

特集：石炭火力発電

石炭火力の展望

岡崎 健*¹
OKAZAKI Ken

キーワード：石炭火力，高効率・クリーン，温暖化対策，国際展開

Coal-Fired Power Station, High Efficiency and Clean, Global Warming, International Collaboration

震災前でも、日本の発電量の25%は石炭火力によるものであったが、3.11震災後、ベース電力としての最新鋭石炭火力の役割が急上昇している。石炭と聞くと、排ガスが汚い、CO₂排出が多い、という旧来の石炭火力の先入観から頭ごなしに否定する人が、一部のエネルギーの専門家の中にさえまだいる。とんでもない話である。1973年、1979年の2度にわたるオイルショックの後、日本では石油火力に代わって最新鋭の石炭火力の開発と導入を、国策として進めてきた。もちろん石炭はほとんどすべて外国炭であり、震災前でも、燃料として用いる一般炭で年間1億トン、原料炭で8千万トンを輸入している。石炭は、安価である、可採年数が長い、産地偏在がなく安定供給が可能という事実に加えて、特に日本ではCCT (Clean Coal Technology) が成熟して世界でも群を抜いてリードしており、1 kWhあたりのNO_x, SO_x, 微粒子の排出は、他の先進国より1桁以上も低いのが現実である。

さらに、日本の最新鋭の石炭火力では超々臨界 (USC: Ultra Super Critical) の採用で、発電端効率で42%にも達しており世界でも群を抜いて高い。もし、日本の最高効率の石炭火力で、米国、中国、インドのすべての石炭火力をリプレースしたとすると、日本のCO₂排出総量に相当する13億トンものCO₂削減が実現するという試算もある。ただ、これはあくまでも試算であって非現実的であろう。ならば、開発途上国で予定されている新設設備容量について、その国の現状技術を導入した場合と比較して日本の最新技術を導入した場合のCO₂削減量を、インド、インドネシア、ベトナムについて試算すると、合算して4.5億トンものCO₂削減になる。最新技術を国内だけに展開するのではなく、国際展開することの重要さ、すなわち、地球温暖化対策は国際規模で実施することの意義を示している。

石炭火力のさらなる高効率化を目指して、高圧タービン入り口の蒸気温度の向上 (A-USC: Advanced USC)、石炭ガス化複合発電 (IGCC: Integrated Coal

Gasification Combined Cycle)、石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC: Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle)、さらに将来的には熱再生を組み合わせたA-IGCC、A-IGFCへと技術開発が進められようとしている。IGCCについては、勿来で実証してきた25万kWのプラントが、2013年度から常磐共同火力の一部として商用に供されている。また、IGFCについても、電源開発、中国電力、経済産業省の共同で、大崎クールジェンプロジェクトがスタートしている。

高効率化に加え、さらなる大幅なCO₂排出削減を目指して、CCS (Carbon Capture and Storage) と統合したCO₂回収型石炭燃焼の技術開発も進められている。石炭燃焼のCO₂ゼロエミッション化である。IGCC+CCSは最も洗練されたCO₂フリー石炭利用システムであるが、コストが割高であることから、最近では、Oxy-fuel (酸素燃焼、CO₂循環石炭燃焼とも言う) 方式が脚光を浴びている。この燃焼方式では、ボイラからの排ガスの約80%を再循環することにより出口での排ガス中のCO₂濃度を95%程度にまで高めることにより、分離過程なしで容易にCO₂を回収できる。さらに、システムの効果として、石炭中の窒素分のNO_xへの転換率が自動的に4分の1程度に減少するメリットもある。日豪共同でクイーンズランド州で実施しているCallideプロジェクトでは、Oxy-fuel + CCSの一貫通貫を世界で初めて実証するのであり、2012年12月に運転開始の式典が行われ、現在、貴重なデータが蓄積されつつある。

シェールガス革命が起きて石炭の位置づけが低下している米国では、CCS付きの石炭火力以外の新設は認めないという2013年6月のオバマ大統領発言が物議をかもしているが、日本では、第5次科学技術基本計画でも、最新鋭石炭火力の重要さが明記されている。

本企画では、石炭火力の現状と将来技術開発について専門家による詳細な解説がなされている。ガスタービン学会の方々にも、石炭火力の重要さとさらなる高効率・クリーン化を目指した技術開発努力に対する理解を深めていただければ幸いである。

原稿受付 2014年5月2日

*1 東京工業大学大学院理工学研究科
〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1

特集：石炭火力発電

日本ならびに世界の石炭火力の動向

牧野 啓二*¹
MAKINO Keiji

キーワード：石炭，火力発電，ボイラ，超々臨界圧発電，石炭ガス化複合発電

Coal, Fossil Power Generation, Ultra Super Critical, Integrated Gasification Combined Cycle

1. はじめに

我が国の電力エネルギー供給は、2011年3月11日の東日本大震災を契機に大きく変わることになると見られている。日本政府は原子力の大幅増を目指し、これをベースに地球温暖化に対するCO₂排出削減を実現する基本計画を閣議決定していたが、原子力が大きな被害を受けてしまいそのようにはならなくなってしまった。

また、世界に眼を向けてみると、再生可能エネルギーを中心に発展させることを目指す国もあるし、引き続き石炭火力を増強しようとしている国など様々であるが、押しなべて石炭は安定入手が可能でまた安価であることから、石炭火力をベース電源として考えてゆくことを基本にしている国々も多い。特に東南アジアの国々では今後の石炭火力の増加が見込まれている。

石炭火力を展開する場合には、地球温暖化に対応するためのCO₂排出削減が前提となることは言うまでもないが、この対応が現時点ではなかなか進んでいないことも事実である。石炭火力からのCO₂排出削減は、熱力学サイクルとしての蒸気温度、圧力を高めた高効率システムの採用、あるいは石炭を一旦ガス化して、そのガスを後段の発電設備の燃料として高効率発電を実現するシステム、あるいは発電設備の排ガスからCO₂を分離回収し地下貯留する方法などが検討され、一部は実用化されてきている。

本稿では、石炭を燃料とする各種発電システムについて、現状や将来に向けての技術的な動向を示し、さらにはCO₂排出削減技術について述べる。また、日本あるいは世界の石炭火力発電について、現状や今後予想される動向などについて述べる。

2. 世界の発電ならびに石炭の需要動向

図1にはIEA World Energy Outlook 2013¹⁾のNew Policy Scenarioに基づいた世界の発電量の推移を示す。2035年にかけて総発電量は現時点の1.6倍くらいに増加し、そのうち石炭による発電量は1.4倍くらいの増加となつて

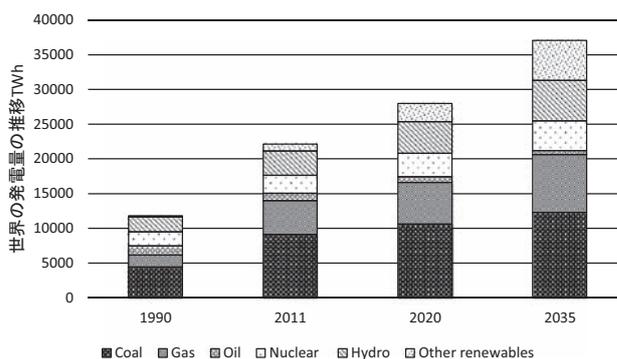


Fig. 1 Trend of World Electricity Generation
(World Energy Outlook 2013)

いる。しかし現状での継続は地球温暖化にとって好ましくなく、CO₂削減を条件に消費拡大しなければならないことは言うまでもない。

3. クリーンコールテクノロジー (CCT)

図2には日本で建設されている一般的な石炭火力発電所の構成を示す。日本では発電用石炭は99%以上が豪州やインドネシアからの輸入石炭であり、一旦各地に設けられたコールヤードに下ろされた後、内航船に積み替えられて発電所まで船舶輸送される。

発電所のボイラでは石炭は平均粒径50ミクロン程度に微粉碎され、ボイラ本体に設けられたバーナまで気流搬送されて火炉内で燃焼する。高温の燃焼ガスは火炉壁と伝熱管に熱を与えて350℃くらいまで温度降下し、ボイラから排出される。排ガスは大気に放出することができ

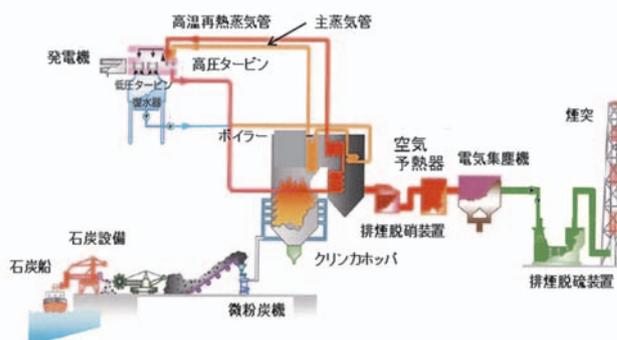


Fig. 2 Typical Flow of Coal Power Generation

原稿受付 2014年5月13日

*1 一般財団法人 石炭エネルギーセンター

〒105-0003 港区西新橋3-2-1 Daiwa西新橋ビル

るレベルまでクリーンアップされる。その順番はまず排煙脱硝装置でNOxを分解し、次いで空気予熱器で燃焼空気に熱を回収した後140℃くらいのがスとなって電気集塵器に入る。ここでフライアッシュなどが取り除かれ、脱硫装置でSOxを吸収して煙突から大気に放出される。これらの設備により排ガス中に含まれる大気汚染物質の量は厳しくコントロールされ、極めて低い数値となっている。

この一連の排ガスのクリーンアップ設備は、我が国のすべての発電用石炭ボイラには必ず設置されているが、世界的に見れば設置されずに未処理の排ガスがそのまま放出されている国は多い。

近年では、地球温暖化の原因であるCO₂の削減も必要となってきているが、大気汚染物質とCO₂の両者の排出を削減する技術をクリーンコールテクノロジー（CCT）と総称している。

図3にはCCTの体系を示すが、従来CCTとは脱硫や脱硝などの大気汚染対策を意味していたが、近年はむしろCCTとはCO₂削減を目的とした地球温暖化対策を意味することが多い。

CO₂削減には発電効率を改善して石炭消費量を減らす

場合と、排ガス中のCO₂を排ガスから分離回収して地中に貯留するCCS（Carbon Capture & Storage）がある。

3.1 微粉炭火力発電での高効率化技術

微粉炭ボイラと蒸気タービンを組み合わせた発電はランキンサイクルと呼ばれるシステムであるが、熱力学的には使用する蒸気の温度、圧力を高くすることで熱効率を向上することができる。

これまでの火力発電所の蒸気条件ならびに発電効率発展の歴史を振り返って図4に示す。1950年代半ばまでは蒸気温度450℃前後、蒸気圧力40気圧程度の、現在から考えると極めて低い蒸気条件で、発電効率もごく低い値であった。その後、ボイラやタービンに使用する高温用金属材料やその溶接技術の開発などが進み、1960年代には温度538℃～566℃、圧力は16.6MPaのような条件が実現された。この条件は約20年間続いたが、1980年代から圧力24 MPa級の超臨界圧（SC）条件が採用されてきた。

しかし我が国では、世界に先駆けて高効率石炭火力実現を目指した国家プロジェクトが行われ、その成果として1993年には主蒸気/再熱蒸気温度で538/593℃、圧力24 MPaのプラントが建設された。このような590℃を超える超高温条件を採用したプラントは超々臨界圧プラント（USC）と呼ばれ、その後も続々と建設された。2002年には初めて600℃を超える600/610℃プラントが完成し、2009年には600℃ /620℃と世界最高の蒸気条件の石炭火力が実現することとなった。

発電効率も図4に示すように1960年代の40%程度（発電端、高発熱量基準）から最新のUSCでは44%にもなっており、この値は世界で運転されている石炭火力では最高の値である。

このようにUSCは世界に先駆けて日本で開発された技術であるが、中国メーカーとも技術的提携することにより世界最大の石炭発電規模を持つ中国では、最近建設される石炭火力では多くがUSCがとなるまでに至っている。

現在我が国では、更なる高効率を目標にした先進的

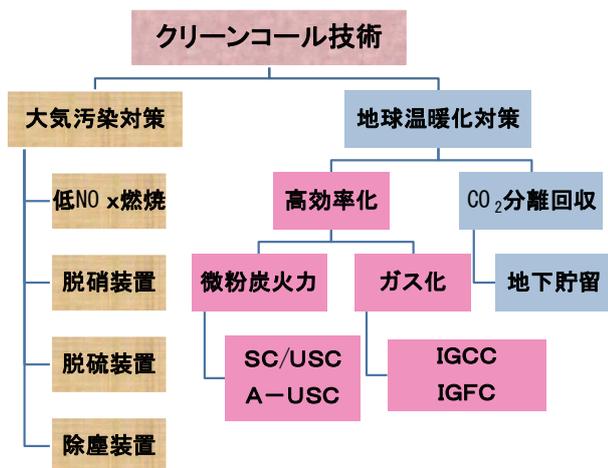


Fig. 3 Criteria of Clean Coal Technology

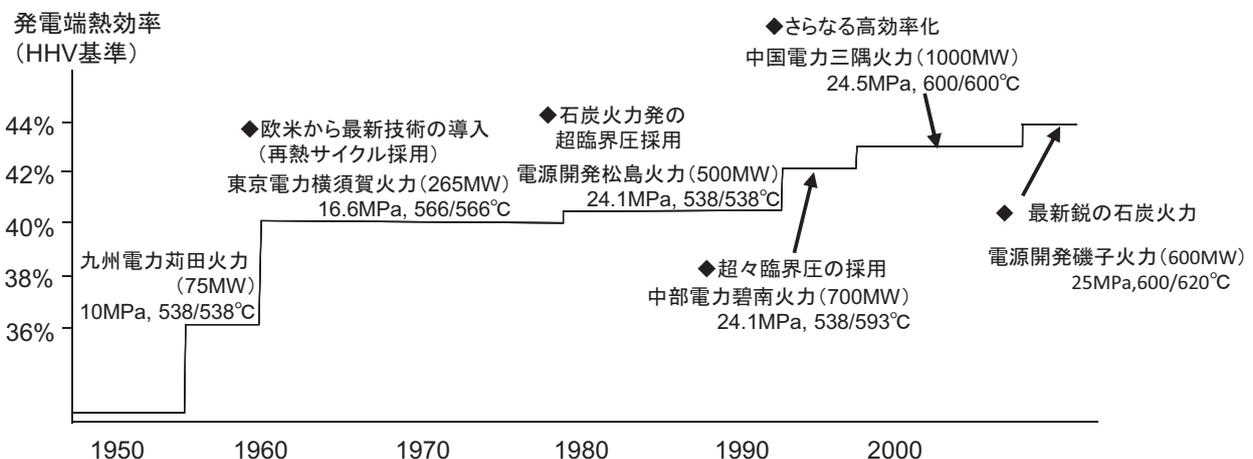


Fig. 4 Improvement of Net Efficiency by the Steam Condition (METI)

超々臨界圧火力（A-USCと呼ばれている）の開発が国家プロジェクトとして進められており、2017年から実用化を目指した10万時間試験が行われる計画になっている。蒸気温度は700℃級で発電効率の目標は46～48%（送電端、高発熱量基準）である。

3.2 石炭ガス化複合発電（IGCC）

IGCCは、石炭を一旦ガス化し、そのガスをガスタービン燃料として発電し、ガスタービンの排ガスから排熱回収ボイラにて蒸気を作り、再度蒸気タービンにて発電を行う複合サイクルである。このようにガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたことにより高い発電効率を得られる。

表1には世界で商用運転されているIGCC（石炭を燃料とするプラントのみ掲載）を示すが、第1号機は、1994年に運転開始したShell社のガス化炉を使ったオランダのBuggenumプラントであり、最近では米国Edwardsport IGCCが2013年に商用運転に入っている。日本では勿来発電所でクリーンコールパワー研究所が行ったIGCC実証試験が成功裏に終了したことを受けて商用機に転換し、常磐共同(株)勿来発電所10号機として運転されているユニットがある。また2017年の運転開始を目指しての大崎クールジェンプロジェクトが進行中である。

また将来の開発目標としては、IGCCに燃料電池を組み合わせたIGFCと呼ばれている更なる高効率トリプル複合発電も考えられているが、送電端効率（高発熱量基準）を比較するとUSCでは43%に対しIGCCでは46%、IGFCでは54%程度であり、今後の高効率石炭利用へ期待されているシステムである。

図5には日本で行われた勿来10号IGCCのフローを示すが、主要な構成機器はガス化炉、ガスクリーンアップ設備、ガスタービン、廃熱回収ボイラならびに蒸気タービンである。IGCCに使われるガス化炉は大容量に適した噴流床ガス化炉であるが、この方式はガス化炉内に微粉炭を噴き込み、石炭を部分的に燃焼して1500℃前後でガス化反応を起こさせる。

IGCCが通常のボイラと大きく異なるのは、石炭中の

灰分をガス化炉内で溶融させ、溶融灰をガス化炉内壁にてトラップし、炉底に設けた溶融灰排出孔から下方の水室に落とす設計となっている点である。従って、IGCCに使用する石炭は灰の溶融温度が低めの方が好都合である。

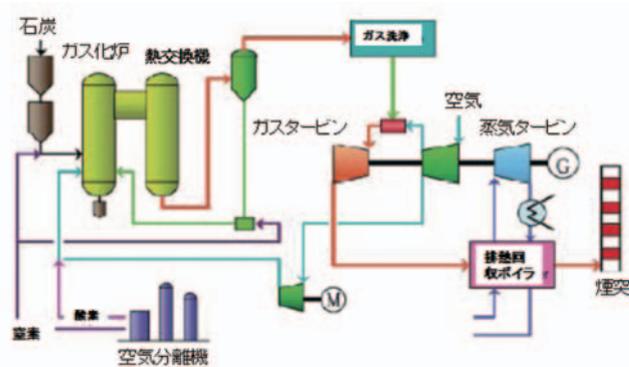


Fig. 5 Flow Sheet of Nakoso IGCC (METI)

3.3 CCS技術

IEAでは地球の平均気温を18世紀半ばから19世紀にかけての産業革命時代から2℃以内の上昇に抑える、このために大気中のCO₂濃度を450ppm以下とするとのいわゆる450ppmシナリオが検討されている。このIEAのシナリオでは、何も対策を行わないCO₂排出量から450ppmシナリオを実現するために必要となる削減量を示しているが、この削減量のうちCCSに2020年には4%、2035年には17%もの大きな数値が期待されている。具体的な削減量の数値としては2035年に2.6Gtが期待されている。この数字の実現のためには2030年には世界で850プロジェクトが必要と、IEAでは示している。

デンマークなどで北海の天然ガス井から天然ガスに伴って排出されるCO₂を分離し、地下に再注入するCCSがすでに商用で行われているが、まだ石炭火力に大規模商用に適用された例はない。

図6には石炭火力CCSに適用が期待されているCO₂分離回収方法を示すが、燃焼前回収と呼ばれているIGCC

Table 1 Commercially Operating IGCC in the World

| No. | 国 | プロジェクト | 出力(MW) | 運転開始 | 燃料 |
|-----|------|---------------|--------|------|-----------|
| 1 | オランダ | Buggenum | 253 | 1994 | 石炭 |
| 2 | 米国 | Wabash River | 262 | 1995 | 石炭/石油コークス |
| 3 | 米国 | Polk County | 315 | 1996 | 石炭 |
| 4 | スペイン | Puertollano | 335 | 1998 | 石炭 |
| 5 | 中国 | GreenGen | 250 | 2012 | 石炭 |
| 6 | 日本 | 勿来 | 250 | 2013 | 石炭 |
| 7 | 米国 | Edwardsport | 630 | 2013 | 石炭 |
| 8 | 韓国 | 泰安 | 300 | 2014 | 石炭 |
| 9 | 米国 | Kemper County | 583 | 2016 | 褐炭 |
| 10 | 日本 | 大崎クールジェン | 170 | 2017 | 石炭 |

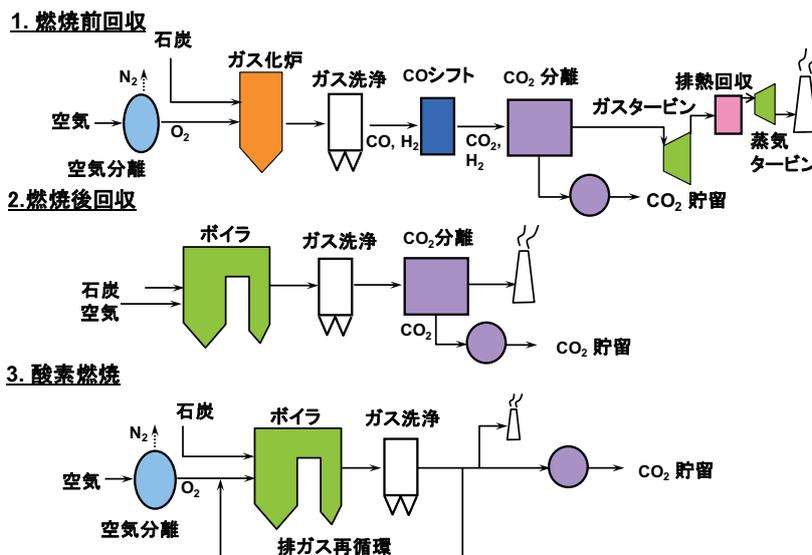


Fig. 6 Carbon Capture Technologies developed for Coal Power Generation

Table 2 Boiler Capacity Operated in Past Five Years⁽²⁾ (MW)

| | | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | Total |
|----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1 | China | 72932 | 81051 | 71340 | 48917 | 44280 | 318520 |
| 2 | India | 7913 | 16951 | 24038 | 40036 | 29818 | 118756 |
| 3 | USA | 3564 | 3832 | 2517 | 3590 | 900 | 14403 |
| 4 | Indonesia | 660 | 2501 | 3865 | 4591 | 1170 | 12787 |
| 5 | Germany | 98 | 750 | 2680 | 4113 | 1700 | 9341 |
| 6 | Vietnam | 0 | 450 | 1230 | 1800 | 2444 | 5924 |
| 7 | Turkey | 600 | 0 | 3720 | 0 | 0 | 4320 |
| 8 | South Africa | 0 | 0 | 0 | 0 | 3980 | 3980 |
| 9 | Netherland | 0 | 0 | 0 | 2740 | 800 | 3540 |
| 10 | Japan | 600 | 900 | 0 | 0 | 1600 | 3100 |

に適用する場合、通常の排ガスから化学吸収液を使ってCO₂を分離する燃焼後回収の場合、ボイラを純酸素にて燃焼し、排ガスから容易にCO₂を分離する場合の3ケースである。

それぞれに共通した課題は、CCSを行うことによる20～30%にもなる所内動力の増加ならびにそれに伴う発電コストの上昇であるが、そのためには設備費ならびに運転動力の大幅な削減が求められる。現在、世界中の関係方面にて努力を傾注しているが、目標に近づきつつあると言われている。

4. 石炭火力の動向

既に述べたように、世界の石炭火力発電は、開発途上国を中心に増加の一途をたどっている。しかし近年は地球温暖化への意識も高まりつつあり、SCあるいはUSCの採用も目立ってきている。

JCOALでは世界の石炭火力発電あるいは日本の火力発電の動向を分析しているので、この分析結果を中心に以下に述べる。なお、分析に当たっては、米国McCoy Power Reports⁽²⁾を利用した。

4.1 世界の石炭火力ならびにUSCの動向

表2には過去5年間について、運転を開始した石炭火力発電の毎年の容量について、多い順に10番目までを示してある。中国とインドが抜きん出て多く、ついで米国、インドネシア、ドイツと続いており、日本は10番目になっている。

本表では米国が3番目に位置しているが、これは過去に発注したユニットの多くが最近になって運転に入っているためであり、近年米国で発注された石炭ボイラは極めて少ない。これはオバマ大統領による気候変動行動計画にて石炭火力のCO₂排出原単位を500gCO₂/KW以下に抑えたとの発表もあり、今後の米国の石炭火力ビジネスは行き先不透明であるためであると考えられる。

図7には2013年だけを取り、世界の石炭ボイラ発注量を示す。ここに示した中国、インド、インドネシア、トルコ、ベトナムの5カ国のみに発注があり、その他の国には発注がなかった。発注量合計は37,440MWであり、2013年に運転開始した世界の石炭ボイラ総容量91,757MWに比べ、40%にしかならない。

既に述べたように、USCを採用することにより高効率

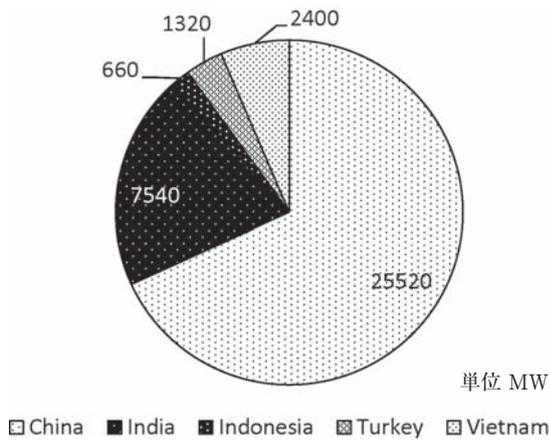


Fig. 7 Boiler Awards in the World⁽²⁾

発電が実現できるが、図8には世界のUSCボイラ建設状況を示す。2004年まではUSCが建設されたのは我が国のみであったが、2006年には日本の支援を受けたUSCが初めて中国に建設され、以降は中国のUSC急増が世界を圧倒している。

このような状況を背景としてUSCのみについて、今後特に注目される中国、インドならびにEUの動きについて述べる。

(1) 中国の状況

中国では既に述べたように多くのUSCが建設される状況となっている。図9には中国の新設石炭火力について、USC、SCあるいは通常の亜臨界圧（SUB）に分けて示してある。ここでは運転開始年ベースで示すが、2009年くらいからUSCの割合が多くなり、2013年には50%を超えている。

また具体的な2006年以降のUSC発注量を表3に示すが、発注基数は極めて大きく、他国と比べると圧倒的な

数字の違いがある。

中国のUSCは1000MW機と660MW機の2種類に標準を定めコストダウンを図っているが、その標準計画条件を表4に示す。主蒸気温度/再熱蒸気温度は605℃/603℃としている。

(2) インドの状況

インドの石炭ボイラの建設状況を図10に示す。インドの場合には中国と状況を異にしており、現在までほとんどが従来の亜臨界圧ボイラであり、僅かに2012年にSCボイラが建設されたのみであり、USCはまだ建設されていない。インドでは旺盛な電力需要に対応するためにウルトラメガワットプロジェクトを設定しているが、この中でいずれはUSCにも踏み込むとしている。

(3) EUの状況

近年EUでは多くのUSCが建設されており、その中には、EU特にドイツで多く使われている褐炭でのUSCも含まれている。JCOAL調査では表5に示すようにドイツ、イタリア、ポーランドに実績が多い。ここに示した国以外のUSCユニットも入れると、EUのUSC総合計容量は29,500MWにもものぼる。

4.2 日本のUSCの動向

日本のUSC建設状況を表6に示す。ここでは2000年以降に運転開始となったUSCのみ示しているが、それ以前のUSCも入れると総数は25基にのぼる。このうち最大容量のUSCは橘湾1号、2号の1050MWであるが、1000MWユニットも8基建設されている。

最新のUSCは2013年12月に運転開始した広野6号と常陸那珂2号であるが、最高の蒸気温度は磯子新2号の600℃/620℃であり、磯子新1号も600℃/610℃と次いで高い蒸気条件である。これらのUSCはJ-POWERが建

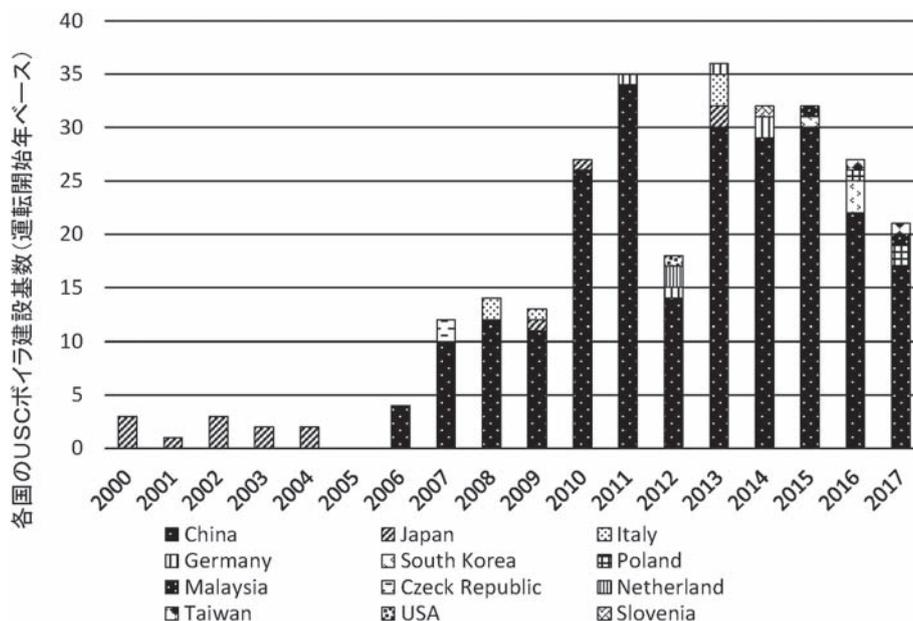


Fig. 8 Construction of Ultra Super Critical Units in the World⁽²⁾

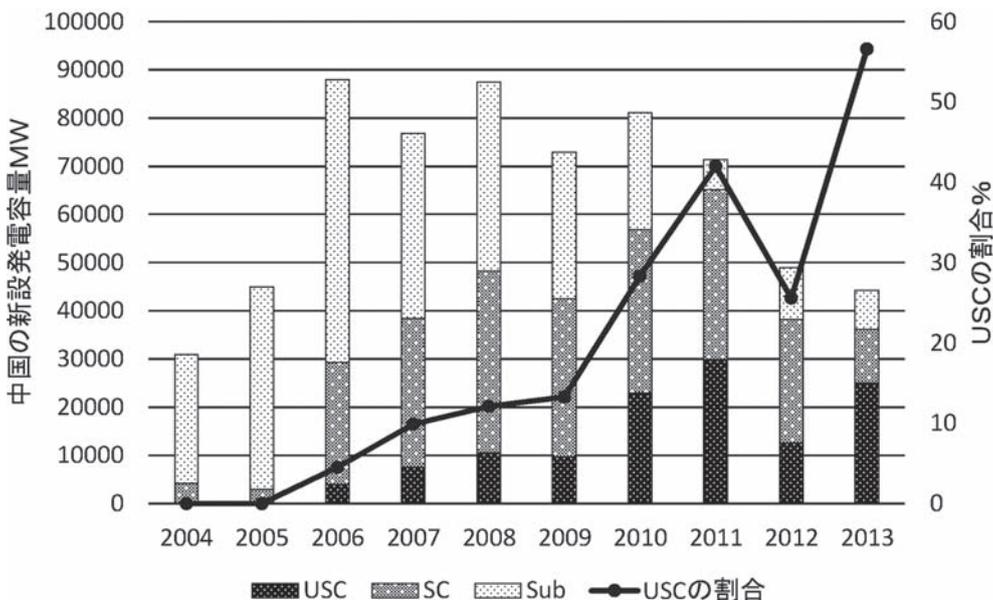


Fig. 9 Status of Construction of Chinese Coal Power Station⁽²⁾

Table 3 Order of USC in China⁽²⁾ (MW×Unit Number)

| 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|--------|-----------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------|
| 1000*4 | 600*6 1000*4 | 600*2 660*2 1000*7 1036*1 | 660*4 1000*5 1036*2 | 660*9 1000*16 1036*1 | 600*4 640*2 660*5 1000*23 | 600*2 660*2 1000*10 | 600*4 630*1 660*9 1000*14 1050*2 | 660*7 700*4 1000*15 1100*3 | 600*1 660*13 1000*15 1100*1 | 660*9 1000*13 | 660*7 1000*8 1100*2 |

Table 4 Standard Design Parameter of USC in China (JCOAL World Coal Report)

| 計画数値 | | 1,000MW機 | 660MW機 |
|----------------|---------|----------|--------|
| 主蒸気 | 温度(°C) | 605 | 605 |
| | 圧力(Mpa) | 26.25 | 26.15 |
| 再熱蒸気 | 温度(°C) | 603 | 603 |
| | 圧力(Mpa) | 4.79 | 4.64 |
| 発電端効率(低発熱量ベース) | | 44.63%以上 | |

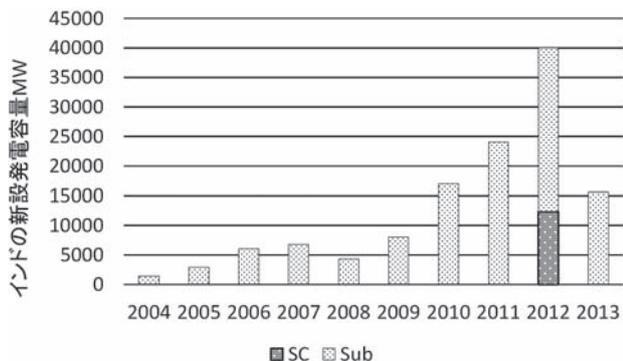


Fig.10 Status of Construction of Indian Coal Power Station⁽²⁾

設した商用運転では世界最高の再熱蒸気温度であり、発電効率(送電端、高発熱量基準)は従来の石炭火力では考えられなかった約43%にもなる。

Table 5 USC in EU (JCOAL World Coal Report)

| 国 | USC基数 | USC合計容量(MW) | 主蒸気温度(°C) |
|--------|-------|-------------|-----------|
| ドイツ | 16 | 14008 | 600 |
| ポーランド | 6 | 4578 | 600 |
| オランダ | 4 | 3500 | 600 |
| イタリア | 6 | 4620 | 600 |
| オーストリア | 1 | 800 | 600 |
| スペイン | 2 | 700 | 600 |
| チェコ | 1 | 660 | |
| スロベニア | 1 | 660 | |

このようなUSCの活躍もあり、日本の石炭火力発電の平均効率は世界で最も高い実績を持っている。図11には、日本を含む世界の石炭火力の平均効率をIEA Electricity Information 2013⁽³⁾のデータからJCOALにて計算し整理した結果を示すが、日本は常に最高効率で運用されてお

Table 6 USC in Japan which are operated after the year of 2000

| 発電所名 | 定格出力MW | 主蒸気圧力MPa | 蒸気温度℃ | 運転開始年 / 月 |
|---------|--------|----------|-----------|-----------|
| 橘湾 | 700 | 24.1 | 566 / 593 | '00/6 |
| 橘湾 1号 | 1,050 | 25.0 | 600 / 610 | '00/7 |
| 敦賀 2号 | 700 | 24.1 | 593 / 593 | '00/9 |
| 橘湾 2号 | 1,050 | 25.0 | 600 / 610 | '00/12 |
| 荻田新 1号 | 360 | 24.1 | 566 / 593 | '01/7 |
| 碧南 4号 | 1,000 | 24.1 | 566 / 593 | '01/11 |
| 苫東厚真 4号 | 700 | 25.0 | 600 / 600 | '02/6 |
| 碧南 5号 | 1,000 | 24.1 | 566 / 593 | '02/11 |
| 磯子新 1号 | 600 | 25.0 | 600 / 610 | '02/4 |
| 荅北 2号 | 700 | 24.1 | 593 / 593 | '03/6 |
| 常陸那珂 1号 | 1,000 | 24.5 | 600 / 600 | '03/12 |
| 広野 5号 | 600 | 24.5 | 600 / 600 | '04/7 |
| 舞鶴 1号 | 900 | 24.5 | 595 / 595 | '04/8 |
| 磯子新 2号 | 600 | 25.0 | 600 / 620 | '09/7 |
| 舞鶴 2号 | 900 | 24.5 | 595 / 595 | '10/8 |
| 広野 6号 | 600 | 24.5 | 600 / 600 | '13/12 |
| 常陸那珂 2号 | 1,000 | 24.5 | 600 / 600 | '13/12 |

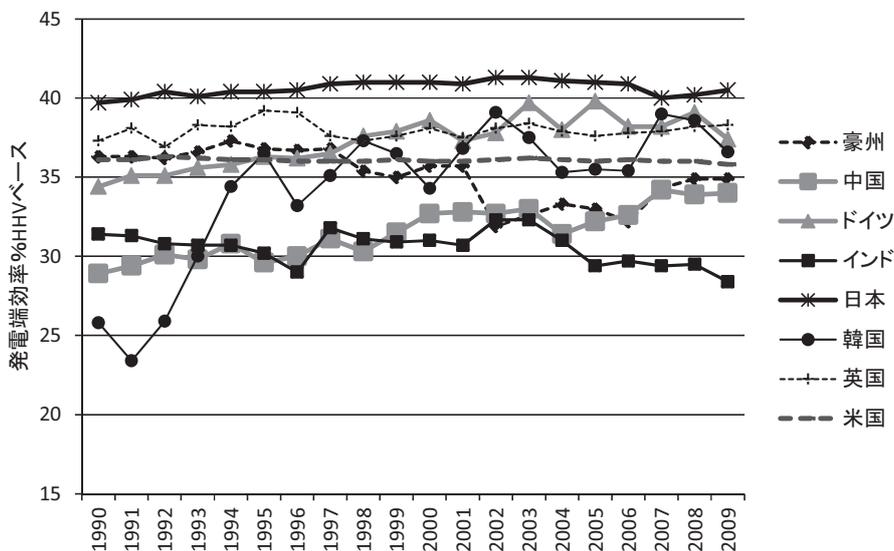


Fig.11 Efficiency of Coal Fired Power Station in the World
(Higher Heating Value Basis, Net)
(IEA Electricity Information 2013)

り、世界に冠たる技術の成果と胸を張ることができる。

図12にはこのような高い効率を持った発電設備の日本の輸出を示すが、豪州、EU、東南アジアなど各地域に輸出され、現地の電力供給の中核を担う活躍を見せている。しかし、最近の石炭火力マーケットでの競合国である中国勢や韓国勢との比較で見ると、図13に示すよう、必ずしも日本からの輸出が多いということではない。むしろ2006年からは中国に水をあげられてしまっている状況が見られる。

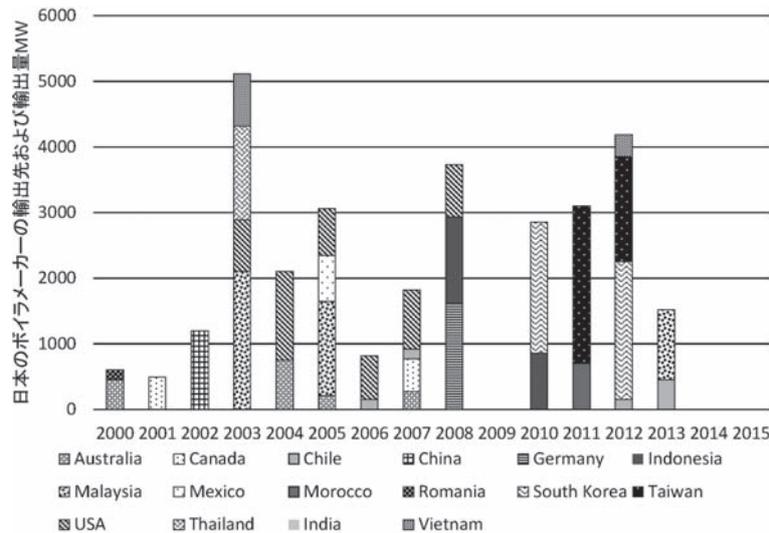
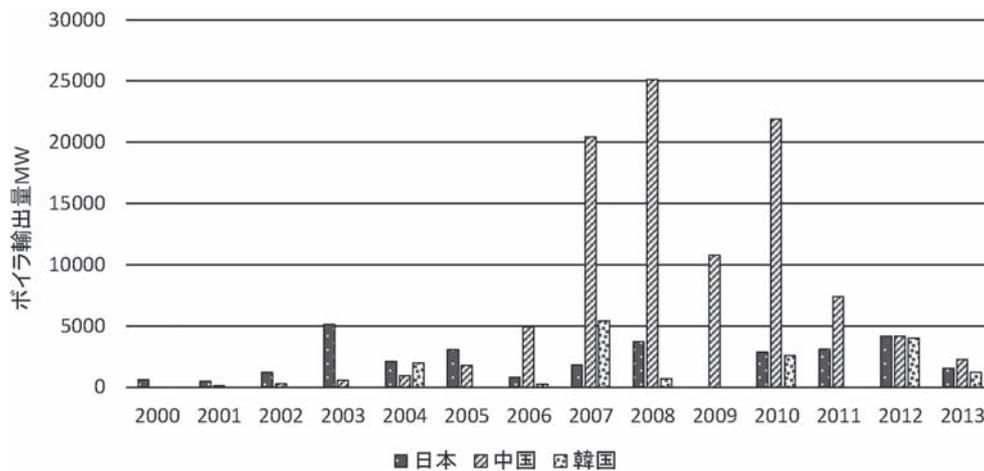
日本の発電設備の性能や信頼性は他の国の追随を許さないと自負できるものの、価格が高いとされ中国に負けてしまっているものと言える。発電設備は30～40年もの長期間使われる設備であるので、この期間で必要とな

る燃料費やメンテ費などの総コストを考えると、日本の設備の方が有利であると考えられるが、このあたりを需要先に理解いただくには時間がかかる。

5. まとめ

以上述べたように、今後の世界の発電量は増加の一途であるものと予想されており、とくに開発途上国の電力需要の伸びは極めて大きな数字である。この中で我が国に甚大な被害を与えた東日本大震災により、原子力発電の行方が不透明になり、当面は天然ガスや石炭の化石燃料発電に頼らざるを得ない。

天然ガスについては米国のシェールガス革命により、日本への供給価格も下がってくるとの期待もあるものの、

Fig.12 Export of Coal Fired Boilers from Japan⁽²⁾Fig.13 Export of Coal Fired Boilers from Japan, China and Korea⁽²⁾

極めてはっきりしないのが実態である。やはり世界に広く分布しており供給が安定ししかも価格も低いレベルに安定している石炭に頼らざるを得ないのが実情である。特にアジアを中心とした開発途上国では、石炭なしでは今後の発展が考えられないとも言える。しかし石炭ボイラから排出されるCO₂排出量を現状のままにして石炭を継続使用することは許される状況ではないことも事実である。

本稿に示した日本が保有している、世界で突出して優れているCCTを背景に、日本が世界のCO₂削減に貢献することが世界から期待されている。このCO₂削減技術はUSCであり、IGCCであり、さらにはCCS技術である。

しかし、石炭発電へのCCS適用は、世界の景気の後退やEUでのCO₂価格の低迷の影響を受けて滞っている。

CO₂削減にはプラントの高効率化も極めて有効であるが、それだけでは十分でなく、CCSが早期に実用化されなければならない。日本が世界に先駆けて石炭火力のCCSを商用化すれば、現在確立したCCT技術に続いてCCSでも世界をリードできることになる。

筆者は、日本での1日も早い実規模CCS実証が行われ、世界の模範となるCCSコストの大幅削減が実現し、CCSが脱硫設備、脱硝設備や電気集塵器のような石炭火力の基本的設備となる日を切に願うものである。

6. 引用文献

- (1) IEA World Energy Outlook 2013
- (2) McCoy Power Reports (www.mccoypower.net)
- (3) IEA Electricity Information 2013

特集：石炭火力発電

最新石炭火力の性能と効率向上の取り組み

水沼 寿行*1
MIZUNUMA Toshiyuki

キーワード：高効率化, USC (Ultra Super Critical), A-USC (Advanced-USC), IGCC (Integrated coal Gasification Combined Cycle), EAGLE (Coal Energy Application for Gas, Liquid & Electricity), バイオマス燃料, 礫子火力発電所

1. はじめに

我が国では、1960年代から1970年代前半に渡る高度経済成長期に、低廉かつ安定的なエネルギーの供給をエネルギー政策の柱に据えて、エネルギー供給の中心を石炭から石油へ転換し、石油火力に多くを依存していた。しかし、第4次中東戦争を契機に1970年代に発生した2度に渡る石油ショックの経験から、エネルギーの安定的な供給確保が国の最重要課題と位置づけ、石油代替エネルギーの開発及び導入をすることで石油依存度の低下を図り、石油代替電源として原子力や石炭火力の開発推進など、エネルギー供給構造の改善を図った。

その中で、石炭火力については、電源開発 (J-POWER) の松島火力発電所が海外からの輸入炭を燃料とした我が国最初の大規模石炭火力として1981年に運転を開始し、これ以降、多くの輸入炭による石炭火力の開発が進められてきている。我が国では、ほとんどのエネルギーを海外からの輸入に頼っているため、海外におけるエネルギー供給上の問題が発生した場合、我が国が自立的に資源を確保しがたいという脆弱性を有している。こうした脆弱性の観点からも、地政学的なリスクが化石燃料の中で最も低い石炭は、今後も我が国にとって必要不可欠なエネルギー資源であり、我が国の電源構成上も石炭火力は重要なものであることは間違いない。東日本大震災以降、原子力発電の停止に伴う発電効率の低い老朽火力の焼き増しなどにより、火力発電におけるエネルギーコストが増加傾向にある。こうした経済性の観点からも、石炭火力の発電効率高効率化によるエネルギーコストの低減がより一層求められる状況である。

一方、世界の温室効果ガスに目を転ずると、特に新興国におけるCO₂排出量の増加が顕著であり、地球温暖化防止問題の解決のためには、世界規模での取り組みが求められる。

本稿では、こうした石炭火力における高効率化や環境負荷低減への取り組みの他、温室効果ガス排出量の低減

に向けた最新技術等、最新石炭火力の性能について述べる。

2. 石炭火力の開発経緯

2.1 発電効率, 蒸気条件の推移

J-POWERでは、1960年代後半に国の石炭政策に沿って建設された国内炭火力 (若松, 旧礫子, 竹原1号, 高砂) から現在の最新鋭海外炭火力 (橘湾, 礫子) に至るまで、数々の石炭火力の開発を行ってきた。図1に、現在、J-POWERが所有する石炭火力の配置図を示す。



Fig. 1 7 Coal-fired Thermal Power stations of J-POWER

現在までの発電効率の向上は、主に蒸気タービンの蒸気条件の向上、つまり蒸気温度の高温化と蒸気圧力の高圧化、更には発電ユニット容量の大型化という二つの技術進歩によって実現されている。図2に、J-POWERの

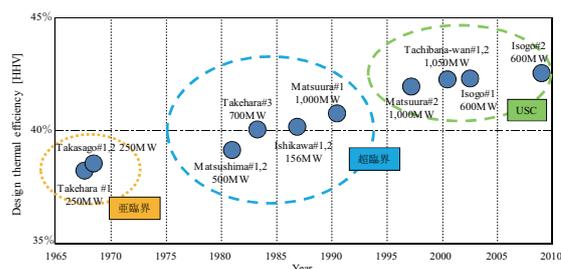


Fig. 2 Transition of plant efficiency in J-POWER

原稿受付 2014年5月7日

* 1 電源開発(株) 火力発電部

〒104-8165 中央区銀座6-15-1

石炭火力発電所の設計効率の推移を示す。

蒸気条件については、1960年代の亜臨界圧 (Sub-Critical) プラントから1980年代には超臨界圧 (Super Critical) プラントへ、そして、1997年に運転を開始した松浦火力2号機において石炭火力では最初の超々臨界 (USC: Ultra Super Critical) プラントが採用され、その後も蒸気条件の向上が図られた。図3に、石炭火力発電所の蒸気条件の推移を示す。2009年7月に運転を開始した最新の磯子火力新2号機では主蒸気温度600℃、再熱蒸気温度620℃という世界最高水準の蒸気条件が採用されている。

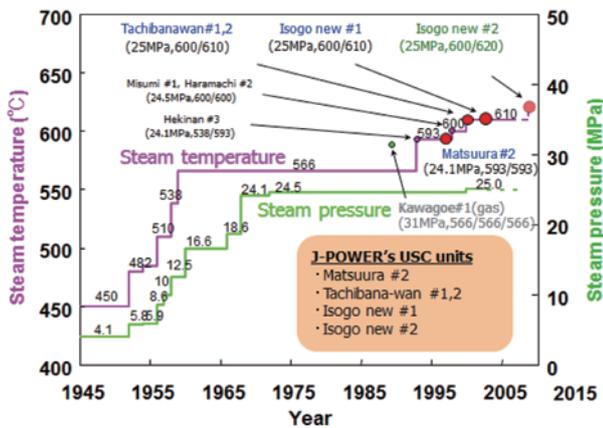


Fig. 3 Transition of Steam Condition in Japan

2.2 環境対策

石炭を燃料として使用する際に課題となるのが、燃焼時に発生するばいじんや硫黄酸化物 (SOX)、窒素酸化物 (NOX) などの大気汚染物質である。そこで、我が国では、先進国の中で最も厳しい環境規制を設け、排煙脱硝装置、電気式集塵装置、排煙脱硫装置等を設置して、石炭燃焼による環境負荷を最小限に抑える取り組みが行われている。中でも、磯子火力新1,2号機については、大都市に位置していることから、最先端の「クリーンコールテクノロジー」を採用し、発電電力量当たりの大気汚染物質排出量を世界トップレベルまで抑制している。また、前述のUSCの採用により高いエネルギー効率を達成し、地球温暖化の原因とされているCO₂の発電電力量当たりの発生量低減を図っている。

2.3 老朽石炭火力のリプレースの効果

磯子火力は、高度経済成長の只中にあり急増する電力需要に対応するべく1967年に旧1号機、1969年に旧2



Fig. 4 Old and New Isogo Coal-fired Thermal Power Station

号機が亜臨界圧プラントとして運転を開始し、総出力530MWの都市型発電所として横浜市を中心とする首都圏に電力を供給してきた (図4参照)。しかし、運転開始から40年強が経過した2000年代初頭に、老朽化への対応や環境負荷の低減等を目的として磯子火力発電所のリプレースを行った。磯子火力新1,2号機は、最新のUSC技術を採用し、発電効率が大幅に向上した。更には、技術進展による所内動力の低減もあいまって、リプレース前後の送電端でのCO₂排出原単位は15%程度もの大幅な削減が達成されている。

仮に、磯子火力新1号機の熱効率をアメリカ、中国、インドの石炭火力に適用すると、CO₂削減効果は計14.7億トンに達し、これは、2009年ベースで世界の石炭火力発電所からのCO₂排出量 (86億トン) の約17%、世界全体のCO₂排出量 (288億トン) の約5%に相当する。また、日本の石炭火力発電所CO₂排出量 (2.6億トン) の約5.7倍に相当し、日本全体のCO₂排出量を上回る大きさとなる。図5に各国の石炭火力を磯子新1号機におきかえた際のCO₂削減量を示す。

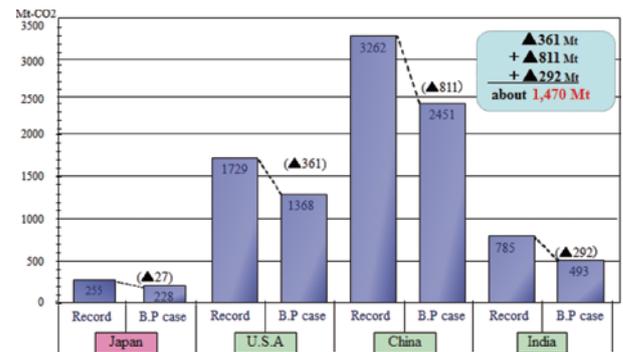


Fig. 5 Record of CO₂ emission in 2009 and the Best Practice case (Isogo #1)

また、乾式排煙脱硫装置をはじめ、高度な環境対策が施され、従来型の大気汚染物質 (SOX, NOX, ばいじん) については、ゼロエミッションに近いレベルが実現されており、他の主要先進国と比べて圧倒的に低い水準を達成している。各国の大気汚染物質の排出量は図6の通り。

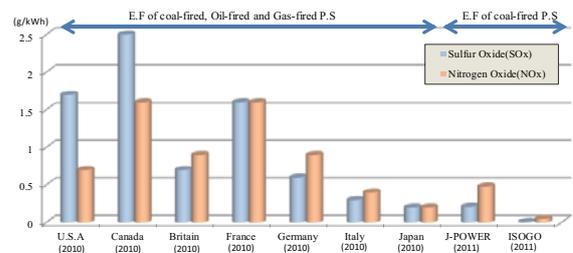


Fig. 6 Comparison of Emission Factor in advanced nations

3. 磯子火力発電所の設備概要

3.1 USCの採用

磯子火力は、2002年に新1号機、2009年に新2号機が運転を開始し、いずれもUSC技術を採用した世界最高レベルの蒸気条件となっている。これにより高位発熱量ベースの発電端効率で43%という石炭火力発電所としては世界最高クラスの効率を実現している。新・旧磯子火力における蒸気条件の比較したものを表1に記載する。

Table 1 Steam Condition of Isogo Coal-fired Thermal P.S

| | MSP [MPa] | MST [°C] | RST [°C] |
|----------|--------------|-------------|-------------|
| Old #1,2 | 16.6 | 566 | 566 |
| New #1 | 25.0 | 600 | 610 |
| New #2 | 25.0 | 600 | 620 |

3.2 高性能タービンの開発及び運用

磯子火力新2号機では、世界最高レベルの蒸気条件に対応するため、タービンロータには12Cr鋼ロータを採用した他、主蒸気入口構造の見直しや中圧タービン冷却構造など、多岐に渡る改良を加えた。また、純変圧運転と絞り変圧運転を可能としており、純変圧運転は、低負荷時で蒸気加減弁(CV)が全開し蒸気流量増加に伴って蒸気圧力を上昇させる運用であり、従来のノズルガバニングと異なり定格運転でCVを絞ることが無いため、高効率運用を可能としている。これに伴い、CVは従来の4弁から2弁設置としている。絞り変圧は、CVを絞った状態で定格運転時の圧力を純変圧運転よりあげ、ガバナーフリー機能を可能とする運用である。本蒸気タービンはスロットルガバニングを行っているため、ノズルボックスが不要となり、絞り損失を排することで性能向上に寄与している。

3.3 乾式排煙脱硫装置の採用

従来、排煙脱硫装置は、湿式(石灰石石膏法)が一般的であったが、磯子火力新1、2号機では火力発電所として日本で初めて乾式(活性炭吸着法)を採用した。従来の湿式より高い脱硫効率が期待できること、及び敷地の狭い磯子では排水処理や石膏の貯蔵に大きなスペースを必要とする湿式は採用が困難であったことから、既設発電所での実証試験を踏まえ、乾式(活性炭吸着法)の採用を決定した。図7は磯子火力新1号機の乾式脱硫装置。

乾式排煙脱硫装置は1cm径ほどのペレット状の活性炭を充てんした脱硫塔に排ガスを通過させることにより活性炭表面にSO₂ガスを吸着させるものであり、吸着したSO₂ガスは再生塔にて加熱離脱させ、最終的に硫酸として回収している。

新1号機の脱硫効率は協定値ベースで95.0%、新2号機は97.8%であるが、実運転においてはより高い脱硫効



Fig. 7 De-sulfurization system of Isogo #1

率を実現している。

また、乾式脱硫装置に加えて、これまでJ-POWERが蓄積してきた脱硝や脱じんなどの排煙処理技術のノウハウを集約することにより、石炭火力でありながらガス火力並みの環境性能を実現することができた。表2に横浜市との環境保全協定値を示す。

Table 2 Environmental Partnership Agreement with Yokohama

| | New Isogo #1 | New Isogo #2 |
|----------------|------------------------|-----------------------|
| Sulfur Oxide | 20 ppm | 10 ppm |
| Nitrogen Oxide | 20 ppm | 13 ppm |
| Dust | 10 mg/m ³ N | 5 mg/m ³ N |

3.4 タワー型ボイラの採用

狭い敷地に600MWのプラントを2基建設するために、新1号機では日本で初めて伝熱面を火炉上部に配置するタワー型ボイラを採用した。これにより、従来型ボイラに比べ設置面積を約20%縮小することができた。なお、新1号機のボイラ高さは約100mであるが、新2号機においては新1号機の実績を踏まえ合理化設計を進め、80mの高さに抑えることができた。図8にタワー型ボイラの断面図を示す。

4. 低炭素化に向けた新技術への取り組み

4.1 次世代低炭素化技術の研究開発

地球温暖化の解決のためには、技術と国際協調の二つが鍵になる。今、利用できる技術を世界に普及させること、同時に更なる技術の開発と商用化を促進すること、このようなクリーンコール技術の開発・商用・移転・普及のサイクルをグローバルに展開していくことで世界のCO₂排出を削減していくことが重要である。ここでは、バイオマス燃料活用や先進的超々臨界圧の採用、更には石炭ガス化複合発電など、石炭火力におけるCO₂排出量削減にむけた取り組みを紹介する。

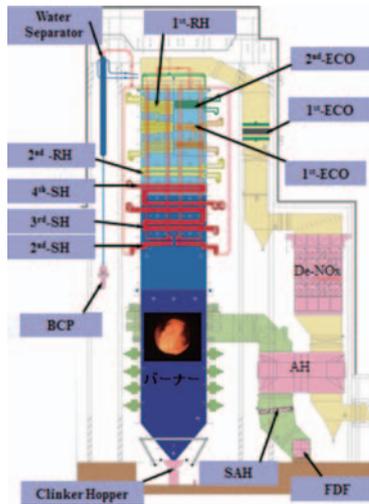


Fig. 8 Cross section of boiler of Isogo #1

4.2 石炭火力でのバイオマス燃料の利用

バイオマス系の燃料は、ライフサイクルにおいてCO₂の吸収量と排出量が同量であるため燃焼時に発生するCO₂がCO₂発生量にカウントされないカーボンニュートラルなエネルギーとみなすことができる固体燃料である。石炭も固体燃料のため、石炭火力ではバイオマス系燃料の混合利用が容易である。バイオマス系燃料としては、下水汚泥を脱水あるいは炭化したものや、木質バイオマスなど様々なバイオマス燃料が対象となる。日本では、未利用の国産バイオマスエネルギーを活用した石炭火力発電の低炭素化をめざし、諸課題に取り組みながら、多様なバイオマス燃料の製造と石炭火力発電所での混焼を推進している。表3に石炭火力発電所におけるバイオマス燃料混焼の取組み例を示す。

バイオマス系燃料の混合利用は、CO₂対策として即効性があり、廃棄物についてはそのリサイクルに役立ち、また、森林の間伐材利用は森林保全とCO₂の吸収源確保のためにも有効である。また、下水汚泥は、従来はそのほとんどが廃棄されており、燃料化されることは国内の未利用資源の有効活用につながる。また、バイオマス燃料混焼は石炭火力発電所における温室効果ガスであるCO₂を削減するだけでなく、下水汚泥の燃料化においてもN₂O（亜酸化窒素）の削減により温室効果ガスの削減

Table 3 Status of biomass mixed combustion initiative

| Biomass resources | Wood | | Sewage sludge | |
|----------------------------------|---|--|--|---|
| | Chips | Pellets | Low-temperature Carbonization | Oil desiccation |
| Examples of biomass fuels | | | | |
| Characteristics of biomass fuels | Scrap construction timber is chipped and used. It has about half the C.V of coal. | Forest offcuts with a high moisture content are dried and turned into pellets. They have about 70% of the C.V of coal. | Sewage sludge is carbonized at low temperatures in order to control the production of N ₂ O when it is burned and to produce a useable fuel. The fuel produces little odor and has 50-70% of the C.V of coal. | Sewage sludge and waste cooking oil are mixed and heated to remove the water content and create fuel. This fuel has a C.V about the same as that of coal. |

につながる。N₂OはCO₂と比較して310倍の地球温暖化係数を持つ物質であり、従来下水汚泥を焼却処分することにより発生していたが、より高温で燃焼することによりN₂Oの発生量の削減が可能となる。

4.3 石炭火力の高効率技術の開発

我が国では、現在のUSCによる世界最高水準の熱効率を更に高める技術として、蒸気条件を更に向上させた先進的超々臨界圧（A-USC）の2020年代の実用化や、燃料となる石炭を可燃性ガスに変換してガスタービン発電と廃熱利用による蒸気タービン発電を同時に行うコンバインドサイクル「石炭ガス化複合発電技術（IGCC）」の2020年代の実用化、更には、IGCCに燃料電池による発電を加えたトリプルコンバインドサイクル「石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）」については、2025年までに技術を確立し、2030年代の実用化を目指し研究開発を行っている。また、石炭火力からのCO₂の排出量を大幅に抑制する技術としては、CO₂を「分離・回収」し、「輸送」後に1,000m以上の地中深くに「貯留」するCCS技術がある。CO₂の分離・回収は、決定的なCO₂排出量削減対策ではあるものの、まだ技術開発の段階であり、解決すべき課題が多くあることに留意しておく必要がある。また、大きなエネルギーが必要で石炭火力発電の熱効率低下を伴うことから、実用化を進める上で、より効率的で経済性の高い技術の開発が必要である。

CO₂回収法には主に三つの方法がある。現在の石炭火力の主流である微粉炭火力でのCO₂回収法としては、「燃焼後回収法」と「酸素燃焼法」の二つがある。また、IGCCにおけるCO₂回収法には「燃焼前回収法」がある。

J-POWERでは、EAGLEプロジェクトと大崎クールジェンプロジェクトにおいて燃焼前回収法によるCO₂分離・回収技術、カライド酸素燃焼プロジェクトでは酸素燃焼法によるCCS技術全体についての研究開発を行っている。図12にIGCC及びCCSのメカニズムを記載する。

EAGLEプロジェクトとは、酸素吹方式の噴流床石炭ガス化技術を採用したパイロットプラントであるEAGLE試験設備（Coal Energy Application for Gas, Liquid & Electricity：多目的石炭ガス製造技術開発）を用いて、J-POWERが新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）との共同研究により2002年から2013年にかけて実施したプロジェクトである。（図11.EAGLE

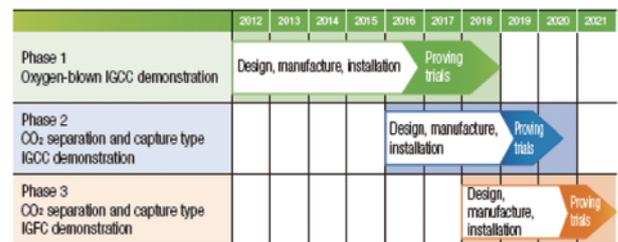


Fig. 9 Osaki Cool Gen Project Schedule

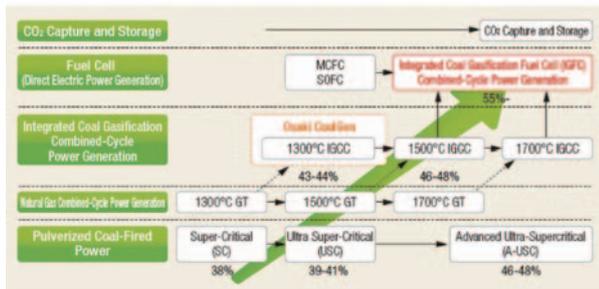


Fig.10 Thermal Efficiency Improvement by Technical Development

パイロットプラント試験設備外観) このプロジェクトでは、IGCC試験プラントの基本性能や長期信頼性の検証し、スケールアップに必要な試験データを取得するとともに、CO₂の分離・回収技術として燃焼前回収法（化学吸収法、物理回収法）の試験を行い、多くの知見と成果が得られた。

EAGLEプロジェクトで得られた成果を活かして、IGCC及びCO₂回収技術の商用化に向けた大型実証試験を行う目的で、2009年に中国電力株式会社と共同で大崎クールジェン株式会社を設立し、2013年3月より出力166MWの大型実証試験発電所の建設工事を開始した。図9に大崎クールジェンプロジェクトのスケジュール、図10には同プロジェクト含む技術開発による熱効率の変遷を示す。ここでは、酸素吹炭ガス化技術のシステムとしての信頼性・経済性・運用性を検証することとしている。

一方、カライド燃焼プロジェクトとは、J-POWERをはじめ株式会社IHI、三井物産株式会社など日豪7社の共同プロジェクトとして、豪州クイーンズランド州のカライドA石炭火力発電所において、世界初の既存発電所付加型CCS一貫システムの実証試験を行うプロジェクトであり、酸素燃焼技術の検証やCO₂地中貯留の検証を行っている。2012年12月に開始されたCO₂液化回収実証試験は、我が国が発案した酸素燃焼技術を世界で初めて商用発電所での運転に適応させた試験である。空気の代わりに酸素をボイラに供給して燃焼させて排ガス中のCO₂濃度を高めCO₂回収エネルギーを低減する酸素燃焼技術は、CCS一貫プロセスの実証に向けたマイルストーンになる事と思われる。



Fig.11 External View of EAGLE Pilot Plant test facility

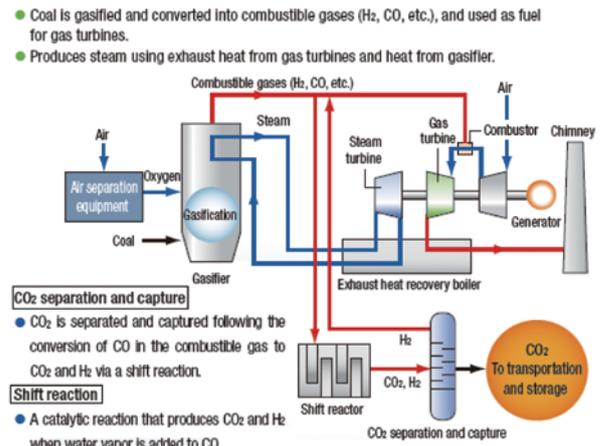


Fig.12 IGCC and technologies for CO₂ separation and capture

しかしながら、CCSの実用化には、技術面、経済面、あるいは環境面など解決すべき多くの課題がある。技術開発としては、CO₂回収エネルギーと回収コストの低減を図っていくことや貯留ポテンシャルの拡大に向けた有望サイトの詳細な調査が必要となる。こうした技術的なハード面に加えて、国による政策的・財政的な支援、法整備などソフト面での条件整備が不可欠になってくる。

今後、官民が協力して、ハード面及びソフト面の双方での条件整備を進め、CCS実証を通じてのCCSの知見と経験の蓄積を急ぐことが重要である。

5. まとめ

エネルギー自給率が小さい日本のような国々にとって、エネルギー源の供給途絶や価格の乱高下など、予期せぬエネルギー情勢の変化があったとしても、いつも変わらぬバランスのとれた、柔軟かつ強靱なエネルギー供給ポートフォリオを作り出すには、世界中に広く分布する石炭の有効利用が不可欠である。しかしながら、石炭は石油や天然ガスなど他のエネルギーと比べ、CO₂排出源単位が高いため、環境負荷を低減させながら石炭を有効活用する上では、クリーンコール技術を発展・普及させていくことが重要である。

また、世界全体、特に主要新興国のエネルギー需給が今後とも増加していく中で、世界の発電電力量の約4割以上を石炭火力が担っており、石炭の活用なしにはこの需要を充足することはできない。更には、世界のCO₂排出量のおよそ3割は石炭火力から排出されており、今後も増加傾向にある中、世界のCO₂排出量の削減には、地球規模での石炭火力からの排出削減が鍵となる。

このような状況において現在、我が国が実証研究に着手している高効率発電技術やCCS等の新技術を官・民が協力して開発し、この新技術を国内のみならず海外まで展開することにより、世界規模での地球温暖化防止に寄与できることが望まれる。

特集：石炭火力発電

先進超々臨界圧火力発電 (Advanced-USC) 要素技術開発プロジェクト

福田 雅文*¹
FUKUDA Masafumi

キーワード：蒸気タービン，ボイラ，超臨界蒸気，耐熱材料，熱効率

Steam Turbine, Boiler, Super Critical Steam Condition, Heat Resistant Materials, Thermal Efficiency

1. 緒言

日本国内においては1973年のオイルショック以後，一次エネルギーのベストミックスを指向するなかで石炭火力発電所の建設が進み，設備容量は現在35GW程度，発電電力量で25%程度まで拡大してきた。一方，東日本大震災により原子力発電への懸念が生じ，発電用一次エネルギーにおける天然ガス，石炭等の化石燃料の位置づけが高まる方向にある。2012年には火力発電は国内の全発電電力量の約90%を供給した。特に，天然ガス，石油火力の伸びは著しく，燃料価格の上昇と相まって，日本の貿易収支が大幅な赤字になるほどのインパクトを与えている。そのような状況下比較的価格が低く，かつ供給が安定している石炭火力に注目が集まっている。しかしながら，石炭火力発電は他の発電方法に比べて単位電力量あたりの二酸化炭素排出量が多く，地球温暖化問題への対応が強く迫られている。

先進超々臨界圧発電技術 (A-USC, Advanced Ultra Super Critical Steam Condition) は石炭火力発電の熱効率を向上させて二酸化炭素排出の削減を目指した技術である。現在の石炭火力発電所はほとんど全てがボイラと蒸気タービンを組み合わせた汽力発電技術を採用しており，A-USCもその一種である。A-USCは熱効率を大幅に向上するために蒸気タービン入口における蒸気温度を従来よりも100℃程度高い700℃まで高めようとしている。そのためには高温で使用できる材料の開発，さらに材料に適した溶接や加工等の製造技術開発が必要である⁽¹⁾。

国内火力発電所の蒸気温度は1950年代に538℃から566℃に向上したが，その後40年近く同じ温度が維持された。そして，1993年に中部電力㈱の碧南3号機で再熱蒸気温度593℃が，1997年に電源開発㈱の松浦2号機で主蒸気温度593℃が達成された。さらに1998年には中国電力㈱の三隅1号機で600℃に上昇した。2000年になる

と電源開発㈱の橘湾1号機で再熱蒸気温度610℃が達成された。

超臨界圧で温度が593℃以上の蒸気条件の技術が一般に超々臨界圧発電技術 (USC, Ultra Super Critical Steam Condition) と称されている。USCは比較的燃料コストが高い日本で開発された技術で，蒸気条件の向上による高効率化により燃料使用量を減らし，発電コストの低減を狙ったものである。USCの実現には耐熱材料の開発が不可欠だった。電源開発㈱とボイラ，タービンメーカーは国からの補助を受け，1981年から2000年にわたる長期の開発を推進した。その結果，600℃級USCに適用可能な9～12%Cr鋼が開発され，順次実プラントに適用されてきた。図1に示すように，現在わが国の石炭火力発電所発電容量のほぼ半分をUSCが占めている^{(4),(5)}。開発された技術や製品は欧米やアジア諸国にも波及，輸出され省エネルギー，二酸化炭素削減に寄与している。

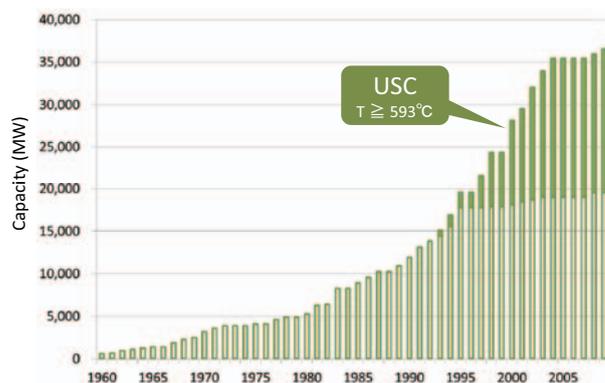


Fig. 1 Capacity of Coal Power Plant in Japan⁽⁵⁾

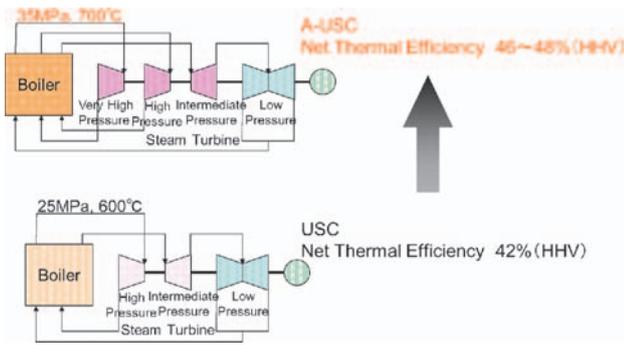
図2に示すように，A-USCは600℃級USCに対してさらに100℃以上の蒸気温度向上を狙っている。その結果，高位発熱量基準 (HHV, Higher Heating Value) の送電端熱効率は42%から46～48%へと向上し，二酸化炭素排出量は10%以上低減できる^{(2),(3)}。

現在ガスタービンでは1600℃級が実用化し，1700℃級が開発されつつある。そのような状況下A-USCで700℃

原稿受付 2014年5月7日

*1 高効率発電システム研究所

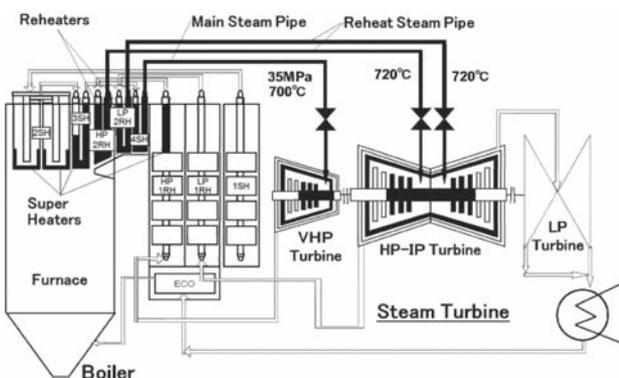
〒140-0011 品川区東大井5-17-6

Fig. 2 Concept of A-USC⁽³⁾

という温度を目指した開発を進めていることに違和感を覚えるガスタービン関係者もいるかと思う。次章の「A-USCの技術課題」でその疑問に答えることとしたい。

2. A-USCの技術課題

図3にA-USCの代表的なシステム構成を示す。A-USCは汽力発電システムの一つであり、主たる構成要素としてはボイラと蒸気タービンがある。ボイラでは火炉 (Furnace) で石炭等の燃料が燃焼し、その熱で水を蒸発させる。発生した蒸気は小径の伝熱管群から構成される過熱器 (Superheater) で700°Cの温度まで過熱された後、大径の主蒸気管 (Main Steam Pipe) と主蒸気弁を通して超高压タービン (VHPT) に導かれ仕事をする。超高压タービンから出た蒸気はボイラに戻され、小径の伝熱管群から構成される再熱器 (Reheater) で720°Cまで再熱される。再熱された蒸気は大径の再熱蒸気管 (Reheat Steam Pipe) と再熱弁を通り、高压タービン (HPT) に送られ仕事をする。高压タービンから出た蒸気はもう一度ボイラに戻され二回目の再熱をされた後中圧タービン (IPT) にもどり再び仕事をする。中圧タービンを出た蒸気は低压タービン (LPT) でも仕事をし、復水器で冷却され水に戻る⁽⁶⁾。

Fig. 3 A-USC System Configuration^{(3),(4)}

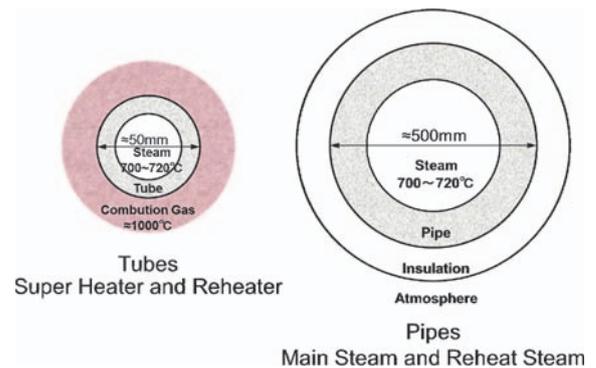
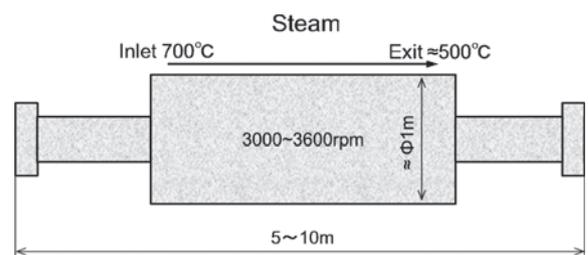
このようなシステムにおいて700°Cの蒸気温度を実現するには耐熱材料や構造に開発課題がある。600°C級USCの実現には9~12%Cr鋼の高温強度向上が主役を演じたがA-USCではさらに高温に耐えうる材料として

Ni基合金に期待がかかっている。図中黒く塗りつぶした部分がNi基合金の適用部材である^{(3),(4)}。

ボイラでは小径の伝熱管と大径の蒸気管にNi基合金を適用する。図4に伝熱管と蒸気管の代表寸法と使用環境を示す。伝熱管は約50mmの外径であり、外部から1,000°C程度の燃焼ガスで加熱され、内部の蒸気に熱を伝える役割を有している。そのため、管材の温度は蒸気温度よりも高い750°C程度まで上昇する。一方、蒸気管は500mm程度の大径であるが、熱を大気に逃がさないように保温材が巻かれているので、管材の温度は内部の蒸気と同じで700~720°C程度になる⁽⁶⁾。

図5に超高压タービンのロータ模式図を示す。タービン入口蒸気温度は700°Cで、出口蒸気温度は500°C程度なので、ロータ表面には入口側で700°C、出口側で500°Cの蒸気が行き交うことになる。そのため、ロータ材の一部は700°C程度の温度に上昇し、Ni基合金を適用する⁽⁴⁾。

Ni基合金はこれまでガスタービンの高温部材や石油、化学工業の耐食性部材として使われてきた。材料の最高温度レベルではガスタービン翼材で1000°Cを超えるものもあるが重量は10kg程度だった。A-USCでは温度は700°C程度であるが蒸気タービンではロータ、ケーシングに数十トンの部材が、ボイラでは過熱器、再熱器、主蒸気管、再熱蒸気管が百トンを超え、Ni基合金部品の従来実績をはるかに上回る大きさとなる。A-USC実現のためにはそのようなサイズでも欠陥や強度の低下等の問題が生じないNi基合金を開発する必要がある。また、ガスタービンでは翼等の高温部材は数年間の使用後に交換することを前提として設計されているが、汽力発電システムの部品は補修をするものの原則として交換はせず数

Fig. 4 Tube and Pipe Size and Operating Condition⁽⁶⁾Fig. 5 Rotor Size and Operating Condition⁽⁶⁾

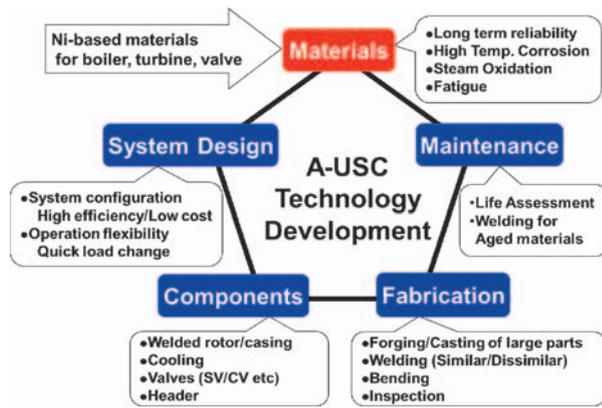


Fig. 6 A-USC Development Tasks⁽²⁾

十年間使われる。

Ni基合金を実際のプラントに適用するには単に材料の開発にとどまらず、システム全般にわたり多様な技術開発が必要になる。図6に示すように保守管理技術の開発、製造加工技術の開発、構造・機器の開発、システムの最適化等が必須である。特に、発電システムでは部材を交換せずに数十年間使用するので、高温環境下での材料の長期信頼性検証は最重要項目である⁽²⁾。

表1にボイラに適用する新規材料の候補を示す。700℃の温度領域で用いるNi基合金6種類が挙げられている。HR6W, HR35, Alloy617は比較的加工が容易で主蒸気管や再熱蒸気管といった厚肉大径管と過熱器や再熱器の小径伝熱管に適用可能である。Alloy263, 740, 141は前者よりも耐熱性が高く過熱器や再熱器の最高高温部に適用可能である。HR6W, HR35, Alloy141はA-USC向けの国内開発材であり、期待が寄せられている。さらに、従来の9%Cr鋼は630℃が使用の限界だったが、少しでもNi基合金の適用範囲を狭めるために、650℃まで耐熱性を向上した高B-9Cr鋼、低C-9Cr鋼、SAVE12ADといった先進9Cr鋼が候補に挙げられている⁽⁴⁾。

Table 1 Boiler Candidate Materials⁽⁴⁾

| Material | Composition | Application | |
|-----------|--|--|------------------------------|
| | | Pipe | Tube |
| HR6W | Ni-based 45Ni-23Cr-7W | Header, Main steam, Reheat Steam, Connecting pipe | Super Heater, |
| HR35 | Ni-based 50Ni-30Cr-4W-Ti | | |
| Alloy 617 | Ni-based Ni-22Cr-12Co-9Mo-Ti-Al | | |
| Alloy 263 | Ni-based Ni-20Cr-20Co-6Mo-Ti-Al | --- | Reheater, |
| Alloy 740 | Ni-based Ni-25Cr-20Co-2Nb-Ti-Al | --- | |
| Alloy 141 | Ni-based Ni-20Cr-10Mo-Ti-Al | --- | |
| HB-9Cr | Ferritic 9Cr-3W-3Co-Nb-V-B | Header, Connecting pipe <650℃ | Super Heater, Reheater |
| LC-9Cr | Ferritic 0.035C-9Cr-2.4W-1.8Co-Nb-V | | |
| SAVE12AD | Ferritic 9Cr-3W-2.6Co-Nb-V-B | | |

表2に示すように、蒸気タービンロータの候補材料としてはFENIX-700, LTES700R, TOS1Xの3種類が挙げられている。全て国内で開発された材料でありそれぞれ特徴を持っている。FENIX-700はガスタービンディスクに多用されているAlloy706からの改良材であ

Table 2 Turbine Rotor Candidate Materials^{(3),(4)}

| Materials | Temperature Level | Weight | Development Target |
|-----------|-------------------|---------------------------|---|
| FENIX-700 | 700℃ | >10ton | Ni-base material heavier than 10 tons without segregation |
| LTES | >700℃ | 30~40ton ↑ Ni:10ton | 10 ton Ni-base material with good weldability to steel |
| TOS1X | >720℃ | Steel:20~30ton Welding | 10 ton Ni-base material with good weldability to steel |

り、A-USCへの適用に当たっては10トン超の大型ロータ部材を製作目標としている。LTES700Rは12%Cr鋼との溶接を前提としており、線膨張係数がNi基合金としては低めになるように材料設計されている。TOS1XはAlloy617からの改良材であり、720℃以上の温度領域での使用が目標である^{(3),(4)}。

3. 要素技術開発プロジェクト

経済産業省の補助を受けて、2008年から2016年までの9年間におよぶ「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」プロジェクトが開始された。そのロードマップを図7に示す。

| | | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | |
|--------------------|---------------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| System Design | | System Design, Economics | | | | | | | | | |
| Boiler Technology | Material | High Temperature Steam Pipe&Tube | | | | | | | | | |
| | Manufacturing | Welding, Pipe Bending etc | | | | | | | | | |
| Turbine Technology | Material | Rotor, Casing, Bolt etc | | | | | | | | | |
| | Manufacturing | Long Term Test (> 30000 hour) | | | | | | | | | |
| Valve Technology | | Material Test, Trial Manufacturing | | | | | | | | | |
| Boiler Components | | Plan, Design | | | | | | | | | |
| Small Turbine Test | | Manufacture | | | Test | | | | | | |

Fig. 7 A-USC Road Map⁽³⁾

開発は(株)IHI, ABB日本ベレー(株), 岡野バルブ製造(株), 新日鐵住金(株), 東亜バルブエンジニアリング(株), (株)東芝, バブコック日立(株), 富士電機(株), 三菱日立パワーシステムズ(株), 三菱重工業(株)のメーカ10社と中部電力(株), 電源開発(株), (財)電力中央研究所, (独)物質・材料研究機構, (一社)高効率発電システム研究所から構成される「A-USC開発推進委員会」により推進されている(図8)。

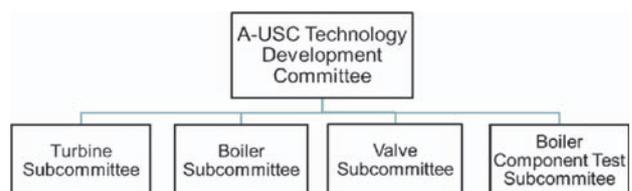


Fig. 8 A-USC Project Structure⁽⁷⁾

図9にボイラ技術の検証フローを示す。プロジェクトの前半5年間に於いて、システム、材料、製造、部品等に関する基本技術開発を行った。システムでは事前検討、システム評価を、材料開発では表1に掲げた材料による小径管、大径管等の試作、製造技術開発では管等の溶接技術、管の曲げ技術検証、部品技術では開発材を用いた過熱器、再熱器ヘッダの試作、材料試験としては水蒸気酸化試験、高温腐食試験、疲労試験、長期材料試験を行った。長期材料試験はプロジェクトの全期間に亘り実施し、プロジェクト終了後も参加各社において10万時間まで継続される。プロジェクト後半の4年間では実機ボイラの一部に700℃の蒸気を発生する過熱器を組み込み、実機試験を行う。現在、試験に向けて装置の詳細設計、製作が進められている。2015年度から2016年度に試験を実施する予定である^{(4),(8)}。

図10には試作されたNi基合金製ボイラ大径管を示す^{(2),(3)}。図11は試作された大径管による溶接試験の結果

である⁽⁹⁾。一部に高い溶接感受性を示す材料があったが、概ね良好な溶接施工を行うことができた。図12にはボイラ大径管の曲げ試験結果を示す⁽³⁾。

2012年度にはこれらの材料技術、製造技術を総合的に検証するために過熱器と再熱器のヘッダーモックアップを試作した。図13にはボイラ各社で試作されたヘッダーモックアップを示す⁽⁵⁾。

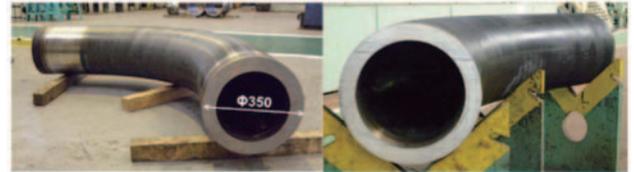


Fig.12 Boiler Pipe Bending Test⁽³⁾



Fig.13 Reheater, Superheater Header Mock-ups⁽⁵⁾

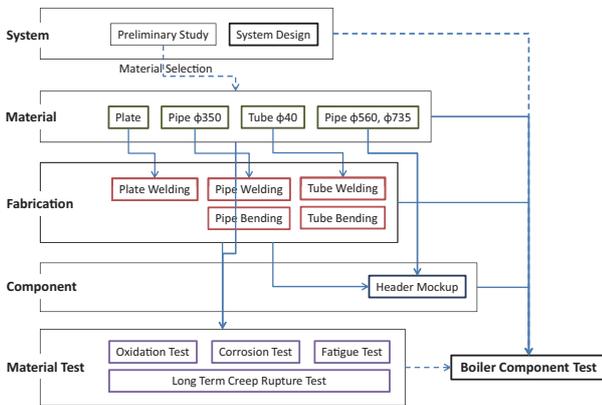


Fig. 9 Boiler Technology Development Flow⁽⁸⁾



Fig.10 Boiler Pipes^{(2),(3)}

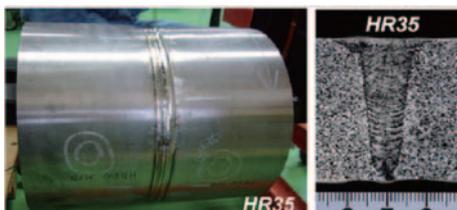


Fig.11 Boiler Pipe Welding Test⁽³⁾

図14に示すように、蒸気タービンについてもプロジェクトの前半5年間に於いて、システム、ロータ材料、製造、ケーシング材料等に関する基本技術開発を行った^{(3),(8)}。

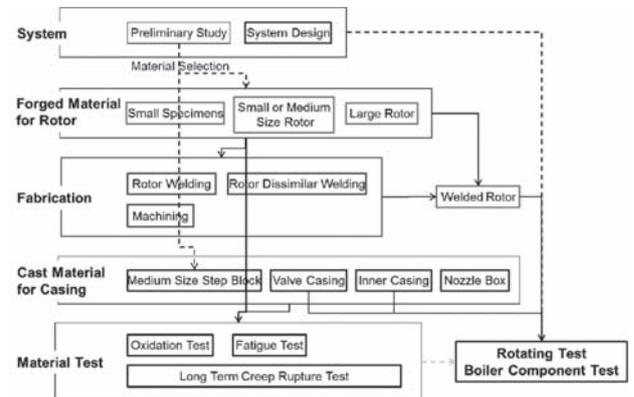


Fig.14 Turbine Technology Development Flow⁽⁸⁾

システムでは事前検討、システム評価を、ロータ材料開発では表2に掲げた材料による大型ロータの試作、製造技術開発ではロータ溶接技術、機械加工技術開発を、材料試験としては水蒸気酸化試験、疲労試験、長期材料試験を行った。長期材料試験はボイラと同様にプロジェクトの全期間に亘り実施し、プロジェクト終了後も参加各社において10万時間まで継続される。プロジェクト後半の4年間では実機と同じ外径を持ったロータを試作し、700℃の温度条件化で、実機と同じ回転数でロータ回転試験を実施する。現在、試験に向けて装置詳細設計、装置製作、ロータ製作が進められている。2015年度初頭か

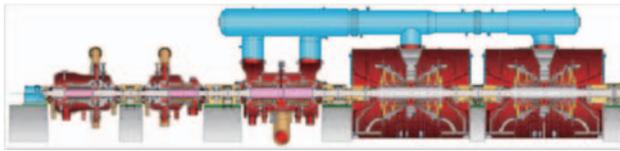


Fig.15 1,000MW A-USC Turbine⁽⁵⁾

ら2016年度末まで試験を実施する。

図15はタービシステム設計の結果得られた1,000MWのタービン断面図である。超高压タービン、高压タービン、中圧タービン、低圧タービンが並んで配置されるタンデムコンパウンド形式となっている⁽⁵⁾。

図16はNi基合金製としては世界最大の試作大型ロータである⁽⁹⁾。図17はNi基合金 (LTES700R) と12Cr鋼の異材溶接の試作溶接ロータである^{(9),(10)}。

タービン静止部品としてNi基合金による大型鋳物試作を行った。図18は複雑形状のノズルボックスである⁽⁵⁾。図19は10トンを超える内部ケーシングであり、Ni基合金の鋳物としては世界最大級である⁽⁵⁾。

A-USCをシステムとして完成するには700℃の蒸気環境下で作動する高温弁が欠かせない。種類としてはター



Fig.19 Inner Casing⁽⁵⁾

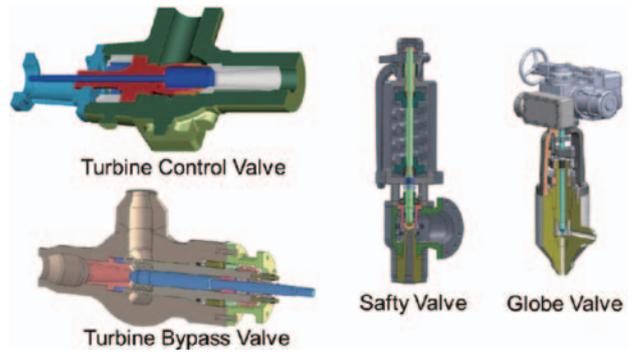


Fig.20 700°C High Temperature Valve⁽⁷⁾

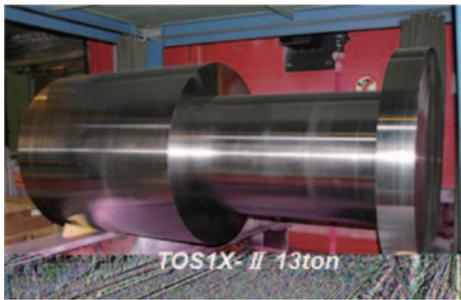


Fig.16 Rotor Trial Forging⁽⁹⁾



Fig.17 Rotor Dissimilar Welding^{(9),(10)}



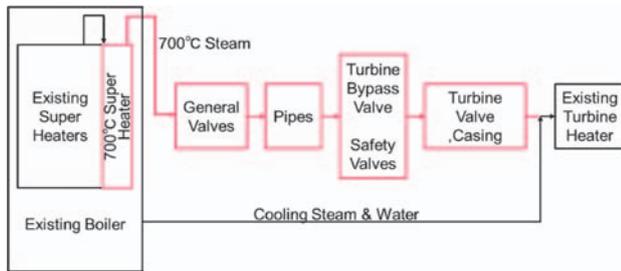
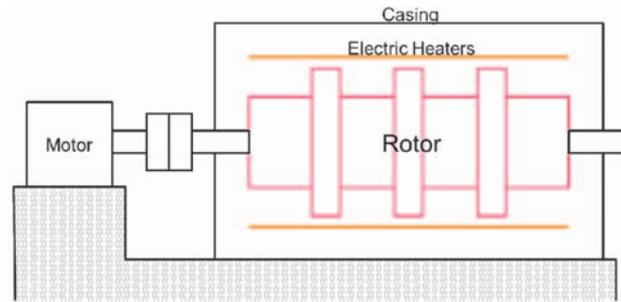
Fig.18 Nozzle Box⁽⁵⁾

ピン蒸気弁、ボイラ起動弁 (タービンバイパス弁)、ボイラ安全弁等があり、図20に示す。これらはタービンの蒸気流量の制御、ボイラ起動時の蒸気流量制御、緊急時に蒸気を逃がす等の機能を有し、システムを安全に運用する上で非常に重要な機器である。700℃の蒸気環境下での高い信頼性を確保するために、弁の摺動部の耐久性や、弁棒周りからの蒸気リーク防止するパッキン材の耐久性等に関する開発、検証が行われた⁽⁷⁾。

本プロジェクト後半には前半5年間の集大成として図21に示すように実缶試験、回転試験が行われる。実缶試験は図22に示すように実ボイラに開発材で製作された伝熱管等を組み込み、700℃の蒸気を発生させる。発生した蒸気で、高温弁、大径管、タービンケーシング等の検証試験が行われる。図23に示す回転試験ではロータを電気ヒータで加熱し、実温度、実速度で検証試験する予定である^{(5),(12)}。

| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|---|------|------|------|------|------|
| Boiler Component Test | | | | | |
| Basic Design | | | | | |
| Components Design | | | | | |
| Components Production & Installation | | | | | |
| Test | | | | | |
| Turbine Rotor Test | | | | | |
| Test Facility Design | | | | | |
| Test Facility Production & Installation | | | | | |
| Test Rotors Production | | | | | |
| Rotating Tests | | | | | |

Fig. 21 Boiler Component Test, Turbine Rotor Test^{(8),(12)}

Fig. 22 Boiler Component Test Facility⁽⁵⁾Fig. 23 Turbine Rotor Test Facility⁽⁵⁾

4. まとめ

石炭火力発電からの二酸化炭素排出削減を狙い、700°C級の蒸気条件を有するA-USCの要素技術の開発が推進されている。開発には国内の主なボイラメーカ、タービンメーカ、研究所などが参加し、2008年度から2016年度の9年間で、ボイラ、タービン、高温弁などの材料開発／検証、要素技術検証等を行っている。

要素開発プロジェクトが開始されてから約5年が経過したが、ほぼ予定に沿って試作、検証試験が進められている。

これまでに、ボイラでは候補材料による大径管等の部材の試作を行い、それらから切り出された試験片等によりクリープ破断試験、溶接試験、曲げ試験等が実施された。タービンでは候補材料によるロータ、ケーシング等の部材の試作を行い、クリープ破断試験、溶接試験等が実施された。材料の長期信頼性は最も重要な検証項目であることからクリープ破断試験はプロジェクトの全期間

(9年間)に亘って行われ、プロジェクト終了後も各社内で10万時間まで実施される。

2015から2016年度にかけて、実機ボイラの一部に伝熱管等の部材を組み込み700°Cの蒸気を発生させるボイラ「実缶試験」、タービンロータを試験チャンバー内で700°Cまで加熱し、実回転数で試験する「回転試験」を予定しており、現在試験装置、試験体の設計、製作に取り掛かっている。

5. 引用文献

- (1) 佐藤幹夫ほか, 欧米および我が国の蒸気温度700°C級石炭焚き発電システムの開発動向, 火力原子力発電技術協会誌, vol.57, No.10, (2006) 89.
- (2) 経済産業, 第一回次世代電力供給システム分野に係る技術評価検討会 資料5 (2010) 103
- (3) M. Fukuda, Advanced USC Technology Development in Japan, 9th Liege Conference: Materials for Advanced Power Engineering 2010, (2010)
- (4) 福田雅文, A-USC先進超々臨界圧火力発電技術, 日本機械学会誌, vol.114, No.1109, (2011) 244.
- (5) M. Fukuda, et al, Advanced USC Technology Development in Japan, 7th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, EPRI, (2013)
- (6) 福田雅文ほか, 微粉炭焚きA-USCおよびCCS, 火力原子力発電誌, vol.63, No.673, (2012) 43,
- (7) 福田雅文, 先進超々臨界圧火力発電 (A-USC) 技術開発, スマートプロセス学会誌, Vol. 3, No.2 (2014)
- (8) M. Fukuda, The on-going and planned activities of the A-USC project in Japan, 39th MPA Seminar, (2013)
- (9) 福田雅文, 次世代超々臨界圧火力発電 (A-USC) 材料, 溶接技術開発, 溶接学会誌, vol.82, No. 6, (2013) 42.
- (10) 中村真二ほか, A-USC (700°C級先進超々臨界圧火力発電) の技術開発と展望, 三菱重工技報, vol.48, No. 3, (2011) 8.
- (11) 先進超々臨界圧火力発電技術開発講演会 講演要旨集, 火力原子力発電技術協会, (2012).
- (12) 福田雅文, 先進超々臨界圧火力発電 (Advanced-USC) 要素技術開発プロジェクト, ターボ機械 Vol.41 No. 1, (2013).

特集：石炭火力発電

石炭火力用蒸気タービン

野本 秀雄*¹
NOMOTO Hideo新関 良樹*¹
NIIZEKI Yoshiki

キーワード：蒸気タービン，石炭火力，超々臨界圧力，A-USC，最終段，チタン翼，ニッケル基材料，12Cr材，溶接ロータ

Steam turbine, Coal fired plant, Ultra super critical, Advanced USC, Last stage blade, Titanium blade, Ni-base material, Welded rotor

要約

石炭火力に使われる蒸気タービンは、圧力、温度、容量、最終段などの観点から蒸気タービンとしては最先端の技術が必要なものが多い。アジアでは石炭火力はいまだ旺盛な需要があり、これからも電力供給の大きな一端を担っていくと考えられる。1990年代にわが国から始まった超々臨界圧力用蒸気タービンは既に成熟期を迎え、今後は更に蒸気条件を高めた先進超々臨界圧力（A-USC：Advanced Ultra Super Critical）の研究開発が行われている。超々臨界圧力用蒸気タービンも含め、これらのタービンの設計・開発には優れた材料が必要である。また、大容量化、高効率化には信頼性に優れた最終段の開発も必要である。本稿ではこれらの状況にかんがみ、最近の蒸気タービンの現状と将来の動向について述べる。

1. はじめに

石炭火力に使われる蒸気タービンは大型で温度や圧力等の蒸気条件も高いものが多く、蒸気タービンとしては最先端技術を必要とする。その意味では蒸気タービン技術の根幹を支えているともいえる。コンバインドサイクル用蒸気タービンや産業用蒸気タービンの進展はいずれも石炭火力に使われたタービンの技術を適用している場合が多く、蒸気タービンの技術の発展には石炭火力は非常に重要である。

さて、日本国内においては、一時期石炭火力の建設は下火になっていたが、原子力発電所の停止による昨今のLNGの輸入量の増大に伴い、より安価な石炭への回帰の傾向が見られる。再生可能エネルギーも伸びているとはいえ、まだ電源供給の主役とはいえ、今後の原子力プラントの動向によっては石炭火力が再度脚光を浴びる可能性がある。事実、幾つかの新規石炭火力建設の計画が進みつつあるとも伝えられる。海外に目を転じてみると、西欧・米国ではここ数年大型石炭火力の新規建設は

非常にまれになってきている。これは米国のシェールガスの急速な普及と石炭火力の弱点であるCO₂の排出に起因しているところが多い。この状態を打開するには、蒸気条件の向上を初めとする蒸気タービンの技術の進歩とCO₂を取り去るCCS（Carbon Capture and Storage）の経済性を実現する技術確立が両輪として必要不可欠である。一方、アジアではインド、中国をはじめとして石炭火力の需要はまだまだ旺盛である。特に、アジアは最近石炭火力の大型化と主に蒸気条件の向上による高効率化に積極的である。日本がこれまで積み上げてきた高効率技術を実践する最も適切な地域であると考えられる。

2. 最近の石炭火力の傾向と設計

図1には1990年代からの当社製タービンの主蒸気温度と再熱蒸気温度の変遷を示す。縦軸には主蒸気温度と再熱蒸気温度を示す。なお、これらに示すデータは圧力に関しては全て超臨界圧力であり、50Hz地区用、60Hz地区用、タンデムコンパウンド型、クロスコンパウンド型などの種々の設計を含む。出力に関しては、500MWから1000MW級の、いわゆる大型機である。燃料に関してはほとんどが石炭を燃料としている。この図からわかるように、1990年代には蒸気温度は高温になっており、いわゆる超々臨界圧（USC：Ultra Super Critical）の時代の到来である。興味深いことは、この図に示されるプロットで1990年代のものは全て国内顧客向けのものであり、2000年以降は海外向けが多くなっている。即ち、当

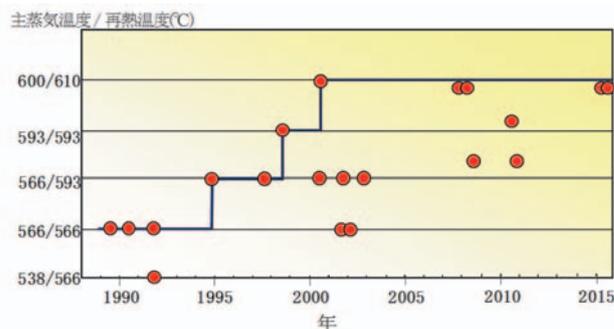


Fig. 1 蒸気条件の変遷

原稿受付 2014年5月14日

*1 (株)東芝 電力システム社

〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4

Table 1 最近の超臨界圧石炭火力

| 国 | 定格出力 (MW) | 主蒸気圧力 MPa(G) | 主蒸気温度 (°C) | 再熱温度 (°C) | 備考 |
|-----|-----------|--------------|------------|-----------|-----|
| 韓国 | 2X1,100 | 25 | 600 | 600 | 製作中 |
| 中国 | 2X1,000 | 25 | 600 | 600 | |
| 米国 | 957 | 26 | 582 | 582 | |
| 米国 | 914 | 25 | 582 | 582 | |
| 日本 | 900 | 25 | 595 | 595 | |
| 米国 | 877 | 26 | 566 | 577 | |
| 米国 | 2X877 | 25 | 566 | 567 | |
| インド | 5X830 | 24 | 565 | 593 | |
| インド | 2X800 | 24 | 565 | 593 | 製作中 |
| インド | 3X800 | 24 | 565 | 593 | 製作中 |
| 台湾 | 2X800 | 25 | 600 | 600 | 製作中 |
| インド | 2X660 | 24 | 565 | 593 | 製作中 |
| 日本 | 507 | 24 | 538 | 566 | |

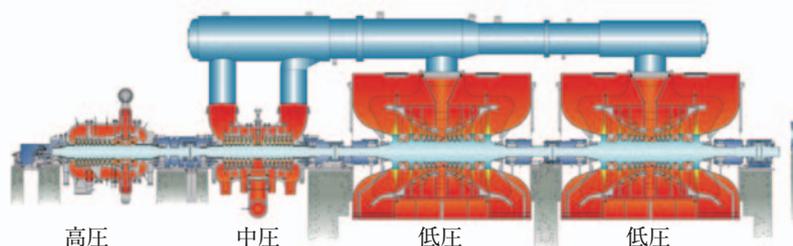


Fig. 2 大容量蒸気タービン

社と限らず、国内のタービンメーカーは1990年代に国内で培った技術を2000年代に入って世界に広めたのである。表1には2000年以降当社が製作した、もしくは受注済みの超臨界圧石炭火力一覧を示す。大半が大容量火力である。無論、この表には含まれない亜臨界のタービンもあるが、最近では超臨界圧力、USC、それも蒸気温度600°C級が標準的なものとなりつつある。アジアのみならず、米国での建設も多かった。しかしながら、米国では最近では石炭火力の建設は、二酸化炭素排出の問題のため、非常に難しくなっている。

図2には代表的な大容量蒸気タービンの組立図を示す。本図は出力1000MW級、蒸気温度は主蒸気も再熱蒸気も600°C級のものであり、石炭火力に使われている。高圧は単流で独立したケーシングの中におさめられ、中圧は対称形の複流構造で一つのケーシング、低圧も対称形の複流構造で二つのケーシングを有する。高圧部と中圧部は高温・高圧ゆえに鋳物を使った内部ケーシングと外部ケーシングの二重ケーシング構造となっており、低圧部は圧力温度が低いゆえに溶接構造の二重ケーシング構造である。ケーシングの数と出力については各社それぞれの設計思想があるが、当社の場合には一般的には800MW以上では高圧部と中圧部を独立させる場合が多い。軸受と呼ばれる油圧潤滑軸受が使われ、回転数の上昇とともに、潤滑油のくさび効果によりロータを支持する。このような大型のロータでは一つのロータを二つの軸受で支持する構造が広く用いられる。ロータ材料は高温の高圧部と中圧部に関しては、温度条件に応じて後述の材料開

発の項で述べる種々のCrMoV系、もしくは12Cr系材料が使われ、低温で高い靱性を要求される低圧ロータにはNiCrMoV鋼が使われる。石炭火力用、コンバインド用、原子力用を問わず、当社のタービンのロータは一体構造が多かったが、最近では溶接ロータの採用も増えつつある。

3. 材料開発

前章で述べたように、1990年代に蒸気条件の向上を実現しているが、これには材料開発が果たした役割が非常に大きい。図3は既存の各種材料のクリープ強度を示す。主蒸気温度が540°C以下の時代にはCrMoV材が多く使われたが、その後、Crの含有量を増した12% Cr鋼が開発されたことにより温度が566°Cになった。この12%

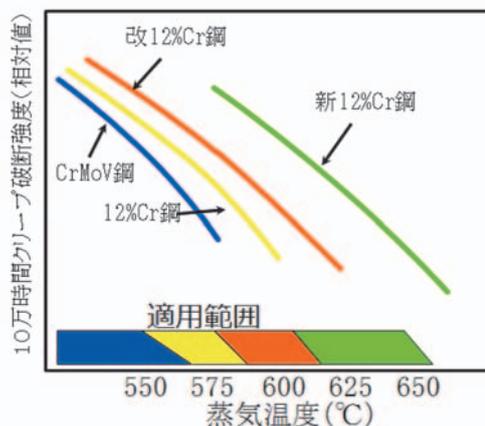


Fig. 3 既存材料の高温強度

Cr鋼は引き続き改良が加えられ、タングステンを加えた改良12% Cr鋼、更にコバルト、ボロンを加えたタングステンを増加させ、またモリブデンは減少させた新12% Cr鋼などが開発された。これにより、蒸気温度は593℃、600℃、610℃へと上げられていったのである。一般に蒸気タービンの材料開発は小さな部材から大きな部材、鍛鋼から鋳鋼へと進んでいく。より具体的に言えば、動翼用材料で得られた開発成果が、ロータ材料へと反映され、更に高温・高圧部位の鋳鋼ケーシング材料への反映されていく。その中でも最も時間がかかるものは大型、高温、かつ回転体というきわめて技術課題が高いロータ材料であり、図3はこの進化を示している。

4. 低圧最終段

蒸気タービンの部品はそれぞれの機能と使用部位によってそれぞれの技術的な困難さがあるが、あえて、非常に開発に手間がかかる部位を挙げると高圧の初段付近、中圧の初段付近そして低圧最終段である。中でも低圧最終段は各タービンメーカーの実力をあらわす部品とも言われている。この技術的困難さの一つには、その大きな遠心力であり、複雑な振動形態であり、また湿り域で運転されるがゆえのドロップレットエロージョンである。遠心力に関して述べると、蒸気タービンの最終段はその設計法により各社異なるものの、一般的には1本の最終段で数百トンの遠心力となり、これが一つのホイールに数十枚から100枚程度装着される。構造的にも各翼を独立して組み立てるフリースタANDINGと呼ばれる構造から、数枚の翼をつなげる群翼構造、全ての翼をつなげる全周一群と呼ばれる構造まで様々である。その構造に応じて振動形態も異なっており、各社それぞれの経験と知見を有している。しかしながら、どのような構造であっても基本的な留意点は、一つに回転数によってその固有振動数が変化すること、そして二つ目には定格回転数においてその回転数の倍数（ハーモニクス）から固有振動数を離すことである。前者は最終段に働く巨大な遠心力がもたらす現象である。翼の中の応力分布が変化すること、ロータ締結部の境界条件が変化することにより、固有振動数が変化すること、このことは、実際に回転数をあげた試験が必要になることを意味する。最近の解析技術は格段の進化を遂げており、様々な構造の最終段の固有値を回転数の変化に応じて精度良く予測できるようになった。しかしながら、まだ、完璧とはいえず、また、最終段の重要性をかんがみると、回転振動試験を完全に省略するまでには至っていない。逆に、解析結果と回転振動試験の結果をどれだけの確に予測できるかが、各タービンメーカーの経験の蓄積ともいえよう。

図4には当社の最新の60Hz地区用48インチ・チタン最終段を示す。これを50Hz地区用の最終段とすると完全な相似則が適用でき57.6インチ翼となる。表2にはその主要項を示す。先端部の周速は766m/sに達している。



Fig. 4 60Hz用チタン48インチ翼

Table 2 チタン48インチ翼の要項

| | 60HzTi48 TM |
|------|------------------------|
| 回転数 | 3600 rpm |
| 翼有効長 | 1219.2 mm 48 inch |
| 平均直径 | 2844.8 mm |
| 環状面積 | 10.9 m ² |
| 先端周速 | 766 m/s |
| 植込形式 | カーブド・アキシヤル・エントリー・グリス |
| 綴り形式 | スナッパカバー 中間スナッパ |
| 材料 | Ti-6Al-4V |

ロータへの植え込み部は軸方向から組み立てるカーブドエントリーと呼ばれる形式で、当社は1990年代の初頭から遠心力の最も厳しいクラスの最終段に適用している。個々の翼のつづり形式は全周一群と呼ばれる構造で、この構造は当社は1970年代の最終段から採用している。ただし、この構造の実現方法には幾つかあり、この翼は翼先端部（最外周部）にスナッパ構造を採用している。全周一群構造は振動モードとしては複雑になるが、最大の長所は最も低次のモード、換言すれば最もリスクの高い、翼接線方向のモードの応答が著しく小さくなる事である。もちろん、固有値解析上はこのモードは存在するが、応答は非常に小さくなるため、実際上は無視することができるようになる。材料面から見ると、最終段の材料は12Cr系の鉄鋼材料かチタンである。チタンを使うメリットは勿論その軽量さにあるが、反面素材費としては高価であり、その価格の変動幅も大きい。また、鉄鋼材料に比べ難切削材であり、切り欠き感受性も高いなど、決して取り扱いやすい材料ではなく、その使用にあたっては豊富な経験が必要である。当社は1990年代から60Hz用40インチ・チタン翼を実機に適用してきた。その後、設計技術の進捗とコスト競争力の強化の観点から40インチ翼は一旦鉄鋼材料に戻したが、今回、更なる長翼を目指

して再びチタン翼の採用に踏み切った。これにより、今後の主力機である1000MW級の石炭火力機の性能競争力を高めることができた。図5には開発の際に実際の発電運転に供した実寸翼とそのロータを示す。前述のごとく、このような厳しい最終段の開発には実寸大の翼による回転振動試験がまだ必要であるが、本ロータはそれをさらに推し進め、実際に蒸気を通し、発電運転に供したものである。したがって、最終段だけではなく、低圧部全体の段落が装着されている。当社は福岡県大牟田市に三川石炭火力発電所を保有しており、その2号機はこのような重要な最新技術をその中に組み入れて実際の発電運転を行っている。勿論、発電用であるとともに、試験タービンとしての性格も有しているため、種々の計測プローブを装着し、なおかつ、広範囲の運転データを採取して最終的な信頼性確認と性能確認を行っている。図6にこの石炭火力発電所の外観を示す。



Fig. 5 試験用低圧ロータ



Fig. 6 三川石炭火力発電所

5. 今後の動向

石炭火力の今後の動向は、いかに二酸化炭素の排出を減らすかにかかっているといえよう。その意味では、タービンとしては、更なる蒸気条件の向上による二酸化炭素の低減、そしてプラント全体としてはCCSの採用があげられる。ここでは蒸気タービン側の技術として、蒸気条件の向上について述べる。既にUSCが標準的な蒸

気条件になっていることは前述したが、既にそれを更に高めた先進超々臨界圧力（A-USC；Advanced Ultra Super Critical）タービンとボイラの研究開発が進んでいる。これは、蒸気圧力を35Mpa程度、温度は700℃から750℃程度にまで向上させようというものである。これだけの向上となると、種々の技術検証が必要となるが、やはり焦点となるのは材料の開発であるため、本稿ではそれについて述べる。蒸気タービンの場合はガスタービンと異なり、複雑な冷却やTBC（Thermal Barrier Coating）は用いないため、材料自体の高温強度に主に頼ることになる。そのためには、ガスタービン材料として広く使われているNi基材料を使用するのが最も近道である。ここで、このNi基の材料を蒸気タービンに適用するにあたっては克服すべき大きな技術課題がある。蒸気タービンの部材はガスタービンに比べはるかに大きい。特にロータはボルトで締め上げるディスク構造では無く、一体構造のため、単体重量ははるかに大きい。なおかつロータには複雑な冷却を適用しないため、ガスタービンロータと比べてもより高温であり、これをNi基で製作することが必要になる。したがって、Ni基材料の大型化、特に蒸気タービンロータ用の大型鍛造材の開発が必要である。とはいえ、大型化とはいっても当然現在のNi基材料メーカーの製造能力を考慮に入れる必要がある。また、もう一つの観点は従来の蒸気タービン用材料に比べて非常に高価なNi基材料の使用は最小限にすることである。これらから得られた結論は、高温であるロータの中央部に限り開発したNi基の鍛造材を用い、両端の温度の低い部位については溶接により、従来の蒸気タービン材料を接続することである。したがって、このNi基材は鍛造性、溶接性なども考慮に入れたものになっている。図7にこのようにして作られたA-USC蒸気タービンの試作ロータの写真を示す。このロータの両端には従来の蒸気タービンロータを溶接し、さらにその後は実機の温度環境下で長期の回転試験を行う予定である。長期の回転試験の後、再度このロータの材料試験が実施され、運転後の信頼性を検証することになる。図8にはこの開発済みのNi基ロータ材のクリープ強度を従来の蒸気タービン材料（従来耐熱鋼）と比較して示す。なお、開発済みのNi基



Fig. 7 A-USC用Ni基試作ロータ

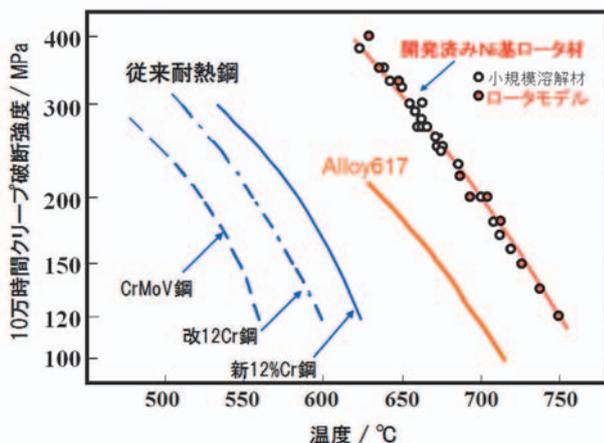


Fig. 8 クリープ強度の比較

ロータ材の強度データは小規模溶解材と大型のロータモデルの両者から採取したものである。参考として、改良の原点となったAlloy617の強度も示す。いずれの材料と比べても高温強度が大きく改善している。このロータ材料の完成により、最も困難な技術課題が解決したといえよう。

無論、タービンは回転部のみで構成されているわけではない。高温・高圧になった場合は静止部も重要である。特に、直接高温・高圧の蒸気に触れる内部ケーシングに



Fig. 9 Ni基鋳鋼ケーシング試作品

は一部Ni基材料の適用が不可欠となる。図9は試作された実寸大のNi基準鋳鋼の内部ケーシングである。このケーシングの材料はAlloy625であり、その材料自体は既に開発済みであるが、ここでは蒸気タービン用の大型鋳鋼としての製造性を検証したものである。このケーシングも、今後材料試験に供される予定である。また、この材料とは別に、開発済みのNi基ロータ材をベースとして、これを鋳鋼に展開した当社独自のNi基鋳鋼材も開発中である。以上のようにA-USCの蒸気タービンに関しては、最も基本となる材料開発がほぼ終了し、最終検証段階に入っており、実機設計・製作の準備は整っているといえよう。

6. まとめ

以上、最近の石炭火力に使われている蒸気タービンの現状と将来の動向について述べた。蒸気タービンは成熟した高速回転機械であるにもかかわらず、蒸気の圧力・温度の向上、更なる低圧最終段の長翼化など多くの技術課題を達成してきており、今後も発展を遂げていくものと考えられる。

参考文献

- (1) Ikeda, Y., et. all, ASME Paper, PWR-Vol. 7 (1989), p. 69.
- (2) Suzuki, A., et. all, Proceedings of IMechE International Conference on Steam Plants for 1990's (1990), p. 31.
- (3) Nomoto, H., et. all, Proceedings of IMechE Conference C423/053, (1991), p. 275.
- (4) Nomoto, H., et. all, EPRI, 3rd International Conference on Improved Coal-fired Power Plants (1991)
- (5) Suzuki, T., et. all, ASME paper, PWR-Vol. 21 (1993), p. 153.
- (6) Nomoto, H., et. all, JSME Int. Journal, Vol. 49 No. 2 (2006) p. 218.
- (7) Shibukawa, N., et. all, Proceedings of Int. Conf. on Power Eng. 09 (ICOPE09), (2009), Vol. 3, p. 365.
- (8) Murata, Y., et. all, Proceedings of the ASME 2011 Power Conf. (2011)
- (9) 野本秀雄, "蒸気タービンの進展と将来展望", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1, (2013), p. 78.

特集：石炭火力発電

IGCCの開発状況

橋本 貴雄*¹
HASHIMOTO Takao坂本 康一*²
SAKAMOTO Koichi石井 弘実*²
ISHII Hiromiキーワード：石炭ガス化複合発電，空気吹きガス化，Integrated coal Gasification Combined Cycle：IGCC，
Air-blown coal gasification

1. はじめに

石炭は世界中に広く分布し、価格が比較的安く、供給が安定していること、および可採埋蔵量が豊富なことから、世界中で使われている重要なエネルギー資源である。日本においても東日本大震災に伴う原子力発電の運転停止等により、石炭を利用した石炭火力発電はベース電源としてますます重要性を増している。しかし石炭火力発電は地球温暖化の主要因として挙げられるCO₂の排出量が多く、温暖化防止のためには石炭火力発電の高効率化によるCO₂排出低減が重要な課題となっている。また日本は、石炭・石油・天然ガスなどエネルギー資源の大部分を海外から輸入しているため、石炭火力発電の高効率化は経済面でも大きな貢献につながる。

従来の石炭火力発電は、燃料である石炭をボイラで燃焼し高温・高圧の蒸気を発生させ、蒸気タービン・発電機を回して発電させるランキンサイクルを利用したものである。

火力発電の効率化の歴史は蒸気条件（蒸気圧力・温度）の向上、再熱・再生サイクル採用などで効率を上昇させてきた。近年では主蒸気圧力24.5MPa（250at）、主蒸気温度600℃/再熱蒸気温度600℃を越える超々臨界圧プラントが実用化されている。さらなる効率向上のため、欧米諸国と同様に我が国でも次世代の超々臨界圧プラントとしてA-USC（Advanced Ultra-Super Critical：蒸気温度約700℃級）の技術開発が進められている。

一方、天然ガス焼きガスタービンと蒸気タービンの組合せによるコンバインドサイクル発電（GTCC：Gas Turbine Combined Cycle）は、1980年代より火力発電に導入され、近年ガスタービンの燃焼温度の向上により発電効率が飛躍的に向上している。コンバインドサイクル発電とは、図1に示す様に、高温域で作動するブレイトンサイクルのガスタービン発電と、その燃焼排ガス

を熱源とし、低温域で作動するランキンサイクルの蒸気タービン発電を組み合わせた複合熱機関であり、作動温度域を高温から低温まで広げることにより総合効率が向上する仕組みである。したがって、ガスタービンの燃焼温度が向上することにより、さらにプラントの発電効率の向上が可能である。

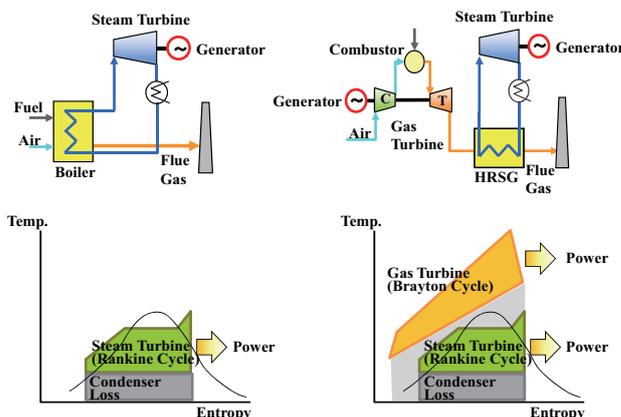


Fig. 1 Rankine cycle and combined cycle

石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated coal Gasification Combined Cycle）は固体である石炭をガス化し、低カロリー焼きガスタービン技術を適用することによって、これまで困難であったGTCC発電における石炭の利用を可能にした。これは従来型石炭火力発電を大きく越える高効率を実現する発電システムで、世界最高水準のクリーンコール技術と位置づけられる。

2. 空気吹きIGCCの特徴

これまで欧米で開発されたIGCC向けガス化炉は化学工業用ガス化炉を転用した“酸素吹き”方式が主流である。化学製品を製造するためには不純物としての窒素が混入しない酸素吹きが必要であるが、発電利用の場合には酸素製造に多くの動力を消費し、送電端としての発電効率が低いという欠点がある。このため我が国では、IGCC本来の特徴を生かし高い送電端効率が得られる“空気吹きIGCC”の開発が我が国独自技術として進められてきた。

原稿受付 2014年4月25日

*1 三菱日立パワーシステムズ(株) エンジニアリング本部
電力プロジェクト総括部

〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3-3-1

*2 三菱日立パワーシステムズ(株) エンジニアリング本部
電力プロジェクト総括部 電力計画部

〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3-3-1

空気吹きIGCCには次の様な特徴がある。

1) 高い発電効率

空気中でガス化することにより酸素吹き方式で必要となる酸素製造に要する所内動力（GT発電出力の約20%）を低減することができ送電端発電効率が高くなる。

また、天然ガスを燃料とするGTCC発電では、すでに最新鋭の燃焼温度1,600℃級J形ガスタービン（図2）を使用して60%（発電端・LHV基準）を越える高効率を実現されているが、IGCCも同様にガスタービンの燃焼温度を高めることにより発電効率の向上が可能となる。1,600℃級に続き1,700℃級の天然ガス焼きガスタービンの開発が進められているが、この技術を用いたIGCCのさらなる効率向上も期待できる。当社では、究極のIGCC開発とGT開発の協調に留意しており、将来の燃焼温度1700℃級の空気吹きIGCCの開発を視野に入れている。



Fig. 2 1,600°C J-type gas turbine

2) 幅広い石炭に適用が可能

従来型石炭火力発電では、灰の融点が低い石炭は適用が難しく、スラッキングやファウリングと呼ばれる現象が発生しやすいため、ボイラの体格を大きく設計したり、高灰融点の石炭と混ぜて利用する混炭運転を行ったりする必要があった。

逆にIGCCではガス化炉にて高温で灰分を溶融して排出するため、灰融点の低い炭種が適しており、これまで発電には使用困難であった炭種も使用可能となる。

3) 高い環境特性

① 高い大気環境特性・温排水の低減

IGCCはガスタービンを用いた複合発電のため、システムの高効率化により、発電電力量（kWh）あたりのSOx、NOx、ばいじんの排出量が低減される。また従来型石炭火力発電と比較して温排水量を約3割低減することが可能となる。

② 用水使用量の低減

従来型石炭火力の排煙脱硫装置は、燃料を燃やした後の排ガス段階で排煙処理を行うので、多量の用水が必要であったが、IGCCは高圧で容積の小さい燃料ガスの段

階で処理を行うことから、用水使用量を大幅に低減できる。

4) スラッグの有効利用が可能

従来型石炭火力発電の場合、灰はフライアッシュとして排出されるのに対し、IGCCではガラス状のスラッグとして排出するため同じ重量で比べると、スラッグの容積はフライアッシュの半分以下となる。またスラッグはセメントの原材料や路盤材等として有効利用が可能である。



Fig. 3 Flyash and slag

3. 空気吹きIGCCの構成

図4に空気吹きIGCCシステムの概略系統を示す。以下に、各設備の特徴について説明する。

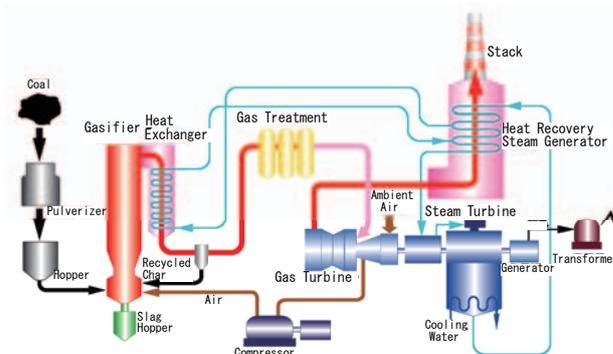


Fig. 4 MHPS air-blown IGCC system

3.1 ガス化炉

石炭ガス化炉は、高温（炉内温度1,200～1,800℃）で石炭を空気、酸素等のガス化剤と反応させることで、一酸化炭素（CO）と水素（H₂）を主成分とした可燃性ガスを生成する。

1) 二室二段噴流床方式の採用

ガス化炉においては、ガスタービンの燃焼に必要な石炭ガス化ガスのカロリーを確保しつつ、ガス化炉内で灰を溶融させて円滑に排出するという二つの機能が求められる。これらを達成するためにはガス化炉内を高温に保つ必要があるが、空気吹きのガス化炉は、酸素吹きに

比べて大量の窒素が存在するため炉内温度が上がり難く、技術的難度が高い。この課題を解決するため、ガス化炉を燃焼室（コンバスタ）とガス化室（リダクタ）を分けた二室二段噴流床方式を採用した。コンバスタでは燃焼反応、リダクタではガス化反応と機能を分離することで二つの機能を両立することが可能となる。

2) 乾式給炭，窒素加圧，高濃度搬送方式の採用

ガス化炉の燃料となる石炭の供給方式には、石炭を数十ミクロンの微粉に乾燥・粉碎して、窒素等イナータガスでガス化炉へ搬送する乾式給炭方式と、水と混合させてスラリー状にして供給する湿式給炭方式があるが、空気吹きIGCCでは乾式給炭方式を採用している。褐炭・亜瀝青炭等は安価ではあるが水分含有率が高く、スラリー化のため水分を添加すると発熱量低下が著しいため、スラリー化が困難であることから、湿式給炭方式には適用できない。一方、乾式給炭方式はこの様な安価な低品位炭を含め、広範囲な性状の石炭に対応可能である。

また、3 MPaに近い高圧のガス化炉へ石炭（微粉炭）を投入することから安全性を考慮して窒素で加圧することとし、また窒素のガス化炉への投入量を極力少なくするため、高濃度搬送方式を採用している。

3.2 ガス精製

ガス精製設備は、ガス化炉で生成された石炭ガスを、ガスタービン燃料及び環境基準に適合するように、石炭ガス中に含まれる硫黄化合物等の不純物を取り除く設備である。

ガス精製の方式には乾式法と湿式法があるが、乾式法は未だ開発中の技術であるため、現時点では化学プラント等で実績のある湿式法が採用される。

ガス化炉から出てきた精製前の石炭ガスには、CO および H_2 といった可燃成分に加え、アンモニア（ NH_3 ）、硫化水素（ H_2S ）、塩酸（HCl）といった不純物を含んでいる。これらのうち、アンモニアや塩酸等水溶性の成分を水洗塔にて除去後、MDEA（メチルジエタノールアミン）吸収液を用いて硫化水素を除去する脱硫を行う。MDEAは他の方式に比べ、所内動力や熱損失が少なく、また、実証機で優れた環境性能を有することを検証している。除去された硫化水素は、後処理工程で石膏化され、副生物として有効利用される。

なお、乾式法は開発段階の技術であるが、開発が進めば更なる効率の向上、システムの簡素化等が期待できる。

3.3 複合発電

IGCCにおける複合発電設備は、天然ガス焼き複合発電設備（図5）と同様に、ガスタービン、蒸気タービンおよび発電機で構成される。

ガス精製設備で精製された石炭ガスを燃料としてガスタービンで発電を行い、さらにその燃焼排ガスの熱を排熱回収ボイラ（HRSG：Heat Recovery Steam

Generator）で回収して蒸気を発生させ、蒸気タービンでも発電を行う。

一般的に水・蒸気系統はクロードサイクルであるため、蒸気タービンで仕事を終えた蒸気は復水器で凝縮し、HRSGへ給水される。また、その給水の一部はHRSGで予熱された後ガス化炉の熱交換器へ送られ、高温の石炭ガスを冷却して熱を回収し、蒸気となってHRSGへ戻り蒸気タービンでの発電に使用される。

この様に、IGCCの場合にはGTCCで用いられるHRSGでの排熱の回収に加え、ガス化炉で発生する熱も蒸気として回収することで、より効率的な発電が可能となる。



Fig. 5 Example of gas turbine combined cycle

3.4 IGCC用ガスタービン

図6に示すように、当社では、2.5MJ/m³Nから84MJ/m³Nまでの幅広い発熱量の燃料ガスの運用実績がある。低カロリーガスとして、高炉ガス（BFG: Blast Furnace Gas）、コークス炉ガス（COG: Cokes Oven Gas）、転炉ガス（LDG: Linz-Donawitz converter Gas）と呼ばれる副生ガスがある。

ガスタービンの高温燃焼技術の革新によるプラント効率の高効率化に伴い、これらの製鉄所副生ガスを利用した複合発電設備を多数納入しており、燃料多様化の実績を積んできている。

IGCC用ガスタービンは、天然ガス焼き標準機のガスタービンをベースに、低カロリー燃料ガス焼きガスタービンの運転実績を反映して設計を行った。

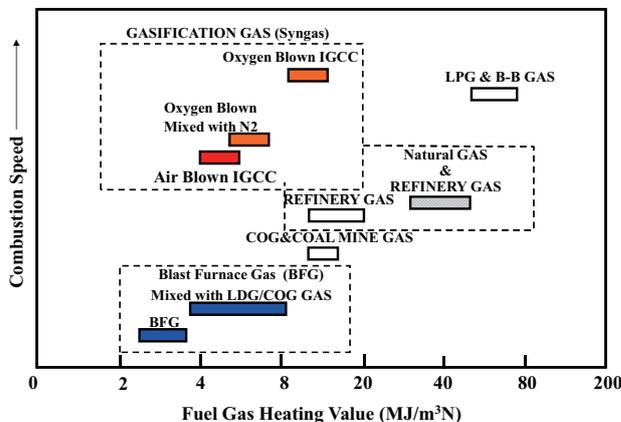


Fig. 6 Experienced fuel gas characteristics



Fig. 7 Sectional view of M701F4 gas turbine

IGCC用ガスタービンの断面図を図7に示す。IGCC用ガスタービンには以下に示す特徴がある。

1) 燃焼器

石炭ガスは天然ガスと比べて発熱量が1/10程度の低カロリーガスであり、またガス精製過程でアンモニア(NH₃)が除去されるために、ガスタービン燃焼器で発生するフェューエルNO_xの発生は少ない。しかも低カロリーガスであるため、断熱火炎温度が低くサーマルNO_xの発生も低レベルに抑えられる。一方、含有水素が高いことから燃焼速度が速く、可燃範囲が広い特徴を有している。

このガスの特性から、燃焼器に拡散燃焼法を適用してもNO_xの排出量は低く抑えられるうえ、燃料性状の変動に対して安定燃焼を確保することができる。なお、次の2)に記載のとおり、ガス化炉にはガスタービンからの圧縮空気を使用するため、ガス化炉起動前にガスタービンを先行的に起動させる必要がある。IGCC用ガスタービンでは天然ガス焼き起動、または灯油焼きによる起動を採用している。灯油焼き起動では、ガスおよび油のデュアル燃料焼きが可能な構造となっている。図8にガスタービン燃料系統図を示す。

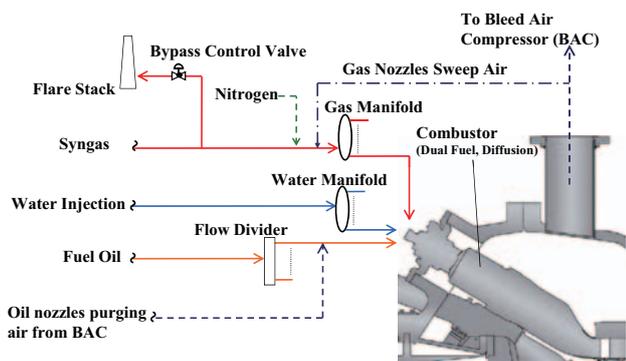


Fig. 8 Gas turbine fuel system for IGCC

2) 空気圧縮機およびタービン

空気吹きIGCCでは、ガス化炉用空気をガスタービンからの圧縮空気で購入インテグレーション方式を採用している。図9に示す通り、タービンへの燃焼ガス流量は天然ガス焼き標準型ガスタービンに比べ若干増加するが、空気圧縮機およびタービンは、空気圧縮機出口に抽気空気口を追加することで天然ガス焼き標準機と同一のものを使用することができる。

3.5 インテグレーション

IGCCを構成する主要設備である、ガス化炉、ガス精製、複合発電設備間では空気や水・蒸気を緊密に連携しており、そのインテグレーション、システム設計が重要となってくる。空気吹きIGCCでは、次の様なインテグレーションを行い、性能向上を図っている。

1) 石炭ガス化用の空気は、ガスタービンの空気圧縮機出口より抽気し、さらに抽気空気圧縮機で必要圧力まで昇圧して使用する。

2) ガス化炉の熱交換器で発生する蒸気は、HRSGの蒸気系統に合流後、さらに過熱してから、蒸気タービンへ供給され駆動力として使用する。

3) 石炭の乾燥熱源としてHRSGの高温排ガスを使用し、乾燥後の排ガスは煙突へ戻す。HRSGの高温排ガスを使用することで、空気乾燥に比べ酸素濃度が低く安全性が向上するとともに効率低下を低く抑えられる。

4. 実証試験の完了と商用運転

当社では空気吹きIGCC技術の実現に向けて、国・電力会社・(一財)電力中央研究所とともに開発・実用化に取り組んできた。1980年代の石炭処理量2t/日の小規模試験炉から200t/日のパイロットプラントを経て、商用化への最終段階として発電出力250MWのIGCC実証機が(株)クリーンコールパワー研究所によって福島県の常磐

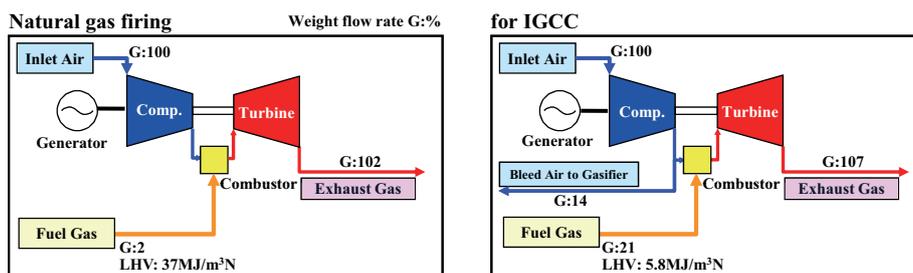


Fig. 9 Comparison of flow balance

共同火力(株)勿来発電所構内に建設され、2007年9月より5年半にわたり実証試験が行われた。図10にプラントの全景写真を、表1に設備仕様を示す。



Fig. 10 Bird's-eye view of IGCC demonstration plant

Table 1 Specification of IGCC demonstration plant

| | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Capacity | 250 MW gross | | |
| Coal Consumption | approx. 1,700 metric t/day | | |
| System | Gasifier | Air-blown & Dry Feed | |
| | Gas Treatment | Wet (MDEA) + Gypsum Recovery | |
| | Gas Turbine | 1200 deg C-class (50Hz) | |
| Efficiency (Target Values) | Gross | 48% (LHV) | 46% (HHV) |
| | Net | 42% (LHV) | 40.5% (HHV) |
| Flue Gas Properties (Target Values) | SOx | 8 ppm | (16%O ₂ basis) |
| | NOx | 5 ppm | |
| | Particulate | 4 mg/m ³ N | |

実証試験として、2008年9月の2000時間連続運転成功後、炭種変化試験、運転最適化試験(熱効率の確認試験)等を行った後、2010年6月には、長期耐久運転試験(信頼性の確認試験)が当初目標の年間累積5000時間に到達した。

一連の運転試験で、目標としていた①設備の信頼性、②熱効率、③環境性能、④炭種適合性、⑤プラントの経済性について、いずれも達成を確認した。

表2に実証試験の目標と成果を示す。発電端出力250MW、送電端効率42.9% (LHV) が得られ、出力・効率共に計画値を十分に満足することを確認した。環境値は計画値を上回る極めて良好な結果を得ており、従来型石炭火力発電に比べ高い環境性能が実証された。また、炭種拡大試験では設計炭である中国炭はもとより、それ以外の北米及びインドネシアで産出される低品位の亜瀝青炭についても安定した専焼運転が可能であることを確認した。

IGCC実証機は、5年半の実証試験を通して全ての試験項目を完了させるとともに、商用機設計に必要なデー

タは全て得られたことから2013年3月末をもって実証試験を終了した。同年4月1日以降は、250MWを電力供給力として活用すること、また運転継続によりIGCC技術をさらに成熟化させていくという二つの目的から、常磐共同火力(株)が設備を引き取り、勿来発電所10号機として商用運転を開始し、昨年末には連続運転3,917時間を達成し、世界最長連続運転時間を更新した。

Table 2 Targets and results of IGCC demonstration plant

| Items | Targets | Results |
|-----------------------------|---|--|
| System Safety and Stability | Safe and stable operation to be verified during start-up, operation and shutdown | Stable operation at rated power 250MW and safe shutdown were confirmed (2008/3) |
| Environmental Performance | Emission concentrations at outlet of stack SOx: 8ppm NOx: 5ppm Dust: 4mg/m ³ N | Emission concentrations less than target values were confirmed (2008/3) SOx: 1.0ppm NOx: 3.4ppm Dust: 0.1mg/m ³ N |
| Reliability | 2000-hr continuous operation (equivalent to 3 summer months) | 2039-hr continuous operation (2008/9), and 2238-hr continuous operation (2011/11) was achieved. |
| Fuel Flexibility | Operations using multiple coal types other than the designed coal (Chinese coal) | North American PRB sub-bituminous coal (2009/2), Indonesian sub-bituminous coal (2009/3, 2010/9), Colombian coal (2011/10), Russia coal (2011/12), Indonesian coal (2012/1), North American Signal Peak sub-bituminous coal (2012/10) |
| Thermal Efficiency | Net thermal efficiency 42% (LHV) | Net thermal efficiency of 42.9% (LHV) was achieved. (2009/1) |
| Durability | Durability of components and auxiliaries to be examined by inspection after 5000-hr operation | <ul style="list-style-type: none"> Total of 5000-hr operation/ year was accomplished. No fatal damage of equipments were found by the overhaul inspections following the 5000-hr operation. Large earthquakes, measuring lower 6 on the Japanese intensity scale of 7, caused no serious damage to main equipments. This verified their high earthquake resistance. |
| Economy | Evaluation of economy of commercial IGCC by the results of construction, operation and maintenance of Demonstration Plant | There is a possibility that power generation cost of IGCC will be equivalent to that of pulverized coal fired power generation. |
| Operability | Operability required as thermal power plant | Operability equal to conventional thermal power plant was confirmed (2011/3) (startup time 15-hrs, minimum load 36%, load change rate 3%/min etc.) |

5. IGCCの今後の取組み

当社では、空気吹きIGCCの次期ステップとして大型のガスタービンを用いた500MW級商用機の標準モデルを作成し国内外への展開を計画している。表3にIGCC実証機と商用機の主要諸元の比較を、図11にIGCC商用機の外観例を示す。

ガス化炉の石炭供給は、実証機と同様に乾式給炭方式

Table 3 Specifications of the IGCC demonstration plant and commercial plants

| Items | Units | IGCC demonstration plant | Commercial plant (50Hz / 60Hz) |
|----------------------------|--------|--------------------------|--------------------------------|
| Gross Power Output | MW | 250 | 540 / 460 |
| Type of coal | - | Bituminous | Bituminous Sub-Bituminous |
| Gasifier | - | Dry feed, air-blown | Dry feed, air-blown |
| Gas cleanup system | - | Wet desulfurization | Wet desulfurization |
| Gas turbine | - | M701DA | M701F4 / M501GAC |
| Net Power Plant efficiency | %, LHV | 42 | 48 |
| Start of operation | - | 2007 | 2020, at the earliest |

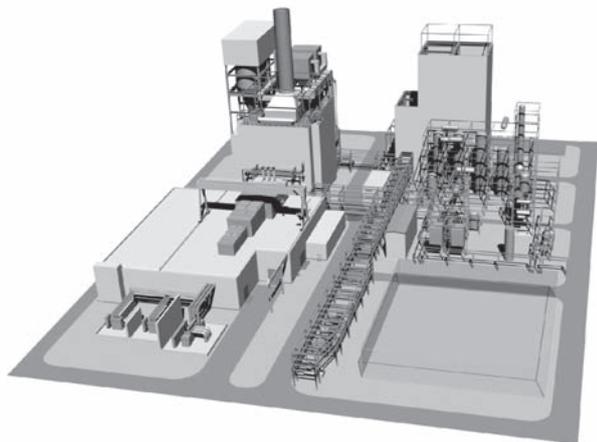


Fig. 11 Bird's-eye view of IGCC commercial plant

を採用する。商用機では石炭搬送に使用する窒素使用量を低減し、窒素製造動力の更なる低減を図る。また、乾式給炭方式は、高水分の亜瀝青炭等低品位炭にも適している。IGCCの導入により炭種選択の幅が広がるため高品位の瀝青炭を含めた石炭の価格交渉力を強化することが可能となる。

更に、ガス化炉後流の熱交換器においては、実証機での運転経験を反映した改善型パネル構造の採用により従来に比べて信頼性の向上、大幅なコストダウンが可能となる見込みである。この構造は既にIGCC実証機にて一部適用され、その効果が確認されている。

ガス精製は実証機と同様のMDEA吸収液による、化学吸収法の湿式脱硫を採用する。

ガスタービンは、天然ガス焚きで実績のある最新の高効率M701F4型／M501GAC型ガスタービンをベースに、BFGガスをはじめとする低カロリー焚きの技術を適用した石炭ガス化ガス用燃焼器を採用する。ガス化に必要な空気は実証機と同様に発電効率の高いガスタービンより抽気するインテグレーション方式を採用する。高効率ガスタービンを組合せた500MW級IGCC商用機標準モデルでは、送電端効率の向上により、従来型石炭焚き火力に比べCO₂排出原単位の大幅な低減が可能となる。

商用機では、IGCC実証機で得られた知見すべてをフィードバックすることにより、信頼性と運用性の更なる向上を図っている。また、実証機で冗長性を確認した各設備には最適設計を適用すること等によりIGCCの経済性は商用機で大きく向上している。更なる取組みとして、多炭種設計、高出力・高効率化、高い運用柔軟性などの高度化研究に取り組んでいる。

500MW級IGCCの基本計画/設計、運転保守計画の精度向上などを進めて商用機建設の要請に応えられるよう鋭意取り組んでおり、実証機実績を反映したRAM分析(Reliability, Availability and Maintainability analysis)により従来石炭火力と同等の信頼性(稼働率)、そして設備価格の低減と廉価な亜瀝青炭使用の効果により商用機として受け入れられる経済性(発電原価)が得られる見通しである。

6. おわりに

日本のエネルギーセキュリティや地球温暖化防止の観点から、IGCCは次世代石炭火力発電の主力たる発電技術として社会に大きく貢献できる技術である。

東京電力(株)は昨年11月に「世界最新鋭の石炭火力発電所プロジェクト」として、500MW級IGCC設備を福島県の2箇所の発電所に建設・運用する案を発表した。これは、世界最高水準のクリーンコール技術(CCT)であるIGCCを福島県に設置することにより、早期の経済復興や雇用回復・創出を目的とし、2020年代初頭にプラントの運転開始を目指したいとされている。さらに、福島県がCCTの拠点として世界へのアピールと、日本の経済成長の貢献等が謳われている。

当社としても、実証試験を通じて優れた性能、環境特性とともに発電設備としての高い信頼性を検証してきたIGCCについて、本プロジェクトに採用いただくべく提案を検討しており、福島の復興と共に、IGCCの世界展開により地球規模でのCO₂削減への一助となることを期待している。

特集：石炭火力発電

CO₂回収型次世代IGCC技術の開発状況沖 裕壮^{*1}
OKI Yusuo

キーワード：石炭，火力発電所，IGCC，効率，CCS，酸素燃焼

Coal, Thermal power station, IGCC, Efficiency, CCS, Oxy-fuel combustion

1. はじめに

地球温暖化対策として温室効果ガス（CO₂）排出削減が検討される中、CCS（CO₂の分離回収・貯留，Carbon Capture and Storage）技術がその中・長期的オプションの一つとして国内外で開発されている。しかし、これまでに検討されているCO₂回収型発電システムではCO₂回収に大量のエネルギーを要するため発電効率が低下することが知られている。例えば、DOEは送電端効率約40%（以下、HHV基準）のIGCCで燃焼前回収システムを構築すると、その送電端効率は約30%になると報告している⁽¹⁾。ここでもし、CO₂回収後も送電端効率を約40%に維持できれば、燃焼前回収システムと比べ、同じ電力を得るために必要な燃料使用量を約1/4削減でき、化石燃料の節減だけでなく燃料費相当分の発電コスト低減も可能となる。そこで当研究所は、CO₂回収後も40%（HHV）以上の高い送電端効率が期待されるCO₂回収型高効率IGCCシステム⁽²⁾（Oxy-fuel IGCC）を提案し、NEDO受託研究として九州大学とともにその基盤技術の開発を進めてきた。本報は、その開発状況を紹介するものである。

2. 開発システムの特徴

CO₂分離回収型の石炭火力は、これまでも燃焼後回収システム（Post-combustion）、酸素燃焼システム（Oxy-fuel Combustion）やIGCCを想定した燃焼前回収システム（Pre-combustion）が提案されているが、いずれもCO₂分離・回収や酸素製造などに大量のエネルギーを要するため、送電端効率が大幅に低下するとされている。

これに対し、当研究所が提案したOxy-fuel IGCCシステム（図1）は、ガスタービン（GT）の燃焼排ガスの一部を循環させてガス化炉の石炭搬送やGTの冷却・希釈に用いるとともに、O₂を添加して石炭ガス化剤やGT用酸化剤として利用するもので、燃焼前回収システムで必要なシフト反応器とCO₂分離・回収設備が不要となり、

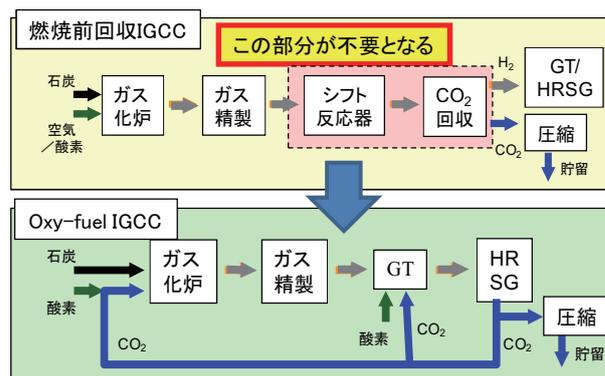


Fig. 1 開発システムと従来の燃焼前回収IGCCの比較

所用動力が低減される等の理由から、CO₂回収後も40%（HHV）以上の高い送電端効率が期待される⁽³⁾。

本システムでは、セミクローズドGTシステムが前提となるが、従来のGTシステムと違い、作動媒体がN₂主体のガスではなくCO₂を主体とするガスとなるため、作動媒体のモル比熱が増大する。従って、予熱が望まれるGT燃焼用酸化剤の圧縮機出口温度が上がりにくくなるが、その一方でGT燃焼排ガスが冷めにくく燃焼器出口ガス温度が高くなる。この点に注目し、再生熱交換器（高性能ステンレス製プレートフィン型ガス-ガス熱交換器）を導入し、燃焼器出口排ガスでGT燃焼用酸化剤を予熱することによりシステム効率向上を狙った。

もう一つの特徴は、CO₂のガス化剤としての効果である。従来のガス化炉がO₂とN₂を主成分とする空気または高濃度O₂をガス化剤に用いていたが、本システムではO₂とCO₂からなるガスをガス化剤としている。N₂は不活性であり石炭ガス化反応には寄与しないが、CO₂は石炭のガス化剤として作用する。従って本システムでは、O₂だけでなくCO₂もガス化剤として作用し、ガス化性能が向上するとも期待されている。

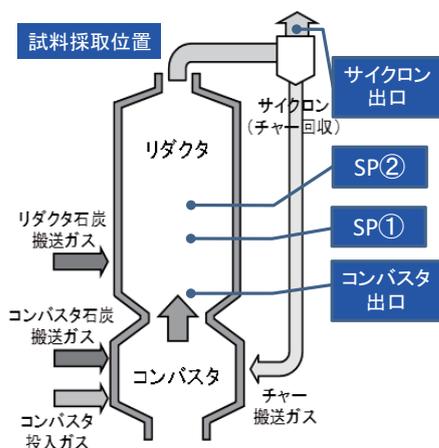
しかし、石炭をO₂/CO₂ガスでガス化するシステムは前例がないため、基礎試験による事前検証が必要である。また、本システムには課題がある。生成ガス中のCO濃度が60%以上と高く、CO₂も多く含むことから、炭素析出が懸念され、その対策確立が必要である。そこでまず種々の基礎試験によるコンセプト確認から検討を始めた。

原稿受付 2014年5月7日

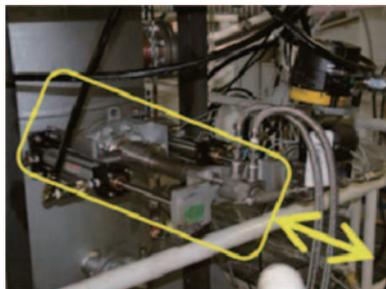
*1 電力中央研究所 エネルギー技術研究所
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

3. 加圧石炭ガス化炉を用いたCO₂富化によるガス化性能向上効果の検証

当研究所が所有する石炭ガス化研究炉（図2、二室二段噴流床式、石炭処理量3t/日、圧力2MPa）に液化CO₂タンクとその供給設備を追設し、CO₂富化時のガス化特性を評価した。本ガス化炉はガス化研究炉の呼称の通り、ガス化炉の内部からダストやガスを採取する炉内サンプリングプローブなどいくつかの特徴的な分析・評価装置を備えている。このサンプリングプローブは、圧力容器の耐圧壁を貫通して内部の試料を捕集するもので、図中の矢印が示すように、サンプリング時は炉内に挿入し、それ以外は炉内の流れを乱さないように引き抜くという運用を行っている。



(1) 石炭ガス化研究炉の概要



(2) 炉内サンプリングプローブ

Fig.2 ガス化概要とサンプリングプローブの外観

通常、本ガス化炉では、微粉炭を空気中、チャー（未反応の炭素を含む粒子。ガス化炉出口のサイクロンで捕集し燃料として再投入する）をN₂で搬送するが、このうち微粉炭搬送空気の一部をCO₂に置き換え、投入ガス中のCO₂濃度を増加させることでその影響を評価した⁽⁴⁾。

その結果、CO₂富化により炉内で発生するチャーが減少し、CO₂によりガス化性能が向上する傾向が示された（図3、横軸は酸素比=投入酸素量*1÷理論酸素量*2。縦軸のチャー生成率=生成チャー中炭素量÷投入石炭中炭素量）。この他に、CO₂を富化するとガス化炉内の温

*1：投入酸素量=投入空気中の酸素量+富化酸素量

*2：理論酸素量は投入石炭を完全燃焼させるのに必要な酸素の量。

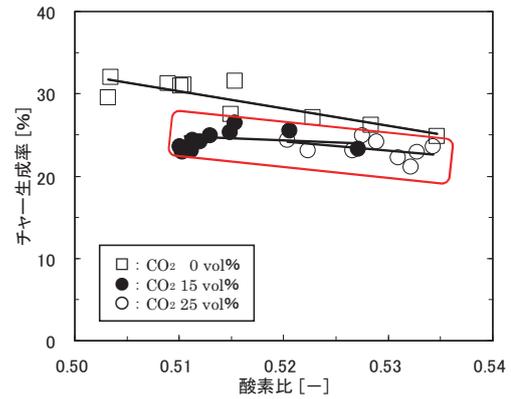


Fig.3 CO₂富化のガス化反応性（チャー生成率）への影響

度が低下することも明らかとなった。これは、N₂とCO₂のモル比熱の違いによるものと考えられ、試験条件設定にあたって考慮すべき重要なポイントである。

さらに、CO₂富化が炉内反応状況に及ぼす影響をより詳細に評価するため、炉内サンプリングプローブによりガス化炉内部のガスおよび粒子を捕集し分析する試験を行った⁽⁵⁾（図2(1)のSP①、SP②部にて試料を捕集）。この試験では、CO₂の富化に伴う炉内温度低下の影響を除外するため、コンバスタ温度1,380℃一定の条件下でCO₂濃度を0%（試験Ⅰ）、14%（試験Ⅱ）、22%（試験Ⅲ）と変化させたデータを取得した。具体的には、試験ⅠではチャーをN₂で搬送したが、試験Ⅱではこのチャー搬送ガスを全量CO₂に置き換えた。さらに試験Ⅲではチャー搬送ガスは全量CO₂のままで、石炭搬送用空気の一部もO₂/CO₂混合ガスに置き換えた。ここで、空気をO₂/CO₂混合ガスで置き換えたのは、酸素比（投入酸素量の理論酸素量*に対する比率。*：理論酸素量は投入石炭の燃焼に必要な酸素量）をできる限り一定として、相互比較できるデータを取得するためであり、この方法により、酸素比の変化を0.52～0.53の範囲に抑えることができた。

図4に炉内のCO濃度分布計測結果を示す。

コンバスタ出口から、SP①、SP②と生成ガスの流れ方向におけるCO濃度の変化を整理したところ、二段目の石炭が投入されるリダクタバーナの後流で特徴的な挙動が確認された。

軸方向の2箇所のサンプリング位置（図3のSP①、SP②）で計測したCO濃度を比較すると、CO₂を富化しない条件Ⅰでは、SP①のサンプリング座でもその下流となるSP②のサンプリング座でもCO濃度はほぼ同一であったが、CO₂を富化した試験では、SP①のCO濃度よりもSP②のCO濃度が増加した（図4）。また、CO濃度の増加幅は、CO₂濃度の高い条件Ⅲの方が大きくなっていった。

これは、CO₂富化によりリダクタ部のCO₂濃度が高くなり、ガス化反応領域が下流に拡大し、CO₂ガス化反応が促進されたものと考えられる。これが図3に示した

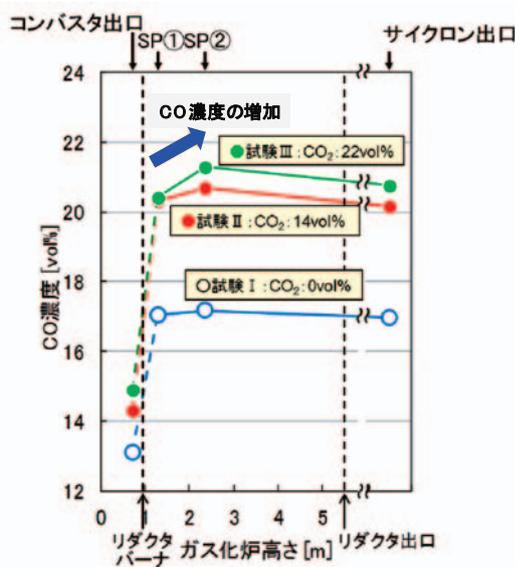


Fig. 4 CO₂富化に伴う炉内CO濃度分布の変化

CO₂富化によるガス化反応性向上の一因とみられる。

4. 実機規模ガス化炉数値解析によるO₂/CO₂ガス化炉の特性検討

4.1 運転条件が炉内温度分布に及ぼす影響の予備検討

当研究所は、実機規模ガス化炉内部の熱物質流動状況を解析する数値解析ツールを開発している。

そこで、前述の当所ガス化研究炉の試験だけでは実運転条件の再現が難しいO₂/CO₂ガス化炉の特性を、当該数値解析ツールにより評価した⁽⁶⁾。

まずは、実験で見出されたN₂とCO₂のモル比熱の違いによるガス化炉内温度の低下について検討した(図5)。従来の酸素富化空気吹きガス化条件(図5①)に対し、N₂とCO₂を単純に置換しただけでは炉内温度が大きく低

下する(図5②)。一般に炉内温度が低下すると、ガス化炉の安定運転確保が難しくなるため、望ましくない現象である。しかし本検討では、図5①~④(および⑤~⑦)では酸素比を一定として解析しているため、投入O₂量はいずれも一定である。すなわち、O₂濃度は一定量のO₂に対してGT排ガスをどれだけ循環・混合するかで決まり、循環排ガス量を低減すればO₂濃度を容易に調整できる。例えば、GT排ガスの循環量を低減し、O₂濃度を35%まで上昇させれば(図5③)、従来の酸素富化空気吹きガス化炉で安定運転が確保されているレベルの炉内温度分布(図5①)に近い状況が実現できる。この他、排ガスの再循環量をさらに低減しO₂濃度を45%まで向上させれば(図5④)、酸素比を基準条件から約1割低減しても同等の炉内温度分布が保てる(図5⑦)可能性があり、冷ガス効率の向上も期待できることが示された。

4.2 O₂/CO₂ガス化に適した高精度反応モデルの提案

O₂/CO₂ガス化においては、ガス化炉内のCO₂濃度が高くなり、CO₂ガス化によりガス化性能が向上すると期待されるが、H₂Oなど他のガス化剤との競合反応となり、反応速度が低減される可能性も指摘されている。そこで、当研究所の加圧型熱天秤(TG)によりH₂O、CO₂混合ガス中での反応性を評価し、O₂/CO₂ガス化場における数値解析精度を向上できる新たな反応モデルを提案した⁽⁷⁾。従来検討されているモデル1やモデル2では複数のガス化剤が競合する複雑なガス化反応実験のプロットを十分に再現できないが、本提案モデルを用いれば、CO₂とH₂Oが共存する複雑なガス化反応場におけるチャーのガス化反応速度を表現することができた(図6)。

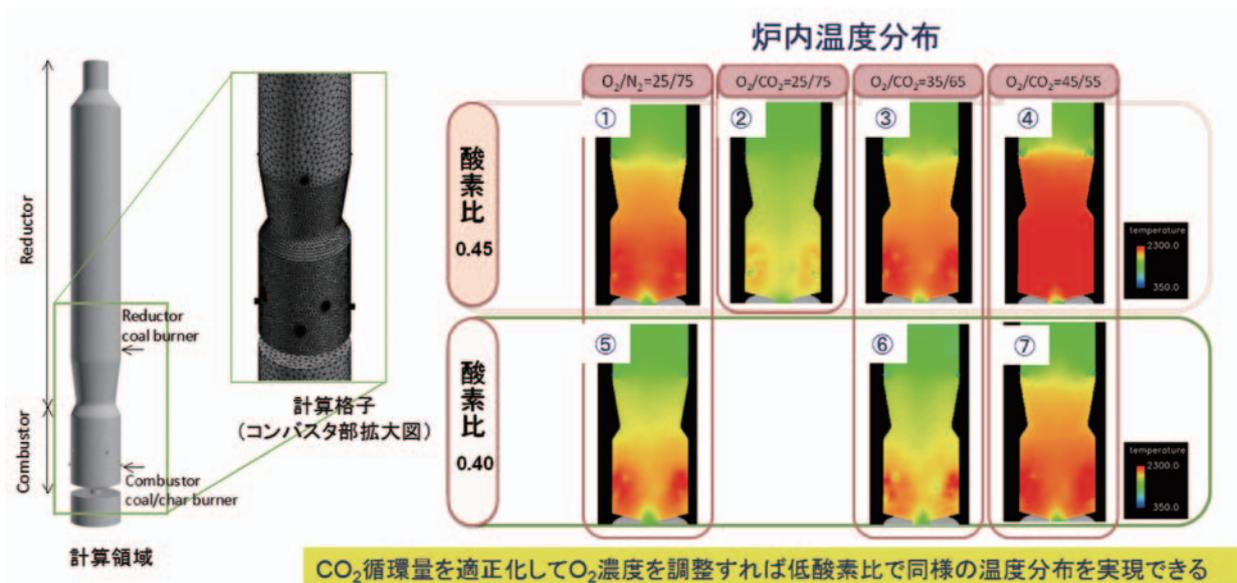


Fig. 5 実機規模数値解析ツールによるOxy-fuel IGCCのガス化炉内温度分布解析結果

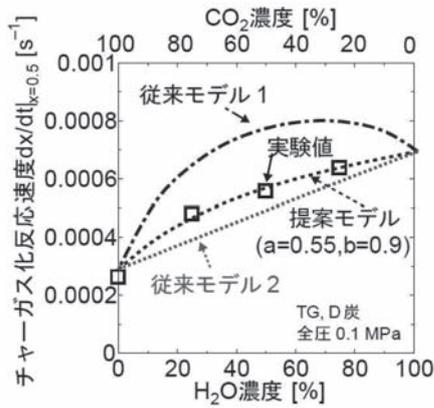


Fig. 6 O₂/CO₂ガス化場に適した反応モデルの提案⁽⁷⁾

4.3 高精度反応モデルを適用した数値解析ツールによる諸検討

実機規模ガス化炉内数値解析ツールに、前述した高精度反応モデルを組み込んで種々の解析を行った。

まずは、前述の図5に相当するO₂濃度25～45%の条件で二室二段型ガス化炉に特有の運転条件である石炭供給量比 (R/T, 上段のリダクタに投入する石炭量と全投入石炭量の比) が炉内温度分布に与える影響を解析し、従来の酸素富化空気吹きガス化炉の運転調整手法がO₂濃度/CO₂ガス化炉にも適用できる可能性を示した。その上で、実機を想定したO₂濃度 (80%以上) 条件での一連の解析を行い、現在その結果をとりまとめ中である。

5. 炭素析出現象の解明と対策構築

本システムではCO₂を主成分とするGT排ガスを循環させるため、ガス化剤中のCO₂濃度、ひいては生成ガス中のCO濃度が高くなり (CO濃度>60%, 酸素富化空気吹きガス化ガスのCO濃度は約30%), 平衡論的には乾式脱硫設備などの比較的低温領域で微粒炭素が析出する可能性があり、その対策確立が必要である。

炭素析出の対策としては、CO₂ガスの添加、水蒸気の添加、さらには両者の混合物である燃焼排ガスの添加の3つの手法が考えられたため、模擬ガスを用いた基礎試験により、上記いずれの対策でも炭素析出が防げること、ガス種によって炭素析出の防止に必要な注入ガス量が異なることを明らかとした⁽⁸⁾ (図7)。

所要注入量としては、水蒸気が最も少ないものの、発電用の蒸気を抽気するため効率への影響が大きい上、脱硫性能への影響も懸念される。一方、CO₂の場合、抽気点での圧力は高いが温度が約90℃と低く、乾式脱硫装置内のガス温度 (約450℃) まで加熱する必要がある上、所要注入量が最も大きい。こうした3手法それぞれの得失を表1に整理した。

その結果、燃焼排ガスの注入が現実的と判断されたため、燃焼排ガス注入を想定したシステム効率解析を行い、炭素析出対策による送電端効率の低下は0.2%未満と極め

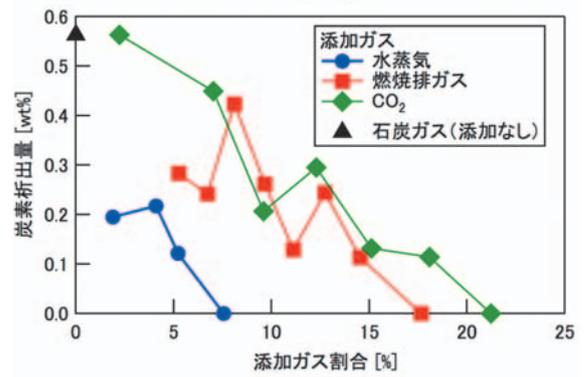


Fig. 7 添加ガスによる炭素析出抑制効果の比較 (添加ガス割合 = 添加ガス量 ÷ 生成ガス量)

Table 1 炭素析出対策の得失比較

| 添加ガス | ①回収CO ₂ | ②水蒸気 | ③燃焼排ガス |
|--------------------------|--------------------|--------|--------|
| 炭素析出抑制効果 | ○ 中 | ◎ 大 | ○ 中 |
| 必要ガス量 | ▲ 多 | ◎ 少 | ○ 中 |
| 添加ガス量比 ^{*1} [-] | 3.1 | 基準:1.0 | 2.3 |
| 熱損失・必要動力 | ○ 中 | ▲ 大 | ◎ 小 |
| 消費熱量比 ^{*2} [-] | 0.7 | 基準:1.0 | 0.2 |
| 脱硫性能への影響 | ◎ 小 | ▲ 大 | ◎ 小 |
| 総合評価 | ○ | ▲ | ◎ |

*1: 水蒸気を基準とする添加ガス量割合の比。
*2: 消費水蒸気の熱量を基準とするCO₂加熱消費熱量および燃焼排ガス昇圧動力の比

て小さいことが確認された⁽⁹⁾。

6. システム全体を考慮した実現性の検討

本システムはGT排ガスを循環するセミクローズドGTシステムなど、従来にない技術を採用するため、プラントメーカーの協力を得て事前にシステムの成立性を検討し、その指摘事項を反映して、より実現性の高いシステムに改良した⁽³⁾。例えば、当初システムでは、効率を最適化するため燃焼排ガスを分岐して、一部を再生熱交換器へ、残りをHRSGへと最適配分する想定であったが、加圧高温ガスの流量配分は難しいため、全てのガスが再生熱交換器を経てHRSGへ流れるシステムに変更した⁽³⁾。また、再生熱交換器は大型化の実績が少ないため、専門メーカーにより本システムを想定した再生熱交換器の試設計し、本システムの温度/圧力条件が現状のステンレス製再生熱交換器の設計範囲にあること、内部の機器構成の工夫により高さ34m、幅約20m、長さ約10m程度のサイズに仕上がる見込みがあることなどを示した⁽¹⁰⁾。

また本システムは、ガス化炉だけでなくGTにも純酸素が必要であり、従来の燃焼前回収システムより多くの酸素を製造する必要がある。そこで、専門メーカーにより本システム用にカスタマイズした空気分離装置 (ASU) を試設計した。従来のIGCCは、高压のO₂、N₂を使用するため、高压型ASUを採用しているが、本システムはN₂ガスを全く用いないため、ASU全体のプロセス圧を下げ、O₂のみを専用圧縮機で昇圧供給する方式とした⁽¹¹⁾。こうした種々の検討の結果、1300℃級GTシステムで送

電端効率40%をクリアでき、1,500℃級GTの採用により42%の高い効率を実現できる見通しを得た。回収後の効率が42%となれば、世界最高効率の国産空気吹き酸素富化IGCCの燃焼前回収システムよりも約5%高い送電端効率となる。

7. おわりに

本システムの基盤技術がほぼ確立されたことを受け、現在、実用化に向けた次ステップについて検討中である。一般にこうした新しい発電システムの開発においては、何段階かのスケールアップを重ねて実証、商用へと進むことが多い。本システム実用化のための最適なステップを見出し、早期実用化に向けた計画を提案してゆきたい。

謝辞

本研究の多くは独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの受託研究として実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) “Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants-Volume1.Rev.2.Nov.2010”, DOE/NETL-2010/1397 (2010).
- (2) 白井裕三 他, “CO₂回収型高効率石炭ガス化複合発電システムの提案とその課題”, 電力中央研究所報告, M07003 (2007).
- (3) Y.Oki, et.al., “Development of high-efficiency oxy-fuel IGCC system”, Gasification Technologies Conference 2013.
- (4) 木戸口和浩 他, “CO₂回収型高効率IGCCの開発 - 小型ガス化炉によるCO₂富化ガス化特性の把握 -”, 電力中央研究所報告, M10016 (2011).
- (5) 濱田博之 他, “3t/日石炭ガス化研究炉を用いたCO₂富化ガス化特性の評価 - リダクタ部ガス化反応に及ぼすCO₂投入の影響 -”, 電力中央研究所報告, M13005 (2014).
- (6) Yuso Oki, et. al., “Development of high-efficiency oxy-fuel IGCC system”, Presentation at the 3rd Oxy-fuel Combustion Conference, (2013) など
- (7) 梅本賢 他, “O₂-CO₂吹きガス化炉におけるチャーガス化反応モデルの構築 - CO₂とH₂Oの共存下におけるガス化反応モデルの提案と検証 -”, 電力中央研究所報告, M09014 (2010).
- (8) 小林誠 他, “CO₂回収型高効率IGCCシステム用乾式脱硫プロセスの最適化 - 添加ガス種による炭素析出抑制効果と脱硫性能の評価 -”, 電力中央研究所報告, M10012 (2011) など
- (9) 小林誠 他, “CO₂回収型高効率IGCCシステム用乾式脱硫プロセスの炭素析出抑制策 - 循環排ガス添加時のガス組成変化を考慮した炭素析出抑制策の検討 -”, 電力中央研究所報告, M12001 (2012) など
- (10) 沖裕壮 他, “CO₂回収型高効率IGCCの開発”, 機学2012年度年次大会予稿集, (2012).
- (11) Yuso Oki, et. al., “Development of high efficiency Oxy-Fuel IGCC System”, Proceedings of ICOPE-13, (2013) など

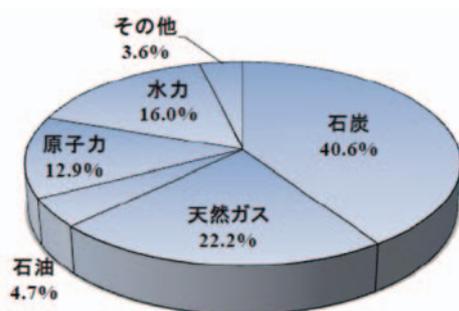
特集：石炭火力発電

Oxy-fuel combustionと石炭火力

渡部 弘達*¹
WATANABE Hirotatsu岡崎 健*¹
OKAZAKI Kenキーワード：Oxy-fuel combustion, 石炭火力, クリーンコールテクノロジー, O₂/CO₂燃焼
Oxy-fuel combustion, Coal-fired, Clean coal technology, O₂/CO₂ combustion

1. はじめに

石炭は、埋蔵量が豊富であり、地域的な偏在性が少なく、さらに低コストという利点がある。石炭火力発電は、日本の一次エネルギーの約1/4を供給しており⁽¹⁾、世界の発電量の約40%を占めている（図1）。さらに、近年、石炭火力発電所の増設が計画されていることから、石炭燃焼が電力供給に果たす役割は今後も大きいことが予想される。

Fig. 1 Electricity generation in world (2010)⁽¹⁾

しかしながら、石炭は石油、天然ガスと比較して、単位発電量当たりのCO₂排出量が多く、石炭火力からのCO₂排出量は、世界全体のCO₂排出量の約30%を占めている⁽¹⁾。LNGコンバインドサイクル発電と比較すると、石炭火力発電の出力当たりのCO₂排出量は非常に多く、石炭火力からのCO₂削減が急務となっている。

石炭火力発電所からのCO₂発生を削減するためには、まず、熱効率を向上させることが望まれる。現在の石炭火力発電では、1990年代に実用化された600℃級USC (Ultra Super Critical, 超々臨界圧) が主流である。2013年3月末時点で、国内で運転中の石炭火力発電の総出力は36,717MWであり、このうち、約50%は、USCである⁽²⁾。現在、700℃級の蒸気条件を採用したA-USC (Advanced Ultra Super Critical, 次世代超々臨界圧) の開発が進められている。USCの送電端効率は、HHVベースで42-43%であるが、A-USCの場合、効率が46-48%程度まで向

上することが期待できるとされている^{(3),(4)}。しかしながら、A-USCの実用化には、700℃以上の蒸気に耐えられる材料の開発が不可欠であり、現在、世界各国で開発が進められている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

CO₂削減のためには、火力発電の高効率化のための技術開発に加えて、現在稼働している火力発電所から大気へ放出されているCO₂抑制も同時に考える必要がある。大気中へのCO₂排出を削減する技術として注目されているのが、CCS (Carbon Capture and Storage) である。CCSとは、CO₂の大規模な発生源から、CO₂を回収し、地中などに貯留する技術である。とくに、CO₂排出量の多い石炭火力へのCCS適用は重要である。近年、CO₂を回収する方式としてOxy-fuel combustionが注目を集めており⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾、Callide oxy-fuel projectをはじめとするOxy-fuel combustionとCCSの統合プロジェクトが世界各国で進められている。Oxy-fuel combustionについては、さまざまな解説記事で紹介されており、プロジェクト動向等については、そちらを参照頂きたい⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。Oxy-fuel combustionは、CO₂回収に適した燃焼法であるが、石炭火力では、CO₂だけでなく、NO_x, SO_x, ばいじんといった各種環境汚染物質の抑制も大きな課題となっており、Oxy-fuel combustionにおいても、石炭をクリーンに燃焼させるクリーンコールテクノロジーの開発は重要である。

本解説では、Oxy-fuel combustionの概念、CO₂回収コストおよび近年の研究動向を述べるとともに、Oxy-fuel combustionのクリーンコールテクノロジーに関する研究事例を紹介する。

2. Oxy-fuel combustion

2.1 概念

図2に空気燃焼とOxy-fuel combustionからのCO₂回収プロセスの模式図を示す。Oxy-fuel combustionとは、燃料を酸素および再循環させた燃焼ガス（主にCO₂）で燃焼させることにより、排ガス中のCO₂濃度を90%以上にし、分離過程なしで、CO₂回収を可能にする燃焼技術である⁽⁷⁾。

燃焼排ガスからのCO₂分離プロセスとして、アミン系の吸収液を用いた化学吸収法がある。化学吸収法ではア

原稿受付 2014年5月7日

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科
機械制御システム専攻

ミン系の吸収液にCO₂を選択的に吸収させた後、吸収液を加熱再生させて、CO₂とアミン吸収液を分離する。大量の熱エネルギーが必要となる加熱再生プロセスは、後述するCO₂回収コスト高の主要因となっている。一方、Oxy-fuel combustionでは、大量の酸素を製造するための深冷分離法による空気分離装置（ASU）が必要になるが、排ガスからのCO₂分離プロセスが不要になるという利点を有している。

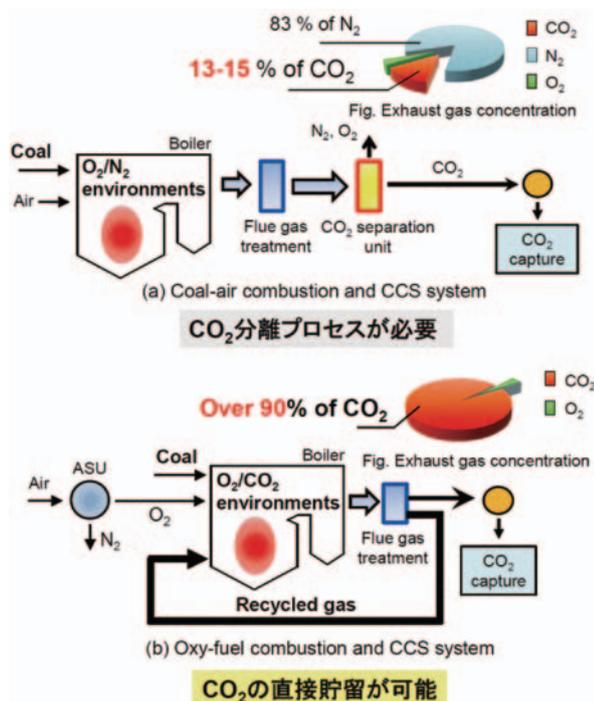


Fig. 2 Schematic diagram of coal-fired boiler with CCS

2.2 石炭火力への適用（CO₂回収コスト）

CO₂回収型石炭火力発電の商用化のためには、経済性を満たすことが求められ⁽⁶⁾、出来る限りCO₂回収コストを低減する必要がある。石炭火力発電所からのCO₂分離にアミン系吸収液を用いた場合と、Oxy-fuel combustionを適用した場合のCO₂回収コストの試算は、さまざまな研究グループによって行われている^{(6),(9)}。

Singhら⁽⁹⁾によって行われたケーススタディでは、亜瀝青炭を使用している400 MWe級の石炭火力発電を対象としている。この場合のCO₂ 1 tonあたりの回収コスト（US \$）を図3に示す

空気燃焼時の排ガスに含まれるCO₂分離にMEA（Mono-Ethanol Amine）を使用した場合のCO₂回収コスト（Amine）と、深冷分離法によりO₂とN₂を分離し、Oxy-fuel combustionを用いた場合のCO₂回収コスト（Oxy-fuel）を示している⁽⁹⁾。Oxy-fuel combustionは、低コストでCO₂を回収できることが示されている。

海外だけでなく、国内においてOxy-fuel combustionを1000MWe級石炭火力発電プラントに適用した場合のCO₂回収コストについても検討がなされており、この場

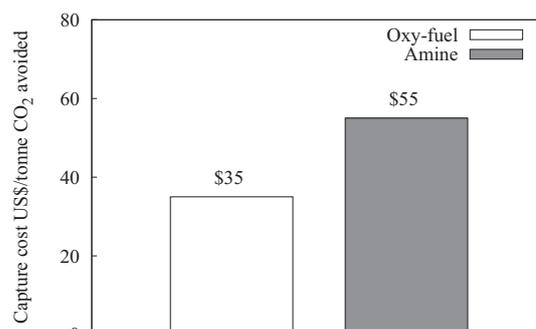


Fig. 3 Total CO₂ capture cost of different CO₂ capture technologies in 400 MWe coal power plant⁽⁹⁾

合、CO₂ 1 ton当たりの分離回収コストは3000円程度といった試算がされている⁽⁶⁾。

400 MWe級の発電プラントにおいてOxy-fuel combustionもしくはMEAを用いてCO₂回収を行った場合、1 tonのCO₂を回収するために必要なコストは、それぞれ、\$35、\$55であるが、これを発電コストに変換すると、Oxy-fuel combustionの場合、2.4 cents/kWhであり、MEAの場合は、3.3 cents/kWhになる⁽⁹⁾。CO₂を回収しない既設石炭火力の発電コストを8.8 cents/kWhとすると⁽¹⁰⁾、CO₂回収設備を追加することで、発電コストは、Oxy-fuelを用いた場合は27%程度、MEAを用いた場合は38%程度増加することになる。CO₂回収におけるOxy-fuel combustionの優位性が示されているものの、CO₂回収コストの低減が必要であることが理解できる。

また、Oxy-fuel combustionのCO₂回収コストの内訳は、酸素製造に関係するコストが、全体のコストの約2/3となっており⁽⁹⁾、酸素製造プロセスの低コスト化が、CO₂回収型石炭燃焼の商用化を促進する効果は非常に大きいと考えられる。現在、大量の酸素を得る方法として、深冷分離法が広く用いられているが⁽¹¹⁾、近年、酸素製造コストを低減できる酸素分離膜を用いた燃焼研究も進められており⁽¹²⁾、今後の展開が望まれる。

2.3 近年のOxy-fuel combustionの研究動向

燃焼という観点から考察した場合、Oxy-fuel combustionは従来の空気燃焼とは大きく異なる。現在、Oxy-fuel combustionの研究開発が世界各国で加速しており、その傾向は、学術誌の文献数にも現れている。学術文献データベースISI Web of Scienceを用いて、Oxyfuel combustionもしくはOxy-fuel combustionというキーワードで検索すると、これらに関する文献数は年々増加しており、2005年は20報程度であったが、2011年以降、急激に増加しており、2013年は、170報程度の論文が掲載されている。Oxy-fuel combustionの国際会議として、Oxyfuel Combustion Conferenceが2年おきに開催されており、2013年9月には、3rd Oxy-fuel combustion conferenceがPonferrada (Spain) で開催されている。日本国内においても、Oxy-fuel combustion

の相互理解と研究推進を目的として、日本燃焼学会『Oxy-fuel combustionの基礎学理体系化と展開に関する研究分科会（活動期間2013年6月から2014年5月）』が発足するなど、Oxy-fuel combustionへの関心の高まりが示されている。

3. Oxy-fuel combustionにおけるクリーンコールテクノロジー

Oxy-fuel combustionは、大量の排ガス循環を伴い、高CO₂濃度という従来の空気燃焼とは異なる雰囲気中で燃焼反応が進行する。したがって、Oxy-fuel combustionのためのクリーンコールテクノロジーを開発するためには、従来の空気燃焼とOxy-fuel combustionの差異を明らかにする必要がある。Oxy-fuel combustionの特徴として、大量の排ガスを再循環するといったプロセスが挙げられるが、既往の研究として、大量の排ガス循環により、NO_x転換率が従来の燃焼方式に比べて、1/4-1/7程度に低減し、さらにSO_xの低減も可能になるといった成果が報告されている^{(13),(14)}。

さらにO₂/CO₂雰囲気中で燃焼反応が進行するという点も、空気燃焼とは大きく異なる点である。まず、N₂とCO₂では、熱容量、密度、粘度、拡散係数といった物性値が異なる。さらに、ふく射物性値も異なる⁽⁷⁾。近年、O₂/CO₂雰囲気とO₂/N₂雰囲気における燃焼特性を比較した、さまざまな実験や数値シミュレーションが報告されている⁽¹⁵⁾。また、物性値の違いに加えて、CO₂はN₂よりも反応性が高く、CO₂ + H → CO + OH (R1) といった素反応を通して、化学反応に積極的に関与することが報告されている^{(16),(17)}。また、気相反応だけでなく、チャーガス化反応のような気固反応にも、CO₂は関与する。近年の研究により、このCO₂の反応性が、Oxy-fuel combustionにおけるクリーンコールテクノロジーを開発する上で重要であることが示されている。本節では、CO₂の反応性に関する著者らの研究事例を紹介する。

3.1 二段燃焼による極低NO_x化

代表的な低NO_x燃焼法として、二段燃焼がある。まず、O₂/CO₂燃焼における二段燃焼時のNO_xの低減メカニズムを詳細に検討するため、平面火炎を用いて検討を行った研究事例を紹介する。

図4に実験で用いた平面火炎リアクターを示す。実験には、O₂、CO₂、CH₄、NH₃/Arを使用している。平面火炎は、1次元解析が容易になるという利点があり、反応解析との比較検討に適している。反応解析に加えて、この平面火炎リアクターは、二次ガスを吹き込むことが可能になっており、二段燃焼を模擬することができる。二段燃焼を行う場合は、全体の空気比 (λ_{total} , 酸素過剰率) を1.2とし、一次空気比 ($\lambda_{primary}$) を0.6, 0.65, 0.7と変化させ、NO_x転換率を測定している。さらに、一次空気比 ($\lambda_{primary}$) を同様に変化させて1次燃焼における窒素化

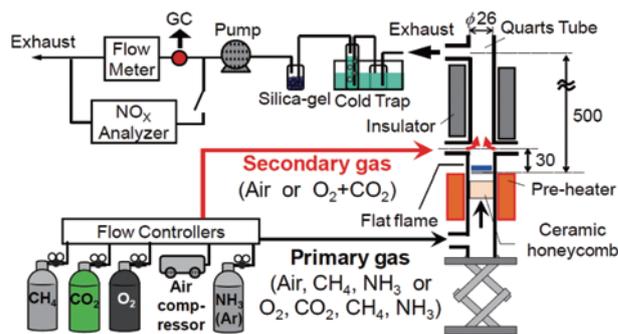


Fig. 4 Experimental setup of flat flame reactor

合物 (NO, HCN, NH₃) の排出特性を検討している^{(18),(19)}。

図5に平面火炎リアクターにおいて二段燃焼を行った際の写真を示す。まず、下部から、1次ガスを導入し、燃料過濃条件下で、平面火炎を形成する。その後、二次ガスを導入し、未燃分を完全燃焼させる。二次ガス導入用のノズル近傍で、二次火炎が形成されている。燃料過濃領域で、NO_x転換率を抑制し、その後、二次ガスにより完全燃焼させる二段燃焼プロセスが示されている。

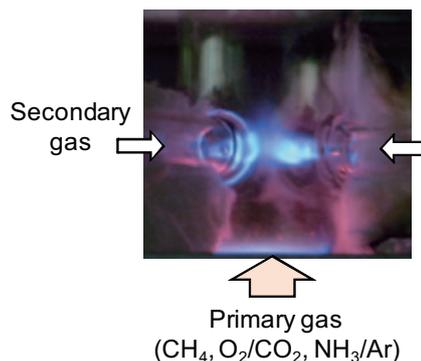


Fig. 5 Flame photograph of staged combustion

二段燃焼時におけるNO_x 転換率を図6に示す。一次空気比の減少に伴い、O₂/CO₂燃焼ではNO_x転換率が減少し、 $\lambda_{primary} = 0.6$ のとき、空気燃焼よりもNO_x が40%程度低減している⁽²²⁾。

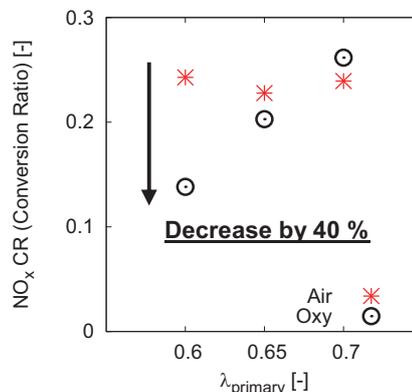


Fig. 6 Measured exhaust NO_x conversion ratio in staged combustion ($\lambda_{total} = 1.2$)⁽²²⁾

二次ガスを吹き込まない一段燃焼における排出 NO_x , NH_3 , HCN 濃度を図7に示す。空気燃焼(図6(a)), O_2/CO_2 燃焼(図6(b))ともに一次空気比の減少に伴い NO_x 転換率は減少しているが、空気燃焼の場合は、 HCN , NH_3 濃度が急激に増大している。別途行った詳細化学反応解析により、 O_2/CO_2 燃焼は空気燃焼と比較して、 $\text{CO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$ の反応速度が大きく OH ラジカルが多量に生成されることが明らかになっている^{[18], [19]}。つまり、 O_2/CO_2 燃焼では、多量の OH ラジカルにより二段燃焼時に NO_x に転換されやすい NH_3 や HCN が燃料過濃領域において分解されていると考えられる。したがって、 O_2/CO_2 燃焼では、一次空気比を低くした場合でも、 NH_3 , HCN の発生が抑制され、空気燃焼よりも低い NO_x 転換率を実現できたと考えられる^[18]。

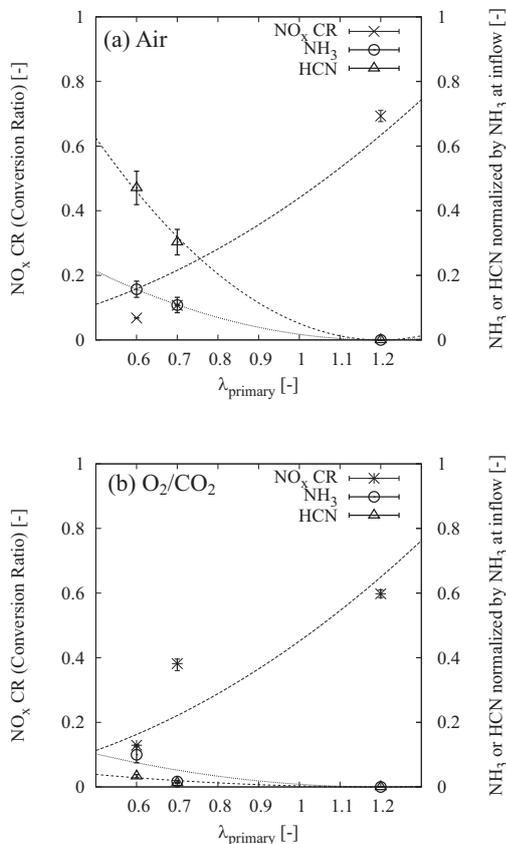


Fig. 7 Measured exhaust NO_x , NH_3 , and HCN concentrations in primary combustion^[22]

図8に反応解析により得られた NH_3 (Fuel-N)の反応経路を示す。反応解析には、CHEMKIN-PROを使用し、修正GRI-Mech 3.0を使用している^[20]。簡略化のため、最終生成物である NO と N_2 に注目し、 $\lambda_{\text{total}} = 0.8$ としている。 $\lambda_{\text{primary}} = 0.7$ のとき、 NH_3 はほとんど分解されるため、 NH の消費反応が低 NO_x 化において重要となり、 OH ラジカルは、 NH の消費反応において、 HNO , NO の生成を促進させる。それに対し、 $\lambda_{\text{primary}} = 0.6$ のときは、一次燃焼領域において NH_3 の分解が十分に進まないため、

NO の還元剤である NH を生成することが重要となる。この場合、 OH ラジカルは NH_3 , NH_2 の分解を促進するため、 NH の生成を促進させる。つまり、 $\lambda_{\text{primary}} = 0.6$ の条件下では、 OH ラジカルは、 HNO 生成よりも、 NH 生成を促進するため、 CO_2 の反応性が低 NO_x 化に寄与する^[20]。

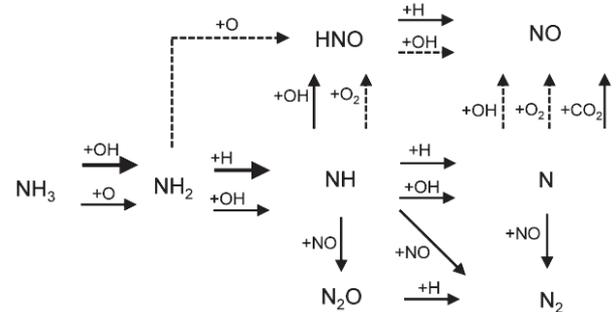


Fig. 8 Reaction path diagram illustrating the major reaction mechanism focusing on N_2 and NO formation (each arrow size denotes time-integral reaction rate: $\lambda_{\text{primary}} = 0.6$, $\lambda_{\text{total}} = 0.8$)^[24]

ここまでは、Fuel- NO の生成抑制に関する研究事例を紹介したが、大量の排ガスを循環するOxy-fuel combustionでは、Recycled- NO が炉内に流入する。Recycled- NO の還元もOxy-fuel combustionの低 NO_x 化において重要である。Recycled- NO の還元メカニズムについても研究が進められている^[21]。

3.2 炭化水素の酸化反応促進とすの低減

図4に示した CH_4 平面火炎リアクターを用いて、炭化水素の酸化反応メカニズムについて検討している研究事例を紹介する。この場合、二次ガスは吹き込まず、また、 NH_3 ガスは使用していない。図9に、 CH_4 平面火炎($\lambda_{\text{primary}} = 0.62$)における未燃炭化水素の実験結果(a)と詳細反応解析結果(b)を示す。実験および解析結果ともに、 O_2/CO_2 燃焼では、空気燃焼と比較して、未燃炭化水素の濃度が大幅に低下している。これは、主に、 CO_2 の反応性により生成される OH ラジカルにより、未燃炭化水素の酸化反応が促進されているためである^[22]。この条件においては、 CO_2 は炭化水素の酸化反応促進に寄与している。しかし、その一方で、 CO_2 の反応性、すなわち $\text{CO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$ (R1)で表される反応は、燃焼反応の重要な分岐反応である $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H} + \text{OH}$ (R2)と、 H ラジカル消費という点で競合しており、炭化水素の酸化反応を抑制するといった報告例もある^[23]。R2の反応は、希薄燃焼のとき、すなわち O_2 が豊富にあるとき、とくに重要な役割を担うが、 O_2 濃度の減少、すなわち燃料過濃状態になるに従い、その影響は低下する。ここで紹介した燃料過濃条件下の O_2/CO_2 燃焼では、R2の反応が抑制される効果よりも、R1により生成される OH ラジカルにより炭化水素酸化を促進する効果が顕著に表れ、未燃炭化分が大幅に減少している。

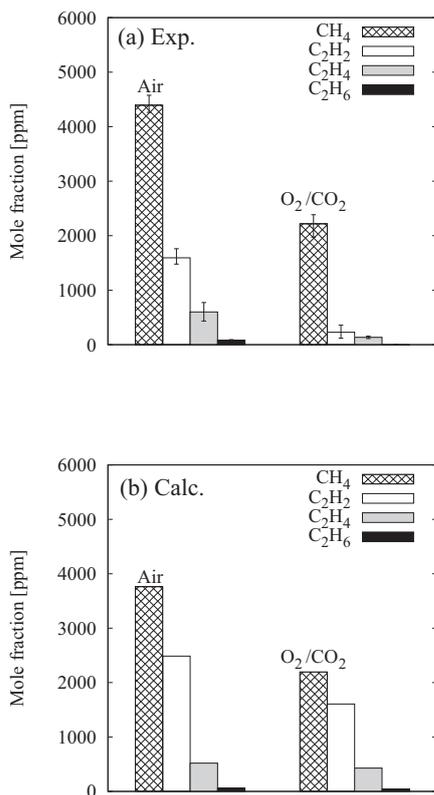


Fig. 9 Measured and calculated exhaust hydrocarbon concentrations at $\lambda = 0.62$ (CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6)²⁶

また、 O_2/CO_2 燃焼において、 C_2H_2 濃度が減少している点は重要である。PAH (Polycyclic aromatic hydrocarbons, 多環芳香族炭化水素)の成長メカニズムとして、HACA (H-abstraction- C_2H_2 -addition) 反応が挙げられる²⁴。このメカニズムでは、*i*環縮合した芳香族化合物 A_i が、Hと反応し、そのラジカル A_i が生成する。 A_i に C_2H_2 が付加し、PAHが成長する。すなわち、 C_2H_2 はすす成長において重要な役割を果たしており、 C_2H_2 の生成が抑制される O_2/CO_2 燃焼では、空気燃焼よりも、PAH生成を抑制できる可能性がある。 CH_4 平面火炎では、PAHの生成は見られなかったが、トルエンを加えた CH_4 平面火炎の反応解析を行った結果、 O_2/CO_2 燃焼では、 C_2H_2 の生成が抑制されることで、PAHの成長が抑制されることが示された²⁵。Oxy-fuel combustionでは、R1で示される CO_2 の反応性を活用することで、ばいじんを抑制できる可能性があり、従来の空気燃焼よりもクリーンな燃焼を実現できる可能性がある。

3.3 CO_2 とアルカリ金属の反応による炭酸塩の生成

石炭やバイオマスといった固体燃料の多くは、灰分を含む。灰分は、炉壁に付着し、運転操作に影響を与えると同時に、熱分解反応やチャーガス化反応の触媒あるいは阻害剤として働く。ここでは、熱天秤を用いて、固体燃料中の灰分、とくにアルカリ金属と CO_2 の反応性について検討を行った。固体燃料には、灰分の多いリグニンを使用した。今回使用したリグニンは灰分が18.2%と多

く、かつアルカリ金属であるNaやKが多く含まれている。実験では、リグニンを CO_2 もしくはAr雰囲気下で 1Ks^{-1} の昇温速度で加熱する。1073K以上では、 $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ のチャーガス化反応が顕著に進行する。ここでは、熱分解プロセスのみを検討するため、373Kから、ガス化反応が顕著に進行しない1073Kまで連続昇温を行い、1073Kで加熱を停止した後、得られた炭化物のIRスペクトルを測定した。

図10に炭酸ナトリウム (Na_2CO_3) とArもしくは CO_2 雰囲気下で得られたリグニンチャーのFT-IRスペクトルを示す。炭酸塩 (Na_2CO_3) のピークを表す波数1450 cm^{-1} および880 cm^{-1} が図中の帯で示してあり、 CO_2 雰囲気下で生成されたリグニンのチャー (CO_2) では、顕著にそのピークが現れている。以上の結果から、リグニンを CO_2 雰囲気下で加熱すると、アルカリ金属と CO_2 が反応し、炭酸塩が生成されることが明らかになった²⁶。

しかしながら、今回使用したリグニンに含まれるアルカリ金属の主成分はNaであり、その濃度は、5.5wt%と高く、実際の石炭やバイオマスといった固体燃料とは大きく異なる。また、石炭に含まれるアルカリ金属は、リグニンよりも少ない。 CO_2 雰囲気下の各種バイオマスや石炭の熱分解過程における炭酸塩の生成挙動については、さらなる検討が必要である。

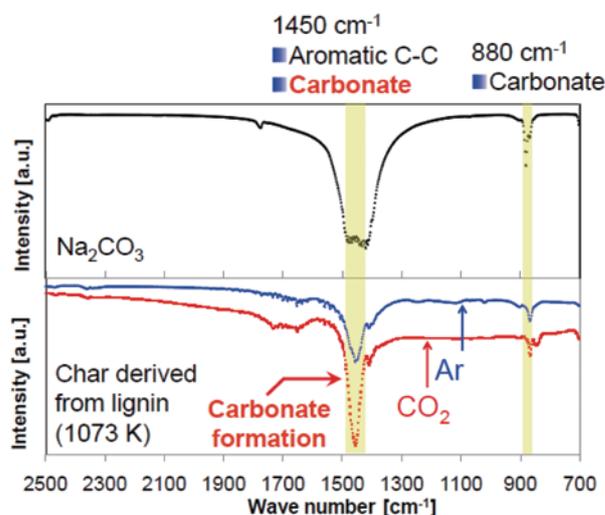


Fig. 10 FTIR spectra of Na_2CO_3 and char derived from lignin

4. おわりに

本稿では、Oxy-fuel combustionと石炭火力について概説し、 CO_2 の反応性を活用することで、低 NO_x 化やばいじんの抑制が可能になることを示した著者らの研究成果を紹介した。Oxy-fuel combustionは従来の空気燃焼とは異なり、大量の排ガス循環および O_2/CO_2 雰囲気下で燃焼反応が進行する特異性がある。Oxy-fuel combustionを石炭火力に適用し、この特異性を積極的に活用することで、従来の空気燃焼よりも、さらにクリーンな石炭火力を実現できる可能性がある。これは他

のCO₂回収方式にはないOxy-fuel combustionならではの
特徴である。Oxy-fuel combustionのためのクリーン
コールテクノロジー開発を目標に定め、今後とも研究を
進めていきたい。

5. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(A)(No. 21246035)、若手研究(A)(No. 24686027)および電源開発株式会社の支援を受けている。ここに記して、謝意を表する。

6. 引用文献

- (1) IEA, World energy outlook (2012), p. 554
- (2) JCOAL, 日本の高効率火力発電の現状 (2013), http://www.jcoal.or.jp/coaldb/tech/cct/2013/11/index_2.html
- (3) 大山宏治, 田中良典, "蒸気タービン高効率化技術の最新動向", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 4 (2010), pp. 13-17
- (4) 五十嵐正晃, 仙波潤之, 岡田浩一, "先進超々臨界圧(A-USC)石炭火力発電ボイラ用耐熱材料の開発動向", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 4 (2010), pp. 13-17
- (5) Bugge, J., Kjær, S., Blum, R., "High-efficiency coal-fired power plants development and perspective", Energy, Vol. 31 (2006), pp. 1437-1445.
- (6) 山田敏彦, 三澤信博, 氣駕尚志, "酸素燃焼技術を利用した石炭火力発電所におけるCO₂排出削減-カライド酸素燃焼プロジェクト-", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 37, No. 2 (2009), pp. 23-27
- (7) 須田俊之, 山田敏彦, "CO₂回収型石炭利用技術", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 5 (2010), pp. 47-54
- (8) Buhre, B. J. P., Elliott, L. K., Sheng, C. D., Gupta, R. P., Wall, T. F., "Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 31 (2005), pp. 283-307.
- (9) Singh, D., Croiset, E., Douglas, P. L., Douglas, M. A., "Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O₂/CO₂ recycle combustion", Energy Conversion and Management, Vol. 44 (2003), pp. 3037-3091.
- (10) Owen, A. D., "The economic viability of nuclear power in a fossil-fuel-rich country: Australia", Energy Policy, Vol. 39 (2011), pp. 1305-1311.
- (11) 橋博志, "最新深冷分離法による酸素製造技術", 日本エネルギー学会誌, Vol. 89, No. 9 (2010), pp. 862-867
- (12) Kirchen, P., Apo, D. J., Anton, H., Ghoniem, A. F., "A novel ion transport membrane reactor for fundamental investigations of oxygen permeation and oxy-combustion under reactive flow conditions", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34 (2013), pp. 3463-3470.
- (13) Okazaki, K., Ando, T., "NO_x reduction mechanism in coal combustion with recycled CO₂", Energy, Vol. 22 (1997), pp. 207-215.
- (14) H. Liu, Okazaki, K., "Simultaneously easy CO₂ recovery and drastic reduction of SO_x and NO_x in O₂/CO₂ coal combustion with heat recirculation", Fuel, Vol. 82 (2003), pp. 1427-1436.
- (15) Chen, L., Yong, S. Z., Ghoniem, A. F., "Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling", Progress Energy and Combustion Science, Vol. 38 (2012), pp. 156-214.
- (16) Glarborg, P., Bentzen, L. L. B., "Chemical Effects of a High CO₂ Concentration in Oxy-Fuel Combustion of Methane", Energy and Fuels Vol. 22 (2008), pp. 291-296.
- (17) T. Mendiara, P. Glarborg, Ammonia chemistry in oxy-fuel combustion of methane, Combustion and Flame 156 (2009) 1937-1949.
- (18) Watanabe, H., Yamamoto, J., Okazaki, K., "NO_x formation and reduction mechanisms in staged O₂/CO₂ combustion", Combustion and Flame, Vol. 158 (2011), pp. 1255-1263.
- (19) Watanabe, H., Arai, F., Okazaki, K., "Role of CO₂ in the CH₄ oxidation and H₂ formation during fuel-rich combustion in O₂/CO₂ environments", Combustion and Flame, Vol. 160 (2013), pp. 2375-2835.
- (20) Watanabe, H., Marumo, T., Okazaki, K., "Effect of CO₂ reactivity on NO_x formation and reduction mechanisms in O₂/CO₂ combustion", Energy and Fuels, Vol. 26 (2012) pp. 938-951.
- (21) 渡部弘達, Kiatpanachart Dejodom, 岡崎健, "O₂/CO₂燃焼におけるFuel NOおよびRecycled-NOの還元メカニズム (CO₂の反応性の影響解明)", 日本機械学会論文集 (B編), Vol. 79, No. 804 (2013), pp. 1703-1713.
- (22) Watanabe, H., Kiatpanachart, D., Okazaki, K., "Experimental and kinetics studies of chemical role of CO₂ in hydrocarbon oxidation during fuel-rich O₂/CO₂ combustion", Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 8, No. 3 (2013), pp. 504-516.
- (23) Giménez-López, J., Aranda, V., Millera, A., Bilbao, R., Alzueta, M. U., "An experimental parametric study of gas reburning under conditions of interest for oxy-fuel combustion", Fuel Processing Technology, Vol. 92 (2011), pp. 582-589.
- (24) Franklach, M., "Reaction mechanism of soot formation in flames", Physical chemistry chemical physics, Vol. 4, (2002), pp. 2028-2037.
- (25) Watanabe, H., Sugai, S., Okazaki, K., "Role of CO₂ in the soot formation and reduction mechanisms in CH₄ flat flame doped with toluene under O₂/CO₂ environments", Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, accepted.
- (26) Watanabe, H., Shimomura, K., Okazaki, K., "Effect of high CO₂ concentration on char formation through mineral reaction during biomass pyrolysis", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34 (2013), pp. 2339-2345.

特集：石炭火力発電

カライド酸素燃焼プロジェクト

氣 駕 尚 志*¹
KIGA Takashi

山 田 敏 彦*¹
YAMADA Toshihiko

キーワード：酸素燃焼，石炭火力発電所，CO₂回収，CCS/CCUS，実証プロジェクト，日豪共同プロジェクト
Oxyfuel Combustion, Coal-Firing Power Plant, CO₂ Capture, CCS/CCUS, Demonstration Project, Japan-Australia Joint Project

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次報告書は、今年4月、第3作業部会での分析結果（気候変動緩和）が発表になり、10月の統合報告書をもって出そろうことになっている。ここまでの分析結果から見えてきたのは、二酸化炭素回収貯留（CCS）の役割の大きさで、野心的な目標達成には必要不可欠な技術とされている。酸素燃焼はこのCCSの中核を成すCO₂回収技術の1つで、主として石炭火力からの回収技術として注目されている。

㈱IHIにおける酸素燃焼の研究は長く、IPCCの設立（1988年）と同時期から始められ、既に四半世紀になる。1990年代には、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援のもと（一財）石炭エネルギーセンター（JCOAL）が取りまとめ、電源開発㈱とともに研究開発を進め、わが国は世界をリードしてきた。この成果を背景として豪州から提案があり、2004年から豪州の発電所に酸素燃焼を適用する実証試験を検討し、豪州クイーンズランド（QLD）州にあるCS Energy社の

Callide A発電所を対象に実施することになった。引き続き、実証試験に向けて体制構築、費用確定、予算確保等のプロジェクト化が進められ、2008年3月にプロジェクトの実施母体であるJV（Joint Venture）が組織され、ここに酸素燃焼を適用し、CCS一貫実証を行うカライド酸素燃焼プロジェクトがスタートした（図1）。日本側は、三井物産㈱がプロジェクトに加わり、経済産業省が支援することになった。これらプロジェクトの創成に関しては、本誌に執筆させて頂いた⁽¹⁾。

現在、酸素燃焼運転開始から2年が過ぎ、酸素燃焼ボイラのみならず酸素燃焼排ガスからのCO₂回収装置の各種運転データ取得および各種試験が実施されているところである。

本稿では、酸素燃焼技術およびプロジェクト概説した後、発電所の改造、試運転および現在実施中の試験の状況、ならびに、豪州QLD州への適用可能性の評価結果を紹介する。

2. 酸素燃焼の特徴

通常、ボイラでの燃焼では空気を用いるが、空気は、容量ベースで約79%の窒素と約21%の酸素で構成されているため、排ガスにも約79%の窒素が含まれるCO₂濃度は約18%にしかならない。一方、酸素燃焼は、空気に替えて酸素を使用するため、排ガスの主成分がCO₂となる上、排ガス量が約5分の1に減少する（図2）。この特



Fig. 1 Ceremonial planting of a bottle tree to celebrate the start of site works in November, 2008 by Japanese, Australian and Queensland Ministers.

原稿受付 2014年6月17日

* 1 ㈱IHI エネルギー・プラントセクター
〒135-8710 江東区豊洲3-1-1 豊洲IHIビル

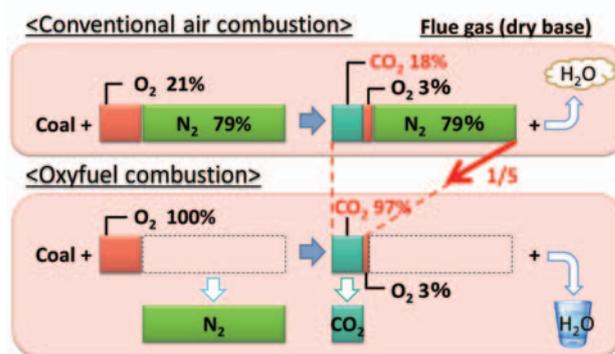


Fig. 2 Concept of oxyfuel combustion

微から、酸素燃焼では容易にCO₂を回収することが可能となる。

実際のボイラでは、酸素のみで石炭を燃焼すると、火炎温度が著しく高くなることから、燃焼排ガスを再循環し、酸素とともにボイラに投入することで、火炎温度を空気燃焼と同等程度に調整している。このようにすることで、従来のボイラに大幅な改造を加えることなく、酸素燃焼運転が可能となる。上記の特徴により、酸素燃焼技術には以下に示すメリットがある。

- ・排ガス中のCO₂濃度が高くガス量が少ないので、排ガス精製、CO₂液化などの後処理が簡素化、小型化できる。
- ・排ガス中のNO_xが炉内で還元されるため、NO_x発生量が低減する。
- ・新設はもちろんのこと、既設ボイラへの酸素燃焼適用改造も可能である。
- ・再循環ガス量を減らし、入口酸素濃度を上げることで、ボイラをコンパクトにできる可能性がある。
- ・酸素製造設備で分離したN₂等の商用利用による経済性向上も期待できる。

3. カライド酸素燃焼プロジェクト

3.1 プロジェクトの概要

本プロジェクトは、日本政府、豪州連邦政府、およびQLD州政府の支援の下、両国の企業が参加してジョイントベンチャーを構成し、進められている（図3）。

本プロジェクトは、世界で初めて商用機に適用され、現時点で世界で唯一の酸素燃焼発電プラントであること、発電プラントから排出されるCO₂の全量を高濃度CO₂流とする世界初かつ現時点世界唯一の発電プラントであること、Capture Readyを考慮していない1960年代のプラントを改造、適用したプロジェクトであることが特徴として挙げられる。また、高濃度CO₂の量は870 t/日で、現時点で世界最大である。本プロジェクトを通じて、システムの実証を行うとともに、設計データ、コストデータ、運転ノウハウの蓄積を目指している。

Oxyfuel Project Partners



Fig. 3 Project Participants

3.2 プラントの概要および改造内容

Callide A発電所には30MWのプラントが4基あり、そのうち4号機を酸素燃焼に改造した。改造後のプラントの主要諸元を表1に示す。また、改造後の系統図を図4に示す。本発電所では、大気への排出規制が日本

に比べ緩いことから、脱硝や脱硫装置を設置してなく、脱じんのみを行うプロセスである。改造では、空気分離装置（ASU：Air Separation Unit）とCO₂液化回収装置（CPU：CO₂ Purification Unit）を設置するとともに、空気燃焼でも酸素燃焼でも定格負荷で運転できるように考慮した系統とし、ファンの容量も見直した。さらに、空気燃焼と酸素燃焼の燃焼モードの切替を考慮しダンパ類を配置するとともに、制御系を組んだ。CPUは、図5に示すように、酸素燃焼排ガスから高純度のCO₂を得るプロセスとなっており、排ガス圧縮機前後にて、脱硝および脱硫し、脱水後にCold Box内で非凝縮性ガスとの分離を行うプロセスとなっている。

発電プラントの改造は、ボイラの通風系統が主で、その状況を図6に示す。一方、ASUおよびCPUは、発電プラントから通路を挟んで設置され、その設置状況および改造後の発電所の全景を図7および図8に示す。

Table 1 Specifications of the modified plant

| | | |
|---|------------------------|-----------------------|
| Output | 30MW | |
| Coal | Callide Coal | |
| Boiler | Type | 2 drums w/o Reheater |
| | Steam flow | 136 ton/h |
| | Steam Press. | 4.31 MPa |
| | Steam Temp. | 462 °C |
| ASU (Air Separation Unit) | Type | Cryogenic |
| | Capacity | 330 ton/day x 2 units |
| | O ₂ Purity | > 98% |
| CPU (CO ₂ Purification Unit) | Type | Cryogenic |
| | Capacity | 75 ton/day x 1 unit |
| | CO ₂ Purity | > 99.9% |

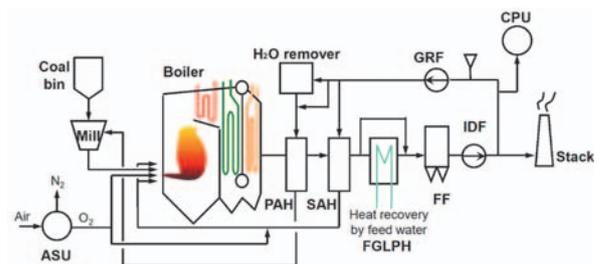


Fig. 4 Flow diagram of power plant

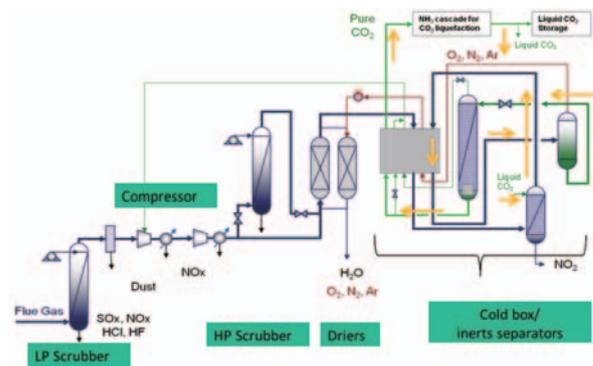


Fig. 5 Flow diagram of CPU⁽²⁾



Fig. 6 Before (left) and after (right) the modification



Fig. 7 Photo of ASU (left) and CPU (right)



Fig. 8 General view after modification

3.3 主な実証運転の成果

発電プラントの改造工事が完了した2011年3月から空気燃焼の試験を開始し、改造後も空気燃焼で問題なく定格負荷が取れることを確認した。2012年3月にはASUが使用できるようになり、酸素燃焼による試験を開始した。さらに、2012年9月にはCPUも立ち上がり、CO₂液化まで一貫した酸素燃焼によるCO₂回収運転が開始された。2014年6月中旬時点で、酸素燃焼運転6,700時間、CO₂液化回収装置運転3,300時間を達成している。

この間、信頼性のあるかつ経済的な商用機の実現を目指して、プラント安全性に係る試験、基本特性の確認、各種パラメータ変更に伴う特性確認試験を順次実施してきている。また、老朽化した設備であり、数ヶ月に1回程度停止し、点検を行っているものの、酸素燃焼に関わる大きなトラブルはなく、安全な運転が継続されている。

実証運転における主な確認内容は次のとおりで、そのうちのいくつかについて具体的な成果を紹介する。

- ・ 異常時の安全な停止方法の確認
- ・ 空気⇄酸素燃焼間のスムーズな燃焼モード移行
- ・ 空気および酸素燃焼における定格負荷運転
- ・ 酸素燃焼ボイラの炉内状況（温度・熱流束など）
- ・ 酸素燃焼でのNO排出量および灰中未燃分の低減

- ・ 酸素燃焼における運転範囲の確認（負荷、入口O₂濃度など）
- ・ ボイラ管材を含めた腐食に係る状況
- ・ 酸素燃焼ボイラでの目標CO₂濃度（70%）およびCO₂回収装置での製造CO₂純度99.95%以上
- ・ 酸素燃焼およびCO₂回収装置を含めた全体プロセスでの微量成分（N, S, Hgなど）の挙動
- ・ カライド炭および2種類のブレンド炭での燃焼

3.3.1 燃焼モードの完全自動移行運転

本プラントでは、起動は通常通り空気燃焼で行ない、石炭専焼24MW以上にて、燃焼モードを空気燃焼から酸素燃焼に切替えるようにしている。切替では、ボイラに酸素を供給すると同時に、大気からの燃焼用空気量を減らし、排ガスを再循環することが必要となる。最終的に、酸素燃焼状態では大気吸い込みダンパは全閉となる。酸素燃焼から空気燃焼に戻すときはこれらが逆動作となる。本プラントではこれらの操作が、中操からのボタン一押しで行なえるよう完全自動化を図っている。

図9には、空気燃焼⇄酸素燃焼のモード切替時のダンパ開度やガス性状などのトレンドを示すが、切替シーケンスの進行とともにダンパ操作や酸素供給量が変化して、排ガス中のCO₂濃度が増減している様子がうかがえる。またこの間、発電機出力制御や排ガスO₂制御が安定して行われている。

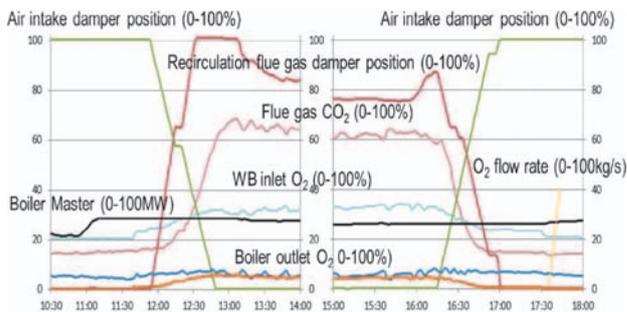


Fig. 9 Trend data during combustion mode change

3.3.2 火炎状況

図10に28MW運転における酸素燃焼時の火炎状況を示す。ボイラ入口O₂濃度の上昇で、炉内が明るくなっていくのが確認され、火炎が短炎化、かつバーナスロート近傍で高温化しているものと考えられる。

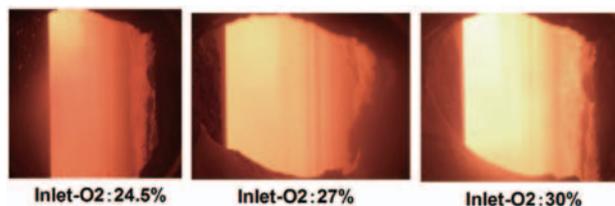


Fig.10 Photos of flame at oxyfuel combustion

3.3.3 定格運転におけるボイラ取熱

図11は、定格負荷（30MW）におけるボイラ各部の取熱量を、改造前後の空気燃焼および酸素燃焼について示した。ここで、酸素燃焼時のボイラ入口O₂濃度は27%（計画条件）であり、主蒸気温度、主蒸気圧力、復水器真空度などは同一条件である。また、後部伝熱部の節炭器を含んで“火炉”と称している。

本図から、まず、酸素燃焼への改造前後でボイラ取熱量や各部の取熱分布にほとんど変化がなく、改造後も空気燃焼で問題なく定格負荷で運転できることが分かる。次に空気燃焼と酸素燃焼の比較を比較してみると、酸素燃焼では、同じ発電機出力（30MW）を得るのに、少ないボイラ取熱量（ひいては燃料消費量）で済むことが分かる。これは、従来はタービン抽気で給水を加熱しているのに対し、酸素燃焼では、排ガス温度を下げるために排ガスで給水加熱を行うことから、タービンの蒸気をタービンの回転（発電）に回すことができるためである。また、取熱分布については、ボイラ入口O₂濃度を計画条件に設定することにより、酸素燃焼時も空気燃焼時とほぼ等しい各部取熱割合となることが確認できた。

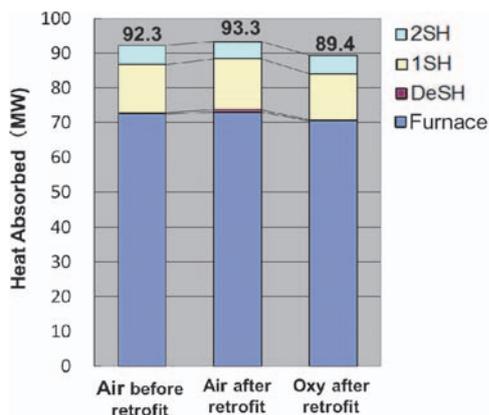


Fig.11 Heat absorption at each part of boiler

3.3.4 排ガス性状および灰中未燃分

図12は負荷に対するCO₂濃度を示したものである。ボイラは負圧で運転していることから、系内への大気の流れによりCO₂濃度が低下するが、本プロジェクトでは特段の対策は施さず、流入量の事前計測結果からCO₂濃度を予測し、その確認を行った。予測値は70 dry%であるが、図に示すとおり、定格負荷（30MW）において予測どおりにになっている。一方、負荷を下げるにしたがい排ガス量が減少するため、相対的に空気の流入割合が増えてCO₂濃度は低下している。実用化においては、負荷によらず高いレベルでCO₂濃度が安定するよう、計画段階で空気流入防止策を考慮することで対応可能である。

図13および図14は、それぞれ負荷に対するNO濃度およびNO₂濃度を示す。ともに、空気燃焼時の値と酸素燃焼時の値を比較できるように、同一CO₂濃度（12%）で換算した値を使用している。酸素燃焼時での換算NO濃

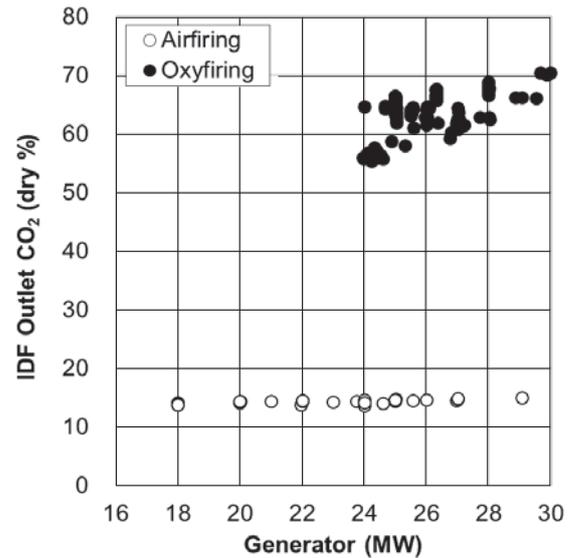


Fig.12 Heat absorption at each part of boiler

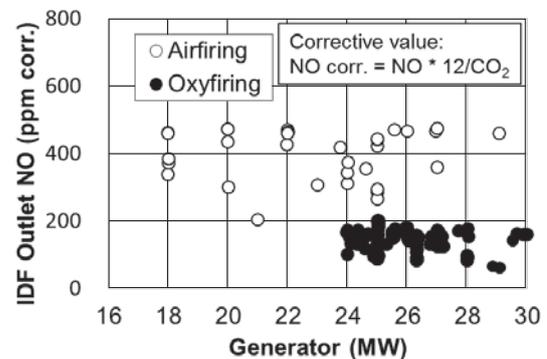


Fig.13 NO concentration at IDF outlet

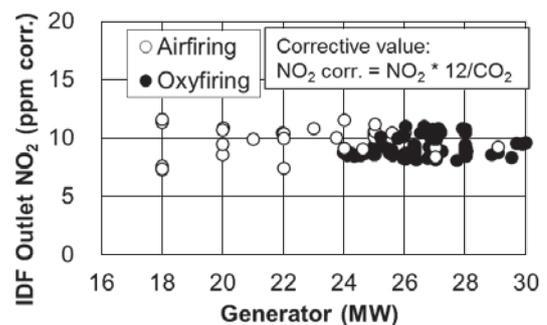


Fig.14 NO₂ concentration at IDF outlet

度は、空気燃焼時の値より低くなっている。これは、排ガス中に含まれるNOが再循環によってバーナに戻され、火炎内で還元されることが大きな要因と考えられる。

一方、換算NO₂濃度は空気燃焼時と酸素燃焼時で同レベルとなっている。これは、NO₂は炉内に戻っても還元はされないことを示唆している。

負荷に対する換算SO₂濃度を図15に示すが、空気燃焼時と酸素燃焼時とはほぼ同じレベルとなっており、変化ない。一方、排ガス系統各部のSO₃濃度（生値）を示したのが図16である。酸素燃焼では排ガス量が約1/5に

減少することから、ボイラ出口や2次ヒータ出口などの高温域では酸素燃焼時の値の方が高くなっているが、酸露点腐食に影響のある排ガスクーラ以降の低温域では、空気燃焼時と酸素燃焼時の値はほぼ等しくなっており、バグフィルタ出口（誘引通風機（IDF）出口）ではどちらも検出限界以下となった。

図17には、2種類の石炭について、空気燃焼時と酸素燃焼時の灰中未燃分を示すが、両炭種とも、酸素燃焼時に灰中未燃分が半減していることが分かる。酸素燃焼では、燃焼用ガス中に多量のCO₂が含まれていることから、石炭のCO₂によるガス化反応などが未燃分の低減に寄与したものと考えられる。

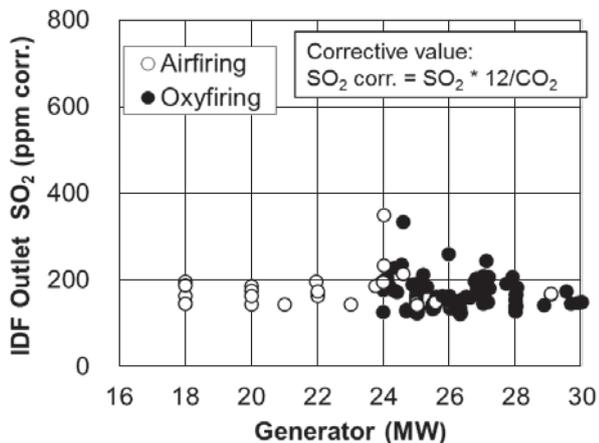


Fig.15 SO₂ concentration at IDF outlet

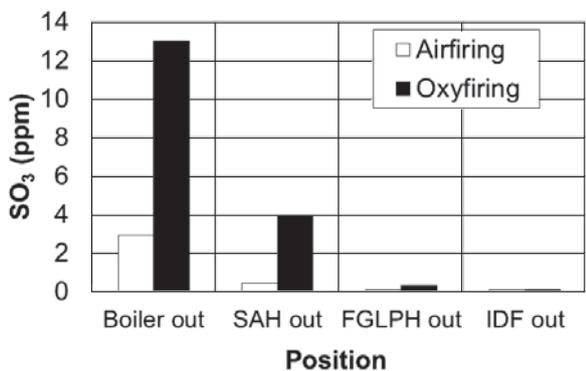


Fig.16 SO₃ concentration vs. position

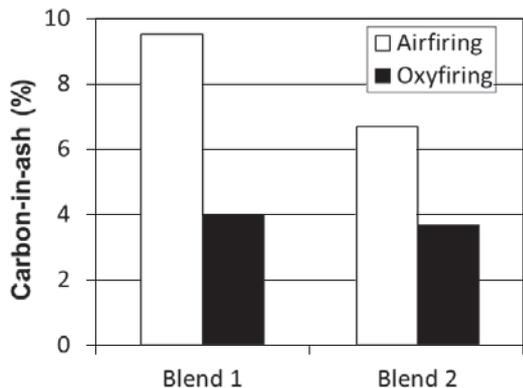


Fig.17 Unburned carbon in fly ash

3.3.5 CPUの特性

本プロジェクトでは、酸素燃焼で回収したCO₂を加圧・脱水し、冷却液化するとともに純度を高め、CO₂貯留工程に引き渡すものとしている。そのため、冷却液化する際の熱交換器を腐食させる水銀の挙動ならびに液化回収したCO₂の性状が大きな関心事である。

図18は、CPU入口以降のプロセスにおける水銀の挙動を調べたものである。同図から明らかなように、低压スクラバ（脱硫装置）で80%ほど除去され、加圧工程で大幅に低下し、最終的にコールドボックス入口で0.1～2 ng/m³未満までになっている。また、表2にプロセス内および液化回収されたCO₂の性状を示すが、純度99.95%以上のCO₂を得ることも可能であり、貯留条件に応じた対応が期待できる。

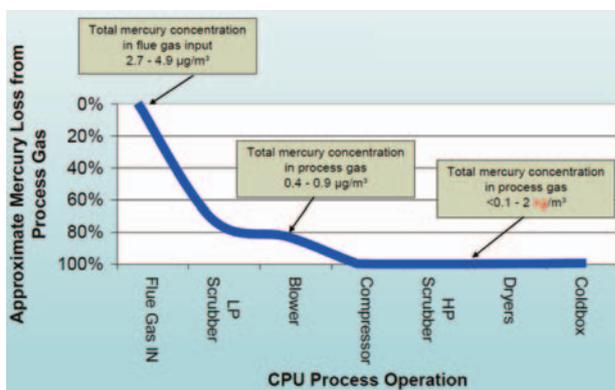


Fig.18 Behavior of mercury along the CPU process⁽³⁾

Table 2 Properties of CO₂ ⁽²⁾

| Composition | Unit | LP Scrubber | | Product CO ₂ |
|----------------------|--------------------|-------------|------------|-------------------------|
| | | Inlet | Outlet | |
| H ₂ O | mol, % | 19 - 22 | 5 - 7 | <20 ppm |
| O ₂ | mol, % | 3 - 5 | 3.5 - 6 | <30 ppm |
| CO ₂ | mol, % | 50 - 57 | 58 - 67 | >99.95 |
| CO | ppmv | 20 - >200 | 25 - >200 | <10 |
| NO | ppmv | 500 - 700 | 580 - 820 | <2.5 |
| NO ₂ | ppmv | 20 - 40 | nil | <20 |
| SO ₂ | ppmv | 800-1000 | <10 | <0.1ppm |
| SO ₃ | ppmv | 10 - 15 | <0.1 | <0.1ppm |
| N ₂ (+Ar) | mol, % | Balance | Balance | trace |
| Hg | ppbv | 0.3 - 0.5 | 0.04 - 0.1 | <0.0002 |
| | µg/Nm ³ | 2.7 - 4.9 | 0.4 - 0.9 | <0.002 |
| Particulates | mg/Nm ³ | 150 - 250 | <0.02 | nil |

3.3.6 酸素燃焼ボイラ 今後の試験計画

本技術の今後の商用展開に向け、各種試験を計画している。酸素燃焼ボイラとして計画している主なものは以下のとおりである。

- ・炭種変更確認試験
- ・微量成分挙動確認試験
- ・耐久性確認（各設備健全性確認）
- ・ボイラ管材腐食確認試験

Table 3 Specifications of the subject plant

| | | |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Gross Output/Efficiency(HHV) | | 500 MW / 45.7% |
| Net Output/Efficiency(HHV) | | 345 MW / 31.5% |
| Boiler | Type | Variable Press, Once-through, Reheat |
| | Main Steam Press | 25.0 MPa |
| | Main Steam Temp. | 600 °C |
| | RH Steam Temp. | 600 °C |
| ASU | Type | Cryogenic |
| | Capacity | 4800 ton/day x 2 units |
| | O ₂ Purity | 96.5 % |
| CPU | Type | Cryogenic |
| | Capacity | 6450 ton/day x 2 unit |
| | CO ₂ Purity | ≥ 99.9% |
| | CO ₂ Recovery Rate | 98% |
| CO ₂ | Phase | Supercritical |
| Pipeline | Length | 140 km |
| Storage | Storage Rate | 2.5Mton/year |

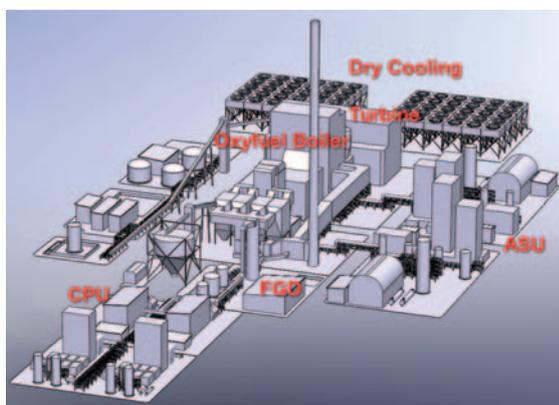


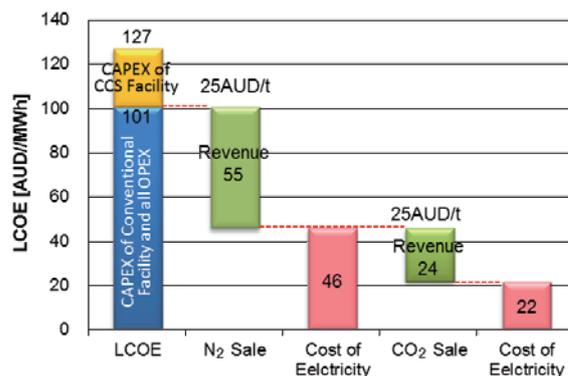
Fig.19 Bird eye's view of the power plant studied

今後、これらの試験を確実に実施し、安全性、信頼性、運用性の高い酸素燃焼ボイラに仕上げていく予定である。

4. 商用化検討

カライド酸素燃焼プロジェクトの成果を豪州QLD州での商用化に反映すべく、酸素燃焼を用いたCO₂回収型新設石炭火力発電所のフェージビリティスタディを行った。検討範囲は、酸素製造設備、CO₂液化回収設備を含めた酸素燃焼ボイラ発電プラントに加え、CO₂を輸送するためのパイプラインおよびCO₂貯留設備までを含むCCSに必要な設備一式である。主要諸元・性能を表3に示す。また鳥瞰図を図19に示すが、通常の発電プラントの1.5～2倍の敷地が必要になっている。

また図20は、経済性を、LCOE（耐用年数平均電力取引価格）を用いて検討した結果について評価したものである。まず、本プロジェクトで発電される電力のLCOEを計算したところ127 AUD/MWhと評価された。これは、QLD州での平均的な電気代の60 AUD/MWh（カーボンタックス、約20 AUD/MWh込み）の約2倍程度であり、このままでは普及が進まないことが分かる。この



[Assumptions for LCOE Calculation]

- Economic life time; 30 years
- Plant availability; 85%
- Post-tax nominal WACC (Weighted Average Cost of Capital); 8.7%
- Income tax rate; 0%
- Inflation rate; 2.5% (2.5%x75% for fuel cost, 4.25% for Labor cost until 2018, then 2.5%)

Fig.20 Unburned carbon in fly ash

状況を改善する方法として、CCSに関わる設備費を補助金で賄う方法があるが、それでも100 AUD/MWh程度であり、更なる改善が必要である。

一方、北米などでは回収されたCO₂を石油増産回収(EOR)に用いるCCUS (Carbon Capture, Utilization & Storage) が注目されている。酸素燃焼では図2に示したように、CO₂の他にN₂も副産物として回収できることから、それらが売却できれば大幅な経済性の改善が期待される。そこで、米国での市場価格から判断して共に25 AUD/tonとしてその効果を図20に合わせて示した。同図から、その場合のLCOEは22 AUD/MWhまで低下し、経済的に成立する可能性が高まることが分かる。

5. おわりに

本稿では、現在推し進めているカライド酸素燃焼プロジェクト、特に酸素燃焼ボイラについての現況を概説した。本プロジェクトは終盤戦にかかってきている。最後まで確実にデータを取得し、商用化に向けた活きたデータとしていきたい。将来本技術が、経済的に有効な貯留と組み合わせた高効率なCO₂回収システムとして実現できるよう、今後の研究・開発・実証を進めていく。

謝辞

本稿は、経済産業省資源エネルギー庁石炭課、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、(一財)石炭エネルギーセンター、電源開発(株)、三井物産(株)および豪州連邦政府、QLD州政府、CS Energy、ACALET、Schlumberger、Glencoreの豪州側関係者のサポートを得て実施したことを記し、謝意を表す。

参考文献

- (1) 山田敏彦, 三澤信博, 氣駕尚志, “酸素燃焼技術を利用した石炭火力発電所におけるCO₂排出削減 -カライド

- 酸素燃焼プロジェクト”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.37, No 2 (2009), pp.67-72
- (2) Chris Spero, Toshihiko Yamada, and Graeme Rees, “Callide Oxyfuel Project: Overview of Commissioning Experience”, 3rd IEA Oxyfuel Combustion Conference (2013).
- (3) Peter Nelson, Anthony Morrison, P. Sargent Bray, Hugh Malfroy, Rohan Stanger, and Chris Spero, “Measuring trace elements during the December 2012 Callide Oxy-Fuel trial”, 3rd IEA Oxyfuel Combustion Conference (2013).
- (4) Takashi Kiga, Takahiro Tanaka, Terutoshi Uchida, Akihiro Komaki, Toshihiko Yamada, Naoki Fujiwara, and Chris Spero, “Feasibility Study of the CCS Deployment to Australia by Use of Oxyfuel Technologies”, 3rd IEA Oxyfuel Combustion Conference (2013).

特集：石炭火力発電

CCSに関する研究動向

植村 豪*¹
UEMURA Suguru平井秀一郎*¹
HIRAI Shuichiroキーワード：二酸化炭素回収隔離, CO₂地中隔離Carbon Capture and Sequestration, CO₂ Geological Sequestration

1. はじめに

CCS (Carbon Capture and Sequestration) とは、二酸化炭素 (CO₂) を火力発電所等の排ガスから分離・回収して地中へ隔離し、大気中へのCO₂放出を防ぐ手法である。CO₂削減への量的寄与、コストの観点から、CO₂排出量を最も効果的に削減できる手法と考えられている。

大気中への人為的なCO₂排出量が増加すると、温室効果が増大し、地球規模での気候変動が引き起こされ、生態系、自然環境、人類の活動に著しい悪影響が生じる可能性が指摘されている。このためIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) によって気候変動と必要な対策に関する学術的な知見が集約、整理されており、2014年4月に発表された第5次評価報告書では、気候変動を最小にするため、2010年比で40-70%ものCO₂排出量を2050年までに削減する必要性が指摘された。

CO₂排出量の増加は、産業革命以降の主要なエネルギー源が化石燃料へと変わるとともに、その使用量が急増したことに起因している。化石燃料以外の再生可能エネルギーや原子力発電へとエネルギー源を転換すればCO₂排出量は削減できるものの、現状では供給量やコスト、安全性の観点から化石燃料の代替とは成り得ない。それどころか新興国の発展に伴って、世界的な化石燃料の使用量は今後ますます増加することが予測され^{(1),(2)}、日本国内でも2011年の東日本大震災以降は電力の約90%が火力発電、すなわち化石燃料から供給されている状況にある。

このように化石燃料を使用しながらCO₂排出量を削減するという、相反する課題を同時に解決するために有効な手法としてCCSが注目されている。本稿ではCCSの特徴を解説した後、ごく一部ではあるが近年の国内外におけるCCSの動向を紹介する。またCCSと関連して、著者らが取り組んでいる新しいCO₂地中隔離手法についても述べる。

2. CCSとは

CCSはCO₂の分離・回収、輸送、隔離の3つのプロセスで構成されている(図1)。CO₂を効率良く回収するためには、定置型で大量のCO₂が排出される施設を対象とすることが望ましく、CCSでは火力発電所、製鉄所、化学プラントなどが主なCO₂排出源になると考えられている。ただし、一般的な火力発電所では排ガス中のCO₂濃度は20%未満であり、輸送と隔離の効率を上げるために排ガス中からCO₂のみを分離・回収する。

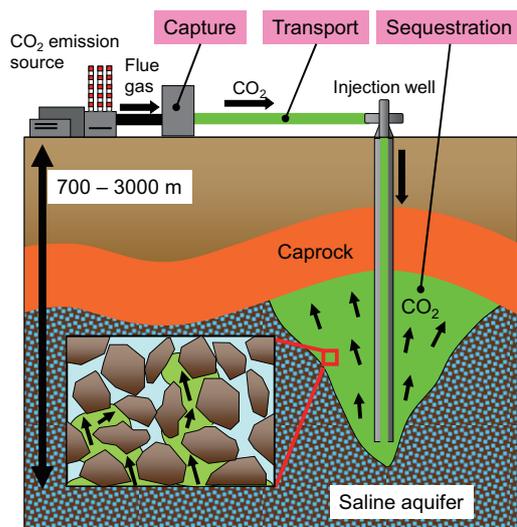


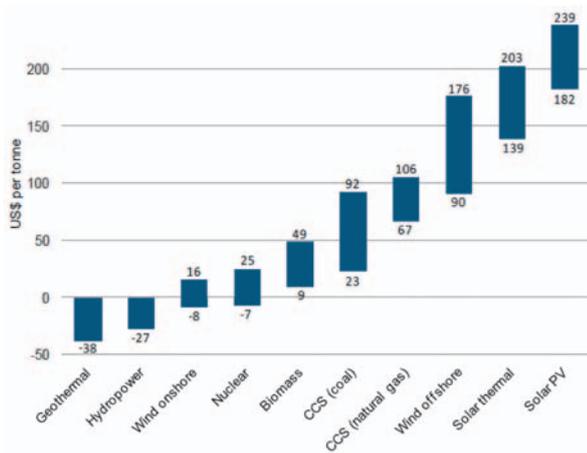
Fig. 1 Schematic view of CCS

回収されたCO₂を地下に隔離する際、CO₂排出源の直近が必ずしもCO₂隔離に適した地質とは限らないため、排出源から隔離サイトまでCO₂を輸送しなければならない。輸送距離は数kmから数百kmと、CCSプロジェクトによって大きく異なっている。輸送手法には主にパイプラインが想定されているが、地域の特徴や輸送距離によってコストの優劣が変わり、タンクローリーや船舶による輸送も候補になり得る。

CO₂の隔離サイトについては、CCS黎明期は地中と海洋の双方が対象であったが、現在は地中または海底下が隔離対象となっており、地下700-3000mに分布する帯水層、油田、ガス田などが候補となっている。帯水層は

原稿受付 2014年5月8日

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科
〒152-8550 目黒区大岡山2-12-1

Fig. 2 Cost of CO₂ avoided⁽⁶⁾

砂粒が堆積、圧縮して形成されたマイクロスケールの多孔質構造で、10-100 μm程度の空隙が水や塩水で満たされている。圧入されたCO₂は一部が水に溶解し、大半のCO₂は空隙内の水を押し出しながら帯水層中を浸透する。なお、CO₂の圧入レートは1つのサイトで10-100万t/year程度で、地質構造に応じて設定されている。

地中に圧入されたCO₂は、周囲の温度圧力条件によって液体、または超臨界状態として存在する。このとき、CO₂の密度は周囲の水よりも小さいため、CO₂は浮力によって帯水層中を2-3 cm/yearと非常にゆっくりと上昇することが示唆されている⁽³⁾。そこで大気中にCO₂が再放出しないよう、帯水層上に不透水層（キャップロック）が存在する地質構造を利用し、地表へのCO₂漏洩を防ぐ対策を講じている。

3. CCSの特徴

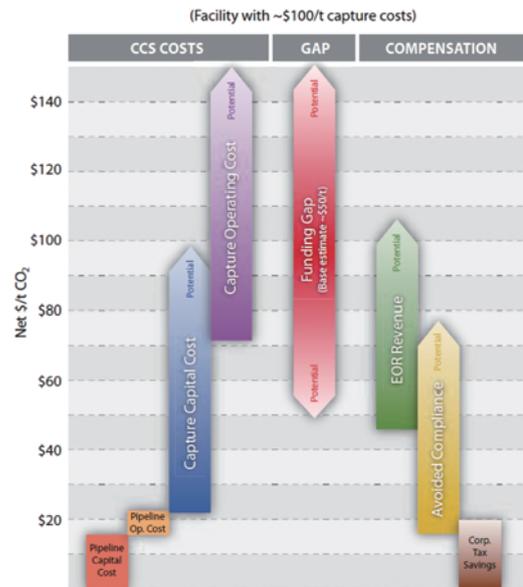
3.1 CO₂削減ポテンシャル

CCSがCO₂削減に対して有効な手法と考えられている理由として、その量的寄与の大きさが挙げられる。

近年の日本におけるCO₂排出量に着目すると、おおよそ13億t/yearで推移している⁽⁴⁾。一方、2013年のCOP19で日本政府が発表した「2020年までに2005年度比で3.8%減」というCO₂削減目標量は、概算すると約5000万t/yearである。大型タンカー1隻の積載重量ですら約30万tであり、CO₂排出量とCO₂削減目標量がいかに膨大であるかが分かる。

これに対し、日本国内のCO₂隔離可能量は約1460億tと試算されている。単純に上記のCO₂削減目標と量的な比較をすれば、十分なポテンシャルを有していることが分かる。なお、世界全体のCO₂排出量は約300億t/yearであるため、既述したIPCCのCO₂削減目標（2050年までに40-70%減）が150-210億t/yearと算出されるのに対して、CO₂の隔離可能量は約2兆tと推算されている。

一方、出力100万kWの石炭火力発電所にCCSを適用すると、CO₂回収量は約560万t/yearと試算できる（CO₂排出原単位：0.95 kg-CO₂/kWh⁽⁵⁾、施設稼働率：75%、

Fig. 3 CCS funding gap⁽⁷⁾

CO₂回収率：90%と仮定)。したがって、1ヶ所の100万kW級石炭火力発電所にCCSを適用するだけで、日本のCO₂削減目標（5000万t/year）の約10%を担うことが可能である。

このようにCO₂削減目標とCCSによるCO₂回収・隔離量を比較すると、CCSのCO₂削減ポテンシャルが極めて高いことが分かる。ただしCO₂削減ポテンシャルを有効に活用できるか否かについては、後述するようなコストや地域住民の理解といった課題の解決が必須である。

3.2 経済性

図2は様々なCO₂削減技術について、CO₂排出量を1t削減するために必要なコストを比較した結果を示している⁽⁶⁾。2011年の東日本大震災以降、日本国内では再生可能エネルギーへの転換が積極的に進められているものの、CO₂削減の観点ではコストが極めて高く、CCSの方が低コストでCO₂を削減できることが分かる。

しかし、火力発電所にCCSを適用する場合、初期投資と運用コストは電気代や環境税に転嫁するか、国からの補助金で賄うなど、国民が必ず負担しなければならない。図3に示すように、現状ではCCSのコストと実現可能な補償額には大きな隔りがあり⁽⁷⁾、日本円にして7000-10000円/tと試算されているランニングコストが2000円/tまで下がらないとCCSの経済的な成立は困難であると指摘されている⁽⁸⁾。

CCSコストの内訳では、CO₂分離・回収がその大半を占めていることから⁽⁷⁾、コスト低減のために低エネルギーで効率良くCO₂を分離・回収するプロセスの開発が積極的に進められている。また、O₂/CO₂石炭燃焼へのCCS適用もCO₂分離・回収コストを低減できる手法として注目されている⁽⁹⁾。O₂/CO₂燃焼では燃焼排ガスの循環によって排ガス中のCO₂濃度が95%以上に濃縮されるた



Fig. 4 World map of large-scale CCS projects¹²⁾

め、CO₂分離コストを低減できることが期待されている。

さらにCO₂を帯水層に隔離するのではなく、油田に圧入するEOR (Enhanced Oil Recovery, 原油増進回収)の利用も重要な選択肢である¹⁰⁾。EORは油田へのCO₂圧入により、油田内に残留した原油を回収する手法である。元々は原油の増産が主目的であるが、圧入されたCO₂の大半は油田内に隔離された状態になるため、原油生産と同時にCO₂地中隔離も実施していると見なせる。帯水層を対象としたCO₂地中隔離では収益がなく、ランニングコストが生じるのみであるが、EORではCO₂圧入に伴って原油増産分の利益が得られるため、図3にも示されているようにCCSのコストを賄うことが可能となる。

3.3 社会受容性

CCSの低コスト化と並び、CCSの実施に際して国民や地域社会の理解と賛同、すなわち社会的受容性を得ることが必要不可欠である。CCSを展開する上での大きな課題として、CO₂地中隔離のキャップロックに万が一亀裂が存在した場合にCO₂が大气中へ放出される可能性(CO₂漏洩リスク)が挙げられる。全く人が住んでいない地域でCO₂地中隔離を実施すれば、CO₂漏洩リスクは極めて限定的で、社会に対する影響も小さく、CCSの実施も比較的容易である。しかしCO₂排出源の立地、CO₂地中隔離の適地、CO₂輸送コストを考慮すると、住宅地に近接した地域でCO₂地中隔離を実施する必要性は今後増加していくと考えられる。その際、大半の地域住民はCCSの重要性と必要性には理解を示すものの、CO₂漏洩リスクが伴うため、自宅の近隣でCO₂地中隔離を実施することには抵抗を感じる事例が報告されている (NIMBY, Not In My Back Yard)¹¹⁾。したがって技術的、コスト的に適した隔離サイトを選定するだけでなく、CO₂地中隔離に関する地域住民の理解が得られなければ、CCSを実現すること困難である。

4. 国内外のCCSの動向

前述のようにCCSには利点と課題が混在しながらも、図4に示すように北米や欧州、アジアでは大規模なCCSが複数実施されるとともに、法規制も進められつつあ

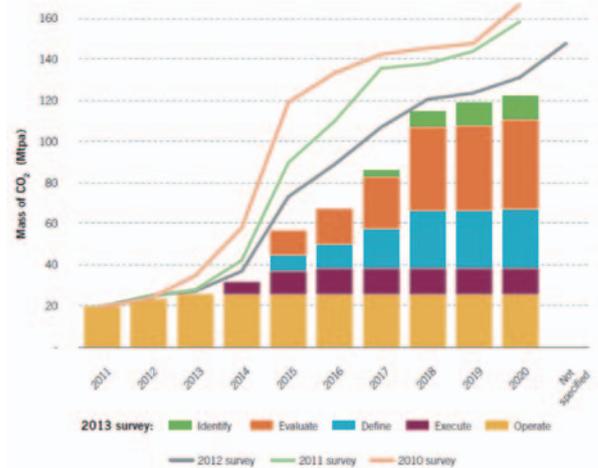


Fig. 5 Mass of CO₂ potentially stored by large-scale CCS projects¹³⁾

る¹²⁾。近年の国内外のCCSの動向について、それぞれ代表的なプロジェクトを以下に紹介する。

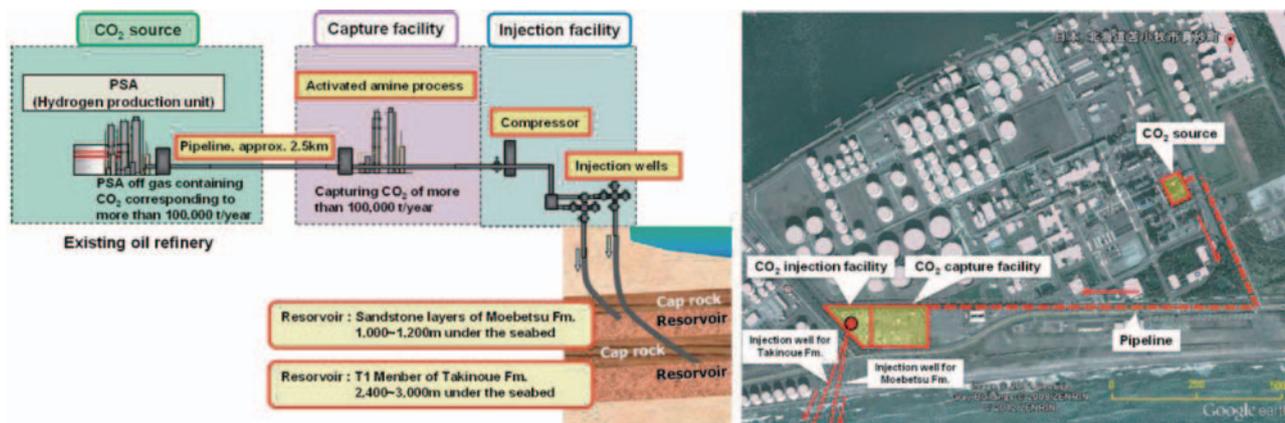
4.1 CCSの国外動向

2013年時点で、世界では12件の大規模CCSが実施され、約2300万t/yearのCO₂が隔離されている¹³⁾。図5に示すように、2014年から2020年にかけてプロジェクト数は増加し、CO₂隔離量は2014年比で4倍以上になると推定されているものの、世界的なCO₂削減目標に寄与するほど普及が進んでいないことが課題である。

4.1.1 北米におけるCCSの動向 (火力発電へのCCS適用)

北米での特徴的なCCSとして、2014年前期に操業開始を予定しているカナダのBoundary Dam Integrated Carbon Capture and Sequestration Demonstration Projectが挙げられる¹⁴⁾。これまで世界で実施されているCCSの代表例にはSleipnerやSnøhvit (いずれもノルウェー)、Weyburn (カナダ、米国)、In Salah (アルジェリア)が挙げられるが、いずれも天然ガス生産や化学プラントからCO₂を回収している。これに対して本プロジェクトでは、改修された石炭火力発電所をCO₂排出源とした世界最初の大規模なCCSが実施される予定で、100万t/yearのCO₂回収量が見込まれている。さらにBoundary Dam CCSプロジェクトの操業が開始した直後には、IGCCにCCSを適用する米国のKemper County IGCC Projectも操業予定で、350万t/yearのCO₂回収が予定されている¹⁴⁾。

上記の2つのプロジェクトはいずれもEORによるCO₂隔離が予定されており、Boundary Dam 発電所の場合は前述のWeyburn油田まで100kmのパイプラインを敷設し、CO₂を輸送する。また図4の北米で実施されているCCSに着目すると、8割近くのプロジェクトがEORによってCO₂を隔離していることが分かる。これはEORの原油増産に伴う収益が、CCSを経済的に成立させる上

Fig. 6 Facilities of the Tomakomai CCS demonstration project¹⁵⁾

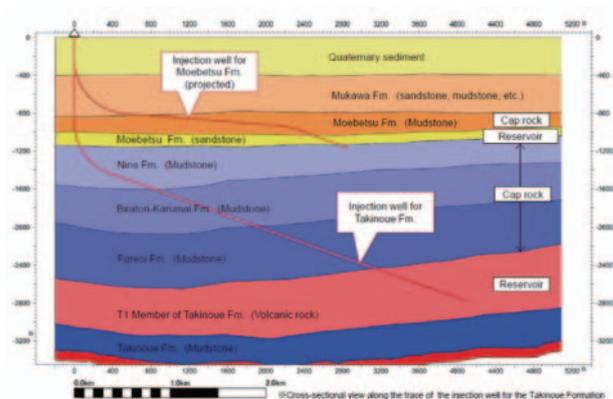
で重要な因子になっていることを示している。また、そもそもEORは米国発祥の技術で長年の実績があることと、CO₂を圧入する油田周辺には住宅が無いために社会的な理解が得やすいなど、EORを容易に推進できる環境が整っていると考えられる。

4.1.2 欧州におけるCCSの動向 (CCS-Readyの適用)

欧州においては、2009年のEU指令によって規定されたCCSR (CCS-ready) が、今後のCCS導入を促す上での重要な施策である¹⁵⁾。CCSRでは30万kW以上の火力発電所を新設する際、将来CCSを技術的かつ経済的に実施可能かどうか事前に調査を行った上で、建設の許認可要件を得ることを求めている。具体的には、CO₂分離・回収を想定した発電プラントを設計し、CO₂輸送コストに見合った距離にCO₂地中隔離が可能な候補地を調査・決定するなどの対策が必要となる。

なお、EU指令ではCCSRを満たさなくとも火力発電所の新設は禁止していないが、英国ではCCSRを満足しない発電所の新設は不可とし、EU指令よりも厳しい規制を義務付けている。ドイツやオランダなど、欧州大陸部では資金計画の変更や地域住民の反対を受けて、複数のCCSプロジェクトが中止または保留されている状況とは対照的である。英国のCCS推進の背景には、積極的な法整備だけでなく、北海油田の存在も挙げられる。北海では1996年からノルウェーのSleipnerで100万t/yearの大規模なCO₂海底下隔離の実績があり、英国にも同様のCO₂隔離サイトを利用できる優位性を有している。

さらに英国では2013年に実施されたEPS (Emissions Performance Standard) により、今後新設される発電所は出力当たりの年間CO₂排出量を0.45 kg-CO₂/kWh以下に抑えなければならない。これは日本国内の最新鋭のLNG複合サイクル発電 (約0.36 kg-CO₂/kWh¹⁶⁾) であれば十分に達成可能な数値であるが、石炭火力発電所 (0.95 kg-CO₂/kWh) でEPSを満足するためには新設時からCCSの設置が必須であることを意味している。なお、EPSについては北米でも石炭火力発電を対象に策定が進

Fig. 7 Geological cross section of the Tomakomai demonstration site¹⁹⁾

められており、米国で0.50 kg-CO₂/kWh、カナダで0.42 kg-CO₂/kWhの規制が検討され、カナダについては2015年から施行が予定されている。

4.2 CCSの国内動向

国内における代表的なCCSとしては、新潟県の長岡市で実施された長岡プロジェクトが挙げられる¹⁷⁾。これは国内初の実証試験であり、RITE (公益財団法人地球環境産業技術研究機構) が経済産業省の補助を受け、2003年から約2年にわたって総量約1万トンのCO₂を地下1100mの帯水層に隔離した。なお、陸域に存在する帯水層へのCO₂地中隔離としては世界初である。現在は弾性波によるモニタリングが継続されており、CO₂がキャップロック下の帯水層で安定して隔離されている観測結果が得られている。

近年では2012年に経済産業省が北海道の苫小牧におけるCCS大規模実証試験の実施を決定し、2020年以降の実用化を目指してJCCS (日本CCS調査株式会社) によって事業が進められている¹⁸⁾。長岡プロジェクトではCO₂地中隔離の実証試験に重きが置かれていたが、苫小牧ではCO₂の分離・回収から輸送と隔離まで、CCSをトータルシステムとして実証することを目的としている (図6)。CO₂排出源は苫小牧沿岸部に既設の製油所

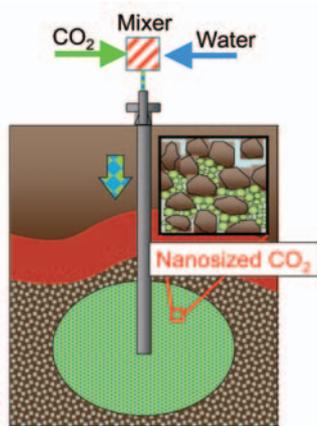


Fig. 8 Schematic diagram of nanosized CO₂ geological sequestration

で、水素製造装置から排出されるCO₂を対象としている。CO₂分離・回収基地と圧入基地は新設し、排出源から隔離サイトまでがパイプラインで全て接続され、典型的なCCSのシステムが構築される予定である。

CO₂の隔離対象は海底下1100-1200 mおよび2400-3000 mに分布する2つの帯水層である(図7)。アーチ状に湾曲したキャップロック構造ではなく、不透水層が一樣に傾斜した地層であるものの、シミュレーションによってCO₂は安定して隔離されることが示されている¹⁹⁾。隔離ポテンシャルとしては25万t/year×3yearのCO₂圧入が可能であることが確認され、圧入設備も20万t/yearの能力を有しているが、実際には圧入レート10万t/yearでのCO₂地中隔離が予定されており、余裕を持った設定となっている。2013年の時点で観測井の掘削が完了しており、2014年度には分離・回収設備の建設が始まるなど、実証試験に向けた準備が着々と進められている。

5. 今後のCCSの課題

現在進行している国外のCCSの実証試験に着目すると、石炭火力発電所を対象とした商用規模の内容へと移行すると共に、新設火力発電所にはCCSRの適用も広がりつつある。先進国の発電プラントメーカーにとっては、発電効率の向上だけでなく、CO₂分離・回収プロセスも考慮した発電プラントの設計、CO₂地中隔離のための地下構造の探査など、発電からCO₂隔離までをトータルシステムとして構築できる技術力が必要不可欠となる。さらに実験やシミュレーションを基にした帯水層内のCO₂挙動の高精度な予測、および環境アセスメントを実施し、地域住民への説明と対話を通じて社会的受容性を得なければならない。国内の現況では、CCSプロジェクトの経験数が少なく、CCSに関する一連の高度な技術力と経験を蓄積しなければ、国外の発電事業における受注競争力が不足することも危惧される。

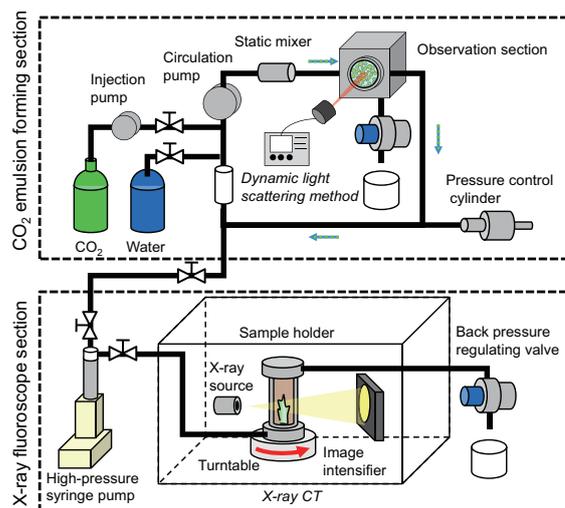


Fig. 9 Experimental apparatus

6. 次世代のCO₂安定地中隔離技術

6.1 安定性の高い地中隔離技術の必要性

これまでに述べてきたように、CO₂の隔離サイトと生活圏が近いため、CO₂漏洩リスクに対する地域住民の理解を得られず、欧州では既に一部のCCSプロジェクトの進行が遅滞する要因にもなっている。国土の狭い日本でも同様の状況が生じる可能性は高く、CO₂地中隔離の社会的受容性を高めなければ、CCSの実用化、商用化は困難であるが、万が一キャップロックに亀裂が存在した場合、現状ではCO₂漏洩リスクを低減させる抜本的な解決策は無い。そこで著者らはCO₂漏洩リスクを低減させるため、ナノスケールまで微粒化したCO₂を帯水層中に注入し、安定してCO₂を隔離できる新しい手法の開発を進めている²⁰⁾。

6.2 CO₂ナノスケール化

帯水層内で生じるCO₂の上昇は浮力によって引き起こされる、その大きさは「水とCO₂の密度差 $\Delta\rho$ (kg/m³) × 重力加速度 g (m/s²) × CO₂の体積 V (m³)」で表される。密度差 $\Delta\rho$ と重力加速度 g は定数であるのに対し、体積 V は可変であり、体積を減少させることで浮力の低減が可能である。そこで図8に示すように、予め高圧水中で液体状態のCO₂をナノスケールの液滴に微粒化し、水とナノスケールCO₂液滴の混合物を帯水層中に注入すれば、浮力による上昇が抑えられると考えられる。

本手法をキャップロック構造の隔離サイトへ適用すれば、浮力低減と毛管力によってCO₂そのものの上昇を抑える効果に加え、さらに上方にはキャップロックも存在するため、二重の漏洩防止措置を講じることができる。また、本手法でCO₂が極めて安定して保持されることが示せば、従来は隔離サイトの対象外とされていたキャップロックの無い帯水層でもCO₂地中隔離を実施できる可能性を有している。

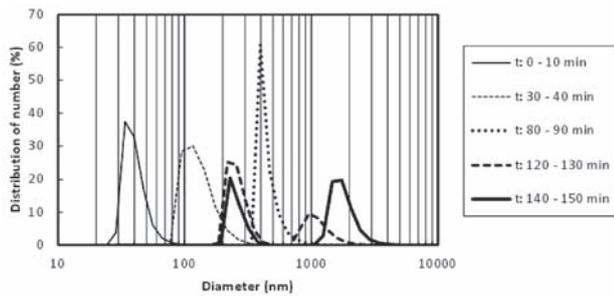


Fig. 10 Time variation of CO₂ diameter distribution

6.3 ナノスケールCO₂の生成

実際の帯水層内と同様の温度・圧力条件下において、ナノスケールCO₂液滴の生成を試みた。図9に示すように、微粒化装置と可視化窓を有した高压流路を用い、体積比1:1の割合で注入した水とCO₂を循環させることで、CO₂をナノスケールまで微粒化する。なお、微粒化を促進するため、水中に予め1 vol%の界面活性剤を添加する。循環を停止した後、動的光散乱法を用いて、CO₂液滴の粒径分布を計測した。

実験の結果、図10のような粒径分布が得られ、ナノスケールCO₂液滴を生成できることが示された。粒径分布は時間と共に右側へとシフトしており、液滴の合一によって粒径が増加することも分かった。ただし、実際には帯水層の多孔質中に圧入されるため、液滴径の増加は空隙内で阻止され、最終的には毛管力によって安定して保持されると考えられる。なお、地上から帯水層まで圧入する際にナノスケールCO₂液滴の粒径が維持されなければならないが、圧入に要する時間は最大でも約20 minと推算されるため、図10が示す粒径成長速度と比較しても、帯水層へのナノスケールCO₂液滴の注入は十分可能である。

6.4 多孔質内におけるナノスケールCO₂液滴

帯水層を模擬した多孔質構造にナノスケールCO₂を圧入し、マイクロフォーカスX線CTを用いてその挙動を可視化した。図11は多孔質内のミクروسケールのCO₂のみを抽出した三次元分布である。ナノスケールCO₂を圧入した直後はCO₂の粒径がX線CTの空間分解能(20 μm)以下であるため、ミクروسケールのCO₂としては検出されていない。一方、3日後にはCO₂がミクروسケールまで成長している様子が捉えられた。しかし6日後のCO₂分布はほとんど変化しておらず、空隙内でCO₂の粒径成長が抑えられると共に、毛管力によって安定してミクروسケールのCO₂液滴が保持されていることが分かる。すなわち、浮力に伴う地表へのCO₂漏洩リスクを大幅に低減し、社会受容性の高いCO₂地中隔離が実現できる可能性を示している。

7. おわりに

本稿ではCCSの特徴について示し、ごく一部ではある

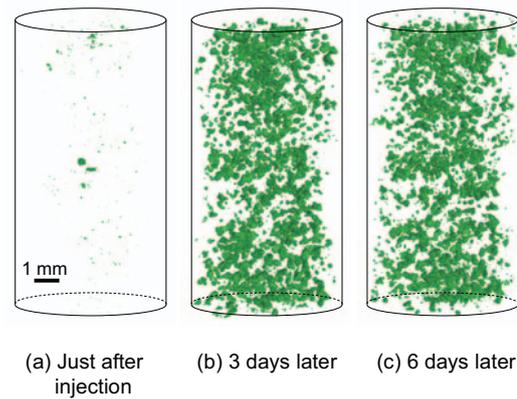


Fig. 11 3D reconstruction of CO₂ distributions in a porous media over time (spatial resolution: 20 μm).

が近年の国内外のCCSの動向と今後の課題について述べた。CCSの今後の展開は技術進歩だけでなく国際情勢に依存するところも大きく、本稿で紹介したデータや政策が短期間のうちに過去のものになってしまう可能性がある。CCSの中長期の動向を予測するには、本稿は極めて限定的な内容で不十分な記述ではあるが、CCSが高いCO₂削減ポテンシャルを有すること、低コスト化を実現して社会受容性を得られるか否かがCCSの成否と直結していることは、本質的に変わらないと考えられる。詳細かつ最新の動向がまとめられた文献が多数ある中で、本稿が今後のCCSの動向を読み解く際のの一助となれば幸いである。

8. 引用文献

- (1) World Energy Outlook 2011, (2011), p. 76, International Energy Agency.
- (2) World Energy Outlook 2012, (2012), p. 56, International Energy Agency.
- (3) Torp, T. A., and Gale, J., "Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects", *Energy*, Vol. 29 No. 9-10 (2004), pp. 1361-1369.
- (4) 2012年度(平成24年度)の温室効果ガス排出量(確定値)について, (2014), pp. 2-3, 国立環境研究所.
- (5) 今村栄一, 長野浩司, "日本の発電技術のライフサイクルCO₂排出量評価-2009年に得られたデータを用いた再推計-", 電力中央研究所報告, Y09027, (2010), p. 9, 財団法人電力中央研究所.
- (6) Abellera, C., and Short, C., "The cost of CCS and other low-carbon technologies", *Issues brief 2011, No.2* (2011), p. 8, Global CCS Institute.
- (7) *Accelerating Carbon Capture and Storage Implementation in Alberta*, (2009), p. 39, Alberta Carbon Capture and Storage Development Council.
- (8) 技術戦略マップ2010 新エネルギー・産業技術開発の現状と将来, (2010), p. 6, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構.
- (9) 須田俊之, 山田俊彦, "CO₂回収型石炭利用技術", *日本ガスタービン学会誌*, Vol. 38, No. 5 (2010), pp. 321-

- 328.
- (10) 岡部博, “CO₂攻法による増進回収とCO₂地中貯留への展望-JNOC-JOGMECの事例-”, *Journal of MMIJ*, Vol. 124, No. 12 (2008), pp. 681-693.
- (11) Devine-Wright, P., “Rethinking NIMBYism: The role of place attachment and place identity in explaining place-protective action”, *Journal of Community & Applied Social Psychology*, Vol. 19-6 (2009), pp. 426-441.
- (12) The global status of CCS: 2013, (2013), p. 26, Global CCS Institute.
- (13) The global status of CCS: 2013, (2013), p. 52, Global CCS Institute.
- (14) The global status of CCS: February 2014, (2014), p. 12, Global CCS Institute.
- (15) CCS ready policy and regulations -The state of play, (2012), p. 8, Global CCS Institute.
- (16) 木村秀夫, 井上昌和, 西村英彦, 藤本喜敏, 本多正人, “石炭焼き火力から環境に配慮した最新F形ガスタービンコンバインドプラントへのリプレース-東北電力(株)仙台火力発電所第4号機-”, *三菱重工技報*, Vol.48, No. 1 (2011), pp. 6-10.
- (17) 薛自求, 松岡俊文, “長岡プロジェクトからみた二酸化炭素地中貯留技術の現状と課題”, *地学雑誌*, Vol. 117, No. 4 (2008), pp. 734-752.
- (18) 阿部正憲, “苫小牧におけるCCS大規模実証試験”, *日本エネルギー学会誌*, Vol. 92 (2013), pp. 266-273.
- (19) Tanase, D., Sasaki, T., Yoshii, T., Motohashi, S., Sawada, Y., Aramaki, S., Yamanouchi, Y., Tanaka, T., Ohkawa, S., Inowaki, R., “Tomakomai CCS Demonstaration Project in Japan”, *Energy Procedia*, Vol. 37 (2013), pp. 6571-6578.
- (20) Uemura, S., Matsui, Y., Noda, A., Tsushima, S., Hirai, S., “Nanosized CO₂ Droplets Injection for Stable Geological Storage”, *Energy Procedia*, Vol. 37 (2013), pp. 5596-5600.

特集：石炭火力発電

低品位炭利用技術

山内 康弘*¹
YAMAUCHI Yasuhiro在間 信之*¹
ZAIMA Nobuyuki角野 慎治*¹
KAKUNO Shinji

キーワード：低品位炭，原動機，ボイラ，改質炭，化学製品

Low Rank Coal, Prime Mover, Boiler, Refinery Coal, Chemical Product

1. 緒言

我が国においては、供給国に限られ原油と価格が連動する天然ガスと比較して、地域偏在性が低く、かつ、価格が安定した石炭は、今後とも重要なエネルギー源であるといえる。しかし、これまで広く使用されている一般炭は、資源量が減少してきており、また、産炭国における石炭需要の拡大により、安定的な供給が難しくなっている。このような現状の下、埋蔵量が豊富な低品位炭の利用拡大が必要となっている。

低品位炭の利用については、これまでも乾燥や改質技術の適用について種々の検討や実証試験等が実施されてきているが、製品の付加価値が低く事業採算をとるのが難しい状況にある。また、付加価値の高い水素、合成天然ガス（SNG; Synthesis Natural Gas）、尿素、メタノール等の製品の製造についても多くの検討がなされ、事業化の可能性も確認されてきているが、これらの製品は既存製品に対して十分な競争力のある価格までコストダウンができず事業化に至っていないのが現状である。

本解説では、低品位炭利用技術が実用化に至らない原因を、技術開発とビジネスモデルの観点から調査分析した内容を報告する⁽¹⁾。

2. 低品位炭の利用技術

2.1 低品位炭の定義と資源量

ここでは、低品位炭の定義として、産業分野において商業ベースで利用されていない石炭、または国際商品になっていない石炭を指す。その定義は国によって異なり統一した基準はないが、一般的には発熱量を目安に、亜瀝青炭と褐炭が含まれる。表1に各機関、国における低品位炭の定義を示す。

各国における、石炭の資源量を表2に示す。世界の石炭資源の内、亜瀝青炭の資源量は米国、ロシア、中国、豪州が多いが、褐炭は、ドイツ、豪州、米国が大きな資源量を持つ。亜瀝青炭と褐炭を合わせた低品位炭は、世

Table 1 Definition of low rank coal

| | |
|-----------|--|
| IEA | <ul style="list-style-type: none"> ■ General term of Lignite and Sub-bituminous coal ■ Heat Value is under 23.9MJ/kg(Dry Mineral Matter Free), Volatile Matter over 31%(Dry Mineral Matter Free) ■ In eleven countries (Japan, Australia, USA etc.), Sub-bituminous coal isn't included in low rank coal. |
| ASME | Heat Values is under 2.44MJ/kg |
| Indonesia | Medium (21.4~25.6MJ/kg) and Low (under 25.6MJ/kg) by national standard correspond |
| China | Under 24MJ/kg |

Table 2 Amounts of resource of Coal in the world⁽²⁾

(Unit Million tons)

| No | Country | Bituminous and Anthracite Coal | Subbituminous Coal | Lignite | Total | Ratio % |
|----|------------------------|--------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|
| 1 | U.S. | 108,501 | 98,618 | 30,176 | 237,295 | 27.6 |
| 2 | Russia | 49,088 | 97,472 | 10,450 | 157,010 | 18.2 |
| 3 | China | 62,200 | 33,700 | 18,600 | 114,500 | 13.3 |
| 4 | Australia | 37,100 | 2,100 | 37,200 | 76,400 | 8.9 |
| 5 | India | 56,100 | | 4,500 | 60,600 | 7.0 |
| 6 | Germany | 99 | | 40,600 | 40,699 | 4.7 |
| 7 | Ukraine | 15,351 | 16,577 | 1,945 | 33,873 | 3.9 |
| 8 | Kazakhstan | 21,500 | | 12,100 | 33,600 | 3.9 |
| 9 | South Africa | 30,156 | | | 30,156 | 3.5 |
| 10 | Serbia | 9 | 361 | 13,400 | 13,770 | 1.6 |
| 11 | Colombia | 6,366 | 380 | | 6,746 | 0.8 |
| 12 | Canada | 3,474 | 872 | 2,236 | 6,582 | 0.8 |
| 13 | Poland | 4,338 | | 1,371 | 5,709 | 0.7 |
| 14 | Indonesia | 1,520 | 2,904 | 1,105 | 5,529 | 0.6 |
| 15 | Brazil | | 4,559 | | 4,559 | 0.5 |
| 16 | Greek | | | 3,020 | 3,020 | 0.4 |
| 17 | Bosnia and Herzegovina | 484 | | 2,369 | 2,853 | 0.3 |
| 18 | Mongol | 1,170 | | 1,350 | 2,520 | 0.3 |
| 19 | Bulgaria | 2 | 190 | 2,174 | 2,366 | 0.3 |
| 20 | Turkey | 529 | | 1,814 | 2,343 | 0.3 |
| 21 | Others | 6,775 | 3,056 | 10,977 | 20,808 | 2.4 |
| | World total | 404,762 | 260,789 | 195,387 | 860,938 | 100.0 |

界石炭資源量の55%を占めている。また、瀝青炭と無煙炭の可採年数は75年、亜瀝青炭と褐炭の可採年数は188年とされており、可採年数の長い低品位炭を優先的に利用するのは資源の確保の意味で有益である。

2.2 低品位炭利用技術開発

低品位炭利用技術を分類すると、前処理（選炭、乾燥、改質、流体化）、燃焼、ガス化、液化に分類できる。日本が取り組んできた技術開発のうち、パイロットプラントから商用化プラントにいたる段階の主なプロジェクトを表3に示す。選炭、乾燥などの前処理技術、直接燃焼

原稿受付 2014年5月16日

* 1 (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
〒212-8554 川崎市幸区大宮町1310 ミューザ川崎
セントラルタワー 19F

Table 3 Technology developments of low rank coal

| Technology Field | Pre-Treatment | | | | Combustion (Power Generation) | | Coke |
|------------------------|---|---|---|--|-------------------------------|--|--|
| Name of Technology | Coal Washery | Drying | Upgrading | CWM | Pulverized Combustion (PC) | Fluidized Bed Combustion | |
| Example | | STD | UBC | JCF | PC | CFBC | Hypercoal |
| Leading Company | NAGATA ENGEENRING Co. | TSUKISHIMA KIKAI | KOBELCO | JCG Corp. | RWE Corp. | Foster Wheeler | KOBELCO |
| Development Status | Commercialization | Commercialization | Finished Pilot Plant | Pilot Plant | Commercialization | Commercialization | Basic Research |
| Adapted Coal Class | High Ash Coal | Lignite | High moisture Lignite | Lignite and Subbituminous Coal | Lignite | Lignite | Lignite |
| Final Products and Use | Low Ash Coal Low Sulfur Coal | Briquet Pre Treatment for Combustion and Gasification | Briquet Substitute coal Fuel for Power Generation | Fuel for Industrial Boiler (Substitute of Heavy Oil) | Electricity | Electricity | Binder for Coke |
| Main Task | Scale up | High Energy Efficiency | Process Simplification Coast down | Coast down | Energy Saving Coast down | Coast down | Process Simplification |
| Trend of Technology | Dry Washery High Yield Using of Waste | Energy Saving Technology | Applied to USC Boiler | Apply Hot Water Treatment to CWM | High Efficiency by pre-Drying | Scale-up (300MWclass) Flexibility of fuel | Focusing to Solvent Extraction Process |

| Technology Field | Coal Gasification | | | Coal Liquefaction | | | |
|------------------------|---------------------------------|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|---|------------------------|
| Name of Technology | Fixed Bed | Fluidized Bed | Entrain Bed | Direct | | | Indirect |
| Example | | TIGAR | | BCL | NEDOL | Exxon Donor Solvent (EDS) | SASOL |
| Leading Company | Lurgi, SASOL | IHI | MHI | NBCL/BCLV | NCOAL | Exxon Research JCLD | SASOL |
| Development Status | Commercialization | Pilot Plant | Commercialization | Pilot Plant (50t/d) | Pilot Plant (150t/d) | Pilot Plant (250t/d) | Commercialization |
| Adapted Coal Class | Lignite and Subbituminous Coal | | | Lignite and Subbituminous Coal | Bituminous and Subbituminous Coal | Lignite and Subbituminous Coal | Subbituminous Coal |
| Final Products and Use | FT Synthesis Oil SNG | Chemical Products | IGCC,SNG, Chemical Products | Hydrogenate Middle or Heavy Oil and Residue Oil | Middle or Heavy Oil | Hydrogenate Middle or Heavy Oil and Residue Oil | FT Synthesis Oil |
| Main Task | Scale up | Coast down | Coast down | Coast down Low GHG | Coast down Low GHG | Coast down Low GHG | High Energy Efficiency |
| Trend of Technology | Large Capacity High Pressure | Diversification of raw materials (Co-firing of Biomass) | Large Capacity High Efficiency | — | — | — | Reduction of GHG |

技術，コークス化，石炭ガス化，石炭液化の各技術が開発されてきており，課題は残されているものの幾つかの技術が商用レベルにまで至っている。

2.3 代表的な低品位炭利用技術

2.3.1 発電技術

低品位炭の発電技術について以下に述べる。

(1)褐炭焼き微粉炭 (PC : Pulverized Combustion) ボイラ
 褐炭は灰融点が高い場合が多く，図1に示すようにスラギング対策でボイラ熱負荷を下げるため，瀝青炭や重瀝青炭を用いるボイラに比して容積を大きく設計する必要がある。図中のLigniteとBrawn Coalはいずれも褐炭のことであり，LigniteはASMEの名称で米国で用いられ，Brawn CoalはISOの名称で，欧州，豪州で用いられる。米国产の褐炭は発熱量が高くボイラ容積はやや小さい。

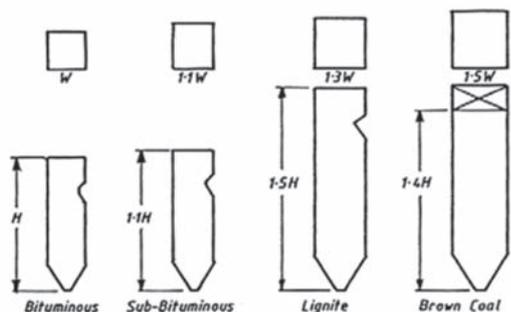


Fig. 1 The change of boiler volume for coal kinds⁽³⁾

褐炭焼き微粉炭燃焼技術は1930年代ドイツで実用化され，その後豪州にも導入された。代表的なドイツRWE社の例を図2に示す。水分の多い褐炭をボイラの上部燃焼ガスで乾燥し粉碎する，フラッシュミル（あるいはピーターミル）で微粉化してバーナに送る構造となっている。

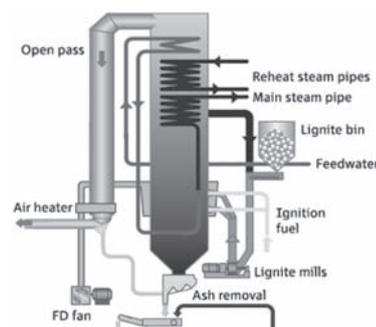
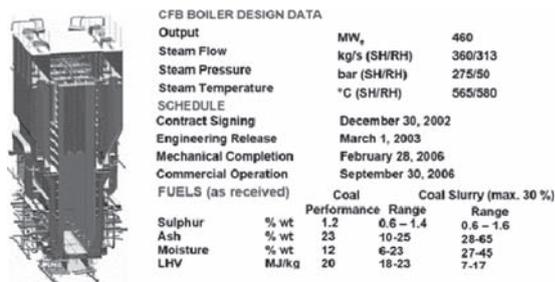


Fig. 2 The outline of lignite firing boiler⁽⁴⁾

(2)循環流動層ボイラ (CFBC : Circulation Fluidized Bed Combustion)

CFBCは，水分の多い褐炭や高灰分の石炭燃焼に適した燃焼方法である。従来は小型のものが多かったが，近年図3に示すような400MWの大型循環流動層ボイラが増加しており，800MWの計画や超臨界圧の採用も検討されている。

Fig. 3 The design data of large CFB^{(5),(6)}

(3)石炭ガス化複合発電 (IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle)

IGCCは、灰融点が高い褐炭のガス化には向いているが、水分が多すぎると灰の溶融排出に必要な1300℃～1500℃の温度が維持できなくなるため、50%以上の水分を含む褐炭は乾燥前処理が必要となる。

2.3.2 前処理技術

低品位炭は、高灰分、高水分であることが多いため前処理が必要となる場合が多く、これには灰分を除去する選炭、乾燥、乾燥と共に自然燃焼を防ぐための改質、輸送性向上のため水スラリー化するものが含まれる。

乾燥については、これまでに多くの技術開発が行われてきており、この中には我が国でも既に製品化されているものもある。チューブドライヤーは、石炭やバイオマス等の乾燥用として商業規模で世界的に採用されており、日本でも数社が開発・商品化している。これには、石炭がチューブ内を流れ、蒸気が本体側を流れるCoal in Tube Dryerと、その逆にチューブ内を蒸気が流れ石炭が本体側を流れるSteam Tube Dryer (STD) の2つの種類がある。STDは月島機械が図4に示す装置を商品化している。

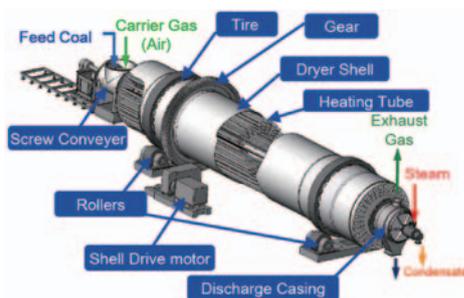


Fig. 4 The structure of Tsukishima's STD

また、流動層を用いるものや、後述する油中で脱水するUBC (Up graded Brown Coal) 技術も開発されている。

脱灰技術としては、石炭と親和性の高い溶剤で石炭を抽出し、不要な灰分を沈降除去して灰分の少ない石炭を作るハイパーコールがある⁽⁷⁾。

褐炭を輸送が容易なCWM (Coal Water Slurry) にして利用する技術では、日揮が技術開発を行っているJCF

(JGC Coal Fuel) 技術がある。使用する褐炭の水分が50%～60%であり、CWMの水分濃度40%に脱水するため、スラリー化の過程で脱水する技術を用いている⁽⁸⁾。本技術はNEDOとJOGMECの実証事業として、図5に示すようにインドネシアで750kg/h (乾炭基準) の実証プラントを運転している。⁽⁸⁾



Fig. 5 The demonstration plant of CWM

2.3.3 化学製品の合成

褐炭のガス化は水分が多いためガス化に必要な温度まで上げるためのエネルギー消費が、瀝青炭に比べ多く、そのままではそれに見合う熱量分部分燃焼の石炭量が増加したり、搬送が困難になることがある。このため、ガス化炉に入れる前に乾燥を行う必要がある。高灰分炭の利用の観点からは、灰を溶融させる噴流床 (噴流層とも言う) ガス化技術はガス化炉壁面への灰の付着、堆積、流化に考慮する必要がある。このため灰を溶かさない流動層ガス化や固定層ガス化技術が有利と考えられる。これらの技術でガス化された石炭ガスを原料として化学製品への転換 (SNG, アンモニア, 水素, メタノール等) が従来から検討されてきた。

これまで実施されてきた低品位炭ガス化技術としては、固定層ガス化方式の米国Dakota Gas Co.がその代表例である。ノースダコタ州の褐炭をLurgi固定層炉でガス化し、合成天然ガス (SNG) を製造した。ノースダコタ褐炭の水分は36.8%で、褐炭としては比較的少なく、また、固定層ガス化炉は水分の多い石炭でも適用可能なので乾燥せず供給可能であったものと思われる。現在中国で計画されているSNG合成設備もこの形式を採用している。

流動層方式では、High Temperature Winker-HTW炉による試験がドイツで実施された。石炭はライン地方の褐炭で水分が50～60%である。流動層ガス化も水分の多い石炭をガス化できる方法であるが、この試験では、褐炭を乾燥させ水分量18%または25%にして供給している。

噴流床ガス化ではShell炉とE-Gas炉の実績がある。噴流床では1300℃以上に加熱して灰を溶融させるので、石炭中の水分が少ないほうが望ましい。Shell炉で用いた石炭はテキサス褐炭で、水分31%でガス化炉には13%まで乾燥して供給されている。

我が国の石炭ガス化炉は燃焼炉とガス化炉を分けた、二段噴流床方式である。三菱重工 (現MHPS) が勿来で

IGCC実証試験を2013年3月に終了し、同4月から商用運転に入っている。しかし、国内に市場が無い化学合成用ガス化炉では中国の実績や、欧米の事業活動に比べれば遅れている。しかし、これら他国の先行技術は、長時間運転信頼性、多炭種対応、コスト、大容量化等で必ずしも完成されておらず、改善の余地がある。特に褐炭のように水分の多い石炭には、二段噴流床方式は石炭を高酸素比と低酸素比の二つの反応条件でガス化するので、石炭性状に合わせ酸素量を最小化できるため、先行するガス化炉にくらべガス化効率が高くできる。このため褐炭の乾燥度合を低くしてもガス化できる可能性があり、設備費の低減が可能となると予想される。

MHPSがインドネシアのスマトラ島で検討している褐炭からSNGを作るプロジェクトを図6に示す。このプロジェクトでは、排出されるCO₂を枯渇油田のEOR (Enhanced Oil Recovery) に用いることを検討している。スマトラ島には褐炭炭鉱近くにジャワ島までの天然ガスパイプラインがあり、製造したSNGを消費地のジャカルタ近郊まで輸送するインフラが整っている。

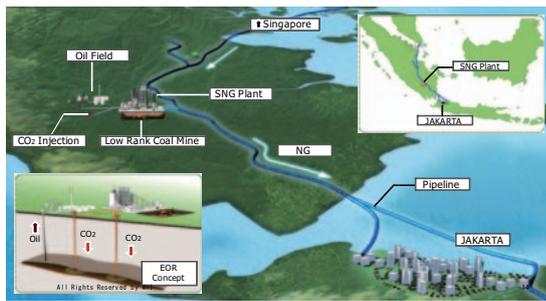


Fig. 6 Concept design of Indonesia SNG project⁽⁹⁾

川崎重工は図7に示すように豪州ビクトリア州褐炭をガス化して水素を製造し、液化水素タンカーで日本に輸送して、燃料電池車の燃料や発電用燃料として用いるプロジェクトを提案している。水素製造時に発生したCO₂は豪州のCCSプロジェクトのCarbon Netで開発中の帯水層に貯留する計画で、褐炭からCO₂を発生させることなく水素の供給が可能となる計画である。

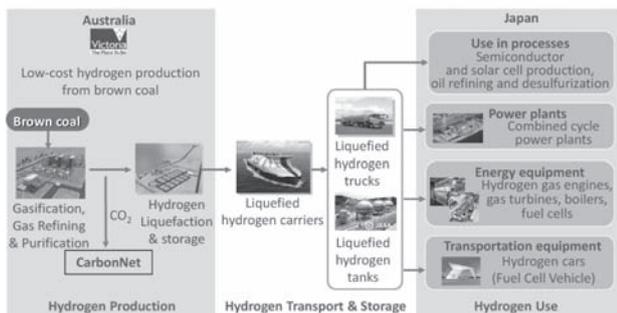


Fig. 7 Concept design of Hydrogen chain project⁽¹⁰⁾

2.3.4 液化技術

褐炭を用いた液化技術はBCL (Brown Coal Liquefaction) 法が豪州で実施された。このプロセスは1) 低品位炭に含まれる水分を効率的に除去するためのスラリー脱水工程、2) 高活性リモナイト触媒を用いた液化工程、3) 液化油中のヘテロ化合物(含硫黄化合物、含窒素化合物等)を取り除いて高品質のガソリン・軽油留分等を得るための水素化工程及び4) 石炭中の灰分や添加した触媒を系外へ排出するための溶剤脱灰工程の4つの工程で構成される。日豪政府間協力のもとで実施され、パイロットプラントの運転を通して液化商業プラント建設に必要なスケールアップデータの取得やプラント操業のノウハウを習得した。

2.4 各国の低品位炭利用ニーズと市場規模

2.4.1 産炭国における技術ニーズ

低品位炭は熱量当たりの輸送コストが高いため、低品位炭利用技術は産炭国の炭鉱山元で行われることが経済的であると考えられる。製造した製品をすべて輸出する場合もあるが、国内に市場があれば生産も安定し、かつ、今後増加することが予想されている産炭国のエネルギー需要にも貢献が可能であり、より事業化の可能性は高くなる。

そこで、産炭国での今後開発が望まれる技術について整理し表4に示した。“ニーズ”としては表に示す技術を考え、国別にニーズの強さを定性的に検討した。

Table 4 Demands for LRC using technology in each country

| Technology | Australia | China | Indonesia | Vietnam | Mongolia | India | Russia | Germany | Poland | USA | Colombia | South Africa | Mozambique |
|-------------------|-----------|--------|-----------|---------|----------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|--------------|------------|
| Coal Washery | | Middle | | Middle | High | High | | | | | | | High |
| Drying | High | Middle | High | | Middle | | | High | High | | | | |
| Upgrading | High | Middle | Middle | | | | | | | | | | Middle |
| CWM | | Middle | Middle | | | | | | | | | | |
| PC | Middle | High | High | | High | High | Middle | Middle | High | Middle | Middle | Middle | |
| CFB | | High | Middle | | Low | High | | High | High | Middle | | | |
| IGCC | | Middle | Middle | | | Middle | | Middle | Middle | Middle | | | |
| Chemical products | | High | High | Middle | | Low | | Middle | Middle | Middle | | | High |
| Liquefaction | | High | Low | | Low | Low | | | | | | | High |
| Coke | | High | High | | Middle | High | Middle | | High | | | | |

2.4.2 期待される市場規模の推測

低品位炭の活用が当該低品位炭利用技術により最も進んだ場合に、2030年に各国で消費する年間低品位炭量を推定した。各国内の潜在需要のすべてに当該利用技術が採用される前提で潜在市場規模を推算した結果を図8に示す。少ないものでも5億トン/年、多いもので20億トン/年の潜在市場規模が期待される。

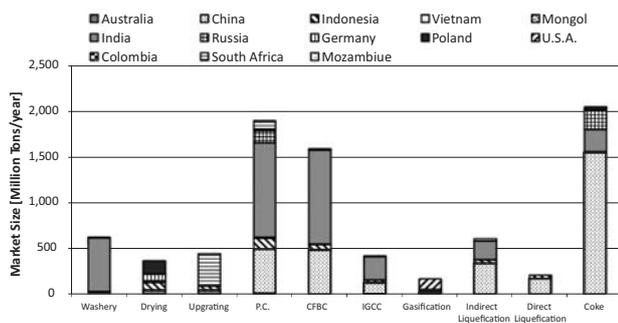


Fig. 8 Potential Market of low rank coal

3. 低品位炭技術開発の課題

3.1 過去の技術開発の振り返り

前述のように大きな期待がある低品位炭について、我が国が行ってきた利用技術の開発に関する主なプロジェクトとしては、インドネシアでの褐炭改質プロジェクトと、豪州ビクトリア州における褐炭液化プロジェクトの二つが挙げられる。以下にその概要について述べる。

3.1.1 インドネシア褐炭改質（UBCプロジェクト）

2006年から2010年までの4年半の間、経済産業省予算により補助を受け、石炭エネルギーセンターと神戸製鋼がインドネシア政府の協力を得て実施したプロジェクトである。

本技術は褐炭を油スラリー化して加熱し、褐炭中の水分を蒸発除去することで高発熱量化する技術であり、その過程で効率的な脱水と、油中に含まれるアスファルト成分の褐炭の細孔への吸着により表面積が小さくなるため自然発熱が抑制される。当該技術の適用により、水分60%の市場価値の低い褐炭を瀝青炭と同等の発熱量を持つ改質炭に変え、また、輸送・貯炭時の自然加熱を防ぐことが可能となり、国際市場への展開を可能とすることができる。

インドネシアカリマンタン島で日産600トンの大規模実証試験を2008年11月から2011年6月まで実施した結果、水分35～60%の褐炭を原料に発熱量25MJ/kg（瀝青炭26MJ/kg）の改質炭を商業生産するめどが得られた。

技術開発の課題においては、いくつかの困難にも直面したが、最終的には実現の可能性が確認され、実用化及び事業化に大きく前進した技術であると言える。しかし、発熱量12.6MJ/kgの褐炭を原料に技術開発を開始したが、その後この発熱量の褐炭に買い手がつく状況になったこと、プロセスが複雑で他の乾燥装置に比べ設備費が高いというインドネシア側の評価であったこと、インフラがない未開発の内陸部炭鉱を選択すると輸送インフラの整備コストが高くなる点が、商用プラントの投資決定につながらなかった大きな要因であったようである。

3.1.2 豪州褐炭液化（BCLプロジェクト）

このプロジェクトは、1970年代の石油危機を契機に

日本への石油供給の代替手段として、ビクトリア州 Latrobe Valleyに豊富に賦存する褐炭資源を液化し活用する、日豪共同国家プロジェクトとして行われた。NEDOから委託された運営主体は、神戸製鋼、三菱化成（現三菱化学）、日商岩井（現双日）、出光興産、アジア石油（現コスモ石油）が合弁で現地法人として設立した日本褐炭液化株式会社（BCLV: Brown Coal Liquefaction of Victoria Pty）で、1982年にはLatrobe ValleyのMorwellで50t/日（乾燥炭基準）のパイロットプラントが建設開始され、1990年に終了した。

当該パイロットプラントにおいては、技術開発の目標である液化油収率50%、連続運転時間1,000時間、脱灰特性（1,000ppm未満）、従来技術より経済的な油スラリー脱水技術などすべての目標を達成し、商用プラント（30,000ton（10万bbl）/日）の概念設計も行われた。その結果、液化油価格は約USD30/bbl～40/bblと試算されている。

この技術は結果的に商用化されていないが、その理由を現地関係者にヒアリングした結果、プロジェクト開始後に原油価格が暴落したことでBCLの経済性が成立しなくなったこと、豪州側協力企業にとって出資額が高額で資金調達ができなかったこと、ストライキによる建設費追加と、合成油のアップグレードプラントの追設が必要となったこと等があげられた。

日本側の関係者の見解では、BCLは原油価格がUSD40/bblで採算可能と試算し、また、原炭調達価格はAUD8～10/ton（乾燥炭基準）と仮定していたが、特に重量基準で7%の水素を添加するため、水素の製造コストが生産原価を押し上げていったとのことである。

3.2 低品位炭技術の実用化阻害要因の分析

前記の実証試験と3か国、22社及び団体へのヒアリング結果から、過去の技術開発の成果と課題を分析した。ヒアリング対象は、実証試験を実施したメーカーだけでなく、実証試験を受け入れた国の政府や、企業関係者、炭鉱会社、コンサルティング会社などの関係者を含み、メーカーとは異なる立場の意見も聴取した。聴取した結果から実用化を阻害したと思われる要因を以下に纏めた。

技術開発上の課題としては、実証試験が成功しても、コストが高く、商用機の販売ができないケースが大多数であった。特に、潜在的なユーザーが、投資を断念した理由として、コストが合わない点を挙げており、コスト目標の設定に課題があったことがわかる。

コスト高となった背景には、プロジェクトの選定時点で、性能優位性を重視し、商業性が成立するコスト水準に落とせるかの確認が不十分だったと考えられる。

販売交渉まで進めた技術についても、ユーザーがメーカーに運用まで求めたために、対応できなかったケースが確認された。また、商用機の販売交渉まで至らない技

術が多いため顕在化していないが、原料となる褐炭の調達計画が十分に計画されていないプロジェクトの場合には、特にインフラ整備の検討が十分行われていないケースが多い。また、多くのプロジェクトに共通した課題としては、①コスト削減の検討が不十分であること、②コスト目標の設定が甘かったこと、③メーカー単独の体制でユーザーの巻き込みが甘かったこと、の3点があると考えられる。コスト目標設定はメーカーが実施してきたが、市場価格を高めに見積もる傾向が見受けられた。また、実証試験もメーカーが単独で実施しているケースが多かった。本調査では、メーカー単独で実証試験を実施する体制が、以下の2つの問題を生んだと推測している。

一つは、技術開発の管理上、コスト目標の設定や進捗管理をメーカーが担ってしまうため、マネジメントが甘くなる問題である。もう一つが、ユーザーの巻き込みが不十分な点である。過去の技術開発プロジェクトでは、ユーザー企業との交渉を、技術実証開始後に行うケースが多かった。このため、ユーザー企業から追加実証試験の実施を依頼され、当該メーカー単独で対応できなかったケースや、ユーザー企業そのものを上手く見つけられないケースもあった。

3.3 技術開発管理上の課題と対策

低品位炭技術の実用化には、いまだ商品化されていない資源を商品化するため、炭鉱からユーザーまでのフルバリューチェーンを押さえたビジネスモデルが必要で、製品の製造原価は客観的な製品プライスに基づくものである必要があることがわかった。

目標設定から事後評価までを実質的にメーカーである実施者に委ねることにより生じた課題として、目標コスト設定が高い、事後評価でビジネス面の評価が不足する、市場調査の不徹底、相手国政府との政策的議論への不慣れがある。

この対策として以下があげられる。

- ・ 開発管理をするものが市場価格を評価し、開発実施者と協議しながら現実的な目標設定をする。
- ・ 開発実施者とは別に客観的な開発進捗評価を行う。
- ・ 市場調査を開発実施者とは別機関が客観的に行う。
- ・ 国が相手国政府との政策議論を行う

4. 低品位炭技術開発管理手法の改善

4.1 客観的な市場調査

市場調査、事業性評価に加えて、相手国の政策動向の把握や、相手国政府への政策的な働きかけ、インフラ整備の検討についても、これまで手薄である事例が多かった。政策的打ち込みやインフラ検討についても、メーカーの専門領域ではなく、第三者の協力を得られるスキームが必要である。

研究管理者の立場としても、実施者とは異なる第三者に各種市場データを収集させるスキームを有している方

が良い。第三者に市場評価をさせる体制にした方が、より客観的、多面的な情報が集まるため、研究開発マネジメントの実効性は高まると思われる。

4.2 開発管理の為のチェック項目

(1)有望技術の選択 低品位炭の利用技術について、商用化を念頭に置くと、必ずしも技術に新規性がある必要性はなく、安価であり、かつ、実証された技術であることの方が重要である。従って、実証試験を実施する技術の選択にあたっては、商用化を見据え、技術の新規性に加え、コストダウンの可能性、安定した運用が可能であるかなど、技術の成熟度合も含めた広い視点で判断する必要がある。

(2)技術の経済性 過去実施された実証プロジェクトで、経済性が最大の課題になっており、実証試験の初期の段階から定量的に、かつ客観的にコスト目標を設定することが不可欠である。コスト目標の設定には、技術の付加価値を定量化することが必要である。ここでは、付加価値を最終製品価格と原料の低品位炭価格の差分と定義する。この付加価値より製造コストが下回り事業利益を生み出す必要がある。

最終製品価格は、市場により異なり、研究管理側が価格の実績と見通しを把握する必要がある。各開発実施者が想定する価格が、過去の製品価格実績よりも過度に高く見積もっていないか、仮に値上がりを見込んでいるならば、十分な根拠があるかを検証する。なお、主要市場における最終製品価格には価格形成メカニズムがあるため、一定の合理性を持って将来価格の幅は予想可能である。

(3)事業展開国の選択 事業展開先国を適切に選択することも重要であり、最終製品の市場性、CO₂課税、CCS-EORアプリケーション市場、外貨への開放度透明性について調査して事業展開国を選択する。

(4)ビジネスモデルの事前検討 開発の前に、市場調査を徹底する必要がある。市場調査では、最終製品の市場規模、現地での有力なユーザー企業の特長、技術の販売にあたり求められるバリューチェーン、マイニングライセンスの取得などにつき検討する。このための事前調査予算を設けることで、あらかじめ検討を深めてから実証試験に移るのが、成功の確度を上げると考えられる。

6. 結言

本解説では、低品位炭の技術開発を技術及び技術開発管理の2つの観点から整理した。技術の観点では、技術開発状況を整理し、市場規模を検討した。研究開発管理の観点では、過去の低品位炭技術の研究開発プロジェクトを振り返り、商用化が実現しなかった要因、研究管理上の問題点を明らかにした。

低品位炭の研究管理のためのポイントは、まず技術開発プロジェクトの選定にあたり、技術が生み出す付加価値

値が高く、商業化が近いとみられる技術を開発対象に選定し、かつ商業化のためのコスト低減も技術開発の対象として捉えることであると思われる。また、このためには、コスト目標を定量的、かつ合理的に定め、管理していく仕組みが必要である。

この結果は、商用化のための体制やビジネスモデルの構築が十分でなかった過去のプロジェクトの教訓であり、今後の研究開発プロジェクトは、組成する段階から、ビジネスモデルの検討を深めていくスキームの整備していく必要がある。

参考文献

- (1) 平成24年度成果報告書「低品位炭利用促進事業に関する検討」, NEDO成果報告書, 平成25年3月
- (2) Survey of Energy Resource 2010 WEC
- (3) Allacice et, Al., Utilization of Low Rank Coals
- (4) Report, WTA Technology-A modern process for treating and drying lignite
- (5) Kettunen.A. et,Al., Lagisza 460MWe Supercritical CFB-Design,Start-up and Initial Operation Experience, 59th IEA FBC Meeting, Oct., 2009
- (6) Hotta.A., Psik.Rafal, Testiing and Simulation in Turow Unit 3 and the Application of the Results on the Lagisza 460 MWe OT FBC, Oct., 2003
- (7) 重久他, 劣質炭の改質による石炭資源適用力の拡大-UBCとHOCの開発状況と展望-, 化学工学, Vol.75, No. 9 (2011)
- (8) 丹下誓, JGC Coal Fuel-Energy Innovation Utilizing Low Rank Coal, クリーンコールデー石炭国際会議2012
- (9) Watanabe, EOR/CCS & Clean Coal Project in Asia, GCCSI, The Global Status of CCS 2013, Seoul, October 9-11
- (10) Yoshino, Feasibility Study of "CO₂ free hydrogen chain" utilizing Australian brown coal linked with CCS, WHEC 2012, Toronto, Canada , June 5th , 2012

特集：石炭火力発電

微粉炭火力のバイオマス高比率混焼

福島 仁*¹
FUKUSHIMA Hitoshi田村 雅人*¹
TAMURA Masato河西 英一*¹
KASAI Hidekazu上野俊一朗*²
UENO Shunichiro

キーワード：木質バイオマス、バイオマス混焼、微粉炭焚ボイラ、微粉炭機

Wood Biomass, Biomass Co-firing, Pulverized Coal Firing Boiler, Pulverizer

1. はじめに

温暖化ガスの排出削減をめざし、再生可能エネルギーである木質バイオマスの混焼が、多くの微粉炭焚火力発電所において実施されている。現状では石炭とバイオマスを混ぜて、石炭用の微粉砕機（ミル）に投入し微粉化してバーナに送り込み、石炭/バイオマスが混合した状態で燃焼しているケースが殆どである。石炭用ミルでは、繊維質である木質バイオマスの微粉砕が難しいため、微粉砕の面から、石炭に対する木質バイオマスの混合率に制約があり、バイオマスの混焼率は重量ベースで数%にとどまっている。高比率でバイオマスを混焼するには、バイオマス専用に工夫されたミルで単独粉砕し、専用バーナで燃焼することが必要となる。IHIではバイオマスの粉砕、燃焼など高比率混焼に関する技術開発を実施してきており、2011年度以降は環境省の委託研究として、既存の微粉炭ボイラ火力発電所でバイオマス混焼比率50%（出熱比ベース）を目指した技術検討を実施している。その検討の一部を含み高比率混焼のための留意点と、対応技術を紹介する。

2. 木質バイオマスの性状

バイオマスの一般性状を表1に示す。石炭に比べ発熱量は低く水分は高い（特にチップ）が、硫黄分、灰分は少なく、揮発分は高いので粒子の着火性、燃焼性は良く、燃料としては有利な点がある。国内の火力発電所で受け入れられているバイオマスの形状として、チップ、ペレットの2種がある。チップは木質バイオマスを切削し切片としたもので、水分40%程度、厚さ数mm、縦横最大100mm×50mm程度で、更に細かく切削した縦横5mm程度のものもある。ペレットは、ソーダストのよ

うな細粒を圧密したもので、径4～8mm、長さ100mm以下に成型されている。衝撃で壊れやすく粉化しやすいため、炭化して強度を上げたものもある。成型過程で水分が蒸発するので、ペレットの水分は5～10%程度と低くなる。バイオマスは発熱量が低く、石炭のかさ比重、約0.8ton/m³に比べ、0.3～0.6ton/m³と軽いので、発電所で扱う容積は石炭の倍以上になることにも留意が必要である。

Table 1 Properties of Wood Biomass

| | | 木質バイオマス | | 国内使用石炭 瀝青炭(例) |
|-------|--------------------|---------|--------------|------------------|
| | | チップ | ペレット | |
| 受入形状 | mm | ～50×100 | φ4-8×100 | ～25 |
| かさ比重 | ton/m ³ | ～0.3 | ～0.6 | ～0.8 |
| 低位発熱量 | J/g | ～8,000 | 2,500～17,000 | ～25,000 |
| 水分 | % | ～40 | ～10 | ～10 |
| 灰分 | % | ～2 | ～2 | ～15 |
| 硫黄分* | % | ～0.04 | ～0.04 | ～1 |
| 窒素分* | % | ～0.4 | ～0.4 | ～2 |
| 揮発分* | % | ～80 | ～80 | ～30 |

*無水ベース

Wood Chip



Wood Pellet



Fig. 1 Wood Biomass

3. 搬送貯蔵システム

微粉炭ボイラ発電所でのバイオマスの搬送貯蔵を検討するため、石炭搬送貯蔵システムを模した試験設備で、木質バイオマスのハンドリング試験を実施した。ペレットは石炭と同等の挙動を示し、石炭と同等の設備で扱いが可能であった。チップは、その形状から詰まりが発生しやすく、石炭設備とは異なる設備が必要であることが

原稿受付 2014年5月13日

*1 (株)IHI エネルギー・プラントセクター
〒135-8710 江東区豊洲3-1-1*2 (株)IHI 技術開発本部
〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1

確認された。チップの場合、例えば下に向け末広がりになった貯蔵容器や、容器底面から掻き出す排出装置など、固有の設備が必要である。ペレットは、衝撃により粉化しやすいので、コンベアの乗り継ぎ部や貯蔵容器には、集塵機や火災探知機、容器内部には可燃性ガスの検知器など、保安設備については石炭の場合以上に配慮する必要がある。

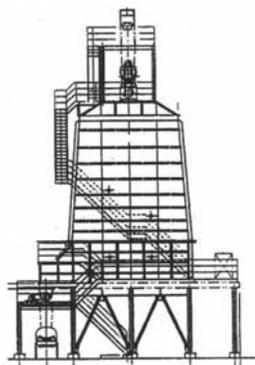


Fig. 2 Storage Tank for Wood Chips (Typical)

4. 粉砕システム

水平燃焼の微粉炭焚ボイラでは、火炉内で石炭を浮遊燃焼させるために、微粉炭機（ミル）で石炭を微粉砕する必要がある。近年の火力発電所では消費動力の少ない縦型ローラミルが設置されている。ミルの概要を図3に示す。石炭はミル上部から粉砕テーブル中心へ供給される。石炭は回転するテーブルの遠心力で外周方向へ広がり、テーブルとローラの間に噛み込まれ粉砕される。テーブル外周のエアポートから一次空気を吹き込み、粉

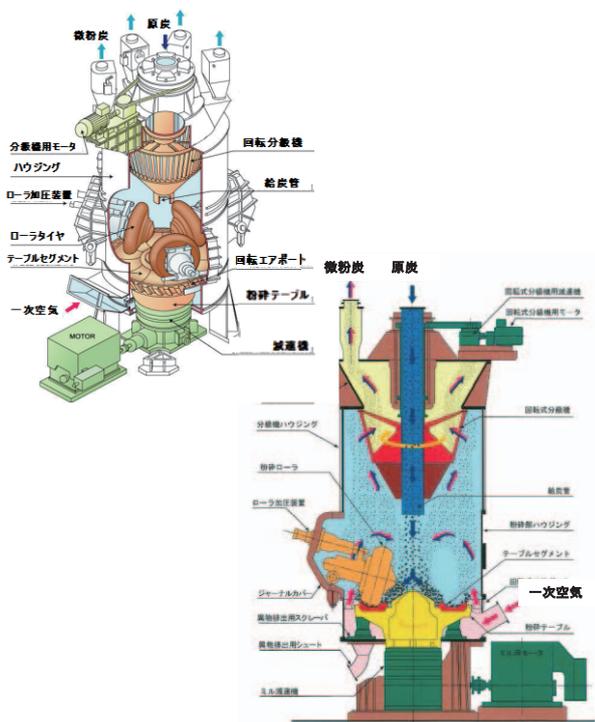


Fig. 3 Coal Pulverizer (Vertical Roller Mill)

砕された微粉を吹き上げ分級機で粗い粒子を分離し、微粉砕された粒子がバーナへ空気搬送される。このミルは大量処理に適し、既設設備との互換性など考慮すると、同じ形式のミルで、木質バイオマスの粉砕をすることが望ましい。

石炭では燃焼性確保のため、平均40～50μmまでの粉砕が必要であるが、木質バイオマスは、基礎燃焼試験の結果、1mm以下程度で石炭と同等の燃焼性となる。縦型ローラミルでこの程度の粉砕が可能か、また可能とするための改造内容を検討するため粉砕試験を実施した。試験の結果として、木質バイオマスをミル内で必要以上に粉砕することなく、出来るだけ早く粉砕粒子をミル外へ搬送することが、粉砕能力の確保に重要なことが確認された。ミル内に整流筒を設置してミル胴内流速を上げるなど、図4に示すような改造を行った結果、ペレットでは、石炭と同等の容量を処理することができた。チップはペレットに比べ長い繊維が入っていることや、水分が高いことからロールミルでの粉砕が難しいが、5mm程度に切削することで処理量は上がり、石炭の2割弱の容量は処理できることを確認した。

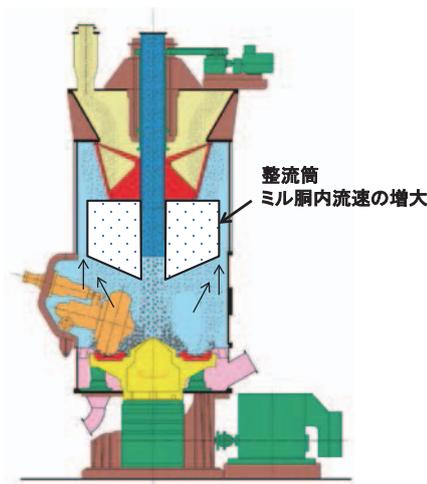


Fig. 4 Mill Modification for biomass pulverizing

チップについては、発電所での微粉砕の効率化について、ミルに投入する寸法や水分など、切削方法や乾燥方式を、その実施場所（出荷場所か、発電所か）も含め、経済性を考慮し検討してゆく必要がある。

また、ペレットでは動特性確認試験を実施し、1分間に3%程度の負荷変動速度で、ミル出口の燃料流量が追従できることを確認し、一般的な微粉炭焚火力発電所に要求される負荷変化に対応できることを検証した。

5. バーナシステム

システムとしては、同一のバーナに微粉炭とバイオマスを別々に噴射するようにしてバーナ前で燃料を切替えて、石炭、バイオマスをそれぞれ単独に専焼するシステムとするか、微粉炭専焼、バイオマス専焼のバーナを配

置して燃焼するシステムにするか、2つの方式が考えられる。図5に、それぞれのシステムを示すが、既設500MW級のボイラを想定し、半数のバーナでバイオマスを燃焼し50%混焼する場合を示す。前者では、石炭/バイオマス共用のバーナを新たに設置し、バイオマス用に改造したミルを新設する必要があるが、燃料の変更はバーナ前の燃料ラインの切り替えで済む。後者では既存の石炭焚バーナを流用してバイオマスを燃焼でき、既存のミルをバイオマス用に改造して流用できるが、石炭専焼が必要な場合は、バイオマス用に改造したミルを石炭用に戻す工事が必要となる。即ち、木質バイオマス混焼の運用の仕方に応じ、システムを選択することになる。

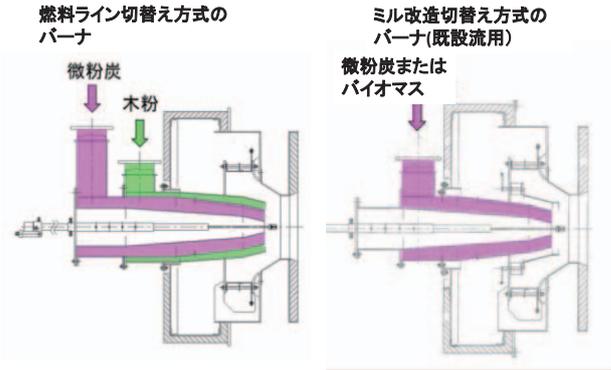
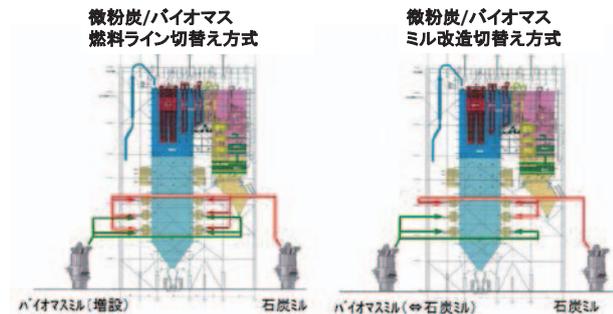


Fig. 6 Burner Proper



| | 燃料ライン切替え方式 | ミル改造切替え方式 |
|------------------|-----------------------|--------------------------------|
| ミル上部の燃料貯蔵容器 | ・バイオマス専用容器の新設が必要 | ・既設石炭容器を流用 |
| ミル | ・バイオマス専用ミルの新設が必要 | ・既設石炭用ミルを改造して流用 |
| バーナ | ・微粉炭/バイオマス共用バーナへ改造が必要 | ・既設微粉炭バーナを流用 |
| 石炭⇔バイオマス燃料変更時の対応 | ・バーナ前での燃料ラインの切替えのみ | ・ミルの改造工事が必要 ・貯蔵容器の燃料入れ替えが必要 |

Fig. 5 Burner System

図6に、それぞれのシステムに適用するバーナを示す。両方のバーナで木質バイオマスの燃焼試験を実施し、どちらも支障なく専焼できることを確認している。既設微粉炭バーナでのバイオマス燃焼試験の状況を図7に示すが、火元は安定し良好な火炎を維持した。

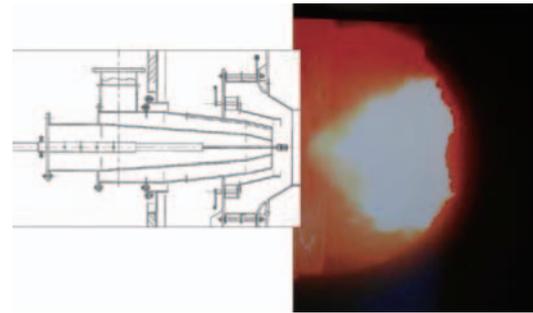


Fig. 7 Biomass Burner Combustion Test (Flame of biomass firing at burner outlet)

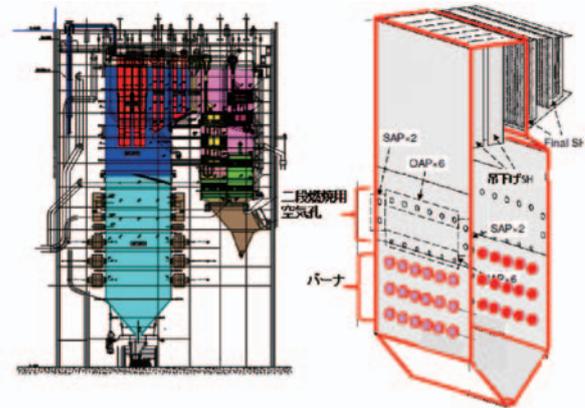


Fig. 8 Boiler Model for Computer Simulation

6. ボイラシステム

木質バイオマスと石炭の燃焼性の相違から、混焼時では火炉での取熱分布などが石炭専焼と変わることが予想される。また高比率混焼では、石炭、木質バイオマスをそれぞれ別々のバーナで燃焼し混焼するが、そのバーナ配置が火炉全体の取熱などに影響することも予想される。これらの影響を検討するため、バイオマスを50%混焼した場合のボイラ性能について、ラボでの燃焼試験や、前述の試験炉での燃焼試験データをもとに、電算シミュレーションを実施しボイラ性能を確認した。

シミュレーションは、図8に示す700MW級ボイラをモデルとした。バーナは火炉前壁に18本、後壁に18本配置されており、半数のバーナ18本でバイオマスを燃焼する計算を実施し、火炉の取熱変化、燃焼排ガスの温度分

布変化、O₂、CO₂等のガス成分の分布変化、などを検証した。

混焼時の石炭、バイオマスバーナからの揮発分の放出状況と、炉内のガス温度分布を図9に示す。燃料性状の相違による揮発分の放出量などの相違から燃焼パターンが変わり、石炭専焼に比べ混焼時の火炉の取熱は多少増加する傾向が認められた。

また、石炭バーナ、バイオマスバーナの配置の影響を検討した結果を図10に示す。石炭は揮発分が少なく、燃焼の完結が遅いため、石炭を上方で燃焼すると、下方で燃焼する場合に比べ火炉出口ガス温度は高くなる傾向がある。なお、これらの取熱変化、ガス温度変化は設備の許容範囲内であった。

図11は、混焼時に石炭バーナから発生するCOと、バ

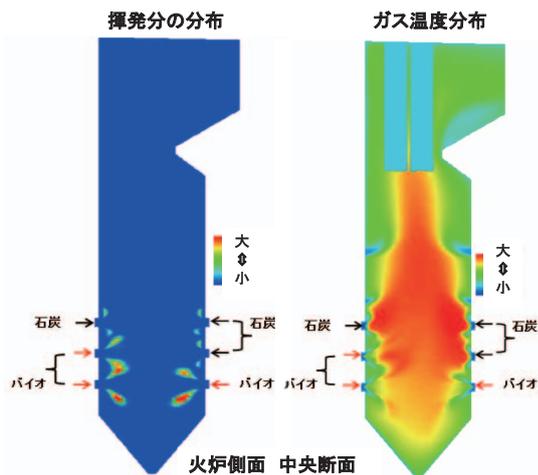


Fig. 9 Volatile Matter and Flue Gas Temperature in Furnace (Side View of Cross Section at Center)

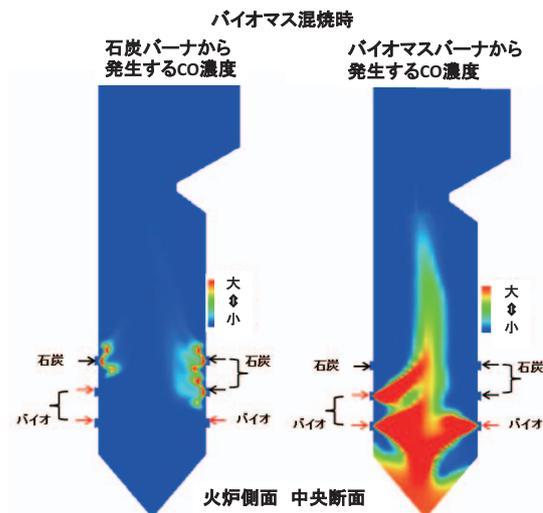


Fig.11 CO Content in Flue Gas at Biomass-Coal co-firing (Side View of Cross Section at Center)

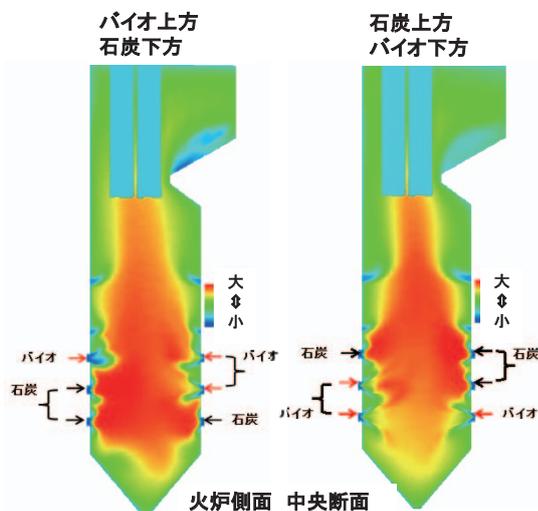


Fig.10 Flue Gas Temperature in Furnace (Side View of Cross Section at Center)

バイオマスバーナから発生するCOを分けて表示したもので、バイオマスは揮発分が多く、揮発した可燃ガスは空気と混合しにくく燃焼が不完全となりCOが残りやすい。従ってバイオマスバーナを下方に設置し、可燃ガスの炉内滞留時間を長くして燃焼を促進するようにした方が、CO濃度の低減からは有利と考えられるが、実用上は上段、下段どちらも可能と考える。

7. バイオマス中の灰成分による影響

7.1 ボイラ本体への影響

木質バイオマス性状の特徴として、灰の含有量は石炭の1/10以下と少ないが、灰中のアルカリ成分 (CaOなど) が高いことが挙げられる。代表的な分析値 (含有範囲) を表2に示すが、アルカリ成分が高いほど、火炉内での灰の熔融付着、高温伝熱面での灰の軟化付着を起こしやすい。

バイオマス混焼時の火炉内での炉壁管灰付着について、ラボ試験を実施しその挙動を確認した。火炉内を模擬し

Table 2 Alkali Content in Ash

| 灰の成分 | | バイオマス | 一般瀝青炭 |
|---------------|--------------------------------|-------|-------|
| アルカリ成分 (%) | CaO | ~70 | ~1 |
| | MgO | ~15 | ~1 |
| | Na ₂ O | ~10 | ~2 |
| | K ₂ O | ~10 | ~10 |
| | Fe ₂ O ₃ | ~5 | ~5 |
| 酸性成分 (%) | SiO ₂ | ~40 | ~60 |
| | Al ₂ O ₃ | ~10 | ~30 |
| | TiO | ~0.5 | ~2 |
| 燃料中灰分(受入状態) % | | ~2 | ~15 |

た1300℃、酸素21%中のガスに、微粉碎した燃料を投入して燃焼し、下流に火炉壁管表面と同等の温度400℃に調整したプローブを設置し、プローブに付着する灰の状況を観察した。図12にテスト装置を示す。

石炭専焼時と、バイオマス混焼率30、60%で試験を実施し、プローブの灰付着状況を図13に示す。石炭専焼と60%混焼の結果を示すが、供したバイオマスは灰含有量が0.4wt%と石炭に比べ少ないので、混焼率を上げると付着灰量は減る傾向となった。投入した燃料から発生する灰量に対し、付着した灰量の割合を灰付着率として整理すると、混焼率を上げても石炭専焼の場合と同等の灰付着率であり、バイオマス灰中のアルカリ成分による付着量の増加は認められなかった。

灰付着以外には、灰中の塩基成分により低融点化合物が生成され、高温の伝熱面に熔融状態で付着し、ガス中の硫黄分とあいまって、伝熱面を腐食する高温腐食に影響がある。石炭に比べNa、Kの割合が高く、伝熱管の高温腐食の懸念はあるが、抑制成分であるMg、CaOの割合が多い、発生灰自身が少ない、など有利な面もある。今後、模擬灰によるラボ腐食試験や、長期運用時の実績調査などで、影響度合いと対応を確認して行く必要がある。

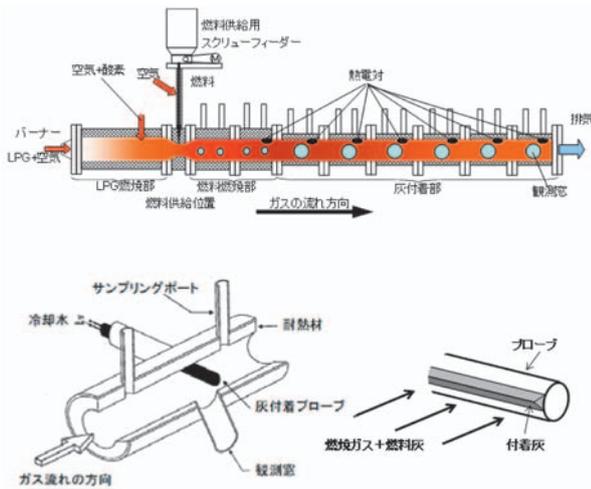


Fig.12 Test Apparatus for Ash Deposit

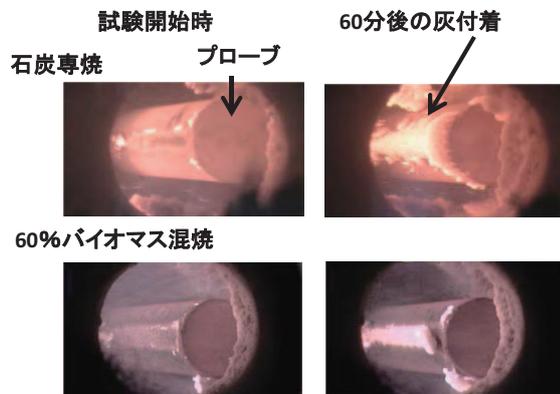


Fig.13 Test Result Ash Deposit on Test Probe

7.2 環境設備への影響

7.2.1 排ガス集塵への影響

火力発電所では燃焼排ガスの集塵装置として、電気集塵器が広く採用されている。電気集塵器の集塵効率は灰の電気抵抗値に影響されるため、バイオマス混焼灰の集塵特性を確認するため、燃焼試験で採取したバイオマス燃焼灰の電気抵抗を測定した。電気集塵器を通過するガス温度100～200℃での、燃焼灰の電気抵抗値は $10^6 \sim 10^{10} \Omega \text{cm}$ であり、電気集塵器で安定して集塵できる範囲 $10^4 \sim 10^{11} \Omega \text{cm}$ の中にあり混燃時の集塵に支障ないと推定される。灰分の少ないバイオマスの混焼で、灰の発生量そのものも減少するので集塵には有利である。

7.2.2 排ガス脱硫への影響

国内で一般に使用される石炭の硫黄分は1%以下で、木質バイオマスの硫黄分は概ね0.05%であり、硫黄分は石炭の1/10以下と少なく、混焼により SO_x 発生量は減少するため脱硫には有利である。火力発電所では湿式脱硫装置が一般的に採用されており、排ガス中の塩素、フッ素は金属材料を腐食する懸念があり、また、石膏石灰法の脱硫システムでは吸収液のpHを低下させるので、脱硫性能を低下させ石膏の結晶成長を阻害する。木質バ

イオマスの塩素、フッ素は分析例は少ないが、石炭と同等、あるいはそれ以下と推定され、混焼時の脱硫装置への影響は無いものと考えられる。

7.2.3 排ガス脱硝装置への影響

木質バイオマス中の窒素含有量は、石炭に比べ低く燃焼による NO_x 発生量は低くなる。単一バーナでのバイオマス燃焼試験結果を図14に示すが、石炭燃焼時に比べ NO_x 発生量は1/10程度になっており、バイオマスの高比率混焼は NO_x 排出量の低減からは有利である。

火力発電所においては、アンモニア接触還元法による排気ガスの脱硝を行い、煙突からの大気排出量を更に低減することが広く行なわれている。排ガスにアンモニアを注入し、触媒を通して窒素酸化物を N_2 に還元するもので、バイオマス灰に多く含まれる、K、Caなどは触媒を被毒し脱硝性能を下げる懸念がある。一次ラボ試験として、バイオマス燃焼灰を触媒に含浸し、模擬ガスを通して脱硝性能への影響を調査したが、脱硝効率の低下傾向が認められた。バイオマス混焼による発生 NO_x の減少を考えると、触媒量の増加などで対応可能と考えられ、直ちに運用に支障を及ぼすことは無いと予想されるが、今後とも長期運用時の実績調査などから影響の確認と対応を検討して行く必要がある。

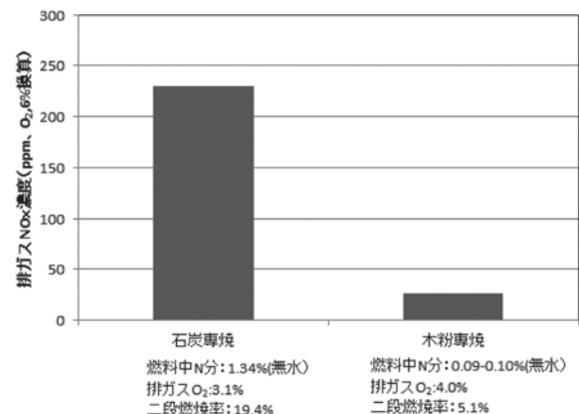


Fig.14 Test Result NOx Emission from Biomass Firing

8. 結言

木質バイオマス高比率混焼については、技術上の阻害はなく、必要な対応をとることで微粉炭ボイラでの適用は可能であり、温暖化ガス排出削減への有効な手段である。燃料として安定した大量流通システムの確立により、既設、新設火力発電所を問わず広く採用されるものと期待しており、今後とも技術の安定化、省動力化に勤めてゆく所存である。なお、バイオマスには様々なものがあるがここで扱った木質バイオマスは、杉や松など国内の未利用材の木質バイオマスであることに御留意いただきたい。

特集：石炭火力発電

国内炭の生産の現状

松本 裕之*¹
MATSUMOTO Hiroyuki

キーワード：国内炭, 釧路コールマイン, 長壁式機械化採炭方式, 産炭国石炭採掘・保安技術高度化事業
Domestic coal, Kushiro Coal Mine Co., Ltd., Full-mechanized longwall mining system, The training project on coal production and safety technology for overseas coal producing countries

1. はじめに

明治以降, 石炭鉱業は, 我が国の重要な基幹産業として発展を遂げてきたが, 20世紀に入り, 石油エネルギーの台頭や安価な海外炭の登場等により, 国内炭は徐々に競争力を失っていった。我が国では, 昭和38年に始まった第1次石炭政策以降, 種々の対策が取られてきたが, 平成13年度に, ポスト第8次石炭政策⁽¹⁾が終了すると, 大手炭鉱は全て, 閉山することとなった。現在は, 北海道内陸部に露天採掘7炭鉱, 道東釧路市に坑内採掘1炭鉱を残すのみとなった。

本論では, 合計8炭鉱が現存する北海道を中心として国内炭の推移に若干触れた後, 坑内掘り炭鉱として唯一稼働を続けている釧路炭鉱について, 生産の現状と将来の課題を記すこととする。なお, 本論は, 平成24年10月18日に, 釧路市で開催された日本ガスタービン学会定期講演会の特別講演において, 口頭発表した内容をもとに文書化し, 加筆したものである。

2. 国内炭の推移

表1に, 明治22年から, 平成8年度までの全国, 北海道, 釧路地方の炭鉱数, 生産量, 従業者数の推移を示した^{(2),(3)}。表中, 太字は最大値である。これによれば, 炭鉱数の最大は, 全国864, 北海道158, 釧路地方27である。また, 生産量は, 全国約5,500万トン, 北海道約2,300万トン, 釧路地方約340万トンである。

Table 1 炭鉱数, 生産量, 従業者数の推移

| 年次 | 炭鉱数 | | | 生産量 (単位:千トン) | | | 常用従業者 | | |
|--------|------------|------------|-----|---------------|---------------|--------------|----------------|----------------|---------------|
| | 全国 | 北海道 | 釧路 | 全国 | 北海道 | 釧路 | 全国 | 北海道 | 釧路 |
| 明治22年 | (2) | | | 2,389 | 4 | | | | |
| 大正元年 | (9) | | | 19,640 | 1,885 | | 152,420 | | |
| 大正3年 | (12) | | | 22,293 | 2,587 | * 51 | 182,637 | | |
| 昭和元年 | (28) | (5) | | 31,427 | 5,906 | 442 | 235,044 | 26,665 | |
| 昭和15年 | (38) | (7) | | 56,313 | 15,378 | 2,263 | 323,571 | 57,479 | |
| 昭和16年度 | 623 | 98 | (6) | 55,602 | 15,747 | 1,393 | 341,468 | 67,482 | |
| 昭和20年度 | 392 | 47 | (3) | 22,335 | 6,972 | 256 | 280,965 | 58,416 | |
| 昭和23年度 | 615 | 103 | (5) | 34,793 | 9,271 | 1,090 | 458,304 | 107,306 | 12,484 |
| 昭和32年度 | 864 | 155 | 27 | 52,255 | 16,188 | 2,026 | 308,841 | 79,582 | 9,239 |
| 昭和33年度 | 824 | 158 | 27 | 48,489 | 15,097 | 2,074 | 293,830 | 79,563 | 9,255 |
| 昭和36年度 | 662 | 152 | 21 | 55,413 | 20,692 | 2,679 | 205,311 | 64,469 | 7,335 |
| 昭和40年度 | 287 | 108 | 14 | 50,113 | 22,133 | 3,342 | 111,360 | 44,549 | 6,341 |
| 昭和41年度 | 239 | 90 | 10 | 50,554 | 22,959 | 3,439 | 104,359 | 42,302 | 6,215 |
| 昭和42年度 | 205 | 81 | 9 | 47,057 | 21,703 | 3,446 | 90,225 | 39,472 | 6,137 |
| 昭和49年度 | 39 | 24 | 1 | 20,292 | 10,334 | 2,285 | 24,274 | 15,438 | 2,430 |
| 昭和55年度 | 29 | 20 | 1 | 18,095 | 10,736 | 2,423 | 19,228 | 12,495 | 2,167 |
| 平成元年度 | 27 | 24 | 1 | 9,635 | 5,933 | 2,168 | 5,150 | 2,889 | 1,611 |
| 平成8年度 | 16 | 13 | 1 | 6,165 | 2,771 | 2,130 | 2,423 | 1,080 | 1,058 |

* 炭鉱数の()は, 大手炭鉱のみ, 中小は不明
* 明治22年~平成8年度の累計生産量 : 全国 2,881,443千トン, 北海道 900,347千トン

原稿受付 2014年5月7日

* 1 釧路コールマイン(株)

〒085-0811 北海道釧路市興津5-2-23

Table 2 近年の国内炭生産量の推移

| 年度 | 単位:1,000トン | | | | | | | | | | |
|-------|----------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 昭和50年度 1975 | S60 1985 | 平成7年度 1995 | H12 2000 | H17 2005 | H18 2006 | H19 2007 | H20 2008 | H21 2009 | H22 2010 | H23 2011 |
| 北海道 | 原料炭 | 4,803 | 1,848 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 一般炭 | 6,197 | 7,943 | 2,848 | 2,149 | 1,249 | 1,351 | 1,280 | 1,290 | 1,206 | 1,145 |
| 計 | 11,000 | 9,791 | 2,848 | 2,149 | 1,249 | 1,351 | 1,280 | 1,290 | 1,206 | 1,145 | |
| 本州・九州 | 原料炭 | 4,462 | 2,140 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 一般炭 (含,無煙炭) | 3,135 | 4,524 | 3,474 | 825 | - | - | - | - | - | - |
| 計 | 7,597 | 6,664 | 3,474 | 825 | - | - | - | - | - | - | |
| 全国合計 | 原料炭 | 9,265 | 3,988 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 一般炭 (含,無煙炭) | 9,332 | 12,467 | 6,322 | 2,974 | 1,249 | 1,351 | 1,280 | 1,290 | 1,206 | |
| 計 | 18,597 | 16,455 | 6,322 | 2,974 | 1,249 | 1,351 | 1,280 | 1,290 | 1,206 | 1,145 | |

* 出典:エネルギー生産・需給統計年報,資源エネルギー庁調べ,(財)石炭エネルギーセンター調べ

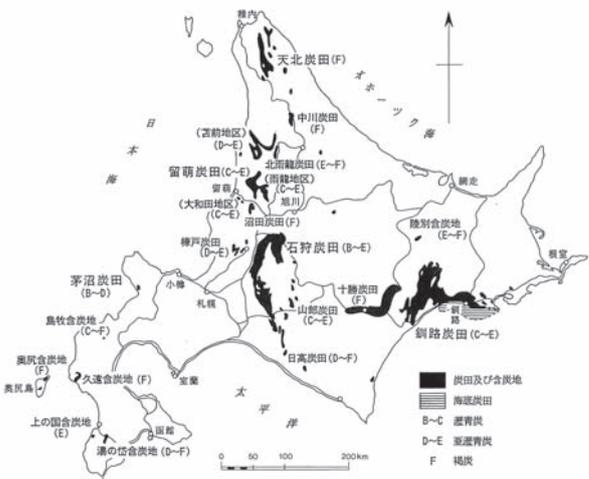


Fig. 1 北海道の炭田・含炭地分布図

道, 釧路地方の炭鉱数, 生産量, 常用従業者数の推移の概略を示した^{(2),(3)}。表中, 太字は最大値である。これによれば, 炭鉱数の最大は, 全国864, 北海道158, 釧路地方27である。また, 生産量は, 全国約5,500万トン, 北海道約2,300万トン, 釧路地方約340万トンである。

また, 表2に昭和50年度から平成23年度までの国内炭生産量の概略推移を示した⁽⁴⁾。近年の国内炭生産量は, 概ね120万トンレベルで推移している。直近の生産量を見ると, 露天採掘7炭鉱は, 合計で年間約70万トン, 坑内採掘炭鉱の釧路炭鉱は, 50万トン強を生産している。稼働中の8炭鉱が現存する北海道の炭田・含炭地分布

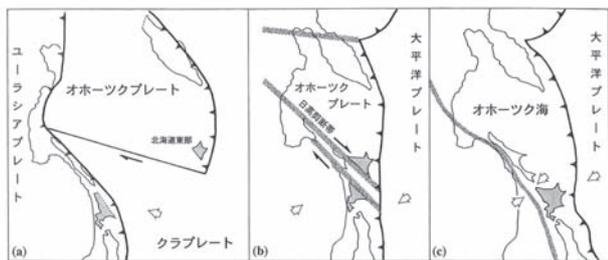


Fig. 2 北海道付近の構造発達史

[Kimura 1994 を改変] (a)6,500万年前, (b)2,500万年前, (c)現在

Table 3 北海道における埋蔵炭量一覧表 (単位:千トン)

| 炭田名 | 昭和30年4月1日現在 | | 昭和30年度～ 昭和63年度間 採掘量 (C) |
|-----|-------------------|---------------------|----------------------------------|
| | 理論埋蔵 炭量 (A) | 理論可採 埋蔵炭量 (B) | |
| 石狩 | 6,487,194 | 6,390,042 | 389,033 |
| 釧路 | 2,027,829 | 1,967,533 | 86,570 |
| 留萌 | 596,810 | 594,564 | 19,120 |
| 天北 | 1,009,137 | 1,004,296 | 7,657 |
| その他 | 111,242 | 110,789 | 1,828 |
| 合計 | 10,232,212 | 10,067,224 | 504,209 |

Table 4 北海道における炭田別・炭質別埋蔵単量 (単位:千トン)

| 炭田名 | 炭質別 | 理論埋蔵量 | 理論可採埋蔵炭量 |
|-----|-----------|------------|------------|
| 石狩 | B1 | 175,639 | 174,282 |
| | B2 | 3,239,407 | 3,205,828 |
| | C | 2,261,664 | 2,219,921 |
| | D | 638,594 | 622,947 |
| | E | 171,890 | 167,064 |
| | 計 | 6,487,194 | 6,390,042 |
| 釧路 | C | 137,361 | 136,308 |
| | D | 839,082 | 789,034 |
| | E | 1,051,386 | 1,042,191 |
| | 計 | 2,027,829 | 1,967,533 |
| 留萌 | B2・C・D・E計 | 596,810 | 594,564 |
| 天北 | F1・F2計 | 1,009,137 | 1,004,296 |
| その他 | B1～F1計 | 111,242 | 110,789 |
| 北海道 | B1～F2 | 10,232,212 | 10,067,224 |
| 全国 | A1～F2 | 21,183,801 | 20,245,786 |

を図1に示した⁽⁵⁾。北海道の炭田をみると、大きく二つに区分される。一つは、日高山脈から天北山地に至る北海道の背骨にあたる地域の西側で、もう一つは、釧路炭田と十勝炭田を含む道東である。現在稼行中の露天採掘炭鉱は全て、前者の石狩炭田と留萌炭田にあり、坑内採掘炭鉱は、釧路炭田にある。

図2に、北海道付近の構造発達史を示した⁽⁶⁾。これによると、上述の北海道中央部西側の炭田群と、道東の炭田では、地質的に、また、生成過程においても異なっていることが窺われる。このことは、前者が断層・褶曲が卓越して急傾斜炭層が多く、また、かつて稼行していた坑内採掘炭鉱が高い地圧と坑道変形、ガス湧出の多さに悩まされたのと対照的に、道東の坑内採掘炭鉱では、比較的安定した地質条件であることの相違に結びついてい

ると考えることができる。

昭和25年から昭和30年までの6カ年間にわたり、通商産業省石炭局が「全国埋蔵炭量炭質統計調査」を行っているが、その結果の概要を表3、表4に示した⁽⁷⁾。これによれば、北海道全体の当時の理論可採埋蔵炭量は、約100億トン、釧路炭田でも約20億トンが賦存していることになる。また、炭質別にみると、北海道中央部の石狩炭田や留萌炭田では、瀝青炭で強粘結・粘結炭を示す、ランクBやCの原料炭が賦存しているが、釧路炭田では、亜瀝青炭で弱粘結・非粘結炭を示すランクDやEの一般炭が多いことが判る。このことも、生成条件・生成過程の相違を示す指標と考えられる。後述するが、釧路炭鉱が電力用一般炭として高品質であったことや、地質条件が安定し、緩傾斜で機械化に適していたことが、坑内採掘炭鉱として生き残った大きな要素と考えられる。

なお、NPO法人地下資源イノベーションネットワークが平成20年に実施した「石炭ガス化ポテンシャル調査に係わる石炭埋蔵調査報告書」によれば、釧路沖に新たに、約28億トンの埋蔵量があるとしている⁽⁸⁾。

3. 釧路炭鉱

釧路炭鉱は、鉱山名であり、所有する法人は、釧路コールマイン株式会社（以降釧路コールマイン）である。

釧路コールマインは、80有余年の歴史と伝統を誇った太平洋炭礦株式会社（以降太平洋炭鉱）の閉山を受け、「ヤマの灯を消すな」、「地域の雇用と経済を守ろう」との地元経済界のご支援と北海道、釧路市等地元自治体のご理解・ご協力のもと、平成13年12月に設立された。当初は、資本金5,000万円で設立し、以後地元経済界の再度のご支援のもと、増資により株主53社、資本金9,960万円の市民炭鉱としてスタートした。操業に当たっては、太平洋炭鉱から鉱区と採掘機械の一部を譲り受け、現在海面下約300メートル以浅を採掘対象として稼働している。

釧路コールマインは、

- ① 石炭事業
- ② 研修事業をメインとした国際交流事業
- ③ 環境関連新規事業の創造

を3本柱として事業展開している。これ以降、新たに設立した後12年を経過した、現存する我が国唯一の坑内採掘炭鉱である、釧路コールマインの主要3事業についての経過と現状、ならび将来を見据えた新たな展開について報告する⁽⁹⁾。

3.1 石炭事業

釧路コールマインの採掘区域は、太平洋炭鉱時代の基幹坑道の下や昭和30年代には技術的・経済的に採掘不可能であった地域等、海面下約300m以浅を対象とし、平成14年4月から採炭業務を開始した。対象とする炭層は、釧路市から太平洋の沖合に向かって5度～6度の傾

斜で賦存する海底下の新生代古第三紀の春採夾炭層であり、そのうちの5番層（本層）と6番層（下層）としている。図3に、釧路コールマインの坑内概況図を示した。図中細線で示した坑道は、採炭準備を進めていた平成14年1月末頃の主たる坑道であり、太線で示した坑道は、平成25年3月末の様子である。太平洋炭鉱時代は、東西8km、南北11kmで、東京山手線内側、または、国立公園である釧路湿原と同程度の広大な区域を採掘対象としており、維持坑道長も二百数十kmに達していた。基幹坑道は岩盤坑道で、二・三百m毎に前線基地となる水平坑道を設けて深部へ向かい、閉山間際には海面下800mレベルでの採炭を行っていた。釧路コールマインになってからは、主として坑口から繋がる斜坑より、沿層坑道（石炭層内坑道）で展開し、採掘している。

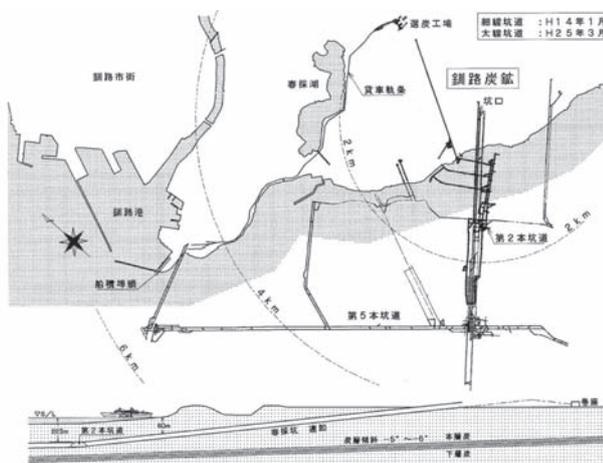


Fig. 3 釧路コールマインの坑内概況図

炭質は亜瀝青炭の純一般炭であり、製品の平均カロリーは約6,100kcal/kg、硫黄分は0.2～0.3%と少なく、古くから低公害炭として利用されてきた。平成14年度から平成18年度の出炭量は、製品炭として年間約70万トン、平成19年度からの出炭量は、製品炭として年間約50万トンとなり、暖房炭、電力用炭のほか、製紙工場や製糖工場等へも出荷している。

生産と保安は炭鉱経営の両輪であり、生産技術・保安技術・経営管理技術すべてを総合技術として統合して運営している。つまり、採炭・掘進・仕繰り・機械・電気・通気・選炭・保安生産監視制御・計画、そして労務・経理・経営管理等すべてが有機的に連動している。釧路コールマインは、80余年の技術的蓄積を持っていた太平洋炭鉱の総合技術を継承し、さらに独自の技術を付加して、世界標準でなおかつ最先端の炭鉱経営技術を有していると自負している。以下にその技術の一端を紹介する。

3.1.1 生産技術

「採炭」は、太平洋炭鉱が昭和40年代に自走枠（シー



Fig. 4 SD採炭切羽

ルド枠）とドラムシアラーを組み合わせて開発し、以降世界標準となった長壁式機械化採炭方式（当社ではSD採炭システムと呼ぶ）を採用している。まず、最初に約100～200mの間隔で、2.5～3mの高さの炭層内に平行に長さ約数百m～2kmにわたる2本の坑道を掘削し、更にもその両端を結ぶ切羽面となる坑道を掘削する。ここに自走枠とドラムシアラーを設置し、囲われた炭層全てを採掘する。

図4に、SD採炭方式の切羽写真を示した。

一方、「掘進」では、坑道切羽面を掘削しながら、石炭・岩石をコンベヤで積み込み・排出できるコンテナスマイナーを世界に先駆けて導入し、運搬機であるシャトルカーと組み合わせた方式を採用している。これも現在世界標準技術である。支保は、鋼枠・ロックボルト・ケーブルボルト等々を組み合わせて使用し、坑道変形等を計測しつつ行っている。図5に掘進機の写真を示す。

原炭は、すべて地下トンネルのベルトコンベヤで運搬され、一貫した生産監視・制御システムのもと、坑口より数km離れた選炭工場へ送られる。



Fig. 5 掘進機

3.1.2 保安技術

幾多の困難を乗り越え開発された日本の保安技術が、釧路コールマインの保安技術として結実している。

当社の総合保安管理システムは、世界でも最先端の、地図情報とセンサー情報をリンクした方式として開発した。測量員が測定・作成した正確なCADによる坑内外地図をベースに、坑内外に1,000点規模配置したセンサーを光ファイバー通信網や伝送機器等を駆使して、リアルタイムで常時監視するコンピューターシステムである。センサーはメタン・一酸化炭素・臭い・煙・温度・風速・圧力・流量等のほか、電流値や各種機器の運転・停止等、多岐に及んでいる。また、同システムは、北海道電力から供給された66千ボルト特別高圧電源を坑外変電所で受け、坑内外各所の変電室を経由して各現場へ供給される各種電源を、一括してコントロールする電力監視・制御システムや、生産監視・制御システムと連携して運用されている。これらは24時間体制で指令室が統括している。図6に指令室の写真を示した。

また、ガス抜き・水抜き等に対応した各種ボーリング技術を有し、坑内での1,000m規模の清水2重管式長孔ボーリングや指向性ボーリングでは世界トップクラスの技術を持っている。さらに、自然発火や坑内火災予防のため、坑内ガスの分析機器一式を所内に完備している。



Fig. 6 指令室

3.2 国際交流事業

海外炭の安定供給確保を目標に、中国、ベトナム、インドネシア等のアジア産炭国の炭鉱に対し、我が国の優れた坑内掘り炭鉱技術の移転を進めるため、平成14年度から平成18年度まで、国の施策に基づき、新エネルギー産業技術総合開発機構（以降NEDO）によって、「炭鉱技術海外移転事業」が実施された。また、上記事業を発展的に継続するとして、平成19年度から平成23年度まで、「産炭国石炭産業高度化事業」が実施された。

平成24年度からは、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（以降JOGMEC）によって、「産炭国石炭採掘・保安技術高度化事業」がスタートした。

ここでは、「国内受入研修」と「海外派遣研修」について、釧路コールマイン分の概要と実績を記す。

3.2.1 国内受入研修事業

受入研修事業は、現在、中国・ベトナムの2カ国の炭鉱技術者を対象とし、石炭エネルギーセンター（以降JCOAL）と、釧路コールマインが委託を受け実施している。釧路コールマインでは、6週間～12週間の期間で、中国、ベトナムから研修生を受け入れる。研修内容は、相手国のニーズに合わせて、中国は、炭鉱管理者向けコース、保安管理者向けコースを、ベトナムは、炭鉱管理者向けコース、炭鉱技術者向けコースを用意し、研修指導員が通訳を介して講義・指導を行う。それぞれ、坑内外での実技研修や座学を織り交ぜカリキュラムを組んでいる。図7に救護隊研修、図8に坑内採炭研修を示した。



Fig. 7 救護隊研修



Fig. 8 坑内採炭研修

表5に、「炭鉱技術海外移転事業」における釧路コールマインでの受入実績を、表6には、「産炭国石炭産業高度化事業」の実績を示した。

平成24年度からスタートした「産炭国石炭採掘・保安技術高度化事業」では、平成24年度に、ベトナムから143人を、平成25年度は、ベトナムから83人、中国から58人の研修生を受け入れた。

Table 5 炭鉱技術海外移転事業実績

| 受入研修（単位：人） | | | | | | |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 国名 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | 合計 |
| ベトナム | 77 | 88 | 103 | 103 | 111 | 482 |
| 中国 | 69 | 95 | 105 | 103 | 109 | 481 |
| 合計 | 146 | 183 | 208 | 206 | 220 | 963 |

Table 6 産炭国石炭産業高度化事業実績

| 受入研修（単位：人） | | | | | | |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 国名 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | 合計 |
| ベトナム | 91 | 116 | 108 | 102 | 92 | 509 |
| 中国 | 93 | 90 | 83 | 79 | 69 | 414 |
| 合計 | 184 | 206 | 191 | 181 | 161 | 923 |

また、釧路市では、研修生と地域住民との文化交流等を推進するため、市民交流事業推進会議を主催し、交流プログラムを策定、年10数回の交流事業を行っている。

3.2.2 海外派遣研修事業

派遣研修は、現在、中国・ベトナムを対象に、実施している。中国では、座学セミナー方式を中心とし、ベトナムでは、坑内外現場にて実務を直接指導している。表7に、「炭鉱技術海外移転事業」における釧路コールマインでの海外派遣実績を、表8には、「産炭国石炭産業高度化事業」における実績を示した。平成24年度からスタートした「産炭国石炭採掘・保安技術高度化事業」では、平成24年度に、ベトナムへ延べ429人を、平成25年度は、ベトナムへ延べ492人、中国へ延べ15人を派遣した。

Table 7 炭鉱技術海外移転事業実績

| 派遣研修（単位：延べ人員） | | | | | | |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 国名 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | 合計 |
| ベトナム | 35 | 40 | 50 | 85 | 115 | 325 |
| 中国 | 10 | 17 | 24 | 19 | 19 | 89 |
| インドネシア | | 8 | 12 | 12 | 12 | 44 |
| 合計 | 45 | 65 | 86 | 116 | 146 | 458 |

Table 8 産炭国石炭産業高度化事業実績

| 派遣研修（単位：延べ人員） | | | | | | |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 国名 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | 合計 |
| ベトナム | 165 | 202 | 244 | 183 | 374 | 1,168 |
| 中国 | 8 | 29 | 32 | 33 | 25 | 127 |
| 合計 | 173 | 231 | 276 | 216 | 399 | 1,295 |

4. 新規事業

新規事業は、釧路コールマイン設立当時からチャレンジしてきた。事業内容としては、石炭関連事業と、環境リサイクル事業に大別される。

石炭関連事業は、海外炭輸入販売と、防爆機器に代表される炭鉱用各種機器の開発・製造・販売等である。当初、釧路コールマインで行ってきたこれらの事業は、平成19年5月に、釧路コールマインの100%出資で設立した、KCMエンジニアリング株式会社に受け継がれている。炭鉱用機器開発は、主としてアジア産炭国向けに、釧路コールマインで実績のある、バーコードリーダー活用の入昇坑管理システム、固定式及び携帯型光干渉式メタンセンサー・検知器、坑内誘導無線システム、集中監視システム等である。この中で、入昇坑管理システムは、高温・多湿なベトナムの炭鉱に適合するよう開発し、現在設置・稼働中である。図9に、ベトナム坑内採掘炭鉱の坑口に設置した様子と、監視状況を示した。また、集中監視システムについても、Mao Khe（マオケー）炭鉱に1号機を販売・出荷し、現在稼働中である。図10に設置状況を示した。



Fig. 9 入昇坑システム



Fig. 10 Mao Khe炭鉱の集中監視システム

一方、環境リサイクル事業は、釧路市から受託した粗大ごみ処理センターの運営管理とごみ収集車5台による収集運搬業務を皮切りに、釧路広域連合の一般廃棄物焼却炉を運転管理している釧路エコクリエイション株式会社に約30名の技術者等を派遣し、3交代で実運転を行っている。また、使用済み自動車のリサイクルを行う釧路オートリサイクル株式会社は、釧路市内の自動車ディーラー18社の他、自動車関連事業者との共同出資で、平成16年5月設立した。図11に釧路オートリサイクルの解体工場を示した。その他、釧路市が主体となり設立した



Fig.11 釧路オートリサイクルの解体工場

釧路B・D・F研究会に参画し、廃食用油からバイオディーゼル燃料を製造する試験事業（1.5万リットル/年製造）や、LED照明機器事業への参画等、多方面へのチャレンジを行っている。これらの事業は、平成20年9月に釧路コールマインの100%出資で設立した、株式会社KCMコーポレーションに受け継がれている。

5. 今後の新たな展開

釧路コールマインでは、将来に向け、釧路コールマインおよび釧路管内に有するエネルギー資源、人的資源、既存事業・技術等を総合的に組み合わせて、更に発展させ、環境を最重視した資源・エネルギー供給基地を誘致・建設し、かつこれらの施設・設備をもって、国内・海外を対象とした上流から下流に至る総合技術・教育・環境・観光等に関する研修センターを開設する「釧路資源エネルギー・エコパーク」構想を練っている。図12に

構想図を示す。図中、実線で囲まれた事業が現在実施中のものであり、破線で囲まれた部分が構想中のものである。最近特に注力しているのは、コールベッドメタン（CBM）、コールマインメタン（CMM）と、炭層下位の白亜紀層に賦存すると思われる非在来型メタン等を有効利用し、発電に結びつける研究開発で、一部経済産業省の補助金にて長孔ボーリングによる実証事業を行っている。

6. おわりに

釧路コールマインの主要3事業は、国、北海道、釧路市をはじめ、JOGMEC、NEDO、JCOAL、そして地域の多くの方々のご理解・ご協力を頂いて実施してきた。関係者にこの紙面を借りて深く御礼申し上げます。

釧路コールマインは、今後も安全を最優先に、技術の研鑽に励み、コストダウンを行いながら活力あふれる炭鉱として活動していく所存である。

7. 参考文献

- (1) 石炭エネルギーセンター、コールノート、2013年版、(2014)、p390.
- (2) 北海道通商産業局、北海道の石炭、(1993)、p20.
- (3) 北海道地域技術振興センター、石炭産業のあゆみ、(1997)、p128.
- (4) 石炭エネルギーセンターホームページ.
- (5) 北海道通商産業局、北海道の石炭、(1993)、p5.
- (6) 小崎、他、日本の地形2北海道、(2003)、p26、東京大学出版会.
- (7) 北海道通商産業局、北海道の石炭、(1993)、p16.
- (8) 北海道ホームページ.
- (9) 松本裕之、江口裕幸、“釧路コールマインの現状と新たな展開”，資源・素材2013（札幌）講演資料、(2013)、pp.59-62.

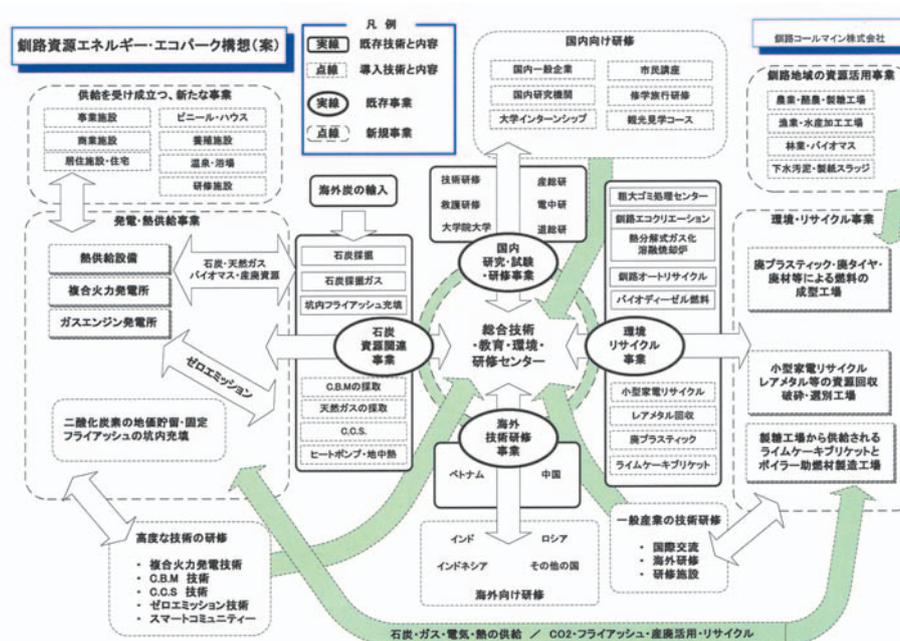


Fig.12 釧路資源エネルギー・エコパーク構想図

特集：石炭火力発電

石炭火力の運用と震災

古沢 昌二*¹
FURUSAWA Shoji

キーワード：安定供給，石炭，火力発電所，経済性，環境

Stable supply, Coal, Thermal power plant, Economy, Environment

1. はじめに

日本の火力電源は、昭和30年代に将来の需要増加に対応するために導入が始まり、技術の進歩に伴って大規模化してきた。

燃料としては、当初、石油が中心であったが、昭和48年、54年に2回の石油危機が発生し、石油価格の高騰と石油確保が不安定になったことにより、代替エネルギーの開発・導入促進による脱石油化が進められ、原子力やLNGなどの導入が進み、エネルギーの多様化が図られてきた。

しかし、現状では、東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故に伴う、国による原子力政策の見直しにより国内の原子力発電所が停止している中、緊急設置電源の新設や既設火力発電所の高稼働、増出力運用などにより、火力発電にて原子力発電の不足分を補っている状況である。

また、既設火力発電所の経年化が進んでいることから、新たな火力電源の開発が計画されており、経済的に優位性がある石炭火力の新規開発が注目されている。

そこで、石炭火力の一般的な特徴や当社にて保有している石炭火力の概要について説明するとともに、東日本大震災による被害状況と復旧、さらには震災以降での電力安定供給に向けた取組みについて石炭火力を中心として紹介する。

2. 石炭火力の特徴

2.1 石炭の性状と特徴

火力電源は、燃料種別による調達安定性や経済性、環境特性等を踏まえ、最適な電源構成を目指し開発が行われてきた。

火力電源の燃料としては、石油、石炭、LNGなどが使用されているが、それぞれにメリット・デメリットがあり、石炭については、以下のような特徴がある。

石炭は、確認可採埋蔵量が豊富であり、他の燃料と比較しても可採年数が長く、北米、欧州、ロシア、アジア、

アフリカ、オセアニアなど世界に幅広く分布しているため、中東湾岸地域に偏在している石油とは異なり、エネルギーセキュリティ上、優位性のある燃料であり、価格も石油やLNGと比較して、低価格で安定しているという特長がある。

一方、石炭は、石油やLNGに比べ、炭素の含有量が多いため、発電過程でのCO₂発生量が多く、また、SO_x、NO_xおよび灰の発生量も多いことから、環境に与える負荷が大きい燃料でもある。

2.2 石炭火力発電設備の特徴

石炭火力は、燃料の安定供給や経済性に優れているため、近年では、スケールメリットを活かした60～100万kW級の大型火力が主流であり、ベース電源として運用されているが、CO₂の排出量が多いことから、地球温暖化対策のために、蒸気条件を向上させることで高効率化が図られてきている。

また、石炭火力は、石炭の特性から付帯設備の設置などで他燃料を使用する火力設備とは異なる特徴があり、その主なものは以下のとおりである。

2.2.1 揚運炭設備

石炭は固体であるため、石炭船から荷揚げするための揚炭機、石炭を運搬するベルトコンベヤ、さらに石炭貯蔵のための広大な貯炭場等の揚運炭設備が設置されている。

また、石炭は炭種ごとに性状が大きく異なり燃焼性などに違いが生じるため、全ての炭種をボイラにて単独で燃焼できるわけではなく、複数の炭種を混合して燃焼する場合があることから、混炭する設備も必要となる。

2.2.2 ボイラ・燃焼設備

石炭火力のほとんどは、微粉炭燃焼方式を採用しており、石炭を微粉炭機で50～100μm程度に粉碎・乾燥し、ボイラ内に吹込み燃焼させる方式で、着火時間および燃焼時間が短縮され、重油やガス焚きに近いバーナーで燃焼できるのが特長である。

また、石炭は、重油やガスと比較して、重量あたりの発熱量が低く燃焼性が劣り、灰による伝熱面の摩耗を防

原稿受付 2014年5月14日

*1 東北電力(株) 火力原子力本部 火力部
〒980-8550 仙台市青葉区本町1-7-1

止するためにガス流速を低くしなければならないことなどから、ボイラの容積を大きくしなければならない。

さらに、ボイラ内で溶融した石炭灰が伝熱面に付着・体積するスラッシングおよびファウリングに対して、火炉内温度を低く設計したり、伝熱面での灰閉塞防止のためにチューブ間ピッチを広くするなどの対策がとられている。

その他、石炭は、各炭種の性状の違いにより燃焼性や排ガス特性等が異なるため、炭種ごとに緻密な制御を行うことで燃焼安定性を確保しなければならない、高度な制御技術が必要となる。

よって、多種の石炭に対する燃焼安定性を確保するため、ボイラ各部の熱吸収量の割合を検出し、ボイラ各操作端のパラメーターを最適化する制御方式がとられ、性状の異なるより多くの炭種に対応可能なよう考慮されている。

2.2.3 環境保全設備

石炭は、他の燃料と比較して、硫黄、窒素、灰等の環境負荷に影響を与える物質を多く含有しており、環境保全設備の設置が必要である。

石炭の燃焼によって発生する排ガス中には、SO_x、NO_xおよびばいじん等が含まれ、これらを除去するために以下の対策が取られている（図1参照）。

SO_x対策としては、排煙脱硫装置を設置して排ガス中のSO_xを除去しており、副産品として生成される石膏は、建設資材（石膏ボード）等として有効利用している。

NO_x対策としては、低NO_xバーナー、二段燃焼および排ガス混合方式などを採用することでNO_xの発生を抑制するとともに、排煙脱硝装置を設置し排ガス中のNO_xを除去している。

また、ばいじん対策としては、電気集じん装置および排煙脱硫装置の除じん効果により排出量の低減を図っており、ボイラや電気集じん装置から回収した石炭灰は、極力セメント原料等として有効利用を図るよう努めている。

その他、貯炭場周囲に防風フェンスを設置し、必要に応じて散水を行うほか、ベルトコンベヤ等の揚運炭設備には防じんカバーを設置するなど、石炭粉じんの飛散防止を図っている。

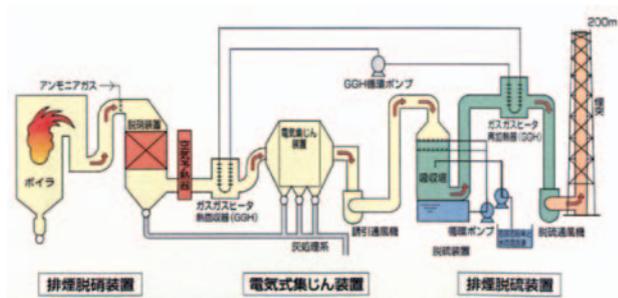


Fig. 1 排煙処理装置の構成例

3. 当社の石炭火力発電設備

当社は、図2に示すように火力発電所（離島を除く）を8地点23ユニット保有しているが、このうち能代火力発電所と原町火力発電所の2地点の4ユニットが石炭火力である。

また、当社火力発電の総出力は1,175万kWであり、このうち27%の320万kWを石炭火力が担っている。

そこで、当社の石炭火力である能代火力発電所と原町火力発電所についての設備概要等を紹介する。



Fig. 2 当社管内の火力発電設備（平成26年4月現在）

3.1 能代火力発電所

3.1.1 設備概要

能代火力発電所（図3）は、東北北部の電力系統強化のため、秋田県の公有水面埋立造成地に脱石油化を指向した海外炭を主燃料とする発電所として計画された。

1号機は、昭和60年10月に建設工事が着工し、一時、電力需要の伸び低迷により工事がスローダウンした時期もあったが、平成5年5月に営業運転を開始した。

2号機は、平成3年10月に建設工事が着工し、日本海特有の冬の厳しい気象条件を克服しながら工期短縮を図り、平成6年12月に営業運転を開始し、1・2号機合わせて総出力120万kWの大型石炭火力が誕生した。



Fig. 3 能代火力発電所 全景

1・2号機とも、変圧運転方式で、負荷変化率18MW/min、最低負荷210MWと石炭火力としては運用特性の優れたプラントであり、蒸気条件は、1号機が538/566℃（主蒸気/再熱蒸気）、2号機は、当時当社初の566/593℃（主蒸気/再熱蒸気）の蒸気条件を採用した。

主要設備の主な仕様は表1のとおり。

Table 1 能代火力発電所 主要設備概要

| ユニット | 1号機 | 2号機 | |
|--------|---------|--------------------|--------------------|
| 認可出力 | 60万kW | | |
| 運転開始年月 | 平成5年5月 | 平成6年12月 | |
| ボイラ | 型式 | 放射再熱式連流型 | |
| | 蒸気圧力・温度 | 28.6MPa, 542/567°C | 27.0MPa, 570/596°C |
| | 蒸発量 | 1,920t/h | 1,860t/h |
| | 燃料 | 石炭, 重油 (補助燃料) | |
| タービン | 型式 | くし形反動4車室4流排気式再熱復水型 | くし形3車室4流排気式再熱復水型 |
| | 蒸気圧力・温度 | 24.5MPa, 538/566°C | 24.1MPa, 566/593°C |
| 発電機 | 型式 | 横置円筒回転界磁形 | |
| | 冷却方式 | 水素 | 水素(回転子)水(固定子) |
| | 容量 | 670,000kVA | |

3.1.2 環境保全対策

能代火力発電所は、計画時点から環境対策に万全を期すよう配慮されており、発電所の山側の海岸砂防林は、「風の松原」と呼ばれ、能代市の名所のひとつであるが、発電所設備の色彩はこの景観を損なうことなく、周辺環境と調和するように配慮されている。

設備的には、1・2号機とも電気集じん装置、排煙脱硫装置、総合排水処理装置などを設置し、環境負荷の低減を図っており、NO_x対策としては、二段燃焼・排ガス混合・低NO_xバーナーを採用したほか、2号機には排煙脱硝装置も設置している。

粉じん対策では、貯炭場の一辺を屋内貯炭場とし、屋外貯炭場の残り三辺をしゃ風フェンスで囲むとともに、揚送炭のベルトコンベヤには防じんカバーを設置している。

また、ボイラおよび電気集じん装置から回収した石炭灰は、秋田県が発電所に隣接して設置した能代港産業廃棄物最終処分場に埋立て処分するとともに、一部はセメント混和材として活用している。

3.1.3 地域対応

能代火力発電所は、本格的な地域共生型発電所、石炭火力のPR拠点として位置付けられ、地域の方や訪れた方が憩いや楽しみを感じながらエネルギー問題と石炭火力の仕組み等を理解してもらえるようPR施設としてエ



Fig. 4 能代火力発電所 エナジウムパーク

ナジウムパーク (図4) を設置している。この施設には憩いの場としての付加価値を高めるために熱帯植物園や冒険広場などの施設も設置しており、開館してから20年が経過しているが、現在では地域の方々に親しまれ、年間約8万人の方が来訪し、開館からこれまで200万人以上の方が来館している。

3.2 原町火力発電所

3.2.1 設備概要

原町火力発電所 (図5) は、当初1号機は出力100万kW、運転開始が昭和61年3月、使用燃料は重・原油およびナフサを含む軽質油で計画され、2号機は出力100万kW、運転開始が昭和63年12月、使用燃料は重・原油とLPG混焼で計画された。

その後、脱石油化の推進や電力需給情勢に対応するため、計画を変更した上で、平成2年3月に港湾土木工事が着工し、1号機は平成5年2月に着工、2号機は平成6年2月に着工して、ほぼ同時並行的に1・2号機の建設工事が進められた。

1号機は、平成9年7月に当社最大規模の単機出力100万kWの石炭火力として営業運転を開始し、続いて、2号機は、平成10年7月に営業運転を開始して、1・2号機合わせて総出力200万kWの大容量石炭火力が誕生した。



Fig. 5 原町火力発電所 全景

タービンの蒸気条件は、1号機が566/593°C (主蒸気/再熱蒸気) であり、2号機は、当時国内最高の600/600°C (主蒸気/再熱蒸気) を採用し、従来の在来型火力に比べて蒸気条件を高温・高圧化することにより熱効率の向上を図った。このため、タービン材質に高温強度に優れた高クロム系合金を使用するなど、新技術を駆使して建設された発電所である。

主要設備の主な仕様は表2のとおり。

3.2.2 環境保全対策

環境保全対策としては、能代火力発電所と同様に、電気集じん装置、排煙脱硫装置、排煙脱硝装置のほか、貯炭場周囲へのしゃ風フェンスの設置などの対策を行い、

Table 2 原町火力発電所 主要設備概要

| ユニット | 1号機 | 2号機 | |
|--------|---------|--------------------|--------------------|
| 認可出力 | 100万kW | | |
| 運転開始年月 | 平成9年7月 | 平成10年7月 | |
| ボイラ | 型式 | 放射再熱式還流型 | |
| | 蒸気圧力・温度 | 25.40MPa, 570/595℃ | 25.40MPa, 604/602℃ |
| | 蒸発量 | 2,970t/h | 2,890t/h |
| | 燃料 | 石炭, 軽油 (補助燃料) | |
| タービン | 型式 | 二軸型4車室4流排気式再熱復水型 | |
| | 蒸気圧力・温度 | 24.52MPa, 566/593℃ | 24.52MPa, 600/600℃ |
| 発電機 | 型式 | 横置円筒回転界磁型同期発電機 | |
| | 冷却方式 | 水素(回転子)水(固定子) | |
| | 容量 | 639,600/486,000kVA | 652,900/475,200kVA |

周辺環境への影響を最大限抑制するよう配慮されている。

これらの環境保全設備においても、排煙脱硫装置における冷却塔(除塵塔)を省略した「吸収塔の一塔化」システム(スート混合型)の採用や給・排水処理装置において事業用として初めて高分子膜処理システムを採用するなど、新技術を取り入れている。

その他、石炭灰は、主にセメント粘土代替材やセメント混和材として有効利用の拡大を図っているが、残りは自前の石炭灰埋立場にて埋立処分している。

3.2.3 地域対応

原町火力発電所では、地域の方に親しまれる憩いの場の施設として、構内の一角に設置した環境施設「オーシャンフィールド」および南防波堤を利用した「海釣り公園」を設置し、多くの方々に利用され、国内外から多数の方が発電施設の見学に訪れていた。しかし、これらの施設は、平成23年3月の東日本大震災における津波により、壊滅的被害を受け、復旧が困難な状況となっているが、震災復旧後は、見学者の受入を行い、多くの方が発電施設の見学に訪れている。

4. 東日本大震災による原町火力発電所の被災と復旧

4.1 東日本大震災当時の火力発電所運転状況

平成23年3月11日14時46分に発生した三陸沖を震源とするM9.0の地震により、当社火力発電設備は甚大な被害を受けた。

東日本大震災の当日、当社火力発電設備(地熱発電設備含む)は20台が運転中であったが、地震発生直後に12台が停止し、火力・地熱発電所総出力(設備容量)で492.6万kW(当社火力・地熱発電所総出力の約55%)が減少した。

日本海側の火力発電所および地熱発電所は、系統側に起因する停止(周波数変動)であったため、停止した8台全てが3日以内に運転を再開したが、太平洋沿岸に立地する4火力発電所(八戸, 仙台, 新仙台, 原町火力発電所)は、運転中の4ユニット全てが停止するとともに、仙台, 新仙台, 原町火力発電所については、津波により1階面の機器が浸水するなどの大きな設備被害を受けた。

八戸火力3号機は、浸水被害があったものの震災から10日後に運転を再開したが、その他の3火力発電所(仙台, 新仙台, 原町火力発電所)については、津波による被害が大きく復旧に時間を要する状況であった。

その中でも、原町火力発電所は、最も甚大な被害を受け、復旧には多大なる時間と労力を要した。

4.2 原町火力発電所の被害状況

原町火力発電所は、当時、1号機が運転中で2号機はボイラ点検のため停止中であった。運転中であった1号機は地震発生直後は運転を継続しており、大津波警報が発令されたことを受け、復水器の循環水量減少に備えるため出力を降下させた。しかし、発電所に津波が到達し、

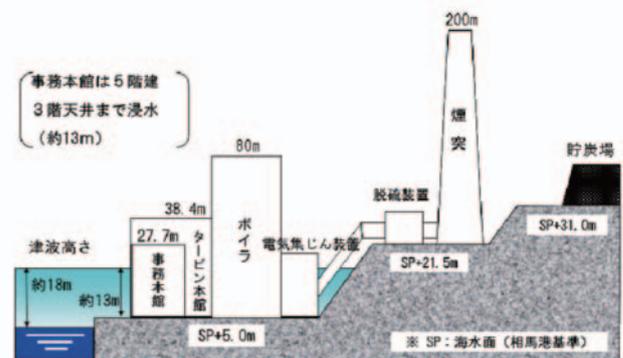


Fig. 6 原町火力発電所の地盤高および津波高



Fig. 7 原町火力発電所の被害状況

構内に浸水する状況となったことから手動操作により停止した。

原町火力発電所には、高さ約13m（グラウンドレベルより）の津波が襲来し、事務所本館とグラウンドレベルに設置されたほとんどの設備は、回復が不可能なほど大きな被害を受けた。港に設置してあった4台ある揚炭機は3台が全壊し1台が損壊、タンク類も13mもの津波により大きな浮力を受け、流され押しつぶされた。また、屋外設置の電動機や電気盤の他、発電所本館内設置の各設備も冠水に加え、大型漂流物の激突で再利用困難な状態となった（図6，7参照）。

4.3 原町火力発電所の復旧

最も甚大な被害を受けた原町火力発電所の復旧にあたっては、早期復旧と当面の支出を抑えるための投資額の低減の両立を目指し検討を行った。

巨大津波により著しい損傷を受けた状況を目の当たりにした直後は、誰もが「復旧は無理だ」と感じていたが、「できない理由ではなく、どうすればできるかを考えよう」をスローガンに、やるべきことの優先順位を明確化して「一日でも早い復旧」を目指し、発電所員のほか、協力工事会社も含め復旧に携わる全ての人が一丸となって復旧作業に取り組んだ。復旧には、多大な労力と時間を要し、平成24年夏季の工事最盛期には、最大で680社、4,600人体制を確保して工事が進められた。

昼夜2交代作業や大物機器搬入用の開口部を追加設置して機器搬入の効率化を図ったほか、仮設備の活用での試運転前倒しなど、工事進捗状況を綿密に管理・調整し早期復旧に向けて取り組んだ。

この結果、当初予定していた時期を前倒して、2号機が平成25年3月29日、1号機が平成25年4月26日に営業運転を再開することができた（図8～10参照）。

また、投資額の低減施策としては、揚炭機の数低減、重油タンク、軽油タンクを軽油に一本化、石膏船積設備にてコンベヤからトラック輸送に変更等を行った。この中でも、津波により甚大な被害を受けた燃料（重油、軽油）タンクについては、設備効率化とともに設置場所を高台に移すなどの津波対策も考慮した。

その他、津波対策としてサービスビルの執務室を3階から5階へ変更したほか、タービン本館2階のメタクラ



Fig.9 原町火力発電所復旧状況 (燃料タンク高台移設)



Fig.10 原町火力発電所復旧状況 (揚炭機水切り)

室周囲に防水壁の設置やサービスビル屋上に災害対策本部室用の非常用発電機を設置するなどの対策を実施した。

5. 震災以降の石炭火力の運用および取組状況

東日本大震災により、当社火力発電設備は甚大な被害を受けるとともに、原子力発電所も停止したため、需要ピーク時における供給力確保が喫緊の課題であった。

このため、早期に供給力を確保する必要があり、工事着工から1年以内に営業運転が開始できるようシンプルサイクルガスタービン発電設備を採用しての緊急電源を5基設置し、総出力約100万kWを確保した。

また、既設火力発電所においては、震災前は低稼働であった油焚き火力や経年火力も含め、全てのプラントが高稼働運転を行っており、需要ピーク時の追加供給力対策として、保安上の管理値および公害防止協定値を超えない範囲、かつ安定運転が可能な範囲において、定格出力を超えて運転する増出力運転を実施している。

このような状況の中、石炭火力である能代火力は、経済性に優れたユニットであることもあり、ベース電源として常に定格出力で運転を継続するとともに、需要ピー

| | | 平成23年度 | 平成24年度 | 平成25年度 |
|-------|------|--------|-----------|------------------------|
| 原町1号機 | 当初計画 | | 工場製作、現地工事 | 夏までに営業運転▽ 試運転 |
| | 実績 | | 工場製作、現地工事 | 1月28日並列▽ ▽4月26日営業運転 |
| 原町2号機 | 当初計画 | | 工場製作、現地工事 | 夏までに営業運転▽ 試運転 |
| | 実績 | | 工場製作、現地工事 | 11月3日並列▽ ▽3月29日営業運転 |

Fig.8 原町火力発電所 復旧工程 (実績)

ク時には、増出力運転も行い、震災以降、1・2号機ともに定期点検等で停止した期間を除き、ほぼ100%の利用率で運転を継続している。

また、原町火力については、震災により甚大な被害を受けたが、当初の計画を前倒ししての復旧を果たし、復旧後は、能代火力と同様にほぼ100%の利用率で高稼働運転を行っている。

このように、当社にとって石炭火力は、大型で経済性にも優れたユニットであることから、電力の安定供給とともに経済的視点に関しても貴重な電源として位置付けられ、トラブル等での計画外停止を極力回避して、安定的な運転を行うことが求められている。

特に、夏季・冬季の需要ピーク時における計画外での停止は、非常に大きな影響を与えることとなるため、需要ピーク前に停止期間を設けて、排ガスシステムの清掃や主要機器の各部点検等を行い、需要ピーク時期に備える運用を行っている。

さらに、石炭火力に限ったことではないが、ユニットの安定運転に向けた取組みとして、運転データのグラフ表示による傾向監視強化や重要設備のパトロール頻度増加などで異常兆候の早期発見に努めている。特に、石炭火力の場合は、設備数が多く、複雑で緻密な制御を行っているため、監視すべきパラメータが多く、また、炭種ごとに各パラメータの値が変化するため、異常兆候を早期に発見するためには、データの傾向監視のほか、ボイラ特性や制御方法等を理解し熟知していなければならない。

その他、経済性に優れている石炭火力やコンバインドサイクルプラントについては、定期点検期間を短縮して稼働率向上を図る取組みを行っている。ボイラに炉内足場搬入用の大型マンホールを設置し作業効率化を図ったり、定期点検期間のクリチカルとなる大型工事を一つの定期点検期間に集中させ、他年度の定期点検期間を短縮するなどにより、極力ユニットの停止期間を短縮して稼働率の向上を図っている。

一方、石炭火力は、環境側面における課題があり、特に地球規模での温暖化対策が求められていることから

CO₂の排出抑制が大きな課題となっている。当社の石炭火力においては、地球環境問題への取組みの一環として、木質バイオマス燃料（木質チップ）の導入を進め、CO₂排出削減に努めている（図11参照）。

能代火力では、平成24年度より木質バイオマス燃料の混焼を開始し本運用に入っており、原町火力では、平成27年4月からの木質バイオマス燃料導入に向け、土木工事を開始している状況である。

木質バイオマス燃料の導入によるCO₂削減効果は、能代火力の場合、木質バイオマス年間使用量3万tで試算すると、約3万tの削減効果があり、原町火力の場合は、木質バイオマス年間使用量を6万tで試算すると、約5万tの削減効果が得られる。

また、木質バイオマス燃料は、地元で伐採された原木のうち、曲がりや細すぎるなどの理由で柱や板などの建築用材に利用できない未利用材を活用することとしており、地域における森林資源の有効活用が促進されるとともに、林地に残地される未利用材が減少するなどにより、森林環境の保全も図られる。

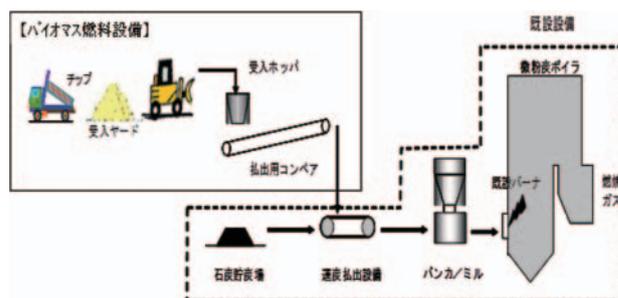


Fig.11 バイオマス混焼設備（イメージ図）

以上のように、石炭火力は、現状、電力の安定供給および経済性の面で、非常に大きな役割を果たしており、今後、CO₂の排出量が多いなどの環境側面でのデメリットを熱効率の更なる向上を目指した技術開発等により克服することで、国内の電源としての重要性がさらに高まっていくと考えられる。

東新潟火力発電所3-1号系列 ガスタービン累積発電時間20万時間到達について ～純国産大容量コンバインドサイクル発電設備の先駆け～

佐藤 裕市*¹
SATO Yuichi

藤田 範生*²
FUJITA Norio

岩崎 洋一*³
IWASAKI Yoichi

味崎 隆久*²
MISAKI Takahisa

キーワード：ガスタービンコンバインドサイクル，20万時間，運用・保守実績，Gas Turbine Combined Cycle

1. はじめに

1970年代の2度に亘る石油危機の経験から，脱石油・省エネルギーが国家的課題となっており，東北電力(株)においても長期的な供給力の確保と電源の多様化が課題となっていた。

東北電力(株)ではこれらの課題解決に向けガスタービンコンバインドサイクル（以下GTCC）発電設備の高い適用性と高効率に着目し研究開発を進め，1984年に事業用大容量GTCC発電設備としては国内初となる東新潟火力発電所3号系列の営業運転を開始した。

当発電所3号系列は現在まで約30年に亘り高効率・高稼働を維持した安定運転を継続し，2014年（平成26年）

2月，事業用大容量GTCC発電設備としては国内初となるガスタービン累積発電時間が20万時間に到達したことから，これまでの歩みについて紹介する。

2. 発電所の概要

東北電力(株)東新潟火力発電所は，新潟県北部の北蒲原郡聖籠町・新潟東港工業地域に位置し，同社最大の火力電源（総出力約520万kW）として，電力の安定供給の一翼を担っている。（図1参照）

当発電所3・4号系列にはGTCC発電設備が導入されており，3号系列は，国内初の事業用大容量GTCC発電設備として1984年に営業運転を開始し，タービン入口ガ



H26.2 現在

| 設備 | 港1号機 | 港2号機 | 港3号系列 (緊急電源) | 1号機 | 2号機 | 3号系列 | 4号系列 | 5号機 (緊急電源) |
|---------|--------|--------|--------------------|-------|-------|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| 出力(万kW) | 35 | 35 | 5.38 | 60 | 60 | 121 | 170 | 33.9 |
| 燃料 | LNG | LNG | 軽油 | LNG | LNG | LNG | LNG | LNG |
| 発電方式 | 汽力 | 汽力 | シンプルサイクル ガスタービン | 汽力 | 汽力 | コンバインド サイクル | コンバインド サイクル | シンプルサイクル ガスタービン |
| 営業運転開始 | S47.11 | S50.11 | H23.8 | S52.4 | S58.6 | S59.12(1系) S60.10(2系) | H11.7(1系) H18.12(2系) | H24.6 |

Fig. 1 東新潟火力発電所全景および設備概要

原稿受付 2014年5月23日

- *1 東北電力(株) 火力部 〒980-8550 仙台市青葉区本町1-7-1
 *2 東北電力(株) 東新潟火力発電所 〒957-0101 北蒲原郡聖籠町東港1-1-155
 *3 三菱日立パワーシステムズ(株)高砂サービス部 〒676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1

ス温度（以下T1T）1,100℃級GT6台から構成される多軸型GTCC発電設備である。（表1参照）

4号系列は3号系列の開発・建設・保守等で培った知見を活かし開発しており、1999年7月に4-1号系列、2006年12月に4-2号系列が営業運転を開始した。T1T1,500℃級GT×4台および蒸気タービン2台から構成される多軸型GTCC発電設備である。

Table 1 3号系列主要設備諸元

| | |
|--------------|-------------------------|
| (1) GT | 6台 |
| 種 類 | 一軸開放サイクル形 |
| 出 力 | 137,000kW (大気温度-1℃時) |
| 入 口 圧 力 | 1.47MPa |
| 入 口 温 度 | 1,154℃(常用) 1,201℃(ピーク) |
| 回 転 数 | 3,000rpm |
| (2) HRSG | 6台 |
| 種 類 | 排熱回収複圧式 |
| 蒸発量 (高圧/低圧) | 194/61t/h |
| 出口圧力 (高圧/低圧) | 6.7/0.59MPa |
| 出口温度 (高圧/低圧) | 505℃/飽和温度 |
| (3) ST | 2台 |
| 種 類 | 反動くし形2流排気式 |
| 出 力 | 203,000kW |
| 入口圧力 (高圧/低圧) | 6.4/0.49MPa |
| 入口温度 (高圧/低圧) | 500℃/飽和温度 |
| 回 転 数 | 3,000rpm |
| (4) プラント性能 | |
| 認 可 出 力 | 1,210,000kW (大気温度7℃) |
| 熱 効 率 | 48% (LHV基準) |

3. 開発経緯と初期に経験したトラブル対応

東北電力(株)ではGTCC発電設備の高い運用性と高効率に着目し、三菱重工業(株)（現 三菱日立パワーシステムズ(株)）および三菱電機(株)殿との共同研究を行いGTCC発電設備としての性能と信頼性を十分確保できることを確認し建設に着手した。（図2参照）

1980年代初めにはまだ国内に大容量GTCC発電設備の導入実績がなくリスクがあったが、当時の東北電力(株)若



Fig. 2 製作工場でのMW-701Dガスタービン

林社長は「日本では今迄は外国で前例のあるものを導入してきたが、今度は日本人の手ではじめてのものをやりたい。前例というものは誰かが作らねばならない。」との考えから導入を決断した。また、導入を決断した背景には、電力会社としても国産技術の発展に寄与したいとの経営トップの信念があった。

3号系列の開発・導入に当たってその技術は対外的にも高く評価され、1985年（昭和60年）には「日本産業技術大賞・内閣総理大臣賞」を受賞した。

また、初の純国産の大容量GTCC発電設備の開発成果やその後の運転実績の蓄積は、GTCC発電設備の信頼性を高め、その後の普及拡大に多大な影響を与えた。

なお、当時社長の言葉はガスタービン累積発電時間20万時間到達記念モニュメントにも記され、当発電所ミュージアムに展示されている。（図3参照）



Fig. 3 燃焼器とともに展示される記念モニュメント
(当発電所ミュージアムにて)

3.1 ガスタービンおよび燃焼器の開発について

3.1.1 MW-701D形ガスタービンの開発

3号系列に採用されたMW-701D形ガスタービンは、当時最新の高温技術を駆使して開発した50Hz機（T1T1,154℃）であり、在来のガスタービンと比較し、T1Tで約100℃、出力で約1.3倍の高性能化が図られた。

MW-701D形は基本的には既存機MW-501B形をベースに60Hz機のMW-501Dで実証された最新の高温技術導入により高性能化を図った。

単機出力を増加させるため、燃焼ガス量を増大させ、これにより増加した排気流出損失の軽減のため、第4段動翼の長翼化が図られた。

3.1.2 乾式予混合型低NOx燃焼器の開発・実用化

当時のGT燃焼器の主流は拡散燃焼方式で、NOx低減のために、水または蒸気噴霧が用いられていたが、この方式では熱効率が低下し大量の水が必要であるため、3号系列では世界に先駆けて乾式予混合型低NOx燃焼器の開発・実用化に成功した。（図4参照）

なお、この予混合燃焼方式は低NOx対策とし現在でもガスタービンに採用されている。

本燃焼器の開発は、ゼロからのスタートであったこと



Fig. 4 乾式予混合型低NOx燃焼器

から、予混合燃焼の安定燃焼範囲が狭いという特性に対し、以下対策を採用した。

- ① 燃焼安定のためにパイロットバーナの設置
- ② 燃空比調節のために空気バイパス弁の設置

試作燃焼器による燃焼試験では予混合ノズルのフラッシュバックによる焼損発生等のトラブルの連続であったが、試行錯誤を繰り返し最適なノズル形状を開発した。また、試運転においても着火失敗や燃焼振動による燃焼器サポート不具合等開発・試作段階では掴めなかったトラブルも発生した。しかし、設計・試作・実用化など各段階における様々な課題に対し、徹底的に悩み抜いて根本的な解決策を見出したことで、本燃焼器の開発・実用化が成された。

3.2 運転開始後初期段階に経験したトラブル

当時の最新技術を満載した3号系列は、技術的に未知の領域への挑戦であり初期段階では様々なトラブルを経験したが、東北電力㈱と三菱重工㈱両社の役割を把握し、各々の専門的知見を反映し迅速に解決した。

3.2.1 タービン動翼の高温酸化

タービン動翼は、高温の燃焼ガスに曝されるだけでなく、ローターと共に回転するため強い遠心力を受けることから耐熱強度の高いU-720材を使用し、さらに翼内部を空気で冷却する空気冷却構造を採用した。

しかし、運転開始後のタービン動翼点検において翼表面に亀甲状の欠陥が認められた。これは、メタル温度が高く、翼材料内の粒界強化成分が酸化し消失したことが原因であった。これに対しては、翼冷却強化や翼表面へのコーティング施工、かつ翼材料も高温長時間組織・強度安定性に優れたU-520に変更するなどの対策をすることで解消を図り、運転実績を積み上げている。(図5参照)

3.2.2 燃焼器内部のTBC剥離と損傷

3号系列の燃焼器には、燃焼器内部表面に遮熱コーティング (Thermal Barrier Coating: 以下TBC) を施工しており、運転開始初期の点検において、パイロット内筒のTBC剥離および、この影響による損傷が認められた。

この発生要因を調査するため、材料組織検査を行った結果、TBCアンダーコーティング層の内部酸化による

| 時期 | 運転時 | 現在の運用翼 |
|---------|---------------|--------------|
| 材質・冷却構造 | U-720 冷却穴一列 | U-520 冷却穴二列 |
| コーティング | 無し | TBC |
| 状況 | 亀甲状クラック発生 | 点検結果問題なし |

Fig. 5 タービン1段動翼の信頼性向上

剥離であるとの結論を得たことから、冷却空気孔径の拡大、冷却空気孔追設およびTBCアンダーコート材の材質を変更する等の対策を行った。この結果、TBC剥離の抑制に伴うメタル温度の低減により、燃焼器の損傷防止および延命化が成された。

本燃焼器ではその他トラブル事例から冷却空気配分の適正化、尾筒へのTBC施工など細部に亘って改良が加えられ燃焼器の信頼性が一層高まった。(図6参照)



Fig. 6 出口部全面にTBC施工した燃焼器尾筒

3.2.3 燃焼振動によるタービン動翼の不具合

タービン動翼の不具合が認められたことから、原因を調査した結果、燃焼器の燃焼振動との相関があることが判明した。燃焼振動とは燃焼に伴う発熱量の変動 (発熱量の時間変化) と燃焼器音響特性の相互作用により生じる自励的な気柱振動である。当時はまだ、燃焼振動の存在が正確には知られておらず、このトラブル経験により燃焼振動の怖さを知ることとなった。この動翼は低周波圧力変動により翼が共振し不具合が発生したことが分かっており、対策とし燃焼調整による低周波振動の低減と翼の固有振動数を変えることで不具合を解消した。

当時、燃焼振動は一部 (18本中2本) の燃焼器の仮設検出器で計測していたが、実機の燃焼振動データと検出器の相関をとることで、燃焼振動を連続して検出できる位置変更を可能とした。その後、検出器を燃焼器全数 (18本) に設置し、連続計測することで監視強化を図った。

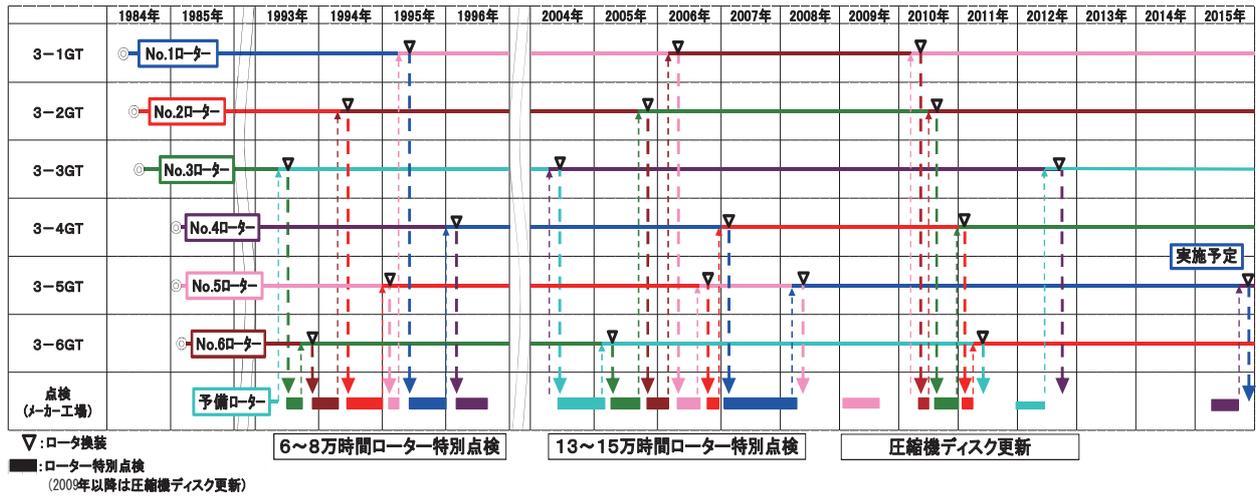


Fig. 7 ガスタービンローター特別点検実施状況

4. 運用・保守管理の充実

3号系列導入時には1980年代当時の従来型プラントと比較し熱効率は約1割高く従来型プラントの限界を飛躍的に押し上げた。また、多軸型GTCC発電設備は所内電力使用量が少なく、1985年（昭和60年）から9年間に亘り、送電端熱効率国内トップを継続するなどGTCC発電設備の高い運用性と高効率を証明した。さらに、3号系列では運開後の運用実績より、GT性能を最大限活かした運用が可能と判断し、GT出力変更（133⇒137MW）を行った。

4.1 予備ローター導入とローター特別点検の実施

3号系列GTは長期運用のフリーリーダーとなる事は予め予想され、中でもローターの長期運用信頼性に関する実績に基づいたデータは少なく、その確認をする必要があると考え、ローター特別点検を実施してきた。

ローター点検に伴うGT停止期間短縮を図るため6台のGTに対して予備ローターを導入し、1回目特別点検を運転時間6～8万時間の間に、2回目を運転時間13～15万時間で実施してきた。（図7参照）

このようなきめ細かな整備を実施したことも20万時間以上もの長期運用達成へと繋がったものと考えられる。

なお、ローター特別点検はメーカー工場にて、圧縮機部、タービン部、中間軸部の目視点検、磁粉探傷検査等の非破壊検査や材質硬度計測等を実施した。

また、ローター信頼性向上として圧縮機後方段ディスクの更新、中間軸インロー部の改造等を行った。

4.2 GT吸気温度低減による増出力

GTは出力特性上、吸気温度が高い時期に出力が低下する特徴があることから、3号系列ではGT吸気温度低下による増出力の検討（効果的な冷却方式の検討・実機試験等）を行い、1989年（平成元年）よりGT吸気口にスプレーノズルを設置し散水することで増出力を図る運用を開始した。（表2参照）

Table 2 吸気口散水試験データ

| 大気温度 (°C) | 相対湿度 (%) | 吸気温度 (°C) | 増出力 (MW) | 熱効率 (%) |
|-----------|----------|-----------|----------|---------|
| 30 | 60 | -1.8 | +12 | +0.035 |

この取組みにより需給が逼迫する夏場における増出力が可能となるとともに、燃焼用空気の湿分が増すことで排出NOx量が低減し、脱硝用アンモニアの使用量節減が図れた。

また、この取組みは1993年（平成5年）省エネルギー推進全国大会において通商産業大臣賞を受賞した。

また、このノウハウは当発電所4号系列にも適用されており、現在も夏場の供給力増加に大きく貢献している。

4.3 GT高温部品の寿命管理

GTの高温部品は長時間使用により材料の熱疲労、クリープ、高温酸化、腐食等により亀裂・減肉等が発生することから、部品毎に定期交換および補修が必要となる。

3号系列GTでは長年に亘る運用実績の中で、寿命に達した部品の破壊調査を行い、使用実績毎の材料組織状況等を把握しながら運用している。

例えば、動翼材料については運転時の高温・高応力下でダメージを受けた組織は、再熱処理によりクリープ強度が回復することは定性的に知見としてあった。そこで実機長時間使用状態での強度低下量並びに再熱処理による強度回復効果の確認を行うために動翼の破壊調査の際、実翼から強度試験片を採取し、クリープ破断強度を確認してきた。

その結果、図8に示すように、再熱処理によりクリープ強度が回復できることが確認され、次の点検時期まで問題なく運用できるバックデータを取得するとともに、実機信頼性向上のデータを構築しながら運用してきた。このような地道な取組みで得られた技術データにより、GT高温部品の信頼性向上に努めるとともに、GTメンテナンス費用の大半をしめる高温部品のコスト低減も

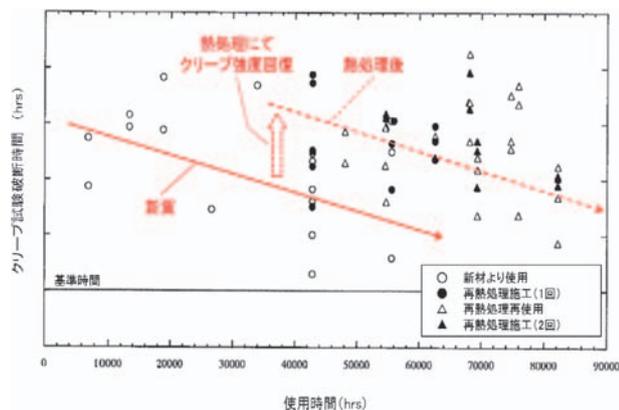


Fig. 8 実機クリープ破断試験結果

図ってきた。

5. 新技術採用によるプラント運用の高度化

3号系列は純国産技術にこだわり1980年代当時の最新技術を駆使し、開発・導入された。

その後、3号系列が先駆けとなった日本の純国産によるGTCC発電設備は世界・我が国において、その運用性・高効率等が高く認められ数多くの地点に導入され技術開発も進んだ。

3号系列では営業運転開始以来、緻密な保守管理に努めプラントの高稼働・高効率を維持するとともに、当所4号系列等の後継機における最新技術をフィードバックし採用することで更なるプラント運用性・信頼性の向上、高効率化による燃料使用量低減および環境負荷低減に努めている。

5.1 新型燃焼器導入による排出NOx低減

3号系列導入時に開発・実用化した乾式予混合型燃焼器に技術改良を加え、更なる環境負荷の低減および高メタン燃料をも燃焼可能とすることでのプラント運用性向上を目的に新型燃焼器（マルチノズル型燃焼器）を開発し2003年（平成15年）導入した。（図9参照）

【新型燃焼器導入による主なメリット】

- ① GT出口排出NOxの低減（約80ppm⇒40ppm）
- ② 脱硝用アンモニア使用量削減



Fig. 9 新型燃焼器（マルチノズル型）

- ③ 高メタン燃料が燃焼可能となったことによる3号系列プラントの運用性向上
- ④ 燃焼器寿命延伸・点検周期延長による修繕費削減

5.2 冷却強化翼採用によるプラント運用性向上および高温部品の延命化

3号系列GTでは常用T1Tを約50℃上昇させ増出力を図るピーク運転（T1T：1,201℃）を長期間、安定的に行うためには、燃焼器やタービン動静翼などの高温部品の信頼性を向上する必要があった。そこで、当時の燃焼器・タービン動静翼の最新技術をフィードバックし、2003年（平成15年）に前述の新型燃焼器を採用し、2008年（平成20年）には高温部品の耐力向上と熱効率の向上を目的にタービン冷却強化翼を採用した。（図10参照）

【主な構造変更内容】

- ① 1, 2段動静翼へのTBCコーティング施工
- ② 冷却構造の変更（冷却孔形状見直し、孔追加）

【冷却強化翼採用による効果】

- ① 長期間・安定的なピーク運転が可能となることで増出力およびプラント運用性の向上
- ② プラント熱効率の向上
- ③ 高温部品の延命化

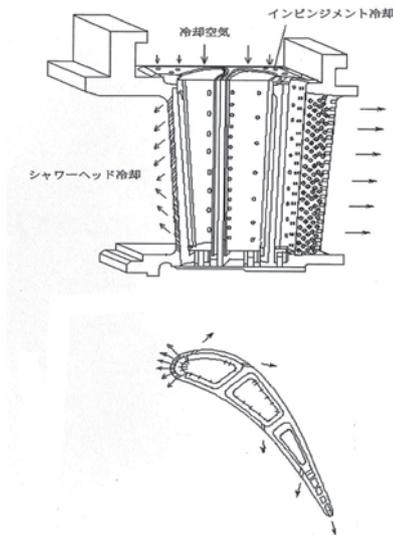


Fig.10 冷却強化翼（1段静翼）

5.3 プラント運用の多様化

3号系列は1980年代の増え続ける電力需要に対し、ベース電源としての役割を期待され導入された。

多軸型GTCC発電設備は蒸気タービンが大型化されることで、定格負荷での熱効率が高く、ベース電源に適しており、導入後、そのメリットを活かしベース電源として高い熱効率を維持し、その役割を果たしてきたが、その後の電源構成変遷に伴い求められる役割は次第にミドル電源へと変わり、現在では電力需給調整を担っている。

5.3.1 DSS運用の実施

3号系列は多軸型GTCCであるため蒸気タービンを停止せずGTだけの起動・停止が可能な点を活かし、起動・停止時間が早いGTのみを日間起動停止運用（Daily Start up and Shut down :以下DSS運用）とすることで、夜間の電力需給調整に貢献している。DSS運用導入にあたり事前に設備耐力強化策を検討・実施し、現在まで安定したDSS運用を継続している。（表3参照）

Table 3 DSS運用に向けた主な設備対策（GT関係）

| 機 器 | 懸念された事象 | 対 策 |
|----------|---------------------|-----------------------------|
| 圧縮機静翼 | 溶接部を起点とした静翼環テノン部の損傷 | テノン構造のない組立式および電子ビーム溶接式静翼環採用 |
| 排気車室、排気室 | 熱応力による亀裂・変形 | 厚肉化による剛性強化および構造変更による応力緩和 |
| エアセパレータ | 摺動面のフレッティングを起点とした亀裂 | 摺動面のない分割型エアセパレータ採用 |

5.3.2 AFC運用, GF運用の実施

2009年（平成21年）より設備の健全性を確認しながら自動周波数制御運転（Automatic Frequency Control :以下AFC運用）、ガバナフリー運転（以下GF運用）を順次導入してきている。

今後、電力系統においては周波数変動の調整機能を有さない自然エネルギーの導入拡大が予想され、3号系列で実施しているAFC・GF運用による系統周波数調整はさらにその必要性が増すことから、今後も安定した系統周波数調整の役割を果たしていく。

6. 東日本大震災後の供給力確保に向けた取組み

2011年（平成23年）3月11日に東日本大震災が発生し、太平洋側火力発電設備等が甚大な被害に直面し、深刻な供給力不足の解消が喫緊の課題となった。

当発電所3・4号系列では震災以前より継続的に設備耐力強化を図り、T1T高温化による増出力運用が常時可能と評価し、法令諸手続きの準備を進めているところであった。

こうした中発生した深刻な供給力不足に対し、関係箇所のご理解、ご協力をいただき、震災発生の翌週（3月17日）には、認可出力変更届出が受理された。

3・4号系列の増出力運用によって、夏場の需給逼迫時の追加供給力（最大210MW）として戦列に加えることができた。（表4参照）

Table 4 3・4号系列増出力効果

| 3号系列 | 増出力前 | 増出力後 |
|---------------------|-------------------|-------------------------|
| 系列出力（MW） （@大気温度） | 1,090 （@24℃以下） | 1,210 （@7℃以下） |
| 最大増出力（MW） | — | 120 |

| 4号系列 | 増出力前 | 増出力後 |
|---------------------|------------------|-------------------------|
| 系列出力（MW） （@大気温度） | 1,610 （@8℃以下） | 1,700 （@4℃以下） |
| 最大増出力（MW） | — | 90 |

7. おわりに

東北電力(株)ではこれまで紹介した当発電所3号系列で国内初の大容量GTCC発電設備を開発・導入して以来、同4号系列、仙台火力4号機そして、現在建設中の新仙台火力3号系列まで高効率GTCC発電設備の開発・運用に邁進してきた。

これは「純国産技術による世界初のコンバインドサイクル導入」という号令の元、開発・導入された3号系列の建設および運転・保守により得られた知見により、成し得たものであり、火力発電技術発展に大きな影響を与えた。また、純国産による大容量GTCC発電設備の開発・運用実績は、国産ガスタービン技術発展の礎としても、我が国における発電技術の発展にも大きく貢献できたと考えられる。

大容量GTCC発電設備の先駆けとし約30年前に運転を開始した3号系列は累積発電時間20万時間を達成し、今後は未踏の長時間運転領域に入っていき、これまで培ってきた運用・保守技術を基盤とし、今後も先行機ならではの課題に挑戦していく。

3号系列の導入に当たっては東北電力(株)ならびに三菱日立パワーシステムズ(株)共に手探りの点も多く、技術者として技術研鑽の日々であった。また、運開後も長期運用に対する機器の保守・信頼性向上のため継続的にメーカーと共同研究を行ってきた。このたゆまぬ研究の推進力と新技術への挑戦の姿勢は火力エンジニアの伝統として現在も生き続けており、引続き継承していくべきものと考えている。

本寄稿に抛り3号系列の開発・建設・運用・保守に尽力された先人の辛苦に敬意を表しめくくるものとした。

ダイハツ ポンプ駆動用ガスタービン DF-4W (横軸横型)/DFL-4W (立軸L型)

野原 弘康*1
NOHARA Hiroyasu

キーワード：ポンプ駆動, 2軸ガスタービン, 2機1軸, 立軸L型

Pump drive, Two shaft gas turbine, Twin input single output, Vertical shaft and L-type installing

1. はじめに

IPCC⁽¹⁾ (気候変動に関する政府間パネル) において、大雨の頻度増加や台風の激化などが指摘されているように、近年、ゲリラ豪雨と呼ばれる局所的かつ時間雨量の極めて多い豪雨が頻発している。さらに、都市化が進んで地下に浸透する雨水が減少し、下水に流入する雨水が増加していることも拍車をかけ、河川の氾濫被害をもたらしている。そこで、ポンプによる強制排水施設 (ポンプ場、排水機場) の重要性が高まり、排水施設の新設や既存設備の能力増強が求められてきている。

ダイハツディーゼル(株)は、自社開発により1998年より500PS (368kW) 級のポンプ駆動用2軸式横軸横型ガスタービン (DFシリーズ) を製造・販売している。その後、ガスジェネレータに対し出力タービンをL型に配置するユニークな構成により出力軸を立軸にし、直交減速機を不要とした2軸式立軸L型ガスタービン (DFLシリーズ) を2000年からラインナップに追加した⁽²⁾。

今回、出力ラインナップ増強を図るなかで、特に都市部で要求の高い、更なる省スペース化に対応するため、1000PS (736kW) 級のDF-4W型ポンプ駆動用ガスタービンを開発した。DF-4Wは、DF-4型ガスタービンを出力減速機を介して2機1軸化することで、出力を2倍にしたものである。続いてDFLシリーズについても、DFL-4型ガスタービンを2機1軸化したDFL-4Wを開発したので併せて紹介する。

2. 概要および特長

DF-4W (横軸横型) / DFL-4W (立軸L型) ガスタービンの特長を以下に述べる。表1に主要諸元を示す。

2.1 自社開発の純国産ガスタービン

今回紹介するDF-4W / DFL-4Wは、自社開発の純国産ガスタービンで実績のあるDF-4およびDFL-4型ガスタービンの機関本体 (ガスジェネレータおよび出力ター

ビン) を2台組み合わせたものである。国内製造のメリットを生かし、新規物件については短納期対応、納入後については充実したアフターサービスが可能である。

尚、国内のポンプ駆動用2軸式立型ガスタービンは、当社を除いて海外製の航空機転用型ガスタービン (以下航転型) を使用している。

Table 1 Main specifications of DF-4W and DFL-4W pump drive gas turbine unit

| 名称 | DF-4W | DFL-4W |
|----------------|----------------------------|--------------------------|
| 型式 | 単純開放サイクル2軸式 | |
| 構造 | 圧縮機 | 1段遠心式 |
| | 燃焼器 | 単筒缶型 |
| | ガスジェネレータタービン | 2段軸流式 |
| | 出力タービン | 1段軸流式 |
| 定格出力 | 736kW (1000PS) | 706kW (960PS) |
| ガスジェネレータ定格回転速度 | 41000min ⁻¹ | |
| 出力軸定格回転速度 | 1000~1500min ⁻¹ | 100~400min ⁻¹ |
| 出力軸回転速度変速範囲 | 60~100% | 60~100% |
| 始動時間 | 60秒以内 | |
| 燃料 | A重油・軽油・灯油 | |
| 機関寸法 LxWxH | 2600x2000x1550 (mm) | 2600x2600x2100 (mm) |
| 機関重量 | 3500kg | 5700kg |

2.2 小型高出力

単機出力500PS (368kW) 級のガスタービン2台を並列に配置して2機1軸とすることで、ポンプ駆動装

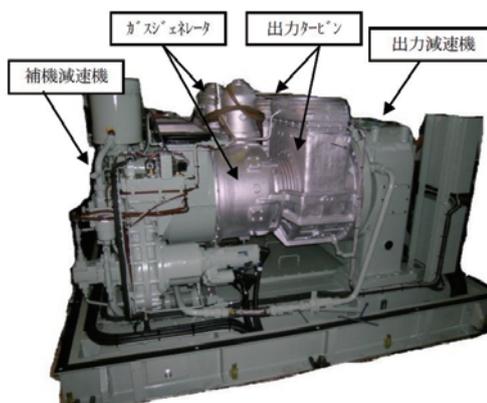


Fig. 1 External appearance of DF-4W

原稿受付 2014年5月28日

*1 ダイハツディーゼル(株) 技術開発部
〒524-0035 滋賀県守山市阿村町45番地

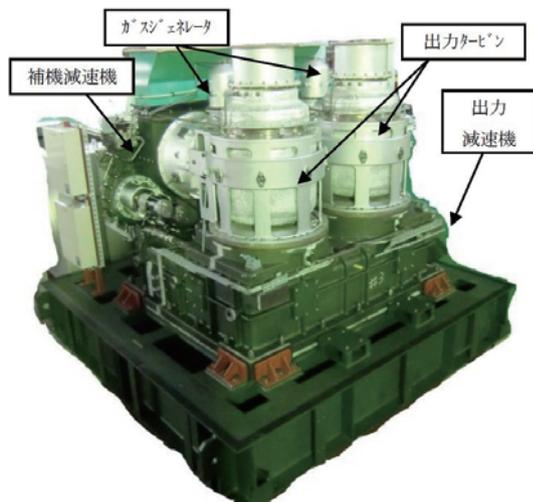


Fig. 2 External appearance of DFL-4W

置パッケージの全長を短くし、航転型を使用したものと同等の設置寸法を実現した。図1, 図2にそれぞれDF-4W型およびDFL-4W型ガスタービン外観を示す。

2.3 高いメンテナンス性

DF-4W / DFL-4W型ガスタービンは、補機減速機、ガスジェネレータ、出力タービンおよび出力減速機の4つのモジュールで構成されているため、各モジュール単位で交換が可能である。また、燃焼器は航転型にみられるような環状型ではなく、単筒缶型を採用しているため、点検・交換が容易である。

DFL-4Wについては、出力タービンの立軸化にあたり、航転型で使用されている潤滑油排油ポンプは使用せずにスムーズに排油できる構造とした。これにより、当該システムを含むメンテナンスおよび不適合要因を排除した。図3にDFL-4/DFL-4W型ガスタービン断面図を示す。

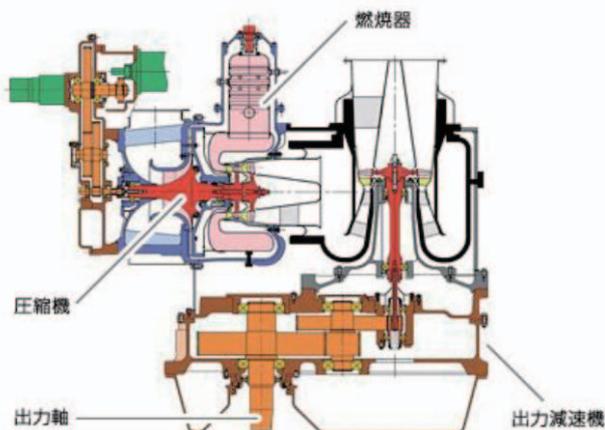


Fig. 3 Cross sectional view of DFL-4 / DFL-4W

2.4 高い始動信頼性

DF-4WおよびDFL-4Wは、2軸式ガスタービンを2機1軸に組み合わせているものであり、出力タービンについては2機直結状態にあるが、ガスジェネレータは各々が機械的に独立している。これに対し、始動時に2機のガスジェネレータを個別に燃料制御することで、最適な制御を行っている。図4に始動性能の一例を示す。

また、ガスタービン停止動作中に再度始動指令が入った場合も、機関遊転中に始動制御を行い、通常始動と同様に60秒以内で始動可能である(オプション)。始動指令入力のタイミングに依らず60秒以内で始動できるため、降雨量増加に備えたポンプ待機運転を短くできるなど、運用上の利点がある。

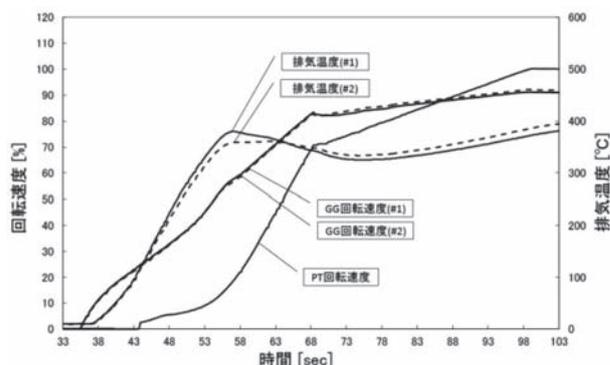


Fig. 4 Trend of usual start (DFL-4W)

2.5 高性能制御装置

デジタルコントローラを組み込んだ当社ガスタービンコントローラ(GTC)は、ハードのみならずソフトウェアについても自社開発であり、始動を含めた全運転条件で安定した運転制御を可能にしている。

また、万一、制御装置の故障が発生した場合、ガスタービン運転中であっても、停止することなく自動的に予備側のGTCに切替え、運転を継続する2重化制御³⁾にも対応可能としている(オプション)。

3. まとめ

1998年より製造・販売を開始したダイハツポンプ駆動用ガスタービンは、多くの納入実績と信頼性の面で高く評価いただいている。

今回、ラインナップに加わったDF-4WおよびDFL-4W型ガスタービンが、さらに多くのお客様にご活用いただき、住民の皆様の生命と財産を守り、国土保全の一助となることを期待している。

4. 引用文献

- (1) 気象庁, IPCC第4次評価報告書第1作業部会報告書技術要約, (2008), pp. 23-36
- (2) 木下茂樹, "ポンプ駆動用立軸L形ガスタービン", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 27, No. 1 (1999), pp. 49-51.
- (3) 杉山敏昭, 原動機制御装置, 特開2010-182251, (2010-08-19)

非常用ガスタービン発電装置における低環境負荷及びデュアル燃料対応技術の紹介

Introduction of Dual-Fuel and Low Environmental Impact Technology of Standby Gas Turbine Generator Set

樽井 真一*¹
TARUI Sinichi

小山 正道*¹
KOYAMA Masamichi

植村 敏幸*¹
UEMURA Toshiyuki

大村 真啓*¹
OMURA Masahiro

ABSTRACT

It is recently required that standby gas turbine engines meet to demands of low environmental impacts and applying many kinds of fuels. In this paper, recent topics in NIIGATA POWER SYSTEMS regarding to the low environmental and dual-fueled standby gas turbine engine will be introduced. For the low environmental one, it is explained that smoke emissions during startup of a standby gas turbine are reduced by improvements of fuel control logics. Finally, fuel control logics and trend data are focused in when fuel changes between liquid and gas. The fuel changes in extremely short time and with low fluctuations of engine speed are realized by fully electronic fuel control.

Key words : Standby gas turbine engine, Fuel control, Dual-fuel, Low environment

1. はじめに

東日本を襲った東日本大震災は発生から2年半が経過した今でも記憶に新しい。この震災にて改めて天災の恐ろしさを認識すると共に、非常事態に備えた安定した電力確保の重要性を再認識した。

非常用発電装置の動力源としてはディーゼル機関やガスタービン機関が一般的である。しかし近年の首都圏のインテリジェントビル、データセンター、上水道施設、排水施設においては、屋上や住宅地に近接するなどの設置条件によりディーゼル機関に対して小型軽量で低環境負荷であるガスタービン機関の需要が高まっている。また災害時の企業のBCP (Business Continuity Plan) 対応として、燃料の調達、供給の観点から液体、ガス燃料のデュアル化が可能な非常用ガスタービン発電装置に注目が集まっている。

一般的に排気ガスがクリーンなガスタービン機関であるが、非常用として急速始動を行う際や、非常時の確実な着火性能を確保するため、始動時に黒煙を排出する場合がある⁽⁴⁾。本報ではこの始動時に排出されてしまう黒煙を着火性、始動性を確保しつつ改善した例を紹介する。

また、デュアル燃料対応としてガス燃焼時のメリット、負荷運転中の燃料切り替えなど新潟原動機㈱（以下当社という）が取組んでいる事例を紹介する。

2. ガスタービン機関

2.1 主要構造

ガスタービン内部構造を当社NGT3B-S型機関を例に紹介する^{(1),(2),(3)}。機関断面図を図1に示す。圧縮機は2段の遠心圧縮機を持ち、圧縮された空気は燃焼器に供給される。燃焼器で燃焼が行われた燃焼ガスは、タービンスクロールにて整流されタービンへ導かれ、排気ディフューザより排出される。表1にNGT3B-S型機関とCNT-3000EA型発電装置の主要目表を示す。

2.2 燃焼器

燃焼器ライナの概観を図2に示す。燃焼器は上部にスワラ及び空気孔、下部に希釈孔を持つ一般的な単筒缶型である。壁面冷却はフィルム冷却構造を採用しており、燃焼器壁面には冷却用の孔が設けられている。さらにライナ内壁面には遮熱コーティングが施工されており耐久性を高めている。着火には火花点火装置が用いられており確実な着火性能を確保している。ライナ上部には整流翼を設置することで、スワラに供給される燃焼用空気を整流し均一な燃焼が行われるよう配慮されている。燃焼

原稿受付 2013年9月3日

校閲完了 2014年5月30日

*1 新潟原動機㈱

〒957-0101 新潟県北蒲原郡聖籠町東港5-2756-3

器ライナに関しては液体燃料，ガス燃料共通して使用することが可能である。

2.3 燃料噴射ノズル

燃料噴射ノズルの概観図を図3に示す。燃料ノズルの液体燃料部は液体仕様，デュアル仕様同一であり，パイロット及びメインの2系統をもつ燃料噴射ノズルを採用している。ガスタービン始動時にはパイロットの圧力噴霧ノズルから燃料は噴霧され，始動中空気量が増加してくるとメインのエアブラストノズルからも供給される。ガス燃料とのデュアル燃料用ノズルは，液体用ノズルの上にガスノズルを取り付ける構造である。ガス燃料運転時，ガスノズルから供給されるガス燃料は，スワラから流入する燃焼用圧縮空気と共に燃焼器ライナ内に送られ燃焼が行われる。

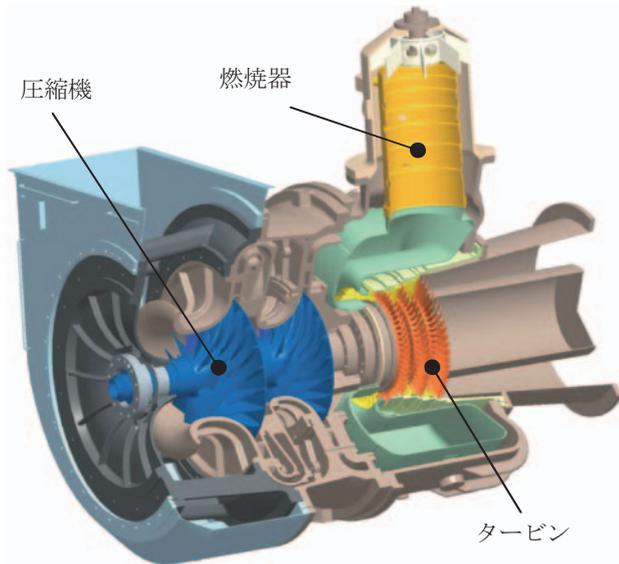


Fig. 1 Cutaway View of NGT3B

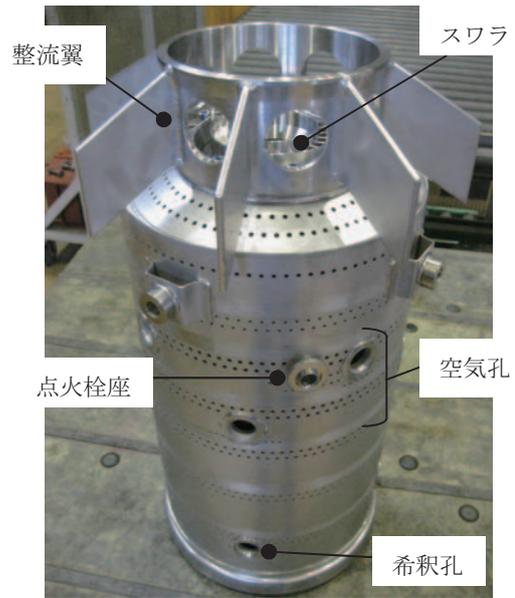
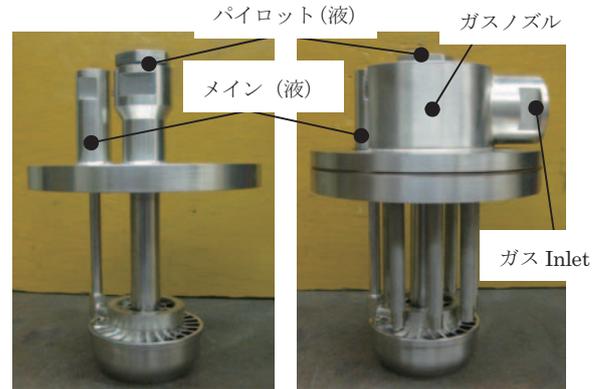


Fig. 2 Liner



(a) Fuel Injector (b) Dual Fuel Injector

Fig. 3 Fuel Injector

Table 1 Basic Specifications of the CNT-3000EA

| | | |
|--------|-------|------------------------|
| 発電装置 | 型式 | CNT-3000EA (DF) |
| | 発電容量 | 3000kVA |
| | 発電出力 | 2400kW |
| | 周波数 | 50/60Hz |
| | 始動時間 | 40秒以内 |
| 燃料 | 再始動時間 | 40秒以内 |
| | 燃料 | A重油，軽油，灯油，都市ガス(13A相当) |
| ガスタービン | 型式 | NGT3B-S |
| | 定格出力 | 2648 kW |
| | 回転速度 | 17600min ⁻¹ |
| | 圧縮機 | 遠心2段 |
| | 燃焼器 | 単筒缶型 |
| タービン | 軸流3段 | |

※周囲条件：40℃，高度150m
 ※装置型式 (DF) はデュアル燃料仕様を示す

3. 発電装置

3.1 エンクロージャ及び台床

一般的な非常用ガスタービン発電装置の断面を図4に示す。ガスタービンにより得られた動力は，減速機を介して同軸にカップリングされた発電機へ伝えられる。非常用発電装置の設置場所は，ビルの屋上に設置されるケースも多く，発電装置全体は軽量，コンパクトであることが要求される。そこでエンクロージャの吸気ダクト及び排気消音器は，騒音仕様を満足しながら軽量化が図られている。また，機関台床構造においても剛性，強度を保持しつつ，簡素な形状で自社旧製品に対し軽量化が図られている。

3.2 ガスタービン制御装置

ガスタービン制御装置は、高性能PLC (Programmable Logic Controller) を採用し、フルデジタルコントロールによりフレキシブルな燃料制御を可能にしている。良好な始動性能、負荷変動時の敏速な応答性能及び運転中の燃料切り替えは、このPLCにより実現されている。また、制御装置をパッケージに搭載することで、回転速度センサ、排気熱電対ケーブル類の外部配線を不要とし、ノイズに対する信頼性を高めている。

その他、リモートI/Oの採用により発電機盤・直流電源盤との信号の受け渡しを通信ケーブルとすることで外部配線の省配線化を図り、設置工事の簡素化を実現している。

3.3 始動性能

非常用発電装置は、日本の消防法規定に適合する停電から40秒以内での始動が可能である。図5に始動トレンド例を示す。横軸は始動指令からの時間、縦軸は回転速度及び排気温度を示す。

さらに、図6に示すように機関停止中に再び停電が起きた場合でも、再始動指令が入り機関停止から40秒以内で再始動を完了できることを実証している。この再始動技術は当社がパイオニアであり、1999年に開発・実用化して以来、大小の機種で多く納入実績がある。

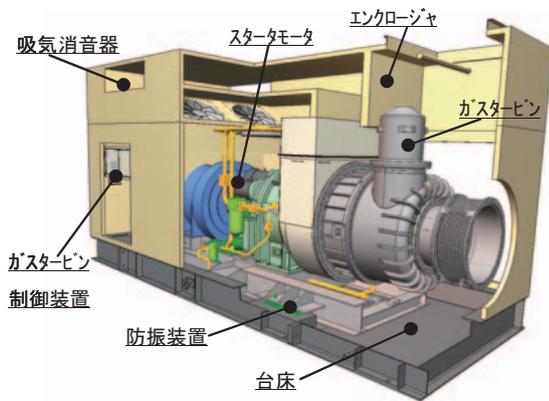


Fig. 4 Standby Gas Turbine Generator Set

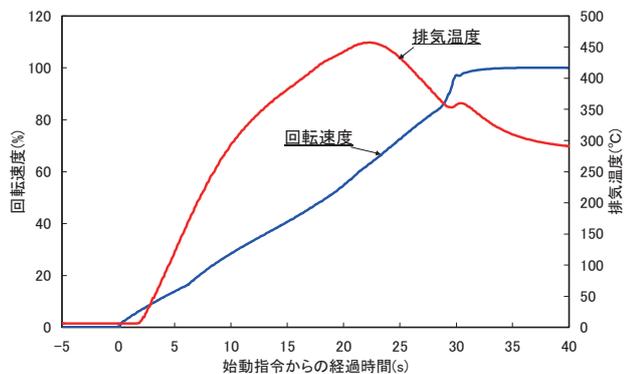


Fig. 5 Engine Start

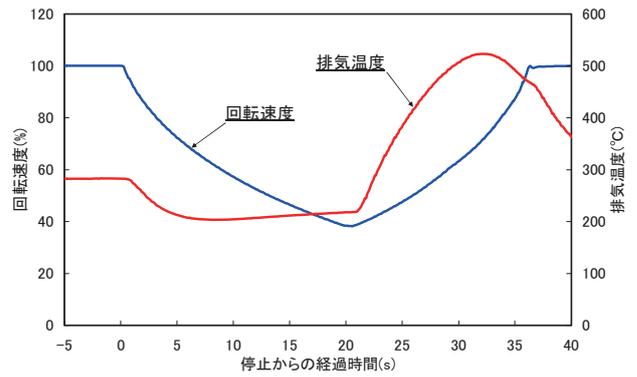


Fig. 6 Engine Restart

4. 黒煙低減対策

一般的にガスタービンはディーゼルに比べて窒素酸化物濃度や黒煙の少ないことが特徴として知られている。しかしながら、非常用として急速始動する時には燃料過多により黒煙を発生させる場合がある。環境に配慮する傾向が強まる中、こうした短時間の黒煙の低減もまた求められている。

4.1 従来の始動中燃料制御

ガスタービン始動中の燃料制御の模式図を図7に示す。横軸は始動指令からの時間を示す。燃料制御弁開度の上昇により、燃料流量は増加される。始動指令からスタータモータによりガスタービン回転速度が上昇し始める。燃料は始動指令後に供給され、着火を確認するまで一定流量に固定される。着火確認後、燃料制御弁開度を滑らかに上昇させることによりガスタービン回転速度は定格回転数に向けて加速されていく。定格回転到達後は、回転数を一定に保つように燃料制御弁開度は常に制御される。

図7の着火時に着目した燃料制御模式図を図8に示す。図8中の点線は別途実測された燃料制御弁開度の着火限界ラインを示す。着火限界ラインの上側は着火領域、下側は非着火領域である。始動指令後、一定量に制御された燃料制御弁開度のトレンドが、この着火限界ラインを下回るまで着火遅れ（燃料制御弁を開いてから着火するまでの経過時間）が生じると着火失敗に陥ることになる。通常の運用においては、着火限界ラインに対して十分裕度をもった燃料制御とする必要があるため、燃料制御弁開度は高めに設定される。結果的に着火時には燃料リッチ状態になり始動中の黒煙排出の要因の一つとなる。また、始動指令から着火完了までの間は一定燃料制御のため、着火までに多量の燃料が投入される。この事も着火時の燃料リッチ状態を強める要因になっている。

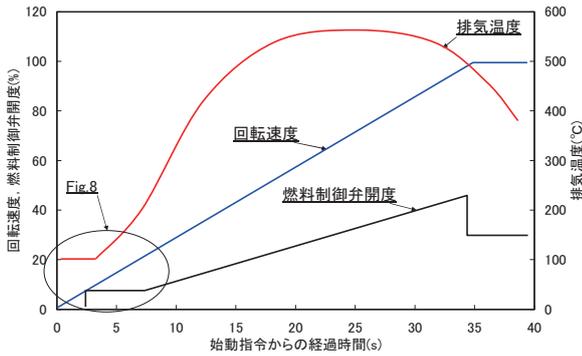


Fig. 7 Fuel Control Logics on Engine Start Up

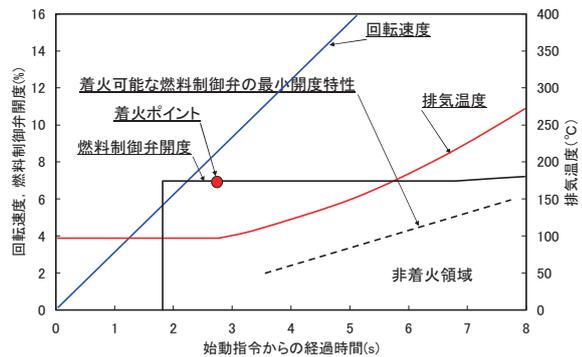


Fig. 8 Current Fuel Control Logics at Light Off

4.2 黒煙低減のための燃料制御

始動中の黒煙低減のために燃料制御方法を変更した。変更後の燃料制御の模式図を図9に示す。着火動作開始時期を従来(図8)より遅らすことで、高い回転速度で着火させ、着火時の空気量を増加させた。また、燃料制御弁開度は非着火領域に入らない様に着火限界ラインの少し上でランプ制御させた。最初の燃料制御弁開度及び燃料流量のランプ制御の割合は、着火可能な燃料制御弁の最小開度特性より上側で任意に設定することが可能である。着火限界ラインに近い燃料制御とすれば、煙突からの黒煙はより低減できるが、周囲環境による着火限界ラインの変動があった場合に着火の信頼性を損なうことが考えられる。一方着火限界ラインより上側へ余裕をもたせた燃料制御にすると黒煙は排出傾向にあるが、着火信頼性は確保される。実際の運用においては着火可能範囲を十分確認し、裕度をもって着火タイミングと燃料の増加割合を設定する必要がある。このようなフレキシブルな着火燃料制御は近年高性能化されてきて各GTメーカー⁽⁵⁾でも適用されているPLCや電気式燃料制御弁と、それらを自在にコントロールする自社開発した制御プログラムの融合により実現できたものである。

以上のように、着火ポイントを高回転速度側へ変更することにより始動中の黒煙を低減できた。また、着火遅れが生じて常に着火可能範囲に燃料流量を保つことにより、着火信頼性も確保した。実際の排気色の比較を次項に示す。

4.3 始動中の排気色の比較

燃料制御変更前の図8及び変更後の図9に示す燃料制御において、始動中のスモークをオパシティーメータにより計測した結果を図10に示す。使用燃料は特A重油である。

スモークトレンドは着火とほぼ同時に上昇し始め、始動開始から5~6秒後にピークとなった。ピーク値は燃料制御変更前が99.7%、変更後が61.0%であり、燃料制御変更によるスモーク値の減少が確認できた。また、変更後については着火ポイントが変更前より遅くなった分スモーク排出時間が変更前より短くなった(約3秒程度)。このときの排気煙突からの黒煙の様子を図11に示す。写真は始動中に最も濃いスモークとなることを示した。燃料制御変更後の(b)においては煙突からのスモークが殆ど気にならない程度まで減少した様子を確認できた。

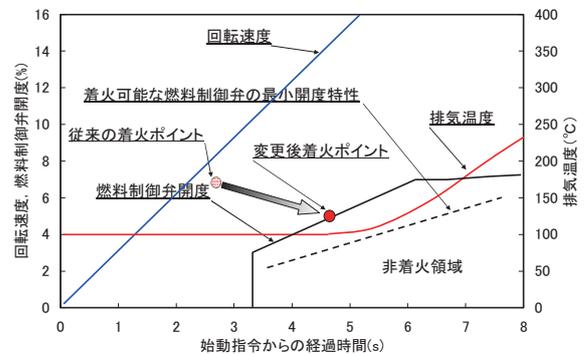


Fig. 9 Modified Fuel Control Logics at Light Off

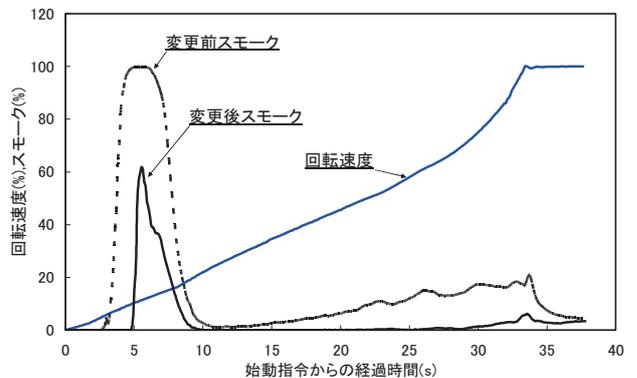


Fig.10 Smoke Trend



(a) Before Modification



(b) After Modification

Fig.11 Smoke Observations at the Outlet of Chimney

5. デュアル燃料対応技術

非常用発電装置用燃料は貯蔵が容易な液体燃料が一般的である。その一方LNG基地などの大型ガス設備ではガス燃料仕様の需要も増えつつある。また、非常時の企業のBCP対応としてインフラ設備が整っている地域においてはデュアル燃料対応の要望も多く、さらに低環境負荷という点においてもガス燃料の需要は増えつつある。そこで当社が取り組んでいるデュアル燃料対応技術について紹介する。

当社デュアル燃料対応発電装置には、液体、ガスそれぞれの燃料制御弁が配置されている。これらの制御弁をPLCにてデジタル制御することで小さな回転数変動で供給方法、発熱量の異なる燃料の切り替えを可能としている。

5.1 液体、ガス燃料における環境負荷

液体燃料に対して炭素含有量が少ないガス燃料は、一般的に温室効果ガスのひとつである二酸化炭素の排出量が少ないことが知られている。また燃料供給時の微粒化工程を必要としないガス燃料はスモークの排出がほとんどなく、また局所的な燃料過濃部が発生しにくいいため窒素酸化物の排出が少ない特徴を持つ。図12に当社発電装置における灯油、都市ガス運転時の排出量比較を示す。それぞれの計測は、NO_xは化学発光式、CO₂は非分散型赤外線式濃度計にて実施し、スモークはボッシュ式スモークメータにて計測を行った。その結果CO₂は約2割、

NO_xは約4割、スモークに関しては約8割減少しており、ガス燃料の低環境負荷性を立証している。

5.2 負荷運転時の燃料切り替え

デュアル燃料対応としてポイントは負荷運転中に燃料の切り替えが問題なく実施できることである。図13に定格負荷にて燃料切り替えを実施した際のトレンドデータ例を示す。燃料切り替えは液⇒ガス、ガス⇒液の双方向定格負荷で実施可能であり、切り替えはいずれの場合でも10秒間で完了する。短時間での燃料切り替えを可能とすることで、一方の燃料供給側に異常が発生した場合でも、もう一方の燃料への切り替えにより運用継続を可能とする。また切り替え中に必要な燃料量が減少するため、燃料供給側のアキュムレータ容量を小さくできるなどのメリットを持つ。

5.3 燃料切り替え中の負荷変動対応

発電装置用原動機は、商用電源や2次側システムとの連携運転等の影響で急激な負荷変動に対応する必要がある。当社発電装置においても定格負荷の遮断、投入を問題なく実施できるように調整されている。

これはデュアル燃料対応発電装置でも対応しており、さらに燃料切り替え中の定格負荷の遮断、投入も可能とすることで運用方法の多様化に適合できる。

図14に燃料切り替え中の定格負荷遮断時のトレンドデータ例を示す。燃料切り替え中の負荷変動に関しても、ガス、液体燃料双方の投入量をPLCにてフレキシブルかつバランス良く制御することで、周波数変動及び回転整定時間を小さく抑えることが可能となっている。

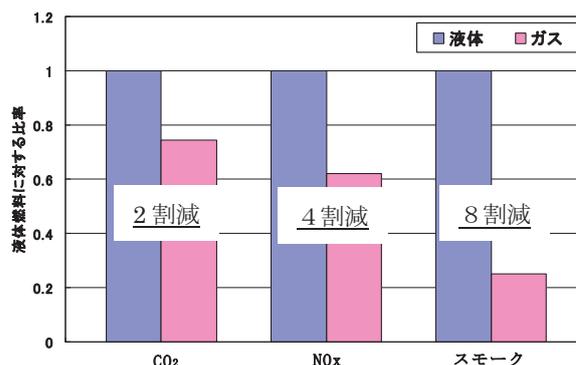


Fig.12 Comparisons of Emissions

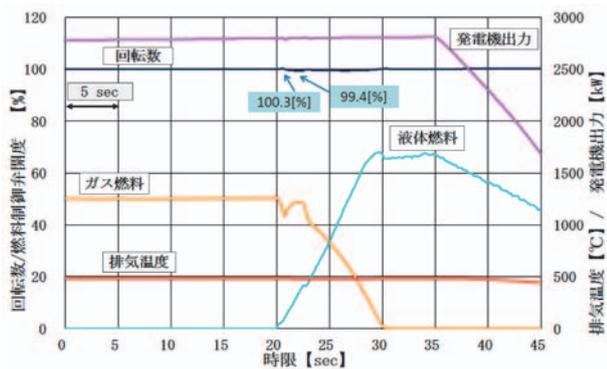
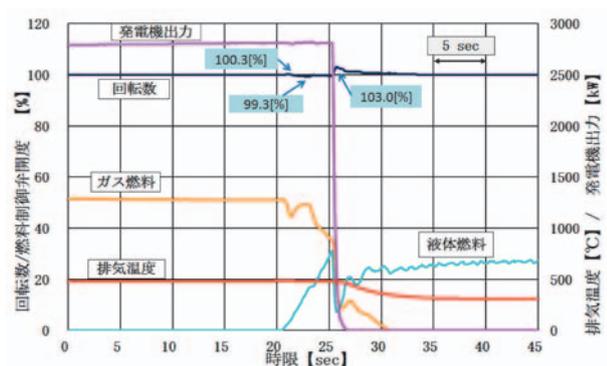


Fig.13 Fuel Switching (Gas⇒Liquid) on 100% Load

Fig.14 Load Dumping (100% Load ⇒ 0%)
While Fuel Switching (Gas⇒Liquid)

6. まとめ

東日本大震災以降、エネルギー供給に関してひとつの変革期が訪れている。非常時の安定した電力供給とともに、環境への配慮は最重要項目として検討すべきものとなりつつある。

当社は今後もこれらの最重要項目及び市場ニーズに適合した発電装置の開発を継続し、市場における新たな付加価値を創造していく。

参考文献

- (1) Tarui, S., Kojima, H., "Development of Niigata NGT3B gas turbine for large standby generator set", Proceedings of the 37th GTSJ Symposium (in Japanese) (2009), pp.305-316.
- (2) Kojima, H. et.al., "Development of Niigata-NGT3B gas turbine for large standby generator set", Proceedings of CIMAC Congress, No.79 (2010).
- (3) Tarui, S., "NIIGATA CNT-3000EA/CNT-6000EN Standby gas turbine generator set", Journal of the Gas Turbine Society of Japan, Vol.39, No.3 (in Japanese) (2011), pp.49-51.
- (4) Koyama, M., "Smoke Emission Reduction during a standby Gas Turbine Generator Set Starting Up", Journal of the Combustion Society of Japan, Vol.53, No.166 (in Japanese) (2011), pp.9-13.
- (5) Nishi, M. et.al., "Introduction of the low emission combustion system for 1.7 MW-class gas turbine M1A-17D", Proceedings of GTSJ congress, No.C-3 (in Japanese) (2013), pp.279-281.

遠心圧縮機の翼振動に関する研究 —ミスチューン応答特性の実験的評価—

Study on Vibration of Mistuned Radial Compressor —Experimental Evaluation of Vibratory Response—

下原 直人*¹
SHIMOHARA Naoto

村江 祥太*¹
MURAE Shota

服部 博明*¹
HATTORI Hiroaki

ABSTRACT

Experimental studies by using Non-Intrusive stress measurement system (NSMS) and strain gage (SG) were performed to reveal the forced response characteristics of mistuned radial compressor. Blade to blade variation in resonant frequency and resonant stress were evaluated from the data obtained by NSMS. Calculated variation in resonant frequency and resonant stress were found to be smaller than the values generally appeared in the radial turbine impeller. Back-to-back evaluation was performed for the measured data of vibratory displacement (NSMS) and strain (SG) for the same blade. Difference between the stresses converted from each measurement data (NSMS and SG) was below 17% and was considered to be acceptable level for the practical use. Additionally, forced response analysis was performed for the mistuned FE model. Analytical results showed the extremely different response characteristics between the two types of slightly different mistuning patterns and the importance of the mistuning identification.

Key words : Compressor, Mistune, NSMS, Turbocharger, Hammering

1. はじめに

遠心式ターボ機械は、小型化・軽量化・高速化に対する設計が容易であり、軸流式に比べて重さあたりの流量や出力を稼ぎやすいなどの利点から、車両・船用ターボチャージャー、産業用圧縮機など様々な用途で用いられる。その一方、これらの利点を生かした安定運用を実現するため、ターボ機械（回転機械）としての信頼性確保の観点から解決すべき技術課題も多く存在する。翼振動問題もその課題のひとつとして各所で多数の研究が行われている。

近年の遠心圧縮機における設計は、さらに大容量、高速回転、高効率化を目指す傾向にあり、空力的な翼形状最適化が進む反面、その代償として翼に発生する高い振動応力や遠心応力の克服が大きな課題となっている。それに伴い翼の振動特性（固有振動数、応答振幅、発生応力）を設計段階で極力正確に予測・評価する技術の開発が旧来以上に求められている。その一つとして、製造時に発生する形状や材料特性のばらつき（ミスチューニング）が共振時の応答特性へ与える影響の予測・計測技術が挙げられる。

遠心翼のミスチューニングに関する研究は、タービン翼については解析技術・計測技術ともに、近年、報告例が多い。J.M.Allport⁽¹⁾、A.Kulkarni⁽²⁾らは非接触翼振動計測（Non-intrusive stress measurement system, NSMS）による全翼計測を行い応答周波数のバラつきが約6～8%、応答振幅の最大値と最小値の比が約3～7倍程度であると報告している。また、D.Hemberger⁽³⁾や服部⁽⁴⁾らは自由度縮小モデルによる解析と実測にて2nd modeの固有振動数バラつきが約2%、それに対する応答振幅ばらつきが2.7倍程度と報告している。

一方、遠心圧縮機のミスチューニングに関しては報告例が少なく、実験的研究については、A.Kammerer⁽⁵⁾らによる産業用圧縮機の歪ゲージ計測、H.P.Dickmann⁽⁶⁾や松田⁽⁷⁾によるNSMSを用いた全翼計測の報告に留まり、計測精度検証を含む報告はほとんど見られない。

そこで、本研究では、遠心圧縮機の応答振幅・応答周波数のばらつきを実験的に把握することを目的とし、NSMSによる全翼振動計測と歪ゲージ（Strain gage telemetry system, SG）との同時計測による計測精度検証に取り組んだ。本論文では、実機計測データの解析結果とミスチューンに関する評価結果について報告する。

原稿受付 2013年9月6日

校閲完了 2014年4月21日

*1 (株)IHI

〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地

2. 試験概要

2.1 翼振動計測システム

非接触翼振動計測NSMSでは、回転体を囲むケーシングに図1に示すように複数の光学式センサーを取り付け、翼先端部がセンサーを通過したときに生じる反射光を検知してその時間を記録し、翼振動によって生じるセンサー到達時間のずれから、例えば、1/rev（回転パルス信号）を基準とした式(1)、式(2)を用いて振動応答変位(A, φ, N)を分析・同定する。式(1)はセンサー1で計測される時間、式(2)は翼振動に伴う時間偏差を含んだ翼がセンサー1とセンサー2の間を移動する時間を表す。

$$T_{s1} = T_{1/rev} \times n_{1/rev} + T_{1/rev} \frac{(\theta_{rk} - \theta_1)}{2\pi} + \frac{A}{U} \sin\{N(2\pi n_{1/rev} + \theta_{rk} - \theta_1) + \phi\} \quad (1)$$

$$T_{12} = T_{s1} - T_{s2} = T_{1/rev} \frac{Z}{2\pi} + \frac{2A}{U} \sin\left(N\frac{Z}{2}\right) \cos\left\{N\left(2\pi n_{1/rev} + \theta_{rk} - \theta_2 + \frac{Z}{2}\right) + \phi\right\} \quad (2)$$

- T_{s1} : 計測時間, T₁₂ : センサー(S₁)と(S₂)の通過時間
- T_{1/rev} : ロータの回転周期 (1/fr)
- n_{1/rev} : ロータの回転した回数
- θ_{rk} : 1/revからk番目の翼までの角度
- θ₁ : 1/revからセンサー (S₁) までの角度
- θ₂ : 1/revからセンサー (S₂) までの角度
- Z : センサー(S₁)とセンサー(S₂)の角度差(θ₁-θ₂)
- U : 計測位置の翼先端部周速
- A : 振動振幅, φ : 位相
- N : 回転次数比

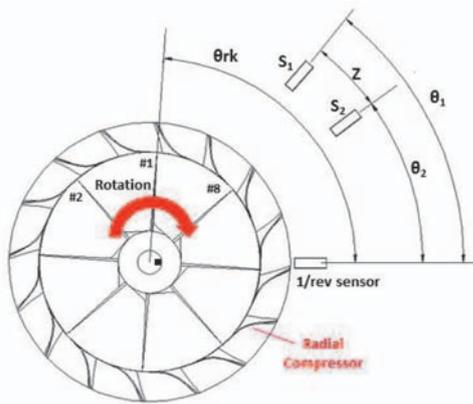


Fig. 1 Tip timing system image

この計測方法の利点は、計装に伴う翼の振動特性への影響がないこと、翼ごとの振動特性が個々の翼について計測可能なことである。航空エンジン分野では以前よりこの計測技術に関して多くの研究がなされており、現在は標準的な翼振動計測方法の一つとして利用されている^{(8)~(9)}。

2.2 試験供試体および対象モード

実機振動計測の対象として、320 ~ 750kWディーゼルエンジンに搭載される過給機の遠心圧縮機を使用した。圧縮機(図2)は、Full bladeとSplitter bladeのそれぞれ8枚ずつ(8+8)から構成され、圧縮機の下流側には、15枚のベンドディフューザが取り付けられている。実機計測にあたり、同スペックの圧縮機における過去のSG計測結果、Modal解析結果を参考に計測条件を決定した。

過去のSG計測試験で得られたSplitter bladeのキャンベル線図(図3)を参考に、計測対象モードを運用範囲中で最も振動応力が顕著なSplitter bladeの1st modeに定めた。またModal解析結果(図4)を参考に、当該モードで振動変位が最大となるLeading edge先端位置をNSMSセンサー位置として設定し光学式センサーを周上5本配置した。さらに、Splitter bladeの1枚にはNSMSとの比較を行なうために図3のデータ取得時と同位置に歪ゲージを貼付し、Telemetry systemにより振動歪を計測することとした。



Fig. 2 Centrifugal compressor

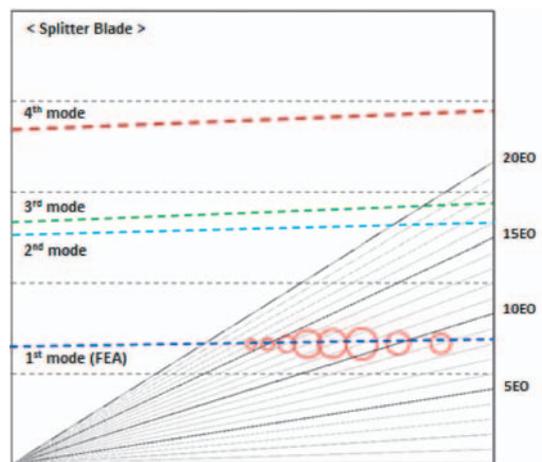


Fig. 3 Campbell diagram (strain gage)

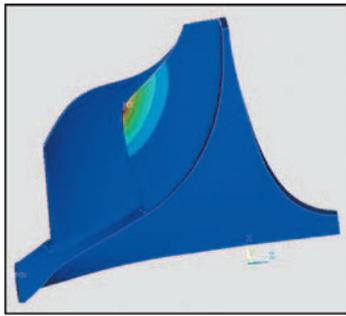


Fig. 4 1st mode shape (FEA)
(Modal displacement)

2.3 試験設備

試験は過給機専用試験リグで実施した。試験スタンドは、流量、圧力、温度などの測定機器を装備し、試験運転中の圧縮機作動点をオンラインモニタリングしながら、圧縮機の性能マップ上で監視することができる。圧縮機はタービン駆動で、回転数制御は燃焼ガスの流入量調整により行う。回転数はベアリングハウジング内部に取り付けた渦電流センサーで計測した。さらに、試験中の回転体の異常振動や圧縮機のサージ検知のために、ピックアップによる外部振動や静圧プローブによる圧力変動モニタリングも実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 計測精度

NSMS計測とSG計測により得られた歪ゲージ貼付翼のキャンベル線図を図5に示す。横軸は最大振幅発生時の回転数で無次元化している。円の径は、振動振幅(NSMS)と翼の最大応力発生位置における応力(SG)を示す。また、図中にModal解析で得られた1st modeの固有振動数(横実線)を示す。

NSMS計測のキャンベル線図(図5上段)から11EO(Excitation order), 12EO, 13EO, 14EO, 15EOと1st mode固有振動数ラインの交差点付近で共振を示すバブル円の集中が見られ、11EOで最大応答振幅が発生している傾向が確認できる。同様の傾向はSG計測(図5下段)からも得られた。

FE解析から得られた1st modeの固有振動数を基準に最大応答振幅時の共振周波数を比較すると、その差は0.3%以内であり、さらに両計測値の差は0.1%(表1)であった。このことからNSMS計測による共振周波数検出が、SG計測と同等レベルの精度で行われていることを確認できた。励振次数(11EO)については、共振次数が比較的高次であることや、ディフューザ枚数が15枚であることからスクロール励振やバンドディフューザなどに起因する励振ではないと推察されるが励振源の特定は本論文の主旨と異なるため、ここでは議論しない。

次に、NSMS計測による振幅検出の精度について述べる。SG計測で得られた最大応力値とNSMS計測で得られた翼端最大振幅値を図6の手順により最大応力発生位

置の応力に換算して比較したものを表1に示す。変位から応力への換算には、変位・応力換算をModal解析で得られた関係から直接換算する方法と、変位・歪の関係を台上加振試験で得た後、歪・応力換算をModal解析により行う方法の2通りをとった。解析による換算には周期対称モデルによるModal解析で得られた当該モード(重根モード)の関係をを用いた。なお、NSMSによる振幅値は、SG計測で得られた値で無次元化している。

表1で明らかのようにNSMSとSG計測の最大応力発生位置の応力換算値の差は、約10~17%程度であった。なお、値に幅があるのは、換算係数の算出方法の違いによるものである。

これまで遠心圧縮機に対する同様のシステムを用いた同時計測、計測精度の検証に関する報告はほとんど見られないが、M.Zielinski⁽¹⁰⁾やV.Charles⁽¹¹⁾らは、比較的応答振幅レベルの大きい航空エンジン圧縮機要素や軸流ファンを対象とした計測を行い、非接触翼振動計測と歪ゲージ計測の差は約±10~20%程度であったとしている。ここから判断すれば、換算係数による誤差を含めても本NSMS計測の振幅検出精度は、実用上十分なものであると判断できる。ただし、両計測方法の評価誤差を小さくするためにも換算係数の最適な算出方法の確立は重要なものであり、今後の課題としたい。

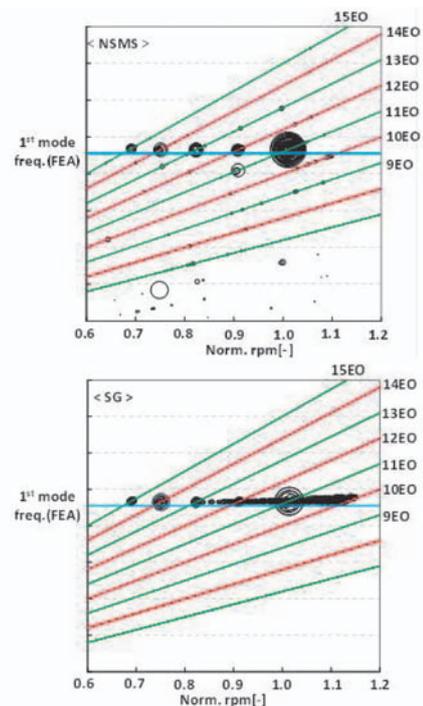


Fig. 5 Campbell diagram (NSMS vs SG)

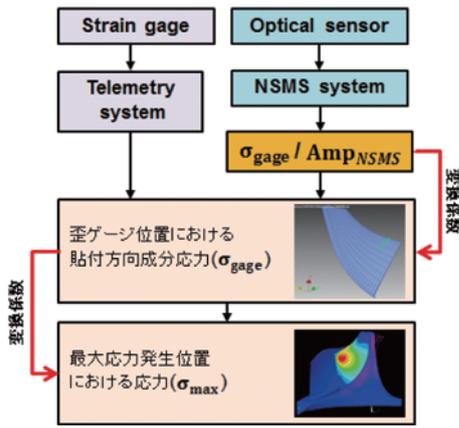


Fig. 6 Evaluation flow

Table. 1 Comparison of measurement value

| Measurement system | NSMS | SG | FEA |
|---------------------------------|----------|------|------|
| Dev. of Resonance frequency [%] | 0.3 | 0.2 | Base |
| Dev. of Stress [%] | 9.9~17.6 | Base | - |

3.2 ミスチューン特性の評価

遠心圧縮機のミスチューンに伴う共振周波数ならびに応答振幅のバラつきを評価するため、NSMS計測で得られた11EO～15EOにおける各翼の応答周波数と応答振幅を各励振次数における平均値で無次元化して図7、図8に示す。

図7から応答周波数のバラつきは、最大でも12EOの0.5%程度であり、遠心タービン翼で認められている値^{(1),(2),(3),(4)}と比較して極めて小さいことがわかる。この原因としては圧縮機材料がアルミ系材料であり、タービン材料で一般的なニッケル系一方向凝固材に比べて材料異方性の影響が小さいこと、製造方法が削り出しであるためタービン翼車で一般的な製造方法（精密 casting）に比べて寸法ばらつきが小さいことなどが考えられる。

また、図8からは、励振次数の違いにより最大応答振幅を示す翼が異なることを確認できる。一般的にミスチューンを持つ系では、Mode familyごとに翼枚数分の振動モードを保有し、励振次数により励起される振動モードが異なる。それに伴い、最大応答翼も変化することが知られているが、本結果からも同様な傾向が得られた。次に、図9に実機計測で得た各励振次数における応答振幅の最大値と最小値の比（Magnification ratio）を示す。11EO～15EOまですべてのMagnification ratioは約1.3～1.8程度であり、応答振幅のバラつきも遠心タービン翼と比較すると小さい結果となった。

その理由について、応答バラつきに影響を及ぼす主なパラメータである翼とディスクの連成の強弱、固有振動数バラつきの観点から考察する。図10にチューン系のModal解析で得られた節直径数と固有振動数の関係を

Full blade, Splitter bladeの1st mode familyについて示す。各Mode familyの固有振動数変化幅は最大でも3%程度と小さく、翼とディスクの連成は小さいことが確認できる。一方、3.4に後述するミスチューンモデルの固有振動数変化幅を10倍（遠心タービン翼の固有振動数変化幅50%レベル）にして周波数応答解析を実施した結果、Magnification ratioは1.3から2.0へと増加した。このことから遠心タービン翼との応答バラつきの違いが主に固有振動数バラつきに起因するものと推察できる。

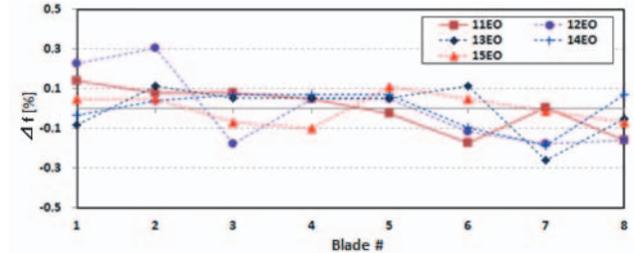


Fig. 7 Distribution of resonance freq. (NSMS)

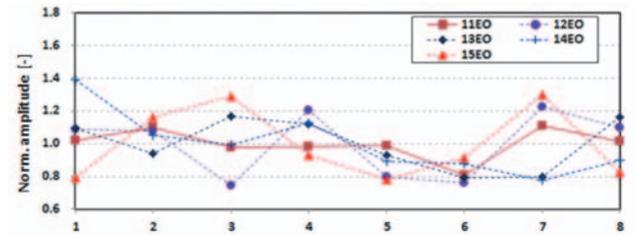


Fig. 8 Distribution of amplitude (NSMS)

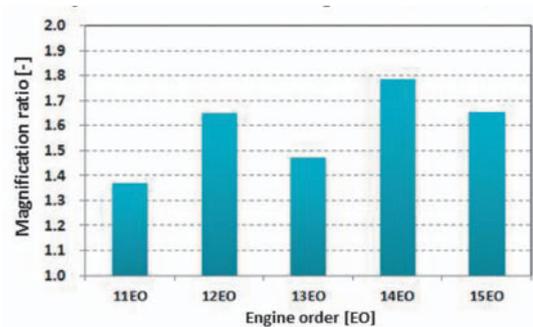


Fig. 9 Magnification ratio (NSMS)

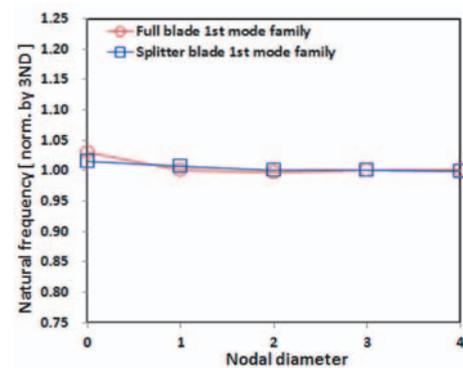


Fig.10 Nodal diameter vs mode families

3.3 減衰

遠心圧縮機の減衰に関する定量的評価を行うため、NSMS計測およびSG計測から減衰比を算出して図11に示す。図11において材料減衰は、歪ゲージ貼付状態の圧縮機を用いたHammering試験結果、Total減衰比は、SG計測とNSMS計測データから、いずれも応答ピーク近傍で1自由度近似を行った後、Half power法を用いて算出した。

NSMS計測から算出されたTotal減衰比は、すべての翼で 10^{-3} オーダーの値となった。一方SG計測から算出されたTotal減衰比(#1)は、0.0016 (1.6×10^{-3})となり、双方は良い一致を示した。なお、運転条件や形状などは異なるが、H.L.Andrew⁽¹²⁾やA.Kammerer⁽⁵⁾の産業用圧縮機を対象とした減衰比に関する実験的研究でも、Total減衰比は 10^{-3} 程度のオーダーになると報告されている。また、翼振動におけるTotal減衰は構造減衰(+材料減衰)と空力減衰の総和と考えられるが、遠心圧縮機においては、翼とディスクが一体構造であるため、Friction dampingのような構造減衰はほとんど考慮されない場合が多い。そのため、図11では、材料減衰をTotal減衰から差し引いたものを空力減衰として示している。この値は0.001 (1.0×10^{-3})程度になった。

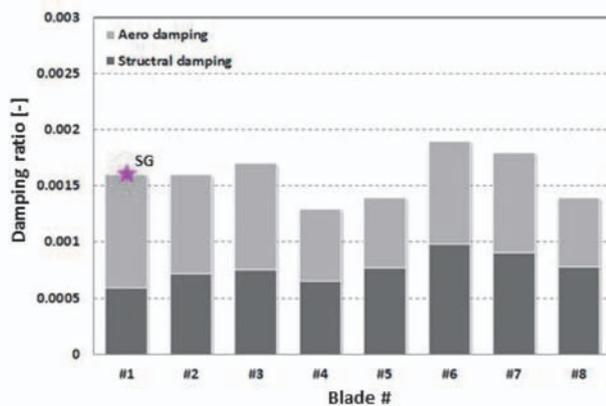


Fig.11 Total damping ratio

3.4 ミスチューン応答予測

NSMS計測から得た応答振幅バラツキの妥当性を検証するため、ミスチューンを考慮したFE解析モデルを用いて、周波数応答解析を実施し、その結果を実測と比較した。ミスチューンFE解析モデルは、Hammering試験から得た1st modeの固有振動数バラツキを式(3)に基づき、各Full bladeおよびSplitter bladeのヤング率を変更することにより作成した。

$$E_{i'} = E_{tune} \times \left(\frac{f_i}{f_{1^{st} mode}} \right)^2 \quad (3)$$

i : 翼番号, E_{tune} : チューンモデルのヤング率

$E_{i'}$: 補正後の翼番号*i*のヤング率

$f_{1^{st} mode}$: 1st modeの各翼の固有振動数平均値

f_i : 翼番号*i*の固有振動数

Hammering試験は、レーザードップラー振動計を用い、計測点と加振点を同一翼として計測する単点加振法(Case1)と、P.Honisch⁽¹³⁾らなどにより報告されている単点付加マス加振法(Case2)の2つの方法で実施し両者を比較した。Case2は、加振翼以外のすべての翼に付加質量を与えることで、計測する系の周期的対称性を崩し、Structural couplingの影響を抑制することでより純粋な翼の振動特性、系のミスチューン特性を得るというものである。

図12に各Hammering試験から得られたSplitter bladeの1st modeにおける固有振動数バラつき(Δf)を示す。なお、値は、全翼の固有振動数の平均値で無次元化している。

Case1における最大固有振動数バラつきは約0.3%となったが、Case2では約1.6%と計測方法の差が顕著に表れた。両Caseを比較すると、特に歪ゲージ貼付翼である#1の固有振動数変化が最も大きいことがわかる。

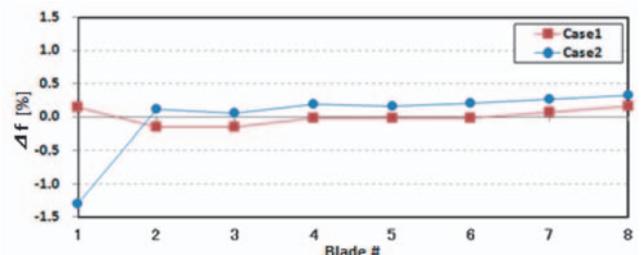


Fig.12 Distribution of natural freq. (SG)

次に、これらのミスチューン特性を式(3)にもとづいて反映した2つのFE解析モデルを用いて周波数応答解析を実施した。実機計測の最大応答時の条件と合わせるため、各翼のTrailing edgeに向きと大きさが等しく11EOに相当する翼間加振位相差を持った外力を与え、減衰比は実測結果にもとづいて0.0016を用いた。

図13にCase1, Case2の解析結果から算出したMagnification ratioを示す。各Caseの最大Magnification ratioを比較すると、Case1で1.4, Case2で2.3となり、Case1はNSMS計測結果(=1.37)とはほぼ一致する結果となった。両Caseの応答特性違いの原因が両ケースの入力の違い(固有振動数バラつき)にあることは明らかであるが、両Caseの固有振動数バラつきは、翼#1の Δf が1%程度異なるのみでそれ以外の翼の固有振動数バラつきに大きな違いは見られない。この程度のわずかな入力パターンの違いでも、振動応答挙動の段階では、最大応答翼の変化(#2→#5)やMagnification ratio最大値の変化(約1.4倍から2.3倍)など非常に大きな影響を生じさ

せること、従って、応答挙動を正確に予測するためにはミスチューンパターンの正確な予測が不可欠であることを示している。

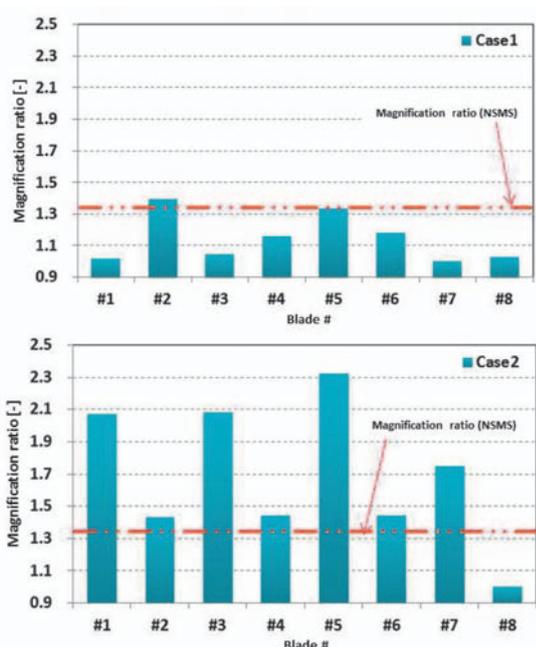


Fig.13 Normalized mistuning distribution (FEA)

4. まとめ

過給機の遠心圧縮機におけるミスチューン特性を実験的に明らかにするために、Splitter bladeの1st modeを対象とした非接触翼振動計測 (NSMS) とその計測精度検証のために歪ゲージ計測 (SG) を実施した。

両計測において11EO ~ 15EOとの共振と推定される応答振幅が検出された。最大振幅は11EOで検出され、共振周波数ならびに振幅から変換した最大応力発生位置における応力値を比較すると、周波数の差が0.1%、応力値の差が約10 ~ 17%となった。なお、応力値のバラつきは、振幅から応力への変換誤差によるものであり、最適な両パラメータの変換方法の確立が課題として残った。また、NSMS計測から得たミスチューンに伴う応答周波数、応答振幅に関するバラつきは、約0.5%、Magnification ratioで1.37となり、遠心タービン翼と比較して極めて小さいレベルに有ることを実験的に明らかにした。

また、2種類のHammering手法を用いた試験結果から作成したミスチューンFE解析モデルを作成し、周波数応答解析を実施した。NSMS計測から得られた応答バラつきとほぼ一致するCaseもあったが、わずかな固有振動数バラつきの違いで最大応答翼やMagnification ratioが変わることが証明され、応答挙動の正確な予測

にはミスチューンパターンの正確な予測が不可欠であることを再確認した。今後、最適なHammering手法・解析方法の確立が課題として残った。

参考文献

- (1) J.M.Allport, M.L.Juppb: Turbocharger blade vibration: Measurement and validation through laser tip-timing, Proc. IMechE 2012 SESSION 3B c1340/011.
- (2) A.Kulkarni, G.LaRue: Vibratory response characterization of a radial turbine wheel for automotive turbocharger application, proceedings of ASME Turbo Expo 2008, GT2008-51355.
- (3) D.Hemberger, D.Filsinger: Mistuning modeling and Its validation for small turbine wheels, Proceedings of ASME Turbo Expo 2013 Turbine Technical Conference and Exposition, GT2013-94019.
- (4) H.Hattori, M.Unno: Mistuned vibration of radial Inflow turbine impellor, The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery, NO. AICFM9-224.
- (5) A.Kammerer: Experimental study on impeller blade vibration during resonance part1: blade vibration due to inlet flow distortion, Proceedings of ASME Turbo Expo 2008, GT2008-50466.
- (6) H.P.Dickmann, T.S.Wimmel, J.Szwedowicz D.Filsinger: Unsteady flow in a turbocharger centrifugal compressor - 3D-CFD-simulation and numerical and experimental analysis of impeller blade vibration, Journal of Turbomachinery Vol. 128, No. 2.
- (7) 松田幸雄, 光武忠晴, 大橋一生: 遠心圧縮機の非接触振動計測, 第15回ガスタービン秋季講演 (2000), C-11.
- (8) 金子康智, 飯塚信也: 改良少数点法を利用した可搬型非接触翼振動計測システムの開発, 機械力学・計測制御講演論文集: D & D 2001 (abstract), 201.
- (9) S.Heath, M.Lmergun: A review of analysis techniques for blade tip-timing measurements, Proceedings of ASME, 97-GT-213.
- (10) M.Zielinski, G.Ziller: Noncontact blade vibration measurement system for aero engine application, ISABE conference, ISABE-2005-1220.
- (11) V.Charles, S.Arnold, B.W.Hayes: Comparison of non-contact stress measurement data to strain-gage data, the 51st International Instrumentation Symposium 8-12 May 2005.
- (12) A.H.Lerche: Experimental study of blade vibration in centrifugal compressors, Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-45928.
- (13) P.Honisch, A.Kuhhorn: Experimental and numerical analyses of radial turbine blisks with regard to mistuning, Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-45359.

高圧タービンのリムシール部における 主流巻き込み予測のための数値解析手法

Numerical Procedure for Hot Gas Ingestion through Rim Seal of High Pressure Turbine

鈴木 正也*¹
SUZUKI Masaya

林 亮輔*²
HAYASHI Ryosuke

山本 誠*³
YAMAMOTO Makoto

真鍋 敬*⁴
MANABE Takashi

ABSTRACT

Numerical simulation of hot gas ingestion around rim seal is highly time consuming since high speed main stream and low speed cooling flow have to be solved simultaneously. Combinations of time marching scheme and convection scheme for all-speed CFD were tested in order to reduce computational cost to predict hot gas ingestion through rim seal of high pressure turbine. Preconditioning alternating direction implicit symmetric Gauss Seidel (pADI-SGS) scheme and SLAU were selected in the present simulation based on screening simulation on simplified axisymmetric geometry. Three-dimensional simulation showed that the combination of pADI-SGS and SLAU was more efficient from 4 to 10 times than classical scheme.

Key words : Turbine, Cooling, Computational Fluid Dynamics, Preconditioning Method, All Speed Scheme

1. 諸言

ガスタービンの性能向上のため、タービン入口温度は年々高くなっている。高圧タービンにおいては、構造上、静止部と回転部の隙間から主流の高温ガスを巻き込んでしまうことは避けられない。巻き込んだ高温ガスにより、ディスクの金属温度を上昇させ、その強度に重大な影響を及ぼす。タービンディスク周囲での主流巻き込みを回避するため、当該キャビティにはパーージェアが供給されるとともに、ディスクリム部にはシール（リムシール）が設けられ、主流ガスの過度の巻き込みを防止している。

パーージェアの流量を大きくすれば冷却上は有利であるが、パーージェアは圧縮機から抽気されるため、パーージェア流量の増加はエンジン性能を低下させる。エンジン性能への影響を最小限とするため、できるだけ少ないパーージェア流量にするには、主流巻き込み現象に対する理解と、リムシールの最適な設計が不可欠である。

従って、主流高温ガスの巻き込み量を精度よく予測す

ることが重要であるが、高圧タービン初段静翼出口の主流マッハ数は1に近い一方で、パーージェアによる冷却流のマッハ数は0.01程度のオーダーとなる。この速度差は数値流体力学（CFD）による解析を困難なものにしている。一般的なCFDソルバーは、非圧縮性流体を対象とした圧力ベースソルバーと圧縮性流体を対象とした密度ベースソルバーに大別される。主流巻き込みを精度よく予測するためには、圧縮性を考慮する必要があるが、密度ベースソルバーはマッハ数がおおよそ0.1以下となるような流れ場に適用すると、厳しい時間刻みの制限と移流スキームの過大な人工粘性による解の硬直性（stiffness）が問題となり、収束解を得られない、あるいは非物理的な解に収束してしまうことがある。

一方、Turkel⁽¹⁾は疑似音速を導入した前処理法（Preconditioning method）を提案した。これは低マッハ数の場合、音速を速度と同じオーダーに強制的に変換する方法である。この方法はWeiss-Smith⁽²⁾によりさらに一般化された。前処理を施すことにより、密度ベースソルバーで低マッハ数流れを解くことが可能となるが、前処理にはカットオフマッハ数と呼ばれる定数が必要となり、この定数の値は収束性に大きな影響を及ぼす。通常はカットオフマッハ数を一様流マッハ数と同程度の値にとるが、本研究で対象とするような主流と冷却流の速度

原稿受付 2013年12月17日

校閲完了 2014年5月30日

* 1 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1

* 2 東京理科大学大学院

* 3 東京理科大学

* 4 (株)IHI

差が大きい流れ場では、一様流マッハ数を定義することができない。また、前処理法を適用する場合、前処理により特性速度が変化するため、移流項の評価についても一般的なFDS, FVS, AUSMを用いることはできない。Weiss-SmithはRoeスキームに忠実に前処理を施した前処理Roeスキームを用いたが、この定式化は煩雑であり、カットオフマッハ数が空間精度にも影響を及ぼす。

近年、移流項については、Liら⁽³⁾、Liou⁽⁴⁾、Shimura⁽⁵⁾などにより低マッハ数流れにも適用可能なスキームが提案されている。中でもLiらのA-RoeとShimuraらのSLAUはカットオフマッハ数を含まないため、一様流マッハ数を定義できない流れ場においても空間精度を維持できると考えられる。従って、前処理とこれらのスキームを組み合わせれば、収束性のみに着目してカットオフマッハ数を選ぶことができるはずである。

本研究では、時間積分法に前処理法に基づく陰解法を、移流項スキームに全速度スキームを適用することで、低マッハ数から亜音速までを高速かつ正確に解析可能な計算手法を構築する。この計算手法を用いて、過去に株式会社IHIで実施した主流巻き込みリグ試験⁽⁶⁾についてCFD解析を行い、従来の方法との比較を行う。なお、実験ではパージェアに二酸化炭素を混入し、二酸化炭素濃度を測定することでシール効率（主流巻き込み量）を算出しているため、本研究では、二酸化炭素濃度をパッシブスカラーとして解析することでシール効率を算出する。

2. 支配方程式と数値解法

2.1 支配方程式

本研究では、圧縮性乱流場を対象とするため、RANSにより計算を行う。支配方程式として、ファール平均された連続の式、ナビエ・ストークス方程式、エネルギー式を解く。乱流モデルについては、標準 $k-\epsilon$ モデルを用いる。本研究では、ローター部に回転座標系を用いるため、回転座標系における慣性力として、コリオリ力と遠心力を体積力として与える。

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij}) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_i'' u_j''}) + \bar{f}_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{e}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ (\bar{\rho} \tilde{e}_i + \bar{p}) \tilde{u}_j \} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} \tilde{u}_i - \bar{q}_j - \overline{\rho e_i'' u_j''}) + \bar{f}_i \tilde{u}_j \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 x_i はデカルト座標、 t は時間、 ρ は密度、 u_i は x_i 方向の速度、 p は静圧、 τ_{ij} は粘性応力、 e_i は流体の持つ単位質量あたりの全エネルギー、 q_i は x_i 方向の熱流束、 f_i は x_i 方向の慣性力による加速度、 δ_{ij} はクロネッカーのデ

ルタである。 (\cdot) は変動成分、 $(-)$ はレイノルズ平均、 (\sim) はファール平均操作を意味する。

シール効率の計算のため、上記に加え二酸化炭素の濃度輸送式を解く。

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{\varphi} \tilde{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{J}_i - \overline{\rho u_i'' \varphi''}) \quad (4)$$

$$\bar{J}_i = \bar{\rho} D \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x_i}, \quad D = \frac{\mu}{\bar{\rho} \sigma} \quad (5)$$

$$\overline{\rho u_i'' \varphi''} = -\bar{\rho} D_i \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x_i}, \quad D_i = \frac{\mu_i}{\bar{\rho} \sigma_i} \quad (6)$$

ここで φ は二酸化炭素濃度、 D は拡散係数、 D_i は乱流拡散係数、 μ は粘性係数、 μ_i は渦粘性係数である。拡散についてはシュミット数 $\sigma = 1$ を仮定し、乱流拡散についても勾配拡散と乱流シュミット数 $\sigma_i = 1$ を仮定する。シール効率 η は得られた濃度分布より以下のように計算する。

$$\eta = \frac{\varphi - \varphi_m}{\varphi_c - \varphi_m} \quad (7)$$

シール効率は全温基準の定義が利用されることもあるが、全温基準の定義はウィンデー熱による影響を受けるため、正確な見積りが難しい。このため、本研究では濃度基準の定義を用いる。

2.2 離散化手法

数値計算は有限差分法を用いて行われる。非粘性項はA-Roe⁽³⁾、AUSM⁺-up⁽⁴⁾、SLAU⁽⁵⁾の三通りのスキームを用いてその性能を比較する。これらのスキームはMUSCLにより二次精度化して用いる。粘性項には二次中心差分を用いる。時間進行にはADI-SGSにWeiss-Smith⁽²⁾の前処理行列を施すことにより構築した前処理型陰解法（ここではpADI-SGSと呼ぶ）を用いる。多くの前処理法の適用例ではLU-SGSを用いているが、ADI-SGSはLU-SGS同様に対角化が不要でLU-ADIと同様に並列化が容易であるため前処理のベースとした。なお、非定常解析に前処理型陰解法を用いるため、内部反復により最大二次精度を維持している。

3. 計算条件

株式会社IHIで実施した主流巻き込みリグ試験を対象とする。詳細は文献⁽⁶⁾に示されている。

まずは計算方法のテストのため、軸対称の流路のみの形状について二次元計算を行う。その後、実際のリグ試験形状について三次元計算を行う。各ケースの概略図を図1に示す。リグ試験はキャビティ位置がディスク下流側およびディスク上流側の場合について行われたが、本研究ではディスク下流側キャビティを対象とし、そのうちの主流レイノルズ数 $Re_m = 2.4 \times 10^6$ 、回転レイノルズ数 $Re_\theta = 3.0 \times 10^6$ 、無次元二次空気流量 $C_w = 3.6 \times 10^3$ のケースについて計算を行う。これらの無次元数の定義は

それぞれ以下の通りである。

$$Re_m = \frac{V_m b}{\nu_m} \tag{8}$$

$$Re_\theta = \frac{\omega b^2}{\nu_c} \tag{9}$$

$$C_w = \frac{Q_c}{\nu_c b} \tag{10}$$

ここで、 V は軸方向速度、 b はキャビティ外周半径、 ν は動粘度、 ω はディスク角速度、 Q は体積流量、添え字 m 、 c はそれぞれ主流と冷却空気を意味する。

計算領域は1ピッチのみとし、周方向には周期境界条件を課す。主流の流入境界は全温・全圧・流れ角を固定し、二次空気は速度・静温を固定する。流出境界は静圧を固定する。壁面は滑りなし断熱壁とし壁関数を適用する。

計算格子は構造格子を用い、流路全体をマルチブロック法により分割し、翼およびシール周囲は重合格子法により背景格子に重ねることとする。図2に計算格子の例を示す。この方法を選んだのは翼形状やシール形状を変更したケースに対して容易に格子生成を行うことができるためである。翼とシールの格子はそれぞれ半径方向と周方向については背景格子と一致させてあり、重合部で

の内挿は各断面ごとに双一次補間により行う。また、重合部で格子解像度差による不連続が生じないことを事前に確認している。動翼回りのブロックには回転座標系を用い、静止ブロックと回転ブロックの間はスライディングメッシュにより連結する。三次元計算の総格子点数は約5,000,000点である。

4. 計算手順

本計算の条件に対し、主流マッハ数の最大値は0.35程度である。一方、二次空気側のマッハ数はおおよそ0.05である。通常は、前処理法（およびAUSM⁺-up）に用いられるカットオフマッハ数を一様流のマッハ数と同じか多少大きな値を取るのが一般的であるが、本計算では適切な一様流マッハ数が定義できない。試行錯誤の結果、本計算ではカットオフマッハ数を0.1としている。この値では主流の収束はかえって遅くなってしまふ。この問題は計算領域全体のマッハ数分布が大きい三次元のディスク上流側のケースで特に顕著になる。

一方、スキーム自体を工夫せずとも、Dingら⁽⁷⁾は非定常計算を行う前に定常計算を行うことでイタレーション回数を削減している。Rabsら⁽⁸⁾は計算領域ごとのゾーナル計算を行い計算負荷を抑えている。そこで、本研究では計算の収束性と解の妥当性を考慮し、定常と非定常の二段階のステップに前処理法を加え、以下のような手順で計算を行うものとする。

- (1)主流がある程度収束するまで通常陰解法を用いて定常解析を行う。
- (2)前処理陰解法に切り替え、キャビティ内がある程度収束するまで定常解析を行う。
- (3)非定常解析を行う。

手順(1)で前処理を用いずに主流を準定常な状態に近づける。この時点ではキャビティ内の流れはほとんど初期条件から変化しない。手順(2)で前処理によりキャビティ内の流れがおおよそ収束する。その後、手順(3)の非定常計算により最終的な解を得る。本計算では動翼のないケースを対象としており、RANSを用いているが、キャビティ近傍のせん断層は非定常性を示した。なお、非定常計算では前処理を使うか否かの任意性がある。キャビ

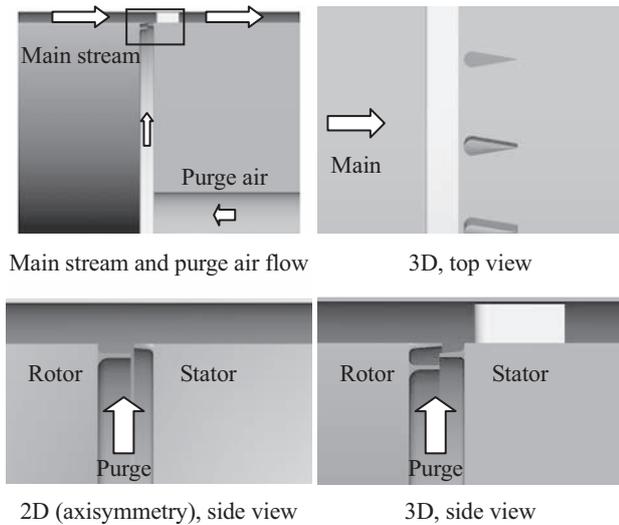


Fig. 1 Schematic Diagram of Turbine Stage

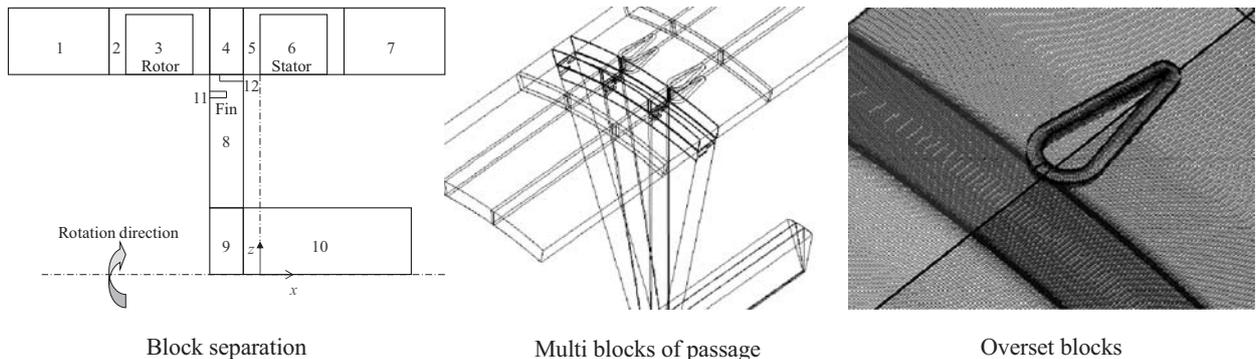


Fig. 2 Computational Grid System



Fig. 3 Comparison of Seal Efficiency by Each Schemes

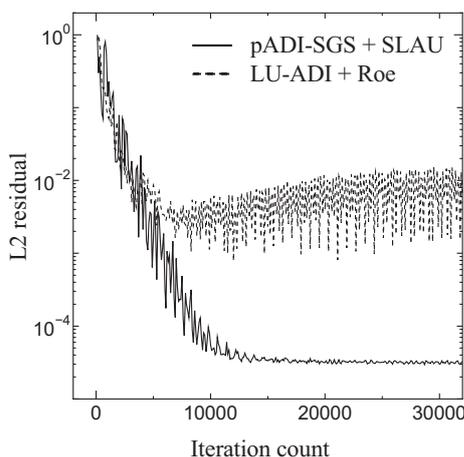


Fig. 4 Comparison of Residual

ティ内の流れが定常的であれば、手順(2)の状態から解の変化がないため、非定常計算では前処理を使わない方が効率的である。一方、キャビティ内の流れが非定常的であれば、前処理が必要になる。しかし、主流のマッハ数に対してカットオフマッハ数が小さすぎるため、陰解法の内部反復回数が増加する。ここでは前処理を用いて計算を行ったが、速度差が大きい流れ場に対し前処理を用いた非定常計算を効率的に行うため、少ない内部反復で時間精度を維持できる方法を確立することが今後の課題である。

直感的に考えれば手順(1)を行わなくてもよいかと思われるかもしれない。しかし、主流の状態がキャビティ内流れより先に収束に近い状態になっていないと、主流の変化につられてキャビティ内流れが変化するため、流れ場全体が変化し続けてしまう。このため全体の収束が遅れてしまう。主流とキャビティ内流れは相互に干渉しているが、特に主流からキャビティ内流れへの影響が大きいため、手順(1)を行うことにより全体を早く収束させることができる。

5. 結果と考察

5.1 二次元解析

計算方法の検証のため、翼を無視した軸対称の二次元解析を行った。煩雑な作業を避けるため、ソルバーは円筒座標系で書き直さず、周方向に5点の格子を配した疑似的な軸対称計算とした。

図3はLU-ADI + Roe, pADI-SGS + A-Roe, pADI-SGS

+ AUSM⁺-up, pADI-SGS + SLAUの4種類のスキームを用いて得られたリムシール近傍のシール効率である。図より明らかなように、古典的なLU-ADI + Roeの組み合わせは他の三種類の全速度解法と比べて主流巻き込みを過少に評価した。本計算ではキャビティ内の初期条件としてパージェアに含まれる二酸化炭素濃度を一様に与えているため、計算がstiffに陥ってしまい、主流巻き込みを妥当に予測できなかったものと思われる。

図4にLU-ADI + RoeとpADI-SGS + SLAUの残差の比較を示す。ここで示した残差は二酸化炭素濃度のL2残差であり、計算領域全体の平均値である。スキームの違いにより、最終的な残差に2桁の違いが見られ、全速度スキームは計算の収束性を著しく改善している事が分かる。また、振幅についても改善が見られる。図2に示されるブロック8に対応する領域では大規模な渦が生成されるが、LU-ADI + Roeはこの領域での収束が特に遅かった。なお、ここではpADI-SGS + SLAUの結果のみを示したが、pADI-SGS + A-Roe, pADI-SGS + AUSM⁺-upについても同様の傾向であった。

二次元解析ではA-Roe, AUSM⁺-up, SLAUの結果には明確な優位性は見られなかったが、A-Roeは対角化に要する計算負荷が大きいこと、AUSM⁺-upはカットオフマッハ数を含むことから、以降はSLAUを用いることとした。ただし、低マッハ数に対応したスキーム全般に言えることではあるが、SLAUは他の2種類のスキームに比べて低速領域の数値拡散が特に小さく、数値的な振動を生じやすい傾向を示した。また、ここでは結果を示さないが、三次元解析においては、翼周りで流れが加速する領域が存在するため、計算領域全体の速度差が二次元解析よりも大きく、カットオフマッハ数を含むAUSM⁺-upは不安定であった。

5.2 三次元解析

図5は主流のスパン方向の二断面におけるマッハ数分布の瞬間場を示している。静翼上流には、動翼が設置されていないため、流れは定常的である。ただし、ローターの回転自体は考慮しているため、静翼に流入する流れはわずかな迎角を持っており、静翼は対称な翼型であるが、ハブ面では非対称な流れとなっている。

図6に子午面における流れ線、マッハ数、シール効率を示す。主流ハブ面近傍から巻き込んだ主流は動翼側フィ

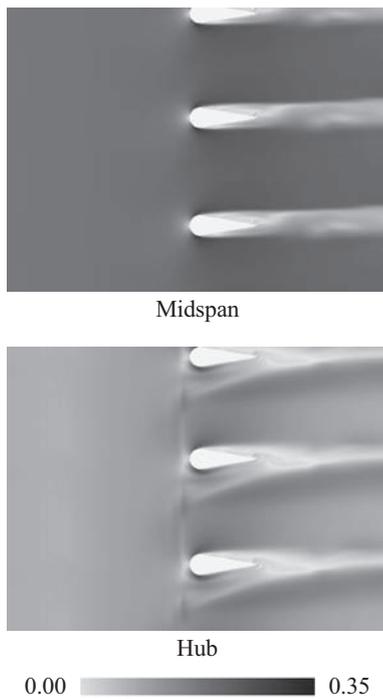


Fig. 5 Instantaneous Mach Number Contour of Main Stream

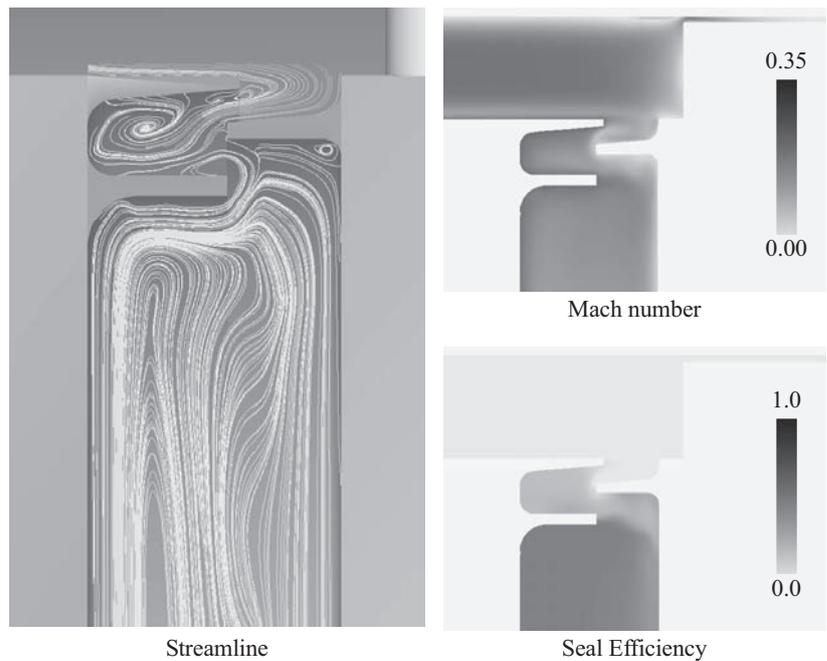


Fig. 6 Instantaneous Flow Field around Rim Seal on Pitch of Stator Vane Center

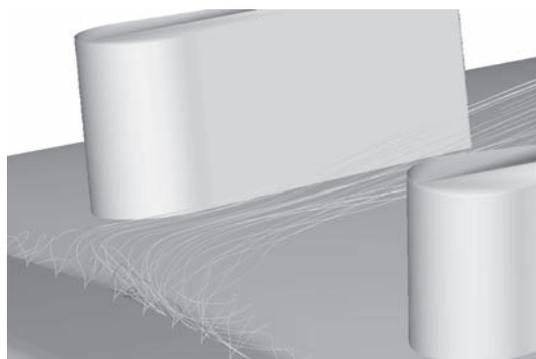


Fig. 7 Mainstream Ingestion and Purge Air Leakage around Rim Seal

ンの間で周方向に軸を持つ渦を形成している。キャビティ内部では、ローターの回転により二次空気が外側へ向かって流れ、ステーター側では巻き込まれた主流ガスが内側へ向かって流れる渦構造となっている。このため、シール効率はローター側の方が高い。また、二次元解析に用いたモデルと比べてシール効率の高いシール形状を用いているため、二次元解析の結果(図3)よりも主流巻き込み量は小さい。

ローター側シール後端付近からの流線を図7に示す。ローター回転により旋回を与えられた主流境界層流れはシール間で渦を形成し、パージエアと混合したのち主流に戻る。静翼前縁の圧力勾配と回転速度のため、シールからの漏れはミッドピッチから正圧面側にかけての周方向位置から下流へと流出していくことが確認できる。

図8に解析と実験によるシール効率の比較を示す。横

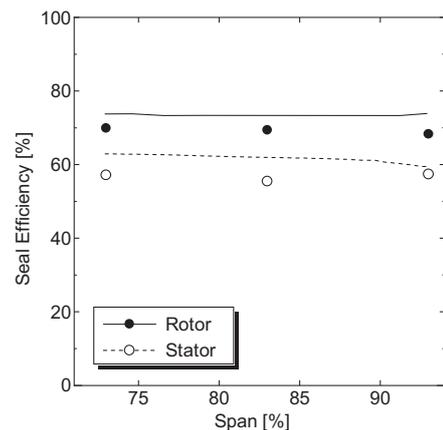


Fig. 8 Comparison of Seal Efficiency between Simulation and Experiment

軸はスパン方向の位置、縦軸はピッチ方向に平均したシール効率であり、ローター側とステーター側のキャビティ壁面上の二箇所の軸方向位置について比較する。解析は実験とおおよそ一致しており、本計算手法により主流巻き込みを妥当に予測できることが確認できた。ただし、解析は実験よりもシール効率を最大6ポイント高く予測した。実験の計測誤差は2%程度であり、他に不一致の原因があるものと考えられる。周期境界を用いたシングルセクタの計算は、マルチセクタの計算よりも主流巻き込みを過少に予測する傾向が報告されている⁽⁹⁾。本計算はシングルセクタでの計算であり、不一致の原因の可能性はある。

計算手順で示した通り、本計算では計算初期の手順(1)では前処理を行わず、手順(2)では前処理を行った。それぞれの計算スキームによって許容される時間刻み幅は

大きく異なり、前処理なしのADI-SGSでは計算領域全体の最小値と最大値は 5×10^{-7} と 3×10^{-5} 、前処理ありのpADI-SGSでは 2×10^{-6} と 3×10^{-4} であった。前処理による計算の加速効果は最小値で4倍、最大値で10倍となった。前処理による疑似音速はカットオフマッハ数0.1に対応することから最大10倍の加速率と予想され、本計算でもそのような結果となった。

6. 結 言

時間積分法として前処理型陰解法を、移流項スキームとして全速度スキームを組み合わせることで、圧縮性を考慮しながら、速度差の大きい主流と冷却流を計算することができる計算手法を構築した。この計算手法を用いて、高圧タービンリムシールにおける主流巻き込みを模擬したリグ試験に対応する三次元数値シミュレーションを行い、以下の知見を得た。

- (1)pADI-SGSスキームは対角化が不要かつ並列化が容易であり、低マッハ数から亜音速領域まで安定かつ高速に計算可能である。
- (2)A-Roeは対角化の計算負荷が大きいですが、全速度で安定かつ高精度である。
- (3)AUSM⁺-upは計算領域全体が高速あるいは低速であれば計算負荷が小さく安定なスキームであるが、本計算のように速度差の大きい流れでは不安定である。
- (4)SLAUは計算負荷が小さく、安定かつ高精度である。ただし、低速ではわずかに他のスキームより不安定である。
- (5)pADI-SGSとSLAUの組み合わせにより、前処理なしの計算手法と比べ4～10倍程度の計算速度向上が期待できる。

今後の課題として、主流と冷却流の速度差が大きい非定常流れに対する効率的な計算手法の確立が挙げられる。前処理に用いるカットオフマッハ数は、冷却流のマッハ数のオーダーに合わせることになるが、この値は主流に対して不適切な値となるため、内部反復の収束に要求される反復回数が増加する。このため、計算領域全体に一定のカットオフマッハ数を用いるのは非効率と考えられる。従って、流れ場の状態に応じてカットオフマッハ数を選択するような方法を導入することで更なる計算効率の向上が期待できると思われる。

謝 辞

本研究の一部は経済産業省からの補助事業である「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」の一環として行ったものである。また、本研究で検証に用いた試験データは、NEDO技術開発機構からの委託研究である「環境適合型次世代超音速推進システムの研究開発」において取得されたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) Turkel, E.: Preconditioned Methods for Solving the Incompressible and Low Speed Compressible Equations, *J. Comput. Phys.*, Vol. 72, No. 2 (1987) pp. 277-298.
- (2) Weiss, J. M., Smith, W. A.: Preconditioning Applied to Variable and Constant Density Flows, *AIAA J.*, Vol. 33, No. 11 (1995) pp. 2050-2057.
- (3) Li, X.-S., Gu, C.-W.: An All-speed Roe-type Scheme and Its Asymptotic Analysis of Low Mach Number Behaviour, *J. Comput. Phys.*, Vol. 227, No. 10 (2008) pp. 5144-5159.
- (4) Liou, M.-S.: A Sequel to AUSM, Part II: AUSM⁺-up for All Speeds, *J. Comput. Phys.*, Vol. 214, No. 1 (2006) pp. 137-170.
- (5) Shima, E., Kitamura, K.: On New Simple Low-Dissipation Scheme of AUSM-Family for All Speeds, *AIAA-2009-136*, (2009) pp. 1-15.
- (6) Teramachi, K., Hamabe, M., Manabe, T., Yanagidani, N.: Experimental and Numerical Investigation of Sealing Performance of Turbine Rim Seals, *Proc. IGTC 2003*, TS-025 (2003) pp. 1-7.
- (7) Ding, Z., Palafox, P., Moore, K., Chupp, R., Kirtley, K.: A New 1.5-Stage Turbine Wheelspace Hot Gas Ingestion Rig (HGIR) - Part II: CFD Modeling and Validation, *ASME GT2013-96021*, (2013) pp. 1-8.
- (8) Rabs, M., Benra, F.-K., Dohmen, H. J., Lock, G. D., Schneider, O.: Model Simplifications for Numerical Simulation of Ingestion through Gas Turbine Rim Seals, *Proc. ISROMAC-14*, ID1105, (2012) pp. 1-9.
- (9) Wang, C.-Z., Mathiyalagan, S. P., Johnson, B. V., Glahn, J. A., Cloud, D. F.: Rim Seal Ingestion in a Turbine Stage from 360-Degree Time-Dependent Numerical Simulations, *ASME GT2012-68193*, (2012) pp. 1-12.

2013年ガスタービン及び過給機生産統計

ガスタービン統計作成委員会

ガスタービン統計作成委員会は、関係各社の協力を得て2013年1月から12月の間におけるガスタービン及び過給機を生産状況を調査・集計し、生産統計資料を作成した。資料提供を、陸船用ガスタービンは15社、航空用ガスタービンは3社、過給機は11社に依頼し、提供を受けた範囲で生産統計資料を纏めた。なお、過給機はすべて排気タービン方式のターボチャージャーであり、機械駆動によるものではない。

I. 概要

1. 2013年陸船用ガスタービン生産統計概要

(1) 生産台数および出力(図1, 表1)をみると、台数では前年の413台に対し374台と、前年に比べて39台、9%減少となった。出力区分別の前年との比較では、小型が10台、中型が19台、大型が10台の減少となった。また、出力では前年の7,970MWに対し6,656MWと、前年から1,314MW(16%)の減少となった。最近6年間で2番目に多かった昨年に比べると台数及び出力とも減少したものの、概ね高い水準を維持した。出力区分別の前年との比較では、小型が3MW、中型が60MW、大型が1,251Wの減少となっている。

ア) 小型(735kW以下)は前年と比べて、台数は8%、出力は5%の減少で、それぞれ120台、50MWとなった。

イ) 中型(736~22,064kW)は前年と比べて、台数は8%、出力は9%の減少で、それぞれ224台、630MWとなった。

ウ) 大型(22,065kW以上)は前年と比べて、台数は25%、出力は17%の減少で、それぞれ30台、5,976MWとなった。

(2) 用途別(表1, 図2, 図3)にみると、ベースロード発電用(BL)、非常用発電用(EM)、艦艇用(MM)、実験用(XP)、およびその他(MC)の用途向けで占められている。台数で最も多いのは非常用発電用(EM)の297台(79%)、出力で最も多いのは

ベースロード発電用(BL)の6,074MW(91%)である。前年と比べ、全体的に台数は減少しているものの、前年は4台であったピークロード発電用(PL)が実績0になったことと、前年は実績0であった実験用(XP)に実績があったことを除けば、全体的な構成は例年と大きく変わっていない。

ア) 非常用発電用(EM)は前年と比べて、台数は22台(7%)減の297台、出力は89MW(18%)減の411MWとなった。出力区分別にみると、小型は台数で5%、出力で6%の減少、中型は台数で8%、出力で19%の減少となっている。今年は、小型・中型ともに昨年よりも台数、出力が減少している。2011年の震災以降の非常用発電のニーズの高まりが、ひと段落した為と考えられる。

イ) ベースロード発電用(BL)は前年と比べて、台数は10台(16%)減少の52台、出力は216MW(3%)減少の6,074MWと、台数・出力ともに減少した。出力区分別にみると、小型は実績がなく、中型は台数で10%、出力で54%の増加、大型は台数で19%、出力で4%の減少となっている。前年は小型・大型が増加し、中型は減少していたが、今年は小型・大型が減少し、中型は一転して増加している。1台あたりの出力を前年と比べると、小型:前年309kW/台、今年実績なし、中型:前年4.5MW/台、今年6.3MW/台、大型:前年172MW/台、今年204MW/台となっており、中型、大型ともにおける大出力化が見られる。

ウ) 前年実績がなかった実験用(XP)が今年は1台、800kWとなっている。

エ) 艦艇用(MM)は前年と比べて、台数は9台(69%)減の4台、出力は30MW(21%)減の112MWとなっている。

オ) その他用途向け(MC)は前年と比べて、台数は5台(33%)増の20台であるが、出力では53MW(1070%)増の58MWとなっており大幅に増加している。これは、大型区分の46.6MW 1台の実績によるものである。

※文中の前年との差異や増加率などの出力に関する数値は、後に示す数表に基づきkW単位で算出している。

(3) 燃料の種類別(表2, 図4, 図5)にみると, 台数ではガス燃料が前年比23%減の55台, 液体燃料が前年比7%減の319台となっている。出力ではガス燃料が前年比9%減の6,122MW, 液体燃料が前年比56%減の534MWとなっている。ガス燃料・液体燃料ともに前年に比べて台数・出力ともに減しているが, 特に前年に急増した液体燃料の出力における減少が顕著である。構成比率は, 台数ではガス燃料が全体の15%に対し, 液体燃料が85%で, この比率は前年とほぼ同じであるが, 出力ではガス燃料が92%, 液体燃料が8%で, 前年と比べガス燃料が増加している。

ア) 液体燃料では, 台数・出力ともに最も多いのが重油1種(H1)であり, 台数は184台で燃料全体の49%を占めている。出力は281MWで燃料全体の4%を占めている。重油1種(H1)は前年に比べて台数は10%, 出力は13%の減となっている。次に台数が多いのは灯油(T)の74台で, 前年に比べると4%減となっている。最も少ない軽油(K)は61台で, 前年と同じになっている。出力では軽油(K)が172MW, 灯油(T)が81MWとなっており, 前年と比べると, 軽油(K)は前年比78%減の大幅な減少となり, 灯油(T)は17%減となっている。昨年は大きかった軽油(K)と灯油(T)の出力の差は今年は縮小している(前年:690MW, 今年:91MW)。

イ) ガス燃料では, 台数が最も多いのは天然ガス(GNG)の32台で, 燃料全体の9%を占めている。出力でも天然ガス(GNG)が最も多く3,976MWで全体の60%を占めている。台数で次に多いのは都市ガス(GTW)の11台, 以下は液化天然ガス(LNG)の9台, 高炉ガス(GBF)の3台となっている。出力で次に多いのは液化天然ガス(LNG)の1,846MW, 以下は高炉ガス(GBF)の255MW, 都市ガス(GTW)の46MWと続く。昨年は出力で液化天然ガス(LNG)が首位だったが, 今年は台数・出力ともに天然ガス(GNG)が最多となった。

ウ) 燃料別比率を出力区分別にみると, 台数の上位3種は, 小型は重油1種(43%), 灯油(32%), 軽油(25%), 中型は重油1種(59%), 灯油(16%), 軽油(14%), 大型は天然ガス(60%), 液化天然ガス(30%), 高炉ガス(10%)となっている。全体では重油1種(49%), 灯油(20%), 軽油(16%)の比率になった。出力で見ると, 小型は重油1種(48%), 灯油(31%), 軽油(21%), 中型は重油1種(41%), 軽油(26%), 天然ガス(16%), 大型では天然ガス(65%), 液化天然ガス(31%), 高炉ガス(4%)と

なっている。全体では天然ガス(60%), 液化天然ガス(28%), 高炉ガス・重油1種(各4%)の割合となった。前年は液化天然ガスが出力全体の40%を占めて最多であったが, 今年は大型の天然ガスが60%を占め最多となった。また, 昨年増加した都市ガスは, 今年は大型で実績がなかったため大幅に減少した。

(4) 納入地域別(表3)で見ると, 台数では国内が前年比28台減の340台, 輸出が10台減の35台となった。出力では国内が前年比1,173MW減の2,590MW, 輸出が140MW減の4,066MWとなっている。

ア) 国内向けは総台数の91%, 全出力の39%を占めており, 全体に占める割合は, 台数で2%増, 出力で8%の減と出力ベースで特に減少した。前年との比較では台数は8%減, 出力は31%減となっている。区分別の台数・出力は, 小型で9台, 2MWの減, 中型で16台, 79MWの減, 大型で3台, 1,093MWの減となっており, 前年はいずれの出力区分でも台数, 出力ともに増加がみられたが, 今年はその逆で全ての出力区分で台数・出力ともに減少となっている。さらに国内の地域別にみると, 台数では北海道で14台, 東北で11台, 関東で16台の減少, 近畿で14台, 四国で10台の増加があったのが大きな変化であった。出力については東北で560MW, 関東で874MW, 中部で157MWの減少があった一方で, 近畿で281MWの増加があったのが大きな変化である。地域別の構成比率は台数では関東が最も多く, 国内全体の44%, 出力では近畿が最も多く41%を占めた。また, 今年は船用主機向けが前年から5台, 16MWの減, 船用補機向けが前年から4台, 14MWの減少となっている。

イ) 輸出は総台数の9%, 全出力の61%であり, 前年と比べた全体に占める割合は台数で2%減, 出力で8%の増となっている。前年よりそれぞれ11台(22%), 141MW(3%)減している。前年との比較を区分別で見ると, 小型は前年ほぼ同様で, 中型は3台減, 18MWの増, 大型は7台減で, 158MWの減となっており, 全体的に減少傾向がみられる。輸出先別にみると, 今年の実績はアジアと欧州のみであり, その他の地域での実績はなかった。台数ではアジア(76%), 欧州(24%), 出力ではアジア(98%), 欧州(2%)となっている。台数・出力ともにアジア向けが最も多くなっているのは例年どおりである。アジア向けは前年と比べて台数は2台(8%)増, 出力は1624MW(69%)増となっている。

(5) 被駆動機械別(表4, 図6, 図7)では, これまで

と同様に、台数・出力とも発電機がほとんどを占め、台数で96%、出力で98%であった。発電機について出力区分別にみると、全ての出力区分別で台数・出力ともに前年に比べて減となっている。それぞれの前年比は、台数では小型が9%、中型が7%、大型が25%の減である。出力では小型が9%、中型が8%、大型が17%の減となっている。水ポンプは全体で前年に比べて4台、5MWの増となっており、出力区分別にみると、小型は1台、2MWの増加、中型が3台、3MWの増加となっている。この他の被駆動機械では、推進機が前年から5台、16MWの減少となった。

- (6) 出力区分別(表5)を前年と比べると、小型は全体で台数・出力ともに減少している、さらに詳細な区分別(0～146kW, 147～367kW, 368～735kW)にみると、0～146kW, 368～735kWでは前年とほぼ同じとなっているが、147～367kWでは9台、2MWの減少となった。中型も全体で台数・出力ともに減少したが、さらに詳細な区分別(736～4,412kW, 4,413～10,296kW, 10,297～16,180kW, 16,181～22,064kW)にみると、736～4,412kW, 10,297～16,180kW, では、台数・出力ともに減少しているが、4,413～10,296kWは台数・出力ともに増加した。大型でも全体で台数・出力ともに減少し、さらに詳細な区分別(22,065～44,129kW, 44,130kW以上)にみても、いずれの区分別でも台数・出力ともに減少となった。台数の多い順では、736～4,412kW, 368～735kW, 147～367kWとなっており、これは前年の傾向と変わらない。また出力の多い順では44,130kW以上, 736～4,412kW, 24,413～10,296kWとなっており、4,413～10,296kW, の割合が増えた。
- (7) 発電用ガスタービン(表6)の台数と出力を前年と比較すると、事業用は、国内では11台、1,927MWとなり、前年比は台数で3台減、出力で1040MW減となった。輸出では8台、1,441MWとなり、前年比は台数で1台増、出力で1,188MW増となった。自家用は、国内が313台、542MWとなり、前年比は台数で19台減、出力で107MW減となった。輸出は26台、2,624MWとなり、前年比は台数で12台減、出力で1,328MW減であった。輸出の事業用のみ台数・出力とも増加したが、それ以外では台数・出力ともに減少となった。
- (8) 陸船用ガスタービン向けモジュールは、前年に引き続き2013年も実績がなかった。
- (9) 好調だった前年度に比べ、今年度は全体的に減少傾向となった。国内の需要は好調なものの、本統計には表れない海外生産のガスタービンの国内導入が増えていること、また燃料代の安い石炭火力を電力会社が導

入し始めていること等が、減少となっている原因と思われる。

2. 2013年航空用ガスタービン生産統計概要

- (1) ターボジェット／ターボファン・エンジンの新規製造状況については、前年と同様、P-1用のF7-10のみであり、合計台数は10台、合計推力は574kNであった。(表7, 図8参照)
- (2) 前年同様にターボプロップ・エンジンの新規製造は無く、ターボシャフトエンジンの新規製造状況は、MCH-101およびCH-101用のRTM322が無くなって、SH60J/KおよびUH60J/JAおよびAH-64D用のT700, CH-47JA用のT55で、合計台数は28台、合計出力は48,528kWであった。(表8, 図9参照)
- (3) 2007年から加わった民間航空機用エンジン向けモジュールの新規製造状況については、A320等用V2500のファンモジュール, CF34の低圧タービンモジュールに、2010年からB787用Trent1000の中圧圧縮機(IPC)モジュールおよび燃焼器モジュール, 2011年からB787, B747-8用GENxの低圧タービンモジュールが加わり、合計台数は1,346台であった。(図10参照)
- (4) 日本の航空用ガスタービン生産全体の動向としては、防衛省向けエンジンの新規製造の減少傾向であったが、前年に比べると若干増加している。一方民間航空機用エンジン向けモジュールの新規製造では、V2500およびCF34用モジュール台数の回復傾向が続く、Trent1000およびGENxといった新機種用モジュールの量産のため増加傾向にある。民間航空機用エンジン向けモジュールに関しては、2007年以降、V2500およびCF34のモジュール生産統計を掲載しているが、部品製造も含めるとGE90, PW2000/4000/6000, GP7200, Trent500/700/800/900, BR710/715など多機種に渡り、その生産規模も相当な額に達している。今後Trent1000, GENxの新機種用モジュール製造, 部品製造の本格化や、開発中のPW1100G-JM, Passport 20等の量産化が予定されていることから、民間航空機用エンジン関連の占める割合が増加する傾向は続くと思われる。(出典：一般社団法人 日本航空宇宙工業会「平成26年版 日本の航空宇宙工業」, ISSN 0910-1527)

3. 2013年過給機生産統計概要

- (1) 生産台数(表9)については、主に自動車向けに使用される圧縮機翼車外径100mm以下のClass 1 過給機の生産台数は前年比8.3%の増加で約395万台と、3年連続で増加した。主に建設機械, 陸上発電設備, 船舶

用機関等向けに使用される圧縮機翼車外径101mm～200mmのClass 2 過給機の生産台数は前年比8.7%の減少で約2.9万台となった。主に船舶用機関向けに使用される圧縮機翼車外径201mm以上のClass 3 以上の過給機についてはClassごとの程度差はあるものの、総じて11.5%減少して、約1.4千台となった。

- (2) 生産型式数(表10, 図11)は14型式が廃止となり、新規に7型式が追加となった。これにより188型式(全Class含む)となった。但し2008年以降Class 1の主要過給機メーカー1社の報告を得られておらず、集計上型式数は減少している。
- (3) 市場動向としては、前年比で生産台数全体では8.1%の増加となり、2010年以降、継続的な市場回復が見られた。ただしこれは主に自動車向けで生産台数の多いClass 1が8.3%増となった事によるものであり、主に建設機械向けとなるClass 2は昨年に引き続き減少している。乗用車向けが主なClass 1の国内生産は、ア

ベノミクス以降の大幅な円安や、環境性能の高い乗用車用クリーンディーゼルエンジン、過給ガソリンダウンサイジングの需要増により大幅に増加していると考えられる。また、主に船舶機関向けとされるClass 3以上についてはClassにより異なるものの総じて11.5%減となっており、造船業界及び海運市場の低迷及び燃料費の高騰等の影響が見受けられる。

- (4) 製品ラインアップについては、排ガス規制や高圧力比を実現する新機種が各大手メーカーより船舶主機、補機用としてClass 4, 5, 6, 7, 8に7型式追加された。また、これに伴って旧型となり需要が減少していたClass 5, 6, 7, 8, 9, 11の14型式が生産中止となった。2014年4月にはIMOにおいてNOx 3次規制の開始時期が2016年に決定された為、高度な環境技術を持つ日本メーカー製品を中心に今後も過給機のラインアップは変化していくと考えられる。

II. 統計

1. 陸船用ガスタービン

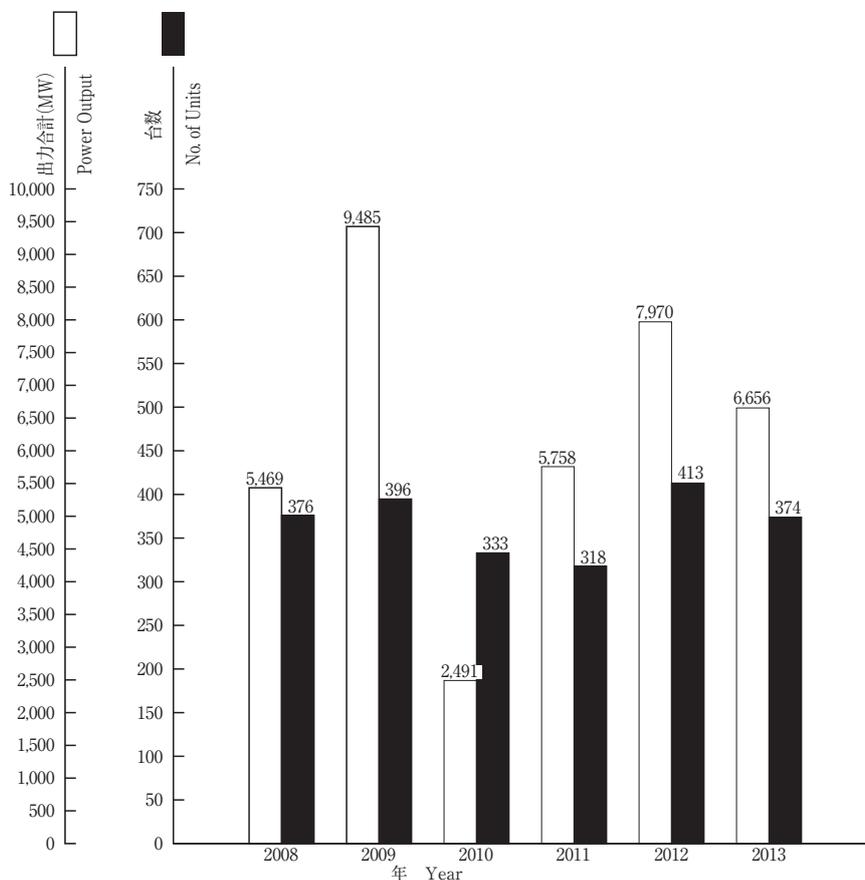


図1 陸船用ガスタービン

表1 2013年用途別生産台数及び出力 (kW)

| 用途 Application | 区分 Code | 小型 Small Unit ~735kW | | 中型 Medium Unit 736~22,064kW | | 大型 Large Unit 22,065kW~ | | 全出力 Total | |
|--|------------|-------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|------------------|--------------|------------------|
| | | 台数 Units | 出力 Output(kW) | 台数 Units | 出力 Output(kW) | 台数 Units | 出力 Output(kW) | 台数 Units | 出力 Output(kW) |
| ベースロード発電用 Generator Drive for Base Load | BL | 0 | 0 | 23 | 144,190 | 29 | 5,929,870 | 52 | 6,074,060 |
| ピークロード発電用 Generator Drive for Peak Load | PL | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 非常用発電用 Generator Drive for Emergency | EM | 105 | 44,354 | 192 | 367,000 | 0 | 0 | 297 | 411,354 |
| 商船用 Merchant Marine | M | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 艦艇用 Military Marine | MM | 0 | 0 | 4 | 112,000 | 0 | 0 | 4 | 112,000 |
| 石油化学プロセス用 Oil Refinery and Chemical Process | OR | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| その他のプロセス用 Miscellaneous Chemical Process | PR | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 実験用 Experimental | XP | 0 | 0 | 1 | 800 | 0 | 0 | 1 | 800 |
| 空調用 Air Conditioning | ACD | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| その他 Miscellaneous | MC | 15 | 5,220 | 4 | 5,850 | 1 | 46,600 | 20 | 57,670 |
| 合計 Total | | 120 | 49,574 | 224 | 629,840 | 30 | 5,976,470 | 374 | 6,655,884 |

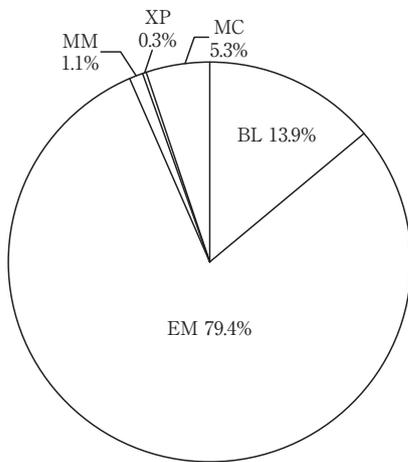


図2 2013年用途別生産台数割合 (%)

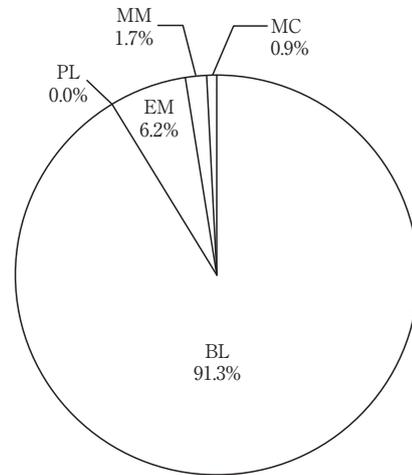


図3 2013年用途別出力割合 (%)

表2 2013年燃料別生産台数及び出力 (kW)

| 燃料種類 Kind of Fuel | | 区分 Size コード Code | 小型 Small Unit ~735kW | | 中型 Medium Unit 736~22,064kW | | 大型 Large Unit 22,065kW~ | | 全出力 Total | |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|--------------|-------------------|
| | | | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) |
| ガス燃料 Gaseous Fuel | 液化天然ガス Liquefied Natural Gas | LNG | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 1,845,800 | 9 | 1,845,800 |
| | 天然ガス Natural Gas | GNG | 0 | 0 | 14 | 99,960 | 18 | 3,875,570 | 32 | 3,975,530 |
| | 高炉ガス Blast Furnace Gas | GBF | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 255,100 | 3 | 255,100 |
| | 都市ガス Town Gas | GTW | 0 | 0 | 11 | 45,890 | 0 | 0 | 11 | 45,890 |
| | ガス燃料 小計 Sub Total | | | 0 | 0 | 25 | 145,850 | 30 | 5,976,470 | 55 |
| 液体燃料 Liquid Fuel | 灯油 Kerosene | T | 38 | 15,495 | 36 | 65,340 | 0 | 0 | 74 | 80,835 |
| | 軽油 Gas Oil | K | 30 | 10,258 | 31 | 161,800 | 0 | 0 | 61 | 172,058 |
| | 重油1種 Heavy Oil No.1 | H1 | 52 | 23,821 | 132 | 256,850 | 0 | 0 | 184 | 280,671 |
| | 液体燃料 小計 Sub Total | | | 120 | 49,574 | 199 | 483,990 | 0 | 0 | 319 |
| その他 Miscellaneous Fuel | | MF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 合計 Total | | | 120 | 49,574 | 224 | 629,840 | 30 | 5,976,470 | 374 | 6,655,884 |

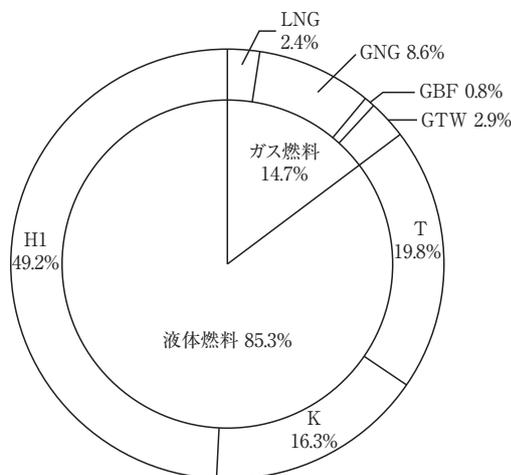


図4 2013年燃料別生産台数割合 (%)

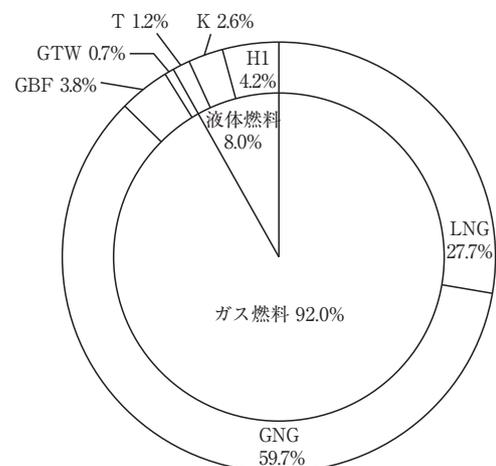


図5 2013年燃料別出力割合 (%)

表3 2013年地域別納入台数及び出力 (kW)

| 地域 Location | | 区分 Size | 小型 Small Unit ~735kW | 中型 Medium Unit 736~22,064kW | 大型 Large Unit 22,065kW~ | 全出力 Total | | | | |
|-------------------------|------------------------------|---------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------|-------------|-------------------|-----------|-----------|
| | | | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) | | |
| 国内向け Domestic Use | 北海道 Hokkaido | | 3 | 1,025 | 8 | 11,600 | 0 | 0 | 11 | 12,625 |
| | 東北 Tohoku | | 8 | 3,380 | 10 | 19,200 | 0 | 0 | 18 | 22,580 |
| | 関東 Kanto | | 41 | 17,595 | 106 | 235,010 | 2 | 81,320 | 149 | 333,925 |
| | 中部 Chubu | | 22 | 11,080 | 23 | 40,230 | 4 | 670,900 | 49 | 722,210 |
| | 近畿 Kinki | | 18 | 7,680 | 29 | 54,650 | 3 | 1,002,000 | 50 | 1,064,330 |
| | 中国 Chugoku | | 5 | 2,492 | 3 | 4,140 | 2 | 172,900 | 10 | 179,532 |
| | 四国 Shikoku | | 3 | 1,300 | 10 | 17,850 | 0 | 0 | 13 | 19,150 |
| | 九州 Kyushu | | 13 | 4,229 | 16 | 33,600 | 1 | 85,200 | 30 | 123,029 |
| | 沖縄 Okinawa | | 1 | 600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 600 |
| | 可搬型 Movable | | 5 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 13 |
| | 船用主機 Marine Propulsion | | 0 | 0 | 4 | 112,000 | 0 | 0 | 4 | 112,000 |
| | 船用補機 Marine Auxiliaries | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 未定 Unknown | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 国内向け 小計 Sub Total | | | 119 | 49,394 | 209 | 528,280 | 12 | 2,012,320 | 340 |
| 輸出向け For Export | 北米 North America | | | | | | | | | 0 |
| | 中南米 South Central America | | | | | | | | | 0 |
| | アジア Asia | | 1 | 180 | 8 | 53,750 | 17 | 3,933,300 | 26 | 3,987,230 |
| | 大洋州 Oceania | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 欧州 Europe | | 0 | 0 | 7 | 47,810 | 1 | 30,850 | 8 | 78,660 |
| | ロシア・NIS諸国 Russia・NIS | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 中東 Middle East | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | アフリカ Africa | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 輸出向け 小計 Sub Total | | | 1 | 180 | 15 | 101,560 | 18 | 3,964,150 | 34 | 4,065,890 |
| 合計 Total | | | 120 | 49,574 | 224 | 629,840 | 30 | 5,976,470 | 374 | 6,655,884 |

表4 2013年被駆動機械別生産台数及び出力 (kW)

| 被駆動機械 Driven Machinery | 区分 Size コード Code | 小型 Small Unit ~735kW | | 中型 Medium Unit 736~22,064kW | | 大型 Large Unit 22,065kW~ | | 全出力 Total | |
|---------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|--------------|-------------------|
| | | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) |
| 発電機 Electric Generator | G | 111 | 44,522 | 217 | 514,390 | 30 | 5,976,470 | 358 | 6,535,382 |
| 推進機 Propeller | PRR | 0 | 0 | 4 | 112,000 | 0 | 0 | 4 | 112,000 |
| 水ポンプ Water Pump | W | 9 | 5,052 | 3 | 3,450 | 0 | 0 | 12 | 8,502 |
| 動力計 | DM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 合計 Total | | 120 | 49,574 | 224 | 629,840 | 30 | 5,976,470 | 374 | 6,655,884 |

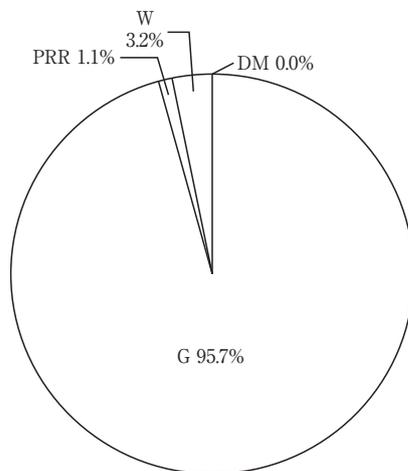


図6 2013年被駆動機械別生産台数割合 (%)

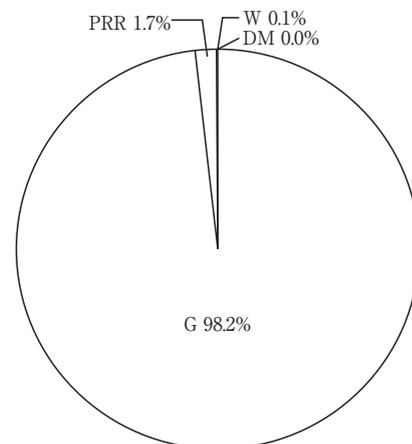


図7 2013年被駆動機械別出力割合 (%)

表5 2013年出力区分別生産台数及び出力 (kW)

| 出力区分 (kW) Units Output | | 台数 Units | 出力 Output (kW) |
|-----------------------------------|---------------|-------------|-------------------|
| 小型 Small Unit 0~735kW | 0~146 | 6 | 33 |
| | 147~367 | 32 | 7,634 |
| | 368~735 | 82 | 41,907 |
| | 小計 Sub Total | 120 | 49,574 |
| 中型 Medium Unit 736~22,064kW | 736~4,412 | 198 | 363,190 |
| | 4,413~10,296 | 22 | 154,650 |
| | 10,297~16,180 | 4 | 112,000 |
| | 16,181~22,064 | 0 | 0 |
| 小計 Sub Total | | 224 | 629,840 |
| 大型 Large Unit 22,065kW~ | 22,065~44,129 | 3 | 112,170 |
| | 44,130~ | 27 | 5,864,300 |
| | 小計 Sub Total | 30 | 5,976,470 |
| 合計 Total | | 374 | 6,655,884 |

表6 2013年発電用ガスタービン用途別生産台数及び出力 (kW)

| 区分 Size | | | 小型 Small Unit ~735kW | | 中型 Medium Unit 736~22,064kW | | 大型 Large Unit 22,065kW~ | | 全出力 Total | |
|--|-------------|-------------|-------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------------|-----------|
| 用途 Application | コード Code | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) | 台数 Units | 出力 Output (kW) | |
| 国内事業用 | ベースロード発電用 | BL | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 1,927,120 | 11 | 1,927,120 |
| | ピークロード発電用 | PL | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 非常用発電用 | EM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Domestic/Public Use 国内事業用 小計 Sub Total | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 1,927,120 | 11 | 1,927,120 |
| 国内自家用 | ベースロード発電用 | BL | 0 | 0 | 9 | 44,230 | 1 | 85,200 | 10 | 129,430 |
| | ピークロード発電用 | PL | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 非常用発電用 | EM | 103 | 43,934 | 191 | 365,400 | 0 | 0 | 294 | 409,334 |
| | 試験用 | XP | 0 | 0 | 1 | 800 | 0 | 0 | 1 | 800 |
| | その他 | MC | 7 | 408 | 1 | 2,400 | 0 | 0 | 8 | 2,808 |
| Domestic/Private Use 国内自家用 小計 Sub Total | | | 110 | 44,342 | 202 | 412,830 | 1 | 85,200 | 313 | 542,372 |
| 国内合計 Domestic Use Total | | | 110 | 44,342 | 202 | 412,830 | 12 | 2,012,320 | 324 | 2,469,492 |
| 輸出事業用 | ベースロード発電用 | BL | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 1,394,850 | 7 | 1,394,850 |
| | ピークロード発電用 | PL | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 非常用発電用 | EM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | その他 | MC | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 46,600 | 1 | 46,600 |
| For Export/Public Use 輸出事業用 小計 Sub Total | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 1,441,450 | 8 | 1,441,450 |
| 輸出自家用 | ベースロード発電用 | BL | 0 | 0 | 14 | 99,960 | 10 | 2,522,700 | 24 | 2,622,660 |
| | ピークロード発電用 | PL | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 非常用発電用 | EM | 1 | 180 | 1 | 1,600 | 0 | 0 | 2 | 1,780 |
| For Export/Private Use 輸出自家用 小計 Sub Total | | | 1 | 180 | 15 | 101,560 | 10 | 2,522,700 | 26 | 2,624,440 |
| 輸出合計 For Export Total | | | 1 | 180 | 15 | 101,560 | 18 | 3,964,150 | 34 | 4,065,890 |
| 事業用 | ベースロード発電用 | BL | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 | 3,321,970 | 18 | 3,321,970 |
| | ピークロード発電用 | PL | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 非常用発電用 | EM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | その他 | MC | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 46,600 | 1 | 46,600 |
| Public Use 事業用 合計 Total | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 3,368,570 | 19 | 3,368,570 |
| 自家用 | ベースロード発電用 | BL | 0 | 0 | 23 | 144,190 | 11 | 2,607,900 | 34 | 2,752,090 |
| | ピークロード発電用 | PL | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 非常用発電用 | EM | 104 | 44,114 | 192 | 367,000 | 0 | 0 | 296 | 411,114 |
| | 試験用 | XP | 0 | 0 | 1 | 800 | 0 | 0 | 1 | 800 |
| | その他 | MC | 7 | 408 | 1 | 2,400 | 0 | 0 | 8 | 2,808 |
| Private Use 自家用 合計 Total | | | 111 | 44,522 | 217 | 514,390 | 11 | 2,607,900 | 339 | 3,166,812 |
| 総計 Grand Total | | | 111 | 44,522 | 217 | 514,390 | 30 | 5,976,470 | 358 | 6,535,382 |

Note : Code Explanation BL : for Base Load PL : for Peak Load EM : for Emergency MC : any other miscellaneous use

2. 航空用ガスタービン

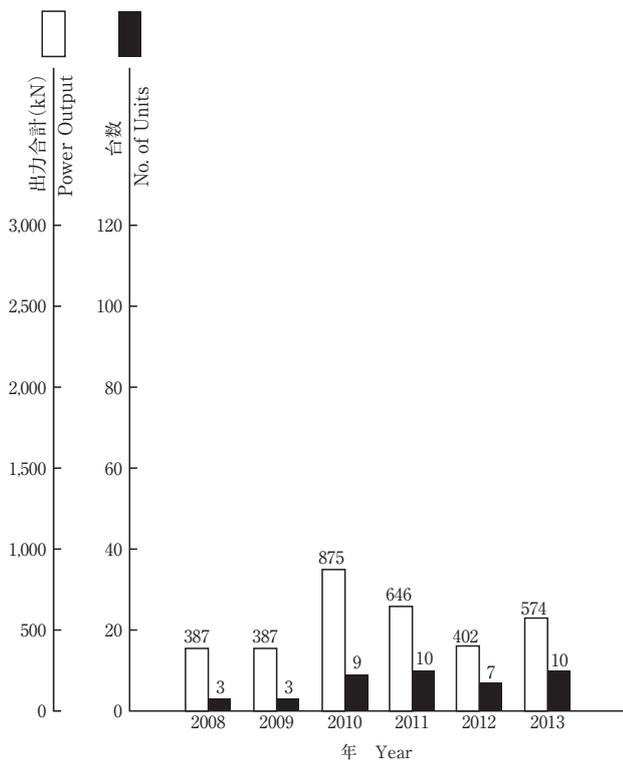


図8 ターボジェット／ターボファン・エンジン

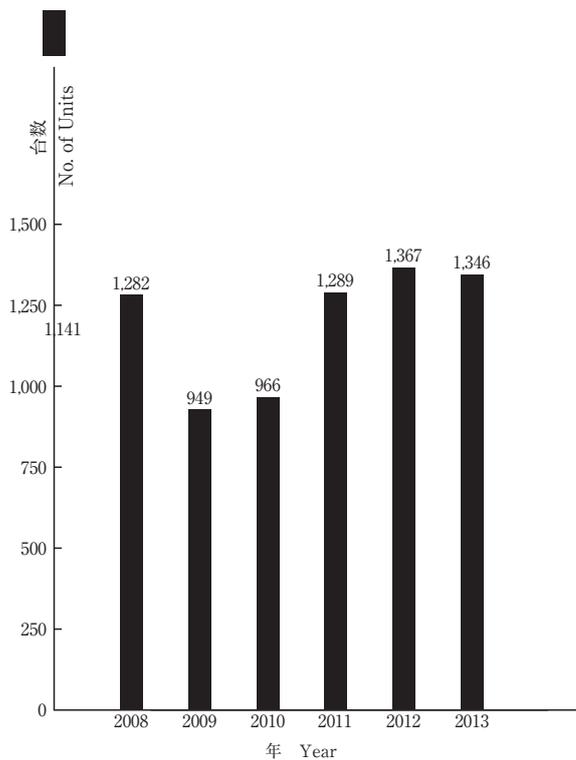


図10 民間航空エンジン用モジュール

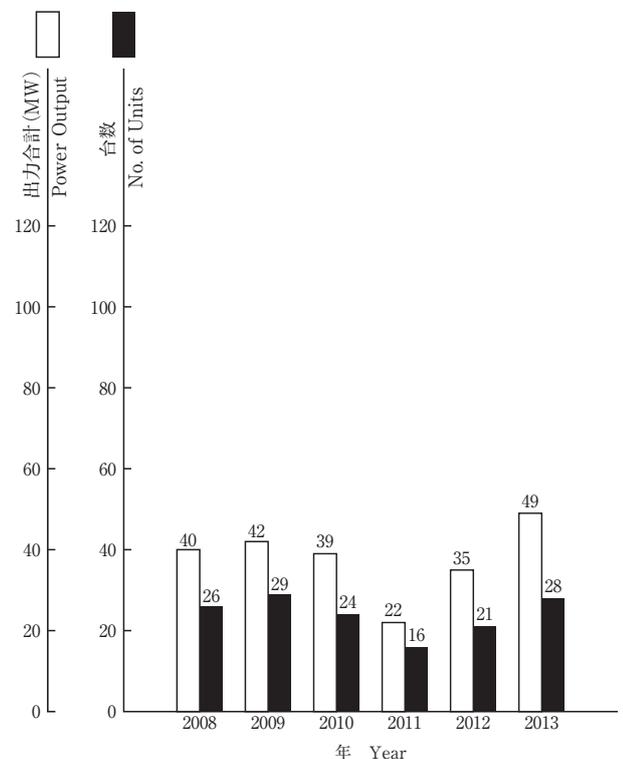


図9 ターボシャフト／ターボプロップ・エンジン

表7 2013年ターボジェット／ターボファン・エンジン
生産台数及び出力 (kN)

| | | | |
|-------------------------|----|--------------------|-----|
| 生産台数 Number of Units | 10 | スラスト合計*1 Thrust | 574 |
|-------------------------|----|--------------------|-----|

※1 海面上静止最大スラスト
Maximum Thrust at Sea Level Static Condition

表8 2013年ターボシャフト／ターボプロップ・エンジン
生産台数及び出力 (kW)

| 区分 Size | 0~735kW | | 736kW~ | | 全出力 | |
|-----------------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| | 台数 Units | 出力*2 Output (kW) | 台数 Units | 出力*2 Output (kW) | 台数 Units | 出力*2 Output (kW) |
| 固定翼機 Fixed Wing Aircraft | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ヘリコプタ用 Helicopter | 0 | 0 | 28 | 48,528 | 28 | 48,528 |
| 補助機関駆動用 Aux. Drive Units | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 合計 Total | 0 | 0 | 28 | 48,528 | 28 | 48,528 |

※2 海面上静止常用出力
Normal Output at Sea Level Static Condition

3. 過給機

表9 クラス別の年間生産台数

| 区分 Class | Size 圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller | 年間生産台数 | | | | | |
|------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 2008年 | 2009年 | 2010年 | 2011年 | 2012年 | 2013年 |
| Class 1 | 0~ 100 | 約529万 | 約275万 | 約345万 | 約354万 | 約365万 | 約395万 |
| Class 2 | 101~ 200 | 42,225 | 24,918 | 37,723 | 45,680 | 32,774 | 29,930 |
| Class 3 | 201~ 300 | 508 | 503 | 482 | 643 | 538 | 574 |
| Class 4 | 301~ 400 | 232 | 185 | 134 | 111 | 265 | 260 |
| Class 5 | 401~ 500 | 175 | 131 | 110 | 57 | 73 | 74 |
| Class 6 | 501~ 600 | 303 | 272 | 231 | 294 | 221 | 195 |
| Class 7 | 601~ 700 | 322 | 290 | 282 | 362 | 274 | 150 |
| Class 8 | 701~ 800 | 48 | 47 | 50 | 55 | 74 | 76 |
| Class 9 | 801~ 900 | 205 | 194 | 150 | 214 | 114 | 51 |
| Class 10 | 901~1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Class 11 | 1001~ | 0 | 0 | 3 | 24 | 0 | 0 |
| 合計 Total ^{*4} | | 44,018 | 26,540 | 39,165 | 47,440 | 34,333 | 31,310 |

表10 クラス別の型式数^{*3}

| 区分 Class | Size 圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller | 型式数 | | | | | |
|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 2008年 | 2009年 | 2010年 | 2011年 | 2012年 | 2013年 |
| Class 1 | 0~ 100 | 61 | 62 | 62 | 64 | 64 | 64 |
| Class 2 | 101~ 200 | 26 | 26 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| Class 3 | 201~ 300 | 14 | 15 | 16 | 18 | 18 | 18 |
| Class 4 | 301~ 400 | 15 | 16 | 16 | 15 | 17 | 18 |
| Class 5 | 401~ 500 | 11 | 12 | 12 | 10 | 16 | 14 |
| Class 6 | 501~ 600 | 11 | 12 | 12 | 14 | 15 | 15 |
| Class 7 | 601~ 700 | 13 | 13 | 14 | 17 | 18 | 15 |
| Class 8 | 701~ 800 | 5 | 5 | 6 | 5 | 8 | 7 |
| Class 9 | 801~ 900 | 12 | 12 | 11 | 8 | 9 | 8 |
| Class 10 | 901~1000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Class 11 | 1001~ | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| 合計 Total ^{*4} | | 109 | 113 | 118 | 117 | 131 | 124 |

- ※3 型式はいずれも排気タービンである。
Every model is an exhaust turbine type supercharger.
- ※4 合計数は、圧縮機翼車外径100mmを越す分を示す。
The figure shows total number of superchargers over 100mm in impeller diameter.

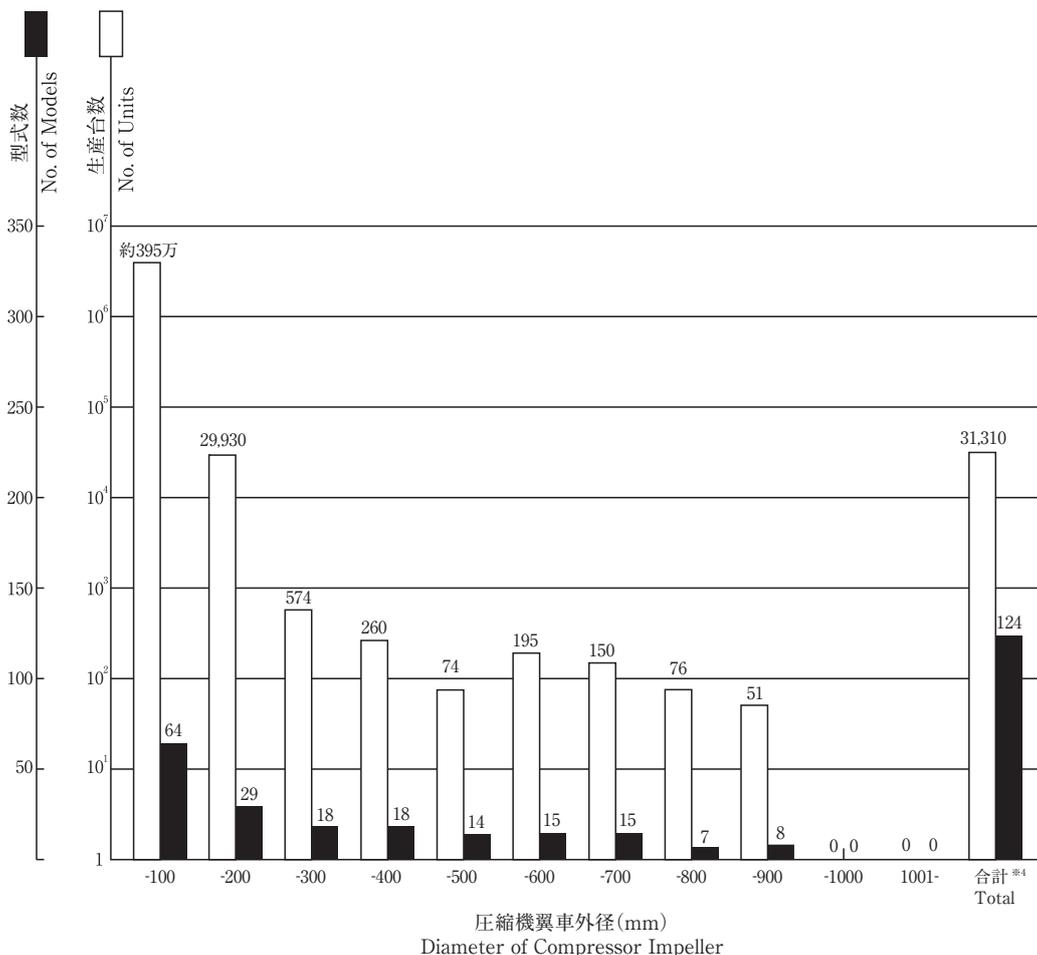


図11 2013年過給機生産台数及び型式数

第25回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

近年、ガスタービン技術の発展にはめざましいものがあり、航空機用ジェットエンジンをはじめ大規模発電やコージェネレーション用や船舶用エンジンとして幅広く用いられています。ガスタービンは高出力・高効率であることやNOx排出を抑えることが比較的容易であることから、環境に優しい原動機として今日の人類のエネルギー問題に寄与する大変重要な役割を担っております。また、将来の地球温暖化防止に向けてガスタービンの更なる高効率化・大容量化が強く求められており、多岐にわたる研究・開発分野で若い技術者の活躍が期待されます。この様な背景から、学生及びガスタービン開発に携わる新人技術者を対象とした標記シンポジウムにつきまして関東地区7月の開催に引続き、5月号での予告通り、関西地区でも下記の日時に実施することといたしました。会員・非会員を問わず積極的にご参加下さい。

1. 日 時： 2014年9月11日(木)、12日(金)
2. 場 所： 三菱日立パワーシステムズ株式会社 高砂工場 高砂クラブ (高砂市荒井町新浜2丁目7番31号)

3. プログラム：

| | |
|-------------------|---|
| 11日(木) 9:30- | 受付 (高砂工場 高砂クラブ2階 大集会議室) |
| 10:00-10:10 | 開会の挨拶 |
| 10:10-11:40 | 「ガスタービン概論」 石坂 浩一 (三菱重工業) |
| 11:40-13:00 | 昼食 |
| 13:00-14:30 | 「ガスタービンと流体工学」 坂元 康朗 (三菱重工業) |
| 14:40-15:30 | 「三菱日立パワーシステムズ社におけるガスタービンの開発」 正田 淳一郎 (三菱日立パワーシステムズ) |
| 15:30-17:45 | 生産設備見学, 実証設備見学 (官学参加者) 三菱日立パワーシステムズのガスタービン技術の紹介 (メーカ参加者) |
| 18:00-19:30 | 懇親会 |
| 12日(金) 9:20-10:50 | 「ガスタービンと伝熱工学」 石田 克彦 (川崎重工業) |
| 11:00-12:30 | 「ガスタービンと燃焼工学」 木村 武清 (川崎重工業) |
| 12:30-13:30 | 昼食 |
| 13:30-15:00 | 「ガスタービンと材料工学」 高橋 孝二 (三菱日立パワーシステムズ) |
| 15:10-16:40 | 「ガスタービンと制御工学」 足利 貢 (川崎重工業) |
| 16:40-16:50 | アンケート記入 |
| 16:50- | 閉会の挨拶 |

4. 定 員：60名
5. 対象者：大学、大学院、高等専門学校在籍者、ならびに技術者 (ガスタービン初心者)
6. 参加費 (税込)：学生 (会員：¥4,320, 非会員：¥7,560), 社会人 (会員：¥10,800, 非会員：¥19,440)
7. 懇親会：参加費 無料
8. 受講証の発行：2日間の講義を受講された方は、「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。
9. 申込方法：下記の申込書に1) 所属 学校名 (専攻, 学年), 社名 (部課名, 入社年度), GTSJ会員は会員番号, 2) 氏名, 3) 連絡先住所, TEL, FAX, E-mail, 4) 懇親会参加の有無を明記し, 学会事務局宛に, 郵便, ファクシミリ, 電子メールのいずれかにより2014年8月27日(水) (必着) までに, お申し込み下さい。学会ホームページからもお申込みいただけます。
10. 参加費の支払：当日支払いですが, 事前の支払いも受け付けます。事前に支払う場合は下記の所に振り込みを行ってください。またその旨を学会事務局にファクシミリ, 電子メール等でお知らせ下さい。

注：開催場所案内図及び詳細については当学会ホームページをご覧ください。(http://www.gtsj.org/)

- 参加費には、テキスト（ガスタービン工学）代金が含まれております。
- 高砂工場及び実証設備の見学は官学からの参加者のみとさせていただきますので予めご了承下さい。
- 高砂工場見学にはカメラおよびカメラ付携帯電話の持ち込みが出来ませんので予めご了承下さい。
- 昼食：実費弁当申し込みを承ります。（飲物付きで1000円程度です。後日注文受付します。）
- 交通：山陽電車荒井駅 下車徒歩5分。同高砂駅からタクシーで5分又は徒歩15分。山陽電車高砂駅へはJR明石又はJR姫路で山陽電車に乗り換え山陽電車特急で約15～20分。
- 学会事務局：（公社）日本ガスタービン学会 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13第3工新ビル402
- 振込先：銀行（みずほ銀行新宿西口支店 普通預金1812298）郵便振替（00170-9-179578）



M501J ガスタービン



M701J ガスタービン



ガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備

第25回ガスタービン教育シンポジウム参加申込書

(2014年9月11, 12日)

公益社団法人 日本ガスタービン学会 行

FAX : 03-3365-0387 TEL : 03-3365-0095 E-mail : gtsj-office@gtsj.org

| | | | |
|--------|-----|--------------------|-----------|
| 氏名 | | | |
| 所属 | | 学年, 入社年度 | |
| 連絡先 | 〒 | | |
| TEL | | FAX | |
| E-mail | | GTSJ会員番号 (No.) | 非会員 |
| 懇親会 | 出・欠 | 昼食申込 | 11日 ・ 12日 |

申込締切日： 2014年8月27日(水) (必着)

Asian Congress on Gas Turbines 2014 (ACGT2014) 参加募集

ACGT2014実行委員会

3月号にてお知らせしました通り、本年8月にソウル国立大学においてACGT2014が開催されます。日中韓を中心にインドや欧米各国から約150件の講演が予定されていますので、奮ってご参加いただきたく、お願い申し上げます。

記

会議名： アジア・ガスタービン会議2014 (Asian Congress on Gas Turbines 2014, ACGT2014)

会 期： 2014年8月18日(月)～20日(水)

場 所： ソウル国立大学 (ソウル, 韓国)

共催団体： 日本ガスタービン学会 (GTSJ),

韓国流体機械学会 Korean Society for Fluid Machinery (KSFM)

中国科学院工程熱物理研究所 Institute of Engineering Thermophysics/ Chinese Academy of Sciences (CAS),

会議ウェブサイト：<http://www.acgt2014.com> (本会ホームページにもリンクしています。)



International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo 開催のご案内

IGTC2015Tokyo実行委員会

委員長 渡辺紀徳

既に学会誌、ホームページ等でご案内しております通り、International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo (IGTC2015 Tokyo) を2015年11月に開催致します。実行委員会で順調に準備を進めている中、会場となる虎ノ門ヒルズが6月11日に無事開業致しました。早速現地を視察し、会場使用等の具体的な計画を立てているところです。この度、1st Circularを発行し、ホームページに公開致しました。会員の皆様には是非積極的なご参加とご協力をいただきますよう、何卒宜しくお願い致します。

記

会議名称： International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo

(2015年国際ガスタービン会議東京大会)

開催場所： 虎ノ門ヒルズ フォーラム (虎ノ門ヒルズ4階・5階)

<http://toranomohills.com/ja/>

会 期： 2015年11月15日(日)～20日(金)

日 程： アブストラクト締切り 2015年1月31日

ドラフト論文締切り 2015年4月30日

最終論文締切り 2015年8月31日

ホームページ：<http://www.gtsj.org/english/igtc/IGTC2015/index.html>

第42回日本ガスタービン学会定期講演会（熊本）・見学会のお知らせ（予告）

第42回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会を以下のように開催します。プログラム他詳細は、決まり次第、学会ウェブページに掲載いたします。また、9月号にも掲載予定です。

主 催：公益社団法人 日本ガスタービン学会

協 賛：協賛団体は日本ガスタービン学会ウェブサイト (<http://www.gtsj.org/>) をご覧ください。

開 催 日：

- ・講演会 2014年10月22日(水)、23日(木)
- ・見学会 2014年10月24日(金)

開催場所：

- ・熊本市国際交流会館 熊本市中央区花畑町 4-18
<http://www.kumamoto-if.or.jp/kcic/default.asp>
Tel: 096-359-2020

講演会：

- ・一般講演：空力、燃焼、システム、伝熱、材料、タービン等
- ・特別講演：熊本大学先進マグネシウム国際研究センター センター長 河村能人氏 講演題目未定
- ・企画：「負荷変動対応型先進的ガスタービン技術（仮題）」等を予定。

参加登録費（税込）：

- ・会員・協賛団体会員 14,040円（ただし、学生は論文集有りで4,320円、論文集無しで1,080円）
- ・会員外 19,440円（ただし、学生は論文集有りで7,560円、論文集無しで4,320円）

懇親会：

- ・第1日目の講演会終了後、市内ホテルにて懇親会を開催いたします。
懇親会参加費（税込）：3,240円（予定）

学生による優秀発表の表彰：

- ・学生による「研究報告」で、講演申込時にエントリーがあったものの中から、特に優秀な発表に対して表彰を行います。

見学会：

- ・日 時：10月24日(金)
- ・見学先：日立造船株式会社有明工場、熊本大学先進マグネシウム国際研究センター等の見学を予定しています。
- ・定 員：45名程度、先着順、講演会参加登録者に限ります。
- ・参加費：6,480円

参加申込方法：

- ・プログラム等詳細決定次第、学会ウェブサイト (<http://www.gtsj.org/>) に掲載いたします。ウェブサイトから登録されるか、9月号掲載参加申込書に必要事項をご記入の上、学会事務局宛にお申込み下さい。参加登録は、受付の混乱を避けるため、事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

関連情報：

- ・講演会の前日（10月21日）に市民フォーラムを計画しています。参加自由・無料の予定です。こちらも合わせてご確認ください。

次号予告 日本ガスタービン学会誌2014年9月号 (Vol.42 No.5)

特集「最近の加工・製造技術」

産業用ガスタービン 岡田 郁生 (三菱重工業)

航空用ガスタービン 櫻井 幹男 (IHI)

IHI/ABB製船用過給機の概要及び最新の加工・製造技術の紹介 百瀬 圭, 中野 健, 宮原 和昌 (IHI)

蒸気タービンの製造技術 浅井 知, 永瀬 保夫 (東芝)

マニシングセンタによるガスタービン部品の最新加工技術 石井 正人 (牧野フライス製作所)

小特集「3Dプリンタの可能性」

3Dプリンタとは、3Dプリンタの可能性 京極 秀樹 (近畿大学)

3Dプリンタとデータ処理 望月 達也 (静岡文化芸術大学)

3Dプリンタの製造応用 中野 禪 (産業技術総合研究所)

産業用ガスタービンにおける3Dプリンタの活用 小牧 孝直 (三菱日立パワーシステムズ)

ラピッド・プロトタイプング (RP) による精密鋳造用鋳型及び中子の迅速造型技術の開発

三島 勝則 (キングパーツ)

ほか

※タイトル、執筆者は変更する可能性があります。

○ 本会共催・協賛・行事 ○

| 主催学協会 | 会合名 | 共催 協賛 | 開催日 | 会場 | 詳細問合せ先 |
|------------------|--|----------|---|---------------------------------------|--|
| 日本機械学会 関西支部 | 第332回講習会「事例に学ぶ流体関連振動（トラブル事例相談会付き）」 | 協賛 | 2014/7/28-29 | 大阪科学技術センター | 日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073,FAX:06-6443-6049 E-MAIL:info@kansai.jsme.ne.jp |
| 日本機械学会 | 「機械の日・機械週間」記念行事 | 協賛 | 2014/8/7 | 早稲田大学国際会議場 | 日本機械学会 http://www.jsme.or.jp/kikainohi/ |
| 日本伝熱学会, 日本学会議 | 第15回国際伝熱会議 (IHTC-15) | 協賛 | 2014/8/10-15 | 国立京都国際会館 | 第15回国際伝熱会議 事務局 info@ihct-15.org |
| 日本マリンエンジニアリング学会 | 技術者継続教育2014「基礎コース」講習会 | 協賛 | 2014/8/28-29, 2014/9/25-26, 2014/10/23-24 | 岡山国際交流センター | 日本マリンエンジニアリング学会 http://www.jime.jp |
| 日本機械学会 | 「伝熱工学資料（改定第5版）」の内容を教材にした熱設計の基礎と応用 | 協賛 | 2014/9/4-5 | 東京理科大学 森戸記念館第一フォーラム | 日本機械学会 熱工学部門 TEL:03-5360-3500 |
| 日本機械学会 | 2014年度計算力学技術者(CAE技術者)資格認定事業(固体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者) | 協賛 | 2014/9/23, 12/20 | 東京工業大学, 名古屋大学, 近畿大学, 金沢大学, JR博多シティ会議室 | 日本機械学会 事業企画G caenintei@jsme.or.jp |
| 日本機械学会 | 講習会「流体騒音」 | 協賛 | 2014/10/17 | 東京大学 生産技術研究所 | 日本機械学会 流体工学部門 http://www.jsme-fed.org/events/2014/14-74.html |
| 日本機械学会 関西支部 | 第333回講習会「熱応力による変形・破壊の評価方法と対策事例」 | 協賛 | 2014/10/23-24 | 大阪科学技術センター | 日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073,FAX:06-6443-6049 E-MAIL:info@kansai.jsme.ne.jp |
| 東京ガス, 日本ガス協会 | 熱電プラザ2014 | 後援 | 2014/11/19-21 | 東京ビッグサイト 東1ホール | 東京ガス エネルギー企画部 03-5400-7701 |
| 日本燃焼学会 | 第52回燃焼シンポジウム | 共催 | 2014/12/3-5 | 岡山コンベンションセンター | 第52回燃焼シンポジウム事務局 http://www.combustionsociety.jp/sympo52/ |
| 日本液体微粒化学会 | 第23回微粒化シンポジウム | 協賛 | 2014/12/18-19 | 弘前大学文京町キャンパス創立50周年記念会館 | 日本液体微粒化学会事務局 http://www.ilass-japan.gr.jp |



▷ 入会者名簿 ◁

〔正会員〕

秋澤 智彦(I H I) 加賀谷 諒(I H I) 石川 裕太(東 芝) 中村 恭明(東 芝)
岩崎 真吾(日本ガイシ)

〔学生会員〕

川崎 初穂(大阪工業大学) 神崎 大(九州大学) 伊藤 響平(首都大学東京) 生繁 佑弥(首都大学東京)
小堀 雄帆(首都大学東京) 平井 雄己(首都大学東京) 鈴木 大樹(筑波大学) 大内 拓也(東京大学)
大橋 俊之(東京理科大学) 大湾 朝日(東京農工大学) 村井 健人(東京農工大学) 森 愛奈(東京農工大学)
矢野 幸汰(東京農工大学) 米村 淳(法政大学) 岡 俊介(早稲田大学) 藤澤 信道(早稲田大学)
原 昇太郎(早稲田大学)

〔賛助会員〕

大阪冶金興業(株) トヨタ自動車(株) Ipsen(株) 三菱日立パワーシステムズ(株)

2014年度役員名簿

会長 藤谷 康男 (MHPS)
副会長 田沼 唯士 (帝京大)
法人管理担当執行理事 伊東 正雄 (東芝), 鈴木 健 (IHI), 幡宮 重雄 (日立), 正田 淳一郎 (MHPS)
公益目的事業担当執行理事 壹岐 典彦 (産総研), 岡崎 正和 (長岡技科大), 佐藤 哲也 (早大), 武 浩司 (川崎重工), 辻田 星歩 (法政大), 春海 一佳 (海技研), 姫野 武洋 (東大), 山根 敬 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大)
理事 桂田 健 (JAL), 松崎 裕之 (東北電力), 渡辺 和徳 (電中研), 渡邊 啓悦 (荏原), 藁谷 篤邦 (本田技術研究所)
監事 塚越 敬三 (MHPS), 藤網 義行 (東京農工大)

2014年度委員名簿 (順不同)

2014年6月26日現在
 ○は委員長

倫理規定委員会 ○幡宮 重雄 (日立), 鈴木 健 (IHI), 伊東 正雄 (東芝), 正田 淳一郎 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 春海 一佳 (海技研)
自己点検委員会 ○幡宮 重雄 (日立), 鈴木 健 (IHI), 伊東 正雄 (東芝), 正田 淳一郎 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 春海 一佳 (海技研)
運営委員会 ○鈴木 健 (IHI), 幡宮 重雄 (日立), 正田 淳一郎 (MHPS), 伊東 正雄 (東芝), 山根 敬 (JAXA), 壹岐 典彦 (産総研), 春海 一佳 (海技研), 太田 有 (早大), 酒井 義明 (東芝), 村田 章 (東京農工大), 堀内 直人 (東京電力), 渡辺 紀徳 (東大), 安田 聡 (MHPS)
企画委員会 ○正田 淳一郎 (MHPS), 鈴木 健 (IHI), 幡宮 重雄 (日立), 山根 敬 (JAXA), 壹岐 典彦 (産総研), 春海 一佳 (海技研), 渡辺 紀徳 (東大)
国際委員会 ○仲俣千由紀 (IHI), 岡井 敬一 (東大), 太田 有 (早大), 小森 豊明 (三菱重工), 葉狩 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研), 船崎 健一 (岩手大学), 松田 寿 (東芝), 三好 市朗 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)
学術講演会委員会 ○春海 一佳 (海技研), 山本 武 (JAXA), 楠田 真也 (IHI), 齊藤 圭司郎 (三菱重工), 渋川 直紀 (東芝), 高橋 康雄 (MHPS), 武田 淳一郎 (富士電機), 玉井 亮嗣 (川崎重工), 姫野 武洋 (東大), 平野 孝典 (拓殖大), 松沼 孝幸 (産総研), 渡辺 裕章 (電中研)
集行事務委員会 ○山根 敬 (JAXA), 尾関 高行 (電中研), 木村 武清 (川崎重工), 澤 徹 (東芝), 鈴木 正也 (JAXA), 瀬川 武彦 (産総研), 辻田 星歩 (法政大), 中村 友行 (防衛省), 西江 俊介 (三井造船), 西村 英彦 (MHPS), 浜辺 正昭 (IHI), 藤井 達 (日立), 細川 哲也 (JALエンジニアリング), 山形 通史 (富士電機), 吉田 征二 (JAXA), 藁谷 篤邦 (本田技術研究所)
ガスタービン技術普及委員会 ○岡崎 正和 (長岡技科大), 秋山 陵 (日立), 賀澤 順一 (JAXA), 木村 武清 (川崎重工), 齊藤 大蔵 (東芝), 檜山 貴志 (三菱重工), 福山 佳孝 (JAXA), 古川 洋之 (IHI), 細川 哲也 (JALエンジニアリング), 宮原 忠人 (エネルギーアドバンス), 村田 章 (東京農工大), 屋口 正次 (電中研), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)
学会誌編集委員会 ○壹岐 典彦 (産総研), 荒木 秀文 (MHPS), 有岡 和也 (三井造船), 石川 揚介 (東芝), 加藤 千幸 (東大), 阪井 直人 (川崎重工), 櫻井 一郎 (元JAL), 佐藤 哲也 (早大),

潮崎 成弘 (MHPS), 鈴木 康文 (防衛省), 辻田 星歩 (法政大), 寺澤 秀彰 (東京ガス), 寺本 進 (東大), 中野 健 (IHI), 中野 剛 (JALエンジニアリング), 新関 良樹 (東芝), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 北條 正弘 (JAXA), 松崎 裕之 (東北電力), 三嶋 正幸 (中部電力), 山下 一憲 (荏原製作所), 堀内 直人 (東京電力), 吉野 展永 (IHI), 渡辺 和徳 (電中研), 渡邊 啓悦 (荏原製作所)

論文委員会 ○寺本 進 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 石田 克彦 (川崎重工), 太田 有 (早大), 加藤 大 (IHI), 幸田 栄一 (電中研), 柴田 貴範 (MHPS), 田頭 剛 (JAXA), 姫野 武洋 (東大), 船崎 健一 (岩手大学), 山根 敬 (JAXA), 山本 武 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 吉岡 洋明 (愛媛大), 渡辺 紀徳 (東大)

統計作成委員会 ○武 浩司 (川崎重工), 恵比寿 幹 (三菱重工), 澤 徹 (東芝), 野村 藤樹 (ターボシステムズユニテッド), 原田 純 (川崎重工), 山上 展由 (MHPS), 山上 舞 (IHI), 吉田 知彦 (MHPS), 米田 幸人 (ヤンマー)

産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 岡崎 正和 (長岡技科大), 金津 和徳 (IHI), 幸田 栄一 (電中研), 佐々木 隆 (東芝), 永井 勝史 (川崎重工), 西澤 敏雄 (JAXA), 幡宮 重雄 (日立), 平野 篤 (防衛省), 福泉 靖史 (三菱重工), 藤岡 順三 (物材研), 船崎 健一 (岩手大), 古川 雅人 (九州大), 本阿弥 眞治 (東京理科大), 吉田 英生 (京大)

広報委員会 ○村田 章 (東京農工大), 酒井 義明 (東芝), 佐藤 哲也 (早大), 高橋 康雄 (MHPS), 岡崎正和 (長岡技科大), 姫野 武洋 (東大), 吉田 征二 (JAXA), 山根 敬 (JAXA)

表彰委員会 ○田沼 唯士 (帝京大), 春海 一佳 (海技研), 壹岐 典彦 (産総研), 児玉 秀和 (IHI), 幡宮 重雄 (日立), 山根 敬 (JAXA), 姫野 武洋 (東大)

情報システム化推進委員会 ○村田 章 (東京農工大), 酒井 義明 (東芝), 佐藤 哲也 (早大), 高橋 康雄 (MHPS), 岡崎正和 (長岡技科大), 姫野 武洋 (東大), 吉田 征二 (JAXA), 山根 敬 (JAXA)

調査研究委員会 ○壹岐 典彦 (産総研), 松沼 孝幸 (産総研), 伊藤 栄作 (三菱重工), 岸部 忠晴 (日立), 合田 真琴 (川崎重工), 齊藤 大蔵 (東芝), 高橋 徹 (電中研), 原田 広史 (物材研), 谷村 和彦 (川崎重工), 米澤 克夫 (IHI), 渡辺 紀徳 (東大)

ACGT2014 実行委員会 ○山本 誠 (東京理科大), 小森 豊明 (三菱重工), 葉狩 智子 (川崎重工), 山根 敬 (JAXA)

IGTC2015Tokyo 実行委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 姫野 武洋 (東大), (総務委員会) ○西澤 敏雄 (JAXA), 牧田 光正 (JAXA), 小見 淳介 (IHI), 沼田 祥平 (MHPS), (論文委員会) ○太田 有 (早大), 寺本 進 (東大), 山本 誠 (東京理科大), 西岡 卓宏 (日立), 辻田 星歩 (法政大), 山根 敬 (JAXA), 山本 武 (JAXA), 吉岡 洋明 (愛媛大), 岡井 敬一 (東大), 新関 良樹 (東芝), 玉木 秀明 (IHI), 仲俣千由紀 (IHI), 葉狩 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研), 三好 市朗 (MHPS), 幸田 栄一 (電中研), 田頭 剛 (JAXA), (展示委員会) ○松田 寿 (東芝), 北山 和弘 (東芝), 猪亦 麻子 (東芝), 岡村 直行 (東芝), 石川 智貴 (東芝), 種橋 信哉 (GE), 井上 俊彦 (川崎重工), 原田 純 (川崎重工), 吉國 孝之 (IHI), 藤木 貴子 (IHI), 西村 真琴 (MHPS), 吉田 知彦 (MHPS), 山形 通史 (富士電機), 牧野 敦 (JAXA), (行事委員会) ○大石 勉 (IHI), 山上 舞 (IHI), 酒井 英司 (電中研), 藤本 秀 (IHI), 堀川 敦史 (川崎重工), 吉田 征二 (JAXA), (財務委員会) ○井上 洋 (MHPS), 後藤 仁一郎 (MHPS), 鎌田 直人 (MHPS), 廣川 順一 (IHI)

日本ガスタービン学会入会のご案内

日本ガスタービン学会は、「エネルギー」をいかにして効率よく運用し、地球規模の環境要請に応えるかを、ガスタービンおよびエネルギー関連分野において追求する産学官民連携のコミュニティーです。

会員の皆様からは、「ガスタービン学会に入会してよかったと思えること」の具体例として次の様な声が寄せられています：

- タテ（世代）とヨコ（大学、研究機関、産業界）の交流・人脈が広がった。
- 学会誌が充実しており、学会・業界・国外の専門分野の研究動向や技術情報が効率的に得られた。
- ガスタービンに熱い思いを持った人達と、家族的雰囲気の中で階層を意識せず自由な議論ができ、専門家の指導を得られた。

学会の概要（2013年3月現在）

会員数：2,056名（正会員 1,968名，学生会員 88名） 賛助会員：101社
 会員の出身母体数：企業・研究機関・官公庁等 約300，学校 約100

会員のメリット

個人会員（正・学生会員）：

学会誌無料配布（年6回）、学術講演会の論文発表・学会誌への投稿資格、本会主催の行事の参加資格と会員参加費の特典、本会刊行物の購入資格と会員価格の特典、調査研究委員会等への参加
 賛助会員：

学会誌の無料配布、学会誌広告・会告掲載（有料）、新製品・新設備紹介欄への投稿、本会主催行事参加および出版物購入について個人会員と同等の特典

入会金と会費（2013年度から）

| 会員別 | 入会金 | 会費（年額） | 後期入会時 会費（初年度のみ） |
|---------------|--------|-------------------|-----------------|
| 正 会 員 | 500円 | 8,000円 | 4,000円 |
| 正 会 員（65才以上※） | 500円 | 5,000円 | 2,500円 |
| 学生会員 | 500円 | 2,500円 | 1,250円 |
| 賛助会員 | 1,000円 | 一口 70,000円とし、一口以上 | 一口 35,000円 |

※当該年度3月1日現在

後期・・・9月1日～翌2月末まで

入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます（<http://www.gtsj.org/index.html>）。

学会事務局にお電話いただいても結構です。申込書を送付致します。



公益社団法人

日本ガスタービン学会

Gas Turbine Society of Japan

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話番号：03-3365-0095

E-mail: gtsj-office@gtsj.org

様々な議論を呼んだ新しいエネルギー基本計画が4月に策定され、今後の日本のエネルギーについて一定の方向が決められました。再生可能エネルギーは『エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源』として位置付けられました。今後再生可能エネルギーの導入を一層進めていくこととなりますが、再生可能エネルギーの割合が増大することが電力システムに大きな負担をかけることはヨーロッパの電力ネットワークの事例でも明らかであり、新たな技術の開発が必要です。また原子力は『重要なベースロード電源』として位置付けられ、石炭も『安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源の燃料として再評価』されて、『高効率石炭火力発電の有効利用等により環境負荷を低減しつつ活用していくエネルギー源』であると位置付けられています。東日本大震災後、電力に世間の注目が集まり、火力発電は日本の電力供給を支えてきましたが、現在は燃料代が大きな問題となっております。火力の中では燃料代が安い石炭火力は今後も重要なエネルギー源であり続けることが想定され、様々な研究開発が行われています。

このような背景の下に本号は石炭火力について特集を組ませていただきました。石炭火力に関わる様々な技術を網羅することは紙面の関係で難しいため、実用になっているもの、大規模の実証が進められているものを主に様々な方にご執筆をお願いしました。岡崎先生の巻頭言にございますように、旧来の石炭火力の先入観を変えていく必要があります。私自身、磯子火力発電所を初めて見学させて頂いた際に、本当に石炭を燃焼させているのかと驚いた記憶がございます。本特集が石炭の重要性、将来性についてご理解頂く機会になれば幸いです。

また、本号では例年通りガスタービンおよび過給機に関する生産統計を掲載いたしました。作成いただいた統計作成委員会の方々にお礼申し上げます。更に東北電力(株)東新潟火力発電所のガスタービン累積発電時間20万時間到達の記事、ダイハツディーゼルの新製品紹介記事など盛りだくさんとなりました。会員にとって有益な情報を発信して参りたく存じますので、ご投稿並びに情報提供を頂ければ幸いです。

最後にご執筆をはじめご協力いただきました皆様に感謝申し上げます。

(壹岐典彦)

- 7月号アソシエイトエディター
壹岐 典彦 (産業技術総合研究所)
- 7月号担当編集委員
荒木 秀文 (三菱日立パワーシステムズ)
鈴木 康文 (防衛省)
三嶋 正幸 (中部電力)

(表紙写真)

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用しております。

詳細については、各記事をご参照ください。

- ・「最新石炭火力の性能と効率向上の取り組み」
..... (P.270 ~ 274)
- ・「先進超々臨界圧火力発電 (Advanced-USC) 要素技術開発プロジェクト」 (P.275 ~ 280)
- ・「IGCCの開発状況」 (P.286 ~ 291)
- ・「カライド酸素燃焼プロジェクト」 (P.303 ~ 309)

だより

✠事務局 ✉ ✠

6月に、ドイツ デュッセルドルフで開催されたASME TURBO EXPOにて展示ブースを置き、GTSJの活動紹介などをしてまいりました。詳細は次回9月号の国際委員会報告にて報告されますが、ブースでは来場者や周囲の展示業者の方と直接お話をすることができ、GTSJや日本に興味を持ってくださっている方がたくさんいらっしゃることを実感いたしました。

さて、今回ドイツでは数回鉄道を利用したのですが、いろいろ驚かされました。まず、空港からホテルに向かうため自動券売機で切符を買おうとしたら、1枚で4人乗れるグループ割引切符のようなものがありました。同じ飛行機に乗り合わせていた4人で1枚購入。改札がないので、購入後、券売機の横の機械(使用日時が印字される)に切符を入れるのですが、1枚の切符の表の前後、裏の前後、と4回切符を入れ

て印字。(親切な若い女性がやり方を教えてくれました)。おもしろいシステムでした。次の日に、再度鉄道を利用したときには、列車がホームに入る直前に到着番線が変更され、急遽隣のホームに移動。列車の発車番線は急に変更になることが多いそうです。当然ながら日本のように時刻通りに列車が到着することはあまりないようで、電光掲示板を常に見ていないと乗り間違えてしまいます。ちなみに、購入した切符と違う列車に乗ったり、乗り越したりした場合には罰金がかかります。高いようで、うっかり間違えた等という言い訳はたたないようです。でも、複雑なことが多いわりに騒がしくないのは、構内アナウンスが少なかったからかもしれません。そしていつも思うことですが、柔軟な対応ができなくなっている我が身を今回も痛感し、怠惰な日常生活に甘んじてはいけないなあと感じました。(中村)

学会誌編集規定

2003.8.29改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - B. 依頼原稿：本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿：学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

| | |
|----------|--------|
| 論説・解説、講義 | 6ページ |
| 技術論文 | 6ページ |
| 速報 | 4ページ |
| 寄書、随筆 | 2ページ |
| 書評 | 1ページ |
| 情報記事欄 | 1/2ページ |
3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規程を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。但し、著作者自身または著作者が帰属する法人等が、自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載、翻訳・翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。
8. 著作者は、学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。
9. 本会発行の著作物に掲載された記事、論文などの著作物について、著作権侵害者、名誉毀損、またはその他の紛争が生じた場合、当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
ニッセイエブプロ(株) PM部 ガスタービン学会誌担当
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5164
E-mail: eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿規定

2010.8.27改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
 - 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
 - 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌 Vol.42 No.4 2014.7

発行日 2014年7月18日
発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
編集者 壹岐 典彦
発行者 藤谷 康男
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
(普) 1703707
印刷所 ニッセイエブプロ(株)
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5164

©2014, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、一般社団法人学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人 学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
FAX: 03-3457-5619 E-mail: info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。直接、本学会へお問い合わせください。