

2017年度会長就任挨拶 —さらに存在感ある学会を目指して—

A Greeting from the President of GTSJ

—What we should do to become a more prestigious society—



船崎 健一*1

FUNAZAKI Ken-ichi

2017年度の日本ガスタービン学会会長を拝命することになりました船崎健一です。産業用ガスタービン、航空用エンジン及びターボチャージャーという我が国における戦略的製品群を核とし、エネルギー関連産業全般までをカバーする学会として、国内のみならず海外にまでもその存在感を示す本学会をリードするという立場となり、公益社団法人として、また、産学官民におけるガスタービン関連技術専門家集団として、日本ガスタービン学会が果たすべき任務を考えたとき、会長として責務の大きさに己の力不足を感じない訳には参りません。ただ、実際のところ優秀で熱意に溢れた理事、委員および会員の皆様が学会活動の要であり、ここは肩の力を抜いて、油谷副会長とともに自然体で学会運営に臨む所存です。宜しくお願いします。

前年度は久山会長のリードの下、多くの事業、委員会活動が展開され成果をあげております。定期講演会、教育シンポジウム、ガスタービンセミナーなど好評を博している恒例の企画に加え、女性研究者、技術者の会や若手技術者の会など、学会との関わりを通じたプロ意識の醸成や人脈形成支援事業が行われております。これらの事業を通じて、将来のガスタービン関連産業や学会を支える有為な人材養成が実施されたことは大変貴重なことであると強く認識しております。また、賛助会員との懇

談会や地方における中小企業等との懇談など、学会の利害関係者への配慮や学会活動の普及、裾野拡大など、将来戦略上意義深い取り組みが行われたことも特筆事項でしょう。さらに、学会活動の国際化も関係者のご努力で着実に進展しており、本学会の国際的な認知度向上にも繋がっております。関係された皆様に深く感謝するとともに、今後ともご協力をお願いする次第です。

今年度も、これまでの活動の成果や課題分析を元に、会員の皆さんの満足度向上に資する業務に一層注力します。また、ガスタービン関連技術醸成の場として学会活動の質的向上をさらに目指す努力を継続し、学術、産業の発展に貢献するとともに、広く社会への発信を続けてまいります。さらに、学生や若手技術者など、次世代を担う人材育成にも、新たな発想で取り組む所存です。特に、学生会員や若手会員数また大学関係の会員数が伸び悩んでいる状況であり、学会の広報活動にも工夫の必要性を痛感しております。本学会は学生の就職面で関心の高い産業分野を擁しておりますので、会員であることのメリットをより鮮明に打ち出すことも一考に値するでしょう。

繰り返しになりますが、会員の皆様のご理解、ご協力をなくして学会活動は成り立ちません。1年間、どうぞ宜しくお願いします。

原稿受付 2017年4月19日

*1 岩手大学理工学部
〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5
funazaki@iwate-u.ac.jp

特集：エミッション低減技術と計測技術

エミッション低減技術への期待と展望

Perspectives for Emission Reduction Technologies

中垣 隆雄^{*1}

NAKAGAKI Takao

航空機用・陸用を問わず、燃焼を伴うガスタービンには、動力源としての性能向上に加え、環境性能の両立も求められており、将来に亘って燃焼排出物の規制が緩和されることはない。排出規制の対象物質にはNO_x、SO_x、CO、HC、PMなど、生体に直接影響を与えるとされる排出物のほか、温室効果ガスの主要因であるCO₂も併せて議論されるようになり、これらのエミッション低減はガスタービンの普及にとって重要な課題となっている。

航空機用では国際民間航空機関（ICAO）の航空環境保全委員会（CAEP）で議論されている。主には地上移動と離発着時における空港周辺の環境対策としてHC、CO、NO_xおよびSmokeの基準があり、NO_x排出量については、2026年までにCAEP/6基準の40±5%まで低減することが目標となっている。航空機では、脱硝装置などの後処理や湿式燃焼には頼れないので、乾式燃焼技術のみで低減せざるを得ない。よく知られたThermal NO_x対策である燃焼場における局所高温の抑制、酸素濃度の低減および滞留時間の短縮の目的に様々な技術が開発されている。二段燃焼はその典型で、燃料一系統のシンプルなRQL燃焼器がある。陸用で実用化されている火炎安定保持のパイロットと希薄予混合のメインの燃料二系統化の方向として、GEはTAPS燃焼器で上記の長期目標達成と同時にHCやCOも大幅な排出削減に成功している。これを超える国産技術としてはJAXAを中心として開発が進められているグリーンエンジンがあり、早期の実用化が待たれる。

発電用コンバインドサイクルやビル・工場の熱電併給システムに用いられているガスタービンのNO_x対策も、基本的には燃焼技術で低減する。多くは前述の通り、燃料二系統で機能を分離した乾式の低NO_xバーナが主流になってきている。石炭を用いるIGCCや製鉄プロセスの副生ガスで、燃焼の速い水素の含有やFuel NO_xの発生などの課題に対しても、既に高いレベルで克服されている。一方、熱電併給システムでは燃焼温度の局所的な高温化の解消に効果がある湿式も採用されており、熱電比可変型の蒸気噴射サイクルや水蒸気改質と組み合わせた化学再生サイクルでもNO_xの大幅な低減が可能である。さらに陸用では外付けのガス処理システムも併用できる。微量成分の多い石炭ガス化ガスやバイオガスなどは燃焼前に精製され、石油化学等で実績のある低温湿式

精製に加え、IGCCの高効率化のための高温乾式の脱硫や集塵技術も開発されている。燃焼後には排煙脱硝があり、アンモニアによる選択触媒還元（SCR）が主流である。ガスタービン排ガスは起動や低負荷運転においてNO₂/NO_x比が高くなる傾向にあるが、SCR触媒反応はNOよりNO₂の還元速度が遅く、低負荷運転での排ガス温度低下もあって脱硝率が低下するため、様々な触媒が開発されている。

CO₂に関しては、IPCCのAR5やCOP21でのパリ協定採択などを契機に規制への動きが始まった。IEAによると、2014年の全世界のCO₂排出量は約320億トンであり、航空機は2.6%ほどの寄与で今後も増加する見込みである。2016年にはCAEPで航空機の燃費向上を促すCO₂排出基準案に合意しており、2040年までに6.5億トンの削減を目標としている。エンジン自体の高効率化に加え、機体の軽量化や翼形状の進化、長期的にはバイオ燃料の利用等の対策が進むと考えられる。発電部門は最大のCO₂排出源であり、削減への動きで先導することが期待されている。東日本大震災以降、原子力再稼働の遅れによる火力頼みの電源構成の下で、日本では2030年度までに2013年度比で温室効果ガスの排出を26%削減する目標を約束草案として提出した。ガスタービンのCO₂排出削減は、TITの高温化による高効率化として1700℃級まで開発が進んでいるが、高温化に対するゲインも縮小していくため、SOFCとのトリプルコンバインド化など、次なる期待もある。

経産省の2030年のエネルギーミックスでは、太陽光や風力など不安定な再生可能エネルギーの大量導入を見込んでいる。火力発電も調整力確保のために頻繁な起動停止や部分負荷運転が増え、定格運転以外のエミッション対策として、NO₂リッチな排気の脱硝率と発電効率の向上が重要になる。それでもCO₂の排出規制は厳しさを増す。政権交代で不透明ではあるが、米国EPAが既設・新設の火力発電に義務付けたCO₂排出規制値は、石炭にとってはバイオマス混焼率の飛躍的増加かCCS以外には達成困難なレベルである。CCSではエネルギーペナルティとコストを同時に下げることが求められる。

航空機も火力発電も一旦導入されると経済寿命の数十年間はその技術でロックインされ、ストックの更新には長い時間がかかる。CO₂排出削減シナリオに基づき、中長期の目標に向けたロードマップの産官学全体での共有と、着実な目標達成に資するタイムリーな技術開発に期待したい。

原稿受付 2017年3月28日

* 1 早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科

〒169-8555 新宿区大久保3-4-1

takao.nakagaki@waseda.jp

特集：エミッション低減技術と計測技術

ジェットエンジンのエミッションと燃焼器技術

Aircraft Emissions and Combustion Technology

松山 竜佐^{*1}

MATSUYAMA Ryusuke

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，NO_x，PM，希薄燃焼，燃焼器
Gas Turbine, Jet Engine, NO_x, PM, Lean Burn, Combustor

1. 航空機の排気物質

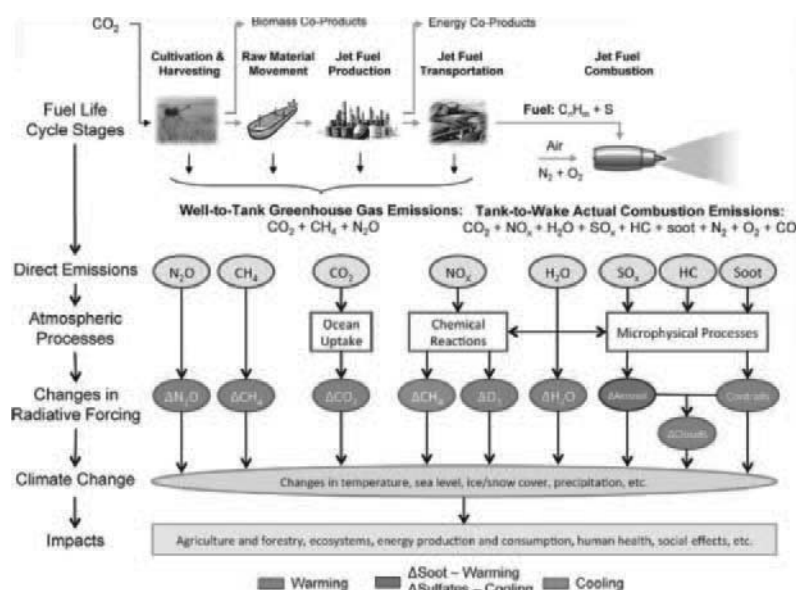
近年の産業活動の活発化により，地球温暖化などの気候変動や大気汚染による健康被害が問題となっている。そのため，国際航空分野においても有害排気物質を抑制するための活動が行われている。航空機からの排気物質は，二酸化炭素（CO₂），水（H₂O），窒素酸化物（NO_x），硫黄酸化物（SO_x），炭化水素（HC），一酸化炭素（CO），粒子状物質（PM: Particulate Matter）からなる（図1参照）。特に環境への影響が大きい物質はCO₂，NO_x，PMである。地球温暖化に影響を与える人為起源の温室効果ガス排出量は，CO₂が全体の76%を占めており，航空機からの排出量は全体の2%程度⁽¹⁾とされているが，世界的に航空需要が拡大しているため，CO₂排出量の削減が議論されている。大気汚染物質である

NO_xは，光化学スモッグや酸性雨の原因であり，また温暖化ガスであるメタン（CH₄）の減少，オゾン（O₃）の対流圏での生成および成層圏での減少に関連し，地球温暖化にも影響しているとされている。PMは，特に小さな粒子が人体深くまで入り込むため，健康への影響が懸念されている他，巻雲などの形成に関連するため，地球温暖化への影響が懸念されている。

2. 航空機の排気物質規制

2.1 規制機関

地球温暖化や大気汚染への対策のために，ICAO（International Civil Aviation Organization：国際民間航空機関）のCAEP（Committee on Aviation Environmental Protection：航空環境保全委員会）によって，航空機

Fig. 1 Climate impact of aircraft emissions⁽²⁾

原稿受付 2017年3月14日

* 1 川崎重工(株)
〒673-8666 明石市川崎町1-1
matsuyama_ryusuke@khi.co.jp

の排気物質の規制が検討、策定されている。CAEPは、1983年にCAN (Committee on Aircraft Noise) と CAEE (Committee of Aircraft Engine Emissions) が統合して発足した機関で、9つのグループで構成されており、排気物質については、WG (Working Group) 3で検討される(図2、図3参照)。

2.2 エンジンの排気物質規制値

ジェットエンジンの排気物質規制は、CAEPが発行するAnnex16, Volume II⁽⁴⁾ (NO_x, CO, HC, Smoke), Volume III (CO₂, 策定中) に詳細が記載されている。ジェットエンジンの排気物質規制は、エンジン全体圧力比と定格出力で計算式が分類されており、計算式に全体圧力比と定格出力を入力して算出された値が規制値となる。Smokeの規制値については、SAE (Society of Automotive Engineers) が定めるSmoke Number (SN) を利用し、計算式に定格出力を入力して規制値を算出する。規制の対象となるエンジンは、定格出力26.4kN以上のターボファン、ターボジェットである。例えば、A320neoに搭載されるPW1130G-JMのCAEP/8規制値は、下記のように定まる⁽⁵⁾。

$$\text{HC: } D_p/F_{00} = 19.6$$

$$\text{CO: } D_p/F_{00} = 118$$

$$\text{NO}_x: D_p/F_{00} = -9.88 + 2.0 \cdot \pi_{00} = -9.88 + 2.0 \cdot 35.5 = 61$$

$$\text{Smoke: SN} = 83.6 (F_{00})^{-0.274} = 83.6 \cdot (134)^{-0.274} = 21.8$$

(or a value of 50, whichever is lower)

D_p: 総排出量 (g) F₀₀: 定格出力 (kN) π₀₀: 圧力比 (-)

エンジンの排気物質特性は、空港周辺3000ft以下を想定したLTO (Landing and Take-Off) サイクルのエンジン出力4条件 (7%, 30%, 85%, 100% MTO: Max Take-Off) で計測された排出値を用いる⁽⁴⁾ (図4参照)。NO_x, CO, HCはLTOサイクルの排出総量, Smokeは4条件で計測された最大値が採用される。排気物質の計測は、地上エンジン試験時にエンジンの出力をLTOサイクル各条件に設定して実施され、計測された排出値の大気圧条件補正後、エンジン排気物質特性として算出する。この排気物質特性が、規制値を下回っていればよい。

2.3 規制の強化

NO_x排出量規制は、CAEE (1981年) で制定されて以降、20%減のCAEP/2 (1992年)、16%減のCAEP/4 (1998年)、12%減のCAEP/6 (2004年)、15%減のCAEP/8 (2010年) と段階的に強化されている(図5参照)。CO, HCの排出量規制は、CAEE以来変更されていない。また、現在のLTOサイクルでは、大気への排出が最も多い巡航時のNO_x排出量を規制できないため、巡航時のNO_x規制導入がCAEPにて議論されている。

2016年2月に開催されたCAEP/10では、NO_x排出量

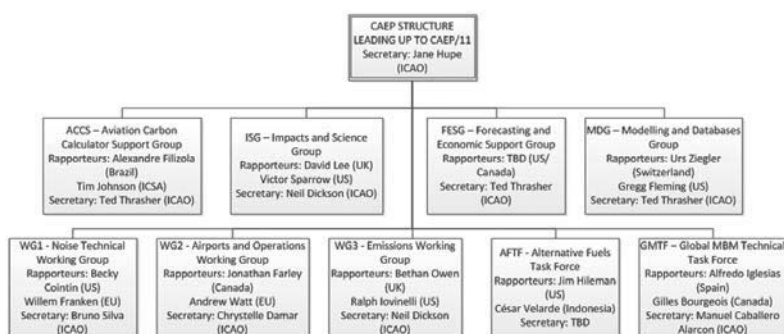


Fig. 2 CAEP Structure⁽³⁾

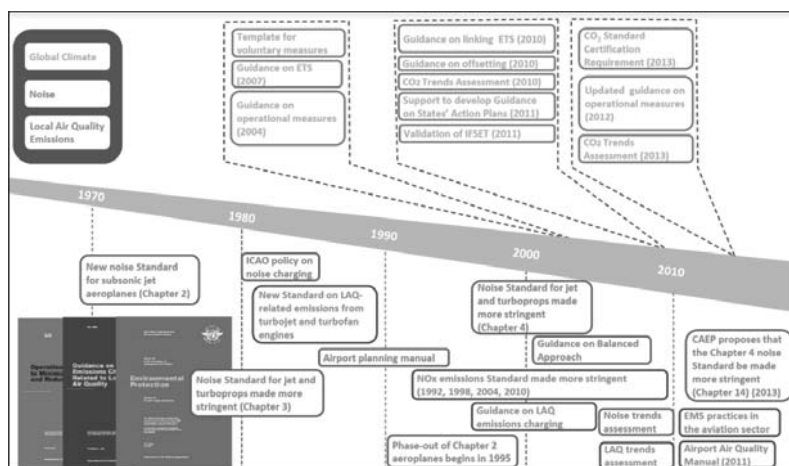
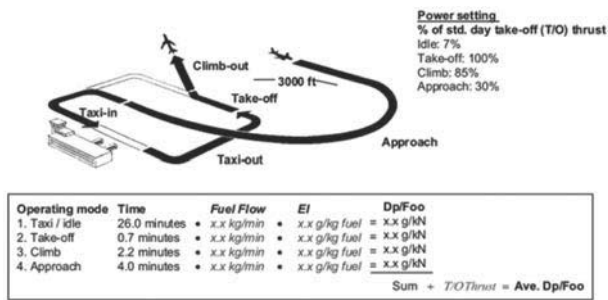
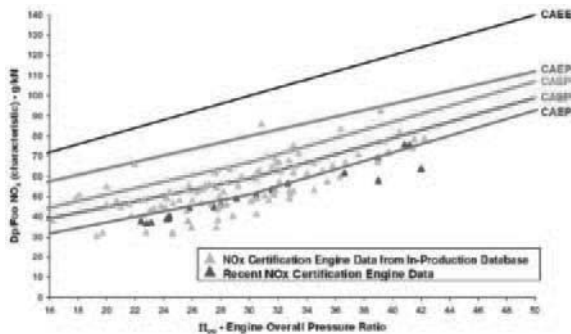
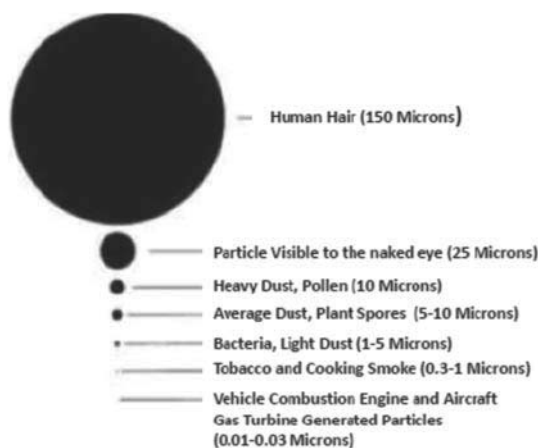


Fig. 3 CAEP Milestones⁽³⁾

Fig. 4 LTO (Landing and Take Off) サイクル⁽⁶⁾Fig. 5 CAEP NOx regulations⁽⁷⁾

の規制強化は見送られた。CAEP/8までの規制強化によりNOxが削減されてきていることと、CO₂, nv (Non-Volatile:不揮発性) PMの基準策定が優先されたことが影響している。Smokeについては、従来のSNを使用した最大質量濃度の規制からnvPMの質量および数に関する規制が導入されることが合意された。現在のSNによる規制とほぼ同等の値を暫定基準として、2020年1月1日以降に製造される定格出力26.4kN以上のターボファンおよびターボジェットに適用される。現在の質量濃度の規制では、PMの数が少量でも、粒径の大きなPMが含まれていれば、質量濃度は大きくなる（図6参照）。PMは粒径が小さいほど人体の深くまで入り込み、健康への影響が懸念されているため、PMの質量と数を評価する規制がより望ましい。CAEP/11では、CAEP/10の暫定基準からLTOサイクルをベースとしたnvPMの質量

Fig. 6 nvPM particle sizes⁽⁸⁾

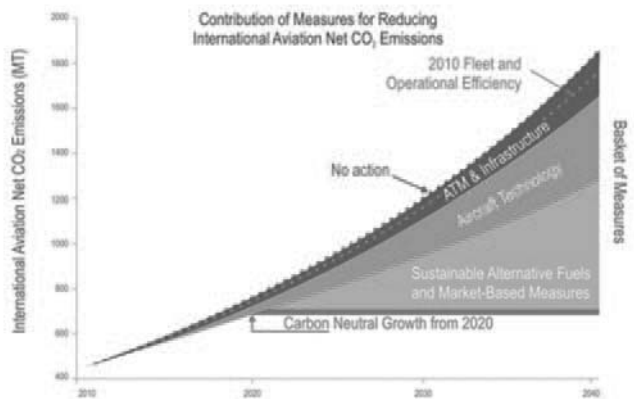
と数を基準としたEI_{mass}およびEI_{num}へと、より厳格な規制が制定される見通しである。

3. 排気物質規制への対策

3.1 有害排気物質の低減方法

各排気物質抑制のための対策としては下記がある。

CO₂とH₂Oは、化石燃料が燃焼する場合の反応生成物であるため、化石燃料を使用する限りゼロにはできないため、燃料使用量を削減する対策が取られる。エンジンの場合は、技術面では高圧比化による熱効率改善、高バイパス比化による推進効率の改善、運用面では航空管制関連の運航効率改善、燃料面では代替燃料の使用など原料調達から消費までを含めたライフサイクル全体でのCO₂削減などがあげられる（図7参照）。

Fig. 7 Contribution of Measures for reducing International Aviation CO₂ Emissions⁽⁹⁾

NOxとPMは、ほとんどがエンジンの燃焼器で発生するため、燃焼器の開発によって排出量の削減が行われている。航空燃料には窒素（N）成分は含まれていないため、空気中のN₂が燃焼器内の燃焼による高温雰囲気にてO₂と反応してNOxが生成される。NOx生成量は、燃焼温度の上昇に対して指数的に増加するため、燃焼温度を抑制すればNOxを抑制できる。発電用ガスタービンでは、触媒の使用や蒸気／水噴射によって燃焼温度を抑制する方法もあるが、航空用では容量、重量などの観点から困難である。そのため、燃焼温度を抑制できるRQL（Rich-burn, Quick-mix, Lean burn）燃焼器、希薄燃焼器などが開発されている。PMは、その内訳は煤煙が大半である。燃料過濃の酸素が不足した状態で燃焼し、燃料の化学反応が完結できない場合にPMが多く生成される。そのため、PMを抑制するためには、燃料過濃状態で燃焼させないことが重要となる。希薄燃焼ではほとんど発生しない。

3.2 低NO_x燃焼器

航空用低NO_x燃焼器としてRQL (Rich-burn, Quick-mix, Lean burn) 燃焼器, 希薄燃焼器が開発・実用化されている。従来航空用燃焼器では, 拡散燃焼方式が採用されていた。各燃焼器の大きな違いの1つは, 燃焼器を通過する空気の流量配分である。燃焼器では, 空気は燃料噴射弁とライナから通過する。拡散燃焼器では, 燃焼器全体の10~20%の空気が燃料噴射弁を通過し, 残りの空気は二次空気, 希釈空気およびライナ冷却空気としてライナを通過する。燃料噴射弁から噴射された燃料噴霧が空気中の酸素と量論比で燃焼するため, 安定燃焼が得られる。一方で燃焼温度が高くなるため, NO_xが発生しやすい。また, 燃料過濃領域が発生するため, PMが発生しやすい。

RQL燃焼器は, 拡散燃焼器と基本構造が類似している。燃料噴射弁通過空気流量は10~20%とするが, 大量の空気を急速に混合して量論比領域の滞留時間を極小とするため, ライナの空気導入配置が工夫されており拡散燃焼器とは異なる。従来の拡散燃焼領域は, 過濃燃焼領域となり燃焼温度を低減し, 急速混合後も希薄燃焼により燃焼温度を低減する (図8⁽¹⁰⁾参照)。RQL燃焼器は, 着火性や保炎性がよい。一方で, 理想的な混合には限界があり, 量論比領域の通過時間をゼロとすることはできない。RQL燃焼器には, PW (Pratt&Whitney) 社のTALON⁽¹¹⁾ (Technology for Advanced Low NO_x) 燃焼器などがある (図9参照)。

希薄燃焼器は, 燃料噴射弁通過空気量を70~80%とし, ライナを通過する空気は20~30%とする。従来の

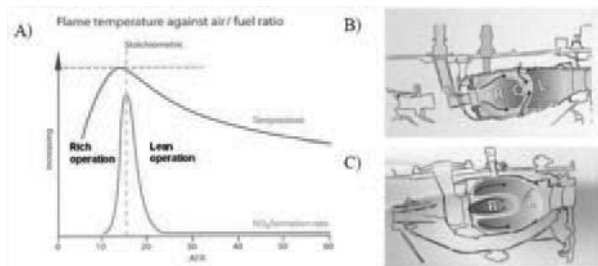


Fig. 8 NO_x formation (A), Rich (RQL) (B) and lean combustion topology (C)⁽¹⁰⁾

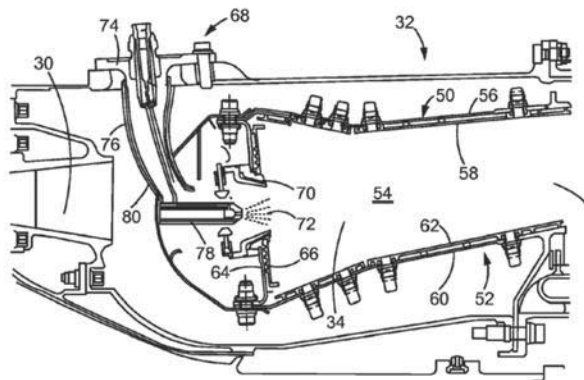


Fig. 9 TALON X RQL combustor (Pratt & Whitney)⁽¹¹⁾

拡散燃焼領域は, 希薄燃焼領域となる。エンジンが低出力の場合は, 高出力の場合と比較して燃焼器内が低温度雰囲気状態となり希薄燃焼のみでは安定燃焼できないため, 希薄燃焼方式のメイン燃料噴射弁だけでなく, 低出力での安定燃焼を目的とした拡散燃焼方式のパイロット燃料噴射弁が配置される。このため, 燃料系統は少なくとも2系統必要となり, 従来とは異なる燃料コーキング防止設計と燃料制御が必要となる。希薄燃焼器の代表的な例としては, GE (General Electric) 社のTAPS (Twin Annular Premixing Swirler) がある (図10参照)。

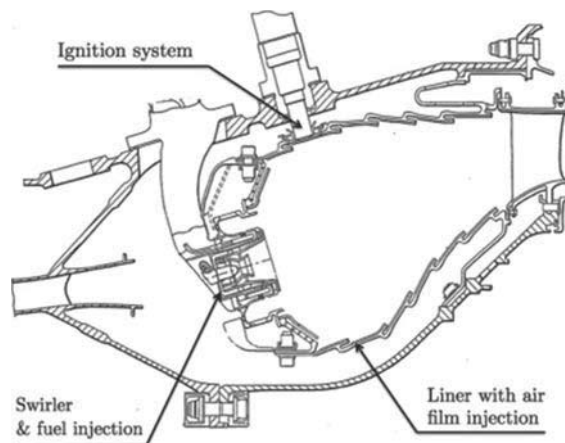


Fig. 10 TAPS Lean staged combustor (General Electric)⁽¹²⁾

4. 航空エンジンメーカーの対応

4.1 既存エンジンのNO_xおよびPM排出

GE, RR (Rolls-Royce), PWは, 低NO_x燃焼器として, RQL燃焼器を開発し, 実機エンジンに導入している。GEはLEC (Low Emission Combustor), RRはPhase5 Tiled combustor (図11参照), PWはTALONなどがある。GE, RR, PWとも希薄燃焼器開発の報告があるが, 実機エンジンに導入しているのは, GE90 (DAC: Double Annular Combustor), GENx (TAPS1), LEAP (TAPS2) のGEのみである。TAPS1はコンセントリック希薄燃料噴射弁の採用, TAPS2は燃料噴射弁にAdditive Manufacturing (AM) を採用している。エ

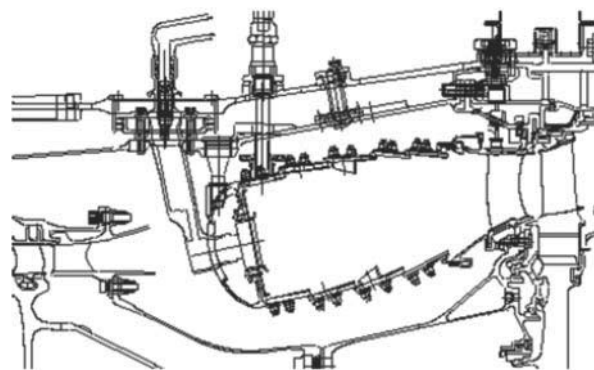


Fig. 11 Trent 'Phase 5' tiled combustor and combustor design space & requirements⁽¹⁰⁾

ンジン試験段階ではあるが、GE9XのTAPS3はCMCs (Ceramic Matrix Composites) を希薄燃焼器のアウトライナおよびインナライナに採用することでライナ冷却空気を削減し、燃料噴射弁 (ミキサ) の通過空気量を増加させて、低NO_xを実現しているとされる⁽¹³⁾。

図12.1, 図12.2は、CAEPのEmission databank⁽⁵⁾ のデータをもとに、定格出力89kN以上のエンジンのNO_xおよびSmokeの排出量について抜粋、整理したものである。各社ともに希薄燃焼器およびRQL燃焼器を導入することで数年ごとのNO_x規制強化に対応している。GENxのTAPS1が他のエンジンより低NO_xであることを示しているが、PW1100GのTALONXも規制に対して十分低い値であり、RRなど他社のRQL燃焼器と比較しても良い数値を示している。

Smokeは、GENx1BPIP (Performance Improvement Package) 2およびGENx2BPIPが、RQLを採用する各社と比較してかなり低い数値を示しており、規制値に対して90%以上削減している。

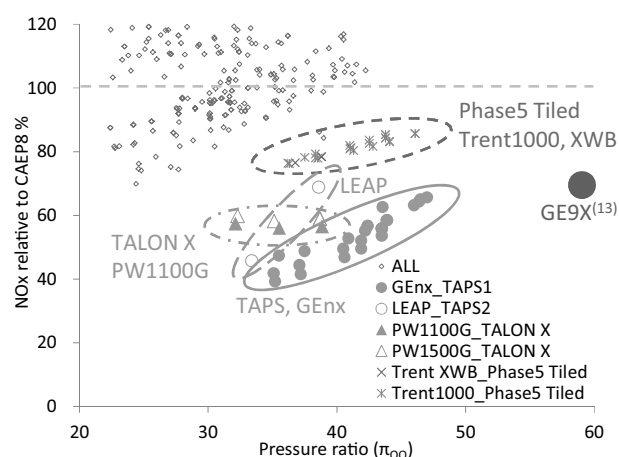


Fig. 12.1 NO_x emissions of existing engines to CAEP8⁽⁵⁾

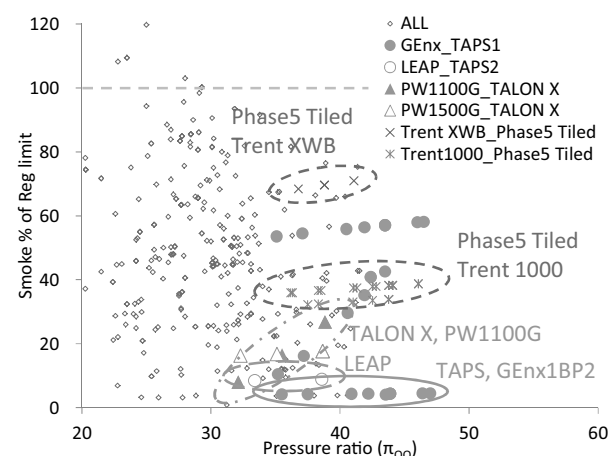


Fig. 12.2 Smoke of existing engines to CAEP8⁽⁵⁾

4.2 各社の技術開発

CAEP/10では、NO_x排出量規制は現状維持となり、Smoke排出規制はSNによる排出規制からnvPMによる排出規制への変更が合意された。CAEP/11ではより厳格なnvPM規制が制定される。将来のNO_xとPMのさらなる規制強化に対応するため、RQL燃焼器を採用する各社は、希薄燃焼器の開発が急がれる。

米国では、NASA が航空機の燃料効率や騒音、NO_x排出量についての削減目標を設定しており (表1参照)、この目標を達成するために、NASAやFAA (Federal Aviation Administration) が官民連携の技術開発プロジェクトを進めている。NASAは、ERA (Environmentally Responsible Aviation:2010-2015) プロジェクトにおいて、N+2の達成を目標に、GE、PWと低NO_x燃焼技術についての共同研究を実施している。ERAでは、GEはTAPS、PWはACS (Axially Controlled Stoichiometry) とそれぞれ希薄燃焼器のマルチセクタ試験を実施し、CAEP6の規制値に対して75%減の目標を達成している⁽¹⁴⁾。FAAが主導するCLEEN (Continuous Lower Energy, Emissions and Noise, 2010-2014) ではN+1を目標にGEがTAPS2の開発、CLEEN2 (2015-2020) ではN+2の達成を目標に、GEはTAPS3、RRはRQL燃焼器の低NO_xの技術開発を実施している。

Table 1 NASA subsonic transport system lead matrix⁽¹⁵⁾

TECHNOLOGY GENERATIONS (Technology Readiness Level = 4-6)	TECHNOLOGY GENERATIONS (Technology Readiness Level = 4-6)		
	N+1 (2015)	N+2 (2025*)	N+3 (2035)
Noise (cum below Stage 4)	-32 dB	-42 dB	-71 dB
LTO NO _x Emissions (below CAEP 6)	-60%	-75%	-80%
Cruise NO _x Emissions (rel. to 2005 best in class)	-55%	-70%	-80%
Aircraft Fuel/Energy Consumption* (rel. to 2005 best in class)	-33%	-50%	-60%

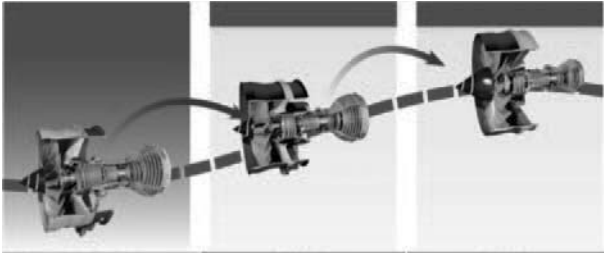
* Projected benefits once technologies are matured and implemented by industry. Benefits vary by vehicle size and mission. N+1 and N+3 values are referenced to a 737-400 with CFM56-7B engines. N+2 values are referenced to a 737-200 with GE90 engines.

** ERA's time-phased approach includes achieving "long-pink" technologies by 2018, 6 by 2015.

† CO₂ emission benefits dependent on lifecycle CO₂, per MJ for fuel and/or energy source used.

Table 1: NASA Subsonic Transport System Level Metrics.

欧州では、資金助成制度Horizon2020が出資する官民連携プロジェクトであるClean Sky1 (2008-2017)、Clean Sky2 (2014-2024) が進行中であり、2020年までにACARE (Advisory Council for Aviation Research and innovation in Europe) 目標値である騒音半減、NO_x排出量80%削減、CO₂排出半減の達成を目標に掲げている。RRは、Clean sky1のSAGE (Sustainable and Green Engines) 6でNO_x排出について40%CAEP6、巡航条件で12g/kgfuel以下を目標として、希薄燃焼器の開発を2016年の地上エンジン試験および飛行試験の予定で進めているとされている。また、Clean Sky2のWP6であるVHBR (Very High Bypass Ratio engines) では、2025年以降のサービスを目標に、RRのADVANCE and Ultra Fanの燃焼器入口圧力70気圧の研究が進行中である⁽¹⁶⁾ (表2参照)。燃焼器は、ALECSYS (Advanced

Table 2 ADVANCE and UltraFan™ concept relative to trent engine⁽⁹⁾


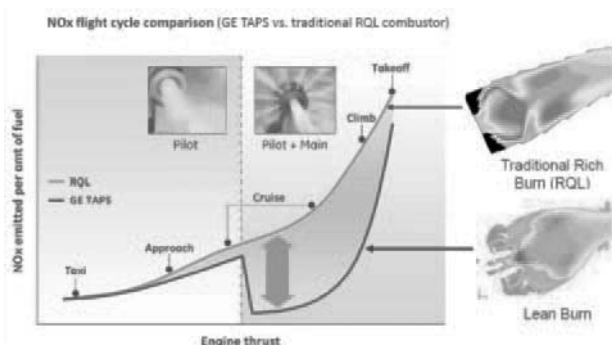
Technology EIS Readiness	2020+	2025+
Bypass Ratio	11+	15+
Overall Pressure Ratio	60+	70+
Efficiency relative to Trent 700	20%+	25%+

Low Emissions Combustion System) の希薄燃焼器とされている。

5. 希薄燃焼器の課題

TAPSのようなコンセントリック燃料噴射弁を採用した希薄燃焼器は、燃料噴射弁の中心軸にパイロットが配置され、その外周に同軸のメインが配置される。低出力では、パイロットの拡散燃焼によって安定燃焼し、高出力では、メインを作動させて予混合燃焼することで、NO_xの排出量を抑制する。図13は、希薄燃焼器とRQL燃焼器のエンジン出力に対するNO_x排出量を示している。LTOサイクル4条件のうち、30%MTO (Approach) と85%MTO (Climb) の間の出力で燃料ステージングが行われる。RQL燃焼器では出力増加とともにNO_xが増加するが、希薄燃焼器では燃料ステージングにより、NO_x排出量の大幅低減が可能である。PMの排出量は、メイン作動時はほぼ0であり、最大排出量はパイロットのみが作動する出力時に記録される。

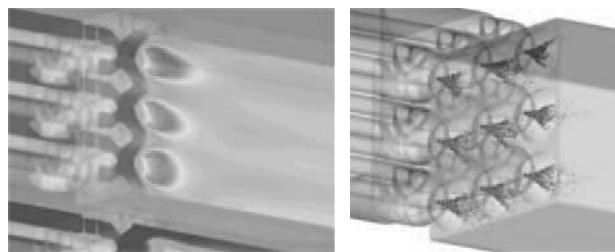
希薄燃焼器の性能面での一般的な傾向にある課題は、低NO_xと高燃焼効率の両立、燃焼振動の抑制があげられる。NO_x低減のために、LTOサイクルの高出力 (85%, 100%MTO) 条件で希薄燃焼させると、メイン作動状態の出力では巡航時が最も燃焼温度の低い状態となり燃焼効率が低くなる傾向にある。燃費に大きな影響を与える巡航時の燃焼効率は99.9%以上が必須なので、巡航条

Fig. 13 Lean-burn fuel staging enables low NO_x at cruise⁽¹⁷⁾

件で99.9%の燃焼効率を維持しつつ、LTOサイクルで低NO_xを実現することが重要である。

燃焼振動は、圧力変動と発熱率変動のカップリングで発生し、エンジン各部品との共振が発生すると部品が破損する恐れがある。燃焼振動を抑制するために、受動制御、アクティブ制御の両方が研究されている。

GE9Xの圧力比60、UltraFanの圧力比70のように近年のエンジン高圧力比化により、希薄燃焼器では自着火／逆火現象による燃焼器破損防止、燃焼器入口空気高温化に対応したライナ用高温材料の選定などが課題となっている。燃焼器入口条件が60気圧1000Kの場合の自着火遅れは約0.3ms⁽¹⁸⁾となるので、燃料噴射弁内での自着火／逆火防止のため、予混合距離はできる限り短くする必要がある。そのため、燃焼領域に直接燃料噴霧するLDI (Lean Direct Injection) の研究が進められている⁽¹⁹⁾ (図14参照)。NASAでは、N+3達成のための鍵となる技術としている。予混合距離が短いため、噴射弁の径を小径化し、個数を増やすことで予混合を促進させる。

Fig. 14 RANS simulation of LDI combustor concepts⁽¹⁹⁾

燃焼器ライナについては、GE9XにてCMC製のアウトライナおよびインナライナの試験が実施されているように、高温耐熱材料としてCMCが期待されている。1000℃以上の温度域においても優れた耐熱性を有しているため、ライナ冷却空気を大幅に削減することができ、より多くの空気を燃料噴射弁に配分できるため、燃焼の希薄化によりさらなる低NO_x化が期待できる。一方で強度や耐酸化性などの材料特性や製造方法が金属とは異なるため、設計・製造手法に工夫が必要とされる。

希薄燃料噴射弁については、燃料噴射弁に従来とは異なる新たな燃料コーキング防止構造が必要となり、既存の製造法では構造が複雑化／大型化し、それに伴ってコストや重量も増加する。その一方で、コアエンジンは小さくなる傾向にあるため、燃料噴射弁のサイズはそれほど大型化できないため、構成部品は小型、薄型化する必要がある。GEは、AM技術を採用し燃料噴射弁の部品を一体成形することで、コストおよび重量の低減、さらに耐久性も向上させている⁽²⁰⁾ (図15参照)。GEは、3Dプリンタ関連企業の買収も進めており、Morris社をはじめ、Concept Laser社、ArcamAB社などを買収し、航空分野を含めた医療などあらゆる分野でAM技術をリードする考えを示している。



Fig. 15 A 3D-printed fuel nozzle for GE's LEAP 1-A engine²⁰⁾

6. まとめ

地球温暖化および大気汚染への対策のため、航空機から排出されるCO₂、NO_x、PMなどの排気物質規制がCAEPによって強化されている。次世代航空用エンジンではCO₂削減を目的とした熱効率向上を目指して、さらなる高圧力比化が求められる。この結果として燃焼器入口の高温高圧化が進み、NO_x、PMが増加することが懸念される。NO_xおよびPMの排気物質規制に対応するため、米国、欧州では産学官連携のもと、希薄燃焼器の開発、CMCなどの高温材料の開発がますます推進されることが予想される。

参考文献

- (1) Joyce E. Penner, David H. Lister, David J. Griggs, David J. Dokken, Mack McFarland, IPCC SPECIAL REPORT Aviation and the Global Atmosphere, (1999).
- (2) Loudness Maurice, Technology & Operations: Aviation Environment Impact, ICAO Symposium on Aviation and Climate Change, "Destination Green", 14-16 May 2013.
- (3) ICAO ENVIRONMENT Committee on Aviation Environmental Protection
<http://www.icao.int/ENVIRONMENTAL-PROTECTION/Pages/CAEP.aspx> (2017/02/20参照).
- (4) Environmental Protection Volume II Aircraft Engine Emissions Third Edition July 2008.
- (5) ICAO ENGINE EXHAUST EMISSIONS DATA BANK.
- (6) NASA/CR2004-212957.P9.
- (7) CAEP/8-IP/30, COMMITTEE ON AVIATION ENVIRONMENTAL PROTECTION (CAEP) EIGHTH MEETING.
- (8) Neil Dickson, Local Air Quality and ICAO Engine Emissions Standards (2014).
- (9) CAEP environmental trends assessment to 2040
<http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/AlternativeFuels-QuestionsAnswers.aspx> (2017/02/20参照).
- (10) Frank Haselbach, Alan Newby, Ric Parker, NEXT GENERATION OF LARGE CIVIL AIRCRAFT ENGINES -CONCEPTS & TECHNOLOGIES, Proceedings of 11th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC11, March 23-27, 2015.
- (11) US 2015/0354824 A1.
- (12) TAPS II Combustor Final Report, Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Program.
- (13) <http://www.geaviation.com/press-release/ge90-engine-family/ge9xs-new-taps-combustor-maintain-its-cool-under-fire> (2017/02/20参照).
- (14) Chi-Ming Lee and Clarence T. Chang, John T. Herbon, Stephen K. Kramer, NASA Project Develops Next-Generation Low-Emissions Combustor Technologies.
- (15) Mark D. Guynn, Jeffrey J. Berton, Michael T. Tong, and William J. Haller, Advanced Single-Aisle Transport Propulsion Design Options Revisited, AIAA 2013-4330.
- (16) <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/products/future-products/ultrafan.aspx> (2017/02/20参照).
- (17) Clarence T. Chang, Low-Emissions Combustors Development and Testing, P16.
- (18) Subith S. Vasu*, David F. Davidson, Ronald K. Hanson, Jet fuel ignition delay times: Shock tube experiments over wide conditions and surrogate model predictions, Combustion and Flame 152 (2008) 125-143.
- (19) Designing Aircraft Engines to Burn Lean and Clean
<https://www.nas.nasa.gov/SC13/demos/demo1.html> (2017/02/20参照).
- (20) 3D PRINTING CREATES NEW PARTS FOR AIRCRAFT ENGINES
<http://www.geglobalresearch.com/innovation/3d-printing-creates-new-parts-aircraft-engines> (2017/02/20参照).
- (21) General Electric Opens Additive Manufacturing Center in Pittsburgh, <http://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/11862/General-Electric-Opens-Additive-Manufacturing-Center-in-Pittsburgh.aspx> (2017/02/20参照).

特集：エミッション低減技術と計測技術

高効率石炭火力発電技術「IGCC」 常磐共同火力 勿来発電所10号機

Coal Fired High Efficiency Power Generating Technology
“IGCC” No.10 Unit in Nakoso Power Station of Joban
Joint Power Company



石橋 喜孝*¹
ISHIBASHI Yoshitaka

キーワード：石炭ガス化、複合発電、IGCC、空気吹き、高効率、ガスタービン

Coal Gasification, Combined Cycle, IGCC, Air-blown, High efficiency, Gas Turbine

1. はじめに

石炭は燃料価格が安価で安定しているというメリットがある一方、エミッション（排出物質）が多いというデメリットを有している。石炭から排出される主な物質としては、硫黄酸化物、窒素酸化物、ばいじん等の大気汚染物質、地球温暖化物質である二酸化炭素CO₂、石炭灰、プラント排水、温排水（海水）等である。

もともと石炭は太古の植物から構成されていることを考えれば、排出される物も自然由来であり、大きな問題は無いと言えない事もないが、それが人間の健康、自然環境に影響を与えるという事であればそうも行かない。エミッションが多いだけに、他の燃料に比べてそれだけエミッション低減技術が必要ということになる。

エミッション低減技術には様々あるが、何と言っても発電効率の向上がエミッション低減の王道である。発電効率の向上、すなわち1kWhを発電するのに消費する燃料使用量を低減させる事が、全てのエミッション低減につながるからである。

現時点において、実用化レベルにある石炭火力発電技術の中で、最も高い発電効率を得られるのがIGCC（石炭ガス化複合発電）である。IGCCについては、(株)クリーンコールパワー研究所が2007年9月から2013年3月まで出力250MWのIGCC設備により実証試験を行っていたが、実証試験が終了した2013年4月以降は、常磐共同火力(株)がこの実証機を引き継ぎ、現在は勿来発電所10号機として商用運転を行っている。そしてこの技術をベースに540MWの大型IGCCの建設が始まろうとしている。

本稿では、IGCC技術をエミッション低減の観点から解説してみたいと思う。

2. IGCCとは

2.1 IGCCの設備構成と導入経緯

IGCCとは石炭ガス化複合発電（Integrated coal Gasification Combined Cycle）のことである。従来型石炭火力とIGCCのシステムの違いを図1に示す。

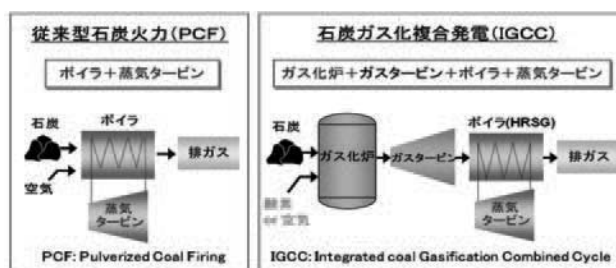


Fig. 1 Conventional PCF & IGCC

ガスタービン（GT）技術の進展に伴い、LNG火力が次々と高効率な複合発電方式に置き換わっていったが、石炭火力の場合、燃料が固体であるため、それをそのままGT燃料とすることは出来ず、これまでの効率向上の取り組みは、蒸気温度と蒸気圧力を可能な限り高めていくものであった。現在は超々臨界圧発電（USC）が主流になり、蒸気温度620℃程度まで実用化されている。さらに700℃級USCの開発も進められているが、さらなる高温化に向けては新たな高温材料の開発が求められている状況にある。

IGCCは、石炭をガス化することにより、石炭火力への複合発電技術の適用を可能とした技術である。USCに比べてシステムが複雑になるというデメリットはあるものの、より高効率な発電が可能となる。

2.2 IGCC開発の歴史

IGCCの技術開発は、最初は欧米で始まった。1994年にオランダのブフナム発電所で284MWのIGCC実証試験が始まったが、その後数年の間に、さらに米国に2基、スペインで1基、合計4基のIGCCの実証試験が開始された。（表1参照）

原稿受付 2017年2月27日

*1 常磐共同火力(株)勿来発電所

IGCC事業本部 本部長

〒974-8223 いわき市佐糠町大島20

Table 1 Major IGCC projects

プロジェクト 国	Buggenum Netherland	Puertollano Spain	Wabash River USA	Tampa USA	Nakoso Japan
ガス化炉 タイプ	酸素吹き Dry-feed Shell	酸素吹き Dry-feed Prenflo	酸素吹き Slurry-feed E-Gas™	酸素吹き Slurry-feed GE	空気吹き Dry-feed 三菱重工
石炭 消費量	2,000t/日	2,600t/日	2,500t/日	2,500t/日	1,700t/日
発電機出力 GT燃焼温度	284 MW 1,100℃級	335 MW 1,300℃級	297 MW 1,300℃級	315 MW 1,300℃級	250MW 1,200℃級
運転開始 時期	1994年1月	1997年12月	1995年10月	1996年9月	2007年9月
連続運転 時間	3,287時間	1,847時間	1,673時間	953時間	3,917時間

日本におけるIGCC開発については、1991～1996年にパイロットプラント試験、2007～2013年に実証試験が行われ、30年以上の開発期間を経て、ようやく実用化の段階に入ってきている。

2.3 酸素吹きIGCCと空気吹きIGCC

欧米で開発されたIGCCはいずれも酸素吹きガス化炉を採用した酸素吹きIGCCである。酸素吹きガス化炉は化学工業の世界では100年以上の実績がある技術であったためIGCCの開発に当たってこれを適用した。酸素吹きガス化炉は、原料ガスの純度を大切にする化学工業の世界では最適な方式であったが、これを発電用途に適用した場合には、酸素製造に大量の所内動力を消費してしまうため発電効率の面では不利であった。そこで日本では、純度よりエネルギー効率を重視する空気吹きガス化炉を開発し、これをIGCCに適用した。

空気吹きガス化炉は空気を使うため、石炭ガス中には不純物である窒素を約55%含む。従って、カロリーは酸素吹きの石炭ガスより約半分まで低下するが、GT燃料としては十分なカロリーを有している。製鉄所では高炉ガス吹きGTも稼働しているが、高炉ガスと、空気吹きガス化炉からの石炭ガスのカロリーはほぼ同等である。

3. IGCCにおけるエミッション低減

3.1 効率向上（CO₂削減）への取り組み

(1)複合発電技術の採用

複合発電の特徴は、GT燃焼温度が高ければ高いほど発電効率が向上することである。

IGCC実証機では、燃焼温度1200℃級のGTを採用したため送電端効率は、600℃級USCと同等の約42%（LHV）である。これは研究費を抑えるため、実証機の出力を商用機の約1/2規模に抑えるための選択であった。次期大型IGCCでは燃焼温度1,400℃級のGTを適用予定であるが、送電端効率は48%（出力54万kW）まで向上する。仮にLNGで実用化されている1,600℃級GTを適用した場合には、送電端効率は約50%（出力約75万kW）に達する。

当面は1,400℃級IGCCの普及を拡大させる計画であ

り、1,600℃級IGCCは次のステップとなる。

(2)空気吹きIGCCの採用

前述の通り、空気吹きIGCCの所内動力は酸素吹きIGCCの所内動力に比べて少ないため、約2ポイント程度高い送電端効率が期待できる。設備的には、空気吹きはガス中に窒素が混入するためガス量が増え、ガス化炉、生成ガス配管は大きくならざるを得ない。一方で大量の酸素を製造する需要が無いため、空気分離設備（ASU）は酸素吹きの1/4規模で済む。ただし空気吹きでも微粉炭加圧用の窒素が必要なため、小型のASUは必要となる。

(3)効率向上のための各種システムを採用

空気吹きIGCCの全体システムを図2に示す。また勿来10号機の全景写真を図3に示す。

全体として高効率が得られるシステムになっているが、さらに効率向上を図るため、個別システムにおいても下記のような設計上の工夫がなされている。

・パーシャルインテグレーション

IGCCでは、ガス化炉の圧力が約30気圧と高く、ここにガス化用の空気を送り込むために大型の空気圧縮機が必要、またASUにも原料空気圧縮機が必要であり、これらの所内動力は非常に大きい。

これらの圧縮機を単独設置せずに、効率の高いGT本体の空気圧縮機からの抽気空気を使ってインテグ

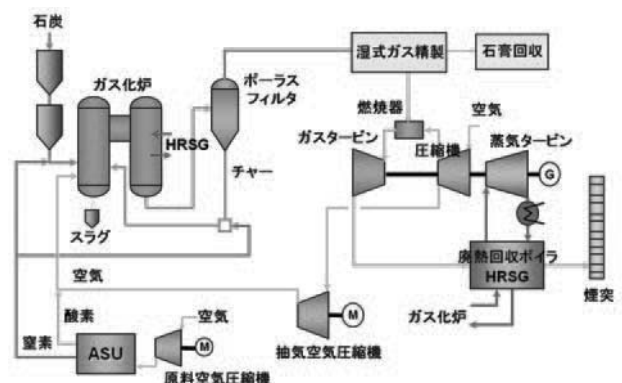


Fig. 2 Schematic diagram of air-blown IGCC



Fig. 3 Bird's eye view of Nakoso No.10 IGCC

レーションし、所内動力を削減する方法がある。

10号機では、原料空気圧縮機は独立モーターを付けたスタンドアローンとし、ガス化用の空気のみインテグレーションするパーシャルインテグレーション方式を採用した。ただしガス化用空気として、GT本体の圧縮機だけでは圧力が足りないため、抽気空気昇圧機で必要圧力まで昇圧をしている。

全ての空気源をGT本体の空気圧縮機から取るフルインテグレーションのアイデアもあるが、この場合ASUを起動するためにGT本体を起動させておく必要が生じ、起動用燃料でGT起動→ASU起動（3日間程度）→ガス化炉起動→GTを石炭ガスに燃料切替→IGCC運転という起動手順を踏まなければならない。このため運用性が極めて悪くなる。欧米のように、石炭も天然ガスも両方が使える発電所であればこの選択肢もあり得るが、日本では考えにくい。ちなみに日本のIGCCでは起動用燃料に灯油あるいは軽油を使用している。

・石炭乾燥熱源にHRSG排ガスを利用

従来型の石炭火力では空気予熱器（AH）を持っているため、そこから熱空気を取り出し、微粉炭機内に導いて石炭の乾燥熱源としている。一方でIGCCは空気予熱器を持っていないため、石炭の乾燥熱源が取り難い。10号機では、GTの排熱回収ボイラから排ガスを分岐し、これを石炭の乾燥熱源として利用して効率向上を図っている。なお、HRSG排ガスの酸素濃度は12%程度と低いため、微粉炭機内での石炭の自然昇温を抑制する効果もある。

・SGCによる熱エネルギー回収

ガス化炉出口での石炭ガスの温度は1,100℃程度であり、この熱を利用して蒸気を発生させるのがSGC熱交換器（シンガスクーラー）である。空気吹きガス化炉の冷ガス効率（石炭のカロリーが石炭ガスのカロリーに移行する割合）は75%程度であり、残りの25%は熱になる。この25%の熱を無駄にすること無く蒸気としてエネルギー回収するのがSGCである。SGCで発生した蒸気は、排熱回収ボイラからの蒸気と一緒に蒸気タービンを駆動する。

・湿式ガス精製における熱エネルギー回収

SGC出口の石炭ガス中には、硫黄化合物、窒素化合物、塩化水素等の不純物が含まれており、ガス精製設備においてGT燃焼前に除去する。ガス精製には乾式と湿式の2方式があり、10号機では湿式ガス精製方式を採用した。乾式を採用した方がガス温度の低下が無くエネルギー損失が少ないが、技術が十分に確立されておらず、10号機では信頼性、確実性の面から湿式ガス精製を採用した。

湿式ガス精製では、石炭ガスを水洗したり薬液で洗浄したりするため、SGC出口の約400℃の石炭ガスは、この過程で約40℃まで低下してしまう。このまま

ガスタービンに送ってはエネルギー損失が大きいため、GGH（ガスガスヒーター）を何段も配置して熱回収を行い、ガス温度を320～330℃程度まで回復させて効率低下を最小限に抑えている。

なお、乾式ガス精製の技術開発は引き続き行われており、将来のIGCCに導入されれば、さらに1～2ポイントの効率向上も可能である。

(4)CCS適用

CO₂エミッションの低減対策としての究極はCCS（CO₂回収貯留）である。排出されるCO₂を回収して、地中に貯留させ、大気にはCO₂を排出させない技術である。地球温暖化防止の切り札として世界的に議論されていると共に、我が国においても政府が提唱している「2050年までに温室効果ガス50%削減」という長期目標達成のためCCS導入が検討されている。CCSを適用するに当たっては、従来型の石炭火力よりIGCCの方がエネルギーロスが少ないことがわかっている。IGCCにCCSを適用する場合には、燃焼前（プレコンバッション）回収となり、燃焼後（ポストコンバッション）回収に比べるとガスボリュームが小さく、また石炭ガスの圧力が高い状態での回収となるため効率的な回収ができる。（図4参照）

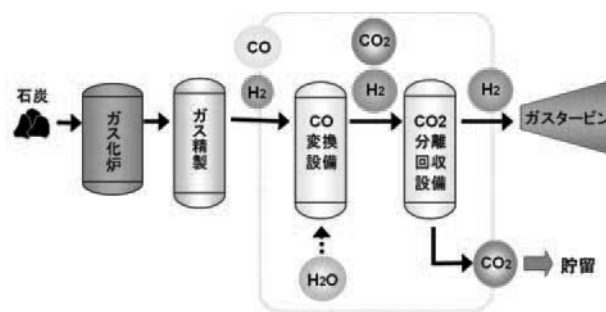


Fig. 4 IGCC system with CCS

CO変換設備の石炭ガス中に水蒸気を吹きこむことによって、石炭ガス中の一酸化炭素（CO）をCO₂とH₂に転換させ、このうちCO₂は回収して貯留に回し、H₂はGTで燃焼させる。CO₂回収技術には化学吸収法や物理吸収法があり、ほぼ確立された技術が適用できるが、検証は必要である。CCSに関しては我が国では日本CCS調査会社が設立され、苫小牧で実証試験が開始されたが、本格導入に当たってはパブリックアクセプタンスを含めて課題が多いと思われる。

IGCCからのCO₂回収については、中国電力(株)と電源開発(株)が進めている、酸素吹きIGCCを用いた「大崎クールジェンプロジェクト」において実証試験が行われる予定である。

(5)IGFCへの展開

IGCCはガスタービンと蒸気タービンを組み合わせてダブルコンバインド方式であるが、IGFC（燃料電池複合発電）は、GTの手前にさらに燃料電池を加え

たトリプルコンバインド方式である。IGCC技術確立後の技術であるが、これを採用すれば送電端効率55%が可能と言われている。IGFCについても、大崎クールジェンプロジェクトで実証試験が行われることになっている。

IGFCでは、石炭ガスを燃料電池を作動させた後にGTで燃焼させる必要があり、空気吹きIGCCでは石炭ガスのカロリーが低いため、そのままでは適用が難しい。経済性等、乗り越えるべき課題は多いが、日本の技術力を示すためにも期待されている技術である。

3.2 大気汚染物質低減への取り組み

日本は高度成長の時代に公害問題を経験したことから、火力発電の環境対策には力を注いで来た。石炭火力のばい煙対策としては、総合排煙処理システム（電気集塵装置、脱硝装置、脱硫装置の組み合わせ）が開発され、1978年のオイルショック以降に建設された石炭火力の排ガスは、それ以前の石炭火力に比べて極めてクリーンになった。まさしく技術の進歩の賜物である。

従来型の石炭火力の排煙処理がポストコンバッション処理であるのに対し、IGCCの場合は基本的にプレコンバッション処理になるところが異なる。環境対策という目的に加えて、GT燃焼時にGT翼等に損傷を与えないレベルまで、事前に石炭ガスをクリーンにしておく必要があるためである。ガス精製設備で処理を行うが、加圧状態での処理となるため設備は非常にコンパクトになる。

(1)窒素酸化物排出量の低減

従来型の石炭火力では、燃焼に伴って窒素酸化物(NO_x)が発生するが、 NO_x には燃料中に含まれるN分起因のフューエル NO_x と、空気中の窒素起因のサーマル NO_x がある。 NO_x の低減方法には低 NO_x バーナーと排煙脱硝があり、低 NO_x バーナーは燃焼の方法を工夫することによってサーマル NO_x を低減するものである。その方法はメーカーによって様々である。排煙脱硝にも様々な方法があるが、通常は選択接触還元法が採用される。排ガス中にアンモニアを添加し、触媒上で NO_x と反応させて NO_x を還元・分解する。

一方IGCCにおいては、ガス化炉内が酸素のない還元雰囲気であるため、燃料中の窒素は窒素酸化物にならずアンモニアになる。このアンモニアをGTで燃焼させるとフューエル NO_x となるので、これを防ぐため湿式ガス精製でアンモニアを除去する。アンモニアや塩化水素類は水に良く溶けるので、水洗することによって除去する（図5参照）。

GTでの燃焼によってサーマル NO_x が発生するが、これは排熱回収ボイラ内の排煙脱硝装置によって除去する。煙突出口の排ガス中 NO_x 濃度は5 ppm以下であり、LNG火力と同等である。

(2)硫黄酸化物排出量の低減

従来型の石炭火力では、燃焼に伴って石炭中の硫黄分は硫黄酸化物(SO_x)となり、排煙脱硫装置で除去

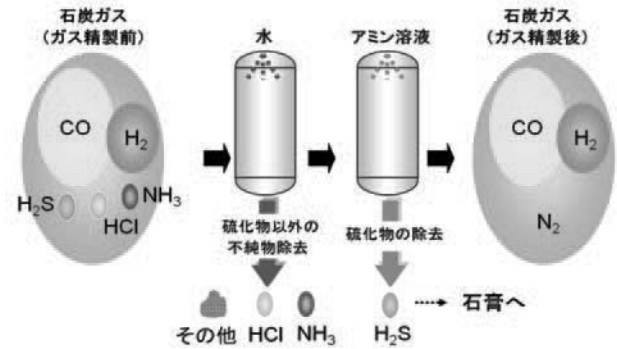


Fig. 5 Wet-Type Gas Clean-up System

される。IGCCにおいては、ガス化炉内が還元雰囲気であるため、燃料中の硫黄は硫化水素(H_2S)になる。この硫化水素は、湿式ガス精製の中でアミン溶液に潜らせ吸収除去する（図5参照）。

ガスタービン燃焼後の煙突出口の排ガス中 SO_2 濃度は8 ppm以下であり、非常にクリーンと言える。

(3)ばいじん排出量の低減

従来型の石炭火力では、ボイラ排ガス中に含まれるフライアッシュは、電気集塵装置および後流の脱硫装置で捕集される。捕集しきれなかったフライアッシュが煙突からばいじんとして排出されるが、その濃度は電気集塵装置と脱硫装置の集塵効率によって決まる。

一方IGCCにおいては、ガス化炉から発生する石炭ガス中に固形分のチャー（未燃分と灰分の混合物）を含んでいるため、非常に目の細かいポーラスフィルタで除去し、さらに後流側のガス精製設備の水スクラバーでほぼ完全に除去する。従って、煙突出口のばいじん濃度は通常 $1 \text{ mg/m}^3\text{N}$ 以下と極めて低くできる。IGCCにおいてばいじん分を燃焼前に徹底的に除去するのは、環境対策だけでなくガスタービン保護の目的もある。

3.3 水質汚濁物質低減の取り組み

(1)プラント排水の低減

従来型の石炭火力では、ユニット排水と脱硫排水が発生し、排水処理設備で水質汚濁防止法および県条例で定められた水質基準まで処理して放流する。

IGCCにおいても、ユニット排水とガス精製排水が発生し、同様の基準まで処理した後に放流するので基本的にはプラント排水に関するエミッションは同等である。

(2)温排水の低減

従来型の石炭火力では、蒸気タービンの復水器に海水冷却水が必要であり、最終的に温排水として海域に放水される。

一方IGCCは複合発電であり、海水冷却水が必要なのは蒸気タービンのみでGTには不要であるため、海水冷却水の量は約3割低減できる。

3.4 廃棄物低減の取り組み

石炭火力において最も多く発生する廃棄物は石炭灰で

ある。従来型の石炭火力では、石炭灰は、燃焼に伴って5～10%はボイラ内で溶融・付着凝集してボイラ下部に落下しクリンカとして排出される。また90～95%は溶融せずに粉体のまま後流側に移行し電気集塵装置でフライアッシュとして回収される。ボイラ内の燃焼温度は1,400℃程度であるので、石炭灰は基本的には溶融しない。クリンカは主に路盤材として有効利用され、フライアッシュの主成分はシリカ、アルミナであるため粘土代替材としてセメント原料に、あるいはフライアッシュセメントの混和剤として有効利用される。

一方IGCCにおいては、ガス化炉内が約1,800℃と非常に高温であるため、石炭灰は全て溶融し、水砕スラグとして排出される。スラグは10号機では路盤材やセメント原料に100%有効利用している。将来的には、スラグの形状が小石状である特性を活かしてコンクリート骨材あるいはアスファルト骨材等、土木建築材料への活用が期待される。

IGCCの発電効率は従来型より約2割高いことから、スラグの排出量は重量で約2割削減できる。さらに溶融することによって容積が小さくなるため、体積は約半分にできる。また石炭灰中の重金属等の微量成分はガラス質のスラグの中に封じ込まれるため、環境にはほとんど溶出しないというメリットもある。

4. 勿来10号機の運転状況

10号機の性能試験結果を表2に示す。

Table 2 Performance test data

	設計値	試験結果
大気温度	15℃	13.1℃
発電機出力	250 MW	250.0 MW
ガスタービン出力	128.9 MW	124.4 MW
蒸気タービン出力	121.1 MW	125.8 MW
送電端効率(LHV)	42%	42.4%
冷ガス効率	73%	73.5%
炭素転換率	>99.9%	>99.9%
石炭ガス発熱量	4.8 MJ/m ³ N	5.2 MJ/m ³ N
組成 CO	28.0%	30.5%
CO ₂	3.8%	2.8%
H ₂	10.4%	10.5%
CH ₄	0.3%	0.7%
N ₂ & Others	57.5%	55.5%
環境性能 (16% O ₂ 換算)	<目標値>	
SO _x	8 ppm	1.0 ppm
NO _x	5 ppm	3.4 ppm
煤塵	4 mg/m ³ N	<0.1 mg/m ³ N

<2008年3月>

試験結果はほぼ設計値どおりであり、IGCCが計画通りの性能を発揮できる事が確認された。ガスタービンと蒸気タービンの出力比率は、LNG複合発電ではほぼ2:1であるが、IGCCではほぼ1:1となる。排熱回収ボイラからの蒸気に加えて、ガス化炉後流のSGCからも蒸気が発生するためである。

冷ガス効率は73.5%であり、これは石炭ガス化により石炭が持つエネルギーの73.5%が石炭ガスのカロリーに転換できていることを表している。炭素転換率は、

チャーリサイクルをしているため99.9%以上と非常に高く、スラグ中の未燃分は0.1%以下になる。

生成ガスの組成は空気吹きであるため55.5%が窒素であり、カロリーは5.2MJ/m³Nと低めであるが、ガスタービン燃料としては十分なカロリーである。

2013年6月～12月の間で、連続運転3,917時間を達成し、これが世界のIGCCの最長連続運転時間となっている。その時の負荷カーブを図6に示す。

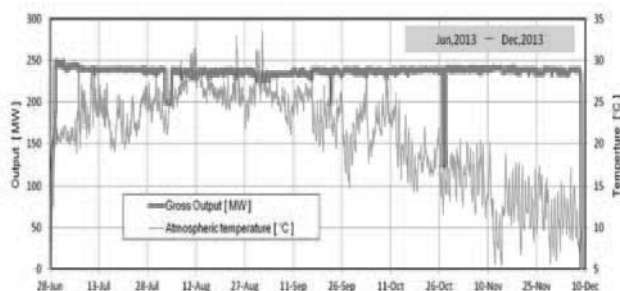


Fig. 6 Load curve during the longest continuous operation

ほぼ定格出力で5カ月と10日運転しており、日本のIGCCの信頼性の高さを証明している。途中で3回ほど負荷が下がっているが、これはポンプ、バルブ、コンベアの故障を負荷を下げながらオンラインでメンテナンスしたためである。

一方で、商用運転を開始してから3年間の年間利用率は50%～60%に留まっている。もともと研究設備として建設されたプラントであること、耐用年数8年で設計されたため耐用年数に達した設備の特に腐食・摩耗に関するトラブルが増えた等が理由である。2015年度には設備を長期間停止して大幅な耐力強化工事を行なったので、研究設備として生まれた10号機でも年間利用率がベースロード相当の70%を見込める状況になりつつある。

5. 福島復興540MW IGCCの建設について

勿来10号機の運転実績によりIGCCの実用性が証明されたため、福島復興電源として出力540MWの大型IGCC 2基を勿来発電所隣接地と広野発電所構内にそれぞれ1基（勿来IGCC、広野IGCCと呼ぶ）を建設することが決定した。勿来10号機での設備改善内容、運転ノウハウが全て次期大型IGCCに反映されるので、これらIGCCは信頼性の高いプラントに仕上がると思われる。

このうち勿来地点については、三菱グループ3社と東京電力と弊社が共同で設立した「勿来IGCCパワー合同会社」によって推進されており、2017年4月にプラント建設着工し、オリンピックが開催される2020年には運転開始の予定である。広野地点については1年ずれて建設が進められる予定である。

10号機と次期勿来IGCCとの比較を表3に示す。ガス化炉やガス精製設備の方式は基本的に同じであるが、GTを燃焼温度1,200℃級から1,400℃級に変えることによ

Table 3 Specifications of No.10 unit & Nakoso IGCC

項 目	勿来10号機 (既設)	勿来IGCC
定格出力	250MW	540MW
発電効率 (送電端, LHV)	約42%	約48%
ガス化炉型式	空気吹き・乾式給炭	空気吹き・乾式給炭
ガス精製設備	湿式 (化学吸収法)	湿式 (化学吸収法)
ガスタービン	燃焼温度1200℃級	燃焼温度1400℃級

り、出力は250MWから540MWへ、送電端効率は約42%から約48%へと飛躍的に向上する。

6. IGCCのO&Mの特徴

石炭火力からのエミッションを低減させるには、グローバルに考えれば、なるべく効率の低いプラントで石炭を焚かず、IGCCのような効率の高いプラントで焚くことが効率的である。そしてIGCCのような複雑なシステムを高稼働で動かすためにはオペレーションとメンテナンス (O&M) が非常に重要である。IGCCのO&Mは従来型石炭火力とは若干異なるところがあるので、ここで特徴を簡単に紹介することとする。

6.1 IGCCのオペレーションの特徴

- ・基本的に起動、通常運転、停止は全自動運転である。
- ・当直員は当直長1名、オペレーター3名の計4名/班が基本であり、4班が入れ替りながら一日二交替で運転する。パトロールも当該班で行う。
- ・温度異常、圧力異常、バルブの動作渋滞等の警報が発せられた場合にはその都度当直員が対応するが、当直で対応できない場合にはメンテナンス班に連絡する。
- ・当直員は燃料製造 (石炭ガス化とガス精製) と複合発電の双方を見るため、運転監視範囲は広い。
- ・燃料製造に関しては化学プラントではあるが、製品である石炭ガスの組成等に関して厳密な品質要求はしないためケミカルエンジニアは不要である。
- ・オペレーターは、石炭火力の運転経験者であれば入直3カ月程度の研修で、通常運転に関して監視操作が可能であり、起動・停止操作に関しては数年の経験が必要である。

6.2 IGCCのメンテナンスの特徴

(1) ガス化炉設備・ガス精製設備のメンテナンス

- ・ガス化炉設備は、微粉炭供給系、ガス化炉・SGC本体、チャーリサイクル設備、スラグ処理設備、ASU (原料空気圧縮機、窒素圧縮機、酸素圧縮機を含む) 等から構成される。
- ・ガス精製設備は、冷却洗浄塔、H₂S吸収塔、熱交換器類、オフガス処理設備、排水処理設備等から構成される。
- ・石炭ガスの圧力は約30気圧であり、腐食性、摩耗性、毒性も有する。すべての設備がこれに耐えられるよう

に設計されている。

- ・微粉炭供給系、チャーリサイクル設備には多くの対摩耗バルブが使われており、バルブの管理は重要である。
 - ・設備点数は多いが、基本的に压力容器、配管、弁等から構成される設備であり、従来型石炭火力に従事している作業員で点検修理等の対応が可能である。
- (2) 複合発電設備のメンテナンス
- ・複合発電設備は、ガスタービン、蒸気タービン、発電機、空気昇圧機等から構成される。
 - ・石炭ガスの発熱量はLNGに比べて1/9程度の低カロリーであるため、GT燃焼器は構造が単純な拡散型を使用している。
 - ・空気圧縮機があることを除いてLNGコンバインドサイクルと同様の設備構成であり、メンテナンスも基本的に同等である。
 - ・なお石炭ガスの燃料係数はメーカーにより1.5とされており、LNGに比べてGT高温部品の劣化が1.5倍のスピードで進むと評価されている。これまでの運転状況ではそのような兆候は見られておらず、今後運転実績を積む中で燃料係数の見直しをしていきたいと考えている。
- (3) 電気制御設備のメンテナンス
- ・電気制御設備について、設備点数は従来型石炭火力より多いが、メンテナンスのやり方は同等である。

7. おわりに

IGCCは高効率な石炭火力発電技術であり、石炭をエネルギー供給源として活用していく以上、資源の節約と地球温暖化対策の観点から、確立が必要な技術と考えられる。

IGCCは欧米で開発が始まったが、残念ながら欧米では普及が進んでいない。なぜなら欧州では自然エネルギーに関心が移っており、また米国ではシェールガスが発見され、石炭火力の建設計画が少なくなってしまったためである。しかしながら世界には石炭にエネルギー供給を頼らざるを得ず、また通常の石炭火力では住民の反対運動等により行き詰っている国も数多くあり、いくつかの国が日本のIGCCに興味を持ち、具体的な導入検討を行なっている。

古くて効率の低い石炭火力が、高効率のIGCCに置き換わっていけば、CO₂排出量を始めとするエミッション低減に貢献することができ、是非ここに長年開発を進めて来た日本のIGCC技術を役立てたいところである。

IGCCは新技術であり、かつこれだけ複雑なシステムが成熟化していくためには、それなりの長期間の運転経験と設備改善が必要である。それでも着実に課題は解決されてきており、今後もIGCCの運転を継続しながらさらに信頼性を向上させ、IGCCの普及に努めていきたいと考えている。

特集：エミッション低減技術と計測技術

微粉炭焚き火力発電における排煙対策技術

Flue Gas Treatment Technology for Pulverized Coal-Fired Power Generation

白井 裕三^{*1}
SHIRAI Hiromi

キーワード：石炭、発電、排煙処理、ばいじん、窒素酸化物、硫黄酸化物、二酸化炭素

Coal, Power Generation, Flue Gas Treatment, Dust, Nitrogen Oxide, Sulfur Oxide, Carbon Dioxide

1. 緒言

石炭は安価でかつ埋蔵量が豊富であり、さらに世界各地に分布していることから、発電用燃料として世界各国で利用され、その発電量は世界の総発電量の41%を占める⁽¹⁾。石炭を利用した発電においては、石炭を微粉にし、バーナで空気と混合して燃やし、その熱で蒸気を発生させて発電する微粉炭焚き火力発電方式が主に用いられている。

石炭を燃やした際には、石炭中に含まれる窒素分、硫黄分および灰分が窒素酸化物（NO_x：NO、NO₂）、硫黄酸化物（SO_x：SO₂、SO₃）、ばいじんとなるため、これらを排ガス規制値以下まで除去する必要がある。さらに石炭に微量に含まれる水銀についても、日本では水俣条約に基づいて、大気汚染防止法に水銀の排出規制が追加された。

これに加え、石炭は発熱量当たりのCO₂排出量が化石燃料の中で最も多いことから、持続的に利用していくた

めには地球温暖化防止のためのCO₂排出抑制への対応が必要となってきている。

本報では、CO₂の除去・回収を含めた微粉炭焚き火力発電における排煙対策技術について解説する。

2. 微粉炭焚き火力発電システムと排煙の排出規制

微粉炭焚き火力発電システムでは、図1に示すように石炭は粉砕機（ローラーミル）において加熱空気乾燥されながら40μm程度まで粉砕され、70～80℃の温度で空気（1次空気）と共にバーナに送られる。バーナでは、微粉炭は加熱空気（2次空気）と混合させて燃やされる。また、窒素酸化物の発生を抑制するため、加熱空気の一部をバーナ部の上部から投入して微粉炭を2段階で燃焼させる二段燃焼技術が採用されている。

蒸気を発生させた後の燃焼排ガスは350℃程度でボイラーから排出され、脱硝装置（De-NO_x Unit）で窒素酸化物が除去される。その後、排ガスは空気予熱器（AH）

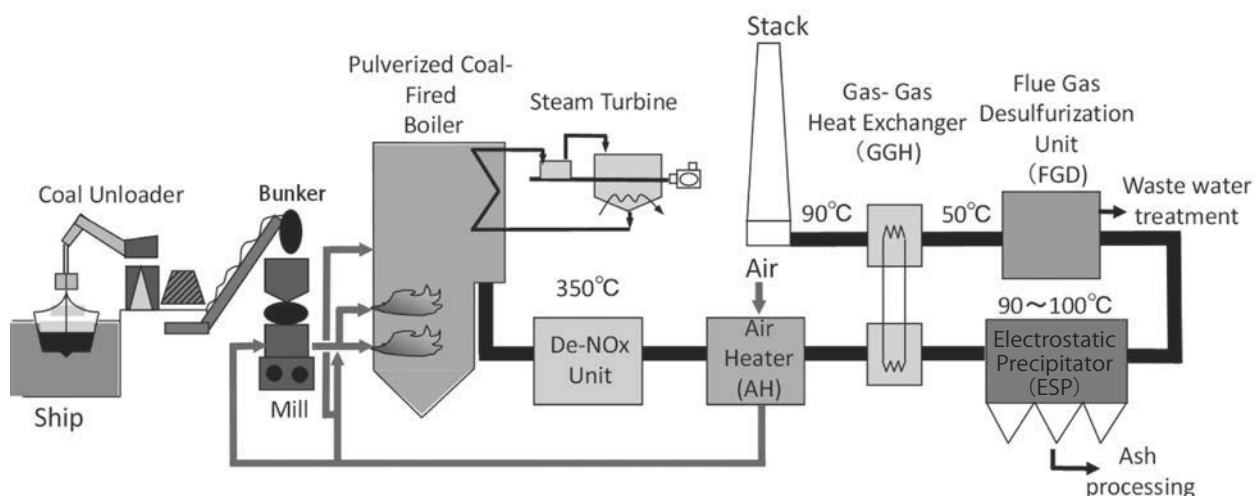


Fig. 1 Pulverized coal-fired power generation process

原稿受付 2017年2月8日

*1 (一財)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
sira@cripi.denken.or.jp

で燃焼用空気と熱交換され、さらにガスガス熱交換器 (GGH) で脱硫装置出口ガスと熱交換され、90～100℃に冷却されて電気集じん装置 (ESP) に入り、ばいじんが除去される。ばいじん除去後、脱硫装置 (FGD) で硫酸化合物が除去され、排ガスは再びGGHに入り、90℃程度まで加熱されて煙突から排出される。微粉炭焚き火力発電では、ボイラー出口から煙突入口までが排煙処理システムの範囲となる。

次に排煙処理システムにおいて、ばいじん、窒素酸化物および硫酸化合物の除去性能を決める基となる排煙の排出基準について解説する。排煙の排出規制は、大気汚染防止法において「ばい煙の排出基準」として定められており、国が定める一般排出基準・特別排出基準と地方自治体が定める上乗せ排出基準・総量規制基準がある。排ガス量20万m³/h以上の石炭燃焼ボイラーにおける一般排出基準および施設ごとに定める総量規制基準を表1に示す。一般排出基準では、ばいじんおよび窒素酸化物の排出基準は濃度値で定められている。硫酸化合物の排出基準は地域毎に定められた係数 (K値) と煙突から排出される排煙の上昇高さを加味した有効煙突高さから求められ、硫酸化合物の排出量 (m³/h) として定められている。微粉炭焚き火力発電所においては、地方自治体が設備毎に定める総量規制基準が適用されており、一般排出基準・特別排出基準よりもさらに厳しい基準が適用されている。

Table 1 Emission standards in coal-fired power plants

	Emission standards for the Soot and Smoke	Standards for Controlling the Total Emissions	
		Maizuru No.1・2 unit	Isogo No.2 unit
Dusts	100mg/m ³ _N	9mg/m ³ _N	5mg/m ³ _N
Sulfur Oxides	K value regulation	49ppm	10ppm
Nitrogen Oxides	200ppm	45ppm	13ppm

at O₂: 6%

また、2016年に石炭燃焼ボイラーにおける水銀に関する排出基準が新たに大気汚染防止法に加えられ、2018年4月から施行されることとなっている。重油換算でのバーナの燃焼能力が10万リットル/h以上の場合、基準値は新規設備：8μg/m³_N、既存設備：10μg/m³_Nである。日本の微粉炭焚き火力発電所では、水銀含有量が少ない石炭を利用していること、排煙処理システムで水銀が除去されることから排出濃度は低く⁽²⁾、現状ではほとんどの発電所において特別な対策は必要とされていないと考えられる。しかし、5年後に排出基準の見直しが行われる計画であり、事前に対策を検討しておく必要はある。本報では、水銀対策技術については省略する。

3. 排煙対策技術

3.1 排煙処理システム構成

排煙処理システムは、図2に示すように電気集じん装置がばいじんを除去する温度により3システムに大別される。2章で紹介した微粉炭焚き火力発電における排煙処理システムは、90～100℃でばいじんを除去する低低温電気集じん装置 (Advanced Low Temperature ESP) を設置したシステムである。高温電気集じん装置 (High Temperature ESP) を用いたシステムでは、脱硝装置と同じ350℃でばいじんを除去することから、他の2つのシステムとは異なり、脱硝装置の前に電気集じん装置が設置されている。低温電気集じん装置 (Low Temperature ESP) を用いたシステムでは130～150℃でばいじんを除去することからGGHは電気集じん装置の下流に設置されている。近年、湿式脱硫装置 (Wet FGD) の代わりに乾式脱硫装置 (Dry FGD) を設置し、排水規制が厳しい地域において排水の削減を行ったシステムも開発されている。

3つの排煙処理システムが存在するのは、低温電気集じん装置において、電気抵抗が高いばいじんに対して集じん効率が下がるとした問題があり、電気抵抗を低くするための対策として高温電気集じん装置および低低温電

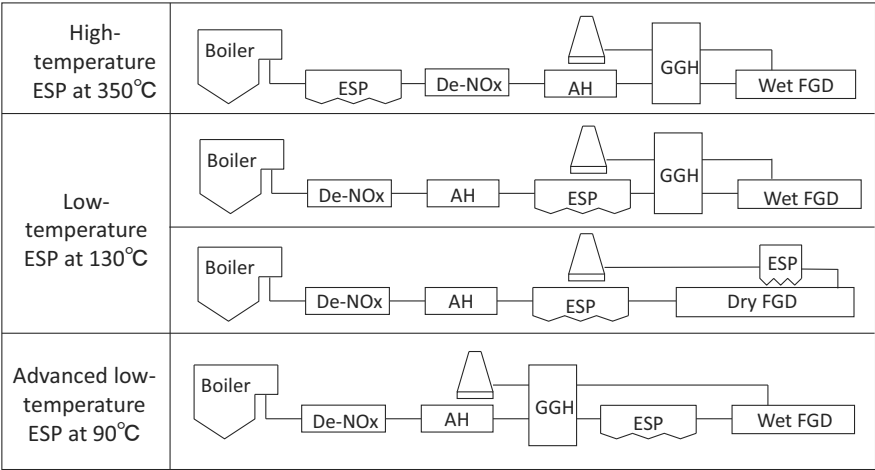


Fig. 2 Flue gas treatment process

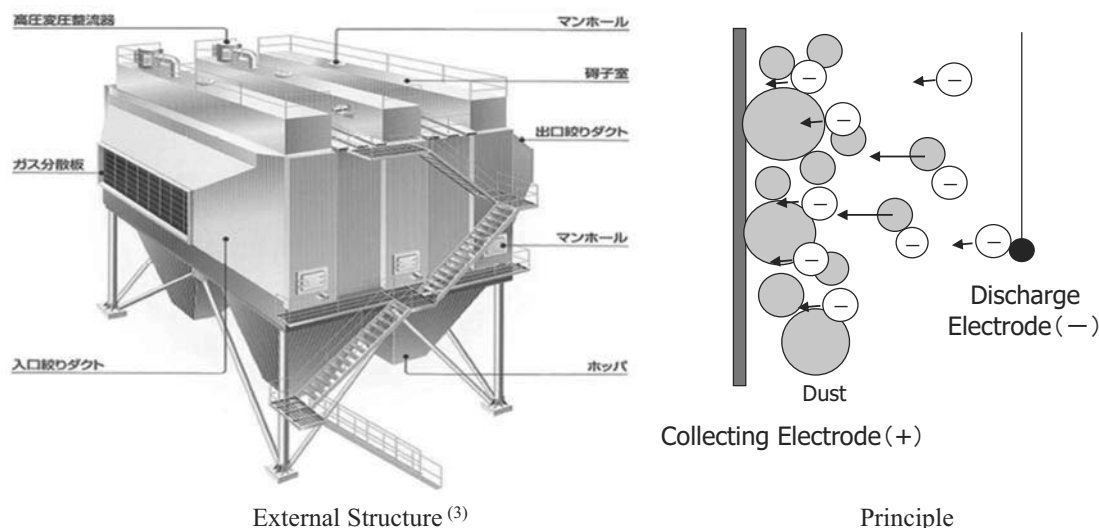


Fig. 3 Electrostatic precipitator

気集じん装置が開発されたことによるものである。現在は、高い集じん効率を有する低低温電気集じん装置を用いたシステムが主流となっている。

3.2 ばいじん対策技術

微粉炭焚き火力発電では、ばいじんを除去する集じん装置に採用する技術として電気集じん技術とバグフィルター技術が用いられている。電気集じん技術は、ばいじんを帯電させ電極で捕集する技術であり、バグフィルター技術は、ろ布に排ガスを通過させてばいじんを捕集する技術である。バグフィルターは炭種によらず安定な集じん効率を得られる。しかし、バグフィルターは、ろ布の定期的な交換が必要なこと、圧力損失が大きいことから、メンテナンスや運用コスト面では電気集じん技術の方が有利となる。日本の微粉炭焚き火力発電ではメンテナンスが容易で、運用コストが低い電気集じん技術が主に採用されている。バグフィルター技術を採用している発電所は小規模な2つの発電所のみである。ここでは、電気集じん技術について解説する。

電気集じん技術では、図3に示すように放電極（マイナス極）で発生させたマイナスイオンや自由電子によりばいじんをマイナスに帯電させ、集じん極（プラス極）に移動させて捕集する。堆積したばいじんは、つい打ちにより集じん極に振動を与えて下部のホッパーに払い落とされる。ばいじんの電気抵抗率が $10^4 \sim 10^{11} \Omega \text{m}$ の範囲で90%以上の集じん効率を得ることができる⁽⁴⁾。しかし、ばいじんは石炭に含まれる灰分に起因するものであることから、電気抵抗率が $10^{11} \Omega \text{m}$ 以上のばいじんも存在する。電気抵抗が高いと集じん極のばいじん層をマイナスの電荷が移動しにくいいため、集じん極のばいじん層表面にマイナスの電荷が溜まる逆電離現象が生じ、集じん効率が低下する場合がある。

この対策として、マイナスの電荷が溜まらないように電圧をかける方法、ばいじん層を物理的に取り除く方法およびばいじんの電気抵抗を下げる方法が挙げられる。

電圧をかける方法については、高電圧をパルス状にかけて集じん極のマイナスの電荷が移動する時間を確保するパルス荷電法が開発されている。物理的除去法としては、集じん極に水を流し、灰を洗い流す湿式電気集じん技術および集じん極を移動させ、ブラシでばいじん層を取り除く移動電極技術が実用化されている。

電気抵抗を下げる方法としては、集じん温度を変えて電気抵抗を下げる方法が検討された。図4にばいじんの電気抵抗率に及ぼす集じん温度の影響を示す。石炭灰を主成分とするばいじんの抵抗は高温になるほど低下する。一方、低温では、ガス成分が凝縮し、ばいじん粒子表面に液膜が生じてマイナスの電荷が表面を伝わるようになるため電気抵抗は下がる。高温電気集じん装置は、高温になるとばいじん自体の抵抗が下がることを利用し、 350°C で運転を行う。しかし、ガスの実際の体積が大きくなり装置が大きくなること、高温では放電量が多くなり、印加電圧を十分にとれないことから一部に普及したのみである。一方、低低温電気集じん装置は、ガス温度

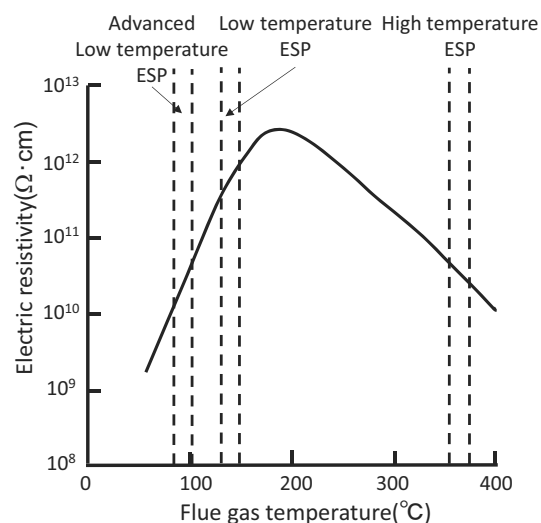


Fig. 4 Effect of flue gas temperature on electric resistivity

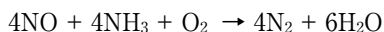
を90～100℃に下げると液膜生成によりばいじんの電気抵抗が下がることを利用した装置で、我が国において開発された⁽⁵⁾。1997年以降に建設された国内のほとんどの微粉炭焚き火力発電所において低低温電気集じん装置が採用されている。

3.3 窒素酸化物対策技術

窒素酸化物は燃焼時に空気中の窒素分や石炭中の窒素分が酸化されて生じたもので、主成分はNOである。微粉炭燃焼時に発生する窒素酸化物は、そのほとんどが石炭に含まれる窒素分から生じたものである。微粉炭焚き火力発電では、低NO_x燃焼による窒素酸化物発生量の抑制と脱硝技術による窒素酸化物の除去を組み合わせる対策を行っている。

低NO_x燃焼技術では、窒素酸化物の生成を抑制しつつ、効率的な燃焼ができる低NO_xバーナと二段燃焼技術を組み合わせて窒素酸化物の発生を抑制する。低NO_xバーナについてはメーカー毎にバーナが開発されており、個々のバーナの解説は省略する。二段燃焼技術では、バーナへ供給する空気を減らして窒素酸化物を分解する還元域を生成させ、不足する空気を下流に入れることにより、燃焼効率の低下を防ぎつつ窒素酸化物の低減を図る。

次に脱硝技術について解説する。微粉炭焚き火力発電では、脱硝装置に適用する技術として選択触媒還元法(Selective catalytic reduction, SCR法)が採用されている。この方法では、図5に示すように、排ガス中にアンモニアを吹き込み、触媒上で窒素酸化物と反応させて窒素(N₂)と水(H₂O)にする。反応は次式で表される。



微粉炭焚き火力発電では、350℃で高い脱硝効率が得られる中温型の触媒が使われている。脱硝温度は、高い脱硝効率の達成、バインダーとなつてばいじんを触媒表面に付着させる硫酸水素アンモニウム(NH₄HSO₄)の生成防止および触媒の劣化防止の観点から決められている。触媒(図6)は、ばいじんによる目詰まりが生じな

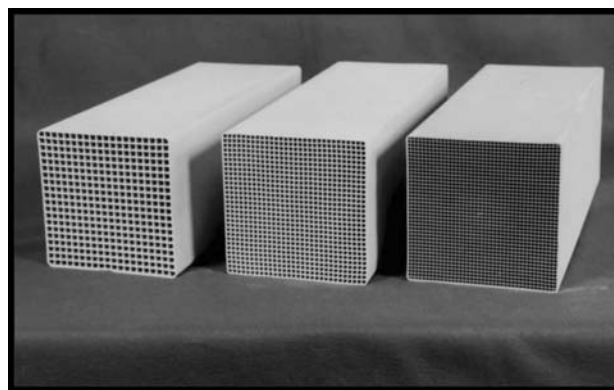


Fig. 6 De-NO_x catalyst (IHI提供)

いように格子状等の構造となっている。触媒成分については、酸化チタン(TiO₂)を担体成分とし、活性成分として五酸化バナジウム(V₂O₅)や酸化タングステン(WO₃)などが含まれている。

脱硝効率は吹き込むアンモニアと窒素酸化物のモル比(NH₃/NO_x)および触媒充填量に対する処理ガス量の比(空間速度(h⁻¹))で決められる。アンモニアを多く吹き込めば脱硝効率は向上するが、脱硝装置出口での未反応のアンモニアが増える。未反応のアンモニアは下流の空気予熱器で排ガス中のSO₃と反応し、硫酸水素アンモニウムとなって、空気予熱器でのばいじんの付着および腐食を生じさせる。このため、未反応のアンモニアを極力なくすよう、NH₃/NO_xを0.8～1.0程度にして運転している。

3.4 硫黄酸化物対策技術

硫黄酸化物は石炭中の硫黄分が酸化されて発生する。この濃度は石炭中の硫黄分含有率に依存することから、日本では硫黄分が1%以下の石炭が利用されている。しかし、石炭中の硫黄分が0.5%でも排ガス中の硫黄酸化物濃度は400ppm程度となることから、排出基準をクリアするためには、脱硫技術の適用が不可欠である。硫黄酸化物はSO₂とSO₃の形態で存在するが、微粉炭焚き火力発電においては、SO₃は10ppm以下であり、脱硫技術ではSO₂の除去が主体となる。脱硫技術には湿式脱硫技術と乾式脱硫技術がある。現在は、主に湿式石灰石-石膏脱硫技術を用いた脱硫装置(図7)が設置されている。

湿式石灰石-石膏脱硫技術は図8に示すように石灰石を含む吸収液を排ガスと接触させ、SO₂を吸収液に取り込んで除去する。排ガスと接触する吸収液量は出口のSO₂濃度が排出基準値以下になるように吸収液循環ポンプで制御される。排ガスと吸収液を接触させる方式については、図8に示したスプレー方式の他に、液柱方式、ジェットバブリング方式など様々な方式が開発されている。また、ばいじん除去の機能も有している。吸収された硫黄分はカルシウム分と反応し、塔底の液だめ部に吹き込まれる空気により酸化されて石膏として回収される。

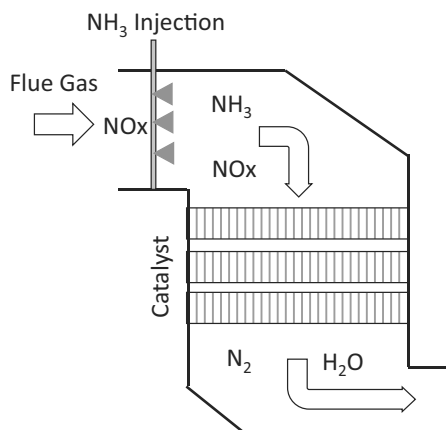


Fig. 5 Principle of SCR method by NH₃ injection



Fig. 7 Limestone-gypsum desulfurization unit

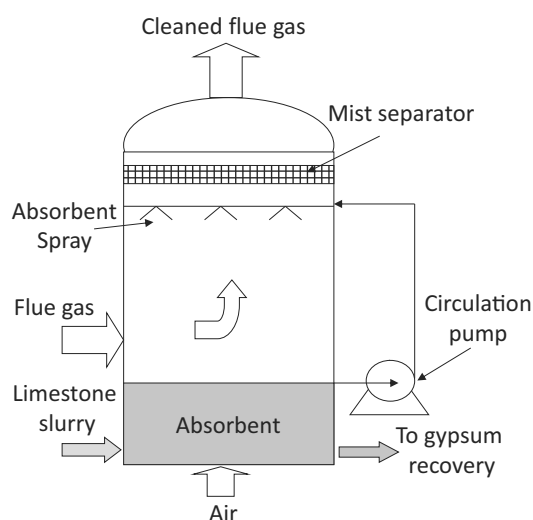


Fig. 8 Principle of limestone-gypsum method

硫酸化物の除去に必要な石灰石は水とのスラリーの形態で液だめ部に供給される。石灰石スラリーの供給量は、石膏回収のために抜き出される吸収液のpHや CaCO_3 濃度を基に制御される。石膏分離後の排水は排水処理設備に送られる。総括反応は次式となる。



脱硫効率は吸収液のpHが高くなるほど向上する。しかし、pHを高くすると投入する石灰石量が増え、これに伴い未反応の石灰石も増えることから、有効利用される石膏の品質が下がることになる。このため、吸収液のpHは4～6の範囲で運転される。また、排ガス量に対する排ガスと接触する循環吸収液量の比率（液ガス比、リットル/ m^3_{N} ）も脱硫効率に影響し、値が大きいほど脱硫効率は向上する。通常は液ガス比が8～15程度で運転されている。

次に乾式脱硫技術について、簡単に説明する。日本の旧一般電気事業者（10電力会社）および電源開発㈱の微

粉炭焚き火力発電所においては、苫東厚真発電所1号機および磯子火力発電所1号・2号機に乾式脱硫装置が設置されている。苫東厚真発電所では石炭灰利用乾式脱硫技術⁽⁶⁾、磯子火力発電所では、活性コークス（石炭から製造した活性炭の一種）を用いた乾式脱硫脱硝技術（商標：ReACT）⁽⁷⁾が用いられている。活性コークスを用いた乾式脱硫脱硝技術では脱硝塔を設置することで活性コークスが触媒となり、アンモニアと NO_x を反応させて窒素（ N_2 ）と水（ H_2O ）にする脱硝機能を持たせることもできる。磯子火力発電所では、脱硝機能を有しない脱硫装置として利用されている。また、水銀やダイオキシンも除去できることが示されている。

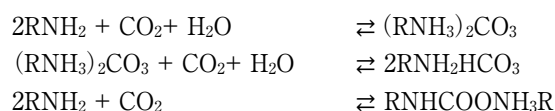
3.5 CO_2 対策技術

微粉炭焚き火力発電における CO_2 の排出削減対策としては、バイオマスなどカーボンニュートラルである燃料の混焼、発電効率の向上および CO_2 の分離回収が挙げられる。既に木質バイオマスは発電所で利用されている。木質バイオマスは、石炭を粉砕するローラーミルでは粉砕し難いため、混焼率は最大3重量%程度である。しかし、バイオマスの確保が難しいことから旧一般電気事業者の平均混焼率は年平均で1重量%にも満たない状況である。

発電効率の向上に関しては、亜臨界圧ボイラーの超々臨界圧（USC）ボイラー（送電端効率（HHV）：約40%）へのリプレースが進められている。さらに主蒸気を35MPa、700℃、再加熱蒸気温度を720℃とするA-USCボイラーを開発し、送電端効率を46%に向上させる計画が進められている⁽⁸⁾。これにより CO_2 排出源単位をUSCボイラーの CO_2 排出源単位（820g- CO_2/kWh ）の87%まで低減できる。

しかし、 CO_2 排出量を現状の20%にするなどの大幅削減が課された場合、バイオマスの供給面や発電原理から上述の方法のみでは微粉炭焚き火力発電を稼働することは難しく、排ガスからの CO_2 の分離回収が必要となる。微粉炭焚き火力発電に適用する CO_2 の分離回収技術としては、図9に示すように CO_2 を吸収液で除去する技術と排ガスを循環利用して窒素を含まない O_2 - CO_2 - H_2O ガスで微粉炭を燃焼させる酸素燃焼技術がある。

常圧の燃焼排ガス中の CO_2 を吸収液で除去する技術では、主にアルカノールアミン系吸収液を用いた化学吸収法が採用されている。原理は、図10に示すように吸収塔（Absorber）で吸収液中のアルカノールアミン（ RNH_2 ）と化学反応させて CO_2 を排ガスから除去する。 CO_2 を吸収した液は脱離塔（Striper）に送られ、ボイラーから抽気した蒸気で加熱することにより CO_2 を放出させて回収する。再生された吸収液は循環利用される。この技術では次式の可逆反応が利用される。



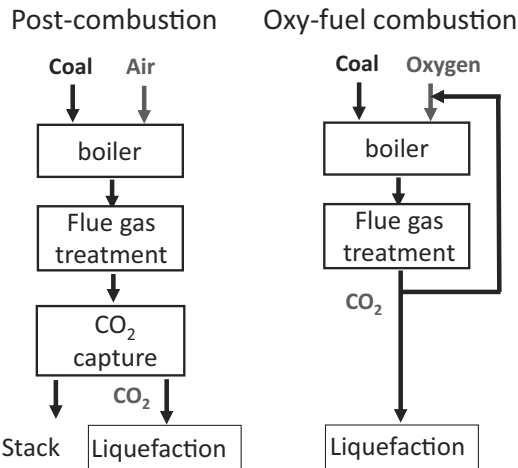


Fig. 9 CO₂ capture process in pulverized coal-fired power generation

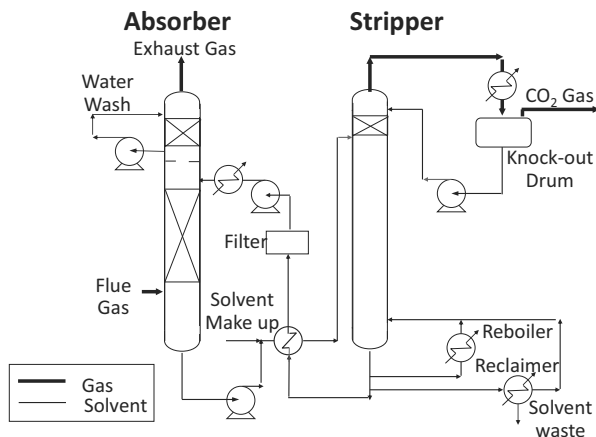


Fig.10 CO₂ absorption process with alkanol amine

この技術は既に化学プラントにおいて商用化されており、様々な吸収液が開発されている。実際の発電所への適用については、カナダSaskPower社のBoundary Dam発電所3号機（送電端：11万kW）において、Shell Cansolv社のCO₂分離回収技術が導入され、2014年10月から実証運転が開始された⁽⁹⁾。排ガス中のCO₂の90%を分離回収し、回収したCO₂は石油の生産量を増進させるEOR（Enhanced Oil Recovery）に用いられる。

酸素燃焼技術については、オーストラリアCS Energy社のCallide A発電所4号機（発電端：3万kW）を改造し、実証試験を2012年6月から2015年3月まで実施し、CO₂回収率90%を達成できることを確認し、プロジェクトを終了している⁽¹⁰⁾。

微粉炭焚き火力発電へ適用するCO₂分離回収技術は既に商用化可能なレベルにある。しかし、吸収液を用いた方法では、CO₂を吸収液から分離させるために必要なエネルギーが大きく、酸素燃焼では酸素製造動力が大きい。このため、発電効率の低下および発電コストの上昇を招く。CO₂の分離回収を前提とする場合には、開発中の

CO₂回収型石炭ガス化複合発電⁽¹¹⁾の方が発電効率の低下も少なく有利となることが示されている。また、日本では回収したCO₂のEOR利用や貯留に関して適用できる規模は小さく、回収したCO₂の対策が大きな課題である。

4. 終わりに

石炭が安価であることから微粉炭焚き火力発電は世界で最も利用されている火力発電技術である。しかし、環境対策が不十分な場合には、環境を悪化させる発電技術でもある。日本では厳しい排出基準の下、本報で解説したように高度な排煙対策技術が確立されている。このことを、日頃石炭に触れることのない皆様にも理解いただければ幸いである。また、排煙だけでなく、排水、ばいじんとして回収した石炭灰についても高度に管理されている状況であることも付け加えたい。

参考文献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁, エネルギー白書2016.
- (2) 水銀大気排出抑制対策調査検討会, 水銀大気排出抑制対策について, 平成28年3月22日.
- (3) 三菱パワーシステム環境ソリューション, 乾式電気集じん装置
<<https://www.es.mhps.com/products/atmosphere/dustcollection/electrostaticprecipitator/dryelectrostaticprecipitator/index.html>> (参照日2017年1月24日).
- (4) 入門講座[火力発電所（全体計画と付帯設備）] IX環境対策, 火力電子力発電, Vol. 51, No. 2, (2000), pp. 67-94.
- (5) 土屋喜重, 川西吉光, 大西召一, 上田康稔, 石炭火力高性能排煙処理システムにおける低低温EP技術開発, 三菱重工技報, Vol. 34, No. 3 (1997), pp. 158-161.
- (6) 工藤慧, 佐々木健彦, 嵐紀夫, 西村士, 石炭灰利用乾式脱硫装置の開発, 火力電子力発電, Vol. 45, No. 12, (1994), pp. 89-96.
- (7) 井原公正, 乾式脱硫脱硝技術, JCOAL平成26年度第1回勉強会, (2014).
- (8) A-USC開発推進委員会, 先進超々臨界圧火力発電(A-USC) 技術開発, 次世代火力発電協議会, (第1回会合) 資料2-2, (2015).
- (9) Global CCS Institute, Boundary Dam Carbon Capture and Storage Project, <<https://www.globalccsinstitute.com/projects/boundary-dam-carbon-capture-and-storage-project>> (参照日2017年2月7日).
- (10) 内田輝俊, 酸素燃焼を用いたCO₂を排出しない石炭火力発電所の実現に向けて～カライド酸素燃焼プロジェクトの運転状況～, 平成25年度火力原子力発電大会論文集, (2014).
- (11) 白井裕三, 原三郎, 幸田栄一, 渡邊裕章, 吉葉史彦, 犬丸淳, 布川信, 牧野尚夫, 三巻利夫, 阿部利夫, CO₂回収型次世代石炭ガス化複合発電システムの提案, 電力中央研究所報告, M07003, (2007).

特集：エミッション低減技術と計測技術

GTCCプラント 脱硝技術の高度化への取組み

Advanced DeNO_x Technology for GTCC Plant島田 秀顕*¹
SHIMADA Hideaki伊東 正雄*¹
ITOHO Masao清水 佳子*¹
SHIMIZU Keiko春日 貴史*²
KASUGA Takafumi野呂 俊平*²
NORO Shunpei

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，脱硝，触媒，選択的触媒還元反応，動特性
Gas Turbine, Combined Cycle, NO_x Reduction, Catalyst, SCR, Dynamic Response

1. はじめに

最近の再生エネルギーの急激な増加で，火力発電の運用に対する要求が大きく変貌してきている。

特にガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）プラントに対しては，より広い負荷範囲で，柔軟な運用が要求されるようになってきている。このような運用の実現には，常に進化するガスタービンと協調し，プラントから排出されるNO_xを低減する技術が鍵を握っている。

東芝とイビデンは，共同でGTCCプラントのガスタービン排気系に設置される脱硝システム（SCR，Selective Catalytic Reduction，選択的触媒還元）用の新型触媒開発並びに高度な脱硝制御方式の開発に取り組んで来た。これは，ガスタービン負荷の数%から全負荷に渡る高効率脱硝を実現し，かつ触媒の圧力損失を極力抑えることによって高レベルのプラント効率を維持する技術であり，前述のプラント運用要求に応えるものである。これらに関わる開発は完了し，実プラントへの適用を開始した。本稿ではこれらについて報告する。

本稿の構成は以下の通りである。まず2章で，発電用ガスタービン及びGTCCに対する最近の要求と，それに伴う技術課題について俯瞰する。続く3章では，これらに対応するための改良型触媒について紹介する。更に4章では，制御上の課題とそれを解決する制御方法について記述する。最後に5章でまとめを行う。

2. GTCCプラント運用への要求とガスタービン特性

2.1 要求される負荷運用の例

最近のGTCCプラント用ガスタービンに要求される負

荷運用の一例を図1に示す。

従来のGTCCプラントは，複数のガスタービンで構成され，運転台数の増減でプラントの出力調整を行う場合が多かった。このため単機では部分負荷効率が低下する低負荷側において運転されない傾向があったが，近年のガスタービン単機の大容量化に伴い，低負荷側での連続運転を要求されるようになってきている。また，再生エネルギーの変動吸収のための急速起動，急速負荷変化及び広範なターンダウン性能が要求されている⁽¹⁾。

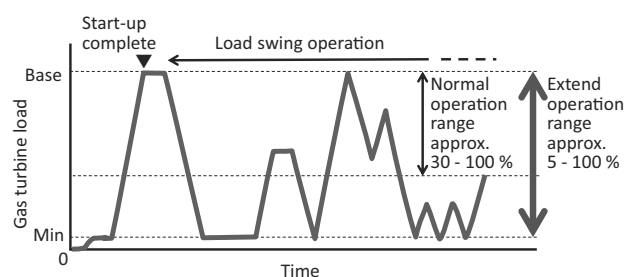


Fig. 1 Recent typical GT operation

2.2 ガスタービンのNO_x排出特性例

汎用の大容量発電用ガスタービンの低負荷側では，排出NO_xに関して以下の特性がある。

- i) 予混合燃焼に移行できず，拡散燃焼での排出NO_x濃度が増加する。
- ii) 全予混合燃焼器を採用した場合での複数バーナのうち，高当量比でシングルバーナを焚いたことにより排出NO_x濃度が増加する。
- iii) 一般的に低負荷では低い火炎温度とならざるを得ないため，NO₂/NO_x比が増加する。

このようなガスタービン排ガスNO_x特性の一例を図2に示す。

原稿受付 2017年3月29日

* 1 (株)東芝 エネルギーシステムソリューション社
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4

* 2 イビデン(株) セラミック事業本部 ECP事業部 SCR-BU
〒501-0695 揖斐郡揖斐川町北方1-1
hideaki.shimada@toshiba.co.jp

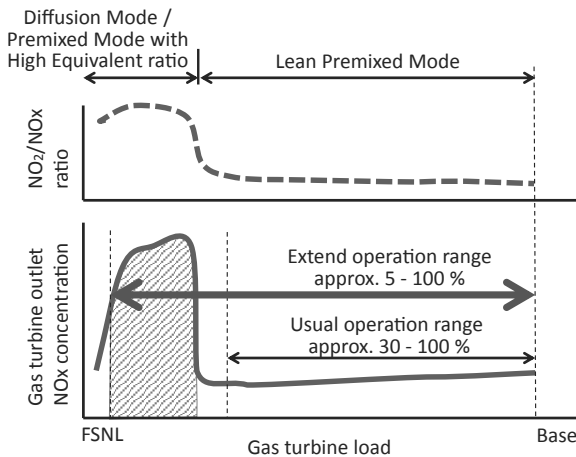


Fig. 2 Typical NO_x emission characteristics vs GT load, typical NO₂/NO_x ratio vs GT load

この例において、低負荷側での排出NO_x濃度は高負荷側の数倍に達するため、通常運用負荷帯はこの領域を避けてきた。例えば比較的新しいガスタービンでも30～40%負荷程度が最低負荷として選定されている⁽²⁾。

これに対し、図1に示すような低負荷での運用の要求が高まっており、排出NO_x濃度が高く高NO₂領域でも運用できる必要性が生じている。

2.3 従来型脱硝触媒

前述のように、従来はGTCCプラントの運用負荷帯はガスタービン負荷が30～40%より高く、この領域ではNO_x量はNOが殆ど（NO₂/NO_x比0.1程度）であり、脱硝触媒もここでの使用を前提としていた。一方、NO₂/NO_x比が0.5を超えると脱硝反応機構が変化し、これに伴い脱硝触媒の特性も著しく変化するため、従来型の触媒では同程度の性能を発揮できない。また、制御方式についても反応速度が遅くなり、対処し切れなくなっている。

2.4 脱硝システムの課題

従来概ね30%とされていたガスタービン最低負荷をさらに低負荷側5%程度まで広げ、所定の負荷追従性を確保するために、脱硝システムは以下の技術課題を克服する必要がある。

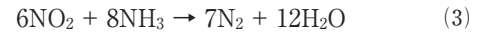
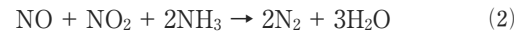
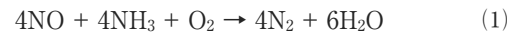
- NO_x発生量が増加する低負荷側（高NO₂下）での脱硝率を従来型よりも上昇させる。
- 排ガス流量が多くなる高負荷側で、圧力損失を極力低く抑え、ガスタービン出力への影響を最小限にする。
- 起動停止、負荷変化時等に出口NO_xを規定値以内に抑える制御方法を確立する。

東芝とイビデンは、共同でこのような要求を満足する脱硝技術を開発に取り組んできている。

3. 高性能触媒の開発

脱硝システムの課題解決に向けて、脱硝触媒には高脱硝と低圧力損失の両立が求められるが、従来技術では高

脱硝率と低圧力損失は背反する項目であり、特に高NO₂領域ではそれが顕著となることが予想される。NO_x還元剤にNH₃を用いた場合の脱硝触媒におけるSCR反応式を下記に示す。



上式に示すとおり、NO_x中のNO₂が50%を越える領域となると、式(3)での反応が起こりやすくなる。しかし、この反応は他の2つの反応に比べて反応速度が遅いとされており、高脱硝を得るのは困難である。また、同式より高NO₂でのSCR反応はNH₃をより多く必要とすることが分かるが、この反応速度が遅いことからリークNH₃量が多くなる恐れがある。そのため、リークNH₃量を抑えるために触媒容量をさらに増やす必要があり、低圧力損失との両立をさらに困難とさせる。そこで、新型の触媒を開発し、高NO₂領域での高脱硝と低圧力損失の両立を図った。

3.1 高NO₂領域での高脱硝触媒開発

改良触媒について、NO_x中のNO₂割合と脱硝率の関係を図3に示す。SCR反応が進みにくくなるNO₂/NO_x比が0.5を超える領域において、従来触媒と比べて高い脱硝率を得ることができた。これより、高NO₂領域でも高脱硝率を発現することができるため、NO₂の割合が多くなりやすいガスタービン低負荷運転における排ガスにも対処可能と考えられる。

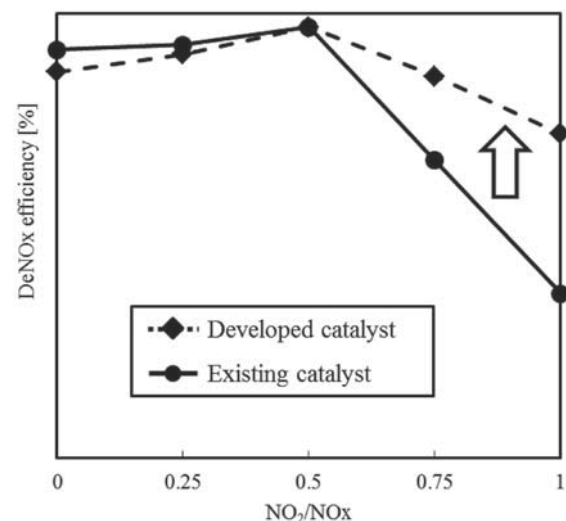


Fig. 3 DeNO_x efficiency vs NO₂/NO_x ratio

3.1.1 静特性

2.4節i)で示したように、実機のガスタービン低負荷条件では、環境規制を満足するために入口NO_x量に対して高負荷側より高い脱硝率が求められる。そこで、あるガスタービン運転条件における低負荷条件を模擬し、

脱硝率の測定を行った。測定結果を図4に示す。改良触媒は、高 NO_2 領域において95%以上の高い脱硝率を得ることができ、ガスタービン低負荷側での高脱硝を満足する技術として期待できる。

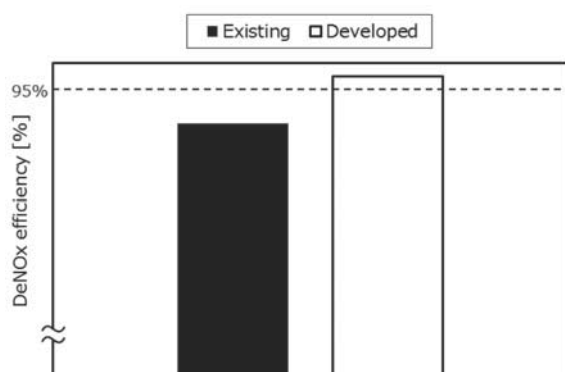


Fig. 4 Performance of developed catalyst

3.1.2 動特性

高 NO_2 条件 (NO_2/NO_x 比=0.65) での脱硝応答性を調査した結果を図5に示す。横軸は時間、縦軸は触媒出口 NO_x 濃度であり、実線が従来触媒、破線が改良触媒による応答である。 NH_3/NO_x モル比が1となるように NH_3 を注入した状態から開始し、時刻0で NH_3/NO_x モル比が1.3となるように NH_3 注入量を変化させている。従来触媒では脱硝反応がゆっくりと進行し反応が安定するまで30分以上を要していること、改良触媒では10分程度で反応が安定しており即応性が改善されていることが確認される。

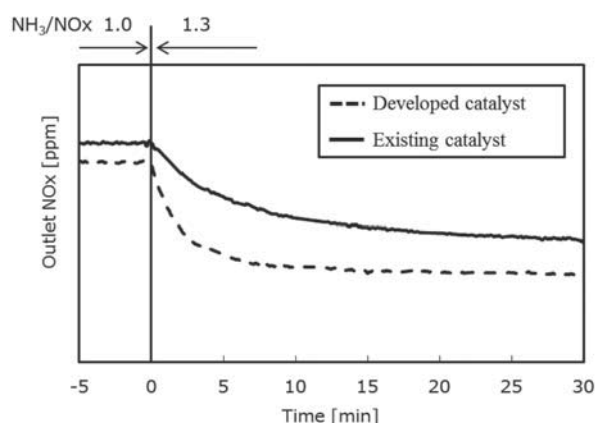


Fig. 5 DeNOx variability over time

この結果に対する考察は以下の通りである。高 NO_2 条件での脱硝は、まずFast反応と呼ばれるSCR反応式(2)が進行すると考えることができ、脱硝後の未反応 NO_x は大部分が NO_2 であると予想される。未反応で残っていると考えられる NO_2 を NH_3 を増やすことによりSCR反応式(3)で反応させることを期待し、 NH_3/NO_x モル比を1.3まで上昇させた。この結果から、従来触媒ではSCR反応式

(3)に対する活性が低く反応が進行しないと考えられるのに対し、改良触媒では速やかに反応が進んでいると判断できる。

以上の結果から、ガスタービン負荷を NO_2 割合の多い低負荷側へ切り替えた場合でも、高脱硝かつ良好な脱硝応答性を示すと考えられる。

3.2 高開口率による低圧力損失の実現

一般的に高脱硝を狙う場合、触媒容量を多くする必要があるので、圧力損失は高くなる傾向がある。ハニカム型触媒の幾何学的表面積と圧力損失の関係を図6に示す。グラフの右に行くほど高セルとなり、ガスとの接触面積が増えることで高脱硝が得られるが、セル穴の開口部分が小さくなるため圧力損失は高くなっていき、高脱硝と低圧力損失が相反する要求であることがわかる。そのため、既設と比べて高開口率化を図ることで幾何学的表面積と開口部の両立を達成し、脱硝率を保ったまま圧力損失を下げることを可能とした。

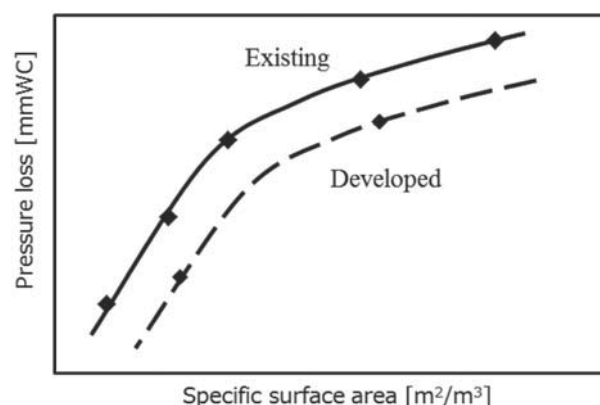


Fig. 6 Relationship between specific surface area and pressure loss

3.3 高性能触媒開発まとめ

上記触媒改良と、既設と比べてさらなる高開口率化を図ることで、SCR反応が進みにくなる高 NO_2 領域での高脱硝と低圧力損失の両立を達成することができた。以上より、ガスタービン運用負荷範囲の拡大と高プラント効率化に貢献でき、より柔軟なプラント運用が可能となると考えられる。

4. 脱硝制御システム

3章に記載したような反応時間が短い改良触媒を用いた場合であっても、脱硝プロセス全体としては、計測システムや NH_3 を注入してから触媒上に流れ着くまでのプロセスにむだ時間や応答時間遅れが含まれる。これらの時間遅れ要素が存在するため、単純なフィードバック制御で性能良く制御することは難しい。こうした時間遅れ要素に対処するために、現代制御理論を用いて応答性の良いアドバンス脱硝制御を実用化している^{(3)~(6)}。本章ではアドバンス脱硝制御について記述する。

以下、4.1節では脱硝プロセスの動特性モデルについて

て概要を示し、制御上の課題を明確化する。続いて4.2節では、アドバンス脱硝制御の設計則を示し、効果をシミュレーションにより確認する。改良型触媒を用いていないプラントでも良好な制御を行うための検討を4.3節で行う。4.4節で実装アルゴリズムについて紹介した後、4.5節で実機適用例について紹介し、4.6節でアドバンス制御システムのまとめを行う。

4.1 脱硝プロセスの動特性モデル

排煙脱硝プロセスとその制御構成を図7に示す。

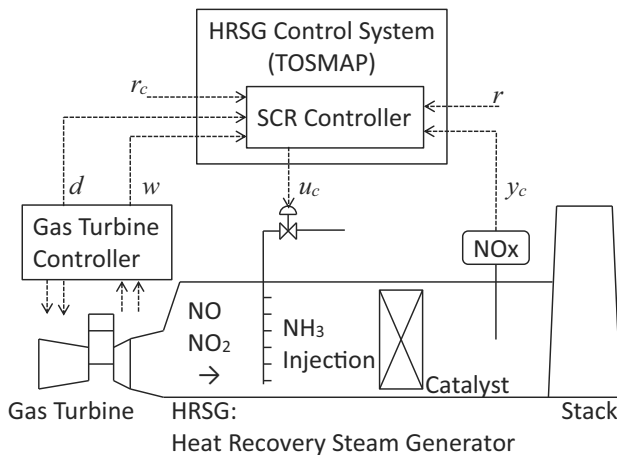


Fig. 7 Schematic configuration of SCR process

図7では、ガスタービン排ガス中に含まれるNO_xを分解するために排ガス中にNH₃を注入し、触媒上で式(1)～式(3)の反応により脱硝する。残存NO_xは分析計で計測される。NH₃系統には流量調節弁が設置されており、残存NO_xが決められた値になるように制御が行われる。図7で、 r_c はNO_x排出濃度設定値、 u_c はNH₃注入流量設定値、 d はGT排気中のNO_x流量、 w は排ガス流量、 r は16%O₂換算値係数、 y_c はNO_x排出濃度である。

脱硝プロセスの動特性モデルを図8に示す⁽⁴⁾。図8で、 v はフィードフォワード信号、 y_c はNO_x排出流量、 $f(x)$ は反応の非線形特性、 $G_1(s)$ は計測の遅れを、 $G_2(s)$ はNH₃が触媒上に到達し反応するまでの遅れを表現している。脱硝制御の目的は、 y_c ないしは y_a を外部から与えられる設定値 r_c に一致するように制御することである。

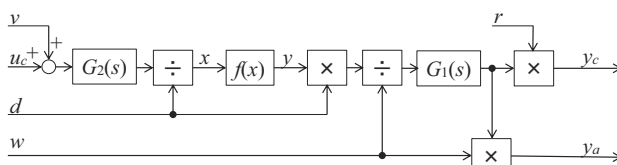


Fig. 8 Dynamic model of SCR process

d を精度良く推定することができれば効果的なフィードフォワード信号 v を作ることができて応答の良い制御を実現できるが、ガスタービンでの燃焼には多くの変数が影響するため、 d を精度良く推定することは難しい。

このため d の推定値には誤差が含まれるものとし、その結果生ずる制御偏差 ($r_c - y_c$ または $r_c - y_a$) はフィードバック制御で解消する必要があるため、フィードバック制御の応答性が重要となっている。

フィードバック制御の応答性には、プロセスの時間遅れが大きく影響する。反応時間が短い触媒を用いた場合であっても、 $G_1(s)$ や $G_2(s)$ にむだ時間や時間遅れが含まれるため、単純なPI制御によるフィードバック制御ではオーバーシュートを生じやすく、オーバーシュートを避けるためにはゆっくりした応答に調整せざるを得ない。

4.2 アドバンス脱硝制御の設計

時間遅れ要素を含むプロセスの制御を効果的に行うために、最適レギュレータ (Linear Quadratic Regulator, LQR)⁽⁷⁾ や一般化予測制御 (Generalized Predictive Control, GPC)⁽⁸⁾ を用いて制御則を設計する。

LQRは制御対象の動特性モデルの情報を用いて内部状態量を推定計算し、状態フィードバックを行う。GPCは制御対象の動特性モデルの情報を用いて将来出力応答の予測計算を行い、それに基づくフィードバック制御を行う。どちらも式(4)の二次形式の評価関数を最小化するようにゲインを決定する。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \{x(k)^T Q x(k) + u_c(k)^T R u_c(k)\} \quad (4)$$

ここで、 $x(k)$ は時刻 k の状態量であり、 $u_c(k)$ は時刻 k の操作量であり、 Q と R は重みであり調整パラメータである。なお、モデル化誤差や外乱による定常偏差を解消するため、LQRには積分器を持たせる設計とする。GPCは最初から積分器を含む設計則となっている。

LQRによる制御構成を図9に示す。なお図9では見通しを良くするために、 d と w の記載を省略している。

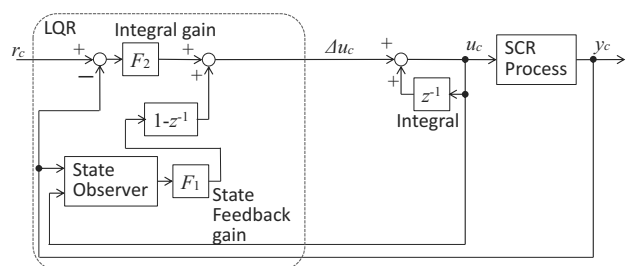


Fig. 9 Configuration of SCR control with LQR

図9で、 F_1 は状態フィードバックゲインであり、 F_2 は積分ゲインであり、 z^{-1} はシフトレジスタである。自動→手動の切り替えや上下制限限などを容易とするように速度型の演算により Δu_c を算出し、その後積分を行って u_c を得る。GPCでは制御則が速度型として提案されているので、速度型LQRと同様に Δu_c を算出し、その後積分を行って u_c を得る。

図10にLQRとPI制御によるシミュレーション結果を示す。図10で、上段がPI、下段がLQR制御による応答

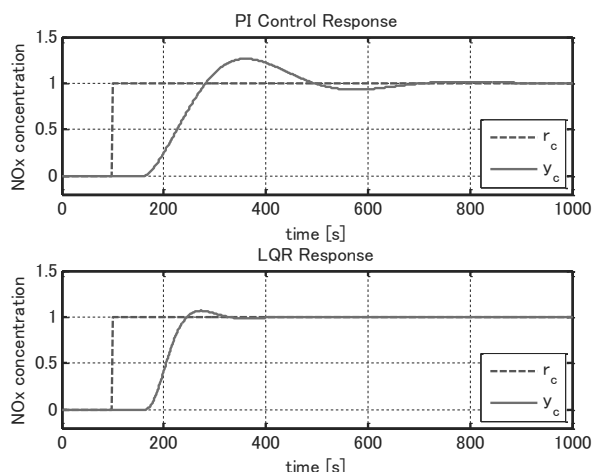


Fig. 10 Simulation results of LQR and PI control

であり、それぞれ破線が r_c 、実線が y_c である。100秒の点で r_c をステップで0から1へ変化させている。LQRにより、即応性に優れオーバーシュートの小さい制御が実現されていることが確認できる。

4.3 動特性変化に対応するためのコントローラの切り替え

従来型触媒を用いた場合には、 NO_2 が少ない運転領域と NO_2 が多い運転領域では動特性が大きく変化する。LQRもGPCも制御対象の動特性モデルを用いた設計であるため、制御対象の動特性が大きく変化する場合には、単独のフィードバック制御では応答性の良い制御を実現できない。

そこで動特性変化に応じたコントローラを2つ設計し、運転領域で切り替えて使用する。2つのコントローラをそれぞれLQRで設計すると、制御構成は図11のようになる。それぞれのLQRは速度型の演算を行うためアンチwindアップが必要無いシンプルな構成となる。

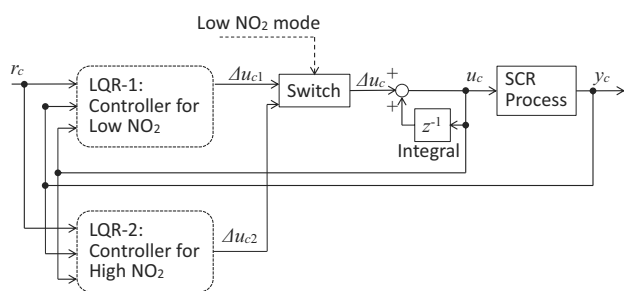


Fig. 11 Configuration of SCR with dual LQRs to switch over

図11の応答を確認するためのシミュレーション結果を図12に示す。

図12で、上段が図9で示した単独のLQRによる応答であり、下段が図11に示した2つのLQRを切り替えた場合の応答である。それぞれの段で、破線が r_c 、実線が y_c である。2000秒の点で、脱硝プロセスのモデルを NO_2 が少ない状態から NO_2 が多い状態に切り替えており、同時にコントローラ側も対応するモードに切り替えている。

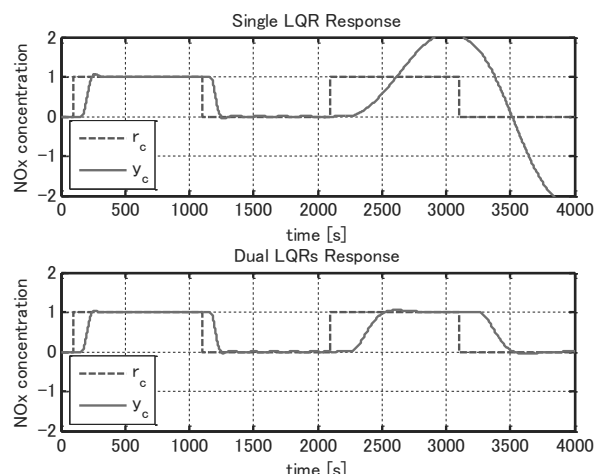


Fig. 12 Simulation results of single LQR and dual LQRs

単独のLQRでは、2000秒以降の制御対象の動特性変化に対応できずに発散しているが、2つのLQRを切り替えて使用した場合には安定した制御応答が得られていることが確認できる。

4.4 コントローラの実装

LQRを用いる場合、例えば60秒のむだ時間を1秒で制御するためのオブザーバは60次になるが、高次のコントローラは実装に不利だけでなく数値計算上の誤差も入りやすい。そこでバランス変換によりオブザーバを低次元化する⁽³⁾。また実装を容易にするために、状態空間形式で得られたコントローラを伝達関数に変換する。この結果、オブザーバを含むLQRは図13のように実装できる。図13で、 $G_{c1}, \dots, G_{c4}$ ではそれぞれ z^{-1} の多項式で表現される離散時間系のフィルタである。LQR-1は低 NO_2 用に設計されたコントローラであり、LQR-2は高 NO_2 用に設計されたコントローラである。

GPCも図13の形式で実装することができる。以上により現実的な構成で、アドバンス脱硝制御を制御装置に実装することができる⁽⁶⁾。

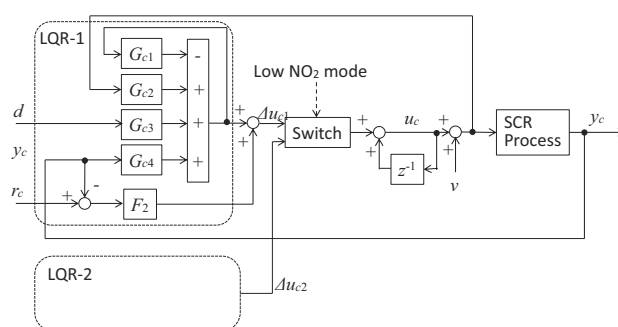


Fig. 13 Schematic diagram of SCR control structure

4.5 実機への適用例

本節ではアドバンス脱硝制御を実機へ適用した例を紹介する⁽⁵⁾。アドバンス脱硝制御による応答を図15に、比較のための従来制御による応答を図14に示す。

図14と図15で、上の段に r_c と y_c を示し、下の段に主要なプラント量を示す。図14と図15ともに、運用最大負荷から運用最低負荷まで変化させた時の応答であり、図14では計測開始後9.5分の時点で、図15では計測開始後12分の時点で、燃焼切替によりNO_x発生量が急増している。図14から、従来制御では、NO_x発生量急増直後にNO_x排出量に大きなピークが表れており、また、負荷変化終了後に y_c が r_c に収束するのに27分かかっていること、更に、 y_c が r_c に収束するまでの制御偏差の絶対値の積分値IAE (Integrated Absolute Error) が262であることが確認できる。一方、図15から、アドバンス脱硝制御では、NO_x発生量急増後のピークも低く抑えられ、また負荷変化終了後に y_c が r_c に収束するのにかかった時間は14.5分であること、IAEは98であることが確認できる。

以上の実機適用例から、アドバンス脱硝制御により制御応答が大幅に改善されたことが確認された。

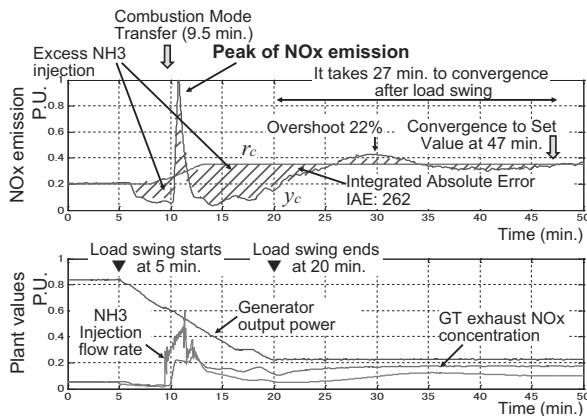


Fig. 14 Actual plant data of conventional control

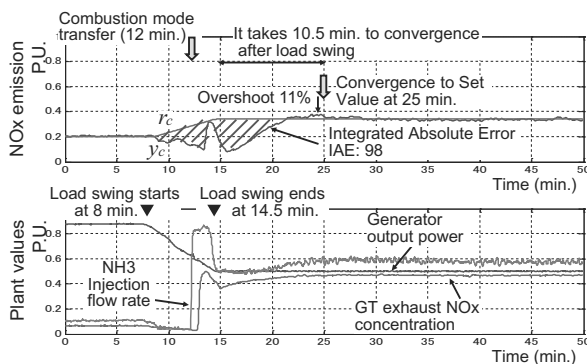


Fig. 15 Actual plant data of advanced control

4.6 脱硝制御システムのまとめ

4章では、脱硝制御のフィードバック制御について、良好な制御応答を実現するためにアドバンス脱硝制御を実用化した例について記述した。改良型触媒を用いた場合でも、高NO₂領域での脱硝反応には反応遅れがあることを含め、脱硝プロセスには時間遅れ要素が複数あることから、アドバンス脱硝制御が有効であることを示

した。

本方式は複数プラントで実用化済みであり、良好な制御応答を示す⁽⁵⁾⁽⁶⁾と共に、従来よりも試運転による調整期間を短縮することにも貢献している。

5. おわりに

東芝／イビデンにおける、GTCCプラントの脱硝技術に関わる新型脱硝触媒の開発並びに高度脱硝制御方式の開発への取り組みについて紹介した。

開発した改良型脱硝触媒は、NO₂濃度が高い運転状態であっても、高脱硝性能を示し、即応性にも優れていることを示すとともに、圧力損失を低く抑えることが可能であることを示した。また脱硝プロセス全体の動特性へ適切に対処し良好な制御を達成する脱硝制御システムについても、実機へ適用していることを示した。

これらの技術は、GTCCプラントを、再生エネルギーによる発電の特性を補完し、プラント効率を高く維持しつつ、より柔軟な運用を可能にするものと期待される。今後もガスタービン低NO_x化技術の進展と協調して、火力発電に求められる、高効率で柔軟かつ環境適合性の高い技術の開発を進めていくことにより、電力の安定供給に貢献していく。

参考文献

- (1) 福泉靖史, 小森豊明, 上田慎太, 富田康意, 平原悠智, 住吉泰生, 火力プラントの柔軟性向上による電力システムの安定化, 火力原子力発電, Vol. 66, No. 11 (2015) pp.676-691.
- (2) 服部祐太, 俵盛勝博, 高効率コンバインドサイクル発電システムの最新技術, 東芝レビュー, Vol. 68, No. 11 (2013), pp. 8-11.
- (3) Wijaya, S., Shimizu, K., Nakamoto, M., A LQR Scheme for SCR Process in Combined-Cycle Thermal Power Plants, Proceedings of 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes ADCONIP 2014 (2014), pp. 19-24.
- (4) Nakamoto, M., Shimizu, K., Nagata, K., Kokubo, T., Generalized Predictive Control for a NO_x Decomposition Process of a Combined Cycle Power Plant, Proceedings of IFAC Control of Power Plants and Power Systems (1995), pp.251-256.
- (5) Hino, S., Shimizu, H., Shimizu, K., Sato, T., An Advanced NO_x Control System for a Selective Catalytic Reduction of a Combined Cycle Power Plant, Proceedings of POWID 2002 (2002).
- (6) 石川鉄郎, 谷明憲, 新田能之, 運用性と環境の改善を実現する次世代コントローラTOSMAP-DSTM/LX, 東芝レビュー, Vol.68, No. 11 (2013) pp.29-31.
- (7) Åström, K. J., Wittenmark, B., Computer Controlled Systems Theory and Design (1984), pp.254-281.
- (8) Bitmead, R. R., Gevers, M., Wertz, V., Adaptive Optimal Control The Thinking Man's GPC (1990), pp.21-42.

特集：エミッション低減技術と計測技術

ガスタービンプラント向け脱硝装置について

SCR System for Gas Turbine Power Plant

宮西 英雄^{*1} 増田 具承^{*1}

MIYANISHI Hideo MASUDA Tomotsugu

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，シンプルサイクル，脱硝装置，脱硝触媒

Gas Turbine, Combined Cycle, Simple Cycle, SCR System, SCR Catalyst

1. 緒言

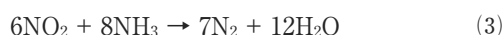
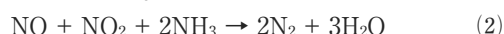
近年，環境保全のための排ガス規制は世界各国で年々厳しくなっており，酸性雨及び光化学スモッグの原因となる窒素酸化物（NO_x）の排出抑制のため，排煙処理技術の高度化が求められている。⁽¹⁾ 乾式脱硝装置は，事業用および産業用ボイラプラント向けとして，あるいはガスタービンプラント向けとして一般的に採用されている技術であり，世界中で広く運用されている。

本稿では，脱硝装置の概要を解説し，ガスタービン向け脱硝装置および脱硝触媒の適用例と技術的課題等について述べる。

2. 脱硝装置概要

2.1 脱硝装置における化学反応

現在の脱硝装置は，還元剤にアンモニアを使用する選択的接触還元法であり，排ガス中に含まれるNO_x（NOおよびNO₂）は，還元剤であるアンモニアと触媒上で接触反応し，無害な窒素と水になり除去される。



排ガス中のNO_xは，通常，NOが主体である。したがって，NO_xが除去される脱硝反応は，式(1)で示される反応式にて進行することが多い。一方，NOとともにNO₂が共存する場合には式(2)及び式(3)が併発する。NO_x中のNO₂比率が半分以下の場合では，式(2)の反応にてNO₂とNOが除去され，さらに，残ったNOが式(1)の反応にて除去されることになる。しかし，NO_x中のNO₂比率が半分より大きくなると，式(2)の反応が進むにしたがって，残されるNO_x成分系はNO₂リッチとなる。この場合，式(3)の反応速度が遅いことに伴い，図1

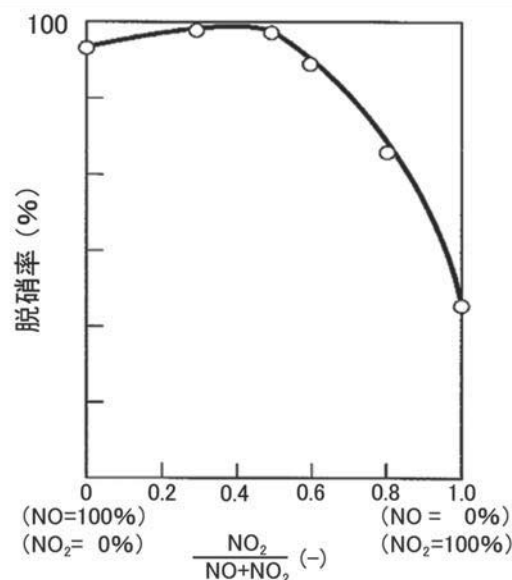


Fig. 1 Correlation between NO₂/NO_x ratio and De-NO_x efficiency
NO₂割合が変化した場合の脱硝率を示す。

に示すように脱硝率が低下することになる。⁽¹⁾

2.2 脱硝装置の機器構成

脱硝装置の主要構成機器は，還元剤であるアンモニアを排ガスに導入するアンモニア注入グリッドおよびアンモニア貯蔵・発生設備，脱硝触媒を格納する脱硝反応器である。

アンモニアは，一般的に液化アンモニア・アンモニア水・尿素が使用され，外部からの熱により気化される（尿素の場合は熱分解によりアンモニアを発生させる）。ここで，気化されたアンモニアは，空気により所定の濃度に希釈され，アンモニア注入グリッドに搬送され，ダクト内部に導入される。石炭焚きボイラ向け脱硝装置の構成例を図2，ガスタービンコンバインドサイクル向け脱硝装置の構成例を図3に示す。

原稿受付 2017年4月17日

*1 三菱日立パワーシステムズ(株)
環境プラント総括部脱硝技術部
〒737-8508 広島県呉市宝町6-9

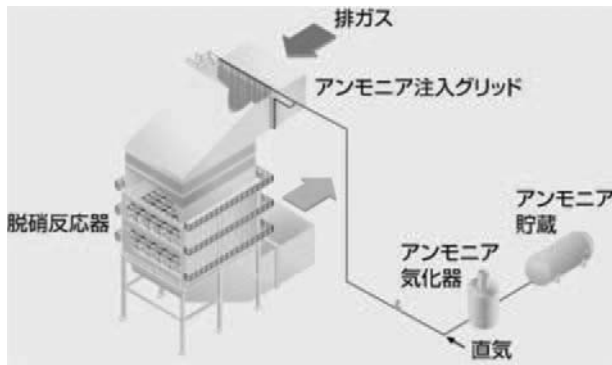


Fig. 2 SCR system for conventional boiler

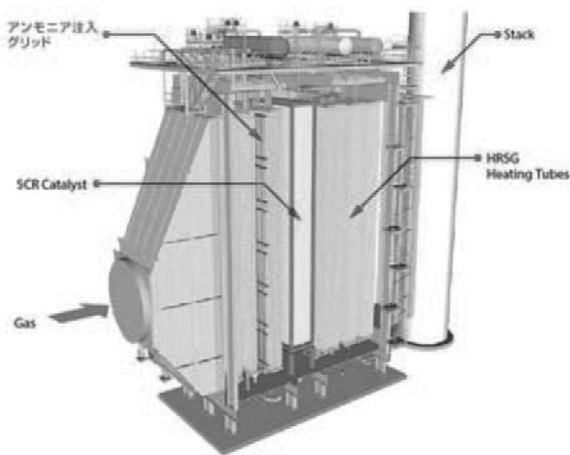


Fig. 3 SCR system for combined cycle plant

2.3 脱硝触媒

脱硝触媒は、主に板状触媒（図4）、格子状触媒（図5）、コルゲート状触媒に大別される。いずれの触媒も使用燃料やプラントの機器構成等により適切な仕様を選定し、採用されており、一般的に脱硝触媒の運用範囲は200～400℃である。

脱硝触媒の仕様を決定する主要パラメータとして、以下のものが挙げられる。

- 排ガス流量
- 排ガス温度
- 排ガス組成
- 脱硝入口/出口NO_x
- 脱硝出口残留アンモニア
- SO₂/SO₃酸化率
- 排ガス中ダスト濃度
- 燃料組成

脱硝触媒は、排ガス中に含まれるガス・ばいじんの条件及び温度的要因により活性が経時的に低下するのが一般的である。それらの主な原因は次の通りである。

- ナトリウム及びカリウム等のアルカリ金属と触媒が化学的に結合し、触媒の活性が低下する。
- ばいじん等が触媒表面に付着し、触媒の活性が低下する。
- 硫酸カルシウム等の可溶性塩類が触媒の細孔を塞ぎ、



Fig. 4 Plate type catalyst

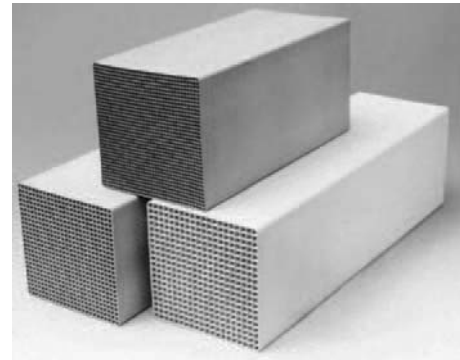


Fig. 5 Honeycomb type catalyst

触媒の活性が低下する。

- 高温にさらされ触媒成分の焼結や結晶形態の変化により活性が低下する。⁽²⁾

ガスタービンプラント向け脱硝触媒においては、使用燃料の性質上、アルカリ金属・ばいじん・可溶性塩類による性能低下はないため、石炭焚きあるいは油焚きボイラ向け脱硝触媒と比較して経時的な劣化は緩やかであり、脱硝触媒の設計としては、高温に対する対策のみが必要となる。

脱硝触媒を構成する材料は、機能上、活性成分、担体及び補助材料に分類される。

活性成分とは、アンモニアを吸着し、NO_xと反応しやすい活性錯合体を生成することで、NO_x-NH₃の脱硝反応を促進するものである。活性成分の材料としては、金属、金属酸化物が用いられる。

担体は、活性成分を分散させる媒体であって、活性成分と排ガスとの接触機会を増やすために多孔質のものが用いられる。担体の材料としては、各種多孔質セラミック類、鉍物等があるが、汎用されているものはAl（アルミニウム）、Ti（チタン）、Si（ケイ素）等の酸化物で多孔質のものである。

補助材料は、主として触媒の機械的強度を保持するための添加剤あるいは基材として用いるもので、触媒の形状等によって、カオリン、ガラス繊維、セラミック、銅板、金網等が用いられる。⁽²⁾

3. ガスタービン向け脱硝装置

3.1 ガスタービン排ガスの特徴および脱硝触媒

ガスタービン排ガスにおいては、起動時及び部分負荷運転時に、排ガスに含まれる NO_x 中の NO_2 割合が高くなる傾向がある。したがって、高 NO_2/NO_x 比率条件($\text{NO}_2/\text{NO}_x > 0.5$)になった場合、脱硝性能低下を生じる潜在的なリスクが存在するため、触媒量を増加させるもしくは NO_x 中の NO_2 比率の変化に影響を受けない脱硝触媒を選定する必要がある。

NO_x 中の NO_2 比率の変化に影響を受けない脱硝触媒として、 NH_3 と NO_2 との反応性及び NH_3 と NO との反応性を両立させた多機能の高 NO_2/NO_x 比対応脱硝触媒が開発され、実用化されている。

NO_x 中の NO_2 比率が0.5より大きい場合、高温域においては上記改良触媒と従来触媒は同等の定常脱硝性能を示すが、低温域になると従来触媒の脱硝性能は大きく低下するのに対して、改良触媒の脱硝性能は比較的保持される。図6に示すように、 NO_x 中の NO_2 比率が0.9においても、改良触媒が高い定常脱硝性能を示すことが確認されている。さらに、 NO_2/NO_x 比率が低い通常条件においても、改良触媒の脱硝性能が従来触媒の脱硝性能と同等であることが確認されている。

また、ガスタービン排ガスでは負荷降下時に NO_2/NO_x 比が高くなり、一時的にプラント出口 NO_x 規定値をオーバーする可能性がある。これに対応するため、 NH_3/NO_x モル比を増加させた時の反応応答性が非常に重要となる。従来触媒では高 NO_2/NO_x 比率における脱硝反応速度が遅いため、図7に示すように、 NH_3/NO_x モル比を変化させた場合の触媒出口 NO_x 濃度は緩やかに低下するが、改良触媒では高 NO_2/NO_x 比率における脱硝反応速度が飛躍的に向上しているため、 NH_3/NO_x モル比変化直後より触媒出口 NO_x 濃度が速やかに低下する。⁽¹⁾

尚、ガスタービン排ガスにはダストが存在しないため、脱硝触媒の仕様としては、一般的に目の小さいものを選

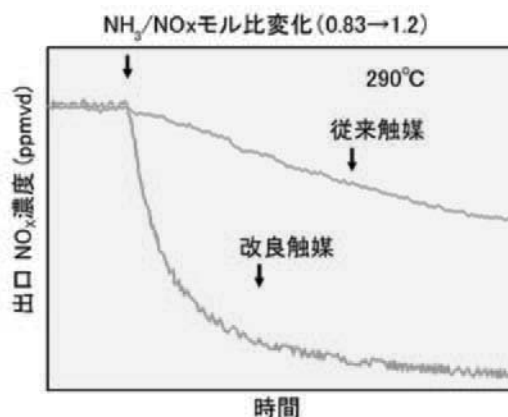


Fig. 7 Catalyst reaction speed by changing NH_3/NO_x molar ratio

定することが可能であるが、脱硝触媒の目を小さくすることにより、設置スペースが小さくなる一方で圧力損失は増加する。ガスタービンプラントでは、排ガスシステムの圧力損失が発電効率に直接影響するため、システム全体の圧力損失バランスを考慮した設計が必要である。

3.2 コンバインドサイクル向け脱硝装置

コンバインドサイクル向け脱硝装置は、排熱回収ボイラ(HRSG, Heat Steam Recovery Generator)の中に組み込まれる。HRSGが再熱三重圧式である場合、脱硝触媒の最適運用温度の観点より、脱硝触媒は高圧蒸発器の下流側に設置される。アンモニア注入グリッドは、脱硝触媒と同じセクションに配置するケースと上流側の伝熱面バンク間スペースに配置するケースがあるが、脱硝触媒と同じセクションに設置する場合は、アンモニアと排ガスの混合距離を十分確保する必要があるため、省スペースの観点から、近年ではアンモニア注入グリッドは脱硝触媒上流側の伝熱面バンク間スペースに配置されるのが一般的である(図8)。

アンモニア注入グリッドは多数の配管により構成され、HRSGの断面に対して均一に配置される。石炭焚きボイラ向け脱硝装置と比較して、ガスタービンプラント向けでは、アンモニア注入グリッドから脱硝触媒までの距離が短いため、ノズル数を増加させるなど混合性能を向上させる対策が必要である。アンモニア注入部の下流に設置される伝熱管群により、排ガスとの混合効果は期待されるものの、環境規制値が厳しく、要求される脱硝効率が非常に高い場合は、アンモニア注入グリッド単独では十分な混合性能が得られないため、排ガス/アンモニア混合器を設置することも必要である。排ガス混合器の一例を図9に示す。

また、コンバインドサイクル向け脱硝装置では、伝熱管群、管群とケーシング間、脱硝触媒部における排ガスおよびアンモニアのバイパス防止対策が重要である。要求される脱硝効率が高くなるにつれ、バイパスが脱硝性能に与える影響度は大きくなり、バイパスがある場合には、脱硝装置出口 NO_x 増加や残留アンモニア増加など

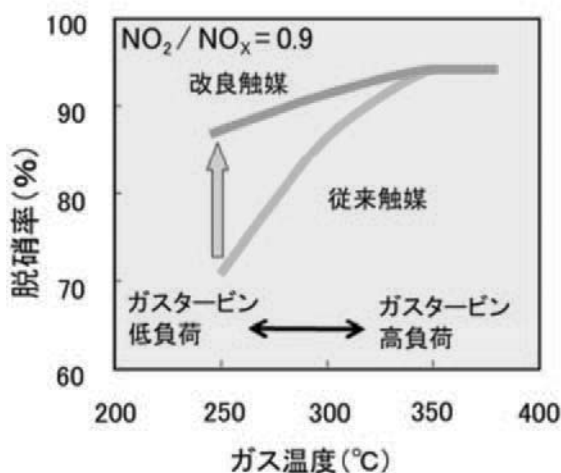


Fig. 6 Catalyst performance for high NO_2/NO_x ratio

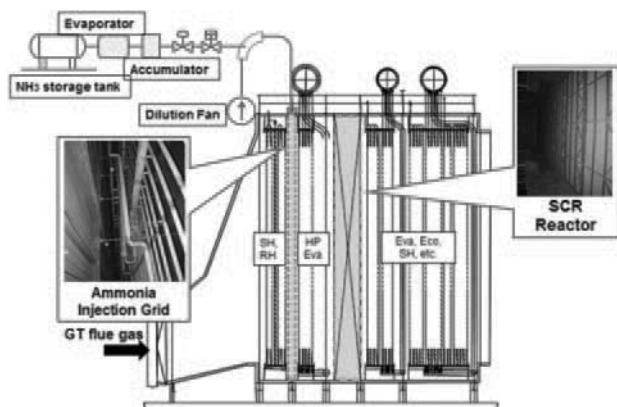


Fig. 8 SCR system for combined cycle power plant

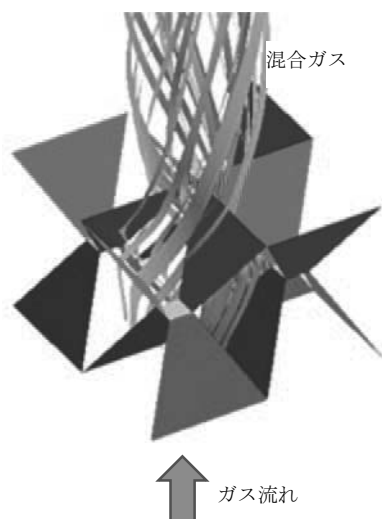


Fig. 9 Static mixer (Model)

の脱硝性能不良となる懸念がある。

石炭焚きボイラ向け脱硝装置では、排ガス中の SO_3 と未反応アンモニアの反応により生じる酸性硫酸がエアヒータを閉塞させる。ガスタービンが油焚きとなる場合は、これと同様のメカニズムにて、HRSGの低温部伝熱管表面において酸性硫酸が生成する懸念があるため、対策を講じる必要がある。

ところで、近年の各国における環境規制強化に伴い、新設のコンバインドサイクルプラントへの脱硝装置設置だけでなく、既存プラントへの脱硝装置設置が必要となることもある。HRSGに将来の脱硝装置設置用のスペースが設けられていない場合には、大規模な改造工事により脱硝装置を設置する必要もある。

3.3 シンプルサイクル向け脱硝装置

緊急電源であるシンプルサイクルガスタービンプラントでは、脱硝装置を設置する場合、設備特有の高い排ガス温度域での高脱硝性能が求められる。⁽³⁾

高排ガス温度への対策としては、①高温脱硝触媒の採用、②排ガス冷却システムの採用が挙げられる。

排ガス温度が高温となる場合、脱硝触媒上においてアンモニアが分解される。高温脱硝触媒は、図10に示すよ

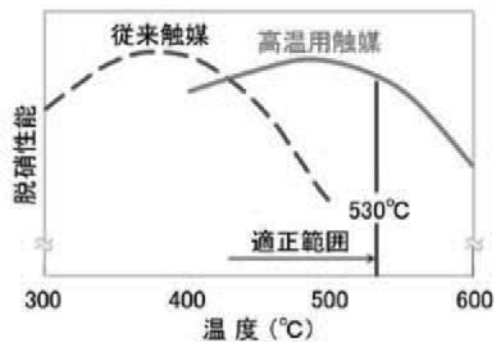


Fig. 10 High temperature catalyst performance

うに高い排ガス温度域における触媒上でのアンモニア分解を抑制し、高い脱硝性能を有するものである。⁽³⁾

アンモニアの分解は、脱硝触媒だけでなく、アンモニア注入グリッドにおいても高温域では配管内部で発生する可能性があるため、アンモニア注入グリッドを過熱しないよう保温するなどの対策が必要となる。

一方、近年のガスタービン高性能化に伴い、排ガス温度は600°Cを超える場合もあり、アンモニア注入グリッド・脱硝触媒でのアンモニア分解および脱硝触媒のシタリングによる性能低下防止のため、ガスタービン排ガスを冷却する方式が採用されている。排ガスの冷却は、大型ファンにより外部空気をダクト内部に投入する方式が一般的である。冷却空気ファンを採用したシンプルサイクル向け脱硝装置の機器構成を図11に示す。

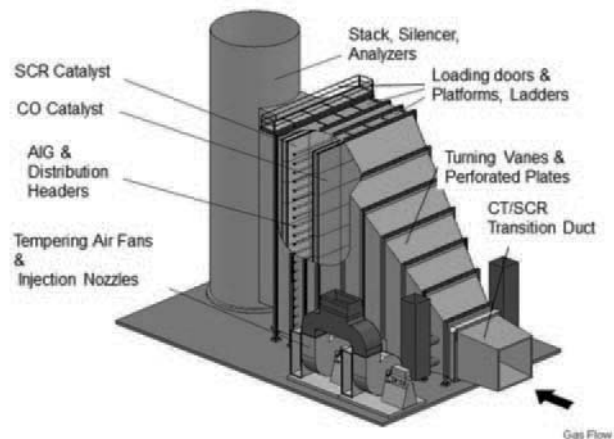


Fig. 11 SCR system for simple cycle power plant

排ガスを外部空気で冷却する際の大きな課題は、高温排ガスと大気温度程度の冷却用空気の混合であり、混合が十分でなく、局所的な高温部が存在する場合は、以下の事項が懸念される。

- ダクト・反応器部の変形
- アンモニア注入グリッド内部におけるアンモニアの分解
- 脱硝触媒におけるアンモニアの分解およびシタリングによる性能低下

冷却用空気ダクトは、その混合効果を考慮して、ガス

タービン排気ダクトと脱硝装置入口ダクト間の比較的流速の速い部位に設置されるため、空気ダクトで発生する熱応力、高周波および低周波サイクルによる疲労等も考慮した設計とする必要がある。

以上より、シンプルサイクル向け脱硝装置は、設計の初期段階においてCFD解析やモデル試験等により混合性能や各部位の機械的強度の検証が必要となる。CFD解析の実施例を図12、モデル試験の実施例を図13に示す。

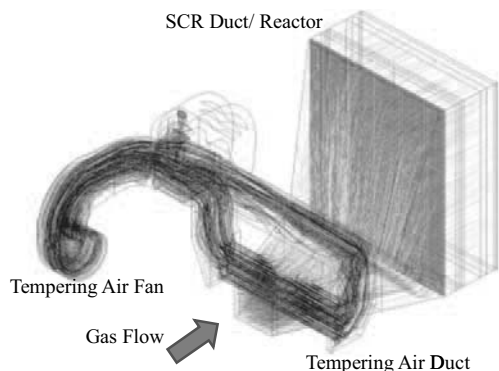


Fig.12 CFD analysis for simple cycle SCR system

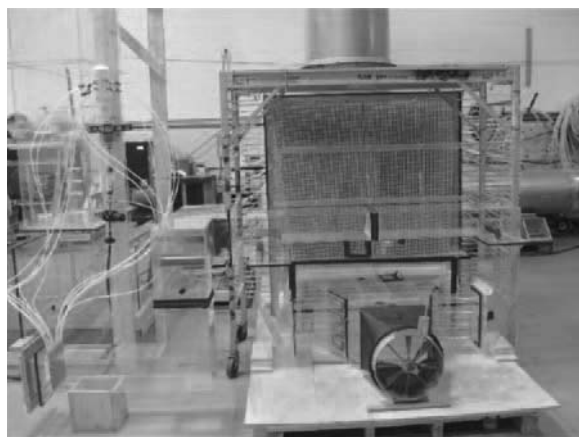


Fig. 13 Cold flow model for simple cycle SCR system

次に、アンモニアと排ガスの混合について、シンプルサイクル向け脱硝装置は、コンバインドサイクル向けと比較してさらに混合距離が短く、また、HRSGのような伝熱管群が存在しないため、必要に応じて排ガス混合器を設置する必要がある。

また、シンプルサイクルプラントは、コンバインドサイクルプラントと比較して起動時間が非常に短く、負荷変化率も大きい。このため、アンモニア流量の制御および構造物の設計には注意を要する。特に、還元剤としてアンモニア水を使用する場合には、ガスタービンの起動に同期してアンモニアを注入する必要があり、希釈空気配管およびアンモニア・空気混合ガス配管のウォーミングのため、大容量の熱源が必要となる。

4. まとめ

近年の各国における環境規制強化やガスタービンの大容量化に伴い、ガスタービンプラントへの脱硝装置設置、さらには脱硝性能の高効率化が要求されている。中でも脱硝装置の高効率化については、HRSG本体やアンモニア注入グリッド等、排ガス系統全体で協調した設備とする必要がある。また、脱硝触媒としては、プラント効率向上のため、さらなる低圧損化が期待される。

参考文献

- (1) 清澤正志, 出本昌則, 加古博, 増田具承, 米村将直, 野地勝己, 地球環境に優しい火力発電プラント向け多機能型脱硝触媒と使用済み触媒の再利用技術, 三菱重工技報, Vo. 49 No. 1 (2012), pp. 99-101.
- (2) 財団法人日本電気協会火力専門部会, 排煙処理設備指針 JEAG 3603-2012, 第3版, (2012), p. 35, 財団法人日本電気協会.
- (3) 世界に誇る三菱日立パワーシステムズ(株)の脱硝技術と製品ラインアップ, 三菱重工技報, Vo. 52 No. 2 (2015), pp. 101-104.

特集：エミッション低減技術と計測技術

脱硝、脱硫装置のガス計測システム

Gas Measuring System for Denitrification and Desulfurization Equipment



田辺 亮^{*1}
TANABE Ryo

キーワード：窒素酸化物 (NO_x)、硫黄酸化物 (SO_x)、化学発光方式NO_x計、赤外線吸収方式ガス分析計
Nitrogen oxides (NO_x), Sulfur oxides (SO_x), Chemi-luminescence type NO_x analyzer,
Non-dispersive Infrared gas analyzer

1. はじめに

工場や火力発電所等の固定発生源から排出される窒素酸化物 (NO_x) と硫黄酸化物 (SO_x) は、大気汚染防止法により排出量が規制され、測定が義務付けられている。排出基準と測定頻度は、施設の排出ガス量や設置区域等により定められており、大規模施設や大都市部の工場等では、煙突や煙道近くに連続排ガス分析計が設置され、常時連続監視がおこなわれている。

また連続排ガス分析計は、ボイラの燃焼管理や脱硝、脱硫など排ガス処理設備の制御用途にも用いられている。

本稿では、これら環境監視用途と排ガス処理設備の制御用途として用いられている連続排ガス分析計の構成と特長について紹介する。

2. 排ガス計測ポイント

図1に石炭や重油を燃料とする大規模火力発電所における排ガス測定ポイントの例を示す。⁽¹⁾

①ボイラ

燃焼制御のための酸素 (O₂) 計がボイラ出口に設置されている。特に応答の速い分析計が必要とされるため、煙道に検出部を直接挿入して測定するジルコニア式O₂計が使用されている。

②節炭器 (エコノマイザ: ECO)

ボイラで過剰空気を抑えた燃焼制御をおこなうため、一酸化炭素 (CO) が発生する。COの多量発生は燃焼効率の低下や黒煙の発生につながるため、CO計を設置し常時監視がおこなわれている。

③脱硝装置

排ガス中のNO_xを除去する脱硝装置 (選択接触還元式: SCR) では、入口と出口にNO_x計が設置され、脱硝効率の計算をおこなうとともに、脱硝装置へのアンモ

ニア注入量の制御信号に用いられている。

制御性の向上のためにNO_x計には速い応答が要求される。また脱硝効率の向上に伴い、出口NO_x計は低レンジでの測定能力が必要とされる。出口では脱硝触媒により煙道内のガス濃度に偏りが生じるため、複数のガスサンプリングプローブで採取したガスを混合して測定する場合がある。

脱硝装置で添加されたアンモニア (NH₃) の一部は、反応することなく残留アンモニアとして排ガス中に残る。多量の残留アンモニアは、ランニングコストアップおよび後段の空気予熱器 (AH) の閉塞を引き起こすため、脱硝出口にNH₃計が設置され、リークNH₃の監視に用いられている。

④空気予熱器 (AH)

AHでの空気漏洩管理のため、出口にO₂計が設置されている。

⑤電気集塵機 (EP)

硫黄分の高い重油燃料を使用するボイラ排ガスの場合、EP出口にNH₃計が設置され、アンモニア注入量の制御信号に用いられている。⁽²⁾

また、EP出口にダスト計が設置され、ダスト濃度の連続監視に用いられている。

⑥脱硫装置

入口に二酸化硫黄 (SO₂) 計を設置し、脱硫設備の効率計算や管理用として使用される。出口にもSO₂計が設けられるが、煙突入口のSO₂計と兼用されることも多い。

以上①～⑥は設備制御用途に用いられる連続排ガス分析計であり、燃焼を効率化したり排ガス中の汚染物質を低減する目的で用いられている。

⑦煙突入口

大気汚染防止法に基づく環境計測用途の連続排ガス分析計であり、大気中に放出されるNO_xとSO₂濃度を測定する。NO_xは、NO_xと同時に測定されたO₂の値で補正された換算値で規制されているため、O₂濃度の連続測

原稿受付 2017年3月16日

* 1 (株)島津製作所 分析計測事業部環境ビジネスユニット
〒604-8511 京都市中京区西ノ京桑原町1
tanaber@shimadzu.co.jp

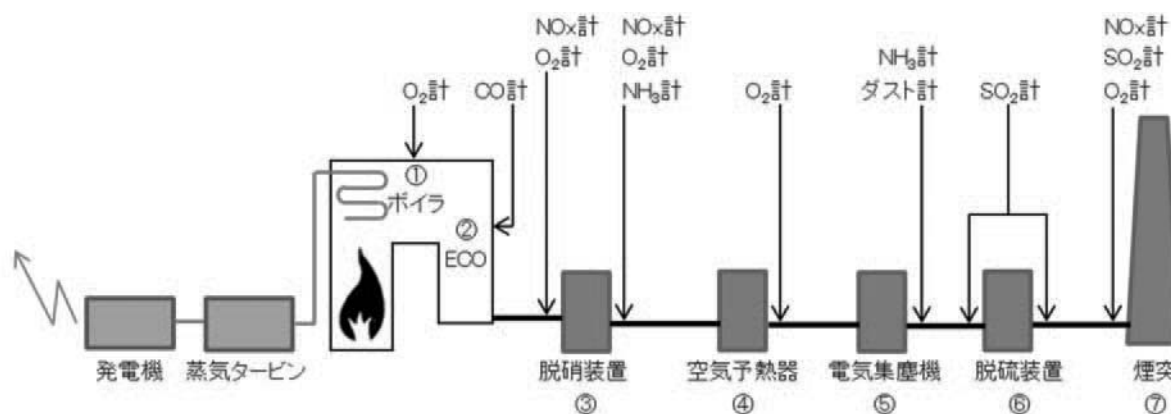


Fig. 1 Flow diagram of steam power plants

定も必要とされる。

3. 連続ガス分析計の構成

連続ガス分析計には、試料ガス採取方式の違いにより下記の2種類がある。

・ガス吸引採取方式

煙道からガスを吸引し連続ガス分析計で測定する。

・ガス非吸引採取方式

煙道からガスを吸引せずに測定する方式であり、センサーを直接煙道に挿入する定点測定方式と、赤外線または紫外線を煙道に貫通させて測定するパスマニター方式がある。

ここでは、NO_xやSO₂等の測定で主流となっているガス吸引採取方式の構成と測定原理について述べる。

3.1 ガス吸引採取方式の構成

煙道から排ガスを吸引して測定する分析計は、図2に示すようにおもに3つの要素で構成されている。

①ガスサンプリングプローブ

煙道に設置し、煙道内に挿入したパイプで試料ガスを採取する。試料ガス中に含まれるダストは、プローブに内蔵された一次フィルタで除去される。一次フィルタは、ドレンによる目詰まりやSO₂の溶解損失を防ぐため、約150℃に加熱されている。

プローブは、試料ガスに含まれるダストの量やガスの温度等に応じて、フィルタやパイプの材質等を使い分けられている。石炭燃焼の脱硝入口、出口の排ガスの場合、ダストが高濃度で含まれるため、フィルタを周期的に自動で掃除するバックパージシステムを使用する。

煙道排ガスの試料採取方法は、JIS K0095に規定されている。⁽³⁾

②ガス導管

ガスサンプリングプローブで採取した試料ガスをガス分析計に導入するためのチューブであり、ガスの吸着が少なく耐食性に優れたPTFE等のフッ素樹脂が一般的に用いられている。ガス導管には2種類あり、チューブとヒータが一体となった加熱導管を使用する場合と、フッ素樹脂チューブをそのまま使う場合とがある。SO₂や

NO₂など、ドレンに溶解損失する成分を測定する場合は加熱導管を使用する。加熱導管は、酸露点以上の120～150℃に加熱されている。ドレンへの溶解損失がないCOやO₂の測定には、フッ素樹脂チューブをそのまま使う場合がある。

③ガス分析計盤

ガス分析計盤内には、試料ガス中のドレンを除去しガスを吸引する前処理装置と、ガス分析計が内蔵されている。ガス分析計は、メンテナンススペースを確保でき、直射日光や輻射熱が当たらない場所を選び設置する。

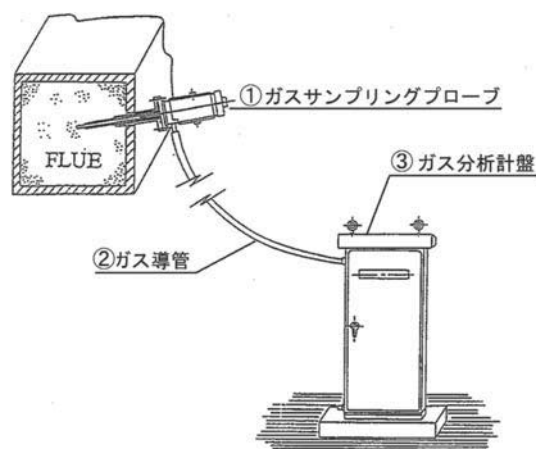


Fig. 2 Gas Monitoring System

3.2 フローシート

ガス分析計盤内に内蔵されている前処理装置のフローの例を図3に示す。

ガスサンプリングプローブで採取された試料ガスは、加熱導管を介してガス分析計盤内に導入される。

試料ガスは、まずドレンセパレータで周囲温度まで冷却され、ドレンとガスが分離される。次にプリクーラで5℃に冷却されてさらに除湿される。ドレンセパレータとプリクーラで発生したドレンは、ドレンポットに溜められ自動排出される。

NO_xを測定する場合は、NO₂をNOに還元するコンバータを使用する。NO_xは一酸化窒素(NO)と二酸化

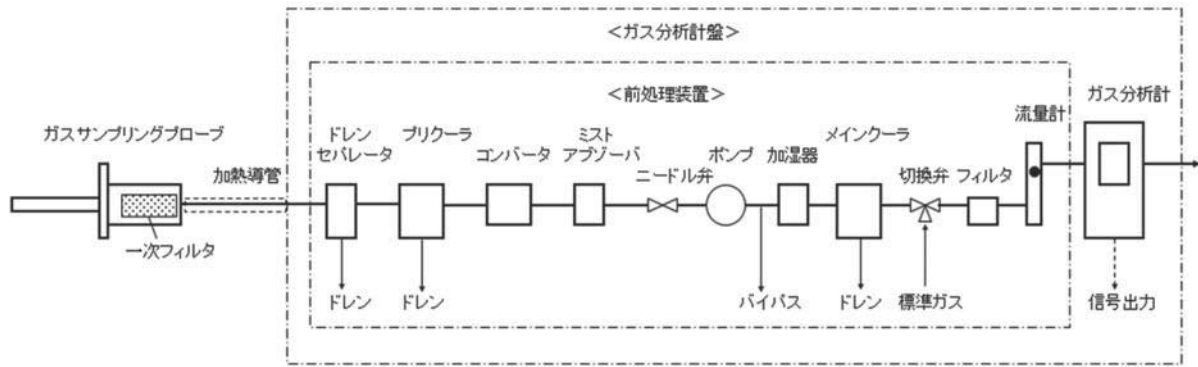


Fig. 3 Flow diagram of gas analyzer

窒素（NO₂）から成り、NO₂はNOに還元してからNO分析計で測定する。一般的にNO_xの大部分はNOであるが、ガスタービンやガスエンジン排ガスなどはNO₂の割合が高くなるため、コンバータの性能が重要となる。

試料ガス中にSO₃ミストが含まれていると配管の汚れや詰りの原因となるため、ミストアブゾーバにより吸着除去する。その後、ニードル弁とポンプにより流量を調整し、加湿器とメインクーラで水分量を2℃飽和に調湿した後、フィルタと流量計を通して分析計に導入し、ガス濃度を測定する。

このように試料ガスを段階的に冷却して除湿する多段除湿システム（ドレンセパレータ常温→プリクーラ5℃→メインクーラ2℃の3段冷却）を採用することにより、SO₂の溶解損失を低減し、より正確な測定が可能となる。

分析計盤には、試料ガスの前処理装置以外に、標準ガスを分析計に流して校正をおこなう自動校正システムが組込まれている。自動校正システムは、標準ガスボンベと電磁弁で構成されており、分析計のコンピュータにより制御されている。

3.3 測定原理

排ガス連続分析計には、おもに表1の測定原理が採用されている。また、各測定成分の自動計測システムはJISで規定されている。

Table 1 Measuring principle of gas analyzer

測定成分	代表的な測定原理	対応するJIS
NO _x	CLD（注1）、NDIR（注2）	JIS B7982 ⁽⁴⁾
SO ₂	NDIR	JIS B7981 ⁽⁵⁾
O ₂	磁気式、ジルコニア式	JIS B7983 ⁽⁶⁾
NH ₃	還元または酸化差動方式	—
	レーザー方式	JIS B7993 ⁽⁷⁾
ダスト	光散乱式、光透過式、摩擦静電気検出式	JIS Z8852 ⁽⁸⁾

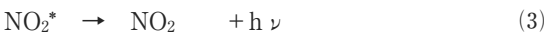
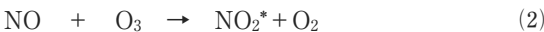
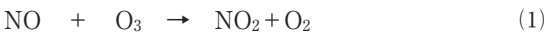
（注1） CLD：化学発光方式

（注2） NDIR：非分散赤外線吸収方式

3.3.1 化学発光方式

オゾンを用いたNO_x測定方法であり、高感度で応答が速い特長がある。

一酸化窒素（NO）はオゾン（O₃）と混合すると、オゾンにより酸化されてNO₂となる。（式(1)）その一部は高いエネルギー状態（励起状態）となる。（式(2)）この励起状態のNO₂*は、式(3)にしたがい波長590～2500nmの光を放射して基底状態に戻る。この反応を化学発光反応（ケミルミネッセンス反応）と呼び、次式であらわされる。



ここで、NO₂*：励起状態のNO₂

h：プランクの定数

ν：光の振動数

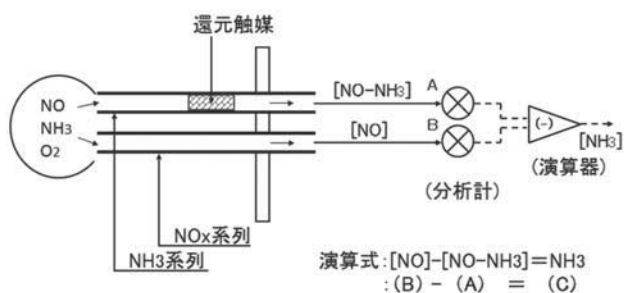
放射光の強度は、反応槽（リアクタ）に導入された試料ガス中のNOの量に比例する。よって光の強度を測定し、NO濃度を出力する。

化学発光方式は高感度でゼロ点が安定していることや、ガス濃度と発光強度の関係が高濃度まで直線であるという特長から、NO_xの最適な計測方法と言える。また、応答が速く脱硝装置の制御など応答時間が重視される用途にも対応できるため、脱硝のNO_x測定に広く用いられている。⁽⁹⁾

脱硝出口のリークアンモニア測定にも、化学発光方式のNO_x計が使用されている。アンモニアの測定は、還元方式または酸化方式の触媒をガスサンプリンググローブに内蔵し、図4に示すように2台のNO_x計の濃度差によりNH₃濃度を測定する。

還元方式の場合、排ガスに含まれるNO_xとNH₃を触媒により還元反応させ、反応によって減少したNO_x濃度を測定し、NH₃濃度を求めている。

また近年では、煙道からガスを吸引せずにレーザー光を煙道に貫通させて測定するレーザー方式のNH₃計も実用化されている。

Fig. 4 NH₃ measuring systemTable 2 Advantage of Chemi-luminescence type NO_x analyzer

特 長	
1	高感度
2	直線性が良い
3	応答が速い
4	ゼロ点が安定している
5	共存ガス影響はCO ₂ のみ

Fig. 5 NO_x-O₂ analyzer NOA-308DxTable 3 Specification of NO_x-O₂ analyzer NOA-308Dx

測定成分	NO _x (NO+NO ₂), O ₂
測定原理	NO _x : 常圧化学発光方式 O ₂ : 磁気風式
測定レンジ	NO _x : 0-10ppm ~ 0-2500ppm O ₂ : 0-10/25vol%
繰返し性	±0.5%フルスケール以内
ドリフト	ゼロ: ±0.5%フルスケール/週以内 スパン: ±1.0%フルスケール/週以内
直線性	±1%フルスケール以内
応答時間	1分以内 (装置入口からガスを流し90%応答を示す時間)
試料ガス採取量	1.5L/分
伝送出力	4-20mA DCまたは0-16mA DC 5チャンネル絶縁出力

3.3.2 非分散赤外線吸収方式

NO, SO₂, CO, CO₂等の異原子分子からなるガスは、それぞれ固有の赤外線吸収スペクトルを持つ。赤外線式ガス分析計は、この性質を利用した安定性と選択性に優れた連続計測方法であり、検出器を測定成分に合わせることで様々な成分の計測に応用できるため、排ガス計測では最も多く使用されている。

Table 4 Advantage of Non-dispersive Infrared gas analyzer

特 長	
1	多成分測定が可能
2	選択性が良い (一部干渉成分がある)
3	セル長選択で、低濃度から高濃度まで計測可能

赤外線式ガス分析計は、図6に示すように光源、回転セクタ、セル、検出器等で構成される。

光源Sは赤外光を分散することなく (非分散のまま) 放射する。回転セクタ板S3により、光源から出た赤外光は試料セルM1と比較セルM2に交互に断続的に放射される。試料セルには常時試料ガスが流れており、被測定成分ガスの濃度に応じて赤外光が吸収される。一方比較セルには不活性ガスが封入されており、入射光がそのまま吸収されることなく通過する。両セルを通過した赤外光は交互に検出器Dに到達する。

検出器には、被測定成分のガスが封入されており、検出器に達した赤外光のうち被測定成分の吸収スペクトルの赤外光のみを選択的に吸収する。検出器は前室と後室の2室に分離されており、この間の圧力差をコンデンサ膜D1で電気信号に変換する。

濃度値は、ゼロガス導入時の比較信号と測定信号の比 (レシオ) と、スパンガス導入時の比較信号と測定信号との比から算出する。比較信号を常にモニターしていることにより、光源や検出器の感度変化等による影響を補正でき、安定した濃度値を得ることができる。この検出方式をレシオ方式と呼んでいる。⁽¹⁰⁾

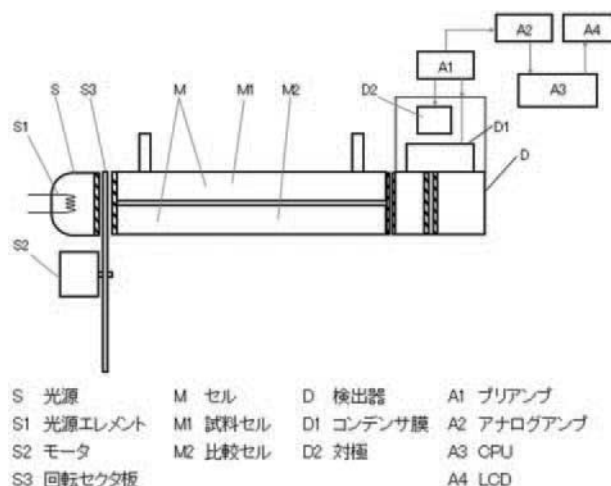


Fig. 6 Measuring system of infrared gas analyzer

Table 5 Specification of continuous gas analyzer NSA-308

測定成分	NO _x , SO ₂ , CO, CO ₂ , O ₂
測定原理	NO _x , SO ₂ , CO, CO ₂ : 非分散赤外線吸収方式(レシオ方式) O ₂ : 磁気風式
測定レンジ	NO _x : 0-200ppm ~ 0-2500ppm SO ₂ : 0-100ppm ~ 0-2500ppm CO : 0-100ppm ~ 0-2500ppm CO ₂ : 0-5vol% ~ 0-20vol% O ₂ : 0-10/25vol%
繰返し性	±0.5%フルスケール以内
ドリフト	ゼロ : ±1%フルスケール/週以内 スパン : ±2%フルスケール/週以内
直線性	±1%フルスケール以内
応答時間	NO _x , CO, CO ₂ , O ₂ : 100秒以内 SO ₂ : 240秒以内 (装置入口からガスを流し90%応答を示す時間)
伝送出力	4-20mA DCまたは0-16mA DC 最大10チャンネル絶縁出力



Fig. 7 Continuous gas analyzer NSA-308

3.3.3 酸素計

環境計器としてNO_xを測定する場合、式(4)のようにO₂の値で補正された換算NO_xで規制されているため、酸素濃度の測定は必須となる。

$$C = \left[\frac{21 - O_n}{21 - O_s} \right] \times C_s \quad (4)$$

C : 換算NO_x値 C_s : NO_x測定値

O_s : O₂測定値

O_n : 大気汚染防止法で定められた発生源ごとの基準残存酸素濃度

O₂計は燃焼管理用途においても重要な計測器であり、下記の測定原理がある。

- ・ 磁気式
 - └ 磁気風式
 - └ 磁気力式 (ダンベル式, 磁気圧式)

- ・ 電気化学式
 - └ ジルコニア式
 - └ ガルバニ電池式

磁気式の酸素計は、酸素の常磁性が他のガスに比べて非常に大きいという性質を利用して測定する。

磁気風式酸素計は、可動部がないため振動に強く、耐久性、安定性に優れた特長があり、弊社では定置型分析計で採用している。

図8に磁気風式酸素計の測定原理を示す。分析部には、測定用と比較用の2つの小室(チャンバ)があり、各々に熱線素子が挿入されており、測定側のみ永久磁石による強い磁場に置かれている。測定側では酸素分子を含む試料ガスが磁場に引き寄せられ、磁気風と呼ばれる対流が生じ、熱線素子を冷やしてO₂濃度に応じた抵抗値変化が生じる。比較側では、自然対流のみが生じる。測定側と比較側の2つの熱線素子は、固定抵抗とともにホイートストンブリッジ回路を構成しており、熱線素子の抵抗変化を不平衡電圧として検出し、O₂濃度を出力する。

Table 6 Advantage of magnetic wind type O₂ analyzer

磁気風式酸素計の特長	
1	耐食性があり、可動部がなく、堅牢
2	安定性が良い

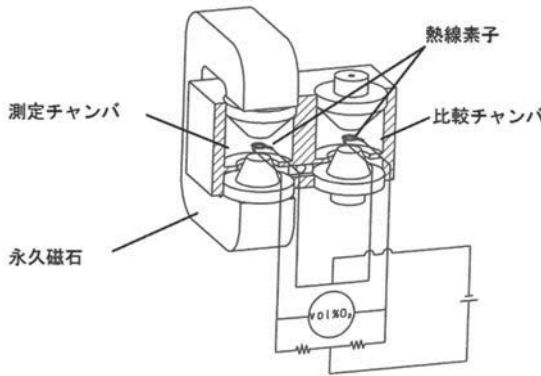


Fig. 8 Principle of O₂ analyzer using magnetic wind method

3.3.4 ダスト計

固定発生源から排出されるダストは、大気汚染防止法により、JIS Z8808に定める手分析による測定が義務付けられている。⁽¹¹⁾しかしダストの連続測定は集塵装置の監視と省エネ運転のために重要であり、連続測定可能な自動計測器が広く用いられている。2013年にダスト濃度の連続測定方法を規定したJIS Z8852が制定されている。おもな測定原理には下記がある。

- ・ 光散乱式
- ・ 光透過式
- ・ 摩擦静電気検出式

4. おわりに

大気汚染防止法が1968年に制定されてから、約半世紀が経過した。この間、燃焼技術や排煙脱硫、脱硝装置などの技術改良が進み、SO₂とNO_xの排出濃度が低下するとともに、連続排ガス分析計も高感度化や高機能化などの改良が進められてきた。東日本大震災以降、火力発電の重要性が一層増し、排気ガスを監視する連続排ガス分析計に対しても、更に高い信頼性が求められている。メンテナンス性を高め、ユーザーが負担なく安定した計測ができるよう、今後ともガス分析計の改良に努める所存である。

参考文献

- (1) 下谷隆雄, 河合広, 高田修嗣, ボイラ排ガスにおけるガス分析計の役割, 島津評論, Vol. 53, No. 3.4 (1996), pp. 217-222.
- (2) 高田修嗣, 加賀美守男, 矢田勝利, 電気集塵装置出口におけるNH₃濃度測定技術, 島津評論, Vol. 56, No. 3.4 (2000), pp. 105-109.
- (3) JIS K0095:1999 排ガス試料採取方法.
- (4) JIS B7982: 2002 排ガス中の窒素酸化物自動計測システム及び自動計測器.
- (5) JIS B7981:2002 排ガス中の二酸化硫黄自動計測システム及び自動計測器.
- (6) JIS B7983:1994 排ガス中の酸素自動計測器.
- (7) JIS B7993:2008 試料非吸引採取方式分析計による排ガス成分の自動計測システム.
- (8) JIS Z8852:2013 排ガス中のダスト濃度の連続測定方法.
- (9) 田辺亮, 三浦宏文, 松久浩明, 小森詳弘, 神吉良英, 煙道排ガス用化学発光式NO_x計NOA-308Dxの開発, 島津評論, Vol. 53, No. 3.4 (1996), pp. 223-228.
- (10) 平岡秀介, 荒谷克彦, 松久浩明, 村上博司, 神吉良英, 煙道排ガス用多成分ガス分析計NSA-308, 島津評論, Vol. 53, No. 3.4 (1996), pp. 229-235.
- (11) JIS Z8808:2013 排ガス中のダスト濃度の測定方法.

特集：エミッション低減技術と計測技術

煙道排ガス中NO_x・O₂・NH₃の高精度測定技術とENDA-9000シリーズの紹介 High Precision Measurement Technology of NO_x, O₂, NH₃ in Stack Gas and Introduction of ENDA-9000 Series



阪倉 誠司^{*1}
SAKAKURA Seiji



石川 浩二^{*1}
ISHIKAWA Koji



井ノ上 哲志^{*1}
INOUE Satoshi



秋山 重之^{*1}
AKIYAMA Shigeyuki

キーワード：流体変調方式，非分散型赤外線吸収方式，磁気圧力方式，化学発光法，アンモニア測定法
Fluid Modulation Method, Non-dispersive Infrared Analyzer, Magnetic Pressure Type Oxygen
Analyzer, Chemiluminescence Analyzer, Ammonia Measurement Method

1. はじめに

日本では1950年代から四日市ぜんそくなど公害問題が表面化するなかで、1962年に初めて大気汚染防止を定めた「ばい煙規制法」が制定された。同年、当社は初めて工場や事業者向けに二酸化硫黄（SO₂）分析装置の提供を開始した。その後、光化学スモッグの原因物質となる窒素酸化物（NO_x）や一酸化炭素（CO）などに測定成分を拡充し、環境監視体制の構築に貢献してきた。

煙道排ガス分析装置はボイラーや燃焼炉など、固定発生源の煙道排ガスに含まれるNO_x、SO₂、CO、酸素（O₂）の濃度を高精度に連続測定を行うのに用いられている。煙突から放出される大気汚染物質の濃度管理だけでなく、燃焼管理やボイラーの制御、排ガス中のNO_xやSO₂を低減するための脱硝・脱硫装置の制御にも用いられる。今後火力発電所では高効率な発電のため、石炭火力では最新の発電技術である、高温・高圧の蒸気でタービンを回転させる「超々臨界圧（USC：Ultra Super Critical）」から、さらに蒸気の温度と圧力を引き上げた方式の「先進超々臨界圧（A-USC：Advanced-Ultra Super Critical）」の導入が見込まれており、蒸気の温度は600℃から700℃に、圧力は25MPaから35MPaにそれぞれ引き上げられる⁽¹⁾。また石炭を高温高圧下で酸化剤と反応させ、石炭ガスを発生させる「石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated coal Gasification Combined Cycle）」の開発も進んでいる。LNG火力では現在主流のガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた「複合発電（コンバインドサイクル）方式」から、発電に伴う排熱を回収して高温の蒸気ガスを発生させてター

ビンの回転に再利用する「高湿分空気利用ガスタービン（AHAT：Advanced Humid Air Turbine）」の実用化が見込まれている。これらの次世代火力発電の導入により、ボイラー内をさらに高温高圧に制御する技術の導入が本格化するとされている。これに伴い煙道内のガス圧力変動も大きくなり、煙道排ガス分析装置にも、この圧力変動時においても高精度な分析装置が求められている。

図1の煙道排ガス分析装置ENDA-9000シリーズは火力発電所向けに特化した煙道排ガス分析装置で、業界最高の低濃度分析かつ安定稼働に最適な機種である。サンプルガス採取点における排ガス性状の多様化、例えば圧力変動に対応するため、業界に先立ちサンプルガス圧力変動の許容幅を拡大（当社従来製品比2倍）した。またカラー液晶タッチパネル採用、部品寿命の監視機能、トレンドグラフ表示、自己診断機能、データロギング機能



Fig. 1 External appearance of ENDA-9000 series

原稿受付 2017年3月14日

*1 株式会社堀場製作所 環境プロセス開発部
〒520-0120 大津市苗鹿1-15-1
seiji.sakakura@horiba.com

など、操作性・メンテナンス性に改善を加えた。

2. 煙道排ガス分析装置ENDA-9000シリーズの NO_x・O₂・NH₃の測定技術および特徴

煙道排ガス分析装置ENDA-9000シリーズは主に電力会社の火力発電所向けに特化した高性能・高感度・高機能の分析装置である。各測定成分の検出方法には流体変調方式を用い、サンプルガスと比較ガス（計装エアまたは精製エア）を交互（1 Hz周期）に検出器セルに導入し、常にゼロ点を比較測定することでゼロドリフトが発生せず、長期的に安定した連続測定を実現している。また計量法検定取得可能な窒素酸化物濃度計は、非分散形赤外式（Non-dispersive Infrared Gas Analyzer：NDIR法）と化学発光式（Chemiluminescence Analyzer：CLA法）があるが、NDIR法の高感度NO_x計では最小10ppmから計量法検定取得可能となっており、さらにレンジ比も従来の最大10倍から20倍に向上し、これまで測定できなかった燃焼開始時の不安定なガス状態で発生する高濃度（～300ppm）のNO_xも測定可能となった。ENDA-9000シリーズの主な仕様を表1に示す。

2.1 流体変調方式NDIR法を用いたNO_xの測定原理

NO_xは主に一酸化窒素（NO）と二酸化窒素（NO₂）であり、高温燃焼の際に燃焼用空気中の窒素と酸素が酸化反応して生成するものがほとんどである。大気中の窒素酸化物の多くは、自動車排ガス、燃焼炉排ガスに含まれているものが大気中に拡散され、一次汚染物質として直接人体に影響を及ぼす。さらに、二次汚染物質を大気中に生成すると、光化学スモッグ発生の要因となる。昭和48年（1973年）5月に、NO₂の環境基準が制定され、続いて同年8月に工場、ボイラー、加熱炉等の固定発生源に対するNO_x排出基準の設定、およびその規制が開始された。昭和52年12月にはJIS B7982「排ガス中の窒素酸化物自動計測システム及び自動計測器」が制定され、平成14年（2002年）に改訂された。⁽²⁾

ENDA-9000シリーズではNO_x・SO₂・COの測定にはNDIR法を採用し、ENDA-2000シリーズ⁽³⁾でも採用され

た流体変調方式を継承している。このNDIR法は図2に示すように、連続的に一定周期で流路を切り替える電磁弁によりサンプルガスと比較ガスを交互に一定流量で測定セルに導入することにより、サンプルガスそのものの赤外吸収によって生じる変調効果を利用したものである。赤外光源から放射される赤外線は、測定セルを通過して測定対象成分に応じたガスが一定条件で封入された検出器に入射する。測定セルに比較ガスが流入しているときには測定成分による吸収のないエネルギーが検出器に到達し、測定セルにサンプルガスが流入しているときにはサンプルガス中の測定成分により減衰（吸収）されたエネルギーが検出器に到達する。したがって検出器に入射する赤外光量は、サンプルガス中の測定成分によって吸収されるエネルギー分だけ変化する。

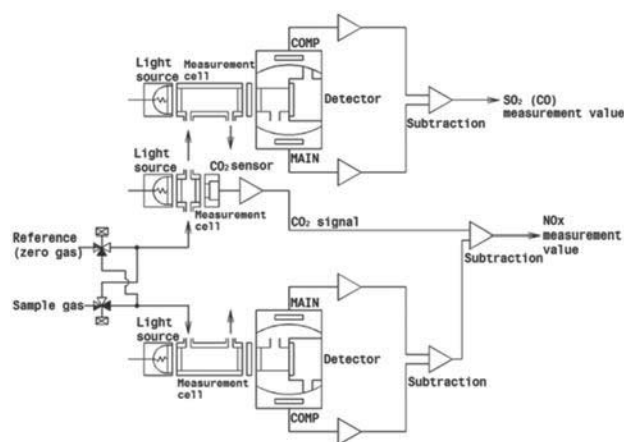


Fig. 2 Detection method of fluid modulation type NDIR

検出器には、受光室のガスの圧力変化を検出する可動膜が設けられており、測定セルの比較ガス流入時とサンプルガス流入時との赤外吸収エネルギーに差が生じると、受光室で吸収されるエネルギーが異なり、その差に相当する分だけ圧力差として可動膜に変位を与える。その変位を電気信号として増幅、出力する。そのため、測定セル内での測定成分のガス濃度に変化がないかぎり、本質

Table 1 Specification of ENDA-9000 series

Measurement Component	NO _x (High sensitivity)	NO _x	SO ₂	CO	O ₂	NO _x /NH ₃
Measurement Method	NDIR	NDIR	NDIR	NDIR	MPA	CLA
Range	10-500ppm	50-5000ppm	50-5000ppm	50-5000ppm	5-25vol%	10-200ppm
Range ratio	Max 20 (≤300ppm)	Max 10	Max 10	Max 10	Max 5	Max 10
Repeatability	± 0.5% of full scale					
CO ₂ interference correction	Continuous correction by CO ₂ detector		-	-	-	-
O ₂ correct	○	○	○	○	-	○
Allowable range of sample gas pressure fluctuation	± 10kPa					

的に膜の変動が生じないので、サンプルガスラインおよび比較ガスラインに同一ガス（例えば本装置のように比較ガス）を流す場合、またはガスを停止した場合も検出器の出力はゼロとなり、ゼロドリフトは原理的に発生しない。また、複合検出器として用いている図3の2室直列受光室タイプは、前室（MAIN 側）では測定成分（干渉成分を含む）を検出し、後室（COMP 側）では主に干渉成分を検出し、両信号を用いて干渉補正を行うことで干渉成分の影響の少ない測定成分信号が得られる。NO_x測定ではNO₂をNO_xコンバータによりNOに還元して測定を行うが、従来NDIR法によるNOの測定では干渉成分として水および二酸化炭素（CO₂）の影響を受けるため、測定誤差要因となっていた。本装置では水分干渉は上記2室直列受光室タイプで、またCO₂の干渉については、独立したCO₂測定用検出器でサンプルガス中の濃度を検出してリアルタイムで補正を行い、測定精度の向上を図っている。以上により、複雑な検出器の光学調整などを必要とせずに、干渉影響の少ない安定な測定信号が得られる。

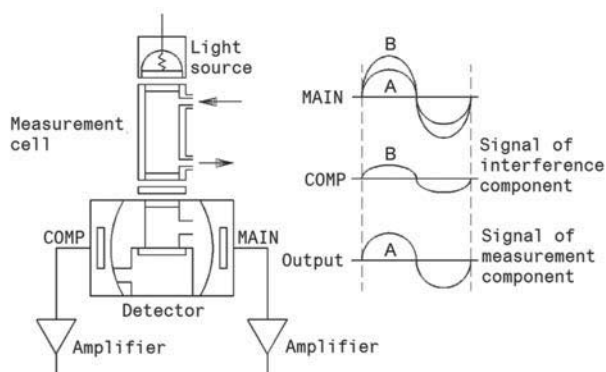


Fig. 3 Correct calculation of moisture interference of NDIR

2.2 磁気圧力方式酸素計（Magneto Pneumatic oxygen Analyzer : MPA）の測定原理

固定排出源からの排ガス測定では、煙道の経路途中で空気が流入した場合、希釈されて測定対象ガスの濃度が低く測定されてしまう。このため、固定発生源から排出されるNO_xの排出濃度測定においては、排ガス中のO₂濃度により補正を行うことが大気汚染防止法の施行規則に掲げられている（O₂換算）。このため一般に排ガス中のNO_xの測定では、O₂濃度を併せて測定する。O₂換算の演算式は式(1)より算出する。

$$O_2 \text{換算濃度 [ppm]} = \frac{2I [\text{vol}\%] - O_2 \text{設定値} [\text{vol}\%]}{2I [\text{vol}\%] - O_2 \text{測定値} [\text{vol}\%]} \times NO_x \text{測定値 [ppm]} \quad (1)$$

O₂設定値は、燃焼施設や燃料によって定められており、ENDA-9000シリーズでは2種類のO₂設定値を設定・選択が可能である。

O₂測定には図4のMPA法が用いられている。不均一

な磁界中にO₂（常磁性の気体）が存在すると、O₂は磁界の強い方に引きつけられ、その部分の圧力が上昇する。一般にその時の圧力上昇ΔPは式(2)で表すことができる。

$$\Delta P = 1/2 H^2 \cdot X \cdot C \quad (2)$$

H：磁界の強さ

X：常磁性体（酸素）の磁化率

C：常磁性（酸素）の濃度

この時の圧力上昇を、非磁性体の窒素を使って磁界外に圧力上昇を取り出し、この圧力変化を可動膜で検知して電気信号に変換する。信号を安定に取り出し伝送させるために、電磁石を励磁し、交流信号で処理している。このため、サンプルガス中にO₂が存在しない場合、電気信号はゼロとなり、ゼロドリフトも発生しない。

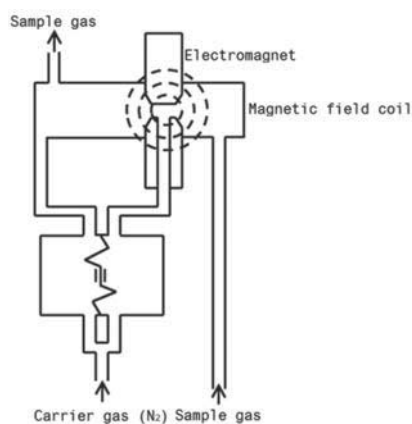


Fig. 4 Schematic of MPA

2.3 流体変調方式CLA法を用いたアンモニアの測定原理

アンモニアは大気汚染防止法の特定物質や悪臭物質として規定されている。大気中に排出されると硫酸アンモニウム等のエアロゾルを形成し、これらが核となり大気中微小粒子が生成することが知られている、大気汚染物質の一つである。

現在火力発電所などで脱硝装置として主に使用されている選択的触媒還元脱硝装置（SCR）や非触媒還元脱硝装置（SNCR）では、反応剤としてアンモニアが使用されている。例えば石炭燃焼排ガス処理システムでは、燃焼排ガス中のNO_x（90%以上はNO）はSCR 部分で注入されたアンモニアと触媒反応し、窒素と水に還元される。NO とアンモニアは理論的には当量で反応するが、通常注入するNH₃の量はNO_x の濃度よりモル比で1以下（0.8～0.9）となるよう不足気味に加える。NO_x中のNO₂濃度が高い場合は過剰に加える。未反応のアンモニアはSCR 出口よりリークアンモニアとして排出される。このリークアンモニアの量が多いと、排ガス出口に設置されているエアヒーター設備にて排ガス中のSO₂と反応し、硫酸アンモニウムが生成し、熱交換器の効率が低下する。また悪臭の問題もある。そのため、リークアンモニアの濃度は可能な限り低く制御される。またア

ンモニアは単価が高いことから、その使用量を最小限に制御することでコストダウンにもなる。以上の理由によりリークアンモニア濃度を適切に管理することは、SCR脱硝装置を管理する上で重要である。⁽⁴⁾

アンモニア (NH₃) の測定原理には、①間接測定法 (還元触媒反応または酸化触媒反応とNO_x 測定原理を組み合わせた構造)、②直接測定法 (紫外線吸収法、イオン電極法、レーザー光源赤外線吸収法) などがある。

発電所におけるNH₃測定はリークアンモニアの監視に使用されており、アンモニア注入量の制御には使用されていない。NH₃の測定には①の間接測定法を用い、触媒変換プローブを煙道内もしくは煙道吸引出口付近に設置し、排ガスを吸引後直ちにNH₃をN₂またはNOに変換するため、採取配管内でのNH₃の損失を防ぐことができる。またCLA法によるNO_x測定を用いることで、NO_xと同時にリークアンモニアの測定が可能となる。

1) CLA法の原理

サンプルガス中のNOにオゾン (O₃) を反応させると、式(3)のようにNOの一部が酸化されて二酸化窒素 (NO₂) になる。生成したNO₂の一部は励起状態 (NO₂^{*}) になっており、式(4)のように基底状態に移るときに光を放射する。この現象が化学発光である。



この反応は極めて速く、かつNOのみが関与し、NOが低濃度であれば、発光光量はその濃度に比例する。この反応を利用してNO濃度を測定するのが化学発光法である。ENDA-9000ではサンプルガス中のNO₂をNO_xコンバータでNOへ還元する。また計装エア中のO₂をオゾン発生器にてO₃に変換し、反応チャンバーに導入する。反応チャンバー内ではサンプルガス中のNOとO₃の反応が起こり、反応に伴う発光がフォトダイオードやフォトマルチプライヤーで検出される。

2) 流体変調方式CLA法

ENDA-9000では図5に示すような連続的に一定周期で切り替わる電磁弁1により、サンプルガスを反応チャンバーに導入する場合と導入しない場合 (ゼロ) による流体変調方式を採用している。これはサンプルガスそのものの化学発光によって生じる変調効果を利用したものである。CLA法は、干渉成分として水分 (H₂O) およびCO₂の影響を受ける。本装置では、水分干渉影響は電子冷却器により除湿することで低減している。CO₂干渉 (クエンチング現象) は、サンプルガスを電磁弁前段で計装エアにて希釈し、反応チャンバー内にオゾンを導入してさらに希釈することで、干渉自体を小さくし測定精度の向上を図っている。NH₃の測定原理では、分析計に導入する前に触媒を用いてNH₃を酸化、または還元し、NO_xライン (触媒を通過しないライン) とNH₃ライン (触媒を通過するライン) に分け、両ラインの差をNH₃

濃度としている。このことによりNO_xとNH₃を同時に測定可能となるだけでなく、図5の電磁弁2にて連続的に一定周期でNO_xラインとNH₃ラインを切り替え、1台の検出器でNO_xとNH₃の測定を行うことで検出器間の器差やドリフトに影響されず、高精度かつ安定して測定を行うことが可能である。

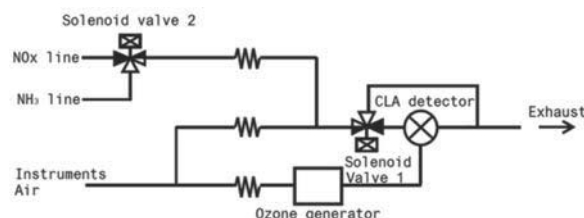


Fig. 5 Gas flow of NO_x / NH₃ measurement by dual stage fluid modulation CLA

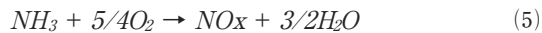
3) 間接測定法によるNH₃の測定原理

間接測定法によるNH₃の測定には酸化触媒法と還元触媒法があり、それぞれの特徴を表2に示す。

Table 2 Measurement principle of NH₃ ⁽⁵⁾

	Oxygen catalyst	Reduction catalyst
NH ₃ concentration calculation	[NH ₃] = [NH ₃ line (NO _x -NH ₃)] - [NO _x line (NO _x)]	[NH ₃] = [NO _x line (NO _x)] - [NH ₃ line (NO _x -NH ₃)]
Material	Platinum	Titanium oxide
Shape	Granular	Honeycomb
Temperature	Approx 700°C	Approx 350°C
Advantage	-Not depend on the concentration ratio of NO _x and NH ₃ in the sample gas.	-Long life Catalyst -Less catalytic efficiency decrease due to dust -Since the catalyst temperature is low, SO ₂ is not easily oxidized
Disadvantage	-When SO ₂ concentration in the sample gas is high, a part of SO ₂ is oxidized to SO ₃ by the oxygen catalyst. -When moisture and NH ₃ concentration are high and gas temperature is low, corrosion of metal parts and piping clogging occurs due to sulfuric acid and ammonium sulfate.	-When NH ₃ concentration in the exhaust gas is higher than NO _x concentration, accurate measurement can not be performed.

酸化触媒法は、分析計に導入する前に式(5)に示す触媒上での酸化反応を利用している。



したがって、触媒を通過するNH₃ラインのNO_x濃度と、触媒を通過しないNO_xラインのNO_x濃度との差がNH₃濃度に相当する。

$$[(\text{NO}_x + \text{NH}_3)] - [\text{NO}_x] = [\text{NH}_3] \quad (6)$$

前処理装置としての構造は、図6のように触媒を充填したNH₃ラインと充填しないNO_xラインで構成されている。触媒部分は約700℃で温調されている。

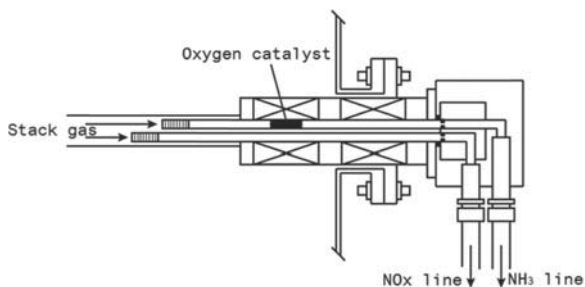
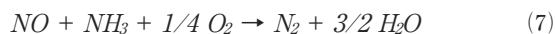


Fig. 6 Schematic diagram of oxidation type catalyst unit

還元触媒法は、ボイラーやガスタービンの脱硝設備に使用されている選択接触還元触媒法の原理を使用している。すなわち、分析計に導入する前に式(7)および式(8)に示すような触媒上での脱硝反応を利用している。



式(7)および式(8)ともにNH₃はNOおよびNO₂と1:1で反応するため、NH₃濃度と同濃度のNOが減少する。したがって、式(9)の通り触媒を通過するNH₃ラインのNO_x濃度と、触媒を通過しないNO_xラインのNO_x濃度の差がNH₃濃度に相当する。

$$[\text{NO}_x] - [(\text{NO}_x - \text{NH}_3)] = [\text{NH}_3] \quad (9)$$

前処理装置としての構造は、図7のように触媒を充填したNH₃ラインと充填しないNO_xラインで構成されている。触媒部分は約350℃で温調されている。

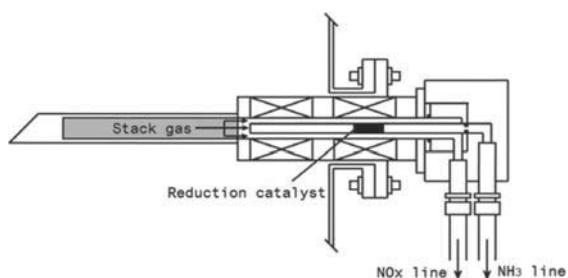


Fig. 7 Schematic diagram of the reduction type catalyst unit

4) 環境負荷の低減とCLA法のNO₂測定への応用

CLA法に必要なオゾンの発生装置には、これまでの水銀を含む紫外線ランプから、沿面放電式に変更することで環境への負荷を低減した。

また、このCLA法を用いたNO_x・NH₃の測定方法を応用することで、NO_x中のNO・NO₂それぞれの濃度測定も可能となる。サンプルガス中のNO₂をNO_xコンバータでNOに還元し、NO_x濃度を求めるラインと、NO_xコンバータを通さずNO濃度を求めるラインを設け、NO_xライン(NO+NO₂)とNOラインの差量からNO₂濃度を算出する。

$$[(\text{NO} + \text{NO}_2)] - [\text{NO}_x] = [\text{NO}_2] \quad (9)$$

3. ENDA-9000シリーズの改良点の概要と特徴

3.1 サンプルガスの圧力変動の対策

ドレン処理機構にチュービングポンプを採用し、サンプルガスの圧力変動の許容範囲を従来機比2倍の±10kPa以内に拡大した。煙道内の排ガス圧力が大きく変動する場合でも、サンプルガスの圧力変動の許容範囲を拡大させたことで安定したサンプリングを維持でき、高精度な連続測定を実現した。

チュービングポンプは各ドレンラインに設けるのではなく、図8のようにシール機構を持つ1つのチュービングポンプで複数ラインのドレンを処理できるよう工夫した。またポンプは連続動作ではなく、発生する最大量のドレンを処理するのに十分な時間のみ動作する間欠運転(5分に1回10秒間動作)とすることで、ランニングコスト低減やメンテナンス性にも考慮した設計とした。ドレン処理ラインには安全ポットの他に異常を検知するフロートスイッチを設けており、異常時にはチュービングポンプが連続動作することでドレンを速やかに処理し、指示突変など測定値への影響や装置へのダメージを未然に防止するための安全機構も備えている。

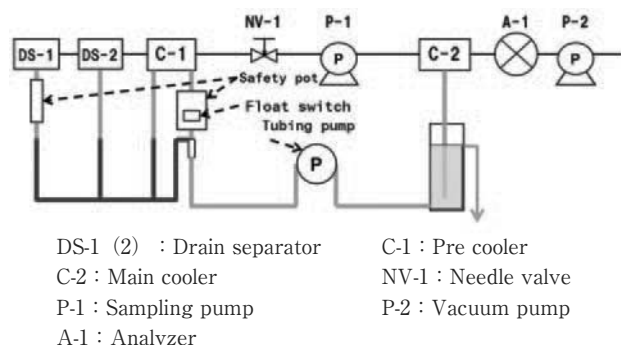


Fig. 8 Drain processing mechanism of ENDA-9000 series

3.2 3段除湿機構を継承したサンプリング系と半透膜除湿器の性能管理

NDIR法を用いたNO_x計では、水分が最大の干渉成分となる。ENDA-9000シリーズでは高いドレン処理能力

を有し、ドレン中へのNO_xやSO₂の溶解損失を低減させるため、ドレンセパレータ（DS：空冷ファンによる雰囲気露点）・プリクーラー（前置電子冷却器C-1：15℃露点）・メインクーラー（主電子冷却器C-2：2.5℃露点）により段階的に除湿を行う3段階除湿機構⁵⁾をENDA-2000シリーズから継承するだけでなく、電子冷却器を改良し、熱交換部の容積を従来よりも小さくし、また、断面積も小さくし流速を上げることでSO₂など測定成分ガスのドレンへの溶解を低減している。

高感度NO_x計ではより水分干渉影響を低減するために、メインクーラーの代わりに半透膜を用いた除湿器を採用した。-30℃という露点温度により可能な限り水分干渉を低減することで高感度を実現している。また、半透膜除湿器出口の露点温度の変化は測定精度に影響を与える場合がある。そのため半透膜除湿器の性能チェックを行うシーケンスおよび水分干渉補正用検出器（COMP側）の信号のみを濃度演算することにより、容易に除湿能力のチェックが可能となっている。

3.3 カラー液晶タッチパネル採用による視認性・操作性の向上

ENDA-9000シリーズでは、カラー液晶画面・日本語表示・タッチパネル採用などにより、誰にでも取り扱いが可能な、感覚的にわかりやすい画面表示とスムーズな画面操作を実現した。



Fig. 9 Measurement screen of ENDA-9000 series

3.4 メンテナンス性の向上

従来機よりもフィルターやポンプなどの部品配置の見直しによる作業性の向上やアワーメータ搭載による部品寿命の監視機能、ユニット構成での修理による作業時間の短縮などにより、日常点検から定期点検まで、メンテナンス性の向上を実現した。

3.5 これまでの自己診断機能に加えデータロギング機能やトレンドグラフ表示を搭載

流量や装置内や電子冷却器の温度、サンプル圧力など、測定に必要な装置内部の各種データを監視し、装置の正常動作の確認や故障発生時の通知を行う自己診断機能に加え、上記各種データおよび検出器信号値を最大7日分保存可能なデータロギング機能を搭載。さらに測定状況

をリアルタイムで表示できるトレンドグラフ表示機能を搭載することにより、故障発生時にこれまでよりも早期に原因の特定や、原因に応じた適切な対処が可能となり、装置のダウンタイムを可能な限り低減した。

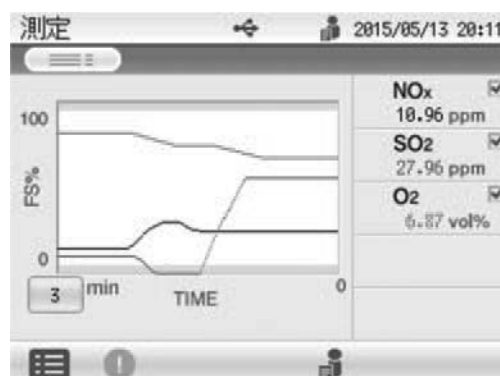


Fig. 10 Trend graph display screen

4. 最後に

国内の火力発電は、2013年以降発電量全体の約90%（2010年は同約60%）を占める重要な電力源である。電力小売りの自由化や電源構造の見直しを背景に、発電コストの低減や排出ガス中有害物質の削減が求められ、発電設備の刷新や発電所オペレーションの効率化が進められている。世界最先端とされる日本の火力発電技術では、発電システム内の圧力や温度が一層高まり、連続稼働することで高効率発電を実現している。この中で煙道排ガス分析装置は、発電所の高度なオペレーションに用いられる正確なデータの提供と安定稼働が求められる。

ENDA-9000シリーズでは、分析装置として要求される性能・信頼性・安定性・メンテナンス性などの向上だけでなく、今後の火力発電所の排ガス性状の多様化を見据え、業界に先立ち圧力変動の許容範囲を大幅に強化した。

今後とも時代のニーズに応じた分析装置の開発・販売を通じ、火力発電所の発電コスト削減や電力の安定供給など、エネルギー産業の事業基盤の強化の貢献に努めたい。

参考文献

- (1) 宮池潔, 電力エネルギー供給の将来動向と次世代火力発電技術, 東芝レビュー, Vol. 71, No. 6 (2016), pp. 2-7.
- (2) 日本電気計測器工業会, 環境計測器ガイドブック (第6版) (2006), p. 19, 日本電気計測器工業会.
- (3) 藤原雅彦, 嘉田教夫, 煙道排ガス分析装置 ENDA-2000シリーズ, Readout, No.9 (1994), p. 77-84.
- (4) 社団法人産業環境管理協会, 株式会社堀場製作所, 排ガス中のアンモニア自動測定法に関する国際標準化 成果報告書 (2012), pp. 10-11, 産業環境管理協会.
- (5) 社団法人産業環境管理協会, 株式会社堀場製作所, 排ガス中のアンモニア自動測定法に関する国際標準化 成果報告書 (2012), pp. 29-30, 産業環境管理協会.

リング型プラズマアクチュエータを用いたタービン翼列の 漏れ流れ制御における先端エッジ形状の影響

Effects of Tip Edge Shapes on Turbine Tip Clearance Flow Control Using Ring-type Plasma Actuators

松沼 孝幸*¹
MATSUNUMA Takayuki

瀬川 武彦*¹
SEGAWA Takehiko

ABSTRACT

Ring-type dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators have been developed to facilitate active control of the tip leakage flow of a turbine rotor. For the fundamental experiments using flat plates with 1 mm tip clearance, particle image velocimetry (PIV) was used to obtain velocity distributions near the plate tip region. In this study, effects of tip shapes of the flat plate were examined using four plates with flat and flat edges (FF), flat and round edges (FR), round and flat edges (RF), round and round edges (RR). The forcibly-induced tip leakage flow was decreased by means of the plasma actuator flow control at constant input peak-to-peak voltage, 12.8 kV, and various frequencies from 10 kHz to 16 kHz. The most effective tip shapes were the FF-type under the frequency of 14 kHz, and the RR-type for the higher frequency of 16 kHz.

Key words : プラズマアクチュエータ, 誘電体バリア放電, 能動制御, タービン, 翼先端隙間, 漏れ流れ, 先端形状

Plasma actuator, DBD, Active flow control, Turbine, Tip clearance, Leakage flow, Tip shape

1. はじめに

誘電体バリア放電 (DBD) プラズマアクチュエータは、絶縁体を挟んだ電極間に高周波の高電圧を加えることにより局所的にプラズマを発生させ、表面に沿った流れを誘起することができる。機械的な可動部を持たず、構造が簡単かつ小型軽量であるため、次世代の能動制御デバイスとして有望視され、近年盛んに研究されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。現状では、プラズマアクチュエータが誘起する流体力は他の能動制御デバイスと比較して低いことが課題であるが、電極構造や印加電圧波形の工夫により着実に改善・進歩を遂げている。例えば、三電極 (Trielectrode, TED) プラズマアクチュエータでは、露出電極より下流側にバイアス電圧を印加する電極を追加し、推力の増加や誘起ジェット噴出方向の制御に成功している^{(4),(5)}。また、プラズマアクチュエータには両極性の交流電圧を印加することが一般的であるが、DC電源を 1 kHz 程度の高周波で ON/OFF することで単極性パルス電圧を印加し、従

来の数十倍の推力が得られるという最新の報告⁽⁶⁾があり、プラズマアクチュエータの飛躍的な性能向上が期待されている。

一方、圧縮機やタービンは、ガスタービンの主要な構成要素として、航空推進用ジェットエンジンや発電用ガスタービンに全世界で広範に利用されているため、わずかな性能向上でも高い省エネルギー効果が期待できる。特に、タービン翼列の翼先端から発生する漏れ流れ (チップクリアランス流れ) は、空力性能を低下させる大きな原因の 1 つであるため、これまでの多くの研究が行われており⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾、タービン翼列の漏れ流れを抑えるためにプラズマアクチュエータを用いる研究も行われている⁽¹⁰⁾。圧縮機翼列でも、サージマージン改善や剥離抑制にプラズマアクチュエータを適用する研究も行われ⁽¹¹⁾、遷音速圧縮機でも 4 % のサージマージン改善が報告されている⁽¹²⁾。

産総研では、新開発の「リング型プラズマアクチュエータ」(図 1) を用いて、タービン動翼の漏れ流れを抑制する実験を行っている。前報^{(13),(14)}では、環状タービン動翼と単独翼の実験で、プラズマ発光と漏れ流れ低減効果を調べた後、平板を用いた 2 次元モデルで 1 m/s から 10 m/s の範囲の漏れ流れを抑制できることを実証した。

原稿受付 2016年4月19日

査読完了 2017年4月6日

* 1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
省エネルギー研究部門
〒305-8564 つくば市並木 1-2-1

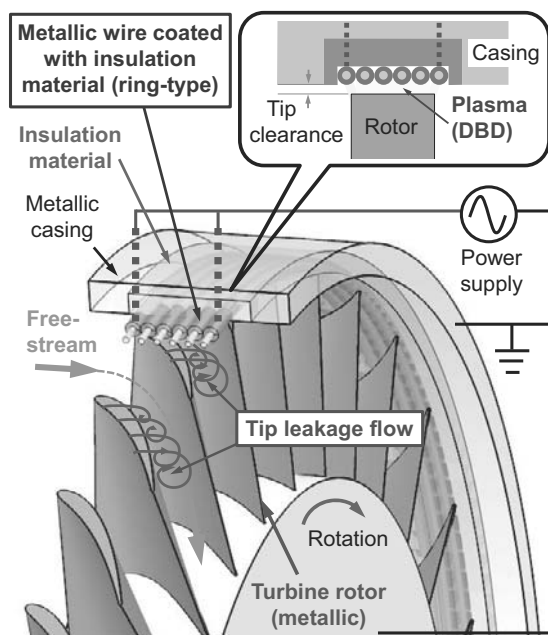


Fig. 1 Ring-type plasma actuator

今回は、平板を用いた2次元モデル実験において、平板先端のエッジを丸めた形状での実験を行い、先端エッジ形状が漏れ流れの抑制効果に与える影響を調べた。この背景として、米ペンシルバニア州立大学で行われたタービン翼の先端形状の影響を調べた研究⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾で、翼負圧面側（漏れ流れの出口側）を面取りした断面形状にすると、漏れ流れが低減したことが挙げられる。リング型プラズマアクチュエータでも、先端形状を変えることにより、正圧面側（入口側）と負圧面側（出口側）のプラズマの強度や空間分布に変化を与え、漏れ流れ低減効果を高められる可能性があることが、本研究を実施する動機となっている。

2. リング型プラズマアクチュエータ

図1に、リング型プラズマアクチュエータの構造を示す。このアクチュエータは、タービン動翼のケーシング（チップ側壁面）内にリング状に設置されるもので、絶縁材料に絶縁被覆ワイヤを埋め込んだ内部構造になっている。タービン動翼・軸・ケーシングなどの風洞全体は金属製であり、全体をグランド電極として接地する。絶縁被覆ワイヤに高周波・高電圧を加えることによって、絶縁被覆ワイヤとタービン動翼先端の間にプラズマ（誘電体バリア放電）が発生し、漏れ流れに体積力を与えることができる。プラズマによって生成される荷電粒子は、場の電界によって力を受け、電気力線に沿って移動する。これらの荷電粒子が存在する微小空間における力の総和として現れる体積力により、翼先端から壁面（絶縁被覆ワイヤ）に向かう流れを誘起するため⁽¹³⁾、漏れ流れに対して直角方向に働く力となり、漏れ流れを抑制する効果を生み出すと考えられる。プラズマは、チップクリアランスの中間部よりも電界が集中する端面に強く発生する

ことから、端面近くでのプラズマ発生が漏れ流れ抑制に大きな役割を果たしている。

3. 実験方法

図2に、平板を用いた基礎実験の概要を示す。吹き出し式小型風洞に接続されたアクリル製の測定部（流路の幅200mm × 高さ200mm × 長さ500mm）の中央にアルミ平板を設置し、下側に1mmの隙間を空けて、チップクリアランスを通る漏れ流れを再現する。流路面積が少なすぎて風洞の流れが不安定になることを防止するため、平板上流の上側にスリットを設けて流れをバイパスさせる。送風機の回転数を900rpmに設定し、チップクリアランスを通過する流速10m/s程度の漏れ流れを作り出す。なお、前報までは平板の上側にあったチップクリアランスを、今回からは下側に移動し、隙間を微調整できる構造に改良している。通常のチップクリアランス流れとは、先端と壁面の上下関係が逆になっていることに注意を要する。下側の壁面には、外径1.3mmの絶縁被覆ワイヤを流れ方向に100本ほど埋め込んだプラズマアクチュエータ（設置面積140mm × 140mm）を設置する。高電圧高周波パルス電源（PSI製、PG-1040F）を用い、アクチュ

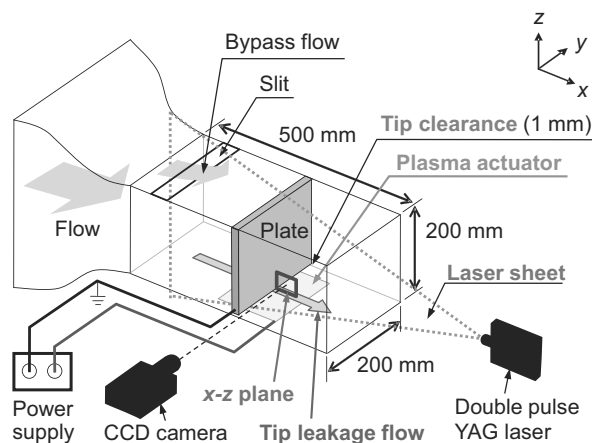


Fig. 2 Measurement system for flat plate with tip clearance

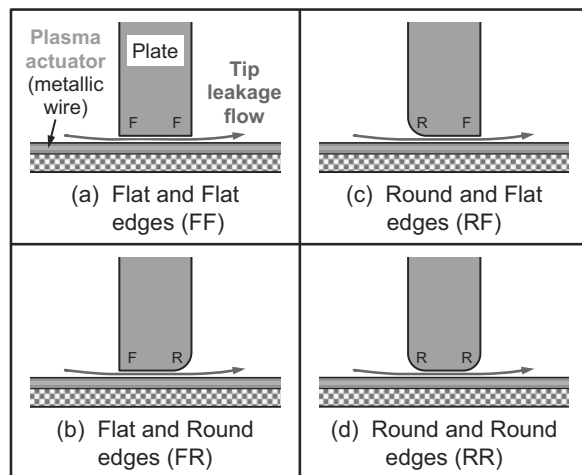


Fig. 3 Tip edge shapes of flat plates

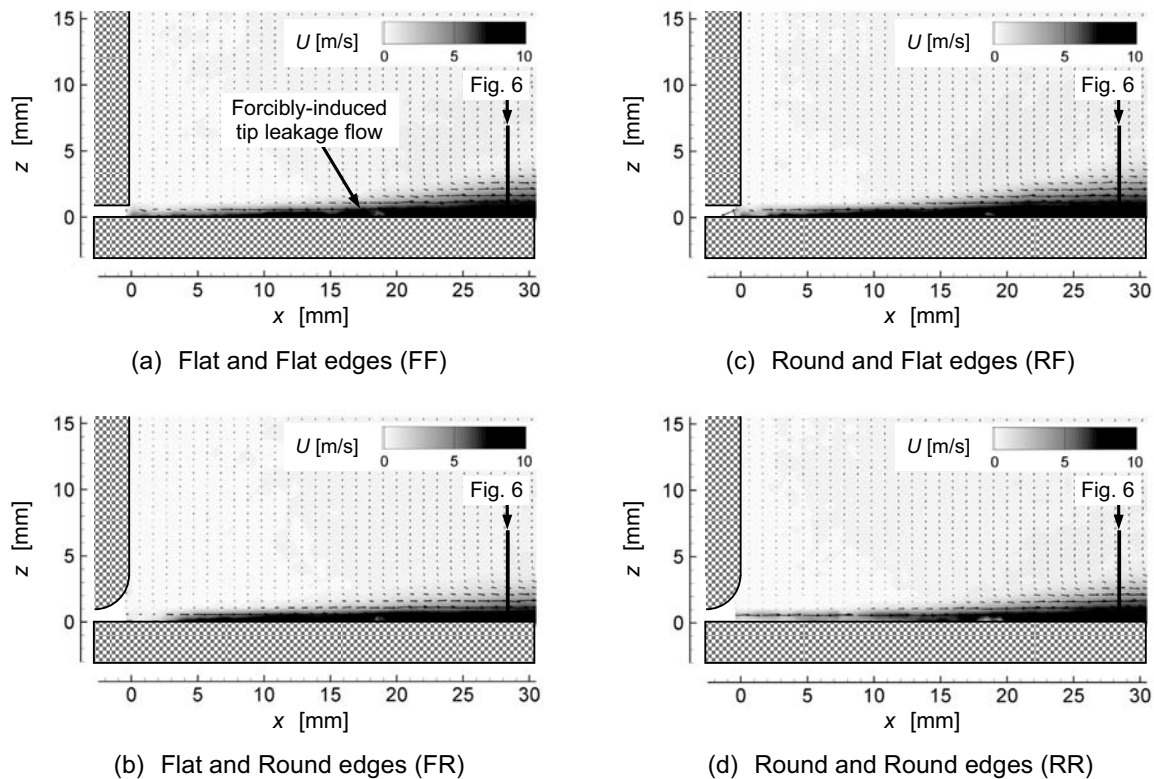


Fig. 4 Time-averaged velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various plate edge shapes (no control)

エータと平板先端の間にプラズマを生成する。前報と同様、印加するpeak-to-peak電圧を本電源の最大値である $V_{p-p} = 12.8\text{kV}$ に固定し、周波数を $f = 10\text{kHz} \sim 16\text{kHz}$ の範囲で変化させることで、投入電力を増加させる。

平板先端付近の x - z 平面の速度場を、粒子画像流速測定法 (PIV) により計測する。PIV計測は、風洞上流から注入したオイルミストを、測定部下流に設置したダブルパルスYAGレーザー (Litron Lasers製, NANO S 30-15 PIV, 15 mJ/pulse) により可視化し、測定部上部に設置したクロスコリレーションカメラ (TSI製, PIV CAM 13-8) により撮影する。瞬時速度分布を200回測定して、平均値を算出する。

図3に、今回の実験で用いた平板の先端形状4種類を示す。平板の厚みはいずれも10mmで、隙間は1mmである。図3(a)は、平らな先端形状 (FF形) で、これまでの実験で使用してきた基本形である。図3(b)は、入口側が平面、出口側が曲面 (FR形)、図3(c)は、入口側が曲面、出口側が平面 (RF形)、図3(d)は、両方を曲面 (RR形) にしたものである (全ての曲面は、 $R = 2.5\text{mm}$ で製作)。これまでの実験から、平面端 (F) の角には電界が集中して強いプラズマが発生することが分かっている。曲面端 (R) には、丸みのために電界の集中が緩和されて弱いプラズマができると考えられる。

4. 実験結果と考察

4.1 漏れ流れ制御における先端形状の影響

4.1.1 漏れ流れへの先端形状の影響

まず、先端形状自体が漏れ流れに及ぼす影響を明らかにする。図4に、制御がない状態における各先端形状での絶対速度分布を示す。チップクリアランス出口から $x = 20\text{mm}$ 付近までの範囲では、漏れ流れが下流よりも低い流速になっている一方、 $x = 20\text{mm}$ より下流では、どの先端形状でも、流速10m/s程度の漏れ流れが徐々に広がっていく様子が観察される。この原因は、出口直後の漏れ流れは幅が狭く速度勾配の大きい剪断流れであるため、PIV計測では空間的・時間的に捉えきれないためと考えられる。

このことを定量的に確認するために、図4の漏れ流れにおける最大流速値の流れ方向への変化を、図5に示す。図中の太い破線は、2次元壁面噴流の最大流速の減衰に関する相関式¹⁸⁾を、本実験データに適用した線である。この図から、流れ方向位置 $x = 10\text{mm}$ 以前では、計測された最大流速は相関式よりもかなり低くなっており、PIV計測で正しい流速を計れていないことが分かる。一方、 $x = 20\text{mm}$ より下流では、どの先端形状でも最大流速が相関式に近い減衰傾向になっており、下流に行くほど漏れ流れが徐々に広がっていく様子をPIVで測定できている。

先端形状の違いによる変化を定量的に観察するため、図4のチップクリアランス出口から28.6mm下流 (図4

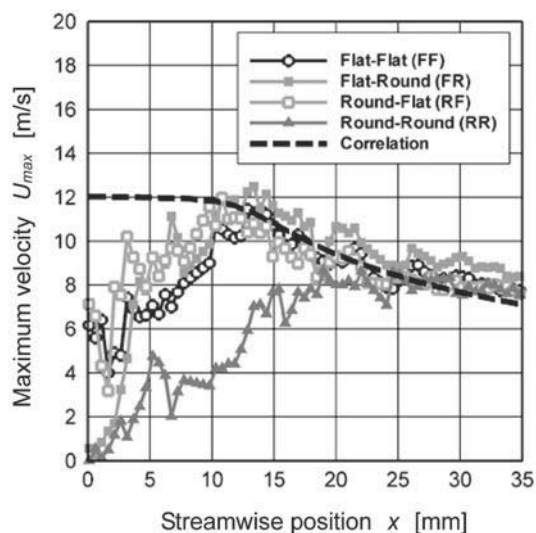


Fig. 5 Streamwise decay of maximum velocity of tip leakage flow (no control)

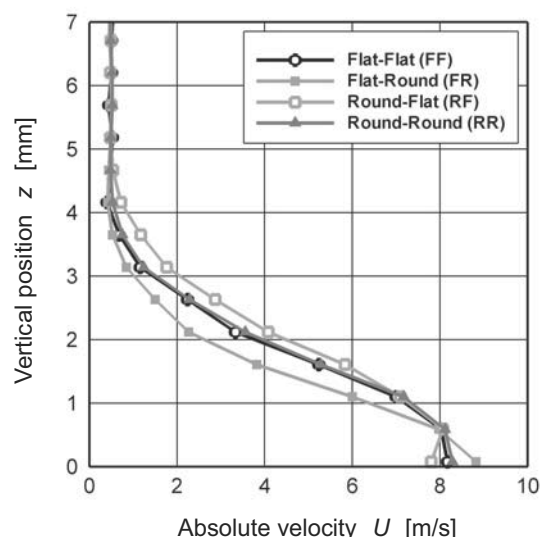
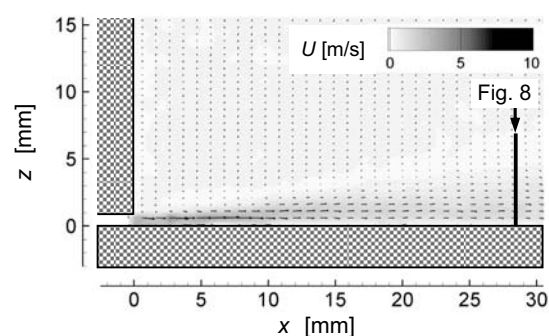
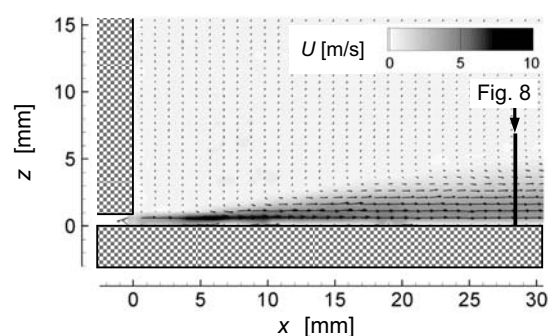


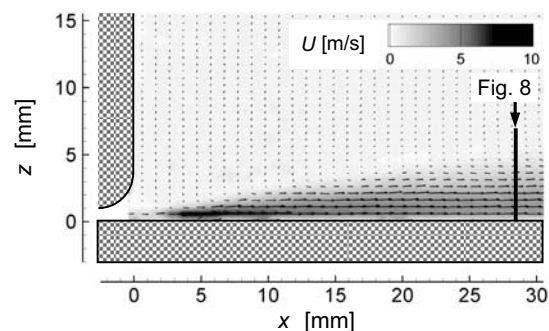
Fig. 6 Absolute velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at $x = 28.6$ mm (no control)



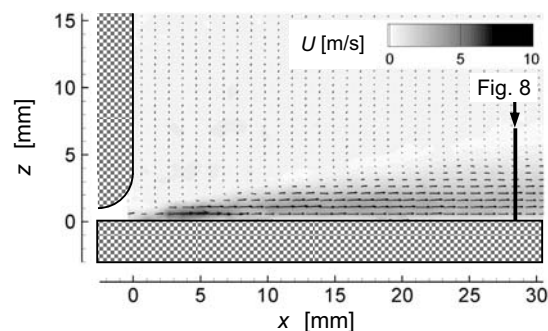
(a) Flat and Flat edges (FF)



(c) Round and Flat edges (RF)



(b) Flat and Round edges (FR)



(d) Round and Round edges (RR)

Fig. 7 Time-averaged velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various plate edge shapes ($V_{pp} = 12.8$ kV, $f = 14$ kHz)

中に示す図6の位置)における絶対速度の垂直方向(z 軸方向)分布を図6に示す。この計測位置を選んだ理由は、前述のように下流のほうがPIVによる速度分布解析の精度が高いためである。FF形とRR形の速度分布はほぼ同じである(最大流速8.3m/s)。FR形の漏れ流れは、他の分布よりも、下側壁面近くの流速は高い(最大流速8.9m/s)が、垂直方向位置 $z = 0.6 \sim 4$ mmでの流速は低く、上側への広がりが少ない。RF形の漏れ流れは、他よりも $z = 1.5 \sim 4.5$ mmでの流速が高く、上側への広が

りが大きい。流量(速度を垂直方向に積分)は、FF形とRR形を基準とすると、FR形が7%少なく、RF形が8%多くなっている。先端形状の違いが漏れ流れに及ぼす影響は全体的に少なく、特に上流側と下流側が同形のFF形とRR形では、ほぼ同じ漏れ流れを得られている。

4.1.2 入力周波数14kHzでの漏れ流れ制御

図7に、入力周波数14 kHzでプラズマアクチュエータによる漏れ流れ制御を行った場合の各先端形状での絶対速度分布を示す。前報¹⁴⁾のFF形での実験では、この周

波数で最も高い制御効果が得られている。図7(a)のFF形で漏れ流れの低減が顕著である。次に効果があるのは、図7(d)のRR形であり、図7(b)のFR形と図6(c)のRF形では効果が少ない。

図8に、図7中に示す図8の位置 ($x = 28.6\text{mm}$) での絶対速度分布を示す。図中の黒丸●の実線は、FF形で制御なし場合の速度分布を比較基準として示している。制御なしの場合と比べて、どの先端形状でも、漏れ流れ

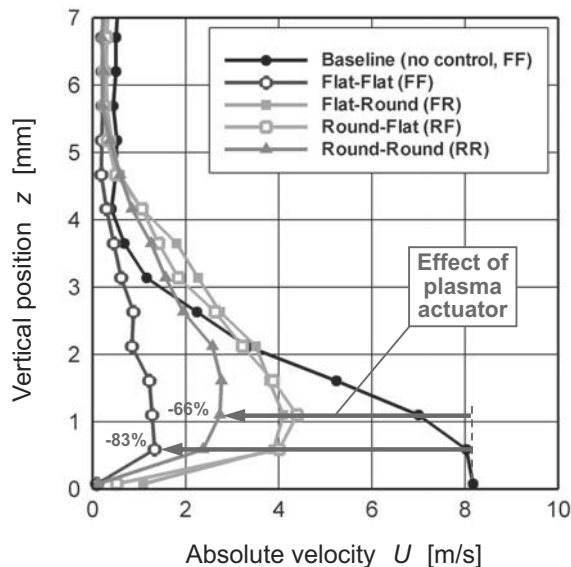


Fig. 8 Absolute velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at $x = 28.6\text{ mm}$ ($V_{pp} = 12.8\text{ kV}$, $f = 14\text{ kHz}$)

の最大流速の位置が壁面から離れた位置に移動している。この理由は、チップクリアランス出口部でプラズマが発生した際に漏れ流れを上方に巻き上げる渦が発生して壁面に垂直な速度成分が増加するためである^[3]。FF形での制御では、最大流速を 8.3m/s から 1.4m/s まで抑制できている（83%の減少）。RR形では最大流速が66%減少するが、FR形とRF形では50%程度の減少になる。この結果から、FF形やRR形のように上流側と下流側の先端形状を同形にしたほうが、FR形やRF形のように異形な場合よりも効果が高いことが分かる。また、RR形のように丸い形状よりも、FF形のように角のある形状のほうが高い効果を得られる。

4.1.3 入力周波数16 kHzでの漏れ流れ制御

図9に、プラズマアクチュエータへの入力周波数を16 kHzまで上昇させた場合の各先端形状での絶対速度分布を示す。この周波数では、使用した電源の出力が限界に近い条件になっている。図9(d)のRR形で顕著な制御効果が得られ、漏れ流れをほぼ完全に止めることに成功している。一方、図9(a)のFF形では、14kHzの時よりも制御効果が減っている。また、図9(b)のFR形と図9(c)のRF形でも、14kHzの時より制御効果がわずかに減っている。

図10に、図9中に示す図10の位置 ($x = 28.6\text{ mm}$) での絶対速度分布を示す。RR形での制御では、最大流速を 0.4m/s まで抑制できている（95%減少）。FF形では最大流速が 3.2m/s （62%減少）となり、14kHzでの83%減

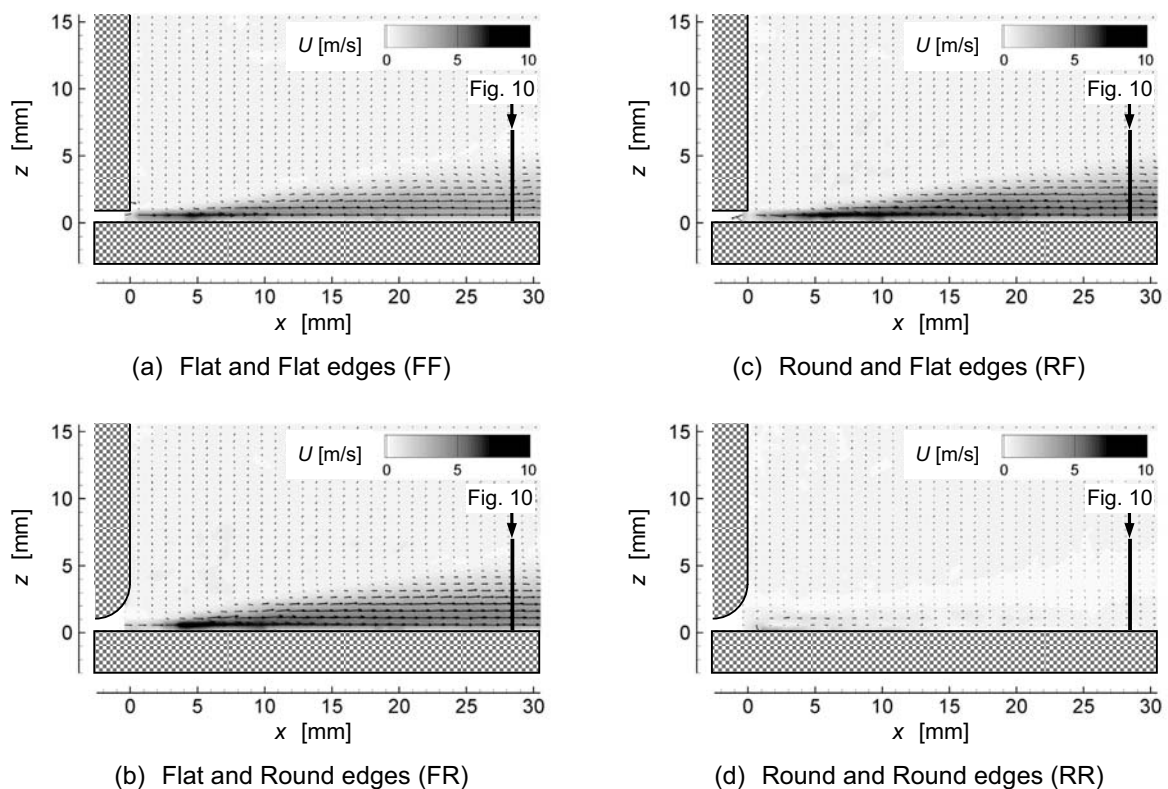


Fig. 9 Time-averaged velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at various plate edge shapes ($V_{pp} = 12.8\text{ kV}$, $f = 16\text{ kHz}$)

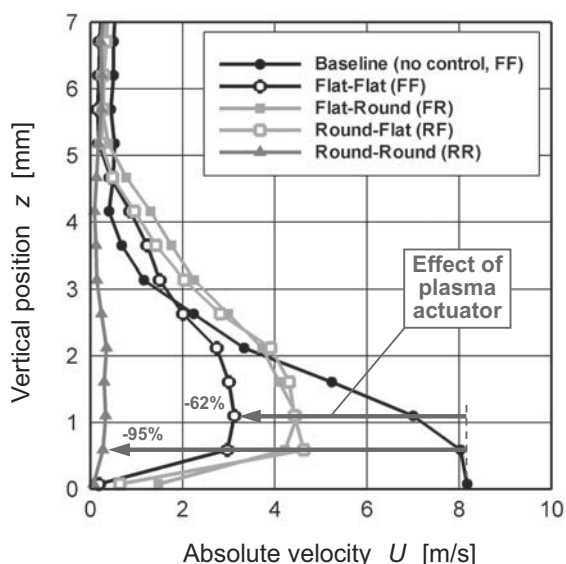


Fig. 10 Absolute velocity distributions near tip clearance exit of flat plate at $x = 28.6$ mm ($V_{pp} = 12.8$ kV, $f = 16$ kHz)

少と比べて、制御効果が減っている。FR形とRF形では47%程度の減少で、14kHzの時よりも数%効果が減る。これらの現象の原因を次節で考察する。

4.2 漏れ流れの流量低減

図11に、 $x = 28.6$ mmでの流れ方向速度成分を積分して算出した漏れ流れの流量をまとめる。図中の太い破線は、基準となるFF形で制御なしの場合の流量である。入力周波数10kHzでは、FF形では流量が約20%減少するが、他では制御効果が見られない。14kHzまでは、どの形状でも周波数の増加とともに流量が減少する。FF形が最も効果が高く、14kHzでは流量が80%減少する。その他は、RR形では54%減少、FR形とRF形では35%の減少である。周波数が15kHzに増えると、流量が増加し、プラズマアクチュエータが漏れ流れを減少させる効果が

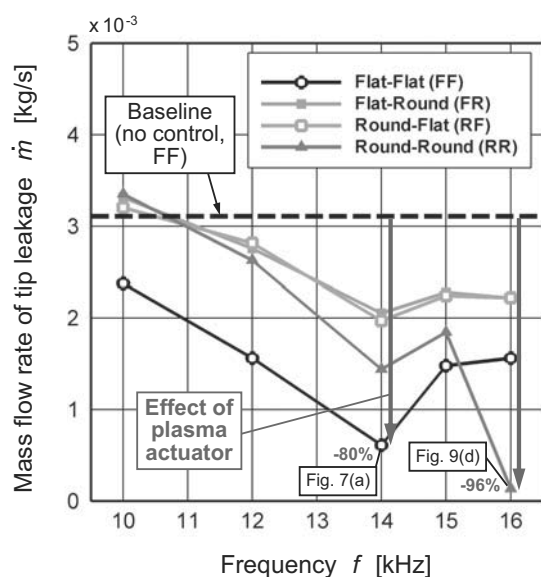


Fig. 11 Mass flow rates of tip leakage at various edge shapes of flat plate at $x = 28.6$ mm

弱くなる。さらに周波数が高い16kHzでの流量は、FF形では少し増加、FR形とRF形では横ばいなのに対し、RR形では大幅に減少し（流量96%減少）、漏れ流れをほぼ完全に抑えている。

FR形とRF形は、どの周波数でも漏れ流れ低減効果が低めである。この理由は、入口側と出口側の端面の形が違う場合に、角のある端面（F側）にプラズマが集中して出ることが考えられる。

14kHzを超えると漏れ流れ低減効果が弱まる理由として、放電モードの変化が考えられる。一般的なシート型プラズマアクチュエータの数値解析で、電圧一定で周波数を増加させると、電圧勾配が300kV/msを超える付近で、正電圧時のプラズマがコロナ型放電からストリーマ型放電に遷移し、誘起される流体力が一時的に減少することが報告されている¹⁹⁾。本研究での電圧 $V_{pp} = 12.8$ kV、周波数 $f = 14$ kHzでの電圧勾配を推算すると約350kV/msとなり、前述の文献に近い値なので、放電現象の変化による漏れ流れ低減効果の減少と考えられる。

16kHzの高周波数で、FF形よりもRR形のほうが高い効果が得られた理由としては、放電モードがストリーマ型放電に変わった場合に、角のある形状よりも丸い形状のほうが端面への電界集中を弱められて、空間的により一様な放電を得られることが考えられる。

5. まとめ

リング型プラズマアクチュエータでの先端形状の影響を調べるため、4種類の先端形状を持つ平板を用いて漏れ流れ（チップクリアランス流れ）を抑制する実験を行った。平板先端の隙間（1 mm）を通る漏れ流れの流速は、約10m/sに設定した。プラズマアクチュエータの印加電圧 V_{pp} を12.8kVに固定し、周波数 f を10kHzから16kHzまで変化させた。PIV計測による速度分布から、印加周波数の違いによって、プラズマアクチュエータの漏れ流れ抑制効果がどのように変化するかを明らかにした。

- (1)制御なしの場合、本実験の先端形状では、形の違いが漏れ流れに及ぼす影響は少ない。
- (2)漏れ流れの入口側と出口側の端面は、同じ形状のほうが漏れ流れ抑制効果が高い。
- (3)両端に角があるFF形は、周波数が14kHzよりも低い場合には、最も漏れ流れ抑制効果が高い（14kHzで漏れ流れが80%減少）。
- (4)両端が丸いRR形は、周波数が16 kHzになると効果が高くなり、漏れ流れをほぼ完全に抑制できる（16 kHzで漏れ流れが96%減少）。

謝 辞

本研究は、JSPS科研費（基盤研究（B）、26289040）の助成により行われた。

参考文献

- (1) Corke, T. C., Enloe, C. L., Wilkinson, S. P., "Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42 (2010), pp. 505-529.
- (2) Roth, J. R., Sherman, D. M., Wilkinson, S. P., "Boundary Layer Flow Control with A One Atmosphere Uniform Glow Discharge," AIAA Paper, No. 98-0328 (1998).
- (3) 深湯康二, 山田俊輔, 石川仁, "プラズマアクチュエータの基礎と研究動向", ながれ, Vol. 29, No. 4 (2010), pp. 243-250.
- (4) Sosa, R., Arnaud, E., Memin, E., Artana, G., "Study of the Flow Induced by a Sliding Discharge," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, Issue 2 (2009), pp. 305-311.
- (5) Matsuno, T., Fujita, N., Yamada, G., Kawazoe, H., Matsuno, S., Asaumi, N., Kouwa, J., "Vectored Jet Control by Trielectrode Plasma Actuator for Turbomachinery," Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power, No. AJCPP2014-155 (2014).
- (6) McGowan, R., Corke, T. C., "Pulsed-DC Plasma Actuator Characteristics and Application in Compressor Stall Control," AIAA Paper, No. 2016-0394 (2016).
- (7) Morphis, G., Bindon, J. P., "The Performance of a Low Speed One and Half Stage Axial Turbine with Varying Rotor Tip Clearance and Tip Gap Geometry," ASME Paper, No. 94-GT-481 (1994).
- (8) Sjolander, S. A., "Overview of Tip-Clearance Effects in Axial Turbines," von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 1997-01, Secondary and Tip-Clearance Flows in Axial Turbines (1997), pp. 1-29.
- (9) Matsunuma, T., "Effects of Reynolds Number and Freestream Turbulence on Turbine Tip Clearance Loss," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 128, No. 1 (2006), pp. 166-177.
- (10) Van Ness II, D. K., Corke, T. C., Morris, S. C., "Tip Clearance Flow Visualization of a Turbine Blade Cascade with Active and Passive Flow Control," ASME Paper, No. GT2008-50703 (2008).
- (11) De Giorgi, M. G., Pescini, E., Marra, F., Ficarella, A., "Experimental and Numerical Analysis of a Micro Plasma Actuator for Active Flow Control in Turbomachinery," ASME Paper, No. GT2014-25337 (2014).
- (12) Saddoughi, S., Bennett, G., Boespflug, M., Puterbaugh, S. L., Wadia, A. R., "Experimental Investigation of Tip Clearance Flow in a Transonic Compressor with and without Plasma Actuators," ASME Paper, No. GT2014-25294 (2014).
- (13) Matsunuma, T., Segawa, T., "Active Tip Clearance Control for an Axial-flow Turbine Rotor Using Ring-Type Plasma Actuators," ASME Paper, No. GT2014-26390 (2014).
- (14) 松沼孝幸, 瀬川武彦, "リング型プラズマアクチュエータによるタービン翼列の漏れ流れ制御に向けた平板基礎実験と消費電力測定", 日本ガスタービン学会誌, Vol. 44, No. 5 (2016), pp. 408-414.
- (15) Tallman J., Lakshminarayana, B., "Methods for Desensitizing Tip Clearance Effects in Turbines," ASME Paper, No. 2001-GT-0482 (2001).
- (16) Tallman J. A., "A Computational Study of Tip Desensitization in Axial Flow Turbines Part 1: Baseline Turbine Computations and Comparisons with Measurement," ASME Paper, No. GT2004-53918 (2004).
- (17) Tallman J. A., "A Computational Study of Tip Desensitization in Axial Flow Turbines Part 2: Turbine Rotor Simulations with Modified Tip Shapes," ASME Paper, No. GT2004-53919 (2004).
- (18) 社河内敏彦, 噴流工学－基礎と応用－, 森北出版 (2004), pp. 44-48.
- (19) Nishida, H., Nonomura, T., Abe, T., "Characterization of Electrohydrodynamic Force on Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator Using Fluid Simulation," World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 6, No. 11 (2012), pp. 254-258.

水素酸素燃焼タービンのエクセルギー解析

Exergy Analysis on Oxy-hydrogen Combustion Turbine

山下 誠二^{*1}
Yamashita Seiji矢嶋 理子^{*1}
Yajima Ayako吉村 健二^{*2}
Yoshimura Kenji西村 元彦^{*2}
Nishimura Motohiko

ABSTRACT

Introduction of hydrogen power generation is considered as one of solution strategies to achieve low carbon society and Graz Cycle is expected to play an important role as high efficient future energy system. Exergy analysis on Graz Cycle was fulfilled and comparison with state of the art gas turbine combined cycle was also implemented. 1600°C class gas turbine combustor exergy loss was 26.8% and net exergy efficiency was 56.5%. On the other hand, 1450°C class Graz Cycle showed great advantage of smaller combustor exergy loss of 21.4% and higher net exergy efficiency of 61.4%. Utilization of liquefied hydrogen physical exergy was also examined. Graz Cycle net exergy efficiency was 2.1 % points improved by applying the cryogenic physical exergy for air separation to supply Graz Cycle oxygen. The results showed that Graz Cycle has a great potential to achieve high efficient hydrogen power generation.

Key words : ガスタービン, グラーツサイクル, 液化水素, 深冷分離, エクセルギー, 低炭素社会
Gas Turbine Graz Cycle Liquefied Hydrogen Cryogenic Separation Exergy Low Carbon Society

1. はじめに

低炭素社会に向けたエネルギー機器として、水素ガスタービンが注目されている。ガスタービン燃料の一部に水素を利用するいわゆる水素混焼ガスタービンは既に実用化されている。また、水素100%のいわゆる水素専焼ガスタービンについては拡散燃焼器と水・蒸気噴射による窒素酸化物低減を組み合わせた方式が実用化されつつある。さらに、より高効率なドライ方式についても燃焼器開発と実用化に向けた取り組みが行われている⁽¹⁾。

現在の国内における水素は、天然ガス改質や石油精製における副生水素などが主流であるが、海外の再生可能エネルギー由来電力による水電解や化石燃料とCO₂貯留の組み合わせにより製造されたCO₂フリー水素を導入する取り組みも行われている⁽²⁾⁽³⁾。水素は二次エネルギーであるが、水素をキャリアとして海外のエネルギーを日本に輸入することは、水素が新たなエネルギーのパスとして日本のエネルギー需要に応えることができることを意味している。

ガスタービンプラントにおいて燃料を天然ガスから水素に置き換えた場合、エクセルギー効率や燃焼のエクセルギー損失は基本的に同じである。したがって、タービ

ン入口温度の上昇や要素機器の流体性能の向上など、現行のガスタービンプラントの高効率化の方策は水素ガスタービンにおいても同様に有効であり、水素混焼ガスタービンを端緒として水素専焼ガスタービンへと漸次移行していくことで、今後低炭素社会に対応していくことが可能である。さらに水素酸素燃焼の特徴を利用したグラーツサイクルが提案されており⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾、エネルギーとしての水素を大量に導入する本格的な水素社会における高効率な将来サイクルとして期待できるものである。

プロセスシミュレーション技術の発展により、マスヒートバランス計算をはじめとする各種サイクル検討を短期間で厳密に行うことが可能となってきたが⁽⁸⁾、エンタルピーを用いた従来の検討では、検討結果としての効率は得られるものの、高効率化の方策が見出しにくいという欠点がある。これはグラーツサイクルの検討でも同様であり、グラーツサイクルが高効率である理由はしばしば水素酸素燃焼であるからの説明がされるが、高効率サイクルとしての特徴は必ずしも明確になってはいない。

近年注目されているエクセルギーを用いた検討は、エネルギーシステムの各構成機器の損失低減の余地を見だし、システム全体の効率向上を目指すものであり⁽⁹⁾、グラーツサイクルなどの将来サイクルの検討においても不可欠なものとする。

また、水素酸素燃焼やグラーツサイクルを検討する際には、その酸素供給についても考慮する必要がある。海

原稿受付 2016年6月24日

査読完了 2017年4月6日

*1 川崎重工業(株) 技術開発本部 技術研究所
〒673-8666 明石市川崎町1番1号

*2 川崎重工業(株) 技術開発本部 水素チェーン開発センター

外からのエネルギーとしての水素導入を考えた場合、液化水素による輸送・貯蔵が経済的・技術的に実現可能な方法として有望であり⁽²⁾、その場合は液化水素の冷熱のエクセルギーを有効に利用することも重要である。これらをふまえて、本稿ではエクセルギー解析の手法を用いてグラーツサイクルの特徴を把握するとともに、将来高効率サイクルとしてのポテンシャルを明らかにする。

2. エクセルギーの定義とエクセルギー効率

ここではエクセルギーの定義とその熱力学的な意味を確認する。エクセルギーの定義を式(1)に示す⁽¹⁰⁾。

$$e = (h - h_0) - (s - s_0) \times T_0 \quad (1)$$

ここで、 e ：エクセルギー， h ：比エンタルピー
 s ：比エントロピー， T ：温度，添字0：基準条件における値

圧力一定で温度 T の気体が温度 T_0 の外界に取り出し可能な仕事は式(2)で示される⁽¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} e &= \int_{h_0}^h \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dh = (h - h_0) - T_0 \int_{h_0}^h \frac{dh}{T} \\ &= (h - h_0) - T_0 \int_{T_0}^T c \frac{dT}{T} \end{aligned} \quad (2)$$

比熱 c が一定の場合

$$\begin{aligned} e &= (h - h_0) - cT_0 [\log_e T]_{T_0}^T = (h - h_0) - cT_0 \log_e \frac{T}{T_0} \\ &= (h - h_0) \left[1 - \frac{T_0}{T - T_0} \log_e \frac{T}{T_0} \right] \end{aligned} \quad (2')$$

エクセルギーとエンタルピーの比 λ は有効比と呼ばれ⁽¹⁰⁾、温度 T の気体の有効比は式(3)で表示される。式(3)を見れば有効比はカルノー効率の積分であり、エクセルギーとはある熱量から取り出すことのできる最大仕事を示していることがわかる。

$$\lambda = \frac{e}{(h - h_0)} = 1 - \frac{T_0}{T - T_0} \log_e \frac{T}{T_0} \quad (3)$$

燃料の発熱量に関するエクセルギーは化学エクセルギーと呼ばれ、その定義を式(4)に示す⁽¹⁰⁾。

$$e = H_l + T_0 \Delta S \quad (4)$$

ここで、 e ：エクセルギー， H_l ：燃料低位発熱量
 T_0 ：基準温度， ΔS ：生成系のエントロピーから反応系のエントロピーを引いた値

ガスタービンは大気圧力101.3kPa、大気温度0～40℃における性能を表示することが多いから、本稿ではエクセルギーの基準条件を圧力101.3kPa、温度0℃とする。ガスタービンプラントのエクセルギー効率を式(5)(6)で定

義する。

$$\text{gross exergy efficiency} = \frac{\text{Generator Terminal Output (kW)}}{\text{Fuel Chemical Exergy (kW)}} \quad (5)$$

$$\text{net exergy efficiency} = \frac{\text{Net Plant Power Output (kW)}}{\text{Fuel Chemical Exergy (kW)}} \quad (6)$$

$$= \frac{\text{Generator Terminal Output} - \text{Auxiliary Loads (kW)}}{\text{Fuel Chemical Exergy (kW)}} \quad (6')$$

3. コンバインドサイクル

グラーツサイクルの特徴を把握するために、比較の対象として最新鋭の天然ガス焚きガスタービンコンバインドサイクルのエクセルギー解析を行う。

本章の検討には解析ソフトウェアとしてThermoFlow社のGTPROを用いる。本ソフトウェアはガスタービン型式ごとにガスタービンの圧縮機・タービンマップを格納したデータベースを保有しており、入力したガスタービン運転条件および排熱回収ボイラ、蒸気タービンの設計変数をもとに、ガスタービンプラント各部の状態量を算出するものであり、実在ガスタービンを用いたプラント検討を迅速に実施できるものである。

検討対象とするガスタービンコンバインドサイクルのプロセスフローを図1に示す。最新鋭の事業用ガスタービンのタービン入口温度は1600℃程度であり、コンバインドサイクルとしての発電端効率は60%（LHV基準）を超える⁽¹¹⁾。サイクル性能を表1に示す。

なお、表1中の低位発熱量（LHV）基準や高位発熱量（HHV）基準などの効率表示は、分散型発電や事業用発電の効率表示として用いられてきたものであるが、これらの効率表示では燃料中の炭素や水素の割合が変わると同一の発電システムでも効率が変わって表示されるので、特に水素を燃料に用いるグラーツサイクルと比較する場合、その特徴を把握することが困難になる。したがって、以降ではエクセルギーを用いて検討を行うものとする。

1600℃級ガスタービンコンバインドサイクルのエクセルギー線図を図2に示す。図2の燃焼器のエクセル

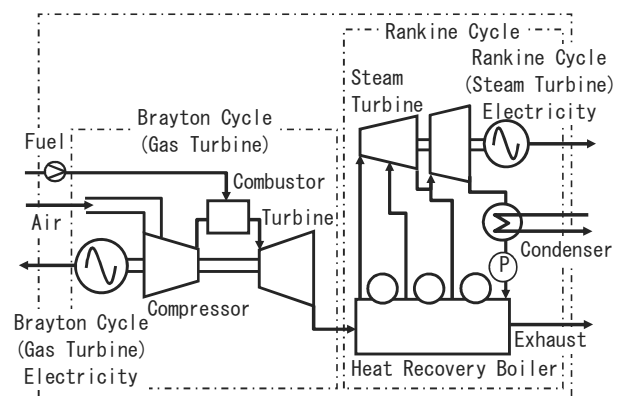


Fig. 1 Gas Turbine combined cycle process flow

Table 1 Example of state of the art 1600 °C class combined cycle performance

Turbine Inlet Temperature	1600 °C
Exhaust Gas Temperature	642 °C
Compression Ratio	22
Gas Turbine generator term Output	320MW×2
Steam Turbine generator term Output	280MW
Plant total generator term Output	920MW
Gross Exergy Efficiency (%)	58.1
Gross Efficiency (LHV%)	60.1
Gross Efficiency (HHV%)	54.3
Net Exergy Efficiency (%)	56.5
Net Efficiency (LHV%)	58.4
Net Efficiency (HHV%)	52.7

Compressor inlet pressure loss 0.98kPa

Gas Turbine exhaust pressure loss 3.43kPa

ギー損失は26.8%である。発電出力30MWの分散型発電用ガスタービンのタービン入口温度は1250℃程度であり、燃焼器のエクセルギー損失が27.5%であるのに比べ¹²⁾、1600℃級ガスタービンは高温化により燃焼器のエクセルギー損失が0.7ポイント程度改善しているが、依然ガスタービンプラントにおける最大の損失は燃焼器のエクセルギー損失であり、将来サイクルではこの燃焼器のエクセルギー損失をさらに低減することが重要である。

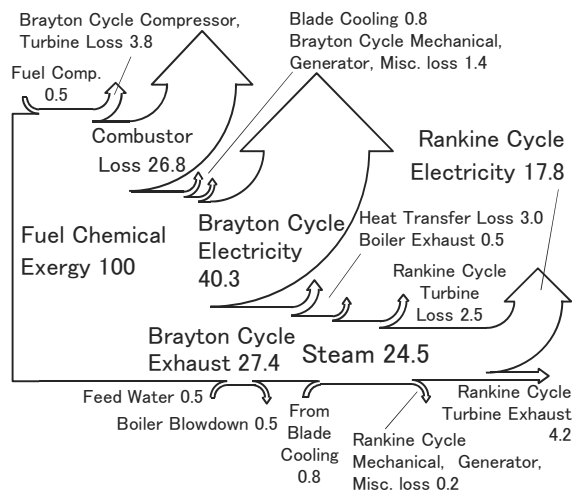


Fig. 2 Gas Turbine Combined Cycle exergy diagram

4. グラーツサイクル

本章では水素酸素燃焼の特徴を利用したグラーツサイクルのエクセルギー解析を行い、その特徴と高効率化のポテンシャルを明らかにする。本章の検討には解析ソフトウェアとしてAspentech社のAspen HYSYSを用いる。本ソフトウェアは圧縮機、タービン、燃焼器や蒸留塔などの物理化学モデルを計算機上で組み合わせることで、より多様なプロセス検討が実施できるものである。

なお、前章で用いたGTPROと本章で用いるAspen

HYSYSは物性値モデルが異なるため、検討結果に差が生じる。1600℃級ガスタービンのマスヒートバランスをそれぞれのソフトウェアで検討した結果を、使用した物性値モデルとあわせて表2に示す。両者の検討結果の差は2%未満であり、これらの差はグラーツサイクルのポテンシャルを把握するうえで十分な精度である。

Table 2 Calculation Deviation on 1600°C class Gas Turbine performance caused by different fluid property model

Software		GTPRO	AspenHYSYS
Fluid property model	Gas	NIST-JANAF	Peng-Robinson
	Steam	IFC-67	
Generator term Output		320MW	313.8MW
Deviation		-	-1.92%

4.1 グラーツサイクルの基本構成と特徴

グラーツサイクルの基本構成を図3に示す⁴⁾。グラーツサイクルは水素酸素燃焼により作動流体を蒸気のみとすることで、ブレイトンサイクルとランキンサイクルの複合サイクルをセミクロズドで構成するものである。ブレイトンサイクルのタービン排気は再生熱交換器により温度を下げられるが、再生熱交換器の中間でブレイトンサイクルの圧縮機入口蒸気と低圧タービン蒸気に分岐される。低圧タービン排気は水素酸素燃焼相当分を系外に排出したのちランキンサイクルの給水として循環される。再生熱交換器において生成された高圧蒸気は高圧タービンで膨張仕事をしたのちにブレイトンサイクルの圧縮機出口の蒸気と混合される。

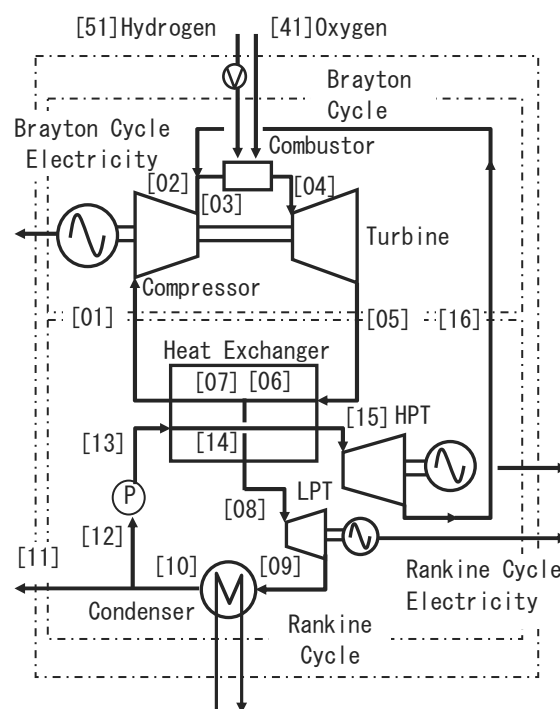
Fig. 3 Graz Cycle process flow⁴⁾

Table 3 Graz Cycle exergy analysis premises

Brayton Cycle	
Compressor adiabatic efficiency	87%
Turbine polytropic efficiency	87%
Compressor Inlet Pressure	0.37MPa
Compressor Outlet Pressure	5.0-13.8 MPa
Compression Ratio	13.5-37.4
Fuel pressure	5.5 -14.3 MPa
Combustor pressure loss	100kPa
Turbine Inlet Temperature	1200-1450 °C
Turbine Outlet Temperature	693 °C
Rankine Cycle	
Turbine polytropic efficiency	87%
HPT Inlet Pressure / Temperature	14.0MPa / 650 °C
HPT Outlet Pressure	5.0-13.8 MPa
LPT Inlet Pressure / Temperature	0.38MPa / 465 °C
LPT Outlet Pressure	5kPa
Other premises	
Mechanical efficiency	98.9%
Generator efficiency	98.0%

グラーツサイクル検討の前提を表3に示す。表3ではタービン入口温度の高温化にあわせて、ブレイトンサイクルの圧力比を高くとりタービン出口温度が一定となる前提としている。

なお、表3においてタービン効率はポリトロップ効率を用いている。これは、グラーツサイクルのタービン膨張比が大きく、ランキンサイクルの高圧タービン、ブレイトンサイクルのタービン、ランキンサイクルの低圧タービンと順次膨張するので、各タービンの膨張比の選定にかかわらずトータルのタービン効率が一定となる前提を与えるためである。圧縮機についてはこの点を特に配慮する必要が無いので、断熱効率を用いている。

タービン入口温度1200℃の場合のグラーツサイクルのエクセルギー線図を図4に示す。図4のグラーツサイクルにおける燃焼器のエクセルギー損失は21.4%であり、図2の1600℃級ガスタービンと比較して、タービン入口温度が低いにもかかわらず燃焼器のエクセルギー損失が5.4ポイントも改善している。

図4の各部の状態量を表4に示す。グラーツサイクルはセミクローズドサイクルであるため、圧縮機入口 [01] を140.8℃、0.37MPaと常温・常圧より高く設定できるので、比較的低い圧力比13.5で燃焼器入口作動流体 [03] を521.0℃、5.0MPaと高温・高圧に設定できる。グラーツサイクルが高効率であるのは水素酸素燃焼が直接の理由ではなく、燃焼圧力や燃焼器入口の作動流体の温度を高くすることで、燃焼のエクセルギー損失を低減しているからである¹²⁾。

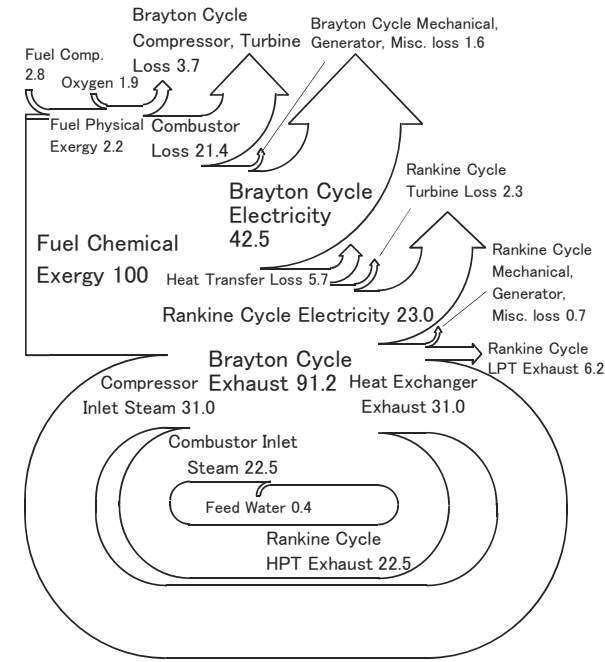


Fig. 4 1200 °C class Graz Cycle exergy diagram

Table 4(a) 1200 °C class Graz Cycle state quantity

Stream No.	[01]	[02]	[03]	[04]	[05]	[06]
V.F.(-)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T(°C)	140.8	538.8	521.0	1200	693.4	464.6
P(kPa)	370	5,000	5,000	4,900	400	380
G(kg/s)	170.6	170.6	241.5	277.5	277.5	277.5
h(kJ/kg)	2,779	3,545	3,504	5,157	3,942	3,438
s(kJ/kg °C)	9.643	9.770	9.719	11.22	11.37	10.80
e(kJ/kg)	855.9	1587	1560	2802	1547	1198

Table 4(b) 1200 °C class Graz Cycle state quantity

Stream No.	[07]	[08]	[09]	[10]	[11]	[12]
V.F.(-)	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
T(°C)	464.6	464.6	41.0	33.1	33.1	33.1
P(kPa)	380	380	5.0	5.0	5.0	5.0
G(kg/s)	170.6	106.9	106.9	106.9	36.03	70.86
h(kJ/kg)	3,438	3,438	2,603	143.0	143.0	143.0
s(kJ/kg °C)	10.80	10.80	11.13	3.098	3.098	3.098
e(kJ/kg)	1,198	1,198	274.3	0.0	0.0	0.0

Table 4(c) 1200 °C class Graz Cycle state quantity

Stream No.	[13]	[14]	[15]	[16]	[41]	[51]
V.F.(-)	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
T(°C)	34.5	339.1	650.0	478.2	25.0	25.0
P(kPa)	14,900	14,600	14,000	5,000	5,000	1,000
G(kg/s)	70.86	70.86	70.86	70.86	32.00	4.03
h(kJ/kg)	162.9	1749	3,725	3,405	8,952	351.8
s(kJ/kg °C)	3.105	6.551	9.526	9.591	4.079	51.56
e(kJ/kg)	25.8	671.0	1,834	1,496	273.5	25.98

V.F.: Vapor Fraction, T: Temperature, P: Pressure
G: Mass Flow, h: enthalpy, s: entropy, e: exergy,

4.2 グラーツサイクルのタービン入口温度と燃焼圧力

前節の検討ではグラーツサイクルのタービン入口温度を1200℃としているが、タービン入口温度の高温化によりさらに高効率にすることができる。ここでは、グラーツサイクルのタービン入口温度および燃焼圧力を変化させた場合のエクセルギー解析を行う。タービン入口温度を変化させた場合のエクセルギー解析結果について図5に示す。図5の横軸はタービン入口温度であり、縦軸は有効な出力であるブレイトンサイクル発電出力、ランキンサイクル発電出力のほか、燃焼器のエクセルギー損失、復水器損失、熱交換器損失、圧縮機・タービン損失等のエクセルギー損失を下から積算して表示した。積算の総和が100を超えるのは燃料の化学エクセルギーの他に燃料、酸素の物理エクセルギーおよび燃料圧縮機の電力が入力されるからである。図5には燃焼圧力および圧縮機

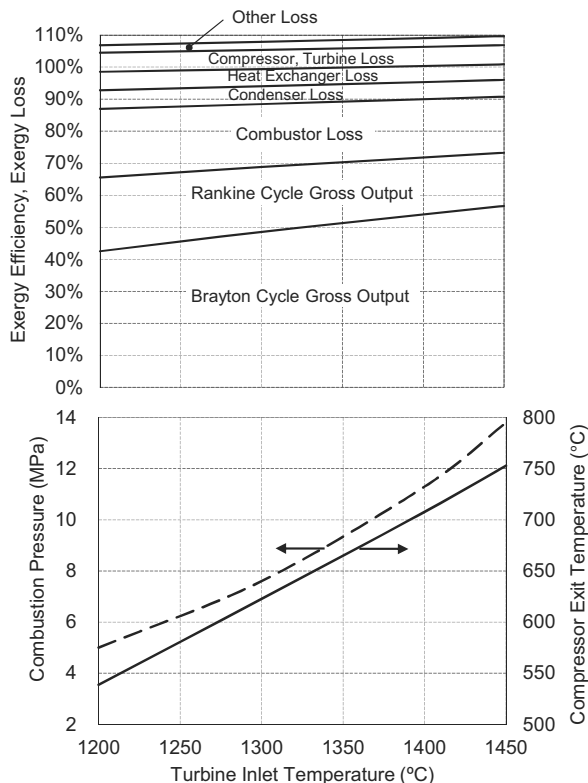


Fig. 5 Exergy analysis on various TIT Graz Cycle

出口の作動流体温度もあわせて示した。

タービン入口温度が1450℃の場合は、燃焼器入口作動流体 [03] の圧力が13.8MPaと高圧蒸気 [15] の圧力14.0MPaとほぼ同じになるので、ランキンサイクルは高圧タービンの設置を省略して低圧タービンのみとなる。理論上はタービン入口温度1450℃を越えるグラーツサイクルの検討も可能であるが、高圧力比化により圧縮機出口 [02] の温度が750℃を越える高温となるので、タービン入口温度は1450℃までの検討とした。

図5ではタービン入口温度を1200℃から1450℃に高温化するに従い、燃焼器のエクセルギー損失が21.4%から16.9%までさらに改善している。燃焼のエクセルギー損失低減には燃焼圧力および燃焼器入口作動流体の温度が高いことも重要であり、高効率なグラーツサイクルの実現には、高圧の水素酸素燃焼器や高温・高圧の作動流体を供給する圧縮機の実現が必要である。これらは現行のガスタービンプラントの高効率化の方策であるタービン入口温度の高温化⁽¹⁾や高圧力比化⁽²⁾と基本的な考え方は同じである。したがって、グラーツサイクルは将来の水素利用機器としてさらなる高効率化のポテンシャルを持つものであると考える。

4.3 グラーツサイクルにおける酸素製造

グラーツサイクルは燃焼圧力や燃焼器入口作動流体の温度を高くとることで、燃焼器のエクセルギー損失を大幅に低減できることが明らかになった。ただし、現行のガスタービンが大気を酸化剤として利用しているのに対し、グラーツサイクルは酸化剤として酸素が必要であるから、将来サイクルとしての高効率化ポテンシャルを論ずる場合には、酸素製造プロセスも含めた検討を実施する必要がある。酸素製造は空気の深冷分離による方法が古くから用いられており、グラーツサイクルにおける酸素製造もこの深冷分離による方法が基本となる。

空気の深冷分離による酸素・窒素製造プラントのシステムフローを図6に示す。空気の深冷分離は空気を低温にして蒸発しやすい窒素を気体中に、蒸発しにくい酸素を液体中に濃縮するという、空気の気液平衡を利用して酸素や窒素を分離するものである⁽³⁾。図6は上部に低圧

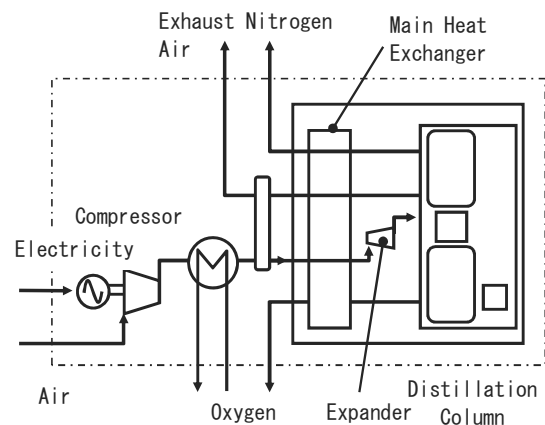


Fig. 6 Cryogenic air separation process flow

塔、下部に高圧塔と2つの圧力の異なる蒸留塔をもついわゆるダブルカラムと呼ばれるものである。

図6の酸素・窒素製造プラントの性能を試算した結果を表5にまとめる。本試算の酸素・窒素製造原単位は0.33 kWh/Nm³であり、標準的な深冷分離を利用した酸素・窒素製造プラントの性能^[3]とほぼ一致している。また、エクセルギー線図を図7に示す。図7は製造した酸素をすべてグラーツサイクルで利用することを想定し、製造した酸素ガスを量論で水素酸素燃焼させた場合の水素の化学エクセルギーを100として表示した。消費電力50.8ポイントのうち、酸素製造動力は5.6ポイント、窒素製造動力は45.2ポイントである。グラーツサイクルでは酸素製造動力をプラント性能に含めた場合、深冷分離による酸素製造に5.6ポイントの電力を消費することになる。

Table 5 Cryogenic air separation performance

Nitrogen Production	647,000 Nm ³ /h (8.0 kmol/s)
Oxygen Production	80,700 Nm ³ /h (1.0 kmol/s)
Electricity Consumption	239,500 kW 0.33 kWh/Nm ³

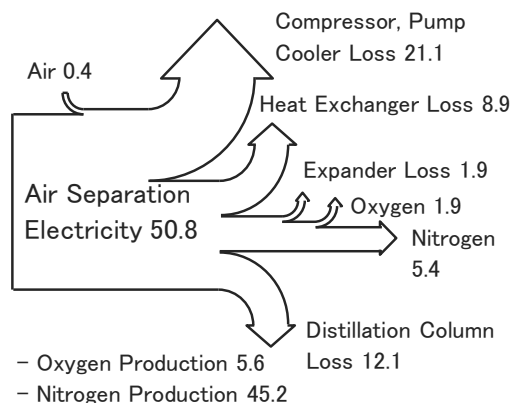


Fig. 7 Cryogenic air separation exergy diagram

4.4 液化水素の冷熱利用

図8に各種ガスの液化温度を示す。液化ガスの冷熱の有効利用としては、エネルギー用途の液化ガスとして先行するLNG等でも行われている。例えば、LNG冷熱でガスタービンの吸気冷却を行い発電出力や効率を上昇させる例^{[4][5]}や、LNG冷熱を用いてランキンサイクルを駆動して発電を行う例^[6]などがある。液化水素においてもLNGと同様に冷熱を利用することが考えられる。さらに、液化水素はその温度が20K (-253℃)と非常に低く、窒素や酸素の液化温度よりも低いことから、空気の大深冷分離等にその冷熱を有効に利用することができる。

液化水素とLNGの化学エクセルギーおよび物理エクセルギー（冷熱のエクセルギー）を図9に示す。図9は化学エクセルギーを100として表示するとともに、単

位重量当たりのエクセルギーを併記した。液化水素は化学エクセルギー 116.8MJ/kgの他に物理エクセルギー 13.3MJ/kgを併せ持つ。燃料の化学エクセルギー 100あたりと比較すると、液化水素の物理エクセルギーは11.4であり、LNGの物理エクセルギーは1.5であり、液化水素の物理エクセルギーがより大きいことがわかる。液化水素は物理エクセルギーを有効に使うことが重要であり、以降はこの物理エクセルギーを空気の大深冷分離に利用し、グラーツサイクルに必要な酸素を製造する検討を行う。

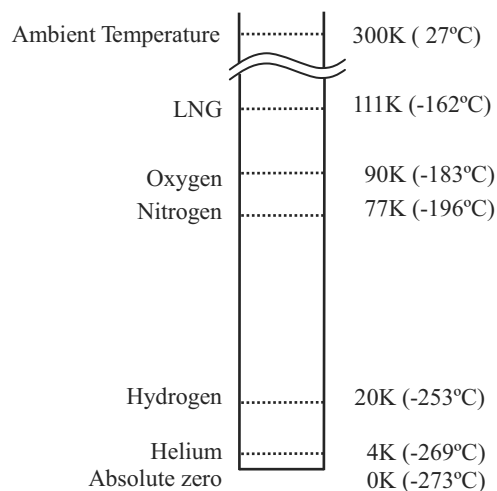


Fig. 8 Liquefaction temperature of various gases

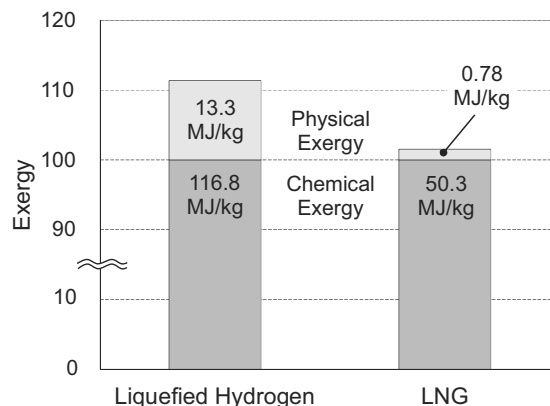


Fig. 9 Physical and chemical exergy of liquefied hydrogen and LNG

空気の深冷分離は自己再生と膨張タービンによる冷熱により低温を作り蒸留するので、液化水素の冷熱を利用する場合、図10のように膨張タービンのかわりに副熱交換器を設置することで液化水素の冷熱を有効に利用できる。図10の液化水素の冷熱を利用した酸素・窒素製造プラントの性能を試算した結果について、エクセルギー線図を図11に示す。図11では液化水素の冷熱11.4ポイントを利用しているので、膨張タービンによる冷熱製造が不要となり、膨張タービンの膨張比相当分の圧縮動力が節約できるので、消費電力が31.6ポイントと19.2ポイントも改善していることがわかる。このうち、グラーツサイ

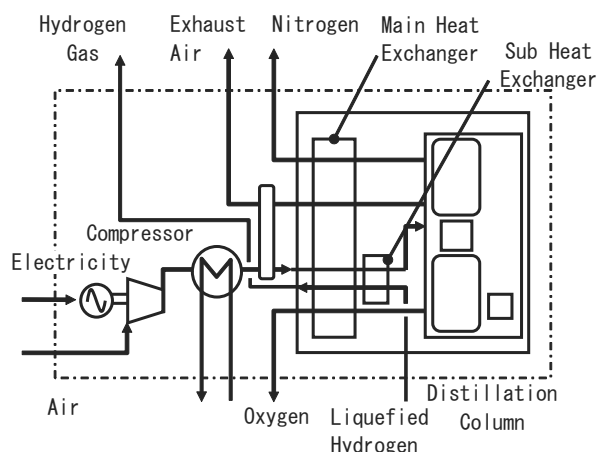


Fig. 10 Cryogenic air separation process flow utilizing liquefied hydrogen physical exergy

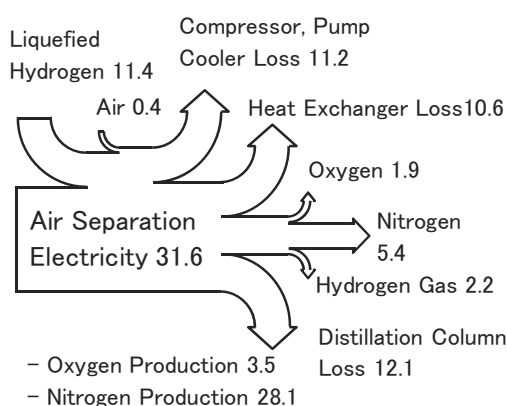


Fig. 11 Cryogenic air separation exergy diagram utilizing liquefied hydrogen physical exergy

クルの酸素製造相当分の消費電力は3.5ポイントであり、液化水素の冷熱利用によりグラーツサイクルの送電端効率を2.1ポイント改善できる。

4.5 グラーツサイクルの高効率化ポテンシャル

グラーツサイクルのエクセルギー効率を図12に示す。図12は燃料圧縮、酸素製造と給水ポンプ動力などの所内動力を考慮した送電端効率での表示である。図12には酸素製造に液化水素の物理エクセルギー（冷熱のエクセルギー）を利用した場合の性能も破線であわせて表示している。1450℃級グラーツサイクルの送電端のエクセルギー効率は液化水素の冷熱を利用しない場合で61.4%である。先に表1に示した1600℃級コンバインドサイクルの送電端のエクセルギー効率が56.5%であるのに比べてグラーツサイクルの送電端のエクセルギー効率は4.9ポイントも高い。また、いずれのタービン入口温度においても、液化水素の冷熱を利用することでさらに2.1ポイント効率が向上する。1450℃級グラーツサイクルで液化水素の冷熱を利用した場合の送電端のエクセルギー効率は63.5%であり、1600℃級コンバインドサイクルに比べて7.0ポイントも高い。表6にグラーツサイクルの性能をまとめる。

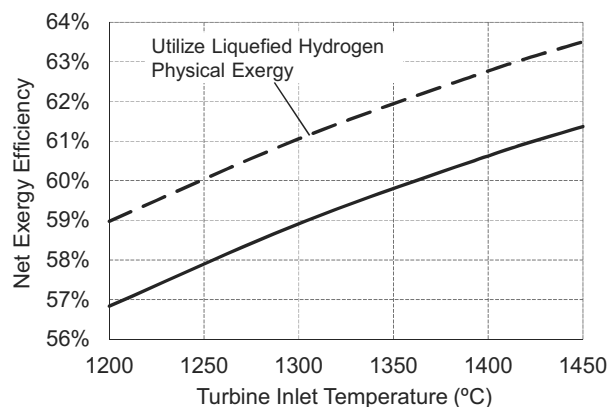


Fig. 12 Effect of turbine inlet temperature on graz cycle net exergy efficiency

Table 6 Estimated 1450 °C class graz cycle performance

Compression Ratio	37.4
Combustor Inlet Pressure	13.8MPa
Combustor Inlet Working Fluid Temperature	722 °C
Turbine Inlet Temperature	1450 °C
Net Exergy Efficiency (%)	61.4
Net Exergy Efficiency (%) (Utilize liquefied hydrogen physical exergy)	63.5

5. まとめ

低炭素社会に向けた将来サイクルとして期待されるグラーツサイクルについて、エクセルギー解析の手法を用いて高効率化のポテンシャルを明らかにした。また、比較の対象としてガスタービンコンバインドサイクルのエクセルギー解析を行った。以下に結論をまとめる。

- ・最新鋭の1600℃級ガスタービンの燃焼のエクセルギー損失は26.8%であり、ガスタービンコンバインドサイクルとしての送電端のエクセルギー効率は56.5%である。ガスタービンプラントにおける最大の損失は燃焼器のエクセルギー損失であり、この損失をさらに低減することが重要である

- ・グラーツサイクルは燃焼圧力や燃焼器入口作動流体の温度を高くすることで、燃焼器のエクセルギー損失を低減することができる。タービン入口温度1450℃、燃焼圧力13.8MPaのグラーツサイクルの燃焼器のエクセルギー損失は16.9%と大きく改善している。また、送電端のエクセルギー効率は61.4%と高効率である。

- ・液化水素は化学エクセルギー（発熱量のエクセルギー）116.8MJ/kgの他に物理エクセルギー（冷熱のエクセルギー）13.3MJ/kgを併せ持つ。液化水素の温度は20Kと非常に低く、窒素や酸素の沸点よりも低いことから、空気の深冷分離にその冷熱を有効に利用することができる。液化水素の冷熱を空気の深冷分離に利用した場合、グラーツサイクルの送電端のエクセルギー効率がさらに2.1ポイント改善できる。

参考文献

- (1) 堀川敦史, 小田剛生, “水素燃焼技術の開発”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43, No. 2, (2015), pp. 80-85.
- (2) 山下誠二, 吉野泰, 吉村健二, 新道憲二郎, 原田英一, “低炭素社会に向けた水素チェーンの実現可能性検討”, エネルギー・資源学会論文誌, vol. 35, No. 2, (2014.3), pp. 33-38.
- (3) 山下誠二, 新郷正志, 海野峻太郎, 今井達也, 洲河誠一, “水素液化貯蔵システムの開発”, エネルギー・資源学会論文誌, vol. 37, No. 4, (2016.7).
- (4) 山下巖, “水素・酸素燃焼タービン開発の背景と可能性”, 日本ガスタービン学会誌, vol. 22, No. 86, (1994), pp. 9-16.
- (5) 幸田栄一, 西田啓之, 犬丸淳, “水素ガスタービンサイクルの開発動向と課題”, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 37, No. 3 (2009), pp. 162-167.
- (6) H. Jericha, W. Sanz, E. Göttlich, “Design Concept for Large Output Graz Cycle Gas Turbines”, ASME Turbo Expo 2006, Paper No. GT2006-90032, (2006), pp. 1-14.
- (7) W.Sanz, Carl-W.Hustad, H.Jericha, “First Generation Graz Cycle Power Plant for Near-Term Deployment”, ASME 2011 Turbo Expo, Paper No. GT2011-45135, (2011), pp. 969-979.
- (8) 田中一雄, 山下誠二, 原田英一, 向井茂, 軽部正明, 柳田高秀, “熱サイクルCAE技術の開発と分散型エネルギーシステムへの適用”, 川崎重工技報, Vol.151, (2002.12), pp. 40-43.
- (9) 中西重康, 久角喜徳, 堀司, 毛笠明志, 小倉啓宏, 山下誠二, 中垣隆雄, 金偉力; エクセルギーデザイン学の理解と応用, 大阪大学出版会, (2012), pp. 3-4.
- (10) 石谷清幹, “熱管理士教本－エクセルギーによるエネルギーの評価と管理－”, 共立出版株式会社, (1977), pp. 72-84.
- (11) 羽田哲, 塚越敬三, 正田 淳一郎, 伊藤栄作, “世界初の1600℃級M501J ガスタービンの実証発電設備における検証試験結果”, 三菱重工技報, Vol. 49 No. 1, (2012), pp. 19-24.
- (12) 山下誠二, 武浩司, “高効率ガスタービンのエクセルギー解析”, エネルギー・資源学会論文誌, vol. 37, No. 5, (2016.9).
- (13) 川上浩, “空気の深冷分離－蒸留による酸素の製造－”, 日本酸素技報, No. 20, (2001), pp. 2-11.
- (14) 小野田 聡, 安井 俊一, “LNG冷熱利用ガスタービン吸気冷却システムに関する研究”, 中部電力株式会社研究資料 vol. 95, (1995), pp. 159-169.
- (15) 久角喜徳, 福吉保弘, 中村恵造, 山下誠二, “LNGハイブリッド冷熱利用システムの研究開発”, エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, Vol. 24, (2005.6.9), pp. 145-148.
- (16) 吉田龍生, 中川潤一, 滝口好美, 大塩章, “LNGサテライト基地における冷熱の有効利用について”, 神戸製鋼技報, Vol. 53 No. 2, (2003.9).

150kW級高湿分空気利用マイクロタービンの動作解析

A Dynamic Simulation of a 150 kW Class Advanced Microturbine System Using Humid Air Turbine Cycle

鈴木 晃純^{*1}
SUZUKI Kojun中野 晋^{*1}
NAKANO Susumu関 慧一^{*1}
SEKI Keiichi竹田 陽一^{*1}
TAKEDA Yoichi岸部 忠晴^{*2}
KISHIBE Tadaharu

ABSTRACT

Both WAC and HAT are methods to improve gas turbine's efficiency using water evaporation. These methods are relatively easy to install into existing turbines, and they are effective ways to increase output power for microturbines. Quick response for output power is also expected to apply to load following that will be needed in power grids due to increase of renewable energy. Therefore, it is important to obtain dynamic characteristic of power systems that are installed WAC or HAT. In this study, dynamic simulations of a microturbine installed WAC and HAT are conducted. Effects of calculation models including WAC and HAT models are examined to compare with experimental data of the 150kW class microturbine prototype which was the first application of HAT to a microturbine. Simulation results show nearly agreements with main system output data of pressure, temperature and power.

Key words : Dynamic simulation, Microturbine, WAC, HAT, Regenerative Brayton cycle, Radial inflow turbine

1. 緒言

熱電併給型の分散電源として1990年台後半から市場投入されているマイクロタービンは、低環境負荷や設置の容易さによって近年再び見直されている。特に複合発電システム、例えば固体酸化物形燃料電池 (SOFC) とのハイブリッドシステム⁽¹⁾では、従来の火力発電を上回る高効率発電が期待されている。しかし、マイクロタービン単体としては、容量が小さいことによる効率低下と、ガスタービン自体の持つ外気温上昇に対する出力低下等の短所を有するため、電力のみの需要に対しては、他の発電方法に比べて不利になる。この点を改善するため、大型ガスタービンで用いられる吸気噴霧冷却 (WAC: Water Atomizing inlet air Cooling) や高湿分空気利用タービン (HAT: Humid Air Turbine) が試みられている。マイクロタービンへのHATの有用性は初期にはParenteら⁽²⁾によって解析的に示され、Williamson & Luker⁽³⁾は商用機のマイクロタービンに蒸発冷却器

を適用した吸気冷却によってWACの有用性を、また、Nakanoら⁽⁴⁾はWAC及びHATを適用した150kW級プロト機によって、出力増加の他、出力応答性等、WAC及びHATの有効性を示した。また、Zhang & Xiao⁽⁵⁾やNikpeyら⁽⁶⁾は、増湿塔によるHATの解析的な検討を、De Paepeら⁽⁷⁾は商用機への増湿塔の適用実験を実施し、部分負荷運転を含む広範囲の運転領域でその有効性を示した。

ところで、再生可能エネルギーの導入増加に伴い、火力発電システムには系統安定のための負荷追従性が要求される。マイクロタービンを適用した複合発電システムは、高効率性の他、WAC及びHATを適用することで負荷追従に対する応答性も改善できるシステムになると期待される。しかし、これまでマイクロタービンを対象とした解析では、性能解析^{(2),(5),(6),(7)}が主体で、システム動作で発電出力を対象としたものは少ない⁽⁸⁾。

本研究ではSOFCハイブリッドシステムのダイナミックシミュレータを開発することを最終目的として、その前段階である高湿分空気利用マイクロタービンのダイナミックシミュレータを開発する。150kW級プロト機による実験結果⁽⁴⁾との比較を行い、プログラムの有効性を検証し、併せてWAC及びHAT実施時のシステム動作の

原稿受付 2016年9月5日

査読完了 2017年4月6日

*1 東北大学大学院工学研究科

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11-720

*2 三菱日立パワーシステムズ(株)

分析を行う。

2. 記号の説明

A : 流路断面積 [m²]

C : 対流熱伝達 [W/m²]

C_p : 定圧比熱 [J/(kg K)]

D : 直径 [m]

$f_{loss}, f_n, f_W, f_\eta, f_w$: 指数関数または多項式形の関数

G : 流量 [kg/s]

h : エンタルピー [J/kg]

h_g : 燃料 1 kg に対する燃焼ガスエンタルピー [J/kg]

H_u : 燃料の低発熱量 [J/kg]

I : 慣性モーメント [kgm²]

L : 水滴の蒸発潜熱 [J/kg]

L_e : オイラーの比仕事 式(8) [J/kg]

m : 水滴 1 滴の質量, 1 滴を囲む湿り空気の質量 [kg]

$\dot{m}$: 水滴の蒸発量 [kg/s]

N_d : 噴霧水滴数 [-]

P : 圧力 [Pa]

Q : 水滴蒸発に伴う熱移動 [W]

R : 輻射熱伝達 [W/m²]

S : 表面積 [m²]

T : 温度 [K]

t : 時間 [s]

u : 周速 [m/s]

V : 圧縮機入口または出口の絶対流速 [m/s]

W : 動力または出力 [W]

W_{loss} : 風損, 軸受損失 [W]

x : 湿り空気の湿度 [-]

ΔQ : 圧縮機での熱の授受量 [W/kg]

α : 圧縮機流入角 [rad]

β : 圧縮機流入速度係数 (流入絶対速度と入口平均径における周速との比) [-]

η : 効率 [-]

η_B : 燃焼効率 [-]

η_{max} : 半径流タービンの圧力比による最大効率 [-]

η_{ratio} : 半径流タービン周速による効率補正值 [-]

η_{rec} : 再生熱交換器の温度効率 [-]

ξ_c : 摩擦係数 [-]

ρ : 密度 [kg/m³]

ω : 角速度 [rad/s]

θ : 燃焼効率の熱負荷パラメータ 式(12) [-]

添え字

a : 乾き空気

atm : 大気

ax : 軸方向

C : 圧縮機

cmb : 燃焼器

cir : 周方向

cr : 修正

$csng$: ケーシング

d : 水滴

$dsgn$: 設計計画値

ev : 蒸発

f : 燃料

in : 入口

jb : ジャーナル軸受

G : 発電機

$liner$: 燃焼器ライナ

$mean$: 平均径

out : 出口

r : ロータ

rec : 再生熱交換器

ref : 基準状態

rs : 定格回転数

T : タービン

tb : スラスト軸受

wa : 湿り空気

0 : 全

1 : 燃焼ガスからライナへ

2 : ライナから冷却空気へ

3 : 冷却空気からケーシングへ

3. 高湿分空気利用マイクロタービンシステムの概要

今回解析対象としたマイクロタービンの概略構成を図 1 に示す。大気を遠心圧縮機で昇圧して再生熱交換器に送る。昇圧した空気は、ガスタービンの排気ガスと熱交換して昇温し、二重構造のタービンケーシングの外側流路を通り燃焼器に送られる。燃焼ガスは半径流タービンを駆動して再生熱交換器を通り大気に排出される。図の矢印はこの空気の流れを示したものである。圧縮機とタービン翼車は永久磁石式発電機ロータと一体化され水潤滑軸受⁹⁾によって支持されている。

WACは圧縮機吸気部ケーシング内で、また、HATは圧縮機と再生熱交換器の接続配管の直管部に設置された噴霧ノズルによって行われる。本マイクロタービンの設計仕様は表 1 に示す通りである。

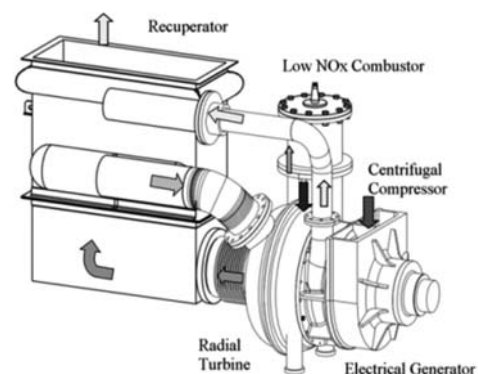


Fig. 1 Arrangement of main components of the microturbine⁽⁴⁾

Table 1 Design specifications of the microturbine⁽⁴⁾

Items		Unit	Design
Rated output	without WAC and HAT	kW	129
	with WAC and HAT	kW	150
Efficiency (LHV)	without WAC and HAT	%	32.5
	with WAC and HAT	%	35
Rated rotational speed		rpm	51,000
Pressure ratio of compressor		-	4
Turbine inlet temperature		℃	960
Thermal efficiency of recuperator		-	92
Bearing lubricant		-	Water

4. 計算モデル

4.1 ロータの運動方程式

タービンロータの運動は角運動量の保存式から、角速度 ω の2乗の時間変化がロータに働く仕事の和として式(1)のように表される。

$$\frac{d\omega^2}{dt} = \frac{2}{I} (W_T - W_C - W_{loss} - W_G) \quad (1)$$

上式で W_{loss} はロータに生じる損失で、本解析では、翼車とロータの風損と、軸受損失を考慮した。

4.2 遠心圧縮機の計算モデル

4.2.1 空気流量

圧縮機に流入する空気流量 G_{wa} は浜島⁽¹⁰⁾の提唱する周速度に比例する経験式を用いて式(2)で表される。

$$G_{wa} = A_{C,in} \rho_{wa,C,in} \frac{\beta_{in}}{\sin \alpha_{in}} \frac{D_{C,mean}}{2} \omega \quad (2)$$

ここで α_{in} , β_{in} の値は圧縮機の運転状態によって変わる値であるが、本解析では α_{in} は 60° に固定し、 β_{in} を調整して対象の圧縮機運転状態に合わせ込むようにした。具体的には定格回転数域到達までは β_{in} を回転数の指数関数式として与え、定格回転数域到達後は、タービン負荷についての関数式、ここでは発電機出力の2次式で与えた。

$$\beta_{in} = f_\omega(\omega), \quad \beta_{in,\omega=\omega_s} = f_W(W_G) \quad (3)$$

図2は、式(4)に示す修正流量、修正回転数によるプロト機圧縮機の圧力比を表す性能曲線⁽⁴⁾である。回転数 ω_n が一定の状態、圧縮機流量が式(2)で決まれば、図2の性能曲線の多項式近似式(5)から圧力比が算出できる。本計算モデルでは、 f_n を修正流量の3次式で近似した。

$$G_{cr} = G \frac{P_{ref}}{P} \sqrt{\frac{T}{T_{ref}}}, \quad \omega_{cr} = \omega \sqrt{\frac{T_{ref}}{T}} \quad (4)$$

$$\left(\frac{P}{P_a} \right)_{\omega_n} = f_n(G_{cr,\omega_n}) \quad (5)$$

図2において、実線で示された回転数以外の任意の回転数 ω においては、式(6)に示すように、その回転数を挟む2本の曲線 (f_{n+1} , f_n) の回転数に関する内分点として

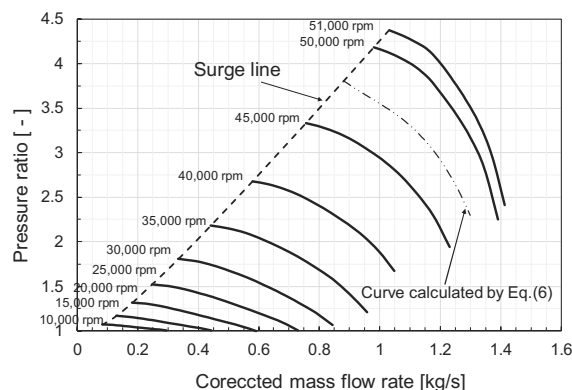


Fig. 2 Characteristic curves of the compressor

算出する。図2の二点鎖線で示す曲線は式(6)によって算出した47,500rpmでの圧力比を表す曲線である。同様な手法を圧縮機の効率に関しても適用している。

$$\left(\frac{P}{P_{atm,\omega}} \right) = \frac{1}{\omega_{n+1} - \omega_n} \left[(\omega - \omega_n) f_{n+1}(G_{cr,\omega}) + (\omega_{n+1} - \omega) f_n(G_{cr,\omega}) \right] \quad (6)$$

4.2.2 遠心圧縮機動力

遠心圧縮機動力 W_C は式(7)で算出する。圧縮機翼車の摩擦損失 ξ_c は回転円板の摩擦係数⁽¹¹⁾を用いた。

$$W_C = \frac{1}{\eta_C} (1 + x) G_a \left(L_e + \xi_C \frac{u_{C,out}^2}{2} + \Delta Q \right) \quad (7)$$

$$L_e = V_{out,cir} u_{out} - V_{in,cir} u_{in,mean} \quad (8)$$

熱の授受量 ΔQ は、隔壁を挟んで背面を合わせるタービン側の燃焼ガスからの熱移動と、WAC実施時に圧縮機内を通過する噴霧水滴の蒸発によって作動流体から奪う蒸発潜熱を考慮する。

4.3 燃焼器の計算モデル

燃焼器の計算モデルは既報⁽⁸⁾と同じものを用いた。つまり、単位燃料流量に対する燃焼器出口の燃焼ガスエンタルピー $h_{g,cmb,out}$ 、単位空気流量に対する燃焼器出口冷却空気エンタルピー $h_{wa,cmb,out}$ 、それらの合流である単位燃料流量当たりのタービンに流入する燃焼ガスのエンタルピー h_g はそれぞれ式(9),(10),(11)に示す通りである。

$$h_{g,cmb,out} = h_{wa,C,out} \frac{A_{liner}}{A_{cmb}} G_{wa} + h_f G_f + \eta_B H_u G_f - \frac{(R_1 + C_1) S_{liner}}{G_f} \quad (9)$$

$$h_{wa,cmb,out} = h_{wa,C,out} + \frac{C_2 S_{liner} - C_3 S_{csng}}{\frac{A_{cmb} - A_{liner}}{A_{cmb}} G_{wa}} \quad (10)$$

$$h_g = \frac{h_{g,cmb,out} G_f + h_{wa,cmb,out} \frac{A_{cmb} - A_{liner}}{A_{cmb}} G_{wa}}{G_f} \quad (11)$$

ここで、今回の解析では、式(9)の燃焼効率 η_B は Lefebvreによって示された既存燃焼器の燃焼効率データを纏めた線図⁽¹²⁾を参照した。燃焼効率は式(12)に示す熱負荷パラメータ θ を用いて整理でき、本解析では図3

に示す燃焼効率曲線を、 θ に関する6次の多項式($f_\eta(\theta)$)で近似した。ここで、図3に示した燃焼効率は、原図¹²⁾が液体燃料に対して纏めた図あることと、本プロト機ではガス燃料を用いることを考慮して、原図の曲線を、高熱負荷領域で燃焼効率が1に漸近するよう原曲線の座標を移動している。なお、プロト機試験では燃焼効率の計測も実施しているため、実測値を用いた場合の結果との比較も行う。

$$\theta = \frac{P_{cmb,in}^{1.75} A_{cmb,in} D_{cmb,in}^{0.75} \exp(T_{cmb,in}/300)}{G_a} \quad (12)$$

$$\eta_B = f_\eta(\theta) \quad (13)$$

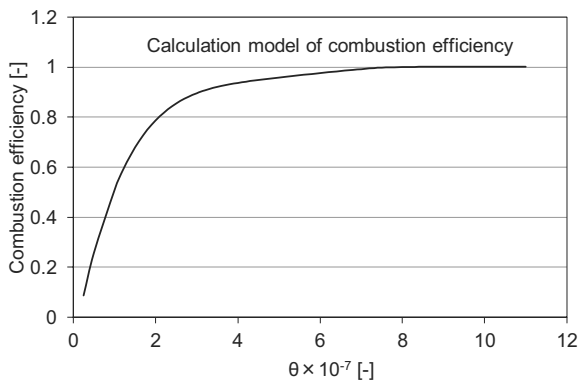


Fig. 3 Calculation model of combustion efficiency

4.4 半径流タービンの計算モデル

タービンの計算モデルも既報⁸⁾と同様なモデルを用いた。半径流タービン出力 W_T はタービン出入口のエンタルピーを用いて式(14)で表される。

$$W_T = \eta_T G_f (h_{0,T,in} - h_{0,T,out}) \quad (14)$$

半径流タービンの効率 η_T は式(15)に示すように、圧力比から決まる最大効率 η_{max} ⁽⁸⁾に、周速と理論速度との比による効率補正係数 η_{ratio} ⁽⁸⁾を掛けて表す。

$$\eta_T = \eta_{max} \eta_{ratio} \quad (15)$$

4.5 再生熱交換器の計算モデル

燃焼器入口の空気温度は再生熱交換器によってタービンを通じた排気ガスと熱交換して昇温され、再生熱交換器の温度効率 η_{rec} を用いて式(16)のように表される。また、温度効率は、熱交換器の構造、並びに通ずる流体の温度及び流量の影響を受けると考えられるため、それらの関数として表すことが望ましい。しかし、ここでは、通過流体の温度及び流量の設計条件が、定格回転数に到達することで整うと仮定した単純なモデルを用いた。つまり、式(17)に示すように設計温度効率を回転数と定格回転数の比で表す簡易な計算モデルとした。温度効率に関しては、燃焼効率と同様に、プロト機運転試験で実測が行われているため、実測の温度効率を用いた場合の計算結果と簡易モデルによる計算結果との比較も行う。

$$T_{cmb,in} = T_{rec,in} + \eta_{rec} (T_{T,out} - T_{rec,in}) \quad (16)$$

$$\eta_{rec} = \frac{T_{cmb,in} - T_{rec,in}}{T_{T,out} - T_{rec,in}} = \eta_{rec,d} \frac{\omega}{\omega_s} \quad (17)$$

4.6 風損及び軸受損失の計算モデル

ロータ損失 W_{loss} は、翼車の風損と軸受損失の和として以下の式(18)で表される。

$$W_{loss} = W_{loss,c} + W_{loss,T} + W_{loss,r} + W_{loss,jb} + W_{loss,tb} \quad (18)$$

翼車の風損は、摩擦円板の風損¹¹⁾で近似した。軸受損失はプロト機軸受用に解析した結果⁹⁾を適用した。つまり、ジャーナル軸受損失に関してはロータの回転数の4次式で近似した。

$$W_{loss,jb} = f_{loss}(\omega) \quad (19)$$

一方、スラスト軸受損失はスラストに依存するため、本来は回転数のみの関数では表せない。プロト機試験の実測では、定格回転数で発電機出力が100kW以上の出力状態で300～400Nのスラストが作用している⁹⁾。400Nのスラストが作用する時のスラスト軸受損失はジャーナル軸受損失の約1.25倍になっている⁹⁾。本計算プログラムではスラストの計算は行っていないため、スラスト軸受損失の予測は困難であるが、参考文献(9)の軸受損失の検討結果を参考に、スラスト軸受損失もジャーナル軸受損失と同様に回転数依存と仮定し式(19)で示されるジャーナル軸受損失の1.3倍に設定した。この仮定は大変に粗い設定であるが、タービン出力、圧縮機動力、及び翼車風損に比べると軸受損失自体は一桁小さい値になるため、動作結果に大きな影響は与えないと判断した。

4.7 WAC及びHATの計算モデル

WAC及びHATでの噴霧液滴の蒸発計算は従来から多くの研究者で用いられている蒸発計算モデル¹³⁾と同等のものを適用した。ここではその詳細の記述は省略するが、液滴の温度変化と気体の温度変化は式(20),(21)で表される。

$$\frac{DT_d}{Dt} = \frac{Q - m_{d,ev} L}{m_d C_{p,d}} \quad (20)$$

$$\frac{DT_a}{Dt} = \frac{-Q}{m_{wa} C_{p,wa}} \quad (21)$$

WACの場合は圧縮機入口領域と、入口領域で蒸発しきれない液滴は圧縮機翼車内においても蒸発計算を実施する。一方、HATに関しては、圧縮機吐出側と再生熱交換器間に設置される直管部において蒸発計算を実施する。水滴噴霧によって空気温度の低下と水蒸気量の増加が生じるが、噴霧後のエンタルピーの計算で、低下した空気温度を用いる場合は、水滴の蒸発に要された蒸発潜熱を加える必要がある。水滴噴霧後の再生熱交換器入口のエンタルピーは式(22)のようになる。

$$H_{rec,in} = G_a h_a + G_a (x + x_{ev,had}) h_{wa} + N_d [(m_d - m_{d,ev}) h_d + m_{d,ev} L] \quad (22)$$

5. 実測値及び実験値からの諸量算出方法

プロト機運転試験では、各所の温度計測、圧縮機及びタービン出入口の圧力計測を行っている。圧縮機空気流量は、図1に示したタービン本体の圧縮機上流に設置した吸気ダクト（図示せず）内のフィルタ差圧から換算した。また、燃料流量、噴霧水流量はそれぞれガス流量計（東京計装TF-2441）、水流量計（キーエンスFD-M）によって計測した。発電機出力は発電機端出力のワットメータ（横河WT1600）による計測値を発電機効率で除した値とした。発電機効率は発電機端出力と発電機ステータの冷却水温度上昇から算出した発電機損失から算出した⁽⁴⁾。

圧縮機動力は、圧縮機出入口の全温度から式(23)によって算出した。タービン出力も同様にタービン出入口の全温度の計測値から算出した。タービン通過流量は、圧縮機空気流量に燃料流量と加湿噴霧水流量を加えた流量である。

$$W_C = G_{w,c} (C_{p,c,out} T_{0,c,out} - C_{p,c,in} T_{0,c,in}) \quad (23)$$

$$W_T = G_{g,T} (C_{p,T,in} T_{0,T,in} - C_{p,T,out} T_{0,T,out}) \quad (24)$$

6. 計算条件

計算に必要な入力データは、翼車、燃焼器等の機器の代表寸法とロータの慣性モーメント等の構造データと、ロータ回転数、燃料流量、噴霧水流量等の運転制御データが必要になる。図4にロータ回転数と燃料流量の入力データを、図5に噴霧水の供給データを示す。入力データは、プロト機試験データを区分的に時間に対して直線近似して入力した。燃料流量の試験データは微小な変動を示すが、起動開始から600秒までの領域を除くと直線近似した入力値と試験データの偏差は最大で4.3%であるが、この点を除いた領域においては2～3%台に収まっている。燃料供給は回転数40,000rpmまではパイロットノズルへの燃料供給のみで無負荷に近い運転で昇速していく。40,000rpmで主燃料ノズルにも燃料を供給して、回転数を増加するとともに発電出力の増加を行う。なお、主燃料の供給は、緩慢燃焼方式⁽⁵⁾の主燃料ノズルの着火を確実にするため再生熱交換器の効果が現れるまでは計画投入量よりも多めに供給し、その後、規定流量まで絞った。今回、計算結果の検証に用いたプロト機試験は、マイクロタービンでHATを実施する初めての試験であったため、加湿による急激な出力増加等の急激な変化が生じた場合でもシステムを安全に制御できるようにするため、運転最高回転数を設計定格回転数よりやや下げた50,490rpmに抑えた。実際には、WAC及びHAT実施の直前、3,200秒経過後に回転数を更に500rpm下げた49,990rpmにした。

噴霧水の供給は、初めにWACの試噴霧を単発的に2回実施して、その後WACの連続噴霧に移り、WAC連続

実施中に、HATの試噴霧を単発的に3回実施し、その後HATの連続噴霧を行った。

プロト機の着火回転数は5,000rpmであるが、この回転数では圧縮機の吐出圧が低く、圧縮機性能曲線上での予測精度が十分でないため、計算の回転数初期値を10,000rpmとした。入力として10,000rpmの回転数と共に燃料流量を与え、タービンシステムの動作計算を実施する。その後、時間の経過と共に回転数と燃料流量に、図4に示す計算条件を与え計算を継続する。さらに図5に示すタイミングで噴霧水を供給する。最大供給量は定格空気流量の2%程度である。なお計算に用いた大気条件は、気温30℃、相対湿度70%、気圧100kPaである。

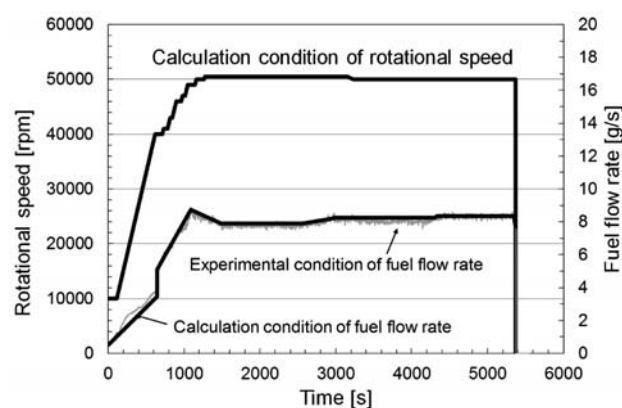


Fig. 4 Calculation conditions

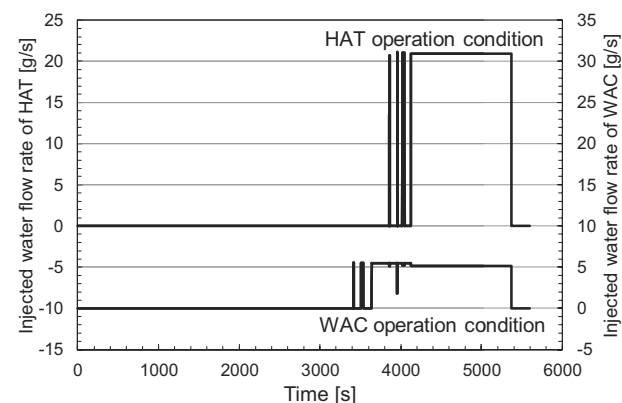


Fig. 5 Calculation conditions of WAC and HAT

7. 計算結果

7.1 圧縮機起動曲線の比較

図6に修正流量と圧力比で表される圧縮機性能マップ上にプロットした起動曲線の比較を示す。実線が計算結果で、丸印が実験結果である。式(3)に示したように、定格回転数領域までは、圧力比は回転数のみに依存すると仮定して実験値に合わせ込んだため、概ね良好な一致を示す。今回の計算では、49,990 rpmと50,490 rpmの回転数を β_{in} のタービン負荷依存領域として式(3)をモデル化した。しかし、実験では、回転数49,990～50,490 rpmで修正流量が1.06～1.20 kg/sまで変化するのに対して、

計算結果の流量領域は狭い。 β_{in} のタービン負荷依存性のモデル化が十分でないことも原因であるが、本計算モデルの場合、後の図9に示すように発電機出力が定格回転数領域到達後に、実験値に比べて大幅な変化を示さないことも要因として挙げられる。定格回転数領域の圧縮機作動点は、発電機出力に直接影響を及ぼす他計算モデルの影響を受けることが分かる。

7.2 圧力及び温度の比較

図7に圧縮機吐出圧の計算結果と実験結果の比較を示す。全体的に計算結果は実験結果に近い傾向を示しており、本計算で用いた圧縮機計算モデルは妥当と言える。一方、約1000～3200秒で計算結果が実験結果よりも高い圧力を示している。本計算モデルでは、この領域で発電機出力が実験値に比べて大きいいため、 β_{in} が発電機出力の増加に伴い小さくなり圧力比が増加するためである。

3200秒時点で回転数を下げ、約3400秒以降に単発的にWACの試噴霧を行っているが、その噴霧のタイミングで圧力上昇が発生しており、圧力上昇幅と共に計算結果は実験値と良好に一致している。WAC実施による修正回転数の増加で作動点が高压側に移動することが計算でも捉えられていることを示すものである。

図8に燃焼器入口およびタービン入口のガス温度の計算結果と実験結果の比較を示す。1000秒以降3000秒程度までの試験運転データの挙動と計算結果の挙動が一致しないが、これは図6及び図7の結果でも考察したように、この領域の燃焼効率と再生熱交換器の温度効率の計算モデルの影響によるもので、この点に関しては7.4で議論する。図8には再生熱交換器入口での空気温度の計算結果も示したが、HATの実施により空気温度の明確な低下が確認できる。

7.3 圧縮機動力、タービン出力及び発電機出力の比較

図9にタービン出力、圧縮機動力及び発電機出力の計算結果と実験結果の比較を示す。これまでの結果と同様に、タービン出力と発電機出力では、実験結果に見られる約1000～3000秒までの緩やかな変化が計算結果では現れていない。しかし、WAC及びHAT実施時に表れる発電機出力の急激な増加が計算結果においても捉えられていることが分かる。

7.4 温度効率と燃焼効率の計算モデルの影響

図10に再生熱交換器の温度効率として図12に示す実験値を近似した場合の計算結果を実線で示す。破線は図9の計算結果と同じ値である。図12に示すように温度効率の計算モデルは、定格回転数に到達する約1300秒で設計温度効率に到達するが、実験値では設計値に到達するのは3600秒以降と遅い領域である。温度効率に実験値を用いることで、定格回転数到達直後からのタービン出力と発電機出力の増加は抑えられている。しかし、その変化の傾向は実験値と一致していない。出力変化の傾向は燃焼効率の影響を強く受けている。

図11に実測の燃焼効率を与えた場合の計算結果を実線

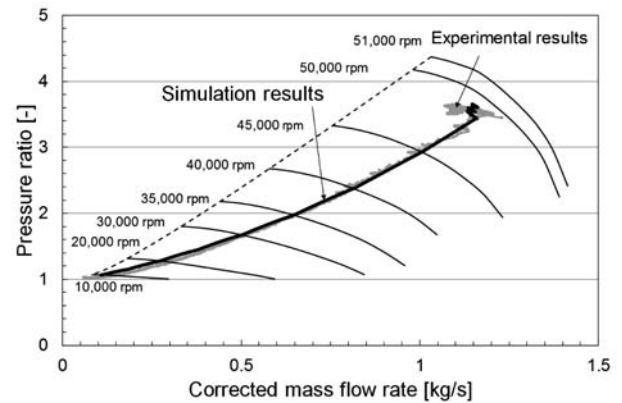


Fig. 6 Running curve

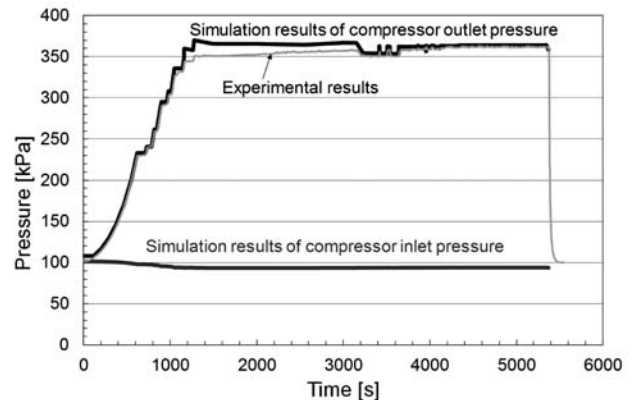


Fig. 7 Pressure histories of compressor

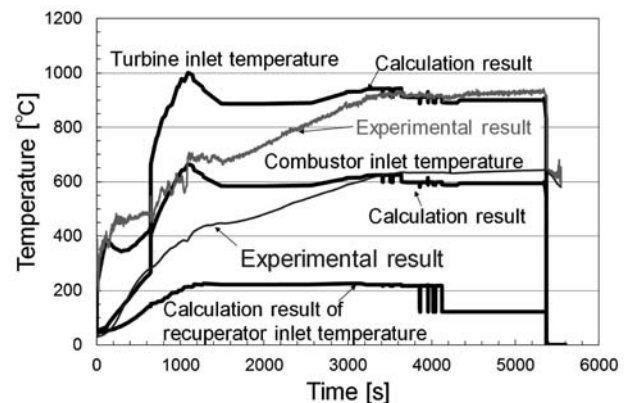


Fig. 8 Temperature histories

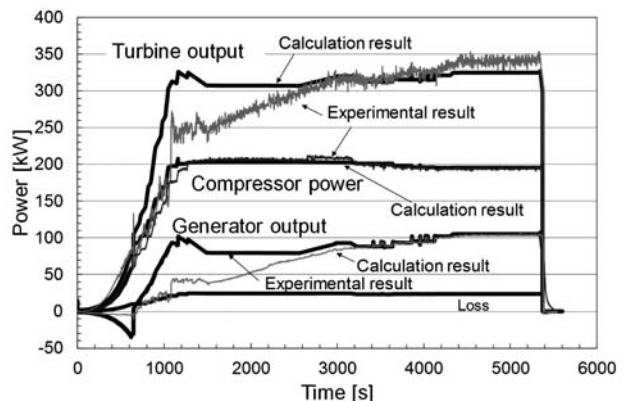


Fig. 9 Power histories

で示す。再生熱交換器の温度効率を回転数比例で与える計算モデルを用いても、燃焼効率に実験値を用いることで、タービン出力も発電機出力も実験値に近づく。特に約1000～3000秒までの徐々に出力増加していく状態が捉えられていることが分かる。本マイクロタービンシステムでは、再生熱交換器の熱容量により熱交換の効果の表れに時間を要す。これは温度効率に直接影響し、また燃料流量の供給方法にも影響するため、結果的には燃焼効率にも影響を及ぼす。温度効率及び燃焼効率の計算モデルには、今後、再生熱交換器の効果の時間遅れを考慮していく必要があると思われる。なお、温度効率も燃焼効率も圧縮機吐出後に関連する物理量のため、図10及び図11において、これらの計算モデルは、圧縮機動力の結果にはほとんど影響を及ぼしていない。

7.5 圧縮機への入熱の影響

4.4.2で述べたように本計算ではタービン側から圧縮機側への熱移動を考慮している。熱移動量の算出は、この部分の構造が複雑なため簡易的な伝熱モデルを作成することが困難なため、ここではタービン入口ガスと圧縮機出口空気の温度差に比例した量の温度上昇が起こると仮定した単純な熱移動モデルを用いた。図9～11に示した計算結果では、その比例量を0.04として計算した結果である。図13に上記の熱移動を零とした結果を破線で示す。図13の実線は図11に示した実線と同じ計算結果である。定格回転数到達直後から、圧縮機動力に大きな差異が生じる。その差は発電機出力の増加に伴い更に広がる。定格回転数到達直後においても入熱の有無で発電機出力に約30kWの影響が表れる。マイクロタービンのような小型タービンでは圧縮機への熱移動はタービンシステムの性能に大きな影響を及ぼすことが分かる。

7.6 WAC及びHATが出力に及ぼす影響

図14の実線は、図13に示した圧縮機への入熱を考慮した場合と同じ計算結果である。図14の破線は噴霧水量を零とした場合の計算結果である。WAC実施時の圧縮機流入空気温度の低下量は計算では約4℃と実測値の約3℃と同等であった。WACによる圧縮機作動点の高圧側への移動によりタービン出力が増加する。また、僅かであるが圧縮機動力が減少する。圧縮機通過中の水滴蒸発計算による圧縮機動力の低減量は約3.4kWであり、この効果が表れているものと考えられる。発電機出力のWAC前後の変化からWACの効果として約6.5kWの出力増加が確認できる。また、HAT実施でもタービン出力の増加と圧縮機動力の低減が見られる。圧縮機動力の低減は燃焼温度の低下による入熱量低減の影響が考えられる。HATにより発電機出力が約9kW増加し、WAC開始直前から比較してHAT実施後において約15kWの出力増加を示す。これらの出力増加量はプロト機実測値⁽⁴⁾のWACによる出力増加約6kW、HATによる出力増加11kW、WAC開始直前からの増加量17kWとほぼ同等の値を示している。

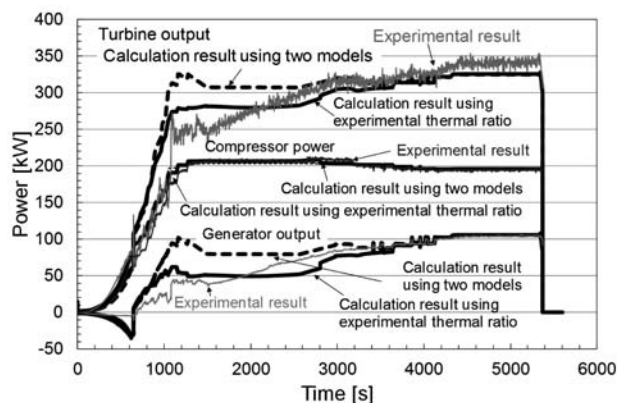


Fig. 10 Effect of calculation model of thermal ratio

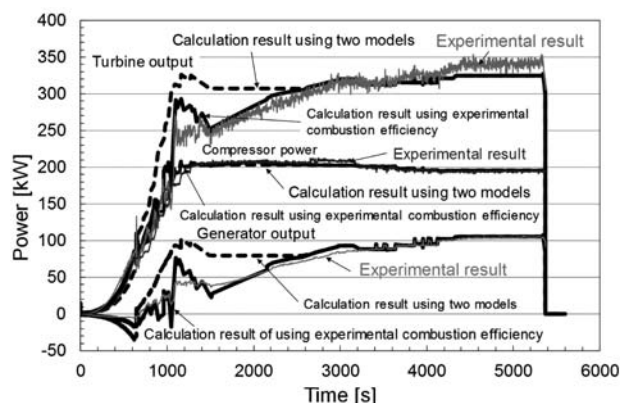


Fig. 11 Effect of calculation model of combustion efficiency

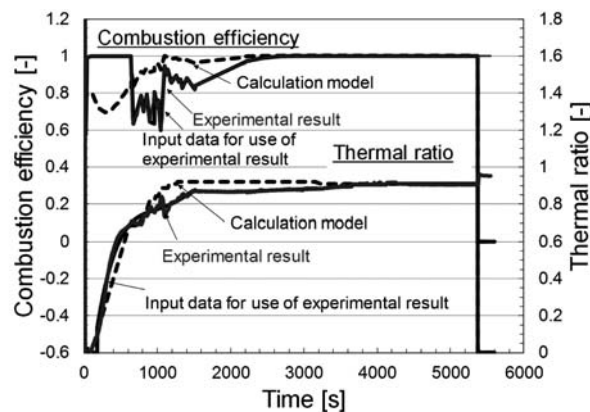


Fig. 12 Combustion efficiency and thermal ratio histories

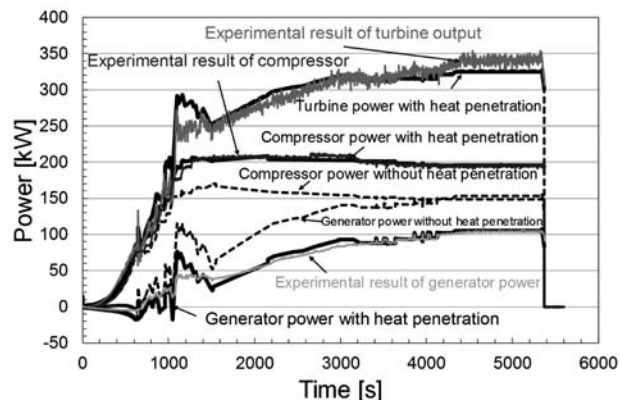


Fig. 13 Effect of heat penetration into compressor

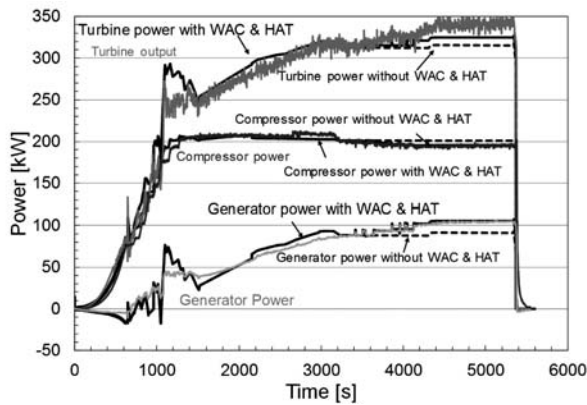


Fig. 14 Effects of WAC and HAT

WAC及びHATの実施で圧縮機動力約5kWの減少と、タービン出力約9.5kWの増加が見られ、発電機出力は約14kWの増加を示している。WAC及びHATによる発電機出力増加の約1/3が圧縮機動力の減少から、また2/3がタービン出力の増加によってもたらされている。なお、本計算においてWAC及びHATとも供給した噴霧水の全量蒸発は見られなかったが、プロト機試験ではWAC及びHATともドレンは回収されなかった⁽⁴⁾ので、本計算では、噴霧水の残量は、それぞれ圧縮機吐出側流路と再生熱交換器で蒸発すると仮定して、空気の湿度に加えた。

8. 結言

WAC及びHATを適用した高湿分空気利用マイクロタービンを対象としたダイナミックシミュレータを開発し、高湿分空気利用マイクロタービンの試験運転での実験結果と比較して以下の結論を得た。

- (1) 圧縮機流入速度係数 β_{in} を回転数及び発電機出力の関数として起動曲線に合わせ込む圧縮機計算モデルにより、起動時及び定格回転数領域におけるタービンシステムの動作を捉えることができた。
- (2) 再生サイクルタービンシステムでは、燃焼効率及び再生熱交換器の温度効率の計算モデルはシステム動作に影響を及ぼし、特に起動時の動作には燃焼効率の与え方が大きく影響を及ぼす。
- (3) 圧縮機へのタービン側からの熱移動を考慮することで圧縮機動力の計算結果は実験値と良好な一致を示し、マイクロタービンにおける圧縮機への熱移動の発電機出力に及ぼす影響が示唆された。
- (4) 水滴蒸発の簡易計算モデルを導入することで、WAC及びHATの効果を再現でき、実験値と同等の発電機出力の増加を得た。高湿分空気利用タービンの動作解析における本計算プログラムの妥当性が示せた。

謝辞

本研究の計算プログラム作成は、東北電力株式会社と東北大学の共同研究部門である電力エネルギー未来技術共同研究部門で実施されたもので、東北電力株式会社から

は研究遂行に対して多くの支援を頂きました。ご支援に対し深く感謝の意を示します。

参考文献

- (1) 小林由則, 加播達雄, 安藤喜昌, 西浦雅則, SOFCとGTのハイブリッド及びトリプルコンバインドシステムについて, 日本ガスタービン学会誌, 40-3 (2012), pp. 89-93.
- (2) Parente J., Traverso A., Massardo A. F., Micro humid air cycle, Part A: Thermodynamic and technical aspect, ASME paper GT-2003-38326, 2003.
- (3) Williamson T., Luker M., Hack R. L., Microturbine performance improvement through the implementation of inlet air cooling, ASME paper GT2005-68377, 2005.
- (4) Nakano S., Kishibe T., Araki H., Yagi M., Tsubouchi K., Ichinose M., Hayasaka Y., Sasaki M., Inoue T., Yamaguchi K., Shiraiwa H., Development of a 150 kW microturbine system which applies the humid air turbine cycle, ASME paper GT2007-28192, 2007.
- (5) Zhang S., Xiao Y., Steady-state off-design thermodynamic performance analysis of a humid air turbine based on a micro turbine, ASME paper GT2006-90335, 2006.
- (6) Nikpey H., Majoumerd M., Assadi M., Breuhaus P., Thermodynamic analysis of innovative micro gas turbine cycle, ASME paper GT2014-26917, 2014.
- (7) De Paepe W., Carrero M. M., Bram S., Contino F., T100 micro gas turbine converted to full humid air operation - A thermodynamic performance analysis, ASME paper GT2015-43267, 2015.
- (8) 関慧一, 中野晋, 竹田陽一, マイクロガスタービンの動作解析, 日本ガスタービン学会誌 Vol. 43 No. 3 2015, pp. 68-74.
- (9) Nakano S., Kishibe T., Inoue T., Shiraiwa H., An advanced microturbine system with water-lubricated bearing, Int. J. Rotating Machinery, 2009, p.718107.
- (10) 濱島操: ガスタービン設計, 近代工業出版, (1965).
- (11) 妹尾泰利: 内部流れ学と流体機械, 養賢堂, (1982).
- (12) Lefebvre A. H., Gas Turbine Combustion, Taylor & Francis, (1983).
- (13) 明連千尋, 高橋康雄, 森崎哲郎, 川村康太, 柴田貴範, 岸部忠晴, 高湿分空気利用ガスタービンシステム総合試験設備を用いた吸気噴霧冷却時の軸流圧縮機性能検討, 日本ガスタービン学会誌, 43-1 (2015), pp. 64-65.
- (14) 佐々木学, 早坂靖, 一瀬雅哉, 百々聡, 中野晋, 八木学, 岸部忠晴, 坪内邦良, 山口和幸, 井上知昭, 福島敏彦, マイクロタービン発電機特性評価, ガスタービン定期講演会講演, 33 (2005), pp. 143-146.
- (15) Dodo, S., Nakano, S., Inoue, T., Ichinose, M., Yagi, M., Tsubouchi, K., Yamaguchi, K., and Hayasaka, Y., 2004, "Development of an advanced microturbine system using humid air turbine cycle". In ASME Conference Proceedings, no. ASME paper GT2004-54337, pp. 167-174.

250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステム向け マイクロガスタービンの開発

Development of the Micro Gas Turbine for 250kW Class SOFC-MGT Hybrid Systems

河野 雅人^{*1}
KAWANO Masato

新井 啓介^{*1}
ARAI Keisuke

安井 芳則^{*1}
YASUI Yoshinori

ABSTRACT

This report is about describes development and a proof evaluation of the micro gas turbine to use for the hybrid system which coupled micro gas turbine with SOFC(Solid Oxide Fuel Cells). Gas turbine supplies compressed air to SOFC. Gas turbine generates electricity with the fuel which finished a reaction in SOFC and with the air which finished a reaction in SOFC. We remodeled the main body of gas turbine to fit SOFC system, and developed the combustor which could burn with low-calorie fuel from SOFC. We developed the control to link SOFC, and to control the gas turbine for SOFC.

Key words : Micro Gas Turbine, Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs), Hybrid System, Compressor, Combustor, Control

1. はじめに

株式会社トヨタタービンアンドシステムは主にコージェネレーション用50kW級マイクロガスタービン（以下MGT）と300kW級MGTを製造、販売してきた。ガスタービンの用途利用開発として50kW級のMGTをベースとして2002年よりMCFC（熔融炭酸塩型燃料電池）-MGTハイブリッドシステムの開発に参画し、5000時間以上の運転実績を積んだ。

その後、以前よりSOFC（固体酸化物型燃料電池）ガスタービン複合発電システムに取り組んでいた三菱重工業株式会社（現三菱日立パワーシステムズ株式会社）とトヨタ自動車株式会社においてSOFCとMGTハイブリッドシステムの開発を2008年より開始した。トヨタ自動車株式会社（トヨタタービンアンドシステム）はMGT本体およびその制御、三菱重工業株式会社においてSOFCおよび補機ユニット（BOP）と全体制御を担当している。2009年より三菱重工業の長崎造船所においてシステム試験を開始、2012年より東京ガス株式会社千住テクノステーションにおいて連続運転試験を実施し4100時間以上のシステム運転時間を達成した。さらに2015年より国立大学法人九州大学において、より高出力密度の新型セルスタック（15式セルスタック）を利用した実証

試験機の運転を開始し、現在運転を継続中である。

本報告ではSOFC-MGTハイブリッドシステムに使用するガスタービンの開発内容と評価状況について報告する。

2. SOFC-MGTハイブリッドシステムフロー

SOFCとガスタービンを組合せたシステムをSOFCとガスタービンという異なるエネルギー変換プロセスを組合せたことからハイブリッドシステムと呼んでいる。ハイブリッドシステムのシステムフローを図1に示す。

SOFCはセル内で酸化剤（空気）と還元剤（燃料）を反応されることにより電力を取り出しており、酸化剤および還元剤を連続的に供給する必要がある。燃料電池への運転圧力を高めることにより、燃料電池の出力を向上させることができる。ガスタービンの圧縮機は、SOFCに高圧の空気を供給するブロア（カソードブロア）の役割を果たしている。またSOFCにおいて反応を終えた空気を排空気と呼んでいるが排空気は高い圧力と温度を維持しておりこの排空気をMGTのタービンに供給することで電力に変換でき、システム効率の向上に貢献できる。本システムではMGTのタービン出口に再生熱交換器を設置して、MGT排気を利用してSOFCへの圧縮空気の加熱をおこない、SOFCへの空気を加熱するエネルギーの低減を図っている。

本システムでは燃料極内の高温環境下で蒸気と燃料を供給することにより内部改質を実現している。燃料及び蒸気は燃料極側に供給され循環するが、SOFCの燃料極で反応を終えた可燃成分を含む一部がガスタービンに供

原稿受付 2016年9月5日

査読完了 2017年4月6日

*1 (株)トヨタタービンアンドシステム
〒471-8573 豊田市元町1番地
トヨタ自動車(株) 元町工場内

給される。SOFC反応後のMGTに供給される燃料を排燃料と呼び、ガスタービンの燃料として再利用される。

システムの定格運転中はSOFCとのシステムバランスを考慮してMGTは部分負荷（MGT発電出力20～30kW）で運転される。

システム運用において、起動時のSOFC昇圧とSOFC昇温についてMGTを高負荷で運転し、起動時間の短縮に貢献している。また停止時についてもMGTを低負荷運転することによりシステム全体の冷却をおこなっている。本システムのMGTはSOFCバイパス回路を使用することにより単独運転が可能である。

3. SOFC（固体酸化物型燃料電池）

燃料電池は燃料の持つ化学エネルギーを直接電力に変換することができるが、使用する電解質により方式が分類される。SOFCは電解質としてセラミックスで構成され、高い動作温度で作動する燃料電池である。高い運転温度が必要だが、発電効率50%以上の非常に高い効率を得ることができる。三菱日立パワーシステムズにおいて開発を進めているSOFCは、円筒形セルスタックを組合せカートリッジを構成し、複数カートリッジを組合せてモジュール化、モジュールを圧力容器に収めた構成となっている（図2）。高い空気圧力において運転が可能であり、モジュールの組合せにより出力を変更でき、ガスタービンの空気量に合わせた出力構成が可能である。

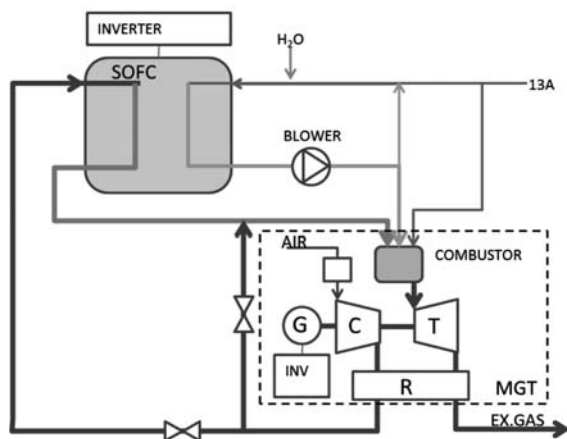


Fig. 1 Flow diagram of SOFC-MGT hybrid system.

4. 50kW級MGT

50kW級MGT（TG051R）は2001年よりコージェネレーションシステム用として販売を開始、150台以上の販売と累計300万時間以上の運転実績がある。

エンジン仕様を表1に示す。エンジン構成として遠心圧縮機1段とラジアルタービン1段で構成されており、軸受の潤滑はオイル潤滑をおこなっている。都市ガスやLPG、灯油に対応した各燃焼器を準備しており、都市ガスは予混合方式、LPG、灯油仕様は拡散燃焼方式を採用している。またプレートフィン式の再生熱交換器を使用することによりガスタービンの排熱から燃焼用圧縮空気を加熱することで熱効率を高めている。ガスタービンにおいて発生した動力は減速機を介さず、エンジン同軸上に配置された高速発電機を用いてエンジン回転数から直接電力変換を行い、インバータを利用して系統に接続している。

50kW級ガスタービンはコージェネレーションシステムとしてパッケージ化されておりガスタービン本体、再生熱交換器、制御盤、連系インバータ、燃料ガス圧縮機、さらに簡易温水ボイラを内蔵したオールインワンパッケージとなっている（図3）。今回250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステム向けのガスタービンのベースとしてTG051Rを使用している。

Table 1 Specifications of Micro Gas Turbine

エンジン型式	TG051R
形式	再生開放サイクル 1軸式
定格軸出力	57 kW (15℃)
定格回転速度	80000 min ⁻¹
圧力比	3.6
空気流量	0.493kg/s
圧縮機	遠心式 1段
タービン	ラジアル式 1段
燃焼方式	希薄予混合燃焼
排気温度	650℃
潤滑油	合成油
起動方式	電気式
発電機	インバータ式高速発電機

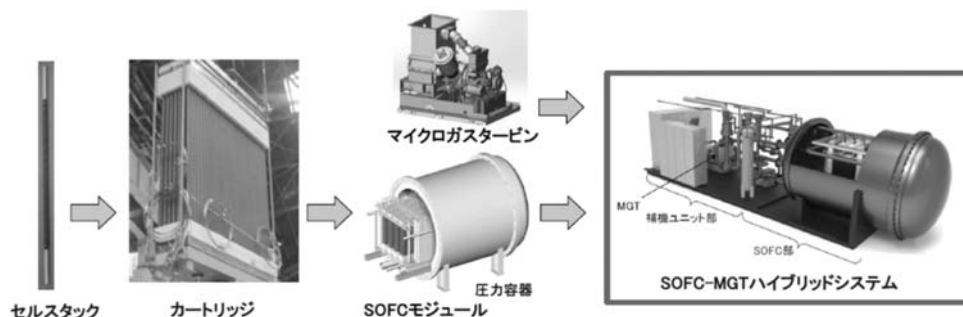


Fig. 2 Configuration of SOFC-MGT hybrid system using segmented-in-series tubular type cell-stack.
(It was provided by MHPS)

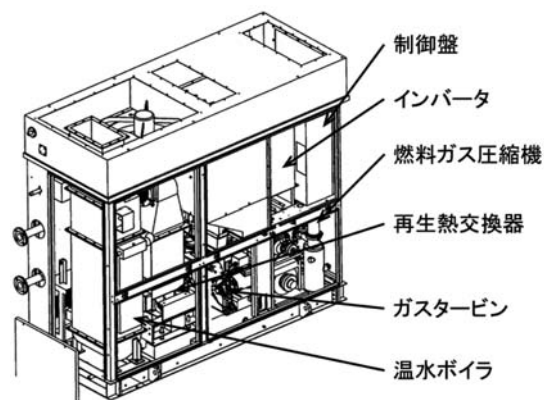


Fig. 3 50kW Class Micro Gas Turbine.

5. システム適応のためのMGT変更点

5.1 ガスタービン本体

SOFC-MGTハイブリッドシステム向けのMGTの断面図を図4, SOFCから供給される排空気および排燃料の条件を表2に示す。

MGTはSOFCから排空気と排燃料が供給されることになるが, SOFCの排燃料の熱量は都市ガスの1/18と非常に低く, 流量はMGTの定格空気流量に対して8.5%と非常に多い。SOFCの排燃料を供給した場合, タービン側の空気流量が増加し, さらにSOFCの圧損も加わるため, 圧縮機の圧力が上昇し圧縮機のサージに近づくことになる。MGT作動域におけるサージを防止する為, 圧縮機側の形状を変更し小容量化することで対応した。コジェネ向けのTG051Rと比較して8%の空気流量低減を図っている。空気流量低下に伴い, 通常MGT性能としては最大出力が10%程度低下する(図5)。

SOFCへ圧縮空気を供給する為, 再生熱交換器の構造を変更し圧縮空気を外部に取り出せるように形状の見直しをはかった。あわせてSOFCからの排空気をMGTに供給できるようにエンジンハウジングの変更をおこなっている。

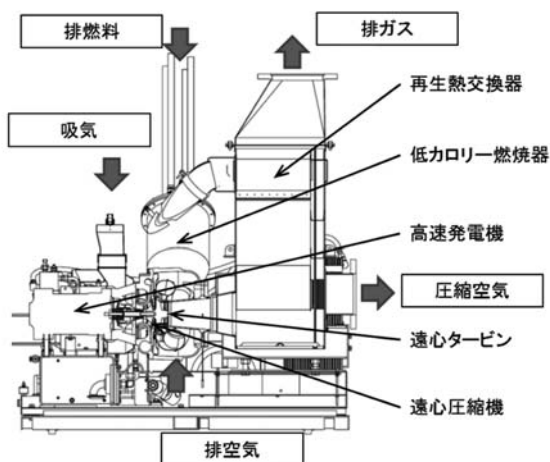
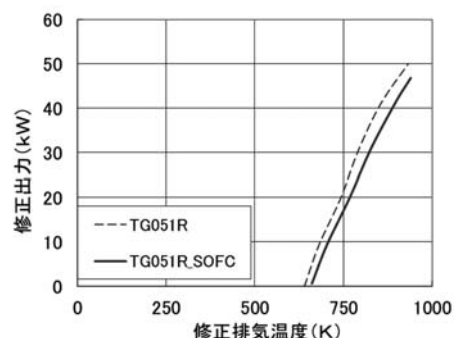


Fig. 4 Micro Gas Turbine cross section view

Table 2 Gas condition from SOFC.

	状態		条件
	温度	℃	
排空気	流量	Nm ³ /h	564
	熱量	MJ/Nm ³	1270
排燃料	温度	℃	300
	流量	Nm ³ /h	115.7
	熱量	MJ/Nm ³	2.2



(修正：大気15℃条件に修正した値)

Fig. 5 Power decreasing TG051R for SOFC

5.2 低カロリー燃焼器

SOFCから供給されるガスの条件を表2に示す。燃料として使用する排燃料中の可燃成分は水素, COなどにより構成されているが, SOFCにおいて反応が終了したガスであり, 可燃成分が減少し, 水分が多いためボリウムが大きくかつ熱量が非常に低くなっている。そのため通常の都市ガス燃焼器では燃焼が困難であった。さらにシステム効率を高めるためMGTの燃焼器内の火炎を維持するためのメイン燃料(パイロット燃料)を最少にする必要があった。SOFCの排空気はSOFCにおいて酸素が消費されるため酸素濃度が15% VOL程度まで減少しており, このため低酸素化下において低カロリー燃料を安定的に燃焼するために専用燃焼器を開発した。燃焼器の構造を図6に示す。燃焼器は都市ガスを供給し, 火炎を維持するパイロット噴孔と, 低カロリーな排燃料を供給する排燃料噴孔を個別に配置しており噴孔形状, 配置, スワール等パラメータについては解析および実験により形状を決定した。また低カロリー燃料の燃焼時間を確保するために燃焼室容積をコジェネ用と比較して約2.5倍に大型化している。SOFCとの連係運転中は部分負荷運転が想定されており, 部分負荷時燃焼室内の温度を確保する為, 都市ガス仕様の予混合燃焼器で実績のある無冷却ライナーを採用している。燃焼器については社内に設置したSOFC模擬試験ベンチにおいて模擬排燃料の条件下による試験を実施し, SOFC連係条件下における燃焼器および制御の適合を図った。図7に模擬排燃料による試験結果を示す。SOFC連係条件下における模擬排燃料ガス(熱量条件あわせたガス)をMGTに供給しMGTのメイン燃料である都市ガス(13A流量)が減少しているが, MGTの発電は維持できていることが確認できる。

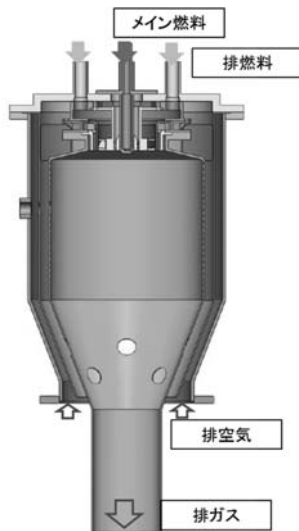


Fig. 6 Combustor cross section view

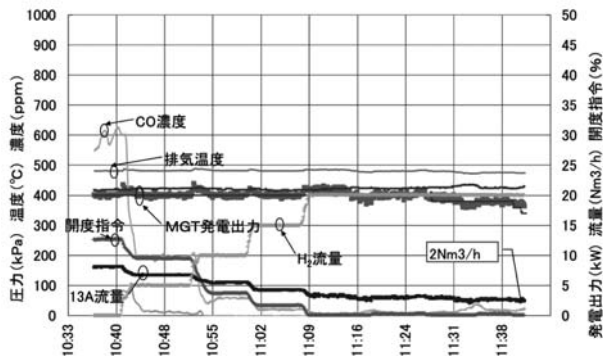


Fig. 7 Combustion test result

5.3 制御

SOFCとの連係運転をおこなうため、専用の制御を開発した。本制御ではMGTのメイン燃料（13A）制御でMGTの負荷を制御する通常運転モードとSOFCとの連係運転をおこなうCC（コンバインドサイクル）運転モードを切り替えて運転をおこなう。CC運転モードではMGTの燃料制御とMGTの発電出力制御を併用した運転制御となっておりSOFCからの排燃料熱量の変動にも追従できる制御となっている。図8にCC運転モードの切替前後の運転チャートを示す。切り換え前は燃料制御

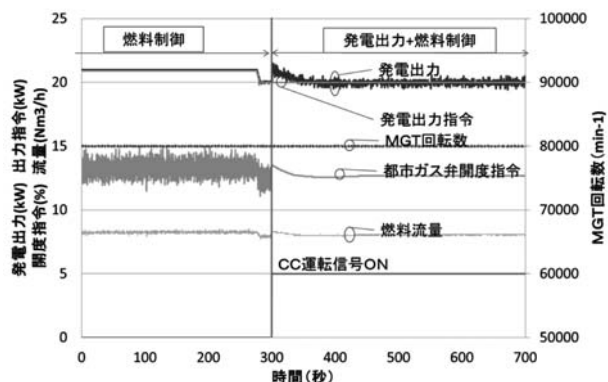


Fig. 8 Operation mode change

（都市ガス弁開度指令）においてエンジン回転数を維持する制御がされているが、切替後は連系インバータへの発電出力を制御し、回転数を維持するように制御していることが確認できる。CC運転モードにおいてはMGTのメイン燃料を絞り燃料調量弁の最小開度で運転することにより、SOFCシステムとしての高効率運転が可能となる。

6. 実証評価

2009年より三菱重工業株式会社の長崎工場内に設置された、SOFC評価設備においてシステム構成確認試験と制御開発を行った。2012年以降、各フィールドにおいて実証評価を開始した。

6.1 10式実証試験

2012年より東京ガス株式会社千住テクノステーション内に設置された10式実証評価機（図9）において運転評価を開始、4100時間の連続運転、発電効率50.2%（LHV）を達成した（図10）。その間、SOFC側、MGT側に異常発生することなく運転することができた。連続運転試験終了後にMGTの燃焼確認試験を実施し、メイン燃料低減状態においても火炎が維持できることを確認した（図11）。

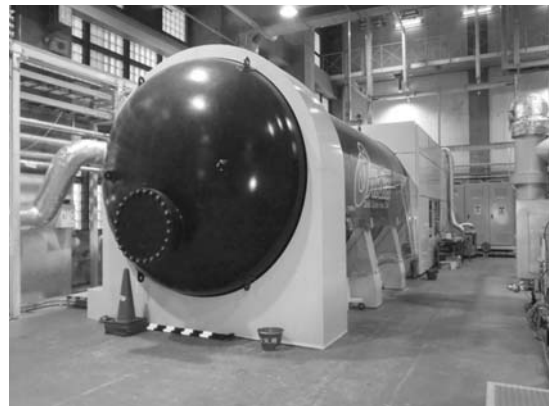
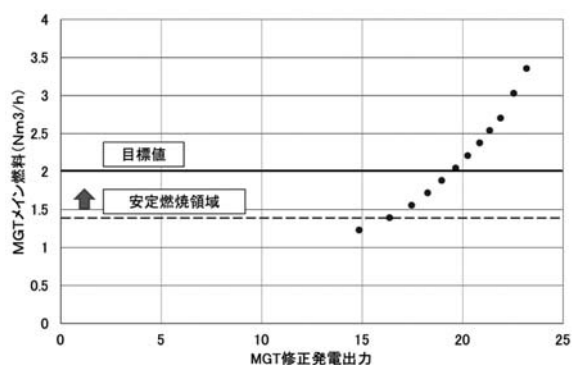


Fig. 9 Appearance of model 10 SOFC-MGT Installed at the Tokyo Gas Co.,Ltd. Senju Techno Station (It was provided by MHPS)



Fig. 10 Long term behavior of model 10 SOFC-MGT hybrid system installed at Tokyo Gas Co.,Ltd.'s Senju Techno Station (It was provided by MHPS)



(MGT修正発電出力：大気15℃条件に修正したMGT発電出力)

Fig. 11 Experiment to reduce main fuel

6.2 15式実証試験

2015年より国立大学法人九州大学伊都キャンパス内NEXT-FC内に15式実証評価機を設置し評価を開始した(図12)。15式実証評価機は細径、長尺化した15式セルスタックを採用し、密充填することによりSOFC圧力容器の小型化をはかると共に、補機ユニットのコンパクト化をはかったシステムである。10式システムまではMGTパッケージ全体をSOFCの補機ユニット内に設置していたが、15式においてはMGTのパッケージを廃止し、MGTエンジンユニット単体のみをSOFCの補機ユニット内に設置するように変更した(図13)。MGT制御盤についてはSOFCの盤内にMGT用の連系インバータとともに納められている。

2015年5月より運転を開始し、瞬低、周辺設備トラブル、熊本地震等によるシステムトリップに見舞われたが、システムは安全に停止し、ただちに再起動をおこない運転を継続している。現在9000時間以上の運転時間と発電効率54%（吸気温度15℃換算LHV基準）を達成している。



Fig. 12 Appearance of model 15 SOFC-MGT hybrid system installed at the Next-Generation Fuel Cell Research Center (NEXT-FC) in Kyushu University (It was provided by MHPS)



Fig. 13 MGT installed in SOFC

7. 今後の展開

2016年より実証評価としてさらに複数台のシステム評価をする予定となっており、各サイトにおいて運転評価を実施していく計画である。各実証評価機においてシステムの信頼性、機能の向上を図ると共に、実機運転による機器の耐久性の確認を実施していく。これらの実証評価からのフィードバックを活かし商品性を向上させ、2017年度より本システムの市場投入を目指している。

7.1 燃料多様化

ガスタービンは燃料多様性が高い熱機関といわれており、コジェネ用MGTにおいても様々な燃料に対応してきた。SOFCは内部改質において燃料の改質をおこない、さらに水素だけでなくCOも発電に利用できることからバイオガスや水素、LPGなどの燃料多様化に対応し易いシステムとなっている。これらのことからハイブリッドシステムにおいても燃料多様化に優れたシステムの構築が可能と考えられる。ただし燃料種別により排燃料組成の変化や、SOFCシステムバランスによる排空気側条件の変化が推測されるため、今後燃焼確認試験および適合開発を進めていく計画である。

7.2 1000kW級システム

これまでの開発は50kW級MGTとSOFCの組合せであったが、300kW級MGTとSOFCの組合せにより1000kW級（メガワット級）のSOFC-MGTハイブリッドシステムとなる。今後メガワット級開発を国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの受託開発として実施する予定である。2017年にかけてメガワット級SOFC専用のMGTの試作をおこない、組合せ評価を実施する計画である。

8. おわりに

これまで250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステム向けにガスタービンの開発をおこない実証評価を実施してきた。SOFCシステムにMGTを適応する為、ガスタービンの改造および専用燃焼器、専用制御の開発を実施した。実際のSOFCとの組み合わせ実証試験において所定の性能を発揮するとともに、安定した運転を実現

し、9000時間以上の運転を継続している。今後、SOFC-MGTハイブリッドシステムの市場普及を通じて高効率な発電システムによるCO₂の削減、水素社会実現に貢献していきたいと考えている。

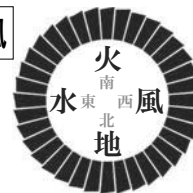
謝辞

本報告は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の共同研究等の成果を含んでおり、関係各位のご指導とご協力に感謝を申し上げます。

またSOFCに関する技術情報のご教授および開発機会を与えて下さいました三菱日立パワーシステムズ株式会社、プロジェクトのご支援いただいたトヨタ自動車株式会社、評価にご協力いただきました東京ガス株式会社、国立大学法人九州大学、その他部品メーカー等関係会社、すべての関係各位にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 富田和男, 北川雄一郎 “MHPSにおけるSOFC-マイクロガスタービンハイブリッドシステムの開発状況” ガスタービン学会誌Vol.44 No.4 2016.7 pp.247-252.
- (2) 安藤喜昌, 大澤弘行, 水原昌弘, 入江弘毅, 浦下靖崇, 池上卓夫 “SOFC-マイクロガスタービン (MGT) ハイブリッドシステム 九州大学向け実証機の運転状況 三菱重工技報 Vol.52 No.4 2015.
- (3) 君島真仁, 加幡達夫 “マイクロガスタービン-SOFCハイブリッドサイクル” ガスタービン学会誌Vol.37 No.3 2009.5 pp.155-161.
- (4) 樋口新一郎, 杉山末吉, 中野吉信, 大久保陽一郎 “50kW級TG051ガスタービンの開発” ガスタービン学会誌Vol.29 No.3 2001. pp.146-151.
- (5) 塩田哲男 “マイクロガスタービンにおける軸受・潤滑システムについて” ガスタービン学会誌Vol.43 No.4 2015.7 pp.256-261.



カザフスタン共和国で活躍する日本のガスタービン

Japanese gas turbine is playing an active role in Republic of Kazakhstan



松崎 裕之^{*1}

MATSUZAKI Hiroyuki

1. はじめに

本号から新企画として『東西南北地水火風』が始まります。

本企画は世界中で活躍する日本のジェットエンジン・ガスタービンとそれに携わる技術者の活躍を紹介するもので、タイトルの『東西南北』は地球規模の広がりを表しています。

また、『地水火風』は古代ギリシャにおいて「物体を構成する最小の単位」(＝アルケー)は水、火、土＝地、空気＝風の四元素なのだという考えが一般的になり、プラトン、アリストテレスがそれらをさらに膨らませることにより西洋では『地水火風こそが万物の根源なのだ』という認識になったといわれております。こうしたことから社会基盤の一翼を担うジェットエンジンやガスタービンを象徴的に表すという意図があります。

つまり、世界中で活躍し今や社会基盤を構成するうえで欠かすことができなくなったジェットエンジン・ガスタービンとそれらを開発・実用化し、社会に広めていく技術者たちの活躍を紹介しようという趣旨です。

大変僥越ながら、記念すべき第1回は現編集委員の小職が担当させていただきますが、会員の皆様からも奮ってご投稿いただけることを期待しています。

2. カザフスタン共和国で活躍する日本のガスタービン

(1)はじめに

東北電力株式会社(以下東北電力)は2002年に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(当時、以下NEDO)より「カザフスタン共和国(以下カザフ)における熱電併給所省エネルギー(以下省エネ)モデル事業」(以下本事業)を受託しました。

NEDOの実施する省エネモデル事業は、日本が保有する様々な分野での省エネ技術を海外の市場経済移行国に紹介し(最初の設備は日本から無償で提供する。なお、周辺設備のうち自国で容易に入手できる設備については自力で調達する)、紹介された省エネ技術の有効性が確

認された暁にはその技術を日本から積極的に購入して欲しいというのが事業の趣旨となっています。

(2)カザフスタン共和国について

カザフは最近でこそレアメタルやウランなどの調達のため日本政府首脳が訪問する機会が増えておりますが、当時はかなりレアな国でした。唯一、新しい首都アスタナ市の都市計画に関わる国際コンペで黒川紀章氏が事業を受注したことが数少ない日本との関係でした。

なお、第二次世界大戦後、カザフは旧ソ連の捕虜収容所としての役割を担い、日本人捕虜が大勢抑留されたほか、ノーベル文学賞を受賞した旧ソ連の作家、ソルジェニーツィンもカザフに永久抑留されていました。アルマトイ市には日本人抑留者の墓地があり、毎年慰霊祭が執り行われています。

カザフは旧ソ連崩壊後の1991年12月16日に独立した国家で、国土面積は2,717,300平方キロメートル、人口17,900,000人で人口密度は6.6人/平方キロメートルとなっており、国土は日本の約7倍、人口は約1/7です。国土の大部分はいわゆる土漠で完全な内陸性気候です。したがって、夏季の最高気温は60℃程度、冬季の最低気温は-30℃以下となると人間には優しくない気候風土です。

人種構成はカザフ人(65%)、ロシア人(21%)、ウズベク人(2%)、ドイツ人(1%)など100以上の人種で構成されていますが、民族紛争は全くと言って良いほど

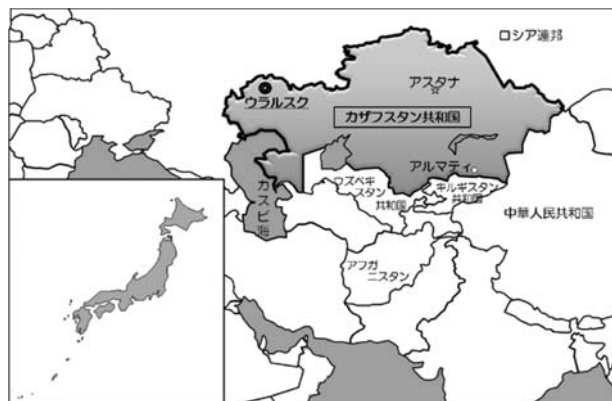


Fig. 1 カザフスタン共和国の位置と日本との国土比較

原稿受付 2017年4月26日

*1 酒田共同火力発電(株) 取締役社長
〒998-8622 酒田市宮海字南浜1-19
hiro-m@mvj.biglobe.ne.jp

無く、非常に安定した国情です。これは、国民の過半数を占めるカザフ人が非常に温かな性格であることに起因していると思われます。

カザフ人は我々と同じモンゴロイドで、赤ん坊は蒙古斑を持って生まれてきますが、我々の祖先でもあるフン族がモンゴロイドに変化してきた歴史をなぞるように赤ん坊も成長します。つまり、蒙古斑を持ちながら瞳が青いとか髪の毛が金髪とかいった特徴を有して生まれてきますが、成長するにしたがってそれらの特徴は薄れ、アジア人の特徴を有するようになります。成人は、我々日本人と見紛うような外見を有しています。まさに、ヨーロッパとアジアの接壤地帯なのです。

図2の左から3人目と右から2人目が日本人で中央が韓国人、あとはカザフ人です。

もともとの言語はカザフ語でアルタイ語族に属しています。ソ連併合後はロシア語が公用語になりましたが、独立後の公用語はカザフ語です。もちろん、ロシア語も日常的に使われています。日本に留学経験もある現地コーディネーターによるとカザフ語の文法は日本語と全く同じとのことですが発音はとても難しいです。(私も、「ありがとう」だけは覚えました)



Fig. 2 関係者集合写真

宗教は人種同様、様々な宗教が信仰されています。一番信者が多いのはイスラム教(スンニ派70%)となっており、その他ロシア正教(26%)、仏教(0.1%)でキリスト教徒も存在します。宗教に対する意識は日本同様大変寛容で例えば、我々が採用していた現地コーディネーターも大部分が日本への留学経験を有するイスラム教徒ですが、お酒は飲みますし、好きな食べ物「豚骨ラーメン」と答える具合です。

我々が事業実施地として選定したウラルスク市はカザフ北西部に位置する西カザフ州の州都で人口約30万人の地方都市です。現地へは国際空港があるアルマティ市(アスタナ市が首都になったのは1997年12月10日、それまではアルマティ市が首都)からジェット機で3時間、プロペラ機ですと途中で給油しながら約5時間かかる距離です。

日本からカザフまでの空路は当初、成田からフランクフルトまで約11時間飛んでフランクフルトから約6時間

東へ戻るというルートを選択していました。一度、フランクフルトでトランジットした際に、ドイツ人の空港職員から「お前らはクレージー!」と言われたこともありました。

その後、インチョン空港からエア・カザフという現地航空会社が空路を開設しましたが、一度、2003年6月末に渡航するときに離陸後、上昇中にエンジントラブルを起こしたため引き返し、その後、日本語が全く通じないソウル市内(たぶん日本人観光客など全く来ない地域と思われます)のホテルに5日間缶詰めになりました。ハングル文字は読めない、日本語は勿論、英語すら通じないということではほとんど困り果てていましたが、唯一、ホテル近くの市場にいた高校生らしき男の子が我々の英語を理解してくれたらしく、銀行まで走って案内してくれた時には本当に助かりました。

その後、エア・カザフ自体が無くなってしまいました。このため、事業終盤での渡航ルートはアジアナ航空で仙台からインチョンに行き、そこからアルマティ行きのアジアナ航空に乗り換え、約8時間で現地に到着するというものになりました。結果として、大変快適・便利になりました。

飛行機といえば、カザフ国内やロシア国内で様々な旧ソ連製の飛行機に搭乗しましたが、面白い逸話が沢山ありますので、いくつかご紹介します。

旧ソ連製の飛行機の特徴として座席の背もたれが簡単に前に倒れる構造になっています。これは、体格の大きな乗客が前の座席が空いている時に背もたれを前方に倒して悠々と使えるようにという配慮なのかもしれません。

離陸の時は日本と同じ光景ですが、着陸してパイロットがブレーキをかけた途端、空席のシートの背もたれがバタバタと前方に倒れる様子はとても面白い光景です。

また、あちらでは着陸すると乗客は席に着いたままで、まず操縦士と副操縦士が下りていくのが常識です。しかも、彼らを拍手で、「Хорошо(素晴らしい)」、「Спасибо(ありがとう)」という言葉をかけて見送るのが乗客の義務です。我々を安全に運んでくれてありがとうということなのでしょう。

また、アントノフ24という大変古い双発のプロペラ機では飛行中のお茶のサービスはカップにティーバックあるいは粉末コーヒーを入れて待っていると客室乗務員が沸騰したお湯をやかんのまま持ってきてカップに注いでくれるという非常に危険な機内サービスもあります。

(3)ウラルスクTETSについて

東北電力は2000年にNEDOに対してカザフにおける「熱電併給所省エネモデル事業」に関するFS調査の提案書を提出し、採択されました。この後、同国内の熱電併給所を調査、比較・検討し、最終的にはウラルスク市の熱電併給所、ウラルスクTETS(TETSはロシア語で熱電併給所を表す頭文字をアルファベット表記にしたもの)を選定し、その所有者である州営のJTE社(ジャイ

ク・テプロ・エネルゴ社:ジャイクはカザフ語でウラル川, テプロ, エネルゴはロシア語でそれぞれ熱, エネルギーを表す)を現地カウンターパートとして事業実施へ向けた本格的なFS調査に取り組みました。

表1にTETSの設備概要を示しますが, ボイラと蒸気タービンの台数が異なります。これは, 万が一ボイラが故障しても発電と熱供給が継続できるようにするためです。冬季に熱供給が止まれば死人が出ますから。

Table 1 ウラルスクTETS設備概要

発電用ボイラ					
No.	運転開始	形 式	蒸発量	主蒸気温度	主蒸気圧力
1	1960年	BKZ-75-39-GM	75t/h	430℃	3.9Mpa
2	1961年	BKZ-75-39-GM	75t/h	430℃	3.9Mpa
3	1961年	BKZ-75-39-GM	75t/h	430℃	3.9Mpa
4	1966年	BKZ-75-39-GM	75t/h	430℃	3.9Mpa
5	1967年	BKZ-75-39-GM	75t/h	430℃	3.9Mpa

蒸気タービン					
No.	運転開始	形 式	電気出力	主蒸気温度	主蒸気圧力
1	1960年	PR-10-35/10/1.2	8MW	430℃	3.5Mpa
2	1964年	PR-10-35/10M	12MW	430℃	3.5Mpa
3	1969年	PR-10-35/10/1.2	10MW	430℃	3.5Mpa

(4)本事業の特徴とその変遷

最初に東北電力が提案した本事業の仕組みは, 省エネモデル事業の基本的な枠組みが①日本側予算規模は20億円以下であること, ②発電事業は事業対象外である, という条件の下, 日本から出力10MW級ガスタービン(以下GT)と発電機, そして排熱回収ボイラ(以下HRSG)を提供するというものでした。

発電事業は対象外とするため, GT発電機から発生する電力量の代わりにカザフ側の同規模の発電設備の運転を停止する。HRSGで発生した蒸気は市中に熱供給する。というシステム設計がなされました。したがって, 省エネ効果はさほど大きいものではなく, 年間に削減されるCO₂の量は17,000トン程度というものでした。

私が本事業に関わったのは2001年7月からで, プロジェクトマネージャー(以下プロマネ)を任せられました。

プロマネとして新たに設計したプロジェクトの仕組みは日立製作所製(当時)の28MW級H-25GTとHRSG, そして発電機などを日本側から提供し, HRSGから発生した蒸気は既設蒸気タービンに送ってコンバインドプラント(以下C/C)化するというものです。

この際に一番問題となったのは, 「発電事業は対象外」という点でしたが, 本事業から発生する熱(蒸気)をどのように利用するかはカザフ側の勝手なのでそこは日本側としては触れないこととする。(当然, カザフ側は既設蒸気タービンに導入してC/C化して高効率化しますが, ここは目をつぶる)これで解決しました。

一方, GT出力の規模が大きくなることにより実施予算も増額が必要となるわけですが, 以下のような理由に



Fig. 3 ウラルスクTETS外観

よりNEDOの理解を得ることができ, 省エネモデル事業としては前代未聞の事業規模で実施することが決定いたしました。

つまり, NEDOの目論見としては本事業を単なる省エネモデル事業としてだけではなく, 地球温暖化防止にかかわる京都議定書に定める柔軟性措置, JI (Joint Implementation) 事業の国内第1号案件にしたいと考えているということでした。この場合, 本事業で削減されるCO₂は日本が削減したものとしてカウントされることから, できるだけ多いことが望ましいわけです。

GT出力の増加に伴って, 予算規模も膨らみますが, 既設の発電効率が20%前後(HHV, 以下同様)であるのに対してC/C化することによって熱効率はほぼ50%に大幅に向上します。これにより, 削減されるCO₂の削減量は68,000トン/年と4倍になります。日本側の予算規模が仮に2倍になったとしてもCO₂のコストは約半分になるという算段です。

こうして事業は開始されましたが様々な困難が待ち受けておりました。

(5)事業の完工を阻む様々な障壁

まずは, 現地カウンターパートであるJTE社が赤字会社で, 事業を完遂できる資金がほとんど無いということでした。カザフは当時から石油, 天然ガスは勿論, ウランからレアメタルまで様々な天然資源が産出されるため, 国としては大変裕福ですが, 一方で一般市民の生活はいたって質素なものでした。こうしたことから, 電気, ガス, 水道など公共料金は旧ソ連時代同様, 非常に低いレベルに抑えられていました。しかし, 電力市場の自由化によって特にロシアの電気料金が高騰している状況でした。こうした中, ウラルスク市は電力の80%を約50km離れたロシアから輸入しており, その価格は20セント/kWh程度であるのに対して一般市民への販売価格は数セント/kWhということで完全な逆ザヤ状態になっていました。本事業で日本側がGT他を提供しC/C化することによりこの地域の電力自給率は20%から40%へと倍増することになり, こうした逆ザヤの解消にも大きく貢献することになります。

このため, 本事業の発電開始式にはナザルバイエフ大



Fig. 4 発電開始式の様子

統領を筆頭に、州政府関係者から一般市民まで大勢の方々がウラルスクTETSに詰めかけてくださいました。

一方、JTE社は州営の企業なので州からは実施予算が出てくるのですが、これが途中でどんどん消えてしまう。消えてしまう一方で、州政府の本事業担当局長の私有車が旧ソ連製ボルガから新車のベンツになったり、自宅が新築されたりは当たり前でした。そのたびに、州政府に追加予算措置をお願いに行くのは我々日本側。

賄賂の話ではこんなことがありました。

日本側から輸送した製品の最大重量物は80トンのGT発電機でしたが、いざ最後の橋を渡っていよいよウラルスク市に入るぞという段になって突然州政府から待ったがかかりました。我々が通過させようとしていた橋は最近完成したばかりの新しい橋で、事前の強度計算書等のチェックでも全く問題ありませんでした。何事が起ったのかと、早速州政府の担当者に詰め寄りました。すると、その担当曰く、件の橋は「最近作られた橋なので重量物が通過した実績がない。」しかも、「建設の時にかなりの賄賂が横行したと言う噂があるので、建設資金の一部がその賄賂に使われ、橋の強度は設計通りになっているかどうかかわからない。」というとんでもない言葉が発せられたのでした。今更ルートを変更すれば工期は大幅に遅延してしまう。よって、最後の手段は州知事に駆け込むしかない。知事室に橋の設計者、施工業者も含めた関係者全員集まってもらい、早速御前会議を開き、以下のような方針を決定して出席者全員から確認のサインをもらいました。

- ① トレーラー通過時に設計者と施工業者が橋梁の安全確認のため全ての重量物積載車両通行まで付き切りになる。
- ② このための費用は日本側からは一切負担しない。
- ③ 万が一、橋梁が破損あるいは、輸送機器が破損した場合の損害は全てカザフ側が負担する。

こうした内容を確認し、しかもトレーラーの走行速度を10km/h以下としてソロソロと通過させました。結局、

橋が破損することなく、もちろんGT発電機が落下することなく無事発電所まで搬入することができました。

また、重機についてもいろいろ障害がありました。その一例をご紹介します。

HRSGは韓国メーカー製を使用しました。3ブロックで輸送されたものを現地で組み立てる必要がありました。

これには、大型のクレーンが必要だったのですが、現地にあるのは唯一鉄道クレーンだけ。しかも、設置時期が12月ということで、真冬には-30℃以下に気温が下がるカザフといえど、この時期は昼間気温が上がって溶け出した雪で地盤はゆるゆるです。しかし、現地のワーカーたちはこのゆるゆるの地盤の上に線路を敷き始めたのです。

私が、「こんなゆるゆるの地盤に線路を敷いて鉄道クレーンを持ってもHRSGのブロックを釣り上げたたん、クレーンが傾くのは必至だから止めろ!」と止めたにも拘らず全く意に介せず線路の敷設を続けました。

そうこうしているうちに、いよいよ明日HRSGを吊り上げるとなった日の朝から強烈な寒波がウラルスク市を襲いました。外気温は-5℃から-20℃まで一気に下がったのです。どうでしょう!昨日まであんなにゆるゆるだった地盤は凍結してコンクリート以上の硬さ!現地ワーカーはこれを待っていたのです。我々では決して考えもつかない現地の人々の知恵を思い知らされました。

そんなこんなで、当初計画の3年の工程が結局4年に延びてしまいましたが、無事完工できました。

(6)カザフでの生活

仕事的话题を書き連ねてきましたが、最後に現地での我々の生活にちょっと触れてみたいと思います。

まず、カザフは旧ソ連圏でも大変ウォッカの美味しいところです。良質な小麦が取れるからなのです。

現地は田舎に行けば行くほど「俺の酒が飲めないのか?」みたいな雰囲気があり、しかも常に一気飲みです。私も、現地に入っところはショットグラス3杯ほどでダウンしました。その後、現地コーディネーターから正しいウォッカの飲み方を教示いただきました。曰く、カザフの宴席では馬肉で作った脂ギトギトのソーセージが必ず出てきますが、着席したならまずそれを食べて胃袋に脂の膜を作る。その後、ウォッカを頂くわけですが、喉を大きく開けて一気に胃袋まで流し込む。そうしないと喉がただれてしまうそうです。

これを実践してからは、ボトル半分、ボトル1本とウォッカを頂ける量も増えていきましたが、我々日本人は所詮世界中で最もアルコール分解酵素が少ない民族のようで、日本からカザフに来る関係者の大部分は酔いつぶれてしまうのが恒例でした。

先にも書いたようにカザフは芳醇な穀倉地帯が広がっており、小麦から大麦、加えてそばや米なども採れ、料理の突き合せとしてそばの実や米を炊いたものが出てきます。また、中国から伝わったうどん(ラグマン)や水

餃子（ペルメニ）なども普通に食えますのでとても助かります。

一方、「カザフ人はオオカミの次にたくさんの肉を食べる」とまで言われており、しかも、ほとんどが羊肉の料理になります。この羊肉も、日本のように匂いの少ないものでなく、翌日、汗まで羊の匂いがするような肉なので好きな人にはたまらないですが、苦手な人には地獄の苦しみでしょう。

一番驚いたのは、カザフ人の最高のもてなしである羊の頭を焼いた料理です。



Fig. 5 カザフ最高のオモテナシ

宴席でホスト側の長がそれぞれの部位を分け与えてくれるのですが、目は遠くまで見通しが効くように、耳は他人の話をきちんと聞くことができるように、舌は弁舌さわやかになるようにという願いを込めて切り分けて下さるわけです。舌と耳はコリコリして美味しいが、目は遠慮させていただきました。

我々が渡航していた頃の娯楽は、ボーリングやディスコでのダンス、サッカー、映画鑑賞、そしてサウナなどでした。

ボーリングは時間制です。例えば1時間一人当たり300円とか。ですから、どんどん投げます。1ゲームで終わろうが、3ゲームやろうが同じ値段ですから。

(7)最後に

初めての海外での発電所建設、しかも、旧ソ連規格との整合の問題やデジタル制御すら知らない現地カウンターパートとの共同プロジェクトが設計通りに完工し、しかもその設備が現在でもしっかり現地の人々の生活を支えています。

さらに、JI事業の第1号案件としても登録されるという、我々にとっては大変名誉な結果にもなりました。

これも、ひとえにNEDO殿、日立製作所殿さらには我々の現地渡航や重量物輸送など多大なご協力を頂いた三菱商事殿をはじめとする関係各位のご理解とご協力のお陰です。

心から感謝申し上げます。



ちょっとマニアックな線香花火の話

A Maniac Story of Traditional Japanese Sparkler, Senko-Hanabi



井上 智博*¹
INOUE Chihiro

もうすぐ花火の季節がやって来る。今年も多くの人で花火大会が賑わうだろう。花火に欠かせない黒色火薬は6世紀に中国で発明された。不老不死を叶える妙薬を作ろうと、炭素(木炭)・硫黄・硝酸カリウムを調べたところ、火を生む薬、火薬が偶然できた。火薬は次第にイスラム、そしてヨーロッパへと西方に広がり、やがてユーラシア大陸西端のポルトガルから火縄銃とともに、戦国時代の日本に伝来した。江戸時代になると、鉄砲の流通が厳しく制限され、そのあおりを受けた砲術指南役は、火薬技術を転用して花火を作るようになった。これが国産花火の起源とも言われる。明治以降、鮮やかに発色し、取り扱いが容易な火薬が開発された。今日でも打上花火は年々進化を遂げており、以前は難しかった青も鮮明に発色するようになっていく。

線香花火も江戸時代に始まった。当初は、藁の先端に、膠(にかわ)で練った黒色火薬を塗布して作られていた(「すぼ手」と言う)。これを香炉に立てて観賞したことから、線香花火の名が付いた。現在では、微量の黒色火薬を和紙で包んで燃った「長手」が主流である。線香花火が広まった理由は二つあるように思う。一つは、その儚い美しさが日本人の琴線に触れたこと。もう一つは、国内では天然に析出しない貴重な硝酸カリウムを僅かに使うだけでよく、数を作れたことである。理由はともかく、昔も今も線香花火は最もシンプルで人気の玩具花火である。残念ながら海外では全く知られていない。

一部の科学者も線香花火に魅せられた。寺田寅彦は、「灼熱した球の中から火花が飛び出し、それがまた二段三段に破裂する、あの現象がいかなる作用によるものであるかという事は興味ある物理学上ならびに化学上の問題であって、もし詳しくこれを研究すればその結果は自然にこれらの科学の最も重要な基礎問題に触れて、その解釈はなんらかの有益な貢献となりうる見込みがかなりに多くあるだろう」と記した(備忘録「線香花火」, 1927)。門下生であり、雪の結晶の研究で知られる中谷宇吉郎は、実際に線香花火の研究に取り組んでいる。優れた実験技術と鋭い観察眼によって、現象の本質に迫った。重要な成果は、線香花火に関する初の研究論文として発表された(理化学研究所彙報, 1927)。30年の後、花火界の偉人である清水武夫も研究を行い、黒色火薬の

反応生成物であるカリウム化合物が火花の分岐に重要な役割を果たすことを示した(1957)。同時期に、都立新宿高校の定時制物理部所属の優秀な生徒達が成分分析を行い、火球を構成する化合物を特定した(1962)。特に、火球には黒色火薬の酸化剤である硝酸カリウムは残っておらず、反応生成物である別のカリウム化合物によって火球が構成されることを明らかにした点が重要である。つまり、火球形成後の線香花火はもはや火薬ではなく、空気中の酸素と自身の炭素の燃焼によって発熱している。今世紀に入ると高速度カメラが普及し、2009年にはNHKが線香花火のスローモーション映像を放送した(アインシュタインの眼)。筆者らは2012年に、時間・空間解像した線香花火撮影に成功し、4年ほどかけて、高速度可視化・非定常温度計測・熱分析・理論解析と様々な観点から検討した。その結果、線香花火の美しさの秘密が明らかになってきた。まず、火球表面にできた気泡が弾けて、火花であるカリウム溶融塩から成る液滴が飛び出す。これは、グラスに注いだシャンパンの気泡が弾ける際に、表面張力の作用によって、水面から液滴が跳び上がる原理と同じである。火球を飛び出した液滴の表面では、炭素が燃えて発熱する。表面から内部に熱が伝わると、次第に液滴全体が温まる。すると、カリウム化合物が吸熱分解を起こして内部で発泡し、急激に液滴が膨張・破裂する。およそ半分の大きさの子液滴が数個でき、それらも自己相似的に同じ過程を経て、更に小さい孫液滴に分かれる。何度か分裂して十分小さくなると、周囲空気による冷却が液滴表面の発熱よりも卓越するから、液滴が冷えて内部の発泡が止まり、それ以上は分裂しない。火球を飛び出した液滴は、最大8回も連鎖的に分裂する。我々にはこれが松葉火花に見える。映像に興味のある方は、「Senko-hanabi as dancing drops」とウェブ検索して頂きたい。現象の詳細は、Physical Review Letters 118, 074502 (2017) に新しい。

先に紹介した寺田寅彦の随筆は、次の言葉で結ばれている。「西洋の学者の掘り散らした跡へはるばる遅ればせに鉋石の欠けらを捜しに行くもいいが、われわれの足元に埋もれている宝をも忘れてはならないと思う。しかしそれを掘り出すには人から笑われ狂人扱いにされる事を覚悟するだけの勇気が入用である」。今年の夏、希少な国産線香花火を楽しむきっかけになれば幸いである。



原稿受付 2017年3月27日

* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1
inoue@rocketlab.t.u-tokyo.ac.jp



学校で習わない英語 (11)

English Which Is Not Taught in School (11)

吉中 司*1
YOSHINAKA Tsukasa

－H－章 続き

[英語] : a red herring

[意味] : 「怪しげなもの」, 「まやかしの」, 「迷わせやすいもの」

[説明] : “herring” はにしんですから, この言葉, 「赤いにしん」となります。勿論, 赤いにしんなどいません。しかし, にしんを燻製にすると, 眼の周りが赤くなりますので, この言葉は, 燻製にしんのことです。

次に, この言葉の意味合いを話しましょう。例えばミステリー小説。これには, 作者が読者の興味をそそるために, わざと間違った答 (例えば殺人犯人は誰か) のヒントを与えます。また意図的なものでなくとも, 或る人の話を信じたために, 皆が間違った結論に達する事があります。こうした, いわば怪しげなもの, 或いは人を迷わせ, 間違った方へ引っ張って行くもの, というのが, この言葉の意味合いです。

では, 燻製にしんが, どうしてこういう意味合いに使われるのでしょうか。その由来は, 今のところハッキリとは分かっていません。しかし, 燻製にしんを猟犬に嗅がせたところ, その特有の強い臭みに興味を持って, 追っかけていた兎など忘れてしまった, という英国での記録が1807年にありますので, この辺りではなからうか, というのが最近の言語研究結果だそうです (参考資料11)。

この意味を比喩として, 会話に持ち込むのです。技術会議などで, この言葉, よく聞かれます。例えば, 或るエンジニアが, 会議中, ある難問に対して, 彼の新しいセオリーを持ち込み, 「これを使えば, この問題は解けます。」と発表しました。それを聞いていた口の悪い男が, 隣に座っていた同僚に, 「あいつの事だ。新しいセオリーなんて, 当てにならんよ。」と耳打ちをしました。英語で, “He? A new theory? It must be a red herring.” となります。

[英語] : on the house

[意味] : 「その店 (レストランなりバー) のオゴリ」

[説明] : 私の経験をお話しましょう。或る日, 出張先のレストランで昼食をとる事になりました。そこで, 私は簡単な鶏肉料理を注文したのです。ところが, 出された料理にナイフを入れてみると, 明らかに鶏肉に十分火が

通っていません。早速ボーイを呼んで文句を言ったところ, 彼は, 赤い鶏肉を見て直ちに状況を納得し, 恐縮したように私の皿をキッチンへ持ち帰りました。それから十分か十五分経ってからでしょうか, そのボーイは同じ鶏肉料理ですが, 別の皿を持って来, テーブルにそれを置きながら, “We are terribly sorry for your chicken, sir. This is on the house.” と言いました。つまり, 「非常に申し訳ございませんでした。お詫びの印として, どうぞ, これを召し上げて下さい。お金は頂きません。」という訳です。

と言う具合で, 目出度くタダメシに有り付いたのですが, ここで忘れていけないのは, チップです。日本やEUメンバー諸国と違って, 北米では, 相変わらず, あちこちでチップを払わねばなりません。私の例の場合, 料理は只ですが, ボーイへのチップは, 彼が為すべきサービスをしましたので, 只ではありません。では, チップとしてどれだけあげれば適当なのでしょう。昔はチップといえば, 注文したものの料金の約十パーセントでしたが, 今日, それが十五から二十パーセントにまで上がっています。そして, 格の高いレストランほど, パーセントが上がって行くようです。

そして, チップの額でもう一つ大切な事は, 注文した料理と飲み物の合計額の何パーセントか, という事です。ですから, セールス・タックス, つまり消費税を含む必要はありません。明細書には, 注文した各品の値段, それらが合算された小計, 税金額 (消費税, 地方税など), そして小計と税金を加えた総計が書かれています。ですから, 客は小計の何パーセント, とチップを計算する訳です。

そうとは言っても, 稀ではありますが, 明細書に既にチップを含めているレストランもありますし, 何人以上のグループにはチップはxx%と, レストランが決めているものもあります。ですから, 要は, 先ず明細書を細かく読み取る事です。

それはそうと, この言葉, “the house” 以外にも使えます。例えば, 友人達と一緒に飲みに行った時, 「最初の分は, 私におごらせて下さい。」と言う場合, “The first round is on me.” で良いのです。

参考資料 (参考資料は本連載を通した番号で示しています)

11. https://en.wikipedia.org/wiki/Red_herring

原稿受付 2017年2月14日

*1 独立コンサルタント
tsuyoshi@videotron.ca

2016年度通常総会報告

公益社団法人 日本ガスタービン学会の2016年度通常総会は、2017年4月19日(水) 14時より、川崎重工東京本社 2階会議室において開催された。出席者は委任状提出者、議決権行使者を含めて1133名であり、定款に定められた成立要件である総正会員数の過半数981名を満たし、総会は成立した。

報告事項

2016年度事業報告・監査結果報告
2017年度事業計画および収支予算
以上について担当理事より報告された。

決議事項

第1号議案：計算書類・財産目録の件 承認
第2号議案：理事選任の件 10名の候補者全員を承認
第3号議案：監事選任の件 2名の候補者全員を承認

第4号議案：名誉会員候補者の件 承認

第5号議案：終身会員候補者の件 承認

以上の通り、いずれの議案も原案通り承認された。

総会終了後、別室にて第1回臨時理事会が開催された。出席理事の互選により船崎健一君が新会長に、副会長には油谷好浩君が選定され、また法人管理及び公益事業担当の執行理事13名が決定された。その後、総会会場にて新役員体制が船崎健一新会長から報告され、新旧会長から挨拶があった。引き続いて名誉会員推薦状授与式が行われた。

なお、2016年度通常総会添付書類（2016年度事業報告、計算書類および財産目録、2017年度事業計画・収支予算）は、学会ホームページの会員ページに掲載されている。



2017年度役員名簿

会長	船崎 健一（岩手大）
副会長	油谷 好浩（東芝）
法人管理担当執行理事	今成 邦之（IHI）、太田 有（早大）（兼務）、渋川 直紀（東芝）、 福泉 靖史（三菱重工）、渡辺 紀徳（東大）
公益目的事業担当執行理事	太田 有（早大）、谷村 聡（MHPS）、辻田 星歩（法政大）、福山 佳孝（JAXA）、 松岡 右典（川崎重工）、松沼 孝幸（産総研）、山根 秀公（防衛装備庁）、 山本 悟（東北大）、輪嶋 善彦（本田）、渡辺 紀徳（東大）（兼務）
理事	川岸 京子（物材研）、高橋 俊彦（電中研）、田尻 敬次（荏原エリオット）、 菰川 宏樹（JALエンジニアリング）、松崎 裕之（酒田共同火力）
監事	田沼 唯士（帝京大）、佃 嘉章（三菱重工）



後列(左から)：福泉靖史、渡辺紀徳、
菰川宏樹、福山佳孝、
川岸京子、輪嶋善彦、
高橋俊彦、谷村 聡、
田尻敬次、松岡右典、
松崎裕之、山根秀公、
山本 悟、太田 有
前列(左から)：辻田星歩、松沼孝幸、
今成邦之、船崎健一、
油谷好浩、田沼唯士、
佃 嘉章、渋川直紀

第1回若手技術者交流会報告

泰中 一樹

TAINAKA Kazuki

日本ガスタービン学会が主催するイベントのアンケートにおいて「ガスタービンの技術分野ごとに専門的な講義をしてほしい」、「若手が気軽に参加できるイベントを開催してほしい」、「他の参加者との交流の場がほしい」、といった要望が多数あった。そこで、今回日本ガスタービン学会では、ガスタービン関連分野で今後中核的な存在としての活躍が期待される若手技術者をメインターゲットに、技術分野を絞った専門的な講義による個々の研究・技術レベルの向上と、参加者同士の交流の促進を目的として、「若手技術者交流会」を企画した。

記念すべき第1回は、2017年2月17日(金)に、兵庫県明石市にある川崎重工業株式会社の明石工場で開催された。初開催であったにも関わらず、ガスタービンに関連する若手技術者33名(8団体)にご参加頂いた。当日のプログラムは、参加者自己紹介、講義、質疑応答およびディスカッションに加えて明石工場内にある川崎クラブにおいて懇親会が行われた。

まず初めに集会行事委員会の輪嶋委員長による開会の挨拶が行われ、本会の開催経緯、ならびにガスタービン技術という共有技術を介した若手技術者の交流の重要性について話がされた。

参加者自己紹介では、各人がスライド1枚を用いて、業務内容の概略、関心のある話題等を紹介した。後述の講義テーマに限らず、ガスタービンに関連する他の技術者と交流を行いたいという高いモチベーションを持った自己紹介が多かった。

講義は、講師に渡辺紀徳氏(東京大学)を招き、「ターボ機械における流体関連振動」をテーマとして講演頂いた。まず、翼に生じるフラッタを中心に、モデルによる理論、数値解析による検討、および最新の研究例等が紹介された。加えて、実際にあったトラブルの事例に関する紹介があった。

質疑応答およびディスカッションでは、フラッタの発生原因、翼の振動抑制・制御技術、および参加者が普段の業務で気になっている流体に関する問題について、様々な議論が行われた。議論は、参加者と講師間だけではなく、参加者間でも行われ、非常に盛り上がった議論となった。

閉会の挨拶として、講師の渡辺氏から今回の交流会の総括が述べられ、盛況のうちに第1回若手技術者交流会を終了した。

交流会終了後の懇親会には、約8割の方が参加し、会場各所で企業間の枠を越えた活発な議論と相互交流がなされた。また、企業における先輩方からも若手技術者に向けて、今後のガスタービン研究に対する熱意のあるメッセージが伝えられ、他分野間、企業間だけでなく世代間の交流も行うことができたように感じる。

全体を通じての感想であるが、非常に意欲的な参加者が多く、懇親会も含めて活発な交流を行うことができた。そして、専門的な講義や企業間の交流を行うことで、参加者の方々には有意義な時間を提供することができたと思う。今回は、流体をテーマに行ったが、他分野での交流会開催も要望があったため、次の交流会に活かす予定である。今後も、集会行事委員会として、会員のニーズに応えた企画を開催して行きたいと思う。

最後に、ご多忙中、講義の準備、実施にご尽力頂きました渡辺氏、会場の準備、運営に多大なご協力を頂きました川崎重工業の関係者各位、そして、活発な議論でこの交流会を盛り上げて頂きました参加者各位に深く感謝致します。

(集会行事委員会委員)



講義風景



集合写真

第29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NO_x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。このような背景から、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の開催を計画しました。会員・非会員を問わず積極的にご参加下さい。

- 日時：2017年7月6日(木)、7月7日(金)
- 場所：(国研)宇宙航空研究開発機構 調布航空宇宙センター（東京都調布市深大寺東町7-44-1）
JR中央線 吉祥寺駅、三鷹駅、京王線 調布駅よりバス約15分+徒歩約5分
- プログラム：

6日(木)	9:30-	受付（事務棟1号館講堂）
	10:00-10:10	開会の挨拶
	10:10-11:40	「ガスタービン概論」 渡辺紀徳（東京大学）
	11:40-13:00	昼食
	13:00-14:30	「ガスタービンと伝熱工学」 村田 章（東京農工大学）
	14:40-15:30	「JAXAにおける航空エンジン研究紹介」 山根 敬（JAXA）
	15:50-17:45	見学会 JAXA 調布航空宇宙センター（ガスタービン関連施設等）
	18:00-19:30	懇親会
7日(金)	9:00-	受付
	9:20-10:50	「ガスタービンと流体力学」 山本 誠（東京理科大学）
	11:00-12:30	「ガスタービンと燃焼工学」 岩井保憲（東芝）
	12:30-13:30	昼食
	13:30-15:00	「ガスタービンと材料工学」 屋口正次（電中研）
	15:10-16:40	「ガスタービンと制御工学」 中村恵子（IHI）
	16:40-16:50	アンケート記入
	16:50-17:00	閉会の挨拶

注：都合により講演順番が入れ替わる場合もございますので、最終プログラムはホームページにてご確認ください

- 定員：60名
- 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）
- 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）
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。
- 懇親会：参加費 無料
- 受講証の発行：2日間の講義を受講された方には、「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。
- 申込方法：下記の申込書に必要事項を明記し、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2017年6月14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申込ができます。
- 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、その旨を学会事務局にお知らせ下さい。

○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7-5-13-402

○昼食：JAXA調布航空宇宙センター内に食堂があり利用できます。

○宿泊施設：斡旋はいたしませんので必要な方は各自手配してください。

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/>）

★今年度は関西地区における教育シンポジウムは開催いたしません。

第29回ガスタービン教育シンポジウム参加申込書

公益社団法人日本ガスタービン学会 行 （2017年7月6日、7月7日）

FAX：03-3365-0387 TEL：03-3365-0095 E-mail：gtsj-office@gtsj.org

氏名		国籍		性別	男・女
所属				学年、入社年度	
連絡先	〒				
TEL			懇親会	参加 ・ 不参加	
E-mail			GTSJ会員番号 (No.) / 非会員		

注) 外国籍の参加者には、申込書に記載した情報の他に別途、パスポート番号などを伺う場合がございます。

詳しくは、申込受付後にご連絡いたします。

申込締切日：2017年6月14日(水)（必着）

第45回日本ガスタービン学会定期講演会・講演募集

下記の日程で、第45回日本ガスタービン学会定期講演会を、愛媛県松山市で開催いたします。講演をご希望の方は、期日までに学会ホームページより講演の申込みをお願いします。

主 催 公益社団法人 日本ガスタービン学会
協 賛 協賛団体は学会ホームページ
 (http://www.gtsj.org/) をご覧ください。
開 催 日 2017年10月18日(水)、19日(木)
講演会場 松山市総合コミュニティセンター
 愛媛県松山市湊町7丁目5
 http://www.cul-spo.or.jp/comcen/
 Tel: 089-921-8222
見 学 会 2017年10月20日(金)

※ 会期中のご宿泊は各自で手配ください。

講演関連日程

講演申込締切 2017年6月23日(金)
 講演採否連絡 2017年8月1日(火)
 論文原稿締切 2017年9月1日(金)

募集講演

「研究報告」及び「技術紹介」に関する講演を募集いたします。「研究報告」の対象は、ガスタービン及びエネルギー関連技術に関する未発表の研究とします。一部既発表部分を含む場合には未発表部分が主体となるものに限り、ます。「技術紹介」は、既発表の研究のレビューや関連情報(例えば、試験設備、設備運転実績等)の紹介等とします。講演論文集では「研究報告」と「技術紹介」の別を明示いたします。

ガスタービン本体及びその構成要素のみならず、補機・付属品、ガスタービンを含むシステム、ユーザーの実績等に関する論文、さらに共通する理論や技術を基盤とする技術分野(ターボチャージャー、蒸気タービンなど)の講演も歓迎します。

講演時間

論文1件につき、講演15分、討論5分、合計20分です。

登壇者の資格

原則として、本会会員もしくは協賛団体会員に限り、ます。(1人1題目の制限はありません。)

講演申込方法と採否の決定

学会ホームページ(http://www.gtsj.org/)で講演題目・著者・登壇者・概要(200文字以内)などを登録してください。講演申込み後すぐに、受付完了をお知らせするEメールが自動返送されますので、申込み内容をご

確認ください。学会ホームページからの申込みができない場合には事務局にお知らせください。

締切後の申込みは受付けません。

講演の採否は、8月1日(火)までにEメールで連絡します。

公益社団法人 日本ガスタービン学会事務局

電話番号: 03-3365-0095

FAX番号: 03-3365-0387

Eメールアドレス: gtsj-office@gtsj.org

講演論文原稿の提出

講演会に先立ち、講演論文原稿をご提出いただきます。原稿は講演論文集原稿執筆要領(学会ホームページに掲載)に従って、A4用紙2~6ページ(技術論文に同時投稿または30日以内に投稿予定の場合は8ページまで可)で作成し、所定の講演論文原稿表紙を付して、期限までにEメールに添付した電子データ(PDF形式)として提出してください。原稿執筆要領および原稿表紙用紙は、講演採否の連絡時にお届けします。

技術論文としての学会誌への投稿

原稿執筆要領に記載の要件を満たす「研究報告」の講演原稿は、著者の希望により、講演会終了後に通常の技術論文として投稿されたものとして受理されます。技術論文としての投稿を希望される場合は、講演論文原稿提出時に原稿表紙の所定欄に希望ありと記入し、さらに技術論文原稿表紙、論文コピー2部を添付していただきます。詳細は原稿執筆要領をご覧ください。

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞

学生による「研究報告」の内、特に優秀な発表に対して表彰を行います。表彰された発表に対しては表彰状及び副賞が授与されます。エントリー希望者は、申込時に所定欄の「エントリーする」に印をつけてください。

学生講演会参加旅費支援

学生が登壇者として講演会に参加する際の旅費の一部を補助する予定です。申請方法や審査方法については、8月上旬に学会ホームページ等でお知らせします。



松山城

○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	共催/協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本航空宇宙学会・宇宙航空研究開発機構	第49回流体力学講演会／第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム	協賛	2017/6/28-30	国立オリンピック記念青少年総合センター（東京・代々木）	URL:http://www.jsass.or.jp/web/index.php
日本機械学会 関西支部	第350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	2017/7/27-28	大阪科学技術センター	URL:http://www.kansaijsme.or.jp/
日本エネルギー学会	第26回日本エネルギー学会大会	協賛	2017/8/1-2	ウインクあいち	URL:http://www.jie.or.jp/2017/taikai/26taikaihappyo.htm
日本実験力学会	日本実験力学会2017年度年次講演会	協賛	2017/8/28-30	岡山理科大学	新潟大学医学部保健学科内 小林公一 TEL:025-368-9310, E-mail:office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp
日本流体力学会	日本流体力学会 年会2017	協賛	2017/8/30-9/1	東京理科大学 葛飾キャンパス	URL:http://www2.nagare.or.jp/nenkai2017/
日本燃焼学会	第55回燃焼シンポジウム	協賛	2017/11/13-15	富山国際会議場	URL:http://www.combustionsociety.jp/sympo55/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

撫佐 郁夫(AIRI)	三石 朗大(旭化成)	内田 博之(キグチテクニクス)
谷村 克之(キグチテクニクス)	吉岡 勇樹(キグチテクニクス)	大島 隆史(東洋エンジニアリング)
内藤 晴久(東洋エンジニアリング)	本田 徹(新潟原動機)	角田 直樹(三菱重工業)

〔学生→正会員〕

加藤 海人(IHI)	佐藤 遼太(IHI)	生繁 佑弥(IHI)
衣川 輝(川崎重工業)	岩永 健太郎(経済産業省)	大橋 俊之(特許庁)
斎藤 寛人(デンソー)	宇多田 悟志(物質・材料研究機構)	岡 俊介(三菱日立パワーシステムズ)

〔学生会員〕

松野下 雄大(木更津工業高等専門学校)	山下 裕史(久留米工業高等専門学校)
---------------------	--------------------

〔賛助会員〕

(株)第一システムエンジニアリング	パルステック工業(株)
-------------------	-------------

次号予告 日本ガスタービン学会誌2017年7月号 (Vol.45 No. 4)

特集 航空エンジン・発電プラントの技術進歩を支える最新の試験計測技術

巻頭言 渡辺 紀徳 (東京大学)
タービン翼列 船崎 健一 (岩手大学)
空力要素に関する実験例 -空力弾性および空力音響- 渡辺 紀徳 (東京大学)
Development of Flow Measuring Instrumentation for Turbo Machines
- Design Aspects for the AM Based Manufacturing - Herwart Hoenen (アーヘン工科大)
光学計測 (PIV等) 西野 耕一 (横浜国立大学)
Experimental Measurements of Turbomachinery Rotordynamics, Component Performance, and Dynamic Control at ROMAC - A Review 筆頭著者: Brian Weaver (バージニア大学)
圧縮機の試験設備 中山 健太郎 (川崎重工業)
燃焼器 Manfred Wirsum (アーヘン工科大)
航空機用ガスタービンにおける空力計測技術 山口 博史 (IHI)
低炭素社会に向けた火力発電プラント総合検証への取り組み 小野田 昭博 (東芝)
ガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備 山崎 哲也 (三菱日立パワーシステムズ)

※タイトル、執筆者は変更する可能性があります。

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、家族的雰囲気ですら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（2016年3月現在）

会員数：2,005名（正会員 1,956名、学生会員 49名） 賛助会員：107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

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

編集後記

新緑の鮮やかさが目に染みる過ごしやすい季節となり、会員の皆様もGWを満喫されていらっしゃると思います。ガスタービン学会は新年度を迎え、船崎会長、油谷副会長を始めとする新しい体制となりました。会長のご挨拶からも当学会の必要性が感じられ、ますますの発展が期待されます。編集委員会も、辻田委員長へと代替わりし、新しい雰囲気の中、一丸となってより一層充実した紙面づくりに向け、努力する所存です。

さて、今週号の特集は、「エミッション低減技術と計測技術」と題し、8編の解説記事を掲載致しました。以前より個人的に、各種プラントのCO₂やNO_x等の低減技術には興味があったため、軽い気持ちで特集テーマに取り上げたいと提案いたしました。ところが、全く知識が伴っておらなかったため、具体的な記事、執筆者の選定のときになかなか方針が定まらず、編集委員の皆様にかなりご心配をおかけしました。近年、公衆の場やSNSでのちょっとした発言が、大きな波紋を呼ぶ時代でもありますので、テーマもよく考えてから提案すべきだったと反省しております。詳しい内容は各記事に委ねますが、中垣先生の巻頭言を始め、ジェットエンジン、石炭火力、ガスタービンコンバインド等の脱硝、制御、計測技術に関連する記事が揃い、予想よりもバリエーションがある特集号となったと思います。編集後記を書いている今はホッとすると同時に多くのことを勉強させていただき感謝しております。

また、今月号より、ガスタービン技術者の海外での体験談を記事にした、新連載「東西南北地水火風」が掲載されます。松崎様のカザフスタンについての記事は、吉田前委員長の企画への熱い想いや「地水火風」という洗練されたネーミングに負けないくらい、内容が濃く、か

つ面白い情景が描かれており、企画としてはこの上ない素晴らしいスタートを切ることができました。今後も楽しみに期待していただくとともに、是非皆様からの楽しい体験談をお寄せいただきたく思います。

最後になりましたが、執筆者の方々にはご多忙の中、ご執筆を快くお引き受けいただきましたことを編集委員一同より心から感謝申し上げます。また、学会員の皆様におかれましては、これから暑い夏を迎えますので、ご健康に留意してお過ごし下さい。

(佐藤 哲也)

- 5月号アシエイトエディター
佐藤 哲也 (早稲田大学)
- 5月号担当委員
石川 揚介 (東芝)
北條 正弘 (宇宙航空研究開発機構)
松崎 裕之 (酒田共同火力発電)

(表紙写真)

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。

詳細については、下記記事をご参照ください。

- ・「高効率石炭火力発電技術「IGCC」常磐共同火力 勿来発電所10号機」…………… (P.128 ~ 133)
- ・「微粉炭焚き火力発電における排煙対策技術」…………… (P.134 ~ 139)
- ・「ガスタービンプラント向け脱硝装置について」…………… (P.146 ~ 150)

だより ♣事務局 ☒ ♣

爽やかな季節となりました。通勤の道すがら色鮮やかなツツジやバラを楽しめて気持ちも軽やかになります。

さて、日本ガスタービン学会では4月19日に2016年度通常総会が終了し、2017年度体制が始動いたしました。今年度は6月に第1回見学会として東北電力新仙台火力発電所等の見学、7月にはJAXAにて教育シンポジウムを開催いたします。昨年度から「女性参画推進イベント」や「若手技術者の会」などの新しいイベントも増え、今年度もさまざまな切り口で会員同士の交流や情報発信の場を提供できるよう企画しておりますので、積極的なご参加をお待ちしております。また、学会ホームページの会員ページでは過去の学会誌の閲覧に加え、定期講演会講演論文集やセミナー資料集の閲覧もできるよ

うに準備をすすめておりますので、システムができましたら、ぜひご活用ください。

現在、事務局員は常勤、非常勤を合わせ、4名在籍しております。大きな学会のように各人が担当の内容を専門にこなすというよりは全員が多種多様なことに対応しなければならないので頭は常にフル回転という状態です。「専門家」はいないのですが、各々得意分野（特技？）があり、またメンバーそれぞれキャラが違って、なかなかにおもしろい面子です。得意分野のみならず、不得手な業務も頼んだり意地悪なことを言いつつ、事務局全体のレベルアップ、そして個々の能力のレベルアップができればいいなあと思っている今日この頃です。

(中村 優美)

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2017年2月8日改定

1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 依頼原稿：学会誌編集委員会（以下、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。執筆者は本学会会員（以下、会員）外でもよい。
 - B. 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。
 - C. 学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。
- 1.2. 技術論文の投稿については、「技術論文投稿要領」による。
- 1.3. 英文技術論文の投稿については、Instruction to Authors, JGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) による。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	技術論文投稿要領による
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 原稿の執筆者は、本会誌の原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、技術論文投稿要領に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、本学会の事務局（学会事務局）から原則として謝礼（図書カード）を贈呈する。
8. 依頼原稿および投稿原稿の執筆者には、抜刷を10部贈呈する。なお、非会員の第一著者には掲載号学会誌1部も贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める著作権規程による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
 ニッセイエブプロ(株) 企画制作部
 学会誌担当：高橋 邦和
 〒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

技術論文投稿要領（抜粋）

2015年3月10日制定

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) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
 - 3) 原稿執筆要領に従って執筆された、モノクロの日本語原稿であること。
 - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
 - 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
 - 特許および実用新案の公報、科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
 - 他学協会の講演要旨前刷、社内報・技報、官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 原則として刷り上がり8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。
3. 著者がカラー1ページあたり50,000円を負担する場合には、カラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、原稿執筆要領に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを、所定の論文表紙および英文アブストラクトとともに学会誌編集事務局に提出する。
5. 投稿された論文は、論文査読に関する内規に従って査読を行い、論文委員会が掲載可否を決定する。
6. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
7. 本技術論文の著作権に関しては、学会誌編集および発行要領（抜粋）9.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
Vol.45 No.3 2017.5

発行日 2017年5月19日
 発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 辻田 星歩
 発行者 船崎 健一
 〒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

©2017, 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の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。