

2 | 研究開発領域

2.1 電力のゼロエミ化・安定化

2.1.1 火力発電

(1) 研究開発領域の定義

本領域は、石油・石炭・天然ガス（LNG）・廃棄物などの燃料の燃焼熱エネルギーを電力へ変換する火力発電に関する研究開発動向を含む領域である。今後も依然として重要な役割を果たすと考えられる天然ガス火力発電と石炭火力発電のほか、カーボンニュートラルなバイオマス火力発電、カーボンフリー燃料として注目が集まる水素、アンモニア火力発電等の二次燃料に係る研究開発動向を主な対象とする。脱炭素化に向けた発電に関するより新しい科学技術動向も含める。

(2) キーワード

天然ガス、石炭、バイオマス、水素、アンモニア、ポリジェネレーション、ガスタービン、石炭ガス化複合発電、ケミカルループ燃焼、超臨界CO₂サイクル、AI技術

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

火力発電は、燃料を燃やすことにより発生する燃焼熱を電気に変換する発電方法であり、2021年度の日本における一次エネルギーの中で約37%¹⁾、発電電力量の約73%を支えている。その燃料の大部分は石炭、LNG、石油等の化石燃料であり、CO₂排出量において本領域のインパクトは大きく、地球温暖化対策の観点から、これら化石燃料の使用量の抑制が求められている。そのため、化石燃料の火力発電による発電電力量とそのシェアは減少傾向にあるものの、依然として重要な電源ソースである。

一方、新エネ等による発電電力量は増加傾向にあり、2021年度のシェアは約13%に達し、その7割強は太陽光発電と風力発電が占める。太陽光発電と風力発電は天候等によって出力が大きく変動する電源であり、自ら発電周波数を維持する機能を持たない。電力システムの安定には需要と供給の同時同量を保つ必要がある。出力変動を吸収し需給バランスを維持するため、火力発電の有する調整力が極めて重要となる。また、ガスタービンや蒸気タービンを使用するタービン系の火力発電ではタービンの慣性力により自身の回転数を維持することから、突発的な需給や電力システムの変動に対しても電力システム周波数の安定に大きく寄与する。

2021年10月に決定された第6次エネルギー基本計画では、再生可能エネルギーの進展も考慮して、火力発電の比率は2030年度に41%と見込まれているが、依然として主要な供給力及び再生可能エネルギーの変動性を補う調整力として活用されることが示されている。同基本計画における温室効果ガスの2030年時点での46%削減、さらに2050年カーボンニュートラル・脱炭素社会の実現という日本の野心的な目標を達成するためには、化石燃料を利用する火力発電は、極限まで熱効率の向上を目指すとともに、カーボンニュートラルなバイオマスやカーボンフリーな水素等への燃料転換、更にはCCS等の炭素回収・貯留技術の実用化が喫緊の課題となる。加えて、2050年のカーボンニュートラル・脱炭素社会の実現に向けて、BECCS(Bioenergy with Carbon Capture and Storage)等のネガティブエミッション技術の開発、導入が極めて重要となる。

また火力発電の主要機器は高度な技術力を結集したもので、その国の工業技術レベルの象徴であり、技術教育上も重要であり、国際競争力の源泉でもある。

[研究開発の動向]

■天然ガス火力発電

主にガスタービン複合発電 (Gas Turbine Combined Cycle : GTCC) が対象となるが、ガスタービンと他のシステムを組み合わせるハイブリッド発電の開発も進められている。GTCCの大容量機 (40万kW程度) については、NEDOのカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/高効率ガスタービン技術実証事業のうち、1700°C級高効率ガスタービン技術実証事業の成果として、ガスタービン入口ガス温度は既に1650°C (発電効率57%、CO₂排出量原単位310 g/kWh) に達しており、順調にマーケット展開がなされている²⁾。更なる高効率化や耐久性向上のため、低NO_x燃焼技術、高性能冷却技術、高性能遮熱コーティング技術、超耐熱材料等の開発が課題として挙げられる。本技術と並行して、再生可能エネルギー大量導入時の調整力の開発を目的に、NEDO事業として2018～2021年の間、機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究が実施され、起動時間 (ホットスタート) 10分、出力変化速度20%/分等を満たす技術開発が行われた³⁾。

米国エネルギー省 (DOE) ではガスタービン開発「Advanced Turbines」の研究開発を3つのカテゴリーとして1700°C級ガスタービン開発を目指す「Advanced Combustion Turbines」(セラミック複合材や低NO_x燃焼技術等)、CO₂回収型超臨界CO₂タービンの開発を目指す「Supercritical CO₂ Turbomachinery」、および新たなコンセプトとして昇圧燃焼型システムの開発を目指す「Pressure Gain Combustion」に整理して推進している⁴⁾。「Advanced Combustion Turbines プログラム」では19件のプロジェクトが進行しているが、そのうちAM (Additive Manufacturing) 技術関連が7件、混焼を含む水素燃焼関連が6件であり、これらに集中的に投資されている。産学連携プログラムとしてNExT (National Experimental Turbine) Cooled Blade Studies⁵⁾、大学をベースとする次世代においても米国の研究優位性を確保するための学術的プログラムとしてUTSR (University Turbine System Research)⁶⁾ が運営されている。NExTは、米国のガスタービン高温化研究の優位性を確立するため、AGILIS、Honeywell、Pratt & Whitney、Solar、およびSiemensのガスタービンメーカー5社協力の下、モデルガスタービン設備を設置し、各社の利益を侵害しない範囲で共通基盤的な実験研究を行うプラットフォームである。2022年に設置を完了し、今後AM技術実証を中心とした研究が開始される予定である⁷⁾。UTSRは調査時点で総額6.2百万ドルの予算で8件の研究プロジェクトが採択されている。主要な課題は、水素専焼、および水素/天然ガス混焼、およびその他の水素混合燃料を利用するガスタービン性能評価である。UTSRもNExTプラットフォームを用いた研究計画を発表している。「Supercritical CO₂ Turbomachinery」プログラムではGE等3件の開発プロジェクトにおいて高温燃焼器や燃焼予測技術の開発を進めている。超臨界CO₂タービンの商用化プロジェクトとして、NET Powerが東芝エネルギーシステム&ソリューション製50 MWth級燃焼器の実証運転を2018年に成功させ、300 MWe級低排出商用機を2026年に運開すべく、開発が継続されている。「Pressure Gain Combustion」プログラムでは3件の水素燃焼に関する基礎研究が大学により進められている。

EUでは、2021年よりHorizon Europe (2021～2027年) の枠組みでエネルギー・気候・モビリティ等の研究開発に152億ユーロ規模が投資されている⁸⁾。前身のHorizon 2020 (2014～2020年) では、FLEXTURBINEプロジェクトにてGE、Siemens等23機関により10.7百万ユーロが投資され負荷変動対応型ガスタービン技術開発を、TANGOプロジェクトにてSiemens等8機関により3.7百万ユーロが投資されGT燃焼器の燃焼振動対策研究を、FACTORプロジェクトによりGE、Siemens等23機関により7.2百万ユーロが投資され燃焼器-タービン相互干渉予測制御技術開発を、OXIGENプロジェクトによりGE、Siemens等10機関により5.6百万ユーロが投資され高温部品用AM技術開発がそれぞれ行われた。

複合発電のうち、固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC) と組み合わせたガスタービン燃料電池複合発電 (Gas Turbine Fuel cell Combine cycle : GTFC) (発電効率63%、CO₂排出量原単位280 g/kWh) について、NEDOでは2025年頃の実用化を目指し、2015年度から2ヶ年の250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステムによる実証試験、および2016年度から3ヶ年の要素技術開発がそれぞれ

進められおり、これら知見をベースに1,000kW級の小型GTFC（蒸気タービンなし）の商用化技術を蓄積した上で、10万kW級の中型GTFC（蒸気タービンあり）の高圧化に係る要素技術の開発を行うこととしている。また、これらの知見は後述のIGFC開発プロジェクト（大崎Cool Genプロジェクト）に反映されることとしている⁹⁾。なお、250 kW級SOFC-MGTは2019年に実用化され、商用運転が開始されている。近年、SOFCからの更なる高効率化が期待できるプロトン導電性セラミック燃料電池セル（Protonic Ceramic Fuel Cell : PCFC）が注目されている（机上検討では発電効率75%）¹⁰⁾。さらに、水電解装置（Solid Oxide Electrolysis Cell : SOEC）とのリバーブルシステムとして、SOFC/SOECの研究も進められている。

■石炭火力発電

主に従来のボイラー-蒸気タービン発電か、ガスタービンを用いる複合発電に大別される。また、全く異なるものとして、ケミカルルーピング発電（排ガスがCO₂とH₂Oのみとなる燃焼法による発電）の研究開発も進められている。

ボイラー-蒸気タービン発電について、国内では1995年頃から実機導入が始まった超々臨界圧（USC : Ultra Super Critical、主蒸気圧力25 MPa、温度600～630℃、発電効率40%、CO₂排出量原単位800 g/kWh）が主流となっている。新たなUSCの導入は、石炭火力に対する世界的な逆風のため、日本からの技術導入により国産化を図った中国など、主にアジア地域に見られる。更なる高効率化を目指し、700℃級の先進超々臨界圧（Advanced-Ultra Super Critical : A-USC、主蒸気圧力35 MPa、温度700℃、発電効率46～48%、CO₂排出量原単位700 g/kWh）の開発が進められている。国内では、経済産業省の事業として2008年から基本設計が始まり、ボイラーやタービン材料の開発を中心に進められている。2016年度以降、NEDO事業「次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」プロジェクトとして移管され、2021年度まで長時間クリープ試験や材料データベースの拡充、表面処理技術、超音波探傷試験精度向上等の保守技術の確立を目指した開発が進められた⁹⁾。海外では、DOEおよびOCDO（Ohio Coal Development Office）により、2000年代初頭から、蒸気条件760℃・35 MPa級のA-USCボイラー・タービン材料開発の研究プロジェクトが立ち上がっており、2016年にはFEED（Front End Engineering Design）を終えている¹¹⁾。欧州では、1998年からCOMTES700プログラムで材料開発や要素設計の研究が始まったが、後継のCOMTES+プロジェクトについては欧州における火力発電の状況の変化から進捗が見られない状況にある¹²⁾。中国、インドおよび韓国においても、近年産官学による開発プロジェクトがアナウンスされたが、現状進捗が確認できるのは、2021年のインド BHEL, NTPC, IGCARによる800 MW級A-USCの開発計画についてのプレスリリースのみである¹³⁾。

ボイラー-蒸気タービン発電とCCSとを統合する技術に酸素燃焼技術がある。ボイラーメーカー協力のもと、国内の電力会社と重電メーカーおよび商社の企業連合が、オーストラリアクイーンズランド州のカライドA発電所において、2012～2015年に酸素燃焼およびCO₂回収実証試験を実施した¹⁴⁾。次期案件として、カナダアルバータ州サンダンス発電所におけるEOR（Enhanced Oil Recovery）による酸素燃焼/CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage）プロジェクトが検討されていたが、当該発電所のユニットは全て天然ガス焚きへ移行することがアナウンスされた。米国ではDOE/NETLが主導するプロジェクトにおいて、現在4件、総額14.6百万ドル規模で加圧酸素燃焼技術、パイロットスケール炉設計、フレームレス燃焼技術、およびシステム最適化などの研究開発が進められている⁶⁾。ドイツでは、SFB/TRR129 Oxyflameプロジェクトが3大学により進められており、酸素燃焼条件における石炭の反応性の解明、モデル化などの基礎研究や関連シンポジウムが行われている。

石炭を用いる複合発電である石炭ガス化複合発電（Integrated Gasification Combined Cycle : IGCC）は、国産の空気吹きIGCC、および国内外の酸素吹きIGCCともに、1990年代後半から2010年頃にかけて実用化されている。日本で1980年代から開発してきた空気吹きでは、250 MW実証機での実証試験運転が2007年度から2012年度まで行われ、42%（LHV基準）を超える送電端効率を達成するなど、空気吹き

IGCCの成立性を実証した。この実証機は、2013年度からは常磐共同火力勿来発電所10号機として商用運転された。また、商用機級の540 MW、設計送電端効率48% (LHV基準)の空気吹きIGCCが福島県の広野と勿来にそれぞれ建設され、勿来IGCCは2021年4月に、広野IGCCは同年11月に商業運転を開始した。

国内の酸素吹きの開発は、NEDOの石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業¹⁵⁾において、大崎クールジェンプロジェクトで行われている。第1段階として2018年度まで166 MWの酸素吹きIGCCの実証が行われ、送電端効率40.8% (HHV基準)、最大負荷変化率16%/minなどの成果を得ることができ、1500°C級IGCCに換算して送電端効率約46% (HHV基準)の達成に見通しを得た。2019年12月からは、第2段階としてCO₂分離・回収型酸素吹きIGCCの実証試験が行われた。最終段階である第3段階では、2022年4月からCO₂分離・回収型IGFCの実証として、発電出力600 kW級の固体酸化物形燃料電池 (SOFC) 2基を設置し、CO₂分離回収後のH₂リッチガスを用いたSOFCでの発電実証試験を2022年4月から行っている。さらに、酸素/CO₂吹きIGCCという新たなコンセプトの国産技術開発が、2008年からNEDO事業の「CO₂回収型クローズドIGCCの開発」として進められた。この事業は、2015年よりCO₂回収型次世代IGCC技術開発事業に引き継がれ、2020年度まで行われた。この事業では、酸素/CO₂吹きガス化の実証、熱効率向上が期待できる乾式ガス精製システムの構築、セミクローズドGTシステムにおける燃焼器性能の検討などを行い、送電端効率42% HHVを見通せる一連の要素技術を確認した¹⁶⁾。

オランダとスペインには1990年代より商用運転を続けてきたIGCCが存在したが、経済的理由からオランダは2013年に商用運転を終了し、スペインは2016年に解体のため運転を停止した。米国では1990年代よりTampaとWabash RiverにてIGCCが商用運転された。Wabash Riverは廃止となったがTampaは運転が継続されている。さらに2013年にEdwardsportにて761 MWのIGCC (Duke Energy社) が運開している。また、中国では2013年にTianjinにて265 MWのIGCC (GreenGenプロジェクト) が運開しており、2016年からはpre-combustion方式によるCCS-EORの実証試験が始まっている¹⁷⁾。韓国では2016年にTaeonにて300 MWのIGCCが運開しており、2019年には水素転換装置を増設し、100 kW級燃料電池の試験運転を実施している¹⁸⁾。現在、DOEにおける研究開発プロジェクトでは、石炭ガス化技術を発電技術よりも水素、ガソリン、ディーゼル、および航空用の液体燃料製造技術として捉えている。発電用としてはEPRIが11百万ドル規模のDOE事業において、石炭とバイオマスの混焼IGCC/CCSによるネガティブエミッション発電技術 (50 MW級IGCC + 8.5 t/h水素製造) のFEEDを実施中である⁶⁾。

ケミカルルーピング燃焼技術はCO₂分離・回収装置や空気分離設備が不要な中小規模石炭火力向け (100 ~ 500 MW: 発電効率46%、CO₂排出量原単位700 g/kWh) に適した技術である。2030年頃の実用化を目指し、NEDOにより2015年から要素技術開発プロジェクトが進められてきている。現在、NEDOカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業において、大阪ガスと石炭エネルギーセンターにより、要素技術開発と300kW級試験装置によるプロセス実証が進められている¹⁹⁾。米国ではDOEが主導し、2015 ~ 2021年にかけて、プラントメーカーや大学・研究機関都合7者と計千百万ドル規模の低コストキャリア開発やシステム最適化、大規模プラントFS等の研究開発を進めてきたが、現時点で実施中のプロジェクトを確認できない⁶⁾。

DOEは2020年2月、石炭FIRSTプロジェクトを立ち上げ、総額77億円の投資をすることを発表した。FIRSTとは、Flexible、Innovative、Resilient、Small、およびTransformativeであり、この方針に従い、7つの具体的プロジェクト (超臨界加圧流動床、間接型超臨界CO₂発電、直接燃焼超臨界CO₂発電、石炭ガス化ベースポリジェネレーション、直接燃焼エンジンおよびガスタービン、モジュラ型加圧酸素燃焼、およびフレームレス加圧酸素燃焼) が実施され、それぞれのPre-FEEDが終了している²⁰⁾。

■バイオマス火力発電

2020年度の日本の新エネ等による発電電力量の内2割強を占めるバイオマス発電は、近年増加の傾向にある。バイオマス発電の多くは、石炭火力でのバイオマス混焼発電あるいはバイオマス専焼発電である。これら

に採用されている発電方式は、ボイラが発生する蒸気により蒸気タービンを駆動するボイラ&蒸気タービン方式である。

日本において、バイオマス混焼発電の発電出力は、既存の石炭火力に依存することから数10～100万kW程度であるが、バイオマス専焼発電の発電出力は、燃料となるバイオマスの供給力から5千～数万kW程度に留まる。また、前者の多くが燃焼温度の高い微粉炭ボイラを採用しているのに対し、後者のボイラには前者よりも燃焼温度の低い流動床ボイラあるいは循環流動床ボイラが採用されている。燃焼温度の違いはボイラが発生する蒸気条件の違いとして表れ、前者の発電効率が40%超であるのに対し、後者の発電効率は30%程度に留まる。一般にボイラ&蒸気タービン方式の発電効率は、発電出力にも比例することから小規模なバイオマス専焼発電（5千kW規模）の発電効率は20%前後となる。

発電効率の観点から、バイオマス発電は石炭火力での混焼発電（微粉炭ボイラ）が有利と考えられるが、燃料となるバイオマスを微粉炭ボイラに供給するには燃料の微粉砕が必要となる。一般にバイオマスは繊維質であることから、石炭に比べると粉砕性に劣り、既存の石炭用粉砕装置で石炭とバイオマスの混合物（あるいはバイオマスのみ）を粉砕すると、粉砕可能量は石炭のみを粉砕した場合よりも少なくなり、バイオマス混焼率は限定されることになる。その解決策として、バイオマス専用の粉砕装置の導入、ペレット化や炭化などの改質によるバイオマスの粉砕性向上が挙げられる。

更に小規模なバイオマス発電の発電方式として、ガス化&エンジン発電が挙げられる。これはバイオマスをガス化炉で可燃性ガス燃料に変換し、それをエンジンに供給することで発電を行うものである。既に固定床ガス化炉を採用した熱電併給ユニットが製品化されており、国内にも導入されている。ユニットあたりの発電出力は数10kW程度で、発電効率は20%強、熱供給と合わせた総合エネルギー効率は約80%となる。

バイオマス発電の重要な課題のひとつは、バイオマスの調達（供給力）であり、前出の混焼発電に使用される大量のバイオマスは、多くの場合、海外からの輸入に頼っているのが実情である。バイオマスの発電利用にあたっては、改質や輸送を含めたライフサイクルCO₂を考慮する必要がある。

ネガティブエミッション技術として、バイオマス発電の燃焼排ガスに含まれるCO₂を回収して固定化するBECCSが挙げられる。英国のDRAXはNorth Yorkshireバイオマス発電所においてMHIのCO₂分離回収技術を導入し、2020年より燃焼排ガスからのCO₂回収パイロット試験を開始した。2024年よりBECCSユニットを建設（2027年運開予定）、これにより年間800万トン以上のCO₂を回収する予定としている^{21), 22)}。国内においても東芝ESSが福岡県の三川発電所（バイオマス発電）で2020年よりCO₂分離回収実証を開始しており、日本製紙とタクマが北海道の勇払バイオマス発電所で2023年度よりCO₂分離回収実証を開始予定である。課題は分離回収したCO₂の貯留であり、帯水層等を活用した貯留地点および設備の開発が不可欠である。類似の取り組みとして、太平電業が広島県の西風新都バイオマス発電所にCO₂回収装置を導入、燃焼排ガスに含まれるCO₂の一部（0.3 t/日）を回収し、発電所構内の農業ハウスでの農産物栽培に活用している（2022年6月運開）。小規模ではあるが、分離回収後のCO₂を帯水層等に貯留するのではなく、農作物に固定化するという現実的な取り組みである。

EUにおけるバイオマスエネルギー利用は再生可能エネルギーの約60%を占めており、熱利用が約75%、発電利用が約13%、輸送用燃料利用が約12%となっている。これに要するバイオマスの殆どはEU域内から供給されている。エネルギー利用されるバイオマスの約60%が木質系バイオマスで、農業系バイオマスが約30%、廃棄物系バイオマスが約10%を占める。発電に供されるバイオマス量は、ドイツ、英国、イタリアが上位となる²³⁾。

■水素・アンモニア火力発電

近年カーボンフリー燃料を使った新たな火力発電方式として研究開発が進められてきている。第6次エネルギー基本計画では、将来の電源構成において水素・アンモニア発電が占める割合を2030年に1%、2050年に10%と計画している。これに向け、国内では水素焚きやアンモニア焚きの火力発電技術の開発が進められ

ている。NEDOは2019～2021年、ドライ低NO_x水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業において、1 MWの電力と2.8 MWの熱の熱電併給が可能な実証試験を実施した。また、2020年からは酸素水素燃焼タービン発電に関する先導研究を実施している²⁴⁾。アンモニアについては、内閣府が主導した戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「エネルギーキャリア」において、水素キャリアとしてのアンモニアに注目し、アンモニア燃料電池とアンモニア直接燃焼に関する研究開発が行われた。アンモニア直接燃焼について、SIPプロジェクトでは不十分であった実証試験に必要な技術開発を対象としてNEDOによる研究開発プロジェクトが開始された。NEDO事業の「次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電技術推進事業/アンモニア混焼火力発電技術の先導研究 (2019～2020年)」ではIHIによる微粉炭ボイラでのアンモニア混焼に向けたバーナ開発およびガスタービンでの液体アンモニア燃焼技術開発が行われた。

「水素社会構築技術開発事業/大規模水素エネルギー利用技術開発/水素エネルギー利用システム開発 (2019～2025年)」では、三菱重工業によるアンモニア熱分解GTCCの設計開発が行われている²⁵⁾。後継のNEDO事業にて、「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/アンモニア混焼火力発電技術/次世代火力発電等技術開発/CO₂フリーアンモニア燃料 火力発電所での利用拡大に向けた研究開発 (2021～2024年/電源開発、中外炉工業、電力中央研究所、産業技術総合研究所、大阪大学)」では、既設の石炭火力発電設備へのアンモニアバーナの導入による石炭との混焼技術の開発、「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/アンモニア混焼火力発電技術/次世代火力発電等技術開発/100万kW級石炭火力におけるアンモニア20%混焼の実証研究 (2021～2024年/JERA、IHI)」では、2023年度中の碧南火力発電所4号機における実証開始に向け、検討を進めている。また、三菱重工業は、4万kW級ガスタービンでのアンモニア専焼技術の開発を進めている。

(4) 注目動向

[新展開・技術ピックアップ]

■ゼロエミッション火力発電技術

• CO₂分離・回収型IGFC

NEDOの石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業において、大崎クールジェンプロジェクトが行われている。2017～2018年の第1段階では170 MW級実証プラントとして世界最高レベルの送電端効率40.8%を達成、2019～2022年の第2段階ではCO₂分離・回収設備のCO₂回収率90%以上、回収CO₂純度99%以上を達成、2022年4月からは最終の第3段階として、SOFCモジュール2基とIGCCを接続した世界初のMW級CO₂分離・回収型IGFCの実証試験において、高濃度水素ガスによる運転・制御方法の確立、発電特性の把握、各要素の協調制御、およびシステム全体効率に関する検討等が行われている。

• CO₂回収型クローズドIGCC (Oxy-fuel IGCC/CCS)

NEDOの「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト」において複数のプロジェクトが実施された。CO₂回収型クローズドIGCCプロジェクトは、2015～2020年に50トン/日ベンチスケールガス化炉試験運転等による要素研究開発が実施され、酸素/CO₂吹きガス化炉技術や乾式ガス精製技術の確立が図られ、送電端効率42%以上を達成する目的が得られた¹⁶⁾。また、文部科学省フラッグシップ2020ポスト「京」で取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発、および「富岳」成果創出加速プログラム「スーパーシミュレーションとAIを活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用」と連携して、熱流体-構造連成大規模解析による先進的設計システムの開発が進められている。

NEDO事業として、これまで電力中央研究所と三菱重工業、三菱パワーが実施してきたCO₂回収型クローズドIGCCプロジェクトは、第2フェーズ (2015～2020年度、45億円規模) が終了した。このシステムは、IGCCにおいてガス化炉を酸素/CO₂吹きとし、CO₂が主成分である排熱回収ボイラ (HRSG) からの排ガスを、ガス化炉への石炭ならびにガス化炉後流で回収されたチャーの投入に必要な搬送ガスに用いるとともに、ガス化炉の温度調整を目的として投入する。CO₂はガス化反応 (C+CO₂→2CO) に寄与するガス化剤であ

るため、ガス化炉内の温度調整の役割を果たすとともに、ガス化反応の促進効果を有している。そのため、従来の空気吹きガス化炉よりも高いガス化性能を得ることができる。また、ガスタービン (GT) については、酸素製造装置からの酸素とHRSGからの排ガスを混合して利用するセミクロードサイクルとしている。これらによって、このシステムでは系内に窒素が投入されず、HRSGからのCO₂を回収するにあたってはCO₂分離に関する装置を設置する必要がなく、CO₂回収を行っても比較的高い送電端効率が得られる。このプロジェクトでは、従来の湿式ガス精製システムよりも高い熱効率を得ることができる乾式ガス精製システムの開発も行われ、ガス化炉へのCO₂投入によるガス化性能向上とともに、効率向上の要素となっている。さらに、HRSGで発生した蒸気を抽気してガス化炉のガス化剤 (C+H₂O→CO+H₂) として利用することでガス化効率を高め、システムの熱効率を向上させている。この事業では、酸素/CO₂吹きガス化の実証、ガス化炉にH₂Oを投入した際のガス化効率の向上効果の検証、乾式ガス精製システムの構築、セミクロードGTシステムにおける燃焼器性能の検討などを行い、送電端効率42% HHVを見通せる一連の要素技術を確立した。

• 超臨界CO₂サイクル発電

米NET Power社が米テキサス州La Porteに建設した超臨界CO₂サイクル発電実証試験設備は、2018年に東芝製50 MWth燃焼器の燃焼試験に成功後、2021年にテキサス州の電力網に接続し売電を開始している。2022年には国際企業Baker Hughesが同社のプロジェクトへ参画することが発表された。このプロジェクトにおいても、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラムとの連携により、超臨界CO₂燃焼器の熱流体-構造連成大規模解析による先進的デザインシステムの開発が進められている。

• 水素燃焼発電

NEDOの水素社会構築技術開発事業において、川崎重工業は2019～2020年に1.1 MW発電と2.8 MW熱供給が可能なドライ低NO_x水素専焼ガスタービンの実証試験に成功した。ここではドライ燃焼方式による従来よりも高い発電効率やNO_x排出量の低減効果について確認された。

NEDOの水素利用等先導研究開発事業において、2020～2022年に産業技術総合研究所等は酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発を実施中である。ここでは酸素水素燃焼を含むクロードサイクルシステムに関するシステム効率検討、高温高压材料や燃焼機器の開発、社会実装シナリオ等が検討されている²⁴⁾。

NEDOのグリーンイノベーション基金事業により、2021～2030年にJERA、関西電力、およびENEOSは水素社会構築技術開発事業にて開発された水素ガスタービン燃焼器等を実際の発電所に実装し、中・大型ガスタービンの水素混焼・専焼実証運転を実施する計画をスタートさせた。水素の国際サプライチェーン実証事業との連携により、水素の大規模需給実証を行う²⁶⁾。

• アンモニア燃焼発電

NEDOのカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業により、2021～2024年に電源開発ら、およびJERAらは、100万kW石炭火力における20%混焼実証等、火力発電所での利用拡大に向けた研究開発を実施中である。

NEDOのグリーンイノベーション基金事業により、2021～2028年にIHI、三菱重工業、およびJERAはアンモニア高混焼微粉炭バーナおよびアンモニア専焼バーナを開発し、事業用石炭火力発電所においてアンモニア利用の社会実装に向けた技術実証を行う²⁷⁾。また、同事業により、2021～2027年にIHIらは2MW級ガスタービンに向けた液体アンモニア専焼技術の開発・実証を行う計画である。

■再生可能エネルギー電源大量導入時の火力発電技術

NEDOのカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業により、2018～2021年に電力中央研究所らは、機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究を実施し、起動時間 (ホットスタート) 10分、出力変化速度20%/分等の高い応答性を備えた系統安定化技術の開発を実施した³⁾。

■ AM (Additive Manufacturing) 技術の適用

内閣府 SIP「統合型税関開発システムによるマテリアル革命」において、川崎重工業、大阪大学、および NIMS は水素焼きガスタービン向け燃焼バーナ等への適用を目指した Ni 基合金の 3D 積層造形プロセスの開発を実施している。

■カーボンリサイクル技術との連携（ポリジェネレーション技術開発）

NEDO のカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業により、2020～2024年に電力中央研究所らは、CO₂回収型ポリジェネレーションシステム基盤技術開発を実施している。石炭の他、バイオマスや廃棄物のガス化発電に加えて、シュウ酸等の高付加価値物の併産について技術開発を進めている。また、同事業において、大阪ガスおよび石炭エネルギーセンターは、ケミカルルーピング燃焼の要素技術開発と 300 kW 級試験装置による電気・水素・CO₂のポリジェネレーションプロセス実証に取り組んでいる²⁸⁾。

このシステムでは、調達の困難さから比較的小規模な発電システムに利用されている廃棄物やバイオマスを石炭と共利用してガス化することで高効率な発電とし、またガス化剤の酸素/CO₂/H₂Oの割合を変えることでガス化ガス（合成ガス）の H₂/CO 比を調整し、合成ガスを発電のみならず化学合成にも利用可能なシステムとなっている。化学合成に利用することで、炭素が有価物に一部固定されるため CO₂ 回収の負担が軽減され、また、廃棄物利用と組み合わせることは炭素資源の循環利用にも繋がる。さらに、再生可能エネルギーが普及するにつれて、火力発電に強く求められるようになる調整力にも貢献できる。通常の IGCC では発電を停止する際、ガス化炉も停止する必要のあるのに対し、本システムでは合成ガスを化学合成に供給することが可能なため、ガス化炉やガス精製設備の稼働率を高く維持できる。これにより柔軟な需給調整が可能となり、結果的に再生可能エネルギーの導入促進に貢献できる。

■ AI 技術の火力発電への適用技術

NEDO 助成事業として、2018～2019年、関西電力と三菱重工業は舞鶴火力発電所において、運用高度化サービスの開発に向けたボイラ燃焼調整の最適化のためのデジタルツイン構築実証事業を実施した²⁹⁾。

NEDO のカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業により、2020～2022年に東芝エネルギーシステムズは、豪ベールズポイント発電所 5・6号機に AI による異常検知や寿命予測技術の実証試験を実施した³⁰⁾。

NEDO は ASEAN 地域電力会社向け IoT 活用による発電事業資産効率化・高度化促進のための技術実証事業において、2019～2022年にタイ・マエモ火力発電所 11・13号機に AI・ビッグデータ解析による発電所全体の熱効率改善や信頼性向上技術の実証試験を実施した³¹⁾、³²⁾。

2022年、JERA は碧南火力発電所 4号機において、「AI によるボイラ運転最適化の本格運用を開始について」として石炭火力運転支援 AI を運用開始したと発表した。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

・石炭ガス化複合発電（ゼロエミッション技術）に関するプロジェクト（2019～2022年、73億円）

空気吹きに関しては商用機規模の 540 MW プラント 2 基が福島県の勿来と広野で 2021 年に運開した。酸素吹きについても大崎クールジェンで実証試験が続けられており、世界を圧倒的にリードしている。NEDO 次世代火力発電等技術開発/石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業では、大崎クールジェンプロジェクト¹⁶⁾において、2019年12月から第2段階として CO₂ 分離・回収型酸素吹き IGCC の実証試験が行われている。商用発電プラント（1500℃級 IGCC）を想定し、石炭ガス化ガスの 17% 程度を抽出し、シフト反応器を通気させた後、CO₂ 吸収塔で CO₂ を回収する実証試験を行っている。CO₂ 回収率 90%、回収 CO₂ 純度 99% 以上の目標を達成し、石炭ガス化ガス由来の H₂ リッチガスをガスタービンに送り、IGCC 設備と CO₂ 分離回収設備

との関係に成功している。さらに、CO₂を回収しながらも1,500°C級IGCCにおいて送電端効率40% (HHV基準) 程度の見通しを得ることなどを目標に進められている。

また、最終の第3段階では、CO₂分離・回収型IGFCの実証として、発電出力600 kW級の固体酸化物形燃料電池 (SOFC) 2基を設置し、CO₂分離回収後のH₂リッチガスを用いたSOFCでの発電実証試験を2022年4月から行っている。将来の500 MW級商用機に適用した場合に、CO₂回収率90%の条件で、送電端効率47%程度 (HHV基準) の見通しを得ることを目標として進められている。

• 石炭ガス化 (ポリジェネレーション技術) に関するプロジェクト (2020～2022年、10億円)²⁸⁾

NEDOのCO₂分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発では、石炭ガス化技術を生かした、多様な燃料を利用するCO₂回収型ポリジェネレーションシステム基盤技術開発 (2020～2022年、電力中央研究所) が進められている。

• 水素発電技術 (混焼、専焼) の実機実証 (2021～2030年、510億円)²⁶⁾

NEDOグリーンイノベーション基金事業として、JERA (2021～2025年、110億円)、関西電力 (2021～2026年、160億円)、およびENEOS (2021～2030年、240億円) により中・大型ガスタービンによる水素混焼・専焼技術の発電所への実装と実証運転が進められている。異なる実証運転により燃焼安定性等を検証するとともに、国際サプライチェーン実証事業との連携も実施している。

• アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業 (2021～2024年、約60億円)

NEDOカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業として、JERAとIHIによる100万kW級石炭火力への20%混焼実証研究、ならびに電源開発、中外炉工業、電力中央研究所、大阪大学、および産業技術総合研究所がCO₂フリーアンモニア燃料の利用拡大に向けた研究開発を実施中。実機アンモニア混焼バーナの設計・製作や最適燃焼方法の検討、混焼率拡大時の燃焼特性評価、リスクマネジメント検討等を行っている。

• 石炭ボイラにおけるアンモニア高混焼技術の開発・実証 (2021～2028年度、452億円)²⁷⁾

NEDOグリーンイノベーション基金事業として、IHI、三菱重工業、およびJERAが高混焼バーナおよび専焼バーナの開発と技術実証を実施している。混焼率50%以上を目指している。

• ガスタービンにおけるアンモニア専焼技術の開発・実証 (2021～2027年度、92億円)²⁷⁾

NEDOグリーンイノベーション基金事業として、IHI、東北大学、および産業技術総合研究所が2 MW級ガスタービンに向けた液体アンモニア専焼技術を開発中。実証試験を通じて運用ノウハウの取得や安全対策の検証を行っている。

• スーパーシミュレーションとAIを連携活用した実機クリーンエネルギーシステムのデジタルツインの構築と活用 (2020～2022年度、2億円)

文部科学省「富岳」成果創出加速プログラムとして、東京大学、京都大学、および九州大学がCO₂回収型IGCC用石炭ガス化炉と超臨界CO₂燃焼器のデジタルツインの構築を各メーカーと連携して実施中。炉内部の固気液三相燃焼流と炉構造体の熱伝導を非定常双方向連成計算法により解く、炉内反応・燃焼特性と構造体の耐熱健全性を同時に評価する技術の開発を進めている。

■ 国外

• オランダMugnum水素焚き転換プロジェクト (2018～2023年、10億ユーロ)

三菱パワー社はオランダMagnum発電所 (現RWE社) 440 MW1ユニットを2023年までに水素専焼GTCCへ転換するプロジェクトを実施中。当初はノルウェー産天然ガス由来のブルー水素で発電し、徐々にグリーン水素へ転換する計画である²⁵⁾。

• Advanced Clean Energy Storage Project for Hydrogen Production (2022～2045年、504.4百万ドル)

三菱パワー社とMagnum Development社はDOEからの504.4百万ドルの資金援助により、ユタ州イン

ターマウンテンにおけるグリーン水素の岩盤貯留と840 MWの水素複合発電プロジェクトを発表した。2025年に30%混焼発電、2045年に専焼発電を計画している。

(5) 科学技術的課題

■石炭ガス化複合発電

石炭ガス化複合発電 (IGCC) については、従来のボイラ蒸気タービンによる発電に比べて20%程度の効率向上が見込めるが、現状設備コストが割高であり普及が進んでいない。出力当たりの設備コストを低下させるには、石炭ガス化炉のガス化転換率向上、熱サイクルの最高温度引き上げ、現状の湿式ガス精製に変わる乾式ガス精製技術 (脱硫黄、脱ハロゲン、脱アンモニア・シアン、脱水銀・ヒ素等) の開発、空気分離装置の高効率化による動力低減などが課題である。また、海外でのCO₂排出量削減に資するための粗悪炭など多炭種への対応性検証、再生エネルギーと共存するための負荷変化率や起動時間等の運用性の向上、なども課題となる。ゼロエミッション火力発電については、クローズドIGCCにおける酸素/CO₂吹き石炭ガス化炉最適化、酸素燃焼ガスタービン燃焼技術、再生熱交換器の効率化、IGFC/CCSにおけるCO₂回収設備の運用コスト低減などの技術が課題となる。超臨界CO₂サイクル火力発電の課題としては、高耐久性の耐熱・耐圧材料の開発、酸素燃焼の安定 (燃焼振動抑制) 制御技術、一貫システムの試験実証、熱システム最適化、システム全体の性能、運用性および信頼性の向上などが挙げられる。

■水素混焼・専焼時の低NOx・安定燃焼技術

水素は可燃限界が広く燃焼速度が速い燃焼性に優れた燃料である。一方で、高い燃焼温度に起因するサーマルNOx生成、応答性の速さに起因する燃焼振動、および速い燃焼速度に起因する逆火等、低NOxかつ安定な燃焼を実現するための技術的課題が多い。水素乱流燃焼の理解と制御技術の開発を進める必要がある。技術の社会実装を加速するためには、実験的研究開発に加え、後に述べるAI技術を含むデジタルツイン技術を活用することも必要とされている。

■アンモニア混焼・専焼時の低NOx・安定燃焼技術

アンモニアは可燃限界が狭く燃焼速度が遅い燃焼性の低い燃料である。また、燃料に窒素が含まれているため、高温時に生成されるサーマルNOxに加えて、燃料由来のフューエルNOxが生成する。着火性の低さや燃焼速度の遅さに起因する不安定燃焼や熱発生位置の変化、低い燃焼温度に起因する収熱量の低下、フューエルNOx生成等、低NOxかつ安定な燃焼を実現するための技術的課題が多い。アンモニア乱流燃焼の理解と制御技術の開発を進める必要がある。水素燃焼と同様に、技術の社会実装を加速するためには、実験的研究開発に加え、後に述べるAI技術を含むデジタルツイン技術の活用も必要とされている。

■再生可能エネルギー変動時の調整力強化技術

再生可能エネルギー変動時には、ガスタービンを中心とした火力発電による調整力が必要となる。これには、急速起動や急速離脱時の過渡状態における空力制御技術や燃焼制御技術、低NOx燃焼技術、材料の耐熱衝撃・耐繰返し応力技術、および各部のクリアランス制御技術が不可欠である。さらに極低負荷運転時における高効率運転技術も必要となる。

■ガスタービン高効率化技術

1700°C級ガスタービンが実用化された現在、更なる高温化による高効率化が重要である。これには、先進的冷却技術、耐壊食・腐食性の高いセラミックコーティング (TBC) 技術、および耐熱合金開発が必要である。特に今後注目すべきは、Additive Manufacturing (AM) による先進的高温部品の製造技術である。耐熱合金の結晶異方性カスタム制御技術や複雑形状成形技術により革新的な耐熱部品製作技術の確立が必

要である。更には圧力増進燃焼技術 (Pressure Gain Combustion) 等、新たな高効率システムへの取り組みも重要である。

■バイオマス発電/水素・アンモニア発電

バイオマス発電に適用される技術は、同じ固体燃料を利用する石炭火力発電の技術に近く、類似の課題を有する。一方、バイオマスと石炭の燃料性状の違い (例えば、発熱量、燃料比、微量成分など) から、バイオマス発電に特有の技術課題もある。バイオマス発電においては、発電技術もさることながら、カーボンニュートラル性を維持しつつ如何に燃料を確保するかが大きな課題である。森林由来の木質系バイオマスを例にすると、カーボンニュートラル性を担保する植林技術、伐採による森林や生態系への環境影響評価、燃料化技術や輸送技術、伐採から利用に至るライフサイクルCO₂評価、関連する規格や規制の国際的な共有化、などが課題となる。

■ゼロエミッション火力技術

クローズドIGCCにおける酸素/CO₂吹きガス化炉最適化、酸素燃焼ガスタービン燃焼技術、再生熱交換器の最適化、IGFC/CCSにおけるガス化炉・燃料電池・ガスタービンの強調制御技術等の開発を進めていく必要がある。超臨界CO₂サイクル火力発電については、耐熱・耐圧材料の開発、超臨界酸素燃焼の安定 (燃焼振動抑制) 制御技術、システム最適化、および運用性・信頼性の向上等が挙げられる。

■デジタルツイン技術の開発

今後の産業競争力強化には、デジタルツイン技術による開発リードタイム削減が強く求められている。火力発電技術の主たる課題には、空力や燃焼等の熱流体制御と、高温部品耐久性等の材料制御が存在するが、これらを同時に双方向連成計算することにより、実機に起こり得る現象を事前に把握し、設計・最適化に活用する技術が必要である。加えて、多目的最適化や機械学習等のAI技術との連携により、加速度的に開発スピードの高速化が期待されている。デジタルツイン技術は特にAM技術との連携に親和性が高いと考えられる。実機内の複合的な現象の詳細な理解と物理モデルの開発、計算科学に基づくスーパーコンピュータ上のバーチャルプラントモデルの開発等、複数分野に渡る連携研究が不可欠とされている。

■発電所運用におけるIoT/AI技術の活用

今後の火力発電所の高効率・安定運用には、IoT/AI技術は必要不可欠と考えられている。設備の安定運転、発電効率の維持・向上、燃料使用量の削減、技術継承、各部品管理、予兆管理による重大事故防止、運転停止期間の短縮、および業務効率化による人件費削減等が期待できる。既存のビッグデータ分析や画像・センサー技術の開発とこれらを活用する機械学習を中心とするAI技術の開発が必要とされている。

(6) その他の課題

■研究開発のデジタルトランスフォーメーション (DX) 推進、デジタルツイン技術確立のための共通プラットフォーム構築

DOEでは、NExTプロジェクトにおいて、米国内におけるガスタービンの高温化技術の優位性を確保するため、ガスタービンメーカー5社の協力の下、モデルガスタービン設備を設置し、各社の利益を侵害しない範囲で共通基盤的な実験プラットフォームを構築し、産学連携体制でのAM技術を中心とした革新的要素技術開発を進めている。ガスタービンは国家戦略技術であり、火力発電の基幹要素である。日本においても、共通プラットフォームを構築し、それをモデルベース開発の基盤となるデジタルツイン技術確立のための検証データ取得や実証研究のためのインフラとして整備することが求められている。

■火力電源の計画的開発

CO₂回収型クローズドIGCCやGTCCの負荷運用性向上に向けた研究開発等、大きな成果が得られた研究であっても、火力電源の新規開発案件が極めて限られているために、社会実装が進まない状況が生じている。水素やアンモニアに関する研究開発が2030年頃を目標とする長期的な視点でプロジェクト化されているのに対して、こうした既存の火力発電技術の高度化に関するプロジェクトの新規設置はほとんどない。水素・アンモニア発電の電源構成に占める割合は2030年断面では1%、2050年断面で10%に過ぎず、既存火力発電技術の高度化（脱炭素化）なしに2050年ネットゼロ社会は実現し得ない。国の責任において、脱炭素火力電源の全体構成を見極め、バランス良く社会実装を進めていくことが求められている。

■ゼロエミッション火力発電の前提となるCCS実現

国内の化石燃料火力はCCSが前提となるため、国内CCSの実現を早期に進める必要がある。これに対し、国が主体的に社会受容を進めるような対策が求められている。

■開発オプションの多様性

1つのテーマに対して複数プロジェクトの採択を行い、開発オプションの多様化を図ることが大切である。日本では先進各国に先んじて水素発電技術開発を進めてきたが、2020年以降になると各国は水素戦略を策定し、水素社会へ向けて大きく舵を切り、多大な資金を投入している。その時、日本はアンモニアを水素エネルギーキャリアとして注目し、混焼技術を中心に研究開発を進めていた。この1、2年で先進各国もアンモニアの基礎研究に着手し、一躍ホットトピックとなってきている。このように世界各国で水素とアンモニアに関する多様な技術開発が行われている。それに対して、国内の開発プロジェクトが1テーマ1グループで進められているのは、産業競争力強化の面から大いに不利だと考えられ、技術の選択肢の多様化が求められている。これにより、人材の裾野も広がっていくものと期待されている。

■人材育成の柔軟性

受託研究では研究者雇用に専従義務が課されることが多く、若手研究者に幅広い分野の見識と経験をもつ人材育成の機会を与えることが難しい。研究開発プロジェクトには常に人材育成の視点を持たせ、適切なエフォート管理により、複数プロジェクトに関わることができる仕組みが求められている。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●NEDOのカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業において、電力中央研究所等は、機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究を実施した。 ●内閣府SIP統合型材料開発システムによるマテリアル革命において、川崎重工業、大阪大学、およびNIMSはAdditive Manufacturing技術によるNi合金の3D積層造形技術の開発を実施中である。 ●文部科学省「富岳」成果創出加速プログラムにおいて、東京大学、京都大学、および九州大学により、AI技術と連携するゼロエミッション火力発電技術に関するデジタルツインの研究開発が進められている。 ●NEDO水素利用等扇動研究開発事業において、産業技術総合研究所等は酸素水素燃焼タービン発電の基盤技術研究を実施中である。 ●NEDOのグリーンイノベーション基金事業において、IHI等は2MW級ガスタービン向けの液体アンモニア専焼技術の開発を実施中である。 ●NEDOのカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業において、電力中央研究所等は、発電に加えてシュウ酸等の高付加価値物の併産が可能なCO₂回収型ポリジェネレーションシステム基盤技術開発を実施中である。 ●NEDOのカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業において、大阪ガスと石炭エネルギーセンターは、300kW級ケミカルルーピング燃焼試験装置によるプロセス実証を実施中である。 ●水素・アンモニア等のカーボンフリー燃料のサプライチェーン構築に関わる製造技術、貯留技術、輸送技術、および燃焼技術に関する基礎研究が科研費等により精力的に進められており、日本は本分野における研究活動、論文数について優位性を保っている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●NEDO石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業において、大崎クールジェンによりCO₂分離回収型IGFCの実証試験が実施されている。 ●NEDO CO₂回収型クローズドIGCCプロジェクトにおいて、電力中央研究所と三菱重工業により酸素/CO₂吹きガス化炉や乾式ガス精製等のベンチスケール要素試験が実施された。 ●NEDO水素社会構築技術開発事業において、川崎重工業が熱電併給を可能とする水素専焼ガスタービン実証試験に成功した。 ●NEDOグリーンイノベーション基金事業において、JERA、関西電力、およびENEOSは中・大型水素ガスタービンの発電所への実装と混焼・専焼実証試験を実施中である。 ●NEDOのカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業において、JERAとIHIは100万kW石炭火力においてアンモニア20%混焼実証試験を実施中である。 ●NEDOのグリーンイノベーション基金事業において、IHI、三菱重工業、およびJERAはアンモニア混焼・専焼バーナの開発と石炭火力発電所における実証試験を実施中である。 ●三菱重工業がアンモニア熱分解GTCCの設計開発を推進中。 ●三菱重工業が4万kW級GTでのアンモニア専焼技術開発を推進中。 ●広野火力発電所および勿来火力発電所において、540MW級空気吹きIGCCプラントの商用運転がそれぞれ開始された。 ●三川発電所(福岡)、勇払バイオマス発電所などでCO₂分離回収実証試験が開始または開始予定。 ●西風新都バイオマス発電所では排ガス中CO₂の一部を分離回収し、農産物のハウス栽培での活用を開始。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●DOE/NETLは、火力発電技術開発事業(Advanced Turbines)を、GTCC技術(Advanced Combustion Turbines)、超臨界CO₂サイクル発電技術(Supercritical CO₂ Power Cycles)、および圧力増進燃焼技術(Pressure Gain Combustion)の3分野に分類して技術開発が進められている。 ●DOE/NETLのAdvanced Combustion Turbines事業では、水素の専焼・混焼燃焼技術、高温材料設計・製造を含むAM技術、Ceramic Matrix Composites(CMC)技術、冷却技術等が進められている。 ●DOE Advanced Combustion Turbines事業において、GEは1700°C級ガスタービン高温部品向けAM技術開発を進められている。

2.1 電力のゼロエミ化・安定化

2.1 電力のゼロエミ化・安定化

				<ul style="list-style-type: none"> ● DOE/NETL事業の大学の学術研究強化プログラムUniversity Turbine System Research (UTSR) において、ジョージア工科大、セントラルフロリダ大、サンディエゴ州立大、パーデュー大、オハイオ州立大、カリフォルニア大アーバイン、およびアラバマ大等水素燃焼（専焼・混焼）の基礎研究を進めている。 ● DOE/NETL事業の産学連携プログラムNational Experimental Turbine (NExT) Cooled Blade Studiesにおいて、AGILIS、Honeywell、Pratt&Whitney、Solar、およびSiemensは共通プラットフォーム用モデルガスタービン設備をペンシルバニア州立大に導入し、UTSRプログラムにてペンシルバニア州立大を中心とする学術チームがAM技術を中心とする高温材料・部品に関する基礎研究を実施している。 ● DOE/NETLのSupercritical CO₂ Power Cycles事業では、サウスウエスト研究所にて超臨界酸素燃焼用燃焼器の開発が、ジョージア工科大にて燃焼シミュレーション技術の開発が、GEにて超臨界CO₂ボトムサイクル用ヒートエンジンの開発がそれぞれ実施されている。 ● DOE/NETLのPressure Gain Combustion事業では、ミシガン大、パーデュー大、およびアラバマ大により、メタン合成ガス、および水素の燃焼性に関する基礎研究が実施されている。 ● DOE/NETLのImprovements for Existing Coal Plants事業では、産学へバランス良く既存石炭火力の運転最適化や熱効率向上、環境影響低減技術等の開発資金が継続的に充当されている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● DOEは2020年石炭FIRST (Flexible, Innovative, Resilient, Small, Transformative) プロジェクトを立ち上げ、超臨界加圧流動床、間接型超臨界CO₂発電、直接燃焼超臨界CO₂発電、石炭ガス化ポリジェネレーション、直接燃焼エンジンおよびガスタービン、モジュラ型加圧酸素燃焼、およびフレイムレス加圧酸素燃焼のPre-FEED (pre Front End Engineering Design) を実施した。 ● NET Power社はテキサス州La Porteにおいて2021年超臨界CO₂サイクル発電による売電を開始した。 ● 2022年DOEはクリーン水素技術の開発に4,000万ドル、グリッドの脱酸素に2,000万ドルの支援を発表。 ● DOE助成によるAdvanced Clean Energy Storage for Hydrogen Productionプロジェクトにおいて、三菱パワー社とMagnum Development社はユタ州インターマウンテンにおいてグリーン水素の岩盤貯留と840MW水素複合発電プロジェクトを推進している。
欧州	基礎研究	○	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Horizon Europeの枠組みで、エネルギー・気候・モビリティ分野へ152億ユーロ規模の投資がなされている。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ガスタービン燃焼の基礎研究では、ケンブリッジ大やニューカッスル大等が世界をリードしている。 ● DRAXはNorth Yorkshireバイオマス発電所にCO₂分離回収技術(MHI製)を導入し、2020年に実証試験を開始、2024年よりBECCSユニットを建設(2027年運開)、年間800万トンのCO₂を回収予定^{21), 22)}。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● SFB/TRR129 Oxyflameプロジェクトにおいて、アーヘン工科大、ポーフム大、およびダルムシュタット大が酸素燃焼の基礎研究を推進している。 ● アーヘン工科大は川崎重工業と共同で水素専焼ガスタービン燃焼器の開発を実施している。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● CERFACS、IMFT-UMR、EM2C-CNRS、およびLMFN-CORIA等において、ガスタービン燃焼に関する基礎研究で世界をリードしている。

	応用研究・開発	○	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Horizon 2020のFLETURBINEプロジェクトにおいて、GE、Siemens他23機関により負荷変動対応型ガスタービン技術の開発が実施された。 ● Horizon 2020のTANGOプロジェクトにおいて、Siemens他8機関によりGT燃焼器の燃焼振動対策技術の開発が実施された。 ● Horizon 2020のFACTORプロジェクトにおいて、GE、Siemens他23機関により燃焼器-タービン相互干渉予測制御技術の開発が実施された。 ● Horizon 2020のOXIGENプロジェクトにおいて、GE、Siemens他10機関により高温部品用AM技術の開発が実施された。 ● 2030年までの石炭火力停止を訴えるPPCA (Powering Past Coal Alliance) がドイツとスロバキアが加盟したことを明らかにした。メンバー数は、32政府、25自治体、34企業となった³³⁾。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ドイツでは褐炭火力発電は原子力の次に発電原価が安く、電気料金の高騰防止に貢献し、また褐炭産業がそれなりの雇用を生んでいるため、褐炭火力廃止の是非について議論がなされたが、最終的に2038年末までに脱石炭・褐炭を定める法案が閣議決定された³⁴⁾。 ● 水素国家戦略の発表により、今後10年間で1兆円超の研究開発予算が投じられる。 ● ウクライナ侵攻の影響でロシアからの天然ガス供給が急減し、閉鎖したMehrum石炭火力が再稼働、Janschwalde褐炭火力の再稼働も準備段階にある。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 2022年までに石炭火力発電所はすべて廃止される予定だが、供給力確保の観点から一部の発電所で運転時間を短縮して2024年まで運転を行うとの報道があった³⁵⁾。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 北海油田・ガス田を有し産油国・産ガス国である英国は、EUの中でも率先して、“再生可能エネルギー重視”“脱石炭”の政策を打ち出しており、火力発電に対する支援策は乏しい。 ● 2025年までにCCS付きを除く石炭火力発電所の全廃が計画されている。 ● 一部の石炭火力の操業を一時的に延長する。石炭火力 (CCSなし) の全廃計画に変更はない。 <p>【ポーランド】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 国産石炭の活用により石炭火力が80%を占めている。このためEUの要求に応えるIGCCへの期待が高く、日本の技術をベースにポーランド炭を活用したIGCCの研究開発が進められている。 <p>【オランダ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 三菱パワー社はNuon Magnum発電所の400 MW1ユニットを水素専焼GTCCへ転換するプロジェクトを実施中。 <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● オーストリアでは2020年に稼働停止した同国最後の石炭火力の再稼働を決定。 ● オランダでは石炭火力に課していた発電量上限を2024年まで撤廃することを決定。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 基礎研究資金は豊富である。海外留学生・研究者の高額な登用もあり、基礎研究力は向上している。基礎研究分野の論文数は既に日本を上回っている。 ● 火力発電関連分野の国際会議の主催が増加している。 ● 欧米のトップ大学との人材交流が活発である。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 2013年に運開したGreenGen 250 MW IGCCプラントでは、2016年からpre-combustion方式によるCO₂回収とEnhanced Oil Recovery (EOR) のための地下貯留を実施している。

韓国	基礎研究	△	→	●大学、研究機関による基礎研究は継続的に行われている。
	応用研究・開発	△	→	●2016年に運開したTaeon 300 MW IGCCプラントは、順調に商用運転を継続中であり2021年3月に5,000時間以上の連続運転を行ったとのプレスリリースがあった。2019年にはガス化ガスの水素転換装置を増設し、100 kW級燃料電池システムの実証試験を実施中であり、2025年には10 MWに拡張する計画である。
その他の国・地域 (任意)	基礎研究	△	→	【豪州】 ●太陽熱利用ガス化・ガスタービンの基礎研究が大学・研究機関等で行われている。
	応用研究・開発	△	→	【豪州】 ●NEDOカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発事業にて、東芝エネルギーシステムズはベールズポイント発電所5・6号機にてAIによる異常検知や寿命予測技術の実証試験を実施した。 【インド】 ●2014年から7カ年プロジェクトでA-USC商用機開発を進めてきた。 【ベトナム】 ●急増する電力需要に対して対応するため、再生エネルギーの導入も積極的に進めているが、ベトナムエネルギープラン2.0 (MVEP 2.0)によれば、2030年の石炭火力の割合は54.2%、容量は現在の19 GWから55 GWに増加させるとしている ³⁶⁾ 【タイ】 ●NEDOはIoT活用による発電事業資産効率化・高度化促進のための技術実証事業において、マエモ火力発電所11・13号機にてAI・ビッグデータ解析による発電所全体の熱効率改善や信頼性向上技術の実証試験を実施した。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ バイオマス発電・利用 (環境・エネ分野 2.1.5)
- ・ CO₂回収・貯留 (CCS) (環境・エネ分野 2.1.9)
- ・ 水素・アンモニア (環境・エネ分野 2.2.2)
- ・ ネガティブエミッション技術 (環境・エネ分野 2.4.1)
- ・ 反応性熱流体 (環境・エネ分野 2.6.1)
- ・ 破壊力学 (環境・エネ分野 2.6.3)
- ・ 微細加工・三次元集積 (ナノテク・材料分野 2.6.1)
- ・ 物質・材料シミュレーション (ナノテク・材料分野 2.6.3)

参考・引用文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」 https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/, (2023年1月28日アクセス) .
- 2) 森本一毅, 他「1650°C級JAC形ガスタービンの中核とする第二T地点実証発電設備での検証結果」『三菱重工技報』58巻1号(2021):32-41.
- 3) 石塚博昭「機動性に優れた高効率ガスタービン複合発電の要素技術開発に着手」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), https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100996.html, (2023年1月28日アクセス) .
- 4) National Energy Technology Laboratory (NETL), “Advanced Turbines”, <https://netl.doe.gov/carbon-management/turbines>, (2023年1月28日アクセス) .
- 5) National Energy Technology Laboratory (NETL), “NETL, PARTNERS TAKE ‘NEXT’ STEPS TO DEVELOP NATIONAL EXPERIMENTAL TURBINE”, <https://www.netl.doe.gov/node/11772>, (2023年1月28日アクセス) .
- 6) National Energy Technology Laboratory (NETL), “University Turbine System Research (USTR)”, <https://netl.doe.gov/carbon-management/turbines/ustr>, (2023年1月28日アクセス).
- 7) National Energy Technology Laboratory (NETL), “DOE Projects: Cooled Blades and NEXt, Nov 2021 UTSR Update”, https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/21UTSR_Thole.pdf, (2023年1月28日アクセス) .
- 8) European Commission, “Research and innovation: Horizon Europe”, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en, (2023年1月28日アクセス) .
- 9) 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)「研究評価委員会「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/(7)次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」(事後評価)分科会」 https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/ZZBF_100585.html, (2023年1月31日アクセス) .
- 10) 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)「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」 https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100039.html, (2023年1月28日アクセス) .
- 11) Robert Purgert, et al., “Materials for Advanced Ultra-supercritical (A-USC) Steam Turbines - A-USC Component Demonstration”, U.S. Department of Energy, <https://doi.org/10.2172/1332274>, (2023年1月28日アクセス) .
- 12) Directorate-General for Research and Innovation (European Commission), “Component test facility for a 700 ° C power plant (Comtes700)”, European Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/98172>, (2023年1月28日アクセス) .
- 13) NTPC Limited, “NTPC signs MoU with BHEL to set up most efficient & environmental friendly coal fired power plant”, <https://www.ntpc.co.in/en/media/press-releases/details/ntpc-signs-mou-bhel-set-most-efficient-environmental-friendly-coal-fired-power-plant>, (2023年1月28日アクセス) .
- 14) 電源開発株式会社「カライド酸素燃焼プロジェクトで世界初の発電所実機での酸素燃焼・CO₂回収一貫実証が完了 平成27年3月2日, プレスリリース資料」 https://www.jpowers.co.jp/news_release/pdf/news150302-2.pdf, (2023年1月28日アクセス) .
- 15) 大崎クールジェン株式会社「世界初、石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)の実証事業に着手」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), https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101103.html, (2023年1月28日アクセス) .

- 16) 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) 研究評価委員会「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発 / ⑤ CO₂回収型次世代IGCC 技術開発：事後評価報告書 (案) 概要」NEDO, <https://www.nedo.go.jp/content/100927307.pdf>, (2023年1月28日アクセス) .
- 17) Changyou Xia, et al., “Prospect of near-zero-emission IGCC power plants to decarbonize coal-fired power generation in China: Implications from the GreenGen project”, *Journal of Cleaner Production* 271 (2020): 122615., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122615>.
- 18) Green Technology Center, “Korea Green Climate Technology Outlook 2020”, Climate Technology Information System (CTis), <https://www.ctis.re.kr/ko/downloadBbsFile.do?atchmfnfNo=4850>, (2023年1月28日アクセス) .
- 19) 大阪ガス株式会社「脱炭素化に貢献するケミカルルーピング燃焼技術の研究開発の開始について：バイオマス燃料による水素・電力・CO₂の同時製造」https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/1291455_46443.html, (2023年1月28日アクセス) .
- 20) National Energy Technology Laboratory (NETL), “Coal FIRST Pre-FEED Studies”, <https://netl.doe.gov/coal/tpg/coalfirst/concept-reports>, (2023年1月28日アクセス) .
- 21) Drax, “BECCS and negative emissions”, <https://www.drax.com/about-us/our-projects/bioenergy-carbon-capture-use-and-storage-beccs/>, (2023年1月28日アクセス) .
- 22) 仙波範明, 他「製造業、エネルギー関連施設へのCO₂回収技術の適用」『三菱重工技報』59 巻 1 号 (2022) : 26-30.
- 23) Joint Research Centre (European Commission), “Brief on biomass for energy in the European Union”, European Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/546943>, (2023年1月29日アクセス) .
- 24) 石塚博昭「高効率な水素発電を支える基盤技術開発に着手：発電効率68%を実現する1400°C級発電システムを開発」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), https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101359.html, (2023年1月29日アクセス) .
- 25) 野勢正和, 他「脱炭素社会に向けた水素・アンモニア焚きガスタービンの開発」『三菱重工技報』58 巻 3 号 (2021): 11-20.
- 26) 石塚博昭「グリーンイノベーション基金事業、第1号案件として水素に関する実証研究事業に着手：商用水素サプライチェーンの構築とPower to Xの実現を目指す」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), https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101471.html, (2023年1月29日アクセス) .
- 27) 石塚博昭「グリーンイノベーション基金事業「燃料アンモニアのサプライチェーン構築」に着手：製造の低コスト化から高混焼・専焼化まで、需給一体で技術的課題を解決」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), https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101502.html, (2023年1月29日アクセス) .
- 28) 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)「「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発 / 次世代火力発電基盤技術開発 / CO₂分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発」に係る実施体制の決定について」https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100219.html, (2023年1月29日アクセス) .
- 29) 三菱重工業株式会社「火力発電所向け運用高度化サービスの開発に向けた取組みの概要」<https://power.mhi.com/jp/media/365371/download>, (2023年1月29日アクセス) .
- 30) 東芝エネルギーシステムズ株式会社「火力発電所向け機器の信頼性向上に寄与する故障予兆診断技術の開発受託について」<https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2020/09/news-20200929-01.html>, (2023年1月29日アクセス) .

- 31) 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) 「民間主導による低炭素技術普及促進事業」https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100022.html, (2023年1月29日アクセス). (実施方針：2019年度版参照).
- 32) 国際部, 省エネルギー部, 次世代電池・水素部, 他 「2019年度実施方針」 <https://www.nedo.go.jp/content/100891782.pdf>, (2023年1月29日アクセス) .
- 33) 一般社団法人海外電力調査会 「ドイツ・スロバキア：ドイツとスロバキアが脱石炭連合に加盟」 <https://www.jepic.or.jp/world/2019/20190922.pdf>, (2023年1月29日アクセス) .
- 34) 一般社団法人海外電力調査会 「ドイツ：2038年末までの脱石炭を定める法案を閣議決定」 https://www.jepic.or.jp/world/2019/20200129_03.pdf, (2023年1月29日アクセス) .
- 35) 一般社団法人海外電力調査会 「フランス：Cordemais石炭火力発電所、制限付で2024年まで運転延長の可能性」https://www.jepic.or.jp/world/2019/20200113_01.pdf, (2023年1月29日アクセス).
- 36) Modern Power Systems, “Vietnam looks to its next master plan”, <https://www.modernpowersystems.com/features/featurevietnam-looks-to-its-next-master-plan-7897330/>, (2023年1月29日アクセス) .