

2.1.2 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発電方法の一つである。今後の燃料として依然重要な役割を果たすと考えられる天然ガスと石炭に加え、再生可能エネルギー由来で製造された水素、アンモニアなどの二次燃料も対象とする。低炭素化に向けた発電に関するより新しい科学技術動向を含める。

- (1) 天然ガス火力発電：シングルサイクルガスタービン発電、ダブル複合発電 [ガスタービン-蒸気タービン]、トリプル複合発電 [燃料電池-ガスタービン-蒸気タービン] など
- (2) 石炭火力発電：ボイラー-蒸気タービンによる発電、石炭ガス利用のダブル複合発電、石炭ガス利用のトリプル複合発電など
- (3) バイオマス火力発電
- (4) 水素、アンモニア火力発電

(2) キーワード

天然ガス、石炭、水素、ガスタービン、蒸気タービン、ボイラー、燃料電池、ケミカルループ燃焼、コンバインドサイクル発電、先進超々臨界圧、石炭ガス化複合発電、トリプル複合発電、超臨界CO₂サイクル、CO₂排出量、ゼロエミッション、再生可能エネルギー、AI技術、カーボンリサイクル

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

火力発電は一次エネルギーの中で35%程度の割合を占め、またエネルギー起源のCO₂排出量も同程度を占める。従って国全体のエネルギー消費やCO₂排出量を論じるときには、本領域が最も量的なインパクトが大きい。与えられたエネルギー源を最大限活用し、社会の便益に供するためには“高効率”が非常に重要であり、このため火力発電の高効率化は長年の重要な研究テーマであり、その研究成果は社会に大きく貢献して来た。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国際競争力の源泉でもある。

2018年7月に決定された第5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2013年度の88%から2030年度56%に低下しているが、火力発電は依然電力供給の主役である。同基本計画に謳われる温室効果ガスの2030年時点での26%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新たに示された我が国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について、極限まで熱効率の向上を目指すとともに、ゼロエミッション技術や再生可能エネルギーとの調和的および統合的な技術の着実な導入が必要不可欠である。変動する再生可能エネルギーを補完する調整力を火力発電が担うことにより、電力の需要と供給のバランスを保つことができる。また、自然災害、予期せぬ変動などに対して電力システムの安定性を維持するレジリエンスの点からも火力発電は重要である。

[研究開発の動向]

1900年代初頭の火力発電の実用化以来、効率向上は常に最優先の技術テーマであった。効率向上による燃料費の節減といった経済的効果は勿論であるが、近年はCO₂削減という環境面・社会面での効果も大きく

評価されている。そのため火力発電は基幹電源（ベースロード）として、高い信頼性を持ち、安定して高効率で発電できることが強く求められてきた。我が国では次世代火力発電技術のロードマップが作成され、2020年頃までに天然ガスおよび石炭でのダブル複合発電を実用化する予定である。一方、再生可能エネルギーの導入時の調整力を担うために、高速負荷変動化や部分負荷での効率向上など、これまでにない運転条件での性能も求められるようになってきている。また、温室効果ガス削減の観点からゼロエミッション化のための技術が必須となっている。

■天然ガス発電

燃料が天然ガスの場合、研究開発は主に複合発電（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。

現在、GTCCの大容量機（40万kW程度）のガスタービン入口ガス温度は既に1600℃（発電効率52%、CO₂排出量原単位340 g/kWh）に達している。国内では、現在、経産省高効率ガスタービン技術実証事業の中の1700℃級高効率ガスタービン技術実証事業¹⁾で、大容量機について1700℃級ガスタービン（発電効率57%、CO₂排出量原単位310 g/kWh）の実用化に必要な先端要素技術を適用した実証試験を2020年度まで実施している。課題として、低NO_x燃焼器の開発、高性能冷却システムの開発、低熱伝導率遮熱コーティングの開発、高負荷・高性能タービンの開発、高圧力比・高性能圧縮機の開発、および超耐熱材料の開発などがある。我が国で近年運開したGTCC発電所は、ほとんどが1600℃級ガスタービンを採用しており、60%を超える発電端効率となっている。2017年に運開した西名古屋火力7-1号系列は世界最高効率の63%（LHV基準）を達成し、ギネス世界記録の認定を受けた。また、1700℃級ガスタービン開発の成果は、三菱パワーが開発を進めている1650℃級ガスタービンに活用されており、2020年度から自社の実証設備複合サイクル発電所において長期実証試験を行い、近々の販売開始を目指している。このガスタービンを用いたコンバインド発電では、64%（LHV基準）の効率に達するとしている。

米国エネルギー省（DOE）は、ガスタービン開発を、1700℃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の3つのカテゴリーに整理し、それぞれの研究を遂行する枠組みとしてNational Experimental Turbine (NExT) Cooled Blade StudiesとUniversity Turbine System Research (UTSR)を立ち上げている²⁾。NExTは、アメリカ国内におけるガスタービン高温化研究の優位性を確立するため、Honeywell、Platt & Whitney、Solar、およびSiemensのガスタービンメーカー4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研究を行うプラットフォームである。UTSRは、大学をベースとするガスタービン研究プロジェクトであり、次世代においてもアメリカの研究優位性を確保するための学術的プログラムである。現在UTSRにより12件の研究プロジェクト（平均100万ドル規模）が採択されている。超臨界CO₂タービンの開発プロジェクトとしては、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級商用機を2022年に運開すべく、開発が継続されている。

EUでは、FP7の中で、ETN（European Turbine Network）という非営利団体が主導しガスタービン技術の開発を進めている³⁾。現在、ETNには、21の国から109の企業等組織が参加している。欧州外からは、アメリカ、カナダの他、韓国、インド、およびマレーシア等が参加している。具体的な開発プロジェクトとして、エアフィルター、Additive Manufacturing（AM）、排気システム、水素、高温壊食、マイクロガスタービン、

および超臨界CO₂タービンについて、ワーキンググループを形成している。

複合発電のうち、固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC) と組み合わせたトリプルコンバインドサイクルとなる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) については、上記ロードマップでは2025年の実用化を目標としている。NEDOは2015年度から2ヶ年の250 kW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ている。これら知見をベースに1,000 kW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⁴⁾。また、これらの知見は後述の石炭ガス化燃料電池複合発電 (Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined cycle:IGFC) 開発プロジェクト (大崎クールジェンプロジェクト) に反映されることとしている⁴⁾。しかしながら事業規模のGTFCについては、開発は遅れていると言わざるを得ない。我が国では、燃料電池は、家庭用のエネファームから業務用の数kW～数百kWのコージェネレーションシステムの開発に注力されている。

天然ガス焚ガスタービンの高効率化技術に、高温分空気ガスタービン (Advanced Humid Air Turbine : AHAT、発電効率51%、CO₂排出量原単位350 g/kWh) がある。GTCCに比べて起動時間が短く、負荷変化率が大きいこと、最低負荷が低いことなど、再生可能エネルギー電源との協調性が高いことが期待されている。2004年度から経産省高効率ガスタービン技術実証事業のうち、高温分空気利用ガスタービン技術実証事業として始まり、圧縮機-タービンマッチング、タービンの高温分条件での健全性、最低負荷での燃焼安定性などを検討し、2017年度に40 MW級実証機試験を完了している。今後は派生システムであるSmart-AHAT、CO₂回収型クローズドサイクルAHATおよびCO₂回収型IGHAT (Integrated Gasification Air Humid Turbine) などの開発に進展していくことが期待されている¹⁾。

■石炭火力発電

燃料が石炭の場合、研究開発は従来のボイラー-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、ケミカルループ発電 (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-蒸気タービン発電では、国内では1995年頃から実機導入が始まった超々臨界圧 (Ultra Super Critical : USC、主蒸気圧力25 MPa、温度600～630℃、発電効率40%、CO₂排出量原単位800g/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 (A-USC : Advanced-Ultra Super Critical、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、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。2017年度以降、700℃再熱器部品から段階的に実用化されていく予定である⁹⁾。また、NEDO戦略的省エネルギー技術革新プログラムにおいて750℃級材料開発に向けた基礎検討が行われている⁵⁾。海外では、米国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⁶⁾。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り、現在はCOMTES+プロジェクトにおいて2021年の500 MWe級実証試験に向けて製造工程を中心とした開発が進められている⁷⁾。中国⁸⁾、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

トが動き出している状況である。

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。日豪政府協力のもと、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。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る⁹⁾。米国ではDOEが主導し、2012年から2020年にかけて、大学・研究機関等都合14者と計3千2百万ドル規模の加圧酸素燃焼技術、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を進めている¹⁰⁾。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¹¹⁾。

一方、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）については、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。我が国が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ている。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建設され試運転中である。勿来IGCCは2020年、広野IGCCは2021年の運開を予定しており、2020年7月には勿来の設備が定格負荷運転を達成、広野の設備は単体試験を開始した。

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¹²⁾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ている。1,500°C級IGCCにおいて、CO₂を90%回収しつつ、送電端効率40%（HHV基準）程度の見通しを得るなどを目標に進められている。最終段階である第3段階では、CO₂分離・回収型IGFCの実証として、発電出力1.2 MW級の固体酸化物形燃料電池（SOFC）を設置し、CO₂分離回収後のH₂リッチガスでSOFCで発電を行う計画となっている。

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が、2008年からNEDO事業のCO₂回収型クローズドIGCC（発電効率42%、CO₂回収率100%）の開発として進められている¹³⁾。

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年に商用運転が終了し、スペインは2016年に解体のため運転が停止した。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が運転開始している¹⁴⁾。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、2020年からはIGCCを400 MW級へ拡張するとともに、CCSを追設して、IGCC+CCS運転の2020年代の運開を計画している。さらに韓国では2016年にTaeanにて200 MWのIGCCが運開している¹⁵⁾。今後運開予定の計画は全てCCSとの統合システムである。中国、韓国のプラントは稼働しているものと思われるが、直近の運転実績等の公開情報は見当たらない。

米国では2017年にKemperにて運開予定であった582 MWのIGCC/CCSがコスト増のためLNG火力へ計画変更されている。2018年にElk Hillsで運開予定であった400 MWのIGCC/CCS（HECA（Hydrogen

Energy California) プロジェクト) がCO₂引取契約の遅れのため中止となった。Texas Clean Energy Project (TCEP) は、DOE資金4億5千万ドルにより2021年頃の運開を目指すEORによる400 MWのIGCC/CCUSプロジェクトであったが、スポンサー企業の不適切支出問題によりDOE資金の引き上げがあり、2017年に倒産した。DOEにおける研究開発プロジェクトでは、現在、石炭ガス化技術を発電技術よりもガスソリン、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。発電用としてはバイオマスIGCC/CCSによるネガティブエミッション発電技術のみを計画している¹⁶⁾。海外のIGCCはいずれも酸素吹きのみであり、空気吹きIGCCを開発したのは我が国のみである。

石炭ガス化燃料電池複合発電 (Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined cycle : IGFC、発電効率55%、CO₂排出量原単位590 g/kWh) については、NEDOにおいて2025年頃の実用化を目指し、2016年度から2ヶ年でIGFCシステムの検討を、2016年度から4ヶ年で燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究を行っている。本IGFC開発プロジェクトのベースは、前述の大崎Cool Genで実証試験中のIGCC/CCSプラントであり、2022年度の実証試験を予定している。

ケミカルループ燃焼技術は、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6ヶ年の要素技術開発プロジェクトが進められている¹⁷⁾。米国ではDOEが主導し、2015～2020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いる¹⁸⁾。

米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) を立ち上げた¹⁹⁾。

■バイオマス火力発電

再生可能エネルギーの一環として、カーボンニュートラルであるバイオマス燃焼発電が増加している。バイオマス燃焼には基本的に火力発電の技術が適用され、①固定床、②流動床、③気流床、の各方式が燃料種、容量、運用性などを考慮して選定されている。木材チップ、ペレットなどの多用されるバイオマス燃料は固体であり、粉碎・乾燥技術、燃焼技術、生成灰の伝熱面への付着によるトラブル防止などの技術開発が進んでいる。また同じく固体燃料である石炭燃焼ボイラーとの親和性が良いので、石炭-バイオマスの混焼ボイラーの技術開発も進んでいる。バイオマスペレットに関しては需要の大きな欧州で規格化・標準化が進み、生産量も大きい。近年では需要をまかないきれず、北米産のバイオマスペレットが大量に輸入されている。日本においても北米産に加え、東南アジア産のペレットの輸入が増加している。

■その他

近年、欧州を中心に再生可能エネルギー、特に風力発電や太陽光発電が強く推奨され、経済的支援のもとに大きく伸長し、ドイツでは年間発電電力量の30%以上を占めるに至っている。これらの発電は天候に大きく左右されることから、出力が不安定で予測困難という欠点を有している。変動出力を需要とマッチさせるためには、そのギャップを埋める調整力が必要である。蓄電池は容量制限や価格の点からまだまだ不十分であり、実質的に火力発電が調整力を担っている。このため従来の安定した高効率運転という要求に加えて、急

速起動停止、急速負荷変化、低い最低負荷などの特性が要求されるようになり、その分野の研究開発が進んでいる。

さらに将来、大量の再生可能エネルギーが導入された場合、貯蔵し、タイムシフトして使用することが必須となると考えられ、電気からガスに変換するパワー・ツー・ガスも議論されている。この場合、ガス燃料としてはメタンのほか水素、アンモニアなどが考えられ、これらの混焼または専焼を可能とする研究も進んでいる。IEAは2019年に開催されたG20向けに水素エネルギーに関するレポートを作成しているが、ここでは、水素、および水素キャリア燃料の製造、貯蔵、輸送、配送、および利用の各技術に関する技術・コスト評価、および政策提言を行った²⁰⁾。ここで議論されているとおり、国内では水素焚きガスタービンの開発が進められている²¹⁾。また、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」では、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²²⁾。国外で特筆すべきは、ドイツが2020年6月に国家水素戦略を発表し、2030年までの10年間に総額1兆800億円に及ぶ水素関連技術開発への投資を行うとした²³⁾。

EUは2021年からの7カ年計画として、約941億ユーロを投じるHorizon Europeプロジェクトの策定を進めている。6分野に整理されているミッション志向型研究のうち、「デジタル・産業・宇宙」分野において計算科学やAI技術の開発を、「気候・エネルギー・モビリティ」分野において水素利用技術について研究テーマの策定を進めている。

(4) 注目動向

[新展開・技術ピックアップ]

米国を中心にシェールガス由来のLNG基地の建設が進んだことから、LNGの国際的な供給量はパイプライン天然ガスに匹敵する市場規模まで大きく増加し、価格も低下している。また取引も長期固定契約から短期契約、仕向け先条項の撤廃（転売可能）、ハブ基地から小分けして販売するバンカリングの強化など、より自由な取引市場の方向へ進んでいる。このような状況下で世界的に天然ガス火力は価格競争力が強め、CO₂削減の要請と相俟って大きくシェアを拡げている。この点からガスタービンの高温化による効率向上とともに、燃料電池を付加したトリプルコンバインドサイクルの早期実現が一層期待される。一方、石炭については、安価な天然ガスの大量供給体制下で相対的に価格競争力が弱まっている。またCO₂削減の要求から、欧州などの先進国を中心に石炭火力を抑制しようという動きが出ており、国内もメガバンクが石炭火力発電所の新設に対して融資を行わない方針を示すなどの逆風が強まっている。

1. ゼロエミッション火力発電技術

国内外で新展開を考える場合、ゼロエミッションのキーワードは極めて重要である。従来型システムの高効率化研究のインセンティブは縮小方向にある。ゼロエミッション火力発電の実用化に向けて様々な技術の研究開発が進められている。その多くは石炭火力が対象であるが、天然ガスを対象としたものも存在する。従来CCS設備の運用コストによる熱効率低下が問題とされてきたが、これを克服する技術の開発が進められている。

① CO₂回収型クローズドIGCC (Oxy-fuel IGCC/CCS)¹³⁾

NEDO事業として、現在電力中央研究所と三菱重工業、三菱パワーが実施しているCO₂回収型クローズドIGCCプロジェクトは、第2フェーズ（2015年～2020年度、45億円規模）に移行し、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進められている。ガス化炉は酸素/CO₂吹きとし、排熱回収ボイラ（HRSG）から排出されるCO₂の一部を、石炭、ならびにチャーの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 ($C+CO_2 \rightarrow 2CO$) 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、ガスタービンについても酸素燃焼方式のセミクローズドサイクルとし、HRSGからの排ガス中のCO₂の一部を利用する。システム内に窒素が投入されないため、排熱回収ボイラーから排出されるCO₂を回収するにあたり、CO₂分離装置が不要となる。そのため、CO₂を回収しても比較的高い送電端効率を得ることができる。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っており、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。酸素/CO₂吹きガス化条件における石炭反応の解明やモデル化などの基礎研究や商用プラントFSなどを通じて、多くの知見が見出されている。また、文科省フラッグシップ2020ポスト「京」で重点的に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、Oxy-fuel IGCC用石炭ガス化炉の熱流体-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²⁴⁾。

② 超臨界CO₂サイクル発電

東芝、Exelon、McDermottおよび8 Rivers Capitalとの共同研究のもと、米NET Power社が米テキサス州 La Porteに建設した超臨界CO₂サイクル発電の実証試験設備において、2018年東芝が開発した50 MWth 燃焼器の燃焼試験に成功した。これは300 MW級商用プラントスケールの燃焼器に相当する。このプロジェクトにおいても、文科省「富岳」成果創出加速プログラムと連携して、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²⁴⁾。また、DOEはGEおよび5つの大学への委託研究として、総額約26億円規模のプロジェクト（超臨界CO₂リーケージ対策技術、酸素-超臨界CO₂燃焼器）を進めている²⁾。

③ IGFC

大崎クールジェンプロジェクトにおいて、第2段階となるCO₂分離・回収型酸素吹きIGCCの実証試験が開始された²⁵⁾。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を分離した後のH₂ガスは、ガスタービンに送られ発電に利用される。第2段階は2020年度までの計画となっており、IGCCからの生成ガスの全量に対してCO₂を90%分離・回収しながら、現状での最新鋭微粉炭火力発電と同等となる送電端効率40%（HHV基準）の達成見通しを得ることなどを目標としている。

④ 低炭素燃料の利用

国内では、2019年3月に新たな「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が策定され、褐炭ガス化による水素製造、水素液化による貯蔵・輸送、CCS、および水素専焼発電による利用など、要素技術それぞれの数値目標が掲げられた。特に水素専焼発電では2020年までに1 MW級ガスタービンで27%の発電効率を獲得することとされた。ドイツ政府は2020年6月に国家水素戦略を発表し、2030年までの10年間に総額1兆800億円に及ぶ水素関連技術開発への投資を行うとした²³⁾。水素エネルギーキャリアのうち、アンモニアについては、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、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²²⁾。

2. 再生可能エネルギー電源大量導入時の火力発電技術

不安定な再生可能エネルギー電源が接続された電力系統を安定に運用するための負荷変動対応の電源として、高効率かつ機動性に優れるGTCCが有望である。NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラムのもと、2014年より、日本ガスタービン学会が主導し、国内重電メーカーおよび大学・研究機関が調査研究を進めてきた。2030年までに実現すべき目標性能は、100 MW級ガスタービンでホットスタート起動10分、負荷変化率20%/分、および最低出力10%（一軸式）である。現在は、2018年度から4年間のプロジェクトとして、高繰り返し熱応力への耐久性、失火・逆火防止技術、システム全体の安定制御などの課題を解決するための非定常熱応力低減技術、安定的燃焼技術、軽量新材料技術およびシステム制御技術などの開発に、非定常数値解析や新規材料開発の面から取り組んでいる²⁶⁾。

3. 高効率火力発電技術

ガスタービンでは、Pressure Gain Combustion (PGC, 圧力増加燃焼) が近年注目されている²⁾。従来の天然ガス焚きガスタービン複合発電の燃焼器では概ね5%程度の全圧損失が発生することに対して、PGC技術を採用することで有効圧力の上昇をもたらすことが可能となる。これにより、複合サイクルで2-4%の効率向上が見込まれる。タービン入口温度上昇という材料の耐熱性や冷却に依存する従来の効率向上法とは異なる別の効率向上手法を提供するものとして期待されている。技術的課題としては、共鳴パルス燃焼やデトネーションといった現象を利用するため、燃料噴射、燃料空気混合、逆火、圧力波と燃焼との相互作用制御などが挙げられる。一方で、水素のように反応性の高い燃料は本技術に有効だと考えられる。

石炭火力の熱効率向上に関しては、2020年6月30日に営業運転を開始した電源開発（Jパワー）の竹原火力発電所新1号機が、蒸気条件600°C/630°Cの超々臨界圧（USC）ボイラーを採用し、熱効率は微粉炭燃焼の火力発電設備として世界最高水準の約48%（LHV基準）となっている。

4. AI技術の火力発電への適用技術

火力発電分野へのAI技術の適用として、設備の安定運転、発電効率の向上、維持（燃料使用量の削減等）、技術継承、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員削減などが考えられる。発電所の保守計画、備品管理、および燃料の最適化を行うシステム、画像やセンサー等リアルタイムシステムから異常検知を計るものなど、様々な提案がなされている。東京電力フエエル&パワーと関西電力は、資源エネルギー庁およびNEDOと協力し、2019年6月に「データの活用等による火力発電所の事業運営効率化に向けた手引き案」を策定した²⁷⁾。国際的には各国の電力会社の協力により2019年に「Power plant Operations & Management Body Of Knowledge (POMBOK)」が発刊されている²⁸⁾。

5. カーボンリサイクル技術との連携

CCS技術との連携は化石燃料を利用する火力発電分野では極めて重要なテーマであるが、近年はCCUSとしてUtilization(利用)技術に注目が集まっている。従来はEOR(Enhanced Oil Recovery、原油増進回収)が主であったが、これにカーボンリサイクルという概念を導入し、排出されるCO₂を利用し、化学品、燃料、および鉱物等の製造を行う技術の開発が進められている。経済産業省は、2019年6月に「カーボンリサイクル技術ロードマップ」を公表した。

6. 脱火力発電への動き

海外では、CO₂排出抑制に向けて火力発電設備への投資が縮小の傾向にあり、欧州投資銀行（EIB）は、2022年以降ガスを含む化石燃料を利用したエネルギープロジェクトへの資金提供を終了することとした²⁹⁾。2022年以降は、エネルギー関連投資における排出基準をCO₂排出原単位550 g-CO₂/kWh から250 g-CO₂/kWhに引き下げる。

国内では、2019年5月に三菱UFJフィナンシャルグループ（MUFG）が、石炭火力発電所新設へのファイナンスを原則停止することを決定したのに続き、2020年4月にみずほフィナンシャルグループ（MHFG）、三井住友フィナンシャルグループ（SMFG）も同様の方針を発表した。これにより、国内の3大メガバンク全てが新設の石炭火力への投融資を原則行わないことになっている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

1. 天然ガス燃ガスタービン複合発電に関するプロジェクト

日本では経済産業省高効率ガスタービン技術実証事業（2012～2020年、約536億円）¹⁾として、1700℃級高効率ガスタービン技術実証事業（三菱重工業）が実施されている。本成果を受けて、三菱パワーのガスタービン実証設備複合サイクル発電所第2号発電設備において、1650℃級ガスタービンの長期実証試験が2020年7月1日から開始された。GTCCとしての発電効率は、世界最高クラスの64%に達する計画である。

米国では、DOE Advanced Turbine Technology Project²⁾のPhase1（2018～2021年、約350万ドル）が、GE（高温部品耐熱性、翼最終段、空力・伝熱）、Siemens Energy（セラミック翼、チタン・アルミナ翼、低NOx燃焼器）、United Technologies Research Center（セラミック翼）をメンバーとして進められている。また、Phase II（2020～、約900万ドル）にて、GEが、Additive Manufacturing、Turbine-based Modular Hybrid Heat Engineを推進している。

2. 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

日本では、IGCCの研究開発が継続して進められている。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試運転中であり、2020年に勿来IGCCが、2021年に広野IGCCが運開する予定である。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（約73億円）では、大崎クールジェンプロジェクトの第2段階として、CO₂分離・回収型酸素炊きIGFC実証が行われている。第2段階は2020年度までの計画となっており、最終段階である第3段階では、CO₂分離・回収型IGFCの実証が計画されている。さらにNEDOのゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト/CCS対応高効率システム開発¹³⁾では、CO₂回収型クローズドIGCC技術開発（2015年～2020年、電力中央研究所、三菱重工業、三菱パワー）が進められている。

一方、欧州ではIGCCのみならずA-USCの研究プロジェクトも中止され、火力発電の高効率化の研究開発はストップしている。米国でも褐炭IGCCプロジェクトであるKemper County 582 MWプロジェクトはガス化には成功したものの、IGCCの運転は断念され、2018年に天然ガスコンバインドサイクルプラントとして商業運転されることとなった。中国のGreenGen IGCCプロジェクトや韓国Taeon IGCCプロジェクトも実証試験開始の報道以来、運転性能や運転状況などの実績については殆ど公表されておらず不明である。ただし、アジアを中心とする発展途上国では、依然として石炭火力を必要としており、高効率化のために小型でかつ機動力に富む超々臨界圧Flex-USC火力の実現が望まれている。

3. その他のゼロエミッション火力発電技術

米国では、超臨界CO₂サイクル火力発電プロジェクト (DOE Advanced Turbine Technology Project、2016～2022年、9百万ドル)⁶⁾ や超臨界CO₂サイクル火力発電プロジェクト (NET Power Allam Cycle Project) が進められ、欧州では、EU Horizon2020 ACT Project (2016～2020年、1千3百万ユーロ)³⁰⁾ が実施されている。

4. 再生可能エネルギー電源大量導入時の火力発電技術

日本では、NEDO 次世代火力発電等技術開発にて、「次世代火力基盤技術/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 (2018～2021年/電力中央研究所、三菱重工業)」が行われている²⁶⁾。また、2020年7月には「石炭火力の負荷変動対応技術開発」に関して開発を行うことを発表し³¹⁾、石炭火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるための先進的な技術開発を実施している。欧州では、EU Horizon2020 FLEXTURBINE Project (2016～2018年、6千5百万ユーロ)³⁰⁾ が行われた。

5. AI技術との連携

日本では、2019年に「データの活用等による火力発電所の事業運営効率化に向けた手引き案」²⁷⁾ が策定され、同じく2019年にPower plant Operations & Management Body Of Knowledge (POMBOK)²⁸⁾ が刊行された。

(5) 科学技術的課題

日本においても電力出力が天候に依存し変動する再生可能エネルギーは着実に増加しており、出力制御可能な火力発電には、電力調整に俊敏に対応し電力系統を安定できるよう、負荷変動対応速度の向上や待機する最低負荷の引き下げ、電力要求時の起動時間短縮など、ニーズがますます高まっている。化石燃料炊き火力発電は、CO₂排出量を抑制するため、非化石燃料であるバイオマスなどを燃料とすることによりCO₂原単位削減が期待される。このように、これまでにない設備仕様のフレキシブルでレジリエントな火力発電を実用化に向けた技術課題が、継続して求められている。

この実現のためには、高速で正確な燃料流量制御と蒸気流量制御が必要である。ボイラーは大きな熱交換器であり熱容量と時定数が大きいと、蒸気タービンとのミスマッチが顕著になってきている。従来、石炭燃料は固体燃料という特性の故に、ガスや液体燃料と異なり、高速燃料流量制御が出来なかった。これを可能にする技術開発が強く望まれている。またボイラーと蒸気タービンの間に設置する、高速熱交換可能でコンパクトな”蓄熱システム”の実現が期待されている。

技術の困難性の高まりに対し、デジタルツインと呼ばれる、実用機器で起きる実現象を事前に正確に予測できるような解析手段の構築が必要である。この実現のためには、バーナーなどの燃焼器やボイラー内部の詳細な現象を把握・理解することが重要であり、未踏複合現象解明に基づく複合現象モデルを活用した解析ツールと解析を実現可能とする解析インフラの整備が肝要となる。

また、完成した実用機器の設備稼働率向上には、定期点検機関の短縮や定期点検間隔の延長が鍵となる。このためには、IoT/AIを活用した機器損傷予測が可能な遠隔監視技術、運転診断技術の開発及び検査・改修工事の効率化も必要となってくる。

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。

低炭素燃料の利用に関しては、褐炭・バイオマス資源からのガス化水素製造技術、水素貯蔵技術、輸送技術、および配送技術、水素燃焼に伴う逆火・不安定燃焼回避技術、アンモニア燃焼制御技術、アンモニア/水素、アンモニア/石炭等のアンモニア混焼技術、アンモニア燃焼における低NO_x燃焼技術、などが課題となる。

再生可能エネルギー電源大量導入時の火力発電技術としては、急速起動、急速離脱時の過渡状態における空力制御技術、上記過渡状態における燃焼制御（燃焼振動・逆火抑制）・低NO_x燃焼技術、材料の耐熱衝撃・耐繰返し応力技術、各部のクリアランス制御技術、予備力としての待機時における50%負荷運転効率の向上、地域・広域間系統連系解析技術、などが必要となる。

天然ガス複合発電（GTCC）については、より高効率なガスタービンの開発と、上記サイクルとの全体最適マッチングが課題となっている。1600℃級ガスタービンが既に実用化されている現在、1700℃ガスタービンの開発が目標であり、2020年の実証機運転を達成するため、超高温に耐える先進的冷却技術、耐壊食・腐食性の高い耐熱セラミックコーティング（TBC）技術、耐熱合金開発に加え、圧縮機・タービンの高効率化、超希薄予混合・高排気ガス再循環条件における安定（燃焼振動・逆火抑制）・低NO_x燃焼技術、高性能シール・軸受け技術、翼制振技術、先進製造技術、特殊計測技術、検査技術などの継続的開発が必要である。一方、入口ガス温度の上昇に伴い、ガスタービンの排気温度は上昇し、1700℃級では600℃を超える。このように、より高温になった排熱回収ボイラーおよび蒸気タービンで使用することを目的として、600～700℃レベルの鉄系の高温材料の開発が重要になってくると考えられる。さらに、1700℃機実用化に対し、耐熱合金の一方方向凝固材から単結晶材への転換製造技術、3Dプリンターを活用したAdditive Manufacturingによる複雑な高温部品材料の革新的製造技術やITを駆使した計測・制御・検査技術の開発も課題である。さらなる高効率化競争には、圧力増加燃焼技術（Pressure Gain Combustion技術）が検討されているが、1800℃級GTの開発も視野に入れる必要がある。そこでは従来技術の延長では達成できない大きな技術革新が求められるため、新コンセプトに基づいた総合的な技術開発が必要である。

石炭火力発電については、700～750℃級の先進超々臨界圧（A-USC）発電の開発に向け、耐熱性能700℃以上のFe-Ni基合金やNi合金の開発、高温部品（650℃域）における材料単価を下げるための先進フェライト系鋼の開発、10万時間以上の耐高温クリープ試験実証、耐水蒸気酸化性、耐石炭灰高温腐食性試験実証などが課題となる。しかし、前述のように欧州などの先進国では石炭の使用が難しくなっており、CO₂原単位削減に向けた石炭/バイオマスの混消費率の増加や、バイオマス専焼などのバイオマス燃焼比率向上のために、利用可能なバイオマス種を増加させる前処理技術やバイオマスのハンドリング性の向上、石炭と比べ多く含まれるアルカリ金属類の影響や灰分の有効利用など、様々な取り組みが必要とされる。

石炭ガス化複合発電（IGCC）については、従来のボイラー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な海外炭など、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

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

向上、なども課題となる。

トリプル複合発電 (GTFC) では、固体酸化物形燃料電池 (SOFC) が将来の高効率火力発電の鍵を握る最重要技術課題である。SOFCの大容量化技術、すなわち、大型セル・スタックの成型・製造技術、信頼性・耐久性・保守性の向上などの開発が課題である。また、トリプルコンバインドシステムとしては2.5 MPa程度の圧力での運転に耐えるSOFCの開発が必要である。さらにSOFC実用化には、安定した大量生産技術の確立によるコストダウンも必要である。まずは、家庭用、業務用SOFCを普及させることで低コスト化を図り、使用実績を積み重ねることで信頼性を高める必要がある。GTFCが実用化されれば、これとIGCC技術の組み合わせにより、IGFCの実用化も有望になってくると思われる。

AIの火力発電への活用技術に関しては、発電所の運転条件最適化、保守管理計画支援、トラブル予兆検知・回避操作支援を行うための、センサー・制御監視システムなどビッグデータのデータ処理技術、正常時データのパターン学習とリアルタイム異常検知技術や部品管理技術などが課題である。

なお、高効率化のための作動流体の高温化とそれを可能にする高温材料の開発の重要性については、これまで継続して強調されてきたが、さらなるプラント効率の向上のためには、低温側の改善すなわち、低温側熱回収による効率向上も重要になってくると考えられる。その場合、排気ガス中の水蒸気の潜熱回収は非常に効果が大きい。低温での耐食性を備えた高性能の熱交換器はますます重要になると考えられる。

(6) その他の課題

火力発電技術は、極めて大型かつ多様な要素機器が高度に統合されたものであるため、新たな技術開発には大きな予算と長いリードタイムが必要である。しかしながら、企業においては収益優先の立場から、長期的な基礎研究が非常に難しくなっており、特に高効率化の鍵となる高温材料の開発などは顕著である。今後、2050年カーボンニュートラルに向けて、我が国でも再生可能エネルギーの導入がますます加速されるが、主電源化にはまだ相当の時間を要する。新規の原子力発電所の建設も具体的な案件がでていないことから、当面は主電源として使われる火力発電の高効率化は重要である。また再生可能エネルギーの割合が増大したときにその出力変動を火力発電が補完するという役割は極めて大きい。再生可能エネルギーの推進は大いに望ましいが、現時点でも火力発電の稼働率が低下し、新技術による火力発電の高効率化を実施しても投資回収ができない事態が生じている。欧州や米国では実機に採用されないため、研究開発もストップしてしまう傾向が出ている。我が国がこれまで培ってきた高度な技術力を維持し、再生可能エネルギーと協調して発展させるには、国の強力なリードのもと、火力発電の必要性を丁寧に説明し、基礎的な要素技術開発から、大規模な実証試験に至るまで、各開発段階において産学官の緊密な連携が必要不可欠である。また、技術革新の開発をスムーズにロスなく次段階へ進めていくことが求められる。

開発の予算・リードタイム削減のために、デジタルトランスフォーメーション (DX) の推進が必要である。近年、大規模計算機環境の整備が進んでおり、例えば、文科省「富岳」成果創出加速プログラムでの取り組みでは、従来不可能であった石炭ガス化炉や超臨界CO₂燃焼器の熱流体-構造連成解析により燃焼特性と構造物耐久性とを同時に評価できるようになってきている。従来の段階的スケールアップによる大型プラント研究開発の手法に、大規模数値シミュレーション技術を積極的に取り入れ、デジタルツインとして設計現場に即活用可能な解析法を開発することが必要である。

火力発電のゼロエミッション技術開発は、短期的に実用化を図るためには国際連携によるCCS実現が不可欠である。国が主導して、連携関係の構築を進めるべきである。また長期的には国内CCSを念頭に、国の責任において社会受容を進めるよう対策を講じていく必要がある。超臨界CO₂サイクル発電技術については、

国内法規制（高圧ガス規制等）から海外で実証試験をせざるを得ない状況が生じている。国際競争力の面から、大きな損失であり、規制緩和などが求められる。

ゼロエミッション化、再生可能エネルギーとの協調につながる水素エネルギーキャリアを含む水素利用技術については、2019年頃から各国が基本戦略を策定し強力で推進し始めている。日本は早期に着手したアドバンテージを活かし、水素需要の主力を担う火力発電分野におけるイニシアティブを取るべきである。

トリプル複合発電の基幹機器である高温型の固体酸化物形燃料電池（SOFC）については、着実に基礎研究が進められているが、早期実用化のためには大量生産によるコストダウンが必要不可欠である。燃料電池はボイラーや蒸気タービンなどの一品生産機器ではなく、半導体や液晶などと同じような大量生産製品である。世界をリードしている我が国の燃料電池技術が半導体や液晶同様、中国や韓国などの後塵を拝することがないよう、自動化された大量生産製造技術を完成させる必要がある。

AI/IoT技術の活用が、今後の産業競争力の強化において極めて重要な要素となる。GE、Siemens、ABB等の欧米企業では、AI/IoT技術を用いたリモート監視・診断プログラムを活用した新たなビジネスモデル展開を図っている。国内新規プラント建設が少ない中、国内メーカーにおいても、世界的なビッグデータネットワーク構築が可能となるような枠組み構築が求められる。

米DOEのように、1つのテーマに対して複数プロジェクトの採択を行い、開発オプションを広げることが大切である。1テーマ1プロジェクト採用だと、国際的なトレンドによって開発リスクが高まる可能性がある。また、研究者雇用で専従義務を課すなど、若手人材の活用に柔軟性を欠く場合が多い。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を可能とし、広い見識と経験を持つ若手人材の育成が求められる。

米DOE/NETLのNExTプログラム等のように、国際競争が激化する中、国内の産業競争力を強化するためには、各業界で共通プラットフォームを設置し、基盤技術の開発を産学連携により進めることが重要である。

米DOEは、石炭火力に対する世界的な逆風の中、コアとなる技術を選定し、石炭FIRSTプロジェクトを立ち上げた。日本の石炭利用技術開発政策においても、世界への説明責任が果たせる大きなビジョンを示す必要がある。

(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"> ●文科省ALCAプロジェクトでガスタービン用の高温材料の開発、遮熱・断熱セラミック材料の開発および600～800℃の高温材料の開発が精力的に行われている。2020年以降の開発がどうなるか注目されている。 ●GTCCのための単結晶材、冷却技術、耐熱コーティング技術等の開発が進められている。 ●GTCCの負荷運用性向上に向けた研究開発が進められている。 ●CO₂回収型クローズドIGCCの基礎要素試験研究が進められている。 ●IGCCボトムリングサイクル抽気蒸気を用いた高効率化研究が進められている。 ●超並列大規模数値シミュレーション技術のゼロエミッション火力技術開発への適用に関して府省連携が進められている。 ●水素エネルギーキャリアのアンモニア燃焼に関する基礎研究が進められている。 ●基礎研究分野における大学・研究機関からの論文数は横ばい傾向にある。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●次世代火力発電のロードマップに従い、1700℃ガスタービンの実用化を世界に先駆けて実現することが強く期待される。

				<ul style="list-style-type: none"> ●負荷変化率増加、最低負荷低下など変動する再生可能エネルギーを調整する”柔軟性を持った火力発電”の研究が進んでいる。 ●GTCC高温部品向けAdditive Manufacturing技術の適用が進んでいる。 ●大崎クールジェンプロジェクトにより、IGFC/CCS実証試験が行われている。 ●CO₂回収型クローズドIGCCのベンチスケール試験(乾式ガス精製含む)が行われている。 ●540 MW級空気吹きIGCCプラントの試験運転が始まっている。 ●微粉炭火力の高効率化において、蒸気条件600°Cを超える発電所が開発されており、最新の発電所ではLHVベースで48%の効率を達成している。また、蒸気条件を700°C以上としたA-USCの実用化に向けた開発が進められている。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●DOEのサポートにより、大学・研究機関における新技術に関する基礎研究への投資が幅広い分野で行われている。 ●GTCCについて、米国エネルギー省(DOE)/国立エネルギー技術研究所(National Energy Technology Laboratory: NETL)では、1700°C級GTCC技術、超臨界CO₂サイクル発電技術、および圧力増加燃焼技術の3分野に注力して技術開発を進めている。 ●DOE/NETLによりUniversity Turbine System Research(UTSR)を立ち上げ、米国内大学の基礎研究力の向上を図っている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●DOE/NETLによりNational Experimental Turbine(NExT) Cooled Blade Studiesを立ち上げ、GTCC業界における共通プラットフォームの構築と基盤技術開発プログラムが進められている。 ●DOEにおいて、TIT高温化技術、超臨界CO₂サイクル発電技術、およびタービン・ヒートエンジン技術に関する応用研究が進められている。 ●NET Powerにより超臨界CO₂サイクル発電の商用スケールプラント計画が進んでいる。 ●DOEにおいて、石炭FIRSTプロジェクトが立ち上げられ、重点7分野の石炭発電技術開発が進められている。 ●シェールガスの登場により、ガス火力発電の利用が増加している。 ●石炭火力は、トランプ政権が規制を緩和したにも関わらず、シェールガスが発電原価で下回ったこともあり、廃止が続いている。 ●GE(旧Alstom)が建設した石炭火力発電所では、発電効率47.5(LHV基準)が達成されている(32)。 ●GEのGTはコンバインド発電で、発電効率64%(LHV基準)に近いレベルに達している(33)。 ●トランプ政権の誕生とともに、EPA環境基準の見直し、石炭火力復活のための支援策などが打たれているが、シェールガスが発電原価で下回ったり、天然ガスコンバインド火力が圧倒的な競争力を有しているため、石炭火力の廃止が続いている。 ●褐炭利用の流動床ガス化IGCCプラントとして建設されたKemper County 582 MWは2016年7月に石炭ガス化成功と報じられたが、大幅な予算超過と、安価な天然ガスによる競争力喪失のため、石炭ガス化を断念し、天然ガスコンバインドプラントとして運転継続されることが2018年に決定された。
欧州	基礎研究	○	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●石炭の高効率化への研究は殆ど中止されたが、変動電力対応の急速起動停止・負荷変化や、バイオマス燃焼、廃棄物処理燃焼などについては研究が継続されている。 ●2014～2020年の7か年計画である科学技術計画Horizon2020において、CCSやCCUSの技術開発が進められている。 ●EUの2021～2027年の7か年計画である科学技術計画Horizon Europeにおいて、約941億ユーロの研究資金を投じる計画を策定中である。ただし、エネルギー分野への投資としては、水素利用技術が主である。

2.1 俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

				<p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●石炭の高効率化への研究は殆ど中止されたが、変動電力対応の急速起動停止・負荷変化や、バイオマス燃焼、廃棄物処理燃焼などについては研究が継続されている。 ●SFB/TRR129 Oxyflameプロジェクトにより、酸素燃焼分野の基礎研究を積極的に進めた（アーヘン工科大、ポーフム大、ダルムシュタット大等）。 ●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。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ガスタービン燃焼に関する基礎研究では、世界をリードする立場にある（CERFACS、IMFT-UMR、EM2C-CNRS、LMFN-CORIA等）。 <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、世界をリードしている（ケンブリッジ大）。
応用研究・開発	○	→		<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●再生可能エネルギー重視の政策のもと、火力発電の高効率化に関する研究や支援策は低迷し、A-USCやIGCC関係のプロジェクトは殆ど中止となっている。しかしポーランドを初めとする中欧ヨーロッパ諸国は石炭への依存度が大きいと、引き続きIGCCなどの石炭の高効率利用に関心が高い。 ●EUの2014～2020年の7か年計画である科学技術計画Horizon2020において、CCSやCCUSの技術開発が進められている。 ●EUの2021～2027年の7か年計画である科学技術計画Horizon Europeにおいて、約941億ユーロの研究資金を投じる計画を策定中である。ただし、エネルギー分野への投資としては、水素利用技術が主である。 ●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³⁴⁾。 <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年までに脱石炭・褐炭を定める法案が閣議決定された³⁵⁾。 ●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。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●もともと原子力重視の方針のもと、発電比率が小さい火力への支援は最低限にとどめられており、目立った研究開発は無い。 ●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³⁶⁾。 <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。 <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>【イタリア】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Ansaldo EnergiaのGT36 HクラスGTを採用したプラントが建設中。発電効率は63%（LHV基準）を見込んでいる³⁷⁾。

中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●日本での高温耐熱材料研究の縮小とは対照的に、USCのさらなる高効率化を目指して鉄系高温材料の開発と規格化が着々と進められている。 ●近年の海外留学者の積極的な人材登用、豊富な研究資金の投入により、基礎研究力は大幅に向上している。基礎研究分野の論文数は激増傾向にある。 ●火力発電分野の国際会議の主催が増えている。人材交流も含めて、欧米のトップ大学との連携を積極的に進めている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●石炭依存のエネルギー事情の根底は変わらず、石炭火力発電の高効率化の役割は大きい。多くの老朽石炭火力を廃止して、大量のUSCプラントを建設し、また世界初のUSC二段再熱プラントを建設するなど高効率化が着実に進んでいる。 ●USCプラントの過剰生産設備を抱え、輸出に活路を見出そうとしており、既に技術輸出国となっている。 ●中国オリジナルのガス化炉（酸素吹き）を採用したIGCC（265 MW：Green Genプロジェクト）が、2012年に天津で運開、稼働を続けていると思われるが、近年は実績の報告等が見当たらない。 ●Green Genプロジェクトでは、2020年代の運開を目指して、mIGCCを400MWに拡張してCCSを追設したIGCC/CCS機を計画している。 ●OMB炉やTU炉等、様々な形式の国際ガス化炉の実用化が進められている。 ●化石燃料発電分野から再生可能エネルギー開発へ研究資金がシフトしつつある。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●大学・研究機関における基礎研究は継続的に行われている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●2016年に運開したTaeanの酸素吹きIGCCが稼働を続けていると思われるが、近年は実績の報告等が見当たらない。 ●IGCC等は海外メーカーのライセンス生産であり、独自プラントの製造に至っていない。一方、燃料電池の実用化には支援策が取られている。 ●2019年、電力研究院とエネルギー研究院は、0.5 MW級加圧ケミカルルーピング燃焼実証機の長時間運転を成功させた。 ●老朽化石炭火力を廃止する政策³⁸⁾が打ち出される一方で、SiemensのGTを採用した送電端効率63%を超えるLNGコンバインド発電所の計画がある³⁹⁾。LNGコンバインド発電については、積極的に導入を進めている。
その他の国・地域 (任意)	基礎研究	△	→	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●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	△	→	<p>【東南アジア】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●東南アジアでは経済成長が速く、電力の需要も大きく伸びているために、発電コストの安い石炭火力への期待が大きかった。一方、電力系統が弱小なところも多いため、機動力に富むFlexible USCが関心を集めている（インドネシアなど）。 <p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●2019年、ヴィクトリア州において、州政府と電源開発（株）により、ロイヤン炭を使ったガス化・水素製造パイロットプラントの建設が始まった。 <p>【インド】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●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。 <p>【ベトナム】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●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⁴⁰⁾。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：特に顕著な活動・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 ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ エネルギー資源探査・開発技術、CCS（環境・エネ分野 2.1.1）
- ・ バイオマス発電・利用（環境・エネ分野 2.1.6）
- ・ 化学エネルギー利用（環境・エネ分野 2.1.12）
- ・ 破壊力学（環境・エネ分野 2.1.17）
- ・ 計算工学（環境・エネ分野 2.1.18）
- ・ 構造材料（金属）（ナノテク・材料分野 2.4.1）

参考・引用文献

- 1) 経済産業省, 「高効率ガスタービン技術実証事業中間報告書」, https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/e00/03/h27/535.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 2) DOE/NETL, “ADVANCED TURBINES”, <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2017-11/Program-108.pdfz> (2021年2月12日アクセス)
- 3) European Turbine Network, <https://etn.global> (2021年2月12日アクセス)
- 4) NEDO, 「次世代火力発電等技術開発 / 次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」, http://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100138.html (2021年2月12日アクセス)
- 5) NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム, http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100039.html (2021年2月12日アクセス)
- 6) DOE/NETL and OCDO, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1332274> (2021年2月12日アクセス)
- 7) A. D. Gianfrancesco, “Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants”, *Elsevier* (2017) , <https://www.elsevier.com/books/materials-for-ultra-supercritical-and-advanced-ultra-supercritical-power-plants/di-gianfrancesco/978-0-08-100552-1> (2021年2月12日アクセス)
- 8) 国家能源局電力司, 「中国の高効率かつクリーンな石炭火力発電の発展における現状と展望」(2014)
- 9) J-Power 「プレスリリース資料」, http://www.jpowers.co.jp/news_release/pdf/news150302-2.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 10) DOE/NETL, “Oxy-Combustion Projects”, <https://netl.doe.gov/node/7477> (2021年2月12日アクセス)
- 11) SFB/TRR, “129 Oxyflame”, <http://www.oxyflame.com> (2021年2月12日アクセス)

- 12) NEDO, 「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」, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101103.html (2021年2月12日アクセス)
- 13) CO₂回収型クローズドIGCCプロジェクト, http://www.nedo.go.jp/activities/EV_00043.html (2021年2月12日アクセス)
- 14) DUKE ENERGY, “Edwardsport IGCC”, <https://www.duke-energy.com/our-company/about-us/power-plants/edwardsport> (2021年2月12日アクセス)
- 15) “Taeon IGCC Project Update”, <https://www.globalsyngas.org/uploads/downloads/2015-9-2-Seungmin-Doosan.pdf> (2021年2月12日アクセス)
- 16) DOE/NETL, “Coal Gasification Technology”, <https://netl.doe.gov/coal/gasification> (2021年2月12日アクセス)
- 17) NEDO, 「CO₂分離型化学燃焼石炭利用技術開発」, http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100464.html (2021年2月12日アクセス)
- 18) DOE/NETL, “Chemical Looping Combustion Projects”, <https://netl.doe.gov/node/7478> (2021年2月12日アクセス)
- 19) DOE, “Coal FIRST Power Plant”, <https://netl.doe.gov/coal/tpg/coalfirst> (2021年2月12日アクセス)
- 20) IEA, “The Future of Hydrogen”, (2019), <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (2021年2月12日アクセス)
- 21) 『三菱重工技報』55巻4号 (2018), https://www.mhi.com/jp/news/whatsnew_181105.html (2021年2月12日アクセス)
- 22) 「内閣府戦略的イノベーション創造プログラム」, <https://www.jst.go.jp/sip/k04.html> (2021年2月12日アクセス)
- 23) ドイツ政府プレスリリース「Hydrogen Strategy」, <https://www.bundesregierung.de/breg-en/search/wasserstoffstrategie-kabinet-1758982> (2021年2月12日アクセス)
- 24) 文部科学省, 「「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」, <https://postk6.t.u-tokyo.ac.jp/project/> (2021年2月12日アクセス)
- 25) 大崎クールジェン (株), 「CO₂分離・回収型酸素吹石炭ガス化複合発電の実証試験を開始」(2019), <https://www.osaki-coolgen.jp/release/pdf/20191226%20ocg%20project%20second%20step.pdf> (2021年2月12日アクセス)
- 26) NEDO, 「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」, http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100996.html (2021年2月12日アクセス)
- 27) NEDO, 「データの活用等による火力発電所の事業運営の効率化に向けた手引き案」, https://www.nedo.go.jp/library/ZZIT_00008.html (2021年2月12日アクセス)
- 28) “Power plant Operation & Management Body Of Knowledge (POMBOK)”, <https://pombok.org/en/> (2021年2月12日アクセス)
- 29) JETRO (日本貿易振興機構), 「欧州投資銀行、2021年に化石燃料エネルギープロジェクトへの資金提供終了」(2019), <https://www.jetro.go.jp/biznews/2019/11/93cc8f97ec5732ad.html> (2021年2月12日アクセス)

- 30) Funded Project under Horizon 2020, “Secure, clean and efficient energy” (2020) , <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/secure-clean-and-efficient-energy> (2021年2月12日アクセス)
- 31) 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/石炭火力の負荷変動対応技術開発」に係る実施体制の決定について」(2020) , https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100203.html (2021年2月12日アクセス)
- 32) *Modern Power Systems* 40, No. 4 (2020) : 26
- 33) *Gas Turbine World*, November-December (2019) : 15-20, <https://gasturbineworld.com/product-category/magazine/> (2021年1月12日アクセス)
- 34) 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」(2019) , <https://www.jepic.or.jp/world/2019/20190922.pdf> (2021年2月12日アクセス)
- 35) 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」(2020) , https://www.jepic.or.jp/world/2019/20200129_03.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 36) 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」(2020) , https://www.jepic.or.jp/world/2019/20200113_01.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 37) *Modern Power Systems* 39, No. 12 (2019) : 5
- 38) (一社) 海外電力調査会、韓国「「第9次電力需給基本計画」草案の概要が明らかに」(2020) , <https://www.jepic.or.jp/world/2020/20200508.pdf> (2021年2月12日アクセス)
- 39) *Gas Turbine World* September-October (2019) : 15
- 40) *Modern Power Systems* 40, No. 3 (2020) : 35

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分