

2.1.15 反応性熱流体

(1) 研究開発領域の定義

本領域は、反応性熱流体、いわゆる燃焼に関する科学、技術、研究開発の領域である。工学を構成する主要な複合的基礎技術、および具体的な応用技術となる。また応用としてエンジン燃焼、ガスタービン燃焼、燃焼式工業炉、微粉炭燃焼などを対象とする。またエンジン燃焼に関しては、低排出ガス化と高効率化の同時実現に向けて研究開発が進められている自動車エンジンを中心に、周辺環境、制御技術も含めた燃焼技術が対象である。工学基礎技術として今後必要な科学技術を対象とする。

(2) キーワード

エンジン、ガスタービン、工業炉、化学反応、NO_x、すす (Soot)、バイオ燃料、合成燃料、e-fuel、水素、グリーンアンモニア、LCA、ゼロエミッション、超希薄燃焼、HCCI、再生可能エネルギー

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

燃焼は、依然として世界の動力・発電・熱需要の大部分を担っている。陸海空の輸送セクタや工業製品の製造工程だけでなく、廃棄物の焼却処理・減容にも用いられ、人類の活動全般を担う基盤技術である。一方、CO₂の主たる排出源であり、その排出量削減に向けた取り組みが喫緊の課題である。一次エネルギー源である(特に液体)燃料は、最新電池と比べてもエネルギー密度が著しく大きいため、エネルギーキャリアとして移動体や大きな仕事率が要求される幅広い用途に用いられる。輸送セクタを担う自動車では、その燃費向上とゼロエミッション化のため、世界的にパワートレインの電動化(HEV、PHEV、BEV、FCEV)が進む方向であるが、2040年時点でもエンジン搭載車が70%を越えるとの予測があり、かつ販売台数は世界総計では今後も増加していくので、省エネ性、CO₂排出量、排出ガスのさらなる大幅なクリーン化と低減が課題である。したがって究極の熱効率の追求や排出ガスのクリーン化を実現する燃焼コンセプト開発が大きな方向である。加えて、車両の燃費や排出ガスの認証テストサイクルが、WLTC (Worldwide harmonized Light vehicle Test Cycle) やRDE (Real Driving Emission) のように、より実走行に近い厳しいテストモードへと向かうことも研究開発の課題である。なお注目すべき動向として欧州を中心に、高効率化・クリーン化について、Tank to Wheel (車での使用段階) から Well to Wheel (燃料製造段階から車での使用段階まで) への評価軸の転換、およびLCAを重視した総合的なCO₂排出量評価への転換がある。一方でシェアカー、自動運転、コネクテッド等、モビリティ社会のシステム自体が大きく変わろうとしており、それらへの対応も重要となる。

基礎科学としての燃焼は、熱や物質の輸送と化学反応が連成する反応性熱流体に分類される。複雑な現象であると同時に極めて広い応用範囲を有する。石炭を中心に燃焼利用全般を回避しようとする動向の一方で、世界的には燃焼研究者人口は増加傾向にある。報道等で大きく取り上げられる理想的エネルギーシステム探求と同時に、実際には多くの国で積極的な燃焼研究投資が継続しているという事実もある。

[研究開発の動向]

近年は燃焼利用そのものを避けるため、再生可能エネルギー由来の電気エネルギーの利用を想定した研究開発が世界的に進められてきた。しかし再生可能エネルギー導入が進むにつれ、その時間的・空間的偏在性や、電気エネルギーの高密度・長期間貯蔵の困難性といった特徴が広く認知されつつある。その結果、再生

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

可能エネルギー導入と並行して、高い出力密度と負荷変動追従性をもつ燃焼を活用する、経済合理性の高い方法による包括的なCO₂削減を目指す方針に転換されつつある。

この観点において、燃焼領域の研究開発動向には大きく二つのトレンドがみられる。一つは、化石燃料を使用する燃焼機器の一層の高効率化である。化石燃料はその製造・貯蔵・輸送における発熱量当たりのCO₂排出量が非常に小さいことから、燃焼利用時における熱効率向上がCO₂排出量削減に直結する。我が国の実用燃焼器の熱効率は世界トップクラスにあり、例示すると自動車ガソリンエンジンでは熱効率40%超（トヨタプリウス・2020年現在）、天然ガス焚き1500℃コンバインドサイクルでは熱効率60%超・出力98万kW¹⁾、空気炊き石炭ガス化炉1200℃級コンバインドサイクル（IGCC、実証試験）は熱効率40%超・出力25万kWなどである。自動車エンジンの高効率化を目標としたSIP「革新的燃焼技術」（2014～2018年度）が行われ、研究段階であるが目標であった正味熱効率50%を達成（ガソリン機関51.5%、ディーゼル機関50.1%）した²⁾。特にガソリンエンジンでは均質超希薄燃焼が技術課題とされた。その中で希薄限界支配因子の科学的特定がなされ、これに基づき燃料の分子構造・燃焼特性に着目した燃料変更・転換により、より一層の効率向上の糸口が見いだされている。この動向はAICE（自動車用内燃機関技術研究組合）や産総研を主体にした、SIP革新的燃焼技術の後継の連携研究の支援体制にも受け継がれており、動向が注目されている。実際、自動車業界から市販車で目標50%という数字が聞かれるようになった。またガスタービンでは、高効率ガスタービン技術実証の下、1700℃級ガスタービンの研究開発が進められ（2020が最終年度）、同成果を元に1650℃級コンバインドサイクル（熱効率64%・出力61万kW）の実機検証が2020年に開始³⁾しており、水素専焼⁴⁾や将来のアンモニアの利用、水素等の混焼プロジェクトへの発展を見込んでいる。海外に目を向けると米国では、国立科学財団（NSF）のCombustion and Fire Systems program⁵⁾により、燃焼におけるエネルギー変換効率向上、エネルギー安全、クリーン化について年間を通した公募が継続されている。また欧州では、2014-2020年の7年にわたる大型予算Horizon2020⁶⁾において、エネルギー変換技術と熱電併給に関する取り組みが進められた。

燃焼機器の高効率化と双璧となる二つ目の大きなトレンドとして、広義の燃料転換が挙げられる。このうちのひとつがカーボンフリー燃料の利用である。カーボンフリー燃料の例として、炭素成分を除去した燃料（天然ガスを原料に炭素成分を地下貯留した水素など）や再生可能エネルギー由来の燃料（バイオ燃料等）がある。また水素供給が可能なパイプラインが整い、広大な国土により豊富なバイオ資源が見込める国において、それらの燃焼利用に関する研究開発が盛んである。米国では、水素利用のスケールアップを目指す研究の枠組みとしてH2@Scale⁷⁾が2019年から実施、また、太陽電池・風力等の導入拡大に伴い、再生可能エネルギー由来の電力供給が電力需要を超過する例も出てきたことから、余剰電力による合成燃料であるe-fuelを利用する選択肢の有望性も急速に高まっている。燃焼機器は燃料の燃焼特性に厳密に整合させる設計で高効率化を実現しているため、同時に各種カーボンフリー燃料の燃焼特性を調べる基礎研究も盛んである。

日本発の動向として、貯蔵性・輸送性に優れたアンモニアに着目した研究開発がSIP「エネルギーキャリア」において進められ、その中で特にアンモニア直接燃焼に関するグループが世界の先駆けとなり、アンモニア専焼によるガスタービンおよび工業炉、天然ガス混焼ガスタービンや石炭混焼ボイラ等の開発や実証に成功している。燃焼過程でのNO_x排出が回避されない限りあり得ないとされてきたアンモニア直接燃焼におけるこの課題に解決の目処がついた⁸⁾ため、世界的に急速な広がりを見せている。これらの成果は我が国の第5次エネルギー基本計画（2018）のみならず国際エネルギー機関（IEA）のレポート⁹⁾にも記載され、さらに我が国の科学技術イノベーション政策の方針を示した統合イノベーション戦略2019、2020にも追加され、アンモニア直接燃焼を背景に新たな戦略資源「燃料アンモニア」として位置づけられた¹⁰⁾。アンモニアに関しては、

SIPエネルギーキャリアの後、グリーンアンモニアコンソーシアム（現・クリーン燃料アンモニア協会）¹¹⁾の枠組みによる活動が注目を集めている。

石炭燃焼は他燃料に比べ単位発熱量当たりCO₂排出量が多いことが指摘されている。このため欧州を中心に石炭火力の建設が抑制され、日本でも2020年7月、経産省が石炭火力縮小の方針を発表した。米国ではシェール革命によりシェールガスとの価格差縮小もありコスト面から石炭火力発電が抑制されている。しかし賦存量豊富かつ安価、資源の地域偏在性が小さいことから、特にアジア地域では今後も需要増加が予想され、世界全体のピークは2040年頃と想定される¹²⁾。石炭火力の主力形態である微粉炭燃焼研究は中国で活発、中国の大学および中国と連携した独英の大学から多数論文発表がある。

微粉炭燃焼研究ではLES（Large-Eddy Simulation）の微粉炭燃焼場への適用が標準となりつつあり、フレイムレットモデルの研究開発が活発化し、新動向として微粉炭燃焼シミュレーションへの人工知能活用の試行¹³⁾がある。SIPではアンモニアの石炭火力への混焼実証に関し、基礎研究やベンチスケール燃焼試験、実機スケールアンモニア/微粉炭混焼の数値解析も実施されている。石炭ボイラへのアンモニア混焼の効果も注目されている。

固体燃料粒子反応の数値解析技術で進歩が見られる。微粉炭燃焼を対象に詳細化学反応の取り扱い可能なフレイムレットモデル開発が進行している。しかし肝心の微粉炭粒子放出の揮発分についての詳細化学反応機構は未開発である。今後、揮発分の化学反応機構構築に資する実験データ取得が必要である。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

- 1) エンジン燃焼：乗用車用ガソリンおよびディーゼルエンジンで最大正味熱効率50%、商用車用ディーゼルエンジンで55%での量産化を目標に内燃機関研究組合AICEが中心となり燃焼コンセプト開発が進行中。SIP革新的燃焼技術では乗用車用ガソリン51.5%、乗用車用ディーゼルで50.1%を達成したが、あくまでも先行研究であり課題が多く残っている。
- 2) 自動車業界トレンド：欧州ではこれまでのTank to Wheelからここ1、2年の間、LCAやWell to Wheel視点に大きく方針転換。欧州委員会の地球環境政策の影響が大きい。そのため、パワートレインとしてBEVだけでなく、エンジンを含む複合電動システムを利用するDedicated Hybrid Powertrain¹⁴⁾コンセプトとしてエンジン、モーター、メカカルトランスミッションに分担された低CO₂に向けた開発が提案され、エンジンについては、欧州、北米、中国でも、最大正味熱効率の数値目標を掲げた燃焼研究開発が開始している。また、LCAによるCO₂削減のため再生可能エネルギーを最大限活用するために、クリーンエネルギーベースの水素利用も1つであり、水素燃焼エンジンの研究も再燃している¹⁵⁾。またその水素と大気中のCO₂を原料に再生可能エネルギーの電力を利用し燃料を合成するe-fuelの研究開発も盛んになっている¹⁶⁾。
- 3) 燃焼コンセプト転換（ガソリンエンジン）：昨今、乗用車用ガソリンエンジンの燃焼はディーゼル燃焼コンセプトに漸近しており、EGRを活用した過給直噴をベースに熱効率向上を狙い、希薄燃焼方式（HCCI含む）や高圧縮比化の研究開発が急増している¹⁷⁾。ただし高圧縮比化の方向にはノッキングや燃焼制御に大きな課題がある。対策として副室付点火プラグ（Pre-chamber Spark Plug）、水噴射などがトレンド。また効率向上、排出ガス低減、ノック抑制の両立の観点からガソリン直噴の燃料噴射圧は、今後も高圧化していく方向にある。特にPN規制対応のために噴射の高圧化は重要で、現状では60MPa辺りに落ち着くと見られる¹⁸⁾。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

- 4) 燃焼コンセプト転換 (ディーゼルエンジン) : これまでNO_xや機械損失低減の観点から低圧縮比 ($\varepsilon=14\sim16$) の方向だったが、最近はこちらの課題を解決しつつ熱効率向上を狙い少し高めの圧縮比 ($\varepsilon=16\sim17$) でPCCI (Premixed Charge Compression Ignition) 燃焼コンセプトをベースに、排出ガスをクリーンに維持しつつ冷却損失を低減することが研究開発のトレンド。ポイントは燃料噴射系であり、可変噴射率制御¹⁹⁾、近接多段噴射制御、燃料噴射圧の高圧化 (200→300MPa)²⁰⁾ の方向。1サイクル (1燃焼) 中の燃料噴射回数も多段化傾向。商用車用ディーゼルエンジンでは乗用車に比べ常用エンジン回転数が低く、高めの圧縮比 ($\varepsilon=18\sim20$) の過給直噴をベースに燃焼時冷却損失の低減が研究開発のトレンド²¹⁾。
- 5) 排ガス低減 : 乗用車用ガソリンエンジンでは、冷間始動時の三元触媒が活性化するまでの数十秒間の排出ガスの低減に注力。そのため始動時燃料噴射増量の低減を狙った冷間燃焼安定化、直噴では遅角燃料噴射により膨張行程での燃焼利用、排気系への空気噴射で三元触媒を早期暖機するコンセプト、冷間始動時のみヒータで触媒を加熱するEHC²²⁾ などがある。世界的にガソリンSootをトラップし燃焼させるGPF²³⁾ の研究開発と量産化が必須となっている。乗用車ディーゼルエンジンの排気クリーン化では、エンジン1サイクル間に複数回 (3~7回) 燃料を噴射し、NO_x、Soot、燃焼音、冷却損失を同時低減することがベース技術となる。排気系では、酸化触媒+尿素水添加SCR触媒+DPFの組合せが一般的。電動化の1つである48V仕様のモータジェネレータ (MG) でディーゼルエンジンの厳しい運転条件をアシストするMHEVコンセプトも脚光を浴びている²⁴⁾。
- 6) 海外動向 : 欧米を中心に、燃費向上・CO₂低減と車両動力性能向上を両立するため、車両重量との関係から過給直噴エンジンを小さくするダウンサイジングから、ライトサイジング (適正トルク/出力) への転換がトレンド。エンジン燃焼研究では、欧州はドイツ圏の内燃機関研究コンソーシアムFVV²⁵⁾ が60年以上の歴史の中で、ゼロエミッションを目指して将来の燃焼研究や燃料合成e-fuelの研究に傾注している。一方米国では、DOEが最大正味熱効率の数値目標を掲げてエンジン燃焼研究に取り組んでいる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・SIP「革新的燃焼技術」(2019年3月、終了)
- ・SIP「エネルギーキャリア」(2019年3月、終了)
- ・ゼロエミッションモビリティパワーソース研究コンソーシアム (2020年~)²⁶⁾ : 産総研コンソーシアムとして、アカデミアとAICEが中心にモビリティのゼロエミッション化を実現することを目指して設置。
- ・クリーン燃料アンモニア協会 (旧グリーンアンモニアコンソーシアム) : SIP「エネルギーキャリア」の後継枠組み。アンモニアの供給から利用までのバリューチェーン構築を目指して、技術開発・国際連携などを実施。
- ・燃焼システム用次世代CAEコンソーシアム : 高性能コンピュータを利用した燃焼を扱う装置の設計や最適操作条件選定の高精度化を検討。産学の緊密な議論及び情報交換を促し次世代の燃焼器ものづくりのフレームワーク構築および実用化を目指す。
- ・Co-Optima (米国)²⁷⁾ : 2030年までに自動車による石油の消費量を30%削減することを目指し、アメリカの国立研究所9カ所が中心となって実施。新エンジンとバイオ由来新燃料の両方の開発を進めている。
- ・Horizon 2020 (EU)²⁸⁾ : EU最大規模の研究開発予算。その中には省エネに関して、運輸 (航空機、車輜、船舶) のエンジン燃焼に関連する小テーマがある。多くのテーマにおいて研究者ネットワークを支援する形をとっており、研究者間の交流が進行。SIP「革新的燃焼技術」を参考にしたとみられ

るプロジェクト (EAGLE²⁹⁾) も進んでおり、追い上げが顕著。また主に水素ガスタービンを対象としたプロジェクトの後継 (FLEXnCONFU³⁰⁾) に、アンモニアも対象とすることが示された。その他、再生可能電力からの燃料製造 (Power to X) のプロジェクト「Integrated solutions for flexible operation of fossil fuel power plants through power-to-X-to-power and/or energy storage (LC-SC3-NZE-4-2019)」や、バイオマスベースの熱電併給等のプロジェクト「Development highly performant renewable technologies for combined heat and power (CHP) generation and their integration in the EU's energy system (LC-SC3-RES-12-2018)」などが進行中。

(5) 科学技術的課題

1) 燃焼ダイナミクスの解明とモデル化、AI 技術の活用：

ノッキングや燃焼振動は実質的に燃焼機器の熱効率向上や運転範囲を律速するため、その発生メカニズムを解明し、予測・回避する必要がある。しかしながら、こうした非定常燃焼挙動は熱流体・化学反応・圧力波など、複数の現象が連成する極めて複雑な現象であるため、詳細な現象解明とモデル化には先進計測・数値計算技術の適用が必要不可欠。燃焼機器の高いエネルギー密度と負荷変動追従性は、再生可能エネルギーの巨大かつ急激な変動を補完しうる唯一の方法と考えられているため、今後は定常運転を想定した定常境界条件における非定常燃焼挙動から、非定常運転を想定した非定常境界条件における非定常燃焼挙動へと、研究対象の条件がさらに複雑化してゆくと考えられる。

またAI 技術を活用した燃焼現象の予測・制御の研究が2000 年代より報告されるようになった³¹⁾。一般的なニューラルネットワーク (NN) を用いて、燃焼振動などの燃焼状態の予測制御、微粉炭バーナへのスラグ付着検知、バイオマスボイラーの出力予測、ディーゼルエンジンのシリンダ内圧力に基づく有害物質の排気量予測等の研究が実施されてきた。近年では、畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) 手法を燃焼状態の予測に適用する例が見受けられ、火災の画像データを基にしたスワール燃焼器における燃焼振動の発生の検知や火災画像による炉内の燃焼状態の予測などが報告されている。未だ基礎研究が主体ではあるものの、燃焼制御分野において、AI がこれまでの手法の代替となる有用な手法となる可能性を秘めている。世界が先行し、日本も研究が進行するものの追い上げが必要。

2) 新燃料の詳細化学反応機構の構築：

アンモニアをはじめ、従来は燃料として考えられてこなかった化学物質が新燃料の候補になっている。燃焼器の設計開発には燃焼反応を正確に予測可能な詳細化学反応機構が必要不可欠。新燃料や新燃料・炭化水素混合燃料の各種燃焼特性 (着火遅れ時間、層流・乱流燃焼速度、消炎限界、火災構造、化学種分布、温度分布、固有不安定性等) を予測可能な詳細反応機構の構築が必要。構築した詳細反応機構を検証するための実験も必要。特に、新燃料は既存の反応機構構築や燃焼特性計測の基盤となる前提 (グループ則、薄い火炎帯等) が成立しないことがあるため、新たな俯瞰的視野による燃焼の学術基盤構築が求められる。

3) 燃焼数値解析の計算負荷削減：

数百の化学種・数千の素反応からなる詳細反応機構では、非現実的な計算リソースの増加に繋がる。計算を可能にするためには、簡略化反応機構、反応性流体に特化した時空間の乱流フィルタリング、燃焼ダイナミクスの簡易モデル構築等に関する研究が必要。究極的には、デジタルツインやモデルベース燃焼制御を視野に入れ、リアルタイム～数秒程度の計算時間を目指した超コンパクトモデル・計算法

の開発が必要。また、各モデルを前述の新燃料に対応させる必要もある。

- 4) 液体燃焼の研究・開発動向として、Engine Combustion Network (ECN)や国際的な研究ワークショップ Turbulent non-premixed flames (TNF)、International Sooting Flame (ISF) のように、研究対象を限定した、複数の研究機関による連携研究が進められている。液体燃料の燃焼に関する研究報告の近年の傾向である、数値解析を用いた噴霧火炎の詳細構造を検討する研究に加え、数値解析に用いる検証データを提供することを念頭においた研究が報告されている。

燃焼の条件がより燃料希薄、高圧となることによって生じる現象（不確実な点火、ノッキング、振動燃焼など）が、液体燃料の燃焼機器においても技術課題となっており、解決を目指した基礎研究および応用研究が求められる。燃料多様化を背景として、燃料に添加物を加えることで、着火遅れやすす生成に与える影響について検討した実験的な研究が進められており、新しい燃料、燃焼条件における環境負荷物質の（二酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物）の排出低減を達成するための基礎データの取得が求められている。

- 5) エンジン燃焼に関する課題：

ノッキング現象の化学的かつ物理的完全解明と、その抑制や制御技術の構築が必須であり、ノックフリー燃焼コンセプトが産学連携の1つの大きなテーマである。それを実現できるコンポーネント（噴射系、点火系）の量産化も大きな課題となる。

近年の傾向であるガソリンエンジンにおける圧縮自着火燃焼の制御技術も大きな課題。化学反応、温度やEGR分布などの広範囲の制御技術がカギとなり、市販化を踏まえた新燃料探索も重要課題である。

ディーゼルエンジン燃焼において、種々の噴霧燃焼条件でのSoot生成メカニズム解明と、超低NOxとの両立が出来るSoot低減技術の構築が重要。EGR系や燃焼室デポジットも課題のままである。燃料のエネルギー変換時のエクセルギー効率に則った基礎研究も重要。

SIP革新的燃焼技術で構築された3Dエンジン燃焼モデルHINOCAについて、SIP終了後はAICEとJAXAを中心に精度向上や異なる燃焼コンセプトにも対応でき、広く自動車産業界で活用できるMBDツールを目指して開発が進められている。今後、デジタルツインとして活用できる数値シミュレーション技術の高度化が望まれる。種々のエンジン燃焼コンセプトとそれらに最適な再生可能エネルギーe-fuelの相乗効果の明確化、e-fuelの実用化に向けたプラント実証（低コスト化）の加速が必要。産業界連携（自動車、石油、化学）や関連する多くの学会連携が必要。

(6) その他の課題

- ・ SIP革新的燃焼技術を通し、基礎研究と応用研究・開発との協創メリットが産学ともに広く認識され、努力が継続されている。今後、国内の産学官連携をより発展させていくためには工学分野の研究・開発におけるアプローチを具体思考に寄せすぎず、大きな概念で広い視点で捉える抽象思考との行き来ができるような風土の醸成や人材育成が必要と考えられている³²⁾。欧米の成功例として、米国での燃焼化学反応計算パッケージChemkinの開発や、仏の航空宇宙・推進分野における産官学にまたがる研究開発体系の構築などには学ぶ点が多い。
- ・ 前述の米国における燃焼化学反応計算パッケージの開発や、仏の航空宇宙分野における産官学に跨がる基礎研究～開発・人材育成をカバーする生態系の構築に比して我が国で足りない点とされるのは、目利きのプログラムディレクターの指揮による、異分野からの研究者・技術者の包括的協創であると言われている。ここには基礎研究者と応用技術者との間や、抽象思考と具体思考との間での相互交流の不足があ

るとの意見もある。基礎研究と開発研究、双方が他方の特徴や強みを理解しあい、人材育成を含む、より包括的な協創体制の構築に務めることが、我が国の研究開発力向上のために必須となる。

(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	○	→	●研究の質は世界トップ水準にあったが、楽観視できない状況。研究者の国際経験の減少が遠因の一つである可能性。燃焼を対象とした大型予算（SIP第一期）が措置され、多くの成果を創出したものの、基礎研究における燃焼分野の学術誌出版には全体的に見て繋がっていない。後継プロジェクトが設定されなかったが、諸外国がキャッチアップを開始しており動向を注視する必要。 ●国際宇宙ステーション「きぼう」モジュールにおいて引き続き、気体・液体、固体燃料の燃焼に関連する特徴ある研究が進行中。他国では燃焼の微小重力実験ファンドは多くが終了しており、日本の強みとなっている。
	応用研究・開発	◎	→	●実用燃焼機器の熱効率・エミッションは世界トップレベルにあり、日本の省エネ技術をけん引している。 ●NEDO等の国家助成が多くは短期的で、主な欧米のプロジェクトの様に産官学共同で長期的に取り組む実証研究段階への大型助成が少ない。 ●エネルギーキャリアの技術開発は世界に先駆けて行われ、アンモニア燃焼を含む反応性流体の先行研究開発を牽引。これに対し欧州を中心にキャッチアップが進められ、例えば海運の推進機関分野では逆に、すでに応用以降のフェーズでの覇権を他国が掌握しつつある状況。
米国	基礎研究	◎	→	●エネルギー政策の大幅変更により、燃焼分野の予算獲得は非常に困難に。しかし明確な選別が進み、研究が世界先端で、進捗が顕著な分野や研究グループへは継続して潤沢な国家資金を投入。逆に役目を終えたとの判断で閉鎖された国立研究所の著名な研究グループもある。結果として、限られた予算の中で、先端燃焼研究の質と研究者の層の厚さは維持され、依然トップレベルにある。 ●ECN (Engine Combustion Network)³³⁾等の基礎研究に関わっている人材の豊富さと交流の多さ、および各国立研究所の所有するスーパーコンピュータや高エネルギーX線解析などが積極的に活用出来る環境にある。
	応用研究・開発	◎	→	●ガスタービン、レシプロエンジンで状況は大きく異なるが、燃焼機器の熱効率・エミッションはいずれも世界トップレベル。ガスタービン研究ではジョージア工科大等、特定の機関が大きな役割。 ●レシプロエンジンでは、2016年に開始したDoE主導のSuperTruck IIにおいて、自動車用エンジンとしては非常にチャレンジングなBTE：55%のシナリオ検証が主要テーマ。SwRI (Southwest Research Institute) のコンソーシアムとして、ガソリン正味熱効率45%を目指したHEDGE-IV (2017～2020)³⁴⁾や、ディーゼルの賞味熱効率55%を目指したCHEDE-VII (2015～2019)³⁵⁾で実用研究を実施。
欧州	基礎研究	◎	→	【EU】 ●国によって、燃焼研究への予算措置がされにくい、国家予算規模が小さい、などの事情があるが、2014～2020年の7年計画である科学技術計画Horizon 2020により、多国間の研究者ネットワークが形成され、研究の質も高いレベルにある。例えばPtXtP (Power to X to Power) やCHPに対する研究が行われている。 ●大学や研究機関が中心となって、エンジン燃焼に関わる様々な基礎現象解明のためのコンソーシアムが組織され、政府や企業が継続的に研究を行っている。IICR Cavitation Workshop³⁶⁾ (COVID-19により2020は中止)、IFPENが主宰するLESのエンジン燃焼活用LES4ICE³⁷⁾、Lund Universityが主宰する予混合圧縮着火のコンソーシアム等がある。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

			●石炭火力の新設は大幅に抑制も、Research Fund for Coal and Steel (RFCS) 等による研究プロジェクトや微粉炭燃焼関係の基礎研究は継続。 【ドイツ】 ●アーヘン工科大学、ミュンヘン工科大学、DLRなどの代表的な研究機関が、燃焼に対する基礎研究から応用研究までを牽引している。 ●微粉炭燃焼の分野では数値解析用フレームレットモデル開発やAIの活用に関する研究など、ドイツ研究振興協会（DFG）の資金により顕著な進展。 ●アーヘン工科大学を中心に2015年からSymposium for Combustion Control³⁸⁾を開催。10カ国、100名を越す参加者があり、今後も拡大方向。基礎研究に対する予算として、DFG（ドイツ学術振興会）も役割を果たしている。一例としてバイオマス燃料の製造から実用まで行うThe cluster of excellence³⁹⁾ プロジェクトがアーヘン工科大学で実施。 【フランス】 ●航空宇宙分野において、基礎研究から開発、人材育成を含めた総合的仕組みが構築され、継続して機能している。反応流LESは世界最高峰レベル、常に先端学術レベルで改良し、国内企業が開発に利用できる状態を継続維持している。 ●Paris Saclay、Centrale Suplec（EM2C）から、燃料噴霧の蒸発・燃焼に対する基礎研究成果が発表されている。2018年、2019年のANR Annual Programmeから燃焼に関する項目がなくなっている。 【英国】 ●ブレグジットの今後の状況によっては、Horizon 2020などのEU事業への参画に制限が設けられる可能性がある。 ●SiemensとCardiff大学の共同研究が中心となり、アンモニア燃焼に関する顕著な追い上げ。 ●微粉炭燃焼関係の研究では、中国の大学との共同研究が活発。
応用研究・開発	◎	↑	【EU】 ●ドイツFVVをはじめとした技術協同組合を通じ、産学連携による燃焼の共同研究は依然として活発。また、アンモニア製造に関するベンチャー企業の設立が進んでおり、アンモニアサプライチェーンの構築に積極的。 【ドイツ】 ●欧州委員会が取り纏めるFP7やHorizon2020といった短期集中型+テーマを絞り込んだ産学プロジェクトが常に多数並行して進み、活発に活動。 ●独ではFVV(Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.)⁴⁰⁾による内燃機関研究コンソーシアムが莫大な予算で継続され、60年以上の歴史。参加団体は、ドイツ圏を中心に自動車関連企業226社と有力大学が一体となった研究を実施。基本的に2/3が公的資金で1/3を参画企業が支援する研究体制。昨今、電動化が叫ばれているが、内燃機関搭載車は存続し続けるので、エンジン燃焼研究への予算投入は今後も継続していくと思われるが、ゼロCO₂、e-fuel、熱効率向上、低排出ガス（Regulation）、Controls、Sensorsの研究テーマが中心になっていく模様。 ●ドイツ圏主導の2大国際学会（Vienna Motor Symposium、Aachen Colloquium）が毎年盛大に開催。欧州自動車メーカーとアカデミアを中心に将来の技術開発戦略が活発に議論。また、産学の人脈の繋がりが広く深く強固。 【フランス】 ●IFPen、ONERAなどの研究機関が、液体燃焼に対する基礎研究から応用研究までを牽引。 【英国】 ●アンモニア燃焼について、Cardiff大学、Oxford大学、SiemensがInnovate UKプロジェクト（Science and Technology Facilities Council）により、発電からエネルギー貯蔵までをカバーするエネルギーシステムをデモ。

中国	基礎研究	○	↗	● 燃焼への大型予算が措置されており、燃焼を主題とした State Key Laboratory 認定が複数ある。欧米から帰国した研究者が顕著な業績を出しており、全体をけん引。 ● National Science Foundation of China、Fundamental Research Funds for the Central Universitiesなどの予算を元に、特にトップレベルの大学における研究の水準は高く、論文数も多い。国際的な共同研究の動きも活発。 ● 潤沢な研究資金を背景に、微粉炭燃焼の分野では世界の論文発表件数の半分以上を中国からの発表が占めており、研究の質も向上している。
	応用研究・開発	○	↗	● 日米欧の自動車メーカーとの合併会社から技術移転がなされはじめ、研究レベルは確実に向上。 ● 中国製造2025（2016～2049）：重要な10大産業が挙げられそれぞれ高い目標を設置。その一つに「省エネルギー・新エネルギー自動車」産業があり、EV化を中心に電動化+内燃機関でエネルギー消費量と排出ガス低減に取り組む。 ● 毎年自動車用エンジンの展示会を開催しており、19th Engine China 2020が11月に開催予定。エンジンへの関心も高い。 ● 超臨界のボイラ等も自国メーカーで建設できるようになり、発展が著しい。
韓国	基礎研究	○	↗	● 研究の質は高いレベルにあるが、燃焼コミュニティの規模が小さく、特定分野（例えば化学反応）では顕著な成果が見られない。
	応用研究・開発	△	→	● 実用燃焼機器の省エネ性能は依然として日本が優位で、特筆すべき大型プロジェクトはみられない模様。
その他の国・地域（任意）	基礎研究	○ ◎	→ ↗	【豪州】 ● 産炭国であることを背景に、褐炭を用いた緩慢酸素燃焼（Oxy-fuel MILD combustion）の研究が活発である。 【サウジアラビア】 2008年に創設されたKing Abdullah University of Science and Technology（KAUST）のClean Combustion Research Centerが豊富な資金と、世界から集めた人材を擁して十年ほどで、基礎燃焼研究の世界トップ拠点の一つとなった。創立後間もなく、サウジアラムコが研究資金提供機関となってからは、米・国立研究所を中心に進められていた燃焼化学反応機構開発に関する世界のトップ研究者グループを引き続きサポート、化学反応機構にAramco機構と命名する等、世界的ブランディングを実施。近年はサウジアラムコの事業展開方針を受け、グリーンアンモニア事業への参入、アンモニア燃焼に関する急速なキャッチアップを進め、日本との協力も開始している。
	応用研究・開発	◎	↗	【オーストラリア】 豊富な再生可能エネルギーと石炭から、カーボンフリーアンモニアの製造と輸出に関して大型プロジェクトが進行している。

(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

- ・火力発電 (環境・エネ分野 2.1.2)
- ・計算工学 (環境・エネ分野 2.1.18)
- ・除去・浄化技術 (大気、土壌・地下水) (環境・エネ分野 2.2.5)

参考・引用文献

- 1) 一般社団法人日本機械学会「特集発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望」『日本機械学会誌』119巻1173号(2016), <https://xtech.nikkei.com/dm/atcl/feature/15/401823/102600023/> (2021年1月21日アクセス)
- 2) SIP『革新的燃焼技術』, <http://www.jst.go.jp/sip/k01.html> (2021年1月21日アクセス)
- 3) 高村他, 「J形ガスタービンの運転実績をふまえた1650°C級JAC形ガスタービンの開発」『三菱重工技報』56巻3号(2019), <http://www.mhi.co.jp/technology/review/abstractj-56-3-20.html>. (2021年1月21日アクセス)
- 4) NEDO『世界初, ドライ低NOx水素専焼ガスタービンの技術実証試験』, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101337.html 2020.7.21 (2021年1月21日アクセス)
- 5) National Science Foundation CBET (Combustion and Fire Systems), https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=505699&org=CBET (2021年1月21日アクセス)
- 6) European Commission, “Horizon2020 (JTI-CS2-2018-CfP08-ENG-01-43, LC-SC3-RES-12-2018, LC-SC3-NZE-4-2019 etc.)”, https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/main/h2020-wp1820-energy_en.pdf (2021年1月21日アクセス)
- 7) U. S. Department of Energy, “H2@Scale”, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale> (2021年1月21日アクセス)
- 8) Kobayashi, H., et al. “Science and technology of ammonia combustion.” *Proceedings of the Combustion Institute* 37, no. 1 (2019): 109-133. DOI: [10.1016/j.proci.2018.09.029](https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029)
- 9) IEA, “The future of hydrogen” (2019), <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (2021年1月21日アクセス)
- 10) 経済産業省『新国際資源戦略』(2020), <https://www.meti.go.jp/press/2019/03/20200330009/20200330009.html> (2021年1月21日アクセス)
- 11) グリーンアンモニアコンソーシアム, <https://greenammonia.org/> (2021年1月21日アクセス)
- 12) 日本エネルギー経済研究所『IEEJ アウトルック2020-2050年に向けた展望と課題』(2020), https://eneken.ieej.or.jp/whatsnew_op/191015teireiken.html (2021年1月21日アクセス)
- 13) P. Debiagi et al. “Machine learning for predictive coal combustion CFD simulations — From detailed kinetics to HDMR Reduced-Order models,” *Fuel* 274 (2020): 117720. DOI: [10.1016/j.fuel.2020.117720](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117720)
- 14) P. Kapus, et al., “Passenger car powertrain 4.x – from vehicle level to a cost optimized

2.1

- powertrain system”, *41st International Vienna Motor Symposium*, (2020)
- 15) Thomas Pauer, et al., “H2 ICE for Future Passenger Cars and Light Commercial Vehicles”, *41st International Vienna Motor Symposium* (2020) ,
<https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/h2-ice-for-future-passenger-cars-and-light-commercial-vehicles> (2021年1月21日アクセス)
 - 16) Otmar Scharrer, et al., “Uncompromisingly fun to drive thanks to synthetic fuel blend”, *40st International Vienna Motor Symposium* (2019) ,
<https://www.vdi-nachrichten.com/shop/40-internationales-wiener-motorensymposium-15-17-mai-2019/> (2021年1月21日アクセス)
 - 17) 古野志健男, 「自動車用内燃機関は消えていくのか?-SIP革新燃焼からの提案と方向性-」『JSME 関西支部第93期定時総会講演会講演論文集』 no. 184-1 (2018): 107-111, <https://www.kansai.jsme.or.jp/soukai93/program/93programHP20180209.pdf> (2021年1月21日アクセス)
 - 18) W. F. Piock, et al., “Delphi Technologies Next Generation GDi-System – improved Emissions and Efficiency with higher Pressure”, *40th int. Vienna Motor Symposium* (2019) ,
https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Documents/Motorensymposium/Tagungsberichte/40_2019.pdf (2021年1月21日アクセス)
 - 19) 相澤哲哉他, 「逆デルタ噴射ディーゼル噴霧火炎の紫外自発光・紫外吸収・輝炎3種同時高速撮影」『自動車技術会春季大会』(2018) , https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=201802221221031112 (2021年1月21日アクセス)
 - 20) F. Steinparzer, et al., “The New 3- and 4-Cylinder diesel Engines from the BMW Group – NEXT Generation Modular”, *26th Aachen colloquium* (2017) : 111-130
 - 21) 渡辺裕樹他, 「ディーゼルエンジンの筒内火炎挙動解析に基づく熱発生率制御と排気特性の改善」『自動車技術会論文集』 48巻2号 (2017) : 233-239. DOI : [org/10.11351/jsaeronbun.48.233](https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.48.233)
 - 22) R. Bruck, et al., “Innovative Catalyst Substrate Components for Future Passenger Car Diesel Aftertreatment”, *26th Aachen colloquium* (2017) : 1075-1096
 - 23) G. Rosel, et al., “System Approach for a Vehicle with Gasoline Direct Injection and Particulate Filter for RDE”, *39th International Vienna Motor Symposium* (2018)
 - 24) R. Sellers, et al., “Optimising the Architecture of a 48V Mild-hybrid Diesel Powertrain”, *26th Aachen colloquium* (2017) : 1309-1325
 - 25) 草鹿仁, 「ドイツFVVに見る産学官連携」『ENGINE REVIEW』 4巻2号 (2014) , <https://docsplayer.net/108209460-Society-of-automotive-engineering-of-japan-vol-4-no-contents-column-messe-frankfurt-で徒然なるままに感じたこと-佐藤唯史-編集委員-1-hat-i-felt-at-messe-frankfur.html> (2021年1月21日アクセス)
 - 26) ゼロエミッションモビリティパワーソース研究コンソーシアム,
<https://zemconso.jp/articles> (2021年1月21日アクセス)
 - 27) OFFICE of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, “Co-Optima”, <http://energy.gov/eere/bioenergy/co-optimization-fuels-engines> (2021年1月21日アクセス)
 - 28) Horizon 2020, <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en> (2021年1月21日アクセス)
 - 29) EAGLE, <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/green->

vehicles/eagle (2021年1月21日アクセス)

30) FLEXnCONFU, <https://flexnconfu.eu/> (2021年1月21日アクセス)

31) Soteris A Kalogirou, "Artificial Intelligence for the Modeling and Control of Combustion Processes : A Review," *Progress in Energy and Combustion Science* 29, no.6 (2003) : 515-66, <https://ktisis.cut.ac.cy/handle/10488/162> (2021年1月21日アクセス)

32) 細谷功『具体と抽象』(dZERO出版、2014) ,
<https://book.impress.co.jp/partner/items/001461.shtml> (2021年1月21日アクセス)

33) ECN, <https://ecn.sandia.gov/> (2021年1月21日アクセス)

34) HEDGE-IV Consortium,
<https://convergecfcd.com/press/join-hedge-iv-consortium> (2021年1月21日アクセス)

35) SwRI, <https://www.swri.org/consortia/clean-high-efficiency-diesel-engine-vii-chede-vii>
(2021年1月21日アクセス)

36) Cavitation and Multiphase flows Workshop, organized by (IICR) ,
<https://iicr2020.net/> (2021年1月21日アクセス)

37) LES4ICE (2020) , <http://www.rs-les4ice.com/> (2021年1月21日アクセス)

38) Symposium for Combustion Control,
<http://www.mechatronics.rwth-aachen.de/cms/Mechatronics/Forschung/~hbnw/SCC/lidx/1/> (2021年1月21日アクセス)

39) The Fuel Science Center, <http://www.fuelcenter.rwth-aachen.de> (2021年1月21日アクセス)

40) FVV, <https://www.fvv-net.de/en/> (2021年1月21日アクセス)

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分