

## 2.6 エネルギー分野の基盤科学技術

### 2.6.1 反応性熱流体

#### (1) 研究開発領域の定義

本領域では、反応性熱流体、いわゆる燃焼に関する科学、技術、研究開発を取り扱う。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である。応用としてエンジン燃焼、ガスタービン燃焼、航空宇宙推進、燃焼式工業炉、微粉炭燃焼などが挙げられる。エンジン燃焼に関しては、高効率化とクリーン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、制御技術も含めた内容が対象である。反応性熱流体は、工学基礎技術として今後も必要な科学技術の中核分野である。

#### (2) キーワード

エンジン、ガスタービン、工業炉、化学反応、NO<sub>x</sub>、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、燃焼合成

#### (3) 研究開発領域の概要

##### [本領域の意義]

カーボンニュートラルの実現に向けた取組が進んでいるが、燃焼技術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航空宇宙推進分野、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質量エネルギー密度が大きく、エネルギーキャリアとして移動体や大きな仕事率が必要な幅広い用途に用いられる。一方、化石燃料はCO<sub>2</sub>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世界的に喫緊の課題である。

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。再生可能エネルギーのみの利用へシフトしようとする動向と同時に、実際には燃焼研究投資が継続しているという事実がある。2020年10月、当時の菅首相による2050年カーボンニュートラル（以下、CN）宣言を受け、国内産業界のCN化への意識が大きく変わり、具体的取組みが急増した。世界的には2021年11月のCOP26（グラスゴー開催）前後から脱炭素化動向が加速した。一方2022年2月に始まったウクライナ危機に端を発し、直近のエネルギー供給に不安が出ると、主として天然ガスの不足から、石炭や原子力への回避など、現実的対策へのシフトが世界的に進んでいる。一時的な世界動向に流されず、燃焼利用の一層の高効率化、低炭素化、CN燃料シフトに向け計画的な努力が望まれる。

##### [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た。その結果、再生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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>排出量が大いことから、燃焼利用時における熱効率向上がCO<sub>2</sub>排出量削減に直結する。日本の実用燃焼器

の熱効率は世界トップクラスにある。例示すると市販自動車ガソリンエンジンでは正味熱効率40%超（トヨタプリウス、ホンダシビック等2020年現在）、天然ガス焚き1500°Cコンバインドサイクルでは熱効率60%超・出力98万kW<sup>1)</sup>、空気炊き石炭ガス化炉1200°C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；以下SIP燃焼）が行われ、研究段階であるが目標であった正味熱効率50%（ガソリン機関51.5%、ディーゼル機関50.1%）を達成した。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、これに基づき燃料最適化・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）を主体にした、SIP燃焼の後継の連携研究に受け継がれ、研究開発で熱効率60%、さらに自動車業界から市販車での目標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°C級ガスタービンの研究開発が進み（2020が最終年度）、同成果を元に1650°C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<sup>2)</sup>、さらに水素専焼<sup>3)</sup>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。米国のDOE（Department of Energy）やEUのERC（European Research Council）では水素専焼だけでなく、水素・アンモニア混焼を対象に大型プロジェクト（DOEの例<sup>4)</sup>）が既に始まっている。

燃焼機器の高効率化と双壁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。特に運輸部門の燃焼機器利用時のCN化のためのCN燃料の研究開発や利用がある。CN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合成燃料（e-fuel）や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は、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して「H2@Scale」を2019年から実施している。米国では毎年約1000万トンの水素を主に天然ガスから水蒸気改質法で生産するが、その際発生する多量のCO<sub>2</sub>は未処理である。そのため、CCUSや再生可能電力による水電解からの低コストでの水素製造を目的として、H2@Scaleにて新たに2020年から「Hydrogen Program Plan」実証研究計画が発表された。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余剰電力のエネルギー貯蔵や、運輸部門に最適な質量エネルギー密度の高いCN燃料合成を狙い、e-fuelを利用する選択肢の有望性も急速に高まっている<sup>5)</sup>。

欧州では、2050年のCNを目指して運輸部門での液体e-fuelの確立と普及のために「eFuel Alliance」<sup>6)</sup>を発足、2022年時点で170社以上が加盟し活動している。e-fuelの課題は低コスト化や生産能力の拡大であり、研究開発が欧州や日本で盛んになっている。その観点で、e-fuelは、まずSAF（Sustainable Aviation Fuel）として航空機での活用が期待されている。一方、非可食性次世代バイオ燃料（植物繊維利用のバイオエタノール等）の低コスト化と生産量向上の研究開発も米国を中心に推進されている。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、各種CN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<sub>x</sub>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の課題に解決の目処がたった<sup>7)</sup>ため、世界的に従来例のない急速な拡がりを見せている。これらの成果は日本の第6次エネルギー基本計画（2021）のみならず国際エネルギー機関（IEA）のレポート<sup>8)</sup>にも記載された。さらに日本の科学技術イノベーション政策の大方針である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に策定された「新国際資源戦略」において「燃料アンモニア」として位置づけられた。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）の枠組みによる活動も始まっている。アンモニアの供給側として、サウジアラビアや

## 2.6

エネルギー分野の  
基盤科学技術

オーストラリアが名乗りをあげ、その低炭素化（ブラウンからブルーへ、さらにグリーンアンモニアへ）も大きなトレンドとなりつつある。アンモニアを液体燃料として利用するアンモニア噴霧燃焼に関する研究開発も開始されている。基礎研究では、液体アンモニアの大きな蒸発潜熱による局所的低温化、噴射直後に相変化を行うことで微粒化が促進する減圧沸騰微粒化等、アンモニア燃料噴霧燃焼の特性が明らかになってきている。応用研究では、アンモニア噴霧専焼のガスタービン開発開始がIHIから発表されている。

石炭燃焼は他燃料に比べ単位発熱量当たりCO<sub>2</sub>排出量が相対的に大きい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。中国も2021年9月に開催された国連総会で、今後は海外で新たな石炭火力発電プロジェクトは行わないと表明した。中国と米国の先進石炭技術コンソーシアム（Advanced Coal Technology Consortium (ACTC)）で行われた石炭利用技術開発の第2フェーズも2020年で終了した。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年頃と想定されている<sup>9)</sup>。米国DOEは、安全、安定で信頼性のある電力供給のための石炭発電技術開発のために、Coal FIRST (Flexible, Innovative, Resilient, Small, Transformative) と呼ばれる研究開発プログラムを企画している。2020年10月には、ネットゼロカーボン発電および水素製造に関する4件のプロジェクトに総額約880億円の資金提供を行っている<sup>10)</sup>。CONSOL Energy社、イリノイ大学、EPRI、Wabash Valley Resourcesが、それぞれ、CO<sub>2</sub>回収型加圧流動層燃焼（300MW石炭火力ベース）、USCボイラ・天然ガスタービン・燃焼後CO<sub>2</sub>回収・CO<sub>2</sub>利用統合プロセス、石炭・バイオマス共ガス化、バイオマスガス化によるCO<sub>2</sub>ネガティブエミッションでの水素製造に取り組んでいる。欧州連合（EU）では、Research Fund for Coal & Steel (RFCS) が、石炭および鉄鋼産業の競争力を高めるための様々な研究開発プロジェクトを支援している<sup>11)</sup>。2021年に開始したプロジェクトとして、流動床ボイラへの最大混焼率100%までの廃棄物由来燃料の導入とCO<sub>2</sub>回収の導入を1 MWthパイロットプラントおよび実機にて実証する研究開発計画（2021-2024年、Darmstadt大、Sumitomo SHI FWなど）、既設石炭火力発電所のバイオマスや水素混焼設備への改造や、閉鎖した石炭火力の設備を有効利用したe-fuelsの製造設備を構築するためのケーススタディ（2021-2024年、Stuttgart大、Mitsubishi Power Europe GMBHなど）等がある。日本においても、石炭火力への大規模アンモニア混焼技術開発を含む「燃料アンモニアサプライチェーンの構築プロジェクト」やケミカルルーピング燃焼技術やCO<sub>2</sub>分離・回収型ポリジェネレーションシステムの実用化を目指す「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発」等のNEDO大型プロジェクトが相次いで採択されており、石炭関係の研究開発は引き続き行われている。

輸送セクタを担う自動車産業界では特に欧州における政治主導の極端な規制方針が、米国に波及する形となっている。欧州グリーンディールの一環で、2021年7月14日に欧州委員会（EC）から「Fit for 55 Package」包括法案が提案された。狙いは、2030年に1990年比で欧州連合（EU）全体でのCO<sub>2</sub>排出量55%低減である。中でも「乗用車および小型商用車のCO<sub>2</sub>排出基準の改正案」は、実質2035年にエンジン搭載車の新車販売を禁止するもので、CN燃料対応車やPHEVなどを排除する法案である。その後2022年6月、欧州議会、欧州閣僚理事会でも支持されたが、ECがe-fuelを含むCN燃料技術やPHEV技術の進捗を考慮し2026年に見直しを実施すると確認した<sup>12)</sup>。これらはEUが対象であるが、成立すれば世界への波及は免れない。また、欧州における次期排出ガス規制案Euro7（2025年施行予定）が2022年11月に発表され、全ての燃料タイプの車に対して同じ基準で汚染物質排出量の制限が強化されている。欧州の新車市場は世界の約12%だが、今後のエンジン搭載車の研究開発に大きな影響を及ぼすとみられている。

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60%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、CO<sub>2</sub>排出量、排出ガスのさらなる大幅なクリーン化と低減が必要とされている。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。注目動向として、欧州の自動車業界を中心に高効率化・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CO<sub>2</sub>排出量評価への転換がある。CN達成に向けてBEV一辺倒からe-fuelなどCN燃料対応車や電動車に特化した高効率なエンジン搭載車などの必要性も公に訴求されるようになった。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

##### ■自動車業界動向

輸送セクタのうちでも本セクタは、膨大な車両数によるCO<sub>2</sub>排出量への影響が大きい。また、日本の産業構造への影響が大きい。

##### • 燃焼利用パワートレイン新動向

再生可能エネルギー由来の電力が約40%と高い欧州と、日本(約20%)ではBEVのCO<sub>2</sub>低減効果が異なる。世界の平均電力ミックスで試算すると、BEVのLCAでのCO<sub>2</sub>をエンジン車よりも少なくするには、11万km以上走行しなければならない<sup>13)</sup>。そのため、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 Powertrain<sup>14)</sup> コンセプトとして、エンジン(Dedicated Hybrid Engine : DHE)、モーター、メカニカルトランスミッションそれぞれにCO<sub>2</sub>低減を分担させた開発が提案され、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されている。

##### • 燃料CN化

世界中で水素生成と活用技術が重要視されている。水素生成技術は、高エネルギーを要する水蒸気改質から水電解による量産化実証が加速。水電解も従来のアルカリ水電解から、より高効率なPEM(Polymer Electrolyte Membrane)型水電解やSOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)型水電解の研究開発が盛ん。活用先として、燃料電池車(FCEV)や水素燃焼エンジン。FCEVは、近年特に大型商用車(トラック、バス)<sup>15)</sup>や農建機のパワートレイン用として研究開発が進む。水素燃焼エンジンは、乗用車から大型商用車まで広い適用範囲を想定して開発が加速している。

##### • エンジン開発

SIP革新的燃焼技術での熱効率50%達成をベースに、内燃機関研究組合AICEが中心となり、さらなる高効率化、具体的には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燃焼コンセプト開発が進行している。欧米でも、DHEで熱効率50%達成に向けた燃焼研究が盛んになっている。その基本コンセプトは、空気過剰率 $\lambda=2$ 前後を狙った過給直噴スーパーリーンバーンである。具体的技術として、日本では、DHEの一例として日産自動車がSTARC(Strong Tumble and Appropriately stretched Robust ignition Channel)燃焼コンセプトを発表した<sup>16), 17)</sup>。シリーズHVであるe-POWER用の発電専用エンジンとして開発され、発電用として定点運転と排熱回収を含めると正味熱効率50%を達成できるという。米国Aramco研究所では、正味熱効率50%に向けてガソリン自着火コンセプトGDCl(Gasoline Direct Compression Ignition)を提案している<sup>18)</sup>。高圧縮比、吸気加熱、内部ホットEGRを採用、高負荷ではノック回避のためコールドEGRと拡散燃焼を取り入れている。最新モデルでは熱効率46.5%と試算されている。

##### • 排ガス低減技術

乗用車用ガソリンエンジンでは、冷間始動時(-7°C規制等)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されている。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EHC<sup>19)</sup>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GPF<sup>20)</sup>の量産化が始まっている。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<sub>x</sub>、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<sup>21)</sup>。

#### • Euro7 法案

予定よりも遅れたが、2022年11月に発表された<sup>22)</sup>。ゼロエミッション車も含め、EU域内で販売されるあらゆる車種の全ての燃料タイプの車に同じ規制を課すとされている。同規制には亜酸化窒素の排出制限が含まれるなど汚染物質排出量の制限が強化されている。

#### • 水素燃焼エンジン

従来のエンジン技術を活用でき、再生可能エネルギー由来の水素を燃料として利用すればCNなエンジン搭載車となる。日本や欧州で研究開発が急増している。日本では、市販化を見据えてモータースポーツ分野の耐久レースにトヨタ自動車が、2021年から水素燃焼エンジン車で参戦している<sup>23)</sup>。また、2022年に開催されたパワートレイン国際会議の第43回ウィーンモーターシンポジウム (43rd International Vienna Motor Symposium) では、72件の講演中、水素燃焼エンジン関係の研究発表が12件もあり、前年より急増した。欧州での水素燃焼エンジン関連の開発キーワードは、「大型商用向け」「熱効率改善技術」「耐久性向上」「排ガス後処理技術 (NOx浄化)」「低コスト化」など。基礎研究の段階を経てかなり実用化に向けた量産開発に移行されている。基本的な燃焼コンセプトは、噴射圧約2~3MPaの低圧水素直噴方式で、空気過剰率 $\lambda = 2$ レベルの高過給スーパーリーンバーンが主流<sup>24), 25)</sup> となっており、それに尿素SCRが搭載される。

#### • CN 燃料

既存エンジンのハード構造をほぼそのまま活用でき、質量エネルギー密度が高い液体のCN燃料 (合成燃料: e-fuel、バイオ燃料等) の開発プロジェクトが国内外で盛んとなっている。日本では、2020年に自動車工業会と石油連盟によるCO<sub>2</sub>低減に関する共同研究 (AOIプロジェクト)<sup>26)</sup> がスタートし、2023年度から実証フェーズに入るとされている。また、2022年7月1日には、「次世代グリーンCO<sub>2</sub>燃料技術研究組合」<sup>27)</sup> が設立された。CN社会実現のため、バイオマスの利用、生産時の水素・酸素・CO<sub>2</sub>を最適に循環させて効率的に自動車用バイオエタノール燃料を製造する技術研究が推進される。e-fuelの効率的な生産技術や、非可食性植物 (繊維質利用) の収穫量向上技術の研究も含まれる。

欧州の第43回ウィーンモーターシンポジウムでは、ドイツのマックス・プランク化学エネルギー変換研究所などが、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>から「e-ガソリン」を製造するプロセスを紹介し、液体のCN燃料はCO<sub>2</sub>ニュートラルな化学電池 (Chemical Batteries) だと主張した<sup>28)</sup>。アメリカでは、バイオエタノール、バイオディーゼル燃料の低コスト化、量産体制を強化されている<sup>29)</sup>。

### ■基礎研究動向

固体燃焼の最近の新しい研究動向として、日本国内ではほとんど研究が行われていない鉄粒子を発電や工業炉の燃料として利用するための研究が欧州で行われている。燃焼関係の国際的な最新研究発表の場である第39回国際燃焼シンポジウム (バンクーバー, 2022/7/25-29) では、これまでの同シンポジウムにおいてはほぼ皆無であった鉄粒子の燃焼に関する発表が口頭発表4件、ポスター発表4件があり、今後増加することが予想されている。オランダのEindhoven University of Technologyでは、鉄粒子を燃料として使うための比較的大きなプロジェクトを立ち上げており、2030年に石炭火力発電所に実装することを目標としている<sup>30)</sup>。

### ■宇宙開発動向

2021年7月21日に日本は回転デトネーションエンジンの宇宙飛行実証に世界で初めて成功した<sup>31)</sup>。長年の研究開発により、デトネーションエンジンの実用化が進んでおりDOEは水素燃料を用いてデトネーションエンジンとガスタービンを組み合わせた新しい発電システムの開発プロジェクトを進めている。

## [注目すべき国内外のプロジェクト]

## 国内

- SIP「革新的燃焼技術」(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～)

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された。

- 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」(2019年3月、終了)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、技術開発・国際連携などを実施している。

- 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としている。

- 次世代グリーンCO<sub>2</sub>燃料技術研究組合

2022年7月設立。メンバーは、ENEOS、スズキ、SUBARU (スバル)、ダイハツ工業、トヨタ、豊田通商の6社である。CN社会実現のため、バイオマスの利用、生産時の水素・酸素・CO<sub>2</sub>を最適に循環させて効率的に自動車用バイオエタノール燃料を製造する技術研究が推進されている。

- NEDO「燃料アンモニアサプライチェーンの構築プロジェクト」<sup>32)</sup>

600億円規模。石炭火力へのアンモニア混焼に関する研究開発項目では、JERAとIHIが共同で実機ボイラ(碧南火力発電所4号機、発電出力:100万kW)を対象として、アンモニア20%混焼の実証試験を行う計画とされている。発電用実機石炭ボイラを対象として20%もの混焼率での実証試験は非常に大規模なアンモニア供給設備が必要となり、世界を見渡してもこのような大規模なアンモニア混焼試験計画は他には見られていない。日本のアンモニア関連研究開発が世界でも突出している。

- グリーンイノベーション基金事業/燃料アンモニアサプライチェーンの構築プロジェクト (NEDO)<sup>33)</sup>

アンモニアの利用拡大及び製造の高効率化・低コスト化等の各要素での技術的課題を解決することで、需要と供給が一体となった燃料アンモニアサプライチェーンの構築を目指すとしている。

## 海外

- Co-Optima (米国)

2030年までに自動車による石油の消費量を30%削減することを目標に、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が進められている。

- Horizon Europe (EU)

EU最大規模の研究開発予算。旧称Horizon 2020。省エネに関して、運輸(航空機、車両、船舶)のエンジン燃焼に関連する小テーマがある。多くのテーマで研究者ネットワークを支援する形をとっており交流が進行している。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(EAGLE)<sup>34)</sup>も進んでおり、追い上げが顕著である。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(FLEXnCONFU)<sup>35)</sup>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)」などが進行している。

- eFuel Alliance (EU)

2050年CN化を目指し運輸部門での液体e-fuelの確立と普及のためドイツを中心に2017年に発足した。2022年時点で自動車、部品、石油化学、航空、海運等業界を越えた170社以上が加盟し活動されている。

## (5) 科学技術的課題

### • 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の発生メカニズムを解明し、予測・回避する必要がある。こうした非定常燃焼挙動は複数の物理現象が連成する極めて複雑な現象であるため、詳細な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とされている。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<sup>36)</sup>。一般的なニューラルネットワーク (NN) に加え、近年では、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network : CNN) 手法を燃焼状態の予測に適用する例が見られる。未だ基礎研究が主体だが、燃焼制御分野において、AIが従来手法の代替となる可能性を有している。海外が先行している。

### • 新燃料の詳細化学反応機構の構築

アンモニアをはじめ、従来は燃料とは考えられ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である。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ている。

### • 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である。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とされている。また、各モデルを前述の新燃料に対応させる必要もある。

### • 液体燃焼の研究・開発動向

研究対象を限定した、複数の研究機関による連携研究 (Engine Combustion Network (ECN) サンディア国立研究所) や国際的な研究ワークショップ Turbulent non-premixed flames (TNF)、International Sooting Flame (ISF) 等) が引き続き進行している。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ている。Net-Zero-Carbonを背景として、添加物を加えた燃料の反応性に関する研究が引き続き報告されている。また、「燃料転換」をキーワードに、新しい燃料 (Polyoxymethylene Dimethyl ether; OME, Sustainable aviation fuel; SAF) と既存燃料の混合燃料に関する研究開発が進捗している。

### • 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。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とされている。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とされている。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である。

再燃している水素燃焼エンジン研究開発では、量産化に向けて異常燃焼制御と、消炎距離低下に起因する冷却損失増大を改善することが重要となっている。

### • CN燃料に関する課題

e-fuelでは、再生可能エネルギー由来電力からのH<sub>2</sub>やCO生成と、FT法等による合成燃料の大量かつ効

率的な製造が課題である。現在水素は主に、天然ガスや褐炭から水蒸気改質法で生成されており、消費エネルギーが大きい。また、アルカリ水電解でも多くの電気エネルギーを必要とする。近年は、高効率なPEM型水電解やSOEC水電解が先行研究段階にある。SOECの場合、H<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>を同時に電解できる共電解法も注目されており、変換効率は85%以上が可能である。

バイオ燃料に関しては、バイオエタノールやバイオディーゼルともに第2世代、あるいは先進的バイオ燃料と呼ばれる非可食性のバイオマスからの精製が重要視されている。課題は、間伐材等の食物繊維（セルロース）系バイオマスから糖化、発酵、蒸留という工程が必要で、多くの消費エネルギーが必要である。バイオディーゼル燃料では廃食油等も注目されているが、エンジンで使用できるように品質確保が大きな課題である。

#### • 固体燃焼の研究・開発動向

微粉炭燃焼研究ではLES (Large-Eddy Simulation) の燃焼場への適用が標準となりつつあり、詳細化学反応の取り扱い可能なフラームレットモデルの研究開発が活発化している。シミュレーションに人工知能を活用する研究も増加している。微粉炭燃焼フラームレットモデルでは、すす粒子の生成を考慮したモデルが開発されつつあるが、すす前駆体となる揮発分のモデル化にはまだ課題が多く、特に実験データが不足している。また、日本ではアンモニアと微粉炭の混焼に関する大規模な研究開発が実施されているが、アンモニア/固体燃料粒子の混焼に関する基礎研究例は少なく、今後は現象の詳細な理解による最適化が必要不可欠とされている。

#### • 機能性材料合成の研究・開発動向

ドイツ研究振興協会 (DFG) からのサポートを受けた、材料合成 (Spray Pyrolysis) (DFG SPP 1980 SpraySyn<sup>37)</sup>) に関連する研究開発が反応性流体に関して最もインパクトがある国際会議 (第39回国際燃焼シンポジウム) において多数報告があった<sup>38)</sup>。

### (6) その他の課題

#### • プログラムダイレクター人材の育成

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広く認識され、努力が継続されている。今後、国内の大型産学官連携をより成功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、俯瞰的な視点で捉える風土の醸成や、欧米プロジェクトに見られるプログラムダイレクター人材の育成が急務とされている。国費を大規模に投入する場合、民間のみの主導でなく、適宜、官や学からアドバイス役を配置する仕組みも必要とされている。この意味で欧米の成功例として、米・燃焼化学反応計算パッケージChemkin開発や、仏の航空宇宙・推進における産官学横断の包括的研究開発体系には学ぶ点が多い。

#### • 大規模産学連携事業の体制

前述の欧米での成功例に比して日本で足りない点は、プログラムディレクター、適切に選定された専門家によるアドバイザーの配置、異分野研究者・技術者の包括的協創といわれている。SIP第一期で良く機能したスキームが、以降の後継事業では必ずしも活かされていない。また基礎研究者と応用技術者との視点の相違や、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、それをアドバイザーが高所から補助する体制を大規模産学連携事業に導入することが、日本の研究開発力向上のために必須とされている。

#### • 若手科学者の国際研究経験

国内においては、新型コロナウイルス感染症の流行による海外への渡航制限の期間は、若手科学者の国際研究経験が困難な時期であった。アジア特定国以外はいち早くコロナ後の対応を開始しており、今後は重点的かつ迅速に巻き返しを図る必要がある。



(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	◎	→ 二極化	<ul style="list-style-type: none"> <li>●研究の質はかつて世界トップ水準。現在は二極化傾向。アンモニア直接燃焼では基礎～応用に至る広範なインパクト創出に成功。基礎研究(原著論文)も世界的インパクト、日本の国際プレゼンス向上に大きく貢献。一方で在外研究経験の機会がない研究者増加、論文数低下は日本全体の傾向と一致。</li> <li>●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、液体・固体・気体燃料の燃焼に関連する研究が進行中。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●アンモニア燃焼関係の国家助成、エンジンの燃料転換GI事業など、産官学共同で長期的に取り組む研究が開始されており、大きな期待。他にも自工会と石連によるCO<sub>2</sub>低減に関する共同研究AOIプロジェクト、次世代グリーンCO<sub>2</sub>燃料技術研究組合の設立等、自動車と石油産業が一体になったCN燃料研究の加速など注目動向あり。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。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投入。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。</li> <li>●ECN等の基礎研究関連人材の豊富さと交流、および各国立研のスパコンや高エネルギーX線解析などが積極活用出来る環境にある。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。特定の機関が大きな役割(例:ガスタービン研究ではジョージア工科大等)。</li> <li>●DOEの水素エネルギー戦略:Hydrogen Program Plan(2020)で、高効率な低コストな水素製造研究開発を推進中。</li> <li>●CNなエンジン燃焼用に、バイオエタノール、バイオディーゼル燃料の製造技術開発に注力。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●2014～2020年のHorizon 2020により多国間の研究者ネットワーク形成、研究の質も高い。続く2021～2027年のHorizon Europeにおいて、水素燃料利用の一部として、Dry Low NOx Combustion関連プロジェクトの公募。European Research Council(ERC)などのすす生成(SOTUF)、Aviationにおけるすす生成に関するプロジェクト。</li> </ul> <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●アーヘン工科大学を中心に2015年からSymposium for Combustion Control<sup>39)</sup>開催。10カ国、100名を越す参加があり、拡大方向で継続中。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。</li> </ul> <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。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。</li> <li>●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、マルチ旋回ノズルを用いた噴霧燃焼器(MICCA burner)に対する数値解析を用いた研究が発表されている。</li> </ul> <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> <li>●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。</li> <li>●微粉炭燃焼研究では、中国の大学との共同研究が活発。</li> </ul>

	応用研究・開発	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●ドイツFVV (Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V.) 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。</li> <li>●自動車や航空機等の運輸部門でのエンジン燃焼のCN化のために、170社以上が参画したeFuel Alliance<sup>6)</sup> が、液体のe-fuel市場の確立と普及のために勢力的に活動。</li> </ul> <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●欧州委員会が取り纏める短期集中型+テーマを絞り込んだ産学プロジェクトが常に並行して進み、活発に活動。</li> <li>●独ではFVV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体制。電動化の動向：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、ゼロCO<sub>2</sub>、熱効率向上、低排出ガス (Regulation)、Controls、Sensorsに加え、e-fuel (合成燃料) や燃料電池の研究テーマにもリソースを投入している。</li> <li>●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。</li> </ul> <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> </ul> <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●アンモニア燃焼について、Cardiff大学、Oxford大学、Siemensが InnovateUK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。</li> </ul>
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●燃焼への大型予算が措置され、燃焼を主題としたState Key Laboratory 認定が多数。これらのラボから欧米主要研究拠点に多数の人材を派遣。一部は定住、その他は欧米から帰国し中国から顕著な業績を創出、部分的には世界をけん引。在外研究の経験者が減る一方の日本と対照的。</li> <li>●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。</li> <li>●潤沢な研究資金を背景に、微粉炭燃焼では世界の論文発表件数の半分以上を中国が占め、質が高い。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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、レベルは確実に向上。</li> <li>●中国製造2025 (2016~2049年)：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。</li> <li>●毎年自動車用エンジンの展示会 Engine China を実施。2022はが10月に開催予定。</li> <li>●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。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>●研究者の質は高いが、燃焼コミュニティの規模が小さく、研究費削減もあり若手研究者参入が少ない。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●国産ロケットの開発などが報道されているが、詳細情報は得られていない。</li> </ul>

その他の 国・地域 (任意)	基礎研究	△	↘	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●伝統的に基礎燃焼研究に強みがある。産炭国であることを背景に、褐炭を用いた緩慢酸素燃焼の研究が活発であった。直近は燃焼研究者人口の減少が顕著。</li> </ul> <p>【サウジアラビア】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●2008年創立の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、基礎燃焼研究の世界トップ拠点の一つとなった。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トップ研究者グループをサポート、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)アンモニア供給事業への参入、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。突出した業績を有する若手研究者を輩出し、発展が顕著。サウジアラムコは2020年9月に世界初のブルーアンモニア輸出を日本向けに実施。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<p>【オーストラリア】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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大型プロジェクト進行。</li> </ul>

(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

- ・火力発電（環境・エネ分野 2.1.1）
- ・持続可能な大気環境（環境・エネ分野 2.9.2）

### 参考・引用文献

- 1) 正田淳一郎「特集 発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望：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) : 434-437., [https://doi.org/10.1299/jsmemag.119.1173\\_434](https://doi.org/10.1299/jsmemag.119.1173_434).
- 2) 高村啓太, 他「J形ガスタービンの運転実績をふまえた1650℃級JAC形ガスタービンの開発」『三菱重工技報』56 巻 3 号 (2019) : 2-10.
- 3) 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), 川崎重工業株式会社, 株式会社大林組「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」NEDO, [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101337.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101337.html), (2023年1月29日アクセス) .
- 4) Office of Fossil Energy and Carbon Management, “Additional Selections for Funding Opportunity Announcement 2400: Fossil Energy Based Production, Storage, Transport and Utilization of Hydrogen Approaching Net-Zero or Net-Negative Carbon Emissions”, U.S. Department of Energy, <https://www.energy.gov/fecm/articles/additional-selections-funding-opportunity-announcement-2400-fossil-energy-based>, (2023年1月29日アクセス) .

- 5) Otmar Scharrer, et al., “Uncompromisingly Fun to Drive thanks to Synthetic Fuel Blend”, *Fortschritt-Berichte VDI* 12, no. 811 (2019) : 84-102., <https://doi.org/10.51202/9783186811127>.
- 6) eFuel Alliance, <https://www.efuel-alliance.eu>, (2023年1月29日アクセス) .
- 7) Hideaki Kobayashi, et al., “Science and technology of ammonia combustion.” *Proceedings of the Combustion Institute* 37, no. 1 (2019) : 109-133., <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.
- 8) International Energy Agency (IEA), “The Future of Hydrogen: Seizing today’s opportunities”, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, (2023年1月29日アクセス) .
- 9) 一般財団法人日本エネルギー経済研究所 (IEEJ) 「IEEJ Outlook 2022 : カーボンニュートラルへの挑戦と課題」 <https://eneken.ieej.or.jp/data/9863.pdf>, (2023年1月29日アクセス) .
- 10) Office of Fossil Energy and Carbon Management, “Project Descriptions: Coal FIRST Initiative Invests \$80 Million in Net-Zero Carbon Electricity and Hydrogen Plants”, U.S. Department of Energy, <https://www.energy.gov/fe/project-descriptions-coal-first-initiative-invests-80-million-net-zero-carbon-electricity-and>, (2023年1月29日アクセス) .
- 11) European Commission, “Synopsis of RFCS Projects 2018-2021”, [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/4c031563-f4ae-4e73-b01d-67aefe88bad6\\_en?filename=synopsis\\_of\\_rfcs\\_projects\\_2018-2021.pdf](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/4c031563-f4ae-4e73-b01d-67aefe88bad6_en?filename=synopsis_of_rfcs_projects_2018-2021.pdf), (2023年1月29日アクセス) .
- 12) Johanna Store, “Fit for 55 package: Council reaches general approaches relating to emissions reductions and their social impacts”, European Council, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/06/29/fit-for-55-council-reaches-general-approaches-relating-to-emissions-reductions-and-removals-and-their-social-impacts/>, (2023年1月29日アクセス) .
- 13) Volvo Car Corporation, “Carbon footprint report: Volvo C40 Recharge”, <https://www.volvocars.com/images/v/-/media/Market-Assets/INTL/Applications/DotCom/PDF/C40/Volvo-C40-Recharge-LCA-report.pdf>, (2023年1月29日アクセス) .
- 14) P. Kapus, et al., “Passenger Car Powertrain 4.x -from Vehicle Level to a Cost Optimized Powertrain System”, 41st International Vienna Motor Symposium, 22.-24. April 2020, [https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/41\\_Symposium\\_2020/Material\\_Temp/Programme\\_2020.pdf](https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/41_Symposium_2020/Material_Temp/Programme_2020.pdf), (2023年1月29日アクセス) .
- 15) T. Wintrich, et al., “2022: The Launch of the First Bosch Fuel Cell System”, 43rd International Vienna Motor Symposium, 27.-29. April 2022, [https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/43\\_Symposium\\_2022/Material\\_Temp/Programme\\_en\\_2022.pdf](https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/43_Symposium_2022/Material_Temp/Programme_en_2022.pdf), (2023年1月29日アクセス) .
- 16) T. Tsurushima, “Future Internal Combustion Engine Concept Dedicated to NISSAN e-POWER for Sustainable Mobility”, 29th Aachen Colloquium, 5.-7. October 2020, <https://www.aachener-kolloquium.de/en/conference-documents/delayed-manuscripts/2020.html>, (2023年1月29日アクセス) .
- 17) 日産自動車株式会社「日産自動車、次世代「e-POWER」発電専用エンジンで世界最高レベルの熱効率50%を実現」 <https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/release-27e779be9766a0ad5ef748eac51b39b7-210226-01-j>, (2023年1月29日アクセス) .
- 18) Mark Sellnau, et al., “Pathway to 50% Brake Thermal Efficiency Using Gasoline Direct Injection Compression Ignition (GDCI) ”, *SAE International Journal of Advances and Current*

- Practices in Mobility* 1, no. 4 (2019) : 1581-1603., <https://doi.org/10.4271/2019-01-1154>.
- 19) R. Brück, P. Hirth and F. Jayat, “Innovative Catalyst Substrate Components for Future Passenger Car Diesel Aftertreatment System”, in *26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2017* (Aachener Kolloquium, 2017), 1075-1096.
- 20) G. Rösel, et al., “System Approach for a Vehicle with Gasoline Direct Injection and Particulate Filter for RDE”, *Fortschritt-Berichte VDI* 12, no. 807 (2018) : 336., <https://doi.org/10.51202/9783186807120-336>.
- 21) R. Sellers, et al., “Optimising the Architecture of a 48V Mild-Hybrid Diesel Powertrain”, in *26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2017* (Aachener Kolloquium, 2017), 1309-1325.
- 22) Sonya Gospodinova and Federica Miccoli, “Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality”, European Commission, [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_6495](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495), (2023年1月30日アクセス) .
- 23) トヨタ自動車株式会社「トヨタ、モータースポーツを通じた「水素エンジン」技術開発に挑戦」<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/35209944.html>, (2023年1月30日アクセス) .
- 24) P. Kapus, et al., “High Efficiency Hydrogen Internal Combustion Engine-Carbon Free Powertrain for Passenger Car Hybrids and Commercial Vehicles”, 43rd International Vienna Motor Symposium, 27.-29. April 2022, [https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/43\\_Symposium\\_2022/Material\\_Temp/Programme\\_en\\_2022.pdf](https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/43_Symposium_2022/Material_Temp/Programme_en_2022.pdf), (2023年1月30日アクセス) .
- 25) X. L. J. Seykens, et al., “The Hydrogen ICE for Heavy-Duty Applications: Towards Ultra-Low NOx Emissions”, 43rd International Vienna Motor Symposium, 27.-29. April 2022, [https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/43\\_Symposium\\_2022/Material\\_Temp/Programme\\_en\\_2022.pdf](https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/43_Symposium_2022/Material_Temp/Programme_en_2022.pdf), (2023年1月30日アクセス) .
- 26) 石油連盟「石油連盟－日本自動車工業会間のCO2低減に関する共同研究（AOIプロジェクト）について」[https://www.paj.gr.jp/paj\\_info/topics/2020/12/21-001908.html](https://www.paj.gr.jp/paj_info/topics/2020/12/21-001908.html), (2023年1月30日アクセス) .
- 27) トヨタ自動車株式会社「民間6社による「次世代グリーンCO2燃料技術研究組合」を設立」<https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/37543249.html>, (2023年1月30日アクセス) .
- 28) E. Jacob and R. Schlögl, “Liquid E-Fuels as Chemical Batteries”, 43rd International Vienna Motor Symposium, 27.-29. April 2022, [https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/43\\_Symposium\\_2022/Material\\_Temp/Programme\\_en\\_2022.pdf](https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/43_Symposium_2022/Material_Temp/Programme_en_2022.pdf), (2023年1月30日アクセス) .
- 29) 古野志健男「米国がe-fuelではなくバイオ燃料を選ぶワケ」日経XTECH, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00878/110500023/>, (2023年1月30日アクセス) .
- 30) IRON FUEL, <https://ironfuel.nl/>, (2023年1月30日アクセス) .
- 31) 名古屋大学「世界初！深宇宙探査用デトネーションエンジンの宇宙飛行実証に成功」<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2021/08/post-3.html>, (2023年1月30日アクセス) .
- 32) 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」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](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101502.html), (2023年1月30日アクセス) .
- 33) 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）「「グリーンイノベーション基金事業／燃料アンモニアサプライチェーンの構築プロジェクト」に係る実施体制の決定」<https://www.nedo>

go.jp/koubo/EV3\_100238.html, (2023年1月30日アクセス) .

34) Innovation and Networks Executive Agency (IANE), “EAGLE (Efficient Additivated Gasoline Lean Engine) ”, European Commission, <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/green-vehicles/eagle>, (2023年1月30日アクセス) .

35) FLEXnCONFU, <https://flexnconfu.eu/>, (2023年1月30日アクセス) .

36) 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) : 515-566., [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00058-3).

37) Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), “SPP 1980: Nanoparticle Synthesis in Spray Flames: Spray Syn: Measurement, Simulation, Processes”, <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/312959688>, (2023年1月30日アクセス) .

38) The Combustion Institute, “39th International Symposium on Combustion”, <http://www.combustionsymposia.org/2022/>, (2023年1月30日アクセス) .

39) Ing. Jakob Andert, “Special issue: Symposium for combustion control 2019”, *International Journal of Engine Research* 21, no. 10 (2020) : 1781-1782., <https://doi.org/10.1177/1468087420947532>.

## 2.6

### エネルギー分野の 基盤科学技術