

3.25 触媒

（１）研究開発領域の簡潔な説明

触媒は化学反応の反応速度を速める物質で、石油精製、エネルギーキャリア変換など燃料生産に関わる触媒から、化成品やアンモニア合成、ファインケミカルなど原材料生産のための触媒、発電所・工場の排気ガス、自動車・船舶等の排気ガスなどの浄化（排出低減・無害化）のための触媒など多岐にわたる分野である。

- 触媒の主要用途による分類
- 機能性化学品（ファインケミカル・高機能品、医農薬品）
- ポリマー合成（バルクケミカル）
- 資源転換・原料多様化（石油、天然ガス、バイオマス）、基礎化学品
- 環境浄化・自動車排ガス触媒
- 燃料電池用触媒
- 光触媒（有機物分解・浄化、人工光合成）

ここでは、この中から環境・エネルギー分野に密接する資源転換と排ガス触媒について主に触れる。光触媒については、CCUS、エネルギーキャリアの項でも、バイオマス転換についてはバイオマスの領域で、燃料電池触媒については燃料電池の項にも記載している。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

現在の我々の生活を支えるエネルギーのほとんどが石炭、石油、天然ガスであり、これらの精製、変換のほとんどには触媒反応が用いられている。石炭、石油からの燃料生産、化学品生産は歴史が古く、確立されたものがあり、今後、新たな技術が生まれることは少ないと考えられる。しかし、当面の間は我々の社会は石炭、石油、天然ガスに基づいたエネルギー社会を続けていくことには疑う余地はなく、より高いエネルギー効率の新たな科学技術が必要である。

化学産業を環境、資源利用効率、またはエネルギー効率的な観点からみると大きな改善の余地が残されている。前者としては、バイオマス転換やシェールガス利用など、新たな資源とリンクした新たな化学工業体系の構築が望まれており、後者としては、現行の官能基変換プロセスの高効率化、低環境負荷な原料を用いた新しい合成ルートの開拓、プロセスの安全性・経済性の向上などが求められている。さらには COP21 において、技術的には高いハードルの地球温暖化対策を前提とした目標が提唱された。CO₂ の削減のみならず、化学資源としての利用技術の開発についても触媒に期待される役割は大きい。

[動向]

触媒作用の研究は、19 世紀前半にロシアの化学者キルヒホッフやスウェーデンの化学者であるベルツェリウスがその作用に注目し、1901 年にドイツの F・W・オストワルトが触媒の定義を与えたときからいまままでに、多くの研究者によって続けられてきた。化学分野において人類最大の発明と言われる二重促進鉄触媒を用いるアンモニア合成反応は 1913 年にドイツのハーバー、ボッシュ、ミタッシュによって実用化され、現在では人工合成されるアンモ

ニアの8割以上は化学肥料として地球上の70億人余の人口の食料の大半を支えている。また、1920年代にはドイツのフィッシャーとトロプッシュによって、石炭から製造される合成ガス（水素と一酸化炭素の混合ガス）からガソリンや軽油などの液体炭化水素を合成する触媒反応が開発され、第二次大戦中はドイツでは年産数百万トンの液体燃料が石炭から生産されていた。原油の多くを占める重質油からガソリンや軽油など需要の多い軽質油へ変換する石油のクラッキング技術も1900年以前より研究は進められ、第二次世界大戦頃には触媒を流動移動層として用いる流動接触分解法(FCC)により石油のクラッキングは行われている。

触媒研究は野依（名古屋大学）、鈴木（北海道大学）、根岸（パデュー大学）らノーベル賞受賞者を輩出していることからわかるように、いわば日本のお家芸ともいえる研究分野であり、ファインケミカル、バルクケミカル合成の基礎研究は大きく発展してきた。不均一系触媒（固体触媒）、均一系触媒ともに世界をリードする数多くの基礎研究がなされ、実用化されている。とりわけ、固体酸化学（1920年代、東大のち早大小林ら）、排気ガス浄化（1980年代～、自動車各社、東工大岩本）、光触媒（1960年代～、東大藤嶋、東大堂免、理科大工藤ら）、ヘテロポリ酸（1970年代～、東大御園生、水野ら）、金の触媒作用（2000年代、首都大春田）、炭素炭素結合生成のための錯体触媒（1960～70年代、名古屋大野依、東レのち東工大辻、東工大溝呂木、北大鈴木、パーデュー大根岸ら）、において世界を制し、リードしてきた。

環境浄化に関わる触媒反応は、発電所、工場など固定発生源からの排気浄化と、船舶、鉄道、自動車など移動発生源からの排気の浄化に分けて考えられる。発電所、工場などからの排気の浄化技術は、我が国は1960～1970年代に大気汚染、水質汚染など我が国は深刻な公害問題を克服してきたことから、高いレベルの技術を有している。工場などから排出される窒素酸化物は、酸化チタン担持酸化バナジウム触媒などを用いてアンモニアと反応させて、無害な窒素と水に変えている。しかし近年飛躍的に発展した要素があるとも考え難い。移動発生源からの排気は、ガソリン乗用車からの排気は、1970年代より三元触媒によって改善が進められてきている。大気汚染には自動車の排ガス中などに含まれる窒素酸化物やスス（PM：Particulate Matter）が関与するが、CO、HC（炭化水素）の酸化のほか、NO_x還元も触媒の作用で同時に進行させる、コーゼライト担体上に活性アルミナ・白金・パラジウム（またはロジウム）を含む三元触媒が開発された。これは酸化と還元を同時に行う難しい反応として知られるが、我が国の自動車業界は世界に先駆けていち早く商品化まで進め、その後の自動車王国の礎を築いた。ディーゼルエンジンの排気浄化技術は遅れていて、尿素SCR（選択触媒還元）法やNO_x吸蔵型触媒などが実用化されてきたのは2000年以降である。省エネルギー社会が求められる中で、ディーゼルエンジン、ガソリンリーンバーンエンジンなどエネルギー効率の高いエンジンが注目を浴びているが、これらのエンジンに適合する排気浄化触媒の研究開発は急務である。

この分野は国内でも多くの研究者らによって取り組まれている。非貴金属化、担体効果の検討、DPF（ディーゼル微粒子捕集フィルター）の炭素燃焼活性向上など、直面している課題が多いため、今後の成長が望まれる分野である。海外では、日本では流行らなくなった古典分野の復興というのが見られる。アンモニア脱硝などというのは、論文では2000年台によく出ていて、日本発（岩本ら）の触媒にゼオライトの一種であるZSM-5に銅をイオン交

換した銅/ZSM-5がある。海外で、2004年ぐらいに突然、新しい銅/ゼオライト（Chabacite型）の特許が出て、実用化された。

また、世界各国に科学技術が広まるなか、触媒技術における材料戦略も重要になっている。例えば自動車排気ガス触媒（Pt,Rh,Pdなど）、燃料電池用電極触媒（Ptなど）には多量の貴金属類や希少元素が使われているが、これらの希少材料を使わない技術を開発しなければ、世界に広く普及する科学技術にはなり得ない。有機ハイドライド変換技術にもPt触媒は多用されているが普及が進んだ場合、資源量の問題が露呈するものと思われる。エネルギー・環境に関わる触媒は、その使用量もファインケミカル用途に比べれば桁外れであり、これからのエネルギー・環境に関わる触媒化学技術には材料の普遍性も重要な課題である。

近年、世界的に消費量が増えているのが天然ガス（主にはメタンおよび随伴するエタン・プロパン）である。シェール（頁岩）層からの天然ガスが今後のエネルギー社会には有望であるとの見解を2009年に米国が示し、シェールガス革命と呼ばれていることから、シェールガスを含む天然ガスへの依存度は高くなっている。しかし、天然ガスの利用技術は石炭、石油に比べれば歴史も浅く、その有効利用技術の発展は今後重要になってくる。米国では2008年からのグリーン・ニューディール政策から、化石資源依存からの脱出、再生可能エネルギーの導入が科学技術のテーマであった。しかし、2013年にシェールガスの大規模生産が進められるとシェールガス、シェールオイルへの期待からエネルギー価格も下がりエネルギーに対する注目は薄れている。2009年に設立したエネルギー先端研究計画局(ARPA-E)がリスクの高いエネルギー技術の応用研究に投資を行うなどの政策を行っているが、化学燃料に関するプロジェクトはElectro Fuels、Rebelsを除くと非常に少ない。一方で、豊富な天然ガスから合成ガスを作り、その合成ガスからメタノールを作成し、基幹物質とする化学が注目されている。メタノール・トウ・オレフィンを含むメタノールの需要の伸び（2014年度の世界需要6900万t/y、今後年率7%程度の伸びが予測されている）を反映し、メタノールの増産が進められている。メタノール合成触媒については現在も基礎から応用研究まで広く展開されている。代表的なCu/ZnO触媒についても未だに活性点の構造及び反応中間体について新たな提案がある。またメタノールの他、合成ガスから的高级アルコール製造用触媒についても報告が散見される。アルカリ金属（Csの例が多い）を添加した触媒に関する検討が多い。世界的には、2040年頃までエチレンの生産用は、年3%程度の増加が予測されており、従来法に加えメタン酸化カップリングを含む新技術の導入も検討されている。アンモニア・尿素については、大規模な新プラントの建設（米国・テキサス州、マレーシア・サバ州など）や生産量の増強（ベトナム、ロシアなど）が計画されている。プロピレンを中心とするアルカン脱水素（酸化的脱水素を含む）によるアルケン製造ならびにブテンからのブタジエン製造については、世界中で継続的に研究が行われている。ブタジエン製造については、アセトアルデヒドヒドを原料とするプロセスのパイロット試験が国内外で行われている。さらに、中国・米国では、ガスから合成軽油を製造するためのプロセスとして、継続的にフィッシャー・トロプシュ合成触媒に関する検討が行われている。Co系、Fe系触媒に関する検討が中心であるが、カーバイド系触媒に関する検討も精力的に行われている。これは、石炭の高度利用を意識している結果である。

非可食性バイオマス転換のための触媒として、セルロースの選択的な触媒分解、リグニン分解によるフェノール合成、ポリオールを選択水素化分解、フルフラール類の選択合成などが取組まれている。リグノセルロースの分解、糖類の分解については、触媒のみならず溶媒や反応条件（温度制御、超臨界あるいは亜臨界条件の適用など）の検討が広範に展開されている。福岡（北大）らの研究グループは、国際的に共同研究を展開し、優れた成果をあげている。

さらに、再生可能エネルギーへの期待が大きく、電力として導入されていく再生可能エネルギーを化学燃料に変え、貯める技術（エネルギーキャリア変換技術）にも注目が集まっている。有機ハイドライド、アンモニア、ギ酸などの水素化脱水素の研究が増えているが、これら化学燃料、化学品を生産するプロセスは、ほぼ触媒反応を利用したものである。一次エネルギーの多様化のなか、それに適合する化学プロセスの開発は常に必要であり、その中で触媒技術は中心的なものであるといえる。

日本の触媒製品市場は、価格ベースでは様々な貴金属を使用している自動車排ガス用途が6割を占める。他に割合が大きい分野は、石油化学品製造用触媒・石油精製用触媒であり、これらに高分子重合用触媒が続く。いずれの分野の出荷額も2012年から増加傾向にある。世界的にも、新興国の経済成長に起因する石油精製用触媒ならびに世界的な環境規制強化による環境保全用触媒の出荷額は堅調に伸びており社会的なニーズも高い。

エネルギーの主体が石炭、石油から天然ガス、バイオ資源、再生可能電力と変遷していく中で、新たなエネルギー源を基とした新たな変換プロセスを開発することが求められている。天然ガスからは水蒸気改質反応で合成ガスが得られるし、バイオ資源は発酵を経ればエタノール資源が得られる。余剰となった再生可能電力は水電解をすれば水素エネルギーに変換できる。これら新たなエネルギー源の利用は、石炭や石油のように100年もの研究開発の上に成り立っているものではなく、ごく最近に重要になってきたものである。大学における基礎研究のみならず、実証可能かどうか広い視野での研究が望まれる。新規なプロセスの開発のための時間、リスクは膨大であり、それを支える研究推進体制が必要である。

（３）注目動向

[新たな技術動向]

排ガス・希少元素関連

- 自動車排気ガス触媒の非貴金属化の研究開発は急速に進歩している。AgやCuを基とする合金、ナノポーラスNiCuMnO金属複合化合物、SrとCuを添加したPrMnO₃系酸化物などが報告されている。また、担体としても従来のAl₂O₃を基としたものから、近年実用化が進んでいるCe-Zr酸化物のもの、希土類酸化物、オキソ酸塩など多様な材料が見出されてきている。

天然資源利用・CO₂関連

- メタン脱水素カップリングや芳香族化は、熱力学的に高温、もしくはエネルギーを投入し

ないと進行せず、高い収率を実現することが困難な反応である。最近、海外では常識を破る方法でのチャレンジが散見される。有機金属グリーンケミストリーで有名なカナダのグループが、GaN がメタンのベンゼン化を進行させるとの報告や、高分散 Fe 触媒でメタンからエチレンやベンゼンをつくる反応を超高温（1000℃）で行い、高収率で、触媒劣化がないプロセスが提案されたり、またハロゲン化を経由する重合なども見直されている。また、マイクロ波や電場アシスト触媒反応が提案されているが、エネルギー効率の向上が課題となっている。

- メタノール・トウ・オレフィンについては、日本で 80 年代に流行り、現在では研究者は少なくなったが、欧米は分光学を使った基礎研究を 20 年ぐらい継続し、複雑な逐次・併発反応の原理を明確化しつつある。中国も、基礎研究から一気に実プラントまで実現している。2013 年以降、均一系の触媒、錯体触媒の分野でメタノールから低温、100℃以下、常圧で駆動する高活性な水素生成の触媒が幾つか報告されている。メタノール・トウ・プロピレンについては、シリコアルミノリン酸塩ゼオライト(SAPO-34 など)を中心に研究が展開されており、最近では、プロピレンとブテンの合計収率が 80%程度に達するなど一定の進展が見られる。
- CO₂の化学品への変換については、メタノール合成やカーボネート合成が継続的に行われていたが、最近のトレンドの一つとして、合成ガスやメタノールというメチル化剤の代わりに CO₂と水素の混合ガスを使う系が、錯体触媒分野で報告された。また、CO₂を酸化剤として用いる低級アルカン脱水素反応に関して報告が散見される。2000 年代から日本では、いくつかの研究グループの検討例もある。アルケンと CO が同時に得られる興味深い系であるが、反応速度のさらなる向上が課題である。また、CO₂とメタノールからジメチルカーボネートを経由してポリマー合成へと導く研究例も我が国から報告されている。

エネルギーキャリア・水素関連

- アンモニア合成触媒はエレクトライド担体を用いた Ru 触媒が注目を浴びたが、それ以外にも様々な担体が開発されている。さらに脱水素触媒の研究が進められている。
- 燃料電池分野では直接アンモニア燃料 SOFC（固体酸化物形燃料電池）、電解分野では有機ハイドライドの電解水素化など新たな分野の研究の進捗が見られ、エネルギー分野における触媒分野、電極触媒の領域の活性化が見られる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

天然資源利用・CO₂関連

- JST「低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出（ACT-C）」（～平成 27 年度）では、二酸化炭素等の安定小分子を資源として活用する反応の研究、工業的な利用につながる不斉炭素-炭素結合生成等の反応の研究、革新的な結合形成等により優れた特性や機能を有する π 電子系分子を創出する研究、 π 電子系分子に官能基導入を行う等による新機能を創成する研究などを対象としている。
- JST/CREST「多様な天然炭素資源を活用する革新的触媒の創製」（平成 27 年度～）では、化石資源消費の中で天然ガスへの依存が進むなか、天然ガスであるメタンから化成品や液体燃料を直接合成する方法を開発することを目指している。従来、メタンは水蒸気改質反応を経て合成ガス(CO+H₂)を経由すれば様々な化成品に転換できることは知られている

が、これを直接変換する革新的な触媒開発を目指している。

- NEDO「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発」で、既存の化学品などの製造プロセス（ナフサ分解プロセスなど）のグリーン化などを目標に研究開発が進められてきた。光触媒により水分解で創り出した水素と、産業界から排出され回収した二酸化炭素から、基幹化学品を合成するための触媒開発が開始されている。

排ガス・希少元素関連

- NEDO 希少金属代替省エネ材料開発プロジェクトは、希少元素の使用低減を目指すプロジェクトであり、産総研などにより、自動車排ガス触媒の Pt,Pd,Rh の低減、および近年担体として多量に用いられている CeO₂ などの使用量低減技術が見出されている。
- 文部科学省「元素戦略プロジェクト（拠点形成型）」（平成 24 年度～）のうち、触媒電池材料においては京都大学に拠点を置き、自動車排ガス触媒の非貴金属化等に取り組んでいる。経済産業省（NEDO）の「希少金属代替省エネ材料開発プロジェクト」と連携しながら触媒の研究開発に取り組んでいる。

バイオマス関連

- NEDO「非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発」（平成 25～31 年度）では、実用化に向けて高いコスト競争力を有する非可食性バイオマスから化学品までの一貫転換プロセスの構築を目指している。
- NEDO「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」はバイオマスのガス化、液体燃料化（BTL: Biomass to Liquid）を含んでいて、ガス化炉とフィッシャー・トロプシュ（FT）合成を組み合わせたシステムによって、建築廃材や間伐材からケロシンへの変換なども盛り込まれている。
- JST ALCA の特別重点プロジェクト「ホワイต์バイオテクノロジーによる次世代化成品創出プロジェクト」（平成 27 年度～）で、化石資源から脱却した次世代の化成品合成一貫プロセスの研究開発を狙って、従来技術とは非連続的な、バイオマスから化成品等を製造するホワイต์バイオテクノロジーの深化が進められている。

エネルギーキャリア・水素関連

- 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、化石燃料依存を低減し、再生可能エネルギーを最大限利用するために、水素のみでなくアンモニア、有機ハイドライドなどエネルギーキャリアに関する研究開発を行っている。触媒分野では有機ハイドライドの水素化脱水素反応装置の実証試験や、直接型アンモニア燃料電池の電極材料などが深く関連している。東京オリンピックまでに水素発電所の実現や、様々な水素実証実験も織り込まれている。
- JST/CREST「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」は、上記の SIP と同様に創設されたプログラムで、新規アンモニア合成触媒や、ギ酸からの水素製造、電解システムによるキャリア製造などを始めとして、エネルギーキャリア生産、利用に関する触媒技術の研究開発を行っている。
- NEDO「水素社会構築技術開発事業」で、千代田化工建設をはじめとする 7 社からなる貴企業グループを助成し、水素の製造・貯蔵・運搬に関して、風力・アルカリ電解による水素製造のモデル実験ならびに褐炭など海外未利用資源からの水素の製造・貯蔵・運搬を行い、国内で利用する水素差プラチェーンの構築に関する実証試験が行われている。

- 川崎水素戦略

川崎市は千代田化工建設㈱と有機ハイドライド技術に基づいた水素エネルギーシステムを構築することを提言し、この中には商用水素発電所なども含まれている。有機ハイドライド技術は、脱水素反応の白金触媒において、副反応抑制などの技術が鍵となっている。

- 経済産業省 革新的水素エネルギー貯蔵・輸送等技術開発（平成 28 年度から）では、再生可能エネルギー等からの低コスト・高効率で水素を製造する次世代技術ならびに水素を長距離輸送・大規模貯蔵が比較的容易なエネルギー媒体への高効率な転換技術の開発が行われている。

海外関連

- Audi e-gas プロジェクト

余剰電力と二酸化炭素からメタンを作り都市ガスへ導入する技術を開発している。現在は Audi 社が積極的に後押ししており 6MW クラスの実証実験が進められている。メタネーションはそれほど新しい技術ではないが、水電解からメタネーションまでシステムを変動電源の下で運用し、社会へ導入することを模索している。

- Electro Fuels（2010 年～）

米国エネルギー省によるプロジェクトであり、余剰電力から液体炭化水素燃料を生産する技術の構築を狙い、生物電気化学的手法を応用することを検討している。電気エネルギーを用いる方法、水電解から得た水素を還元剤に用いる方法の二通りの方法を用いて、CO₂の炭化水素燃料化を目指している。ドイツの e-gas プロジェクトが実証試験の大規模化が中心であるのと比較すると、ElectroFuels は基礎レベルの研究を目指していて、実証試験レベルの技術が見出せているとは言い難い。

（４）科学技術的課題

〔課題（ボトルネック）〕

一般に不均一系触媒の活性・選択性は、均一系触媒よりも劣るとされるが、最近では均一系と同程度あるいはそれらを凌駕する触媒能を有するものが見出されつつある。不均一系触媒の研究は理論的な体系化が難しく、均一系触媒は大型プロセスに向かないなど、均一系触媒、不均一系触媒にはそれぞれ長所・短所があり、それらの長所を併せ持つような触媒を開発する必要がある。ただ単に、分離・回収・再使用ができるというだけでなく、均一系触媒と同等あるいはそれらを凌駕する活性・選択性を有し、分離・回収・再使用が容易な触媒を開発することが必要である。そのためには、均一系触媒研究者と不均一系触媒研究者のより密な連携をはじめ、多様な分野間の連携が必要となる。

触媒化学分野に直結した領域に電気化学（電極触媒）がある。これらは、本来、界面での電子の授受があるかないか、反応生成物が蓄積するか定常的に流通するかどうかなど、僅かな違いがあるのみで、本質的には固液界面での表面化学反応を使いこなすのが鍵となる領域である。

また、プロセス工学との連携は重要であり、マイクロリアクターの採用なども積極的に検討する必要がある。最近、マイクロフローリアクターによる医薬品化合物を含む複雑化合物の合成例が報告され始めており、中には、不均一固定化触媒だけで医薬有効成分を合成した

例もある。さらにナノ粒子の合成など触媒を含む機能性材料の合成に有用なツールとして利用されている例も増加している。

さらに基礎的な取組として熱力学についても触媒分野や電池分野で重要となる濃厚系を記述する新たな理論体系が必要と考える。理論計算に基づいた反応メカニズムの提言ができる研究者との協調は重要である。界面化学反応の理論計算は現在最も成長している計算機化学分野であるが、萌芽的レベルであり、不均一系の触媒のモデル化などで課題が多い。また理論計算の結果を裏付ける、基礎科学的な実験研究者も必要である。

触媒化学領域は、触媒のナノ構造を構築し機能を発現させることが、ナノテクノロジーが謳われた頃からの研究のトレンドであり、微細な構造の触媒を構築する技術は大学等に十分な蓄積がある。これらを現実的にエネルギー・環境に直接関与する触媒に応用するためには、ナノ構造制御を得意とする研究者、実用触媒の性能評価が得意な研究者が連携して研究を推進できるような枠組みも必要である。

[今後取組むべき研究テーマ]

我が国が利用する化石エネルギーが、石油中心から天然ガス（シェールガス）などに変わりつつあるので、この有効利用は重要である。シェールガスの他燃料への変換反応や、シェールガスからの化学品生産（メタンに代表される低級アルカンからのブテン・ブタジエン・BTX合成・重質炭化水素資源の高効率転換及び脱硫プロセスなど）は、水蒸気改質反応を通して行わなければならない、他の反応経路の科学技術は未成熟である。特に、メタンについては、直接変換が重要である。また、中国・北米で大規模な生産が進められているメタノールについて、我が国ではその化学的利用のための触媒開発が遅れており、産業界も含め危機感を持った研究開発が必要である。

非可食性バイオマス、木質系バイオマス資源の有効利用は今後重要になってくる。欧州でのエネルギー需給におけるバイオマス資源の割合は高い。発酵を経る生物的手法のみならず、ガス化、液体燃料化による化学的なバイオマスの直接変換技術の研究開発は今後重要である。例えば、非可食性バイオマス（セルロースやリグニンなど）の発酵によって得られた低濃度エタノールをダイレクトに水蒸気改質する反応は吸熱反応であり、これにより高濃度水素へと一段で転換可能である。このための触媒は現在 400℃以下でも活性を示しており、今後さらなる低温化（触媒の高活性化）を図ることで、排熱を利用した熱回収型（エクセルギー再生型）水蒸気改質が可能になれば、これまで捨てていた熱を回収して用い水素へと再生することで、再生可能エネルギー利用、水素製造とエクセルギー回収が同時に実現可能となる。また、リグニンからの化学品合成においても、製紙産業と化学産業の規模感の一致を考えると重要なものとなる。

自動車排気ガス浄化触媒もこれからの研究テーマとして重要である。まず、Pt,Rh,Pd や CeO₂ などの希少材料に依らない排ガス処理触媒の構築は、世界に広く排ガス触媒を普及させるためにも必須の技術である。また、ディーゼルエンジンやリーンバーンエンジンの NO_x 吸蔵型排気ガス触媒についても、今後更なる改良が必要である。この種の触媒は吸蔵・除去のサイクル運転が複雑であり、NO_x の除去のためには燃料を無駄に使う運転サイクルが必要

である。将来的には NO_x そのものを酸素共存下でも N₂ と O₂ に直接分解する触媒の実現が求められる。

また、CO₂ をエネルギーキャリアであるギ酸へと転換する触媒や、化学品に誘導する触媒系の多様化も望まれている。水素キャリア（アンモニア・有機ヒドライド・ギ酸・メタノールなど）の製造・利用のための触媒技術も今後その重要性を増すと考えられる。

（５）政策的課題

旧来からのディシプリン間の人的、技術的障壁は厚く、これらを越えたコミュニティ作りが革新的な触媒を生み出すための最重要課題である。

エネルギー・環境に関わる技術は、国のエネルギー政策や環境基準などに大きく研究が左右される。東日本大震災を経験した我が国は、エネルギーシステムの脆弱さを痛感し、欧州諸国のような再生可能エネルギーの大量導入を掲げた。しかし、エネルギー輸入額の高騰、原子力発電の存続廃止問題、シェールガス革命による石油価格の低迷など、我が国のエネルギー情勢が不安定であり、エネルギー政策が安定かつ持続的でない今日では、エネルギーに関わる研究開発も触媒分野のみならず全てが不安定である。

また、近年は内閣府、経済産業省、文部科学省が連携して特定の研究課題に取り組んでいるプロジェクトも多く見られる。前出の元素戦略プロジェクトやエネルギーキャリアプロジェクトなどは省庁横断型として進められている。産官学の連携はエネルギー、環境分野では特に重要であり出口を見据えた基礎研究が必要であるので、多方面の省庁の連携は重要である。実用に際しては、国内のみでの展開ではなく海外展開を見据えた戦略が必要である。

（６）キーワード

燃料変換、エネルギーキャリア、バイオマス転換(BTL)、シェールガス、天然ガス変換(GTL)、自動車排ガス触媒、ディーゼル排ガス触媒、NO_x 除去、CO₂ 削減

（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	◎	↑	一時期のナノ構造構築を目指した触媒研究から、新規応用のための触媒研究に変化しつつある。また、有機ヒドライド、アンモニア、ギ酸などエネルギー物質の生産を掲げたプロジェクトも多く、自動車排ガス触媒の非貴金属化なども重点的に進められている。 低級アルカン（メタン・エタン・プロパン等）を効率的に化学物質に変換する技術、メタノール（将来的には合成ガス）を利用したアルケン製造技術について世界をリードするポテンシャルを持つ。 バイオマス変換触媒の研究開発は世界レベルにある。 再生可能エネルギーからの水素製造、特に光触媒・人工光合成の研究開発については世界をリードしている。光電気化学的なアプローチは急増している。 水素製造技術（水蒸気改質・オートサーマル改質・部分酸化・水電解）に関して世界レベルにある。また、水素の貯蔵・輸送に必要な要素技術では世界レベルにある。

				放射光など大型施設を利用した研究は、広範な範囲で優れた成果を挙げている。
	応用研究・開発	○	↑	産総研福島再生可能エネルギー研究所の設立や川崎水素戦略、オリンピック村水素タウン構想など、水素サプライチェーンに関する研究・開発が増加している。ただし一方、エネルギー価格が低く、バイオマスを含む再生可能エネルギーへの注目は薄れつつある。石炭転換については、実証・実用の面で遅れがある。低級アルカンを効率的に化学物質に変換する技術、メタノール（将来的には合成ガス）を利用したアルケン製造技術について世界をリードするポテンシャルを持つ。しかし、国内での展開ではなく海外展開を見据えた戦略が必要である。特に、メタンについては、直接変換が重要であり産学での研究が進む。 民間企業は省エネ化につながる運転条件の変更、プロセスの改良によって着実にグリーンプロセスを実践してきた。しかし、アジアや中東、北米のエネルギー事情などに押され、新規プロセスの実用化は国の補助頼みであり、企業独自での新規プロセス開拓意欲が乏しい。
米国	基礎研究	○	→	グリーン・ニューディール政策以降、太陽光利用など新規な再生可能エネルギー技術に向けられていた研究開発支援が、昨今のシェールガス革命、エネルギー価格の低迷で、研究開発支援も低調になっていると考えられる。全体的に、エンジニアリングに注力した研究が増えつつあると感じられる。合成ガス経由での燃料油製造（フィッシャー・トロプシュ合成）に優位性を持つ。
	応用研究・開発	○	→	シェールガスが開発されたことで、エネルギー需給が天然ガス、石油とも安定していて、新奇な触媒技術が見出されていない。エチレンの製造、アンモニアの製造に関するプロセスの新規導入・増産が進んでおり、世界展開を図っている。シェールガス由来の合成ガス製造、これを原料とするメタノール合成、アンモニア合成の大型プラントの稼働が進み、関連技術が発展している。テキサス州では、メタン酸化カップリングによるエチレン製造のデモプラント(1t/day)の稼働が開始されている。
欧州	基礎研究	◎	→	HORIZON2020において広範な取り組みが行われている。欧州はドイツを始め、基礎表面科学から実用触媒まで幅広い基礎研究の基盤を有していることが特長である。日本のように実験室での目先の性能に捕らわれない、本質を追及する科学研究の体制が整っている。応用物理や計算機化学などの分野で触媒を研究している研究者も多く、応用研究に集中しがちな日本とは対照的である。 メタンからメタノールへの直接酸化について現在、最も優れた系の報告がある。また、ドイツではPower to Gasによる再生可能エネルギーからメタンへの転換触媒の技術が実用を視野に開発が進められている。 放射光を用いたOperando分析を利用し、活性点構造の解析や反応機構の解析で世界をリードする研究者が活躍している。 自動車排ガス（特にディーゼル関連）触媒での優位性がある。これは、欧州でディーゼルエンジン普及率が高いことを反映している。
	応用研究・開発	◎	→	Audi e-gasプロジェクトなど、エネルギーに関して最大級の実証実験を進めている。再生可能エネルギー導入量、バイオマス導入量などエネルギー政策に関して常に進んでいて、それに見合う技術を有している。 ディーゼルエンジン車の自動車排ガス触媒などもBASF, Johnson Matthey, Umicoreなど欧州系企業が主導していると考えられる。
中国	基礎研究	○	↑	中国はエネルギーや環境に関わる触媒化学に関しては優秀な科学者を多く抱え、精力的に研究をしている国である。他の研究領域より触媒化学領域は応用化学よりの側面が強く、古くより中国の化学の中心的な立場にある。石炭由来の合成ガス経由での燃料油製造（フィッシャー・トロプシュ合成）について優位性をもつ。 バイオマス変換触媒の研究開発は盛んであり世界レベルにある。
	応用研究・開発	○	↑	石炭ガス化による合成ガス製造、これを原料とするメタノール合成、アンモニア合成の大型プラントの稼働が進み、関連技術が発展している。これに付随してMTP（メタノール・トゥ・プロピレン）についても世界でも最大規模の検討が進められている。 中国の環境浄化触媒の実装の遅れは諸外国に比べ遅れは顕著である。しかし2012~2014年には火力発電所の脱硝が義務付けられるなど対策は進められており、今後、環境保護の観点から環境触媒の導入を急ピッチで進めると予測される。触媒の基礎研究は一定の科学技術を有しているが、社会応用に進まない同国の社会的な欠点が露呈している。

韓国	基礎研究	△	→	エネルギー変換型光触媒やアンモニア電解合成、ゼオライト・規則多孔性炭素（CMK）など多孔体の研究について世界レベルにある。最新の研究課題に取り組む研究者が迅速に増えるため、日本よりも柔軟に研究課題を選べる体制である。光触媒の研究レベルは比較的高い。
	応用研究・開発	△	→	触媒技術には一定のレベルを有しているが、特に国際的に際立ったものは見られない。触媒化学分野の成長は顕著ではない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考文献

- 1) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2015年）」
- 2) JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2015年）」CRDS-FY2015-FR-02
- 3) JST-CRDS「俯瞰ワークショップ報告書 平成 27 年度エネルギー科学技術分野 最新研究開発動向」
- 4) JST-CRDS「米国 ARPA-E（エネルギー高等研究計画局）の概要」CRDS 海外動向ユニット、<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FU/US20140620.pdf>
- 5) 触媒年鑑 2016 触媒学会編
- 6) 文部科学省科学技術・学術政策研究所（NISTEP）サイエンスマップ 2014
- 7) NEDO ロードマップ（エネルギー・基礎化学品分野の触媒開発ロードマップ、環境保全分野の触媒開発ロードマップ、機能性化学品製造分野の触媒開発のロードマップ等）
- 8) 触媒学会「触媒技術の動向と展望 2016」
- 9) 触媒学会「触媒技術の動向と展望 2015」
- 10) 触媒学会「触媒技術の動向と展望 2014」
- 11) Lu Li; Xiaoyue Mu; Wenbo Liu; Xianghua Kong; Shizhao Fan; Zetian Mi; Chao - Jun Li, Angew. Chem. Int. Ed. 2014, 53, 14106 –14109
- 12) Yuehui Li; Tao Yan; Kathrin Junge; Matthias Beller, Angew. Chem. Int. Ed. 2014, 53, 10476 –10480
- 13) Marc D. Porosoff; Myat Noe Zin Myint; Shyam Kattel; Zhenhua Xie; Elaine Gomez; Ping Liu; Jingguang G. Chen, Angew.Chem. Int. Ed. 2015, 54,15501 –15505
- 14) Masato Yoshioka, Toshiyuki Yokoi*, and Takashi Tatsumi, ACS Catal., 2015, 5, 4268
- 15) Jie Sun, Shaolong Wan*, Fen Wang, Jingdong Lin, and Yong Wang, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2015, 54 (32), pp 7841–7851
- 16) Thomas Lunkenbein; Julia Schumann; Malte Behrens; Robert Schlögl; Marc G. Willinger, Angew.Chem. Int. Ed. 2015, 54,4544-4548
- 17) Hiroyuki Miyamura; Arisa Sonoyama; Davit Hayrapetyan; Shū Kobayashi, Angew.Chem. Int. Ed. 2015, 54,10559 –10563

18) 特開 2013-212948, 仁科勇太（岡山大学）

19) Ken - ichi Fujita; Ryoko Kawahara; Takuya Aikawa; Ryohei Yamaguchi, Angew.Chem.Int.
Ed. 2015, 54,9057 –9060

3.26 分離技術

（１）研究開発領域の簡潔な説明

分離技術とは、混合物から目的成分を取り出す、または不要物を除くものである。

ここでは、気体・液体の分離技術、鉱物資源・固体の分離技術を対象とする。気体・液体の分離技術では、工場から排出される CO₂ を分離・回収する技術や、いわゆるオイルサンドやシェール層の開発時に生ずる大量の随伴水・汚染水の分離技術を対象とする。鉱物資源・固体の分離技術では、低品位化が課題となっている鉱山からの希少金属(レアメタル)の分離・濃縮や、使用済み家電製品を鉱山に見立て（都市鉱山）、そこからの有用資源(レアメタル)の分離技術を対象とする。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

● CO₂

CO₂ の分離回収は、地球温暖化対策として発電部門では再生可能エネルギーや原子力とともに、また鉄鋼業やセメント業などの産業部門でも CO₂ 排出削減のための重要な低炭素化技術と位置付けられる。しかし、分離・回収部のコストおよびエネルギーペナルティがまだ大きく、低コスト化、高効率化が必要である。

● 随伴水・汚染水

石油や天然ガスの採掘時に伴って産出される随伴水・汚染水（ここでは随伴水と総称する）の排出量は、1日あたり 6400 万トン（2016 年）と言われ、10 年に 2 倍になる勢いで増加している。その処理費用は、年間 4 兆円にも達しており、年率 6% で増加している。特に、非在来型の油田・ガス田では、随伴水の処理費用が急激に増加しており、低コストかつ効果的な処理技術の開発が要請される。

● 鉱山からの希少金属

金属は鉱石から選鉱・製錬を経て分離される。選鉱は物理選別とも呼ばれ、鉱石中を粉砕し有用成分を含む部分を濃化する工程である。製錬は、選鉱で得た精鉱を元素単体（あるいは合金）に分離する工程であり、一般に、99%以上の濃度まで高純度化される。我が国は、資源・エネルギーコストで圧倒的に不利であるにも関わらず、国内で、Fe、Cu、Zn、Pb、Ti、Ni、Co、V、Bi、Sn、貴金属、半導体 Si 等々の製錬が行われ、自動車から各種電化製品を含む製品の高い開発力の源泉となっている。近年、利用可能な鉱石は少しずつ難処理化しており、有用金属成分の濃度は減少し、銅鉱山の鉱石中の銅濃度は、僅か 0.5% 程度であり、採掘された鉱石のほとんどが鉱山で有効利用方法のないまま“ずり”として堆積され環境破壊を引き起こしている。また鉱石中にはヒ素や水銀など有害とされる忌避成分が共存することも多い。これらの鉱石に対して全量を熱や薬剤、電気で溶かしてから分離濃縮する方法は、投入エネルギーが膨大となり環境負荷も大きい。

他には、ニッケル鉱山では広大な面積の熱帯雨林を破壊しており、希土類、錫の生産では、随伴するウランなどの放射性廃棄物の処理が問題となっている。このように、製錬業は、国内産業の

持続的発展ならびに我が国の資源セキュリティ、世界的な環境保全の観点から、新たな技術開発が求められている。

● 都市鉱山からの希少金属

近年では、都市鉱山（有用金属を含有する廃棄物）の重要性が高まり、電子廃基板からのレアメタルの回収などで銅製錬、亜鉛製錬、鉛製錬が資源循環に利用され、これら製錬業が国内に存在することの意義が改めて認識されている。そして、都市鉱山の有効利用は、海外の鉱山サイトで新たな環境破壊を起こさないという、グローバル視点での貢献が期待できる。

しかし、都市鉱山は、資源としての有用性に加えて、最終処分場の逼迫や、環境規制物質の管理、資源セキュリティの観点から、多種多様な金属の回収が求められている。都市鉱山を対象とした前処理に関しても、固体を固体のまま分離濃縮する技術であることから、有用金属の含有濃度は鉱石に匹敵するかあるいはそれ以上であっても、その鉱物学的形態は鉱石と全く異なるため、比較的長い歴史を有する鉱石に対して培われた選鉱技術をそのまま都市鉱山に適用することはできず、都市鉱山に適した新たな前処理技術開発が必要不可欠である。

[動向（歴史）]

● CO₂

CO₂の分離・回収は、対象とするガスの性状や目的とする CO₂回収率、CO₂純度などに応じて種々の技術を使い分ける必要がある。分離・回収技術を原理によって分類すると、吸収法、吸着法、膜分離法、深冷分離法などがあり、吸収法には化学吸収法と物理吸収法がある。対象ガスによって分類すると、燃焼後回収（Post-Combustion）、燃焼前回収（Pre-Combustion）、酸素燃焼回収（Oxy-Combustion、Oxy-Fuel）に大別される。

燃焼後回収は、石炭焚き火力発電所ボイラなどの燃焼排ガスから CO₂を回収するもので、通常はほぼ大気圧で運転される。排ガスの圧力が低く、CO₂濃度も低いので、回収技術としては、通常は CO₂との反応性が高い溶液による化学吸収法が使われている。燃焼前回収は、化学プラントなどでの水蒸気改質ガスからの CO₂除去や、天然ガスからの CO₂除去、石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated Gasifier Combined Cycle）など、石炭の部分酸化により生成した H₂、CO、CO₂などからなるガスから CO₂を分離・回収するもので、一般に圧力が高いガスに適用されるので、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法が適用される。燃焼中回収は、事前に酸素製造装置により空気中の窒素を除去し、酸素で燃焼することによって燃焼排ガス中の窒素濃度を低く抑え、CO₂を濃縮して CO₂回収を容易にするシステムである。なお、燃焼排ガスから CO₂を回収するプロセスでは、含まれる酸素、硫黄化合物、石炭灰などの影響も十分に考慮する必要がある。

ほぼ大気圧で運転される石炭や天然ガスの火力発電所や、セメント・鉄鋼プラントでは化学吸収法が適用されている。化学プラントや石炭ガス化複合発電（IGCC）のような高圧で運転されるプラントでは物理吸収法が有利とされている。化学吸収法には使用するアミン化合物により吸収特性が異なり、高圧に適した吸収液がある。CO₂分離では、吸収液から高純度の CO₂を放散させる「CO₂の再生」に最も大きなエネルギーを消費する。再生温度は 120℃程度であり、低品位のエネルギーである。この低品位エネルギーのシステム

内での発生方法、あるいは周辺の熱が余剰のプラントからの供給方法によって、経済性に大きな影響を与える。燃焼後回収の CO₂ 回収技術に関して、三菱重工業は国内の研究資金を活用して、2008 年頃まで 10ton-CO₂/日規模の技術開発を国内で試験を行った後、米国のサザンカンパニーと共同で、サザンカンパニーのバリー（Barry）火力発電所において CO₂ 500ton-CO₂/日の実証試験を 2012 年～2014 年実施した。J-Power と日立製作所が若松発電所において 24ton-CO₂/日規模の MDEA を吸収剤として用いる化学吸収法と、Selexol 吸収液を用いる物理吸収法による試験を 2014 年 3 月に完了した。

● 随伴水・汚染水

2016 年の推定では、随伴水の 89%は、在来型の油田・ガス田から生じている。原油は、砂岩や石灰岩などの貯留岩の中に閉じ込められており、通常、水と一緒に存在している。油井の掘削直後は、原油のみが自噴する場合があるが、通常は、幾分かの水と一緒に噴出する。原油の産出を開始してから 5 年ぐらい経つと、随伴水の割合が増加してくる。これは、油層圧が低下するにつれて自噴能力が下がるため、ポンプ採掘や高圧ガスを圧入するガスリフトなどの方法がとられるためである。このような方法を用いても原油の産出量が低下してくると、水攻法と呼ばれる方法により増産が検討される。これは、油層に水を打ち込むことで生産量を維持し、原始埋蔵量（貯留槽中の原油の総量）の 4 割程度を回収するのである。この段階になると、随伴水の量は益々増加し、体積にして原油の 4～6 倍に達する。最近の原油の生産量：276 億バレル（2012 年）（0.756 億バレル/日）と随伴水の排出量：3.05 億バレル/日（2012 年）を比較すると、多くの油田で大量の随伴水を排出していることが伺える。（オマーンでは、2004 年に石油の 6 倍の随伴水が出ていたが、2013 年には石油の 24 倍になっている。国によっては、非常に深刻な問題である。）

天然ガスの生産でも状況は類似しており、最初は少ないが、徐々に随伴水の排出量が増えてくる。例えば、米国の Offshore のガス田では、水とガスの比（WGR, water gas ratio）が 90 バレル/100 万立方フィートぐらいになっており、ガスの重量に対して 7 割程度の随伴水が排出している¹⁾。在来型ガス田における随伴水の量は、内陸と海洋、あるいはガス井によって大きく異なる。中東の大規模洋上ガス田では、随伴水をガスと一緒に陸上までパイプラインで運び、圧入井に廃棄している。圧入井を長期的利用や生活用水の確保のためにも、随伴水の再利用は重要な課題となっている。

1990 年ぐらいから海底 500 メートルを超える深海での石油開発が始まり、2000 年以降のオイル価格の高騰により、大深水での石油開発が活発となった²⁾。この分野の技術の進展は著しいものがあり、現在では海底 3000 メートルぐらい油田でも開発することが可能となった。2012 年のデータでは、石油生産における海底油田の割合は 27%となっており、長期的には大きくなるものと考えられる。

2000 年以降のオイル価格の高騰は、非在来型資源の開発も活発化させた。中でも重質油の開発は、随伴水の総量の 5%程度に及んでおり、今後も増加傾向にある。その代表格は、アルバータ（カナダ）のオイルサンド開発であろう³⁾。ここでは、地下数 100 メートルにある重質油を含むサンド層に連続的に水蒸気を注入し、流動性を得た重質油を回収している。この方法は、SAGD（Steam-Assisted Gravity Drainage）法と呼ばれており、生産される重質油の 2 倍程度の水を必要とする。また、重質油は、多量の随伴水と一緒に回収さ

れるため、その処理コストも大きい。

非在来型資源として、CBM（Coalbed Methane）やシェールガスの開発も盛んになっている。これらの随伴水の生成量は、それぞれ全体の3%（CBM）、2%（Shale gas/Tight oil）を占める。2020年には、CBM由来の随伴水の割合が微増し、350万トン／日程度になると予想されている。

随伴水の処理コストは、2014年の時点で、379億ドル（約4兆円）と見積もられている。コストの内訳としては、随伴水の輸送と廃棄（圧入など）が8割を占め、水処理費用と水処理のための設備投資がそれぞれ約1割を占める。水処理設備のみの市場は、3500億円／年程度である。海底の油田やガス田の開発に限定すると、水処理設備の市場は1800億円／年と見積もられている。

随伴水処理の要素技術は、以下の通りである。

- HP Pressure Production Separator

スラッジを除去したのち、高圧のタンクの中で随伴水、原油、ガスの3相を重力で物理的に分離する。通常、50～100気圧で運転され、原油や天然ガスから随伴水を分離するために一般的に用いられる。天然ガスの場合、高価なコンデンセート（ナフサ）を分離するためにも用いる。この場合、加圧前に冷却操作を行う。

- API セパレーター

常圧で重力によりオイルを分離する装置。直径150マイクロメートル以上のオイルは、この装置で除去できる。コアレッサーと呼ばれる波形の平行板をもつ構造のものは、直径50マイクロメートル程度のオイルを除去できる。これらの一次処理より随伴水中のオイル濃度は300ミリグラム／リットル以下になる。

- Gas Flotation

APIセパレーターなどの一次処理が終わった随伴水に窒素ガスを吹き込む、コロイド状のオイルを気液界面に移動させる。これにより、直径20マイクロメートル程度のオイルを除去できる。凝集剤を加えることで、除去効率が向上する。

- Hydrocyclone

細長い円錐状の筒の中に随伴水を勢いよく注入することで、分速3000回転ぐらいの渦を発生させ、遠心力により軽いオイルを中心部に集めて分離する。これらの二次処理により、直径10マイクロメートル程度のオイルまで除去でき、随伴水中のオイル濃度は数10ミリグラム／リットル以下になる。

- Media filtration

砂ろ過、無煙炭やクルミ殻などを介したろ過により、オイル成分を吸着させる。複数吸着材を詰めたカラム（multimedia filter）単純であるが、随伴水中のオイル濃度は数ミリグラム／リットル以下にでき、TOC（total organic carbon）やTSS（total suspended solids）値を下げるができる。塩分濃度が高い随伴水の三次処理には特に適しているが、吸着材の入れ替えが問題となる。

- 鉱山からの希少金属

選鉱の歴史は有史以来とも言われているが、最古の記録と言われるのは、1556年にドイツ

ツの鉱山学者ゲオルク・アグリコラが執筆した鉱山書「デ・レ・メタリカ」であろう。戦後復興期は、主にアメリカから、大型選鉱機械の製造法や、水へのぬれ性の違いを利用して分離する技術である浮選に関する選鉱技術が導入され、技術の合理化を図り分離成績を向上させる試みが行われた。しかし、国内の鉱山は、貿易自由化や為替変動制の影響を受けて、海外鉱山との熾烈な国際競争に直面するようになったと共に、戦時中の乱開発などに起因する環境悪化に対する改善対策などが経営上の負担となり、閉山が相次いだ。そのような中、1955年に秋田県北部で「黒鉱型銅鉱床」と呼ばれる銅鉱床が相次いで発見され、一大開発ブームとなった。この黒鉱とは、銅と亜鉛、鉛などが混在した複雑硫化鉱であり、当時は日本に特有で独特の鉱床であったため、分離技術に関しても浮選を中心に日本で独特の技術が開発され、選鉱技術の発展につながった。しかしこの黒鉱型鉱山も資源が枯渇し国内では1994年にすべて閉山した^{4,5)}。

基本的に鉱山の近くで実施される分離技術である選鉱は、1990年代にほとんどの国内鉱山が閉山し海外鉱山へ進出したのと共に海外で実施されることが多くなり、自然と国内での選鉱技術研究は減速した。一方、国内には環境対策だけが必要な休廃止鉱山が残り、極度なコストダウンを求められる状況下での確実な重金属処理を達成する環境浄化技術が、分離技術の1つとして大きく発展した。現在でもこの環境浄化分野では日本が高精度で確実な分離技術を有する。

この間、海外で開発された分離技術として特筆すべきは、SX-EW（solvent extraction and electrowinning）法である。この方法は、それまで利用が困難であった低品位の酸化銅鉱石から銅を酸で直接進出させ、溶媒抽出法を用いて電解液まで浄化、濃縮し、電解採取法に供するというものである。1960年代にアメリカで溶媒抽出法が開発されたことに端を発するが、1980年代の銅価格の低迷期にアメリカでのコスト削減策として採用され広く実用化された。この方法は世界の主流を占める硫化銅鉱等の鉱石種では銅浸出が進まないという課題をかかえており、現在も技術開発が続けられている。

また、難処理化鉱石を対象とした微粒鉱石の分離技術に関しても技術開発が進められた。より小さな気泡を利用して分離するマイクロバブル浮選や、高勾配型磁選機、流動層の原理を利用するネルソン型比重選別、あるいは薄流選別の応用であるファルコン型比重選別やMGS(Multi gravity separator)などが開発され、現在もさらなる高効率化の努力が続けられている。

21世紀に入ると、中国をはじめとする新興国の資源消費量が爆発的に増え、資源は高騰し濃度が高く質のよい鉱石が入手しづらくなったことから、再び選鉱技術開発の重要性が認識されるようになった。資源セキュリティの面から、海底熱水鉱床、レアアース堆積物、コバルトリッチクラスト、マンガンノジュールといった日本近海に賦存する海底鉱物資源を対象とした分離技術の確立も求められている。

● 都市鉱山からの希少金属

都市鉱山とは、地上に蓄積された使用済み製品を資源とみなし、資源をそこから積極的に取り出すことを試みる概念であり、1988年に東北大の南條道夫教授らによって提唱された。1990年代には各種リサイクル法が制定され、対象品目ごとに前処理技術の開発がすすめられた。この時期は上述の国内鉱山の相次ぐ閉山ならびに海外鉱山への進出の時期と重

っており、多くの選鉱技術研究者がリサイクルのための前処理技術研究に着手した。都市鉱山を対象とした分離技術は、当初は古くから鉄スクラップ業界で培われたシュレディングと、比重選別や磁選などの組み合わせであったが、1984年にフランスで開発された渦電流選別の導入によって、アルミニウムや銅の選別が可能となった。

都市鉱山の分野では、難処理鉱石に求められる微粒に対する分離技術に加えて、塊状粒子を対象とした分離技術の開発も求められている。対象を検知・識別するセンサー部と、実際に圧縮空気やパドルなどで分離する部分とからなるソーティング技術はその有用な手段の1つであり、古くから色度を識別して分離するカラーソーティングは選鉱や前処理にも導入されていたが、近年では近赤外線・X線・レーザーなどを利用して分離する技術が積極的に開発されている。

都市鉱山に求められる分離技術は、鉱石を対象とする分離技術以上に、法制定や政策によって大きく左右されるのが特徴である。特に2010年～2011年には中国の輸出制限政策によりレアアースが急騰し、国内ではいくつかのレアメタルを対象とした分離技術の開発が加速した。

（３）注目動向

[新たな技術動向]

● CO₂

石川播磨重工業は酸素燃焼技術開発を豪州クイーンズランド州の Callide A 発電所で進めた。2006年3月にスタートし、2012年12月～2015年3月まで実験を実施し、のべ5000時間のCO₂回収試験を行い、70ton-CO₂/日規模の試験を完了した。

米国ではCO₂規制が厳しく、CCSを設置しないと石炭火力発電所が規制をクリアできなくなった。オイルシェール田からの天然ガスの価格が安価であり、石炭から天然ガスへの燃料転換を行うと発電量当たりのCO₂発生量が半分となるので、天然ガスへの燃料転換がCO₂削減対策のフロントランナーとの位置付けとなる。

● 随伴水・汚染水

2014年の夏ごろから油価が大幅に下落しており、油田やガス田の新規開発は、延期や保留になっているケースが見られる。世界の原油生産量は、伸び悩んでいるが、減ってはいない。比較的生産コストが高いカナダの重質油であっても、生産量が緩やかに増加することが見込まれている⁹⁾。一方、随伴水の海洋投棄や地下への圧入に対する規制は、年々厳しくなっている。在来型の油田・ガス田では、年々随伴水の量が増加しており、非在来型の資源開発では、随伴水処理の新技术への期待が大きい。この分野の新たな技術動向には、以下のようなものが上げられる。

・ Sulfate 除去

海底油田の二次回収増産のために、海水中のSulfate濃度をNF膜で100ミリグラム／リットル以下にして、油層中に圧入する技術が普及しつつあり、年間400億円程度の市場が生まれている。特にブラジル沖の海底油田では、このシステムが確立している。現在、RO膜を用いて脱塩した海水と処理後の随伴水を混合し、圧入する技術が北海油田で検討

されており、BPはこのシステムに120億円を投資している。海洋油田の随伴水は、現在、84%が処理後に投棄されており、圧入は13%に過ぎない（残りは、陸上に輸送）。しかし、今後は、圧入に再利用されるケースが増えるであろう。

- ・ MPPE

随伴水の海洋投棄の規制が厳しくなり、吸着材を用いて三次処理を行うケースが増えている。その中で、高分子系の吸着材を用いたオイルの除去技術（MPPE, Macro-Porous Polymer Extraction）が普及しつつある。MPPEでは、随伴水の有害成分であるBTEX（Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene）を吸収し、スチーム処理により再生する。この処理は、有害物質のゼロエミッションの方針にマッチしており、その有効性が北海油田（ノルウェー）での実証されている。MPPEは、最近、オーストラリア西岸のLNGプラント（Inpex Ichthys, 2017年から操業予定）からの随伴水処理にも適用されており、今後の展開が期待できる。なお、Ichthysは、日本初のLNG大型プロジェクトとなる。

- ・ セラミック膜

セラミック膜は、hydrocycloneやflotationの代替技術として注目されてきた。膜が高価であり、ファウリングしやすいなどの問題があり、利用範囲が非常に限定されていたが、最近、海底油田のプラットフォームでの利用が拡大しつつある。Liqtech社のシリコンカーバイド膜は、北海油田での随伴水処理のためのフルスケールユニット設置が検討されている。

- 鉱山からの希少金属

- ・ METTOP-BRX-TECHNOLOGY 法

METTOP-BRX-TECHNOLOGY法は新しい銅電解精製のための電解槽が従来の電解槽の1.5倍の速度で高速電解を行うことができると主張。一部の企業で商用化されている。（オーストラリアMETTOP社）

- ・ Armstrong 法

Armstrong法は、 TiCl_4 のNa還元によるチタンの製造法であり、粉末の製造に適している。2010年には、年間1800トンの商業生産を開始すると報告していたが、現時点での生産能力は不明である。（サウジアラビアCristal社⁷⁾）

- ・ 鉱石からの浸出促進

SX-EW法は低品位鉱の開発を可能にする画期的な技術革新であったが、硫化銅鉱石に対しては高効率に浸出できないという課題を有することから、バイオリーチングや、酸化促進、触媒活性化あるいは不働態形成防止などの目的による薬剤添加、加温や加圧といった試みが研究されている。また、超微粉碎による比表面積増加、あるいはメカノケミカル反応による浸出促進も研究されている。

- 都市鉱山からの希少金属

- ・ 単体分離を促進するための新規粉碎技術

高効率に単体分離を達成するために異相境界面に選択的に応力が加わるような粉碎技術が開発されている。具体的には、電気パルス粉碎、マイクロ波粉碎、圧力を利用するHPGR

（High Pressure Grinding Roll）などが検討されており、難処理鉱石や都市鉱山への有用性が確認されている。この中で HPGR は、すでにいくつかの海外の鉱山やセメント業で実用化されている。また、その有用性を確認するために、単体分離を測定する特殊固体分析技術である MLA（mineral liberation analysis）が積極的に導入されている。さらには、特殊粉碎技術を可視化し、内部状態を詳細に明らかにするためのシミュレーション技術も開発され、選鉱をメインターゲットにした市販ソフトも製品化されている。

- ・都市鉱山を対象としたソーティング技術

比較的粗粒状態で高度に単体分離された塊状（現状では 10mm 以上）粒子については、各種のセンシング技術を利用した Sensor Based Sorting（日本語的にはソーティング）が有効であり、従来型の確率的分離である固相分離（比重選別・磁選・電氣的選別等々）では達成し得なかった（理想分離に近い）高度な分離が可能となる。例えば、アルミ合金類の相互分離は従来型の固相分離では不可能であったが、数年前より、透過 X 線および蛍光 X 線ソーティングを組み合わせることにより実用化プラントが建設され始めた。LIBS（Laser Induced Breakdown Spectroscopy）を利用したソーティング技術も世界に先駆けて日本で開発され、実用化の一手前まで進んでいる。この分析技術の特徴は水素からウランまでほとんどすべての元素の分析が ppm オーダーで可能なことであり、今後、特にミックスメタルおよび鉄合金の相互分離等への適用が期待される。また、プラスチック類の相互分離においては、10 年ほど前より近赤外線（NIR）吸収を利用したソーティング技術が実用化されており、日本に限らず世界中で採用されている。この分野の最新技術としては、ラマン分光やテラヘルツ波吸収特性を利用するものがあり、今後の実用化が期待されている。

- ・イオン液体による新規分離剤の開発

常温で液体を呈するイオン液体は、100 年ほど前からその存在は知られていたものの、工業的な利用が研究開発され始めたのはここ 20 年ほどのことである。難処理鉱石や都市鉱山の分野でも、ここ数年、従来とは異なる選択性を有する分離剤としての利用研究が、計算化学との融合によって積極的に進められている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- CO₂

日本の鉄鋼業では、「革新的製鉄プロセス技術開発（COURSE50）」で、コークス炉ガスに含まれる水素を利用した水素還元製鉄、高炉ガスから化学吸収法、物理吸着法により CO₂ を分離回収し、CO₂ 排出量を 30%削減する低炭素製鉄を目指している⁸⁾。日本は燃焼後回収システムの化学吸収法で世界的リーダーであり、三菱重工、三菱日立パワーシステムズ、東芝、IHI、がそれぞれプロセスを開発している。米国の PetraNova 大規模 CCS プロジェクトでは、三菱重工の技術が採用され、2016 年に操業開始が予定されている。

米国では、Illinois Industrial CCS Project（ICCS）がエタノールプラントからの CO₂ 回収／帯水層（深部塩水層）貯留商業プロジェクトを 2016 年から開始することとなっている。

カナダでは、2015 年に開始された Quest プロジェクトは、オイルサンド改質用の水素を製造する設備から CO₂ を回収し、年間 100 万 t 以上を帯水層（深部塩水層）へ圧入する

予定である。

欧州では、欧州連合において 2009 年に規定された CCS 指令が 2014 年に見直され、2015 年 1 月に最終報告書が欧州委員会に提出された⁹⁾。CCS プロジェクトが実証から商業への移行を可能にするために、CCS 指令以外の政策が必要であるという所見が示されている。

中国では、2014 年 11 月に発表された中国・米国両政府による機構変動に関する共同声明（Joint Announcement on Climate Change）以降、両国の CCS および CCUS 実施に向けた協力関係が強化されている⁹⁾。

韓国では、火力発電からの CO₂ 回収プロジェクト（燃焼前回収あるいは酸素燃焼、燃焼前回収）2 件が評価段階にある。浦項産業技術科学院（RIST）は、アンモニア水を利用し高炉ガスから CO₂ を回収するプロジェクト研究を行っている。

● 随伴水・汚染水分離

・ EOR（enhanced oil recovery）

中東の多くの巨大油田は、かなり老朽化しており、水攻法による二次回収が広く行われてきた。最近では、EOR（enhanced oil recovery）と呼ばれる増進回収が進んでいる¹⁰⁾。この地域では、2014 年の推定では、随伴水の 63%が圧入による廃棄、30%が水攻法への利用、7%が EOR に利用されている

・ CBM（Coal Bed Methane）

オーストラリア東岸のコールベットメタン CBM（Coal Bed Methane）開発には、2020 年までに 1100 億円が投資される予定であり、逆浸透膜を含めた最新の随伴水処理技術が導入されることが期待されている。CBM の開発では、石炭層の割れ目に溜まった水を抜く必要があり、ガスの生産の前に大量の随伴水が発生する。クイーンズランドだけでも年間で 2000 万トンの随伴水が生じており、これを処理しなければならない。CBM の開発では、二次回収として窒素や二酸化炭素を圧入する研究も進められており、ガス分離膜への期待も大きい。

● 鉱山からの希少金属

・ JOGMEC（独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構）における銅原料中の不純物低減技術に関する基礎研究委託事業

JOGMEC では、銅鉱石中のヒ素濃度が増加していることが国内の銅製錬工程でのスラグ中のヒ素濃度を増加させ、その利用に対する懸念事項となっていることから、銅鉱石中のヒ素を現地の環境規則を遵守しつつ分離・残置することが可能となるような選鉱プロセスを開発するための基礎技術研究事業を、2015 年から 2016 年度の 2 年間、実施している。

・ JOGMEC における海底熱水鉱床採鉱技術開発等調査事業に係る選鉱・製錬技術調査研究

2008 年 4 月に策定された「海洋基本計画」に基づき、沖縄海域及び伊豆・小笠原海域における海底熱水鉱床の開発に向けた選鉱および製錬技術開発事業が開始している。5 年間の第 1 期における基礎検討の後、2013 年には第 2 期事業が開始され、より実用化に近い検討が行われているが、海底熱水鉱床は生成年代が若く結晶化が進展していない上、ヒ素などの不純物の含有割合も高いことから分離技術上の課題は多く、熱水鉱床鉱石に特化した新規分離技術開発が望まれている。

・米国 DOE/ARPA-E ¹¹⁾

二酸化炭素排出量の削減、3D プリンターなどの Additive Manufacturing への期待の高まりなどから、DOE/ARPA-E 主体で、低コストを目的とした軽金属製錬、都市鉱山関係 (Ti、Al、Mg、スクラップ再生) の研究が遂行されている。DOE/ARPA-E では、これまでに 19 件の研究が実行され、うち 6 件、総額 12 億円ほどがチタン製錬に投入されている。4 件が電解技術を 2 件が熱還元技術を利用した提案である。

● 都市鉱山からの希少金属

・欧州委員会による Circular Economy(CE)政策パッケージ ¹²⁾

EU はかねてより「Resource Efficiency」という概念を打ち出し、既存の廃棄物管理の取り込みを超えた価値観で資源効率の向上により経済と社会の持続的成長を図る政策をとっていたが、2015 年 12 月に「Circular Economy」政策パッケージとして、サプライチェーン全体で幾重もの循環の輪を作り、消費スタイルそのものを変化させるような政策を発表している。これは資源循環を政策の中心に据えた経済政策であり、今後、この分野に大きな投資がもたらされ、新たな価値観が創出される可能性があり、日本を含め世界が動向を注視している。特に金属資源では、European Institute of Innovation & Technology (EIT) が設立した EIT Raw Materials ¹³⁾ が上述の政策実施に対する重要な拠点となっており、EU 内の資源、製錬、リサイクラー、ならびに電気メーカーなど多種業界にわたる企業が支援している。

・産業技術総合研究所における戦略的都市鉱山研究拠点 (Strategic Urban mining REserch base, SURE) 形成 ¹⁴⁾

産業技術総合研究所では、都市鉱山の有効利用を実現するための産官学連携拠点として 2013 年より SURE を発足させた。本拠点では、製品の資源配慮設計、製品情報利用と新規分離技術を連携させるとともに、都市鉱山ポテンシャルや金属需要の予測など都市鉱山の計画的な開発を実現することによって、多くの金属種に対する経済的な資源循環の実現を目指している。

・NEDO におけるアジア省エネルギー型資源循環制度導入実証事業

NEDO では 2016 年度からの新規事業として、日本が培ってきた資源循環技術やシステムをアジアへ展開するための実証事業を行っている。また同時に日本国内では、資源供給逼迫にも対応できるように、動脈産業（主に製品の設計・製造・販売等を行う産業）と静脈産業（主に製品の回収・分離選別・最終処分等を行う産業）が一体となった資源循環システム構築を目指し、リサイクル技術やシステムの効率化や高度化を図る実証事業を行っている。

・JOGMEC における低品位銅電解精製技術実証事業

JOGMEC では 2015 年度より低品位粗銅からの銅回収を可能とするエネルギー低減電解技術の開発・実証事業を行っている。これは、リサイクル原料を主体とした銅の精製では電解採取法により電気銅として回収されているが、この方法では電力使用量が大いのに対して、より電力使用量の少ない電解精製法を用いて電気銅を回収する試みである。不純物を多く含む低品位銅アノードを電解精製法に供した際の不動態化をいかに防ぐかが技術開発の主眼となっている。

・ EU HORIZON2020 における MSP-REFRAM project ¹⁵⁾

EU の「HORIZON2020」は、2014 年～2020 年の 7 年間にわたる総額 800 億ユーロ規模の研究およびイノベーションへの資金助成プログラムであり、世界に広く門戸が広がれているが、その中で、高融点金属の関連企業のネットワーク強化、研究開発の方向性の示唆、新たな市場開拓の可能性を議論する MSP-REFRAM プロジェクトが実施されている。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

● CO₂

分離・回収における(a)システム効率向上、(b)Oxy-Fuel などの燃焼法の確立、(c)コスト低減である。CO₂回収コストの低減では、CO₂回収量数千トン/日の処理能力で、設備費及び運転費（蒸気使用量）を半減できるような吸収液、吸収剤やシステムの改良が求められる。圧力、ガス量が変動した際の CO₂回収装置の負荷変動対応と応答速度向上にある。日本はエネルギーセキュリティのために天然ガスと石炭火力をほぼ同程度の割合にするという方針で進めている。石炭火力に課せられた負荷変動対応を天然ガス火力と同等のモデルピーク対応にさせるという、海外よりさらに上載せした技術開発が必要とされている。

● 随伴水・汚染水

・ EOR

随伴水処理の今後の動向として最も重要なものは、EOR 技術の普及である。中東の大油田の三次回収、カナダやベネスエラの重質油、オーストラリアの CBM 開発に見られるように、随伴水を精製後、スチームとして、あるいはポリマーや薬品を混入させて油層に圧入する技術は、長期的な技術の深化が必要である。また、新しい EOR 技術として、CO₂や炭化水素、あるいは窒素などの圧入も広まりつつある。今後の油田や天然ガス開発は、在来型や非在来型に関わらず、EOR 技術なしには生産が不可能になる。このため、三次処理レベルの次の技術を確立することは、最重要の課題となる。

- ✓ 随伴水中の Tight Emulsion の分離技術
- ✓ 随伴水中の TSS や多価イオンの分離技術
- ✓ 随伴水の脱塩技術

そのボトルネックは、耐熱性、オイル耐性、耐久性であり、これらに加えて、分離性能を一層向上させる必要がある。さらに、スチーム以外の EOR 技術に関連して、以下の分離技術の深化も重要となる。

- ✓ 随伴水や生産ガス中の炭化水素（C₁～C₈）の濃縮、分離・蒸留の技術
- ✓ 生産ガス中からの窒素や CO₂ の分離技術

・ 環境規制と水不足

随伴水の圧入や海洋投棄の環境への影響は、必ずしも明らかになっていないが、環境アセスメントの結果は、開発プロジェクトの許認可に決定的に影響する。海洋資源への影響などを考えると、随伴水の四次処理、即ち、有害物質の完全除去は重要であろう。また、中東や中央アジアでは、水不足が深刻化しており、灌漑や生活用水への利用も重要となる。

また、将来的には、北米のオイルサンド開発に見られるような広大な排水池の再生も必要となる。

- ✓ 随伴水のイオン交換やオゾン処理等による四次処理
- ✓ 随伴水の都市や農地への循環（Greenfield Project）
- ✓ 汚染地域の再生（Brownfield project）

● 鉱山からの希少金属

・ 固体分離技術のミクロレベルな機構解明

選鉱や前処理技術に関する現象論に関しては、長年の検討により経験知が蓄積されているが、対象は複雑な形態を呈する固体の混合物であることから、これまでその現象の直接的な観察が難しく、詳細な機構解明には至っていない現象も多い。選鉱の分野では SEM 画像と顕微鏡画像とを組み合わせ、自動的に単体分離度を計測する MLA が近年開発され、日本にも導入されつつあり、これまで詳細に解明されていなかった選鉱分離を支配する要因が直接的かつ定量的に明らかになりつつあるが、現状ではオーストラリアでのみ開発されている MLA には装置の頑丈性や、解析ソフトウェア精度・速度にもまだ課題があり、改良が望まれる。

● 都市からの希少金属

・ 単体分離過程の解明のための破壊の科学の確立

破碎・粉砕による単体分離はその後の分離効率を支配する重要な過程であるが、多種多様な鉱物種の混合体である鉱石や、多種多様な強度を有する材料が接合されて形成されている都市鉱山資源に対する破壊の科学は確立されていないため、省エネルギーで単体分離を達成する技術の選定は経験に基づいているのが現状である。SEM（電子顕微鏡）による破面観察など亀裂進展の詳細な観察と、組成や鉱物学的形態の破壊前後の変化を詳細に把握し、両者の知見の融合させることによって、鉱石や都市鉱山に対する破壊の科学を確立させる必要がある。

・ 前処理技術に対する経験知の統合と IT 化

前処理での分離対象は廃小型家電などの人工物であることから、使用されている材料や強度、構造などが製造年代やメーカーによって実に多種多様にわたっている。しかしながらこういった情報は、最適な分離技術の開発および分離プロセスの構築に当たり非常に重要な情報であり、これまでに研究者や技術者が蓄積してきた経験知を統合し、広く公開して、利用可能な情報へと集約する必要がある。前処理技術に関する経験知の IT 化は、将来的にはリサイクリングを前提とした材料、製品開発研究にもつながると期待される。

[今後取り組むべき研究テーマ]

● CO₂

・ CO₂回収コストの低減に関する技術開発

アミン法については蒸気使用量削減を可能とする熱利用プロセス開発、設備の小型化・簡素化を可能とする気液接触装置・熱交換器の開発、CO₂ 吸収容量が大きく、CO₂ 脱離エネルギーが小さい吸収液や吸収剤の開発が必要となる。

- ・ 高効率な温室効果ガス分離膜の開発

従来方法とは大きく原理が異なる、回収エネルギー低減が期待できる革新的な CO₂ 分離技術の基礎研究が要請される。

- ・ 回収 CO₂ を還元する物質の経済的な製造方法

触媒による反応速度の向上、反応器・反応システム改善による反応収率向上が望まれる。

- 随伴水・汚染水

- ・ 量産可能な無機膜

随伴水の二次処理用の無機膜は、我が国が優れた製品を要しており、実証試験レベルにある。一方、限外ろ過（UF）膜、ナノ濾過（NF）膜などの三次処理レベルの無機膜は、改良の余地が大きい。無機膜は、耐久性に優れ、随伴水処理との相性が良い。また、ガス分離膜としても優れた性能があり、生産ガス中からの窒素や CO₂ の分離技術にも利用できる。ここでの問題は、製造方法が水熱合成を利用していることで、生産性が悪いことである。無機膜で量産化可能なガス分離膜の研究を推進すべきである。

- ・ 再生可能なオイル吸着剤

随伴水中のコロイド状のオイルは、Hydrocyclone によって分離可能であるが、10 マイクロメートル以下のオイルは除去できない。また、オイルの含有量にもバラツキがあり、Hydrocyclone を通過してしまうオイルやクレゾールなどの溶存有機物も多い。吸着サイトがルーズで、簡単にオイルが脱着する吸着剤が求められている。

- ・ カーボン系のオイル耐性分離膜

最近、研究室レベルであるが、カーボン系の NF 膜や RO 膜が開発され、多価イオンの分離や脱塩に利用できることが分かってきた。カーボン膜には、耐久性や耐熱性、オイル耐性に高いポテンシャルがあり、高温の随伴水からの EOR 用スチームの製造や Sulfate 除去を行うための最適な膜となる。このため、基材の耐久性の向上を含めて、モジュールとしての総合的な研究開発が期待される。また、カーボン系の薄膜は、生産ガス中の炭化水素成分（C₁～C₈）の濃縮、あるいは CO₂ の分離にも有効と考えられる。

- ・ 実証プラントとオペレーション技術の開発

随伴水処理では、実証プラントでの実験結果が最も重要であり、ここでのオペレーション技術により、分離ユニットの実用性能が大きく変化する。また、オペレーション技術により、当初の想定以外の性能を発揮する場合も多い。このため、分離ユニットの製造とオペレーション技術の向上は、この分野で避けて通れない研究テーマとなる。

- 鉱山からの希少金属

- ・ 液体ならびに界面の原子の挙動の第一原理計算による理解

電気分解に必要な電圧を下げるためには、溶液内抵抗に起因する部分と、反応抵抗に起因する部分のそれぞれの低減が必要である。前者は伝導度として体系化がすすんでいるが、溶液中の伝導度の原子論的な理論的研究は少ない。後者の反応抵抗に関する原子レベルでの理論的メカニズムの解明はまったく進んでいない。これらの研究を推進する必要がある。

- ・ 放射光ならびに中性子透過を活用したサブミクロンレベルでの界面現象のその場観察

界面現象の精緻な計算を精度良く遂行するためには、精緻な実験観察が両輪として必要となる。金属製錬では、しばしば反応温度が 1000℃以上の高温となり、また、厳密な雰囲気制御が必要であり、その反応の様子は未だブラックボックスのままであるので解明する必要がある。なお、観察施設は産業界の研究者が垣根なく利用できるように、1700℃程度までの温度で、超高真空からあらゆる腐食性・爆発性ガス雰囲気でのその場観察ができるような設備が望ましい。

- 都市からの希少金属

- ・ 低品位・高不純物鉱石利用のための選鉱技術の開発

今後の増加が予想される低品位・高不純物鉱石を、エネルギーをかけずに低環境負荷なプロセスで分離濃縮するための選鉱技術の開発が必要不可欠である。これらの選鉱技術開発の方向性としては、後段に従来型の製錬プロセスを想定した技術開発と、後段に電解法など湿式製錬プロセスを想定した技術開発の 2 つが考えられ、対象によってどちらが適するかを見極めながら開発すべきである。前者に対しては、電気パルスやマイクロ波、温度や圧力などを駆使した特殊粉砕によるこれまでにない単体分離性の実現や、新たな選択性を有する浮選剤等の分離剤の開発などが考えられる。また後者に対しては、省エネルギープロセスでメカノケミカル反応を実現する超微粉砕技術の開発や、微粒子に対して高精度に分離濃縮を実現する固固分離技術開発などが考えられる。

- ・ 各種都市鉱山資源の特徴をいかした省エネルギー型前処理技術の開発

都市鉱山資源は対象によって使用されている材料や使用されている元素、強度などが大きく異なることから、都市鉱山資源ごとに適する前処理技術を個別に検討する必要がある。特に、小型家電、希土類磁石モーター、太陽電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池などは、それぞれに対して、電気パルスや機械式粉砕、熱や圧力を駆使した特殊粉砕などによって省エネルギー型の単体分離技術を開発すべきである。また、比較的粗粒域で単体分離を達成し、それを高精度に分離するソーティング技術が確立されれば、一部の都市鉱山資源は従来型の製錬設備を介さず、直接的に電解法で回収するような画期的な省エネルギー型金属精製プロセスが実現する可能性がある。

- ・ 不純物を多く含有する金属資源を従来製錬設備で精製するための課題解決

想定されるあらゆる不純物元素について、その電極触媒挙動を把握し整理することが、喫緊の課題である。不純物挙動の体系化は、リサイクリングを前提とした材料開発研究にもつながる。

（５）政策的課題

- CO₂

CO₂を排出する事業者への CO₂分離回収実施の動機付けとしては、CO₂排出基準規制、固定価格買取制度、炭素税、排出量取引制度等、事業者インセンティブを与える施策を検討する必要がある。

海外での CO₂削減が排出権取引により国内での削減に結び付く枠組みの構築も重要である。例えば、CO₂の利用あるいは貯留方法が、国際的な枠組みで CO₂削減事業がビジネスとして成立するためには、先進国が途上国に対して CO₂削減を行う際の Win-Win な仕組

みの制定、および環境保全を図るための環境インパクトの評価方法、ガイドラインおよび規制のあり方を国際的に合意していくことが望まれる。

● 随伴水・汚染水

我が国には、石油や天然ガスの資源がほぼ皆無であり、オイルメジャーのような開発企業もない。資源開発には、商社が資本的にサポートし、エンジニアリング企業がプラントを設置するという状況が続いてきたが、資源開発の主体は、メジャーであり、国営企業であり、独自の技術を有する新興企業である。このため、大深水の開発や掘削・圧入技術のノウハウなど、先端分野では、かなりの遅れをとっている。大学等では、分離工学の研究者が非常に少なくなっており、産業界との隔たりも大きい。NEDOなどのファンディング機関やJOGMECなどの資源の安定供給のための機関も整備されているが、研究開発を行う人材の層は、決して厚くない。

単にファンディングを増やすだけでは、このような状況を打破できず、企業連携での成果の取扱いの問題が残る。このため、大学、文科省や経産省傘下の研究所などの工学系の人材を調査・選別し、オープンイノベーションを推進し、若手の育成と開発プロジェクトを検討する必要がある。主な実施主体は、日本人のアカデミア＋産油国の若手研究者の組み合わせになり、プロジェクトの成功により、資源国との長期的な関係評価が可能になる。オイルメジャーや新興企業ではできないオープンな研究開発がプロジェクトの鍵を握る。

● 鉱山からの希少金属

製錬分野では、環境問題、資源問題、エネルギー問題に関連した種々の問題が顕在化しており、これらの解決に向けた継続的な取り組みが望まれる。しかし、既存の産業規模、また、その波及範囲も大きさにも関わらず、大学における基礎教育に携わる教員数は減少傾向であり、将来的な人材不足が懸念される。これに対して、関連学会では、合宿講義などで、各大学からスペシャリストを招き集中講座を行っているが、短い時間の講義では、習熟に限界があり、また、実体(実習)を伴わない座学での学習では、十分な理解度まで到達できていないのが現状である。よって、大学における製錬に関わる研究室・講義の再生を考える必要がある。その方法論には、産業界からの寄附講座、特定の難分離性混合物の分離工学を念頭に国費によるプロジェクト研究室、テニユアトラック制度を製錬工学に拡充し若手教員のユニークな発想に期待した研究室、などが考えられる。同時に、製錬研究で重要となる、熱力学的諸量、粘性、表面張力、熱伝導度、密度、電気伝導度などの基礎物性を高い信頼性で測定できる、米国のNISTにあたる国立研究機関が必要であろう。国研と大学研究機関の役割を再度議論する必要がある。

● 都市からの希少金属

- ・ 経産省と環境省の連携による資源循環に対する新たな価値観の創成

EUが発信したCE(Circular Economy)で、ヨーロッパでは省庁がその領域を超えて連携し、資源循環の新しい価値観を創成すべく政策が始まっている。国内においても、資源循環に関連する経産省と環境省が密接に連携し、廃棄物処理を超えた経済政策としての資源循環政策を検討する必要がある。

・ 長期的な資源確保戦略に基づいた産学官連携の仕組み醸成

資源循環型社会を構築するための分離技術開発は、社会からの要請も大きく、産学官が連携して取り組む課題であり、すでに JOGMEC や NEDO など実証事業が展開されている。しかし、それらの事業は喫緊の課題に対して実装に近い技術を対象としているものが多く、また事業期間も短期間であるものが多い。長期的な視点に立てば鉱石の難処理化や都市鉱山利用の必要性は自明であることから、息の長い検討が必要である新規分離技術開発や機構解明など基礎研究に相当する事項に対しても、小規模であっても継続的に産学官が連携し、広く人材と学術的知見を育成する仕組みを検討する必要がある。

・ 資源国との選鉱技術に関する連携強化

資源国とはこれまでも人材育成や地質調査などに関する連携事業が実施されているが、選鉱をはじめとする分離技術に関する連携事業は現在のところ実施されていない。地球規模の環境問題解決に対する国際連携研究に関する事業に加えて、選鉱をはじめとする分離濃縮技術に関する国際連携研究に対しても個人レベルでの連携以上の強化が望まれる。

・ 都市鉱山資源を対象とした分離技術開発に関する国際連携強化

EU では CE 政策パッケージに基づき、分離技術開発を含む資源循環促進のために多額の投資が予定されている。日本もこの機会に EU との国際連携を強化し、特にクリティカルメタルを対象とした分離濃縮技術の共同開発を検討する必要がある。また、日本における資源循環のあり方はアジア地域を含めた国際資源循環の視点から論じるべきであり、引き続きアジア地域との国際連携強化も望まれる。

（６）キーワード

CO₂ 分離・回収、Pre-Combustion、Post-Combustion、Oxy-Fuel、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離、深冷分離、化学ループ燃焼、随伴水、EOR、大深水、SAGD、Coalbed Methane、Tight oil、Hydrocyclone、TSS、MPPE、非鉄製錬、環境保全、環境技術、持続的発展、資源の有効利用、資源循環、人材育成、反応モデル、その場観察技術、第一原理計算の利用、反応メカニズム、レアメタルからコモンメタルへ、製錬廃棄物最小化、府省連携、選鉱、鉱物処理、都市鉱山、金属資源、2 次資源、リサイクリング、前処理、中間処理、物理選別、固固分離、固液分離、単体分離、粉砕、破碎、磁選、浮選、渦電流選別、電気選別、ソーティング、MLA、粉体シミュレーション

（７）国際比較

CO₂

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	○	→	● CO₂回収プロセスについては分離回収手法の開発が継続されている。 ● RITEは膜法と貯留関連の技術開発を実施している。
	応用研究・開発	◎	→	● 三菱重工は、関西電力と共同開発したKS-1吸収液の実証を行い、RITEおよび電源開発の協力を得て、松島石炭火力発電所で2006年～2008年10t/日、5,000時間以上の連続運転実証を実施。東芝は、2009年より三川発電所内で石炭火力発電所から高性能の吸収液の実証を開始。2011年よ

				り、米国Alabama PowerのBarry発電所で、500 t/日のCO₂回収・貯留実証試験を開始している。 ● 東芝は、2009年に燃焼後回収プロセスのパイロットプラントを福岡県大牟田市に建設し、運転を行っている。 ● 三菱重工は米国で石炭火力からの燃焼後回収商業プラントをEOR用に建設中で、2016年稼働開始予定である。 ● RITEと鉄鋼5社がCOURSE50プロジェクトで開発・実証した吸収液を新日鐵住金エーエスが商業化し、新日鐵住金室蘭製鉄所で1号機が稼働した。 ● CO₂分離膜として、産総研は、安価な材料(ポリフェニレンオキシド)から優れた分離性能と柔軟性を持つ新規中空糸炭素膜を開発し、低コストで破損しにくい膜モジュールの開発に世界で初めて成功。
米国	基礎研究	○	→	● DOE (米国エネルギー省)の National Energy Technology Center(NETL)、National carbon capture center(NCCC)が企業主体のポストおよび燃焼前回収技術開発を支援している。
	応用研究・開発	◎	→	● 米国、カナダでは、石炭火力に対して厳しいCO ₂ 排出量基準を設定している。
欧州	基礎研究	○	→	● Horizon2020で吸収液、セメント製造工程からのCO ₂ 回収技術を支援している。
	応用研究・開発	△	↘	● 英国では、石炭火力に対して厳しいCO₂排出基準を設定している。 ● EUでは、EU指令で、300MW以上の火力発電に対してCCS readyのFSを求めている。英国はさらにCCS readyを義務付けている。
中国	基礎研究	○	→	● 2013年にKCRCは500MWの酸素燃焼、あるいは300MWのIGCCのCCS計画を発表するが、その後国内での具体的なCCSプロジェクトの計画が見られない。Doosan Heavy Industry and Constructionsは吸収液プラントも検討していたが、現在は酸素燃焼技術開発を実施中と表明している。
	応用研究・開発	○	→	● 合計9件のプロジェクトが計画されている。
韓国	基礎研究	△	→	● KCRCとRISTが吸収液、酸素燃焼の基礎研究を実施している。 ● CCSに関する世界最大級の学術会議であるGHGTにおいて、顕著な発表が見られない。
	応用研究・開発	△	→	● Doosan Heavy Industry and Constructionsは吸収液プラントも検討していたが、現在は酸素燃焼技術開発を実施中と表明している。

随伴水（汚染水含む）

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	○	↘	● 大学における化学工学の研究室が少なくなっており、膜分離などの研究も、諸外国と比較して、弱い。近年、水処理に関する大型プロジェクト（CREST、NEDO、COI-STREAMなど）が実施され、ナノテクと分離技術の融合などの新たな動きがあり、若干の盛り返しが見られる。しかし、日本の産学連携は相変わらず弱く、国内の石油化学プラントの縮小傾向にあり、全体としては、弱含みである。
	応用研究・開発	○	↗	● JOGMECなどの公的資金のサポートにより、一定の技術開発が進んでいる。産業界と中東などの資源国との繋がり深く、また信頼関係もあり、中期・長期の研究開発は、油価の低迷にもかかわらず、順調である。また、無機膜など日本が開発してきた分離機能材料が随伴水処理に普及しつつあり、全体として上向きである。
米国	基礎研究	◎	→	● 基礎研究では、トップレベルにある。DOEからの研究予算も潤沢で、テキサス大などの産油地に近い大学では、基礎研究が充実している。産学連携も盛んで有り、シニアの研究者層が厚いのも特徴である。2017年の水関連の予算としては、DOEが4500万ドル、DOIが9860万ドル（WaterSMART program）、USDAが1500万ドル、NSFが8800万ドルを計上している ¹⁶⁾ 。

	応用研究・開発	◎	↗	●油ガス田開発におけるメジャーの相対的な地位は、やや低下したが、シェール開発などで新興企業が台頭し、技術力は非常に高い。また、GEの水処理分野への参入など、資金力を活かした迅速な事業展開が見られる。但し、水処理のベンチャーキャピタルへの投資は、2013年の5億8500万ドルから2014年の3億5800万ドルに急落している ¹⁷⁾ 。
欧州	基礎研究	○	→	●世界企業であるBPやShellが本拠地としているイギリスやオランダは、水処理技術の基礎研究をリードしている。また、DNV（ノルウェーのオイル&ガス分野の認証機関）などには、資源開発のエキスパートも多い。European Commissionでは、2017年に1000万ユーロの予算で水処理関連のプロジェクトを募集している ¹⁸⁾ 。
	応用研究・開発	◎	↗	●水処理に関しては、2大グローバルオペレータであるVeoliaとSuezの存在感が高い。また、英仏は、西アフリカの海底油田の開発などを手がけており、その技術力は、米国に劣らない。
中国	基礎研究	○	→	●国内問題としての水不足や環境汚染を抱えており、かつペトロチャイナを中心に海外の資源開発にも積極的であったことから、基礎研究にも多くの資金が提供されており、かなり充実している。しかしながら、アカデミアと企業との連携は、必ずしも密ではない。
	応用研究・開発	○	→	●水処理関連の部材や機械の生産が盛んであるが、先端技術の開発では、必ずしも進んでいないように感じられる。
韓国	基礎研究	△	↘	●資源開発や関連する水処理技術の基礎研究が進んでいるようには思われない。大学では、エレクトロニクス関連の研究者が多く、化学工学への関心は、あまり感じられない。
	応用研究・開発	○	→	●GLによる水処理ベンチャーの買収など、一時期は、ホットな話題があったが、近年は、動きがない。分離膜などの生産装置の製造力があり、ポテンシャルが感じられるが、随伴水処理のビジネスを展開するには、総合力に欠けるように感じられる。

製錬、都市鉱山

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	○	→	●【銅製錬】銅製錬に関しての基礎研究は活発でない。最近になって、若い技術者の不足から企業での支援も出つつあるが、国内の有力大学にそのような講座がなくなったせいで効率が上がっていない。国の機関としてJOGMECを中心に基礎研究を進める試みがなされようとしているが、長期的ではない。 ●【チタン製錬】企業に基礎研究を行う余力はほとんどなく大学で製錬の基礎研究が行われている。学術は高いレベルにあるが、人材不足であり、この点が急務である。 ●【都市鉱山】選鉱に関する研究は、近年の難処理化に対する懸念を受けて、再び活発化する兆しを見せている。選鉱分野で最も大きい国際会議であるIMPC（International mineral processing congress）^{19,20)}では、欧米、中国、オーストラリアといった資源国に次いで日本から報告件数が非常に多い。前処理に関する研究は、近年の金属価格の低調を受けてややトーンダウンしている。JOGMEC²¹⁾を中心に、選鉱や前処理の基礎研究を進める試みがされているが、プロジェクトが長期的ではないという問題点がある。
	応用研究・開発	○	→	●【銅製錬】企業をベースに行われているが、現在注力されているのは、鉱石にはない人工不純物の対策を施しながら、既存の技術・設備を活用して如何に電子スクラップを処理するかである。なお、我が国の貴金属製錬・リサイクル技術は世界的にみて高いレベルにある。 ●【チタン製錬】国内2社体制（生産量6万トン程度）。新しい製錬法の確立よりも高品質・安定操業に注力。東邦チタニウムのサウジアラビア合弁会社の商業生産の開始、中国のチタン産業の競争力向上などの影響がこの数年で現れると予想。 ●【都市鉱山】企業を中心に応用研究・開発が行われているが、画期的な新規技術は生み出されておらず、注視されているのは、既存の技術や設備を活用して、いかに難処理化する鉱石、あるいは2次資源に対応していくか、といった点であるように見受けられる。2次資源の利用にあたっては、従来の鉱石には含まれない不純物対策や環境対策が必要となるため、そのための技術開発は活発である。

米国	基礎研究	△	↘	●【銅製錬】基本的には海外まかせ。ただし、新規抽出剤などの基礎分野は、化学の基礎研究として残っている。 ●【チタン製錬】DOE/ARPA-E のプログラムで計 6 件(約 12 億円)の新しいチタン製錬の研究を実施。ここ数年で急激にアクティビティーが向上している。90 年代から検討が行われている Armstrong 法のチタン粉ビジネスへの発展も余地を残している。 ●【都市鉱山】選鉱に関しては、以前に比べて米国の存在感は低下しており、目立った基礎研究は見られない。前処理に関しては、リサイクル技術開発全般が米国ではあまり活発ではなく、依然としてその状態が続いている。ただし、新規抽出剤や分離剤の開発など、化学分野に属する基礎研究は活発である。
	応用研究・開発	○	→	●【銅製錬】応用も最近は海外任せになっている。貴金属製錬の一部や環境関連の部分は少し残っている ●【チタン製錬】近年の大幅な技術力の向上はないと考えられる。 ●【都市鉱山】選鉱に関する応用研究・開発に関しても、以前に比べて米国の存在感は低下している。比較的活発であるのは、2 次資源からの貴金属回収や、2 次資源利用に伴う環境対策技術である。
欧州	基礎研究	○	→	●【銅製錬】ヨーロッパは、簡単に学問分野を切り捨てないので、基礎研究も残している。ただし、以前ほど活発ではない。ここのリサイクルや貴金属回収、環境対応の部分が対象 ●【チタン製錬】ケンブリッジ大のシーズを利用したベンチャー Metalysis が商業化へむけ試行錯誤中。しかし、これ以外の有力な研究は見当たらない。 ●【都市鉱山】欧州は伝統を大切にし、息の長い研究を継続する風土があり、そのことによって、選鉱および前処理の双方の分野において、画期的な新規技術が数十年に一度、発見されている。国際会議においても安定した基礎研究発表を続けている。前処理の分野では、貴金属回収や、環境対応に関する基礎研究が特に活発である。
	応用研究・開発	◎	↑	●【銅製錬】リサイクルや貴金属回収、環境対応の部分については応用開発がまだ行われている。特にリサイクルについては先進的な取り組みがなされている。 ●【チタン製錬】チタン製錬会社はない。仮に、上記、Metalysis が商業的に成功すれば、大きなインパクトがあるが、チタン純度、コスト面で大規模生産には困難であると判断する。 ●【都市鉱山】特に前処理の分野において、他分野の企業が共同した応用研究や開発事例が認められる¹⁵⁾。特に 2 次資源利用、貴金属回収、環境対応に対する開発が活発であり、その取り組みは先進的である。
中国	基礎研究	○	↑	●【銅製錬】本当の意味の基礎研究の進み具合は不明であるが、教員、学生数が多く、いずれ日・欧に内容でも追いつき、凌駕する可能性がある。 ●【チタン製錬】熱心な大学の研究室が複数あり、近年の基礎力の向上が認められる。 ●【都市鉱山】国際会議での発表件数および論文報告数は多いものの、質の良い基礎研究ばかりではない。しかし、資源を有し、国土も広く、当該分野の教員および学生数も多いことから、いずれ、日本を含む先進国を質および量ともに凌駕する可能性がある。
	応用研究・開発	◎	↑	●【銅製錬】オリジナリティとしては若干不明であるが、新しく銅の溶錬炉などを開発し、かつ海外の新規プロセスを導入している。 ●【チタン製錬】2013 年時点で、13 社のチタン製錬メーカーがある。総生産量で 8 万トン程度。今後、品質面での向上による競争力アップが見込まれ、輸出も増えるのではないかと予想する。 ●【都市鉱山】技術は先進的ではないものの、新規開発の件数の多さとスピードは目を見張るものがある。自国のみならず、東南アジアやアフリカを中心に、数多くの新規選鉱プロセスを開発しているほか、2 次資源利用の分野においても新規炉等を開発している。環境対策が十分でない点に大きな問題がある。
韓国	基礎研究	△	→	●【銅製錬】昔からあまりこの分野に研究リソースを割いていない。湿式製錬の一部はレアメタル回収と絡み、国立研究所で一定の研究がなされている ●【チタン製錬】特段の動きなし ●【都市鉱山】従来この分野の研究は活発ではなく、選鉱を専門としている大学教員も少ない。一部、レアメタルを対象としたリサイクル技術に関する基礎研究は比較的活発である。

	応用研究・開発	△	↘	●【銅製錬】ほぼ技術的には飽和している。開発対象はやはりリサイクルと環境である。 ●【チタン製錬】特段の動きなし ●【都市鉱山】リサイクルや環境対策に関する多少の応用研究および開発が実施されている程度である。
--	---------	---	---	--

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考文献

- Water for Onshore Oil & Gas, Opportunities in produced water management, hydraulic fracturing & enhanced oil recovery, A Global Water Intelligence Publication (2014).
- Water for Offshore Oil & Gas, Opportunities in sulphate removal, produced water treatment & deepwater operations, A Global Water Intelligence Publication (2014).
- 石油・ガス生産現場における随伴水処理技術（講習会テキスト）、技術情報センター（2014.12）.
- 冬室誠,資源開発における原油・ガス生産の分離技術(分離技術シリーズ 21)分離技術会（2011.7）.
- 海洋ビジネスの最前線と将来展望 2014, 富士経済（2013.12）
- White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil, Natural Gas, and Coal Bed Methane
- <http://www.circleofblue.org/wp-content/uploads/2010/08/prodwaterpaper1.pdf>
- 酒匂 幸男、銅製錬技術の系統化調査、国立科学博物館技術の系統化調査報告、Vol.6 2006.March (<http://sts.kahaku.go.jp/diversity/document/system/pdf/020.pdf>)
- Philip Dewhurst, Titanium sponge supply, Roskill Consulting Group report (http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/DewhurstPhilipTiUSA2013Suppl.pdf)
- 宇田哲也、これからの製錬研究、化学工学第 48 回秋季大会概要集、2016
- 1) Produced Water Volumes and Management Practices in the United State
<http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2009/07/64622.pdf>
- 2) 海底システムの現状 --- 何処まで信頼性を保ち、機器を海底に設置できるか
https://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/3/3127/0905_out_subsea_production_system.pdf
- 3) 伊原賢、目からうろこの重質油 ～開発状況と技術～
http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/2/2113/0808_out_heavy_oil_dev_technology.pdf
- 4) JOGMEC, 我が国の銅の需給状況の歴史と変遷（2006 年）
<http://mric.jogmec.go.jp/public/report/2006-08/chapter2.pdf>
- 5) JOGMEC,日本の鉱業政策の歴史と変遷 ―第 2 次世界大戦後―（2006 年）
<http://mric.jogmec.go.jp/public/report/2006-08/chapter3.pdf>
- 6) 船木弥和子、原油価格下落でのカナダのオイルサンド・LNG プロジェクトの現状

- https://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/7/7666/201601_031a.pdf
- 7) クリスタル社、ならびに東邦チタニウムと合併の中東のチタン製錬工場に関する情報
<http://cristalmetals.com/index.html>
<https://www.toho-titanium.co.jp/company/principals.html>
http://www.nikkei.com/article/DGXNASDD220KR_S4A120C1TJ1000/
- 8) 日本鉄鋼連盟. 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会（第7回）資料「日本鉄鋼連盟説明資料」. 2014年12月.
- 9) 世界のCCSの動向. 2015 サマリーレポート. GLOBAL CCS INSTITUTE. 2015年11月.
- 10) 岡津弘明, 石油開発における採油増進回収技術, 季報エネルギー総合工学, vol.30
http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/06/200707_Vol30_No2.pdf
- 11) 米国 DOE/ARPA-E プログラム紹介
<http://arpa-e.energy.gov/?q=slick-sheet-project/direct-production-titanium-powder>
- 12) EU Comission, Circuller Economy Strategy
http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm
- 13) EIT, EIT Raw Materials
<https://eit.europa.eu/eit-community/eit-raw-materials>
- 14) 産総研, 戦略的都市鉱山研究拠点
<https://unit.aist.go.jp/emri/sure/index.html>
- 15) MSP-REFRAM project
<http://prometia.eu/msp-refram/>
- 16) Research and Development, Analytical Perspectives, 299-306, Whitehouse
https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/omb/budget/fy2017/assets/ap_19_research.pdf
- 17) Investument in North Americal Water Technologues Down, RWL water
www.rwlwater.com/investment-in-north-american-water-technologies-down/
- 18) 2017 Work Programme includes €10m funding for water research, WaterBriefing
<http://www.waterbriefing.org/home/technology-focus/item/12730-horizon-2020-2017-work-programme-includes-%E2%82%AC10m-funding-for-water-research>
- 19) XXV International Mineral Processing Congress 2010 (IMPC 2010) (6-10 September 2010, Brisbane, Australia), Proceedings.
- 20) XXVI International Mineral Processing Congress 2012 (IMPC2012) (24-28 September 2012, New Delhi, India), Proceedings.
- 21) JOGMEC 金属資源開発 技術開発・技術支援
<http://www.jogmec.go.jp/metal/index.html>

3.2 7 燃焼(全般)

（１）研究開発領域の簡潔な説明

燃焼は、化学反応と熱・物質移動現象が複合する極めて複雑な現象である。燃焼反応は数千に及ぶ素反応の組み合わせからなり、熱・物質移動現象は微細な分子スケールの拡散現象から大規模火災のような大スケールの輸送現象までを包含している。現在は燃焼が、動力・発電・熱需要の大部分を賄う基幹技術となっている。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

我が国の一次エネルギー供給構造を見ると石炭、原油、天然ガスなどの化石資源が 2014 年の段階で 90%を超える割合となっている¹⁾。その多くが燃焼により消費されており、燃焼におけるエネルギー利用効率の格段の向上および温室効果ガス排出の大幅削減の重要性は容易に理解できる。特に 2015 年 12 月の COP21 において、産業化以前より地球平均気温上昇を 2℃に抑える長期目標が採択され、これに伴い革新的な技術の創生が不可欠となっている。技術革新を推進するには、その現象を支配する物理・化学過程の根本的な理解が欠かせないが、燃焼現象は化学反応と熱・物質移動現象が複合する極めて複雑な過程であり、その理解が不十分であるため革新的技術を現実のものにできない例が数多く存在している。例えば、内燃機関における予混合圧縮着火エンジン、1700℃級ガスタービンにおける希薄燃焼技術、Oxy-Fuel 燃焼などはその代表的な例といえる。したがって、燃焼の技術革新を支える燃焼科学の深化とそれに基づく革新的基盤技術の構築が求められている。

また、もう一つは種々のエネルギー源の最適な組み合わせを可能にするエネルギーキャリアの導入と、これに対応した燃焼技術の確立が重要な課題である。例えば、原子力や太陽光のエネルギーにより既存の化石燃料を置き換えるには、電気エネルギーを水素あるいは他の燃料に転換し貯蔵、配送を可能にするとともに、これを動力、熱、物質といった他の形態でも効果的に使用できるようにしなければならない。この時に、エネルギーキャリアとなる燃料の燃焼特性や燃焼機器への効果的導入を可能にする基盤技術の構築が要請されている。

[動向（歴史）]

燃焼分野には起源を 1920 年代に遡る国際研究コミュニティが存在する。1954 年に正式に The Combustion Institute として発足以来、世界中の燃焼研究の礎となってきた。今日燃焼は、発電・運輸・産業・民生等のあらゆる活動に深く関わっており、エネルギー供給、輸送、鉄・ガラスなどの素材製造、さらに宇宙活動に至るまで膨大な用途に利用されている。我が国はこの国際コミュニティで、米欧およびアジア環太平洋諸国と共に国際協力の核となる役割を果たしてきた。1950 年代に熊谷清一郎（東大）が実施した液滴燃焼に関する微小重力実験は、微小重力場が科学に貢献することを世界で初めて示し、米国による国家規模の宇宙実験活動へつながった。今日まで、燃焼学における世界最高峰の賞が 4 名の日本人に授与されている。

石炭による発電技術に関する「クリーンコールプロジェクト」においては、あらゆる側面から石炭利用技術が研究され、基礎・実用技術が蓄積された結果、我が国の石炭利用技術が

現在、世界最高水準にあることが挙げられる²⁾。また 90 年代から始まった加熱工業炉のための新燃焼方式「高温空気燃焼技術」の研究開発では、均一燃焼場形成によって 30%と大幅な燃料削減と NO_x の著しい低減を達成しただけでなく、あらゆる角度から検証された基礎研究を武器に同技術が種々の異種燃焼器に応用された³⁾。特筆すべきは同方式の廃棄物焼却炉であり、ダイオキシンの大幅減少のみならず、廃棄物発電も可能とし圧倒的優位性を確立している⁴⁾。また同方式のスチームリフォーマーでは、世界をほぼ独占していた欧州メーカーとの力関係を変える新方式の国産リフォーマ開発に繋がった⁵⁾。「高温空気燃焼技術」は日本発の技術であるが、その後海外でも盛んに研究が行われており Mild-combustion, Flameless combustion といった別の呼び名で基礎および応用研究が継続されている⁶⁾。

CO₂ 問題や燃料多様化を背景に、各国が抜本的な燃焼研究進捗を目指し巨大な燃焼研究拠点の形成を進めている。近年では米・中、さらにサウジアラビアで 200 億円規模な燃焼研究拠点が設置されている。新興国とりわけ中国の台頭が目覚ましい中、我が国でも低炭素社会実現のため抜本的な取り組みが急がれる。

燃焼技術は、動力・発電・熱需要の大部分を賄う基盤技術である。それぞれの主要な動向として、エンジン燃焼、ガスタービン燃焼、燃焼式工業炉、微粉炭燃焼の技術動向について述べる。また、燃焼技術の新たな応用動向について述べる。

a) エンジン燃焼（研究開発領域を別途設定）

我が国の自動車メーカー各社のエンジンは依然として高いレベルにあり、近年の厳しい排ガス規制に対応しつつ、最新エンジンの熱効率は 38～40%に達する⁷⁾。さらなるブレークスルーを目指して、熱効率 50%を目標に戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的燃焼技術」が進行中である⁸⁾。本プロジェクトの研究開発対象は、ガソリンエンジンにおける超希薄燃焼、ディーゼルエンジンにおける燃料と空気の高度混合、両エンジン共通の排気再循環燃焼、制御モデリング、設計開発基盤となる高速 3D 燃焼数値計算ソフト、排気エネルギーの有効利用、燃料改質による反応性制御、機械摩擦損失低減などであり、燃焼だけでなく関連要素技術についても研究開発が進められている。また、家庭用コージェネレーションやトラックを中心に、天然ガスを用いたガスエンジンの研究開発が進んでおり、販売台数が増加している⁹⁾。一方、海外ではエンジン単体の高効率化だけではなく、バイオ燃料由来の最適燃料の研究開発も同時並行で進められている⁹⁾。また、オゾンやプラズマの利用による着火制御についても研究開発が進められている。

◇ SIP「革新的燃焼技術」（日本）⁸⁾：自動車用内燃機関を対象に、熱効率 50%を目標とした要素技術の研究開発と実証が進められている。主要国内自動車メーカー9 社が中心となる自動車用内燃機関技術研究組合と延べ 78 大学が連携している。人的交流による持続的な産学連携体制の構築も進められている。

◇ SIP「エネルギーキャリア」（日本）¹⁰⁾：再生可能エネルギー由来のエネルギーキャリアについて、製造・貯蔵・輸送・利用までを俯瞰的に見据えた研究開発が進められている。このうち燃焼利用分野において、アンモニア燃焼によるマイクロガスタービンの実証が実現し、大型化に向けた研究開発が進められている。

◇ Co-Optima（アメリカ）⁹⁾：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 ヶ所が中心となって進めている。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ことが特徴である。燃料が変われば最

適燃焼法も変わってくるが、我が国の SIP「革新的燃焼技術」では既存燃料を対象に研究開発を進めていることから、新燃料の研究開発に関する動向は特に注意する必要がある。

- ◇ 7th Framework Programme (FP7)および Horizon 2020（欧州）：EU 最大規模の研究開発予算。省エネに関するテーマの中に、運輸（飛行機、自動車、船舶）のエンジン燃焼、微粉炭燃焼ボイラの高効率化（目標効率 48%）、ゼロエミッション石炭火力発電の開発などが挙げられている。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いる。非 EU・先進国の研究者は自国のファンディング機関から支援を受ける形で参画可能（日本の場合は JST）。英国の EU 離脱により、今後の英国研究者への支援体制に注意を要する。
- ◇ Clean Combustion Research Center(CCRC)（サウジアラビア）：前国王によって大学（KAUST: King Abdullah University of Science and Technology）が 2009 年に設立され、同時期に設立された燃焼専門の研究センターである。前国王と世界最大の石油会社 Saudi Aramco の巨額資金により、最先端の研究設備導入と著名な研究者のリクルートが進められている。設立準備段階を終え、近年は論文数・被引用数ともに、世界トップレベルになっており、急速に成長している。世界各国の学生・研究者が在籍しているが、日本人の在籍は皆無であり、今後の動向に注意を要する。
- ◇ FVV（ドイツ）：自動車用内燃機関に関連するメーカー・サプライヤーの技術協同組合であり、産学連携による共同研究を推進している。前述の SIP「革新的燃焼技術」における産学連携コンソーシアムのモデルケースである。

b) ガスタービン燃焼

低 CO₂ 排出を志向して、天然ガス焚き発電用ガスタービンについて研究開発が盛んである¹¹⁾。我が国では、タービン入口温度 1500℃級のコンバインドサイクルで熱効率 60%超・出力 98 万 kW（2016 年 7 月稼働の新仙台火力 3 号系列）を実現し、世界トップクラスの高効率・大電力供給を実現している¹²⁾。現在、1700℃級ガスタービンの研究開発が進められており、タービン入口温度の高温化は各国共通の開発目標である¹¹⁾。また、バイオ燃料¹¹⁾や水素⁴²⁾と炭化水素との混焼も、各国共通の開発目標である。我が国特有の動向として、高湿分空気利用ガスタービン（AHAT）が挙げられる¹¹⁾。タービン入口温度の高温化による第一法則における効率向上とは異なり、空気の高湿化と再生サイクルの組み合わせによる第二法則における効率向上を狙っており、中小型ガスタービンで有意性が顕著となる。また、空気炊きガス化炉により石炭をガス化して燃料とする 1200℃級コンバインドサイクル（IGCC）は、熱効率 40%超・出力 25 万 kW の商用運転中であり、1500℃級による熱効率 50%超が期待されている¹¹⁾。さらに、エネルギーキャリアとして有効性が期待されているアンモニア¹⁰⁾と炭化水素の混焼について研究開発が進められている。アンモニアはその反応性の低さからガスタービンでの燃焼利用が難しいと考えられていたが、産総研でアンモニア専焼による小型ガスタービン発電に世界で初めて成功した¹⁴⁾。

c) 燃焼式工業炉

排熱回収により空気を 1000℃以上に加熱してから燃焼利用する高温空気燃焼技術は、従来型燃焼炉と比較して燃料消費量の約 30%削減を実現し、各種燃焼式工業炉に普及が進んでいる^{15),16)}。日本発の技術の海外普及を促進させるために、日本工業炉協会が中心となり、

工業炉の効率評価法の ISO 規格化が進められており¹⁷⁾、日本の高い省エネ炉をより本質的かつ公正に評価できるように、エクセルギーを用いた効率評価法の研究開発が進められている。ポスト高温空気燃焼として、高温酸素燃焼の研究開発が進められた¹⁸⁾。排熱回収に排気再循環を組み合わせ、予熱した既燃ガスと酸素の混合気を酸化剤として用いることで、極限まで排気損失を低減することと、炉内が輻射性ガス（CO₂とH₂O）で満たされることで被加熱物への入熱量が増加することとの相乗効果により、従来型燃焼炉と比較して燃料消費量の44%削減を実現した。また、比較的低温の加熱需要に対して、マイクロコンバスタ技術を利用した密閉式ガスヒータ搭載連続加熱炉の研究開発が進められている^{19),20)}。強度の排熱回収により、従来型ガスバーナと比べて燃料消費量の80%削減を実現した。

d) 微粉炭燃焼

石炭は他の燃料に比べて単位発熱量当たりのCO₂排出量が大きく、地球温暖化防止の観点に対するデメリットを有するが、賦存量が豊富かつ安価で比較的価格変動が少ないことから、2040年までの需要は増加し続けると予想されている²¹⁾。石炭の利用形態の大部分を占める微粉炭燃焼技術の分野では、米国での研究活動は縮小傾向であるものの、欧州や中国では引き続き研究が活発に行われている。特に、品質は低い安価な石炭をトラブル無く利用できるようにするため、ボイラ内での微粉炭の燃焼特性を予測する数値シミュレーション技術開発が盛んに行われている。特に、これまで主にガス燃焼場や噴霧燃焼場を対象に行われてきたラージ・エディ・シミュレーション(LES: Large Eddy Symulation)が微粉炭燃焼場にも適用されるようになってきており、近年、石炭燃焼 LES に関する論文の発表件数が、欧州と中国を中心に飛躍的に増加している。その他、欧州では、フレームレス燃焼により微粉炭燃焼ボイラからのNO_xを低減する技術の開発²²⁾が行われている。CO₂回収貯留(CCS: Carbon Capture and Storag)の適用を見据えた酸素燃焼技術開発については、豪州のカライド発電所4号機(30MWe)にて実証試験が行われた²³⁾。その他、欧州、米国においても活発に研究が行われている。

- ✧ **Mega-grant** (ロシア) : 全自然科学分野の中から約160の重点分野が選定され、研究開発と教育の両面において、大型予算により最先端の環境整備が進められている。重点分野のひとつに燃焼が選ばれ、ウラジオストックの極東連邦大学において先端燃焼研究の環境整備が進められている。
- ✧ **Federal Alternative Jet Fuels Research and Development Strategy**(アメリカ)²⁴⁾ : 2016年に発表されたジェット燃料に対する研究戦略。代替燃料の燃焼特性、燃焼排出物に対する研究開発が求められている。
- ✧ **ANR Work Programme** (フランス)²⁵⁾ : **Societal challenges and the other knowledge challenge**の項目内において新燃焼法、新燃料に対する研究が求められている。
- ✧ **FLOX-COAL-II**²²⁾ (ドイツ) : **Stuttgart**大学が中心となっているプロジェクトで、石炭にフレームレス燃焼を適用することにより、火炉からのNO_x排出量を大幅に削減する技術である。
- ✧ **ポスト京開発プロジェクト「革新的クリーンエネルギーシステムの実用化」**²⁶⁾ (日本) : スーパーコンピュータを用いた燃焼・ガス化の数値シミュレーション技術開発が進められている。
- ✧ **日本燃焼学会「設計プロセスの高度化を目指した燃焼解析のプラットフォーム開発と**

検証」（日本）：日本燃焼学会および国内 13 社が協力し燃焼に関する非競争領域の数値解析プラットフォームを開発するとともに標準実験によるプログラムの検証を行っている²⁷⁾。

（３）注目動向

〔新たな技術動向〕

- 燃料技術の新しい応用技術としては、マイクロ燃焼技術を利用して、携帯サイズ小型熱源による小型発電の研究開発が進められており、日本の研究グループが世界最高の変換効率と出力密度を達成した。マイクロ燃焼場の高い比表面積を利用して、各種材料の表面失活におけるラジカルの吸着係数を計測するプラットフォーム化が進んでいる。また、蒸気化した材料物質を燃焼場で反応させることで、各種機能性ナノ粒子の合成が研究開発されている。次世代ロケットおよびスクラムジェット燃料として、単位体積当たりの発熱量等の要因から、水素から炭化水素に回帰する動向がみられる。
- 石炭燃焼に関する新たな動向として、ケミカルループ燃焼（CLC：Chemical Loop Combustion）が挙げられる。CO₂回収のために、火力発電所へのケミカルループ燃焼の適用を最初に 1994 年に論文²⁸⁾で提案したのは、東工大の石田愈・名誉教授であったが、その後、実用化を目指した大きなプロジェクトは日本国内では近年まで行われてこなかった。その間に、欧州²⁹⁾や米国^{30,31)}で活発に研究が行われてきており、実用化を目指したプロジェクトが進行している。日本では最近になって三菱日立パワーシステムズ、JCOAL、エネ総工研、産総研が中心となった NEDO プロジェクト³²⁾が開始したが、日本国内でこの分野に従事している研究者は著しく少ない。

〔注目すべき国内外のプロジェクト〕

CLC について、以下のプロジェクトが進んでいる。

- NEDO ゼロエミッション石炭火力技術プロジェクト：「CO₂回収型次世代 IGCC 技術開発」では、O₂/CO₂ 吹ガス化炉とセミクローズドガスタービンを組み合わせた発電システムについて、電中研と九州大学が中心となって開発を行っている。「CO₂分離型化学燃焼石炭利用技術開発」では、欧米が先行している CLC の技術について、三菱日立パワーシステムズ、JCOAL、エネ総工研、産総研が中心となって開発を行っている。共に H28 年度からは NEDO 「次世代火力発電等技術開発」に引き継がれている。
- SUCCESS²⁵⁾（欧州）：Vienna、Chalmers 等の大学や SINTEF 等の研究所、Shell 等の企業が参加し、1MW_{th} スケールの CLC システムの技術開発を行っている。
- DOE/CLC 関連プロジェクト（米国）：Alstom 社が CLC の 1MWe プロトタイプシステムを構築するプロジェクト（FE0009484）および Babcock and Wilcox (B&W) とオハイオ州立大学が石炭を燃料とする CLC の商用化を目指したケーススタディを行うもので、同じく 1MWe の装置を構築するプロジェクト（FE0009761）が採用されている。
- DOE/Advanced Combustion Systems（米国）：DOE では現在、先進的燃焼技術に関する公募を行っており、特に加圧酸素燃焼および CLC の分野での採用が想定されている。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

■ 燃料と酸化剤の多様化

各技術動向の共通課題のひとつとして、燃焼させる燃料と酸化剤が多様化していることが挙げられる。燃料は産地や各国の事情によりその成分が大きく異なり、バイオ燃料・水素・アンモニアなどの添加が期待され、ガス化・改質の方式により得られる燃料組成が変化する。また、排気再循環の強度や燃焼条件により酸化剤中の CO_2 、 H_2O 、 O_2 、 N_2 、 NO_x 、 SO_x 、未燃炭化水素の割合が変化する。燃料組成と酸化剤組成が変化すると、燃焼特性も敏感に変化する。このため、燃料と酸化剤の組成変化に対応した新燃焼器の設計開発には、膨大な燃料組成や酸化剤組成の組み合わせに対して、燃焼特性の把握とモデル化の基盤整備が求められている。

■ 実機相当の高温高压における基礎燃焼データ

多くの実用燃焼器では酸化剤または予混合気を加圧または予熱後に燃焼させ、さらなる高効率化のために加圧や予熱を強化する動向にあることから、高温高压条件における基礎燃焼特性の把握が欠かせない。また、こうした基礎データはモデルの実機相当条件における妥当性検証にも不可欠である。着火特性については衝撃波管などにより高温高压条件の基礎データが取得されつつあるが、伝播火炎の特性については、依然として基礎試験が実現できる高温高压条件と実機相当条件に乖離があり、データも限られている。

■ ノッキングおよび燃焼振動（異常燃焼）

多くの燃焼機器において、ノッキングまたは燃焼振動の発現が実質的な性能向上を制限している。ノッキングは乱流火炎伝播と着火と圧力波の連成現象であり、燃焼振動は非定常火炎挙動と圧力波の連成現象である。いずれも古くから知られている現象であり、深刻な場合は機器破損にも至る。しかしながら、極めて短い時間スケールにおける複雑な連成現象であるため、依然として発現を正確に予測することは困難である。先進の計測技術と数値計算技術により、発生メカニズムを解明し、モデル化することで、抑制または回避方法の創出が期待される。

■ 燃焼数値解析の計算負荷

燃焼器の設計開発において実スケールの試験を繰り返すことはコスト面で非現実的であるため、数値解析による燃焼シミュレーションが必要不可欠である。しかしながら、数百化学種・数千素反応からなる詳細な燃焼反応モデルを用いた燃焼数値解析は計算負荷が膨大で、化学反応項の解の硬直性が強いいため、現実的な計算リソースと時間内に解を得ることが困難である。

■ NO_x 、 SO_x 、スス排出、未燃炭化水素排出

多くの分野で厳しい環境規制が導入されているため、燃焼器の実質的な運転範囲が NO_x 、 SO_x またはスス排出量によって制限されることがある。燃焼器からの排出量を規制値以下に保つための基盤技術として、 NO_x 、 SO_x およびスス生成のメカニズム解明と精緻なモデル構築が求められている。また、燃焼器単体での排出量削減が不可避な場合に NO_x 還元触媒や PM 酸化触媒が、各種化学プラントでは未燃炭化水素を含むオフガス処理のために酸化触媒が利用されることがある。これらの触媒によるコストやエネルギー消費の増加を極力抑える

ために、高収率・高耐久性な触媒の研究開発が求められている。

■ 微粉炭燃焼および CLC

微粉炭燃焼および CLC の共通課題として、今後の燃料性状の低品質化が挙げられる。今後の石炭の需要増により、これまで使用してきた安定的な品質の石炭が入手しにくくなり、低品位な燃料の利用拡大が求められてくる。燃料として利用する石炭の性状は、燃焼特性を通して実用機器の設計や運転に大きく影響を与えるが、その影響度を予測する技術は発展途上である。また、燃焼特性のみならず、石炭の品質が変われば灰のトラブル（伝熱面等への灰付着等）の起こりやすさも影響を受けるが、灰粒子の伝熱面付着に関する予測技術も発展途上である。また、CO₂排出量削減を目的として、固体バイオマス燃料や可燃固体廃棄物の混焼を行ってもトラブル無く実用機器を運転できるかどうか予測する技術も求められる。

CLC は、金属酸化物をキャリアとして、キャリアを空気によって酸化する反応器と、キャリアを燃料によって還元する反応器の二つの反応器から構成され、酸化反応器からは窒素と残存酸素が、燃料反応器からは CO₂ と水がそれぞれ別々に排出されるため、CO₂ 回収時に燃料反応器からの排ガスの水を凝縮させるだけで高濃度の CO₂ が得られる。課題としては、発電のコストに直結するものとして、いかに安価で耐久性の高いキャリアを開発するかという点と、未だ実用化されていない技術であるため、実用化規模へのスケールアップをしながら全体のシステムを開発する必要がある点である。

[今後取り組むべき研究開発テーマ]

■ 多様な条件における燃焼基礎特性の取得

技術動向を念頭に置きつつ、様々な燃料・酸化剤・温度・圧力条件における燃焼基礎特性を取得する必要がある。実用燃焼器の燃焼場では複数の燃焼特性が重要となることから、燃焼基礎特性として、着火遅れ時間、層流燃焼速度、乱流燃焼速度、消炎限界、火炎構造、化学種分布、温度分布、固有不安定性、微粒化特性などを取得する必要がある。これらのデータを取得するためには、燃焼場で利用可能な先進計測技術の研究開発が重要となる。可燃限界近傍の基礎燃焼特性は自然対流の影響を受けやすいことから、微小重力環境の利用が必要である。高温高压の燃焼試験設備は大型となることから、研究拠点の整備が求められる。得られた基礎実験データは、後述する各種モデルの検証データとして広く利用される必要がある。

■ 化学反応モデルの研究開発

長年の継続的な研究開発により、各種炭化水素の単成分については信頼できる化学反応モデルが構築されつつある。モデルのさらなる信頼性と予測精度向上のため、理論計算により得られた反応速度定数の高精度化・不確かさ解析を進め、基礎実験データと比較検証することで、モデル定数の最適化を進める必要がある。また、依然として理解が進んでいない化学反応は多く（低温酸化反応、バイオ燃料由来燃料に含まれる含酸素燃料の酸化反応、混合燃料成分系におけるクロスリアクション、NO_x・SO_x 反応と炭化水素反応の連成、水蒸気や二酸化炭素が燃料の酸化反応に及ぼす影響、アンモニア燃焼反応、スス前駆体の多環芳香族生成反応、オゾンによる反応促進、プラズマ反応）、燃焼機器の高熱効率化と低エミッション化の極限を志向するための基盤となる”完全な”化学反応モデルの構築を目指して、継続的な研究開発が必要となる。

■ 高速燃焼数値解析法の研究開発

燃焼数値解析に要する膨大な計算リソースを大幅に削減するために、燃焼数値解析の革新的高速化法と解の精度を損なわない詳細化学反応モデルの簡略化法の両方が必要となる。また、一般に実用燃焼器は乱流燃焼の形態をとるため、乱流渦と化学反応の干渉を解く必要があるが、これを実現する直接数値計算（DNS）は実用的でない。したがって、乱流火炎の基礎特性を DNS や乱流燃焼実験で取得し、これらと比較検証しつつ、LES や RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation、レイノルズ平均モデルシミュレーション) をベースにした乱流燃焼モデルの研究開発が必要となる。

■ 異常燃焼の予測回避技術の研究開発

管内音響共鳴や強制音響場における非定常火炎挙動およびモデル燃焼器（単気筒エンジン、ガスタービン、工業炉、ロケットなどの模擬バーナ）の燃焼試験を通して、ノッキングや燃焼振動の発生メカニズムの解明が重要である。また得られた知見を元に、異常燃焼の回避方法および事前予測技術の研究開発も重要となる。これらの基盤となる、実用燃焼器に適用可能なセンシング技術および得られたリアルタイムデータの統合処理技術の研究開発が必要となる。

■ 粒子生成モデルの研究開発

燃焼器からのスス排出量を削減するために、スス生成過程（多環芳香族を代表とするスス前駆体物質が成長して一次粒子を形成、これらが重合して二次粒子を形成）の解明とモデル化が重要となる。気体から固体粒子が形成される過程は、量子力学レベルの化学反応と分子動力学レベルの運動が連成するため、分野横断的研究開発が必要となる。また、本研究開発は燃焼合成によるナノ粒子生成過程の解明とモデル化にも有益である。

■ 触媒反応モデルの研究開発

各種材料表面近傍における化学種濃度計測技術の研究開発し、表面における様々な化学種の吸着と脱着、ラジカルの失活の速度定数をモデル化し、表面反応モデルを構築することが重要になる。また、ナノオーダーの触媒粒子や担体周りの物質拡散モデルを構築することも重要になる。両者を統合することで、数値流体解析による触媒性能評価を実現し、触媒の研究開発を加速させることが期待される。

■ 固体燃料粒子反応数値シミュレーション技術開発

固体燃料の性状の変化が実用燃焼機器内における燃焼特性や灰粒子の伝熱面付着特性に与える影響を精度良く予測できる数値シミュレーション技術開発が重要である。特に、燃焼場中における固体粒子の熱分解挙動や、その後の熱分解ガスの詳細な化学反応機構について、計算精度の高いモデルの構築が重要となる。モデル構築のためには、固体燃焼場中の化学種濃度分布計測などによるモデル検証用のデータ取得も必要となる。

■ CLC 技術の確立へ向けた研究開発

日本は CLC の研究開発について、欧米に遅れをとっているが、安価で耐久性の高いキャリア開発等の分野や、実用化へ向けたシステムインテグレーション等について、日本は高い潜在力を持っているため、遅れを取り戻すためにも研究者の数を拡大していくことが期待される。

（５）政策的課題

制度上の課題としては、産学官連携研究において大学の研究を如何に活性化するかという点である。例えばドイツ FVV の場合、大学が基礎研究から技術開発のあるレベルまでを担うことができる体制を維持しているがその大きな原動力が大学の博士課程の学生やポスドクの存在である。博士学生が高いモチベーションで大学において研究を行える背景には博士学生が給与を得ながらプロジェクト内で研究活動に励みその成果が認められれば、産学連携を行っている企業や国の研究機関で職を得るという循環ができていたためである。我が国ではこのような循環はできておらず、産学官連携の実働を担うのは主に修士課程の学生でありこの部分が研究の競争力の差になっている。また、燃焼領域に限ることではないが、現象の科学的理解の深さが技術力の差に直接結びつくことを産業側が理解することの一方で、大学側は科学的理解を深める際に出口となる産業応用を意識することが重要であり、両者がこのような意識を持つことができる体制づくりが望まれる³¹⁾。技術の標準化に関しては、わが国の優れたエネルギー機器の性能が正当に評価されるような国際標準をわが国主導で構築していくことが望まれる。

（６）キーワード

エンジン、ガスタービン、ロケット、工業炉、層流火炎、乱流火炎、燃焼速度、化学反応、固有不安定性、燃焼振動、ノッキング、簡略化反応機構、詳細反応機構、NO_x、SO_x、スス・PM（Particulate Matter）、低温酸化反応、着火、バイオ燃料、水素、アンモニア、微小重力燃焼、マイクロ燃焼、高温空気燃焼、高温酸素燃焼、触媒燃焼、微粒化、プラズマ支援燃焼、エネルギーキャリア、固体燃料、石炭、微粉炭、廃棄物、低品位燃料、数値シミュレーション、熱分解、CLC、灰付着

（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レベルにあるが、研究者の層が薄い。近年、燃焼を主眼とした大型予算が措置され始めたため、今後研究者の層の厚みが形成されることが期待される。
	応用研究・開発	◎	→	・ 実用燃焼機器の熱効率・エミッションはいずれも世界トップレベルにあり、日本の省エネ技術をけん引している。
米国	基礎研究	◎	→	・ 燃焼を主眼とした大型予算が措置されにくい状況にあるが、研究の質と研究者の層の厚さは依然強トップレベルにある。 ・ シェールガス開発によるガス価格の下落に伴い、石炭の基礎研究は下火になりつつある。
	応用研究・開発	◎	→	・ 産業界との大学の共同研究が活発である。また、具体的な目標物（自動車、航空機）に対する政府機関と大学の共同研究が進められている。
欧州	基礎研究	◎	→	・ 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、EUが措置するFP7および後継のHorizon 2020により、多国間の研究者ネットワークが形成されており、研究の質も高いレベルにある。 ・ 液体燃焼に対してIFPen(フランス)、ONERA(フランス)、DLR（ドイツ）などの研究機関が基礎研究から応用研究までを牽引している。

	応用研究・開発	◎	→	- ドイツFVVをはじめとして、産業界との共同研究が活発である。 - 石炭燃焼は、CLCやフレームレス燃焼など、新しい技術開発プロジェクトが活発に行われている。
中国	基礎研究	○	↗	- 燃焼への大型予算が措置されており、燃焼を主題目とした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、全体をけん引している。 - 微粉炭燃焼関連研究は研究発表件数が著しく増加すると共に、研究の質の向上も顕著である。
	応用研究・開発	△	↗	実用燃焼機器の省エネ性能は依然として我が国の方が優位であるが、研究開発は旺盛に進められている。
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いため、特定分野（例えば化学反応）では成果が見られない。 - 液体ロケットエンジンに対する研究に予算が付けられている。 - 微粉炭燃焼研究は引き続き活発に行われている。
	応用研究・開発	△	→	実用燃焼機器の省エネ性能は依然として我が国の方が優位であり、特筆すべき大型プロジェクトもない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考文献

- 1) BP Global(2014)
- 2) Clean coal technologies in Japan, NEDO, 2006.12.
- 3) Hiroshi Tsuji, Ashwani K. Gupta, Toshiaki Hasegawa, Masashi Katsuki, Ken Kishimoto, and Mitsunobu Morita, High Temperature Air Combustion -From Energy Conservation to Pollution Reduction-, CRC Press 2002, Print ISBN: 978-0-8493-1036-2
- 4) <http://www.jfe-eng.co.jp/products/link/t02.html>
- 5) <https://www.chiyoda-corp.com/technology/future/hicot.html>
- 6) Antonio Cavaliere, Mara de Joannonb, Progress in Energy and Combustion Science Volume 30, Issue 4, 2004, pp.329-366
- 7) 公益社団法人自動車技術会、自動車技術 特集 年鑑（2016年8月号）
- 8) SIP「革新的燃焼技術」 ホームページ <http://www.jst.go.jp/sip/k01.html>
- 9) Co-Optima, <http://energy.gov/eere/bioenergy/co-optimization-fuels-engines>
- 10) SIP「エネルギーキャリア」 ホームページ <http://www.jst.go.jp/sip/k04.html>
- 11) 一般社団法人日本機械学会、日本機械学会誌 特集 発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望（2016年8月号）
- 12) 東北電力 プレスリリース http://www.tohoku-epco.co.jp/news/normal/1192188_1049.html
- 13) NEDO、水素社会構築技術開発事業 <http://www.nedo.go.jp/content/100784044.pdf>
- 14) 産業技術総合研究所 プレスリリース http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2015/pr20150917/pr20150917.html

- 15) NEDO、高性能工業炉等の開発プロジェクト（平成 5-11 年度）
- 16) NEDO、高温空気燃焼制御技術の研究開発（平成 11-15 年度）
- 17) 工業炉協会 ホームページ <http://www.jifma.or.jp/index.html>
- 18) NEDO、高温酸素燃焼技術の研究開発（平成 23-25 年度、先導研究）
- 19) NEDO、マイクロコンバスタ技術を利用した密閉式ガスヒータ搭載連続加熱炉の研究開発（平成 23-25 年度、実用化開発）
- 20) NEDO、マイクロコンバスタ技術を利用した密閉式ガスヒータ搭載連続加熱炉の研究開発（平成 26-27 年度、実証フェーズ）
- 21) アジア／世界エネルギーアウトルック 2015, 日本エネルギー経済研究所
- 22) FLOX-COAL- II , <http://floxcoal2.eu-projects.de/>
- 23) カライド酸素燃焼プロジェクト, <http://www.callideoxyfuel.jp/>
- 24) https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/federal_alternative_jet_fuels_research_and_development_strategy.pdf (USA)
- 25) <http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/funding-opportunities/work-programme-2016/> (FRA)
- 26) ポスト京開発プロジェクト「重点課題 6 革新的クリーンエネルギーシステムの実用化」
<http://www.aics.riken.jp/jp/post-k/pi/kadai6>
- 27) 日本燃焼学会 燃焼解析プラットフォーム研究開発プロジェクトチーム「産学連携研究事業 燃焼解析プラットフォーム開発・検証」, 日本燃焼学会誌 vol.58 No.186 (2016 年 11 月号).
- 28) Ishida, M. et al., Energy, 19, 415-422, 1994
- 29) SUCCESS, <http://www.clc-success.eu/>
- 30) DOE, FE0009484
<https://www.netl.doe.gov/research/coal/project-information/proj?k=FE0009484>
- 31) DOE, FE0009484
<https://www.netl.doe.gov/research/coal/project-information/proj?k=FE0009761>
- 32) NEDO ニュースリリース http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100421.html

3.2 8 エンジン燃焼(自動車)

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

エンジン(本領域では内燃機関)は、シリンダ内の吸気・圧縮・燃焼・排気の往復動サイクルにより、燃料の化学エネルギーを回転運動に変換する装置である。エンジン燃焼の特徴は間欠的な短時間での燃焼完結が必要であり、さらには圧縮時において自己着火という、他の燃焼装置ではあまり問題とならない現象の制御が重要なことが挙げられる。ここでは、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用エンジンにおける周辺機器開発や制御技術も含めた燃焼技術を対象とする。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義] 1)2)

自動車のエネルギー消費量は、我が国の最終エネルギー消費の 20.8%(2013 年度)と高い割合を占めており、自動車燃費を向上させることはエネルギー消費削減、CO₂ 排出削減だけでなく輸送業におけるランニングコストの削減、ひいては経済の活性化の観点からも重要となる。自動車燃費向上のためには、エンジンの熱効率向上、車両の軽量化、駆動系改良、さらには車両減速時のエネルギーを電気回生するハイブリッド化などのパワートレインシステム全体からの方法などが挙げられるが、この中でエンジンの熱効率向上は自動車燃費向上のための基本的な方策の一つである。

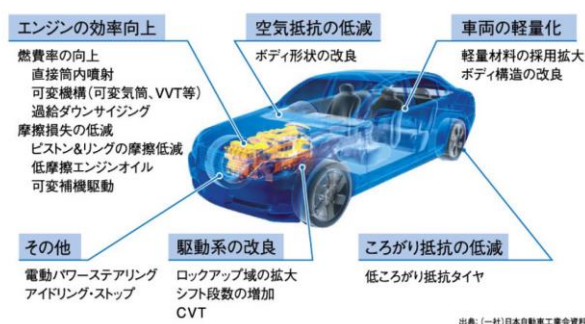


図 3-18

出典：自動車工業会

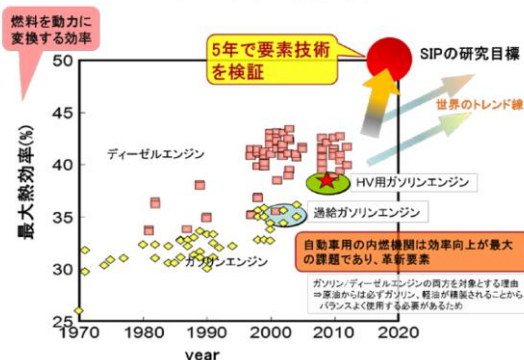


図 3-19

出典：SIP 革新的燃焼技術

なお IEA による自動車の将来パワートレイン推定では、今後 30 年以上、ハイブリッド自動車などの動力源の過半数は、内燃機関(以下、エンジン)が使われ、結果として世界の石油エネルギーの約 50%を自動車が消費するものとしている。このため電気自動車や燃料電池自動車の技術向上を考慮しても、エンジンを用いる自動車の重要性およびその燃費低減に向けた研究開発の必要性は変わらない。

[動向 (歴史)]

現在自動車用エンジンは、吸気・圧縮・燃焼・排気の 4 サイクルによるレシプロ型エンジンが主流であり、1 秒間で数十回程度(2400rpm の場合、1 秒間で 20 回)の間欠的な燃焼

を用いるものである。

現在市販されているエンジンは機構上 2 種類に大別される。一つは、ガソリンのように蒸発性が高く、自己着火(高温高圧場で燃料が自然に着火する現象)しにくい燃料を用いて予め空気との混合気を形成した後に火花点火し、火炎伝播により燃焼を制御する火花点火燃焼を用いたオットーサイクルエンジン(通称・ガソリンエンジン)がある。もう一つは、シリンダ内に充填され断熱圧縮により高温高圧になった空気内に燃料(主に軽油)を高圧噴射して燃料と空気を急速に混合させ、自己着火により燃焼を開始させ、その後燃料と空気との拡散燃焼を燃料噴射によって制御する圧縮着火燃焼を用いるディーゼルエンジンがある。

エンジン燃焼は、ボイラー燃焼のような連続的燃焼と異なり、自己着火現象の制御が重要な課題となる。ガソリンエンジンでの火花点火燃焼の場合、自己着火はノッキング（未燃混合気が伝播火炎で燃焼する前に自己着火による急激な燃焼を起こし振動を与える現象。最悪エンジン損傷につながる）としてあらわれるため、抑止・回避すべき現象となる。一方ディーゼルエンジンでの圧縮着火燃焼の場合、自己着火は本来の着火方式であり、着火タイミングの制御上、重要となる。また自己着火は燃焼組成に依存した低温酸化反応(約 800K 以下)の影響を受けるため、燃料品質として自己着火性が重要となり、ガソリンでは自己着火のしにくさを表すオクタン価、軽油では自己着火のしやすさを表すセタン価（あるいはセタン指数）の指標を用いた規定がある。

エンジンに求められる性能は出力・トルクの基本性能に加え、燃費性能および排気性能である。一般に燃費性能は、高圧縮比化が可能でかつ機構上吸気を絞らないためにポンプ損失が少なく希薄燃焼となるディーゼルエンジンの方が、ガソリンエンジンよりも 2 割程度良いとされる。一方、排気性能については、燃焼時に生成する有害成分である窒素酸化物(NO_x)、一酸化炭素(CO)、未燃炭化水素(HC)、さらには粒子状物質(PM)の排出物の削減、いわゆる排出ガス低減技術であり、触媒等を用いた排出ガス浄化技術の役割が大きい。しかし排出ガス浄化はエンジン燃焼制御も含めたシステム技術であり、エンジン燃焼も排気性能を高くする上で重要な要素となる。ガソリンエンジンでは燃焼時に生成する NO_x 、 CO 、 HC について、燃料・空気の予混合気を量論比制御することで三元触媒よりほぼゼロにできるが、ディーゼルエンジンでは拡散燃焼で生成する NO_x や PM の大幅な低減が課題になる。特に NO_x は排気中の残存酸素や低い排気温度等により排気中の NO_x 、 CO 、 HC は三元触媒による連続還元処理が難しいという課題もあるため、研究開発の動向として、ガソリンエンジンは燃費向上、すなわち高効率化を主眼に、ディーゼルエンジンは排出ガス特性改善(NO_x と PM の同時低減)を主眼に研究開発が進められてきた経緯にある。

現在のガソリンエンジンの原形は、1877 年にドイツのニコラウス・オットーがガス燃料を用いたエンジンを開発したことに始まるとされる。その後、1985 年にやはりドイツのベンツが火花点火を用いたガソリンエンジンを搭載したガソリン自動車を開発している。一方、ディーゼルエンジンについては、ドイツのルドルフ・ディーゼルが発明し 1893 年に特許取得している。ただし振動や小型化の技術的困難さにより自動車への搭載が実現したのは 1920 年代のことである。第二次大戦後に目を向けるとガソリンエンジンではキャブレター、ディーゼルエンジンではジャック式ポンプといった機械式制御装置が用いられていた。しかしながら、1960 年代からの排気規制強化や、燃費向上の要求に従い、精度の高い制御の必要性、コンピュータ技術の向上・低コスト化によって、電子制御が取り込まれるようになった。ガソ

リンエンジンでは、1980年代にキャブレターに代わって、電子制御式の燃料噴射装置が使われるようになり、排気管の酸素センサーのフィードバック信号との組み合わせにより燃料噴射量を精度よく制御できるようになった。これにより予混合気の量論当量比付近で燃焼させることで、排気中の NO_x 、 CO 、 HC は三元触媒により高い浄化率で同時低減が可能になった。また、1990年代からは可変バルブタイミング（VVT：Variable Valve Timing）も導入され、燃費改善やドライバビリティの向上に寄与してきた。エンジンの高効率化のためには、一般的にディーゼルエンジンのように高圧縮比化させ、かつ吸気を絞らないことが望ましい。しかしながら現状のガソリンエンジンの圧縮比は、ノッキング現象が起きない上限レベル（10～12 前後）であり、これ以上の高圧縮比化のためには自己着火を抑止する技術が必要になる。現在 SIP「革新的燃焼技術」で実施されているガソリンエンジンのスーパーリーンバーン（超希薄燃焼）では、より理論サイクルに近い熱効率を得、熱損失やポンプ損失を低減するために空気過剰率（ λ ）を 2 以上とすることを狙いとしているが、火花点火が難しく、また火炎伝播速度の低下による燃焼の不安定化もあり、その対策技術の研究開発が進められている。

ディーゼルエンジンでも、1970 年代より段階的に強化された排出ガス規制（最終的には未規制時から NO_x 、 PM とも 1/100 レベルまでの低減）に対応するべく、特に NO_x と PM の同時改善を目指す技術開発が進められてきた。ジャーク式ポンプに代わる高圧ポンプと電子制御式の燃料噴射系を組み合わせたコモンレールシステムが 1990 年代に登場したことで、エンジンの運転状態によらずに安定した高い噴射圧力を確保できるようになった。これにより燃料と空気の混合促進、さらには既燃ガスの再導入（EGR：Exhaust Gas recirculation）や、触媒を利用した後処理システムとの組み合わせもあって、排気規制の対象となる NO_x 、 PM の同時低減を可能としてきた。またコモンレールシステムでは 1 サイクルのうちに数 mm^3 の微量な燃料を正確に数回に分割して噴射する多段噴射などで、燃焼時に生成する排気の低減、騒音の低減、また触媒の制御なども行っている。

エンジン燃焼としては、着火と燃焼形態の違いによりガソリン燃焼とディーゼル燃焼の 2 種類以外にも成層燃焼（直噴ガソリンエンジン）、HCCI（Homogeneous-Charge Compression Ignition：均一予混合圧縮着火）燃焼がある。（表 3-8）

表 3-8 着火方式と燃焼方式の違いによる燃焼区分

着火方式 混合気形成 (燃焼方式)	均質 (予混合燃焼)	不均質 (拡散燃焼)
	ガソリン燃焼	成層燃焼 (直噴ガソリンエンジン)
火花点火		
圧縮着火	HCCI燃焼 (均一予混合圧縮着火)	ディーゼル燃焼

成層燃焼を用いた直噴ガソリンエンジンは、吸気を絞らないため部分負荷運転時の効率を高くできる。過去には市販エンジンとしても搭載されたが、酸素存在下では三元触媒が機能しないことや拡散燃焼による PM 生成などの排気性能の点で問題があった。このため現在の直噴ガソリンエンジンは、従来同様の均一予混合燃焼のみを採用し、成層燃焼の形態は用いられていない。一方、HCCI 燃焼は均一予混合気を自己着火させる燃焼方式であり、1990 年

代に NO_x と PM の大幅な同時低減が可能な燃焼技術として、ガソリンエンジンより早くディーゼルエンジンを用いた HCCI や PCCI(部分予混合圧縮着火燃焼)の研究領域に注目が集まり、一時は数多くの研究が実施された。しかし過早着火や未燃燃料の増加による燃費の悪化、中負荷以上での制御が困難など、当時の技術レベルでは解決が困難なことが多く、EGR 制御の高度化や排出ガスの後処理技術の進展と共に次第に衰退した経緯にある。現在はガソリンを用いた HCCI 燃焼、ディーゼルにおける PCCI 燃焼が研究されているが未だ実用には至っていない。これらの燃焼方式を実用化するためにはハード面以外にもソフト面として、燃焼自体の緻密な制御技術が必要となる。それぞれの基本的な機器構成と燃焼特性から HCCI では既燃ガスを利用した燃焼制御則^{3),4)}、PCCI では燃料噴射を利用した制御則⁵⁾が検討されており、その性質上、前者は主にフィードバック制御系に関する研究^{6),7)}が、後者は主にフィードフォワード制御系^{8),9)}に関する研究例が多い。制御器については、研究レベルでは MPC (Model Predictive Control) の利用^{10),11)}が、計算機の処理速度の向上に伴い多く試されるようになってきている。

現在は用途(乗用車 or 商用車(トラック・バス等))でエンジン技術のトレンドが異なっており、そのため燃焼に関わる技術課題も異なる。以下に乗用車用ガソリンエンジン、乗用車用ディーゼルエンジン、商用車用ディーゼルエンジン(中～大型)に分けて最近のトレンドを記する。

- 乗用車用ガソリンエンジン

乗用車用ガソリンエンジンでは車の燃費向上技術のために、エンジンの排気量を小さくするダウンサイジングがトレンドになっている。これは小排気量化により燃費が悪い低負荷領域での運転を回避できるためであり、低下する出力とトルクはターボ過給器により補うことになる。このためターボ過給器の特性、小排気量化にともなうシリンダサイズの減少により直接シリンダ内に複数回に分割して噴射されたガソリン噴霧の特性¹²⁾やガソリン噴霧とピストン、シリンダ壁との衝突挙動は混合気の形成やノック回避技術という観点からニーズの高いテーマである^{13),14),15)}。また、ダウンサイジングされた直噴エンジン固有の現象としては、低速、高負荷において Low Speed Pre-Ignition (以後、LSPI) と呼ばれる異常燃焼が挙げられる¹⁶⁾。これは、エンジンオイルが起因となった自己着火現象が一因と言われている。さらに、オイル中の Ca 成分が触媒的な作用をすることで HC の自己着火反応を促進させるとも言われている^{17),18)}。またダウンサイジングのもう一つの問題としては微粒子(Particulate Matter、以後 PM)、微粒子の排出数 (Particle Number、以後 PN)) の生成が挙げられる。このようなエンジン内の微粒子は過渡運転時においても多く生成され、常に複雑な生成過程をたどることが知られている。この現象を解明し、微粒子生成に対して感度の高い現象を表現できるモデル等¹⁹⁾によりエンジン燃制御を行う研究が行われている^{20),21),22),23)}。その他、燃費改善効果が大きい技術としては、圧縮比を高め、さらに、圧縮比と膨張比の異なるミラーサイクルの利用²⁴⁾や、EGR をターボ過給と併用し、ポンピングロスや熱損失を減らすことが求められる。しかし、EGR による燃焼速度の低下を補うため、シリンダ内の乱れを強化するが、点火性の悪化やサイクル変動を誘発することになる。したがって、火炎伝播速度の予測や強乱流場における点火特性の解明や点火装置の強化²⁵⁾の研究のニーズがある。

3 次元数値熱流体モデリングに関しては、エンジンではバルブやピストンといった移動境界をもつことと、計算時間の観点から、RANS(Reynolds Averaged Numerical Simulation)をベースとした計算コードは産業界においては需要が高い²⁶⁾。サイクル毎の吸気、圧縮、燃焼、膨張、排気行程の一連のシミュレーション、特に燃焼過程においては、分割的に直接噴射されたガソリン燃料の混合気の形成過程²⁷⁾、火花点火による放電から火炎核の形成、さらには、火炎伝播への移行、未燃領域の自己着火反応機構の開発および反応機構のリダクションによる Computational Fluid Dynamics²⁸⁾によるノッキングの発生予測の研究も行われている。今後は、コンピュータの性能向上とともに LES (Large Eddy Simulation)に移行すると考えられている。

その他の重要技術としては、近い将来、シリンダ内の圧力を測定し²⁹⁾、次のサイクルの制御に役立てるサイクル毎制御を行うため、オンボードレベルで可動可能な多段噴射を含む燃焼過程を記述しうる高速演算燃焼モデルはガソリンエンジンの開発に必須のツールとなる^{30),31),32)}。このようなツールにおいては、実走行での燃費を改善する観点からもニーズは高い。

- 乗用車用ディーゼルエンジン

近年の乗用車クラスのエンジンにおいては、排出ガスと燃費の同時改善技術として、低圧縮比化が提案されている。これは低圧縮比化により燃料噴射開始から着火までの着火遅れ期間を長くし、燃料の予混合化を促進することが目的である。一般に低圧縮比化は理論熱効率の低下をまねく。しかし乗用車クラスのエンジンサイズの場合、現状の圧縮比(16程度)を下げても、低温始動性など新たな課題は生ずるものの、機械損失・熱損失の減少や燃料噴射時期の最適化により効率改善効果の方が大きくなる。このため最近の乗用車用ディーゼルエンジンでは圧縮比 14 程度を採用するものも市販化されている。ディーゼル燃焼自体の改善による燃費向上として、噴射圧力を 300 MPa 程度まで高めた高圧燃料噴射⁴⁾の需要は高まることが予測されている。このため、高温、高密度の雰囲気中に噴射された高圧燃料ジェットの分裂、混合気形成さらには燃焼、排出ガス過程を明らかにすることがニーズの高い研究テーマである³³⁾。また、ディーゼルエンジンに対して低コストで可変圧縮比を可能にする研究のニーズが高まる可能性がある³⁴⁾。

ディーゼルエンジンにおける 3 次元数値熱流体シミュレーションにおいては、上記の開発トレンドを考慮すると軽油や重油を代替する反応機構の開発とその反応機構のリダクション、吸気、燃焼、排気行程及び NO_x や微粒子をあるレベルで一気通貫で計算できるコードが必要である。ガソリンと同様に RANS のニーズは未だ高いが、今後は LES が主流になるものと予測している^{35),36)}。

また、ディーゼルエンジン固有の問題として、VW 事件に端を発した排出ガス不正やエンジンの保護制御領域を低減する研究は今後益々盛んになるものと考えている。特に、吸気低温における EGR による凝縮水や未燃 HC の発生、各種要因による EGR デポジットの生成とその対策を進めることは急務とされ^{37),38)}、経済産業省+AICE のプロジェクトでも精力的に研究が進められている。

- 商用車用ディーゼルエンジン（中～大型）

中～大型商用車用のディーゼルエンジンの研究の動向で乗用車用と異なる点は、低圧縮比化には進んではないことが挙げられる(現状およそ圧縮比は 17～19 レベル)。これは、

現状で熱効率が最適条件近くになっており、低圧縮比化により熱効率の低下が顕著になるためである。

新機構のエンジンとしては、米アーケテス・パワー社はトラック用エンジンとして対向ピストン型のエンジンを開発^{39),40)} 中で、最大熱効率 50%を達成しており、現在、耐久性テストを実施している注目すべきプロジェクトである。

（３）注目動向

[新たな技術動向]

- Wisconsin University では反応性の異なる 2 燃料を用いた新燃焼方式(RCCI: Reactivity Controlled Compression Ignition)等の)が提案されている。
- スプリットサイクル(Volvo Trucks+Lund University の 2 段圧縮 2 段膨張形式、イギリス Ricardo 研究所の等温圧縮行程を実現した CryoPower など)や VCR(Variable Compression Ratio: 可変圧縮比)等のエンジンの開発も数多く行われている。
- SwRI(Southwest Research Institute)での Dedicated EGR では 4 気筒の乗用車用ガソリンエンジンのうち 1 気筒の排気を吸気にすべて環流し、燃料を部分酸化させることで、ノッキング発生を抑制する目的である。25%という高 EGR 率にもかかわらず失火による燃焼変動を低減でき高効率燃焼が可能となる技術である。
- エンジン制御においては、従来の事前実験による制御マップを用いたエンジン制御が限界にきていることから、新たなモデルを利用した制御系設計や制御に注目が集まっている。モデルは、大きく二つに分類でき、実験データを基に、統計的手法によりモデルを構築する統計モデルと、物理や化学反応論に基づく物理モデルがある。前者は DoE (Design of Experiments) を利用して実験点数を可能な限り削減し、設定値（入力）と結果（出力）から様々な統計処理を用いて入出力の関係を導き出すものである。この統計処理の手法として、ニューラルネットワーク⁴¹⁾や機械学習⁴²⁾の利用による過渡状態の再現も含めた試みがなされている。後者については、エンジン筒内の燃焼現象の複雑さより、現状では一部は統計モデルが用いられるものとなる

[注目すべきプロジェクト]

【日本】

- SIP 革新的燃焼技術(2014～18)⁴³⁾: 内閣府(および経済産業省、文部科学省、JST)主導の乗用車エンジンの熱効率をガソリン、ディーゼルエンジンとも 50%まで高めることを目標に革新的な燃焼技術、燃焼解析技術の実現

【米国】

- SuperTruck(2009～16)、SuperTruck II(2016～)プロジェクト^{44),45),46)}: エネルギー省主導の本年度からの SuperTruck II プロジェクト(年間 8 千万ドル規模)では、車両走行燃費を 2009 年当時のトップランナーから 100%以上改善することを目指す。
- Co-Optimization of Fuels and Engines (Co-Optima)プロジェクト(2016～19、19 年で終了)は火花点火エンジン: Thrust I、で圧縮着火エンジン: Thrust II については 25 年頃ま

で続けるという当初計画)：

【欧州】

- 欧州委員会(European Commission)が推進する FP7(7th Framework Programme)、および Horizon2020 の各サブプログラムから、エンジン燃焼関係(主に Transport カテゴリーに属するものとして)
- CO₂RE(CO₂ REduction for long distance transport : 2012～15)⁴⁷⁾ : Daimler の中型、Volvo の大型商用エンジンをベースに総予算 1700 万ユーロで Euro VI 排気要件適合エンジンの燃費を Euro V 時を基準として 15%改善を目指すデモンストレーションプロジェクト(その他天然ガスエンジンの燃費改善も含む)。開発の前提としては、TRL6 乃至 7 レベル、2020 年までに市場に導入可能な技術の範囲内で、という条件が付いていることから、特別な新規技術についての研究開発にはなっていない。
- POWERFUL(POWERtrain for FUture Light-duty vehicles : 2010～14) : POWERFUL プロジェクトは以下の(クラス A～B に属する)小型車両用 3 種のエンジンが対象で、2005 年の車両をベースに 2020 年までに CO₂排出を 50%低減することを目指すためのコンセプト

(4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)] ^{48),49)}

- 自己着火の機構解明が進んできたが、その制御技術、および着火後の燃焼制御技術については今後の課題。特に比較的単純な直鎖系炭化水素ではある程度解明が進んできたが、多成分(芳香族を含む)で構成される液体燃料の詳細な燃焼化学反応機構、Soot 生成機構等の解明が今後の課題である。
- 新たな計測手法として注目を集めている米国 Argonne 国立研究所の高エネルギーX線を使った燃料噴霧のノズル内流れや噴射直後の噴霧構造の可視化などに関して、国内の SPring-8 ではポテンシャルは有るものの同様な計測の出来るビームは存在せず、全て米国での実験に頼っているのが現状である。
- 今後の燃焼制御の基礎となり、数値シミュレーションモデルの基となるディーゼル噴霧混合気形成や壁面での熱損失、摺動部品・回転部品の潤滑と燃焼との関連といった基本的な現象の解明が遅れている。
- 熱効率と排出ガステ性を両立する最適な燃焼過程およびそれを組み合わせて効果を発揮するエンジン機構が現状維持で良いのか、或いは全く別の機構の方が相応しいのか、熱力学的・工学的に解明することが、新たな要素技術提案のためにも必要な課題となる。

[今後取組むべき研究テーマ]

- 従来からの物理的なアプローチ(燃料噴射特性、筒内流動、燃焼室形状、過給圧等)だけでなく、燃焼制御に関する化学的なアプローチ(低温燃焼制御のための反応速度論やラジカル等の燃焼改善への寄与等)
- 熱損失や潤滑状態、高圧噴霧拡散燃焼といった未だ明らかでない基礎的な現象の詳細解明と、その推進のために必要な、新たに標準化されるべき計測・解析技術の構築

- 新たなエンジン機構、壁面遮熱構造など、原理的にはポテンシャルが有りながら過去の技術水準では実現不可能だった技術への画期的なアプローチ
- Super Computer(京など)を活用したエンジンの燃焼に関わる大規模数値シミュレーション(神戸大学の堀先生らが現在取り組んでいるが、より裾野を広げる必要がある)
- 燃料の持つ化学エネルギーをどの様に燃焼させる事で熱エネルギーに変え、更にそれをどのような過程(或いはパワートレーン系のエンジン以外のサブシステムでの動力回生)を経て仕事に変換するのが最も効率が高くなるか、といったエクセルギーバランスに則ったストラテジーの検討
- 基礎的な燃焼現象の研究成果から TRL6~7 といったデモンストレーション可能なエンジン(要素)技術開発へと橋渡しする、様々なトレードオフのブレークスルーを可能にする新たな燃焼コンセプト

（５）政策的課題

国内の独自研究・技術開発に固執するのみではなく、国内技術レベルの底上げを狙うならばより広い視野を持つ事が最優先であり ECN や Horizon2020 といった現時点では先行しているエンジン燃焼の基礎・応用に関する国際的共同研究の枠組みへ、より研究者が積極的に参加する事への(経済的)助成も一考に価する。

国内においては米国エネルギー省のように基礎と応用を繋げる領域に対しての継続的(且つ計画的)な研究への投資と、その成果の(将来的)価値を正しく評価する開かれた場(エネルギー省では Annual Merit Review として全ての委託課題について毎年春に一般公開で開催、その発表資料および報告書集も毎年 WEB 上に公開)を整備することが重要になる。SIP の公開シンポジウムは、成果評価の公開の場としてある程度機能しているが、今後誰がどういった基準で成果を評価するかまで踏み込んだ環境整備が必要になってくる。また、SIP の革新的燃焼技術プロジェクトに対しては、研究対象を初めから「乗用車用(小型)エンジン」といった特定のカテゴリーの要素技術に絞ったことで、エネルギー消費量としてはより比率の高いその他多様なアプリケーション(トラック・バス、汎用機、建設機械、コジェネシステム、鉄道等)への技術の適用性を減ずる事にならないようにすることも配慮が必要と考えられる。

また将来燃料に関してはエネルギーの大半を輸入に頼っている国内向け技術としては課題化することが困難ではあるが、少なくとも、海外の動向に目を向け燃料の多様化に対する将来燃焼技術のコンパチビリティを常に担保していく必要がある。

（６）キーワード

排出ガス規制、燃費規制、ダウンサイジング、過給機、多段噴射、PM、VVA、サイクル毎制御、燃料高圧噴射、ディーゼル触媒、触媒反応機構、DOC、DPF、NSR、SCR、EGR、デュアルフューエル、エンジンシステム統合制御モデル、熱損失、超高圧燃料噴射、噴霧火炎構造、ノッキング、詳細化学反応機構、超希薄燃焼(スーパーリーンバーン)、摩擦損失低減、制御マップ、モデルベース制御、高効率燃焼方式

（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	○	↑	● SIP革新的燃焼技術により、産学の相互理解が深まっている。またいくつか重要な成果が創出されはじめている。一部の研究領域の研究者が不足している分野があるので強化が必要である ● 燃料に関する基礎研究が不足している
	応用研究・開発	○	→	● 基礎部分の下支えが十分でないため産学共に充分に取り組めていない ● NEDOの助成も企業が短期的に事業化することが大前提で、主な欧米のプロジェクトの様に産学共同で取り組む(直接は製品に至らないかも知れないが)将来の技術として必要と考える実証研究段階への大型助成が少なすぎるのが一因と考える ● AICE(自動車用内燃機関技術研究組合)内のディーゼル燃焼分科会に制御分科会も追加され、ディーゼル燃焼・制御分科会となり、SIPの制御チームとAICEの協力体制が強化された⁵⁰⁾。 ● 経済産業省+AICE、内閣府SIPプロジェクトにおいて、基礎研究の成果を実際のエンジンに応用した研究を産、学、研究機関で展開している。経済産業省+AICEのプロジェクトはFY2016が最終年度であり設備や研究結果を活用した実用化へ向かって次のステップを繋げる必要がある。 ● 商用車のエンジンの大型プロジェクトが不足している。
米国	基礎研究	◎	↑	● ECN(Engine Combustion Network)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こと ● 潤沢な予算のもと、国立研究所、有力大学で基礎研究を実施している。基礎研究成果としては、目を見張るものも多いが、エンジンへ適応できるかどうかは今後の課題である。
	応用研究・開発	○	↑	● 本年度から開始する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となると考えられる ● 例えばUniversity of Wisconsinではその地方に数多く有る小型エンジン企業(農耕用、2輪用など)を纏めてコンソーシアムを設立し、大学として製品に直接繋がるような研究を長年続けてきている(各大学がその様な研究の中核を担っている) ● 2014年末までに、米エネルギー省のプロジェクトとして、産学連携でACCESS(Advanced Combustion Concepts・Enabling Systems and Solutions)が動いていた。熱効率向上を目指したHCCIエンジンシステムに関する内容で、Boschがプロジェクトのリーダー的立場で、燃焼制御はミシガン大が担当した⁵¹⁾。 ● エンジンへ適応して熱効率の改善に具体的に役立てるような研究は少ない。今後、USDRIVE、21st Century Truck プロジェクト、対向ピストンエンジンのプロジェクトがどの程度、発展するか注目に値する。 ● 商用車の研究開発にも力点を置いている点が評価できる。
欧州	基礎研究	◎	→	● 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(例えばCity University of Londonが中心となっているノズル内キャビテーション：ICR Cavitation Workshop、IFPENが主宰するLarge Eddy Simulationのエンジン燃焼への活用：LES4ICE、Lund Universityが主宰する予混合圧縮着火のコンソーシアム等)基礎現象理解のためのコンソーシアムが組織され、地方政府や企業を巻き込みながら継続的に研究を行っている。 ● ドイツアーヘン工大を中心に2015年からSymposium for Combustion Controlが開催されるようになった。10カ国、100名を越す参加者があり、シングルトラックでの研究成果発表が2日間行われている⁵²⁾。 ● 独では1953年からFVVによるコンソーシアム型の内燃機関研究が莫大な予算の元、展開されていて、ドイツにおける全ての自動車関連企業と有力大学が一体となった研究を実施している。FVVではドイツ産業研究協会連合(AiF)をはじめとして2/3が公的資金で1/3を参画企業が支援する。企業から選出されChairmanのもと、大学間でチームを組んで研究を進めていくことが大きな特徴である。VW事件の影響か今後は燃料電池を研究テーマに加えるとのことで、内燃機関への予算投入が今後のエンジン燃焼研究発展の鍵である。 ● 基礎研究に対する予算としてはFVVとは別にDFG(ドイツ学術振興会)も存在する。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 excellence という大規模なプロジェクトがAachen工科大学で

				は行われている ⁵³⁾ 。
	応用研究・開発	○	→	● 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、複数メーカーが共同&競合して取り組んでいる(SuperTruckも同様)。 ● 但し成果のアウトプットにはバラツキもあり、部分的には成果が公開されることはあってもなかなか欧州外から全てを把握することが難しい。 ● ドイツの内燃機関の研究コンソーシアムであるFVV(Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.) がこれから積極的に取り組むテーマの一つとして、Controls, Regulation, Sensors を掲げている。Regulation を Controls と Sensors の一つの括りとしている点は興味深い⁵⁴⁾。
中国	基礎研究	△	↗	● 国家重点大学を中心に燃焼の基礎研究設備の拡充が進んでいる。研究論文のレベルは全体的に上がってきていると言える
	応用研究・開発	△	→	● 日米欧の自動車メーカーとの合弁会社から技術移転がなされはじめており、研究レベルは確実に向上している
韓国	基礎研究	△	→	● Korea auto-oil プログラムがFY2017まで実施予定であるが、着実に進んでいる。 ● エンジン燃焼に関する基礎研究の国プロジェクトは新規に立ち上がっていないようである。
	応用研究・開発	△	→	● 環境府を中心に実用化事業（製作車、レロフィット、計測技術）が進行中 ⁵⁵⁾ 。事業期間はphase I が2011.5－2016.4, Phase II が2016.5-2021.4で、毎年100億ウォン/年。ディーゼルエンジンの開発が全体的に遅れている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2012, Pathways to a Clean Energy System,
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012_free.pdf p. 443, August, 12th, 2016
- 2) International Energy Agency, Technology roadmap, Fuel economy of road vehicles,
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Fuel_Economy_2012_WEB.pdf, p.18-19, p.24-25, August, 12th, 2016
- 3) Law, D., Kemp, D., Allen, J., Kirkpatrick, G. et al., "Controlled Combustion in an IC-Engine with a Fully Variable Valve Train," SAE Technical Paper 2001-01-0251, 2001, doi: 10.4271/2001-01-0251.
- 4) Caton P. A., Simon A. J., Gerdes J. C., and Edwards C. F., "Residual affected homogeneous charge compression ignition at low compression ratio using exhaust reinduction," Int. J. Engine Res., vol. 4, no. 3, pp.163-177, 2003.

- 5) Kook, S. and Bae, C., "Combustion Control Using Two-Stage Diesel Fuel Injection in a Single-Cylinder PCCI Engine," SAE Technical Paper 2004-01-0938, 2004, doi:10.4271/2004-01-0938.
- 6) E. Hellstrom, J. Larimore, S. Jade, A. G. Stefanopoulou, and L. Jiang, "Reducing cyclic variability while regulating combustion phasing in a four-cylinder HCCI engine," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 22, no. 3, pp. 1190–1197, 2014.
- 7) M. Karlsson, K. Ekholm, P. Strandh, R. Johansson, P. Tunestål, and B. Johansson, "Closed-Loop Control of Combustion Phasing in an Hcci Engine Using Vva and Variable Egr," IFAC Proc. Vol., vol. 40, no. 10, pp. 501–508, 2007.
- 8) R. Finesso, E. Spessa, and Y. Yang, "Fast estimation of combustion metrics in di diesel engines for control-oriented applications," Energy Convers. Manag., vol. 112, pp. 254–273, 2016.
- 9) A. E. Catania, R. Finesso, and E. Spessa, "Predictive zero-dimensional combustion model for DI diesel engine feed-forward control," Energy Convers. Manag., vol. 52, no. 10, pp. 3159–3175, Sep. 2011.
- 10) Ebrahimi, K. and Koch, C., "Model Predictive Control for Combustion Timing and Load Control in HCCI Engines," SAE Technical Paper 2015-01-0822, 2015, doi:10.4271/2015-01-0822.
- 11) V. M. Janakiraman, X. Nguyen, and D. Assanis, "An ELM based predictive control method for HCCI engines," Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 48, pp. 106–118, 2016.
- 12) C.Pötsch, L. Baumgartner, D. Koch, F. Bernhard, B. Beyfuss, G. Wachtmeister(Technische Universität Munchen), D. Wichelhaus (Volkswagen Motorsport) Optimization of the Mixture Formation for Combined Injection Strategies in High-Performance SI-Engines, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2476, 2015/9/13-17
- 13) A.Montanaro, L. Allocca, G. Meccariello, M. Lazzaro(Istituto Motori CNR), Schlieren and Mie Scattering Imaging System to Evaluate Liquid and Vapor Contours of a Gasoline Spray Impacting on a Heated Wall , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2473, 2015/9/13-17
- 14) R. Cracknell(Shell Global Solutions (UK)), W. Warnecke, J. Redmann, T. Goh(The Shell Global Solutions Deutschland), Octane Requirements of Modern Downsized Boosted Gasoline Engines , MTZ, Vol.76, No.7-8, 2015/7
- 15) M. Costa, P. Sementa, U. Sorge, F. Catapano, G. Marseglia, B. M. Vaglieco(Istituto Motori CNR), Split Injection in a GDI Engine under Knock Conditions: an Experimental and Numerical Investigation , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2432, 2015/9/13-17
- 16) M. Kassai, H. Hashimoto, T. Shiraishi, A. Teraji, T. Noda(日産), Mechanism Analysis on LSPI Occurrence in Boosted S.I. Engines, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1867, 2015/9/1-4
- 17) E.Chapman(GM), V. Costanzo(Aramco Services), A Literature Review of Abnormal Ignition by Fuel and Lubricant Derivatives, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1869, 2015/9/1-4

- 18) K. Morikawa, Y. Moriyoshi, T. Kuboyama, T. Yamada(Chiba University), M. Suzuki(Sustainable Engine Research Center), Investigation of Lubricating Oil Properties Effect on Low Speed Pre-ignition, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1870, 2015/9/1-4
- 19) 森島彰紀、草鹿仁、大聖泰弘、ディーゼル燃焼における微粒子生成過程の解析ー過濃予混合燃焼場における検討ー、自動車技術会論文集、Vol.38, No.1、pp.151-156、2007 年 1 月
- 20) N. Cavina, A. Businaro, D. Moro(University of Bologna), R. Di Gioia, G. Bonandrini, D. Papaleo, M. Picerno(Magneti Marelli Powertrain), Assessment of the Influence of GDI Injection System Parameters on Soot Emission and Combustion Stability through a Numerical and Experimental Approach, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2422, 2015/9/13-17
- 21) H. Dageforde(Robert Bosch), M. Bertsch, H. Kubach, T. Koch(Karlsruhe Institute of Technology), Reduction in Particle Emissions with Gasoline Engines with Direct Injection, MTZ, Vol.76, No.10, 2015/10
- 22) 2A. Siedentop, J. Schech, A. Bradenstahl, P. Eilts(Technische Universität Braunschweig), Thermodynamic, Optical and Numerical Investigation of a Small Direct Injection Spark Ignition Engine, 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2015/10/5-7
- 23) C.Disch, J. Pfeil, H. Kubach, T. Koch(Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Experimental Investigation of a DISI Engine in Transient Operation with Regard to Particle and Gaseous Engine-out Emissions, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1990, 2015/9/1-4
- 24) P. Pertl, A. Trattner, R. Stelzl, M. Lang, S. Schmidt, R.Kirchberger(Graz University of Technology), Expansion to Higher Efficiency – Experimental Investigations of the Atkinson Cycle in Small Combustion Engines, 2015 Small Engine Technology Conference, No.2015-32-0809, 2015/11/17-19
- 25) 緒方 健一郎, 片岡 徹夫, EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.2, 2016/3
- 26) M. Wentsch, A. Perrone, M. Chiodi(FKFS), M. Bargende(FKFS/IVK, University of Stuttgart), D. Wichelhaus(Volkswagen Motorsport) Enhanced Investigations of High-performance SI-Engines by Means of 3D-CFD Simulations, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2469, 2015/9/13-17
- 27) M. Costa, F. Catapano, G. Marseggia, U. Sorge, P. Sementa, B. M. Vaglieco(Instituto Motori CNR), Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Split Injections on the Performance of a GDI Engine under Lean Operation, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2413, 2015/9/13-17
- 28) T. Yoso, M. Yamakawa(マツダ), R. Tamura, J. Kusaka(Waseda University), Developments of the Reduced Chemical Reaction Scheme for Multi-component Gasoline Fuel, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1775, 2015/9/1-4
- 29) A.Dulbecco, S. Richard, C. Angelberger(IFP Energies Nouvelles), Investigation on the Potential of Quantitatively Predicting CCV in DI-SI Engines by Using a One-Dimensional

- CFD Physical Modeling Approach: Focus on Charge Dilution and In-Cylinder Aerodynamics Intensity , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2401, 2015/9/13-17
- 30) R. Amirante, C. Casavola, E. Distaso, P. Tamburrano(Politecnico Di Bari), Towards the Development of the In-Cylinder Pressure Measurement Based on the Strain Gauge Technique for Internal Combustion Engines , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2419, 2015/9/13-17
- 31) R. Saracino, M. R. Gaballo, S. Mannal, S. Motz(Bosch CVIT Bari), A. Carlucci, M. Benegiamo(Universita Del Salento), Cylinder Pressure-Based Closed Loop Combustion Control: a Valid Support to Fulfill Current and Future Requirements of Diesel Powertrain Systems , 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2423, 2015/9/13-17
- 32) J. Schaub, T. Koerfer, S. Pischinger(FEV), T.Schnorbus(FEV Diesel Engine Development), Cylinder Pressure Based Fuel Path Control for Non-Conventional Combustion Modes, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2508, 2015/9/13-17
- 33) M. Palanisamy, J. Lorch, R. J. Truemner, B. Baldwin(AVL Powertrain Engineering), Combustion Characteristics of a 3000 Bar Diesel Fuel System on a Single Cylinder Research Engine , SAE 2015 Commercial Vehicle Engineering Congress, No.2015-01-2798, 2014/10/6-8
- 34) M. Diezemann, C. Schramm, M. Brauer, C. Severin(IAV) , Variable Compression Ratio in Diesel Engines , MTZ, Vol.76, No.7-8, 2015/7
- 35) Y. Pei, P. Kundu(Argonne National Laboratory), G. M. Goldin(Convergent Science), S. Som(Argonne National Laboratory), Large Eddy Simulation of a Reacting Spray Flame under Diesel Engine Conditions, 2015 JSAE/SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants, No.2015-01-1844, 2015/9/1-4
- 36) B.Zhou, M. Horikoshi, A. Kikusato, Daisho(Waseda University), K. Sato, H. Fujimoto(マツダ) , Detailed Diesel Combustion and Soot Formation Analysis with Improved Wall Model Using Large Eddy Simulation, 2015 Small Engine Technology Conference, No.2015-32-0715, 2015/11/17-19
- 37) J. Serrano, P. Piqueras, E. Angiolini(Universitat Politècnica De València), C. Meano, J. Morera(GM Powertrain-Europe SrL), On Cooler and Mixing Condensation Phenomena in the Long-Route Exhaust Gas Recirculation Line, 12th International Conference on Engines & Vehicles, No.2015-24-2521, 2015/9/13-17
- 38) S. Favelier, A. Dutot, K. Surbled, F. Morello, C. Cherreau (VALEO Powertrain System), Low Pressure EGR Impact on Condensate and Product Specifications , 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2015/10/5-7
- 39) 鶴原吉郎、エンジンの革新目指す米企業の挑戦、日経ビジネス ONLINE、2016 年 7 月 5 日、<http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/264450/070300038/?P=1>
- 40) DOE, Vehicle Technology Office のホームページ、
<http://energy.gov/eere/success-stories/articles/eere-success-story-fca-and-partners-achieve-25-fuel-economy>, 2016/08/

- 41) V. Janakiraman, X. Nguyen, and D. Assanis, “Nonlinear identification of a gasoline HCCI engine using neural networks coupled with principal component analysis,” Appl. Soft Comput., 2013.
- 42) V. M. Janakiraman, X. Nguyen, J. Sterniak, and D. Assanis, “Identification of the Dynamic Operating Envelope of HCCI Engines Using Class Imbalance Learning,” Ieee Trans. Neural Networks Learn. Syst., vol. 26, no. 1, pp. 98–112, 2015.
- 43) SIP「革新的燃焼」制御チーム Web サイト, <http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/scc/>
- 44) <http://energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/Adoption%20of%20New%20Fuel%20Efficient%20Technologies%20from%20SuperTruck%20-%206-22-16%20%28002%29.pdf>
- 45) Delgado and N. Lutsey, “THE U.S. SUPERTRUCK PROGRAM EXPEDITING THE DEVELOPMENT OF ADVANCED HEAVY-DUTY VEHICLE EFFICIENCY TECHNOLOGIES”, ICCT white paper (2014)
- 46) <http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office-annual-merit-review-presentations>
- 47) CO2RE 資料 <http://co2re.eu>
http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fom_17838.pdf
http://www.ertrac.org/uploads/documents_publications/2015%20ICE%20workshop/CORE%20results.pdf
- 48) 矢野利明、伊藤献一、メタノール燃焼排ガス中の未燃メタノールおよびホルムアルデヒド：反応動力学的検討、日本機械学会論文集. B 編 48(429), 962-971, 1982-05-25
- 49) 草鹿 仁、大聖泰弘、詳細な素反応過程を考慮した多次元モデルによる天然ガス予混合圧縮着火に関する基礎的研究、自動車技術会、自動車技術会論文集 Vol.32, No.2, pp.43-48, 2001 年 4 月
- 50) AICE（自動車用内燃機関技術研究組合）Web サイト <http://www.aice.or.jp/>
- 51) 米国エネルギー省 Web サイト
http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace066_yilmaz_2014_o.pdf
- 52) Symposium for Combustion Control Web サイト
<http://www.mechatronics.rwth-aachen.de/cms/Mechatronics/Forschung/~hbnw/SCC/lidx/1/>
- 53) <http://www.fuelcenter.rwth-aachen.de>, 2016 年 8 月 18 日
- 54) FVV Web サイト <http://www.fvv-net.de/en/fvv4/mission-and-vision/index.html>
- 55) http://www.cefv.re.kr/index.php?mid=sub02_01_01, 2016 年 8 月 18 日

3.2.9 トライボロジー

（１）研究開発領域の簡潔な説明

トライボロジーは相對運動をしながら互いに影響を及ぼしあう 2 つの表面に起こるすべての現象を対照とする科学技術である。潤滑、摩擦、摩耗などを取り扱う分野である。ここでは、省エネルギーの観点より摩擦メカニズム、接触表面状態、潤滑剤の影響などのトライボロジーの基礎を対象とする。また実用面では研究開発が特に注目されている分野として車関連のトライボロジーを中心に記述する。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

トライボロジーはギリシャ語の *tribos*（摩擦する）を基にした造語である。摩擦低減技術はあらゆる産業分野、生活環境における効率的エネルギー活用と安全・安心の鍵であり、低炭素社会実現の観点からも極めて重要な技術である。

トライボロジー研究の経済効果による社会的意義は、1966 年に英国の H. P. Jost による「Lubrication (Tribology) - A Report on the Present Position and Industry's Needs」の中でトライボロジーの用語を初めて使用すると共に、英国における潤滑改善による経済効果として年間 5 億ポンド(当時)の大きな値を報告している。その後、同様な推算が各国でなされており、我が国の最近の推算例として、2002 年度で 8.6 兆円、対 GDP 比 1.7%の値を出している¹⁾。

2015 年 12 月の COP21 パリ協定の合意を受け、世界各国で更なる CO₂削減努力が必要であるが、今後世界的に増加が見込まれる自動車分野におけるエネルギーの効率的利用も非常に重要となる。現在の自動車は燃料の約 1/3 はエンジンや変速等、タイヤなどにおける摩擦損失によって浪費されており、最新のトライボロジー技術を適用することで 5~10 年の短期レンジで 18%、15~25 年の長期レンジでは 61%もの削減が可能という報告²⁾がある。その結果を世界全体での CO₂排出量として換算すれば、それぞれ 2 億 9000 万トンと 9 億 6000 万トンの削減に上り、我が国の年間 CO₂総排出量に匹敵する量となる。このようにトライボロジーは、既存技術の改良や改善を通し波及効果と即効性の高い工学技術として、地球環境問題解決への貢献が期待されている。その一方で、摩擦は固体表面・潤滑油など多くの要素が界面において複雑に絡む動的特性のために、その理解は十分には進んでおらず、従来の開発は主に経験的な蓄積に基づくものである。このため、現在の省エネルギーにおける摩擦低減技術の必要性ならびに課題の大きさからは、より合理的な設計論による開発の加速が重要となる。

[動向（歴史）]

摩擦・潤滑の利用や研究の基礎は産業革命前後（1750 年から 1900 年頃）の研究に負うところが多く、現在まで使われている経験式も提案されている。例えば、クーロン（Coulomb）による静止摩擦の研究、流体潤滑の概念の提示と流体力学による定式化並びに系統の実験（1847 年）、鉱物油の潤滑油としての使用の開始、ストライベック曲線の提案（1902 年）、「境界潤滑」の用語の導入（1922 年）などがある³⁾。さらに 20 世紀の半ばには微視的な視点か

ら摩擦現象を理解しようとする先駆的な試みが見られるようになった。例えば、ホルム（Ragnar Holm）によって提唱された真実接触面積の概念は、英国ケンブリッジ大学のバウデン（Frank Philip Bowden）とテーバー（David Tabor）により原子・分子レベルでの接着力と摩擦による新しい形の摩擦の凝着理論が確立され、それまでの摩擦の凹凸説に代わって摩擦の凝着説が広く認められることになった⁴⁾。1966年には、摩擦学に対し”トライボロジー”という用語が作られ、現代的な摩擦研究が開始された。

トライボロジーの先端研究は、米ソ冷戦時代の宇宙開発競争にしのぎを削る NASA（米国航空宇宙局）を中心とした米国に舞台を移し、さらにモータリゼーションの到来を背景として自動車関連のトライボロジーを中心に、ドイツ、フランス、日本などへと発展の場を広げていった。一方、磁気記録装置の性能向上が急務となった IT 分野では、ハードディスク装置の開発に最先端のトライボロジー技術が次々と導入されることになった。米国 IBM など为先導役とした技術開発競争の最中、微細加工技術の進歩と相まって、“マイクロトライボロジー”が新たなテーマとして取り上げられるようになった。さらに今日では、高度な表面分析技術と計算科学を融合した“ナノトライボロジー”へと発展し、最先端研究の一翼を担っている。医療分野では、英国リーズ大学中心とするグループが、トライボロジーの視点から人工関節の開発に精力的に取り組み、性能の向上に大きく寄与するとともに、“バイオトライボロジー”という医工連携の新しいテーマを開拓した。このほか、レイノルズ(O.Reynolds)にはじまる流体力学理論、各種機械要素や潤滑剤の発明や普及、そして新しいコーティング材料など、トライボロジーはそれぞれの時代の産業技術の隆盛と深く関わりながら発展してきた。

トライボロジーを原理的に解明しようとする研究加速への契機は、ナノテクノロジーに代表される表面・界面を見る評価法の進歩と、ハードディスクの潤滑に代表されるような技術的な要請である⁵⁾。1990 年頃から導入された代表的な装置に、表面力装置(Surface Forces Apparatus, SFA, Tabor が現代化に貢献)、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) ならびに水晶発信子マイクロバランス (Quartz Crystal Microbalance, QCM) がある。また、同時に表面を単分子層レベルで観察できる、X 線光電子分光法 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) などの元素組成分析法、フーリエ変換赤外分光法のような振動分光法など広範囲な表面・界面分析法が、比較的手軽に利用できるようになり、基材と表面・界面評価と摩擦特性との関連を調べるアプローチも始まっている。

我が国におけるトライボロジー研究の歴史は、戦後、東大航空研・曾田範宗先生がその基礎を作っており、その後、通産省工業技術院機械技術研究所にトライボロジー課が設置され、民間企業においても三菱重工が長崎にトライボロジー研究所を設立したのをはじめ製造産業の発展に伴い、大学から公的研究機関、民間企業に至るまで、その研究開発の場は大きくすそ野を広げた。しかし、最近では広い領域をカバーするトライボロジーの研究開発を実施する体制の維持が、特に製品毎の細分化した研究体制に移行した民間企業においては難しくなった。また、大学においても、学際領域となるトライボロジーの看板を研究室に掲げることが難しくなり、主要国立大学でもトライボロジーを専門とする研究室がないところもある。我が国でトライボロジー研究が活発に行われている大学としては、東京理科大、東北大、名古屋大、九州大、横浜国大、関西大学などが挙げられる。

工学分野の学問としてトライボロジーを見れば、自然現象の解明のみならず、得られた知見をもとに制御する技術を構築する必要がある。その場合、トライボロジーが制御対象とす

るものは、摩擦、摩耗、そしてエミッションの3つとなる⁷⁾。摩擦の制御においては、機械システムのエネルギー効率を大きく支配する摩擦損失を低減するという大きな課題がある。この課題解決に当たっては、摺動面における潤滑状態を決定する設計の最適化技術が重要となる。摺動面を表面材料と潤滑剤からなるシステムとして捉え、潤滑状態に応じて必要とされる性能をデザインし、個々の要素技術に再び要求性能をブレークダウンすることが必要になる。DLC膜に着目すれば、当初は硬くて自己潤滑性のある膜として注目を集めたものの、その用途は一部の切削工具や金型などに限られていた。エンジン部品などの摺動面材料として急速に普及するようになった背景には、エステル系添加剤（GMO）と水素フリーDLC（ダイヤモンドライクカーボン）との組み合わせによる低摩擦現象発現の発見によるものである⁷⁾。摩耗の制御においては、信頼性や耐久性向上の観点からは耐摩耗性に優れた材料の適用が望まれる。ただし、これも摩擦面材料のみで性能が決まる訳ではないので、摺動条件を十分に加味した上での素材開発と適用技術が必要となる。例えば、発電タービン用すべり軸受の例^{8),9)}では、従来のホワイトメタルに代えて耐摩耗性に優れるPEEK（ポリエーテルエーテルケトン）樹脂複合材料を適用して軸受幅を減少することにより、摺動面積に比例する軸受摩擦損失を約2/3に低減することに成功している。また、経時変化する摺動面の状態を診断・予測可能とする摩耗の制御技術であろう。風力発電設備では、メンテナンスの問題¹⁰⁾が普及を妨げる因子であるとの指摘もあることから、「サステナブル・トライボロジー」の推進は、ひいては再生可能エネルギー利用拡大への貢献につながるものと期待される。

エミッションの制御では、摩耗粉や潤滑油の拡散による環境汚染の防止が課題になる。ブレーキやタイヤからの摩耗粉排出や機械システムからの潤滑油漏洩を根本から無くできれば理想であるが、現実的な対策としては、最小油量で潤滑（MQL）する技術¹¹⁾や、仮に環境に排出されても環境負荷を最小限に止めるような物質でこれらを構成する技術を開発する必要がある。これまでトライボロジー分野では、アスベスト¹²⁾やフロン¹³⁾、鉛^{14),15)}などに代表される環境汚染物質を環境負荷の小さい物質に代替してきたが、今後一層の環境負荷低減策が求められており¹⁶⁾、生分解性潤滑油¹⁷⁾やカーボンニュートラルなバイオベース素材の利用¹⁸⁾、RoHS指令に代表される規制物質の排除など、取り組むべき課題は多く残されている。

トライボロジーの国際的な動向を国際会議から見ると、2005年に米国のワシントンで開催された第3回国際トライボロジー会議（WTCⅢ）までは、ナノテクノロジーを1つのキーワードとして、SPMを用いた高精度計測や分子動力学シミュレーションによる摩擦メカニズムの解明などに高い関心を集めていた。IPCC第4次報告書を発表した2007年を境にして、WTCⅣ（2009年京都）では、P. Jost氏による“Green Tribology”など、会議全体を通して環境問題を強く意識した内容の発表が目立っている。2001年にオーストリアで開催されたWTCⅡ、2011年の第3回ECOTRIBの成功を担ったのが2002年にウィーン郊外のハイテクパークに設立されたAC2T(the Austrian Center of Competence for Tribology)である。AC2Tにはオーストリア政府の重点政策として多額の研究資源が投入され、140名以上のスタッフを擁しており、活発な研究開発事業を展開している。AC2Tでの研究テーマは、トライボロジー全般を網羅しており、大きく4つの領域（①Lubricants and Surface Interactions、②Wear Processes、③Integrated Tribodiagnostics and design、④Multiscale Computational Tribology）に分けて管理・運営が行われている。またAC2Tを中心として実施される“XTribology

“(a)cross Tribology)”と呼ばれる COMET (Competence Centers for Excellent Technologies) プロジェクトには、2010 年 4 月から 2015 年 3 月までの期間中に、総額 59 百万ユーロが投入された¹⁹⁾。

2012 年で 39 回目を迎える国際会議 Leeds-Lyon Symposium on Tribology は、トライボロジー分野では欧州でもっとも伝統ある国際会議であり、各会議にテーマが設定されている。1997 年にロンドンにおいて WTC I との合同開催となった第 24 回会議²⁰⁾のテーマは、“Tribology for Energy Conservation”であり、環境問題解決に向けてトライボロジーが果たすべき役割について強いメッセージが発信された。また、2010 年の第 37 回会議²¹⁾のテーマは、“Tribology for Sustainability, Economic, Environmental and Quality of Life”である。英国にはトライボロジーのメッカとも言われたケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所をはじめとして、リーズ大学、ロンドン大学インペリアルカレッジ、ノッティンガム大学など、トライボロジー研究の国際的研究拠点が点在して世界の研究開発をリードしてきたが、近年、新たにササンプトン大学がこれらに加わった。2007 年、ササンプトン大学は EPSRC (Engineering and Physical Science Research Council, 工学・物理科学研究会議) より “Science and Innovation Awards”を受賞し、これを契機として nCATS (national Centre for Advanced Tribology at Southampton) を設立している。nCATS は、この受賞により EPSRC から 2008 年 4 月からの 5 年間に約 3.2 百万ポンドの助成金を得て、民間企業や大学分を合わせて総計 9.7 百万ポンドの研究資金を集めた²²⁾。また、“Green Tribology”というタイトルで 2011 年 9 月から 5 年間に総額約 1.2 百万ポンドのグラントを EPSRC から獲得するなど、英国では P.Jost 氏のお膝元で推進される“グリーン・トライボロジー”は、今後の研究開発動向を調べる上で目が離せないものとなっている。

米国では、トライボロジーに関しては目立った大型プロジェクト等の動きは見られない。ただし、DOE (The U.S. Department of Energy) は次世代の先進自動車開発に 175 百万ドルの投入を決め、その中の 4.7 百万ドルが潤滑油に関するプロジェクトに配分されるとのことである²³⁾。その内訳は、新調合潤滑油の評価としてマサチューセッツ工科大学に 1.5 百万ドル、PAG (Polyalkylene glycol) 基油の開発としてフォードモーターに 1.2 百万ドル、新規多機能添加剤としてのイオン液体の評価としてオークリッジ国立研究所に 1.2 百万ドル、ボロン系添加剤の開発としてアルゴンヌ国立研究所に 0.8 百万ドルとなっている。公の研究拠点としては、ジョージア工科大学とノースウェスタン大学が NSF (National Science Foundation) による支援を受け、1985 年より CSET (Centre for Surface Engineering and Technology) として、基礎から応用までの広い研究領域をカバーしている²³⁾。また、ナノトライボロジー分野ではオハイオ州立大学の B.Bhushan 教授らによる “Green tribology”の解説記事²⁴⁾が参考になる。

また、中国に目を向けると、清華大学と蘭州化学物理研究所がトライボロジー分野での国家重点実験室に指定され、研究資源の重点配分のもと活発な研究活動を展開している。中国ではトライボロジーの関係する国際会議が年数回行われているが、中国トライボロジー学会 (Chinese Tribology Institution of CMES) 主催で 3 年毎の CIST (China International Symposium on Tribology) が最もメジャーな国際会議である。2011 年に蘭州で開催された第 6 回の会議²⁵⁾では、清華大学 Q.Xue 教授による “Green tribology: health, environment and efficiency”など “グリーン・トライボロジー”は中国でも流行のようである。

（３）注目動向

[新たな技術動向]

■ 材料に関する新たな技術動向

- 高分子ブラシは、固体表面の表面修飾、低摩擦化材料ならびに生体内潤滑モデルとして世界的に学を中心として研究されている。しかし、高負荷など厳しい摺動条件では摩耗してしまい～1MPa 程度の穏やかな条件のみで利用できるものと考えられていた。京都大学の辻井敬亘教授は濃厚ポリマーブラシの厚膜化に成功している。膨潤溶媒も水からイオン液体や潤滑油に変更した材料が作成できるようになっており、実用用途に可能性のある日本独自の展開である。
- 無機コーティングに関しては、DLC は既に新しい潤滑材料として、車にも実装され始めている。無機酸化物コーティングは、酸素存在下でも安定であるという特徴があるが研究例は僅少であった。物質材料機構の土佐らは、特定の条件で調製した ZnO の摩擦係数が半減することを見出しており、注目されている。
- 低摩擦化添加剤として、吸着部位ならびに潤滑部位を有する高分子が東北大学栗原らにより設計されている。
- ゲルの機械における潤滑材料としての応用

■ 研究手法に関する新たな技術動向

- ナノテクノロジーの発展により開発・普及している様々な表面評価法（XPS、EDX、FTIR-ATR など）のトライボロジー研究への適用
- 共振ずり測定など表面力装置を利用したずり測定による潤滑油評価と低粘度化への対応
- 機械と材料・計測分野の融合による摩擦現象の解明による低摩擦の合理的設計の研究推進
- 基材（機械部品の材料）と潤滑油の組み合わせによる低摩擦化技術の開発

■ 摺動面アーキテクチャの概念とその具体的研究

- 固体接触や潤滑油との反応により表面状態が常に変化していくことを前提に、システムの一部として摺動表面の構造や組成などを設計する概念として、摺動面アーキテクチャが重要である。そのため、マルチスケール・テクスチャリング²⁵⁾の考え方として、表面の構造及び組成の空間分布をナノ・マイクロからマクロレベルまでの連続したスケールで俯瞰・理解した上で、階層的な役割の振付が必要になる
- 表面損傷の進行や摩擦環境の変化に能動的に対応する自己適応（self-adaptive）する機能表面の創製として、自己修復性と環境適応性を有する生体皮膚などの模倣（バイオミメティックス）、また加工技術として新しい付加加工技術として注目されている 3 次元積層造形技術（通称 3D プリンタ）の応用²⁶⁾など

[注目すべきプロジェクト]

■ 国内プロジェクト

1) SIP「革新的燃焼技術」

- 損出低減チーム：排気エネルギーの有効利用と機械摩擦損失の低減に関する研究開発

- 革新的要素技術：モノリス構造を利用したナノブラシの階層化による革新的高度潤滑
- 2) 機械と材料・計測分野の融合による摩擦現象の解明（あるいは基礎研究の技術課題の適用）による低摩擦の合理的設計の研究推進を行うプロジェクト
 - MEXT、GRENE、グリーントライボロジーネットワーク（平成 23 年度～27 年度）
 - MEXT、東北発素材先導プロジェクト「低摩擦領域」（平成 24 年度～28 年度）
 - MEXT、光・量子融合連携研究開発プログラム、「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」（平成 25 年度～29 年度）
- 3) 厚膜濃厚ブラシの実用化
 - JST、ACCEL 事業「濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」（平成 27 年度～31 年度）

■ 国外プロジェクト

- COST MP1303 : “Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction”¹⁸⁾。
(COST: European Cooperation in the field of Science and Technical research) 2013 年より開始された研究トライボロジーに関する欧州共同研究の活動(2017 年の終了予定)

(4) 科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

トライボロジー研究にとって摩擦・摩耗・潤滑の基礎メカニズムを理解することが、まずは重要な課題である。しかしトライボロジー現象は、真実接触部と言われる固体間に挟まれた $1\mu\text{m}^3$ 未満の空間領域において、長くても 1ms 程度の短時間に起こる現象（温度・圧力変化、表面原子・分子構造変化、化学反応など）を捉えることが必要とされる。計測・分析技術として、極めて高度なその場観察技術(in-situ)が要求される。現在、様々な表面分析技術が開発されているが、未だに十分な時間分解能や感度を有し、摩擦界面のその場観察に決定的な有用性をもたらす技術は開発されていない。この分析・観察技術が確立することが、計算機シミュレーションによる数値解析技術の妥当性等に重要となる。

また実用面として自動車用エンジンでは低摩擦化に向けて油の低粘度化が進む一方で、荷重や速度の条件がそれぞれ異なるエンジン要素部品を同じエンジン油で潤滑させるため、効果的な添加剤設計技術が重要となっている。また、熱効率（燃費）向上のための小型化(ダウンサイジング)・高過給化によるプレイグニッション、デポジット、燃料のシリンダ内直噴化による潤滑油の燃料による希釈などが、異常燃焼と摩擦摩耗増加を引き起こす等の新たな技術課題がある。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- ① 基本的なメカニズム解明のための表面分析技術の開発
- ② 摺動表面の材料や形状、潤滑油添加剤などを総合的にデザインする摺動面アーキテクチャ技術の開発
- ③ 低粘度潤滑油の開発
- ④ 境界潤滑の解明と低摩擦化設計指針の構築

- ⑤ 低粘度化のための添加剤の開発：低粘度潤滑油で進みやすい焼き付きをさける添加剤の開発
- ⑥ 新規基材ならびにコーティングの開発、低摩耗材料の開発
- ⑦ 原子・分子レベルでの摩擦現象の解明
- ⑧ MEMS における摩擦制御
- ⑨ 表面性状（テクスチャリングや DLC）の最適化による境界潤滑領域における低摩擦・低摩耗及び表面性状と潤滑油の最適化。

（５）政策的課題

トライボロジーが扱う対象は、原子・分子レベルでの摩擦現象から、ハードディスクのスライダヘッド、自動車の駆動部品やタイヤ、発電タービンの軸受、電気接点、人工関節、地震予知や人工衛星など、多岐に渡っている。そのため、トライボロジーが関連する学問は機械工学を本拠としながらも、物理学や化学などの基礎分野から、材料、電気、土木・建築、航空・宇宙などの工学分野、エネルギー・環境や防災に係わる応用領域、さらにはナノテクノロジー、バイオテクノロジーといった新融合領域に至るまで、非常に幅広い範囲に跨がっている。このように分野融合の科学・技術の典型であるトライボロジーであるが、世界的には大規模なトライボロジー研究拠点が各国に存在する。一方で、日本のトライボロジー研究は大学の小規模研究室で実施されており、基礎と技術課題の融合研究を推進するのに十分な体制にない。先進的なトライボロジー研究を推進するには、材料、計測そして機械分野の研究者の融合研究が必須であり、そのような研究推進に適切な体制が必要となる。諸外国の学のトライボロジー研究のリーダーには電気化学（Jost）、物理化学（Tabor）、表面科学（N.D. Spencer, チューリッヒ工科大学）、化学（H. Spikes, インペリアルカレッジ）など、材料系の研究者が多く、機械分野の研究者・技術者と共同している。より積極的な基盤分野の研究者の参画が可能になるような体制が必要である。また大学教育においても「トライボロジー」を講義科目として開設していない理工系大学も少なからずあることも課題である。

（６）キーワード

境界潤滑、流体潤滑、添加剤、潤滑油、閉じ込め効果、ナノ計測、共振ずり測定、ストライベック曲線、コーティング技術、高分子ブラシ、ゲル、イオン液体、In-situ 分析（その場観察）、摩擦メカニズム、摺動面アークテクチャ

（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	○	↑	● 基礎分野の研究者の参画により、摩擦・潤滑研究の新しい展開が出ている。特に、物理、化学、材料、計測の研究者の融合研究への参画が進んでいる。 ● トライボロジーにおける低摩擦の発現現象や焼き付き及びなじみのメカニズム、カーボン系炭素膜等多くの基板技術が大学をはじめとする研究機関をで推進されている。（CREST、さがけ他）

	応用研究・開発	○	→	● 近年の自動車の燃費向上の大きな部分が、低摩擦化技術の向上によっている。過去20年間で15%²⁷⁾と燃費向上が実現している。 ● 各機械要素技術(部品)の低摩擦・耐久性技術は現状でも世界トップクラスである。これらが変わらず高品質の機械システムを支えている。SIPにおける乗用車エンジンでのトライボロジー研究の推進等
米国	基礎研究	◎	→	● 基礎と応用研究の循環がスムーズである。ベンチャーから生み出された摩擦試験機が世界標準機になっている（現在はBrukerが販売）。
	応用研究・開発	◎	→	● 基礎と応用研究の循環がスムーズである。例えば、ハードディスクの潤滑研究をナノテクノロジーから推進したIBMの研究者が教科書⁵⁾を執筆するなど、先端研究の導入へのハードルが低い。SAE International (Society of Automotive Engineers) の年会では、2009年にNanotechnologyのセッションが開催された。
欧州	基礎研究	◎	→	● 欧州全体としては、数か所の拠点（資料参照）があり、シンポジウムの開催や共同しての若手育成などを連携して進めている。産業界との連携も強い。 ● 国際会議や国際誌の発表、COSTプロジェクト
	応用研究・開発	◎	↗	● 産学の連携が強い。添加剤におけるエボニックなど世界的な企業が研究をリードしている。 ● 機械システム及びその課題を明確化した産学官の連携体制（FVV等）。エンジン設計に有用な解析モデルでは世界有数の企業（FEV、AVL、RICARDO等）があり、世界の自動車企業のエンジン開発のサポートを行っている。
中国	基礎研究	○	↗	● 摩擦研究拠点が、北京と蘭州にある（State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University（1986年創立）；State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, the Chinese Academy of Science（1987年創設）。ともに百人規模の研究者（前者は87名、後者は80名以上・ポストドク以上）を擁する大規模な組織。欧米で教育あるいは研究経験を積んだ中堅研究者がリーダーとして研究を率いている。研究テーマも現代的であるが、まだ追随型である。
	応用研究・開発	△	↗	● 欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆する応用研究はないが、基礎研究の状況から今後の応用研究レベルの向上が考えられる。
韓国	基礎研究	△	→	● 内燃機関のトライボロジーで特筆すべき研究はない
	応用研究・開発	△	→	● 欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆する応用研究はない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考文献

- SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）革新的燃焼技術（日の丸内燃機関が地球を救う計画）研究開発計画 内閣府資料
 - 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) シンポジウム資料(2014)
 - SIP「革新的燃焼技術」公開シンポジウム資料（2015）
- 1) 財団法人 化学技術戦略推進機構,「ST/GSC 技術開発プログラム構想－ST 戦略の具体化に向けて－」(2005年)。（注：ST:Sustainable Technology, GSC: Green Sustainable

Chemistry)

- 2) K.Holmberg, P.Andersson, A.Erdemir, : “Global energy consumption due to friction in passenger cars”, Tribology International, 47(2012)221-234
- 3) B. N. J. Persson, “Sliding Friction, Physical Principles and Applications, 2nd Ed.”, Springer, 2000.
- 4) F.P. Bowden, D. Tabor, “The friction and Lubrication of Solids”, Oxford University Press, (1950, 1954), paperback edition, (1986), Reprinted in 2008.
- 5) C. M. Mate, “Tribology on the Small Scale, A Bottom Up Approach to Friction, Lubrication, and Wear”, Oxford University Press (2008).
- 6) S.Sasaki: “Environmentally friendly tribology (Eco-tribology)”, Journal of Mechanical Science and Technology,24,1(2010)67-71
- 7) 加納真, “硬質炭素膜のトライボロジー研究動向”, トライボロジスト, 58, 8 (2023) 524-531
- 8) 三菱重工株式会社: “タービン向け低漏洩リーフシール・耐高圧樹脂軸受” 「優秀省エネルギー機器 平成 20 年度受賞機器の概要」, 一般社団法人 日本機械工業連合会 (2008) 18-21
- 9) 斉藤英治, 松野成之, 田中恵三, 西本慎, 山本隆一, 今野晋也, “最新鋭蒸気タービンの技術開発と展望”, 三菱重工技報, 52, 2 (2015) 36-43
- 10) 「風力発電促進の条件整備に関する調査研究報告書」: 一般社団法人日本海事検定協会 (2012) (http://www.nkkk.or.jp/pdf/public_business_report_4-09.pdf)
- 11) 須田聡: “MQL 切削用油剤の動向”, トライボロジスト, 47, 7 (2002) 550-556
- 12) 紺野常雄: “ブレーキ, クラッチ用ノンアスベスト材の開発動向”, トライボロジスト, 38, 5 (1993) 445
- 13) 瀧川克也: 冷凍サイクルにおけるトライボロジー, トライボロジスト, 43, 3(1998)183-186.
- 14) Y.Kumada, K.Hashizume and Y.Kimura: “Performance of microgrooved bearings under mixed lubrication - Application to partial journal bearings in automobile engines, part 2,” Proc. JSAE, No.9633900(1995)69-72
- 15) 岡本裕: すべり軸受における摩耗と疲労, トライボロジスト, Vol.47, No.8(2002) 616-622.
- 16) P. Laemmle & P. Rohrbach: “Application of ECLs and Today’s Legislation”, J. of ASTM International, 9,1 (2011) doi:10.1520/JAI103563.
- 17) C.A. Bailey: “USDA Programmes to support development and use of biobased industrial products”, J. of ASTM International, 8,6 (2011) doi:10.1520/JAI103565
- 18) M.Woydt: “Polyaklylene glycols as next generation engine oils”, J. of ASTM International, 8,6, doi:10.1520/JAI03368 (2011)
- 19) F.Franek: “Tribology activities in Austria- update2011”, Proc. of 3rd European Conference on Tribology, Vienna (2011) 945-950
- 20) 「Tribology for Energy Conservation」, Elsevier Science, Netherlands (1998)
- 21) “37th Leeds-Lyon Symposium on Tribology Special Issue: Tribology for Sustaina-

- bility: Economic, Enviroment, and Quality of Life”, edited by M. Priest, Tribology International,46,1 (2012)1-298
- 22) 英国ササンプトン大学の nCATS の Web サイト:
<http://www.southampton.ac.uk/ncats/>
- 23) CSET の Web サイト: <http://www.nsf.gov/eng/iip/iucrc/directory/cset.jsp>
- 24) M.Nosonovsky and B. Bhushan: “Green tribology: principles, research areas and challenges”, Philosophical Transactions of the royal Society A, 28(2010) 4677-4694
- 25) Proceedings of 6th Chinese Internarional Conference on Tribology, Lanzhou, China(2011)
- 26) 佐々木信也, “3D プリンティングによる表面テクスチャ創製とトライボロジー”, 月刊トライボロジー, 329 (2015) 36-40
- 27) 鈴木 厚, トライボロジー,Vol.,61 (2012) .

3.30 耐熱材料

（１）研究開発領域の簡潔な説明

耐熱材料は、耐熱性をもつ固体材料の総称で金属・合金、セラミックス、有機または無機高分子などがある。火力発電用ボイラ・蒸気タービン・ガスタービン、原子力発電用蒸気タービン、石油化学プラント、航空機用ジェットエンジン、廃棄物発電、自動車等などに利用される。多くの種類の耐熱材料があるが、条件（温度、応力、環境）によって使い分けられている。ここでは、主に耐熱鋼、Ni 基合金、チタン合金に関し、高温強度に優れた新たな耐熱材料の創成、革新的な耐熱コーティング技術の開発、耐熱材料の高性能化（低コスト・長寿命化等）などの研究開発に加えて、近年急速に注目を集めるようになった SiC/SiC 複合材料（通称 CMC）や高融点基複合材料などに関する研究開発、さらに、材料の損傷・劣化評価に関わる開発研究を対象とする。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

我が国が直面するエネルギー問題において、エネルギー転換・利用効率向上による省エネルギー、排出ガス削減が求められている。このため、熱に耐え、強くて軽い革新的材料を開発し、発電等産業機器・輸送機器への実機適用を行い、エネルギー転換・利用効率向上を実現するとともに、機器の安全性・信頼性を確保する必要がある。耐熱構造材料には、エネルギー効率を高めて資源を節約し、環境負荷を下げ持続性を維持するための機能、性能の向上がより一層求められる。

また、2011年に発生した東日本大震災以降、耐用年数が間近に迫っている多くの既設火力発電プラントでは、火力発電プラントへの依存度が極めて高い状況のもと長期間の運転が余儀なくされており、長期使用に伴う高温、高応力部位で使用されている構成材料の損傷や劣化の進行が懸念されている。さらに、近年開発されている耐熱材料の多くは、高温環境においても高い変形抵抗を有し、一般鋼材で見られるマクロな変形や劣化現象が発現しにくく、これまでの材料損傷・劣化評価手法を適用することが困難である。従って、高温機器構造物の安全性維持の観点から耐熱材料の損傷・劣化評価技術の開発に関わる研究開発が重要となる。

[動向（歴史）]

火力発電では、1950年代後半にボイラの過熱機関や再熱機関などの高温部材に、クリープ強度、高温腐食、水蒸気酸化など、耐熱性の観点から 18-8 系ステンレス鋼が初めて使用された。1980 年代以降、蒸気条件を高温高压化した超々臨界圧（USC ; Ultra Super Critical Pressure）プラントに向けて様々な高耐食・高クリープ破断強度のオーステナイト系ステンレス鋼が開発された¹⁾。2008 年からは蒸気条件をさらに高温高压化した先進超々臨界圧発電技術（Advanced-USC）の開発が進められてきたが、本蒸気条件下では、オーステナイト系ステンレス鋼ではもはや耐えられないため、Ni 基超合金の適用が考えられてきた。しかし一方で、Ni 基超合金は鋼に対して圧倒的に原料コスト高となるため、新規な耐熱鋼の研究開発が国家プロジェクトとして推進され²⁾、フェライト系耐熱鋼、オーステナイト耐熱鋼共に成

果を挙げつつある。

700°C 級 A-USC 石炭火力発電の研究開発は、世界各国（欧州、米国、中国、インド）で行われ、日本では、Ni 基超合金や Fe-Ni 基合金を用いたボイラ圧力部材、蒸気タービンが試作され、実用化試験が進められている。800°C を目指したボイラ用 Ni 基合金の開発・改良研究も進められている。フェライト系耐熱鋼の耐用温度は 600°C であったが、650°C 耐用の耐熱鋼（高 B-9Cr 鋼や SAVE12AD 鋼）も開発され、実用化が進められている。更に耐熱鋼の耐用温度を上げるために 15Cr 鋼や 20~25Cr 鋼の研究も進められている。

Ni 基超合金は、鍛造合金から普通鑄造合金、一方向凝固合金、単結晶合金へと進化してきた。1940 年代に開発された鍛造（Wrought）合金 N80 等がタービンの動・静翼に適用され、析出強化等により強度を上げてくると、鍛造成形が次第に困難になってきた。これに替わって、1950 年代半ばに真空溶解技術が開発され、Al、Ti 等の活性元素を多量に含む合金組成を、中空（中空な鑄物を作る場合に主型の中空部にはめ込む鑄型）を用いた普通鑄造（CC：Conventionally Cast）鑄物として精密鑄造することが可能となり、析出強化や固溶強化がさらに進んだ。しかし、得られた合金は結晶粒が多数集合した多結晶であり、結晶粒界が破壊の起点になることが課題であった。特にタービンブレードの場合、高温で高速回転しているため長時間使用すると遠心力によって結晶粒界に沿って割れが生じてしまうという問題があった。これに対して結晶制御により、一方向凝固合金や単結晶合金による鑄造材で、疲労とクリープ破壊が発生しやすいタービン翼の長手方向に垂直な結晶粒界を無くした合金が開発された。1970 年頃に米国で一方向凝固（DS：Directionally Solidified）プロセスの適用が開始されると、長手方向にかかる遠心力とほぼ平行に結晶粒界をそろえることにより、タービン翼の長手方向のクリープ強度と延性、および疲れ特性が大幅に向上した。さらに、1980 年頃には、結晶粒界を全て無くし高温強度を大幅に向上させた単結晶（SC：Single Crystal）合金が開発された。方向性凝固により優先的に成長する結晶方位は、クリープ強度に優れ、熱疲労に強いという特性を持つ。また、単結晶超合金を越えるクリープ強度を有する超合金として酸化物分散強化（ODS）超合金が開発されている。この合金は、機械的合金（メカニカルアロイ）化→押出加工→一方向再結晶という一連のプロセスで製造される。酸化イットリウム（ Y_2O_3 ）のような長時間での高温下使用でも安定な微細酸化物が均一に分散されているため、特に 1,000°C を越える様な高温のクリープ強度に優れている。この合金は、シート状に鍛造、圧延して燃焼器などの高温部材として用いられている。1940 年代初頭の開発直後の合金の耐用温度が 730°C 程度であったものが、最近では 1,150°C まで開発が進んできた。400°C 近い耐用温度の向上に約 70 年かかっており、構造材料開発の典型的な例として、時間をかけて徐々に特性を向上させてきたことがわかる。開発合金の内、旧金属材料技術研究所で開発された TMS 以外は民間で開発されたことは注目される。PWA、Rene、CMSX 等は米国、MC はフランス、MDSC は日本のメーカーで開発された合金の商標である。特に欧米では航空宇宙産業においてエンジン開発が盛んであったため、政府が民間企業を支援し、官民一体となって耐熱合金の開発が加速された³⁾。米国では、1700°C 級ガスタービンの開発で、エネルギー省（DOE）の High Efficiency Engines and Turbines プログラム（2003~2015、約 1000 億円）により国家的な支援の下で耐熱材料の技術開発を進めてきている。

東日本大震災後、発電用高効率ガスタービンの重要性は増している。ガスタービンの高効率化では、Ni 基超合金と遮熱コーティング（TBC：Thermal Barrier Coating）の開発がキー

テクノロジーである。発電用大型ガスタービンにおいても単結晶合金の導入が進められ、1500°C 級ガスタービンが実用化されている。ヨーロッパでは第 2 世代の CMSX-4 が用いられており、米国 GE の 1500°C 級ガスタービンでは第 2 世代の Rene N5 が用いられている。物材機構の「新世紀耐熱材料プロジェクト」では、1700°C ガスタービン要素技術研究が行われた²⁷⁾。ガス温度の上昇に伴い、タービン動静翼においては遮熱コーティング (TBC) が特に重要となっている。TBC と基材との熱膨張差により、起動停止の温度変化による割れやはく離の防止が重要になる。一般的な TBC システムは、熱を遮蔽するセラミックトップコートと、Ni 基超合金基材の密着性改善と耐食性を目的としたボンドコートからなる。トップコートにはイットリア安定化ジルコニア (YSZ) が、ボンドコートには Pt-Al コーティングや MCrAlY 金属 (M: Ni, Co) などが用いられている。タービン動静翼においては、TBC の破損は、基材を直接燃焼ガスに曝す危険があるため回避しなければならない。TBC の破損には、トップコート/ボンドコート界面に生じる熱成長酸化物 (TGO: Thermally Grown Oxide) が原因となるはく離、熱機械疲労 (TMF: Thermo-Mechanical Fatigue) によるボンドコートの割れなど種々の形態がある²⁸⁾。このため、ボンドコート材料の改良・開発、新規な TBC システムの開発、先進コーティング技術の適用、TBC の試験評価技術の開発など多くの研究が行われている。ボンドコートの耐酸化性向上 (TGO の成長抑制) や、基材との元素の相互拡散抑制のための様々な研究もすすめられている。物質・材料研究機構では、基材と熱力学平衡する EQ コーティングを開発している²⁹⁾。トップコートについては、耐熱温度を向上させるための複合セラミックトップコートの研究が進められている。これらの新しいコーティングの実用化が期待される。皮膜の緻密化や遮熱性の向上のために、先進のコーティング技術 (電子ビーム物理蒸着、サスペンションプラズマ溶射、コールドスプレー、ウオームスプレーなど) を TBC 成膜に適用する研究も進められている²⁸⁾。

チタン合金開発については、航空機のジェットエンジンの軽量化という点で、最近研究が再燃している⁴⁾。航空機用チタン材料としては例として、1) 純チタン、2) Ti-6Al-4V 合金 (Ti-64, IMI318)、3) Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 合金 (Ti-6242)、4) Ti-8Al-1Mo-1V 合金、5) Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo (Ti-17) 合金、6) Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金 (Ti-6246)、7) Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (Ti-15-3-3-3) 合金、8) Ti-10V-2Fe-3Al (Ti-10-2-3) 合金などが挙げられる^{5, 6)}。この中で、エンジン用耐熱部材に用いられているのは 2) の Ti-64 合金、3) の Ti-6242 合金、5) の Ti-17 合金、6) の Ti-6246 合金などである。Ti-64 合金は、チタン合金を代表する合金であり、強度、延性、疲労強度、破壊靱性、高温強度、クリープの各種特性や溶接性、加工性、熱処理性等の特性がバランスよく備わった合金である。低圧コンプレッサーディスクやブレードなどに用いられている。Ti-6242 合金は、1960 年後半に開発された合金で、耐熱温度は 450°C 程度である。1970 年代後半には、耐酸化性やクリープ特性を向上させるために、Si を 0.06~0.2wt% 添加した Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Sn 合金が開発され、耐熱温度は 500°C まで改善されている。高圧コンプレッサーディスクやブレードなどに用いられている。Ti-17 合金は、高強度で破壊靱性に優れたチタン合金として 1970 年代に米国で開発された。耐熱温度は 400°C 程度であり、ファンディスクやコンプレッサーディスクに用いられている。Ti-6246 合金は、1966 年頃に開発されたチタン合金であり、耐熱温度は 450°C である。この合金も高圧コンプレッサーディスクやブレードに用いられている。

材料損傷・劣化評価技術に関しては、1999年の電気事業法の改正に伴い、ボイラ設備等について定期点検間隔が最長4年に延長可能となり、余寿命診断指針が提示された。そして、翌2000年から事業者による自己責任に基づく法定自主点検に移行した。これにより、事業者が設備の安全な運用と保守コストとのバランスを考慮した保全計画を柔軟に設定できるようになった。現在までの高温機器における損傷・劣化診断と余寿命評価に用いられてきた方法は、破壊評価法、非破壊評価法、解析評価法の3つに大別できる。

- 破壊評価法

実機からサンプルを採取して温度加速試験もしくは応力加速試験を行い、得られたデータを用いて直接余寿命を算出する方法であり、最も精度が高い方法である。

- 非破壊評価法

非破壊評価は実機からサンプルを採取することなく、物性測定や組織観察等から損傷を評価し、余寿命を推定する方法である。物性の変化を測定する方法としては、硬さ計測法や電気抵抗法などがあり、また組織検査法としては、結晶粒変形法、組織対比法、炭化物組成測定法、析出物粒間距離法、Aパラメータ法、ボイド面積率法、ボイド個数密度法が挙げられる。基本的にこれらの非破壊評価法では損傷マスターカーブの作成が必要となる。溶接部における内部のき裂計測には超音波法が用いられている。表面の探傷には、浸透探傷検査や磁粉探傷検査が用いられている。

- 解析評価法

解析による評価では、診断対象箇所近傍のメタル温度データや運転データ（蒸気温度、圧力、流量等）を基に、熱応力や内圧応力を有限要素法等で計算している。そして、これらの温度、応力と材料特性からクリープ損傷則を使用してクリープ寿命比を計算する。代表的なクリープ損傷則は、寿命比則、ひずみ比則、複合則である、各法則において累積損傷率が1となったときに破壊が起きるものとされている。また材料の変形特性に基づいてクリープ余寿命評価を行う手法も提案されている。

上記の3つの評価法を組み合わせるなどして、事業者の自己責任に基づき火力発電プラントの法定自主点検を実施している。

USC、A-USC ボイラでは、特に溶接部において多軸応力の影響やクリープ疲労を考慮した寿命予測技術の開発・確立が重要である。損傷を早期に検出するために、非破壊検査技術の高精度化や新しい検査技術の実用化が検討されている。タービン翼とTBCは複雑な負荷履歴と熱履歴を受けるが、高温低サイクル疲労や熱機械疲労による損傷・破壊の予測においては、未解明の課題が多く残されており、試験評価技術の確立にむけた研究が進められている²⁸⁾。

材料損傷・劣化評価技術に関して、近年の高温機器構造物において使用されている材料の強度、損傷、余寿命等の評価で緊要な課題は、1)短時間データからの正確な長時間強度の算出、2)溶接部における損傷やき裂の問題、3)多軸応力の損傷形態、破断寿命、破断延性への影響についてである。1)については、近年では、長時間使用したボイラ材を用いて、非破壊検査法や解析法に比べて診断精度が高いとされている破壊試験法により余寿命を予測する研究が国内のみならず国外でも活発に行われている。2)については、国内の火力発電用ボイラ等において発生している不具合事例であるTypeIV損傷（高温・長時間領域において、母材の

10 分の 1 程度の寿命で、溶接熱影響部の細粒域で発生する損傷）について、強度低下を合理的かつ保守的に評価する必要がある、国内では実験的研究と解析的研究が活発に行われている。この問題の解決が A-USC プラントの早期実現につながるものである。3)については、平滑材および切欠材を用いたクリープ条件下の損傷形成挙動やき裂成長特性における多軸応力効果に関して、実験的および解析的研究が盛んに行われている。また破壊力学パラメータによる溶接継手材の余寿命評価の可能性も検討されている。

（３）注目動向

〔新たな技術動向〕

近年、ジェットエンジン向けの Ti-Al 合金、Mo-Si-B 基合金、SiC/SiC 複合材料（通称 CMC）、高エントロピー合金（High Entropy Alloys; HEAs）が要注目である。

1980 年代初頭から約 20 年間にわたって興った金属間化合物材料開発のブームによって得られた大きな成果として、TiAl 金属間化合物ならびに Ti_3Al 金属間化合物を主相とする Ti-Al 合金のジェットエンジンへの実用化が挙げられる。2011 年に就航したボーイング 787 機（通称ドリームライナー）には、Rolls-Royce 社の Trent1000 エンジンと GE の GEnx エンジンが採用されている。Trent1000 エンジンには、我が国の物質材料研究機構（NIMS）が開発した Ni 基単結晶超合金が、高圧タービン動翼として搭載されていることは有名である。これに対して、GEnx エンジンには、Ti-Al 合金で作られた低圧タービン動翼が最後段に搭載されている⁷⁾。Ti-Al 合金は Ni 基超合金に比べて比重が小さいため、エンジンの軽量化に大きな役割を果たしており、ドリームライナーの低燃費化の一翼を担っている。現在のところ、鋳造材が使用されているものと思われるが⁸⁾、今後は鍛造材などの開発が大きなテーマになるものと思われる。耐熱温度は現在のところ 700°C 以上と考えられており、従来の耐熱チタン合金とは一線を画す。

2016 年 7 月、英国ケンブリッジ大学で開催された ECI Conference on “Beyond Nickel-Based Superalloys II”⁹⁾において、米国の Office of Naval Research の David A. Shifler 博士は講演の中で、「現在、米国が注目しているのは、Mo-Si-B 基合金、SiC/SiC 複合材料（CMC）、そして高エントロピー合金（HEAs）である。」と述べた。

Mo-Si-B 基合金が耐熱材料として世界で注目されるようになったのは、1996 年に Iowa State University の Ames 研究所が、 Mo_5Si_3 金属間化合物に B を添加することで、その耐酸化性が劇的に改善されることを発表した¹⁰⁾のが契機となっている。その後、米国、ドイツ、日本の研究者らによって地道な研究が続けられてきた結果、近年、徐々に開花しつつある状況である。Mo-Si-B 合金は、密度は現在のところ Ni 基超合金と同等であるが、CMC に比べて高温クリープ強度が高く、室温破壊靱性も 15MPa(m)^{1/2} 以上と良好な値を示すものが提案されてきており、耐熱性が要求されるパーツでは CMC を凌ぐ次世代の耐熱材料として期待が高い⁹⁾。耐熱温度は、現在のところ、CMC の 1300°C を超える 1350~1400°C と考えられている。

炭化ケイ素（SiC）の長繊維は 1975 年に東北大学で開発されたセラミックスファイバーである。これを同じく SiC のマトリックスで複合化したものが SiC/SiC 複合材料、いわゆる CMC である。高温における長繊維とマトリックス間の界面反応を抑えると共に、界面の適

度なせん断すべり変形などで良好な高温強度と破壊に対する抵抗を実現するため、長繊維表面にはグラファイトや窒化ホウ素（BN）などのコーティングが施されている。CMC製の静的部品はGEと仏スネクマ社の合併会社、CFM インターナショナルが開発した次世代旅客機エンジン「LEAP」に実用化されており、これまで受注または内定したLEAPエンジンの販売台数は9,500基を超えていると報道されている（2015年10月現在）¹¹⁾。LEAPエンジンへのCMCの実用化（搭載）に対する最初のプレスリリース日は定かではないが、2014年にはすでにインターネット上で報道がなされている¹²⁾。

高エントロピー合金に関しては、現在のところ萌芽段階であるが、新しい合金群が見出されるものと期待が寄せられている。

Additive Manufacturing（AM）、いわゆる3Dプリンティングによる造形技術は、耐熱材料の分野でも注目を集めている。2016年現在、GEやRolls Royce、Pratt&Whitneyなどは皆ジェットエンジン部材の試作に乗り出しているとの報道がある¹³⁻¹⁶⁾。近年の材料関連の国際会議では必ずAM関連のシンポジウムが開催され、常に活況を呈している。経済産業省でもAM技術に対して注視しており、対策を検討している¹⁷⁾。耐熱材料のAM技術は、良質な素材粉末の提供が大きな鍵になると考えら、粉末作製技術を含め今後大いに発展する分野と期待が集まっている。

〔注目すべき国内外のプロジェクト〕

資源エネルギー庁「先進超々臨界圧火力発電実用化技術開発」プロジェクト（2008～2016年）は、2050年二酸化炭素大幅削減にむけた「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」の課題の一つで、700℃級A-USCの実現に向けて、耐熱材料と構造部材の安全性・信頼性評価研究が行われている。2017年からは第2期研究が行われる予定である。700℃級A-USC石炭火力発電については、現在、世界各国で研究が行われている。欧州のEncioプロジェクトをはじめ、米国、中国、インドで国家プロジェクトが行われている³⁰⁾。

NEDO戦略的省エネルギー技術革新プログラム「750℃級極限高効率率石炭火力発電用耐熱材料の開発」では、A-USCボイラ用Ni基合金、耐熱鋼の更なる耐用温度の向上を目指した研究が進められている。

2014年度開始の内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」¹⁸⁾では、耐熱合金、金属間化合物等がセラミックスコーティング、航空機用樹脂、FRPとともに研究開発項目として挙げられている。この中では航空機エンジン用部材としてニッケル基合金、チタン合金、Ti-Al合金の加工技術開発など行われている。全26採択課題のうち、2拠点を含む8課題が耐熱合金・金属間化合物等領域に属する。ただし、これらはあくまで熱間鍛造を中心とした加工技術開発が主であり、材料設計等は含まれていない。

JST先端的低炭素化技術開発(ALCA)「耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料」（2011年度～）¹⁹⁾では、低炭素化社会の実現に向けた、主に発電・輸送機器用蒸気・ガスタービン等のための耐熱材料・コーティング技術開発が推進されてきたが、2015年より実用技術化プロジェクト「低CO₂排出型次世代火力発電用新規耐熱材料の開発」²⁾に衣替えをして、先進耐熱鋼やMo-Si-B基超高温材料の研究開発を引き継いでいる。

2014年度にはNEDOのエネルギー・環境新技術先導プログラムで、東北大学とIHIによ

る「無冷却高圧タービン動翼を実現する最先端超高温材料の研究開発」が採択され、Mo-Si-B 基合金と耐熱セラミックスとの複合化を含む研究開発が推進されている。

このような流れの中で、主要な耐熱材料である、耐熱鋼、Ni 基超合金、Ti-Al 合金、Mo-Si-B 基合金に関しては、国際的にも見ても明確な研究拠点が国内に形成されている。耐熱鋼に関しては、物質材料研究機構 NIMS（木村一弘博士）、東京工大（竹山雅夫教授）、九大（中島英治教授）の 3 大拠点である。Ni 基超合金に関しては NIMS（原田広史博士）、Ti-Al 合金に関しては東京工大（竹山雅夫教授）、Mo-Si-B 基超高温材料に関しては東北大学（吉見享祐教授）である。これらはいずれも、上記プログラムのいずれか、あるいは複数に参画している。

2015 年まで、米国では Mo-Si-B 基合金に対するコーティング技術に関するプロジェクトが、Navy や Air Force からの支援の下、University of Wisconsin-Madison の J.H. Perepezko 教授らを中心に推進されていた^{20, 21)}。

一方、CMC に関しては、公式発表は少ないものの国際的には大きな研究開発が急ピッチで進んでいる。たいへん残念なことは、日本カーボン社の SiC 長繊維「ハイニカロン」の実質的な技術流出である。日本カーボンと米国 GE、仏サフランの 3 社は合弁会社を設立し、米国内にて SiC 長繊維の製造に着手する¹¹⁾。米国はこれまで、NASA や GE を中心に CMC の開発を強く推進してきたが²²⁾、SiC 長繊維の製造に関しては我が国が先行していた。今回のハイニカロン製造技術の流出によって、米国は CMC の量産を本格化することになり、我が国にとってはそれを追従する形になる。現在、もう一つの国産 SiC 長繊維である宇部興産の「チラノ繊維」を使って、どこまで我が国の CMC 製造技術を発展させることができるかが重要な鍵となることは間違い無い。先述のように、すでに CMC 製の静的部品は CFM インターナショナルが開発した次世代旅客機エンジン LEAP に実用化されている。この LEAP エンジン中国の民間航空機にも搭載の計画があり^{16, 23)}、CMC の製造技術が世界に拡散するのは時間の問題である。我が国の SiC 長繊維製造技術の先進性が将来的に低下していくことが懸念される。

EU では、2014 年から 2020 年にかけて、Horizon2020 という超大型研究イノベーションプログラム（7 年間で総額約 800 億ユーロ）を推進している²⁴⁾。このプログラムの中で、先述の AM 技術は重要な技術戦略の一つとなっている²⁵⁾。

物質・材料研究機構 構造材料研究拠点では、「グリーンプロセスを用いた高性能構造材料の創製」、「界面制御による構造材料・構造体の高信頼性化」のプロジェクトの中で、省エネルギー・低環境負荷の実現のため、輸送機器材料の軽量化・高強度化、エネルギーインフラ材料の耐熱性向上と信頼性評価技術開発に取り組んでいる³¹⁾。

米国では、エネルギー省(DOE)の High Efficiency Engines and Turbines プログラム(2003～2015、約 1000 億円)により国家的な支援の下で、1700°C 級ガスタービンの技術開発を進めている。

材料の損傷・劣化評価技術開発については以下の 2 つのプロジェクトに含まれている。経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」（2013 年度～）は、自動車をはじめとする輸送機器の抜本的な軽量化を目的として、鉄鋼、非鉄金属（アルミ、チタン、マグネシウム）、CFRP およびこれらの接合技術の開発を行う。本プロジェクトの推進のために、「新構造材料技術研究組合」（ISMA）³²⁾が設立され、鋼材、アルミニウム、チタン、マグネシウムの材料・プロセス・接合技術開発に関して 19 企業、1 独法が加入した。さらにこれらの対象

材料の高温環境下の強度評価技術開発も行われている。

上述の SIP「革新的構造材料」では、耐熱合金、金属間化合物等がセラミックスコーティング、航空機用樹脂、FRP とともに研究開発項目として挙げられている。この中では航空機エンジン用部材としてニッケル基合金、チタン合金、チタンアルミの加工技術開発および強度評価技術開発などが行われている。全 26 採択課題のうち、2 拠点を含む 8 課題が耐熱合金・金属間化合物等領域に属する。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

ガスタービン入口ガス温度は、既に 1600°C が達成されているが、現在開発が進められている 1700°C 級、更には、中長期的に開発が検討される 1800°C 級に向けた耐熱材料開発が重要である。耐熱合金に関しては、合金単体での使用限界温度の改善に加え、革新的製造技術による冷却構造の複雑化や遮熱コーティングの高性能化など複数技術の組み合わせで高温化に対応する必要がある。合金そのものについても、より一層の高強度化、耐環境性向上、低密度化が不可欠である。また、将来にわたり持続可能な使用サイクルを構築することが重要である。遮熱コーティング(TBC)に関しては、メタル温度の上昇に伴い、ボンドコート、トップコートの材料・製造技術の開発が求められる。

ボイラ・蒸気タービンのさらなる高効率化には、蒸気温度の向上が必要である。現状のフェライト系耐熱鋼では高クリープ強度耐熱鋼の開発・実用化が、さらに、蒸気温度を高めた A-USC の実現には、ニッケル合金の適用が不可欠である。素材としての大径厚肉配管や大型鍛造材の成分設計および製造技術の開発に加えて、加工・溶接部の特性把握、長期実機検証試験および損傷評価技術の開発が必要となる。

材料特性の視点からボトルネックとなっている別の課題は耐酸化性である。耐熱材料の重要な耐熱特性の一つであるが、とかく高温強度等の機械的性質を優先し、耐酸化性を後回しにする傾向がある。しかし、Mo-Si-B 基超高温材料や CMC のような極めて厳しい高温環境下においては、耐酸化性の付与と同時にコーティング等による酸化環境からの防御が不可欠となっている。世界的にも大きな課題である。

材料開発、材料試験、実用化にかかる多大なコストや時間を削減するには、計算科学や材料データベースに基づく情報学（インフォマティクス）を導入することが課題となる。最先端の計算科学や計測・評価技術も、耐熱材料の開発や高温機器部材の設計には有効である。これらにより、耐熱材料の諸特性の発現機構や、時間依存の破壊機構について、ミクロからマクロに至る現象を解明し、材料開発にフィードバックすることが重要と考えられる。更に、これらのデータがデータベースに蓄積されることにより、材料開発のスピードアップが期待される。

計算科学技術は、耐熱材料の開発、高温使用中に生じる様々な現象の解明においても有益な知見を与えてくれる。第一原理計算、分子動力学法、熱力学計算、フェーズフィールド法、有限要素法などを組み合わせて、原子・分子レベルのナノスケールから、ミクロ、部材レベルのマクロスケールまでマルチスケール解析の有効性が顕在化しつつある。また、その計算には相応のデータベース、併せてそこから有用なデータを抽出するデータマイニング技術な

ども課題となる。

ただし、計算科学の重要度が増す一方で、強度や劣化に関わる計測・評価技術の進歩も重要である。進歩の方向性の一つが微細構造に向かうことは確かである。耐熱構造材料開発に長期間を要する原因は、疲労、クリープ、応力腐食割れ、水素脆化など、時間依存性の破壊現象の正確な理解不足にある。これらの現象は、その巨視的な破壊が起こるまでに何十年もかかる場合もあり、それをより短期間で把握するために、実験的研究により微視的兆候を捉えることが有効であり、かつ(3)の注目動向の項で概説したとおり、短時間の強度実験データからの長時間強度や劣化予測のための技術開発が緊要な課題である。また、もう一つの方向性としては、材料の状態を三次元で把握することが挙げられる。それは三次元アトムプローブ、FIB-SEM などのように微細構造解析に限らず、中性子線による三次元の残留応力測定、多軸応力場での力学特性評価など、より巨視的な計測・評価も含まれる。特に多軸応力場での損傷や劣化評価については、理論的に解決できる課題ではなく、実際の試験結果に基づく経験的な余寿命評価法を開発する必要がある。そのためには、多軸応力下での試験技術開発が重要となる。一方、部材の形状、荷重、拘束の条件が複雑化する状況においては、単純な機械的試験のみから部材のパフォーマンスを予測することには無理があり、計算科学の併用により解決されるべき問題である。

[今後取り組むべき研究テーマ]

耐熱合金の適用部材では、三次元積層造形技術や分割製造・接合技術といった精密製造技術を代替または補佐できる技術開発が、中長期的に期待される。また Ni 基高性能合金では、高価なレアメタル元素の使用量が増加してきており、レアメタルフリー合金や効率的なリサイクル技術の開発も求められる。短期的には高精度な寿命予測を可能とする組織シミュレーション技術や材料劣化診断技術なども有益である。加えて、低密度や高融点金属間化合物および低線膨張・高強度のタービンディスク材料の開発も有益である。

TBC については、高い遮熱効果、並びに高温・長時間信頼性を確保するためトップコートの開発とボンドコートの開発が必要であり、ボンドコートの材質経年変化を加味した寿命評価技術の開発が必要となる。将来技術として、輻射も考慮・加味した低熱伝導化や、トランスピレーション（染み出し）冷却の開発が望まれる。

高温で使用されるボイラ・蒸気タービンの耐熱材料開発では、母材成分・組織の改善とともに、溶接部クリープ強度、クリープ延性などを改善して、材料の特性に起因するリスクの低減が求められる。オーステナイト系ステンレス鋼は、さらなる蒸気条件の向上に対応するためには、いっそうのクリープ強度の改善に加え、脆性的なクリープ破壊を防止するための改善の取り組みが求められる。A-USC ボイラ向けの合金開発のためには、ニッケル合金等新規耐熱材料開発、強度評価技術、溶解・鍛造・ casting・溶接・加工等の製造技術及び新たな検査・寿命評価技術開発が重要になる。

我が国の耐熱材料に関する大型プロジェクトは、SIP 革新的構造材料が 2019 年 3 月末¹⁸⁾で、また JST-ALCA の実用技術化プロジェクトは 2020 年 3 月²⁾で終了予定である。その時点の国内外の耐熱材料開発の状況も考慮して、特に、以下の研究テーマ案に着手する、あるいは大掛かりな研究支援に乗り出すことが期待される。

- A-USC 向け耐熱鋼の開発

耐熱温度 700°C のフェライト系耐熱鋼を 2019 年度末までに開発することを目標とする。ただし、ボイラー管などをターゲットにしているため、材料が耐熱温度をクリアできてもそれを大口径パイプにするための加工技術、さらにはパイプ間の溶接（接合）技術が求められることは容易に想像される。しかも、数多くの合金元素が添加されているため、溶接部の弱化が大きな問題となる。そこで例えば、特殊摩擦攪拌接合による開発耐熱鋼の接合技術開発などを研究計画に含めておくべきである。耐熱性の高い合金に対する大型の摩擦攪拌接合となるため、耐熱性かつ耐摩耗性が極めて高い専用の特殊接合ツールが必要になってくる。

- Ti-Al 合金の開発（コンプレッサータービン翼、ディスク等）

現在、 β 相を含む Ti-Al-X 合金の平衡状態図に関する研究が SIP 内でも進められているが、これをさらに加速し、早期に（第一期目標は 2019 年度末）データベース化することが期待される。そして、計算機支援による合金設計体制を出来る限り早期に確立することも望まれる。合金開発は、実用化に向けて三元系から四元系、五元系へと添加元素種が増え複雑化するが、優れたデータベースによって適切な合金設計を迅速に行うことができるようになり、それによって熱間加工プロセス開発等も促進されるはずである。

また、今後の Ti-Al 合金の用途拡大を想定すると、フェライト系耐熱鋼と同様、溶接性あるいは接合性が問われることが容易に想像される。そこで、Ti-Al 合金に対しても摩擦攪拌接合等の接合技術開発、あるいは接合ツール開発の着手が期待される。

Ti-Al 合金は、今後、AM 技術の導入が大いに期待される材料系である。しかしながら、Ti-Al 合金は活性金属である Ti を多量に含むこと、一方、材料特性向上の目的で重金属である Nb、Mo 等が添加されるため casting 偏析が著しく、AM 用の良好な合金粉末の作製が難しいように考えられる。そこで、AM 用の良質な Ti-Al 粉末合成技術の開発が重要である。粉末開発に関しては、世界的にすでに動き出しているため、ここ 1、2 年内にある程度の結果を出し権利化を進めることが期待される。

- Mo-Si-B 基超高温材料の材料プロセッシング、耐酸化コーティング技術の開発
- フェライト系及びオーステナイト系耐熱鋼の高強度化、長寿命化
- より耐熱性の高い Ni 基合金、チタン合金、TiAl 金属間化合物、その他新合金の開発
- より耐熱性の高い TBC の開発、新しいプロセスによる TBC の高性能化
- マルチマテリアル化のための異種材料接合技術開発
- マルチスケール解析を利用した材料設計技術開発、高温損傷・破壊の予測技術開発
- 材料物性データベースの整備、情報学、人工知能の活用
- 多軸応力場での力学特性（クリープ疲労、機械熱疲労など）評価技術開発
- 高温機器の余寿命診断技術開発として短時間強度データからの正確な長時間強度を予測する評価アルゴリズムの構築
- 高温機器における劣化・損傷の検出・診断として溶接部における損傷やき裂の非破壊的検査技術
- 高温機器における余寿命診断技術開発として溶接部を含めた余寿命診断アルゴリズム開発

（５）政策的課題

超耐熱材料の開発をリードする画期的要素研究が文科省・NIMS や大学を中心に継続的に行われてきているが、実用化に関しては発電システムとの統合や膨大で長時間にわたる材料特性データの継続取得や周辺技術開発が必要となり政策的な支援が不可欠である。材料の開発のみでは、高効率コンバインド複合発電、汽力発電プラントの実現は難しく、開発した材料を用いたパイロット発電設備の実証試験が不可欠であり、政策的な推進が望まれる。高度な要素技術の成果を実用化する為には、要素技術を統合する高度な研究マネジメントが重要であると共に、実機での使用条件を考慮した実験/解析技術や、実部品を想定した高度な製造技術開発等、経産省や NEDO も含めた産学官連携での長期的な取り組みが求められると共に、エンジンメーカー、素材メーカーとの連携が極めて重要となる。大学、公的研究機関においては、耐熱材料を含めて金属系構造材料に取り組む研究者、特に若手研究者層の薄さも懸念される。短期的な成果が求められる中で、長期的な取り組みが必要な耐熱材料の開発や実用化には取り組みにくい状況にあると思われる。

Ni 基超合金の歴史は 70 余年に及ぶ。この間、Ni 基超合金製造技術は進化を遂げ、単結晶タービンプレードを溶解鑄造法で作製するにまで至っている。しかしながら、我が国で Ni 基超合金の単結晶タービンプレードを自作する技術を有する公的研究機関は NIMS のみである。Ti-Al 合金の融点は Ni 基超合金とほぼ同等であるが、チタンという活性な金属を扱うため、特殊でかつ大型な溶解炉が必要となる。大学をはじめ公的研究機関では対応が困難である。上記 2 種類の耐熱材料に関しては、産学連携が不可欠である。しかし、Mo-Si-B 基超高温材料にいたっては融点が 1900°C を超えているため、我が国の民間企業では対応できるところがほぼ無い。上記材料群に関しては、大学や国立研究所など公的研究機関でシーズ開発をし、それを産業界で実用化していくという図式が成立し難い。Mo-Si-B 基超高温材料に関しては成立していない。唯一現在の技術レベルで多様な対応が可能と考えられるのは、耐熱鋼のみである。そして、そういった状況であるということが、意外に理解されていない。つまり、優れたシーズ開発がなされたら、産業界は出口まで開発を進めることができると誤解されている。出口まで開発が進まなかったのはシーズに問題があった。

したがって、出口の問題は後述するが、我が国の耐熱材料分野は世界の動きに遅れを取る傾向を潜在的に持っている。CMC が最も良い例である。これを解決するためには、ポスト CMC として Mo-Si-B 基超高温材料の研究開発では、まず超高温研究開発に向けたインフラ（溶解、鑄造、鍛造、焼結、押出加工等々）の整備が大きな課題であり、実験ノウハウや技術の早期高度化、また超高温材料研究者の育成が求められる。前述の(3)で指摘した国内の研究拠点と超高温材料研究センターが連携し、集中的な超大型研究資金によって研究インフラを整備し、飛び抜けた先導的な「開発研究」を推進することで、実用化を想定した「ものづくり」技術の高度化を図ることが望まれる。公募型の研究プロジェクトを大型化してもたいした効果は得られない。なぜならば、上述のように、そもそも国内において耐熱材料を試作・開発できる公的研究機関が少ない。仮に面白いアイデアが提案されたとしても、それをものづくりに発展させていく力が弱く、ほとんどの場合「研究のための研究」に落ち込んでいく。

平成 27 年度から、防衛省が大学等に向けて競争的研究資金制度を開始した²⁶⁾。この制度は、軍民両用のデュアル・ユースを謳っているが、これから制度の運用方法などを検討して

いく必要がある。少なくとも、これまで軍用研究が閉ざされてきた我が国において、大学や公的研究機関における機密保持の概念、あるいは機密を保持する研究環境が乏しい。

（６）キーワード

耐熱鋼、ニッケル基合金、チタン合金、Ti-Al 合金、Mo-Si-B 合金、CMC、高温強度、クリープ強度、耐酸化性、疲労、ジェットエンジン、ガスタービン、高強度化、軽量化、耐熱性、材料信頼性、計算科学、情報学、異種材料接合、損傷・劣化評価、余寿命評価

（７）国際比較

＜新材料開発技術＞

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	◎	→	● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において日本のアクティビティは非常に高い。 ● 2011年に就航したボーイング787機（通称ドリームライナー）には、Rolls-Royce社のTrent1000エンジンとGEのGENxエンジンが採用されている。Trent1000エンジンには、我が国の物質材料研究機構（NIMS）が開発したNi基単結晶超合金が、高圧タービン動翼として搭載されている。これに対して、GENxエンジンには、Ti-Al合金で作られた低圧タービン動翼が最後段に搭載されている⁷⁾。Ti-Al合金の開発は、我が国の大学、国立研究機関による基礎研究、またIHI社の開発研究の貢献が大きい。 ● Mo-Si-B基超高温材料の研究開発は、米国、ドイツ、日本の研究者らによって地道な研究が続けられてきた結果、近年、徐々に開花しつつある状況である。 ● 平成27年度から、防衛省が大学等に向けて競争的研究資金制度を開始した²⁶⁾。
	応用研究・開発	◎	→	● 高効率火力発電プラントの技術は日本が最も優れており、次世代のA-USC石炭火力や1700°Cガスタービンの開発でも世界をリードしている。 ● 2015年より実用技術化プロジェクト「低CO₂排出型次世代火力発電用新規耐熱材料の開発」²⁾に衣替えをして、先進耐熱鋼やMo-Si-B基超高温材料の研究開発を引き継いでいる。 ● 2014年度にはNEDOのエネルギー・環境新技術先導プログラムで、東北大学とIHIによる「無冷却高圧タービン動翼を実現する最先端超高温材料の研究開発」が採択され、Mo-Si-B基合金と耐熱セラミックスとの複合化を含む研究開発が推進されている。 ● 我が国の耐熱材料分野は世界の動きに遅れを取る傾向を潜在的に持っている。CMCが最も良い例である。 ● 今回のハイニカロン製造技術の流出によって、米国はCMCの量産を本格化することになり、我が国にとってはそれを追従する形になる。
米国	基礎研究	△	↘	● 高温の実験はあまり行われていないが、耐熱材料や高温強度に関する計算科学の分野は進んでいる。 ● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において米国のアクティビティはやや落ちている。 ● Mo-Si-B基超高温材料の研究開発は、米国、ドイツ、日本の研究者らによって地道な研究が続けられてきた結果、近年、徐々に開花しつつある状況である。 ● 2015年まで、米国ではMo-Si-B基合金に対するコーティング技術に関するプロジェクトが、NavyやAir Forceからの支援の下、University of Wisconsin-MadisonのJ.H. Perepezko教授らを中心に推進されていた^{20,21)}。
	応用研究・開発	◎	↗	● GEやEPRIなどを中心に高温強度研究が進められている。A-USC、1700°Cガスタービン、ジェットエンジンの研究を推進している。 ● 2011年に就航したボーイング787機（通称ドリームライナー）には、Rolls-Royce社のTrent1000エンジンとGEのGENxエンジンが採用されて

				いる。 ● CMC製の静的部品はGEと仏スネクマ社の合弁会社、CFMインターナショナルが開発した次世代旅客機エンジン「LEAP」に実用化されている。 ● 米国はこれまで、NASAやGEを中心にCMCの開発を強く推進してきた²²⁾。 ● 日本カーボンと米国GE、仏サフランの3社は合弁会社を設立し、米国内にてSiC長繊維の製造に着手する¹¹⁾。 ● 今回のハイニカロン製造技術の流出によって、米国はCMCの量産を本格化することになる。 ● Additive Manufacturing(AD)、いわゆる3Dプリンティングによる造形技術は、耐熱材料の分野でも注目を集めている。2016年現在、GEやRolls Royce、Pratt & Whitneyなどは皆ジェットエンジン部材の試作に乗り出しているとの報道がある¹³⁻¹⁶⁾。
欧州	基礎研究	○	→	● 耐熱材料と高温強度に関する研究の歴史は最も古く、維持継続されていると思われる。実験、計算両面で研究が行われている。 ● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において欧州のアクティビティーは良好である。 ● Mo-Si-B基超高温材料の研究開発は、米国、ドイツ、日本の研究者らによって地道な研究が続けられてきた結果、近年、徐々に開花しつつある状況である。 ● EUでは、2014年から2020年にかけて、Horizon2020という超大型研究イノベーションプログラム（7年間で総額約800億ユーロ）を推進している²⁴⁾。
	応用研究・開発	◎	↗	● 大学と企業が連携して耐熱鋼と高温強度の研究を進めている。高温強度に関する欧州全体の研究プロジェクトを幾つか推進している。 ● 2011年に就航したボーイング787機（通称ドリームライナー）には、Rolls-Royce社のTrent1000エンジンとGEのGENxエンジンが採用されている。 ● CMC製の静的部品はGEと仏スネクマ社の合弁会社、CFMインターナショナルが開発した次世代旅客機エンジン「LEAP」に実用化されている。 ● 日本カーボンと米国GE、仏サフランの3社は合弁会社を設立し、米国内にてSiC長繊維の製造に着手する¹¹⁾。 ● Additive Manufacturing (AD)、いわゆる3Dプリンティングによる造形技術は、耐熱材料の分野でも注目を集めている。2016年現在、GEやRolls Royce、Pratt & Whitneyなどは皆ジェットエンジン部材の試作に乗り出しているとの報道がある¹³⁻¹⁶⁾。
中国	基礎研究	△	↗	● 環境エネルギー関係の研究に力を入れており、研究レベルの向上、研究者の増加が見られる。高温強度関係の実験設備の整備に力を入れている。 ● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において中国のアクティビティーはこれからといったところである。
	応用研究・開発	△	↗	● USC石炭火力の実用化プロジェクトが推進されている。 ● LEAPエンジンは中国の民間航空機にも搭載の計画があり^{16, 23)}、CMCの製造技術が中国に拡散するのは時間の問題である。
韓国	基礎研究	△	↘	● 耐熱材料の開発や高温強度に関わる研究者はあまり多くない。 ● 材料関連の国際会議において、各耐熱材料分野において韓国のアクティビティーは低い。
	応用研究・開発	△	→	● 耐熱材料、高温強度の分野の研究開発はあまり推進していないと思われる。 ● 2016年に、GEは韓国の戦闘機にエンジン供給することを発表した。

<材料損傷・劣化評価技術>

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	◎	↑	「新構造材料技術研究組合（ISMA）」や内閣府戦略イノベーション創造プログラム（SIP）においても高温環境下での強度評価技術に関わる研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	↑	日本機械学会および日本材料学会の分科委員会、日本学術振興会分科委員会等で産学官の共同研究が行われており、主たる成果はASTMやISOへの規格改定案として、世界に発信されている ^{19,20)} 。
米国	基礎研究	◎	↑	ASME（米国機械学会）では、1910年よりボイラおよび圧力容器の設計コードの作成に着手し、現在まで改定が重ねられている。現在では解析に基づく損傷評価法の開発が主として展開されている。
	応用研究・開発	○	→	EPRI（米国電力中央研究所）の主導でラウンドロビンテストを実施し ¹⁶⁾ 、既存の評価手法の実機への適用性等を検討している。実用化に向けて、ASTMやISO規格の改定を進めている。
欧州	基礎研究	◎	↑	英国では1990年にBritish Energy社が策定した高温構造に対する評価手法R5をガイドラインと位置づけ、この手法による構成材料の適用性等の研究調査が行われている。またフランスでは1977年に高速炉の設計規格であるRCC-MRを策定し、現在までこの規格の新材料に対する改定等が行われている。
	応用研究・開発	○	→	EPRI（米国電力中央研究所）の主導でラウンドロビンテストを実施し、既存の評価手法の実機への適用性等を検討している。実用化に向けて、ASTMやISO規格の改定を進めている ^{19,20)} 。
中国	基礎研究	○	↑	Hefei General Machinery Research Instituteを中心に研究が進められており、高クロム鋼のTi添加による組織への影響や強度評価などを調査している。また、Ningbo Univ.of Technologyではオーステナイト系ステンレス鋼の高温での寿命予測評価技術について研究がなされている。
	応用研究・開発	—	—	
韓国	基礎研究	○	→	Korea Univ.およびChung Ang Univ.を中心として研究体制があり、Korea Atomic Energy Research Institute等の研究所と企業が密に共同研究を実施している。
	応用研究・開発	—	—	

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考文献

- 1) 電気製鋼. “ステンレス鋼の最近の動向” 第86巻, 1号 (2015) 37-44.
- 2) JST 先端的低炭素化技術開発 (ALCA) 実用技術化プロジェクト. “低CO₂排出型次世代火力発電用新規耐熱材料の開発” http://www.jst.go.jp/alca/kadai/prj_03.html
- 3) Science & Technology Trends. “発電用ガスタービン高効率化に向けた耐熱材料の開発動向” 1月号 (2004) 22-29.

- 4) 電気製鋼. “チタン合金の最近の研究・開発動向” 第 86 巻, 1 号 (2015) 45 – 50.
- 5) 新日鉄住金技報. “航空機用チタンの適用状況と今後の課題” 第 396 号 (2013) 23 – 28.
- 6) まてりあ. “航空機用チタン合金の材料特性および開発指針” Vol. 55, 8 (2016) 370 – 376.
- 7) IHI 技報. “GEnx エンジンの開発” Vol.48, No.3 (2008-9) 153 – 158.
- 8) IHI 技報. “チタンアルミ翼が実現する航空エンジンの軽量化” Vol.53, No.4 (2013) 16 – 19.
- 9) ECI. “Beyond Nickel-Based Superalloys II”, July 17–21 (2016), Cambridge, UK.
<http://www.engconf.org/past-conferences/2016-conferences/beyond-nickel-based-superalloys-ii/>
- 10) M. Meyer, M. Kramer, and M. Akinc, “Boron-Doped Molybdenum Silicides”, *Advanced Materials*, 8 (1) (1996), 85 – 88.
- 11) GE REPORTS JAPAN. “GE、日本の技術が生きた超先端セラミック複合材料（CMC）量産へ” <http://gereports.jp/post/132139569884/made-in-rocket-city>
- 12) GE REPORTS JAPAN. “日本生まれの新素材を採用、次世代航空機エンジン「LEAP」”
<http://gereports.jp/post/94704456459/leap>
- 13) GE Digital/Stories. “Advanced Manufacturing is reinventing the way we work”
<http://www.ge.com/stories/advanced-manufacturing>
- 14) Rolls-Royce Media/Insights. “High powered Trent XWB-97”
<http://www.rolls-royce.com/media/insights/simon-burr.aspx>
- 15) optics.org NEWSDESK/Applications. “Pratt & Whitney uses 3D printing for aero engine parts” <http://optics.org/news/6/4/7>
- 16) Wikipedia. “CFM インターナショナル LEAP” https://ja.wikipedia.org/wiki/CFM_インターナショナル_LEAP
- 17) 金属素材競争力強化検討会技術開発小委員会資料. 経済産業省製造産業局鉄鋼課・非鉄金属課
平成 27 年 6 月 3 日.
- 18) 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP). <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>
- 19) JST 先端的低炭素化技術開発(ALCA) . <http://www.jst.go.jp/alca/index.html>
- 20) Navy, 2010-2015, High temperature oxidation resistant coatings for refractory metal systems.
- 21) Air Force, University of Vermont, 2011-2015, Mo-Si-B alloys and diboride systems for high-enthalpy environments: Design and evaluation.
- 22) J.A. DiCarlo, *Advances in SiC/SiC Composites for Aero-Propulsion*, NASA/TM-2013-217889 (2013).
- 23) cfm Engines/LEAP. “The LEAP Engine –Performance. Execution. Technology.”
<https://www.cfmaeroengines.com/engines/leap/>
- 24) 駐日欧州連合代表部. “ホライズン 2020”
<http://www.euin-japan.jp/research/science-research/horizon2020/>
- 25) European Commission HORIZON 2020. “Faster, cheaper, energy-efficient manufacturing of metal parts”
<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/faster-cheaper-energy-efficient-manufacturing-metal-parts>
- 26) 防衛省・自衛隊. “安全保障技術研究推進制度（競争的資金制度）”

<http://www.mod.go.jp/j/approach/kaihatsu/suishin.html>

- 27) 原田広史, 横川忠晴, 川岸京子, 小林敏治, 小泉裕, 坂本正雄, 湯山道夫, 高温ガスタービン用耐熱材料と実機適用, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43, No. 5 (2015) pp.349-357.
- 28) 山崎泰広, 第 64 期第 2 回高温強度部門委員会講演会資料, Ni 基超合金およびコーティング材に関する研究の現状と超合金 WG の活動, 日本材料学会高温強度部門委員会 (2015) pp. 37-41.
- 29) 原田広史, 山崎道夫, 小泉裕, 713C 合金の γ - γ' 結線上にある一連の Ni 基耐熱合金 (高温の組織と強度), 鉄と鋼, Vol. 65, No. 6 (1979) pp.1049-1058.
- 30) Advances in Materials Technology for Fossil Power Plant, ed. by D. Granfy and J. Shinbledecker, EPRI (2013).
- 31) 国立研究開発法人物質・材料研究機構 第 4 期中長期計画
- 32) 新構造材料技術研究組合(ISMA) . <http://isma.jp/index.html>

3.3 1 高強度軽量材料

（１）研究開発領域の簡潔な説明

高強度軽量材料は、自動車、航空機をはじめとする輸送機器などへ適用される軽量かつ高強度の構造材料である。ここでは、繊維強化プラスチック（FRP）、炭素繊維複合材料（CFRP）、アルミ合金、チタン合金、セルロースナノファイバー（CNF）などの研究開発を対象とする。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

省エネルギー、低環境負荷（CO₂排出量削減）という地球的課題に対して、高強度軽量材料は自動車、航空機をはじめとする輸送機器などへの適用により、その解決に直接的に貢献する。代表的な複合材料である FRP は、マトリックスとしての樹脂の中に強化材としての繊維を配置することにより、高比強度、高比剛性を達成した“軽くて強い”構造材料である。さらに、構造物にかかる荷重の分布や変形様式に合わせて強化材を配置することにより、その強度や剛性を適切に制御することが可能な材料でもある。しかしながら、加工性、生産性などの点から従前の金属材料に比べて高コストとなり、現状において、特に大型構造物や輸送機器などの分野においては、金属系構造材料を凌駕するほど普及していない。

鉄鋼系金属材料の開発がある程度成熟化しつつある状況において、高強度軽量金属系材料としては、アルミ合金、チタン合金のさらなる高強度化、軽量化の研究開発が期待されている。さらに、炭素繊維複合材料（CFRP）の技術開発、特に、プロセス技術開発は、まだ大きな伸びしろを有している。炭素繊維にはポリアクリロニトリルを出発原料とし、それを焼成することにより得られる PAN 系、また、石油精製において得られるピッチを出発原料とするピッチ系があるが、いずれも日本発の技術であり、その生産量において日本は世界のおよそ 7 割を占める。世界の需要は 2014 年には 53 千トン/年であるが、2020 年には 140 千トン/年に達するものと予想されている¹⁾。この炭素繊維を用いた CFRP は今後、自動車・航空機産業に革新をもたらし、産業・社会にパラダイムシフトを引き起こす可能性が高い。ポスト CFRP 材料としては、木材から生成されるセルロースナノファイバー(CNF)が環境負荷の低減への期待から注目されており、その研究開発、将来の実用化が望まれている¹¹⁾。

自動車に代表されるように、昨今の車体の軽量化が燃費の向上と CO₂排出量低減へ大きく貢献することは公知の事実であり、現在のハイブリッド車から、電気自動車、燃料電池車へと走行距離を延長させる効果も含めて、ますます軽量化の効果が期待される状況になっている。

[動向（歴史）]

・ FRP、CFRP

日本の FRP の出荷量は 1960 年代後半から徐々に増加し、1996 年にはピークの 0.48 百万トンに達したが、その後は減少を続け、2009 年以後 0.2 百万トン台に低迷している。一方、世界の総出荷量（2008 年）はおよそ 8.6 百万トンで、そのおよそ 4 割が米国、3 割が欧州、3 割がアジアと言われている。アジアの中で最も出荷量が多いのは中国（1.6 百万トン）で、年成長率も日本よりはるかに高い。国内生産の FRP の需要として最も大きいのは浴槽・浴室

ユニットなどの住宅機材であり、生産量全体の約半分を占め続けている。他に建設資材、輸送機器、浄化槽などがある。そのほとんどは GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）である。GFRP の成形法は、1980 年代にはほぼ確立されていた。1980 年にはハンドレイアップ法、スプレーアップ法が主流で、FRP 成形法全体のおよそ 5 割を占めていたが、その後モーディングコンパウンド法の割合が増加し、現在およそ 5 割を占めている。前述の住宅機材にもこの成形法が使用されている^{2),3)}。

CFRP は熱硬化性樹脂もしくは熱可塑性樹脂をマトリクスとし、その中に直径 6~10 μ m の炭素繊維を強化剤として配置させた複合材料である。作成方法としては、従来のガラス繊維を用いた GFRP と同様にハンドレイアップ法やホットプレス法なども用いられるが、高い機械的性能が要求される航空宇宙分野では、もっぱらホットメルトタイプの熱硬化樹脂を用いたプリプレグという中間成形体を出発原料とし、オートクレーブ（圧力釜）を用いた加圧成形法が用いられることが多い⁴⁾。

熱硬化性樹脂をマトリクスに用いた CFRP では、上記のオートクレーブ成形法が主流であり、航空宇宙用の構造材やスポーツ用具等の成形に広く利用されているが、製造にはその製品を成形できる大きさの圧力釜が必要であり、大型航空機の翼にもなると 30m 程度の長さを有する圧力釜を用意するしなければならない。それゆえ、非常に高コストとなる。

近年、CFRP を主要構造材として用いた大型構造物の代表例であるボーイング 787 の場合、機体構造重要の 50%が CFRP で製造されており、その 70%、つまり全機体重量の 35%が国産のプリプレグにより製造されている。炭素繊維における非常に高い製造能力を背景として CFRP 製造においても日本は高い国際競争力を有してきたが、欧州がロボットを利用したプリプレグの積層技術など、次世代航空機の製造技術の研究開発を着々と進めており、日本はやや遅れをとっている状況である。複合材・カーボン繊維の製造技術は日本メーカーがリードしているが、樹脂素材や製造法、検査技術では海外が先行しており、日本メーカーが十分に活躍できていないのが現状である。また、航空機産業で複合材適用を拡大するためには、各種試験を要する材料認定や設備認定など高いハードルをクリアする必要があるが、この分野でも欧米がリードしている。

2013 年 11 月にドイツ BMW 社は、世界で初めて CFRP(三菱レーヨン製)を車体の主要骨格に採用した電気自動車「i3」を一般向けに発売している。2015 年には BMW7 シリーズにおいて、センターピラー、ルーフサイド、リアピラー等、15 の主要部品に対して CFRP 補強部品を採用し、車両全体で 130kg の軽量化を達成したと報告されている¹²⁾。

なお、複合材料には金属、セラミックスをマトリックスとする金属基複合材料(MMC)、セラミックス基複合材料(CMC)もあり、1980 年代のいわゆる新素材ブームの中で多くの研究開発がなされたが、炭素繊維は金属マトリクスとの相性が悪いこともあり、有力な商品は生まれず 90 年代のバブル経済崩壊とともにほとんどの企業は炭素繊維強化金属の分野から撤退した。有望な材料としては SiC/SiC コンポジットが挙げられる。SiC/SiC コンポジットの製造方法としては室蘭工業大学の香山らにより開発された NITE 法(Nano-powder Infiltration and Transient Eutectic Process)などが用いられている。高靱性、高耐熱の SiC/SiC 複合材は、Ni 基超合金を超える耐熱材料として、次世代航空機エンジンのタービン翼や次世代発電システムへの適用が期待されている¹³⁾。

- 軽金属材料

アルミニウム、チタンなどの軽金属材料に関しては、日本は、鉄鋼ともにナノスケールでの微細組織化、ナノ材料の添加などで世界最高性能を誇る。例えば、ナノスケールの析出物を鋼中に分散させることにより強度を大幅に増加させたナノハイテンが市販されている。一方、欧米は軽金属メジャー企業を有し、航空・宇宙・防衛産業において依然として研究開発から産業化まで優位性を保っている。ロシアは航空・宇宙産業に強みがあり、アルミニウム、チタンに関する技術も保有していることから、今後の動向が注目される。中国、韓国は製品化のコスト競争で優位に立ち、さらに、自前の素材開発に注力しつつある。軽金属では、ロシアとカナダにおけるアルミニウムの生産量が米国を上回っており、固溶強化、析出強化型の東南アジア、インド、イランなどのアジア圏も追い上げ傾向にある。

アルミニウムの新地金の需要は 1970 年代から急速な消費量の増加がみられており、世界的にも増加傾向にある。日本も同様であるが、2009 年にはいったん大きく減少、その後 V 字回復を見せた。アルミ消費量の総量では 2000 年までは欧州がトップであったが、その後、中国が大きな伸びを見せ、2014 年現在では中国が 1 位、続いて、欧州、米国、日本の順となっている。国民一人あたりに換算すると、2000 年以降は日本が 1 位で、2014 年現在では日本、米国、中国、欧州となっている。日本では特に自動車や鉄道車両に代表される輸送機関関連の製品へのアルミ需要が増加傾向にあり、アルミサッシなどの住宅関連製品は 2000 年頃をピークに減少傾向にある¹⁹⁾。とくに自動車のアルミ製品としては、鍛造・ダイカスト製品が 1980 年代は 9 割を占めていたが、2000 年第以降は鍛造・ダイカスト製品は 8 割、残り 2 割を圧延板材と押出材が占めるようになってきており、用途に応じた製品の適用が行われていると考えられる²⁰⁾。

- セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーは 1980 年前後に米国の Turbak らが製紙用パルプを解繊して調製したのが始まりと言われている。セルロースナノファイバーの研究開発が材料として特に発展したのは 2000 年頃からであり、2004 年頃から論文や特許数が急激に増加している。セルロースナノファイバーの研究開発の中心は北欧、北米、日本であり、最近では中国でも活発化している。特許からみると出願が多いのは、日本では、日本製紙、王子ホールディングス、凸版印刷、三菱化学、花王、フィンランドの UPM キュンメネ、ストラ・エンソ、カナダの FPINNOVATIONS、一方、大学では、日本の京都大学と中国の東華大学である²¹⁾。

セルロースナノファイバーの製造では、多大なエネルギーを要するというコスト課題があり、製造方法について多くの方法が開発されている。低濃度で製造する技術としては、高圧ホモジナイザー、水中カウンターコリジョン法等があり、一方、高濃度では 2 軸混練機などを用いた方法もある。この方法はセルロースナノファイバーを樹脂中でナノファイバー化とナノ分散を同時に行えるため複合材料を製造するには有利である。

解繊を促進するために触媒や酵素を使う技術も開発されている。特に、TEMPO 触媒を用いることにより解繊を大きく促進する技術が確立された。この技術を開発した東大の磯貝明教授ら日本人研究者 3 人が 2015 年スウェーデンの財団から「マルクス・バーレンベリ賞」を授与されている。

セルロースナノファイバーの高強度軽量材料への応用は日本が世界をリードしており、その中でも京都大学を中心として研究開発が行われている。京都大学では 2000 年にセルロー

スナノファイバーの構造用途の研究に着手し、2001年には世界で初めてセルローススナノファイバーを樹脂に複合化することにより高強度の材料を開発した。その後、経済産業省のプロジェクトを中心に、セルローススナノファイバーの製造方法、修飾方法、樹脂への分散方法等を検討し、高強度軽量材料として大きな研究成果を上げてきた。

「日本再興戦略」改訂 2014、同改訂 2015、及び同改訂 2016 において、セルローススナノファイバーの製品化に向けた研究開発や国際標準化等を進めることが明記され国家の成長戦略における位置づけが明確に示された。平成 28 年 5 月 13 日に閣議決定された「地球温暖化対策計画」や平成 28 年 6 月 2 日に閣議決定された「経済財政運営と改革の基本方針 2016」においてもセルローススナノファイバーの研究開発推進が記載された。

2014 年 6 月には経済産業省の主導のもと、ナノセルロースの実用化の加速のため「ナノセルロースフォーラム」が発足した。2014 年 8 月 4 日にはナノセルロースに関連する政策連携を目的として「ナノセルロース推進関係省庁連絡会議」が創設された。また、2016 年 5 月 17 日には、セルローススナノファイバー活用推進議員連盟が発足している。

（３）注目動向

[新たな技術動向]

・ CFRP

前述の脱オートクレーブ成形法の一つとして、RTM 成形法(Resin Transfer Molding：樹脂含浸)が挙げられる。これは繊維のみを予め積層し、その後に樹脂を含浸させる成形法で、プリプレグが不要になることにより低コスト化が可能となる。RTM 成形法は 1970 年代に既に国内において確立されたが、近年はその発展形である VaRTM 成形法（真空樹脂含浸成形法）が開発された。VaRTM は真空ポンプを利用して、大気圧との圧力差を利用して低温で樹脂含浸を行うもので、さらなる低コスト化が可能となる。海上自衛隊のえのしま型掃海艇の製造に VaRTM が採用されている。また、三菱重工業(株)では、この VaRTM 法をさらに改良した A-VaRTM(Advanced VaRTM)を開発し、MRJ の尾翼の成形に適用した¹⁴⁾。

マトリクス樹脂については、従来は主にハンドリングに優れた熱硬化性樹脂が使用されてきたが、近年のリサイクル性の流れのなかで熱可塑性樹脂が注目されつつある。ノート型パーソナルコンピュータの筐体など、民生の電気電子機器の分野において、射出成形、スタンピング成形、プレス成形等により製造された熱可塑性樹脂ベースの短繊維複合材料はすでに実用化されているが、今後は自動車用構造材等に対しても熱可塑性樹脂ベースの CFRP が普及を加速するものと考えられる。NEDO のプロジェクトとして平成 25 年度よりスタートした「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発」では、自動車用構造材料としての熱可塑性 CFRP が研究ターゲットとなっており、名古屋大学を核として、その精力的な研究開発と技術開発がすすめられている¹⁵⁾。

検査技術としては、構造物に発生した損傷や内部剥離を検知するための構造ヘルスマモニタリング技術が注目されている。これは光ファイバセンサなどを CFRP 複合材料製造時に埋め込み、製造時、使用時のひずみ、振動、温度変化、損傷などをリアルタイムで検知・診断するもので、航空機認証機関による認証取得の段階にまで達している⁴⁾。

- 軽金属材料

軽さに加えて、リサイクル性がカーボン繊維や CFRP 複合材料に比較して、インフラを含めて圧倒的に優れていることから、特に自動車用部材としてはすでに実装も含めた適用がなされている。自動車用材料など人命にかかわる製品となることから、鉄鋼材料のように高強度と高信頼性を併せ持つ製品が望まれている。このような中で、1980 年代に盛んに研究されたアルミニウム - リチウム (Al-Li) 系合金が再度注目されている。Li は原子番号 3 番であり、金属としては最軽量であることから、アルミニウムと合金化することでさらなる軽量化が実現する。

- セルロースナノファイバー

製造についてコストが高いことが課題である。構造用途へのセルロースナノファイバー利用に関して、最近、京都大学は企業と共同で、京都プロセスと呼ばれる新しい製造方法を開発した。一般には水を用いてセルロースナノファイバーを製造した後に化学処理して樹脂に分散するが、この方法では、パルプを化学処理したのち樹脂との熔融混練時にパルプ繊維のナノ解繊と樹脂中への均一分散を達成するもので、プロセスが大幅に短縮され大きなコストダウンにつながることを期待されている。京都大学では 2016 年に宇治キャンパス内にセルロースナノファイバー強化樹脂を試作・製造するテストプラントを設置した²⁸⁾。

中越パルプ工業(株)では、九州大学との共同研究を通じて、水中対向衝突法 (ACC 法) によるナノセルロースを開発し 2013 年にサンプル提供を開始した。2015 年にはポリオレフィンに均一分散できたことを発表している²⁹⁾。星光 PMC (株)では、NEDO プロジェクトに参画しセルロースナノファイバーの変性と熱可塑性樹脂との複合化に関する基盤技術開発を行った。その技術を元に 2014 年にセルロースナノファイバーのパイロットプラントを建設し、変性セルロースパウダー及び変性セルロース配合樹脂のサンプル提供を開始した³⁰⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- CFRP

経済産業省「革新炭素繊維基盤技術開発」(2011 年度～)は、炭素繊維製造時の消費エネルギー消費量・CO₂ 排出量の半減及び生産性の大幅向上(大量供給)を実現する、新たな炭素繊維製造プロセスに必要な基盤技術を確立することを目的としている。

経済産業省「次世代構造部材創製・加工技術開発(複合材構造)」(2013 年度～)は、航空機用 CFRP 構造ヘルスマニタリング技術の実用化や製造プロセスモニタリング技術の開発を進めている^{5),6)}。脱オートクレーブ化の流れが世界的に加速しつつある状況のなか、より高品質な複合材部材の製造技術基盤を確立するため、複合材製造プロセスモニタリング技術、光ファイバセンサによる航空機構造の成形モニタリング技術、高生産性・易賦形複合材の技術開発を中心とした研究開発がすすめられている。

NEDO「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」(平成 20～24 年度)では、東京大学を中心として、6 大学、6 企業の参画により、炭素繊維複合材料の易加工・高強度を実現するための基盤技術として、炭素繊維と熱可塑性樹脂による短時間成形が可能な易加工性中間基材の開発を実施した。さらにこの中間基材を用いた高速成形加工技術の開発、部材の接合技術、CFRP のリサイクル技術の開発を実施した⁹⁾。

経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」(2013 年度～)では、自動車を

はじめとする輸送機器の抜本的な軽量化を目的として、より広く、鉄鋼、非鉄金属（アルミ、チタン、マグネシウム）とともに CFRP およびこれらの接合技術の開発を行う⁷⁾。CFRP に関しては、量産車の超軽量化のための熱可塑性 CFRP(CFRTP)の開発を行っており、有限長の繊維をランダムに分散させた CFRTP のプレス成形を軸にした自動車用シャーシ構造材の成形技術の開発が行われており、実生産車両への応用展開を目指して精力的に研究開発が進められている。本プロジェクトの推進のために、「新構造材料技術研究組合」(ISMA)が設立され、CFRP の研究開発グループに関しては、名古屋大学をはじめ 1 大学、17 企業が加入した。そのほか、「革新的チタン材の開発」、「革新的アルミニウム材の開発」、「革新的マグネシウム材の開発」、「革新的鋼板の開発」に対し、延べ 13 社が参画し、精力的な研究開発を実施している¹⁵⁾。

内閣府戦略的イノベーション創造プログラム「革新的構造材料」（2014 年度～では、航空機用樹脂、FRP がセラミックスコーティング、耐熱合金・金属間化合物等とともに研究開発項目として挙げられている⁸⁾。この中では国産の炭素繊維と熱可塑性樹脂を利用した航空機エンジンファンケース・ブレード向け CFRTP、航空機機体構造用の脱オートクレーブ成形技術、大型部材成形技術などが行われている。光ファイバーを利用したセルフモニタリング技術や、RTM 成形時における温度のリアルタイムモニタリングとデータ同化を用いた温度制御によって CFRP 成形を最適化する技術などについて精力的に研究開発が取り組まれている¹⁶⁾。全 26 採択課題のうち、1 拠点を含む 6 課題が航空機用樹脂・FRP 領域に属する。また、この中では航空機エンジン用部材としてチタン合金、チタンアルミの加工技術開発なども行われている。全 26 採択課題のうち、2 拠点を含む 8 課題が耐熱合金・金属間化合物等領域に属する。

- 軽金属材料

米国の National Science Foundation (NSF) の工学分野 Division of Chemical, Division of Civil, Mechanical and Manufacturing Innovation (CMMI) の Cyber-Enabled Materials, Manufacturing and Smart Systems (CEMMSS) では、2012～2014 年の 3 年間に総額 585 百万ドルが計上され、材料工学、情報工学、ロボット工学の融合による新規イノベーションが目指された^{21),22)}。米国では既存のアルミニウム合金の研究は基礎研究に分類されており、それらよりも先鋭化した応用研究が軍事およびエネルギー関連の研究支援によって推進されている。例えば基礎研究を支援する NSF の工学系研究テーマにおいて、Aluminum AND Alloy でヒットした過去 10 年間程度の採択テーマは 257 件、研究内容は casting、鍛造、熱間加工、塑性変形、接合、破壊に関する研究テーマが多い。100 万ドル以上が 7 件、50 万ドル以上 100 万ドル未満が 20 件、10 万ドル以上 50 万ドル未満が 177 件、10 万ドル以下が 53 件であった。そのうち、modeling を含む研究が 123 件と大半を占めていた²³⁾。さらには医療用新規金属ガラス(Mg 基合金)や、ハイエントロピー合金への研究が注目されている。中国では、2005 年には約 27 億元、2007 年には 43 億元と近年急激に増額されている。科学技術のイノベーションが世界レベルに到達したとして、今後はそれらを持続させる体制づくりとして、①革新の主体としての企業の地位を強化、②大衆による起業・革新と「Internet 十」との相乗効果、③科学技術管理体制の改革深化を掲げている²⁴⁾。

- セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーについては、日本では関連する省庁が役割分担をし以下の主要

プロジェクトを実施している。経済産業省「高機能リグノセルロースナノファイバーの一貫製造プロセスと部材化技術開発」では、リグノセルロースナノファイバーについて一環製造プロセス及び自動車部品や建材等の部材化に関する技術開発を行っている。農林水産省「新たな木材需要創出総合プロジェクト」は、セルロースナノファイバー等のマテリアル利用の促進に向け、サポート体制の構築及び技術開発等を、同省「工学との連携による農林水産物由来の物質を用いた高機能材料等の開発」は、農産物や木材由来のセルロースナノファイバー（NC）を用いた素材開発を支援する。環境省「セルロースナノファイバー等の次世代素材活用推進事業」は、地球温暖化対策の観点よりセルロースナノファイバーやバイオプラスチック等について評価し社会実装を推進する。文部科学省「ホワイトバイオテクノロジーによる次世代化成品創出プロジェクト」では、バイオマスから化成品を製造するホワイトバイオテクノロジー等世界に先駆けた革新的技術の研究開発が推進されている。

カナダでは民間非営利研究機関である FPIInnovations が中心となりナノセルロースの研究開発と実用化を推進している。2012年には製紙会社と共同で CelluForce 社を設立し、2014年には Kruger 社と共同で、セルロースフィラメントの実証プラントを稼働させた。トロント大学グループ、アルバータ大学グループもナノセルロースの開発を推進している。米国では Agenda2020 が製紙業と林産業の研究開発を推進するため産学官連携をサポートしており、ナノセルロースが重要テーマのひとつとなっている。研究開発は米国農務省林産研究所（FPL）が中心となり Maine 州立大学等と連携して進めている。フィンランドではフィンランド国立技術研究センター（VTT）が、Aalto 大学や大手製紙会社である UPM 社とナノセルロース技術センターを設立した（2012 年終了）。また VTT はフランスやドイツ等と連携しセルロースナノファイバーのスケールアップを目的とした大型プロジェクト（SUNPAP）の実績がある。スウェーデンでは製紙関連研究機関である Innventia グループ、スウェーデン王立工科大学（KTH）、木材科学センター（WSC）が中心となっている。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- CFRP

CFRP の強化材である PAN 系炭素繊維の製造においては、ポリアクリロニトリル繊維の焼成工程において大量のエネルギーが必要となる。製造エネルギーおよび CO₂ 排出量のいずれもが鉄の約 10 倍である（1 トンの炭素繊維をつくるのに、20 トンの炭酸ガスが排出される）。自動車用材料等として、より広く社会に普及するためには原料、製造プロセスの抜本的な見直しによる製造エネルギーおよび CO₂ 排出量の大幅低減が求められる。

CFRP の製造において、プリプレグ、オートクレーブを用いる方法は、生産時間が長く、大型のオートクレーブが必要となることから非常に大規模な設備投資が必要となる。さらに、曲率半径が小さいとプリプレグ積層体に層うねりやしわが発生し、さらにこれらに起因してボイドや繊維配向乱れが発生し、生産性低下や部材不良率上昇を招きやすい。オートクレーブ法自身の技術開発課題としては、冷却固化速度の高速化に対応した樹脂を用いることにより、ハイサイクルオートクレーブ¹⁷⁾の技術開発が進んでいるが、いまだ発展途上であり、今後のさらなる研究展開が望まれている。一方、より高生産性かつロバストな生産技術として、

VaRTM, プレス成形など、脱オートクレーブ成形法の技術開発も課題となる。航空機体向けなどの大型部材向け生産ライン、大量生産に対応した自動化技術、検査技術においても、やや欧米に遅れをとっている状況であり、キャッチアップが求められる。

CFRP の航空機、自動車への本格的な適用はまだ始まったばかりで、その破壊および損傷特性や、耐久性、耐衝撃性などに関して未だ十分な知見が得られているわけではない。材料の健全性の評価・検査技術の開発と併せて、そのデータを蓄積、解析する必要があるが、民生航空機分野においてはボーイング 787 が順調に就航を続けており、耐雷¹⁸⁾やバードストライクに対する補修技術や構造部材の疲労特性についてデータの蓄積がなされることが期待される。

将来的には、航空機の機体、自動車用構造部材等が大幅に CFRP に置き換えれば、従前の金属材料を前提とした構造設計が根本から見直されることになる。しかしながら、金属材料が全て CFRP に置き換わる状況は考えにくく、BMW の 7 シリーズにみられるように、金属部材と CFRP を接合した形でのハイブリッド材が多くの構造に採用されるものと予想される。その意味において、鉄鋼、アルミニウム、チタンなどの金属材料と CFRP との接合技術、接着技術は重要なキーテクノロジーとなる。接合技術として、接着材を使った接合法や、レーザー・超音波を利用した溶着技術が注目され、積極的な研究展開が図られている。

- 軽金属材料

いわゆる純アルミニウムの地金価格の安定化、新しい Al-Li 合金においては、製造から製品までの一貫した戦略的な取り組みによって、1980 年代と同じ展開とならないようにすべきである。さらに、現在展開されている革新的新構造材料等技術開発においても取り上げられているように、接合技術は構造物製造においては不可欠であるが、熱伝導性の良好なアルミニウム合金においては大きな入熱が必要である。これは接合前の材料中のマイクロ組織を破壊して、機械的性質を著しく低下させることとなるため、摩擦攪拌接合技術などの新展開による信頼性の高い接合技術が望まれる。また、従来接合していた構造物を、接合を要しないような、大型ダイカスト技術で精密に一体成型できる技術の新規展開も課題である。これは部品点数低減の観点からも重要である。

アルミ合金は航空宇宙分野で古くから活用され、近年の低燃費化の要請から自動車にも適用が拡大しつつある。航空機用の高強度アルミ合金は Zn、Mg 添加量の増大と時効処理条件の最適化により引張耐力が 600MPa を超えるものも実用化されているが、構造部材で要求される破壊靱性、耐食性、耐疲労特性との両立が技術的な課題となる。

チタン合金は、航空機機体構造の重要部品に活用されている。機体構造用材料としては、高強度化よりも素材の低コスト化、機械加工コストの低減が課題であり、リサイクルも視野に入れたサプライチェーン構築も重要な課題である。

- セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーを高強度軽量材料用の産業用素材として利用するためには一層のコストダウンが求められている。これまでに多くの研究がなされパイロット生産段階ではあるものの、現状では複合対象の樹脂と比較して価格が高い。構造材料として求められる強度、耐熱性などの特性を保ちつつ、一層のコストダウンが求められている。天然材料である木材や農産廃棄物から、工業的に安定して高品質の製品を生産する技術の開発が重要である。

ナノセルロースは、各種前処理した植物セルロース繊維を水に分散させ、機械的解繊によ

り、セルロースマイクロフィブリル間に形成されている無数で強固な水素結合を切断し、ナノサイズ幅に分散して調製される。したがって、元々極めて親水性の素材であり、調製段階では水分散液として得られる。一方、ナノセルロースを充填成分として疎水性のプラスチック基材中でナノ分散させ、ナノ複合化効果を発現して移動体（自動車、航空機）・建材用の軽量高強度材料、断熱材、高性能分離材、電子プリント基板、ガスバリアフィルム等の先端部材として利用するためには、湿度変化に対して物性を一定に維持できるだけの耐水性や、エレクトロニクス部材に求められる 300°C 程度までの熱安定性（熱分解や着色性の制御）等の特性が求められ、現状では完全な解決方法には至っていない。さらに、基材中でナノセルロースが凝集せずにナノ分散化することで、少量のナノセルロースの添加でも著しいナノ複合化効果が発現して軽量高強度部材の特性が発揮される。したがって、ナノセルロースを基材中で完全にナノ分散化する制御技術と、それを定量化・視覚化・計測する手法の構築が求められている。

また、ナノセルロースを高性能部材として利用するためには、多孔体や複合化物の高い光学透明性、導電性の制御、気体や物質の選択分離機能、断熱性の付与とそれを発現するメカニズムの解明が必要となる。加えて、多様性のある様々な起源の植物セルロース繊維から、先端部材として利用可能なナノ素材原料とするためには、常に一定のナノサイズ幅、長さ／長さ分布、さらには分子量／分子量分布に制御する方法と、その評価・測定方法を構築する必要がある。現状ではナノサイズ幅が一定となる限られたナノセルロース類のみが上記の基本特性の測定方法検討の対象となっている。一方、幅が不均一で分布があり、複雑なネットワーク構造を有しているナノセルロース類については、学術的に構造解析・制御可能な技術にまで発展させるには長期間を要すると推察され、そのハードルは極めて高い。さらに、ナノセルロースを医療・ヘルスケア分野で利用する際や、企業で量産化を進める際には、使用および生産現場における長期的な安全性の確認、環境負荷の検討とその適正な対応が求められる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

• CFRP

CFRP に関しては、以下の研究テーマに取り組むべきと考える。

－ オートクレーブ法製造工程の短縮化

オートクレーブの成形工程を短縮するための「ハイサイクルオートクレーブ成形技術」が開発されつつある。固化速度の速いマトリクス樹脂を開発するとともに、成形型内の適切な温度制御を実現することによって実現可能な技術として注目されている。

－ 成形品の寸法精度向上

CFRP の熱粘弾性・熱粘塑性特性を考慮することにより、成形時の熱変形や熱残留応力を適切に評価する手法の研究開発が急がれている。予測された熱変形を補うべく金型形状を適切に守勢することによって製品の成形寸法精度が向上されるものと期待されている。また、冷却固化の温度分布を適切にモニタリング・制御することによって成形精度を改善する「データ同化手法」も提案されており、製品寸法の大幅な寸法改善に寄与するものと期待される。

- 高生産性かつロバストな脱オートクレーブ成形法の技術開発
近年は A-VaRTM を中心として、オートクレーブを必要としない成形法が登場し、大型航空機の製造にも適用がはじまっているが、構造が大型化するほど冷却時の温度ムラや成形ムラが発生することによるクオリティの低下が顕著でとなる。今後は大型部材の製造に適した RTM 成形法の開発がキーテクノロジーになると考えられるが、上述の成形寸法の改善技術が、脱オートクレーブ化に大きく寄与するものと考えられる。
- 大型部材向け生産ライン、大量生産に対応した自動化技術、検査技術開発
自動車用構造材としての CFRP の適用を考えると、織物や一方向材を中心とした部材の適用は BMW の 7 シリーズのような車両の市販価格が 1000 万円を超えるような製品に限られるものと思われる。廉価な車種への適用およびリサイクル性を考慮すれば、熱可塑性樹脂マトリクスによる CFRTP のプレス成形品が主流になるものと思われる。現状、国内の主要自動車メーカーにおいても、CFRTP の市販車への適用を睨んだ研究開発はさかんに行われているが、CFRTP のさらなる高強度化、さらなる高剛性化が課題である。
- CFRP の破壊過程、耐久性、耐衝撃性などに関する現象解明
CFRP におけるき裂進展挙動は、トランスバースクラックや繊維ブリッジングなどが複雑に関与する破壊を示すことから、き裂の進展予測、特に疲労き裂の進展予測が難しい。き裂進展メカニズムに対してさらなる知見の蓄積がなされることによって、耐久性や耐衝撃性、疲労特性の適切な評価が可能になると期待される。
- CFRP の健全性評価・検査技術開発
光ファイバーを用いた損傷モニタリング技術は、東京大学の武田らを中心として精力的に進められており、近年特にその技術レベルの向上が望ましい。今後は実際の航空機製造過程ならびに運航機体への適用を図るとともに、ヘルスマニタリング技術の国際的な基準を確立することが重要である。
- CFRP と異種材料の接合・接着技術の開発
先に述べたように、BMW 製乗用車への CFRP 適用事例を見る限り、今後は CFRP と従来の金属構造との接合したハイブリッド材の事例が増えてくると予想される。鉄鋼を中心とした従前の金属材料と CFRP との接合技術、接着技術の発展・展開に大きな期待が寄せられている。
- 軽金属材料
アルミ合金については、新規一体成型精密ダイカスト、およびそれに適した合金開発やナノ組織解析とナノ組織制御技術の工業へのルーチンの展開、超高強度・高靱性・高耐食性を両立可能なアルミ材料の開発、シミュレーション等を活用した組織制御による材料製造プロセスの高度化・信頼性向上技術開発、高耐熱性アルミ合金の開発などを進める必要がある。
チタン合金は、低コストチタン合金の開発、ニアネット製造技術開発（Additive Manufacturing の活用含め）が重要となる。
- セルロースナノファイバー
セルロースナノファイバーについては、国際標準化や製造プロセスや装置を含めたコストダウンのための基礎研究が期待される。原料である木質バイオマスの適正、材料のキャラク

タリゼーションや強度等各種特性の発現するメカニズムの解明は、安定生産、品質改良、耐久性の向上等の面から継続的に必要な研究テーマである。セルロースナノファイバーはそのサイズからナノ材料であるため、安全性に関する評価や、今後、産業的に大量に用いられることを想定すると、リサイクルの評価や LCA の評価も求められる。現状、多くの研究ではセルロースナノファイバーをフィラーとして樹脂に対して数%～数十%添加することにより母体の樹脂の特性を大きく改善している。長期的にはセルロースナノファイバーの軽量高強度特性、熱的寸法安定性をさらに生かすためセルロースナノファイバーが多い系での基礎物性や成形加工技術について基礎研究を進める必要がある。

上記から、具体的には、以下の以下の研究テーマに取り組むべきと考える。

- － ナノセルロースの幅／幅分布、長さ／長さ分布の評価／測定方法－制御方法の構築
目 的：上記により初めて先端材料としての利用が可能になる。
短中期：完全ナノ分散化 CNF(現状では TEMPO 酸化 CNF とリン酸エステル化 CNF) の上記測定方法－制御方法の構築。
長 期：機械解繊で調製される上記以外の不均一な構造の CNF の上記測定方法－制御方法の構築。
- － ネットワーク型ナノセルロース類のナノ構造の定量的評価・測定方法の構築と、ISO 標準化対応
目 的：先端材料に CNF を使用するためには、従来の高分子材料のように特性制御と定量的解析方法の構築が必要。それにより CNF の ISO 標準化戦略においても日本がリードできる。
短中期：CNF 分散液のレオロジーによる研究基盤の構築。
長 期：レオロジーと光散乱、その他の先端分析技術による複雑で不均一な CNF の構造を数値化すること。
- － ナノセルロース類のナノ構造、表面構造の解析方法の構築と、効率的で環境適応型のナノセルロースの表面化学改質－高機能化方法の検討
目 的：現状では顕微鏡画像からの視覚的な定性的評価が主体。表面のセルロース分子のコンフォメーション、結晶性等の詳細な知見の蓄積が必要。それにより表面改質による高機能化が可能になる。
短中期：固体 NMR、CNF 表面の段階的剥離法等によるナノ構造解析。CNF 中の非晶領域の生成機構と構造の解析。
長 期：セルロースの表面の構造や非晶領域の分布状態を評価する方法を構築すると共に、非晶領域の結晶化（修復）手法の構築。
- － ナノセルロースの効率的、環境低負荷型の疎水性付与、耐熱性付与方法の検討
目 的：CNF を疎水性プラスチック基材中にナノ分散化させることで、少量の CNF 添加で軽量高強度化、耐熱性向上が期待できる。しかし現実には、CNF 表面の親水性が高く、疎水性のプラスチック基材中で凝集しやすく効率的に CNF の複合化効果が発現しないので、その課題を克服する。
短中期：CNF 表面に、効率的に水系媒体で疎水基（例えばアルキル鎖）を導入する方法の検討と導入位置、導入効果（疎水性、プラスチックとの複合化効果）を評価する。

- 長期：現在汎用プラスチックとして用いられているポリエチレン、ポリプロピレン、ポリビニルアルコール、ポリ塩化ビニル、ナイロン、ポリカーボネートとのナノ複合化により、5%以下の添加量で強度（弾性率、破断強度）を5倍以上に向上させる。
- － ナノセルロースから高性能断熱材用の透明高強度多孔体の調製方法の検討
目的：CNFを高価で脆い透明シリカゲルに代わる、新規バイオ系高性能断熱材として利用すること。
短中期：凍結乾燥あるいは風乾によって高比表面積で空気よりも断熱性の高い多孔体の調製条件を構築する
長期：透明、高断熱性、高強度の3条件を満たした多孔体の調製方法を見出し、自動車、航空機、建材用に利用する。
- － ナノセルロース類の安全性評価方法の構築と、生産現場／使用時における対応策
目的：CNF製造および医薬品・食品として使用する際の短長期的安全性を明らかにし、カーボンナノチューブのように使用、製造における安全指針を明らかにする。
短中期：微生物、動物実験による急性毒性、発がん性を評価する。乾燥CNFの飛散性と飛散サイズを明らかにする。
長期：人間に対する中長期的安全性を評価し、食品、医療、ヘルスケア材料としての安全性の指針を作成する。
- － 国産未利用針葉樹材（主に間伐材や林地残材）の流通ルートを構築し、木材セルロース繊維に変換する製紙／化学企業に安定的に原料を供給するシステムの構築
目的：CNFの先端材料としての可能性は多数報告されているが、国産針葉樹材を原料とするには、急斜面で放置されているような針葉樹林地残材、間伐材由来のチップを製造し、CNF製造工場まで安定的に搬出するシステムを構築する必要がある。
短中期：現状で針葉樹材を製紙原料としている地域の拡大、個人所有林を、企業が代替して間伐材の伐採し、流通システムを構築する可能性を法的小および技術的に検討する。
長期：国産針葉樹間伐材から安定的にCNFを工場生産し、先端部材に利用するマテリアルストリームシステムを構築し、伐採－利用した分、植林を進めることで炭素の固定化、二酸化炭素削減、循環型社会基盤システムを構築する。

（5）政策的課題

高強度軽量複合材料の研究開発においては、構造物設計と材料設計が一体となって行われることが多く、それに携わる研究者は、比較的機械工学系の研究者が多い傾向にある。しかし更なる高性能化のためには繊維/樹脂界面の解析・制御や、複合材マトリックスの分子構造の制御、さらなる高強度と耐熱性を発揮する新規樹脂マトリックスの開発など、応用化学的視点からの、ナノ・ミクロスケールでのアプローチが重要であり、材料科学系および材料工学系との協働促進が課題となる。さらには、将来的な二酸化炭素排出量のさらなる削減を考えれば、セルロースナノファイバーに代表されるバイオ系素材が注目を集めることは間違いなく、

その意味においては農学系や生命科学系との連携促進も重要になろう。大学、公的研究機関、ユーザー産業、素材産業の異分野研究者の協働による共同研究と実用化を促進するとともに、さらには複数の府省も取り込んだ形での連携による施策も大切である。一方、欧州の航空機分野における研究連携をみると、欧州航空研究諮問委員会（ACARE : Advisory Council for Aeronautical Research in Europe）が中心となり、国を超えた形での企業、大学、研究機関の有機的な研究連携が実現されている¹⁰⁾。

欧米では、国家プロジェクトとして産学官が連携したコンソーシアムを形成し、技術開発及び実用化をリードしており中国でも動きが活発になっている。日本でも同様の枠組みを形成し、素材開発から適用技術開発までの総合的分野で国が積極的にバックアップして開発を加速・推進する必要がある。

- 軽金属材料

例えばアルミニウム合金の鋳造、加工基盤技術について、従来の鋳造方法や、圧延、押出、切削加工等で残されている基礎的内容を研究テーマとして技術開発を行う若手研究者、若手技術者が大変不足している。約 10 年前から問題となっているように博士課程進学率も工学系は横ばいであることから、人口減少は今後この傾向にますます拍車をかけると考えられる。昨今の研究支援や研究論文の風潮としても、ピンポイントで新素材、新技術開発が推奨されていることは疑う余地がない。もちろん新素材に興味を持つことは大変重要なことであるが、大学から金属工学科がほぼ消えたことから明らかなように、金属素材産業にとっては、高品質な素材そのものを日本では作れない、つまり応用研究はできるが、既存の金属材料の本質を知らないために、既存の金属材料の製造、技術開発・研究開発ができないという憂うべき状況になりつつある。米国や中国のように地下資源に恵まれた国とは異なり、また人口も国土面積に対して密度の高い科学技術立国と称する日本としては、輸入した金属地金から、いかに他国と差別化できる高性能の製品を創製するかが鍵であることは明白であり、そのためには既存の材料に対する知見をビッグデータ化するような地道な基礎研究の集積と、新材料・新技術の応用研究をバランスよく行っていくことが重要であると考えられる。

また、アルミ合金、チタン合金については、欧米諸国では、産官学が連携したコンソーシアムを形成し、基礎研究から実用化まで計画的に研究開発が実行されている。日本でも同様の枠組みにより効率的な研究開発を推進する必要があると思われる。

- セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーは、まだ見出されたばかりの新規バイオ系ナノ素材であり、基礎分野としてはナノ構造解析、分散状態のシミュレーション解析－物性との関連性の検討など多くの解決すべき課題がある。現在の有機・高分子材料が汎用・高機能先端材料としての幅広く利用されている背景には、長年にわたる基礎的な高分子科学、材料科学工学およびそれらの関連科学に基づく知見・技術の蓄積がある。ナノセルロースのような新しい研究領域では、実用化－応用研究開発と共に、基盤となる多面的な学術的基礎研究の更なる継続と成果の蓄積が必要となる。世界的にナノセルロースに最適な出口－応用分野 (killer application) の探索を支援する国家および EU などの国際的政策が多い中で、他国と同じ価値基準で切磋琢磨するような競争的な研究支援と共に、長期的な観点から日本が独自性と優位性を維持するような基礎研究領域も含めた両輪支援が必要となる。安全性や、ナノ構造解析法の構築等に基づく国際標準化政策については、正にオールジャパン体制で取り組むべき重要な長期的

基礎分野である。知的財産戦略も含め、日本が強みをするコア部分はクローズ化、そうでない部分をオープン化し、オープン・クローズ戦略を構築する必要もある。また、近畿、中国、四国、九州等では地域の特徴を生かしたナノセルロースの拠点形成されている。地域経済の活性化のため、地域の資源的、産業的特長を生かした地域展開の推進も重要である。

（６）キーワード

複合材料、炭素繊維、CFRP、CFRTP、熱可塑性樹脂、高比強度、軽量化、脱オートクレーブ、低コスト化、アルミ合金、チタン合金、ナノ組織解析、ナノ組織制御、一体成型精密ダイカスト、セルロースナノファイバー（CNF）、ナノセルロース、レーザー溶着、超音波溶着、損傷モニタリング、製造プロセス最適化、トポロジー最適化、データ同化、ハイサイクル成形

（７）国際比較

繊維強化プラスチック（FRP）や炭素繊維複合材料（CFRP）

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	○	→	● 米国、欧州に比して基礎研究分野はやや立ち遅れが目立つ。
	応用研究・開発	◎	↑	● 有力な材料系メーカーと重工系・自動車系企業が存在が先進材料系の応用研究開発を強く後押ししている。
米国	基礎研究	◎	↑	● 世界各国から優秀な人材を集めており、基礎研究分野のポテンシャルは極めて高い。
	応用研究・開発	○	→	● 航空宇宙分野における応用研究開発レベルはいまなお世界トップクラスであるが、民間航空機については、他国からの技術移転も多い。
欧州	基礎研究	◎	↑	● 学術的な研究レベルは極めて高く、欧州における国境のない各国の強い連携のもとに、高い研究水準を維持している。
	応用研究・開発	◎	↑	● 航空機分野でのエアバス社、自動車分野でのBMWなど、先進技術をけん引する企業があり、それら主要企業を中心に大学・企業が有機的研究を行うためのクラウドを形成している。
中国	基礎研究	○	→	● 大学・研究機関など、海外経験を得た研究者が国内に舞い戻る傾向も出始めており、今後の伸びしろは大きいと考えられる。
	応用研究・開発	○	→	● 現状では米国、欧州、日本に比べて発展途上の段階である。
韓国	基礎研究	△	→	● 比較的日本に似た状況であるといえるが、基礎研究を担う研究者の人口が少ない点が惜しまれる。
	応用研究・開発	○	→	● 電気電子産業を中心として高い技術レベルを維持しているが、自動車産業や航空宇宙産業においては、先進主要国と比べ、未だ発展途上の段階である。

軽金属材料（アルミニウム合金）

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	○	↓	● 日本が米国と同様の科学技術政策をとっていること、さらに新技術製品の輸出量が低下していることから、今後日本が米国と同様の傾向、応用研究・開発が主流になることが推測される²⁵⁾。 ● 研究論文数の基礎研究比率は55%。
	応用研究・開発	○	↑	● JST「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」のように基礎研究を重視しながら出口の明確な応用研究が遂行されている。 ● 研究論文数の応用研究比率は45%。
米国	基礎研究	△	↓	● 米国の基礎研究離れが、明確となつて。 ● 研究論文数の基礎研究比率は42%。
	応用研究・開発	◎	↑	● 米国は、応用研究・開発が主流になっている。 ● 研究論文数の基礎研究比率は58%。
欧州	基礎研究	△	→	● 欧州の基礎研究離れは明確である。 ● 研究論文数の基礎研究比率は42%
	応用研究・開発	◎	↑	● UK等、欧州で取り組まれた基礎研究離れに対する施策²⁶⁾が奏功した。 ● 研究論文数の応用研究比率は58%。
中国	基礎研究	○	↓	● 研究論文数の基礎研究比率は43%
	応用研究・開発	○	↑	● 中国は、「政府活動報告」²⁴⁾にあるように応用研究への展開を謳っていることから、今後本分野への拡大が予想される。 ● 研究論文数の応用研究比率は57%。
韓国	基礎研究	○	↓	● 韓国は日本の基礎研究動向と似た傾向にある。 ● 研究論文数の基礎研究比率は57%。
	応用研究・開発	○	↑	● 韓国は日本の応用研究・開発動向と似た傾向にある。 ● 研究論文数の応用研究比率は43%。

*現状評価は、主に、ScienceDirect2004-2016年のaluminum&applicationの論文数をaluminum研究論文総数で除した数値で判断した。

セルロースナノファイバー

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	◎	↑	● 天然高分子系ナノファイバーの論文のうちセルロースを原料とする論文が日本は208件である。天然高分子系ナノファイバーの論文が2004年頃より増加している。
	応用研究・開発	◎	↑	● 天然高分子系ナノファイバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが日本は808件と世界最多である。セルロースナノファイバー製造のパイロットプラント建設が増え、積極的にサンプル提供による用途開拓を進めている。
米国	基礎研究	◎	↑	● 天然高分子系ナノファイバーの論文のうちセルロースを原料とする論文が米国は180である。天然高分子系ナノファイバーの論文が2004年頃より増加している。結晶性ナノセルロースとセルロースナノファイバーの両方を研究している。カナダの論文数も多く40件、北米として基礎研究が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↑	● 天然高分子系ナノファイバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが米国は357件である。米国林産研究所とMaine大学はパイロットプラントを設置し、企業にサンプル供給することにより用途開拓を進めており、オープンイノベーションを推進している。
欧州	基礎研究	◎	↑	● 天然高分子系ナノファイバーの論文のうちセルロースを原料とする論文は欧州が世界で最多の521である。天然高分子系ナノファイバーの論文が2004年頃より増加している。フィンランドやスウェーデンが中心である。

				が、EU内の国際連携も実施。ヴァレンベリ木材科学センター（スウェーデン）やアールト大学（フィンランド）といった大学を中心に基礎研究を継続している。
	応用研究・開発	◎	↑	●天然高分子系ナノファイバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが欧州は802件である。フィンランド、スウェーデン等が中心となり、産官学連携等のプロジェクトを通じて積極的に応用研究と開発を継続。SUNPAP、BiMac、SustainComp等の大型研究開発プロジェクトも実施した。セルロースナノファイバーに注力するのは製紙産業の高付加価値分野への構造転換も背景にある。
中国	基礎研究	◎	↑	●天然高分子系ナノファイバーの論文のうちセルロースを原料とする論文が中国は172件である。天然高分子系ナノファイバーの論文が2007年頃より急増している。資金が大学に投入されている。
	応用研究・開発	○	↑	●天然高分子系ナノファイバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが中国は257件であり、増加している。
韓国	基礎研究	△	↑	●天然高分子系ナノファイバーの論文のうちセルロースを原料とする論文が韓国は38件。天然高分子系ナノファイバーの論文がここ数年増加している。 ●国立森林科学院が中心となり2007年より研究を行っている。
	応用研究・開発	△	↑	●天然高分子系ナノファイバーに関する特許出願のうちセルロースを原料とするものが韓国は94件である。天然高分子系ナノファイバーの特許が増加傾向にある。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 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、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考文献

- 1) 炭素繊維協会、東レ資料、http://www.carbonfiber.gr.jp/pdf/24th_seminar_PAN.pdf.
- 2) “新版複合材料・技術便覧”。2011. 強化プラスチック協会、日本複合材料学会。
- 3) “社会インフラ材料研究の新たな展開：安全・安心な持続性社会の構築へ向けて”。2012. 物質・材料研究機構。
- 4) 武田展雄，水口周，伊藤悠策「先端複合材料構造の成形モデリングおよびモニタリングの最近の動向」日本機械学会論文集（A編）78巻795号（2012-11）。
- 5) 武田展雄、越岡康弘「航空宇宙木複合材構造の構造ヘルスマニタリング技術の進展」、「非破壊検査」（日本非破壊検査協会誌）第60号3号、2013。
- 6) S. Minakuchi, T. Umehara, K. Takagaki, Y. Ito, N. Takeda, Life cycle monitoring and advanced quality assurance of L-shaped composite corner part using embedded fiber-optic sensor, Composites: Part A 48 (2013) 153–161
- 7) 新構造材料技術研究組合(ISMA). <http://isma.jp/index.html>
- 8) JST 戦略的イノベーション創造プログラム「革新的構造材料」.<http://www.jst.go.jp/sip/k03.html>
- 9) NEDO「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」（中間評価）分科会 資料 5-1
- 10) 一般社団法人日本航空宇宙工業会会報、平成28年5月、第749号

- 11) 第 200 回生存圏シンポジウム・第 7 回バイオ材料プロジェクト, セルロースナノファイバーを用いた高機能で Green な研究開発,『未来の自動車は植物で作る』要旨集, 平成 24 年 3 月 12 日, 京都大学 生存圏研究所
- 12) 日経ビジネスオンライン, 炭素繊維で鍛えた BMW 新型「7 シリーズ」, 2015 年 12 月 8 日, <http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/264450/120400015/>
- 13) 中里直史, 香山晃, 幸野豊, NITE 法による SiC 成型挙動への SiC 粉末表面特性の影響, 日本金属学会誌 第 76 巻第 11 号(2012), pp.634-638
- 14) MRJ 尾翼桁間構造適用に向けた A-VaRTM 技術開発, 山下満広, 坂川亨, 武田文人, 木俣文雄, 子守康裕, 三菱重工技報, Vol.45, No.4, 2008. P.2-5.
- 15) ISMA Report (新構造材料技術研究組合広報誌), 2016 年 3 月
- 16) 東京理科大学理工学部機械工学科知的材料構造研究室 (松崎研究室) ホームページ: <http://www.rs.tus.ac.jp/rmatsuza/research.html>
- 17) CFRP の材料、成形加工の最新技術と自動車への適用, 平成 25 年度次世代自動車地域産学官フォーラム・技術開発セミナー～ものづくり技術で拓くモビリティ新産業～, 発表資料, 東邦テナックス(株), 梅元禎孝, www.nisri.jp/jisedai/docs/lecture_20131010_umemoto.pdf
- 18) 平野義鎮, 勝俣慎吾, 岩堀豊, 轟章, 模擬雷撃を加えた CFRP 積層板の損傷挙動, 日本複合材料学会誌, 第 35 巻 4 号(2009)
- 19) 日本アルミニウム協会 ロードマップ 2015&2016
- 20) 新倉昭男: UACJ テクニカルレポート, Vol.2, No.2, 2015, pp.32-42
- 21) National Science Foundation, 採択研究課題 2014 公開分, <http://www.nsf.org/>, http://www.nsf.gov/about/budget/fy2014/pdf/34_fy2014.pdf
- 22) 平成 25 年版科学技術白書, http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa201301/detail/1338121.htm
- 23) National Science Foundation, 採択研究課題: 検索結果 (Aluminum + AND + Alloy), <http://www.nsf.gov/awardsearch/simpleSearchResult?QueryText=Aluminum+AND+Alloy>
- 24) 第 12 期全国人民代表大会第 4 回会議「政府活動報告」2016 年 3 月 5 日
- 25) 文科省、http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa201301/detail/1338121.htm
- 26) 在英国日本国大使館・経済班, 「英国の科学技術の概要」2005 年 7 月
- 27) 平成 27 年度 特許出願技術動向調査報告書 (概要) ナノファイバー、平成 28 年 2 月特許庁. https://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/h27/27_10.pdf
- 28) 日本経済新聞 電子版 2016 年 4 月 4 日
- 29) 中越パルプ工業株式会社. <http://www.chuetsu-pulp.co.jp/feature/1778>
- 30) 星光 PMC 株式会社. http://www.seikopmc.co.jp/files/20141121_2.pdf