

2. 俯瞰区分と研究開発領域

2.1 環境・エネルギー応用

有限な地球環境を鑑みて持続可能なエネルギー社会に向かうために、エネルギー、環境、経済、安全の観点での様々な取り組みが世界的に進んでいる。日本は資源に乏しいことに加え、CO₂削減の観点から、太陽光発電、風力発電、地熱発電などの再生可能エネルギーの導入の拡大を図り化石燃料の消費を抑えること、エネルギー変換や利用に伴うエネルギー損失を小さくすることが求められている。

環境・エネルギーへのナノテクノロジー・材料分野の貢献としては、再生可能エネルギーの高効率利用、効率的なエネルギー蓄積、変換、CO₂排出量の削減を可能にする材料技術、デバイス技術、プロセス技術を提供することが挙げられる。本節では重要な研究開発領域として、太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、ファイン触媒、分離技術、複合材料、極限環境材料・計測技術を取り上げる。

太陽電池については、新たな物理的・化学的現象の探索や、新たな半導体材料、素子構造の革新などにより、変換効率向上や低コスト化が進められている。

蓄電デバイスは、電気エネルギーを化学エネルギーに変換する電池、あるいは物理エネルギーとして蓄えるキャパシターを挙げる。大容量、急速充電、高出力、長寿命の実現に加え、特に安全性の向上を目的とした電極活物質や電解質、電池構造の開発が進められている。

パワー半導体は電気のオン・オフ、昇圧・降圧、直流・交流変換などに用いるデバイスである。動作時の電力損失の低減や高耐久性、低コスト化を目標に新たなワイドバンドギャップ半導体材料の開発、素子構造の革新に向けた研究が進められている。

ファイン触媒は、化成品合成やファインケミカルズ合成の製造プロセスに用いる触媒と、人工光合成に用いる触媒を取り上げる。新たな触媒材料の開発により、反応の短縮、精密合成、環境負荷の低減が進んでいる。人工光合成の触媒は可視光での物質変換効率向上を目標に研究が進められている。

分離技術は、複数物質の混合状態にある混合物から目的物質だけを取り出したり、不要物を取り除くなどの分離操作を低エネルギーかつ高精度に行うことを目指す研究開発領域である。具体的にはCO₂や大気汚染物質の分離・回収、鉱物資源採掘時の金属分離、排水処理や海水淡水化、石油精製や石油化学における化学プロセスでの気体・液体の分離、水素の分離、細胞やタンパク質など生体物質の分離などがある。分離プロセスを分子レベルで理解し、気体・液体の吸着分離／膜分離／吸収分離、鉱物資源・固体のリサイクル精錬／金属精錬などにおける新手法や新材料の研究開発が進められている。

複合材料は、複数の異なる種類の材料を組み合わせることによって、個々の材料では持ち得ない機能・性能を発揮する材料である。繊維状の強化材とマトリックス材を複合化した材料は、均質材料では達成できない高比強度（引張強さ／比重）や高比剛性（剛性／比重）、高耐熱性などの特性を発揮可能であり、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）、セラミックス基複合材料（CMC）、セルロースナノファイバーなどの開発が進んでいる。

極限環境材料・計測技術に関しては、宇宙や原子力分野への適用を念頭に置いた材料研究および計測技術を取り上げる。高温、低温、大きな温度差、強い放射線、腐食環境などの厳しい

環境下において使用可能な、高強度、高靱性そして軽量などの機能を兼備えた材料の研究開発が進められている。計測としては、軽水炉の安全性評価を目的として、原子炉材料の脆化評価方法の高度化が進められている。

2.1.1 太陽電池

(1) 研究開発領域の定義

太陽光エネルギーを高効率かつ低コストで電気エネルギーに変換するデバイスを研究開発する領域である。結晶 Si 系太陽電池に関しては、Passivated Emitter Rear Contact (PERC) 型セルの量産化が進んでおり、ポスト PERC 型の次世代高効率セル構造の明確化と早期量産化、ウェーハの高品質化・超薄型化などが課題である。化合物薄膜太陽電池に関しては、接合界面・光吸収層の高品質化に改善の余地があり、現状の 22.9% を超える高効率化が目標である。ハイブリッド型のペロブスカイト太陽電池に関しては、既に変換効率約 22% が達成されているが、今後はさらなる高効率化を目指した新材料開発と発電機構の解明、耐久性の改善が重要な課題となる。

(2) キーワード

シリコン系太陽電池、PERC 型セル、低コスト化、高効率化、有機系太陽電池、分子設計、プロセス技術、劣化機構の解明、ペロブスカイト太陽電池、タンデム化、車載太陽電池、リサイクル

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

今世紀に入り、地球環境・温暖化問題はますます顕在化している。2018年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画では、再生可能エネルギーについて、2030年のエネルギーミックスにおける電源構成比率の実現とともに、確実な主力電源化への布石としての取組を早期に進めることが明記された。再生可能エネルギーの一番手である太陽光発電の大量導入が世界の潮流となる中、日本国内でも太陽光発電の普及が進んできた。この分野の研究開発の重要性が益々増大している中で、エネルギー変換分野では高効率・低コストの革新的太陽電池の開発が精力的に行われている。既に海外においては、超大規模発電所として、太陽光発電設備の建設が急激に進んでいる。日射量が豊富で大規模なシステムを安価に構築可能な中東地域では、従来型の結晶シリコン太陽電池を用いた大規模な発電所の入札において、2US¢/kWh 以下の入札事例が出てくるなど、低炭素かつ安価な電源として、世界的にその利用が進んでいる。また、今後の期待が大きいスマートグリッド構想でも、太陽電池は重要な役割を果たす。そこでは、太陽電池を含むオンサイト分散電源をネットワークで接続して、電力を有効に利用することが可能となる。さらに、従来から用いられている家庭用太陽電池、太陽電池発電用電池に加えて、農業用ソーラーシェアリング、ネット・ゼロ・エネルギー・ビル構想、環境発電という観点から、建材一体型太陽電池、室内で高効率を実現出来る太陽電池（センサーネットワーク系電源）、電気自動車（BEV）やハイブリッド自動車（HEV, PHEV）用太陽電池、飛行機用太陽電池（ソーラーインパルス）、ヒートポンプ等を活用した熱需要への電力エネルギー供給などの用途に応じた太陽電池が必要となる。これらの分野では、軽量、フレキシブル、任意形状、設置容易性、交換可能等の種々の機能を持った太陽電池が必要になっている。さらに、ゲームチェンジング・テクノロジーとなる第三世代太陽電池の研究開発も、将来の社会革新に繋がる超高効率太陽電池として、非常に重要な研究ターゲットである。具体的な第三世代太陽電池としては、量子効果を利用した中間バンド太陽電池やマルチエキシトン（MEG）太陽電池が挙げられる。

[研究開発の動向]

実用化が進んでいる、結晶 Si、薄膜 Si、CIGS [Cu(InGa)Se₂]、CdTe、GaAs 集光型の太陽電池では、より低コスト、より高効率を目指した開発が産学連携により行われている。太陽電池モジュールの価格は年々低下しており、大規模なメガソーラから中規模なシステムでは、システム価格に占めるモジュール価格の割合は3～4割程度にまで低下してきた。今後のさらなる普及拡大と低価格化には、最もシェアの大きい結晶 Si 系においてもセルの高効率化を含めたモジュールの高効率化により、整地・架台・配線・施工等の BOS (Balance Of System) コストあたりの設置量を増やすことが求められる。

一方、革新的太陽電池としては有機薄膜型やハイブリッド型の有機太陽電池が将来性を有する候補として考えられている。これらの分野では、劣化機構解明、接合形成技術、耐久性向上技術、界面制御技術の開発が必要になる。特に、ハイブリッド型の代表であるペロブスカイト太陽電池は急激な勢いで変換効率が上昇しており、発電機構に関する知見も得られてきた。今後の発展のためには、より詳細な発電機構の解明に基づく新材料の開発が鍵となる。

実用化が進んでいるシリコン系太陽電池や化合物半導体系太陽電池では、さらに極限まで変換効率を高めるために、材料の点欠陥・表面欠陥の低減、表面・界面パッシベーション技術、光マネジメントの最適化などの研究が盛んに行われてきた。また、集光型太陽光発電は、太陽電池の使用量が圧倒的に少量化できるため、低コスト化のための新技術として注目され始めている。

太陽光発電システム技術の研究開発は、実用化された太陽電池の技術革新を含め、主として日本、欧州、米国の3極で進められ、中国、韓国における研究開発は実用化された分野の開発成果の吸収・国産化に主眼が置かれていた。しかし、結晶シリコン太陽電池では、従来型の Al-BSF 構造から、裏面パッシベーション膜とポイントコンタクトを導入した PERC 型構造への転換は中国系企業が先導するなど、世界的な勢力地図が大きな変革の時期にある。

日本は Si、CIGS 共に高い技術を持つ。Si 太陽電池では、企業主体で応用研究が進められ、大学や国研が基礎研究で企業の技術開発を支えるという体制により、高い技術水準を維持している。欧州、米国も高い技術開発力を維持しており、実用技術分野では研究機関に試作生産ラインを整備し、新材料や設備開発などの周辺産業を含む技術革新に貢献している。CIGS 太陽電池では企業が高い製造技術を有し、これを支える形で大学・国立研究所が学術的知見の蓄積・提供と新たな高効率化要素技術の開発を行っており、世界最高水準の技術を有している。超高効率太陽電池などの次世代技術への研究開発も米国、日本、欧州で進められているが、先進諸国の太陽電池企業の多くは中国、韓国など新興国や CdTe 太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にあり、産業の基幹である結晶 Si 系太陽電池の生産はすでに新興国に追い越された。ハイブリッド型であるペロブスカイト太陽電池は、急激な変換効率の上昇に伴い日本、米国、欧州、中国、韓国等、世界中で熾烈な研究開発競争が開始されている。そのため、ペロブスカイト太陽電池は日本発の革新的太陽電池にもかかわらず、研究開発では世界の後塵を拝する結果となっている。

結晶 Si 太陽電池では、変換効率を極限まで高めるために、異種材料による接合形成や局所ドーピングによるバンドエンジニアリング、表面・界面のパッシベーション技術、基板の超薄型化や超薄型基板にも対応可能な光マネジメントなどの高効率化技術が必要である。また、低コスト化に向けて高品質基板の低コスト製造技術に対して産業界からの根強い要請がある。高

効率結晶シリコン太陽電池として普及しはじめた PERC 型及びその改良版の PERL 型の太陽電池では、光照射・温度上昇による劣化現象である LeTID (Light and elevated Temperature Induced Degradation) が課題となっており、その発生メカニズムの解明と抑制手法の確立が重要となっている。また、タンデム化による超高効率化のための材料開発や、接合界面のデザインとデザインした界面を実現するプロセス技術の開発が必要である。化合物系の太陽電池に関しては、今後、さらなる効率アップと低コスト化のために、集光型太陽光発電関連技術が重要となる。近年、CIGS 太陽電池では、CIGS の光吸収層の改良、接合界面の改質、バルクのキャリア密度上昇による高効率化のブレイクスルーがあり、変換効率 22.9% を達成している。接合界面の高品質化にはまだ改善の余地があり、接合界面の欠陥密度・バンド構造の詳細な解析、透明電極・バッファ層・光吸収層を含めたバンド構造の最適設計が進められている。現在、日本の集光型太陽光発電関連技術は、世界トップレベルであるが、近年、アメリカやスペインの進展が著しい。

有機系太陽電池として期待されている有機薄膜太陽電池に関しては、現時点での光電変換効率の最大値は 1cm 角セルの認証値で 11% 程度とシリコン系太陽電池の半分であるが、論文ベースでは 14% を超える値が報告されるようになった。この進展は、新素材である非フラーレン・アクセプターと、新たな素子構造である三元ブレンド素子の開発によるところが大きい。今後さらなる変換効率の向上には、新規導電性ポリマーを用いた高効率有機太陽電池の研究、一重項エキシトン解裂を用いた革新的有機太陽電池の研究、三重項色素を用いた革新的有機太陽電池の研究に加え、エキシトン解離に必要なバンド構造 (オフセット・エネルギー) の解明が挙げられる。また量子ドット太陽電池に関しては、量子ドット・ナノワイヤーを利用したもの、異なるバンドギャップを有する量子ナノ円盤構造を利用したものなどが提案されている。最近では、新規ペロブスカイト化合物 (CsPbX_3) にて構成された量子ドットが注目されはじめ、マルチエキシトン生成を示唆する結果が報告されている。変換効率も PbS 量子ドットの記録を破り、13.4% が CsPbI_3 量子ドット太陽電池にて報告されている (NREL およびワシントン大学)。さらにペロブスカイト太陽電池に於いては、発明からわずか 7 年ほどで、22% を越える変換効率が達成されている (米国 NREL の認証値)。より一層の高効率化を目指した新規ペロブスカイト化合物やホール輸送剤の開発と発電機構の解明、高耐久化を目指した劣化機構の解明、低毒性化を目標とした非鉛系ペロブスカイト化合物の開発が重要となる。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

単結晶 Si 太陽電池

量産モジュールでは、従来の裏面全面に Al 電極を用いる AlBSF (Back Surface Field) 型セルから PERC 型セルへの転換が、中国系企業の先導により進められている。LONGI Solar では単結晶 PERC 型セルで 23.6%、ハーフカットしたセル 120 枚によるモジュールでは出力 360W を達成している。Jinko Solar では、選択エミッタやパッシベーションの最適化により 23.95% の達成と 60 直 (モジュールあたりの太陽電池セルの枚数) モジュールで出力 370W を達成している。

1999 年から 15 年間にわたり小面積も含めた結晶 Si 系太陽電池の変換効率の最高値とされてきた 25% の壁が突破された。Panasonic 社は、高品質なアモルファス Si 層により接合を

形成する「ヘテロ接合」の進化と、電極を全て裏面に形成する「バックコンタクト型」を組み合わせるにより、実用サイズ（セル面積 143.7cm^2 ）のセルで変換効率 **25.6%** を達成した。カネカ社は、さらにこの技術を進化させ世界最高効率 **26.7%** (79cm^2) を報告している。SHARP は、コンソーシアム形式のプロジェクトである NEDO 委託研究「極限シリコン結晶太陽電池の研究開発」の成果を活用することにより、フォトリソグラフィを用いない低コストプロセスにより、同様のセル構造を実用サイズで実現し、変換効率 **25%** 超えを達成している。産総研でも、低コストプロセスの基礎検討が進められるなど、ヘテロバックコンタクト型太陽電池は、日本が世界を先導しており、早期の量産化が期待される。

プロセスが煩雑なバックコンタクト型に対し、よりシンプルなプロセスで高効率を追求する新規セル構造の発表が相次いでいる。ドイツのフラウンホーファー研究所は、界面再結合速度の小さい酸化膜を介してトンネル効果により電流を収集する「トンネル酸化膜パッシベーションコンタクト構造 (TOPCON)」を提案し、両面電極型としては世界最高効率の **25.8%** を報告している。その後、世界中の研究機関で、金属酸化物やヨウ化物など新規キャリア選択性材料に対する開発競争が続いている。異種材料を接合に用いることは有機薄膜太陽電池分野の常套手段であることから、有機薄膜太陽電池の研究者の単結晶 Si 太陽電池への参入が見られる。日本では、両分野の協力が遅れているように思われる。

多結晶 Si 太陽電池

多結晶 Si 太陽電池においては、微細結晶粒により転位クラスターの発生を抑制したいわゆる「High-Performance Multi」基板が市場を席巻している。セル構造は、従来型のアルミニウム BSF 構造から PERC 型への移行が進んでおり、中国 Trina Solar が PERC セルで **21.3%** を達成するなど高効率化傾向が著しい。高い生産性で単結晶と遜色のないモジュール効率が得られることから、市場での多結晶 Si の優位性は増している。日本国内では、機能性欠陥を用いたスマート法、ノンコンタクトクルーシブル法、撥液ルツボの利用など多くのユニークな研究開発が大学を中心に行われており、産学連携研究への発展が期待される。ドイツのフラウンホーファー研究所は、n 型の High-Performance Multi 基板に TOPCON 構造を融合することで **22.3%** (3.9cm^2) を達成した。

薄膜 Si 系太陽電池

変換効率での不利を改善すべく、透明導電膜へのテクスチャ形成、透明中間層、プラズモニクス、フォトリソ構造など、光閉じ込め技術の進歩が近年著しい。市場では、バルク結晶 Si 系モジュールの低価格化に押され、苦しい状況が続いており、またその結果、大学等における基礎研究、産業界での量産技術開発とも、縮小傾向にある。しかし、今後のさらなる生産量増大が必須の太陽光発電市場において、材料の安定供給面での優位性を考えると、中長期的な研究開発の継続が重要な分野と言える。またその特徴からエナジーハーベストデバイスとしての活用も期待される。東京都市大では IoT 用エネルギーハーベストデバイス応用を目的に両面受光型薄膜 Si 多接合太陽電池を作製し、LED 照射下の 2セル直列にて 4V 以上の開放電圧を報告している。南海大学では a-SiC:H/a-Si:H/a-SiGe:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ の 4 接合薄膜 Si 太陽電池を作製し、変換効率 **14.58%** (NREL にて測定) を達成している。非晶質 Si、微結晶 Si では産総研などにより近年世界最高効率が更新され、着実な技術の向上が見られる。2017 年に、Si

microcrystalline cell の公式最高効率が 11.9 % (1.044 cm², 産総研) に書き換えられた。薄膜結晶 Si では、2018 年に Helmholtz Zentrum Berlin (HZB) がラインレーザによる熔融・結晶化により、13μm の薄膜 Si 結晶薄膜を作製し、IBC-SHJ セルにて開放電圧 654mV、変換効率 14.2% を達成した。

CIGS 太陽電池

ソーラーフロンティア社が年産 1GW を有し、小面積セルでも 2017 年 12 月に報告した 22.9% (公式) の世界最高効率を誇り、日本が世界を牽引している。近年の CIGS 太陽電池の変換効率の向上が加速している背景にはアルカリ金属を発電層成長後に添加する PDT (post-deposition treatment) 処理がある。KF-PDT 処理をはじめとして、最近では RbF-PDT、CsF-PDT 処理などの重アルカリ金属処理が注目され、これらの処理によって pn 接合および多結晶粒界の品質が向上し、変換効率の向上を後押ししている。さらに光吸収層のワイドギャップ化の検討も進められている。CIGS の代替を目指して、レアメタルフリーの材料が大きく注目されている。その代表格は、CZTSSe であるが、その他のレアメタルフリー材料として、Cu₂SnS₃、CuSbS₂、SnS、Cu₂O、BaSi₂ などの研究開発も活発化してきている。CZTS の公式最高効率は 10.0 % (1.113 cm², UNSW) に書き換えられた。

集光型太陽光発電

集光型太陽電池の関連技術は毎年、着々と進歩しており、集光用の超高効率セルで 46%、集光型太陽電池モジュールで 35%、集光型太陽光発電システムで 30% にまで伸びてきている。これらの効率向上のラーニングカーブより、2025 年には、セルで 50% 超、モジュールで 45%、システムで 40% にまで効率が向上することが予測されており、今後のさらなる発展に期待できる。2016 年には日本の企業がモロッコに 1MW の集光型太陽光発電システムを設置し順調に稼働しており、高日照地域への今後ますますの発展が見込まれる。同システムはオーストラリアにおいても既に導入され、高い発電能力を示している。集光型太陽光発電の高効率を活かしたアプリケーションとして、太陽電池から発生した電力を用いて水を電気分解し水素を発生させるという技術が開発されている。東京大学、宮崎大学、住友電工の共同研究により、Solar to Hydrogen の効率において 24.4% の世界最高効率を達成したことが報告されている。さらに太陽光由来水素と二酸化炭素を触媒反応させることによりメタンを生成することも可能であり、開発が進んでいる。これらの技術を用い、これまで化石燃料しか輸出することができなかった高日照地域から、低環境負荷かつ安価な太陽光由来水素やメタンが生成されることが期待されており、早期の技術開発が求められている。

有機薄膜型太陽電池

2012 年に三菱化学が変換効率 11.1% の有機薄膜太陽電池を開発し、世界最高の変換効率を更新するなど進展が著しい。2018 年の Solar cell efficiency tables (version 52) に掲載されている世界最高効率は、東芝の 11.2% (セル 0.992 cm²)、9.7% (ミニモジュール 26.14 cm²)、小セルでは中国科学院高分子物理及び化学国家重点実験室 (PPC/CAS) の 12.3% である。また、PPC/CAS の Hou らの研究グループは、非フラーレン・アクセプターを用いた高分子太陽電池により 14.4% の変換効率を、タンデムセル構造の非フラーレン高分子太陽電池により

14.9%の変換効率を達成している。さらに、三元ブレンド高分子太陽電池でも、非フラーレン・アクセプターを用いた素子で12-14%が報告されている。このように、変換効率の面では着実な進展が見られている。応用面では、非フラーレン・アクセプターを用いた高分子太陽電池は、可視域の透過率を高めた半透明太陽電池としての応用研究が急速に進展している。さらに、理研と東大は共同で、洗濯可能な超薄型有機薄膜太陽電池を開発し、7.9%の変換効率を実現している。一方、発電機構の面では、励起子を解離するために必要と考えられてきたドナー・アクセプター材料のエネルギーオフセットが0.1 eV未満の系でも、効率良く電荷生成する系が報告されている。これにより、エネルギーギャップ E_g と開放電圧 V_{oc} との光エネルギー損失 $E_g - qV_{oc}$ が0.5 eVを切る系が報告されるようになった。有機薄膜太陽電池の最も大きな損失過程が低減できる可能性があるため、今後のさらなる機構解明が求められる。今後も新規な材料および素子構造の開発とともに、光エネルギー損失の低減が実現できれば、20%に迫る高効率化も視野に入ると期待できる。現在の有機薄膜型のベンチャー企業としては、米国のNanoFlex Power Corporationや独国のHeliatekが挙げられる。用途としては、ビルや自動車が考えられている。

色素増感型太陽電池

近年の最大のニュースは、色素増感型でこの分野を牽引してきた米国ベンチャー企業Konarkaの倒産である。ただ、同社のセルは変換効率が低く、製品としての完成度が不十分だったとの認識が一般的である。現在の色素増感型の主要なベンチャー企業は、G24iから発展したG24 Power (イギリス)、3GSolar (イスラエル)、Dyesol (オーストラリア)の3社である。この内、G24 PowerのセルがLogitech製iPad用外部キーボード電源に採用され(採用時はG24i)、市場投入が始まった。このような状況下、日本はより高効率化を目指した研究開発が進行中である。いずれにしても、色素増感太陽電池は実用化段階に入っており、研究者数そのものは減少傾向にある。それに伴い、ペロブスカイト系太陽電池の研究人口が増加している。色素増感太陽電池の研究は、 V_{oc} のロスがヨウ素系電解液よりも小さいCo系、Cu系電解液を用いた高効率化研究に集約されてきた。製品化では、フジクラが一般ユーザーに量販店を通じて販売を開始した。

ペロブスカイト太陽電池

特に欧米で新たな取り組みが進展している。たとえば、独Fraunhofer研究所は建材用途に大面積60 cm x 100 cmセルを作製しようとしており、英国ではベンチャー企業Oxford Photovoltaicsが上市に向けた研究開発をスタートしている。また、カナダ・サスカチオン大学ではフレキシブル太陽電池実現の可能性が明らかにされている。公式な最高効率、0.991 cm²のセルで20.9%、0.0935 cm²で22.7%であり、両者とも韓国KRICTが報告している。また、モジュールでは、16.29 cm²(6セル直列, Microquanta)で、16.0%が公式効率として報告されている。さらに、最近Graetzelらのグループは、23.2%の効率を達成したと発表した。一方、東芝はフレキシブル基板を使ったモジュールで世界最高の10.5%(5 cm x 5 cm)を報告した(新聞発表)。耐久性は2D材料の添加、混合カチオン化により急激に向上している。高効率化に関しては、1.4 eV程度のバンドギャップを持ったSnPbペロブスカイトの研究(18%効率・非公式)が増加してきた。それ以外には、Pb-freeの研究も盛んであり、

ハロゲン化 Bi 系金属化合物で 4 % 程度の効率が報告されている。Sn 系ペロブスカイト太陽電池の効率も上がってきており、非公式ではあるが 7-9 % 程度の報告が相次いでいる。高効率化を目指した研究開発では、各種タンデムセルが精力的に検討されている。シリコンとのタンデムセルでは、オーストラリア Australian National University (ANU) が 24.5% を達成している。さらに、究極のセルであるペロブスカイト・ペロブスカイト・タンデムセルでは、スタンフォード大学とオックスフォード大学が共同で 20.3% を達成している。タンデム化に於いてはシングルセルで 22% 以上が達成されているため、25% 以上の変換効率が求められ、それを目指した研究開発が世界中で精力的に実施されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- シリコン系太陽電池に関しては、2015 年より NEDO プロジェクトで、世界最高レベルの競争力を有する結晶 Si 太陽電池の実現を目指し、先端複合技術 Si 太陽電池の共通基盤に関するコンソーシアム型の研究開発が開始された。6 大学 (豊田工業大学、明治大学、名古屋大学、九州大学、東京工業大学、兵庫県立大学) コンソーシアム体制により、ヘテロ接合太陽電池など次世代型セルのオープンイノベーションプラットフォームの構築が進んでいる。北陸先端科学技術大学院大学は、cat-CVD によるドーピングやパッシベーション技術のヘテロ接合太陽電池への実装を目指している。産業技術総合研究所では、再生可能エネルギー研究所 (福島) において、次世代薄型結晶 Si モジュールの研究開発や高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発が進められている。SHARP は、ヘテロ接合バックコンタクト太陽電池の量産プロセス開発を実施している。パナソニックは、低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero-junction (SSHJ) 太陽電池の開発に、カネカは、低コストヘテロ接合バックコンタクト太陽電池の小規模量産実証に NEDO の支援を受けて取り組んでいる。名古屋大学では、高品質シリコンインゴット創製に向け、実験科学・計算材料科学・データ科学を融合させた新たな研究開発の方法論の構築に取り組んでおり、インゴット中の結晶欠陥の 3 次元可視化に成功している。
- NEDO プロジェクトで、ソーラーフロンティア、産業技術総合研究所と複数の大学からなるオールジャパン体制で CIGS 太陽電池の高効率化・物性評価をより一層進める研究がスタートし、材料設計・分析・高効率セル作製を重点的に行っている。CZTS については、日本発の材料であり、JST の CREST でも研究が行われた。JST の未来社会創造事業では、Pb フリーペロブスカイト太陽電池の開発、超薄型シリコン系トリプル接合太陽電池の開発が進められている。地球規模課題である低炭素社会の実現に向けてボトルネックとなっている課題の新規募集も継続して行われている。
- 2011 年 6 月より、集光型太陽光発電に関する日欧の共同研究開発が始まり、欧米においても集光型太陽光発電システムの重要性が再認識されている。2015 年 7 月より、超高効率・低コスト III-V 化合物太陽電池モジュールの研究開発が NEDO プロジェクトとして開始されており、超高効率太陽電池モジュールの開発を実施している。このプロジェクトでは非集光でも変換効率 30% を超えるモジュールが開発されており、新しい用途が期待される。日本における一般的な自家用車の一日あたりの走行距離は 30km 程度であり、この高効率モジュールを車載太陽電池として用いることにより、電気自動車における一日 30km 分の電力を発電することが可能となる。電気自動車に外部から給電する必要がない、自己

発電無給電型電気自動車の実現に貢献すると考えられる。

- 有機系太陽電池では、ペロブスカイト太陽電池のプロジェクトに資源を集中して研究開発が進められている。具体的には、NEDO プロジェクト『高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発』や、JST の ALCA、未来社会創造事業が挙げられる。一方、有機薄膜太陽電池のプロジェクトは大幅に減少してきている。ただ、高効率化に向けた成果が得られてきており、地道な研究開発が実を結び始めている。これらの分野に於いては、以前実施された JST さきがけ『太陽光と光電変換機能』領域の研究者がネットワークを形成し、我が国の基礎研究開発を牽引している。

(5) 科学技術的課題

短期～中期的な視点では、実用太陽電池の主流である結晶 Si 太陽電池において、変換効率を極限まで高める技術開発が必要である。またポスト PERC 型の高効率セル構造では、中国系企業に遅れを取らないように容易に追いつくことのできない技術の確立と早期の量産化を行うべきである。金属酸化物などの異種材料による接合形成や局所ドーピングを駆使することにより、半導体レーザや超高速トランジスタで用いられているような「バンドエンジニアリング」の概念を実用太陽電池でも具現化する必要がある。Si をボトムセルとするタンデムセルによる超高効率化には、Si と整合性に優れたバンドギャップ 1.5 ~ 1.7eV 程度の半導体材料の開発が必要である。金属と Si 化合物であるシリサイド半導体、シリコンをベースとするナノ構造、ペロブスカイトなどがその候補として挙げられる。

長期的な視点では、自立的に太陽電池の普及し始める頃には、現在の理論限界効率を突破するような、飛躍的な変換効率の向上が可能な新概念太陽電池が必要となる。ナノワイヤや量子ドットなどの量子構造を用いた太陽電池はその一つの候補である。これらの新概念太陽電池は現在の太陽電池よりも非常に高い限界効率を有するものの、その多くは未だ基礎研究の段階である。

また、真の再生可能エネルギー源として普及させるには、単に太陽電池単体の開発だけでは不十分であり、システム技術の開発が不可欠である。例えば、太陽電池による発電量が大きくなると電力システムによる連系許容限界に近づいてくる。電力システムとの統合においては、メガソーラ、住宅用ともにビッグデータを活用した発電量予測技術の高精度化とリアルタイム発電量把握技術の確立、および蓄電池やエネルギーマネージメントを最大限利用したピーク抑制と需給バランス確保への貢献に加え、より短時間での変動や急激な出力の立ち上がり（立ち下がり）に対する系統安定化への貢献が期待される。加えて、世界的な導入量拡大が始まってから既に 10 数年が経過し、発電性能を維持するための維持管理技術、不具合等を屋外において検出する点検技術、設備更新や廃棄時のリサイクル技術等の重要性が高まっている。日本でも固定価格買取制度導入から 20 年経過移行、全量買取りの対象であった多くの発電システムから、大量の太陽電池モジュールが排出されることが予想されている。設備を更新し、長期的に主力電源として太陽光発電を利用していくためにも、これらのモジュールの適切なリサイクル技術の開発が不可欠である。

CIGS 太陽電池については、日本の企業（1 社）が世界一の製造技術を有するとともに変換効率の面でも世界トップレベルを維持している。この技術的優位性を維持するためにも、産官学の連携が必須である。特に CIGS 太陽電池では光吸収層の準安定性による欠陥密度評価の難

し、5元素以上にも及ぶ多元系化合物半導体の電子構造評価の難しさを克服するためにも官学による評価・分析面に関する学術面のサポートが必要である。

超高効率 III-V 化合物太陽電池については、その圧倒的な高効率が魅力である。そのため、さらなる高効率化とともに、その高効率を活かした新規用途開発が必要である。搭載可能面積の限られた車載太陽電池やモバイル型太陽電池は今後急速に発展すると考えられ、それらの新規用途をめざした研究開発が課題となる。また、III-V 化合物太陽電池を用いた集光型太陽電池は高日照地域で特に高パフォーマンスを示す。集光型太陽電池の効率や実環境下での発電特性、さらには耐久性を向上させることにより、高日照地域で太陽発電由来の水素やメタンを生成することが可能となり、これまでの化石燃料に頼るエネルギー供給の在り方を変える開発課題となる。

有機薄膜太陽電池については、非フラーレン・アクセプターに代表される新材料の開発、三元ブレンドなどの新素子構造の提案により、着実な変換効率の向上が見られ、15%に迫る勢いである。特に、非フラーレン・アクセプターに代表される新規材料の開発では中国の勢いが目覚ましく、国家重点としての取り組みが成果を挙げている。また、米国・欧州でも継続的に研究開発が実施されている。これに対して、最近の我が国に於ける有機薄膜太陽電池への研究支援は大きく減少してきており、十分とは言えない。そのため、日本の国際競争力を維持するためには、長期的視点に立った研究支援を継続的に行うべきである。実用化に向けた技術開発も吃緊の課題であるが、民間企業にとって投資リスクが大きいため、自立的な市場参入・拡大はあまり期待できない。そのため、国が主導的な役割を果たし、資金・人材面での支援を行い、技術開発の推進を後押しすることが必要である。

ペロブスカイト太陽電池は、研究開発が始まったばかりであり、上市に向けてはさらなる高効率化、高耐久化、低毒性化等の多くの課題をクリアする必要がある。そのため、国が主導した新材料開発、発電機構解明、劣化機構解明等の基礎研究を強力に推進するとともに、産官学連携による技術開発を効果的に進めていく必要がある。

(6) その他の課題

太陽電池の研究開発を進めていく上では、基礎研究段階からプロジェクト形式で産学連携を実施することが重要である。研究内容が多岐に亘るため、単独の企業が独自に取り組むと研究投資に対する費用対効果が悪くなる。エネルギー分野では基礎は「学」、実用化は「産」という役割分担は効率的ではなく、双方の融合が必須である。政府主導で実用化研究を進めるためのプロジェクト研究拠点を構築し、共同研究（研究開発部分）と役割分担（市場化部分）を適切に進めながら、ファンディングを充実させた上で、そこに産学の研究人材を投入することも有効と考えられる。また、中長期の集中研究拠点を核とし国際的な人材獲得も視野に入れた革新的な基礎研究の強化と、その成果の迅速な応用展開に向けたネットワーク連携が重要な鍵となる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<p>個別の企業が次世代技術の基礎研究開発を実施することが、太陽電池産業が新興国との激しい価格競争にあることから困難となる中、公的支援に基づく共通基盤技術の開発、オープンイノベーションプラットフォームの構築が着実に進められている。NEDO プロジェクトを受託した6大学コンソーシアム、産総研、JAISTと企業群が緊密な連携の下で、先端技術を複合した高性能太陽電池や、Siの理論限界を超える技術についての研究が実施されている。コンソーシアムの成果として、結晶Si太陽電池では変換効率25%超のセルが実現され、薄膜Si太陽電池においては、産総研と国内企業の連携により世界最高効率13.6%が達成された。</p> <p>集光型太陽電池・化合物太陽電池の研究水準は、世界トップレベルにあるが、欧米との開発競争が激化している。ナノワイヤ・量子ドットなどの新概念太陽電池を対象とするプロジェクトが、JSTやNEDOの事業として行われている。</p> <p>有機系太陽電池においては、有機薄膜型の研究が一時期加速し、大学のみならず、三菱化学や住友化学、東レといった企業においても材料開発の基礎力を活かし、世界最高レベルの変換効率10%を達成するなど同分野を牽引していた。新しい流れとして、有機系太陽電池を人工光合成の一種として捉えた国のプロジェクトもスタートしている。一方で、ペロブスカイト太陽電池へのプロジェクトの集中により、有機薄膜型ならびに色素増感型の研究は、一時期の勢いを失いつつある。</p> <p>ペロブスカイト太陽電池は日本発の革新的太陽電池にもかかわらず、研究開発に於いては世界の後塵を拝する結果となっている。ただ、JSTやNEDOのプロジェクトを始めとした国の主導的な取り組みが始まっており、今後の成果が期待される。特に、従来に無い全く新たな試みとしては、分野横断的なさきがけ横断プロジェクトが挙げられる。</p>
	応用研究・開発	◎	↑	<p>結晶Si系の技術開発は、原料技術からモジュールに至る各要素技術、実用サイズでの効率記録などの高性能化技術において世界トップレベルにある。特に、パナソニック社が世界最高効率25.6%を報告し、15年ぶりに実用サイズのセルで更新し、さらにその記録をカネカ社が更新することで、その技術力の高さが改めて世界に示された。SHARP社は、変換効率25.1%を量産プロセスと整合性のあるプロセスにより達成している。</p> <p>有機系太陽電池の応用では、色素増感型が先行して各企業が発売に向けたセル開発を行っていた。また、有機薄膜型も室内用途などが検討されたが、十分な特性が得られず、現在はペロブスカイト太陽電池への研究開発へ各社が集結することとなった。車載用途では、有機薄膜型もペロブスカイトとともに軽量性を活かして応用が期待されているが、本格研究には至っていない。ペロブスカイト太陽電池は欧米に続き、我が国でもベンチャー企業が創設されはじめています。</p>

米国	基礎研究	○	↑	NREL, MIT, アリゾナ州立大学などで、結晶 Si の欠陥および不純物制御に関する実用太陽電池の高効率化を支援する基礎研究や、ペロブスカイトとのタンデム化など新規な取り組みが実施されている。IBM 社は、CZTS 太陽電池で構成材料の最適化により 12.6% の変換効率を報告している。First Solar 社は CdTe 太陽電池での技術革新が著しく、最近セル効率 20.4% を報告した。Dupont などの大企業も CZTS の研究を行っている。Uni-Solar 社は、小面積 3 層タンデムセルで初期変換効率 16.3% を達成しており、高い研究水準を有している。量子ドット型やプラズモン太陽電池など新しい技術への取り組みは大学を中心に活発化している。有機系太陽電池では、産官学ともにペロブスカイト太陽電池への転換が進んだが、なおミシガン大学、南カリフォルニア大学などが中心となって基礎研究を牽引している。また、色素増感型の研究は非常に少ない。最後に、ペロブスカイト太陽電池に関しては多くの大学で研究されているが、プリンストン大学、カリフォルニア大学バークレー校がその先頭を走っている。
	応用研究・開発	○	↑	SunPower 社は、裏面接合型の高効率結晶 Si 太陽電池で、Panasonic 社のヘテロ接合型太陽電池と結晶 Si 系の実用太陽電池における最高効率を競っており 25.2% を達成した。Si 基板に関連する周辺産業でも技術開発力が高いベンチャー企業が多く、融液からの直接成長やエピタキシャル基板など新しいアイデアが生まれている。化合物系太陽電池では、多数のベンチャー企業が参入しており動向が注目される。モジュールの信頼性については NREL が米国内の議論をリードし、日欧などとの国際協力の下、さらなる長期信頼性の確保に向けて様々な試験方法や規格の提案が行われている。有機系太陽電池ベンチャーの草分けとして、高分子系では Solarmer、低分子系では Global Photonic Energy Corporation (GPEC) が活躍中である。Solarmer はカリフォルニア大学ロサンゼルス校、中国科学協会・化学研究所の研究成果、GPEC はプリンストン大学、ミシガン大学などの研究成果を活用している。
欧州	基礎研究	◎	→	結晶 Si 系の要素技術についての基礎研究は、非常に高い研究水準を維持している。独 Fraunhofer 研究所、Konstanz 大、ISFH、オランダ ECN、ベルギー IMEC、仏 INES、スイス CSEM、ノルウェー NTNU など、各国の研究機関が中核的研究機関として学界・産業界をリードしている。トンネルパッシベーションコンタクトや、キャリア選択性新材料を利用したヘテロ接合セルなど新規な取り組みで多くの成果が報告されている。有機薄膜太陽電池の研究者の参入も多くみられる。Si 系薄膜においては、スイス EPFL が世界の研究開発を牽引している。CIGS 太陽電池、CZTS 太陽電池ともに、効率自体は日米に及ばないものの、基礎物性からデバイス評価まで、学術的な研究にしっかり取り組んでおり、研究水準は着実に上がっている。有機系太陽電池においては、有機薄膜型の研究が依然として盛んであるが、EPFL (グレッツェル研) に代表されるように、研究の中心をペロブスカイト太陽電池へ移行する動きも多くみられる。色素増感型ではなお、EPFL (グレッツェル研) が研究の中心である。また、有機薄膜型では Imperial College やケンブリッジ大学が基礎研究を牽引している。ペロブスカイト太陽電池では固体化セルを開発したオックスフォード大学、色素増感型太陽電池のメッカである EPFL (グレッツェル研) が世界の研究開発の中心となっている。
	応用研究・開発	◎	→	市場拡大を背景にベンチャー企業が多く設立され、製品化を目指している。企業での開発の中心は、生産技術であり、研究機関との研究コンソーシアム体制が有効に機能している。装置メーカーによるターンキー製造装置の高度化も進んでおり、Roth&Rau 社は PERC セルやヘテロ接合セルなど多様なセル構造に対するラインを提供している。ヘテロ接合セルは 24% 以上が可能としている。また、利用技術の開発や標準化、規格化では幅広い検討が行われている。また、利用技術の開発や標準化、規格化では幅広い検討が行われている。薄膜 Si ではエリコンソーラー社により、小面積 a-Si セルの安定化効率 10% 超が初めて達成されるなど、高い技術開発水準を有している。有機薄膜型では、Heliatek が 13% 以上の変換効率を達成している。集光型太陽電池・化合物太陽電池においても、高い技術開発水準を有している。研究機関の開発成果が人とともに移動して企業の技術開発を支えている。研究機関で企業の研究的な研究を展開しているので実用化は早い。

中国	基礎研究	○	↗	結晶系 Si 太陽電池は、産業として急速な発展を遂げており、国家計画の下で、公的研究機関・大学が研究開発を推進している。研究員は、先進国への留学生が戻って活躍するケースや半導体分野からの転身が多い。現時点では、海外の研究機関等の追跡研究が主体であり、独創的な研究は限定的であるが、研究水準は上昇傾向にある。薄膜 Si では 4 接合タンデムにて 15% に迫る変換効率を実現している。化合物太陽電池など、その他の太陽電池においても研究活動は見られるが、まだ研究水準は高くない。有機系太陽電池やペロブスカイト太陽電池においても留学時に培った人脈を活かし、国際共同で基礎研究を推進。潤沢な研究資金で猛烈な進歩を遂げている。特に、有機薄膜型では非フラーレンアクセプターの開発に重点を置き、15% に迫る変換効率を実現している。
	応用研究・開発	◎	↗	企業は国外の大学や研究機関、製造装置メーカー等と連携して先端技術を導入・活用することで、高性能太陽電池の実現や、低コスト化などへの取り組みをみせている。企業間での技術情報に関する障壁が低いため、導入された先端技術が、国内全体へ拡散する速度は非常に早い。Trina Solar 社は多結晶の PERC セルで 21.3% を達成したことを報告している。Jinko Solar 社は p 型単結晶セルで 23.95% を報告している。ヘテロ接合太陽電池でも GW スケールの製造ラインの建設が計画されている。有機系太陽電池においては、中国、台湾ともに多くのベンチャー企業が創立されている。
韓国	基礎研究	○	↗	韓国政府は、半導体や液晶分野に続く産業として、太陽光発電産業として育成しようと研究開発を支援している。研究開発は、現実的な技術を中心として、結晶シリコン系のシステム開発に多くの予算を投入している。セルとモジュールの研究開発は、ペロブスカイト太陽電池など次世代技術に集中している。ペロブスカイト太陽電池の研究開発では世界のトップレベルを走っており、KRICT が世界最高変換効率 22.7% (米国 NREL 認証) を達成している。
	応用研究・開発	○	↗	韓国政府による Renewable Energy 2030 戦略では、2030 年まで国内エネルギーの 20% を再生可能エネルギーで賄うことを目標としており、その中で太陽光発電は 60% を占有する予定である。Hanwha Q Cells 社は結晶シリコンセルとモジュールの国内生産量の大幅な拡大をしている一方、LG 電子と Hyundai は、生産ラインの増加投資を中断し、事業戦略を立て直している。セルと module の生産技術は世界レベルであり、R&D 水準は着実に上昇傾向にある。

(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範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：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) 各種太陽電池の最高効率

M. Green et al., "Solar cell efficiency tables (ver.52)," *Progress in Photovoltaics* 26 (2018): 427. doi:10.1002/pip.3040

・ヘテロ接合太陽電池の 25% 超

K. Masuko et al., "Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell," *IEEE J. Photovoltaics* 4 (2014) : 1433. doi:10.1109/JPHOTOV.2014.2352151

・裏面電極ヘテロ接合太陽電池の 26% 超

K. Yoshikawa et al., "Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts

for a photoconversion efficiency over 26%,” *Nature Energy* 2 (2017) . doi:10.1038/nenergy.2017.32

・裏面電極ヘテロ接合太陽電池 25.1% の量産技術

7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, USA, 10-15 June, 2018.

・シリコンインゴット中の結晶欠陥の3次元可視化技術

Y. Hayama et al., *Solar Energy Mat. and Solar Cells* 189 (2019) : 239.

・シリサイド半導体の太陽電池応用

D. Tsukahara et al., “p-BaSi₂/n-Si heterojunction solar cells with conversion efficiency reaching 9.0%,” *Appl. Phys. Lett.* 108 (2016) . doi:10.1063/1.4945725

・ペロブスカイト シリコンタンデム

J. P. Mailoa et al., “A 2-terminal perovskite/silicon multijunction solar cell enabled by a silicon tunnel junction,” *Appl. Phys. Lett.* 106 (2015) . doi:10.1063/1.4914179

2) 14% を超える非フラーレン高分子太陽電池

S. Zhang et al., “Over 14% Efficiency in Polymer Solar Cells Enabled by a Chlorinated Polymer Donor,” *Adv. Mater.* 30 (2018) . doi:10.1002/adma.201800868

3) 14% を超えるタンデム非フラーレン高分子太陽電池

Y. Zhang et al., “Thermally Induced Bending of ReS₂ Nanowalls,” *Adv. Mater.* 30 (2018) . doi:10.1002/adma.201704585

4) 14% を超える三元ブレンド非フラーレン高分子太陽電池

H. Li et al., “Thermostable single-junction organic solar cells with a power conversion efficiency of 14.62%,” *Sci. Bull.* 63 (2018) : 340. doi:10.1016/j.scib.2018.02.015

5) 光損失エネルギーの小さな高分子太陽電池

K. Kawashima et al., “High-efficiency polymer solar cells with small photon energy loss,” *Nat. Commun.* 6 (2015) . doi:10.1038/ncomms10085

6) 14% を超える色素増感太陽電池

K. Kakiage et al., “Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes,” *Chem. Commun.* 51 (2015) : 15894. doi:10.1039/C5CC06759F

2.1.2 蓄電デバイス

(1) 研究開発領域の定義

電気エネルギーを必要なときに蓄え、必要なときに取り出すデバイス・システムにおいて、大容量、高出力、高エネルギー密度などを目指す研究開発領域である。蓄電デバイスとしては物理現象を利用したもの（フライホイール電力貯蔵、超伝導電力貯蔵など）と化学反応を利用したものがあり、また用途として自動車・輸送機器用（大型×移動型）、スマートグリッド・EMS用（大型×定置型）、ユビキタス・モバイル機器用（小型×移動型）などがあるが、ここでは今後重要になる再生可能エネルギー利用や電気自動車普及に関係の深い大型用途で化学反応を利用した蓄電デバイス（蓄電池、スーパーキャパシタ）を中心に取り上げる。

(2) キーワード

二次電池、蓄電池、リチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池、金属空気電池、リチウム空気電池、全固体電池、リチウム硫黄電池、多価イオン電池、多価カチオン電池、NAS電池、レドックスフロー電池、スーパーキャパシタ、リチウムイオンキャパシタ、エネルギー密度、出力密度、安全性

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ノートパソコンや携帯電話、スマートフォンなどのエレクトロニクス機器において、小型の蓄電池やスーパーキャパシタは、すでに広く使われている。一方、環境保全・地球温暖化対策としての電気自動車の普及に向けた動きが活発化しており、大型で移動型の蓄電池の市場が急速に拡大し、高信頼性、高耐久性、高入出力特性などの要求に対応するための技術開発競争が世界で激化している。また、太陽光や風力など気象により変動する再生可能エネルギーの最大限の活用に向け、気象変動の吸収緩和、安定な出力制御、あるいは需要側での需要変動緩和やピークシフトの目的から、大容量・大型で定置用の蓄電デバイスのニーズも顕在化してきている。このような大型の蓄電デバイスに要求される機能や性能は小型・携帯用（移動型）のものとは異なってくるため、その用途に合った研究開発が必要である。

本領域では、近年関心が高まってきている電気自動車やスマートグリッド・EMS用途などに向けた移動型および定置型で大型の蓄電デバイスを中心に取り上げる。大型の蓄電デバイスとしては、蓄電池やスーパーキャパシタのような化学反応を利用したものと、フライホイール電力貯蔵や超伝導電力貯蔵のような物理現象を利用したものがあがるが、ここでは車や家庭での蓄電にも使える程度の扱いやすさや大きさを考慮して、化学反応を利用した蓄電デバイスに絞る。具体的には、小型・移動型ですでに使われているリチウムイオン電池、次世代の革新電池（全固体電池、金属空気電池、リチウム硫黄電池、多価カチオン電池）、大型・定置用に特化した電池（レドックスフロー電池、NAS電池）、急速充放電可能なスーパーキャパシタについて記載する。

[研究開発の動向]

・リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は実用レベルで最もエネルギー密度の高い電池であり、世界中で研究が

行われ、高性能化が重点的に進められている。この電池は1990年頃に携帯機器用の蓄電池として開発され、その後、電池の製造技術の進展に伴って、エネルギー密度が当初の約3倍の約200 Wh/kgに達した。また、リチウムイオン電池を大型化し定置用や電気自動車用への展開が進められてきた。大型リチウムイオン電池のエネルギー密度は、携帯機器用の電池と比較するとまだ半分強程度であるが、今後、向上が進むと考えられる。なお、携帯機器用の小型リチウムイオン電池も、ドローンなどの新しい応用のためにエネルギー密度の向上が求められている。

リチウムイオン電池の開発項目としては、①高エネルギー密度、②高入出力密度、③高い安全性、④長いサイクル寿命、⑤広い温度域での安定動作、があり、新しい材料および部材の研究が進められている。

エネルギー密度の向上は、高容量の正極および負極を使用する方法と、電極として活物質の密度を上げて実用量を増加させる手法がある。電気自動車用の負極材料ではSiあるいはSiを担持した炭素などが活発に開発されている。正極材料はLiCoO₂からLiNi_{0.5}Mn_{0.2}Co_{0.3}O₂などのNi系にシフトが進んでいる。その他の部材に関しても可能な限り薄くするなどの試みがなされている。定置用の大型リチウムイオン電池では、負極材料は携帯機器用のリチウムイオン電池と同じであるが、正極材料としては酸化物正極より安定で安全性が高いことからLiFePO₄が用いられてきた。しかし、LiFePO₄は放電電圧が3.4 V vs. Li/Li⁺であり酸化物正極よりも低いため、4.0 Vで放電できるLiMnPO₄に関する研究が行われている。電極構造は可能な限り密度を高くし、集電体も可能な限り薄くすることが試みられている。

出力に関して、電動車両の電池は携帯機器よりも大きな出力が必要である。特に、ハイブリッド自動車の場合、搭載する蓄電池の容量が小さいことから、要求される電池あたりの出力が非常に大きくなり、高出力電池としての設計が必要になる。一方、プラグインハイブリッド車や電気自動車では搭載する蓄電池の容量が大きいため、ハイブリッド自動車の電池ほどには大きな出力は求められない。しかし、急速充電を重視し、充電時間を数分レベルまで短縮しようとする場合には高入力密度が必要となり、ハイブリッド車に搭載される高出力電池と同様の設計が求められる。

安全性と寿命は、大型電池の場合には安全性が損なわれると重篤な事故につながるため、携帯機器の電池以上に重要であり、より安全な電池の設計が必要となる。例えば、ポリオレフィン系のセパレータでは安全性を担保できないため、アルミナをコートすることや、正極に酸化物のみを使用しないでリン酸塩系材料と組み合わせること（リン酸塩を30%程度複合）で安全性を強化している。電気自動車の場合には、エネルギー密度が重要であるためLiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O₂やLiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂などの正極の開発も進められているが、安全性の確保が課題となっている。その他にも、LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄に代表される5V系の正極材料の検討も進められているが、この場合には電解液の酸化分解が問題になっている。また、サイクル寿命の向上も必要である。蓄電池の容量の劣化には、活物質そのものの劣化、電極の電子伝導性の劣化、イオン伝導性の劣化など多くの要因があり、電池ごとに特定しなければならない。蓄電池に要求される15年程度のサイクル寿命を達成するためには、少なくとも活物質そのものの劣化があってはならない。セルレベルでの寿命を支配する因子として、特にハイレートでの使用の場合における電流分布があり、より均一な電流分布のための電極およびセパレータ技術が求められる。

リチウムイオン電池のエネルギー密度は改善されているが、材料由来の理論的な限界があり、

300 ~ 400 Wh/ kg である。これ以上の向上はリチウムイオン電池系では不可能であるため、革新電池に関する研究が始まっている。革新電池系としては、以下に述べる全固体電池、リチウム金属電池、金属空気電池、リチウム硫黄電池、マグネシウム電池（多価カチオン電池）などが挙げられる。これらの電池は理論的にリチウムイオン電池に比較して数倍のエネルギー密度を有するものもあるが、実用電池の作製には、材料開発、部材開発を進める上で必要な電池設計の基礎的データがまだ不足している。

・全固体電池

全固体電池は、リチウムイオン電池の有機電解液を無機固体電解質に置き換えた電池である。可燃性の有機電解液を用いないため、過熱による変形や膨張、発火事故の心配がない電池として期待されている。無機固体電解質材料としては硫化物系と酸化物系に大別される。硫化物系固体電解質のリチウムイオン伝導度は有機電解液よりも高く、日本や韓国をはじめとして開発が活発である。次世代電池の中では最も先行して実用サイズの単セル作製が可能となっており、信頼性まで含めた評価が始まっている。しかし、現時点では、有機液系リチウムイオン電池と同じ正極活物質材料を用いているため、体積当たりのエネルギー密度で有機液系リチウムイオン電池を上回れるかどうかが課題である。また、硫化物系固体電解質は、水分と反応して硫化水素を発生するため、大量生産の作製プロセスと、電池使用中に損傷したとき水分が侵入して硫化水素が発生することへの対策が課題である。さらに、現在の有機電解液系と同じ正極活物質を用いる限り、高温時に正極活物質の分解が発熱反応となり、熱暴走への懸念は皆無ではないため、全固体電池に向けた正極活物質の開発も進められている。一方、酸化物系固体電解質は、化学的に極めて安定であること、硫化水素の発生がないこと、大気中での製造が可能であることから期待が高いが、リチウムイオン伝導度が硫化物より低いこと、活物質と電解質界面のイオン伝導度がきわめて低いことなど、解決すべき課題も多い。

・金属-空気電池

金属（リチウム、アルミニウム、亜鉛など）-空気電池は、正極活物質に大気中の酸素を用いるため、電池内部の活物質は負極活物質のみで良く、高エネルギー密度を期待できる。しかし、低いエネルギー変換効率、低い出力、金属負極の可逆性の問題がある。電解質に関する研究と正極に用いる炭素材料の工夫を中心に研究開発が行われ、成果も得られているが、実用するにはまだ時間がかかる。

・リチウム硫黄電池

リチウム硫黄電池は、高エネルギー密度が期待される電池である。リチウムイオン電池の容量は正極活物質の容量で主に制約されているが、ここに高容量の硫黄を用いることで高エネルギー密度となる。硫黄は有機電解液に溶け出して正極が壊れるという問題があるが、電解質としてイオン液体を用いることにより、最大の問題である多硫化リチウム中間体の溶解が抑制される。さらに、炭素の細孔構造を制御することで、溶解をより抑制することが可能になりつつある。しかし、正極の膨張・収縮と負極のリチウム金属のサイクル特性の改善が今後の課題として残る。なお、ドイツのフラウンホーファー研究機構では、電気自動車を念頭に置いて、この電池系に注力している。

・多価カチオン電池

多価カチオン電池は、1価のリチウムに対して多価の元素（例えばマグネシウム）を用いることで高エネルギー密度を狙う電池である。反応が複雑であること、劣化が早いなど解決すべき課題が多く、電解液や正極に適した材料の探索などの基礎研究が行われている。

・レドックスフロー電池

レドックスフロー電池は、1974年にNASAが基本原理を発表したことに端を発する。現行の主な形態は、正極および負極電解液にバナジウムイオンを含む硫酸水溶液を利用し、正極と負極との間に隔膜を介在させた電池セルに外部タンクから正極電解液および負極電解液をそれぞれ供給して充放電を行うようになっている。この外部タンクに入った電解液にエネルギーを貯蔵することが特徴である。日本では住友電工が主体となって開発している。すでに大型定置用の実証評価として、経済産業省が北海道電力南早来変電所にレドックスフロー電池（出力15MW／容量60MWh）を、東北電力西仙台変電所にリチウムイオン電池（40MW／20MWh、東芝）を2014年度末までに配備し、その後3年間で系統安定化の実証試験を実施している。この電池の主な特徴としては、高い耐久性、発火に対する安全性が高いことが挙げられる。一方で、エネルギー密度が低く、電解液の循環のためにポンプが必要で、大型化せざるを得ないという問題がある。米国では、エネルギー省パシフィック・ノースウェスト国立研究所（PNNL）、中国では、中国科学院大連化学物理研究所が大型実証試験を進めている。

・NAS電池

NAS電池は、1966年に米フォード社が発表した電池である。正極に硫黄、負極にナトリウム、電解液に固体電解質のβアルミナを用いる。原材料が資源的に豊富で、量産によるコスト低減の見込みが高い。しかし、開発元の米国は信頼性の課題を解決できずに撤退した。これは、運転時に300℃程度に保持した硫黄と金属ナトリウムを活物質として用いる点が、長期の火災安全性担保の観点から問題になったことによる。現在は世界で唯一、日本ガイシだけが量産を行っている。環境省では、再生可能エネルギーの拡大のために、蓄電池（リチウムイオン、NASなど）を用いた太陽光や風力発電の変動を吸収する実証事業を、東北や九州の離島など全国8地域で、2014年度から4年間で実施している。

・スーパーキャパシタ

スーパーキャパシタは、電気二重層キャパシタ（EDLC）およびリチウムイオンキャパシタが主に研究、実用化されている。EDLCの応用は限定的であるが、充放電サイクル耐久性が特に大きいこと、使用温度範囲が広いこと、充放電が高速であること、などの特徴を生かした用途開発が始まっている。日本国内では1970年代後半に製品化され、1990年代に各種家電に採用が始まり、2000年代以降には携帯電話やデジタルカメラにもメモリーバックアップ用などとして使われるようになった。しかし、このような用途には大容量な超小型固体二次電池の採用例が出てきており、スーパーキャパシタにも容量などの性能向上が求められている。

一方、大型用途としては、高出力特性を生かして、半導体工場で電源の瞬間停電対策に用いられている。また、容量を現状の数Wh/kgから数倍～十倍程度高めると、自動車のエンジン始動用など用途が広がるとの期待があり、キャパシタ反応を界面でのイオン吸着ではなく、リ

チウムイオン電池に類似した電気化学反応を導入する検討が行われている。リチウムイオンキャパシタもその一つである。最近では正極活物質の究極的なナノ化により、高容量のキャパシタの研究も進展している。

現在、1000～2000 F (定格電圧 3.8V)、10 Wh/kg (20 Wh/L) の実用セルが製品化されている。日本では、JM エナジー (JSR グループ) がリチウムイオンキャパシタ、日本ケミコン、日立化成などが EDLC を販売中である。2011 年にマツダが乗用車用として世界で初めて、EDLC を採用した減速エネルギー回生システム i-ELOOP を実用化した。中国では、中国南車株洲電力汽車有限公司により、電気バスへの応用が試みられている。これは、繰り返し寿命が 100 万回程度と長く、充電が高速なのでバス停毎に充電できる特徴を活かしている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

・リチウムイオン電池

負極に関して、理論容量が現行の炭素負極の 10 倍である Si 系の研究が多い。リチウム金属に関する研究も、デンドライト析出抑制に向けた研究が進んでいる。電解液では、濃厚電解液の研究が行われている。濃厚な電解液のため、電池製造プロセスに課題があるが、電解液の塩濃度を高くしてフリーな溶媒を減少させることで、Li 金属の溶解・析出の可逆性が向上し、また、火災安全性も向上する結果が得られている。セパレータでは、リチウムのデンドライトを貫通させない 3DOM セパレータの開発が行われている。リチウム金属を使用しても短絡することではなく、リチウム金属の可逆性を向上させることができる。正極に関しては、5V 級スピネル $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 系による高電圧化、ニッケル含有量を高めたリチウムニッケルマンガンコバルト酸化物 ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, Ni: Co: Mn= 5:2:3, 6:2:2, 8:1:1, 200～230 mAh/g)、あるいはリチウム過剰固溶体系 ($\text{Li}_2\text{MnO}_3\text{-LiMO}_2$, 250～300 mAh/g) などによる高容量化が進められている。これらの材料が実用レベルに到達した場合、リチウムイオン二次電池の理論的限界と考えられている 300 Wh/kg に近いエネルギー密度が達成できる。

・全固体電池

固体電解質分野では有機電解液を凌駕するイオン伝導性が実現されており、固体電池の開発に大きな影響を与えている。固体電解質を前提とする場合は、正極に接する電解質に高電位に強い電解質、負極側に低電位に強い電解質を配置することができる。単一の電解質で広い電位範囲の電気分解耐性を持たなくても良い。これを利用すると、有機電解液では使うことの出来なかった高電位正極活物質を用いる可能性が拓け、電池のエネルギー密度が大きくなる。これにより、 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ や $\text{Li}_2\text{CoP}_2\text{O}_7$ などの現状の有機電解液では使用できない高電位動作の正極活物質開発が進んでいる。

・リチウム-硫黄電池

硫黄の還元生成物の溶解を抑制可能な溶媒和イオン液体を用いた取組みが行われており、数百回程度の充放電が可能になっている。

・レドックスフロー電池

バナジウムを含む強酸電解液から有機電解質を含む水溶液にして低コスト化を目指す研究などが行われている。アメリカ DOE パシフィック・ノースウェスト国立研究所が研究中の新しい電解液は、陽極液としてメチルピオローゲン、陰極液として 4-ヒドロキシ-2,2,6,6-テトラメチルピペリジン 1-オキシルを使用し、コストを 60%削減できるとしている。国内でも中性の電解液の研究例があり、長期の信頼性向上が期待される。

・NAS 電池

2018 年 11 月にドイツにおいて、NEDO、日立化成、日立パワーソリューションズ、日本ガイシによる実証試験が始まった。日立化成の 2.5 MWh のリチウムイオン電池と日本ガイシの 20 MWh の NAS 電池を組み合わせたハイブリッド蓄電システムであり、再生可能エネルギー導入による系統安定化の課題に対する有効性を検証する。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

アメリカでは DOE のプロジェクトが引き続き継続されている。科学局 (SC) Basic Energy Sciences (BES) のプログラムである Energy Innovation Hub では、次世代蓄電池 (車載用/定置用) の研究拠点として、Argonne 国立研究所を中心とする Joint Center for Energy Storage Research が 2012 年に発足し、非常に広範な電池系について検討している。少なくともリチウム金属の使用と全固体電池に関しては重要な研究課題となっている。5 年間で予算は 1 億 2 千万ドル、5 倍のエネルギー密度 (400 Wh/kg)、1/5 のコスト実現 (100 ドル/Wh) が目標とされ、現在までに数多くの研究成果が発表されている。また、2018 年 4 月に、DOE は超急速充電を可能にするための 1900 万ドルの支援プログラムを開始した。急速充電できる電気自動車システムの開発に焦点を当て、バッテリーパックのコストをキロワット時当たり 100 ドル以下にし、航続距離を 300 マイル以上にする、2028 年までに 15 分以内の充電を可能にすることを目的としている。MIT と DOE による Materials Project では、インフォマティクスやデータ科学をこれまでの物質・材料科学に融合させることにより、新物質・材料科学研究を加速する取組みが進行中である。

欧州では、欧州バッテリー同盟 (EBA) が 2017 年 10 月に設立され、電気自動車 (EV) 用電池など、EU 域内産業の競争力強化を目指しており、EU 域内企業による EV 用電池の生産プロジェクトが相次いで立ち上げられている。電池開発では、欧州連合の Horizon 2020 研究およびイノベーションプログラムから 790 万ユーロの資金を調達して、安全で軽量、高エネルギーな自動車用 LiS 電池のプロジェクト “LISA” が始まった。Varta Micro Battery、Renault、Fraunhofer、TU Dresden、Oxis Energy などがパートナーとして参加している。ここでは 20 Ah レベルの自動車搭載サイズのセルで、非可燃性のハイブリッド固体電解質も開発する予定である。これらの技術は既存のリチウムイオン電池にも応用可能としている。重要な点は、電池の特性向上だけではなく、生産プロセス開発、生産工場立ち上げまでをスコープに入れたプロジェクトになっていることである。

中国では「国家ハイテク研究発展計画」(863 計画)により車載用蓄電池の研究がなされている。2020 年の開発目標は、単電池でエネルギー密度 300 Wh/kg、サイクル寿命 3000 回、コスト 1 元/Wh (約 1 万 6 千円/kWh) である。また、「中国国家重点基礎研究発展計画」(973 計画)においては、300 Wh/kg 以上のエネルギー密度を目標とした革新型蓄電池の基礎研究

が行われている。ここでは $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ に関する研究と $\text{LiMn}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}\text{PO}_4$ に対するファンディングが増えている。

韓国では、KIET（韓国産業技術評価管理院）が素材部品技術開発事業を行っている。電池生産は産業として強いが、素材が弱いために強化を目指している。韓国経済研究院は2019年1月に発表した報告書「電気自動車時代、バッテリー産業競争力強化のための政策課題」で、次世代技術の開発と制度的支援の拡大が必要であると指摘しており、電池開発の強化が予想される。現在、リチウムイオン電池への補助から革新電池への補助に切り替わりつつある。リチウム金属負極を中心に固体電池を含めた研究に国からの補助がなされている。

日本では、以下の大きな2つの動きが継続中である。NEDO・RISING（革新型電池先端科学基礎研究事業）において、京都大学に中核的研究拠点を置き、大学・独法・企業の産官学連携による基礎から応用に至るまでの革新電池開発プロジェクトが進行中である。SPRING-8、J-PARCなどの最先端大型研究施設の共同利用などを行いながら、基礎研究と革新型蓄電池のイノベーションに向けてオールジャパン体制で進めている。2016年度より引き続き第2期（RISING II）が進行中で、硫化物系全固体リチウムイオン電池の基本アーキテクチャー開発を中心として進めている。また、JSTのALCA-SPRING（先端的低炭素化技術開発一次世代蓄電池特別重点技術領域）でも物質・材料研究機構（NIMS）に研究インフラである蓄電池基盤プラットフォームを設置し、全国42機関、82研究室が4つのチームに所属し、大規模な組織的研究開発を実施している。ALCA-SPRINGは、2018年7月に成果の一部を上述のRISING IIへ移管するなど実質的連携を進めている。

（5）科学技術的課題

・リチウムイオン電池

負極については、高エネルギー密度であるSi系の研究が進んでいるが、Siは導電性が低いこと、充放電に対する体積変化が大きいことが問題となっている。導電性を高めるために導電助剤が大量添加されるが、それによって電極としてのエネルギー密度が低下し、現行の炭素負極に対する優位性は小さくなっている。バインダーの改良による体積変化の影響抑制も重要である。また、エネルギー密度を高めるために正極電位を高めていくと、電解液の分解により耐久性が落ちてしまい、これは、電池の火災安全性にも関係する問題となる。今後、大型機器にリチウムイオン電池が展開されていくと、火災安全性を担保するための負極の安定性、電解液の分解抑制、正極の安定性、正負極を隔てるセパレータの改善、安定動作温度範囲の拡大など、電池各所にそれぞれ解決すべき課題がある。また、製造プロセスの安定性維持（異物混入など）も重要である。携帯機器は単セル使用が多いが、電気自動車などの大型機器は多数を直列接続するので、電池個々のばらつきを小さくすることが求められ、製造管理も課題である。

・全固体電池

電池内部がすべて固体で流動性がなく、かつ充放電に伴い電極活物質の体積変化が生じることから、活物質と電解質界面を安定に維持することが課題となっている。酸化物系では、接触抵抗が高く、電極、電解質作製の低温プロセス化技術の開発が実用化の鍵である。また、電極活物質と固体電解質との界面におけるリチウムイオンの移動度が極端に低下して抵抗が高くなり、出力特性が低下するという問題も大きい。全固体電池は有機電解液系リチウムイオン電池

とは原料および製造方法が異なるため、素材、電池とも生産装置や設備等を含めた新たな製造プロセスの開発も求められる。

・金属-空気電池

充電時の過電圧が高いために充放電効率が低いこと、副反応による劣化や大電流を流すことが困難なこと、大気から酸素を取り込む時に同時に取り込まれる水分や二酸化炭素による劣化など、重要な基礎的課題が残されている。また、金属負極のサイクル性や利用率の向上も大きな課題である。電極材料や電解質の開発を含めた基礎研究の強化と、セル化・スタック化（システム化）に向けた広範な技術開発が求められている。

・リチウム-硫黄電池

正極活物質である硫黄電極の充放電に伴う体積変化や、硫黄の放電時に生成する多硫化リチウムの有機電解液への溶解を抑制する手法の開発が求められている。また、硫黄は導電性が低いため大量の導電助剤を用いる必要があり、それに伴う正極のエネルギー密度低下や、エネルギー密度を高めるための正極厚膜化による性能低下も解決すべき課題となっている。

・多価カチオン電池

マグネシウム金属は高い還元性を示し、電解質と反応して表面にイオン伝導性、電子伝導性を持たない不動態被膜を形成するため、反応性の小さい電解質溶液を用いる必要がある。しかし、そのような電解質溶液は比較的低い電位で酸化されるため、正極との適切な組み合わせが難しい。マグネシウムイオンが可逆的に挿入脱離可能で、3 V 以上の電圧を与える正極材料の開発が必要である。

・レドックスフロー電池

定置用途では、低コスト化とセル抵抗の低減が課題である。20 年以上と長寿命である点を考慮しても、電解液や隔壁材料が高価であり、リチウムイオン電池の数倍の Wh 単価である。現在のバナジウム溶液に対し、アントラキノンなど有機レドックス材料を用いる試みが始まっている。セル抵抗低減など将来の特性向上に向けては、様々な反応系に対して、高い反応活性と電極の耐久性、高イオン濃度と電解液の粘性低減、などのフロー電池デバイスとして動作させるときにトレードオフとなる材料特性をいかに両立させるかが課題となる。

・NAS 電池

300 °C に封止されたナトリウムと硫黄を用いる電池であるため、電池缶の封止が安定であることの長期実証が課題である。

・スーパーキャパシタ

材料面では体積エネルギー・出力密度の向上に向けた高密度炭素材料や酸化物の開発が求められている。活性炭電極はかさ密度が低く、表面利用率が低いことや無駄な細孔があることが問題であり、精密に細孔構造を制御した高比表面積な低価格材料の開発が求められている。レドックスキャパシタ材料も同様であり、表面あるいは表面近傍でのレドックスを最大限有効活

用したナノ粒子やナノシート材料及びそれらを利用した高密度多孔質電極の材料開発がキャパシタンスの増大に向けた課題である。高電圧化に向けては、デバイスレベルでのハイブリッド構成を考慮することが必須であり、高容量キャパシタ電極だけでなく、高速反応かつサイクル性を各段に向上させた電池電極（リチウムイオン二次電池技術の転用や応用など）、ならびに耐電圧が高い電解液も必要となる。

(6) その他の課題

次世代電池の全固体電池の研究は産学官連携して進められているが、材料や作製プロセスは現行の有機電解液系リチウムイオン電池と大きく異なるため生産設備など従来と互換性のない部分が多く、新たな投資競争になる点への対応が課題である。また、日本では自動車用の蓄電池研究が主体であるため、リチウムイオン電池や全固体電池が主要な研究開発対象となっているが、欧米や中国では大型定置用に最適化したリチウムイオン電池以外の電池の研究が行われている。小型から超大型まで一つの電池系でやりきれんかどうかの判断が必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	ALCA-SPRING、Rising II、などいくつかの電池に関するプロジェクトが積極的に連携しつつ進められている。特に全固体電池で、積極的な取り組みが見受けられる。
	応用研究・開発	○	→	応用研究はアカデミアでの活動は少ないが、電池メーカー、自動車メーカー、材料メーカーで行われており、現状では世界のトップレベルにある。
米国	基礎研究	○	→	DOE が基礎的な研究に研究費を投入しており、マテリアルゲノムとの連携による新しい成果も出ている。数多くの電池を同時並行しているが、突出した強みのある分野がない。
	応用研究・開発	△	→	エネルギー省パシフィック・ノースウェスト国立研究所 (PNNL) が電気自動車を念頭に置いた強化策として、急速充電をターゲットにファンディングを新たに開始している。
欧州	基礎研究	○	→	リチウムイオン電池の基礎研究と革新電池の基礎研究をバランスよく実施している。ドイツのハイテク戦略 2025 では、自動車電動化を念頭に電池強化が挙げられている。ドイツ連邦教育研究省が 1,600 万ユーロ規模での全固体電池研究への助成を 2018.11 に発表した。BASF、ソルベイなどの参入により基礎研究が進展している。
	応用研究・開発	○	↑	ドイツハイテク戦略 2025 では、電池の製造プロセス開発、欧州域内での生産が挙げられている。新しいリチウムイオン電池のメーカーが生産の準備を始めるなど、応用面での展開が著しい。
中国	基礎研究	△	↑	中国科学院は長寿命、北京大学は高エネルギー密度に注力している。革新電池研究は 5 年間 60 億円の規模で進行中であり、今後の実力向上が予想される。
	応用研究・開発	◎	↑	第 13 次 5 ヶ年計画／国家重点研究開発計画／新エネ車試行特別プロジェクト (2016) などで強化している。生産に関しては世界有数の企業が存在、応用・開発も進展している。電気自動車のための応用・開発が活発に行われており、素材産業も育成中である。
韓国	基礎研究	◎	↑	リチウムイオン電池に関する研究は基礎から応用まで幅広く実施されている。革新電池系はサムスン SDI が全固体電池に注力している。
	応用研究・開発	◎	↑	特に電池の生産技術者が多く、円筒型電池の低コスト生産力は世界有数となっている。韓国産業技術評価管理院は電池素材の国産化に注力し始めた。

(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範囲

- 応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲
(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。
◎：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) Yan Jin et al., "Challenges and Recent Progress in the Development of Si Anodes for Lithium-Ion Battery," *Advanced Energy Materials* 7, no. 23 (2017) . doi:10.1002/aenm.201700715
- 2) Sung-Kyun Jung et al., "Understanding the Degradation Mechanisms of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ Cathode Material in Lithium Ion Batteries," *Advanced Energy Materials* 4, no. 1 (2014) . doi:10.1002/aenm.201300787
- 3) Longwei Liang et al., "Synthesis and Characterization of Concentration-gradient $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ Cathode Material for Lithium Ion Batteries," *Journal of Alloys and Compounds* 613 (2014) : 296-305. doi:10.1016/j.jallcom.2014.05.027
- 4) Peng Yue et al., "Effect of Fluorine on the Electrochemical Performance of Spherical $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ Cathode Materials via a Low Temperature Method," *Powder Technology* 237 (2013) : 623-626. doi:10.1016/j.powtec.2012.12.061
- 5) Guohua Li, Hideto Azuma and Masayuki Tohda, " LiMnPO_4 as the Cathode for Lithium Batteries," *Electrochemical and Solid-State Letters* 5, no. 6 (2002) . doi:10.1149/1.1475195
- 6) Shoichiro Watanabe et al., "Capacity Fade of $\text{LiAl}_y\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{O}_2$ Cathode for Lithium-ion Batteries during Accelerated Calendar and Cycle Life Tests (surface Analysis of $\text{LiAl}_y\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{O}_2$ Cathode after Cycle Tests in Restricted Depth of Discharge Ranges) ," *Journal of Power Sources* 258 (2014) : 210-217. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.02.018
- 7) Umair Nisar et al., "Extreme Fast Charging Characteristics of Zirconia Modified $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ Cathode for Lithium Ion Batteries," *Journal of Power Sources* 396 (2018) : 774-781. doi:10.1016/j.jpowsour.2018.06.065
- 8) Andrew W. Thompson, "Economic Implications of Lithium Ion Battery Degradation for Vehicle-to-Grid (V2X) Services," *Journal of Power Sources* 396 (2018) : 691-709. doi:10.1016/j.jpowsour.2018.06.053
- 9) Lorenzo Grande et al., "The Lithium/Air Battery: Still an Emerging System or a Practical Reality?" *Advanced Materials* 27, no. 5 (2015) : 784-800. doi:10.1002/adma.201403064.
- 10) Jun-Woo Park et al., "Ionic Liquid Electrolytes for Lithium-Sulfur Batteries," *The Journal of Physical Chemistry C* 117, no. 40 (2013) : 20531-20541. doi:10.1021/jp408037e
- 11) Yunya Zhang et al., "Graphene and Its Derivatives in Lithium-sulfur Batteries," *Materials Today Energy* 9 (2018) : 319-335. doi:10.1016/j.mtener.2018.06.001
- 12) Hirofumi Tsukasaki et al., "Analysis of Structural and Thermal Stability in the Positive Electrode for Sulfide-based All-solid-state Lithium Batteries," *Journal of Power*

Sources 367 (2017) : 42-48. doi:10.1016/j.jpowsour.2017.09.031

- 13) Naoya Ishida et al., "Crystal Structure Analysis and Electrochemical Properties of Chemically Delithiated $\text{Li}_{0.13}\text{Mn}_{0.54}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{O}_{2-\delta}$ as Cathode Material for Rechargeable Mg Batteries," *Chemistry Letters* 46, no. 10 (2017) : 1508-1511. doi:10.1246/cl.170615
- 14) Jing Zeng et al., "A Long Cycle-life Na-Mg Hybrid Battery with a Chlorine-free Electrolyte Based on $\text{Mg}(\text{TFSI})_2$," *Electrochimica Acta* 284 (2018) : 1-9. doi:10.1016/j.electacta.2018.07.111
- 15) Hirokazu Munakata, Dai Yamamoto and Kiyoshi Kanamura, "Three-dimensionally Ordered Macroporous Polyimide Composite Membrane with Controlled Pore Size for Direct Methanol Fuel Cells," *Journal of Power Sources* 178, no. 2 (2008) : 596-602. doi:10.1016/j.jpowsour.2007.08.060
- 16) Deepak P. Dubal and Pedro Gomez-Romero, "All Nanocarbon Li-Ion Capacitor with High Energy and High Power Density," *Materials Today Energy* 8 (2018) : 109-117. doi:10.1016/j.mtener.2018.03.005
- 17) Jianhui Wang et al., "Superconcentrated Electrolytes for a High-voltage Lithium-ion Battery," *Nature Communications* 7, no. 1 (2016) . doi:10.1038/ncomms12032
- 18) Yulong Sun et al., "Superionic Conductors: $\text{Li}_{10+\delta}[\text{Sn}_y\text{Si}_{1-y}]_{1+\delta}\text{P}_{2-\delta}\text{S}_{12}$ with a $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ -type Structure in the Li_3PS_4 - Li_4SnS_4 - Li_4SiS_4 Quasi-ternary System," *Chemistry of Materials* 29, no. 14 (2017) : 5858-5864. doi:10.1021/acs.chemmater.7b00886

2.1.3 パワー半導体

(1) 研究開発領域の定義

高効率の電力変換を可能にする超低損失電力制御用デバイス（パワーデバイス）を実現する研究開発領域である。SiC、GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体はSiに比べて原理的に内部損失が小さく高効率化に優れるが、結晶品質向上、ウェハの大口径化、物性制御、デバイス作製プロセス、デバイス構造、性能優位性の向上、高精度の熱設計・パワーマネジメント、モジュール・実装技術、電力変換回路・制御技術、周辺部材・受動部品、長期信頼性向上などの研究開発課題がある。

(2) キーワード

パワーエレクトロニクス、電力変換、パワー半導体デバイス、IGBT、MOSFET、SJ-MOSFET、JFET、HEMT、HBT、GTO、SBD、シリコン、Si、ワイドギャップ半導体、炭化ケイ素、SiC、窒化ガリウム、GaN、ダイヤモンド、酸化ガリウム、Ga₂O₃、MOCVD、HVPE、MBE、アモノサーマル法、Naフラックス法

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球温暖化の抑制に向けて二酸化炭素（CO₂）排出量の削減が世界的に強く求められており、エネルギー資源の乏しい日本にとっても、従来の化石燃料エネルギーから自然エネルギーへの転換を促進するとともに、エネルギー消費を大幅に削減することが必要になっている。一方、世界の全エネルギー消費に対する電気エネルギーの占める割合は年々増加しており（現在は約25%）、電気エネルギーの輸送・変換・制御・供給に関わる広範囲なパワーエレクトロニクス機器の省電力化が重要になってきている。直流電圧の変換を行うDC-DCコンバータや、直流を交流に変換するインバータなどの電気エネルギー変換には、チョップ制御やパルス幅変調などのパワースイッチングが用いられ、その基本性能はパワーデバイスの性能によって決定される。パワーエレクトロニクスの研究開発領域としては、材料・デバイス・回路だけでなく、電力変換システムまでを含むが、ここでは「パワー半導体」領域としてナノテクノロジー・材料分野と関係の深い材料・デバイス・回路を中心に述べる。

今日のパワーデバイスにはシリコン（Si）が主として用いられている。現在は、スーパージャンクション（SJ）やトレンチなどの構造上の工夫により、デバイス性能の向上が牽引されているが、Siの材料定数の限界から来るデバイス性能の限界が指摘されている。このため、将来に向けてパワーエレクトロニクス機器のさらなる省エネ化と高性能化を推進するためには、パワー半導体デバイスの基本性能を大きく向上させる技術革新が必要であり、パワー半導体デバイスの基本性能である高耐圧化と低損失化（低オン抵抗化）の両立に優れたワイドバンドギャップ半導体の研究開発が重要になっている。

[研究開発の動向]

パワー半導体の研究開発動向については、現在の製品の主流であるシリコン（Si）デバイス、実用化が開始された炭化ケイ素（SiC）、研究が活発化している窒化ガリウム（GaN）、酸化ガリウム（Ga₂O₃）を中心に記載する。

Siの低耐圧系(100V以下)および中耐圧系(100V~600V)については、現在普及しているSi-MOSFETのさらなる高性能化(低オン抵抗化)の開発が進んでおり、微細化・トレンチ構造などのMOSFETデバイス構造の改良と合わせて、Si基板抵抗の低抵抗化などによる性能向上が試みられている。また、今後の中耐圧領域の市場拡大に対応するため、Si-MOSFET、Si-IGBTの個々の性能向上と合わせて、新しいフェーズとしての量産技術開発が進められており、従来の200mm製造ラインに代わる300mmラインでの製造が欧州から発表されている。高耐圧系(1200V)は、Si-IGBTが主要パワーデバイスとして普及してきており、オン抵抗の低減、チップの小型化(高パワー密度化)を進めてきている。近年、Si-IGBTに対して新しいスケーリング則を適用することで、現在のSiC-MOSFETと同等なレベルまでさらなる性能向上が連続的に可能であることが示されている(NEDOプロジェクトの成果)。超高耐圧系(1700V以上)は、6.5kVまではSi-IGBT、それ以上ではSiサイリスタが主要パワー半導体となっており、電力グリッド、電鉄などの超高パワー応用系に用いられることが多いため、高耐圧とあわせて大電流容量、低オン抵抗が必須となっている。今後の再生可能エネルギーをはじめとする新電力エネルギーグリッドの拡大や、世界規模での高速鉄道網などに対応する需要は大きく、この領域のSiパワー半導体の技術開発は欧州と日本で競争となっている。

SiCに関しては、SiCウェハの大口径化、高品質化の取り組みや、ショットキーバリアダイオード(SBD)、MOSFETの開発が進められ、1.2kV SiC-MOSFET/SBDモジュールが実用化され、電車への応用など社会実装が進められている。SiCウェハは、4インチおよび6インチ径が市販されており、8インチも開発品が示されている。これに伴い、SiCパワー半導体メーカーはデバイス量産ラインを4インチから6インチへと移行している。量産されているバルク結晶成長技術は、ほぼ昇華法で占められており、高品質・低価格に向けた量産技術が開発されている。初期に問題となっていたマイクロパイプはかなり低減されており、課題は転位欠陥の低減に移っている。また、国内を中心に、高品質が期待される溶液法によるバルク結晶成長や、ガス原料を用いたCVDを高温で行う方法も試みられている。このようなバルク基板の高品質化と併せ、SiCデバイスの活性層を形成するエピタキシャル成長においても、少数キャリアが基板のBPD(基底面転位)に注入されることによるSF(積層欠陥)の発生を抑制するために、少数キャリアをバルク基板に到達させないようなエピ膜構造の工夫が試みられている。

SiCパワーデバイスのうち、SBDについては技術的にかなり成熟してきており、Si-IGBTとの組み合わせ(ハイブリッドモジュール)での実績も多い。MOSFETにおいては、SBD内蔵MOSFETの学会発表が増えており、最近のトレンドになっている。また、オン抵抗を下げするため、Si-MOSFETと同様にチャンネル部をプレーナ構造からトレンチ構造にする流れもあり、Siと比べて酸化膜に印加される電界が高いため、特にトレンチ底部の酸化膜を保護する構造が各社で開発されている。10kV以上のSiCパワーデバイスについては、日本では電力系統応用を目指したIGBTおよびPiNダイオードの報告があり、米国ではDARPAの支援によりIGBT、GTO(Gate Turn-Off thyristor)などのバイポーラ型デバイスに加え、MOSFETも開発されている。

GaNに関しては、ワイドギャップ半導体の中では最も活発に研究開発が行われ、掲載論文数は他の材料に比べ圧倒的に多くなっている。これまでのサファイア、SiC、Si基板上へのGaNヘテロエピタキシャル成長層を用いることに加え、光デバイス(レーザーダイオード)用に開発されたハライド気相成長法(HVPE)によるGaN自立基板を用いたデバイス開発も

行われている。

パワーデバイスとしては、高周波トランジスタの HEMT 技術を活用し、安価な Si 基板を用いることで、コストパフォーマンスに優れた GaN-on-Si 横型パワーデバイスの開発が精力的に行われている。このデバイス開発の最大の課題は熱膨張係数差によるウエハの割れであったが、GaN と Si 基板の間に AlGaIn/GaN 超格子などを導入し、成長温度において熱膨張係数差を相殺する歪みを GaN デバイス層に意図的に与える技術が進展し、製品化が可能となっている。米国の EPC、International Rectifier (IR)、Transphorm がまず製品化を行い、現在では、Panasonic、GaNsystem、On-semiconductor など製品化している。この数年間の産業界の動きとしては、Transphorm が GaN-HEMT の製造能力を有する富士通の工場を実質的に買収して生産拠点とし、Si パワーデバイス最大手の Infineon が IR を買収して GaN-on-Si 事業を手中にし、半導体ファウンドリー最大手の TSMC が GaN-on-Si のラインを設置するなど、世界的に GaN-on-Si 横型パワーデバイス産業がいよいよ本格化してきた。また、横型 GaN デバイスを用いた製品も一部出荷が始まっており、600V 耐圧品を中心に、AC アダプター、サーバー用電源、LED 用電源、太陽光発電システム用パワーコントローラなどの製品が開発されている。

一方、縦型の GaN デバイスも最近大きく進展してきている。ヘテロエピタキシャル成長に起因する高密度の貫通転位が GaN 本来の特性を最大限に引き出すことを阻んでいるが、まだ高価であるものの比較的容易に入手できるようになったレーザー用の GaN 基板を用いてホモエピタキシャル成長による縦型 GaN パワーデバイスの作製が報告されるようになってきた。後述するように、日米欧のプロジェクトにおいて、ウエハ、エピ技術、デバイスプロセス技術、デバイス構造などの検討、デバイス試作によるデモンストレーションが進んでおり、横型 GaN パワーデバイスでは実現不可能なアバランシェ耐性や高耐圧化、大電流化、低欠陥化によるリーク電流の低減などが示されている。最終的に普及の鍵となるのは、コストパフォーマンスであるが、GaN バルク結晶の作製方法として、既にレーザー用基板で実績のある HVPE 法の技術が洗練されてきていることに加え、アモノサーマル法や Na フラックス法などスケラビリティがあり高い量産性が期待される技術が立ち上がりつつある。

Ga₂O₃ に関しては、この 2~3 年で研究者人口の大幅な増加が認められ、Ga₂O₃ を専門に扱う国際会議・シンポジウムが新設されたり、既存の化合物半導体材料・デバイス国際会議に Ga₂O₃ セッションが設けられるなど、新しい半導体研究分野として広く認知されるようになってきた。最安定結晶構造に相当する β-Ga₂O₃ のバルク単結晶融液成長技術開発に関しては、チョクラルスキー (CZ) 法、ブリッジマン法、Edge-defined Film-fed Growth (EFG) などのいくつかの手法による研究が世界中で行われている。薄膜エピタキシャル成長は、これまでの分子線エピタキシー (MBE) に加えて、ハライド気相成長法 (HVPE)、有機金属気相成長法 (MOCVD) など、多様な結晶成長法が行われている。デバイス開発も、日本や米国を中心に活発化しており、基礎的なトランジスタ、ダイオードの開発成果がこの 1~2 年で多く発表されるようになってきた。これはタムラ製作所からカーブアウトしたベンチャー企業 (ノベルクリスタルテクノロジー) が、Ga₂O₃ バルクおよびエピ基板の製造、販売を始めたことが大きな要因となっている。また、準安定構造に相当する α-Ga₂O₃ の薄膜結晶成長やデバイス開発も活発化している。α-Ga₂O₃ は、主にサファイア基板上のヘテロエピタキシャル成長で得られる結晶構造であるため、準安定構造の中では最も研究が進んでいる。その他、もう一つの準安定構造である ε-Ga₂O₃ の薄膜結晶成長研究も、国内外機関から報告され始めている。デバイ

ス特性に関する報告も増加しており、ショットキー接合型ダイオードや MOSFET（トレンチ型を含む）で優れた特性が報告されている。

高耐圧・超高耐圧領域の将来技術として、優れた熱伝導性と大きなバンドギャップを有するダイヤモンドについても半導体物性の理解とあわせて、ダイヤモンド基板、ダイオード、トランジスタ原理実証などが試みられている。日本にはダイヤモンドの CVD 合成の先導的な研究、リンによる n 型ドーピングなど当該分野での画期的な先行研究があり、最近の論文件数を見ても日本が先行している状況にある。

（４）注目動向

[新展開・技術トピックス]

Si パワーデバイスで用いられている高品質（酸素や炭素不純物が少ない）ウェハはフローティングゾーン（FZ）法によるものであるが、デバイスプロセスの大口径化に対応するために大口径化が容易な磁場印加チョクラルスキー（MCZ）法による高品質化の試みが進められている。Si パワーデバイスは、縦型構造であり基板全体を活用するため、LSI 半導体よりも品質要求が厳しく、最近は特に酸素、炭素などの軽元素濃度低減が課題となっている。また、耐圧系に対応した要求比抵抗値が固定されるため、均一なドーピング制御が要求されるが、偏析現象、MCZ 炉内輸送現象などのために、結晶成長時に比抵抗値を面内・成長方向ともに一定値におさえることは極めて困難である。これらの課題を解決し、大口径 Si ウェハの結晶成長技術を確立することが喫緊の課題となっている。

SiC パワーデバイスの価格低減のためには、SiC 基板の大口径化が重要であり、II-VI 社（米）が 8 インチウェハのサンプル出荷を始めた。デバイス関連では、Infineon（独）や富士電機がトレンチ型 MOSFET の量産を開始した。また、ベンチャー企業の Littlefuse（米）が Monolithic Semiconductor の技術を導入して 1200 V 耐圧の MOSFET を発売した。これらのデバイスを用いた SiC パワーモジュールの発表も相次いでいる。特にインバータ応用として、ダイオードとトランジスタを一体化したフルモジュールの開発・商品化が、三菱電機、日立パワーデバイス、デンソー、Infineon、Semikron Elektronik（独）、CRCC（中国）などから発表されている。さらに実機への搭載も相次いでおり、電気自動車用充電器や太陽光発電用パワーコンディショナーへの適用を目指して Infineon、Vincotech、ロームなどから試作品が発表されている。また、東海道新幹線の N700 系に SiC インバータが搭載され、2020 年の本格運転を目指して試運転が始まった。

GaN を用いたデバイス（GaN on Si 横型パワーデバイス）では、低耐圧品を中心に商品化が相次いで発表されている。Exgan（仏）は 8 インチ Si 基板を用いた GaN パワーデバイスの量産技術を確立したことを発表し、On Semiconductor（米）、EPC（米）、ルネサスエレクトロニクスが 40~100 V 品の量産を開始した。また、Nexperia（オランダ）や GaN System（カナダ）では、自動車用インバータへの搭載を目指して 600 V 耐圧品の商品化を発表した。さらにパワー半導体最大手の Infineon が Panasonic の技術を導入し、2018 年 4Q から GaN デバイスの量産を開始すると発表している。実機への搭載としては、東芝ライテックが LED ランプ点灯回路、安川電機がサーボモータ用に GaN デバイスを搭載した回路を発売した。

GaN の縦型パワーデバイスの実用化を目指したデバイス開発のためには、エピタキシャル成長技術やイオン注入技術、MOS 界面制御技術など、それぞれの要素技術をしっかり固める

ことが重要であり、これらの要素技術についての研究開発の報告が相次いでいる。特に極めて困難と考えられていた GaN の Mg イオン注入による p 型化について、複数のグループからそれぞれ独自の工夫により p 型化に成功した報告がなされており、研究開発の方向性が見えてきた。MOS 界面制御に関しては、ノーマリオフの反転チャネル MOSFET でチャンネル移動度 $100\text{cm}^2/\text{Vs}$ を超えるものが報告され、Mg イオン注入領域上への MOSFET の試作も報告されている。

Ga₂O₃ のパワーデバイスにおいては、これまで n 型 Ga₂O₃ バルクチャネルを用いる横型 Ga₂O₃ FET の開発が主であったのが、(AlGa)₂O₃、(InGa)₂O₃ などの混晶の薄膜エピタキシャル成長技術が進展し、ヘテロ構造による (AlGa)₂O₃/Ga₂O₃ 高電子移動度トランジスタ (HEMT) も報告されるようになってきた。また、縦型構造の FET の報告が国内外複数の機関から出始めており、今後縦型デバイス開発が活発化することが予想される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

欧州では、EU 内のエネルギー融通、CO₂ 削減などを主目的に、パワーエレクトロニクス・パワー半導体関連の技術革新のために、各種プロジェクトが展開されている。パワー半導体・パッケージング・応用技術などの垂直統合で実施された eRamp (2014 年度～2016 年度) の後継として R3-Powerup が 2017 年度から開始されている。ここではスマートパワーをコンセプトに Si-300mm パイロットラインを活用し、個別半導体素子開発からロジック、アナログデバイスとパワーデバイスの統合によるシステムオンチップ、パワー IC 開発を進めている。また、将来のパワーエレクトロニクス応用を見据えた欧州パワー半導体産業競争力強化を目的に SemI40 (Power Semiconductor and Electronics Manufacturing 4.0) が 2016 年度から始まっている。SiC 関係では、SPEED (SiC Power Electronics Technology for Energy Efficient Devices)、CHALLENGE (3C-SiC Hetero-epitaxially grown on silicon compliant substrates and new 3C-SiC substrates for sustainable wide-band-gap power devices)、OSIRIS (Optimal SiC substrates for Integrated Microwave and Power CircuitS)、WInSiC4AP (Wide Band Gap Innovative SiC for Advanced Power) などが行われている。GaN 関係としては、PowerBase Project (2015 年～2018 年) などで IT 系応用を見据えた 200mm GaN パワーデバイス製造技術の開発などを進めている。ダイヤモンドのパワーデバイスについても研究が盛んになりつつあり、GreenDiamond Project が進行している。

欧州の各国においても独自のプログラムが進められており、例えばドイツでは、クラスタープロジェクトの中で、ワイドバンドギャップ半導体応用技術開発が始まっている。このプロジェクトは国際連携として、2016 年からのワイドバンドギャップ半導体応用の FS 調査を経て、2018 年から日本の NPERC-J と国際共同で SiC パワー半導体の応用技術研究が始まった。また、ドイツでは Ga₂O₃ の結晶成長、物性研究を行う GraFOX (Growth and fundamentals of oxides for electronic applications) も行われている。イギリスでは EPSRC Center for Power Electronics、フランスでは GaNEX や ReAGaN プロジェクトなどが進行している。

米国では軍からの豊富な資金がパワー半導体の研究開発を支えている。米国防総省 (DoD) の海軍研究局 (ONR : Office of Naval Research) では、MURI (Multidisciplinary University Research Initiatives Program)、NEPTUNE (Naval Enterprise Partnership Teaming with Universities for National Excellence) などの複数のプログラムが実施されてい

る。新たな材料である Ga_2O_3 に関するプロジェクト (GAME : The Gallium Oxide Materials Science and Engineering) も MURI などで行われている。ONR の他にも、AFOSR、ARO (Army Research Office)、DARPA (Defense Advanced Research Project Agency)、DTRA (Defense Threat Reduction Agency) などから資金提供されている。米エネルギー省 (DoE) のエネルギー高等研究計画局 (ARPA-E : Advanced Research Projects Agency-Energy) では SWITCHES (Strategies for Wide Bandgap, Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems) プログラムが実施されている。この中には 14 件のプロジェクトがあるが、SWITCHIES の拡張として 2017 年より GaN のデバイスプロセス開発を目指す PNDIODES (Power Nitride Doping Innovation Offers Devices Enabling SWITCHES) も実施されている。DoE が主導し、アメリカでのハイテク製造業の雇用創出とパワーエレクトロニクスシステムへのワイドギャップ半導体 (SiC、GaN) の大規模適用の加速による省エネルギー化をミッションとして 2015 年から 5 年の期間で 140M\$ の予算で進められている PowerAmerica もあり、ノースカロライナ州立大を中心に産官学合わせて 67 の機関が参画している。ここでは、X-Fab による 150mm ウェハを用いた SiC デバイスのファウンドリー事業も展開している。また、GE と SUNY Poly が中心となり官民パートナーシップによる NY-PEMC (New York Power Electronics Manufacturing Consortium) が 2014 年に開始されており、Albany (NY) で 200mm の SiC ウェハプロセス (ベースは GE で開発された 1.7kV SiC-MOSFET のプロセス) が可能なファウンドリーを保有し、15000 枚/年の能力を持ち、産業の成長に合わせ 50000 枚/年まで拡張が可能となっている。

中国は、最近論文の発表件数が急増していることから豊富な研究資金が各研究機関に配分されていると考えられるが、提供元 (プログラム) は限られており、「National Natural Science Foundation」、「National Key R&D Program」、「National High-Tech R&D Program」の中でパワー半導体の研究開発が進められている。例えば、2016 年から「National Key R&D Program」の中で、SiC 基板、エピタキシャル成長、パワーデバイス、応用まで一貫した開発を行っており、1200V SiC-MOSFET を用いて 1200V/200A の SiC パワーモジュールの開発や、35KV/5MW の SST (Solid-State Transformer) の開発なども行っている。

韓国では MOTIE/KEIT と呼ばれるプロジェクトや、パワーデバイス応用に向けた研究開発ファンド Development of epitaxies and power devices technologies (3 年総額 90 万ドル) などが進行している。

国内では、Si パワー半導体の産業競争力強化を目的として、Si-IGBT 開発が経済産業省「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」で進行し、SiC-MOSFET と同性能の Si-IGBT 実証が報告されている。また、同じプロジェクト内で SiC 応用技術開発も進められてきた。内閣府では、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) において、SiC、GaN、 Ga_2O_3 、ダイヤモンドの開発が基板、デバイス、パッケージなどを含め包括的に行われてきた。ここでは 2014 年度～2018 年度まで毎年 20 億円程度の予算が実施されているが、およそ半分は SiC 関係の研究開発に投入され、高耐圧デバイス用の多層膜ウェハやその伝導度制御、6.5kV 級の SJ-MOSFET および 20kV 級のバイポーラ (IGBT、PIN ダイオード) デバイス、小型・高温・高速動作が可能な次世代モジュールの開発が進められている。文部科学省、環境省などでも、GaN パワーデバイス関連プロジェクトが進行している。2016 年には文部科学省の「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」事業による結晶創製

拠点 (名古屋大学) や、名古屋大学と産総研との窒化物半導体先進デバイスオープンイノベーションラボラトリ (GaN-OIL) が発足し、名古屋大学を中心に GaN デバイスの研究開発が精力的に進められている。

(5) 科学技術的課題

Si パワー半導体は、すでに完成した技術と考えられることがあるが、個別半導体素子としての性能向上、個別半導体素子からモジュール化への変貌、需要拡大に対応する産業・量産化技術のそれぞれに新たな課題があり、川上にある Si 基板、デバイスプロセス技術や、川下にある回路、応用技術との連携で解決していく必要がある。例えば、材料技術では、酸素・炭素などの軽元素濃度の低減が求められているとともに、従来より低濃度の軽元素を正確に測定する評価技術の確立が求められており、軽元素に関連する欠陥などがパワーデバイスの特性におよぼす影響の物理的な解明も重要である。

SiC パワー半導体については、SiC 基板製造技術がボトルネックとなっており、大口径化・高品質化・低コスト化を満足する結晶成長技術を開発する必要がある。現状使われている昇華法は、結晶成長科学としても、結晶成長技術としても、いまだ不明な点が多く、基礎的な観点から再構築する必要がある。また、Si-IGBT の代替ととして期待される SiC-MOSFET は、酸化膜に関連する課題、内蔵ダイオードの動作時欠陥誘起など、半導体物性の課題が指摘されている。

GaN パワー半導体については、p 型制御、信頼性向上、基板作製技術が課題である。パワー半導体は理想的には、p 型、n 型の両者を利用したいため、p 型制御とその移動度の向上が重要である。アバランシェ耐量を代表例として、GaN パワー半導体の破壊物理の検討も必要である。横型デバイスを念頭にした大口径ヘテロエピタキシャル基板作製技術、縦型デバイスを念頭にしたバルク基板作製技術、いずれも結晶成長科学・欠陥物理などと合わせて、装置技術としての開発が必要である。

Ga₂O₃ については、本質的な課題として十分なホール濃度の p 型の実現が困難なことがある。Ga₂O₃ のアクセプタ準位は非常に深いため室温ではほとんどホールを発生できないことや、価電子帯構造が強い結合を有する酸素 (O) の 2p 軌道により形成されるためバンド端にほぼエネルギー分散が無く (ホールの有効質量が非常に大きく) 移動度が小さいことがある。さらに Ga₂O₃ 中のホールは格子緩和を伴って局所的にトラップされ、拡散や低電界でのホール伝導は見込めないとの理論的予測もあり、p 型 Ga₂O₃ の実現はかなり難しい。このため、Ga₂O₃ の p 型不純物ドーピング技術の研究だけでなく、デバイス構造として他の p 型材料を組み合わせるなど p 型 Ga₂O₃ を用いずにデバイスを設計するなどの検討が重要である。もう一つの大きな課題としては Ga₂O₃ デバイスの放熱性の向上がある。Ga₂O₃ の熱伝導率は、Si、SiC、GaN と比較して 1 桁程度小さいため、大電力動作時のデバイスの自己発熱が問題となる。高熱伝導率および電気伝導率を有する異種材料基板への直接接合技術や、水冷配置等の実装技術の研究開発など、応用を見据えた取り組みも必要である。

パワーエレクトロニクス機器・システムの実用化・製品化には最先端の高性能パワー半導体デバイスだけでなく、磁気部品 (変圧器、リアクトル) やキャパシタ (コンデンサ) などの受動部品、各種センサ、デジタル信号処理技術 (DSP、FPGA、A/D 変換器などを含む)、制御技術、実装技術、放熱・冷却技術なども重要である。実際の製品では、高性能パワー半導体

デバイスではなく、他の部品が機器・システム全体の性能・仕様を決定する、いわゆる「ボトルネック」が存在することが多い。このため、パワー半導体デバイスの特性（高温動作、高周波動作など）を十分に引き出せるような受動部品や制御技術、実装技術などシステム化の研究開発にも取り組んでいく必要がある。

(6) その他の課題

SiC や GaN は日本が主導的役割を果たして育ててきた技術であり、Ga₂O₃ やダイヤモンドも今のところ日本が技術的に優位な状況にあるが、欧米や中国が多額の研究資金を投入して研究開発を加速している。このような海外の動きに対抗して日本の技術力、産業競争力を維持していくためには、技術優位性の確保、技術限界の把握と次世代技術の先行研究が重要であり、材料・デバイスの研究開発拠点あるいは共通プラットフォームの整備や人材育成が重要な課題である。また、ウェハ技術からプロセス技術、デバイス技術、回路技術までを含む垂直統合型の研究課題については、産業界・国立研・大学から有能な研究者を結集させ、早期に技術課題を明らかにして取り組めるような産学官連携体制の構築が望まれる。すでに実用・普及している Si パワー半導体においても、新たな技術課題に対して新しい物理、科学、技術の導入が必要となり、国立研・大学の担うべき役割は大きく、共通プラットフォームの整備が重要である。

次世代パワーエレクトロニクスの研究開発を担う若手人材が不足していることも深刻な課題である。大学におけるパワー半導体、パワーエレクトロニクス関係の教育を充実させることや、産学官連携のプロジェクトの中で若手の学生・研究者・技術者に広い知識と高度な経験をさせることが望まれる。例えば、筑波大学での企業によるパワーエレクトロニクスの寄附講座の設置や、TIA でのパワーエレクトロニクスの夏季スクール開催などが行われているが、このような活動が広がることが期待される。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<p>Si-IGBT スケーリング則の発表は、世界的に IGBT 研究をリードするもので、その後欧州から追試（シミュレーション）が報告されている。</p> <p>SiC、GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンドすべての材料で世界トップレベルにある。MOS 界面準位密度の低減、ゲートリーク電流の伝導機構などデバイス実用化に不可欠な研究が進められている。</p> <p>SiC、GaN、では基板の大口径化、欠陥密度低減、デバイスでは縦型トレンチ構造 FET の開発が進展している</p> <p>GaN 縦型パワーデバイスに関しては SIP に加え文科省プロジェクトが始まり、オールジャパンの産官学連携で基盤技術の系統的な研究が進められている。</p> <p>Ga₂O₃ のバルク・薄膜結晶成長、物性基礎研究などの材料研究、およびデバイス基盤技術開発が、大学、国研、企業で広がりつつある。ダイヤモンドでは、伝導型の制御、MOSFET の試作などで優れた結果が報告されている。</p>

日本	応用研究・開発	◎	↗	<p>Si パワー半導体は、欧米がシステム型に移行しつつあるところ、国内は個別半導体素子にとどまっている。</p> <p>企業を中心に SiC-MOSFET/SBD モジュールの応用研究・開発が活発に進展し、SiC インバータモジュールは着実に Si MOSFET の置き換えが進んでいる。また電気自動車、新幹線などで実用化試験が進展している。</p> <p>GaN は低耐压品を主として市場への投入が始まっている。低価格を指向した Si 基板と、縦型デバイスを指向した GaN 基板の 2 つの方向で応用研究が進められている。</p> <p>ベンチャー企業 (ノベルクリスタルテクノロジー) が、Ga₂O₃ バルク・およびエピ基板の製造販売をスタートしている。また、FLOSFIA がコランダム構造の Ga₂O₃ デバイス開発を進めている。</p>
	基礎研究	◎	↗	<p>ONR や ARPA-E をはじめ、多くの国家プロジェクトが材料・プロセス・応用技術と広範囲をカバーし、アカデミアを結集させた体制で世界トップレベルの研究開発を行っており、縦型 FET や縦型ダイオードの高耐压化など優れた成果を上げている。</p> <p>研究開発拠点が集約され、SiC は North Carolina 州立大、GaN は UCSB と MIT に集中的に資金投入されている。</p>
米国	応用研究・開発	◎	→	<p>新しい動きとして、パワーグリッドに関して複数のコンソーシアムが活動している。他にも目的・応用を明確にしたコンソーシアム活動が活発に進んでいる。</p> <p>SiC に関しては、軍用途の応用研究が進んでいる。Wolfspeed を中心に、ウェハからデバイスまでの開発・生産が盛んである。900V 級から超高耐压の 15kV 超級まで幅広く研究開発が行われている。フェアウズドリー X-Fab を用いて、1.2kV 級を中心とした SiC デバイスの開発・生産がおこなわれ、デバイス設計に特化した会社もある。</p> <p>SiC, GaN パワーデバイスの使いこなし技術にフォーカスした DoE の CURCITS プロジェクトが開始された。</p> <p>GaN については、横型 FET の市場投入が進行中で、縦型 FET の開発も加速している。Transphorm 社をはじめ関連のベンチャー企業から商品化が始まると考えられる。</p>
	基礎研究	◎	→	<p>欧州プロジェクトにおいて、パワー半導体関係の各種のプロジェクトがあり、国立研や大学が基盤技術の役目を担っている。新材料系では産業界に先行する原理実証まで行っている。</p> <p>GaN の研究開発は EPFL や Univ. of Padua (伊) が主導しており、極めて活発である。特に電流コラプスの低減や、デバイスの故障解析などに関して優れた成果を出している。</p> <p>Ga₂O₃ については、ドイツベルリン地区で、大学・国研が一体となった材料研究プロジェクトが進められている。また、イギリス、イタリアの大学においても、デバイス評価に関する研究開発報告が出始めている。</p>
欧州	応用研究・開発	◎	↗	<p>産業競争力強化を念頭に材料からデバイス、応用まで垂直統合的にカバーするプロジェクトが進んでおり、パイロットラインは次世代の産業に対応できるスケールで進められている。</p> <p>GaN-on-Si 横型パワーデバイスに関して Imec やフランフォーファー研究所などで産学連携のプロジェクトが進行している。</p> <p>Infineon や ST Micro などが SiC デバイスの製品化を進めている。特に Infineon は、ショットキーダイオードに加えて SiC FET の量産を開始した。また GaN に関しても 2018 年 4Q からの量産開始を発表している。これらに加えて、Semikron Elektronik や Exgan などのベンチャー企業からも各々 SiC、GaN デバイスの商品化が発表されている。</p>
中国	基礎研究	○	↗	<p>欧米日から帰国した研究者が研究をリードし、かつ重点大学制度を活用した若手育成を徹底している。その結果、パワー半導体・パワーエレクトロニクスの国際学会における発表件数が著しく増加している。</p> <p>SiC の論文発表件数は多いものの、10 以上の研究機関が関与しており、まだ拠点化の動きは見られない。</p> <p>GaN に関しては、西安電子科技大と北京大学を研究拠点と位置付けて活発な研究開発を行っている。研究内容は MOSFET の改良などが多く、新構造、新デバイスなどの報告は少ない。一方、HKUST (香港) では、新構造デバイスなどの報告が多く、最近中国と連携して研究を進めている。</p> <p>Ga₂O₃ については、この 1~2 年で、多くの大学からの研究開発が報告されるようになってきた。</p>

中国	応用研究・開発	○	↑	国内製造技術の強化を図る「中国製造 2025」には直接はパワー半導体は取り上げられていないが、IT、ロボット、航空宇宙、交通、自動車、電力など、パワー半導体を必要とする産業が網羅されており、実際にシリコン半導体結晶、LSI プロセスラインの増強が発表されている。 SiC の結晶、デバイス、システムまで一貫した研究開発体制を敷き、すべての国産化を目指している。 GaN に関しては HVPE 法による GaN 基板を作るメーカーが誕生した。創立から数年にも関わらず、ある程度の品質を実現している。ただ、GaN デバイスの市場投入の動きはまだ見られない。
韓国	基礎研究	△	↓	最近、国際学会で発表が低迷しているだけでなく、参加者（聴講者）数も低迷している。 Ga ₂ O ₃ パワーデバイスについては国のプロジェクトがスタートしている。研究開発の内容は、日本でのこれまでの開発をフォローする程度となっている。
	応用研究・開発	△	↓	これまでの財関係の新材料開発の勢いはなく、低迷している。GaN については光デバイスに注力しており、パワーデバイス応用に関しては資金援助に留まっている。

(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範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：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) T. Kimoto and J. A. Cooper, *Fundamentals of Silicon Carbide Technology* (Wiley, 2014) .
- 2) Tsunenobu Kimoto, "Material Science and Device Physics in SiC Technology for High-voltage Power Devices," *Japanese Journal of Applied Physics* 54, no. 4 (2015) . doi:10.7567/jjap.54.040103
- 3) Min Sun et al., "High-Performance GaN Vertical Fin Power Transistors on Bulk GaN Substrates," *IEEE Electron Device Letters* 38, no. 4 (2017) : 509. doi:10.1109/led.2017.2670925
- 4) Yuhao Zhang et al., "720-V/0.35-mΩcm² Fully Vertical GaN-on-Si Power Diodes by Selective Removal of Si Substrates and Buffer Layers," *IEEE Electron Device Letters* 39, no. 5 (2018) : 715. doi:10.1109/led.2018.2819642
- 5) Hajime Fujikura et al., "Elimination of Macrostep-induced Current Flow Nonuniformity in Vertical GaN PN Diode Using Carbon-free Drift Layer Grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy," *Applied Physics Express* 11, no. 4 (2018) . doi:10.7567/apex.11.045502
- 6) K. Hoshikawa et al., "Growth of β-Ga₂O₃ Single Crystals Using Vertical Bridgman Method in Ambient Air," *Journal of Crystal Growth* 447 (2016) : 36-41. doi:10.1016/j.jcrysgro.2016.04.022
- 7) Akito Kuramata et al., "High-quality β-Ga₂O₃ Single Crystals Grown by Edge-defined Film-fed Growth," *Japanese Journal of Applied Physics* 55, no. 12 (2016) . doi:10.7567/jjap.55.1202a2

- 8) Zbigniew Galazka et al., "Scaling-Up of Bulk β -Ga₂O₃ Single Crystals by the Czochralski Method," *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 6, no. 2 (2017) . doi:10.1149/2.0021702jss
- 9) Kohei Sasaki et al., "Device-Quality β -Ga₂O₃ Epitaxial Films Fabricated by Ozone Molecular Beam Epitaxy," *Applied Physics Express* 5, no. 3 (2012) . doi:10.1143/apex.5.035502
- 10) Elaheh Ahmadi et al., "Demonstration of β -(Al_xGa_{1-x})₂O₃/ β -Ga₂O₃ Modulation Doped Field-effect Transistors with Ge as Dopant Grown via Plasma-assisted Molecular Beam Epitaxy," *Applied Physics Express* 10, no. 7 (2017) . doi:10.7567/apex.10.071101
- 11) Hisashi Murakami et al., "Homoepitaxial Growth of β -Ga₂O₃ layers by Halide Vapor Phase Epitaxy," *Applied Physics Express* 8, no. 1 (2015) . doi:10.7567/apex.8.015503
- 12) Yuichi Oshima, Encarnación G. Villora and Kiyoshi Shimamura, "Halide Vapor Phase Epitaxy of Twin-free α -Ga₂O₃ on Sapphire (0001) Substrates," *Applied Physics Express* 8, no. 5 (2015) . doi:10.7567/apex.8.055501
- 13) Michele Baldini et al., "Editors Choice—Si- and Sn-Doped Homoepitaxial β -Ga₂O₃ Layers Grown by MOVPE on (010) -Oriented Substrates," *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 6, no. 2 (2016) . doi:10.1149/2.0081702jss
- 14) Shizuo Fujita et al., "Evolution of Corundum-structured III-oxide Semiconductors: Growth, Properties, and Devices," *Japanese Journal of Applied Physics* 55, no. 12 (2016) . doi:10.7567/jjap.55.1202a3
- 15) Francesco Mezzadri et al., "Crystal Structure and Ferroelectric Properties of ϵ -Ga₂O₃ Films Grown on (0001) -Sapphire," *Inorganic Chemistry* 55, no. 22 (2016) : 12079. doi:10.1021/acs.inorgchem.6b02244
- 16) Daisuke Tahara et al., "Stoichiometric Control for Heteroepitaxial Growth of Smooth ϵ -Ga₂O₃ Thin Films on C-plane AlN Templates by Mist Chemical Vapor Deposition," *Japanese Journal of Applied Physics* 56, no. 7 (2017) . doi:10.7567/jjap.56.078004
- 17) Elaheh Ahmadi et al., "Demonstration of β -(Al_xGa_{1-x})₂O₃/ β -Ga₂O₃ Modulation Doped Field-effect Transistors with Ge as Dopant Grown via Plasma-assisted Molecular Beam Epitaxy," *Applied Physics Express* 10, no. 7 (2017) . doi:10.7567/apex.10.071101
- 18) Sriram Krishnamoorthy et al., "Modulation-doped β -(Al_{0.2}Ga_{0.8})₂O₃/Ga₂O₃ Field-effect Transistor," *Applied Physics Letters* 111, no. 2 (2017) : 023502. doi:10.1063/1.4993569
- 19) Kohei Sasaki et al., "Depletion-mode Vertical Ga₂O₃ Trench MOSFETs Fabricated Using Ga₂O₃ Homoepitaxial Films Grown by Halide Vapor Phase Epitaxy," *Applied Physics Express* 10, no. 12 (2017) : 124201. doi:10.7567/apex.10.124201
- 20) Man Hoi Wong et al., "All-ion-implanted Planar-gate Current Aperture Vertical Ga₂O₃ MOSFETs with Mg-doped Blocking Layer," *Applied Physics Express* 11, no. 6 (2018) : 064102. doi:10.7567/apex.11.064102
- 21) Zongyang Hu et al., "Enhancement-Mode Ga₂O₃ Vertical Transistors With Breakdown

Voltage 1 KV," *IEEE Electron Device Letters* 39, no. 6 (2018) : 869-72. doi:10.1109/led.2018.2830184

- 22) J. B. Varley et al., "Role of Self-trapping in Luminescence Andp-type Conductivity of Wide-band-gap Oxides," *Physical Review B* 85, no. 8 (2012) . doi:10.1103/physrevb.85.081109

2.1.4 ファイン触媒

(1) 研究開発領域の定義

化石資源を高効率・低環境負荷で基礎化学品へ変換するための触媒や、人工光合成により水素や炭化水素を作り出す触媒に関する研究領域である。ここでは、石炭や石油、天然ガスなどの在来型化石資源、およびシェールガスなどの非在来型化石資源を原料として、プラスチック製造などの基礎となる化学品に変換するときの触媒に関する課題、および人工光合成による水からの水素生成や、水と二酸化炭素から炭化水素、基礎化学品などの合成に用いる触媒の課題を中心に記載する。

(2) キーワード

人工光合成、C1ケミストリー、ゼオライト、水素製造、二酸化炭素還元、窒素還元、半導体光触媒、有機金属錯体、生体触媒、可視光利用、Zスキーム、エネルギーキャリア

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

近年、プラスチックなどの化学製品の製造の基礎となる化学品（基礎化学品）の需要は増大しており、石炭、石油、天然ガスなどの化石資源を高い資源利用効率で環境に配慮して基礎化学品に変換する技術が重要になってきている。また最近では、メタンを主成分とする非在来型資源であるシェールガスが大量に産出され、これを基礎化学品に利用することも重要になってきている。このような在来型／非在来型の化石資源を基礎化学品に変換するときには、ほとんど触媒反応が使われており、高効率・低環境負荷での変換を可能とする新たな触媒やそれを用いたプロセスなどの研究開発が必要である。特に、まだ歴史の浅い天然ガスやシェールガスなどの新たな資源に対する変換プロセス開発や、現行の官能基変換プロセスの高効率化、プロセスの安全性・経済性の向上などが求められており、優れた触媒（高活性、高選択性、長寿命）の開発に対する期待は大きい。

一方、化石資源の利用は二酸化炭素(CO₂)発生を伴うことや資源枯渇の恐れがあることから、植物の光合成に学び、太陽光と水、二酸化炭素から水素や炭化水素などを生成する人工光合成への期待が高まっている。人工光合成により得られる水素や炭化水素などは貯蔵できるエネルギーである化学エネルギーとしての利用とともに、基礎化学品としての利用が可能であり、変換効率の高い光触媒の開発や、目的の生成物とそれに対する酸化・還元反応の選択などが重要になる。

[研究開発の動向]

石油からの基礎化学品生産は歴史が古く、技術はほとんど確立されており、新しい技術の提案は少ない。一方、産出量が豊富で安価でCO₂生成の少ない天然ガスやシェールガスについては、まだ歴史が浅く研究開発が進められている。天然ガスやシェールガスから合成ガス（一酸化炭素と水素）を作り、その合成ガスからメタノールを合成して基幹物質とする化学が注目されるようになってきている。また、中国では石炭を原料としたC1ケミストリーが爆発的に広がっており、石炭から合成ガスを経てメタノールを合成し、このメタノールからエチレン、プロピレン、芳香族などの製造を行っている。これらに用いられるメタノール合成触媒については、

現在も基礎研究から応用研究まで広く行われており、代表的な Cu/ZnO 触媒についても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、メタノールの他に、合成ガスからの高級アルコール製造用触媒についての報告もあり、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。さらに、メタノールを経由せず合成ガスから直接的に基礎化学品を合成する研究も行われている。例えば、メタンを部分酸化してエチレンを直接合成するものがあり、現状は触媒の性能が不足して実用的プロセスではないが、 La_2O_3 に Sr をドーピングして効率向上させる試みなどがある。

化石資源の有効利用および環境負荷低減の観点から、化石資源から基礎化学品を作る過程や、メタンから水素を製造する過程で排出される CO_2 を活用する試みも始まっており、排出された CO_2 を利用してメタノールを合成するプロセスがアイルランドで稼働を始めた。また、再生可能エネルギー電力の電解水素と CO_2 からメタンを合成する power to gas プラントが欧州で多数稼働を始めている。これらの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り、化石資源から基礎化学品への変換方法が多様化する中、それぞれに適合する化学プロセスの開発が常に必要である。新たな触媒技術の開発はその中で中心的なものになっている。

人工光合成に関する研究では、これまでは主に水の分解 (還元) による水素製造、および二酸化炭素の還元再資源化が研究されてきたが、近年になって窒素の還元による資源化なども対象に加わってきた。いずれも最終的な還元生成物 (水素、炭化水素、アンモニア等) が持つ高い化学ポテンシャルを、化石資源に代わるエネルギー (燃料)、あるいは資源として利用することが目的となっている。これらの還元生成物を得るためには、電子源が必要である。その電子を光エネルギーを利用して高エネルギー状態へと励起し、水や二酸化炭素 (あるいは窒素) と反応させて、還元生成物を得ることが人工光合成の基本的なプロセスである。地球上にて半永久的に利用できる電子源としては、水分子以外に選択肢が無いので天然光合成と同様に水の酸化が人工光合成におけるキープロセスであり、これを効率良く進行させることが最重要課題である。これまでは基礎科学的な観点から、天然光合成と同様に水分子を 4 電子酸化して酸素を生成することが重要視されてきた。しかし、生成した酸素にはそれほど高い市場価値が見いだせないことから、代わりに 2 電子酸化を選択的に進行させて高付加価値の過酸化水素を生成し、同時に生成する水素などと合わせて高いコスト競争力を付加させる試みも近年始まっている。

人工光合成の実用化へ向けた共通かつ最大の課題は太陽光エネルギー変換効率の向上であり、太陽光に豊富に含まれる可視光の利用が一つの重要な鍵となる。水分解反応を例に取れば、単位面積に降り注いだ太陽光エネルギー (約 100 mW/cm^2) のうち、水素 (H_2) のエネルギー (237 kJ/mol) へ変換された割合を示す太陽光エネルギー変換効率 (以後、変換効率) が重要である。吸収された光子のうち、実際に反応に寄与した光子の割合を表す量子収率とは区別しておく必要がある。紫外光領域 (300~400 nm) の全光子を吸収可能な光触媒系を仮定し、これが全波長において量子収率 100 % で水を分解できるとしても、その変換効率は最大でも約 2 % にとどまる。しかし可視光領域の 600 nm まで利用波長が拡大できると、太陽光中の光子数の増加に伴って最大変換効率は約 16% まで向上する。仮に平均の量子収率を 30 % (70 % は電荷再結合等で消失) としても、変換効率は約 5 % と計算される。このような背景から、水分解および二酸化炭素還元のいずれの研究分野においても、可視光の効率的利用が最大の課題となっており、これを実現するために可視光応答型光触媒・光電極の新規開発が精力的に進めら

れている。また、これに並行して2段階励起機構などのプロセス開発、量子収率の向上に向けた光キャリアの移動制御、表面反応促進などが重要研究課題として進められている。特に、水中において二酸化炭素を選択的に還元するための触媒（錯体を含む）設計が重要となっている。また、元素戦略の観点から、安価かつ資源的に豊富な元素からなる光触媒および触媒材料の開発も進められており、一部に天然物由来もしくは模倣型の生体触媒系を用いる試みもなされている。さらには、社会実装を鑑み、高スケーラビリティを有するシステム構築の検討も始まっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■化石資源から基礎化学品への変換

石油の用途として、石油化学品原料としての需要が増加しているため、世界で原油 (Crude oil) から高付加価値の化学品を製造するプロセス (Crude to Chemicals、CTC) が注目されている。ExxonMobil は新たに石油化学品製造目的の石油精製プラントを2014年からシンガポールでスタートさせた。ここでは、原油を蒸留せずに直接スチームクラッカーに全量導入し、化学品原料を製造している。中国の Zhejiang Petrochemical Co. は Zhoushan、Zhejiang において UOP (Universal Oil Products) の技術を用いて原油から化学品の製造プラントの建設を行うことを決定した。サウジアラビアの SABIC とアラムコは、アラビアンライト (サウジアラビア産軽質原油) から直接化学品を製造する大規模な CTC プラントを、2025年に稼働させるプロジェクトをスタートさせた。

メタンを直接部分酸化脱水素してエタン、エチレンを生成させるメタンの酸化二量化では、以下の2つの方法が注目される。

・ナノファイバー触媒によるメタンの酸化カップリング反応 (OCM)

カルフォルニア大学の Daniel Noon らは、電界紡糸 (エレクトロスピンニング) 技術を用いて $\text{La}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$ ナノファイバー触媒を調製した。これは直径が 50 ~ 75 nm、BET 比表面積が $26\text{m}^2/\text{g}$ と小さいが、内部に細孔はなく高密度になっている。SEM 観察ではナノファイバーの間には隙間が見え、この隙間がファイバーでの拡散を高め、シンタリングを抑制していると考えられる。

・電場中での OCM

反応中に触媒層へ電場をかけることによって、反応率が上がることが見いだされている。反応率が高いところでは効果は見られないが、低温で反応率が低いところで電場をかけると転化率が向上することから、低温度での反応が可能となる。 CeO_2 に $\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ を担持した触媒では 150 °C という低温で、メタン転化率 14.9 %、 C_2 選択率 43.4 %、 C_2 収率 6.4 % を与えている。

メタンの熱分解による化学品の合成も注目される。高温での熱分解は、次の式で表されるように、エチレン、ベンゼン、ナフタレンと水素が合成される。



触媒は熔融 Fe/SiO_2 であり、石英と Fe メタロシリケートを空气中 1700 °C で熔融後、硝酸

水溶液で洗浄し、乾燥して調製されている。調製された 0.5 %Fe/SiO₂ (BET 比表面積: <1 m²/g) を 900 °C、90 vol % (CH₄/N₂) で活性化し、固定層マイクロリアクターを用いオンラインで分析した結果、950 °Cにおけるメタン転化率は 8.1 %、1090 °Cに昇温すると転化率は 48.1 % となっている。

■ CO₂ 利用による化学品合成

従来は複合酸化物触媒 (CuZnO_x) 以外のメタノール合成触媒は知られていなかったが、チューリッヒ工科大学の Martin らは、CO₂ と H₂ からのメタノール合成に In₂O₃ が高活性で安定性に優れていることを発見した。触媒は硝酸 In を ZrO₂ に含浸担持調製した In₂O₃ (9 %In) /ZrO₂ であり、In₂O₃ 単独よりも ZrO₂ に担持した In₂O₃ は特異的に活性が高くなっている。反応温度が 260 °C を超えると Cu-Zn-Al₂O₃ より活性が高く安定性も優れている。

フィッシャー・トロプシュ法 (FT) 合成による CO₂ と水素からの化学品の合成において、大連化学物理研究所の Jian Wei らは Fe₃O₄/HZSM-5 触媒が反応中に Fe₅C₂ に転化し、ゼオライトの酸点との協働作用により FT 合成が進行し、CO₂ 転化率 22 %、C₅-C₁₁ 選択率 78%、CH₄ 選択率 4 % でオレフィンが生成することを発表した。

大気中には CO₂ が約 400 ppm 含まれているが、この CO₂ を Pentaethylenehexamine (PEHA) に常温で吸収反応させ、Ru-Macho-BH pincer 触媒を加え triglyme 溶媒を用いて 155 °C に加温し、55 bar の水素圧を掛けると、79 % の収率でメタノール、6 % の収率で HCHO が得られることを、南カルフォルニア大学の G. Olah の研究室の J. Kothandaraman らが発表した。この方法を用いると、空気中の CO₂ から再生可能エネルギーによって得られた水素を用いてメタノールを合成することができる。Ru-Macho-BH 錯体の触媒量は 0.02 mol% である。触媒と PEHA は蒸留分離再使用されるので大気中の二酸化炭素削減の究極の方法の一つと思われるが、大量の空気からの CO₂ の吸収を PEHA 溶媒で行うため、溶媒の大気中への汚染問題の解決が必要である。

メタンから CO₂ フリーの水素製造技術として、ドイツのカールスルーエ液体金属研究所 (the Karlsruhe Liquid-metal Laboratory) は Sn などの熔融金属にメタンを反応器の下部から気泡で注入し、CH₄ を C と H₂ に熱分解する方法を発見した。

■ 人工光合成

可視光利用による効率向上の研究開発が進んできている。可視光の利用には 3.0 eV (400 nm の光子に相当) より小さなバンドギャップを有する半導体 (分子系ではエネルギーギャップに相当) が必要であるが、主にバンドエネルギーと水の酸化還元ポテンシャルとの間のミスマッチから、単一の半導体材料で可視光水分解を実証することは原理的に極めて困難であり、実証例はわずか数例にとどまっている。一方、植物の光合成における 2 段階励起機構を模倣した「2 段階励起型 (Z スキーム型) 水分解系では、水素生成 (水の還元) 系と酸素生成 (水の酸化) 系にそれぞれ異なる光触媒を用い、両者の間の電子伝達を可逆的なレドックスメディエーターで行うことで、各系に必要なエネルギー的要件が低減され、結果として多種多様な可視光応答型 (低バンドギャップ) の半導体材料の適用が可能となる。また、水溶液に溶解したイオン対などをレドックスメディエーターとして用いる系では、多孔質ガラスなどを利用して 2 種の光触媒粒子を 2 室へ分離し、レドックスのみ移動させることにより、水素と酸素を分離して生成

することも可能である。これは実用化に際して水素と酸素の混合気体の爆発の危険性が懸念される従来系に比べて優位性を有する。2段階励起型（Zスキーム型）水分解系は、2001年に初めて実証されて以来、可視光利用の有効な手段として大きな注目を集めている。これまでに従来の金属酸化物半導体のみならず、金属（酸）窒化物、金属（酸）硫化物、金属酸ハロゲン化物、さらには有機色素なども各系に適用され、Zスキーム型の可視光水分解が実証されている。特にごく最近見出されたビスマス系酸ハロゲン化物は、その特異なバンド構造ゆえに、可視光照射下において高効率かつ極めて安定に水を酸化できることが示されており、可視光水分解用光触媒の新たな設計指針を示したもので、今後の進展が期待される。水溶液中にレドックスメディエーターを含む反応系では、光触媒に生じた励起電子および正孔がレドックスへの逆電子移動を起こし、反応の量子収率は数%と概して低いものであったが、ごく最近になって中国のグループにより量子収率約10%で太陽光エネルギー変換効率も0.5%程度と、従来系に比べて高効率の可視光水分解が報告された。この系で用いられている2種類の光触媒材料はいずれも我が国で開発されたものであるが、その露出結晶面の制御や適切な助触媒の開発により、上記の逆電子移動を効率的に抑制して高い水分解効率を達成している。

また最近では、水分解のみならず二酸化炭素還元においても2種の可視光応答型半導体光触媒間のZスキーム機構に基づいて、水を電子源とする二酸化炭素の一酸化炭素への還元が実証されている。この場合、一酸化炭素の生成とともに水の還元による水素生成も併発しており、今後表面修飾等による二酸化炭素還元の選択性向上が望まれる。ただし、実用化の観点からは必ずしも生成物を一酸化炭素にする必要は無く、ある程度の割合で水素と混合している場合は、そのまま合成ガスとしてメタノール合成などに用いることも可能であろう。

半導体系と分子系（金属錯体等）は相補的な性質を持っていることから、両者のハイブリッドが近年になって盛んに検討されている。例えば、可視光応答型半導体である CoO_x/TaON 光電極を Re-Ru 金属錯体とハイブリッド化することにより、水を電子源とする可視光二酸化炭素還元が初めて実証されている。これらハイブリッド系では、分子系の優れた光吸収特性および高い反応選択性と、半導体系の優れた安定性という各々の長所が協奏的に発揮され、単独では実現不可能な高い機能性が実現されている。

基礎的な観点からの研究が進む一方で、将来の社会実装に向けた研究も一部で進められている。例えば、半導体光触媒の粒子を用いる水の分解は、そのシンプルさゆえに低コストが期待される。現状の研究室レベルの実験では、光触媒粒子をマグネチックスターラーなどを用いて攪拌して懸濁状態を保って光照射が行われている。しかし、大規模展開時において、このような攪拌は困難である。そこで、光触媒粒子を安価なガラス基板などの上に、その活性を維持したまま適切に固定化した光触媒シートや光触媒パネルの開発が進められている。最近では、2種類の可視光応答型光触媒を混合したペーストなどをガラス基板上に塗布・焼成して得た光触媒パネルが、Zスキーム機構に基づく可視光水分解に活性を示すことが実証されている。当初は2種類の光触媒粒子間の接触による直接の電荷移動が用いられていたが、基板上に金を蒸着して固体電子伝達体を用いることにより効率が大幅に向上し、植物の光合成に迫る約1%の太陽光エネルギー変換効率での水素製造が実証されている。さらに、金を安価な炭素系や酸化物系の電子伝達体へ置き換えて同等レベルの効率を維持するとともに、光触媒粒子の塗布時にスクリーン印刷法を適用するなどして、高い拡張性（スケーラビリティ）の実証にも成功している。

従来の人工光合成研究では、天然光合成と同じく水の4電子酸化（酸素生成）の進行が必須

と考えられてきたが、多電子過程ゆえにボトルネックとなり、反応効率の低下を招いてきた。また上述の通り、通常の水分解系では水素と酸素が同時に気相生成するため、爆発回避のためのガス分離が必須となる。この課題に対し、近年では、水の2電子光酸化により過酸化水素を高選択的に生成可能な分子系および半導体系の開発が進められている。このような系では、還元生成物の水素は気相に、一方の酸化生成物の過酸化水素は液相へと生成するため、相分離が可能となる。最近になって、Al系ポルフィリンを用いた電気化学的水酸化において、ほぼ100%の選択率で過酸化水素が生成することや、バナジン酸ビスマス半導体光電極を炭酸イオン存在下で可視光照射すると、50%を超える選択率で過酸化水素が生成することが見出されている。過酸化水素は、化学工業において漂白剤や酸化剤として大量に使用されており、付加価値が高い。

また近年、新たな人工光合成系として、窒素の直接還元によるアンモニアの合成も注目を集めている。現代社会では、アンモニアは化石資源由来の水素と空気中の窒素からハーバー・ボッシュ法を介して大量に合成されており、その際のエネルギー消費量は莫大なものとなっている。この観点から、太陽光エネルギーを利用して窒素を直接還元してアンモニアを合成できれば、そのインパクトは極めて大きい。三重結合ゆえに極めて安定な窒素分子を活性化することは容易ではない。現状ではその報告例は限定的だが、水を電子源とした窒素の還元が進行しており、人工光合成の新たな研究分野を切り拓く可能性がある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

国内では、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」(2009年度～2015年度)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生成した水素と、産業界から排出され回収したCO₂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。また、JST CREST「多様な天然炭素資源の活用に資する革新的触媒と創出技術」、さきがけ「革新的触媒の科学と創製」(2015年度～)では、化石資源消費の中で天然ガスへの依存が進む中、天然ガスの主成分であるメタンや低級アルカ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。

人工光合成に関連しては、新学術領域研究「光合成分子機構の学理解明と時空間制御による革新的光-物質変換系の創製」(2017年度～2021年度)、NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発(人工光合成プロジェクト)」(2014年度～2021年度)(人工光合成化学プロセス技術研究組合(ARPCHEM))、JST CREST「新たな生産プロセス構築のための電子やイオン等の能動的制御による革新的反応技術の創出」(2018年度～)などのプロジェクトが推進されている。

欧米では、化石資源から基礎化学品への変換や人工光合成に関するプロジェクトが数年前に終了しており、最近では目立ったプロジェクトはあまり見当たらない。その中で、欧州のpower to gasプロジェクト(HELMETH: Integrated High-Temperature Electrolysis and METHanation for Effective Power to Gas Conversion)は注目される。再生可能エネルギー由来の電力を水素に転換し、この水素と一酸化炭素または二酸化炭素を組み合わせることでメタンを

合成するものであり、化学エネルギーとしての利用と基礎化学品への利用が期待できる。約 800 °C の高温電解の SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cells) を用いると効率 88 % を達成することができるため研究が行われており、メタンネーションの熱がまだ利用できていないが、効率 75 ~ 80 % の実証結果が得られている。

(5) 科学技術的課題

シェールガス革命によりメタンが安価に供給される。メタンをコンパクトな改質装置により合成ガスとすれば、多くの化学品の合成が可能であることから、新たな C1 ケミストリーの展開が課題となる。また、人工光合成では、半導体や金属錯体それぞれにおける変換効率の向上を目指すことが重要である。ファイン触媒に関して、今後取り組むべき研究開発課題の例を以下に示す。

課題	開発技術	備考
メタンケミストリー	コンパクトなメタンの部分酸化プロセス (改質装置)	迅速部分酸化触媒とプロセスの開発 (ATR 改質装置) CO ₂ を用いた ATR 改質プロセスの開発
C1 ケミストリー	合成ガス (CO/H ₂) からメタノールを経由しない直接化学品の合成	CO/H ₂ から軽質オレフィンの合成 CO/H ₂ から芳香族の合成 含酸素化合物の合成
	低温メタノール合成触媒	メタノール合成反応は平衡上低温高圧が有利 現状は高温反応でワンパス収率は 17% 程度。未反応ガスのリサイクルに多大な動力費。
	含酸素化合物の合成	エタノールの合成
メタノールケミストリー	MTX	メタノールから選択的にプロピレン、ブテン、芳香族 (p-キシレン) 他の化学品の製造技術
メタン分解	メタンの高温熱分解	エチレン、ベンゼン、ナフタレン、水素の製造
	水素製造	メタンの分解による CO ₂ フリーの水素製造技術
CO ₂ の利用 (CCU) 技術	CO ₂ と水素から化学品	CO ₂ と再生可能余剰水素からの化学品製造技術
人工光合成の効率向上	半導体や金属錯体それぞれにおける変換効率の向上	基礎研究の着実な促進

(6) その他の課題

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には、ナノ構造制御を得意とする研究者と、産業界など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が必要である。

(7) 国際比較

化石資源における用途の燃料から石油化学原料への転換

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	○	→	メタン酸化カップリングの触媒研究など水準が高い研究を進めている。
	応用研究・開発	○	→	大学中心の研究テーマが、工業化に繋がりにくい。産業界は、海外との会社との協働・協業が弱い。
米国	基礎研究	○	→	合成ガス経由での燃料油製造で優位性がある。基礎研究に対する支援がやや低調。
	応用研究・開発	◎	→	DOE が Multi-Scale Ordered Cell Structure for Cost Effective Production of Hydrogen とのプロジェクトで低コスト水素製造の開発を支援している。
欧州	基礎研究	○	→	必要な基礎研究を着実にやっている。BASF が基礎研究は海外の大学や研究機関に調査委託している。
	応用研究・開発	◎	→	「Power to Gas」プロジェクトの推進により、メタン合成の実証プラントの構築などが進められている。BASF は海外の会社を含めた応用研究を行っている。
中国	基礎研究	◎	↑	基礎研究の目的が明確で活発である。石炭の C1 とメタンを用いた研究が精力的に行われている。大連化学物理研究所や上海石化研究所が中心となりゼオライトをはじめ多くの触媒開発がなされている。
	応用研究・開発	◎	↑	国家事業として開発技術は国営のエンジニアリング会社と共同で行っているため、工業化へのスピードが極めて速い。
韓国	基礎研究	△	→	KAIST を中心として地道な研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	ACO プロセスの開発では KBR との共研で成功させている。触媒やプロセスの開発に海外との共同開発を積極的に進めている。燃料電池発電の導入や熱回収が進んでいる。

人工光合成

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	◎	→	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光電気化学的なアプローチが急増し、世界をリードしている。新学術領域などのプロジェクトにおいて多くの波及効果の大きな成果が創出され続けている。
	応用研究・開発	◎	→	社会実装を見据えた光触媒パネルやリアクター、生成物分離のための要素技術開発なども進められている。
米国	基礎研究	○	↓	以前は JCAP プロジェクトにおいて人工光合成研究が精力的に進められていた。
	応用研究・開発	△	↓	以前に見られた大学教授主導のベンチャー企業の設立等が停滞しているように見受けられる。
欧州	基礎研究	○	↓	太陽電池を利用した光電気化学的な人工光合成研究が主である。
	応用研究・開発	△	↓	上述のような太陽電池ベースの燃料製造が盛んに検討されていたが、未だ実用化には至っていないようである。
中国	基礎研究	○	↑	従来はオリジナリティに欠ける感があったものの、その研究レベルの底上げが著しく、独創的な研究成果も多く見られるようになってきている。
	応用研究・開発	△	→	二酸化炭素と水からメタンを取り出す、燃料製造の研究などに積極的に取り組んでいる。
韓国	基礎研究	△	→	米国の JCAP との連携をし、韓国 KCAP 中心に研究。
	応用研究・開発	×	→	水の分解反応や二酸化炭素からメタンの直接生成などを試みているが基礎研究中心。

(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範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：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) 国際特許

VELOCYS INC. CATALYTIC REACTION PROCESS USING MICROCHANNEL TECHNOLOGY. WO/2007/008495. 2006-06-30.

2) Daniel Noon, Anusorn Seubsai and Selim Senkan, "Oxidative Coupling of Methane by Nanofiber Catalysts," *ChemCatChem* 5, no. 1 (2013) : 146-149. doi:10.1002/cctc.201200408

3) Kei Sugiura et al., "Low-temperature Catalytic Oxidative Coupling of Methane in an Electric Field over a Ce-W-O Catalyst System," *Scientific Reports* 6, no. 1 (2016) . doi:10.1038/srep25154

4) Oliver Martin et al., "Indium Oxide as a Superior Catalyst for Methanol Synthesis by CO₂ Hydrogenation," *Angewandte Chemie International Edition* 55, no. 21 (2016) : 6261-6265. doi:10.1002/anie.201600943

5) Jian Wei et al., "Directly Converting CO₂ into a Gasoline Fuel," *Nature Communications* 8 (2017) . doi:10.1038/ncomms15174

6) Jotheeswari Kothandaraman et al., "Conversion of CO₂ from Air into Methanol Using a Polyamine and a Homogeneous Ruthenium Catalyst," *Journal of the American Chemical Society* 138, no. 3 (2016) : 778-781. doi:10.1021/jacs.5b12354

7) 国際特許

科学技術振興機構．複合体、複合体の製造方法、アンモニア合成触媒及びアンモニア合成方法．WO/2016/088896. 2014-12-04.

8) D. Chester Upham et al., "Catalytic Molten Metals for the Direct Conversion of Methane to Hydrogen and Separable Carbon," *Science* 358, no. 6365 (2017) : 917-921. doi:10.1126/science.aao5023

9) 石川, 針生, 川崎, 大門 「70 MPa 差圧式高圧水電解スタックの開発」『Honda R&D Technical Review』Vol.28, No.1 (2016) .

10) ニュースリリース

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) .

「非単結晶光触媒で世界最高の水素生成エネルギー変換効率 12.5%を達成」https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101013.html (2019年2月12日アクセス)

11) Xinjian Shi et al., "Unassisted Photoelectrochemical Water Splitting beyond 5.7% Solar-to-hydrogen Conversion Efficiency by a Wireless Monolithic Photoanode/dye-sensitised Solar Cell Tandem Device," *Nano Energy* 13 (2015) : 182-191. doi:10.1016/j.nanoen.2015.02.018

- 12) H. Döscher et al., "Solar-to-hydrogen efficiency: shining light on photoelectrochemical device performance," *Energy Environ. Science*, no. 9 (2016) :74-80. doi:10.1039/C5EE03206G
- 13) Yiou Wang et al., "Mimicking Natural Photosynthesis: Solar to Renewable H₂ Fuel Synthesis by Z-Scheme Water Splitting Systems," *Chemical Reviews* 118, no. 10 (2018): 5201. doi:10.1021/acs.chemrev.7b00286
- 14) Hironori Fujito et al., "Layered Perovskite Oxochloride Bi₄NbO₈Cl: A Stable Visible Light Responsive Photocatalyst for Water Splitting," *Journal of the American Chemical Society* 138, no. 7 (2016) : 2082. doi:10.1021/jacs.5b11191
- 15) Yu Qi et al., "Redox-Based Visible-Light-Driven Z-Scheme Overall Water Splitting with Apparent Quantum Efficiency Exceeding 10%," *Joule* 2, no. 11 (2018) : 2393. doi:10.1016/j.joule.2018.07.029
- 16) Akihide Iwase et al., "Water Splitting and CO₂ Reduction under Visible Light Irradiation Using Z-Scheme Systems Consisting of Metal Sulfides, CoO_x-Loaded BiVO₄, and a Reduced Graphene Oxide Electron Mediator," *Journal of the American Chemical Society* 138, no. 32 (2016) : 10260. doi:10.1021/jacs.6b05304
- 17) Go Sahara et al., "Photoelectrochemical Reduction of CO₂ Coupled to Water Oxidation Using a Photocathode with a Ru (II) –Re (I) Complex Photocatalyst and a CoO_x/TaON Photoanode," *Journal of the American Chemical Society* 138, no. 42 (2016) : 14152. doi:10.1021/jacs.6b09212
- 18) Qian Wang et al., "Scalable Water Splitting on Particulate Photocatalyst Sheets with a Solar-to-hydrogen Energy Conversion Efficiency Exceeding 1%," *Nature Materials* 15, no. 6 (2016) : 611. doi:10.1038/nmat4589
- 19) ニュースリリース
新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) .
「人工光合成を実現する混合粉末型光触媒シートを開発」
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100533.html (2019年2月12日)
- 20) Kojiro Fuku and Kazuhiro Sayama, "Efficient Oxidative Hydrogen Peroxide Production and Accumulation in Photoelectrochemical Water Splitting Using a Tungsten Trioxide/bismuth Vanadate Photoanode," *Chemical Communications* 52, no. 31 (2016) : 5406. doi:10.1039/c6cc01605g
- 21) Tomoya Oshikiri, Kosei Ueno and Hiroaki Misawa, "Selective Dinitrogen Conversion to Ammonia Using Water and Visible Light through Plasmon-induced Charge Separation," *Angewandte Chemie International Edition* 55, no. 12 (2016) : 3942. doi:10.1002/anie.201511189

2.1.5 分離技術

(1) 研究開発領域の定義

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。例えば、大気汚染物質の分離、工場や火力発電所から生じる CO₂ の分離、高純度水素や炭化水素の分離、海水の淡水化や廃水処理、さらには鉱物資源の選鉱、製錬・精錬も分離だが、有害物質を多く含む低品位鉱の採掘において、目的元素を低環境負荷・低エネルギーで分離する研究開発を指す。私たちは、資源から製品を生産し、消費し、その後はリサイクルで再び分離することが求められている。現代の分離要求は多岐にわたるが、化学工学や精錬学に代表される既存の学術体系によって構築されてきた分離プロセスを越えて、イノベーションの観点からより横断的な分離工学の研究開発が期待されている。以下では、気体・液体に関する分離技術と、鉱物資源からの金属分離技術を対象とする。

(2) キーワード

膜分離、蒸留、ヒートポンプ、ガス吸収、物理吸収、化学吸収、分離膜、IGCC、CCS、CCUS、ケミカルルーピング、製錬、精錬、乾式精錬、湿式精錬、選鉱、浮選、浸出、抽出、溶媒抽出、吸着、イオン交換、沈殿、凝集、都市鉱山、レアメタル、貴金属、レアアース

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

●化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

気体、液体の分離は、平衡分離（蒸留、吸着、吸収、抽出）、速度差分離（膜分離、電気泳動、遠心分離）や晶析、イオン交換など、石油精製、石油化学、天然ガスや合成ガス精製、海水淡水化、浄水、排水処理、食品分野等で、工業的に幅広く利用され成熟したとされる分野である。石油化学産業におけるエネルギー消費は、産業分野の約 15% に相当し、そのエネルギー消費の約 40% が蒸留操作に伴う分離・精製によるものである。また、例えば分離蒸留塔でエチレンとエタンを分離する場合、その段数は 120 ~ 150 段程度、プロピレンとプロパンに至っては 250 段程度が必要とされており、省エネルギー化、高効率化、コンパクト化、低コスト化のニーズは高い。しかしながら、既存の石油精製、石油化学システムでは既存技術での最適化が図られており、また、長期信頼性・安定性・安全性（耐久性や耐汚れ性など）やメンテナンスの容易さが優先されるため、格段のエネルギー低減やコスト低減が見通せないかぎりには、新たな分離システムを導入するインセンティブはなかなか働かない状況にある。現在おこなわれているのは、蒸留操作に使用された熱エネルギーを回収し、再利用または別利用するコージェネレーションが一般的であるが、限られた高温の熱を除いては、再利用も難しい状況にある。また、蒸留に替わる省エネルギーの気体・液体の分離プロセスとして、膜分離や吸着などの新材料からのイノベーションが期待されている。気体・液体の分離は石油化学産業の他にも、様々なかたちで行われる。例えば、飲料可能な水資源が不足し、現在でも世界で 19 億人の飲料水は安全でなく、さらに、世界の廃水の 80% は未処理のまま水域に放流されている。海水淡水化や浄水における液体成分の分離技術は世界スケールの課題である。特に淡水化技術では、大きな電力を要するため、電力・コストの低減が課題となっている。

● CO₂ 分離技術

工場や火力発電所などから生じる CO₂ の分離技術が重要であることはいうまでもないが、単に CO₂ を分離するだけでなく、分離した後の CO₂ を有効利活用する CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization & Storage) の観点では技術評価が基本になる。例えば、次世代の火力発電所として注目されている石炭ガス化複合発電 (IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle) における燃焼前ガスからの CO₂ 分離や、シェールガスをはじめとする天然ガス井戸元における CO₂ と炭化水素との分離技術など、様々な条件下での CO₂ 分離がある。いずれも対象とするガスの性状や回収率、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。対象ガスに応じて、燃焼後回収、燃焼前回収、酸素燃焼回収に大別される。

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) 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・回収するものである。これは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、硫黄酸化物、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°C 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。新技術の実用化を目指すにあたっては、CO₂ の低コストで効率的な回収や固定化とともに、CO₂ を有効に利活用できるかが重要になる。

● 鉱物資源からの金属分離技術

金属資源は天然では主に鉱石として存在する。採掘された鉱石から、目的金属を多く含有する鉱石の物理選別（選鉱）を経て、製錬によって目的金属が分離回収される。自動車産業や電気電子機器産業などの我が国を支える製造業には多種多様な金属資源が欠かせず、金属資源の大半を輸入に依存する我が国にとって金属資源の確保は産業の根幹に関わる課題である。新興国の経済発展に伴い金属資源の需要は増大し、その結果、採掘される鉱石の低品位化が進んでいる。鉱石中にはヒ素などの有毒な元素が含まれており、加えて途上国では金属精製に水銀が利用されるなどして環境問題が生じている。鉱石の低品位化、環境問題、製錬の省エネルギー化・CO₂ 排出量削減などの問題に対応するため、選鉱、浸出、抽出などの技術開発が重要とな

る。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。

●都市鉱山からの金属分離

小型家電等から回収した金・銀・銅で2020年東京オリンピックの入賞メダルを製作される計画が推進されるなど、都市鉱山開発は我が国でも注目のトピックスである。我が国の都市鉱山蓄積量の2008年の試算と2017年の各金属の世界の可採埋蔵量を比較すると、アンチモンは2割以上、金は約1割に相当する量が国内に蓄積しており、資源の可能性として無視できない回収量が国内にあると推算されている。このため電子廃基板等からの貴金属・レアメタルの回収が重要視されている。廃棄物からの金属リサイクルは、形態的にも金属組成からも鉱石の精錬に用いられる技術をそのまま適用できるとは限らず、都市鉱山に適した解体、物理選別技術、ならびに精製技術の開発が重要となる。

将来的な電気自動車の普及に伴って、リチウムイオン電池 (LIB) を構成するリチウムやコバルトが供給不足になることが懸念されている。廃棄される LIB を分別すれば、構成元素は比較的明確であるので、安全なリサイクルプロセスを構築できれば有望な供給源となる。他方、2010年の中国のレアアース禁輸措置に伴うレアアース問題は沈静化したかにみえるが、2016年のレアアース生産量に占める中国の割合は83%、ディスプレイなどの重金属はほぼ100%と、依然として中国からの産出・輸出動向に左右される状況にある。微量のディスプレイを含むネオジム磁石は、パソコン、家電、電気自動車 (HV/EV) などに用いられる。電気自動車用ネオジム磁石の需要は増大することが予想され、そのリサイクル技術の確立が望まれている。

[研究開発の動向]

●化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

化学プロセスでは蒸留がかなりの割合の分離プロセスを担ってきた。蒸留は古くからアルコール工業において用いられ、石油工業の発展とともに体系化されてきた。蒸留分離は代表的な熱エネルギー多消費型プロセスであるが、その一方で、シンプルな装置構造を持ち連続的な分離を達成可能であることから、広く産業分野で利用されてきた。しかしながら、我が国の競争力強化の方向性として、省エネルギー化は避けられない状況にある。特に近年、米国等海外でシェールガスに随伴する炭化水素 (C2-C5) 等を化成品の原料として利用する流れがあり、競争力強化の観点から高効率かつ省エネルギーな分離プロセスの開発が急務となっている。また、Humphrey は1992年に Chem. Eng. Progress にて、分離技術の省エネルギー化のために熱統合があり、次にハイブリッドシステム (蒸留と吸着、膜、晶析など) を考え、最終的に膜分離が望ましいとの提案をしている。

我が国においては、2002年度から2005年度に実施された NEDO 「内部熱交換による省エネ蒸留技術開発」以降、内部熱交換技術を用いた省エネルギー型蒸留分離プロセスに関する研究開発がおこなわれており、2014年度に東洋エンジニアリング株式会社が SUPERHIDIC として商用機を受注・建設し、2016年度から丸善石油化学株式会社がメチルエチルケトン (MEK) 製造プロセスにて商業利用しており、現在、従来型蒸留塔に比して50%以上の高い省エネ

ギー率にて安定稼働している。

一方で、膜分離技術に関しては、これまで高分子膜やゼオライト膜の一部が溶剤回収やバイオエタノール精製プロセスに用いられたものの、化学産業における基幹となる化学品を分離するプロセスに膜分離が実用化された例はまだなく、現在、膜材料、膜モジュール、膜分離プロセスなどを対象に精力的な研究開発がおこなわれている。具体的には、2014年度に実施された NEDO 調査研究「基礎化学品製造における革新的省エネルギープロセスに関する先導的検討」および 2015年度から 2016年度に実施された NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラム「革新的分離技術の導入による省エネ型基幹化学品製造プロセス」において、エチレン/エタンの分離、プロピレン/プロパンの分離等に代表されるオレフィン/パラフィン系の分離、水素、窒素を含む炭化水素系の分離などを対象に開発したゼオライト、シリカ、炭素膜が高い選択性を示すことを明らかにしており、今後の展開が期待されている。

● CO₂ 分離技術

CO₂ 分離回収を主な用途とするガス吸収液の開発が、かねてより進められている。ポリエチレングリコールを主骨格に持つ Selexol 吸収液は代表的な物理吸収液である。最近、Dow Chemical 社から、既存の Selexol 吸収液より高い CO₂ 吸収能を有する次世代の物理吸収液として Selexol Max が上梓されており、UOP 社によって Selexol Max を利用した CO₂ 分離回収プロセスが提案されている。Selexol Max は、既存 Selexol 吸収液に比べて粘度が低く、ライフサイクル全体のコストが最大で 17% 削減可能であり、置き換えが進みつつある。

アミンをシリカ等の多孔質材料に担持した、固体吸収材の開発も進められている。アミンを吸収液として利用する場合に比べ、所要顕熱が低減し、溶媒に起因する潜熱損失も伴わないため、大幅な消費エネルギーの削減が期待できる。地球環境産業技術研究機構（RITE）が開発した固体吸収材を用いて、川崎重工業との実用化研究開発が進められており、2017年までに 10m³ スケールで合成した固体吸収材を用い、1.5 GJ/ton-CO₂ での低温スチーム再生性能（60℃）が実証されている。また、関西電力の石炭火力発電所での実ガス実証試験に向けた検討も進んでいる。

● 金属分離（湿式プロセス）

湿式プロセスで金属を精錬するにあたり、鉱石等に含まれる特定の成分を酸、アルカリ等の浸出液で溶かしだして固体と分離する操作を浸出（リーチング）という。主要な銅鉱石の 1 つである黄銅鉱は硫酸浸出することができないため、浸出技術が開発されている。鉄・硫酸酸化細菌を利用して鉱物の酸化溶解を促すバイオリーチングは 1970 年代に始まったラボスケール試験が、既に多くの国で産業化されている。ヒ素含有銅鉱物を利用するうえで低コストのバイオリーチングの適用が期待されている。

溶媒抽出法は目的金属の選択的分離と大量処理に適したプロセスであり、抽出剤の抽出能力と金属選択性がプロセスの成否を決定づけることから様々な抽出剤が開発されている。原子力分野で開発されたアミド系抽出剤が、近年、白金族金属の抽出に利用が検討されるようになった。チオグリコールアミド化合物は従来の抽出剤よりも耐酸性が高いことが明らかになっておりパラジウムの抽出剤として実用化も検討されるほか、錯体の構造解析研究も進んでいる。不揮発性・難燃性などの特徴を有するイオン液体の溶媒抽出への利用は 2000 年代頃から注目さ

れるようになり、近年非常に多くの研究がおこなわれている。トリオクチルアンモニウム型のイオン液体でのロジウムの選択的分離が報告されているほか、カチオン性抽出剤とアニオン性抽出剤の混合など、2種類の抽出剤を混合した協同抽出系の検討も多い。抽出分離性の観点からはイオン液体を用いて多くの優れた成果が得られているが、高粘性、水への漏出といった問題に加えて、低価格化が実用化への鍵を握る。

金属分離回収のための吸着剤・イオン交換体の開発もまた世界的に継続的に行われており、アジア諸国では植物等の天然物由来の吸着剤の開発が多く検討されているほか、最近ではグラフェン等の炭素材料を基体としたイオン交換体も検討されている。しかしながらこれらは製品安定性やコスト面に課題が多く、工業的な金属精製プロセスに用いられるためには多くの課題を解決しなければならない。吸着法による金属回収は本質的に大量処理には適していないため、希薄な溶液からの回収など、用途も踏まえた開発が重要と考えられる。

●都市鉱山からの金属元素分離、プラスチック分離

電子機器などから有価金属等を回収する際の最前段に位置するのは解体・破碎等の操作であるが、現状は専ら人力が利用されている。労働力不足が懸念される今後についてはIoTを活用した解体技術の自動化が進むと考えられる。Apple社はiPhoneを自動解体するロボット「Liam」、「Daisy」を開発しており、こうした製造業主体の解体技術の推進はリサイクル率の向上に大きく貢献するとみられる。

機器における異相境界面に選択的に応力が加わるような粉碎技術の開発が進められている。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。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。解体・破碎後の物理選別には磁力選別、うず電流選別、静電選別などの電磁氣的な力を用いる方法、風力選別や薄流選別など、流体中の粒子の運動性の差を用いた方法が挙げられる。比較的粗粒状態で高度に単体分離された塊状（現状では10 mm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ている。また、プラスチック類の相互分離においては、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る。粒子から得られる情報を基にして、センシングによる、粒子識別、選別（マニピュレーション）からなるが、技術進展が著しいAI技術との相性が非常に良い。

他方、鉱山会社ではリサイクル原料を焼却、破碎、熔融等の前処理を行った後、スケールメリットを活かし鉱石の製錬工程にリサイクル原料を組み込んだ濃縮・回収が行われている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

●化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

上述したようなエチレン/エタン、プロピレン/プロパンのようなオレフィン/パラフィン はポリマー原料として重要であり、これまでは加圧系にて数百段にもなる蒸留塔を用いて用いた分離がなされてきた。また、このアップストリームプロセスにおいては水素やメタンの分離、ダウンストリームではベンゼン、トルエン、キシレン (BTX) や脱水プロセスなどがあり、そのほとんどすべてが蒸留塔により分離されている。もちろんこれらのプロセスは最適な熱統合がなされ、省エネルギー化が図られているが、機能性化学品製造を考えると上述したような原油資源に代表される石油化学プラントのみならず、原料多様性の観点から、シェールガス、コンデンセート、バイオマスなど様々な資源を対象とする分離技術の開発が必要になる。これまで、機能性化学品製造を対象とした気体・液体分離は汎用性の観点から蒸留が用いられてきたと考えられるが、この製造プロセスには非常に多くの反応や分離もしくは反応分離プロセスが存在しており、それに対してアップ/ダウンストリームプロセスの影響を考慮した分離技術の選定や評価はなされたことがなく、蒸留塔の比較は極めて限定的である。上述の NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラム「革新的分離技術の導入による省エネ型基幹化学品製造プロセス」において、膜分離に限定されるが関連する取り組みがなされており、今後の展開が期待される。

また、米国においては ALTSEP という ACS Green Chemistry Institute (米国化学会) と American Institute of Chemical Engineers (米国化学工学会) が連携し、Sustainable Separation Processes に関する取り組みを 2015 年から開始しており、膜や吸着に関する材料からそれを利用するプロセスまでを対象に産学連携体制での検討を開始している。この他、米国化学工学会では 2016 年末に The Rapid Advancement in Process Intensification Deployment (RAPID) が、Process Intensification (プロセス強化) に関する活動を活発に展開しており、この中で研究プロジェクトも展開しており、膜分離、吸着分離、反応分離やハイブリッド分離技術に関する研究が行われている。

●CO₂ 分離技術

常圧・室温付近で化学吸収させるアルカノールアミン水溶液だけでなく、近年では、高圧下でも駆動可能なアミン系ガス吸収液の開発が進んでいる。2015 年には、日揮と BASF 社との共同開発品であるアミン系吸収液 HiPACT を利用した CO₂ 回収を伴うガス処理・CCS 設備がセルビアのナフトナ・インダスリジヤ・サービジェ (NIS) 社において建設され、商用運転が開始されている。

既存のガス吸収液における CO₂ の分離エネルギーを削減することを目的とし、2015 年に JST・ALCA の研究プロジェクトの一環として、町田洋 (名古屋大学) らにより「相分離型省エネルギー CO₂ 吸収剤の開発」が進められた。町田らが提案する相分離型 CO₂ 吸収材は、CO₂ 吸収時に相分離を引き起こし、CO₂ 濃縮相を形成することで従来よりも大幅な省エネ化が可能となる。

また、CO₂ とメタンをはじめとする炭化水素の分離、CO₂/水素分離、CO₂/窒素分離、CO₂/硫化水素分離などを目的としたガス吸収液の開発と評価も進められている。なかでも、イオン

液体や深共融溶媒など新規物理吸収液やハイドレートを用いた分離法の開発が、国内外で盛んに実施されている。

●銅鉱石の低品位化

銅鉱石中のヒ素含有濃度が増加しており、有毒性の高いヒ素の蓄積が懸念されていることから、鉱石からヒ素を除去する技術、あるいはヒ素を溶出速度が遅い化合物として固定する技術の開発が求められている。日本に輸入されている鉱石はヒ素濃度 0.2%程度の低いものに限定されているが、チリ等の産出国では数%程度のヒ素を含有する鉱石も処理している。環境基準を満たしながらヒ素を分離・除去あるいは固定化する技術開発が今後一層重要になる見込みである。

●都市鉱山からの金属回収

JX 金属社の佐賀関精錬所では、銅精鉱に対するリサイクル原料の比率が高まっており、生産量に占めるリサイクル原料の比率は金が 25%、銀が 74%、白金、パラジウムはほぼ全量がリサイクル原料由来になっている。

スマートフォン等の小型家電の普及ならびに電気自動車の今後の発展見込みより、リチウムイオン電池（LIB）からのレアメタル回収は今後一層重要になると予想される。世界的にもこの課題への関心は高く、欧米諸国でも中国でも LIB のリサイクル技術開発に関する研究報告が増加している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

●化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

・JST 未来社会創造事業

探索加速型「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域において「高効率・高性能分離技術を用いたプロセス強化技術」が設けられており、高効率・高性能な革新的分離プロセスを開発し、プロセス強化を行う必要があるとしている。現在の採択課題には下記の CO₂ 分離を除けば、化学プロセスにおける気体・液体の分離は含まれていないが、今後の展開が期待される。

・戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）

脱炭素社会実現のためのエネルギーシステムにおいて「革新的炭素資源高度利用技術」が設けられており、その中に「安価な酸素製造技術の開発」、「膜分離・精製技術の開発」、「ライフサイクルアセスメント（LCA）を考慮した CO₂ 排出量を最小化する評価手法の開発」が開発課題に上がっている。いずれの課題においても、膜分離技術が次世代の分離技術の基盤となるべく課題設定がなされており、多様な分離材料の合成から利用プロセスの開発、そして温室効果ガスの削減に資する分離技術が求められている。

●CO₂ 分離技術

・JST 未来社会創造事業

2050 年の温室効果ガスの大幅削減に向け、エネルギーの安定的な確保とエネルギー利用の効率化（省エネルギー技術、再生可能エネルギーの高効率化、水素や蓄エネルギー等によるエネルギー利用の安定化技術）などを対象とする領域の探索加速型「地球規模課題である低炭素

社会の実現」の公募があった。重点公募テーマの『『ゲームチェンジングテクノロジー』による低炭素社会の実現』の一つとして、平成 29 年より「CO₂ 分離機能とエイジング耐性を兼備した多孔性複合膜」が、Easan SIVANIAH (京都大学) らにより実施されており、最新のポリマーと MOF との複合材料により、1,500 円 / ton-CO₂ の実現を目指している。

・ NEDO 次世代火力発電等技術開発

酸素キャリアによる石炭の酸化反応により CO₂ のみを排出させるケミカルルーピング技術を利用し、CO₂ 分離・回収装置そのものを廃止することを目指している。本技術が実現できれば、流動床燃焼を用いる中小規模の石炭火力発電に適しており、微粉炭燃焼では使いにくい低品位炭やバイオマスを使えるという特長も有している。

● 金属分離

・ 戦略的都市鉱山研究拠点 (SURE)

産業技術総合研究所 (産総研) では戦略的都市鉱山研究拠点 (Strategic Urban mining Research base, SURE) を設立し、金属資源循環率の向上、技術向上に伴う都市鉱山市場の拡大、リサイクル装置産業の成長とリサイクルプラントの国産化等を目指した活動を行っている。関連して「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業 (H29 年度～ H34 年度)」が NEDO にて実施中であり、小型家電等の廃製品を対象に、レアメタル等も含めた多様な金属の低コスト・高効率なリサイクル技術開発が行われている。

・ リチウムイオン電池 (LIB) のリサイクル

JX 金属では、リチウムイオン電池リサイクルの実証化試験工場を福井県敦賀市に建設しており、焼却、破碎/篩別して得られる電池粉の不純物除去、溶媒抽出工程を経てコバルト、ニッケルを電解回収し、マンガン、リチウムは炭酸塩として分離回収している。ドイツでは LIB リサイクルプロジェクトとして LithoRec II が進められ、基礎研究からパイロットプラントの設置までが実施されてきた。

・ JST 未来社会創造事業

2018 年度より、探索加速型「持続可能な社会の実現」領域の重点公募テーマ「新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新」において、以下の 5 つの研究課題が開始している。

- 「アルカリハイドロメタラジーによる資源循環イノベーション」(宇田哲也 京都大学)
- 「貴金属・レアメタルの革新的リサイクル技術の開発」(岡部 徹 東京大学)
- 「相転移型水系溶媒抽出によるレアメタル分離分析システムの開発」(塚原剛彦 東京工業大学)
- 「有機溶剤を用いた革新的レアメタル分離回収プロセスの創出」(三木貴博 東北大学)
- 「リチウムイオン電池完全循環システム」(渡邊 賢 東北大学)

・ 太陽光発電パネルのリサイクル

我が国の太陽光発電システムは再生可能エネルギー固定価格買取制度によって急速に拡大し

ており、政府の長期エネルギー需給見通しの2030年度目標に対し、既に約6割が達成されている。一方で、拡大した太陽光発電システムは将来使用済みとなり廃棄されると見込まれ、リサイクルならびに適正処分の確立が今後重要になる。NEDOでは「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト(2014～2018年度)」が実施され、分解処理困難な太陽電池モジュールの低コスト分解処理技術、撤去・回収・分別・リユース関連技術などについて検討されている。有価金属のリサイクルとして、シリコン系太陽電池からの銀の回収、CIS系太陽電池からのインジウム、ガリウム等の回収が重要視されている。

・海底熱水鉱床における取り組み

JOGMECでは、海底熱水鉱床の資源量調査、採鉱技術開発、選鉱・精錬技術開発、環境影響評価等を行っている。沖縄近海において海底約1600mの海底熱水鉱床を掘削・集鉱し、海水とともに連続的に洋上に揚げる世界初の採鉱・揚鉱パイロット試験に成功している。今後、採鉱・揚鉱技術に係る商業化に向けた課題を抽出するとともに、選鉱・製錬技術も含む生産技術の検討を進める予定としている。

・銅原料からの不純物低減技術開発

銅精鉱中のヒ素が増加していることが銅製錬事業の問題となっていることから、現地の環境規則を遵守しつつ銅鉱石中のヒ素を海外鉱山で分離・処分する鉱石処理プロセスの要素技術の開発が4年計画で実施されている。銅鉱物とヒ素鉱物は性質が類似して既存技術では分別が困難なため、分析技術に加えて粉碎技術・選別技術を開発してヒ素分離プロセスを確立することを目指している。

(5) 科学技術的課題

●気体・液体の分離技術(化学プロセス)

・蒸留：投入エネルギーの削減、装置サイズの縮小

蒸留分離プロセスは、塔頂蒸気再圧縮や内部熱交換のようにヒートポンプ技術を用いることで、従来に比して50-70%の省エネルギー化が可能となる新技術が社会実装されているが、その装置サイズやさらなる省エネルギー化についての検討が求められている。

・膜分離：分離可能系の明確化、多成分系分離、汚れ系対応、コストなど

機能性の化成品製造プロセスに限っても、その分離対象は多岐に渡っており、どのような膜材料でどの程度の分離をおこなえるのか、また、現状と同等の生産量を達成するためには、どの程度の透過速度、分離係数が必要になるのかといったデータベースの構築が課題である。加えて、不純物やコーキングの可能性のある系のように多成分系(含む汚れ系)の分離に関する信頼度について実績を積み上げる必要がある。

この他、膜エレメントやモジュールのコスト、制御系の構造などが不明であり、現状では高い省エネルギー性を示しつつも経済的に成立しない可能性が否めないことから、これらの検討が求められている。

膜分離技術は、蒸留のように熱力学的な平衡関係に支配されない速度差分離技術であることか、分離に要するエネルギーの大幅な省エネルギー化が期待されている。しかしながら、機能

性化学品製造の処理量は、一般的に数十から数百トンのスケールが主流となっており経済効率のためのスケールメリットの追求がおこなわれている。このようにプラントの大型化のために、精度の高い設計技術、信頼性のある装置技術、安定な運転技術が必要であるが、これを構築するためにはコンピュータによるプロセスシミュレーション技術も必須である。

● CO₂ 分離技術

・ガス吸収液

Selexol 吸収液など現行ガス吸収液では、CO₂ と他のガスとの分離選択性に劣るため、利用可能な資源を十分に回収利用できていない。したがって、CO₂ 吸収能に優れるだけでなく、炭化水素や水素、硫化水素や窒素などを含む混合ガスからの分離選択性に優れるガス吸収液の開発が重要になってくるであろう。また、ガス吸収液だけでなく、CCS プロセス全体を通じたトータルパッケージコストの低減、EOR との組合せなど CO₂ の有効利活用も見据えたプロセス設計が大切である。

・イオン液体

新規ガス吸収液として注目されているイオン液体については、国内外の多くの研究者によって、イオン液体を構成するカチオンとアニオンの組合せにより CO₂ 吸収量がどのように変化するかについて実験データの蓄積が進んできたが、精度の高い信頼性に優れるデータは限られる。データの良し悪しの判別は難しく、例えば、量子化学計算と人工知能との組合せによる分子設計などを進めることによる取捨が進むことが期待される。また、フッ素系アニオンに変わる低コストアニオンの探索、合成・精製にかかるコスト低減による安価な製造法の確立、高粘性が原因でガス吸収液として利用しにくい一部のイオン液体などを、高分子膜や無機膜に担持させた支持膜としての利用や開発、などが期待される。

●都市鉱山からの金属回収

製品の機能向上やコストダウンを目指して製品を構成する金属が複雑化した結果、リサイクルにおける分離操作が難しくなるといった問題が挙げられる。例としてハードディスクの磁性材料にルテニウムを用いた製品が普及し、そのリサイクル工程において白金との分離が困難になるといった問題が発生している。組成が変化するリサイクル原料に対する分離技術開発が今後重要になると考えられる。

LIB の正極材を構成する金属のリサイクルは世界的に注目される課題であり、国内でも実証試験が進められている。LIB は要素技術開発に加えて、廃棄される LIB の回収・集約によるリサイクル率の向上が重要になると予想される。

電子機器や電気自動車にはネオジム磁石等の希土類磁石が用いられるが、希土類金属はイオン半径などの物性が類似するために相互分離が難しく、鉱石からの製錬においても、リサイクルにおいても希土類同士の分離が課題となる。

●抽出試薬開発の戦略

溶媒抽出プロセスでは、特定の金属を抽出分離できる抽出剤を見出すことができれば分離プロセスを大幅に効率化することができる。このため世界的に多種多様な抽出剤開発が行われて

いるが、目的の金属抽出能力や金属選択性を満たしても、抽出剤が溶剤によく溶けなければ工業化できない。さらに、原料水相には漏出せず、毒性や引火性などの安全性が高いなど、様々な工業化のための要件を満たさなければ実用化は困難であり、これらの要件を満たした場合でも、化審法における毒性、蓄積性などの審査費用を含めたコストが見合わなければ実プロセスへの導入が見送られる。従って新規抽出剤は工業化に求められるこれら多くの要件を満たすことを前提とした開発が肝要となる。抽出剤開発において溶剤への溶解性が重要な課題となる一方、抽出剤の金属選択性や抽出能力が、抽出剤を溶かす溶剤によって変化する事例も最近幾つか報告されており、抽出プロセスに適した溶剤を見出すことで新たなブレイクスルーが見つかる可能性もある。

近年関心を集めてきたイオン液体を用いた溶媒抽出系に関する研究は、2000年代初頭の初期的な研究と比較して高度化・複雑化しており、イオン液体を用いた学術的な研究は成熟段階に至ったと考えられる。今後はこれらの中から優れた抽出剤が見いだされ、高濃度・大量処理に耐えうるなど実用化に向けたプロセスの開発に移行することが望まれる。

(6) その他の課題

●気体・液体の分離技術 (化学プロセス)

膜分離を対象とした材料系の研究者は多く、それに関連する学術的な論文も多く発行されているが、膜分離をプロセスとして捉えた研究者は限定的であり、材料からプロセスやシステムまでを対象とするマルチスケールな研究体制の構築が課題である。

国内における分離技術分野の研究者は限られるため、それぞれが持つ固有の技術を相互に補完しながら研究を進めていく体制が重要である。特に、分離・吸収にかかる素材開発からプロセス設計に至るまでの実用化を視野にした産官学によるプロジェクト型のチーム構築が、益々重要になってくるであろう。

●金属分離技術

小型家電リサイクル法が2013年に施行され、自治体等による使用済み小型家電の回収が進められている。2016年の回収量は約58,000トンで、解体後の電子基板や金属部分から金属資源の回収が行われ鉄が約2万7千トン、アルミニウムが約2千トン、銅が約1,500トン、銀が2,563kg、金が181kg回収されている。同法の施行以前に算定されていた、小型電子機器の年間排出量に含有される金属では銀が約50トン、金が約6トンと試算されていたことから、再資源化に至る量は現時点では当初見込みの10%にも達しておらず、今後リサイクルのさらなる推進が望まれる。資源有効利用促進法によりメーカーによる回収が促進されてきたパソコンのように、小型家電においても製造業がリサイクルのシステムに組み込まれることがリサイクル率の向上に有効と考えられる。

現行の都市鉱山開発で実質的にリサイクルされているのは構成する金属のうち経済的に採算の合う貴金属類が中心で、電子機器を構成するレアメタルの大半は回収・再利用されず捨て置かれているのが現状である。リサイクル率を向上し、再利用される金属種が増えるためには、換金性の高い金属インゴットとしてのリサイクルだけでなく、製品製造に必要な材料を調達する手段として多種の金属がリサイクルされることが重要と考えられる。その実現には、動脈産業と呼ばれる製造業を巻き込んだリサイクルシステムの構築が求められる。

(7) 国際比較

気体・液体の分離技術 (化学プロセス)

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	◎	↑	早稲田大学、産総研、広島大学、芝浦工大、山形大学、日揮、NOK による NEDO 無機膜分離プロジェクトが実施された。
	応用研究・開発	○	↑	JST や SIP による膜分離に関する大型プロジェクトが開始。
米国	基礎研究	◎	↑	ExxonMobil と Georgia Tech が連携し、炭素膜を用いてパラキシレンを高効率に分離。
	応用研究・開発	○	→	ALTSEP や RAPID など学会を中心とした産学連携体の構築が進んでいる。
欧州	基礎研究	◎	↑	Horizon2020 にて、無機分離膜の開発並びに反応分離プロセスの研究がなされている。
	応用研究・開発	△	→	FP7 の後継プロジェクトとして Horizon2020 にて、すべての膜材料を対象に大規模な研究が行われている。
中国	基礎研究	◎	↑	大連理工大学、南京工業大学などで無機分離膜 (ゼオライト) の開発が加速している。
	応用研究・開発	△	↑	上記大学からスピンアウトしたベンチャー企業などが集積化されている。
韓国	基礎研究	◎	↑	多くの大学が研究所にて膜分離技術に関する研究がおこなわれている。
	応用研究・開発	△	→	CO ₂ 分離・回収に関するプロジェクト内で分離膜の開発が行われている。

CO₂ 分離技術

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	○	→	RITE、産総研、名古屋大学、日本大学などにおいて、ガス吸収液の研究が精力的に実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	日本 CCS 調査による CCS 実証試験が苫小牧にて実施中。IGCC や IGFC からの CO ₂ 分離回収については、大崎クールジェンにて実証試験中。RITE、三菱日立パワーシステムズ、電源開発、東芝、産総研などで精力的に研究中。
米国	基礎研究	◎	↑	DOE の NETL の他、Dupont 社とカンザス大学のグループ、テキサス大学やノートルダム大学が精力的にガス吸収液 (イオン液体) の開発と評価を進めている。一方、ハイドレートを利用した CO ₂ /CH ₄ などの分離技術について、コロラド鉱山大学で精力的に実施されている。
	応用研究・開発	○	→	Dow Chemical 社によるガス吸収液 (Selexol Max) の開発と UOP 社によるプロセス開発が進められており、CO ₂ をはじめとする酸性ガスを高効率に分離可能。
欧州	基礎研究	○	→	ポルトガルのアヴェイロ大学で、CO ₂ /CH ₄ などガス分離の研究が精力的に行われている。
	応用研究・開発	○	→	BASF 社や Linde 社、Clariant 社などによりガス吸収液とプロセスの開発が精力的に進められており、実証も進んでいる。
中国	基礎研究	◎	↑	多くの大学でガス吸収液の開発と評価が進められており、論文数も増加傾向。
	応用研究・開発	○	→	Tianjin にて、GreenGen プロジェクトによる 265 MW の IGCC 稼働中。2020 年稼働を念頭に EOR 目的の CCS が計画されている。
韓国	基礎研究	△	→	KAIST と KCRC にてガス吸収液の開発が進められている。
	応用研究・開発	△	→	2016 年末に、Taean にて、380 MW の IGCC が稼働した。CCS 設備はないがアミン吸収液による CO ₂ 分離を実施中。

金属分離

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	○	→	当該分野の研究者数の漸減は懸念されるが、リサイクル分野では先鋭的な研究が進められており、論文数等も堅調に推移している。
	応用研究・開発	○	→	NEDOで太陽光発電リサイクル技術開発は進められるなど、先進的な取り組みが進む。貴金属等のリサイクル率向上には課題が残る。
米国	基礎研究	○	→	イオン液体、金属・有機構造体 (MOF) など、最先端材料研究を牽引しているが、精錬・都市鉱山に密接な基礎研究で特筆する成果は見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	水処理など、環境分野の研究は散見されるものの、非鉄金属探鉱費が減少するなど、活発な動きとは言い難い。
欧州	基礎研究	○	→	ドイツ・フランス・英国などでの関連分野の公的研究組織は堅調で、論文数は過去2年で増加傾向にあり、被引用数が多く質の高い基礎研究が継続的に実施されている。
	応用研究・開発	◎	↑	WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) 指令に沿ったリサイクルプロセスの構築に向けた動きは世界的に最高水準にあり、各国で活発な取り組みが進められている。
中国	基礎研究	○	↑	選鉱・浸出・抽出について論文数は世界一で研究者数も多い。レアアースなど技術集積の水準が高い分野もある。
	応用研究・開発	◎	↑	LIBのリサイクルなど、今後を見据えた課題への研究開発が積極的に進められている。研究者数は最も多い。
韓国	基礎研究	○	→	LIB、レアアースなど、リサイクル分野では積極的な研究開発が行われている。
	応用研究・開発	△	↓	海外事業の縮小、リサイクル事業の停滞など、鉱業政策全般に停滞の動きが強く、研究開発も進んでいるとは言い難い。

(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) J. L. Humphrey, A. F. Seibert and R. A. Koort, "Separation technologies: Advances and priorities," Technical Report, U.S. DOE, 1991.
- 2) J. L. Humphrey and A. F. Seibert, "Separation Technologies: An Opportunity for Energy Savings," *Chem. Eng. Progress*, 88 (1992) : 32-41.
- 3) Hiroshi Machida et al., "Development of phase separation solvent for CO₂ capture by aqueous (amine + ether) solution," *J. Chem. Thermodyn.*, 113 (2017) : 64-70. doi:10.1016/j.jct.2017.05.043
- 4) The 21st International Solvent Extraction Conference, programbook.
- 5) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 『世界の鉱業の趨勢 2017』.
- 6) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 『世界の鉱業の趨勢 2018 韓国』.
- 7) 原田幸明他 「[特集] 都市鉱山リサイクルの課題と展望」『化学工学』82 (2018) : 410-438.
- 8) 南悌二他 「[小特集] 太陽光発電に関わるリサイクル技術」『化学工学』82 (2018) : 439-454.
- 9) 谷ノ内勇樹他 「[特集] 貴金属のリサイクル関連技術の最前線」『日本金属学会誌』81 (2017) :

151-195.

- 10) 佐野正樹『季刊 資源と素材』Vol.2 No.3 (2017) : 38.
- 11) P. A. Kobielska et al., "Metal-organic frameworks for heavy metal removal from water," *Coord. Chem. Rev.*, 358 (2018) : 92-107. doi:10.1016/j.ccr.2017.12.010
- 12) X. Zheng et al., "A mini-review on metal recycling from spent lithium ion batteries," *Engineering*, 4 (2018) : 361-370. doi:10.1016/j.eng.2018.05.018
- 13) A. Kumar Awasthi and J. Li, "An overview of the potential of eco-friendly hybrid strategy for metal recycling from WEEE," *Resour. Conserv. Recycl.*, 126 (2017) : 228-2239. doi:10.1016/j.resconrec.2017.07.014
- 14) J. L. Wankowski et al., "Ionic liquid (IL) cation and anion structural effect on metal ion extraction into quaternary ammonium-based ILs," *Solv. Extr. Ion Exch.*, 34 (2016): 48-59. doi:10.1080/07366299.2015.1110410
- 15) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100070.html (2019年2月12日アクセス)
- 16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100129.html (2019年2月12日アクセス)
- 17) 産業技術総合研究所 戦略的都市鉱山研究拠点 (SURE) , <https://unit.aist.go.jp/emri/sure/> (2019年2月12日アクセス)

2.1.6 複合材料

(1) 研究開発領域の定義

金属やプラスチック、セラミックスなど二種類以上の材料を組み合わせることによって、個々の材料では持ち得ない機能・性能を有する材料の創出を目指す研究開発領域である。特に、繊維状の強化材とマトリックス材を複合化した材料は、均質材料では達成できない高比強度（引張強さ／比重）や高比剛性（剛性／比重）、高耐熱性などの特性を発揮可能であり、代表的な材料には炭素繊維強化プラスチック（CFRP）、セラミックス基複合材料（CMC）、セルロースナノファイバーなどがある。

(2) キーワード

複合材料、炭素繊維強化プラスチック、炭素繊維、熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂、セラミックス基複合材料、セルロースナノファイバー、CNF、高比強度、軽量化、プリプレグ、樹脂含浸成形法、RTM、CFRP、GFRP、SiC/SiC、CMC、MMC

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

複数の異なる材料の複合化によって、均質材料では達成できない特性を発揮する複合材料は、目的に応じて設計可能な材料とも言える。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、軽量構造材料は自動車、航空機、風車発電等、輸送・エネルギー分野への適用により、その解決に直接的に寄与する。中でも、繊維強化プラスチック（FRP）は高比強度、すなわち強くて軽い、という点で金属材料に大きく優り、さらに理想的には、構造物にかかる荷重の分布に合わせて繊維（強化材）を配置することで、より効率的な材料として機能しうる。一方、金属材料と比較して高価格であり、信頼性、加工性、生産性等にも課題が多いことから、まだ金属系構造材料ほどには普及していないのも事実である。また、セラミックス基複合材料や耐熱合金・金属間化合物に関する技術革新は、材料の耐熱性・靱性を向上させ、航空機用エンジンの高効率化に大きな期待が寄せられている。さらに、航空機分野に比べて市場規模は小さいものの、宇宙分野においても特殊環境下で高信頼性が維持された材料の候補として、複合材料への期待が高まっている。また、再生産可能な資源の有効活用および石油資源からの脱却の観点から、強化材としてセルロースナノファイバーが注目を集め、産学官での取組が活発化している。

[研究開発の動向]

一般に、複合材料は強化材としての繊維とマトリックスから構成され、前者は炭素、ガラス、セラミックス、後者は樹脂、セラミックス、金属が代表的である。実用化された複合材料の中ではFRPが最も普及しており、FRPにはガラス繊維強化プラスチック（Glass Fiber Reinforced Plastics : GFRP）と炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP）がある。最も使われているのはGFRPであり、その用途は浴槽・浴室ユニット等の住宅機材が代表的であり、他に建設資材、輸送機器、浄化槽などがある。一方、CFRPはGFRPの数倍の比強度を有するが、高価であるため、一般的な用途はスポーツ用品等に限定されてきた。しかし近年、輸送機器への適用により、CFRPに対する注目度が高まっている。

その代表例が航空機であり、例えばボーイング 787 の機体構造重量の約半分が CFRP である。また、自動車についても、2013 年 11 月にドイツ BMW 社は、世界で初めて CFRP を車体の主要骨格に採用した電気自動車「i3」を発売した。

CFRP 技術開発は素材開発と成形技術開発に大別される。素材については、炭素繊維にアクリル繊維を使用する PAN 系、ピッチを使用するピッチ系がある。いずれも日本発の技術であり、その生産量のおよそ 6 割超を日本メーカーが占める。前述のボーイング 787 の場合も、CFRP の 70% が日本メーカーにより製造されている。

また、炭素繊維は用途・成形法により、長（連続）繊維と短繊維が使い分けられている。炭素繊維はアクリル繊維を空气中・高温で耐炎化（焼成）して製造するため、高コストかつ高 CO₂ 排出であり、その大幅改善が求められる。一方、樹脂には熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂があり、これも用途・成形法により使い分けられている。

成形法については、プリプレグ（強化繊維の織物に樹脂を含浸させたシート状の中間基材）をオートクレーブ（圧力釜）にかける方法が代表的であり、高強度、高剛性かつ品質安定性に優れる。一方、高価であり、成形性、生産性に難があるため、用途が限定される。例えば航空機のように高価な材料の適用が認められやすい場合でも、主翼、胴体という主構造を除く尾翼、ドア等には、新たな成形法が望まれる。その候補は脱オートクレーブ成形法であり、プリプレグを用いる方法と RTM (Resin Transfer Molding : 樹脂含浸) 成形法がある。RTM 成形法は繊維のみを予め積層し、その後に樹脂を含浸させるので高価なプリプレグが不要となる。これは 1970 年代に国内において確立されたが、その発展形である VaRTM 成形法（真空樹脂含浸成形法）は低温で樹脂含浸を行うもので、より低コスト化が可能となる。脱オートクレーブ成形法の最重要課題の一つはボイドの低減である。

さらに、自動車のように、安価かつ成形性、高生産性がより一層重視される生産には、プレス成形、射出成形等が適している場合が多い。以上の成形法を高性能かつ高コストの順に並べると、オートクレーブ、RTM、プレス成形、射出成形となる。このとき、最適な素材の組み合わせも成形法に依存する。繊維については、オートクレーブ、RTM には長繊維、プレス成形、射出成形には短繊維が用いられる。一方、樹脂は、オートクレーブ、RTM には熱硬化性樹脂、射出成形には熱可塑性樹脂、プレス成形には両方の樹脂が候補となり得る。なお、樹脂については、必ずしも成形性、生産性だけを考慮して使い分けることにはならない。例えば、航空機エンジンのファンに適しているのは熱可塑性樹脂と考えられているが、これはバードストライクに対する耐衝撃性が熱硬化性樹脂より優れているためである。ただし同じエンジン部品でも、圧縮機の高温部（最高でおよそ 300℃）に適用可能な CFRP 開発の場合、温度特性から熱硬化性樹脂が適当と考えられている。

FRP 以外の複合材料には、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 (Metal Matrix Composites : MMC)、セラミックス基複合材料 (Ceramic Matrix Composites : CMC) がある。中でも CMC は①酸化物系 CMC、②非酸化物系 CMC に大別され、非酸化物系 CMC である SiC/SiC CMC 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への適用が期待され、国内外の航空機エンジンメーカー（特に GE、IHI）が中心となり開発が進められている。

SiC/SiC CMC は、SiC 繊維の織物にマトリックスとしての SiC を含浸させたものである。SiC 繊維が開発されてからこれまでの約 30 年の間に材料そのものに関する多くの基礎的知見

が得られただけでなく、工業的プロセス技術や特性評価技術の進展など、実用材料としての地位を築きつつある。ただし、現行のNi基超合金と比べると高価であるという欠点もあり、コスト低減が求められている。さらに、破壊靱性向上の観点から、マトリックスに生じたクラックが繊維に伝播することを防ぐために、繊維表面（マトリックスとの界面）にコーティングを施すなどの処置も必要と考えられている。また、この材料は1400℃での使用にも十分な高温強度を有するが、燃焼ガスに含まれる水蒸気により高温酸化が起こる。そのため、環境遮蔽コーティング（EBC）が必要とされる場合がある。

近年、持続性という観点から再生可能かつ生物由来の有機性資源であるバイオマス素材が注目されているが、その一つとしてセルロースナノファイバー（Cellulose Nano Fiber : CNF）を強化繊維として用いる複合材料開発に向けた動きも活発化している。CNFは、木材などの植物中から得られるパルプをナノレベルまで解きほぐしたものであり、鉄の5倍の強度で1/5の軽さ、熱膨張率は石英ガラス並という特性を持っているため、樹脂などと複合化することで軽量高強度複合材料になることが期待されている。また、CNFの原料であるセルロースはあらゆる木材や植物から抽出可能であるため、資源枯渇の心配がないことも特徴である。一方、CNFは表面に水酸基が多数存在するため親水性が極めて高く、疎水性の石油由来の樹脂と複合化するためには表面を化学処理する必要があるため、製造コストが高いという課題がある。そのため、現状では機能性添加剤として親水性CNFを用いた大人用おむつや液だれ防止のボールペンインクなどでの実用化に留まっている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

複合材料全般で注目すべき技術の一つが構造ヘルスマニタリング技術である。例えばCFRPの場合には、光ファイバセンサなどを製造時に埋め込み、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。また、モデリング・シミュレーションの研究開発も、成形時の樹脂挙動、成形品の機械的特性等を高精度で予測するために重要である。これらは認証の際にも、試験データを補完する役割として重要度が増している。

CNFに関しては、2014年6月には、オールジャパン体制でナノセルロース（セルロースナノファイバー、セルロースナノクリスタル、およびそれらを用いた材料の総称）の研究開発、事業化、標準化を加速するためのナノセルロースフォーラムが発足し、木材、製紙、化学・樹脂、自動車、電気・電子製品など幅広い分野から200を超える企業が参画している。また、ナノセルロース研究を行っている個人会員とともに、経済産業省、環境省地球環境局、特許庁、（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構、（株）産業革新機構、岡山県、高知県、愛媛県、京都市などの50近い公的機関が特別会員として参加している。

この動きに刺激され、東海、近畿、中国、四国などの地域においてもナノセルロースに関する研究会やコンソーシアムができていく。このような地域の動きを受けて、2015年4月にはナノセルロースフォーラム内に地域分科会が設立され、地域のナノセルロース研究開発の支援に向けて動き出している。セルロースナノファイバーの社会実装に向けた産官学のダイナミックな動きは、ますます活発化すると考えられる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

・CFRP

日本は炭素繊維の生産では世界市場で圧倒的な強さを維持しているが、成形技術においては、米国、ドイツが日本と同等以上と見られる。主に、米国は航空、ドイツは自動車を対象としてその技術を磨いている。代表的な研究開発拠点として、米国ではデラウェア大学、ドイツではブラウンホーファーの ICT (化学技術研究所)、生産技術・応用マテリアル研究所 (IFAM) が挙げられる。また、英国のブリストル大学を中心とする NCC (国立複合材料センター) も、航空機向けに特化して、産学官コンソーシアムを形成している。一方、アジアでは中国、韓国が近年、世界の炭素繊維市場に進出しつつある。国内では、NEDO「革新的新構造材料等研究開発」(2014～2022年度)、内閣府の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」(2014～2018年度)がある。前者が主に自動車向け、後者が航空機向けであり、成形技術等の開発が行われている。2018年度より開始された SIP 第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(2018～2022年度)においては、上記 SIP「革新的構造材料」で開発してきたマテリアルズインテグレーション (MI) の素地を活かし、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」に対応した次世代型 MI システムを世界に先駆けて開発するとともに、MI を活用して、競争力ある革新的な高信頼性材料の開発や設計・製造・評価技術の確立に取り組み、発電プラント用材料や航空用材料等を出口に先端的な構造材料・プロセスの事業化を目指している。また、NEDO「次世代構造部材創製・加工技術開発」(2015～2021年度)は、航空機用 CFRP 構造ヘルスマonitoring 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。

・SiC/SiC CMC

米国および欧州 (特にフランスとドイツ) が世界をリードしている。米国においては GE 社と P&W 社による民間航空機用エンジン材料としての用途開発が検討されている。特に、GE 社においては、社内で SiC 繊維および SiC/SiC 部材製造技術を開発し、外部からの調達が必要な段階に達している。また、米国内には CMC の製造を行うベンチャー企業も数社あり、CMC の製造と製品化を行っている。国内においては、日本カーボンと宇部興産が SiC 繊維を製造することができるが、日本カーボンと米国の GE 社およびフランスのサフラン社は 2012 年に NGS アドバンスドファイバーという合弁会社を設立し、SiC 繊維の量産製造を行っている。

・CNF

軽量・高強度・低熱膨張などの特性を示す CNF は次世代のグリーンナノ材料として注目を集め、2004 年以降、論文数や特許数が増加している。その中心となっているのは、森林資源が豊富で製紙産業が盛んな北欧、北米、日本である。近年、中国のキャッチアップも無視できない状況である。2011 年からはフィンランド、カナダ、米国の主導で国際標準化の議論も始まっている。国内における研究プロジェクトとしては、CNF を活用することで自動車の 10%軽量化を目指した環境省「NCV (Nano Cellulose Vehicle) プロジェクト」(2016～2019年度)があり、京都大学をはじめとする 21 の大学、研究機関、企業等のサプライチェーンで構成される一気通貫のコンソーシアムも設立している。また、NEDO「非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発」(2013～2019年度)における研究開発テーマの一つとして、セルロースナノファイバーの一環製造プロセスと部材化技術開発に取り組んでいる。その他、

個別の研究課題としては、JST 戦略的創造研究 (CREST) 「二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と生産物活用のための基盤技術の創出」研究領域 (研究総括: 磯貝彰) において、「新規セルロース系ナノ素材の表面構造および集積構造制御による炭素マテリアルストリームの創成」(2013 ~ 2018 年度) が実施されている。ここでは、それまで困難であった均一幅の CNF を解繊可能にする TEMPO 酸化触媒と呼ばれる化学反応と軽微な機械処理を組み合わせによって得られる TEMPO 酸化 CNF の調製方法、表面ナノ構造改質、ナノ集積構造解析等の基礎研究が行われている。TEMPO 酸化 CNF に関しては、国内 2 社 (日本製紙、第一工業製薬)、米国農務省林産物研究所、フィンランドのベンチャー企業と共同研究を実施し、既に生産を開始している。

(5) 科学技術的課題

CFRP の材料・プロセス技術の進化に伴い、その特長を最大限に活かす構造の設計技術の要望も高まっている。CFRP はブラックメタルとも呼ばれるが、それは肯定的な意味とは言えず、いまだに金属材料の代替材料という位置づけから脱していない。これまでほとんどの場合、構造設計は金属材料 (機械的特性が均一) を前提としたままで適用されてきた。部材内部で機械的特性の分布を変化できることが CFRP の強みであり、それを活かした設計・成形技術により、さらなる軽量化、ひいては省エネルギー、コスト削減が期待される。

さらに、切削等の二次加工技術の進歩も不可欠である。三次元・複雑形状に対して前述の成形技術開発が進められる一方、穴あけ等は成形時に行うことは無理である。併せて、接合技術の重要度も増している。また、CFRP が全ての特性において金属材料に優るわけではないので、鉄鋼、アルミニウム合金、チタン合金等の異種材料と組み合わせたマルチマテリアル構造が最適な場合もある。そのための異種材料接合技術がキーテクノロジーの一つとなる。例えば、金属材料と同等にボルト接合を行うことは、(一次) 部材成形に加えてさらにコスト増加の要因となる。そこで、接着剤による接着に大きな期待が寄せられる。これは既に構造物に多用されている技術ではあるが、主たる荷重を支持する部分に用いられるほどの信頼性は確保されていない。

また、CFRP をはじめとする複合材料の特長を十分に発揮するためには破壊機構の解明が不可欠であるが、まだ十分とは言えない。結果的に、CFRP においては板厚を増す、接着とボルト接合を併用するなど、軽量化を犠牲にして安全率を高くする構造を選択するケースが多い。複合材料部材の寿命等、パフォーマンスの評価方法の標準化およびその認証に関する取り組みも併せて重要である。加えて、航空機等向け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、欧米に遅れをとっており、キャッチアップが求められる。

複合材料の研究開発においては、構造設計と材料設計が一体となって行われることが多く、研究者も機械工学系が多い傾向にある。しかし、特に、破壊機構、接合の研究を通して更に進化させるためには、繊維/樹脂間、接合面等の界面の解析・制御をはじめとする、ナノ・ミクロスケールでのアプローチが重要であり、材料科学工学系との協働の促進が求められる。特に CFRP は炭素を主体とする材料であるため、金属系、セラミックス系と比較して、物理解析技術を適用しにくいことが障壁になっている。その進歩が CFRP の進歩に大きく寄与することは間違いない。

(6) その他の課題

航空機産業は CFRP、SiC/SiC CMC の今後の巨大ユーザーと期待されるが、機体はボーイング、エアバス、エンジンはプラット・アンド・ホイットニー、ゼネラル・エレクトリック、ロールス・ロイスと、米欧メーカーが圧倒的に強い。したがって、彼らの動向を常に注視し、彼らの開発スケジュールに合わせて新技術等を提案する必要がある。標準化についても同様である。さらに、採用までの所要時間を短くするために、日本国内に認証機関を持つことも重要である。これらは、まさに府省連携、産学官連携で取り組まなければ、目標達成は極めて困難である。その際、連携の中核となる拠点が必要であり、SIP 革新的構造材料では、JAXA がその役割を担うよう進められている。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 大学、国研による、CNT ベースのナノコンポジット、繊維/樹脂界面の解析・制御の研究開発。 大学中心の、植物由来原料による CFRP 素材、セルロースナノファイバー関連の開発。 国研中心の、耐熱 CFRP の開発。 2017 年に東京工科大学内に CMC センターを設立。 セルロースナノファイバーに関する基礎研究が東大、京大、九大を中心に活発化
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 経産省「革新的新構造材料等技術開発」による自動車用 CFRP 成形技術開発。 「次世代構造部材創製・加工技術開発（複合材構造）」による構造ヘルスマニタリング技術の開発。 内閣府「革新的構造材料」による、航空機用 CFRP 脱オートクレーブ成形技術、強靱性オートクレーブ CFRP 材料開発。 航空機エンジンメーカー中心の、高性能・高生産性 SiC/SiC CMC の開発。 日本カーボンと宇部興産が SiC 繊維を製造できる技術を有する。 ほぼ全ての大手製紙産業がナノセルロースの製造と応用展開を進めている 産総研のコンソーシアムである「ナノセルロースフォーラム」が、ナノセルロースの実用化を目指した情報交換の場として機能。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> Materials Genome Initiative の下での計算材料科学による材料設計。 CNT などを用いたナノコンポジットなどの基礎研究。 農務省林産物研究所においてや大学で、数種類のナノセルロースを製造し、企業にサンプル提供。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> デラウェア大学複合材料センターによる、各種成形技術およびそれを前提とする材料設計技術、生産ライン最適化技術の開発。 エジソン溶接研究所 (EWI) による、金属-CFRP の接合・接着技術の開発。 DOE/IACMI プログラムによる CFRP 材料・成形技術、及び成形・損傷シミュレーション技術。 1m 級の酸化物系 CMC を製造できる企業が存在 GE 社および P&W 社では SiC/SiC CMC を航空機エンジン材料としての応用展開が進展 ナノセルロースの先端材料への実用化を目指したベンチャー企業が存在

欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ナノコンポジット、ナノ繊維強化プラスチックの研究への巨額の公的投資。 ・主に北欧では、国研や大学を中心にセルロースナノファイバーの基礎研究が活発化。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・独連邦教育研究省 (BMBF) のファンディングによる「マルチマテリアルシステム」における複数構造材料の組み合わせによる車体軽量化技術開発。 ・フラウンホーファー化学技術研究所 (ICT) による、各種成形技術およびそれを前提とする材料設計技術の開発。 ・フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所 (IFAM) による、大型部材の生産・検査自動化技術、接合・接着技術 (異種材料間含む) の開発。 ・独 CFK-Valley Stade, MAI Carbon Cluster などによる CFRP 成形技術拠点。 ・独では既に CF/SiC CMC を軽量耐摩耗材料として自動車やオートバイのブレーキローターに使用している。 ・英国溶接接合研究所 (TWI) による、金属-CFRP の接合・接着技術の開発。 ・英国 (EPSRC) の高価値センター”CATAPULT”プロジェクトによる、ブリストル大学中心の産学官コンソーシアムの航空機向け CFRP 研究開発拠点、国立複合材料センター (NCC)。 ・製紙産業でナノセルロースやマイクロフィブリル化セルロースの製造・販売を開始。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・日本の ISMA、SIP に相当するような国家プロジェクトは持たないが、政府は有力大学へ個別に研究資金を提供している。特に国家支援の航空機メーカーである COMAC が関係したものが多く、豊富な資金力で、欧米からの購入により設備、ソフトを揃えている。 ・セルロースナノファイバーに関しては、学術的な論文は多数発表されている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・1960年に国家建材局の下に4研究所を設立、1999年に組織改革し、企業活動を開始。 ・航空機、電気自動車、風力発電用の応用開発に多額の資金投資中。紙以外の用途に対するナノセルロースの研究開発は盛んではない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・日本の ISMA、SIP に相当するような国家プロジェクトはない。個々の研究者による研究が中心。 ・ナノセルロースに関する論文は見受けられるがそれほど盛んではない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・2006年に政府主導で本格的な炭素繊維開発に入り、2013年に商用化。 ・韓国材料科学研究所 (KIMS) による、大型 FRP 部材 (風力発電ブレードなど) の性能評価。他に韓国炭素収束技術研究所 (KCTECH) による自動車向け CFRP の開発がある。 ・一部の企業がナノセルロースをサンプル提供しているようだが、用途は確立されていない。

(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範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発 (プロトタイプの開発含む) の範囲

(註2) 現状 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：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) 福田博, 邊吾一, 末益博志 監修『新版複合材料・技術便覧』(産業技術サービスセンター, 2011) .
- 2) 物質・材料研究機構 調査分析室レポート「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).
- 3) RIMCOF 技術研究組合 ,
<http://www.rimcof.or.jp/> (2019年2月12日アクセス)
 - 4) 武田展雄、越岡康弘「航空宇宙機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』第60巻3号(日本非破壊検査協会, 2013) : 157.
 - 5) Shu Minakuchi et al., "Life Cycle Monitoring and Advanced Quality Assurance of L-shaped Composite Corner Part Using Embedded Fiber-optic Sensor," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 48 (2013) : 153. doi:10.1016/j.compositesa.2013.01.009
 - 6) 新構造材料技術研究組合 (ISMA) ,
<http://isma.jp/> (2019年2月12日アクセス)
 - 7) 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> (2019年2月12日アクセス)
 - 8) デラウェア大学複合材料センター (CCM) ,
<http://www.ccm.udel.edu/> (2019年2月12日アクセス)
 - 9) エジソン溶接研究所 (EWI) ,
<http://ewi.org/> (2019年2月12日アクセス)
 - 10) フラウンホーファー化学技術研究所 (ICT) ,
<http://www.ict.fraunhofer.de/en.html> (2019年2月12日アクセス)
 - 11) フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所 (IFAM) ,
<http://www.ifam.fraunhofer.de/en.html> (2019年2月12日アクセス)
 - 12) CFK Vallay Stade, <https://cfk-valley.com/en/> (2019年2月12日アクセス)
 - 13) MAI Carbon Cluster, <https://carbon-composites.eu/en/network/departments/mai-carbon/> (2019年2月12日アクセス)
 - 14) 英国接合溶接研究所 (TWI) ,
<http://www.theweldinginstitute.com/> (2019年2月12日アクセス)
 - 15) 韓国材料研究所 (KIMS) , <https://www.kims.re.kr/eng/> (2019年2月12日アクセス)
 - 16) ナノセルロースフォーラム ,
<https://unit.aist.go.jp/rpd-mc/ncf/index.html> (2019年2月12日アクセス)
 - 17) 磯貝明「最近の CNF 開発動向ー応用展開の新潮流ー」『化学装置』15 (33) (2018) : 601-608.
 - 18) 磯貝明「基礎研究と実用研究の両輪による核となるナノセルロース市場の形成を」『紙パルプ技術タイムズ』60 (5) (2017) : 1-6.
 - 19) 磯貝明「セルロースナノファイバーの特性と応用」『ケミカルエンジニアリング』62 (6) (2018) : 1-7.
 - 20) 磯貝明「TEMPO 酸化セルロースナノファイバーの可能性」『化学経済』64 (8) (2017) : 18-23.
 - 21) 磯貝明「セルロースナノファイバーの製法と応用」『塗装工学』52 (3) (2017) : 87-93.

2.1.7 極限環境材料・計測技術

(1) 研究開発領域の定義

航空宇宙分野や原子力分野などの極限環境において使用される材料を念頭に置いた材料技術と、このための計測技術を対象とする。極限環境としては、高温、低温、大きな温度差、強い放射線、腐食環境などがあり、これらの中で使用するために材料には高強度、高靱性、軽量、耐熱、放射線耐性などが必要である。これらに対応する材料開発と、材料の損傷や機械的特性の劣化などを計測・評価する計測技術の研究開発が求められる。

(2) キーワード

炭素繊維強化プラスチック (CFRP)、チタン合金、耐熱合金、金属間化合物、セラミックス複合材料 (CMC)、積層造形、材料データベース、非破壊検査、軽水炉、高経年化、圧力容器の照射脆化、事故耐性燃料被覆管、Gen-IV (第4世代原子炉)、核融合炉、超伝導線材、ブランケット、ダイバータ、研究用原子炉 (照射炉)、加速器のターゲット材料・超伝導線材

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

航空宇宙分野や原子力分野などの極限環境で用いられる材料 (極限環境材料) には、通常の構造材料に求められる軽量、高強度の他に、高温、低温、大きな温度差、強い放射線、腐食環境などに耐える特性が求められる。また、使用されている材料が破壊された時の損害がきわめて大きいため、材料特性の劣化の精密な評価や、高精度の劣化や寿命の予測を行い、高い信頼性を保証できなければならない。この研究開発領域は、「2.1.6 複合材料」とも関連が深い。航空機における材料技術については先の節に委ね、ここでは、主にロケットや衛星などの宇宙空間での利用、および原子力分野での利用を想定した材料技術と計測技術について取り上げる。

宇宙まで衛星を投入するロケットにおいては、高性能・高信頼・低コストのエンジンや、液体燃料用の軽量で極低温に耐える燃料タンクが重要であり、高温に耐えるエンジン周りの材料・部品や複合材料によるタンクの開発が必要である。また、衛星においては、太陽を向く面での高温、その反対側での低温、宇宙に飛び交う各種の放射線に耐える構造材料が必要である。さらに、打ち上げ頻度がそれほど多くないという特徴から、少量多品種の製造方法や信頼性確保のための設計手法、そして品質予測などが求められている。

原子力分野は、福島第一原子力発電所事故後、社会のこの分野に対する考え方は大変厳しい。この状況下で、最も重要な研究開発の1つは、現行の軽水炉の安全を科学的に担保することである。その中で、材料の健全性、特に中性子を中心とした放射線環境下での材料の健全性のメカニズムを明らかにし、それを基にした材料劣化の予測、さらには過酷事故を想定した環境での耐性の高い材料の開発が必要である。さらに今後は第4世代原子炉が検討されており、軽水炉に比べて高温、高放射線量、高腐食環境などが重畳する厳しい環境で使用できる材料の開発が必要である。また、究極の原子力エネルギーとして核融合炉への期待がある。核融合炉は、プラズマ閉じ込めに必要な機器と燃料・エネルギー生産に必要な機器等からなる複雑な複合機器の集合体であり、第4世代炉同様に様々な極限環境材料の開発が必要である。

これらの放射線照射に関連する極限環境材料は、狭い意味の原子力材料にとどまらず、例えば、加速器のターゲット材料や超伝導線材の開発にも不可欠である。また、放射線照射された

材料の微細組織の分析手法は、他の材料研究分野と比べても先を進んでいるものもあり、幅広い基礎科学への寄与が期待される。

[研究開発の動向]

・宇宙分野

宇宙用材料では、ロケット・衛星構造にはすでに幅広く複合材料が使われている。使用箇所による個別の要求に応じ、高強度、薄板・構造安定性、耐熱性、極低温用など、各種要求に特化した進化が進んでいる。固体ロケットのモータチャンバは、FW（フィラメントワインディング）-CFRP への移行がほぼ済んでいる。

複合材料による極低温燃料タンクは、再使用ロケット実現のためには必須であるが、運用機への適用は10年以上先になる見込みである。衛星構造、ロケット段間構造では、すでに主構造の複合材化が進んでいる。必要耐荷重に合わせた積層の最適化やプロセスの安定化による複合材特別係数の低減により、軽量化が進んでいる。また、Alハニカムに代わり、複合材ハニカムも使われ始めた。ここでは表皮のより一層の薄肉化による軽量化が進められている。これら複合材によりアンテナなどの精密大型構造を構築するため、熱および経年劣化に対する構造安定性確保の研究開発が、材料と構造の両面から進められている。

エンジン周りなどでは数多くの複雑形状部品が使われている。現在、それらは削り出しや鋳造などのプロセスで作られており、これらの信頼性確保とコスト削減が課題である。より信頼性の高い定量的な非破壊検査手法の開発と、プロセス管理で保証できる部分については逆に非破壊検査を省略するという工数低減の努力が続けられている。

・原子力分野

軽水炉は世界中で多くの発電炉が稼働しており、今後、稼働後40年を超える高経年化原子炉が世界的に増える。材料の健全性、特に中性子を中心とした放射線環境下での材料の健全性のメカニズムを明らかにし、それを基にした材料劣化の予測の研究が行われている。最も重要な対象の一つは、事実上交換不可能な圧力容器の照射脆化である。劣化現象は、照射脆化や照射促進応力腐食割れなど多様である。近年、高経年化原子炉の実機に装荷されている監視試験片を直接調べることによって、照射速度効果が明らかになりつつある。また、近年の3次元アトムプローブ法の発展により、微細な不純物・溶質の照射促進（誘起）析出の照射脆化への寄与が定量的に明らかにされ、原子力規制庁による安全審査基準にも反映されている。一方、多量の微小な照射欠陥集合体（転位ループ）の形成が、我が国で開発された新しい顕微鏡法（ウェークビーム(WB)-STEM法）によって明らかになり、その脆化への寄与の評価が進みつつある。

もう一つのトレンドは、福島第一原発事故を端緒とした事故耐性の高い材料の開発である。特に、現在の燃料被覆管材料であるZr合金よりも事故環境における安定性が高い材料として、酸化物粒子分散強化(ODS)鋼や炭化ケイ素(SiC)複合体材料などの開発が進められている。福島第一原子力発電所の事故においては、冷却材損失に伴いジルコニウム合金製燃料被覆管等の高温水蒸気酸化が進み、水素発生・爆発に繋がった。そこで、事故耐性燃料(ATF: Accident Tolerant Fuel)の開発が進められている。

超臨界圧水炉(SCWR)、高温ガス炉(VHTR)、ガス冷却高速炉(GFR)、ナトリウム冷却高速炉(SFR)、鉛冷却高速炉(LFR)、熔融塩炉(MSR)が第4世代原子炉(Gen-IV)として、

世界各国で開発が進められている。Gen-IVでは、従来の軽水炉よりも高温の冷却材を利用することによって、高い熱効率が得られることも特徴のひとつである。一方、高温において腐食性の高い冷却材を使用することに加え、中性子照射が重畳する環境に耐えうる構造材料の開発が必要となる。Gen-IVで用いるために開発が進められている構造材料や燃料被覆管材料の候補材として、その使用環境に応じて、Ni基超合金、酸化物分散強化合金、炭化ケイ素複合材料など、幅広い材料の開発が進められている。

核融合炉は、複合機器の集合体であり、様々な極限環境材料の開発が必要とされている。磁場閉じ込め核融合炉では、プラズマの閉じ込めに超伝導コイルで発生させた磁場を用いるため、超伝導コイルの冷却に必要な極低温環境と、熱エネルギー取り出しのために必要な高温環境が隣在する環境となる。現在フランスで建設が進む国際熱核融合実験炉 ITERにおいて、ニオブ-チタン合金やニオブ-ズ合金が超伝導線材として用いられるが、わが国独自のヘリカル型核融合炉では高温超電導材の使用が検討されている。超伝導コイルの耐照射性については、超伝導材そのものに加えて、従来の絶縁樹脂に代わるセラミックス絶縁材の開発や、コイルケースのために強度と靱性に優れた極低温構造材料の開発が必要である。ブランケット部は、核融合炉における燃料自己生産と熱エネルギーの発生を担う機器となる。ここで用いられる構造材料や機能性材料は、高エネルギー中性子の重照射を受ける。我が国で検討されている固体増殖水冷ブランケットは、低放射化フェライト鋼を構造材料、リチウム酸化物をトリチウム燃料増殖材、ベリリウム金属化合物を中性子増倍材とする構成である。一方、高い熱効率等の先進ブランケットについては、液体金属増殖方式が提案されている。構造材料については Gen-IV で検討されている材料の適用性に関する検討が進みつつあるが、基礎研究の段階である。ダイバータは、核融合反応で発生したヘリウム灰を排気するための機器であるが、高い熱流束を受けることが想定される。ITERにおいても 20 MW/m^2 という高い熱流束を定常的に受けることが想定されており、タングステンモノブロック方式と呼ばれるタングステンに銅合金配管を通した構造が使用される。炉心プラズマや周辺プラズマの制御によっては、より高い熱流束の非定常熱負荷を受けることも示唆されており、新たな材料開発や冷却概念の構築が必要である。核融合炉の制御に必要な磁場計測やプラズマ計測に用いられる材料についても、中性子照射環境下において機能する材料の開発が求められる。

原子力分野の計測手法として、照射損傷組織の分析は上記の様々な原子力材料研究に欠かせないが、その基本は透過電子顕微鏡法や走査電子顕微鏡などの電子顕微鏡である。今世紀に入ってから、収差補正技術が大きな進展を見せ、微細組織分析の高精度化が進展した。一方で、原理的に電子顕微鏡法では困難な対象も未解決問題として残っている。その一部を解決したものが、原子分解能に近い精度で元素の3次元マッピングを可能にする3次元アトムプローブ法である。これによって、微細な不純物・溶質クラスター、粒界偏析などの直接観察が可能になり、多くの照射材料の研究に適用されている。

一方、機械的特性に関しても先進的な取り組みが行われており、照射損傷組織の分析の高度化・高精度化が著しく進んでいる。照射損傷組織に対応するサイズでの機械的特性の変化を直接評価し、原子力材料の機械的特性の変化を更に高精度に予測するモデルの構築が進められている。近年、ナノインデンテーション法や集束イオンビーム加工装置を駆使することにより、マイクロからサブマイクロメートルサイズの試験片に対する機械的特性評価が可能となってきている。具体的には、マイクロピラー圧縮試験やマイクロ引張試験、ナノインデンテーション

硬さ試験等が照射材の評価に適用されており、超微小試験技術 (USTT : Ultra-Small Testing Technologies) として、照射による機械的特性変化の研究に用いられるようになっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

・宇宙分野

極低温燃料タンク用の極低温複合材料については、再使用ロケット実験機あるいは試験機での搭載が期待されている。タンクが複合材化しても、配管やエンジンは金属のままなのでこれらを接続する異材接合技術も必要になってきている。

エンジン周りの複雑な形状の部品に対する信頼性確保とコスト削減を抜本的に実現するプロセスとして、Ti 合金、SUS、Ni 基合金などで 3D 積層造形金属部材の開発が始まっており、5 年後には一部部品への適用が始まると期待される。

複合材構造および特殊工程部材の信頼性向上には、データベース構築とともに、非破壊検査技術の高度化が必須である。材料・構造の抜本的な信頼性向上のために、非破壊検査を設計段階から取り入れた統合化設計手法によりシステムとしての信頼性を高めることが行われるようになってきており、H3 ロケット開発に活用されている。この統合化設計手法は、材料技術だけでなく、設計や非破壊評価などとの連携が重要になってくる。

・原子力分野

最近の技術的なトピックスとしては、前述した WB-STEM 法の開発により、これまで困難であった微小な欠陥集合体の定量が可能になったことや、弱い歪み場を持った微小な転位ループなどを広い領域にわたって高精度で観察することができるようになったことがある。今後、本手法の当該分野での多くの適用が見込まれている。

機械的特性試験では、中性子照射試料が得られにくくなっている中で、特に重照射研究を必要とする核融合炉材や次世代原子力システムでの材料開発において、イオン照射法の活用が進められ、マイクロメートル程度の損傷領域に対応した超微小試験片による機械的特性評価法として USTT を用いた研究が進んでいる。また、計算機シミュレーションの進展により、従来は不可能だった粒界脆化の計算なども可能になり、実験結果を補う有用な知見が数多く得られている。

近年、欧米では、新しい概念の原子炉 (小型モジュラー炉等) や核融合炉について、国費や民間資金を受け入れたベンチャー企業による開発が進められている。これらの新概念のシステムに用いられる材料については、液体金属や熔融塩環境で用いられるため、耐照射性と耐環境性を併せ持つ材料の開発が必須と考えられる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

・宇宙分野

直接的に宇宙への応用を狙ったものではないが、航空機向けの高強度・軽量材料、耐熱材料の開発を目指した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」(2014 年度～2018 年度) が進められている。詳細は研究開発領域「2.1.6 複合材料」に記載する。

・原子力分野

核融合分野では、世界最大のプロジェクトである ITER 計画が日、欧、米、中、韓、印、露の7極が協力して進められている。核燃焼プラズマの維持と、エネルギー取出しの実証を目的とする ITER は 2025 年頃のファーストプラズマ発生に向けて、現在フランスにおいて建設が進められている。また、ITER 後の発電実証に向けた核融合原型炉の設計と要素技術開発も各極において個別に進められている。国内では、原型炉設計合同特別チームが設置され、原型炉の設計活動を行っている。ITER 計画においても、その後の原型炉においても、核融合材料とその関連技術の開発は重要な位置付けとなっている。日欧協力の下での核融合研究開発に関する幅広いアプローチ (BA) 活動において、核融合炉材料の研究開発が進められている。この中で、国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動 (IFMIF/EVEDA) が実施されるとともに、その知見を活用して、核融合原型炉の材料開発に必要な先進核融合中性子源 (A-FNS) に係る研究開発も進められている。

国際的なファンディングの状況としては、軽水炉材料の照射劣化の研究に関しては、欧州では長年にわたり大型プロジェクトが続けられている (PERFECT プロジェクト、PERFORM-60 プロジェクトなど)。照射後実験施設への投資も活発で、フランスではルーアン大学に数十億円規模の新たな照射後実験施設が建設されている。米国では、NSF、DOE の様々なプログラムにより、基礎から実用研究まで、軽水炉から核融合炉まで、継続的に幅広いファンディングが続けられている。我が国では、文部科学省の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」と「原子力システム研究開発事業」の二つがあり、その中で耐照射材料の研究が行われている。しかし、この数年で大幅な予算削減がされており、研究分野の存亡の危機に直面している。

(5) 科学技術的課題

宇宙分野における CFRP 複合材料、耐熱合金の主な科学技術的課題は構造材料全体の課題と同様であるが、材料の信頼性に関わる放射線照射下における材料劣化機構の解明と、それを考慮した劣化予測・寿命予測の手法の確立が必要である。精度の高い劣化の計測手法、予測手法の開発が期待される。また、宇宙応用では、多品種少量生産の材料・部品が多く、これらの信頼性確保とコスト低減の両立が課題であり、応用・利用範囲が拡大している 3D 積層型金属部材の開発、工法の確立が望まれる。

原子力分野では、軽水炉関連の材料研究において、構造材料の長期健全性のための材料劣化機構の研究や過酷事故耐性の強い材料開発などが重要な課題である。また、Gen-IV と核融合炉の材料技術開発の方向性に共通して、経済性に留まらない社会受容性に優れたシステムの実現に貢献することが求められる。すなわち、発電効率や設備利用率の向上という経済的な視点だけではなく、高い安全性はもとより将来のエネルギーを取り巻く社会の要請に応えられるような柔軟な設計が必要である。このような例として、一部で進められている水素社会の実現に貢献可能な原子力あるいは核融合炉による水素製造に関連する材料技術開発がある。

(6) その他の課題

欧米はメーカーや軍が主導して、大きなコンソーシアムを構築し、その中で部材や素材のメーカーが基礎データを取得してデータベースを作り、プロセス条件から組織や特性を予測するプ

プログラムを作っている。日本においても、各企業が独自のデータを取得するだけでなく、素材メーカー、重工メーカー、大学などでコンソーシアムを構築し、その中でデータを収集、活用し、予測計算ツールを作ることが課題であろう。

福島第一原子力発電所事故をきっかけに、軽水炉といえども産業界とは独立に、学术界が安全性の向上に資する研究に積極的に寄与することが重要になっている。また、中性子照射場の確保が喫緊の課題となっている。これは大学レベルの照射影響に関する基礎研究から、耐照射性材料の開発段階、そして安全性の実証段階に到るプロセスにおいて必要不可欠である。しかし、材料照射研究の可能な研究炉の再稼働や、廃炉が決まった JAEA の材料試験炉 JMTR (Japan Materials Testing Reactor) の後継などの問題があり、これらの研究炉の在り方に関しては日本学術会議より、2018年8月に提言がなされている。照射炉は世界的にも老朽化が進んでおり、照射材料研究の世界的な問題になっている。

基盤設備の消滅やファンディングの減少という厳しい状況により、人材育成は極めて危機的状況にある。文部科学省、経済産業省、原子力規制庁から人材育成用の資金が出されているが十分ではない。人材育成には、先端の研究に従事させることが本質的かつ不可欠であり、喫緊の対策が求められる。

(7) 国際比較

・宇宙分野

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	○	→	宇宙航空科学技術推進委託費の活用などで進められている。
	応用研究・開発	△	↑	産・学のコンソーシアム構築を目指した動きがある。日本政策投資銀行が2018年から宇宙関連産業支援に3000億円を投資。国内の宇宙関係ベンチャーは10社未満と少ない。宇宙専門の大手企業はない。
米国	基礎研究	◎	↑	「2017年度予算科学技術優先事項覚書」において9の重点領域が挙げられており、そのうちの「先進製造と未来の産業」において材料研究が進められている。「実験を重視しながら」も積極的に「計算機科学」を利用し、計算機上での劣化現象完全模擬というグランドチャレンジが活発になっている。
	応用研究・開発	◎	↑	2017年9月にDOEは米国産業界による極限環境下で使用する新しい材料や改良された材料の開発を加速するための新しい高性能コンピューティング (HPC4Mtls) イニシアチブを発表した。超高压、放射線、温度、腐食、化学環境、振動、疲労、ストレス状態などの極限条件に耐えることができる新しい材料や改良された材料を開発する。宇宙関係ベンチャー3000社。
欧州	基礎研究	◎	↑	「実験を重視しながら」も積極的に「計算機科学」を利用し、計算機上での劣化現象完全模擬というグランドチャレンジが進行している
	応用研究・開発	○	↑	航空機メーカーや空軍が主導して、大きなコンソーシアムを構築している (例えば、英国の National Composite Center(NCC) と Bristol 大学の連携)。宇宙関係ベンチャー400社。
中国	基礎研究	○	↑	重点大学を中心に急速に論文数が増大している。
	応用研究・開発	◎	↑	23万人規模 (日本は1万人弱) の大きな産業であり、大型衛星打ち上げ実績を重ねている。
韓国	基礎研究	○	→	第3次科学技術基本計画に掲げられた5大推進分野と重点国家戦略技術の中に宇宙発射体開発技術が上げられている。
	応用研究・開発	△	→	大きな動きは見られない。

・原子力分野

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	◎	→	新しい計測手法の開発、ODS 鋼開発など、我が国が世界を牽引しており、基礎研究のポテンシャルは高い。しかし、照射場の消滅やファンディングの減少などの要因が上昇トレンドを抑えている。
	応用研究・開発	○	↓	福島第一原発事故以降、特にここ数年の研究開発費の落ち込みが大きい。
米国	基礎研究	○	↓	幅広いファンディングにより高いレベルを維持しているが、人材は高齢化目立つ。特にトランプ政権では基礎研究へのサポートが減少している。
	応用研究・開発	◎	↑	新しい概念の原子炉（小型モジュラー炉等）など、国費や民間資金を受け入れたベンチャー企業による開発が進められている。
欧州	基礎研究	◎	→	核融合炉材料研究を中心に国費の投入も多く、活動は非常に活発である。
	応用研究・開発	○	↓	ドイツなどの脱原発国は衰退しているが、推進国のフランス、イギリス、ベルギーなどは高いレベルを維持している。しかし、フランス原子力庁は 2018 年 11 月に日本も参加する高速炉計画 ASTRID を凍結と発表している。
中国	基礎研究	△	↑	原子力材料を研究する優秀な大学生・大学院生が増加している。
	応用研究・開発	○	↑	まだ中国独自技術はほとんど存在しないが、発電の増加とともに、新型実用炉（AP1000 など）、試験研究炉、高速炉も建設され、急ピッチで上昇トレンドにある。固有安全性の高さから 2020 年目標に熔融塩炉（液体核燃料）の稼働を目指す。
韓国	基礎研究	△	→	第 3 次科学技術基本計画に記載は無い。
	応用研究・開発	△	→	KAERI（韓国原子力研究所）が主導しているが、国際的に顕著な活動は少ない。文在寅大統領の脱原発政策が継続中で衰退の方向にある。

(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範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註 2) 現状 ※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：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) 第 5 次エネルギー基本計画, 2018 年 7 月 3 日,

http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf (2019 年 2 月 12 日アクセス)

2) T. R. Allen et al., "Materials Challenges for Generation IV Nuclear Energy Systems," *Nuclear Technology* 162, no. 3 (2008) : 342-357. doi:10.13182/nt08-a3961

3) 文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 核融合科学技術委員会 原型炉開発総合戦略タスクフォース (第 14 回) 配付資料、

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/078/shiryo/_icsFiles/fieldfile/2017/12/06/1398877_004.pdf (2019 年 2 月 12 日アクセス)

4) 浅井朋彦他「小特集 企業による核融合研究の最近の動向」『プラズマ・核融合学会誌』, Vol.93, No.1 (2107)

- http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2017_01/9301SPall.pdf (2019年2月12日アクセス)
- 5) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構「平成29年度原子力の利用状況等に関する調査(革新的原子炉の研究開発動向等に関する調査)報告書」
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000908.pdf (2019年2月12日アクセス)
 - 6) Kenta Yoshida et al., "Weak-beam Scanning Transmission Electron Microscopy for Quantitative Dislocation Density Measurement in Steels," *Microscopy* 66 (2017) : 120-130. doi:10.1093/jmicro/dfw111
 - 7) 日本学術会議 提言「研究と産業に不可欠な中性子の供給と研究用原子炉の在り方」(平成30年8月16日, 総合工学委員会 原子力安全に関する分科会)
 - 8) 谷合まどか「原子力人材育成の現状と課題」『立法と調査』2017.10 No. 393
http://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2017pdf/20171002042.pdf (2019年2月12日アクセス)
 - 9) 文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 核融合科学技術委員会(第13回)「核融合エネルギー開発の推進に向けた人材の育成・確保について(案)」(平成30年3月28日)
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/attach/1405147.htm (2019.2.12 アクセス)
 - 10) 経済産業省 製造産業局「航空機産業戦略策定以降の取組について」(平成28年12月26日).
 - 11) 邊吾一、石川隆司「先進複合材料工学」(東京:培風館, 2005) pp.169-174.
 - 12) Anubhav Jain et al., "Commentary: The Materials Project: A Materials Genome Approach to Accelerating Materials Innovation," *APL Materials* 1, no. 1 (2013) . doi:10.1063/1.4812323
 - 13) 小関敏彦「材料データとマテリアルズインテグレーション」『情報管理』59 (2016) : 165-171. doi:10.1241/johokanri.59.165
 - 14) 経済産業省 第1回「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム(次世代型産業用3Dプリンタ等技術開発)」研究開発プロジェクト 中間評価検討会(平成28年3月29日)
 - 15) 倉谷尚志他「高信頼化に向けたロケットエンジン統合化設計手法」『日本航空宇宙学会論文集』54 (2006) : 403-412.
 - 16) 内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当)「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 研究開発計画」(平成30年4月1日)
 - 17) 中小企業庁「中小企業の航空機産業への参入のためのガイド～国際認証(Nadcap)制度の取得に向けて～」(2015年3月)