

3. 俯瞰区分と研究開発領域

3.1 環境・エネルギー応用

持続可能な社会の実現に向けて、3E（Energy・Environment・Economy）＋S（Safety）の視点でのバランスの取れた取り組みが世界的に重要となっている。特に、エネルギー資源の乏しい日本にとっては、太陽光発電や風力発電、地熱発電といった再生可能エネルギーの利用拡大を促進してエネルギー自給率を向上させることや、非効率なエネルギーの大量消費を根本的に見直す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排出量の削減など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であり、ここでは重要な研究開発領域として、太陽電池、人工光合成、燃料電池、熱電変換、蓄電デバイス、パワー半導体、グリーン触媒、分離技術を取り上げている。

太陽電池および人工光合成は、再生可能エネルギーの一つである太陽光エネルギーを電気エネルギーまたは化学エネルギーに変換するものであり、新たな物理的・化学的現象の探索や、新たな半導体材料や触媒材料の開発、素子構造の革新などにより、変換効率向上、耐久性向上や低コスト化などが進められている。

燃料電池および熱電変換は、化学エネルギーまたは熱エネルギーを電気エネルギーに変換するものであり、新たな触媒材料や熱電変換材料の開発などにより、変換効率向上、低コスト化などが進められている。

蓄電デバイスは、電気エネルギーを蓄え、必要に応じて放電するものであり、新たな電極材料や電解質の開発などにより、大容量化、高出力化、耐久性向上などが進められている。

パワー半導体は、電気のオン・オフ、昇圧・降圧、直流・交流変換などに利用されるものであり、新たな半導体（ワイドギャップ半導体）の利用や素子構造の革新により、動作時の電力損失を抑制し、パワー半導体を用いた電力制御装置の小型化・軽量化が進められている。

グリーン触媒は、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られるものであり、新たな触媒材料の開発により、多段階で行っていた反応を1段階で行うなどプロセスの短縮、精密合成、環境負荷の低減などが進められている。

分離技術は、温暖化ガス（CO₂）や大気汚染物質の分離・回収、化石資源採掘時の随伴水・廃水処理や海水淡水化、バイオ燃料精製時の脱水分離、水素の分離、細胞やタンパク質など生体物質の分離、など多様である。複数物質の混合状態にある混合物から目的とする物質だけを取り出す、または不要物を取り除く等の分離操作を、従来に比して格段に低エネルギーかつ高精度におこなうことを目指す研究開発分野である。ここでは、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・固体のリサイクル製錬／金属製錬、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。

3.1.1 太陽電池

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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、量産技術が確立されているが、ウェハーの超薄型化やタンデム化による超高効率化が課題である。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% を超える高効率化が目標である。急激に研究が進展してい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、また耐久性の改善が重要な課題となる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

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。さらにはエネルギーの安全確保の観点から、現在世界中でエネルギー政策の見直しが進んでいる。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。

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。これは、国際的に普及が進む低価格結晶 Si 系モジュールとの差別化においても重要な方向性となる。また太陽光発電システムとしての利用技術・標準化・規格化技術なども普及拡大につれ重要度を増している。

一方、革新的太陽電池としては有機太陽電池である有機薄膜型やハイブリッド型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色々と得られてきた。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。また、シリコン太陽電池等とペロブスカイト太陽電池のタンデム化研究も精力的に実施されるようになってきた。

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おり、プレーヤーが増加してきている。直達日射量（直射日光）の多い地域では、今後ニーズが増えることが予想される。

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極で進められており、中国、韓国における研究開発は現段階で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る。しかし、今後中国勢の台頭が一層顕著になると予想される。

これまで、有機系太陽電池においては膨大な研究が実施されており、各種の新規材料開発によって高効率化が達成されてきた。その結果、有機薄膜太陽電池、色素増感太陽電池ともに11%以上の変換効率が得られている。また、ペロブスカイト太陽電池では発明からわずか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）。

日本はSi薄膜、CIGS共に高い技術を持ち、Si太陽電池では企業主体で研究開発し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度な製造技術を有し、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。性能と信頼性、ブランド面で日本製は優位ではあるが、次世代高性能セルにおいて技術による差別化を示すために技術開発を怠ってはならない。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、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、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の接合界面の改質による高効率化のブレークスルーがあり、変換効率22%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、今後、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必要とされる。また、結晶Si並みの変換効率を実現され始めたことから、結晶Si同様、発電層界面のパッシベーション構造についても検討が始まってきている。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く、我が国においてもさらなる技術革新が必要である。この分野では、いかにコストを低減できるかが普及の鍵となる。特に、集光用太陽電池として用いられるIII-V族多接合型太陽電池や、光学系、追尾架台の精度の向上について、国際的に熾烈な競争になっている。また、アモルファスシリコン太陽電池では、高品質光吸収材料の開発とともに、界面制御技術開発、光劣化機構の解明が急務である。

有機系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11%程度で、シリコ

ン系太陽電池の半分程度である。従って、その向上が科学技術的に重要な課題である。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などが上げられる。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。ここでは量子ドット、プラズモニクスの輸送機構解明が期待される。さらにペロブスカイト太陽電池に於いては、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。また、発電条件下（光・温度）での耐久性の向上も重要な課題である。従って、実用化に至るには、太陽電池の活性層に用いる有機分子の探索やデバイス構造の改良により、上記の問題を克服しなければならない。更に、ペロブスカイトも含めた有機系太陽電池の大きな特長であるプリンタブル化の研究も重要になってくると考えられる。

(3) 注目動向

以下に新たな技術動向を記す。

単結晶 Si 太陽電池

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」を組み合わせることにより、実用サイズ（セル面積143.7 cm²）のセルで変換効率25.6%を達成した。SHARPも、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、同様のセル構造で小面積（セル面積3.72 cm²）ではあるが、変換効率25.1%を達成した。カネカ社、米国SunPower社も相次いで変換効率25%超を達成している。

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。ドイツのブ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25.1%を報告している。ドーピング層を全く用いずに金属酸化物によりキャリア選択型の接合を形成したセル構造 (DASH) が、UCバークレー、スイスEPFL、オーストラリアANUの共同研究チームにより報告されている。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。低コスト化に向けては、米国Crystal Solar社が高速エピタキシャル成長による単結晶基板の開発を進めており、日本のセルメーカーがヘテロ接合太陽電池への適用を検討している。

住宅用システムなど、限られた屋根面積における設置量増加、施工コストあたりの設置量増加に向け、太陽電池モジュールの高効率化・軽量化が強く求められている。このような市場では、中期的には、25%を超える変換効率を低価格で実現する必要がある。

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 PERL 型への移行が進んでおり、中国 Trina Solar が PERL 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。しかし、High-Performance Multi は、原理的に単結晶と比較して変換効率でのデメリットが存在するため、大容量の単結晶あるいは単結晶ライクのインゴット成長技術への要請は根強い。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、撥液するつぼ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。

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、プラズマモニクス、フォトニック構造など、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ネルギーハーベストデバイスとしての活用も期待される。バルク結晶 Si 系では、ウェハの薄型化の流れが今後も継続すると予想されており、薄い Si を使用するという意味において、バルク型と薄膜型は、究極的には同じ目標に向かっているとの見方もある。薄膜 Si 太陽電池において培われた Si 製膜技術や光閉じ込め技術などは、将来的な薄型 Si 太陽電池の効率向上に大きく貢献すると期待される。非晶質 Si、微結晶 Si、薄膜結晶 Si とも、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。薄膜結晶 Si では、薄膜 Si プリカーサーをラインレーザー等で熔融・結晶化する新たな手法が提案され、効率更新が進展している。

CIGS 太陽電池

ソーラーフロンティア社が年産 1GW を有し、小面積セルでも世界最高レベルの 22.3%（自社測定では 22.8%）を誇り、日本が世界を牽引している。2016 年 6 月、ZSW（独）は CIGS セルの世界最高効率を塗り替え、22.6%（公式）を達成した。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 K を発電層堆積後に添加する KF-PDT (KF post-deposition treatment) 処理がある。KF-PDT 処理およびアニール処理によって pn 接合そのものの品質が向上し、変換効率の向上を後押ししている。また、フレキシブルセルモジュールの検討も行われており、フレキシブルポリイミド基板上に作製したセルで 20.4% の変換効率が EMPA（スイス）より報告されている。CdTe 太陽電池では First Solar 社が年産 2.7GW と世界を牽引する生産能力を有している。傾斜組成による長波長感度の向上、窓層の改善による短波長感度向上・Cl パッシベーション・粒径の肥大化によるライフタイムの向上により、2015 年にはセル効率 22.1% が報告され、製造レベルのモジュール効率も 16.4% まで向上してきている。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、 Cu_2SnS_3 、 CuSbS_2 、 SnS 、 Cu_2O 、 BaSi_2 などの研究開発も活発化してきている。

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することが決まり、高日照地域への今後ますますの進出が期待される。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。

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。2016 年時点での世界最高効率は香港科学技術大学の 11.5% である。また、住友化学と米カルフォルニア大学により、2 種類の光電変換層を組み合わせた「タンデムセル構造」からなる、10.6% の光電変換効率が発表されている。さらに、東大とオーストリアのグループと共同で、髪の毛 1 本にも巻ける伸縮自在な世界最薄かつ最軽量のデバイス作製に成功し、東芝は 5cm 角サイズの有機薄膜太陽電池モジュールにおいて 7.7% の光電変換効率を実現するなど、力強い進歩が見られる。今後も新規な材料開発で、更なる高効率化が期待できる。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 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

発売に向けた地道な研究開発が各企業で実施されている。産官学多くのプレーヤーが関与しているため、今後の益々の進展が期待できる。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）、3 GSolar（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。また、サムソン電子が建材一体型（BIPV: Building-integrated photovoltaics）やモバイル電源向けに発売を計画している。液晶や有機 EL、リチウムイオン電池の歴史を考えると、後発ながら脅威となる。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。

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 60cm × 100cm 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・サスカウォ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。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、オーストラリアの Australian National University (ANU) が 24.5% を達成している。また、CIGS ではスタンフォード大学が 18.6%、有機系では高分子薄膜太陽電池を用いてマサチューセッツ大学とインド工科大学の共同研究チームが 16% 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。

注目すべきプロジェクトとしては、以下のものがある。

- 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。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が進められている。また、同じ研究所内で実施されているシリコンナノワイヤー太陽電池の開発に特化した「革新的エネルギー研究開発拠点形成事業」では、プロジェクト後期となりテーマの選択と集中が進むとともに、開発した技術による次の展開が模索されている。
- 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 でも研究が進められている。
JST の ALCA では、フォトニックナノ構造を利用した光マネジメント、窒化物半導体、Si 系クラスレート、多元系混晶、資源戦略性に優れた薄膜太陽電池技術など挑戦的な課題が実施されてきたが、研究成果の社会還元を加速化するために、実用技術化プロジェクトへの再編が進められている。先端的低炭素化技術の実用化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。本プロジェクトでは、日本における超高効率太陽電池・材料、集光モジュール、およびシステムに関する研究開発が活発に行われており、ヨーロッパ諸国との連携を強化している。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。

- 有機系太陽電池は基礎研究段階を離陸し、より製品に近いレベルに達しており、国の後押しも盛んである。例えば NEDO では、『24 年度有機系太陽電池実用化先導技術開発』や『有機系太陽電池に関する特許動向調査』の新規プロジェクトが開始された。ペロブスカイト太陽電池では JST のさきがけ、CREST、ALCA で研究が開始されている。特に新たな取り組みである、JST のさきがけ研究者を結集した横断プロジェクトで、将来に繋がる顕著な成果が得られている。また、さきがけ研究者は有機薄膜太陽電池の分野でも、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。

(4) 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。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、半導体レーザー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。タンデム動作を前提とし光とキャリア輸送をマネジメントする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。また、今後、基板の超薄型化が進展することが予測されるが、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の開発が必要である。
- 長期的な視点では、自立的に太陽電池が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。しかしながら、日本がこの分野を将来的にもリードしていくためにも現段階から、基礎研究を続けていく必要がある。
- 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系統による連系許容限界に近づいてくる。電力系統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。今後も引き続き蓄電池、電気自動車（PHV を含む）などの利用やデマンドレスポンスの活用に向け、スマートグリッド関連技術の開発が求められる。市場拡大が活発化している欧州では既にこうした研究開発が活発化しているが、日本でも早い段階からのシステム技術開発の準備が必要となる。
- 電力系統に接続される太陽電池の量が増えると、その出力変動に対して火力発電や水力（揚水）発電などが調整できる許容範囲を逸脱する可能性が指摘されている。このことから、新たな仕組みによる調整力の確保が必要となる。その一つの手法として蓄電デバ

イスを活用した需給制御システムがある。大容量リチウムイオン電池はその一つの候補であるが、過放電による劣化や短サイクル寿命、保守管理が不可欠、充放電に一定の時間が必要であることが課題として挙げられる。これらを解決するにはキャパシタをベースとした蓄電デバイスの開発が期待される。

- 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さ、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。また、デバイス構造にも改善の余地があり透明電極・バッファ層・光吸収層の最適なバンド構造設計が今後さらに高効率化を実現するためにも必須である。オールジャパンともいえる産官学の協働によって技術的なリードを広げることで国際的な競争力を一層強めることが期待される。
- 有機系太陽電池については、新しい有機分子の開発やデバイス作製法の改良など、個々の要素技術に関する基礎研究は着実に進歩しているものの、実用化に向けた大スケール化などの技術開発までは行われておらず、産官学の緊密な連携下での技術革新が求められる。米国、欧州はもとより、新興各国においても研究が盛んに進められている。そのため、日本の国際競争力を早期に確保するためには実用化に向けた技術開発が喫緊の課題である。民間企業にとって投資リスクが大きいと、自立的な市場参入・拡大はハードルが高い。
- 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。そのためには、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。

(5) 政策的課題

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。そのためには国策としての総合的な研究開発戦略の企画推進力強化が不可欠である。世界の太陽電池産業全体が過酷な価格競争に巻き込まれている中で、高性能太陽電池の開発を企業だけに任せることは、国際競争上も好ましくない。諸外国でも太陽光発電の技術開発に多額の国費が投入されている状況にある。

(6) キーワード

シリコン系太陽電池、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

(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加速している。大学での研究が非常に盛んになるとともに、企業においても三菱化学や住友化学が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。この住友化学の成果は、カリフォルニア大学バークレー校との産学連携の結果である。一方、色素増感型は、産官学分野で地道な高効率化研究が実施されている。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がスタートしている。</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、カネカ社も、相次いで変換効率25.1%を達成している。薄膜太陽電池では、実用サイズモジュールの効率記録や、ガラスの高いシェアの維持など、技術開発水準は高い。</p> <p>有機系太陽電池の応用では色素増感型が先行しており、各企業が発売に向けたセル開発を行なっているが、まだ市場投入の段階ではない。また、有機系の特長を活かしたフィルムタイプ太陽電池の研究開発が非常に盛んである。</p> <p>ペロブスカイト太陽電池は欧米では既にベンチャー企業が創設され始めているが、我が国ではまだ基礎研究段階である。</p>
米国	基礎研究	○	↑	<p>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、産官学ともに有機薄膜型の研究が非常に盛んである。高分子型ではカリフォルニア大学バークレー校など、低分子型ではミシガン大学、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おり、それ以外にも多数の研究拠点が存在する。一方、色素増感型の研究は非常に少なく米国NREL等があるのみである。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。</p>

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

米国	応用研究・開発	○	↑	<p>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。</p>
欧州	基礎研究	◎	→	<p>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、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、色素増感型、有機薄膜型ともに非常に研究が盛んである。色素増感型ではEPFL(グレッツェル研)やウブサラ大学、有機薄膜型ではImperial Collegeが基礎研究を牽引している。ただ、EPFLは研究の中心をペロブスカイト太陽電池に移行しつつある。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。</p>
	応用研究・開発	◎	→	<p>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。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。</p>
中国	基礎研究	△	↑	<p>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、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。</p>
	応用研究・開発	○	↑	<p>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。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。</p>

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。現実的な技術を中心として、原材料からセル、システムまで研究開発が進められている。次世代技術の研究も主流ではないが進められている。有機系太陽電池の研究機関は多いが、基礎研究力はまだキャッチアップ・レベルである。一方、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 17.9% (米国 NREL 認証) を達成している。
	応用研究・開発	○	↗	LG 電子や Hanhwa QCells 社は結晶シリコン太陽電池モジュールの国内生産量の大幅な拡大を計画している一方、Hyundai は、事業撤退の動きがある。卓越した半導体技術を背景として技術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) Panasonic 25.6%のプレスリリース
<http://news.panasonic.com/jp/press/data/2014/04/jn140410-3/jn140410-3.html>
- 2) SHARP 25.1%の学会報告
第 40 回 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Denver, USA, 8-13 June, 2014
- 3) 各種太陽電池の最高効率
M. Green *et al.*, Solar cell efficiency tables, Progress in Photovoltaics **24**, 3 (2016).
- 4) フラウンホーファーの Topcon セル 25.1%のプレスリリース
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/press-releases-2015/fraunhofer-ise-achieves-new-world-record-for-both-sides-contacted-silicon-solar-cells>
- 5) ドーパントを用いない DASH 太陽電池の提案
J. Bullock *et al.*, Nature energy **1**, 15031 (2016).
- 6) 気相成長によりウェハを作製する Direct Gas to Wafer 技術
<http://www.xtalsolar.com/benefits.html>
- 7) Crystal Solar と長州産業の連携研究
E. Kobayashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 223504 (2015).
- 8) Trina Solar の 21.3%
http://www.trinasolar.com/us/about-us/newinfo_978.html
- 9) 機能性欠陥を有するスマート法の提案
I. Takahashi *et al.*, Appl. Phys. Express **8**, 105501 (2015).
- 10) ノンコンタクトクルーシブル法
K. Nakajima *et al.*, J. Cryst. Growth **344**, 6 (2012).
- 11) 撥液ルツボ
K. Fujiwara *et al.*, Energy Science & Engineering **3**, 419 (2015).
- 12) ZSW の CIGS 太陽電池 22.6%の報告
https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Pressemitteilungen/2016/

pr09-2016-ZSW-WorldRecordCIGS.pdf

- 13) 東大、宮崎大の自然光を水素へ変換：プレスリリース

<http://www.u-tokyo.ac.jp/ja/utokyo-research/research-news/highest-efficiency-hydrogen-production-under-natural-sunlight.html>

- 14) NEDO プロジェクト始動のプレスリリース

http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100393.html

- 15) シリサイド半導体の太陽電池応用

D. Tsukahara *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 152101 (2016).

- 16) ペロブスカイト シリコンタンデム

J. P. Mailoa *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 121105 (2015).

3.1.2 人工光合成

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

太陽光エネルギーをエネルギー源とし、二酸化炭素と水を原料に人工的に化学エネルギー（水素や炭化水素）に変換する科学技術である。水から水素・酸素を発生させる過程、二酸化炭素と水（水由来水素又は水素イオン）から有機物・酸素を得る過程、必要に応じて水素・酸素の混合物を分離する過程などに大別される。半導体光触媒を用いるものと有機金属錯体を用いるものがある。実用的に応用が可能な変換効率や耐久性をもつ材料は未だ見いだされておらず、材料開発の基礎からの研究が重要な領域である。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

化石資源に基づいた現在のエネルギー社会は本質的に資源枯渇の問題をはらんでおり、再生可能エネルギーの早期大規模導入が期待されている。地球に照射される太陽光エネルギーは各種の自然エネルギーの源であり、人類の文明活動で消費される一次エネルギーの一万倍が地表に降り注いでいる。集光型太陽熱発電や太陽電池などを用いた太陽光エネルギー利用は既に世界各国で行われている。しかし、これらによって得られる電力は、長期間大量貯蔵や、地球規模での長距離輸送が困難である。化学エネルギーは貯蔵・輸送が比較的容易であり、化石燃料に代わる化学エネルギーを太陽光により創出できれば、その社会的インパクトは極めて大きい。

人工光合成は自然エネルギーから化学エネルギーを直接生産する非常に可能性の高い方法といえ、また水素エネルギー社会の基幹技術となりうる。

人工光合成には半導体光触媒を用いるものと金属錯体を用いるものがある。

• 半導体光触媒を用いる人工光合成

半導体光触媒を用いて水を光により水素と酸素に分解する方法は、酸化チタンを用いた本多藤嶋効果が発表されて以来、我が国で1970年代から積極的に研究が進められている分野である。

半導体光触媒を用いる方法には、水中に粉末状の半導体光触媒を懸濁し、光照射によって水を水素と酸素に分解する方法と、電極化した半導体光触媒で水素もしくは酸素を発生し、対極で酸素もしくは水素を発生させる光電気化学的な方法の2つがある。

粉末状の半導体光触媒（前者）では、紫外光によって水を水素と酸素に分解するもので量子収率が50～70%のものが報告されているが、太陽光に含まれる紫外光のエネルギーの割合は5%未満と極めて少なく、太陽光エネルギー変換効率に換算すると無に等しい。現在、最も高い太陽光エネルギー変換効率をもつ水分解光触媒は、堂免（東京大学）らによる、窒化ガリウムと酸化亜鉛の固溶体光触媒で、波長500nm以下の可視光を吸収し0.3%前後の太陽光エネルギー変換効率で、水から水素を発生できる。これは通常の植物のエネルギー変換効率と同程度であるが、市販の太陽電池のエネルギー変換効率10～15%とは大きな差がある。

光電気化学的な方法（後者）では、半導体電極を太陽電池技術によって作製し多段階起型にすることによって、太陽エネルギー変換効率にして約12%で水を水素と酸素に分解した報告が1998年にTurner (National Renewable Energy Laboratory) からのグループからされている。また近年では2011年頃よりArtificial Leaf（人工葉）という

水分解が可能な3段型シリコン太陽電池を水中に沈め、水素と酸素を2%前後の太陽光エネルギー変換効率で発生させた研究も Nocera (ハーバード大学) らのグループによって発表されている。これらの光触媒法、光電気化学法を実用につなげるためには、太陽光の大部分を占める可視光全域の光を有効に利用し、安価で大量生産に向く材料によるシステムの開発が重要になっている。

半導体光触媒やその光電極による二酸化炭素還元も研究が進んでいる。銀助触媒を用いることで二酸化炭素を一酸化炭素に選択的に還元することなどが工藤 (東京理科大) らによって報告されている。しかし水素発生も無視できない速度で起きるため、完全な二酸化炭素還元選択性を得るためには、さらなる研究開発が必要である。さらに、ギ酸やメタノールなど、二酸化炭素をより有用な有機化合物に変換するためには、無機光触媒では不十分であり、有機金属錯体やタンパク質系の化合物の応用が必要と考えられる。

• 有機金属錯体を用いる人工光合成

自然界の光合成を模したものであり、有機金属錯体における光捕集部、電荷分離機構、触媒部位の分子設計が重要な要素である。二酸化炭素と水から、高エネルギーな有機物と酸素を作ることが最終目標であるが、有機金属錯体系の光触媒では、一段の光触媒系でこの反応を起こすことは困難である。自然界の光合成のZスキーム型2段階光反応機構を模したプロセスが必要であり、人工的にどのように全体のプロセスを構築するかが重要になってくる。

現状の有機金属錯体の人工光合成の研究では、二酸化炭素の還元や水からの酸素発生の対の反応になる酸化還元を起こすための犠牲試薬を用いた半反応を研究する例がほとんどであり、全反応として二酸化炭素と水から量論的に有機物と酸素が生成されている例は極めて少ない。

人工光合成に関する研究は、欧米はもとより、中国・韓国などにおいても急激に研究投資が進んでいる分野である。日本は諸外国をリードしているものの研究競争は激化している。

人工光合成の実用化のためには太陽エネルギー変換効率として5~10%を達成できるプロセスの構築が必要である。そのためには以下の課題例に取り組む必要がある。

- 1) 水分解が可能なバンド構造をもつナローギャップ半導体光触媒の開発
- 2) 光電気化学セルにおける電極/電解質/発生水素酸素の構造設計
- 3) 水素/酸素の安全な分離手法の開発
- 4) 高品質な半導体粉末の調製技術の開発
- 5) 高ターンオーバー数で光触媒反応が可能な有機金属錯体光触媒の開発
- 6) 二酸化炭素還元系、酸素発生系を組み合わせた全反応のプロセスの構築

これらの解決のためには無機材料科学、錯体化学の研究者のみでの取り組みでは不十分であり以下のような学術分野との融合が重要である。

- 1) 半導体光触媒分野と有機金属光触媒とのハイブリッド化
- 2) 計算化学・固体半導体物理など広い物理化学理論による物性・機能の解明
- 3) 最先端の計測・分析による材料特性の解明
- 4) 化学工学的な容器設計、電気化学セル設計、生成物分離器設計

特に近年は二酸化炭素排出削減、二酸化炭素排出量の国際取引などの世界的状況から、二酸化炭素を還元して有用な燃料や化成品原料を得ることへの期待が高まっており、水からの水素・酸素発生のみならず、二酸化炭素還元も重要な研究課題である。

(3) 注目動向

人工光合成による水の水素と酸素への分解では、東京大学の堂免らが人工光合成化学プロセス技術研究組合に参画する企業とともに研究を行っているが、太陽エネルギー変換効率3%を超えたことを2016年に報告しており、最終的には10%を超える効率を目指している。また、Zスキーム型粉末光触媒をシート状に成膜したものをを用い、水を水素と酸素に分解することにも成功している。これは水素発生光触媒粉末と酸素発生光触媒粉末をシートに塗布しただけで、外部回路を用いず、そのものだけで光によって水を水素と酸素に分解するものであり、前述した光電気化学的な電極や、太陽電池を組み込んだ光電極と大きく異なる。

CO₂からの有機物の人工光合成では、米国のNocera（ハーバード大学）らのグループは、近年では半導体光電極とバイオテクノロジーを組合せ、CO₂を還元し、高級アルコールを合成する方法などを発表している。米国ではElectrofuelプログラム（DOE）が2011年頃より行われ、電気から化学エネルギーへ変換する技術には注目が集まっていた。このプログラムでは生物電気化学的手法が中心になっていて、この技術と光電気化学的手法を組み合わせることにより人工光合成を行うことができる。また、豊田中央研究所は光電極を用い太陽光のエネルギーでCO₂をギ酸に変換する手法を研究し、エネルギー変換効率4.6%が得られたことを2015年に発表している。これはCO₂の還元極に、金属錯体を応用した光電極が用いられている。また、東芝は、CO₂を光電気化学的手法によってエチレングリコールに80%のファラデー効率（電流効率）で変換する手法を2015年に発表している。これはCO₂の還元極に金基板をイミダゾリウム誘導体で修飾したものをを用いている。このようにCO₂還元においては、錯体化学や生化学と光電気化学の組み合わせが重要になっている。さらにパナソニックでも、窒化物光電極を応用し、CO₂からメタンへ還元する技術について成果を発表している。

注目すべきプロジェクトとしては以下のものがある。文部科学省の科学研究補助金から経済産業省未来開拓研究まで幅広い研究投資が同時期に始まったために、基礎研究から応用研究まで取り組みは広がっている。物理化学分野の基礎研究者から、民間企業まで人工光合成の研究に関わることのできる機会は増えているといえる。既に2012年前後から多くの人工光合成に関するプロジェクトが開始されているため、現在、これらのプロジェクトの成果が上がってきた段階であり、逆に直近で新たなプロジェクトはスタートしていない。

・国内

➤ 文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究：人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合（井上晴夫・首都大学東京ら、2012年～）

有機金属錯体の研究者と半導体光触媒の研究者の分野間融合によって人工光合成の研究が進められている。東京工業大学・石谷らのレニウム系二酸化炭素還元触媒が注目されている。

- JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ：光エネルギーと物質変換領域（研究総括 井上晴夫・首都大学東京、2012年～）

若手研究者を中心としたプロジェクトであり光触媒型、有機金属錯体型、生化学までを網羅した40人前後の研究者からなる研究プロジェクトである。

- JST 戦略的創造研究推進事業先導的物質変換領域（ACT-C）：低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出（國武・北九州産業学術推進機構／根岸・パデュエ大学ら、2012年～）

人工光合成の課題が多く取り込まれている。この中で「太陽光と水で二酸化炭素を資源化する光触媒反応系の開発」として豊田中研・森川らは半導体光電極と有機金属錯体のハイブリッド電極で二酸化炭素還元を実現している。この他にも多種の人工光合成研究が含まれている。

- 経済産業省未来開拓研究：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（革新的触媒）

（人工光合成化学プロセス技術研究組合（ARPCHEM）、東京大学・堂免ら、2012年～）
光触媒による人工光合成から水素を生産し、化学品原料として用いるトータルプロセスの研究開発を行っている。現在までに太陽エネルギー変換効率2%を超えたことを発表していて、最終的には10%を超える効率を目指している。更に最近では光触媒粉末をシート状にした光触媒シートのようなシンプルな方法も見出している。

・海外

人工光合成型エネルギー変換のプロジェクトは世界各国で進んでいる。主なものではDOEが2010年に人工光合成研究拠点JCAP（Joint Center for Artificial Photosynthesis）などをスタートさせている。米国では同時期にEnergy Frontier Research Centers（EFRCs）が拠点型研究ネットワークとして設立され、この中でも人工光合成型エネルギー変換の研究が進められている。また、NSFが主導するCCI Solar（Center for Chemical Innovation in Solar Fuels）が立ち上がっている。また、当該分野の研究機関をネットワークするSOFI（Solar Fuels Institute）が組織され、研究者間の横連携、実用化を目指した縦連携を模索する動きも注目される。さらに、SunCatalytixやLiquidLightのような大学主導のベンチャーも立ち上がり、産業界の一部も本格的に興味を持ちだした。

また欧州では2014年からFP7の後継となるHORIZON2020（H2020）が始動した。H2020では重点課題としてクリーンエネルギーを設定し、再生可能エネルギー分野の研究開発が積極的に実施されている。欧州ではNanoPEC、EuroSolarFuels、SOLARH2、SOLHYDROMICSなど多くの人工光合成に関わるプロジェクトが進行している。

韓国ではKCAP（The Korean Centre for Artificial Photosynthesis）が進行している。

また中国ではDalian National Laboratory of Clean EnergyをDalian Institute of Chemical Physics（DICP）、Chinese Academy of Sciences（CAS）内に2008年に設立し、ここで人工光合成型太陽エネルギー変換は行われているが、中国内では多くの研究者らが分散してエネルギー変換型光触媒の研究をしている。

これら人工光合成型エネルギー変換に関するプロジェクトは、2012年前後に始まっ

たものが多く、現在は特に新しい大規模な研究プロジェクトが立ち上がる様子はみられない。現在行われているプロジェクトの成果によって、本分野の動向は大きく変わるものと考えられる。

(4) 科学技術的課題

人工光合成分野は半導体光触媒によるものも、有機金属錯体によるものも我が国が世界をリードする研究分野である。しかしながら、実用化にはまだ遠く、高い太陽光エネルギー変換効率だけを追求した応用研究だけでは不十分であり、分子科学的な反応メカニズムの詳細など、基礎研究の促進も重要である。特に有機金属錯体を用いた方法では、生体分子に近い化合物の利用、生体システムの模倣も重要で生化学分野との融合も必要である。さらに、実用化に向けたプロセス設計など応用面の研究も進めておく必要性もあり、マルチスケールな視点において化学工学など多分野の研究者が融合する枠組みが必要である。

(5) 政策的課題

エネルギーに関わる科学技術分野は政策による影響を強く受けやすいが、本分野は自然エネルギーの利用につながるものであり、再生可能エネルギーを中心としたエネルギー社会を形成することは人類の最終的な目標でもある。政治、経済動向や、現在の多数のプロジェクトの成果の多寡に関わらず、継続的な研究支援体制が重要な領域である。

(6) キーワード

太陽光、水分解、二酸化炭素還元、酸素発生、半導体光触媒、有機金属錯体、可視光有効利用、Z スキーム型、光合成、植物模倣

(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	◎	↑	本文に示した各種の人工光合成プロジェクトの成果がもたらされる時期であり、多くの研究成果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↑	太陽電池の効率をターゲットにした、エネルギー変換効率の目標を掲げて研究開発がされており、実用化に近い段階での研究開発が進められている。またフィージビリティ検討やプロセス設計などにも着手していて、応用研究が展開しているといえる。豊田中央研究所、東芝、パナソニックなど企業内で研究している例も多い。国際的にも日本が最も活発に研究開発を進めている。
米国	基礎研究	◎	→	EFRCs、JCAP によって積極的に研究が進められている。ナノテクノロジーを活用した画期的な光触媒のデザインが提案されているが、実際に高いエネルギー変換効率で人工光合成反応を行うものは、太陽電池を応用したものがほとんどである。
	応用研究・開発	○	→	DOE が研究促進を行っているため、基礎研究を超えた取り組みがなされている。また米国では Electrofuels プロジェクトなど、再生可能電力で化石資源を代替する燃料を生産する方法の開発のプロジェクトもあり、これらとの相互作用で人工光合成の注目度は高まっている。 大学教授が興すベンチャーも産業化への重要な推進力となっており、D. Nocera (Harvard) の Sun Catalytix や A. Bocarsky (Princeton) の Liquid Light などがある。
欧州	基礎研究	◎	→	欧州は EPLF の Grätzel らの色素増感太陽電池などの光電気化学研究基盤が厚く、光触媒電極を用いた人工光合成反応の研究が定常的に進められている。
	応用研究・開発	○	↑	欧州では SolarFuel などの再生可能電力から化学燃料を生産するプロジェクトもあり、実用化を見据えた研究が進んでいる。Grätzel らはベンチスケールで色素増感太陽電池と半導体光電極を組み合わせソーラー水素を生産するシステムを構築しているため、応用への視野は開けているといえる。
中国	基礎研究	△	→	研究者は多いが、オリジナルなものがない。研究者間のレベルの差が大きい。
	応用研究・開発	×	→	実用化を見据えた研究開発を行っているとは考えにくい。未だ基礎的な段階の研究が多い。
韓国	基礎研究	△	→	KCAP が設立され JCAP と連携しているが、それほど注目すべき成果は見られない。
	応用研究・開発	×	→	実用化を見据えた研究開発を行っているとは考えにくい。未だ基礎的な段階の研究が多い。

(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) A. Fujishima, K. Honda, *Nature*, 1972, **238**, 37.
- 2) O. Khaselev, J.A. Turner, *Science*, 1998, **280**, 542.
- 3) S.Y. Reece, J.A. Hamel, K. Sung, T.D. Jarvi, A.J. Esswein., J.J. H. Pijpers, D.G. Nocera, *Science* 2011, **334**, 645.
- 4) NEDO 研究評価委員会、「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」（中間評価）分科会概要説明資料、2016/10/17
http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_bunkakai_28h_cyuukan_11_1.html?from=nedomail
- 5) NEDO ニュースリリース 2016/3/10 http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100533.html
- 6) C. Liu, B.C. Colón, M. Ziesack, P. A. Silver, D.G. Nocera, *Science* 2016, **352**, 1210.

- 7) The Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E)
<http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/electrofuels>
- 8) T. Arai, S. Sato, T. Morikawa, *Energy and Environmental Sci.*, 2015, **8**, 1998.
豊田中央研究所、森川特別研究室 <http://www.tytlabs.co.jp/sflabmorikawa/theme.html>
- 9) J. Tanuma, A. Ono, Y. Sugano, C.C. Huang, H. Nishizawa, S. Mokoshiba, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2015, **17**, 26072.
東芝、研究開発ライブラリ、2015/9 https://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1509_01.htm
- 10) パナソニック、2013/12/18、<http://news.panasonic.com/jp/topics/2013/38285.html>
- 11) 文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究 <http://artificial-photosynthesis.net/>
- 12) Y. Yamamoto, H. Takeda, T. Yui, Y. Ueda, K. Koike, S. Inagaki, O. Ishitani *Chem. Sci.*, 2014, **5**, 639-648.
東京工業大学ニュースリリース <http://www.titech.ac.jp/news/2014/024699.html>
- 13) JST 戦略的創造研究推進事業個人型研究さきがけ 光エネルギーと物質変換領域
<http://www.jst.go.jp/presto/chem-conv/index.html>
- 14) JST 戦略的創造研究推進事業先導的物質変換領域 (ACT-C) <http://www.jst.go.jp/act-c/>
- 15) NEDO、二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発
http://www.nedo.go.jp/activities/EV_00296.html
- 16) 米国 DOE, The Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP)
<http://www.energy.gov/articles/fuels-sunlight-hub>
<http://solarfuelshub.org/index.html>
- 17) 米国 DOE, Energy Frontier Research Centers (EFRCs) <http://science.energy.gov/bes/efrc/>
- 18) Centers for Chemical Innovation Program <http://www.nsf-cci.com/>
- 19) Solar Fuel Institute; <http://www.solar-fuels.org/>
- 20) Sun Catalytix; <http://www.suncatalytix.com/about.html>
- 21) Liquid Light; <http://liquidlightinc.com/>
- 22) European Commission, The EU Framework Programme for Research and Innovation, HORIZON 2020; <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>
- 23) Korea Center for Artificial Photosynthesis (KCAP), http://www.k-cap.or.kr/e_index.html
- 24) Dalian National Laboratory for Clean Energy, Solar Energy; <http://www.dnl.org.cn/>

3.1.3 燃料電池

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

燃料電池は、水素などの燃料と酸化剤である空気（酸素）との化学反応により電気エネルギーを直接取り出す装置である。燃料電池自動車、家庭用の高効率分散型コジェネレーションシステム、さらには、ガスタービン等と組み合わせた高効率コンバインドサイクル発電などの応用が期待されている。普及のためには、低コスト化の他にコンパクト化、高効率化、高耐久化などの課題があり、各種燃料電池について述べる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

燃料電池は、化学エネルギーから直接的に電気エネルギーを取り出すことができるため、カルノー効率の制約を受けない。このため内燃機関に比べてエネルギー変換効率が高く、CO₂排出の大幅削減が可能であり、今後のクリーンエネルギー時代のキーテクノロジーである。我が国における燃料電池を用いた商用化例としては、2009年度に世界で初めて、固体高分子型（PEFC）を用いた家庭用燃料電池コジェネシステムが実用化・販売開始され、2016年6月現在で累積15万台上が設置されている。また2014年12月には世界に先駆けて量産型の燃料電池自動車（FCV）が販売されており、高効率化や水素社会の実現に向けた対応の一つとして研究開発が推進されている。このように我が国における燃料電池は、特に応用研究・開発において強みのある分野となっている。

燃料電池は、セルと呼ばれる単電池が積層する形になっており、そのセルはイオン伝導性を持つ電解質膜とその両側にある燃料極（アノード）と空気極（カソード）で構成され、それぞれの極は電気化学反応を促進する触媒活性のある物質より成っている。電解質の種類によって固体高分子形（PEFC）、リン酸形（PAFC）、熔融炭酸塩形（MCFC）、固体酸化物形（SOFC）の大きく4種類に分類され、前者2つはプロトン、MCFCはCO₃²⁻、SOFCはO²⁻がイオン伝導体となる。また最近では、電解質にアニオン膜を用いてOH⁻がイオン伝導体となる全固体アルカリ形（SAFC）が、安価な金属触媒が利用できる可能性があることから注目されている。

我が国ではPEFCとSOFCの実用化が進展している。PEFCは高出力密度化や小型化が可能であり、室温付近で動作することから車載用や家庭用コジェネレーションシステムなどの用途で有望な電池である。700～900℃付近の高温で作動するSOFCは、高発電効率が特徴であり、熱電比の小さい家庭向けとして、また業務用・産業用用途や既存のガスタービンと組み合わせたコンバインドサイクル発電システムは70%を超える高効率発電の技術としても期待されている。

燃料電池の原理は1801年に発見され、1839年に水素と酸素の電気化学反応から、電気エネルギーを取り出すことに成功している。実用化は20世紀になってからであり、1958年米国のユナイテッド・エアクラフト社によるアルカリ型燃料電池である。1961年からは米国NASAによる研究が進められ、ゼネラル・エレクトリック（GE）社製の燃料電池（固体高分子形）がジェミニ5号に搭載された。その後のアポロ計画ではアルカリ系の燃料電池を搭載されている。また1971年に米国TARGET（ターゲット）計画で、定置用リン酸形燃料電池の開発が始まり、12.5kWの実証実験が行われた。カナダでは、

1987年にバラード社がフッ素系イオン交換樹脂膜を用いた固定高分子形燃料電池を開発し、1994年にはドイツのダイムラー・ベンツ社がバラード社の燃料電池を搭載した世界で初めての燃料電池自動車（FCV）を発表している。

日本では、石油代替・省エネルギー技術の開発を目指して始まった1981年通産省の「ムーンライト計画」（93年からは「ニューサンシャイン計画」）において、燃料電池の開発が組み込まれ、1992年リン酸形燃料電池によるフィールドテストが行われた。90年代にはトヨタ、日産、ホンダが燃料電池自動車の開発に着手、また家庭用燃料電池についても国内電機メーカーが開発に着手している。

2011年には、自動車・家庭用電気・エネルギー企業が参加する燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）の参加企業13社によって、2015年度からのFCVの普及に向けた市販開始と4大都市圏での水素ステーション整備に関わる共同声明が出された。

実用化研究としては、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の新エネルギー技術開発プログラム「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発」（2005～2009年度）、経済産業省（METI）の「水素・燃料電池実証プロジェクト（Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project）」（2002～2010年度）などによって実証試験と水素インフラ整備が行われてきた。

セルスタックに関しては出力密度2.5～3kW/Lレベルの高性能化や高耐久化が図られ、FCV本体の耐久性や信頼性も向上した。量産の準備を経て、2014年12月、世界に先駆けてトヨタ自動車から燃料電池自動車MIRAIが一般販売された。

定置用燃料電池については、2005～2008年NEDO/NEFの「家庭用PEFCの大規模設置事業」、2007～2010年の「家庭用SOFCの実証試験」を経て、2009年度に世界で初めて、PEFCを用いて家庭用燃料電池コジェネシステム「エネファーム」が実用化・販売開始され、2016年6月現在で累積15万台以上が設置されている。その後、性能向上、耐久性向上、コンパクト化、そしてコスト低減が図られている。一方SOFCに関しては、2007～2010年に200台規模のSOFC実証試験が実施され、その成果を踏まえて、2011年JX日鉱日石エネルギーがSOFCタイプエネファームの発売を開始した。2016年4月より大阪ガスは発電効率52%の燃料電池を販売開始している。また大阪ガスでは、電力自由化に合わせて、SOFCの定格一定運転を目的として、余剰電力を系統に逆潮流して買い取る、電力買取プランも提案し、普及拡大を図っている。このように家庭用定置型電源・コジェネレーション利用分野において、我が国は、他国に先んじて実用化を達成し、世界を圧倒的にリードしている。

現在、家庭用燃料電池では、PEFCの総合効率が94～95%レベル（発電効率は40%程度）、SOFCにおいてはアイシン精機の最新モデルにおいて発電効率が52%まで向上している。またコスト低減や耐久性向上の面でも大きな進歩がみられる。PEFCでは、メーカー希望小売価格が、160万円と2009年発売開始時点（300万円前後）の約半分以下まで低下し、SOFCも200万円を切る価格になるなど、低コスト化が着実に進んでいる。耐久性の面では、PEFCは7万時間を超える耐久性が、SOFCでも4万時間の耐久性を見通すことができるようになり、着実に耐久性が向上している。なお、エネファームに関する国の補助金は当初2015年度で打ち切られる予定であったが、METIによるスキーム見直しの上、2016年度以降も継続され、PEFCでは2018年度、SOFCで2020年度まで

継続される予定である。

産業用燃料電池としては、三菱日立パワーシステムズが NEDO における実証試験の成果を反映した複合発電システムの分散電源として、SOFC・マイクロガスタービン（MGT）ハイブリッドシステム（定格出力 250kW、都市ガス利用）を九州大学（伊都キャンパス）におけるグリーンアジア国際戦略総合特区“スマート燃料電池社会実証”の実証研究用として 2015 年 3 月に設置し、運転継続中である。今後、2016 年度末まで、長期耐久性検証試験等を実施する予定となっている。また、業務用数 kW 級 SOFC システムとして、京セラ、三浦工業、数十 kW 級システムとして日立造船、の各社が 2017 年度の市場導入を目指して開発を継続中である。

NEDO は「燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010」を策定し、燃料電池・水素利用技術として定置用燃料電池システム、燃料電池自動車、水素インフラの 3 本柱を設定し、燃料電池地に関しては特に PEFC と SOFC に注力した技術開発、実証研究、基準づくり・標準化を一体化させた研究開発が実施された。METI では「水素・燃料電池戦略協議会」が設置され、産業界との議論を踏まえて「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が 2014 年 6 月に策定された。ロードマップでは、2030 年までの水素社会の構築の工程表を提示し、家庭用燃料電池や燃料電池自動車に加えて、CO₂ フリーな水素による発電を想定することで、より一層の低炭素高効率社会の実現を目指している。この中で PEFC は、更なる低コスト化と耐久性向上のための研究開発を実施し、乗用車のみならず商用車や鉄道・船舶・航空機などへ利用先を拡大することが期待されている。なお 2016 年 3 月に改定された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、家庭用燃料電池の更なる価格低下（2019 年までに PEFC 型 80 万円、2021 年までに SOFC 型 100 万円）、FCV の普及加速（2020 年までに 4 万台程度、2025 年までに 20 万台程度、2030 年までに 80 万台程度）、水素ステーション箇所数の増加（2015 年末の数を 2020 年度までに倍増（160 箇所程度）、2025 年度までにさらに倍増）と自立化（2020 年代後半）が示されている。「日本再興戦略 2014」等においても、FCV の 2015 年販売開始、水素ステーションの設置支援、業務産業用燃料電池の 2017 年市販開始、将来的な水素発電導入や再生可能水素技術開発などが明記されている。

欧州では、ドイツを中心に環境政策を強力に推進する政府の支援もあり、関連産業界の技術水準・産業技術力が上昇傾向にある。欧州燃料電池・水素共同技術イニシアティブ（European Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative : FCH JTI）の下、2008 年、官民のパートナーシップという形態で欧州燃料電池・水素共同実施機構（FCHJU: Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking）が立上げられ、研究開発からフィールド実証まで広範囲な取組みが継続して進められている。研究開発の面では、例えば、開発する触媒、電解質材料の MEA の構成材料や接合体多孔質構造の作動模擬条件での性能・耐久性、あるいは氷点下起動・低加湿条件運転の影響の実験的解析とシミュレーション解析、さらには電池特性への不純物の影響などの非常に多くの関連研究が実施された。フィールド実証の面では、Ene.Field プログラムにおいて、1000 台の設置を目標として燃料電池（高温型 SOFC、中温型 SOFC、高温型 PEFC、低温型 PEFC）の実証試験が欧州 12 カ国で実施されている。

2014 年からは FCHJU の後継組織である FCH2JU（Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint

Undertaking) が 2024 年までの予定で設置され、新たな μ -CHP (小型熱電併給) の大規模フィールド実証である「PACE」を立ち上げて 2016 年から 2021 年までの 5 年間に μ -CHP を 2,650 台設置する計画を立てるなど精力的に活動を行っている。また最近の状況として、特に欧州では再生可能エネルギーの導入拡大等により SOEC セルの研究開発が活発化しており、Sunfire 社や Topsoe 社等が研究開発を進めているほか、SOEC に関するプロジェクト (HELMETH、GRINHY 等) が進行中である。

ドイツは 2007 年に「水素・燃料電池技術革新国家プログラム」(NIP: Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie / 10 年プログラム) を立ち上げ、官民共同で累計 14 億ユーロを水素・燃料電池技術開発展開に充てている。半分の 7 億ユーロが政府資金であり、内 2 億ユーロが教育研究省からのものである。R&D とデモンストレーションの二本柱で推進されており、市場形成を重視し、42% のリソースを自動車分野に充てている。定置用燃料電池分野では 2008 年から 2015 年までの 7 年間のプログラムである Callux プログラムにて約 500 台の定置用燃料電池の実証試験を実施した。参加企業は Baxi Innotech 社 (PEFC)、Hexis 社 (SOFC)、Vaillant 社 (SOFC) である。2016 年からは各企業での商用化に向けた市場開拓が行われている。

中国は、著しい高度成長による国外からの技術流入と、悪化する環境に対応するためのグリーン技術への政府援助の推進により、研究水準・技術開発水準・産業技術力のすべてにおいて上昇を示している。2016 年 4 月には、「エネルギー技術革命革新行動計画 (2016-30 年)」「エネルギー技術革命重点革新行動ロードマップ」を発表し、燃料電池技術に関しては 15 件の重点革新任務の 1 つに掲げて、PEFC 燃料電池車と関連技術、大型 SOFC スタック、PEFC と SOFC のコジェネシステムの研究開発が進められている。また FCV の研究開発を推進しており、PEFC 搭載バスや自動車の開発は現在実証段階である。中国では、環境問題の急速な悪化を背景に今後燃料電池バスが普及する可能性があり、Ballard 社等の欧米メーカーとのアライアンスも進めている。

韓国は、日本と同様の実証事業が進められ着実な技術開発水準の向上が見られる。2020 年までの予定で、燃料電池など様々なクリーンエネルギーを家庭に導入するグリーンホームプログラム (1 million green home program) の下、各企業が普及に向けた研究開発に取り組んでいる。業務用・産業用燃料電池に関しては、韓国の製鉄会社 POSCO のグループ会社である POSCO Energy が米国の FuelCell Energy 社と提携し、MCFC スタックの工場を設立、また現在トータルで 100MW 以上の規模で MCFC 燃料電池発電所の導入が進められている。

韓国の LG 社は、英国ロールス・ロイス社の SOFC 開発部門を買収し LG Fuel Cell System 社を立ち上げて、本格的な実用化に向けた研究開発を強化している。FCV に関しては、現代自動車が FCV の一般販売も限定的に始めているが、価格は一千万円を超える水準にとどまっており、現在韓国国内では購入者に補助金を支給して販売価格を約 765 万円にするなど普及拡大に向けて取り組んでいる。

(3) 注目動向

研究開発の内容に目を向けると PEFC の場合、本格普及時の燃料電池システムコストに占める電極触媒の割合が非常に大きくなると予測されるため、Pt の使用量を現状から 10 分の 1 に削減する低白金化技術、あるいは脱 Pt 触媒の基礎研究が世界的に実施され

ている。前者として、①コアシェル触媒、②合金触媒、後者としては、③カーボン系触媒、④金属酸窒化物がある。さらには実用電極内での触媒の有効利用率の向上を目指した研究が行われている。また、触媒活性の向上だけでなく、耐久性やMEA (Membrane Electrode Assembly) としての実用性を兼ね備えた材料が求められている。

- ① コアシェル触媒：コアシェル触媒は、コアを白金以外の金属や白金合金を用い、触媒反応が起こる表面部分（シェル）に白金を配置する触媒である。性能に関しては、コアのPdの構造を制御したものや、Pd-Irを合金化したコアを用いることで最大11倍程度の質量活性が報告されている。耐久性に関しても従来白金触媒と比較し、高い耐久性を有する報告もある。
- ② 合金触媒：白金以外の金属（Co, Ni, Fe, Cu, Ag, Au, Pd, La等）と合金化することにより、白金の質量活性を増加させる手法である。トヨタMIRAIには白金コバルトの合金触媒が採用されており、従来の白金触媒の1.8倍の活性を示すことが報告されている。CoやNiを用いた報告が多いが、その他金属を用いた報告や三元系、四元系の合金触媒の報告もある。合金触媒は低白金・非白金触媒の中でも最も多く検討が進められている領域である。その中でも特に米国での進捗が著しく、DOEプロジェクトの成果として、従来のPt触媒にくらべて25倍程度の活性を示す格子状の構造をもったPt₃Ni触媒が報告されている。
- ③ カーボン系触媒：カーボンアロイ、窒素ドーピング炭素材料等がある。カーボン系触媒は、カーボン原子の集合体を主体とした多成分系からなり、それらの構成単位間に物理的・化学的な相互作用を有する材料として定義されている。多くの報告では、窒素等を含むポリマー樹脂とコバルトや鉄等の遷移金属や遷移金属錯体を混合して、炭素化することにより得られる。カーボンアロイ触媒は非白金触媒としては、高い酸素還元活性を有することが特徴である。現状としては、基礎研究段階であり、実使用環境である空気を酸化剤として評価している報告は少ないが、群馬大学・日清紡のグループおよびNEDO固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発の東京工業大学らのグループで空気を酸化剤とした単セル試験の発電性能が報告されている。ただし現状は白金触媒と比較すると不十分であり、改善が必要とされる。
- ④ 金属酸窒化物：金属酸窒化物はバルブメタルとして知られている4および5族元素を用いた金属酸化物である。炭窒化物や有機錯体を焼成することにより得られ、金属種としては、Ta, Nb, Zr, Ti等の金属酸化物が酸素還元活性を示すと報告されている。近年、高い導電性を有するTi₄O₇等を用いたオール金属酸窒化物系触媒の開発も進められているが、性能改善が必要である。本分野は日本での研究が多い領域であり、NEDO固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発、固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発事業にて、横浜国立大学を中心としたグループ等で研究開発が進められている。また、日本国籍の特許出願が多く、中でも昭和電工㈱の出願件数が特段に多い。

• PEFC 用電解質膜

実用化されているフッ素系電解質膜では、日・米・欧を中心に活発な研究開発が継続的に行われている。特に、安定性と耐久性の向上に対する日本企業（旭化成、旭硝子など）の取り組みは世界トップレベルで、分解機構の詳細な解明とその知見に基づく分子設計が実を結んでいる。分子末端の保護、側鎖エーテル結合の数と部位の最適化、安定

剤の添加により、従来膜では数百時間程度で顕著な分解が起こった高温低湿度条件においても優れた耐久性を持つ電解質膜が開発されている。

また加湿器レス運転のために電解質膜の薄膜化が注目されている。10ミクロン程度の薄膜化により水輸送能が向上し、燃料電池反応で生成される水をカソードからアノードに輸送し膜全体を加湿する。燃料電池劣化原因となるガスクロスオーバーも高くなり、耐久性とのバランスが重要となる。薄膜化の技術としては、多孔薄膜基材の細孔中に電解質ポリマーを充填した複合膜により実現される。

非フッ素系電解質膜としては、芳香族炭化水素系電解質膜を中心に様々な材料が検討されているが、精密な分子設計と物性の精確な評価で、日米の研究開発がこの分野を率いている。ブロック共重合化により低加湿対応への可能性がひらけてきたことが最近の重要な成果であり、フッ素系電解質と同程度の導電率が得られている。今後はいかに耐久性を向上させるかが開発の鍵となる。

• PEFC 用拡散層

PEFCでは、生成する水により、特に高電流密度領域での運転を阻害する。このため水を排出する技術が重要であり、拡散層および電極と拡散層の間のマイクロポーラスレイヤー（MPL）の親疎水化技術などがある。また、100～150℃で安定に運転できるPEFCの開発も望まれている。

• SOFC

大きな技術課題であった耐久性をクリアするセルメーカーが増えてきている。劣化メカニズムの解明も着実に進み、形状が異なる各タイプのSOFCセルスタックにおいて、最適化が進んでいる。

車載要SOFCについては、日産自動車はSOFC搭載のFCVを2020年めどに実用化すると発表し、ブラジルでプロト機を公開した。これはバイオエタノールを燃料として、改質器により改質した後SOFCで発電を行い、電気モーターの駆動源として利用するものである。

業務用SOFCでは、三菱日立パワーシステムズが、SOFCハイブリッド機を活用して、水素を製造するコンセプトを提案している。SOFCの余剰熱を利用して燃料改質により水素を製造するというアイデアであるが、SOFCから取り出すエネルギーとして、通常のコージェネレーションシステムが電気および熱のみの併産であるのに対して新たに水素を製造することが可能であり、トリジェネレーションシステムと呼ばれている。トリジェネレーションシステムでは電気、熱、水素の比率を自由に変えることが可能であり、水素ステーションでの利用などが期待される。例えば、FCVの黎明期において、ステーションの稼働率が低い時には電気と熱を供給し、FCVの台数が増えれば水素を生産する、といった自由度の高い運用が期待される。

注目すべき動きとしては、米国DOEエネルギー高等研究計画局（ARPA-E）により、2014年に中温域燃料電池に特化した13件のプロジェクトから成るプログラムREBELS（Reliable Electricity Based on Electrochemical Systems）が開始された。本プログラムは200-500℃の中温域で作動する分散型燃料電池開発により、PEFCと

SOFCの両方の利点を取り込むことや新たな機能（メタン原料からの燃料電解合成など）を狙いとしたものである。

(4) 科学技術的課題

実用化・普及の上で重要な課題は、システムとしてのコンパクト化、高効率化・信頼性向上（高耐久化）・低コスト化の4点である。システムサイズやパフォーマンス、耐久性の面では、一定の進捗は見られるが、最大の課題はコストである。パフォーマンスや耐久性とコストとはトレードオフの関係にあり、パフォーマンスや耐久性を落とさずにコストを下げるのが鍵である。また、高効率・高耐久かつ低コストのセルを開発するためには、触媒の構造や電子状態の変化について構造反応解析を行うなど、材料を原子レベルやナノレベルで見直すとともに、革新的な電極触媒や電解質材料の創成、デバイス開発などが必要であり、以下のような取り組みが必要である。

- ① 電極触媒、電解質の原子・分子・ナノ構造制御およびその界面制御を行い、反応機構や劣化メカニズムを理解することで、低温作動用の高活性・高耐久性電極触媒層開発に向けた材料設計指針を構築
- ② 低コスト化を実現するための白金使用量の低減、更には非白金系触媒の開発：システムコストにおける白金コストの占める割合は年々減少してきており、今後は、セルスタックコストの低減とともに、セルスタック以外の部分の更なるコスト低減も推し進める必要がある。FCVでは、水素貯蔵タンクやその他の関連部品、定置用FCでは改質器や燃料処理器なども大きなコスト要因であり、システム構成の見直しや、簡素化による補機点数の削減など、新たな試みが必要である。上記補機コスト低減を視野に入れたセルスタック開発が一つの焦点となる。
- ③ 中温作動化や多様な燃料対応を可能にする高活性電極材料の開発
- ④ 機動性やコンパクト化でメリットが出せる、中温（100～600℃）無加湿運転が可能な電解質の開発。
- ⑤ 超高効率発電を実現し、高温作動における長時間安定性を有する、燃料電池のセル・スタック・システムの開発・実証

(5) 政策的課題

燃料電池普及の課題は、定置用でもFCVでも、自立普及に至るまでのコスト低減がいかにかつどの程度かである。いったん実用化されると、コスト低減の道筋は、一般的には習熟曲線と大量生産に拠るところが大きい。初期の普及拡大をサポートするために、METIは手厚い補助政策を行ってきたが、現在では、メーカーの自助努力を促すために、補助率や補助額は大幅に低減され、早期の自立普及が期待されている。一方で、定置用燃料電池の普及台数は、国のロードマップ目標である2020年140万台にはまだ遠く、販売台数の伸びも鈍化の兆しが表れ始めた。今後は、大量生産とコスト低減を繰り返す正のスパイラルから逸脱するリスクが大きくなってきている。この状況を打破するためには、大量生産によるコスト低減のシナリオだけに頼らず、新規技術開発により、抜本的にコスト低減を図る技術開発の道筋が必要である。実用化したことにより研究開発の手綱を緩めず、新規の技術開発への新たなスキーム作りが必要である。

FCVも同様であり、水素ステーションに対する補助や、FCV 拡販のための国の補助金、及び行政区の補助金政策は柔軟に執られているが、一方で、今後の爆発的な普及にはまだ時間がかかり、大量生産の効果により FCV が低コスト化するシナリオはすぐには描きにくい。

最近の燃料電池分野の国家プロジェクトは、FCV 市販のための近々の技術課題に集中する傾向があり、その先の革新的な次世代技術に対する支援がほとんど成されていない。これらの技術開発は、ハイリスク・ハイリターンであり、一民間企業では対応は難しく、国としての課題であろう。

次世代を見据えた戦略として多くのシーズ技術を保有する大学・公的研究機関の基盤的研究強化と実用化に注力する企業研究をシームレスに橋渡しする必要がある。基礎学理に基づいた高性能な酸素イオン伝導体、水素イオン伝導体、電極触媒、改質触媒などの革新的材料開発は国内外で地道な基盤研究が行われているが、研究者ネットワークを分野横断的に構築して研究開発に取り組むことで、デバイス化までの研究開発を加速できる。国内には、高度な燃料電池システム技術を有する企業が多く、これらの企業が、迅速かつ効率的に大学発の革新的デバイスのシステム化を行うことで、我が国の産業活性化、さらには、エネルギーセキュリティの問題の解決につながるものと期待される。

(6) キーワード

固体高分子形燃料電池（PEFC）、リン酸形燃料電池（PAFC）、熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）、固体酸化物形燃料電池（SOFC）、電気化学、高効率発電、エネルギー変換効率、低白金・非白金触媒、トリジェネレーション

(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"> • NEDO 資金等による全国複数の集中的拠点の研究活動により、研究水準は世界をリードしている。しかし、燃料電池導入補助金や水素ステーション設置補助金の増加等により、基礎研究や次世代技術開発への支援は減少方向。 • 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに幅広い研究が行われており、研究水準は世界をリードしている。主な研究グループとして、①コアシェル触媒（同志社大らのグループ）、②合金触媒（山梨大らのグループ、東工大らのグループ）、③カーボン系触媒（群馬大らのグループ、東工大らのグループ）④金属酸窒化物（横国大らのグループ）などがある。 • SAFC 用電解質膜の開発では、耐久性電解質膜としてヘテロ元素を有さない全芳香族からなる電解質材料の開発が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> • 燃料電池本体・発電システム・補機類などの技術が進展し、世界トップの水準を維持。集中研究拠点等を中心とした産官学の連携強化も図られている。 • 触媒についても、産官学の連携等により、低白金・非白金触媒いずれについても成果が得られてきている。主な研究グループとして、①コアシェル触媒では、田中貴金属工業-山梨大、石福金属興業-同志社大、トヨタ・日産等の自動車メーカー、触媒メーカーとしてキャタラー、エヌ・イーケムキャット、および昭和電工、②カーボンアロイ触媒では、日清紡-群馬大、帝人-東工大、材料メーカーとして旭化成、帝人、富士フィルム、③金属酸窒化物では、昭和電工-横国大がある。 • PEFC を用いたエネファームは既に 15 万台が設置され、燃料電池自動車の市販も始まっている。 • SAFC でも、実用化はまだまだだが、ダイハツ社が、水加ヒドラージン燃料、貴金属フリーの燃料電池車両の開発を発表している。 • SOFC の実用化も始まっている。

米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 2014年度、予算抑制の方針を転換し、その後研究開発予算は再び増加の傾向を見せている。低白金・非白金触媒については以下の研究グループがある。①コアシェル触媒では多くの研究がある、②合金触媒では、アルゴンヌらのグループ、③カーボンアロイ触媒では Los Alamos らのグループ、イリノイ大らのグループ、カナダの INRS-Énergie ら、University of Waterloo らがある。Case Western Reserve University らのグループはナノカーボンを中心にした触媒の開発。 SAFCの開発では、高アルカリ耐性を有するイオン官能基の開発が行われ、耐久性電解質膜に展開している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国では、バックアップ電源、フォークリフト用電源、バッテリー充電用電源、小型移動体向け電源など幅広い分野への商用化が進められている。DOE ファンドにより、コスト低減のため、低白金・非白金触媒の開発及び、電解質膜・MEA等の開発が推進されている。産官学の連携等により、低白金・非白金触媒いずれも成果が得られている。研究グループは、①コアシェル触媒で UTC Power ら、②合金触媒で 3M らのグループ、GM やフォード、UTC POWER といったシステムメーカーがある。米国の特許出願は多く、白金系触媒の開発については、米国が最も先進的に進められている。③カーボンアロイ触媒: Los Alamos らのグループ、イリノイ大らのグループで開発した触媒の量産化を PAJARITO POWDER が検討。ニューメキシコ大学や Los Alamos からの特許出願があるが日本出願件数と比較すると少ない。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ドイツは 2007 年に 10 年プログラム「水素・燃料電池技術革新国家プログラム」を立ち上げ、官民共同で累計 14 億ユーロを充てている。 2014 年には FCH 2 JU が開始され、プログラムが実施される 7 年間で合計 13.3 億ユーロの予算を計上しており、燃料電池・水素エネルギーの導入を目的として、自動車用燃料電池の低コスト化や発電用燃料電池の効率向上等の研究が進められている。 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに研究が行われているが、非白金触媒については、日米と比較すると少ない。①コアシェル触媒では、ドイツの Technical University Berlin らのグループ、②合金触媒ではドイツの Technical University Berlin らのグループ、デンマークの Technical University of Denmark らのグループ、フランスの NRS-Université ら、③カーボンアロイ触媒では、フランスの Université de Montpellier らのグループなどがある。 PEFC の電解質膜では、高効率なホスホン化反応により、高い IEC を有し、かつ優れた熱的安定性を示すホスホン酸高分子電解質膜の開発に成功した。 SAFC の電解質膜: 放射線によりフッ素系樹脂に電解質材料をグラフト重合させた膜の開発が行われている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 新たな μ-CHP の大規模フィールド実証である「PACE」が立ち上がった。 2014 年には FCH 2 JU が開始され、プログラムが実施される 7 年間で合計 13.3 億ユーロの予算を計上しており、燃料電池・水素エネルギーの導入を目的として、自動車用燃料電池の低コスト化や発電用燃料電池の効率向上等の研究が進められている。 触媒に関しては、低白金化に関する検討が主流。①コアシェル触媒でジョンソンマッセイ、②合金触媒でジョンソンマッセイ、ダイムラー、BASF、フランス原子力庁、③カーボンアロイ触媒では、企業の開発報告や特許は見られない。

中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 「エネルギー技術革命重点革新行動ロードマップ」を発表し、燃料電池技術を15件の重点革新任務の1つに掲げている 2025年以降の市場化を狙い、国産燃料電池技術の開発に向けた取組みを進めている。「中国製造2025」には2020年までに1,000台規模の試運行、2025年までに量産化の実現が目標として定められており、これらを実現するプロジェクトとして、「863計画」、「973計画」などの中央政府のR&D活動に水素燃料電池が設定されている。 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに研究が行われており、近年論文等による報告が増加している。しかしながら、触媒性能に関しては、日本や米国に比べると劣る。研究グループは、①コアシェル触媒では、South China University らのグループ、Wuhan University らのグループ、Dalian National Laboratories らのグループ、②合金触媒では、National Central University, Taoyuan らのグループ、Wuhan University らのグループ、③カーボンアロイ触媒では、Xiamen University らのグループ、South China University らのグループがある。 PEFC：チャンネル構造の構築に向け、多置換のイオン交換基を有するユニットを利用した高分子電解質膜を多く報告している。 SAFC：多孔性高分子やロタキサン構造を用いた高速アニオン伝導性材料の開発が行われている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 「エネルギー技術革命重点革新行動ロードマップ」を発表し、燃料電池技術を15件の重点革新任務の1つに掲げている 過去10年間、燃料電池自動車・バスのデモンストレーションが行われてきたが、現時点で市場はなく、また市場形成に向けた政策も打ち出されていない。2025年以降の市場化を狙い、国産燃料電池技術の開発に向けた取組みを進めている状況である。 触媒に関しては、低白金・非白金いずれについても企業が関与して開発を進めている報告はない。過去5年の特許出願状況を見ても大学からの特許出願は一部見られるが、企業からの出願は見られない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> 燃料電池に関する一定レベルの基礎研究は継続されている 韓国科学技術院などを中心に、国のファンドで固体高分子形やリン酸燃料電池、溶融炭酸塩形燃料電池など定置用と自動車用の両方の応用を目指して取り組んでいる。 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに研究されているが、触媒性能に関しては、日本や米国に比べると劣る。①コアシェル触媒では、Korea Institute of Science and Technology らのグループ、Sungkyunkwan University、②合金触媒では、Korea Institute of Science and Technology、③カーボンアロイ触媒では、Republic of Korea Naval Academy、および National Institute of Science and Technology らのグループがある。 PEFC：アニーリング処理し、明瞭な相分離構造を構築することで、低湿度環境下でプロトン伝導を促進される含フッ素炭化水素系マルチブロックポリマーを開発した。 SAFC：エンブラ系のポリマーをベースとした、ペンダント型のアニオン交換膜の開発が行われている。
	応用研究・開発	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> 2020年までの予定で、燃料電池など様々なクリーンエネルギーを家庭に導入するグリーンホームプログラムが進んでいる。現代自動車のFCV実用化も進んでいる。 自動車用では、現代自動車少量連続生産設備が完成。内製技術による日本メーカーに迫るスペックの車両開発が達成され確実な技術力向上が見られる。 触媒に関しては、企業からの開発状況や性能に係る報告はほぼない。自動車メーカーである現代自動車の特許出願が多く、白金系・非白金系のいずれも出願。特筆すべきは Samusung グループの特許出願が非常に多いこと。米国・欧州等にも多くの件数の特許を出願。しかし、2016年4月の報道では、サムスの燃料電池研究開発部門はコーロンに売却されることが報じられている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 水素燃料電池戦略ロードマップ (平成 28 年 3 月 22 日改訂版)
- 2) 水素・燃料電池戦略協議会 第 4 回、第 5 回 配布資料 (平成 27 年 6 月 11 日、11 月 11 日)
- 3) 平成 27 年度新エネルギー等導入促進基礎調査 水素社会の実現に向けた取組に関する調査 調査報告書
- 4) The U.S. Department of Energy's (DOE's) 2016 Annual Merit Review 報告書
- 5) Minhua Shao ら著、Recent Advances in Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction、
- 6) ACS Publications, August 7, 2015
- 7) 平成 27 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会、燃料電池・水素分野予稿集 (平成 27 年 8 月 31 日、9 月 1 日)
- 8) 平成 26 年度 炭素材料学会年会 (2014 年 12 月 8 日～10 日) 予稿集
- 9) 太田健一郎・石原顕光、固体高分子形燃料電池の本格普及に向けた脱白金酸素還元触媒への展望、粉砕 No.55 (2012)、48-53.
- 10) 第 7 回新電極触媒シンポジウム (2014 年 10 月 24 日) 講演予稿集
- 11) NEDO 固体高分子形燃料電池実用化技術開発 (平成 22 年度～26 年度)、基本計画
- 12) NEDO 固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発 (平成 27 年度～31 年度)、基本計画
- 13) Sarah C. Balla et al., Activity and Stability of Pt Monolayer Core Shell Catalysts. ECS Trans.2009,
- 14) Velázquez-Palenzuela, A.; Zhang, L.; Wang, L.; Cabot, P. L.; Brillas, E.; Tsay, K.; Zhang, J. Fe-Nx/C Electrocatalysts Synthesized by Pyrolysis of Fe(II) - 2,3,5,6-Tetra(2-Pyridyl)Pyrazine Complex for PEM Fuel Cell Oxygen Reduction Reaction. Electrochim. Acta 2011
- 15) Yang, L.; Larouche, N.; Chenitz, R.; Zhang, G.; Lefèvre, M.; Dodelet, J.-P. Activity, Performance, and Durability for the Reduction of Oxygen in PEM Fuel Cells, of Fe/N/C Electrocatalysts Obtained from the Pyrolysis of Metal-Organic-Framework and Iron Porphyrin Precursors. Electrochim. Acta 2015
- 16) Marina V. Lebedeva et al., Effect of the Chemical Order on the Electrocatalytic Activity of Model PtCo Electrodes in the Oxygen Reduction Reaction. Electrochim. Acta.2013
- 17) Ifan E. L et al., Understanding the Electrocatalysis of Oxygen Reduction on Platinum and Its Alloys. Energy & Environmental Science.2012
- 18) Chunhua Cui et al., Octahedral PtNi Nanoparticle Catalysts: Exceptional Oxygen Reduction Activity by Tuning the Alloy Particle Surface Composition. Nano letters.2012
- 19) Frederic Jaouen et al., Effect of ZIF-8 Crystal Size on the O₂ Electro-Reduction Performance of Pyrolyzed Fe-N-C Catalysts. Catalysts.2015
- 20) The U.S. Department of Energy's (DOE's) 2015 Annual Merit Review 報告書
- 21) Lin Gan et al., Understanding and Controlling Nanoporosity Formation for Improving the Stability of Bimetallic Fuel Cell Catalysts. Nano Lett. 2013

- 22) Wang, Y.-C.; Lai, Y.-J.; Song, L.; Zhou, Z.-Y.; Liu, J.-G.; Wang, Q.; Yang, X.-D.; Chen, C.; Shi, W.; Zheng, Y.-P.; et al. S-Doping of an Fe/N/C ORR Catalyst for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with High Power Density. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2015
- 23) Peng, H.; Mo, Z.; Liao, S.; Liang, H.; Yang, L.; Luo, F.; Song, H.; Zhong, Y.; Zhang, B. High Performance Fe- and N- Doped Carbon Catalyst with Graphene Structure for Oxygen Reduction. *Sci. Rep.* 2013
- 24) Pylypenko, S.; Mukherjee, S.; Olson, T. S.; Atanassov, P. Non-Platinum Oxygen Reduction Electrocatalysts Based on Pyrolyzed Transition Metal Macrocycles. *Electrochim. Acta* 2008
- 25) Cheon, J. Y.; Kim, T.; Choi, Y.; Jeong, H. Y.; Kim, M. G.; Sa, Y.J.; Kim, J.; Lee, Z.; Yang, T.-H.; Kwon, K.; et al. Ordered Mesoporous Porphyrinic Carbons with Very High Electrocatalytic Activity for the Oxygen Reduction Reaction. *Sci. Rep.* 2013,
- 26) Matin, M. A.; Jang, J.-H.; Kwon, Y.-U. One-Pot Sonication-Assisted Polyol Synthesis of Trimetallic Core – Shell (Pd,Co)@Pt Nanoparticles for Enhanced Electrocatalysis. *Int. J. Hydrogen Energy* 2014
- 27) Choi, R.; Choi, S.-I.; Choi, C. H.; Nam, K. M.; Woo, S. I.; Park, J. T.; Han, S. W. Designed Synthesis of Well-Defined Pd@Pt Core – Shell Nanoparticles with Controlled Shell Thickness as Efficient Oxygen Reduction Electrocatalysts. *Chem. - Eur. J.* 2013
- 28) Hwang, S. J.; Yoo, S. J.; Shin, J.; Cho, Y.-H.; Jang, J. H.; Cho, E.; Sung, Y.-E.; Nam, S. W.; Lim, T.-H.; Lee, S.-C.; et al. Supported Core@Shell Electrocatalysts for Fuel Cells: Close Encounter with Reality. *Sci. Rep.* 2013

3.1.4 熱電変換

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

熱電変換の研究開発領域では、廃熱や未利用の熱を電気として高効率に利用する技術開発を目的とする。固体の両端に温度差を与えると温度差に比例した起電力が発生するゼーベック効果を利用した熱電変換素子の高変換効率、高耐久、低重量、低コスト、低環境負荷を実現するための、材料のナノ構造制御、pn制御技術、低次元量子構造の活用を含めたバンド構造制御（バンド・エンジニアリング）、ナノスケール熱制御（フォノン・エンジニアリング）、新原理（磁性や複合効果など）を活用した新規熱電材料・熱電変換素子開発などの研究開発課題がある。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

人類が使用する石油・石炭・ガスなどの1次エネルギーの約7割は未利用の廃熱として捨てられている。これは、熱力学第2法則により、熱から仕事を取り出すためには必ず熱を廃棄しなければならないことと、温度が低くなるほど熱エネルギーの質が低く熱の有効利用は困難であるためである。この廃熱の一部でも電気エネルギーとして回収できれば、省エネ・省CO₂社会の実現へ大きく前進することができるため、ゼーベック効果により直接的に熱エネルギーから電気エネルギーを得ることができる熱電変換技術への期待は高い。

一方、近年のエレクトロニクスやインターネット技術など情報・通信分野の飛躍的な発展により、あらゆるものをインターネットで繋いでそれらの情報を様々な場面で活用して利便性の高い社会を実現しようとするIoT（Internet of Things）やトリリオンセンサの活動が活発化している。ここでは、情報を集めるためのセンサとともに、長期間動かせる電源の確保が重要であり、熱や振動など環境にあるエネルギーから電気エネルギーを得るエネルギーハーベスティングが注目されている。ここでも、熱電変換は可動部分がなく小型でメンテナンス・フリーにできることなどから期待されている。

熱電変換は固体素子であるため高信頼性、長寿命であり、さらにスケール効果がないため、上述したように廃熱発電やエネルギーハーベスティングなどへの期待が高いが、現在は冷却用のペルチェ素子としての実用化にとどまり、期待される発電用途の実用化には至っていない。しかし、近年のナノテクノロジーや新規材料の発展により大きな熱電性能向上が得られ、実用化への実装技術などの開発取り組みも増えている。また、海外（欧米中など）では自動車廃熱や工場廃熱の回収、太陽熱エネルギー利用、エネルギーハーベスティングへの実用化が進んでおり、材料開発だけでなくシステムとして熱交換器の低コスト開発など、実用化に向けた研究開発競争が激化している。

熱電変換材料の開発は1950年代に遡り、ペルチェ冷却素子用途としてBi₂Te₃、宇宙用電源としてSi-Ge合金が実用化された。しかし、熱電変換の高効率化には高ゼーベック係数、高電気伝導、低熱伝導という、相反する3つの性質が材料に求められるため、材料の無次元性能指数ZTは1程度であり、実際の変換効率は数%にとどまっていた。しかし、1990年代以降、物性理論に基づく新たな設計指針の提唱や2010年代の数値計算科学の飛躍的な進歩による現象の深い理解によって、現在は高温ながらもSnSeでZT=2.6が米国グループから発表されるなど、世界的には着実に新材料開発が進んでいる。高電気伝導と低熱伝導の両立に向けて、フォノンに対してはガラスのように電荷キャリアに対しては

結晶のような PGEC (Phonon-Glass Electron-Crystal)、フォノンを選択的に散乱する技術の開発が進んだ。結晶構造レベルでは、PGEC を体現する系として、カゴ状結晶構造を有するスクッテルダイトやクラスレートにおいて、ラトリング現象が効力を発揮して ZT が 1 を大きく超える新規材料が見出された。また、3 元系以上の複雑な組成を持つ材料も研究対象となり、相分離によるナノ構造化や Si のナノ結晶化による効率向上や、コスト面重視のテトラヘドライトやカラーサイトといった鉱物の直接利用、PEDOT : PSS を代表例とするフレキシブルな有機熱電材料など多岐に渡る材料研究が進められている。さらに、これまでの膨大な知識を集約して新規材料を提案するマテリアルズ・インフォマティクスを熱電変換材料開発にも導入する動きが始まっている。

一方で、電気伝導率とゼーベック係数で構成されるパワーファクターを増強するために、バンド構造制御（バンド・エンジニアリング）にあたる低次元ナノ構造の閉じ込め効果や、共鳴準位のようにフェルミ面近傍での状態密度の先鋭化や電子状態の multi-valley 構造などが提唱されてきたが、前述のナノ構造制御のように高性能化が得られるレベルにはまだない。

国内外の研究開発動向に関しては、従来は、米国と日本がそれぞれ新規概念や材料研究の厚みで牽引してきたが、2000 年代中盤以降、米国に加えて欧中韓でも国レベルでの研究予算の大幅増強があり、研究人口の大幅な増加に伴って研究活動の強力なレベルアップが達成されている。例えば、新規材料が見つかったからの高性能化研究において、米国主要研究者の協力を得て中国が日本を凌駕するケースも数多く出て来た。以前は米国とトップに並んでいた日本の論文数は他国の大幅上昇とは逆に 2006 年から減少傾向にあった。しかし、異分野からの新規研究者参入などで 2013 年から論文数は大きく増えており、さらに 2015 年から JST の CREST・さきがけ「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」の新規プロジェクトも立ち上がり、特に室温近傍域のエネルギーハーベスティングにおける今後の日本の熱電研究の躍進が期待される。

各国の研究開発の特徴を以下に示す。米国では、毒性や希少であっても最高性能を追求する PbTe 系や新原理を発掘する研究、スタートアップ企業主導によるシステム全体での実用化開発（工場廃熱利用、自動車廃熱利用、太陽熱利用技術開発）などが進められている。欧州では、新規材料開発と自動車応用、太陽熱利用、エネルギーハーベスティングの実用化研究が進められている。しかし、欧米ではバブル的に大型予算が付いていた（欧州で 2007 年から大型プロだけで 100 億円以上）2015 年ごろまでに比べて、実用化へすぐつながる期待や約束・目標設定が高過ぎたことの反動のためか予算は減少する傾向にある。中国では、マンパワーを活かした系統的な熱電材料最適化研究、砂漠を利用した太陽熱利用技術開発、数値計算科学による新材料探索、韓国はウェアラブル熱電研究などが特徴として挙げられる。また、中韓では引き続き大型のプロジェクトが走り、それにとまらぬ若手研究者人口や熱電研究に関わる新規ラボが増えている。日本では有害元素や希少元素を含まない元素戦略的な新規材料創製（シリサイドや酸化物、硫化物、ハーフホイスラー合金、有機材料など）、鉄鋼所廃熱利用技術開発などが進められている。また、日本の学会では、熱エネルギーの多角的で高度な制御や評価を目指すフォノンエンジニアリングの活動が活発化しており、2016 年秋には応用物理学会で複数の分科に跨る「フォノンエンジニアリング」の合同セッションが発足し、熱電応用を含むナノスケールの熱制御に関連する横断

的な研究領域として今後の発展が注目される。

産業の動向に関しては、冷却用のペルチェ素子が一定のマーケットを形成しているが、熱電発電が築き得る大きな市場がまだ実現していない。最近の一つの動きとして、各温度域での実用化のチャンピオン材料として設定して主導権を握るべく各国研究者が具体的に自材料を取り上げた実用化研究と情報発信が増えている。

(3) 注目動向

熱電変換は材料分野に加え、電気・電子分野と熱分野の融合領域であるが、もともと優れていた電子物性の数値計算科学に加え、近年の熱物性の数値計算科学の進歩が著しい。電子物性予測で先行していた学術の導入が熱物性予測の理解にも導入された形である。格子熱伝導率の低減も結晶構造からメゾスコピックなサブミクロン構造までを包括した手法が確立されるようになり、フォノンエンジニアリングをキーワードにして高度なナノ構造設計や材料設計（高次のナノ構造や高性能材料が最近得られたナノポーラス材料など）による熱伝導率低減を通じた熱電変換の高効率化が進んでいる。特に、フォノンエンジニアリングの先を見据え、フォトンとフォノンの類似性に着目したフォノンクスやフォノンニック結晶の研究も活発になっており、Si や Ge などありふれた材料を用いた熱電変換の実現も期待される。

一方で、パワーファクターの増強技術の開発が強く求められている。従来から挙げられているバンド構造制御の他に、より広い範囲で適用可能性がある磁性（磁性半導体、異常ネルンスト効果など）を利用する試みなどが新たに注目されている。また、複合的な効果として、例えば、不純物ドーピングされた異種半導体ナノ粒子から母体材料への効果的なキャリアの注入が実現する変調ドーピングや、材料中の異種界面が形成するエネルギー障壁によってエネルギーの高いキャリアのみが伝播するエネルギー・フィルタリング効果などが挙げられる。詳細な機構は未解明であるが、金属との複合材料において、ナノスケールの高伝導パスが形成され、大幅なパワーファクターの増強が実験的に得られた例も複数ある。このような複合効果の界面やナノスケールに起因する効果のより詳細な解明とその応用は、今後の飛躍的な性能向上につながる可能性を有している。

また、材料開発手法として、データ・マイニングを含めたマテリアル・インフォマティクスを熱電材料開発に活用しようとする動きも活発化している。アメリカでは早くに個別の報告などがあったが、日本では、有志により包括的な熱電データベースの構築が開始された。

材料系の動向に関しては、酸化物に関する熱電研究は日本がリードして盛んに行われてきたが、最近の新たな動向として、周期率表の下方に移行し、共有結合性を増すことで電気伝導度の増強を得て、高性能の硫化物、セレン化物が新規に見出された。特に、カルコパイライトや安四面銅鉱などの天然鉱物をベースとする材料は注目され、アメリカの企業は安四面銅鉱を使用したモジュールの販売を行っている。窒化物の高性能材料も理論計算により示されている。さらに、新たな展開として層状硫化物へ有機物がインターカレートした無機・有機のフレキシブルなハイブリッド熱電材料も得られている。有機材料も、種々の高分子や錯体から CNT 含有材料を含めて、熱電への新規参入数が最大の材料系であり、2016年には初めての単独の有機熱電国際会議が日本で開催され、MRS 会議における単独セッションが開催されるなど、研究が活発化している。

個別材料系の実用化や実装研究も増えていくことが予想される。理由としては、例えば巨額な資金が投入されたヨーロッパでは引き続きの資金獲得には次の実用化へのステップを見せる必要があり、また、広範囲に実用化を進めて行く各温度域での熱電チャンピオン材料はまだ確定しておらず、その主導権争いもあると考えられる。

温度域に関しては、自動車応用などを見越して中高温域材料の研究も最近多かったが、JSTの微小エネルギー領域の熱電関連研究は、膨大な未利用の室温近傍の貧熱のエネルギーハーベスティングに特に有効であると期待される。将来的にIoTやウェアラブルの自立電源の応用可能性もあり、潜在的なインパクトは大きい。一方で、高温域では、火力発電所の出力を向上し得る熱電トッピング・サイクルは、カスケード型のモジュール作製が不要で高温材料のみによるので、妥当な材料が見つければ比較的早く実用化される可能性もある。

米国では、熱電関連のEFRC（Energy Frontier Research Center）で唯一更新されたMIT中心の太陽光熱エネルギー変換に関するプロジェクトは、実用化への研究を加速させており、注目するプロジェクトの一つである。熱電冷却モジュール販売の長い歴史を持つMarlowe社とGMが参画するDOEの車載熱電発電の国プロも最終年をこれから迎え、結果が注目される。

欧州では、巨額の大型プロジェクトがいくつか終了したばかりであるが、個別の研究資金はまだあり、ドイツのフ라운ホーファー研究所、マックス・プランク研究所やフランスのCRISMAT研究所などは底力があり、個別材料系の実用化へ向かうための研究が特にフォーカスされると考えられる。

中国は、2016年に自国の参加者も400人以上参加した史上最大の国際熱電会議ICTを主催し、武漢工科大学を筆頭とする5機関の国プロの他に、役割分担した3つのNSFCの大型プロジェクト（新規材料、複合材料、熱電デバイス）が走っており、その動向が注目される。

日中韓の熱電学会が起点となり、地理的に近いアジアの国々の連携や若手育成の促進のために2016年に正式に発足したアジア熱電連盟（AAT）が、今後どのように展開して熱電の発展や連携につながるか注目される。

日本においては、JSTの「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」の研究領域が立ち上がり、熱電のエネルギーハーベスティングの実用化につながるような斬新な研究切り口や原理発掘と応用を求める大型プロジェクトとして、今後の研究活動と成果が期待される。経産省では未利用熱を削減する大型プロジェクトが産総研と企業中心に走っており、モジュール関連技術などの開発を進めている。また、物質・材料研究機構における複数の企業とアカデミア機関が参画するオープンイノベーション拠点では、基礎研究を含めた密な産学官連携により熱電材料と熱管理技術の総合的な開発を行う取組みも続いている。

(4) 科学技術的課題

ナノ構造制御によるフォノンの選択散乱による高性能化や、パワーファクター増強をもたらし得る複合効果を活用するためには、自在に所望のナノ構造を設計・制御できる技術が必要である。さらに、重要な点として、ナノスケールや界面などでの熱電現象を直接評

働けるような技術の開発が高性能化メカニズムの深い理解と応用には不可欠である。

また、熱電の実用化範囲を大幅に広げるためには、飛躍的な高性能化につながるような新原理の基礎的な探索も引き続き行う必要がある。磁性（磁性半導体、異常ネルンスト効果など）を新規に活用する取り組みも増えているが、そのほかに古典的な輸送現象の枠を超えさせるような相転移などの臨界現象を利用する試みなども望まれる。

米国での研究例を上回ると期待されるような包括的な熱電データベースの構築が日本で始まっているが、マテリアルズ・インフォマティクスやデータ・マイニングの研究手法も、高性能材料の探索に今後活かすべきと考えられる。

使用温度や変換効率の視点から、既存熱電材料であるビスマステルライドや鉛テルルの性能（発電効率）を超えるものはいまだ開発されていない。熱電分野において、Natureなどの高インパクトな学術ジャーナルに多数の論文（特に米国関連）が10年以上前から掲載されているにも関わらず、種々の理由で（材料自体が応用に適さない、未再現など）、ほとんどの材料が実用化された形跡がない。企業の取り組みが足りない側面もあるが、技術課題として材料評価を高いレベルで行うとともに、実用化への見通しを付けるためのプロセス技術、モジュール試作・評価、熱電材料や電極材料の熱的・力学的耐久性、熱設計、スケールアップ技術、材料・プロセスコスト削減などの研究や総合的システム開発を精力的に進める必要がある。

(5) 政策的課題

産学官連携に関わる課題として、実用化のための具体的なニーズ、要求性能や応用を整理して研究開発を実施するような仕組みが望まれる。熱電材料の総合的な開発には、物理、化学、材料科学を統合した連携研究の取り組みが必要であり、さらに実用化への諸問題を解決するためには、単独の機関で成し得るのは不可能であり、企業、大学、国研が実質的に密に連携するオープンイノベーションの取組が鍵となる。

日本は個々にオリジナリティも科学的価値も極めて高い研究が実施され、成果も挙がっているが、最近では研究予算に勝る欧米中韓が厚みのある研究を早いスピードで展開しており、高性能化や実用化研究などで海外に先行される傾向にある。JSTのALCAやCREST、NEDO、経済産業省主導のプロジェクト等で個別に実施されているものの、研究開発と社会実装を加速するような戦略的な投資はなされていない。

熱電研究は200年の歴史の中で、ナノ構造制御や新規材料の発掘でかつてない程の $ZT \sim 1$ を超える格段の高性能化を実現して、実用化フェーズに入るための様々な壁を越えようとしている。今後、異なる温度域や実用化課題や企業連携を促進する厚みのある政策を考えることで、世界の熱電発電実用化を主導できる大きなチャンスがあると考えられる。

(6) キーワード

廃熱利用、廃熱回収、再生エネルギー、エネルギーハーベスティング、エネルギー変換、熱電発電、熱電材料、熱電変換素子、ナノ構造制御、低次元量子構造、ナノスケール熱計測技術、元素戦略、低環境負荷、フォノンエンジニアリング、マテリアルズ・インフォマティクス

(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"> 他国の大型プロに比べて最近のファンディングが相対的に少なく論文数は後退傾向にあるが、異分野からの新規参入が活発であり、分野横断的に応物学会で新たな分科「フォノンエンジニアリング」が創設された。 包括的な熱電データベースの構築が始まり、マテリアルズ・インフォマティクスが活発になっている。 2015年から熱電に関連するJSTの「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」の研究領域も立ち上がり、進展が期待される。 新規物質開発やナノ構造物質、スピンゼーベックのような新現象について、実験から計算科学まで幅広く盛んに展開されており、特に材料分野では独創的かつ科学的にも高い研究レベルを維持している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 経産省の未利用熱を削減する大型プロが産総研と企業中心に走っており、モジュール作製や評価などに関する実用化技術の開発が進んでいる。 また、物材機構にオープンイノベーション拠点が形成され、複数の企業と機関が参画し、基礎研究を含めた産学官連携により企業の応用開発研究を加速させる取組みが進んでいる。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 新規な原理（低次元量子効果、フォノンの選択散乱、共鳴準位、変調ドーピングなど）を先んじて提唱してリードしてきた側面がある。 DOEのEFRCで熱電に関連する拠点が1つだけ（MIT中心のもの）継続し、CERC-CVCなどの大型プロも終了して、基本的に高いレベルとはいえ、今後基礎研究の活動が相対的に鈍化する可能性がある。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> スタートアップ企業を中心となって、自動車廃熱回収や工場廃熱回収での熱電実用化が活発化している。 NASAのJPLは熱電発電の技術実証・応用実証を継続的に実施し、EFRCは太陽熱利用モジュールの研究開発を進めており、これらの研究拠点では実用化へ向けた応用研究開発も加速すると考えられる。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 環境・エネルギーの新規技術に注力するEUのFP7やドイツのDFGや各省において、この10年間に非常に多くの研究予算が投入され、バルクの新規材料創製から薄膜創製、評価、材料開発が高いレベルで進行している。 ドイツやフランスを中心に、論文発表数が増加傾向にある他、新規にイギリスではTEMPESTという熱電ネットワークが形成され、イタリアでは国内熱電学会が立ち上がるなど、研究が活発化している。 米国や中国であまり見られない有機材料開発が日本と同様活発である。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> FP7において熱電変換に関するプロジェクト研究が数件実施されており、有機材料やナノ材料の基礎研究からモジュール開発まで幅広く取り組まれている ドイツのブラウンホーフ研究所が戦略的に応用研究・開発を牽引し、大型プロがいくつか終わるが、モジュールとシステムの開発や評価に関する技術開発、スケールアップなどを精力的に推進している。 フランスでもモジュールの設計や解析研究が進んでいる。 エネルギーハーベスタ用の熱電発電モジュールを早くから実用化しているスタートアップ企業が数社あり、大手電機メーカーとコンソーシアムを構築して開発を進めている。
中国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 5機関の大型国プロや役割分担した3つのNSFCの大型プロ（新規材料、複合材料、熱電デバイス）が走っており、バルク材料の新規創製、ナノ構造化などによる高性能化で優れた結果を出している。 日米帰りの研究者が主に顕著な活動を引っ張っており、米国との密接な共同研究で底上げをしており、論文数も米国と並びトップにある。 研究資金が潤沢で、若手研究者人口も大きく、今後も伸びると予想される。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> モジュールやデバイス作製、電極接合などの応用研究開発により力を入れ始めており、活動が伸びている。 中国はマンパワーにも秀でており、最適化研究など分厚く展開することができるので、電極接合など、応用のための技術開発が加速すると予想される

韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> • 主要な国際会議では、開催国、日本、中国に次いで参加者が多く、存在感を示している。 • 以前はターゲットがウェアラブル熱電を含めた室温近傍の発電や冷却応用に使える材料（有機、Bi₂Te₃系材料など）と、かなり研究が応用にフォーカスされていたが、現在はそれらに加えて中高温域材料開発やナノ効果を調べるような基礎研究まで、研究に厚みが増している。 • 大手の材料化学メーカーも基礎研究的な材料開発を進めている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> • 韓国の大手材料やエレクトロニクス企業の発表が学会で増え、少なくともペルチェ素子の冷却応用の産業化が進んでいることを示唆する。 • 室温近傍の応用（ペルチェ素子、ウェアラブル熱電）に加え、自動車車載発電などの中高温用途も視野に入れている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

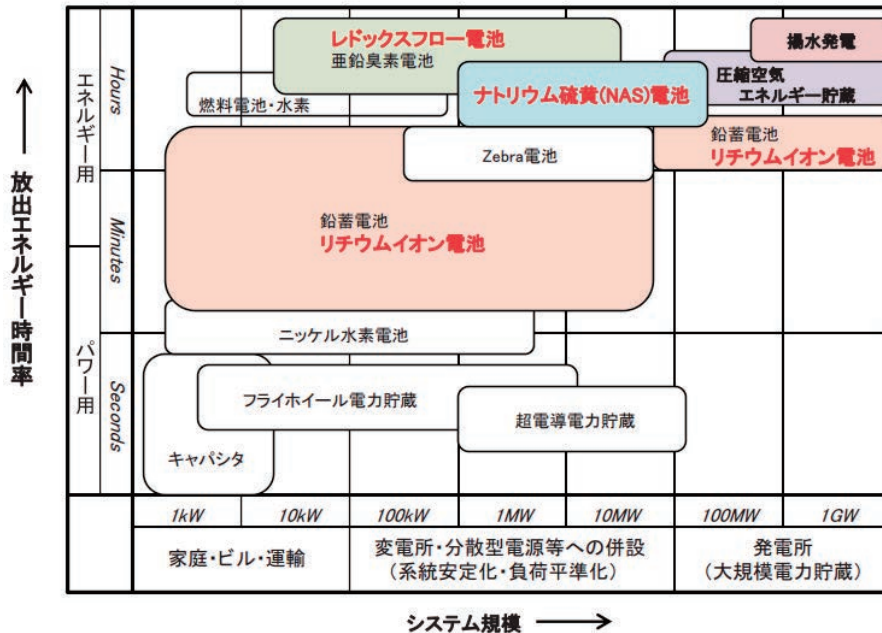
- 1) Journal of Electronic Materials Vol.45 (No.3) (ICT2015 特集号) 2015.6.28-7.2, Dresden, Germany
- 2) PowerMEMS 2015, 2015.12.1-4, Boston, U.S.A.
- 3) MRS Fall Meeting 2015, 2015.11.29-12.4, Boston, U.S.A.
- 4) IUMRS-ICAM2015, 2015.10.25-29, Jeju, Korea.
- 5) ICOT2016, 2016.1.18-20, Kyoto, Japan.
- 6) Z. Tian, S. Lee, and G. Chen, arXiv:1401.0749 (2014).
- 7) D. Zhao, and G. Tan, Applied Thermal Engineering, Vol. 66, pp. 15-24 (2014).
- 8) M. H. Elsheikh et al., Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 30, pp.337-355 (2014).
- 9) X. Zhang, and L.D. Zhao, J. Materiomics, Vol.1 (No.2), pp.92-105 (2015).
- 10) M. W. Gaultois et al., Chem. Mater., Vol. 25 (No.15), pp. 2911-2920 (2013).
- 11) J. F. Li, W. S. Liu, L.D. Zhao, and M. Zhou, NPG Asia Mater., Vol.2 (No.4), pp.152-158 (2010).
- 12) G. J. Snyder, and E. S. Toberer, Nature materials, Vol.7, pp.105-114 (2008).
- 13) Thermoelectric Nanomaterials, Springer Series in Materials Science (Springer, Heidelberg, 2013).
- 14) Scripta Materialia Viewpoint Set “Contemporary innovations for thermoelectrics research and development” (2016).
- 15) ICT2016, 2016.5.29-6.2, Wuhan, China.
- 16) TMS2016, 2016.2.14-18, Nashville, USA.
- 17) C. Wan et al., Nature Mater. 14, 622-627 (2015).
- 18) R. Ang et al., Angew. Chem. Int. Ed. 54, 12909–12913 (2015).
- 19) J. He et al., Mater. Today 16, 166-176 (2013).

3.1.5 蓄電デバイス

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

電気エネルギーを必要とときに蓄え、必要とときに取り出すデバイス・システムについての研究開発領域。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）があり、それぞれに求められる機能・性能は異なる。

蓄電池術としては他にフライホイール電力貯蔵、超伝導電力貯蔵などの物理的蓄電技術の開発も進められているが、以下では、化学反応を利用して蓄電するリチウムイオン電池、金属-空気電池等のポストリチウムイオン電池、NAS 電池やレドックスフローなどの大規模定置型電池、およびスーパーキャパシタ（イオンの表面吸着反応を利用する電気化学キャパシタ）について取り上げる。



出典：科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター
「科学技術動向 2014年3・4月号（143号）」

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

蓄電池やスーパーキャパシタは、エレクトロニクス用などの民生用途のみならず、環境保全・地球温暖化対策としての電気自動車用途にむけて市場が急速に拡大しつつあり、高信頼性、高耐久性、高入出力特性など要求される性能が上がり、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、変動の吸収緩和、出力が一定となる制御、あるいは需要側での変動緩和やピークシフトの目的から大容量の定置用蓄電デバイスのニーズも顕在化してきている。

化石燃料などの化学エネルギーは安定で、貯蔵・輸送が容易であるが、電力は電気のまま貯蔵することが難しく、経済性も含めたシステムの構築が課題となっている。現状では、普及拡大のためには、コストの低減や性能・安全性の向上など多くの研究開発課題がある。

1990年代に、携帯電話、ノートパソコン、デジカメなどに代表される小型電子機器が急速に普及したが、その立役者の一つが1990年に世界で初めて、松下電池工業、三洋電

機が相次いで量産化したニッケル水素電池である。ニッケル水素電池を越えるエネルギー密度を持つ電池として登場したリチウムイオン電池は、1991年にソニー・エナジー・テックが世界で初めて量産化した（電池工業会 web）。これは1980年にJ.B.Goodenoughと水島（現、東芝）らがりチウムイオンを吸蔵する遷移金属酸リチウムを電池の正極に使用することを提案し、その後1983年、吉野（旭化成）らが、正極にコバルト酸リチウム、負極にポリアセチレンという電池を試作し、「リチウムイオン電池」の原型が誕生したことに端を発する。

従来の鉛蓄電池のエネルギー密度は30Wh/kg程度、トヨタ自動車の「プリウス」が最初に採用したニッケル水素蓄電池でも80Wh/kg程度である。実用化されたリチウムイオン電池は、負極に炭素系材料、正極にリチウムを含有する複合酸化物（コバルト酸リチウム、マンガン酸リチウム、ニッケル酸リチウムやコバルト・ニッケル・マンガン酸リチウム、リン酸鉄リチウムなど）、電解質に低分子有機溶媒を使った二次電池で、軽くて高容量の活物質の組み合わせを使うことと、単セル当たりの電圧がニッケル水素電池の3倍に当たる3.6Vと高いことから、150Wh/kg～200Wh/kgという非常に高い質量エネルギー密度を実現し、定置用や電気自動車用に使用されている。

今後、コスト面や技術面でのさらなる競争が激化するが、市販のリチウムイオン電池は現状の活物質の組み合わせで得られるエネルギー密度の限界に達しており、新しい材料の採用により高エネルギー密度化を測る必要がある。一方で、リチウムイオン電池はエネルギー密度が高い上に、可燃性の電解液を使用しているため、高温環境では冷却機構が必要となる他、過充電や短絡時には大きなエネルギーが放出され発火や破裂などの異常を起こす危険がある。

本格的な電気自動車の普及を目指したエネルギー密度の目標値として、ガソリン車の航続距離に匹敵する700Wh/kgが示されており（経済産業省2006年「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」）、現行のリチウムイオン電池の延長線上の技術では原理的に達成不可能である。次世代の蓄電デバイスでは、現状リチウムイオン電池より大きなエネルギー密度が求められる。そのため、世界各国で、次世代の革新的な電池反応機構の創製、高性能電極材料の発見を目指した基礎研究および応用研究への投資が著しく増大している。リチウムイオン電池の理論的限界を目指す次世代リチウムイオン電池（エネルギー密度250～300Wh/kg）の開発や、全固体電池、リチウム・空気電池、リチウム・硫黄電池、多価イオン電池などのポストリチウムイオン電池（エネルギー密度>500Wh/kg、革新型蓄電池とも呼ばれる）の開発が進められている。

- リチウムイオン電池

理想的な電極は、より多くのリチウムイオン（高い容量）をできるだけ高速で（大電流で）挿入脱離でき、サイクルによる容量劣化が少ない物質で、正極は電極電位が高い物質、負極は逆に電極電位が低い物質が求められている。負極材料および正極材料に関する研究が活発である。

- 全固体型電池

過熱による変形や膨張、発火事故の解決手段として、電解液に匹敵するイオン伝導性をもつ固体電解質の開発が期待されている。固体電解質材料としては酸化物系、硫化物系、高分子系に大別される。硫化物系は有機電解液系で生ずる多硫化リチウムの溶解が起こらないため、Li-S電池の有力電池系として検討されている。近年有機電解液とほ

ば同等のイオン伝導特性を示す固体電解質 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ （LGPS = リチウム・ゲルマニウム・リン・硫黄）も東工大、トヨタ自動車らによって発見されている。有機電解液を含むゲル高分子電解質についてはすでに1999年よりリチウムポリマー電池として実用化されており、有機電解液を含まない純高分子電解質に関しても研究が進められている。

- 金属-空気電池

正極として空気中の酸素を使うリチウム-空気電池に関する研究は、エーテル系電解液が適用された2012年以降、空気極の特性が大きく改善し、世界的な広がりを見せている。学界のみならず、トヨタ、ホンダ、現代、BMW等の大手自動車メーカーも研究を進めている。後述のNEDO-RISINGプロジェクトでは亜鉛を負極とした水溶液系亜鉛-空気電池の開発が進められている。

- リチウム-硫黄電池

硫黄は、放電電位がLi金属基準で約2Vと層状酸化物系に比べると低いが、 1675 mAhg^{-1} の極めて高い比容量を持ち、ポストLIBの正極として検討されている。有機電解液を用いると硫黄の還元生成物の溶解が起こるため、無機固体電解質、ポリマー電解質を用いる研究が進められている。

- 多価カチオン電池

Liの酸化還元は1電子反応であるが、多価のカチオンを用いた酸化還元は多電子反応が期待でき、高容量化のアプローチの一つとして検討されている。例えば、マグネシウム金属極は、比較的低い酸化還元電位（+0.68V vs. Li+/Li）を示し、2電子移動により、 2.21 Ah g^{-1} 、 3.83 Ah cm^{-3} の高容量が期待できる。しかも、マグネシウムは資源的に豊富であり、その化合物の多くは毒性を示さない。アルミニウムやカルシウムを負極として用いる電池の開発も進められている。

定置用（電力用）蓄電池では、耐用年数、リサイクル性、コスト、容量が重視される。容量としては、数百kWh以上（平均的な戸建て住宅での使用電力量が12kWh/日程度、ビル・商業施設では数百kWhから数MWh）の大規模なものが必要となる。

ナトリウム硫黄電池（NAS）は、正極に硫黄、負極にナトリウム、電解液に固体電解質のβアルミナを用いており、日本ガイシが実用化したMWh級の蓄電池で、負荷平準化、出力安定化、バックアップ電源としての利用が進んでいる。瞬時の応答速度が速いなどの利点があり、資源的には豊富で量産によるコスト低減の見込みが高いといえる。しかし、運転時に300°C程度を保持する必要がある点や、硫黄と金属ナトリウムを活物質として用いているため一度出火すると消火が困難である点など課題もある。

レドックスフロー電池は、1974年、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、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たもので、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及び負極電解液をそれぞれ供給して充放電を行う。この外部タンクに入った液体にエネルギーを貯蔵する二次電池である。日本では住友電工が主体となって開発している。主な特徴として、充放電サイクルの寿命が1万回以上と非常に長い、ミリ秒単位での瞬時応答性が可能で、短時間であれば設計の数倍の瞬時出力が可能である、常温動作で劣化が少ない、安全性が高いとされる。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などの課題もある。海外では、ここ数年で研究報告が著しく増加し

ており、特に、米国では2009年頃から複数の研究開発プロジェクトが立ち上がり、近年、その成果が表れてきている。

経済産業省では、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。また環境省では、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。

その他、系統用電力貯蔵システムは、国内では主力である揚水発電と海外で実績のある圧縮空気貯蔵も実用化されている。

蓄電デバイスは、従来、日本の産業界が強い分野であったが、韓国、中国勢の急速な台頭、米国でのベンチャー企業による新たなビジネスモデルなどによって猛追されている。リチウムイオン電池の世界シェアはこれまで、エレクトロニクス用途において、パナソニック、ソニー等が強かったが、2012年以降には韓国勢にシェアトップの座を譲っている。今後、蓄電池としては車載用、電力用が急激に市場拡大すると見込まれている。車載用はこれからの市場であるが、現時点ではパナソニック、オートモーティブエナジーサプライ（日産、NEC）、リチウムエナジージャパン（三菱商事、三菱自動車、GSユアサ）が存在感を見せている。

Bloomberg New Energy Financeによれば、リチウムイオン電池の価格は2014年前期にkWh当たり540ドルになり、2年前の同期と比べて20%低下、1000ドル前後であった2010年と比べるとほぼ半額になった。再生可能エネルギーの導入拡大等に伴う、電力系統の安定化を図る場合、現状では、蓄電池と揚水発電を比較すると、導入コストベースで比較した場合、揚水発電は約2.3万円/kWh、NAS電池で約4万円/kWh、鉛蓄電池が約5万円/kWh、ニッケル水素電池で約10万円/kWh、リチウムイオン電池で約20万円/kWhとコスト差がある。また、寿命（耐用年数）は、揚水発電が約60年である一方、NAS電池が約15年、鉛蓄電池が約17年、ニッケル水素電池が約5～7年、リチウムイオン電池が約6～10年である。

スーパーキャパシタは、容量の点では蓄電池にはかなわないものの急速充放電が可能である等の特徴を有しているため、メモリのバックアップ用やハイブリッド自動車等の補助電源等に用いられている。例えば、2011年にマツダは乗用車用として世界で初めて、電力供給用の蓄電機としてキャパシタを採用した減速エネルギー回生システムi-ELOOPを開発している。大容量化して太陽光発電や風力発電にスーパーキャパシタを組み合わせた蓄電システムが開発されており、今後も大容量スーパーキャパシタ市場の急速な拡大が期待されている。日本国内では1970年代後半に電気二重層キャパシタ（EDLC）が製品化され、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使われるようになった。EDLCは、電極（正極、負極ともに活性炭が一般的）の表面にイオンが近づいてできる電気二重層を電荷蓄積に利用するもので、極めて充放電が速い（入出力密度が高い）が、エネルギー密度が低い。そこで、2つの電極のいずれか1つが電気二重層を使用し、もう一方の電極が酸化還元反応を使用したハイブリッドキャパシタという概念が出て来た。リチウムイオンキャパシタは、EDLCの負極を置き換えたハイブリッド構造の蓄電部品であり、出力密度や充放電の繰り返し可能回数をリチウムイ

オン電池に対しケタ違いに改善し、エネルギー密度を電気二重層キャパシタの数倍に高めた。現状は、リチウムイオンキャパシタ（LIC）などの、正極（または負極）活物質にキャパシタ反応、負極（または正極）に電池反応を利用したハイブリッドキャパシタの高電圧、高エネルギー密度化に向けた研究開発が活発化している。正負極の様々な組み合わせや電解質が検討され、1000～2000F（定格電圧3.8V）、10Wh/kg（20Wh/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）、太陽誘電（太陽誘電エナジーデバイス）、FDK リチウムイオンキャパシタ、日立化成、日本ケミコン、フジクラ、岡谷電機産業などがリチウムイオンキャパシタを販売または開発中である。

高速反応チタン酸リチウム負極、低抵抗アルギン酸ゲル電解質、高効率リチウムプレドープ手法やプレドープカーボンの材料・プロセス開発について東京農工大、関西大学、山口大学、信州大学などが研究を進めている。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

• リチウムイオン電池

負極では Si に関する研究が多く（理論容量が黒鉛の約 10 倍）、充放電の可逆性向上に向けた研究が行われている他、より実用に近い SiO（Si ナノ粒子を SiO₂ マトリックス中に分散した材料）や Si-炭素複合体などを用いた負極開発が進められている。また、Li 金属に関する研究も進展しており、今後 1500mAh g⁻¹ を超える容量を有する負極が開発されるとの予想がある。

正極に関しては、5V 級スピネル LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ 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（LiNi_xMn_yCo_zO₂, Ni: Co: Mn = 5:2:3, 6:2:2, 8:1:1, 200～230mAh g⁻¹）、あるいはリチウム過剰固溶体系（Li₂MnO₃・LiMO₂, 250～300mAh g⁻¹）と呼ばれる材料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すると、リチウムイオン二次電池の理論的境界といわれている 300Wh kg⁻¹ 近いエネルギー密度を有する電池の開発が可能となる。

• 全固体型電池

東工大、トヨタらのグループによって、世界最高のリチウムイオン伝導率を示す超イオン伝導体「L_{19.54}Si_{1.74}P_{1.44}S_{11.7}Cl_{10.3}」（リチウム・シリコン・リン・硫黄・塩素）が発見され、これを用いた電池が最高の出力特性を達成している。

• 金属-空気電池

リチウム-空気電池の空気極については、Li₂O₂ が生成、分解する基本反応が支配的であることが確認され、100 回程度のサイクルも可能になってきた。

• リチウム-硫黄電池

近年、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いる。

• レドックスフロー電池

薄型多孔質電極と新規流路構造の採用によりセル抵抗の大幅な低減が実現されてきている。新たな反応系として、キノン-臭素系、チタン-マンガン系、アルカリ型水素-臭素系などが提案され、活物質の探索範囲の拡大とともに起電力の向上が見られる。スラリー型やイオン液体の利用による高エネルギー密度化も提案されている。

- スーパーキャパシタ

MnO₂ 正極と活性炭負極を用いた 2V 級水系ハイブリッドキャパシタは日本やフランスを中心に開発が活発化している。研究段階ではあるが、正極に大容量レドックスキャパシタ電極と水系電解質、負極に Li 複合負極を、セパレーターに固体電解質を用いることで可能にした 4V 級ハイブリッドキャパシタも提案されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 米国ではエネルギー省（DOE）を中心として、車載用蓄電池の技術開発を進めている。自動車技術局（VTO）関連では BATT など 5 つのプロジェクトを、エネルギー高等研究計画局（ARPA-E）では BEEST、RANGE、AMPED の 3 つのプロジェクトを進めている。空気電池および硫化物系電池への研究投資が行われており、欧・日の企業も参画している。
- 科学局（SC）の Basic Energy Sciences（BES）プログラムでは、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 年から発足している。5 年間で 120M ドルの予算が計画され、5 倍のエネルギー密度（400Wh/kg）、1/5 のコスト実現（100 ドル/Wh）が目標とされており、現在までに数多くの研究成果が発表されている。
- 米国 MIT と DOE による Materials Project や NIMS の情報統合型物質・材料開発拠点など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始まっている。
- 米国の電気自動車メーカー、テスラモーターズは、家庭用の蓄電池を日本でも発売する方針を明らかにした。価格は、蓄電容量が 10kWh の機種で 3,500 ドルと、ほぼ同じ容量の日本メーカーの製品よりも大幅に安い。2017 年に発売予定の電気自動車の普及モデルに搭載するリチウムイオン電池をパナソニックが独占的に供給すると発表している。車両価格は 3 万 5000 ドル（約 410 万円）程度。ミネバダ州にリチウムイオン電池の生産工場「Gigafactory（ギガファクトリー）」を建設し、パナソニックと共同で量産を開始した。
- 欧州では官民パートナーシップ「欧州グリーンカー・イニシアティブ」等の資金を使って、10 以上の車載用蓄電池の開発プロジェクトを推進中。リチウムイオン電池の高性能化・低コスト化技術を取り扱うプロジェクトが多いが、金属空気電池、リチウムイオン電池などの革新型蓄電池開発のプロジェクトもある。
- ドイツでは EV および車載用蓄電池の分野でドイツ企業を世界トップ水準に引き上げることを目指しており、教育研究省（BMBF）の資金により「イノベーション連合リチウムイオン電池 2015（LIB2015）」、「リチウムイオン電池コンピダンス・ネットワーク（KLiB）」、「ミュンスター電気化学エネルギー技術センター（MEET）」、「ヘルムホルツ電気化学エネルギー貯蔵ウルム研究所（HIU）」などの研究プロジェクトを次々と立ち上げ、基礎研究、実用化研究に力を入れている。
- 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、エネルギー密度 300 Wh/kg、サイクル寿命 3000 回、コスト 2.5 万円/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、300Wh/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。

- 韓国では、2010年の「二次電池の競争強化に向けたロードマップ」において車載用リチウムイオン電池で日本をキャッチアップするための研究開発に4～5兆ウォンを投資するとしている。また、リチウムイオン電池の材料の大部分を日本からの輸入に頼っているという現状を打破するために、二次電池分野の研究者の育成、電池分野の素材メーカーの育成に注力している。
- NEDO - RISING（革新型電池先端 科学基礎研究事業）では京都大学に中核的研究拠点を置きつつ大学・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り、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つつ基礎研究と革新型蓄電池のイノベーションをオールジャパン体制で行っている。2015年度に第1期の研究が終了し、2016年度より引き続き第2期(RISING II)がスタートした。
- 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。このような国内の多くの関連アカデミア研究者が参画した産学連携研究開発が、国際的に見ても最大規模の体制の下で発足しているのは特筆すべきことと言える。ALCA - SPRINGでは、上述のNEDO - RISINGや、NEDO先進・革新電池評価技術開発との実質的連携を進めている。
- EUではイオン液体を用いたハイブリッドキャパシタの大型プロジェクト(ILHYPOS, 2,866,168 €, 2005/12から3年)が進められ、米国ではDOE Energy Frontier Research Centerとして認定されたFluid Interface Reactions, Structures and Transport (FIRST) Center (Oak Ridge National Labほか)やARPA-Eの支援を受けたグラフェン系キャパシタのプロジェクト(Georgia Tech, \$2,115,000)など、開発競争は熾烈化している。

(4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

- リチウムイオン電池

負極については、Siは導電性が低いため導電助剤として主にカーボン系材料を混合して使用することが多く、その分活物質の量が減少する。またリチウムイオンの挿入・脱離により、体積が大きく膨張・収縮するなど寿命と容量のトレードオフの課題も多い。

- 全固体電池

充放電に伴い電極活物質の体積変化があることから、長寿命の全固体電池を形成する電池構造や製造手法の開発が大きな課題となっている。酸化物系では特に接触抵抗が高く、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、硫化物系、酸化物系ともに電極活物質と固体電解質との界面における接触面積の増大と、特に正極活物質と固体電解質の接触界面で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問題もある。また、有機電解液系リチウムイオン電池と製造方法が異なることから、生産装置や設備等の製造プロセスの開発も求められる。

- 金属-空気電池

充電時に過電圧が高く、副反応を伴うことによる劣化や大電流を流すことが困難など、重要な基礎的課題も残されている。また、リチウム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

充放電に伴い電極物質の体積変化があること、および硫黄の放電時に生成する多硫化リチウムが有機電解液によく溶解するため、その抑制手法の開発が求められている。また、エネルギー密度を高めるための正極厚膜化に伴う性能低下も課題となっている。

- 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してしまうため、反応性のほぼない電解質溶液を用いる必要がある。そのような電解質溶液は比較的低い電位で酸化されてしまうため、適当な正極と組み合わせることができないという大きな課題がある。また、マグネシウムイオンが可逆に挿入脱離可能で3V以上の電圧を与える正極材料の開発も必要である。

- レドックスフロー電池

定置用途では、セル抵抗の低減と低コスト化が課題であり、多孔質電極とセル構造について従来型からの大幅な転換が図られており、最適化された材料・構造の解明と実現が課題である。将来に向けては、エネルギー密度と出力密度のさらなる向上が課題であり、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、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して向上させるかが課題となる。

- 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え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、改善）ならびに耐電圧が高い電解質など広範な技術開発が求められている。

[今後取組むべき研究テーマ]

電池反応現象を理論的に解明し、材料の選択を含めた最適システムの設計を可能にする技術基盤を構築することが必要である。

1. 新材料開発

新電極材料開発、電極材料界面近傍のナノレベルの三次元構造の最適設計・制御、安全性と高電圧化の両方のバランスを実現する新電解質材料開発、高安全セパレーター材

料開発

2. 蓄電デバイス・システム新技術開発

バッテリーマネジメントシステムの高性能化・高機能化、電池材料のリサイクル法開発、使用済み電池のリユース法開発

3. 電池反応の現象解明と理論モデル構築

（2及び3に共通）電池反応の直接観察・計測技術開発、界面現象の原子レベルでの理解、性能低下・劣化機構の解明、反応理論のモデル化、計算科学による予測・シミュレーション技術開発

特に電解質材料に関する研究は重要となる。また、活物質を有効に利用するための周辺部材に関する研究も欠かせない。また、実際に電池を作製するためのプロセス開発も必要となる。

ポストリチウムイオン電池の個別課題は下記の通りである。

- 全固体電池（硫化物系）：電池作製プロセスの開発、電極（活物質）／電解質界面の設計
- 全固体電池（酸化物系）：固体電解質の開発と電池の構造化、電極（活物質）／電解質界面の設計、プロセス技術の開発
- リチウム・空気電池：空気極の高性能化と電池設計、リチウム負極のデンドライト生成抑制、可逆性の向上、取り入れる空気中の水分除去法
- リチウム・硫黄電池：硫黄極の設計のための周辺部材開発
- 多価イオン電池：材料全般に関する研究と電池化
- レドックスフロー電池：反応系・電池材料・セル構造の研究開発と最適化設計、新規なコンセプトの実証と評価

これらの電池には、実験室レベルのセルの状態でも留まっているものもあり、可能な限り早く実際の電池を用いる性能実証実験研究が求められる。さらに、各電池系ともに電極（活物質）／電解質界面の現象解明をおこない、界面の設計・制御性を向上させていくことが求められる。

これらのポストリチウムイオン電池も90年代からの歴史があり、過去の研究を踏まえ、足腰を据えた基礎研究が求められている。

(5) 政策的課題

一般的に海外では大学や国立研究所と企業の技術開発との連携が多いのに比べて、日本は個人研究や、個別テーマで研究開発が進められる傾向が強い。海外では得意な分野や材料を中心に研究を展開し、不足する部分は他の研究者と共同研究を行うことで研究を進展させている。

国内企業間競争よりも国際競争力の強化に力点を置く研究開発を行う戦略が重要と考えられ、こうした研究推進には、中長期の集中研究拠点を核とした異分野融合や国際連携も視野に入れた革新的な基礎研究の強化と、その成果の迅速な産業界での応用展開に向けたネットワーク連携が重要な鍵となる。この観点で、上述のNEDO・RISINGやJSTのALCA・SPRINGの進展と、両者のシームレスな連携が今後最重要であろう。

また、日本では自動車向けの研究開発が主流であるが、欧米ではグリッド（送配電網）の安定化に大きな関心があり、定置型電池の研究開発投資も重点化されている。

(6) キーワード

二次電池、蓄電池、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、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、界面

(7) 国際比較表

■リチウムイオン電池、およびポストリチウムイオン電池

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	◎	↑	次世代リチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池ともに基礎研究ではトップレベルを維持している。独創性の高い材料開発や高度解析技術開発では欧米に遅れをとってきたが、NEDO RISING や ALCA-SPRING などの大型のプロジェクトの設置により、独創性の高い材料開発や高度解析技術開発も欧米並みに進んできている。これらのプロジェクトではポストリチウムイオン電池開発がメインであり、次世代リチウムイオン電池の基礎研究は他国に少し遅れを取り始めているので要注意。
	応用研究・開発	◎	→	応用研究はおもに電池メーカー、自動車メーカー、材料メーカーで行われており、現状ではトップレベルにあるが、学界での研究はほとんどなされていない。次世代リチウムイオン電池やポストリチウムイオン電池の実用化に際しては、企業と大学との共同研究の連携により、学界で見いだされた新材料、新技術を産業に結びつける仕組みの強化が必要。
米国	基礎研究	◎	↑	DOE の多額の研究費により、アルゴンヌ国立研究所を中心に多くの研究者が基礎研究に参画している。独創性の高い材料研究者と質の高い解析技術者の連携により材料開発を進めるというスタイルは効率的。
	応用研究・開発	△	↑	国内大企業の参入が少なく、米国国内での産業化は難しいように思われる。ベンチャー企業や国立研究所などを中心に応用開発研究が行われ、近年中国の企業との結びつきも顕著となってきた。テスラモーターズなど新しいビジネスモデルの提案は活発。
欧州	基礎研究	◎	↑	フランスでは固体化学が強く、これまでも材料開発に関しては世界をリードしてきた。ドイツではこれまでは研究者層が薄く、基礎研究は遅れていたが、近年の政府の多額の研究費により電池研究者が著しく増え、力をつけている。また、欧州共同体として欧州内の連携も進んできており、ポテンシャルは高い。
	応用研究・開発	△	↑	大きな電池メーカーは少ないが、材料関係では BASF などの巨大化学メーカーが急激に電池材料に力を入れている。電池製造、利用技術に関してはそれほど高いとはいえないが、有力な自動車関連メーカーが電気自動車開発に力を入れている。
中国	基礎研究	○	↑	基礎研究はこれまでかなり遅れていると考えられてきたが、近年急速に材料開発の分野での基礎研究が進んできた。中国科学院を中心とした 973 計画においては、リチウム硫黄電池やリチウム空気電池などのポストリチウムイオン電池や高度解析技術の開発など基礎研究に力を入れており、今後さらにレベルが上がる可能性が高い。
	応用研究・開発	○	↑	電池製造技術は現状では性能や安全性の面で課題があるものの、自国消費と低コストでシェアを拡大しつつある。外国からの企業と連携し、応用開発研究を推進させている。また、電解液、活物質などの材料はこれまで日本から輸入していたが、自国生産が多くなってきている。
韓国	基礎研究	○	→	産業界での実力に比べて、基礎研究のアクティビティ、研究者層の厚さは必ずしも高いとはいえない。国外、特に米国の研究者と連携して研究を進めている研究者が多い。
	応用研究・開発	◎	↑	財閥系メーカーを中心に応用開発に関する実力は非常に高い。低コスト化技術も高く、シェア拡大に貢献している。民生用ではすでに日本を凌駕している部分もあり、電動車両用途も伸びている。近年、政府は電池材料の国産化にも力を入れている。

■ レドックスフロー電池

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	○	→	萌芽的な研究成果が創出されてきたにもかかわらず、現在、他国に比較して、大学、国立研究所、民間企業のレベルで関連研究に携わっている研究者は少なく、増加する傾向も乏しい。
	応用研究・開発	◎	→	民間企業（住友電工）の着実な研究開発が大規模実証実験（北海道南早来や米国カリフォルニア州）に繋がっているが、材料メーカーなど関連部門への浸透が緩やかであり、将来にわたり競争力とプレゼンスを発揮できるかは不透明な状況である。
米国	基礎研究	◎	↑	新規な反応系や電解質膜などの材料レベルから新たな方式などのシステムレベルに至るまで幅広く展開されており、研究者と関連分野のすそ野も広く、学会においても中心となって関連分野を牽引している。
	応用研究・開発	◎	↑	大規模電力貯蔵への社会的要請をいち早く察知して、関連したベンチャー企業がいくつも立ち上がっており、競争的環境とともに活発な研究開発が進められている。
欧州	基礎研究	○	↑	PSI, ETH（ともにスイス）、Imperial College Londonなどの研究者の参画が進んできている。新規な反応系から電池性能の評価・解析など、関連研究者の人数ならびに成果報告は増加傾向にある。
	応用研究・開発	○	↑	SGL Carbon社の炭素電極材料が多くの論文で用いられるなど、知見が蓄積される状況が出来上がりつつある。Nanoflowcell社はフロー電池を搭載したとされる電気自動車を発表しているが詳細は明らかではない。
中国	基礎研究	△	↑	電極、膜材料など要素技術に関連した論文数は増加傾向にある。
	応用研究・開発	○	↑	Rongke Power社が大型実証設備（200 kW/1.2MWh、3MW/10MWhなど）の納入でドイツ、米国での実績を上げてきている。バナジウムを資源として保有するため電解液製造などで優位性をもつ。
韓国	基礎研究	△	→	要素技術に関連した論文はあるが顕著な変化は見られない。
	応用研究・開発	△	→	H2社がバナジウム型システムを製造している。

■ スーパーキャパシタ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	大学の研究者人口は増加傾向にある。国際学会での講演件数や参加者数は国別でみた場合は依然として高い比率を維持している。
	応用研究・開発	○	→	EDLC、LICを製造する会社の合併、合併解消、事業移転など目まぐるしく環境が変化しているなか、フジクラや岡谷電機産業など新規参入企業もあり。
米国	基礎研究	○	↑	大学や国研での研究者が増加し、マイクロスーパーキャパシタやウェアブルを目指した特殊用途を中心とした研究が増加傾向にある。
	応用研究・開発	○	→	業界最大手のMaxwellやスーパーキャパシタ専門メーカーのIOXUSなどが幅広いラインアップでEDLCを販売している。
欧州	基礎研究	◎	↑	フランスを中心に研究者人口が大幅に増加。ヨーロッパ全体の基礎研究や材料研究をけん引している。ヨーロッパ内の研究者間の交流も多く、ほとんどの研究が複数機関が関与する共同研究となっている。2009年以降、各年でスーパーキャパシタの国際会議を開くようになり、基礎研究やデバイス開発が急速にレベルアップしている。
	応用研究・開発	○	↑	ニース（フランス）のトラムへのスーパーキャパシタ搭載（ALSTOMが製造）を皮切りに応用が広がっている。
中国	基礎研究	◎	↑	グラフェンを中心に材料開発が進んでいる。スーパーキャパシタに関する論文数は、2015年に2010年比で6倍、年率50%を超える急速な伸びを示している。
	応用研究・開発	◎	↑	バス、自動車などの移動体への需要が急速に拡大し、スーパーキャパシタ駆動のバスを上海万博では発表後、全中に展開している。マーケットの拡大にあわせ、EDLCを中心に製造する会社も拡大傾向にあり。
韓国	基礎研究	△	↓	グラフェンを中心に研究がすすめられているが、以前ほどの活動が見えない。
	応用研究・開発	△	↓	VINATechKorchip、Nesscap、LS Mtron、Samwha Electricなど多数のメーカーがEDLCを製造販売しているが、以前ほどの活動が見えない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) JST-CRDS 「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2015年)」
CRDS-FY2015-FR-05
- 2) JST-CRDS 戦略プロポーザル「次々世代二次電池・蓄電デバイス基盤技術 ～低炭素社会・分散型エネルギー社会実現のキーデバイス～」 CRDS-FY2011-SP-04
- 3) 一般社団法人 電池工業会 <http://www.baj.or.jp/knowledge/history01.html>
- 4) NEDO 「二次電池技術開発ロードマップ 2013」
- 5) NEDO 技術戦略研究センターレポート「TSC Foresight」 Vol. 4、2015年10月
- 6) The 18th International Meeting on Lithium Batteries, Abstracts, Chicago (2016).
- 7) 第56回電池討論会要旨集、名古屋 (2015).
- 8) International Battery Association 2016, Abstracts, Nante (2016).
- 9) 特許庁「平成22年度特許出願技術動向調査報告書 電気化学キャパシタ」平成23年4月

3.1.6 パワー半導体

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

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。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。しかし多くの研究課題がある。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・回路技術、周辺部材・受動部品、長期信頼性向上などである。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

エネルギー資源の乏しい日本にとって、非効率なエネルギーの大量消費を根本的に見直し、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、エネルギー変換効率を抜本的に向上させ、エネルギー自給率を改善させることが急務となっている。これらの活動は、結果として、二酸化炭素の排出量を削減し、地球温暖化、異常気象、砂漠化などの環境問題を解決することにつながる。一方、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つつあり、電気エネルギーの輸送・変換・制御・供給に関わる広範囲のパワー関連機器において省電力化への期待が高まっている。具体的には、再生可能エネルギーの有効活用として太陽光発電の直流電力を交流に変換するインバータのロス低減や、移動・輸送の電動化（E-mobility）の促進として鉄道や自動車のさらなる電動化・高効率化が重要になる。このような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半導体デバイスの性能によって決定される。このため、高効率の電力変換・スイッチ用パワー半導体デバイスの開発・普及が重要である。また、電力網の長距離化に伴う送電損失の増大を抑えるための送電電圧の高圧化が進みつつあり、パワー半導体デバイスにはより高い耐電圧、低損失（低オン抵抗）が求められている。

現在普及しているパワー半導体は半導体にシリコン（Si）を用いたものであり、微細化技術の進展、ウェハ品質の向上、製造プロセスの低温化など新しい作製プロセスの導入やデバイス構造改良（スーパージャンクションMOSFET、IGBTの世代交代など）により、性能を向上させている。また、拡大する電力化社会に対してSiパワー半導体を引き続き拡大普及させていくための、ウェハからプロセス・デバイスまで一貫した垂直統合による低コスト化の取り組みが進んでいる。一方で、Siの絶縁耐圧や移動度が低いことによるデバイス性能の限界が広く指摘されている。このため、原理的に高耐圧化と低オン抵抗の両立が可能な炭化シリコン（SiC）や窒化ガリウム（GaN）などSiよりも禁止帯幅（バンドギャップ）の広い半導体を用いたパワー半導体の早期実用化が望まれており、材料・プロセスからデバイス・回路・実装面にわたる広範囲な研究開発を行う必要がある。

このような次世代パワー半導体デバイスの開発とその応用回路・システム技術の確立ができれば、再生可能エネルギーによる発電、電力インフラ（直流送電や系統連携）、鉄道、自動車だけでなく、産業（工場）や民生（家電）、拡大を続ける情報通信機器、さらには今後想定されるIoT社会を支える通信系インフラなど、広範囲の省電力化につながる。また、現在の電力制御を支えているSi技術の限界追求、すでに実証が始まりつつあるSiC、

GaNなどの普及実現、新たな可能性をもつ酸化ガリウム (Ga_2O_3)、ダイヤモンドなどの実証など、多角的に次世代パワー半導体技術を先鋭化させてコア技術とすることで日本の産業の活性化・競争力強化につなげることが期待される。

これまで、パワー半導体に関しては以下のような国内外の取り組みがなされてきた。

Siに関しては、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) 用高品質・量産化を目指したウェハの新しい技術開発が NEDO により始まっている。Si パワーデバイスは、現在の産業競争の中心であり、特に高耐压系は欧米に対して競争力を維持している。低耐压系は、特に米国を中心に半導体メーカーが電源メーカーとしての立場も確立しつつある。

SiCに関しては、各種パワーデバイスの製品化が進展している。ウェハでは米国 Cree 社 (2016年にパワー関係部門が Infineon により買収) やダウコーニング社が先行しているが、ドイツの SiCrystal や日本の新日鐵住金も量産を行っており、4インチのウェハについては高い品質のものが世界の複数メーカーから入手可能である。6インチウェハも出荷されており、複数のデバイスメーカーで6インチ製造ラインの構築が進められている。中国 (台湾を含む) も新規投資により参入を始めた。SiCのショットキーバリアダイオード (SBD) は2001年に SiCED (現在は Infineon) で始めて商品化されて以降、着実にオン抵抗の低減などの性能向上が進められ、現在は日米欧の複数のメーカーから市販されている。すでにエアコンの省エネ型インバータに使用され、鉄道車両用インバータとしての実験が完了し、SiC-SBDを搭載した山手線新型車両が営業運転を開始した。SiCのMOSFETに関しては、Si-IGBTよりも優れたデバイス性能の SiC-MOSFET が複数メーカーから市販され、さらにオン抵抗の低減が可能な SiC トレンチ MOSFET の量産も開始された。ロームや Infineon など数社から耐压 1200V、動作電流 100A 級の SiC-MOSFET の製品化が発表されている。モジュールの開発も活発であり、Si-IGBT と SiC-SBD と一体化した Si/SiC のハイブリッドモジュールや、SiC-MOSFET と SiC-SBD を一体化したフル SiC モジュールが開発・商品化されている。Cree など海外勢も SiC-MOSFET の製品化を行っているが、製品化についてはロームや三菱電機など日本メーカーがトップを走っている。このように、SiCを用いたパワーデバイスは、社会実装が順調に進んでいる。今後は基板を含めたデバイスの低コスト化と高性能化、さらにはデバイス・モジュールの長期信頼性の確認が重要である。

GaNについては、これまで自立基板材料の開発が遅れたため、Siなどの異種基板上のヘテロエピタキシャル成長層を用いて、デバイス開発が進められてきた。しかし、大きな格子不整合のため、Si基板上のエピタキシャル層には高密度の欠陥が導入される。このため、将来的には GaN 基板を用いるホモエピタキシャル成長が望ましく、GaN 基板の成長技術の研究開発も加速している。コスト面で比較すると Si 基板が勝るため、低価格性を重視する「GaN-on-Si」と、高性能性を重視する「GaN-on-GaN」の2つの技術に2極化が始まっている。自立 GaN 基板については、LED や LD 用に2インチ径の基板が HVPE 法により生産されているが、Si や SiC のような縦型パワーデバイスを作製するにはまだ欠陥密度が高く、作製方法も含め、欠陥低減、量産性を含めた技術開発が必要である。

GaNを用いた電子デバイスは高周波パワーデバイスとして製品化が先行している。特に、小型高出力の携帯電話基地局用途として、AlGaIn/GaNヘテロ接合 FET (HEMT) の製品化が国内メーカーを中心に進展している。一方、パワースイッチング用途では、市

場投入が遅れていたが、ここ数年で EPC 社、Transphorm 社、GaN systems 社、ON-semiconductor 社などから製品化がなされている。また、GaN デバイスを用いた電力制御用のモジュールも一部出荷が始まっており、SiC より低耐压の 600V 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化が検討されている。

ダイヤモンドは優れた熱伝導性と大きなバンドギャップを有する半導体であり、パワーデバイスとして魅力的な特性を有する。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、半導体基礎物理および原理実証のトライアルが継続的に行われている。ダイオードやジャンクション FET (JFET)、バイポーラトランジスタ (BJT)、金属半導体接合 FET (MESFET)、最近では MOSFET の実証なども報告されている。

SiC や GaN よりもバンドギャップの大きな酸化ガリウム (Ga_2O_3) のパワーデバイス応用の研究が始まっている。 Ga_2O_3 は比較的容易に大型結晶が作製可能であり、n 型のドーピングが可能である。無色透明で電気伝導に優れていることから GaN LED 用の基板として注目を集めていたが、最近では、パワーデバイス用基板としての事業展開の報告がなされている。萌芽的段階であるが、基板の流通が始まるので、今後後研究者が増える可能性がある。

ワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイスに関する国のプロジェクトや産学官の共同研究は、継続的に進められている。つくばイノベーションアリーナ (TIA-nano : 2016 年度より TIA に改名) の 6 つのコア研究領域の一つとしてパワーエレクトロニクスが位置づけられ、この中で、内閣府の最先端研究開発支援プロジェクト (FIRST) 「低炭素社会創成へ向けた炭化珪素 (SiC) 革新パワーエレクトロニクスの研究開発」(2009 年度末～2013 年度末)、技術研究組合「次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構」(FUPET) による経済産業省の「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」(2009 年度～2014 年度末) が実施された。また、2012 年 4 月に産総研と産業界との共同でパワーエレクトロニクス・オープンイノベーションの推進に向けた民活型の共同研究体「つくばパワーエレクトロニクス・コンステレーションズ (TPEC)」が設立されて活発な活動が行われ、2013 年からは JST のスーパークラスタープログラムの中で、京都地区および愛知地区をコアクラスターとした地域を越えた連携、2014 年度には内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の「次世代パワーエレクトロニクス」が開始された。

以上のこれまでの取り組みを踏まえ、今後は以下のような取り組みが課題である。

Si パワーデバイスの高耐压系は欧米と伍して優位な立場を維持しているが、低耐压系は市場がディスクリットからシステム電源へ移行しており、厳しい競争に追い込まれており、日本が産業競争力を有する Si パワーデバイスで更に勝ち続けるためのシナリオが必要である。

ワイドギャップパワー半導体デバイスの研究開発は、早い段階での普及、産業競争力に結び付けるために、SiC、GaN などワイドギャップ半導体ウェハの高品質化、大口径化や、デバイス構造の最適化、信頼性の高いデバイス作製プロセスの開発、高精度の熱設計・パワーマネジメント、周辺回路部品の開発などが必要である。また、Si の置き換えではなく、Si では達成できないワイドバンドギャップ半導体の特性を活かした新たな応用を

念頭に、総合的な研究開発を加速していくことが必要である。基礎物性の面では、いずれのワイドギャップ半導体も結晶の転位と欠陥の制御、表面・界面における課題が多く、過去の Si や GaAs 等で培われた結晶品質向上、表面・界面制御の知見や施策に学び、基礎基盤研究を進める必要がある。

(3) 注目動向

Si パワーデバイスはこれまで限界到達技術と称されてきたが、パワー用として CZ 法の改善による長ライフタイム結晶成長の報告など、新しい試みが始まっている。また、デバイスプロセスにおいても、従来の FZ シリコンウェハから CZ ウェハへ転換する際に酸素や炭素濃度がデバイスプロセスパラメータに及ぼす影響などが報告されている。

SiC については、従来の昇華法による SiC 基板作製技術に対して、成長速度の高速化が可能となりうる高速 CVD 法の報告が始まっている。モジュールについては、Si トランジスタと SiC-SBD を組合せたハイブリッドパワーモジュール、縦型トレンチ構造を主構造に用いた SiC-MOSFET と SiC-SBD を用いたフル SiC パワーモジュールなどが開発され製品化されている。

GaN については、Si 基板上の GaN エピ技術を用いて、600V 応用を想定した GaN HEMT が米国を始めとして複数社から製品化されている。これらのデバイスを用いたモジュール製品化も始まり、低・中電力機器を対象に、AC アダプター、サーバー用電源、太陽光発電のパワーコントロールユニット、LED 電球用電源回路など家庭用・産業用機器への搭載の実用レベルでの検討が始まった。GaN デバイスの研究開発では、従来の横型 HEMT の論文数が減少し、縦型 MOSFET やダイオードの報告が増えている。また、縦型 MOSFET の特性向上のため、絶縁膜/半導体界面特性の向上を目指したゲート絶縁膜の材料検討、堆積方法の改良、界面特性評価に関する報告が増えている。さらに、欧州を中心に実用化を目指した短期・長期信頼性を調べるプログラムや、プロトン照射など放射線耐性の検討も行われている。

海外の注目すべきプロジェクトとしては、以下のものがある。

欧米では、次世代パワー半導体の先進的な研究成果と研究拠点づくりを目指した特徴あるプロジェクトが進行中である。基礎研究、実用化実証研究、産業競争技術研究など、明確にその目的が示されており、複数のプロジェクトをコンカレントで進めている。

米国では、Naval Research、DARPA、Air force Research など軍関係と、DOE、ARPA-E などの政府機関からの補助金をもとに、大学主導で産業応用と実用化を目指した研究・開発が進められている。次世代パワーエレクトロニクスの研究拠点が複数形成され（The Next Generation Power Electronics Innovation Institute, Power Electronics Manufacturing Consortium など）、産業創出、社会実装を念頭に産学の連携で材料、デバイス、実装、回路、システム、応用の総合的な研究開発が進められている。また、ARPA-E では将来の産業競争力を念頭に、継続的に SiC、GaN、ダイヤモンドなどのパワー半導体研究、および周辺技術としての磁性体材料研究などを包括的に進めている。

欧州では、デバイス、回路、パッケージ、デバイス信頼性、デバイス特性評価技術、などの要素技術ごとに国家間と産学にまたがる横断的なプロジェクトが進行中である。今日の産業競争力強化を念頭に EPPL (Enhanced Power Pilot Line)、EPT300 (Enabling

Power Technologies on 300mm wafers) に続き、2014年から Infineon 主導の eRamp が始まった。さらに ECSEL (Electronic components and systems for European Leadership) が欧州プロジェクトとして、Smart Mobility、Smart Society、Smart Energy、Smart Health、Smart Production を重点応用分野として、半導体産業の総合的開発を進め、特に Power Base と題して、集積化 GaN デバイスが大きく取り上げられている。その他にも、MOST (GaN MOSFET の開発)、EuSiC (SiC 基板上の GaN)、E²COGaN (炭素排出量の削減)、MANGA、VEGA、STARGaN、など多くのプロジェクトがある。

中国では、「National Natural Science Fund」と呼ばれる国家予算から、北京大学、Xidian 大学、Chinese Academy of Science などに補助金が出ていると推測され、「National High-Tech Res. and Development」などのプログラムが進行中である。

国内では、Si パワー半導体のその競争力維持を念頭に、2014年より産学連携で新世代 Si-IGBT などの研究開発を行う「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」が始まった。また、内閣府では2014年度から新たな戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) に基づく「次世代パワーエレクトロニクス」が開始され、SiC、GaN、酸化ガリウム (Ga₂O₃)、ダイヤモンドについて、基板育成、エピタキシャル成長、デバイス、回路モジュール、パッケージ、熱設計などの広範囲な技術開発が進められている。また、2013年開始の JST のスーパークラスタープログラムによる SiC や GaN パワーデバイスの研究開発に加え、2016年に文部科学省の「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、GaN デバイスの研究開発が精力的に進められている。

(4) 科学技術的課題

SiC を用いたパワーデバイスは、鉄道車両や太陽光発電のパワーコントロールユニットなどに搭載され実用化段階にある。また、新幹線や自動車に搭載されて走行試験が行われており、これらの試験を通して長期信頼性などの問題点の確認が重要になる。SiC 基板の大口径化、高品質化、低コスト化も引き続き求められる。

GaN ウェハは現在はハイドライド気相成長法で作製されており高価であるが、アモノサーマル法や Na フラックス法など低価格で作製できる技術の開発が望まれる。また、GaN は SiC よりも絶縁破壊電界強度が大きく、理論的には SiC よりもオン抵抗を低減できるため、GaN ウェハの低コスト化と組み合わせ、GaN 基板上 GaN 縦型パワーデバイスの研究も必要である。

SiC や GaN パワー半導体デバイスよりもさらに高性能化が期待できるダイヤモンドや Ga₂O₃ などの新規パワー半導体材料においては、材料作製技術と合わせて、材料・電子物性評価、およびその応用を見据えた基礎基盤研究を厚く進めていくことが重要である。世界に先駆けてウェハの高品質化、大口径化、エピタキシャル層のドーピング制御、p 型/n 型両伝導層の実現、表面・界面制御などの基本課題へ取り組み、大面積化を可能にする製造技術・加工技術、低抵抗のコンタクト技術、絶縁耐圧を向上させるデバイス技術などの研究開発を進めていく必要がある。

ワイドギャップパワー半導体デバイスを中心にその周辺技術 (小型・高性能トランス、

耐熱コンデンサ、配線、パッケージ、実装技術、新規回路設計、システム設計)の研究開発も今後必要不可欠である。例えば、ワイドバンドギャップ半導体の特性を活用するためには、高パワー密度集積化に対応する放熱・冷却技術、高温動作に対応できる受動部品（コンデンサ、コイルなど）、高周波化に対応する受動部品（特に磁性体系）の寄生容量や寄生インダクタンスを最小限に抑える3次元集積実装技術などが必要になる。

回路面においても、これまでよりさらに高いスイッチング周波数のインバータやDC-DCコンバータなどが検討されており、従来技術の延長ではなく、新しい発想に基づく設計や回路方式の開発が必要である。

(5) 政策的課題

欧米が、集積化チップ、システム応用からのディスクリードデバイスなど、国レベルの施策としてターゲットを定め、Siパワー半導体を中心に、ワイドバンドギャップ系半導体の導入ポイントを絞りこんで研究開発を進めている。また、中国、台湾、韓国が各国のファブを活用してSiパワー半導体およびワイドバンドギャップ半導体市場への新規参加を企てている。このような欧米・アジアの動きに対抗して日本の産業競争力を維持していくためには、今日の産業競争における技術の限界追求、来るべき産業競争の場に備えるための研究開発、デバイス研究拠点設備の整備が重要であり、継続的な取り組みが必要である。特に、これからパワーエレクトロニクス市場への展開が進んでいくSiCやGaNなどのワイドギャップパワー半導体は、それぞれの電子物性・材料特性を活かした独自の応用分野を念頭にして、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形での産学官連携体制が重要である。

次世代のパワーデバイスの研究開発では、産業界が直面する課題の認識が重要であり、大学の研究においても実用化に向けた技術間のトレードオフ関係を考慮した取り組みをさせるような産学連携の形態を模索する必要がある。また、次世代パワーエレクトロニクスを担う人材が圧倒的に不足している現実があることから、広い知識と高度な経験を積んだ学生・研究者・技術者を社会に輩出することは極めて重要である。筑波大学では、企業によるパワーエレクトロニクスの寄附講座が設けられ、TIAではパワーエレクトロニクスの夏季スクールが毎年開催されているが、このような活動を広げ、パワー半導体、パワーエレクトロニクス関係の多くの優秀な人材を育成していくことも重要である。

(6) キーワード

パワーエレクトロニクス、パワー半導体、IGBT、MOSFET、SBD、HEMT、HBT、シリコン (Si)、ワイドギャップ半導体、炭化珪素 (SiC)、窒化ガリウム (GaN)、ダイヤモンド、酸化ガリウム (Ga_2O_3)、電力変換、インバータ、超高压送電、スマートグリッド

(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	◎	→	SiC と GaN の研究開発は裾野が広がっている。主要学術誌に掲載された研究機関は 34 機関 (大学: 20、国公立研究機関: 3、メーカ: 11) であり、特に企業が増えてきている。SiC は SIP で超高耐圧 SiC-IGBT や SiC スーパー Junction の基礎研究が進められている。GaN に関しては GaN 縦型パワーデバイスの基礎研究が SIP で進められており、GaN 基板の欠陥密度低減や GaN 縦型パワーデバイスの基礎研究が進展している。またダイヤモンド、Ga ₂ O ₃ などの次々世代パワー半導体材料・デバイス開発も本格化してきた。
	応用研究・開発	◎	↑	SiC は、デバイス、モジュールが製品化され、産業機器や家電製品に一部搭載が始まっている。電車への搭載が試験段階から実用段階に入っており、次世代新幹線はフル SiC インバータ仕様が予定されるなど社会実装も見えている。SiC デバイスの特性を活かした使いこなしに関しては SIP で研究開発が進められている。GaN に関しては、低コスト化のために Si 基板を使う研究と、より高い性能・信頼性を実現するために GaN 基板を使う研究の 2 つの方向で進められている。また実用化を見据えた縦型高耐圧 SBD および PN ダイオードの開発が発表されている。
米国	基礎研究	◎	→	米国の多数の大学にパワーエレクトロニクス研究センターが次々と設立されており、Si、ワイドギャップ半導体パワーデバイスを利用したさまざまなパワエレ技術の研究開発を企業も巻き込んで非常に活発に展開している。特に新構造、新発想のデバイスは他国よりも多い。研究資金は Naval Res.、DARPA、DOD、DOE などから豊富な資金が提供されている。低耐圧系は極限までの集積化パワーチップ、高耐圧系はワイドバンドギャップ半導体投入による高周波集積化と、応用に対する技術開発ターゲットを明確に分けている。さらに、周辺技術となる受動部品、高温実装技術なども包括的に進められている。
	応用研究・開発	◎	→	SiC に関しては軍と企業が製品開発を進めている。GaN に関しては、実用化に向けて縦型 MOSFET、縦型 Diode の開発が加速しており優れた特性を得ている。ベンチャー企業はもとより、コンソーシアムにおいて実デバイス・実パワー IC の試作を行うなど、開発ベースの研究が進行している。
欧州	基礎研究	◎	↑	欧州全体のプロジェクトとして、材料からデバイスプロセス、実装、応用など垂直統合的に研究がすすめられている。国の研究機関が活発な研究を行っていることが特色と言える。特に Si および GaN に関して大きくプロジェクトが展開している。GaN バッファ層の品質やトラップとの関係などの研究を積極的に進めている。IMEC などは GaN 横型パワーデバイスの研究を活発に行っている。
	応用研究・開発	◎	↑	Infineon、STMicro などが SiC パワーデバイスを活発に研究開発している。Infineon は Cree の SiC パワーデバイス部門を買収し、GaN-on-Si と合わせて全方位的な展開。GaN に関しては、欧州研究機関で連携して信頼性を向上させるプロジェクトが始まり、ストレス試験、熱解析など幅広い研究が行われている。
中国	基礎研究	○	→	欧米からの研究者招聘、大学の重点化・拠点化整備を進めている。GaN に関しては、欧州研究機関で連携して信頼性を向上させるプロジェクトが始まり、ストレス試験、熱解析など幅広い研究が行われている。香港科学技術大学は以前から GaN 横型 HEMT に関しては世界トップレベルの研究を展開している。また、大学にて実デバイス試作が可能になってきている。
	応用研究・開発	△	↑	国策としてパワー半導体を重点項目に掲げている。まずは Si パワーデバイスであるが他国からの技術導入の状況にある。ワイドギャップ半導体に対しても意欲的であるが、現在はデバイスと言うより、SiC や GaN のウエハーやエピ成長などのサービス会社が立ち上がっている段階。GaN トランジスタの実用化で障害となる「電流コラプス」やオーミック特性の改善などに精力的に取り組んでおり、実用化を見越した応用研究が進められている。
韓国	基礎研究	△	→	しばらく SiC に関して国プロが進行していたが、昨今の経済状況の悪化のためか、国際学会などにおいても、発表件数が低迷している。大学や国立研で GaN 横型 HEMT に関する研究はあるが、発展途上である。SiC や GaN 縦型パワーデバイスに研究は少ない。
	応用研究・開発	△	→	財閥企業群が精力的にワイドバンドギャップ半導体の開発を進め、市場参画のアンウンスもあったが、昨今は低迷しているように見える。
台湾	基礎研究	△	→	7 つ大学において、特に GaN MOS-HEMT の特性改善に積極的に取り組んでいる。
	応用研究・開発	△	↑	地味ではあるが、独自の実装技術開発 (Flip-chip bonding、Flexible 基板) など、製品化を念頭においた応用研究が進められている。TSMC や WIN Semiconductor など最大手のファウンダリー工場があり、SiC や GaN デバイスの製造を請け負っている。

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

(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) 資源エネルギー庁エネルギー白書、資源エネルギー庁・NEDO省エネ技術戦略など)
- 2) デバイス関係の国際会議・ワークショップ報告 (ISPSD、IEDM、PCIM など)
- 3) SiC や GaN など、材料を掲げた国際会議報告 (ICSCRM、ECSCRM、ICNS、IWN など)
- 4) パワーエレクトロニクス国際会議報告 (APEC、ECCE、EPE など)
- 5) デバイス関係の学術誌 (Applied Physics Express, Applied Physics Letters, IEEE Trans. on Electron Devices, IEEE Electron Device Letters, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Japanese Journal of Applied Physics, Journal of Applied Physics)
- 6) <http://arpa-e.energy.gov/>
- 7) <http://www.powerbase-project.eu/>
- 8) <http://www.nedo.go.jp/content/100584077.pdf>
- 9) http://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1368524.htm

3.1.7 グリーン触媒

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

基礎化学品の合成、環境負荷物質の低減などのための触媒を主な対象とした領域である。触媒は、石油精製、基礎化学品・機能性化学品・高分子などの化学品の生産、工場や自動車の排気ガスの浄化処理など広範な分野で用いられる。本領域では、基礎化学品の合成におけるバイオマスやシェールガスなどの非在来型資源を利用するための転換用触媒、環境負荷物質の低減のための自動車排ガス処理触媒などを主な課題として述べる。光触媒については人工光合成の項で、燃料電池触媒については燃料電池の項に記載する。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

現在の我々の生活を支えるエネルギーのほとんどが石炭、石油、天然ガスであり、これらの精製、変換のほとんどには触媒反応が用いられている。石炭、石油からの燃料生産、化学品生産は歴史が古く、確立されたものがあり、今後、新たな技術が生まれることは少ないと考えられる。しかし、当面の間は我々の社会は石炭、石油、天然ガスに基づいたエネルギー利用を続けていくことには疑う余地はなく、より高いエネルギー効率の新たな科学技術が必要である。化学産業を環境、資源利用効率、またはエネルギー効率的な観点からみると大きな改善の余地が残されている。環境、資源利用効率の観点では、バイオマス転換やシェールガス利用など、新たな資源とリンクした新たな化学工業体系の構築が望まれており、エネルギー効率的観点では、現行の官能基変換プロセスの高効率化、低環境負荷な原料を用いた新しい合成ルートの開拓、プロセスの安全性・経済性の向上などが求められている。これらの課題を解決する糸口になるのが、優れた触媒（高活性、高選択性、長寿命）の開発である。

化学分野において人類最大の発明と言われる二重促進鉄触媒を用いるアンモニア合成反応は1913年にドイツのハーバー、ボッシュ、ミタッシュによって実用化され、現在では人工合成されるアンモニアの8割以上は化学肥料として地球上の70億人余の人口の食料の大半を支えている。また、1920年代にはドイツのフィッシャーとトロプッシュによって、石炭から製造される合成ガス（水素と一酸化炭素の混合ガス）からガソリンや軽油などの液体炭化水素を合成する触媒反応が開発され、第二次大戦中はドイツでは年産数百万トンの液体燃料が石炭から生産されていた。原油の多くを占める重質油からガソリンや軽油など需要の多い軽質油へ変換する石油のクラッキング技術も1900年以前より研究は進められ、第二次世界大戦頃には触媒を流動移動層として用いる流動接触分解法（FCC）により石油のクラッキングは行われている。

触媒研究は野依（名古屋大学）、鈴木（北海道大学）、根岸（パデュー大学）らノーベル賞受賞者を輩出していることからわかるように、いわば日本のお家芸ともいえる研究分野であり、ファインケミカル、バルクケミカル合成の基礎研究は大きく発展してきた。不均一系触媒（固体触媒）、均一系触媒ともに世界をリードする数多くの基礎研究がなされ、実用化されている。

環境浄化に関わる触媒反応は、発電所、工場など固定発生源からの排気浄化と、船舶、鉄道、自動車など移動発生源からの排気の浄化に分けて考えられる。発電所、工場などが

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

この分野は国内でも多くの研究者らによって取り組まれている。非貴金属化、担体効果の検討、DPF（ディーゼル微粒子捕集フィルター）の炭素燃焼活性向上など、直面している課題が多いため、今後の成長が望まれる分野である。

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

近年、世界的に消費量が増えているのが天然ガス（主にはメタンおよび随伴するエタン・プロパン）である。シェール（頁岩）層からの天然ガスが今後のエネルギー社会には有望であるとの見解を2009年に米国が示し、シェールガス革命と呼ばれていることから、シェールガスを含む天然ガスへの依存度は高くなっている。しかし、天然ガスの利用技術は石炭、石油に比べれば歴史も浅く、その有効利用技術の発展は今後重要になってくる。米国では2008年からのグリーン・ニューディール政策から、化石資源依存からの脱出、再生可能エネルギーの導入が科学技術のテーマであった。しかし、2013年にシェールガスの大規模生産が進められるとシェールガス、シェールオイルへの期待からエネルギー価格も下がりエネルギーに対する注目は薄れている。2009年に設立したエネルギー先端研究計画局（ARPA-E）がリスクの高いエネルギー技術の応用研究に投資を行うなどの政策を行っているが、化学燃料に関するプロジェクトはElectro Fuels、Rebelsを除くと非常に少ない。一方で、豊富な天然ガスから合成ガスを作り、その合成ガスからメタノールを作成し、基幹物質とする化学が注目されている。

メタノール・トウエン・オレフィンを含むメタノールの需要の伸び（2014年度の世界需

要 6900 万 t/y、今後年率 7%程度の伸びが予測されている）を反映し、メタノールの増産が進められている。メタノール合成触媒については現在も基礎から応用研究まで広く展開されている。代表的な Cu/ZnO 触媒についても未だに活性点の構造及び反応中間体について新たな提案がある。またメタノールの他、合成ガスからの高級アルコール製造用触媒についても報告が散見される。アルカリ金属（Cs の例が多い）を添加した触媒に関する検討が多い。

世界的には、2040 年頃までエチレンの生産用は、年 3%程度の増加が予測されており、従来法に加えメタン酸化カップリングを含む新技術の導入も検討されている。アンモニア・尿素については、大規模な新プラントの建設（米国・テキサス州、マレーシア・サバ州など）や生産量の増強（ベトナム、ロシアなど）が計画されている。

プロピレンを中心とするアルカン脱水素（酸化的脱水素を含む）によるアルケン製造ならびにブテンからのブタジエン製造については、世界中で継続的に研究が行われている。

ブタジエン製造については、アセトアルデヒドを原料とするプロセスのパイロット試験が国内外で行われている。さらに、中国・米国では、ガスから合成軽油を製造するためのプロセスとして、継続的にフィッシャー・トロプシュ合成触媒に関する検討が行われている。Co 系、Fe 系触媒に関する検討が中心であるが、カーバイド系触媒に関する検討も精力的に行われている。これは、石炭の高度利用を意識している結果である。

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

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

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

エネルギーの主体が石炭、石油から天然ガス、バイオ資源、再生可能電力と変遷していく中で、新たなエネルギー源を基とした新たな変換プロセスを開発することが求められている。天然ガスからは水蒸気改質反応で合成ガスが得られるし、バイオ資源は発酵を経ればエタノール資源が得られる。余剰となった再生可能電力は水電解をすれば水素エネルギーに変換できる。これら新たなエネルギー源の利用は、石炭や石油のように 100 年もの研究開発の上に成り立っているものではなく、ごく最近に重要になってきたものである。

大学における基礎研究のみならず、実証可能かどうか広い視野での研究が望まれる。新規なプロセスの開発のための時間、リスクは膨大であり、それを支える研究推進体制が必要である。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

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

メタノール・トウ・オレフィンについて、欧米では分光学を使った基礎研究を 20 年ぐらい継続し、複雑な逐次・併発反応の原理を明確化しつつある。中国も、基礎研究から一気に実プラントまで実現している。2013 年以降、均一系の触媒、錯体触媒の分野でメタノールから低温、100°C 以下、常圧で駆動する高活性な水素生成の触媒が幾つか報告されている。メタノール・トウ・プロピレンについては、シリコアルミノリン酸塩ゼオライト (SAPO-34 など) を中心に研究が展開されており、最近では、プロピレンとブテンの合計収率が 80% 程度に達するなど一定の進展が見られる。

CO₂ の化学品への変換については、メタノール合成やカーボネート合成が継続的に行われていたが、最近のトレンドの一つとして、合成ガスやメタノールというメチル化剤の代わりに CO₂ と水素の混合ガスを使う系が、錯体触媒分野で報告された。また、CO₂ を酸化剤として用いる低級アルカン脱水素反応に関して報告が散見される。2000 年代から日本では、いくつかの研究グループの検討例もある。アルケンと CO が同時に得られる興味深い系であるが、反応速度のさらなる向上が課題である。また、CO₂ とメタノールからジメチルカーボネートを経由してポリマー合成へと導く研究例も我が国から報告されている。

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

アンモニア合成触媒はエレクトライド担体を用いた Ru 触媒が注目を浴びたが、それ以外にも様々な担体が開発されている。さらに脱水素触媒の研究が進められている。

燃料電池分野では直接アンモニア燃料 SOFC (固体酸化物形燃料電池)、電解分野では有機ハイドライドの電解水素化など新たな分野の研究の進捗が見られ、エネルギー分野における触媒分野、電極触媒の領域の活性化が見られる。

[注目すべきプロジェクト]

■エネルギーキャリア・水素関連

- 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「エネルギーキャリア」では、化石燃料依存を低減し、再生可能エネルギーを最大限利用するために、水素のみでなくアンモニア、有機ヒドライドなどエネルギーキャリアに関する研究開発を行っている。触媒分野では有機ヒドライドの水素化脱水素反応装置の実証試験や、直接型アンモニア燃料電池の電極材料などが深く関連している。東京オリンピックまでに水素発電所の実現や、様々な水素実証実験も織り込まれている。
- JST/CREST「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」は、上記のSIPと同様に創設されたプログラムで、新規アンモニア合成触媒や、ギ酸からの水素製造、電解システムによるキャリア製造などを始めとして、エネルギーキャリア生産、利用に関する触媒技術の研究開発を行っている。
- NEDO「水素社会構築技術開発事業」では、千代田化工建設をはじめとする7社からなる企業グループを助成し、水素の製造・貯蔵・運搬に関して、風力・アルカリ電解による水素製造のモデル実験ならびに褐炭など海外未利用資源からの水素の製造・貯蔵・運搬を行い、国内で利用する水素差プラチェーンの構築に関する実証試験が行われている。
- 経済産業省 革新的水素エネルギー貯蔵・輸送等技術開発（平成28年度～）では、再生可能エネルギー等からの低コスト・高効率で水素を製造する次世代技術ならびに水素を長距離輸送・大規模貯蔵が比較的容易なエネルギー媒体への高効率な転換技術の開発が行われている。

■非在来型資源・CO₂利用関連

- JST「低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出（ACT-C）」（平成27～30年度）では、CO₂等の安定小分子を資源として活用する反応の研究、工業的な利用につながる不斉炭素-炭素結合生成等の反応の研究、革新的な結合形成等により優れた特性や機能を有するπ電子系分子を創出する研究、π電子系分子に官能基導入を行う等による新機能を創成する研究などを対象としている。
- JST/CREST「多様な天然炭素資源を活用する革新的触媒の創製」（平成27年度～）では、化石資源消費の中で天然ガスへの依存が進むなか、天然ガスであるメタンから化成品や液体燃料を直接合成する方法を開発することを目指している。従来、メタンは水蒸気改質反応を経て合成ガス（CO+H₂）を経由すれば様々な化成品に転換できることは知られているが、これを直接変換する革新的な触媒開発を目指している。
- NEDO「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発」で、既存の化学品などの製造プロセス（ナフサ分解プロセスなど）のグリーン化などを目標に研究開発が進められてきた。光触媒により水分解で創り出した水素と、産業界から排出され回収した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。

■バイオマス関連

- NEDO「非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発」（平成25～31年度）では、実用化に向けて高いコスト競争力を有する非可食性バイオマスから化学品までの一貫転

換プロセスの構築を目指している。

- NEDO「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」はバイオマスのガス化、液体燃料化（BTL: Biomass to Liquid）を含んでいて、ガス化炉とフィッシャー・トロプッシュ（FT）合成を組み合わせたシステムによって、建築廃材や間伐材からケロシンへの変換なども盛り込まれている。
- JST ALCA の特別重点プロジェクト「ホワイトバイオテクノロジーによる次世代化成品創出プロジェクト」（平成 27 年度～）で、化石資源から脱却した次世代の化成品合成一貫プロセスの研究開発を狙って、従来技術とは非連続的な、バイオマスから化成品等を製造するホワイトバイオテクノロジーの深化が進められている。

■排ガス・希少元素関連

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

■海外関連

- Audi e-gas プロジェクト（ドイツ） 余剰電力と CO₂ からメタンを作り都市ガスへ導入する技術を開発している。現在は Audi 社が積極的に後押ししており 6 MW クラスの実証実験が進められている。メタネーションはそれほど新しい技術ではないが、水電解からメタネーションまでシステムを変動電源の下で運用し、社会へ導入することを模索している。
- Electro Fuels（2010 年-） 米国エネルギー省によるプロジェクトであり、余剰電力から液体炭化水素燃料を生産する技術の構築を狙い、生物電気化学的手法を応用することを検討している。電気エネルギーを用いる方法、水電解から得た水素を還元剤に用いる方法の二通りの方法を用いて、CO₂ の炭化水素燃料化を目指している。ドイツの Audi e-gas が実証試験の大規模化が中心であるのと比較すると、ElectroFuels は基礎レベルの研究を目指していて、実証試験レベルの技術が見出せているとは言い難い。

(4) 科学技術的課題

不均一系触媒の研究は理論的な体系化が難しく、均一系触媒は大型プロセスに向かないなど、均一系触媒、不均一系触媒にはそれぞれ長所・短所があり、それらの長所を併せ持つような触媒を開発する必要がある。ただ単に、分離・回収・再使用ができるというだけでなく、均一系触媒と同等あるいはそれらを凌駕する活性・選択性を有し、分離・回収・再使用が容易な触媒を開発することが必要である。そのためには、均一系触媒研究者と不均一系触媒研究者のより密な連携をはじめ、多様な分野間の連携が必要となる。触媒化学分野に直結した領域に電気化学（電極触媒）がある。これらは、本来、界面での電子の授

受があるかないか、反応生成物が蓄積するか定常的に流通するかどうかなど、僅かな違いがあるのみで、本質的には固液界面での表面化学反応を使いこなすのが鍵となる領域である。触媒化学領域は、触媒のナノ構造を構築し機能を発現させることが、ナノテクノロジーが謳われた頃からの研究のトレンドであり、微細な構造の触媒を構築する技術は大学等に十分な蓄積がある。これらを現実的にエネルギー・環境に直接関与する触媒に応用するためには、ナノ構造制御を得意とする研究者、実用触媒の性能評価が得意な研究者が連携して研究を推進できるような枠組みも必要である。

(5) 政策的課題

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

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

(6) キーワード

低環境負荷、バイオマス、シェールガス、均一系触媒、不均一系触媒、エネルギーキャリア、天然ガス、自動車排ガス触媒、NOx 除去、CO₂ 削減

(7) 国際比較

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

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

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発(プロトタイプの開発含む)のレベル

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑: 上昇傾向、→: 現状維持、↓: 下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 触媒学会、「触媒技術の動向と展望」(2014、2015、2016)
- 2) JST-CRDS、「俯瞰ワークショップ報告書平成27年度エネルギー科学技術分野最新研究開発動向」
- 3) JST-CRDS、「米国 ARPA-E (エネルギー高等研究計画局) の概要」CRDS 海外動向ユニット、<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/FU/US20140620.pdf>
- 4) 文部科学省科学技術・学術政策研究所 (NISTEP)、「サイエンスマップ2014」
- 5) NEDO ロードマップ (エネルギー・基礎化学品分野の触媒開発ロードマップ、環境保全分野の触媒開発ロードマップ、機能性化学品製造分野の触媒開発のロードマップ等)
- 6) Lu Li; Xiaoyue Mu; Wenbo Liu; Xianghua Kong; Shizhao Fan; Zetian Mi; Chao-Jun Li, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2014, 53, 14106-14109
- 7) Yuehui Li; Tao Yan; Kathrin Junge; Matthias Beller, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2014, 53, 10476-10480
- 8) Marc D. Porosoff; Myat Noe Zin Myint; Shyam Kattel; Zhenhua Xie; Elaine Gomez; Ping Liu; Jingguang G. Chen, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, 54, 15501-15505
- 9) Masato Yoshioka, Toshiyuki Yokoi, and Takashi Tatsumi, *ACS Catal.*, 2015, 5, 4268
- 10) Jie Sun, Shaolong Wan, Fen Wang, Jingdong Lin, and Yong Wang, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2015, 54 (32), pp 7841-7851
- 11) Thomas Lunkenbein; Julia Schumann; Malte Behrens; Robert Schlögl; Marc G. Willinger, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, 54, 4544-4548
- 12) Hiroyuki Miyamura; Arisa Sonoyama; Davit Hayrapetyan; Shū Kobayashi, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, 54, 10559-10563
- 13) Ken-ichi Fujita; Ryoko Kawahara; Takuya Aikawa; Ryohei Yamaguchi, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, 54, 9057-9060

3.1.8 分離技術

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

分離技術とは、混合物から目的成分を取り出す、または不要物を除くものである。以下では、気体・液体の分離技術、鉱物資源・固体の分離技術を対象とする。気体・液体の分離技術では、工場から排出されるCO₂を分離・回収する技術や、オイルサンドやシェール層の開発時に生ずる大量の随伴水・汚染水の分離技術について記載している。鉱物資源・固体の分離技術では、低品位化が課題となっている鉱山からの希少金属（レアメタル）の分離・濃縮技術や、使用済み製品からの有用資源の分離技術について記載している。

※より詳細な内容は、「CRDS 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2017年）」と「CRDS 戦略プロポーザル 分離工学イノベーション～持続可能な社会を実現する分離の科学技術～」の二報にそれぞれ記載しているので、併せて参照されたい。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

●CO₂

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

●随伴水・汚染水

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

●鉱山からの希少金属

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

●都市鉱山からの希少金属

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

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

[動向（歴史）]

●CO₂

CO₂の分離・回収は、対象とするガスの性状や回収率、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℃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。

●随伴水・汚染水

2016年の推定では、随伴水の89%は、在来型の油田・ガス田から生じている。原油の産出を開始してから5年ほど経つと、随伴水の割合が増加してくる。これは、油層圧が低下するにつれて自噴能力が下がるため、ポンプ採掘や高圧ガスを圧入するガスリフトなどの方法がとられるためである。このような方法を用いても原油の産出量が低下してくると、水攻法により増産が検討される。この段階になると、随伴水の量は益々増加し、体積にして原油の4～6倍に達する。最近の原油の生産量：276億バレル（2012年）（0.756億バレル/日）と随伴水の排出量：3.05億バレル/日（2012年）を比較すると、多くの油田で大量の随伴水を排出していることが伺える。（オマーンでは、2004年に石油の6倍の随伴水が出ていたが、2013年には石油の24倍になっている。国によっては、深刻な

問題である。)

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

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

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

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

随伴水処理の要素技術には、HP Pressure Production Separator、API セパレーター、Gas Flotation、Hydrocyclone、Media filtration、がある。

● 鉱山からの希少金属

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

この間、海外で開発された分離技術として特筆すべきは、SX-EW (solvent extraction and electrowinning) 法である。それまで利用が困難であった低品位の酸化銅鉱石から銅を酸で直接浸出させ、溶媒抽出法を用いて電解液まで浄化、濃縮し、電解採取法に供するというものである。この方法は世界の主流を占める硫化銅鉱等の鉱石種では銅浸出が進まないという課題をかかえており、現在も技術開発が続けられている。また、難処理化鉱石を対象とした微粒鉱石の分離技術に関しても技術開発が進められた。より小さな気泡を利用して分離するマイクロバブル浮選や、高勾配型磁選機、流動層の原理を利用するネルソン型比重選別、あるいは薄流選別の応用であるファルコン型比重選別や MGS (Multi

gravity separator) などが開発され、現在もさらなる高効率化の努力が続けられている。

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

●都市鉱山からの希少金属

1990年代に各種リサイクル法が制定され、対象品目ごとに多くの選鉱技術研究者がリサイクルのための前処理技術研究に着手した。都市鉱山を対象とした分離技術は、当初は古くから鉄スクラップ業界で培われたシュレディングと、比重選別や磁選などの組み合わせであったが、1984年にフランスで開発された渦電流選別の導入によって、アルミニウムや銅の選別が可能となった。

難処理鉱石に求められる微粒に対する分離技術に加えて、塊状粒子を対象とした分離技術の開発も求められている。対象を検知・識別するセンサ部と、実際に圧縮空気やパドルなどで分離する部分とからなるソーティング技術はその有用な手段の1つであり、古くから色度を識別して分離するカラーソーティングは選鉱や前処理にも導入されていたが、近年では近赤外線・X線・レーザーなどを利用して分離する技術が積極的に開発されている。都市鉱山に求められる分離技術は、鉱石を対象とする分離技術以上に、法制定や政策によって大きく左右される。特に2010～2011年には中国の輸出制限政策によりレアアースが急騰し、国内では分離技術の開発が加速した。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

●CO₂

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

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

●随伴水・汚染水

・Sulfate 除去

海底油田の二次回収増産のために、海水中の Sulfate 濃度を NF 膜で 100 ミリグラム/リットル以下にして、油層中に圧入する技術が普及しつつあり、年間 400 億円程度の市場が生まれている。現在、RO 膜を用いて脱塩した海水と処理後の随伴水を混合し、圧入する技術が北海油田で検討されており、BP はこのシステムに 120 億円を投資している。海洋油田の随伴水は、現在、84%が処理後に投棄されており、圧入は 13%に過ぎない（残りは、陸上に輸送）。しかし、今後は、圧入に再利用されるケースが増えるであろう。

- MPPE

随伴水の海洋投棄の規制が厳しくなり、吸着材を用いて三次処理を行うケースが増えている。その中で、高分子系の吸着材を用いたオイルの除去技術（MPPE, Macro-Porous Polymer Extraction）が普及しつつある。MPPEでは、随伴水の有害成分であるBTEX（Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene）を吸収し、スチーム処理により再生する。有害物質のゼロエミッションの方針にマッチしており、その有効性が北海油田（ノルウェー）で実証されている。

- セラミック膜

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

- 鉱山からの希少金属

- METTOP-BRX-TECHNOLOGY 法

新しい銅電解精製のための電解槽が従来の電解槽の1.5倍の速度で高速電解を行うことができることとされる。一部の企業で商用化されている。（オーストリア METTOP 社）

- Armstrong 法

TiCl₄のNa還元によるチタンの製造法であり、粉末の製造に適している。2010年には、年間1800トンの商業生産を開始すると報告していたが、現時点での生産能力は不明である。（サウジアラビア Cristal 社）

- 鉱石からの浸出促進

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

- 都市鉱山からの希少金属

- 単体分離を促進するための新規粉砕技術

異相境界面に選択的に応力が加わるような粉砕技術が開発されている。電気パルス粉砕、マイクロ波粉砕、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。

- 都市鉱山を対象としたソーティング技術

比較的粗粒状態で高度に単体分離された塊状（現状では10mm以上）粒子については、各種のセンシング技術を利用したSensor Based Sorting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・電気的選別等々）では達成し得なかった（理想分離に近い）高度な分離が可能となる。例えば、アルミ合金類の相互分離は従来型の固相分離では不可能であったが、数年前より、透過X線および蛍光X線ソーティングを組み合わせることにより実用化プラントが建設され始めた。LIBS（Laser Induced Breakdown Spectroscopy）を利用したソーティング技術も世界に先駆けて日本で開発

され、実用化の一手手前まで進んでいる。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り、今後の実用化が期待されている。

- イオン液体による新規分離剤の開発

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

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- CO₂

日本の鉄鋼業では、「革新的製鉄プロセス技術開発（COURSE50）」で、コークス炉ガスに含まれる水素を利用した水素還元製鉄、高炉ガスから化学吸収法、物理吸着法によりCO₂を分離回収し、CO₂排出量を30%削減する低炭素製鉄を目指している。

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

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

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

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

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

- 随伴水・汚染水分離

- EOR（enhanced oil recovery）

中東の多くの巨大油田は、かなり老朽化しており、水攻法による二次回収が広く行われてきた。最近では、EORと呼ばれる増進回収が進んでいる。

- CBM（Coal Bed Methane）

オーストラリア東岸のCBM開発には、2020年までに1100億円が投資される予定であり、逆浸透膜を含めた最新の随伴水処理技術が導入されることが期待されている。CBMの開発では、石炭層の割れ目に溜まった水を抜く必要があり、ガスの生産の前に大量の随伴水が発生する。二次回収として窒素や二酸化炭素を圧入する研究も進められており、ガス分離膜への期待も大きい。

● 鉱山からの希少金属

● JOGMECにおける銅原料中の不純物低減技術に関する基礎研究委託事業

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

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

2008年4月に策定された「海洋基本計画」に基づき、沖縄海域及び伊豆・小笠原海域における海底熱水鉱床の開発に向けた選鉱および製錬技術開発事業が開始している。5年間の第1期における基礎検討の後、2013年には第2期事業が開始され、より実用化に近い検討が行われている。しかし分離技術上の課題は多く、熱水鉱床鉱石に特化した新規分離技術開発が望まれている。

● 米国 DOE/ARPA-E

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

● 都市鉱山からの希少金属

● 欧州委員会によるCircular Economy（CE）政策パッケージ

EUはかねてより「Resource Efficiency」という概念を打ち出し、既存の廃棄物管理の取り込みを超えた価値観で資源効率の向上により経済と社会の持続的成長を図る政策をとっていた。そして2015年12月に「Circular Economy」政策パッケージとして、サプライチェーン全体で幾重もの循環の輪を作り、消費スタイルそのものを変化させるような政策を発表している。特に金属資源では、European Institute of Innovation & Technology（EIT）が設立したEIT Raw Materialsが上述の政策実施に対する重要な拠点となっており、EU内の資源、製錬、リサイクラー、ならびに電気メーカーなど多岐業界にわたる企業が支援している。

● 産業技術総合研究所 戦略的都市鉱山研究拠点（Strategic Urban mining REserch base, SURE）

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

● NEDO アジア省エネルギー型資源循環制度導入実証事業

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

- JOGMEC における低品位銅電解精製技術実証事業

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

- EU HORIZON2020 における MSP-REFRAM project

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

(4) 科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- CO₂

システム効率向上、Oxy-Fuelなどの燃焼法の確立、コスト低減が課題。コスト低減では、CO₂回収量数千トン/日の処理能力で、設備費及び運転費（蒸気使用量）を半減できるような吸収液、吸収剤やシステムの改良が求められる。圧力、ガス量の変動した際のCO₂回収装置の負荷変動対応と応答速度向上にある。石炭火力に課せられた負荷変動対応を天然ガス火力と同等のミドルピーク対応にさせる技術開発が必要とされている。

- 随伴水・汚染水

- EOR

随伴水処理で今後最も重要なものは、EOR技術の普及である。中東の大油田の三次回収、カナダやベネズエラの重質油、オーストラリアのCBM開発に見られるように、随伴水を精製後、スチームとして、あるいはポリマーや薬品を混入させて油層に圧入する技術は、長期的な技術の深化が必要である。また、新しいEOR技術として、CO₂や炭化水素、あるいは窒素などの圧入も広まりつつある。今後の油田や天然ガス開発は、在来型や非在来型に関わらず、EOR技術なしには生産が不可能になる。このため、三次処理レベルの次の技術を確立することは、最重要の課題となる。そのボトルネックは、耐熱性、オイル耐性、耐久性であり、これらに加えて、分離性能を一層向上させる必要がある。さらに、スチーム以外のEOR技術に関連して、以下の分離技術の深化も重要となる。

- ✓ 随伴水や生産ガス中の炭化水素（C₁～C₈）の濃縮、分離・蒸留の技術

- ✓ 生産ガス中からの窒素やCO₂の分離技術

- 環境規制と水不足

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

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

- 鉱山からの希少金属

- 固体分離技術のマイクロレベルな機構解明

選鉱や前処理技術に関する現象論に関しては、長年の検討により経験知が蓄積されているが、対象は複雑な形態を呈する固体の混合物であることから、これまでその現象の直接的な観察が難しく、詳細な機構解明には至っていない現象も多い。選鉱の分野では SEM 画像と顕微鏡画像とを組み合わせ、自動的に単体分離度を計測する MLA が近年開発され、日本にも導入されつつある。

- 都市からの希少金属

- 単体分離過程の解明のための破壊の科学の確立

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

- 前処理技術に対する経験知の統合と IT 化

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

[今後取組むべき研究テーマ]

- CO₂

- CO₂ 回収コストの低減に関する技術開発

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

- 高効率な温室効果ガス分離膜の開発

回収エネルギー低減が期待できる革新的な CO₂ 分離膜の基礎研究。

- 回収 CO₂ を還元する物質の経済的な製造方法

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

- 随伴水・汚染水

- 量産可能な無機膜

随伴水の二次処理用の無機膜は、日本が優れた製品を要しており、実証試験レベルにある。一方、限外ろ過（UF）膜、ナノ濾過（NF）膜などの三次処理レベルの無機膜は、

改良の余地が大きい。無機膜は、耐久性に優れ、随伴水処理との相性が良い。また、ガス分離膜としても優れた性能があり、生産ガス中からの窒素やCO₂の分離技術にも利用できる。

- 再生可能なオイル吸着剤

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

- カーボン系のオイル耐性分離膜

最近、カーボン系のNF膜やRO膜が開発され、多価イオンの分離や脱塩に利用できることが分かってきた。カーボン膜には、耐久性や耐熱性、オイル耐性に高いポテンシャルがあり、高温の随伴水からのEOR用スチームの製造やSulfate除去を行うための最適な膜となる。また、カーボン系の薄膜は、生産ガス中の炭化水素成分(C₁～C₈)の濃縮、あるいはCO₂の分離にも有効と考えられる。

- 実証プラントとオペレーション技術の開発

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

- 鉍山からの希少金属

- 液体ならびに界面の原子の挙動の第一原理計算による理解

電気分解に必要な電圧を下げるためには、溶液内抵抗に起因する部分と、反応抵抗に起因する部分のそれぞれの低減が必要である。前者は伝導度として体系化が進んでいるが、溶液中の伝導度の原子論的な理論的研究は少ない。後者の反応抵抗に関する原子レベルでの理論的メカニズムの解明が課題である。

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

界面現象の精緻な計算を精度良く遂行するためには、精緻な実験観察が両輪として必要となる。金属製錬では、しばしば反応温度が1000℃以上の高温となり、また、厳密な雰囲気制御が必要であり、その反応の様子は未だブラックボックスのままであり解明が待たれる。

- 都市からの希少金属

- 低品位・高不純物鉍石利用のための選鉍技術の開発

エネルギーをかけずに低環境負荷なプロセスで分離濃縮するための選鉍技術の開発が必要不可欠である。これらの選鉍技術開発の方向性としては、後段に従来型の製錬プロセスを想定した技術開発と、後段に電解法など湿式製錬プロセスを想定した技術開発の2つが考えられ、対象によってどちらが適するかを見極めながら開発すべきであろう。

- 各種都市鉍山資源の特徴をいかした省エネルギー型前処理技術の開発

対象によって使用されている材料や使用されている元素、強度などが大きく異なることから、都市鉍山資源ごとに適する前処理技術を個別に検討する必要がある。特に、小型家電、希土類磁石モーター、太陽電池、Ni-水素電池、Liイオン電池などは、それぞれに対して電気パルスや機械式粉碎、熱や圧力を駆使した特殊粉碎などによって省エネ

ルギー型の単体分離技術の開発が必要になる。また、比較的粗粒域で単体分離を達成し、それを高精度に分離するソーティング技術が確立されれば、一部の都市鉱山資源は従来型の製錬設備を介さず、直接的に電解法で回収するような画期的な省エネルギー型金属精製プロセスが実現する可能性がある。

- 不純物を多く含有する金属資源を従来製錬設備で精製するための課題解決
想定されるあらゆる不純物元素について、その電極触媒挙動を把握し整理することが、喫緊の課題である。不純物挙動の体系化は、リサイクルを前提とした材料開発研究にもつながる。

(5) 政策的課題

● CO₂

CO₂ 排出基準規制、固定価格買取制度、炭素税、排出量取引制度等、CO₂ を排出する事業者インセンティブを与える施策の検討が重要になる。海外での CO₂ 削減が排出権取引により国内での削減に結び付く枠組みの構築も重要である。

● 随伴水・汚染水

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

● 鉱山からの希少金属

既存の産業規模、また、その波及範囲の大きさにも関わらず、大学における基礎教育に携わる教員数は減少傾向であり、将来的な人材不足が懸念される。これに対して、関連学会では、合宿講義などで、各大学からスペシャリストを招き集中講座を行っているが、短い時間の講義では、習熟に限界があり、また、実体（実習）を伴わない座学での学習では、十分な理解度まで到達できていないのが現状である。大学における製錬に関わる研究室・講義の再生が求められる。

● 都市からの希少金属

- 経産省と環境省の連携による資源循環に対する新たな価値観の創成

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

- 長期的な資源確保戦略に基づいた産学官連携の仕組み醸成

資源循環型社会を構築するための分離技術開発は、社会からの要請も大きく、産官学が連携して取り組むべき課題であり、すでにJOGMECやNEDOなどで実証事業が展開されている。しかし、それらの事業は喫緊の課題に対して実装が近い技術を対象としているものが多く、また事業期間も短期間であるものが多い。長期的な視点に立てば鉱石の難処理化や都市鉱山利用の必要性は自明であることから、息の長い検討が必要であ

る新規分離技術開発や機構解明など基礎研究に相当する事項に対しても、小規模であっても継続的に産官学が連携し、広く人材と学術的知見を育成する仕組みが重要である。

• 資源国との選鉱技術に関する連携強化

資源国とはこれまでも人材育成や地質調査などに関する連携事業が実施されているが、選鉱をはじめとする分離技術に関する連携事業は現在のところ実施されていない。地球規模の環境問題解決に対する国際連携の方策が求められる。

• 都市鉱山資源を対象とした分離技術開発に関する国際連携強化

EUではCE政策パッケージに基づき、分離技術開発を含む資源循環促進のために多額の投資が予定されている。日本はこうした機会を捉えて国際連携を強化することが課題であろう。日本における資源循環のあり方はアジア地域を含めた国際資源循環の視点から論じるべきであり、アジア地域との国際連携強化も望まれる。

(6) キーワード

- 分離、回収、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離、深冷分離、随伴水、MPPE、Coalbed Methane、Tight oil、Hydrocyclone、選鉱、都市鉱山、前処理、中間処理、物理選別、固固分離、固液分離、単体分離、粉碎、破砕、磁選、浮選、電気選別、ソーティング、

(7) 国際比較

CO₂

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	分離回収手法の開発が継続されている。RITEは膜法と貯留関連の技術開発を実施。
	応用研究・開発	◎	→	三菱重工は、RITE、電源開発、東芝、産総研等で精力的な研究。
米国	基礎研究	○	→	DOEのNETL、NCCCが企業主体の回収技術開発を支援。
	応用研究・開発	◎	→	米国、カナダでは、石炭火力に対し厳しいCO ₂ 排出量基準を設定。
欧州	基礎研究	○	→	Horizon2020で吸収液、セメント製造からのCO ₂ 回収技術を支援。
	応用研究・開発	△	↘	EUでは、EU指令で、300MW以上の火力発電に対してCCS readyのFSを求めている。
中国	基礎研究	○	→	2013年にKCRCは500MWの酸素燃焼、あるいは300MWのIGCCのCCS計画を発表、その後国内での具体的なCCSプロジェクトの計画が見られない。
	応用研究・開発	○	→	合計9件のプロジェクトが計画されている。
韓国	基礎研究	△	→	KCRCとRISTが吸収液、酸素燃焼の基礎研究を実施している。
	応用研究・開発	△	→	Doosan Heavy Industry and Constructionsは吸収液プラントも検討していたが、現在は酸素燃焼技術開発を実施中と表明している。

随伴水（汚染水含む）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	水処理PJ（CREST, NEDO, COI）が実施され、ナノテクと分離技術の融合など新たな動きがある。石化プラントは縮小傾向にあり弱含み。
	応用研究・開発	○	↑	産業界と資源国との繋がりは深く、研究開発は油価の低迷にもかかわらず順調。無機膜などの分離機能材料が随伴水処理に普及しつつある。
米国	基礎研究	◎	→	トップレベル。DOE研究予算も潤沢で、テキサス大などの産油地に近い大学では研究充実。産学連携も盛ん、シニア研究者層が厚い。
	応用研究・開発	◎	↑	シェール開発で新興企業が台頭し技術力は非常に高い。また、GEの水処理分野への参入など、資金力を活かした迅速な事業展開が見られる。
欧州	基礎研究	○	→	BPやShellが本拠としている英や蘭は、水処理技術の研究をリード。DNV（ノルウェーの認証機関）などには資源開発のエキスペートも多い。

欧州	応用研究・開発	◎	↑	水処理に関しては、Veolia と Suez が存在感。英仏は、西アフリカの海底油田の開発などを手がけており、その技術力は、米国に劣らない。
中国	基礎研究	○	→	水不足や環境汚染を抱えており、ペトロチャイナを中心に海外の資源開発にも積極的。基礎研究にも資金が提供されておりかなり充実。
	応用研究・開発	○	→	水処理関連の部材や機械の生産が盛んであるが、先端技術の開発では、必ずしも進んでいないように感じられる。
韓国	基礎研究	△	↘	関連の基礎研究が進んでいるようには思われない。
	応用研究・開発	○	→	分離膜などの生産装置の製造力があり、ポテンシャルが感じられるが、ビジネスを展開するには総合力に欠けるように感じられる。

製錬、都市鉱山

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	【都市鉱山】選鉱に関する研究は、近年の難処理化に対する懸念を受けて、再び活発化する兆し。選鉱分野の国際会議 IMPC では、欧米、中国、オーストラリアといった資源国に次いで日本から報告件数が多い。
	応用研究・開発	○	→	我が国の貴金属製錬・リサイクル技術は世界的にみて高いレベルにある。企業を中心に応用研究・開発が行われているが、画期的な新規技術は生み出されていない。2次資源の利用にあたっては、不純物対策や環境対策が必要となるため、そのための技術開発は活発である。
米国	基礎研究	△	↘	【銅製錬】新規抽出剤などは、化学の基礎研究として残っている。 【チタン製錬】DOE/ARPA-E で6件（12億円）の新チタン製錬研究を実施。ここ数年で急激にアクティビティが向上。 【都市鉱山】選鉱の存在感は低下、目立った研究は見られない。
	応用研究・開発	○	→	【都市鉱山】存在感は低下。比較的活発であるのは2次資源からの貴金属回収や、2次資源利用に伴う環境対策技術。
欧州	基礎研究	○	→	息の長い研究を継続、選鉱および前処理の双方の分野において、画期的な新規技術が数十年に一度、発見されている。国際会議においても安定した基礎研究発表を続けている。前処理の分野では、貴金属回収や、環境対応に関する基礎研究が特に活発である。
	応用研究・開発	◎	↑	特にリサイクルについては先進的な取り組みがなされている。2次資源利用、貴金属回収、環境対応に対する開発が活発で、取組みは先進的。
中国	基礎研究	○	↑	【チタン製錬】熱心な大学の研究室が複数あり、近年基礎力が向上。 【都市鉱山】国際会議での発表・論文数は多い。教員・学生数も多い。
	応用研究・開発	◎	↑	【銅製錬】新しく銅の溶錬炉を開発し、海外新規プロセスを導入。 【チタン製錬】品質向上による競争力アップで、輸出も増えると予想。 【都市鉱山】新規開発の多さとスピードは目を見張る。東南アジアやアフリカを中心に、多くの新規選鉱プロセスを開発。2次資源利用でも新規炉等を開発。環境対策が十分でない。
韓国	基礎研究	△	→	【都市鉱山】一部、レアメタルを対象としたリサイクル技術に関する基礎研究は比較的活発である。
	応用研究・開発	△	↘	【銅製錬】ほぼ技術的には飽和。開発対象はリサイクルと環境である。 【都市鉱山】リサイクルや環境対策に関する多少の応用・開発を実施。

(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