

3. 研究開発領域

3.1 環境・エネルギー

持続可能な社会の実現に向けて、3E（Energy・Environment・Economy）の視点でのバランスの取れた取り組みが重要になっている。特に、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、化石燃料や原子力から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、エネルギー自給率を向上させることが求められている。

環境・エネルギーへのナノテクノロジー・材料分野の貢献としては、再生可能エネルギーの高効率利用、効率的なエネルギー蓄積・変換、CO₂ 排出量の削減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にあり、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、グリーンプロセス触媒を取り上げている。

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。

3.1.1 太陽電池

（１）研究開発領域の簡潔な説明

太陽光を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。既に基盤技術が構築されているシリコン系太陽電池に関しては、さらなる低コスト化が課題になり、最近高効率化の進展が著しい有機系太陽電池については、分子設計、プロセス技術の構築、劣化機構の解明などを通じて、変換効率 15%以上のレベルを実現することが課題となる。さらに超高効率を目指した量子ドット系などの新構造太陽電池の開発に取り組む必要もある。加えて特筆すべきは、ここ数年で急激に研究が進展している有機無機ハイブリッド型のペロブスカイト太陽電池である。現在、既に変換効率 20.1%が達成されているが（2014 年 12 月時点）、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動向

〔背景と意義〕

近年の地球環境・温暖化問題の顕在化、さらにはエネルギーセキュリティの確保の観点から、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的潮流となる中、日本国内でも固定価格買取制度の後押しを受け太陽光発電の普及が進んでいる。この分野における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。

太陽電池モジュールの価格は低下しており、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 系においては、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いるが、発電機構の詳細は不明なままである。今後の発展のためには、発電機構の解明に基づく新材料の開発が鍵となる。

〔これまでの取組み〕

実用化が進んでいる、シリコン系太陽電池（結晶 Si、薄膜 Si）や化合物半導体系太陽電池（CIGS [Cu (InGa) Se₂]、CdTe、GaAs 集光型）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きた。さらに極限まで変換効率を高めるために、材料の点欠陥・表面欠陥の削減、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いる。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。直達日射量の多い地域では、今後ニーズが増えることが予想される。

有機系太陽電池においてはこれまでに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、有機薄膜太陽電池では10%以上、色素増感太陽電池では12%以上の変換効率が得られている。ペロブスカイト太陽電池では発明からわずか5年で、17.9%（米国 NREL 認証）の変換効率が達成されている。

日本は Si 薄膜、CIGS 共に高い技術を持ち、Si 太陽電池でも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。超高効率太陽電池などの次世代技術の研究開発も米国、日本、欧州で進められているが、これらの太陽電池企業の多くは中国、韓国など企業や 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、いつまで優位性を維持できるか不安がある。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。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おり、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。

〔今後必要となる取組み〕

実用化が進んでいるシリコン系や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。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、米国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。

有機系太陽電池については、現時点での光電変換効率の最大値は10%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おいては、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。

（３）科学技術的・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。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。そのためには、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、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。

- ・シリコン系太陽電池を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、住宅用ともに発電量予測技術の高精度化とリアルタイム発電量把握技術の確立、および蓄電池やエネルギーマネージメントを最大限利用したピーク抑制と需給バランス確保への貢献に加え、より短時間での変動や急激な出力の立ち上がり(立ち下がり)に対する系統安定化への貢献が期待される。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。
- ・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・拡大はあまり期待できない。そのため、国が主導的な役割を果たし、資金・人材面での支援を行い、技術開発の推進を後押しすることが必要である。
- ・ペロブスカイト太陽電池は、研究開発が始まったばかりであり、上市に向けてはさらなる高効率化、高耐久化、低毒性化等の多くの課題をクリアする必要がある。そのためには、国が主導した新材料開発、発電機構解明、劣化機構解明等の基礎研究を強力に推進するとともに、産官学連携による技術開発を効果的に進めていく必要がある。
- ・各国で太陽光発電の普及拡大が進む中、ドイツなどでは太陽光発電導入量が電力系統に対する連系許容限界に近づいており、特定の日を見ると風力と併せた再生可能エネルギーが半分以上の電力を供給している時間帯もある。そのため、電力系統の安定運用に向け、発電量予測技術の重要性が高まっている。翌日～リアルタイムまで予測のニーズは広く、衛星画像と地上観測データを用いて広域で正確に予測する技術の開発

が進んでいる。日本国内においても同様の取り組みは進んでいるが、地上における気象庁の日射計測地点数が減少傾向にあることや、導入済の太陽電池のアレイ構成(方位など)がデータベース化されていないことから、予測の高精度化に向けて早急に取り組むべき課題は多い。また、系統全体で見た時の余剰電力や調整力不足の問題に対しては、今後も引き続きスマートグリッド関連技術の開発が必要となる。特に家庭用から電力系統用大型設備まで、蓄電池の導入に関する研究、および蓄電池そのものの開発が各国で進んでおり、これに加えて電気自動車などの移動・流通手段の電化と需給調整などの系統安定化への利用、および建物における省エネ化とエネルギー管理技術の開発が活発に行われている。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

・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 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 143.7cm²)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 3.72cm²)ではあるが、変換効率 25.1%を達成した。また、米国 SunPower 社も 121 cm²のバックコンタクト型セルで 25.0%を達成している。カネカは、銅プレーティング技術を利用した 6 インチのヘテロ接合型太陽電池で 23.5%を達成している。このように、高効率化セルの開発競争においては、日本企業の高い技術力が改めて示されたといえる。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。

太陽電池用 Si 結晶インゴット製造の分野では、低コストで高品質なインゴット開発への指針が二極化している。一つは、大粒径(結晶粒サイズが数 cm~数十 cm)の結晶から構成され、結晶粒方位や結晶粒界などの組織制御による高品質化を目指したものであり、もう一方では、粒径が数 mm 程度の微細な結晶粒を意図的に成長させることで転位密度の低減と結晶の均質化を目指している。前者には、単結晶の種結晶を利用してインゴット製造を行う、モノキャスト技術の研究開発も含まれる。仏 INES は 450kg インゴットで 95%の領域で単結晶を得ることに成功し注目を集めている。歩留まりや品質に課題はあるものの、良質な部分にヘテロ接合太陽電池を適用し、100mm 角セルで 20.2%を達成している。日本国内では、浮遊キャスト成長法、粒界エンジニアリングによる欠陥制御技術、モノキャスト技術の種結晶の小型化、ノンコンタクトクルーシブル法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いる。技術の引き受け手となる企業が現れることが望まれている。後者は、High-Performance Multi と呼ばれ、主として台湾や中国の企業が生産を行い、高い歩留まりを実現している。

・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、透明中間層の利用、プラズモニクス、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。バルク結晶 Si 系モジュールの低価格化に押され、苦しい市場状況が続いており、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、材料の安定供給の面での優位性を考えると、中長期的には重要な分野であるとも言え、このまま薄膜 Si 系の研究開発が後退してしまうことが危惧される。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 とともに、近年最高効率が更新され、着実な技術の向上が見られている。

・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の 20.9%を誇り、日本が世界を牽引している。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。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。

集光型太陽電池に使用する多接合型太陽電池において、SHARP は集光時の効率として、44.4% (250-300 倍集光) の世界最高効率を達成している。また、張り合わせ技術（メカニカルスタック）による多接合化についても開発が進んでおり、4 接合で集光時 44.7% が報告されている。米国 Solar Junction 社も世界最高タイ効率である 43.5% (400-600 倍集光) を達成しており、量産レベルでも 42% の高効率を出している。モジュールについては、米国 Semprius 社が 33.9% のモジュール最高効率を達成している。

・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。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た。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 5 cm 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。

・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。最近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 (英国)、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。

・ペロブスカイト太陽電池

特に欧州で新たな取り組みが進展している。たとえば、独 Fraunhofer 研究所は建材用途に大面積 60 cm x 100 cm セルを作製しようとしており、英国ではベンチャー企業 Oxford Photovoltaics が上市に向けた研究開発をスタートしている。また、米国においても研究が進展しており、スタンフォード大学は CIGS とのタンデム化で 18.6% を達成している。タンデム化では、従来の CIGS や結晶シリコン太陽電池を用いることにより、20% 以上の効率が期待されている。また、カナダ・サスカチュワ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。

[注目すべきプロジェクト]

- ・シリコン系太陽電池に関しては、NEDO プロジェクトで、結晶 Si 太陽電池のコスト限界を打破し、安価で高効率な結晶 Si 太陽電池を大量に供給する技術の実現を目指したコンソーシアムが形成されている。原料の製造からセルまでの一貫した産学連携の研究体制が構築され、豊田工大には、産業開発プラットフォームとして太陽電池試作ラインが導入された。このプロジェクトからは、前述の SHARP の変換効率 25.1% のセルを始め、結晶成長から高効率セルに至る多くの成果が実現されている。産業技術総合研究所では、2014 年 4 月に再生可能エネルギーに特化した研究施設が、福島県郡山市に開所された。産業の基幹である結晶 Si 太陽電池が研究の対象となり、次世代薄型結晶 Si の研究開発が進められる。また、同じ研究所内では、文部科学省・JST による「革新的エネルギー研究開発拠点形成事業」が実施され、国際的な研究体制が構築され、ナノワイヤ太陽電池の研究開発が集中して行われている。
- ・最近大きな注目を集めているレアメタルフリーの薄膜 CZTS 太陽電池に関しては、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体制で一気に CZTS 太陽電池の高効率化・物性評価を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。ソーラーフロンティアは、世界最高水準の 12.3% という効率を誇っている。CZTS 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、フォトリソ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、欧州諸国との連携を強化している。

- ・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、「有機系太陽電池実用化先導技術開発」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が、中でも新たな取り組みとして、さきがけ研究者を結集した横断プロジェクトの成果が期待される。

（５）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

（６）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	◎	→	無機系太陽電池の日本の基礎研究水準は、これまで個別の研究機関や企業の努力によって高い研究水準を保ってきた。しかし、研究水準の高い欧米の研究機関や、急速な追い上げを見せている新興国への対抗から、産業の主体である結晶系Si太陽電池や、薄膜太陽電池の分野などでは、オールジャパンのコンソーシアムを構築することにより研究体制を強化し、国際競争力を高めようとする動きがある。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、薄膜太陽電池においては、微結晶Siのシングルセルで世界最高効率の11%が達成された。独Fraunhofer研究所、米国NRELなど、研究開発の中核となる研究機関が日本でも求められている。 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。 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。 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。
	応用研究・開発	◎	↗	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、最近小面積セルを含めた太陽電池セルの世界最高効率を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。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。モジュール信頼性やシステム技術に関する技術開発は、これまで個別企業に依存してきたが、一部の技術では、コンソーシアムでの技術開発が行われている。 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。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。 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、日本ではまだ基礎研究段階である。
	産業化	◎	↘	国際的な価格競争の中で、低価格化が進み、原料やウェハメーカーなど撤退を余儀なくされた企業もある。業績不振のセルメーカー・装置メーカーも少なくない。一方で、固定価格買い取り制度の後押しもあり、国内各地のメガソーラー設備や住宅用向けにモジュール生産量は増加してきた。太陽光発電設備を含めたスマートグリッド関連技術の開発など、エネルギーのトータルソリューションを提供することでメーカーは生き残りをはかっている。Si系の薄膜太陽電池では、苦戦が続いている。海外他社との連携や、薄膜技術をヘテロ接合に利用した高性能結晶Si太陽電池の開発に活路を見出そうとの動きもある。 CIGS太陽電池については、ソーラーフロンティアが世界を牽引しており、年産1GWの生産規模は突出している。将来の海外進出時の基本製造プラントとすることを視野に入れ、最新の高効率化製造技術を採用した新工場を建設している。

米国	基礎研究	○	↗	多様な太陽電池に対して低コスト・高効率化を推進するプロジェクトがエネルギー省の事業として実施されている。結晶Si系の基礎研究は、研究人口は多くはないものの、MITやNRELなどにおいて高い水準の研究が行われている。宇宙用・集光用の多接合型太陽電池の研究は活発である。また、太陽光発電の利用技術に関する研究開発は先行している。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。この内、カリフォルニア大学バークレー校は非公式ながら19.3%の変換効率を達成している。
	応用研究・開発	○	↗	SunPower社は、裏面接合型の高効率結晶Si太陽電池で、Panasonic社のヘテロ接合型太陽電池と結晶Si系の実用太陽電池における最高効率を競っている。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、新しいアイディアが生まれている。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。この内GPECは、NanoFlex Power Corporationと発展的に名称を変更している。
	産業化	△	→	集光型太陽電池や、裏面接合型の高効率結晶Si太陽電池などにおいて優位性がある。Si基板材料関連やCIGS系などで生まれた多くのベンチャー企業は、近年では目立った報告がなく足踏みしているようにみえる。First Solar社は、CdTe太陽電池の製造でトップ技術を有しており、技術革新により近年変換効率が著しく向上している。モジュール効率でも17.0%という高い効率を実現している。また、スマートグリッドなどシステム産業への注力化が顕在化している。
欧州	基礎研究	◎	→	結晶Si系の要素技術についての基礎研究は、非常に高い研究水準を維持している。独Fraunhofer研究所、Konstanz大、ISFH、オランダECN、ベルギーIMEC、仏INES、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。開発はどちらかというと現実路線で短期的テーマが中心だが、基礎も重視し各種太陽電池の研究を展開、超薄型や新原料などの次世代技術への取り組みも活発で研究人口も多い。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) やウプサラ大学、有機薄膜型ではImperial Collegeが基礎研究を牽引している。また、IMECが産学連携共同研究機構Solliance Allianceを活用し、薄膜太陽電池の研究開発を精力的に行っており、その一つが有機系である。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。

	応用研究・開発	◎	→	市場拡大を背景にベンチャー企業が多く設立され、製品化を目指している。企業での開発の中心は、生産技術であり、研究機関との研究コンソーシアム体制が有効に機能している。装置メーカーによるターンキー製造装置の高度化も進んでおり、Roth&Rau社のシリコンヘテロ接合太陽電池製造設備では、平均効率20.7%が達成されている。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所的な研究を展開しているので実用化は早い。各研究所の成果が中国に流れているケースが散見される。有機系太陽電池でも多くのベンチャー企業が活躍中であり、代表的なものは色素増感型の英国G24 Power (以前のG24i)。また、ペロブスカイト太陽電池では同じく英国のベンチャー企業 Oxford PhotovoltaicsとドイツのFraunhofer研究所が先陣を切っている。
	産業化	◎	↘	国際的な価格競争の影響を受け、セルメーカーやウェハメーカーなど、厳しい状況にある。過去に世界トップの生産量を記録した独Q-cells社も例外ではなく、2012年8月には、韓国ハンファグループによる買収に合意している。装置メーカーにおいても、量産用薄膜シリコン太陽電池モジュールのターンキー製造ラインで高い実績をもつエリコンソーラー社は、東京エレクトロン社に買収された。さらに東京エレクトロン社はアブライドマテリアルとの経営統合に向かっている。有機系太陽電池のニッチ用途製品が発売され始めた。G24iの色素増感太陽電池が、Logitech製iPadの外部キーボード電源に採用されている。
	基礎研究	△	↗	結晶系Si太陽電池は、産業として急速な発展を遂げており、国家計画の下で、公的研究機関・大学が研究開発を推進している。研究員は、先進国への留学生が戻って活躍するケースや半導体分野からの転身が多い。現時点では、海外の研究機関等の追跡研究が主体であり、独創的な研究は限定的であるが、研究水準は上昇傾向にある。薄膜Si、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。
	中国			
	応用研究・開発	○	↗	企業は国外の大学や研究機関、製造装置メーカー等と連携して先端技術を導入・活用することで、高性能太陽電池の実現や、低コスト化などへの取り組みをみせている。企業間での技術情報に関する障壁が低いため、導入された先端技術が、国内全体へ拡散する速度は非常に早い。結晶Si系太陽電池の大手数社の開発力拡充には注目すべきである。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。一例として、Yingkou OPV Tech New Energy が挙げられる。企業化まで後一步の所まで来ており、2015年にも発売が予定されている。
	産業化	◎	↘	急激な成長を遂げ、世界最大の太陽電池生産国にまで上り詰めた。しかし、主要市場であった欧州諸国の購入支援策の縮小や、モジュールの過剰生産による販売価格の急速な低下の影響もあり、世界的な大手であったSuntech Power社が経営破綻にいたるなど状況は厳しさを増している。原料からモジュールまでの垂直統合が行われる一方で、多くの企業が乱立し過剰な投資に政府が懸念を示していた原料製造分野については、淘汰が進んでいる。また、モジュールの信頼性については、特にPIDなど品質に問題のあるケースが指摘されており、信頼性の向上が課題である。政府は、国内導入施策を整備することで、国外市場に強く依存する企業の体質強化をはかっている。薄膜太陽電池では、CIS系で技術力のある欧州企業を買収する動きが進んでいる。
韓国	基礎研究	△	→	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20.1% (米国NREL認証) を達成している(2014年12月時点)。

韓国	応用研究・開発	○	↗	Samsungグループ、LGグループ、Hyundaiグループなど、財閥系企業が太陽電池製造に参入し、技術開発を進めてきた。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。LG電子社は、大規模製造プロセスと整合するCuプレーティングを導入したヘテロ接合型太陽電池で20.5%の変換効率を報告している。有機系太陽電池では、色素増感型でSamsungが製品化を企画中。用途は建材一体型（BIPV: Building-integrated photovoltaics）やモバイル電源である。
	産業化	○	↗	生産量で中国に遅れを取っていたが、Samsung electronics社、LG electronics社は、生産ラインを本格稼働させて積極投資の姿勢をみせてきた。しかし事業環境の急変により、計画の見直しも行われている。ハンファグループは独Q-cells社を買収し、太陽光発電業界におけるグローバルプレーヤーの仲間入りをした。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 参考資料

- 1) 第40回 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Denver, USA, 8-13 June, 2014
- 2) HOPV14, Lausanne, Swiss, 11-14 May, 2014
- 3) 28回 EUPVSEC, Paris, France, 30 September-4 October, 2013
- 4) 第11回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム予稿集
- 5) サムソン SDI : <http://samsungsdi.com/nextenergy/dssc-solar-cell-battery.jsp>
- 6) G24 Power : <http://gcell.com/>
- 7) Heliatek : <http://www.heliatek.com/?lang=en>
- 8) NEDO : http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100135.html
- 9) M. D. McGehee, Nature, 501, (2013) 323
- 10) R. F. Service, Science, 344, (2014) 458
- 11) Fraunhofer : <http://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/>

3.1.2 人工光合成

（1）研究開発領域の簡潔な説明

人工光合成は、植物が太陽光エネルギーをエネルギー源に、二酸化炭素と水を原料として、グルコース、デンプンなどの有機物を合成する過程（光合成）を模し、人工的に太陽エネルギーを化学エネルギー（水素や炭化水素）に変換する科学技術である。水のみを原料として水素を生成物とするものを指す場合と、二酸化炭素と水を原料として、液体燃料や有用化学物質を生成物とするものを指す場合とがある。

また、溶液中に分散した半導体光触媒や溶解した有機金属錯体を用いる方法、半導体を電極として光電気化学的に反応を起こす方法、さらに太陽電池で発生させた電気を用いて電気化学的に反応を起こさせる方法などがある。

付加的な過程として二酸化炭素の捕集、濃縮や生成物の分離・濃縮が必要となる。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必要である。また、目標（水素製造、大気中の二酸化炭素濃度の低減、液体燃料や有用化学物質の合成）を明確にした工学的、経済的評価手法の開発・標準化が必要である。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

〔背景と意義〕

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。

水を光により水素と酸素に分解する方法は、酸化チタン電極（光電気化学）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¹⁾。

〔これまでの取り組み〕

・半導体光触媒を用いる人工光合成

半導体光触媒を用いる方法には、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と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がある。

光電気化学的な方法では、まず 1977 年に酸化チタン光電極と対極の白金電極を直接、接触させたデバイスをつくることを、コロラド大学の Nozik が考えた。その後様々な改良を経て、半導体電極を太陽電池技術によって作製し多段励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）らのグループからされている²⁾。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³⁾。これらは実用的な太陽エネルギー変換効率をもつものの、多段式太陽電池技術を用いたもので、電極が太陽電池よりはるかに高価なものになる。

粉末状の半導体光触媒では、1978 年頃、テキサス大学の Bird らによって、酸化チタンの粉末に白金微粒子をつけた Pt/TiO₂ が生まれたことに端を発する。近年、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。また、水素、酸素混合気体が大面積で出てくるため、分離技術が重要になっている。

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。

〔今後必要となる取組み〕

現状の研究においては、犠牲試薬を使った場合、全体として自由エネルギーが負であり、自発的に進行することを無視して太陽エネルギー変換効率としている場合や、光電気化学系では外部バイアスや化学的バイアス（pH 差）を加えているのにそれを無視して太陽エネルギー変換効率としている場合が多い。また、水と CO₂ から有機物を作ったとしている論文のほとんどで犠牲試薬を用いており、酸素が有機物生成に見合う量が検出されていないことには留意すべきである。したがって、まずは各研究グループの結果が比較可能な標準的評価法を確立する必要がある。

その上で、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。これには現時点で量論的に最も現実的な太陽電池による発電と水の電気分解による水素製造を組合せ、二酸化炭素+水素の化学プロセスによる有機物製造も視野に入れて取り組むことが必要である。

（３）科学技術的・政策的課題

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。

また、ある効率が得られたときにどれくらいのスケールが必要を考え、実現可能かどうかのクリティカルな評価を踏まえた上で、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。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔新たな技術動向〕

近年は半導体光触媒の分野と有機金属錯体の分野の融合が進んでいて、半導体電極上に有機金属錯体を固定化したものが注目されている。また金属ナノ粒子を用いたプラズモン共鳴型の増感型の光触媒や光電極も研究が進んでいる。

〔注目すべきプロジェクト〕

文部科学省の科研費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。

・国内

➤ 文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究⁴⁾：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⁵⁾。

➤ JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ⁶⁾：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）⁷⁾：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・パデュー大学ら、2012年～)

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⁸⁾。この他にも多種の人工光合成研究が取り組まれている。

➤ 経済産業省未来開拓研究：グリーン・サステ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(ARPCChem)⁹⁾、堂免・東京大学ら、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。最近では堂免らにより粉体光触媒から水分解において高効率な光電極を構築する方法を見出されている¹⁰⁾。また光電気化学系で光カソードと光アノードを組み合わせ1%前後の太陽光エネルギー変換効率で水を水素と酸素に分解する方法を見出している。

なお、再生可能エネルギーからの化学エネルギー物質の生産技術開発については、2013年度から「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

「新基盤技術の創出」のプロジェクトが文部科学省・経済産業省の連携で開始され、JSTの先端的低炭素化技術開発(ALCA)、CREST事業で展開されている。さらに2014年度からは戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)に展開している¹¹⁾。経済産業省でも同期して再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発を展開しているが、前年、多種の人工光合成のプロジェクトが立ち上がったため、これらのエネルギーキャリアプロジェクトでは人工光合成はほとんど取り上げられていない。

・ 国外

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¹²⁾。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¹³⁾。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¹⁴⁾、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)が立ち上がっており、8つのCCIの1つで関連する研究が取り上げられ、2005年から年間数億円規模の基礎研究が行われている。また、Northwestern大を中心に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、SunCatalytix¹⁵⁾やLiquidLight¹⁶⁾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。一方で、近年、シェール資源の開発や最近の原油価格の急速な低下により、米国内におけるクリーンエネルギーに関する関心度は低下している側面もある。

欧州では2014年からFP7の後継となるHORIZON2020 (H2020)において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。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¹²⁾。

韓国ではKCAP(The Korean Centre for Artificial Photosynthesis)が進行している¹⁷⁾。

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、この中で人工光合成型太陽エネルギー変換は行われている。

また、ソーラー燃料生産の国際ネットワーク¹⁶⁾が設立されている。

(5) 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

（６）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	◎	↑	本文に示す各種の人工光合成プロジェクトの中間評価の時期であり、多くの研究成果が上げられている。
	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。
	産業化	×	↑	人工光合成は実用化の段階にはない。しかし、経済産業省のプロジェクトは多数の民間企業を含んでいて、産業化の土台はできつつある。
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型反応を行うものは、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 ¹⁹⁾ 、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 ¹⁵⁾ やA. Bocarsky（Princeton）のLiquid Light ¹⁶⁾ などがある。しかし、米国、特に応用側の研究者においては、近年シェールガス関連技術の注目度が急激に高まった分、再生可能エネルギー技術への期待は減少している。
	産業化	×	→	人工光合成は未だ実用の段階になく、産業が形成されているとはいえない。
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は進められている。
	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 ²⁰⁾ 、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ので、応用への視野は開けているといえる。
	産業化	×	→	人工光合成は未だ実用の段階になく、産業が形成されているとはいえない。
中国	基礎研究	△	↑	人工光合成への注目度は高いが、科学技術として成熟しているとはいえない。欧米・日本の模倣が多く、独自性のない研究が多くみられる。
	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。
	産業化	×	→	人工光合成を産業化する取り組みは未だ見られない。
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。
	産業化	×	→	人工光合成を産業化する取り組みは未だ見られない。

（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

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、
△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(7) 引用資料

- 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.
<http://web.mit.edu/newsoffice/2011/artificial-leaf-0930.html>
- 4) 文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究
<http://artificial-photosynthesis.net/>
- 5) 東京工業大学ニュースリリース
<http://www.titech.ac.jp/news/2014/024699.html>
Y. Yamamoto, H. Takeda, T. Yui, Y. Ueda, K. Koike, S. Inagaki, O. Ishitani *Chem. Sci.*, 2014, **5**, 639-648.
- 6) 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>
- 7) 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/>
- 8) JST ACT-C 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領域
http://www.jst.go.jp/act-c/research_area/ongoing/morikawa.html
- 9) 経済産業省ニュースリリース
<http://www.meti.go.jp/press/2012/11/20121128003/20121128003.html>
- 10) K. Domen, "Innovative fabrication of photoelectrodes for solar water splitting", SPIE Newsroom, 2014, doi: 10.1117/2.1201408.005496.
- 11) JST 戦略的イノベーション創造プログラム「エネルギーキャリア」
<http://www.jst.go.jp/sip/k04.html>
- 12) Solar Fuels and Artificial Photosynthesis, RSC Advancing the Chemical Science, Jan. 2012.
http://www.rsc.org/images/Solar-fuels_tcm18-221433.pdf
- 13) 米国 DOE, The Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP)
<http://www.energy.gov/articles/fuels-sunlight-hub>
<http://solarfuelshub.org/index.html>
- 14) 米国 DOE, Energy Frontier Research Centers (EFRCs)
<http://science.energy.gov/bes/efrc/>
- 15) Sun Catalytix
<http://www.suncatalytix.com/about.html>

- 16) Liquid Light
<http://liquidlightinc.com/>
- 17) Korea Center for Artificial Photosynthesis (KCAP)
http://www.k-cap.or.kr/e_index.html
- 18) Solar Fuels Institute
<http://www.solar-fuels.org/>
- 19) 米国 Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E), Electrofuels
<http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/electrofuels>
- 20) SolarFuel GmbH
<http://setis.ec.europa.eu/system/files/Presentation%20by%20Stephan%20RIEKE.pdf>

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、水素などの燃料ガスと酸化剤である空気（酸素）から電気化学反応（酸化還元反応）により電気エネルギーを直接取り出す装置であり、燃料電池自動車、家庭用などの分散型高効率電源として、さらには複合サイクル発電などと組み合わせた発電の高効率化への応用も期待されている。

発電特性を左右する電極（触媒）材料の高性能化、高耐久化、低コスト化、異なる温度領域での作動を可能にする新規電解質材料創製、実用化・製品化に向けたセルスタック（燃料電池の積層体）やシステム技術開発、最適運転指針の確立など、研究開発対象は多岐にわたる。これらの研究開発においては、原子レベル観察から、3次元可視化、その場観察、システム評価手法などの階層的な評価手法も含めたエネルギー変換デバイス・システムの設計技術基盤の確立が求められている。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

〔背景と意義〕

燃料電池は、化学エネルギーから電気エネルギーへの変換過程で熱や運動エネルギーを経ないため、内燃機関などに比べてエネルギー変換効率が高く、二酸化炭素の排出を大きく削減することが可能であり、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。

燃料電池のセルは、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、それぞれの極には電気化学反応を促進する触媒が配置されている。電解質膜やその中を通過するイオンの種類によってリン酸形（PAFC）、熔融炭酸塩形（MCFC）、固体高分子形（PEFC）、固体酸化物形（SOFC）の大きく4種類に分類される。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自動車や家庭用定置電源などにおいて有望な電池である。特に、2015年から、燃料電池自動車（FCV）の一般販売が開始される予定であり、そのための量産技術開発や水素インフラ整備が加速されている。

700～900℃付近の高温で作動するSOFCは、熱需要に比べて電力需要の方が多い家庭向けのみならず、業務用・産業用や既存の複合サイクル発電と組み合わせて70%を超える超高効率発電の技術としても期待されている。現在、家庭用燃料電池（通称「エネファーム」）の主流はPEFCであるが、より効率の高いSOFC型エネファームの商用化が2011年に始まり、業務産業用も2017年からの市販開始が国のロードマップに明記されている。

〔これまでの取り組み〕

日本では、ハイブリッド車の普及が進む中、電気自動車と燃料電池自動車の将来市場の棲み分けの議論も進められた。一般に前者は、短距離中心の通勤・通学などの役割が期待されるのに対し、燃料電池自動車は、航続距離や燃料充填時間が現在の自動車と同等であることから、中長距離向けの用途で期待される。

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 年からの燃料電池自動車の普及に向けた量産と 4 大都市圏での水素インフラ整備に関わる共同声明などが出されている。

NEDO 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「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。2.5～3 KW/L レベルの高性能化や高耐久化、量産技術の進展を受けて、2015 年からの FCV の一般販売が計画されている。

家庭用発電については、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「エネファーム」補助事業が開始され、日本で、2009 年度に世界で初めて家庭用燃料電池コジェネシステムが実用・販売開始され、技術力の高さを示しているが、より一層の低コスト化が必要となっている。また、2010 年度に数十台規模の SOFC 実証試験が実施され、その成果を踏まえて、JX 日鉱日石エネルギー社などが 2011 年から SOFC 型で発電効率 45% の高効率エネファームの発売を開始するなど、家庭用定置型電源・コジェネ利用においては我が国は世界を圧倒的にリードしている。

NEDO は「燃料電池・水素開発ロードマップ 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、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。経済産業省では「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、クリーン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、さらに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。「日本再興戦略 2014」等においても、燃料電池自動車の 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。

家庭用燃料電池では、PEFC で総合効率が 94～95% レベル (発電効率は 40% 程度) まで向上し、SOFC においては発電効率が 45～46.5% での一般販売が開始されている。PEFC では、定価 200 万円を切る普及機の販売が本格化するなど、低コスト化が着実に進んでいる。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、年間数千台規模の本格的な家庭用システムの市販が始まっている。両タイプを合わせた累積販売台数は 10 万台に到達しつつある。

欧米では、バックアップ電源、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おり、家庭用コジェネ以外へのアプリケーション開発は、日本よりも活発に行われている。米国では、特にフォークリフトなどで PEFC の普及が始まり、業務用について、米国ブルームエナジー社などが政府や地域の補助金などを受けデータセンターなど IT 分野を中心に燃料電池ビジネスを急展開している。しかし、再生可能エネルギーなどを重視する政府の方針により 2010 年度に水素・燃料電池関連の

政府研究開発予算が大幅に削減され、太陽光、バイオ燃料、蓄電などが優先されていることから、燃料電池分野から他の産業へシフトする傾向が見える。それに伴って高い水準を保っていた技術水準と産業技術力が低下する可能性もあるが、2014年度、予算抑制の方針を転換したことから今後の動向を見守る必要がある。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。

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。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。

研究開発面では、米国の研究予算に顕著に現れているように、太陽光発電、二次電池、バイオ燃料などに優先が置かれたことのおおきくを受けて、全体的にややトーンダウン、スローダウンの感が否めないが、日米欧が先導している状況は近年と変わりが無い。

〔今後必要となる取組み〕

実用化・普及に必要とされる課題は、システム全体における高効率化・信頼性向上（高耐久化）・低コスト化の3点である。PEFCでは、空気極の触媒として白金が使用されているが、この白金のコストが本格普及のネックの一つとして挙げられることが多い（高温作動のSOFCでは白金を使用しない）。

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製、デバイス開発など上記3つの課題解決に資する以下のような取り組みが挙げられる。

- 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非白金、低白金触媒の開発
- 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

ただし、システムコストの中では、白金のコストは一部であり、移動体用システムでは、水素貯蔵タンクや電気・ガス・水・熱などの制御系統、定置用システムでは改質器や燃料処理器なども大きなコスト要因となっていることに留意して研究開発を進める必要がある。

（３）科学技術的・政策的課題

燃料電池普及の課題は、市場で要求される低価格で機能・性能を充たすシステムが開発途上にあることと、発電効率が高く長期耐久性に優れた製品の信頼性確立や大型化で

ある。

最近の燃料電池分野の国家プロジェクトでは、2015年からの燃料電池自動車の市販に向けた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、公的研究資金の投入が不可欠な領域である。

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。

これまでの電解質、電極材料の研究では、個々の独立した分野の研究に限定されることが多く、デバイスやシステムを理解した上での材料研究は少ない。また、それらを解析・検討するための新しい手法の開発も不可欠となる。ナノレベルにおいて、リアルタイムで直接観察する分光解析やSPRiNG8などでの放射光を用いた解析や可視化技術の確立など、次世代測定手法も重要となる。高温作動の固体酸化物形燃料電池においても、高温でのその場観察や可視化、三次元観察、非破壊観察など、革新的な評価手法が求められている。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔新たな技術動向〕

・ Pt 触媒

PEFCにおいては、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ことから、主成分である Pt の使用量の現状からの大幅削減（ $<1/10$ ）、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。前者に関しては Pt 粒度制御、耐食性 Pt 担体利用、あるいは第二、第三成分との合金化とコアシェル化などが、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。米国 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 Pt 触媒が報告されており、今後の動向が注目される。脱 Pt 触媒に関しては、金属酸窒化物、カーボンアロイ、窒素ドーパ炭素材料、ポリマーアロイ、Co 担持導電性高分子などが研究されている。これらの基礎研究で得られた結果を評価し、効率的に研究開発を推進するには、評価技術の共有化も極めて重要であり、燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）や NEDO 技術開発機構が評価プロトコルをまとめて公開している。

・ PEFC 用の高分子電解質膜

最も使われているのがフッ素系電解質膜であるが、日・米・欧を中心に活発な研究開発が継続的に繰り広げられている。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。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の開発においては産学連携が重要となるが、FC-Cubic 技術研究組合や山梨大学「燃料電池ナノ材料研究センター」がPEFCの集中研となって、産学連携の中核的な役割を果たしている。

・ 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。今後は、普及を見据えたシステムレベルでの性能評価、実証研究、製品化、その中で明らかになった技術課題の材料・セル開発へのフィードバックなどが、本格普及に向けて重要となる。SOFCの開発においても産学連携は重要であり、NEDO事業で産学が連携した迅速評価手法の確立が進められている。さらに、世界でも例がないSOFCに焦点をあてた産学連携集中研として九州大学「次世代燃料電池産学連携研究センター」が経済産業省の補助で設置されており、実証研究や製品開発も含めた産学連携が進められている。

[注目すべきプロジェクト]

・ 米国

DOE が中心となって燃料電池水素エネルギーの研究開発プロジェクトが継続的に進められている。新たな取り組みとして、2014年に中温域燃料電池に特化したプログラム REBELS (Reliable Electricity Based on Electrochemical Systems) が開始された。本プログラムはPEFCとSOFCの長所を組み合わせ、これまでにない革新的な燃料電池を作る試みで、エネルギー高等研究計画局(ARPA-E)が33百万ドルの予算を充てている。DOEは明確なコスト・性能目標を提示しており、自動車用燃料電池では、現状(2013年)は55ドル/kWを2020年に40ドル/kW(50万ユニット量産時)にし、最終的には30ドル/kWにすることを目指している。定置用小型燃料電池(5kW)では、2020年に1,500ドル/kW、発電効率45%、耐久時間6万時間以上を、定置用中型燃料電池(100kW~3MW)では、2020年までに1,500ドル/kW(天然ガス利用)または2,100ドル/kW(バイオガス利用)で、発電効率50%、耐久時間8万時間以上を達成することを目標としている。

現在、DOEが集中的に取り組んでいるのは白金担持量の低減と非白金触媒の開発、さらに低コストの膜・電極複合体(MEA)の開発(劣化低減を含む)である。白金担持量低減ではナノフレーム触媒をアルゴンヌ国立研究所とローレンスバークレー国立研究所が開発しており、また3Mのナノ構造薄膜(NSTF)をMEAに適用して6.2kW/g-PGM

を達成している。また特徴的なこととして、定置用の大型システムでは MCFC の開発を支援している。なお、DOE は小型バックアップ電源として燃料電池の普及を支援しているが、家庭用の小型定置用燃料電池を普及させるプログラムは有していない。

・ 欧州

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、欧州燃料電池・水素共同実施機構 (FCH JU: Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking) が立上げられ、技術開発を含めた広範囲な取組みが継続して進められている。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ている。また Ene.Field プログラムでは、1000 台の燃料電池 (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。

ドイツは 2007 年に 10 年プログラムである「水素・燃料電池技術革新国家プログラム」(NIP: National Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie) 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るとしている。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 Callux プログラムで合計 500 台 (現状 350 台程度) の定置用燃料電池の実証試験を進めている。参加企業は Baxi Innotech (PEFC)、Hexis (SOFC)、Vaillant (SOFC) である。ドイツでは定置用燃料電池の 2016 年の商用化を目指している。また商用 SOFC に特化した FuelCell@Home プログラムを実施しており、Ceramic Fuel Cells (CFC) 製の SOFC が 200 台導入される予定である。

・ アジア

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、本格的な実用化に向けた研究開発を強化している。現代自動車が燃料電池自動車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いる。

中国も燃料電池自動車の研究開発を推進している。PEFC 搭載バスや自動車の開発は現在実証段階である。2011 年～2015 年の「新 863 プログラム」では主として、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開発に注力している。

(5) キーワード

固体高分子形燃料電池 (PEFC)、固体酸化物形燃料電池 (SOFC)、電気化学、固体イオニクス、ナノ構造制御、エネルギー変換、高効率発電、XAFS などの先端計測、非白金・低白金触媒、可視化手法

(6) 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	◎	↘	NEDOなどによる研究資金により、全国の複数の集中的研究拠点の研究活動が本格化し、研究水準は引き続き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や二次電池研究への重点投資などに押される形で、基礎研究や次世代技術開発への支援は減少傾向。 PEFCにおいては、山梨大学を中心としたグループでの新規電極触媒開発や触媒製造プロセス構築、FC-Cubic（台場）においては、自動車メーカー等と連携した階層的な評価手法の確立、同志社大学などが中心となったコアシェル型の電極触媒研究と低コスト化に向けた取り組み、横浜国立大学を中心としたグループによる非白金電極触媒開発プロジェクトなどが進められている。並行して、各大学で、JSTや科学研究費補助金などの支援で、自由な発想に基づいた新規材料開発などが進められている。 SOFCにおいては、主要技術課題の一つである耐久性向上に向けた取り組みがNEDO事業で進められ、現在は迅速評価手法の確立に重点が移ってきている。並行して、各大学における新規材料開発や劣化メカニズム解明などが進められている。
	応用研究・開発	◎	→	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。集中研究拠点を中心とした産官学の連携強化も図られている。 また、過去数十年、燃料電池の研究に重点的に取り組んできた山梨大学は、「燃料電池ナノ材料研究センター（HyPer-FC）」において電極触媒研究に集中的に取り組んでおり、教育プログラムも含めた総合的な取り組みを継続している。 PEFC分野では、「FC-Cubic技術研究組合」が約10年間活動を継続しており、PEFCの実用化を実現した自動車メーカーおよび家庭用燃料電池「エネファーム」を販売する電機メーカーが、関連する大学とも連携して、集中研の役割を果たしている。大学の成果が触媒、膜メーカーなどに移管され産業化がすすめられている。 また、世界初のSOFC分野の産学連携集中研として発足した九州大学「次世代燃料電池産学連携研究センター（NEXT-FC）」においては、民間企業十数社が入居して、電池セルスタックの顕微鏡観察評価や耐久性評価、実証研究などが進められている。 最近では、「グリーンアジア国際戦略総合特区」事業（平成26年度、17.5億円）も開始され、特に政府のロードマップに明記されている業務産業用SOFCの2017年市販開始に向けた取り組みが民間企業と連携して集中的に進められている。
	産業化	◎	↗	家庭用では固体高分子形燃料電池（PEFC）に続いて石油メーカーとガスメーカーから相次いで固体酸化物形燃料電池（SOFC）の一般販売が開始され、コストダウンや高耐久化技術開発が進展中。家庭用燃料電池の年間販売台数は8万台レベルに到達し、コジェネ利用において世界をリードしている。日本再興戦略においては、2030年までにエネファーム530万台（全世帯の1割）設置が明記されており、補助金なしでの自立的な本格普及に向けた、低コスト化などの取り組みが進められている。 自動車用では、国内各社の実証車の効率・運転性能・走行距離・車両重量など世界をリード。その性能を維持した上での、量産技術の確立による大幅なコストダウンが進行中で、それらを踏まえて、トヨタやホンダ、日産から燃料電池自動車（FCV）が2015年以降、順次発売される予定。欧米と比較して遅れ気味であった水素インフラ整備に関しても、全国100か所の水素ステーション整備などを関連業界が計画して、40基は超えており、国の方も補助率を向上させて、燃料電池自動車市販に向けたインフラ整備を後押ししている。 なお、水素社会構築に向けた取り組み加速に向けて、我が国の水素関連予算（資源エネルギー庁関係）はFY2014年の360億円（エネファーム補助金の補正予算を含む）に対し、FY2015年は401億円の増額要求が出されている。エネファーム導入、水素ステーション設置、燃料電池自動車導入への手厚い補助が予定されている。安倍総理からも、FCVの全省導入の方針が示されている。

米国	基礎研究	◎	→	研究資金は減少傾向。電気自動車関連研究への研究者の移動も見られ、停滞気味の状況が続いている。2010年度には水素・燃料電池関連の政府研究開発予算が約60%削減され、その影響は近いうちに顕在化すると予想される。また2013年度予算の優先課題を見てもソーラー、バイオ燃料、バッテリーなどが優先されており、水素・燃料電池のトーンダウンの感は否めないが、予算的には2014年度は2013年度と同等であり、2015年度も2014年度を維持するなど下げ止まる模様。ただし、水素社会構築の重要研究テーマとして位置づけられ高いレベルを維持している。また、論文では、固体高分子形燃料電池コアシェル触媒などに関するものの伸びが大きく、全体的にはレベルアップ。
	応用研究・開発	◎	→	DOEファンドにより、コスト低減のため、触媒Pt量低減のための材料技術の研究（合金触媒、コアシェル触媒、膜構造触媒、および、非白金触媒）と、低加湿度でも作動する電解質膜の研究が、強力に推進されている。研究チームは、国立研究所、大学、企業の連合により推進されている。開発されたコアシェル触媒や合金触媒などを産業化するための研究開発がベンチャー企業や大手化学会社などで進められている。従来からの取り組みに加え、2014年秋から中温型燃料電池の開発プロジェクトが始まるなど、新しい試みも始められている。電気自動車関連への方向転換などにより、技術開発力は低下する傾向にあるものの日本と同等以上のレベルを維持していると判断される。
	産業化	○	↘	フォークリフト・非常電源用途、軍事用途など、ニッチな市場への展開は進行中であるが、自動車メーカーの取り組みは停滞気味。自動車会社のFCEVの実用化開始時期は、2020年以降に量産を見込む（GM）など、やや中長期的になっている。PEFCに関して、バックアップ電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められている。またSOFCでは、ブルームエナジー社が200kW級の発電モジュールを組み合わせて販売しており、商用化で世界トップを走っている。GEもガスエンジンと組み合わせた、発電効率65%で1MWクラスの高効率分散型発電システムの開発を公表している。携帯用SOFCのベンチャー企業も活動中。
欧州	基礎研究	◎	→	FP7の枠組みの元、大学アカデミア向けのファンドによる研究開発が進められている。これに加えて、ドイツやスイスなどでは、各政府によるファンドや研究開発への税制優遇策がとられている。フランスでは、原子力研究所（CEA）が産業化にそなえて、MEA内の水の挙動モデリングを含めた基礎研究から材料・システムの応用研究まで手がけている。スイスでは、原子力研究所（PSI）において、基礎研究から、プロトタイプの実作まで手がけている。特筆すべきは、所有する中性子線源による燃料電池内の水の可視化研究であり、世界トップレベルを維持している。ただし、米国NISTなどにおける同様な活動が活発化しており、優位性は薄れてきている。
	応用研究・開発	○	→	ドイツを中心に、自動車メーカーを含めての異業種連携により、水素社会インフラ構築を精力的に推進している。関連部材産業の技術開発も活発化しており技術水準は上昇している。オーストラリア発祥のCFCL社の市販に続き、スイスHEXIS社など各社で、SOFCの市販やそれを見据えた実証研究が行われている。
	産業化	○	↗	ドイツを中心として政府主導の環境技術への支援、各種実証事業も活発化しており、それに伴って関連産業のアクティビティ・技術力は向上している。米国同様、PEFCに関して、バックアップ電源、バッテリー充電電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められているが、SOFCの製品化には時間がかかっている。最近、デンマークのTopsoe社がSOFCシステム開発から撤退して、高温水蒸気電解（SOEC）に特化することを発表するなど、選択と集中も進んでいる。
中国	基礎研究	○	→	FCEVの産業化は、長期的にとらえており、もっぱら基礎研究や応用研究を重視している。国家863プロジェクトなどに従って重点的な取り組みを、選択された機関に集中投資して実施している。主要研究機関での環境整備も進み、研究水準が上昇。PEFC、SOFC、バイオ燃料電池などあらゆる分野で論文数の数、伸びが大きく、燃料電池全体で、論文数は世界トップレベルだが、基礎研究レベルは欧州や米国には劣る。

韓国	応用研究・開発	△	→	政府主導の環境技術への支援が増大、産学連携によるベンチャー企業中心に燃料電池主要部品およびシステムの内製化が進められており技術開発力が向上している。 FCEVのプロトタイプ車作成とデモンストレーションは、上海汽車からのベース車両提供などのサポートの元、同済大学（乗用車）と清華大学（バス）を中心におこなわれ、北京五輪、上海万博などで実施された。
	産業化	△	→	大学・国研の開発中心で産業技術力は高くないが、産業の高度成長およびオリンピックと上海万博での実証デモを経て、確実に向上している。上海汽車が2015年に1,000台規模のFCV（燃料電池自動車）の小規模量産を開始すると発表。
	基礎研究	○	→	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型燃料電池、熔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研究開発に取り組んでいる。中国ほどの上昇傾向は見られない。
	応用研究・開発	○	↗	自動車用では、現代自動車で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。 定置用においても実証事業が進められ、着実に技術開発水準が向上している。 LG社がロールス・ロイス社のSOFC部門を買収し、SOFC分野の技術開発に本格参入。
	産業化	○	↗	POSCOが熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）の年間生産100MW規模を目指している。現代自動車が2013年2月に少量連続生産設備を完成、2014年6月から米国にてリースを開始した。CFRPの韓国国内供給体制も構築が進み、水素タンクの韓国サプライヤもECE認証を取るなど、材料部品レベルでの活動が活発化。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 参考資料

- 平成 23 年度 NEDO 研究成果報告会資料（平成 24 年 12 月開催）
http://www.nedo.go.jp/events/FF_100025.html
- パナソニック株式会社ホームページ
<http://panasonic.co.jp/ap/FC/index.htm>
- 東芝燃料電池株式会社ホームページ
<http://www.toshiba.co.jp/product/fc/products/index.htm>
- JX 日鉱日石エネルギー株式会社ホームページ
<http://www.noie.jx-group.co.jp/lande/product/fuelcell/index.html>
- アイシン精機株式会社ホームページ
<http://www.aisin.co.jp/cogene/index.html>
- 特許庁「平成 23 年度 特許出願技術動向調査報告書（概要） 燃料電池」
- 米国エネルギー省 2014 年 Annual Merit Review プロシーディング資料
http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review14_proceedings.html
- 経済産業省 水素・燃料電池戦略ロードマップ
<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004.html>

3.1.4 熱電変換

（１）研究開発領域の簡潔な説明

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研究開発領域。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（ナノワイヤ、ナノポラスなど）の新規熱電材料開発、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動向

〔背景と意義〕

人類が使用する石油・石炭・ガスなどの一次エネルギーの約 7 割は未利用の廃熱として捨てられており、こ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。廃熱の大部分は 100~300℃の低温熱エネルギーであり、熱電変換材料・素子を用いた熱電発電は少量の熱エネルギーでも電気に変換できることから、希薄な廃熱エネルギーを回収できる有望な技術として注目されている。また、固体素子であることからメンテナンスフリーでスケール効果が無いため、エネルギーハーベストへの応用も期待される。熱電発電によりセンサ・モジュールにおける電源の問題が解決されれば、エネルギーハーベスト市場のグローバルな拡大が予想される。熱電変換は冷却用のペルチェ素子として実用化されているが、廃熱や未利用熱による発電の実用化には至っていない。しかし、近年のナノテクや新規材料開発の進展により熱電変換の効率が向上し、世界中で実用化に向けた研究開発競争が激化している。

〔これまでの取組み〕

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。

1990 年代以降、物性理論に基づく新たな設計指針の提唱や、それまで 2 元系化合物半導体が中心だった研究対象が、3 元系以上の様々な材料へと探索の幅が広げられ、各国の環境・エネルギー政策への注力などもあり、熱電材料の研究は活性化し、質、量ともに飛躍的に伸びている。「ガラスのように格子熱伝導を抑え、金属のように電子を流す (Phonon-Glass Electron-Crystal)」材料の概念が提唱されたことは研究者を大いに刺激した。この設計指針に基づき、クラスレートやスクッテルダイトなど、かご状骨格にゲスト原子をゆるく閉じ込めた特別な結晶構造の材料では、ラトリング現象などでフォノンの選択的な散乱を起こし、格子熱伝導を極端に低く抑えられることが発見され、1 を大きく超える ZT を持つ材料の開発につながった。一方、ナノテクの観点からは、超格子などによる低次元量子構造における閉じ込めによるフェルミ面近傍での状態密度増大がゼーベック係数の増大に有効であることが提唱され、また、材料の適度なナノ構造化（結晶粒の微細化）によるフォノンの選択的散乱を利用した材料で ZT の増大が図られてい

る。PbTe 系などでは、ナノ構造化により ZT が 2 を超えるような材料も開発されている。

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感があったが、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大幅なレベルアップが達成されている。例えば、新規材料発見後の高性能化研究においては、中国が日本を凌駕するケースも数多く出て来ている。以前は論文数で日本は米国と並んで世界トップであったが、現在は、米国と中国の 4 割程度に留まっている。各国の特徴としては、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、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、ハーフホイスラー合金など）と開発研究、欧州はそれに加えて導電性ポリマーの研究や評価研究および自動車応用の開発研究、中国はマンパワーを活かした系統的な最適化研究、韓国はウェアラブル熱電研究などが挙げられる。

産業に関しては、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十分には実現していない。熱電発電は、高温、中温、低温（室温付近）のさまざまな熱源を対象にした省エネからエネルギーハーベスティングの多種多様な応用が考えられ、その実用化は今後の科学技術動向や政策に依存する。

〔今後必要となる取組み〕

これまでの有望材料の改良や新規材料の創出とともに、実績のあるナノ構造化やカゴ状などの特徴的な原子構造に基づく熱伝導率低減手法を発展させることや、性能を飛躍的に向上させる新原理の探求も必要である。

材料のナノ構造化は ZT の向上に有効な手法であるが、人工的に作製したナノスケールの粒子を焼結する方法では、粒界による電気伝導率低下を回避する必要がある。バルク材料中にナノスケールの第 2 相を析出させる方法では、母相と粒界整合性の良い析出物により電気伝導率を低下させずに熱伝導率のみ低下させることができるが、適用可能な材料が今のところ限られており、適用範囲の拡大に向けた研究開発が必要である。

電気的性能を向上させる新しい手法として変調ドーピングが挙げられる。変調ドーピングは、材料中のキャリア供給相と伝導相（母相）を分離し、キャリア供給相から母相にキャリアを流す方法である。キャリア移動度を低下させずにキャリアドーピングが実現できるため、高い電気伝導率が期待できる。さらに、ゼーベック係数を向上させる方法として、結晶粒界によりエネルギーの低いキャリアを遮断するフィルタリングや、不純物ドーピングによる共鳴準位形成が提唱されており、これらを効果的に用いた材料の開発が期待される。閉じ込め効果やエネルギーフィルタリングを発現し得る低次元量子構造（ナノ薄膜、超格子、ナノポーラス、ナノワイヤなど）もその有望な候補である。

環境調和型・低コストの熱電材料の開発もこれまで以上に求められていくとみられ、バルク材の応用には元素戦略的な開発を進める必要がある。例えば、カルコパイライトや安四面銅鉱などの鉱物をベースにした高性能材料も見出されており、こうした元素戦略的材料の今後の研究の進展が期待される。また、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、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

ンの取組みが鍵となる。

熱電変換素子の産業化に関しては、利用する応用で熱電変換素子に求められる動作温度や性能が異なるため、応用目的に合致した研究開発を行う必要がある。例えば、廃熱の回収においては廃熱エネルギー量や回収源(温度・形態)を考慮した高変換効率・高耐久性の材料開発、エネルギーハーベストの用途では低温動作・低重量・低コスト・低環境負荷の材料開発、冷却・過熱制御では高変換効率・省電力特性の材料開発が求められる。

（３）科学技術的・政策的課題

我が国においては、熱電変換用の新材料開発に多くの人材・資金が投入されてきたが、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。新たな方法としてナノ構造化や低次元量子構造による熱電材料の高性能化が報告されてきたが、今後のさらなる高度化には、ナノスケールでの熱計測・解析技術の開発が必要であり、また、実用化・産業化に向けては、プロセス技術やモジュール技術などの周辺技術の開発も重要である。

日本は個々にオリジナリティの高い有望新規材料や材料研究シーズを見出しているが、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、戦略的な投資はなされていない。このため、今後は、欧米中韓に対抗できるような戦略的なプロジェクトの設立が必要と考えられる。日本の熱電変換に関わる研究者の分野の裾野は非常に広がっており、新規なマーケットの基盤となる材料、プロセッシング、モジュール、熱管理などに関わるさまざまな科学技術や技術要素の知財を先取りできるチャンスがあると考えられ、総合的で戦略的な研究投資と開発が望まれている。

（４）注目動向

〔新たな技術動向〕

材料開発の設計指針としては、これまでは、フィルドスクッテルダイト化合物に代表される結晶構造制御による Phonon-Glass Electron-Crystal の実現と、ナノ構造化による格子熱伝導率の選択的低減の二つが主要なものであった。ところがここ数年の間に、いくつかの注目すべき現象とそれを利用した熱電材料の性能向上の可能性が提唱されつつある。具体的には、バンド構造の精密制御によるゼーベック係数の増大、キャリアのエネルギーフィルタリング効果を利用したゼーベック係数の増大、変調ドーピングによるキャリア移動度の増大、結晶中のイオン種の伝導による格子熱伝導率の低減等である。また、従来からあるナノ構造熱電材料の開発研究においても、近年は、特に異種のナノ組織間の格子整合性が熱電特性の向上に極めて重要であることが見出されてきている。

これらの新たな設計指針に基づいた材料開発がなされているが、材料系のトレンドは、大きく二つのグループに分かれている。一つは Pb・Te 系材料であり、もう一つは環境調和型元素から構成される材料、とりわけシリコンである。Pb・Te に関しては、海外、特に米国において研究が活発に行われており、極めて高い ZT を示す物質も多く報告されて

いる。これらの Pb-Te は、Advanced Pb-Te と呼ばれている。一方、環境調和型元素から構成される材料に関しては、我が国が世界の熱電材料研究をリードしている。古くは酸化物熱電材料のブームを起こし、また最近バルクナノシリコン熱電材料の開発研究が積極的に進められている。

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、共有結合性を増すことで電気伝導度を増大させた高性能の硫化物、セレン化物が新規に見出された。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、マテリアルデザインの観点から、ナノブロックインテグレーションの手法が発展し、酸化物に加えて、層状硫化物で、無機・有機のハイブリッド材料も得られ、その優れた制御性が注目されている。

キャリアの精緻な調整により高性能有機材料が報告され、室温近傍のエネルギーハーベスティングに向けた研究が加速している。一方で、高温応用に関しては、発電所における topping cycle の試算や、太陽光集光熱電発電の実証実験が行われて高性能高温熱電材用の必要性が改めて示されている。

高性能化に関する技術動向では、ナノ構造化のためのボールミルプロセスに対して、容易さやコストにメリットがあるナノシート創製などのボトムアッププロセスの開発も進んでいる。一方で、パワーファクターを増強する方法への関心が高まっており、低次元量子構造による閉じ込め効果の幅広い実践や、新原理として発電に本質的なゼーベック効果と電気伝導パスを分離し得る複合効果も報告されており、今後の発展が期待される。また、磁性を利用する試みも増えており、スピンゼーベック効果や異常ネルンスト効果、磁性半導体に関する熱電研究が精力的に進められている。

デバイス・システム研究に関しては、中温域で使用が想定される熱電発電デバイスに注目が集まっている。具体的には、アンチモン系のスクッテルダイト化合物やスズ系のハーフホイスラー合金等を熱電材料としたテルルフリー熱電発電デバイスの開発に期待が寄せられている。新しいシステムに関しては、燃料電池からの高温排熱を利用した熱電発電システムや、従来から注目されている太陽光発電とのハイブリッド発電システムなども、継続して注目を集めている。

【注目すべきプロジェクト】

米国では、熱電関連の EFRC（Energy Frontier Research Center）で唯一更新が内定した 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が、実用化への研究を加速させている。また、スイスの EMPA では太陽光集光熱電発電の実証研究が行われている。

欧州では、2008～2013 年の熱電研究の公的資金投入額が、日本の少なくとも 6 倍という試算があり、大型のプロジェクトが複数あるが、特に自動車応用を目指したものが大きい。

日本国内では、JST の ALCA において、バルクナノシリコン熱電材料の開発研究が 2011 年度から 2016 年度までの予定でスタートしており、着実な研究成果が得られている。同じく JST の CREST においては、スピンゼーベック効果に関する研究開発が 2010 年度から 2014 年度の予定で実施されている。実用化の観点からは、NEDO においてかご状物質を利用した熱電材料の開発研究（2009 年度～2012 年度）や製鉄プロセスにお

ける排熱を利用した熱電発電システムの開発（2011 年度～2013 年度）などが実施されている。また、2013 年度からは、経済産業省の所管で、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発事業がスタートしており、その中で、高効率熱電材料の開発もターゲットとして設定されている。また、物質・材料研究機構にオープンイノベーション拠点が形成され、複数の企業とアカデミア機関が参画し、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がある。

（５）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

（６）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	◎	→	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盛んに研究が行われており、特に材料分野では高い研究レベルを維持している。しかし、他国が大きく論文発表数を伸ばしているにも関わらず、日本のここ数年の論文発表数は横ばいであり、また、文部科学省系の熱電基礎研究へのファンディングが近年は相対的に少ない。一方、天然鉱物や環境調和型材料に関する、熱電発電の実用化を見据えた研究が増加傾向にあり、他分野からの熱電研究への参加も増えており、今後増強する兆候がある。
	応用研究・開発	◎	↗	NEDO 事業として、大手の鉄鋼・材料等のメーカーと大学とが共同で熱電モジュールの開発を進めており、工場排熱を利用した発電の実証実験等が行われている。また、経済産業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立ち上がり、モジュール関連技術や熱管理技術などのモジュール関連技術の開発が進むと期待される。NIMS にオープンイノベーション拠点が形成され、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もある。
	産業化	○	↗	冷却目的のペルチェ素子については、大手から中・小規模のメーカーまで多くの企業が手掛けている。試作的なモジュールやデバイスに関する新規参入企業の発表が増えており、従来の焼却炉や工業炉への取組みに加えて、エネルギーハーベスティング用の薄膜応用や、温排水や製鉄所の廃熱利用の実証実験が行われるなど、熱電応用に関わる企業や応用先が増えている。
米国	基礎研究	◎	→	新設計指針(低次元量子効果、フォノンの選択散乱、共鳴準位など)に基づく超高性能材料の発表で世界をリードしている。一流ジャーナルへの掲載論文数も高いシェアを維持している。一方で高水準の研究成果が少数の研究グループに偏っている面もある。また、DOE の EFRC で熱電に関連する拠点が 1 つだけ (MIT 中心のもの) 継続が内定され、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	◎	↗	NSF や DOE の車載モジュールへ向けた大型プロジェクトが継続しており、さまざまな用途へ向けた新規ベンチャー企業などの動きも活発化している。また、NASA の JPL は熱電発電の技術実証・応用実証を行ってきており、今後、実用化へ向けた応用研究開発が加速すると考えられる。

	産業化	○	↑	DOE の自動車プロジェクトに大手メーカーが参画し、実用化に近づいている。また、材料から発電モジュール、応用まで、多くのベンチャー企業・中小企業が存在している。ハーフホイスラー合金や Mg_2Si など、比較的新しい材料を用いたモジュールも販売されるようになってきている。ペルチェやエネルギーハーベスティング用の熱電モジュールやデバイスのメーカーが大型企業に買収される複数例の動きがあり、熱電マーケットの拡大が予測されていることを裏付ける。
欧州	基礎研究	◎	↑	以前は日米のレベルに届かないものであったが、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 や各省においてここ 10 年間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おり、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。ドイツ、フランス以外の欧州の国でも研究が活発化し、全体傾向として日本同様に低環境負荷の材料が特に対象となっている。また、有機材料に関しては、比較的高い性能を示す PEDOT 系の火付け役になっている。
	応用研究・開発	◎	↑	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。特にドイツは上記の多くのプロジェクトに関与しているのに加え、ブラウンホーファー研究所を中心とした自動車応用を目指したプロジェクトにおいて、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。活発な基礎研究とファンディングに押し上げられて応用研究開発の動きもさらに進むと考えられる。
	産業化	○	↑	ロシアやウクライナ、ドイツに多くのメーカーが存在する。ドイツでは、エネルギーハーベスティング用の熱電発電モジュールを手掛けるベンチャー企業が数社あり、中でもブラウンホーファー研究所の研究者が設立したベンチャー企業は半導体微細加工技術を利用したエネルギーハーベスティングや局所冷却用の特色のある薄膜モジュールを展開しており、生産規模を拡大している。自動車車載が一つの大きなターゲットであり、ドイツを中心に自動車、半導体、材料、エレクトロニクスメーカーが積極的に取り組んでいる。新規素材で高性能のカゴ状中高温熱電材料に関しては、大型供給の体制を整えている材料メーカーもある。
中国	基礎研究	◎	↑	熱電国際会議の発表数からわかるように極めて活発に研究活動が行われている。大学・研究所に日米欧留学から帰国した研究者が研究活動を引っ張っていることや、人材派遣を含めた米国との密接な共同研究で底上げがなされ、論文発表数や質が徐々に向上し、論文数では米国と並びトップである。また、大型の拠点プロジェクトが複数走っており、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すでに出している。
	応用研究・開発	◎	↑	冷却と発電素子の両方を製造する会社が増え、活発な基礎研究と連携した製品開発を行っている。熱電変換、太陽エネルギー等の技術が更に伸び、先進国に輸出している。大型の拠点プロジェクトでも、電極接合や応用研究開発により力を入れ始めている。中国はマンパワーに秀でており材料の最適化研究にも強いので、今後さらに企業連携をとおした応用のための技術開発が加速すると予想される
	産業化	○	↑	産業化は発電素子よりも冷却素子を中心であり、国防、家電製品、電子デバイス、工業、医療、農業等への応用が進められている。現状では、日米欧と比較して、熱電モジュール作製技術や周辺技術が進んでいるとは言えないが、冷却素子のメーカーがあることと、基礎研究と応用・開発研究の活動レベルの上昇を考慮すると産業競争力の向上が予想される。
韓国	基礎研究	○	↑	本格的な参入は上記の国や地域よりも遅く、活動規模も小さかったが、大学・研究所の研究者も徐々に増えるとともに国家プロが立ち上がり、活発化している。理論研究やウェアラブル熱電のための有機材料や冷却応用のための Bi_2Te_3 系材料などに特に力を入れており、直近の ICT2015 では、開催国の米国、日本に次いで 3 位の参加人数で、存在感が増している

韓国	応用研究・開発	○	↗	大手有名企業が中心になって実用に向けた応用研究開発が活発であり、かなりのスピードで独自の材料を開発している。また、高性能熱電素子開発に取り組んでいるメーカーも徐々に増えている。特に、ペルチェ素子やウェアラブル熱電を目的とした薄膜や有機系材料に関する技術開発が伸びると予想される
	産業化	△	↗	サムソン電子が熱電素子を製造し始めている。また、大手の材料・エレクトロニクス大企業の熱電関連の発表が学会で増えていることから、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が示唆される。製品展開力が強いので、今後の動向に注目する必要がある。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 参考資料

- 1) Journal of Electronic Materials Vol. 42 (No.7), Vol.43 (No.6) (熱電国際会議 ICT2012, 2013 特集号)
- 2) ICT2014, 2014.7.6-10, Nashville, USA
- 3) MRS Fall Meeting 2013.12.1-6, Boston, USA
- 4) K. Biswas et al., Nature, 489, 414-418
- 5) B. Yu et al., Nano Letters, 12, 2077-2082.
- 6) 2nd Dresden Conference: Energy in Future, 2013.5.28-29, Dresden, Germany.
- 7) PACRIM10, 2013.6.2-7, San Diego, USA
- 8) TEP-CH2013, 2013.9.17-19, Duebendorf, Switzerland.
- 9) IUMRS-ICAM2013, 2013.9.22-28, Qingdao, China
- 10) CIMTEC2014, 2014.6.15-20, Montecatini, Italy
- 11) Thermoelectric Nanomaterials, Springer Series in Materials Science (Springer, Heidelberg, 2013).
- 12) C. L. Wan et al., J. Electron. Mater. 40, 1271-1280 (2011).
- 13) K. Yazawa, et al., Energy Conversion and Management 84, 244-252 (2014).

3.1.5 蓄電デバイス

（１）研究開発領域の簡潔な説明

既存の蓄電池（リチウムイオン電池を含む）が到達できないエネルギー密度を有する電池(*)を、理論的に設計・製造できる基盤技術を創出する研究開発領域である。最先端解析科学と計算材料科学を融合させ、デバイス内部の複雑な反応現象を解明して理論モデルを確立、試作・評価技術に展開して目的とする性能のデバイスを自由に設計・製造できる技術基盤を確立する。

(*)現状の技術レベルに対し、容量 5-10 倍以上、コスト 1/5-1/10 以下で、分散電源端末として大量に普及するレベル。300 W h kg⁻¹を超えて 500 W h kg⁻¹までのエネルギー密度を有する電池。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

〔背景と意義〕

新電池・キャパシタ分野は、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・温暖化対策としての電動車両用途にむけて市場が急速に拡大しつつあり、高信頼性、高出力特性など要求される性能が上がっていて国際技術競争が激化している。さらに、開発途上国の急激な経済成長などによる燃料価格の高騰や原子力発電の安全性への懸念などから、再生可能エネルギーの最大限の活用や非常用電源の確保などに向け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。

世界のリチウムイオン電池市場は、2014年に1兆2137億円に達すると予測されている（富士経済）。大型の車載用リチウムイオン電池に限れば、2014年に6579億円、2015年に9521億円に達すると見込まれている（矢野経済研究所）。こうしたなかで、わが国は高い材料技術基盤の上に産業界の経験的努力により当該分野で世界的競争力を構築してきたが、ここ7年程で日本の電池売上高は世界の70%から30%前後にシェアが低下している。しかしながら、韓国や中国も日本からの材料供給が電池製造の鍵となっている。最近になり米国や欧州の材料メーカーが電池材料に進出しつつあるが、電池に関する材料をすべて供給できる国は日本だけである。

将来大きく伸びると考えられる市場で日本の材料技術ならびにモノづくりおよび品質管理の強みなどを活かすべく、現行リチウムイオンの高性能化における開発競争に加え、次世代の革新的二次電池の研究に備える必要がある。

〔これまでの取り組み〕

従来の電池が有するエネルギー密度より大きなエネルギー密度を有しているため、リチウムイオン電池は定置用や電気自動車用に使用され始めている。今後、コスト面や技術面でのさらなる競争が激化するが、リチウムイオン電池はエネルギー密度の限界に近い電池が既に商品化されている。

次世代の蓄電デバイスでは、リチウムイオン電池より大きなエネルギー密度が必要となる。そのため、世界各国で、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。米国、欧州、韓国などにおいて、リチウム・空気電池や全固体電池など新しい電池への取り組みとして、共

同研究施設や国家プロジェクトが立ち上げられ、革新電池の研究を加速的に行おうとしている。現時点では、材料研究を中心に展開されており、電池システム研究へと進展していく。

米国 DOE で EFRC や ARPA-E、エネルギー・イノベーション・ハブ (battery & energy storage hub) など、基礎から応用・実証に至るまでの研究開発が戦略的に推進されている。グリーン政策の影響もあり、スマートグリッドなど再生可能エネルギーの負荷平準化などに利用する大規模定置型蓄電池の研究開発が盛んである。これらは米国にハイブリッド車を生産するメーカーが無いことなど産業構造的な理由が大きいと考えられるが、米テスラモーターズ社など有力な電気自動車企業や、関連してパナソニック エナジーノース米国社の進出など、特徴的な動きがある。欧州では EU 連合の中で電池プロジェクトが立ち上がっている。また、ドイツやフランスなどでは国が電池研究をバックアップしている。これまで基礎研究面では、世界的な潮流を作る新しい電極材料の発明、インターカレーション反応や相変化型電極反応などの固体電気化学分野での新しい現象の発見などは、欧米の研究機関から出てきているものが多い。

日本は、国際的にも見ても大規模な電池開発の国家プロジェクトが複数推進されている。基礎から応用にわたり広いスペクトルの研究を行っており、総合的にはトップレベルと言える。電池および電池材料の製造企業が数多くあり、電池研究の主流は移動体電源、特に電気・ハイブリッド自動車用の高エネルギー密度型二次電池、さらに従来型蓄電池の延長上には無い革新的タイプと位置付けられるポストリチウムイオン電池へシフトしている。市場規模が大きく産業競争力に貢献する自動車用電源を支援する電池基礎研究への投資が加速している。これらの企業の自助努力により研究が支えられている面もある。

論文数では日本は中国の後塵を拝する状況となっているなど、中韓が激しい価格競争のもとでの事業拡大を背景に研究開発レベルをも向上させつつある。

〔今後必要となる取組み〕

ポストリチウムイオンなど次世代蓄電池の研究開発には基礎研究の強化が重要である。すなわち、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。高性能化が進むとともに安全性と経済性の確保は益々難しくなるなか、こうした技術基盤の存在がなければ次世代蓄電池の実現は不可能といってよい。基礎・基盤研究の強化は、次世代蓄電池の実用化のみならず、足元のリチウムイオン電池の低コスト・高性能化にとっても重要である。さらに、基礎的な知見をいち早く実用化につなげるための、産官学連携体制の強化が必要である。

今後の研究開発課題としては、以下のようなものが考えられるが、そのなかで、ナノテクノロジーがひとつのキーテクノロジーとなっている。

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、新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（電池反応の直接観察・計測技術開発、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)

- 3.電池反応の現象解明と理論モデル構築（電池反応の直接観察・計測技術開発、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）

次世代蓄電池としては、全固体電池（硫化物系）、全固体電池（酸化物系）、リチウム・空気電池、リチウム・硫黄電池、多価イオン電池、その他の電池系が研究されているが、取り組まなければならない課題は電池系により異なる。次世代蓄電池の研究を進める上でも新材料研究の重要性は変わらない。特に電解質材料に関する研究はより重要となる。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。今後取り組まなければならない重要課題を電池系に分けて記述すると、

- ・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
- ・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・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
- ・その他の電池系：原理原則の確認と材料研究

となる。これらの電池系には、実験レベルのセルの状態で留まっているものもあり、可能な限り早く実際の電池を組んでの実験研究が求められる。そのためには、分析、解析、計算機科学などの分野のフォローアップも必須である。この場合には電池系の実験結果を元にして何を分析するのか、何を計算するのかを明確にしなければならない。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。

（３）科学技術的・政策的課題

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。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、ポストリチウムに限らずより広い電池系で行う戦略が重要と考えられる。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。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。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。

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)では、チームを中心に展開しており、これまでとは異なるプロジェクト体制となっている。しかし、より緊密な協力体制が求められる。得られた基礎的な知見や成果を如何にして実用化し社会へと還元していくのかをさらに議論しなければならないだろう。実際

に電池を製造し商品化した経験がないため、この道筋をどのように形成するのか、技術研究組合リチウムイオン電池材料評価研究センター（LIBTEC）のような組織との連携が非常に重要となる。ALCA や NEDO・RISING（革新型電池先端 科学基礎研究事業）のような組織との連携が非常に重要となる。ALCA や RISING、LIBTEC のより強い連携を形成していくことが電池研究にとって重要である。科学技術の進展が個人研究の範囲を超えて社会に大きなインパクト与えるには、各研究者の意識改革が必要である。国内のプロジェクトではこの点に関しても議論しながら進めており変革が期待される。政策的には、プロジェクトメイキングに対する基本的な考え方を創成していく、先駆けとなるプロジェクトとして位置付けることができるだろう。

海外では政府や民間資金の支援により有力大学に電池研究者を養成する学科や講座を置く動きが加速しており、将来においても日本の技術開発競争力を維持するためには、現在の高い研究ポテンシャルを継承し、世界をリードできる電池研究者・技術者の育成が極めて重要であり、産学官の総力を挙げた取り組みが求められる。

カリフォルニア州では、ZEV 規制（Zero Emission Vehicle）によって、州内で一定台数以上自動車を販売するメーカーは、その販売台数の一定比率を、プラグインハイブリッドカーやハイブリッドカー、天然ガス車、など排ガスが極めてクリーンな車両にしなければならないと定めており、こうした政策とのリンクが影響する。各国の電池研究開発が国策的かつ大規模になるにつれ、自国の産業構造をベースとした研究開発ターゲットが策定されるので、国情を反映した研究開発が行われていることも把握したうえで、日本の研究開発の方向性を検討していく必要がある。当該分野の基盤研究強化は、エレクトロニクス新デバイス創出の可能性を秘めており、新しい学術分野の開拓や将来のイノベーション誘発のきっかけとなることが期待される。人材育成も含めた幅広い研究戦略が必要となる。

（４）注目動向

〔新たな技術動向〕

エネルギー密度のさらなる向上のためには空気電池などに代表される革新電池が必要である。しかし、革新電池の開発に大きな進展をもたらすような知見は世界的に得られておらず、革新電池が将来において現在のリチウムイオン電池を超える電池になるのかどうか、多面的に検討しなければならない。

・革新リチウムイオン電池

負極材料および正極材料に関する研究が活発で、負極では Si に関する研究が多く、充放電の可逆性向上に向けた研究が行われている。また、Li 金属に関する研究も進展しており、今後 1500 mA h 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。一方、正極に関しては、Li リッチ系あるいは固溶体系と呼ばれる材料に関する研究が圧倒的に多く、 300 mA h g^{-1} 程度の容量が期待されている。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電池あるいはリチウム金属電池により、 500 W h 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。

・金属・空気電池

ガソリン車の貯蔵エネルギー密度に匹敵する 700Wh/kg 超級の蓄電容量を有する高エネルギー密度型電池の研究開発が世界各国で急展開している。米国では金属・空気電池やレドックスフロー電池などに DOE など国策で大きな研究投資が行われている。この研究投資は世界に向けて発信されており、欧・日の企業も参画している。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。空気極については、 Li_2O_2 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。しかし、充電時に過電圧が高く副反応を伴うことなど、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／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

硫黄は、放電電位が Li 金属基準で約 2 V と層状酸化物系に較べると低いが、 1675mAh g^{-1} の極めて高い比容量を持ち、ポスト LIB の正極として過去より注目されている。しかし、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。全固体型電池は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おり、有機電解液とほぼ同等のイオン伝導特性を示す固体電解質も日本によって発見されている。ただ、充放電に伴い電極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。

・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注目されている。例えば、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。しかも、マグネシウム金属極は、比較的低い酸化還元電位 ($+0.68\text{ V vs. Li}^+/\text{Li}$) 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。ただ、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が、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。

〔注目すべきプロジェクト〕

大規模プロジェクトとしては日本国内のものと米国のものが注目される。現状ではリチウムイオン電池あるいはその延長上の範囲内での現実に即した研究が多く、革新電池に関する研究は大きく展開されていない。革新電池の場合、これまでの電池開発とは異なり、大胆で挑戦的でありかつ実践的な研究が求められる。リチウム・空気電池につい

ては、従来のトヨタに加え、ホンダ、現代、BMW 等の大手自動車メーカーが研究を開始している。

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次世代電池のイノベーションを All Japan 体制で行っている。JST の ALCA・SPRING（先端的低炭素化技術開発—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）に共同研究拠点を置き国内大学・独法の研究者を集結し4つの重点課題にグループ編成した大規模な組織的研究開発がスタートしている。このような国内のほぼ全ての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かつ Under One Roof の体制の下で発足しているのは特筆すべきことと言えよう。

米国では DOE のエネルギー・イノベーション・ハブの一つ、battery & energy storage hub 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 倍の性能、1/5 のコスト実現が目標とされている。

韓国では、WPM (World Premium Material)において電池開発のプログラムが進められ、サムソンを中心に研究が進展している。大学や研究所と企業間の連携が緊密にとられている。日本での NEDO の RISING プロジェクトなどに比べて、韓国ではより電池システム側に立った研究開発が進展しているようであり、日本のプロジェクトとは異なる面を有する。

（５）キーワード

二次電池、蓄電池、次世代蓄電池、革新電池、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、エネルギー密度、現象解明、活物質、電極、界面

(6) 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	◎	↑	リチウムイオン電池 (LIB)、ポストLIB、キャパシタとも基礎研究は世界トップレベル。独創性の高いテーマ創出の観点では、欧米などに比べ必ずしも日本に優位性があるとはいえず、中期的には楽観できない。分析や解析をはじめ、材料の新合成などの重要な研究が行われているが、電池のシステム研究などは少ない。ALCAやNEDOなどの研究プロジェクト、研究グループは増加したが、連携に課題がある。トヨタ、ホンダがリチウム空気電池の研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↑	電池メーカーや材料メーカーを中心に応用開発研究が行われており、世界トップレベル。基礎研究で得られた知識や知見を産業化に向けてことが求められており、応用研究・開発の方法と連携組織としての位置づけについて明確な方向を示す時期であろう。
	産業化	◎	→	定置用および電動車両用や電力貯蔵用途も含め、標準品からハイエンドに至るまで幅広い実製品化を行っており、材料メーカーの参画も含め世界的に最も産業化が進展していると言える。世界で市場が急拡大しており、今後はより高いレベルでの産業化が必要。足元のLIBの低コスト高性能化のみならず、次世代二次電池の開発・実用化についても、産官学が連携し研究成果の迅速な実用化展開が必要となるが、多くの関係組織の力の統合を促進する政策が必要となっている。
米国	基礎研究	◎	↑	DOEを中心に大きな研究費が配布されており、多くの研究者が参画している。ポストLIBなど次世代二次電池に関わる基礎研究が盛ん。米国国内の国立の研究所のほとんどが多かれ少なかれ研究を行っており、大きな基礎研究体を形成している。特にアルゴンヌ国立研究所はDOEと密接に関係し米国の基礎研究をマネジメントしている。
	応用研究・開発	○	↑	ベンチャー企業や国立研究者などを中心に産業界に向けて応用開発研究が行われているが、次世代電池に関する研究が多い。大学発のベンチャー企業がいくつか出てきており期待されるが、電池メーカーとして有力な企業が乏しく応用開発研究のスピードがそれほど速くない。逆に中途半端な開発を基に製品化しようとするグループも見受けられる。
	産業化	△	↑	電池製造に関する産業は一次電池では存在するがリチウムイオン電池ではない。ベンチャー企業も多くは生産を海外で行っており、代表的なA123社も売却され、産業としては定着していない。化学・素材メーカーの一部が基礎素材の提供を行っているが、全体としての産業展開は不透明である。
欧州	基礎研究	◎	↑	LIBおよびポストLIBについて、各国が協力して基礎研究を進めている。欧州共同体として強みを生かしたプロジェクトがあり、材料を中心に基礎研究が進展しているといえる。ボルドーのグループなどいくつかの研究組織で活発な研究が行われている。ドイツも最近では基礎研究に力を入れている。Goodenoughの酸化物正極に関する発見も英での研究成果であり、材料および反応に関する研究ポテンシャルは高い。BMWがリチウム空気電池の研究を行っている。
	応用研究・開発	○	↑	最近ではドイツやフランスで大手化学メーカー (BASFやメルクなど) が参画し始めており、今後の動きが注目される。ただし、現時点では有力な電池メーカーが少なく、研究テーマなどは日本に求めている面もある。
	産業化	○	↑	ドイツとフランスの国営的な企業を中心にリチウムイオン電池の生産が行われているが、日本に比べると規模は小さい。ベンツなどの自動車会社での電池開発が進展すれば欧州での電池製造が増えるかもしれない。材料関係の企業は欧州にあり、今後の動向が注目されるが海外に生産拠点を設ける場合が多くなるであろう。
中国	基礎研究	△	↑	中国での基礎研究への投資は増加しており、装置が充実してくれば研究も進展すると考えられる。現時点では日米欧で提案された考えに基づくものが多い。また材料研究が中心で、電池システムについてはこれから。

	応用研究・開発	○	↗	電池製造に関する研究にしても、材料に関する応用開発にしても自国の研究は少ない。海外から企業が参画し、中国での応用開発研究を推進している。今後は、応用研究を充実させていくものと思われるが、研究体制など整備しなければならない課題が多い。
	産業化	○	↗	800社近くの電池メーカーがあり、多くの電池を国内向けに生産している。また、海外の企業の進出も著しい。製造レベルは低く、電池の安全性や性能では問題となっている。一方、コスト面では優位に立っている。特許の問題はグレーのままであり、国際化していくための課題である。また、電池の安全上の問題を抱えており、国内産業として産業化大いに進展しているが国際化することは難しいであろう。
	基礎研究	○	↗	ポストLIB系について、Li/S系などで独創的な基礎研究が行われている例があるが、国の政策も産業化への傾斜があり、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。しかし、分析および解析面でも進歩しており、大学、研究機関、企業ともに活発に研究を推進しはじめているので、今後の動きを注目する必要がある。 現代自動車ガリウム空気電池の研究を行っている。
韓国	応用研究・開発	◎	↗	市場シェアでトップをとることに集中したりリソース投入が行われている。技術開発は日本や米国で提案された手法を踏襲したものが多く、低コスト化の可能な手法で性能・信頼性を担保するという開発が進んでおり、実用技術開発での成果はすでに日本を凌駕している部分もある。
	産業化	◎	↗	国策としての電池開発強化のもと、財閥系グループの電池メーカーが急速に成長してきており、開発水準も年々向上している。日本企業の競争力が衰えるのに従い人材流出もある。ウォン安など経済環境の効果などにより市場シェアが増大し、民生用のみならず、次の大きな市場である電動車両用途に向けても、日本の強力なライバルとなり得る。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、
△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 参考資料

- 1) CRDS-FY2011-SP-03 戦略提言「エネルギー分野研究開発の戦略性強化」
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2011/SP/CRDS-FY2011-SP-03.pdf>
- 2) CRDS-FY2011-SP-04 戦略イニシアティブ「次々世代二次電池・蓄電デバイス基盤技術」
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2011/SP/CRDS-FY2011-SP-04.pdf>
- 3) Electrochemical Society Meeting in Hawaii, October 2012, Abstract.
- 4) International Lithium Battery Meeting in Cheju, June 2012, Abstract.
- 5) 米国 DOE, <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/m/index.htm>
- 6) 王 子冬、「中国での動力用電池の安全性評価の取り組み」、日経 BP Techon セミナー「第1回 日中電池サミット」(2012/5/21、東京)
- 7) Jiqiang Wang, "R & D Activities & Some Achievements of the Battery Energy Storage Programs in China", the 5th International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications (2012/9/17-20, Istanbul).
- 8) The 17th International Meeting on Lithium Batteries (2014)

- 9) 第 54 回電池討論会 要旨集 (2013)
- 10) 7th International Conference on Advanced Lithium Battery for Automobile Applications (ABAA-7), abstract (2014)

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）を実現する研究開発領域である。SiC、GaN、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体はSiに比べて原理的に内部損失が小さく高効率化に優れるが、結晶品質向上、ウェハの大口径化、物性制御、デバイス構造、作製プロセス、高精度の熱設計・パワーマネージメント、モジュール・回路技術、周辺部材・受動部品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動向

〔背景と意義〕

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、日本は、高度経済成長期以降、電力消費量とあわせて電力化率を継続的に高めており、現在の約25%から2050年には50%を越えるとの予想もある。このため、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、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や、電車や電気自動車のようにモーターを制御するときのロスを低減させることが重要であり、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）を用いたものであるが、Siの材料定数による限界によるデバイス性能の限界が広く指摘されており、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が開発できれば、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、工場、家電のインバータ、情報機器の電源など極めて広範囲での省電力化につながる。

また、新たな可能性をもつ酸化ガリウム（Ga₂O₃）、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。

〔これまでの取組み〕

Siに関しては、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、性能を向上させてきた。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、特に高耐圧系は欧米と伍して優位な立場を維持している。低耐圧系に関しては、市場がディスクリートからシステム電源へ移行しており、厳しい競争に迫られている。ここでは、産業競争力を有

している 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。

SiC に関しては、ウェハで米国 Cree 社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な状況になりつつあり、一部のメーカーは 6 インチウェハの出荷も行っている。基板の欠陥密度についても大きく改良が進んでいる。中国（台湾を含む）は新規投資により参入を始めた。SiC パワーデバイスとして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。一般の回路技術者にもその存在が浸透しつつあり、すでにエアコンの省エネ型インバータや鉄道車両用インバータとして実用化が始まっている。SiC の MOSFET に関しては、Si IGBT よりも優れたデバイス性能の空乏型の DMOSFET が一部のメーカーで市販が開始され、いよいよ普及を狙う段階にきている。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。

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、サファイアや Si などの異種基板の上のヘテロエピタキシャル成長層を用いたデバイス開発が進められており、Si 基板上に成膜した GaN ヘテロ接合 FET (HEMT) でパワーデバイスを作製する GaN on Si (GaN/Si) が大きく進展している。数百ボルト級のデバイスとして米国 IR 社、EPC 社が先行して商品化を行ったが、カリフォルニア大学サンタバーバラ校発のベンチャーである Trasnphorm 社が活発に製品開発、学会でのアピールを進めており、存在感を増している。日本国内でもパナソニックをはじめとした数社が GaN/Si デバイスの商品化をアナウンスしている。自立 GaN 基板については、2 インチ径程度の基板が少量生産されているが、まだ欠陥密度が高く、量産性を含めた基礎研究が今後必要である。パワーデバイスとしては通信用高周波パワーデバイスとして移動体通信分野での実用化が先行している HEMT の他に、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) の研究も進められてきた。

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、そのドーピング技術を用いて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) などの通常の半導体のデバイス構造の検討も進められている。また、ダイヤモンドの電子放出源としての働きに着目した新規構造デバイスなどの検討も進んでいが、可能性実証の段階にある。

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、n 型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、 Ga_2O_3 自体を半導体デバイスに使う試みが数年前から試みられるようになってきており、ショットキーダイオードや MESFET などの試作が行われて

いる。まだ萌芽的段階であるが、研究開発用に基板が市販されはじめたので、今後研究者が増える可能性がある。

〔今後必要となる取組〕

Si パワーデバイスよりも性能的に優れ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、特に Si の置き換えではなくワイドバンドギャップの特性を活かした新機能装置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。特に、SiC はデバイス製品が上市されているため、基礎研究は終了したと思われがちであるが、MOS 界面をはじめ未解明の点が多々ある。現状は一部の特性を犠牲にして製品化を行っている状況であり、しっかりした基礎的研究を進め、物性制御やデバイスプロセスを確立することで、さらに性能向上できる余地が大いにある。

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も進みつつあり、SiC パワーデバイスのように同種基板上に縦型パワーデバイスを作製できる可能性もある。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て、GaN 基板上 GaN 縦型パワーデバイスの研究も必要と考えられる。

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、ドーピング制御、コンタクト、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、絶対耐圧を出すための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、高温動作に対応できる部品（コンデンサ、コイルなど）や放熱性に優れたパッケージなど、材料科学に立ち戻った研究も行う必要がある。また、付加価値を高め世界をリードできるように、回路、パワーモジュール、システム化技術においても強化する必要がある、ワイドギャップパワー半導体の特性を積極的に活用したこれらの研究開発も重要になってくる。

（３）科学技術的・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、シリコンパワー半導体を中心にして、ワイドバンギャ

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きている。また、中国（台湾を含む）、韓国が、自身のファブ能力を活用してシリコン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の両輪を国策として進めていく必要がある。

Si は、研究開発といえども既に装置産業規模での取り組みが必要なレベルにあること、大学や公的研究機関、企業の双方に開発投資を含め種々の困難を抱えていることから、国レベルでの取り組みが必要である。

ワイドギャップ半導体パワーデバイスの研究開発では日本は先行しているが、今後の本格的なワイドギャップ半導体パワーデバイス時代が到来することを考えると、研究開発はまだ不十分であり、十分な措置をとらなければ現在の優位性を保持できない。パワーデバイスは LSI 技術とは異なり、用途により扱うべきパワー・周波数などが多岐にわたる。パワー半導体自体も、材料・電子物性において各々が固有の特性を有している。また、産業競争・市場が、これまでのディスクリート半導体から装置・システムへの転換が進んでおり、日本においても、応用分野（家電、電気自動車、鉄道、電力インフラ）を念頭に適切な研究開発を進める必要がある。

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り、研究の担い手であるポスドクを含む博士研究員の役割を再認識し、国のプロジェクトでの彼らの雇用を奨励し、プロジェクト終了後には産業界への円滑な移行を促進するなどの仕組みの検討も必要である。

（４）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

〔新たな技術動向〕

・ Si

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。

・ SiC

Si トランジスタと SiC-SBD を組合せたパワーモジュールの製品化が先行しており、家電や鉄道車両への SiC パワーデバイスの利用が拡大している。また、太陽光発電やエレベータなどの DC-AC コンバータ応用にも SiC の製品化が始まっている。さらに、縦型トレンチ構造を主構造に用いた SiC-MOSFET と SiC-SBD を用いたフルパワーモジュールの出荷も開始された。SiC 基板については、日米欧から 6 インチ径基板の製品化が相次いでいる。台湾が精力的に SiC に関して結晶からパワーデバイスまで一貫した研究開発を活発化させている。韓国や中国と異なり、台湾には Si パワーデバイスファブの経験、産業があるので、今後急速に立ち上がる可能性がある。

・ GaN

Si 基板上の GaN エピ技術を用いて、米国企業が低電圧対応の GaN パワー HEMT の製品化で先行している。一方、600V 応用を想定したパワー HEMT のサンプル出荷は、日米の複数企業を中心に始まっている。研究開発では、安価な大口径 Si 基板を使う技術と、性能向上を狙って低欠陥密度の GaN 基板を使う技術の 2 極化が進んでいる。なかでも、米国ベンチャーにより GaN 基板上の高耐圧縦型デバイスの研究成果が活発に行われ、耐圧とオン抵抗の相関特性において、理論限界を超える性能が報告されており注目されている。

新しいワイドバンドギャップ材料として、日本から Ga_2O_3 のデバイス基礎実証の報告が始まっているが、欧州で同様のプロジェクトが始まりつつある。

〔注目すべきプロジェクト〕

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ることで、優位性の確保を狙っている。

米国で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つつあり（The Next Generation Power Electronics Innovation Institute, Power Electronics Manufacturing Consortium など）、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つつある。これらは、産業創出、社会実装を念頭に産学の確固たる連携で計画されており、日本にとって脅威となりうる。また、将来の産業競争力を念頭に米国 APRA-E で、ADEPT（Agile Delivery of Electrical Power Technology）に加え、SWITCHES（Strategies for Wide-Bandgap Inexpensive Transistors for Controlling High-Efficiency Systems）が始まり、SiC、GaN、ダイヤモンドなどのパワー半導体研究に投資がなされている。DARPA の NEXT プログラムでは、GaN の高周波パワーデバイス研究が進行している。

欧州では、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）などが進められている。また、デバイス、回路、パッケージ、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。SiC パワーデバイスのプロジェクト SPEED（Silicon Carbide Power Electronics Technology for Energy Efficient Devices）、GaN 半導体の極限性能追求を目的とした MORGAN（Materials for Robust Gallium Nitride）や AL-IN-WON（AlGaIn and InAlN based microwave components）、高温高出力対応のパッケージ開発を目的とする AGAPAC（Advanced GaN Packaging）、SiC 基板上の GaN 成長に関する EUSIC（High Quality European GaN-wafer on SiC Substrates for Space Applications）、ノーマリーオフ動作の HEMT に関する HiPoSwitch（GaN-based normally-off high power switching transistor for efficient power converters）などのプロジェクトが進められている。

国内では、つくばイノベーションアリーナ（TIA-nano）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ており、この中で、2009年度末より(2013年度末まで)内閣府の最先端支援プロジェクトの一つとして、木本恒暢教授を中心研究者とする「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年度より(2014年度末まで)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」が実施された。また、2012年4月に産総研と産業界と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ている。また、JSTのスーパークラスタープログラム(2013年～)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が図られ、SiCデバイスおよびGaNデバイスの研究開発が行われている。

Siパワー半導体のその競争力維持を念頭に、産学連携で新世代Si-IGBTプロジェクトが始まった。また、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、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に関する産学連携プロジェクトが進められている。

(5) キーワード

- ・パワーエレクトロニクス、パワー半導体デバイス、IGBT、MOSFET、SBD、HEMT、HBT
- ・パワー半導体、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、Ga₂O₃
- ・高効率インバータ、高周波インバータ、電力変換、超高压送電、HVDC、スマートグリッド

(6) 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	◎	→	Si系パワー半導体は、新たなウェハ材料技術開発が報告されるなど、従来の限界を超える開発が始まっている。SiCはFIRSTプログラムで超高耐圧SiC-IGBTの試作に成功するなどの成果をおさめている。GaNは、GaN基板の欠陥密度低減やAlGaN/GaN-HEMTの高耐圧化などに関して重要な研究が行われている。新材料として、よりバンドギャップの大きなダイヤモンド材料・素子開発が進められ、酸化ガリウムの研究が立ち上がりつつある。
	応用研究・開発	○	→	Si系パワー半導体は、デバイス企業での開発が主である。SiCやGaNは、デバイス、電源企業からの製品化発表（予告を含む）、電車（試験導入）や家電機器（商品）への搭載が始まっている。SiCに関しては、低コスト化を図るために6インチ基板の品質向上に対する取り組みが活発になっている。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。
	産業化	◎	→	Si系パワー半導体は、東芝、三菱、ルネサス、富士電機などが世界市場のなかで、高い産業技術力を有している。その競争力維持を念頭に、産学連携で新世代Si-IGBTプロジェクトが始まった。SiCの事業化に関してはローム、三菱電機が非常に活発であり、住友電工や富士電機なども取り組みを本格化させており、世界トップ水準にある。GaNパワーモジュールに関してはやや実用化が遅れており、GaN FETについては、複数社からサンプル出荷が始まっている。
米国	基礎研究	◎	→	ICTや民生家電を対象とする低耐圧系のパワー半導体は集積化・IC化に向かっており、半導体とあわせて磁性体、集積化技術など大学を中心にした産学連携コンソーシアムで推進し、世界の先駆的発表を行なっている。SiCやGaNは、大学発の技術がベンチャーを含む企業群に移行し、大学は要素技術、評価などでさらなる開発を支えている。GaNに関する研究が精力的に進められており、中でもUCSBとMITからの発表数が多い。また、ARPA-E (SWITCHES) において、さらにワイドバンドギャップ系を発展させる試みが国家レベルで始まった。
	応用研究・開発	◎	→	低耐圧集積化パワーチップは開発力が高い。また高耐圧系に関しては、大学主導で米国内にあるワイドバンドギャップ系半導体企業とも連携し、次世代グリッドを見据えたシステム研究を展開している。SiCやGaNなどは、ベンチャーから始まった企業群が製品、R&D品の市場供給を積極的に展開している。SiCのMOSFETの特性改善が報告されており、電力ネットワーク用SiC超高耐圧パワーデバイスの研究も行われている。GaNに関しては、実用化に向けて縦型、横型FETの低オン抵抗化、高耐圧化が着実に進んでいる。
	産業化	◎	→	低耐圧集積化パワーチップ、特に電源は世界市場で最も強力な立場を有している。SiCやGaNでも特にウェハ材料において競争力を有する企業（Cree、ダウコーニング）を有しており、R&D市場で世界を席巻している。GaNデバイスは、Transphorm社、EPC社、IR社の3社が商品化しており、先行している。産業競争力の強化、新規産業の創出などを念頭にした垂直統合・集中型プロジェクトがNew York、North Carolinaなどで始まった。
欧州	基礎研究	◎	↗	Siパワーデバイスは、低耐圧、高耐圧ともに、極めて高い基礎研究力を有しており、英国、ドイツ、スイスなどから多くの先駆的発表が行われている。SiCでは既にスウェーデン、ドイツが世界トップ水準にあり、基礎研究、応用FS研究で高水準の成果が報告されている。GaNでは国の研究機関が活発な研究を行っており、主にGaN FETの開発をマイクロ波応用と併せて積極的に進めている。いずれも、材料化学、基礎物性のみならず、プロセス基礎研究まで含めて大学や国立研などが高水準研究を続けている。

	応用研究・開発	◎	↑	ECPEの活動に見られるように、欧州では産業界を中心にした産学連携がうまく機能し、大学や国立研での要素技術、システムFS実証が、企業への人・技術の移転にうまくつながっている。また欧州の地域性を利用して、PV、風力、海流、原子力などの多くの電力源からなる電力ネットワークが構成されていることから、システムレベルでの次世代技術開発、実証で新しくかつ高度な成果を発表している。GaNの応用研究はInfineon、IMEC、NXPなどメーカー主導的に進められ、IMECを拠点としたプロジェクトもスタートしている。
	産業化	◎	↑	パワー半導体、およびそれをキーコンポーネントとした電力・エネルギーシステムともに世界的競争力を有している。特に、社会インフラ系システムは圧倒的に強い。この競争力維持を念頭に、特にシリコンに関して、EPPL、EPT300を欧州プロジェクトとして進めている。SiCパワーデバイス、SBDに関してInfineonが先行してディスクリート素子、SiC SBDを組み込んだモジュールなどを販売している。EpiGaNやEPFL(スイス)がGaNエピウエハを商品化している。
中国	基礎研究	△	↑	欧米からの研究者招聘(自国出身、外国出身)、重点拠点化整備を行うなど、急激に強化策がすすめられている。SiCやGaNパワーデバイスに関係する学会や論文誌の掲載論文数はここ1～2年間で急速に増加している。また、盛んに国際学会誘致・開催を行っており、情報収集も政策的に行なっている。パワー半導体は、シリコン、GaNで香港大学などが高い研究水準を構築しており、2015年度パワーデバイス国際会議(ISPSD)のホストを務めるに至っている。GaNで積極的な研究を行っている香港科学大学(HKUST)では、特に新構造のトランジスタの開発に力を入れている。
	応用研究・開発	△	↑	欧米の企業が中国進出を果たしていること、また昨今の情勢により日本も含めて世界中の企業の買収、研究者・技術者招聘を試みており、これらを連携させた独自技術開発の可能性がある。SiCではまだ目立ったものはないが、HKUSTなどは、GaNトランジスタの実用化で障害となる「電流コラプス」の改善などにも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。
	産業化	△	↑	SiCバルク結晶やSiCエピサービスを行うベンチャー企業が存在する。SiCバルク結晶(例えば、Takeblue社やSiCC社)については、まだ、Cree、ダウコーニング、SiCrystal、新日鐵住金にはおよばないが、技術レベルは上がりつつある。
韓国	基礎研究	△	↑	大学や国立研が徐々にではあるが研究水準を高めつつある。ワイドバンドギャップ系パワー半導体はいくつかの国プロが行われている。既存のLSI、LEDなどの関連技術の導入、諸外国との連携模索などが試みられている。SiCについては韓国企業が明確に興味を示しており、今後産学連携などの体制で追いついてくる可能性はある。GaNに関してはLED、LDに関して多くの経験を有する企業・大学があり、GaNパワーデバイスに転向してくる可能性がある。
	応用研究・開発	△	↑	大学や国立研は、まだ発展途上である。一方で、企業(Samsung、LG Electronicsなど)が勢力的に、かつスピードを伴ってパワー半導体関連の技術開発を進めつつある。今は、独自技術開発ではなく、他国からの技術導入の状況にある。
	産業化	△	↑	LSI系では実力のある企業が存在しており、パワー半導体への展開を始めている。また、これらの企業に加え、これまで異種分野にいた企業群が、特にワイドバンドギャップ系パワー半導体へ新たに参画することを模索している。SKCはSiC事業に取り組むことを表明している。

(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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↓ : 下降傾向

（7）参考資料

- 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、ICNS 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) <http://arpa-e.energy.gov/>
- 6) http://cordis.europa.eu/home_en.html

3.1.7 グリーン触媒

（１）研究開発領域の簡潔な説明

基礎化成品合成、ファインケミカルズ合成、環境負荷物質の低減のための触媒を対象とした領域である。基礎化成品合成においては、非在来型資源（バイオマスやシェールガスなど）を活かした転換用触媒、多段反応を一段などより少ない反応回数で且つ選択的に穏和な条件で利用できる触媒など、ファインケミカルズ合成では、従来の低分子触媒では実現できない精密合成を可能とする触媒、環境負荷物質の低減においては、自動車排ガス処理触媒の元素戦略的観点などが課題となる。

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している。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

〔背景と意義〕

現在の高度な文明社会を支える化学技術・工業で稼動する化学プロセスの90%以上が触媒反応であるといわれるほど触媒の貢献は大きい。一般論としては、すでに現状のプロセス技術は飽和しつつあり、向上の余地が小さいものの、化学産業を環境、資源利用効率、エネルギー効率的な観点からみると大きな改善の余地が残されている。前者としては、バイオマス転換やシェールガス利用など、資源とリンクした新たな化学工業体系の構築が望まれており、後者としては、現行の官能基変換プロセスの高効率化、低環境負荷な原料を用いた新しい合成ルートの開拓、プロセスの安全性・経済性の向上などが急務であり、これらの課題を解決する糸口になるのが、真に力量のある触媒（高活性、高選択性、長寿命）の開発である。

触媒研究は野依（名古屋大学）、鈴木（北海道大）、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。

〔これまでの取組み〕

グリーン・サステイナブル ケミストリー（GSC）の視点からみた不均一系触媒の適用対象には、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。シェールガスなどの低級不活性アルカンの転換のために、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、投入エネルギーに見合う効果が得られるかが課題となっている。ポリマー合成触媒としては、オレフィン-ジオレフィンの立体特異性ランダム共重合、オレフィンブロック共重合体の触媒的合成などが研究されている。また、元素戦略に基づく自動車排気ガス処理触媒（Pt/Rh/Pd 等貴金属使用量の低減）も重要な対象である。

これら不均一系触媒の活性・選択性は、一般的には均一系触媒よりも劣るとされるが、最近では均一系と同程度あるいはそれらを凌駕する触媒能を有するものが見出されつつ

ある。また、不均一系触媒ならではの反応の開発もされている。ゼオライトを触媒とした気相ベックマン転位、金-酸化ニッケル触媒によるメタクリル酸メチル製造プロセスなどが国内企業により低環境負荷プロセスとして実用化され運転されている。

均一系触媒分野（有機分子触媒や有機金属錯体触媒）では、分子構造や配位子の精密分子設計に基づいた触媒の分子・原子レベルでの設計指針の確立や、精密有機合成（基礎化成品を含む）に関する反応開発において、我が国の研究開発レベルは極めて高い。デザインが容易に行える有機分子のみならず、酸化反応に有効な無機物のみからなる無機分子触媒もある程度自在に合成できるようになっている。例えば、欠損型分子性酸化物ナノクラスターを設計し、それを“分子鋳型”として種々の金属を個数や配位様式を精密に制御して導入することで、機能性無機分子触媒の合成にも世界で初めて成功している。

米国は基礎研究、産業化の双方で先端を走っている。欧州は基礎研究から産業化まで高い能力を有している。中国は日米欧を急速に追い上げており、特に有機合成分野（触媒や新反応開発）で力をつけてきている。

日本においても後述する複数の科研費新学術領域をはじめ、先導的物質変換領域（ACT-C）他、JST 戦略創造事業（CREST、さきがけ）の元素戦略、分子技術、超空間などの各領域において、触媒研究の課題が多く実施されている。

〔今後必要となる取組み〕

基礎化成品の製造プロセスでは、資源の有効利用、省エネルギー、環境負荷低減が求められており、これらニーズに応じてさらなる高機能触媒や新しい概念の触媒の開発が必要不可欠となっている。多様な資源への対応という観点では、不均一系触媒が特に重要と見られ、木質系バイオマスやシェールガス（メタンおよび随伴するエタン・プロパン）を原料とした化学反応の体系化、多様化、高性能化が望まれる。メタンに代表される低級アルカンからのブテン・ブタジエン・BTX 合成などが重要な反応として考えられる。また、アンモニア合成、メタノール合成、メタン改質などの平衡制約が大きく、反応条件の大幅な緩和が望まれる反応の高効率化、環境触媒（排気ガス浄化）や光触媒の大幅な高性能化、活性成分としての担持金属の脱貴金属化などが望まれる。

ファインケミカルズ合成分野では、還元反応、酸・塩基反応などに比べて酸化反応の開発が圧倒的に遅れており、高機能酸化触媒の開発が切望されている。例えば、種々の有機基質の含酸素有機化合物への変換と脱水素反応に代表される酸化的官能基変換は、いまだに量論量以上のクロム、マンガン、鉛等を含む重金属塩、次亜塩素塩、硝酸などの試薬が用いられているケースがあり、毒性重金属塩の処理等の問題も抱えている。高機能酸化反応触媒開発には、酸素や過酸化水素などのグリーンな酸化剤を効率よく活性化するための活性点構造が必要であるだけでなく、耐酸化性を付与する必要があるため、不均一系触媒が望ましい。活性な（無機）分子触媒をリンカーなどを介して規則正しく配列させたり、担持金属種のサイズや構造の厳密制御、結晶性酸化物の使用など、これまでにない分子論的な観点からの触媒設計が必要不可欠となる。

有機機能材料、医・農薬などの生理活性物質の合成のため、鈴木カップリング、根岸カップリング、溝呂木・ヘック反応に代表されるパラジウム触媒を用いたクロスカップ

リング反応の利用頻度が増えている。しかしながら、これらの反応は活性化された化合物を基質として用いる必要があるため、大量の廃棄物生成や多段階合成に由来する合成効率の低下などの問題点がある。近年、C-H あるいは Y-H (Y = ヘテロ元素) 結合の直接脱水素型クロスカップリング反応が高い原子効率を有することや一段階合成法であることから注目を集めており、特に、酸素を酸化剤とした脱水素クロスカップリング反応のための触媒開発が必要となる。

医薬品の中間体製造においては、鏡像異性体など分子式は同じでも構造が異なる分子を作り分けできるような触媒が必要である。従来型の分子触媒(数百の分子量)でも反応の種類によっては高い触媒活性と選択性を示すが、その特徴は高い反応汎用性にあり、より高度な立体化学制御を行うには限界がある。そのため、活性点近傍のみならず、その周辺構造の親・疎水性制御、3次元構造制御、特異的な基質の取り込み・識別能の付与など、いわゆる反応活性空間制御を目指した新たな取り組みが必要となる。

(3) 科学技術的・政策的課題

不均一触媒の研究は泥臭く、均一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。

政策的な課題としては、当該分野の若手研究者を育成していく取り組みが必要である。基礎研究に関しては、2013年1年間に主要な触媒専門国際ジャーナル(13誌)に発表された4846報の論文のうち、我が国は347報(バイオマス転換10報、メタン転換9報、GSC分野11報を含む)と、世界におけるシェアが下がっており、米国の1/4程度、中国の半分程度となっている。

(4) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

・日本

Mo-Bi系触媒によるプロピレン気相酸化、銀触媒によるエチレンオキシド合成、Rh触媒によるヒドロホルミル化、Pd合金触媒による液相酸化、ハロゲンフリーワッカー触媒などが商業化・実用化されてきた。

特筆すべきものとして、ナイロン6の原料となるε-カプロラクタム合成への不均一触媒の適用が挙げられる。ε-カプロラクタムは従来硫酸を触媒としたシクロヘキサノンオキシムのベックマン転移によって生産されてきたが、この方法では均一系触媒である硫酸の分離、処理に大きなエネルギーを必要とする。住友化学によって規則性無機酸化物ナノ多孔体であるシリカライトをベースに開発された不均一系触媒を用いた「気相ベックマン転移」はこの問題点を解決し、低環境負荷プロセスを可能にした。

メタクロレインの酸化メチルエステル化法(直メタ法)において、旭化成によって開発された金-酸化ニッケル触媒は従来の触媒と比べて圧倒的に高活性・高選択性を示し、

触媒寿命も長い。この触媒を用いたプロセスは、海外メーカーへのライセンスやジョイントベンチャー計画も進められている。また、本触媒は直メタ法以外にも様々な酸化反応にも高活性を示すことから、他の酸化反応の実用展開も検討されている。

・世界

現在進行している産業プラントプロジェクトに関しては、2012年までは中国が1位であったが、シェール革命の影響により米国が急増し中国を上回った。また、インドやロシア、イラン、メキシコ、ブラジルが多く、シンガポールやドイツは減少傾向である。とりわけ、北米でのアンモニア・エチレンプラントの増加は驚くべき状況である。以下に用途別に状況を概説する。

ガスから液体燃料を作る FT 反応（鉄系・コバルト系などの不均一系触媒）に関しては、ナイジェリア、米国（いずれも Sasol 技術）、ウズベキスタン、小規模ながらロシア、また石炭起源としてモザンビークでの 9500 バレル/日（Vale/Uhde 技術）のプラント建設・設計が進められている。

石炭（褐炭含む）やバイオマスのガス化については、中国が最も精力的であり、アンモニア合成やメタノール合成のための大規模ガス化プラントが数百基建設され、500 kt/日を上回る大量の石炭が化学品へと転換されている（うちアンモニア合成 50 kt/日、MTP によるプロピレン合成 20 kt/日、メタノール合成 100 kt/日以上）。また豪州では褐炭のガス化による二酸化炭素フリー水素合成の研究開発が進む。

ゼオライト触媒を用いた軽質炭化水素製造のための流動接触分解(FCC)については、印 7 基・越・ウズベキスタン・カザフスタン・アンゴラ・湾岸協力会議（GCC、含むイラク）10 基・露 3 基・独・加・墨 2 基・コロンビア・伯・ペルーでの建設が進み、また水素化分解プロセスについては中・印・ナイジェリア・アンゴラ・露・ブルガリアなどの東欧・GCC・中南米諸国・米・加で進められている。

水素や合成ガス製造のためのナフサの水蒸気改質/部分酸化（ATR 含む）については、中・露・ブルガリア・埃・比・印・GCC・中南米・米・加で進められている。得られた炭化水素の異性化によるオクタン価向上においては、印・ウズベキスタン・アルジェリア・露・イラク・UAE・チリで建設が進む。

アンモニアは現在世界中で 1 億 6000 万トン/年生産され、肥料や各種化学品、近年はエネルギーキャリアとしても注目されている。我が国では北野・細野（東工大）らによる Ru/エレクトライド触媒など新たな報告が相次ぐ。世界では印・中・インドネシア・豪・アルジェリア・埃・仏・露・アゼルバイジャン・トルクメニスタン・UAE・イラン・南米・米で大規模に建設が進められている。

プラスチックの原料となるモノマー合成に関しては、4 大汎用プラスチックである PP・PE・PS・PVC、ならびに PET、PMMA の各モノマー合成プラント建設が進められている。最も生産量の多いエチレンについては、従来は石油留分由来で無触媒でのナフサクラッカーによるエチレン合成が主であったが、近年はシェールガス随伴あるいは石油随伴のエタンを脱水素する無触媒でのエタンクラッカーの大規模な建設・計画が北米・GCC を中心に 30 以上進められている。プロピレンは従来は上記ナフサクラッカー由来が多かったが、近年はルーマスなどによる触媒脱水素プロセスが印・台湾などでいくつ

も建設・計画されている。スチレン合成はエチルベンゼンの鉄カリ系触媒による脱水素により行われ、印・イラン・韓・伯での大規模プラント増設が進められている。メタノール合成についてはメガプラントがナイジェリア・イラン・米で建設・設計が進められている。MMA についてはサウジアラビアで建設が進む。PE 重合は 50 以上の建設・設計が露・GCC・イラン・埃・中・印・墨・米で進められ、PP 重合は 15 以上、PS 重合はサウジアラビアで、PVC 重合は中・露・イラン・墨・米で、PET 重合はオマーン・米で、キシレンプラントはシンガポール・韓・アルジェリア・ルーマニア・サウジアラビア・イラン・墨・伯で 20 以上が建設・設計中である。

[注目すべきプロジェクト]

・不均一系触媒

- NEDO の「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のグリーン化などを目標に研究開発が進められてきた。また、経済産業省の未来開拓技術実現プロジェクトの中で、光触媒により水分解で創り出した水素と、産業界から排出され回収した二酸化炭素から、基幹化学品を合成するための触媒開発が開始されている。
- 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 年度～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。
- 平成 27 年度からは、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」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る予定である。

・均一系触媒

文部科学省科研費新学術領域研究において精密有機合成の分野で注目すべき研究開発が進められている。

- 「反応集積化の合成化学 革新的手法の開拓と有機物質創成への展開」(領域代表：吉田潤一(京都大学)、平成 21 年度～)では、通常のバッチ反応の条件では反応制御が困難であった不安定な活性種を、マイクロフロー反応装置を用いることにより瞬時に反応を終えることにより制御できるようになりつつある。
- 「有機分子触媒による未来型分子変換」(領域代表：寺田眞浩(東北大学)、平成 23 年度～)では有機分子触媒の開発から有用物質の合成までをターゲットに研究が進められている。
- 「直裁的分子変換を可能とする分子活性化」(領域代表：茶谷直人(大阪大学)、平成 22 年度～)では高効率な物質合成を実現するために、今まで有効に利用されてこなかった化学結合の新たな活性化法を開発し、従来困難と考えられていたより直截的な触媒的分子変換反応を実現しようとしている。
- 「配位プログラミング 分子超構造体の化学と化学素子の創製」(領域代表：西原

寛（東京大学）、平成 21 年度～）では、化学結合を自由度高く制御するための配位化学を駆使して、ある程度自在に特異な構造を階層的に設計・構築することに成功しつつある。これらの知見は、階層的な固体触媒（分子固体触媒）設計にフィードバックできる。

（５）キーワード

低環境負荷、資源制約、バイオマス転換、シェールガス、均一系触媒、不均一系触媒、ナノ材料、不斉合成、立体化学制御、分子固体触媒

（６）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	◎	→	均一系触媒（銅やパラジウム）を用いたクロスカップリングでは先駆的な仕事が多くあり、世界をけん引している。また金触媒については、春田教授（首都大学東京）の仕事が先駆となり世界が追随している。電子移動に関連した反応や、Rh触媒による不斉付加なども高いレベルにある。 金属錯体触媒から有機分子触媒へと元素戦略に基づく研究成果が次々と生まれており、世界を先導している。とくに、プレンステッド酸触媒、求核塩基触媒、超原子価ヨウ素触媒の分野で顕著な研究成果が出ている。また、官能基化を伴わないC-H活性化に基づく触媒反応の開発分野の展開も目覚ましい。 一方、バイオマス転換や規則性多孔体触媒、電極触媒などは米国・中国に比して目立っていない。
	応用研究・開発	◎	↘	マイクロフロー反応装置などを利用した反応制御の分野でも世界を先導している。こうした化学工学的なアプローチによる反応制御によって小規模装置による大量合成が可能になりつつある。近年の化学工学の退潮に伴い若手技術者が減少している。
	産業化	○	↘	民間企業は省エネ化につながる運転条件の変更、プロセスの改良によって着実にグリーンプロセスを実践してきた。しかし、アジアや中東、北米のエネルギー事情などに押され、新規プロセスの実用化は国の補助頼みである。企業独自での新規プロセス開拓意欲が乏しい。
米国	基礎研究	◎	→	有機分子触媒、特に酸塩基触媒の開発研究では顕著な研究成果を挙げている。官能基化を伴わないC-H活性化に基づく触媒反応の開発分野への関心は高く優れた研究成果が出ている。バイオマス転換による水素製造や金触媒を用いたアミノ化・異性化、電極触媒などでも世界をリードしている。クロスカップリングなどについても多くの研究が展開されている。
	応用研究・開発	○	→	応用を見据えた化学工学のプロセス研究はバイオマス変換、バイオマスリファイナリーを中心に発展しているが、注力される部分が大きく偏っている。DOEのarpa-eなどのプログラムが大学と企業の応用研究を支えている。
	産業化	◎	↗	基礎研究を産業化するための社会システムができ上がっており、産業化の力は強い。 シェールガス革命を背景に、新規ガス転換プロセスが数多く立ち上がっている。近年例のなかったアンモニア合成プラント・メタノール合成プラントなども計画されており、建設・計画はBRICsや中東を上回る。しかし、あたらしい化学プロセスを構築するという傾向はみられない。

欧州	基礎研究	◎	→	欧州各国は伝統的に省エネルギー・環境問題に対して高い意識を持っているため、広い範囲にわたってグリーンプロセス触媒の研究が進んでいる。イオン液体、マイクロフローシステムの分野での研究レベルは高い。この分野の学術誌が欧州に集中していることも当然の結果と考えられる。 金触媒、ナノポーラス金触媒、ナノポーラス銅触媒などではドイツが世界をリードしている。フランスはメタン転換で目立った研究がある。Rh触媒による不斉付加を除き、英国はこの分野での存在が弱い。 また各国の研究者の連携も進んでおり、欧州統合は研究の上で大きな成果を挙げている。
	応用研究・開発	◎	→	FP-7やHorizon2020をベースに多くの多国間協力型プロジェクトが進められている。また民間企業が多く大学の研究者を支えており、これがよい結果を生み出している。例えばゼオライト研究のパイオニアであるスペインのCormaのグループは多くの民間企業により積極的に支援されている。
	産業化	◎	→	多くの優れたグリーンプロセス触媒が実用化している。英国、フランス、ドイツなどの国ごとに方向性が異なっている。
中国	基礎研究	◎	↗	以前は他研究者の研究の模倣であったが、近年では独自の優れた触媒の研究が多くなってきた。特に若い世代の研究者が中国の発展を牽引しており、すでに我が国にとって、脅威であることは明らかである。例えば水素製造、バイオマス転換、金触媒、Pd触媒によるタンデム反応、電極触媒で数多くの素晴らしい成果が出ている。ゼオライトの研究で優れた不均一触媒が多数現れている。
	応用研究・開発	◎	↗	基礎研究と同様に、応用研究・開発には手厚い支援がなされており、活発な開発が推進されている。応用研究・開発力については他の先進国と肩を並べる水準に到達している。石炭ガスから得られた合成ガスを中心として、MTPによるプロピレン合成が実用化された。ガス製造・ガス転換について精力的な研究開発が進められている。化成品生産だけでなく、バイオマス変換、バイオマスリファイナリーを目標とした開発が大々的に進められている。
	産業化	○	↗	応用研究が力づくで商業化までフェーズアップされており、他国に先駆けた新たなプラントの建設が多い。一方で環境配慮に乏しく、環境対応触媒分野の重点化が望まれる。
韓国	基礎研究	△	↘	基礎研究は比較的弱く、一部の著名な研究者の活躍が韓国の触媒分野を支えている。研究者の数も欧米、日本、中国に比べ少ない。
	応用研究・開発	◎	→	燃料電池用の触媒、水素製造触媒、石油化学触媒などに民間企業が注力しており、応用研究・開発の研究は目覚ましいものがある。
	産業化	◎	→	韓国の石油化学産業（触媒を多用）は、我が国に比べ高い競争力を有し、キシレンプラントなどでアジアをリードしている。化成品製造のエネルギー効率についても日本に勝るとも劣らない状況になっている。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

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

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

（7）参考資料

1) Scopus による文献検索

2) 触媒年鑑 2013 触媒学会編

3) 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 2010&2012

4) 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

5) 文部科学省新学術領域一覧

http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hoiyo/1300048.htm