

2 | 俯瞰区分と研究開発領域

2.1 環境・エネルギー応用

地球環境の有限性に鑑みて持続可能なエネルギー社会に向かうために、SDGsに代表されるエネルギー、環境、経済、安全の観点でのさまざまな取り組みが世界的に進んでいる。日本は2020年、菅首相がパリ協定にもとづく2050年までの温室効果ガス80%削減目標を超えた、実質排出量ゼロの脱炭素社会の実現を所信表明した。この目標の達成には、太陽光発電、風力発電、地熱発電などの再生可能エネルギーの導入の拡大を図り化石燃料の消費を最大限抑えること、エネルギー変換や利用に伴うエネルギー損失を小さくすることが不可欠となる。

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貯蔵変換、CO₂排出量の削減を可能にする材料技術、デバイス技術、プロセス技術を提供することがあげられる。本節では重要な研究開発領域として、太陽電池、蓄電デバイス、パワー半導体、エネルギーキャリア、分離技術を取りあげる。

太陽電池は、高効率、低コスト、高耐久性への要求が高まっており、新たな半導体材料、素子構造、モジュール化技術の探索および実装での研究競争が激化している。また、利用領域のさらなる拡大に向けて用途に応じた機能（安全性、軽量性、フレキシブル性、易交換性）の追求が進んでいる。

蓄電デバイスは、エネルギー変換機構で各種の分類があるが、化学エネルギーとして蓄積する二次電池の進展が著しい。民生用途に加えEV用途、グリッド電力貯蔵用途の急成長が見込まれ、大容量、急速充電、高出力、長寿命の実現に加え、特に安全性の向上を目的とした電極活物質や電解質、電池構造の開発が進められている。

パワー半導体は、増大する電力部門でのエネルギー消費を抑制するための高効率電力変換を目的として、動作時の電力損失の低減や高耐久性、低コスト化を目標に新たなワイドバンドギャップ半導体材料の開発、素子構造の革新に向けた研究が進められている。また多様化する用途・ニーズに応えるための高周波対応技術、小型化技術などの周辺技術の重要性も高まっている。

エネルギーキャリアは、再生可能エネルギーの時間的・空間的偏在という課題を克服することを目的とし、水素・アンモニア等のキャリアの製造技術、利活用技術、輸送技術の研究が進められている。要素技術の挑戦性はもとより、社会システム全体の変革を伴う領域であることから法規制、社会的受容性を十分配慮した研究開発が求められる。

分離技術は、化学プロセスの効率化、高純度材料の生成、環境負荷物質の回収など、低炭素社会・資源循環社会を支える基盤技術である。分離過程を分子レベルで理解し、高効率分離を可能にする材料系の開発や混合物質の相状態を理解した高効率プロセス設計が進められている。さらに資源循環への要求の高まりから、リサイクルシステム全体としての効率性を高めるための研究開発も進められている。

2.1

2.1.1 次世代太陽電池材料

(1) 研究開発領域の定義

太陽電池は、太陽光エネルギーを直接電気エネルギーに変換するデバイス/テクノロジーであり、長きにわたる研究開発の結果、広く社会実装が進んではいるが、パリ協定後のGHG削減のために、より一層の普及が求められている。普及に必要な、高効率化・低コスト化を実現するための技術的検討は、もっとも古くから実用化されたシリコンの単結晶/多結晶/薄膜系、高効率太陽電池の代表である III-V 化合物系、低コスト高効率特徴の CdTe、CIS 系に加え、近年、研究開発人口が増え効率が急上昇してきたペロブスカイト系などに対してさかんに行われている。これらに加え将来の超高効率化に向けた次世代太陽電池についても注目する。

(2) キーワード

シリコン系太陽電池、PERC 型セル、パッシベーションコンタクト、CdTe、薄膜太陽電池、CIS 薄膜太陽電池、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、車載太陽電池、モジュール、リサイクル

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球環境・温暖化問題は、今世紀に入りますます顕在化し、喫緊の対応が必要となっている。2018 年 7 月に閣議決定された日本の第 5 次エネルギー基本計画では、再生可能エネルギーについて、確実な主力電源化への布石としての取組を早期に進めることが明記され、また、2020 年に就任した菅首相は、その所信表明演説において、2050 年に温室効果ガスをゼロとすることを宣言するなど、わが国の再生可能エネルギー導入の姿勢は、大きく前進し始めている。

再生可能エネルギーの一番手である太陽光発電の大量導入は、明らかに世界の潮流となっている。すでに海外においては、超大規模発電所として、太陽光発電設備の建設が急激に進んでおり、日射量が豊富で大規模なシステムを安価に構築可能な中東地域では、1.6 USセント/kWh 以下の入札事例が出てくるなど、低炭素かつ安価な電源として実績を出し始めている。

日本国内でも太陽光発電の普及は進んでおり、わが国における導入量は、2030 年のエネルギーミックスで示された目標 64 GW に、2019 年末時点ではほぼ到達している。しかし、2050 年に向けた再生可能エネルギーを中心とする脱炭素化エネルギーシステムの構築には、少なくとも 150 GW 以上、長期的には 300 GW 以上とさらなる大量導入が必要とされる。高効率・低コスト・長期信頼性といった従来型の評価指標における次世代太陽電池セル・モジュールの研究開発に加えて、太陽光発電の「利用領域の拡大」を通じて、導入量を増やしていくことが重要となる。そのためには、用途に応じて、軽量、フレキシブル、任意形状、設置容易性、交換可能といった求められる機能を持つとともに、意匠性にも優れた、さまざまなタイプの太陽電池を提供することや、ゲームチェンジング・テクノロジーとなりうる第三世代太陽電池を早期実現することが、非常に重要な研究ターゲットとなっている。

[研究開発の動向]

Si 系太陽電池や化合物半導体系太陽電池では、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さかんに行われてきた。また、集光型太陽光発電は、太陽電池の使用量が圧倒的に少量化できるため、低コスト化のための新技術として注目され始めている。

変換効率を極限まで高めるためには、さまざまな要素技術の研究開発が必要となる。結晶Si太陽電池では、金属酸化物や窒化物、二次元物質、有機高分子などの異種材料により高いパッシベーション性能と高い伝導特性を両立するパッシベーターティッドコンタクト技術、表面・界面での精緻な化学組成制御などによる高性能パッシベーション、基板の超薄型化や超薄型基板にも対応可能な表面ナノ構造形成技術を駆使した光マネジメントなどの高効率化技術が必要である。また、低コスト化に向けて高品質基板の低コスト製造技術に対して産業界からの根強い要請があり、擬単結晶などの高品質インゴット製造技術、基板の大型化・薄型化技術の開発が必要である。高効率結晶シリコン太陽電池の主流であるPERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 型およびその改良版のPERL (Passivated Emitter and Rear Locally Diffused) 型の太陽電池では、光照射・温度上昇による劣化現象であるLeTID (Light and elevated Temperature Induced Degradation) が課題となっており、その発生メカニズムの解明と抑制手法の確立が重要となっている。また、ペロブスカイトや化合物半導体とのタンデム化による超高効率化、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、さらなる効率向上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。

CIS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いる。実用化規模の面積モジュールの高効率化および低コスト製造プロセスにおいて日本は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、韓国など新興国の安価なシリコン太陽電池や米国のCdTe太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にある。近年、CIS太陽電池では、CIS光吸収層の改良 (K、Cs、Rb添加など)、接合界面の改質 (CIS表面層のIn酸化物の制御)、バルクのキャリア密度上昇による高効率化のブレイクスルーがあり、変換効率23.4%を達成している。

有機系太陽電池として期待されている有機薄膜太陽電池に関しては、ここ数年の急激な特性向上 (変換効率及び耐久性) により、一時の停滞期から脱して再び世界的に研究開発がさかんになってきた。現在、この研究を牽引しているのは米国と中国である。最近の進展は、新素材である非フルーレン・アクセプター (NFA) と、素子構造の精密制御によるところが大きい。今後さらなる変換効率の向上には、新規熱活性化遅延蛍光 (TADF) 材料や新規導電性ポリマーを用いた高効率有機太陽電池の研究、一重項エキシトン解裂を用いた革新的有機太陽電池の研究、三重項色素を用いた革新的有機太陽電池の研究に加え、エキシトン解離に必要なバンド構造 (オフセット・エネルギー) の解明が求められる。

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。最近では、新規ペロブスカイト化合物 (CsPbX_3) にて構成された量子ドットが注目されはじめ、マルチエキシトン生成を示唆する結果が報告されている。変換効率も PbS 量子ドットの記録を破り、 $\text{Cs}_{0.5}\text{FA}_{0.5}\text{PbI}_3$ (FA: formamidinium) 量子ドット太陽電池にて16.6%が報告されている (豪クイーンズランド大学)。

ペロブスカイト太陽電池においては、発明からわずか9年ほどで、25.2%の変換効率が達成されている (米NREL 認証)。今後は、より一層の高効率化をめざ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、高耐久化をめざ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。これらの有機系太陽電池の研究開発では、新材料の創出に向け、マテリアルズ・イン

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

フォーマティクス (MI) の活用が精力的に行われるようになってきている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

結晶 Si 太陽電池

太陽電池用 Si 基板のシェアは、単結晶が増加傾向にあり、2019年度に単結晶が約65%、多結晶が約35%と数年前より多結晶を逆転している。また、日本発の技術である機能性欠陥の活用や種結晶のアレンジを工夫することで高品質擬単結晶インゴットを製造する技術についての研究が世界的に広がり、中国・GCLは量産化に至っている。基板サイズは、156.75 mm角 (M2規格) が世界市場の約70%を占めるが、将来的に166 mm角 (M6規格)、182 mm角 (M10規格)、210 mm角 (M12規格) に置き換えられるとの予測がある。

高性能セルの研究開発においては、単結晶シリコンでは、表面に電極のないバックコンタクト構造とアモルファス Si をベースとするヘテロ接合を複合化したセル構造を採用したカネカ社が26.73% (産業技術総合研究所測定) の世界最高効率を保有している。ホモ接合における最高効率はドイツ・ハーメルン太陽エネルギー研究所が報告した26.1%であり、n型単結晶をベースとし、バックコンタクト構造、酸化膜によるパッシベーション (ピンホールもしくはトンネリングにより導電性を担保)、高ドーブ多結晶薄膜による接合を複合化した構造を採用している。多結晶 Si 基板をベースとするセルでは、中国・Jinko Solarが23.3%を達成し、中国・Trina Solarの持つ23.2%を0.1%更新した。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として、ドイツのフラウンホーファー研究所は、界面再結合速度の小さい酸化膜を介してトンネル効果により電流を収集する「トンネル酸化膜パッシベティッドコンタクト構造 (TOPCon)」を提案し、その後、量産化技術開発も含め研究が世界中に広がっている。また、ヘテロ接合型太陽電池で課題となっている接合材料中での寄生吸収の低減に向け、より大きなバンドギャップをもつ酸化チタン、酸化モリブデン、酸化ニッケル、窒化チタンなどの金属酸化物や窒化物、グラフェンやカルコゲン化合物などの二次元物質、有機 EL や有機薄膜太陽電池のキャリア輸送層に利用される PEDOT/PSS などの導電性有機高分子をヘテロ接合形成に適用する試みが行われている。

結晶 Si 太陽電池モジュールの廃棄・リサイクルのための技術開発も進んでいる。株式会社 NPC では、使用済み太陽電池モジュールの部材の分離を行うための手法として、ホットナイフ分離法を開発し、実用化している。加熱した金属刃を太陽電池モジュールのカバーガラスと封止材の間に差し入れて掃引することで、両者を効率よく分離できる。装置化も完了し、国内リサイクル会社での運用が始まっている。

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、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。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いるが、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いえる。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。東京都市大では IoT 用エネルギーハーベストデバイス応用を目的に両面受光型薄膜 Si 5 接合太陽電池を作製し、3000 lux の LED 照射下で 4V 以上の開放電圧を報告している。非晶質 Si、微結晶 Si では産総研などにより近年世界最高効率が更新され、着実な技術の向上がみられる。薄膜結晶 Si では、2020 年に Helmholtz Zentrum Berlin (HZB) がラインレーザによる溶融・

結晶化により、14 μ m厚の Si 結晶薄膜を作製し、IBC-SHJ セルにて開放電圧 645 mV、変換効率 15.1% を達成した。

CIS 系太陽電池

ソーラーフロンティア社が年産 1 GW を有するとともに、小面積セルでの世界最高効率 (23.4%) を誇るなど、日本が世界を牽引している。近年、CIS 太陽電池の変換効率の向上が加速している背景にはアルカリ金属を発電層成長後に添加する PDT (post-deposition treatment) 処理がある。KF-PDT 処理をはじめとして、最近では RbF-PDT、CsF-PDT 処理などの重アルカリ金属処理が注目され、これらの処理によって光吸収層の品質が向上し、変換効率の向上を後押ししている。CIS 系タンデム型太陽電池の実現に向けては、ワイドギャップの硫化物カルコパイライトである Cu (In,Ga) S₂ が開発され 16% の効率が確認されている。効率 30% のタンデムセルを実現するには、ボトムセルに 24% の CIS 太陽電池を用いた場合を想定すると、トップセルである Cu (In,Ga) S₂ には少なくとも 18% 以上が要求され、高効率化の研究が今後も求められる。

また、CIS の代替をめざして、レアメタルフリーの材料も開発が進められている。その代表格は、CZTSSe であるが、その他のレアメタルフリー材料として、Cu₂SnS₃、CuSbS₂、SnS、Cu₂O、BaSi₂ などの研究開発も活発化してきている。CZTSSe の公式最高効率は 11.3% (1.1761 cm²、韓国の DGIST) である。

集光型太陽光発電

ビル壁面や自動車屋根などの新しい設置方式では、太陽電池コストよりも工事費などの付帯費用がかさむので、限られた設置面積でいかに発電量を増大するかといった方向に関心が移りつつある。最高効率の太陽電池は集光型太陽電池であるので (効率 47.1%)、高効率を求め、欧州を中心に、新しい集光型太陽電池の研究開発が再燃している。大型架台を用いて大型パネルを高精度で追尾するといった、これまでの手法ではなく、微細な光学系やセル、モジュール内蔵の薄型駆動機構を組み込んだマイクロ CPV (Concentrator photovoltaic) の新技術が研究開発の主流である。また、従来型技術では直達日射しか活用していなかったために CPV は高直達日射が得られる乾燥地域向けの大規模発電プラント向け技術とされていたが、マイクロ CPV では、微小光学系、微小駆動機構を組み込んでおり、通常のソーラーパネルと同程度の厚さで、かつ、通常のパネルと同様に、定置設置が可能である。

ドイツでは Si 太陽電池の上に 1 mm 程度の集光型太陽電池を配置する手法で 34.1% のモジュール効率を記録している (集光型太陽電池の透過光を活用するとともに、パネル背面からの光も活用)。EU のプロジェクト (イタリア、スペイン) では、薄型モジュール内部に追尾機構を組み込み、35.4% のモジュール効率を達成した。米国では、マイクロ CPV の衛星用ソーラーパネルへの応用が進められている。日本では、機構による追尾に一切頼らず、非結像光学系技術を駆使した全天からの太陽光の有効利用により、32.8% のモジュール効率を達成した。この方式は、また、曲面化が可能であることから、高い信頼性が要求される車載応用が期待されている。

有機薄膜型太陽電池

この数年で急激な特性改善がなされている。2020 年の Best Research-Cell Efficiencies (米 NREL) に掲載されている世界最高変換効率は、上海交通大学-マサチューセッツ大学 (SJTU-UMass) の非フラーレン・アクセプターを用いた低分子系太陽電池の 17.4% である。また、高分子系太陽電池では、浙江大学の Chen らの研究グループは、2 種類の非フラーレン・アクセプターを高分子ドナーに添加したセルにより

17.0%の変換効率を達成している。

また、耐久性に関しても非常に大きい進展があり、プリンストン大学のForrestらによって実用上問題がないことが証明された。以前砂漠での耐久性試験でセルの安定性を確認していたが、昨年実験室での加速試験で27,000年安定であることが証明されている。応用面では、非フラーレン・アクセプターを用いた有機薄膜太陽電池は、可視域の透過率を高めた半透明太陽電池としての応用研究が急速に進展している。今後の市場への投入に向け、特に製造工程を考えると、溶液を用いた各種塗布法で製造できる高分子系太陽電池のさらなる進展が望まれる。

一方、発電機構の面では、励起子を解離するために必要と考えられてきたドナー・アクセプター材料のエネルギーオフセットが0.1eV未満の系でも、効率良く電荷生成する系が報告されている。これにより、エネルギーギャップ E_g と開放電圧 V_{oc} との光エネルギー損失が0.5 eVを切る系が報告されるようになった。有機薄膜太陽電池のもっとも大きな損失過程が低減できる可能性があるため、今後のさらなる機構解明が求められる。現在の有機薄膜型のベンチャー企業としては、米国のNanoFlex Power CorporationやドイツのHeliatekがあげられる。

色素増感型太陽電池

シャープが2012年に達成していた色素増感太陽電池の最高変換効率を、8年ぶりにEPFLが更新し、12.3%になった(米NREL認証)。他の有機系太陽電池に比較して、変換効率の観点からはほとんど飽和状態にある。一方、商品化に向けた取り組みには進展がみられ、最近の最大のニュースは、リコーが2020年、完全固体型色素増感太陽電池モジュールの販売を開始したことである。色素増感太陽電池で完全固体型は世界初となる。

色素増感太陽電池の世界の主要なベンチャー企業は、G24iから発展したG24 Power(英国)と3GSolar(イスラエル)がある。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大幅に減少傾向にある。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。現在、色素増感太陽電池の世界の研究開発拠点として残っているのは、EPFLのGrätzel研とHagfeldt研である。その研究は、ドナー・アクセプター結合型の新規色素の開発が継続されている。さらに電解質では、Vocのロスがヨウ素系電解液よりも小さいCo系、Cu系電解液を用いた高効率化研究に集約されてきた。

ペロブスカイト太陽電池

現在の世界最高変換効率は高麗大学の25.2%である(米NREL認証)。シングルセルでの変換効率は上限に近づいてきており、それに合わせて商品化に向けた取り組みがさかんになってきた。わが国での最近のトピックとしては、パナソニックがNEDO事業「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」で、大面積モジュール(開口面積802 cm²:縦30cm×横30cm)で世界最高変換効率16.09%を達成したことがあげられる。この製造工程では、低コスト化が可能なインクジェット法が用いられている。また、三菱マテリアルは本年、ペロブスカイト太陽電池の製品化をめざすエネコートテクノロジーズ(京大発スタートアップ)へ出資を行った。エネコートテクノロジーズはJSTおよびNEDOプロジェクトで得られた成果を活用している。また、欧米でも新たな取り組みが継続しており、ドイツFraunhofer研究所による建材用途に大面積セルの作製、英国のベンチャー企業Oxford Photovoltaicsのペロブスカイト/シリコンタンデム型太陽電池の研究開発などの例があるほか、ベルギーでは、IMECがペロブスカイト/シリコンタンデム型太陽電池の研究開発を精力的に進めている。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。

上記のペロブスカイト太陽電池は鉛を用いているが、その毒性に対する懸念から、鉛フリーの研究もさかんであり、ハロゲン化 Bi 系金属化合物で 4% 程度の効率が報告されている。また、もっとも研究が注力されている Sn 系ペロブスカイト太陽電池の効率も上がってきており、再現性のある 10% 以上の変換効率が報告されている。

高効率化をめざした研究開発では、世界中で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、世界最高の変換効率はドイツ HZB Institute の 29.1% である (米 NREL 認証値)。なお、先に述べた Oxford Photovoltaics は 28% の変換効率を得ている。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。タンデム化においてはシングルセルで 25% 以上が達成されているため、26% 以上の変換効率が求められ、それをめざした研究開発が世界中で精力的に実施されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・ 2020 年度より、NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発」が開始された。このプロジェクトは、太陽光発電の主力電源化を推進するため、需要地に近接しているが従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいなかった場所を利用可能にするための太陽光発電システム開発や、長期安定的な事業運営を可能にするために、現在顕在化している事業上の課題を解決する技術開発を行うものである。新市場創造技術開発、および、安全性・信頼性確保技術開発の課題に対して、産学連携体制で真正面からの取り組みが期待されている。
- ・ NEDO では、2020 年度より「クリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業」が開始された。この事業は、2030 年以降に温室効果ガス排出量の大幅削減など、気候変動問題解決に資するクリーンエネルギーや環境分野における革新的技術の開発を目的として実施するものであり、太陽光発電の技術ポテンシャルへの期待も大きい。
- ・ Si 系太陽電池に関しては、2015～2020 年に NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発プロジェクト」が実施され、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る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が構築された。また、北陸先端科学技術大学院大学では、Cat-CVD によるドーピングやパッシベーション技術のヘテロ接合太陽電池への実装で進展があった。産業技術総合研究所では、次世代薄型結晶 Si モジュールの研究開発や高性能キャリア選択性パッシベーターコンタクトの開発が進められた。JST-CREST では、名古屋大学が、高品質シリコンインゴット創製に向け、実験、理論、シミュレーション、データ科学を融合させた新たな研究開発の方法論の構築に取り組んでおり、結晶欠陥に関連する特徴領域抽出、粒界の原子構造や物性を解明する新たな計算法、多結晶組織やその変化の新たな計測手法など、多様な材料に横展開可能な基盤技術の創出を進めている。
- ・ CIS 太陽電池では、NEDO プロジェクトで、ソーラーフロンティア社、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 CIS 太陽電池の高効率化・物性評価をより一層進める研究が実施され、ソーラーフロンティア社から世界最高効率である 23.25% が報告された。
- ・ JST の未来社会創造事業では、鉛フリーペロブスカイト太陽電池の開発、超薄型シリコン系トリプル接合太陽電池の開発が進められている。地球規模課題である低炭素社会の実現に向けてボトルネックとなっている課題の新規募集も継続して行われている。

- ・集光型太陽光発電システムの研究開発としては、2015年7月より、超高効率・低コストIII-V族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実施された。このプロジェクトでは非集光でも変換効率30%を超えるモジュールが開発されており、新しい用途が期待される。日本における一般的な自家用車の一日あたりの走行距離は30 km程度であり、この高効率モジュールを車載太陽電池として用いることにより、電気自動車における一日30 km分の電力を発電することが可能となる。
- ・有機系太陽電池では、ペロブスカイト太陽電池のプロジェクトに資源を集中して研究開発が進められている。具体的には、NEDOプロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」(2019年度終了)や、JSTの未来社会創造事業があげられる。有機薄膜太陽電池においては新しいプロジェクト投資が減っており、以前実施されたJST さきがけ『太陽光と光電変換機能』領域の研究者がネットワークを形成し、わが国の基礎研究開発を牽引している。

(5) 科学技術的課題

短期～中期的な視点では、実用太陽電池の主流である結晶Si太陽電池において、変換効率を極限まで高める技術開発が必要である。またポストPERC型の高効率セル構造では、海外企業に遅れをとらないように、容易に追いつくことのできない技術の確立と早期の量産化を行うべきである。金属酸化物などの異種材料による接合形成や局所ドーピングを駆使することにより、半導体レーザや超高速トランジスタで用いられているような「バンドエンジニアリング」の概念を実用太陽電池でも具現化する必要がある。Siをボトムセルとするタンデムセルによる超高効率化には、Siと整合性に優れたバンドギャップ1.5～1.7 eV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あげられる。

長期的な視点では、太陽電池が自立的に普及し始めるためには、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1つの候補である。また、蓄電や熱電といった機能を有する多機能太陽電池により、さらなる光電変換効率の向上やエネルギーの有効利用、利用用途の拡大などが可能となる。これらの新概念太陽電池は現在の太陽電池よりも非常に高い限界効率を有するものの、その多くは未だ基礎研究の段階である。

また、真の再生可能エネルギー源として普及させるには、単に太陽電池単体の開発だけでは不十分であり、モジュールとしての効率向上、長寿命化に加えて、用途別の太陽電池開発、システム技術の開発が不可欠である。需要地近接型では、建物壁面、工場の屋上など、軽量、可撓性、意匠性が求められるとともに、建材相当の長期安定性、信頼性が重要となる。

加えて、世界的な導入量拡大が始まってからすでに10数年が経過し、発電性能を維持するための維持管理技術、不具合等を屋外において検出する点検技術、設備更新や廃棄時のリサイクル技術等の重要性が高まっている。日本でも固定価格買取制度導入から20年経過以降、全量買取の対象であった多くの発電システムから、大量の太陽電池モジュールが排出されることが予想されている。設備を更新し、長期的に主力電源として太陽光発電を利用していくためにも、これらのモジュールの適切なリサイクル技術の開発が不可欠である。

CIS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CIS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。

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

有機薄膜太陽電池については、非フラーレン・アクセプターに代表される新材料の開発、3元ブレンドなどの新素子構造の提案により、急激な変換効率の向上がみられ、すでに17%以上の変換効率が達成されている。また、十分な耐久性を有することも実証された。この非フラーレン・アクセプターに代表される新規材料の開発では中国の勢いが目覚ましく、国家重点としての取り組みが成果をあげている。また、米国・欧州でも継続的に研究開発が実施されており、その成果にもとづいて例えば米国 NanoFlex Power Corporation のようなスタートアップ企業が立ち上げられている。それに対して、最近のわが国における有機薄膜太陽電池への研究支援は大きく減少してきており、日本の国際競争力を維持するためには、長期的視点に立った研究支援を継続的に行う必要がある。実用化に向けた技術開発も喫緊の課題であるが、民間企業にとって投資リスクが大きいこと、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求められる。

ペロブスカイト太陽電池は、研究開発が順調に進んでおり、商品化に向けた取り組みも開始されている。今後の本格的な市場展開に向けては、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。この新材料開発においては、各種の材料開発で有効性が示されてきたマテリアルズ・インフォマティクス (MI) の活用が望まれる。

(6) その他の課題

2030年、2050年といった長期的なエネルギー・環境政策の視点では、太陽光発電がわが国の主力電源として担う役割は大きく、太陽電池モジュールの自立的な導入を推し進めていく必要がある。今後は太陽電池モジュールの設置に適した土地が少なくなっていくことや、新しい応用先を探すなかで求められる太陽電池のスペックはますます高くなることが予想され、発電コスト以外の指標 (kWh/m²、W/g、曲げ性、意匠性、強度等) を重視したセル・モジュール開発が重要になると考えられる。このような出口・用途に応じた研究開発を行うためには、これまで行ってきたような材料種別の研究実施体制だけでなく、太陽電池を使う側 (たとえば、ゼネコンやハウスメーカー、車メーカーといった出口ユーザー企業) から用途に応じたニーズを引き出し、国費の投入に資する技術目標と波及効果 (エネルギー自給率やCO₂削減等のアウトカム) を明確にして研究開発を推進することが求められる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	高度な光とキャリアのマネジメントを具現化する多様な材料やプロセス技術が大学や研究機関で創出され、共用可能な高度なプロセス設備を含む試作ラインが構築された。 JST や NEDO のプロジェクトをはじめとした国の主導的な取り組みにより、京都大学発のペロブスカイト太陽電池ベンチャー企業が立ち上げられている。有機薄膜太陽電池は、JST さきがけ『太陽光と光電変換機能』領域の研究者がネットワークを形成し、継続して基礎研究を牽引している。
	応用研究・開発	◎	↗	さまざまな種類の無機系太陽電池で、変換効率の世界最高記録(2020年4月現在)を保持するなど、高い技術力を保有している。一方で、大手太陽電池メーカーにおける国内の研究開発や生産体制は縮小傾向にあり、ソリューション・サービスへの転換が進む傾向にある。 有機系太陽電池の応用では、色素増感型が先行しており、リコー、シャープ、フジクラ等の各企業が発売に向けたセル開発を行なっている。NEDOプロジェクトの成果にもとづき、2020年パナソニックがペロブスカイト太陽電池大面積モジュールで世界最高のエネルギー変換効率16.09%を達成した。
米国	基礎研究	○	↗	MITではハイスループット実験、機械学習、シミュレーションを融合することで、太陽電池に適用可能な鉛フリーペロブスカイト化合物やその劣化を抑制するキャップ層材料の探索や太陽電池の耐久性向上のための材料探索を行っている。NREL、アリゾナ州立大学などでは、結晶Siをベースとするヘテロ接合太陽電池の高効率化を支援する基礎研究や、ペロブスカイトと結晶Siのタンデム化など新規な取り組みが実施されている。ペロブスカイト太陽電池の商業化に向けては、NRELを中心とした研究開発コンソーシアムUS-MAPが設立された。IBM社は、CZTS太陽電池で構成材料の最適化により小面積ながら12.6%の変換効率を報告している。First Solar社はCdTe太陽電池で、セル効率22.1%を報告した。新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、ミシガン大学、南カリフォルニア大学などが中心、ペロブスカイト太陽電池では、コロラド大学、カリフォルニア大学バークレー校が研究を牽引している。
	応用研究・開発	○	↗	米中間貿易摩擦激化により、国内太陽電池モジュール生産能力が増加傾向にある。SunPower社は、裏面接合型の結晶Si太陽電池モジュールで22.8%と高い効率を達成している。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、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。CdTe太陽電池市場には、新たな製造企業も参入している。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 Energy、低分子系ではNanoFlex Power Corporationが活躍中である。
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。ドイツFraunhofer研究所、ISFH、Konstanz大学、HZB、オランダTNO、ベルギーIMEC、仏INES、スイスEPFL、CSEM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。CIS太陽電池、CZTS太陽電池ともに、基礎物性からデバイス評価まで、学術的な研究にしっかり取り組んでおり、研究水準は着実に上がっている。有機系太陽電池においては、有機薄膜型の研究が依然としてさかんであるが、色素増感型ではなお、スイスEPFL(グレッツェル研)が研究の中心である。EPFLはSi系薄膜においても世界の研究開発を牽引している。有機薄膜型ではImperial Collegeやケンブリッジ大学が基礎研究を牽引している。ペロブスカイト太陽電池では固体化セルを開発したオックスフォード大学が世界の研究開発の中心となっている。さらに、ベルギーIMECでは有機系太陽電池の研究が精力的に実施されている。

	応用研究・開発	◎	→	結晶Si太陽電池では、太陽電池サプライチェーン再構築の動きが活発化しており、装置産業の復活に期待が高まっている。また、太陽電池製造コストの大幅削減につながる研究開発が産学連携体制で進められている。利用技術の開発や標準化、規格化では幅広い検討が行われている。薄膜Siではエリコンソーラー社により、小面積a-Siセルの安定化効率10%超が初めて達成されるなど、高い技術開発水準を有している。有機薄膜型では、Heliatek社が13%以上の変換効率を達成しており、住宅向けにセルの販売を開始している。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。
中国	基礎研究	○	↗	結晶Si系太陽電池は、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。以前は、海外の研究機関等の追跡研究が主体であったが、研究水準は急激に上昇している。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。
	応用研究・開発	◎	↗	原料からモジュールに至るまで中国国内での生産量は増加傾向にある。基板の大型化・多品種化、セル構造の高度化、ハーフカットセルを採用したモジュール生産が進められており、新しい技術の導入のために大規模な設備投資能力のある大手企業による寡占化傾向が強まる可能性が高い。数GW~数十GW/年の生産能力拡大計画が続々と発表されている。有機系太陽電池においては、多くのベンチャー企業が創立されている。
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、太陽光発電産業を育成しようとして研究開発を支援している。Si系(結晶系、薄膜系)ではすでに出遅れており、ペロブスカイトおよび有機太陽電池を中心にして、材料、セルともに次世代技術開発に集中している。ペロブスカイト太陽電池の研究開発では世界のトップレベルを走っており、高麗大学が世界最高変換効率25.2%(米国NREL認証)を達成している。
	応用研究・開発	○	→	政府によるRenewable Energy 2030戦略では、2030年まで国内エネルギーの20%を再生可能エネルギーでまかなうことを目標にしており、太陽光発電は60%を占有する予定である。応用研究開発は高効率シリコン太陽電池発電システム開発に集中している。セルとモジュールの生産技術は世界レベルであり、R&D水準は着実に上昇傾向にある。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発(プロトタイプの開発含む)の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1~2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・ 太陽光発電 (環境・エネ分野 2.1.4)

参考・引用文献

1) M. A. Green et al., "Solar cell efficiency tables (version 55)", *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 28,

- no. 1 (2020) : 3–15. doi : 10.1002/pip.3228
- 2) NREL, “Best-Research Cell Efficiency Chart”, Photovoltaic Research, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (2020年12月20日アクセス)
- 3) K. Masuko et al., “Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell”, *IEEE J. Photovoltaics* 4, no. 6 (2014) : 1433. doi : 10.1109/JPHOTOV.2014.2352151
- 4) K. Yoshikawa et al., “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%”, *Nature Energy* 2, no. 5 (2017) : 17032. doi : 10.1038/nenergy.2017.32

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

2.1.2 蓄電デバイス

(1) 研究開発領域の定義

電気エネルギーを入力して、それを一定期間保持したのちに、電気エネルギーとして出力するデバイスが蓄電デバイスである。エネルギーの保持のために、静電エネルギーとして蓄積するもの（キャパシタ）、電流（＝静磁）エネルギーとして蓄積するもの（超伝導コイル）、運動エネルギーとして蓄積するもの（フライホイール）、重力（位置）エネルギーとして蓄積するもの（揚水発電）、化学エネルギーとして蓄積するもの（二次電池）などがある。ここでは、従来の携帯機器用電源から発展し、自動車等のモビリティのパワーソース、再生可能エネルギーをグリッドに適合させるためのバッファなどで、急速に用途が拡大し、価格も低下している二次電池を中心に取り上げる。先端リチウムイオン電池のほか、次世代電池候補の最右翼であるリチウム金属を負極として使用するリチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池、リチウム全固体電池を対象とする。

(2) キーワード

二次電池、蓄電池、リチウムイオン電池、次世代電池、ビヨンドリチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池、革新電池、リチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池、リチウム全固体電池、エネルギー密度、パワー密度、安全性、寿命、使用温度範囲、コスト

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

2019年ノーベル化学賞が「リチウムイオン電池の開発」による功績でJohn B. Goodenough、M. Stanley Whittingham、吉野彰の三氏に授与されたように、現代社会を支えるさまざまな電子・電気機器のエネルギー源としてのリチウムイオン電池は、欠かすことのできない基幹デバイスとなっている。リチウムイオン電池は1991年にソニー社が商品化して以来30年になるが、年間出荷量は電力量で約200 GWh、年間売上高は約5兆円に達し、金額ベースでは鉛蓄電池を抜いて最大の蓄電デバイスにまで成長した。また、環境調和社会に向けた環境保全・地球温暖化対策として自動車の電動化（EV化）が世界的に急速に進められており、2017年以降、民生用途（3C; Computer, Communication, Consumer electronics）を上回るほどまでに、EV用途の急成長が見込まれている。さらに、EVとともに地球温暖化対策としての太陽光や風力など気象により変動しやすい再生エネルギーの有効活用の観点から、グリッド電力貯蔵（Energy Storage System: ESS）用途も普及しつつあり、リチウムイオン電池が再生可能エネルギーを有効利用するための電力貯蔵用途として定置型でさらに大きな容量をもつ蓄電デバイス用途に期待されている。しかしながら、EVやESS用途などの中大型リチウムイオン電池の市場拡大には、さらなるエネルギー単価の低コスト化が必須である。

一方、リチウムイオン電池の性能向上の余地はまだ残されているものの、エネルギー密度向上の限界（350 Wh/kg）も見えてきており、リチウムイオン電池の性能を凌駕するいわゆる次世代電池（ビヨンドリチウムイオン電池、ポストリチウムイオン電池、革新電池などとも称される）の必要性が強調され、500 Wh/kgのエネルギー密度を達成できる二次電池を目標にした研究開発が全世界的になされている。その有力候補としてリチウム金属を負極として使用するリチウム遷移金属酸化物電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気電池などが注目を浴びている。

さらに、二次電池の、高エネルギー密度化・大容量化が進むほど充放電時の発熱が顕著となって放熱が難しくなるため、安全性の確保も喫緊の課題となっている。この要請を満たすために可燃性の電解質を不燃性の無機固体に替えた全固体電池もさかんに研究されている。

[研究開発の動向]

・リチウムイオン電池

二次電池に対する要求性能は、①高エネルギー密度、②高パワー（入出力）密度、③長寿命、④高安全性、⑤広使用温度領域などであるが、これらの間には互いにトレードオフの関係にあるものが含まれている。こうした要求に対して、材料、電極板、セルの各レベルでの研究開発がなされている。構成要素である①正極材、②負極材、③電解液、④セパレータ、⑤その他（導電材、バインダー、集電体、接着テープ、外装ケースなど）の材料開発は主に素材メーカーが担当し、それらを使用した電極板製造、セル組立の最適化開発を電池メーカーが担当している。

小型電池の最大の用途であるスマートフォン用パウチ型（ラミネート型）電池においては、従来からの黒鉛負極とコバルト酸リチウム（ LiCoO_2 ：LCO）正極の組み合わせには変化はないが、スマートフォンの大型薄型化、高機能化に伴い、高エネルギー密度化、急速充電対応化およびそれに伴う高安全・信頼性化が継続的に要求されている。具体的には、①正極材：LCOの高電圧化と電極高密度化による比容量、容量密度の向上（満充電状態の正極電位：4.2 V vs. Li/Li⁺、電流容量 135 mAh/g → 満充電状態の正極電位：4.5 V vs. Li/Li⁺、電流容量 200 mAh/g）、②負極材：人造黒鉛の低膨張化と電極高密度化による容量密度の向上、③電解液：低粘度カルボン酸エステル副溶媒による含侵性の改善と数種類の添加剤による寿命向上、④セパレータ：薄膜化とアルミナコートによる安全性の向上、⑤導電材：高価なカーボンナノチューブの極少量添加による活物質間の導電性確保などが採用されており、そのエネルギー密度は290 Wh/kg、720 Wh/lにまで向上している。

一方、EV用途には、角型あるいはパウチ型で、安全性重視の観点からマンガン酸リチウム（ LiMn_2O_4 ：LMO）正極が初期に採用されたが、航続距離延長の要請からニッケルコバルトマンガン三元系酸化物（ $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ ：NCM）正極に移行しており、さらなる低コスト、高エネルギー密度化の要請から、Co削減/フリー化、Niリッチ化の開発が推進されており（NCM333 → NCM523 → NCM622 → NCM712 → NCM811）、エネルギー密度も民生用途に近づいている。特筆すべき事柄としては、テスラ社はEV開発で最も安価なPC用円筒型18650電池（直径18 mm、長さ65 mm）を数千個使用するという奇抜なアイデアで創業した。現在では専用の2170電池（直径21 mm、長さ70 mm）を採用し、この電池を搭載したModel 3が約15%のEV新車市場を獲得し、ベストセラーEVとなっている。使用正極材はニッケルコバルトアルミ酸化物（ $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ ：NCA）正極であり、NCM系と同様にさらなるCo削減/フリー化、Niリッチ化を推進している（ $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2 \rightarrow \text{LiNi}_{0.9}\text{Co}_{0.05}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ ）。さらに、バスやトラックなどの商用大型車には低コストで安全性の高いリン酸鉄リチウム（ LiFePO_4 ：LFP）正極が使用されており、普及帯価格の中国内専用Model 3にもモジュールを介さない新たな設計手法であるCell-to-Pack技術を用いた蓄電池システムのセルとして、LFP正極が採用される予定である。

また、負極材に関しては、人造黒鉛系が主流であるが、安価な天然黒鉛の配合比の向上が課題となっている。容量向上のため、シリコン（Si）あるいは一酸化ケイ素（SiO）を担持した黒鉛の開発が推進されているが、充放電時の膨張収縮による劣化という本質的課題は解決されておらず、Si/SiO含有比率は10%未満で、物理的に膨張を抑制できる小型円筒型電池での採用にとどまっている。チタン酸リチウム（ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ：LTO）負極も高パワー密度（高入出力）、高安全性、高耐久性など長所を活かして、マイルドハイブリッド車

への採用が進んでいる。

電解液に関しては、従来からの六フッ化リン酸リチウム (LiPF₆) を炭酸エステル (EC、PC、DMC、EMC、DEC) の混合溶媒に溶解した有機電解液が使用されているが、少量の添加で電池性能を向上させることができる添加剤の開発およびそれらの配合が主たる開発となっている。

セパレータに関しては、薄膜化が進行しているが、安全性確保の観点から従来の乾式法PP(ポリプロピレン)/PE(ポリエチレン)/PP3層膜から、湿式法PE微多孔膜にシフトする傾向にあり、アルミナやアラミドのコーティング品の比率が増加している。

上記のように、リチウムイオン電池は各材料系の特徴を活かした多様化が進みながらも、大量生産による低コスト化とともにその用途を拡大しつつある。この市場の拡大を受けて、高性能材料、新技術の研究開発も依然として継続されている。

• リチウム金属電池

リチウム金属を負極として使用するリチウム二次電池は、リチウムイオン電池が登場する直前に一時的に商品化されたことがある。しかし、リチウムデンドライト析出に起因する製品の発火事故の影響で、市場が大きく広まることはなく、代わりにリチウム金属を含まないリチウムイオン電池の方に開発の中心が移り、今日の普及にいたっている。

しかしながら、リチウム金属は最も負の電位 (標準電極電位 -3.04V)、高い比容量 (3860 mAh/g) を有し、エネルギー密度的に究極の負極材となりうる材料であるので、その活用に再挑戦することは、ポストリチウムイオン電池候補の最有力と考えられている。正極材として、①リチウムイオン電池に使用されているものと同じ遷移金属酸化物を使用するリチウム遷移金属酸化物電池 (Transition metal oxide : Li/TMO)、②もっとも比容量の高い硫黄 (1672 mAh/g) を使用するリチウム硫黄電池 (Li/S)、③あるいは空気中の酸素 (1675 mAh/g) を使用するリチウム空気電池 (Li/O₂) の3種類の論文が2010年頃から増加している。いずれのリチウム金属電池系も有機電解液が使用されるが、各電池反応が異なるため、リチウムイオン電池とは異なった電解液材料が必要であり、高濃度電解液やイオン液体のような電解液系も検討されている。また、燃えやすい有機電解液を難燃性の有機ポリマー固体電解質や無機セラミック固体電解質に置き換えることによって、電池安全性を向上させることができるので、固体電解質材料の研究開発も積極的に推進されている。各電池系に関する詳細を下記に示すが、多くは材料レベルの研究にとどまっており、実用電池レベルの評価にまではいたっていない。

• リチウム遷移金属酸化物電池

もともとリチウムイオン電池の登場直前まで開発されていた系であるとともに、材料構成はリチウムイオン電池の正極材探索時に使用するコイン型ハーフセルと同一である。リチウム金属は反応性が高いため有機電解液中での電気化学的溶解、析出のクーロン効率が低いためサイクル寿命が短い。また、リチウムデンドライトの成長によって短絡するので、安全性に劣るといふ本質的課題が存在する。その課題解決のための研究開発がさかんになっており、フッ素元素を多量に含む電解液でLiFを含む強健な固体電解質皮膜 (Solid-Electrolyte Interphase : SEI) を形成する、あるいは、リチウム金属上に人工SEIを形成するなどの対策技術が開発されている。近年、米国スタートアップ会社を中心にNiリッチ正極、薄膜Li保護負極、高F含有電解液などを採用した実用的なパウチ型電池の開発が進んでいる。また、リチウムデンドライト抑制などのため、低レート (0.5C以下) の充電にしか耐えられないが、Sion Power社 (米国) では480 Wh/kgのエネ

ルギー密度で、350サイクル以上の寿命を達成しており、EV用途のほかに、電気垂直離着陸車（electric Vertical Take-off and Landing Vehicle : eVTOL）や無人航空機（Unmanned Aerial Vehicles : UAV）などの特殊用途への適用に焦点を合わせている。

• リチウム硫黄電池

金属リチウムを含む二次電池としては古典的な系であり、1980年代に米国スタートアップを中心に開発されたが、その際に障害となった、硫黄の放電中間生成物であるポリスルフィドアニオンの電解液への溶出、そのレドックスシャトル効果による自己放電、サイクル寿命劣化という本質的課題に再挑戦している。2009年にメソポーラスカーボン(host)を宿主材として、その細孔内に硫黄を固定化することによって、その溶出を防止するという新技術が発表されてから研究開発が再燃し、さまざまな見地から研究されているもっとも論文数が多いリチウム金属電池系である。活物質である S_8 およびその放電生成物である Li_2S は電子伝導性、 Li^+ 伝導性がないので、正極内での電子および Li^+ 移動を促進させるためには、大量(>30 wt%)の多孔質炭素を必要とする。また、作動電圧が約2Vと低いため、高エネルギー密度化のためには、正極の面積比容量(mAh/cm²)をより大きくする必要があるが、正極内の硫黄の充填量を多くするとその利用率が低下するだけでなく、正極の体積変化によるサイクル劣化が顕著になるという本質的課題が存在する。Oxis Energy社(英国)では約400 Wh/kgのエネルギー密度で、数十サイクルの寿命を達成しており、EV、eVTOL、UAV、自立型潜水艇(Autonomous Underwater Vehicle : AUV)などへの適用を検討している。

• リチウム空気電池

1996年にポリマー電解質中で $2Li + O_2 \rightleftharpoons Li_2O_2$ の充放電反応が起こることが発見された。酸素極は活性サイト表面上で、 Li_2O_2 を生成・収納あるいは分解を触媒し、 Li^+ と O_2 を輸送する細孔チャンネルが必要なので、電子伝導性が高く、表面積が大きく、密度の低い多孔質炭素が使用される。当初はリチウムイオン電池用の電解液を使用して検討されたが、系内で発生するスーパーオキシドラジカルアニオンが電解液を分解し、上記の充放電反応ではなく、溶媒が分解することで電気が生成しているという事実が解明され、安定な溶媒系の探索の結果、グライム溶媒が比較的安定であることが確認された。しかしながら、スーパーオキシドラジカルアニオン以上に活性の高い一重項酸素が発生することも確認され、これら活性酸素種に電解液および多孔質炭素が安定でないため、サイクル劣化が著しいという本質的課題が存在する。また、絶縁性の放電生成物 Li_2O_2 や副生成物である Li_2CO_3 を分解する際の過電圧が高く、エネルギー効率が悪く、パワー密度も低いという課題も存在するが、レドックスメディエータによって、副反応を抑制することで性能が改善されている。まだ、実用的なセルで評価できる技術レベルにはいたっていないが、放電電圧は約2.7V、約400 Wh/kgのエネルギー密度で2サイクル程度の実力である。ほとんどの試験は純酸素下で実施されており、空気から酸素を分離供給するシステムや空気中の水分、窒素、二酸化炭素などの影響といった基本的事項を検討できる段階にはないのが現状である。

• リチウム全固体電池

可燃性の有機電解液を難燃性の有機ポリマー固体電解質や無機セラミック固体電解質に置き換えることによって、電池安全性を向上させることができるので、上記、3種類のいずれのリチウム金属電池系にも適用されている。しかしながら、もっとも注目を浴びているのはリチウム遷移金属酸化物電池に無機セラミック固体電解質を適用する研究開発である。その大きな理由は、①リチウム dendrite による短絡の抑制、②リチウ

ム金属の充放電効率の向上、③5 V級の高電圧正極の使用という有機電解液系で達成困難な課題を解決できる可能性を秘めているからである。

無機固体電解質は硫化物系と酸化物系に大別できるが、硫化物系固体電解質を用いた全固体電池の開発が先行している。硫化物系の特徴は、第一にリチウムイオン伝導度が酸化物系に比べて高いことであり、ものによっては有機電解液をも凌ぐ。これは硫化物イオンとリチウムイオンとの結合が酸化物イオンとの結合に比べて弱いため、リチウムイオンが動きやすいことに起因していると考えられる。また、同じく硫化物イオンとの結合が弱いことから硫化物系固体電解質は全般に柔らかい材料であり、圧粉成形だけで高密度かつ低抵抗なペレットが得られ、焼結過程なしでも電池を形成できる利点がある。硫化物系固体電解質では活物質との接合時に、特に酸化物である正極活物質との界面が高抵抗になる問題があるが、正極活物質と同じ酸化物でリチウムイオン伝導性があり電子伝導性のない緩衝層を挟むことで、抵抗が劇的に下がることがわかっているため、硫化物系の全固体電池ではLiNbO₃等の酸化物を被覆した正極活物質粒子が用いられている。

一方の酸化物系固体電解質では、酸化物イオンがリチウムイオンを強く束縛していることからリチウムイオン伝導度が硫化物系に比べて1~2桁低い上に、硬くて扱いづらい材料ではあるものの、大気中でも安定なため製造上では大きな利点がある。これは、大気中のわずかな水分と反応して有毒な硫化水素を発生する硫化物系固体電解質とは対照的である。このように、安全性の観点からは酸化物系固体電解質を用いた全固体電池が理想的だが、低抵抗な酸化物系固体電解質ペレットを作るにしても酸化物は全般に高融点の材料であるため1000°Cを超えるような高温の焼結過程が必要である。活物質との接合をこのような高温で行うと不要な界面反応が起き、活物質が活性を失ったり固体電解質が伝導性を失ったり、界面に高抵抗相が形成されるなどして電池動作しなくなるという大きな問題がある。現在は、微粒子化や助剤添加による焼結温度の低温化、低温焼結性や可塑性のある酸化物系固体電解質材料の開発、界面反応を抑制できる新奇な焼結プロセスの開発等により、低抵抗な界面を得る接合技術の開発が進められている。

多数のスタートアップ会社や研究機関がマスコミをにぎわせているが、室温で安定的に作動する高エネルギー密度電池の立証にはいたっていない。その理由として、固体電解質自身の電気伝導率や電気化学的・化学的安定性が不十分である場合も多いが、固体電解質と電極との接合における界面抵抗が大きいという本質的課題が存在する。一方で、大手電子部品各社（TDK、FDK、村田製作所、太陽誘電）が省電力化の進むIoT機器やウェアラブル機器用途に表面実装型（Surface Mount Device: SMD）の薄膜型全固体電池（酸化物系固体電解質）を開発中であり、一部量産化が始まっている。

（4）注目動向

【新展開・技術トピックス】

• リチウムイオン電池

寿命や安全性を担保しながら、正極材から高価なCoを削減する開発がEV用途で最大の課題であるが、CATL社（中国）、SKI社、LG Chem社（韓国）はNCM811（LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂）を使用した電池を出荷し、NIO ES6、Kia Niro、Tesla Model 3などに採用され始めている。同様に、Envision AESC社（中国/日本）はSi/黒鉛複合負極、NCM811正極を使用して、エネルギー密度が292 Wh/kg、容量が75 Ahのパウチ型EVセルの開発に成功した。さらなる低コスト化のための脱Co化の技術開発が注目される。

マサチューセッツ工科大学発の米国ベンチャーである24M Technologies社が提供する半固体リチウムイオン電池技術を使用したクレイ型リチウムイオン電池を京セラ社が住宅用ESS向けに開発した。あらかじめ電解液を練り込んだ粘土状の電極材料を厚塗する構造によって、高安全性、長寿命、低コストを実現した。同様

に、三洋化成社が出資するAPB社も全樹脂電池を開発中である。民生、EV用途のように体積エネルギー密度を重視しない定置用ESS用途に、電極の厚膜化による容量向上、製造法の簡素化による低コスト化からのアプローチであり、今後の進展が注目される。

• リチウム金属電池

米国立研究所Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) は、電解液量が少ない条件下での故障原因はLiデンドライト形成による短絡ではなく、電解液の消費による液枯れによる抵抗増加であることを報告した。そして、加圧下ではあるが、エネルギー密度350 Wh/kgの2.5 Ahパウチ型セルで350サイクルの寿命を達成した。局所的Li⁺配位構造の電解液を使用することでリチウム金属負極との反応性を抑制することに成功した。

リチウム金属電池に関する研究の多くが、実用的な電池設計を考慮せずに誇大性能を発表しているとの意見がある。特に、リチウム量や電解液量がエネルギー密度に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、大過剰のリチウム、電解液を使用して、リチウムイオン電池よりずっと低いエネルギー密度の条件下で実験しているケースがほとんどである。物質・材料研究機構 (NIMS) は現行のリチウムイオン電池技術を転用した場合のパウチ型電池のエネルギー密度をシミュレーションし、新技術の適用なしには500 Wh/kgのエネルギー密度の達成は困難であることを立証した。それと同時に500 Wh/kgのエネルギー密度を達成できる電解液量では二次電池として機能しないとの報告も現れ始めた。

• 全固体電池

開発が先行する硫化物系固体電解質の全固体リチウムイオン電池は、有機系電解液を凌駕する高いリチウムイオン伝導度の実現と、正極-固体電解質との界面抵抗の問題の解決により、実用化に近づいている。耐久性や信頼性等、商品としての性能確認ができれば早期の市場投入が期待される。また、流動性のある電解液と異なり正極側と負極側で異なる固体電解質が使えることから活物質の選択肢が広がり、高電圧のために電解液が電気分解してしまう5V級のスピネルやオリビン酸正極材料等の実用による高エネルギー密度化の可能性もある。

一方、酸化物系固体電解質のリチウムイオン伝導度に大きな向上はないが、硫化物系固体電解質とは異なり酸化物同士となる正極と固体電解質の界面は潜在的には低抵抗となり、実際に薄膜型では数秒で充放電ができる内部抵抗の小さい酸化物固体電解質型全固体電池が作製できている。バルク型電池で低抵抗な接合を達成するための1つの方策として界面反応を抑制するための低温焼結化がある。単に材料を微粉化して焼結温度を下げることに加え、リチウムイオン伝導度は高いものの高温焼結が必要な酸化物固体電解質粒子 (例えばガーネットの $\text{Li}_{7-x}\text{La}_3\text{Zr}_{2-x}\text{M}_x\text{O}_{12}$: M=Nb, Ta等) を、比較的低温で焼結できるガリチウムイオン伝導度はそれほど高くない Li_3BO_3 や Li_2CO_3 でコーティングしたコアシェル構造の粒子を用いた低温焼結化が試みられている。また、酸化物でありながら、硫化物ほどではないものの柔らかい固体電解質 (例えば Li_3BO_3 や Li_2SO_4 等) を混ぜ込んで圧粉形成により低抵抗な界面を形成することも試行されている。

また、リチウムイオン電池においても有効な高エネルギー密度化の方策の1つとして、高容量かつ卑な負極材料として期待されているSiの実用化があげられる。しかしながら、Li挿入・脱離時の3倍にも及ぶ体積膨張・収縮によって、リチウムイオン電池では集電極から剥がれる問題があるため、現状では現行のグラファイト負極に少量を混ぜ込むことで高容量化をめざしている。一方、全固体電池では電解液中よりも大きな拘束圧がかけられるため、特に可塑性のある硫化物系固体電解質型全固体電池ではSi単体での使用も検討されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2030年頃の実用化を目標に、EV次世代電池プロジェクトが世界中で国家プロジェクトとして進行中である。研究対象の電池系は各国ともほぼ同様であるが、以下に示すように、その重点の置き方は国ごとに異なる。

[日本] JSTのALCA-SPRING (Li硫黄、Li空気、Li全固体、Mg電池)、約150億円 (2013～2022)。

NEDOのRISING2 (フッ化物シャトル、亜鉛空気、コンバージョン、硫化物電池)、約150億円 (2016～2020)。

NEDOのSOLiD-EV (全固体リチウムイオン電池)、約100億円 (2018～2022)。

[米国] エネルギー省のBattery500 (Li/TMO、Li硫黄、Li全固体)、50Mドル (2016～2020)。

[中国] 国家重点研究開発計画「新エネルギー車」重点項目内 (先端リチウムイオン電池、Li/TMO、Li硫黄、Li空気、Li全固体電池)、110M元 (2016～2020)。

[欧州] Horizon 2020 (2014～2020) 内次世代電池、90Mユーロ (2020)、Battery 2030+が継続。ASTRABAT (Li全固体電池)、7.8Mユーロ (2020～2023)。

SOLiDIFY (Li全固体電池用材料)、7.8Mユーロ (2020～2023)。

[韓国] 次世代リチウム金属二次電池核心源泉技術開発、24.3Bウォン (2018～2023)。

(5) 科学技術的課題

• リチウムイオン電池

さらなるエネルギー密度の向上を目的とする正負極材の研究開発が必要である。具体的には、①インタカレーション反応の層状酸化物 (Niリッチ、Liリッチ、カチオン無秩序岩塩構造)、高電圧スピネル酸化物、高電圧ポリアニオン錯体の高性能化、②遷移金属元素あたり多電子移動可能なコンバージョン反応の金属フッ化物、金属酸化物などの基礎探索、③Siを有効に利用するための材料開発と電極板設計、などがある。特に、後者2つはいずれも充放電に伴う体積変化が大きく、サイクル特性の良くない系であり、ナノテクノロジー (ナノカーボン材料の利用も含む) を利用して電極内の空間制御をする方法論の確立が必要である。

また、リチウムイオン電池の普及に伴う廃棄リチウムイオン電池のリサイクル、および資源再利用の研究開発も必要である。

• リチウム金属電池

リチウム金属を負極とする電池はリチウムイオン電池の発火事故の教訓から鑑みても、電池安全性に不安があり、それを払拭できるだけのリチウム金属負極制御技術の確立が必須である。また、無機セラミック固体電解質を利用したフレキシブルな無孔セパレータ膜が開発されれば、正負極間のクロスオーバー反応を防止することができるので、電解液系電池の寿命や安全性を飛躍的に改善できる可能性がある。

現時点では、リチウム遷移金属酸化物電池がエネルギー密度を含め全ての性能面で、リチウム硫黄およびリチウム空気電池を上回っている。後者2つの短所は、平均作動電圧がリチウム硫黄2.1V、リチウム空気2.7Vとリチウム遷移金属酸化物電池3.8Vよりかなり低いことである。それを補うためには正極を厚膜化して、面積比容量を向上させることの可能な3D集電構造の技術確立が必須である。リチウム硫黄およびリチウム空気電池は、各国の国家プロジェクトの結果をみても、リチウムイオン電池の質量エネルギー密度を超えることは可能であるが、体積エネルギー密度はリチウムイオン電池より低くなる。したがって、EV用途への適用は現実的ではなく、軽量化を最重要視するeVTOL、UAV、AUVなどの用途をめざすべきである。

EV用途にはリチウム全固体電池が望ましいので、界面接合の本質的課題を重点的に研究開発する必要がある。

(6) その他の課題

大学が次世代電池を研究するには、現行のリチウムイオン電池の知識や技術が必須である。同様に、産業界もリチウムイオン電池の改良のためには、大学での新しい解析技術などが必須である。現行のリチウムイオン電池の延長上の研究は産業界で、公的資金は次世代電池のみという厳密な区分は国家全体の利益を考慮すると好ましくなく、弾力的運用が必要である。電池材料と電池設計が電池研究の両輪であるが、どちらかを軽視している場合、科学的進歩にも実社会にも寄与しない中途半端な研究にとどまってしまうことになる。大学がブレーク技術を生み出すための基礎研究に、産業界がそれを実業利用に、国立研究所が大学と産業界を仲介する役割分担で、産官学連携できるような運営が好ましい。そのためには諸外国並みに本分野における人材の流動化が起こる環境を整備することが望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・ALCA-SPRING、RISING2などで、継続的に推進。特に、全固体電池の活動が顕著
	応用研究・開発	○	↘	・素材、電池、セットメーカーの市場シェア低下より、全固体電池以外は低調
米国	基礎研究	◎	→	・DOE、DODの資金で多数の大学、国研が参画。Li空気電池は低調。
	応用研究・開発	◎	→	・PNNL、Sion Power、SolidEnergyなどで、Li/TMO電池で顕著な性能向上 ・DOE資金でリサイクル研究
欧州	基礎研究	◎	↗	・Battery 2030+ initiativeで、大規模、長期の研究計画策定。2020年9月から7プロジェクトが開始
	応用研究・開発	○	↗	・韓国・中国系の生産拠点新設、その依存脱却を目指す欧州バッテリー同盟（EBA）、欧州バッテリー連合（EBU）などの活動が活発化
中国	基礎研究	○	↗	・全世界的なネットワークでほとんどの電池系で論文数がNo.1、指導的地位に
	応用研究・開発	◎	↗	・中国科学院が怀柔、溧陽、東莞に大研究センターを設立し、産官学が混然一体となって推進
韓国	基礎研究	○	↗	・リチウム金属負極に特化した国家プロジェクトが発足進行
	応用研究・開発	◎	↗	・LGC、SDI、SKIのEV市場シェア上昇により活況。コアシェル型Ni-rich正極の実用化

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・電気エネルギー利用 (電力貯蔵) (環境・エネ分野 2.1.9)

参考・引用文献

- 1) Martin Winter, Brian Barnett and Kang Xu, "Before Li Ion Batteries", *Chemical Reviews* 118, no. 23 (2018) : 11433-11456. doi : 10.1021/acs.chemrev.8b00422
- 2) Matthew Li et al., "30 Years of Lithium-Ion Batteries", *Advanced Materials* 30, no. 33 (2018) : 1800561. doi : 10.1002/adma.201800561
- 3) Ghassan Zubi et al., "The lithium-ion battery : State of the art and future perspectives", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89 (2018) : 292-308. doi : 10.1016/j.rser.2018.03.002
- 4) Wontae Lee et al., "Advances in the Cathode Materials for Lithium Rechargeable Batteries", *Angewandte Chemie International Edition* 59, no. 7 (2020) : 2578-2605. doi : 10.1002/anie.201902359
- 5) Yingchun Lyu et al., "An Overview on Advances of LiCoO₂ Cathodes for Lithium-Ion Batteries", *Advanced Energy Materials* (2020). doi : 10.1002/aenm.202000982
- 6) Richard Schmich et al., "Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries", *Nature Energy* 3 (2018) : 267-278. doi : 10.1038/s41560-018-0107-2
- 7) Arno Kwade et al., "Current status and challenges for automotive battery production technologies", *Nature Energy* 3 (2018) : 290-300. doi : 10.1038/s41560-018-0130-3
- 8) Xiaoqiao Zeng et al., "Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles", *Advanced Energy Materials* 9, no. 27 (2019) : 1900161. doi : 10.1002/aenm.201900161
- 9) Wangda Li, Evan M. Erickson and Arumugam Manthiram, "High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries", *Nature Energy* 5 (2020) : 26-34. doi : 10.1038/s41560-019-0513-0
- 10) Gavin Harper et al., "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles", *Nature* 575, no. 7781 (2019) : 75-86. doi : 10.1038/s41586-019-1682-5
- 11) Bin Liu, Ji-Guang Zhang and Wu Xu, "Advancing Lithium Metal Batteries", *Joule* 2, no. 5 (2018) : 833-845. doi : 10.1016/j.joule.2018.03.008
- 12) Makoto Ue and Kohei Uosaki, "Recent progress in liquid electrolytes for lithium metal batteries", *Current Opinion in Electrochemistry* 17 (2019) : 106-113. doi : 10.1016/j.coelec.2019.05.001
- 13) Makoto Ue, Ken Sakaushi and Kohei Uosaki, "Basic knowledge in battery research bridging the gap between academia and industry", *Materials Horizons* 7 (2020) : 1937-1954. doi : 10.1039/d0mh00067a
- 14) Shuru Chen et al., "Critical Parameters for Evaluating Coin Cells and Pouch Cells of Rechargeable Li-Metal Batteries", *Joule* 3, no. 4 (2019) : 1094-1105. doi : 10.1016/j.joule.2019.02.004

2.1

- 15) Chaojiang Niu et al., "Self-smoothing anode for achieving high-energy lithium metal batteries under realistic conditions", *Nature Nanotechnology* 14, no. 6 (2019) : 594-601. doi : 10.1038/s41565-019-0427-9
- 16) Rudra Kumar et al., "Recent research trends in Li-S batteries", *Journal of Materials Chemistry A* 6, no. 25 (2018) : 11582-11605. doi : 10.1039/c8ta01483c
- 17) Yin Hu et al., "Strategies toward High-Loading Lithium-Sulfur Battery", *Advanced Energy Materials* 10, no. 17 (2020) : 2000082. doi : 10.1002/aenm.202000082
- 18) Won-Jin Kwak et al., "Lithium-Oxygen Batteries and Related Systems : Potential, Status, and Future", *Chemical Reviews* 120, no. 14 (2020) : 6626-6683. doi : 10.1021/acs.chemrev.9b00609
- 19) Shangqian Zhao et al., "Failure analysis of pouch-type Li-O₂ batteries with superior energy density", *Journal of Energy Chemistry* 45 (2020) : 74-82. doi : 10.1016/j.jechem.2019.09.029
- 20) Shuixin Xia et al., "Practical Challenges and Future Perspectives of All-Solid-State Lithium-Metal Batteries", *Chem* 5, no. 4 (2019) : 753-785. doi : 10.1016/j.chempr.2018.11.013

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

2.1.3 パワー半導体材料・デバイス

(1) 研究開発領域の定義

高効率の電力変換を可能にする電力制御用半導体素子（パワーデバイス）を、その応用技術とともに研究開発する領域である。SiC、GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンドなど、原理的に高効率化に優れるワイドギャップ半導体の研究開発が進むなか、主流のSi（シリコン）パワーデバイスの性能向上も続けられている。ワイドギャップ半導体の結晶品質向上、ウェハの大口径化、物性制御、デバイス構造、作製プロセスなど、材料・デバイス技術に関する研究開発課題に加え、受動部品や制御技術、実装技術、応用技術など、システム化に関する研究開発課題がある。

(2) キーワード

パワーエレクトロニクス、電力変換、パワーモジュール、パワー半導体デバイス、IGBT、MOSFET、スーパージャンクション、高電子移動度トランジスタ、HEMT、SBD、PINダイオード、スケーリング、デジタルゲートドライブ、シリコン、Si、ワイドギャップ半導体、炭化ケイ素、SiC、窒化ガリウム、GaN、ダイヤモンド、酸化ガリウム、Ga₂O₃、AlN、AlGaIn、MOCVD、HVPE、アモノサーマル法、Naフラックス法、自立基板、転位

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球温暖化の抑制に向けて二酸化炭素（CO₂）排出量の削減が世界的に強く求められており、従来の化石燃料エネルギーから太陽光、風力、地熱、潮流など再生可能エネルギーへの転換を促進するとともに、エネルギー消費の大幅な削減が必要となっている。全世界の最終エネルギー消費に占める電力の割合は年々上昇し続けており、電力の役割が増している現代において、電力を高い効率で利用し融通するパワーエレクトロニクス技術の研究開発と普及が重要となる。パワーエレクトロニクス技術は、省エネルギー化だけでなく、再生可能エネルギーの直接利用を実現し、化石燃料エネルギーへの過度な依存からの脱却に貢献する。

パワーエレクトロニクスの研究開発領域は、①Si、SiC、GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンドなどのパワー半導体材料・プロセス技術、②IGBT、MOSFET、HEMT、サイリスタ、ダイオードなどパワー半導体デバイスのチップ・モジュール技術、③インバータやコンバータなどパワー半導体デバイスを使用した電力変換システムとその応用、の3分野に大別できる。ここでは、ナノテクノロジー・材料分野と関係の深い①および②を中心にパワーエレクトロニクス分野を俯瞰する。

パワー半導体デバイスの開発の大きな目的は、電力密度を向上させ電力単価を低減させることである。そのためパワー半導体の動作特性として、導通時のオン抵抗低減およびスイッチング時の損失低減が研究開発目標となり、同時にオフ時の絶縁性能（オフ耐圧）を満たすことが要求される。今日のパワー半導体デバイスではSiが主として用いられているが、Siの材料定数の限界から来るデバイス性能の限界が指摘されており、高耐圧化と低損失化を両立できるワイドバンドギャップ半導体材料の研究開発が重要となる。SiCおよびGaNはすでに実用化フェーズに進んでおり、システムの高効率化と、高周波動作による小型化が可能となった。これに伴い、高周波対応の受動部品の開発、高周波回路技術、実装技術の開発も重要となっている。

パワー半導体デバイスの定格電圧は、IT産業に代表される低耐圧（100V以下）、民生・家電に代表される中耐圧（100V～600V）、産業ドライブ・運輸に代表される高耐圧（1200V）、鉄道・エネルギーグリッ

ドなどに代表される超高耐圧（1700V以上）と多岐にわたる。さらに、応用製品によって電流容量や周波数も大きく異なる。そのため、パワー半導体デバイスの研究開発動向は各耐圧領域に分けて議論することが適切といえる。また、整流・還流動作を目的としたダイオードと、スイッチング動作を目的としたサイリスタ・トランジスタ構造に分けての議論が必要である。パワー半導体デバイスは、一般にはパワーエレクトロニクス機器の中でダイオードとトランジスタを組み合わせたインバータ回路やコンバータ回路で用いられる。そのため、ダイオードおよびトランジスタの両者の性能向上が求められる。

【研究開発の動向】

世界のパワー半導体市場は2019年で約2.9兆円であり、このうち98%以上をSiパワー半導体が占める。2030年には4.3兆円に増大し、SiC、GaN、Ga₂O₃等のワイドバンドギャップ半導体の市場が著しく伸びる見通しであるが、Siパワー半導体市場も拡大し93%程度を維持すると予測されている。原理的に優れた特性を有するワイドバンドギャップ半導体の研究開発を進めるとともに、性能面とコスト面で着実に進歩が続いているSiパワー半導体デバイスの高い競争力を維持していくこともわが国にとって極めて重要である。以下、半導体材料ごとに研究開発動向を述べる。

• Si (シリコン)

低耐圧系（100V以下）では、現在普及しているSi-MOSFETのさらなる高性能化（低オン抵抗化）の開発が進んでいる。微細化・トレンチ構造などのMOSFETデバイス構造の改良とあわせて、Si基板の低抵抗化などによる性能向上が試みられている。後述する横型GaNデバイス（HEMT）は、低耐圧系でのSiの競合技術である。

中耐圧系（100V～600V）でもSi-MOSFETのさらなる高性能化が進んでいる。この耐圧領域ではスーパージャンクション（SJ）構造が用いられることが多く、トレンチ構造の最適化によるオン抵抗低減、プロセス技術の向上によるSJ構造の微細化・最適化が進んでいる。中耐圧系のうち600V付近ではSi-IGBTも普及している。今後、中耐圧領域の市場拡大は必然といわれており、この領域でも横型GaNデバイスが競合技術となる。

高耐圧系（1200V）ではSi-IGBTが主要パワーデバイスとして普及しており、フィールドストップ（FS）層導入、トレンチ構造の微細化、ウェハ薄膜化など、不連続技術の導入で性能向上を達成してきた。1200V系は、自動車等の電動化に伴って今後急激な需要の拡大が予想される。高耐圧系における競合技術はSiC-MOSFETである。

超高耐圧系（1700V以上）は、6.5kVまではSi-IGBT、それ以上ではSiサイリスタが主要なパワー半導体である。電力グリッド、電鉄などの超高パワー応用系に用いられることが多く、高耐圧とあわせて大電流容量が必須となる。超高パワー応用がゆえにパーセントレベルのわずかな損失も莫大な損失となるため、導通時のオン抵抗低減も必要である。再生可能エネルギーをはじめとする新電力エネルギーグリッドの拡大、世界規模での高速鉄道網など需要は大きく、この領域のSiパワー半導体技術開発は欧州・日本で競争となっている。超高耐圧系における競合技術もSiC-MOSFETである。

Siパワー半導体では、近年、大口径ウェハ量産技術開発により低コスト化が進んでいる。これまで200mm製造ラインが主流であったが、欧州のInfineonでは300mmラインでの製造が本格化している。米国ではLSI用の300mmラインをパワー向けに転用する動きがあり、中国では複数の300mmラインが建設中である。

• SiC (炭化シリコン)

1200V 耐圧の SiC-MOSFET とショットキー・バリア・ダイオード (Schottky barrier diode : SBD) を使用したパワエレ機器・システムの研究が応用フェーズに移行している。同一電圧・電流定格の Si-IGBT/PND モジュールと比較すると SiC-MOSFET/SBD モジュールの価格は 4~8 倍であるが、一部の太陽光発電用連系インバータや在来線鉄道車両などで SiC-MOSFET/SBD モジュールが実際に使用されている。産業機器や電鉄向け用途の 1700~3300V 耐圧素子、電気自動車や充電設備向けの 650~900V 耐圧素子も多くの企業から提供されている。2020年7月から営業運転を開始した新幹線電車 N700S では SiC デバイスを使用したインバータが採用され、N700 系の Si-IGBT インバータと比較して大幅な小型・軽量化を実現している。米国はコンピュータ断層撮影装置 (CT) や核磁気共鳴画像装置 (MRI) など医療用機器への応用で世界をリードしている。

製造コストを下げるため、デバイス製造ラインの主流は 4 インチから 6 インチへと移行した。高品質 8 インチウエハの市場投入も始まっている。ただし、デバイスを高い歩留まりで形成できる高品質大口径ウエハの供給量は十分ではなく、その確保が課題となっている。現在ほとんどの SiC ウエハは昇華法により作製されており、長尺のインゴットを成長させることが難しい。成長速度の向上や長尺化、高品質化、さらなる大口径化をめざし、ガス法や溶液法による結晶成長技術の研究開発が進められている。

SiC-SBD は、技術的には高い完成度にあると考えられる。600V 以上の耐圧系のパワーモジュールでは、従来の Si の pn ダイオード (PND) に代わって SiC-SBD を採用したパワーモジュールが一般化してきている。PND と異なり SBD は蓄積キャリアが存在しないため、高速化・低損失化が可能となる。逆方向に高電圧が印加された際のショットキー障壁の電界を緩和してリーク電流を抑えるため、JBS (Junction Barrier Controlled Schottky) や MPS (Merged PIN Schottky) とよばれる p 型層を配置したデバイス構造が主流となっている。

SiC-MOSFET は、従来からの課題である低いチャネル移動度が解決されたわけではないが、短チャネル化やトレンチゲート化などデバイス構造の工夫により、Si デバイスに対して十分な低オン抵抗を実現している。しきい値電圧変動の抑制も従来から残っている課題である。特に負ゲートバイアスを印加した際の変動が大きく、このため負バイアス印加が -5V 程度に制限されているものが多い。MOSFET には pn 接合のボディダイオードが内蔵されているため、インバータ回路ではこれを積極的に活用したい場面がある。ボディダイオードに通電すると、電子・正孔の再結合エネルギーにより基底面転位 (basal plane dislocation : BPD) を起源として積層欠陥 (stacking fault : SF) が拡張する、いわゆるバイポーラ劣化と呼ばれる現象が起こり、MOSFET のオン抵抗増大につながる。BPD を低減した基板の開発や、エピ成長初期に BPD を貫通刃状転位 (threading edge dislocation : TED) に変換する技術が開発されている。どのような欠陥がバイポーラ劣化を引き起こすか、またはバイポーラ劣化を起こす再結合電流のしきい値などが研究されている。一方で、内蔵ダイオードの代わりに SBD を MOSFET に内蔵させる研究開発がさかんである。これまでは学会発表が主であったが、量産開始のアナウンスもされ始めた。用途によっては、今後の主流デバイス構造となる可能性がある。

10kV を超える超高耐圧 SiC パワーデバイスについては、日本では電力系統応用をめざした IGBT および PIN ダイオードの報告があり、米国では DARPA の支援により IGBT、GTO (Gate Turn-Off thyristor) などのバイポーラ型デバイスに加え、MOSFET も開発されている。

• GaN (窒化ガリウム)

Si 基板上にヘテロエピタキシャル成長させた GaN 層を用いた横型パワーデバイスの開発がさかんに行われ

ている。これは高周波トランジスタのGaN-HEMT技術を活用したもので、GaN-on-Si横型パワーデバイスとよばれている。このデバイス開発の最大の課題は熱膨張係数差によるウェハの割れであったが、GaNとSi基板の間にAlGaN/GaN超格子などを導入し、成長温度において熱膨張係数差を相殺する歪をGaNデバイス層に意図的に与える技術が進展し、製品化が可能となった。米国のEPC、International Rectifier (IR)、Transphormがまず製品化を行い、現在では、Panasonic、GaNsystem、On semiconductorなども製品化している。600V耐圧品を中心に製品の出荷が始まっており、ACアダプタ、サーバ用電源、LED用電源、太陽光発電システム用パワーコントローラなどの製品が開発されている。プラグインハイブリッド自動車のチャージャーの試作展示も行われ、自動車分野への採用も目前に迫っている。

一方、縦型のGaNデバイスも最近大きく進展している。レーザ用に開発されたハイドライド気相成長 (hydride vapor phase epitaxy : HVPE) 法によるGaN自立基板を用いた縦型GaNパワーデバイスの研究開発がこの7年間で大きく進展した。日米欧のプロジェクトにおいて、ウェハ、エピ技術、デバイスプロセス技術、デバイス構造などの検討、デバイス試作によるデモンストレーションが進んでいる。最終的に普及の鍵となるのはコストパフォーマンスであるが、HVPE法によるGaNバルク結晶の作製技術が洗練されてきていることに加え、三菱ケミカルで開発されているアモノサーマル法や、大阪大学で開発されているNaフラックス法など、高い量産性が期待される技術が立ち上がりつつある。

• Ga₂O₃ (酸化ガリウム)

Ga₂O₃に関しては、近年研究者人口、学術論文出版数の大幅な増加が認められる。最安定結晶構造に相当するβ-Ga₂O₃のバルク単結晶の融液成長技術開発に関しては、これまでのチョコラルスキー、Edge-defined Film-fed Growth (EFG)に加えて、ブリッジマン技術に進展が認められる。Ga₂O₃ウェハメーカーの最大手であるノベルクリスタルテクノロジーは、EFG単結晶バルクから6インチ径ウェハの製造に成功した。市販品として4インチウェハが生産されている。信州大学からは、水平ブリッジマン法による2インチ径単結晶バルクの育成が最近報告された。薄膜エピタキシャル成長に関しては、分子線エピタキシー (molecular beam epitaxy : MBE)、ハライド気相成長法、有機金属気相成長法 (metal organic CVD : MOCVD) などの開発競争が行われている。

日本や米国を中心にデバイス開発も活発化しており、トランジスタ、ダイオードの開発の成果がこの1~2年でさらに多く発表されるようになった。縦型構造に関してはトランジスタ、SBDともに着実な進展がみられるが、横型トランジスタについてはデバイス特性の小さな改善にとどまり大きな進展は認められない。

準安定構造に相当するα-Ga₂O₃の薄膜結晶成長やデバイス開発も活発化している。α-Ga₂O₃は、主にサファイア基板へのヘテロエピタキシャル成長で得られる結晶構造であるため、準安定構造の中ではもっとも研究が進んでいる。FLOSIA社はα-Ga₂O₃を用いたSBD、トランジスタの開発を進めている。その他、準安定構造であるε-Ga₂O₃の薄膜結晶成長研究も、国内外機関から報告されている。

• ダイヤモンド

高耐圧・超高耐圧領域の将来技術として、優れた熱伝導性と大きなバンドギャップを有するダイヤモンドについても半導体物性の理解とあわせて、ダイヤモンド基板の合成、ダイオード、トランジスタ原理実証などが試みられている。日本にはダイヤモンドのCVD合成の先導的な研究、リンによるn型ドーピング、ノーマリーオフ特性を持つMOSFETの動作実証など、当該分野での画期的な先行研究が行われている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

Siパワーデバイスでは、わが国発のIGBT新技術「IGBTスケーリング」の効果実証がなされ注目を集めている。これはIGBTのMOS駆動部の密度を上げずに微細化（スケーリング）することで、MOS駆動の性能を向上させつつキャリアの逆注入を抑え、キャリア注入レベルを向上させる技術である。1200V系でも3300V系でも従来IGBTと比較して約35%のターンオフ損失が実現されている。IGBTスケーリングによりゲート駆動電圧を従来の15Vから5Vに低減できるため、ゲート駆動集積回路をデジタル化し、人工知能（AI）などの最先端情報技術を用いてパワーエレクトロニクス機器をインテリジェント化することができる。

SiCパワーデバイスに関しては、Tesla製の電気自動車にSTMicroelectronics製のSiC-MOSFETが採用され、大きな話題となった。SiC-MOSFETチップにSBDを内蔵したモジュールの研究開発は完了し、量産のための技術開発に移行している。耐圧1700VまでのSiC-MOSFETチップではSBDを除去して製造コストを抑える実装技術が進展している。欧州の大学では域内の公的機関から、米国の大学はNSFなどからそれぞれ研究資金を獲得し、10kV耐圧のSiC-MOSFET/SBDモジュールを使用したSST（Solid-State Transformer）の研究を実施している。現在のSiC-MOSFETはプレーナゲート構造が一般的であるが、RohmとInfineonがトレンチゲート構造を採用したSiC-MOSFETのモジュールを市場に投入している。

GaNパワーデバイスに関しては、GaN-on-Si横型パワーデバイスが移動体通信の基地局に使用され始め、また小型で持ち運びが容易なUSB高出力充電器として販売されるなど、産業として本格的に立ち上がった。GaN-on-Siは高速スイッチング特性でSiに対し圧倒的な優位性があり、スイッチング周波数を1MHzまで引き上げることができる。高周波化によりトランスやコンデンサなどの受動部品を大幅に小型化できるため、システム全体の小型軽量化、コスト低減を実現できる。これに伴い、高周波対応の受動部品の開発、高周波回路技術、実装技術の開発が必要となる。また、極めて困難と考えられていたMgイオン注入によるGaNのp型化技術にも近年進歩がみられた。2019年に名古屋大学のグループがポーランドの高圧物理研究所（UNIPRESS）と共同でMgイオン注入後の超高压窒素アニール（1万気圧）の研究を系統的に行い、低温から高温までホール効果測定が可能でp型化に成功した。再現性や均一性などの問題が完全にクリアされ、注入Mgの70～80%がアクセプタとして働いていることが確認されている。MOS界面に関しては、ノーマリーオフの反転チャンネルMOSFETでチャンネル移動度 $150\text{cm}^2/\text{Vs}$ を越えるものが報告されており、Mgイオン注入領域上への横型MOSFETの試作も報告されている。2020年には内閣府の戦略的イノベーション創造プロジェクト（SIP）の研究成果として、Mgイオン注入を用いた耐圧1200VのGaN-MOSFETの試作が富士電機より報告された。また、SiC基板上にGaN-HEMTを作製するGaN-on-SiCパワーデバイスも検討されている。SiCの熱伝導率はSiの3倍以上であり、放熱効果が格段に優れている。

Ga₂O₃パワーデバイスに関しては、この2年間に縦型SBDに関する多くの開発報告がなされた。米コーネル大学はトレンチ構造を採用した優れた特性のSBDを報告している。縦型トランジスタ開発は、コーネル大と情報通信研究機構の2機関で行われている。コーネル大ではトレンチ構造を用いた縦型フィントランジスタ（FinFET）を開発した。情報通信研究機構において開発された縦型トランジスタでは低コストプロセスであるイオン注入ドーピングを用いている。Ga₂O₃薄膜エピタキシャル成長に関しては、特にこの2年でMOCVD技術の進歩が目覚ましく、米国の大学と企業による研究開発によってHVPE成長膜と同等程度以上の結晶品質が実現された。MOCVDは高品質（AlGa）₂O₃混晶薄膜を成長可能であることも大きな利点である。

ダイヤモンドパワーデバイスに関しては、産業技術総合研究所発のベンチャー企業であるEDPが、10mm×10mmの単結晶ダイヤモンドを量産しているほか、アダマンド並木精密宝石がマイクロニードル成長法を

複合させて大口径基板の安定製造を可能にするなど、ダイヤモンドウェハの大口径化が進展している。またSiウェハとの直接接合技術も進展している。欧州ではElement Sixがダイヤモンドウェハ開発を行っている。ダイヤモンドMOSFETの開発でも日本がリードしており、金沢大学や早稲田大学でノーマリーオフ特性を有するMOSFETの動作に成功している。非プラズマプロセスによるダイヤモンド基板の高速異方性エッチング技術が開発されるなど、加工プロセス技術の研究開発も進んでいる。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

各国で進められてきた大型プロジェクトの多くが2020年頃までに終了を迎え、Si、SiC、GaNについては、企業における量産技術開発フェーズに移行しつつある。ただし、国内のTIAやTPEC、米国のFREEDMなど、産官学のコンソーシアムで様々な研究開発課題に取り組む体制が継続している。以下、国内外で進行中もしくは最近終了した注目プロジェクトを地域ごとにまとめる。

国内では、経済産業省の「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」でSi-IGBTの研究開発が2014年度から2019年度まで実施され、IGBTスケーリングの実証やデジタルゲートドライブなどの成果をあげた。同プロジェクト内でSiCの応用技術開発も進められた。2014年度から2018年度まで内閣府が主導したSIPでは、SiC、GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンドに関する包括的な研究開発が実施された。研究費のおよそ半分がSiC関係に投入され、高耐圧デバイス用の多層膜ウェハやその伝導度制御、6.5kV級のSJ-MOSFETおよび20kV級のバイポーラ（IGBT、PINダイオード）デバイス、小型・高温・高速動作が可能な次世代モジュール、SiC-MOSFET/SBDモジュールのパワーエレクトロニクス機器・システムへの応用研究が進められた。2018年11月からのSIP第2期では、ユニバーサルスマートパワーモジュール（USPM）への応用をめざした α -Ga₂O₃パワートランジスタ開発が行われている。文部科学省、環境省でもGaNパワーデバイス関連プロジェクトが進行している。2016年には文部科学省「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」事業による結晶創製拠点（名古屋大学）や、名古屋大学と産総研との窒化物半導体先進デバイスオープンイノベーションラボラトリ（GaN-OIL）が発足し、名古屋大学を中心にGaNデバイスの研究開発が精力的に進められている。

欧州では、EU内のエネルギー融通、CO₂削減などを主目的に、パワーエレクトロニクス機器・パワー半導体関連の技術革新のために、各種プロジェクトが展開されてきた。2017年度から始まったR3-Powerupでは、STMicroelectronicsがコーディネータとなり、Si-300mmパイロットラインを活用し、個別半導体素子開発からロジック、アナログデバイスとパワーデバイスの統合によるシステムオンチップ、パワーIC開発を進めている。2019年からはInfineonがコーディネータを務めるPower2Powerがスタート、300mmウェハによる1700V Si-IGBT技術、200°C動作での電力密度20%向上、キャリアライフタイムの50%向上などを目標に掲げている。ドイツではGa₂O₃結晶成長および物性研究に関する大型研究プロジェクトGraFOxが2016年から実施された。GraFOxは最近終了したが、その後継に当たる新規プロジェクト（仮称：GraFOx 2）が計画されている。パワーエレクトロニクス機器・システム関連では、アーヘン工科大学がドイツ最大の電力・ガス供給会社エーオンからの研究資金を得て次世代直流電力供給ネットワークの研究プロジェクトを推進している。

米国では2016年のトランプ政権発足後、大学のパワーエレクトロニクス研究開発予算が削減されたが、エネルギー省（DOE）や国防総省（DOD）からの補助金による研究プロジェクトは継続している。DOEエネルギー高等研究計画局（ARPA-E：Advanced Research Projects Agency-Energy）では、CIRCUITS（Creating Innovative and Reliable Circuits Using Inventive Topologies and Semiconductors）や

BREAKERS (Building Reliable Electronics to Achieve Kilovolt Effective Ratings Safely) などのプログラムが実施され、SiやSiC、GaNパワーデバイスを用いた回路技術や実装技術が研究されている。また、米国でのハイテク製造業の雇用創出とパワーエレクトロニクスシステムへのワイドギャップ半導体 (SiC、GaN) の大規模適用により省エネルギー化をめざすプロジェクト PowerAmerica が、2015年から5年間、DOE主導で実施された。2019年から米国の複数大学が研究チームを結成し、ARPA-Eの資金援助を受けて、中電圧・高電圧高速直流遮断器に関する最長5年の研究プロジェクトを推進している。これは現在の交流給電ネットワークの一部を直流送電・配電に置換、あるいは併用の実現をめざしたもので、その要の技術が高速直流遮断器である。Ga₂O₃結晶成長および物性研究にも、DODから大型研究ファンドが相次いで投入されている。2019年からは空軍研究所 (AFRL) とコーネル大の共同研究としてUCoE (University Center of Excellence) が始まり、Ga₂O₃材料およびデバイスの研究開発が行われている。

中国は、最近論文の発表件数が急増していることから、豊富な研究資金が各研究機関に配分されていると考えられる。SiCの材料、デバイス、システムの垂直統合開発をthe National Key Research and Development Program of Chinaの一環で行っており、多くの人材と予算が投入されているといわれている。また多くの大学や研究所がこの1~2年でGa₂O₃の研究開発を始めており、急激な盛り上がりを見せている。韓国では MOTIE/KEIT と呼ばれるプロジェクトや、パワーデバイス応用に向けた研究開発ファンド Development of epitaxies and power devices technologiesが2017年より実施されている。

(5) 科学技術的課題

Siパワー半導体デバイスは、すでに完成した技術と考えられることがあるが、わが国の強みを今後維持していくためには課題が山積している。特にSi-IGBTにはまだ性能向上の余地がある。その1つが高速化 (損失低減) である。バイポーラデバイスであるIGBTは、ターンオフ時にキャリアがnベース層に残り、電流が完全にオフになるまで時間を要する。オフ電流の切れの悪さは、そのままターンオフ損失の増大につながる。そこで第2のゲートを設け、第1のメインゲートとタイミングをずらしてnベース内のキャリアの動きを制御する方法 (デュアルゲートIGBT) が提案されている。Si-IGBTの定格電圧の上限は現状6500Vだが、さらに高い耐圧 (13000V) が達成できれば電力送電への応用も可能になる。また、わが国が圧倒的に強いSiウェハ技術にも多くの課題が残されている。Siパワーデバイスは縦型デバイスであり基板全体を活用するため、大規模集積回路 (LSI) よりもウェハに対する品質要求が厳しい。特に酸素・炭素などの軽元素濃度低減が課題となっている。現在、Siパワーデバイス用のウェハはフローティングゾーン (FZ) 法を用いて製造されているが、FZウェハは大口径化に対応できない。そこで大口径化が容易な磁場印加チヨクラルスキー (MCZ) 法によるウェハの高品質化が重要な研究開発課題となる。

SiCパワー半導体については、SiC基板製造技術がボトルネックとなっており、大口径化・高品質化・低コスト化を満足する結晶成長技術を開発する必要がある。現状使われている昇華法は、結晶成長科学としても、結晶成長技術としても、いまだ不明な点が多く、基礎的な観点から再構築する必要がある。また、Si-IGBTの代替として期待されるSiC-MOSFETは、MOS界面とイオン注入技術に課題が残されている。MOSチャネル抵抗成分は小さくなってきているが、依然として多くの界面準位、酸化膜欠陥、固定電荷が存在する。また、MOSFETのボディダイオードはイオン注入で形成されるが、イオン注入で形成したPINダイオードの順方向電流特性はエピ成長で形成したものに比べてオン電圧が高い。今後、pチャネルMOSFETやCMOS-ICへの展開、超高耐圧領域用のIGBTやPINダイオードなどバイポーラ素子の開発に向けて、MOS界面とイオン注入の基礎的な学理を構築する必要がある。

GaN パワー半導体については、p型イオン注入活性化技術、MOSFET 技術が整い、信頼性向上と GaN 基板の大口径化・低コスト化が次なる課題である。特に MOSFET では、MOS の信頼性と安定性の向上が極めて重要な課題となる。アバランシェ耐量を代表例として、GaN パワー半導体の破壊物理の検討も必要である。横型デバイスを念頭にした大口径ヘテロエピタキシャル基板作製技術、縦型デバイスを念頭にしたバルク基板作製技術、デバイス不良をもたらす貫通転位の特異性と抑制など、いずれも結晶成長科学・欠陥物理などと合わせて、装置技術としての開発が必要である。

Ga₂O₃ については、本質的な課題として十分なホール濃度の p 型の実現が困難なことがある。このため、他の p 型材料を組み合わせる方法の検討も重要である。もう一つの大きな課題として Ga₂O₃ デバイスの放熱性の向上がある。Ga₂O₃ の熱伝導率は Si、SiC、GaN と比較して 1 桁程度小さく、大電力動作時の自己発熱が問題となる。高熱伝導率および電気伝導率を有する異種材料基板への直接接合技術なども検討する必要がある。

ダイヤモンドパワーデバイスは既存のデバイスの性能を大きく上回る可能性があるが、ウェハ価格、成膜や研磨、エッチングなどのプロセス開発など、実用化に向けて解決すべき課題が多く残っている。デバイスの実用化には 2 インチウェハが必要とされており、2 インチウェハの実用化は 2025 年、デバイスの実用化は 2030 年と予測されている。

パワーエレクトロニクス機器・システムの実用化・製品化には最先端の高性能パワー半導体デバイスだけでなく、磁気部品（変圧器、リアクトル）やキャパシタ（コンデンサ）などの受動部品、各種センサ、デジタル信号処理技術（DSP、FPGA、A/D 変換器などを含む）、制御技術、実装技術、放熱・冷却技術なども重要である。実際の製品では、パワー半導体デバイスではなく、他の部品が機器・システム全体の性能・仕様を決定する、いわゆる「ボトルネック」が存在することが多い。このため、パワー半導体デバイスの特性を十分に引き出せるような受動部品や制御技術、実装技術などシステム化の研究開発にも取り組んでいく必要がある。

(6) その他の課題

ワイドギャップ半導体材料は日本が主導的役割を果たして育ててきた技術であるが、欧米や中国が多額の研究資金を投入して研究開発を加速しており、今後も日本が技術優位性、産業競争力を維持していけるかどうか予断を許さない状況にある。特に米国では、Ultrawide bandgap (UWBG) と呼ばれる、SiC や GaN よりもバンドギャップの大きな半導体材料（Ga₂O₃、ダイヤモンド、AlN、立方晶 BN など）に対する注目が高まっており、研究ファンドが拡大し研究者人口も増加している。Si パワーデバイスも着実に日々進化しており、常に新しい物理、科学、技術の導入が求められる。国内の量産工場で基礎的な検討や新規パワーデバイスの開発を行うことは困難であり、大学や公的研究所を中心に材料・デバイスの研究開発拠点体制、共通プラットフォームを整備していくことが重要である。次世代の研究開発を担う若手人材が不足していることも深刻な課題である。特にパワーエレクトロニクス機器・システムの研究開発には幅広い知識が必要であり、人材教育に時間を要し、企業の求人に対して大学からの人材供給が追いついていない。大学におけるパワー半導体、パワーエレクトロニクス関係の教育を充実させ、産学官連携のプロジェクトの中で若手の学生、研究者、技術者に高度な研究開発の機会を提供することが望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	Siパワーデバイス技術のポテンシャルは依然として高い。Si-IGBTスケールリング則の実証で世界をリードしている。SiC、GaN、Ga ₂ O ₃ 、ダイヤモンドすべての材料で世界トップレベルにある。SiC、GaNでは基板の大口径化、欠陥密度低減、MOS 界面準位密度の低減、イオン注入技術、縦型トレンチ構造 FET の開発が進展している。SiC-MOSFET/SBD モジュール技術の基礎研究が企業や大学を中心に進められている。GaN 縦型パワーデバイスに関して、国家プロジェクトの成果が多く出ており、システムの基礎研究を行っている大学も増えている。応用第2期SIPでも高速スイッチング GaN 縦型 MOSFET の開発が行われている。Ga ₂ O ₃ の材料研究、デバイス基盤技術開発が、大学、国研、企業で広がりつつあり、発表論文数、国際会議の発表件数が増加している。ダイヤモンドでは、伝導型の制御、MOSFET の試作などで優れた結果が報告されている。
	応用研究・開発	◎	↗	Si-IGBTではデュアルゲート技術など新技術開発が進んでいる。欧米がSiパワー半導体のシステム化に移行しつつあるのに対し、日本の技術開発は総じて個別半導体デバイスにとどまる。一方SiCについては、SiC-MOSFET/SBD モジュールの応用研究・開発が企業を中心に活発に進展し、SiCインバータが新幹線車両 N700S に搭載されるなど、SiからSiCへと置き換えが進んでいる。GaN は低耐压品を主として市場への投入が進んでいる。低価格を指向した GaN-on-Si 基板と、縦型デバイスを指向した GaN 自立基板の2つの方向で応用研究が進められている。GaN 自立基板について、HVPE 技術の洗練、Na フラックス技術、アモノサーマル技術などの開発が進んでいる。ベンチャー企業のノベルクリスタルテクノロジーが世界で唯一 Ga ₂ O ₃ バルクおよびエピ基板の製造販売をスタートしている。
米国	基礎研究	◎	→	Ultrawide bandgap 半導体への注目が高まっており、Ga ₂ O ₃ 関連の研究者人口が急激に増加している。研究資金提供元としては、AFOSR、NSF、ONR、DOE などがあげられる。Siでは目立った動きは少ないが、SiCについては企業と大学の共同研究やコンソーシアムにおける研究でトップレベルの報告が多い。GaNに関する基礎研究は縮小傾向にある。横型の GaN-HEMT を使用したシステムの基礎研究を行っている大学が増加している。
	応用研究・開発	◎	↗	Si-IGBTに関して、On semiconductor社がその製造を目的としてGlobalFoundries社の300mmラインを買収した。SiCについてはCree/Wolfspeedをはじめとする多くの企業でウェハやデバイスの研究開発および生産が行われている。ファウンドリも活用されている。DOEのCIRCUITS、BREAKERSプロジェクトではSiCおよびGaNパワーデバイスの応用技術の研究開発が進められている。主に性能と小型・軽量化を優先した医療機器、損失低減を重視した大容量太陽光発電を対象としている。横型の GaN-HEM については、一部の米国企業は GaN-HEMT を使用したサーバ用電源を製品化している。
欧州	基礎研究	◎	→	【EU】パワー半導体関係のプロジェクトの多くが終了し、大学や国立研が企業と連携してパワーエレクトロニクス機器・システムの研究開発に比重を移しつつある。直近の製品化を見据えているため、Si-IGBTモジュールの使用を前提とした基礎研究が多く、SiC-MOSFET/SBDモジュールの応用に関する基礎研究は足踏み状態である。GaNについてはGaN-on-Siで低コストな縦型デバイスを開発するプロジェクトが進められている。 【ドイツ】Ga ₂ O ₃ に関して、ベルリン地区で大学・国研が一体となって材料研究プロジェクトが進められている。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

	応用研究・開発	◎	↗	<p>【EU】産業競争力強化を念頭にして材料からデバイス、応用まで垂直統合的にカバーするプロジェクトが進められてきた。GaN-on-Si 横型パワーデバイスに関してIMECやフラウンホーファー研究所などで産学連携のプロジェクトが進行している。Ga₂O₃デバイス開発は基盤技術開発の段階にある。</p> <p>【ドイツ】Infineon社が世界で唯一300mmラインでのSiパワーデバイスの製造を本格稼働させており、圧倒的な技術とコスト競争力をもつ。SiC、GaNのデバイス技術でも世界をリードしている。</p> <p>【スイス】STMicroelectronics製のSiC-MOSFETがTesla製の電気自動車に採用され、大きな話題となった。</p>
中国	基礎研究	○	↗	<p>欧米日から帰国した研究者が研究をリードし、かつ重点大学制度を活用した若手育成を徹底している。その結果、パワー半導体・パワーエレクトロニクスの国際学会における発表件数が著しく増加している。ただし、シミュレーションのみの研究や後追い研究が多く、オリジナリティやインパクトは高くない。SiCに関しては、日欧米から輸入した最新のSiC-MOSFET/SBDで小容量パワエレ機器・システムの基礎研究を行っているが、周辺部品がボトルネックとなっている。GaNに関しては、基幹研究大学にGa₂O₃に関する研究費が投入されており、Ga₂O₃に関する研究も増えている。Ga₂O₃について多くの大学から報告されるようになり、科学的・技術的レベルは大きく上昇している。</p>
	応用研究・開発	○	↗	<p>国内製造技術の強化を図る「中国製造 2025」には直接パワー半導体は取り上げられていないが、新エネルギー自動車（NEV）や鉄道などで膨大なパワー半導体の内需があり、複数のSi-IGBT向け300mmラインが建設中との報道もある。量的には今後数年で中国の世界シェアが急増する可能性がある。</p> <p>SiCについても、ウェハ、デバイス、モジュールから最終製品まで一貫通貫で開発が行われており、非常に活発である。展示会等で多くのブースが出展されている。GaNについては、HVPE法によるGaN基板を作るメーカーが誕生し、創業から数年であるにも関わらずある程度の品質を実現している。GaNデバイスの市場投入の動きはまだ見られない。</p>
韓国	基礎研究	△	↘	<p>最近、国際学会で発表が低迷しているだけでなく、参加者（聴講者）数も低迷している。SiC-MOSFET/SBDやGaN-HEMTは輸入に頼っており、パワーエレクトロニクス機器・システムに関する基礎研究は低迷している。</p>
	応用研究・開発	△	↘	<p>これまでの財閥系の新材料開発の勢いはなく、低迷している。SiデバイスについてはOn semiconductorが富川市の工場で生産することを発表しており、今後の開発が加速する可能性がある。</p>

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）（環境・エネ分野 2.1.8）

参考・引用文献

- 1) 富士経済グループ『2020年版 次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望』(東京: 富士経済, 2020), <http://www.fuji-keizai.co.jp/report/detail.html?code=141909826>.
- 2) 津田建二「パワー半導体の王者 Infineon は冬の時代に何を考えるのか?」マイナビニュース, <https://news.mynavi.jp/article/car-electronics-132/> (2021年1月27日アクセス).
- 3) 服部毅「半導体不況どこ吹く風の中国パワー半導体市場 - 2019年も12%成長の予測」マイナビニュース, <https://news.mynavi.jp/article/20190308-785604/> (2021年1月27日アクセス).
- 4) 平本俊郎, 大村一郎「スケーリング IGBT が拓くパワーエレクトロニクス of 新しいパラダイム」『応用物理』86巻11号(2017): 956. https://kyutech.repo.nii.ac.jp/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_action_common_download&item_id=5271&item_no=1&attribute_id=17&file_no=1&page_id=13&block_id=21
- 5) T. Saraya, et al., “Demonstration of 1200V Scaled IGBTs Driven by 5V Gate Voltage with Superiorly Low Switching Loss”, *International Electron Devices Meeting, IEDM* 8614491 (2019): 8.4.1-8.4.4. doi: 10.1109/IEDM.2018.8614491
- 6) T. Saraya et al., “3300V Scaled IGBTs Driven by 5V Gate Voltage”, *2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (2019): 43-46. doi: 10.1109/ISPSD.2019.8757626
- 7) ECSEL Joint Undertaking, “R3-Powerup”, COMODO, <https://www.ecsel.eu/projects/r3-powerup> (2021年1月27日アクセス).
- 8) Y. Takeuchi et al., “A Novel Hybrid Power Module with Dual Side-gate HiGT and SiC-SBD”, *IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (2017): 57. <https://www.hitachi-power-semiconductor-device.co.jp/event/symposium/ispsd2017/index.html>
- 9) H. Yano et al., “Fast 4H-SiC Bulk Growth by High-Temperature Gas Source Method”, *Mater. Sci. Forum* 1004 (2020): 5-13. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.5
- 10) K. Puschkarsky et al., “Review on SiC MOSFETs High-Voltage Device Reliability Focusing on Threshold Voltage Instability”, *IEEE Trans. Electron Devices* 66, no. 11 (2019): 4604-4616. doi: 10.1109/TED.2019.2938262
- 11) Y. Ebiike, et al., “Reliability Investigation with Accelerated Body Diode Current Stress for 3.3 kV 4H-SiC MOSFETs with Various Buffer Epilayer Thickness”, *Proc. 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)* (2018): 447-450. doi: 10.1109/ISPSD.2018.8393699
- 12) H. Yano et al., “Towards Making SiC ICs Durable and Accessible for Use in the Most Extreme Environments (Including Venus)”, *Mater. Sci. Forum* 1004 (2020): 1057-1065. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1004.1057
- 13) R. Tanaka et al., “Mg implantation dose dependence of MOS channel characteristics in GaN doubleimplanted MOSFETs”, *Applied Physics Express* 12, no. 5 (2019): 054001 doi: 10.7567/1882-0786/ab0c2c
- 14) J. L. Hudgins et al., “An assessment of wide bandgap semiconductors for power devices”,

- IEEE Tran. Power Electron.* 18, no. 3 (2003) : 907-914. doi : 10.1109/TPEL.2003.810840
- 15) M. Higashiwaki et al., “Gallium oxide (Ga_2O_3) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal β - Ga_2O_3 (010) substrates”, *Appl. Phys. Lett.* 100, no. 1 (2012) : 013504. doi : 10.1063/1.3674287
- 16) K. Hoshikawa et al., “50 mm diameter Sn-doped (0 0 1) β - Ga_2O_3 crystal growth using the vertical Bridgeman technique in ambient air”, *J. Cryst. Growth* 546 (2020) : 125778. doi : 10.1016/j.jcrysgr.2020.125778
- 17) J. Y. Tsao et al., “Ultrawide-Bandgap Semiconductors : Research Opportunities and Challenges”, *Adv. Electron. Mater.* 4, no. 1 (2018) : 1600501. doi : 10.1002/aelm.201600501
- 18) H. Akagi, “Multilevel Converters : Fundamental Circuits and Systems”, *Proceedings of the IEEE* 105, no. 11 (2017) : 2048-2065. doi : 10.1109/JPROC.2017.2682105

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

2.1.4 エネルギーキャリア

(1) 研究開発領域の定義

再生可能エネルギーの本質的課題である時間的・空間的偏在を克服するために必要とされる。再生可能エネルギーを電力以外のエネルギー物質として長距離輸送し、中長期かつ大規模に貯蔵する媒体、エネルギーキャリアに関する研究開発領域である。有望なエネルギーキャリアとして、水素・アンモニア・有機ハイドライドなどがあげられる。再生可能エネルギーによる水素製造と水素の貯蔵・輸送・利活用技術としての液化水素、アンモニア・有機ハイドライドの高効率製造・脱水素技術（触媒・分離膜）、アンモニア・有機ハイドライドの直接活用技術などの研究開発課題がある。

(2) キーワード

エネルギーキャリア、再生可能エネルギー、液体水素、アンモニア、有機ハイドライド、水素化、脱水素、クラッキング、オートサーマル反応、燃料電池、固体酸化物形燃料電池、アルカリ形燃料電池、アニオン交換膜形燃料電池

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球温暖化を抑制するため、2050年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする目標が掲げられており、そのためには脱化石燃料や低炭素化技術を進め、再生可能エネルギーの大規模利用や水素社会の普及が必要とされる。太陽光や風力などの再生可能エネルギーは生産地が一般には都市部など消費地の遠隔にあり、さらに時間や季節、天候によって得られるエネルギー量が大きく変動する。クリーンで、かつ量的な可能性を有する再生可能エネルギーを大規模に利用するためには、エネルギーの生産地で水素を多く含む化学物質（エネルギーキャリア）を製造し、これを消費地まで運搬して最適な形で水素やエネルギーに戻すようなシステムの構築が必要となる。水素、メチルシクロヘキサン（MCH）、アンモニアなどがエネルギーキャリアとして注目され、普及、実用化に向けて検討が進んでいる。液化水素は純度が高く、水素ステーションなどでの利用に向いているが、沸点が低いために、液化に要するエネルギーや運搬貯蔵中のボイルオフの問題がある。MCHは石油インフラがそのまま使える優位性があるが、この3者のなかでは水素貯蔵密度が低い。アンモニアは貯蔵密度が高いが有害性があるなど、エネルギーキャリア候補はそれぞれ長所と短所を抱えており、またエネルギーキャリアとしての導入にいたる開発のステージも異なっている。MCH、液化水素については国際的な製造輸送の試みが始まろうとしている。

[研究開発の動向]

エネルギーキャリアに関するプロジェクトとして、古くはEuro Quebec Hydro Hydrogen Pilot Project (EQHHPP、1986～1998年)にて液化水素、アンモニア、トルエン/メチルシクロヘキサン系有機ケミカルハイドライドをエネルギーキャリアの候補とし、カナダの水力発電を用いて欧州に大規模水素輸送を行うプロジェクトが実施された。EQHHPPではメチルシクロヘキサンから脱水素する触媒が開発できなかったことから、液化水素が現実的な選択とされた。これをうけ、日本のWorld Energy NETwork (WE-NET、1993～1998年)では、液化水素をエネルギーキャリアとして南米およびカナダの水力発電を基盤としたプロジェクトが実施された。その後、世界的に水素関係の研究開発は燃料電池に集中投資されていたが、近年、

世界的にも二酸化炭素排出量抑制のためには再生可能エネルギーを基盤とする必要があり、水素の重要性が再認識されている。

再生可能エネルギーによる電力の導入による電力網のアンバランス解消と電力をさまざまな用途で利用する技術としてのPower to Xのキー技術として、世界的に水電解による水素製造技術の重要性が増している。EU、ロシアや北米地域では天然ガスのパイプラインが発達しており、Hydrogen Europeや米国エネルギー省では、水素の輸送に関しては1) 圧縮水素（ボンベやカードル）、2) 液化水素、3) パイプライン、4) ハイタン（水素と天然ガスの混合）のパイプライン、水素の貯蔵に関しては1) 圧縮水素（ボンベやカードル）、2) 液化水素、3) 材料への貯蔵（金属水素化物、有機ハイドライド、吸着）、4) 地下貯蔵、5) ガス配管網などのオプションがあるとして整理されている。日本の場合、船舶輸送が前提となるため、船舶輸送に適した水素の輸送・貯蔵技術に注目する必要がある。また、水素はアンモニア製造に必要な重要な原料でもある。

アンモニアは、肥料原料や汎用化学品原料として大量に使用され、その製造方法はハーバー・ボッシュ法として確立されている。1972年には鉄（Fe）触媒よりも高活性なルテニウム（Ru）触媒が東京工業大学の秋鹿、尾崎らによって発見された。数MPaの水素圧でもアンモニア合成が可能であり、近年、環境負荷の低い触媒として再注目され、その担体を変えた種々のRu系触媒合成の研究が日本を中心に行われている。一方、ハーバー・ボッシュ法では反応圧力が20MPa以上とすでに高圧のためアンモニアの液化は容易であるが、Ru触媒では反応圧力が低いため液化技術が別途必要となるという問題点はある。また、再生可能エネルギーを使用して高効率にアンモニアを製造できる小規模分散型アンモニア合成プロセスの基礎研究、応用研究・開発も進められている。外部電場印加アンモニア合成触媒、マイクロ波照射アンモニア合成触媒、高周波照射アンモニア合成触媒、プラズマアンモニア合成触媒等の研究がある。電気や光エネルギーを利用せず水と窒素とモリブデン（Mo）触媒からのアンモニア合成も報告されている。

アンモニアは、沸点が -33°C であり、水素に比べ容易に液化でき、その体積あたりの水素貯蔵量は水素吸蔵合金や高圧水素はもちろん、液化水素、メチルシクロヘキサンなど有機ハイドライドに比しても大きい。その利用法としては、直接燃料として燃焼、水素に分解して燃料電池で利用、アンモニアを直接燃料電池燃料として利用するなどの手法が考えられる。

燃料としてのアンモニアは、炭化水素よりも燃えにくく火炎伝播速度が遅いなどの特徴はあるが、炭化水素系燃料の代替燃料として、過去にはロケットやバスに利用された歴史がある。また最近では乗用車の燃料としての検討のほか、ガスタービン燃焼、工業炉への展開、石炭との混焼による環境負荷の低減など多くの試みがなされており、活発に国内外において検討されている。

アンモニアとして輸送後に、接触分解法により水素を生成させ、燃料電池燃料として利用するための技術も検討されている。アンモニア接触分解触媒としては貴金属系と非貴金属系触媒がいずれも検討されているが、貴金属触媒のうちRuを活性成分とするものが最もアンモニア分解活性が高く、低温で高い転化率を達成できることが知られている。

また、アンモニアを直接燃料とする燃料電池も検討されている。固体酸化物形燃料電池（SOFC）の燃料適応性は他の燃料電池より優れており、アンモニア直接供給も可能である。燃料電池発電は発熱反応であり、運転温度領域が $700\sim 900^{\circ}\text{C}$ と、アンモニア接触分解反応温度に近く、両者を組み合わせることにより、高効率なアンモニア利用発電技術が構成できる。また、SIPアンモニア燃料電池プロジェクトでもアンモニアを利用した燃料電池システムの1つとして、接触分解反応器と低温で動作するアニオン交換膜形燃料電池（Anion Exchange Membrane Fuel Cell:AEMFC）を組み合わせた発電システムが検討されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

水電解による水素製造の効率を上げるために、熱エネルギーと電気エネルギーの両方を利用して水を分解する熔融塩リアクター、プロトン伝導性酸化物、酸素イオン伝導性酸化物を電解質とする水蒸気電解セル、高温水電解用ポリマー無機複合プロトン交換膜が開発されている。熱エネルギーと電気エネルギーの両方を使用して2ドル/kg以下のコストで水素ガスを生成できる可能性がある。

電気化学的アンモニア合成研究は中国、米国を中心にさかんに行われている。電極触媒（窒化クロム、窒化バナジウム、ニッケル/ナノポーラスカーボン、層状遷移金属の炭化物および窒化物、ヘマタイト、遷移金属窒化物ナノ粒子、ルテニウム-白金合金、窒素ドーパナノポーラスカーボン等）や固体電解質（プロトン伝導性BCY電解質膜、BaZrO₃等）を利用した膜反応器が研究されている。

アンモニアはプロトン交換膜の障害物質であるため、燃料電池用水素中のアンモニア許容濃度は0.1ppm以下（FCV用）と定められている。アンモニア接触分解ではこのような低濃度の達成は不可能であるため、Pressure Swing Absorption (PSA) などの分離技術を組み合わせる必要があるが、ゼオライトやNH₄HSO₄が新たにアンモニア吸収材として提案されており、長時間にわたって微量アンモニアを除去可能であったとされている。

アンモニア分解技術として、アンモニアと空気を触媒に併給し、サーモニュートラル近傍または発熱領域で運転するオートサーマル接触分解も検討されている。自己発熱による急速起動が容易であり、分解反応器構造がシンプルとなる。非貴金属触媒であるCo-Ce-Zr系複合酸化物触媒は入口から燃焼と分解が並行して進行するため温度プロファイルがより平坦となる。

有機ハイドライドに関しては、トルエンの電解水素化と水分解を同時に行う、固体高分子電解質（SPE）電解技術を応用した有機ハイドライド電解合成が開発されている。製造あるいは利用の過程で上流や下流のプロセスとコンバインドした高効率システムである。

また、基礎研究ながら、ギ酸（HCOOH）もエネルギーキャリアとして注目され、水素発生、直接燃料電池などの利用技術を中心に研究されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

[日本]

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第1期として「エネルギーキャリア」（2014～19年）では、再生可能エネルギー等を起源とする電気および水素等により、クリーンかつ経済的でセキュリティレベルも高い新たなエネルギー社会を構築するため、(1) 太陽熱を利用した水素製造、(2) アンモニアの製造・利用技術、(3) 有機ハイドライドの製造・利用技術、(4) 液化水素の利用技術、(5) エネルギーキャリアの安全性評価を実施した。

JST-CRESTおよび さきがけ「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」（2013～2020年）が実施された。

また、NEDO水素社会構築技術開発事業（2014～2022年）では液化水素およびトルエン-メチルシクロヘキサン系の有機ケミカルハイドライドについて実証研究を実施している。

[米国]

エネルギー庁（Department of Energy : DOE）が水素関連のプロジェクトをH2@ScaleとしてFuel Cell R&D、Hydrogen Fuel R&D、Hydrogen Infrastructure R&D、Technology Acceleration、

Safety, Codes and Standards、Systems Analysisなどの研究プログラムを進めている。金属窒化物触媒を使用したアンモニアの電気化学合成とプロトン交換膜での遷移金属窒化物ナノ粒子の電気化学的窒素還元反応電解槽などの研究も行われている。

2020年1月米国下院はアンモニアを低炭素燃料として定義する法案を発表した。また、米国にはアンモニアエネルギー協会が設立されており、持続可能なエネルギー経済におけるアンモニアの採用と使用を促進する活動をしている。アンモニア燃料会議は2017年から米国化学工学会の中で開催されている。

[EU]

Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertakeing (FCH-JU) は研究および革新的開発を促進するための欧州研究・イノベーション枠組み計画 Framework Programme (FP) の1つと位置付けられ、FCH-JUと欧州の産官学の共同体であるHydrogen EuropeでEUの資金配分をマネジメントして、主に大規模な実証プロジェクトを推進している。

ドイツでは2007年から省庁連合でNational Innovation Programme for Hydrogen and Fuel Cell Technologyを推進しており、NOW GmbHがNIPの予算配分を担ってモビリティを中心に大規模プロジェクトを実施している。ドイツのなかでも水素関連の環境技術は研究開発投資が活発な領域である。

[国際エネルギー機関 (IEA)]

IEAは、水素に関する世界的な政策をリードする理想的な立場にある。IEA Hydrogen Task 32“水素ベースのエネルギー貯蔵”は水素を利用したエネルギー貯蔵の研究を2013年から2018年まで行ってきた。IEA Hydrogen Task 32は17カ国から来た50人以上の専門家が参加しており、7つのワーキンググループで構成されている。2019年1月1日から2021年12月31日までTask 40が実施されている。

(5) 科学技術的課題

水電解に関しては、貴金属材料のような資源量の制約のある高価な材料を使用せず、変動性の再生電力に適合する安価で高性能な水電解システムを構築する必要がある。このため、アニオン交換膜などのアルカリ水電解の高性能な隔膜となる技術、アルカリ環境下で安価で高活性かつ起動停止を伴う運転条件で高耐久な電極触媒技術、高性能化のための電解槽内の物質移動の解析・促進技術を体系的に検討するプロジェクトを継続的に推進することが必要と思われる。

アンモニアをエネルギーキャリア、燃料として利用するためには、再生可能エネルギーを利用して高効率（低コスト）に合成する技術の開発が課題である。ハーバー・ボッシュ法の触媒改良、電気化学的合成、膜反応器を用いたアンモニア合成などが候補技術となっている。

アンモニアからの水素製造触媒やアンモニアを活性化する電極触媒についての研究も重要である。現在、材料設計指針が明らかにされつつあるが、新規材料の探索の段階が多く、コストを含めた実用性の評価という点では十分とはいえない。

上述のように、エネルギーキャリア技術に関して、液化水素、液化アンモニア、トルエン/メチルシクロヘキササン系有機ヒドライドが候補として技術開発が進められているが、これらの利点、欠点の比較が規模や応用可能な範囲を含めて客観的に比較された例は公表されていない。リスクマネジメントを含めてそれぞれのキャリアの利点、欠点を明らかにしたうえで、個別技術の効率向上や低コスト化に資する技術について研究開発を推進する必要がある。

(6) その他の課題

エネルギーキャリアの社会実装には、高圧ガス保安法、消防法、毒劇法、労働安全衛生法、道路法、船舶安全法、航空法、港則法、化審法、消防法、水質汚濁防止法、大気汚染防止法などをクリアしたうえで、社会受容性があることが必要である。特にアンモニアは劇物として規定されており取り扱いにおける規制は厳しく、特に国内での規制は燃料としての広範な利用の場合には障害となる。

CO₂フリーアンモニアのバリューチェーンの構築をめざすグリーンアンモニアコンソーシアムが産業界を中心に2019年4月に設立されているが、高効率、低コストのアンモニア製造技術の実現のためには、従来の学協会を超えた分野連携、産学連携が必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	水電解はNEDOの先導事業等で実施しているが、燃料電池・二次電池ほどの広がりが無い。エネルギーキャリアCREST/さきがけでアンモニア電解合成、アンモニア燃焼・触媒燃焼の研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	経済産業省や環境省が中心の実証プロジェクトが増加している。水電解、エネルギーキャリアともにプロジェクトが進行中。2018年から福島再生可能エネルギー研究所で実証プラントが稼働。
米国	基礎研究	◎	→	DOEが中心となって非常に秩序だった基礎研究を推進。電気化学アンモニア合成用電極触媒など。ただし、いわゆるエネルギーキャリアには積極的ではない。
	応用研究・開発	○	→	実証研究、デモンストレーション等は州レベルやエネルギー企業中心で見えにくい。APRA-E DOE プロジェクト車載用直接NH ₃ アニオン交換膜形燃料電池の開発など。
欧州	基礎研究	○	→	基礎研究は各国ごとの取り組みが主体。ドイツ、フランスを中心に基礎研究力は強力。ただし、いわゆるエネルギーキャリアには積極的ではない。電極触媒、光触媒や遷移金属錯体、固体酸化物電解槽セルの研究。
	応用研究・開発	◎	↗	多数の実証プロジェクトが進行中。 EU:FCH-JU (欧州燃料電池水素共同実施機構) で、電力・暖房・輸送・産業の各部門の低炭素化に向けEUの多年度研究プログラムの一環で実施。 英国:風力によるハーバー・ボッシュ法、アンモニア分解による水素ステーションの可能性調査。 オランダ:グリーンエネルギーによる水電解システム。 ノルウェー:グリーン水素によるアンモニア製造プラント (5万トン/年)。
中国	基礎研究	○	↗	オリジナル技術は限られているが、新技術をキャッチアップする体制は整っている。アンモニア製造の電極触媒、光触媒、高活性触媒やアンモニア燃料電池の基礎的研究が行われている。被引用件数上位の論文も増加。
	応用研究・開発	○	→	水電解槽が製品として出回り、実証・実用化研究が動いている。
韓国	基礎研究	○	→	水電解に関する中長期的なオリジナルな研究開発プロジェクトは実施されていない。KAISTで電気化学的アンモニア合成の基礎的研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	水素ロードマップを策定して推進しようとしているが、水素タンク爆発事故などの影響もあり順調ではない。

2.1

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：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・電気エネルギー利用（電力貯蔵）（環境・エネ分野 2.1.9）
- ・化学エネルギー利用（環境・エネ分野 2.1.12）

参考・引用文献

- 1) K. Aika, H. Hori and A. Ozaki, “Activation of nitrogen by alkali metal promoted transition metal I. ammonia synthesis over ruthenium promoted by alkali metal”, *Journal of Catalysis* 27, no. 3 (1972) : 424-431. doi : 10.1016/0021-9517(72)90179-0
- 2) M. Kitano et al., “Ammonia synthesis using a stable electrode as an electron donor and reversible hydrogen store”, *Nature Chemistry* 4, no. 11 (2012) : 934-940. doi : 10.1038/nchem.1476
- 3) K. Sato et al., “Surface dynamics for creating highly active Ru sites for ammonia synthesis : accumulation of a low-crystalline, oxygen-deficient nanofraction”, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 8 (2020) : 2726-2734. doi : 10.1021/acssuschemeng.9b06299
- 4) M. Hattori et al., “Solid solution for catalytic ammonia synthesis from nitrogen and hydrogen gases at 50° C”, *Nature Communications* 11, no. 1 (2020) : 2001-2008. doi : 10.1038/s41467-020-15868-8
- 5) NH3 Fuel Association, “15th Annual NH3 Fuel Conference, Pittsburgh, PA, October 31, 2018 : NH3 Energy+ Topical Conference at the AIChE Annual Meeting”, NH3 Fuel Association, <https://nh3fuelassociation.org/conference2018/> (2020年12月27日アクセス).
- 6) AMMONIA ENERGY ASSOCIATION, “16th Annual Ammonia Energy Conference 2019 November 12–14, 2019, Orlando, FL (USA)”, AMMONIA ENERGY ASSOCIATION, <https://www.ammoniaenergy.org/event/ammonia-energy-conference-2019/#event-schedule> (2020年12月27日アクセス).
- 7) Y. Ashida et al., “Molybdenum-catalysed ammonia production with samarium diiodide and alcohols or water”, *Nature* 568, no. 7753 (2019) : 536-540. doi : 10.1038/s41586-019-1134-2
- 8) 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終了報告書」, https://www.jst.go.jp/sip/k04_result.html (2020年12月27日アクセス) .

- 9) NH3 Fuel Association, “15th Annual NH3 Fuel Conference, Pittsburgh, PA, October 31, 2018 : NH3 Energy+ Topical Conference at the AIChE Annual Meeting”, NH3 Fuel Association, <https://nh3fuelassociation.org/conference2018/> (2020年12月27日アクセス).
- 10) 新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO)「成果報告書 2018年7月-NEDO 20180000000406, 平成26年度-平成29年度成果報告書 水素利用等先導研究開発事業 高効率水素製造技術の研究 高温水蒸気電解システムの研究,2018/7/13」, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201807/20180000000406.html (2020年12月27日アクセス).
- 11) K. Leonard et al., “Efficient intermediate-temperature steam electrolysis with Y : SrZrO₃-SrCeO₃ and Y : BaZrO₃-BaCeO₃ proton conducting perovskites”, J. Mater. Chem. A 6, no. 39 (2018) : 19113-19124. doi : 10.1039/C8TA04019B
- 12) H. Miyaoka et al., “Highly purified hydrogen production from ammonia for PEM fuel cell”, Int. J. Hydrogen Energy 43, no. 31 (2018) : 14486-14492. doi : 10.1016/j.ijhydene.2018.06.065
- 13) T. Okanishi et. al, “Comparative Study of Ammonia - fueled Solid Oxide Fuel Cell Systems”, Fuel Cells 17, no. 3 (2017) : 383-390. doi : 10.1002/fuce.201600165
- 14) 光島重徳, 長澤兼作「固体高分子電解質 (SPE) 電解技術を応用した有機ハイドライド電解合成」『触媒』58巻6号(2016) : 346-350. <https://catsj.jp/jnl/top?volume=58&issue=6>
- 15) H. Kawanami, M. Iguchi and Y. Himeda, “Ligand Design for Catalytic Dehydrogenation of Formic Acid to Produce High-pressure Hydrogen Gas under Base-free Conditions”, Inorg. Chem., 59, no. 7 (2020) : 4191-4199. doi : 10.1021/acs.inorgchem.9b01624
- 16) K. Mori et al., “Phenylamine-functionalized mesoporous silica supported PdAg nanoparticles : A dual heterogeneous catalyst for formic acid/CO₂-mediated chemical hydrogen delivery/storage”, Chem. Commun. 53, no. 34 (2017) : 4677-4680. doi : 10.1039/c7cc00864c
- 17) M. Zainoodin et al., “Performance of a direct formic acid fuel cell fabricated by ultrasonic spraying”, Int. J. Hydrogen Energy 43, no. 12 (2018) : 6413-6420. doi : 10.1016/j.ijhydene.2018.02.024
- 18) Hydrogen Program, “2020 Annual Merit Review : Progress Updates”, Department of Energy, https://www.hydrogen.energy.gov/annual_review20_proceedings.html (2020年12月27日アクセス).
- 19) Fuel Cells and Hydrogen, Joint Undertaking, “FCG JU PROJECTS”, Fuel Cells and Hydrogen, <https://www.fch.europa.eu/page/fch-ju-projects> (2020年12月27日アクセス).
- 20) Hydrogen Europe, “Hydrogen Europe : projects”, Hydrogen Europe, <https://hydrogeneurope.eu/projects> (2020年12月27日アクセス).
- 21) Technology Collaboration Programme by IEA, “Task 40 : Energy storage and conversion based on hydrogen”, Hydrogen TCP, <https://www.ieahydrogen.org/task/task-40-energy-storage-and-conversion-based-on-hydrogen/> (2020年12月27日アクセス).

2.1.5 分離技術

(1) 研究開発領域の定義

分離技術とは、混合物から目的成分を取り出す、または不要物を取り除く技術領域である。化学プロセスにおいて目的成分を低環境負荷・低エネルギーで取り出す技術、火力発電所や製鉄所から生じるCO₂の分離、高純度水素や炭化水素の分離、海水の淡水化や各種排水の浄化、医療（人工透析、酸素濃縮）、鉱物資源や都市鉱山からの目的金属の分離など幅広い産業の基盤となっている技術である。環境保全、資源循環型社会の実現のためにも重要な技術である。化学プロセスにおける気体・液体の分離技術、CO₂分離技術、鉱物資源からの金属分離技術、資源循環のための分離技術などに研究開発課題がある。

(2) キーワード

膜分離、吸着、蒸留、反応分離、物理吸収、化学吸収、深冷分離、逆浸透、ナノろ過、浸透気化、単体分離、メカノケミカル、センサ選別、アップサイクリング、イオン液体、深共晶溶媒、ナノ流体、磁性流体

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

分離技術は相の状態によって分類が可能であり、分離したい成分が別々の相の場合と、分子混合物として同一の相に存在する場合に大別される。分離したい成分が別々の相の場合は機械的単位操作が主に使用され、気相中の固体あるいは液体微粒子の除去や液相中の微粒子の除去、粒子混合物の粒子サイズによる分級などがあげられる。一方、気相および液相における分子混合物の分離は、平衡分離（蒸留、吸着、吸収、抽出、イオン交換、晶析など）と速度差分離（膜分離、電気泳動、遠心分離など）に分類され、ガス精製、海水淡水化、浄水等の工業分野、排水処理や排ガス処理などの環境保全、食品・医薬品製造など幅広い産業に用いられている基盤技術である。

また、多種多様な分離手法が存在していることが本領域の特徴である。それぞれの分離技術は互いに競合関係にあり、採用されるためには当該分離を可能とする唯一の技術であるか、優位性を示さねばならない。それぞれの分離技術の優劣をコスト、エネルギー、LCAなどさまざまな視点を含めて比較する手法の確立に関する研究も望まれる。

米国では全エネルギーの32%が産業用途であり、そのうち45～55%が分離プロセスに使用されている。すなわち米国の全消費エネルギーのうち約15%が分離プロセスということである。この分離プロセスのエネルギーのうち、49%が蒸留、20%が乾燥、11%が蒸発の熱源として使用されている。非熱駆動分離を増やすべきだという指摘があるが、現状ではわずかに20%にすぎない。

既存の石油精製、石油化学システムでは既存技術での最適化が図られており、また、長期信頼性・安定性・安全性（耐久性や耐汚れ性など）やメンテナンスの容易さも重要であるため、新たな分離システムを導入するインセンティブは少ない状況にある。蒸留に使用される熱エネルギーの回収、再利用も一般的に行われている。非熱駆動型の分離プロセスには、膜分離や吸着などの新材料からのイノベーションが期待されている。

また、火力発電所や製鉄所、工場などから生じるCO₂分離技術の開発は喫緊の課題であり、実用化を指向した研究開発はもちろん、次世代に繋がる基盤的研究の裾野を広げていくことが大変重要である。CO₂分離技術には、物理吸収、化学吸収、分離膜、深冷分離や吸着、DAC（Direct Air Capture）などがあるが、単にCO₂を分離するだけでなく、分離した後のCO₂を有効利活用するCCUS（Carbon dioxide Capture,

Utilization & Storage) の観点から技術評価を進めていく必要がある。例えば、次世代の火力発電所として注目されている石炭ガス化複合発電 (Integrated coal Gasification Combined Cycle : IGCC) における燃焼前ガスからのCO₂分離やシェールガスをはじめとする天然ガス井戸元におけるCO₂と炭化水素との分離なども重要な課題である。

一方、天然鉱山や都市鉱山からの有用物の分離技術も重要である。天然鉱山では、近年では低品位鉱石や、金属精製で発生する尾鉱、スラッジ、スラグ、ダストといった2次資源を対象とせざるを得なくなり、それらに対する技術開発が求められている。これらは、目的とする元素の品位が低く、鉱物相が十分に成長していないため、物理的な分離濃縮が困難であり、また不純物の濃度が高い。また、都市鉱山においても、利益の出やすい工程内リサイクルや経済価値の高い貴金属等のリサイクルから、サーキュラーエコノミーの概念を主軸とした廃棄物ゼロに近い概念にもとづいたリサイクルへと技術課題が変遷している。

[研究開発の動向]

• 膜分離技術

水処理膜が最大のマーケットであり、日本企業のシェアが高いが、精密ろ過や限外ろ過膜では韓国や中国の技術開発が進んできている。かつては日米の数社のみが製造可能といわれていた海水淡水化膜でも日本のシェア低下が起きている。

海水淡水化を志向した革新的膜として、多孔性ナノ粒子を添加したポリアミド膜やアクアポリンの利用があるが、このような革新的分離膜の提案が日本からはなされていない。

水処理で最近注目される研究課題は、オイル含有水の膜処理である。石油やオイルシェールの採掘により排出される排水量は、オイル製造量の数倍に達するといわれる。オイル回収、処理水の再利用、水の廃棄のためにも、オイル含有水の膜処理技術が必要不可欠である。高分子膜およびセラミック膜および新規分離膜の開発が行われている。

一方、有機水溶液の処理に膜分離の利用が拡大している。NEDO先導プログラムでは、非水系の有機溶媒混合溶液の逆浸透分離が、蒸留や蒸発と比べて、分離エネルギーが1/100以下であることが明らかにされた。

• 化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

蒸留分離は熱エネルギー多消費型プロセスであるが、装置構造がシンプルであり、連続的運転が可能であることから、産業分野で広く利用されてきた。最近では、競争力強化の観点から高効率かつ省エネルギーな分離プロセスの開発が求められており、塔頂蒸気を圧縮して熱エネルギーとして再利用するヒートポンプ蒸留や、塔内に仕切板を設け多成分系分離を可能にした塔分割型蒸留塔などで、従来比30～50%の省エネルギー化を実現している。

一方、膜分離技術は、基幹化学品を分離するプロセスで実用化された例はまだないが、膜材料、膜モジュール、膜分離プロセスなどを対象に精力的な研究開発が行われている。具体的には、JST-CREST「超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製」において結晶性マイクロ細孔を有する材料を用いた新しい無機分離膜の研究開発が行われている。また、NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」では、光触媒を用いて水から水素を製造し、生成した水素を分離膜により分離・精製し、水素と二酸化炭素を原料として基幹化学品を製造する一連のプロセス開発が行われている。

吸着分離に関しては、NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム「革新的分離技術の導入による省工

「ネ型基幹化学品製造プロセス」において、オレフィン/パラフィン系の分離、水素・窒素を含む炭化水素系の分離などを対象に金属有機構造体 (MOF) を用いた分離技術が検討されている。

• CO₂分離技術

CO₂分離回収を主な用途とするガス吸収液の開発が進められている。化学吸収法では、代表的なモノエタノールアミン水溶液に比べて、分離・回収エネルギーを大幅に低減するアミン吸収液の開発に成功している。物理吸収法も、代表的なポリエチレングリコールを主骨格に持つ Selexol 吸収液 (dimethyle ether of polyethylene glycol) より高い CO₂ 吸収能を有する Selexol Max が実用化されている。Selexol Max は、ライフサイクル全体のコストが最大で 17% 削減可能であり、置き換えが進みつつある。アミンをシリカ等の多孔質材料に担持した固体吸収材の開発も進められており、アミンを吸収液として利用する場合に比べ、所要顕熱が低減し、溶媒に起因する潜熱損失も伴わないため、大幅な消費エネルギーの削減が期待できる。RITE が開発した固体吸収材を用いて、川崎重工業との実用化研究開発が進められており、2017 年までに 10 m³ スケールで合成した固体吸収材を用い、1.5 GJ/ton-CO₂ での低温スチーム再生性能 (60°C) が実証されている。

• 固体を対象とした分離濃縮技術 (天然鉱山、都市鉱山)

固体を対象とした分離濃縮技術は、選鉱から発展した物理分離プロセスと、製錬から発展した高温分離プロセス、湿式分離プロセスに大別される。

物理分離プロセスとしては、単体分離 (異相境界面を選択的に破壊して、単体の状態にする) を促進するための技術開発と、相互分離 (単体分離したものを相互に分離濃縮する) を高度化するための分離開発とに大別される。単体分離を促進するための技術開発では、機械的な作用力 (圧縮、衝撃、せん断) を制御しながら単体分離を促進する研究開発のほかに、電気パルスやレーザー、マイクロウェーブ等を活用した異相境界選択破壊に関する研究開発や、粉碎中の発生エネルギーを利用して選択的な反応を進行させるメカノケミカル反応を利用した研究開発も実施されている。相互分離を高度化するための分離技術としては、磁性ナノ流体を用いた微粒子分離、レーザー誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS) 等を利用したセンサ開発や、分離を高精度にするための機械的あるいはロボットを活用した装置の開発が進められている。

高温分離プロセスでは、原料が天然鉱石から 2 次資源に変遷したことによって新たに混入しはじめた有機物や微量忌避元素の分離のための熱力学的データを取得しながら、それらの相互分離精製をめざす研究開発が見受けられる。

湿式分離プロセスの開発動向は、イオン液体、深共晶溶媒、有機王水などの新たな溶媒を用いて抽出選択性を高めた分離技術開発や、亜臨界や超臨界といった新たな反応場によって選択性を高めた分離技術開発が見受けられる。また、多孔質材料や有機材料、あるいはバイオを利用した吸着材あるいは吸着プロセスの開発もさかに行われている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 膜分離技術

有機溶媒系におけるろ過技術としては、中・高分子の溶質分離を目的とするナノろ過法が OSN (Organic Solvent Nanofiltration) や SRNF (Solvent Resistant NanoFiltration) と命名され、研究が活性化し

ている。有機溶媒系の逆浸透法については、キシレン分離がRO法で可能であることが報告されたのを契機に、OSRO (Organic Solvent Reverse Osmosis) として再び研究開発が活性化している。相変化を伴わない逆浸透法は、熱駆動型分離プロセスの蒸留や蒸発と比べて分離に要するエネルギーが1/100以下であるとされる。実際の蒸留法では熱の多重利用がなされており、過大評価している可能性もあるが膜分離法の省エネルギー性は有望である。

また、水蒸気をエネルギーおよび物資として回収する技術開発が注目されている。各種プロセスでの投入エネルギーは、水蒸気として高エンタルピーを有したまま環境に排出されるケースが多い。サブナノ細孔膜を用いた蒸気透過 (Vapor Permeation : VP) 法は、回収した水の品質が高く、また高温のまま回収できる点で優れている。高温でも高い水蒸気透過性と選択性を示すオルガノシリカなどの無機多孔性膜が注目される。

• 化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

基幹化学品製造においては、原油資源のみならず、原料多様性の観点から、シェールガス、バイオマスのような新たな資源に関する分離技術の開発が必要になってきている。

基幹化学品製造プロセスは、基本的に反応プロセスと分離プロセスの組み合わせから成り立っているが、例えば、二酸化炭素 (もしくは一酸化炭素) と水素からメタンやメタノールを合成するプロセスでは、平衡条件から離れることが可能な膜反応器 (反応分離) に代表されるような新規プロセス開発が注目されている。また、人工光合成のようなクリーン系のみならず、Crude to Chemicalsのような不純物の多い系にも利用可能な新たな反応分離プロセスの開発も必要になる。サウジアラビアのサウジアラムコは、フランスのアクセンス、テクニップFMC との間で、原油から直接化学品を生産するCrude to Chemicals技術の共同開発を実施し、2021年までの商業化をめざしている。

• CO₂分離技術

常圧・室温付近で化学吸収させるアルカノールアミン水溶液だけでなく、近年では高圧下でも駆動可能なアミン系ガス吸収液の開発が進んでいる。東芝エネルギーシステムズでは、大牟田市で大規模実証設備を建設中であり、IHIでは、オーストラリアLoy Yang A発電所から排出されるCO₂をアミン吸収液で分離回収するプラントを稼働させている。日揮と日本ガイシは、米国テキサス州の油田回収設備において、モノリス型DDRゼオライト膜を活用した原油随伴ガスからのCO₂分離回収技術の実証実験を開始している。

新規CO₂吸収剤技術としては、九州大学の星野らにより、アミン含有ゲルを用いて中低圧のガスからCO₂を分離・変換・利用するプロセスの開発が行われている。最近、ハニカム-炭素繊維担持アミン含有ナノゲル粒子を回転カラムに用いて燃焼後の排ガスからCO₂を回収可能な温度スイング吸着プロセスを提案している。

また、CO₂とメタンをはじめとする炭化水素の分離、CO₂/水素分離、CO₂/窒素分離、CO₂/硫化水素分離などを目的としたガス吸収液の開発と評価も進められている。なかでも、イオン液体や深共晶溶媒 (deep eutectic solvents : DES) など新規物理吸収液やハイドレートを用いたCO₂分離法の開発が、国内外でさかんに実施されている。

• 固体を対象とした分離濃縮技術 (天然鉱山、都市鉱山)

単体分離を促進するための技術として、機械的な破壊では達成できない選択的分離方法である電気パルス、レーザなどの研究開発が進められている。また、通常とは異なる選択性での融解や電析を達成しうる相互分離の手法として、イオン液体や深共晶溶媒を用いた金属やプラスチックの分離に対する研究開発が進められて

いる。

吸着剤としては、磁性ナノ流体が、磁性粒子の選択的な吸着特性と、ナノ流体の分離特性とを組み合わせ、レアアース等の分離に対する研究開発に使われている。また、金属有機構造体（MOF）では、金属と有機リガンドとの広範な相互作用が明らかにされつつあり、活性炭以外の有効な吸着剤が存在しない金属の選択的な相互分離に応用できる可能性が高く、注目されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

国家プロジェクトとしては、分離プロセスに特化したものはないが、下記のような様々なプロジェクトの重要な要素技術として研究開発が実施されている。

JST 未来社会創造事業 探索加速型「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域、「持続可能な社会実現」領域

ALCA（先端的低炭素化技術開発）「炭素循環化学システムの高効率化」

NEDO「機能性化学品の連続精密生産プロセス技術の開発」

NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」（人工光合成プロジェクト）

NEDO ムーンショット「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」

NEDO 先導研究プログラム「エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/新産業創出新技術先導研究プログラム/未踏チャレンジ」

JOGMEC「銅原料中の不純物低減技術開発事業/海底熱水鉱床関連事業」

一方、米国ではALTSEPというSustainable Separation Processesに関する取り組みが2015年から始まり、膜や吸着に関する材料からそれを利用するプロセスまでを対象に産学連携体制での検討を開始している。2019年には、ACS、AIChE、NISTの連名で、A Road Map to Accelerate Industrial Application of Less Energy-Intensive Alternative Separationsを発表し、分離プロセスバリューチェーンの階層ごとのワークショップを設置することで精緻な検討がなされている。

(5) 科学技術的課題

• プロセス強化技術

単一の単位操作のみで分離を行うのではなく、複数の技術を組み合わせるプロセス強化技術が注目される。さらに反応と膜分離を組み合わせた膜型反応器は、平衡支配の反応系から特定成分を引き抜くことで平衡シフト、反応速度の向上が可能である。

• 分離プロセスのプラットフォームづくり

分離手法には、蒸留、吸収、抽出、膜分離、吸着など多くの分離手法があり、特徴ある分離が可能となる一方で、分離したい対象ごとにも種々の条件が異なり、種々の分離手法の優劣を評価する手法の確立が必要である。さらには、分離ユニットのみならず、最終製品までの全体を統合した上での最適化も必要になる。加えて、多成分系、不純物の分離に関する信頼度評価も必要になる。このようなエンジニアリングにもとづいた分離プロセスの評価技術のプラットフォームづくりが必要である。

• 固体を対象とした分離濃縮技術（天然鉱山、都市鉱山）の科学的理解

対象が複雑であり、物理的、化学的な現象の複雑な組み合わせで達成されるものであるが、その物理現象を科学的に理解することが重要である。純粋系、単純系で得られている知見を体系化し、実験的な検討とマルチフィジックスシミュレーションとの組み合わせによって知見を集積することが必要である。

(6) その他の課題

日本においては分離プロセスに特化した国家プロジェクトは少ないが、さまざまなプロジェクトの一部として研究開発されているケースが多い。関連プロジェクトについて、情報を俯瞰的に把握できるような仕組みが望まれる。

また、分離技術は多岐にわたるにもかかわらず、当該技術分野の研究者数は限られており、それぞれが持つ固有の技術を相互に補完しながら研究を進めていく体制が必要と思われる。

(7) 国際比較

膜分離技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	いくつかの国家プロジェクトで研究開発が進行中だが、膜分離はプロジェクトの一部の位置づけである。
	応用研究・開発	○	→	RITEのCO ₂ 分離膜プロジェクトが進行中。ムーンショットには膜分離も要素技術として取り上げられる。
米国	基礎研究	◎	→	DOEは水素関連プロジェクトを2020年から開始。膜分離、CO ₂ 回収プロジェクトも行われている。
	応用研究・開発	◎	→	Membrane Technology&Researchなど膜ベンチャーが成長し、実プロセスに採用され始めている。DOEプロジェクトも数多い。
欧州	基礎研究	◎	↗	Horizon 2020に分離膜を中心としたプロジェクトがあり、国際協力もうまく組織化されている。
	応用研究・開発	◎	↗	水処理膜以外の実用化が進んでいる。EVONIK：有機溶媒ろ過膜など。
中国	基礎研究	◎	↗	南京工業大学が無機分離膜、天津工業大学が高分子膜研究を牽引。論文数が増え、質も高い。
	応用研究・開発	◎	↗	大学発ベンチャー企業が多数。水素分離やゼオライト膜、膜反応器などで実用化が進んでいる。
韓国	基礎研究	○	→	Horizon 2020 (NANOMEMC2) で欧州と共同研究を実施した。論文数が増加し、日本の論文数の1.5倍以上。
	応用研究・開発	△	→	かつてはKRICTなどで大型プロジェクトを行っていたが、最近はないと思われる。

化学プロセスの気体・液体の分離技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	早稲田大学、神戸大学、産総研、広島大学を中心に膜分離に関する国家プロジェクトを実施中。
	応用研究・開発	○	↗	JST、NEDOによる分離技術に関する大型プロジェクトが開始されている。
米国	基礎研究	◎	↗	ExxonMobil、Georgia Tech、Imperial College Londonが、原油の直接分離。
	応用研究・開発	○	→	ALTSEPなど学会が中心となり産学連携体の構築が進んでいる。

欧州	基礎研究	◎	↗	Horizon 2020にて、無機分離膜の開発並びに反応分離プロセスの研究がなされている。
	応用研究・開発	△	→	Horizon 2020にて、すべての膜材料を対象に大規模な研究が行われている。
中国	基礎研究	◎	↗	大連理工大学、天津工業大学などで分離膜の開発が加速している。
	応用研究・開発	△	↗	上記大学からスピナウトしたベンチャー企業などが集積化されている。
韓国	基礎研究	◎	↗	多くの大学の研究所にて膜分離技術に関する研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	CO ₂ 分離・回収に関するプロジェクト内で分離膜の開発が行われている。

CO₂分離技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	RITE、産総研、名古屋大学、京都大学、神戸大学、九州大学、日本大学などにおいて、ガス吸収液やゲル、分離膜の研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	CO ₂ 分離回収の実証試験中。日本CCS調査によるCCS実証試験は、2019年11月でCO ₂ 圧入量30万tを達成した。
米国	基礎研究	◎	↗	イオン液体によるCO ₂ ガス吸収液やハイドレートを利用したCO ₂ /CH ₄ などの研究がさかん。
	応用研究・開発	○	↗	ガス吸収液、プロセス開発が進められており、酸性ガスの高効率分離が可能。CO ₂ -EORの開発や固定化アミンによるTSAプラント実証中。
欧州	基礎研究	◎	↗	ポルトガルのアヴェイロ大学やノバ・デ・リスボン大学などにおいて、イオン液体や深共融溶媒を用いたガス分離の研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	ガス吸収液とプロセスの開発・実証が進められている。固定化アミンによるTSAプラント実証中。
中国	基礎研究	◎	↗	多くの大学でガス吸収液の開発と評価が進められており、論文数も増加傾向。
	応用研究・開発	○	↗	Tianjinにて、GreenGenプロジェクトによる400 MWのIGCCとEOR目的のCCSを稼働中。
韓国	基礎研究	◎	↗	多くの大学でガス吸収液の開発と評価が進められており、論文数も増加傾向。
	応用研究・開発	△	→	KEPCOとArstromaは、Dangjin火力発電所にて、CO ₂ 分離膜設備の稼働準備中。

固体を対象とした分離濃縮技術 (天然鉱山、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	○	↘	境界学問領域である上、研究開発を支える産業形成がなされておらず、研究者が少ない。
	応用研究・開発	○	→	NEDO、環境省などのプロジェクトで研究がなされているが、分野間の連携が十分ではなく、技術開発内容にはやや新規性が欠けている。
米国	基礎研究	○	→	中国に続く報告件数を維持している。
	応用研究・開発	◎	↗	CMI (Critical Materials Institute) でのプロジェクトが多数進行中であり、活発である。
欧州	基礎研究	○	→	ドイツ、フランスが牽引、英国、イタリアがそれに続く。新興国の台頭に押され気味である。
	応用研究・開発	◎	↗	Horizon 2020で難処理鉱石や都市鉱山を対象とした種々のプロジェクトが設置されているほか、EIT Raw materialsやMETGROW+ projectなど複数で活発に研究開発されている。
中国	基礎研究	◎	↗	基礎研究案件数を伸ばしており、論文数や学会での報告件数では他の国を圧倒している。
	応用研究・開発	◎	↗	国家主導でLiB分離濃縮技術開発センターを複数建設。迅速に開発拠点形成を進めている。
韓国	基礎研究	○	→	特に湿式分離プロセスでの伸びがみられるが、他の新興国に押されて低調。
	応用研究・開発	△	→	国をあげての大きなプロジェクトはないと思われる。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：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

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 化学エネルギー利用 (環境・エネ分野 2.1.12)
- ・ 水循環 (水資源・水防災)(環境・エネ分野 2.2.3)
- ・ 水利用・水処理 (環境・エネ分野 2.2.4)
- ・ 除去・浄化技術 (大気、土壌・地下水)(環境・エネ分野 2.2.5)

参考・引用文献

- 1) David S. Sholl and Ryan P. Livery, “Seven Chemical separations to change the world”, *Nature* 532, no. 7600 (2016) : 435-437. doi : 10.1038/532435a
- 2) B. -H. Jeong et al., “Interfacial polymerization of thin film nanocomposites : A new concept for reverse osmosis membranes”, *Journal of Membrane Science* 294, no. 1 (2007) : 1-7. doi : 10.1016/j.memsci.2007.02.025
- 3) C. Y. Tang et al., “Desalination by biomimetic aquaporin membranes : Review of status and prospects”, *Desalination* 308 (2013) : 34-40. doi : 10.1016/j.desal.2012.07.007
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「平成30年度中間報告 NEDO 先導研究プログラム/ エネルギー・環境新技術先導プログラム/有機溶剤の超ろ過膜法開発による化学品製造プロセス革新」, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201904/20190000000214.html (2020年12月30日アクセス).
- 5) JST 低炭素社会戦略センター「CCS (二酸化炭素回収貯留) の概要と展望 -CO₂ 分離回収技術の評価と課題-」, <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2015-pp-08.pdf> (2020年12月30日アクセス).
- 6) JST-CREST「精密分子ふるい機能の高度設計に基づく無機系高機能分離材料の創製」, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/43/43_04.html (2020年12月30日アクセス).
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」, https://www.nedo.go.jp/activities/EV_00296.html (2020年12月30日アクセス).
- 8) JST 低炭素社会戦略センター「低炭素社会の実現に向けた 技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書」, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201901/20180000000059.htm (2020年12月30日アクセス).
- 9) D. -Y. Koh et al., “Reverse osmosis molecular differentiation of organic liquids using carbon molecular sieve membranes”, *Science* 353, no. 6301 (2016) : 804-807. doi : 10.1126/science.aaf1343
- 10) Jubao Gao, Yu Hoshino and Gen Inoue, “Honeycomb-carbon-fiber-supported amine-containing nanogel particles for CO₂ capture using a rotating column TVSA”, *Chem. Eng. J.* 383 (2020) : 123123. doi : 10.1016/j.cej.2019.123123
- 11) Less Energy-Intensive Alternative Separations (AltSep), “Sustainable Separation Processes A Road Map to Accelerate Industrial Application of Less Energy-Intensive Alternative Separations”, National Institute of Standards and Technology (NIST), <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/greenchemistry/redesign/roundtables/altsep-report-2019.pdf> (2020年12月30日アクセス).
- 12) Kirstie A. Thompson et al., “N-Aryl-Linked Spirocyclic Polymers for Membrane Separations of Complex Hydrocarbon Mixtures”, *Science* 369, no. 6501 (2020) : 310-315. doi : 10.1126/science.aba9806
- 13) 苫小牧における CCS 大規模実証試験 30万トン圧入時点報告書 (「総括報告書」) 概要、https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2020/05/report202005_overview.pdf (2020年12月30日アクセス).