

3.1 9 燃料電池

（1）研究開発領域の簡潔な説明

燃料電池は、水素などの燃料と酸化剤である空気（酸素）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高効率に直接取り出す装置である。燃料電池自動車、家庭用・業務用の高効率分散型コジェネレーションシステム、さらにはガスタービンと組み合わせた複合サイクル発電への応用等が期待されている。ここでは各種燃料電池およびそのシステムを対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

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

[動向（歴史）]

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

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

燃料電池の原理は1801年に発見され、1839年に水素と酸素の電気化学反応から、電気エネルギーを取り出すことに成功している。実用化は20世紀になってからであり、1958年米国のユナイテッド・エアクラフト社によるアルカリ型燃料電池である。1961年からは米国NASAによる研究が進められ、ゼネラル・エレクトリック（GE）社製の燃料電池（固体高

分子形) がジェミニ 5 号に搭載された。その後のアポロ計画ではアルカリ系の燃料電池を搭載されている。また 1971 年に米国 TARGET (ターゲット) 計画で、定置用リン酸形燃料電池の開発が始まり、12.5kW の実証実験が行われた。カナダでは、1987 年にバラード社がフッ素系イオン交換樹脂膜を用いた固定高分子形燃料電池を開発し、1994 年にはドイツのダイムラー・ベンツ社がバラード社の燃料電池を搭載した世界で初めての燃料電池自動車 (FCV) を発表している。

日本では、石油代替・省エネルギー技術の開発を目指して始まった 1981 年通産省の「ムーンライト計画」(93 年からは「ニューサンシャイン計画」) において、燃料電池の開発が組み込まれ、1992 年リン酸形燃料電池によるフィールドテストが行われた。90 年代にはトヨタ、日産、ホンダが燃料電池自動車の開発に着手、また家庭用燃料電池についても国内電機メーカーが開発に着手している。2011 年には、自動車・家庭用電気・エネルギー企業が参加する燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ) の参加企業 13 社によって、2015 年度からの FCV の普及に向けた市販開始と 4 大都市圏での水素基礎研究、実用化研究としては、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の新エネルギー技術開発プログラム「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発」(2005~2009 年度)、経済産業省 (METI) の「水素・燃料電池実証プロジェクト (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project)」(2002~2010 年度) などによって実証試験と水素インフラ整備が行われてきた。セルスタックに関しては出力密度 2.5~3kW/L レベルの高性能化や高耐久化が図られ、FCV 本体の耐久性や信頼性も向上した。量産の準備を経て、2014 年 12 月、世界に先駆けてトヨタ自動車から燃料電池自動車 MIRAI が一般販売された。

定置用燃料電池については、2005~2008 年 NEDO/NEF の「家庭用 PEFC の大規模設置事業」、2007~2010 年の「家庭用 SOFC の実証試験」を経て、2009 年度に世界で初めて、PEFC を用いて家庭用燃料電池コジェネシステム「エネファーム」が実用化・販売開始され、2016 年 6 月現在で累積 15 万台上が設置されている。その後、性能向上、耐久性向上、コンパクト化、そしてコスト低減が図られている。一方 SOFC に関しては、2007~2010 年に 200 台規模の SOFC 実証試験が実施され、その成果を踏まえて、2011 年 JX 日鉱日石エネルギーが SOFC タイプエネファームの発売を開始した。2016 年 4 月より大阪ガスは発電効率 52% の燃料電池を販売開始している。また大阪ガスでは、電力自由化に合わせて、SOFC の定格一定運転を目的として、余剰電力を系統に逆潮流して買い取る、電力買取プランも提案し、普及拡大を図っている。このように家庭用定置型電源・コジェネレーション利用分野において、我が国は、他国に先んじて実用化を達成し、世界を圧倒的にリードしている。現在、家庭用燃料電池では、PEFC の総合効率が 94~95% レベル (発電効率は 40% 程度)、SOFC においてはアイシン精機の最新モデルにおいて発電効率が 52% まで向上している。またコスト低減や耐久性向上の面でも大きな進歩がみられる。PEFC では、メーカー希望小売価格が、160 万円と 2009 年発売開始時点(300 万円前後)の約半分以下まで低下し、SOFC も 200 万円を切る価格になるなど、低コスト化が着実に進んでいる。耐久性の面では、PEFC は 7 万時間を超える耐久性が、SOFC でも 4 万時間の耐久性を見通すことができるようになり、着実に耐久性が向上している。なお、エネファームに関する国の補助金は当初 2015 年度で打ち切られる予定であったが、METI によるスキーム見直しの上、2016 年度以降も継続され、PEFC では 2018 年度、SOFC で 2020 年度をまで継続される予定である。

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

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

欧米では、バックアップ電源、フォークリフト用電源、バッテリー充電用電源、小型移動体向け電源など幅広い分野への商用化が進められており、家庭用コジェネレーションシステム以外へのアプリケーション開発は、むしろ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、業務用においては、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。燃料電池フォークリフトに関して、2009 年に制定されたアメリカ復興・再投資法では、フォークリフトを含む荷役用途への燃料電池利用を促進する目的で合計 970 万ドルの予算が計上され、導入補助が行われた。その結果、2011 年までの間に 500 台程度の燃料電池フォークリフトが政府の補助を受けて導入された。政府補助の終了後も自立的な導入が進み、現在では全米で 4,000 台以上の燃料電池フォークリフトが利用されている。また、カリフォルニア州では、自動車会社、エネルギー会社、政府機関、燃料電池関連企業等のコラボレーション組織であるカルフォルニア燃料電池パートナーシップ（CaFCP）が FCV・水素ステーションの普及に取り組んでおり、2020 年時点の FCV 保有 1.8 万台に対して、100 箇所の水素ステーション整備を見込んでいる。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たが、2014 年度、予算抑制の方針を再び転換し、その後米国エネルギー省 (DOE) の燃料電池に係る予算は、2015 年度 3,300 万ドル、2016 年度 3,500 万ドルと増加の傾向を見せている。燃料電池開発において、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国立研究所 (ANL) 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 6.8kW/g-PGM を達成している。2015 年度から触媒・MEA 等の解析を行うため、DOE の研究所 (ロスアラモス国立研究所 (LANL)、ANL、国立再生可能エネルギー研究所 (NREL)、ローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL)) のコンソーシアムにより、FC-Performance and Durability (FC-PAD) が開始された。5 年間の実施を予定しており、総予算は 2,500 万ドルを想定している。SOFC 関連では、DOE の化石エネルギー関連予算により、国立エネルギー技術研究所 (NETL) が主導する研究開発プロジェクトである SECA (Solid State Energy Conversion Alliance) プログラムが展開されてきたが、インダストリアルチームとして FuelCell Energy 社、LG Fuel Cell Systems 社らが参加している。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。

欧州では、ドイツを中心に環境政策を強力に推進する政府の支援もあり、関連産業界の技術水準・産業技術力が上昇傾向にある。欧州燃料電池・水素共同技術イニシアティブ (European Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative: FCH JTI) の下、2008 年、官民のパートナーシップという形態で欧州燃料電池・水素共同実施機構 (FCHJU: Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking) が立上げられ、研究開発からフィールド実証まで広範囲な取組みが継続して進められている。研究開発の面では、例えば、開発する触媒、電解質材料の MEA の構成材料や接合体多孔質構造の作動模擬条件での性能・耐久性、あるいは氷点下起動・低加湿条件運転の影響の実験的解析とシミュレーション解析、さらには電池特性への不純物の影響などの非常に多くの関連研究が実施された。フィールド実証の面では、Ene.Field プログラムにおいて、1000 台の設置を目標として燃料電池 (高温型 SOFC、中温型 SOFC、高温型 PEFC、低温型 PEFC) の実証試験が欧州 12 カ国で実施されている。2014 年からは FCHJU の後継組織である FCH2JU (Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking) が 2024 年までの予定で設置され、新たな μ -CHP (小型熱電併給) の大規模フィールド実証である「PACE」を立ち上げて 2016 年から 2021 年までの 5 年間で μ -CHP を 2,650 台設置する計画を立てるなど精力的に活動を行っている。また最近の状況として、特に欧州では再生可能エネルギーの導入拡大等により SOEC セルの研究開発が活発化しており、Sunfire 社や Topsoe 社等が研究開発を進めているほか、SOEC に関するプロジェクト (HELMETH、GRINHY 等) が進行中である。

ドイツは 2007 年に 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ている。半分の 7 億ユーロが政府資金であり、内 2 億ユーロが教育研究省からのものである。R&D とデモンストレーションの二本柱で推進されており、市場形成を重視し、42%のリソースを自動車分

野に充てている。定置用燃料電池分野では 2008 年から 2015 年までの 7 年間のプログラムである Callux プログラムにて約 500 台の定置用燃料電池の実証試験を実施した。参加企業は Baxi Innotech 社 (PEFC)、Hexis 社 (SOFC)、Vaillant 社 (SOFC) である。2016 年からは各企業での商用化に向けた市場開拓が行われている。

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

韓国は、日本と同様の実証事業が進められ着実な技術開発水準の向上が見られる。2020 年までの予定で、燃料電池など様々なクリーンエネルギーを家庭に導入するグリーンホームプログラム（1million green home program）の下、各企業が普及に向けた研究開発に取り組んでいる。業務用・産業用燃料電池に関しては、韓国の製鉄会社 POSCO のグループ会社である POSCO Energy が米国の FuelCell Energy 社と提携し、MCFC スタックの工場を設立、また現在トータルで 100MW 以上の規模で MCFC 燃料電池発電所の導入が進められている。韓国の LG 社は、英国ロールス・ロイス社の SOFC 開発部門を買収し LG Fuel Cell System 社を立ち上げて、本格的な実用化に向けた研究開発を強化している。FCV に関しては、現代自動車が FCV の一般販売も限定的に始めているが、価格は一千万円を超える水準にとどまっており、現在韓国国内では購入者に補助金を支給して販売価格を約 765 万円にするなど普及拡大に向けて取り組んでいる。

研究開発の内容に目を向けると PEFC の場合、本格普及時の燃料電池システムコストに占める電極触媒の割合が非常に大きくなると予測されるため、Pt の使用量を現状から 10 分の 1 に削減する低白金化技術、あるいは脱 Pt 触媒の基礎研究が世界的に実施されている。前者として、①コアシェル触媒、②合金触媒、後者としては、③カーボン系触媒、④金属酸窒化物がある。さらには実用電極内での触媒の有効利用率の向上を目指した研究が行われている。また、触媒活性の向上だけでなく、耐久性や MEA としての実用性を兼ね備えた材料が求められている。

- ① コアシェル触媒：コアシェル触媒は、コアを白金以外の金属や白金合金を用い、触媒反応が起こる表面部分（シェル）に白金を配置する触媒である。性能に関しては、コアの Pd の構造を制御したものや、Pd-Ir を合金化したコアを用いることで最大 11 倍程度の質量活性が報告されている。耐久性に関しても従来白金触媒と比較し、高い耐久性を有する報告もある。
- ② 合金触媒：白金以外の金属（Co,Ni,Fe,Cu,Ag,Au,Pd,La 等）と合金化することにより、白金の質量活性を増加させる手法である。トヨタ MIRAI には白金コバルトの合金触媒が採用されており、従来の白金触媒の 1.8 倍の活性を示すことが報告されている。

CoやNiを用いた報告が多いが、その他金属を用いた報告や三元系、四元系の合金触媒の報告もある。合金触媒は低白金・非白金触媒の中でも最も多く検討が進められている領域である。その中でも特に米国での進捗が著しく、DOEプロジェクトの成果として、従来のPt触媒にくらべて25倍程度の活性を示す格子状の構造をもったPt₃Ni触媒が報告されている。

- ③ カーボン系触媒：カーボンアロイ、窒素ドーピング炭素材料等がある。カーボン系触媒は、カーボン原子の集合体を主体とした多成分系からなり、それらの構成単位間に物理的・化学的な相互作用を有する材料として定義されている。多くの報告では、窒素等を含むポリマー樹脂とコバルトや鉄等の遷移金属や遷移金属錯体を混合して、炭素化することにより得られる。カーボンアロイ触媒は非白金触媒としては、高い酸素還元活性を有することが特徴である。現状としては、基礎研究段階であり、実使用環境である空気を酸化剤として評価している報告は少ないが、群馬大学・日清紡のグループおよびNEDO 固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発で東京工業大学らのグループで空気を酸化剤とした単セル試験の発電性能が報告されている。ただし現状は白金触媒と比較すると不十分であり、改善が必要とされる。
- ④ 金属酸窒化物：金属酸窒化物はバルブメタルとして知られている4および5族元素を用いた金属酸化物である。炭窒化物や有機錯体を焼成することにより得られ、金属種としては、Ta,Nb,Zr,Ti等の金属酸化物が酸素還元活性を示すと報告されている。近年、高い導電性を有するTi₄O₇等を用いたオール金属酸窒化物系触媒の開発も進められているが、性能改善が必要である。本分野は日本での研究が多い領域であり、NEDO 固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発、固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発事業にて、横浜国立大学を中心としたグループ等で研究開発が進められている。また、日本国籍の特許出願が多く、中でも昭和電工(株)の出願件数が特段に多い。

• PEFC 用電解質膜

実用化されているフッ素系電解質膜では、日・米・欧を中心に活発な研究開発が継続的に行われている。特に、安定性と耐久性の向上に対する日本企業（旭化成、旭硝子など）の取り組みは世界トップレベルで、分解機構の詳細な解明とその知見に基づく分子設計が実を結んでいる。分子末端の保護、側鎖エーテル結合の数と部位の最適化、安定剤の添加により、従来膜では数百時間程度で顕著な分解が起こった高温低湿度条件においても優れた耐久性を持つ電解質膜が開発されている。また加湿器レス運転のために電解質膜の薄膜化が注目されている。10ミクロン程度の薄膜化により水輸送能が向上し、燃料電池反応で生成される水をカソードからアノードに輸送し膜全体を加湿する。燃料電池劣化原因となるガスクロスオーバーも高くなり、耐久性とのバランスが重要となる。薄膜化の技術としては、多孔薄膜基材の細孔中に電解質ポリマーを充填した複合膜により実現される。

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

- PEFC 用拡散層

PEFC では、生成する水により、特に高電流密度領域での運転を阻害する。このため水を排出する技術が重要であり、拡散層および電極と拡散層の間のマイクロポーラスレイヤー(MPL)の親疎水化技術などがある。

また、100~150°Cで安定に運転できる PEFC の開発も望まれている。

- SOFC

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

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

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

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

- 非白金触媒の更なる性能向上・耐久性向上については、活性発現メカニズムの解明が重要である。また、非白金触媒については、触媒持分量が従来の白金触媒よりも多いことから、非白金触媒に適した MEA の構成検討を行う必要がある。これらの結果を適切に評価し、効率的に研究開発を推進するには、非白金触媒に特有の評価プロトコルの整理等も今後重要になる。
- 固体アルカリ形 (SAFC) : PEFC はプロトンが伝導する酸環境であり、白金以外の多くの金属は溶解するため、触媒金属が限定される。一方で、OH⁻イオンが膜を伝導する SAFC では、アルカリ環境であるため白金以外の多くの金属が触媒として使用可能である。課題は、アルカリ中で電解質ポリマーの耐久性が低いことから、新しい電解質膜の開発が必要なことであり、耐久性の高い電解質膜の研究開発が進められている。

[注目すべきプロジェクト]

新たな取り組みとして米国 DOE エネルギー高等研究計画局(ARPA-E)により、2014 年に中温域燃料電池に特化した 13 件のプロジェクトから成るプログラム REBELS (Reliable

Electricity Based on Electrochemical Systems) が開始された。本プログラムは 200-500°C の中温域で作動する分散型燃料電池開発により、PEFC と SOFC の両方の利点を取り込むことや新たな機能（メタン原料からの燃料電解合成など）を狙いとしたものである。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

定置用燃料電池普及の上での最大の課題は、コストである。市販の燃料電池システムは一定量の価格低下はしてきたものの、未だに自立普及するレベルには至っていない。各メーカーの努力により、性能、耐久性、信頼性は向上してきたが、今後の更なる普及拡大に向けては一層のコスト低減が必須である。また、運用上の課題も明らかになってきている。PEFC は熱主の運転であり、貯湯が満蓄になると運転が停止してしまい、稼働率が低くなってしまう。熱主の運転の結果、夏期や、熱負荷の小さな需要家にはランニングメリットが出せなくなる。一方、SOFC は、満蓄時でもラジエタによる放熱により運転が継続できるために、貯湯の満蓄による制約を受けることは無い。しかしながら、高温で作動するために、頻繁な起動・停止が難しく、電気需要の少ない深夜帯においても常時運転を継続する必要がある。その結果、電力負荷の小さい需要家では、運用の結果として、本来の高効率な発電性能が発揮できないケースも出てくる。この課題を解決するために、高効率発電を主眼として常時定格運転を継続し、余剰電力は電力系統に逆潮して、新電力が買い取る、という新しいビジネスもスタートしている。

また、PEFC では理論発電効率からかなり離れており、新しい材料の開発が待たれている。また、自動車用燃料電池は将来的なコストダウンが強く求められており、定置型とはコスト目標が大きく離れている。普及実現のためには新規材料開発が不可欠となっているが、膜、触媒などの個別材料の開発では燃料電池全体の最適化は難しく、燃料電池全体から考えた個別材料の設計・開発が重要となる。また、白金使用量を 10 分の 1 にするときにも、耐久性、実用性は譲れないため、現状の触媒材料の改良でなく、根本的な新規材料開発も必要となる。次世代 PEFC 材料の開発においては産学連携が重要となるが、従来とは異なる多様な試みが必要となる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

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

- ① 電極触媒、電解質の原子・分子・ナノ構造制御およびその界面制御を行い、反応機構や劣化メカニズムを理解することで、低温作動用の高活性・高耐久性電極触媒層開発

に向けた材料設計指針を構築

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

（5）政策的課題

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

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

最近の燃料電池分野の国家プロジェクトは、2015年からのFCV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。

（6）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、逆潮流、トリジェネレーション

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ NEDOなどによる研究資金により、全国の複数の集中的拠点の研究活動により、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等により、基礎研究や次世代技術開発への支援は減少方向。 ・ 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに幅広い研究が行われており、研究水準は世界をリードしている。主な取組み状況及び成果は以下のとおり。①コアシェル触媒：同志社大を中心としたグループではPdをコアとした触媒の検討、②合金触媒：山梨大学を中心としたグループでは、Pt-Co合金の表面に2層の白金スキン層を設けた触媒の検討。また、東工大を中心としたグループでは、規則fct3元系PtFeCo合金触媒の検討、③カーボン系触媒：群馬大学らのグループでは、各種ポリマーを炭素源として、また、各種金属種を用いて炭素化した触媒を開発するとともに、触媒の活性発現機構解明に向けた検討。共同研究先である日清紡HDでは、非白金触媒としては、世界最高レベルの発電性能を有する触媒が開発。東工大らのグループはポリイミドをポリマーとして、金属種に鉄を用いた触媒の検討。④金属酸窒化物：横国大らのグループは、ジルコニア系の酸窒化物の検討 ・ PEFCの電解質膜に関して量子化学計算を利用して、水の運動性が非常に低い状態でもプロトンが伝導する機構を見出し、低湿度環境下で優れた性能を示すPEMの設計指針（酸高密度構造）を提案した^{1,2)}。 ・ また、パーフルオロスルホン酸ポリマーに関して、EW500のポリマーが旭化成社から報告されている。 ・ SAFC用電解質膜の開発では、膜のアルカリ分解機構の解析が行われ、耐久性電解質膜としてヘテロ元素を有さない全芳香族からなる電解質材料の開発が行われている^{3,4,5)}。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料電池本体・発電システム・補機類などの技術が進展し、世界トップの水準を維持。集中研究拠点等を中心とした産官学の連携強化も図られている。 ・ 触媒についても、産官学の連携等により、低白金・非白金触媒いずれについても成果が得られてきている。詳細は以下のとおり。①コアシェル触媒：田中貴金属工業では、山梨大学で開発したPt-Coをコアとする触媒の量産化検討。また、石福金属工業では、同志社大学で開発したPdをコアとするコアシェル触媒の量産化検討。白金触媒及びその触媒層について過去5年の特許出願件数から見ると、トヨタ・日産といった自動車メーカーからの出願が多く、世界的に見ても出願件数は多い。材料メーカーで見ると、触媒メーカーとしては、キャタラー、田中貴金属工業、エヌ・イーケムキャット等の出願が多く、白金を担持する担体として、昭和電工の出願が多い。②カーボンアロイ触媒：日清紡では、共同研究先である群馬大学で得られた触媒開発指針に基づき、開発。また、帝人では、東工大で開発したカーボンアロイ触媒の知見を活用し、PANと鉄を炭素化した触媒の開発過去5年の特許出願件数について、世界的に見ても日本国籍の特許出願が多い。材料メーカーとしては、日清紡、旭化成、帝人、富士フィルム等の出願が多い。③金属酸窒化物：昭和電工が、横濱国大らのグループと連携して開発を進めている。過去5年の特許出願件数は世界的に見ても昭和電工の出願が圧倒的に多く、本分野を主導している。

研究開発領域

				<ul style="list-style-type: none"> PEFCを用いたエネファームは既に15万台が設置され、燃料電池自動車の市販も始まっている。 SAFCでも、実用化はまだだが、ダイハツ社が、水加ヒドラジン燃料、貴金属フリーの燃料電池車両の開発を発表している。 SOFCの実用化も始まっている。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 2014年度、予算抑制の方針を転換し、その後研究開発予算は再び増加の傾向を見せている。低白金・非白金触媒については以下の通り①コアシェル触媒：コアシェル触媒に関して多くの研究がなされている。②合金触媒：アルゴンヌらのグループでは従来のPt触媒にくらべて25倍程度の活性を示す格子状の構造をもったPt3Ni触媒がある。③カーボンアロイ触媒：Los Alamosらのグループはシアナミドとポリアニリンを炭素源とし、鉄を加え炭素化した触媒の検討。また、イリノイ大らのグループではNicarbazinやMOFなどを炭素源とし、鉄を加え炭素化した触媒の検討が行われている。カナダのINRS-ÉnergieらではMOF（ZIF8）を炭素源とし、Fe錯体を加え、炭素化した触媒の検討。また、University of Waterlooでは、Fe、Coなどの遷移金属錯体を炭素化した触媒の検討。 Case Western Reserve Universityらのグループでは、グラフェン、3次元、Nドーブ、PNドーブ、BNドーブ、CNT等、ナノカーボンを中心にした触媒の開発イオン交換基の酸性度の違いがプロトン伝導性に及ぼす影響を実験的に明らかにした上で、良好なプロトン伝導性を示すイオン交換基のデザインを示した⁶⁾。 SAFCの開発では、高アルカリ耐性を有するイオン官能基の開発が行われ、耐久性電解質膜に展開している^{7,8)}。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 米国では、バックアップ電源、フォークリフト用電源、バッテリー充電用電源、小型移動体向け電源など幅広い分野への商用化が進められている DOEファンドにより、コスト低減のため、低白金・非白金触媒の開発及び、電解質膜・MEA等の開発が協力で推進されている。産官学の連携等により、低白金・非白金触媒いずれについても成果が得られてきている。詳細は以下のとおり。①コアシェル触媒：UTC Powerらで開発されたコアのPdの形状を調整した触媒。②合金触媒：3Mらのグループでは、NSTFに触媒をスパッタした触媒の開発。白金触媒及びその触媒層について過去5年の特許出願件数から見ると、GMやフォード、UTC POWERといったシステムメーカーからの出願が多く、材料メーカーではNSTF等の開発を進めている3Mからの出願が多い。また、米国での特許出願件数は他国と比較しても多く、特許出願件数からも白金系触媒の開発については、米国が最も先進的に進められていると言える。③カーボンアロイ触媒：Los Alamosらのグループやイリノイ大らのグループで開発したカーボンアロイ触媒を量産化するための検討をPAJARITO POWDERが進めている。過去5年の特許出願状況を見ても、ニューメキシコ大学やLos Alamosからの出願が見られるが、世界的に見ても米国籍の出願件数は日本国籍の出願している件数と比較すると少ない。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ドイツは2007年に10年プログラムである「水素・燃料電池技術革新国家プログラム」（を立ち上げ、官民共同で累計14億ユーロを水素・燃料電池技術開発展開に充てている 2014年にはFCH 2 JUが開始され、プログラムが実施される7年間で合計13.3億ユーロの予算を計上しており、燃料電池・水素エネルギーの導入を目的として、自動車用燃料電池の低コスト化や発電用燃料電池の効率向上等の研究が進められている。 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに研究が行われているが、非白金触媒については、日米と比較すると少ない。①コアシェル触媒：ドイツのTechnical University Berlinを中心としたグループで脱合金化法により処理を行ったコアシェル触媒。②・合金触媒：ドイツのTechnical University Berlinを中心としたグループでは、粒子形状を制御し、粒子径が9.5nm PtNi合金触媒を開発。デンマークのTechnical University of Denmarkを中心としたグループではPt5La合金触媒を開発。また、フランスのNRS-Universitéでは、fcc構造を有するPtCo合金触媒。③カーボンアロイ触媒：フランスのUniversite de Montpellierらのグループでは、MOF（ZIF8）を炭素源とし、Fe錯体を加え、炭素化した触媒の検討 PEFCの電解質膜：高効率なホスホン化反応を利用することによって、高いIECを有し、かつ優れた熱的安定性を示すホスホン酸高分子電解質膜の開発に成功した^{9,10)}。 SAFCの電解質膜：放射線によりフッ素系樹脂に電解質材料をグラフト重合させた膜の開発が行われている¹¹⁾。

	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新たなμ-CHPの大規模フィールド実証である「PACE」が立ち上がった。 ・ 2014年にはFCH 2 JUが開始され、プログラムが実施される7年間で合計13.3億ユーロの予算を計上しており、燃料電池・水素エネルギーの導入を目的として、自動車用燃料電池の低コスト化や発電用燃料電池の効率向上等の研究が進められている。 ・ 触媒に関しては、低白金化に関する検討が主流。①コアシェル触媒：ジョンソンマッセイでは、Pd₃Coをコアとしたコアシェル触媒。②合金触媒：ジョンソンマッセイでは、PtN合金触媒をリーチング。白金触媒及びその触媒層について過去5年の特許出願件数から見てみると、システムメーカーであるダイムラーの他、ジョンソンマッセイ、BASF等の材料メーカーが多く出願している。また、ヨーロッパでの出願では、フランス原子力庁（Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives）からの出願が多いことも特徴である。③カーボンアロイ触媒：論文では、企業が参画し、開発を進めている報告はない。また、過去5年の特許出願状況を見ても大学からの特許出願は一部見られるが、企業からの出願は見られない。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「エネルギー技術革命重点革新行動ロードマップ」を発表し、燃料電池技術を15件の重点革新任務の1つに掲げている ・ 2025年以降の市場化を狙い、国産燃料電池技術の開発に向けた取組みを進めている。「中国製造2025」には2020年までに1,000台規模の試運行、2025年までに量産化の実現が目標として定められており、これらを実現するプロジェクトとして、「863計画」、「973計画」などの中央政府のR&D活動に、水素燃料電池がテーマ設定されている。 ・ 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに研究が行われており、近年論文等による報告が増加している。しかしながら、触媒性能に関しては、日本や米国に比べると劣る。①コアシェル触媒：South China UniversityらのグループではCu-UPD法を用いたコアシェル触媒の検討。Wuhan Universityらのグループでは化学還元法を用いたコアシェル触媒の検討が行われており、Niをコアとした触媒。Dalian National LaboratoriesらのグループではPd-Auをコアとしたコアシェルの開発。②合金触媒：National Central University, Taoyuanらのグループでは、ナノロッド上のPtCu合金触媒の開発。また、Wuhan Universityらのグループでは、Pt-Cu-Ag三元系合金の開発がある。③カーボンアロイ触媒：Xiamen Universityらのグループでは、炭素源(樹脂など)と3d遷移金属(Fe,Coなど)を混合し炭素化した触媒の開発が。また、South China Universityらのグループでも、炭素源(樹脂など)と3d遷移金属(Fe,Coなど)を混合し炭素化した触媒の開発を行っている。 ・ PEFC: チャネル構造の構築に向け、多置換のイオン交換基を有するユニットを利用した高分子電解質膜を多く報告している^{12,13)}。 ・ SAFC: 多孔性高分子やロタキサン構造を用いた高速アニオン伝導性材料の開発が行われている¹⁴⁾。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「エネルギー技術革命重点革新行動ロードマップ」を発表し、燃料電池技術を15件の重点革新任務の1つに掲げている ・ 過去10年間、燃料電池自動車・バスのデモンストレーションが行われてきたが、現時点で市場はなく、また市場形成に向けた政策も打ち出されていない。2025年以降の市場化を狙い、国産燃料電池技術の開発に向けた取組みを進めている状況である。 ・ 触媒に関しては、低白金・非白金いずれについても企業が関与して開発を進めている報告はない。過去5年の特許出願状況を見ても大学からの特許出願は一部見られるが、企業からの出願は見られない。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料電池に関する一定レベルの基礎研究は継続されている ・ 韓国科学技術院などを中心に、国のファンドで固体高分子形やリン酸燃料電池、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取り組んでいる。 ・ 触媒に関しては、低白金化・非白金化ともに研究が行われている。しかしながら、触媒性能に関しては、日本や米国に比べると劣る。①コアシェル触媒：コアシェル触媒に関しては、あまり大きな進捗はない。Korea Institute of Science and TechnologyらのグループではCu-UPD法を用いてPd-Cu合金をコアとして用いた報告。また、KAISTでは化学還元法を用いて、Pdをコアとした触媒の開発、Sungkyunkwan UniversityではPd-Coをコアとした触媒の報告。②合金触媒：Korea Institute of Science and TechnologyではPtNi合金触媒を熱処理（アニール）すると表面が白金層になり配列が制御され、活性・耐久性が向上することを報告。またKorea Institute of Science and Technologyでは、Pt3Laが高い活性と耐久性を示すことを報告している。③カーボンアロイ触媒：Republic of Korea Naval Academyでは、窒素含有の炭素源と遷移金属(Fe, Co)を混

			<p>合し、炭素化した触媒の開発。また、National Institute of Science and Technologyらのグループでも窒素含有の炭素源と遷移金属(Fe、Co)を混合し、炭素化した触媒の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> PEFC:アニーリング処理し、明瞭な相分離構造を構築することによって、低湿度環境下でプロトン伝導を促進される含フッ素炭化水素系マルチブロックポリマーを開発した¹⁵⁾。 SAFC:エンプラ系のポリマーをベースとした、ペンダント型のアニオン交換膜の開発が行われている¹⁶⁾。
応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 2020年までの予定で、燃料電池など様々なクリーンエネルギーを家庭に導入するグリーンホームプログラムが進められている。また、現代自動車のFCV実用化も進んでいる。 自動車用では、現代自動車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。 触媒に関しては、企業からの開発状況や性能に係る報告はほぼない。また、過去5年の特許出願状況を見ると、自動車メーカーである現代自動車の出願が多く、白金系・非白金系のいずれについても出願が見られる。特筆すべきはサムソングループの特許出願が非常に多いことである。韓国内での出願のみならず、米国・欧州等にも多くの件数の特許を出願している。しかしながら、2016年4月の報道では、サムソンの燃料電池研究開発部門はコーロンに売却されることが報じられている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗: 上昇傾向、→: 現状維持、↘: 下降傾向

(8) 参考文献

- 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2015年）
- 水素燃料電池戦略ロードマップ平成28年3月22日改訂版
- 水素・燃料電池戦略協議会（第4回、第5回）- 配布資料
- 平成27年度新エネルギー等導入促進基礎調査 水素社会の実現に向けた取組に関する調査 調査報告書
- The U.S. Department of Energy's (DOE's) 2016 Annual Merit Review 報告書
- Minhua Shao ら著、Recent Advances in Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction、
- ACS Publications, August 7, 2015
- 平成27年度NEDO新エネルギー成果報告会 燃料電池・水素分野 予稿集
- 平成26年度 炭素材料学会年会 予稿集
- 太田健一郎・石原顕光著 固体高分子形燃料電池の本格普及に向けた脱白金酸素還元触媒への展望
- 第7回新電極触媒シンポジウム 講演予稿集
- NEDO 固体高分子形燃料電池実用化技術開発 基本計画
- NEDO 固体高分子形燃料電池高度利用化技術開発 基本計画
- Sarah C. Balla ら著、Activity and Stability of Pt Monolayer Core Shell Catalysts. ECS Trans.2009,

- Velázquez-Palenzuela, A.; Zhang, L.; Wang, L.; Cabot, P. L.; Brillas, E.; Tsay, K.; Zhang, J. Fe-Nx/C Electrocatalysts Synthesized by Pyrolysis of Fe(II)-2,3,5,6-Tetra(2-Pyridyl)Pyrazine Complex for PEM Fuel Cell Oxygen Reduction Reaction. *Electrochim. Acta* 2011
- Yang, L.; Larouche, N.; Chenitz, R.; Zhang, G.; Lefèvre, M.; Dodelet, J.-P. Activity, Performance, and Durability for the Reduction of Oxygen in PEM Fuel Cells, of Fe/N/C Electrocatalysts Obtained from the Pyrolysis of Metal-Organic-Framework and Iron Porphyrin Precursors. *Electrochim. Acta* 2015
- Marina V. Lebedeva ら著、Effect of the Chemical Order on the Electrocatalytic Activity of Model PtCo Electrodes in the Oxygen Reduction Reaction. *Electrochim. Acta*.2013
- Ifan E. L ら著、Understanding the Electrocatalysis of Oxygen Reduction on Platinum and Its Alloys. *Energy & Environmental Science*.2012
- Chunhua Cui ら著、Octahedral PtNi Nanoparticle Catalysts: Exceptional Oxygen Reduction Activity by Tuning the Alloy Particle Surface Composition. *Nano letters*.2012
- Frederic Jaouen ら著、Effect of ZIF-8 Crystal Size on the O₂ Electro-Reduction Performance of Pyrolyzed Fe-N-C Catalysts. *Catalysts*.2015
- The U.S. Department of Energy's (DOE's) 2015 Annual Merit Review 報告書
- Lin Gan ら著、Understanding and Controlling Nanoporosity Formation for Improving the Stability of Bimetallic Fuel Cell Catalysts. *Nano Lett.* 2013
- Wang, Y.-C.; Lai, Y.-J.; Song, L.; Zhou, Z.-Y.; Liu, J.-G.; Wang, Q.; Yang, X.-D.; Chen, C.; Shi, W.; Zheng, Y.-P.; et al. S-Doping of an Fe/N/C ORR Catalyst for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with High Power Density. *Angew. Chem., Int. Ed.* 2015
- Peng, H.; Mo, Z.; Liao, S.; Liang, H.; Yang, L.; Luo, F.; Song, H.; Zhong, Y.; Zhang, B. High Performance Fe- and N- Doped Carbon Catalyst with Graphene Structure for Oxygen Reduction. *Sci. Rep.* 2013
- Pylypenko, S.; Mukherjee, S.; Olson, T. S.; Atanassov, P. Non-Platinum Oxygen Reduction Electrocatalysts Based on Pyrolyzed Transition Metal Macrocycles. *Electrochim. Acta* 2008
- Cheon, J. Y.; Kim, T.; Choi, Y.; Jeong, H. Y.; Kim, M. G.; Sa, Y.J.; Kim, J.; Lee, Z.; Yang, T.-H.; Kwon, K.; et al. Ordered Mesoporous Porphyrinic Carbons with Very High Electrocatalytic Activity for the
● Oxygen Reduction Reaction. *Sci. Rep.* 2013,
- Matin, M. A.; Jang, J.-H.; Kwon, Y.-U. One-Pot Sonication-Assisted Polyol Synthesis of Trimetallic Core-Shell (Pd,Co)@Pt Nanoparticles for Enhanced Electrocatalysis. *Int. J. Hydrogen Energy* 2014
- Choi, R.; Choi, S.-I.; Choi, C. H.; Nam, K. M.; Woo, S. I.; Park, J. T.; Han, S. W. Designed Synthesis of Well-Defined Pd@Pt Core-Shell Nanoparticles with Controlled Shell Thickness as Efficient
● Oxygen Reduction Electrocatalysts. *Chem. - Eur. J.* 2013
- Hwang, S. J.; Yoo, S. J.; Shin, J.; Cho, Y.-H.; Jang, J. H.; Cho, E.; Sung, Y.-E.; Nam, S. W.; Lim, T.-H.; Lee, S.-C.; et al. Supported Core@Shell Electrocatalysts for Fuel Cells: Close

Encounter with Reality. Sci. Rep. 2013

- 1) T. Ogawa, K. Kamiguchi, T. Tamaki, H. Imai and T. Yamaguchi, *Anal Chem*, 2014, 86, 9362-9366.
- 2) T. Ogawa, T. Aonuma, T. Tamaki, H. Ohashi, H. Ushiyama, K. Yamashita and T. Yamaguchi, *Chem Sci*, 2014, 5, 4878-4887.
- 3) Takeo Yamaguchi et al *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2016, 18, 12009-12023
- 4) Takeo Yamaguchi et al *Rsc Adv.*, 2016, 6, 36269-36272
- 5) Takeo Yamaguchi et al *Poly. Chem.*, 2015, 6, 7964-7973
- 6) Y. Chang, G. F. Brunello, J. Fuller, M. L. Disabb-Miller, M. E. Hawley, Y. S. Kim, M. A. Hickner, S. S. Jang and C. Bae, *Polym Chem-Uk*, 2013, 4, 272-281.
- 7) Geoffrey W. Coates et al *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134 (44), 18161-181642.
- 8) Geoffrey W. Coates et al *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, 137 (27), 8730-8737
- 9) I. Dimitrov, S. Takamuku, K. Jankova, P. Jannasch and S. Hvilsted, *Macromol Rapid Comm*, 2012, 33, 1368-1374.
- 10) I. Dimitrov, S. Takamuku, K. Jankova, P. Jannasch and S. Hvilsted, *Journal of Membrane Science*, 2014, 450, 362-368.
- 11) John R. Varcoe et al *Energy Environ. Sci.*, 2012, 5, 8584-8597
- 12) S. N. Feng, K. Z. Shen, Y. Wang, J. H. Pang and Z. H. Jiang, *J Power Sources*, 2013, 224, 42-49.
- 13) J. H. Pang, S. N. Feng, H. B. Zhang, Z. H. Jiang and G. B. Wang, *Rsc Adv*, 2015, 5, 38298-38307.
- 14) Tongwen Xu et al *Adv. Mater.*, 2016, 28(18), 3467-3472
- 15) D. W. Shin, S. Y. Lee, C. H. Lee, K. S. Lee, C. H. Park, J. E. McGrath, M. Q. Zhang, R. B. Moore, M. D. Lingwood, L. A. Madsen, Y. T. Kim, I. Hwang and Y. M. Lee, *Macromolecules*, 2013, 46, 7797-7804.
- 16) Young Moo Lee et al *Macromolecules*, 2012, 45(5), 2411-2419

3.20 モーター・トランス等用磁石材料

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

次世代自動車や家電、産業機械の心臓部であるモーター（電気エネルギーを機械エネルギーに変換するデバイス）の省エネ化に資する稀少レアアースに依存しない革新的な永久磁石（硬磁性材料）、さらには電圧の変換に使用されているトランス（電力用変圧器）やモーターの鉄芯として使用され、電気エネルギーの損失を少なくする軟磁性材料についての研究開発領域である。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

モーター等の部材として用いられる強磁性体には、永久磁石のようにいったん磁化されると半永久的に外部に磁束を供給する硬磁性の材料と、その磁束、および、電磁石の鉄心のようにコイルが作る交番磁束の通り道として機能する（電流の向きを反転すると容易に磁化も反転する）軟磁性の材料とが存在する。

永久磁石は、自動車の走行モーターをはじめ、パワーステアリングの駆動モーター、エアコン用圧縮機のモーター、洗濯機のドラム駆動用モーター、工作機械の位置決め・割り出しやロボットに使う産業用モーターのほか、家庭内のあらゆる電化製品の可動部品類の駆動モーターなど、広範囲の用途に使われている。また、エネルギー消費の観点では、モーター全体による消費電力量は、世界の消費電力量全体の40～50%（日本では約60%）を占めるとされている¹⁾。駆動回路を含むモーターの総合効率は、誘導モーターに比べて永久磁石式モーターが5-10%高く、効率90%を超える高効率モーターが可能である²⁾。モーターにおける電力損失は膨大な量に上り、一部の産業モーターを永久磁石式にすることにより国内だけでも年間数百億 kWh の電力を節約できる。

鉄をベースとする軟磁性材料は、変圧器、発電機、モーターなどの鉄心に用いられ、材料の低損失化はエネルギー変換の効率の改善に貢献する³⁾。その代表である電磁鋼板はトランスやモーターなどの電気機器の鉄芯材料として不可欠な材料として、変圧器では電気エネルギーを電気エネルギーに、モーターでは電気エネルギーを機械エネルギーに変換する役割を担ってきた。電力総量の中でこれらの損失が占める比率は、送電時の変圧トランスによる損失が1%、機器内のモーターやトランスの磁心で発生する損失が2.4%と言われており、電磁鋼板による電力損失（鉄損）の比率は合計3.4%、電力損失量では日本だけで年間300億 kWh の大きさになる³⁾⁴⁾。また、温室効果ガスであるCO₂排出量1424万トンに相当する。（CO₂国内総排出量の1.1%に相当）

トランスやモーターの構成要素のうち効率を大きく作用するのがこれら永久磁石、および電磁鉄心用軟磁性体という磁性材料である。今後も電動自動車の生産台数増加をはじめとするエネルギーの電化率の増加に伴い、それらの需要は増加の見込みであり、小型軽量で高い磁気エネルギー密度をもつ永久磁石と高磁束密度で低損失の電磁鉄心材料の開発が求められている。

[動向（歴史）]

永久磁石材料開発は 1917 年の本多光太郎らによる KS 鋼（コバルト・タングステン・クロム鋼）より本格化し、合金による磁石が先行し、次にフェライト（酸化物）が登場した。さらに 1970 年ごろから希土類を含む金属間化合物によって超強力磁石が作られるようになり、サマリウム・コバルト磁石で最高性能を達成する等、1970 年代から 1980 年代初頭に日本の研究者が先導する分野となった。戦略元素であるコバルトの価格が高騰し、新しい高性能磁石の必要性が認識される中、1982 年に佐川真人（当時、住友特殊金属（株）（現在の日立金属（株））、現インターメタリクス（株）、NDFEB（株））らによるネオジム磁石（Nd₂Fe₁₄B 焼結磁石）により大きなブレイクスルーを迎えた⁵⁾。現在においてもネオジム磁石は最強の永久磁石であり、人工磁石の開発は、現在のネオジム磁石まで日本人の貢献が大きい。

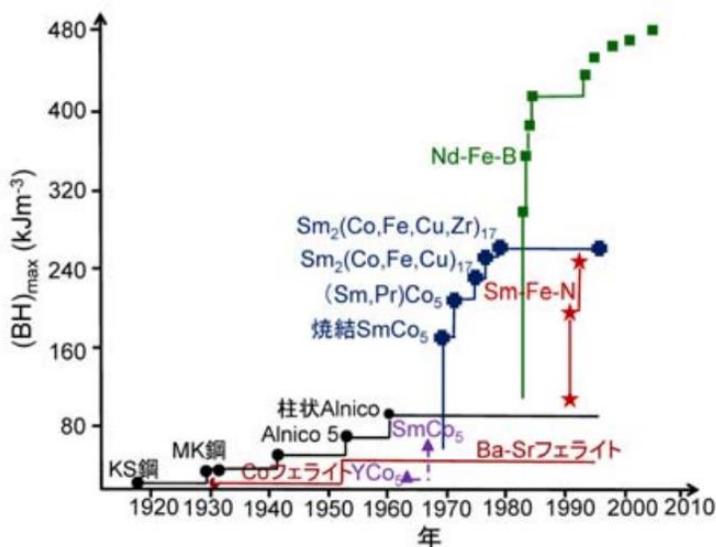


図 3-16 永久磁石の歴史

出典：宝野和博（NIMS・フェロー）

現在の磁石材料は二極化しつつあり、電動ワイパーなどの電装品やスピーカー等、寸法への制約が比較的小さな用途の磁石にはフェライトが用いられ、装置の小型軽量化と強力な磁気特性が同時に要求される用途にはネオジム鉄化合物が用いられる。

ネオジム磁石はハイブリッド自動車に 1~2kg 程度使用されているとされるが、温度が 180~200°C 程度になるエンジン部など高熱下では保磁力が低下する。ハイブリッド車等、電気自動車の駆動モータでは、通常はネオジムの 20-30% を重レアアースであるジスプロシウム (Dy) で置き換えたジスプロシウム含有ネオジム磁石が使われている。

これらレアアース（ネオジム、ジスプロシウム等）は、特定国がほぼ供給を独占しており、21 世紀に入って、ジスプロシウムを始めとした各種レアメタルの価格の乱高下や供給の不安定性が顕在化し、2007 年頃から多くのレアメタルの価格が顕著に上昇し始め、資源開発や備蓄のみでは対応しきれない事態に発展する懸念が生じた。さらに、資源メジャーの M&A や占有化や国家資本の積極的参入が続く最中に、2011 年には、中国の希土類輸出制限に端を発した 30 倍以上(特にジスプロシウムの価格は 2011 年には 100 倍⁶⁾までに至った)の希土類価

格の暴騰が世界を襲った。このことから、レアアースの中でも特に稀少な重レアアース元素を使用せずとも同じ性能が得られる磁石が求められている。

国内磁石メーカーは 2004 年ごろから粒界拡散技術を開発し、ジスプロシウム危機の際に省ジスプロ化の手段として発展、実用化させた⁷⁾。低ジスプロシウム組成で作製した焼結磁石の表面に追加ジスプロシウム源として化合物等を塗布し、加熱処理することによりジスプロシウムを粒界部に沿って磁石内部に拡散させ、結晶粒最外郭部に薄くジスプロシウムを追加導入することにより省ジスプロシウム化する技術であり、HEV 用磁石のジスプロシウム使用量をおよそ半減できる。ガリウム等の添加により省ジスプロシウム化する技術も併せて開発されている⁸⁾。2016 年 7 月、大同特殊鋼株式会社と本田技研工業株式会社は、重希土類元素を全く使用せずに、ハイブリッド車用駆動モータに適用可能な高耐熱性、高磁力を実現したネオジム磁石を世界で初めて実用化している。

永久磁石のうちネオジム磁石の生産量では、既に一位の座を中国（60%強）に譲っている状況であるが、日立金属、信越化学、TDK などの日本メーカーが約 25%の世界シェアを有する⁹⁾。

ネオジム磁石の発表から 33 年が経過した。この間、Nd-Fe-B 磁石の特性を越える新磁石の探索や製造が試みられ、いくつかの物質が新たに発見されてきたが、ネオジム磁石を越える新磁石の実現には至っていない。基本特許が切れたこともあいまって、レアアースを使用せずに、ネオジム磁石と同等以上の性能を得られる次世代磁石の開発が強く望まれている。研究開発状況を論文発表動向から見ると、日本は Nd 系・Pr 系及び L10 規則格子系の研究は盛んであるが、SmCo 系や MnAl 系等のレアアースフリー研究は低調である。この分野は、欧州、特に中国からの論文発表が増加していることから、今後は中国の研究開発状況を注視すべきである。

軟磁性材料の歴史としては、電磁鋼板は珪素（Si）を含む鉄心用の材料で、1900 年に Hadfield（英）が Fe に Si を添加して磁気特性を向上させた珪素鋼板を発明し、1903 年に製造方法が確立され、ドイツや米国において工業生産が開始された。1932 年、東北大学の増本、山本らが、Fe-Si-Al 合金の非常に高い透磁率を持つ材料を開発し、「センダスト」と命名され、東北金属（現、NEC トーキン）によって工業化された。その後、1934 年に Goss（米）が方向性電磁鋼板の製造方法を発明し、翌年から Armco 社（米）が方向性ケイ素鋼板の製造を開始した¹⁰⁾。日本では 1950 年代に方向性電磁鋼板及び無方向性冷間圧延電磁鋼板の製造が、新日本製鐵、川崎製鉄により開始され、1968 年からは高磁束密度方向性電磁鋼板の製造も開始された。1960 年代から液体急冷法によるアモルファス金属の研究が始めた。その中で、東北大学の増本のグループは 1975 年に Fe-Si-B 系のアモルファス（Amomet）を開発した。1988 年、日立金属は、Nb と Cu を添加した Fe-Si-B 系アモルファスを熱処理することにより微細結晶を析出させる（結晶化）ことに成功し、工業化した。これらは、軟磁気特性はケイ素鋼より優れているが、ケイ素鋼板に比べ飽和磁束密度が低いことから、モータやトランスなどのパワー系用途に用いることが難しいことから実用化に限界があった。変圧トランスやモータの鉄心などに使用される電磁鋼板に代表される軟磁性材料では、コイルが誘導する磁束の時間変化への応答に遅れがあると使用中に損失（鉄損）が生じ、変圧器やモータの電力効率が低下する。数十年に亘り、その地道な材料特性の改善により損失低減が図られてき

たが、近年その改善は飽和に達している。2008年、東北大学において特異なヘテロアモルファスの結晶化を利用した新たな高鉄濃度ナノ結晶合金が発明された。これは、飽和磁束密度が1.8Tを超えケイ素鋼板と遜色ないと共に、軟磁気特性にも優れている。すなわち、Fe基アモルファス合金や従来型ナノ結晶合金に比べ飽和磁束密度が大きく、鉄損はケイ素鋼板と比較し1/2から1/10と大幅に小さいことを特徴とすることから、早期の実用化が望まれている。

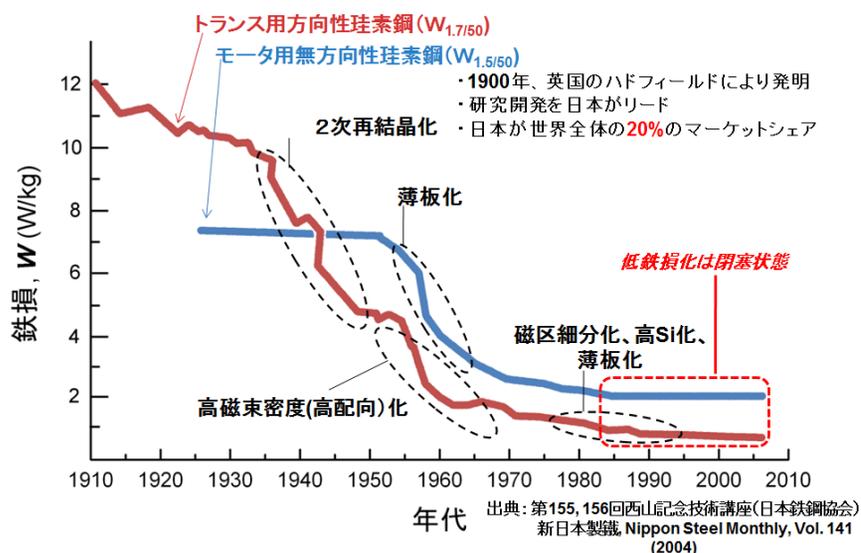


図 3-17 従来材料 (ケイ素鋼板) における低損失化の歴史

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

物質・材料研究機構 (NIMS) では、2014年にジスプロシウムフリー磁石の高保磁力化に成功している¹¹⁾。結晶粒合径を磁区サイズより微細化してジスプロシウムフリー化に伴う保磁力の低下を補償する技術と、低融点の軽希土類合金を用いた粒界拡散手法による結晶粒相の制御で逆磁区の核生成を抑制して保磁力を増強する技術からなっている。前者には微粉末プロセスに依らずに微細で清浄な結晶粒制御を達成するプロセス技術、後者は原子配置を三次元観察できる最新の解析技術といった、いずれもナノテクノロジーの発展がもたらした成果といえる。さらに、2015年には非経験的電子論計算が予測した高磁化の化合物を実際に合成することにも成功し、ネオジム磁石の構成化合物を超える磁気物性値を持つことを明らかにするなど¹²⁾、新物質探索面においても成果を上げている。

2016年7月、大同特殊鋼株式会社と本田技研工業株式会社は、重希土類元素を全く使用せずに、ハイブリッド車用駆動モータに適用可能な高耐熱性、高磁力を実現したネオジム磁石を世界で初めて実用化した。

東北大学では、電力損失を大幅に削減可能なナノ結晶軟磁性材料の開発に成功し、鉄系ナノ結晶材料にリンを添加した圧粉磁心を用いたコンプレッサモーターによりモータ効率3.1%向上を実証することに成功している¹³⁾。従来型ナノ結晶合金は、アモルファス化に必要な元素を比較的多く加える必要があり Fe含有量が制限されることから、飽和磁束密度を十

分に高くできないという課題があった。新規高 Bs ナノ結晶合金 NANOMET®は、Fe-Si-B系合金に P と Cu を複合添加し、成分組成を適切に制御することにより、アモルファス形成限界を超えた 80at%以上の高 Fe 濃度領域において、レアアースを含むことなく 10nm 程度の均一なナノ結晶組織を得ることを可能とした。本材料は、ケイ素鋼板に匹敵する 1.8T 以上と高い飽和磁束密度 (Bs) と低い鉄損を兼ね備える優れた軟磁気特性を示す。この新規高 Bs ナノ結晶合金 NANOMET®は、本材料を用いて世界最高クラスの高効率モータの試作に成功したことにより、次世代高効率モータ用の新たな軟磁性材料候補として期待されている。また、本材料の実用化、工業化、更なる特性向上を目指し、産業競争力強化法に基づく官民イノベーションプログラム (文部科学省・経済産業省) による大学発ベンチャーが発足している。

ポストネオジム磁石として、有望視されているのは 1-12 系と呼ばれる希土類磁石と鉄ニッケル系の磁石がある。1-12 系は希土類元素 1 に対し、鉄を 12 混ぜる。NIMS が発見し、世界に研究が広がった。また隕石 (いんせき) の結晶構造を採る鉄ニッケル系 (L10-FeNi 規則相磁石) において、東北大学では、アモルファスから微細結晶を作る方法 (上記の新規高 Bs ナノ結晶合金と同じ簡便な工業的手法¹⁵⁾) を、デンソーは窒化脱窒化法という製造法を開発した。実用化されると希土類の供給リスクから解放されると期待されている⁷⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- 経済産業省が 2012 年に開始した「次世代自動車向け高効率モータ用磁性材料技術開発」を NEDO が引き継ぐ形で、2014~2021 年度の 8 年間という長期プロジェクトが始まっている。レアアースに依存しない革新的高性能磁石の開発、モータを駆動するためのエネルギーの損失を少なくする高性能軟磁性材料の開発ならびに新規磁石、新規軟磁性材料の性能を最大限に生かして更なる高効率を達成できるモータ設計の開発を行い、次世代自動車や家電、産業機械の心臓部であるモータの 25%省エネ化を図り、競争力を確保し、我が国産業全体の活性化に寄与することを目標としている。
- 文部科学省の「元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>」として磁石材料、電子材料、電池・触媒材料、構造材料を課題とする 4 拠点が 2012 年から 10 年間の事業として動いている。これらの拠点は SPring-8 や J-PARC、京コンピュータなどの基礎的・大型ファシリティと積極的に結びついて、材料創成、解析評価、理論の三位一体で物質の本性を理解することで抜本的代替材料開発への道を開こうとしている。磁石材料研究拠点では磁力発生原理を理論的に解明し、希少元素を全く使わない磁性材料の開発を目指している。
- 東北大学では、国内磁石メーカーとのコンソーシアムの中で微粉末プロセスの極限をねらい省ジスプロシウム化する技術の研究開発が進められている。
- JST の CREST においても 2011 年と 2012 年にそれぞれ 5 年間の永久磁石材料を対象としたプロジェクト各 1 件が採択され、それらの成果の一部は元素戦略磁性材料研究拠点に合流し継続研究される方向である。上述の NIMS の成果はこれらプロジェクトの果実である。
- 文部科学省主導の東北発素材技術先導プロジェクトにおける 3 テーマの一つである超低損失磁心材料の研究開発を実施する、東北大学金属材料研究所「超低損失ナノ結晶軟磁性材料研究開発センター」では、モータやトランスなどの磁気応用製品の電気・磁気変換に

- 伴う磁心損失（エネルギーロス）低減という課題に対し、高鉄濃度ナノ結晶軟磁性合金（新規高Bsナノ結晶合金 NANOMET®）の創製に取り組んでいる。
- 欧州では、レアアースを含まない、あるいは削減した永久磁石材料について、2011年から2015年度にわたり産学コンソーシアム型プロジェクト ROMEO(Replacement and Original Magnet Engineering Options)がスロベニアのヨゼフ・シュテファン研究所を盟主として6企業6大学により構成され、ネオジム磁石代替材料技術の研究開発を行った¹⁶⁾ほか、レアアースを含まない磁石材料探索に絞ったプロジェクト REFREEM(The Rare-Earth Free Permanent Magnets)がギリシャの国立科学研センターDemocritusを盟主として進められた¹⁷⁾。その他、いくつかの小規模プロジェクトが進められた¹⁸⁾。現在はこれらが終了し、次期プロジェクトへの再構成が進められている状況である。新たなものとしては、INAPEM(International Network on Advanced High Energy Permanent Magnets)¹⁹⁾、NOVAMAG(Novel, Critical Materials Free, High Anisotropy Phases for Permanent Magnets, by Design)²⁰⁾などがあり、理論計算主導の研究開発を目指している。
 - 米国では、AMES国立研究所を盟主としてCritical Materials Instituteと呼ばれる拠点プロジェクトが2013年に組織されて現在も遂行されており、レアアース資源から回収再利用技術に至るまでの広範な研究を進めており、その中で、セリウムなどの使い道のないレアアースをフリーレアアースと称して利用し磁石材料を創製する試みや、アルニコ磁石材料を高保磁力化する研究なども行われている²¹⁾。それら自体は我が国の磁石産業界および材料研究にとって脅威ではないが、3Dプリンタを用いたコンビナトリアル的実験遂行技術の開発²²⁾など、我が国では行われていない試みも行われており、継続して追跡する必要はある。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

永久磁石材料と通常の強磁性体との最も顕著な違いは、磁気異方性に由来する保磁力であり、その発現には相対論効果である電子スピン・軌道カップリングが本質的な役割を果たしていると考えられている。しかし磁石が実際に使用される高温での磁氣的振舞いを電子論に基づいて正確に記述し予測することには、現在の計算科学をもってしても、いくつかの本質的な困難が残っている。一方、十分な保磁力の発現のためには、主相を微細な結晶粒に分断し、適切な粒界相を配置した微細組織を構成することが必須である。しかし、保磁力の微視的メカニズムを記述するために必要な粒界や相界面の原子論的理論や計算科学などの基盤科学、それらを天文学的個数の結晶粒からなる磁石材料の保磁力に対して定量的予測が可能な仕方で連結するための理論手法、および、組織制御の基盤となる材料熱力学に関する情報は、いまだほとんど整備されていない。

また、メカニズムの解析や理論予測に基づいて新たに磁石材料を創出するには、熱力学的合理性を持った材料設計によるものでなければ、大量生産可能なバルク材料としての社会実装は難しいことから、材料熱力学基盤の整備はとりわけ重要である。

磁石材料は典型的な多元系材料であり、特に希土類元素や化合物の測定データはほとんどなく、その整備と活用が我が国の研究開発競争力の強化に有効と考えられる。

[今後取り組むべき研究テーマ] ²³⁾

- 永久磁石の高性能化、およびそのための指導原理の確立
 - 計算科学、物性論等を利用した新永久磁石材料の設計あるいは設計指導原理の確立
 - 原子スケールからサブミリメートルスケールに及ぶ広範囲のサイズ階層にまたがる磁気構造の解析技術およびシミュレーション技術の確立
- 保磁力発生メカニズムの徹底的解明に基づいた既存材料の高保磁力化、あるいは、希少元素を使用しない新永久磁石の開発
 - 結晶粒合径を微細化して保磁力を増強する技術 (清浄な結晶粒界制御のプロセス技術)
 - 結晶粒界面の制御で逆磁区の核生成を抑制して保磁力を確保する技術 (原子配置を三次元観察できる最新の解析技術)
 - バルク化が困難であった材料の革新的なバルク化プロセスなど
- 開発材の社会実装を支援、加速する永久磁石材料の熱力学基盤整備
 - 本質的に多元系物質である永久磁石材料における相安定性や相生成量の定量解析および予測が可能な、関連元素全体にわたる熱力学計算用データベースの整備
 - さらに、多くの相界面を内包する永久磁石材料における組織形成原理を扱うための、非平衡過程の記述ができる材料熱力学の整備
- ネオジム磁石を超える新規永久磁石合金の探索
 - 多様な元素の特性に着目し、「電子状態」「原子配列」「階層構造」「ナノスケール複合構造」「欠陥配置」などの微視的な観点から目的機能を如何に発現させるかを検討し、計測技術や計算科学を活用した構造・機能・反応プロセスの設計
- 我が国固有技術である高鉄濃度ナノ結晶軟磁性合金の工業化、実用化の推進
 - 更なる高 Fe 濃度において、ヘテロアモルファス形成能を向上させる最適組成をデザインする。
- インフォマティクス
 - 上記諸項目を加速するための、電子論計算に基づく高速スクリーニング、および、データ同化と機械学習を含む物性値推算技術の開発
 - 電子論から出発し、原子論的描像、連続体的描像の各階層へとスケールを拡大するための物理的有効パラメータを決定する手法(すなわち、粗視化技術)の開発
- 統合的工学研究分野

電気学会では電磁アクチュエータシステムのための磁性材料について、特にインバータで駆動する際に界磁電流に不可避免的に重畳され、モータ効率に悪影響を与える高周波成分による磁石材料の渦電流損失や軟磁性鉄心材料のヒステリシス損失(鉄損)に対する評価技術の調査が進められている。これらは磁性材料の加工方法や絶縁技術、組み立て技術などにもわたる広範な工学的問題を含み、これまでは学問の机上に乗ってこなかったが、重要な取り組みである。

（5）政策的課題

- 長期的視点に立った基礎材料科学分野振興

磁性材料に限らず他の材料分野と共有するものであるが、特に、労多くして実が少ないという理由で敬遠され、主要大学の工学部門から姿を消しつつある熱力学計測の実験研究部門は全ての材料科学の基盤的存在であり、再興と維持が必要である。世界的に見ても材料熱力学、特に実験測定分野は、一つのデータを得るにも材料系に特化した測定技術を開発し、実験精度を確保するための測定を多数繰り返す必要があることから、後継者が少なく衰退の危機にさらされている。この危機を乗り越えて次世代に技術継承した者こそが素材分野において競争力を維持継続できると言える。

また、既存の知識体系による評価の保守性が非連続なイノベーションの障害になる可能性もあり、国の研究機関は、失敗を許容する新しい管理手法によって、ハイリスクな研究開発に取り組むべきである。

- 大型研究施設の産業界による利用促進

大型研究施設は施設建設自体が大型物理学実験に焦点を合わせて建設されてきたが、材料科学にとっては、勝手が分かりにくくアクセスしにくい存在になっている。磁性材料に限らず、産業界の研究者が利用し新規材料の開発に役立てるに至るには、ユーザーサポート体制、および、特化された目的のために個別に製作されたオーダーメイド実験機器の設計製作とインタフェース開発のための部署を設営し維持する施策が必要である。

- 省庁間連携

新規材料の創製に成功した場合に産業界による社会実装を加速するための補助金等の施策が有効であることは明らかであるが、企業にとっては知的財産権の適切な運用により実施権が保護されることが不可欠である。単一のプロジェクトあるいは政策の設計や評価に留まらず全体最適化を目指す評価システムの設計と、それを可能とする省庁間連携が重要である。

（6）キーワード

軟磁性、ネオジム、ジスプロシウム、レアアース、保磁力、磁束、ナノ組織、粒界、原子配列、アモルファス・非晶質、ナノ結晶、電子論・計算科学、インフォマティクス

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	国内・国際会議におけるトランス材料の研究発表件数は少なく、新材料の研究は低調である。国プロとしては文科省の東北復興Pjが終了し、NEDOのMagHEMにおいても、2016年度にテーマが終了する予定で、新規テーマの募集を開始している状況。 永久磁石材料については、文科省Pj元素戦略、NEDO-PjMagHEMなどが引き続き実施される他、新規テーマ探索のための先行研究も実施中。また、JST-Pj産学共創も新規テーマを公募するなど研究投資は盛んである。 磁石に関する重要論文発表が多い機関は、NIMS、東北大学、日立金属、大阪大学、長崎大学の5機関となる。NIMSは解析に関する論文が多く、東北大学の論文はNdFeBとFePtに偏っている。日立金属は基礎から高性能化の

				研究まで幅広い。大阪大学の研究はNdFeB薄膜によるDy、Tb拡散の研究と希土類磁石のリサイクルに関する研究の2つに大別され、長崎大学は薄膜や急冷薄帯による磁気特性向上の研究とシミュレーションによるマイクロマグネティックスを行っている。 さらに、今後の研究展開としてマテリアルインフォマティクス利用が期待されている点について、研究環境の整備が進みつつある。
	応用研究・開発	○	→	トランスなどパワーデバイスの研究開発では高周波化が進んでいる。新規の回路などの研究も盛んであるが、実用化の面からみると、産業界からの研究発表件数は多くない状況である。 モータの研究については、自動車用の可変磁気回路の新たな構造が提案され始めている。しかし、国際的な研究発表の件数は、中国や韓国と比較して減少する傾向にある。
米国	基礎研究	○	→	2011年の希土類価格高騰以降、非希土類の磁石の基礎研究が盛んとなった。国プロとしてはNSF-PjのG8とREACTが2015年に終了し、DOE-PjのCMIも2016年に終了予定。非希土類元素に関する国プロはマテリアルズゲノムなどでひきつづき行われる。 磁石に関する重要論文発表数が多いのはAmes Laboratoryとデラウェア大学となる。Northeastern大学がFeNi磁石関連研究を継続している。
	応用研究・開発	○	↘	EV用のモータとして国内をリードしているものがインダクションモーターであり、新規構造のモータ開発は低調。また、トランスについても一時期アモルファス材料の利用で活性化された市場動向も盛り上がりを欠く状況。マグネクエンチ社は、海外の企業としては唯一、磁石に関する重要特許公開件数で目立っている。
欧州	基礎研究	○	→	EUによる大型Pjの終了後は、新規に開始されるPjが理論研究に限定されるなど、材料研究より物理寄りの内容が中心。Pjの形態についても、日本の研究グループが参加するなど、国際Pj、領域振興といった目的が中心。磁石研究分野において、これまで中心的役割を果たしていたドイツ、フランスに加えて、スペインやイタリアからも国際会議における発表が見られるようになった。新材料開発では軽希土類の利用促進等が提案されている状況であるが、研究の中心は解析技術の開発等が目立つ状況。
	応用研究・開発	△	↘	モータ・トランス共に新たなデバイス開発に関する研究発表は低調な状況。欧州の変圧器は積層による鉄心が主流であることから、巻き方式で製造するアモルファス鉄心の市場が拡大していない。
中国	基礎研究	○	↑	永久磁石関連の研究は盛んであり、国際会議における研究発表や特許出願など増加傾向にある。ただし、材料研究の中心は新材料開発よりも既存ネオジム磁石の高性能化や材料プロセスの検討による低価格化などが中心であり、これらを支えている地方大学からの研究発表も目立つ。 中国科学院は磁石関係の研究開発に関し包括的に論文発表している。山東大学は保磁力の理論的解析、モデリングに特化した研究をおこなっている。
	応用研究・開発	○	↑	モータやモータ用制御回路に関する研究は盛んであり、近年では、国際会議においても全体の発表件数の10～20%程度まで増加する傾向を示している。
韓国	基礎研究	△	→	磁性材料関連の研究はスピントロニクスやメモリー関連の弱電分野に関する研究であり、永久磁石やトランス材料の研究は少ない。ただし、材料輸入国としての立場から、希少元素の代替えには注目されており、日米欧を中心として実施されている希少金属代替え技術三極会議では、リサイクル分野を軸として、オブザーバー参加を開始した。
	応用研究・開発	△	↑	モータ、トランス、パワーデバイスに関する研究は盛んであり、近年では、国際会議における同分野の発表件数は日本とほぼ同程度のレベルに達している。

(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

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) 中道 理「モータの省エネ化が日本を救う」、日経エレクトロニクス、2011年6月23日、データ原典は富士経済研究所調査報告(2009) <http://www.fed.or.jp/tech/2008/electricpower.pdf>
- 2) 国吉ら「省エネルギー・省資源を実現する磁性材料」、日立評論 95 (2013) 370.
- 3) 鉄鋼プロセス工学入門(JFE 21sst Century Foundation)
<http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/index2.html> 第1章
http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/chapter_1/1d_2.html
- 4) 東北発素材技術先導プロジェクト 超低損失磁心材料領域
<http://nanoc.imr.tohoku.ac.jp/outline.html>
- 5) M. Sagawa et al., “New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe”, *Journal of Applied Physics*, 55 (1984) 2083.
- 6) 日刊工業新聞 平成 28 年 9 月 27 日「革新の系譜・日本の科学技術力/ネオジム磁石-EV・ロボの実用化」
- 7) 中村元「高性能 Nd-Fe-B 系焼結磁石における省 Dy 技術」、日本金属学会会報(マテリア)50 (2011) 374.
- 8) 山崎貴司ら、「Dy フリー1600 超 kA/m NdFeB 系焼結磁石及び合金の開発と量産化」、粉体粉末冶金協会 3013 年秋季大会講演概要集(2013) p.74、講演番号 3-10B.
- 9) JOGMEC「電動自動車関連部材のレアメタル使用実態(Nd 磁石)」平成 26 年度(第 7 回)金属資源関連成果発表会資料
- 10) 一般社団法人 特殊鋼倶楽部 「特殊鋼 2014 Vol.No,5 9」
- 11) Akiya et al., “High-coercivity hot-deformed Nd-Fe-B permanent magnets processed by Nd-Cu eutectic diffusion under expansion constraint”, *Scripta Materialia* 81 (2014) 48.
- 12) Y. Hirayama et al., “NdFe₁₂N_x hard-magnetic compound with high magnetization and anisotropy field”, *Scripta Materialia* 95 (2015) 70.
- 13) 2016 年 2 月 29 日プレスリリース「世界最高水準の高効率モータを搭載した圧縮機の省エネ性を実証」、<http://www.imr.tohoku.ac.jp/ja/info/results/2016/0229.pdf>
- 14) 東北大学金属材料研究所超低損失ナノ結晶軟磁性材料研究開発センター「Newsletter」
- 15) <雑誌> *Scientific Reports*/
<DOI> 10.1038/srep16627/ <タイトル> An artificially produced rare-earth free cosmic magnet
- 16) P. McGuinness et al., “Replacement and Original Magnet Engineering Options (ROMEOS): A European Seventh Framework Project to Develop Advanced Permanent Magnets Without, or with Reduced Use of, Critical Raw Materials”. *JOM* 67 (2015) 1306.
- 17) D. Niarchos et al., “Toward Rare-Earth-Free Permanent Magnets: A Combinatorial Approach Exploiting the Possibilities of Modeling, Shape Anisotropy in Elongated Nanoparticles, and Combinatorial Thin-Film Approach”, *JOM* 67 (2015) 1318.
- 18) S. Hirosawa, “Permanent Magnets Beyond Nd-Dy-Fe-B”, *JOM* 67 (2015) 1304.
- 19) INAPEM, <http://www.inapem.eu/>
- 20) NOVAMAG,
<http://www.bcmaterials.net/project/novel-critical-materials-free-high-anisotropy-phases-for-permanent-magnets-by-design/>

- 21) The Ames Laboratory, Critical Materials Institute, <https://cmi.ameslab.gov/>
- 22) J. Geng et al., “Bulk Combinatorial Synthesis and High Throughput Characterization for Rapid Assessment of Magnetic Materials: Application of Laser Engineered Net Shaping (LENS™)”, JOM 68 (2016) 1972.
- 23) JST 産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」HP

3.2.1 スマートビル・ハウス

（1）研究開発領域の簡潔な説明

スマートビル・ハウスとは、エネルギーを創り、蓄え、効率的に活用・制御することが可能な業務用建物や住宅をいう。建築物単体だけではなく、住宅、マンション、ビル、工場などの各需要管理単位でのシステム研究開発、さらには地理的に分散配置されている多数の需要側エネルギーリソースを通信制御でアグリゲートして1つのシステムとして利活用するシステムオブシステムズ(System of Systems)まで、接続される系統とのエネルギーや情報のやりとりを含む多種多様なエネルギーマネジメントシステムも研究開発対象となる。建物躯体の工夫、高効率な設備機器の導入、再生可能エネルギーの利活用、ICT利用によるエネルギーのマネジメント・BEMS/HEMS (Building/Home Energy Management System) により、統合的効率化を目指す。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

先進国に限らずほとんどの国々における共通の問題として、民生用エネルギー消費の急激な増加があげられる。我が国の住宅・建築部門におけるエネルギー消費量は過去 20 年間に於いて増加しており、省エネ基準の見直し実施や建物の省エネ基準への適合義務化の計画など、より高い省エネ性能をもった住宅や建築物への機運が高まっている。

2015年4月の長期エネルギー需給見通しでは、エネルギー自給率向上、エネルギーコストの上昇抑制、温暖化ガス排出削減の達成のため、2030年までの電力供給側・需要側の重点施策と目標を示している。需要側では徹底的な省エネルギーの推進を旗印に、ネットゼロエネルギービル・住宅 (ZEB・ZEH : Zero Energy Building/House) の促進、自動車の電化の推進、コジェネレーションシステムの拡大、需要のスマート化 (DR: Demand Response) などを重要要素としてあげている。

また、2014年エネルギー基本計画（平成26年4月11日閣議決定）においては、「建築物については、2020年までに新築公共建築物等で、2030年までに新築建築物の平均でネット・ゼロ・エネルギー・ビルの実現を、住宅については、2020年までに、ハウスメーカー等の新築戸建の過半数をネット・ゼロ・エネルギー・ハウス化する」となっている。

次世代型エネルギー需給マネジメントシステム（スマートグリッド）の確立には、分散型電源やリチウムイオン電池、HEMS (Home Energy Management System)、BEMS (Building Energy Management System)、MEMS (Mansion Energy Management System)、FEMS (Factory Energy Management System) などを含む多様な需要側資源を連携させる双方向通信技術、およびエネルギー需給マネジメントなどの制御技術に重点的に取り組む必要がある。また、これらの中で必要な情報をやり取りすることで、街などの単位で需要家 EMS を統合する CEMS (Community EMS) により、さらに大域的な最適化を可能とするシステムも期待される。

EMS の目的は、省エネのみならず、電力システム全体の最適化である。今後太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーが大量導入されるようになると、需給バランスの確保が困難になり、電力システムの柔軟性を向上させるための対策が必要となる。EMS による需要の

制御は、重要なオプションの一つであり、2017年開始予定のネガワット取引市場の創設を出発点として、今後需要資源の積極的な活用が期待されている。

[動向（歴史）]

住宅のオートメーションを目的としたスマートハウスの概念は1980年から存在したが、2000年代後半から、地球温暖化を中心とした環境に配慮した住宅や業務用建築物の研究が開始された。建物や住宅の省エネ化を促進してZEB化やZEH化を目指すためには、太陽の光、風など自然を取り込んだパッシブ技術の活用（自然採光、自然換気など）、躯体の断熱性能の向上（高性能な断熱材・窓など）、高効率な設備機器の導入（LED照明、デシカント空調、タスクアンビエント照明・空調、高効率給湯システムなど）、再生可能エネルギーなどの導入（太陽光発電システム、蓄電池システム、太陽熱利用システムなど）、さらにこれらを最適に制御するエネルギー管理システム（BEMS、HEMS）の導入により、システム全体で省エネを追求することが必要となる。

建物や住宅に用いられる断熱材は、一般に繊維系、発泡プラスチック系、その他に大別される。繊維系には、グラスウール、ロックウール、セルローズファイバなどがあり、発泡プラスチック系には、押出法ポリスチレンフォーム、硬質ウレタンフォーム、高発泡ポリエチレン、ビーズ法ポリスチレンフォーム、フェノールフォームなどがある。建材に関しては建材トップランナー制度が発足した。

窓におけるサッシの素材は、現在はアルミが主流であるが、高断熱サッシとして、アルミ樹脂複合サッシ、樹脂サッシ、木サッシが開発されている。またサッシの形状の設計工夫も検討が進んでいる。

太陽熱利用システムについては、面積当たり一次エネルギー削減量で太陽電池を上回る再生可能エネルギー利用システムとしてさらなる普及が期待されており、新たな機器認証と環境価値認証制度の方向性の検討が日本国内で進められている。対象となるシステムは、強制循環式の給湯または暖房とソーラークーリングである。

日本における建物躯体と設備機器の統合的エネルギーシミュレーション手法として、The BEST Program（BEST：Building Energy Simulation Tool）があり、継続的に開発とメンテナンスが行われている。米国では、イリノイ大学、カリフォルニア大学、ローレンスバークレー国立研究所（LBNL：Lawrence Barkley National Laboratory）によって開発され、エネルギー省（DOE：Department of Energy）から配布されている建築物のエネルギー消費量予測ツールであるEnergy Plusがある。研究的にはこれらのプログラムは用いられているが、省エネ法の改正により建築研究所で作成されたWEBプログラムによって省エネ適合や省エネラベルが計算されるようになった。こうした標準化により簡易に省エネ手法の比較は可能になったが、WEBプログラムの省エネメニューに収録されていない手法に関しては効果の算定が難しくなった。研究開発された新しい手法の省エネ量の計算が客観的に認められる方法に関して検討をしておく必要がある。

一方、需要サイドで各国において最初に取り組みされたのはスマートメーターであった。需要家の消費電力を15~30分の単位で計量し電気事業者にデータを送るとともに、需要家に消費電力を詳細に見えるようにすることで省エネルギー行動を誘導するとともに、全需要家に設置されることから、様々なサービス展開も視野に重要な社会インフラと認識された。米国

では、DOE等の予算でスマートメーターの設置を加速する傍ら、老朽化したインフラ整備・近代化に対して投資を進めた。我が国では、次世代社会システムとしてスマートコミュニティの構築を目指す取り組みが精力的に進められた。横浜市、豊田市、けいはんな、北九州市がスマートコミュニティ実証地域に選定され、2011年から4ヶ年にわたり実証試験が行われた。このなかで、需要家毎にBEMS・HEMSなどを配置するとともに、太陽光発電、電気自動車をはじめとする多様なDER（Distributed Energy Resources）を導入し、さらにコミュニティ全体の需要家間を最適に統合するためにCEMSを設置するシステム構成がとられた。これは分散協調型EMSの一つの実現形態である階層型EMSの研究と位置付けることができ、これをもとに次世代の低炭素型コミュニティの実証が行われた。さらに、社会実験的な要素も取り入れられ、電力消費データ分析に行動科学的知見を反映した省エネルギーアドバイスレポートや、電力消費を下げたい時間帯にクーポンを発行して外出を促すなど需要家行動を変容させる実証試験も実施されている。

このように、スマートメーターで収集されるエネルギー消費のデータやHEMSネットワークで収集されるエネルギー利用関連データなどのビッグデータを分析し、消費者心理に踏み込んだ研究やサービス開発が国内外で盛んになりつつある。これらのデータは新産業ビジョンにおいてもリアルデータとして注目されており、エネルギーだけではないビジネスに活用される可能性がある。エネルギー分野におけるネットワークとビッグデータの活用は、デマンドレスポンスやリアルタイムプライシングなどのサービスとの関連が深い。いずれのサービスも個人情報扱う一種のフィードバックを含む制御系であり、プライバシー保護とサイバーセキュリティの確保が非常に重要となる。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

- 人間の快適性、健康性に関する研究は省エネ検討時の必要条件であるため、欧米でも盛んに研究が行われるようになった。日本ではハードウェア中心で本分野は軽視されてきたが、最近ようやく研究事例が出てきている。
- 室内環境の測定、制御に関する分野の研究がビッグデータの活用、IoTの事例として注目されている。
- 注目される高性能断熱材としては、真空断熱材（VIP：Vacuumed Insulated Panel）とエアロゲルがある。VIPは、多孔質の芯材をフィルムで包み、内部を1~200Paまで減圧したものであって、熱抵抗値が他の断熱材よりも高い。ただし、減圧するためのコストが大きく、非常に高価であることが課題であるため、日本国内では住宅の部分断熱改修に採用されるなどの限られた範囲での使用が目立つ。エアロゲルは、ナノメートルオーダーの空隙を有する脆弱な多孔質体で構成される。熱抵抗値が高いが原材料・製造装置が高価であることから価格が非常に高く、日本国内では住宅用にはほとんど普及していない。
- 昼光の導入技術、高性能ガラスの技術として、サーモクロミック（Thermochromic）技術やエレクトロクロミック（Electrochromic）技術がある。DOEとLBNLは、共同でエレクトロクロミック・ウインドウの研究開発を長く続けてきている。欧米では建築的な工夫に資する研究が盛んに行われているが、日本では、エアコンなどハード的な研究が主流に

なっている。

- 配電事業者がスマートメーターの導入を開始し、見える化、B ルート（スマートメーターと HEMS 間の双方向通信）通信等のサービスが広がりつつあり、将来の新たなプラットフォーム構築が進行中である²⁾。2024 年までには、全国約 8000 万台の全需要家に導入される計画であり、消費エネルギーデータも 30 分の標準スペックに加え、B ルートの活用で HEMS による 30 秒程度の粒度データの収集が可能になっている。
- 建物単体ではなく、電力需給全体の評価により、スマートハウス・ビルにおけるデマンドレスポンスの価値を定量化するためのシミュレーションが、米国 NREL（National Renewable Energy Laboratory）や日米の大学で行われている。

[注目すべきプロジェクト]

- スマートメーターが導入され、初期のスマートグリッド構築が進みつつある米国、欧州、日本において、需要家から収集される大量のデータを用いたエネルギー消費分析などに関する公的なプロジェクトが散見される。従来エネルギー供給者側の視点からのデータ分析が中心であったが、今後は国民全体の利便性向上などを考え、エネルギー消費者の視点からのエネルギー消費に関するデータ分析、エネルギーと情報とが融合した新たなサービスの創出が必要となることが考えられる。
- JST-CREST の「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」でプライバシー保護に関連する研究課題が採択されるなど、研究が進行中である。
- IEA Annex66,69 における人間行動、居住環境のデータベース構築などが注目される。日本では本分野に資金を提供することがないため、参加できない状況である。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

欧米の研究はそれを利用する人間や環境、ICT のソフト的な研究に移行している。日本の研究は、最近ではソフト的な研究も見られるが現状まではハード中心で進行しており、こうした波に乗りきることができていない。

[今後取り組むべき研究テーマ]

- IoT 利用によるエネルギーのリアルタイムデータ取得と利用に関する研究開発。
- 建物や住宅において、自然採光や自然換気の効果企画設計段階で正確に予測するパッシブ技術導入のためのシミュレーションツールの開発。単体から複数の建築物を同時にシミュレーションできる工夫が必要。
- 躯体の断熱性能を向上させる高性能な断熱材と窓（サッシおよびガラス）材料の技術開発。夏と冬を考えた技術開発の必要性。
- 高効率な設備機器の技術開発、およびその最適な利用方法検討のための建物躯体と設備機器の統合的エネルギーシミュレーション手法の開発。
- 高効率でかつ低コストの施工を実現するための再生可能エネルギー利用システムの開発。
- 建物や住宅に導入されるシステムの性能を正しく発揮するための最適制御を行うエネル

ゲーミングシステムシステムの開発。

- 企画設計段階や建設段階、運用段階における意思決定のための、建物や住宅の環境に関わる性能を総合的に評価する環境影響評価手法の開発。
- 建物や住宅の建設段階、運用段階において運用可能なコミッショニング手法の開発。
- 既築の建物や住宅ストックの資産価値や改修要否の判断を正確に行うことのできる性能評価手法、およびそれに適用可能な照明や空調の簡易改修が可能な省エネルギー手法の開発。
- ビジネスとして省エネ化を推進することが可能になるようなビジネスモデルの探求。

（５）政策的課題

政策的課題としては、省エネルギーに関する建物や住宅の実効的な規制や基準の整備があげられる。政府や自治体などの補助金や税制優遇などのインセンティブも期待される。

欧米では建築物においても、環境性能を公開することにより、市場メカニズムを用いて建築ストックの質の向上を図っている。米国では **Energy Star** による建築物の格付けが公開されているほか、EU 加盟国では不動産取引時にエネルギー消費実態に基づく格付け情報を建物所有者が提供することを義務づけている。このように社会制度を通じてエネルギー消費実態をビッグデータとして把握し、そのデータ活用により市場メカニズムを働かせ、よりエネルギー効率の高い製品、建築が選好され、社会のエネルギー効率の改善が自律的に進む社会制度設計に関する研究が、欧米では積極的に行われている。また、グリーンリースなどの政策的な仕組みの構築や初期投資の抑制に関する技術開発が求められる。

（６）キーワード

ネットゼロエネルギービル・住宅（ZEB・ZEH）、IoT、パッシブ技術、高性能断熱材、高性能窓、高効率設備、統合的エネルギーシミュレーション、再生可能エネルギー利用、エネルギー管理システム、環境影響評価

（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	○	→	電気分野を中心に優れた研究が行われているが、供給サイドの研究 電気学会では供給サイドの研究が中心である。 エネルギー・資源学会、建築学会、建築設備学会等では需要サイドの研究も多数あり。 ただし、研究領域間を横断した供給から需要までの横断的研究活動は、 JST/CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」 が唯一である。
	応用研究・開発	△	↘	経済産業省 次世代エネルギー・社会システム他多数の実証事業が行われている。 諸外国で行われている建築外皮に関する研究費は少ない。 人間行動に関する分野は特に遅れている。
米国	基礎研究	◎	↑	建築外皮に関する研究は先駆的。 需要資源を電力システムの運用に用いる考え方は、米国が最も先進的であり、ネットワーク事業者により濃淡はあるものの、すでにピーク対応のDR

				は実運用レベル。再エネ対応DRに関しては、各種の実証が行われている。例えばPJMでは、需要資源を供給資源と同様に位置づけ、定量的に価値が評価されている。
	応用研究・開発	◎	↑	IEEE SmartGrid等でエネルギーマネジメントシステムに関する研究多数。NREL（は再エネ、DRに関する研究成果をが多数公開。カリフォルニアなどでは再エネ対応のためのDRの実証が行われている。NEDO ハワイPJ、ニューメキシコPJ
欧州	基礎研究	◎	↑	基準化や規制により進展
	応用研究・開発	◎	↑	建築環境系の大学コースを見直すなど、過去10年の努力がある。EPBDで規制化。ZEB普及に積極的であり実証事例多数あり。（例：NEDO LyonプロジェクトTask1におけるPEB:Positive Energy Building）ドイツなど再エネ普及が拡大している国では、住宅用太陽光発電の自家消費拡大等に関心が高まっており、NEDOも電池やHP給湯機を用いた実証をドイツシュパイヤー市で行っている。
中国	基礎研究	○	→	着実に力を付けている。英文誌の投稿は日本よりもすでに多い。
	応用研究・開発	◎	↑	政策的精力的に進めている。大学対抗、ソーラデカスロンでは日本代表よりも高得点。資金も豊富。中国におけるスマートシティプロジェクトは大連等多数
韓国	基礎研究	○	→	民間企業によるIT技術と絡めた研究開発が推進。
	応用研究・開発	○	↑	ZEB、ZEHに関する関心は日本よりも高い。2009年ごろから済州島でスマートグリッド実証事業がスタート。家庭における家電制御など実施。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考・引用文献

- 1) 未来投資に向けた官民対話（第3回 平成27年11月26日）第3回「未来投資に向けた官民対話」 http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/zeh/
- 2) 「電力会社におけるシステムの開発・整備状況及びスマートメーターの設置状況」平成27年10月27日資源エネルギー庁

3.2.2 断熱・遮熱・調光

（1）研究開発領域の簡潔な説明

断熱とは、建築物において外部からの流入出熱を小さくして、夏・冬期の冷・暖房負荷を削減する技術である。遮熱とは、太陽光の日射を吸収しないように反射することや、太陽光によって、屋根、壁、窓が温められた結果、温度の高くなった面から出る熱の輻射（放射）を遮る技術である^{1,2)}。調光とは、透明体の光学的特性を変化させ、光の透過量や色などを変える技術で、このような機能を持たせたガラスが調光ガラスである。

ここでは、建築物向けの高性能な断熱材料、遮熱機能を持つ遮熱材料や遮熱窓の調光ガラスを対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

世界の全エネルギーの約45%は、住居やオフィス・工場などの建物に使用されており、その大部分が暖房と空調に使用されている³⁾。また、一般住宅では、全エネルギー消費の内、給湯や冷暖房など熱に関するものが全体の半分以上を占めている⁴⁾。

建物の断熱や熱遮断は、このエネルギー消費を押さえるために大きな役割を果たす。家屋の断熱・遮熱は、電気などのエネルギーの生産と輸送の効率を上げることや、環境に優しい新エネルギーの開発と同様に重要な課題である。例えば、建築物の断熱を高度に活用した実証実験では、冷暖房負荷が従来に比べて1/3に減少した実例もある⁵⁾。

建物の熱環境は、室内外の気温差による熱移動だけでなく、日射の影響を強く受けることから、遮熱は夏季の冷房負荷を減らす上で、断熱とともに市場要請が高まり技術の普及が進んできた。建物は、様々な部位から構成されるが、その中でとくに、窓（開口部）は建物内外への熱移動が大きい。これは、窓ガラスの断熱性が比較的低いことと、窓が採光性や眺望性など室内を開放的にする視覚的・心理的な役割を担って、日射が直接入射する経路になるためである。広い意味で遮熱の考えは古くから知られ、庇や簾、葦簀などの道具や、軒、縁側、坪庭といった建物空間など、現在も生活の中に浸透している^{6,7)}。一方で、近年、化石燃料の使用低減、温暖化ガス排出規制など、環境問題への意識が高まり、遮熱においても新技術の提案や実用化など、様々なステージで研究開発が進んでいる。

日本の国土を広く占める温暖地では、暖冷房期の両季節に適応した技術が求められるので、調光ガラスは有力な遮熱の候補である。調光ガラスは、以下のような3つの目的（個別か、もしくは複合して）で用いられる。

- a) エネルギー制御により冷暖房負荷を低減する
- b) 外部から入ってくる光量の制御により照明負荷を低減する
- c) 視覚的な変化をもたらす

中でも近年、a)の省エネルギー材料としての目的が大きな注目を集めている。省エネルギーのために遮熱を行う場合、注意しなければならないのは、遮熱を行うことで、冷房負荷は下がるが、暖房負荷は上がることである。日射の影響は方角によって全く異なるが、特に南に向いた窓では、冬の日射の方が夏の日射よりはるかに強いため、この方向で遮熱を行うと、

透明ガラスと比較した場合、冷房負荷の低減量よりも暖房負荷の増加量の方が大きく、年間を通じた冷暖房負荷は逆に増加してしまう。ところが、もし夏と冬で遮熱のレベルを可変できる調光ガラスを用いれば、夏はできるだけ遮熱して冷房負荷を下げ、冬は日射を取り入れて暖房負荷の増加量を抑えることで、年間を通じた冷暖房負荷を下げるができる。このように、南に向けた窓では、調光ガラスを用いることにより、遮熱による省エネルギーが可能になり、これが調光ガラスの必要性を示している⁸⁾。

これに対して、西や東を向いた窓では、南とは逆に夏の日射の方が冬の日射より強いので、この方角で遮熱を行うと、冷房負荷の低減量の方が、暖房負荷の増加量よりも大きくなり、年間の冷暖房負荷が下がる。ただ、この方向では、できるだけ遮熱する方が年間の冷暖房負荷が下がるので、結局窓のない状態がエネルギー的には一番好ましい状態になってしまう。ところが、調光ガラスを用いて夏と冬で遮熱のレベルを変えることができれば、この窓がない状態よりもさらに冷暖房負荷を下げるができ、大きな省エネルギー効果が得られる。これが、もう一つの調光ガラスの意義を示している。

[動向 (歴史)]

民生建物の省エネルギーの歴史は、第1次石油ショックを契機に発足した「サンシャイン計画(1974年)」、エネルギー利用効率の向上を狙った「ムーンライト計画(1978年)」を受け、その後の省エネ法制定(1979年)により告示された「省エネルギー基準(1980年)」、さらに同法改正にともなって告示された「新省エネルギー基準(1992年)」、「次世代省エネルギー基準(1999年)」で、より厳格な規制となって引き継がれている。これらの基準は、建物の断熱・気密性に重点がとくに置かれ、冷暖房削減の指針が示されてきた。この期間では、京都議定書(1997年協定)、東日本大震災(2011年)、パリ協定(2015年)と、エネルギー供給・温暖化ガス等の環境問題がクローズアップされる経緯で、今日まで省エネ住宅への関心が高まり、ゼロエネルギーハウス(ZEH)やゼロエネルギービルディング(ZEB)といったスマート建築物の市場への普及が加速してきた。

家屋の断熱材としては、これまでグラスウールや硬質ウレタンフォームなどが普及してきているが、さらに高性能な真空断熱パネル(VIP)も海外を中心に利用され始めている。既存の断熱材については、グラスウールの繊維を熱流束と直角方向に制御することによって、熱伝導率を制御する方法が提案されている⁹⁾。シリカをゲル化させ超臨界で乾燥させるシリカエアロゲルは、多孔質構造がナノ構造で空気の平均自由行程より短いので、個体の熱伝導率が常圧でも空気の熱伝導率より小さくなる特色を有する。これらの多くは粉体として用いられているが、水分を吸収するとその表面張力によりナノ構造が破壊されるため、湿度が大きいわが国では、高温の断熱剤として一部に使用されているのみである。

中国では、一般住宅にVIPが使用され始めているが、経年とともにVIPの真空度低下による断熱性能劣化が問題となっている^{10,11)}。ヨーロッパでは、市街地の多くが石またはレンガ造りの歴史的な建物であり、外観の変更や建て替えが不可能である。そのため、内装のみの変更が行われるが、従来の断熱材を建物の内側に設置すると、居住空間が著しく狭くなる。そこで、従来の断熱材より格段に薄いVIPを室内内装に利用することが検討されている¹²⁾。

近年では、部材系での技術開発が活発化しているが、それらを実用化させるべく、熱負荷

ひいては消費エネルギーの低減の効果について、以下に示す様々な観点で分析・調査がなされている¹³⁻¹⁶⁾。具体的には、①遮熱の技術・方式、②遮熱性能、③使用環境、④評価・試験方法、⑤ライフサイクルアセスメント(LCA)である。①遮熱の技術・方式では、外付けブラインド、ブラインド入複層ガラス、低放射ガラス (low-Emissivity:low-E と略し、内部に特殊な金属膜を設けた複層ガラス) や、近赤外選択反射フィルムといった技術で、光吸収か反射の方式に分類され、それぞれで特徴づけられている。②遮熱性能では、光反射率・透過率・吸収率の基本光学特性に加え、日射強度の波長分布や時々刻々と変わる日射高度に鑑みて、それらの分光特性と入射角依存性が重要となる。また、日射エネルギーをガラス面が一部吸収すると、熱に変換され、伝導・対流・赤外放射として、間接的に室内に侵入する。このように、間接的な日射侵入も含めた遮熱性能は、日射熱取得係数で表される。③使用環境は、建物の間取り(方位)、建物タイプ(戸建・集合住宅、オフィスビル)、気候(暑熱・温暖・寒冷地)、生活様式(家族構成、職業)、個性(体質・感性)と幅広いが、これらは互いに関係づけられて、様々な分析が行われている。④評価・試験方法は、材料、部材・部品、屋外実証試験、シミュレーションなどが挙げられ、調べる対象範囲とともに、検討項目が変わる。⑤LCAは、製造・使用・廃棄にわたる環境負荷(CO₂ 排出換算、資源消費量、安全性)、性能、寿命を総合的に分析して技術を判定する。

エネルギー消費の観点から、住宅やオフィスの暖冷房負荷は、国内の最終エネルギー消費の1割前後に達している¹⁷⁾。一方、建物の内外の境界を通る熱流は、窓が他の部位に比べて大きい。例えば、1992年の省エネ基準住宅で、夏は7割の熱が窓を通して室内に入り、冬は5割が流出しているとの報告がある¹⁸⁾。近年、ガラスの複層化やlow-Eフィルムといった技術が普及し始め、窓の熱性能は格段に上がってきた。しかし、省エネ化の要望で、外壁や屋根などの断熱等級も高仕様の建物が増えており¹⁹⁾、窓は大きな熱損失源である状況に変わらない。近年、遮熱の関心が高まり、窓の外側で日射を遮ることで高い効果が得られることが、実験や計算により改めて明らかになってきた。例えば、庇やシェード(簾や葦簣なども含む)といった、従来の技術が見直されてきただけでなく、その発展型と言える外付けブラインドや複層ガラス内ブラインド、さらに遮熱や遮断熱タイプのlow-Eガラスの普及が進んでいる。

現在の遮熱窓は、主に複層ガラスの中にlow-E膜が組み込まれた形態、いわゆるlow-E複層ガラスと呼ばれるタイプが主流で、2006年までは普及が僅かだったにも拘わらず、2015年には、複層ガラスの内、約2割をlow-E複層ガラスが占めるという状況にまでなった(普及面積による換算)。low-E複層ガラスは、遮熱型と断熱型に分類され、前記の普及率が全て遮熱型であるとは言えないが、それでも相当数あると推察され、遮熱技術に対する供給者・消費者の意識が高まってきたと言える。

断熱型の複層ガラスの国内出荷量は1999年で8,763千m²であったのが、2015年15,171千m²と1.7倍増加である。近年の経済活動の停滞や世代毎の人口分布の変化など、経済的・社会的な背景により、新築物件の数が大幅に減少している状況を考慮すると、複層ガラスの普及率は極めて高いと言える²⁰⁾。

1996年に透明状態または鏡状態に自在に変更できる材料が発見され、ガラスに塗膜した金属膜の光学特性を自由に制御できる機能を有する“調光ガラス”の研究が行われ始めた⁹⁾。調光ガラスは、物理的刺激により光学的性質が可逆的に変化する材料(「クロモジェニック材料」と呼ばれる)をガラスにコーティングするか、ガラスの間に挟むことで実現することが

できる。この物理的刺激として何を用いるかによって、以下のような種類がある。

- ① エレクトロクロミック：電氣的にスイッチングを行う
- ② サーモクロミック：温度によって変化する
- ③ サーモトロピック：温度によって散乱状態が変化する
- ④ ガスクロミック：周囲の雰囲気（ガス）で変化する

- ① エレクトロクロミックは、かなり前から研究が行われており、現在、実用化されているエレクトロクロミック材料には、a)薄膜型、b)溶液型、c)SPD型、d)PDLC型の4つのタイプがある。a)薄膜型は、調光ガラスの中でも、最も研究の歴史が長く、開発が始まったのは40年以上前だが、2012年頃、アメリカのベンチャー企業 SAGE Electrochromics 社（現在はフランス Saint-Gobain 社の子会社）でエレクトロクロミック窓ガラスとして商品化され²¹⁾、現在、欧米でビル等への導入が始まり、日本でもこの窓ガラスを使った建物が出てきつつある。b)溶液型は、元々、米国のベンチャー企業 Gentex 社が、自動車のルームミラーとして用いられる「防眩ミラー」用に開発した技術²²⁾を、窓ガラスに適用したものである。2012年に航空機の窓ガラスとして実用化され、ボーイング 787 で用いられている²³⁾。c)SPD型は、米国のベンチャー企業 Research Frontiers Inc. (RFI) が実用化したもので、様々なメーカーがそのパテント供与を受けて製造を行っている。現在、自動車のサンルーフや航空機の窓として使用されている。d)液晶型は日本板硝子ウムプロダクツから UMU（ウム）という標品名で販売されているが、スイッチングは非常に速く、不透明から透明への変化が 1/1000 秒、透明から不透明への変化は 1/100 秒程度である²⁴⁾。
- ② サーモクロミックは、周囲の温度によってその光学的性質が可逆的に変化する材料のことを指し、このような性質を持つ薄膜をコーティングしたガラスがサーモクロミックガラスである。この材料を建物の窓として用いると、冬は太陽光の熱線成分を透過し、夏は熱線を反射するという変化が自動的に起こり、暖房負荷及び冷房負荷を低減することができる。エレクトロクロミックガラスのように、自由にコントロールを行うことはできないが、膜の構造が簡単でコントロール系もいないというメリットがある。
- ③ サーモトロピックガラスは白濁調光ガラスとも呼ばれ、温度が低い時は透明状態だが、ある転移温度より高温になると白濁した状態になって光を遮る。これは日本のベンチャー企業で実用化されたガラスで、ある転位温度（この温度は作製時に設定できる）以下では無色透明なのに対し、転移温度以上になると白濁した状態になり光を遮る²⁵⁾。
- ④ ガスクロミックガラスは、周囲の雰囲気ガスを変えることで調光を行うガラスである²⁶⁾。ガスクロミックガラスの研究はドイツで進められていたが、必ず二重ガラスにする必要があることや、またスイッチングに大量の水素を必要とすることなどから商品化にはいたっていない。

これまで実用化されている調光ガラスは、いずれも太陽光を調光層で吸収することで調光を行うが、太陽光の照射が強いと薄膜部分の温度が上がり、それが室内に再放射されることになる。これを避けるためには、吸収ではなく、反射でコントロールすることが望まれるが、そのような材用は長く見つかっていなかった。それが、1996年にオランダのグループにより、

イットリウムやランタンなどの希土類金属薄膜がこのような反射型のクロミック特性を持つことが発見され、透明な状態と鏡の状態を切り替えできる調光ミラー（Switchable Mirror）と名付けられて一躍注目されるようになった²⁷⁾。

この調光ミラー薄膜を反射調光型の調光ガラスとして実用化するための研究は、主に日本で行われて、かなり実用化に近い段階までできている²⁸⁾。薄膜材料に関しては、当初スイッチングの繰り返しに対する耐久性が悪く、100回ぐらいスイッチングすると劣化してしまうという問題があったが、材料としてマグネシウムとイットリウムの合金を用いることで、耐久性が飛躍的に向上することが見いだされ、実用化の目処がたってきた。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

● 真空断熱パネル（VIP）

これまで、冷蔵庫などの高性能断熱材として使用されてきた真空断熱パネル（VIP）の住宅利用が検討されている。これは、ガラス繊維や粉体断熱材を金属蒸着したプラスチック膜に包み中を真空にしたものである。VIPは、ガスによる熱伝導をほぼゼロにすることができるので、従来の断熱材に比べて約1/10の厚さで断熱が可能である。心材は熱伝導やふく射熱伝達を阻害する材料が使用されており、空気の熱伝導率に比べて1/20の熱伝導率を有する高性能VIPも開発されている²⁹⁾。VIPを建築部材として利用する場合、真空度の低下で経年劣化することが大きな課題である。真空度がある程度低下しても心材の断熱性能低下を押さえられるフェームドシリカの利用が検討されている。フェームドシリカはコストが高いが、コストの安いパーライトや中空ガラスビーズ、各種繊維やカーボンを混入させてコストを下げることが検討されている³⁰⁻³²⁾。

● 遮熱フィルム

近年、化学メーカーを始めとして、多くの企業が遮熱(あるいは遮断熱)フィルム開発への取り組みを開始している。技術の流れとしては、AgやAuなどの金属膜や、ITO、その関連の透明酸化物系といった単層膜タイプ、金属と酸化物等の多層膜系で三層・五層タイプは既に商品化されている。さらには屈折率の異なる高分子系材料を数百層重ねた多層膜タイプへと開発が移行し、これが遮熱フィルムの主流になりつつある¹⁵⁾。これらフィルム化への開発では、選択波長反射による遮熱への展開も併せて行われ、多層膜タイプでは、日射の可視領域の透過率をできるだけ高めて、採光性・眺望性を確保しつつ、日射の近赤外光のみを遮蔽する技術開発が進んでいる。また、高分子のみからなる多層膜タイプでは、電磁波が通過できるため、室内においても携帯電話など無線機器への電波障害が起きにくくなるなどの利点も得られる。

● 調光技術

調光技術では、次の2つが挙げられる。

① プラズモン調光材料

これまでの調光材料は、スペクトルの特定の波長における吸収や反射のレベルを変える事で調光を行う物がほとんどだったが、最近、スペクトル上の吸収端波長を変える事で調光を行う新しいタイプの調光材料が注目を集めている³³⁾。電気の密度を変える事で

プラズモンの吸収波長を変える方式が用いられるため、プラズモン調光材料とも呼ばれる。アメリカのローレンス・バークレー研究所のグループを中心に研究が進められている。

② 有機薄膜エレクトロクロミック材料

有機系の薄膜では様々な色が出せるのに加え、真空装置を用いず、湿式法で成膜できるため、安価に製造することができる。材料としては、PEDOT (poly (3,4-ethylenedioxythiophene)) や PANI (poly (aniline)) といったポリマーが代表的な物で、酸化・還元反応により着消色する³⁴⁾。着色の効率が無機系の材料に比べて高く、鮮やかに発色する物が多いことから、表示素子等には適している。

[注目すべきプロジェクト]

● 真空断熱パネル (VIP)

建築物の断熱に関して、従来の断熱材に比べて 1/10 程度の厚さにできる真空断熱材 (VIP) は住宅の断熱性能向上が期待できる。しかし、冷蔵庫などの家電製品の断熱材の耐用年数は 2-20 年程度なのに比べて、建築物の断熱性能は 20-100 年と格段に長期間の耐用年数が要求される。

これを克服するために、心材と被覆材の改良が重要である³¹⁾。さらに、被覆材から多少空気が進入しても断熱性能が低下しにくいフュームドシリカを心材とすることが検討されている³⁵⁾。フュームドシリカやエアロゲルを真空断熱層として利用することは、ヨーロッパの研究グループで進められており、それらの機械力学的特性や熱的特性の研究が、分子動力学を用いて行われている³⁶⁾。また、VIP は施工時に穴を開けると使用不能となる欠点も有している。その欠点を克服するために、真空層を小分けに分割した VIP も開発されている³⁵⁾。

● 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合³⁷⁾

同組合が進めるプロジェクト内の一つ「革新的次世代遮熱フィルム」の開発では、高精度・高性能なナノ積層技術で、高い可視透明性と遮熱性を両立したフィルムの開発が進められている。実証試験により、現状の市販品より高い冷房負荷削減効果が得られている。今後、冬季の暖房に対する影響を調べ、通年での正味の省エネルギー効果の検証が計画されている。

● “INNOSHADER”プロジェクト

ヨーロッパで 2009 年から 2012 年に行われていた調光材料に関するプロジェクト³⁸⁾。特に湿式法を用いたエレクトロクロミック・シートの開発に重点を置いたプロジェクトで、技術的には大きな成果を上げて終了している。現在も、湿式法を用いた大型シートの作製に関して、この流れを受け継いだ研究がドイツを中心に行われている。

(4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

● 断熱

次世代の建築用断熱材として、真空断熱材 (VIP) が期待されているが、これが広く実用化されるためには、耐用年数と価格の大幅な改善が必要である。現在、家電用で広く使用さ

れているVIPは耐用年数が2-20年であり³⁹⁾、長期の利用では層内の真空度が低下して断熱性能が低下する。中国ではガラス繊維を心材としたVIPの価格は15ドル/m²程度まで下がっており³⁾、従来型の断熱材と競合できる価格まで下がっている。しかし、耐用年数の問題は解決されていない。VIP層内の圧力が上昇しても断熱性能をある程度維持できるシリカエアロゲルやフュームドシリカを使用したVIPが開発されているが、この場合は価格がボトルネックとなっている。耐用年数が長く、低価格の心材開発が進めば、VIPの利用は大きく前進すると考えられる。

● 遮熱

遮熱技術では、①遮熱フィルムの遮熱性能・断熱性能・可視透過率の向上および、②暖冷房負荷の正味での削減効果が、現状の課題として挙げられる。

①は、実質的に遮熱材の光吸収で生じる赤外放射の問題が少なからずあり、まずは、それを低減する光学構造や材料探索を行うことが求められる。具体的な例としては、多層膜タイプの遮熱フィルムの各層間の屈折率差を拡げ、近赤外の選択反射によって実現される遮熱性能を極限まで高めることが望まれる。但し、この性能向上は限界に近付いていると考えられる。この理由は、地上での日射エネルギーは、可視域に約5割が集中しているため、可視透明性を維持したままでは、日射の遮熱性能向上は、約5割で頭打ちになるからである⁴⁰⁾。また、建材である遮熱フィルムが、市場で受け入れられるためには、現在のlow-Eガラスやフィルムとの競争に耐えるよう、比較的、低い販売価格に設定せざるを得ず、その意味でもハードルが高い。

②は、とくに温暖地や準寒冷地に立地する住宅などの建物では、冷房負荷よりも暖房負荷が高く、遮熱フィルムをこの地域で用いると、冬季の日射の恩恵が減り、暖房消費エネルギーが増えて逆効果になる可能性がある。これは、遮熱技術では避けられないジレンマで、この解決に向けては、現実に即した性能評価をまず行い、遮熱特性を最適値に調整する必要があると考えられる。これまで、遮熱による冷房負荷抑制の効果の検証は、各社で行われ、情報発信がなされているが、冬季の暖房負荷増加の可能性も同時に検討し、通年での正味の暖冷房負荷低減の効果を検証すべきであろう⁴¹⁾。具体的には、季節ごとあるいは通年での屋外実証試験、シミュレーションなどを地域や気象などを分けて行う。さらには、LCAにより、製造・使用・廃棄までの長期的な環境インパクト(CO₂排出換算、資源消費量)を見積もり、環境負荷、性能、寿命を総合的に分析し、遮熱の効果を判定すべきと考える⁴²⁾。

● 調光ガラス

調光ガラスの実用化における最大の課題はコストにある。特に調光ガラスによって冷暖房負荷を下げようとする場合、その効果はそれほど大きくなく、年間の冷暖房費をどのくらい低減できるかを見積もると、その費用効果は1m²あたり千円程度ある。現在商品化されている調光ガラスの値段はだいたい1m²あたり15万円程度であり、これで回収しようとする150年以上かかることになり、あまりに高すぎる。現在は、調光ガラスは視覚的なコントロールに用いられているが、少なくとも、省エネルギー材料として普及させるためには、そのコストは現在の10分の1程度に下げる必要があり、それが最大の課題である。

[今後取り組むべき研究テーマ]

● 断熱

繊維系断熱材や発泡プラスチックの断熱材、従来型二重窓ガラスと低熱伝導窓枠による窓断熱など、既存の断熱技術の研究は成熟期を迎えている。建材用真空断熱材（VIP）はこれからの建築資材としてさらに研究が進められるべきである。特に、低価格な長寿命 VIP の開発は、今後の省エネ住宅のキーテクノロジーとなる可能性がある。パーライトなどの低価格断熱材と構造用強度を備えた、長寿命低価格 VIP も今後の研究進展が期待される。また、欧州で行われている既存住宅に設置可能な薄型 VIP の開発研究は、日本の既存住宅や建築物にも適用可能であり、今後の研究進展が望まれる。

断熱材の高性能化に伴い、断熱材の性能を計測する装置の高度化が必要となっている。新たな計測原理による断熱材の高精度熱伝導率測定手法⁴³⁾の標準化も今後必要となってくる。

● 遮熱

遮熱フィルムの性能向上の課題に対しては、単に反射率や透過率の物性値を材料調製によって変えるだけでなく、日射の入射角や環境の変化に応じて、光学特性が変わる、環境応答型の機能性遮熱部材の開発が待たれる。一方、暖冷房負荷の正味の削減効果を把握する課題に対しては、国内の気候条件、地域性、生活様式など、多くのパラメータを考慮した実証試験やシミュレーション予測を行うことが有効と考えられる⁴⁴⁾。また、エクセルギー⁴⁵⁾を用いて遮熱性能を評価することで、快適性など実際に近い状況での検証結果を発信できると期待される。

● 調光ガラス

調光ガラスのエネルギー性能は、断熱性能と遮熱性能で決まる。季節に応じて遮熱のレベルと断熱のレベルと最適にコントロールすることができれば、さらに冷暖房負荷を大きく下げることができる。現在研究されている調光ガラスは、ほとんど遮熱性だけを可変するものだが、今後は、断熱性についてもそのコントロールができるような調光ガラスの開発が望まれる。

(5) 政策的課題

● 断熱

わが国の既存住宅 6000 万戸の内、2300 万戸が築 25 年以上である⁴³⁾。最近の新築住宅戸数は年約 90 万個であるから、既存の住宅の断熱性能向上がわが国の省エネに大きく貢献する。しかし、住宅の断熱性能向上にかかる経費の投資回収年数が 25 年以上なので、現行では築 25 年以上の住宅の断熱改修は経済的に成立困難である。

一方、従来の断熱材に比べて 1/10 程度にすることが可能な VIP の新技術が発展し、耐用年数が上昇すれば、大規模な改修なしで既存住宅への適用が可能となる。ここに、政府の省エネ助成を組み合わせることにより、わが国のエネルギー消費を一定量削減することが可能である。さらに、省エネ住宅は省エネ換気システムと組み合わせることにより、住宅内の温度を均一化して健康寿命をのばす効果もあるので、家屋断熱の対費用効果が増大する。

● 遮熱

該当なし。

● 調光ガラス

日本は窓ガラスの省エネルギー性能に関しては、世界でも最下位クラスで、非常に遅れている。外国では窓のエネルギー性能に対して罰則規定があるために、エネルギー性能の悪い窓ガラスをつけることができないが、日本ではそのような法律が無いのが大きな原因になっている。従って政策的には、窓ガラスの省エネルギー性能に対してもう少し厳しい条件を義務化すると共に、エネルギー性能の良い窓ガラスの普及を促進するための補助金の充実等が望まれる。

(6) キーワード

断熱、遮熱、熱伝導、ふく射伝熱、真空断熱材 (VIP)、遮熱塗料、二重窓ガラス、シリカエアロゲル、フュームドシリカ、外付けブラインド、low-E、選択波長反射、日射熱取得係数、ライフサイクルアセスメント(LCA)、省エネルギー基準、ゼロエミッションハウス(ZEH)、ゼロエミッションビルディング(ZEB)、複層ガラス、最終エネルギー消費、赤外放射、エクセルギー、調光ガラス、エレクトロクロミック、サーモクロミック、サーモトロピック、ガスクロミック

(7) 国際比較

断熱・遮熱

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 【断熱】初期性能と経年劣化による性能低下の評価¹¹⁾。 ● 【断熱】真空断熱材の熱伝導率計測の不確かさ評価^{46,47)}。 ● 【遮熱】波長選択型の遮熱フィルム(金属/酸化物積層膜、高分子多層膜等)、塗布材、機能性賦与(光触媒作用等)の基礎研究は、概ね実用化の研究に移行。 ● 【遮熱】Cs₂WO₃ナノ微粒子の化学合成による近赤外選択反射塗膜材等、新規材料の探索⁴⁸⁾。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 【断熱】Panasonicの真空層を小分けにした真空断熱材によって施工時の損傷にも対応した¹¹⁾。 ● 【断熱】Lixil:ヒュームドシリカを利用し、多孔質を微細化することで、低真空でも低熱伝導率を可能とした¹¹⁾。 ● 【遮熱】遮熱ガラス・フィルム・塗布膜の性能評価法の確立の必要性。例えば、遮熱による暖冷房両方の負荷増減を通年で評価^{49,50)}。 ● 【遮熱】住宅/非住宅、新築/既築物件に分類し、窓の遮・断熱化の現状と今後のシナリオ分析⁵¹⁾。 ● 【遮熱】生活様式、自然環境の活用、高性能化、施工技術、費用対効果といった観点で産業発展への指針を提示⁵²⁾。 ● 【遮熱】高遮断熱型の波長選択反射、フィルム化、塗布材への実用化研究が多数進行中^{53,54)}。 ● 【遮熱】季節により変わる日射高度とともに遮熱性能が調節されるプラスチックシート⁵⁵⁾。 ● 【遮熱】エクセルギーに基づいた遮熱効果の分析。内側/外側ブラインドの比較、放射冷却による効果の計算解析⁵⁶⁾。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 【断熱】NISTによる低熱伝導率材料の不確かさ評価が行われており、真空断熱材の熱伝導率測定には、熱板サイズや試料サイズの検討が重要であると報告がされている⁵⁷⁾。 ● 【遮熱】LBNL他のグループによる高分子系の波長選択型の遮熱塗装技術の開発⁵⁸⁾。 ● 【遮熱】太陽熱を分子の化学歪みエネルギーとして蓄積、必要時に熱として取り出せる材料⁵⁹⁾。

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●【断熱】真空断熱材は、軍事用途・航空用途での利用は勧められているが、住宅用途への展開は緩やかである⁵⁷⁾。 ●【遮熱】中国との共同事業による遮熱技術開発、プロジェクトが進行(DOEの下、LBNLを中心に、米中の多数メーカが参画)⁶⁰⁾。 ●【遮熱】low-E、波長選択型の遮熱に関する研究多数あり。 ●【遮熱】日射入射角により透過光量が変わる波長選択遮熱窓の技術分析⁶¹⁾。 ●【遮熱】気候別で遮熱材のライフサイクルアセスメントを行い、経済的・環境的影響を分析⁶²⁾。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●【断熱】フュームドシリカを利用した長寿命断熱材に関する研究が行われている³⁰⁾。 ●【断熱】真空断熱材を住宅転用した場合のエネルギー消費削減量に関する研究も行われている。 ●【遮熱】Ag/SiO₂コアシェル型ナノ微粒子を用いたプラズモン吸収による波長選択型の遮熱膜の作製⁶³⁾。 ●【遮熱】形状記憶材料によるダイナミック遮熱制御技術の包括的な調査(豪、英、チリ、伊の共同作業)⁶⁴⁾。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●【断熱】VIPの規格化を2000年より、実証試験が行われている⁶⁵⁾。 ●【断熱】シリカエアロゲルに微粒子を混入することで、防火性の高い外壁仕上げとして利用できるモルタルとして商品化されている⁶⁶⁾。 ●【遮熱】low-E、波長選択型の遮熱材の実用化研究多数あり⁶⁷⁾。 ●【遮熱】潜熱蓄熱材(PCM)を用いた遮熱窓材の熱的效果の検証⁶⁸⁾。 ●【遮熱】落葉植物を使った日除け(Bioshader)の遮熱制御性の通年実証研究⁶⁹⁾。 ●【遮熱】地域性にに基づいた遮熱技術効果の調査分析。シャッターやブラインドといった遮熱部材に関し、暑熱地の多い南欧(地中海気候)での調査が多いが、北欧でもオフィスビル等の冷房負荷が生じる建物を対象とした分析報告も見られる⁷⁰⁻⁷⁷⁾。 ●【遮熱】ブラインドの開放具合・傾斜角が居住者の心理的満足感に及ぼす影響の調査⁷⁸⁾。
中国	基礎研究	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●【断熱】繊維と粉体の混合断熱材で長寿命・低コスト化な真空断熱材の研究が行われている²⁹⁾。 ●【遮熱】WO_{3-x}ナノ微粒子を用いたポーラロン・プラズモン共鳴吸収による波長選択吸収膜の創製⁷⁹⁾。 ●【遮熱】エアロゾルCVDによるGa/ZnO膜の創製およびバンドギャップ、キャリア濃度制御による選択波長の制御⁸⁰⁾。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●【断熱】真空断熱材の住宅利用がさかんに行われているが、真空度の低下に伴う性能低下などに関して、考慮されているわけではない⁶⁶⁾。 ●【遮熱】遮熱技術等に関する米国との共同プロジェクトが進行(米中のメーカが多数参画)⁶⁰⁾。 ●【遮熱】高性能low-Eガラス等の開発素材の安定生産と大規模化への移行(~2016年)。低製造コスト・高性能オンラインコーティングを目的としたlow-Eガラス産業化への支援(発展改革委員会)⁸¹⁾。 ●【遮熱】窓ガラスの規格や認証制度の基盤整備。複層ガラスの産業規格「パッシブ低炭素建築物透明部分用ガラス」が2014年に通過⁸¹⁾。 ●【遮熱】金晶(集団)有限公司は、low-Eガラスを韓国等へ輸出。また、米国自動車用ガラス大手メーカとの共同出資による生産を開始⁸¹⁾。 ●【遮熱】通年でダブルスキングラスの効果の調査、遮熱部材の設定条件の選定⁸²⁾。 ●【遮熱】居住者の快適感に基づいた遮熱部材の推計学的制御技術の開発⁸³⁾。
韓国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●【断熱】ガラスウールやヒュームドシリカを様々な密度で作製し、最適化設計が行われている⁸⁴⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●【断熱】真空断熱材の国際標準化の提案をはじめに行ったが、現在では欧州勢が先行している。 ●【遮熱】TiO₂触媒効果を賦与した赤外波長選択反射low-Eガラスの開発⁸⁵⁾。

調光ガラス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	● ガスクロミック方式を用いた調光ミラーシートの開発（産総研） ⁸⁶⁾ ● 銀の電解析出を用いた調光材料の開発（千葉大学） ⁸⁷⁾ ● プルシアンブルーを用いた調光材料の開発（産総研） ⁸⁸⁾ ● 金属錯体を用いた調光材料の開発（物材機構） ⁸⁹⁾
	応用研究・開発	×	→	● 特段の活動無し
米国	基礎研究	◎	↑	● プラズモン調光材料の開発（Lawrence Barkley Laboratory） ⁹⁰⁾ ● 有機エレクトロクロミック材料の開発（Georgia Tech） ⁹¹⁾
	応用研究・開発	◎	↑	● エレクトロクロミック調光ガラス窓の実用化（Sage Electrochromic社、View Dynamic Glass社、Gentex社） ⁹²⁾ ● 有機色素を練りこんだサーモクロミックシートの実用化（Suntuitive社） ⁹³⁾ ● 液晶を用いた調光ガラスの実用化（Kent Optronics社） ⁹⁴⁾
欧州	基礎研究	○	↑	● “EELICON” Smart shading systemに関するEUのプロジェクト。調光機能を持った後張りフィルムの開発を行っている ⁹⁵⁾ 。 ● 水素化物薄膜を用いたフォトクロミック材料の開発(Norway,IFE) ⁹⁶⁾
	応用研究・開発	○	↑	● エレクトロクロミック調光ガラス窓の実用化（ドイツ、eControl社） ⁹⁷⁾
中国	基礎研究	○	↑	● エレクトロフルオロクロミック素子の開発（中国科学技術大学） ⁹⁸⁾
	応用研究・開発	○	↑	● VO ₂ を用いたサーモクロミックシートの実用化（上海大学） ⁹⁹⁾
韓国	基礎研究	○	↑	● 銀の電解析出を用いた調光材料の開発（Yonsei University） ¹⁰⁰⁾
	応用研究・開発	×	→	● 特段の活動無し

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 化学工学会誌 垣内田洋 「液晶と高分子の複合材料による遮熱制御材料の開発」第 80 号第 4 号（2016 年）
- 1) 断熱用語(Thermal Insulation-Vocabulary),JISA0202(2008).
- 2) 「省エネの基本」、宿谷正則、建てる前に読む 家づくりの基礎知識(2014)pp.9~47.
- 3) Song, T. H., Vacuum Insulation –Achievements and Anticipations-, Proceedings of the First Pacific Rim Thermal Engineering Conference, March 13-17, 2016, Hawaii’s Big Island, USA.
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁, ”エネルギー白書 2015”,
(<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-1.html>)
- 5) ニチアス技術時報, 建材事業本部 技術開発部, 空調効果を最大限に活かす断熱材,

- (<https://www.nichias.co.jp/research/technique/pdf/371/03.pdf>)
- 6) 「境界 世界を変える日本の空間操作術」、隈研吾、淡交社 (2010).
 - 7) 「今に生きる日本の住まいの知恵」完全版、(公財)日本住宅総合センター (2014).
 - 8) K. Yoshimura : Journal of Energy and Power Engineering 8 p. 2012-2016 (2014)
 - 9) Friessen, R., Huiberts, J.N., Kremers, M., van Gogh, A.T.M., Koeman, N.J., Dekker, J.P and Notten, P.H.L, “*Journal of Alloys and Compounds*” vol.253-254, pp.44-50, (1997).
 - 10) Kim, J., Song, T. H., Yeo, I., Choi, B., The 2nd Generation Vacuum Insulation Panel, *Proc. of 4th International Conference on Applied Energy*, Suzhou, (2012).
 - 11) NEDO, 省エネルギー技術フォーラム 2014, (<http://www.nedo.go.jp/content/100580959.pdf>)
 - 12) 欧州における真空断熱材の企画開発に関する動向調査報告,
(http://www.jtccm.or.jp/library/new/7_kikaku/publication/1506/1506_kaigai.pdf)
 - 13) 「高反射率材料の新展開」、松尾陽、CMC 出版 (2010).
 - 14) 「断熱材／遮熱材の開発と応用および評価・試験法」、R&D 支援センター (2012).
 - 15) 「透明断熱・遮熱ウインドウフィルム・素材の差新技術開発動向・機能性向上と将来展望」、
AndTech (2012).
 - 16) 「サーマルマネジメント 余熱・排熱の制御と有効利用」、酒井孝司、NTS (2013).
 - 17) 「エネルギー白書 2015」、資源エネルギー庁.
 - 18) 「省エネルギー住宅ファクトシート VI」、全国温暖化防止活動推進センター(2006) 8.
 - 19) 「省エネルギー対策等級 4 技術基準」、住宅金融支援機構 (2012).
 - 20) 「複層ガラス/Low-E 複層ガラス普及率の推移」、板硝子協会 (2016).
 - 21) SageGlass 社 ホームページ <https://www.sageglass.com/>
 - 22) Gentex 社 ホームページ <http://www.gentex.com/ja>
 - 23) Gentex 社 Aerospace <http://www.gentex.com/aerospace/aerospace-overview>
 - 24) 日本板硝子ウムプロダクツ社 ホームページ <http://umu.jp/>
 - 25) Affinity 社 ホームページ <http://www.afty.jp/>
 - 26) V. Wittwer, M. Datz, J. Ell, A. Georg*, W. Graf, G. Walze, *Solar Energy Mater. & Solar Cells*, 84 p.305 (2004)
 - 27) N. Huiberts, R. Griessen, J.H. Rector, R.J. Wijngaarden, J.P. Dekker, D.G. de Groot, and N.J. Koeman, *Nature*, 380, p.231 (1996).
 - 28) 吉村和記、応用物理、79、p.628 (2010)
 - 29) Li, Z, Gong, L., Cheng, X., Song, T.H., Li, C. and Zhang, H., “*Materials and Design*,” Vol. 99, pp.349-355, (2016).
 - 30) Alam, M., Singh, H., Brunner, S. and Naziris, C., “*Energy and Buildings*,” Vol.69, pp.442-450 (2014).
 - 31) Vouquerel, M., Doforwstel, T., Baillis, D. and Rusaouen, G., “*Energy and buildings*,” Vol.54, pp.320-336, (2012).
 - 32) Li, C., Li, B., Pan, N., Chen, Z., Saeed, M.U., Xu, T. and Yang, Y., “Thermo-physical Properties of Polyester Fiber Reinforced Fumed Silica Hollow Glass Microsphere Composite Core and Resulted Vacuum Insulation Panel, “*Energy and Buildings*,” Vol.125, pp.298-309, (2016).

- 33) A.Llordes, G. Garcia, J. Gazquez & D. J. Milliron, *Nature* 500, p.323 (2013)
- 34) "Electrochromic Materials and Devices", Edited by M.S. Monk *et al*, WILEY-VCH (2015)
- 35) 真空断熱材の経年劣化による性能低下, (<http://www.nedo.go.jp/content/100580959.pdf>)
(<http://www.nedo.go.jp/content/100541220.pdf>)
- 36) Gonçalves, W., Morthomas, J., Chantrenne, P., Perez, M., Foray, G. and Martin, C. L., "Journal of Non-Crystalline Solids," Vol.447, pp.1-8, (2016).
- 37) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 -革新的次世代遮熱フィルム- ホームページ
<http://www.thermat.jp/project/thermalinsulation/>
- 38) Innoshade プロジェクト <http://www.innoshade.de/192.html>
- 39) Gonome, H., Okajima, J., Komiya, A. and Maruyama, S., "Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer," Vol.133, pp.454-463, (2014).
- 40) 「板ガラス類の透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試験方法」、JISR 3106 (1998).
- 41) 「ビルと複層ガラス 建物用途別編」、板硝子協会 (2004).
- 42) 「エコガラスの LCA 報告書」、板硝子協会 (2014).
- 43) 平成 27 年度住宅経済関連データ, 国土交通省,
(http://www.mlit.go.jp/statistics/details/t-jutaku-2_tk_000002.html)
- 44) 「温暖地版 自律循環型住宅への設計ガイドライン エネルギー消費 50%削減を目指す住宅設計」、国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所 (2015).
- 45) 「『涼しさ』感をもたらす熱環境と人体エクセルギー収支に関する研究(その 1~3)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、宿谷昌則、pp.41-46 (2010).
- 46) Kobari, T., Okajima, J., Komiya, A. and Maruyama, S., "International Journal of Heat and Mass Transfer", Vol.91, pp.1157-1166, (2015)
- 47) Tasaka, T. et al, Study on thermal conductivity measurement of low thermal conductivity materials, Proceedings of the 33rd Japan Symposium of Thermophysical properties, October 3-5, 2012, Osaka, Japan.
- 48) "Facile synthesis of homogeneous Cs_xWO₃ nanorods with excellent low-emissivity and NIR shielding property by a water controlled-release process", C. Guo *et al*, *J. Mater. Chem.*, 212 (2011) 5099.
- 49) 環境省 環境技術実証事業, 例えば、報告書 051-1302, 「窓用透明遮熱・断熱フィルム ナノバルーンフィルム CA」(H25 年度).
- 50) 環境省 環境技術実証事業, 例えば、報告書 051-1001, 「透明遮熱フィルム・SC70」(H22 年度).
- 51) 平成 27 年度 経済産業省委託調査報告, 000662, 「平成 27 年度製造基盤技術実態等調査国内外のガラス市場の今後の需給動向等に関する調査報告書」, 矢野経済研究所 (2015 年 7 月).
- 52) 平成 24 年度中小企業支援調査報告, E002834, 「平成 24 年度中小企業支援調査今後の住宅関連産業発展のための検討調査報告書」, 野村総合研究所 (2013 年 2 月).
- 53) "Microstructure analysis of Ag films deposited by low-voltage sputtering", Kato *et al*, *Thin Solid Films*, 520 (2012) 4139.
- 54) "Near-infrared reflection from periodically aluminium-doped zinc oxide thin films", Y. Okuhara *et al*, *Thin Solid Films*, 519 (2011) 2280.
- 55) 「太陽光を自動調節する省エネ調光シート」, 吉村和記, 産総研 Today, 13 (2013) 14.

- 56) "Theoretical analysis of the performance of different cooling strategies with the concept of cool exergy", O. B. Kazanci *et al.*, *Buld. Environ.*, 100 (2016) 102.
- 57) 建材試験センター 建材試験情報 2013年5月号,
(http://www.jtccm.or.jp/library/new/7_kikaku/publication/1305/1305_kaigai.pdf)
- 58) "Berkeley Lab Scientists Developing Paint-on Coating for Energy Efficient Windows",
<http://newscenter.lbl.gov/2016/02/25/berkeley-lab-scientists-developing-paint-on-coating-for-energy-efficient-windows/>.
- 59) "Solid-State Solar Thermal Fuels for Heat Release Applications", D. Zhitomirsky *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, 6 (2016) 1502006.
- 60) ADVANCED WINDOW AND SHADING TECHNOLOGIES,
<http://energy.gov/eere/buildings/downloads/advanced-window-and-shading-technologies>.
- 61) "Angular selective window systems: Assessment of technical potential for energy savings", L. L. Fernandes *et al.*, *Energy Build.*, 90 (2015) 188.
- 62) "Life cycle assessment of exterior window shadings in residential buildings in different climate zones", H. Babaizadeh *et al.*, *Build. Environ.*, 90 (2015) 168.
- 63) "Core-shell-typed Ag@SiO₂ nanoparticles as solar selective coating materials", T. Gao, *J. Nanopart. Res.*, 15 (2013) 1370.
- 64) "Shape morphing solar shadings: A review", F. Fiorito *et al.*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 55 (2016) 863.
- 65) Simen, E. Bjorn, P., "*Applied Energy*," Vol.116, pp. 355-375, (2014).
- 66) 建材試験情報 2016年7月号,
(http://www.jtccm.or.jp/library/new/7_kikaku/publication/1601/1601_tokushu6.pdf)
- 67) "Effect of thermal annealing on the mechanical properties of low-emissivity physical vapor deposited multilayer-coatings for architectural applications", R. Meszaros *et al.*, *Thin Solid Films*, 520 (2012) 7130.
- 68) "Experimental analysis of an external dynamic solar shading integrating PCMs: first results", A. Komerska, *Energy Procedia*, 78 (2015) 3452.
- 69) "Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy ", Kenneth Ip, *Build. Environ.*, 45 (2010) 81.
- 70) "Energy simulations for glazed office buildings in Sweden", H. Poirazis *et al.*, *Energy Build.*, 40 (2008) 1161.
- 71) "Solar shading control strategies in cold climates – Heating, cooling demand and daylight availability in office spaces", S. Grynning *et al.*, *Sol. Energy*, 107 (2014) 182.
- 72) "An overview on solar shading systems for buildings", L. Bellia *et al.*, *Energy Procedia*, 54 (2013) 190.
- 73) "Characterization and assessment of cool coloured solar protection devices for Mediterranean residential buildings application", M. Zinzi *et al.*, *Energy Build.*, 50 (2012) 111.
- 74) "Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves", S. M. Porritt *et al.*, *Energy Build.*, 55 (2012) 16.
- 75) "The Energy Upgrading of Existing Buildings: Window and Shading Device Typologies for

- Energy Efficiency Refurbishment", C. Carletti *et al.*, *Sustain.*, 6 (2014) 5354.
- 76) "Impact of facade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses", L. Vanhoutteghem *et al.*, *Energy Build.*, 102 (2015) 149.
- 77) "Experimental Analysis of Cool Traditional Solar Shading Systems for Residential Buildings", A. L. Pisello, *Energies*, 8 (2015) 2197.
- 78) "Occupant satisfaction with two blind control strategies: Slats closed and slats in cut-off position", L. Karsen *et al.*, *Sol. Energy*, 115 (2015) 166.
- 79) "The optical properties of low infrared transmittance WO_{3-x} nanocrystal thin films prepared by DC magnetron sputtering under different oxygen ratios", Y. Xin *et al.*, *RSC Adv.*, 5 (2015) 57757.
- 80) "Aerosol assisted chemical vapour deposition of Ga-doped ZnO films for energy efficient glazing: effects of doping concentration on the film growth behaviour and opto-electronic properties", S. Chen *et al.*, *J. Mater. Chem. A*, 3 (2015) 13039.
- 81) 平成 26 年度経済産業省委託調査報告, 000037, 「国内外のガラス市場の今後の需給動向等に関する調査報告書」, 矢野経済研究所 (2015 年 3 月 17 日).
- 82) "An experimental study of all-season operation strategy for a respiration-type double-layer glass curtain wall system in cold zone of China", X. Kong *et al.*, *Build. Environ.*, 97 (2016) 166.
- 83) "Occupants' impact on indoor thermal comfort: a co-simulation study on stochastic control of solar shades", J. Yao *et al.*, *J. Build. Perform. Simul.*, 9 (2013) 272.
- 84) Kim, J., Song and T. H., Yeo, I., "International Journal of Heat and Mass Transfer", Vol.64, pp. 783 – 791, (2013).
- 85) "Multi-functional $TiO_2/Si/Ag(Cr)/TiN_x$ coatings for low-emissivity and hydrophilic applications", C. Loka *et al.*, *Appl. Surf. Sci.*, 363 (2016) 439.
- 86) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130123/pr20130123.html
- 87) <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-25620193/>
- 88) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20121120/pr20121120.html
- 89) <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20160713/>
- 90) D. J. Milliron: *Nature*, Vol.500, 323 (2013)
- 91) <http://www.news.gatech.edu/2015/02/09/electrochromic-polymers-create-broad-color-palette-sunglasses-windows>
- 92) <http://viewglass.com/>, <http://www.gentex.com/aerospace/aerospace-overview>
- 93) <http://www.suntuitive.com/>
- 94) <http://kentoptronics.com/switchable.html>
- 95) <http://www.eelicon.eu/>
- 96) http://www.academia.edu/1720634/Photochromic_films_of_oxygen-containing_yttrium_hydride
- 97) <http://www.econtrol-glas.de/en/home/>
- 98) Chen & Xu: *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 7, 11387 (2015)
- 99) *Nature Scientific Reports* 3, Article number: 3029 (2013)
- 100) C. Park *et al.*: *Chem. Sci.*, Vol. 6, 596 (2015)

3.2.3 照明・ディスプレイ (有機 EL、量子ドット LED 等)

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

有機 EL (OLED)、量子ドットなどに関する発光材料 (素子)・デバイスについての研究開発領域である。LED (発光ダイオード) は、半導体の特性を利用して電気エネルギーを直接光に変える仕組みの光源であり、OLED とは、りん光発光素子などの有機物に電圧をかけることで有機物自体が発光する現象を用いた発光素子を指す。量子ドット LED とはナノサイズの半導体粒子で、粒子の大きさを調節するだけで発光色を変えることができる自発光素子である。ここでは、主に照明・ディスプレイへの応用を企図した有機 EL、量子ドット LED についての材料の合成技術、デバイス構造、低コスト製造・実装技術、長寿命封止技術などの研究開発について延べる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

世界の電力使用量のうち照明で消費される電力は総電力使用量の約 20%と推定されている。日本の場合は、照明に消費されている電力はおよそ日本全体の電力消費量の約 25%あるといわれており、照明大国であるといえる。家庭においても消費電力の約 16%もの割合を占めており、これまでの主流であった白熱電球や蛍光灯をエネルギー効率の高い LED や有機 EL による次世代照明に置き換えることにより、住宅・オフィス (ビル) 等の省エネルギー化を図ることが期待されている。

蛍光灯は発光効率は大変優れているが、発光させるために水銀を蛍光灯の管内に封入してある。一本の使用量はわずかではあるが、蛍光灯の製造数量は莫大であり、それらを合計すると相当量の水銀使用量になる。2013 年 1 月にスイスで合意された「水銀に関する水俣条約」の批准が各国で進められているが、早ければ 2020 年までに条約が発効することになるかもしれない。そうすれば、蛍光灯を含む水銀を使用した放電灯などがほとんど使用できなくなる可能性がある。

LED は、一般に 0.2~1mm 角サイズの点光源であり輝度の高い発光特性を備えていることが特徴である。有機 EL は比較的大きなデバイス (数 cm 角~数十 cm 角程度) が非常に軽く、かつ薄く作製可能であることが大きな特徴である。その特徴のひとつは面での発光である。このことからダウンライトや自動車のヘッドライトのように光を集中させる用途では LED 照明が、一方、自然光に近い風合いでの発光や部屋の照明のような広範囲を照らす用途では有機 EL 照明が活用されていくと予想されている。

液晶ディスプレイは、自らは光を發せず、液晶の分子の向きの変化で、常時点灯しているバックライト (LED) の光の透過量を調節しながら画像を表現している。液晶ディスプレイは、バックライトを用いる性質上、輝度やコントラスト、応答速度、消費電力などに課題がある。例えば、現在ではバックライトに青色 LED と黄色蛍光体からなる白色 LED が使用されているが、黄色蛍光体では光の三原色である赤色、緑色の中間領域の光が発せられており、それらはカラーフィルターによりカットされるためエネルギー効率を下げ大きな要因となっている。さらに、蛍光体から発せられる赤色光は真の赤色成分が少ない、カラーフィルターにより切り取られる緑色、赤色の色純度はそれほど高くないことから、自然色を忠実に

再現する広色域の表示が難しい。これらの課題を解決する、エネルギー効率が高く、より広色域を達成できるバックライトの開発が求められている。

有機 EL ディスプレイは、バックライトがなく、有機分子膜を電極で挟んだ構造であり、ディスプレイそのものを薄くできることに利点を有する。量子ドット LED (QLED) は半導体の微小結晶である量子ドット (QD) を半導体薄膜で挟み込んだ構造の薄膜発光素子で、量子ドットの材料を変えることで可視光に限らず任意の波長を発光する素子である。QLED をディスプレイに用いると有機 EL ディスプレイ (OLED) と同様にディスプレイそのものを薄くできることに利点を有する。

省エネルギーの必要性が高まる中、よりエネルギー効率の高い発光材料・デバイスとその簡便な製造方法が求められている。特に、従来の半導体製造プロセスとは異なり印刷法などの溶液プロセスを適用して素子の作製が可能であり、素子の大面積化に加え製造プロセスの飛躍的な省エネ化・低コスト化の実現が期待される。

[動向（歴史）]

20 世紀中ごろには、水銀蒸気中で放電を起こすことで得られる紫外線を蛍光体で可視光変換する技術が生まれ、蛍光体の改良が進むにつれ、電気-光変換効率がそれまでの白熱灯から飛躍的に上昇していくことになった。一方で、1996 年日亜化学が発明した青色発光 LED により、光の三原色が揃い、白色 LED が登場したことで LED 照明が広く普及し始めている他、有機 EL が注目を浴びている。

LED は、1962 年に GE のニック・ホロニアック氏が赤色 LED を発明して以来、1970 年代までに赤、黄、橙、黄緑などの各色 LED が誕生した。一般照明用光源として利用する場合、鮮やかな色光では不都合なので、白色の光が必要であるが、LED で白色を発光させるには、青色 LED が必要であった。この青色 LED の開発では、1985 年に赤崎と天野（名古屋大学）が青色 LED に必要な窒化ガリウム (GaN) の単結晶化に成功し、1989 年に青色 LED を開発した。現在の LED につながる高輝度青色 LED の量産技術は、中村（当時日亜化学）によって 1993 年に開発された。1995 年、この青色 LED に黄色蛍光体を加えた白色 LED が開発された。白色 LED の発光には多様な方式がある。当時は、青色 LED と黄色蛍光体を組み合わせて、白色発光させる方式が一般的だった。しかしこの方式には色再現性が低いという欠点もあり、その後青色 LED と赤色蛍光体、そして緑色蛍光体による光の 3 原色を利用する方法が開発された。現在、ほとんどの LED におけるこの赤色蛍光体には広崎（NIMS）らにより開発された、サイアロンが使用されている。

LED は日亜化学が世界のトップランナーであり、2014 年には世界最高となる発光効率 315.4 lm/W を達成している。世界シェアを見ると、日本勢が 30%程度でトップであったが、韓国もほぼ同じシェアとなっている他、台湾も強みを有する。

有機 EL 分野では、1987 年当時米国コダック社の研究員であった Ching Wang Tang 博士が発表した論文が契機となった¹⁾。それまで有機電界発光素子は弱い光でしかなかったが、1000cd/m²を越える光強度が 10V 以下という直流電圧で実現された。さらに、試料の膜厚は有機層だけなら 200 未満で、陽極と陰極の厚さを加えても 1 μm 未満という、従来では考えられない薄さであった。有機 EL では出光興産が青色発光を実現し、1992 年には実用レベルの RGB が出揃った。照明に応用できる白色に発光する有機 EL (蛍光灯の効率 (約 100 lm/W))

を凌駕する高効率白色光源となり得るポテンシャルを有する) は、1993年に山形大学の城戸らによって実現された²⁾³⁾。この発明がきっかけで有機 EL の次世代照明光源としての活用が議論されるようになった。

1999年に米国プリンストン大学のグループが、リン光発光化合物であるイリジウム錯体をドーパント材料に、アルバゾール誘導体である CBP をホスト材料に用いることで、室温で発光するリン光材料を開発した。外部量子効率 8%を記録し、特に緑色発光材料では蛍光材料の約 4 倍に当たる 20%の値を示した。これにより、ディスプレイでも、照明でもリン光材料が必須と言われ、採用が進められている。このように早くから期待されながら、照明に必要とされる明るさ(輝度)を発揮するため大きな電流を流すと、発光寿命が短くなるという性質がネックとなり実用化には時間がかかっていた。

その後、2004年ごろから複数の企業および研究機関から、白色発光有機 EL の光源・照明としての実用化を意図した報告や、有機 EL 照明の試作品の展示などが数多くなされはじめ、2010年ごろからは、実際に製品として販売を開始するところが出始めた。

照明用途では、住友化学は 2014年に高分子材料を基にした 2色を発光できる照明用パネルの量産技術の確立を発表した。コニカミノルタが世界最高発光効率となる 131 lm/W の白色パネルを開発し、本格的な事業化を発表している(2014年7月)。三菱化学なども商品ブランドを立ち上げ実用化に向けて動き出している。有機 EL の高効率化の可能性は既に実験的にも証明されたといえる⁴⁾⁸⁾。白色有機 EL の発行効率の理論限界は 248 lm/W であり、今後も発光効率はさらに伸びると期待されている。また寿命の観点でも、最近大きな進展が見られた。発光面積 25cm²、発光効率が 110 lm/W で輝度 1,000cd/m²のとき、光出力が初期の 50%になる時の推定寿命が 10 万時間以上の高輝度・長寿命白色発光素子の報告もなされるようになり⁹⁾、有機 EL の最大の懸念であった寿命の問題も着実に解決されつつある。

フレキシブル有機 EL パネルについては、一部 LG ディスプレイが発売を開始しており、シーリングライトやスタンドに応用した商品が発表されている。

ディスプレイ分野では、1997年、パイオニアがカーステレオに世界で初めて有機 EL ディスプレイを搭載した。有機 EL テレビが、市販品として最初に登場したのは 2007年ソニーの 11 インチ有機 EL テレビである。もともと有機 EL は日本が卓越した技術を有しており、1990年代にはソニーが先導して有機 EL ディスプレイ技術を蓄積してきた。また、パナソニックは 2007年から 2014年にかけて、独自の有機 EL 照明パネル技術を NEDO の委託事業を受託して研究開発を行い、世界トップレベルの技術に磨き上げた。しかし、各社ともさらなる生産技術開発に移行するためには巨額の開発費が必要で、二の足を踏んでしまったことにより、技術開発に遅れが生じた。

2012年になり、Samsungや LG が 55 インチの大型有機 EL テレビの発売を発表するなど、韓国勢の有機 EL ディスプレイに対する投資が非常に活発化した。ディスプレイについては、2010年以降サムソン、有機 EL 照明については、2014年以降は LG、といった韓国勢に完全に追い抜かれてしまう状態が続いている。特に今では中小型有機 EL ディスプレイではサムソンが一強、テレビ用有機 EL パネルでは、LG が一強という状況で、iPhone7s (仮称) から採用予定の有機 EL パネルは、当初はサムソン一社、その後 iPhone を視野に置いた大型投資を決断した LG ディスプレイを加えた韓国勢が中核となって請け負うのではないかと目

されている。韓国 LG Display は、今後数年間で、テレビ用を含めた有機 EL パネル生産に約 10 兆ウォン (約 1 兆円) を投資するとしている。2016 年 6 月 18 日付日経新聞によれば、韓国サムスン電子が 8 兆ウォン (約 7200 億円) を投じ、有機 EL ディスプレイパネルの製造ラインを拡充し、アップルに有機 EL ディスプレイパネルを供給するとの報道があり、同じく韓国 LG Display もスマートフォン用有機 EL ディスプレイにも参入すると発表しており、大きな動きが出てきた。

QD は大きさが数 nm~十数 nm の微小半導体の単結晶で、量子閉じ込め効果により電子および正孔のエネルギーが離散化していることを特徴とする。電子・正孔のエネルギーは、量子サイズ効果のため結晶が小さいほど大きくなるので、バンドギャップ (電子-正孔対の再結合による発光波長) をその大きさに制御できる。発光はピコ秒からナノ秒の短時間で起こるので、OLED とは異なり、発光素子へと展開すると高速レスポンスを達成できる。QD の製造方法にはリソグラフィ法、エピタキシャル薄膜における自己組織化法のほか様々な方法があるが、溶液法により化学合成されるコロイダル QD は、その製造に大型の真空設備を必要としないのでマスマプロダクションに適している¹⁰⁾。

コロイダル QD における蛍光発光は、1993 年に Bawendi ら MIT (米国) のグループにより作製された CdSe, CdTe コロイダル QD によるものが最初の報告となっている¹¹⁾。MIT グループのブレイクスルーは QD 表面のパッシベーションにあると同時に Se, Te などの供給源となる原料の開発にある。これを契機に ZnSe, PbSe など主にカルコゲナイド化合物半導体のコロイダル QD が続々と開発された。1996 年にはカリフォルニア大バークレー校の Alivisatos らにより赤外線領域で発光する InAs (III-V 化合物半導体) コロイダル量子ドットが開発されている¹²⁾。このように 1990 年代の後半には赤外光から紫外光の広い波長範囲で発光するコロイダル QD のラインナップがほぼ完成している。それらの中でも可視光領域で発光する CdSe コロイダル QD はディスプレイ用および生化学標識用の蛍光材料として開発が進められ、2000 年前後には米、英を中心に多くのベンチャー企業が立ち上げられた。UC バークレーからの技術ライセンスを受けた Quantum Dot Corp (1998 年設立; 米国)、マンチェスター大のスピンアウトベンチャー Nanoco (2001 年設立; 英国)、Nanosys (2001 年設立; 米国)、MIT スピンアウトベンチャーの QD Vision (2004 年設立; 米国) などがその代表例である。日本にはカドミウムに対する強い忌避感があるため、学界、産業界のいずれにおいても CdSe コロイダル量子ドットの研究は活発化せず、2006 年に設立された産総研ベンチャーの NS マテリアルズが国内唯一のコロイダル QD メーカーとなっている。

2013 年 6 月にソニーが QD Vision 社の波長変換システム Color IQ を搭載した広色域ディスプレイ「トリルミナス」を発売し、10 月には Amazon.com 社がタブレット端末「Kindle Fire HDX」に Nanosys 社と 3M 社 (米国) が開発した波長変換シート QDEF を搭載した。ASUS 社のノート型 PC への搭載や、2014 年には Apple 社が QD ディスプレイの特許出願など、市場への投入と次世代技術の開発が活発化した¹³⁾。このような機運の高まりに応じ、NS マテリアルズも 2015 年にディスプレイ用 CdSe コロイダル QD の製造販売を強化するプレスリリースを行い、2016 年には日本電気硝子による資本参加を受けるなど開発力の向上が進められている¹⁴⁾。ただしこれらは量子ドットをバックライトの光源に用いており、ディスプレイそのものを量子ドット化しているわけではない。

自発光素子である QLED の分野では、MIT グループによる CdSe コロイダル QD 蛍光体の最初の報告の翌年となる 1994 年に、カリフォルニア大学バークレー校の Alivisatos らにより CdSe コロイダル QD を発光層とした QLED が報告されている¹⁵⁾。その後、発光の色純度、輝度の改善が継続され 2002 年には MIT グループにより黄緑色で 1,000cdm⁻² の輝度が¹⁶⁾、2011 年にはフロリダ大学のグループが 10,000cdm⁻² を超える赤色、緑色、青色発光を達成しており¹⁷⁾、ディスプレイとして展開しうる輝度が達成されている。2014 年には浙江大学 (中国) のグループが 20% を超える外部量子効率を有する QLED を発表しており¹⁸⁾、効率の点でも OLED と同等の性能が達成されている。これらはいずれも CdSe コロイダル QD を発光層とした QLED である¹⁹⁾。

カドミウムは毒性元素の一つとして EU 圏や我が国では規制対象あるいは表示義務対象となっており、カドミウムフリーのコロイダル QD 蛍光体の開発が求められている。2000 年代前半では InP がその候補として期待されたが、CdSe などのカルコゲナイド化合物半導体に比べリン化合物はリン原料の反応性が高いため、大学、研究所等での技術開発が進まなかった。2005 年には Evident Technology 社 (米国) が (In,Ga)P コロイダル QD を Evidot として製造販売したが可視光発光は達成されなかった。我が国でも 2008 年に産総研の村瀬らが InP/ZnS コロイダル QD の合成方法を開発したが²⁰⁾、性能において CdSe を凌駕するには至っていない。

この状況は、大阪大学の小俣と産総研の前田の共同研究グループによる CuInS₂ をベースとした ZnS との混晶半導体のコロイダル QD での可視発光の発表²¹⁾ (2006 年) により一変した。カドミウムフリー化への期待が高まり CuInS₂、CuInSe₂ などの三元系化合物半導体のコロイダル QD の研究開発が、米国、中国を中心に活発化した。Los Alamos Natl. Lab. (米国) の Klimov のグループから 2011 年に 80% 以上の高い蛍光量子効率が報告されるなど²²⁾、急速に技術開発が進んだ。CuInS₂ コロイダル QD を発光層とした QLED も作製されている。しかしながら、これら三元系化合物半導体のコロイダル QD では例えば CuInS₂ であれば Cu (銅) と In (インジウム) を 1:1 の組成に合わせ込むのが難しく、通常はいずれかが不足した組成となり点欠陥を含む QD となる。その結果、電子-正孔の再結合は欠陥準位を介したものとなり、発光の波長幅が広がる²³⁾。すなわち、コロイダル QD 蛍光体の最大の特徴である高い色純度が失われる。2014 年の QD の国際ワークショップで、Samsung 社 (韓国) の開発ディレクターは、カドミウムを含む QD を搭載した製品は発売しないと述べている。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

- 高効率有機発光材料の分野では、九大の安達グループによって報告された熱活性型遅延蛍光 (TADF: Thermally Activated Delayed Fluorescence) 現象に基づいた発光材料の研究が裾野を広げている。従来から用いられてきたイリジウム (Ir) や白金 (Pt) などの希少金属を含む錯体からの発光というりん光発光原理を用いた材料と異なり、希少金属を用いずに、従来熱として捨てられていた三重項励起状態から一重項励起状態にキャリアを戻し遅延蛍光発光できる材料の開発に成功している²⁴⁾。また、関西学院大学においても、

高効率な青色有機発光材料の研究開発が日本の材料メーカーとの協業で進んでおり²⁵⁾、今後の進展が期待される。

- 低コスト生産にむけて本格的に塗布積層型の高効率有機 EL の研究が山形大の城戸らグループで進められており、素子レベルの効率で見た場合、蒸着系との差は縮まってきている。従来から溶媒に可溶な高分子有機 EL 材料を用いた塗布型の有機 EL 素子の研究が進められていたが、分子量分布が大きくや構造的欠陥を完全に除去することが困難であり、特性が上がらないなどの課題があった²⁶⁾。ここにきて、低分子系の有機 EL 材料を有機溶媒に可溶化し、インクによる塗布成膜した有機 EL デバイスの研究開発が進展している。特に、今までの研究では、電子輸送層まで含めて塗布できる材料の研究が進んでいなかったが、近年、陰極層を除くすべての有機層を塗布で作製できる材料の開発が進展してきた。塗布型有機 EL デバイスを作製する上で重要なのは、下層で用いた有機材料がその上層に塗布する有機材料の溶媒に不溶であるという点が最も困難であり、溶媒自体の選択肢が限られ多くは望めなかった。有機材料の分子量が変化すると溶解性も変化するという点に着目し、溶媒に適した分子量の制御を行うことで、多積層化を実現した²⁷⁾。また、無機材料やナノ粒子を適切に活用することで、塗布可能な電子注入層や電荷発生層を塗布で形成することが可能となり²⁸⁾⁻³⁰⁾、結果、二つの有機 EL 発光デバイスを縦方向に積層して高効率な発光が期待できるマルチフォトン構造のデバイスを塗布プロセスで実現することに成功している³¹⁾。このデバイスは 9 層の有機層の積層で、白色リン光発光を有する世界初のものとなっている³²⁾。民間企業でも塗布型の研究開発が推進されており、日本では、コニカミノルタがすでにパイロットプラントを建設して開発を進めているが、まだ、量産できるレベルには至っていない模様である³³⁾。
- フレキシブル有機 EL パネルについて、一般照明分野以外での応用用途開発が模索され始めた。特に欧州では、OSRAM 社が車載に特化して有機 EL 照明パネルを実用化しようとしており、BMBF も後押しして、フレキシブル化の開発検討を加速してきた。この成果を受けて、欧州自動車メーカーでは、テールランプ（ストップランプ）などへの応用が模索されており、2015 年 1 月に米国で開催された、CES(Consumer Electronics Show)において、ドイツの BMW が OSRAM 社製のフレキシブル有機 EL パネルをテールランプに用いたコンセプトモデル (BMW M4) を展示した。また、BMW は 2016 年からモデル M2 としてこのテールランプを搭載した車を販売予定である³⁴⁾。一方、Audi も 2016 年 4 月に、最新モデルである 2016 TTRS Coupe にオプションではあるが、LG ディ스플레이が供給する有機 EL で組み立てられたテールライトを搭載するとしており、世界で初の試みであるとしている。
- 近年では、InP コロイダル QD に再び注目が集まっている。2016 年に入りワシントン大学、エール大学（米国）の共同研究グループから³⁵⁾、また、亜洲大学、東国大学（韓国）の共同研究グループから³⁶⁾高い発光効率の InP コロイダル QD が相次いで発表されている。また、産業界では Nanoco 社はカドミウムフリーの QD 蛍光体として CFQD (Cadmium-Free Quantum Dots) を製造販売し、2013 年には Dow 社（米国）と製造販売のライセンス契約を締結するなど³⁷⁾、両社はカドミウムフリー材料に特化して開発を進めている。Nanoco 社は QD 材料の組成の詳細を明らかにしていないが、InP 系材料であることは間違いない。2016 年には CFQD はエジソン賞の銀賞を獲得するなど注目も集

めている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ドイツの Dresden にあるフラウンホーファー研究所 (Fraunhofer Institute) や、オランダの IMEC や TNO が出資して設立したホルストセンター (Holst Centre) が、精力的に有機 EL 照明用途として、塗布型有機 EL デバイス、材料の研究開発を、メルク (Merck) などの欧州の民間企業を巻き込んで推進している。特に、Holst Centre は EU (欧州連合) プロジェクトの The Flex-o-Fab project (3年間€11.2mil のプロジェクトで、フレキシブル有機 EL をプロジェクト終了後 6 年以内に商業化するというプロジェクト) のメンバーとしてフレキシブル有機 EL 照明パネルの開発に参画し、R2R (ロール・トゥ・ロール) による塗布型照明用有機 EL パネルを試作している³⁸⁾。基礎研究だけでなく、評価技術や製造技術まで視野に入れたプロジェクトとなっている
- その他、欧州においては、EU に基づき、有機 EL 照明に関する IMOLA (Intelligent Light Management for OLED on foil Applications) プロジェクト (2011 年～) や、本格的な実用化研究を行う COLAE (Commercialisation of Organic and Large Area Electronics) プロジェクト (2014 年～) がスタートし、EU 圏全体を巻き込んで、有機エレクトロニクスおよびその周辺分野の実用化を強力に推進している。特にドイツやオランダで、Philips, OSRAM, BASF, Merck, 多数の欧州の企業がかかわってきている。
- 山形大学で推進中のセンター・オブ・イノベーション・プログラム (COI STEAM) はアンダーワンルーフで有機エレクトロニクスを推進していく体制となっており、中でも有機 EL に関しては、フレキシブルも含め塗布型有機 EL も視野に研究開発が進められている。

(4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

有機 EL 照明が従来の照明と肩を並べるためには、1 平方メートルあたりの輝度が 3000 カンデラ、1 万時間以上の寿命、1 ワットあたり 80 ルーメン以上の発光効率、平均演色評価数 80 点以上が必要だといわれる。しかし、輝度を向上させれば寿命が短くなり、発光効率を上げれば演色性が低くなるというように、バランスを保ちながらすべてを向上させるのは難しい³⁹⁾。

今後、有機 EL を照明光源として普及させるためには、効率・寿命をより高いレベルで両立することだけではなく、照明光源としての特性、たとえば、対象物を明るく照らせること ((大光束化) 光束: 光源が発する光量であり、輝度と発光面積に概ね比例)、対象物の色調を正しく再現できること (高演色性化)、などを確保していくことが必要である。たとえば、家庭用の蛍光灯照明には 6,000 lm 程度の光束を放射するものが用いられているが、同等量の光束を有機 EL で得るには、輝度 5,000cd/m²・60cm 角など、高輝度かつ大面積発光が可能なのが求められる。また、高演色性の白色発光を得るためには、青-黄等の補色ではなく、RGB3 波長の発光を呈する素子構造などを用いる必要がある。よって、高輝度・長寿命化技術、高演色性化技術、大面積素子の均一発光化技術および低コスト製造技術など、さらなる実用化を加速するための技術開発への注力が、有機 EL ディスプレイについても、有機 EL

材料（発光素子）の寿命・コスト、および製造プロセス（量産技術）の面で今なお多くの課題が残されている。

カドミウムフリー化のボトルネックは3点ある。1点目はInP系の材料における課題で、蛍光量子効率（入射光の光子数に対する蛍光の光子数の割合）、すなわち、発光効率の向上とQDのサイズ制御技術である。CdSe系のコロイダルQDでは蛍光量子効率は量産レベルでも80%程度がうたわれており、ラボレベルでは100%近い値も報告されている。これに対しInP系では最新の報告でも青色で40%、緑色で85%、赤色で60%程度である。また、QD蛍光体では発光波長をそのサイズによって制御するが、InPでは特に緑色より短波長の領域では僅かなサイズの違いによって発光波長が大きく変化する⁴⁰⁾。サイズを精密に制御できなければ色純度の高い蛍光体とはならない。2点目はCuInS₂などの三元系化合物半導体のコロイダルQDにおける課題であり、化学組成の揺らぎのない化学式通りの化合物の製造技術である。このような技術が完成すれば、CdSeと同等の蛍光発光特性が達成できる。3点目はInP、三元系化合物以外の新たな材料の開発である。

また、液晶ディスプレイでの波長変換では、光源となる青色LEDから離れた位置にコロイダルQDを混練した波長変換用フィルムが搭載されている。青色LEDのチップの直上にQD蛍光体を塗布などにより搭載できればコロイダルQDの使用量はフィルムを使用した場合の1万分の1に低減できディスプレイの大幅なコストダウンにつながる。これらの技術開発を阻害する最大の要因は、CdSeコロイダルQDの蛍光量子効率が室温以上で大きく低下することになる。レーザー光の照射やLEDの直上では150~200°C程度の高温となるため、コロイダルQD蛍光体を使用できない。この課題はCdSeに本質的で新たな材料を開発する以外に解決手段がない。

QLEDなどの自発光素子においては発光の輝度、量子効率ではOLEDと同程度であるが、素子全体の寿命が実用化に向けた最大のボトルネックとなっている。外部量子効率20%以上を達成した素子でも100時間で輝度は半分まで劣化している⁴¹⁾。

[今後取り組むべき研究テーマ]

有機ELの科学技術的課題として、①高効率化、②長寿命化、③フレキシブル化、④塗布印刷で製造できる塗布型有機ELデバイス、などが考えられる。

高効率化について材料の視点からみると、米国を中心にして開発が進んだ燐光材料の登場によって、内部量子効率はかなり高いところまで実現できていると考えられる。より波長の短い青色発光色に実現に開発の力点が置かれるべきである。また、新たな発光メカニズムとしてTADF(遅延蛍光材料: Thermally Activated Delayed Fluorescence)材料の開発が進んでおり、今後のさらなる開発が期待される。一方、デバイスの駆動電圧低減による高効率化も期待され、分子配向を考慮した電子輸送層材料の開発や、光取り出しに寄与する分子配向材料などの開発については、今後大いに注力すべき課題であると考えられる。単一分子レベルの物性はシミュレーション技術の向上によりかなり予測可能となり、高精度な分子設計が行えるようになってきているが、薄膜などの分子集合体の構造制御については、適用範囲がまだ限られている。有機エレクトロニクスで使われる π 共役電子系は平面的で本質的に異方性が強いことから、この分子集合体の制御こそが、今後の性能向上のブレイクスルーに必要となってきている。

寿命については、特にパーティクル (異物) が原因の劣化が顕著である。これらは有機 EL を製造する際に発生する要因であると考えられており、有機 EL を製造するメーカーの責任に起因するものであり、学術的な検討課題ではないとする研究者が多い。しかし、これが、日本の有機 EL 産業の発展を妨げてきた大きな要因であったと考えられる。つまり、パーティクルの発生要因やパーティクルがどのようなメカニズムで欠陥を引き起こすに至るか、パーティクル削減のプロセス技術、パーティクルがあっても劣化しないデバイスや材料の開発など、科学的アプローチでやるべき課題は多くあると考える。

フレキシブル化の課題については、基板の材料の開発が早急に望まれる。プラスチック基板はフレキシブル性に富み、破壊しにくいのでフレキシブル有機 EL の基板としては望ましいが、表面の平坦性に問題があることと、水分や酸素の透過性については有機 EL に耐えるレベルのバリア性が確立できていない。一方、薄膜ガラス基板を用いることも検討されている。表面の平坦性やバリア性は全く問題なく理想的な基板だが、ガラスであるがゆえに破壊しやすく、そのハンドリング性の低さで扱いにくい。プロセスの確立と破壊しにくいガラスの開発が期待される。近年は、箔状金属を基板に用いる検討も進められている。これもバリア性や破壊しにくいという点では優れた基板候補だが、導電性であること、表面平坦性が低いことなどをクリアする必要がある、さらなる開発が期待される。

次に、透明導電膜であるが、従来から用いられている ITO ではもろくて曲げたときに破壊する可能性がある。曲げて特性の変化しない透明導電膜の材料開発が期待される。最近では、金属ナノ粒子を用いた透明導電膜の形成などが発表されている。

最後にバリア性の付与である。これは、基板側のバリア性が実現できたとしても、デバイスの上面のバリアをきっちりとしなければ、デバイスとして実用化できない。バリア性を持ったフィルムを張り合わせるなどの手法があるが、将来的には薄膜による封止方法の確立が望まれる。

塗布・印刷プロセスでは、使用する材料の溶解性と上層塗布溶媒の下層への浸透防止が極めて重要であり、下層と上層で溶解性が異なる直交溶媒を用いる手法や、光による架橋反応を利用した材料の不溶化により多積層構造を形成する。塗布型有機 EL デバイスの初期の研究段階では PEDOT:PSS と発光材料のシンプルな二層構造が主流であった⁴²⁾。水溶性である PEDOT:PSS は、ルエンやキシレンなどの無極性溶媒やクロロホルムやクロロベンゼンなどのハロゲン溶媒に不溶であるため、それら溶媒を用いることで PEDOT:PSS/発光層の二層構造が容易に形成できる。しかしながら、発光材料へのホール注入障壁や励起子消光などの課題から、ホール輸送性励起子ブロック層を PEDOT:PSS と発光層の間に挿入した三層構造が検討されはじめ、ここで大きな役割を果たしたのが架橋技術の応用である⁴³⁾。塗布成膜後の UV 照射や熱アニールにより共有結合を介した三次元的なネットワークを形成することで、成膜後に材料を不溶化し、さらにその上層への塗布多積層化を可能にしている。光架橋反応の例としては、オキセタンのカチオン開環重合^{44)・46)}やアジドのナイトレンラジカル付加反応^{47)・48)}が挙げられる。また、熱架橋反応にはスチレンのラジカル重合が挙げられる^{49)・51)}。ホール輸送性を有するアリアルアミン低分子材料や高分子材料に架橋性置換基を付与することで、塗布成膜による PEDOT:PSS/架橋性ホール輸送材料/発光材料の三層構造を実現している。

塗布成膜による多積層化には、光や熱架橋反応を利用した膜の不溶化以外に、極性が大きく異なる直交溶媒を用いる手法がある^{52)・55)}。フルオレン骨格を有する蛍光高分子材料

poly(9,9-dioctylfluorene)(PFO)や poly(9,9-dioctylfluorene-alt-benzothiadiazole)(F8BT)はトルエンや p-キシレンに可溶かつアルコール溶媒に不溶であることから、その上層にアルコール溶媒を用いて電子輸送層や電子注入層を塗布成膜することが可能である。一般的に電子注入材料として用いられるアルカリ金属炭酸塩 Cs_2CO_3 はアルコール溶媒に可溶であることから、塗布成膜可能な電子注入材料として知られている^{56)・57)}。しかし、架橋性置換基の導入は電荷移動度⁵⁸⁾や発光量子効率の低下⁵⁹⁾を招くことが報告されている。また、これらの架橋技術は UV 照射や長時間の高温熱アニール工程が必要である。

近年、有機 EL 材料の分子量をコントロールすることで、溶解性の違いをもたせ、さらにデバイス性能が低下しないような有機 EL 材料の合成を行う研究開発が発表され、タンデム型有機 EL デバイスを形成できるようになった^{31)・32)}。しかしながら、塗布型デバイスは、真空蒸着によるものと比較して効率、寿命とも特性が劣る。これは、まだ材料に高分子バインダーなどが含まれていることによることも一つの原因で、今後、高分子バインダーを添加しないオール低分子発光ユニットの開発や電荷発生および電子注入材料のさらなる改善を進めていく必要がある。これにより、発光効率と長寿命化の両立を実現し、実用水準に到達する塗布型タンデム有機 EL デバイスの開発が期待され、これが実現されると有機 EL の製造コストも大幅に低減されると期待され、照明業界、ディスプレイ業界に一大変革が起こる可能性がある。

上述したほか、大面積化に対応した製造装置の開発や、大面積を発光させるためのグリッド電極材料・プロセス開発、デバイス評価技術の開発が並行して行われるべきと考える。

量子ドット発光材料では、LED チップ上への直接塗布やレーザディスプレイへの展開を可能とする、150～200℃で高い発光効率を達成する新たな材料の開発が、社会的波及効果が最も大きい革新的技術となろう。

（５）政策的課題

EU のような巨大水平連携、韓国のような強力な垂直統合に太刀打ちできる政策が必要であり、基礎研究から実用化研究まで、プレイヤーを増やして研究の裾野を広げ、実用化に向けた産学連携の仕組みの構築や拠点形成、ベンチャー企業創出の支援などが必要不可欠と考えられる。

有機 EL では、国内においては、個々の研究グループ及び企業は高い技術を有しているものの、実用化、産業化に舵を切るためには「オールジャパン体制」を実現するための強い求心力が必要である。たとえば、九州大学は TADF 発光材料に特化した開発で特に先行しており、山形大学は、発光材料からホスト材料やキャリア輸送材料などの周辺材料までの幅広い研究開発で強みを見せるとともに、白色有機 EL デバイスやマルチフォトン構造のデバイスで知られるように、デバイス研究やそのプロセス研究というような一気通貫の研究体制が可能であり、その点で大きな強みを発揮している。このような拠点の強みをさらに発揮できるようなサポート体制の構築が重要であり、それにより、有機 EL 分野の研究開発が一層加速し、国際競争力も高まっていくと考えられる。

材料開発を行う大学、国研を核として、蛍光体メーカーあるいはわが国唯一のコロイダル

QD メーカーである NS マテリアルズ、フィルム製造などを担当できる化学メーカー、発光素子やディスプレイのメーカーとが連携したコンソーシアムの構築とその支援、その中で物質の設計と合成技術の双方を推進できる研究者の育成が必要不可欠と思われる。

（6）キーワード

有機発光材料、燐光発光材料、遅延蛍光発光材料（TADF 材料）、マルチフォトン構造、フレキシブル基板材料、フレキシブル封止材料、フレキシブル透明電極材料、プロセス技術、真空蒸着法、印刷法、塗布型有機 EL、配向性キャリア輸送材料、カドミウムフリー

（7）国際比較

有機 EL

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	◎	↑	山形大学、九州大学に有機EL研究拠点ができている。山形大学では、JSTが推進する、COIプログラムにより、社会実装も視野に入れながらアンダーワンループで基盤技術開発を遂行中。特に、究極のディスプレイ・照明と言われる「貼れる有機ELディスプレイ・有機EL照明」をコンセプトとした基礎研究を遂行中。九州大学では、最先端有機光エレクトロニクス研究センターがOPERAの肝いりで設立され、特に材料分野における基礎研究を遂行中。また、関西学院大学、京都大学、大阪大学などさまざまな大学で新しい材料技術の開発が進んでいる。（参考：有機EL討論会第22回例会）
	応用研究・開発	△	↓	九州大学では、経済産業省が推進するOPERAプログラムによる有機光エレクトロニクス実用化開発センターが設立され、産業化研究会も発足し、実用化を目指した研究開発が進展中。 ジャパンディスプレイ（以下：JDI）は、アップルが早ければ2017年からiPhoneを有機ELに変えるとの観測を受けて、新たに500億円を投じ、2017年春に有機ELパネルの生産ラインを立ち上げる予定との報道。日本経済新聞によると、JDIは主力拠点の一角である千葉県の茂原工場に500億円を投じ、有機ELパネルの本格生産を行う予定とのこと。パネル生産に必要な全工程を同工場で担うべく、17年春より生産ラインを試運転し歩留まりを向上させ、18年以降に投資をさらに上積みして本格生産を開始するという段階的なアプローチで臨む予定。これまでもJDIは14年春から有機ELについて小型の試作ラインを設け量産技術の研究開発を進めてきたが、水準が一定に達したと判断したことで、今回の本格投資に踏み切ることとした、とのことである。 一方でJDIは、これまでLCDパネルをiPhone用に卸してきたが、サムスンやLGと異なって有機ELディスプレイの量産実績はないため、IGZOを武器にサプライヤーとして参入を計画しているシャープ-Foxconnグループとともに、次世代ディスプレイのサプライヤーとしては「後発」扱いとなっている。JDIは、傘下にJ-OLEDを抱え、高いレベルの技術力を保有しているとも言われているが、資金的に非常に苦しく（2016年8月6日の日経報道）単独で開発を完遂させられるのか未知名数。アップルやその他の企業から資金的なサポートを得ることに成功すれば、今後サムスンとLGの2党体制に食い込んでいける状況も十分想定されるがシャープの技術力も含め、その内実は不透明である。
米国	基礎研究	◎	→	1990年代から2004年にかけて世界に先駆けて有機EL技術を構築し、材料、デバイスの基礎技術もその時にアグレッシブに研究が進んだ。有機ELの基本特許といわれているC.Tang氏の特許は、2007年に切れたが、ほかにもいくつかの重要な特許が米国で権利化されている。例えば、高効率発光を実現する燐光発光材料技術は米国で生まれたもので、基本特許とその重要な関連特許は2018年ごろまで有効と考えられている。
	応用研究・開発	◎	↑	KODAK倒産後、KODAKにいた技術者、研究者が中心となり、有機EL照明パネルの製造販売会社である、OLEDWorks社を設立。2015年10月には、ドイツのAachenにあった、Philipsの有機EL開発製造部門を買収し、製造

研究開発領域

				能力を大幅にアップ。 材料では、Universal Display Corporation (UDC)が燐光発光材料の基本特許を武器として、業界に君臨。サムソン、LGはじめ、日本の有機EL照明メーカーともライセンス契約を締結しており、安定的な収入とそれに裏付けされた研究開発力を維持している。ただし、2018年ごろに、基本特許が切れるとの観測もある。
欧州	基礎研究	○	→	BMBFが主導した、R2Flex（2011-2013:予算規模€11million.(約15億円)。Fraunhofer FEP(COMEDD)、Novaled, Fraunhofer IPMS, Tridonic, Heliatek, Von Ardenneなどが参画。フレキシブル有機EL照明の基盤技術を確立。
	応用研究・開発	○	↗	Flex-O-Fabプロジェクト以外にも、BMBFが2013年10月にフレキシブル有機EL照明プロジェクト（通称R2D2：期間2年間）を立ち上げ。この目的は、R2R(ロールtoロール)製造技術を含む新製造技術探索研究。予算規模は約€6million(約7.5億円)。Fraunhofer FEPがリーダーとしてプロジェクトを主導し、参画企業として、OARAM, Novaled, Audiなどが参画している。2015年9月に完了し、この成果がすでに複数の企業で製品化に向けて動いているとのこと。 2016年1月からBMBFが「国際共同製品開発による産業クラスターの国際展開強化事業」をスタート。プロジェクト期間4年で、予算規模は、BMBFとドイツ国内参画企業が50%ずつ出し合うマッチングファンド形式で合計€8million(9億円)。山形大学や、英国ケンブリッジ大学にも参加要請があり。世界のマーケットに展開できる有機EL商品を早期に造出するため、国際共同製品開発を行う。
中国	基礎研究	×	→	1991年ごろから有機ELの研究を始めたといわれ、有機ELディスプレイの研究開発が先行した。有機EL照明の開発は緒に就いたばかり。北京大学や清華大学、蘇州大学、香港都市大学などで材料、デバイス研究がおこなわれているが特段見るべき成果は認められない。
	応用研究・開発	△	↗	政府主導で設備投資、技術開発投資が行われている。中国政府は昨年、「第13次5カ年計画」（2016-2020）でOLEDに投資方向を変更することにした。業界の関係者は「中国がLCD投資に対する審査を難しくし、その代わりにOLED投資を誘導している」と推測している模様。特に、照明に関しては、First-O-Light、BOE、Visionoxが顕著。ディスプレイではBOE、Tienmaに巨大な研究開発投資がされている模様。ただ、装置は入れられてもそれを運用する技術者が不足しており、有機EL特有の「すりあわせ技術」に対する経験も浅いので、まだしばらく時間が必要。
韓国	基礎研究	○	↗	水原にある成均館大学(Sungkyunkwan University)および、ソウルの慶熙大学(Kyung Hee University)にサムソンやLGが資金を出し、政府も相当量の資金を拠出し、一丸となって、有機EL材料や有機ELディスプレイ技術の研究開発拠点として精力的に活動している。昨年までドイツのBASFも有機EL材料研究拠点を上記Sungkyunkwan大学に置いていたが、現在は撤退している。 また、全州には、フレキシブルやプリンタブル有機ELの政府系研究拠点KISTもある。
	応用研究・開発	◎	↗	ディスプレイについては、LGディスプレイが大型有機ELテレビ用パネル(55-65インチサイズ)を量産し、日本を含む世界に販売中。Samsungが中小型のタブレット、スマートフォン用有機ELディスプレイをすでにかんがりの規模で量産中。現在では、すでに同サイズの液晶ディスプレイより低価格になったとの見方もある。基板サイズは、LGのテレビはG6サイズだが、今年中にG8.5サイズにアップグレード予定、サムソンの中小型有機ELパネルに使われるサイズは、現在はG4.5程度と推測されるが、今年中にG6サイズまで拡大予定で大規模投資を計画している。

(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

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

量子ドット LED

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	◎	↘	CuInS ₂ 系コロイダルQDの材料開発とその発光過程の評価では世界をリードしてきた。論文の被引用件数と学界での評価は非常に高い。しかし、最近はその人的、資金的理由によりそのアクティビティが低下している。 <ul style="list-style-type: none"> ・ CuInS₂系可視蛍光を世界で最初に達成した論文 (Chem. Mater. 18, 3330(2006))の被引用件数は184件でこの分野では非常に高い。 ・ CuInS₂の欠陥を同定した英国化学会の論文 (J. Mater. Chem. C 2, 6867(2014)) はエディターにより「Hot Article」に選出されている。 ・ CuInS₂系コロイダルQDの特許(特許5136877)を我が国が保有している。 ・ CuInS₂以降の新技术が現れていない。
	応用研究・開発	△	→	NSマテリアルズがCdSe系コロイダルQD蛍光体をディスプレイメーカーに供給することを発表しているが、先行他社と同水準以下でありカドミウムフリーという点では進展をもたらしていない。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 2014年12月ソニーはQD Vision社(米国)のColor IQを搭載したテレビを発売したが、技術的にはQD Vision社の技術である。
米国	基礎研究	◎	→	CdSeコロイダルQDによるQD蛍光体の世界初の報告、CuInS ₂ 系コロイダルQDにおける世界最高の蛍光量子効率の達成など、これまでにコロイダルQD蛍光体の研究を強力に牽引してきた。それらを推進した研究者は現在もリーダーとして活躍している。 <ul style="list-style-type: none"> ・ CdSeでの最初の報告 (J. Am. Chem. Soc. 115, 8706 (1993).) ・ InAsでの最初の報告 (Appl. Phys. Lett. 69(1996)1432.) ・ CuInS₂での最高蛍光量子効率 (J. Am. Chem. Soc. 133, 1176(2011)) ・ 自発光デバイスにおいても輝度向上において牽引的役割を担ってきた。 ・ CdSeを使用した最初のQLED (Nature 370, 354(1994)) ・ 1,000cdm⁻²を突破した報告 (Nature 420, 800(2002)) ・ 可視光全域をカバーするQLED (Nano Lett. 9, 2532(2009)) ・ 10,000cdm⁻²を突破した報告 (Nature Photon. 5, 543 (2011))
	応用研究・開発	◎	→	液晶ディスプレイへの応用を牽引するCdSeコロイダルメーカーを有する <ul style="list-style-type: none"> ・ QD Vision (2004年設立)、Nanosys (2001年設立) ・ ソニー製テレビにQD Vision社のColor IQが搭載 ・ Nanosys-3M社により開発された波長変換フィルムQDEF コロイダルQDの製品化に向けて、3M社、Dow社などの巨大化学メーカーが強力なサポートを行っている (Nanosys-3Mグループ、Nanoco-Dowグループの存在)
欧州	基礎研究	○	↘	英国マンチェスター大学のO'Brienグループが一時期カドミウムフリーコロイダルQDの研究を活発に進めていた。近年は新たな成果が現れていない。その他の欧州圏各国ではコロイダルQDの研究はあまり活発でない。
	応用研究・開発	◎	↗	英国Nanoco社が米国Dow社と協力しInP系カドミウムフリーQD蛍光体の量産体制を確立しつつある。
中国	基礎研究	○	↗	コロイダルQDの合成に関する研究は、そのほとんどが後追い技術であり大きな成果を出していない。一方で、QLEDでは世界最高の外部量子効率を達成している。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 世界最高効率のQLED (Nature 515, 96(2014))
	応用研究・開発	×	→	先行技術を利用してコロイダルQDを製造販売するベンチャーは多数あるが、目立った特徴は特でない。
韓国	基礎研究	◎	↗	Samsung社、LG社が米国MITやLos Alamos Natl. Lab.に資金と人材を供与し技術開発を進めてきた。Samsung社の意向に沿ってInP系の材料でカドミウムフリー化技術を向上してきた。 <ul style="list-style-type: none"> ・ InP系での高い蛍光量子効率の達成 (Sci. Rep. 6, 30094; doi: 10.1038/srep30094 (2016))
	応用研究・開発	○	→	Samsung社は2016年1月開催の2016 International CESにて1000nit/10億色を再現する量子ドット技術搭載4Kテレビを出品

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、 ○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、 × 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑: 上昇傾向、 →: 現状維持、 ↓: 下降傾向

(8) 参考文献

- 1) C. W. Tang, S. A. VanSlyke, *Applied Physics Letters* 51, 913 (1987).
- 2) J. Kido, K. Hongawa, K. Okuyama, K. Nagai : *Appl. Phys. Lett.*, 64, 815 (1994).
- 3) 小田敦 : 応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会第9回講習会 (応用物理学会), 3-10 (2001).
- 4) T. Komoda, K. Yamae, V. Kittichungchit, H. Tsuji, N. Ide, "Extremely High Performance White OLEDs for Lighting," *SID 2012 Digest*, pp. 610 (2012).
- 5) K. Yamae, H. Tsuji, V. Kittichungchit, Y. Matsuhisa, S. Hayashi, N. Ide, T. Komoda, "High-Efficiency OLEDs with Built-up Outcoupling Substrate," *SID 2012 Digest*, 694 (2012).
- 6) J. Kido, Y. Fujita, N. Ide, K. Nakayama : 2007 MRS Spring Meeting, O10.8 (2007).
- 7) T. Nakayama, K. Hiyama, K. Furukawa, H. Ohtani : *SID 2007*, 19.1 (2007).
- 8) B. W. D'Andrade, J.-Y. Tsai, C. Lin, M. S. Weaver, P. B. Mackenzie, J. J. Brown : *SID 2007*, 19.3 (2007).
- 9) K. Yamae, H. Tsuji, V. Kittichungchit, N. Ide, T. Komoda, "Highly Efficient White OLEDs with over 100lm/W for General Lighting" , *SID 2013 Digest*, 916-919 (2013).
- 10) 小俣孝久, 野瀬勝弘, マテリアルインテグレーション, 21(12), 15-22(2008).
- 11) C. B. Murray, D. J. Norris, M. G. Bawendi, *J. Am. Chem. Soc.*, 115, 8706(1993).
- 12) A. A. Guzelian, U. Banin, A. V. Kadavanich, X. Peng, A. P. Alivisatos, *Appl. Phys. Lett.* 69, 1432(1996).
- 13) 日経エレクトロニクス 2014年3月3日号, p.53
- 14) NS マテリアルズ社ウェブサイト (<http://www.ns-materials.com/>)
- 15) V. L. Colvin, M. C. Schlamp, A. P. Alivisatos, *Nature* 370, 354(1994).
- 16) S. Coe, W. K. Woo, M. Bawendi, V. Bulović, *Nature* 420, 800(2002).
- 17) L. Qian, Y. Zheng, J. Xue, P. H. Holloway, *Nature Photon.* 5, 543 (2011).
- 18) X. L. Dai, Z. X. Zhang, Y. Z. Jin, Y. Niu, H. J. Cao, X. Y. Liang, L. W. Chen, J. P. Wang, X. G. Peng, *Nature* 515, 96(2014).
- 19) Y. Shirasaki, G. J. Supran, M. G. Bawendi, V. Bulovic, *Nature Photon.* 7, 13(2013).
- 20) C. L. Li, M. Ando, H. Enomoto, N. Murase, *J. Phys. Chem. C*, 112, 20190(2008).
- 21) H. Nakamura, W. Kato, M. Uehara, K. Nose, T. Omata, S. Otsuka-Yao-Matsuo, M. Miyazaki, and H. Maeda, *Chem. Mater.* 18, 3330 (2006).
- 22) L. Li, A. Pandey, D. J. Werder, B. P. Khanal, J. M. Pietryga, V. I. Klimov, *J. Am. Chem. Soc.*, 133, 1176(2011).
- 23) T. Omata, K. Nose, K. Kurimoto and M. Kita, *J. Mater. Chem. C* 2, 6867 (2014).
- 24) J. L. Stein, E. A. Mader, B. M. Cossairt, *J. Phys. Chem. Lett.*, 7, 1315(2016).

- 25) H. Uoyama, K. Goushi, K. Shizu, H. Nomura, C. Adachi, *Nature* 492, 234–238 (2012).
- 26) T. Hatakeyama, et. al., “Ultrapure Blue Thermally Activated Delayed Fluorescence Molecules: Efficient HOMO-LUMO Separation by the Multiple Resonance Effect”, *Advanced Materials Communication*, (DOI: 10.1002/adma.201505491
<http://www.flexofab.eu/flex-o-fab/about-us>
- 27) Y. J. Pu, M. Higashidate, K. Nakayama, J. Kido, *J. Mater. Chem.* 18, 4183 (2008)
- 28) N. Aizawa, Y.-J. Pu, M. Watanabe, T. Chiba, K. Ideta, N. Toyota, M. Igarashi, Y. Suzuri, H. Sasabe, J. Kido, *Nat. Commun.* 5, 5756 (2014)
- 29) T. Chiba, Y.-J. Pu, M. Hirasawa, A. Masuhara, H. Sasabe, J. Kido, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 4, 6104 (2012).
- 30) T. Chiba, Y.-J. Pu, H. Sasabe, J. Kido, Y. Yang, *J. Mater. Chem.* 22, 22769 (2012)
- 31) Y. J. Pu, N. Morishita, T. Chiba, S. Ohisa, M. Igarashi, A. Masuhara, J. Kido, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 7, 25373 (2015)
- 32) Yong-Jin Pu, T. Chiba, K. Ideta, S. Takahashi, N. Aizawa, T. Hikichi and J. Kido, “Fabrication of Organic Light-Emitting Devices Comprising Stacked Light-Emitting Units by Solution-Based Processes”, *Adv. Mater.* 2015, 27, 1327-1332.
- 33) T. Chiba, Yong-Jin Pu and J. Kido, “Solution-Processed White Phosphorescent Tandem Organic Light-Emitting Devices”, *Adv. Mater.* 2015, 27, 4681-4687
- 34) 例えば、Lighting Japan 2015, 技術セミナー発表資料
- 35) http://www.oled-info.com/tags/companies/osram_opto_semiconductors
- 36) J. P. Park, J.-J. Lee, S.-W. Kim, *Sci. Rep.* 6, 30094; doi: 10.1038/srep30094 (2016).
- 37) Nanoco 社ウェブサイト (<http://www.nanocotechnologies.com/>)
- 38) http://www.oled-info.com/tags/companies/osram_opto_semiconductors
- 39) みずほ情報総研 NAVIS 019 | JANUARY 2013 「特集」有機エレクトロニクスの可能性 一次世代技術に挑む日本」
- 40) G. Pellegrini, G. Mattei, and P. Mazzoldi, *J. Appl. Phys.* 97, 073706(2005).
- 41) P. K. H. Ho, J. S. Kim, J. H. Burroughes, H. Becker, S. F. Y. Li, T. M. Brown, F. Cacialli, R. H. Friend, *Nature*, 404, 481 (2000).
- 42) J. S. Kim, R. H. Friend, I. Grizzi, J. H. Burroughes, *Appl. Phys. Lett.*, 87, 023506 (2005).
- 43) X. H. Yang, D. C. Muller, D. Neher, K. Meerholz, *Adv. Mater.*, 18, 948 (2006).
- 44) P. Zacharias, M. C. Gather, M. Rojahn, O. Nuyken, K. Meerholz, *Angew. Chem. Int. Edn.*, 46, 4388 (2007).
- 45) G. Liaptsis, K. Meerholz, *Adv. Funct. Mater.*, 23, 359 (2013).
- 46) R. Q. Png, P. J. Chia, J. C. Tang, B. Liu, S. Sivaramakrishnan, M. Zhou, S. H. Khong, H. S. Chan, J. H. Burroughes, L. L. Chua, R. H. Friend, P. K. Ho, *Nat. Mater.*, 9, 152 (2010).
- 47) J. Park, C. Lee, J. Jung, H. Kang, K. H. Kim, B. W. Ma, B. J. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, 24, 7588 (2014).
- 48) Y. J. Cheng, M. S. Liu, Y. Zhang, Y. H. Niu, F. Huang, J. W. Ka, H. L. Yip, Y. Q. Tian, A. K. Y. Jen, *Chem. Mater.*, 20, 413 (2008).

- 49) M. S. Liu, Y. H. Niu, J. W. Ka, H. L. Yip, F. Huang, J. D. Luo, T. D. Kim, A. K. Y. Jen, *Macromolecules*, 41, 9570 (2008).
- 50) N. Aizawa, Y. J. Pu, H. Sasabe, J. Kido, *Org. Electron.*, 14, 1614 (2013).
- 51) X. Gong, S. Wang, D. Moses, G. C. Bazan, A. J. Heeger, *Adv. Mater.*, 17, 2053 (2005).
- 52) F. Huang, Y. Zhang, M. S. Liu, A. K. Y. Jen, *Adv. Funct. Mater.*, 19, 2457 (2009).
- 53) T. Earmme, E. Ahmed, S. A. Jenekhe, *Adv. Mater.*, 22, 4744 (2010).
- 54) N. Aizawa, Y.-J. Pu, M. Watanabe, T. Chiba, K. Ideta, N. Toyota, M. Igarashi, Y. Suzuri, H. Sasabe, J. Kido, *Nat. Commun.*, 5, 5756 (2014).
- 55) J. S. Huang, G. Li, E. Wu, Q. F. Xu, Y. Yang, *Adv. Mater.*, 18, 114 (2006).
- 56) J. Huang, Z. Xu, Y. Yang, *Adv. Funct. Mater.*, 17, 1966 (2007).
- 57) C. Y. Lin, Y. C. Lin, W. Y. Hung, K. T. Wong, R. C. Kwong, S. C. Xia, Y. H. Chen, C. I. Wu, *J. Mater. Chem.*, 19, 3618 (2009).
- 58) G. Liaptsis, D. Hertel, K. Meerholz, *Angew. Chem. Int. Edn.*, 52, 9563 (2013).

3.2.4 熱再生利用技術

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

熱再生利用技術とは、熱を利用する際に減少するエクセルギーを再生(補充)することで、中低温領域の熱需要を満足させる技術である。これにより、従来の化石燃料の燃焼に依存して熱供給する体系を変革でき、化石燃料の消費を削減できる。

ここでは、中低温の熱需要の賦存の把握技術、熱再生(熱が持つエクセルギー率を高める)技術の理論、およびその要素技術として、熱交換、熱輸送、ヒートポンプ(機械方式、化学方式)技術を対象とする。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

二度にわたるオイルショックの結果、産業部門においては、大幅な省エネルギー化がなされてきた。しかしながら、依然として産業部門全体では日本のエネルギー消費量の45%程度を消費しており、更なる省エネルギー化が求められている。

従来、工場等では、化石燃料の燃焼により、種々の熱需要先へカスケード的に熱を供給してきた。これは、エネルギー保存の法則に従っていることからエネルギーの量は変化していないが、熱力学第二法則にあるエントロピーの増大、言い換えるとエクセルギーの損失(エクセルギー率の低下)を避けることができず、熱から取り出しうる“仕事”の量が減少する。エクセルギー率の低下幅を極力小さくすることで、再生のために投入するエネルギー量を最小化しつつ熱需要に供給することができると、産業部門の省エネルギー化に大きく貢献する。ここで、中低温領域の熱需要が必要とするエクセルギーは、未利用熱が有するエクセルギーを再生し、供給することで、十分に満足できると考える。

熱再生利用技術には、まず、中低温の熱の需要および排熱として捨てられている未利用熱がどれだけ、どこに存在するかという情報(熱需要の賦存の把握)が必須である。そして、熱再生利用技術の理論確立が必要である。熱再生利用技術の要素技術を下記に示す。

● 熱交換

中低温領域の熱を利用するためには、熱源が中低温であるが故に、小さい温度差で必要な熱を伝える高性能な熱交換器が必要とされる。熱交換能力は熱通過率×伝熱面積×温度差と表されるが、これは即ち、小温度差と低コストを両立するためには、熱通過率を促進すること(伝熱促進)、そして安価な材料への転換を図ること(材料転換)、新規な低コスト製法を採用(量産技術の転用)するしかないということを意味する。このうち、特に、伝熱促進は全ての分野に共通する基盤技術であり、非常に大きな波及効果がある。

● 熱輸送

概して、熱源(高温熱源、低温熱源)に対して熱を利用する場所は離れている。必要とされる熱輸送距離は用途によりナノスケールから数十キロメートルスケールまで存在し、それぞれ用いられる技術が異なる。しかし、共通する要求としては、輸送時の熱損失を減らし熱源の温度を極力変化させることなく高効率に運ぶことである。したがって、高効率な熱輸送技術の創出が要請される。

- ヒートポンプ

ヒートポンプを適用することで、低温の熱源を利用して熱源よりも高温の熱の生成を効率よく行うことが可能となる。

ヒートポンプは、100°C未満の排熱を活用して産業用として改めて活用可能な温度レベルの蒸気等を生成することが可能である。産業用では、180°C程度の温度レベルが必要であるが、現状の商品化されているヒートポンプでは、このレベルの温度生成は困難である。このため、家庭用だけでなく、広く産業分野にまで広く有効活用可能なヒートポンプの開発の確立が急務となっており、それに向けた要素技術、システム化技術が求められている。

- ケミカルヒートポンプ

250°Cを超える高温の領域では化学変化を利用するヒートポンプ（ケミカルヒートポンプ）の研究が進んでおり、これを適用することで、化石燃料の燃焼熱に依存していた熱の供給の従来体系を脱化石燃料に転換できる。

[動向（歴史）]

- 熱の賦存の把握

熱の有効利用や管理に関する国家プロジェクトでは、ムーンライト計画の中で行われた「排熱利用技術システム」が、一連の熱利用に関するプロジェクトの最初のものである。続く、「スーパーヒートポンプエネルギー集積システム」は、高効率ヒートポンプと、蓄熱するシステムが開発されたが、このプロジェクトの中で排熱調査が行われた。また、さらに、これに続く「広域エネルギーネットワークシステム（エコエネ）」は、熱の発生地と需要地を結ぶとことを目標にされたが、この中で行われた排熱調査は、比較的広範囲に行われた²⁾。この調査は、排熱の温度領域、形態（気体、温水、固体、）、業種、設備ごとに区分、解析されている。広範囲の省エネおよび熱利用に関するプロジェクトはこのエコエネが行われた時期がムーンライト計画およびニューサンシャイン計画の最後となる。現在は2014年に経済産業省の委託事業として始まった「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発」が行われている³⁾。

熱需要および排熱の調査の方法は文献による調査、現地での調査に大別され、この中間的なものとしてアンケート調査などがあり、前述の参考文献²⁾の調査はこの方式による。

文献による調査では、産業連関表を利用する方法が比較的古くから行われている⁴⁾。製品ごとのエネルギー消費が求まるため、標準的な製品製造工程の例に当てはめ、熱需要の温度帯とその量を推測することが出来る。ある程度温度領域まで論じた文献調査や⁵⁾、手法を論じる文献調査がある^{6,7)}。文献調査ではデータの出処や処理方法によって結果に差異が生じるため⁶⁾で述べられているようにメタアナリシスが必要である。

工業地帯で行われた現地調査には新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトで2000年から行われた「エネルギー使用合理化技術実用化開発事業／ピンチテクノロジーによる工場地域のエネルギー共有技術の研究開発」の中で行われたものがある⁸⁾。

2008年度エネルギーの使用合理化等に関する法律（省エネ法）の改正により、特定の事業を行う事業者に対して、事業者の省エネ状況を業種内で比較できる「ベンチマーク制度」が2010年度から導入された。

熱使用量および排熱量の計測技術として、NEDO が行う産業技術研究助成事業の一環として北海道大学で超音波パルスによるリアルタイム混相流計の開発が行われた⁹⁾。熱の発生源として業種あるいは事業所によっては電力も相当な割合を占めるが、電力測定技術は近年、大きな進展が見られた。1980年代に工場内にロボットを導入するFA(ファクトリーオートメーション)が台頭したが、三菱電機が2003年に始めたe-F@ctoryの一環として、ネットを通じた電力監視が可能な電力計測システムが市場投入された。グリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクト(2011年度~2014年度)が、革新的かつ実用的で安価な小型グリーンセンサの開発を目的に行われた。これらを用いたネットワークシステムを構築して、環境計測やエネルギー消費量等の把握(見える化)及びエネルギー消費量の制御(最適化)を可能にするような省エネを目指す実証が行われた。再生可能エネルギー熱利用計測技術実証事業(NEDO)で(2011年度~2013年度)流量計を中心とする簡易熱量計測技術が開発された¹⁰⁾。

● 理論

1970年代に発生したオイルショック以降、産業部門においては、熱エネルギーを循環再利用するための熱交換器を用いた熱回収(ヒートリカバリー)技術が発展してきた。この技術は、廃熱を回収し、循環再利用することで、外部から与える熱を大幅に削減することができる。特に、受熱流体と与熱流体を最適に組み合わせ、熱交換器ネットワークを構築することができるピンチテクノロジーは、視覚的にも理解しやすいことから工場への導入・普及が進んだ。

1970年代後半から、産業界を中心に種々のエネルギーの質を定量的に評価する指標として、エクセルギーが定義された。このエクセルギーは、あるエネルギーから取り出し得る最大の仕事量を示している。エクセルギーは熱力学第二法則に従っており、何らかのプロセス(工程)を経ることで、エクセルギーは必ず損失する。

このエクセルギーを用いて1990年代頃からプロセスを評価するエクセルギー解析が目されてきた^{11,12)}。実際、昨今の学術論文においても、現状の工場内に位置する各プロセスのエクセルギー解析を行う内容が数多く報告されている。しかし、プロセスのエクセルギー解析を行うだけでは、求められているプロセスの省エネルギー化や高効率化がなされるわけではなく、あくまでも、エクセルギーはその指標であり、プロセスを経ることで、エクセルギーが損失するということを定量的に評価した報告は皆無といってよい。また、損失したエクセルギーを元の量に戻すには、別途エネルギーが必要となる。そのため、プロセスに必要とするエネルギー消費量を削減するには、従来のプロセス内のエネルギーを循環再利用するだけでなく、プロセスにおけるエクセルギー損失を最小化することが望まれる。つまり、熱に限定すると、プロセス内の全ての熱を循環再利用するには、プロセス内の熱のエクセルギー損失を極力抑え、損失相当分のエクセルギーを何らかのエネルギーの形で与えることで熱を再生させる必要がある。ここで与えるエネルギーの量を小さくするには、高質なエネルギーを用いるのが良い。そのため、仕事を用いるのが一般的であり、結果として、加えたエネルギーはエクセルギー損失に相当する熱再生(熱の質の向上)のための仕事となる。また、熱再生のためにプロセスに与える仕事から熱を発生させると損失につながることから、熱再生には、等エントロピー変化を用いるのが最適となり、理想的には断熱変化が望ましい。

断熱変化には、物理変化、化学変化がある。物理変化（機械方式）は、断熱圧縮や膨張を用いたヒートポンプ技術の他にも磁場や電場などを用いた例が報告されている^{13,14}。また、化学変化は、ケミカルヒートポンプや吸着式冷凍機などが有名である。これらの物質は1990年代には広く研究が進められており、実際にプロセスに用いた例が多く報告されている¹⁵。

2010年頃になって、プロセス内の熱の質を等エントロピー変化の一つである断熱圧縮を用い、再生した熱を全て循環再利用することでプロセスを省エネルギーとする自己熱再生が提案され^{16,17}、2012年にはNEDOプロジェクトの中でバイオエタノールの濃縮のための蒸留塔に導入し、その省エネルギー効果が実証されている¹⁸。

● 熱交換

熱交換技術は、これまで電力、自動車、輸送機器、冷凍空調向けの熱機関や、産業部門の加熱炉、乾燥機やプロセス工程の熱回収用途等の熱機器に広く用いられてきた。我が国の1次エネルギー供給は、現在ほぼ全てが化石燃料に依存しており、熱交換器は総量として膨大な熱量を扱っている。膨大な熱量を扱うために、一般に熱交換器は大型となりがちで、単体でのコストはもちろん、設備自体の大型化を招くなど、コスト上の大きな課題となっている。このため、長きにわたって伝熱促進を図ることで伝熱面積を削減し、コンパクト・省資源・低コスト化を目指した研究開発が続けられてきた。例えば、空調用熱交換器では、空気側フィンについては1970年代に比べて熱伝達率が約3倍に、管内側熱伝達率についても70年代に対し3倍以上になるなど、大きな伝熱促進が図られている¹⁹。これらの技術は、我が国が完全にリードし世界的に広く普及している。我が国の貢献は非常に大きなものがあるが、近年では韓国や中国メーカーの追い上げが激しくなっており、一層の技術開発が求められる。

● 熱輸送

熱輸送の古典的な例は、電気式冷蔵庫が普及する以前に1950年頃まで用いられた氷式の冷蔵庫が挙げられる。冷熱源となる氷は氷屋から仕入れ、製氷工場から各家庭までリヤカーで搬送された。

数十メートル以上の熱輸送方式としては、トラックや船舶によるオフライン熱供給、熱媒体をパイプラインを介して輸送するパイプ熱輸送方式に大きく分けられる。さらにパイプ熱輸送方式に関してはポンプなどを用いた電気式熱輸送と、毛管力や重力を用いることで電力を要さない受動型熱輸送に分類される。

トラックや船などで熱供給をするオフライン熱供給は、工場やごみ処理施設などから発生する200°C未満の低温廃熱を潜熱蓄熱材（PCM）に回収・貯蔵して、コンテナ車で離れた施設に熱エネルギーとして供給するのが一般的である。海外においては、ドイツ、フランス、アメリカで既に導入実績があり、日本においても、栗本鐵工所・三機工業が取り組む「トランスヒートコンテナ」や、神戸製鋼所・神鋼環境ソリューションが取り組む「サーモウェイ」がある²⁰。

また、低温熱源の輸送としては雪・氷を船で輸送し、都市部での冷房等に活用する技術がある。例として北海道の氷を大都市に運ぶ、国土交通省北海道開発局の「雪氷輸送物流システム検討調査」が挙げられる。2005～2006年に実証実験を行い、製氷、輸送、利用の観点から有効性の検証と課題の洗い出しが行われた。

パイプ熱輸送方式では、環境省が実施した環境研究総合推進費補助金研究事業（2010～2012年）で、ごみ焼却排熱有効利用に向けた熱輸送、蓄熱の実験評価がなされた。アンモニア吸収冷凍機に溶液輸送配管を追加して溶液を輸送する実験的検証が行われ、50mの熱輸送が実証された。また、シミュレーションにおいては数kmの熱輸送も可能であることが示された²¹⁾。

電力を用いない受動型熱輸送では、NEDOの産業技術助成において、マイクロ多孔体で生じる毛細管力を熱輸送駆動力としたループヒートパイプ熱輸送技術により4mの受動型熱輸送が実証された²²⁾。

また、経済産業省の航空機用先進システム基盤技術開発において、航空機のエンジン排熱を用いた翼前縁の凍結防止のための熱輸送技術としてループヒートパイプの適用が提案され、システム成立性が検討された²³⁾。

● ヒートポンプ

ヒートポンプに適用されているサイクルは、カルノーが考案したカルノーサイクルを逆に駆動する逆カルノーサイクルを基本としている。冷凍機とヒートポンプは、全く同様のサイクルであり、蒸発器による熱の吸熱（対象は冷却される）を利用した機器は冷凍機であり、凝縮器からの放熱を利用した機器は、ヒートポンプと呼ばれる。

ヒートポンプの技術は、20～50℃程度の冷温熱を利用する空調分野で発展してきた。最初の電気式エア・コンディショナは1902年、ニューヨーク州のWillis Carrierが発明した。印刷工場の製造工程を改善するために設計されており、温度だけでなく湿度も制御できるようになっていた。その後もCarrier（Carrier社の創設者）の技術は様々な仕事場の生産性向上に使われた。ヒートポンプとしての暖房機は、1930年代に登場している。

わが国では、空調機器としては、1930年代にはじめて業務用が導入され、1950年代には家庭用のヒートポンプ式暖房機の商品化が初めてなされた。1960年代には、ガスエンジン式エアコンが開発され、ガスによる空調を可能とし、後の電力負荷平準化へ貢献することになる。1970年代から冷暖兼用機が登場しはじめ、1980年には、インバーター機が開発され負荷変動に対しても効率よく空調が行えるようになった。また、ビル用マルチエアコンもこの時期に開発され、ビル空間でも効率よく快適な環境が適用できるようになった。また、要素技術としてもスクロール圧縮機が実用化された。このころから、冷暖兼用機が急速に普及し始めることとなった。1980年代がまさにヒートポンプがその後急速に普及する大きな転換期となった。

2001年には、CO₂を冷媒とする家庭用ヒートポンプ給湯機が開発された。これにより、90℃の温水を作る技術が大きく進歩した。当初は、10MPaにもなる機器のため、普及はしないだろうとの意見も多数聞かれたが、わずか15年程度で500万台が市場に導入された。このヒートポンプ給湯機の開発の際には、水と冷媒が熱交換する新しい熱交換器、高圧のCO₂冷媒にも耐えうる新しい圧縮機、膨張ロスが大きい膨張エジェクターによる膨張エネルギー回収技術が新たに開発された。

1970年代から業務用の大型ヒートポンプも開発がすすめられ、1984～1992年にかけて工業技術院のムーンライト計画の一環として大型省エネルギー技術開発プロジェクトが実施され、その中で、スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムの開発が進められた。ここでは、水を冷媒とし、150℃の熱源に対して300℃でCOP（成績係数）が3を達成す

る機器が開発された。このようにして産業用用途にも確実にヒートポンプが展開されつつある。

ヒートポンプの場合には、冷媒がその動向を大きく左右する。もともとアンモニアから始まった冷媒は、1930年から「フレオン」という商標で生産が開始された。フロンは化学的、熱的に極めて安定であるため、開発当時は「夢の化学物質」としてもはやされたが、1970年代にオゾン層破壊が問題化すると、フロン類はその原因物質とされ、1985年のオゾン層の保護のためのウィーン条約や1987年のオゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書により、製造及び輸入の禁止が決定された。これによりフロンの代わりとしてオゾン層を破壊しにくいHCFCやHFCが代替フロンとして利用され始めた。代替フロンのHCFCやHFCも温室効果ガスとして問題視されはじめ、地球温暖化係数（Global warming potential: GWP）が高いものは、今後規制がかけられていくであろう。

● ケミカルヒートポンプ

化石燃料に依存しない熱再生利用技術として、化学反応を利用して熱の質を変化させる技術（ケミカルヒートポンプ）に関する実証試験や実用化が相次いで報告されている。

熱源温度100℃以下の熱再生利用においては、ゼオライト系吸着材（AQSOA®）を用いた吸着式冷凍機が商品化され、現在では60℃前後の排熱を用いて20℃以下の冷水を得ることが可能となっている²⁴⁾。

熱源温度100℃～200℃の熱再生利用においては、2000年頃潜熱蓄熱材を用いた熱エネルギーオフライン輸送システムがドイツにて実用化され、国内でも同様の技術が2005年に実用化された²⁵⁾。また、2015年には、希土類硫酸塩と水蒸気との反応を用いた化学蓄熱材が新しい技術として発表された²⁶⁾。

熱源温度200℃～400℃の熱再生利用においては、1990年代より酸化マグネシウムと水蒸気との反応を用いた化学蓄熱／ケミカルヒートポンプに関する研究が行われ、2014年からマグネシウム系化学蓄熱材を用いた排熱輸送の実証試験がスタートした²⁷⁾。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

● 熱の賦存の把握

国内では2016年4月の電力自由化を機にスマートセンサを用いた計測が導入され、データ収集および解析が迅速に行えるようになった。また、生産現場で配管内の流体の熱量計測を行うための流量計（熱量計）の開発が相次いで行われた^{7,8)}。超音波を利用する外装式の流量計は新たな市場参入も見られる。

● 理論

2013年に伝熱過程において損失するエクセルギー量を数式的に算出し、自己熱再生で必要となる仕事量が伝熱過程において損失するエクセルギー量とほぼ等しいことを証明した論文が報告されている²⁸⁾。さらには、2015年には本検討をさらに進めることで、自己熱再生が中低温領域において省エネルギー効果が大きいことを明確にしている報告がなされている²⁹⁾。また、プロセス流体自身の熱を再生し循環再利用する自己熱再生を用いることは別の媒体を経ることがないことから、他のヒートポンプアシスト型のプロセスに比べ熱

交換器内の伝熱過程の数が減り、結果として、省エネルギー化できることがこれらの報告で明確となっている。

アメリカにおいては、温度エントロピー線図上におけるサイクル線図のずれからプロセスの効率を評価する取り組みが行われており、LNG製造プラントを用いて検討がなされている。しかしながら、現状としては、エクセルギーの評価との明確な差異がないことから、今後更なる検討が必要となる³⁰⁾。

また、ヨーロッパの研究グループにおいては、圧縮・膨張機と熱交換器ネットワークを組み合わせた最適設計手法の提案がなされている。これらの検討が進むことで将来のプロセス設計手法が大きく変わる可能性を秘めている³¹⁻³³⁾。

● 熱交換

伝熱面の開発において、近年では最適化技術が大きく進展し、例えば随伴解析を用いた多自由度の伝熱面最適化が可能となってきている³⁴⁾。この手法では、数値シミュレーションに用いる格子点がすべて最適化の対象となるため、膨大なパラメータ数、即ち非常に複雑な形状の最適化が可能である。このことで、従来気づかなかった新たな伝熱促進メカニズムが見出され、新たな伝熱促進面の提案につながる可能性がある。

熱交換器材料には、従来、銅、アルミ、鉄等が広く用いられてきたが、近年、排気ガス循環（EGR）クーラーやバイナリーサイクル等、未利用熱や排熱からの熱回収といった新規な熱利用技術の開発が活発化しており、これに伴い、耐熱・耐腐食性の高い材料のニーズが高まってきている。例えば、ステンレスが代表的な耐熱・耐腐食性材料であるが、ステンレスの熱伝導率は銅の約 1/25、アルミ合金の約 1/10 であるため、フィン効率が非常に小さなものとなりやすく、従来の熱交換器設計技術では対応できないケースが多発しており、設計技術の高度化が求められている。

熱交換器に関する研究開発においては、未利用エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）は 1300℃の耐高温性能を有し、産業／工業炉からの排熱を従来比 3 倍の性能で回収する高温用高効率熱交換器を開発し、TherMAT の組合員である美濃窯業（株）から、2015 年 12 月に製品化された³⁵⁾。今回開発された熱交換器は、高温で使用される熱交換器において、トレードオフの関係にある耐高温性能と熱回収性能の両立を実現するため、従来の熱交換器の構造と材質を見直したものである。

一方、熱放射に関しては放射の放射波長制御技術を利用することで、従来の黒体や灰色体の仮定では発想しえないエネルギー輸送や変換が実現できる可能性が指摘されている³⁶⁾。放射の放射波長制御を利用した加熱炉および乾燥炉、選択波長フィラメント照明、熱光起電力電池を用いた発電等が検討されている。

● 熱輸送

パイプ熱輸送においては、2016 年より愛知製鋼株式会社が電気炉から排出される排熱からエネルギーを回収・活用する試みがなされている。具体的には電気炉の排熱を蒸気エネルギーとして回収、輸送し、一部は他の製鋼設備で直接活用し、残りは発電により電力に変換し、他設備の動力源として活用する試みであり、鋼材、鍛造プロセスにおける使用エネルギーを原油換算で約 1%削減を見込んでいる。電気炉排熱を有効活用した発電事例としては国内初の試みである。2017 年 1 月の稼働を目指している³⁷⁾。

パイプ熱輸送における受動型熱輸送においては、2012 年にパナソニックエコシステムズ

がループ式サーモサイフォンの原理を利用し、重力により 3m の熱輸送を実現する技術を開発した³⁸⁾。390W/cm²の高い熱流束に対応できる技術である。

● ヒートポンプ

冷媒が技術動向のカギである。今後冷媒は、R32 や HFO 系、炭化水素系のような微燃性、可燃性を有するものとなる。このため、冷媒の充填量を減らすことが求められている。最近になり、冷媒の流動経路サイズが極めて小さく冷媒の充填量を低下できる扁平微細多孔管を用いた熱交換器が日本のメーカーで実用化された³⁹⁾。

寒冷地向けでも高効率駆動が可能なヒートポンプが強く求められ、-25℃でも比較的効率よく駆動可能なヒートポンプが開発されている。着霜による性能低下は、伝熱性能の低下よりも通風経路低減による風量低下が主な原因であることも判明している。このため、エジェクターにより、蒸発器の温度レベルを上げ、前面熱交換器での着霜を低減することにより、着霜による空気の通風経路低減を防止し、性能を改善したヒートポンプも開発されている。

二元冷凍サイクルによって低段側と高段側のそれぞれの段で良い性能を発揮できる異なる冷媒を用いることにより、高効率な給湯も実現されている。ガス給湯器とハイブリッド化することにより、ヒートポンプとガス給湯器それぞれのメリットを上手に生かした形で高効率を実現した機器も開発されている。

太陽熱の変動や不足をヒートポンプで上手に補うハイブリッド機も開発されている。また、除湿機とヒートポンプを組み合わせることにより、除湿機の再生プロセスをヒートポンプからの排熱で行い、除湿冷房された快適な空気を供給するようなシステムも提案されている。

● ケミカルヒートポンプ

固体材料の潜熱を利用した潜熱蓄熱分野においては、従来からパラフィン系有機化合物や糖アルコール系有機化合物を潜熱蓄熱材として用いる研究開発が進められている。最近では 500℃以上の熱源で蓄熱を行うための Al-Si 系合金についても研究開発が進められている⁴⁰⁾。

固体の化学反応熱を利用した化学蓄熱／ケミカルヒートポンプ分野においては、塩化カルシウムの水和・脱水反応を用いた系で充填層型反応器を用いて 1000 回の繰返し耐久性が実証された⁴¹⁾。また、他の反応系についても耐久性評価が行われている。

これまで多く研究開発が進められている潜熱蓄熱、化学蓄熱とは異なる概念をもつ蓄熱材として、五酸化三チタンの相転移を用いた「蓄熱セラミックス」が提案された⁴²⁾。この材料は加熱処理によって吸収した熱エネルギーを加圧によって取り出すものであり、今後の発展が期待される。

[注目すべきプロジェクト]

● 熱の賦存の把握

- 経済産業省資源エネルギー庁省エネルギー課は業務部門におけるベンチマーク制度の導入に向けた調査・検討を実施している。
- EU 域内の動きを紹介する。EUFORIE (European Futures for Energy Efficiency)⁴³⁾ は 2015 年に始まり 2018 年まで予定で EU 域内のマクロレベル、国別レベル、地域レベ

ル（工業地帯または工場）、家庭レベルでのエネルギー効率を調べ、長期予想を行うプロジェクトである。対象として中国も含まれる。

- ENERGY-SMARTOPS⁴⁴⁾が 2011 年から 2015 年にかけて実施された。装置とプロセスから複数の測定を監視し、情報を取得するとともに、新しいアルゴリズムを考案提供することでプロセスの最適化を行い、エネルギーの節約も目的とされた。

- 熱交換

2013 年 10 月から、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）が経産省の委託で開始され、蓄熱技術、遮熱技術、断熱技術、熱電変換技術、排熱発電技術、ヒートポンプ技術、熱マネジメント技術、基盤技術の各プロジェクトが実施されている⁴⁵⁾。

- 熱輸送

オフライン熱輸送については、2014 年より新エネルギー導入推進協議会による「次世代エネルギー技術実証事業」の一環として、トヨタ自動車と中部電力、東邦ガスと共同で、1km 圏内のサプライヤーの工場から排熱を回収して運び、自社工場で使う熱輸送の実証事業に取り組んでいる。捨てられている排熱を発電や生産に利用して、燃料の使用を減らす。排熱を出す企業、排熱を利用する企業を登録し、トラックの運用計画を作成する IT システムも整備している。これまで蒸気生成に要するエネルギーを 11%低減する効果を実証した⁴⁶⁾。

パイプ熱輸送方式による受動型熱輸送では、TherMAT において自動車排熱の有効利用を睨んだ受動型熱輸送の研究開発が行われている。ループヒートパイプ技術により 2022 年度末までに熱輸送距離 10m、熱輸送量 3kW の無電力熱輸送を目指している⁴⁷⁾。

- ヒートポンプ、ケミカルヒートポンプ

産業分野では、蒸気の流通プロセスで放熱による熱ロスが多いことや最終的には 100℃以下の温度で熱が利用されることも多く、ヒートポンプによる個別分散利用で大幅な省エネルギーを実現することが推奨されてきた。しかし、次の通り、ヒートポンプ自体で高温（200℃程度）の取り出しを可能とするプロジェクトや脱フロン対策の研究も TherMAT にて進められている。

- NEDO、未利用エネルギーの革新的技術開発、2015～2022 年度

- (ア) 産業用高効率高温ヒートポンプの開発
- (イ) 機械・化学産業分野の高温熱供給に適した冷媒とヒートポンプシステム技術
- (ウ) 低温駆動・低温発生機の開発

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 熱の賦存の把握

排熱量の計測には温度計、流量計等、ほぼ必要な機器は市場に出揃っているが、それを実際に取り付けるには非常にコストがかさむ。また、送風機などの機器の仕様も古いものは定格運転のデータのみ使用者に提供されている。熱回収に当たって、実際に熱が排出されていても、熱交換器にスケールや汚れが多量に付着するようなケースも多い。また、一般的な酸露点による制約の生じるケースも多い。

● 理論

課題は、熱を再生させる技術が限られていることである。熱再生のためにプロセスに与える仕事から熱を発生させると損失につながるため、熱再生には、等エントロピー変化を用いる必要があるが、等エントロピー変化が大きいものは気体の圧縮・膨張、または化学的な変化に限られている。また、これらの変化を用いても実際には装置の摩擦や抵抗などの変化過程における熱の発生により厳密に等エントロピーで変化することが難しい点がある。

同時に、非定常運転時におけるプロセス技術開発が望まれる。これは、バッチプロセスを例にしても、詳細にプロセスを表現できるモデル構築がなされていないことに由来する。対象とするプロセスのモデルに伝熱速度や物質移動速度を正しく組み込み、産学の連携のもとで、非定常時のエネルギー消費と熱再生技術の課題抽出を行うことで、将来のエクセルギーをベースとした新規プロセス設計手法の提案ができる。

● 熱交換

実際の熱交換器では、霜、煤、析出等により伝熱面が覆われ、伝熱が阻害される場合が多いため、これらのスケールの付着や成長メカニズムに関して、科学的な知見は不足しており、多くの場合はメンテナンスで性能回復を図るか、あるいは大型化することで流路が閉塞しにくくする等の対策が採られている。

また、蒸発器や凝縮器中の作動流体は気液二相流となるが、複数の流路に適切に分配することは現状でも大きな困難が伴う。これは、気液二相流は流量と乾き度という2つの自由度がある上に、気液界面形状の定量予測が困難なためである。現状では、実験で試行錯誤的に分配を改善させているが、数値シミュレーションによる予測が可能になると、大幅な設計工数の削減が可能となる。

● 熱輸送

オフライン熱供給においては、熱輸送を担うトラックや船舶の燃費向上、熱輸送密度向上のために高温高密度に対応する蓄熱材の開発や断熱材の更なる性能向上があげられる。

パイプ熱輸送方式においては、熱輸送効率向上のための圧力損失低減、ポンプ動力の低減が挙げられる。受動型熱輸送に関しては熱輸送距離と輸送量の増大が課題である。現在は数 kW、10m 程度の輸送の実証を目指しているが、さらに大きな熱量を長距離輸送するための技術開発が挙げられる。

● ヒートポンプ

ヒートポンプでは、熱源の情報不足が課題である。産業用の排熱を中心にヒートポンプの熱源となりうるものについて、その温度や量の調査はすでに何回か実施されているが、十分なデータが得られていない。継続した調査が必要であろう。

電力構成もヒートポンプの発展に影響が大きい。特に家庭用給湯機は夜間電力を有効活用可能ということで発展してきたが、原子力発電所が停止している状況下ではその効果が低くなってしまう。

● ケミカルヒートポンプ

課題は、熱エネルギーの授受の速度が十分でないことである。このため、技術を実用化するためには、装置の小型化、蓄熱媒体の耐久性、安全性、コストの点で大幅な改善が難

しい。熱エネルギーの授受に関わる物理的現象、化学的現象をナノメートルスケールからセンチメートルスケール・メートルスケールまで総合的に理解し、様々なスケールにおける諸問題を解決する必要がある。

[今後取り組むべき研究テーマ]

● 熱の賦存の把握

熱量の簡易計測方法の技術の拡充が必要である。配管等を修正するのではなく、廉価な外付けタイプのものが望ましい。

ポンプ、送風機の流量等、比較的計測しにくい計測対象を、ポンプ、送風機の電力測定によって、インバータを使用したときにも適用できるような実用に耐えうる相関式の提供が必要である。

また、省エネルギー機器を導入するための、社会学、経済学を含めた多方面からの熱利用のためのソフトウェア作りが必要である。例えば、初期コストの回収年がどのくらいになるのか等の試算を行うものである。

● 理論

電気や磁気、さらには波動などの機械的仕事を用いた新規の熱再生技術の提案とともに、それらを生かすためのプロセス開発、熱交換技術の研究開発が望まれる。さらには、エクセルギーによる評価を組み込んだプロセス設計手法の開発とその最適設計手法の提案を目指すとともに、定常のみならず非定常運転時の最適設計および制御手法の研究開発が必要と考える。

● 熱交換

霜、煤、析出等のスケールの伝熱面への付着により熱交換性能が低下する。スケールの成長、閉塞機構の解明、制御、および予測技術の開発が必要である。

気液二相流の数値シミュレーション技術の高度化や輻射の放射波長制御技術が必要である。

● 熱輸送

トラックによるオフライン熱輸送、パイプ熱輸送方式の電力式蒸気熱輸送、受動型熱輸送、この3者の熱輸送効率的限界、コスト的限界を明らかにし、適材適所の熱輸送方式の選定を行うことが求められる。

ループヒートパイプやループ式サーモサイフォンなどの受動型熱輸送要素技術で電力を用いずにどこまで熱輸送を行えるかの限界を明らかにする取組が期待される。限界を伸ばすためには毛管力の向上、熱輸送時の熱ロスの低下、低温度差で熱輸送を実現する安全な冷媒の開発、大型に起因するより高精度なモデルの構築、低コストな製造方法、長期安定性の検証などが必要である。また、単なる要素技術の研究開発にとどまらず、熱利用システムに組み込んだ形での実証研究が求められる。

● ヒートポンプ

冷媒、熱源、高温取り出し化、コスト低減が取り組むべきテーマである。

安全性の高い冷媒、ヒートポンプの高温化に耐えうる冷媒の探索が求められる。ヒートポンプに組み込む熱交換器としては、冷媒の混合が進んだ場合には、混合冷媒でも高性能

な形式が改めて求められる。

不安定な排熱のような熱源を用いる場合には、立ち上がりがよく、排熱の変動に対しても安定した駆動を可能とする制御方法の考案が求められる。

高温取り出しのヒートポンプの場合には、起動から通常運転まで大きく温度レベルが変わるため、潤滑油の粘度が大きく変わってしまう。このような状況にも対応可能な潤滑油、運転方法が確立されることが求められる。高温ヒートポンプは、圧縮過程で冷媒温度を高めるために、かなり高圧に圧縮する必要があり、その分、膨張過程での減圧（圧力落差）も大きなものになるので、その圧力落差から動力（エネルギー）回収を可能とする膨張機の開発が求められる。

電力、ガスが自由化された中では、従来のようなガス機器、電気機器といった分類ではなく、システムトータルとしてベストミックスをし、最も効率よく駆動可能なシステムの提案が求められる。

●ケミカルヒートポンプ

取組むべき研究テーマは、蓄熱媒体（蓄熱材、熱媒体等）、装置設計などであり、対象としては、伝熱現象、物質移動、化学反応などの解析・シミュレーションが挙げられる。また、実際のシステム運用面では生産プロセスのエネルギー的最適化等も研究対象となる。

（5）政策的課題

●熱の賦存の把握

経団連に加盟する大企業では業種ごとに自主的に省エネに精力的に取り組んでおり、大きな成果を挙げている^{48,49)}ので、事業所あるいは事業者の中で対応できるものと推測される。一方で中小の企業では、省エネルギーに対する関心があっても、その具体的な方法に対する情報が乏しかったり、省エネルギーに充当する人的資源が不足している場合も多い。このようなことから、省エネに関する知識や情報を与えたり、また、プロセスの改良等の専門家を派遣する一方で、企業側からの情報を集約し、個々の例を蓄積し、細かな見直しを可能にすることが出来るような制度や体制作りの検討が必要である。

設備投資をしたものの、エネルギー価格が下がったり、または市場が縮小したり、なんらかの事情で他の事業者からの熱が受けられなくなったり、あるいは供給できなくなったりするときに初期投資の回収が困難になったときの支援を公的機関が支援する仕組みを作るかあるいは省エネ投資保険商品とし整えるなどのバックアップ作りの検討も必要である。

●理論

産学官、府省庁や海外を含む研究者間の連携をより強化する枠組みの策定とともに、実用に向けた実験を行うために高圧ガスの限度を産業プラントレベルまでに引き上げた実験地区、またコンビナートレベルの研究開発が可能となるようなフィールドを国内外に指定し、研究機関発の研究内容を実用・実証レベルにまで引き上げる方策が望まれる。

●熱交換

熱交換の技術開発には長い歴史がある上に、温度差がゼロという理論的上限が存在するため、不連続的な革新技术が今後生まれる可能性は高いとは言えないが、これは逆に言えば僅かな差であっても長期間優位性を保てるということを意味する。膨大な熱量を扱うこ

とから市場も大きく、エネルギー問題への量的な貢献という側面での価値が高い。幅広い分野の基盤を支える技術として、熱交換器設計のためのシミュレーション技術を高度化することが求められている。

● 熱輸送

工場からの廃熱取り出し時の既存装置改善に伴う消防法、労働安全衛生法等の規制の緩和や特例措置なども必要とされる。さらに、CO₂削減に対する熱供給側や需要側へのインセンティブの付与や、少量危険物（冷媒等）の規制手続きの統一化なども求められる。

● ヒートポンプ

冷媒の動向がヒートポンプ開発の行方をも左右してしまうが、冷媒に関しては様々な規制がある。これについては、単に性能の良い冷媒が必ずしも主流となるとは限らないため、国としてのきちんとした見極めとできるだけ早い対応が求められる。

熱源や冷媒の方向性が明確とならないとメーカーも思い切った製品開発投資ができない状況である。これがコストダウンや産業用ヒートポンプの普及を妨げている要因の一つかと思われる。

● ケミカルヒートポンプ

熱再生利用技術を実用化するには、実証試験、熱エネルギー需給データベースの作成、熱エネルギー市場の確立の検討が必要である。これまでは理論化学、応用化学、化学工学、機械工学等の学術分野において単独で研究開発が進められる例が多く、分野間の相互連携は限定的であったが、今後は学術分野間の広い相互連携、産官学の枠を超えた共同研究実施拠点の創設による共同研究開発の促進も望まれる。

（6）キーワード

熱需要、排熱、文献調査、アンケート調査、現地調査、計測、メタアナリシス、スマートメータ、製造プロセス、未利用熱、熱の融通、省エネ投資保険、エクセルギー、自己熱再生、磁気熱量効果、誘電熱量効果、熱伝達、熱輻射、相変化、伝熱促進、オフライン熱輸送、パイプ熱輸送、受動型熱輸送、ループ式サーモサイフォン、ヒートパイプ、ループヒートパイプ、蓄熱、断熱、排熱、ヒートポンプ、高温化、熱源、冷媒、空調、産業用、熱電変換、排熱発電、ケミカルヒートポンプ、熱マネジメント

（7）国際比較

熱の賦存の把握

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	○	→	● JST、JSPS、NEDO等のプロジェクトの中で省エネ機器、熱の計測、削減が行われている。
	応用研究・開発	○	→	● NEDOのプロジェクトで、流量計の開発は積極的に行われている。いわゆる「見える化」は進みつつある。 ● 電力のスマートメータの普及が開始した。
米国	基礎研究	○	→	● 定点観測ともいうべき、一定地域の年次変化を追うなど有意義な研究がなされている。 ⁵⁰⁾
	応用研究・開発	○	→	● 古くから車両用の排熱利用がなされ、現在も多種類のエンジン（電気自動車、燃料電池車）を対象とする研究をリードする。 ^{51,52)}
欧州	基礎研究	◎	↑	● EUの研究プログラム（cordis）で計測技術・監視・制御システムを伴う新しいプロセスの導入などが、挑戦的に進められる。
	応用研究・開発	◎	↑	● 市民の啓蒙や、経営者と省エネ機器・システムの開発者を結び付けるなどの動き（cordis）が盛んである。 ⁵³⁾
中国	基礎研究	○	→	● 長期エネルギー需要予想などは行われている ⁵⁴⁾ 。 ● COP21では2030年までに2005年比でGDP当たりのCO ₂ 排出量を60～65%削減する目標が掲げられた。
	応用研究・開発	○	→	● 工業排熱の都市利用も検討されている。 ⁵⁵⁾ ● 気体流量計の普及に向け、中国国内での気体流量計が2013年に開始された。これにより生産効率が向上するとともに、エネルギー使用量のデータ収集も容易になるものと推測される。 ⁵⁶⁾ ● ISO50001の要求事項を反映した国家エネルギー管理規格を発行し、270社が取得している。 ⁵⁷⁾
韓国	基礎研究	○	→	● 引用文献は古いですが、省エネのための調査・分析が行われている ⁵⁸⁾ 。 ● 省エネ機器の基礎的な研究が行われている ⁵⁹⁾ 。
	応用研究・開発	○	→	● 工業排熱の都市利用も検討されている ⁶⁰⁾ 。 ● ISO50001の取得件数は日本より多い42社（2014年）

理論、熱交換、熱輸送

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	◎	→	● 【理論】自己熱再生のみならず、内部熱交換型蒸留プロセスの基礎研究が多くなされており、基礎研究については、日本の基礎研究レベルは世界を先駆けている。 ● 【理論】熱再生利用方法の研究（ヒートポンプ技術や磁器冷凍など）も多く報告されている。 ● 【理論】プロセス設計手法と理論検討を統合的に検討がなされている。 ● 【熱交換】純粋な意味での熱交換を研究対象とする研究者は減少している。 ● 【熱輸送】受動型熱輸送技術に関しては、熱輸送メカニズムの解明、詳細モデルの構築など研究が進められつつある。
	応用研究・開発	△	↘	● 【理論】内部熱交換型蒸留プロセス、自己熱再生蒸留プロセスについては、実証プラントが作られたが、これらの実証プラントの次のフェーズの検討がなされていない ● 【理論】その他の応用検討はなされているが、実際の利用の見込みがない ● 【熱交換】特に自動車分野等で新たな技術開発が近年数多く取組まれている。 ● 【熱輸送】太陽熱利用、コジェネレーションシステムにおいても熱輸送が必要となるが日本は出遅れている。 ● 【熱輸送】蓄熱供給の実用化研究も進められているが事例は少ない。 ● 【熱輸送】受動型熱輸送技術に関しては、自動車、航空機への適用を目指した実用化研究が進められつつある。

米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●【理論】プロセス全体についてサイクル線図に基づいて研究がなされている。 ●【理論】熱再生について特化した研究は少ない。 ●【熱交換】ナノ材料等の物理系へのシフトが進み、純粋な意味での熱交換技術の基礎研究はやや減少している。 ●【熱輸送】特筆すべき基礎研究は見られない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●【理論】プロセスの設計について実用化に向けた検討はそれほど多く報告されていない。 ●【熱交換】個別企業での研究は進められている。 ●【熱輸送】蓄熱供給の実用化研究が行われている。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●【理論】常温以下の冷熱の循環を対象に基礎検討結果は非常に多く報告されている。 ●【理論】熱交換ネットワークの最適設計についても報告例が多数存在する。 ●【理論】ノルウェーのグループでは特に、圧力変化を含むネットワーク（圧縮機と膨張機の最適配置）について検討している ●【理論】熱を全て循環再利用するという考え方ではなく、基本的に最適に熱を循環再利用することを目的として検討している。 ●【熱交換】ナノ材料等、物理系へのシフトが進み、熱交換としての基礎研究は衰退している。 ●【熱輸送】受動型熱輸送技術に関して一定の基礎研究が大学、研究機関、企業で実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●【理論】深冷空気分離を対象に内部熱交換型蒸留プロセスの実証プラントが建設された。 ●【理論】その他の実用検討結果は、報告例に限られている。 ●【熱交換】個別企業での研究は進められている ●【熱輸送】ドイツ、デンマーク、スウェーデンなどで太陽熱利用、コジェネレーションシステムの導入が推進されており、熱輸送に関する応用研究・開発も進んでいる。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●【理論】自己熱再生を引用した文献がみられるが、自己熱再生の本質であるプロセス流体の熱を再生し、全てプロセス内において循環再利用するという本質を理解している論文は少ない。 ●【理論】設計者の都合に合わせて、プロセスを設計し、比較しているため、プロセスが最適化された根拠が少ない例が多い。 ●【理論】種々のプロセスに熱再生技術（ヒートポンプアシスト型、蒸気再圧縮型の技術）を適用して、その経済性評価を行っている文献が数多くみられる。しかしながら、正当な評価というよりもプラント建設に向けて設計者による恣意的な評価結果が多い。 ●【熱交換】若手を含め、アカデミアの研究者数は多い ●【熱輸送】受動型熱輸送技術に関しては、大学を中心に基礎研究が進められている
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●【理論】基礎研究で述べた通り、種々のプロセスに熱再生技術を適用して、その経済性評価を行っている文献が数多くみられる。 ●【理論】その結果を受けてプラント建設を進めている。 ●【理論】現状、最終的なプラント例が出ているわけではないが、応用研究は今後も進むものと予想される。 ●【熱交換】民間企業での研究開発は大きく進んでいる。 ●【熱輸送】受動型熱輸送技術に関しては、低コスト製作などの研究が進められている。新規建築への太陽熱温水器設置が義務付けられており、関連して熱輸送に関する応用研究・開発も進んでいる。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●【理論】蒸留技術についてヒートポンプアシスト型の検討がなされている。 ●【理論】プロセスの統合的な研究例はそれほど多く報告されていない。 ●【熱交換】純粋な意味での熱交換を研究対象とする研究者は少ない。 ●【熱輸送】研究例が少ない
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●【理論】蒸留技術に特化していくつかの実用研究がなされているが、全体的にそれほど多くの報告例は存在しない。 ●【熱交換】民間企業での研究開発は大きく進んでいる。 ●【熱輸送】自然エネルギー利用が推奨されており、熱輸送に関する応用研究・開発も進められている。

ヒートポンプ（ケミカルヒートポンプ含む）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 冷媒の熱力学的物性や輸送物性の測定評価は世界のトップクラスを保持しており、測定結果は世界標準である冷媒物性計算ソフト“refprop（米国NIST）”にも採用されている⁶¹⁾。 ● 九州大学は高温ヒートポンプサイクルの熱力学的な基本性能解析の基礎分野で強さを示している⁶²⁾。 ● 日本冷凍空調学会“熱交換器技術委員会”等は大学研究者やメーカーエンジニアを横断し総合的な技術交流の場を提供し、この方面の研究・開発を支えている⁶³⁾。 ● 【ケミカルヒートポンプ】化学工学会、機械学会、冷凍空調学会、鉄鋼協会等の学協会において熱エネルギー有効利用に関する研究会が活動しており、産官学それぞれの立場で研究開発が進められている。さらに、これらの学協会が主催する研究発表会、シンポジウム、工場見学会等の研究会活動を通して研究者間の情報交換が活発に行われている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 我が国には世界を代表する冷媒メーカー（デュボンやハネウエル）はないが、メーカーの商品開発能力は世界トップクラスであり、低圧蒸気（100～120℃）を製造できるヒートポンプを商品化した⁶⁴⁾。さらに160℃の蒸気取出しも商品化した⁶⁵⁾。 ● 家庭用のCO₂ヒートポンプ給湯器（商品名“エコキュート”）を世界で最初に実用化し幅広く普及している⁶⁶⁾。 ● 世界トップクラスの圧縮機メーカー（ターボ、スクリュウ、スクロール等）があることに加え、機器メーカーはサイクル技術や熱交換器、制御に関する先端技術を有しており、世界に先駆けたヒートポンプ機器開発が可能である。 ● 【ケミカルヒートポンプ】次世代型エネルギーシステムの確立を目指したプロジェクトが進行している。2017年8月には「International Sorption Heat Pump Conference (ISHPC2017)」が早稲田大学にて開催予定である⁶⁷⁾。熱再生利用技術に関するプロジェクトについては、経済産業省が主導したプロジェクトが多く進められている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● フッ素系冷媒の研究・開発においては世界のトップクラス。 ● DOEの支援で熱交換器やファン等の研究を行っている⁶⁸⁾。 ● 【ケミカルヒートポンプ】論文発表はコンスタントに続けられている ● 【ケミカルヒートポンプ】4カ年技術レビュー2015の中で、各種産業や製造業の成長の鍵となる技術候補の中に、熱発電と排熱利用技術を挙げている⁶⁹⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● DOEやオークリッジ国立研究所（Oak Ridge National Laboratory）がヒートポンプ研究を進めているが、暖房を中心としたビルおよび住宅用である⁶⁸⁾。 ● 産業用の100℃以上の温水や蒸気取出しヒートポンプの研究は、これからの課題。 ● 北米カナダのHydro-Québecでは117℃の低圧蒸気取出しの研究がありこの方面の研究開発がある⁷⁰⁾。 ● 【ケミカルヒートポンプ】排熱利用技術、熱発電技術等の産官学プロジェクトを実施
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● フランスEDFにより、3つのプロジェクトが進んでいる。①R245faによる高温ヒートポンプの開発、②スクロール圧縮機と混合冷媒による140℃取出しの高温ヒートポンプの開発。③水冷媒による高温ヒートポンプの開発がある⁷¹⁾。 ● ドイツでは、自然系冷媒のイソブタンを用いた単段・高温ヒートポンプもしくはイソブタンを高温側にR134aを低温側に用いたカスケードヒートポンプが開発されている⁷²⁾。 ● デンマークでは、自然冷媒（アンモニア、CO₂、イソブタン）の90℃取出しレベル等の研究を実施している⁷³⁾。 ● 【ケミカルヒートポンプ】コンスタントに論文発表があり、今後も引き続いて進展する可能性が高い
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● ドイツでは、アンモニア冷媒を用いた高温ヒートポンプが開発されている。ジーメンス社は高温ヒートポンプ用冷媒のLG6を用いた150℃レベルの出熱試験が実施された⁷²⁾。 ● ノルウェーのDrammenの地域暖房にはアンモニアの2段圧縮スクリュウヒートポンプが海水を熱源とし90℃の温水を供給している⁷⁴⁾。

				<ul style="list-style-type: none"> ● ドイツには日本と同様、トップクラスの圧縮機メーカーがあり、ヒートポンプ機器の研究開発は世界トップレベル。 ● 【ケミカルヒートポンプ】熱電発電、地域熱供給の熱源として再生可能エネルギーや排熱の利用率が高まっている。特にドイツやフランスでは地域熱供給の熱源として再生可能エネルギーや排熱回収分の占める割合が10%（ドイツ）、27%（フランス）となり、化石燃料からの転換が進んでいる ● 【ケミカルヒートポンプ】太陽熱利用に関する研究開発アライアンスを組織し、研究活動が活発となっている⁷⁵⁾。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 中国はIEA Annex 48 (Industrial heat pummp) に参加を予定しており、本格的な基礎研究はこれからと思われる。 ● 【ケミカルヒートポンプ】論文発表数は増加傾向にある。今後も引き続いて進展する可能性が高い。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● ヒートポンプの研究開発は主に住宅の暖房用と思われる。産業用の実施例は100℃以下⁷⁶⁾。 ● 冷媒として炭化水素を推奨し、メーカーに試作をさせている。まだ、安全性等について十分な評価分析が進んでいないが、市場が大きいだけに注視する必要がある。 ● 【ケミカルヒートポンプ】技術導入が進展すると、競争力の強化が見込まれる。
韓国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 特段目を引くような動きはない ● 【ケミカルヒートポンプ】論文発表数は増加傾向にある。今後も引き続いて進展する可能性が高い ● 【ケミカルヒートポンプ】2016年9月には「The 15th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC2016)」が韓国ソウルで開催された⁷⁷⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ヒートポンプの研究開発は住宅の暖房用で空気熱源や地中熱源とした70℃レベルであり、産業用の高温ヒートポンプの研究はこれからと思われる。 ● オンドル文化があるため、ヒートポンプの普及を妨げているとの見方もある。ヒートポンプ導入に向けて国家として何らかの方向性を指し示すのか注目される。 ● 【ケミカルヒートポンプ】技術導入が進展すると、競争力の強化が見込まれる。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

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

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2015年）
 - 省エネルギー総覧編集委員会編『省エネルギー総覧2010-2011』通算資料出版会，2010
 - 熱エネルギー高度有効利用と省エネルギー技術－エクセルギー損失の最小化、未利用熱エネルギーの有効利用、自己熱再生技術など最新の熱エネルギー利用技術体系－、フロンティア出版（2015）
- 1) 鹿園直毅，エクセルギー損失削減に貢献する伝熱促進技術，機能材料,33(7),pp.13-19(2013)。
 - 2) 財団法人省エネルギーセンター、広域エネルギー利用ネットワークシステムの開発 エネルギーシステム設計技術の研究 工場群のエネルギーシステムに関する調査研究 平成12年度調

- 査報告書、平成 13 年 5 月
- 3) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合ホームページ (未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発の紹介ページ)
<http://www.thermat.jp/>
 - 4) 西村一彦、本藤祐樹、内山洋司、産業連関表を用いた製品のエネルギー消費量の推定、電力中央研究報告 : Y95007、1996
 - 5) Clemens Forman and others, Estimating the global waste heat potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57(2016) 1568-1579
 - 6) Sarah Brueckner and others, Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions –A categorization and literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38(2014) 164-171
 - 7) Laia Miró and others, Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: A case study for Spain, *Applied Energy* 169 (2016) 866-873
 - 8) NEDO 実用化ドキュメントホームページ- 複数工場間で熱を共有し、コンビナート全体での省エネを実現 (コンビナート地域の排熱調査の紹介)
<http://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201315chiyoda-corp/index.html>
 - 9) エネルギーの面的利用促進研究会、エネルギーの面的利用促進に関する調査報告書、平成 17 年 3 月
 - 10) NEDO ホームページ (成果報告書詳細)
http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201501/20140000000806.html~
http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201501/20140000000810.html
 - 11) 吉田邦夫編 エクセルギー工学－理論と実際－, 共立出版株式会社(1999)
 - 12) 唐木田健一 エクセルギーの基礎, オーム社(2005)
 - 13) Y. Kotani, Y. Kansha, A. Tsutsumi, Conceptual design of an active magnetic regenerative heat circulator based on self-heat recuperation technology, *Energy*, 55, 127-133 (2013)
 - 14) Y. Kotani, M. Aziz, Y. Kansha, C. Fushimi, A. Tsutsumi, Magnetocaloric heat circulator based on self-heat recuperation technology: *Chem. Eng. Sci.*, 101, 5-12 (2013)
 - 15) 高性能ケミカルヒートポンプ応用事例集, サイエンスフォーラム(1991)
 - 16) Y. Kansha, N. Tsuru, K. Sato, C. Fushimi, A. Tsutsumi: Self-heat recuperation technology for energy saving in chemical processes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 48, 16 (2009) pp.7682-7686
 - 17) Y. Kansha, N. Tsuru, C. Fushimi, K. Shimogawara, A. Tsutsumi: An innovative modularity of heat circulation for fractional distillation, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 65, 1 (2010) pp.330-334
 - 18) 生研記者会見 東京大学生産技術研究所／新日鉄エンジニアリング株式会社 合同記者会見 バイオエタノール製造コストを大幅削減！～自己熱再生理論を用いた省エネ蒸留プロセス実証試験～<http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/992/>
 - 19) 柴田, 空調機用熱交換器の高性能化における研究開発, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2007 講演論文集, pp. 25-32 (2007).
 - 20) 資源環境対策 Vol. 42, No. 13 (2006).
 - 21) 平成 24 年度 環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書

- https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/pdf/K2419.pdf
- 22) NEDO ニュースリリース 次世代熱エネルギー輸送デバイス「ループヒートパイプ」を開発
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0024-2A.html
- 23) 航空機用先進システム基盤技術開発 (航空機システム革新技術開発) の概要について
http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H24/121129_koukuuki/koukuu5-3-5.pdf
- 24) (株) 前川製作所プレスリリース (2012年4月17日),
<http://www.mayekawa.co.jp/ja/news/2012/pdf/news20120418.pdf>
- 25) 三機工業 (株) ホームページ, <http://www.sanki.co.jp/product/thc/index.html>
- 26) JST 新技術説明会資料, https://shingi.jst.go.jp/var/rev1/0000/1099/2016_kyoto-u_4.pdf
- 27) (一社) 新エネルギー導入促進協議会資料,
http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150330/150330_2_5.pdf
- 28) Y. Kansha, Y. Kotani, M. Aziz, A. Kishimoto, A. Tsutsumi: Evaluation of a self-heat recuperative thermal process based on thermodynamic irreversibility and exergy, *J. Chem. Eng. Jpn.*, Vol. 46, 1 (2013) pp. 87-91
- 29) Y. Kansha, H. Mizuno, Y. Kotani, M. Ishizuka, C. Song, Q. Fu, A. Tsutsumi: Numerical investigation of energy saving potential for self-heat recuperation, *Chem. Eng. Trans.*, Vol. 45 (2015) pp. 187-192
- 30) H. Dinh, et al., Study on Cascade Refrigerant and Mixed-Refrigerant Systems for Ethylene Plants, 2012 AIChE Spring Meeting, Apr. 1-5, Houston, TX (2012)
- 31) C. Fu, T. Gundersen, Integrating compressors into heat exchanger networks above ambient temperature. *AIChE Journal* 61(11) s. 3770-3785 (2015)
- 32) C. Fu, T. Gundersen, Integrating compressors into heat exchanger networks above ambient temperature. *AIChE Journal* 61 (10) s. 3404-3422 (2015)
- 33) C. Fu, T. Gundersen, A novel sensible heat pump Scheme for industrial heat recovery. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 55(4) s. 967-977 (2016)
- 34) Hasegawa, Y. and Shikazono N., Model-Based Optimization of Three-Dimensional Complex Structure for Heat Transfer Enhancement in Single-Phase Flows, Proc. 15th International Heat Transfer Conference, Kyoto, Japan, August 10-15 2014, IHTC15-8867 (2014).
- 35) 美濃窯業 (株) プレスリリース (2015年12月24日),
http://www.mino-ceramic.co.jp/pdf/corp20151224_2.pdf
- 36) 日本伝熱学界特定推進研究, 波長選択ふく射輸送とエネルギー変換, HTSJ-FY2014-02,
http://www.htsj.or.jp/wp/media/1410_report.pdf
- 37) 愛知製鋼株式会社 ニュースリリース
https://www.aichi-steel.co.jp/news_item/20160520.pdf
- 38) パナソニック エコシステムズ株式会社 プレスリリース
<http://news.panasonic.com/jp/press/data/2012/09/jn120914-1/jn120914-1.html>
- 39) 村上、石橋、細川、富山、“細径多列流路の折り返し合流部における冷媒二相流の流量分配特性”、
Vol. 82 (2016), No. 838 ID:15-00685.
- 40) JST 新技術説明会資料, https://shingi.jst.go.jp/past_abst/abst/p/12/1265/hokkaido02.pdf
- 41) 名古屋大学小林敬幸研究室発表資料,

- http://www.energy.gr.jp/wp-content/uploads/2016/04/CaCl2_HeatStorage_2016April.pdf
- 42) 東京大学プレスリリース(2015年5月12日), <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/27.html>
- 43) EU コミュニティリサーチアンドデベロップメントインフォメーションサービス(以下 CORDIS と表記) ホームページ (EUFORIE の紹介)
http://cordis.europa.eu/project/rcn/194572_en.html
- 44) CORDIS ホームページ (ENERGY-SMARTOPS の紹介)
http://cordis.europa.eu/project/rcn/97548_en.html
- 45) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合(TherMAT), <http://www.thermat.jp/>
- 46) トヨタ自動車 プレスリリース
<http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/3396815>
- 47) NEDO「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」基本計画
<http://www.nedo.go.jp/content/100749586.pdf>
- 48) 一般社団法人日本経済団体連合会、環境自主行動計画 温暖化対策編—2011 年度フォローアップ調査結果 (2010 年度実績) —個別業種版、2012 年 7 月
- 49) 日本製紙連合会、製紙産業における地球温暖化対策の取り組み、2013 年 12 月
- 50) ローレンス・リバモア国立研究所ホームページ(エネルギーフロー図)
<https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy>
- 51) Ho Teng and others, Waste Heat Recovery of Heavy-Duty Diesel Engines by Organic Rankine Cycle Part I: Hybrid Energy System of Diesel and Rankine Engines, SAE paper, 2007-01-0537
- 52) A. Shabashevich and others, Analysis of powertrain design on effective waste heat recovery from conventional and hybrid electric vehicles, Applied Energy 157 (2015) 754–761
- 53) Exergyn のホームページ
<https://www.exergyn.com/>
- 54) Lynn Price and others, The challenge of reducing energy consumption of the Top-1000 largest industrial enterprises in China, Energy Policy 38 (2010) 6485–6498
- 55) Hao Fang and others, Industrial waste heat utilization for low temperature district heating, Energy Policy 62 (2013) 236–246
- 56) Xing-Ping Zhang and others, Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China, Ecological Economics 68 (2009) 2706–2712
- 57) アズビル株式会社ホームページ (ニュースリリース)
<http://www.azbil.com/jp/news/130925.html>
- 58) Sunhee Suk and others, A survey study of energy saving activities of industrial companies in the Republic of Korea, Journal of Cleaner Production 41 (2013) 301-311
- 59) Seok Hun Kang, Design and preliminary tests of ORC (organic Rankine cycle) with two-stage radial turbine, Energy 96, (2016) 142–154
- 60) Song Hwa Chae and others, Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park, Applied Energy 87 (2010) 1978–1988
- 61) NIST REFPROP Version 9.0, R1234yf, Fluid Information, Surface tension, Literature reference.

- 62) 近藤, 小山, “廃熱利用高温ヒートポンプサイクルの基本性能に関する熱力学的考察”, 日本冷凍空調学会論文集, Vo,31, No.2(2014),pp.133-144.
- 63) 日本冷凍空調学会ホームページ, 冷凍空調技術委員会,
<http://www.jsrae.or.jp/committee/refrigeration/>
- 64) 二宮, “排熱回収ヒートポンプ式蒸気・温水製造装置”, 冷凍 2008 年 7 月号第 83 巻 969 号,
pp.53-57.
- 65) 飯塚, “日本冷凍空調学賞 技術賞「高効率蒸気供給システム SGH (スチームグロウヒートポンプ)」”, 冷凍 2014 年 6 月号第 89 巻 1040 号, pp.20.
- 66) 斎川, “電力中央研究所フォーラム 2010「ヒートポンプの役割と課題」”
<http://criepi.denken.or.jp/result/event/forum/2010/pdf/SD09.pdf>
- 67) ISHPC2017 ホームページ, <http://biz.knt.co.jp/tour/2017/ISHPC2017/>
- 68) ホームページ ENERGY.GOV Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
<http://energy.gov/eere/buildings/success-stories>
- 69) アメリカエネルギー省 (DOE) ホームページ,
<http://energy.gov/under-secretary-science-and-energy/downloads/chapter-6-innovating-clean-energy-technologies-advanced>
- 70) Marc-André Richard, “Techno-economic evaluation of combining heat pump and mechanical steam compression for the production of low pressure steam from waste heat”, IEA Heat Pump Centre Newsletter Volume 32 - No. 4/2014, pp.50-61.
- 71) IEA Heat Pump Programme Annex 35, “産業用ヒートポンプの応用 最終報告書”(日本語), ヒートポンプ・蓄熱センター, 2015 年, PP296-307.
- 72) IEA Heat Pump Programme Annex 35, “産業用ヒートポンプの応用 最終報告書”(日本語), ヒートポンプ・蓄熱センター, 2015 年, PP307-326.
- 73) IEA Heat Pump Programme Annex 35, “産業用ヒートポンプの応用 最終報告書”(日本語), ヒートポンプ・蓄熱センター, 2015 年, PP271-273.
- 74) IEA Heat Pump Programme Annex 35, “産業用ヒートポンプの応用 最終報告書”(日本語), ヒートポンプ・蓄熱センター, 2015 年, PP524-530.
- 75) ヨーロッパエネルギー研究アライアンス (STAGE-STE) ホームページ,
<http://www.stage-ste.eu/index.php>
- 76) J. Zhang et al.,” A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China” Applied Energy 178 (2016) 800–825
- 77) DHC2016 ホームページ, <http://www.dhc2016.kr/index.php>