

ATTAAIC A AAGA C CTAACCT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAACCT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAACCT CTCAGACC

戦略プロポーザル 反応プロセス革新

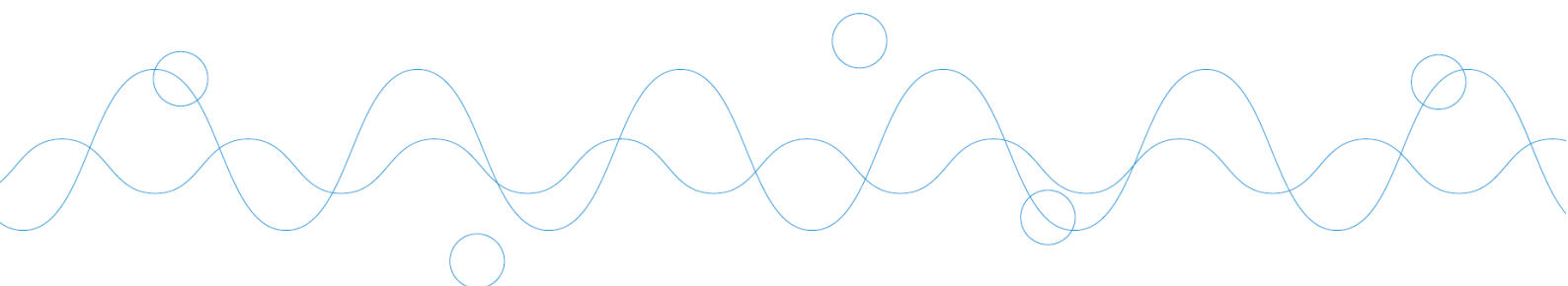
～イオンと電子の制御による中低温域の革新的化学反応～

STRATEGIC PROPOSAL

Innovation of Reaction Process

- Innovative chemical reaction in a low to intermediate
temperature range through ionic and electronic control-

0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする独立行政法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDS は、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

<http://www.jst.go.jp/crds/about/>

エグゼクティブサマリー

本戦略プロポーザルでは、エネルギー変換や化学品合成などの物質生産の基盤となる化学反応プロセスの革新に資する研究開発戦略を提案する。具体的には、触媒化学、電気化学、固体イオニクスを融合することで、化学反応におけるイオンと電子の動きを独立に制御する技術の研究開発を対象とする。これにより、150～600℃の中低温域において反応速度と反応選択性を同時に向上することが可能となり、熱・電気併用の革新的化学反応を実現できる。このような革新的反応を実反応プロセスに適用することで、設備の大幅な簡素化と低コスト化、そして高効率化が可能となる。本研究開発領域はこれまで研究の空白状態となっていたが、近年、鍵となる中低温域作動の固体イオニクス材料の可能性が見え始めたことから、研究開発を重点的に推進すべき時期にある。本戦略を推進し、世界に先駆けて革新的化学反応による物質生産の実現を目指すことにより、我が国の産業競争力強化、低炭素社会の実現に資することが期待できる。

近年、目覚ましい成果が上がっている燃料電池は、固体イオニクス材料を用いた電気化学反応により、燃料の化学エネルギーを直接電気として取り出すエネルギー変換技術である。一方、化学品合成など、物質生産に固体イオニクス材料を用いた電気化学反応を適用する技術はまだ研究開発が緒についたばかりである。化学品合成における化学反応では、反応速度のみならず、目的とする生成物への高い反応選択性が求められる。また、自発的に進まない反応も存在することなど、燃料電池のような自発反応から電気を取り出す技術とは異なる課題が存在する。本戦略プロポーザルで取り上げる革新的化学反応は、固体イオニクス材料を用いた電気化学反応において、温度と電位による反応制御を高度化することで、反応速度と反応選択性を同時に向上させることを狙いとしている。また、従来高温が必須だった化学反応においても中低温域まで反応温度を下げ、触媒作用を高機能化することで、新しい化学反応が可能になることも考えられる。加えて、中低温熱を反応のエネルギー源として利用することで、コストの高い電気を必要最小限量に抑えることもできる。このような熱・電気併用の革新的化学反応を適用した新しい反応プロセスを構築することで、設備の大幅簡素化・低コスト化やこれまでにない高効率化が可能になる。これは、資源小国の日本における化学産業をはじめとした産業の競争力向上に資する技術になる。さらには、これら技術をエネルギー利用・転換のプロセス技術に拡大することで、排熱回収によるエネルギー利用の格段の高効率化をもたらし、低炭素社会の実現を加速すると期待される。

革新的化学反応の研究開発を推進するためには、中低温域で作動する固体イオニクス材料が必要となるが、これまで良い材料がなく、本格的な研究開発は行われてこなかった。しかしながら、最近になって中低温域で作動する固体イオニクス材料として候補となる材料（新規材料としてナトリウムチタネート系酸化物、あるいは格子ひずみ効果の利用など）が見出されており、これら材料の研究開発も含めた本格的な研究開発を開始できる状況にある。

研究開発には、中低温域作動の固体イオニクス材料の研究開発、電極触媒の物質探索や機能強化、さらにはこれらの研究開発を支援するための分析技術、計算科学による反応機構解明など、基盤的な技術の研究開発が同時に必要である。また、具体的な化学反応プロ

セスに適用するための応用研究が非常に重要であり、これらのことから触媒化学、電気化学、固体イオニクスのみならず、機械工学、化学工学、プロセス工学、その基盤技術を支える分析科学、計算科学などを巻き込んだ広範な研究領域の協同が求められる。本プロポーザルの実施により、学際的にも多くの研究領域の融合による領域拡大が期待される。

具体的な研究開発課題を以下に要約する

- 新たな化学反応の構築・反応器設計に資する研究開発
 - 電気化学的反応における最適な電極触媒の探索
 - 中低温域での作動を可能とする固体イオニクス材料の研究開発
 - 化学反応における触媒機能について、電位操作も含めた最適制御の研究
 - 基礎研究からのフィードバックによる材料探索・開発および化学反応方法の研究開発
- 表面・界面における化学反応過程のイオンと電子の移動に係る現象解明と理論構築（基礎研究）
 - 分析技術と計算科学による現象解明と理論構築
- 反応プロセスの適用に向けた研究開発（応用研究）
 - 反応プロセスにおけるライフサイクルアセスメント（LCA）も踏まえたエネルギー効率などの評価に関する研究とその評価法による化学反応・プロセスの選択
 - プロセス設計に向けた反応器設計などの応用研究

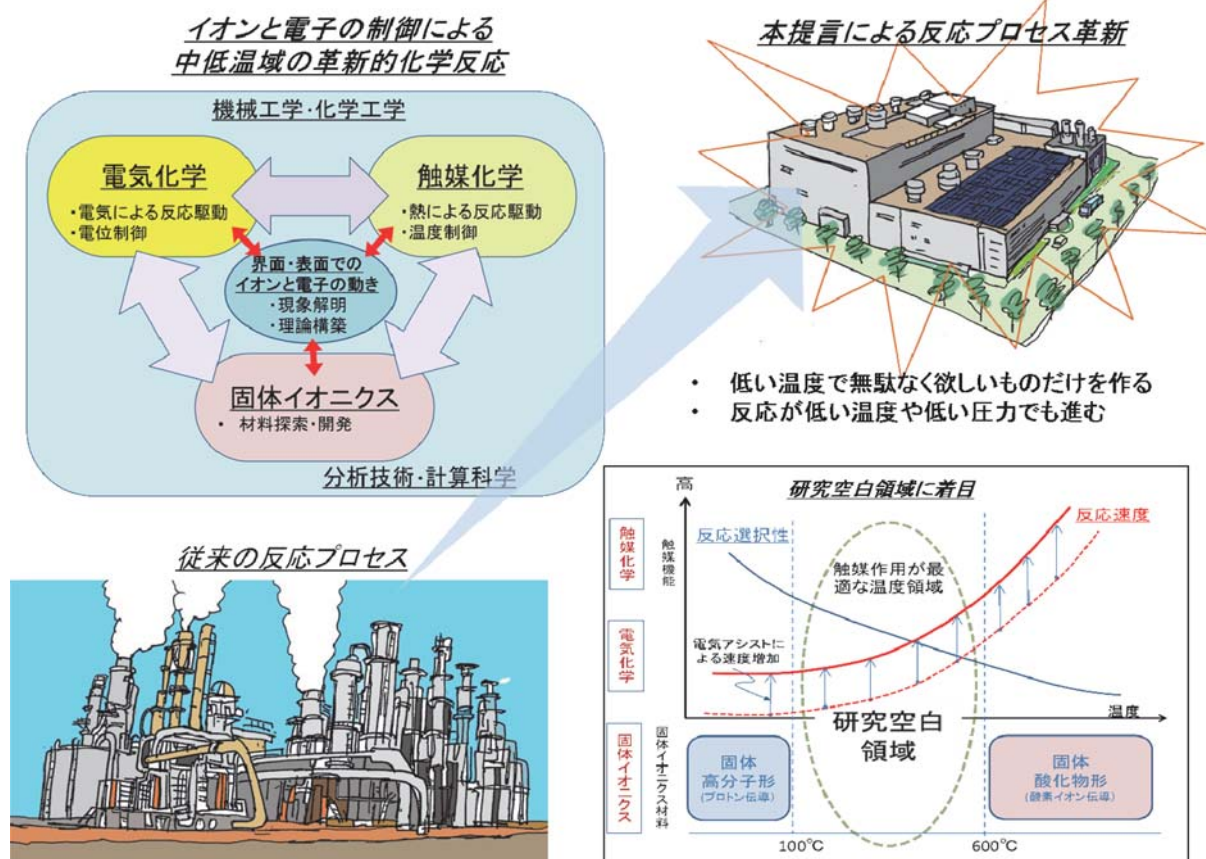


図 反応プロセス革新のコンセプト

Executive Summary

This report is a strategic proposal related to the research and development (R&D) involved in innovation of reaction processes that form the bases of processes such as energy conversion, chemicals synthesis, etc. Specifically, it focuses on a technology that enables independent control of ions and electrons in a chemical reaction by a combination of catalysis, electrochemistry, and solid-state ionics. This technology can improve both reaction rate and selectivity in a low to intermediate temperature range, namely 150 to 600°C to realize an innovative chemical reaction through the combined use of heat and electricity. Utilization of these technologies to industrial processes is expected to simplify the process, to reduce production cost and to improve energy efficiency. This research topic has now entered into a stage of active R&D thanks to novel solid-state ionics materials working in a low to intermediate temperature range. These R&Ds can contribute to the reinforcement of industrial competitiveness and the realization of a low-carbon society.

Fuel cells are a good example of energy conversion technologies, in which chemical energy from the fuel is directly converted to electricity by electrochemical reactions using solid-state ionics materials. Application of solid-state ionics materials to chemical production have just started. Chemical synthesis requires not only high reaction rate, but also high selectivity for a targeted product. The innovative chemical reaction proposed in the report aims at simultaneous improvement of both reaction rate and selectivity by enhancing reaction control through thermal and electric potential using solid state ionics materials. The new procedures will enhance catalytic activities in a low to intermediate temperature range for selective chemical reaction. In addition, the use of thermal energy can reduce the use of costly electricity as low as possible. Moreover, the combined use of heat and electricity in industrial sectors enables simplification of large-scale facilities and cost reduction. This can enhance competitiveness in various industries including the chemical industry. Furthermore, the widespread use of such technology in energy utilization and conversion may be expected to recover waste heat and to achieve higher efficiency, leading to accelerated realization of a low-carbon society.

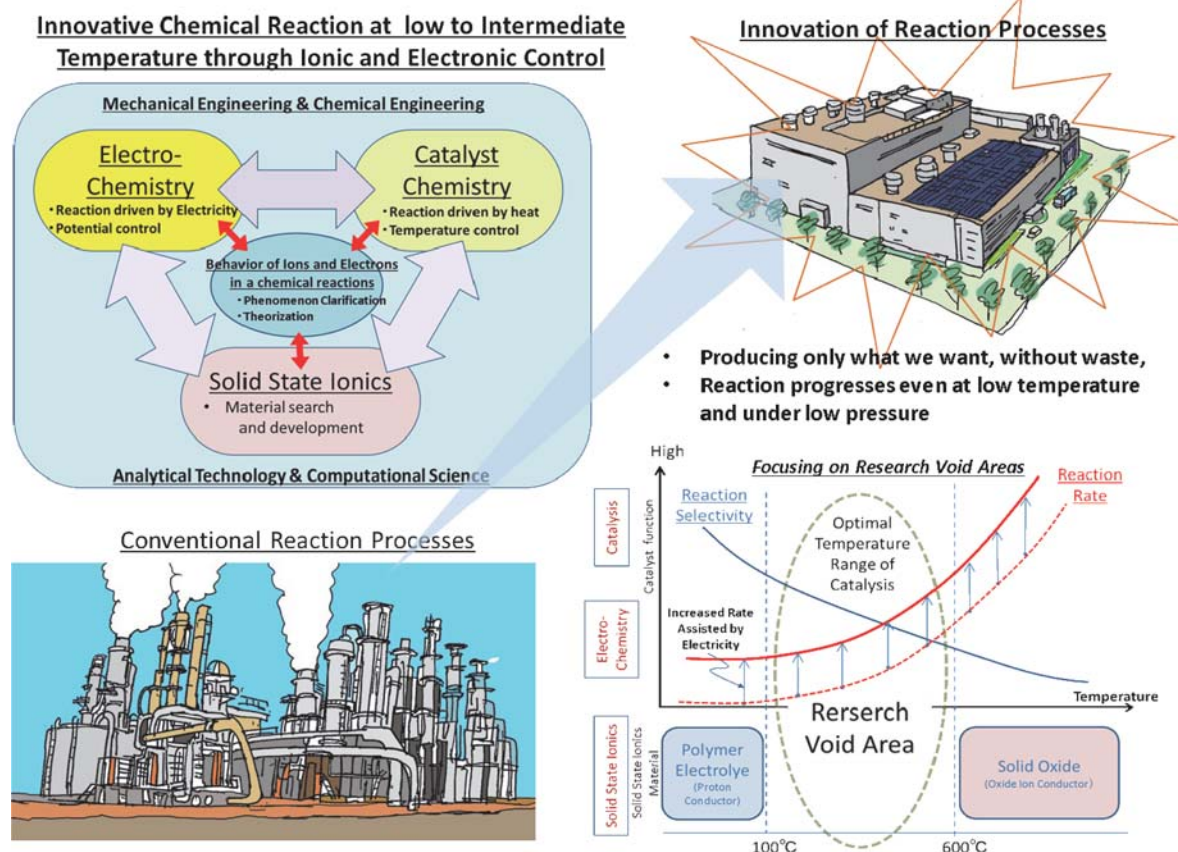
For facilitating the R&D of innovative chemical reactions, it is necessary to employ materials that function in a low to intermediate temperature range. Recently, candidates such as sodium titanate oxide have been proposed. Also, lattice-strain effects are known to enhance ionic conductivity.

Collaborative research on this technology is very important involving not only catalyst chemistry, electrochemistry, and solid-state ionics, but also mechanical engineering, chemical engineering, process engineering, analytical science, and computational science. Implementation of the present proposal will expand these

areas by merging various interdisciplinary research areas.

The R&Ds in the present strategic proposal are summarized as follows:

- R&D focused on constructing/designing reactors for novel chemical reactions
 - Search of optimal electrode catalysts in electrochemical reactions
 - R&D of solid-state ionics materials working in a low to intermediate temperature range.
 - R&D of optimal control on catalysis functions in chemical reactions including electric potential control.
 - R&D for material search/development and method of chemical reactions through feedback from the basic research.
- Theoretical and experimental investigations on ion and electron transfer phenomena on surfaces and interfaces
- R&D toward the application for reaction processes
 - Study on the evaluation of energy efficiency, etc., based on Life Cycle Assessment (LCA) in reaction processes as well, and selection of chemical reactions/processes based on the results of such evaluation
 - Applied research of the designing of reactors toward process designing



Conceptual figure of Innovative Reaction Processes

目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1. 研究開発の内容	1
2. 研究開発を実施する意義	3
2-1 現状認識および問題点	3
2-2 社会・経済的効果	11
2-3 科学技術上の効果	18
3. 具体的な研究開発課題	20
4. 研究開発の推進方法および時間軸	23
付録1 検討経緯	25
付録2 国内外の状況	29
付録3 専門用語解説	31
参考文献	32

コラム目次

1 再生可能エネルギー利用による水電解技術	5
2 化学反応における電気化学的反応の活用意義	6
3 外部電位操作による反応選択性の制御	8
4 非ファラデー電気化学的触媒活性 (NEMCA/EPOC)	9
5 中低温作動の固体イオニクス材料の開発状況	10
6 化学品原料 ―オレフィン、BTX―	16
7 産業界における排熱とその利用	17

1. 研究開発の内容

本戦略プロポーザルでは、エネルギー変換や化学品合成などの物質生産の基盤となる化学反応プロセスの革新に資する研究開発戦略を提案する。具体的には、触媒化学、電気化学、固体イオニクスを融合することで、化学反応におけるイオンと電子の動きを独立に制御する技術の研究開発を対象とする。これにより、150～600℃の中低温域において反応速度と反応選択性を同時に向上することが可能となり、熱・電気併用の革新的化学反応を実現する。このような革新的化学反応を実反応プロセスに適用することで、設備の大幅簡素化と低コスト化、そして高効率化が可能となる。ここでは革新的化学反応およびその適用によるプロセス革新に向けた研究開発の内容を示す。

近年、目覚ましい成果が上がっている燃料電池は、固体イオニクス材料を用いた電気化学反応により、燃料の化学エネルギーを直接電気として取り出すエネルギー変換技術である。一方、化学品合成など物質生産に固体イオニクス材料を用いた電気化学反応を適用する技術はまだ研究開発が緒についたばかりである。化学品合成における化学反応では反応速度のみならず、目的生成物への高い反応選択性が求められる。また、吸熱反応のように自発的に進まない反応も存在することなど、燃料電池のように完全酸化という発熱反応を利用した電気化学反応とは異なる課題が存在する。特に、反応選択性の課題解決のためには触媒の機能拡大が重要となる。本プロポーザルで取り上げる革新的化学反応は固体イオニクス材料を用いた電気化学反応において、触媒反応に最適な温度条件である中低温域（150～600℃程度）で反応させ、温度と電位による反応制御を高度化させることで、反応速度と反応選択性を同時に向上させるものである。この熱・電気併用の革新的化学反応を実現するためには、中低温域でイオン伝導体として十分作動する固体イオニクス材料の研究開発、電極触媒における物質探索および電位操作も含めた触媒作用の機能強化などに関する研究開発が必要である。さらには、表面・界面における化学反応時の現象観察のための表面分析技術および理論構築のための計算科学などの研究開発も重要であり、このような基礎研究が革新的化学反応の実現を支援することとなる。さらに応用研究としてこの革新的化学反応の特徴である熱・電気併用などの従来とは異なる特徴も活かせる反応プロセスを探索し、新たにプロセス設計につなげるための研究開発も重要となる。

具体的な研究開発課題を以下に要約する

- 新たな化学反応の構築・反応器設計に資する研究開発
 - 電気化学的反応における最適な電極触媒の探索
 - 中低温域での作動を可能とする固体イオニクス材料の研究開発
 - 化学反応における触媒機能について、電位操作も含めた最適制御の研究
 - 基礎研究からのフィードバックによる材料探索・開発および化学反応方法の研究開発
- 表面・界面における化学反応過程のイオンと電子の移動に係る現象解明と理論構築（基礎研究）
 - 分析技術と計算科学による現象解明と理論構築

- 反応プロセスの適用に向けた研究開発（応用研究）
 - 反応プロセスにおけるライフサイクルアセスメント（LCA）も踏まえたエネルギー効率などの評価に関する研究とその評価法による化学反応・プロセスの選択
 - プロセス設計に向けた反応器設計などの応用研究

2. 研究開発を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

化学反応は化学品合成などの物質生産のみならず、燃料製造や燃焼などのエネルギー変換・利用など、生産・消費活動のいたるところに存在する基本的な現象である。この化学反応を適切に制御・操作することは非常に重要であり、これを実現するための研究開発が持続的に行われてきた。

近年、目覚ましい成果が上がっている燃料電池は、固体イオニクス材料を用いた電気化学反応により、燃料の化学エネルギーを直接電気として取り出すエネルギー変換技術である。燃料電池は、特許動向調査¹⁾や家庭用途への普及拡大²⁾、燃料電池自動車の市販化³⁾などが示すように、国による研究開発や実用化への支援策が効果的に機能した事例と言える。その一方で、例えば化学品合成などの物質生産に固体イオニクス材料を用いた電気化学反応を適用する技術はまだ研究開発が緒についたばかりであり、研究事例も水電解など限定的なものとなっている（コラム1）。工業的な化学反応においては、生産性向上に十分な反応速度と高い反応転化率が必要であるとともに、目的生成物への高い反応選択性が求められる。また、吸熱反応のように必ずしも自発的に進まない反応が存在するなど、熱力学的平衡や反応速度論的制約に基づいた課題がある。これらの技術課題は、燃料電池のように自発的に完全酸化まで進む大きな発熱反応を利用する場合とは異なるものである。

固体イオニクス材料を用いた電気化学反応の大きな特徴は、化学反応時のエンタルピー変化を電気化学的に仕事（電気）と熱とに分けて取り扱うことが可能になることである。このような熱・電気併用の特徴をうまく用いることで、発熱反応の場合は燃料電池のように反応で発生するエネルギーを電気として取り出せること、また吸熱反応の場合は反応に必要なエネルギーを熱と電気の両方で供給することができる。これにより、本来自発的に反応が進まない温度域でも、電気によるアシストで反応駆動が可能となる（コラム2）。このことは、熱のみを反応に利用する従来の触媒化学反応とは異なり、電気を併用することで温度や圧力の反応条件の制約が大幅に緩和されることを意味する。触媒化学反応では、低温の場合は反応速度が遅いこと、高温の場合は熱力学的平衡に近づき反応選択性が低下することが課題となる。このため、触媒機能を最大限発揮できる中低温域（150～600℃程度）での化学反応を可能にすることは、反応速度と反応選択性の同時向上を狙う観点から極めて効果的である。さらに、固体イオニクス材料を用いることで、これまでにない触媒機能を付与できる可能性がある。これは、固体イオニクス材料自体が隔壁となることで、アノード極側とカソード極側の反応を別々に制御できること、固体イオニクス材料内を移動する特定イオン種が選択的に化学反応に供与されること、さらには反応選択性に関して外部からの電位操作で電極面の触媒作用を制御することによる（コラム3）。また、電位操作により、触媒表面の反応活性が向上し、ファラデー則に依存しない特異的な触媒作用が存在することも見出されており、その効果の活用も期待できる（コラム4）。

以上のとおり、固体イオニクス材料を用いた電気化学反応に触媒化学反応を融合し、中低温域で熱・電気併用による化学反応を行うことで、従来は不可能であった反応速度と反応選択性を同時に向上させた化学反応を実現できる可能性が示唆される。（図1参照）

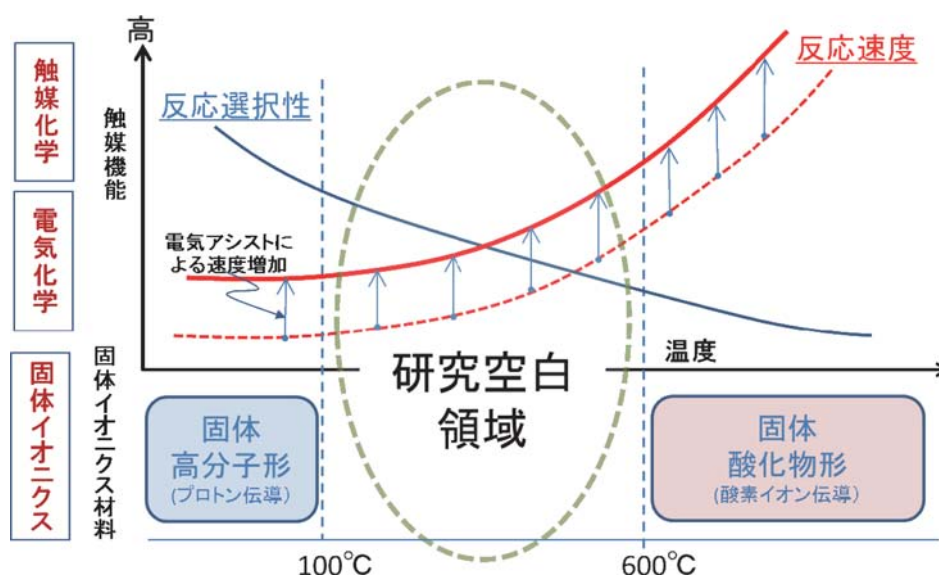


図1 固体イオニクス材料を用いた電気化学と触媒化学が融合した化学反応

しかしながら、現時点ではこの革新的化学反応を確立するための本格的な研究開発は行われていない。この最大の理由は、中低温域で作動する固体イオニクス材料、すなわち十分なイオン伝導性を持つ材料が実用化されていないことにある。現在、実用化されている固体イオニクス材料の作動温度は、固体高分子形のプロトン伝導体で100°C以下、固体酸化物形の酸素イオン伝導体で600°C以上であり、100～600°Cで作動可能な良い材料は存在しない。このため、化学反応の利用範囲は、現状では反応速度の遅い低温領域、あるいは反応選択性の制御が難しい高温領域での限定的なものにとどまっている。しかるに、このボトルネックとなっている中低温域作動の固体イオニクス材料の課題については、最近になって新たな材料としてナトリウムチタネート系酸化物、あるいは格子ひずみ効果の利用など、課題解決に資する新しい知見が見出されている⁴⁾（コラム5）。このことから、本プロポーザルで取り上げる革新的化学反応の本格的な研究開発を開始すべき時期に差し掛かっていると言える。

これまで物質生産に電気化学を用いる分野として、有機電気化学分野の研究開発が行われてきたが⁵⁾、その実用面での大きな課題はコストの高い電気を用いることにあった。主として化石資源などから40%程度の発電効率で得られる電気は、高価なエネルギーである。実際に電気のコストは熱のコストと比較して3倍程度（電気：約7円/MJ；都市ガス：約2.9円/MJ）⁶⁾も高価であるため、電気を用いた化学合成の例は、ソーダ塩素工業における食塩水の電気分解による水酸化ナトリウムや塩素の製造、ナイロン原料であるアジポニトリルのアクリロニトリルからの二量体合成など、限定的なものとなっている。つまり、物質生産に電気を用いるためには、熱のみを用いる場合と比較してエネルギー効率を格段に高め、投入電力量を必要最小限量に抑えることも重要な課題となる。本プロポーザルで提案する熱・電気併用による革新的化学反応では、比較的高いエネルギーを持つ中低温域の熱を反応エネルギーの一部として利用できる。これは、常温付近で電気のみで反応を駆動させる従来型の電気化学反応とは異なり、実用面でも優位性を持つ。

なお、電気の価値については将来的に変わることも想定される。これは、コラム1にも示すように、出力変動が大きく需給調整の困難な太陽光、風力などの再生可能エネルギー由来の電力の導入が今後拡大されることで、利用できない余剰電力量が増加することが想定されるためである。例えば、欧米においても再生可能エネルギー由来の余剰電力を利用して燃料製造を行う動きがある⁷⁾。本プロポーザルで提案する革新的化学反応を拡大展開する際には、コスト面の障壁を緩和できるこの再生可能エネルギー由来電力の動向をにらみながら対応することが重要である。

コラム1 再生可能エネルギー利用による水電解技術

現在、世界的に再生可能エネルギー由来の電力の導入が進められている。その中で、太陽光、風力などは出力変動が大きく、需給調整が困難な電力源であることから、今後これらの発電設備の導入拡大とともに、系統電力に取り込めない余剰電力量が増大してくることが想定される。このため、これらの余剰電力を物質転換に用いて化学エネルギーとして貯蔵・搬送する対策が考えられている。その一例が水（水蒸気）の電気分解による水素製造（および酸素）である。

欧州では、原子力発電あるいは風力発電の余剰電力利用を目的に、EUの研究プログラムFP7（2007～2013年）の中で、RelHy（Innovative Solid Oxide Electrolyte Stacks for Efficient and Reliable Hydrogen Production）プロジェクトが実施された。これは、水蒸気から固体酸化物形電解セルを用いて水素を製造するものであり、ドイツ・カールスルーエ大学が中心となり企業も参画した。

また、日本でも経済産業省「未来開拓研究プロジェクト再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」の中で、水素製造システムの研究が実施されている^{1) 2)}。

なお、水電解による水素製造方法には、アルカリ水電解、固体高分子形水電解、固体酸化物形電解セルを用いた水蒸気電解がある。この中で、水蒸気電解は水蒸気を直接用いることで蒸発潜熱分のエネルギーが不要となることから、高効率な反応が可能となる。さらに、水蒸気電解自体が吸熱反応であることから、反応に必要なエネルギーを反応場の熱を取り込むことで電解に必要な電力量を少なくできる利点もある³⁾。

【コラム1 参考文献】

- 1) 経済産業省. 平成25年度「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」に係る委託先の公募について
<http://www.meti.go.jp/information/publicoffer/kobo/k130529003.html>
- 2) NEDO. 水素利用等先導研究開発事業
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100068.html
- 3) 石原達己. サーマルマネジメント 余熱・排熱の制御と有効利用 第2編.
エヌ・ティー・エス（株）. 2013, 第2章, 第3節排熱のエネルギー再生技術

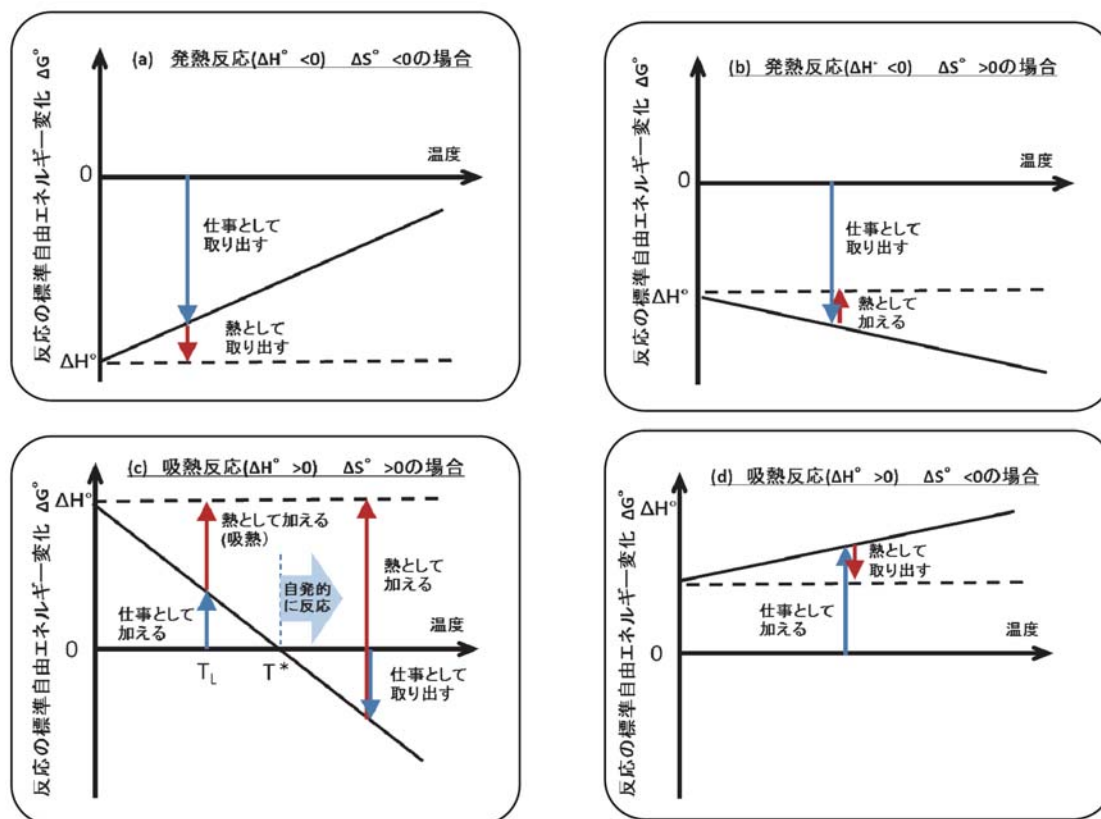
コラム2 化学反応における電気化学的反応の活用意義

化学反応前後におけるエンタルピー変化 ΔH は、物質から放出 ($\Delta H < 0$ 時) あるいは吸収 ($\Delta H > 0$ 時) されるエネルギー量を示している。この ΔH は、反応前後の Gibbs 自由エネルギー変化 ΔG とエントロピー変化 ΔS を用いて以下の式で表される。

$$-\Delta H = -\Delta G - T\Delta S \quad (\text{あるいは } \Delta H = \Delta G + T\Delta S) \quad (\text{C2-1})$$

ここで、 $(-\Delta H)$ 分は反応による発熱量であり、 $(-\Delta G)$ 分は反応を準静的に進めた場合に外部に取り出すことができる最大仕事を表す。また、 $(-T\Delta S)$ は外部に熱として放出される分を示している。すなわち、式 (C2-1) は反応時に外部と授受されるエネルギーを仕事と熱とに分けて取り出せることを示している。電気化学を用いることの利点は、化学反応を準静的に行うことができることである。すなわち、反応時の化学エネルギーを電気 (仕事) と熱とに分けた形で外部とやり取りができる。燃料電池は、このような電気化学の特徴を用いたエネルギー転換技術である。

図 C2-1 は、 ΔG - T 線図と呼ばれ、 ΔG を縦軸に、温度 T を横軸にして式 (C2-1) を表した図である。なお ΔH と ΔS は、温度の影響が小さいことから温度によらず一定とし、標準状態 (1 気圧、25℃) の値 ΔH° と ΔS° を用いた。 ΔH と ΔS の正負符号の違いにより、化学反応は 4 通りに分類できる¹⁾。



図C2-1 ΔG - T 線図

水蒸気改質反応の場合は、図C2-1 (c) の形になる。化学反応が熱のみで自発的に進むためには $\Delta G < 0$ となる必要があり、 $\Delta G = 0$ となる温度 T^* を転換温度と呼ぶ。この転換温度で化学平衡定数が 1 となる。例として、表C2-1 に水蒸気改質反応における T^* を示す。ここで、電気化学を用いると反応の駆動エネルギーの一部として電気を仕事分として加えることができ、これにより T^* 以下の温度条件でも反応を進行させることが可能となる（図C2-1 (c) に T_L として例示）。

表C2-1 水蒸気改質反応（吸熱反応）と転換温度 T^*
（熱力学データ²⁾より求めた値）

反応物	反応	転換温度 T^* [°C]
メタノール	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$	5
エタノール	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 6\text{H}_2$	194
メタン	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	589
エタン	$\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 7\text{H}_2$	421
エチレン	$\text{C}_2\text{H}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 6\text{H}_2$	247

表C2-1 に示すように、転換温度が比較的低いものはメタノールであり、メタン、エタンのような低級アルカン類は C-H 結合のエネルギーが高いことから転換温度は高い。

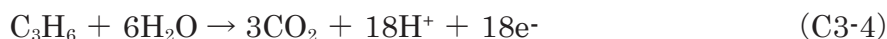
【コラム 2 参考文献】

- 1) 堤敦司. エネルギー科学・技術のパラダイムシフト：カスケード利用からエクセルギー再生へ. 化学工学. 2013, 第 77 巻, 第 3 号
- 2) L. V. Gurvich et al., 'Thermodynamic Properties as a function of Temperature'
http://www.galeon.com/raymond210/PDF/prop_termo_temp.pdf

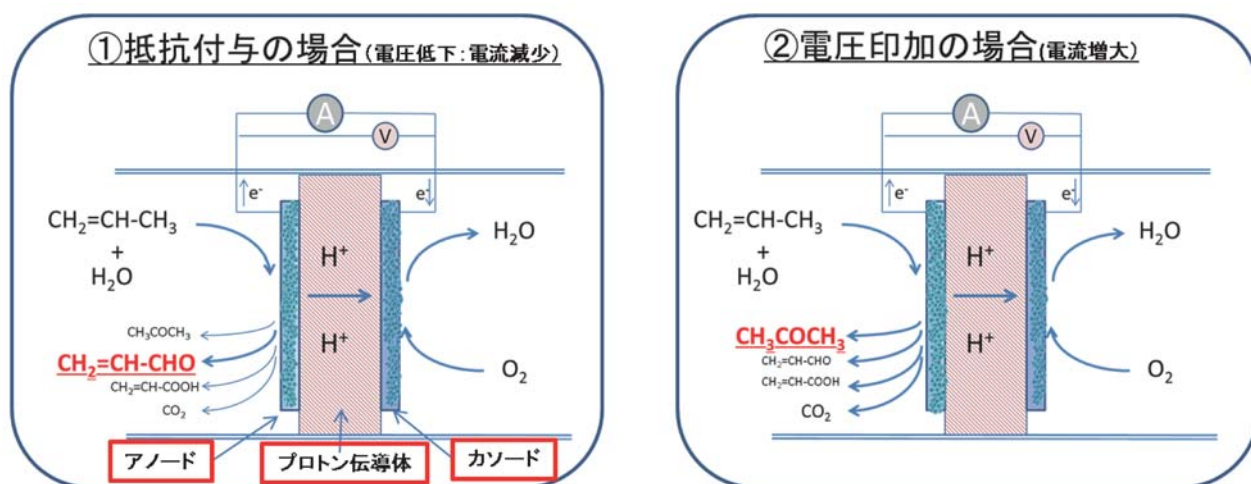
コラム3 外部電位操作による反応選択性の制御

固体イオニクス材料を用いた電気化学反応においては、外部からの電位操作により電極触媒での反応選択性を制御することができる。図C3-1に研究事例を示す¹⁾。この反応は、プロトン伝導体を用い、電極触媒としてアノード側にPd、カソード側にPtを用いることでプロピレンを酸化させる反応である。このときのアノード、カソードの反応を以下に示す。

・アノード反応



・カソード反応



図C3-1 外部からの電位操作による反応選択性の制御事例

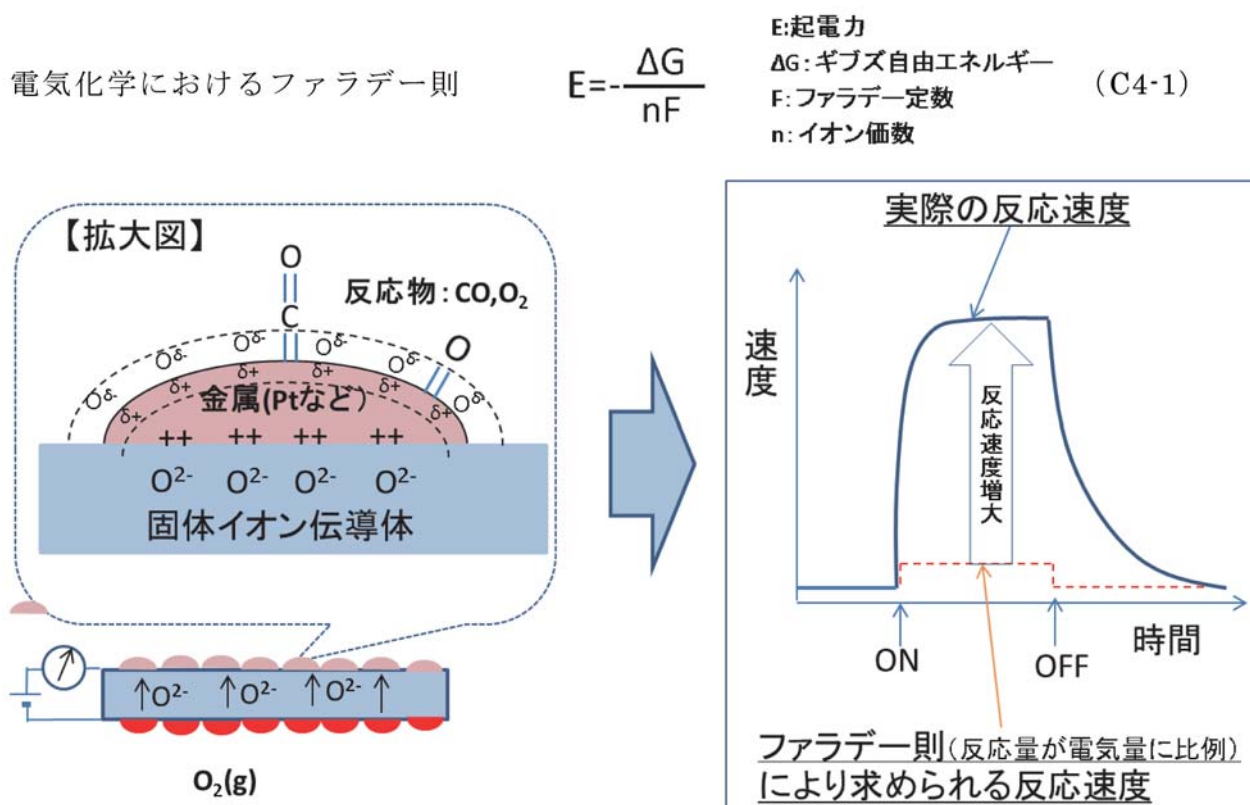
本反応は発熱反応であり、電気を取り出すことで反応が進む。その際、図C3-1①のように抵抗を付与し電圧を低下させると、反応（C3-2）が優位となりアクロレインが選択的に生成する（ π アリル酸化）。一方、図C3-1②のように電圧印加を行うと、反応（C3-1）が優位になりアセトンが選択的に生成する（ワッカー酸化）。これは、 π アリル酸化ではPd⁰が、ワッカー酸化ではPd²⁺が活性点となり、電位を上げることでPd⁰ → Pd²⁺が促進されるために反応選択性が変わると考えられる。このように、外部からの電位操作により反応選択性を変えることができる。

【コラム3 参考文献】

- 1) 大塚潔, 山中一郎. 表面. 1994, Vol.32, No.2, 66

コラム4 非ファラデー電気化学的触媒活性 (NEMCA/EPOC)

非ファラデー電気化学的触媒活性は、電気化学反応におけるファラデー則に従わない著しい触媒活性効果を示す現象のことである。NEMCA (Non-Faradaic Electrochemical Modification of Catalytic Activity)、あるいは EPOC (Electrochemical Promotion of Catalysis) とも呼ばれる。通常の電気化学反応は、式 (C4-1) のファラデー則に従い、流れた荷電量、すなわち電流に比例した量の化学反応が進行する。非ファラデー電気化学的触媒活性では、図 C4-1 のように荷電により与えた電流量以上の反応量が観察され、電流から求められる反応速度の $10^2 \sim 10^5$ 倍の速度となる現象が観察されている¹⁾。この触媒化学・電気化学・固体イオニクスの三位一体による特異現象は、さまざまな反応系、固体イオン伝導体および電極触媒の組み合わせでも観察されている。この作用機構については、電荷二重層の形成による触媒の表面関数増加ともいわれているが、詳細は明らかになっていない。



図C4-1 非ファラデー電気化学的触媒活性

【コラム4 参考文献】

- 1) M.Stoukides, C.G.Vanenas. Journal of Catalysis. 1981, 70 ,137

コラム5 中低温作動の固体イオニクス材料の開発状況¹⁾

現在、実用化されている主な固体イオニクス材料は、固体高分子形と固体酸化物形がある。固体高分子形は、パーフルオロカーボン ($-\text{CF}_2-$) で構成された高分子骨格に、スルホン酸基 ($-\text{SO}_3\text{H}$) が付与された構造をしており、水を介してプロトン (H^+) がイオン移動する。このため、水が蒸発しない 100°C 以下が作動温度となる。一方、固体酸化物形は、イオン伝導性のセラミックであり、格子構造の酸素イオン (O^{2-}) が拡散により移動する。固体酸化物形としては、ジルコニア系酸化物、セリア系酸化物、ランタンガレート系酸化物などが挙げられ、現状では最も低温で作動するペロブスカイト型構造のランタンガレート系酸化物でも 600°C 以上が必要とされる。このため、プロトン伝導体では高温作動化の研究が、酸素イオン伝導体（固体酸化物形）では低温作動化の研究が行われてきた。プロトン伝導体の高温作動化としては、無機酸素酸塩を用いる研究が行われている。

一方、酸素イオン伝導体としては、ナトリウムチタネート系酸化物 ($\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ (NBT)) などの新しい材料が見つかった²⁾。また、 Pr_2NiO_4 という欠陥ペロブスカイトの混合伝導体に、イオン伝導体であるサマリウムドープセリアを 100nm で積層させることで、酸素イオン伝導度が $2 \sim 3$ 桁程度高くなり、 300°C でも作動する結果が得られている。これは、サマリウムドープセリアの格子定数が少し小さく、薄膜であることも相まって引張応力が大きくなり、結晶格子のひずみにより異常原子価状態になるためである。なお、材料そのものの薄膜化技術による作動温度低温化も期待できる。

【コラム5 参考文献】

- 1) CRDS.2014. 中低温域作動の革新的反応と材料ワークショップ報告書 (CRDS-FY2014-WR-11)
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/WR/CRDS-FY2014-WR-11.pdf>
- 2) 九州大学プレスリリース. 2013. 新規高酸素イオン伝導体「 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ (NBT)」の発見
http://www.kyushu-u.ac.jp/pressrelease/2013/2013_11_08.pdf

2-2. 社会・経済的效果

本プロポーザルで取り上げる革新的化学反応は、さまざまな化学品合成の物質生産やエネルギー利用・変換に用いることができる。まずは、燃料よりも付加価値のある化学品などの物質転換への適用を進め、信頼性などの精緻な技術の確立も考慮しながら進めることが望ましい⁴⁾。特に、量的にも多い化学品原料、例えばオレフィン、BTX（コラム6）、メタノールやアンモニアなどへの適用検討を行うことは、さらに大規模なエネルギー利用・転換への展開につながることから、技術的にも社会的にも重要となる。将来的に再生可能エネルギー由来の電力が大量に発生する状況になると、電気に掛かる経済的なハードルも大きく下がる。このため、エネルギー利用・転換への適用の展望が明確化され、社会・経済的效果もより一層大きなものになる。以下に、化学品合成への利用およびエネルギー利用・転換によるインパクトについて示す。

(1) 化学品合成への利用によるインパクト

ここでは、本プロポーザルの化学反応により、どのようなことが実現・期待されるかについて、具体的な化学反応例をあげる。また、本プロポーザルの化学反応の特徴を、どのように反応プロセスの設備簡素化や高効率化につなげていくかのイメージを示す。

図2に、本プロポーザルの革新的化学反応により可能となる化学品合成の事例を示す。これは、固体イオニクス材料としてプロトン伝導体を用いた場合の事例であり、化学品の中間原料に用いられるアルコール、アルデヒド、有機酸などの誘導体生成例をまとめたものである⁴⁾。

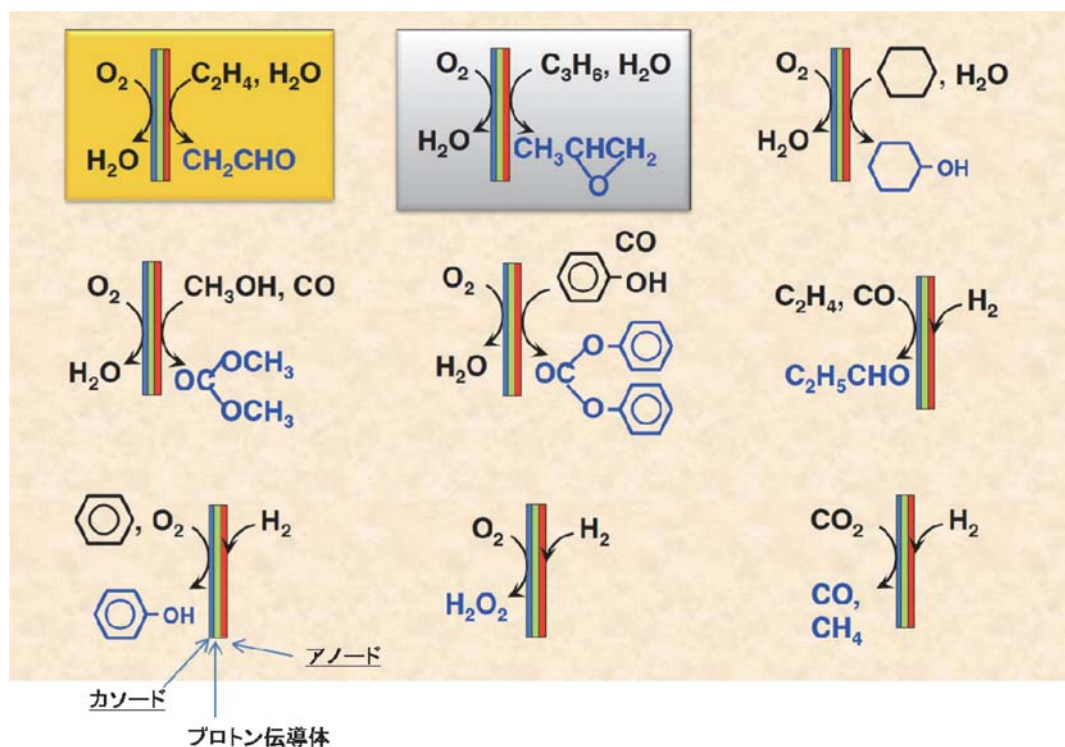


図2 革新的化学反応による生成物事例（プロトン伝導体）⁴⁾

このような部分酸化反応による化学反応の場合、中低温域で反応させることで完全酸化への反応を抑止できることから、高い反応選択性が期待できる。今後の研究開発により、これらにとどまらず、さまざまな化学品を選択的に生産することが期待できる。例えば、これまで高温条件が必須であるが故に触媒機能を利用することができなかった化学反応に対して、本プロポーザルの革新的化学反応を適用すれば、中低温域で触媒作用を最大限に活用した化学反応が実現でき、これまで考えたことのない新しい化学反応が可能になることが期待できる。

化学産業における反応プロセスは、長い歴史とともに触媒やプロセスの改良を積み重ねた円熟した技術となっている。このため、これらの技術を置き換えるためには、格段のエネルギー効率の向上、あるいは設備の簡素化を実現できる技術が必要となる。以下、反応プロセスとして、エネルギー効率や設備の簡素化に対してどのような可能性が考えられるかを示す。

まず、化学原料として世界的に生産量の多いアンモニア（2012年世界生産量：1.36億トン⁸⁾）に着目する。現在のアンモニア製造はハーバー・ボッシュ法で行われており、この反応を行うためには25MPa以上の高圧条件が必要となる。このため、アンモニア製造の設備費の9割超が圧縮機と圧力容器の加圧系によるものといわれている⁴⁾。

【ハーバー・ボッシュ法】



仮にこの高圧の反応条件を低圧化できると、加圧系プロセスの設備簡素化や動力源のエネルギー消費削減、その結果として設備費や電気代の大幅なコスト削減が期待できる。さらに、アンモニア合成に係る全体のエネルギー消費やコストを考えると、原料の水素を製造する部分が大きな割合を占めている。このため、原料として窒素と水を用いて電気化学的に直接アンモニアを製造することを目的とした研究開発が行われており、イオン伝導体として熔融塩化合物などを用いた検討が行われている^{4) 9)}。

【窒素と水からのアンモニア合成】



上記反応は、熱を用いた従来の触媒反応では常圧条件で反応が進まないため、電気によるアシストが必須の反応である。このため、本プロポーザルの固体イオニクス材料を用いた革新的化学反応の適用を検討する候補の一つとなると考えられる。

化学製品の製造方法の多くは、複数の化学反応を組み合わせたプロセスとなっているが、各反応プロセス間で反応温度条件の違い等の理由で利用できない熱が発生し、現状は多くの熱が捨てられている。例えば、メタンを水蒸気改質して合成ガスを製造し、その合成ガスからメタノールを製造するような二段階の反応プロセスを考えると、前段の反応は吸熱反応であり、後段の反応は発熱反応である。この二つの反応を連続したプロセスとして、前後の反応の熱の授受をうまく行うことができれば、エネルギー消費を削減することが可能となる。しかしながら、実際には最初の反応はメタンの炭素水素結合が強く、高温条件での反応となるため、後段の相対的に低温の熱を前段の反応に利用することは難しい。仮に、これらの反応の温度条件をそろえることができれば、前後のプロセス間で熱の授受が容易になることが考えられる。図3は、上記に示した反応プロセスの革新をイメージとし

て示したものである。図3左上は従来プロセスであり、前段の反応温度が後段の反応温度よりも高いため、後段の反応エネルギーをうまく利用できない。一方、図3右上が本プロポーザルで提案する革新的化学反応を用いた新しいプロセスをイメージしたものである。この場合、後段の反応エネルギーを、電気を介して前段の反応エネルギーの一部として利用する。さらに、前段の反応温度を工場における排熱温度域まで低下させることができれば、排熱を吸熱反応で利用することが可能となり、プラント全体でのエネルギー消費削減が期待できる。さらに一步進めて、図3左下のように従来複数段で行っていた反応を一段化できれば、エネルギー消費削減に加え、設備の大幅簡素化も可能となり、メリットはさらに大きくなる。

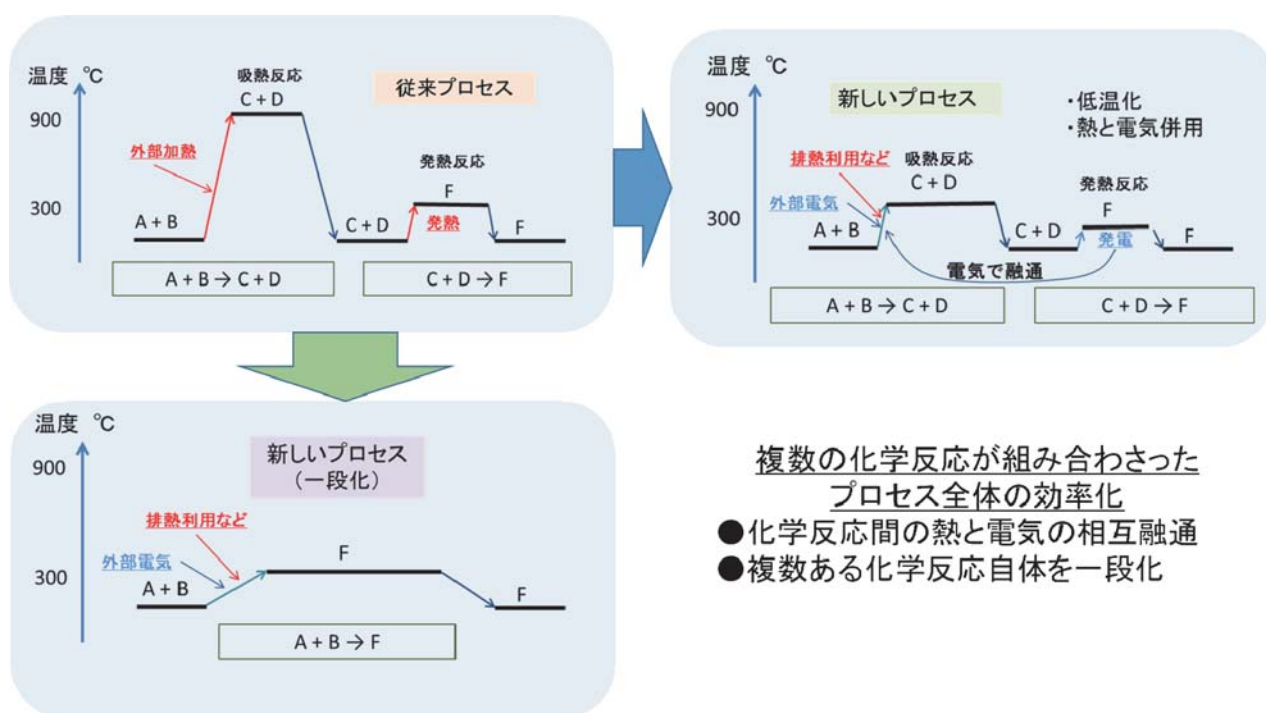


図3 従来プロセスと革新的化学反応を用いた新しいプロセス（イメージ）

このように、化学反応において中低温熱と電気を利用し、エネルギーの授受を効率的に行うことでプロセス全体としてのエネルギー効率を高めることや、革新的化学反応そのものを利用してプロセスの簡略化と高効率化が期待できる。

また、触媒反応として格段に高い反応選択性が実現できれば、分離・精製プロセスなどの工程を省略できる可能性がある。図4左側は従来の反応プロセスであり、高温で反応選択性が低いため、後段で副次生成物の分離・精製のための蒸留操作等が必要になる。一方、図4右側は本プロポーザルの革新的化学反応を適用したプロセスである。高い選択性が期待できる中低温域で反応させて100%に近い生成物を得ることができれば、従来必要だった分離・精製の工程を省略でき、設備の大幅な簡素化による設備費削減、用益削減による省エネ効果・費用削減など、大きな効果が見込まれる^{4) 10)}。

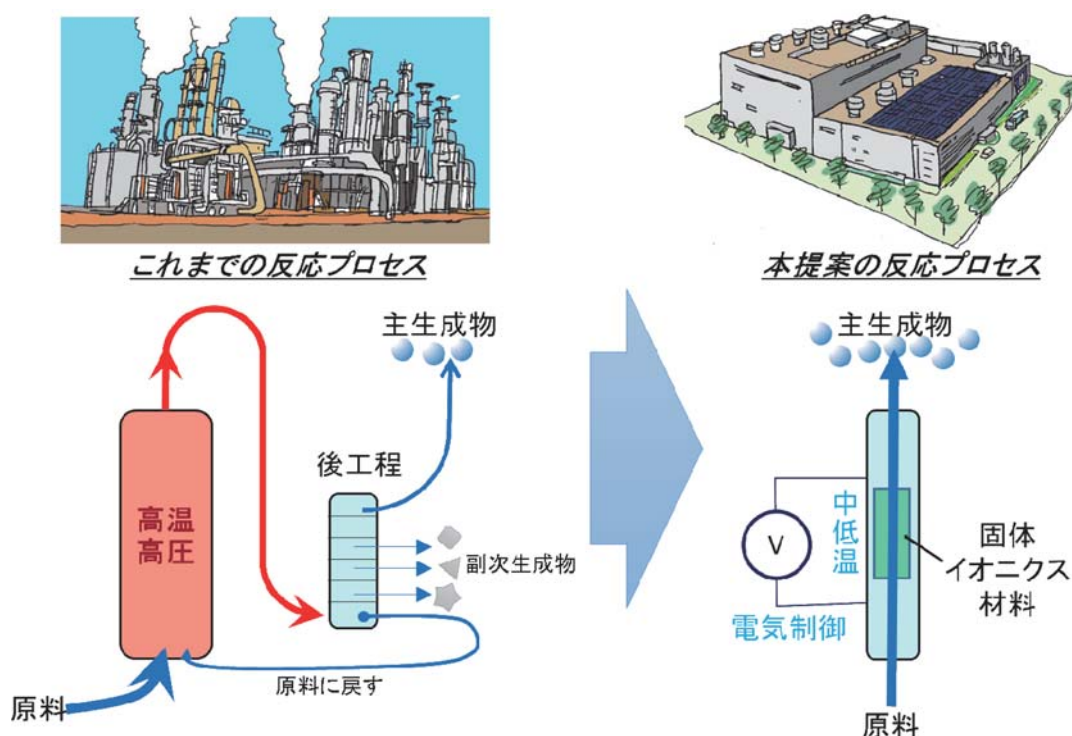


図4 高い反応選択性による反応プロセスの簡略化（イメージ）

以上のように、革新的化学反応の特徴である触媒の高機能化および熱と電気の併用により、これまでにないエネルギー効率の高い革新的な化学プラントの実現が期待できる。

我が国における化学産業（プラスチック・ゴム製品を含めた広義の化学工業）の位置づけを見ると、出荷額は40兆円で、輸送用機械器具（自動車等）に次いで製造業中第2位であり、世界の化学産業でも中国、アメリカに次いで第3位の位置にある。また、従業員数では86万人で製造業中第3位である¹¹⁾。また、製造業中の化学産業の最終エネルギー消費は2012年度で2131PJ（原油換算5500万kL）であり、このうち原料分である非エネルギー利用分は1447PJ、エネルギー利用分は684PJ（原油換算1760万kL）である¹²⁾。国内一次エネルギー総供給量は21710PJであることから、化学産業のエネルギー利用分だけを取り上げても3.2%と大きな割合を占める。このように、我が国の化学産業は世界的にも規模が大きく、また日本における製造業としても重要なポジションを占めるエネルギー多消費型の産業と言える。本プロポーザルの革新的化学反応が化学合成品の製造に適用され、仮に化学産業のエネルギー消費が5%削減できたとすると、原油換算88万kLの削減となり、相当規模の削減効果が期待できることになる。

（2）エネルギー利用・転換によるインパクト

エネルギー利用・転換に向けた適用としては、排熱回収が考えられる。産業界においては、未利用熱、すなわち利用されず捨てられている排熱が存在し、その熱量は国内一次エネルギー総供給量の5%程度（約1EJ（EJ=10¹⁸J））とも言われており、削減・回収・利用のための研究開発も行われている（コラム7）。

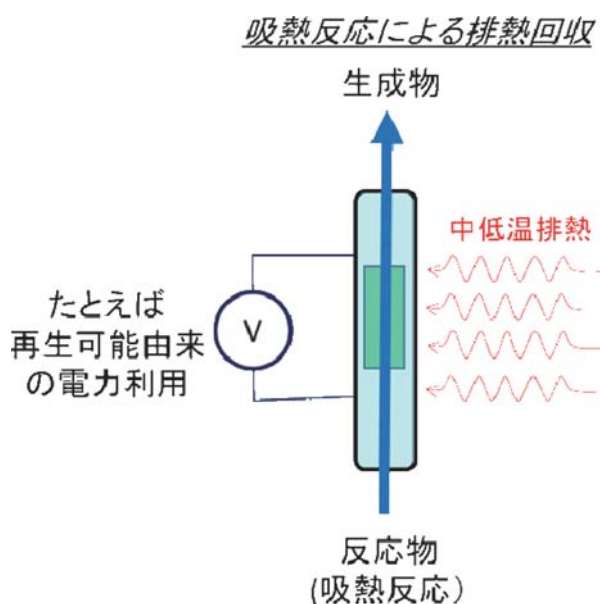


図5 吸熱反応を用いた排熱回収利用（イメージ）

本プロポーザルの革新的化学反応により、吸熱反応を用いて排熱を回収し化学エネルギーとして物質に取り込み、再利用することが考えられる（図5）。この方法は、物質変換によりエネルギーをいったん物質内に蓄えるため、物質として貯蔵・輸送が可能となる点で優位性を持つ。技術課題としては、排熱の多くが 150°C 以下の温度と低く、環境との温度差の小さい排熱をどのように効率的に熱交換するかといった排熱利用全般に共通する工学的課題に加え、この温度領域で自発的に進む吸熱反応がごく一部に限定される（例えばメタノールの水蒸気改質）といった課題がある。この課題に対しても、電気によるアシストで吸熱反応を排熱回収ができる温度条件まで下げることが可能となる。なお、この時に利用する電気としては、将来的には再生可能エネルギー由来の余剰電力が大きな候補となることが考えられる。これは、現在戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）で実施されているエネルギーキャリアの研究開発の中の検討課題¹³⁾とも関係していることから、このプロジェクトの進捗を注視しながらの取り組みになる。さらに、再生可能エネルギー由来の余剰電力と排熱を利用したエネルギー利用・転換のみならず、将来的には排出される CO_2 を用いてメタンや液体燃料を製造することも可能となることから、エネルギー利用・転換においてさらなる拡大展開が期待できる。

以上のとおり、資源の乏しい我が国の産業界が競争力を維持・向上するためには、イノベーションに資する技術力、そのためには世界に先駆けた新しい研究開発を行う必要がある。本プロポーザルは、現時点で日本の強みと考えられる触媒技術の優位性¹⁴⁾、およびこれまで進展してきた燃料電池分野の技術を生かすことのできる研究開発であることから、我が国として積極的に推進していくことの位置づけは高い。

コラム6 化学品原料 –オレフィン、BTX–

石油化学製品は、炭素数 2 ～ 4 程度の低級オレフィン類（エチレン、プロピレン、ブタジエンなど）および BTX と呼ばれるベンゼン、トルエン、キシレンを出発原料とし、その後のさまざまな合成反応により生産される。これらの出発原料であるオレフィン、BTX は、石油におけるガソリン相当の蒸発留分であるナフサを主たる原料として製造される。

エチレンなどのオレフィン類は、ナフサをスチームクラッカーと呼ばれる装置に掛け、高温（900℃程度）で熱分解により製造される。無触媒のため、生産されるエチレンとプロピレンの比率はほぼ固定される。また BTX は、このスチームクラッカーで製造する方法以外にも、重質ナフサと呼ばれる炭素数が 6 以上を中心としたナフサを用いて、リフォーマー（接触改質装置）と呼ばれる装置で脱水素反応（貴金属系触媒）させることで製造される。

なおエチレンについては、米国でのシェールガス由来のエタンや、中東での天然ガス随伴ガスからのエタンの熱分解、中国での石炭合成ガス由来のメタノールの MTO（Methanol To Olefin）反応等から製造されている。

日本では、化学品の原料となるエチレンなどは、石油からのナフサを主原料とした輸入に依存しており、米国のシェールガス由来や中国の石炭化学でのエチレンなどと比較するとコスト競争力では大きく劣り、大きな課題となっている。

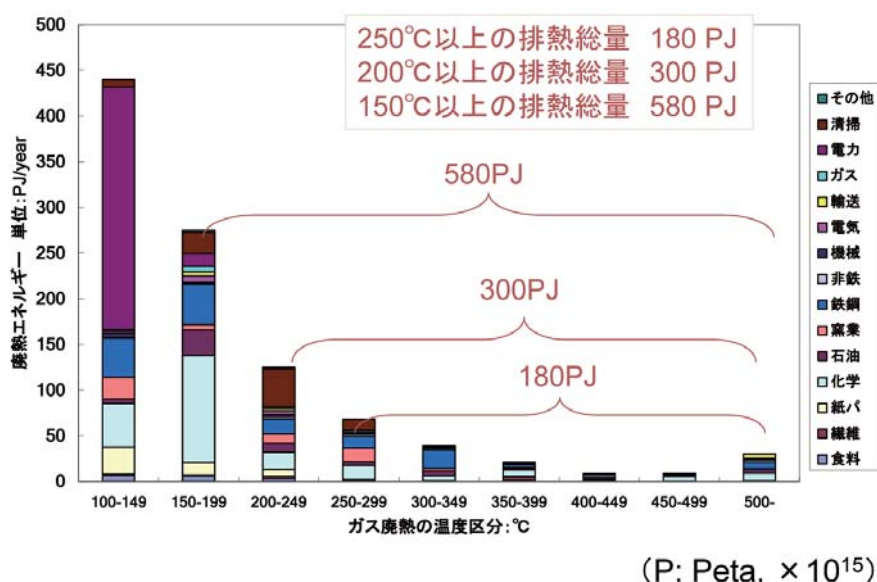
ちなみに、2013 年度日本での化学原料であるエチレンの生産量は 626 万トン、芳香族系（BTX）の生産量は 1183 万トンであり¹⁾、ガソリン販売量の 5596 万 kL（ガソリン密度を 0.733kg/L とする 4102 万トン）と比較しても、相当な規模の量である。

【コラム 6 参考文献】

- 1) 経済産業省. 2014. 石油化学産業の市場構造に関する調査報告
<http://www.meti.go.jp/press/2014/11/20141107001/20141107001a.pdf>

コラム7 産業界における排熱とその利用

我が国の産業界における排熱は、我が国の国内一次エネルギー総供給量の5%程度(1EJ(= 10^{18} J)/年程度)と言われている。平成25年10月17日に、「未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合(略称: TherMAT)」が設立され、経済産業省の事業が開始している。これは、膨大な量の未利用熱エネルギーを削減・回収・利用するための要素技術(断熱、遮熱、蓄熱、ヒートポンプ、熱電変換、排熱発電、熱マネジメント等)を革新し、システムとして確立することを目的としている。なお、プロジェクトの中に吸熱反応を用いた熱回収技術は含まれていない。



図C7-1 わが国における産業界での排熱総量¹⁾

【コラム7 参考文献】

- 1) 経済産業省. 2010. 未利用熱エネルギー導入基盤整備調査

2-3. 科学技術上の効果

触媒化学、電気化学、固体イオニクスの研究領域は、イオンと電子による電荷移動現象という共通の課題を捉える研究領域である。しかしながら、物質生産、電池反応、材料開発といったそれぞれの主な研究目的が異なっていたこともあり、別々の研究領域として独立して発展してきた。近年の燃料電池分野の研究開発の進展により、電気化学と固体イオニクスの両分野については研究領域の融合が始まっているが、触媒化学との関係は未だ希薄と言える。本プロポーザルは、電気化学と固体イオニクスのみならず、触媒化学も巻き込んだ領域、さらにはその基盤技術を支える分析科学、計算科学、加えて応用のための機械工学、化学工学などの広範な研究領域の協同が求められる分野であり、領域間の融合による複合領域への拡大が期待できる。

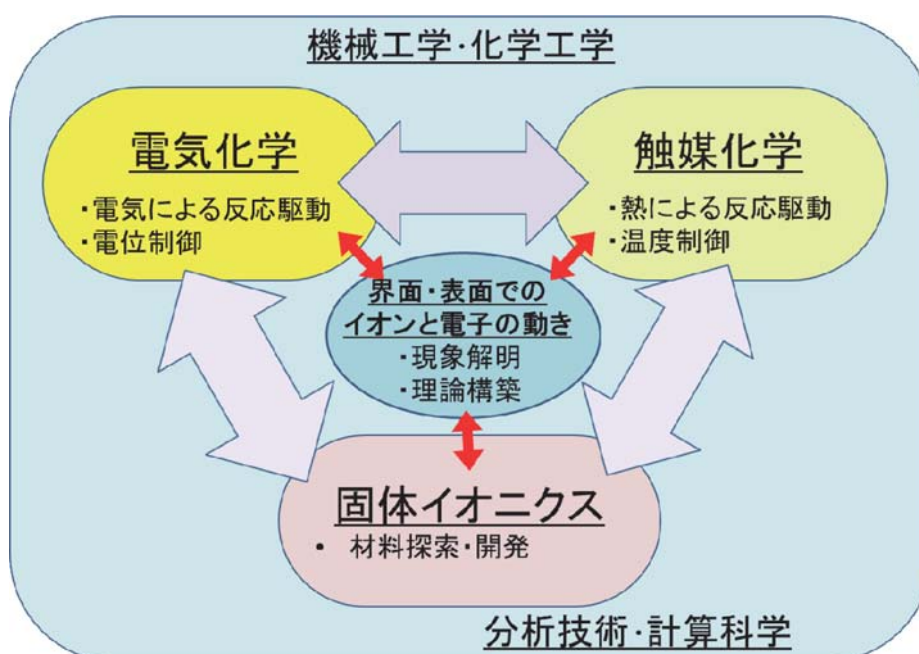


図6 本プロポーザルに関連する学術分野

固体イオニクス分野の研究として、界面、表面におけるナノレベルでのイオンと電子の動きを捉えるナノイオニクスと呼ばれる研究も進められてきており、そのナノレベルでの特異な現象を詳細に解析することも実施されている。このような基礎研究が触媒化学のような応用面の広がりのある研究と結びつくことで、学術的にも実用的にも拡大展開が期待できる。特に、コラム4で示したNEMCAと呼ばれる非ファラデー電気化学的触媒活性化効果の機構解明はこれからの段階であり、分析技術および計算科学の協力によりその機構解明が進むことで、化学反応における触媒作用の新しい創生につながることも期待できる。このような表面・界面での化学反応現象における機構の解明には、反応が起きている場（*in-situ*）における反応の実動作（*operando*）を分析できる技術やそれを理論的に支援する計算科学が重要な役割を果たす。我が国には、SPRING-8やSACLAなど表面における放射光分析として大きなポテンシャルを持つ設備があるが、これらを学術的、実用的な

面からさらに進展させるとともに、計算科学と融合させ、組織的かつ有効に活用する上でも本プロポーザルで提案する研究分野は重要である。また、分析技術は日進月歩の分野であり、国際的に競合しつつも協調関係も必要となる。この点でも、本プロポーザルは重要と言える。

また長期的な観点からは、本プロポーザルの研究開発を契機として、界面・表面上のイオンと電子の流れを自在に制御できる材料や方法が将来的に確立できれば、電子の流れを制御することで大きなイノベーションをもたらした半導体分野のように、新規のデバイス材料としての工学的利用面で社会に大きな変革と貢献をもたらすほか、学術分野での新たな知の創出と大きな進展も期待できる。

3. 具体的な研究開発課題

本プロポーザルを実現するための研究開発課題として、(1)新たな化学反応の構築・反応器設計に資する研究開発が挙げられる。さらに、その研究開発を分析と理論により支援するための基礎研究として、(2)表面・界面における化学反応過程のイオンと電子の移動に係る現象解明と理論構築が必要である。また、本プロポーザルの化学反応を具体的なプロセスに実装するための応用研究として、(3)化学反応プロセスの適用に向けた研究開発、例えば有効な化学反応プロセスの探索やその評価方法、さらにはその化学反応プロセスへの具体的な設計・適用に必要な研究開発などがある。図7に、研究開発課題をあげるとともに具体例を以下に示す。

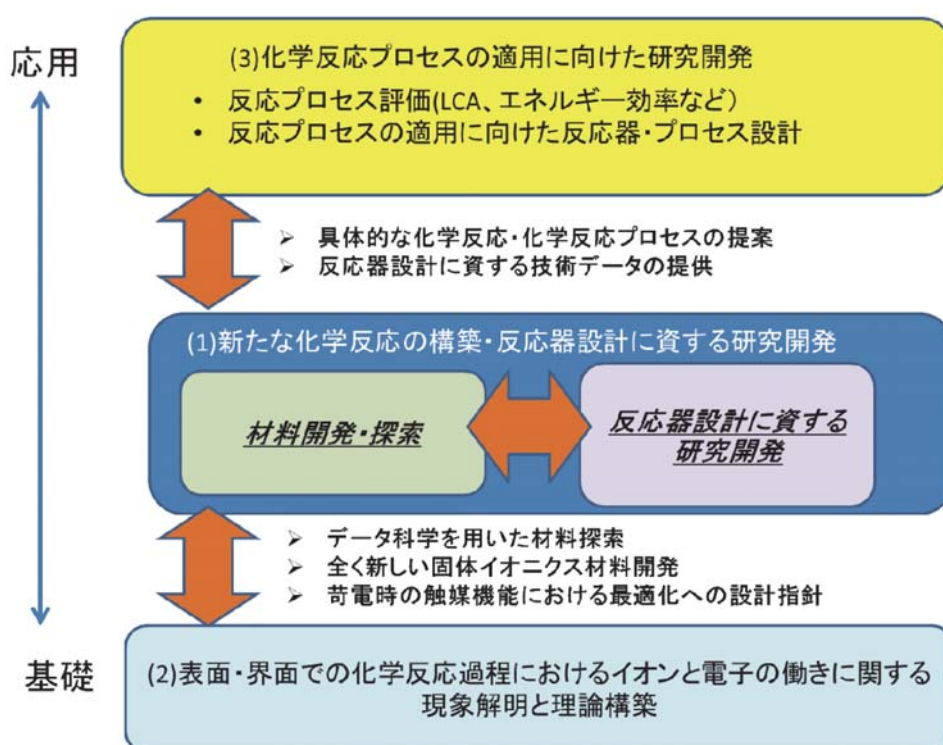


図7 本プロポーザルにおける研究開発課題

(1) 新たな化学反応の構築・反応器設計に資する研究開発

本プロポーザルに取り上げる化学反応方法を実現するためには、電極触媒、中低温域での作動を可能とする固体イオニクス材料の探索、開発のような要素的な研究開発が必要である。さらには、その新しい材料の特性を調べ、具体的な反応器を設計・開発するためのシステム的な研究開発が必要となる。

●固体イオニクスを用いた電気化学的反応における触媒作用に関する基盤研究

電気化学的反応における触媒作用については、反応系に応じて適切な電極触媒を探索する必要がある。熱のみを用いた化学反応では、反応駆動、すなわち反応を進めるために高温条件が必須の化学反応も多く存在するが、これらは触媒機能を有効に利用する観点からの研究対象から外れていた。本プロポーザルで示した化学反応では、反応駆動に

電気アシストが可能になることから、これまで研究対象外であった反応系に対しても触媒作用に最適な中低温域での化学反応が可能になる。このため、これまで考えがおよばなかった全く新しい化学反応が生み出される可能性がある。さらに、触媒作用においても外部電位という新しい制御因子が追加されることから、触媒の高機能化をさらに拡大できる可能性がある。反応系に関しては、現行プロセスに用いられている反応のみならず、原点に戻ってさまざまな反応への適用の可能性を検討する必要がある。また、合わせてこれらの電極触媒における外部電位による化学反応への影響を調べることも必要となる。なお、このような研究を効率的に進めるためには、基礎的な支援として化学反応時の触媒表面における素反応機構の解明など、理論構築のための研究も重要であり、後述する分析技術や計算科学の基礎的な支援が非常に重要となる。

●中低温域での作動を可能とする固体イオニクス材料の研究開発

現在実用化された固体イオニクス材料の作動温度は、プロトン伝導体が 100℃以下、酸素イオン伝導体が 600℃以上である。このため、プロトン伝導体については高温作動化、酸素イオン伝導体については低温作動化の研究開発が必要である。現在、ナトリウムチタネート系などの新しい材料が見つかったが、見出された材料の実用化に向けた改良に加え、さらなる材料探索も重要である。また、酸化物構造の結晶格子に引張応力を与えた格子ひずみ効果により、酸素イオン伝導度が上昇することも見出されており、この効果を利用して実用するための研究開発も必要となる。さらには、プロトン、酸素イオンのみにこだわらず、全く新しいイオン伝導体を研究開発することも今後重要と考えられる。例えば、 NH_4^+ や H^- などのイオンを移動させるための無機/有機ハイブリッド型や MOF（金属有機構造体）などのユニークな構造体を設計・開発することも新たな観点からの研究開発として重要になる^{4) 15)}。なお、この材料開発においても分析技術や計算科学の基礎的な支援が肝要となる。

（2）表面・界面における化学反応過程のイオンと電子の移動に係る現象解明と理論構築

前述のとおり、電極触媒や固体イオニクス材料の研究開発においては、表面・界面での化学反応における機構の解明が重要となる。この解明のためには、反応が実際に生じている場（*in-situ*）における反応の実動作（*operando*）を対象とした分析技術や、それを理論的に支援する計算科学が重要な役割を果たす。このため、国内で分析、計算科学の分野を含めたチームを組織することが必要となる。また、日進月歩の分野でもあるので、国際的なコミュニティ、ネットワークも合わせて必要である。このような分析技術や計算科学による基礎研究により理論構築ができれば、例えばデータ科学を活用したスクリーニング方法などの全く新しい探索方法が可能になることも考えられる。このような方法ができれば、新規固体イオニクス材料や新規電極触媒の探索や開発を行う上で、従来の試行錯誤的な方法と比較して格段のスピードで研究開発が進展できることになる。

また、コラム 4 に示した非ファラデー電気化学的触媒活性（NEMCA/EPOC）のような新たな触媒作用現象を分析と理論で解明することで、全く新しい触媒機構の発見につながる可能性も考えられる。これにより、触媒化学分野への大きな波及効果もありうる。その意味でも機構解明のための研究は重要であり、それには分析技術、計算科学の基礎的支援が鍵となる。

(3) 反応プロセスの適用に向けた研究開発

本プロポーザルで提案する革新的化学反応を推進するに当たっては、研究開発の初期段階よりプラントにおける全体のプロセス、あるいはライフサイクルアセスメント（LCA）のように原料から製品利用までを含めたエネルギー効率や CO₂ 排出などに関する評価研究が必要となる。すなわち、本プロポーザルで取り上げる革新的化学反応の出口として、プラント全体あるいは物質生産のライフサイクルでの効果について評価することも重要な研究開発課題である。このためには、本プロポーザルの革新的化学反応の特徴を理解することと、さらには現状の反応プロセスを十分理解して進めることも必要となる。また、この革新的化学反応を複数の化学反応が組み合わさった反応プロセスに適用し、仕事と熱の相互融通を最大限に発揮させプロセス革新につなげるためには、エネルギー効率の点のみならずエクセルギーの観点から全体プロセスを見据えた効率評価も重要となる。

さらに、研究室スケールで得られた要素技術をベースとして、パイロットスケールから商業スケールまで社会実装できる技術に仕上げていく必要があり、この段階では機械工学、化学工学、プラント工学などが重要な役割を果たす。

4. 研究開発の推進方法および時間軸

本プロポーザルに示す研究開発によって化学反応プロセスにイノベーションをもたらす可能性があるにもかかわらず、本研究開発領域は空白状況であることを鑑みると、早急に公的資金による研究開発を開始すべきである。特に、我が国の燃料電池や触媒化学分野の層の厚い人材をさらに拡大発展させ、国際競争力の源泉を維持活用する意味でも重要となる。また、本プロポーザルの革新的化学反応を社会実装にまでつなげるためには、要素技術を含む化学反応に関連する技術開発の進展はもとより、社会実装時に想定される反応プロセス設計の具体化など、複数の課題を時間軸も含めてあらかじめ考慮した推進方法を考えることが必要になる。

現状において電気は高価なエネルギー源であることから、まずは信頼性などの精緻な技術の確立も考慮し、燃料よりも付加価値のある化学品などの物質転換への適用を進め、化学産業への適用を狙うことが効果的である。ただし、化学産業では成熟した既存の化学反応プロセスがあるため、新規なプロセスを導入することは容易ではない。その一方で、本プロポーザルで提案する革新的化学反応を実反応プロセスに適用した場合の具体的な優位性評価は行われたことがない。このことから、化学工業における反応プロセスを再評価し、本提案が適すると考えられる具体的な化学反応や反応プロセスを探索・選択することも必要であり、そのためのプロセス評価の研究が研究開発の初期段階から必要かつ重要となる。また、社会実装を考える上で反応プロセスにおける産業界のニーズをいち早くとらえることも重要であり、大学の機械工学、化学工学、プロセス工学の専門家のみならず、産業界の技術者とともに評価検討を行うことが必要である。図8に、研究開発課題毎の時間軸と社会の期待・動向との関係を示す。

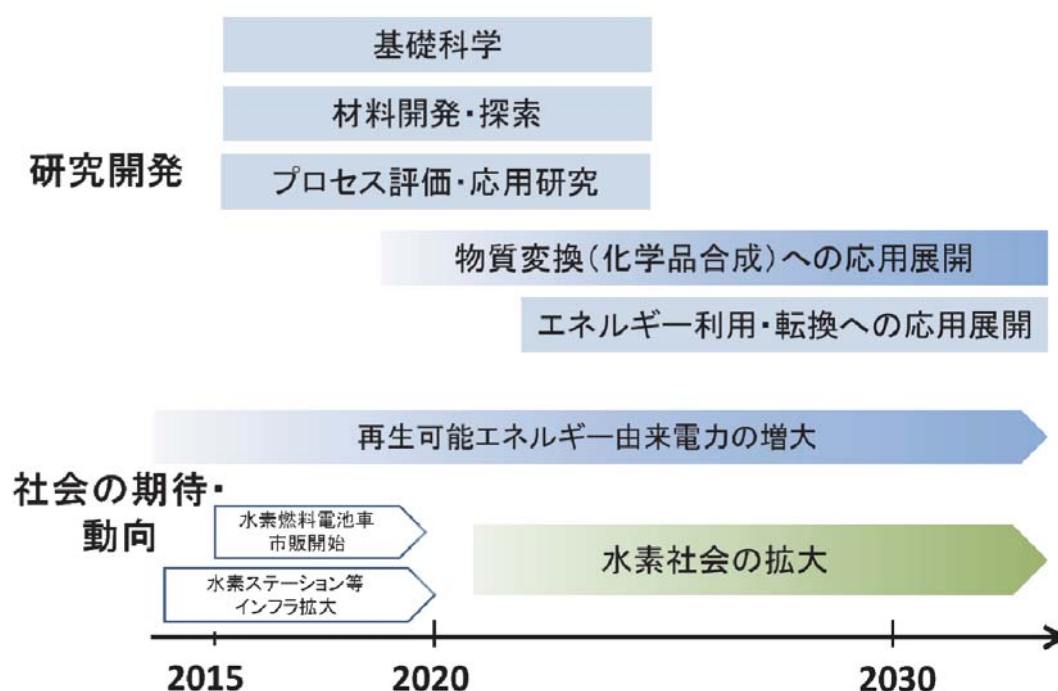


図8 研究開発の時間軸および社会の期待・動向との関係

社会実装に向けた応用分野の研究開発について、固体イオニクス材料や触媒電極などの基本となる材料探索に目途が見えてきた段階（3～5年後）で、反応プロセスに適用するための具体的な反応器の設計等を進めることが重要である。さらに、応用研究で出てきた新たな課題を要素技術にフィードバックしながら実施することも重要となる。また、図8に示したようにエネルギー利用・転換への応用展開については、再生可能エネルギー由来の電力の増大や水素社会の拡大と関係することから、現在戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）で実施されているエネルギーキャリアの研究開発の進捗を注視しながら進めることも重要である。また、実装に向けたパイロットスケールでの研究開発においては、国の実用化に向けた方策が重要となる。

基礎科学において重要な役割を果たす放射光分析技術や、それを理論的に支える計算科学については、チーム体制を組織することも重要となる。分析技術と計算技術の分野については他のプロジェクトでも共通課題と考えられ、共用的かつ柔軟な組織作りが重要になる。

また、本プロポーザルの研究開発、特に中核である反応器の設計に資するための要素技術を進展させるためには、触媒化学、電気化学、固体イオニクスなどの複数領域の研究者の参画が必要になる。しかしながら、本研究開発は従来の触媒化学反応とは異なるため、触媒化学分野の研究者が初期段階から多数参加することは期待しにくいと考えられる。このため、研究開発の当初は、CRDSにおけるワークショップ⁴⁾に関連する大学関係者や、固体イオニクスや電気化学など燃料電池分野に係る研究者などが中心になることが考えられる。しかしながら、研究開発の発展のためには、触媒機能の知識や工業的知見を多く持つ触媒化学分野の研究者の参画が非常に重要となる。触媒化学分野の研究者に関心を持ってもらい、積極的に参加してもらうためには、触媒学会などの学協会活動を通じた広報活動や、学協会内での研究会の組織化を通じた情報交換の場の設定など、学協会の協力が重要になる。

付録 1. 検討の経緯

①検討の経緯

- ・JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、平成 26 年 5 月に中低温域の革新的化学反応に関する検討チームを発足させ、国内外の最新の研究開発動向や技術の水準を明確化するための文献等調査や、大学や企業に所属する研究者へのヒアリングを通じて、シーズ（技術動向等）やニーズについて調査を行った。

その上で、固体イオニクスによる電気化学を触媒化学と融合させた化学反応に関する技術的仮説および応用展開について議論することを目的に、科学技術未来戦略ワークショップを開催した。ワークショップの結果は報告書として、平成 27 年 1 月に CRDS より発行している（CRDS-FY2014-WR-11）。

以上の調査・分析・検討の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえて、平成 27 年 3 月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

②ワークショップ

平成 26 年 10 月 10 日に科学技術未来戦略ワークショップ「中低温域作動の革新的反応と材料」を開催し、本プロポーザルの基となる化学品合成やエネルギー変換・利用における化学反応について、電気化学、触媒化学、固体イオニクスを融合させた新しい化学反応方法を導入していくことの意義や役割の共通認識を行った。また、専門家との議論を通じて、化学反応に係る研究領域の現状や、国として研究投資を重点的に行うべき課題を広く俯瞰するとともに、研究を支援する際の方策について検討した。以下にワークショップの要点をまとめる。詳細はワークショップ報告書 CRDS-FY2014-WR-11 を参照されたい。

本ワークショップでは、触媒化学、電気化学、固体イオニクス研究分野において、複数の分野に精通した専門家の方々より、触媒反応と電気化学反応を融合させた新しい化学反応方法の可能性、さらにはその方法を確立するために推進すべき基盤技術に関する話題提供をいただき、技術的ポテンシャルや課題を明らかにすることを試みた。さらには、化学品合成やエネルギー変換・利用などさまざまな化学反応に利用できると考えられるこれらの化学反応方法について、産業界専門家の方々よりニーズや期待、具体的な化学反応プロセスに関する話題やコメントをいただき、応用開発の方向性を議論した。また、このような研究テーマを推進する際の、研究領域の融合・拡大の必要性、国として主導すべき研究推進体制についても議論した。

以上の結果、本ワークショップでは以下の共通認識が確認された。

○触媒反応の高機能化などの新たな化学反応方法の可能性について

- ・固体イオニクスによる電気化学的反応の適用で、化学反応時のエンタルピー変化を電気（仕事）と熱とに分けて相互的に利用できる化学反応が可能となる。
- ・触媒化学と電気化学を融合させた化学反応により、外部からの電位操作で触媒反応を制御し、これまでにない反応を選択的に起こすことが期待できる。
- ・触媒反応を活用する上で中低温域での電気化学的反応は重要であり、例えば酸化反応

の場合、部分酸化で反応抑止が可能となるなど、さまざまな化合物の合成への適用が期待できる。

- ・表面で起こる触媒作用に関して、分析技術、計算科学等を含めた基礎研究を推進することで現象を解明し、反応設計を行うことで、常識を打ち破る電気化学反応が可能になることが期待できる。

○中低温域作動の固体イオニクス材料について

- ・現状、作動温度が 100℃以下のプロトン伝導体は 300℃程度までの高温化の可能性があるが、これ以上の温度域拡大については学理的に新たな理論や材料によるアプローチが必要。
- ・現状、作動温度 600℃以上の酸素イオン伝導体では異常電子化状態の安定化の考え方により 400℃程度あるいはそれ以下の低温化の可能性を秘めている。
- ・温度域拡大の別な方法として材料の薄膜化技術開発による対応も考えられる。

○新規化学反応への期待やニーズなどについて

- ・究極の目的として、CO₂を原料とし、余剰の再生可能な電気に排熱を取り込みながらメタンなどの燃料を製造することを狙う必要がある。
- ・現時点では貴重な電気を利用することから、最初から規模の大きいエネルギー利用を狙うのではなく、燃料よりも付加価値がありかつ量も期待できる化学原料（オレフィン、芳香族）を狙うべきである。まずは、技術の確立を目指すことが必要である。
- ・化学品合成では、一連の反応が発熱反応と吸熱反応との組み合わせが多く、これら反応を同じ温度域につなげる、あるいは同時に反応させることができればメリットは大きい。また、高圧反応の圧力緩和ができれば、設備簡素化による費用削減メリットは大きい。
- ・新しい化学反応方法の工業的な価値としては、個々の反応ではなく、プロセス全体での LCA 的な視点からメリットを考える必要がある。例えば、化学原料製造では安定な低級アルカンを活性化するために従来は高温が必要だったものを、電気によるアシストで低温化できれば複数の反応をつなげやすくなり、プロセス全体の効率向上の可能性はある。

○分野融合による研究コミュニティの拡大や分析

- ・触媒化学、電気化学、固体イオニクスには、イオンと電子の電荷移動現象という共通研究領域があり、本テーマが推進されることで研究領域の拡大、融合、そして新たな学際領域の形成が期待できる。
- ・表面・界面の分析技術（最先端の分光技術など）が非常に重要な役割を果たすため、国内で分析、計算科学の分野を含めたチームをまず組織することが必要である。また、分析技術は日進月歩で進展が続いており、国際的には戦略的な研究協力、連携も必要である。

以上から、本戦略プロポーザルにおける内容が我が国として推進すべき研究開発課題の一つとして適切であることを確認した。

以下に、ワークショップのプログラム、参加者リストを示す。

ワークショップのプログラム

●開催日時：平成 26 年 10 月 10 日（金） 12：30 ～ 17：30

●開催場所：JST 東京本部別館 2F セミナー室

●プログラム（敬称略）

総合司会 鈴木 至（CRDS フェロー）

12:30 ～ 13:00

開会挨拶 佐藤 勝昭（CRDS フェロー）

開催趣旨説明、WS 課題設定 尾山 宏次（CRDS フェロー）

セッション 1

※発表各 20 分、質疑応答各 10 分

13:00 ～ 15:00【話題提供】

司会：佐藤 勝昭（CRDS フェロー）

- ・菊地 隆司（東京大学大学院工学系研究科 化学システム工学専攻 准教授）
- ・山中 一郎（東京工業大学大学院理工学研究科 物質科学専攻 教授）
- ・石原 達己（九州大学大学院工学研究院 応用化学部門 主幹教授）
- ・山口 周（東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 教授）

セッション 2

※発表各 10 分以内

15:20 ～ 16:30【コメンテータから話題提供・コメント】

司会：関根 泰（早稲田大学理工学術院 先進理工学部応用化学科 教授／ CRDS フェロー）

・コメンテータ

瀬戸山 亨（三菱化学（株）執行役員）

矢加部 久孝（東京ガス（株）基盤技術部エネルギーシステム研究所 所長）

吉田 利彦（トヨタ自動車（株）FC 開発部 主査）

土肥 英幸（JX 日鉱日石エネルギー（株）中央技術研究所 システム研究所長）

鷺見 郁宏（JFE スチール（株）スチール研究所環境プロセス研究部 部長）

鹿園 直毅（東京大学生産技術研究所 教授／ CRDS 特任フェロー）

16:30 ～ 17:25【総合討議】

モデレータ：関根 泰

17:25 ～ 17:30【まとめ・閉会挨拶】

ワークショップ参加者リスト（敬称略、所属・役職は実施時点）

氏名	所属	役職
講演者・コメンテータ（五十音順）		
石原 達己	九州大学大学院工学研究院 応用化学部門	教授
菊地 隆司	東京大学大学院工学系研究科 化学システム工学専攻	准教授
鷲見 郁宏	JFE スチール株式会社 スチール研究所環境プロセス研究部	部長
瀬戸山 亨	三菱化学株式会社	執行役員
土肥 英幸	JX 日鉱日石エネルギー株式会社 中央技術研究所システム研究所	所長
矢加部 久孝	東京ガス株式会社 基盤技術部エネルギーシステム研究所	所長
山口 周	東京大学大学院 工学系研究科マテリアル工学専攻	教授
山中 一郎	東京工業大学大学院 理工学研究科物質科学専攻	教授
吉田 利彦	トヨタ自動車株式会社 FC 開発部	主査
研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット関係者		
尾山 宏次	環境・エネルギーユニット	フェロー
佐藤 勝昭	ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
鹿園 直毅	環境・エネルギーユニット／東京大学 生産技術研究所	特任フェロー／教授
鈴木 至	環境・エネルギーユニット	フェロー
関根 泰	環境・エネルギーユニット／早稲田大学 理工学術院	フェロー／教授
山田 直史	環境・エネルギーユニット	フェロー
斎藤 広明	環境・エネルギーユニット	フェロー
福田 哲也	環境・エネルギーユニット	フェロー
松本 麻奈美	環境・エネルギーユニット	フェロー
府省関係者		
梶田 信	内閣府 グリーンイノベーショングループ	科学技術政策フェロー
原田 千夏子	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	
科学技術振興機構関係者		
私市 光生	研究開発戦略センター 政策ユニット	上席フェロー
田中 康裕	戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ	主任調査員
栗原 健二	戦略研究推進部 研究評価グループ	主任調査員
林 義則	研究プロジェクト推進部	専門役

付録2. 国内外の状況

化学反応への固体イオニクス材料を用いた電気化学の適用は、燃料電池以外の分野としては水電解による水素製造など、限定的である。こうした技術は、再生可能エネルギーを水素等に変換して燃料として利用することを大きな目的としており、欧州、米国、日本を中心に研究開発が行われている。

例えば、欧州では、原子力あるいは風力による余剰電力利用を目的に、固体酸化物形電解セルを利用した水素製造の研究開発（RelHy）が行われている¹⁾。（RelHy：Innovative Solid Oxide Electrolyser Stacks for Efficient and Reliable Hydrogen Production。EU の FP7：7th Framework Programme の中で実施。ドイツ・カールスルーエ大学が中心となり、企業も参画。）

米国では、DOE（米国エネルギー省）における ARPA-E プログラムの重点分野の一つとして、Electrofuel と呼ばれるバイオ燃料製造に電気化学を組み合わせることで、従来の製造法の 10 倍の効率を目指した研究が実施されている²⁾。これは、自動車用の液体系燃料に利用することを目的としている。

日本でも、経済産業省「未来開拓研究プロジェクト再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」の中で水素製造システムの研究が実施されており、その中で固体電解質を用いた電解セル反応器における水電解（高温水蒸気電解）による水素製造が検討されている^{3) 4)}。また、JST の先端的低炭素化技術開発（ALCA）ではエネルギーキャリア（有機ハイドライド）合成が検討されている戦略的イノベーションプログラム（SIP）へ移行（後述）⁵⁾。

上記の動きに関連し、内閣府 SIP において、平成 25 年度から、新しいエネルギー社会の実現に向けてエネルギーキャリアの研究開発が行われている。本プロジェクトでは、アンモニア、有機ハイドライド、水素（液体、高圧）等のエネルギーキャリアの研究開発や水素利用技術の開発のほか、エネルギーキャリアの安全性評価の研究開発を実施することとしている⁶⁾。なお、エネルギーキャリアの研究開発は再生可能エネルギー（電力）の利用拡大、エネルギー利用・転換という観点において本提案とも関連することから、その進捗を注視して研究開発を進めていくことが重要である。

物質生産については、電解液を用いた従来の電気化学まで広げると、ソーダ塩素工業における食塩水の電気分解による水酸化ナトリウムや塩素製造がある。また有機合成への適用例としては、1964 年に米国モンサント社により、アクリロニトリルの電気化学による二量体反応でナイロン原料であるアジポニトリルを合成するプロセスが工業化されている。このように、一部の物質生産の製造方法として電解合成、すなわち電気化学による物質生産が行われてきてはいるが、工業的な利用は限定的である。これは、電気のコストが高いこと、および反応が電極表面積で制約されることでスケールアップ効果がないことなどが考えられる。

産業界におけるエネルギー利用の効率化という観点では、ALCA において、「革新的省・創エネルギー化学プロセス」の領域において、既存プロセスに比べて大幅な省エネルギー化、CO₂ 削減が見込める技術として、CO₂ 分離膜の開発やメタノール合成プロセスの高効率化に関する研究などが行われている⁸⁾。

また、経済産業省において平成 25 年度から未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発が開始されている。この事業で設立された未利用熱エネルギー革新的活用技術組合(略称: TherMAT)では、熱使用量を削減する技術(断熱・遮熱など)、未利用熱を利用する技術(蓄熱・ヒートポンプなど)、熱を変換利用する技術(熱電変換・廃熱発電など)などの研究開発が行われている。産業界における未利用熱エネルギーを削減するという目的を掲げているが、上述のとおり、本提案で挙げられている革新的反応とは異なる技術群である。なお、本事業において未利用熱(排熱)の実態調査も行われることとなっている⁹⁾。

本提案で取り上げる中低温域において、イオンと電子の制御を可能とする化学反応の革新に関しては、世界的に研究開発が進んでいない空白領域となっている。これは、中低温域で作動する固体イオニクス材料が存在しないためである。しかしながら、最近になって、この温度域において作動する固体イオニクス材料(ナトリウムチタネート系酸化物)や格子ひずみ効果により固体酸化物形イオン伝導体において高い伝導性が発現することが明らかになるなど、研究開発段階ではあるが有用な材料、知見が見出されてきており、本格的な研究開発ができる状況が揃いつつある。

こうした背景のもと、本提案における技術分野において、我が国が国際的にイニシアチブをとれる可能性は十分高いものと考えられるため、一刻も早く研究開発を進めていく必要がある。

【付録2 参考文献】

- 1) Final Report – RELHY,
http://cordis.europa.eu/publication/rcn/15767_en.html
- 2) ARPA-E.Electrofuels
<http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/electrofuels>
- 3) 経済産業省. 平成 25 年度「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」に係る委託先の公募について
<http://www.meti.go.jp/information/publicoffer/kobo/k130529003.html>
- 4) NEDO. 水素利用等先導研究開発事業
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100068.html
- 5) JST. 先端的低炭素化技術開発. エネルギーキャリア,
<http://www.jst.go.jp/alca/kadai.html#T02>
- 6) 内閣府. 戦略的イノベーション創造プログラム. エネルギーキャリア,
<http://www.jst.go.jp/sip/k04.html>
- 7) 科学研究費助成事業データベース. 有機電気化学の新展開 (1993 ～ 1995 年)
<https://kaken.nii.ac.jp/d/p/05235101.ja.html>
- 8) JST. 先端的低炭素化技術開発. 革新的省・創エネルギー化学プロセス,
<http://www.jst.go.jp/alca/kadai.html#K06>
- 9) 未利用熱エネルギー革新的活用技術組合
<http://www.thermat.jp/>

付録3. 専門用語説明

●固体イオニクス

固体中のイオンの動きに関する学問と技術を指す。主に固体イオン伝導体（固体電解質）やイオン-電子混合導電体を対象としている。

●イオン伝導体（プロトン伝導体、酸化物イオン伝導体）

イオンが伝導（移動）できる物質のこと。電解質とも呼ばれる。プロトン（ H^+ ）や酸化物イオン（ O^{2-} ：酸素イオンとも呼ばれる）など、伝導するイオンによって、プロトン伝導体、酸化物イオン伝導体（酸素イオン伝導体）などと呼ばれる。なお、本プロポーザルでは酸素イオン、酸素イオン伝導体の呼称を使用。

●反応選択性

化学反応において複数の生成物ができる可能性のある場合、特定の生成物が優先的にできる性質。

●SPring-8

スプリングエイト（Super Photon ring-8 GeV）。兵庫県播磨科学公園都市にある、世界最高性能の放射光を利用する大型放射光施設。放射光を用いることで微細な物質の構造や状態を解析することが可能。

●SACLA

サクラ（SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser）。SPring8に併設されているX線自由電子レーザー施設。原子レベルの超微細構造や化学反応等のきわめて速い動きの解析ができ、これにより反応が起きている場（*in-situ*）における反応の実動作（*operando*）を分析することが可能。

参考文献

- 1) 特許庁. 2012 平成 23 年度特許出願技術動向調査 (概要) 燃料電池
https://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/23energy_fuelcell.pdf
- 2) エネファーム パートナーズ. 2014. エネファーム 10 万台突破記者発表会資料,
http://www.gas.or.jp/user/comfortable-life/enefarm-partners/common/data/20140929_web.pdf
- 3) トヨタ自動車ホームページ. MIRAI
<http://toyota.jp/mirai/>
- 4) CRDS.2014. 中低温域作動の革新的反応と材料ワークショップ報告書 (CRDS-FY2014-WR-11)
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/WR/CRDS-FY2014-WR-11.pdf>
- 5) 科学研究費助成事業データベース. 有機電気化学の新展開 (1993 ～ 1995 年)
<https://kaken.nii.ac.jp/d/p/05235101.ja.html>
- 6) CRDS.2013. 中低温熱利用の高度化に関する技術調査報告書 (CRDS-FY2013-RR-02)
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/RR/CRDS-FY2013-RR-02.pdf>
- 7) CRDS.2012. 戦略プロポーザル: 再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術 (CRDS-FY2012-SP-08)
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/SP/CRDS-FY2012-SP-08.pdf>
- 8) グローバルノート・国際統計・国別統計専門サイト
<http://www.globalnote.jp/post-3131.html>
- 9) 伊藤靖彦. 2011. アンモニアエコノミーと常圧アンモニア電解合成. 水素エネルギーシステム Vol.36, No.4
- 10) 瀬戸山亨. 2009. 触媒. Vol.51, No.7, 535
- 11) 日本化学工業協会. 2014. グラフでみる日本の化学工業 2014,
https://www.nikkakyo.org/sites/default/files/Graph_Jap2014.pdf
- 12) 経済産業省資源エネルギー庁. 2014. 平成 24 年度 (2012 年度) におけるエネルギー需給実績 (確報)
http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_014.pdf
- 13) 内閣府. 戦略的イノベーション創造プログラム. エネルギーキャリア
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/4_enekyari.pdf
- 14) CRDS.2011. ナノテクノロジー・材料分野 化学技術・研究開発の国際比較, 2011 年版 (CRDS-FY-2011-IC-04)
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2011/IC/CRDS-FY2011-IC-04.pdf>
- 15) 山口周. 第 40 回固体イオニクス討論会, 特別講演資料 (2014 年 11 月 17 日)

■戦略プロポーザル作成メンバー■

総括責任者	笠木 伸英	副センター長・上席フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	尾山 宏次	フェロー・リーダー	(環境・エネルギーユニット)
	佐藤 勝昭	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	鹿園 直毅	特任フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	鈴木 至	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	関根 泰	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	山田 直史	フェロー	(環境・エネルギーユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2014-SP-05

戦略プロポーザル

反応プロセス革新

～イオンと電子の制御による中低温域の革新的化学反応～

STRATEGIC PROPOSAL

Innovation of Reaction Process

-Innovative chemical reaction in a low to intermediate temperature range through ionic and electronic control-

平成 27 年 3 月 March 2015

ISBN 978-4-88890-431-5

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

環境・エネルギーユニット

Environment and Energy Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

(※2015 年 4 月から法人名称が国立研究開発法人科学技術振興機構に変更となります)

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5124-7481

ファックス 03-5124-7385

<http://www.jst.go.jp/crds/>

© 2015 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTAAC T CTCGCC
AA TAATC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC TTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC T
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC T
ATTAATC A AAGA C CT
GA C CTAAC T CTCAGACC
0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

