

## 戦略プロポーザル

# 電気・物質エネルギー 変換技術の革新

～再生可能エネルギーの大量導入に向けた  
多様な反応場の実現～

## STRATEGIC PROPOSAL

# Innovation in electricity-material energy conversion technologies

– Realization of diverse reaction fields towards  
massive integration of renewable energy

# エグゼクティブサマリー

本提言は、電気-物質エネルギー変換技術（物質との相互変換を利用して電気エネルギーを生成、変換、貯蔵する技術）の高度化・多様化を通じて、再生可能エネルギーの時間変動性や適地の局在性に伴う需給ギャップを解決し、再生可能エネルギーの有効利用を可能にする研究開発戦略である。再生可能エネルギーの大量導入にあたっては、蓄電池、燃料電池、電解といった電気-物質エネルギー変換を利用したデバイスの大量導入も必要となる。本提言では、反応基質、電子・イオンといった電荷担体（キャリア）、電極材料、電解質材料といった構成要素だけでなく、デバイスの作動パラメーターである温度、pH、電圧といった反応環境変数を含め、デバイス特性を司る制御因子を広く“電気-物質エネルギー変換反応場”と定義する。そして、エネルギー効率・反応速度の観点から、より理想的な反応環境やエネルギーインフラとしてより広範な作動環境を実現する材料・デバイス開発の方向性を提言する。特に、反応場のデバイス横断的な理解に取り組み、デバイス特性の制御因子の知的基盤を構築することで、わが国が強みを持つ電気化学デバイス材料の新規シーズ創出やデバイス間の技術融合による研究開発の加速が期待される。また、わが国がこれらの研究開発を進めるための具体的方策として、1. 電気-物質エネルギー変換技術に関してデバイス横断的に異分野研究者間の知の循環を促進する研究開発プロジェクトの推進、2. 分野外からの新規参入の障壁を取り払うための研究基盤の整備、3. インフォマティクスを利用した材料・デバイス開発に関する研究開発の推進や研究開発体制の構築を提言する。

カーボンニュートラルをはじめとする持続可能な社会の実現に向けて、環境負荷の小さい再生可能エネルギーを化石資源の代替エネルギー源として大量導入することが求められる。再生可能エネルギーは時間変動性による需要と供給のミスマッチや適地の局在性という短所を有しており、その問題点を克服するための蓄電システムや燃料への転換（エネルギーキャリア）などの大量導入も必要となる。しかしながら、現有の技術を大量に実装するだけでは、持続可能な社会の実現はほど遠い。例えば、蓄電池や水素燃料電池・水電解（水素製造）といった電気化学システムは、現在利用されている反応環境で作動させるためには、材料として希少資源が必要となる場合があり、資源確保のリスクが懸念される。希少資源を必要とする要因は、電気化学システムの反応環境（温度、pH、電圧等）に起因する。このような問題に対し、従来よりも温和な反応環境の実現、従来よりも資源効率の高い反応環境の実現などが期待され、これには革新的な材料・デバイス技術の創出が不可欠である。再生可能エネルギーの大量導入という観点では、再生可能エネルギーの変動性に追従するインフラとして、突発的な環境変動も吸収できるような材料・デバイスへのニーズも生まれている。さらに、化成品原料もしくは化成品の電気化学プロセスによる製造、製鉄・セメントなどのマテリアル製造の電気化学プロセス化、などの新たな応用分野への展開も期待されている。

このように、電気化学システムはカーボンニュートラル社会のインフラとして重要な位置づけにあるが、希少資源利用の問題や新たなシステムニーズに応えるための反応場の拡張が求められている。

これらの問題に対し、本提言は、電気-物質エネルギー変換反応場の拡張に貢献する材料・デバイス創出の推進を提案する。長らく電気化学デバイスの研究開発は、個々のデバイスの高機能化や先鋭化によって進展してきたが、そのようなアプローチは行き詰まりを見せつつある。また、電気化学デバイスの高度化に伴い、従来の学理では取り扱うことが難しい新たなサイエンスが要求されている。例えば、電気自動車向けの高性能蓄電池ではナノ～マイクロスケールに様々な構成要素が閉じこめられており、そのような複雑な構造を持つ反応場での現象理解や制御手法の確立が不可欠である。また、高速な水電解・燃料電池では電極から生成される泡（バブル）が性能を左右することが知られているが、物質変換過程から物質移動までの複雑な反応場を理解する方法論は確立されていない。このような反応場の拡張に伴うデバイス横断的な学理を構築し、新たなコンセプトの材料創出やデバイスごとに蓄積された技術の融合を進めることで材料開発の効率化や加

速を促すことを提言する。具体的には、次に示す4つの研究開発課題に取り組むべきである。

## 1. 電気・物質エネルギー変換反応場の横断的理解に向けた基盤科学の構築

電気化学デバイスは電気・物質エネルギー変換反応場として、目的の異なるデバイスにおいても多くの共通因子を含む。しかし現在は個々のデバイスに特化・細分化された研究開発が進んでいる。デバイス横断的な反応場の学理を構築することで、デバイス横断的な材料コンセプトや新規材料・デバイス開発技術の創出が期待される。特に、反応場の拡張には高電流・高電圧・高温等の過酷な環境を伴う場合も多いため、極限環境の反応場の理解を支える基盤科学の構築が必要となる。具体的には、異種材料からなる界面現象の理解、反応場の環境特性（温度、電位、pH）に応じた物質状態の理解、電子伝導・イオン伝導機構の解明と新たな伝導機構の探索などが挙げられる。反応場の理解を支えるためのオペランド計測技術、第一原理計算・マルチスケールシミュレーション手法やデータ科学的な方法論の構築も進める必要がある。ここで構築した方法論は、以下に示す研究開発課題2、3、4の推進にも貢献する。

## 2. 電気化学デバイスの動作環境の拡大に資する材料開発

反応場の拡張に向けて、従来とは全く異なる動作環境を実現する新規材料や、従来デバイスよりも広い動作環境に追従できる新規材料の研究開発が必要となる。具体的には、温度、電位、pH（イオン濃度）などの拡張に資する電極材料、電解質材料、膜材料、電極触媒、導電性材料開発などの研究開発課題がある。これらは大量実装を見据えて低コスト、資源制約の克服、高安定性の実現が求められる。

## 3. 新規材料を用いた革新的電気化学デバイスの創出

カーボンニュートラル社会の実現には電気化学システムの大規模導入や応用領域の多様化が求められる。反応場の学理や新規材料を基盤として、革新的電気化学デバイス創出を合理的かつ迅速に進める。資源制約の小さい蓄電・電解デバイスによるエネルギー応用、CO<sub>2</sub>等の新たな原料を用いた化成品電解合成、アルコール合成による化学分野や食糧分野への応用、機能性材料や鉄鋼・セメントの製造などの新興領域への展開、などが期待される。

## 4. 電気化学材料・デバイスインフォマティクス技術の確立

電気化学デバイスの多様化に対応するため、用途に応じて材料、デバイス構造、動作パラメーターを迅速に最適化する技術の確立が必要である。一方、電気・物質エネルギー変換プロセスは反応基質・キャリア、電極材料、電解質材料といった構成要素の自由度が非常に高い。また、異種材料が界面を通じて複雑に絡み合っており、デバイス特性の最適化にはその構造制御も求められる。このような膨大な組み合わせを持つ複雑な反応場において、目的の機能を発揮する材料やデバイス構造を迅速に設計・実装するためのインフォマティクス技術の確立が求められる。

具体的には、ハイスループット計算やハイスループット実験、先端計測によって得られる大規模データを利用したデータ駆動型の材料開発（マテリアルズ・インフォマティクス）技術を構築する。さらに、研究開発課題1で得られるデバイス横断的な学理を援用し、異種材料の組み合わせやデバイス設計までを行うデバイス・インフォマティクスに展開していくことが望ましい。

これら研究開発課題の推進方策は次の通りである。デバイス横断的な基盤科学の追求、材料探索、デバイス開発に取り組むプロジェクトを推進し、異分野からの新規参入を促す。異分野からの新規参入障壁を下げするため、革新的な材料・デバイスの概念実証や標準評価技術の確立を容易にする研究支援体制を強化する。また、電気化学材料・デバイスインフォマティクス技術確立のための拠点構築、革新的な電気化学デバイスの社会実装を促進するコンソーシアムの設立、なども併せて推進する。



# Executive Summary

---

This proposal discusses how to innovate “electricity-material energy conversion technologies” that can generate, convert, and store electrical energy using interconversion with materials. The sophistication and diversification of this technology will solve the problems of supply-demand gap due to spatio-temporal variability and localization of suitable locations for renewable energy, and lead to the effective use of renewable energy. The massive integration of renewable energy will require the mass introduction of devices that utilize electric-material energy conversion, such as storage batteries, fuel cells, and electrolysis. In this proposal, we focus on the reaction field that governs device characteristics and suggest directions for the development of materials and devices that realize a wider operating environment as an energy infrastructure and a more ideal reaction environment in terms of energy efficiency and reaction rate. In particular, we introduce the concept of “electrical-material energy conversion reaction field”. This represents the control factors that govern device characteristics, including not only the components such as reaction substrates, charge carriers (electrons and ions), electrode materials, and electrolyte materials, but also the reaction environment variables such as temperature, pH, and voltage. By establishing a cross-device science of reaction fields, it is expected to accelerate the creation of new technologies for electrochemical materials and devices, in which Japan has an advantage, and to accelerate research and development through technological integration among devices.

We propose the following activities or policies: 1. Promotion of R&D projects that contribute to the circulation of knowledge among researchers in different fields related to electricity-material energy conversion technology, 2. Development of research infrastructure to encourage new entrants from different fields, 3. Promotion of materials and device development using informatics and establishment of R&D system.

In order to realize a sustainable society, including a carbon-neutral society, renewable energies with low environmental impact must be introduced in large quantities as an alternative energy source to fossil resources. Renewable energies have the disadvantages of mismatch between supply and demand due to time variability and the localization of suitable locations. To overcome these problems, energy storage systems and the conversion of renewable energy into fuel (energy carriers) must also be introduced on a large scale. However, simple implementation of existing technologies is far from enough to realize a sustainable society. For example, electrochemical systems such as storage batteries, hydrogen fuel cells, and water electrolysis (hydrogen production) often require the use of scarce resources when operated in the reaction environments currently in use. It raises concerns about resource constraints. In other words, resource constraints are caused by the reaction environment (temperature, pH, voltage, etc.) of electrochemical systems. To address this problem, it is expected to realize a reaction environment that is milder and more resource-efficient than before. The creation of innovative material and device technologies is essential for this. In addition, from the perspective of mass adoption of renewable energy, a need has arisen for materials and devices that can absorb sudden environmental changes as infrastructure to follow the variability of renewable energy. Furthermore, electrochemical devices are expected to expand into new application

fields, such as synthesis of chemical products by CO<sub>2</sub> electrolysis and electrochemical processes for manufacturing materials such as steel and cement. In other words, electrochemical systems have an important place in the infrastructure of a carbon neutral society. In particular, there is a need to expand the reaction field to solve from resource constraints and to meet new system demands.

To address these issues, this proposal proposes to promote the creation of materials and devices that contribute to the expansion of the electric-material energy conversion reaction field. For a long time, research and development of electrochemical devices has progressed by increasing the functionality and sophistication of individual devices, but such an approach is becoming saturated. Advanced electrochemical devices require new science that is difficult to handle with conventional science. For example, in high-performance storage batteries for electric vehicles, various components are confined to the nano- to micro-scale, and it is essential to understand the complex phenomena occurred in the reaction field and establish how to control such phenomena. In high-speed water electrolysis and fuel cells, it is known that the bubbles generated by electrodes determine the performance, but even in such systems, no methodology has been established to understand the complex reaction field from material conversion to mass transfer. We propose to establish a cross-device science for the expansion of such reaction fields, and to promote the creation of new concepts of materials and the integration of technologies accumulated in each device, thereby promoting the efficiency and acceleration of materials development. Specifically, the following four R&D issues should be addressed.

### **1. Development of fundamental science for a cross-sectional understanding of the electricity-material-energy conversion reaction field**

Electrochemical devices contain many common factors even among devices with different purposes. However, materials and devices are currently being developed that are specialized and subdivided into individual systems. By constructing a science of the reaction field across devices, it is expected to create material concepts that cross over between devices and to create new materials and device development technologies. In particular, since the extension of reaction fields often involves harsh environments such as high current, high voltage, and high temperature, it is necessary to establish fundamental science to support the understanding of reaction fields in extreme environments. Specifically, understanding of interfacial phenomena consisting of heterogeneous materials, understanding of material states depending on the environmental characteristics of the reaction field (temperature, potential, pH), elucidation of electronic and ionic conduction mechanisms and search for new conduction mechanisms, should be addressed. Understanding reaction fields confined to the nanoscale, such as near electrode surfaces with complex nanostructures, is essential for the advancement of electrochemical devices. It is also necessary to develop operando measurement techniques, first-principles calculations, multi-scale simulation methods, and data science methodologies to support the understanding of the reaction field. The methodologies constructed here will also contribute to the promotion of R&D topics 2, 3, and 4 listed below.

## **2. Development of materials that contribute to expanding the operating environment for electrochemical devices**

Research and development of new materials that realize a completely different operating environment from that of conventional devices or that can follow a wider range of operating environments than conventional devices is required. Specifically, there are R&D issues such as electrode materials, electrolyte materials, membrane materials, electrocatalysts, and conductive materials development that contribute to the expansion of temperature, electric potential, and pH (ion concentration), which are typical examples of the operating environment of electrochemical devices. These must be oriented toward low cost, overcoming resource constraints, and high stability with a view to mass implementation. Another challenge is to control not only electrochemical properties but also mechanical properties, as in the case of all solid-state batteries.

## **3. Creation of innovative electrochemical devices using novel materials**

The realization of a carbon-neutral society requires large-scale introduction of electrochemical systems and diversification of application areas. Based on the science of reaction fields and novel materials, we will promote the creation of devices in a rational and rapid manner. Energy applications using energy storage and electrolysis devices with low resource constraints, electrolytic synthesis of chemical products using CO<sub>2</sub>, alcohol synthesis for applications in the chemical and food fields, and development in emerging areas such as materials production (steel and cement), are also expected.

## **4. Development of electrochemical materials and device informatics**

With the diversification of electrochemical devices in the future, it will be necessary to establish technologies to optimize materials, device structures, and operating parameters as early as possible for each application. On the other hand, the electric-material energy conversion process has a very high degree of freedom in terms of components such as reaction substrates/carriers, electrode materials, and electrolyte materials. Informatics approach is required for rapid research and development of materials and device structures for such a complex reaction field with a huge number of combinations. In the short term, we will establish data-driven materials development technology (materials informatics) for electrochemical materials by utilizing large-scale data obtained through high-throughput calculations, high-throughput experiments, and advanced measurements. In the mid- to long-term, it is desirable to develop device informatics, in which the combination of heterogeneous materials and device design are performed by utilizing big data, with the aid of the cross-device science obtained in the Research Issue 1. For this purpose, it is necessary to enable more data accumulation and utilization, and it is required to construct a cross-device data utilization method for heterogeneous materials and devices.

The following promotion measures are proposed to effectively address the above R&D issues. Promote projects that address the pursuit of fundamental science across devices, materials exploration, and device development, and encourage new entrants from different fields. Strengthen the research support system to facilitate proof-of-concept of innovative materials and devices and establishment of standard evaluation technologies as an approach to lower the

barriers to entry for newcomers from different fields. It is also considered necessary to establish a research center for the establishment of electrochemical material and device informatics technology, and to establish a consortium to promote social implementation of innovative electrochemical devices.

## 目次

---

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>研究開発の内容</b>                       | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>研究開発を実施する意義</b>                   | <b>5</b>  |
| 2.1      | 現状認識および問題点                           | 5         |
| 2.2      | 社会・経済的効果                             | 9         |
| 2.3      | 科学技術上の効果                             | 12        |
| <b>3</b> | <b>具体的な研究開発課題</b>                    | <b>16</b> |
| 3.1      | 電気・物質エネルギー変換反応場の横断的理解に向けた<br>基盤科学の構築 | 16        |
| 3.2      | 電気化学デバイスの動作環境の拡大に資する材料開発             | 19        |
| 3.3      | 新規材料を用いた革新的電気化学デバイスの創出               | 21        |
| 3.4      | 電気化学材料・デバイスインフォマティクスの確立              | 22        |
| <b>4</b> | <b>研究開発の推進方法および時間軸</b>               | <b>25</b> |
| 4.1      | 現在の研究開発体制の問題点                        | 25        |
| 4.2      | 研究開発の推進方法                            | 27        |
| 4.3      | 人材育成の推進方法                            | 29        |
| 4.4      | 時間軸                                  | 31        |
| 付録 1     | 検討の経緯                                | 32        |
| 付録 2     | 国内外の状況                               | 35        |
| 付録 3     | 研究人材に関する状況                           | 39        |
| 付録 4     | 専門用語説明                               | 42        |





# 1 | 研究開発の内容

本提言は、電気・物質エネルギー変換技術（物質との相互変換を利用して電気エネルギーを生成、変換、貯蔵する技術）の高度化・多様化を通じて、再生可能エネルギーの時間変動性や適地の局在性に伴う需給ギャップを解決し、再生可能エネルギーの有効利用を可能にする研究開発戦略である。再生可能エネルギーの大量導入にあたっては、蓄電池、燃料電池、電解といった電気・物質エネルギー変換を利用したデバイスの大量導入も必要となる。本提言では、反応基質、電子・イオンといった電荷担体（キャリア）、電極材料、電解質材料といった構成要素だけでなく、デバイスの作動パラメーターである温度、pH、電圧といった反応環境変数を含め、デバイス特性を司る制御因子を広く“電気・物質エネルギー変換反応場”と定義する（図1-1）。そして、エネルギー効率・反応速度の観点からより理想的な反応環境やエネルギーインフラとしてより広範な作動環境を実現する材料・デバイス開発の方向性を提言する。特に、反応場のデバイス横断的な理解に取り組み、デバイス性能の制御因子の知的基盤を構築することで、わが国が強みを持つ電気化学デバイス材料の新規シーズ創出やデバイス間の技術融合による研究開発の加速が期待される。

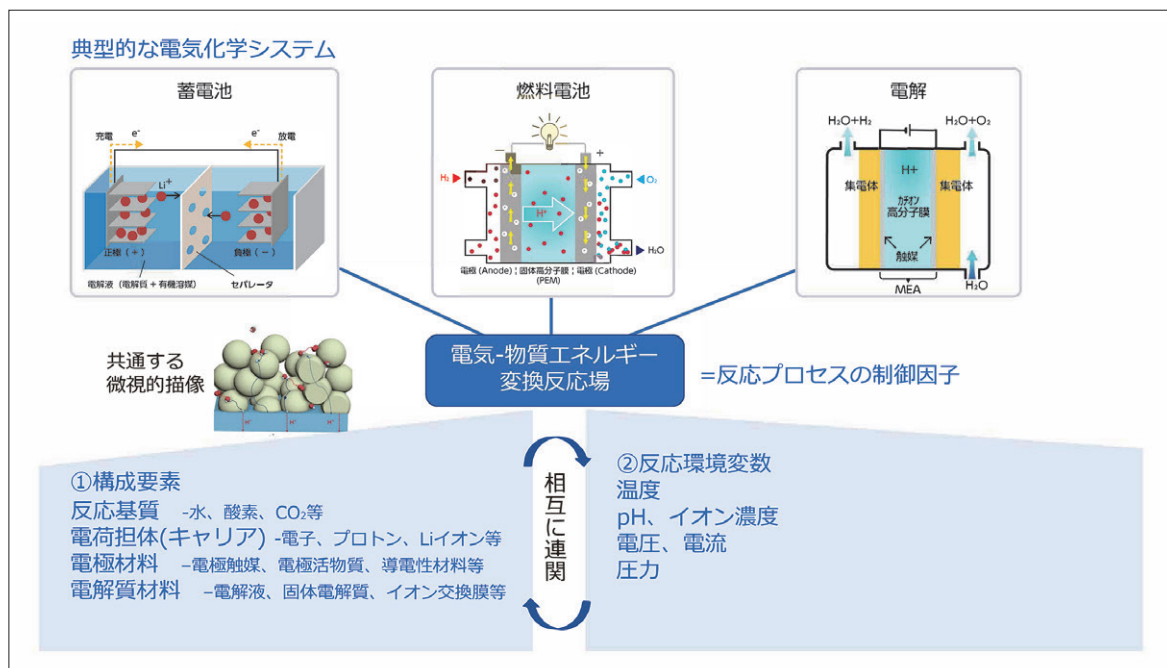


図1-1 電気・物質エネルギー変換反応場の定義

本提案では以下の研究開発課題に取り組むことを提言する。

## 1. 電気・物質エネルギー変換反応場の横断的理解に向けた基盤科学の構築

蓄電池、燃料電池、電解といった電気化学システムは電極、電解質などの構成要素の統合的な理解や設計が重要である。しかしながら、個々の電気化学システムの最先端の技術開発とその基盤をなす電気化学との乖離が著しく、合理的な材料選択やデバイス構築が困難で、研究開発に長い期間を要する。例えば、電気自動車向けの高性能蓄電池ではナノ～マイクロスケールに様々な構成要素が閉じ込められており、そのような微小かつ複雑な構造を持つ反応場での現象理解や制御手法の確立が不可欠である。また、高速な水電解・燃

料電池では電極から生成される泡（バブル）が性能を左右するが、物質変換過程から物質移動までの複雑な反応場を理解する方法論は確立されていない。このように反応場の拡張には物質変換場の新たな基盤科学の構築が求められており、様々な電気化学システムに共通する問題である。

具体的には、次の研究開発課題が挙げられる。

- ・電気・物質エネルギー変換プロセスの素過程の理解と学理の構築
- ・電気化学界面現象の理解と制御技術の構築
- ・反応環境の変化が物質変換プロセスに与える影響の理解
- ・反応場の物質状態の理解と学理の構築
- ・上述の課題群に取り組むための理論・計算・計測・シミュレーション・データ科学の構築

これらの課題は従来から取り組まれてきたが、近年の電気化学デバイスの高度化や、今後要求されるであろう高電流・高電圧・高温環境などの極限環境の反応場を理解するための理論・計算・計測手法の構築が必須である。反応場の理解という観点では、軽元素からなるキャリアと材料の相互作用を動作環境下で理解するための計測技術（オペランド計測技術）やシミュレーション技術の高度化が挙げられる。このような取り組みを通じ、異なる電気化学システム間における知識やノウハウの互換性を高める材料・デバイス横断的な学理の構築を推進することによって、反応場の拡張のための材料・デバイス設計指針の確立が期待される。

## 2. 電気化学デバイスの動作環境の拡大に資する材料開発

これからの電気化学デバイスには、再生可能エネルギーの大量導入を加速させるためのインフラとして、多くの機能や要件が求められる。例えば、時間変動する再生可能エネルギーに対して安定かつ高効率に追従するシステムを構築するために、システム負荷を抑えるべくデバイス設計のレベルから幅広いパラメーター領域での安定性が期待される。また、高出力化や高性能化にあたって、しばしばより過酷な条件でのデバイス動作が求められるが、そのような条件下での高耐久性にも応えなければならない。つまり、材料・デバイスレベルでも、これまでよりも広い動作環境で機能を発揮し続けることが求められる。そのため、電気化学デバイスの反応環境パラメーターの拡大を可能にする材料開発を推進する。

反応環境パラメーターの拡大やこれからの電気化学システムに必要とされる普遍的な材料開発の方向性は次の通りである。

- ・資源制約を克服するための原料代替
- ・ナノ構造利用やナノ特性の発揮による材料（資源）効率の向上
- ・幅広い動作環境で高い安定性を保つためにナノからマクロまでデザインされた材料
- ・電子伝導を担う導電性担体と反応を制御する電極材料を融合したような複合新機能材料

電気化学デバイスにおいては電気化学的安定性、熱安定性、機械的安定性など様々な耐久性が求められるため、電気化学系の研究者と材料研究者の協働による新たな材料シーズの創出は優先度の高い課題である。

## 3. 新規材料を用いた革新的電気化学デバイスの創出

カーボンニュートラル社会の実現に向けては、運輸・産業・住宅・民生等あらゆる部門の電化とともに再生可能エネルギーなどのCO<sub>2</sub>排出の少ないエネルギー源の導入が不可欠である。そのためには、電気化学システムの大規模導入を可能にする技術基盤の確立や、応用領域の多様化に貢献する革新的な電気化学デバイスの創出が必要である。各応用領域で求められるシステムの耐用年数やコスト、電気化学的特性等に応じて、材料およびデバイス構造を最適化していく必要がある。その際には、研究開発課題1で掲げた電気・物質エネルギー変換技術の基盤科学にもとづいて、新たな材料を用いて合理的に設計したデバイス開発に取り組む。エネルギー分野での応用はもちろんのこと、近年ではアルコール・糖類の電解合成による食糧分野への応用、機能性材料や鉄やセメントなどの材料製造といった新興領域への展開も期待されている。

具体的に研究開発が期待される電気化学デバイスは次の通りである。

- ・ 中性領域で動作し、安価かつ希少性の低い材料を用いた水電解デバイス
- ・ 水の資源制約を克服するために海水を利用した水電解デバイス
- ・ CO<sub>2</sub>や窒素等の環境中・産業プロセス中に豊富に存在する資源を化成品や燃料に変換する電解デバイス
- ・ アルカリ環境で動作する資源制約の少ないアニオン交換膜型電解デバイス
- ・ 中低温領域で動作する燃料電池もしくは化成品合成システム
- ・ 電極に希少元素を利用しない蓄電池
- ・ 新たな電解液を利用した高安全性かつ高電圧領域で安定な蓄電池

#### 4. 電気化学材料・デバイスインフォマティクスの確立

電気化学システムの多様化に対応するため、今後は各システムにおける材料およびデバイス構造もしくは動作環境を迅速に最適化する必要が生じる。電気化学デバイスは、電荷担体、電極材料、電解質の選択の自由度が非常に大きい。また、異種材料が界面を通じて複雑に絡み合っており、その構造制御も求められる。このような複雑な反応場において目的の機能を発揮する材料やデバイス構造を最適化するためにはインフォマティクス技術の活用が期待される。

ハイスループット計算やハイスループット実験によって得られる大規模データを利用して電気化学材料のマテリアルズ・インフォマティクス技術を確立するために推進すべき課題は次の通りである。

- ・ 自動実験ロボット等を導入した電気化学材料探索手法の確立
- ・ 電気化学特性のハイスループット評価手法および標準実験プロトコルの構築
- ・ 大規模データ化に向けたデータ形式や情報集積の方法論の構築
- ・ 集積したデータを活用した新規材料創出技術の構築

計算科学や実験で得られる材料の部分的な特性（イオン伝導度等）を利用した材料探索への活用から始め、最終的には界面の効果も取り入れたデバイス性能との相関や物理化学的なダイナミクスとの関連付けまでを行える技術体系（電気化学デバイスインフォマティクス）へと展開することが望ましい。

研究開発課題1～4の推進方策は次の通りである（研究開発課題と推進方策の関係については、4章および図4-4-1を参照）。

##### A. 電気化学システム横断的な材料・デバイス開発のプロジェクトの推進

本提言の主題である電気・物質エネルギー変換反応場のデバイス横断的理解を進め、それによって新規材料・デバイスを創出するためには、異なる電気化学システムを対象とした研究チームを束ねるプロジェクトの推進が有効である。このようなプロジェクトによって、デバイスごとの反応場の特性の違いや共通項を理解し、そのボトルネックを解決するためのシーズやアイデアの融合が進展すると期待される。

また、反応場の横断的理解という観点では、従来の電気化学分野だけでなく、物性物理、物理化学、計算科学、材料科学、反応工学といった多様な技術的背景を持つ研究者の参画が望ましい。またこのような多様な分野の研究者が集結するプロジェクトを推進することによって、従来電気化学に関心がなかった材料研究者の興味を喚起し、自身の研究シーズの展開先を探索しやすくなるという観点で電気化学分野への新規参入障壁を下げることも期待される。

##### B. 革新的な電気化学デバイスの試作支援や標準評価プロトコル確立の支援体制の確立

電気化学デバイスの性能評価はセル設計や実験手法などに高度な専門性・ノウハウが求められ、新規参入における障壁が非常に高い。新規材料のデバイス展開可能性の迅速な評価支援体制、スケールアップの可能性の評価支援体制の充実により、障壁を大きく下げることが期待できる。燃料電池や蓄電池分野ではすでに技術研究組合が産学共同の研究開発を支えることで研究開発を活発化させている。水電解やCO<sub>2</sub>電解などの



新興分野でもこのような体制の構築が望まれる。

C. システム横断的な材料・デバイス開発を促進する研究インフラの整備

研究開発課題1で述べた電気・物質エネルギー変換反応場の学理の構築には、高度な計測やシミュレーションを可能にする計測施設やハイパフォーマンスコンピューティング施設などの研究インフラの整備や拡充が欠かせない。また、近年ではデータ駆動型の材料開発（マテリアルズ・インフォマティクス）が進展しており、電気化学材料・デバイス分野でのインフォマティクス活用を促すような研究インフラの整備も求められる。電気化学材料インフォマティクスの確立にあたっては、多くの計算・実験データを収集する必要がある。個々の研究チーム内での閉じたデータ活用に留まらず、日本全体もしくは世界を視野に入れたデータ収集および活用には、研究開発課題4に挙げるデータ標準化や実験手法の標準化が必要である。現在国として整備を進めているマテリアルDXプラットフォームや先端計測のプラットフォームの活用に向けて、電気化学材料・デバイスにおけるデータ収集・連携の仕組みの構築や拡充が求められる。

D. 革新的な電気化学デバイスの社会実装を促進する産学連携体制の強化

欧米では水素・燃料電池などを中心とし、産官学が一体となった社会実装に向けた大型研究開発事業が相次いで発足している。日本でもグリーンイノベーション基金による研究開発や社会実装促進を進めているが、投資規模やプロジェクト数では見劣りする。

一方でCO<sub>2</sub>電解などの革新的な応用領域について、日本ではムーンショット型研究開発事業において高いレベルの基礎研究を推進している。このような萌芽領域の技術群においては、研究開発の早い段階から、産業界とアカデミアが一体となって研究開発を行う体制を構築すべきである。そのためには、推進方策Aを通じて得られた研究成果を産業界と常時共有できるようなコンソーシアムの構築も課題である。

用語説明

本提言で、頻出する用語を以下のように定義する。

電気・物質エネルギー変換技術

物質との相互変換を利用して電気エネルギーを生成、変換、貯蔵する技術。

電気・物質エネルギー変換反応場

電気・物質エネルギー変換プロセスの特性を司る制御因子。

- ①反応基質、電子・イオンといった電荷担体（キャリア）、電極材料、電解質材料といった構成要素
- ②デバイスの作動パラメーターである温度、pH、電圧といった反応環境変数の2つからなる。

電気化学システム・デバイス・材料

| 用語   | 意味                                                                | 具体例                                                        |
|------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| システム | エネルギーや原料の入力から出力までの一連のプロセス。熱・圧力制御のプロセスや分離プロセスなども含めた全体としての効率最適化が必要。 | ・ 車載用リチウムイオン電池システム<br>・ 発電用 SOEC 燃料電池システム<br>・ アルカリ水電解システム |
| デバイス | システムの構成要素である、電気エネルギーと化学エネルギーとの変換を担うユニット。セルとも呼ばれる。                 | ・ リチウムイオン電池セル<br>・ PEM 型燃料電池                               |
| 材料   | デバイスの構成要素である部素材。典型的には、カソード、アノード、電解質、筐体から構成される。                    | ・ リチウムイオン用負極炭素材料<br>・ 燃料電池用 Pt 電極触媒<br>・ 酸化物系固体電解質         |



## 2 | 研究開発を実施する意義

### 2.1 現状認識および問題

#### 2.1.1 カーボンニュートラル社会に向けての社会的要請

地球温暖化などの気候変動問題の解決に向けて、パリ協定が2015年に採択された。この協定は「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分に低く保つとともに、1.5℃に抑える努力をすること」を長期目標として掲げ、そのために「今世紀後半には人為的な温室効果ガスの排出と吸収源による除去の均衡を達成する」ことを目指すものである。

これを受け、国際エネルギー機関（IEA）は2021年7月に「IEAロードマップ」（Net Zero by 2050 : A Roadmap for the Global Energy Sector）<sup>1</sup>を公表した。このロードマップ中では、世界のエネルギー関連のCO<sub>2</sub>排出量を2050年までに正味ゼロにすることは技術的に不可能ではないが、これを実現するためには多くの社会的変革が必要であることを示唆している。そのため、先進的な蓄電池、電解による水素製造、大気からのCO<sub>2</sub>分離回収（DAC）と貯蔵・利用など、次の10年でのさらなる研究開発の推進と大規模実装へのインフラ整備を進めることを提言している。

わが国では、菅総理大臣（当時）が、2020年10月に2050年のカーボンニュートラル実現を目指すことを宣言し、米国主催の気候サミット「Leaders' Summit on Climate」（2021年4月開催）において「2030年度に、温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指す。さらに50%向け挑戦を続けていく」と

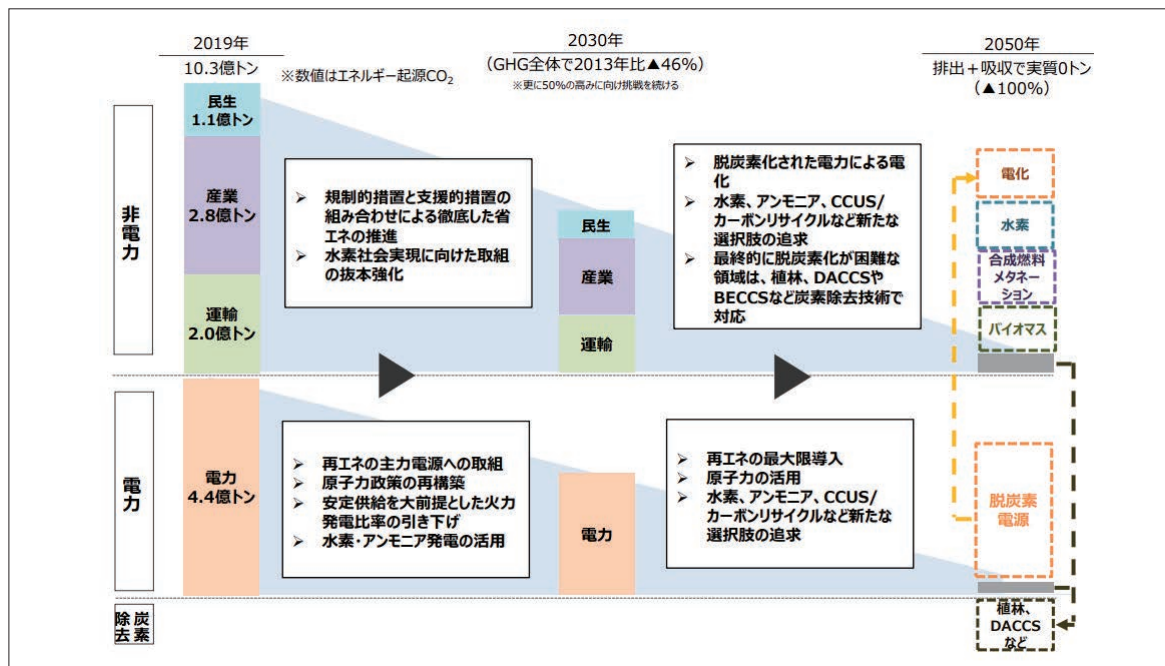


図2-1-1 2050年カーボンニュートラルの実現シナリオ

（出典：経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略<sup>2</sup>」より）

1 <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

表明した。

2020年12月には経済産業省が「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」<sup>2</sup>を公表した(2021年6月に、より具体化)。この中で、再生可能エネルギーの最大限の導入(発電量の約50～60%)、非電力エネルギーの電化、水素・アンモニア・CCUS/カーボンリサイクルなど新たな選択肢の追求が必要であることを示している(図2-1-1)。

さらに、2兆円の「グリーンイノベーション基金」を新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)に造成し、グリーン成長戦略において実行計画を策定している重点分野のうち、特に政策効果が大きくかつ社会実装まで長期間の取り組みが必要な領域において、具体的なコミットを示す企業等を10年間支援する体制を整えた。

このようにカーボンニュートラル社会の実現には、再生可能エネルギー発電の最大限の導入とエネルギー利用の電化が必要である。太陽光や風力などの再生可能エネルギーによる発電は、運用時のCO<sub>2</sub>排出が少ないという長所がある一方、発電量が季節や天候に左右されるという短所がある。また、再生可能エネルギー発電に適する地域が電力需要地と必ずしも一致しないという地域的偏在性も問題として挙げられる。

変動性が高い電源を電力系統に接続する場合、電力の需要と供給のバランスが崩れることにより周波数変動を引き起こし、接続機器の故障や大規模停電などが発生するおそれが高くなる。これまでの需給バランス調整は、火力発電や揚水発電などによって行われてきたが、再生可能エネルギー発電の導入量が増えると従来方法だけでは対応が難しくなる。そのため、再生可能エネルギーを大規模に導入していくためには、蓄電池を使った電力供給量の平準化、余剰時電力を使った水素・アンモニア・メタン・e-fuelなどのエネルギーキャリアへの変換、CO<sub>2</sub>からの化成品原料製造などが必要になる。

再生可能エネルギーの地域的偏在については、日本で必要な電力をすべて国内の再生可能エネルギーで賄うことは難しいと予測されており、中東やオーストラリアなどの再生可能エネルギー発電に適した地域で発電し、燃料や化成品原料に変換した上で日本へ輸送するという選択肢も重要と考えられる。

再生可能エネルギーを、蓄電池やエネルギーキャリアに貯蔵・変換し、いつでも必要な時に利用する技術やそれを利用したデバイス・システムの大規模な社会実装が求められている。

## 2.1.2 電気・物質エネルギー変換技術の問題点

2.1.1で述べたように、再生可能エネルギーの大量導入を可能にするためには、電気エネルギーを容易に生成、変換、貯蔵する技術が重要になる。典型的には、電解や燃料電池、蓄電池などの電気化学デバイス・システムが挙げられるが、現在目途が立っている技術の社会実装を加速するだけでは、以下のような問題があり非現実的である。

### 1) 材料の資源的制約

現在の電気・物質エネルギー変換技術には、希少資源や限られた産出国に依存している元素が使用されている。例えば、燃料電池やPEM型水電解では、電極触媒として貴金属である白金やイリジウムが使用される。また、リチウムイオン電池に使用されているリチウム、ニッケルやコバルトはいずれも産出地が特定の国に偏在している。これらは、埋蔵量の少なさや、技術やコストの面から抽出が難しいなどの理由で、今後、安定的に増産することは難しく、サプライチェーンを含む経済安全保障の観点からも問題意識が高まっている。IEAの分析<sup>3</sup>によると、クリーンエネルギー導入が進んだ2040年における需要見込みは2020

<sup>2</sup> <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html>

<sup>3</sup> IEA, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, May 2021, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

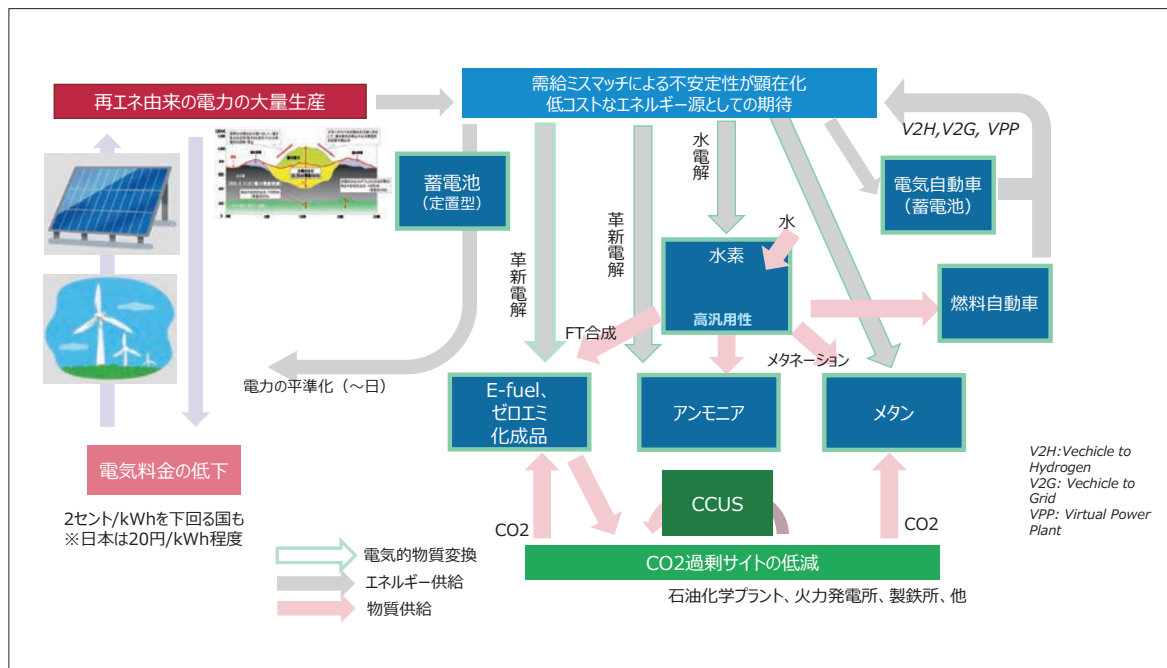


図2-1-2 再生可能エネルギーを基軸としたエネルギー・物質循環

年対比で、イリジウム約1800倍、白金約150倍、リチウム約40倍、ニッケル約20倍、コバルト約20倍という予想もある。

また、アルカリ水電解では、高濃度アルカリ溶液に耐えるため、耐久性の高い材料をセパレーターや筐体・部品などに使用する必要があり、抜本的なコストダウンの妨げとなっている。

これらの材料は、現行のデバイスの作動条件に適合するものを選択した結果である。したがって、よりマイルドなデバイス作動条件を適用できれば、材料の選択範囲を広げることができ、中長期的な資源的制約やコストの問題の解決が期待できる。

## 2) 電気化学デバイスの作動条件トレランス・長期運転性の不足

現行の電気化学デバイスは、主に最適な作動条件（温度、pH、電圧など）での安定運転を前提として開発されてきた。しかし、変動する再生可能エネルギーを効率的に活用しながら長期間運用するシステムとしては、それぞれの電気化学デバイスの作動条件のトレランス（許容度）を大きくする必要がある。温度や電圧の変動や、頻繁な立ち上げや停止にも対応できることが必要であるが、これらの面はまだ十分に検討されているとはいえない状況である。つまり、従来よりも広い作動条件で動作するデバイスが求められ、それを可能にする材料開発が必要となる。

また、再生可能エネルギーをエネルギー・物質変換の基軸とするためには、電気化学デバイスの長期間安定運転が必須であるが、電気化学デバイスの長期運転の実績が不十分であるため、部品などの寿命・交換時期などの予測が難しく、必要以上に設計に余裕を持たせざるを得ないのが問題である。

## 3) 電気・物質エネルギー変換技術の適用範囲の狭さ

再生可能エネルギーを基軸としたエネルギー・物質循環を構築するためには、図2-1-2に示すように、CO<sub>2</sub>の利用技術の確立も重要である。JST-CRDSは2020年発行の調査報告書<sup>4</sup>において、CO<sub>2</sub>の燃料・

4 JST-CRDS、二酸化炭素資源化に関する調査報告書、<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2019-RR-05.html>



化成品原料への変換技術、特に再生可能エネルギー由来の電気エネルギーを駆動力とする変換技術の重要性を取り上げた。現状の研究開発は、技術的な見通しが立っているCO<sub>2</sub>と水素を用いた燃料・化成品への変換技術が中心となっているが、長期的な視点から、水とCO<sub>2</sub>からの直接変換技術の重要性を指摘している。さらに、再生可能エネルギーを用いた変換技術は経済産業省が発表する「カーボンリサイクルロードマップ」でも長期的な研究開発目標として設定されている。

また、燃料・化成品原料は製造コストが重視されるが、CO<sub>2</sub>電解還元では様々な反応ルートが同時に進行するため、収率向上が困難であるといった技術的な問題点がある。従来検討が進んでいない反応場にも探索範囲を拡大していくことが今後求められる。

これらの問題点は、いずれも電気・物質エネルギー変換反応場の性質に起因するものである。電気・物質エネルギー変換反応場は、①反応原料、電子・イオンといった電荷担体（キャリア）、電極材料、電解質材料などの構成要素と、②デバイスの作動パラメーターである温度、pH、電圧などの反応環境変数の両方が含まれ、①構成要素と②反応環境変数は相互に強く関連している。反応原料や電極・電解質材料が決まると最適な反応条件が決まり、また反応環境に耐えるために電極・電解質材料の選択が制約されるという関係である。例えばデバイスの作動条件をマイルドにするためには、その条件で十分に機能する電極・電解質などの材料を創出することが必要になる。

電気化学デバイスは長らく、各デバイスごとに科学的知見・ノウハウを蓄積し、その性能向上や反応環境を拡張する研究が進められてきた。

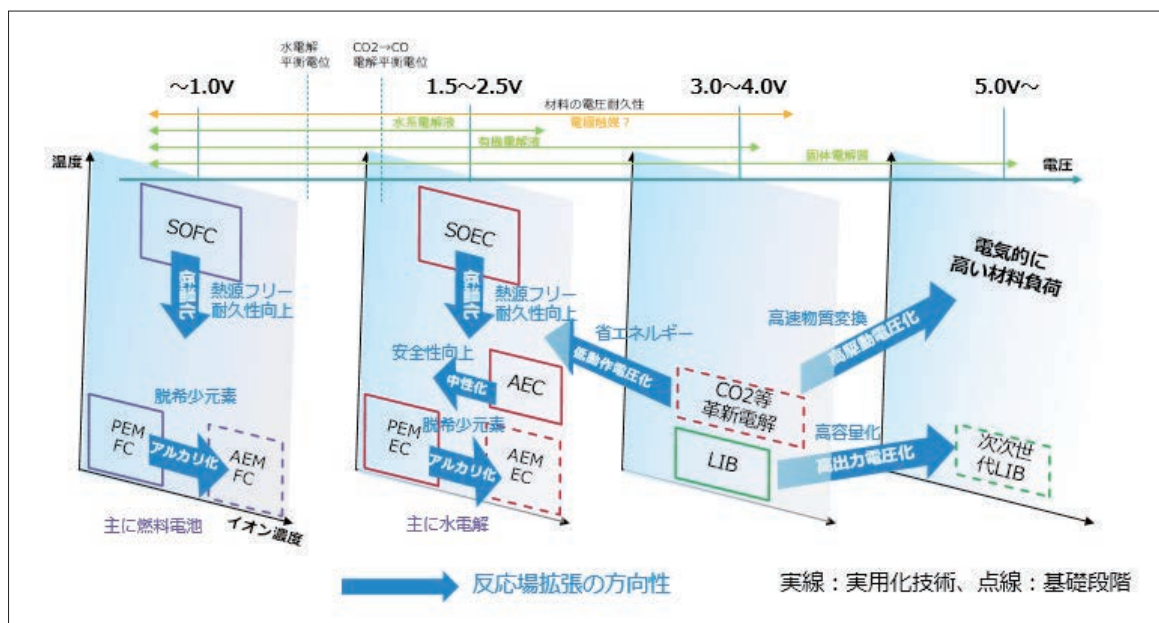


図2-1-3 各種電気化学デバイスの作動条件と反応場拡張の方向性

図2-1-3に示すように、燃料電池や水電解においては、高温領域でSOFC/SOECが検討され、低温領域ではPEM型FC/ECが検討されてきたが、エネルギー効率などの点から200～400℃程度の中温域の利用が求められている。アルカリ水電解は強アルカリ性ゆえに材料が限定されたりハンドリングが難しいという問題があり、中性～近中性pH域の利用が求められている。リチウムイオン電池は高容量化のために高電圧化の研究開発が進められている。

このように、各デバイスはそれぞれの作動条件（温度、pH、電圧）から反応場拡張のためのさまざまな検討がされてきている。従来、個々のデバイス研究は限られた範囲での検討となっており、デバイス横断的に全

体を見渡すと幅広い反応条件領域に取り組んできたにもかかわらず、これまではデバイス間での科学的知見・ノウハウの相互活用が充分だったとはいえない状況である。

日本は電気化学分野において世界をリードしてきた歴史を持つ。種々の電気化学デバイスの科学的知見・ノウハウを統合的に活用し、反応場の横断的理解を獲得することによって、電気化学デバイスの動作環境の拡大に資する材料開発や新たな反応場を利用した電気化学デバイスの創出につなげることが期待できる。

## 2.2 社会・経済的效果

本提言の電気・物質エネルギー変換反応場の拡張を進めることにより、再生可能エネルギーを利用した様々なエネルギー変換プロセスや物質変換プロセスの高効率化や性能向上が期待される。また、2.1で述べたような資源制約やインフラとしての頑健性や長期耐久性といった課題の解決も期待され、カーボンニュートラル社会や水素社会といった持続可能な社会の礎を作るという大きな社会的インパクトにつながる。また、電気化学プロセスを利用したデバイス・システムはすでに蓄電池等で大きな市場となっているが、今後さらに大きな市場を形成していくと期待されており、その経済的インパクトも大きい。本節では、反応場の拡張による技術的な性能向上等の典型的な効果を示すとともに、それらが社会実装された際の社会・経済的效果について述べる。

### 2.2.1 反応場拡張がもたらす効果

反応場拡張は①構成要素の拡張、②反応環境の拡張、の2つの方向性があるが、ここでは②の反応環境の拡張に関して、典型的な反応環境変数の拡張による効果を紹介する。

#### (温度領域の拡張)

現在多くのエネルギー変換プロセスや化学プロセスは1000℃近い高温プロセスや100℃以下の低温プロセスが用いられている。高温プロセスは高い反応速度を実現できる一方で、選択性などが一般的に低いことが知られている。また低温プロセスは反応速度という観点で、大規模なエネルギー利用を伴うプロセスへの応用には課題もある。200～400℃という中温領域は反応速度と選択性を両立できる温度領域として期待されている<sup>5</sup>。特に、エネルギーキャリアとして活用が期待される水素・アンモニア合成やメタンの部分酸化反応などの革新的な化学プロセスを実現することによって、産業廃熱の高度利用による化学産業の構造転換が期待される。

#### (pH領域の拡張)

アルカリ水電解による水素製造プロセスは現在強アルカリ水溶液を利用したアルカリ領域で動作しており、これによって材料選択に制約が生じたり、危険性のあるアルカリ水溶液を安全に運用・管理する必要が生じており、これらはコスト低減のための課題となっている。また、リチウムイオン電池においても有機溶媒中のイオン濃度をコントロールすることは電池のイオン伝導率や電気化学的安定性などの性能指標に直結する。例えばアルカリ水電解を中性領域で動作させることによって、電極、セパレーター、筐体で現在使われている材料コストを大幅に低減することが可能になると考えられている。

5 JST-CRDS, 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～,  
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2014-SP-05.html>



## （電圧領域の拡張）

電気化学デバイスの作動電圧は、蓄電池のエネルギー密度や充放電速度、燃料電池や電解等の反応速度に直結する指標である。リチウムイオン電池では、長年の研究開発や製品改良の結果、容量はほぼ理論値に近づくレベルに至っているが、作動電圧については大きな進展がない。作動電圧上限の高い蓄電池の研究開発を進めることによって、エネルギー密度が高く、軽量・小型の蓄電池が生まれ、蓄電池のさらなる社会実装に貢献することが期待される。

燃料電池や電解においても高電流密度化を進めることによって、水電解やCO<sub>2</sub>電解の大量・高速な物質変換が実現し、カーボンニュートラル社会に必須となる化学原料の製造に貢献することができる。

## 2.2.2 電気化学システムの市場予測

電気化学システムが、再生可能エネルギーの大量導入に伴う経済的効果を述べる。

カーボンニュートラル社会を達成するには、クリーンエネルギーへの投資を比類のないほど増やす必要がある。IEAが提唱するNZEシナリオ(2050年に世界でネットゼロを達成するシナリオ)では、クリーンエネルギーへの年間投資額は2030年までに4兆ドルに増加、現在の水準の3倍以上にすべきと示唆している。クリーンエネルギーへの移行を確保するために必要な投資を通じて、クリーンエネルギーサプライチェーン全体の機器メーカー、サービスプロバイダー、開発者、エンジニアリング、調達、建設土木などかつて無いレベルの市場機会が出現することになる。2050年までの累積市場は、風力タービン、ソーラーパネル、リチウムイオン電池、電解槽、燃料電池の市場規模を合わせたもので、27兆ドルに相当すると予測されている（図2-1-4）。この中で、蓄電池、燃料電池、電解などの電気化学システムに関わる市場は全体の70%以上を占めると予測されている。

一方で、蓄電池、燃料電池、電解のうち、どの技術が多く市場に導入されるかは、予測を行う機関や調査会社によって大きく見解が分かれる。特に、昨今カーボンニュートラル政策は経済政策と強くリンクするため、各国の国益や競争優位性といった観点が色濃く反映されている。2.1.2で述べた資源制約の問題点やそれを克服するための電気化学システムの多様化という潮流を考えると、着実に現有の技術の社会実装を進めなが

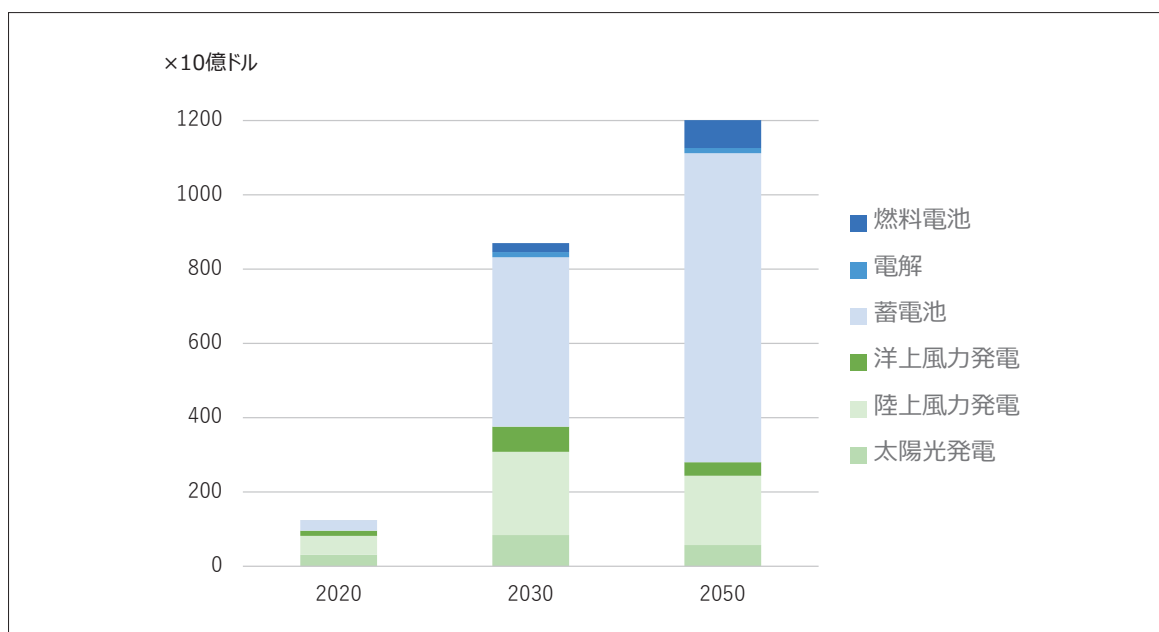


図2-1-4 クリーンエネルギー技術の市場予測

(出典：IEA, Energy Outlook 2021, Fig. 1.3よりCRDSが作成)

らも、どれか1つのデバイス・システムの研究開発に偏重することなく、技術的選択肢を増やすための研究開発を続けていく必要がある。

## 2.2.3 電気化学材料・デバイスの産業競争力強化

わが国では、カーボンニュートラル社会の実現を成長戦略として取り組むべく、2020年12月に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。カーボンニュートラルを目指すために必要な、洋上風力、自動車・飛行機・船舶、蓄電池、カーボンリサイクル等の重要分野における技術確立と社会実装を加速していくための取り組みが始まった。そのなかで、蓄電池や電解など電気化学システムもその重要性が高まっている。

日本は電気化学分野において、高い存在感を示してきた。吉野彰博士がリチウムイオン電池の研究で2019年にノーベル化学賞を受賞するなど基礎研究としての貢献だけでなく、2010年代初頭まではリチウムイオン電池やその他の蓄電デバイスでも売り上げ高の大きな世界シェアを獲得していた。一方で、その後は中国・韓国にシェアを奪われ競争力が低下している。このような背景をもとにデバイスレベルでの競争力強化を目的として、蓄電池分野では経済産業省が「蓄電池産業戦略」を策定した（2022年8月）。本戦略は、社会実装が進む液系リチウムイオン電池を中心として、国内での製造拠点やサプライチェーンを再構築し、シェアの再獲得を目指すものである。また、全固体電池などの次世代技術の迅速な社会実装も目標に掲げている。

材料供給の観点では、図2-1-5に示すように日本は高い競争力を有している。ただし、近年では材料面でもアジア系企業にシェアを奪われつつあり、競争力の維持は喫緊の課題である。

現時点では、蓄電池や水電解のシステムを構成する電極材料、セパレーター、電解質など、電気系企業、化学系企業や金属系企業など多くの企業で長年の間に蓄積された電気化学の技術・ノウハウをベースに製品開発が行われ、グローバルマーケットのシェアを維持している。今後電気化学システムは用途ごとに多様化し、かつ大量導入が進んでいくと考えられる。それに併せて材料も大量に必要となり、用途ごとに最適化が求められる。

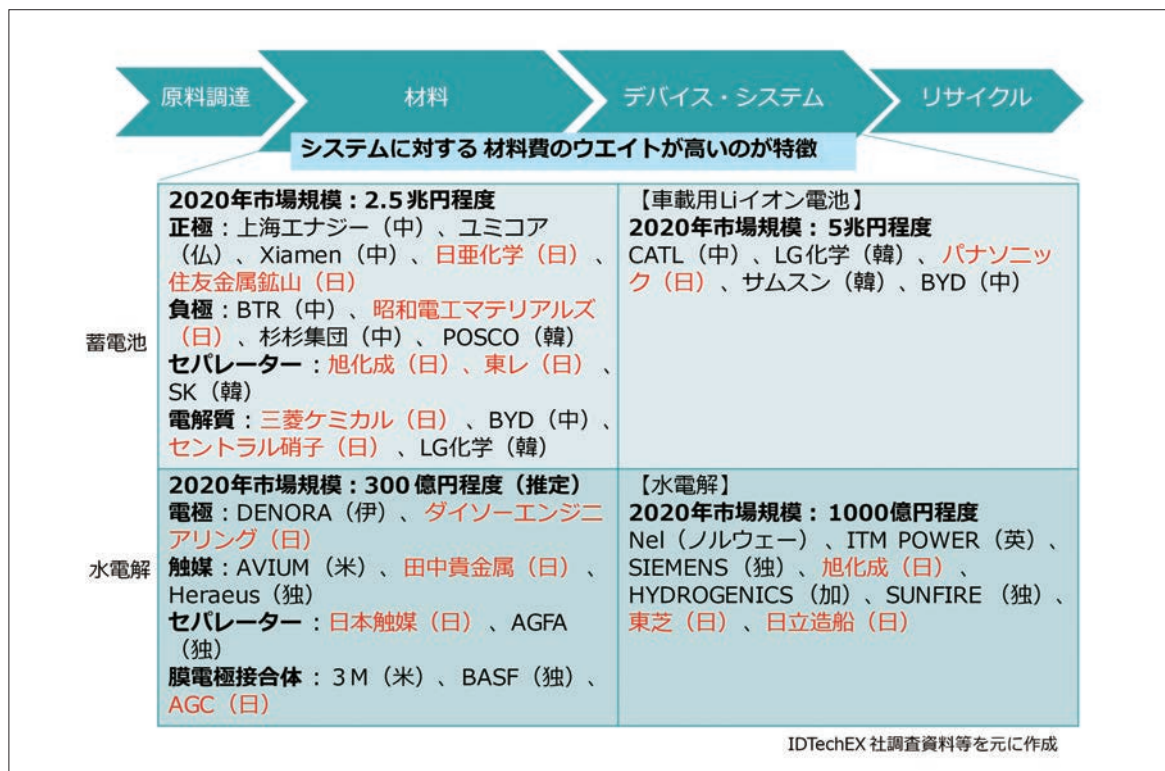


図2-1-5 電気化学システム関連の材料の優位性

れる。材料開発は一般に長い開発期間を必要とし、それは電気化学系においても同様である。今後この開発期間をいかに短縮できるかが、産業競争力の観点で非常に大きな課題である。

本提言で提案する電気化学系のシステム横断的な基盤科学の構築や材料・デバイスインフォマティクス技術の研究開発の推進を通じ、研究開発期間の短縮や革新的な技術創出が可能となり、将来的な産業競争力の向上につながると期待される。

## 2.3 科学技術上の効果

本提言で提案する、電気化学デバイスおよびその反応場の横断的理解を目指した研究を推進することで、電気化学に対する新たな学問的アプローチの推進、および非電気化学系の研究者の新規参入による新展開、という2つの観点において、新たな科学技術領域の開拓に貢献できる。以下に、それぞれの科学技術上の意義、展開について述べる。

### 2.3.1 電気化学に対する新たな学問的アプローチの推進

電気化学の研究には、材料開発・デバイス開発・解析評価において“経験的な知”が非常に重要であった。蓄電池や電解など実利的なデバイスの発明・進化過程は、デバイスごとに異なり、それぞれに特化した実験方法や評価手法が生み出されてきたため、一口に電気化学デバイスといってもノウハウが大きく異なる。このような背景のため、電気化学システムへの社会からの期待が高まりながらも、技術開発が必ずしもその期待に追いついていない現状は否めない。反応場の横断的な理解を進め、共通する研究課題の学理を追求することにより、新たな研究開発の潮流を生み出すことが可能になる。

具体的には、電気化学デバイスに共通するナノスケールでの電子・イオン授受、反応性制御の科学、メソスケールでの界面反応の学理や制御技術、マクロスケールでの物質移動の理解や制御技術が進展することが期待される。これらは個別の材料・デバイスでは従来から研究が進んできたトピックであるが、横断的な視点でとらえることにより相乗効果や新たな展開が期待される。特に、ナノスケールでの反応性制御に関しては、物理化学的なアプローチによる材料設計、電極設計、界面設計が可能になると期待される。

現在、このようなアプローチを支える高精度かつマルチスケールな計算手法、オペランド計測技術が、経験的な電気化学分野にも導入されつつある。本提言の研究開発課題を進めることにより、複雑な電気化学デバイスの合理的設計・開発が可能になると期待される。

また、このような研究開発はエネルギーデバイスの最重要要素である耐久性の科学を進展させることも期待される。材料・デバイス寿命は、システム全体において複雑に絡み合った因果関係の結果であり、予測が非常に難しい。これまで寿命評価は、加速試験による評価の短期間化は可能であっても、実際にデバイスを組み上げ評価するという経験的な手法以外は存在しない。上述の合理的設計・開発を進展させることは、電気化学デバイスのデジタルツインの構築につながると期待され、デバイス試作・評価という時間的にもコスト的にもネックとなる研究開発のステージを簡略化する大きな可能性を秘めている。

さらに、電気化学は電子とイオンが絡む化学反応・物質輸送現象として捉えることができるので、本提言で主眼に置くエネルギーシステムだけでなく、バイオ、医療分野への波及効果も期待される。特に、生体内部の電気化学反応の理解やそれを利用した生化学デバイスへの展開や、逆にバイオ分野で進展する研究開発をエネルギーデバイス分野に援用するなどの相乗効果も期待される。



## 2.3.2 非電気化学系の研究者の新規参入による新展開および人材育成

2.3.1で述べたような、物理化学的なアプローチを追求した合理的な電気化学材料・デバイス設計は、物理・化学・化学工学・情報科学・数理科学などの学際的な研究コミュニティの構築によって可能になる。特に、デバイス横断的な学理の構築やそれにもとづく材料・デバイス開発という課題設定やそれを可能にする研究開発体制の構築（4章参照）によって、これまで電気化学系の研究開発に携わってこなかった学問分野の研究者層の参画を促進することが期待される。

例えば、有機合成化学研究者が有する主反応に及ぼす副反応の阻害もしくは助長効果の知見や、電極触媒に限らず触媒化学に精通する研究者の触媒劣化メカニズムの知見は、界面の電子・イオン授受反応の精緻な理解にもとづく新たな材料設計のコンセプトにつながると期待される。

さらに、物理学、数理科学系の研究者が有する、第一原理による計算手法や革新的な現象モデリング手法に関する知見は、複雑な電気化学現象に対して新たな現象理解・記述の方法を生み出すことが期待される。特に、反応場の横断的理解という現象の抽象化と具象化を繰り返す過程においては、この分野の領域の研究者の貢献が期待される。

複雑な反応場の横断的理解に向けては、データ科学的手法の重要性は高まり、研究開発のDXや自動化を推進していく必要がある。計算科学分野の研究者、先端解析分野の研究者、実験自動化技術に精通する研究者の参画によって、大規模なデータ創出が可能になる。また、情報系研究者の参画によって、生成される大規模データから学理や材料・デバイス開発に関する新たな知見を引き出すことが可能になる。無論、どのようなデータを共有すべきかというデータフォーマットなどの枠組みの構築にあたっては、電気化学を専門とする研究者との不可分な連携体制の構築が必要となる。

このように、非電気化学系の研究者の参画は、複雑な電気化学プロセスの研究開発のDXを加速することにつながる。3章の研究開発課題で述べるように、ハイスループット実験・計算を用いたマテリアルズ・インフォマティクス、異種界面の効果や影響を取り入れたデバイス・インフォマティクス、材料・デバイスのプロセス化技術までを視野に入れたプロセス・インフォマティクスへと、研究開発を導くことが期待される。

### コラム

## Electrification of Everything

カーボンニュートラル社会の実現に向けては、化石資源の利用を低減し、エネルギー供給源を最大限再生可能エネルギー起源にしていく必要がある。つまり、究極的にはエネルギー供給はすべて再生可能エネルギーを用い、産業・民生・輸送等のエネルギー利用セクターの電化や水素化を実現できることが望ましい（Electrification of Everything）。一方で、エネルギー利用セクターには脱化石資源化がしやすい領域とにくい領域が存在する。特に、製鉄、セメント生産、石油化学産業などのマテリアル製造は、エネルギー集約型のプロセスであること、現状技術では原料からのマテリアル製造プロセスにおいて原理的にCO<sub>2</sub>排出はさげられない、といった観点で、CO<sub>2</sub>排出削減が非常に難しい領域である。

表1は主なマテリアル産業やその製造プロセスのCO<sub>2</sub>排出量や今後の需要予測を



まとめたものである。

表1 主なマテリアル産業のCO<sub>2</sub>排出量、世界生産量、需要予測  
(参考文献1をもとに作成)

| マテリアル | CO <sub>2</sub> 排出量<br>Mt/年<br>(2000年) | CO <sub>2</sub> 排出量<br>Mt/年<br>(2017年) | 排出原<br>単位 <sup>*1</sup> | 世界生産量<br>Mt/年<br>(2017年) | 2050年の<br>世界需要予測<br>Mt/年 |
|-------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| セメント  | 1,588                                  | 2,200 (直接)                             | 860                     | 4,050                    | 4,682                    |
| 鉄鋼    | 1,319                                  | 3,700                                  | 2,000                   | 1,736 (粗鋼)               | 2,535                    |
| アルミ   | 324                                    | 1,000                                  | 14,400                  | 64.3                     | 110                      |
| 石油化学  | 2,013                                  | 1,500                                  | 1,700                   | 960                      | 1,500                    |

\*1 排出原単位はkg CO<sub>2</sub>/tで表され、当該マテリアルの製造にあたってどれくらいCO<sub>2</sub>が排出されるかを表す。本表での値は参考文献1にもとづき、基準年は業界によって異なる。

表1からわかるように、2050年まで各種マテリアルの需要は増えていくことが見込まれ、これらの製造にかかるCO<sub>2</sub>排出をどのように低減するかは大きな課題となっている。CO<sub>2</sub>排出量低減への方策としては主に以下の3つが考えられている。

- (1) マテリアルの利用効率の向上による需要の低減
- (2) マテリアル製造プロセスの革新
- (3) マテリアルリサイクルの推進

特に、(2)に関しては各マテリアル分野において様々な技術オプションが検討されているが、2050年カーボンニュートラルの実現に寄与しうる量的ポテンシャルを持った技術の多くは現時点で技術成熟度（TRL）が低いため、研究開発を加速させる必要があるであろう。

革新的なマテリアルプロセスとして、電気化学反応を用いたプロセスが期待されている。これまでもアルミニウムの電解法による精錬は知られているが、これを他の金属やセメントに展開しようという考え方である。ただし、製鉄への電解応用は、鉄はアルミニウムに比べて融点が高いため、より電極が過酷な環境にさらされるという問題がある。これに対するアプローチとしては、電気化学反応の効率を高めるための、耐久性およびイオン導電性の高い電解質の開発、電子移動効率の高い電極材料・界面設計が求められている。本提言では主にエネルギーデバイスをとりあげてはいるが、革新的な反応場設計とそれに必要な電極・電解質材料開発といった研究開発課題は共通している。蓄電池、燃料電池、水電解といった今顕在化している研究領域での技術開発が、将来的にマテリアルの電解合成にも波及効果を与える可能性がある。

一方で、再生エネルギーへの依存度を高めていくこと、社会の電化を進めていくことへのリスクも認識しておく必要がある。2021年5月に米国Wall Street Journal紙に“Electrification of Everything”という記事が掲載された。この記事は、カーボンニュートラル社会の推進を目標に急速に進行しようとする“電化”がどのようなメリットやリスクを持つのかを概観したものであり、そもそも米国市民がそのリスクを認識できていないことに対する問題提起を発信している。

米国では、この10年間で停電件数が2倍に増加している。その原因は配電網の老朽化、自然災害など多岐にわたる。米国では、2050年に向けて電力需要が現在の2～3倍に増加するとの予測があり、この需要に対応しつつ安定な電力網を構築するには、高圧送電網の新設やエネルギーグリッド網（分散型エネルギー網）の構築が必要であると考えられている。その解決策の一步として、バイデン政権は80億ドルの高圧送電網の新設計画を発表している。一方で、このような大規模なインフラ施設の新設を市民・社会の合意を得ながらどのように進めていくのか、エネルギーグリッド網の構築に対して消費者が適切に利益享受できる仕組みの設計などの課題が残っている。また、様々な分散型電源が相互に接続し合うということは、サイバーセキュリティ面でのリスクが高まることを意味している。今後、エネルギー技術とICT技術の融合を図るための技術開発やサービスの提供が求められている。

日本においても課題認識は同様であり、JST-CRDSでは戦略プロポーザル「未来エネルギーネットワークの基盤技術とエネルギー需要科学」（2017年3月）を発行し、未来のエネルギーネットワーク像を見据えた、ICT技術にアナロジーを得た新たな研究開発課題や行動経済学等を含めた市場メカニズムの検討の必要性を提言している。また、2018年からは「Society5.0×再生可能エネルギー」を見越した社会・エネルギーシステムの検討や必要技術の研究開発を進めるSIP「IoE（Internet of Energy）社会のエネルギーシステム」が開始されている。

一方で、米国ではエネルギー技術とICT技術の融合を図るための技術開発、特にエネルギーシステムを支えるためのAI技術やソフトウェア技術に関するスタートアップへの支援が進んでいる。当該領域は日本では必ずしもスタートアップ等の取り組みが顕在化していない領域であるが、カーボンニュートラル社会の基盤をなす電化社会のリスクを低減させる基盤技術として、研究開発や新規サービス創出を積極化させる必要がある。

#### 【参考文献】

- 1) Katrin Daehn et al., Innovations to decarbonize materials industries, Nature Reviews Materials 7,4,275 (2021)
- 2) The Electrification of Everything : What You Need to Know, Wall Street Journal May 15 (2021)
- 3) Energize Inc., Electrifying Everything – An Energy PoV -, <https://www.energize.vc/news-insights/electrifying-everything-the-top-30-software-innovators>
- 4) JST-CRDS, 未来エネルギーネットワークの基盤技術とエネルギー需要科学～2050年超の一般家庭でのエネルギー需給構造変化に向けて～（2017）, <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2016-SP-04.html>

## 3 | 具体的な研究開発課題

電気・物質エネルギー変換反応場を拡張し、新たな材料・デバイス開発を進めるための研究開発課題について述べる。従来の個別の電気化学システムの材料・デバイス開発にとどまらない横断的な研究開発を進めるための研究開発課題を3.1～3.4に詳述する。

### 3.1 電気・物質エネルギー変換反応場の横断的理解に向けた基盤科学の構築

蓄電池や電解・燃料電池などの電気化学システムは高度化かつ先鋭化されており、個々のシステムの研究開発は非常に個別化されているという現状がある。また、個々の電気化学システムの研究開発は材料開発からシステム構築まで非常に長い時間が必要である。今後さらに増大する電気化学システムの需要に対して、研究開発を短縮化するための方法論や異なるデバイス間の知見を融合することによる開発加速などが必要になる。本提言では、様々な電気化学システムの反応場に共通する学理の構築が、派生する材料・デバイス開発の研究開発の加速や新たなコンセプトの創出につながると期待している。また、高電圧化が期待される全固体電池や濃厚電解液系二次電池や高電流・高出力な水電解・燃料電池といった反応場拡張に伴う極限環境および複雑系の反応場を理解する方法論の構築が必要となる。具体的には、以下のような電気・物質エネルギー変換プロセスに関する学理構築のための研究開発課題に取り組むべきである（図3-1-1）。

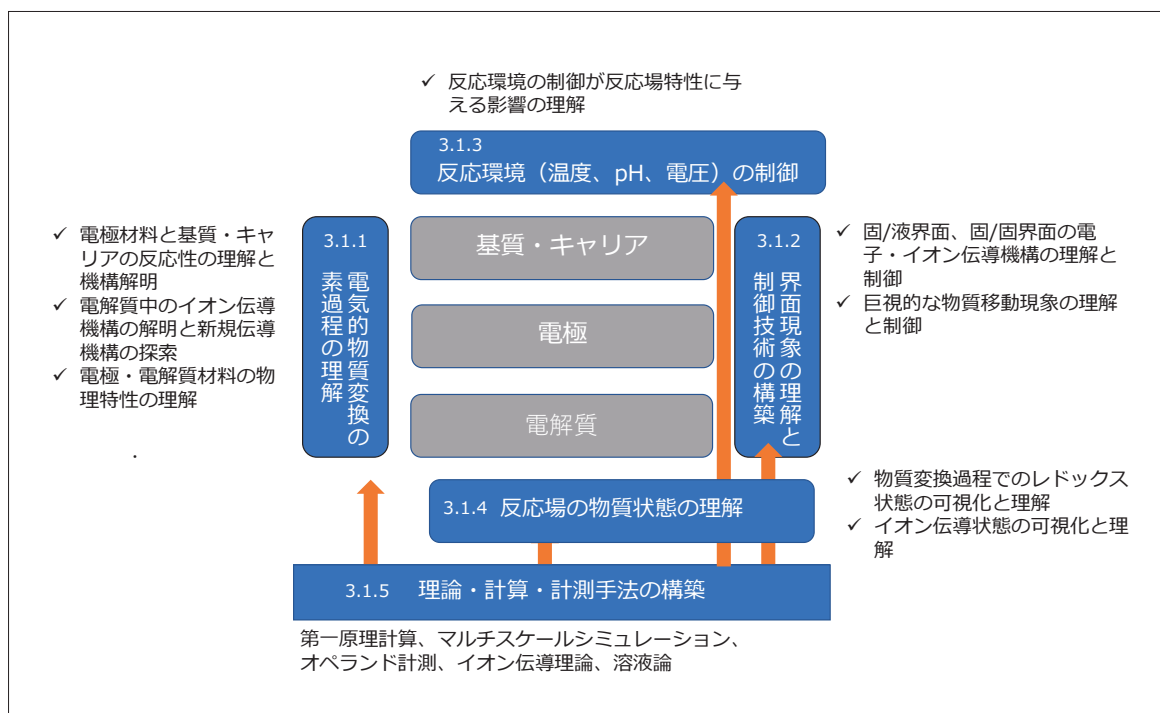


図3-1-1 反応場の横断的理解に向けた基盤的な科学および技術体系の構築

### 3.1.1 電気-物質エネルギー変換プロセスの素過程の理解

電気-物質エネルギー変換プロセスの性能や効率は反応場で生じているナノスケールの素過程に起因するため、それらを理解し制御する必要がある。反応基質およびキャリア、電極材料、電解質等の反応場の構成要素を規定することで決まる熱力学的な特性とともに、素過程の速度論的理解を進めることが重要となる。

これらの理解には、①基質・キャリアと電極との相互作用、②基質・キャリアと電解質との相互作用、③基質・キャリア/電極/電解質の界面での現象理解が必要となる。まず、①、②について研究開発課題を述べる。③については3.1.2に記載する。

①については、燃料電池や電解における電極触媒と基質との相互作用や蓄電池における活物質とキャリアとの相互作用の反応機構の解明やそれにもとづく反応性の評価を進める必要がある。これらの反応性評価には、計算科学的な手法による反応経路の探索や活性化エネルギーの評価、先端計測による電子授受過程や酸化還元状態の可視化を援用することも求められる。

②については、電解質中でのイオン伝導機構の解明と新規伝導機構の探索が主な研究開発課題となる。電解液、イオン液体、ポリマー系固体電解質、無機系固体電解質など材料の物質相や組成、結晶構造などとキャリアの組み合わせに応じて様々なイオン伝導機構が知られている。電解質としては幅広いデバイス作動状態（温度、pH、電圧）で高速かつ安定的にイオン伝導特性を示すことが開発目標となるため、材料横断的にイオン伝導機構の発現メカニズムを理解し、その発現メカニズムを新規材料の設計に適応する方法論を構築することが必要となる。また、近年では液相と固相が混じり合うもしくは両者の性質が共存するような新たな電解質が生まれてきているため、新規材料ならではの新たなイオン伝導機構の探索も重要な研究開発課題である。

また、電極材料、電解質材料そのものの特性理解という観点でも、基質との触媒能やキャリアの脱挿入能の起源となる物質の電子状態の理解やその制御手法の構築、材料の熱安定性評価・酸化還元安定性評価などの方法論の構築が重要な研究開発課題である。

ここに挙げた研究開発課題は従来の電極開発、電解質開発でも進められてきているが、今後は反応性の共通因子や相違性を司るのはどのような材料物性に起因するのかという横断的な視点での研究開発を進める必要があるであろう。

このような課題を推進するには、先に述べた計算科学や計測技術の援用に加え、インフォマティクス的なアプローチも重要となると考えられる。

### 3.1.2 界面現象の理解と制御技術の構築

3.1.1では電気-物質エネルギー変換プロセスを素過程に分解した際の研究開発課題について述べたが、実際にはこれらのプロセスは基質・キャリア、電極、電解質からなる三相界面（もしくは四相界面）を反応場として進行する。またこの反応場中で電極や電解質がナノからメソ、マクロまで複雑な階層構造をなしている。このような反応場の複雑性が電気化学システムの研究開発を難しくしている最大の原因である。例えば、リチウムイオン電池では電極と電解液の界面に被膜構造が形成され（SEI被膜）、このSEIが電池の安定化等の性能向上に大きく貢献することが知られているが、SEIの形成メカニズムや材料依存性などは詳しく理解できていない。また、燃料電池や電解においても、電極触媒上に電解質（アイオノマー）を被膜することで、イオン伝導性や反応性を向上させる設計戦略がとられている。

電気化学プロセスの効率性は過電圧（抵抗）を指標として表現されることが多いが、その多くの因子は界面に起因するものであり、プロセスの高効率化という観点からも界面現象を理解し制御する手法を構築する必要がある。

まずは、電気化学界面での界面構造と物性との相関や関係性を理解する必要がある。それには、固体-液



体界面、固体-固体界面など様々な系において、界面がどのような構造をなしているのか、その界面はどのような物理化学的な状態を有しているのか、といった性質を微視的に理解することが求められる。また、電気化学反応にとって重要な電気二重層がどのように形成されるのか、それが動的にどのように変化するのかなどの学理を構築することは基礎的な立場から重要な課題である。

次に界面現象に起因する抵抗因子の微視的理解とその低減手法に関する共通理解の促進が求められる。液系リチウムイオン電池、全固体リチウムイオン電池、燃料電池などそれぞれの系で界面抵抗を低減するための界面設計手法が提案されている。反応場の横断的理解という観点からはそれらの方法論がどのような物理化学的な特性によって抵抗を低減しているのかを理解し、その共通性を理解することによって、異なる電気化学システムへの方法論の援用を可能にすると考えられる。

また、抵抗因子の理解という観点では、ナノスケールの界面現象だけではなく、メソスケールからマクロスケールまでの物質変換プロセスを理解するためのマルチスケールシミュレーション技術やモデリング技術の構築も今後重要な研究開発課題となる。

### 3.1.3 反応環境と物質変換プロセスの因果関係の理解と制御

電気・物質エネルギー変換プロセスは反応場の構成部材だけではなく、温度、電圧、pHなどどのような環境で動作させるかという反応環境もその性能を大きく左右する。したがって、3.1.1や3.1.2で取り扱うある環境での素過程や反応性の理解と同時に、反応環境を能動的に制御した場合に材料やキャリア・基質などの反応場がどのような影響を受けるのかについても体系的に理解することが求められる。今後再生可能エネルギーの大量導入を念頭に置いた際には、大電流・高電圧・大型化した電気化学システムの実装も必要なため、反応環境としてもこれまでよりも広い範囲を検討する必要性が生じると考えられる。また、頻繁に変動する再生可能エネルギーに追従できるシステムを設計する際にも、環境変化が反応場に与える影響を理解することは重要な要素となる。

研究開発課題としては、物質変換に伴う局所的な環境変化と反応性などの反応場の変化との因果関係の理解が挙げられる。例えば、CO<sub>2</sub>電解など物質変換の選択性が大きな性能要件となる場合には、このような局所的な環境変化の効果が重要な問題となっている。一方で、従来はこのような研究課題は小型のデバイスを用いた基礎的な研究開発に留まっており、今後このような研究で得られる成果を実デバイスのスケールに展開するためのサイエンスや方法論の構築が必要となる。

また、実デバイスとの関係性においては、システムを大型化した際の物質移動の不均一性を取り扱う方法論の構築が求められる。これには3.1.2で言及したマルチスケールシミュレーションの方法論や電気化学プロセスだけではなく熱の効果も取り入れたマルチフィジックスシミュレーション技術の方法論が必要となる。

### 3.1.4 反応場の物質状態の理解

蓄電池、燃料電池、電解などの異なる電気化学システムの反応場の横断的理解に向けて、反応プロセスの素過程の理解が重要であることを3.1.1、3.1.2で述べた。これを進めるためには、反応場の構成要素である基質・キャリア、電極、電解質などがどのような物質状態にあるかを理解することが不可欠である。物質状態の理解という観点では多岐にわたる研究開発課題があるが、ここでは反応場の横断的理解という観点で重要と考えられる研究開発課題を述べる。

第一に、イオンの溶媒和状態の理解が挙げられる。リチウムイオン電池ではLiキャリアに対してどのように有機溶媒が構造形成するかはイオン伝導やSEI被膜の形成に関して重要な性能因子となっているが、界面ダイナミクスを含めた溶媒和構造の理解は不十分である。また、Liのような一価キャリアと、Mg、Caのような多価イオン電池では溶媒和状態と伝導性との関係が異なり、先進的な多価イオン電池では溶媒和の理解が重

要な課題となっている。また、電解・燃料電池においても、電解液のpHに応じてイオンの存在状態が異なることで反応性が異なり、電解質の環境を制御することでデバイスの性能を向上させるような取り組みが進んでいる。

第二に、電極・電解質の電子状態や酸化還元状態などの物理化学的な状態やとその時空間ダイナミクスの理解が挙げられる。材料の物質状態の理解は合理的な材料設計において必須となりつつあるが、電気化学システムでは従来物質状態の可視化が難しいという状況があり、これまで経験則にもとづく研究開発が主流であった。3.1.5に述べる計測ツール等の発展と併せて着実にこのような研究開発を進めていく必要がある。

### 3.1.5 理論・計算・計測手法の構築

3.1.1～3.1.4にわたって、電気化学システムによらずに反応場を横断的に取り扱うための研究開発課題を示した。いずれにおいても、反応場の物理化学的な理解が重要となり、それを支える理論・計算・計測手法についても最先端の方法論を構築していく必要がある。

計算手法については、電極・電解質のバルクの第一原理計算や表面・界面のダイナミクスを取り扱える第一原理計算などが大きな研究開発課題である。また、微視的な反応場を超えて、メソスケールからマクロスケールにかけたデバイスとしてのマルチスケールシミュレーション技術の構築も重要な要素である。

計測手法については、電極、電解質、キャリア・基質などの物質状態の理解を支える計測技術を進展させる必要がある。特に電池の充放電過程や燃料電池や電解の反応進行過程をオペランドで計測する技術の進展が期待されている。これらは、反応の素過程理解や物質状態の理解という基礎的な関心に応えるだけでなく、システムの劣化予測などの応用的な面からも進展が期待されている。また近年、水素や酸素などの軽元素の計測が可能になってきており、このような計測技術をさらに発展させることで反応場のより詳細な理解にいたることが可能になると期待される。特に電気化学デバイスを作動状態で理解するオペランド計測技術、TEMやX線・中性子回折などを組み合わせたマルチモーダル計測を開発することが重要である。また、開発した最先端の計測手法を最先端の研究インフラに実装していくような支援も求められる。

理論については、界面現象を再現する理論およびモデリング技術の構築が期待される。特に溶媒和現象は近年、固体-液体界面、固体-固体界面といった界面の多様性に応じて改めて見直しが進んでおり、溶液系の科学を含んだ体系化が期待される。近年では大規模な数値計算によって個別の界面現象についての理解は進んでいるが、それらを物理化学的な視点で体系化するような研究開発も進める必要がある。

またイオン伝導に関しても、イオン伝導機構やそれを媒介する材料の性質との関係性も含めた体系化が望まれる。

## 3.2 電気化学デバイスの動作環境の拡大に資する材料開発

本提言の中心的な概念である反応場は、電気・物質エネルギー変換プロセスが生じる場所に存在する材料群と、反応環境を規定するパラメーターから構成されている。それらの材料と反応パラメーターの間には、「材料を変えることで反応パラメーターが変化する」、「反応パラメーターを変えるためには材料を変える必要がある」、といった強い相関関係がある。この強い相関こそが、電気化学刷新のためには、それらをすべて含めた全体を一体のもの(=「反応場」)としてとらえていかなければならないと我々が考える根拠となっている。この節では、電気・物質エネルギー変換プロセスに関与する代表的な材料に関して求められる材料開発の方向性について述べる。

### 3.2.1 反応場の拡張に資する電解質開発

電解質は、電気・物質エネルギー変換プロセスそのものに直接的に関与する材料ではないものの、活物質などのイオンに対するイオン導電性を通して電気化学デバイスの抵抗損失に、イオンとの親和性（溶媒和のエネルギーなど）を通して活性化損失に、イオンの溶解度を通してデバイスの最大電流量などに、関係する材料である。また、デバイスが動作する際の正極・負極それぞれの電位での電解質の安定性も、デバイスの耐久性・寿命に大きな影響を与える。これらの、電気化学デバイスの性能に与える直接的な影響以外に、電解質の酸化還元電位、pH、温度などの動作パラメーターが、そのデバイスで利用できる材料（集電電極、電極触媒、導電助剤など）の選択に制限を加えていることを通して、間接的にデバイス性能を支配している。

具体的な研究開発課題の例としては、100℃～200℃で高イオン伝導性を示す高分子材料、400℃前後で高イオン伝導性を示す無機固体材料、高電位でも安定動作する電解液材料、中性領域で高いイオン伝導性を示す電解液などがある。それぞれ、PEM型燃料電池/電解装置、SOFC/SOEC、5V級リチウム（イオン）電池等のデバイスの有する性能の限界や欠点を克服するために強く求められている材料である。また、すでに精力的な研究開発が行われている、全固体リチウムイオン電池用の長寿命・高イオン伝導率の固体電解質や、NaなどのLi以外の金属イオンに適した電解質材料についても、カーボンニュートラル実現の鍵を握る材料として実現が強く期待されている。

### 3.2.2 反応場の拡張に資する電極材料

電気・物質エネルギー変換プロセスにおいて、電極表面は基質との間に電子の授受が起こる場所であり、その意味で電極は反応効率や反応速度などの特性を握る要である。電極表面では基質との間の電子の授受以外に、基質が電子を授受できる物質まで変化していく前駆反応や、電極から離脱する物質まで変化していく後継反応などを伴う逐次反応が起こる場合がある。こうした表面での反応が速やかに起こるためには、電極表面はその反応を触媒する能力を有することが必要であり、このことから、基質と最適な触媒能を持つ電極との間にはマッチングの善し悪しが生まれる。一般には、基質を変更すれば、同時に電極材料を変更する必要がある場合が多い。

また、電極反応の起こりやすさは、電極の種類だけでなく、温度や電解液のpHといった反応場のパラメーターにも大きく依存する。反応場パラメーターを変えることで今まで反応性が低くて使えなかった電極が使えるようになる、あるいは、逆に、電極材料が変わることでそれまで必須であった反応パラメーターをより都合の良いものに変更できるようになるといったことが可能になることはよく知られている。

具体的な研究開発課題としては、資源制約を克服するための豊富な元素から作られる高性能電極、電極性能を向上させるための高次ナノ構造、触媒と導電性担体との高次な融合による革新的電極材料などが考えられる。

例えば、高電位あるいは高温の酸化性雰囲気の中でその環境に耐えられる唯一の材料として用いられる貴金属電極を、反応パラメーターをより温和な状態に変えて、低コストな卑金属電極を使用できるようにすることなどがその例に当たる。

電極の化学組成以外に、電極性能に大きな影響を与える因子としては、そのサブ $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ のミクロ構造（モルフォロジー）がある。電極－電解質－基質の接するいわゆる3相界面の面積が、見かけの電極面積あたりにどのくらい存在するかは、実用的な電気化学デバイスを得るためには極めて重要である。その物質の単結晶表面がどれだけ高い電気化学活性を示したとしても、有効面積が大きな電極構造を形成する方法がない場合は、実用に供することはできない。高い触媒活性と大きな比表面積を合わせ持つような電極ミクロ構造を構成する技術は非常に重要である。また、電池において電極材料や活物質材料の電子伝導率が必ずしも高くない場合には、電極内の抵抗損失を下げるために、導電性を付与する別の材料と混合して電極を構成



することが行われるが、そうした場合には、複合体として電極のモルフォロジー（電極/導電補助材比、一次粒子径、凝集状態、など）を最適化することが求められる。

ここで述べたような電解質、電極は、過去数十年にわたり常に求められてきたものである。それに対して多くの研究開発が綿々と続けられてきており、その成果の集積が現在の電気化学デバイス・システムであるということもできる。また、2.2.3で示したように日本は材料・デバイスにおいて革新技術の実用化を先導し、産業的にも高い存在感を発揮してきた。こうした歴史を踏まえたうえでさらに、反応場拡張に資する材料開発を提言するには、電気化学周辺の科学技術の近年の著しい発展にその理由がある。

新材料開発の面では、ハイスループット実験の電気化学系への応用とマテリアルズ・インフォマティクスを活用した材料候補探索の活用で、新材料のスクリーニングが飛躍的に高速化される兆候がある。どちらの手法も、勘と経験に頼る従来の材料開発を根本から覆すものと期待されている。また、複雑な電気化学系を対象としたシミュレーション手法や、実デバイスそのものを詳細に調べるオペランド計測技術などの材料開発を支える基盤技術に関しても、精力的な研究と着実な進歩がみられている。これらの潮流を、蓄電池、燃料電池、水電解などの分野における技術蓄積で日本が他国に対して一定の優位性を保っている今適用することで、世界に先駆けて新しい電気化学材料開発スキームを確立できる可能性がある。

「これまでできなかったことができる」ようになり始めた今こそが、本提言が主張するデバイス横断的な反応場拡張へのアプローチを開始すべき時である。

### 3.3 新規材料を用いた革新的電気化学デバイスの創出

カーボンニュートラル社会の実現に向けては、運輸・産業・住宅・民生等あらゆる部門の電化もしくは低炭素エネルギーの導入が不可欠であり、電気化学システムの大規模導入や応用領域の多様化に貢献する革新的な電気化学デバイスを創出する必要がある。各応用領域で求められるシステムの耐用年数やコスト、電気化学的特性等に応じて、材料およびデバイス構造を最適化していく必要がある。その際には3.1で掲げた反応場の横断的理解にもとづいて、新たな材料を合理的に設計したデバイス開発に取り組む必要がある。

#### 3.3.1 革新的な反応場を利用した電気化学デバイスの創出

蓄電池、電解・燃料電池などの電気化学システムの研究開発は長い歴史を有しているが、近年ではカーボンニュートラル社会への要請から全世界的に早期の社会実装を進めるべくデバイス開発や大規模システムの開発が進んでいる。

一方で、現在開発が進んでいる電気化学システムは、カーボンニュートラル社会に貢献するという観点で見ると、必ずしも最適化されておらず、より理想的な反応場を利用したデバイス開発が今後必要となる。具体的には、以下のようなデバイス開発に関するニーズが挙げられる。例えば水電解分野では、現有のアルカリ電解は高いアルカリ環境で動作するために材料負荷やオペレーションコストが高いことが知られており、中性領域で動作する水電解デバイスや水の資源制約を克服する海水電解が期待されている。また、電極材料の資源制約を克服するという観点ではPEM電解・燃料電池にかわるアニオン交換膜型水電解デバイスも注目される研究開発課題である。蓄電池に関しても、資源制約を克服した電極材料や新たな電解質を利用した高い安全性を持つ蓄電池、高電圧下で安定に動作する蓄電池の開発が期待される。具体的には、5V程度の高電圧下で動作するリチウムイオン電池、リチウム資源を使わない多価イオン電池やアニオン電池などが研究開発課題としてあげられる。

また、新たなエネルギー用途としては、CO<sub>2</sub>からの化成品合成への電気化学プロセスの適用やアンモニア



やMCHなどの水素以外のエネルギーキャリアへの電解直接合成なども、より効率的なエネルギープロセスの構築を求め取り組むべき研究開発課題である。

### 3.3.2 電気・物質エネルギー変換プロセスの適用範囲の拡張

3.3.1ではエネルギー分野での革新的なデバイス開発について述べたが、電気・物質エネルギー変換プロセスは他の応用領域にも今後大きく派生していくと考えられる。

例えば、上記の含炭素プロセスの電気化学プロセスは食糧分野へと応用することで、天然の代謝経路を超越するアルコール・糖の人工合成を可能にすることが期待される。このような研究開発は米国DOEのプロジェクトで近年推進されているほか、日本でもムーンショットプログラムのなかで一部研究開発が進んでいる。これらは微生物を利用した電気化学システムとして検討されているが、一連の物質変換過程のどの部分を人工プロセスで置き換え、どの部分を天然プロセスで進めるかといった検討はまだ基礎研究レベルであり、今後の研究の進展が期待される。

また、2章コラム「Electrification of Everything」で述べたように、エネルギー問題の解決には重工業領域におけるマテリアル製造のCO<sub>2</sub>削減に取り組む必要がある。現在、製鉄、セメントといった領域では水素や合成ガスなどの低環境負荷な還元剤への代替を主なオプションとして取り組んでいるが、反応場をうまく設計することにより、電氣的に還元していくことも今後の方策と考えられる。

一方で、3.3.1および3.3.2に共通して存在する課題として、エネルギーや食糧の問題を解決するには、電気化学システムを大規模システムとして実装するためのスケールアップ技術が必要であり、反応が電極表面で起きる、いわば“2次元”な電気化学システムを低コストでスケールアップするためのシステム工学的な研究開発にも力を入れる必要がある。

## 3.4 電気化学材料・デバイスインフォマティクスの確立

3.1にあげたデバイス横断的な反応場の理解を進めることで、異種材料からなる界面現象の理解、反応場の環境特性（温度、電位、pH）に応じた物質状態の理解、電子伝導・イオン伝導機構の解明と新たな伝導機構の探索などの反応場の基盤科学の高度化が期待される。また、反応場の理解を支えるためのオペランド計測技術、第一原理計算・マルチスケールシミュレーション手法やデータ科学的な方法論の構築も重要であり、これらの基盤科学や技術を統合的に活用することで、電気化学材料あるいは電気化学デバイスの研究開発を加速することが期待される。

しかしながら、電気化学プロセスは非常に複雑な過程を伴う。特に本提言が求める反応場の拡張は、高電流、高電圧、高温等の過酷な環境を伴う場合も多いため、物質変換から物質移動までを含めたプロセスがさらに複雑化することが想定される。

電気化学デバイスの構成要素としては、反応基質、電子・イオンといった電荷担体（キャリア）、電極材料、電解質材料などが含まれる。また、反応環境としては、温度、pH、電圧などが挙げられる。電気化学材料あるいは電気化学デバイスの性能を最適化するには、目的・用途に合わせてこれら多数の要素の組み合わせを最適化することが必要になる。さらに、電極表面での反応は、固一液または固一液一気のように異なる相の物質が混在する界面で起きる現象であり、デバイス特性を最適化するためにそれぞれの材料や界面構造を統合的に制御することも求められる。

また、実用的な電気化学デバイスは、ある程度の大きさを持つがゆえに、電極面内の抵抗による電圧・電流のばらつきや、重力の影響や物質移動律速などによる電解液内の物質濃度の不均一化を考慮することも重

要になる場合がある。さらには、再生可能エネルギー電源の周期的変動あるいは突発的変動に対応できるデバイスである必要があり、また、長期間運転が必要になるデバイスの場合、電極触媒活性などの経時変化に対応して運転条件を調整する必要性も想定される。

このように電気化学プロセスは幅広い空間・時間スケールでの非定常な複雑現象であり、このような現象を物理化学的な立場から理解するために必要なシミュレーション技術や理論を構築するためには、長期的な研究開発の取り組みが必要になる。したがって、材料やデバイス構造、反応環境の最適化にかかる時間を短縮するためには、物理化学的なアプローチだけでなくインフォマティクス技術を活用することが有効と考える。ここでインフォマティクスとは、実験科学、理論科学、計算科学、データ科学の4つの科学を統合的に活用する手法であり、具体的にはハイスループット計算やハイスループット実験、先端計測によって得られるデータをも利用して最適な材料・条件を探索するものである。

リチウムイオン電池用の正極材料や固体電解質、水電解用電極触媒などの電気化学材料探索は、これまでマテリアルズ・インフォマティクスの活用事例として進められ、一定の成果がでてきている。しかし、従来はデバイスごとに最適な材料の探索に活用されてきていたが、今後はデバイス横断的に材料ごとのデータを統合し利用していくことが重要になる。幅広いデバイス・材料でのデータを、転位学習などのデータ科学の手法を用いて解析することで、反応場の拡張を実現することが可能になる。例えば、リチウムイオン電池用固体電解質のデータを活用した水電解用中温固体電解質の探索などの例が考えられる。

電気化学材料を変更することによって、当然、最適な反応環境も変わる。このため、電気化学材料を探索するにあたっては、反応環境（温度、pH、電圧など）も最適化する必要がある。ここでは、プロセスインフォマティクスが有効であり、多数のパラメーターから影響度の高い因子を抽出する次数低減などのデータ科学の手法などによって、複雑な系から支配因子を特定することによって、最適な反応環境をより効率的に探索できるようになると期待できる。

インフォマティクスを可能にするには、多くの材料・反応条件において大量のデータを生成するハイスループット実験やハイスループット計算の方法論の構築が必要である。一方で、簡便な実験手法で得られる材料・デバイス特性をもとにしたデータベースやそれにもとづく解析結果は誤った解釈を与えかねないことも懸念されている。現実の材料・デバイス設計に適用可能な実験プロトコルの構築やデータ活用の方法論の構築が不可欠である。

電気化学プロセスは、幅広い空間・時間スケールでの現象が複雑に絡み合った非定常現象であり、先端計測技術をもってしてもそのすべてを把握するのは難しい。このため計測インフォマティクスの活用も重要である。再生可能エネルギーの変動への対応やデバイスの長期安定運転のためには、デバイス内での電圧・電流分布や物質移動の状態を把握することが重要であるが、これらをリアルタイムで計測することは困難である。ソフトセンサーのようにリアルタイムで測定可能なデータから電圧・電流分布や物質移動を可視化する手法の構築などが望まれる。

中長期的には、電気化学材料インフォマティクス（マテリアルズ・インフォマティクス）、プロセス・インフォマティクス、計測インフォマティクスの3つを強く連携させることで、電気化学デバイス・インフォマティクスへと発展させる（図3-4-1）。ここで、電気化学デバイス・インフォマティクスとは、実験・計算によるビッグデータを駆使したデータ駆動型のデバイス設計手法を意味する。電気化学材料と反応環境の同時最適化だけでなく、デバイスや材料の寿命の予測、加速診断技術の構築にも繋げることが可能であり、デバイス試作・評価という時間的にもコスト的にもネックとなる研究開発のステージを簡略化する大きな可能性を秘めている。また、カーボンニュートラル社会の実現に大きく貢献する新規な電気化学デバイス開発の加速が可能になる。

JST-CRDSでは、戦略プロポーザル「材料創製技術を革新するプロセス科学基盤～プロセス・インフォマティクス～」(2021年6月)を発行し、マテリアルズ・インフォマティクス、計測インフォマティクス、プロセス・インフォマティクスが連携した材料・デバイス開発の重要性や材料プロセスに対する統合的な記述子の導入の推進を提言している。本プロポーザルで進める電気・物質エネルギー変換プロセスの横断的理解やイン

フォマティクス導入は、「プロセス科学基盤」の技術対象として適切な候補になると考えられる。

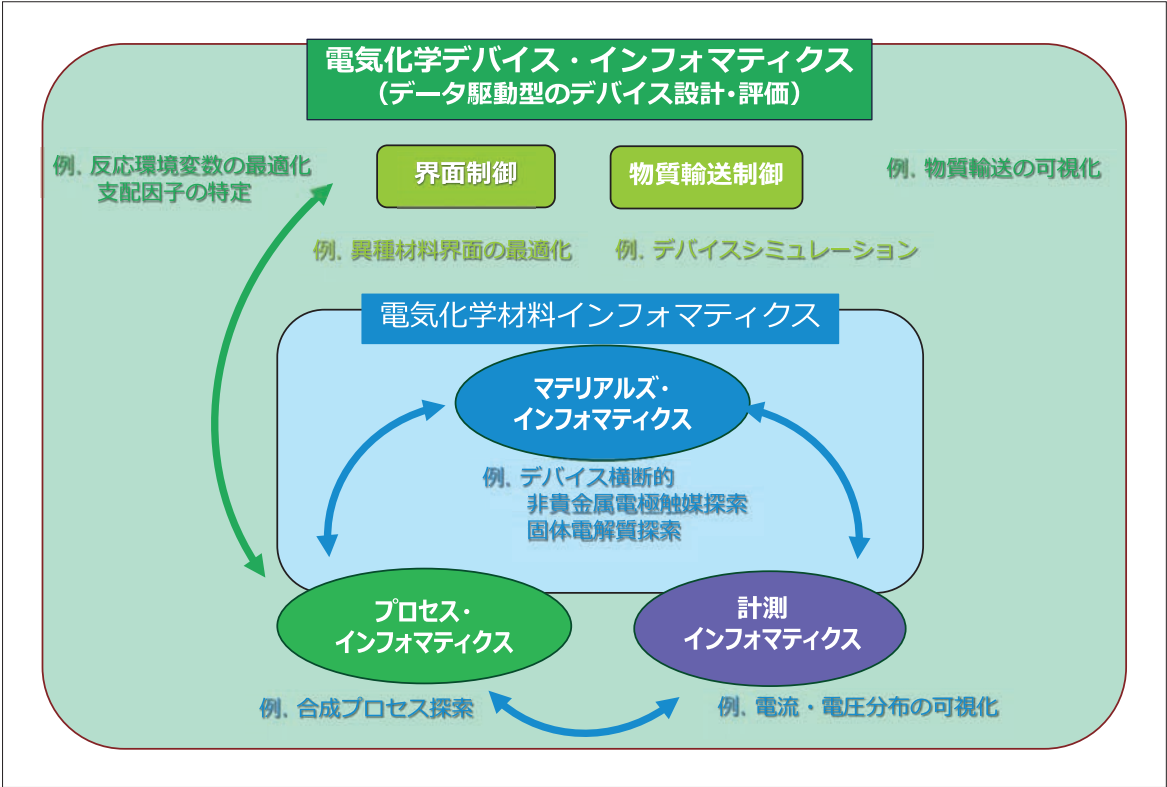


図3-4-1 電気化学材料・デバイスインフォマティクスの確立

## 4 | 研究開発の推進方法および時間軸

### 4.1 現在の研究開発体制の問題点

3章で述べた研究開発課題を推進するうえで、電気化学システムの現在の研究開発体制に関する問題点を整理する。

電気・物質エネルギー変換技術を利用した材料・デバイス・システムの研究開発の歴史は古い。特に、燃料電池、蓄電池、水電解といった再生可能エネルギーを基軸とした社会への移行を支える電気化学システムは基礎研究から応用研究レベルまで多くの国家プロジェクトによって研究開発が進められてきた。これらの研究開発は日本発の技術の構築やそれによる製品の上市などに大きな貢献を果たしてきた。特に、大学・国研を中心とした材料・デバイスの基礎研究、NEDOプロジェクトを中心とした橋渡し研究、そこから派生する技術研究組合・コンソーシアムによる本格的な産学連携という研究開発体制は、高性能な燃料電池、蓄電池の創出に技術面・人材面等で大きく貢献してきた。

一方で、技術の先鋭化に伴い個々のシステムにおける研究開発課題が複雑化したことに相まって、燃料電池のみ、蓄電池のみ、など特定のシステムごとへの研究者の分断が進みすぎ、研究開発の細分化が行き過ぎってしまった点に問題がある。

付録3に示すように、他国が電気化学分野の研究者人口を急速に増やしているなかで、日本は研究者人口が伸び悩んでいる。今後も劇的な研究者人口の増加が望めない状況下で、高いアクティビティを発揮し続けるためには、①現在電気化学に従事する研究者の流動性を高め、新たな領域での研究を活性化させる、②これまで電気化学に関与していなかった研究者の新規参入を促す、③国際協力による実質的な研究者数の向上を進める必要がある。

図4-1-1に主な電気化学システムに関する現在の研究開発体制を示す。

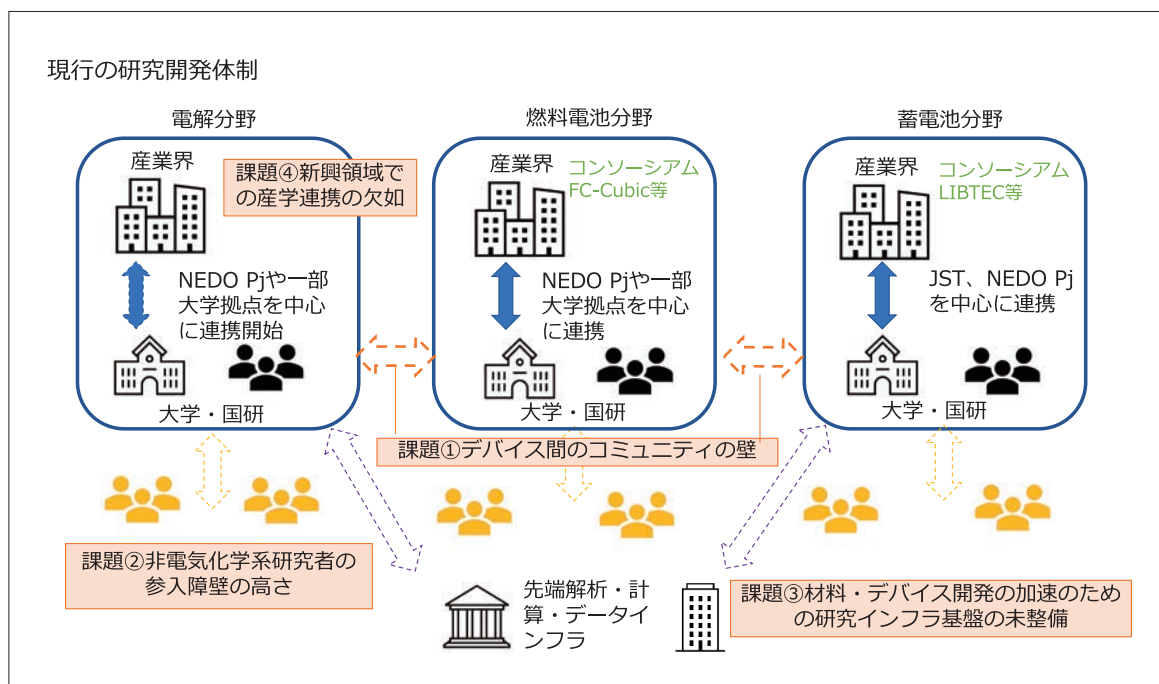


図4-1-1 電気化学システムの研究開発における研究開発体制の課題



現行の研究開発体制は、3章に挙げた研究開発課題を推進するためには以下のような問題点が存在している。

1つ目は、先に指摘した技術の先鋭化に伴い対象とするデバイス間での研究コミュニティに壁が存在することである。もちろん関連する学協会や国プロを通じてゆるやかな連携体制やデバイスを越える研究を展開する研究者は存在するものの、これらをより確固たるものにする必要がある。

2つ目は、電気化学デバイス研究への参入障壁の高さである。電気化学分野では材料開発からPoCレベルのデバイス開発に移行するところが非常に難易度が高い。例えば、小型のデバイスの組み上げ、性能評価に関する実験手順など、経験が必要な部分が多い。燃料電池では、NEDOプロジェクトを通じて標準的な実験プロトコルの整備やデバイス開発・解析支援などが進んできているが、新たな材料シーズやデバイスコンセプトを取り入れるためには、材料研究者をはじめとする非専門家をコミュニティに招き入れる方策は必要である。

3つ目は、それぞれの電気化学システム領域で生まれる材料・デバイスのシーズに関する知見やアイデアを系統的に活用する研究インフラが未整備である点である。近年では材料・デバイス開発に計算・計測データを活用したインフォマティクスを導入する事例は増えてきているが、個別の研究者や研究チームが個別の課題を解決するのに利用されているのが現状である。今後はシステム横断的に材料・デバイスの基礎的なデータを集積し活用していくような研究データインフラの充実が研究開発の加速に向けて必要と考えられる。

4つ目は、早期のカーボンニュートラル社会の実現に向けて、電解を利用した水素・化成品製造などの新興領域での産学官の連携の促進が諸外国に比べて遅れている点である。燃料電池分野では、技術研究組合FC-Cubicの活動や関連プロジェクトを通じて産業界の技術的なボトルネックをアカデミアと共有し、アカデミアがその解決のための基礎科学的な知見や技術シーズを提供する仕組みが構築されている。このような取り組みを新興領域でも進める、もしくはシステム横断的に進めることは有効だと考えられる。

以上の課題をもとに、本提言では図4-1-2のような研究システムの構築を目指し、4.2に示す4つの推進方法を提言する。

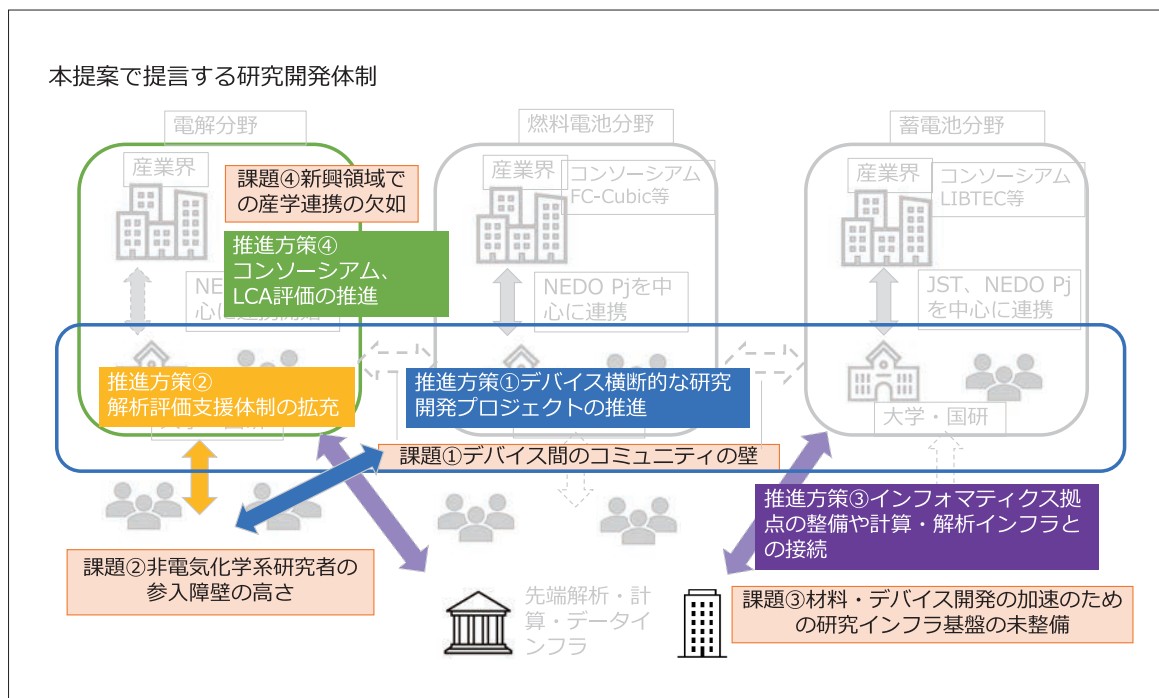


図4-1-2 本提言で提案する研究開発体制と4つの方策

## 4.2 研究開発の推進方法

### 4.2.1 電気化学システム横断的な材料・デバイス開発プロジェクトの推進

4.1で述べたように増大する電気化学システムへのニーズに対し、材料・デバイス開発を従来の延長で行うだけでは本分野に積極的な研究開発投資を行う諸外国に後れをとってしまうことが危惧される。この懸念を克服するためには、3.1で述べたように電気・物質エネルギー変換反応場の横断的な理解を進め、異なるシステム間でのアイデアや知見の交流を促進し、研究開発を加速する必要がある。この反応場の横断的な理解に向けては、様々な反応場を対象とする電気化学材料・デバイスの研究者や研究チームが一堂に会する研究開発プロジェクトを推進するべきである。

現在電気化学分野に関与する研究者だけで、反応場の横断的理解を飛躍的に進めることは難しく、物性物理、物理化学、計算科学、材料科学、反応工学といった多様な背景を持つ研究者が新たに参画することが望ましい。そのような観点から文部科学省やJSTが推進するような課題解決を志向した長期的な視点での基礎研究プロジェクトが有効と考えられる。このような多様な分野が集結するプロジェクトを推進することは、従来、電気化学に関心の低かった材料研究者等が課題を認識しやすくなり、多様な応用探索を可能にするという観点で新規参入障壁を下げることが期待される。

また、新規参入を促すという観点では、チーム型プロジェクトの推進によって材料研究者、デバイス研究者等の連携を奨励するなどの工夫も有効に働くと考えられる。

このアプローチの成否を握るのは、適切に設計されたチーム作りである。例えば、合成化学に強い材料研究者、実験データおよび量子化学計算データを駆使できるマテリアルズ・インフォマティクスの研究者、電気化学を解するデバイス開発研究者のチームが、問題意識を共有し、研究を進める体制が不可欠である。加えて、様々な先端解析設備を駆使した物性評価のプロフェッショナルが、複雑に絡み合う因果関係を解きほぐし、素過程を解き明かしてゆくと共に、各材料を組み合わせでデバイス、さらにはシステムを構築できるエンジニアの知恵を集約し、トータルとして効率的に動作するデバイスをプログラミングするという、原理追求からデバイス開発・製造までを一気通貫で見通せる体制が望ましい。

さらに、電解・燃料電池・蓄電池といった確立された電気化学システムだけでなく、電気化学プロセスを活用した低環境負荷材料合成技術やセンサー技術応用などエネルギー応用に限らない研究領域も含めた取り組みへと展開していくことも必要である。

また、このような基礎研究プロジェクトの成果を現在取り組みが進んでいるグリーンイノベーション基金事業やムーンショット事業やNEDOプロジェクトなどの社会実装を志向するプロジェクトと連携させていくことが求められる。

### 4.2.2 革新的な電気化学デバイスの試作支援や標準評価プロトコル確立の支援体制の強化

電気化学デバイスの試作や性能評価は高度な専門性やノウハウが必要であり、この点も非専門家の新規参入を妨げる大きな障壁の1つとなっている。多くの場合、材料探索段階では完全なデバイス（フルセル）ではなく、単一の電極（ハーフセル）や模擬環境での試験が標準的である。そのような環境下で高い性能を発揮する材料シーズが見つかったとしてもフルセルで同様の性能を発揮するかどうかは不明瞭であり、新たな材料シーズのデバイス展開可能性を早期に診断する試作支援の強化や材料・デバイス評価の標準的な実験プロトコルの整備が必要となる。

燃料電池分野や蓄電池分野では、NEDOプロジェクトやそこから生まれた技術研究組合やコンソーシアム

がそのような体制構築に貢献してきた。例えば燃料電池分野では技術研究組合FC-Cubic、蓄電池分野では技術研究組合LIBTECがデバイス設計・評価手法の標準プロトコルの策定やデバイス製作・解析支援などを進めてきた。今後発展が期待される水電解・CO<sub>2</sub>電解などの分野においてもそのような体制の確立を進めるべきである。

さらに、国が主導する技術研究組合やコンソーシアムだけでなく、材料・デバイス試作・評価を行う民間企業の増加を促すような施策の拡充も求められる。

#### 4.2.3 システム横断的な材料・デバイス開発を促進する研究インフラの整備

研究開発を加速させるためには、個々の研究開発課題に対する個々の研究者や研究チームの取り組みを進めるだけでなく、横断的な基盤科学から互いの研究開発に相乗効果を与えるような仕組み作りが求められる。特に、近年ではデータ駆動型の材料開発（マテリアルズ・インフォマティクス）が進展しており、電気化学材料・デバイス分野でのインフォマティクス活用を促すような研究データインフラの整備が必要である。具体的には、現在は個々の研究者や研究チームに分散している実験データや計算データを集積するデータプラットフォームを構築するとともに、新たに大量のデータを創出していく必要がある。現在文部科学省では、大学や国研が保持する解析装置等の高度化やデータ収集の共有化を進める「マテリアルリサーチインフラ事業」や新たなデータ創出を進めるための「データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト事業」を2021年度から推進している。また、JST-ALCA-Springのような既存の国家プロジェクトで創出されたデータとの連携も始まっている。このような取り組みと4.2.1で述べたシステム横断的なプロジェクトを連携することによって、効率的な材料・デバイス探索環境が実現すると期待される。

なお、システム横断的なデータ利活用を可能にするためには、異なる材料群、異なるシステム群でどのようなデータを共有すべきなのか（データフォーマット）、データをどのように共有・活用するかに関する検討や方法論の確立が必要である。そのような集中的な検討や実践を推進するためには電気化学材料に関して集中的な研究開発を進める拠点の設置や推進が有効であると考えられる。事例としては、JSTのALCA-SPRING事業では参画した研究チームのデータ蓄積や共有化への先進的な取り組みが進んでいる。このような取り組みを電気化学研究の標準的なスタイルとし、日本全国に広げていくことが必要であろう。

また、データ創出という観点では、複雑な電気化学プロセスを効果的に可視化するための解析技術の構築やそのための研究インフラの整備も求められる。特に今後は材料・デバイスの動作状態を解析するオペランド解析の重要性が増していく。オペランド解析は現在は研究開発要素が高いため、高い解析技術やそのための計測デバイス開発者との個別の共同研究等を通じて利用される状況にある。このような技術を、研究ニーズを日々更新しながら解析装置として共用化されていくような体制の構築が資金面の援助も含めて必要である。また今後本格的に始動するNanoTerasuやSpring-8・J-PARCなどの大型量子ビーム施設といった研究インフラにおける最先端計測技術を活用していくことで、反応場の基盤的理解が進むだけでなく、計測技術の利用を通じた国際的なネットワークの構築にも貢献するであろう。

#### 4.2.4 革新的な電気化学デバイスの社会実装を促進する産学連携体制の強化

諸外国では、水素社会の実現やモビリティの電動化を推進するための産学官連携の大規模事業が相次いで発足している。日本の場合には、産業界を中心とした業界団体によるコンソーシアムとアカデミアを中心とした研究組織が分離する傾向が強く、諸外国のような産学官連携の取り組みが遅れている。

燃料電池分野におけるFC-Cubicや蓄電池分野におけるLIBTECのように、特定の分野では技術研究組合・コンソーシアムによる産学官連携が進展している。しかし、革新的な電気化学システムにおいては同様な取り組みは見られず、早急な体制整備が求められる。



特に、グリーンイノベーション基金やムーンショット事業で大規模な研究開発が進む水電解やCO<sub>2</sub>電解の領域において、個々の技術の競争を進めながらも、社会実装に向けてどのような課題があるのかを研究開発の初期段階から検討するコンソーシアム等の設置を早期に進める必要がある。

本来は技術を磨くべき基礎研究プログラムにおいても、LCA評価などの付帯する検討が重荷になっているケースも増えてきている。LCA評価についても、研究開発と同様にデバイス横断的に検討する方向性も今後強化していくべきである。

## 4.3 人材育成の推進方法

巻末の付録3に示すように日本では電気化学システムに関する基礎研究を行う研究者人口は増えているが、その伸びは他国に比べて鈍い。今後電気化学システムの社会実装が大量に進むなかで、電気化学に関する知識を有した人材を輩出することは重要な課題である。

日本では、大学における電気化学の講義は主に化学系を専攻した学生のみが履修対象となっている（多くの場合は選択科目）。したがって、非化学系の分野には、電気化学を十分に学ぶ機会がない。大学院で研究に携わりながら必要な知識を学んでいくのが主流となっており、このような機会を拡充していく必要がある。

米国でも電気化学分野の教育については、重要性が認識されておりNSFが実施するNGenEというプログラムで特に大学院生や若手研究者を対象として、最新の電気化学の研究トピックなどを紹介するワークショップを開催している（コラム参照）。

具体的な人材育成に関する取り組みとしては、国が主導する研究開発プロジェクトの中で若手研究者の育成を促すような取り組みを推進するのが効果的であると考えられる。これには、4.2で提案した研究プロジェクトの実施のような取り組みや電気化学分野における世界トップレベルの研究拠点を構築し国際的な頭脳循環を促すような施策も有力であると考えられる。例えば、物質・材料研究機構や九州大学は世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）や他の拠点形成プロジェクトを通じて、海外研究者にとって魅力的な研究環境を整備している。これらの研究拠点を維持・拡大するとともに、新たな国際的な研究拠点の創出が期待される。

人材育成については、産業界が果たす役割も重要である。「蓄電池産業戦略」では蓄電池分野を対象として、関西圏の産官学が集結する人材育成コンソーシアムを形成する動きが始まっている。一方で、電気化学はこれからの日本の科学技術を支える基礎学問分野となるため、蓄電池だけにとどまらず、燃料電池・水電解分野へも拡張可能な取り組みとなることが期待される。

学会等が実施するセミナーも大きなニーズがあるため、学会への人材育成の取り組みについても引き続き拡充を期待したい。



## コラム

## 米国における電気化学教育の拡充のためのプロジェクト (NGenE)

2016年に米国化学会の論文誌であるACS Nanoに“The Rising and Receding Fortunes of Electrochemists”という論説が掲載された。この論説では、電気化学がエネルギー分野で普遍的な学問分野になっているにもかかわらず、基礎研究における取り組みが不十分なために、電気化学システムの社会実装に支障をきたしているという学術界のコンセンサスの表れと理解されている。

そのような学術界の動向と同じ時期に、NSFは“Next Generation Electrochemistry (NGenE) : A Summer Research Institute”というプロジェクトの支援を開始している。NGenEは大学院生や若手研究者向けの教育を目的としたサマーワークショップの開催を主な目的としている。本プロジェクトは、基礎的な電気化学がその重要性にもかかわらず、他の学問分野と比べて進展が著しくないという前提にもとづいており、この分野の研究や教育に力を入れるべきだということを狙っている。

NGenEでは、全米から最大40名の大学院生とポスドクを選び、電気化学の先端トピックを探索する1週間の集中サマーワークショップを行っている。10名程度の著名な研究者や講師とともに1週間ほどを過ごし、電気化学の未解決の最も重要な研究課題について講義やディスカッションを進める。このプログラムはイリノイ大学シカゴ校で行われ、アルゴンヌ国立研究所の研究施設訪問見学なども含まれる。

また、参加者はワークショップ期間中、チームに分かれて、電気化学の最先端の課題を1つ選び、革新的な実験と理論によってその課題を解決するためのプロジェクトに携わる。また、最終日には、チームメンバーや専門家による審査員の前で、その成果を発表するという機会を設けている。

## NGenEでの取り扱いテーマ

| 開催年度 | プログラム概要                                                                                                                                                                                                                                            |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2021 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・電気化学は工業的な熱化学プロセスを代替できるか？</li> <li>・電極触媒の最前線</li> <li>・電気化学と溶媒科学の最前線</li> <li>・神経電気化学の最前線</li> <li>・電気化学の局所的効果の最前線</li> <li>・蓄電池</li> <li>・腐食の最前線</li> <li>・電気化学研究と論文出版</li> <li>・電気化学分野のキャリアプラン</li> </ul> |
| 2020 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・エネルギー貯蔵の最前線</li> <li>・電気化学現象に対する計算・実験のアプローチの統合</li> <li>・水資源・エネルギー資源と電気化学の最前線</li> <li>・有機電気化学の最前線</li> </ul>                                                                                              |

## 4.4 時間軸

今後爆発的な社会実装が期待される電気化学システムの材料・デバイス開発の加速を進めるために、本提言では電気・物質エネルギー変換反応場の横断的理解に取り組み、そこから得られた知見や基盤的知識を利用して材料・デバイス開発を進めていくことを狙っている。

4.2.1のデバイス横断型プロジェクトについては、横断的な学理構築という意味合いも強いいため、10年程度の長期にわたる研究開発支援を行うことが望ましい。その際、学理構築と同時に得られる材料・デバイスシーズを現在進行しているNEDOプロジェクトなどの社会実装をめざすプロジェクトに連結することが重要である。

4.2.2の標準化技術に関しても4.2.1で有望な技術シーズが現れたり、既存プロジェクトで大きなニーズが生じた時には拡充を進めるべきであると考ええる。

4.2.3の研究インフラ拡充については、インフォマティクス拠点については先駆的な取り組みの推進やデータ標準化の仕様等を検討するために10年程度の長期にわたる支援が必要であると考えられる。計算・計測等のインフラについては、リサーチインフラ事業、富岳、次世代放射光施設といった進行中の計画に対して、長期的な連携体制の構築が求められる。

4.2.4の産学連携体制の構築については、グリーンイノベーション基金やその他NEDO事業などの社会実装をめざすプロジェクトがおおむね2030年頃に終了予定であるため、反応場の拡張という本提言から得られる研究シーズの受け取り手としての産学連携プログラムを今から検討しておく必要があると考える。

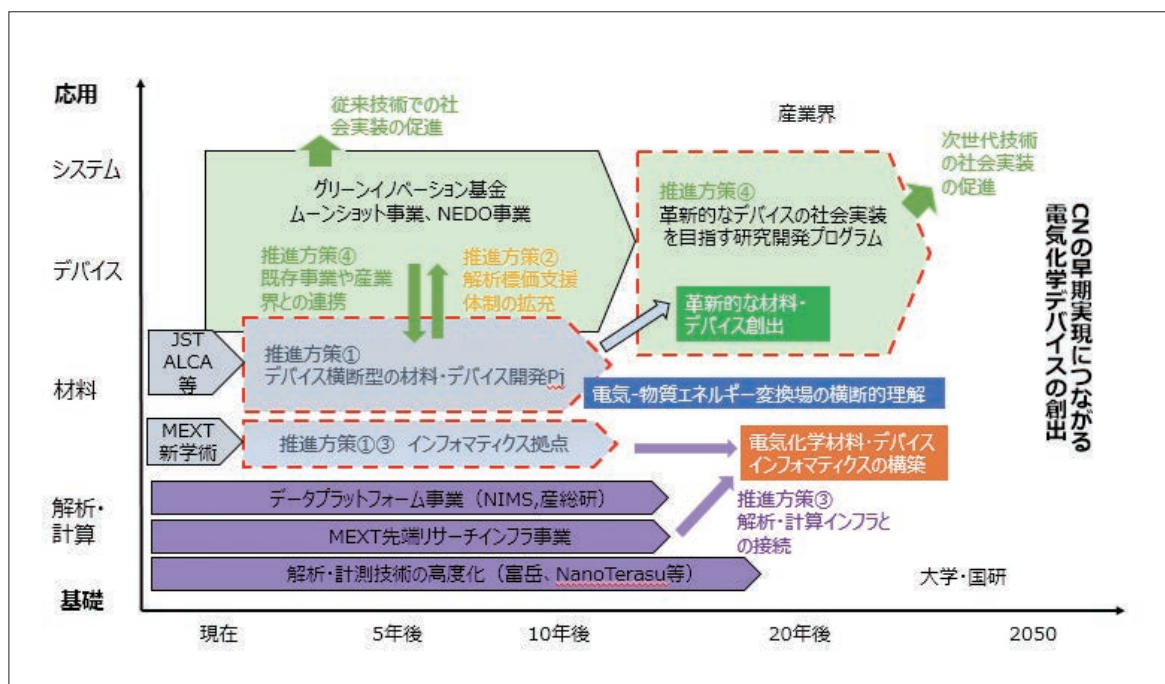


図4-4-1 研究開発の時間軸

実践黒枠は現在・過去に進行している施策群を表し、点線赤枠は本提言で提案する施策を表す。

## 付録1 検討の経緯

- ・JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、令和3年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補をCRDS戦略スコープ2021検討委員会を経て指定し、令和3年8月に検討チームを発足させた。その後、検討チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。
- ・チームの活動では、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、以下の有識者へのインタビュー・意見交換を実施した。
- ・その上で、電気化学材料・デバイスの研究開発に関してCRDSが構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した（詳細次ページ）。ワークショップの結果は報告書として発行を予定している。
- ・CRDSでは以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえて、令和5年3月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

### ■意見交換・インタビューを実施した識者

（敬称略、所属・役職は実施時点）

|                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| 雨澤 浩史           | 東北大学 教授           |
| 井上 元            | 九州大学 准教授          |
| 入山 恭寿           | 名古屋大学 教授          |
| 臼井 健敏           | 旭化成株式会社 部長        |
| 梅田 実            | 長岡技術科学大学 教授       |
| 浦川 篤            | デルフト工科大学 教授       |
| 栄長 泰明           | 慶應義塾大学 教授         |
| 江口 浩一           | 京都大学 教授           |
| 大友 順一郎          | 東京工業大学 教授         |
| 岡田 佳巳           | 千代田化工建設株式会社 上席技師長 |
| 小川 敬也           | 京都大学 特定助教         |
| 北川 良太           | 株式会社東芝 上席研究員      |
| Andrew Gewirth  | イリノイ大学 教授         |
| 小藤 勇介           | 株式会社東芝 研究主務       |
| 古山 通久           | 信州大学 教授           |
| 里川 重夫           | 成蹊大学 教授           |
| 杉山 正和           | 東京大学 教授           |
| Petros Sofronis | イリノイ大学 教授         |
| 高鍋 和広           | 東京大学 教授           |
| 中西 周次           | 大阪大学 教授           |
| 中村 龍平           | 理化学研究所 チームリーダー    |
| 西原 洋知           | 東北大学 教授           |
| 姫田 雄一郎          | 産業技術総合研究所 首席研究員   |
| 前田 和彦           | 東京工業大学 教授         |
| 光島 重徳           | 横浜国立大学 教授         |
| 山口 猛央           | 東京工業大学 教授         |

山中 一郎

東京工業大学 教授

## ■科学技術未来戦略ワークショップ

「電氣的物質変換反応場の開拓に向けた材料開発

～再生可能エネルギーの大量導入に向けた革新的電気化学デバイスの創出～」

開催日時：2022年3月5日（土） 10：00-17：40

場所：TKP市ヶ谷バンケットホール9CとZoomのハイブリッド開催

10：00-10：05 開会挨拶

曾根 純一（JST-CRDS）

10：05-10：20 事務連絡・趣旨説明

沼澤 修平（JST-CRDS）

10：20-12：00 セッション1「電解質・電解液・膜材料」

話題提供1：温度領域の拡大と中低温固体電解質（燃料電池・水電解）

石原 達己（九州大学）

話題提供2：反応場拡大のための固体電解質・電極材料の開発

高村 仁（東北大学）

話題提供3：次世代PEMとしてのポリフェニレン電解質膜

宮武 健治（山梨大学）

話題提供4：アルカリ領域でのポリマー安定性と水電解材料・システムの設計・開発

山口 猛央（東京工業大学）

13：00-14：15 セッション2「電解質・電解液・膜材料」

話題提供5：pH領域の拡大と中性pH領域電解液（水電解）

高鍋 和広（東京大学）

話題提供6：蓄電池材料における固体高分子電解質

富永 洋一（東京農工大学）

話題提供7：電圧領域の拡大と配列制御型電解液

山田 淳夫（東京大学）

14：30-15：45 セッション3「電極材料・材料開発手法」

話題提供8：低電圧化と電極触媒（CO<sub>2</sub>電解）

中西 周次（大阪大学）

話題提供9：資源制約と電極触媒

山内 美穂（九州大学）

話題提供10：電解液探索DX（蓄電池、水電解）

松田 翔一（NIMS）

16：00-17：30 総合討論

ファシリテーター：本間 格（JST-CRDS/東北大学）

論点

1. ターゲットとすべき“革新的反応場”とは
2. 反応場を拡張・開拓するために求められる材料およびそのボトルネック
3. 材料開発およびデバイス開発の新たな方法論
4. 研究開発体制（コミュニティ形成、人材育成、産学連携）

17：30-17：40 閉会挨拶

招聘有識者（敬称略、所属・役職は開催時のもの）

（話題提供者）

石原 達己 九州大学 工学研究院 教授

高鍋 和広 東京大学 大学院工学系研究科 教授

高村 仁 東北大学 大学院工学研究科 教授



富永 洋一 東京農工大学 工学研究院 教授  
中西 周次 大阪大学太陽エネルギー化学研究センター 教授  
松田 翔一 物質・材料研究機構 エネルギー・環境材料研究拠点 主任研究員  
宮武 健治 山梨大学 大学院総合研究部 教授  
山内 美穂 九州大学 先導物質化学研究所 教授  
山口 猛央 東京工業大学 科学技術創成研究院 教授  
山田 淳夫 東京大学 大学院工学系研究科 教授

(コメンテーター)

岡田 佳巳 千代田化工建設株式会社 技術開発ユニット 技師長  
杉政 昌俊 日立製作所株式会社 研究開発グループ脱炭素エネルギーイノベーションセンタ 主任研究員  
杉山 正和 東京大学 先端科学技術研究センター 教授  
藤本 則和 旭化成株式会社 クリーンエネルギープロジェクト 部材開発グループ長  
光島 重徳 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授

## 付録2 国内外の状況

ここでは、蓄電池、燃料電池、電解などの電気・物質エネルギー変換技術を利用した電気化学システムの研究開発に関して、近年の国内外の政策動向について記載する。

### ●蓄電池関連

#### 【日本】

蓄電池は日本の2050年のカーボンニュートラル達成のための重要技術としてグリーン成長戦略にも位置づけられている。また足下の産業としては、蓄電池材料・デバイスの産業競争力の強化を目的として、経済産業省が「蓄電池産業戦略」を策定した（2022年8月）。蓄電池・材料の国内製造基盤の確立、安全性・カーボンフットプリントに関する国際標準化の戦略策定、材料資源確保のためのサプライチェーンの充実、次世代技術の開発、インフラ整備による国内市場の創出、人材育成強化、再エネ増大やリサイクルの促進といった目標を掲げ、産官学一体となった議論が進行している。特に、現在、車載用蓄電池の主流である液系リチウムイオン電池の技術力・産業競争力の強化と全固体電池などの次世代蓄電池の研究開発の強化を図っている。

これらの政策にひもづく研究開発の取り組みとしては、2030年頃の実用化を目標に、次世代蓄電池関連研究開発に関する国家プロジェクトが多く進行している。

- ・ NEDO グリーンイノベーション基金（全固体電池、省希少資源技術、リサイクル関連技術）約1,200億円（2021～2030年）
- ・ JST ALCA-SPRING（リチウム硫黄、リチウム空気、全固体リチウム等）約190億円（2013～2022年）
- ・ NEDO RISING2（フッ化物シャトル、亜鉛空気、硫化物電池）約150億円（2016～2020年）
- ・ NEDO SOLiD-EV（全固体リチウムイオン電池）約100億円（2018～2022年）
- ・ NEDO RISING3（フッ化物電池、亜鉛負極電池）総予算未定（2021～2025年）

#### 【米国】

バイデン政権は米国のサプライチェーンに関する100日レビューを行い、バッテリー分野に関する大規模な国家的な介入が必要であるとの報告書を2021年6月に発行している。そのレビュー結果にもとづき、リチウムバッテリー国家計画を発表し、31.6億ドルの電池・電池材料の製造・リサイクル支援に関する投資を行う法案が成立している。

この法案をもとにエネルギー省（DOE）は、米国内での電池と材料の製造強化、国内サプライチェーンの強化、高収入かつ新規の雇用の創出、家庭向け蓄電池のコスト削減に向けた施策に31億ドルを支援することが決まっている。また、蓄電池のリサイクルに向けた研究開発・インフラ投資に6000万ドルを投資する。

DOEを中心として基礎研究から実用化研究までを幅広く展開している。基礎研究では、国立研究所や大学を中心に構成されるJCESR（Joint Center for Energy Storage Research）の取り組みが顕著である。溶媒和現象、動的界面現象、複雑性材料などのエネルギー貯蔵の基盤科学を推進している。また、対象となる電池系としても、多くのプロジェクトが進行することで、先進リチウムイオン電池（Si負極、Li金属負極）、全固体電池、ナトリウムイオン電池や多価イオン電池など幅広く研究に取り組んでいる。2021年からはEnergy Earthshots Initiativeという枠組みのなかでLong Duration Storage Shotという研究開発プログラムが開始している。このプログラムではエネルギーグリッド向けの大規模蓄電池の性能を「10時間以上の持続時間を可能にし、10年以内に90%のコストを削減する」ことを目標に掲げており、技術開発から商業化までを一体となって推進することを狙っている。

**【欧州】**

欧州域内での蓄電池製造能力向上に向けて、中国・韓国の製造メーカーの誘致や欧州域内メーカーでのサプライチェーンの構築を目指して欧州バッテリー連合などの業界団体の活動が活発化している。また、カーボンフットプリント規制、責任ある材料調達規制、リサイクルに関する規制を盛り込んだ「バッテリー規則案」が欧州委員会によって提言されている。欧州はこのようなルールメイキングを主導することによって、欧州域内の市場形成を優位に進めようとしている。

研究開発の観点では、研究・イノベーション枠組みプログラム Horizon 2020（2014～2020年）の予算で、「Battery 2030+」という大型イニシアチブが開始され2020年より9つのプロジェクトが推進されている。また、Horizon 2020の後継プログラム Horizon Europe（2021～2027年）でも「BATT4EU」という官民のパートナーシップがスタートしている（予算18.5億ユーロ）。BATT4EUでは、2030年までに欧州に世界最高のイノベーションエコシステムを確立し、競争力があり、持続可能で循環型の蓄電池バリューチェーンを構築し、カーボンニュートラル社会への変革を推進することを目標としている。

**【中国】**

中国政府は製造業の強化を目指す「中国製造2025」において、重点項目の1つに省エネ・新エネ自動車を位置付けている。電気自動車やリチウムイオン電池産業への大規模な補助金投入に加え、先端リチウムイオン電池や次世代電池の研究開発にも大規模な投資を行っている。

また、2021年には循環経済発展に関する第14次5カ年計画を発表し、電池のリサイクルが重点テーマの1つになっている。電池サプライチェーン全体を通じての回収・リサイクルに関する実証実験や国家基準の制定への取り組みが期待されている。

**【韓国】**

韓国政府は2021年7月に「K-バッテリー戦略」を発表している。これは、2030年までに蓄電池分野の産業競争力を世界一に高めることを目標にしたもので、官民による大規模な研究開発の推進、サプライチェーンの構築、リサイクル市場を含めた多様な市場の創出などの戦略を掲げている。また、韓国の主要電池関連企業に対して、約3.9兆円の投資を行う方針も示されている。

韓国の電池メーカーは大学との協業による人材育成に以前から積極的であったが、本戦略ではこのような協業をさらに強化し、専門人材を毎年1,100人以上養成することを目標に掲げている。

**●燃料電池・水電解関連****【日本】**

日本政府は2017年に水素基本戦略を発表し、水素社会の実現に向けた取り組みを加速している。また、グリーン成長戦略でも重要技術の1つに位置づけられ、水素関連技術の社会実装の加速とそれを可能にするコスト低減等の技術開発を進めている。

特に、水電解技術に関してはグリーンイノベーション基金において、大規模アルカリ型水電解装置の開発や大規模PEM型水電解装置の開発を進めている。また、同基金においては、水素サプライチェーンの構築にも力を入れており、エネルギーキャリアの低コスト化技術として、エネルギーキャリアの候補物質であるメチルシクロヘキサン（MCH）の電解直接合成に関する研究開発も推進している。

燃料電池に関しては、国内自動車メーカーによる燃料電池自動車の製品化が世界に先駆けて進行しており、その普及に向けたインフラ構築の施策を行っている。また、技術開発に関してはNEDO「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」が2020～2024年にかけて進行中であり、産業界が抱えるボトルネック課題を産官学で解決するためのプラットフォームの構築が進んでいる。

## 【米国】

米国エネルギー省（DOE）は2020年に水素関連の研究開発・実証計画である「Hydrogen Program Plan」を発表している。この計画は、これまでH2@Scaleという産学官プログラムで進んできた研究開発をさらに強化するものである。また、インフラ投資雇用法にもとづき2022年から2026年にかけて地域的なグリーン水素ハブの開発に80億ドルの予算を投入する見込みとなっている。

技術開発に関しては、DOEは2021年に「Hydrogen Shot」というプログラムを立ち上げ、「10年以内にクリーン水素コストを80%削減し、1kg当たり1ドルにする」ことを目標とした研究開発を開始している。また、「HydroGEN（The HydroGEN Advanced Water Splitting Materials）」「ElectroCat（Electrocatalysis Consortium）」という水電解・燃料電池関連の触媒材料開発、光・電気化学関連の電極材料開発に関するプログラムがDOEで進行している。

## 【欧州】

欧州委員会は2020年7月に「欧州の気候中立への水素戦略」を発表している。同戦略では、水素の電解槽の設置規模とグリーン水素の生産量を、2030年までに40GWと1,000万トンに引き上げることを目標としている。なお、短中期における推進対象には、既存の水素生産によるGHG（温室効果ガス）を削減するほか、将来のグリーン水素導入を支えるため、「低炭素水素」（ブルー水素）も含んでいる。また、欧州委員会はこれらの戦略の推進および実施を支援し、投資を加速させるために「欧州クリーン水素アライアンス」を発足させている。

研究開発に関しては、Horizon Europeの官民パートナーシップの1つにClean Hydrogen Joint Undertakeing（Clean Hydrogen-JU）があり、欧州の燃料電池・水素産業の代表であるHydrogen Europe、および研究コミュニティの代表であるHydrogen Europe ResearchがEUの資金配分をマネジメントして、主に大規模な実証プロジェクトを推進している（予算20億ユーロ、2021～2027年）。

ドイツは2020年6月に国家水素戦略を発表し、同戦略の達成に向けて90億ユーロの助成を計画している。特に技術開発に関しては、教育・研究省（BMBF）が（1）水素製造の電解装置、（2）洋上での水素製造、（3）水素の運搬に関するプロジェクトを立ち上げ、2021年～2025年までに総額7億ユーロを助成する計画である。電解装置の量産化を目指す「H2Giga」は、ドイツ国内の水電解プラントを2030年までに5GW、2040年までに10GW規模までに拡大することを目標としている。

## 【中国】

中国政府は2016年に「エネルギー技術革命とイノベーション行動計画」を発表し、水素の製造・貯蔵・運送、燃料電池等の研究開発を重要領域に認定している。特に、燃料電池車の普及とそのためのインフラ整備に力を入れており、中央政府・地方政府ともに様々な政策を推進している。2025年までに北京市、上海市などのモデル都市において、クリーンエネルギーによる水素製造と水素エネルギーの貯蔵・輸送技術を大きく進歩させ、再生可能エネルギーによる水素製造に基づく水素エネルギー供給システムの初歩的段階を確立することを目標としている。

一方で、グリーン水素製造技術（電解技術）に関しては、燃料電池や水素インフラに比較すると明確な戦略性が打ち出されておらず、徐々にグリーン水素の比率を高めていくという程度の言及に留まっている。

## 【韓国】

韓国政府は2021年に水素先導国家ビジョンを発表し、水素経済への移行のためのマイルストーンを示している。同ビジョンの策定に先立って、水素経済の推進策、水素産業の計画的な発展、安全対策を規定した「水素経済の育成および水素安全管理に関する法律」を世界で初めて制定している。

また、同法律にもとづき水素専門企業の認定を進めており、認定企業に対して、年間30億円規模の研究



開発支援や事業化支援を行う計画である。

米国、英国、ドイツ、オーストラリア、中国、韓国などの18カ国の水素協会が参加する「グローバル水素産業連合会（GHIAA）」の初代議長国に韓国が選出されており、急速に国際的な存在感を高めている。なお、GHIAAには現時点で日本は参画していない。

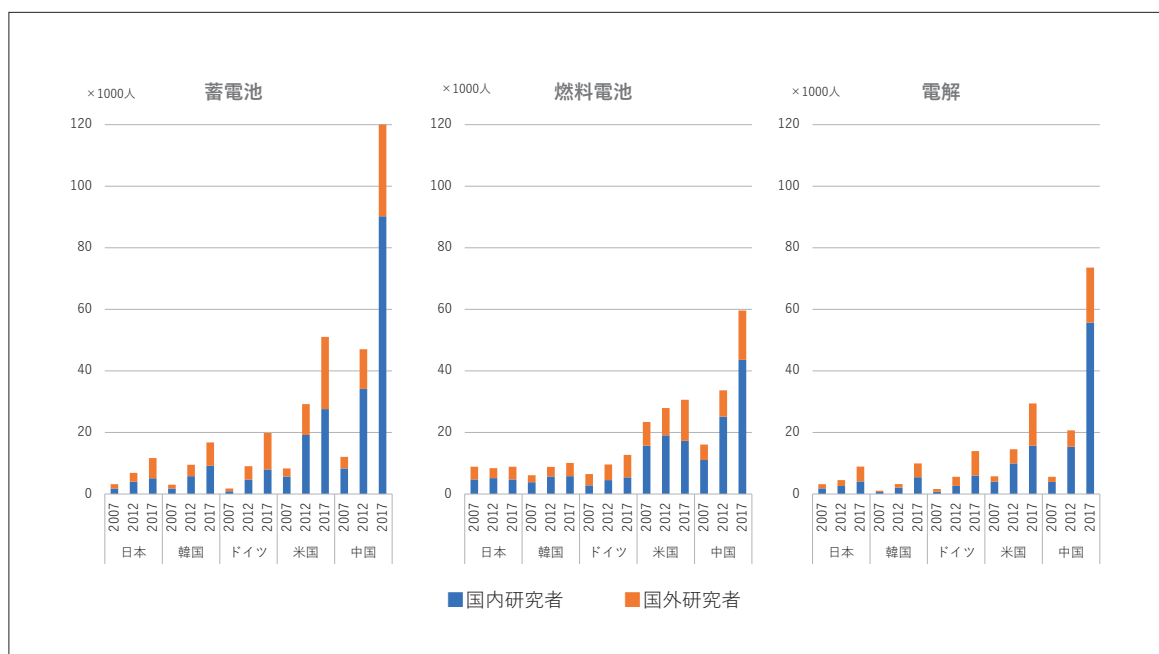
## 付録3 研究人材に関する状況

電気化学材料・デバイスに関する基礎研究に携わる研究人材の状況を各種統計データにもとづきまとめる。

### (1) 電気化学材料・デバイス関連の基礎研究に携わる研究者の数

ここでは、電気化学材料・デバイス関連の基礎研究に携わる研究者数の動向を示す。分析方法は以下の通りである。

- ① 2007～2011年、2012～2016年、2017～2021年の3つの期間に発表された電気化学材料・デバイス関連の研究論文群のうち、日本、韓国、ドイツ、米国、中国の5カ国の研究者が著者に含まれるものを特定（データベースはWeb of Scienceを利用）。
- ② ①で特定した論文群の著者を自国の研究機関に所属する著者と他国の研究機関に所属する著者に分類し、研究者数をカウント。

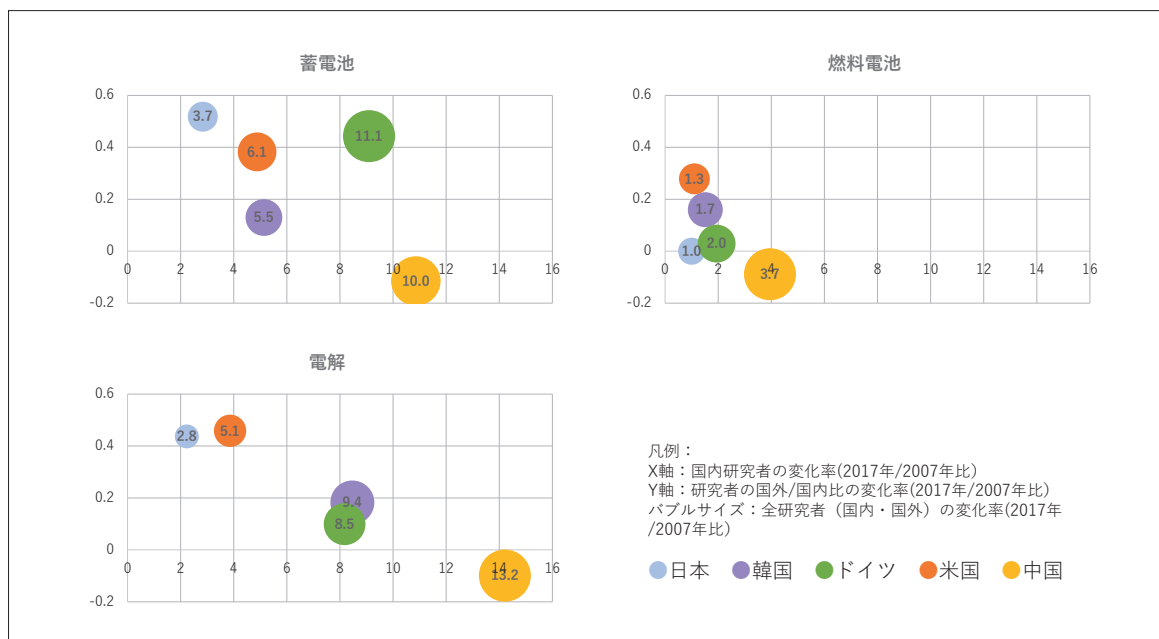


図A-1 電気化学材料・デバイス関連の各国の基礎研究従事者数の変化

図A-1からわかるように、日本は、蓄電池・電解関連でこの10年間程度で研究者人口が3～4倍程度に増えているが、他国はそれ以上の伸び率で研究者人口が増大している。研究者の絶対数では、2007～2011年時点では米国、中国に次ぐ第3位の位置を占めていたが、現在では他国に追い抜かれている状況である。

図A-2は、図A-1のグラフを自国の研究者の増加率、海外研究者の協業割合といった観点から見直したものである。世界的に、蓄電池、電解関連の研究開発に大きく力を入れていることが見て取れる。日本は自国の研究者の増加率が他国に比べて低い点を海外との協業によってカバーしている。

図A-3は各デバイスに対する国際共同研究相手国・地域の変化をまとめたものである。日本、韓国、ドイツ、米国、中国の5カ国がどのような国・地域と共同研究を進めているのか、論文数からランキングを行ったものである。この図からは、多くの国や対象とするデバイスにおいて、日本は共同研究相手としての重要性が低くなっていることが見て取れる。



図A-2 電気化学材料・デバイスの研究者人口の変化率

| 日本        |           | 韓国        |           | ドイツ       |           | 米国        |           | 中国        |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 蓄電池       | 燃料電池      | 蓄電池       | 燃料電池      | 蓄電池       | 燃料電池      | 蓄電池       | 燃料電池      | 蓄電池       | 燃料電池      |
| 2007-2011 | 2007-2011 | 2007-2011 | 2007-2011 | 2007-2011 | 2007-2011 | 2007-2011 | 2007-2011 | 2007-2011 | 2007-2011 |
| 1 中国      | 1 中国      | 1 米国      | 1 中国      | 1 中国      | 1 中国      | 1 中国      | 1 中国      | 1 米国      | 1 米国      |
| 2 米国      | 2 米国      | 2 オーストラリア | 2 米国      | 2 米国      | 2 米国      | 2 韓国      | 2 韓国      | 2 オーストラリア | 2 オーストラリア |
| 3 韓国      | 3 オーストラリア | 3 イタリア    | 3 オーストラリア | 3 スイス     | 3 英国      | 3 日本      | 3 ドイツ     | 3 シンガポール  | 3 香港      |
| 4 フランス    | 4 韓国      | 4 日本      | 4 インド     | 4 イタリア    | 4 フランス    | 4 カナダ     | 4 カナダ     | 4 香港      | 4 シンガポール  |
| 5 カナダ     | 5 ドイツ     | 5 中国      | 5 ドイツ     | 5 英国      | 5 スペイン    | 5 フランス    | 5 英国      | 5 ドイツ     | 5 カナダ     |
| 6 インド     | 6 インド     | 6 シンガポール  | 6 日本      | 11 日本     | 15 日本     | 6 英国      | 7 日本      | 7 日本      | 8 日本      |

図A-3 電気化学材料・デバイスの共同研究相手先の変化

基礎研究力の向上や産業界への人材供給能力という観点からは、基礎研究に携わる人口を他国に見劣りしないレベルにまで、今後長期的ビジョンを持って増加させる必要があるであろう。

## (2) 関連学会の会員数

日本を代表する電気化学分野の学術団体である電気化学会と世界を代表する電気化学分野の学術団体であるElectrochemical Society (ECS) の会員数を比較する。

図A-4のように、電気化学会、ECSともに個人会員および学生会員を加味した総数には大きな変化はない。ここ最近の会員数の増減はCOVID-19の影響による学会活動の停滞によるものと考えられる。ただし、ECSが学生会員の比率を増加させているのに対し、電気化学会では学生会員比率およびその絶対数が近年低下している。また、関連する日本の材料系学会、物理系学会、化学系学会でも会員数の減少が指摘されている。今後の研究力向上という観点からは、本提言に関連する分野の若手人材の育成に力を入れる必要がある。

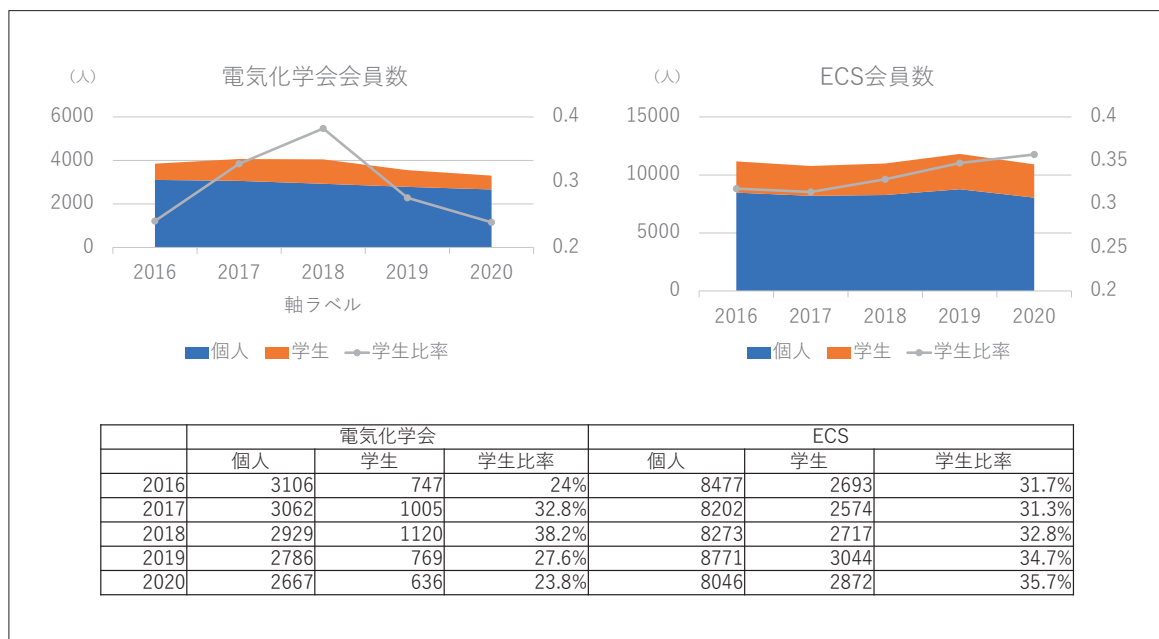


図 A-4 主要な電気化学会の会員数の変化



## 付録4 専門用語説明

### SOEC/SOFC

固体酸化物型電解セル（solid oxide electrolysis cell; SOEC）および固体酸化物型燃料電池（solid oxide fuel cell）の略。固体酸化物を利用した電気化学デバイス的一种で、典型的には高温（700～1000℃）領域で利用される。熱エネルギーも併用できるため変換効率は高いが、高温環境の維持に課題がある。

### e-fuel

再生可能エネルギー、水、二酸化炭素によって製造される低環境負荷の化石資源代替燃料。典型的には、再生可能エネルギーによって製造される水素と、人工的に濃縮したCO<sub>2</sub>を原料として、各種気体燃料や液体燃料の製造が検討されている。

### PEMEC/PEMFC

プロトン交換膜型電解セル（proton-exchange membrane electrolyzer cell; PEMEC）およびプロトン交換膜型燃料電池（proton-exchange membrane fuel cell : PEMFC）の略。イオン導電性を有する高分子膜を利用した電気化学デバイス的一种で、典型的には低温（～100℃超）領域で利用される。

### オペランド計測

オペランド（Operando）はラテン語で“working”, “operating”という意味を持ち、材料やデバイスの動作状態を理解するための計測手法を表す。電気化学デバイスでは、電極界面での反応状態や材料の電子状態の理解に不可欠である。

### ハイスループット計算・ハイスループット実験

大規模な計算機シミュレーションやロボットによる自動実験によって、大量の計算・実験データを生み出すこと。マテリアルズ・インフォマティクスなどのデータ駆動型の材料開発にとって今後不可欠な研究ツールになると考えられる。

## 作成メンバー

|       |       |        |                   |
|-------|-------|--------|-------------------|
| 総括責任者 | 曽根 純一 | 上席フェロー | (ナノテクノロジー・材料ユニット) |
| リーダー  | 沼澤 修平 | フェロー   | (ナノテクノロジー・材料ユニット) |
| メンバー  | 石原 毅  | 主任調査員  | (研究プロジェクト推進部)     |
|       | 佐藤 勝昭 | 特任フェロー | (ナノテクノロジー・材料ユニット) |
|       | 中村 新  | 主任専門員  | (戦略研究推進部)         |
|       | 福井 弘行 | フェロー   | (ナノテクノロジー・材料ユニット) |
|       | 本間 格  | 特任フェロー | (ナノテクノロジー・材料ユニット) |
|       | 眞子 隆志 | フェロー   | (ナノテクノロジー・材料ユニット) |
|       | 八巻 徹也 | 特任フェロー | (ナノテクノロジー・材料ユニット) |
|       | 山下 勝久 | 主任専門員  | (戦略研究推進部)         |
|       | 宮下 哲  | フェロー   | (ナノテクノロジー・材料ユニット) |

## 戦略プロポーザル

CRDS-FY2022-SP-09

# 電気-物質エネルギー変換技術の革新

～再生可能エネルギーの大量導入に向けた多様な反応場の実現～

## STRATEGIC PROPOSAL

# Innovation in electricity-material energy conversion technologies

– Realization of diverse reaction fields towards massive integration of renewable energy

令和 5 年 3 月 March 2023

ISBN 978-4-88890-838-2

国立研究開発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

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

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

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・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。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF  
SCIENCE AND  
SOCIETY



CRDS

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