

# NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ

—水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理（解説書）—

2023年2月

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」）では、1980年の創立以来、水素・燃料電池に関する技術開発に取り組んできました。基盤技術開発から各種実証研究、基準・規格作りなどの総合的な取り組みの成果もあり、我が国は2009年に家庭用燃料電池「エネファーム」を、2014年に燃料電池自動車先駆けて市場に導入するなど、水素・燃料電池分野で世界をリードしてきました。

昨今世界各国でカーボンニュートラルの実現に向けた動きが加速する中、水素・燃料電池に対する期待が急速に高まっています。同時に、本分野の技術開発や事業展開が加速度的に進展し、競争が激しさを増しています。このような状況下、我が国が引き続き本分野をけん引し、カーボンニュートラルの実現に貢献していくためには、中長期的なビジョンを関係者間で共有し、戦略的かつ効率的に取り組むを進めていくことが必要不可欠です。

NEDOは2005年から、産学官が長期的視野を共有して技術開発に取り組むために、燃料電池・水素技術開発ロードマップを公開してきました。今年度は世界的に大規模なプロジェクトが数多く立ち上がるなど技術開発指針の策定が喫緊の課題となっている水電解分野を対象として、新たな技術開発ロードマップの検討に着手しました。

水電解技術開発ロードマップの策定に当たっては、具体的なユースケースを想定の上、定量的な性能、耐久、コストの目標を議論する必要がありますが、今年度はまず現状の水電解技術の開発状況等に基づき、優先的に解決すべき技術課題をボトムアップ的に整理し、本書にとりまとめました。次年度以降、将来目指すべき目標の具体化に向け検討を続けていきますが、様々な動きが待ったなしで進む中、本書が技術開発の方向性を議論する基礎となり、産学官一体となった取り組みの加速化へとつながることを願っております。

最後に、本ロードマップの策定に向けた課題整理にあたり、企業や研究機関、大学など、非常に多くの機関の方々のご協力を賜りました。この場をお借りして、厚くお礼を申し上げます。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）  
スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 燃料電池・水素室

# 目次

|       |                             |    |
|-------|-----------------------------|----|
| 1.    | 水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理の概要 | 1  |
| 1.1   | 策定の背景                       | 1  |
| 1.2   | 本年度のスコープ                    | 2  |
| 1.3   | 普及目標・普及シナリオ                 | 3  |
| 1.4   | 技術開発の方向性                    | 7  |
| 2.    | 技術開発課題                      | 10 |
| 2.1   | アルカリ水電解の技術開発課題              | 10 |
| 2.1.1 | 隔膜                          | 10 |
| 2.1.2 | 電極                          | 11 |
| 2.1.3 | セルスタック                      | 11 |
| 2.1.4 | 付帯設備                        | 11 |
| 2.1.5 | 評価解析、規制対応                   | 12 |
| 2.2   | プロトン交換膜水電解の技術開発課題           | 14 |
| 2.2.1 | 膜電極接合体                      | 14 |
| 2.2.2 | 電解質材料                       | 14 |
| 2.2.3 | アノード触媒                      | 15 |
| 2.2.4 | カソード触媒                      | 15 |
| 2.2.5 | 多孔質輸送層                      | 16 |
| 2.2.6 | 双極板                         | 16 |
| 2.2.7 | セルスタック                      | 16 |
| 2.2.8 | 評価解析                        | 17 |
| 2.2.9 | その他                         | 18 |
| 2.3   | アニオン交換膜水電解の技術開発課題           | 20 |
| 2.3.1 | 膜電極接合体                      | 20 |
| 2.3.2 | 電解質材料                       | 21 |
| 2.3.3 | 電極触媒                        | 21 |
| 2.3.4 | 多孔質輸送層                      | 21 |
| 2.3.5 | 双極板                         | 22 |
| 2.3.6 | セルスタック                      | 22 |
| 2.3.7 | 付帯設備                        | 22 |
| 2.3.8 | 評価解析                        | 22 |
| 2.4   | 固体酸化物電解の技術開発課題              | 24 |
| 2.4.1 | 電極                          | 24 |
| 2.4.2 | 電解質                         | 24 |
| 2.4.3 | セルスタック                      | 24 |
| 2.4.4 | システム・付帯設備                   | 25 |
| 2.4.5 | 評価解析                        | 25 |
| 2.4.6 | 金属支持型                       | 25 |

|       |                               |    |
|-------|-------------------------------|----|
| 2.4.7 | プロトン導電性セラミック電解セル.....         | 26 |
| 2.4.8 | リバーシブル固体酸化物形燃料電池—水蒸気電解セル..... | 26 |
| 2.5   | 技術開発課題（システム制御・付帯設備）.....      | 27 |
| 2.5.1 | システム制御.....                   | 27 |
| 2.5.2 | 整流器.....                      | 27 |
| 2.5.3 | 水素圧縮機.....                    | 28 |
| 2.5.4 | 純水製造.....                     | 28 |
| 2.5.5 | 水素精製.....                     | 28 |
| 2.5.6 | 計装機器.....                     | 28 |
| 2.5.7 | 安全対策.....                     | 28 |
| 3.    | 今後の課題.....                    | 29 |

## 1. 水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理の概要

### 1.1 策定の背景

近年の世界における脱炭素化に向けた水素関連施策は強力に推進されており、例えば 2020 年ではドイツ政府が 6 月に国家水素戦略を策定、水素製造設備に対して再エネ賦課金を免除するとした。次いで EU が 7 月に水素戦略を公表、暫定的に低炭素水素（化石+CCUS）も活用しつつ製造、輸送・貯蔵、利用に向けて取り組むことを示した。また、フランスは 9 月に水素戦略を改定してグリーン水素の生産に向けた方向を示すなど、世界中で水素関連技術の開発が加速している。

水素の社会実装を促すためには、水素供給コストの低減が必要である。水素製造技術として今後の飛躍的な普及拡大が期待される水電解装置は、再生可能エネルギー<sup>1</sup>を利用して水素を製造し、熱需要の脱炭素化や基礎化学品の製造なども含め、Power to X という形で余すことなく活用することができ、再エネの導入を最大限に促進する。装置の種類については、「アルカリ水電解<sup>2</sup>」と「プロトン交換膜水電解<sup>3</sup>」の 2 形式が商用化の技術水準にある。しかしながら、装置コストを含む水素製造コストは依然として高く、更なる低コスト化のためには、一段の装置コスト削減や耐久性や効率などの性能向上に向けた取り組みが必要不可欠である。

水素・燃料電池戦略協議会において策定された「水素・燃料電池戦略ロードマップ（2014 年 6 月策定、2016 年 3 月改訂、2019 年改訂）」では、燃料電池と共に水素製造システムについての普及拡大に向けた政府の骨太大方針や政策目標が示されており、今後の市場規模の拡大を予想している。このため産業技術政策の実現をミッションとする NEDO としては、これら政府目標等を具現化するために取り組むべき技術的課題を明確化するとともに、時系列に整理した「NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ」（以後、「ロードマップ」という。）を 2005 年に策定、過去に 4 度、燃料電池を中心に、最新の政策、市場及び技術動向等を反映すべく改訂してきた。前回の改定は 2017 年であった。その後、パリ協定やアフターコロナの経済成長戦略等で世界各国での水素社会に向けた取組が急加速している状況である。このような背景の下、本調査では「水電解技術開発ロードマップの策定」に向け、水電解に関する最新の政策・技術動向を調査すると共に、今後解決が必要となる技術開発課題を整理した。本解説書は、「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」として、水電解の普及シナリオや各種技術開発課題の詳細をまとめたものである。

---

<sup>1</sup> 以下、「再エネ」と略記する場合がある。

<sup>2</sup> 以下、「AWE」と略記。

<sup>3</sup> 以下、「PEMWE」と略記。

## 1.2 本年度のスコープ

水電解に焦点を当てた技術開発ロードマップの検討は今回が初めての取組である。技術開発ロードマップにおいては、将来達成すべき性能やコストの目標と、目標達成に向けた技術開発シナリオを提示することとしているが、本年度は技術開発ロードマップ策定に向けた予備段階として、解決優先度の高い技術開発課題の抽出に重点を置いている。2022年7月に開催した「課題共有フォーラム」での産業界から共有されたアカデミアへの課題解決の要望、事業者ヒアリング・アンケートを通じて抽出した課題や、各種実証を通じて明らかとなった課題の優先づけを行い、世界的なグリーン水素への期待・開発競争が加速するなかで、今後の普及拡大期に向けて産学が連携して取り組むべき技術課題を盛り込むことを重視している。

一方、他の政策における普及目標との紐づけや、技術開発目標の新規設定については、今年度は未実施である。政策面での動きとして、2022年12月発表の「GX<sup>4</sup>実現に向けた基本方針」においても、今後3年程度で日本においては水素・アンモニアの大規模かつ強靱なサプライチェーン構築に向けて集中的な制度創設が行われる計画である。その中には水素基本戦略やロードマップの改定、新たな産業戦略の策定などが含まれる。



図1 GX実現に向けた今後の道行き（水素・アンモニア）

出典：「GX実現に向けた基本方針（案） 参考資料」

水電解技術開発ロードマップの策定に向けて、今後新たに技術開発目標を設定する場合もこれらの戦略との連動が必要となる。

<sup>4</sup> GXとは「グリーントランスフォーメーション」の略称であり、化石燃料をできるだけ使わず、クリーンなエネルギーを活用していくための変革やその実現に向けた活動を指す。

### 1.3 普及目標・普及シナリオ

日本の水素政策では、国内での水電解装置の導入容量や水電解により製造される水素の導入目標は現状設定されていない。一方で、世界的には今後水電解の導入量が急拡大することが期待されている。IEAによれば、2030年には現在までに発表済みの計画の合計で134 GWを上回る水電解が導入される見通し<sup>5</sup>であり、さらに「IEA Net Zero シナリオ」では2050年の水電解導入量は3 TWに至るとされている。

日本の水素導入に関する量的目標としては、「グリーン成長戦略」記載の「2030年最大300万トン/年（うちクリーン水素約42万トン以上）、水素供給コスト30円/Nm<sup>3</sup>、カーボンニュートラル実現の2050年に約2000万トン、水素供給コスト20円/Nm<sup>3</sup>」が挙げられる<sup>6</sup>。日本でも2030年以降、クリーン水素の供給量は大きな伸びを示すと想定されており、供給手段の整備が急務である。

日本におけるクリーン水素の供給手段としては、大きく分けて①海外で製造し、海上輸送して国内に輸入、その後利用するケースと、②国内で製造して、国内で利用するケースの二通りがあり、いずれの場合も、水電解技術は重要な役割を果たす。普及シナリオの基軸としては、この2つを区別して表現することとした。以下にそれぞれにおける、導入状況例と想定される普及シナリオを示す。

#### ① 海外で製造し、海上輸送して国内に輸入、利用するケース

日本は従前から水素エネルギーの輸入と発電用途等での大規模利用に注目、海上輸送技術開発をはじめとするサプライチェーン構築への取り組みを推進しており、現在までに海上輸送技術の小規模実証を完了している。従来、水素源には安価な未利用エネルギーの活用を期待してきたが、近年、海外の再エネ適地では安価な再エネ電力による水素製造が期待できることから、グリーン水素の注目が高まっており、2020年代後半から30年頃のグリーン水素輸入計画が複数発表されている。

一方この潮流は日本に限られるものではない。特に最近では世界的な脱炭素化への取り組みの加速と産業部門をはじめとする「電化が困難な領域での脱炭素化」の必要性、上記の再生可能エネルギーのコストダウンなどを背景に、再生可能エネルギーの安価な地域における水電解での水素製造と自国への輸入に関心を示す国が増加している。例えば欧州ではドイツ、オランダ、ベルギーといった国々が国外からの水素の輸入計画があることを発表している。日本が従来水素輸入先として想定してきた豪州や南米の国々と、これらの国が想定する水素輸入元は既にオーバーラップしており、今後安価な再エネの獲得競争の激化も予想される。こうした環境の変化の中で、国内では水素の非化石価値の制度的な位置づけが与えられ、更に受入拠点整備や水素供給に対する支援制度整備の議論が進められている。

水素輸出入のためのインフラ整備を伴う国際サプライチェーンでは、供給コストの低減のためサプライチェーンのスケールアップが重要であり、取りまとめによる需要の規模拡大と集中的な供給が重要となる。日本の戦略では水素輸入について2030年以降の本格化を想定しており、今後の商用実証を経て規模を拡大する計画である。

<sup>5</sup> IEA “Global Hydrogen Review 2022”

<sup>6</sup> 内閣官房、経済産業省ほか「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」

以上を以下の様に整理した。

なお、普及拡大に向けた要素やシナリオについて、「外部環境」と「外部環境を受けた水電解活用イメージ」を「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」上は区別している。

#### 【導入状況の例】

- 水素海上輸送技術の実証が完了
- 国外適地の安価な再エネへの世界的な注目
- 2020年代後半～30年頃のグリーン水素輸入計画を複数発表（日豪等）

#### 【2030年頃まで】

- 水素の非化石価値位置づけ・利用促進（外部環境）
- 水素導入支援制度の検討（外部環境、国外製造・国内製造共通）
- 水素受入拠点の整備支援（外部環境）
- 沿岸部・工業地帯での大規模水素利用に向けた海外水素輸入・大規模利用の商用化実証
- 再エネ適地への日本の進出の加速

#### 【2030年頃】

- 海外輸入水素の商用化開始（水素供給コスト 30 円/Nm<sup>3</sup>）※グリーン水素に限らない
- 海外再エネ適地での集中製造で早期に安価な水素製造が期待
- クリーン水素>42 万トン導入（国内、国外製造合計）
- 輸入水素等の大規模な水素供給を発電や産業部門を含むコンビナートで集中的に利活用

#### 【2030年以降】

- 需要増加に伴う国際サプライチェーン拡大と技術進展に伴う水素コストダウン（外部環境）
- 産業部門等でのグリーン水素需要拡大を受けた製造規模拡大

#### 【2050年】

- 水素供給ポテンシャル 2000 万トン（水素供給コスト 20 円/Nm<sup>3</sup>）（国内、国外製造合計）  
※グリーン水素に限定しない

#### ② 国内で製造し、国内で利用するケース

現状、国内の再エネ発電コストは、水電解水素製造に利用できるほど安価ではない。例えば、発電コスト検証ワーキンググループによる 2030 年の事業用太陽光の発電コスト見通しは 8.2 円/kWh~11.8 円/kWh であり、これを利用した水素製造は経済性に課題がある。

一方、九州を始めとした再エネに適した地域では、既に一部の時間帯においては出力抑制が発生しており、未利用電力が生じている。これらを活用することが可能であれば、水電解での水素製造コストのうち、電力由来分を抑制することができる。また、北海道では調整力が不足しており、北海道電力が苫小牧で 1 MW 級水電解装置の導入を行い、未利用電力の利用や出力変動吸収へ利用することが 2022 年に発表された。

今後も日本がカーボンニュートラルに向けて太陽光や風力といった再エネ導入を拡大する際、これらの出力抑制や調整力不足といった課題はより大きくなると予測され、系統連系による再エネ導入拡大への貢献という観点でも水電解技術は大きく期待されている。



また、脱炭素化の加速が進む中で、工場 CO<sub>2</sub> 排出ゼロ化を打ち出す企業も既に現れており、再エネの調達、自家消費による電力の低炭素化のみならず、熱の脱炭素化の必要性が高まっている。今後、上記の系統連系とは別のオフグリッド的な形で水電解が導入され、オンサイトでの水素製造に活用される可能性がある。

その他、系統の混雑により再生可能エネルギー導入拡大が難しい地域において、蓄電池を利用した平準化による混雑緩和が検討されているが、類似の系統安定化の役割として水電解での水素製造が利用される可能性もある。

2030 年以降には上述の水電解の活用の進展に加え、FIT の終了（2032 年）、その他洋上風力発電等の再生可能エネルギー導入増大に伴って、国内でもコスト低下が進むことも期待される。再生可能エネルギーからの電力が十分安価になり、合わせてグリーン水素の需要が拡大すれば、水素輸入港から距離のあるエリアなどにおいて、国内でもグリーン水素のサプライチェーン構築が進展することも期待される。

以上を踏まえて、ここでは普及シナリオを以下の様に整理した。

#### 【導入状況の例】

- 福島県で FH2R<sup>7</sup>（10MW 級 AWE）を活用したデマンドレスポンス（DR）実証を実施
- 山梨県で 1.5 MW の PEMWE を開発、調整力提供に関する実証を実施
- 北海道で 1 MW 系統用水電解の導入
- 工場脱炭素等の地域実証での地産地消 Power to Gas<sup>8</sup>を検討

#### 【2030 年頃まで】

- 再エネ拡大に伴う出力制御の増加（外部環境）
- 調整力としての水電解の活用拡大
- 工場等の脱炭素化加速に向けた再エネ調達・自家消費の拡大と、熱の脱炭素化（外部環境）
- 工場等熱需要地・近傍での分散型 P2G の実証
- 系統混雑緩和への寄与（外部環境）
- 需要地近傍での分散型 P2G の実証

#### 【2030 年頃】

- クリーン水素導入 > 42 万トンを供給（国内、国外製造合計）
- 出力制御等による安価な国内再エネを活用した国内分散型製造

#### 【2030 年以降】

- FIT 終了（2032）、洋上風力等の普及拡大による再エネコストの低減（外部環境）
- グリーン水素製造規模の拡大、国内サプライチェーンの構築
- 余剰電力の発生量・時間の増加（外部環境）
- 水電解の系統連系での活用拡大
- 分散エネルギーシステムの普及拡大（外部環境）
- 分散型 P2G の拡大

<sup>7</sup> 「福島水素エネルギー研究フィールド」の略称。

<sup>8</sup> 以下、「P2G」と略記。

**【2050年】**

- 水素供給ポテンシャル 2000 万トン（水素供給コスト 20 円/Nm<sup>3</sup>）（国内、国外製造合計）  
※グリーン水素に限定しない

## 1.4 技術開発の方向性

1.2 節で述べた通り、本年度は技術開発目標の設定は新規には行わず、産学が連携して取り組むことのできる「協調領域」の技術課題の抽出と開発優先度の整理に注力する。

委員会、ワーキンググループ（WG）においてこれらの作業を進める中で、「世界的な水電解の開発競争の中で、どのように日本の強みを発揮して世界で勝ち残っていくか」という問題意識で協調領域を抽出すること、電解の種類毎に独立した検討のみをするのではなく、技術間のつながりや関連性を意識することを目指した。

日本の強みとしては、既に高効率な電解装置を開発している企業を複数擁しており、また素材技術に元来強みを持つこと、さらに燃料電池ではきわめて優れた技術競争力を有することなどが直ちに挙げられる。これらを踏まえた技術開発の方向性・技術課題記述の観点（仮説）として、

- 現在まで培ってきた AWE・PEMWE 技術・知見の活用  
⇒先進技術（アニオン交換膜水電解<sup>9</sup>）への展開による競争力の獲得
- 日本が強みを持つ燃料電池（固体高分子形燃料電池<sup>10</sup>、固体酸化物形燃料電池<sup>11</sup>）技術の積極活用（材料技術、生産技術など）  
⇒シナジー発揮での開発加速

があると考えられ、以降の水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理においても、その点を意識した記述に努めている。

特に低温電解ではしばしば言われるように、AWE と PEMWE の利点を併せ持つポテンシャルを持つ技術として AEMWE が挙げられる。現状では成熟度で AWE や PEMWE には劣る技術ながら、高コストな貴金属を利用せずに済むポテンシャルを持つこと、PEMWE 類似のセルスタック構造で高い電流密度を目指すことができるポテンシャルを持つことなどから近年世界的にも AEMWE が注目されており、水電解の普及拡大に向けての中長期的な AEMWE への期待は大きい。

日本は、AEMWE で利用されるアニオン交換膜で世界的に見ても優れた技術を保有するが、近年では欧米でスタートアップや大手化学メーカーの動きが活性化しており、今後の競争激化が予想される。そのため、世界に伍するには一層の技術開発が重要である。また、これまで AEMWE 装置は数 kW 級の小型の装置が発表されているのみであったが、最近では米国においてスタートアップが大型の AEMWE を開発しており、今後の動向が注目される。国内には食塩電解の優れた技術を持ち、AWE に取り組む企業が既に複数存在するが、「AWE の進化系としての AEMWE の大型化」という技術開発の方向性は、日本の強みを活かすという観点も含めて可能性に期待がなされるものである。

以上の動向も踏まえ、AEMWE の技術開発へ国内企業が有する優れた技術（AWE：大型セルスタック構築、耐アルカリ材料技術、運用技術など。PEMWE：膜電極接合体<sup>12</sup>やセルスタックの作製、量産技術、評価解析技術など）を展開する観点を持って技術開発課題整理に努めた。

---

<sup>9</sup> 以下、「AEMWE」と略記。

<sup>10</sup> 以下、「PEFC」と略記。

<sup>11</sup> 以下、「SOFC」と略記。

<sup>12</sup> 以下、「MEA」と略記。

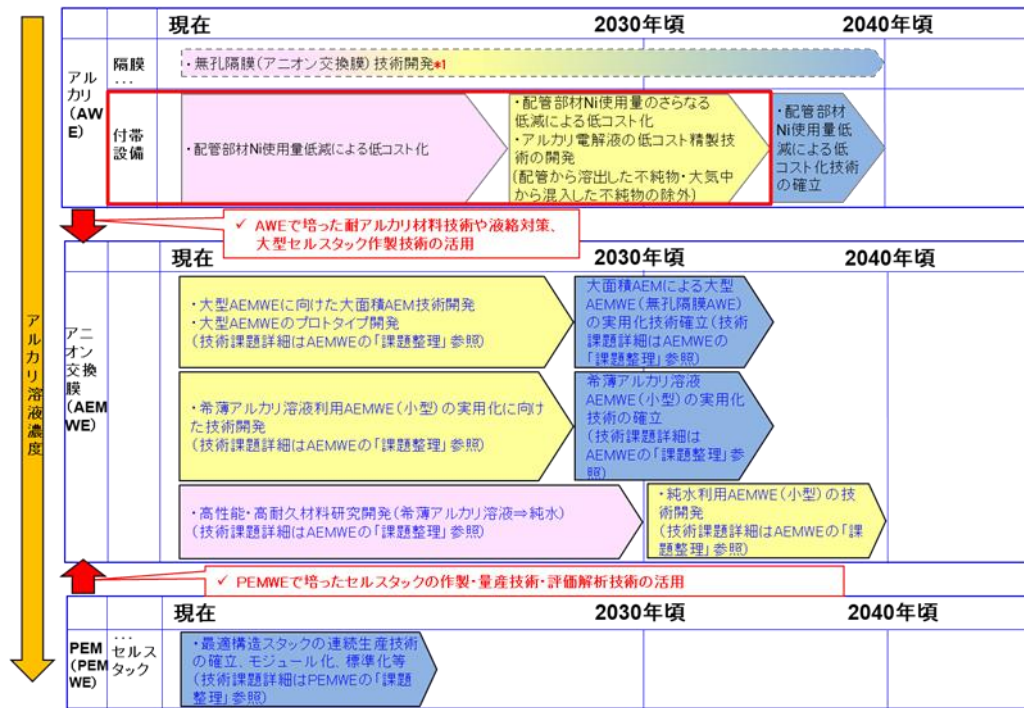


図 2 低温電解の技術・知見活用、開発連携イメージ

固体酸化物電解<sup>13</sup>については、すでに国内企業が優れたセラミック技術をもって SOFC を開発していることから、そこでの知見を活用して効率的な開発を行うこと、また SOEC 特有の技術としてはリバーシブル運転が挙げられることから、これらを一定程度念頭に置いた整理とした。また、「定置用燃料電池ロードマップ」でもリバーシブル固体酸化物形燃料電池—水蒸気電解 (rSOC) は取り上げられていることから、そこの連携も意識した。

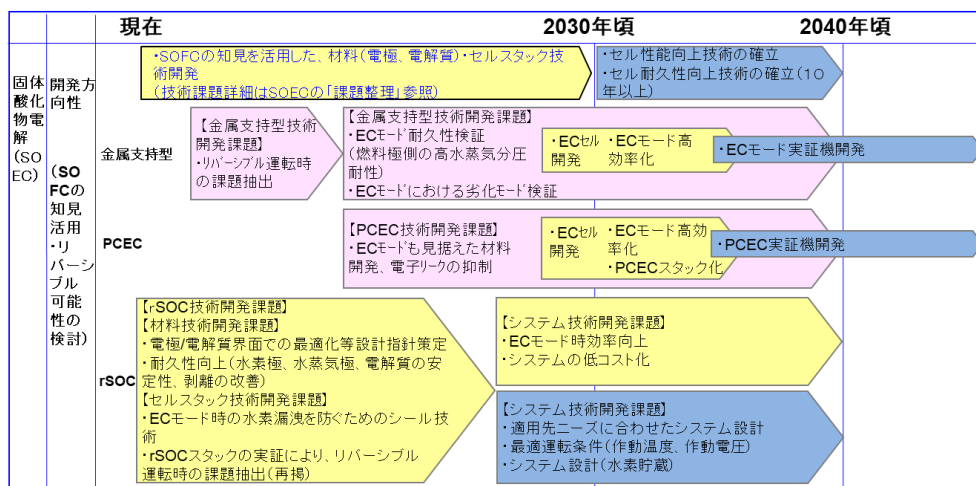


図 3 高温電解の技術・知見活用イメージ

13 ここでは通常の水蒸気電解を指しており、以下「SOEC」と略記。

また、水電解を今後世界市場に展開するにあたり、標準化も意識する必要があること、協調領域として、電解種にまたがる付帯設備の課題解決に取りくむべきであることから技術開発の方向性として

- 評価解析基盤構築、材料評価プロトコルや試験ガイドラインを検討  
⇒将来の国際標準化も視野に
- 協調領域としての付帯設備の技術課題整理  
を掲げた。

## 2. 技術開発課題

水電解装置に共通して必要な技術開発の方向性として、今後の再生可能エネルギーの大量導入に向けて、インバランスを解消できるような電解槽が求められる。この実現には特に水電解槽の耐久性や柔軟性の向上が必要である。そのためには実際の運転時に想定される起動停止や高電流密度運転、また整流器から電解槽に印加される電源に含まれるリップルなどの影響を評価し、安価な電源を利用しつつ電解槽として必要な耐久性を満足し、系統にも影響を与えない電解システムの技術を開発する必要がある。また材料開発の加速には、材料や部材の耐久性や柔軟性を評価する際に実運転時に進行する劣化現象を短時間で再現可能な評価プロトコルを構築することが重要であり、産業界からアカデミアへの期待も高い。これらの課題については、各電解種に共通する内容として各電解種の「技術開発課題」として重点的に盛り込むこととした。

また、技術開発の課題整理にあたっては、今後生じる水電解装置の新たな用途やエネルギーとしての水素需要拡大なども念頭に、従来よりも水電解装置が大型化することを考慮し、数 MW～10 MW 程度の装置規模感<sup>14</sup>を想定した。これは需給調整市場として必要となる最低入札量、整流器の出力電圧を数百 V、系統接続時の電流値の上限（数万 A 程度）、及び海外メーカーの装置規模感を考慮して設定したものである。ただしこれらの数値については次年度以降の精緻な分析の際に改めて検討する。

### 2.1 アルカリ水電解の技術開発課題

AWE は従来定負荷下での電解に広く用いられてきたが、今後の変動再生可能エネルギー導入拡大下での活用に向けては、耐久性の向上や柔軟性の向上が必要と考えられ、そのための劣化メカニズムの解明やより高耐久性で入力電力の変動にも対応可能な新たな電極材料の開発が強く求められる。例えば起動停止時に逆電流が生じることで、電極の劣化が進行することが知られている他、整流器から電解槽に印加される電流に含まれるリップルが電解槽劣化に影響を及ぼす可能性があるという報告もあるが、未解明な点が残されている。耐久性向上や低コスト化に向けては、従来と異なる運転条件下での劣化のメカニズム解明や各種性能の評価解析のための基盤技術の開発とともに、現在の AWE における高コスト部材の利用量抑制や電極特性の向上だけでなく、超高活性・高耐久・低コストを達成するための革新的な触媒材料や電極材料の開発に取り組むことが急務である。

#### 2.1.1 隔膜

- 耐差圧性などの機械的特性の向上、耐アルカリ性向上に加え、薄膜化による抵抗分極低減とガス分離性能を両立させることが必要である。
- また、上記の要求性能に優れた革新的材料や構造の探索が求められている。特に重要な技術としては無孔隔膜がある。無孔隔膜を用いた AEMWE としては従来小型装置の研究開発が進められてきたが、最近は無孔隔膜を AWE に適用しようとする企業も出てきており、次世代の AWE の形式として今後の動向が注目される（1.4 技術開発の方向性も参照）。ここでは「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」として、無孔隔膜の開発に関して

---

<sup>14</sup> 電解種ごとに最適なモジュール規模は異なるため、すり合わせは電解種別に設置したワーキンググループ（WG）内の議論で実施するものとした。

は AEMWE に詳細を記載し、AWE の「隔膜」の技術開発課題としては AEMWE の記述を参照するものとした。

### 2.1.2 電極

- 超高性能・高耐久・低コスト電極材料や触媒材料によって、AWE による水素製造の低コスト化や製造設備のフットプリントの削減を可能とし、国際的競争力の高い水素製造技術を開発することを目指すために、マテリアルズ・インフォマティクス (MI) や電極構造に関するシミュレーション等も活用しながら、電極や触媒に必要な金属の使用量を格段に低減しつつ高い電極活性と耐久性を実現する新たな革新的材料の開発が必要である。
- 一方、「触媒の高活性化」については、現状の電極材料を用いた電極の高活性化に向けた取り組みを表しており、革新的材料の開発を想定した「超高活性・高耐久・低コスト電極材料の開発」とは異なるものである。また、「金属使用量の低減」は貴金属以外の金属も含めた金属使用量の低減を図るものである。
- 海外では、触媒を混合したスラリーを、隔膜に塗布することで隔膜と触媒層を一体とした Catalyst Coated-Diaphragm を作成し、PEMWE に類似した触媒層を持ったカソードとして用いることで高性能化を図る事例が次世代の AWE のセル構造として報告されている。同様な構造をもつ電極の開発はアノードにも当てはまる。このような背景とともに、技術開発にあたっては PEMWE 類似触媒層開発の前段階として、気泡排出を促進するような電極、隔膜の構造を探索することが必要である。

### 2.1.3 セルスタック

- 二相流シミュレーション技術を活用した電解槽設計の支援が必要である。具体的には、水の均一供給、効率的なガス排出を実現する双極板<sup>15</sup>などの設計支援などが挙げられる。
- セルスタックの構造や組み立てに関連する課題として、抵抗を低減しつつ構造を単純化することにより生産性を高めた電解槽や、ゼロギャップ構造での電極と隔膜の接触に伴う電極と隔膜間のストレスを低減する構造の開発が挙げられる。このような開発ではシミュレーションによる設計支援も必要である。また、海外では AWE も 3 MPa 程度での加圧運転することから加圧に耐えうる高強度セルスタックの設計や加圧対応のシール技術開発などが必要である。

### 2.1.4 付帯設備

- 耐アルカリ性の配管部材として用いられている Ni は近年価格が上昇しており、Ni の使用量低減による配管部材のコスト低減は重要な技術課題である。また、配管部材での Ni 使用量低減を進めた後には、配管からの溶出金属をアルカリ電解液から効率的に除去する技術が重要な技術課題となる。溶出金属が効率的に除去可能となった後は、「大気から混入した CO<sub>2</sub> のアルカリ電解液からの除去技術」の開発についても取り組む必要がある。

---

<sup>15</sup> 以下、「BPP」と略記。

## 2.1.5 評価解析、規制対応

- 材料レベル
  - 個々の材料を評価するための評価プロトコルの整備や、評価方法の標準化が必要である。また、材料評価においては、実機評価レスで、開発した材料の適用可否を判断可能であることが望ましい。
  - 材料開発を支援する計測技術（触媒の電子状態観察のためのオペランド開発など）や分析・解析技術の開発も重要である。
- セルスタックレベル
  - 開発した電極触媒や隔膜を組み合わせることで性能や耐久性を評価することが可能な技術や研究開発の仕組みを整備することが必要である。
  - 水電解槽の要求寿命（10年＝約8万時間運転）の達成には、8万時間の運転での劣化モードを短時間で再現可能な加速劣化プロトコルの開発が必須である。具体的には、8万時間の100分の1の時間である800時間以下で、再現できることが望ましい。
  - 加速劣化プロトコルの開発では、材料開発効率化の観点から早期に確立可能な範囲から随時成果を公表し、材料開発加速に向けて材料開発の研究者と密な連携を行うことが必要である。また、評価手法の標準化も国際競争力の観点から重要である。
  - 経時劣化時の過電圧分離と劣化メカニズム解明による知見を生かして、耐久性能シミュレーション技術やその場劣化診断技術の開発も必要である。
- システムレベル
  - 電解装置として以下を標準化することが必要である。
    - ◇ 電解装置（セル以外も含む）としての原単位（kWh/Nm<sup>3</sup>）の測定方法（動作パターン・環境条件等）の標準化。
    - ◇ Beginning of Life (BOL)・End of Life (EOL) の定義の標準化。
    - ◇ 電解装置（セル以外も含む）としての劣化性能の測定方法（動作パターン・環境条件等）の標準化。
    - ◇ 電解装置（セル以外も含む）としての各種性能（変動レート等）の測定方法（動作パターン・環境条件等）の標準化。
    - ◇ 電解装置（セル以外も含む）としてのLCAの標準化。
- 数値解析
  - 定負荷運転時のみならず変動運転時の気液二相流解析技術を解析可能なモデルを開発し、電解槽設計を支援することが必要である。
  - 電極反応によって発生した水素、酸素は一度電解液に溶存した後、気泡となると考えられるが、気泡発生メカニズムは十分には解明されておらず、数値解析を援用して解明し、電極設計を支援することが必要である。
  - 水電解装置のシステム性能（原単位、変動追従性など）の検討に当たり、水電解装置を使用するエンドユーザーが電解装置に求める運転条件や出力を達成するために必要となる電解装置のシステム性能を明らかにする必要がある。運転条件等からシステム性能を決定するためのシステムシミュレーションモデルと、セル劣化モデルや性能評価モデルなどの開発が必要である。



- 高度オペランド計測技術開発
  - 高度オペランド計測技術による気泡移動や気液二相流挙動の可視化技術と、気液二相流数値解析技術を連携して、メカニズム解明や解析技術の精度向上を加速することが必要である。
- 加圧試験のガイドライン作成
  - 海外では約 3 MPa の出口圧力を持つ水電解装置が主流である。日本では、高圧ガス保安法において常用温度でのゲージ圧力 1 MPa 以上となる圧縮ガスの製造に対する規制が存在し、現状では水電解装置の出口圧力を 1 MPa 未満とする例が主である。将来的にわが国の水電解装置を海外に展開することを想定すると、国際的な競争力を高めるためには海外と互換性のある規則・仕様を持った水電解装置の開発を加速することが不可欠になる。高圧ガス保安法が研究開発や商用化の障害とはならず、安全を担保した上で加圧運転を実施可能な環境を整備することを目指して、加圧試験を実施する場合に準拠すべきガイドラインを策定するような取り組みも必要である。
- 強アルカリ溶液利用にあたり装置の備えるべき機能指針、設置指針、安全対策指針策定
  - AWE で電解液として用いる水酸化カリウムや水酸化ナトリウムなどの高濃度アルカリ溶液は劇物であるため、設備からのアルカリ溶液流出対策や、流出時に備えた対応など、高濃度アルカリ溶液特有の機能や安全設計指針を策定することが普及のためには必要である。

## 2.2 プロトン交換膜水電解の技術開発課題

PEMWE は AWE と比較すると、高電流密度での運転が可能、変動応答性能に優れるなどの特徴を持つが、一方で貴金属や電解質など使用部材が高く、比較的高い設備コストが課題である。特にアノード触媒で利用される Ir は極希少な貴金属であり、普及期の大量導入を想定した場合 Ir 使用量がボトルネックとなるおそれがある。そのため Ir 使用量低減・フリー化技術の開発は低コスト化のみならず、将来の普及に向けての喫緊の課題である。貴金属使用は電極触媒に限らず、高電位・酸性条件である PEMWE のアノード側では白金や金などの貴金属が BPP や多孔質輸送層<sup>16</sup>のコーティング材料として用いられる。これらの抑制も低コスト化に向けて重要である。

また、今後の変動再生可能エネルギー導入拡大下での活用に向けては、耐久性の向上や柔軟性の向上が必要と考えられ、そのための劣化メカニズムの解明が強く求められるのは AWE 同様である。電解質膜をはじめ耐久性と安全性、稼働率向上に寄与できる材料の開発が求められる。

PEMWE の耐久性向上や低コスト化に向けても、従来と異なる運転条件下での劣化のメカニズム解明や各種性能の評価解析のための基盤技術の開発と革新的材料開発や高コスト部材利用量抑制とに連携して取り組むことが重要である。材料、部材開発を加速するためには、劣化モードを再現可能な評価プロトコルを早期に整備し、材料、部材開発にスピーディにフィードバックしていくことが必要である。その他、PEFC と PEMWE の構造や部材は類似しており、技術開発において蓄積された知見の活用や、生産技術開発の横展開などに取り組むことでシナジーを発揮し、効率的に技術開発を進めることができる。

### 2.2.1 膜電極接合体

- 触媒層に水を効率的に供給するためには、気相排出を促進することが重要となる。AWE と比較して PEMWE で大電流密度化できるのは、電解質膜の抵抗が小さいことと並び、PEFC の触媒層において反応ガスの溶解する界面と反応界面の分離が実現し反応界面の飛躍的増大が図られているのと同様に、PEMWE の触媒表面の反応界面と気化界面の分離が図られ、反応界面への気相による阻害が抑制されているためと考えられる。ただし、PEMWE での触媒層内における電子、プロトン、気相、液相の輸送メカニズムの解明はまだ不十分であり、PEFC でのメカニズム解明の取組も参考にした上で、輸送メカニズムに基づいて触媒層、MEA の構造を最適化するとともに、最適構造 MEA の製造方法を検討する必要がある。

### 2.2.2 電解質材料

- 将来的な加圧運転や差圧運転を想定した場合、電解質膜に求められる性能の要求水準が高くなる。加圧条件下で重要となる課題の一つとして、機械的特性の維持が挙げられる。また、過電圧低減によって高電流密度運転を達成しつつ、クロスリークを抑制することで高安全性・高稼働率を達成することができるような電解質膜の開発も必要である。
- アノード側では、高電位に起因して、電極触媒の Ir が溶解する現象が報告されている。溶解した Ir が電解質膜やアイオノマーに侵入しラジカルが形成されると、化学劣化が進行する可能性がある。アノード電位でのラジカル耐性の確保が必要である。

---

<sup>16</sup> 以下、「PTL」と略記。

- 将来的には現状の電解槽と比較して更に高性能な次世代電解槽の導入が進むことも想定される。そこで、現状の電解槽に搭載することを想定した電解質膜の「機械的特性や耐久性の向上」に加え、次世代電解槽に搭載することを想定した「高耐久、高安全性、高稼働率」を実現するような次世代電解膜の技術開発が必要である。
- 部材の開発を加速するためには、大学で研究された材料を、企業がすぐに試験できるような大学と企業のシームレスな連携が必要であり、連携して取り組むべき課題の一つとして、大型化に向けた面安定化技術の開発がある。

### 2.2.3 アノード触媒

- 極希少金属である Ir の使用量を低減しつつ、耐久性を確保するための開発が必要である。また、負荷変動時や起動停止時についても、アノード触媒における Ir の溶解現象などが報告されており、変動運転時における耐久性向上が必要である。
- 現状のアノード触媒での Ir 使用量では、将来の GW スケールでの PEMWE の導入に伴って Ir の年間使用量が急増し、年間使用量が、現在の年間採掘量を超過する可能性がある。そのため、アノード触媒における Ir 使用量を圧倒的に低減する技術が PEMWE の普及拡大には必須である。Ir 使用量低減と性能や耐久性を両立した触媒を開発するためには、長時間運転での劣化モードを再現可能な耐久性評価プロトコルの整備が急務である。
- 貴金属フリー触媒の開発については、第一世代 (Gen1) の貴金属フリー触媒がシーズ探索から研究開発段階へと進んだ場合であっても、更なる低コスト、高耐久を有する第二世代 (Gen2) 貴金属フリー触媒を実現するべくシーズ探索を継続する必要がある。

### 2.2.4 カソード触媒

- 将来的なグローバルでの GW スケールの PEMWE 装置導入を想定すると、アノード触媒での Ir 使用量低減は喫緊の課題である。一方、カソード触媒に用いる貴金属 (Pt) の低減・フリー化については、以下に述べる理由からアノードに比して優先度は高くないことが想定される。
  - まず、既に燃料電池の電極開発において、Pt 使用量低減に向けた取り組みが進められており、PEMWE のカソード触媒には、燃料電池で培われた低減技術を転用することが可能である。
  - また、PEMWE では、PTL や BPP へのコーティング材料としても Pt を使用しており、電解槽トータルでの Pt 使用量低減という観点からはコーティングでの Pt 使用量の低減の方が、貢献度が大きい。

これらの理由から、カソード触媒での貴金属フリー化に向けた取り組みの優先度は相対的に低い。

しかしながら、将来的に燃料電池、PEMWE が共に GW スケールで導入された場合に Pt が不足する可能性があること、PEMWE の更なる低コストも必要であることなどから中長期的視点では PEMWE でもカソード触媒の貴金属フリー化に取り組む必要がある。

### 2.2.5 多孔質輸送層

- シミュレーション技術に基づいて PTL 構造を設計することで、気泡排出性能などを向上させることが必要である。
- 触媒層からの集電面に不動態が形成することに起因する電子伝導性低下、酸性・高電位環境による腐食を抑制するため、PTL 表面に貴金属をコーティングする必要があるが、酸性・高電位下であるために白金や金の利用が必要となり高コスト要因となっている。そのため、貴金属使用量低減により低コスト化しつつ、耐久性を維持するような開発が必要である
- アノード PTL の材料として現在主流である Ti は高コストであり、Ti の使用量を低減する技術開発や、Ti に代わる材料の開発が必要である。
- 貴金属フリーと耐久性を両立するコーティング技術の開発については、第一世代 (Gen1) のコーティング技術がシーズ探索から、研究開発段階へと進んだ場合であっても、更なる高耐久を有する第二世代 (Gen2) 貴金属フリーコーティング技術を実現するべくシーズ探索を継続する必要がある。
- 現状では、PTL 材料の濡れ性や空孔の構造や大きさの分布が気泡排出に及ぼす影響は十分に解明されていない。そのため、PTL 内の気泡排出メカニズムを解明し、排出メカニズムに基づいて構造を最適化するとともに、最適構造 PTL の生産方法を検討する必要がある。

### 2.2.6 双極板

- PTL と同様に、PTL と BPP 界面の不動態形成に起因する電子伝導性低下、酸性・高電位環境による腐食を抑制するため、表面に貴金属をコーティングする必要があるが、コーティングに用いる貴金属は高コスト要因の一つである。そのため、使用量を低減しつつ、耐久性を維持するような開発が必要である。
- アノード BPP の材料として主流である Ti は高コストである。そのため、Ti の使用量を低減する技術開発や、Ti に代わる材料の開発が必要である。PEMWE でも、燃料電池の BPP のようにプレス成型やモールド成形できるような金属材料が望ましい。
- 貴金属フリー表面コーティング技術の開発については、第一世代 (Gen1) のコーティング技術がシーズ探索から、研究開発段階へと進んだ場合であっても、更なる高耐久を有する第二世代 (Gen2) 貴金属フリー表面コーティング技術を実現するべくシーズ探索を継続する必要がある。

### 2.2.7 セルスタック

- 部材間の接触抵抗低減に向けては、単独の部材に閉じた開発ではなく接触する相手部材と連携した開発が必要となる。例えば、PTL であれば、電解質膜や触媒層などと連携した開発が必要となる。これらを効率的に進めるための仕組みの整備も重要である。
- 海外では約 3 MPa の出口圧力を持つ水電解装置が主流である。日本では、高圧ガス保安法において常用の温度でのゲージ圧力が 1 MPa 以上となる圧縮ガスの製造に対する規制が存在し、現状では水電解装置の出口圧力を 1 MPa 未満とする例が主である。将来的にわが国の水電解装置を海外に展開することを想定すると、国際的な競争力を高めるためには海外と互換性のある規則・仕様を持った水電解装置の開発を加速することが不可欠になる。特に車載用

燃料電池のシールでは 3 MPa という高圧を想定しておらず、燃料電池の技術を直接転用することはできない。そのため、PEMWE での高圧運転に耐えうるシール技術を開発するためには、加圧条件下での長時間耐久運転や純水に溶出ししない材料の開発というシーズ探索・基礎研究の段階から取り組みを実施する必要がある。

- 将来的な水電解装置の大量導入に伴う Ir 資源枯渇の可能性を考慮すると、Ir 使用量低減だけではなく、電解槽から Ir を回収、再利用するリサイクルの技術開発が重要となる。リサイクルは、電解槽を分解、スタックを分解、CCM を分別、貴金属を回収という長い工程で構成される。貴金属含有量が少ないほどリサイクルの難易度が上がり収益性が下がるので、貴金属使用量のターゲットは性能、耐久性、リサイクル性を考慮して決定する必要がある。

## 2.2.8 評価解析

- 材料レベル
  - 個々の材料を評価するための評価プロトコルの整備や、評価方法の標準化が必要である。また、材料評価においては、実機評価レスで、開発した材料の適用可否を判断可能であることが望ましい。
- セルスタック
  - 開発した電極触媒や電解質膜の MEA として性能や耐久性を評価可能な技術や研究開発の仕組みを整備することが必要である。
  - PEMWE の要求寿命 (10 年=約 8 万時間運転) の達成には、8 万時間の運転での劣化モードを短時間で再現可能な加速劣化プロトコルの開発が必須である。具体的には、8 万時間の 100 分の 1 の時間である 800 時間以下で、再現できることが望ましい。
  - 加速劣化プロトコルの開発では、材料開発効率化の観点から早期に確立可能な範囲から随時成果を公表し、材料開発加速に向けて材料開発の研究者と密な連携を行うことが必要である。また、評価手法の標準化も国際競争力の観点から重要である。
  - 経時劣化時の過電圧分離と劣化メカニズム解明による知見を生かして、耐久性能シミュレーション技術やその場劣化診断技術の開発も必要である。
- システムレベル
  - 電解装置として以下を標準化することが必要である。
    - ◇ 電解装置 (セル以外も含む) としての原単位 (kWh/Nm<sup>3</sup>) の測定方法 (動作パターン・環境条件等) の標準化。
    - ◇ Beginning of Life (BOL) ・ End of Life (EOL) の定義の標準化。
    - ◇ 電解装置 (セル以外も含む) としての劣化性能の測定方法 (動作パターン・環境条件等) の標準化。
    - ◇ 電解装置 (セル以外も含む) としての各種性能 (変動レート等) の測定方法 (動作パターン・環境条件等) の標準化。
    - ◇ 電解装置 (セル以外も含む) としての LCA の標準化。
- 数値解析
  - 定負荷運転時のみならず変動運転時の気液二相流解析技術を解析可能なモデルを開発し、電解槽設計を支援することが必要である。

- 電極反応によって発生した水素、酸素は一度イオノマーに溶存した後、気泡となると考えられる。溶存した物質が、触媒層、PTL のどの位置で気泡として発生するかなど、気泡発生メカニズムは解明されていない。気泡発生メカニズムを、数値解析を援用して解明することで、電極設計を支援することが必要である。
- 水電解装置のシステム性能（原単位、変動追従性など）の検討に当たり、水電解装置を使用するエンドユーザーが電解装置に求める運転条件や出力を達成するために必要となる電解装置のシステム性能を明らかにする必要がある。運転条件等からシステム性能を決定するためのシステムシミュレーションモデルと、セル劣化モデルや性能評価モデルなどの開発が必要である。
- 高度オペランド計測技術開発
  - 高度オペランド計測技術による気泡移動や気液二相流挙動の可視化技術と、気液二相流数値解析技術を連携することで、メカニズム解明や解析技術の精度向上を加速することが必要である。
- 加圧試験のガイドライン作成については、AWE の記載を参照されたい。

### 2.2.9 その他

「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」は協調領域の技術課題を主に記載する位置づけであるが、それとは別の内容でありつつも PEMWE の競争力確保のため重要で検討が必要な項目を以下に示す。

- 材料開発体制
  - 材料開発を支援するため、アカデミアが最新材料にアクセスできる仕組みの整備や、ベンチマークとなる標準材料の設定が必要である。
- サプライチェーン
  - 現在、材料としてのフッ素自体の入手が困難となっていることで、フッ素系膜の供給が制限されて高コストとなっている。炭化水素系膜の開発促進やフッ素の増産など、業界の枠を超えたサプライチェーン全体としてのサポートが必要である。
  - 直近では補機の電子部品のサプライチェーン確保が喫緊であり、切実かつ水電解分野にとどまらない課題である。
- 法整備
  - 高リサイクル率を達成するためには、貴金属リサイクルや Ti パーツの再利用について、産業廃棄物としての廃棄を防ぐ法整備や、海外からのスタックの再輸入などが容易にできるような制度の整備が必要である。
- 規制対応
  - ヨーロッパでは PFAS 規制があり、フッ素の規制への対応を検討することが必要である。
- 開発方針（加圧対応）
  - 欧州の PEM 水電解メーカーは 3~5 MPa を標準スペックにしている。日本のスタック、周辺デバイスがそのスペックに対応しないと、市場ボリューム的に不利になる。そのた

め、スペックを含めて、日本はどのように市場を見出していくのか、競争力を生み出すのかというビジョンを明らかにする必要がある。

## 2.3 アニオン交換膜水電解の技術開発課題

AEMWE は、アルカリ性環境下のため高コストな貴金属を利用せずに済むポテンシャルを持つこと、PEMWE 類似のセルスタック構造で高い電流密度を目指すことができることから注目されている。一方で現状その技術的な成熟度はまだ高くなく、AEMWE の製品化の状況は世界的にみてもごく限定的である。特に小型システムについてはイタリアの Enapter 社が世界に先駆けて 2.4 kW の装置を商用化している。同社はこの小型のモジュールを大量生産することでコストダウンを図り、大出力対応は小型のモジュールを並べることで行う戦略である。一方最近では、米国の Verdagy 社がセル面積 2.85 m<sup>2</sup> の大型 AEMWE の開発に取り組んでいることが発表されており、今後の動向が注目されている。両者のうち、小型 AEMWE は、PEMWE の進化系という位置づけと想定され、Enapter 社が商用化しているシステムでは、PEMWE のようにアノード側のみに電解液を供給するカソードドライのシステムを採用している。一方、Verdagy 社が取り組んでいる大型 AEMWE は、AWE の進化系という位置づけと想定される。小型、大型の AEMWE にはそれぞれ特有の技術課題が存在するため、「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」ではそれぞれに特有の技術課題を、【小型】、【大型】と明記するものとした。

また、AEMWE では電解液として濃度 1 M 程度のアルカリ溶液を用いることが主流である。これは AWE の電解液に比べれば低濃度だが、さらにアルカリ濃度を低減することにはスタック内のセル間短絡の抑制、配管での Ni 使用量低減による付帯設備の低コスト化、などの利点があるため、究極的には純水供給のみでの運転する AEMWE にも期待がされている。一方、現状では純水運転時には電解性能や耐久性が著しく低下することが報告されており、純水運転の実現には純水条件でも高性能、高耐久性を発揮できる部材が必要となることに留意が必要である。既にアルカリ電解液を用いた AEMWE の開発が世界で進められている中、究極的な純水運転の実現に向けた開発には世界の動向も見据えながら取り組む必要がある。材料開発の進展によるブレイクスルーへの期待が大きい領域といえる。また、今後の変動再生可能エネルギー導入拡大下での活用に向けては、耐久性の向上や柔軟性の向上が必要と考えられ、そのための劣化メカニズムの解明が強く求められるのは AWE、PEMWE 同様である。アニオン交換膜をはじめ耐久性と安全性、稼働率向上に寄与できる材料の開発が求められる。その他、AEMWE と PEMWE の構造は類似しており、PEMWE において蓄積された生産技術開発の展開などに取り組むことで、効率的に技術開発を進めることができる。

### 2.3.1 膜電極接合体

- AEMWE でも PEMWE に匹敵する高電流密度での運転実現が期待される。PEMWE における記載と同様に、高電流密度化に向けた開発の方針として、電子、アニオン、気相、液相の輸送メカニズムを解明し、適切な三相界面を形成することで、反応面積の増大を図ると共に、電子やアニオンの伝導パスを確保して伝導抵抗を低減する必要がある。
- 触媒層構造を変更することで、気泡排出性能、アイオノマーへの給水性能などが影響を受けるため、これらの他様々な因子を考慮した上で、触媒層を最適化する必要がある。特に、pH に依存して、反応種である水酸化物イオンの濃度が変化するため、pH 変化時の反応面への水酸化物イオンの輸送などを考慮し、触媒層の構造を最適化する必要がある。



- MEA 製造の方法として、現状は電解質膜に触媒を塗布する Catalyst-Coated Membrane (CCM)と、PTL 基板に触媒を塗布する Catalyst-Coated Substrate (CCS)の両方の開発が進められている段階であり、特定の手法に収斂している段階ではない。それぞれに対して、接触抵抗低減や生産技術の開発を進めることが必要である。
- 「MEA 中の水分・ガス・プロトン輸送現象の解明」については、PEMWE の記載を参照されたい。

### 2.3.2 電解質材料

- アニオン交換膜が水に接触した際、膜の寸法が変化するが、この寸法変化は組み立ての際の問題となる。生産性を向上させるためには、膜の基礎設計の段階から、給水時における膜の寸法安定性を確保しておく必要がある。
- 電解質材料の耐久性を考える上では、ラジカルに対する安定性、つまり化学劣化に対する耐性も重要な因子である。また、AEMWE では運転条件が明確に定まっておらず、高温で運転することも想定されるため、耐熱性の向上も重要である。
- AEMWE でも PEMWE と同様にアノード側のみに電解液を供給するカソードドライ運転が検討されている。しかしながら、カソードドライ運転時は、カソード側に電解液が供給されないため、カソード側の電解質膜、アイオノマーがドライアウトする現象、アニオン交換膜のカソード側の含水量が低下することにより膜内のアルカリ濃度が増加し、膜が劣化する現象などが進行する可能性がある。そのため、電解質材料のアニオン伝導性のみならず高アルカリ耐性や透水性も増大させる開発が必要である。
- 将来的に、高活性・高耐久を実現する電解質材料を実用化するには、現在から、新しいコンセプトに基づく好材料開発に取り組むことが必要である。材料開発の方針として、例えば、イオン伝導機構に着目した電解質材料の開発などが挙げられる。

### 2.3.3 電極触媒

- 大気中の CO<sub>2</sub>がアルカリ電解液に混入する現象は AWE と同様に課題である。特に、AEM のように、電解液として希薄アルカリ溶液を用いると、CO<sub>2</sub> 混入による電解液の pH 変化がより顕著となる。このように電解液の pH が経時的に変化した場合であっても触媒活性を担保できる触媒の開発が必要である。
- AEMWE は、アルカリ性環境下であるため、高コストな貴金属を使用せずに済むポテンシャルを有しており、貴金属フリー触媒の開発は、重要な技術開発項目である。現状では、アノード触媒の貴金属フリー化については検討が進んでいる段階である。一方、カソード触媒の貴金属フリー化は、アノードと比較して難易度が高く、貴金属フリー化の検証も含めた中長期的な検討が必要である。

### 2.3.4 多孔質輸送層

- PTL の材料の候補として Ni が検討されているが、Ni は高コストであるため、耐アルカリ性を備えた安価な代替材料の探索や、安価な材料へのコーティング技術の開発に取り組む必要がある。また、コスト低減のみならず、PTL の電子導電性や耐久性を向上させるためにも、

新規材料の適用は必要不可欠である。性能や耐久性向上を実現しつつコストを低減可能な材料の探索が必要である。

- 「気泡排出メカニズムの解明」については、PEMWE の記載を参照されたい。

### 2.3.5 双極板

- BPP の材料の候補として Ni が有力視されているが、Ni は高コストであるため、耐アルカリ性を備えた安価な代替材料の研究が求められる。BPP の材料は現状収斂しておらず、AEMWE の実用化に向けて代替材料の探索に取り組むことも重要である。また安価な材料へ貴金属をコーティングすることも想定されるため、コーティング技術開発についても取り組む必要がある。

### 2.3.6 セルスタック

- AEMWE は未だ材料開発の段階にあり、スタック構造についても基礎研究が必要である。例えば、AEMWE ではアルカリ溶液を使用するため、スタック内のセル間の液絡が問題となる。使用する材料、電解液のアルカリ濃度などに対して適切なスタックの構成は解明されておらず、基礎研究が必要である。
- PEMWE では、アノード側のみに純水を供給するシステムが実用化されている。同様に AEMWE でもアノード側のみに電解液を供給するカソードドライ運転が検討されている。しかしながら、カソードドライ運転時は、カソード側に電解液が供給されないため、カソード側の電解質膜、アイオノマーがドライアウトする現象、アニオン交換膜のカソード側の含水量が低下することにより膜内のアルカリ濃度が増加し、膜が劣化する現象などが進行する可能性がある。そのため、セル内の水分を適切に制御することで、これらの課題を解決する必要がある。
- PEMWE と同様に、高圧運転に耐えうるシール技術開発に取り組む必要があることに加え、アルカリ性環境下で適用可能な材料の探索も必要となる。

### 2.3.7 付帯設備

- 「配管部材 Ni 使用量低減による低コスト化」については、AWE の記載を参照されたい。
- カソード側にアルカリ溶液を供給しないカソードドライ運転を実施した場合であっても、電解によって生成された水素中に水酸化カリウムが含まれる場合がある。純度の高い水素を製造するためには、精製装置の開発に取り組む必要がある。

### 2.3.8 評価解析

- 材料レベル
  - 個々の材料を評価するための評価プロトコルの整備や、評価方法の標準化が必要である。
  - アニオン交換膜の性能を評価する際、大気中に存在する二酸化炭素が膜に吸収されることで、膜のアニオン伝導性が変化するという課題がある。大気中に存在する二酸化炭素の影響を考慮した標準的な性能評価方法を確立し、性能を横並びで比較できるようにすることが必要である。

- セルスタックレベル
  - 開発した電極触媒や電解質膜の MEA として性能や耐久性を評価可能な技術や研究開発の仕組みを整備することが必要である。
  - 水電解槽の要求寿命（10 年＝約 8 万時間運転）の達成には、8 万時間の運転での劣化モードを短時間で再現可能な加速劣化プロトコルの開発が必須である。具体的には、8 万時間の 100 分の 1 の時間である 800 時間以下で、再現できることが望ましい。
  - 加速劣化プロトコルの開発では、材料開発効率化の観点から早期に確立可能な範囲から随時成果を公表し、材料開発加速に向けて材料開発の研究者と密な連携を行うことが必要である。また、評価手法の標準化も国際競争力の観点から重要である。
- システムレベル
  - システムの性能を評価するための評価プロトコルの整備や、評価方法の標準化が必要である。
- 数値解析
  - 電極反応によって発生した水素、酸素は一度アイオノマーや電解液に溶存した後、気泡となると考えられる。溶存した物質が、触媒層、PTL のどの位置で気泡として発生するかなど、気泡発生メカニズムは十分には解明されておらず、数値解析を援用して解明することで、電極設計を支援することが必要である。
  - 水電解装置のシステム性能（原単位、変動追従性など）の検討に当たり、水電解装置を使用するエンドユーザーが電解装置に求める運転条件や出力を達成するために必要となる電解装置のシステム性能を明らかにする必要がある。運転条件等からシステム性能を決定するためのシステムシミュレーションモデルと、セル劣化モデルや性能評価モデルなどの開発が必要である。
- 高度オペランド計測技術開発
  - 高度オペランド計測技術による気泡移動や気液二相流挙動の可視化技術と、気液二相流数値解析技術を連携することで、メカニズム解明や解析技術の精度向上を加速することが必要である。

## 2.4 固体酸化物電解の技術開発課題

「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」のうち、SOECの部分では材料レベルの技術開発課題（電極、電解質に分けて記載）、セルスタックレベルの技術開発課題、システム・付帯設備（SOEC特有のもの）の技術開発課題、評価解析技術開発課題の4つに分けて記載している。また、「定置用燃料電池ロードマップ」のうちSOFCに関する部分との共通課題やrSOC（リバーシブル固体酸化物形燃料電池—水蒸気電解セル）などと共通する項目などもある点が固有の点である。以降で4つの分類に基づいて技術開発課題についての補足を行う。

### 2.4.1 電極

- 電極においては、特にセル性能向上に向けた技術開発と耐久性向上に向けた技術開発が求められる。前者では、水蒸気の利用率向上が課題として挙げられているが、実サイズセルを想定した場合は製造プロセスの観点が必要になり各社開発領域でもあるため、技術開発の推進には設計指針策定などの協調領域の抽出がポイントである。
- 耐久性向上は重要な課題であり、実用技術開発の段階ではセル耐久性として10年以上の水準が求められる。劣化にはNiの移動や凝集が大きな役割を果たしていると考えられることから、そのメカニズムの理解が重要である。とりわけSOEC特有の雰囲気・電場下でのメカニズム解明が必要である。その他、不純物ガス被毒などの技術課題に対しては、SOFCでの知見が活用できる可能性があるため、もしSOEC固有の課題があればそれに取り組むべきである。
- その他、中長期的な課題としては、還元雰囲気を効率よく作るための高活性触媒の開発、純酸素利用を視野に入れた場合の高濃度酸素や水蒸気下での材料耐久性向上、加圧時の耐久性向上などが必要である。

### 2.4.2 電解質

- 電解質の技術課題としては、特にセル耐久性向上に向けてZrO<sub>2</sub>系の相変態や応力分布の抑制が重要となる。
- また、超高効率な水電解装置に向けて期待されるプロトン導電性セラミック電解セル<sup>17</sup>の材料開発、特に電子リークを抑制可能な材料開発が必要である。

### 2.4.3 セルスタック

- セルスタックにおいては、特にスタック性能向上、耐久性向上、低コスト化に向けた技術開発を進める必要がある。インターコネクタでは安価なコーティング技術と汎用材利用によるコスト低減が必要である。また、水蒸気・酸素雰囲気での配管耐久性向上が求められる。
- シール技術はSOEC技術開発において重要であり、高温でリークのない材料開発が必要である。高効率化に向けた加圧スタックにおいては、加圧対応可能シール技術も求められる。セルスタックでの熱応力耐性、高水蒸気条件での不純物による電極被毒抑制なども必要である。
- 生産技術に関しては、セルの大型化・低コスト化に向けた技術開発が必要とされる。一方で、耐久性の観点から大型化にはセラミックセルには最適なサイズがあると考えられる点は留意

---

<sup>17</sup> 以下、「PCEC」と略記。

が必要である。また、既にある技術（セラミックシート成型、セル作製技術）については各社で活用を進めることが可能である。そのため、協調領域にある技術課題として、ロードマップにはセルの大型化・低コスト化に向けた革新的な技術への取り組みを記載した。

- SOFC とも共通する技術課題として、以下の記載を行った。
  - 低温化や高耐久化などのメリットを持つ金属支持形の SOEC についても現状は基盤研究の水準ながら今後の技術開発についての記載を行った。
  - 将来の超高効率な水蒸気電解に向けて期待される PCEC の開発の記載を行った。
  - リバーシブル形の固体酸化物形燃料電池—水蒸気電解セル (rSOC) について、実証による課題抽出から一層の性能向上へと技術開発に取り組む方向性の記載を行った。

#### 2.4.4 システム・付帯設備

- システムの技術課題としては、将来の産業用途での利用などを見据えての大型化に向けた基盤技術開発、その他システム高効率化、高耐久化が主な技術課題である。
- 付帯設備については SOEC 特有の項目をここでは記載した。水素精製は電解種共通課題でもあるが、SOEC では製造した水素ガスに含まれる水蒸気量が他の電解と比較して多く、高効率水素精製（水分分離）技術開発が必要であるため、特記した。
- その他、SOEC 特有の付帯設備（熱交換器、断熱材、水蒸発器）の技術課題はここにまとめて記載した。普及に向けてはセルスタックの他、これらの付帯設備の低コスト化も合わせて求められる。

#### 2.4.5 評価解析

- 評価解析技術については、技術課題同様に材料レベル、セルスタックレベル、システムレベルの三階層での整理を行っている。
- 材料レベルの課題として、ここでは新規材料探索技術（マテリアルズ・インフォマティクス (MI)、プロセスインフォマティクス (PI))、界面での元素拡散-耐久性相関評価解析、PCEC 用電解質の電導種評価技術、シール材、インターコネクタ材料安定評価技術を記載した。その他、中長期的課題として迅速材料安定性評価解析手法を記載しており、開発効率化のためには重要である。
- セルスタックレベルの課題として、水蒸気発生法を含めた性能・耐久性評価技術、加速劣化試験プロトコル開発、その他セルスタックの熱や電流密度分布を明らかにするシミュレーション技術、耐久性・寿命予測シミュレーション技術、スタック構造信頼性評価、界面近傍での反応その場観察技術が必要である。
- システムレベルでは、SOEC システムの評価標準化の必要性、耐久性や寿命予測シミュレーション技術が必要である。

#### 2.4.6 金属支持型

- SOFC 同様に、金属支持型のセル構造とすることで作動温度の低温化や耐久性に関してメリットが期待される。「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」では、「定置用燃料電池ロードマップ」と齟齬のない記載を行っている。

- rSOC に関しては、定置用燃料電池と齟齬のない記載を行っている。

#### 2.4.7 プロトン導電性セラミック電解セル

- SOFC 同様に、超高効率な水電解に向けた次世代の技術としてプロトン導電性セラミックを利用した電解セル (PCEC) への期待がある。PCEC は特にドライな水素を製造できるという点も特長である。PCEC の技術開発に関しては、「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」では、「定置用燃料電池ロードマップ」と齟齬のない記載を行っている。

#### 2.4.8 リバーシブル固体酸化物形燃料電池—水蒸気電解セル<sup>18</sup>

- rSOC に関しては、定置用燃料電池と齟齬のない記載を行っている。

---

<sup>18</sup> 以下、「rSOC」と略記。

## 2.5 技術開発課題（システム制御・付帯設備）

水電解装置を用いる Power to Gas のシステムとしての成立性を考える上で必要となる課題を本節に記載する。特に重要な点としてはシステムの制御技術があげられる。水電解システムの大規模化に伴う複数のモジュールや補機を含むシステム制御、入力電力の変動や水素需要の変動への対応、最適制御による水電解槽の耐久性向上、システム保守の高効率化などの観点から重要かつ必要となる技術を整理した。

また、システム全体の低コスト化や負荷変動対応に向けては、水電解槽及び付帯設備も技術開発が必要となる。様々な電解装置に共通する設備とそれらに関する技術開発課題についても本節で整理した。

### 2.5.1 システム制御

- 制御の対象については、対象や現象に応じて階層別にシミュレーションを行うためのマルチドメイン（電気、気体、液体等）のモデリングと要素技術開発が重要である。対象は電解槽に限定せず、電力設備や水素貯蔵、調整力への利用など電解槽外部への影響・効果、中長期的には水素サプライチェーンを包含するモデリングやシミュレーションが必要とされており、基盤技術開発への必要性が高い。
- 制御技術の開発においては、特にプラントレベルで必要とされる長寿命化実現のための制御技術の開発に先行して取り組み、低コスト化に向けた制御技術の開発へとつなげて、互いに連携して取り組む必要がある。
- 長寿命化に関する個別要素技術としては、システム大型化に伴う複数モジュールやスタックの協調制御とそれによる起動停止回数の抑制やばらつき抑制、電解槽の圧力・差圧制御、温度制御、付帯設備の高度化として水素・酸素濃度高精度化、付帯設備の負荷変動対応などが挙げられる。
- 低コスト化に関する個別要素技術としては、設備容量最適化、並列化による補機簡素化、無人最適運転、故障検知・予知保全、排熱や酸素の利用等が挙げられる。

### 2.5.2 整流器

- 現在、整流器には大きくサイリスタと IGBT チョッパタイプの二つの種類がある。サイリスタでは大電流対応が比較的容易であるが、高調波や無効電力の抑制が大きな課題である。系統連係には系統への高調波の流出を抑制するためのフィルタなどが必要となるが、コスト増加につながる。IGBT チョッパでは、高調波、無効電力の抑制が可能であるが、一方で大電流の対応に制限がある。特徴が異なるこれら 2 種類の技術課題について、ロードマップでは区別しての記載を行った。
- 整流器から電解槽に印加される電流に含まれるリップルは、電解槽の劣化に影響を及ぼすと近年報告されている。リップルに起因する電解槽劣化の抑制にはリップルの更なる低減が求められると予測されるが、リップルの低減は整流器の高コスト化につながる。リップルによる電解槽劣化のメカニズムは未解明の部分も多く残されているため、基盤技術としてメカニズムの解明に取り組むことで、リップル起因の電解槽劣化抑制と整流器低コスト化の両立を実現できる可能性がある。

- 系統調整力として提供する際には、電源装置が上流側の系統へどのような影響を及ぼすかという点を検証する必要がある。電源装置を系統と電解槽の双方に接続した上での検証が望ましいが、効率的な検証のためには、シミュレーションの活用、電源のみでの影響評価が可能である環境整備が必要である。

### 2.5.3 水素圧縮機

- 従来の水電解装置は定格での運転を想定していることから、付帯設備も定格での運転を想定して設計されている。今後、再エネ導入量の増大により、水電解も柔軟な運転が求められ、電解槽のみならず水素圧縮機にも入力電力の変動に対応可能な柔軟性が求められる。
- 低コスト化に向けては、標準化・モジュール化による量産が必要である。

### 2.5.4 純水製造

- イオン交換樹脂の寿命向上によるメンテナンスコスト低減や、大型化に向けた実用技術開発が必要である。

### 2.5.5 水素精製

- 従来の水電解装置は定格での運転を想定しており、付帯設備も定格での運転を想定して設計されている。今後、再エネ導入量の増大により、水電解も柔軟な運転が求められ、精製装置にも入力電力の変動に対応可能な柔軟性が求められる。

### 2.5.6 計装機器

- システムの低コスト化のためには付帯設備である酸素濃度計、水素濃度計、流量計、調整弁等の低コスト化も必要である。
- 水素中の酸素を正確に測ることは困難であり、技術開発が必要である。水素中の酸素濃度を正確に測定可能な技術は、安全対策を施す際に必要とされており、安全のための計装技術として開発が望まれる。

### 2.5.7 安全対策

- アノード水素濃度や酸素圧力に関する安全技術開発、電解槽のスタックのセル枚数増加等による高電圧化に対する絶縁設計については電解種類共通の課題と考え安全対策としてまとめた。
- その他、今後大規模な水電解装置を系統連系して、調整力として提供するような水電解システムの利用ケースが現れてくる可能性が高い。これは過去に例がない利用ケースであり、大規模水電解装置が故障した場合に、系統へどのような影響を及ぼしうるのか、また大きな影響がある場合の故障時の対策については、検証する必要がある。



### 3. 今後の課題

次年度以降に水電解技術開発ロードマップの策定を図るための課題として、以下が挙げられる。

- 定量的な目標の設定

本年度の「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」はボトムアップ形であり、課題の網羅的な抽出を実施し、着手するタイミングの優先度付けを行うことを最優先とした。

一方でこれらの課題は独立ではなく、課題間にはトレードオフも存在するものが含まれているため、最適な解決法を探るためには定量性の考慮が必要である。また時間軸に関連して、目指す水準を具体化すべきであり、定量的な目標設定が必要である。

- ユースケースの分類・具体化

本年度の「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」では水電解装置のユースケースについて詳細な議論は行っていない。たとえば上流側でどのようなプロファイルの電力を受けることを想定するのか、下流側でどのような性状の水素をどの程度の規模・頻度の需要に対応して提供するのか、などを想定した課題抽出は実施していない。蓋然性の高いユースケースが特定できれば、詳細な水電解技術開発ロードマップの記載に直結するため、ユースケースの議論は今後に向けての重要な課題である。その際は重要な用途を絞り込んで議論することが効率的である。（議論点として、早期導入が期待される、典型的な用途で水電解装置量産につながる、水素普及に向けて量的効果が期待できる、CO<sub>2</sub>削減が困難な領域で貢献度が高い等）今回は水素関連の目標を主に記載しているが、水素はアンモニアやメタン、合成燃料などの原料としても展開可能であるため、ユースケースの検討を経て今後普及シナリオについても記載の検討を図っていく。

- 投入される電力の変動やそれに伴う起動停止の特徴づけ

本年度の「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」では、上記タイトルの要素について具体的な議論は未実施である。応答性能としての要件がある程度明確である調整力としての提供については、議論をWGにて実施したが、その他のケース、たとえば系統の混雑解消や、オフグリッドでの水電解の活用などより幅広い事例を水電解の視点から特徴づけて、各ケースでの技術課題の議論を行うといった段階にシフトしていく<sup>19</sup>。より広範囲な運用とそれに伴う技術課題の検討を具体的に行うことは重要な課題であり、今後の課題である。

---

<sup>19</sup> この取り組みの順序に関しては、制度の整備や水電解の活用で先行する欧州でも水電解装置の評価プロトコル案は調整力としての提供を想定したものを提出しており、系統の混雑解消などのケースについては今後要検討であり、現状未公開の段階であることも念頭に想定した。