

水電解技術開発ロードマップ（アルカリ形水電解システム）			
	現在	2030年頃	2040年頃
アルカリ形水電解システムの技術開発シナリオと目標値	【海外適地の再エネを主とした水素製造、国内の再エネ主電源化に伴う系統電力を利用した水素製造をターゲットとし、投入電力・水素利用形態に対応したシステムの技術仕様や量産仕様を確立し、段階的なスケールアップを踏まえた水素利用ケースにも対応していく。 ・水素製造コスト低減に向けては、再エネおよび系統からの電力を安価に調達することを前提に、電解槽の技術進展、電解槽・付帯設備のコスト低減、生産性向上、設置コストや間接費も含む総資本コストの低減を進める。以下では電解槽の性能向上と高電流密度化、起動停止・電力変動等に対する耐久性向上との両立による水素製造コストの低減と技術開発課題を中心に整理。		
	【2040年目標値設定の考え方】 ・国の目標に倣い、水素コスト(CIF)を30円/Nm ³ と設定し、海外再エネ適地での水素製造～海上輸送(将来見込として12円/Nm ³)のケースにて、水素製造コスト目標を18円/Nm ³ と設定 ・今回、豪州の実データを参考に太陽光+系統からの電力調達により電力価格2.5円/kWh、設備利用率40%または電力価格3.0円/kWh、設備利用率70%、起動停止回数400回/年程度と仮定し、上記水素製造コストを満足する水電解システムの目標値を以下の通り導出(※投入電力や水素利用形態、設置地域によって種々条件が異なることに留意)		
	【現在値*1】 総資本コスト*3 37.0万円/kW エネルギー消費量*4 4.77 kWh/Nm ³ システム耐用年数 20年 スタック性能*5 1.8V@0.6A/cm ² 部品交換時間*6 60,000h(定常運転) 電荷移動過電圧*7 0.36V @0.6A/cm ² (0.39V @1.0A/cm ²) 物質移動過電圧*7 0.27V @0.6A/cm ² (0.45V @1.0A/cm ²) (物質移動抵抗*7) 0.45Ωcm ²	【変動電力への対応】<< 原理解明・技術開発・評価基盤構築・解析技術・技術実証 >> ・停止時の逆電流による電極触媒劣化対策 ・低負荷運転時のクロスオーバーの低減 ・変動電力に対する電極・隔膜の劣化対策、付帯設備への影響緩和 【耐久性向上・性能向上】<< 原理解明・技術開発・評価基盤構築・解析技術・技術実証 >> ・電荷移動過電圧・物質移動過電圧の低減 ・高電流密度化に伴う電極・隔膜の劣化対策 ・部材の機械的強度・耐久性、化学的耐久性の向上 ・加圧型電解槽でのシール対応・クロスオーバーの低減 【量産化・生産性向上・システムコスト低減】<< 生産技術開発・評価基盤構築・解析技術・設計技術 >> ・スケールアップによるコスト低減、量産化技術の開発・適用によるコスト低減 ・部品・セルスタックの製造・検査の自動化によるコスト低減 ・付帯設備や設置コスト・間接費を含めたシステム全体のコスト低減	【2040年目標値*2】 6.6万円/kW *8 4.51 kWh/Nm ³ 20年 1.70V@1.0A/cm ² 90,000h(変動運転) 0.27V @1.0A/cm ² － 0.26V @1.0A/cm ² － 0.26Ωcm ²
	【前提条件および定義】 *1 電解槽稼働圧力:常圧～1MPa、電解槽稼働温度:80℃、電解液:KOH濃度6M水溶液。 *2 システム出口水素圧:3MPa、電解槽稼働圧力:常圧～3MPa、電解槽稼働温度:80℃、電解液:KOH濃度6M水溶液。電力価格:PV+系統で2.5円/kWh、設備利用率:40%または3.0円/kWh、設備利用率:70%の条件で水素製造コスト18円/Nm ³ を達成するための目標値を記載。 *3 システムコストはスタックと付帯設備の製造コストと製造元のマージアップ(合わせて未設置コスト)、設置コストおよび間接費を含む。現在値は、解説書1.5節参照。 *4 BOL(初期性能)の値。システムのエネルギー消費量に対して、整流器変換効率98%、付帯設備損失8%を見込んで電解槽のエネルギー消費量を設定。 *5 電解槽のBOL(初期性能)の値。スタック性能は動作圧力0.1MPa、温度80℃、電解液KOH濃度6Mが前提。 *6 電解槽のBOL(初期性能)からセル電圧が10%上昇するまでの平均的な実時間。部材(電極・隔膜/セル)の交換時期として設定。部材コストは総資本コストの6%。現在値は、Fraunhofer ISEによるコスト分析結果に基づく基準値(解説書1.5節参照)。 *7 温度は80℃前提。物質移動過電圧・物質移動抵抗については、膜抵抗に限らずセルスタックにおいて物質移動過電圧として発現する成分が対象。 *8 kWあたりの総資本コストは反応面積30,000cm ² 、セル数309の電解槽を前提として、電解槽容量、整流器変換効率98%、付帯設備損失8%を前提としたシステム容量で規格化した値。(現在値から水素製造量増加とスタック交換回数低減を達成できる電解槽および付帯設備を前提とし、電解槽コスト、付帯設備コストおよび設置コストを含めた全体でのコスト低減が必要)。		
技術開発課題	セルスタック		
隔膜	電極		
付帯設備	生産技術		
評価解析・標準化	技術実証		
規制対応	凡例		

【備考】
*9 無孔隔膜についてはAEMWEを参照。

水電解技術開発ロードマップ（PEM形水電解システム）			
	現在	2030年頃	2040年頃
PEM形水電解システムの目標値と技術開発シナリオ	・海外適地の再エネを主とした水素製造、国内の再エネ電源化に伴う系統電力を利用した水素製造をターゲットとし、投入電力・水素利用形態に対応したシステムの技術仕様や量産仕様を確立し、段階的なスケールアップを踏まえた水素利用ケースにも対応していく。 ・水素製造コスト低減に向けては、再エネおよび系統からの電力を安価に調達することを前提に、電解槽の技術進展、電解槽・付帯設備のコスト低減、生産性向上、設置コストや間接費も含む総資本コストの低減を進める。以下では電解槽の性能向上と高電流密度化、起動停止・電力変動等に対する耐久性向上との両立による水素製造コストの低減と技術開発課題を中心に整理。 【2040年目標値設定の考え方】 ・国の目標に倣い、水素コスト（CIF）を30円/Nm³と設定し、海外再エネ適地での水素製造～海上輸送（将来見込として12円/Nm³）のケースにて、水素製造コスト目標を18円/Nm³と設定 ・今回、豪州の実データを参考に太陽光+系統からの電力調達により電力価格2.5円/kWh、設備利用率40％または電力価格3.0円/kWh、設備利用率70％、起動停止回数400回/年程度と仮定し、上記水素製造コストを満足する水電解システムの目標値を以下の通り導出（※投入電力や水素利用形態、設置地域によって種々条件が異なることに留意） 【現在値*1】 総資本コスト 40.0万円/kW *3 エネルギー消費量 4.68kWh/Nm³ システム耐用年数 20年 スタック性能 1.82V @ 2.0A/cm² スタック交換時間*4 40,000h（定常運転） Ir目付量（触媒層） 0.4mg/cm² Pt目付量（触媒層） 0.4-1.0mg/cm² Pt目付量（PTL） 1.0-2.0mg/cm² 質量活性 1,350A/g @ 1.5V *5 抵抗 0.137Ωcm²*5 運転温度 50℃*6 運転圧力 ～0.8MPa 【システム技術仕様・量産化指針の確立】 ・投入電力、水素利用形態と水電解システムの技術仕様と量産仕様の確立 【評価解析プラットフォームの構築・運用】 ・変動運転や高温化・加圧運転を考慮した性能評価・耐久評価プロトコルの策定 ・劣化メカニズム解明・特性評価手法の確立 ・クロスオーバーのメカニズム解明と影響評価手法の確立 変動運転下での耐久性向上に向けた材料・部材開発やセルスタックシステムの技術開発（劣化を低減する制御手法等） Ir資源制約を満たすためのIr目付量低減と、触媒活性の向上及び耐久性向上の両立を目指した技術開発、そのほかPt等の貴金属量低減 低Ir目付触媒に対しても回収率の高いIrリサイクル技術の開発 高効率化（活性向上および抵抗低減）による高電流密度化の実現と、耐久性およびクロスオーバー低減の両立を目指した材料・部材開発やセルスタックシステムの技術開発 高温化・加圧運転の実現（耐久性向上およびクロスオーバー低減との両立）を目指した材料・部材開発やセルスタックシステムの技術開発 【実証の場から市場形成への移行】 ・数量効果高スループット製造技術による生産性向上 ・付帯設備、設置コスト等の低減 【評価解析プラットフォームの利用促進】 ・材料・部材の開発加速 ・材料-セルスタックレベルの耐久性検証の加速 ・高度解析、自律・自動実験、シミュレーション技術等の基盤技術の進化 水電解システムの実用化・市場獲得へ向けた研究開発の加速 【2040年目標値*2】 5.7万円/kW *7 4.62kWh/Nm³ 20年 1.8V @ 4.0A/cm² 90,000h（含、変動運転）*8 <0.10mg/cm² <0.1mg/cm² <0.1mg/cm² 32,000A/g @ 1.5V *9 0.07Ωcm² *9 80℃*10 最大3MPa		
【前提条件および定義】	※1 定常運転で稼働するシステムを想定。 ※2 2040年目標値の前提として、電力価格：PV+系統で2.5円/kWh、設備利用率：40％または3.0円/kWh、設備利用率：70％の条件で水素製造コスト18円/Nm³を達成するための目標値を記載。 前提とする運転条件は以下の通り。システム出口水素圧：3MPa、電解槽稼働圧力：常圧～3MPa、電解槽稼働温度：80℃、変動運転（起動停止1日あたり1回程度を含む）。 ※3 欧州European Hydrogen Observatoryの2024年最新情報およびFraunhofer ISEによるコスト分析結果に対し、設置コストおよび間接費を考慮した総資本コスト。（解説書1.5節を参照） ※4 BOLに対してIV性能が10％低下する平均的な実時間として定義。 ※5 Ir目付量0.4mg/cm²、80℃での基準IV（S. M. Alia et al., J. Electrochem. Soc., 166 F1164, 2019）をフィッティングして取得した質量活性と抵抗値を基準性能として採用し記載。 ※7 kWあたりの総資本コストは反応面積1,500cm²、セル数183の電解槽を前提として、電解槽容量、整流器変換効率98％、付帯設備の損失5％を前提としたシステム容量で規格化した値、（現在値から水素製造量増加とスタック交換回数低減を達成できる電解槽および付帯設備を含めた全体でのコスト低減が必要）。 ※8 目安として、起動停止による劣化10％/5,000回、および運転時間による劣化（S. M. Alia et al., J. Electrochem. Soc., 166 F1164 (2019)の結果を基準）を基準として1/10まで低減する水準。 ※9 動作点1.8V・4.0A/cm²を達成する性能水準の代表値として、Ir目付量0.1mg/cm²の基準IVに対して質量活性向上（10倍）、および抵抗低減（膜厚さ3/7相当）を仮定して得た性能指標。なお、質量活性等倍、および抵抗低減（膜厚さ2/7相当）でも動作点1.8V・4.0A/cm²を達成可能であり、技術開発方針に合わせて目標値を絞り込む検討を続ける必要がある。 ※10 将来的に80℃程度の高温化と性能・耐久性などの指標を両立すべきものとして記載。 社会実装 技術実証 産学官連携基盤研究 要素技術開発		
技術開発課題	・部材間の接触抵抗低減、面内・スタック内の部材均一性の担保 ・起動停止や変動運転に伴う劣化を低減する制御技術の開発 ・電力コストや劣化の低減、安全性の確保などの観点で適切な運転範囲の検討 成果・知見の活用による開発加速 ・目標とする運転条件*11での劣化機構解明・評価プロトコル確立、技術仕様確立 ※起動停止耐久性・変動電力への対応、最高負荷の増大・高温運転・加圧運転 ・評価解析の利用促進 ・気液二相流シミュレーション技術による電解槽設計支援技術開発 水の均一供給・効率的な気泡生成・成長・離脱、構造抵抗低減 ⇔電極構造（気孔率・細孔分布・粒径）・電極表面（濡れ性）と膜（隔膜、電解質膜）のストレス低減 ・抵抗成分ごとの分離定量化 電解槽の各種機能確認サイズ用セル設定 電解槽設計のさらなる高度化（ユースケースによる差異検討を含む） 可視化セル設定 標準セル設定（評価条件・材料含む） 【高信頼シールシース確立】（燃料電池とのシナジー） ・高速生産への対応、加圧対応、PFAS対応 【高信頼シール技術開発】（燃料電池とのシナジー） ・高速生産への対応、加圧対応、PFAS対応 【高信頼シール実用化】（燃料電池とのシナジー） ・高速生産への対応、加圧対応、PFAS対応 ・低コスト連続製造技術開発（セルスタック自動組み立て技術） ・電解槽のモジュール化、標準化、部品点数・組立工数削減 ・スタック製造コスト低減に向けた取り組みの継続 ・回収率の高いIrリサイクル技術の開発 ・低Ir目付触媒に対応するリサイクル技術の開発、およびサプライチェーン構築		
膜電極接合体（MEA）	・高温運転・加圧運転が可能で、高電流密度運転と変動耐久性が両立可能なMEAの開発 ※高温化・加圧・高性能化 ・Ir目付量低減触媒の使用を前提に、起動停止や変動運転下での耐久性の向上を実現するMEAの開発 ※起動停止耐久性・変動運転への対応 ・MEAにおける輸送を最適化する構造の検討 成果・知見の活用による開発加速 ・目標とする運転条件*11での劣化機構解明・評価プロトコル確立、技術仕様確立 ※起動停止耐久性・変動電力への対応、最高負荷の増大・高温運転・加圧運転 ・触媒層及び電解質膜中での水分・ガス・プロトン輸送現象の解明 ・評価解析の利用促進 ・PFAS対応アイオノマ技術開発 ・PFAS対応アイオノマ実用化 ・低コスト連続生産技術の開発（RiR、両面連続塗工によるCCM生産） ・低コスト連続生産技術の確立 ・品質ばらつきの抑制 ・品質ばらつきの抑制にむけた検討の継続		
電解質膜	・GRCや新たな電解質膜材料等のクロスオーバー低減技術の開発 ※クロスオーバー低減 ・プロトン伝導性の向上や薄膜化などによる抵抗低減と低クロスオーバー・高耐久性を両立する電解質膜の開発 ※高性能化・高耐久化 ・補造材やケエンチャなどの耐久性向上技術の研究開発による起動停止・変動運転に対する耐久性の確保 ※起動停止・高耐久性・高耐久な電解質膜の実用化 ※起動停止・変動電力への対応 成果・知見の活用による開発加速 ・目標とする運転条件*11での劣化機構解明・評価プロトコル確立、技術仕様確立 ※起動停止耐久性・変動電力への対応、最高負荷の増大・高温運転・加圧運転 ・クロスオーバーの原理解明と運転条件への依存性の把握、評価指標確立 ・評価解析の利用促進 ・PFAS対応電解質膜技術開発 ・PFAS対応電解質膜実用化 ・低抵抗・高伝導率・低透過・高耐久な電解質膜の低コスト連続生産技術の開発や品質ばらつきの抑制、大型化に向けた面安定化技術の開発 ・低抵抗・高伝導率・低透過・高耐久な電解質膜材料の低コスト・連続生産技術の確立、大型化に向けた面安定化技術の実用化		
アノード	・高電流密度運転が可能な活性向上と、起動停止・変動運転耐久性の両立に向けた技術開発 ※高性能化・高電流密度化 ・触媒のナノ構造や担持体など、Ir目付量の低減と活性向上・起動停止や変動運転に対する耐久性向上を実現する技術の開発 ※起動停止耐久性・変動電力への対応 高性能・高耐久な触媒層の実用化 成果・知見の活用による開発加速 ・目標とする運転条件*11での劣化機構解明・評価プロトコル確立、技術仕様確立 ※起動停止耐久性・変動電力への対応、最高負荷の増大・高温運転・加圧運転 ・評価解析の利用促進 ・貴金属フリー触媒の探索（特に耐久性の確保、Ir依存による普及阻害要因の脱却） ・貴金属フリー触媒の高性能化・実用化 ・低Ir目付量の触媒層を安定に生産する技術の開発 ・Ir目付量低減触媒層生産技術の実用化		
カソード	・燃料電池触媒をベースに、低Pt目付量かつ、変動運転などの水電解に合わせた性能と耐久性を持つ触媒の開発 ※高性能・高耐久な触媒層の実用化 ※起動停止・変動電力への対応 成果・知見の活用による開発加速 ・目標とする運転条件*11での劣化機構解明・評価プロトコル確立、技術仕様確立 ※起動停止耐久性・変動電力への対応、最高負荷の増大・高温運転・加圧運転 ・評価解析の利用促進 ・貴金属フリー触媒の探索（特に耐久性の確保） ・貴金属フリー触媒の高性能化・実用化 ・低Pt目付量の触媒層を安定に生産する技術の開発（燃料電池触媒を参考） ・Pt目付量低減触媒層生産技術の実用化		
PTL・BPP	・Ti代替材料利用技術開発 ・貴金属使用量を低減しつつ、接触抵抗低減と起動停止・変動運転耐久性を両立できる新規コーティング技術の開発 ※高性能化・高電流密度化 ・貴金属使用量を低減しつつ起動停止・変動運転耐久性を向上できる新規コーティング技術の開発 ・新規コーティング技術の実用化 ・接触抵抗低減・アノード溶出耐性・カソード水素化耐性 ※起動停止耐久性・変動電力への対応 成果・知見の活用による開発加速 ・目標とする運転条件*11での劣化機構解明・評価プロトコル確立、技術仕様確立 ※起動停止耐久性・変動電力への対応、最高負荷の増大・高温運転・加圧運転 ・触媒抵抗の増大に至るプロセスの解明と耐久性予測手法の開発 ・評価解析の利用促進 ・PTLの気泡成長・離脱メカニズムの解明 ・PTL構造（空隙分布・メソ形状・線径）や運転条件が気泡生成・成長・離脱性に及ぼす影響の解明（気相圧力・水流量・電流密度・温度等の要因） ・実用PTL構造や運転条件が気泡生成・成長・離脱性に及ぼす影響の解明（気相圧力・水流量・電流密度・温度等の要因） ・実用PTLの過電圧定量化 ・実用化技術の確立（CCSなど） ・最適構造PTLの実用化技術の確立 ・貴金属フリー表面コーティング材料開発 ・貴金属フリー表面コーティング材料の高性能化・実用化探索 ・高速・高精度・低コストなPTL製造技術の開発（RiRプロセスなど） ・高速・高精度・低コストBPP製造技術の開発 ・燃料電池BPPを参考に、高速プレスやRiRプロセスなどの技術を検討 ・高速・高精度・低コストなBPPおよびPTL製造技術の実用化		
評価解析	開発材料・部材 【材料レベル・セルスタックレベルでの評価手法確立と検証】 【材料レベル】 ・材料性能評価標準化・実機評価し化 ・幅を持った条件を簡潔に評価できる材料評価プロトコルの開発 ・実機環境が再現された評価プロトコル開発・加速耐久試験法の確立 ・材料開発を支援する分析・解析技術の開発（MI、自動・自律実験の技術開発など） ・電極触媒の電子状態に関する高度オペランド計測技術の開発 【セルスタックレベル】 ・100倍加速評価を可能とする加速劣化試験プロトコル開発・標準化 ・経時劣化の過電圧分離とメカニズム解明 ・その場での劣化診断技術の開発 ・高温運転や加圧運転による性能への影響評価・モデル化 【数値解析】 【気液二相流に関する数値解析】 ・気液二相流解析等によるセル内流体可視化技術の開発 ・負荷変動時における気液二相流の変動可視化技術の開発 ・溶存現象を考慮した気泡の発生・成長・離脱メカニズム解明 ・セル内の気泡の発生・成長・離脱に対し、気相圧力・水流量・電流密度・pH・温度等の要因の及ぼす影響等も考慮した流体解析 ・I-V性能予測シミュレーション技術の開発（各種抵抗成分の数値化） ・セル内の物質移動解析技術開発 ・システムシミュレーションモデルの開発（補機・電源・外部系統など） ・セルスタック劣化シミュレーションモデル・耐久性シミュレーションモデルの開発 電解槽設計技術の開発 電解槽設計技術の開発・改良 可視化セル設定 標準セル設定（評価条件・材料含む） 【高度オペランド計測技術】 ・気泡滞留・物質輸送、気液二相流挙動に関する高度オペランド計測技術の開発 ・高度オペランド計測技術の継続的な開発・改良および活用促進 【システムレベルでの評価手法確立と検証】 【システムレベル】 ・加圧運転を考慮した変動電流制御の最適化（最低電流の設定等） ・セル以外を含めた電解装置の評価標準化（原単位、BOL/EOLの定義、劣化測定手法、変動レート等各種性能測定手法、LCA、起動停止） ・高温運転や加圧運転による効率やコストへの影響評価・モデル化 ・システムレベルでの評価解析手法の継続的な開発・改良および活用促進 耐久性検証結果、運用実績 開発・設計へフィードバック		
付帯設備	・スケッドマウント設計による設置コスト低減 ・圧力・差圧制御、温度制御 ※加圧型電解槽 ・自動最適運転・予知保全 ・電力変動追従性⇔BOPの最適化、水素・圧力保持停止 ※変動電力への対応 ・マルチモジュール設計・最適運転 ※変動電力への対応 ・整流器の高電流密度運転対応、および低電流時の効率向上		
技術実証	・起動停止に耐える電解槽の実証（変動電力への対応） ・大型装置を評価可能な実証設備の構築および実証機の増強 ・フィールド導入による結果の還元 ・系統接続時の調整力などの影響評価		
規制対応	・PFAS対応アイオノマ技術開発 ・PFAS対応アイオノマ実用化 ・加圧試験のガイドライン作成に向けた基礎検討 ・加圧試験のガイドライン作成 ・高圧ガス規制の緩和などの対応検討		
凡例	基盤研究 シーズ探索研究 要素技術開発 実用化技術開発		
【備考】	*11 起動停止や変動運転、高電流密度運転（～4.0A/cm ² ）、D高温化（～80℃）、加圧運転（～3MPa）を想定し、劣化機構の解明と評価プロトコルの確立を目指す。		

現在

2030年頃

2040年頃

AEM水電解
システムの技術開
発シナリオ

・海外適地の再エネを主とした水素製造、国内の再エネ主電源化に伴う系統電力を利用した水素製造をターゲットとし、電解システムの技術仕様や量産仕様確立、段階的なスケールアップを踏まえた水素利用ケースにも対応。
・水素製造コスト低減に向けては、再生可能エネルギーおよび系統からの電力を安価に調達できることを前提に、電解槽の技術進展、電解槽・付帯設備のコスト低減、生産性向上、設置コストや間接費も含む総資本コストの低減が必須。以下では電解槽の高性能化と高耐久化、それらの技術開発を促進する評価解析の基盤技術、付帯設備の高度化、低コスト化に向けた技術開発課題を中心に整理。

AEMWEは大きくは2つの方向性で将来的な活用が見込める。

- ①ゼロギャップAWEの隔膜代替としてアルカリ溶液にて活用。AWEに対してアルカリ濃度を下げることで低コストな補機も使用可能、また電流密度を上げることでさらに低コスト化を狙える。
- ②①よりも更に希薄アルカリ溶液や純水供給とし、カソード側は無給水運転とすることで、PEMWEの低コスト電解装置タイプとして活用。PEMWE類似のセルスタック構造で大電流化が期待できる。また、段階的に貴金属触媒フリーの達成や、純水供給稼働の場合では耐アルカリ部材が必要となることで更に低コストが期待できる。
- 2030年頃までに～1MW級の技術実証開始、2040年頃にはAWE、PEMWEに対して競争力を持っているレベルへ発展。

技術実証

社会実装

～1MW級
(単一モジュール)

10MW級～
(モジュール並列)

希薄アルカリおよび純水タイプの技術確立は
アルカリタイプの5年後を目指す

技術開発課題
セル・スタック

・接触抵抗低減
・スタックでの液絡の抑制
【小型】
・連続製造技術の開発(セルスタック自動組み立て技術)

【小型】
・連続製造技術の確立(セルスタック自動組み立て技術)

【小型】
・面内・スタック内での部材均一性の担保

スタック構造の基礎的研究
・加圧対応(特にシール、シールは下記項目も参照)

・セルスタックの実用化技術の確立
・加圧対応技術の確立

【高信頼シールシース確立】
(PEMWE、燃料電池とのシナジー)
・セル内・セル間シール(アルカリ条件下での検討)
・高速生産への対応
・加圧対応

【高信頼シール技術開発】
(PEMWE、燃料電池とのシナジー)
・セル内・セル間シール
・高速生産への対応
・加圧対応

【高信頼シール実用化】
(PEMWE、燃料電池とのシナジー)
・セル内・セル間シール
・高速生産への対応
・加圧対応

【小型】
・セル内水透過性の制御(特にカソード無給水運転時)

【小型】
・セル内水透過性の制御技術の確立

【大型】
・大面積化に向けた電解セル内部構造最適化

【大型】
・大面積化に向けた電解セル内部の最適設計技術の確立

・品質ばらつきの抑制技術開発

・三相界面形成技術開発
・触媒層構造最適化(気泡排出性能、アイオノマー分布、pH依存性など)
・低コスト連続製造技術の開発(CCM、CCS)
・接触性の改善(CCM、CCS)
・負荷変動運転時の耐久性向上
・起動停止時の耐久性向上
・高電流密度運転時の耐久性向上

・高性能・高耐久を実現する最適構造MEAの実用化技術の確立

・触媒層中の水分・ガス・水酸化物イオン輸送現象の解明

・MEAの構造最適化

成果・知見の活用による開発加速
・触媒層劣化メカニズム解明
(定負荷時・負荷変動時、評価プロトコルへの活用⇒標準化)
・加速耐久プロトコルの設定

・加圧時の現象・劣化機構の解明

・触媒層劣化メカニズム解明
(評価プロトコルのさらなる高度化)

【大型】
・大面積アニオン交換膜に対応した触媒コート技術の開発

【大型】
・大面積アニオン交換膜に対応した触媒コート技術の確立

・寸法安定性の向上(吸水に伴う寸法変化の抑制)
・品質ばらつきの抑制技術開発

・アニオン導電性(水酸化物イオン導電率)の向上
・気体(不)透過性、水透過性の制御
・アイオノマーの気体透過性の制御、膨潤の抑制
・耐久性(アルカリ安定性、機械強度、ラジカルに対する安定性、耐熱性)向上
・負荷変動運転時の耐久性向上
・起動停止時の耐久性向上
・高電流密度運転時の耐久性向上
・薄膜形成能の向上、形成方法の改善
・触媒層形成のためのアイオノマー溶解性制御

・高活性・高耐久を実現する電解質材料の実用化技術の確立

・新規材料探索

・新規材料利用技術開発

・PFAS対応電解質膜技術開発

成果・知見の活用による開発加速
・電解質膜、アイオノマー劣化メカニズム、被毒現象の解明
(定負荷時・負荷変動時、評価プロトコルへの活用⇒標準化)
・加速劣化プロトコルの構築

・電解質膜、アイオノマー劣化メカニズム解明
(評価プロトコルのさらなる高度化)

【大型】
・大型膜のハンドリング性向上(膜厚、機械強度(補強膜)、柔軟性)
・大型膜の連続成膜技術開発

【大型】
・大型膜の更なるハンドリング性向上と低コスト連続生産技術の確立

電極触媒*2

・触媒活性の向上
・触媒機構の解明
・電子導電性の向上
・負荷変動運転時の耐久性向上
・起動停止時の耐久性向上
・高電流密度運転時の耐久性向上
・触媒活性の担保(電解液炭酸化によるpH変化時)

・高活性・高耐久を実現する電極触媒の実用化技術の確立

成果・知見の活用による開発加速
・触媒劣化メカニズム解明
(定負荷時・負荷変動時、評価プロトコルへの活用⇒標準化)

・触媒劣化メカニズム解明
(評価プロトコルのさらなる高度化)

・アノード貴金属フリー触媒の探索

・アノード貴金属フリー触媒低コスト化・高耐久技術開発

・アノード貴金属フリー触媒の実用化技術の確立

・カソード触媒 低白金族化 技術開発

・カソード触媒 低白金族化実用化技術の確立

・カソード触媒の貴金属フリー化材料の探索

・カソード触媒の貴金属フリー化技術開発

多孔質輸送層
(PTL)*3

・低コスト連続製造技術の開発

・低コスト連続製造技術の確立

・品質ばらつきの抑制技術開発
・安価な基材の利用技術開発(材料コストのみならず設備、製作方法や、材料調達性も考慮)

・電子導電性の向上
・多孔質輸送層(PTL)の最適化
・負荷変動運転時の耐久性向上
・起動停止時の耐久性向上
・高電流密度運転時の耐久性向上
・加圧時差圧対応PTLの開発

・高性能・高耐久を実現する最適構造PTLの実用化技術の確立

・低コスト材料(Ni低減)探索

・低コスト材料利用技術開発

・気泡排出メカニズムの解明
(空孔径分布やパラツキとの関係解明など)

・PTLの構造最適化

成果・知見の活用による開発加速
・PTL劣化メカニズム解明
(定負荷時・負荷変動時、評価プロトコルへの活用⇒標準化)
・腐食性評価プロトコルの構築

・PTL劣化メカニズム解明
(評価プロトコルのさらなる高度化)

双極板
(BPP)

・高コスト材料代替(耐アルカリ性)

・エンドプレート発熱防止

・さらなる低コスト・耐アルカリ性を実現するBPPの実用化技術の確立

・材料探索(耐アルカリ性)

・耐アルカリ性材料利用技術開発

成果・知見の活用による開発加速
・BPP劣化メカニズム解明
(定負荷時・負荷変動時、評価プロトコルへの活用⇒標準化)
・腐食性評価プロトコルの構築

・BPP劣化メカニズム解明
(評価プロトコルのさらなる高度化)

【高速・高精度流路形成シース確立】
(PEMWE、燃料電池とのシナジー)
・高速プレス
・積層造形
・量産プロセスシース検討

【高速・高精度流路形成技術開発】
(PEMWE、燃料電池とのシナジー)
・高速プレス
・量産プロセスシース検討

【高速・高精度流路形成実用化】
(PEMWE、燃料電池とのシナジー)
・高速プレス
・量産プロセスシース検討

評価解析

開発材料・部材

構造・特性・メカニズム(現象機構)理解

【材料レベル・セルスタックレベルでの評価手法確立と検証】
【材料レベル】
・標準材料の選定
・材料性能評価プロトコルの設定、評価法の標準化(セルスタックでの検証、製造手段の影響を含む)
・加速劣化プロトコルの設定
・劣化要因解析方法の確立
・アニオン交換膜の性能評価法の標準化(二酸化炭素の影響を考慮)
・電解質膜中の主鎖、およびイオン交換基分解率の評価
・計算科学・インフォーマティクス技術を用いた新規材料探索基盤の構築
【セルスタックレベル】
・部材を組み合わせたMEAとしての性能・耐久性評価技術
・標準評価セル(単セル、スタック用)の設定
・過電圧分離方法の確立
・加速劣化試験プロトコル開発(百分の一(8万時間→約800時間)の加速評価を可能にするプロトコル)
・劣化要因解析方法の確立
・アノードとカソードの過電圧分離手法の開発

(特にメカニズム解明が望まれる現象)
・部材劣化、分解メカニズム
・通常運転時の劣化挙動(立ち上げ・たち下げ時や停止・保管時含む)

・材料レベル・セルスタックレベルでの評価解析手法の継続的な開発・改良および活用促進

【数値解析】
・性能予測シミュレーション技術の開発(各種抵抗成分を数値化可能なI-V特性予測モデルを構築し、実セルのI-V性能との整合性を確保)
・システムシミュレーションモデルの開発
・セル劣化シミュレーションモデルの開発
【気液二相流に関する数値解析】
・可視化セル設定
・溶存現象を考慮した気泡の発生・成長・離脱メカニズム解明(触媒層、PTL)

(特にメカニズム解明が望まれる現象)
・通常運転時の劣化挙動(立ち上げ・たち下げ時や停止・保管時含む)

・数値解析技術の継続的な開発・改良および活用促進

【高度オベラント計測技術】
・気泡滞留・物質輸送、気液二相流挙動に関する高度オベラント計測技術の開発

・高度オベラント計測技術の継続的な開発・改良および活用促進

【システムレベルでの評価手法確立と検証】
【システムレベル】
・性能評価プロトコルの設定、評価法の標準化

(特にメカニズム解明が望まれる現象)
・通常運転時の劣化挙動(立ち上げ・たち下げ時や停止・保管時含む)

・システムレベルでの評価解析手法の継続的な開発・改良および活用促進

付帯設備

・配管部材Ni使用量低減による低コスト化

・配管部材Ni使用量のさらなる低減による低コスト化
・アルカリ電解液の低コスト精製技術の開発
(配管から溶出した不純物・大気中から混入した不純物の除外)

・配管部材Ni使用量低減による低コスト化技術の確立

・水素ガス精製技術の高度化(低コスト化・変動対応など)

・水素ガス精製技術のさらなる高度化

凡例 基礎研究 シーズ探索研究 要素技術開発 実用化技術開発

【備考】
*1 抵抗・ガス分離性能・機械特性は相関関係にあり、何か一つを改善する際は、他の2つを、現状並みに維持することが要件。(例えば、抵抗を下げた場合、ガス分離性能・機械特性は現状並みを維持)
*2 耐久性・貴金属使用量・活性はすべて相関関係にあり、何か一つを改善する際は、他の2つを、現状並みに維持することが要件。(例えば、貴金属使用量の低減を図る際は過電圧および耐久性維持が必要)
*3 GDL、MPLを含む。

現在

2030年頃

2040年頃

SOEC形
システムのありよう

水素製造設備
あたりの出力規模
（大規模集中製造設備想定）

MWクラス

数十MWクラス

GWクラスの普及

実施されるべき
技術開発

2040年以降の水素市場の拡大を鑑みると、大量水素需要に応える水素製造設備が所望されるところであり、SOECにおいてもスケールアップが必須となる。SOECの特性として、今後のスケールアップ時には、数十kW～を単位とするスタックやセル集合体（円筒形等の場合）を複数組み合わせたモジュール（100kW～）やそれを更に複数組み合わせたMW級のコンテナサイズレベルのモジュールが（他の電解方式と同様に）システム化時の基本構成となると想定され、大規模から小規模分散型にも柔軟に対応可能となるであろう。加えて、SOECは熱力学的原理から他の電解方式に比べ少ない電力での水素製造が可能であるものの水蒸気の気化熱を必要とするため、特に水素を用いる燃料合成（炭化水素、アンモニア）の反応熱との組み合わせや、低・高温熱との組み合わせにより、効率上昇幅が拡大するため、SOECの高効率特長を活かした高効率なP2Gシステムを実現することができる利用・立地条件があると見込まれる。2050年のカーボンニュートラルに向けた我が国の需給分析においては海外輸入水素の重要性を示す分析もあることから、海外再生可能エネルギー適地での大規模水素製造市場での競争力も重要であり、そのためにSOECシステムの低コスト化も不可欠である。

SOECは小規模な分散型地産地消モデルから、再エネ適地での大量水素製造まで幅広い適用先が想定され将来像は多様である。熱源確保ができる立地やメタン・アンモニア製造時の排熱利用との組み合わせの他、熱自立運転など、吸熱・熱中立・発熱の熱供給条件がある。電力供給の運用条件や熱の利用条件の違いはセル・スタックの要件への影響も大きい。そのため、セル・スタックやモジュールの検討は各社の競争領域にも深く関与する。しかし、将来の水素需要に応えるにはナンバリングアップやセル・スタックの大量生産への対応も鑑みる必要がある。そのために今後求められる重要な検討課題として各種運転条件や大規模生産などを鑑みると以下があげられる。

1. 共通基盤

（1）電解条件ごとの特性理解

・短期課題1.4～1.5V級（発熱動作）

・中長期課題1.2V以下級

（2）特性整理～共通課題の抽出

・電解条件や電力供給条件に基づく共通仕様

・標準化仕様

（3）スタック技術

・機械的特性、信頼性の把握

・高積層化

（4）評価技術の確立と評価・現象解明

・加速劣化、寿命予測

・劣化現象解明
2. 生産技術・大量生産

大量、低コスト生産実現のための生産および検査技術
3. BOP

数MW級以上を想定したSOEC本体部/BOPの構成・制御

なお下記に示す技術開発課題および線表については今後の議論を踏まえる必要が有り、22年度決定のままとしている。

現在

2030年頃

2040年頃

	現在	2030年頃	2040年頃
技術開発課題 (SOEC)	【 2030年代の普及拡大に向けた課題】 (2030年頃までに達成すべき課題)		【 2040年頃の本格普及に向けた課題】 (2030～2035年頃までに達成すべき課題)
電極	【水素極技術開発課題】 ・セル性能向上に向けた技術開発 ・水蒸気利用率向上 (多孔度最適化等設計指針策定) 【水素極・酸素極技術開発課題】 ・セル耐久性向上に向けた技術開発 ・不純物ガス被毒対策(SOFCの知見を活用) ・電解質界面の剥離・破壊への対策 【水素極技術開発課題】 ・セル耐久性向上に向けた基盤研究 ・水蒸気雰囲気でのNi移動・凝集機構解明(電場、雰囲気効果他) 【酸素極技術開発課題】 ・セル性能・耐久性向上に向けた基盤研究 ・酸素湧き出し反応の効率化・劣化機構の解明		・セル性能向上技術の確立 ・セル耐久性向上技術の確立(10年以上)
電解質	【電解質技術開発課題】 ・セル耐久性向上に向けた技術開発 ・ジルコニア系相変態・応力分布の抑制 ・PCEC電子リーク抑制等		・高活性触媒等の開発 【酸素極技術開発課題】 ・高濃度酸素・水蒸気下での高耐久性 【電解質技術開発課題】 ・高圧、高水蒸気下での高耐久性
セルスタック	【セルスタック電解モジュール技術開発課題】 ・セルスタック性能向上、耐久性向上 ・低コスト金属材料の利用 ・水蒸気・水素雰囲気での配管酸化減肉抑制 【インターコネクタ技術開発課題】 ・汎用材利用によるコスト低減 ・大量生産可能かつ安価なコーティング手法の開発 【シール技術開発課題】 ・シール材料の熱応力耐久性 ・高水蒸気条件での不純物による電極の被毒抑制 ・高圧対応スタックに向けたシール性向上		・さらなるセル性能・耐久性向上に向けた要素技術開発 【水素極技術開発課題】 ・高活性触媒等の開発 【酸素極技術開発課題】 ・高濃度酸素・水蒸気下での高耐久性 【電解質技術開発課題】 ・高圧、高水蒸気下での高耐久性 ・さらなるスタック性能向上 ・スタック耐久性向上技術の確立(10年以上) ・スタック設備コスト低減技術の確立 ・高効率化に向けた高圧対応スタック開発
システム・ 付帯設備	【セルスタック生産技術開発課題】 ・セル大型化・低コスト化に向けた技術開発 ・革新的生産技術の検討 【SOEC電解システム技術開発課題】 ・システム高効率化、性能向上 ・システム高耐久化に向けた技術開発 ・大型化に向けた基盤技術開発 【付帯設備技術開発課題】 ・高効率水素精製(水分分離)技術開発		【セルスタック生産技術開発課題】 ・革新的生産技術の実証 【システム技術開発課題】 ・変動電源への対応 ・さらなる大型化
評価解析	【付帯設備技術開発課題】 ・システム低コスト化に向けた技術開発 ・熱交換器低コスト化 ・断熱材低コスト化 ・水蒸発器低コスト化 【材料レベル】 ・新規材料探索・MI、AI機械学習の適用 ・電極/酸化物界面での微構造変化、元素拡散と耐久性相関評価・解析 ・PCEC用電解質の電導種評価技術(ホール、プロトン他) 【材料レベル】 ・シール材料、インターコネクタ(IC)材料の安定性評価法の開発		【付帯設備技術開発課題】 ・システム高効率化技術の確立 ・さらなる付帯設備低コスト化 ・低コスト部材の利用 【材料レベル】 ・さらなる高性能材料評価・新規解析法 ・迅速材料安定性評価法・解析法 【材料レベル】 ・シール、IC材料の安定性評価法の実機適用
金属支持型*1	【セルスタックレベル】 ・SOEC単セルの性能・耐久性評価技術 ・SOECスタックの性能・耐久性評価技術(安定水蒸気発生法も含む) ・加速劣化試験プロトコルの開発(短時間で長期寿命を予想するプロトコル、国際標準化への検討) ・セル及びスタックの熱・電流密度等を明らかにするシミュレーション技術 ・セルスタックの耐久性・寿命予測シミュレーション ・スタック構造信頼性評価技術 ・電極/電解質界面近傍での反応その場観察技術 【システムレベル】 ・SOECシステムの評価標準化 ・耐久性・寿命予測シミュレーション		【セルスタックレベル】 ・SOEC単セルの性能・耐久性評価技術 ・SOECスタックの性能・耐久性評価技術(安定水蒸気発生法も含む) ・加速劣化試験プロトコルの開発(短時間で長期寿命を予想するプロトコル、国際標準化への検討) ・セル及びスタックの熱・電流密度等を明らかにするシミュレーション技術 ・セルスタックの耐久性・寿命予測シミュレーション ・スタック構造信頼性評価技術 ・電極/電解質界面近傍での反応その場観察技術 【システムレベル】 ・SOECシステムの評価標準化 ・耐久性・寿命予測シミュレーション
プロトン導電性 セラミック電解 セル(PCEC)*1	【金属支持型技術開発課題】 ・リバーシブル運転時の課題抽出		【金属支持型技術開発課題】 ・ECモード耐久性検証 (燃料極側の高水蒸気分圧耐性) ・ECモードにおける劣化モード検証 【PCEC技術開発課題】 ・ECモードも見据えた材料開発、 電子リークの抑制
リバーシブル 固体酸化物 形燃料電池 一水蒸気電解 セル(rSOC)*1	【rSOC技術開発課題】 【材料技術開発課題】 ・電極/電解質界面での最適化等設計指針策定 ・耐久性向上(水素極、水蒸気極、電解質の安定性、剥離の改善) 【セルスタック技術開発課題】 ・ECモード時の水素漏洩を防ぐためのシール技術 ・rSOCスタックの実証により、リバーシブル運転時の課題抽出(再掲)		【システム技術開発課題】 ・ECモード時効率向上 ・システムの低コスト化 【システム技術開発課題】 ・適用先ニーズに合わせたシステム設計 ・最適運転条件(作動温度、作動電圧) ・システム設計(水素貯蔵)

凡例 シーズ探索研究・基盤研究 要素技術開発 実用化技術開発

備 考

*1 定置用燃料電池と共通。

