

2024年度 NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ報告会

NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップに関する検討 (水電解技術開発ロードマップ)

ープロトン交換膜水電解 (PEMWE) ー

【委託先】

みずほリサーチ&テクノロジーズ

技術開発本部

サイエンスソリューション部

2025年3月5日

ともに挑む。ともに実る。

MIZUHO



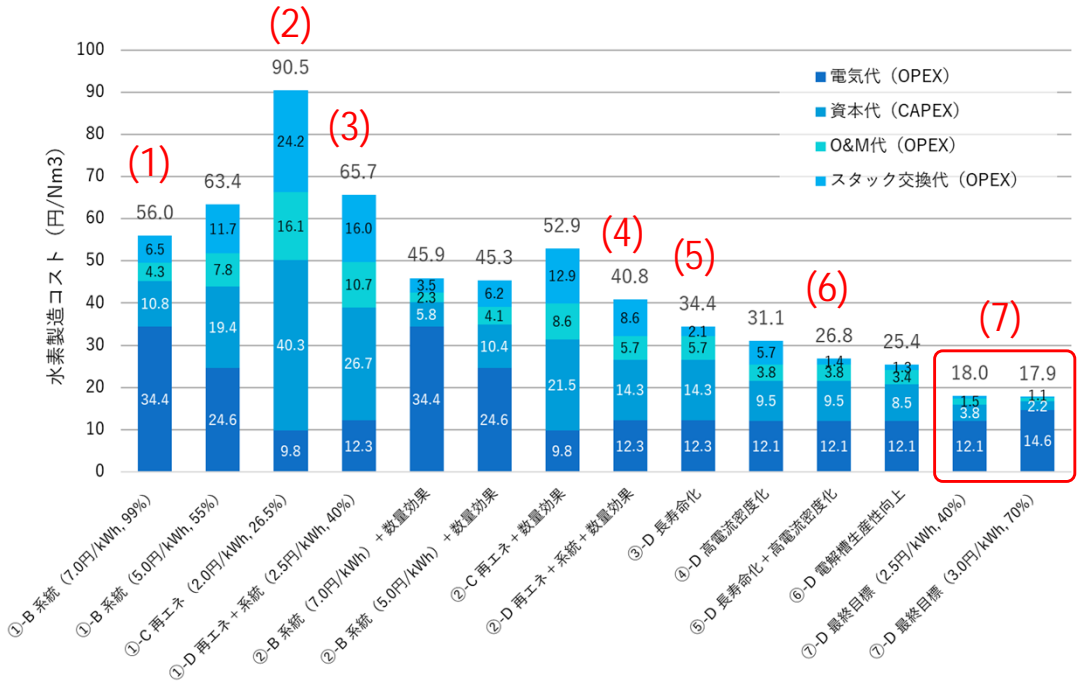
- PEM形水電解（PEMWE）の2040年目標設定と技術開発課題について検討
- 「1. 水電解技術開発の状況整理と全体シナリオ」の「水素製造コスト低減に向けた検討」に沿って、2040年での水素製造コストを目標水準に低減させるための技術課題について検討した
- 2022年度のロードマップ（課題整理）をベースとし、PEMWEで特に重要と考えられる課題について整理、公開情報や有識者の意見に基づき具体的な技術開発課題を更新、目標値として設定すべき項目と具体的な目標値について検討
- 水素製造コストの観点に加えて、以下の2点についても検討し目標値を設定
 - Ir資源制約の観点からアノード触媒のIr目付量低減目標を設定し、活性向上や耐久性向上とのトレードオフの観点から技術課題を整理
 - 高温化や加圧運転については、システム冷却の観点や海外市場での競争力の観点から議論があり、電解槽運転温度80℃・運転圧力（最大）3MPaを目標として設定
- 水素製造コストの低減に向けては、安価な再生エネルギー利用に向け変動電力への対応として起動停止・変動運転耐久性の向上、数量効果による電解槽・付帯設備全体のコスト低減、耐久性の向上によるスタック交換時間の延長、活性向上・抵抗低減による高効率化と高電流密度化、電解槽の生産性向上によるコスト低減、設置コスト・間接コスト、量産に向けた標準仕様化によるコスト低減、など全体的な取り組みが必要
- 目標値として、総資本コスト、スタック交換時間、エネルギー消費量、電解槽性能、貴金属目付量、電解槽運転温度・圧力を設定。スタック交換時間やエネルギー消費量、電解槽性能については、シミュレーションも活用して劣化率や質量活性、抵抗などの目標水準を設定

1. 技術目標値の検討

PEMWEシステムの技術目標値の検討

- 現在のPEMWEシステムの仕様（左下表）を起点として、以下の示すシナリオに基づくコスト低減効果を試算
 - (1) 系統電力を活用した定常な運転
 - (2) 安価な再生可能エネルギーの活用
 - (3) 系統電力との併用による電気代と設備利用率を最適化
 - (4) 年産10MW/yr/社程度から100倍程度の数量効果によるコスト低減
 - (5) 長寿命化の実現
 - (6) 高電流密度化の実現（性能向上及び耐久性の確保）
 - (7) 高スループット生産技術の実現、および付帯設備・設置コスト・間接コストなどの低減
- 電気代2.5円/kWh・設備利用率40%、または電気代3.0円/kWh・設備利用率70%に対し、今回設定した水素製造コストの目標水準（18円/Nm³、但し前提に依存）を満たすことができる水準をシステムの技術目標値として設定

パラメータ	PEMWE
システム耐用年数	20年
総資本コスト（kWあたり） （ ）内は総資本コスト	40万円/kW (430百万円)
年間O&Mコスト率	システム総資本の2%
交換時間（回数）	40,000 h（スタック交換） （4回/耐用年数）
交換コスト率	システム総資本の15%
電解槽・システム仕様	
システムエネルギー消費量（BOL）	4.68 kWh/Nm ³
システムエネルギー消費量（平均）	4.91 kWh/Nm ³
システム容量（BOL）	1.074 MW (AC)
補機エネルギー損失	5%
整流器変換効率	98%
電解槽容量	1 MW (DC)
電解槽動作点（BOL）	1.82 V at 2.0 A/cm ²
電解セルの反応面積	1,500 cm ²
電解槽のセル数	183
水素製造量	230 Nm ³ /h
出口水素圧力	常圧（～0.8MPa程度）



PEMWEシステムの技術目標値のまとめ

- 水素製造コストの目標水準（18円/Nm³、但し前提に依存）を満たすことができる水準をシステムの技術目標値を以下の表に整理し、PEMWGでは目標値の達成に向けた技術開発課題を抽出し、ロードマップとして整理した
 - 今回の検討では主に電解槽の技術開発にフォーカスしている

項目	PEMWE	
	現在値	2040年頃
システム耐用年	20年	20年
システム総資本コスト（コスト総額）	40.0万円/kW *2（430百万円）	5.7万円/kW（122百万円）
年間O&Mコスト率 *2	システム総資本の2%	システム総資本の2%
交換時間（交換回数） *3	40,000 h（4回） *4	90,000 h（1回） *5
交換コスト率 *6	システム総資本の15%	システム総資本の15%
電解槽・システム仕様		
システムエネルギー消費量（BOL） *7	4.68 kWh/Nm ³	4.62 kWh/Nm ³
システムエネルギー消費量（平均） *8	4.91 kWh/Nm ³	4.85 kWh/Nm ³
システム容量（BOL）	1.074 MW (AC)	2,123 MW (AC)
補機エネルギー損失 *9	5%	5%
整流器変換効率	98%	98%
水素製造量	230 Nm ³ /h	459 Nm ³ /h
出口水素圧力	常圧（～0.8MPa程度）	最大3 MPa
電解槽容量	1 MW (DC)	1.976 MW (DC)
電解槽動作点（BOL） *10	1.82 V at 2.0 A/cm ²	1.8 V at 4.0 A/cm ²
電解セルの反応面積	1,500 cm ²	1,500 cm ²
電解槽のセル数	183	183

*1：システムコストはストックと付帯設備の製造コストと製造元のマークアップ（合わせて未設置コスト）、設置コストおよび間接費を含む

*2：European Hydrogen Observatory 2024（<https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/electrolyser-cost>）の値を仮定

*3：電解槽のBOLからセル電圧が10%上昇するまでの時間、部品（電極・隔膜/セル）の交換時間として設定、交換時間はシステムの実稼働時間ではなく実期間として定義

*4：Fraunhofer ISE, "Cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems"の報告による寿命値（4.5-8年）の最低値を仮定、ただし定格運転前提の耐久時間であることを留意、4.5年=約40,000hの実時間でシステム耐用年数20年とすると交換回数4回

*5：最大で起動停止（1回/日）程度、負荷変動を含む運転を前提、90,000h（10年相当）の実時間でシステム耐用年数20年とすると交換回数1回

*6：Fraunhofer ISE, "Cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems"の報告による総資本コストに対するストックの割合を仮定

*7：補機エネルギー損失および整流器変換効率を考慮した値

*8：ストックの交換時期まで平均でBOLの105%電圧で稼働すると仮定（2040年頃については起動停止1回/日程度、負荷変動を含む運転を前提として平均でBOLの105%電圧で稼働することが求められる）

*9：Fraunhofer ISE, "Cost forecast for low temperature electrolysis - technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems"の2030年の補機損失値を仮定

*10：動作圧力～0.8MPa、温度50°Cが前提

*11：動作圧力最大3MPa、温度50°Cが前提

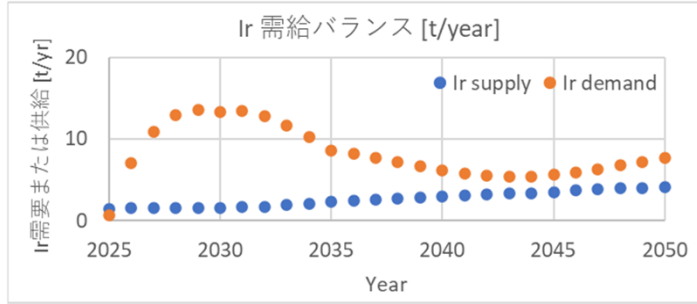
Ir目付量目標に関する検討の概要

- Irの需給バランスについて、製品寿命とリサイクルを考慮した包括的な分析を行った文献[1]を参考に、現在のRMの前提に基づいた再計算を実施
- 計算の結果、2035年での0.014mg/W (1.8V @ 4.0A/cm²前提で0.10mg/cm²) 以下の場合、2040年頃にNZE 2024シナリオでの水素需要量のうちPEMWEシェア40%を満たすPEMWEを導入することが可能となる。
 - RMの議論では、2035年頃までは実証段階としており、2040年頃に十分なPEMWEが導入できることをIr目付量低減目標のシナリオとしてよいものと思料 (但し、前提の置き方に依存するため、継続的な検討も必要)

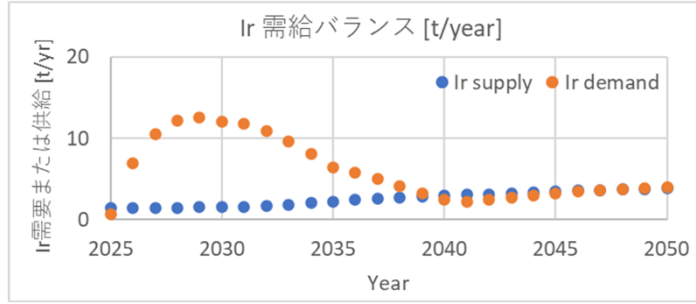
[1] Mark Clapp et. al, Catalysis Today 420 (2023) 114140

項目	文献[1]の仮定*1	今回の計算
水素需要量	NZE2022に準拠	NZE2024に準拠
設備利用率	60%	40% (文献[1]に対して1.5倍のPEMWE需要量となる)
PEMWEシェア	40%	40%
目付量	2020年1mg/Wから、2030年頃に0.04mg/Wまで低下	2025年0.123mg/Wから、2035年0.014mg/Wまで指数関数的に低下。(後述の動作点とあわせて、2025年0.4mg/cm ² から2035年0.10mg/cm ² へ削減する水準)
動作点電圧	2020年1.8Vから2040年1.7Vまで低下	1.8V (70%LHV) で一定
動作点電流	-- (mg/cm ² 換算しない)	2025年1.8A/cm ² から2035年4.0A/cm ² まで増加
システムエネルギー消費率	2050年までに6.5%まで低下	2050年までに6.5%まで低下 (整流器変換効率98%、補機損失率5%)
リサイクル率	2020年70%から2035年100%へ上昇	2020年70%から2035年90%へ上昇、その後一定

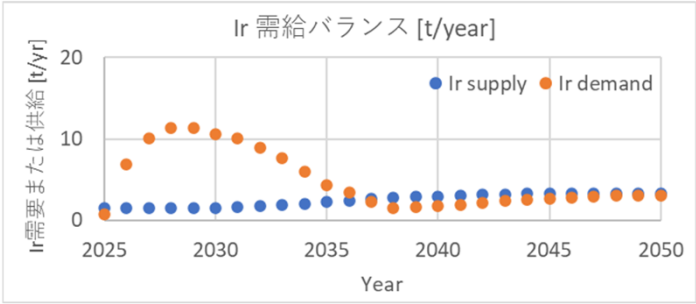
Ir目付目標0.12mg/cm²



Ir目付目標0.10mg/cm²



Ir目付目標0.08mg/cm²



2. 水電解システムシミュレーションによる水素製造コスト感度解析

目的

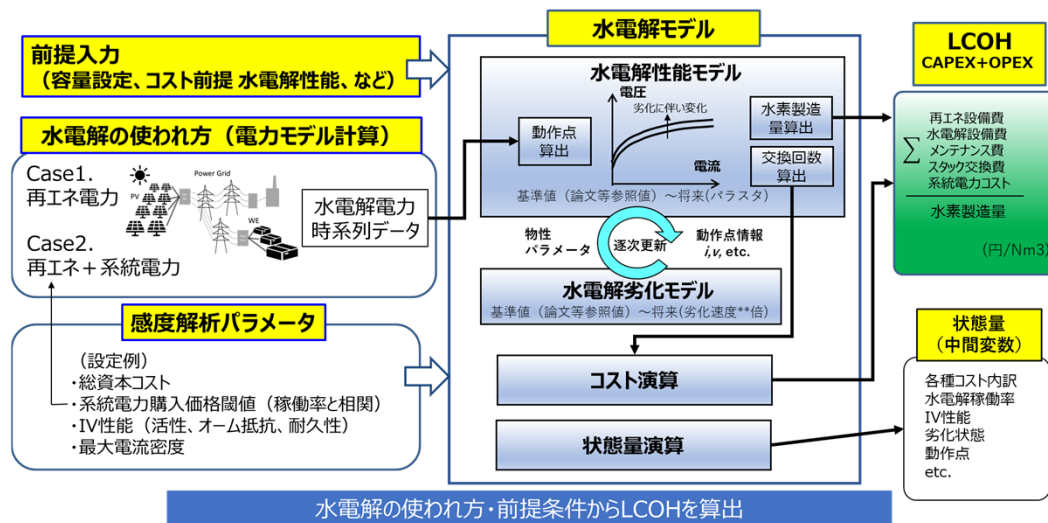
将来の水素製造コスト実現に向けたシナリオ（方向性）

および、水電解要素技術目標値提示

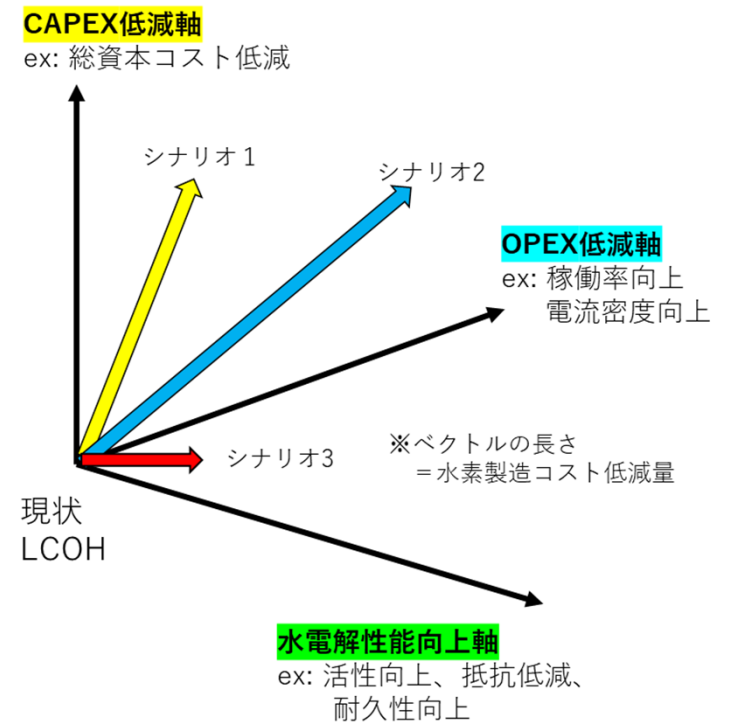
方法

水素製造コストに対する各種方策（パラメータ）の感度解析を行い、水素製造コスト目標到達に向けた、CAPEX低減軸、OPEX低減軸、水電解性能向上軸への目標値割り付けを行う。

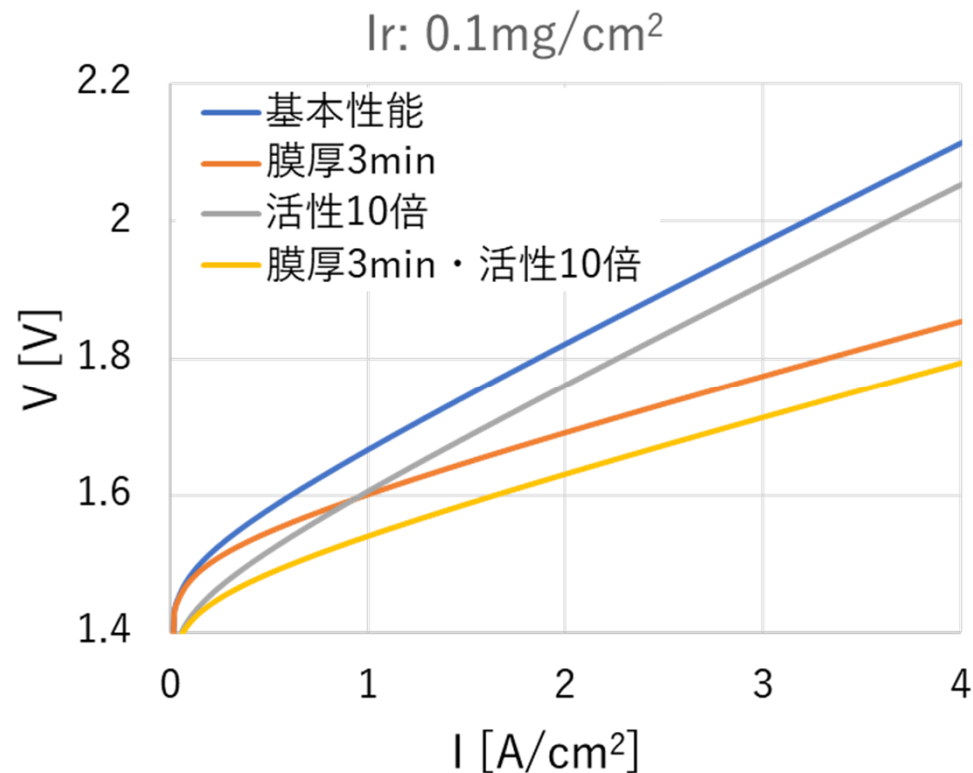
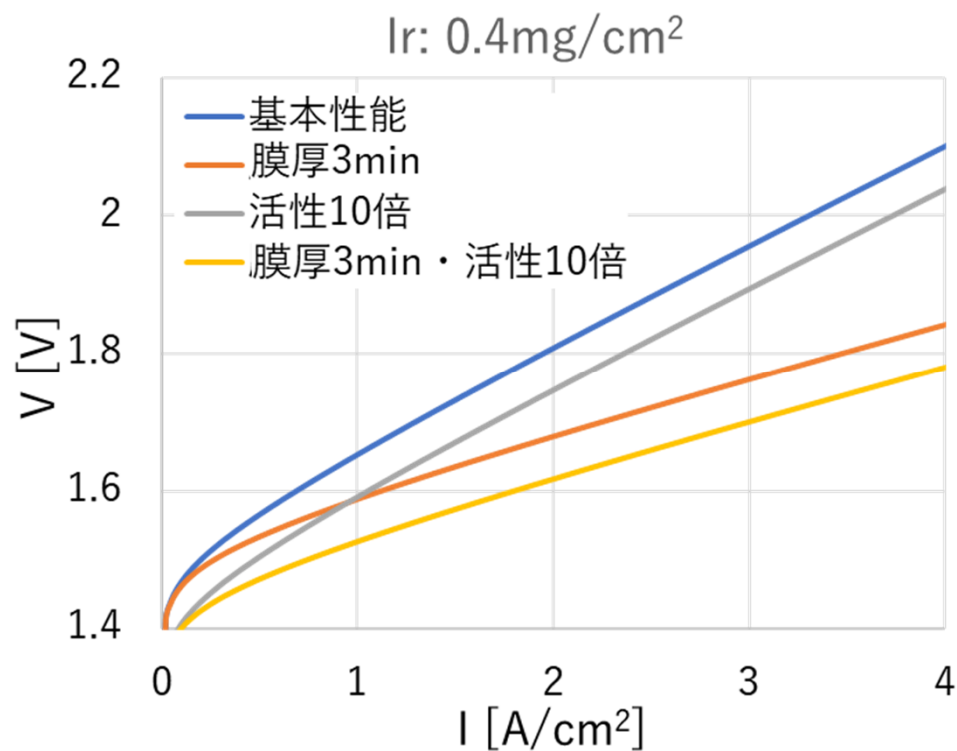
モデル



OPイメージ



		基準条件・計算前提	感度解析パラメータ
水電解システム	電解槽容量	1MW(DC) 基準IV性能で最大電流密度2A/cm ² 相当	最大電流密度に依存
	AC/DC変換効率	98%	—
	補機消費電力割合	5%	—
	水電解システム容量	1.07MW(AC)	最大電流密度に依存
水素製造コスト (LCOH)内訳 (円/Nm ³)	システム総資本コスト	1億円 電解出力は最大電流密度と性能に依存するが、今回の容量設定範囲での総資本は1億円で固定。	—
	O&Mコスト	総資本コストの2%/年	—
	スタック交換コスト	総資本コストの15% × 交換回数	—
	電力コスト(円/kWh)	豪州PV + 系統電力分のコスト PV電力：4万円/kW (2円/kWh@豪州PV,20年間)	—
セル仕様	電解槽セル面積	1500cm ²	—
	最大電流密度	2.0A/cm ²	2.0 ~ 4.0A/cm ²
	セル数	183枚	—
	An-Ir目付	0.4mg/cm ²	0.4 ~ 0.1mg/cm ²
	Ca-Pt目付	0.1mg/cm ²	—
	電解質膜厚	7min	7 ~ 3min
セルI-V物性値	An質量活性@1.5V	3200A/g	3200 ~ 32000A/g (活性倍率1 ~ 10)
	セル直流抵抗	0.137 cm ²	0.137 ~ 0.0723 cm ² (膜厚7 ~ 3minに対応)
I-V劣化性能	劣化速度	電解時：論文参照 始動停止時：5000回で10%性能低下	劣化速度1 ~ 1/10 (基準条件を1とした場合)
耐久性	スタック交換	セル電圧10%上昇毎に交換	— 2) S. Alia et al 2024 J. Electrochem. Soc. 171 024505
	システム耐用年数	20年 (LCOH算出の稼働年数)	— 3) S. Alia et al 2019 J. Electrochem. Soc. 166 F1164



論文 : S. Alia et al 2024 J. Electrochem. Soc. 171 024505より引用

I-V性能の物性値 (Ir:0.1mg/cm², 膜厚7min)

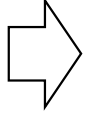
項目	基本性能	感度解析パラメータ上限、下限
An質量活性(@1.5V)	3,200 A/g	32,000A/g (活性10倍)
オーム抵抗 (電子抵抗+プロトン抵抗)	0.137 cm ²	0.0723 cm ² (膜厚3/7相当)

劣化予測モデル

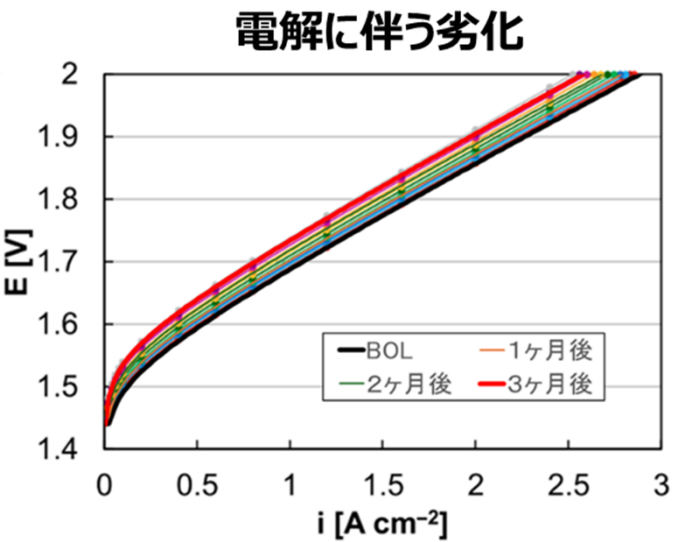
起動停止劣化 (5000回で10%性能低下)

電解に伴う劣化：論文公開劣化データを参照、モデル化

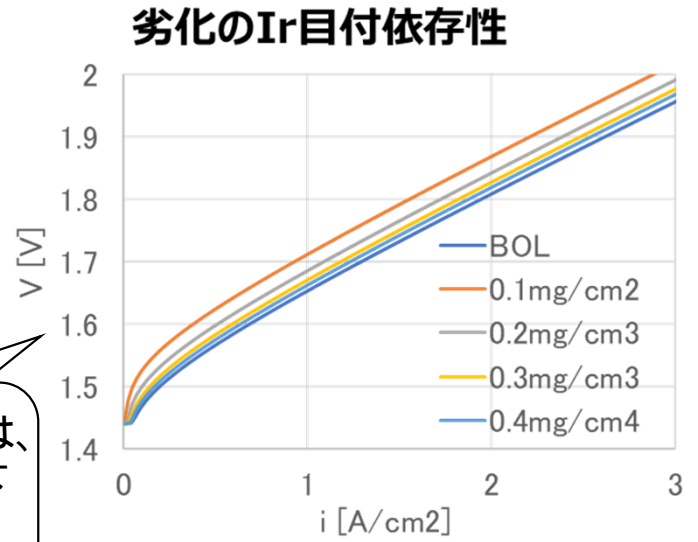
前提 (論文, SIM)
Ir: 0.1mg/cm²
PV90日 (3カ月)



0.1mg/cm²では、
IV性能10%低下まで
約1.1年
(9,600hour)



0.4mg/cm²では、
IV性能10%低下
まで約4年
(35,000hour)



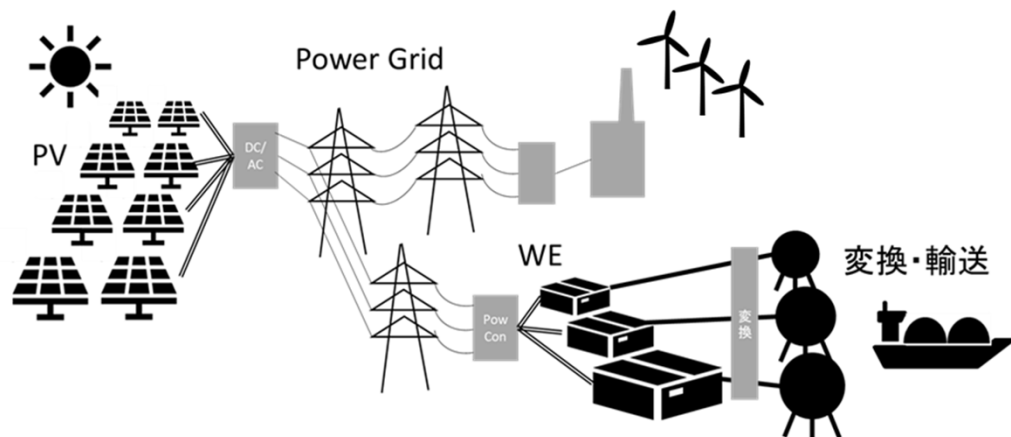
NREL論文 データの劣化をSIMで再現

2019 J. Electrochem. Soc. 166 F1164

スタック交換

電解の使い方に応じて + でIV性能低下予測 **性能劣化10%でスタック交換**

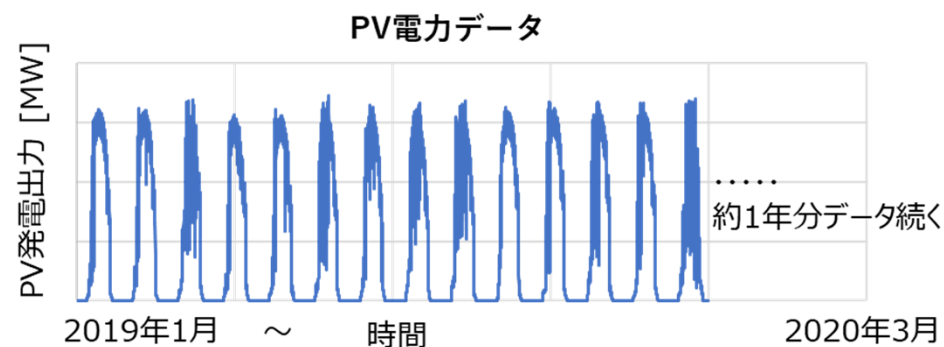
- 海外の再エネ適地での大量水素製造と輸入を想定
- 水電解で用いる電力は、再エネPV主体で、系統電力も活用



- 再エネ(PV) + 系統電力により水素製造

電力データ

豪州QLD州の2019年1月から2020年3月までのデータを活用（ENEOS様よりご提供）

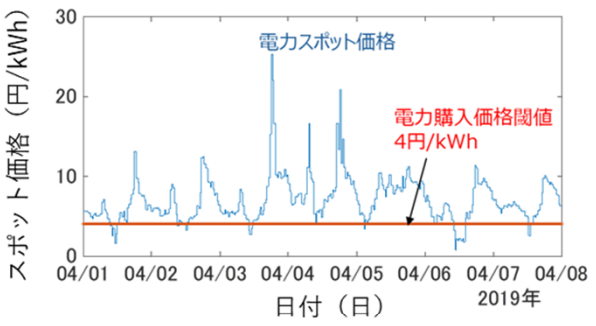


PV + 系統電力による水素製造のシミュレーション

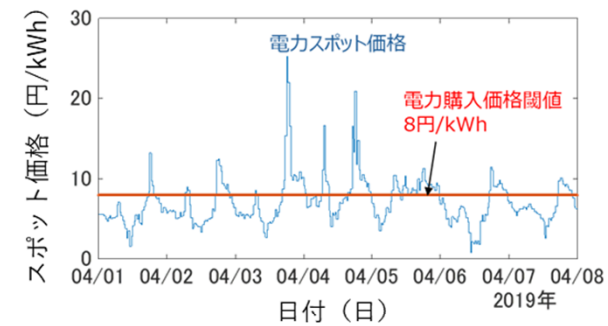
PV + 系統電力SIM前提：

スポット価格が**閾値**より安い時間帯に水電解容量を上限として系統電力購入

閾値4円/kWhの場合

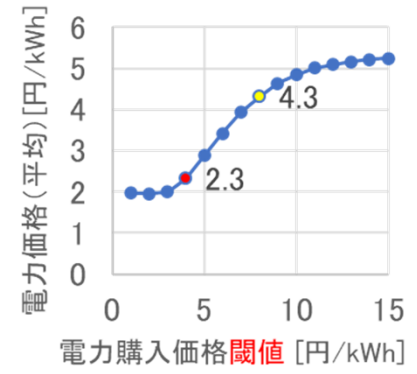
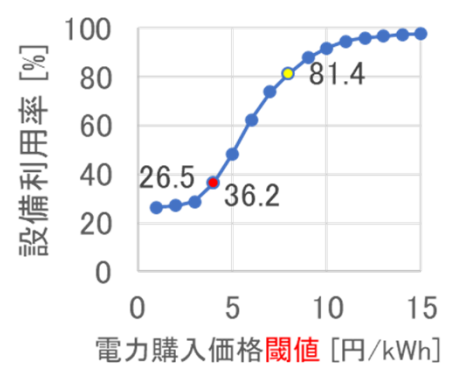


閾値8円/kWhの場合



電力購入価格閾値と設備利用率・電力価格の関係

豪州のPV+系統電力を前提とした試算結果



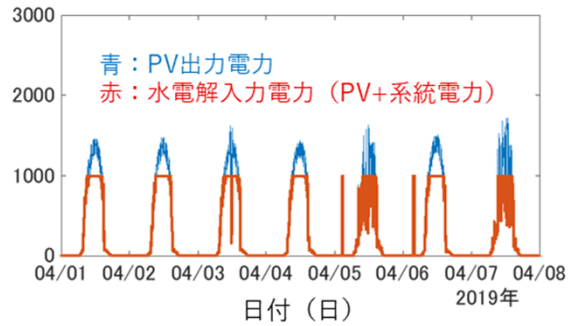
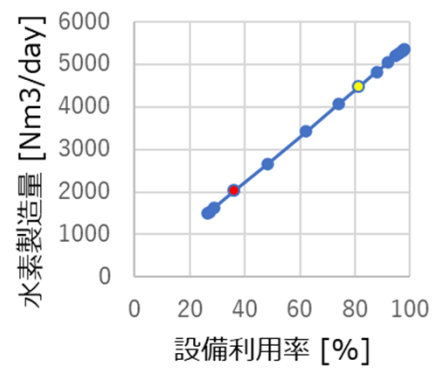
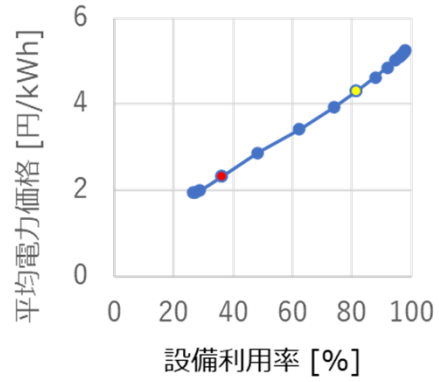
閾値増加により
設備利用率向上

閾値増加により
電力価格増加

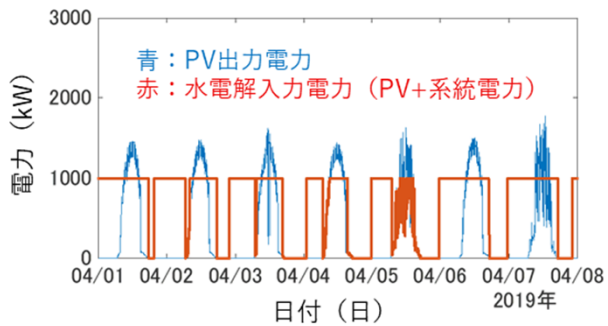


設備利用率に対する電力価格・水素製造コストの関係

豪州のPV+系統電力を前提とした試算結果



設備利用率が低い



設備利用率が高い

系統電力の使い方による水電解への入力電力の違いをシミュレーションで表現

$$\text{設備利用率} = \frac{\sum \text{電解電力} \times \Delta t}{\text{水電解最大電力} \times \text{稼働時間}} \times 100 [\%]$$

設備利用率毎に水電解に与えるストレスと、電力価格・水素製造量をシミュレーションで提示

計算前提

システム総資本コスト	1億円(10万円/kW@1MW)
O&Mコスト	総資本コストの2%
スタック交換コスト	総資本コストの15%×交換回数 性能低下10%でスタック交換
PV電力コスト	2万円/kWh 1
系統電力コスト	スポット価格から算出

水素製造コストLCOH

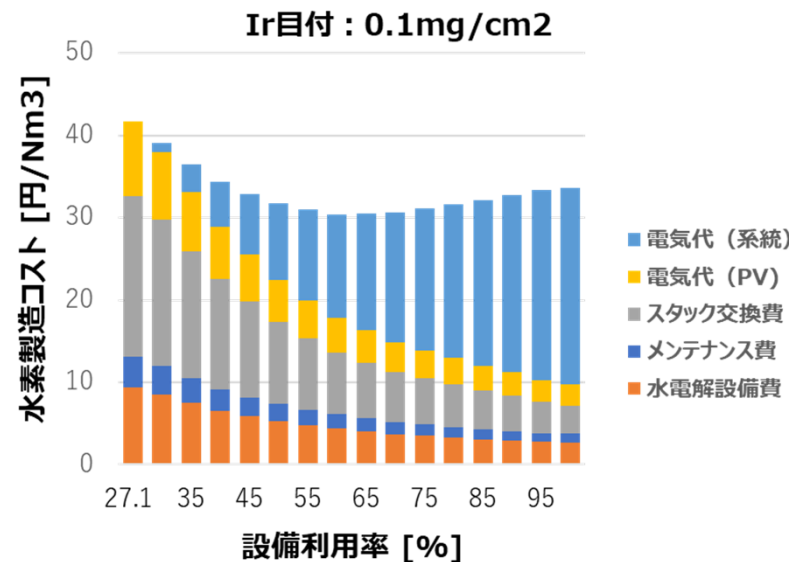
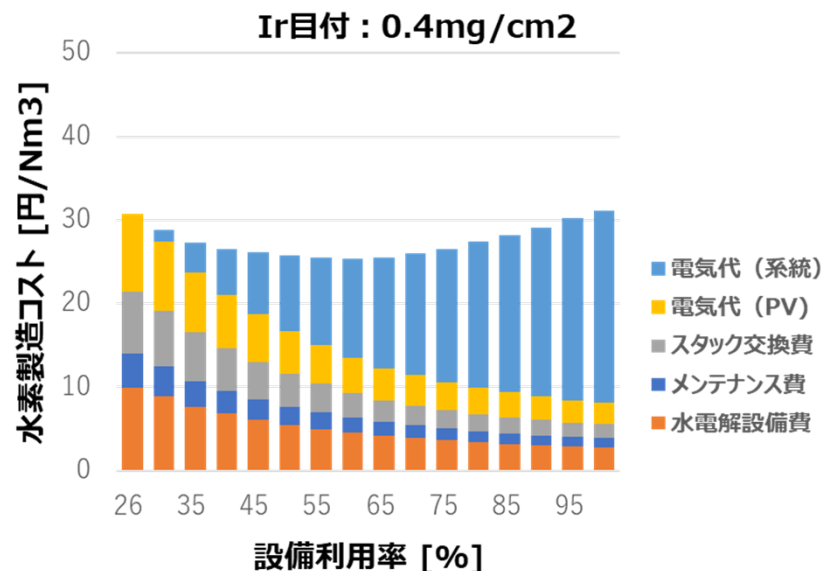
$$= \frac{\text{系統電力コスト} + \text{PVコスト} + \text{資本コスト} + \text{O\&Mコスト} + \text{交換コスト}[\text{円}]}{\text{水素製造量} [\text{Nm}^3]}$$

- ・ IV性能・劣化性能は基準条件(2,3)
- ・ 最大電流密度：2A/cm2

2) S. Alia et al 2024 J. Electrochem. Soc. 171 024505

3) S. Alia et al 2019 J. Electrochem. Soc. 166 F1164

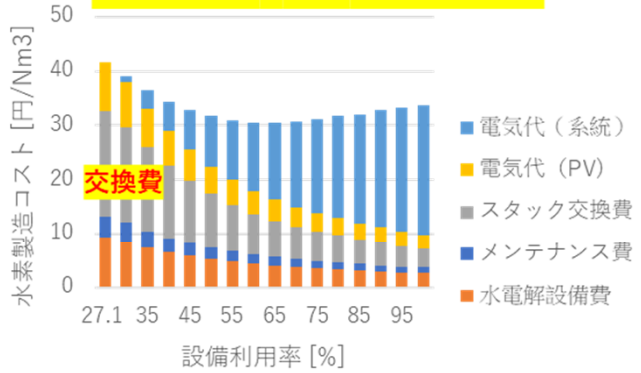
基準条件でのLCOH



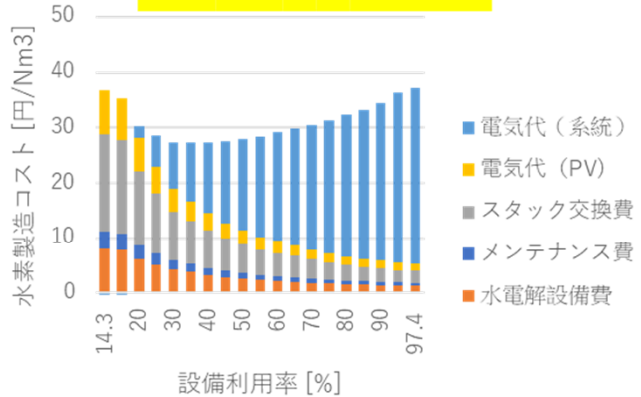
- 低設備利用率では設備費などCAPEX割合が多く、設備利用率が高い場合は電気代が支配的。
- 資源量制約からIr目付低減すると、原材料費は若干低下するが耐久性が低下し水素製造コストが増加

コスト低減技術による水素製造コストの推移と内訳

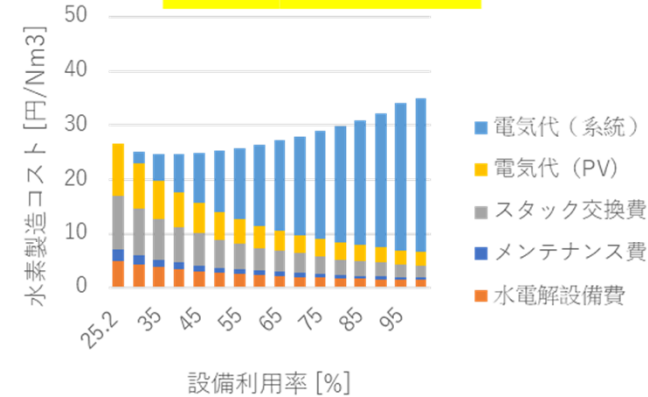
基準条件@Ir目付:0.1mg/cm²



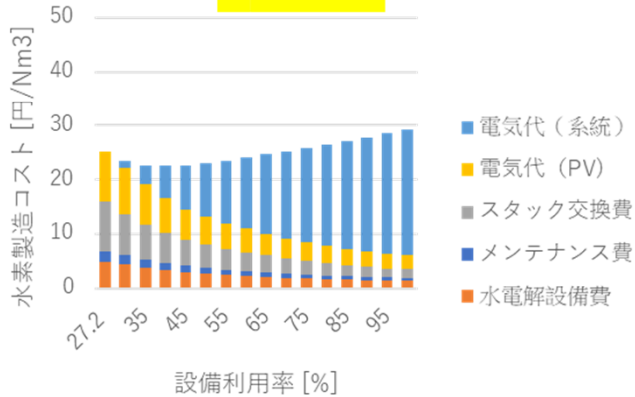
I_{max}増加(2→4A/cm²)



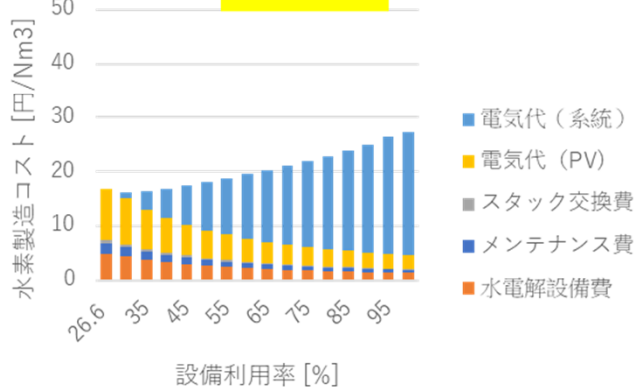
PV/WE容量比最適化



IV性能改善



耐久性向上

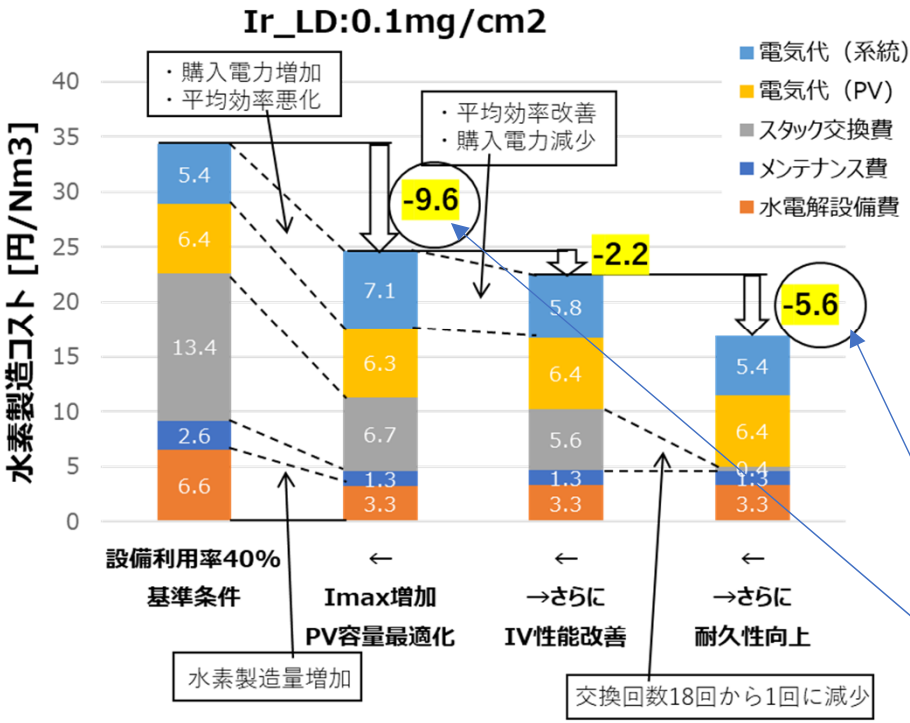


高電流密度化 & PV/WE容量比により水素製造量を増やし、CAPEX依存コストを低減
 IV性能改善により使用電力量を減らし電気代を低減
 耐久性向上により交換費用を低減

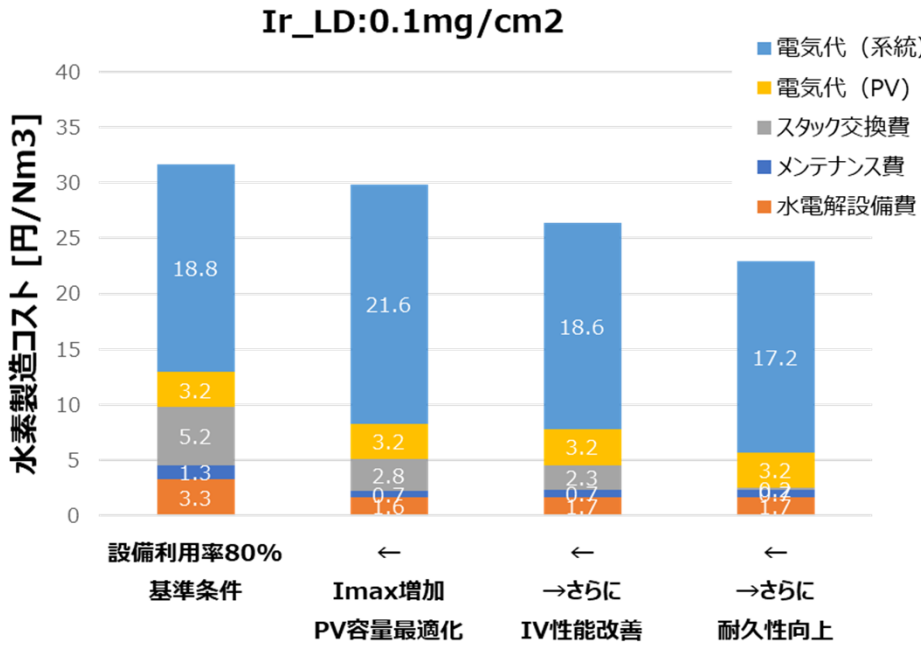
高電流密度化による水素製造量増加、耐久性向上による交換回数削減
 共にコスト低減効果が大きい

各コスト低減アイテムによる水素製造コスト内訳への影響

コスト低減アイテムによるLCOH内訳の推移, 設備利用率:40%



コスト低減アイテムによるLCOH内訳の推移, 設備利用率:80%



・低目付では耐久性悪化
 ・各アイテムによる交換コスト低減感度が大きい

- 目標コスト実現に向け、最大電流密度向上とIV性能改善、耐久性向上は、設備利用率にかかわらず重要
- 設備稼働率が高い場合は、目標値実現はさらにハードルが高く、更に電気代（再エネ、系統）低減が必須

設備利用率は、水電解の種類・設置環境と電力事情により対象エリアやユースケースによっても異なる

水素製造コスト：18円/Nm³に向けた各種方策によるコスト感度解析を実施、水電解要素技術にフォーカス

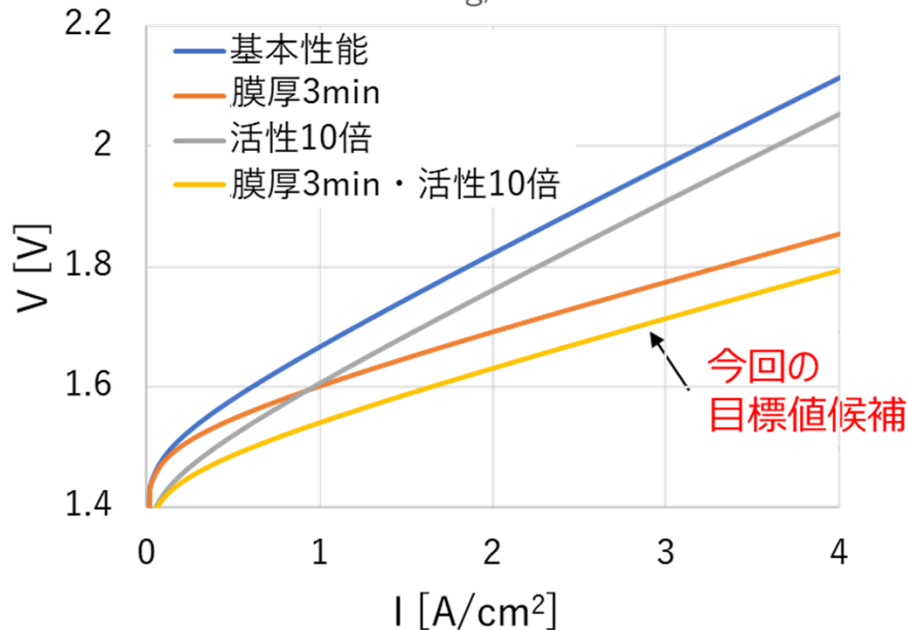
再エネPV + 系統電力では、下記方策が目標実現に対し有効

- 資源制約からIr目付低減(0.4 → 0.1mg/cm²)に加え、耐久性向上が必須
- 高電流密度化は効果が大。しかし、過電圧低減など付随する課題対策が必要
- IV性能向上（活性10倍、膜厚3/7によるオーム抵抗低減）により相乗効果



IV性能目標案

Ir: 0.1mg/cm²



具体的な、IV性能向上・耐久向上目標

An触媒Ir目付		0.1	mg/cm ²
An触媒質量活性(@1.5V)		10倍	32000 A/g
オーム抵抗 (電子抵抗 + プロトン抵抗) (膜厚3/7)		0.0723	cm ²
劣化速度	起動停止	1/10	-
	電解時	1/10	-



耐久性：

IV性能低下10%まで、0.1mg/cm²で11.4年
起動停止回数：1.1回/day

3. 技術開発目標および技術開発課題のまとめ

- PEMWEシステムの技術目標値から、部材などの技術開発目標を検討。
 - Ir目付量は資源制約の議論から目標値を設定し、Pt目付量（触媒層及びPTL・BPP）についても目標値を設定した（詳細は解説書を参照）
 - 質量活性および抵抗については、シミュレーションの結果から、スタック性能目標を達成する水準として設定

	【現在値 *1】	【2040年目標値 *2】
総資本コスト	40.0万円/kW *3	5.7万円/kW *4
エネルギー消費量	4.68kWh/Nm ³	4.62kWh/Nm ³
システム耐用年数	20年	20年
スタック性能	1.82V at 2.0A/cm ²	1.8V at 4.0A/cm ²
スタック交換時間 *5	40,000h（定常運転）	90,000h（含、変動運転）*6
Ir目付量（触媒層）	0.4mg/cm ²	<0.10mg/cm ²
Pt目付量（触媒層）	0.4-1.0mg/cm ²	<0.1mg/cm ²
Pt目付量（PTL・BPP）	1.0-2.0mg/cm ²	<0.1mg/cm ²
質量活性（アノード触媒）	1,350A/g at 1.5V *7	32,000A/g at 1.5V *8
抵抗	0.137 cm ² *7	0.07 cm ² *8
運転温度	50 *9	80 *10
運転圧力	~0.8MPa	最大3MPa

PTL: Porous Transport Layer（多孔質輸送層）, BPP: Bi-Polar Plate（双極板）

*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、電力コスト：PV+系統・2.5円/kWh（変動運転）、設備利用率：40%の電力が使用可能な場合に、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、マークアップ、設置コストおよび間接コストを考慮した総資本コスト。（解説書1.5節を参照）

*4 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、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のコスト低減が必要）。

*5 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。

*6 目安として、起動停止による劣化1%/5,000回、および運転時間による劣化1/10（S. M. Alia et al., J. Electrochem. Soc., 166 F1164 (2019)の結果を基準）

*7 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。

*8 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。

*9 現在の標準的な電解槽の運転温度として記載。

*10 将来的に80℃程度の高温度と性能・耐久性などの指標を両立すべきものとして記載。

- システム目標を満たすための技術開発項目と目標値を以下のように設定
 - 2030年頃までは、実証を通じた技術仕様の策定や評価解析プロトコルの策定を進めるとともに、一定の数量効果による総資本コスト低減に向けた量産仕様の確立などを行うものとした
 - 2040年頃までには、まず一定の耐久性向上やIr・Ptなどの目付量低減を合わせて進めるべきとした。これらの間にはトレードオフの関係が存在するため、両立させるような技術開発が必要である

	技術開発課題	目標値	狙い	想定される方針の例	トレードオフの整理
2030年頃までの 技術開発	技術仕様策定	将来的な再エネ・系統電力の活用を前提に、耐久性向上、高性能化、高温化、加圧運転などを考慮したPEMWEの技術仕様を確立に向け、実証な技術開発状況に応じて継続的にアップデートする。			
	評価解析	変動運転下での性能評価や耐久評価のためのプロトコルを策定し、技術開発に活用する。また、劣化メカニズムや物質輸送メカニズム、クロスオーバーのメカニズム解明などを進める。（特にアノード触媒層やPTL被覆、電荷質膜。）DXによる材料開発の加速なども実現する。			
	総資本コスト低減	現在の100倍の数量効果によるコスト低減を仮定（22万円/kW）	・コスト低減に向けた量産仕様の確立	電解槽および付帯設備の量産化指針の検討	
2040年頃までの 技術開発	耐久性向上	変動運転下でスタック交換時間90,000時間	・水素製造コスト低減	耐久評価プロトコルを確立したうえで、各種部材の耐久性向上策の検討や、システム制御手法の開発などを行う	高電流密度化・IrおよびPt目付量低減とのトレードオフ
	Ir目付量低減	0.10mg/cm ² 水準（1.8V・4.0A/cm ² ）	・Ir資源制約の回避 ・電解槽コスト低減	触媒の担体やナノ構造の工夫や非PGM触媒の検討など	耐久性向上・活性向上とのトレードオフ
	カソード触媒Pt目付量低減	0.1mg/cm ² 水準	・Pt資源制約の回避 ・電解槽コスト低減	燃料電池触媒技術の応用や水電解に適した仕様の検討	耐久性向上・活性向上とのトレードオフ
	PTL/BPPのPtコーティング量低減	0.1mg/cm ² 水準	・Pt資源制約の回避 ・電解槽コスト低減	接触抵抗低減と耐久性向上を実現するコーティング材の検討	耐久性向上・抵抗低減とのトレードオフ

- システム目標を満たすための技術開発項目と目標値を以下のように設定（続き）
 - さらに、より長期的な視点で、高電流密度化や抵抗の低減、活性向上および加圧運転、高温運転の実現（耐久性やクロスオーバー低減とのトレードオフの解決）を進める
 - さらに、高スループット化達成のためのプロセス技術開発や、付帯設備の製造コスト・設置コスト・間接費などを推し進めることで、水素製造コストの十分な低減を目指す

技術開発課題	目標値	狙い	想定される方針の例	トレードオフの整理
高電流密度化	1.8V・4.0A/cm ² まで引き上げる	・水素製造コストに対する資本代の寄与低減	耐久性向上とのトレードオフ解決、性能向上とあわせて進める	耐久性向上とのトレードオフ
抵抗の低減	1.8V・4.0A/cm ² を達成する水準(目安として、抵抗値0.07 Ω・cm ² (基準IVから膜厚76.2 μm相当))	・高電流密度化の達成	薄膜化と耐久性の確保(補強材やクエンチャーの導入)や、炭化水素系電解質膜などの活用や電解質材料の研究開発、接触抵抗などの膜以外の抵抗成分の低減	クロスオーバー低減・耐久性向上とのトレードオフ
活性向上	アノード触媒で1.8V・4.0A/cm ² を達成する水準(目安として、質量活性32,000A/g @ 1.5V)	・高電流密度化の達成	触媒の担体やナノ構造の工夫など	IrおよびPt目付量低減とのトレードオフ
加圧運転	3MPaまでスタック動作圧力を上昇	・海外市場での競争力向上 ・気泡影響低減	クロスオーバー低減や各部材の耐久性確保、効率低下への対策	クロスオーバー低減・耐久性向上・活性向上・補機コスト低減とのトレードオフ
高温運転	80 程度まで運転温度を上昇	・性能向上 ・冷却性能の向上	耐久性の確保	耐久性向上・クロスオーバー低減・補機コスト低減とのトレードオフ
総資本コスト低減	5.7万円/kW (動作点1.8V at 4.0A/cm ²)	・水素製造コスト低減	高スループット化達成のためのプロセス技術開発や、付帯設備の製造コスト、設置コストや間接費等の低減	性能や耐久性と両立しながらのコスト低減

2040年頃までの技術開発

4. ロードマップ改訂内容

- 2023-24年度の改訂では、2022年度の課題整理の方向性を大まかに踏襲しつつ、技術開発シナリオと目標値を設定、記載内容を見直し

【技術開発シナリオと目標値】

- PEM形水電解の使われ方と水素製造コストの低減に向けたシナリオ
- 2040年の目標設定の考え方
- 目標とする項目についての現在値と設定した目標値
- 水素製造コスト低減に向けて対応すべき技術課題

【技術開発課題の項目】

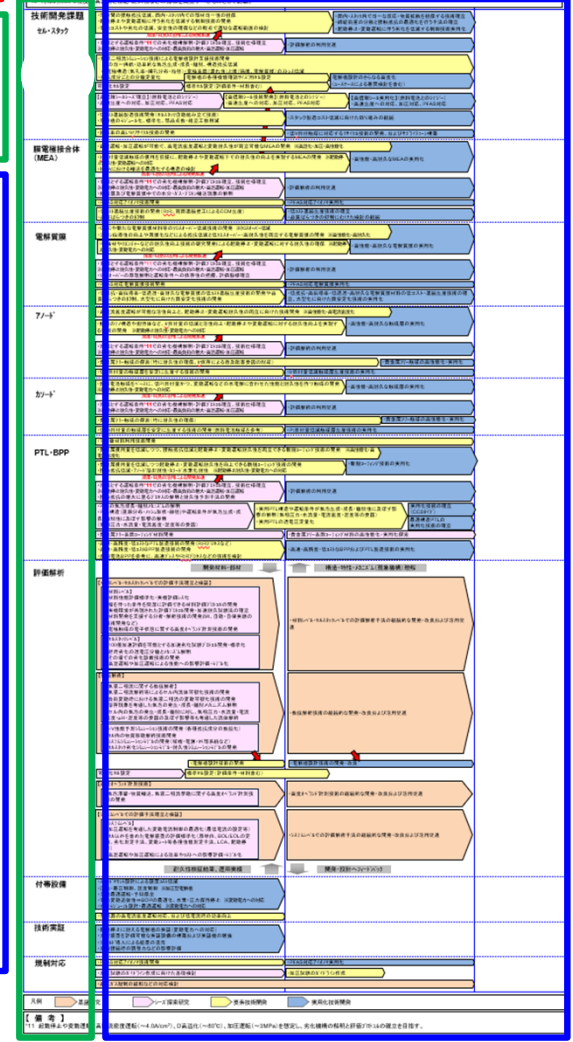
- セル・スタック、MEA、電解質膜、アノード、カソード、PTL・BPP、評価解析、付帯設備（追加）、技術実証（追加）、規制対応（追加）

【技術開発課題の内容】

- 2022年度の課題整理内容をベースとして、記載内容を詳細化・修正
- ✓（全般）2030年頃に向けて実証などを通じたシステム技術仕様・量産化指針の確立や、評価解析プラットフォームの構築・運用を進めるべきであることを記載。
- ✓セル・スタック：運転範囲の検討や制御技術開発、二相流に関する課題解決など
- ✓MEA：低Ir目付触媒を前提とした耐久性向上・活性向上・抵抗低減、および高温化・加圧化
- ✓電解質膜：起動停止や変動運転に対する耐久性の確保を進め、さらに高温化・加圧運転下で抵抗低減・低クロスオーバーの両立
- ✓アノード：Ir目付量低減と活性向上・耐久性向上・高電流密度化
- ✓カソード：燃料電池触媒をベースに、Pt目付量低減と水電解に合わせた性能および耐久性の向上
- ✓PTL・BPP：貴金属コーティング低減と耐久性向上を課題として記載、PTLについては気泡成長・離脱メカニズム解明や構造最適化などの観点を記載
- ✓評価解析：2030年までの「実証の場」を作る取り組みと併せ、評価解析の技術開発および評価プロトコルの開発や加速耐久試験法の確立、評価の標準化などを推し進め、要素技術開発や実証、付帯設備などの開発と相互にフィードバックすべきことを記載
- ✓付帯設備・技術実証・規制対応については2022年度課題抽出の内容を継承しつつ、整流器など、指摘のあった項目を追加。今後の実証などと併せたロードマップの検討が必要。

水電解技術開発ロードマップ (PEM形水電解システム)

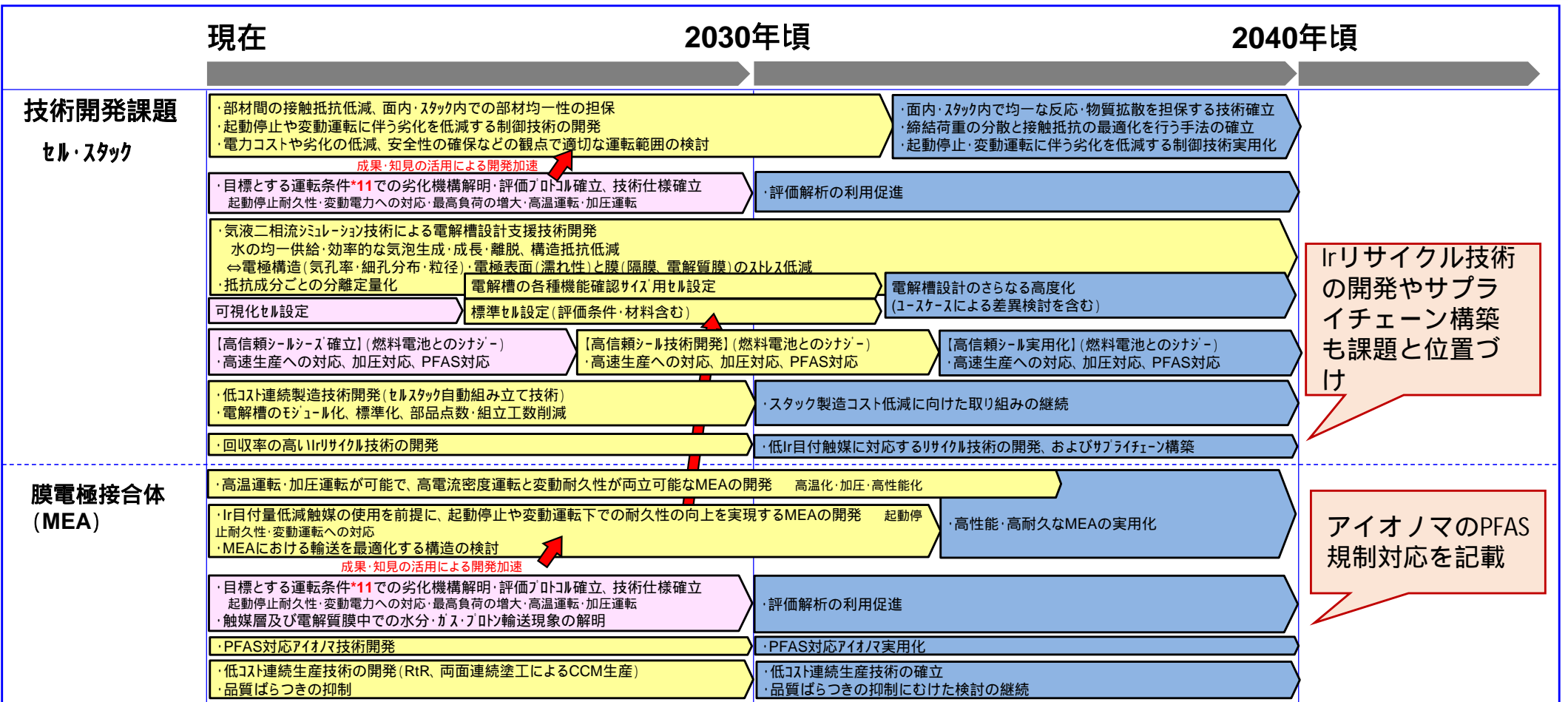
	2030年頃	2040年頃
発電コスト	40.0万円/kWh	5.7万円/kWh
システム効率	4.65kWh/Nm ³	4.52kWh/Nm ³
システム効率	20%	20%
システム効率	1.52 @ 2.0kcm ²	1.52 @ 4.0kcm ²
比目付量 (触媒層)	0.4mg/cm ²	-0.1mg/cm ²
比目付量 (触媒層)	0.4-1.0mg/cm ²	-0.1mg/cm ²
比目付量 (PTL)	1.0-2.0mg/cm ²	-0.1mg/cm ²
電圧効率	1.350A/g @ 1.5V	32,000A/g @ 1.5V
電圧	0.17V/cm ²	0.07V/cm ²
電圧	50TPa	100TPa
電圧	-0.5MPa	最大3MPa



- PEM形水電解の技術開発に関する全体的なシナリオおよび目標値をロードマップ冒頭に提示
 - 2030年頃に向けて、実証などを通じたシステム技術仕様・量産化指針の確立や、評価解析プラットフォームの構築・運用を進めるべきであることを記載
 - 水素製造コスト目標（本検討では18円/Nm³と設定）を達成するための技術開発水準を示し、変動運転下での耐久性向上やIr目付量低減と触媒活性向上・耐久性の両立を初め、取り組むべき各種の技術開発課題を整理

	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	<p>・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の確立し、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。</p> <p>・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。</p> <p>[2040年目標値設定の考え方]</p> <p>・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</p> <p>・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%、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)</p>			
		<p>[2040年目標値*1]</p> <p>[システム技術仕様・量産化指針の確立]</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 <p>[評価解析プラットフォームの構築・運用]</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 	<p>[実証の場から市場形成への移行]</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 <p>[評価解析プラットフォームの利用促進]</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 	
総資本コスト	40.0万円/kW *3		5.7万円/kW *7	
エネルギー消費量	4.68kWh/Nm ³		4.62kWh/Nm ³	
システム耐用年数	20年		20年	
スタック性能	1.82V @ 2.0A/cm ²		1.8V @ 4.0A/cm ²	
スタック交換時間*4	40,000h (定常運転)		90,000h (含・変動運転)*8	
Ir目付量(触媒層)	0.4mg/cm ²	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)	<0.10mg/cm ²	
Pt目付量(触媒層)	0.4-1.0mg/cm ²	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	<0.1mg/cm ²	
Pt目付量(PTL)	1.0-2.0mg/cm ²	低Ir目付触媒に対しても回収率の高いリサイクル技術の開発	<0.1mg/cm ²	
質量活性	1,350A/g @ 1.5V *5	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	32,000A/g @ 1.5V *9	
抵抗	0.137Ωcm ² *5		0.07Ωcm ² *9	
運転温度	50°C*6		80°C*10	
運転圧力	~0.8MPa	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	最大3MPa	

- セルスタックやMEAなどの電解槽の構成要素については、劣化機構解明や評価プロトコル策定、技術仕様確立を2030年頃までに進め、耐久性向上や高性能化のための方策を進めていき、2040年ごろまでの実用化（2030年台半ばまでの技術開発）を進めるものとした（続く他の構成要素も同様）
 - ・ セルスタックでは運転範囲の検討や制御技術開発、二相流に関する課題解決などを課題として記載。
 - ・ MEAでは低Ir目付触媒を前提とした耐久性向上・活性向上・抵抗低減、および高温化・加圧化を記載。
- 高スループット化を目指した生産技術開発も重要な課題とした



- 解説書の改訂にあたっては、今回のロードマップ改訂の主眼となる「目標設定の考え方と目標値」について記載するとともに、ロードマップの線表への修正・追記にあわせて更新を行った

■ 2022年度解説書 目次

- 2. 技術開発課題
 - 2.2 PEM形水電解の技術開発課題
 - 2.2.1 膜電極接合体
 - 2.2.2 電解質材料
 - 2.2.3 アノード触媒
 - 2.2.4 カソード触媒
 - 2.2.5 多孔質輸送層 (PTL)
 - 2.2.6 双極板 (BPP)
 - 2.2.7 セルスタック
 - 2.2.8 評価解析
 - 2.2.9 その他
- [計3ページ]

■ 2023・2024年度解説書 目次

- 2. 技術開発課題
 - 2.2 プロトン交換膜水電解の技術開発課題
 - 2.2.1 概要
 - 2.2.2 高電流密度化と高効率化について
 - 2.2.3 高温化及び加圧運転について
 - 2.2.4 貴金属使用量低減に関する目標
 - 2.2.5 システムシミュレーションによる感度解析
 - 2.2.6 技術開発シナリオと技術科初課題
 - 2.2.7 セルスタック
 - 2.2.8 膜電極接合体 (MEA)
 - 2.2.9 電解質膜
 - 2.2.10 アノード
 - 2.2.11 カソード
 - 2.2.12 多孔質輸送層 (PTL)
 - 2.2.13 双極板 (BPP)
 - 2.2.14 評価解析
 - 2.2.15 付帯設備
 - 2.2.16 技術実証
 - 2.2.17 その他
 - 2.2.18 今後のロードマップ検討に向けた課題
- App. システムシミュレーションによる感度解析 [12ページ]
- [計 33ページ]