

「水素利用等先導研究開発事業」
(中間評価)

事業原簿【公開】




担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 次世代電池・水素部
-----	--

目次

概 要	2
1. 事業の位置付け・必要性について	9
1. 事業の背景・目的・位置づけ	9
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	11
2.1 NEDO が関与することの意義	11
2.2 実施の効果（費用対効果）	11
2. 研究開発マネジメントについて	13
1. 事業の目標	13
1.1 研究開発の目標	13
1.2 研究開発項目と実施期間	14
1.3 各研究開発項目の目標	16
2. 事業の計画内容	35
2.1 研究開発の内容	35
2.2 研究開発の実施体制	37
2.3 研究開発の運営管理	40
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	41
3. 情勢変化への対応	42
4. 中間評価結果への対応	43
5. 評価に関する事項	45
3. 研究開発成果について	46
1. 事業全体の成果	46
2. 研究開発項目毎の成果	53
3. 研究成果の最終目標の達成可能性について	73
4. 成果の普及（特許、論文、外部発表等の件数）	79
4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて	79
1. 本プロジェクトにおける実用化の考え方	79
2. 成果の実用化に向けた戦略	80
3. 成果の実用化に向けた取組及び見通し	80
事業成果概要	83
プロジェクト用語集	97
添付資料	(添付-1) 水素利用等先導研究開発事業 中間評価（2017 年度） (添付-2) プロジェクト基本計画 (添付-3) 事前評価関連資料（事前評価書） (添付-4) 研究開発項目の成果詳細

概 要

		最終更新日	2020年9月17日
プロジェクト名	水素利用等先導研究開発事業		プロジェクト番号 14021
担当推進部/ PMまたは担当者	新エネルギー部 大平英二 (2013年4月～2018年3月) 次世代電池・水素部 原 大周 (2018年4月～現在)		
0. 事業の概要	<p>脱二酸化炭素の社会の潮流の中で世界各国は、水素に将来のエネルギー源としての役割を担わせる水素社会の実現に期待を寄せている。このため本事業は2040年以降の長期的視点を見据えて水素等の新たなエネルギー源が従来の化石燃料と競合できる価格となることを目指し、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術、炭化水素等からの水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術、及び高効率水素発電技術の先導的な研究開発に取り組むものである。</p>		
1. 事業の位置 付け・必要性について	<p>我が国においては、過去の原子力発電所における事故等も踏まえて「国民の安全の確保」を最優先とした上で、望ましいエネルギーミックスが可能となるようなエネルギー供給体制を構築することが求められている。エネルギーミックスの実現には、社会インフラの変革も視野に入れ、省エネルギー・節電対策を抜本的に強化すること、再生可能エネルギーの開発・利用を最大限加速させること、天然ガスを始め、環境負荷に最大限考慮しながら、化石燃料を有効活用すること（化石燃料のグリーン化利用）等が重要である。</p> <p>このうち、再生可能エネルギー関係技術に対しては、出力変動のある太陽光発電、風力発電等を有効利用するための電力貯蔵や、移動体としての電気自動車用途を想定した二次電池の開発が進められているが、現状では電池のエネルギー密度が十分に高いとは言えないため、変動周期が長い風力発電等に対する大規模電力貯蔵能力の向上や、電気自動車の航続距離延長に貢献するための大規模蓄エネルギー体の実現が喫緊の課題となっている。また、海外では再生可能エネルギー又は炭酸ガス貯留技術と組み合わせた未利用化石燃料等の大規模開発が急速に進められているが、エネルギー適地がエネルギー消費地から長距離隔てられていることが開発の障害の一つとなっている。</p> <p>このような問題に対し本事業は、再生可能エネルギー等からの高効率低コスト水素製造技術開発、高効率水素-エネルギーキャリア転換・輸送技術等の技術開発、高効率な国内外の再生可能エネルギー等の大規模利技術開発、再生可能エネルギー適地等の経済発展支援、世界規模での炭酸ガス排出削減等を図るものであり、我が国のエネルギーセキュリティの確保、並びに世界的な地球温暖化対策への貢献のために、本事業に国として投資を行うことは極めて重要である。</p>		
2. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>【アウトプット目標】</p> <p>再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に取り組む。水素製造・輸送については、2030年における水素コスト 30 円/Nm³ を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。水素発電については、2040年以降、水素コスト 20 円/Nm³ において発電コスト 1.2 円/kWh 以下の実現を目指す。また、我が国のエネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギーの適地等の経済発展に貢献する。</p> <p>研究開発項目① 水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発（委託事業）</p> <p>【中間目標（2020年度）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムを解明する。 ・劣化等を規定する因子を見出すとともに、材料・セルに関する設計指針の原案を策定する。 		

	<p>【最終目標（2022年度）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プラント引渡し価格 30 円/Nm³に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針の策定や性能等評価方法を確立する。 <p>研究開発項目② 大規模水素利用技術の研究開発（委託事業）</p> <p>【最終目標（2019年度）】</p> <p>＜水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発＞</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃焼試験により、シングルクラスタバーナ出口 NOx 50ppm 以下を達成する。 ・燃焼試験により、フラッシュバックを発生しないことを確認する。 ・大型ガスタービンに適用可能なクラスタバーナの基礎設計を完了する。 ・燃焼振動を抑制し、安定燃焼できる条件の閾値を算出し、燃焼器体格を決定する。 <p>＜水素ガスタービン燃焼技術の研究開発＞</p> <ul style="list-style-type: none"> ・50%負荷から定格 100%負荷相当条件にて、NOx 35ppm 以下を達成する。 ・失火や逆火が生じない、安定燃焼を確認する。 <p>研究開発項目③ 超高効率発電システム基盤技術研究開発（委託事業）</p> <p>【中間目標（2019年度）（研究開発項目継続可否審査）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・F Sを行い、技術成立性・経済性確保の見通しを提示する。 ・上記を通じて、発電効率 75%を達成しうるシステム構成を提示する。 ・上記を通じて、競合技術の特定及びそれらに対する優位性を提示する。 <p>研究開発項目④ エネルギーキャリアシステム調査・研究（委託事業）</p> <p>【最終目標（2018年度末、事業は2019年6月終了）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低コストシール法と効率的熱伝導方式を組み合わせた実用的な水素分離膜を用いた水素分離モジュール構造を開発する。 ・1,000時間の耐久試験による、1万時間以上の実用的な耐久性を見通す。 ・商業化を見据えた水素分離膜型脱水素のパイロットプラントの概念設計を完了する。 <p>研究開発項目⑤ 炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査（委託事業）</p> <p>【中間目標（2020年度）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・基礎研究の可能性調査を行い、技術成立性を理論的・科学的に提示する。 ・水素を消費者まで安価かつ大量導入する実用化シナリオ原案を構築、経済性を提示する。 ・2030年における水素コスト 30 円/Nm³に、当該技術がどのように貢献するか定量的に示す。 <p>【最終目標（2022年度）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上記の審査結果を踏まえ、継続することとなった場合には別途定める。 									
事業の計画内容	主な実施事項	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	年度
	後期5年（2018-2022年）									
	研究開発項目①	水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 （…は予定を示す） 								
	研究開発項目②	大規模水素利用技術の研究開発 （前期からの継続） 								
研究開発項目③	超高効率発電システム基盤技術研究開発 									

		従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発 (2020年8月～) —————>								
	研究開発項目 ④	エネルギーキャリアシステム調査・研究 (前期5年からの継続) —————>								
	研究開発項目 ⑤	炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査 —————>								
	前期5年(2013年度* - 2017年度)									
	年度	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
	研究開発項目 ①	低コスト水素製造システムの研究開発 —————>								
	研究開発項目 ②	高効率水素製造技術の研究開発 —————>								
	研究開発項目 ③	周辺技術(水素液化貯蔵システム)の研究開発 —————> (大規模水素利用技術の研究開発で継続)								
		大規模水素利用技術の研究開発 —————>								
	研究開発項目 ④	エネルギーキャリアシステム調査・研究 —————>								
	研究開発項目 ⑤	トータルシステム導入シナリオ調査研究 —————>								
事業費推移 (会計・勘定別に NEDOが負担した 実績額(評価実施 年度については予 算額)を記載) (単位:百万円)	会計・勘定/年度	2013*	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	合計
	一般会計	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	特別会計 (電源・需給の別)	1,079	1,277	1,455	1,296	879	815	1,319	1,500	9,620
	開発成果促進財源	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	総NEDO負担額	1,079	1,277	1,455	1,296	879	815	1,319	1,500	9,620
	委託	1,079	1,277	1,455	1,296	879	815	1,319	1,500	9,620
	【注】*2013年度は経済産業省直執行予算、2020年度は予定									

	経産省担当原課	産業技術環境局 研究開発課
	プロジェクトリーダー	<p>全体共通 PL :</p> <p>国立研究開発法人産業技術総合研究所 後藤新一 (2013~2015)</p> <p>国立研究開発法人産業技術総合研究所 栗山信宏 (2016~2020)</p> <p>知財管理 :</p> <p>一般財団法人エネルギー総合工学研究所 後藤新一 (2016~2017)</p>
	プロジェクトマネージャー	<p>新エネルギー部 大平英二 (2013年4月~2018年3月)</p> <p>次世代電池・水素部 原 大周 (2018年4月~現在)</p>
開発体制	委託先	<p>①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発</p> <p>①-1 アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発 (～2019)</p> <p>旭化成(株)</p> <p>①-2 高温水蒸気電解技術の研究開発</p> <p>東芝エネギーシステムズ(株) / [再委託先] 国立研究開発法人産業技術総合研究所 / [再委託先] 一般財団法人ファインセラミックセンター</p> <p>①-3 非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発</p> <p>国立研究開発法人 理化学研究所 / [再委託先] 東ソー(株)</p> <p>[再委託先] ブラザー工業(株) (～2020.1)</p> <p>①-4 アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発</p> <p>国立研究開発法人産業技術総合研究所 / 学校法人早稲田大学 / 国立大学法人北海道大学大学院工学研究院</p> <p>①-5 高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発</p> <p>国立大学法人東京工業大学 / [再委託] (株)ノリタケカンパニーリミテド (2019.6～) / 地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所</p> <p>①-6 アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化</p> <p>国立大学法人横浜国立大学 / 国立研究開発法人産業技術総合研究所</p> <p>国立大学法人京都大学 / 公立大学法人大阪 / 国立大学法人東北大学</p> <p>金属材料研究所 / 学校法人立命館 / デノラ・ペルメック(株)</p> <p>②大規模水素利用技術の研究開発</p> <p>②-1 水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発 (～2019) 三菱日立パワーシステムズ(株)※ / 三菱重工業(株)</p> <p>※三菱パワー(株)に社名変更 (2020.9.1)</p> <p>②-2 水素ガスタービン燃焼技術の研究開発 (～2018)</p> <p>川崎重工業(株)</p> <p>③超高効率発電システム基盤技術研究開発 (～2019)</p> <p>③-1 酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発</p> <p>国立研究開発法人産業技術総合研究所 / 国立大学法人東京工業大学</p> <p>一般財団法人エネルギー総合工学研究所 / 川崎重工業(株)</p> <p>③従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発 (2020.8～)</p> <p>③-2 酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発</p> <p>国立研究開発法人産業技術総合研究所 / 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 / 国立大学法人東京工業大学 / 国立大学法人大阪大学 / 電力中央研究所 / 一般財団法人石炭エネルギーセンター / 川崎重工業(株) / 東芝エネルギーシステムズ(株)</p>

		<p>④エネルギーキャリアシステム調査・研究（MCH）（～2018.6）</p> <p>④-1 水素分離膜を用いた脱水素（MCH） 千代田化工建設(株)／公益財団法人地球環境産業技術研究機構</p> <p>⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査</p> <p>⑤-1 膜反応器を用いたメタン直接分解による CO2 フリー水素製造技術 公益財団法人地球環境産業技術研究機構（無機膜研究センター）</p> <p>⑤-2 アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造（～2019） 国立大学法人広島大学</p> <p>⑤-3 メタン直接分解による水素製造に関する技術調査 (株)伊原工業／〔再委託〕あいち産業化学技術総合センター／ 〔再委託〕学校法人東京理科大学 国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学</p> <p>⑤-4 メタンの熱分解による水素製造に関する技術調査 国立研究開発法人産業技術総合研究所／(株)I H I／ 国立大学法人京都大学</p>
情勢変化への対応	<p>2013.6 戦略的イノベーションプログラム（SIP）が創設された。この情勢に対応し、研究者間の交流が促進されるよう、SIP との連携を図った。</p> <p>2015.3 ワークショップの開催、継続してSIPとの合同技術交流会開催（合計4回、～2017年3月）</p> <p>2016.3 研究開発項目②（大規模水素利用技術の研究開発）公募</p> <p>2016.3 研究開発項目⑤（トータルシステム導入シナリオ調査研究）公募</p> <p>2018.3 研究開発項目③（超高効率発電システム基盤技術研究開発）公募</p> <p>2018.3 研究開発項目①（水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発）公募</p> <p>2019.1 研究開発項目⑤（炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査）公募</p> <p>2020.3 研究開発項目③（従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発研究）公募</p>	
中間評価結果への対応	<p>2017 に2回目の中間評価を実施し、各研究開発項目の進捗と整合性・連携状況の確認、政策動向・業界技術動向の把握等を行い、後期5年は以下の研究開発項目を新たに追加して実施した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発 ・高効率発電システム基盤技術研究開発 ・炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査 <p>その結果、事業における研究開発は基礎基盤の研究開発フェーズにシフトし、大学・国研といった事業化フェーズの役割を直接担うことが想定しにくい事業者の比率が増加した。そのため、研究開発成果を産業界へスムーズに橋渡しするために、研究開発成果の社会実装への貢献イメージの共有、目標とするアウトプットのイメージを共有など、確度高く社会実装されるための活動を推進した。</p>	
評価に関する事項	事前評価	2013年度 実施 担当部 新エネルギー部
	中間評価	2015年度 中間評価実施
	中間評価	2017年度 中間評価実施
	中間評価	2020年度 中間評価実施 次世代電池・水素部
3. 研究開発成果について	<p>①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発</p> <p>アルカリ水電解システムの変動試験による電極、隔膜の劣化特性を評価し、シャットダウン過程の繰り返しにより過電圧が上昇することが判明した。大型電解装置では累計12,000時間の長期運転の実績を積み上げた。</p> <p>SOECにおいては、セル・スタック構成部材の劣化要因を抽出して劣化機構を解明した。また、変動入力による劣化加速が少なく、長寿命化可能なSOECセルの設計指針素案を策定した。</p>	

	<p>固体高分子形水電解においては、高性能、高耐久、低コストを成立させるべく、新規導電担体フリーの IrRu ナノ粒子連結触媒及び非貴金属 Mn 系酸化物触媒を開発した。</p> <p>アニオン交換膜型水電解においては、超高分子量型ポリマーを開発し、水電解セルで 0.6 A/cm² で 1.68 V (1M KOH) という高い性能を得た。また、無電解析出法による NiFe 酸化物触媒を開発した。</p> <p>評価試験法の構築においては、アルカリ水電解及び固体高分子水電解の劣化機構を解明するための評価解析試験法、加速劣化試験プロトコルを開発、材料・セルに関する設計指針原案を策定した。</p> <p>②大規模水素利用技術の研究開発</p> <p>250MW 級利用技術の開発では、逆火耐性がある多孔噴流燃焼器（クラスタバーナ）を採用した解析・非燃焼試験（気流試験）による単孔ノズルの基本設計、縮小モデルバーナを設計・製作し、燃焼試験による低圧・中圧試験条件において、フラッシュバックの発生無く、安定燃焼を実現し、実機換算により NOx が 50ppm(15% O₂ 換算) を下回る目途を得た。</p> <p>2 MW 級利用技術の開発では、50%から 100%負荷運転に相当する条件で NOx 35ppm 以下を達成するとともに、エンジンでの急負荷遮断および負荷投入を模擬した水素流量の急増減操作下での安定した水素燃焼を確認した。更に、高圧水素燃焼試験において、定格相当条件を 2 時間保持する試験で燃焼器部品に問題がないことを確認するとともに、水素着火試験における安定した着火性及びエンジンの起動（エンジンの低回転数）条件での安定した燃焼状態を確認した。</p> <p>③超高発電システム基盤技術研究開発効率</p> <p>1700℃級効率追求型のシステムは技術的には成立しうるものの、酸素製造設備など周辺機器を含めると経済成立性の面では厳しく、コスト削減が必要であることから、システムの構成を見直した1,400℃級合理化案では、経済成立性を満足しながら発電効率68%以上を達成できることを示した。技術の実現性の確度向上に鑑み、今後はまずはクローズド型ガスタービンの共通基盤として1,400℃級の実証試験を実現させて、次のステップとして1,700℃級クローズド型ガスタービンを目指すことを実用化シナリオ案とした。</p> <p>④エネルギーキャリアシステム調査・研究</p> <p>水素分離膜（シリカ膜）として世界最高レベルの性能を得るとともに、70mmL から 500mmL への長尺化に成功した。また、反応管を選ばない実用的モジュール構造を開発した。</p> <p>1,500 時間の加速耐久試験による劣化率の検証を行い、メンテナンス等を考慮した実用的な耐久性（15,000 時間以上）を見通した。また、不純物についても膜への影響がないことを確認した。</p> <p>コジェネシステム等として、SOFC、PEFC、水素ステーションを設定し、原料 MCH 量等を評価した。その結果、水素ステーションでは既存法とほぼ同等であるが、SOFC では分離膜の適用により約 15%、PEFC では約 10%の削減が可能であることを確認した。</p> <p>⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査</p> <p>メタン熱分解に関する中核技術として反応器や触媒技術・経済成立性の観点で絞込をすすめた結果、触媒と炭素の分離、触媒失活回避、分解反応炉の最適設計など課題が整理された。また、生成炭素の用途の拡大と価値の創出、加えて安全性等もプラスの潜在力を確認できた。</p>
投稿論文	前・後期合計：29 件、 内 2018 年度～2020 年度：13 件（2020 年 8 月 25 日現在）
特 許	前・後期合計：「出願済」71 件(うち国際出願 9 件)、「登録」12 件、これらの内 2018 年度～2020 年度：「出願済」29 件(うち国際出願 5 件)、「登録」0 件 (同上)
その他の外部発表 (プレス発表等)	前・後期合計：研究発表・講演(557 件)／雑誌・図書等への掲載(102 件)（新聞記事は除外）、展示会へ出展(66 件)（同上）、 内 2018 年度～2020 年度：研究発表・講演(200 件)／雑誌・図書等への掲載 (35 件)（新聞記事は除外）、展示会へ出展（12 件）（同上）、

<p>4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて</p>	<p>①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発 再エネ由来の変動電源に対する評価プロトコルの開発、劣化メカニズムの解明といった評価解析基盤技術を構築し、触媒、電解質といった材料開発、セル、電解槽における高性能・高耐久化とシステム規模での低コスト化を継続して検討することで、2030年以降の実用化を見通した。</p> <p>②大規模水素利用技術の研究開発 数 MW～数百 MW 級の水素専焼ガスタービンをターゲットに研究開発を実施し、低 NO_xでの逆火のない安定した燃焼等、製品化に必要な基本性能を確認したことから、本格的な実証フェーズに移行するための技術レベルに到達した。その結果、次のフェーズとしての助成事業に採択され、実証試験を実施中である。</p> <p>③超高効率発電システム基盤技術研究開発 1,700°C級効率追求型のシステムは技術的には成立しうるものの、酸素製造設備など周辺機器を含めると経済成立性の面では厳しい結果となったことから、システム構成を見直した1,400°C級合理化案のシステムにおいて経済成立性を満足しながら発電効率68%以上を達成できることを示した。この結果、2022年までに1,400°C級にて実証実験実施を可能とする計画を策定して2023年以降の次のフェーズの研究開発を目指すこととした。</p> <p>④エネルギーキャリアシステム調査・研究 水素分離膜を用いた MCH 脱水素プロセスと SOFC の組み合わせでメンブレンリアクターの経済優位性が確認できたことから、大規模化の検討とシステム規模での低コスト化を継続して検討することで、2030年以降の実用化を見通した。</p> <p>⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査 メタン等の炭化水素等をはじめとした多様な水素化合物源から、二酸化炭素を排出せずに安価かつ大量の水素を製造するという、コア技術の可能性を調査した。その結果を踏まえて 2020 年には技術成立性と経済性に関する外部有識者からの評価を行うことで、2021 年度以降に当該研究開発項目を継続するか否かを審査する。</p>	
<p>5. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>2014 年 2 月 制定</p> <p>2014 年 3 月 制定</p> <p>2016 年 2 月 中間評価結果を踏まえ、研究開発項目③④⑤の内容及び目標を改定</p> <p>2017 年 3 月 基本計画マニュアル改訂及び中間評価結果を踏まえ、プロジェクトリーダーの追記及び研究開発項目②、④の目標を改訂</p> <p>2017 年 6 月 3. 研究開発の実施期間及び 4. 評価に関する事項を一部改訂</p> <p>2018 年 3 月 中間評価結果（2017年度）を踏まえ、事業期間の延長及び後期 5 年における実施内容の追加による改訂</p> <p>2018 年 5 月 プロジェクトマネージャー変更による改訂</p> <p>2019 年 1 月 研究開発項目②の達成目標の一部修正及び期間延長、研究開発項目⑤の追加</p> <p>2020 年 3 月 研究開発項目③の実施内容と名称の変更</p>

1. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ

①政策的な重要性

水素は、これを燃料とした場合に二酸化炭素を排出しないという環境特性に加え、エネルギーキャリアとして再生可能エネルギー等を貯蔵、輸送、利用することができる特性（貯蔵性、可搬性、柔軟性）を有する。このため、水素を有効利用することで従来は利用困難であった海外の豊富な再生可能エネルギー資源や未利用エネルギー資源等を活用するとともにCCS適地等を利用することが可能となる。これは水素が、エネルギー資源の乏しい我が国にとってエネルギー安全保障と温暖化対策の切り札となる重要なカギとなることを意味する。

2017年12月26日に取りまとめられた『水素基本戦略』（再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議）では、2050年を視野に入れた水素社会実現に向けて将来目指すべき姿や目標として官民が共有すべき方向性・ビジョンが示されている。さらに、COP21で採択されたパリ協定では、全ての締約国は“長期的な温室効果ガス低排出型の発展”のための戦略（長期低排出発展戦略）を作成するとともにその実現に向けて努力すべきであるとされている。このため2019年6月、我が国は「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を閣議決定し、パリ協定が定める長期低排出発展戦略に位置付けた。その中では、水素の特長として、①再生可能エネルギーを含め多種多様なエネルギー源から製造し、貯蔵・運搬することができる二次エネルギーである、②製造段階でCCS・CCU技術や再生可能エネルギー技術を活用することで、トータルでも脱炭素化したエネルギーとすることが可能である、③水素から高効率に電気・熱を取り出す燃料電池技術と組み合わせることで、電力、運輸のみならず、産業利用や熱利用など、様々な領域で脱炭素化が可能となる、という点を示しており、水素が脱炭素化エネルギーの新たな選択枝として利用されることが期待されている。

このように水素を日常生活や産業活動で利活用する社会、すなわち“水素社会”を世界に先駆けて実現していくためには、水素を再生可能エネルギーと並ぶ新たなエネルギーの選択枝とすべく、環境価値を含め、水素の調達・供給コストを従来エネルギーと遜色のない水準まで低減させていくことが不可欠である。このため、『水素基本戦略』等に基づき、短期的には燃料電池自動車を中心としたモビリティにおける水素需要の拡大を加速すべく、導入支援や技術開発、規制改革を進める。また、中長期的な水素コストの低減に向け、水素の「製造、貯蔵・輸送、利用」まで一気通貫した国際的なサプライチェーンの構築、水素を大量消費する水素発電の導入に向けた技術開発を進めることにより、2030年頃に商用規模の国際水素サプライチェーンを構築し、30円/Nm³程度の水素コストの実現を目指している。

②我が国の状況

化石燃料等の天然資源に恵まれない我が国は、1970年代の二度の石油危機以来、国民生活と産業活動の血脈であるエネルギーを海外に依存する構造的脆弱性を抱え続けている。加えて、2016年11月のパリ協定の発効を受け、深刻化する地球温暖化問題に対し、我が国としての責任を一層果たしていくことが求められている。一次エネルギーのほぼ全てを海外の化石燃料に依存する我が国においては、エネルギー安全保障の確保と温室効果ガスの排出削減の課題を解決していくことが必要である。

このような課題解決に向けた具体的な我が国の取り組みとして、2018年10月には、水素の利活用をグローバルな規模で推進するために、閣僚レベルが水素社会の実現をメインテーマとして議論を交わし、関係各国が歩調を合わせ一層の連携を図るプラットフォームとして「水素閣僚会議」を日本で開催した。この会議には21の国・地域・機関より閣僚等が集まり、エネルギー転換・脱炭素化に向けた水素の重要性や、水素関連技術の現状と将来に向けた展望、水素が将来的にビジネスとして自立できるマーケットの創出に向けた国際的な連携の必要性などについて、積極的な議論を行い、会議の成果として「東京宣言」を発表した。さらに、2019年9月には、第2回水素閣僚会議を開催し、前回発表した「東京宣言」に関する官民の取組状況を共有し、その上で、グローバルな水素の利活用に向けた政策の方向性について議論を深め、各国の水素・燃料電池に

関する行動指針として「グローバル・アクション・アジェンダ」を議長声明として発表した。また、2020年1月に公表された革新的環境イノベーション戦略においては、革新的技術の2050年までの確立を目指す具体的な行動計画（5分野16課題）について、①コスト目標、世界の削減量、②開発内容、③実施体制、④基礎から実証までの工程がイノベーションアクションプランとして明記されており、水素に関しては、目標の一例として「過去の経験と、現在見つかっている革新的な技術を勘案し、2050年までに水素のコストを既存エネルギー同等とする」と示されており、水素も重要5分野の一つとして位置づけされている。

③世界の取組状況

水素は次世代のエネルギーとして国際的にも注目を集めており、欧米をはじめとする先進国のみならず、中国等のエネルギー需要の増大が続く新興国においても水素利用に向けた様々な取組が進められている。

欧米各国、特にドイツを中心として、再生可能エネルギー由来の電力を水素に変換するPower to Gasの取組が積極的に行われているが、製造した水素はそのまま貯蔵・利用される他、天然ガスパイプラインに供給されており、水素のサプライチェーンを構築する等の取組は現状なされていない。

水素製造技術に関しては、アルカリ水電解技術においてNel、Hydrogenics等が大規模開発・実証を推進しており、固体高分子型水電解においては、Siemens、Nel、Hydrogenics、ITM Power等が大規模開発・実証を推進している。また、豪州Hazer社は、天然ガス及び類似のメタン原料に鉄鉱石触媒を利用して水素及びグラファイトに転換するプロセスを開発している。また、IEA ANNEX30等のワークショップでは、水電解技術に関する情報交換が定期的に行われている。

水素輸送貯蔵技術に関しては、欧米では100～200km規模の水素専用パイプラインが複数整備されており、ノルウェーは水素戦略において、水電解や天然ガス改質等で製造した水素をパイプラインや船舶で輸出する可能性に言及している。

水素利用技術に関しては、例えば、オランダでは440MW天然ガス発電所のうちの1つを、水素専焼に転換する可能性調査を行っている。米国においてGE社は、米国エネルギー省（DOE）のAdvanced Energy Systems /Hydrogen Turbineプログラムに参画し、水素ガスタービンの研究開発を行っている。当該プロジェクトでは2035年頃までに1,700℃級の水素タービンの開発・実証を予定している。

我が国には、こうしたグローバルな動向を適切に把握して世界と協調しつつ、水素社会の実現へ向けて世界をリードしていくことが求められる。

また、アフターコロナの水素に関わる経済対策として、EUにおいては「再生可能エネルギー（特に風力、太陽光）および水素利用技術」にフォーカスした7,500億ユーロ（89兆円）の景気回復パッケージを発表している。ドイツでは経済へのテコ入れの一環として「国内外での水素製造能力の拡大」に90億ユーロ（1.1兆円）を計上、ポルトガル政府は国家水素戦略を承認し、70億ユーロ（8,800億円）を投資、水素利用拡大により天然ガス輸入量を削減することとしている。また、デンマークでは「大規模な水素生産」への11億ユーロ（1,300億円）の投資含む政府提案が提出され、英国においてはガスネットワーク会社5社が経済対策の一環として9億ポンド（1,200億円）のガスネットワークインフラへの投資を解放している。これらのように欧州ではアフターコロナの経済対策として、水素に関わる投資が積極的に行われている状況である。

④本事業の目的

本事業では、二次エネルギーとしての水素等を最大限に活用するため、2040年以降という長期的視点を睨み、水素等の「カーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢」としての地位を確立させることを目指す。具体的には、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術及び大規模水素利用技術の先導的な研究開発に主として取り組む。

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

我が国政府には、過去の原子力発電所における事故等を踏まえて「国民の安全の確保」を最優先とした上で望ましいエネルギーミックスが可能となるようなエネルギー供給体制を構築することが求められている。このエネルギーミックスの実現には、社会インフラの変革も視野に入れ、省エネルギー・節電対策を抜本的な強化、再生可能エネルギーの開発・利用を最大限加速化、天然ガスシフトを始め、環境負荷に最大限配慮しながらの化石燃料の有効活用（化石燃料のクリーン利用）等が重要である。

しかし、このうち再生可能エネルギーについては、出力変動のある太陽光発電、風力発電等と需要をバランスさせるための電力貯蔵用や電気自動車用の二次電池の開発が進められているものの、電気化学反応による物質の酸化還元を原理とする二次電池では十分なエネルギー容量を確保することが困難であるため需要の時間といった本質的な問題を内包している。また、海外では再生可能エネルギーや、低品位炭等の未利用化石燃料等とCCSを組み合わせた技術の大規模開発が急速に進められているが、大抵の場合はエネルギー適地がエネルギー消費地から隔てられていることから効率的な輸送が難しいといった問題も生じている。

このような問題は喫緊に解決しなくてはならないが、超長期的かつ大規模な研究開発投資が必要であることから個別の企業や研究機関が対処することは困難である。従って公的研究開発推進としてNEDOが本事業によりエネルギー媒体として水素を活用することで各エネルギーの価値を向上させることを目的として、再生可能エネルギー等からの高効率低コスト水素製造技術、高効率水素-エネルギーキャリア転換・輸送技術、高効率な国内外の再生可能エネルギー等の大規模水素利用技術開発等を推進する必要がある。さらに、公的研究開発機関としてNEDOが関与することで、水素閣僚会議、IPHE（国際水素・燃料電池パートナーシップ）等の政府間ハイレベル会合への参加を通じて各国政策機関と密に情報を共有することができ、必要に応じて迅速に国家プロジェクト運営に反映することや、各国政府に必要事項をインプットすることが可能となる。

2.2 実施の効果（費用対効果）

本事業では、中長期的な水素コストの低減に向け、水素の「製造、貯蔵・輸送、利用」まで一貫通貫した国際的なサプライチェーンを構築するため、水素を大量消費する水素発電の導入に向けた再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発、高効率な水素発電技術開発等に取り組んできている。そして、国の政策に則り最終的には水素価格20円/Nm³を究極目標とする化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現に貢献する成果の創出を目指している。

さて、本事業は超長期先の実用化を見据えた先導的な研究開発であるものの、基盤研究として確実に結果も出始めており、事業化に向けた取組が進められているものもある。例えば、水電解技術においては本事業成果を活用して2020年に福島水素エネルギー研究フィールドに10MW級のアルカリ水電解システムを導入した実績を有する。これは、2017年の世界の風力発電導入量である539GW/年（GWEC Global Wind 2017 Report）の1%程度が水電解により水素に変換されると仮定した場合であっても5GW/年程度の水素発生機が必要であることから、その市場は2,500億円/年（発生機価格5万円/kWとして算出）と予想されるものの先鞭となる。

この様に、本事業がもたらす将来の水素社会の実現には、省エネルギー、環境負荷低減、エネルギーの供給多様化、石油代替、分散型電源としての利用、産業競争力強化と新規産業・雇用の創出等の多様な効果が期待される。また、本事業では水素の「製造、貯蔵・輸送、利用」までの広いサプライチェーンに関わる産業界その製造において様々な民間企業の該当分野への参画を促進し、この分野における裾野産業の強化、拡大に繋がる。これらを総合して国が示す政策としての「水素・燃料電池戦略ロードマップ」（経済産業省2014年6月）等では、2030年の日本の水素・燃料電池関連の機器・インフラ産業の市場規模は1兆円程度、2050年には8兆円程度と試算しており、本事業はこの実現に貢献するものである。また、国内外の民間企業トップによるイニシアティブである“Hydrogen Council”（水素協議会）では、いわゆる2℃シナリオの達成のためには、2050年までにエネルギー起源CO₂の排出量の60%削減が必要であるとの前提のもと、その実現に水素が活用されることにより2.5兆ドルの市場及び3,000万人の雇用が創出されると報告しており、上記水素原料価格目標を実現することで将来の大きな市場拡大及び産業への寄与が見込まれる。

2. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 研究開発の目標

本事業では、2040年以降という長期的視点を睨み、水素等の「カーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢」としての地位を確立させることを目指し、「水素利用等先導研究開発事業」基本計画を策定している。基本計画で定めている本事業のアウトカム目標、アウトプット目標は下記の通りである。

①-1 アウトカム目標

再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に取り組む。

水素製造・輸送については、2030年における水素コスト30円/Nm³を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。

水素発電については、2040年以降、水素コスト20円/Nm³において発電コスト12円/kWh以下の実現を目指す。

また、我が国のエネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギーの適地等の経済発展に貢献する。

①-2 アウトカム目標達成に向けての取組

再生可能エネルギー由来の電力を用いて水素を製造する場合は一般には水電解が用いられるが、生成した水素は大規模水力発電を利用する場合を除き、現状では高価格で化石燃料とは競合できない。水素コストの過半は水素製造システムの設備コストと消費電力コストが占めるため、低コスト水素製造システムを実現するためには、設備コストを5万円/kW程度に低減するための研究を行うとともに電解効率を向上させて消費電力コストの低減を図ることが重要である。

次に、製造した大量の水素を効率よく貯蔵して利用するため、高効率な水素液化装置やボイloffの少ない水素タンクなどの水素貯蔵に関する周辺機器、水素をエネルギーとする発電技術などの基盤技術を開発する。このようなエネルギーキャリアシステム研究では、従来プロセスに対し、エネルギー効率、経済性等を飛躍的に向上させる可能性のある新規プロセスについて、基盤技術を開発する。

また、トータルシステム導入シナリオ研究では本事業で開発する技術の速やかな実用化・普及と技術課題の明確化、将来の技術課題・シーズの発掘を目指し、普及シナリオを作成する。

さらに、中間評価における指摘事項を踏まえ、水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発及び従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発に取り組む。

②アウトプット目標

【中間目標（2015年度末）】

- ・各研究開発テーマの中間目標（2015年度末）の達成
- ・研究戦略を策定し、新規テーマとの入れ替えも含め、各研究開発テーマを再編する

【中間目標（2017年度末）】

- ・中間目標の達成状況を踏まえ、研究戦略に基づく設定目標（2017年度末）の達成

【研究開発項目継続可否審査（2019年度）】

- ・後期5年間における研究開発項目③「超高効率発電システム基盤技術研究開発」については、研究開発項目継続可否審査によりテーマ継続の可否を判断

【中間目標（2020年度）】

- ・研究開発項目①「水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発」及び研究開発項目③「超高効率発電システム基盤技術研究開発」については、中間目標の達成

【最終目標（2022年度末）】

- ・中間目標（2020年度）の達成状況をふまえ、最終目標の達成

1.2 研究開発項目と実施期間

①研究開発項目

上記目標を達成するために、以下の研究開発を実施する。なお、各研究開発項目の具体的スケジュールは、図1の研究開発計画に示す通りとである。これらの事業は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、原則として委託事業として実施する。

【前期4年間】

- 研究開発項目①低コスト水素製造システムの研究開発
- 研究開発項目②高効率水素製造技術の研究
- 研究開発項目③大規模水素利用技術の研究開発
- 研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究
- 研究開発項目⑤トータルシステム導入シナリオ調査研究

【後期5年間】

- 研究開発項目①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発
- 研究開発項目②大規模水素利用技術の研究開発
- 研究開発項目③超高効率発電システム基盤技術研究開発
- 研究開発項目③従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発（2020年8月～）
- 研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究
- 研究開発項目⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査

②研究開発の実施期間

経済産業省は、未来開拓研究プロジェクト「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」の事業期間として2013年度から2022年度（10年間）を予定し、2013年度から2017年度までの5年間の実施体制を公募した。同事業がNEDOへ移管することを受け、NEDOは2014年度から2017年度までの4年間の基本計画を策定し、研究開発を実施した。その後2018年度から2022年度の5年間については、2017年度に実施した外部有識者による中間評価の結果等を踏まえ、延長することとした。

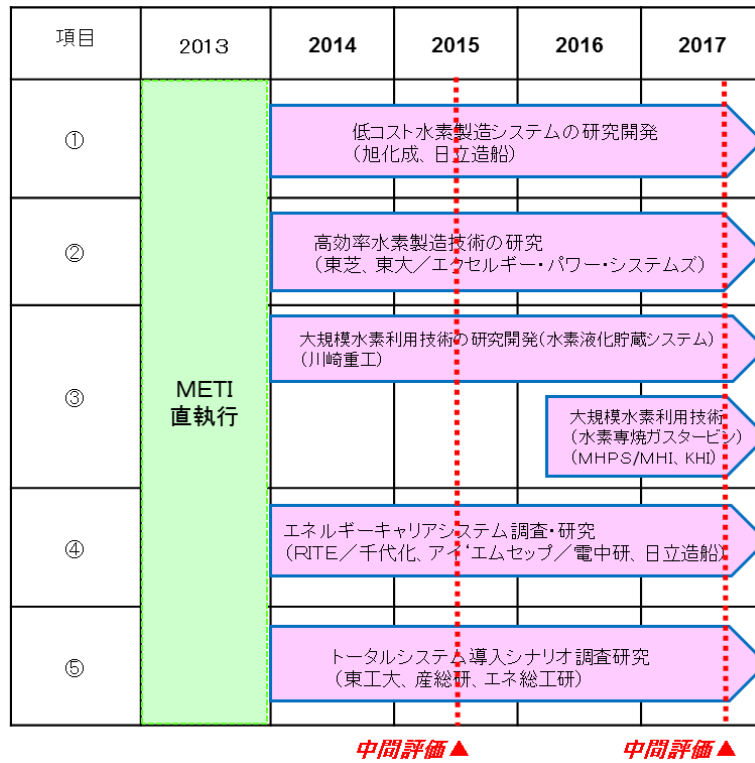


図1-1 研究開発計画 前期5年(2013-2017)

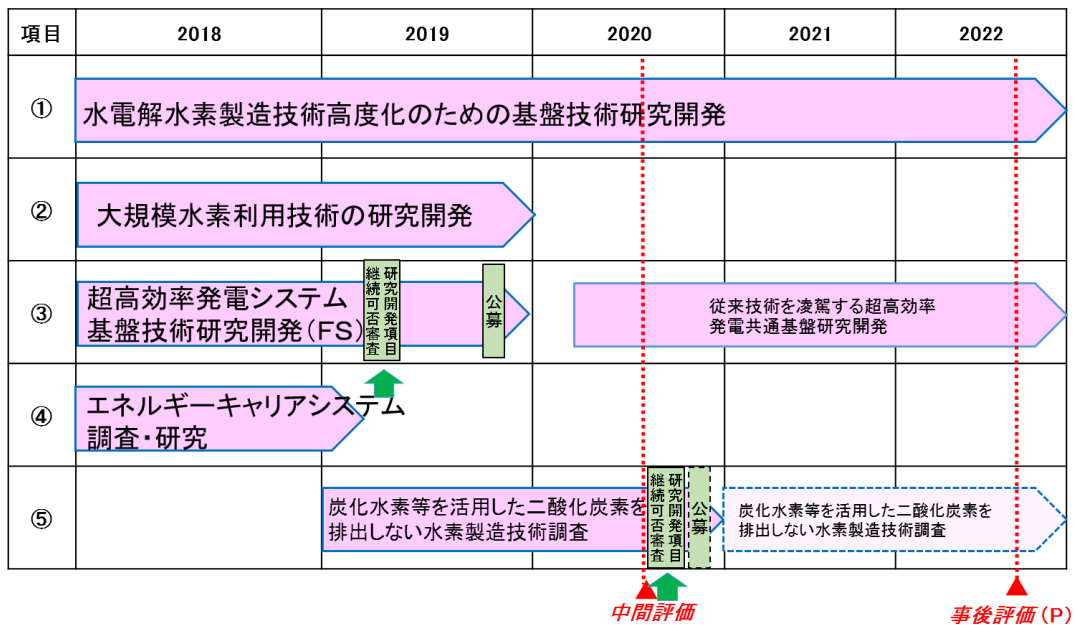


図1-2 研究開発計画 後期5年(2018-2022)

1.3 各研究開発項目の目標

本事業は上記の通り、前期4年間、後期5年間の計画で実施している。前回の中間評価を2017年度に実施しており、その中間評価の結果を反映し、2018年度からの事業を推進している。中間評価への具体的な対応に関しては、「2. 研究開発マネジメントについて」の「4. 中間評価への対応」を参照されたい。2017年度までに事業成果に関しては添付資料「水素利用等先導研究開発事業 中間評価（2017年度）」を参照とし、本項目以降では、後期5年の研究計画における2018年度以降の事業推進成果に関して主に報告する。

2018年度以降に取り組んできた研究開発項目①～⑤における個別テーマは下記の通り。

研究開発項目① 水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発（委託事業）

- ①-1 アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発
- ①-2 高温水蒸気電解技術の研究開発
- ①-3 非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発
- ①-4 アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発
- ①-5 高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発
- ①-6 アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化

研究開発項目② 大規模水素利用技術の研究開発（委託事業）

- ②-1 水素専焼対応型 DRY LOW NOx 高温ガスタービンの研究開発
- ②-2 水素ガスタービン燃焼技術の研究開発

研究開発項目③ 超高効率発電システム基盤技術研究開発（委託事業）

- ③-1 酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発

研究開発項目③：従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発（委託事業）

- ③-2 酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発（2020年8月～）

研究開発項目④ エネルギーキャリアシステム調査・研究（委託事業）

- ④-1 水素分離膜を用いた脱水素（MCH）

研究開発項目⑤ 炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査（委託事業）

- ⑤-1 膜反応器を用いたメタン直接分解によるCO₂フリー水素製造技術
- ⑤-2 アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造
- ⑤-3 メタン直接分解による水素製造に関する技術調査
- ⑤-4 メタンの熱分解による水素製造に関する技術調査

各研究開発項目の達成目標は下記の通り。

研究開発項目① 水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発（委託事業）

【中間目標（2020年度）】

- ・変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムの解明
- ・劣化等を規定する因子を見出すとともに、材料・セルに関する設計指針の原案を策定

【最終目標（2022年度）】

- ・プラント引渡し価格 30 円/Nm³に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針の策定
- ・性能等評価方法の確立

【主な設定根拠】

水素基本戦略に「2030年頃に～中略～30円/Nm³程度の水素コストの実現を目指す」という記述。

個別テーマの詳細目標は以下のとおり。

研究開発項目①－1 アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発（旭化成（株））（2019年度終了）

中間目標および最終目標（2019年度）	
①アルカリ水電解装置の劣化挙動の検証	
<2018年度開発目標>	<ul style="list-style-type: none"> ・商用仕様の大型電解装置を用いた、変動電源を中心とした運転の実施
<2019年度開発目標>	<ul style="list-style-type: none"> ・商用仕様の大型電解装置を用いた、変動電源を中心とした運転の実施 ・長期運転でのプロセスの総合評価

研究開発項目①－2 高温水蒸気電解技術の研究開発

（東芝エネルギーシステムズ（株）、【再委託先】国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人ファインセラミックセンター）

中間目標（2020年度まで）	
①SOECセル・スタックの劣化機構解明	
<2018年度開発目標>	<ul style="list-style-type: none"> ・SOECセル及びスタックの劣化影響因子整理 ・劣化影響度評価手法の構築
<2019年度開発目標>	<ul style="list-style-type: none"> ・セル及びスタック構成部材の劣化試験及びその分析 ・セル及びスタック構成部材の劣化機構解明に向けた改良試験 ・高温モジュール構造材料の劣化影響因子の整理、影響度評価手法の構築と試験
<2020年度開発目標>	<ul style="list-style-type: none"> ・劣化試験前後でのセル及びスタック構成部材構造、材料組成等の分析 ・セル及びスタック構成部材の劣化機構解明 ・高温モジュール構造材料の劣化評価
②SOECセル・スタック部材の設計指針策定	
<2019年度開発目標>	<ul style="list-style-type: none"> ・セル及びスタック構成部材の耐久性向上施策抽出

中間目標（2020年度まで）
<p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> セル、スタック構成部材の耐久性向上一次試作及びその評価 高耐久性 SOEC セル・スタックの設計指針の素案策定
<p>③新規 SOEC 電極の設計指針策定</p> <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 新規 SOEC 電極候補材料の選定及び設計 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> LaCoO₃ 系材料組成検討の試作セルの評価及び分析
<p>④SOEC スタック運転条件検討</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> SOEC スタック変動入力運転条件の策定 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 平板型セルスタックの変動入力パターンを含めた劣化試験 平板型セルスタックの変動入力劣化影響度調査 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 平板型セルの変動入力パターンを含めた劣化分析 スタック運転条件（温度）がセル、スタックに及ぼす劣化影響度評価 SOEC スタックの運転条件設計指針の素案策定
<p>⑤SOEC 評価技術／標準化調査</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> SOEC 試験方法、評価技術、標準化に関する動向調査 小流量水蒸気の長期安定供給手法の開発 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> SOEC 試験方法、評価技術、標準化に関する動向調査 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> SOEC 試験方法、評価技術、標準化に関する動向調査、中間まとめ 電解セル及びスタック構成材料の耐久性試験方法の提案 <p>得られた成果に基づき、変動する再生可能エネルギーに対する劣化機構、劣化等を規定する因子、材料・セルに関する設計指針の観点から、前半3年間のまとめを実施する。</p>

研究開発項目①－3 非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発

（国立研究開発法人理化学研究所、[再委託先] 東ソー(株)、ブラザー工業(株)（2020年1月まで）

中間目標（2020年度まで）
<p>①－1. 触媒・担持材料の安定電位-pH 領域の特定</p> <p><2018年度開発目標></p> <p>複数台電気化学評価システムの導入とその試験動作確認</p> <ul style="list-style-type: none"> 紫外可視吸収分光装置の導入と溶液中のマンガンイオン検出についての確認 電気化学顕微ラマン分光・顕微赤外分光システム構築の着手 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> マンガン酸化物系触媒の過電圧情報を入れた「安定電位-pH 領域図」の熱力学データとの差異の確認及び整理 （差異ある場合、）差異が最も大きくなる条件の確認 電気化学 ATR-IR システムの構築に着手

中間目標（2020年度まで）
<ul style="list-style-type: none"> 異種元素を添加した混合物（複合酸化物）触媒の合成に着手 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> マンガン酸化物系触媒の過電圧情報を入れた「安定電位-pH領域図」の完成 各種オペランド分光による「安定電位-pH領域」内外における触媒の性能発現と劣化機構の解析により、マンガンイオンの溶出反応を引き起こす因子（電子状態・表面結合状態・結合歪み度）の明確化 非貴金属（Co, Ni, Fe）系触媒及びその混合物、Umicore Elyst の「安定領域-pH領域図」の構築に着手
<p>①-2. マンガン系触媒の試作</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 酸性領域でも安定に存在すると推定される、理論酸化還元電位よりも“貴”な電位を有する(平衡論的に溶解し難い)マンガン酸化物系の提案 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 酸性領域でも安定に存在すると推定されるマンガン酸化物系を浸漬電位から酸素発生電位までの範囲で電位を繰り返しスweepする LSV を用いた電気化学測定により、その過電圧の経時変化や電解液側への成分溶出量を基に良好であるかどうか選別する <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 良好であると認定されたマンガン酸化物系触媒の「安定電位-pH領域図」完成用サンプルとしての提供 前の年度までに見いだされた電気化学的安定性に加え、比表面積・結晶性等の物性や構成部材の改良を行い、アノード触媒としての適性評価（①-1による評価）を行うことによる、水電解酸素生成触媒としての位置づけの見極め
<p>②-1. MEA劣化機構の直接的証拠の確認</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> MEAの評価を行うための温度分布検出装置開発と温度分布測定専用の水電解セルの自作 標準となる固体高分子型水電解セルの形状探索 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 標準型水電解セルを用いた定常運転条件と劣化状況の把握 標準型水電解セルと温度分布測定を行うセルの改良 定常状態における温度分布測定を行う水分解セルによる温度分布評価による電流集中部分の経時変化把握及び整理 MEAの経時変化評価前後における電流分布の変化が生じた部分の触媒の形状・分布状態変化の把握 これらの結果のまとめによる劣化機構の推定 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> マンガン酸化物系触媒を組み込んだ MEA を用いた水電解セルによる一定電圧印加条件における電流密度の劣化率を利用した劣化確認 水電解変動電源評価装置の導入（項目③-1による水電解セルの変動電源下での印加電圧値と時間から推定された劣化率による劣化状況の確認 MEAの劣化機構モデルの作成と検証
<p>②-2. MEA劣化機構の確認に基づいた水電解セル構造の解析</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> シミュレーションによる水や気体の流れの推定とセル特性への影響の評価 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> シミュレーションから考えられる劣化機構対策を行ったセルの作製と劣化対策に効果的な特性の評価を上記項目②-1にて開発した手法を用い、劣化対策の有効性を確認 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 各種劣化機構の評価を基にセルの改良を実施し、劣化抑制を確認 セル劣化原因の再確認し、他の劣化要因を抽出
<p>③-1. 太陽電池の電力変動環境下の固体高分子型水電解セルの劣化評価</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 太陽光量を中心とした気象条件変化データ収集を行う装置の作製

中間目標（2020年度まで）
<ul style="list-style-type: none"> ・ 気象測定結果に基づく太陽光発電デモンストレーションが可能な装置の作製 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 気象データの年間を通じた取得 ・ 気象データに基づく太陽電池発電量の、一日の発電量を12時間に規格化したパターンに基づく代表的な発電パターンのデモンストレーション作成 ・ 劣化条件として定めたテスト用変動電圧印加や太陽電池の発電量変化から求められる発電パターンの繰り返しデモンストレーションに基づくテスト条件による変動電力印加による水電解セルの劣化評価 ・ 実際の太陽光利用発電下での水分解セルの劣化進行の評価を行うための太陽光発電装置、および、水電解セル変動電源評価装置の導入準備 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 実際の太陽光利用発電での水分解セルの劣化進行の評価を行うための太陽光発電装置、および、水電解セル変動電源評価装置の導入 ・ まとめa)で作製した水電解セル変動電源評価装置への水電解セルの組み込みと劣化評価 ・ デモンストレーション的な水電解セルの劣化評価との比較と劣化機構のモデルの修正 ・ 全ての結果を総合した水電解セルの劣化原因推定とそれに基づく材料やセル設計に対する設計原案の作成
<p>③-2. 電力変動環境下の劣化機構の評価に基づいた水電解セル構造の解析</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動電源に対する水電解セルの応答評価による問題を及ぼす可能性のある電源変動の推定と要因抽出 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 電源変動に対するセル劣化防止策の検討と対策の実施 ・ セル劣化防止策を施したセルの電源変動に対する応答性評価 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動電源下の評価を基にセルの改良とその改良結果の評価

研究開発項目①-4 アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発
（国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人早稲田大学、国立大学法人北海道大学大学院工学研究院）

中間目標（2020年度まで）
<p>①アニオン交換膜（AEM）水電解装置の高効率化</p> <p>1-1 電解機構の解明および電解性能の改善</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 従来法による触媒層作製法高度化による電解性能改善（電解電圧 1.92V 以下@1A/cm²） <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 従来法による触媒層作製高度化による電解性能改善 ・ （触媒層以外の）セル構成部材最適化による性能改善（電解電圧 1.91V 以下@1A/cm²） <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ （無電解メッキなど）新手法による触媒層作製高度化による電解性能改善 ・ セル構成部材最適化による性能改善（電解電圧 1.90V 以下@1A/cm²）
<p>1-2 水素発生カソード触媒層開発</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 無電解析出プロセスの基盤技術を確立 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 電解法による触媒層形成 <p><2020年度開発目標></p>

中間目標（2020年度まで）	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 微細多孔性導電層の形成方法の確立 	<p>1-3 酸素発生アノード触媒層開発</p> <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 無電解法による導電層形成 ・ 電解法による触媒層形成 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 組成制御、構造制御の方法論検討（遷移金属酸化物の選定及び電解浴の設計）
<p>1-4 アノード触媒層気泡離脱挙動解析</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 測定系の構築 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 気泡発生挙動のその場観察 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 表面電位分布測定と影響評価 	<p>②アニオン交換膜（AEM）水電解装置の耐久性評価</p> <p>2-1 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価（担当：産業技術総合研究所）</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 評価系の構築 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 一定負荷試験劣化評価と分析 <p><2020年度開発目標> -</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 一定負荷試験および変動負荷試験における劣化評価と分析、劣化メカニズムの解明と設計指針原案の策定
<p>2-2 構成部材の耐食性評価および防食技術開発</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 材料の選定と腐食発生メカニズムの理解（発錆部の特定） <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 材料の浸漬試験と電解化学測定（腐食速度の算出） ・ 腐食物の成分分析 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 温度を変化させた材料の耐食性評価（腐食速度 0.05mm/year 以下を実現する材料特定） 	<p>③水素製造コスト評価</p> <p>3-1 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価</p> <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 既存小型（～10kW）水電解装置のコスト調査 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 小型（～10kW）AEM水電解装置のコスト見積

研究開発項目①－ 5 高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発
(国立大学法人東京工業大学、[再委託先](株)リタケカンパニーリミテド (2019年6月から)、
地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所)

中間目標 (2020年度まで)
<p>①固体高分子形および固体アルカリ水電解用電解質膜の研究開発</p> <p>①-1 固体高分子形水電解用電解質膜の研究開発</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動電源を用いる固体高分子形水電解で求められる特性を考慮した、水素ガス透過性を低減可能な電解質膜の合成。 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体高分子形水電解セルの電解性能向上に資する固体高分子形水電解用細孔ファイリング膜の開発。 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体高分子形水電解セルの電解性能および耐久性の向上に資する固体高分子形水電解用細孔ファイリング膜の設計指針の提案。 ・ 変動電源を用いる固体高分子形水電解に適した固体高分子形水電解用電解質膜の材料設計指針の原案策定。
<p>①-2 固体アルカリ水電解用電解質膜の研究開発</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動電源を用いる固体アルカリ水電解で求められる特性を考慮した、アルカリ・ラジカル環境下で高耐久性を示すアニオン伝導性電解質ポリマーの合成。 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体アルカリ水電解セルへ適用可能な細孔ファイリング電解質膜の開発。 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体アルカリ水電解のセル性能向上に資する固体アルカリ水電解用細孔ファイリング膜の開発。 ・ 固体アルカリ水電解に適した固体アルカリ水電解用電解質膜の材料設計指針の原案策定。
<p>②固体高分子形および固体アルカリ水電解用触媒の研究開発</p> <p>②-1 Ir系ナノ粒子連結触媒の研究開発</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動電源を用いる固体高分子形水電解で求められる特性を考慮した、高表面積と高耐久性の両立が可能な Ir ナノ粒子連結触媒の合成。 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体高分子形水電解セルの電解性能向上に資する Ir 系ナノ粒子連結触媒の開発。 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体高分子形水電解セルの電解性能および耐久性の向上に資する Ir 系ナノ粒子連結触媒の設計指針の提案。 ・ 変動電源を用いる固体高分子形水電解に適した触媒設計指針の原案策定。
<p>②-2 固体アルカリ水電解用ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高価な貴金属を用いない固体アルカリ水電解触媒の開発へ向けた、ペロブスカイト・スピネル触媒の合成。 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ペロブスカイト・スピネル触媒の溶液中の活性向上に資する材料の開発。 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ペロブスカイト・スピネル触媒の溶液中の劣化機構に関する知見の獲得。
<p>③変動電源に追従できる高性能水電解セルの設計・開発</p> <p>③-1 高性能固体高分子形水電解セルの開発</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体高分子形水電解セルの基礎的な電解性能評価結果の獲得。 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動電源で求められる特性を考慮して合成した材料を用いた固体高分子形水電解セルについての、電解性能の改善に資する材料高度化指針の獲得。

中間目標（2020年度まで）
<p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動電源を用いる固体高分子形水電解に適した単セル設計指針の原案策定。 ・ 変動電源に対して設計・開発した固体高分子形水電解セルに関する電解性能への影響が大きい電圧損失要因の特定。
<p>③-2 高性能固体アルカリ水電解セルの開発</p> <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体アルカリ水電解の基礎的な電解性能評価結果の獲得。 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体アルカリ水電解セルについての、電解性能の改善に資する材料・セル高度化指針の提案。
<p>④水電解セルの変動電源に対する耐久性評価および劣化機構解析</p> <p>④-1 固体高分子形水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体高分子形水電解セルの電解性能評価後の構造評価結果の獲得。 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動サイクル試験による固体高分子形水電解セルの耐久性評価結果の獲得。 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動サイクル試験による固体高分子形水電解セルの劣化機構解析結果の獲得。 ・ 固体高分子型水電解セルの劣化機構解析手法の確立。
<p>④-2 固体アルカリ水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析</p> <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体アルカリ水電解セルの電解性能評価後の構造評価結果の獲得。 ・ 固体アルカリ水電解セルの耐久性評価結果の獲得。 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 変動サイクル試験による固体アルカリ水電解セルの耐久性評価にもとづく、耐久性改善に資する材料・セル高度化指針の提案。
<p>⑤ 実セルにおける電解性能・耐久性評価結果を反映した固体アルカリ水電解用の電解質ポリマー・膜の高度化</p> <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体アルカリ水電解セルの電解性能・耐久性評価にもとづき、特性の改善を図ったアニオン伝導性ポリマーの合成。 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体アルカリ水電解セルの電解性能・耐久性評価にもとづき、特性の改善を図ったアニオン伝導性ポリマー、および電解質膜の合成。
<p>⑥ 固体アルカリ水電解用の卑金属触媒の開発</p> <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体アルカリ水電解用の卑金属触媒の合成、および溶液中の活性・耐久性評価結果の獲得。 <p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 固体アルカリ水電解セルの電解性能あるいは耐久性向上に資する卑金属触媒の触媒設計指針の原案策定。

研究開発項目①－6 アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化

(国立大学法人横浜国立大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人京都大学、公立大学法人大阪、国立大学法人東北大学金属材料研究所、学校法人立命館、デノラ・ペルメレック(株))

中間目標 (2020 年度まで)
<p>①アルカリ水電解及び固体高分子形水電解槽内の物質移動現象の把握と構成材料評価基盤技術の開発</p> <p>①-1. 気泡の挙動に注目した電解槽内の物質移動の評価</p> <p><2018 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・電極表面でのガス発生挙動を、その場で高解像度観察するための高度撮影技術の構築 <p><2019 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・生成ガス気泡の直径、個数密度、成長速度の in situ 測定技術の確立 <p><2020 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・気泡生成挙動と電流密度の関係を明らかにした上での、電解性能との関係性の整理
<p>①-2. 気泡が電極反応に与える影響の評価</p> <p><2018 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・電解液の物性や電解液中での電極反応過電圧に関する、ウルトラファインバブルの有無による差異の整理 <p><2019 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・平板電極に於ける電極反応の速度論的パラメータや物質移動挙動に関する、ウルトラファインバブルの有無による差異の整理 <p><2020 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ウルトラファインバブルを含む電解液中での平板電極と多孔質電極に関する、速度論的パラメータや物質移動挙動の差異の整理 ・ウルトラファインバブルを含有する電解液における電気化学反応についての知見の総括、及び電極より発生する気泡の電解槽性能への影響のまとめ
<p>①-3. 要素試験法の開発</p> <p><2018 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・標準触媒を用いたアルカリ水電解 0.6 A cm^{-2} および固体高分子型水電解 1.0 A cm^{-2} 条件において、試作した 1 cm^2 要素試験用小型電解槽と小型電解槽 (10 cm^2 級) 間のセル電圧の測定値差 5%以下 ・標準組み立て法プロトコルの作成 <p><2019 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・標準触媒を用いたアルカリ水電解 0.6 A cm^{-2}、固体高分子型水電解 1.0 A cm^{-2} 条件において、改良した 1 cm^2 要素試験用小型電解槽と小型電解槽 (10 cm^2 級) 間の参照極を用いた分極評価のアノードおよびカソード電位の測定値差 5%以下 ・標準組み立て法および評価法プロシージャの策定 ・劣化後の実電極試料に対する有効な分析法の策定 <p><2020 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・電極触媒劣化因子の抽出 ・劣化要因、劣化事象を包含した起動停止評価法の策定 ・増設した要素試験用小型電解槽間の、策定した標準的な起動停止評価法を用いた標準触媒の性能劣化後の電位測定値差 10%以下
<p>①-4. アルカリ水電解槽の評価法の開発</p> <p><2018 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ニッケルメッシュ電極バイポーラ電解槽の電解時間、電解電流と逆電流の関係の基礎データ取得および劣化機構の推定 <p><2019 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ニッケルメッシュ電極を用いた 0.6 A cm^{-2} 条件における開発した標準小型バイポーラ電解槽の電位の測定値のばらつき 5%以下 ・標準電解槽の要素部材の提案 <p><2020 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・逆電流を模擬した劣化プロトコル及び加速プロトコルの策定

中間目標（2020年度まで）
<p>・逆電流に対する電解槽劣化要因マップの策定</p> <p>①-5. 電解槽のモデリング</p> <p><2018年度開発目標></p> <p>・気泡観察結果や触媒劣化測定結果が電流電圧特性などに与える影響の直接比較など、モデルパラメータの決定及びパラメータスタディが可能な連成モデルの開発</p> <p><2019年度開発目標></p> <p>・気泡挙動・気液二相を考慮に入れ起動停止を含んだ性能比較を行うために非定常解析に拡張したモデルの開発</p> <p><2020年度開発目標></p> <p>・実機スケールの検討、システムの概念設計を始めるために実機スケールの解析を可能とする、拡張スケールモデルの開発</p>
<p>②固体高分子形水電解触媒の活性・加速評価法開発とそのための劣化要因の解明</p> <p>②-1. 共通的な触媒活性評価法の提案</p> <p><2018年度開発目標></p> <p>・ハーフセルによるアノード触媒の初期活性評価因子の整理とラボ評価用 SPE 型水電解セルの試作・課題抽出</p> <p><2019年度開発目標></p> <p>・ラボ評価用 SPE 型水電解セルの提案</p> <p>・ラボ評価用 SPE 型水電解セル評価条件設定のための基盤データの集積</p> <p><2020年度開発目標></p> <p>・ハーフセル及び SPE 型水電解セルによる共通的なアノード触媒活性評価法の確立</p>
<p>②-2. 劣化要因の解析と加速劣化試験法の提案</p> <p><2018年度開発目標></p> <p>・長時間運転用 MEA 仕様の決定、及び連続電解試験の開始</p> <p>・モデル触媒（イリジウム触媒担持基板）の作製法と特性評価法の確立</p> <p><2019年度開発目標></p> <p>・変動電源や高負荷等の加速条件で長期の電解試験と分析による、劣化要因の提示</p> <p>・電位変動等によるモデル触媒の劣化挙動をプローブ顕微鏡により解析し、モデル触媒の劣化要因を明確化</p> <p><2020年度開発目標></p> <p>・水電解セルの劣化メカニズムの明確化</p> <p>・加速劣化手法の提案</p>
<p>③アルカリ水電解及び固体高分子形水電解電極性能・劣化機構／物質移送解明のための高度解析技術開発</p> <p>③-1. 電気化学計測と放射光計測による水電解の電極性能発現・劣化機構解明の研究開発</p> <p><2018年度開発目標></p> <p>・全反射蛍光 XAS 法・XRD 法用セル、フローセルによる XAS 法・XRD 法用セルの試作</p> <p><2019年度開発目標></p> <p>・アルカリ水電解、固体高分子形水電解に対して、電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の計測法の確立</p> <p>・研究開発協力企業試料に対する解析とそのフィードバック</p> <p><2020年度開発目標></p> <p>・前年度に確立したアルカリ水電解、固体高分子形水電解に対する計測手法を用いた、電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の關係の明確化</p>
<p>③-2. 電気化学計測とレーザー計測によるナノバブル成長機構解明の研究開発</p> <p><2018年度開発目標></p> <p>・レーザー散乱による電極極近傍のナノバブル計測、2次元光検出器による個々のナノバブル計測用の測定系の試作</p> <p><2019年度開発目標></p> <p>・マイクロ電極、平板電極を用いたモデル系に対するオペランド計測系の確立</p> <p><2020年度開発目標></p> <p>・気泡生成状態ごとに、電流密度を操作変数とした、気泡の発生密度、場所によるナノバブルの数密度分布、バブル成長速度</p>

中間目標（2020年度まで）	
と成長方向などの定量化	
④アルカリ水電解用電極触媒の活性評価法開発	
<2018年度開発目標>	・Niを始めとする遷移金属の板状電極触媒の触媒活性評価法の確立
<2019年度開発目標>	・多孔体や発泡体のような形状の異なる遷移金属電極の触媒活性評価法の確立
<2020年度開発目標>	・組成の異なる遷移金属電極の触媒活性評価法の確立 ・触媒劣化時の触媒活性評価法の指針構築
⑤再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムモデルの開発	
<2018年度開発目標>	・再エネ水素製造試験装置及びシステム装置を導入して、水素製造システムモデルの開発、再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムのシミュレーションコンセプトの構築
<2019年度開発目標>	・ラボ試験向けの再エネ水素製造試験システムに水素貯蔵・利用モデルを導入した装置の改良と、テストベッド試験向けの各装置及び水素製造システムの構築を進め、実測データからのシミュレーションによる最適化と予測を実施して、P2G水素製造システムに必要な性能を評価
<2020年度開発目標>	・水素製造装置における各要素項目と電極反応を考慮したモデル構築へと拡張したシミュレーション実施による、電解槽の制御法の最適化と電解槽に対する性能要求事項の明確化
⑥高度解析による劣化機構解析手法の開発	
<2018年度開発目標>	・各機関で使用する触媒試料を立命館大学S Rセンターで測定する輸送機構の確立、標準データの取得完了
<2019年度開発目標>	・複数の劣化条件における触媒試料の軟 X 線吸収分光測定の実施による、各劣化状態における電子構造データの取得、劣化状態と電子構造のマッピング作成
<2020年度開発目標>	・共通の運転条件下における触媒劣化因子を評価可能な X 線吸収分光解析技術の確立 ・運転終了後 4 週間で触媒を評価可能にする測定体制の確立
⑦小型電解槽を用いた評価試験法の開発	
<2018年度開発目標>	・評価設備を構築し、直流電源を用いた暫定的な STD セル各 1 台の初期性能の評価、再現性の検証
<2019年度開発目標>	・精度を向上させた直流および変動電源による STD セル各 4-6 台の稼働、直流および変動電源における電解および停止起動操作の影響確認
<2020年度開発目標>	・直流電源にて 8,000 時間、変動電源にて 1,000 時間の連続稼働の達成、劣化機構を精密な分析手法により解明、STD セルの最終仕様を確定し、各 2-4 台の稼働実現、加速試験プロトコルの暫定仕様の提案

研究開発項目② 大規模水素利用技術の研究開発（委託事業）

【最終目標（2019年度）】

＜水素専焼対応型 Dry Low NO_x 高温ガスタービンの研究開発＞

- ・燃焼試験により、シングルクラスタバーナ出口 NO_x 50ppm 以下を達成する。
- ・燃焼試験により、フラッシュバックを発生しないことを確認する。
- ・大型ガスタービンに適用可能なクラスタバーナの基礎設計を完了する。
- ・燃焼振動を抑制し、安定燃焼できる条件の閾値を算出し、燃焼器体格を決定する。

【最終目標（2018年度）】

＜水素ガスタービン燃焼技術の研究開発＞

- ・50%負荷から定格 100%負荷相当条件にて、NO_x 35ppm 以下の達成
- ・失火や逆火が生じない、安定燃焼の確認

【主な設定根拠】

大気汚染防止法で定められた 70ppm(残存酸素 16%換算値)を下回ることを必須とし、マージンの確保を含めて個々に設定。なお、その後の水素・燃料電池戦略ロードマップの記述とも対応する。

＜水素専焼対応型 Dry Low NO_x 高温ガスタービンの研究開発＞については、「2030 年頃の商用化を実現」という記述。

＜水素ガスタービン燃焼技術の研究開発＞については、「2020 年までに発電効率 27%（1MW 級、発電端効率、LHV）、NO_x35ppm」の記述。

個別テーマの詳細目標は以下のとおり。

**研究開発項目②－ 1 水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発
 (三菱日立パワーシステムズ(株)、三菱重工業(株)) (2019 年度終了)**

中間目標および最終目標 (2019 年度)	
①単孔ノズルの解析・検証 (2017 年度までの開発項目)	
<2017 年度開発目標>	数値解析等により、流速分布および燃料濃度分布が 2016 年に計画した目標値に対しフラッシュバックを発生しない許容範囲にある事を検証する。非燃焼試験による検証を行う。
②縮小モデルバーナの解析・検証	
<2018 年度開発目標>	非燃焼試験によって、燃焼器内部の燃料濃度分布および流速分布が数値計算で求めた計画値に対し、許容範囲内であることを確認する。燃焼試験により、コンバインド効率で 60% (LHV 基準) を達成可能な燃焼条件においてシングルクラスタバーナ出口 NOx 50ppm (15%O ₂ 換算) を達成可能であることとフラッシュバックが発生しないことを確認する。
<2019 年度開発目標> (最終目標)	シングルクラスタバーナのパーミアウト性能 (フラッシュバックが瞬間発生しても回避可能なこと) を数値解析や非燃焼試験により検討して、燃焼試験で確認する。
③大型ガスタービンむけクラスタバーナの構造成立性検討	
<2018 年度開発目標>	研究開発項目①および②の成果を反映し、大型ガスタービン (250MW 級) に適用可能なクラスタバーナの基礎設計を完了する。
<2019 年度開発目標>	研究開発項目①および②の成果を反映し、大型ガスタービン (250MW 級) に適用可能なクラスタバーナの基礎設計を完了する。
④燃焼振動抑制の検討	
<2019 年度開発目標>	クラスタバーナの燃焼振動を予測し、安定燃焼が可能な燃焼器形状を検討する。

研究開発項目②－ 2 水素ガスタービン燃焼技術の研究開発 (川崎重工業 (株)) (2018 年度終了)

最終目標 (2018 年度)	
高圧水素燃焼試験	
<2018 年度開発目標> (最終目標)	高圧水素燃焼試験 (3 回目、4 回目) を実施し、NOx 35ppm 以下の達成と安定燃焼の技術を確立する。

研究開発項目③ 超高効率発電システム基盤技術研究開発（委託事業）

【研究開発項目継続可否審査（2019年度）】

- ・ F Sを行い、技術成立性・経済性確保の見通しを提示すること。
- ・ 上記を通じて、発電効率 75%を達成しうるシステム構成を提示すること。
- ・ 上記を通じて、競合技術の特定及びそれらに対する優位性を提示すること。

【最終目標（2022年度）】

事業終了時に、酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立する。

【主な設定根拠】

水素基本戦略に「水素を安定的かつ大量に消費する水素発電は国際的なサプライチェーンの構築とセットで進めるべき最重要アプリケーション」との記述。

2019年度継続可否審査において最終目標は「2022年度の事業終了時に実機レベルに移行可能な要素技術を確立すべき」という有識者意見。

個別テーマの詳細目標は以下のとおり。

研究開発項目③－1 酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発

（国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人東京工業大学、一般財団法人エネルギー総合工学研究所、川崎重工業(株)）（2019年度で終了）

中間目標および最終目標（2019年度）
<p>①酸素水素燃焼タービン発電システムの技術成立性検討</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 酸素水素燃焼タービン発電システムが技術的に実現可能であることを示す。 ・ 将来の実用化に向けて研究開発が必要な技術課題を明確化する。 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 技術課題の検証方法を提示する。 ・ フェーズ毎のターゲットを検討・設定し、次の開発ステップの小型検証実験に関して、目的や検証すべき実験内容等を検討して実験機の仕様を検討・設定する。
<p>②酸素水素燃焼タービン発電システムの経済成立性の検討</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 水素コスト 20 円/Nm³で 12 円/kWh 以下の発電コストを示す。 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 主な競合技術の経済性データ（発電コスト）を示す。
<p>③実用化シナリオ検討</p> <p><2018年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 競合技術を選定し、多面的な比較評価により当該システムの優位性を提示する。 <p><2019年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 将来の水素燃焼タービン発電システムの普及を想定したときの、実現性が高い水素サプライチェーン（供給側、需要側）の候補を提示する。 ・ 当該システムの技術開発から実用化に至るシナリオ案を検討・提示する。また、将来の電源構成における酸素水素燃焼タービン発電システムの位置付けを検討・提示する。

中間目標および最終目標（2019年度）	
④酸素水素高圧燃焼技術の研究 <2019年度開発目標> ガスタービン内を模擬した高圧場での酸素水素小型バーナの成立性を確認するとともに、タービン入口での熱化学特性を明らかにし、「酸素水素燃焼タービンサイクルの研究」と連携することでサイクル成立性を検討するための燃焼特性を取得・提供する。	
⑤酸素水素燃焼タービンサイクルの研究 <2019年度開発目標> ・発電効率75%を達成可能な酸素水素燃焼発電サイクルを提案する。	
⑥システム最適化・合理化検討 <2019年度開発目標> ・酸素製造設備等の付帯機器を含む総設備費および送電端効率について、経済的に合理的な酸素水素燃焼タービン発電システムプラント仕様案を提示するとともに、その実現に必要な技術課題を明らかにする。	

研究開発項目③：従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発

【最終目標（2022年度）】事業終了時に、酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立する。

研究開発項目④ エネルギーキャリアシステム調査・研究（委託事業）

【最終目標（2018年度末、事業は2019年6月終了）】

・前年度までに開発した大面積化及び水素分離性能向上を行ってきた水素分離膜を用いて、低コストシール法と効率的熱伝導方式を組み合わせた実用的なモジュール構造を開発する。また、1,500時間の耐久試験により劣化率を検証し、少なくとも15,000時間程度（脱水素触媒と同等以上）の実用的な耐久性があることを見通す。水素分離膜型脱水素プロセスの経済的優位性の確認、商業化を見据えた水素分離膜型脱水素のパイロットプラントの概念設計を完了する。

【主な設定根拠】

水素基本戦略に「2030年頃に商用規模のサプライチェーンを構築し、年間30万t程度の水素を調達するとともに、30円/Nm³程度の水素コストの実現を目指す。」との記述。

個別テーマの詳細目標は以下のとおり。

研究開発項目④-1 水素分離膜を用いた脱水素（2019年6月終了）

（千代田化工建設(株)、公益財団法人地球環境産業技術研究機構）

最終目標（2019年6月）	
①水素分離膜型脱水素パイロットプラントの概念設計及び他用途展開の検討、及び他用途展開に向けた分離膜型脱水素反応器の優位性の把握 <2019年6月開発目標> ・モジュール化検討結果を反映した水素分離膜型パイロット試験装置の概念設計を完了 ・主に水素分離を対象とした、分離膜の他用途展開先の調査	
②実用的モジュール構造の開発 <2019年6月開発目標> ・低コストシール法と効率的熱伝導方式を組み合わせた実用的な新モジュール構造の開発	

最終目標（2019年6月）	
③耐久性評価	<p><2019年6月開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 1,500時間の耐久試験により劣化率を検証し、少なくとも1万5千時間（脱水素触媒と同程度）以上の実用的な耐久性があることを見通す

研究開発項目⑤ 炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査（委託事業）

【中間目標（2020年度）】

- ・基礎研究の可能性調査を行い、技術成立性を理論的・科学的に提示する。また、当該技術を活用して水素を消費者まで安価かつ大量導入する実用化シナリオ原案を構築して経済性を提示する。
- ・科学的根拠をもって実用面を踏まえた上で、長期目標としての20円/Nm³を念頭に置いて、本事業のアウトカム目標である2030年における水素コスト30円/Nm³を目標に、当該技術がどのように貢献するか定量的に示す。当該実用化シナリオ原案を作成するにあたっては、国等が示す関連ロードマップに示す市場規模を用いることとする。

【最終目標（2022年度）】

- ・上記の審査結果を踏まえ、継続することとなった場合には別途定める。

【主な設定根拠】

水素基本戦略に「高効率な水電解・人工光合成、水素高純度化透過膜など、新たな水素製造技術に係る研究」という記述。

水素・燃料電池戦略ロードマップのアクションプランに「化石資源から水素と炭素を直接分離する水素製造等の技術開」という記述。

個別テーマの詳細目標は以下のとおり。

研究開発項目⑤-1 膜反応器を用いたメタン直接分解によるCO₂フリー水素製造技術 （公益財団法人 地球環境産業技術研究機構）

最終目標（2020年度）	
①精密に細孔径を制御したシリカ膜およびPd膜の開発および評価	<p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 500℃以上の耐熱性を有し、水素透過率 $5 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$、透過率比 (H₂/CH₄) 3,000以上の透過分離性能を有する分離膜を開発
②膜反応プロセスに好適な触媒の探索及び開発	<p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 低温活性（500～600℃）を有し、メタン直接分解用膜反応器においてメタン転化率60%以上の触媒を見出すとともに、コーキング対策の指針を得る。
③膜反応装置の開発及び有効性の実証検討	<p><2020年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ メタン直接分解用膜反応器の有効性を実証し、最適反応条件を見出す。
④水素製造および分離膜技術に関する情報収集・発信	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水素製造および分離膜技術に関する国内外の最新の研究動向について広く情報を収集する。

研究開発項目⑤-2 アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造
(国立大学法人 広島大学) (2019年度終了)

最終目標 (2019年度)
<p>①反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討</p> <p>①-1 セラミック材料粉末を用いた酸化ナトリウム・過酸化ナトリウムとの反応性評価</p> <p>①-2 セラミック材料の焼結体を用いた酸化ナトリウム・過酸化ナトリウムとの反応性評価</p> <p>①-3 気相および液相のナトリウムについて、配管部材との腐食性能評価</p> <p><2019年度開発目標></p> <p>ターゲットとする反応である以下の反応 $2\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{Na}$ において、現状キャラクタリゼーションが行われていない反応生成物の過酸化ナトリウム (Na_2O_2、あるいは、起こりうる反応生成物のキャラクタリゼーション)がなされること。</p>
<p>②反応制御技術の検討</p> <p>②-1 熱風流入式の流動層を用いた反応容器の設計を行い、反応制御技術の検討</p> <p>②-2 点集熱式の加熱方法を用いた反応容器の設計を行い、反応制御技術の検討</p> <p>②-3 不活性ガスと水素の分離法の検討</p> <p>②-4 三段階の熱化学水素製造における熱力学データの取得</p> <p>②-5 スケールアップ後のコスト試算と本技術の成立性検討</p> <p><2019年度開発目標></p> <p>ターゲットとする反応である以下の反応、あるいは水分解に資する反応 $2\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{Na}$ において $2\text{Na}_2\text{O}$ の70%以上の Na_2O_2 への反応進行が確認できることを目標とする。</p>

研究開発項目⑤-3 メタン直接分解による水素製造に関する技術調査

((株)伊原工業、国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学

[再委託先] 愛知県 (あいち産業科学技術総合センター) , 学校法人東京理科大学)

中間目標および最終目標 (2020年度)
<p>① 水素製造効率を向上するための板触媒の調査</p> <p>② 反応炉設計のための基礎データ収集実験</p> <p>③ 内加熱式反応炉の小型試験装置を製作実験</p> <p>④ 生成炭素及び生成ガスの特性解析</p> <p>⑤ 板触媒の微細構造の解析</p> <p>⑥ ガスの滞留防止と加熱促進による水素製造効率向上技術の調査</p> <p><年度開発目標></p> <p>[2019年度目標]</p> <ul style="list-style-type: none"> 炭素の生成メカニズム及び触媒表面の微視的構造と生成炭素の特徴の関係を解明する。 想定する各システムのエネルギーバランス (熱収支・物質収支) の比較および経済性を評価するプログラムを開発し分析を行う。 ラボスケール反応炉内での流動挙動、温度分布、炭素生成挙動等からメタン直接分解による水素製造反応炉の基本構造指針を得る。 ラボスケール反応炉において、炉内温度 800℃で生成ガス中の水素濃度 50%を達成する条件を示す。 <p>[2020年度目標]</p> <ul style="list-style-type: none"> 小型反応テスト炉において、触媒探索及び触媒構造の改良により反応炉温度 800℃において生成ガス中の水素濃度 50%を達成する。 水分解水素製造システムや未分解メタンを密閉系純酸素燃焼器で利用するシステムの伝熱現象や燃焼反応に関する数値解析を行い、本水素製造装置のエネルギーバランス (熱収支・物質収支) と経済性を評価する。 実用化開発 (次フェーズ) へ向けた課題を抽出、整理するとともに、水素製造量 10~20Nm³/h 程度を達成する水素大量製造装置の概念を提示し、水素コスト 30 円/Nm³を達成可能か評価する。

研究開発項目⑤－４ メタンの熱分解による水素製造技術の研究開発

(国立研究開発法人産業技術総合研究所、(株)IHI、国立大学法人京都大学)

中間目標および最終目標 (2020 年度)
<p>①メタン熱分解 CO₂ フリー水素製造に適した新規触媒の開発</p> <p><2019 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 固体炭素回収と触媒再生が可能な高効率メタン分解に適した触媒の探索を行う。 <p><2020 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 本タスク 1 年目の触媒探索作業において絞り込んだ触媒について、反応温度が 800～900℃、メタン転換率 80%以上、炭素生成率が重量比で 10 倍以上、連続的に分離回収可能な炭素を生成することを目標に、触媒の高機能化を進める。開発した触媒はタスク②へ供給し、連続反応装置への適応性と技術的課題を明らかにする。
<p>②炭素回収型メタン熱分解を実現する反応器およびシステムに関する具体的検討</p> <p><2019 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 入手可能な触媒を用い、小型の固定層、流動層、ロータリーキルン等異なる形式のリアクターで反応試験を実施し、異なる気固接触あるいは流動条件の下でメタン分解反応特性（メタン分解率、生成炭素の発生挙動など）を明らかにする。それらの実験的知見をもとに生成炭素の分離回収の可能性や課題、効率的な炭素回収型連続水素製造に適した反応器形式の探索と技術課題を明らかにする。 <p><2020 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> タスク①から供給される触媒、本タスク一年目の試験結果に基づいて選定するリアクターおよび反応条件下でメタン分解の連続的反応試験を行い、触媒の活性および副生炭素製造率を調べる。得られたデータから反応速度の動的解析を行い、反応器設計に必要な設計パラメータを求めていく。
<p>③固体炭素の有効利用に向けた調査、分析、評価</p> <p><2019 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> メタン分解による固体炭素の物性評価（形態、結晶性など）を行い、カーボンブラック代替の可能性について経済性を含めて評価する。カーボンナノ繊維をフィルターとしてガラス繊維樹脂複合材（曲げ強度 150MPa）を上回る樹脂複合材料を作製する。 <p><2020 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 自動車用途に適合する曲げ強度 400MPa 以上の複合材開発への見通しを明らかにする。
<p>④提案技術の社会導入を想定した固体炭素の安全性評価</p> <p><2019 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> メタン熱分解で生成される固体炭素の粉じん飛散に着目して排出シナリオを作成し、大気シミュレーションを実施して、事業所内の従業員および事業所周辺の住民の曝露濃度を推定し、世界のいくつかの機関・団体が提示している許容曝露濃度にもとづいて、ヒト健康リスクのスクリーニング評価を行う。 <p><2020 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 固体炭素の回収・加工・利用のライフサイクル段階まで評価のバウンダリーを拡張し、排出シナリオをもとに従業員および住民の曝露濃度を推定し、ヒト健康リスク評価を行う。そして、メタン熱分解で製造される固体炭素の有効利用におけるリスク管理手法の課題を抽出する。
<p>⑤メタン分解による CO₂ フリー水素製造プロセス構築のための効率および熱・物質マネジメント検討</p> <p><2019 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> メタン分解による CO₂ フリー水素プロセスにおいて、熱的自立操作のためにプロセス内の熱交換スキームを検討し、水素損失率（メタン中の水素のうち、プロセス内で消費される割合）を 40%以下にするプロセスの成立可能性を検討する。バイオマスとバイオマス炭化物の共熱分解により水素が有効に得られる条件を明確化する。 <p><2020 年度開発目標></p> <ul style="list-style-type: none"> 天然ガスあるいはバイオガスを原料とし、CO₂ の化学原料転換プロセスと水素製造プロセスのインテグレーション等により、水素損失率を 30%以下にするプロセスを構築する。バイオマスとバイオマス炭化物の共熱分解、水素転換率（バイオマス中の水素が水素ガスに転換される割合）60%を達成できる条件を明らかにする。
<p>⑥新規プロセスの技術成立性および事業性検討</p>

中間目標および最終目標（2020年度）

<2019年度開発目標>

- ・ タスク①、②から把握される反応の基礎データ（温度、反応速度、メタン転換率等）をもとに生成水素量をベースとしたメタン熱分解リアクターの形状等を検討する。またリアクター以外の補機および必要なプロセスを検討し、プロセスフロー図を作成することで、プラント全体の概念設計を行い、プロセス全体の概算コストを算出する。事業性検討では IRR10%以上を達成するために必要な条件（スケール、水素販売価格等）を見出す。

<2020年度開発目標>

- ・ タスク①～⑤に対する取り組みにより明らかになる基礎データをもとに、プロセスフロー図を作成し、プラント全体の概念設計を行い、プロセス全体の概算コストを算出する。事業性検討では、2020年度のタスク①～⑤の成果を反映させた上で IRR10%以上を達成するために必要な条件（スケール、水素販売価格等）を見出す。

⑦提案技術の社会実装のためのシナリオ策定・開発計画検討

<2019年度開発目標>

- ・ これまでの報告の調査および成果を整理し、大規模利用、分散型利用の其々において、シナリオ検討のために必要となるケース設定、境界および前提条件を整理する。これらの知見を基に、シナリオ・開発計画策定の枠組みを構築する。

<2020年度開発目標>

- ・ 本研究により得られる技術成立性および事業性検討に関する成果等を活かしながらコスト試算等を行い、開発した水素製造システムの社会導入に向けたシナリオ策定及び開発計画を構築する。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

事業の目標を達成するために、以下の研究開発項目の研究を行う。これらの事業は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、原則として委託事業として実施する。

研究開発項目①：「水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発」

アルカリ水電解、固体高分子形水電解（PEM）、高温水蒸気電解法（SOEC）等の水電解各方式において、電極触媒の性能発現と劣化機構の高度解析、電解槽の劣化機構、劣化評価法に関する共通的解析を行い、性能向上へフィードバックする。また各方式に応じた材料やシステムの高度化に向けた指針を確立するとともに、次世代材料等を検討する。

なお、本研究開発によって得られた設計指針の原案等の成果は、産業界（水電解メーカーや材料メーカー等）と共有することで研究開発を促進するとともに、耐久性等の評価方法については必要に応じて国際間で情報共有を図る。

- ①-1 アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発
- ①-2 高温水蒸気電解技術の研究開発
- ①-3 非貴金属触媒を利用した固体高分子系水電解の変動電源に対する裂開解析と安定性向上の研究開発
- ①-4 アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発
- ①-5 高性能・高耐久な固体高分子形及び固体アルカリ水セルの設計開発
- ①-6 アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化

研究開発項目②：「大規模水素利用技術の研究開発」

水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発（大型/数百MW）と水素ガスタービン燃焼技術の研究開発（小型/数MW）を行う。

大型では、単孔ノズル及びシングルクラスタバーナの解析・検証を通して、シングルクラスタバーナのパーミアウト性能（フラッシュバックが瞬間発生しても回避可能なこと）を数値解析や非燃焼試験により検討して、燃焼試験で確認する。

小型では、2 MW級ガスタービン用ドライ低NOx燃焼器の設計・試作及び改良を行い、高圧水素燃焼試験を通して、低NOxで失火や逆火が発生しない安定燃焼を実現する。

- ②-1 水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発
- ②-2 水素ガスタービン燃焼技術の研究開発

研究開発項目③：「超高効率発電システム基盤技術研究開発」（2018～2019年度）

次世代発電システムとして期待される酸素水素燃焼タービン発電システムについて、酸素水素燃焼特性等に関する要素研究等によって技術的な実現可能性を示す（技術成立性、経済成立性、発電効率 75%、優位性）とともに、将来の実用化のための技術課題を明確化し、その検証方法を提示する。

なお、本研究開発項目は 2019 年度に研究開発項目継続可否審査を行い、次の開発ステージへの以降の可否を判断する。

③-1 酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発

研究開発項目③：「従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発」（2020～2022年度）

水素社会の実現に向けて 2040 年以降という長期的視点から、従来の開放系サイクル技術とは一線を隔す超高効率の発電技術を現時点から検討しておく必要性を踏まえ、従来技術を凌駕するポテンシャルを有する超高効率発電を対象として、燃焼器やタービン等の業界共通の要素研究を推進することにより、それらの基盤技術を確立する。

③-2 酸素水素燃焼タービン発電の共通基盤技術の研究開発

研究開発項目④：「エネルギーキャリアシステム調査・研究」

小型・分散型の脱水素装置として最適と考えられる、脱水素反応器と生成水素の分離精製器をコンパクトに一体化したメンブレンリアクターの実用化に必須な要素技術の確立を目的として、装置の小型化を可能とする水素分離膜およびそれを用いたメンブレンリアクターのシステムについて技術課題及び経済性を検討する。

④-1 水素分離膜を用いた脱水素（MCH）

研究開発項目⑤：「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査」

多様な水素化合物等を水素源として安価かつ大量の水素を製造する、二酸化炭素を排出しないコア技術の可能性を調査する（基礎的な実験等の研究開発を含む）。この際、エネルギー収支及び効率、技術成立性、経済性並びに水素製造時に副生される固体炭素等の有効活用法を検討する。

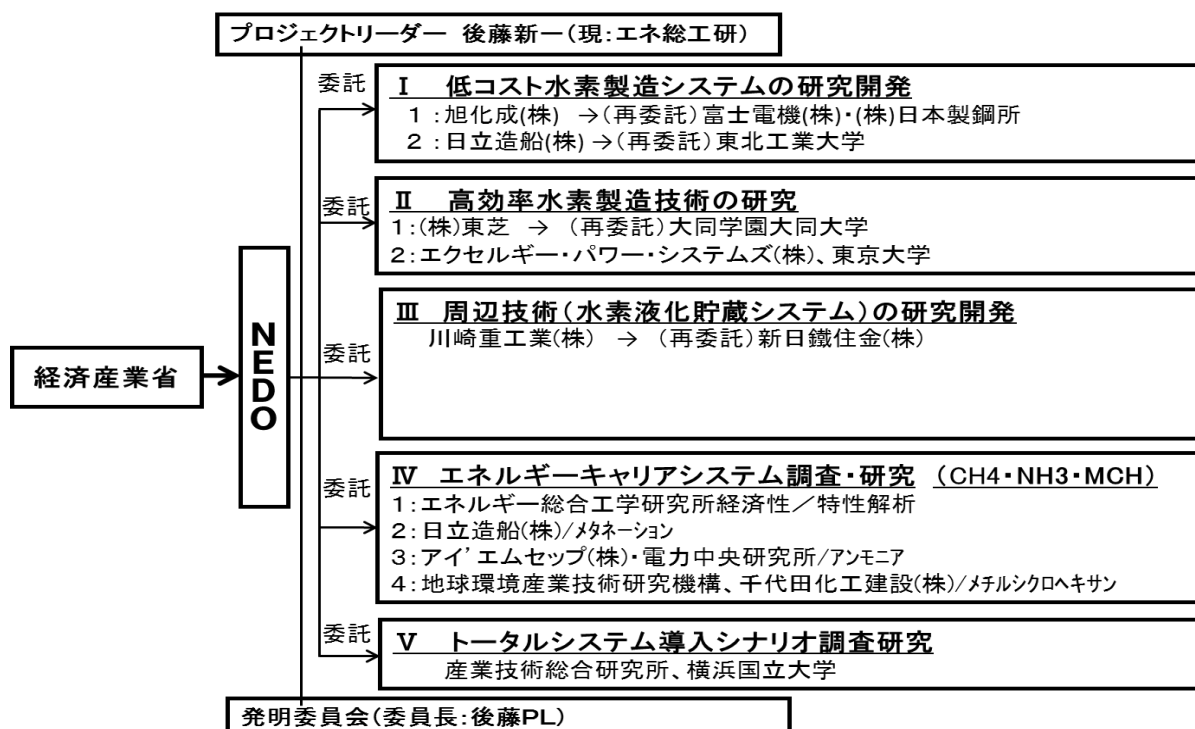
- ⑤-1 膜反応器を用いたメタン直接分解による CO₂ フリー水素製造技術
- ⑤-2 アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造
- ⑤-3 メタン直接分解による水素製造に関する技術調査
- ⑤-4 メタンの熱分解による水素製造に関する技術調査

2.2 研究開発の実施体制

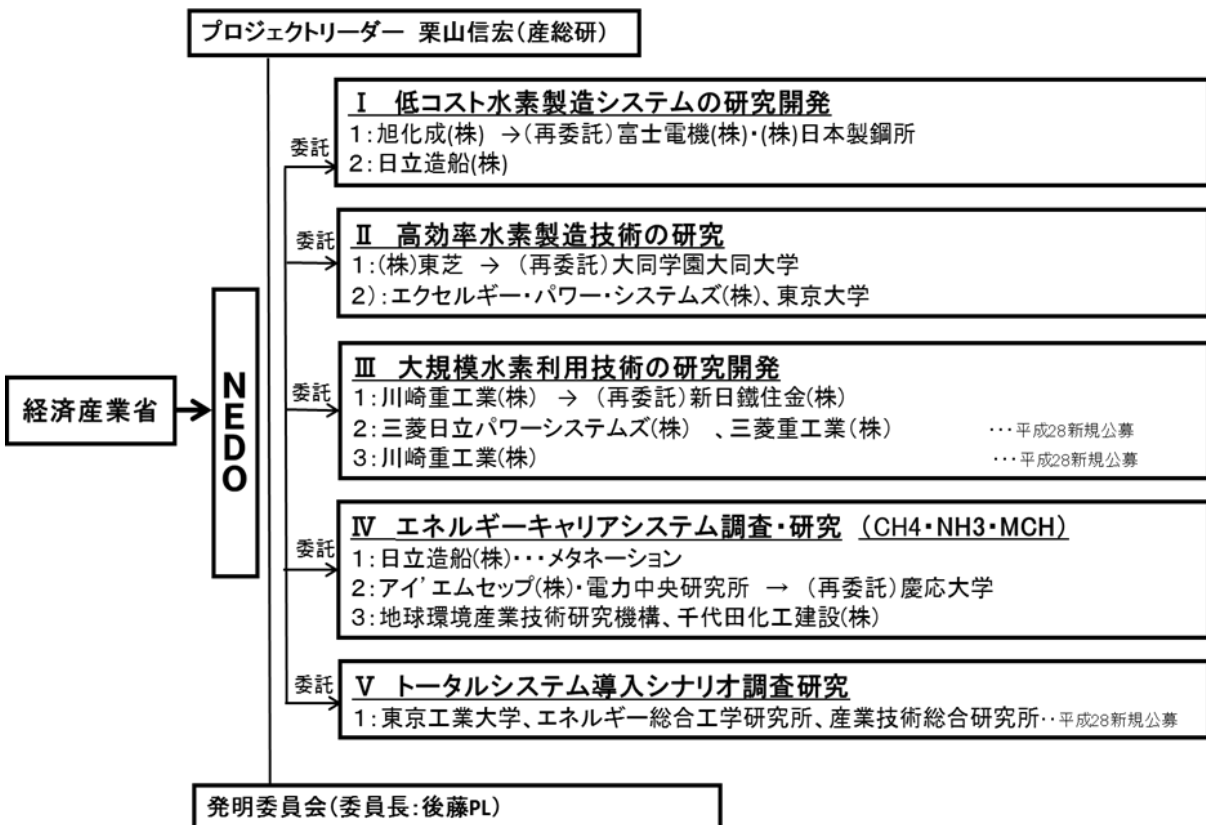
2013年から現在までの実施体制を以下に示す（2016年と2018年に体制変更、その他に事業終了や新規公募に伴う変更あり）。

なお、NEDOは2018年度から本事業のプロジェクトマネージャー（以下「PM」という）はNEDO次世代電・水素部 原大周氏を任命（2013年度から2017年度までは大平英二氏）、2016年度から技術的観点からPMを支援するプロジェクトリーダー（以下「PL」という）は産業技術総合研究所 栗山信宏氏（2013年から2015年度までは後藤新一氏）を任命した。

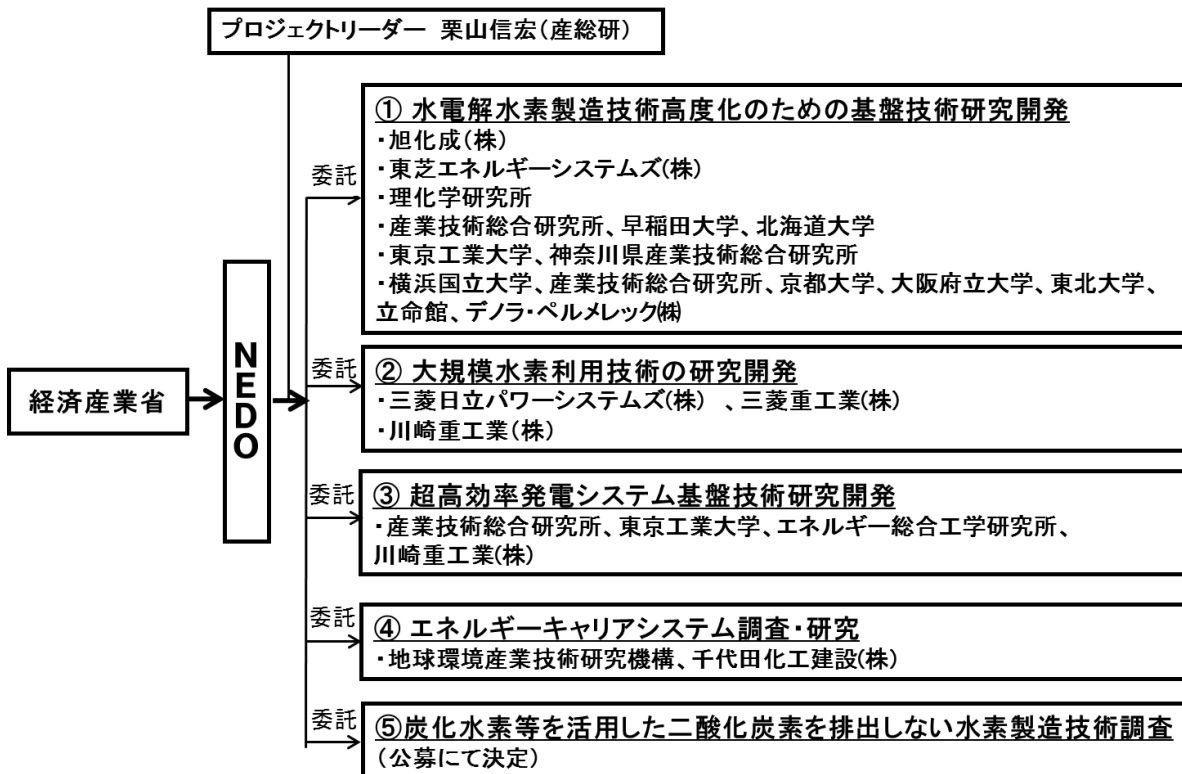
実施体制の全体図（2013～2015） / PM：大平英二



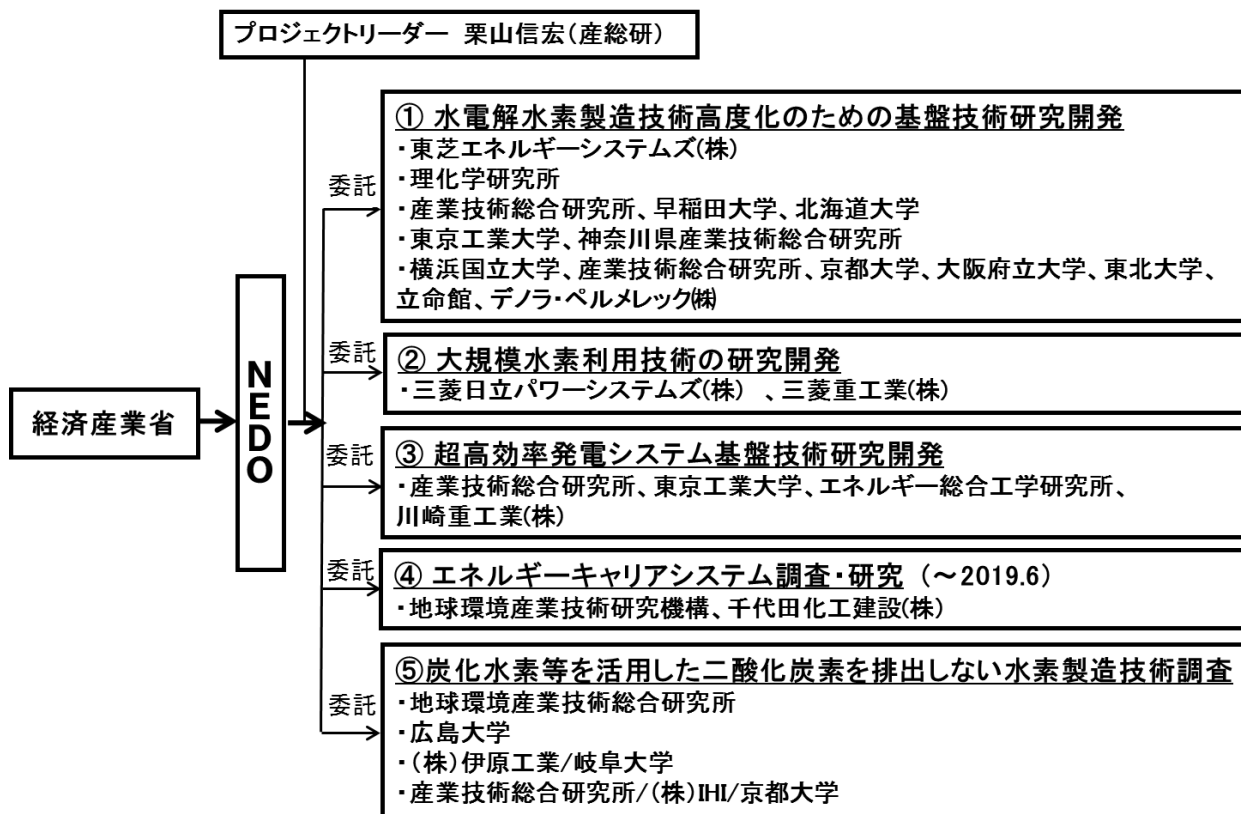
実施体制の全体図（2016、2017）／PM：大平英二



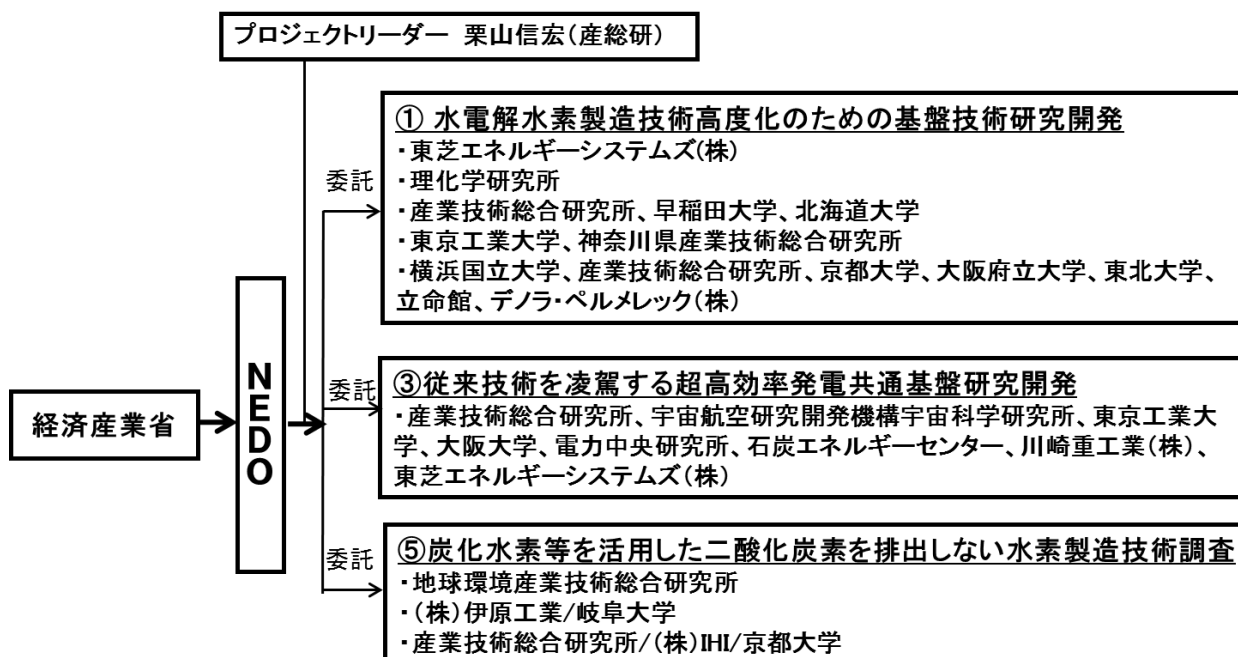
実施体制の全体図（2018）／PM：原 大周



実施体制の全体図（2019）／PM：原 大周



実施体制の全体図（2020）／PM：原 大周



2.3 研究開発の運営管理

(1) 研究開発の進捗管理の妥当性

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、経済産業省及び PL や研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、事業の目的及び目標に照らし適切に管理運営する。

具体的には、必要に応じて研究開発実施者が設置する WG 等における外部有識者の意見を実施計画に反映させると同時に、定期的に NEDO や PL は研究開発実施現場を訪問して、実施計画に対する進捗度合の報告を受けるとともに遅延や相談が有れば NEDO の観点から助言する。また、事業を効率的に推進するために、本事業の実施者間での報告会を開催し、実施者間及び関係産業界等との情報の共有と共通認識を図ることとする。

(2) NEDO と実施者との面談及び意見交換について

各実施者が設置する WG 等へ出席し、実施計画に基づく「進捗状況の報告、課題の抽出、今後の実用化に向けた見通し等」について聴取し状況を把握すると共に NEDO の観点から助言した。更に、H28 年から 2 回/年の頻度で全実施者との進捗フォロー会議の場を設定し、現在も継続して実施しているところ。この様に実施計画書のスケジュールに対する進捗状況のタイムリーな把握により、P L からの技術専門的なアドバイスのみならず、検査契約等の観点からも積極的に研究開発事業者を支援した。特に、水電解のテーマに関する進捗フォロー会議においては、評価条件の共有化による研究開発の効率化と、全テーマの知財活動の強化を目的として、「仕上げたい技術の姿」という情報共有ファイルを設定し、事業実施者の知財化意識と出願計画管理の強化に貢献している。更に、毎月 1 回 PL を交えて NEDO、経済産業省関係者で開催する P L 定例会議を開催し、事業関連情報を共有すると共に今後の政策への反映等を議論している。更に、事業に関係する NEDO が保有する最新情報を「Newsletter」というタイトルの文書に整理して継続的に事業実施者へ配信し、研究開発推進に役立てた。

なお、計画段階で設定した年度毎のマイルストーンに対する成果は、毎年度末に提出される報告書（中間年報）で確認している。また、各事業の予算の執行状況と執行内容は年 4 回、予算執行調査票により詳細を確認して管理するとともに、年 2 回の会計実地検査で領収書等の証拠書類と共にその適切性を確認している。

(3) 他事業及び事業内の連携体制について

NEDO は、水素製造から利用まで多様な技術を全方位でカバーしつつ事業を進めている。具体的には、定置用固体酸化物形燃料電池開発として「固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発(P13001)」、水素利用全般の技術開発として「水素利用技術研究開発事業(P13002)」、基礎基盤の提案公募型技術シーズ発掘として「NEDO 先導研究プログラム(P14004)」、水素サプライチェーン構築として「水素社会構築技術開発事業(P14026)」、燃料電池自動車等用の固体高分子形燃料電池開発として「固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発事業(P15001)」、燃料電池自動車用水素ステーション開発として「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業(P18011)」がある。

本事業は水素社会の実現に向けて水素製造から輸送、貯蔵、利用までの多様な分野において、F S 的に当該技術の有用性を探る基礎研究としての位置付けであり、この研究開発成果が他の大型の研究開発事業の技術シーズに展開されていくことを期待するものである。そのため、毎年大規模に公開の場で開催する成果報告会、2019 年度から開催している技術シーズとニーズのマッチングの場である NEDO 評価ウィークの場等、異なる事業実施

者が密に意見交換する場を設定するとともに、NEDO 及び PL が事業実施者と直接意見交換をする進捗フォロー会議等を通じて収集した成果情報を他事業実施者へ橋渡しする等の連携を図っている。

本事業に係る事業

事業番号	事業名	内容
P13001	固体酸化物形燃料電池等 実用化推進技術開発	2030 年頃に社会実装される定置用を想定した固体酸化物形燃料電池の高効率化、高耐久化等の研究開発。
P13002	水素利用技術研究開発事業	2020 年以降の FCV 及び水素供給インフラの本格普及に向けて、FCV 及び水素ステーション関連に資する事業。
P14004	NEDO 先導研究プログラム	中長期的なエネルギー・環境課題を解決していくために必要となる技術シーズ、特に既存技術の延長とは異なる、飛躍的なエネルギー効率の向上や低炭素社会の実現に資する有望な技術の原石を発掘するもの。
P14026	水素社会構築技術開発事業	水素社会の本格的実現を目指して水素発電の本格導入といった水素需要の拡大や、その需要に対応するための水素サプライチェーンの構築を目指した一体的な取り組み。
P14021	水素利用等先導研究開発事業	2040 年以降という長期的視点を睨み、水素等の「カーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢」としての地位を確立させることを目指し、先導的な研究開発に主として行う。
P15001	固体高分子形燃料電池利用 高度化技術開発事業	固体高分子形燃料電池(PEFC)の社会への本格実装に向けて、PEFC の大量普及に必要な要素技術を確認する。
P18011	超高压水素インフラ本格普及 技術研究開発事業	2025 年以降の FCV 及び水素ステーションの本格普及、2030 年以降の水素ステーションの事業自立化に向け、国内規制適正化・国際基準調和・国際標準化に関する研究開発、FCV 及び水素ステーション用低コスト機器・部品等の研究開発を行う。

2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

(1) 研究開発成果の取扱い

①成果の普及

開発された成果を我が国の産業競争力強化に繋げるため、事業者だけでなく、潜在的なユーザー等の意見を聴いて、標準化戦略や成果の市場への受容を促すための安全・性能証明の方策を含む事業化戦略を策定する。また、途中段階で得られた成果は他の施策と連携しつつ、事業化を図る。具体的には、毎年大規模に開催する成果報告会、2019 年度から開催している技術シーズとニーズのマッチングの場である NEDO 評価ウィーク等、多様なユーザー候補が参加して意見交換する出来るようにすることを重視している。

②知的財産権の取扱い

委託研究開発の成果の知的財産権は、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条の規定等に基づき、原則として委託先に帰属させることとする。

また、推進体制を構成する企業等が相互に連携しつつ、研究開発及び事業化を効果的に推進するために、知的財産管理規程等を定めることを求める。

(2) 基本計画の変更

NEDO は、関連技術や市場の動向を随時把握し、最新の技術や知見を取り込むこととし、毎年度、必要に応じて、基本計画に掲げられた研究開発プロジェクトの目標や研究開発の内容を評価し、必要に応じて変更する。

(3) 根拠法

本研究開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 15 条第 1 項第一号二に基づき実施する。

(4) その他

①他省庁の施策との連携体制の構築

NEDO は、文部科学省が所管する独立行政法人科学技術振興機構の「戦略的イノベーション創造プログラム」における「エネルギーキャリア研究開発計画」など基礎研究の実施体制と緊密に連携するため、各プロジェクトの統括者、所管省庁等の課室長等から構成される連携体制に参画する。当該連携体制では、プロジェクト間の事業計画の調整、成果の共有や取扱いの調整、設備の共用や研究人材交流の促進等について協議を行うものとする。

②大学における人材の流動化等に係る取組

大学の研究者の企業等への出向を容易にするための取組、守秘義務を課した形でのポスドク等のプロジェクト参加など、本プロジェクトを活用した実践的人材の育成への取組を促すこととする。また、大学側も、これらの取組を促進する方策について検討するものとする。

③国立研究開発法人産業技術総合研究所の協力

独立行政法人産業技術総合研究所において独自に実施しているエネルギーキャリアに関連した安全性評価等の成果について定期的に情報共有や意見交換を行い、プロジェクトの研究開発又は事業化の方向性を検討する等の連携を求めていくものとする。

④工業所有権情報・研修館の協力

本プロジェクトにおける知的財産に関する戦略策定や管理方法の検討に当たっては、必要に応じて、独立行政法人工業所有権情報・研修館に知財プロデューサーの派遣を求める。

3. 情勢変化への対応

NEDO は、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等、柔軟かつ迅速に対応してきた。具体的には以下のとおり。

- (1) 2013年6月、戦略的イノベーションプログラム（SIP）が創設された。この情勢に対応し、研究者間の交流が促進されるよう、SIP との連携を図った。（ワークショップの開催 2015年3月～2017年3月、計4回実施）
- (2) 2014年、欧米のアカデミアの研究者を中心に水電解評価技術構築を目的として IEA Annex 30 が開始された。NEDO 事業委託機関の研究者を中心に継続してワークショップに参加。2019年9月からは事業者主体で PME 型ラウンドロビテストに参画、主要メンバーとして議論推進を継続中。

- (3) 2016年3月、水素利用拡大を見据えて、「大規模水素利用技術の研究開発」の公募を実施。水素専焼タービン関連テーマを2件採択。
- (4) トータルシステム導入調査研究のテーマについて、より活動を強化する為、新たに東京工業大学を加えた体制とし、活動の推進を実施。
- (5) 2018年3月、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を用意するためのエネルギーキャリア技術及び大規模水素利用技術の先導的な研究開発に取り組むために、酸素水素燃焼タービン発電関連を1件、水電解技術関連テーマを5件採択。
- (6) 2018年3月、内閣府「ボトルネック課題研究会」における“CO2 利用に当たってのボトルネック課題及び研究開発の方向性”が議論された、水電解以外の水素製造の重要性に関して言及された。これに対応し2019年1月、二酸化炭素を排出せずに安価かつ大量の水素を製造する技術開発として、「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査」の公募を実施、4件採択。
- (7) 2019年5月、研究開発項目③「超高効率発電システム基盤技術研究開発」の継続可否審査を議論し、経済合理性を考慮しつつ目標を変更して継続することが妥当だと結論した。
- (8) 2019年6月、同年3月に経済産業省が設定した「水素・燃料電池戦略ロードマップ」において、研究開発の進捗度合を毎年度レビューすることとされたため、「NEDO 評価ウィーク」と題して研究開発成果とユーザー企業のマッチングの場を提供し、MHPS 社の研究開発成果とオランダバッテンフォール社との技術シーズの連携体制を構築。
- (9) 2020年3月、1,400℃級クローズドサイクルの共通基盤技術開発に取り組むこととして、超高効率発電を対象として、「従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発」の公募を実施、1件採択。

4. 中間評価結果への対応

2017年度に実施された中間評価において、事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント、研究開発成果については概ね良好であると評価され、将来を見越した先導的な研究開発でありながらも、経済的にも水素が社会に導入しうる状況を実現すべく実用化を念頭に置いた形で成果が得られているとの評価を得た。また、水素を取り巻く環境は大きく変化していくことが予想され、世界動向を見つづ方針の見直し、テーマの入替などを交えながら対応していくなど、研究途中であっても環境に応じて柔軟に対応することが期待された。

特に日本のエネルギー海外依存度の高さに鑑みると再生可能エネルギーに基づいた自立的な社会形成を目指す場合には技術的には変動の大きなエネルギー利用のための水素利用技術が必要となる。また、再生可能エネルギーを主とする社会におけるバックアップ発電は燃料電池コジェネレーション等の分散電源が主体となることも想定される中で大規模なバックアップ発電に対する考え方も取り巻く環境の変化を読み取りながら対応することが求められた。このほかプロジェクトごとの基礎や実用といったフェーズの違いに応じた目標設定や先の長い技術開発においてもスムーズに実用に移行できる研究開発と技術蓄積がされるようなマネジメントが求められた。

また、NEDOは各研究開発項目の進捗と整合性・連携状況の確認を行うと同時に、政策動向・業界技術動向なども把握して、必要な対策を合議した結果、特に後期5年は以下の研究開発項目を新たに加えて実施した。

- ・水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発
- ・超高効率発電システム基盤技術研究開発／従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発
- ・炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査

これらの取り組みの結果、事業における研究開発は基礎基盤の研究開発フェーズにシフトし、大学・国研といった事業化フェーズの役割を直接担うことが想定しにくい事業者単独で担う事業の比率が増加した。そのため、事業にお

ける研究開発成果が社会実装段階に向けてどの様な貢献を果たすのか、事業成果の実用化を担う企業に橋渡ししていくためにも、目標とするアウトプットのイメージを共有するなど、確度高く社会実装されるための活動を推進した。なお、中間評価における指摘事項への対応は以下の通りである。

指摘事項 1 : 欧州、特にドイツにおける P 2 G の実証事業は活発に行われているので、常に最新の情報を更新するよう定期的な情報収集を実施する。必要に応じて、目標の妥当性も検討するべき。

対 応 : 多様な水素製造技術を俯瞰する調査を実施し、世界中の水素製造技術を対象として技術開発の進捗や各技術の関係性を整理すると共に現在から取り組むべき新たな技術課題とその目標を検討することとした。また、再生エネルギー利用に対応するため変動劣化メカニズムの解明を電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発で着手し、標準化に対する対応としては欧米のアカデミア中心に始まっている IEA ANNEX30 (水電解技術のワークショップ) を通じて世界動向を把握するとともに、国内のアカデミアと企業間において技術情報を共有する場の形成促進など取り組んでいる。

指摘事項 2 : オープン/クローズに関しては、慎重に実施者と協議し、特許/ノウハウの構成を整備していく。また新規テーマについては、基礎的な研究開発に注力し、新たな発見・発明を促すこと。

対 応 : 「NEDO知財マネジメント基本方針」及び「経済産業省委託研究開発における知的財産マネジメントに関する運用ガイドライン」に則り戦略を検討した。特にアカデミア成果についてはオープン/クローズ戦略を進めるうえで重要な戦略としての出願やノウハウ指定などの権利主張についても丁寧な議論を推奨すると共に、「仕上げたい技術の姿」という定型プラットフォームを構築して、実施計画書に記載する実施項目のアウトプットの絵姿を見える化したことで具体的な議論を推進することを可能とした。また、知財届出申請書のフォーマットを変更し、成果の公開時に権利化していない場合はその理由も明記することで、知財創出に対する気付きを醸成することとした。

指摘事項 3 : 研究開発レベルが基礎段階のテーマについては、実用化に向けたフォローを行う。

対 応 : 年 2 回行っている PL 中心の進捗フォローアップ会議で、成果の実用化に向けたイメージを具体的に示すように意見交換を行った。基礎的なテーマ (研究開発項目③超高効率発電システム基盤技術研究開発、研究開発項目⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査) では、2 年目に外部有識者による継続可否審査を実施し、実用化に向けた体制変更等を議論した。また、指摘事項 2 への対応で記載した「仕上げたい技術の姿」では開発基礎段階の技術の社会実装される姿について思考展開するフォームを作成、活用し、技術開発の社会実装のためのボトルネックや制約条件、また想定する製品の競合製品に関して思考展開することを試みている。さらに顧客イメージや市場について思考展開することで、オープンクローズや標準化に向けた議論を期待し、ビジネスモデルキャンパス等の分析ツールの活用も併せて事業者との対話を継続している。

指摘事項 4 : 新規テーマについては事業継続審査や中間評価等を実施し、実用化に向けた研究開発となるようマネジメントを行う。比較的実用化に近いテーマについては、引き続き研究開発を実施し、その中で精緻な技術成立性、経済性を検証する。

対 応 : 新規公募のテーマである超高効率発電システム基盤技術研究開発及び炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査 では 2 年目に外部有識者による継続可否審査を実施し、実用化に向けた体制変更等を議論して事業運営を推進。

5. 評価に関する事項

NEDO は、技術的及び技術的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を原則として 2013 年度に事前評価、中間評価を 2015 年度、2017 年度を実施済みであり、2020 年度に中間評価を 2022 年度に事後評価を実施する計画としている。また、中間評価結果、本プロジェクトにおける目標達成度、他省庁における連携事業の進捗状況、内外の研究開発動向の変化、社会・経済情勢の変化、政策動向の変化その他の情勢の変化を踏まえ、本プロジェクトの必要性、目的、目標、研究開発の内容、推進体制等についてゼロベースで見直しを行い、次期の基本計画を改定するものとする。

なお、評価の時期については、当該研究開発に掛かる技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

特に研究開発の最終段階にあるものや早期に成果が見込まれるものは、事業化の促進の取組みも含め、適切に見直しを行うものとする。

3. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

中間目標に対して、変動する再生可能エネルギーに対する水電解の劣化メカニズムの解明、材料・セルに関する設計指針の原案策定が見込まれ、水素専焼型ガスタービンでは目標達成、高性能化した水素分離膜の目標達成、水素液化貯蔵システムの性能達成、および炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術の達成見込の結果から、中間時点で解決すべき技術課題はクリアできたと言える。新たに開始した事業においても着実に中間目標を達成見込みであることから今後も研究開発をこれまで同等または加速して進めることで、最終目標を達成することが見込まれる。

各研究開発項目の目標、成果、達成度は下記の通りである。

研究開発項目と目標	研究開発成果	達成度
①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発（2020年度中間目標）		
<ul style="list-style-type: none"> 変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムを解明する。 劣化等を規定する因子を見出すとともに、材料・セルに関する設計指針の原案を策定する。 	アルカリ、PEM、AEM型水電解技術開発に取り組み、再生エネルギー由来の変動電源対応の高性能・高耐久・低コストを成立させる材料からシステム開発、評価技術、劣化加速プロトコルを開発。劣化要因を把握し、目標水素価格実現に向けての基盤技術開発を行った。	○
②大規模水素利用技術の研究開発（2018年度及び2019年度目標）		
<ul style="list-style-type: none"> 大型：燃焼試験により、シングルクラスタバーナ出口NOx 50ppm以下を達成、フラッシュバックの発生なしの確認及び大型用クラスタバーナの基礎設計を完了 小型：50%負荷から定格100%負荷相当条件にて、NOx 35ppm以下の達成、失火や逆火の無い安定燃焼の確認 	大型（2MW級）、小型（250MW級）ともに、フラッシュバックの無い安定燃焼を確認するとともに、実用化時の目標である低NOx値を下回る性能達成の目途を得た。	○
③超高効率発電システム基盤技術研究開発（2019年度（研究開発項目継続可否審査））		
<ul style="list-style-type: none"> FSを行い、技術成立性・経済性確保の見通しを提示。 上記を通じて、発電効率75%を達成しうるシステム構成を提示。 上記を通じて、競合技術の特定及びそれらに対する優位性を提示。 	技術成立性について、高圧で酸素水素燃焼が可能で、発電効率75%を達成しうるシステム構成を示し、経済性確保について1,700℃級発電では大出力化とコストダウン、1,400℃級合理化案を提示した。	○
④エネルギーキャリアシステム調査・研究（最終目標（2018年度末、事業は2019年6月終了））		
有機ハイドライドから水素を効率的に取り出すメンブレンリアクター(MR)の実用化に必須な要素技術の確立	量産性を見据えた新規モジュール構造を提案し、MRとしての有効性を確認。MRの耐久性も15,000hの耐久性を有していることを確認。 水素分離膜型脱水素プロセスについて、既存プロセスと比較してランニングコストにおいて優位性を確認した。	○
⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査（2020年度中間目標）		
基礎研究の可能性調査を行い、技術成立性を理論的・科学的に提示する。また、当該技術を活用して水素を消費者まで安価かつ大量導入する実用化シナリオ原案を構築して経済性を提示する。	技術成立性とともに、触媒・反応炉の耐久性向上、生成炭素のさらなる用途開発など解決すべき課題が具体的に。加えて、実用面において規模や副産物の用途・安全性に関する基礎的検討を行い、経済成立性についても評価結果を示した。	○

各テーマとも、達成状況は下記の通りである。

1.1 研究開発項目①：水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発

①-1 アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発アルカリ水電解水素製造システムの研究開発（2019年度）まで

2018年度までに実施した前身事業「水素利用等先導研究開発事業／低コスト水素製造システムの研究開発／アルカリ水電解水素製造システムの研究開発」にて長期運転試験に供した大型アルカリ水電解装置について、福島県相馬市内の「そま IHI グリーンエネルギーセンター」に移設し、エネルギーマネジメントシステムから運用指令を受け、PV変動出力と連携した再エネ水素製造を開始した。移設後、運用開始から約2年間で2,655時間稼働し、シャットダウン回数は102回、平均水素製造原単位は4.73kWh/Nm³となった。

水電解装置の変動運転にて、PV発電量の変動に対し、アルカリ水電解装置が速やかに応答していることを確認した。また、稼働開始から2019年度末までの約2年間の運転期間を通じ、水素製造原単位に顕著な劣化は認められなかったことを確認した。

①-2 高温水蒸気電解技術の研究開発

高温水蒸気電解の重要技術課題の一つとしてセル・スタックの一層の耐久性向上があり、その為に、セル材料、スタック部材、セル・スタック構造、運転条件、被毒などが劣化に及ぼす影響、機構を包括的な検討、調査を通じて確認し、設計指針のポイントを明らかにした。

- ・長期の電解運転で問題が判明している水素極/電解質界面での間隙に対し、改良を試み、SEM観察およびSEM/EDX分析で界面構造の改善を確認した。

- ・スタック部材の劣化については、セパレータ金属部材、圧縮シール材、ガラス系シール材について、劣化改善に向けての多くの重要な知見を得た。

- ・耐久性試験方法も含め、高耐久性SOECセル・スタック、運転条件等に関する高耐久性設計の指針案の策定が可能なレベルになった。

①-3 非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発

豊富で利用しやすい非貴金属触媒の水電解への適用、実用化を目指し、マンガン酸化物系触媒を軸に、ベーシックな研究開発とともに、実用化に向けて技術適用の可能性について、評価セルを用い、劣化メカニズム解明も含めて調査を実施している。

- ・マンガン酸化物系触媒に対して速度論を考慮した安定電位－pH領域図の作成を進め、従来の安定領域を超えた条件にて駆動が可能であることを確認した。

- ・安定電位－pH領域図の作成より新規に見出されたMn系酸化物触媒について最適な動作条件を抽出することで、1A/cm²の電流密度において安定的な水分解を達成する可能性を示した。

①-4 アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発

アニオン交換膜（AEM）水電解装置の高効率化を検証し、触媒膜形成プロトコルの確立とその触媒膜の評価を行った。低コスト材料であるステンレス鋼の耐食性に関し耐久性の検証を実施した。

・アノードについて、多孔質移動体（PTL）上に触媒担持する電極構造を維持しつつ、触媒塗工方法を再度検討することにより、触媒緻密層の PTE 表面近傍での作製が可能となり、活性化過電圧に加えて濃度過電圧の低減を実現でき、中間目標としていた $1.90\text{V}@1.0\text{A}/\text{cm}^2$ 以下を 1 年前倒しにて達成した。

・AEM 膜の末端化学構造に依拠して解明された無電解析出機構に基づき触媒膜形成プロトコルを確立した。このプロトコルを活用して、酸素発生アノード触媒層として無電解による AEM 膜上 Cu 膜および、その上の NiFe oxide 形成に成功した。

・高速 AFM による水素気泡発生現象（ナノバブル）の動的挙動を世界で初めてリアルタイムで観察することに成功し、各発生サイズが約 20nm、気泡離脱・会合サイズが約 100nm であることが分かった。

・水電解装置コスト評価として、小型(5-10kW)水電解装置について、PEM と AEM の価格比較を行った結果、およそ AEM 装置が PEM 装置の半分であることが分かった。

①-5 高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発

変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムの解明へ向けて、劣化等を規定する因子を見出し、変動電源に適した水電解材料・セルに関する設計指針原案を策定した。また、水電解性能への影響が大きい電圧損失要因を特定した。

・固体高分子形水電解に対しては、変動電源を用いるセルの電解性能および耐久性の向上に資する触媒設計指針の原案を策定し、電解性能への影響が大きい電圧損失要因を特定した。また、変動サイクル試験による水電解セルの劣化機構解析手法を確立する見通しを得た。

・固体アルカリ形水電解に対しては、電解性能の改善に資する材料・セル高度化指針を提案し、変動サイクル試験による水電解セルの耐久性評価にもとづく、耐久性改善に資する材料・セル高度化のための指針を提案した。また、電解性能・耐久性評価にもとづき、新規アニオン伝導性ポリマーおよび電解質膜の合成に成功。さらに電解性能あるいは耐久性向上に資する卑金属触媒の触媒設計指針の原案を策定した。

①-6 アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化

アルカリ水電解及び固体高分子形水電解における電極性能評価、電極界面構造、気泡や物質輸送挙動、逆電流挙動等の諸現象の同一条件で統一的な解析方法を確立し、電極性能及び劣化機構の理解に基づく再生可能エネルギーに対応した P2G システムの要求性能に対応した材料設計指針の検討が可能となり、中間目標を達成した。

・高速度カメラを用いた顕微撮影、レーザー散乱と2次元光検出器を用いた撮影により、気泡の発生速度や数密度の挙動をその場測定により数値化する手法、水素過飽和濃度の推定法を確立した。さらに、画像解析により個別の気泡のサイズ、成長速度、移動方向等を数値化するシステムを開発した。これらにより、ナノバブルから100 μm程度の気泡までの様々な気泡の挙動を明確化し、材料開発における気泡排出制御の設計指針に関する情報を得た。

・放射光設備を利用した operando 計測で電極触媒の電極/電解質界面の構造及び電子構造計測技術を確立し、起動停止に伴う劣化機構に係わる電極触媒の構造変化に関する情報を得た。また、各研究機関で得られた劣化電極を同一条件で解析できる輸送機構及び測定プロトコルを整備し、各機関での運転終了後4週間で触媒の解析結果をフィードバックする体制を整え、劣化機構を決定するための標準材料に関する基盤データを得た。

・異なる研究機関において同一条件で統一的な電極性能評価を可能とするために、材料評価要素試験用1 cm²級小型電解セル、標準小型バイポーラー電解セル、ラボ評価用SPE型水電解セルを設計試作し、標準試料の測定値が各セル間で一致する標準的なセル仕様を確定した。さらに、要素試験用小型電解セルを本プロジェクト参加機関とNDAを締結した10の大学、研究機関、企業での試験利用に供した。

・各研究機関にて同一条件で電位変動下での逆電流を伴う電極劣化挙動を評価するため、標準小型バイポーラー電解セルにより得られた逆電流データを元に電解槽の起動停止挙動を模した起動停止評価プロトコルを提案し、標準アノード、カソードそれぞれについて電位変動下での寿命・劣化データを蓄積し、加速試験法の必要条件を見出し、基本パターンを提案した。

・太陽光発電及び風力発電の実測データを用いた水素製造シミュレーションシステム、再エネ発電電力の高効率利用に向けたDCグリッドと蓄電池を活用したP2G新方式を開発し、最大電力点追従機能削減と高効率化の実現、再エネ変動負荷低減による水電解槽の長寿命化の可能性を見いだした。

1.2 研究開発項目②：大規模水素利用技術の研究開発

②-1 水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発（2019年度まで）

本事業では、水素を最大限に活用するため、2030年といった長期的視点を睨み、数百MW級の発電事業者向け大型ガスタービンに適用可能な水素専焼ドライ低NOx燃焼器の技術開発を目的に、250MW級大型ガスタービンに適用可能な燃焼器の設計の達成に向けた課題の抽出と、それに必要な研究開発を実施した。

・耐火性がある多孔噴流燃焼器（クラスタバーナ）を採用し、解析・非燃焼試験（気流試験）による単孔ノズルの基本設計をもとに、縮小モデルバーナを設計・製作した。燃焼試験により、低圧・中圧の試験条件において、フラッシュバックの発生が無い、安定燃焼を実現し、ターゲット計画条件において、実機換算したNOx:50ppm（15% O₂換算）を下回る目途を得た。

②-3 水素ガスタービン燃焼技術の研究開発（2018年度まで）

水や水蒸気を用いない水素専焼ドライ低NOx燃焼技術を用いたガスタービン燃焼器の要素技術開発、基盤技術の開発として、試作燃焼器の改良ならびに各種の水素燃焼試験による燃焼特性の評価を実施した。

・2 MW級ガスタービンエンジンの50%負荷から定格100%負荷運転に相当する燃焼器入口条件において、NOx 35ppm（残存酸素16%換算値）以下の性能を確認した。

・着火、エンジンの回転数上昇時を想定した各種条件において、水素燃焼で失火や逆火の無い、500℃以上の燃焼ガスを安定に生成する安定燃焼を達成した。

1.3 研究開発項目③：超高発電システム基盤技術研究開発効率

③-1 酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発（2019年度まで）

技術的成立性、経済成立性、実用化シナリオを検討し、要素研究として、酸素水素高圧燃焼技術の研究、酸素水素燃焼タービンサイクルの研究、システム最適化・合理化検討に取り組んできた。発電効率75%LHVを達成するサイクル、コスト削減を狙った合理化案及び、研究開発シナリオをまとめた。この検討により、1,700℃級効率追求型のシステムは技術的には成立しうるものの、酸素製造設備など周辺機器を含めると経済成立性の面では厳しく、コスト削減が必要であることを示した。一方、システムの構成を見直した1,400℃級合理化案のシステムでは、経済成立性を満足しながら、発電効率68%以上を達成できることを示した。まずは、酸素水素燃焼タービン発電システムについて、1,400℃級クローズド型ガスタービンの実用化を目指し、技術の成熟度を高めた上で、1,700℃級クローズド型ガスタービンを目指すことを実用化シナリオ案とした。

1.4 研究開発項目④：エネルギーキャリアシステム調査・研究

④-1 水素分離膜を用いた脱水素（2018年度まで）

水素分離膜の面積化については、70 mmL から 500 mmL、φ10 mm の面積化を達成し、良好な分離性能を確認した。

高水素透過性膜の作製については、世界最高性能の水素分離性能である水素透過性 $3.5 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ 、分離係数（ H_2/SF_6 ）63,700 以上を有するシリカ水素分離膜を得た。

膜反応器の耐久性については、1,500 h の耐久性試験を行い、試験開始初期に低下する傾向を示したが、その後はほぼ一定の転化率を示しており、少なくとも1,500 h の耐久性を有していることを明らかにした。試験結果をもとに、15,000 h 後の転化率予測を検討し、約2割の減少であるとの予測値を得た。

実用的モジュール構造の開発については、量産性を見据え、モジュール構造を改良し、メンブレンリアクターとしての有用性を評価した。また、吸熱反応である脱水素反応においてモジュール内部に効率よく熱供給を行うための熱伝導フィン構造についても評価を行い、フィン形状によりモジュール内部への熱供給が効率的になされ、転化率が向上することを確認した。さらに、これらの結果をもとに、実用的なモジュール構造を提案した。

以上により、高純度水素を得る小規模・分散型 MCH 脱水素技術の基盤が構築できるとともに、多様な展開が可能なモジュール化技術を確立できた。

1.5 研究開発項目⑤：炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査

⑤-1 膜反応器を用いたメタン直接分解による CO₂ フリー水素製造技術

精密に細孔径を制御したシリカ膜、および Pd 膜の開発及び評価について、高い水素透過性を維持しつつ、耐熱性の向上が見込まれる水素選択透過膜（シリカ、パラジウム）の製膜を可能とした。、パラジウム膜では、製膜条件を精査することにより、500℃における水素透過率が $1.3 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ （これまでは $8 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 程度）に向上することができた。

膜反応プロセスに好適な触媒の探索および開発については、Ni/Fe/Al₂O₃ 系の触媒を候補として選定し、その触媒について、調製条件、組成などを変更し、組成比が Ni : Fe : Al は 2 : 1 : 1 が適しているという知見を得た。一方、触媒反応器試験において、反応中に触媒が固着・閉塞するという課題に対し、文献等を調査し、課題解決のための指針を得た。さらに、水素と固体カーボンの同時製造にて低コスト水素を実現する可能性の検討を行い、CNT 合成などで一般的に用いられているフェロセン（Fe がシクロペンタジエンでサンドイッチされているメタロセン）を触媒としてメタン直接分解（触媒反応器；PBR）により生成したカーボンの性状を評価した。

膜反応装置の開発および有効性の実証検討については、膜反応装置を設計・製作し、本反応系に適していると考えられる Ni/Fe/Al₂O₃ 触媒、水素分離膜として Pd 膜を用いた膜反応試験を行い、反応温度 600℃、反応圧力 0.4 MPa の条件において、メタン転化率 93～99%を確認し、膜反応器の有効性を実証することができた。一方で、試験後の Pd 膜の水素透過性能がおよそ 1/2 に低下し、その原因究明を行った結果、試験後の膜の SEM-EDX 結果より Pd 層内にカーボンが固溶している様子が確認され、水素透過性能の低下はカーボンの固溶によるものであることが示唆された。

⑤-2 アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造（2019 年度まで）

本事業では、ナトリウムレドックスサイクルを用い、500℃以下の熱エネルギーと水から水素を製造する技術の研究開発を目的とし、現状の課題を解決するための要素技術に関する研究を行った。その結果、反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討においては種々のセラミックス系材料の耐腐食性に関する研究を行い、酸化物、Al 化合物及び、安定な構造を有するグラファイトや窒化ホウ素が耐腐食性を示した。また、焼結体や粉体に比べ、表面平滑化処理を施した多結晶体では、腐食速度が遅いことがわかった。反応制御技術の検討ではまず、Na₂O 及び Na₂O₂ による腐食を低減するため、容器との腐食を回避しつつ反応を制御する技術として、部分加熱方式を用いて試料に温度勾配をつくる反応装置を設計、作製した。この反応装置を用いることで、酸化物と容器壁面の腐食を抑制しつつ反応を進行させることができる可能性が示唆された。加えて本熱化学水素製造を用いた水素製造コスト試算を行ったところ、20 円/Nm³ 程度と見積られるケースを示した。

⑤-3 メタン直接分解による水素製造に関する技術調査

メタン直接分解による CO₂ フリー水素製造装置の実用化に向け、水素製造効率を向上させる新たな技術の成立可能性を調査した。(1)触媒性能向上技術の調査として、Ni 系板状触媒を中心とした表面構造の調査、触媒探索及び生成炭素の解析、触媒及び生成炭素の微細構造解析を実施した。更に、(2)内加熱式反応炉の小型試験装置の製作実験（生成炭素の回収、工業利用）、炉内伝熱促進技術の調査（ガスの滞留防止と加熱促進、熱流体シミュレーション）を実施した。上記の調査より、高い水素製造効率のメタン直接分解水素製造装置の設計指針を提案するとともに、将来の水素の大量供給を想定した水素製造装置の概念を検討した。

・800℃で50%以上の水素変換効率を示す金属板触媒を開発した。温度と水素濃度の平衡計算から導かれる800℃の理論値94%に対し、Cu-Niメッキ板にて水素濃度93%、Ni+Cu+Niメッキ板水素濃度83%の特性を確認した。更に、Ni板にCuNiメッキ処理した触媒で水素濃度89%を得た。なお、Cu層を形成後Niメッキすることにより、他の金属板（SPC等）でも、一様に水素濃度の上昇を観察した。

・反応炉内からの生成炭素の離脱、排出法を確立するとともに、工業利用についても用途を得、水素の大量製造装置の概念設計を確認した。なお、炉内ガスの経路短縮と滞留(よどみ)の防止策としては、「ガス流入部への多孔板設置」および「触媒の放射配置」の2つの方法を検討し、流動可視化試験により、炉内ガスの経路短縮と滞留(よどみ)の抑止を確認した。

⑤-4 メタンの熱分解による水素製造技術の研究開発

メタンを水素と固体炭素に分解し、固体炭素を回収しつつ、水素を製造するプロセスの確立を目指し、それを実現するための触媒の探索及び当該触媒を適用した高効率なCO₂フリー水素製造プロセスの基本設計に資する実験的あるいは理論的研究を実施している。当該プロセスのリアクター形式の探索については循環流動槽に重点を置いて検討継続する方針を導く結果を得ている。触媒開発においてはメタン分解率や炭素の生成特性などの反応特性の最適化を進める。また、触媒反応で生成する固体炭素（副生炭素）の物性評価及び安全性評価を行った結果、カーボンナノチューブ(CNT)許容曝露濃度データをもとに中～大規模事業所ではフィルター設置による局所排気対策で、十分にリスク低減が図れる可能性を示した。メタン熱分解炭素を用いた複合材料を調製・性能を評価し、最終目標である曲げ強度400MPa達成に向けた課題・見通しを得た。メタン分解プロセスの熱・物質マネジメントを最適化し、プロセスの成立性評価を目的にプロセスの基本構成を設定し、プロセスシミュレーター(Aspen plus)で各ユニットでの物質・温度変化を算出する手法を構築した。加えて当該技術の社会実装のためのシナリオを策定については中規模プロセスの検討を中心に進める方針を立てた。

2. 研究開発項目毎の成果

各テーマについての成果および達成度は以下のとおりである。(◎大幅達成、○達成、△達成見込み、×達成困難)

研究開発項目①：水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発

研究開発項目①－1 アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発/旭化成(株)(2019年度終了)

最終目標(2019年度)	研究開発成果	達成度
(1) アルカリ水電解装置の劣化挙動の検証—1) 商用仕様の大型電解装置を用いた、変動電源を中心とした運転の実施	1) 相馬に大型水電解装置を移設し、PV 変動電源と連携した運転を2年間実施した。	○
(2) アルカリ水電解装置の劣化挙動の検証—2) 長期運転でのプロセスの総合評価	2) 累計 2,655 時間の運転の結果、平均電解効率 4.73 kWh/Nm^3 。性能劣化はほとんど確認されなかった。	○

研究開発項目①－2 高温水蒸気電解技術の研究開発/東芝エネルギーシステムズ(株)

中間目標(2020年度)	研究開発成果	達成度
(1) SOEC セル・スタックの劣化機構解明 ・SOEC セル・スタック部材の劣化機構を解明する。	SOEC セル各部(水素極・電解質・酸素極)およびスタック部材の劣化要因を抽出し、劣化機構を解明した。セル界面、スタック被膜での元素移動の詳細解析等により、高耐久化施策に繋がる世界初の知見を得た。また、セル強度低下要因を究明し、高温モジュール構造材の劣化要因を抽出、影響度を明らかにした。	◎
(2) SOEC セル・スタック部材の設計指針策定 ・高耐久性 SOEC セル・スタックの設計指針の素案策定	劣化機構解明で得られた知見を反映し、高耐久化可能な SOEC セル構造・スタック材料の改良案を策定。改良セルにて、劣化率の低減に成功した。また、Cr 被毒抑制セパレータ被膜構造の一次改良案を策定し、その効果を検証している。	○
(3) 新規 SOEC 電極の設計指針策定 ・新規 SOEC 酸素極の設計指針の素案を策定する。	カチオン種/比率の異なるペロブスカイト材料と電解質材料の材料両立性に注目し、酸素極として可能性のある材料系を選定。選定した材料系の合成/評価を行い、新規 SOEC 酸素極の設計指針素案を得た。	○
(4) SOEC スタック運転条件検討 ・SOEC スタック運転条件の設計指針を策定する。	一定入力および変動入力条件下での劣化速度に影響する因子を抽出し、抽出した因子の影響度を把握した。また、劣化影響度の高い因子を抑制することで劣化抑制可能な運転方法の素案を作成している。	○
(5) SOEC 評価技術/標準化調査 ・SOEC 試験方法、評価技術、標準化に関する動向調査、中間まとめを実施する。	小流量水蒸気供給技術を開発し高濃度水蒸気(～90%)の安定供給に成功した。リバーシブル SOC 性能評価試験法 IEC 規格の問題点を抽出し、SOEC セルスタック性能評価に適する試験ユニット改良案を作成した。	○

研究開発項目①-3 非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発/理化学研究所

中間目標 (2020 年度)	研究開発成果	達成度
<p>①-1 触媒・担持材料の安定電位-pH 領域の特定</p> <p>a) マンガン酸化物系触媒の過電圧情報を入れた「安定電位-pH 領域図」の完成</p> <p>b) 各種オペランド分光による「安定電位-pH 領域」内外における触媒の性能発現と劣化機構の解析により、マンガンイオンの溶出反応を引き起こす因子（電子状態・表面結合状態・結合歪み度）の明確化</p> <p>c) 異種元素ドーブした触媒の開発に着手。</p>	<p>a) Mn 酸化物系の水の酸化触媒に関して、過電圧（速度情報）を考慮した安定電位-pH 領域図への拡張を終了した。</p> <p>b) オペランドラマン分光を用いた解析より、マンガンイオンの溶出するメカニズムを特定した。</p> <p>c) 上記(a),b))の評価手法を、異種元素を含む Mn 複合酸化物系へ展開。その結果、0.2 A/cm² 以上の電流密度を長期に渡って維持できる新規 Mn 系酸化物の開発につながった。</p>	◎
<p>①-2 マンガン系触媒の試作</p> <p>a) 良好であると認定されたマンガン酸化物系触媒の「安定電位-pH 領域図」完成用サンプルとしての提供</p> <p>b) 前の年度までに見いだされた電気化学的安定性に加え、比表面積・結晶性等の物性や構成部材の改良を行い、アノード触媒としての適性評価（①-1 による評価）を行うことによる、水電解酸素生成触媒としての位置づけの見極め</p>	<p>a) マンガン系触媒として物性や構成部材の改良を加えたサンプル（7 種類）を供給した。</p> <p>b) 工業的なマンガン電解法を用いて、異種元素ドーブしたマンガン酸化物材料の合成が可能であることを実証した。</p> <p>その結果、電解合成法で作成したマンガン系触媒は、従来の水熱合成で作製した材料と比較して、格段に優れた安定性と活性を有することを確認した。</p>	○
<p>②-1 MEA 劣化機構の直接的証拠の確認</p> <p>a) マンガン酸化物系触媒を組み込んだ MEA を用いた水電解セルによる一定電圧印加条件における電流密度の劣化率を利用した劣化確認</p> <p>b) 水電解変動電源評価装置の導入（項目 3-1）による水電解セルの変動電源下での印加電圧値と時間から推定された劣化率による劣化状況の確認</p> <p>c) MEA の劣化機構モデルの作成と検証</p>	<p><定常（一定）条件></p> <p>電極部分の温度分布を測定可能な改良型のセルを用い、温度分布の改善を確認した。</p> <p>また、運転時間にともない触媒等構成物質が原料水中へ溶解していくことを見出した。なお、これら溶解した金属が固体高分子膜中に入り込むことが電流-電圧特性の劣化の要因であると推定している（推奨水質：金属系不純物の量として約 0.1 mg/L 以下）。</p>	○
<p>②-2 MEA 劣化機構の確認に基づいた水電解セル構造の解析</p> <p>a) 各種劣化機構の評価を基にセルの改良を実施し、劣化抑制を確認</p> <p>b) セル劣化原因の再確認し、他の劣化要因を抽出</p>	<p><定常（一定）条件></p> <p>シミュレーションの結果では、水流等の不均一性により MEA 電極部分の水電解反応が不均一となり、特性劣化が起こる可能性が示唆された。この結果に基づき、複数種のセルを作製・評価し、電極構成部の均一化による改善効果を確認中。</p>	○

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>③-1 太陽電池の電力変動環境下の固体高分子型水電解セルの劣化評価</p> <p>a) 実際の太陽光利用発電での水分解セルの劣化進行の評価を行うための太陽光発電装置、および、水電解セル変動電源評価装置の導入</p> <p>b) まとめ a) で作製した水電解セル変動電源評価装置への水電解セルの組み込みと劣化評価</p> <p>c) デモンストレーション的な水電解セルの劣化評価との比較と劣化機構のモデルの修正</p> <p>d) 全ての結果を総合した水電解セルの劣化原因推定とそれに基づく材料やセル設計に対する設計原案の作成</p>	<p><非定常（変動）条件></p> <p>実測した気象データを用いて作成した変動電源モードによる評価が可能な水電解セルの評価装置を構築した。</p> <p>ON/OFF ステップモードでは、水電解セルの電力条件範囲内で運転する限り劣化は観測されないが、電圧制御モードでは電力条件範囲を超えた大きな過電流・負電流が観測された。</p> <p>実システムを用いた変動電源の下での長時間運転の結果では、水質劣化による電流－電圧特性劣化の影響の方が変動運転の影響より大きい結果が得られている。</p> <p>なお、実際の気象データ条件下での運転では、現時点、目立った劣化は観測されていない。</p>	○
<p>③-2 電力変動環境下の劣化機構の評価に基づいた水電解セル構造の解析</p> <p>a) 変動電源下の評価を基にセルの改良とその改良結果の評価</p>	<p><非定常（変動）条件></p> <p>実際の気象データから得られた激しい変動条件下においては、局所的なMEAの破壊による電流-電圧特性の大きな劣化（立ち上がり電圧：1.5V => 2.0V程度へ、かつ、電流密度の低下（2.0V程度⇒3.5V程度必要）とともに、原料水の水素生成極側への大量のリークが見られた（原因はMEA電極部分の不均一性と推定）。</p> <p>なお、MEA電極構成部の均一化により、改善予定。</p>	○

研究開発項目①－4 アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発/産業技術総合研究所、早稲田大学、北海道大学大学院工学研究院

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>(1) 電解帰国の解明および電解性能の改善</p> <p>・電解電圧 1.90V 以下@1A/cm²</p>	<p>アノードについて、多孔質移動体（PTL）上に触媒担持する従来の電極構造を維持しつつ、触媒塗工方法を再度検討することで、触媒担持状態の最適化を図った。その結果小型単セル(25cm²)における電解性能において、中間目標値である電解電圧 1.90V@ 1A/cm²を1年前倒して達成することができた。</p>	○
<p>(2) 水素発生カソード触媒層の開発</p> <p>・無電解析出＋電解法の確立と最適化による微細多孔性導電層の形成方法の確立</p>	<p>計算化学的な材料設計手法も利用しながら効率的なプロセス開発が可能になるよう検討を進めた。その結果、無電解析出の駆動力となる還元剤反応を促進するための触媒核付与のプロセスを AEM 用に最適化することによって NiP、NiCoP、Cu など種々の金属層または合金層の AEM 上への直接形成が可能となることを確認した。また、塗布型等既往の手法で得られる AEM 上触媒層よりも高い密着性を得られることも示唆された。更に、微細多孔性構造についても構築できた。これらの結果に基づき AEM 上の高密着金属触媒層の形成を可能にする製法を確立した。</p>	○

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>（3）酸素発生アノード触媒層の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・無電解法による導電層形成と電解法による触媒層形成 ・組成制御、構造制御の方法論検討（遷移金属酸化物の選定及び電解浴の設計） 	<p>カソード触媒層開発において確立した AEM 膜表面上への無電解析出プロセスがアノード触媒層にも有用であることが確かめられた。即ち、NiFe をはじめとする Fe 系遷移金属合金酸化物触媒層を積層可能とした。また AEM 以外の部材としてガス拡散電極層（GDL）への直接触媒形成も新たに視野に入れ、電解析出プロセスを用いて NiFe 層の GDL 上への直接形成を実証すると共に、その触媒性能の確認も達成した。同時に組成の浴条件依存性についても観察した。この成果とカソード触媒層の研究結果に基づいて水電解操作を検討することで組成制御、構造制御の指針を立案した。</p>	○
<p>（4）アノード触媒層気泡離脱挙動解析</p> <ul style="list-style-type: none"> ・気泡発生挙動のその場観察 ・表面電位分布測定と影響評価 	<p>AFM 観察用水電解セルを構築することでナノバブルの観察を可能とした。さらに高速 AFM 観察を適用することで、電解中（低電流密度）に発生するナノバブルの核発生から成長過程に至る動的挙動の観察に成功し、約 100nm 以下のナノバブル同士の会合や、電極からの離脱挙動をリアルタイムで観察することまで達成した。</p> <p>ケルビンプローブ顕微鏡を活用した電極表面電位の測定を行い、ナノバブルの気泡成長による動的挙動と表面電位との関係を今年度中に明らかにする。</p>	○
<p>（5）電解セル耐久性および変動負荷耐久性評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一定負荷試験および変動負荷試験における劣化評 2 価と分析 → 劣化メカニズムの解明と設計指針原案の策定 	<p>予定していた 100～200 時間の一定負荷連続運転を複数回行ったが、電解性能の劣化は見られず、むしろセル抵抗が漸減傾向にあり、それに伴い電解性能は改善する挙動が見られた。また変動負荷試験を 5 時間程度行ったがここでも電解性能の劣化は確認できなかった。こうした初期安定性を確認することができたことは大きな一歩ではあるが、劣化挙動を観察するため、評価プロトコルの見直しを進め、今年度中に劣化メカニズムの解明と設計指針原案の策定まで至る予定。</p>	○
<p>（6）構成部材の耐食性評価および防食技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・温度を変化させた材料の耐食性評価（耐食速度 0.005mm/year 以下を実現する材料特定） 	<p>pH=12、13 の NaOH 水溶液に対して SUS304L の耐食性を電気化学測定により評価した。1000 時間の電解を想定した耐食性を評価中であり、今年中に腐食速度を算出予定。他の電解液候補の K₂CO₃ 溶液中においても今年度中に耐食性を明らかにできる見込み。</p>	○
<p>（7）水電解装置コストおよび水素製造コスト評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・既存小型（～10kW）水電解装置のコスト調査 ・小型（～10kW）AEM 水電解装置のコスト見積 	<p>米国 NREL の解析例を参考に装置コスト見積りに着手した。今年度中に中間目標である小型装置コスト見積りを完了する予定。</p>	○

研究開発項目① – 5 高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発/
東京工業大学、神奈川県立産業技術総合研究所

中間目標 (2020 年度)	研究開発成果	達成度
<p>(1) ①-1 固体高分子形水電解用電解質膜の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・固体高分子形水電解セルの電解性能および耐久性の向上に資する固体高分子形水電解用細孔ファイリング膜の設計指針の提案 ・変動電源を用いる固体高分子形水電解に適した固体高分子形水電解用電解質膜の材料設計指針の原案策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・固体高分子形水電解用の電解質膜では、プロトン伝導性と水素透過阻止性を両立するために、細孔ファイリング膜の充填ポリマーおよび多孔質基材(機械特性・膜厚)を選択することにより、水電解に適した特性を示す電解質膜を設計する。現時点までに、片側の電極に水が常に供給されて湿潤環境となる水電解では、プロトン伝導性より水素透過性が水電解性能へ与える影響が大きいとの仮説のもと検証を行い、従来用いられているパーフルオロスルホン酸ポリマーより水素透過性が低い芳香族炭化水素系ポリマーを厚さ 25μm のポリエチレン多孔質基材へ充填した細孔ファイリング膜を開発し、水素透過性を 1/5 まで低減(水素透過阻止性を 5 倍増加)させた。 ・変動電源に適した固体高分子形水電解用電解質膜の設計指針の原案を、水素透過性を低減した細孔ファイリング型プロトン伝導性電解質膜が有効であると策定した。 	○
<p>(2) ①-2 固体アルカリ水電解用電解質膜の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・固体アルカリ水電解に適した固体アルカリ水電解用電解質膜の材料設計指針の原案策定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・独自に発見したアニオン交換膜の分解機構に基づき開発した高分子量ポリフェニレン系アニオン伝導性ポリマー・膜がアルカリ水電解に応用できること、当該電解質膜は製膜性・機械的強度に優れていることを実証した。 ・高分子の機械強度や化学耐久性をさらに向上させるため、3 次元ねじれ構造を導入した共重合体、ポリフルオレン系アニオン伝導膜、2 次元ジグザグ型のアニオン伝導膜の合成に成功した。 ・アニオン交換膜の分解機構を初めて発表し設計指針を明らかにした後、ポリフェニレン系アニオン交換膜の開発に成功しているグループは世界で 4 グループ程度であり、10 万を超える重量平均分子量のポリフェニレン系アニオン交換膜を実現したのは本研究だけである。 	○
<p>(3) ②-1 Ir 系ナノ粒子連結触媒の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・固体高分子形水電解セルの電解性能および耐久性の向上に資する Ir 系ナノ粒子連結触媒の設計指針の提案 ・変動電源を用いる固体高分子形水電解に適した触媒設計指針の原案策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・高表面積・高活性な Ir ナノ粒子連結触媒を開発し、導電担体フリーで市販触媒より 5 倍高い酸素発生活性を示した。また、Ru との合金化により Ir 単体のナノ粒子連結触媒と比較して 3-15 倍高い酸素発生活性が得られた。 ・変動電源に適した固体高分子形水電解用触媒の設計指針の原案を、導電担体フリーかつ高表面積・高活性触媒が有効であると策定した。 	○
<p>(4) ②-2 固体アルカリ水電解用ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ペロブスカイト・スピネル触媒の溶液中の劣化機構に関する知見の獲得 	<ul style="list-style-type: none"> ・ペロブスカイト・スピネル触媒の溶液中の活性向上に資する材料として安価で汎用的に用いられる鉄およびアルカリ土類金属を含む複合酸化物を開発した。 ・Orthorhombic 構造 CaFe_2O_4 は、他のアルカリ土類金属または希土類を含む鉄系酸化物触媒や、OER の標準触媒である IrO_2 より高活性を示し、電位サイクル 100 サイクル後も活性や元素組成に変化がないことを明らかにした。 	○
<p>(5) ③-1 高性能固体高分子形水電解セルの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・変動電源を用いる固体高分子形水電解に適した単セル設計指針の原案策定 ・変動電源に対して設計・開発した固体高分子形水電解セルに関する電解性能への影響が大きい電圧損失要因の特定 	<ul style="list-style-type: none"> ・変動電源で求められる特性を考慮して開発した高表面積・高活性な導電担体フリー-Ir 系ナノ粒子連結触媒により、Ir 使用量を低減しても高性能な水電解性能が得られるとの仮説のもと検証を行い、従来研究の標準的な Ir 使用量の 1/3~1/4 程度で十分に高い電解特性(2 A/cm² で 1.69 V)が得られた。 	○

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>(6) ③-2 高性能固体アルカリ水電解セルの開発</p> <p>・固体アルカリ水電解セルについての、電解性能の改善に資する材料・セル高度化指針の提案</p>	<p>・開発した高分子量ポリフェニレン系アニオン伝導性膜ポリマー・膜を固体アルカリ水電解セルに応用し、アルカリ水溶液だけでなく純水を用いた場合にも極めて高い性能を発現することを見出した。また、80℃でも高い耐久性を示し、高性能・高耐久を両立した水電解性能を得ることに成功した。高分子量を有するポリフェニレン系アニオン交換ポリマーおよび膜を使用することにより、高耐久性と高性能を両立出来たのは、世界初である。従来の研究は耐久性が無く、最近の研究でも、耐久性と高性能を両立した報告は存在しない。</p>	◎
<p>(7) ④-1 固体高分子形水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析</p> <p>・変動サイクル試験による固体高分子形水電解セルの劣化機構解析結果の獲得</p> <p>・固体高分子型水電解セルの劣化機構解析手法の確立</p>	<p>・定電流保持試験(1 A/cm²)による固体高分子形水電解セルの耐久性評価を行い、耐久性試験前後のインピーダンス測定により、電解質膜由来の抵抗と反応由来の抵抗を分離に成功した。2020年度末までに、劣化機構解析手法を確立の見通し。</p>	○
<p>(8) ④-2 固体アルカリ水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析</p> <p>・変動サイクル試験による固体アルカリ水電解セルの耐久性評価にもとづく、耐久性改善に資する材料・セル高度化指針の提案</p>	<p>・高分子量のポリフェニレン系アニオン交換ポリマーを用いた固体アルカリ水電解セルにおいて、高耐久な固体アルカリ水電解セルの開発に成功。(水供給・定電流(200 mA/cm², 80℃)で120時間程度性能維持)</p> <p>・触媒層の劣化をMEAの表面および断面観察、劣化後の膜材料のFT-IR または NMR で確認した結果、構成要素の改善点は、変動電源対応では膜の機械的強度、親水化による電極中のイオノマー溶出や電解質膜の劣化、が課題となる可能性を明らかにし、耐久性改善に資する材料・セル高度化指針を、機械的強度が高い電解質膜、およびさらに高いラジカル耐久性を有する電解質ポリマー・膜が有効であると策定した。</p> <p>・これまで高耐久なアニオン交換膜が存在しなかったため、固体アルカリ水電解で変動電源での耐久性を考察できたのは本プロジェクトが世界初であり、膜の化学的耐性だけでなく、機械的強度も重要となることを初めて明らかにした。</p>	◎
<p>(9) ⑤ 実セルにおける電解性能・耐久性評価結果を反映した固体アルカリ水電解用の電解質ポリマー・膜の高度化</p> <p>・固体アルカリ水電解セルの電解性能・耐久性評価にもとづく、特性の改善を図ったアニオン伝導性ポリマー、および電解質膜の合成</p>	<p>セルの電解性能・耐久性評価にもとづく、以下3点について特性改善を図った。</p> <p>(1) さらに高いラジカル耐性：量子化学計算に基づき設計した主鎖骨格の適切な部位にフッ素基を導入したポリフェニレン系ポリマーは、酸化耐性評価(80℃ フェントン試験)に対しても高耐久であることを示した。</p> <p>(2) 機械特性：変動電源模擬試験により、膜のピンホール形成による性能低下が観察され、変動電源対応では膜の機械的強度が必要であることが明らかとなった。加熱変換型ポリマーの主鎖のフェニル鎖延長による回転自由度付与により、機械的強度約2倍増加に成功した。</p> <p>(3) 触媒の活性表面積の維持(吸着抑制)：固体アルカリ水電解における触媒金属表面へのポリマーの強固な吸着による三相界面としての性能低下に対して、主鎖のねじれ構造をさらに強くしたポリフェニレン系イオノマーでは、三相界面での反応が促進されるとの仮説を策定した。ラジカルによるベンゼン環酸化抑制のために、量子化学計算より分子設計し、ベンゼン環の酸化を抑制する分子構造を世界で初めて提案した。</p>	○

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>(10) ⑥ 固体アルカリ水電解用の卑金属触媒の開発</p> <p>・固体アルカリ水電解セルの電解性能あるいは耐久性向上に資する卑金属触媒の触媒設計指針の原案策定</p>	<p>・固体アルカリ水電解用の卑金属触媒として、電解法を使って Ni フォームへ卑金属触媒を担持した高活性触媒を開発した。</p> <p>・開発した Ni フォーム担持卑金属触媒をアノード触媒と高耐久ポリフェニレン系アニオン伝導性ポリマーを電解質として用いた MEA では、貴金属触媒を用いていないにもかかわらず、高い電解性能が得られた。</p> <p>・変動電源に適した固体アルカリ水電解用電解質膜の設計指針の原案を、卑金属触媒、特に集電体として用いられる Ni フォームへの接着性の良い高活性触媒が有効であると策定とした。</p>	○

研究開発項目①－6 アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化/横浜国立大学、産業技術総合研究所、京都大学、大阪府立大学、東北大学金属材料研究所、立命館大学、デノロ・ペルメック(株)

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>(1) A-1. 気泡の挙動に注目した電解槽内の物質移動の評価</p> <p>・電極表面でのガス発生挙動を、その場で高解像度観察するための高度撮影技術の構築</p> <p>・生成ガス気泡の直径、個数密度、成長速度の in situ 測定技術の確立</p> <p>・気泡生成挙動と電流密度の関係を明らかにした上での、電解性能との関係性の整理</p>	<p>・アルカリ水電解用電極表面での微細気泡の発生挙動を高い空間及び時間分解能で撮影するシステムを構築し、電極上での気泡生成、成長、合一を経て離脱までの挙動を in situ で撮影する技術を確立した。</p> <p>・アルカリ水電解槽中で生成される気泡の直径、個数密度、成長速度などを画像解析により測定する技術を構築し、カソードとアノードの両極において、電極形状と気泡挙動の関係、離脱気泡径を、電流密度の広い条件範囲を対象に定量化することに成功した。</p>	○
<p>(2) A-2. 気泡が電極反応に与える影響の評価</p> <p>・電解液の物性や電解液中での電極反応過電圧に関する、ウルトラファインバブルの有無による差異の整理</p> <p>・平板電極に於ける電極反応の速度論的パラメータや物質移動挙動に関する、ウルトラファインバブルの有無による差異の整理</p> <p>・ウルトラファインバブルを含む電解液中での平板電極と多孔質電極に関する、速度論的パラメータや物質移動挙動の差異の整理</p>	<p>・ウルトラファインバブル（UFB）を含む電解液における物性の違いを確認した。</p> <p>・平板電極を用いた酸性電解質中での水素発生反応において、UFB 存在下では速度論的パラメータへの影響は小さく、物質輸送に起因すると考えられるターフェル領域の上限のシフトが見られた。</p> <p>これらの知見より、発生気泡を UFB のスケールで制御し、気泡の排出促進にも効果を持つ電極構造設計は電解槽の性能向上に有効であると考えられる。現状ではその性能向上の程度は小さいため、今後その影響を最大化する条件を検討する。</p>	○

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>(3) A-3. 要素試験法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・標準触媒を用いたアルカリ水電解 0.6 A cm⁻² および固体高分子型水電解 1.0 A cm⁻² 条件において、①試作した 1 cm² 要素試験用小型電解槽と小型電解槽（10 cm² 級）間のセル電圧の測定値差 5%以下 ②改良した 1 cm² 要素試験用小型電解槽と小型電解槽（10 cm² 級）間の参照極を用いた分極評価のアノードおよびカソード電位の測定値差 5%以下 ・標準組み立て法および評価法プロセスの策定 ・劣化後の実電極試料に対する有効な分析法の策定 ・電極触媒劣化因子の抽出 ・劣化要因、劣化事象を包含した起動停止評価法の策定 ・増設した要素試験用小型電解槽間の、策定した標準的な起動停止評価法を用いた標準触媒の性能劣化後の電位測定値差 10%以下 	<ul style="list-style-type: none"> ・要素試験用小型電解槽を開発し、標準触媒を用いたアルカリ水電解 0.6 A cm⁻² 及び固体高分子型水電解 1.0 A cm⁻² 条件において測定値差 1.6%を達成した。 ・実験性、測定条件を考慮したセル設計を開発し、国内特許出願を行った。当初の計画を越えて、NDA1 を締結した 10 の大学、研究機関、企業にて要素評価セル、共通評価法としての展開を進めた。水電解に関わる共通化は業界で初のことである。 ・要素試験用小型電解槽を用いてアルカリ水電解用粉末電極触媒を評価するため、気泡排除可能な流路形状を用いた評価法、および気泡影響の少ない初期微小時間における電流を解析する評価法を策定した。 ・アルカリ水電解及び固体高分子型水電解のアノード用起動停止評価法基本プロセスを策定し、NiCo 系触媒被覆標準アノードの耐久テストを実施して、電極触媒劣化因子を抽出した。各試験条件と劣化挙動の相関を明確化、電極劣化抑制パラメータを検討し、劣化要因、劣化事象を包含した起動停止評価法を策定した。 ・劣化後の電極試料に関して、微視的評価から ex-situ での放射光分析までの分析プロセスを確立した。 ・電極の劣化の進行を抑制可能な起動停止運転条件を見いだした。 	◎
<p>(4) A-4. アルカリ水電解槽の評価法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ニッケルメッシュ電極バイポーラー電解槽の電解時間、電解電流と逆電流の関係の基礎データ取得及び劣化機構の推定 ・ニッケルメッシュ電極を用いた 0.6 A cm⁻² 条件における開発した標準小型バイポーラー電解槽の電位の測定値のばらつき 5%以下 ・標準電解槽の要素部材の提案 ・逆電流を模擬した劣化プロトコル及び加速プロトコルの策定 ・逆電流に対する電解槽劣化要因マップの策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ニッケルメッシュ電極及び標準電極を用いた標準小型バイポーラー電解槽を開発し、電位測定精度についてばらつき 2.7%以下を確認した。 ・要素部材提案に関し、既存の各種電極評価により ADT プロトコル評価を実施、高耐久触媒を見出した。 ・標準小型バイポーラー電解槽を用い、電解条件と逆電流の関係の把握、劣化挙動を評価、推定すると共に、逆電流現象解明のための 8 セルスタックバイポーラー型電解槽システムを構築した。 ・実測した逆電流挙動に対して等価回路を用い、理論解析により測定値から定量的に評価および予測する方法を検討。 ・項目 A-3 と共通化した逆電流模擬劣化プロトコル及び加速劣化プロトコルを策定した。 	○

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>(5) A-5. 電解槽のモデリング</p> <ul style="list-style-type: none"> ・気泡観察結果や触媒劣化測定結果が電流電圧特性などに与える影響の直接比較など、モデルパラメータの決定ならびにパラメータスタディが可能な連成モデルの開発 ・気泡挙動・気液二相を考慮に入れ起動停止を含んだ性能比較を行うために非定常解析に拡張したモデルの開発 ・実機スケールの検討、システム概念設計を始めるために実機スケールの解析を可能とする、拡張スケールモデルの開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・交換電流密度や界面抵抗などのモデルパラメータを設定し、パラメータスタディ可能な定常運転連成モデルを開発し、単セルスケールの実験と比較しパラメータ推定を行った。 ・ラボスケール電解装置の定格性能・非定常データと比較等を行い、気泡の影響や材料の劣化等を考慮可能とするために負荷変動を伴う非定常モデルに拡張した。 ・電極シフトによる反応電流密度変化を考慮しないモデルでは電位推定値に 50 mV 程度の誤差が生じていたが、A-3 との連携により従来よりも高精度な過電圧分離およびセル・スタックシミュレーションが可能となった。 ・電気化学反応と気泡分布とその影響をスタックスケールで連成可能なモデルは知られておらず、本拡張スケールモデルの独自性は極めて高い。 	○
<p>(6) B-1. 共通的な触媒活性評価法の提案</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ハーフセルによるアノード触媒の初期活性評価因子の整理とラボ評価用 SPE 型水電解セルの試作・課題抽出 ・ラボ評価用 SPE 型水電解セルの提案 ・ラボ評価用 SPE 型水電解セル評価条件設定のための基盤データの集積 ・ハーフセル及び SPE 型水電解セルによる共通的なアノード触媒活性評価法の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・ハーフセル活性評価に影響を与える因子として、触媒担持量や分散液組成、電位条件の影響等を明らかにした。簡便な触媒活性評価法として適用可能なハーフセル（回転電極）による触媒活性評価の適正条件を明らかにした。 ・実用電解槽に近い条件で活性・耐久性の評価が可能な SPE 型水電解ラボ評価セルの設計、電解特性評価を行う手順を策定した。また、ベンチマークとして IEA-AFP TCP-ANNEX30 ラウンドロピテスト-Phase2 に用いる電解セルとも同等の電解特性初期電解特性が得られることを確認した。 	○
<p>(7) B-2. 劣化要因の解析と加速劣化試験法の提案</p> <ul style="list-style-type: none"> ・長時間運転用 MEA 仕様の決定、及び連続電解試験の開始 ・モデル触媒（イリジウム触媒担持基板）の作製法と特性評価法の確立 ・変動電源や高負荷等の加速条件で長期の電解試験と分析による、劣化要因の提示 ・電位変動等によるモデル触媒の劣化挙動をプローブ顕微鏡により解析し、モデル触媒の劣化要因を明確化 ・水電解セルの劣化メカニズムの明確化 ・加速劣化手法の提案 	<ul style="list-style-type: none"> ・MEA 仕様を決定し連続電解試験を開始するとともに、モデル触媒（Ir ナノ粒子／NbTiO₂ 基板）の作成法とプローブ顕微鏡（AFM）を用いた特性評価法を確立した。 ・1000 時間レベルの連続電解試験において、膜電極界面近傍への酸化イリジウム粒子の析出及びフッ素イオン溶出等の劣化現象の進行を確認した。 ・起動停止を模擬した電流電位サイクルを加速劣化試験として検討し、一定負荷運転よりもセル電圧上昇（劣化）が大幅加速することを確認した。 ・プローブ顕微鏡によるモデル触媒解析より、電位サイクルがイリジウム粒子の溶解を促進することが明らかになった。 ・電流電位サイクル試験中はフッ素溶出が増大するとともに、10,000 サイクル後（約 60 時間）には 1,000 時間連続電解サンプルと同様のイリジウム粒子の析出が確認され、劣化現象が加速されたと判断される。 	○

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>（8）C-1. 電気化学計測と放射光計測による水電解の電極性能発現・劣化機構解明の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全反射蛍光 XAS 法・XRD 法用セル、フローセルによる XAS 法・XRD 法用セルの試作 ・アルカリ水電解、固体高分子形水電解に対して、電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の計測法の確立 ・研究開発協力企業試料に対する解析とそのフィードバック <p>（2020年度目標）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・前年度に確立したアルカリ水電解、固体高分子形水電解に対する計測手法を用いた、電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の関係の明確化 	<ul style="list-style-type: none"> ・アルカリ水電解、固体高分子形水電解について、A-3, B-1, B-2 で提案されたプロトコルに忠実に対応する、気泡の影響を強制対流により軽減させたセルを開発し、電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の計測法を確立した。 ・本手法は電極が実際に作動する高い電流密度（A-3: 600 mA cm⁻²、B-2: 4 A cm⁻²）において、気泡発生の影響なく計測ができ、低電流密度域で行われてきたこれまでの計測よりも優位である。 ・上記手法を利用し、アルカリ水電解、PEM 型水電解における電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の関係を operando XAS により明らかにした。 ・研究開発協力企業の試料に対する放射光解析を 2019 年度は 5 件、2020 年度は 2 件実施し、硬 XAS、軟 XAS データ提供とフィードバック実施した。 ・確立した計測法を用いて、FS 研究として、アルカリ水電解アノード触媒を開発した。 ・触媒の電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の関係を定量化を行う。（2020 年度末） ・確立した計測手法について、他の研究機関が広く用いることができるようにマニュアル化を行う。（2020 年度末） 	○
<p>（9）C-2 電気化学計測とレーザー計測によるナノバブル成長機構解明の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・レーザー散乱による電極極近傍のナノバブル計測、2次元光検出器による個々のナノバブル計測用の測定系の試作 ・マイクロ電極、平板電極を用いたモデル系に対する operando 計測系の確立 ・気泡生成状態ごとに、電流密度を操作変数とした、気泡の発生密度、場所によるナノバブルの数密度分布、バブル成長速度と成長方向などの定量化 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー散乱と 2 次元光検出器の組み合わせによる電極極近傍のナノバブル計測技術を確立した。 ・電流密度を操作変数として、気泡の発生頻度や発生状況、個別気泡の径や成長速度、移動方向を場所ごとに数値化する画像解析システムを開発し、電極極近傍の水素濃度を評価する解析アルゴリズムを開発した。 <p>本プロジェクトにて開発した電解バブル光学計測システムは、溶存気体濃度の計測にしばしば用いられる走査型マイクロ電極による電気化学計測と異なり、数秒以内で「広い範囲」を「同時に」計測できるのが特長であり、電極面に構造を付与した場合でも広い面上を同時に計測できるという優位性がある。したがって、電極面構造の最適化を進めるにあたって有力な計測手段となる。</p>	○
<p>（10）D. アルカリ水電解用電極触媒の活性評価法開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Ni を始めとする遷移金属の板状電極触媒の触媒活性評価法の確立 ・多孔体や発泡体のような形状の異なる遷移金属電極の触媒活性評価法の確立 ・組成の異なる遷移金属電極の触媒活性評価法の確立 ・触媒劣化時の触媒活性評価法の指針構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・平滑な Ni 電極および多孔質構造を有する発泡 Ni 電極における正確な触媒活性評価法を確立した。 ・実用のカソード標準仕様電極について、項目 A-3 で開発した起動停止プロトコルを用い評価条件と劣化モード及び進行度との関係を整理した。 ・二元系合金などの組成の異なる遷移金属電極やカソード改良仕様電極などについて、正確な触媒活性評価法を確立する見込みである。（2020 年度末） ・A-3 で開発された触媒評価用小型電解槽ならびに起動停止プロトコルを使用するカソード触媒の劣化挙動について、水素化電流値の変化を測定する方法以外に Cdl 値及び ECSA を評価し、これらの変化から触媒劣化時の触媒活性を評価する方法についての指針を得る見込みである。（2020 年度末） 	○

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>(1 1) E. 再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムモデルの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 再エネ水素製造試験装置及びシステム装置を導入して、水素製造システムモデルの開発、再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムのシミュレーションコンセプトの構築 ラボ試験向けの再エネ水素製造試験システムに水素貯蔵・利用モデルを導入した装置の改良と、テストベッド試験向けの各装置及び水素製造システムの構築を進め、実測データからのシミュレーションによる最適化と予測を実施して、P2G 水素製造システムに必要な性能を評価 水素製造装置における各要素項目と電極反応を考慮したモデル構築へと拡張したシミュレーション実施による、電解槽の制御法の最適化と電解槽に対する性能要求事項の明確化 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電及び風力発電の実測データを用いた水素製造シミュレーションシステムを開発し、水電解槽へ印加される再エネ電力からの変動負荷分の予測を完了した。 再エネの発電電力の高効率利用に向けて、DC グリッドと蓄電池を活用した P2G の新方式を開発した。これにより最大電力点追従機能削減と高効率化が実現でき、再エネ変動負荷低減による水電解槽の長寿命化の可能性を見出した。 2019 年度までに構築したラボベース試験向けの再エネ変動対応再エネ水素製造試験装置及びシステム装置の更なる改良と、テストベッド試験向けの各装置及び水素製造システムの構築を進め、水電解槽における各要素項目を考慮したシミュレーションモデルに拡張し、材料・セルに関する設計指針原案を策定する。 水素 1Nm³ 製造時における CO₂ 排出量を Z とし、グリーン水素である $Z \leq 0.39$ を満たす電解槽の制御方法最適化と追従性への性能要求事項を明確にする。 	○
<p>(1 2) F. 高度解析による劣化機構解析手法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 各機関で使用する触媒試料を立命館大学 S R センターで測定する輸送機構の確立、標準データの取得完了 複数の劣化条件における触媒試料の軟 X 線吸収分光測定の実施による、各劣化状態における電子構造データの取得、劣化状態と電子構造のマッピング作成 共通の運転条件下における触媒劣化因子を評価可能な X 線吸収分光解析技術の確立 運転終了後 4 週間で触媒を評価可能にする測定体制の確立 	<ul style="list-style-type: none"> 各機関からの試料を同一条件で解析できる輸送機構及び測定プロトコルを策定した。 参照用化合物および、各機関から提供された劣化触媒試料の軟 X 線吸収分光測定を実施し、代表的な劣化機構を決定するための基盤情報を取得した。 触媒処理条件と劣化状態の相関性解析に基づき、電解セルから触媒試料を取り出し輸送するまでの手順を文書化することで、触媒解析技術を確立した。 研究開発協力企業の試料に対する測定を 14 測定行い、京都大学（項目 C-1）と協力し、データ提供とフィードバックを実施した。 各機関から運転終了後 4 週間で触媒の解析をフィードバックすることを可能にした。 	○
<p>(1 3) G. 小型電解槽を用いた評価試験法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> 評価設備を構築し、直流電源を用いた暫定的な STD セル各 1 台の初期性能の評価、再現性の検証 精度を向上させた直流および変動電源による STD セル各 4-6 台の稼働、直流および変動電源における電解および停止起動操作の影響確認 直流電源にて 8,000 時間、変動電源にて 1,000 時間の連続稼働の達成、劣化機構を精密な分析手法により解明、STD セルの最終仕様を確定し、各 2-4 台の稼働実現、加速試験プロトコルの暫定仕様の提案 	<ul style="list-style-type: none"> 3 エlementを有するアルカリ水電解セル（電解面積 27.8 cm²）を 3 台、1 エlementを有する固体高分子形水電解セル（電解面積 10 cm²）4 台を立ち上げ完了した。 初期 100 時間での連続電解評価および暫定的に確定した停止起動操作による加速評価を実施し、実際のセル運転モードでの劣化挙動を再現する適切な標準セルおよび加速条件を確定する見込みである。（2020 年度末） 当社施設の定期点検期間を考慮して、年度末にて直流電源で 5,500 時間、変動電源で 1,000 時間の連続稼働を達成する見込みである。（2020 年度末）8,000 時間の稼働は 2021 年 7 月に達成の見込みである。 	△

中間目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
(14) 水電解の研究動向調査 海外での参加予定国際学会（IEA Annex 30 Electrolysis Workshop、ECS Meeting、Annual Meeting of ISE 等）に参加し、国際間での情報共有及び海外研究動向調査、成果発表、情報収集を行う。また、外部調査機関への外注も活用して水電解及び周辺技術に関する2000年以降の特許動向調査を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・IEA-ANNEX30、ECS meeting、ISE annual meeting を中心として水電解技術の動向を調査した。 ・2000年以降の特許動向調査として、特許の分類を完了、マッピングならびに知財の解析を開始した。 ・IEA-ANNEX30、ECS meeting、ISE annual meeting を中心として水電解技術の動向を調査する ・特許動向のマッピングをもとに開発指針を提案する。 	○

各テーマについての成果および達成度は以下のとおりである。（◎大幅達成、○達成、△達成見込み、×達成困難）

研究開発項目②：大規模水素利用技術の研究開発

研究開発項目②-1 水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発/三菱日立パワーシステムズ(株)、三菱重工業(株)（2019年度終了）

最終目標（2019年度）	研究開発成果	達成度
(1) 単孔ノズルの解析・検証 ・数値解析によりフラッシュバックを発生しないノズル構造の設計 ・非燃焼試験（気流試験）によりフラッシュバックを発生しない許容範囲にあることの検証	<ul style="list-style-type: none"> ・数値解析により、低 NOx 性能とフラッシュバック耐性をともに確保できるノズル構造を設計した。 ・気流試験により、設計したノズル構造が低 NOx 性能とフラッシュバック耐性をともに確保できることを確認した。また、燃料噴射方式として上流突出噴射方式の方が壁面燃料噴射方式よりも低 NOx 性能とフラッシュバック耐性を満足する領域を拡大できることを確認した。 	○
(2) 縮小モデルバーナの解析・検証 ・縮小モデルバーナの燃焼試験により、コンバインド効率60%(LHV基準)の燃焼条件において NOx 50 ppm(15%O ₂ 換算)以下 ・燃焼試験によりパーミアウト耐性があることの確認	<ul style="list-style-type: none"> ・縮小モデルバーナの燃焼試験により、低圧・中圧試験条件にて、フラッシュバックの発生無く、安定燃焼を実現し、ターゲット計画条件において NOx 50 ppm(15%O₂換算)以下を達成した。 ・単孔ノズルを対象としたパーミアウト試験を実施し、計画運用範囲でのパーミアウト耐性を確認した。 	○
(3) 大型ガスタービン向けクラスタバーナの構造成立性検証 ・大型ガスタービンに適用可能なクラスタバーナ燃焼器の全体計画図 ・燃料ステージング設計	<ul style="list-style-type: none"> ・大型ガスタービンに適用可能な水素専焼クラスタバーナ燃焼器の全体計画図を作成した。 ・燃料システムを設計し、着火から定格負荷までの燃料ステージングを設計した。 	○
(4) 燃焼振動抑制の検討 ・クラスタバーナの燃焼振動の予測 ・安定燃焼を実現する方法の策定	<ul style="list-style-type: none"> ・水素燃焼の燃焼振動を予測できる燃焼解析技術を開発した。 ・水素燃焼クラスタバーナで安定燃焼を実現するためには高周波の燃焼振動の抑制が必要であり、既存技術の音響ライナで振動対策できることがわかった。 	○

研究開発項目②－ 2 水素ガスタービン燃焼技術の研究開発/川崎重工業(株) (2018 年度終了)

最終目標 (2018 年度)	研究開発成果	達成度
(1) NOx 性能 (50%から 100%負荷相当での NOx 排出値) ・35ppm 以下 (残存酸素 16%換算値)	・ガスタービン実機の各負荷条件で水素燃焼試験を実施し、50%負荷から 100%負荷相当の範囲で NOx 値 35ppm 以下を確認した。 ・エンジン実機の運転においても大気汚染防止法 70ppm を十部に下回る目途を得た。	○
(2) - 1 燃焼安定性 ・水素燃料のみでの安定した着火 (異常なく着火) / 実機エンジンと同じ、高温・高圧環境下での試験	・ガスタービン実機の着火条件で水素着火試験を実施し、安定した着火を確認した。	○
(2) - 2 燃焼安定性 ・低回転数条件相当での燃焼安定性 (各種条件にて 500℃の保炎) / 0.2MPa 以下の低圧環境下での試験	・ガスタービン実機の回転数上昇を想定した条件で水素火炎の燃焼安定性を確認する試験を実施し、500℃で保炎することを確認した。 (2) - 1 の結果と共に、エンジン実機でも着火・起動が可能である目途を得た。	○

研究開発項目③－ 1 酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発/産業技術総合研究所、東京工業大学、エネルギー総合工学研究所、川崎重工業(株) (2019 年度で終了)

最終目標 (2019 年度)	研究開発成果	達成度
(1) 酸素水素燃焼タービン発電システムの技術成立性検討 ・技術課題の検証方法を提示する。 ・フェーズ毎のターゲットを検討・設定し、次の開発ステップの小型検証実験に関して、目的や検証すべき実験内容等を検討して実験機の仕様を検討・設定する。	国内外の学会、研究会などに参加し、情報収集を行った。「Ⅱ.要素研究」以外の課題も含めて技術情報を収集した。 その結果、技術成立性については、高圧でも酸素水素燃焼が可能であることを示し、技術的課題、検証方法を示した。	○
(2) 酸素水素燃焼タービン発電システムの経済成立性の検討 主な競合技術の経済性データ (発電コスト) を示す。	酸素水素燃焼タービン発電システム (商用機) の経済性確保の見通しを得るために、発電コスト計算ツールを整備した上で、選定された高効率発電システムの発電コストを試算した。その試算結果が目標発電コストよりも大幅に高くなったため、目標値を達成するためのコストダウン検討を行い、今後の技術開発課題を示した。また、競合技術と想定される各種発電方式の水素発電コストを試算し、更に、酸素水素燃焼タービン発電システムの国内への経済波及効果に関する評価手法を検討した。 その結果、経済性確保については、1,700℃級発電では大出力化とコストダウンにより、発電単価を下げうることを示した。また、1,400℃級合理化案を提示した。	○
(3) 実用化シナリオ検討 ・将来の水素燃焼タービン発電システムの普及を想定したときの、実現性が高い水素サプライチェーン (供給側、需要側) の候補を提示する。 ・当該システムの技術開発から実用化に至るシナリオ案を検討・提示する。また、将来の電源構成における酸素水素燃焼タービン発電システムの位置付けを検討・提示する。	酸素水素燃焼タービン発電システムの将来の実用化に向けた開発シナリオ案を検討するために、以下の 4 項目を実施した。a)世界の水素燃焼タービン関連技術の研究開発動向や水素サプライチェーンの開発動向の調査、b)水素サプライチェーンの将来像の検討、c)当該システムの技術開発から実用化に至るシナリオ案の検討、d)競合技術の選定と評価。 その結果、競合技術の特定と優位性について示せた。	○

最終目標（2019年度）	研究開発成果	達成度
<p>（４）酸素水素高圧燃焼技術の研究 ガスタービン内を模擬した高圧場での酸素水素小型バーナの成立性を確認するとともに、タービン入口での熱化学特性を明らかにし、「酸素水素燃焼タービンサイクルの研究」と連携することでサイクル成立性を検討するための燃焼特性を取得・提供する。</p>	<p>定容燃焼器と急速圧縮膨張装置（RCEM）により高圧での水素噴流および水素拡散火炎を観察した。数値シミュレーション結果から、水蒸気希釈酸素と水蒸気希釈水素を並行に噴射すると保炎性が良くないことが示唆された。このため、マルチクラスターバーナの構成要素となるシングルバーナを衝突火炎混合型で試作し、1MPa以下、水蒸気希釈条件での酸素水素燃焼試験を行い、噴射流速、水蒸気希釈率や雰囲気圧力などの試験条件が火炎の外観や保炎性に与える影響を調べた。</p> <p>タービン入口（燃焼器出口）での熱化学特性の解明、高圧酸素水素層流非予混合燃焼の火炎保持機構の解明、高圧酸素水素乱流非予混合燃焼の熱化学特性の解明、Large Eddy Simulation(LES)のための乱流燃焼モデル開発と検証に取り組み、マルチクラスターバーナを構成するマルチクラスターバーナでの火炎干渉に関する知見を得た。以上の結果、技術成立性について、高圧でも酸素水素燃焼が可能であることを示した。</p>	○
<p>（５）酸素水素燃焼タービンサイクルの研究 ・ 発電効率 75%を達成可能な酸素水素燃焼発電サイクルを提案する。</p>	<p>酸素水素燃焼タービンサイクルを対象に、熱効率解析及びエクセルギー解析を行うことで、熱効率 75%達成可能な発電システムを提案するための検討を行った。コンバインドサイクルと比較し、酸素水素燃焼タービンサイクルの優位性を示した。ガスタービン入口温度 1,700℃の酸素水素燃焼タービンサイクルについて最適化により最大熱効率 75.6%が得られた。さらに不凝縮ガスを含む酸素水素燃焼タービンサイクルの発電システムについても検討し、脱気器の設置場所の提案、各流路での残存酸素濃度を明らかにした。熱効率および設備費を考慮した上で、経済的に優れた酸素水素燃焼タービンサイクルのシステム案を提案し、基本構成を示すことができた</p> <p>その結果、発電効率 75%を達成しうるシステム構成を示した。</p>	○
<p>（６）システム最適化・合理化検討 酸素製造設備等の付帯機器を含む総設備費および送電端効率について、経済的に合理的な酸素水素燃焼タービン発電システムプラント仕様案を提示するとともに、その実現に必要な技術課題を明らかにする。</p>	<p>酸素製造設備等の付帯機器を含む総設備費および送電端効率について、経済的に合理的な酸素水素燃焼タービン発電システムプラント仕様案を提示するとともに、その実現に必要な技術課題を明らかにした。</p>	○

研究開発項目④：エネルギーキャリアシステム調査・研究

研究開発項目④－1 水素分離膜を用いた脱水素（2019年6月終了）/千代田化工建設(株)、地球環境産業技術研究機構

最終目標（2019年6月）	研究開発成果	達成度
（1）セラミック系水素分離膜（単管膜）の長尺化技術課題の明確化—対向拡散 CVD 法を用いたセラミック系水素分離膜の長尺化（200 mmL）を達成する。また、長尺 CVD シリカ膜の製膜条件の知見の蓄積を行う。	製膜条件の精査を行い、φ10 mm、200 mmL のシリカ膜の製膜を可能とした。得られた膜の性能は、水素透過率 $1 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、分離係数（H ₂ /SF ₆ ）16,000 以上であった。	○
（2）単管メンブリアクターによる反応検討—メンブリアクターとしての性能を評価し、反応温度低減効果を確認する。また、温度依存性、圧力依存性等の詳細な基礎データを取得する。	単管メンブリアクターを構築し、平衡シフト効果による反応温度の低温化を確認した。また、シミュレーション値と実験値は良好に一致した。	○
（3）多管メンブリアクターの設計・試作、技術課題の明確化—膜材料やメンブリアクターの要素部材の耐久性等の技術課題の検討を行う。また、小型メンブリアクター試験装置を設計、運転を行い、熱収支、総括伝熱係数の算出を行う。	膜、部材の技術課題を検討し、その結果を基に、200 mmL x 7 本のメンブリアクター試験装置を構築し、実験にて平衡シフト効果を確認した。	○
（4）水素分離型脱水素プロセスの経済性検討—水素分離膜型脱水素プロセスに関して、分散型/小型プラントの概略コストを把握する。また、分散型コジェネを対象とした水素利用事業についてフィージビリティスタディを実施する。	水素分離膜型脱水素システムに関して概略コストを試算した。水素分離膜型脱水素プロセスはランニングコストで既存プロセスよりも優位であり、分離膜コストを半減することで、機器コストも優位になることが明らかとなった。	○
（5）小型脱水素プロセスのシステム検討—水素分離膜型脱水素反応器シミュレータの改良を行うとともに、小型発電設備と組み合わせたシステムの熱バランス検討結果を水素分離膜型脱水素プロセスへの適用を検討する。また、コスト低減に向けたプロセス改良/技術課題の抽出の検討を行う。	水素分離膜型脱水素システムについて、SOFC との連携を想定した物質・熱収支を算出し、水素分離膜の優位性を確認した。また、膜反応器シミュレータを、伝熱の影響を簡易的に評価できるよう改良した。	○
（6）エネルギー総合工学研究所との実機に向けた協同会議への参加と検討—開発課題と開発目標を把握するため、実機に向けた協同会議に参加し、検討を行う。	計 4 回の共同会議に参加し（2013 年度の METI 未来開拓研究プロジェクトを含めれば合計 6 回）、情報交換を行い、MCH からの脱水素の有用性を確認し研究を推進した。	○
（7）セラミック系水素分離膜（単管膜）の大面积化—200 mmL のシリカ膜製膜において得られた知見を活かして、500 mmL の長尺化を図る。膜性能の目標は、水素透過率 $1 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、分離係数（H ₂ /SF ₆ ）16,000 以上を目指す。また、量産性を考慮して、製膜時のキーファクターを明確化して再現性の向上を検討する。	製膜条件および製膜装置を精査することにより、φ10 mm、500 mmL のシリカ膜の製膜を可能にした。また得られた 500 mmL 膜の性能は、従来の膜性能と比較して同等以上であった。	○

最終目標（2019年6月）	研究開発成果	達成度
<p>(9) 高圧化基礎検討—使用圧力の高圧化が脱水素反応に及ぼす影響について、基礎検討を行う。供給圧 300~600 kPaG（状況に応じて最大 1,000 kPa 未満）の範囲で、転化率、純度、回収率、分離膜の耐圧性、装置のシール性等に関する検討を行い、高圧化の有効性を検証する。</p>	<p>反応側を高圧にすることで MCH 原料量を 10% 三元できる条件をシミュレーションにより見出すとともに、高圧供給の有効性を確認した。</p>	○
<p>(10) 水素分離膜型脱水素パイロットプラントの概念設計及び他用途展開の検討、及び他用途展開に向けた分離膜型脱水素反応器の優位性の把握—分離膜反応器のパイロット試験（7 Nm³-H₂/hr 程度）による水素分離膜型脱水素反応装置の検証運転に向けて、パイロットプラントの概念設計を実施する。また、FCV、他メーカーの SOFC/PEFC 等の水素利用用途向け、及び、本研究成果の応用によりメンブレンリアクターの実用化に必須な要素技術が確立することを予想した水素利用以外の要とも対象とした分離膜システムの概念検討を実施する。</p>	<p>水素分離膜型脱水素プロセスの優位性について、ランニングコストにおいて優位性を確認した。また分離膜コストが半減することで機器コストも優位性が表れることがわかった。また、他用途展開先として、低温コージェネ、水素ステーションへの適用、メタンからナノカーボン製造を想定した用途にして検討し、メンブレンリアクターシステムの優位性を確認した。あわせて、パイロットプラントについて、7 Nm³-H₂/h と 2 Nm³-H₂/h についての設計を実施した。</p>	○
<p>(11) 実用的モジュール構造の開発—低コストシール法と効率的な熱供給方式を組み合わせたモジュール構造を検討し、量産時の構造案を提示、課題を抽出する。抽出された課題に対する対策を検討した上で、MCH 脱水素試験を行ってその有効性を検証する。</p>	<p>量産化を見据えて、モジュール構造を改良し、小型メンブレンリアクター装置を用いた試験において有用性を確認した。また効率的な熱供給を目的として熱伝導フィン形状を検討した。それらの結果をもとに、実用的なモジュール構造を提案した。</p>	○
<p>(12) 耐久性評価—シリカ膜について、劣化因子を絞り込み、因子別に 100 時間程度の耐久性を実施するとともに、各種分析により劣化機構を考察する。また、劣化機構の考察に基づき、MCH（実液あるいは模擬液）を用いて単管メンブレンリアクターによる耐久性評価試験を実施する。さらに、評価試験結果および劣化機構に関する考察に基づいて、材料の改良を含めた耐久性向上に向けた対策指針を策定する。</p>	<p>シリカ膜の劣化要因を絞り込み、耐久性評価を行った。また、微量水分が存在すると膜性能が劣化する、その劣化機構を考察し、耐久性向上に向けたシリカ膜の設計指針を見出した。また、メンブレンリアクターの耐久性評価では、1,500 h の試験を行い、劣化予測により 15,000 h 後の転化率の減少率は 2 割程度であり、実用上問題のない範囲の減少率であった。</p>	○
<p>(1) セラミック系水素分離膜（単管膜）の長尺化技術課題の明確化—対向拡散 CVD 法を用いたセラミック系水素分離膜の長尺化（200 mmL）を達成する。また、長尺 CVD シリカ膜の製膜条件の知見の蓄積を行う。</p>	<p>製膜条件の精査を行い、φ10 mm、200 mmL のシリカ膜の製膜を可能とした。得られた膜の性能は、水素透過率 $1 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$、分離係数（H₂/SF₆）16,000 以上であった。</p>	○

各テーマについての成果および達成度は以下のとおりである。(◎大幅達成、○達成、△達成見込み、×達成困難)

研究開発項目⑤：炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査

研究開発項目⑤－1 膜反応器を用いたメタン直接分解によるCO₂フリー水素製造技術/地球環境産業技術研究機構

最終目標 (2020 年度)	研究開発成果	達成度
(1) 精密に細孔径を制御したシリカ膜および Pd 膜の開発および評価—水素透過率 $5 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、透過率比 (H_2/CH_4) 3,000 以上の透過分離性能を有するメタンと水素を分離する膜を開発する。	シリカ膜は、シリカ源および製膜条件を精査することにより、600℃の雰囲気下において耐熱性のある膜を製膜することに成功するとともに、2020 年度末の目標値達成に目途を得た。 Pd 膜はめっき条件を精査し、薄膜化することで、これまでよりも高い水素透過性を発揮する膜の製膜を可能とした。	○
(2) 膜反応プロセスに好適な触媒の探索及び開発—低温活性 (500~600℃) を有し、メタン直接分解用膜反応器においてメタン転化率 60%以上の触媒を見出すとともに、コーキング対策の指針を得る。	Ni/Fe/Al ₂ O ₃ 触媒を用いた触媒反応 (PBR) 試験において、従来よりも低温で比較的活性の高い触媒を見出した。また、PBR、膜反応 (MR) 試験ともにコーキングによる触媒層の固着・閉塞を確認し、触媒粒径を大きくすることにより、ある程度緩和されることが明らかとなった。 また、文献等の調査により、コーキング対策の指針を得た。	○
(3) 膜反応装置の開発及び有効性の実証検討—反応温度・圧力、原料供給量などをパラメータとして膜反応器における最適反応条件を見出す。	Pd 膜と Ni/Fe/Al ₂ O ₃ 触媒を組み合わせた膜反応器において、反応温度 600℃で転化率 90%以上を達成することができ、膜反応器の有効性を実証することができた。	○
(4) 水素製造および分離膜技術に関する情報収集・発信—メタンから直接水素を製造するプロセスの簡易な LCA 評価。 ・研究活動内容・成果を社会・国民に対してわかりやすく説明する。	簡易的なプロセスの LCA 評価では、反応温度 500~600℃では MR の方が水素製造効率、CO ₂ 排出量ともに優位であることを確認した。 情報発信については、2020 年 2 月 26~28 日に開催された FC-EXPO において、本プロジェクトで得られた成果を広く公表し、国民との対話を行った。	○

研究開発項目⑤－2 アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造/広島大学

最終目標 (2019 度)	研究開発成果	達成度
(1)反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討として以下の方法論について検討を行い、耐腐食性可能性評価する。 -1 セラミック材料粉末を用いた酸化ナトリウム・過酸化ナトリウムとの反応性評価 -2 セラミック材料の焼結体を用いた酸化ナトリウム・過酸化ナトリウムとの反応性評価 によりターゲットとする反応である以下の反応 $2\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{Na}$ において、現状キャラクタリゼーションが行われていない反応生成物の過酸化ナトリウム (Na ₂ O ₂)。あるいは、起こりうる反応生成物のキャラクタリゼーションがなされること。	本技術においては、反応中間体である Na ₂ O 及び Na ₂ O ₂ の高い腐食が課題である。そこで、本研究では、種々のセラミックス系材料の耐腐食性に関する研究として、各材料の状態変化を観察すると共に X 線回折を用いた生成物の分析や電子顕微鏡を用いた局所的な試料観察を行った。その結果、酸化物、Al 化合物、及び安定な構造を有するグラファイトや窒化ホウ素が比較的高い耐腐食性を示した。また、焼結体や粉体に比べ、表面平滑化処理を施した多結晶体では、腐食速度が遅いことが示唆された。	○

最終目標 (2019 度)	研究開発成果	達成度
<p>(2)反応制御技術の検討</p> <p>-1 熱風流入式の流動層を用いた反応容器の設計を行い、反応制御技術を検討する。</p> <p>- 2 点集熱式の加熱方法を用いた反応容器の設計を行い、反応制御技術を検討する。</p> <p>以上より</p> <p>ターゲットとする反応である以下の反応、あるいは水分解に資する反応 $2\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{Na}$ において $2\text{Na}_2\text{O}$ の 70%以上の Na_2O_2 への反応進行が確認できることを目標とする。</p> <p>- 5 スケールアップ後のコスト試算と本技術の成立性検討</p>	<p>熱風流入式の流動層反応器を設計、作成し、グローブボックス内に設置した。点集熱式のヒーターを上記反応容器に組み込み、Na_2O を 500 °C で加熱する実験を行った。その結果、点集熱方式を用いることで温度勾配を形成させることができ 500 °C 付近で Na 生成が示唆される結果を得た。これらの結果をベースに Na_2O の熱分解反応にあった制御技術の検討も必要であろう。助言員会で指摘を受け、コスト試算を前倒して実施した。既存技術として太陽熱利用施設ヘマソラール(スペイン)の事例を参考に、水素製造コストを試算した結果、20 円/Nm^3 程度で水素製造が可能である検討結果を提示した。</p>	△

研究開発項目⑤－3 メタン直接分解による水素製造に関する技術調査/(株)伊原工業、岐阜大学

最終目標 (2020 年度)	研究開発成果	達成度
<p>①水素製造効率を向上するための板触媒の調査</p> <p>・反応炉温度 800°Cにおいて生成ガス中の水素濃度 50%を達成する。</p>	<p>温度と水素濃度の平衡計算から導かれる 800°Cの理論値 94%に対し、Cu-Ni メッキ板にて水素濃度 93%、更に Ni+Cu+Ni メッキ板にて水素濃度 83%が得られた。</p>	◎
<p>②反応炉設計のための基礎データ収集実験</p> <p>・板触媒の加飾、反応炉内での配置などの条件を変更しての調査。生成炭素の板触媒からの離脱方法の調査。</p>	<p>・金属触媒板とメタンガス流路との間隔は狭い方が良いこと。金属触媒板を揺動させ、生成炭素を離脱できることが判明。</p>	○
<p>③内加熱式反応炉の小型試験装置を製作</p> <p>・実機と同様な内加熱式反応炉の小型試験装置を製作し、データ収集を行う。</p>	<p>・反応炉温度 800°C、メタン 0.72Nm^3/h の時の生成ガス中の水素濃度 50%を実現。反応炉稼働中でも生成炭素を排出できる、真空チャンバー法は世界初である。</p>	◎
<p>④生成炭素及び生成ガスの特性解析</p> <p>・メタン直接分解により生じた生成炭素及び生成ガスの分析を行い、生成炭素の利用法の検討を行う。</p>	<p>・生成炭素の体積抵抗率は、ケッチェンブラック並み、熱伝導率はグラファイトと同等の性能が得られた。</p>	○
<p>⑤板触媒の微細構造の解析</p> <p>・反応炉内の生成炭素が板状触媒に与える影響、板状触媒のどのような変化が触媒効率に影響を与えるのかを解析する</p>	<p>・Ni 板触媒がナノサイズに微細化すること。Ni 核の生成とグラフェン層の発達によりナノカーボンが形成される組織構造変化を明らかにした。</p>	○
<p>⑥ガスの滞留防止と加熱促進による水素製造効率向上技術の調査</p> <p>・ラボスケール反応炉内での流動挙動、温度分布、炭素生成挙動等からメタン直接分解による水素製造反応炉の基本構造指針を得る。</p>	<p>・ガス流入部への多孔板設置、触媒の放射配置の 2 つの方法により、炉内ガスの経路短縮と滞留の抑止を確認した。</p>	○
<p>⑦熱流体シミュレーションによる水素大量製造装置の概念検討</p> <p>・水素製造量 10~20Nm^3/h 程度を達成する水素製造装置の概念を提示し、水素コスト 30 円/Nm^3 を達成可能か評価する。</p>	<p>・流入メタン流量をパラメータとした試験において水素収率と電力を測定し、水素製造量 10 Nm^3/h 時の製造コストを外挿予測するためのデータを蓄積している。</p>	○

研究開発項目⑤ - 4 メタンの熱分解による水素製造技術の研究開発/産業技術総合研究所、(株)IHI、
京都大学

最終目標 (2020 年度)	研究開発成果	達成度
<p>(1) メタン熱分解 CO2 フリー水素製造に適した新規触媒の開発 本タスク1年目の触媒探索作業において絞り込んだ触媒について、反応温度が800~900℃、メタン転換率80%以上、炭素生成率が重量比で10倍以上、連続的に分離回収可能な炭素を生成することを目標に、触媒の高機能化を進める。開発した触媒はタスク②へ供給し、連続反応装置への適応性と技術的課題を明らかにする。</p>	<p>触媒開発および反応条件の明確化に取り組み、目標であるメタン転換率80%、炭素生成量10倍以上の性能を有する触媒を開発した。炭素分離回収型プロセス提案に向けて新規触媒を開発し特許を出願した。</p>	○
<p>(2) 炭素回収型メタン熱分解を実現する反応器およびシステムに関する具体的検討 タスク①から供給される触媒、本タスク一年目の試験結果に基づいて選定するリアクターおよび反応条件下でメタン分解の連続的反応試験を行い、触媒の活性および副生炭素製造率を調べる。得られたデータから反応速度の動的解析を行い、反応器設計に必要な設計パラメータを求めていく。</p>	<p>回転炉型反応器および流動層反応器を用いた評価により、反応器の特徴や課題を明らかにした。項目(1)で開発した触媒を用いた試験を行い、触媒活性など反応器設計に必要なデータを取得するとともに、流動層反応器に重点を置くという方向性を提示した。</p>	○
<p>(3) 固体炭素の有効利用に向けた調査、分析、評価 自動車用途に適合する曲げ強度400MPa以上の複合材開発への見通しを明らかにする。</p>	<p>カーボンブラック代替の可能性について市場適合性検討を行った。メタン熱分解炭素を用いた複合材料を調製・性能を評価し、最終目標である曲げ強度400MPa達成に向けた課題・見通しを得た。</p>	○
<p>(4) 提案技術の社会導入を想定した固体炭素の安全性評価 固体炭素の回収・加工・利用のライフサイクル段階まで評価のバウンダリーを拡張し、排出シナリオをもとに従業員および住民の曝露濃度を推定し、ヒト健康リスク評価を行う。そして、メタン熱分解で製造される固体炭素の有効利用におけるリスク管理手法の課題を抽出する。</p>	<p>暴露モデルを整理し、有効なパラメータ等を取得することで、固体炭素の暴露解析手法を構築した。大気拡散シミュレーションにより暴露濃度を推定し、局所排気対策によって十分にリスク低減が可能であることを明らかにした。</p>	○
<p>(5) メタン分解によるCO2フリー水素製造プロセス構築のための効率および熱・物質マネジメント検討 天然ガスあるいはバイオガスを原料とし、CO₂の化学原料転換プロセスと水素製造プロセスのインテグレーション等により、水素損失率を30%以下にするプロセスを構築する。バイオマスとバイオマス炭化物の共熱分解、水素転換率(バイオマス中の水素が水素ガスに転換される割合)60%を達成できる条件を明らかにする。</p>	<p>プロセスシミュレータ等を用いた検討手法を構築し、本提案システムにおける熱マネジメントの重要性を把握した。水素損失率を試算し、目標である30%以下を可能とするプロセスの成立性について確認した。</p>	○

最終目標（2020年度）	研究開発成果	達成度
<p>（6）新規プロセスの技術成立性および事業性検討 タスク①～⑤に対する取り組みにより明らかになる基礎データをもとに、プロセスフロー図を作成し、プラント全体の概念設計を行い、プロセス全体の概算コストを算出する。事業性検討では、2020年度のタスク①～⑤の成果を反映させた上でIRR10%以上を達成するために必要な条件（スケール、水素販売価格等）を見出す。</p>	<p>循環流動層をベースとしたシステムの構築・検討を行い、水素製造原価（コスト）30円/Nm³以下、IRR10%以上を達成する条件を把握、特許を出願した。</p>	○
<p>（7）提案技術の社会実装のためのシナリオ策定・開発計画検討 本研究により得られる技術成立性および事業性検討に関する成果等を活かしながらコスト試算等を行い、開発した水素製造システムの社会導入に向けたシナリオ策定及び開発計画を構築する。</p>	<p>プロジェクトや特許動向調査を行い、シナリオ検討に必要な情報等を整理した。成果を取り纏め、社会導入に向け、中規模シナリオおよび流動層反応器を用いた検討へ重点を置くという方向性を提示した。</p>	○

3. 研究成果の最終目標の達成可能性について

最終年度である 2022 年度までの達成見通しは以下のとおりである。

研究開発項目①：水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発

研究開発項目①-1 アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発/旭化成（株）（2019 年度終了）

最終目標（2019 年度末）	達成見通し
（1）アルカリ水電解装置の劣化挙動の検証—1） 商用仕様の大型電解装置を用いた、変動電源を中心とした運転の実施	最終年度（2019 年度）を含め、各年度の目標を達成済み。
（2）アルカリ水電解装置の劣化挙動の検証—2） 長期運転でのプロセスの総合評価	最終年度（2019 年度）を含め、各年度の目標を達成済み。

研究開発項目①-2 高温水蒸気電解技術の研究開発/東芝エネルギーシステムズ（株）

最終目標（2022 年度末）	達成見通し
・プラント引渡し価格 30 円/Nm ³ に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立	中間目標の達成度として、セル界面、スタック被膜での元素移動の詳細解析等により、高耐久化施策に繋がる世界初の知見を得ており、既に SOEC セル・スタックの劣化機構解明および高耐久性 SOEC セル・スタック設計指針の素案作成を実施しており、今後、（1）SOEC システム実現可能な長寿命 SOEC セル・スタックの設計指針策定、（2）SOEC セルおよびスタック構成材料の耐久性試験方法の確立を目指し、活動を継続することで、最終目標を達成する見通しである。

研究開発項目①-3 非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発/理化学研究所

最終目標（2022 年度末）	達成見通し
・プラント引渡し価格 30 円/Nm ³ に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立	中間目標の達成度として、Mn 酸化物系の酸化触媒に関して、過電圧（速度情報）を考慮した安定電位-pH 領域図に拡張終了、1 A/cm ² の性能も確認している。耐久性についても、触媒等固体高分子周辺の電極物質の酸化（安定電位より過剰な正電位印加）が最も大きな劣化要因であることを確認済みであり、最終目標についても、非貴金属触媒の可能性研究を更に継続することで達成見通しは十分ある。

研究開発項目①-4 アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発/産業技術総合研究所、早稲田大学、北海道大学大学院工学研究院

最終目標（2022 年度末）	達成見通し
・プラント引渡し価格 30 円/Nm ³ に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立	中間目標として置いていた電解電圧 1.90V 以下@/cm ² をアノード電極の最適化により 1 年前倒しで達成しており、セル温度を揃えると PEM 電解とほぼ同等の性能とすることができた。水素発生カソード触媒および酸素発生カソード触媒の開発において無電解析出プロセスを適用することで従来手法では困難なカチオン官能基末端を有する AEM 上の膜形成を達成し、電解析出プロセスにて GDL 上への直接触媒形成を実証した。これら電気化学プロセスの適用は、AEM 装置の生産性向上を期待させる。AEM 水電解運転における短時間の一定負荷・変動負荷の試験で電解性能の劣化はほぼ見られず、現行セルの初期安定性を確認できた。更に開発を継続することにより、最終目標を達成する見通しは十分ある。

**研究開発項目①－ 5 高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発/
東京工業大学、神奈川県立産業技術総合研究所**

最終目標（2022 年度末）	達成見通し
・プラント引渡し価格 30 円/N m ³ に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立	2020 年度末までに劣化機構の解析手法を確立するとともに、固体高分子形および固体アルカリ水電解セルの耐久性試験前後の電圧損失要因の評価により劣化等を規定する因子を特定する。最終目標の達成へ向けて、開発した固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルに対して負荷変動や起動停止模擬試験を実施して劣化機構を解明し、材料・セル開発へフィードバックし、高耐久・高性能な電解材料・セルの設計指針を策定する準備は整っている。したがって、最終目標を達成できる見通しは十分にある。

研究開発項目①－ 6 アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化/横浜国立大学、産業技術総合研究所、京都大学、大阪府立大学、東北大学金属材料研究所、立命館大学、デノラ・ヘルメレック(株)

最終目標（2022 年度末）	達成見通し
・プラント引渡し価格 30 円/N m ³ に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立	中間目標である変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムの解明を行い、劣化等を規定する因子を見出すとともに、材料・セルに関する試験法や設計に関わる要素技術の開発は順調に進んでおり指針原案の目途が立ち、産業界との情報共有の仕組みも確立した。今後、さらに要素技術の精度を高めるとともに、要素技術を結合する電解槽やシステムのシミュレーション技術の構築をすすめることにより、最終目標であるプラント引渡し価格 30 円/N m ³ に資する電解性能、耐久特性を有する電解槽と、この電解槽を用いた水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法が確立できる見通しは十分にある。

研究開発項目②：大規模水素利用技術の研究開発

研究開発項目②－ 1 水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発/三菱日立パワーシステムズ(株)、三菱重工業(株)（2019 年度終了）

最終目標（2019 年度末）	達成見通し
（1）シングルクラスタバーナのパーミアン性能（フラッシュバックが瞬間発生しても回避可能なこと）を数値解析や非燃焼試験により検討して、燃焼試験で確認する。	最終年度（2019 年度）を含め、各年度の目標を達成済み。
（2）大型ガスタービン（250MW級）に適用可能なクラスタバーナの基礎設計を完了する。（クラスタバーナの燃料ステージング設計の完成）	同上
（3）クラスタバーナの燃焼振動を予測し、安定燃焼が可能な燃焼器形状を検討する。	同上

研究開発項目②－ 2 水素ガスタービン燃焼技術の研究開発/川崎重工業(株)（2018 年度終了）

最終目標（2018 年度末）	達成見通し
（1）高圧水素燃焼試験を実施し、2 MW級ガスタービンエンジンの 50% 負荷から定格 100% 負荷運転に相当する燃焼器入口条件において、NOx 35ppm(残存酸素 16%換算値)以下を達成する。	最終年度（2018 年度）を含め、各年度の目標を達成済み。
（2）低圧水素燃焼試験を実施し、2MW 級ガスタービンエンジンの着火、エンジンの回転数上昇時を想定した 5%、20%、40%、80%、100% 回転数を模擬した各種条件において、水素燃焼で失火や逆火が生じず、500℃以上の燃焼ガスを安定に生成する安定燃焼を達成する。	同上

研究開発項目③：超高発電システム基盤技術研究開発効率

研究開発項目③－1 酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発/産業技術総合研究所、東京工業大学、エネルギー総合工学研究所、川崎重工業(株) (2019年度で終了)

最終目標 (2019年度末)	達成見通し
(1) -1.技術的成立性の検討 a)酸素水素燃焼タービン発電システムが技術的に実現可能であることを示す。 b)将来の実用化に向けて研究開発が必要な技術課題を明確化する。 c)技術課題の検証方法を提示する。 d) フェーズ毎のターゲットを検討・設定し、次の開発ステップの小型検証実験に関して、目的や検証すべき実験内容等を検討して実験機の仕様を検討・設定する。	最終年度 (2019年度) を含め、各年度の目標を達成済み。
(1) -2.経済成立性の検討 a)水素コスト 20 円/Nm ³ で 12 円/kWh 以下の発電コストを示す。 b) 主な競合技術の経済性データ (発電コスト) を示す。	同上
(1) -3.実用化シナリオ検討 a) 将来の水素燃焼タービン発電システムの普及を想定したときの、実現性が高い水素サプライチェーン (供給側、需要側) の候補を提示する。 b)当該システムの技術開発から実用化に至るシナリオ案を検討・提示する。また、将来の電源構成における酸素水素燃焼タービン発電システムの位置付けを検討・提示する。 c)競合技術を選定し、多面的な比較評価により当該システムの優位性を提示する。	同上
(2) -1.酸素水素高圧燃焼技術の研究 ガスタービン内を模擬した高圧場での酸素水素小型バーナの成立性を確認するとともに、タービン入口での熱化学特性を明らかにし、「II -2.酸素水素燃焼タービンサイクルの研究」と連携することでサイクル成立性を検討するための燃焼特性を取得・提供する。	同上
(2) -2. 酸素水素燃焼タービンサイクルの研究 発電効率 75%を達成可能な酸素水素燃焼発電サイクルを提案する。	同上
(2) -3.システム最適化・合理化検討 酸素製造設備等の付帯機器を含む総設備費および送電端効率について、経済的に合理的な酸素水素燃焼タービン発電システムプラント仕様案を提示するとともに、その実現に必要な技術課題を明らかにする。	同上

研究開発項目④：エネルギーキャリアシステム調査・研究

研究開発項目④－1 水素分離膜を用いた脱水素 (2019年6月終了) /千代田化工建設(株)、地球環境産業技術研究機構

最終目標 (2019年6月)	達成見通し
(1) セラミック系水素分離膜 (単管膜) の長尺化技術課題の明確化	最終年度 (2019年度) を含め、各年度の目標を達成済み。
(2) 単管メンブレンリアクターによる反応検討	同上
(3) 多管メンブレンリアクターの設計・試作、技術課題の明確化	同上
(4) 水素分離型脱水素プロセスの経済性検討	同上
(5) 小型脱水素プロセスのシステム検討	同上
(6) エネルギー総合工学研究所との実機に向けた協同会議への参加と検討	同上
(7) セラミック系水素分離膜 (単管膜) の大面積化	同上
(8) 膜モジュールおよびメンブレンリアクターの開発	同上
(9) 高圧化基礎検討	同上
(10) 水素分離膜型脱水素パイロットプラントの概念設計及び他用途展開の検討、及び他用途展開に向けた分離膜型脱水素反応器の優位性の把握	同上

	最終目標（2019年6月）	達成見通し
	(11) 実用的モジュール構造の開発	同上
	(12) 耐久性評価	同上

研究開発項目⑤：炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査

研究開発項目⑤-1 膜反応器を用いたメタン直接分解によるCO₂フリー水素製造技術/地球環境産業技術研究機構

最終目標（2020年度末）	達成見通し
<p>(1) 精密に細孔径を制御したシリカ膜およびPd膜の開発および評価—水素透過率 $5 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$、透過率比 ($\text{H}_2/\text{CH}_4$) 3,000以上の透過分離性能を有するメタンと水素を分離する膜を開発する。</p>	<p>Pd、シリカ膜ともに目標値達成の目途を得た。一方でシリカ膜は、Pd膜と比較すると水素透過性が低い。そのため、如何に水素の透過性を向上させるかが課題である。</p> <p>Pd膜は、生成したカーボンがPdに固溶することで、水素透過性が低下する現象が確認されている。そのため、生成カーボンの固溶を如何に抑制するかが課題である。</p>
<p>(2) 膜反応プロセスに最適な触媒の探索及び開発—低温活性（500～600℃）を有し、メタン直接分解用膜反応器においてメタン転化率60%以上の触媒を見出すとともに、コーキング対策の指針を得る。</p>	<p>コーキングによる触媒の固着・閉塞については、触媒粒径を大きくすることである程度緩和できる可能性を見出すことはできたが、根本的な解決になっているとは言い難い。今後、文献調査などで、微量の添加物（たとえばH₂O、CO₂）を原料に混合することでコーキングを抑制できることが報告されている。本反応系においても、その方法が有効であるかを確認する必要がある。</p>
<p>(3) 膜反応装置の開発及び有効性の実証検討—反応温度・圧力、原料供給量などをパラメータとして膜反応器における最適反応条件を見出す。</p>	<p>Ni/Fe/Al₂O₃触媒では、PBRの場合も同様であるが、触媒と生成カーボンの分離が必要である。その触媒再生のランニングコストが水素コストに影響してくることが懸念される。そのため、触媒再生工程を必要とせず、なおかつ、生成カーボンを高付加価値化できる触媒が必要となってくると考えられる。</p>
<p>(4) 水素製造および分離膜技術に関する情報収集・発信—メタンから直接水素を製造するプロセスの簡易なLCA評価。 ・研究活動内容・成果を社会・国民に対してわかりやすく説明する。</p>	<p>簡易的なプロセスのLCA評価については、達成することができている。一方で、情報収集・発信については、昨今の新型コロナウイルスの影響で、出張できない、学会が中止になる、などの影響により思うように進んでいない。今後、オンライン会議システムの導入、利活用が課題となる。</p>

研究開発項目⑤ – 2 アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造/広島大学

最終目標 (2020 年度末)	達成見通し
<p>(1)反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討として以下の3つの方法論について検討を行い、耐腐食性可能性評価する。</p> <p>-1 セラミック材料粉末を用いた酸化ナトリウム・過酸化ナトリウムとの反応性評価</p> <p>-2 セラミック材料の焼結体を用いた酸化ナトリウム・過酸化ナトリウムとの反応性評価</p> <p>-3 気相および液相のナトリウムについて、配管部材との腐食性能評価</p> <p>以上より、ターゲットとする反応である以下の反応 $2\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{Na}$ において、現状キャラクタリゼーションが行われていない反応生成物の過酸化ナトリウム (Na_2O、あるいは、起こりうる反応生成物のキャラクタリゼーション)がなされること。</p>	<p>材料の化学的性質及び、物理的性質を考慮することで、耐腐食材料の設計の可能性は示唆した。今後は定量的な分析・評価を進める必要がある。</p> <p>なお、2019年1月に実施した継続可否審査により本事業は2019年度で終了した。</p>
<p>(2)反応制御技術の検討</p> <p>-1 熱風流入式の流動層を用いた反応容器の設計を行い、反応制御技術を検討する。</p> <p>-2 点集熱式の加熱方法を用いた反応容器の設計を行い、反応制御技術を検討する。</p> <p>-3 不活性ガスと水素の分離法の検討</p> <p>-4 三段階の熱化学水素製造における熱力学データの取得</p> <p>-5 スケールアップ後のコスト試算と本技術の成立性検討</p> <p>以上より、ターゲットとする反応である以下の反応、あるいは水分解に資する反応 $2\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{Na}$ において $2\text{Na}_2\text{O}$ の70%以上の Na_2O_2 への反応進行が確認できることを目標とする。</p>	<p>同上</p>

研究開発項目⑤ – 3 メタン直接分解による水素製造に関する技術調査/(株)伊原工業、岐阜大学

最終目標 (2020 年度末)	達成見通し
<p>(1) 小型反応テスト炉において、触媒探索及び触媒構造の改良により反応炉温度 800°C において生成ガス中の水素濃度 50% を達成する。</p>	<p>Cu 板に Ni メッキをし、水素濃度 93% を達成 (理論値 94%)、確認しており、更に、耐熱性を考え、Ni 板に Cu メッキをした上で Ni をメッキした場合で、水素濃度は 83% を確認している。Cu 層形成後 Ni をメッキすることにより、他の金属板 (SPC 等) でも、一様に水素濃度の上昇を確認しており、目標を上回るレベルで達成済である。</p>
<p>(2) 水分解水素製造システムや未分解メタンを密閉系純酸素燃焼器で利用するシステムの伝熱現象や燃焼反応に関する数値解析を行い、本水素製造装置のエネルギーバランス (熱収支・物質収支) と経済性を評価する。</p>	<p>炉内ガスの経路短縮と滞留(よどみ)の防止策として、「ガス流入部への多孔板設置」および「触媒の放射配置」の2つの方法を検討し、流動可視化試験により、炉内ガスの経路短縮と滞留(よどみ)の抑止を確認、提案モデルの実反応炉 (40L 級反応炉) を製作し、優れた加熱性能を達成している。40L 級反応炉での水素収率とエネルギー効率について調査を継続することで、最終目標を達成見込みである。</p>
<p>(3) 実用化開発 (次フェーズ) へ向けた課題を抽出、整理するとともに、水素製造量 $10\sim 20\text{Nm}^3/\text{h}$ 程度を達成する水素大量製造装置の概念を提示し、水素コスト $30\text{円}/\text{Nm}^3$ を達成可能か評価する。</p>	<p>流入メタン流量をパラメータとした試験において水素収率と電力を測定し、水素製造量 $10\text{Nm}^3/\text{h}$ 時の製造コストを外挿予測するためのデータを蓄積中。また、大流量時における性能予測および反応炉基本設計指針のツールとして、ガス反応・触媒表面反応・炭素凝集モデルをカップリングした反応シミュレーションモデルを構築しており、7割程度完成。</p> <p>これらの成果をもとに、大量水素製造装置の流量、サイズ、加熱領域、触媒面積等の最適化を行うことで、大型反応炉の基本設計指針を示すと同時に、熱流動シミュレーションも活用し、性能予測の高精度化を進めることで、最終目標の達成が見通せる。</p>

研究開発項目⑤-4 メタンの熱分解による水素製造技術の研究開発/産業技術総合研究所、(株)IHI、
京都大学

最終目標 (2020 年度末)	達成見通し
<p>(1) メタン熱分解 CO₂ フリー水素製造に適した新規触媒の開発 本タスク1年目の触媒探索作業において絞り込んだ触媒について、反応温度が800~900℃、メタン転換率80%以上、炭素生成率が重量比で10倍以上、連続的に分離回収可能な炭素を生成することを目標に、触媒の高機能化を進める。開発した触媒はタスク②へ供給し、連続反応装置への適応性と技術的課題を明らかにする。</p>	<p>触媒の更なる高性能化と流動層に適した触媒の開発に取り組み、触媒を項目(2)に提供することで、最終目標の達成に貢献する。</p>
<p>(2) 炭素回収型メタン熱分解を実現する反応器およびシステムに関する具体的検討 タスク①から供給される触媒、本タスク一年目の試験結果に基づいて選定するリアクターおよび反応条件下でメタン分解の連続的反応試験を行い、触媒の活性および副生炭素製造率を調べる。得られたデータから反応速度の動的解析を行い、反応器設計に必要な設計パラメータを求めていく。</p>	<p>項目(1)で高性能化した触媒を用い、流動層反応における反応条件を最適化、炭素分離が可能な条件を明確化することで、最終目標の達成が可能となる。</p>
<p>(3) 固体炭素の有効利用に向けた調査、分析、評価 自動車用途に適合する曲げ強度 400MPa 以上の複合材開発への見通しを明らかにする。</p>	<p>これまで得た知見をもとに、用いる熱分解炭素および複合材調製法の最適化を行うことで、性能(曲げ強度)の向上を目指す。</p>
<p>(4) 提案技術の社会導入を想定した固体炭素の安全性評価 固体炭素の回収・加工・利用のライフサイクル段階まで評価のバウンダリーを拡張し、排出シナリオをもとに従業員および住民の曝露濃度を推定し、ヒト健康リスク評価を行う。そして、メタン熱分解で製造される固体炭素の有効利用におけるリスク管理手法の課題を抽出する。</p>	<p>リスク評価の精度を向上させ、対象法令等の扱い・見直しに向けた検討を行うことで、最終目標を達成する。</p>
<p>(5) メタン分解による CO₂ フリー水素製造プロセス構築のための効率および熱・物質マネジメント検討 天然ガスあるいはバイオガスを原料とし、CO₂ の化学原料転換プロセスと水素製造プロセスのインテグレーション等により、水素損失率を30%以下にするプロセスを構築する。バイオマスとバイオマス炭化物の共熱分解、水素転換率(バイオマス中の水素が水素ガスに転換される割合)60%を達成できる条件を明らかにする。</p>	<p>水素分離システムを含めた総合的な検討を行い、その成果を項目(6)(7)へと展開する。</p>
<p>(6) 新規プロセスの技術成立性および事業性検討 タスク①~⑤に対する取り組みにより明らかになる基礎データをもとに、プロセスフロー図を作成し、プラント全体の概念設計を行い、プロセス全体の概算コストを算出する。事業性検討では、2020年度のタスク①~⑤の成果を反映させた上で IRR10%以上を達成するために必要な条件(スケール、水素販売価格等)を見出す。</p>	<p>ワンパス型を含むプロセスの検討・最適化を行い、その成果を項目(7)へと展開する。</p>
<p>(7) 提案技術の社会実装のためのシナリオ策定・開発計画検討 本研究により得られる技術成立性および事業性検討に関する成果等を活かしながらコスト試算等を行い、開発した水素製造システムの社会導入に向けたシナリオ策定及び開発計画を構築する。</p>	<p>鉄鋼利用や埋設、また海外での利用を含めた検討を行い、項目(5)(6)などの成果を取り纏め、社会導入に向けたシナリオ策定・開発計画検討を行うことで、最終目標の達成が可能となる。</p>

4. 成果の普及（特許、論文、外部発表等の件数）

本事業での特許、論文、外部発表等の件数は2020年8月末で以下の表のとおりである。論文発表、研究発表等は順調に成果をあげ、特許権利化活動は積極的に行っており、前期の取り組みで初期アイデアを一通り知財化した。一方、後期以降は対象分野が基礎基盤側へ移行したため、国研・大学等の研究機関の割合が増加し、材料や原理に近い基盤技術に関する知財創出が増加、またユーザー候補の企業が参画しているテーマにおいては、実用化を見据えた材料・システム視点での知財化も並行して取り組んでいる。また、知財化した事業成果に関しては、製造・輸送・貯蔵、利用の幅広い技術成果を学会、展示会、新聞等で発表することで幅広く成果普及を行っている。水素製造技術においては、基盤研究成果を招待講演等で成果発信していること、輸送・貯蔵技術、利用技術は、比較的技術成熟度高く、セミナー・講演、新聞等で成果発信している点が特徴となっている。

年度	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	計
論文	0	0	16	13	10	3	9	1	52
研究発表・講演	0	24	100	176	57	68	121	11	557
受賞実績	0	0	0	2	0	0	0	0	2
雑誌・図書等への掲載（注1）	0	13	14	25	15	23	11	1	102
展示会へ出展（注1、注2）	0	9	13	21	11	2	9	1	66
特許出願	4	10	8	15	5	9	13	7	71
うち外国出願	0	1	0	3	0	3	2	0	9

注1：NEDO 発表会の講演では、講演とともに抜き刷り集（図書）や出展（パネル）もカウントしております。図書やパネルのみの場合もあります。

注2：「展示会への出展」が、講演等と同時に実施の時には、同様に展示（パネル）もカウントしております。

※詳細は各項目の成果詳細に記載

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

1. 本プロジェクトにおける実用化の考え方

本事業は先導的な技術開発であり、多様なテーマで実施する技術シーズの技術成立性や経済成立性等を確認して次の研究開発フェーズへ移行させるか否かを判断するものである。従って、本評価における「実用化」とは、「水素製造から、貯蔵・輸送、利用等まで水素サプライチェーンを構成する要素技術について、事業化に向けた次のフェーズの国家プロジェクトや自主研究開発等へ移行可能な技術が創出されること」と定義している。

なお、事業化に向けてのテーマ毎のフェーズの違いについては、テーマ毎のポジションに応じて上記の基本的な考え方に則り、適宜、柔軟かつ適切に判断、評価し事業マネジメントを行っている。

2. 成果の実用化に向けた戦略

本事業では、テーマ毎に社会実装に向けての「仕上げたい技術の姿」が見える化、共有することで、各ロードマップの下、確実に次のステップに移行することで社会実装化を推進するマネジメントを行っている。各テーマに関しての成果の実用化に向けた戦略は下記の通りである。

研究開発項目① 水電解水素製造技術高度化

再エネの変動電力に対応できる水電解要素技術を劣化メカニズムの解明を軸に開発するとともに、個々の技術の優位性、フェーズに応じて水電解装置の実用化に向けて、水電解基盤技術の高度化を推進する。先行した要素技術の成果は次期国家プロジェクト等の実証フェーズでの開発でフェーズに移行する。

研究開発項目② 大規模水素利用技術の研究開発

大規模水素利用技術の重要技術である高効率、高性能なガスタービンの基本設計を構築し、技術の検証・確立を新規事業に移行して実用化に移行する。

研究開発項目③ 超高効率発電システム基盤技術

2040年以降の水素社会を見据え、FS調査も踏まえ、究極の発電システムの実現に繋がる燃焼器やタービン等、業界共通の要素研究を着実に進める。

研究開発項目④ エネルギーキャリアシステム調査・研究

水素分離技術としては本事業により要素技術として構築することができた。今後、小型／分散型コジェネシステム等への適用、事業化に向けて提携先等との共同で実用化を目指す

研究開発項目⑤ 炭化水素等を活用した水素製造

安価かつ大量の水素を製造しうる二酸化炭素を排出しないコア技術の実現可能性調査を通して、実現可能な有望技術を見極め、水電解を補う形で水素社会実現へと繋ぐ。2年間のFS調査の結果を踏まえ、経済成立性及び技術成立性の観点から2020年度に研究開発項目継続可否審査を実施する予定。

3. 成果の実用化に向けた取組及び見通し

本事業は先導的な技術開発であるため、2030年以降に実用化すると考えている開発リスクが高いテーマが多い。そのような状況でも、基盤研究として確実に結果も出ており、事業化への移行が見えるものもある。また、将来求められる仕様に合った技術を選定するために、現状では同分野で複数の技術開発を並行して進めている事業もある。先導事業という長期的な将来を見据えた事業であるため、各テーマにおける難易度、技術成熟度および実用化・事業化に向けた課題にも幅があると考えられる。早期に事業化へと移行できるテーマと先を見据えた継続的な研究開発が必要なテーマがある中で、今後、各開発段階での技術成熟度や技術的解決すべき課題を俯瞰、比較検討しながら、事業化に近いテーマに対しては次のフェーズの実用化のための新規事業への移行を検討し、将来的なポテンシャルの高い技術については長期的な視点先導的に開発を継続することが必要である。

各研究開発項目での実用化の見通しについて以下に詳述する。

3.1 研究開発項目①：「水電解水素製造技術高度化のための基盤技術開発」の実用化の見通しについて

再エネ由来の電源を用いた水電解水素製造技術に関しては、日本国内では福島水素エネルギー研究フィールドや山梨県米倉山での実証試験が進められているほかは、ラポレベルでの水素需要の市場であり、自立した産業レベルでの市場としては黎明期である。そのため、一部では社会実験や市場開拓が進んでいる欧州市場への参入が進められている。一方で、今後の求められるカーボンフリーやエネルギーセキュリティといった水素の価値を 2030 年～2040 年ごろの水素社会実現の時代に最大限発揮するために、これまでに構築してきた変動電源対応の水電解水素製造基盤技術をベースとし、今後の実証試験、商用システムの開発といったフェーズを経て本格導入が期待される。

- ①-1：2020 年に福島水素エネルギー研究フィールドに 10MW 級のアルカリ水電解システムを導入した実績を有する。また、現状、実証試験フェーズに大型設備を導入している。また、水電解水素製造の市場開拓が進んでいる欧州のドイツ・ヘンテル市の水素関連技術開発拠点「h2herten」にて、風力等の変動電源を使った実証プロジェクトも開始しており、早期の実用化、市場導入が期待される。
- ①-2：SOEC 型水電解技術開発において、劣化メカニズムの解析とその対策を行い、システム視点での運転制御方法まで含む開発を行っているため、将来の変動電源対応の水素製造技術の早期投入が期待される。水素社会の立ち上がりまでの間に現状行っている基礎技術を継続し、システムレベルでの製品開発を先行して進めることで、水素産業の立ち上がりに合わせて市場参入することが期待される。
- ①-3：PEM 型水電解技術における新規非貴金属系触媒開発を行っており、将来の低コスト化と高活性化が期待される。今後、他の先行するシステムにおいて、低コスト、高耐久を実現する触媒として置き換え、さらには非貴金属触媒の特徴を最大化するシステムを併せて開発することで優位性ある有望技術となる可能性があり、実用化が期待される。
- ①-4：高耐久かつ高性能な独自の電解析出触媒材料を用いた水電解システムの開発が期待され、アニオン交換膜型の特徴である、低材料コストと高性能を両立する高いポテンシャルを有する。今後は、再エネ由来の変動電源対応のシステム実装を想定した検証とその結果をフィードバックした材料開発およびデバイス開発のサイクルを繰り返し、将来の実用化につなげられることが期待される。
- ①-5：再エネ由来の変動電源に対応する固体高分子形およびアニオン交換膜形水電解技術における、触媒材料及び電解質膜材料開発、劣化メカニズム解明を行っており、その技術的優位性は世界の最先端技術であることが示されている。今後も強みである材料開発技術とシステム運転を想定した検証を繰り返すことで研究機関が浅い技術でありながらも、早期の市場導入を期待することができる。そのためにも、今後は、システム視点での要求仕様を想定しながらの材料開発が望まれる。
- ①-6：プロジェクトの最終目標は再生可能電力を用いた高効率・コストミナムの P2G システム及びその電解槽を開発するガイドラインとなる共通評価法や設計手法を提案し、産業育成に資することである。当研究開発グループには材料からシステム開発までのユーザー企業が関心を示しており、事業に協力をしている。ここで開発された評価方法を他の事業および産業界の開発に展開することで日本の水電解業界全体の開発加速を行うことができ、2030 年～2040 年い置ける水素プラント引渡し価格 30/Nm³を実現することが期待される。

3.2 研究開発項目②：「大規模水素利用技術の研究開発」の実用化の見通しについて

- ②-1：2030 年といった長期的視点を睨み、数百 MW 級の発電事業者向け大型ガスタービンに適用可能な水素専焼ドライ低 NOx 燃焼器の技術開発を目的に、250MW 級大型ガスタービンに適用可能な燃焼器の設計の達成に向けた課題の抽出と、それに必要な研究開発を実施した。その結果、低位発熱量基準の発電端コンバインド効率 60%が達成可能な燃焼条件において、多孔噴流燃焼器（クラスタバーナ）を前提とした単孔ノズルの基本設計、縮小モデルバーナの設計・製作、燃焼試験により低圧・中圧試験条件において、フラッシュバックの発生無い、安定燃焼を実現し、実機換算した NOx 値とし

て 50 ppm(15% O₂)換算を下回る目途を得ていることから、十分な実用化の見通しを得た。実際、次期プロジェクトとして、新規公募の助成事業での活動を開始している(2020年度～)。

- ②-2: 水素社会の初期および普及期における水素発電は、工場等での出力数 MW から数十 MW の水素ガスタービンを用いた小規模の分散型発電による電気と熱(水蒸気)の供給が主と予想されることから、2MW 級ガスタービンエンジンを想定し、高圧水素燃焼試験を実施し、50%負荷から定格 100%負荷運転に相当する燃焼器入口条件において、NO_x 35ppm(残存酸素 16%換算値)以下を達成した。「マイクロミックス」と呼ばれる本燃焼器技術により、水を噴射せずに NO_x 生成を抑えつつ水素 100%で燃焼させることができ、CO₂ ゼロエミッションでの発電の実現が、目前にまで迫っているということであり、十分な実用化の見通しがあると言える。なお、次期プロジェクトとして、新規公募の助成事業での活動を実施しており、マイクロミックス燃焼技術を活用したドライ低 NO_x 水素専焼ガスタービンの技術実証試験に世界で初めて成功するなど、一部、結果も出ている(2019年度～)。

3.3 研究開発項目③:「超高発電システム基盤技術研究開発効率」の実用化の見通しについて

- ③-1: 水素社会の実現のためには、需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術が必要であり、本事業で目指す 2040 年以降という長期的視点を睨み、従来の開放系サイクル技術とは一線を隔す超高効率の発電技術を現時点から検討しておく必要がある。本事業においてこれまで取り組んできた効率追求型 1,700℃級発電技術の成果や外部技術委員会での議論を踏まえ、経済性を確保しつつ、クローズドサイクルや超高压条件を実現する 1,400℃級超高効率発電を対象として、燃焼器やタービン等の業界共通の要素研究を推進する。達成目標としては事業終了時に、酸素水素燃焼器(実機レベル)に移行可能な要素技術を確立する、とする。

3.4 研究開発項目③:「エネルギーキャリアシステム調査・研究」の実用化の見通しについて

- ④-1: 脱水素装置については、計画していた個別技術開発はすべて達成済みであり、H30 年度以降、2 年間で量産用モジュール構造開発、耐久性評価、エンジニアリングデータ収集及びプロセス検討を進め、実機の詳細設計を経て、順次スケールアップを図る。シリカ膜モジュール量産化体制については、CH の脱水素プロセスに適した量産用モジュール構造の開発、耐久性の評価・確認を行い、セラミックメーカーが主体的にシリカ膜 MR の開発を進める体制を整備すれば、量産化が促進されると考えられる。

3.5 研究開発項目③:「炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査」の実用化の見通しについて

- ⑤-1: 予備検討で選定した Ni・Fe・Al 系触媒を様々な調製法(調製条件、触媒担持法)で試作し、性能評価を行った。Fe・Al の成分組成比を変更することで、炭素生成速度に違いがあるなど触媒作成方法による性能の把握を進めた。膜反応器については Pd 膜を用いた反応機で高転換率を確認し、膜反応器の有効性を確認できた。一方で反応器の課題も具体化してきており、その課題解決を進めることで実用化への確度を高めていく。LCA 評価については水素製造部分を触媒釜と膜反応の条件で行い水素製造効率の観点から、膜反応器は 500~600℃、0.3MPa 程度が望ましいとの結果を得たので、この条件を鑑みたプロセス検討を進めることで実用化への確度を高める。
- ⑤-2: 2019 年 1 月に実施した継続可否審査により本事業は 2019 年度にて終了したため、記載事項無し。
- ⑤-3: 触媒性能向上技術の調査および炉内伝熱促進技術の調査を通して、Cu-Ni 板触媒にて非常に高い水素濃度(理論値に匹敵する)を確認するとともに、炉内ガスの経路短縮と滞留(よどみ)の抑止を確認した。これら結果より、メタンから水素と固体の炭素を製造する装置の基礎的データを得ることができた為、次の段階として、事業化の観点から、小型水素製造装置を製作し、耐久性・信頼性等を含めた更なる開発が必要である。又、生成炭素の回収、用途開発の検討も進んでおり、次期ステップへの移行という観点から、十分に実用化を見通すことができる。
- ⑤-4: 流通式反応器に適用できるファイバー状のカーボンが生成する触媒の開発及びその反応条件を把握した。非多孔性の材料を担体とすることで、担体と(C+Fe)が分離可能であることを確認した。炭素回収への適用性から流動層反応器を選択した。そのうえで、触媒再利用プロセスの経済成立性を評価した結果、回収固体炭素価格を 0 円/kg としても IRR10%達成条件を把握した。一方で、回収固体炭素の物性評価と活用適用先の模索を継続している。

①-1 「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基礎技術研究開発／アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発」 委託：旭化成株式会社

●成果概要（実施期間：2018年4月～2020年3月終了）

- 1) 福島県相馬市（そうまIHIグリーンエネルギーセンター）に大型水電解装置を移設し、IHIとの共同研究契約のもと、PV変動電源と連携した運転を2年間実施した。
- 2) 累計2655時間の運転の結果、平均電解効率 4.73 kWh/Nm^3 であった。電解性能の劣化はほとんど確認されなかった。

●背景/研究内容・目的

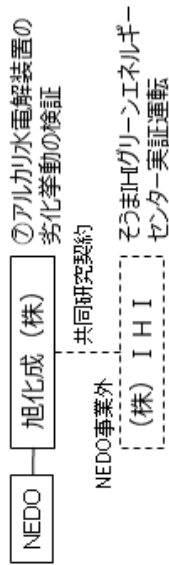
再生電力を水素に転換することで、貯蔵・輸送が可能で、二次エネルギーとすることができ、変動性が高いという再生エネの欠点を埋めることが可能である。水素エネルギー転換の中核を担うのが水電解装置であり、この高効率化、低コスト化、耐久性向上が、持続可能な水素社会実現のカギを握っている。

本研究開発事業では、前身事業「水素利用等先導研究開発事業／低コスト水素製造システムの研究開発／アルカリ水電解水素製造システムの研究開発」で得られた成果を基に、大型アルカリ水電解装置の長期運用における劣化挙動を評価することを目的とする。

●研究目標

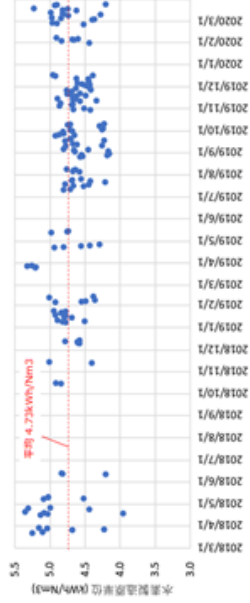
実施項目	目標
①アルカリ水電解装置の劣化挙動の検証	1) 商用仕様の大型電解装置を用いた、変動電源を中心とした運転の実施 2) 長期運転でのプロセスの総合評価

●実施体制及び分担等



●これまでの実施内容／研究成果

- 福島県相馬市に移設
- PV変動電源と連携して運転。
- 2年間で2655時間運用、累計水素製造量は $22,605 \text{ Nm}^3$ 。
- 平均水素製造原単位は 4.73 kWh/Nm^3 。



●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①アルカリ水電解装置の劣化挙動の検証	1) 大型水電解装置を移設し、PV変動電源と連携した運転を2年間実施した。	○
②アルカリ水電解装置の劣化挙動の検証	2) 累計2655時間の運転の結果、平均電解効率は 4.73 kWh/Nm^3 。性能劣化はほとんど確認されず。	○

●今後の課題

一般的な設計寿命である10年を見据えた長期運転実績の確立が今後の課題。

●実用化・事業化の見通し

2025年の大型水電解装置の上を目指し、相馬市および浪江町の大型水電解装置の継続運用を通じて、性能・品質・コストの改善を図っていく

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0件	0件	23件	0件

①-2 「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／
高温水蒸気電解技術の研究開発」

委託：東芝エネルギーシステムズ株式会社

●成果カリ (実施期間：2018年8月～2021年2月予定)

SOECセルおよびスタック部材について、劣化現象を把握し、劣化機構を解明し、劣化機構を解明した劣化機構を基に、長期耐久性を有するSOECセル構造、およびスタック部材の設計指針案を策定した。さらに一層の耐久性向上を狙うSOEC新規酸素極材料の設計指針案を策定した。また、一歩入力および変動入力運転でのスタック劣化現象の把握から、長寿命化可能なSOECスタック運転方法の案を策定した。並行して、SOEC性能評価のキー技術を開発、技術動向調査と先行関連規格の改良検討を行った。

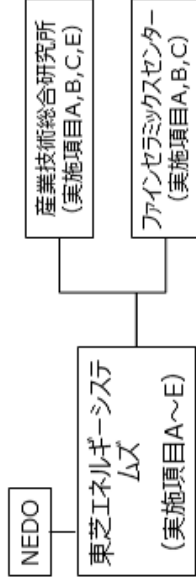
●背景/研究内容・目的

SOEC実用化に向けた重要課題の一つに、セル・スタックの一層の耐久性向上が挙げられる。セル・スタックの耐久性は、システム運転中のスタック交換寿命に関係し、その改良が実用化に向けて不可欠である。劣化率の改良には、セル材料、スタック部材、セル・スタック構造、運転条件、被毒などが劣化に及ぼす影響／機構を包括的に検討する必要がある。本事業では、SOECセル・スタックの劣化機構を解明し、SOECセル・スタックの設計指針を策定することを目標とする。また、SOEC評価技術／標準化調査を実施する。

●研究目標

実施項目	目標
A	SOECセル・スタック部材の劣化機構を解明する
B	SOECセル・スタック部材の設計指針を策定する
C	新規SOEC電極の設計指針を策定する
D	SOECスタック運転条件の設計指針を策定する
E	SOEC評価技術開発、標準化調査をまとめる

●実施体制及び分担等



●これまでの実施内容／研究成果

SOECセルおよびスタック部材の劣化要因を抽出。セル各部(水素極・電解質・酸素極)・スタック部材間および部材とガスとの反応による劣化状態を把握し、劣化機構を明らかにした。また、セル強度低下要因を究明した。高温モジュール構造材の劣化影響因子を抽出し、その影響度を明らかにした。
 ○劣化機構解明で得られた知見を反映し、高耐久化可能なSOECセル構造・スタック部材の改良案を策定。改良セルにて、劣化率の低減に成功した。また、C飛散抑制セルータ被膜構造の一次改良案を策定し、その効果を検証している。
 ○カチオン種／比率の異なるペロブスカイト材料と電解質材料の材料両立性に注目し、酸素極として可能性のある材料系を選定。選定した材料系の合成／評価を行い、新規SOEC酸素極の設計指針案を得た。
 ○一歩入力および変動入力運転での劣化速度に影響する因子を抽出し、抽出した因子の影響度を把握した。また、劣化影響度の高い因子を抑制することで劣化抑制可能な運転方法の案を作成している。
 ○小流量水蒸気供給技術を開発し高温度水蒸気(～90%)の安定供給に成功した。リバーシブルSOC性能評価試験法IEC規格の問題点を抽出し、SOECセルスタック性能評価に適する試験ユニット改良案を作成した。

●今後の課題

○高耐久化可能なSOECセル・スタック構成部材の一次案について、引き続きその効果を検証すると共に、更なる改良案も加え、設計指針として策定する。
 ○高耐久化の可能性のある新規酸素極材料について、電解質との反応性低減と高活性を両立可能な材料設計検討を継続する。
 ○電解電圧/電流、ガス条件、変動入力条件がセル・スタックの劣化に及ぼす影響を更に広範囲に把握する。
 ○SOEC評価技術、標準化については今後も海外動向調査を継続する。

●実用化・事業化の見通し

本事業の成果および自社での開発、東芝グループが長年培った燃料電池や発電システムに関する技術蓄積を活用し、SOEC水電解装置や、当社が有するシステムの制御・設計技術、および運転マネジメント技術を活用した総合的な最適水電解ソリューション(システム/運用)を提供する計画である。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
A	セル・スタック部材の劣化機構を解明。セル強度低下、高温モジュール構造材劣化現象を明確化	◎
B	Aを基に高耐久セル・スタック部材の設計指針案を策定	○
C	電解質材料との両立性から新規電極設計指針案を策定	○
D	一定/変動入力での劣化抑制可能なスタック運転条件を明確化	○
E	小流量水蒸気安定供給技術を開発。性能評価法の改良案を作成	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
10件	18件	15件	0件

①-3)「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発」 委託：理化学研究所

●成果期 (実施期間)：2018年6月～2021年2月(予定)

・新規なMn酸化物系触媒を開発。これにより、固体高分子型水電解において、Fe系触媒の数分の1程度の特性を安定的に出すことを実現

・固体高分子型水電解セルの電流-電圧特性の主劣化要因が、水の酸化側の構成部材の溶解であることを特定

・太陽電池出力の変動を水電解セルに印加可能な装置を製作。これにより、実用レベルの水電解セルを用いた変動出力下での劣化機構解析のための基盤評価技術確立

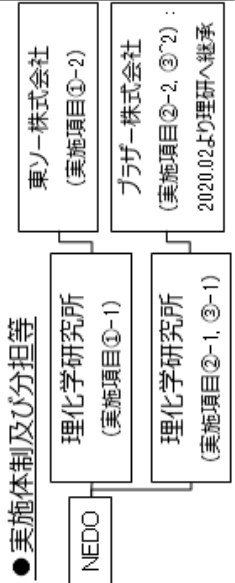
●背景/研究内容・目的

背景：
電源変動に比較的強い固体高分子型水電解セルの触媒は、希少な貴金属が用いられており低コスト化・大規模普及に向けた課題となっている

研究内容・目的：
非貴金属系触媒を用いた固体高分子型水電解セルで
①電極触媒の性能発現と劣化機構の解明
②MEAとセル構造の最適化
③変動電源との連動による劣化特性評価
を行い、非貴金属触媒固体高分子型水電解セルの基盤技術の開発を目指す

●研究目標

実施項目	目標
①-1	触媒・担持材料の安定電位-pH領域の特定
①-2	マンガニ系触媒の試作
②-1	MEA劣化機構の直接的証拠の確認
②-2	MEA劣化機構の確認に基づいた水電解セル構造の解析
③-1	太陽電池の重力変動環境下の固体高分子型水電解セルの劣化評価
③-2	重力変動環境下の劣化機構の評価に基づいた水電解セル構造の解析



●これまでの実施内容/研究成果

- ・ Mn酸化物系触媒の安定電位領域の推定、及び、A/cm²レベルでの触媒動作とサブA/cm²レベルでの触媒安定性の確認
- ・ Mn酸化物系触媒の量産技術への目途
- ・ MEA電極部分の密着度の向上(均一化)が水電解セル電圧-電流特性向上の鍵
- ・ Mn非貴金属系触媒の水電解セルにおいても貴金属系触媒の同じ電圧において数分の1の電流密度が得られることを確認
- ・ 定常状態下でのMEA劣化の要因として水を酸化する触媒を中心としたセル構成金属の原料水中への溶解を確認。劣化要因はこの溶解した金属による固体高分子膜の特性劣化と推定
- ・ 太陽電池発電変動データを基にした水電解セル動作が可能な装置を製作し、劣化評価の基盤技術を確認
- ・ 電圧のON/OFFステップ変動動作においては大きな過電流や負電流が観測される一方、電流のON/OFFステップ変化ではオーバーシュートが生じない電圧変化となることを確認
- ・ 電力変動が大きい場合はMEAの局所的な異常劣化が生じる可能性があり、この局所劣化を防ぐにはMEA電極部分の密着度の向上(均一化)が必要であると推測

●今後の課題

- ・ 非貴金属系触媒のさらなる特性向上
- ・ 非貴金属系触媒を用いたMEAの実用レベルでのセル評価・システム内評価(長時間定常運転、及び、システム内に組み込んだ変動電源動作確認)
- ・ これら評価を基にした非貴金属系触媒を用いた水電解セルの安定運転条件の提案

●実用化・事業化の見通し

非貴金属触媒において、貴金属触媒並みの電流-電圧特性が達成でき、劣化機構が貴金属触媒の場合と同様である、もしくは、非貴金属系触媒特有の条件を改善することで安定動作出来れば、非貴金属触媒を用いた固体高分子型水電解セルの実用化が可能である

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①-1	Fe系触媒の発見	◎
①-2	Mn系触媒の量産化に目途	○
②-1	主な劣化機構は触媒等MEA構成物質の溶解	○
②-2	電極構造部の密着度の向上(均一化)が重要	○
③-1	非常に新しい電源変動下で異常劣化を確認	○
③-2	②-2と同様均一構造が重要	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
1件	0件	8件	0件

(① - 4) 「水素利用等先導研究開発事業 / 水電解水素製造技術高度化のための基盤技術
研究開発 / アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発」

委託：産業技術総合研究所、
早稲田大学、北海道大学

●成果刊列 (実施期間) : 2018年7月～2021年2月予定)

- ・小型単セルにおける電解性能において、中間目標値(1.90V以下@1A/cm²)を約1年前倒しで達成した。
- ・触媒層形成に無電解ミック法を適用し、AEM上への種々の合金層の直接形成に成功した。
- ・報告例がなかった電解中に発生するナパブルの核発生から成長過程に至る動的挙動のその場観察に成功した。

●背景/研究内容・目的

グリーン水素の需要が高まる中、低コストかつ高性能水電解装置の開発が求められている。アルカリ性アニオン交換膜(AEM)を電解質膜に用いるAEM水電解装置は、セル部材に用いる材料の選択肢が広く低コストを実現できる一方で高い電解性能を発揮できる可能性を持つ新しい水電解装置である。

しかし同装置は開発の歴史が浅く、電極材料や構造にまだまだ改善の余地を多く残し、電解性能もプロトン交換膜(PEM)水電解に及ばない。さらに使用部材選定に必要な材料の電解環境下での腐食性に関する情報が十分ではない。

これらの技術的課題を克服し、アニオン交換膜(AEM)の水電解装置の設計指針を獲得し、実用化に向けた橋頭堡を築くべく、提案者により包括的研究開発を行う。

●研究目標

実施項目	目標
(1-1) 電解性能改善	電解電圧1.90V以下@1A/cm ²
(1-2) アノード触媒層開発	多孔性導電層形成方法の確立
(1-3) カソード触媒層開発	組成、構造制御の方法論検討
(1-4) 気泡挙動解析	気泡発生 of 動的挙動評価
(2-1) セル耐久性評価	劣化メカニズムの解明と対策
(2-2) 部材耐食性評価	腐食速度0.05mm/year以下
(3-1) 水素製造コスト評価	小型電解装置のコスト見直し

●実施体制及び分担等

NEDO	産業技術総合研究所 (1-1, 2-1, 3-1)
	早稲田大学 (1-2, 1-3)
	北海道大学 (1-4, 2-2)

●これまでの実施内容 / 研究成果

- (1-1) 電解機構の解明および電解性能の改善：アノードについて、触媒塗工方法を再度検討することで、触媒担持状態の最適化を図った。その結果小型単セルにおける電解性能において、中間目標値(1.90V以下@1A/cm²)を約1年前倒しで達成した。
- (1-2) 水素発生カソード触媒層開発：無電解析出の駆動力となる還元剤反応を促進するための触媒核付与のプロセスをAEM用に最適化することによって、NiP、NiCoP、Cuなど種々の合金層または合金層のAEM上への直接形成を実現した。
- (1-3) 酸素発生アノード触媒層開発：カソード触媒層開発において確立したAEM膜表面上への無電解析出用プロセスを適用し、NiFeをはじめとするFe系遷移金属合金酸化物触媒層の積層を実現した。さらにPTL上への直接触媒層形成も実現し、装置構成の選択肢を広げることができた。
- (1-4) アノード触媒層気泡離脱挙動解析：高速AFM観察を適用することで、未だ報告例がなかった電解中に発生するナパブルの核発生から成長過程に至る動的挙動のその場観察に成功した。
- (2-1) 電解セル耐久性および姿勢負荷対応性評価：100-200時間の一定負荷連続運転や数時間の変動負荷試験の結果、ほぼ電解性能の劣化は見られず、現行セルの初期安定性を確認できた。
- (2-2) 構成部材の耐食性評価および防食技術開発：これまで報告例のなかったpH=12,13のNaOH水溶液に対してのSUS304Lの耐食性を電気化学測定により評価した。1000時間の電解を想定した耐食性を評価中であり、今年中に腐食速度を算出予定。
- (3-1) 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価：米国のNRELの解析例を参考に装置コスト見直し着手し、今年度末に見直し。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
(1-1)	電解電圧1.90V以下達成	○
(1-2)	膜上への直接形成に成功	○
(1-3)	膜上とPTLへの触媒層形成	○
(1-4)	ナパブル発生 of その場観察	○
(2-1)	連続運転初期安定性確認	○
(2-2)	SUS304Lの耐食性確認	○
(3-1)	装置コスト見直し今年度未完	○

●今後の課題

中間目標未達の実施項目について、今年度目標達成に向けた着実な進捗を図る。またプロジェクト後半においては実施者間の協力関係をより密にし、シナジー効果を発揮しつつ最終目標達成に向けた加速度的な開発を期する。

●実用化・事業化の見通し

既に商品化されている機器の仕様、価格を参照しつつ、知財取得などを通じた技術的優位性を確保し、さらに国内企業との協力関係を築き、早期の実用化を図る。

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
1件	1件	16件	0件

(1-5)「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発」 委託：東京工業大学、神奈川県立産業技術総合研究所

●成果ガリ (実施期間：2018年8月～2021年2月予定)

- ・固体高分子形水電解、固体アルカリ水電解の2つの方式について、変動電源に適した電解質膜および触媒の設計指針原案を策定した。
- ・本事業で開発した触媒・電解質膜を用いた固体高分子形および固体アルカリ水電解セルの耐久性試験を実施した。
- ・固体アルカリ水電解では、本研究グループが開発した高耐久なエーテルポリマー・膜を用いた水電解セルにより高性能・高耐久の両立に成功した。

●背景/研究内容・目的

本事業では、2030年における水素コスト30円/Nm³の達成に向けて、固体高分子形水電解およびアルカリ水電解において、変動電源に対する高耐久性・高効率・高効率を実現するために、高性能・高耐久な材料・セル設計を行う。2020年度までに変動電源に適した電解質膜および触媒の設計指針原案を策定する。また、開発した水電解セルの性能・耐久性評価を行い、材料・セルのフィードバックを行うとともに、劣化機構解析手法を確立する。

●研究目標 PEWE: 固体高分子形水電解、SAWE: 固体アルカリ水電解

実施項目	目標
①-1 PEWE電解質膜の研究開発	変動電源を用いるPEWEに適した電解質膜の材料設計指針の原案策定
①-2 SAWE電解質膜の研究開発	SAWEに適した電解質膜の材料設計指針の原案策定
②-1 Ir系ナノ粒子連結触媒の研究開発	変動電源を用いるPEWEに適した触媒設計指針の原案策定
②-2 SAWE用プロパライズドセルの研究開発	プロパライズドセル触媒の溶液中の劣化機構に関する知見の獲得
③-1 高性能PEWEセルの開発	PEWEセルに関する電解性能への影響が大きい電圧損失要因の特定
③-2 高性能SAWEセルの開発	SAWEセルの電解性能改善に資する材料・セル高度化指針の提案
④-1 PEWEセルの耐久性評価・劣化機構解析	PEWEセルの劣化機構解析手法の確立
④-2 SAWEセルの耐久性評価・劣化機構解析	変動サイクル試験によるSAWEセルの耐久性評価にもとづき、耐久性改善に資する材料・セル高度化指針の提案
⑤ SAWE用の電解質ポリマー・膜の高度化	SAWEセルの評価にもとづき、特性の改善を図ったアニオン伝導性ポリマー、および電解質膜の合成
⑥ SAWE用の卑金属触媒の開発	SAWEセルの性能・耐久性向上に資する卑金属触媒設計指針の原案策定

●実施体制及び分担等



●これまでの実施内容/研究成果

- ①-1: 細孔リング膜の孔径ポリマーを多孔質材料の選択により水素透過性を1/5まで低減させた。設計指針の原案を、水素透過性を低減した細孔リング型プロトン伝導性電解質膜が有効であると策定した。
- ①-2: エーテルポリマー・膜が水電解で高性能・高耐久であることを実証した。設計指針の原案を、親水性・機械的強度に優れた高アルカリ耐久性・高ラジカル耐久性を有するポリエーテル系アニオン交換ポリマーが有効であると策定した。
- ①-1: 導電担体ポリマーかつ高表面積Ir系ナノ粒子連結触媒により市販触媒より5-15倍高い電解発生活性が得られた。設計指針の原案を、導電担体ポリマーかつ高表面積・高活性触媒が有効であると策定した。
- ②-2: Orthorhombic 構造を有するCaFe₂O₄は、標準触媒であるIrO₂より高活性を示し、電位サイクル後の活性や元素組成が変化しなかった。
- ③-1: Ir系ナノ粒子連結触媒を用いた水電解セルで従来研究の標準より1/3~1/4のIr使用量で十分に高い水電解特性が得られた。
- ③-2: 高分子量ポリエーテル系アニオン伝導性触媒ポリマー・膜を用いた水電解セルで、純水供給でも極めて高い性能が得られ、80℃で高耐久性を示し、世界で初めて高性能・高耐久性の両立に成功した。
- ④-1: 定電流保持試験による耐久性試験を実施し、耐久性試験後の電気化学解析を行った。
- ④-2: 80℃の定電流保持試験で120時間程度性能が維持され、高耐久な固体アルカリ水電解セルの開発に成功した。耐久性試験後の解析を行い、膜の機械的強度が重要であることを実験的解析から初めて示した。
- ⑤: 固体アルカリ水電解セルの性能・耐久性評価にもとづき、さらに高いラジカル耐性、高い機械的強度を有する電解質・ポリマーの合成に成功した。
- ⑥: 設計指針の原案を、卑金属であるNi/Coへの接合性の良い高活性触媒が有効であると策定した。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①-1	設計指針の原案を策定	○
①-2	エーテルポリマー・膜が水電解で高性能・高耐久であることを実証し、さらに高分子量化に成功 設計指針の原案を策定	○
②-1	設計指針の原案を策定	○
②-2	設計指針の原案を策定	○
③-1	従来研究の標準より1/3~1/4のIr使用量で十分に高い水電解特性	○
③-2	高性能・高耐久を両立した水電解特性を得ることに成功	◎
④-1	劣化機構解析に着手し2020年度未までに劣化機構解析手法を確立する見込み	○
④-2	80℃で120時間程度性能が維持され高耐久なSAWEセルの開発に成功 耐久性試験後の構造解析結果より耐久性改善に資する高度化指針を提案	◎
⑤	SAWEセルの性能・耐久性評価にもとづき、電解質ポリマー・膜の特性を改善	○
⑥	設計指針の原案を策定	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
1件	2件	21件	0件

●今後の課題

- ・開発した水電解材料・セルに対して水電解セルの負荷変動や起動停止試験を実施して、耐久性・性能評価基準の材料・セル開発ロードマップ、設計指針を策定する。
- ・変動電源に対する耐久性評価手法を確立する。

●実用化・事業化の見通し

- ・固体高分子形水電解の材料・セルについては、本事業後に企業と連携したプロジェクトにより、大型実証を行う。
- ・固体アルカリ水電解の材料・セルについては、本事業後に構造最適化・耐久性実証を進めるプロジェクトを行い、企業と連携したプロジェクトにより大型実証を行う。

①-6 「水素利用等先導研究開発事業／水素製造技術高度化のための基礎技術研究開発／アルカリ水電解及び固体高分子水電解の高度化」

委託：横浜国立大学、産業技術総合研究所、京都大学、公立大学法人大阪、東京大学金属材料研究所、立命館大学、テラ・ベルメック（株）

● 成果カリ（実施期間：2018年7月～2021年2月予定）

- ・アルカリ水電解および固体高分子水電解を再E+電力変動による起動停止に伴う劣化に注目して解析モデル化したTopレベルを開発して電解槽の劣化モードを明確化
- ・上記計測および電解槽の機能現機構構解明のための標準的なセルおよび試験法、並びに放射光や可視光を用いたOperando計測法を開発
- ・再E+電力の先行予測制御、水電解槽と蓄電池システムの連携制御アルゴリズムを開発し、最小の蓄電池容量のグリーン水素P2Gシステム設計法を開発

● 背景/研究内容・目的

変動性の再生電力を大量に導入するためのP2Gシステムを構築するためには、材料評価アルゴリズムや標準的な評価法を策定しなければならぬ。また、アルゴリズムを策定し、起動停止や電源変動による劣化現象を明らかにする必要がある。また、電解槽の低コスト化のためには電極触媒の性能発現メカニズムや電極近傍の気泡などの物質移動を明らかにしなければならない。加えて、P2Gシステムを構築するためには立地条件に応じた電源変動の自発性や蓄電池との最適な組み合わせと運転アルゴリズムが必要である。本プロジェクトではこれらの要素技術開発を推進し、体系化することを目的とした。

● 研究目標

実施項目	目標
A	気泡発生挙動と電気化学特性の関係を明確化、水電解の加速劣化アルゴリズムと要素評価法の策定と電解槽リグの開発
B	PEM水電解の共通触媒評価法、加速劣化手法の提案
C	水電解触媒や気泡のオペランド高度計測手法の確立
D	アルカリ水電解のキャリア触媒活性評価法の指針構築
E	水素製造システムのシミュレーション構築と電解槽側への要求性能明確化
F	触媒劣化因子評価の高度解析技術の確立
G	アルカリおよびPEM水電解槽による劣化機構の分析

● 実施体制及び分担等

NEDO	横浜国立大学（実施項目A）	産業技術総合研究所（実施項目B）
京都大学（実施項目C）	公立大学法人大阪（実施項目D）	
東北大学金属材料研究所（実施項目E）		
立命館大学（実施項目F）	テラ・ベルメック（株）（実施項目G）	

● これまでの実施内容/研究成果

ホウスクワールのアルカリ水電解のハイポーター型電解槽および固体高分子水電解槽の標準的な評価法を策定し、起動停止や電源変動に伴う劣化の性能の等価性を確認した。これらの電解槽を用いた起動停止試験にて停止時にアノード電位の低下およびカソード電位の上昇挙動を把握、モデル化して起動停止後の電極触媒の劣化、還元が繰り返されること、SPE水電解のI₀触媒でも同様に、還元を繰り返して電解槽から溶出し、電解質膜に析出したり、触媒槽内のイオン交換樹脂が分解して溶出するモードで劣化することを明らかにした。

高度解析では劣化Topレベル中に電極が腐食化、還元を繰り返す挙動や電極表面での気泡発生挙動をOperando計測により明らかにした。グリーン水素P2Gシステム設計法として、再生電力の先行予測制御、水電解槽と蓄電池システムの連携制御アルゴリズムを開発し、最小の蓄電池容量のを開発した。

● 今後の課題

これまでに明らかにした劣化機構をもとにした材料評価アルゴリズム、材料評価法、電解槽の非定常解析モデル、及びP2Gシステム設計法を体系化する指針を示す。

● 実用化・事業化の見通し

これまで開発した要素技術を2023年までに体系化して材料・電解槽・P2Gシステムの開発手法としてまとめ、次期P2G実証事業の開発支援を行うとともに次世代材料開発にも展開し産業育成に貢献する。



● 研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
A	気泡発生挙動と電気化学特性の関係を明確化、水電解の加速劣化アルゴリズムと要素評価法の策定と電解槽リグの開発	○
B	評価法の適正条件を抽出、起動停止試験でのI ₀ 触媒の溶解/析出、腐食化モードを確認	○
C	再生電力変動の放射光計測法を確立、性能解析で実証、アルゴリズム計測技術、解析アルゴリズムを開発	○
D	触媒評価法における電気化学条件を評価	○
E	電解槽の応答性と関連付けたグリーン水素製造アルゴリズムを開発	○
F	劣化/電子構造マッピング基礎データ取得	○
G	各種試験における加速劣化条件データ取得	△

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
2件	3件	34件	0件

(2-1) 「水素利用等先導研究開発事業／大規模水素利用技術の研究開発」
水素専焼対応型Dry Low NOx高温ガスタービンの研究開発

委託：三菱日立パワーシステムズ株式会社
三菱重工株式会社

●成果概要 (実施期間：2016年8月～2020年2月終了)

- ・数値解析により低NOx性能/フラッシュバック耐性を確保できるノズル構造を設計し、気流試験によりその性能の確保を確認した。
- ・燃焼試験により、低圧・中圧条件で、フラッシュバックの発生無(ターゲット計画条件にてNOx 50ppm(15%O2換算)以下)を達成した。また、計画運用範囲のパーミアート耐性を確認した。
- ・燃焼器の全体計画図を作成し、燃料系統、燃料ステージングを設計した。
- ・水素燃焼振動を予測できる解析技術を開発した。また、既存技術の音響ライナで振動対策が可能であることがわかった。

●背景

- ・地球温暖化、化石燃料の枯渇の課題に対して、水素を本格的に利活用する水素社会の実現が求められている
- ・水素専焼大型ガスタービンの導入は、水素需要を大幅に拡大し、水素インフラの充実と普及拡大に大きな波及効果
- ・水素は天然ガスと比べて燃焼速度が速いため、天然ガス較きドライ低NOx燃焼器による対応困難
- 水素専焼には、フラッシュバックに高い耐性をもつ多孔噴流燃焼方式(クラスターバーナ)が有効

●研究内容・目的

- ・大型ガスタービンに適用可能な水素専焼ドライ低NOx燃焼器(クラスターバーナ採用)の設計に必要な研究開発を実施し、安定運用と低NOx性の両立に必要な課題の抽出、その解決に向けた研究開発を実施

●研究目標

実施項目	目標
A 単孔ノズルの解析・検証	・数値解析によりフラッシュバックを発生しないノズル構造の設計 ・気流試験によりフラッシュバックを発生しない許容範囲にあることの検証
B 縮小モデ「M」-ナ解析・検証	・NOx50ppm(15%O ₂ 換算)以下 ・パーミアート耐性の確認
C 大型ガスタービン向けクラスターバーナ燃焼器全体計画図	・クラスターバーナ燃焼器全体計画図 ・燃料ステージング設計
D 燃焼振動抑制の検討	・クラスターバーナの燃焼振動の予測 ・安定燃焼を実現する方法の策定

●実施体制及び分担等

NEDO	委託	三菱日立パワーシステムズ株式会社 (実施項目A、B、C)
	委託	三菱重工株式会社 (実施項目A、B、D)
アディエクトーダ 国立研究開発法人産業技術総合研究所 東山信也 関西センター所長代理		

●実施内容／研究成果

A. 単孔ノズルの解析・検証

B. 縮小モデ「M」-ナ解析・検証

C. 大型ガスタービン向けクラスターバーナ構造成立性検証

D. 燃焼振動抑制の検討

●今後の課題

- ・実機相当圧力条件のバーナ燃焼特性確認
- ・フラッシュバック耐性向上を図ったバーナ改良
- ・燃焼器全体計画/燃料ステージング詳細設計
- ・フルスケール燃焼器の性能検証
- ・燃焼解析技術の検証試験、振動抑制方法の効果の検証

●実用化・事業化の見通し

- ・大型GTに適用可能な水素専焼燃焼器の実用化に向け、バーナ改良、フルスケール燃焼器の詳細設計、燃焼器性能検証を順次進める。本研究開発の成果により実用化に向けた取り組みを継続でき、研究開発を加速できる。(実施者：MHPS、MHI)

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
単孔ノズルの解析・検証	数値解析により低NOx性能/フラッシュバック耐性を確保できるノズル構造を設計し、気流試験によりその性能の確保を確認した	○
縮小モデ「M」-ナ解析・検証	・燃焼試験により、低圧・中圧条件で、フラッシュバックの発生無(ターゲット計画条件にてNOx 50ppm(15%O ₂ 換算)以下)を達成した ・計画運用範囲のパーミアート耐性を確認した	○
大型GT向けクラスターバーナ燃焼器全体計画図	・燃焼器の全体計画図を作成した ・燃料系統、燃料ステージングを設計した	○
燃焼振動抑制の検討	・水素燃焼振動を予測できる解析技術を開発した ・音響ライナで振動対策が可能であることがわかった	○
特許出願	論文発表 2件 外部発表 28件	受賞等 0件

②-2)「水素利用等先導研究開発事業／大規模水素利用技術の研究開発／水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」

委託：川崎重工株式会社

● 成果別 (実施期間：2016年6月～2019年3月終了)

- ・水や水蒸気を用いない2MW級ガスタービン用の水素専焼ドライ低NOx燃焼器の改良試験。水素燃焼試験によるNOx性能ならびに燃焼安定性の確認。
- ・2MW級ガスタービンエンジンの50%負荷から定格100%負荷運転に相当する燃焼器入口条件において、NOx値35ppm (残存酸素16%換算値) 以下を得た。
- ・着火、エンジンの回転数上昇時を模擬した各種条件において、水素燃焼で失火や逆火が生じず、500℃以上の燃焼ガスを安定に生成する安定燃焼を得た。

● 背景/研究内容・目的

水素社会の普及および水素エネルギー市場の拡大・市場形成には、水素の需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術、特にガスタービンやエンジンといった水素を多量に利用するエネルギー機器を用いた水素専焼ならびにそれらに必要な水素燃焼技術が必要不可欠である。

本研究開発事業は、水や水蒸気を用いない水素専焼ドライ低NOx燃焼技術を用いたガスタービン燃焼器の要素技術開発、基盤技術の開発を目的とし、試作燃焼器の改良ならびに各種の水素燃焼試験による燃焼特性の評価を実施した。

● 研究目標

高圧水素燃焼試験を実施し、2MW級ガスタービンエンジンの50%負荷から定格100%負荷運転に相当する燃焼器入口条件において、NOx 35ppm (残存酸素16%換算値) 以下を達成する。

低圧水素燃焼試験を実施し、2MW級ガスタービンエンジンの着火、エンジンの回転数上昇時を想定した5%、20%、40%、80%、100%回転数を模擬した各種条件において、水素燃焼で失火や逆火が生じず、500℃以上の燃焼ガスを安定に生成する安定燃焼を達成する。

実施項目	目標
① NOx性能	35ppm以下
②-1 燃焼安定性 水素燃料のみでの安定した着火	異常なく着火
②-2 燃焼安定性 低回転数条件相当での燃焼安定性	各種条件において 500℃以上で尿炎

● 実施体制及び分担等

NEDO 川崎重工株式会社

● これまでの実施内容 / 研究成果

本研究開発事業では、CFD解析技術や特殊計測技術を用いて燃焼器形状を検討し、試作部品を製作した。水素燃焼試験を実施し、NOx値や燃焼安定性等の基本的な燃焼特性を把握した。取得した試験データを燃焼器部品の改良検討にフィードバックし、燃焼器部品形状および燃焼特性の改善を図った。

- ・燃焼器部品に改良を重ね、以下の成果を得た。
- ・50%から100%負荷運転に相当する条件でNOx 35ppm (残存酸素16%換算値) 以下を達成した。
- ・急負荷遮断および負荷投入を模擬した水素流量の急増減操作を行い、安定した水素燃焼を確認した。
- ・定格負荷相当条件を2時間保持し、試験後の燃焼器部品に問題がないこと確認した。
- ・水素での着火・エンジン起動を想定し、水素着火試験を実施。安定した着火性を確認した。
- ・エンジンの起動 (エンジンの低回転数) に相当する条件においても安定した燃焼状態を確認した。



水素専焼ドライ低NOx燃焼器



燃焼器試験 (左)



着火試験装置 (左)

水素着火時の燃焼状態 (右)

● 今後の課題

実機エンジン搭載に向けた設計や水素供給系の設計、エンジン起動から発電、停止に至るエンジン運転のための燃料制御技術を確認する必要がある。

● 実用化・事業化の見通し

NEDO実証事業「ドライ低NOx水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」に採択され、燃料制御技術の開発やエンジン運転試験を実施中。世界初、ドライ低NOx 水素専焼ガスタービンの技術実証試験に成功。

https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101337.html

● 研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①	50%から100%負荷運転に相当する条件で35ppm以下	○
②-1	着火・エンジン起動を想定した水素着火試験にて安定した着火性を確認	○
②-2	安定した燃焼状態を確認	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
1件	1件	52件	0件

(3-1) 「水素利用等先導研究開発事業／超高効率発電システム基盤技術研究開発／
酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発」

委託：産総研、東工大、
川崎重工、エネ総工研

● 成果サマリ (実施期間：2018年6月～2020年2月終了)

- ・高圧でも酸素水素燃焼が可能であることを示し技術的課題、検証方法を提示した。
- ・酸素水素燃焼タービン発電システムについて、発電効率75%を達成しうるシステム構成を提示した。
- ・酸素水素燃焼タービン発電システムについて、競合技術の特長と優位性について示した。

● 背景/研究内容・目的

クロージドガスタービンは、既存の開放系ガスタービンとは一線を隔す超高効率の発電システムとして期待されている。このため、水素基本戦略で示す2030年以降の水素発電用化政策も踏まえ酸素水素燃焼によるクロージドガスタービンシステムの実現性を検討する。具体的には、2018年度から2019年度までの2年間で発電効率75%を達成可能なシステムの技術成立性・経済性確保の見直しを検討するとともに、それらを競合技術と比較するファイビリティスタディ(FS)を実施する。

委託期間：2018年6月22日～2020年2月28日

技術評価委員会：2019年5月16日

● 研究目標

実施項目	目標
システムとりまとめ	技術成立性・経済性確保の見直しを提示すること。 競合技術の特長及びそれらに対する優位性を提示すること。
要素研究	技術成立性の見直しを提示すること。 発電効率75%を達成しうるシステム構成を提示すること。

● 実施体制及び分担等

NEDO	産総研 (システムとりまとめ、要素研究)
	東工大 (システムとりまとめ、要素研究)
	川崎重工 (システムとりまとめ、要素研究)
	エネ総工研 (システムとりまとめ)

● これまでの実施内容/研究成果

- (1) システムとりまとめ
I-1. 技術的成立性の検討 高圧でも酸素水素燃焼が可能であることを示し、技術的課題、検証方法を提示した。
I-2. 経済成立性の検討 1700℃級発電では大出力化とコストダウンにより、発電単価を下げること示した。また、1400℃級合理化案を提示した。
I-3. 実用化シナリオ検討 競合技術の特長と優位性について示した。
- (2) 要素研究
II-1. 酸素水素高圧燃焼技術の研究 高圧でも酸素水素燃焼が可能であることを示した。
II-2. 酸素水素燃焼タービンの研究 発電効率75%を達成しうるシステム構成を示した。
II-3. システム最適化・合理化検討 酸素製造設備等の付帯機器を含む総設備費および送電端効率について、経済的に合理的な酸素水素燃焼タービン発電システムプラント仕様案を提示するとともに、その実現に必要な技術課題を明らかにした。

● 今後の課題

酸素水素燃焼、耐熱、耐高温水蒸気材料、不凝縮ガス、漏洩・シール、爆発安全性の技術課題。システムの制御技術がある。
酸素水素燃焼による高温水蒸気発生を行う「クロージドサイクル検証装置」、さらに高圧化しタービンも含めた「小型酸素水素燃焼タービン試験装置」を用いて、技術課題を検証する。
1400℃級合理化案の基盤技術開発、研究開発と進めて技術の成熟度を高める。基盤技術開発、研究開発成果を踏まえた実用化への長期研究開発計画立案。

● 実用化・事業化の見直し

本FSにおいて技術成立性・経済性確保の見直しを提示し、競合技術の特長と優位性について示し、実用化シナリオが検討された。

● 研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
システムとりまとめ	技術成立性について技術的課題、検証方法を提示した。 経済性確保について1700℃級発電では大出力化とコストダウン、1400℃級合理化案を提示した。 競合技術の特長と優位性について示した。	○
要素研究	技術成立性について、高圧で酸素水素燃焼が可能であることを示した。 発電効率75%を達成しうるシステム構成を示した。	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0件	1件	12件	0件

(4-1) 「水素利用等先導研究開発事業／エネルギーキャリアシステム調査・研究／水素分離膜を用いた脱水素」

委託：(公財)地球環境産業技術研究機構
千代田化工建設(株)

● 成果カリ (実施期間) : 2014年4月～2019年6月終了

・世界最高レベルの性能を有する水素分離膜の開発に成功し、量産性を見据えた新規モジュール構造を提案した。
・水素分離膜型脱水素プロセスは、既存プロセスと比較してランニングコストにおいて優位性が示された。

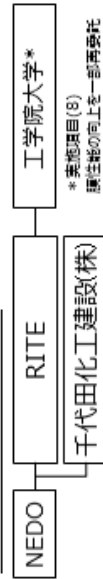
● 背景/研究内容・目的

水素エネルギーの安定な貯蔵・輸送という点で大きな可能性を有するエネルギーキャリアである有機ハイドライドから水素を効率的に取り出すメンブレンリアクター(MR)の実用化に必須な要素技術を確認することを目標に、装置の小型化を可能とする水素分離膜およびそれを用いたメンブレンリアクターのシステムについて技術課題および経済性検討を行う。

● 研究目標

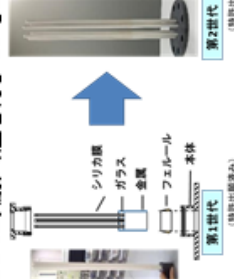
実施項目	目標
(1)	水素分離膜の長尺化 (200 mmL)
(2)	メンブレンリアクターの性能評価、量産化取得
(3)	メンブレンリアクターの技術課題検討、小型メンブレンリアクター装置の設計・運転
(4)	水素分離膜型脱水素について分散/小型プラントの顧客コスト把握
(5)	プロセス検討・改良、技術課題の抽出
(6)	実機に向けた協同会議への参加、検討
(7)	500 mmLの水素分離膜の製膜、再現性の向上
(8)	モジュールのシール方法、膜の性能向上
(9)	高圧化の有効性を検討
(10)	パイロットプラントの概念設計、他用途展開
(11)	モジュール構造案の提示、課題抽出
(12)	膜、メンブレンリアクターの耐久性評価

● 実施体制及び分担等



● これまでの実施内容/研究成果

量産性を見据えた新規モジュール構造を提案し、MRとしての有効性を確認。MR (単管) の耐久性も劣化予測から、15,000 hの耐久性を有していることを確認。



また、水素分離膜型脱水素プロセスについて、既存プロセスと比較してランニングコストにおいて優位性が示された。分離膜のコストを試作時の1/2とすることで、機器コストでも優位性が表れる結果となった。

● 今後の課題

計画した技術開発は全て達成済み。モジュールの長期耐久性、エンジニアリングデータの取得及びプロセスの詳細設計を経て、スケールアップを行う必要がある。

● 実用化・事業化の見通し

「シリカ膜モジュール量産化体制」、「SOF Cとの連携」を検討することにより、実用化が促進されると考えられる。

また、他用途展開についても、概念的な経済性検討を行い、有効性を確認している。

本技術の展開についても用途に応じた製膜技術の改良やパイロット試験を経て、実用化を目指す。

● 研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
(1)	φ10 mm, 200 mmLで目標性能を達成	○
(2)	平衡シフトによる反応温度の低減を確認	○
(3)	200 mmL×7本のメンブレンリアクター装置において平衡シフト効果を確認	○
(4)	既存プロセスもランニングコストで優位、分離膜製造コストの目標を設定	○
(5)	プロセス検討からも膜分離型の優位性確認	○
(6)	計6回の協同会議にすべて参加、MCH脱水素の有効性を確認	○
(7)	φ10 mm, 500 mmLで目標を達成	○
(8)	新規モジュール構造を考察・試作、その可能性を確認 世界最高性能を示す水素分離膜の作製に成功	○
(9)	反応側を高圧にすることの有効性を確認	○
(10)	高圧ガスの規制緩和による高圧化に伴い、プロセスを再検討し、分離膜の優位性を確認	○
(11)	実用的なモジュール構造を提案、課題を抽出	○
(12)	分離膜、メンブレンリアクターともに、実用的な長期信頼性を有することを確認	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
2件	6件	59件	0件

(5-1) 「水素利用等先端研究開発事業／炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査／膜反応器を用いたメタン直接分解によるCO₂フリー水素製造技術」

委託：(公)地球環境産業技術研究機構

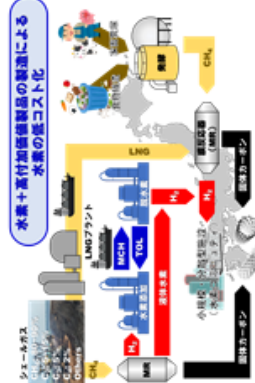
●成果カリ (実施期間：2019年4月～2021年2月予定)

- ・500℃以上の耐熱性を有する水素透過膜を開発し、水素透過率 $5 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、透過率比(H₂/CH₄) 3,000以上に目途を得た。
- ・Pd膜とNi/Fe/Al₂O₃触媒を組み合わせた膜反応器にて、反応温度600℃の条件下でメタン転化率90%以上を達成し、膜反応器の有効性を示した。

●背景/研究内容・目的

水素社会構築のためには、水素を低コストかつ大量に製造する技術の確立が重要である。長期にわたる安定供給ができるメタンに着目し、水素の低コスト化のために「水素＋高付加価値製品」の同時製造を可能とする技術を開発する。

本研究開発では、(1)精密に細孔制御されたシリカ膜およびPd膜などの水素選択透過膜の開発、(2)膜反応プロセスに好適な触媒の探索および開発、(3)膜反応装置の開発および有効性の実証検討を行う。またLCA評価も含め、(4)水素製造および分離膜技術に関する情報収集・発信を行う。



●研究目標 Fig.1 想定される低コスト水素供給

実施項目	目標
(1)	500℃以上の耐熱性を有し、水素透過率 $5 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、透過率比(H ₂ /CH ₄) 3,000以上の透過分離性能を有する分離膜を開発する。
(2)	低温活性(500～600℃)を有し、メタン直接分解用膜反応器においてメタン転化率60%以上の触媒を見出すとともに、コーキング対策の指針を得る。
(3)	メタン直接分解用膜反応器の有効性を実証し、最適反応条件を見出す。
(4)	膜反応器を用いたプロセスのLCA評価を行い、その有効性を示す。さらに、研究活動内容・成果を社会・国民に対してわかりやすく説明する。

●実施体制及び分担等



●これまでの実施内容/研究成果

シリカ膜は製膜条件を精査することにより、反応温度付近である500℃以上の耐熱性を確認した。またPd膜も同様に製膜条件を精査し、これまでよりも高い水素透過性($1.3 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)を有する膜を得ることができた。

Pd膜とNi/Fe/Al₂O₃触媒を組み合わせた膜反応器において、操作条件を検討したところ、反応温度600℃にてメタン転化率90%以上を達成し、膜反応器の有効性を示した。メタン分解反応プロセスのLCA評価では、従来の触媒反応プロセスと比較して、水素製造効率、CO₂発生量ともに膜反応プロセスが優位であることが分かった。

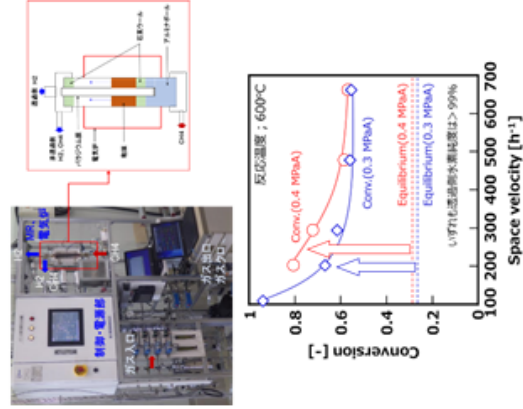


Fig.2 膜反応装置外観と膜反応試験の結果

●今後の課題

水素分離膜については、2020年度末の目標を達成できる目途を得た。一方で膜反応試験において、シリカ膜であれば耐水蒸気性、Pd膜であればPd-Cの形成といった課題があげられた。

膜反応試験では、コーキングの影響であると考えられる触媒の固着・閉塞が確認され、文献調査等で微量の添加物を加えることで抑制できる可能性ができた。膜反応試験における微量添加物の効果を確認する必要がある。

●実用化・事業化の見直し

実用化に向けては、固体カーボンが生成する反応系であるので、連続的にカーボンを取り出すプロセスを考える必要がある。また、コーキング対策についても、まずはラポールの試験において、その効果を確認し、順次スケールアップしていくことにより実用化を図る。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
(1)	Pd、シリカ膜ともに2020年度末の目標達成の目途を得た。	○
(2)	触媒反応試験において、従来よりも低温で比較的活性の高い触媒を見出した(Ni/Fe/Al ₂ O ₃ 系)。	○
(3)	Pd膜とNi/Fe/Al ₂ O ₃ 触媒を組み合わせた膜反応器において、600℃でメタン転化率90%以上を達成し、その有効性を示した。	○
(4)	LCA評価において、膜反応器の有効性を示すことができた。またFC-EXPOへの出席など、国民との対話を行った。	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
0(2)件	0(1)件	5件	0件

()内は準備中の件数

(5-2) 「水素利用等先導研究開発事業／炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査／アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造」

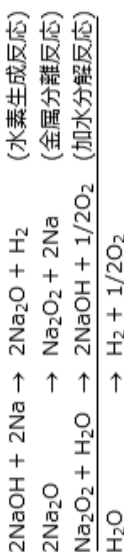
委託：広島大学

●成果サマリ(実施期間：2019年4月～2020年3月終了)

- ・ナトリウムレドックスサイクルの課題である酸化ナトリウムによる容器腐食を抑制する耐腐食性材料の設計指針を見出し、酸化ナトリウムの熱分解挙動の新たな知見を得た。
- ・部分加熱方式を採用した反応制御システムを設計及び作製し、これを用いることで容器腐食を回避しつつ酸化ナトリウムの熱分解反応が制御可能であることを実証した。
- ・既存技術を参考に水素製造コストの試算を行い、ナトリウムレドックスサイクルを用いた場合の水素製造コストが20円/Nm³程度と見積もられることを示した。

●背景/研究内容・目的

本事業では、以下に示すナトリウムレドックスサイクルを用いた500℃以下の熱エネルギーと水から水素を製造する技術の研究開発を目的とし、現状の課題を解決するための要素技術に関する研究を行った。

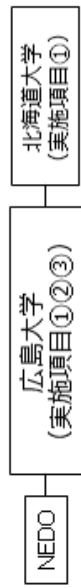


この熱化学サイクルは、太陽熱や排熱を利用することができ、既存する蓄熱システムと組み合わせれば連続運転が可能である。一方で、上記反応過程で生成する酸化物が極めて強い腐食性を示し、反応容器が腐食されることが最大の課題である。そこで、本事業では、高い耐食性を有する反応場を実現し、実用化に繋げるための知見を得ることを目的とした研究を実施した。

●研究目標

実施項目	目標
①反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討	ターゲットとする反応である反応 $<2\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{Na}>$ において、現状キヤラクタリゼーションが行われていないあるいは、起こりうる反応生成物のキヤラクタリゼーションがなされること
②反応制御技術の検討	ターゲットとする反応 $<2\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{Na}>$ あるいは水において $2\text{Na}_2\text{O}$ の70%以上の Na_2O_2 への反応進行の確認及び水素製造コストの試算

●実施体制及び分担等



●これまでの実施内容/研究成果

実施項目①：反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討

水素製造プロセスで生成する酸化ナトリウム(Na₂O)の高い腐食性を抑制するため、耐腐食性材料の探索及び評価を行った。その結果、酸化物及びAl化合物、グラファイトのような安定構造を有する物質が高い耐腐食性を示すことが明らかになった。また、単結晶体や多結晶体が高い耐腐食性を示したことから、材料の化学的性質だけでなく、表面形状等の物理的性質の寄与も大きいことがわかった。また、耐腐食性材料を使うことによりNa₂Oの熱分解反応は、当初想定していた金属分離反応とは異なり、単独熱分解(Na₂O → Na + O₂)により進行することが示唆された。

実施項目②：反応制御技術の検討

集光式ハロゲンスポットヒーターを用いた流動層型反応装置を設計、作製した。このような部分加熱方式を用いることにより、反応部と容器壁面の間に温度勾配を作製することで、反応容器の腐食を回避しつつNa₂Oを500℃程度に加熱することに成功した。Na₂Oを加熱することにより得られた生成物の分析を行ったところ、Na蒸気の生成は示唆されたものの、予想された生成物であるNa₂O₂は観測されなかった。これは、前述したNa₂Oの単独熱分解が進行している可能性を示唆している。太陽熱利用施設ヘムソラール(スベイン)を参考に、Naレドックスサイクルを用いた水素製造におけるコスト試算を行った結果、1Nm³あたりの製造コストは20円程度と見積もられた。

●今後の課題

実施項目①：材料に対する腐食環境下への暴露時間と腐食反応の進行度の相関を得るための定量的な分析・評価が必要である。

実施項目②：Na₂Oの熱反応に関する生成物の分析や反応条件の最適化、本反応制御技術の流動層への適用について検討する必要がある。

●実用化・事業化の見通し

実用化や事業化への展開については、助言員メンバー企業と引き続き連携して議論を進めたい。

●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
①	耐腐食材料の設計指針、及びNa ₂ Oの熱分解挙動に関する知見を得た。	○
②	Na ₂ O等の腐食性材料に有効な反応制御装置の基礎を確立した。水素製造コストを試算した。	△

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
1件	0件	1件	0件

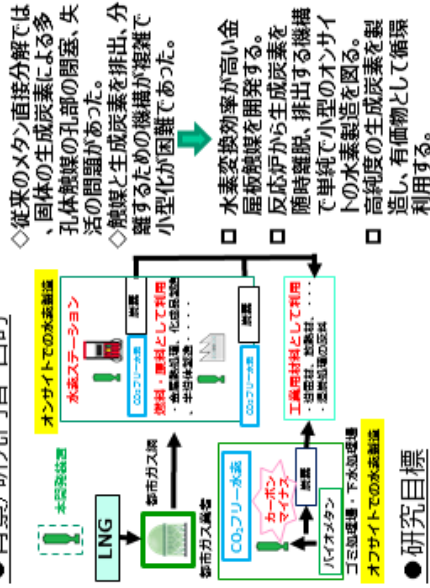
⑤-3 「水素利用等先導研究開発事業／多様な水素化合物等からの二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査／メタン直接分解による水素製造に関する技術調査」

委託：伊原工業、東海国立大学機構岐阜大学

●成果サマリ (実施期間：2019年4月～2021年2月予定)

- ・800℃で50%以上の水素変換効率を示す金属板触媒を開発した。Ni板にCuNi10ppm処理した触媒では水素濃度89%が得られた。
- ・高純度の生成炭素を直接分離し、工業材料としての利用に目処を付けた。体積抵抗率、熱伝導率特性に優れた生成炭素を得ることができた。
- ・反応炉内からの生成炭素の離脱、排出法を確立、水素の大量製造装置の概念設計を確認した。離脱法の確立、水素製造装置の温度、流量、反応炉サイズの諸元を得た。

●背景/研究内容・目的



●研究目標

実施項目	目標
1	水素製造効率を向上するための板触媒の調査
2	反応炉設計のための基礎データ収集実験
3	内加熱式反応炉の小型試験装置の製作実験
4	生成炭素および生成ガスの特性解析
5	板触媒の微細構造の解析
6	ガスの滞留防止と加熱促進による水素製造効率向上の技術調査
7	熱流体シミュレーションによる水素大量製造装置の概念検討

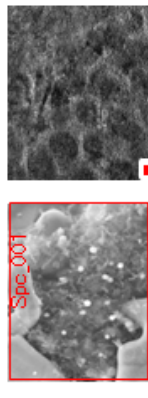
●実施体制及び分担等



●これまでの実施内容／研究成果

板触媒の調査 (1, 5)

板触媒の表面がナノサイズに微細化した。加熱に伴う二次再結晶によりNi10ppmのステップ構造が積層した隆起が形成され、触媒性が向上したと推測される。

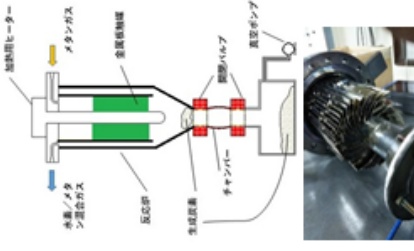


生成炭素の用途開発 (4)

生成炭素の体積抵抗率、熱伝導率はグラフアライメントの数値が得られた。

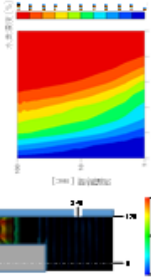


反応炉の開発 (2, 3)



流動解析 (6, 7)

流動可視化実験を実施。炉内ガスの経路短縮および滞留の抑止を確認。温度、流量、反応炉サイズをパラメータとし、水素製造装置の概念設計を実施。



●研究成果まとめ

実施項目	成果内容	自己評価
1	水素製造効率を大幅に高める触媒を開発 (水素濃度理論値94%に対し93%達成)	◎
2	触媒配置、離脱法等の基礎データ取得	○
3	内加熱式反応炉を試作し、総合的データ取得 (世界初の真空チャンバー法)	◎
4	生成炭素の解析、用途開発	○
5	板触媒の表面微細構造の変化を究明	○
6	反応炉内での流動解析を実施	○
7	大型装置の熱流動シミュレーションの実施	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
2件	0件	1件	0件

●今後の課題

- ▶ 触媒、反応炉の耐久性、信頼性の向上のための機器開発を行う。
- ▶ 生成炭素のさらなる用途開発。
- ▶ 小型の水素精製装置の開発。
- ▶ 装置のメンテナンス、生成炭素の回収を行う業者とのアライアンスの構築。

●実用化・事業化の見通し

熱利用する製鉄業向けに、オンサイト水素製造装置を販売する。水素精製装置などを開発し、オンサイト水素ステーション等の純水素利用分野へ展開する。

(5-4) 「水素利用等先導研究開発事業／炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査／メタンの熱分解による水素製造技術の研究開発」

委託：産業技術総合研究所、株式会社IHI、京都大学

● 成果目録 (実施期間：2019年4月～2021年2月予定)

- ・メタンから炭素と水素を製造可能とする触媒の開発、反応器検討およびプロセス構築のための熱・物質マネージメント検討
- ・回収炭素の有効利用法の探索と製造・利用における安全性の評価
- ・新規提案プロセスの技術成立性・事業性検討、および社会実装に向けたシナリオ検討

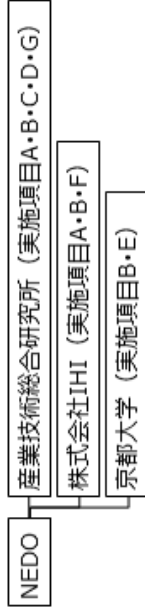
● 背景/研究内容・目的

低炭素化社会の実現に向け、二酸化炭素を排出しない水素製造技術として、触媒を用いた熱化学的メタン分解 ($\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$) による水素製造プロセスの開発を推進

● 研究目標

実施項目	目標
A	メタン熱分解CO ₂ フリー水素製造に適した新規触媒の開発
B	炭素回収型メタン熱分解を実現する反応器およびシステムに関する具体的検討
C	固体炭素の有効利用に向けた調査、分析、評価
D	提案技術の社会導入を想定した固体炭素の安全性評価
E	メタン分解によるCO ₂ フリー水素製造プロセス構築のための効率および熱・物質マネージメント検討
F	新規プロセスの技術成立性および事業性検討
G	提案技術の社会実装のためのシナリオ策定・開発計画検討

● 実施体制及び分担等



● これまでの実施内容／研究成果

革新的な技術の社会導入に向け、触媒開発などの要素技術開発からシステム、反応プロセスシナリオに至るトータルでの研究開発を推進

- ・固体炭素の製造に適した触媒の開発および反応条件の明確化に取り組み、性能目標達成に資する成果を取得、固体炭素回収型プロセス提案に向けて新規触媒を開発、特許を出願
- ・熱分解炭素を用いた複合材料を調製、目標 (強度) 達成に向けた見通しを取得
- ・固体炭素の暴露解析手法を確立、局所排気対策によってリスク低減が可能であることを提示
- ・熱マネージメントの重要性を把握し、反応システム開発の方向性を提示
- ・反応システムを構築、水素製造原価30円/Nm³以下、IRR10%以上を達成する条件を把握、特許を出願
- ・規模を想定した検討により、中規模シナリオおよび流動層反応器を用いた検討に重点を置くという方向性を提示

● 今後の課題

- ・流動層に適した触媒の開発と高性能化
- ・炭素分離可能な条件の提示
- ・種々の熱分解炭素の評価検討
- ・プロセスの最適化と全体システムに関する総合的な検討
- ・鉄鋼利用や埋設、また海外を含めた検討

● 実用化・事業化の見通し

- ・ラポベルでの小型反応器を用いた評価等による要素技術の確立
- ・水素分離・熱供給システム等を含む全体システムの構築
- ・スケールアップ・事業化検討

実施項目	成果内容	自己評価
A	触媒開発と性能目標の達成、反応条件明確化	○
B	反応器開発の方向性提示	○
C	性能目標達成見通しを取得	○
D	リスク低減可能であることを提示	○
E	反応システム開発の方向性提示	○
F	システム構築・検討、水素製造原価の提示	○
G	中規模シナリオ検討への重点化	○

特許出願	論文発表	外部発表	受賞等
2件	1件	2件	0件

プロジェクト用語集

課題番号：①－1「アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発」

	用語	解説
あ行	アルカリ水電解	電解液にアルカリ水溶液（KOH）を用いた水電解
か行	隔膜	陰極を有する陰極室と陽極を有する陽極室とを区画し、陰極と陽極の直接的な接触を防止するとともに、陰極室と陽極室で発生したガス物質の混合を防止し、かつ透水性を有する膜をいう。
た行	電解セル	陰極を有する陰極室と陽極を有する陽極室とを区画する隔膜を装着し、陰極室及び陽極室に電解液を充填して、陰極・陽極間に理論分解電圧以上の電圧を印加することで物質を電気分解するための構成の最小単位をいう。

課題番号：①－2「高温水蒸気電解技術の研究開発」

	用語	説明
A	ASR	面積比抵抗（Area Specific Resistance）
F	FIB-SEM	収束イオンビーム搭載走査型電子顕微鏡（Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscope）きわめて細く集束したイオンビームを試料表面で走査することにより、試料表面を加工ながら、電子顕微鏡観察を行う装置。
G	GDC	中間層材料。ガドリニア添加セリア（Gadolinia Doped Ceria）。 $Gd_2O_3-CeO_2$
I	IEA	国際エネルギー機関（International Energy Agency）
	IEC	国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission）
	ISO	国際標準化機構（International Organization for Standardization）
L	LCCF	酸素極材料。ランタン・カルシウム・コバルト・鉄（La・Ca・Co・Fe）複合酸化物。
	LCCM	酸素極材料。ランタンカルシウム・コバルト・マンガン（La・Ca・Co・Mn）複合酸化物。
	LCFM	酸素極材料。ランタン・カルシウム・鉄・マンガン（La・Ca・Fe・Mn）複合酸化物。
	LSCF	酸素極材料。ランタン・ストロンチウム・コバルト・鉄（La・Sr・Co・Fe）複合酸化物。
	LSTF	酸素極材料。ランタン・ストロンチウム・チタン・鉄（La・Sr・Ti・Fe）複合酸化物。
N	Ni-GDC	水素極材料。ニッケル（Ni）と“GDC”のサーメット

O	OCV	開回路電圧 (Open Circuit Voltage)
S	SOEC	固体酸化物電解セル (Solid Oxide Electrolysis Cell)
	SOFC	固体酸化物燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell)
Y	YSTC	酸素極材料。イットリウム・ストロンチウム・チタン・コバルト (Y・Sr・Ti・Co) 複合酸化物。
	YSTF	酸素極材料。イットリウム・ストロンチウム・チタン・鉄 (Y・Sr・Ti・Fe) 複合酸化物。
	YSZ	電解質材料。イットリア安定化ジルコニア (Yttria Stabilized Zirconia)。 Y ₂ O ₃ -ZrO ₂
Z	ZMG	SOFC用セパレータ材料として開発されたフェライト系合金
が行	高温水蒸気電解	“固体酸化物形セル”を用い、水電解を高温で行う技術。
	固体酸化物電解セル	主にセラミックス (およびサーマット) からなる、水素極/電解質膜/酸素極の積層構造体。酸素イオン伝導性の高い酸化物を電解質膜とし、電場下で水素極側の水蒸気から酸素を酸素極側へ移動して水素製造する。電解質にプロトン伝導性の膜を使用する場合もある。
ざ行	スタック	複数のセルを積層一体化したもの。ガス供給・排出、および給電のポートを備える。

課題番号：①－3 「非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発」

	用語	説明
M	MEA	Membrane Electrode Assembly、日本語では、膜電極複合体、もしくは、膜電極接合体と呼ばれる。アニオンもしくはカチオンを透過する高分子膜と触媒電極陪を一体化した構造体。水電解の場合は、この電極部分で水電解反応を起こす。
P	PEEC	Polymer Electrolyte Electrochemical Cell、固体高分子型水電解セル。
	PEM	Polymer Electrolyte Membrane、固体高分子膜。
あ行	アニオン	負に荷電したイオン。
	アノード	反応物質を酸化する (反応物質から電子を取り去る) 反応を生じさせる電極。外部から電流が流れ込む電極となる。
が行	カソード	反応物質を還元する (反応物質に電子を与える) 反応を生じさせる電極。外部へ電流が流れだす電極となる。
	カチオン	正に荷電したイオン
	貴金属	化合物をつくりにくく希少性のある金属。金 (Au)、銀 (Ag)、白金 (Pt)、パラジウム (Pd)、ロジウム (Rh)、イリジウム (Ir)、ルテニウム (Ru)、オスmium (Os) の8つを一般に貴金属元素という。

	固体高分子型水電解セル	高分子膜をイオン導電体として用いた水を電解して酸素と水素を生成するデバイス。高分子膜として、普通はカチオン透過膜を用いる。
	固体高分子膜	イオン導電性を持つ高分子膜。(電気化学では通常液体をイオン導電性物質として用いるため、こう呼ばれる。)
ざ行	システム	お互いに影響を及ぼす複数のデバイスを組み合わせることである目的に対応して動作する形としたもの。
	スタック	一対のアノードとカソードをたくさん積層すること。これより動作電圧を高くすることが可能なため、デバイスとして制御が行いやすくなる。
た行	デバイス	ある特定の機能を持つ機械。
は行	非貴金属	貴金属元素以外の全ての金属元素。
ま行	マルチスタック	複数のセルを積み重ねること。
	水電解セル	水を電解して酸素と水素を生成するデバイス。

課題番号：①－４「アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発」

	用語	説明
A	AFM (原子間力顕微鏡)	微細な探針で試料表面を走査し、ナノスケールの凹凸形状を三次元的に計測する装置
C	CCM (触媒担持膜)	表面に触媒を担持させた電解質膜。通常アイオノマを結着材に用いる。
M	MEA(膜電極接合体)	ガス拡散層、触媒層、固体高分子膜(電解質)、を貼り合わせて一体化した膜/電極接合体
P	PTE (多孔質電極)	PTL (多孔質移動層) 表面に触媒層を形成したもの。水電解セルではこの触媒表面を電解質膜に押し付ける。CCS という場合もある。
	PTL (多孔質移動層)	水電解セルで電極と複極板の間に配され、反応物や生成物の移動や両者の間の電気伝導を担う。一般的に導電性材料を用いた多孔質媒体。燃料電池のガス拡散層に相当し、水電解セルでは絡絡電体とも呼ばれる。
あ行	アイオノマ	高分子膜の主鎖およびイオン交換基をイソプロピルアルコールなどの溶媒に溶解させた溶液。乾燥させると高分子膜と近い性状を持つことになる。電極を作成する際、触媒粒子の結着剤(バインダ)として用いられることが多い
	アニオン交換膜 (AEM)	負の電荷をもったアニオンがイオン担体となりイオン伝導性を有する固体高分子膜、代表的 AEM の構造は、炭化水素系ポリマー主鎖に四級アンモニウム塩基のアニオン交換基を有するもの。
	アノード	水電解セルでは酸素を発生する陽極
か行	カソード	水電解セルでは水素を発生する陰極

	活性化過電圧	電極反応速度が律速となる過電圧成分。触媒性能、触媒有効表面積に依存する。
	過電圧	水電解に要する理論電圧値と実際の電解電圧の差
ざ行	触媒	電極反応を促進するために用いる材料。プロトン交換膜水電解では白金系金属しか触媒に使用できないが、アニオン交換膜時水電解では、アルカリ水電解と同様に遷移金属が触媒材料として使用可能。
	触媒核	無電解析出プロセスを利用して不導体上に金属薄膜を形成するにあたっては、その表面に対し、還元剤の酸化反応を選択的に促進する触媒（Pd など）のナノ粒子をあらかじめ付与する必要がある。これを触媒核と呼ぶ。水電解に利用する触媒材料という意味での「触媒」とは異なる（「触媒」欄参照）。無電解析出を用いた不導体基板への金属薄膜形成の高精度制御においては、この触媒核を均一に表面に付与する方法が最も重要な要素技術の一つとなる。
た行	電解質膜	電気化学装置でイオン伝導を担う媒体である電解質に用いる固体高分子膜。主にカチオン交換膜とアニオン交換膜の二種類がある。
	電解性能	水電解セルでは、電流密度－電圧曲線が代表的性能指標。特定の電流密度における電圧は低いほど高性能
な行	ナノバブル	1 μm 以下のナノメートル単位の気泡
	濃度過電圧	反応物や生成物の物質移動が律速となって生じる過電圧成分。
は行	複極板（バイポーラープレート）	電解セルをスタックした際にセル同士の仕切り板となる導電性金属板であり、スタックでは一枚が陽極と陰極の役割を同時に果たす。水やガスを流すための流路を設けるための加工が施されている。
	プローブ顕微鏡	走査型トンネル顕微鏡（STM）や原子間力顕微鏡（AFM）に代表される、微小な針（探針：プローブ）で試料をなぞって、その形状や性質を観察することができる顕微鏡の総称
ま行	無電解析出	金属薄膜を形成する電気化学的めっきプロセスの一つであり、還元剤の酸化反応からの電子供給によって金属イオンを還元することで膜を形成する。薄膜の析出均一性に優れ、樹脂等の不導体表面にも金属析出が可能であるという特長を有する。

課題番号：①－5「高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発」

	用語	説明
英数	FT-IR	フーリエ変換赤外分光法(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)。
N	Ni フォーム	スポンジ状の多孔質ニッケル。

	NMR	核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance)。
O	OER	酸素発生反応(Oxygen Evolution Reaction)。水電解セルにおけるアノード反応である。
	Orthorombic 構造	結晶構造の一つ。直方晶(斜方晶)。
あ行	アイオノマー	水電解セルの触媒層で用いられるイオン伝導性ポリマー。触媒(担体)の結着性も担うことからバインダーと表現されることもある。
	エーテルフリーポリフェニレン系アニオン交換ポリマー	脂肪族ポリマーはラジカルによる主鎖分解が容易に起こる。ラジカルには強い芳香族系アニオン伝導性ポリマーも主鎖にエーテル結合が含まれる場合は、アルカリ環境でエーテル結合の開裂が引き金となって、即座にイオン官能基が同時分解する。アルカリ環境での分解の起点となるエーテル結合を有さない全芳香族ポリマーであるエーテルフリーポリフェニレン系アニオン交換ポリマーはアルカリ・ラジカルに対して高い耐久性を有する。
か行	固体アルカリ水電解(PEWE)	電解質膜に固体のプロトン伝導性電解質膜を用いる水電解。
	固体アルカリ水電解(SAWE)	電解質膜に固体のアニオン伝導性電解質膜を用いる水電解。
さ行	細孔ファイリング膜	機械的強度の高い多孔質基材へ、イオン伝導性ポリマーを充填した電解質膜。多孔質基材への充填によりイオン伝導性ポリマーの膨潤が抑制され、イオン伝導性を維持したまま水素などのガス透過性が抑制される。また、多孔質基材が有する高い機械的強度により薄膜化も可能となる。多孔質基材の膜厚・空孔率・機械特性やイオン伝導性ポリマーを選択することで、電解質膜のイオン伝導性とガス透過性を制御できる。
	スピネル構造	結晶構造の一種。組成は AB_2O_4 (A, B は異なる陽イオン)。
な行	ナノ粒子連結触媒	数 nm の大きさのナノ粒子同士が部分的に融着した数珠上のネットワーク構造を取る触媒。金属が連結しているためカーボン等の導電性担体を用いなくても導電パスが形成される。担体フリーであるため担体由来の劣化がなく、かつ数 nm の金属粒子構造が維持されるため高表面積である。
は行	パーフルオロスルホン酸ポリマー	スルホン酸基を側鎖に有するフッ素系電解質ポリマー。米 DuPont 社の Nafion が有名である。
	複合酸化物	2 種類以上の金属で構成される酸化物。
	ペロブスカイト構造	結晶構造の一種。組成は ABO_3 (A, B は異なる陽イオン)。

課題番号：① - 6「アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化」

	用語	説明
A	AC グリッド	交流グリッド。一般には電力会社・送配電事業者の送電網をさす。
	AFP TCP (Advanced Fuel Cells Technology)	1990 年に IEA 内で燃料電池の市販化・開発に貢献するために設立された技術情報交換プログラム。

	Collaboration Programme)	
	ANNEX30	IEA AFC TCP での電解に関するワーキンググループ。IEA AFC TCP の7つのワーキンググループの中で最も活発に活動しており、年2回対面ミーティングに加えて web でのミーティングも実施されている。本事業の参画機関からも期間中のミーティングに出席している。
C	CV	Cyclic Voltammetry の略。「サイクリックボルタンメトリー」の項を参照。
D	DNJ-V01, DNJ02019	デノラ・ペルメレック社で実施された固体高分子形水電解の起動停止試験の名称。
	DNJ-V4, DNJ2019	デノラ・ペルメレック社で実施されたアルカリ水電解の起動停止試験の名称。
F	Fraunhofer ISE	Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems。 ドイツの国研に相当するラウンホーファー研究機構における研究所の一つ。太陽光だけでなく水素エネルギー関連の研究も実施している。IEA Annex 30 内での PEM 電解標準セルを開発した。
I	International Energy Agency (IEA)	国際エネルギー機関。1974 年、OECD においてエネルギーに関する自律的機関として設立。
L	Linear Sweep Voltammetry (LSV)	「リニアスイープボルタンメトリー」の項を参照。
M	MPPT 制御	Maximum Power Point Tracking。最大電力点で追従する制御方式。
	Matlab	MathWorks 社が開発している数値解析言語・ソフトウェアプラットフォーム。
N	NDA1, NDA2	Non-Disclosure Agreement、機密保持契約。 本事業ではプロジェクトを代表して横浜国立大学がプロジェクト外と締結する機密保持契約を通称「NDA1」とし、プロジェクト内の機関と NDA1 締結機関のうち、本プロジェクトのリソースを利用して研究開発を促進する機関のための任意の機関のグループで結ぶ機密保持契約を「NDA2」としている。
	Nafion	米国 DuPont 社の開発したパーフルオロスルホン酸系イオン交換樹脂の商標（現在は Chemours 社の取り扱い）。食塩電解等の工業電解用の隔膜や固体高分子形燃料電池・水電解の電解質膜として広く利用されている。
N	Nyquist プロット	異なる周波数で測定したインピーダンスの実数成分と虚数成分をそれぞれ横軸、縦軸にプロットした図を Nyquist プロットという。「交流インピーダンス測定」の測定結果を表示する方法の一つで、各種抵抗（過電圧）などを読み取ることができる。 「交流インピーダンス測定」の項も参照。

P	P2Gシステム	Power to Gas system の略。パワーツーガス。 変動があり貯蔵の難しい再生可能エネルギー由来の電力などを化学エネルギーとして貯蔵・輸送するために水素などのガスに変換すること。
	PEM 水電解	固体高分子形(SPE)水電解のうち、固体高分子形燃料電池などにも用いられるプロトン交換膜(Proton Exchange Membrane : PEM)を電解質に用いる水電解方式。電解質が固体のため電解質でのガスクロスオーバーが小さく、生成水素の純度が高く、薄膜電解質を用いるため抵抗損失が小さく電流密度を高くできる。非定常応答にも優れるなどの特徴を持つ。また、電極などを薄くすることができ、体積・重量あたりの生成速度に優位性がある。一方で一般にイリジウム等の貴金属触媒やチタン製の構成部材が必要となるなど材料コストが高い欠点もある。
	PV	Photovoltaic の略。太陽光発電。
R	RHE	可逆水素電極 (Reversible Hydrogen Electrode) 。作用極と同じ支持電解質(電極反応する物質を含まない電解質)中に配置して参照(基準)電極として用いられる。
S	SEM-EDX 分析	走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) は電子顕微鏡の一種であり、試料表面上に電子線ビームを照射し、試料表面から放出される二次電子や反射電子を検出することにより試料表面を観察する装置である。また、EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) は二次電子や反射電子と同時に放出される特性 X 線を検出することにより試料の元素分析を行う方法である。SEM-EDX は、SEM で試料の観察を行いながら、その視野に対して元素分析を行う方法のことである。
	SPE 電解	固体高分子形水電解 (Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis) の略。「固体高分子形水電解」「PEM 水電解」の項も参照。
T	TEM	透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope) の略称。収束させた電子線を電界で加速し、サンプルに照射することで、透過した電子線像を観察する。近年、光学系や検出器が大きく進歩しており、原子レベルの解像度を比較的容易に得られるようになってきている。
	Tafel プロット	電流-電位曲線の電流軸を対数スケールで示したプロット。Tafel 式に基づき、電極反応領域は直線となる。cf. Tafel 勾配、Tafel 領域
	Tafel 勾配	電気化学反応における平衡電位からのずれを表す過電圧は電流密度の対数に比例する (Tafel の関係) 。このときの傾きを Tafel 勾配と言い、電気化学反応の反応機構と関わりのある量として知られている。
	Tafel 領域	分極曲線において Tafel 勾配が一定となる電流密度または電位の範囲のこと。物質輸送の影響を受けない電荷移動律速で反応が進行する条件や反応機構が変化しない条件の指標として用いられる。
X	XANES	「X 線吸収計測」を参照

	X線吸収スペクトル(変動)	「X線吸収計測」を参照
	X線吸収計測	ある原子によるX線の吸収は、原子核の周囲にある電子がエネルギーを吸収し、外側の電子軌道に移ることで行われ、その原子の電子構造による特定のエネルギーで吸収が起こり、それを吸収端と呼ぶ。吸収端のあとに現れる微細な構造をX線吸収微細構造(XAFS)と呼び、吸収端の直後のエネルギー領域に現れる構造をX線吸収端近傍構造(X-ray Absorption Near Edge Structure: XANES)、それより後に現れる構造を広域X線吸収微細構造(Extended XAFS: EXAFS)という。XANESから電子構造に、EXAFSから局所構造に関する情報が得られる。このような、X線の吸収を計測する測定手法をX線吸収計測という。
あ行	アイオノマー	プロトン等のイオン種を輸送するために触媒層内に添加される成分。燃料電池、水電解分野ではイオン交換樹脂(パーフルオロスルホン酸系が多い)を構成するイオン性ポリマーを指す。アイオノマーを有機溶媒等に溶解させた溶液を触媒粉末と混合したスラリーを用いて電極触媒層を形成する。電極触媒層内で触媒粒子を結着する役割も担うことからバインダーと呼ばれることもある。
	アノード	Anode。 水電解の場合、陽極に対応し酸素が発生する。
	アルカリ水電解	KOHなどアルカリ水溶液を電解質、活物質として用いる水電解方式。電極は両極ともに貴金属は必ずしも必要ではなくニッケルなどが使用可能であり、製造コストを抑制することができ大型化も容易である。
	ウルトラファインバブル	直径1 μm未満の気泡のことであり、消滅することなく水中に長時間漂うという他の気泡には無い性質をもっている。ナノバブルとも呼ばれる。水中に酸素を高濃度に保持させたり、汚れを簡単に浮かせる性質があり、これらの特異な性質が水電解の効率に影響を与える可能性がある。
か行	カソード	Cathode。 水電解の場合、陰極に対応し水素が発生する。
	加圧溶解式	ウルトラファインバブルの生成方式の一つであり、加圧により高濃度に溶解させた気体を急激な減圧により吐出させることで微細な気泡を析出させる技術。
	加速劣化試験	ある触媒の所定条件での長期耐久性を加速して評価するための試験技術。通常条件よりも高温、高電流密度での試験や、電位サイクルを繰り返すと言った操作により、短期間で触媒の劣化を生じさせることができる。
	回転電極	三電極式セルによる対流バレルタンメトリーに用いられる電極で、円板の作用極を回転させた状態で電気化学測定を行い活性を評価する。回転数を変化させた測定を行うことで、拡散の影響を取り除いたKineticな活性

		を外挿により求めることができる。触媒の評価では、円板電極上に触媒を担持して作用極とする。
	逆電流	2セル以上のバイポーラー型電解槽において電解停止後にバイポーラー板に対して、電解時の電流と逆方向に流れる電流。電解時に生成されるアノードの酸化体とカソードの還元体が電解停止時に元に戻る化学的駆動力が起電力となって、セル間においてマニホールド（液供給管）を通過してイオン電流が流れることにより閉回路を形成する。電極の酸化、還元が化学的、機械的要因により劣化に影響を与える。
	クロスリーク	隔膜を介して片方の電極反応生成物が反対側に通過してしまうこと。水電解の場合にはアノード側の酸素がカソード側に、もしくはカソード側の水素がアノード側に混入することであり、純度低下（広義でのファラデー効率低下）の問題がある。
	グリーン水素	再生可能エネルギーから電解で生成するなどした環境負荷の小さい水素。欧州連合の CertifHy プロジェクトでは、水素 1 Nm ³ 製造時における CO ₂ 排出量を Z [kg-CO ₂ Nm ⁻³ -H ₂] とし、天然ガス改質から 60%削減した Z ≤ 0.39 でプレミアム水素と定義している。
	固体高分子形水電解	固体高分子膜を電解質に用いる水電解方式。液体ではなく固体の高分子膜を使うことで電解質でのガスクロスオーバーが小さいため生成水素の純度が高く、薄膜電解質を用いるため抵抗損失が小さく電流密度を高くできる。非定常応答にも優れる。 プロトン交換膜(Proton Exchange Membrane : PEM)を電解質として使う場合には PEM 電解(Electrolytic cell : EC)とも呼ばれるが、アルカリ膜を用いる場合を含め広義に固体高分子形水電解 (Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis : SPE 電解) と呼ばれる。 「プロトン交換膜型水電解」「PEM 水電解も参照」
	交流インピーダンス測定	電気化学系に交流信号を加え、その交流信号の伝達の性質を測定する方法を交流インピーダンス法といい、電極反応機構を解析する非定常測定法の一つである。実際には、電極電位あるいは平衡電位に微小な交流電圧変動を異なる周波数で与えたときの電流応答を測定し、振幅比と位相差からインピーダンス（交流で測定した抵抗）を求める。等価回路を仮定することにより電気二重層容量や電荷移動抵抗などを静電容量（キャパシタンス）や抵抗などの電気要素として求めることができる。
さ行	サイクリックボルタンメトリー	Cyclic Voltammetry: CV 。 一定速度で電位を変化させ、そのときに流れる電流を電流－電位曲線として記録する方法を電位走査法といい、決められた電位範囲を繰り返し電位走査する場合をサイクリックボルタンメトリーという。電極反応の起こる電位や速さ（電流）などを知ることができる。

	シャットダウン耐性	外部電源の変動・停止により、電解セルに使用する部材にはさまざまな劣化が発生する。このような操作に対して、部材性能が維持されることを耐性があるという。
	シャドーグラフ	微小物体を背景光によって照らし、その影(シャドー)をカメラで結像検出することによって微小物体を検出する方法。
	スタック (セルスタック)	水素製造速度を速めるため複数のセルを直列に接続させ、一つのユニットとしている状態。主に電解膜が重ねられた方向に配置されるためスタックと称する。
た行	多孔質輸送層	MEAの外側に配置されたガス、液輸送域となる多孔質体であり、触媒への電子伝導の役割がある。PTLはPorous Transport Layerの略。
	電気化学表面積	電気化学的手法により求めた面積(ECSA: Electrochemical Surface Area)のことである。一般に、白金などの貴金属のECSAは、水素の吸脱着波やCO脱離波などから求めた電気量を、その貴金属の単位面積当たりの吸着電気量(既知)で除することにより求めるがニッケルなどの非貴金属電極やこれらの酸化物の電極では表面に一層だけ吸着する適当な物質が無いため評価が難しい。
	電気二重層容量(C_{dl})	電気二重層容量(C_{dl} : Electric double-layer capacitance)は、電解液に浸漬させた電極の電極-電解液界面に電子やイオンが並んで形成される電気二重層に蓄えられる電荷の量(電気量)のことである。 C_{dl} は電解液に接した電極表面の面積に比例するパラメータであるため、これをECSAの指標として用いることが可能である。
	電気量	電気量(Q)は(電流×時間)の次元をもち、導線に1Aの電流が1秒間流れたときの電気量が1クーロン($C=A\ s$)である。本文中での Q_{ox} は、Ni電極の最表面が酸化されるのに要した電気量である。
な行	ナノバブル	気泡直径が μm 以下の気泡をナノバブルという。ウルトラファインバブル(UFB)と同義。水電解においては、電極表面上または電極極近傍でバブル核が生成された後、それらがナノバブル、あるいはマイクロバブルへと成長した段階で電極面を離脱し、電解液中を浮上した後、最終的には電解液面から解放される。
は行	バイポーラー(型)電解槽	アノード、カソード、膜で構成される単一セルを複数直列に接続させた電解槽の形式。単セル間を電氣的に繋ぐ部材(バイポーラー板)の両面がアノードとカソードになることからバイポーラー(複極式)と称する。大規模な水電解槽では一般的な形式である。
は行	フ라운ホーファーセル (FHセル)	IEA Annex 30のラウンドロビン試験フェーズ2のPEM電解用標準セルとして使用されているFraunhofer ISEで開発されたセル。
	分極則定	電極を自然電位から電位(もしくは電流)走査する事でアノードとカソードの電流(もしくは電位)を計測する測定法。測定の際には基準電位となる標準電極(参照極)が必要である。過電圧測定と同義。

	放射光	放射光とは、シンクロトロン放射による電磁波である。放射光施設（SPring-8 や立命館 SR センター等）において、高エネルギー電子が磁場で曲げられるときにその進行方向に放射される。指向性が高く、極めて明るいためにおperando 計測に向いている。
ま	マルチフィジックス	電気化学反応と流体・物質輸送、イオン輸送などの複数の物理現象・支配方程式を連成して解析する手法。電解槽などの複雑系のシステムに対して有効であるが、収束性や連成の解き方などに技術が必要であり解析の難易度は高くなる。
	膜電極接合体 (MEA)	固体高分子膜等の隔膜に触媒をスプレー法、転写法で塗布もしくは触媒が塗布された拡散層を熱処理することで接合された部材。主に SPE 水電解や PEFC で使用される。MEA は Membrane Electrode Assembly の略。
ら	ラウンドロビンテスト(RRT)	一般に測定方法や測定装置の信頼性を検証するために同一試料を巡回させる手法を指す。 IEA Annex 30 では参加機関相互のセル性能評価手法の標準化のために、標準化されたセルと部材を使用し、性能のばらつきを調べている。本事業内では産総研で標準セルを用いて試験を進めている
	リニアスイープボルタンメトリー (LSV)	電気化学測定の一つで電位範囲の下限値から上限値あるいは上限値から下限値までを一定の電位走査速度で変化させ電流値を計測する測定法。LSV は Linear Sweep Voltammetry の略。
	立命館大学 SR センター	日本の私立大学で唯一、大学が所有する放射光施設で滋賀県草津市の立命館大学びわこ・くさつキャンパス内にある。国立研究開発法人理化学研究所が運営する世界最高性能の放射光施設である SPring-8 が、周長 1436 メートルであるのに対し、SR センターは 3.14 メートルの小型放射光施設である。低いエネルギーの X 線（軟 X 線）を利用して、電解槽触媒に含まれる軽元素や遷移金属の化学状態解析が実施可能であり、キャンパス内に位置することで、タイムリーな実験ができる利点を有している。
	ルギン管	電極電位の測定に用いられる毛細管であり、これを用いると電極の表面近傍の電解質電位に対する電位差を計測し電極電位を求めることができる。

課題番号：②－1「水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発」

	用語	説明
C	CFD	計算流体力学（Computational Fluid Dynamics）のこと。偏微分方程式の数値解法等を使用して流体の運動方程式（オイラー方程式、ナビエ-ストークス方程式、またはその派生式）を計算機で解くことで流れを観察するシミュレーション手法。
D	Dry Low NOx	ドライ低NOxのこと。詳細はドライ低NOx燃焼器の項を参照。
G	GW	ギガワット。ギガは接頭辞の1つで、10の9乗倍を表し、ワットは仕事率や電力をあらわす単位。W=J/秒。
あ行	圧カスペクトル	時間領域における圧力変動（波形）に対し、それから周波数領域への変換で得られる周波数の関数のこと
	インフラ	インフラストラクチャーの略。インフラとは道路、鉄道、上下水道、電気、電話網、通信網など生活や産業などの経済活動を営む上で不可欠な社会基盤となる施設の総称
	音響ライナ	燃焼振動を抑制するための構造を備えたライナ（内筒）
か行	火炎	燃料や物が燃えるときの、光や熱を出している部分
	ガスタービン	原動機の一つ。燃料の燃焼により生成した高温の燃焼ガスでタービンを回転させ回転運動エネルギーを得る内燃機関
	化石燃料	地質時代にかけて堆積した動植物などの死骸が地中に堆積し、長い年月をかけて地圧・地熱などにより変成されてできた化石物のうち、人間の経済活動で燃料として用いられる（または今後使用が検討されている）ものの総称
	逆火	火炎が上流、特に燃料噴射ノズルまで遡ること。逆火によりノズルが損傷するリスクがある。フラッシュバック。
	混合管	クラスタバーナの基本構成要素。空気流中に燃料を噴射して空気と燃料を混合する管のこと。
	コンター	等値線図
さ行	再生可能エネルギー	絶えず資源が補充されて枯渇することのないエネルギー。具体例として、太陽光、太陽熱、水力、風力、地熱、波力、温度差、バイオマスなど。
	水素専焼	燃料として水素100%で燃焼させること
	水素発電	水素を燃料として用いた発電のこと
	旋回流	気体などの流体が旋回しながら流れる流れ
た行	多孔噴流燃焼方式（クラスタバーナ）	空気流中に燃料を噴射して空気と燃料を混合する混合管1本を基本構成要素とし、これを複数本備えるバーナ
	脱硝	窒素酸化物をアンモニア等を用いて還元し、窒素と水に変えて無毒化すること。

	窒素酸化物	酸化窒素の総称で、環境汚染物質のこと。Nitrogen Oxides (NOx)。
	着火	燃料が空気中の酸素と酸化反応し燃焼を始めること
	低位発熱量	燃料が燃焼し、仕事に変えることができる熱量。Lower Heating Value (LHV)
	点火トーチ	燃料を点火させるために、先端に発熱体などを備えた棒状の構造
	天然ガス	地中から天然に産出するガスの総称。通常、炭化水素類を主成分とする可燃性ガスをさし、化学工業原料・工場燃料・都市ガスなどに利用される。
	ドライ低 NOx 燃焼器	乾式低 NOx (Dry Low NOx) 燃焼器のこと。乾式とは水や蒸気、窒素などの希釈剤を使用せずに低 NOx を図る燃焼器のこと。
な行	二次エネルギー	石炭、石油、天然ガス、薪、水力、原子力、風力、潮流、地熱、太陽エネルギーなど自然から直接採取されるエネルギーを一次エネルギーというのに対して、これらの一次エネルギー源を転換および加工することによって得られる電力、都市ガス、コークスなどのこと。
	燃焼振動	燃焼器内の圧力変動と火災による発熱変動が同期して圧力変動が増大する共鳴現象であり、燃焼振動が発生すると燃焼器、さらにはガスタービンが破損するリスクがある
	燃焼速度	未燃焼混合気に対する火炎面の相対速度として定義され、燃焼性を直接表す指標。この速度が速いほど燃えやすく、逆火しやすい
	燃料ステージング	着火から定格負荷条件まで各燃料系統に燃料を供給していく計画のこと
	燃料噴射ノズル	燃料を噴射する装置
	ノズル	空気流中に燃料を噴射して空気と燃料を混合する装置
は行	パーミアウト耐性	ガスタービン燃焼器の燃焼性能のひとつで、フラッシュバックが瞬間的に発生しても回避可能な耐性のこと。
	パイロット系統	主に保安を確保する系統であり、予混パイロット系統、拡散パイロット系統はそれぞれパイロットがそれぞれ予混合燃焼、拡散燃焼方式を採用している系統
	発電端効率	発電機が発電した電力量で評価した効率
	非燃焼試験 (気流試験)	燃料と空気を供給し、燃焼させずに気流の流動や混合を調べる試験
	フラッシュバック	逆火のこと
	ベルマウス	空気がスムーズに流入するように流入部分に取り付けた部品
ま行	マルチクラスタ燃焼器	モデルバーナを複数備えた燃焼器

	モデルバーナ	混合管を複数本備えた構造
	予混合燃焼方式	燃焼前に予め燃料と空気を混合させる燃焼方式

課題番号：②－２「水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」

	用語	説明
C	CFD 解析	計算機を用いた数値シミュレーション (Computational Fluid Dynamics)
P	PLR	燃焼器圧力損失率 (Pressure Loss Ratio)
あ行	温度計測プローブ	水素燃焼ガスの温度を計測するためのセンサーが備わった特殊プローブ
か行	可視化計測	空気の流れ等の目に見えない現象を見えるようにし、実現象を把握する計測、計測手法
	ガスサンプリングプローブ	水素燃焼ガスを捕集するための特殊プローブ
	逆火	燃焼器部品の内部に燃焼ガスや火炎が入り込む現象
	高圧水素燃焼試験	ガスタービン燃焼器試験時に燃焼器に供給する空気や燃料ガス条件が 2MW 級ガスタービンの条件に相当する試験
さ行	失火	ガスタービン運転中に燃焼が途絶えてしまうこと
	水素専焼	燃料ガスに 100%水素を用いた燃焼
た行	低圧水素燃焼試験	ガスタービン燃焼器試験時に燃焼器に供給する空気や燃料ガス条件が大気条件から 2 気圧に相当する試験
	定格負荷相当	ガスタービンエンジンにおいて発電出力 100%kW に相当する条件
	ドライ低 NOx	窒素酸化物 NOx の低減方法に水や蒸気を用いず、燃焼の工夫のみで NOx を抑制する燃焼方法
な行	燃焼器圧力損失率	ガスタービン燃焼器で生じる差圧を燃焼器入口空気圧力で除したもの。
	燃焼器入口条件	ガスタービン燃焼器部品に供給される空気の温度・圧力・流量と燃料流量
	燃料ステージング	ガスタービン運転時、発電量に応じて、段階的に燃料ガスを供給量すること。
ま行	無負荷相当	ガスタービンエンジンにおいて発電出力 0%kW に相当する条件

課題番号：③－0 「酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発」

	用語	説明
L	Large Eddy Simulation (LES)	乱流の数値計算シミュレーションを行う手法の総称で、空間的なフィルターをかけた基礎方程式を用いています。フィルターのスケール以下の渦はモデル化され、フィルターのスケール要理も大きい渦は直接計算します。
M	MCH	メチルシクロヘキサン。トルエンに水素を反応させて MCH に転換することで、水素ガスを約 1/500 の容積の常温・常圧の液体として貯めて、運ぶことが可能になる。
か行	急速圧縮膨張装置 (RCEM)	Rapid Compression Expansion Machine。エンジンにおける吸気→圧縮→膨張→排気の行程を 1 サイクルだけ模擬することができる装置で、産業技術総合研究所に設置された装置では、ピストン位置を圧縮状態で停止できるため、短時間ではあるが、大型ガスタービン燃焼器のような高圧状態を再現できる。
	クローズドガスタービンシステム	一般的なガスタービンは、外部より作動媒体として空気を取り込み圧縮した後、燃焼によって高温にした上でタービンにおいて膨張させて動力を取り出す。その際に膨張した作動媒体は排気ガスとして外部に放出される。クローズドガスタービンは基本的に作動媒体を循環させて、外部から取り込まず、放出もしない。酸素水素燃焼タービン発電システムでは、多くの作動媒体は循環しているものの、酸素と水素は作動媒体に供給されて燃焼し、燃焼生成物である水分を外部に排出する。このため、技術的に厳密に言えばセミクローズドガスタービンとなっている。
は行	復水器	熱交換器の一種で、蒸気タービン等の熱機関で仕事を取り出した後の低圧蒸気を冷却して凝縮させて、低圧の液体に戻す装置。

課題番号：④－1 「水素分離膜を用いた脱水素」

	用語	説明
さ行	水素分離膜	混合ガスから水素を分離する膜。原理として、気体分子の大きさにより分離する分子ふるい機構によるもの、水素が現市場に解離して膜中を透過する解離容解・拡散機構によるものに大別される。前者の機構を持つものとして、高分子膜、シリカ膜、ゼオライト膜、炭素膜など、後者としてパラジウム膜などが知られている。有機ケミカルハイドライドの脱水素反応の温度条件下では、高分子膜は適用が難しく、セラミック系水素分離膜が検討されている。
	セラミック系水素分離膜	セラミック材料を用いた水素分離膜。細孔径を持つセラミック薄膜を調製することで、分子ふるい効果により水素のみを選択的に透過させることが可能。セラミックのため、高温条件下でも使用可能であり、シリカ膜、ゼオライ

		ト膜などが知られている。通常は多孔質アルミナ等の管状支持体の表面あるいは細孔内に形成される。
た行	対向拡散 CVD 法	多孔質支持体の両面から原料ガスを供給し、支持体の細孔内で反応させて化学蒸着する製膜法。高透過性、高選択性の膜が再現良く得られる。シリカ膜の場合は、管状支持体の内側から酸素を、外側から原料であるアルコキシシラン類（シリカプレカーサ）を供給し、加熱して製膜する。他に、多孔質支持体の片側から全ての原料ガスを供給する一方供給 CVD 法が知られている。
	トルエン	ベンゼンの持つ水素のひとつがメチル基（CH ₃ ）に置換されたもの。ベンゼンと同様の芳香がある無色透明の可燃性液体。化学式 C ₆ H ₅ CH ₃ 、分子量 92.14 g/mol、融点-95.0℃、沸点 110.6℃。染料・樹脂などの原料や溶剤として広く用いられる。生産量は日本 130 万 t/年、世界 2,180 万 t/年 ¹⁾ 。
ま行	メチルシクロヘキサン (MCH)	トルエンの芳香環を水素化したもの。化学式 C ₆ H ₁₁ CH ₃ 、分子量 98.19 g/mol、融点-126.6℃、沸点 100.9℃。トルエンやキシレン等より毒性が低いため、修正液・インキ等の文具用の溶剤や医薬・農薬等製造用の溶媒として使用されている ²⁾ 。
	メンブレンリアクター	触媒反応器に分離膜を組み合わせた装置。二重管構造になっており、内側の管に管状の水素分離膜を適用する。内側の管状水素分離膜の内側に触媒を設置する場合と、外側に設置する場合がある。本装置を平衡反応に適用した場合、分離膜によって生成物を選択的に系外に取り出すことにより、平衡シフト効果（転化率の向上や反応温度の低減）が期待できる。実用化の際は、単管のメンブレンリアクターを複数本組み合わせてモジュール化することが必要となる。
	モジュール	メンブレンリアクターに用いるシリカ膜を複数本束ねた一つの単位。メンブレンリアクター内で反応生成物から、水素のみを透過させるシリカ膜を束ねるため、反応生成物と透過した水素が混合しないよう、モジュール作製には、気密性と、機械的強度の確保が重要になる。そのため、モジュールを束ねる材料は一般的には金属となるが、セラミックと金属は熱膨張係数が異なるため、室温から作動温度（本系では 300℃）まで、各温度で異なる膨張率を吸収し、かつ、気密と強度を確保できるモジュール作製法の開発が課題となる。
や行	有機ケミカルハイドライド	反応により水素を付加したり取り出したり出来る有機化合物。水素のキャリアーとしては、メチルシクロヘキサン（MCH）、シクロヘキサン、デカリンなどが注目されている。
	有機ケミカルハイドライドによる水素輸送方法	トルエンなどの芳香族の水素化反応によって上記の有機ケミカルハイドライドとして水素を固定し、水素の利用先で脱水素反応により水素を取り出して利用する方法。適切な有機ケミカルハイドライドを選定することで、常

		温・常圧の液体状態で貯蔵輸送を行うことが可能。但し、脱水素反応が吸熱反応であり、反応熱を供給することが必要。
--	--	--

1) 経済産業省資料「世界の石油化学製品の今後の需要動向（総論）」

2) 丸善石油化学(株)HP より (http://www.chemiway.co.jp/product/data/me_deta02.html)

課題番号：⑤－1 「膜反応器を用いたメタン直接分解による H₂ フリー水素製造技術」

	用語	説明
か行	カーボンナノチューブ	カーボンナノチューブは、炭素原子同士が蜂の巣状に結合し、チューブ状になった構造をしている。直径は数ナノメートルで、複数層のものを「多層カーボンナノチューブ (MWNT)」、1層のものを「単層カーボンナノチューブ (SWNT)」と呼ぶ。SWNT は、MWNT に比べて、強度は鋼の 20 倍、熱伝導性は鋼の 10 倍、電気伝導性は鋼の 1,000 倍と、極めて優れた素材としての注目されている。
	コーキング	炭化水素を反応などで問題となる触媒上での炭素析出。析出した炭素により活性点が覆われ、活性低下を引き起こす。
さ行	細孔内充填型パラジウム膜	パラジウム (Pd) 膜は水素分離に利用されている。通常、Pd 膜は、セラミック支持体の表面に設けられる。しかし、圧延で製膜をした際には、膜厚が大きくなりコストアップとなる。また、無電解/電解メッキなどにより薄膜を形成すると外部からの飛来物などによる耐久性が課題となっている。そこで、支持体の内側に Pd を形成 (細孔内充填型パラジウム膜) することにより耐久性の向上し、使用される Pd 量も低減し、低コストが可能となった。
	シリカ源	シリカ膜の原材料で、一般的に TMOS (テトラケイ酸オルトメチル) などのアルコキシドが用いられる。
	水素透過率	水素が分離膜を通過しやすさの指標で、用いられる単位は $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ である。
	水素分離膜	混合ガスから水素を分離する膜。原理として、気体分子の大きさにより分離する分子篩機構によるもの、水素が原子状に解離して膜中を透過する解離溶解・拡散機構によるものに大別される。前者の機構を持つものとして、高分子膜、シリカ膜、ゼオライト膜、炭素膜など、後者としてパラジウム膜などが知られている。有機ケミカルハイドライドの脱水素反応の温度条件下では、高分子膜は適用が難しく、セラミック系水素分離膜が検討されていた。

た行	対向拡散 CVD 法	多孔質支持体の両面から原料ガスを供給し、支持体の細孔内で反応させて化学蒸着する製膜法。高透過性、高選択性の膜が再現よく得られる。シリカ膜の場合は、管状支持体の内側から酸素を、外側から原料であるアルコキシシラン類（シリカプレカーサ）を供給し、加熱して製膜する。他に、多孔質支持体の片側から全ての原料ガスを供給する一方供給 CVD 法が知られている。
	転化率	メタンを直接熱分解して、発生した水素との比で、次の式から計算される。 $\text{転化率} = (\text{透過 H}_2 \text{量} + \text{反応 H}_2 \text{量}) / 2 / \text{CH}_4 \text{導入力}$
ま行	メンブレンリアクター	触媒反応器に分離膜を組み合わせた装置。二重管構造になっており、内側の管に環状の水素分離膜を適用する。内側の環状水素分離膜の内側に触媒を設置する場合と、外側に設置する場合がある。本装置を平衡反応に適用した場合、分離膜によって生成物を選択的に系外に取り出すことにより、平衡シフト効果（転化率の向上や反応温度の低減）が期待できる。実用化の際は、単管のメンブレンリアクターを複数本組み合わせてモジュール化することが必要となる。

課題番号：⑤－2「アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造」

	用語	説明
M	Mo	モリブデンの元素記号
N	Ni	ニッケルの元素記号
	Ni 系合金	ニッケルを主成分とした合金
W	W	タングステンの元素記号
X	X 線回折測定	X 線を用いた試料同定法の 1 つ。
あ行	アルカリ環境	pH が高い環境
	アルカリ金属	リチウム、ナトリウム、カリウム等の水素を除く第 1 族元素
	インコネル	ニッケルをベースとして鉄、クロム等の合金組成を示す合金で、耐熱性、耐蝕性、耐酸化性、耐クリープ性などの高温特性に優れている
	エントロピー変化	化学反応が進行するかどうかを決定する因子の 1 つで、乱雑さをあらわす
か行	化学的性質	化学反応によって他の物質に反応して、新しい物質に変化する性質のこと
	金属レドックスサイクル	金属の酸化還元反応サイクル

	グローブボックス	アルゴン雰囲気等、空気非接触下で実験を行うことができる容器
さ行	焼結体	粉末試料を加熱しながら圧縮することでできる塊
	セラミックス	酸化物 (MOx)、炭化物 (MCx)、窒化物 (MNx) などの無機化合物の総称
た行	耐腐食性	腐食反応に対する耐性
	蓄熱	熱を蓄えること
	電気分解	電圧を加えることで電気化学的に物質を分解すること
	点集熱式加熱	熱源となる光を1点に集めることでそのポイントのみを加熱する方式
	透過型電子顕微鏡	顕微鏡の1種でナノメートルスケールで物質の観察ができる
な行	ナトリウムレドックスサイクル	ナトリウムの酸化・還元反応サイクル
	熱化学サイクル	発熱・吸熱の反応により進行するサイクル
	熱化学水素製造	熱エネルギーにより水を分解し、水素を製造する手法。
	熱力学データ	反応の進行条件を決定する反応物質固有の値
は行	ハステロイ	ニッケルを主成分とする合金で、耐酸化性の高いものや耐熱性が高い金属であるため、腐食性環境や高温環境での使用に向くもの、物理的強度やクリープ強度、疲労強さは特段の強さを持たない
	反応中間体	反応の途中で生じる物質
	光触媒	酸化チタンなど、光を照射することで触媒作用を示す物質
	腐食	酸化反応などの反応により、材料が変化すること。これにより材料が脆くなるなど、本来の性質を失う
	不活性ガス	アルゴンや窒素のような反応に関与しにくいガス
	ビューポート	のぞき窓
ま行	メッキ	表面処理の一種で、金属または非金属の材料の表面に金属の薄膜を被覆すること
ら行	流動層	一般的に、上向きに流体を噴出させることによって、固体粒子を流体中に懸濁浮遊させた状態をいい、粒子に働く流体の力と重力が釣りあい、全体が均一な流体のように挙動する

課題番号：⑤－3 「メタン直接分解による水素製造に関する技術調査」

	用語	説明
D	DSS 運転	DSS は Daily Start and Stop の略で、毎日発停運転、WSS は Weekly Start and Stop の略で、毎週発停運転のこと。
L	LAMMPS	アメリカサンディア国立研究所によって開発されている古典分子動力学計算を行うためのソフトであり、Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator の略称である。
P	PPS	ポリフェニレンサルファイド (PPS) 樹脂。耐熱性ポリマー。
あ行	アモルファス	結晶構造を持たない物質の状態。固体では、原子が規則正しく並んだ結晶と呼ばれるものと、原子が不規則に配列したアモルファス(非晶質)と呼ばれるものの2種類がある。一般に、氷や金属、水晶などの鉱物などは結晶構造で、ガラスなどはアモルファス構造。
	オンサイト型水素ステーション	水素ステーションは大きく分けて、需要地で水素を製造するオンサイト型と、他で水素を製造して需要地へ輸送するオフサイト型がある。
か行	カーボンナノカプセル	ナノメートルサイズのグラファイト壁で囲まれたかご状の炭素。
	カーボンナノチューブ	グラフェン層が同軸円筒状に積層したチューブ状の炭素で、ナノメートルサイズの直径を持つ。単層カーボンナノチューブ、多層カーボンナノチューブのように細分される。
	グラフェン	炭素原子が六角形の格子状に結合した平面状の物質。グラファイトは、グラフェンが多数枚積層した構造を持つ炭素である。
	ケッチンブラック	ケッチンブラックは導電性カーボンブラックの商品名。プラスチック・ゴムなどに混練することで、従来のカーボンブラックに比べ少量の添加量で同等の導電性を付与することができる。
さ行	シンタリング	粉末状の固体をその融点よりも低温度で加熱した場合に、粒子が結合し、高い硬度をもつ物体が形成される焼結現象。
	失活	化学物質などの活性が失われ、反応を起こさなくなること。
	生成炭素	メタン直接分解において、メタンが水素と炭素に分解される時に、生成された固体の炭素。
	ステップフロー成長	結晶の表面に拡散した原子がステップもしくはキンクに吸着することにより、ステップが継続的に発達し結晶が成長すること。
	ステップ-テラス構造	結晶表面において観察される、1原子以上の段差部位がステップ構造。ステップで接続される原子整列部位がテラス構造。

た行	滞留型反応炉	メタンガスの投入口と混合ガスの出口が、同一の炉に接続されているので、ガスの流れは循環流となり、入口と出口へのガスの流れは分岐流となります。
	透過型反応炉	メタンガスの投入口から混合ガスの出口までのガス流路が物理的な壁で遮られているので、流れが一方向となります。
は行	平衡状態	正反応と逆反応の反応速度が等しくなり、見かけ上反応が止まったように見える状態。
	フィラー	プラスチック材料等に混ぜ込む充填剤。用途により、様々な種類がある。
	ポイド	結晶中に原子空孔が三次元的に集合して形成された格子欠陥のこと
ま行	モリス構造	マイクロメートルオーダーの網目状の骨格が繋がった特徴的な構造をもつ一体型の多孔質体構造。
ら行	ランス加工	切り曲げとも言い、抜き加工の切り込み（スリット）と曲げを一体化した加工方法。

課題番号：⑤－４「メタンの熱分解による水素製造技術の研究開発」

	用語	説明
I	IRR	内部収益率（Internal Rate of Return）の略で、投資に対する事業収益率を示す指標。投資によって得られる将来のキャッシュフローの現在価値と、投資額の現在価値が等しくなる割引率のことである。
か行	回転炉型反応器 （ロータリーキルン）	容器（反応管）に原料や触媒等を充填あるいは連続供給し、回転によって攪拌しながら、ガスを供給する。セメント製造などの産業分野等で利用されている。メタン熱分解反応においては、回転する反応管に原料ガスであるメタンを供給し、管内の触媒と接触させることで、連続的な反応を行う。
	固気向流接触型断熱反応器	固体（触媒）粒子を反応器上部から供給し、反応器下部から反応ガスを供給する。固体粒子が反応器上部から自由落下し、反応器下部から排出され、反応ガスは反応器上部から排出される。そのため、サイクロンなどの固気分離装置を必要としない断熱型の反応器システムである。
さ行	抄紙法	紙や不織布の製造方法のひとつで、繊維を水などの溶媒中に分散させたうえで、分散溶液を濾過するためのシートもしくはネット上に抄いて紙層を形成し、その紙層を乾燥させる方法。カーボンナノチューブやナノファイバーなどのナノ炭素材料は、製造条件によって繊維直径や繊維長さ、繊維同士の絡まりの程度が大きく異なるため、薄膜（ペーパー）を作成するためには、適切な溶媒と分散補助剤の選択、分散処理条件の設定が重要となる。

	積層型の熱硬化性樹脂複合材料	代表的な熱硬化性樹脂複合材料である CFRP(炭素繊維強化プラスチック)では、一方向に配向させた長繊維に樹脂を含浸させてシート状に成型したプリプレグ(中間基材)を積層して、母材(樹脂マトリックス)中で一体となるようにプレス成形することで製造される。ナノ繊維では、母材と均一に混練する複合材料も考えられるが、構造材料としての特性を高めるためにはプリプレグを積層した複合材料が望ましい。
な行	熱交換器	熱交換により、高温の流体が持つ熱エネルギーを低温の流体に移動させるユニット。効率よく熱交換するために、細い管やフィンなどを用いて伝熱面積を広くしている。反応流体の加熱や冷却に加え、反応器出口等での高温の流体と反応原料の間で熱交換させることにより、エネルギーの効率的な回収にも利用される。
は行	曝露解析	ヒトや生物が化学物質に曝露される濃度や量を解析すること。本事業のようにメタン熱分解事業所が存在しない場合は、モデル予測により固体炭素の曝露解析を行うことになる。
	ヒト健康リスク	ヒトが化学物質に曝露されることによる生体影響の生起確率を意味し、化学物質の有害性をもとに、その曝露濃度を許容できるか否かを判断する。その許容曝露濃度は、労働者が通常の作業時間で曝露されても健康に影響がないであろう化学物質の大気中濃度で、国内外の各種機関が設定している値となる。
	プロセスシミュレータ	様々なユニットからなるプロセス(プラント)に対し、物性データと各ユニット内の数学モデルを利用して、プロセス全体の熱と物質の流れを計算機上でシミュレーションするソフトウェア。各ユニットで必要な熱量や物質量的変化が明示できることから、プロセス設計や運転を検討するために使用される。
ら行	流動層反応器	触媒等の粒子を容器内に充填した層に、上向きにガスを噴出させることによって粒子をガスの流れ中に懸濁浮遊させた状態である流動層を利用した反応器。流動層では粒子が浮遊状態にあり、容器内でよく攪拌されながらガスと接触するため、粒子とガスの接触効率が良く、温度の制御性も高い。流動層反応器において、複数の容器を用いて(触媒)粒子を流動化し、連結管を用いて、容器間で粒子を循環させながら所定の反応を行う装置を循環流動層と呼ぶ。
	流通式反応器	閉鎖系である回分式反応器に対し開放系の反応器であり、ガス等が、連続的に流入して反応し、系外に流出させることで、目的物質を製造する。

(添付- 1)

水素利用等先導研究開発事業
中間評価 (2017 年度)

素利用等先導研究開発事業 中間評価（2017年度）
事業の計画内容、Ⅲ. 研究開発成果について を抜粋

2. 事業の計画内容

2. 1 研究開発の内容

事業の目標を達成するために、以下の研究開発項目について、研究開発を実施する。

研究開発項目Ⅰ：「低コスト水素製造システムの研究開発」

アルカリ水電解、固体高分子型水電解等の水電解システムについて、電解電流密度の向上、電解セル大型化等により設備コストを低減するとともに、従来システムと同等の耐久性を維持しつつ、変動する再生可能エネルギーの有効活用が可能な水素製造システムの研究開発を行う。

研究開発項目Ⅱ：「高効率水素製造技術の研究」

原理的に電解効率に優れた高温水蒸気電解等の技術について、電解セル構成材料、セル構造、セル運転条件等の革新及びセル・スタック製造技術の開発、耐久性向上の研究等により変動する再生可能エネルギーへの追従性を確保するとともに、水素製造効率を飛躍的に向上させる次世代水素製造技術の研究開発を行い、水素製造電力消費の低減、電力貯蔵等への適応可能性を明らかにする。

研究開発項目Ⅲ：「周辺技術（水素液化貯蔵システム）の研究開発」（平成 25～27）

「大規模水素利用技術の開発」（平成 28～29）

本事業では、水素生成量の変動に対応可能な大型（50～100 t/day）高効率液化システム、断熱性に優れた大型（50,000 m³級）液体水素タンク等からなる水素液化貯蔵システムの基盤技術を開発する。また環境負荷が低く、かつ大量水素の利用に繋がる基盤技術を開発する（但し燃料電池は除く）。

研究開発項目Ⅳ：「エネルギーキャリアシステム調査・研究」

有機ハイドライド、各種の炭化水素、アンモニア、金属など水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、既存の水素附加プロセス、水素脱離プロセスと比較してエネルギー効率、経済性の飛躍的向上が期待できる新規プロセスの有効性を確認する解析評価研究を行う。具体的には、新規プロセスに必要な材料・要素機器の小規模な試作、性能評価やそのプロセスを含むシステムの特長解析などを行い、システム全体の性能・経済性、開発課題、開発目標を把握する。

研究開発項目Ⅴ：「トータルシステム導入シナリオ調査研究」

水①再生可能エネルギーのポテンシャル調査（ケーススタディ等による量やコスト等の把握）、②エネルギーキャリア技術のコスト分析、③許容されるコスト（競合する既存システムのコスト等から導かれる）の分析等に基づいてシナリオを策定する。併せて、シナリオが実現した際のエネルギー需給や炭酸ガス排出削減、経済成長への寄与等を検討する。

シナリオは、①本事業で開発する水素製造技術、②液体水素、メチルシクロヘキサン等のエネルギーキャリア技術及び①と②を組み合わせたトータルシステムについて最低限策定する。シナリオの設定や分析にあたっては、秘密情報の確実な管理を前提に、本事業の参加者から技術情報等を収集するとともに、本事業内外の有識者の知見を幅広く得られる適切な体制を構築する。

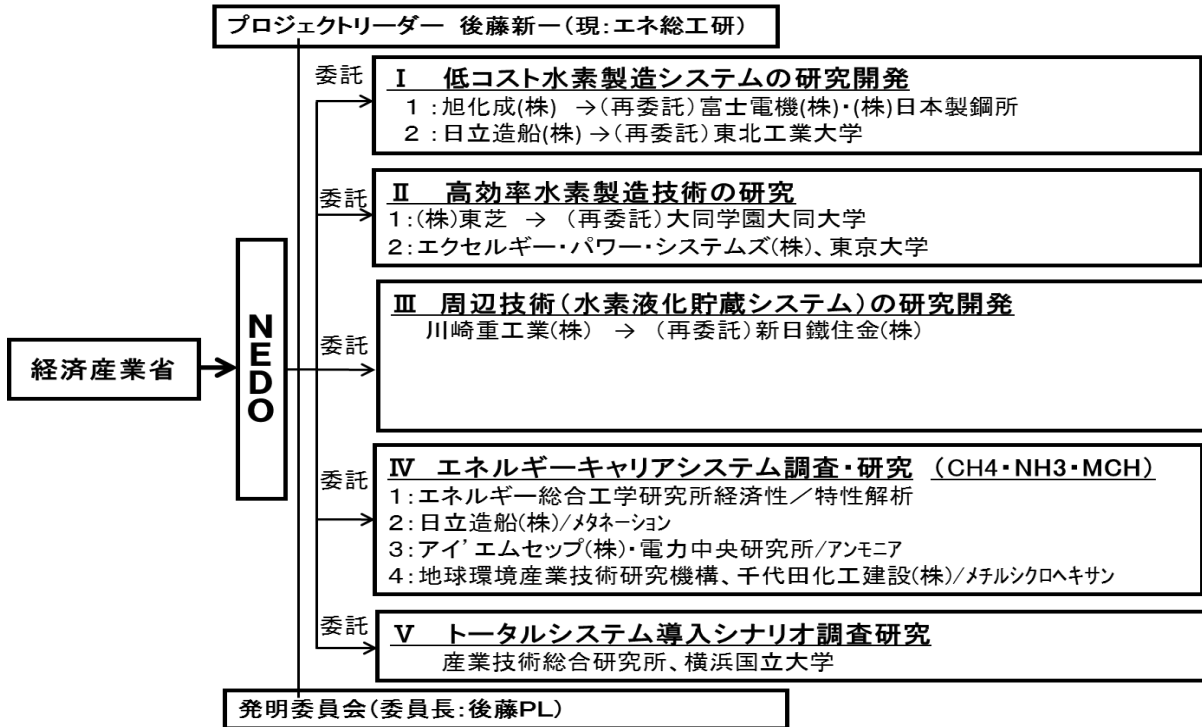
さらに、水素製造から貯蔵、輸送、利用に至るサプライチェーン全体を通じた経済性・環境影響等の分析・評価、エネルギーシステム全体の中での水素エネルギーの位置付けについての評価、要素・システム技術の将来予測に関する評価について、新たな評価軸の検討を含め、その方法を検討する。

シナリオ作成にあたっては、秘密保持の確実な管理を前提に、本事業の参加者との十分な連携による技術情報等の収集やフィードバックを行うとともに、本事業内外の有識者の知見を反映させることが可能な適切な体制を構築する。

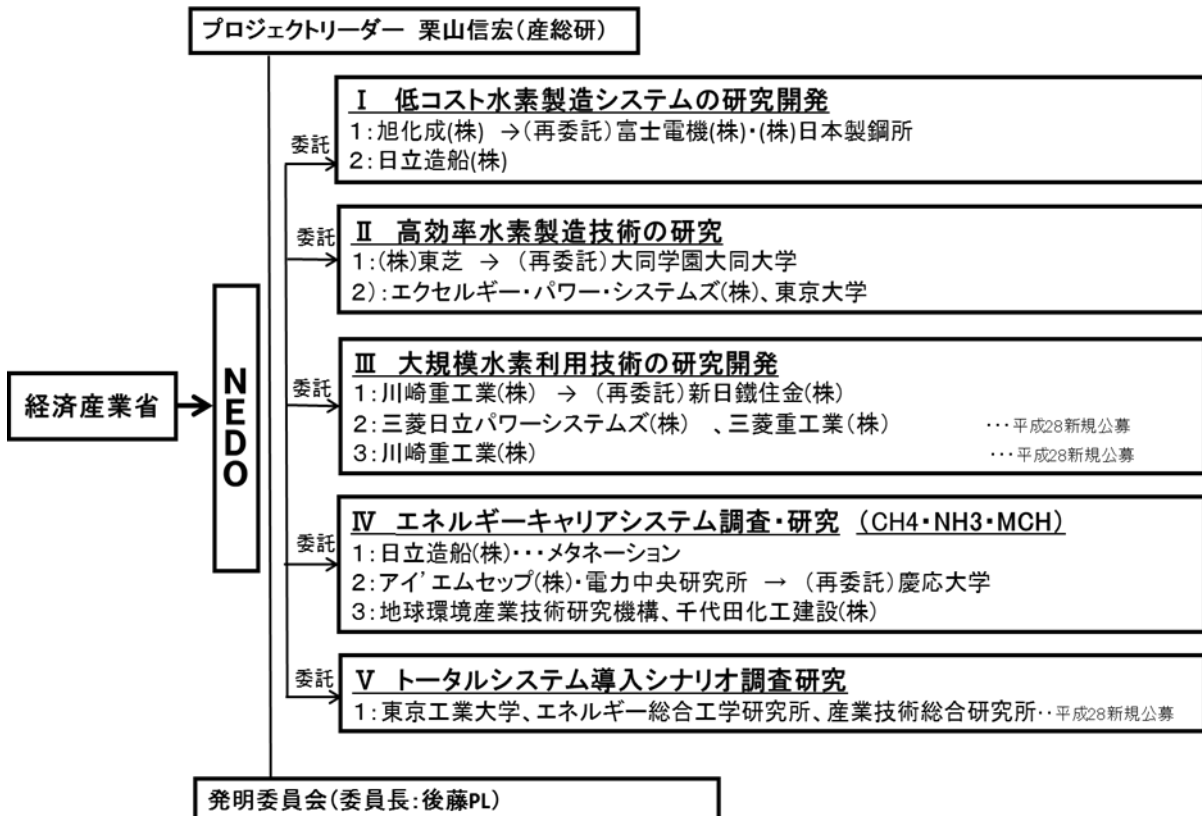
2. 2 研究体制の実施体制

平成25年から現在までの実施体制について以下に示す（平成28より新体制）。

実施体制の全体図（平成25～27）



実施体制の全体図（平成28～29）



2. 3 研究の運営管理

●研究開発の進捗管理の妥当性

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、経済産業省及び PL や研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、事業の目的及び目標に照らし適切な運営管理を実施する。

具体的には、必要に応じて研究開発実施者が設置する WG 等における外部有識者の意見を実施計画に反映させると同時に、NEDO、PL はオブザーバ出席を行い適切な助言を行う他、適時委託先から実施計画の進捗について報告を受ける等を行う。また、事業を効率的に推進するために、本事業の実施者間での報告会を開催し、実施者間及び関係産業界等との情報の共有と共通認識を図ることとする。

●NEDO と実施者との面談及び意見交換について

各実施者が設置する WG 等へのオブザーバ出席を通して、実施計画に基づく「進捗状況の報告、課題の抽出、今後の実用化に向けた見通し等」について聴取し状況把握と助言等を行った。更に H27 年の中間評価の結果を受け、H28 年から 2 回/年の頻度で全実施者との進捗フォロー会議を導入、継続して実施している。実施計画書のスケジュールに対しての進捗をタイムリーに確認することで、正確な状況を把握することが可能となり、P L の協力の下、専門的なアドバイスに加えて進捗管理の観点からも助言を行った。なお、進捗フォロー会議においては、知財管理、安全管理事項も含めて幅広く協議を実施した。知財管理に関しては、H29. 2 に知財マネジメント報告会を開催し、全テーマについてフィードバックを実施。さらに、毎月の PL 定例会にて関連情報の共有化、フリー協議を実施した。

また毎年の成果については、毎年度毎のマイルストーンを設け、毎 3 月提出される中間年報により確認をしている。また予算執行状況については、毎月提出される執行調査票をもとに内容確認、管理を行うとともに、毎 9 月と毎 3 月に中間検査を行い、実施計画と乖離が認められる場合については事業者個別に適切な予算運営を指導した。以上により今後の各テーマの課題等を把握し適切な方向付けを実施した。

●他事業及び事業内の連携体制について

他事業との連携体制について、関係する事業として「水素利用技術研究開発事業(P13002)」「水素社会構築技術開発事業(P14026)」「固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発(P13001)」「固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発事業(P15001)」があり、必要に応じて事業担当者で情報共有、連携して対応を進めた。

事業番号	事業名	内容
P13002	水素利用技術研究開発事業	2020 年以降の FCV 及び水素供給インフラの本格普及に向けて、FCV 及び水素ステーション関連に資する事業を行う。
P14026	水素社会構築技術開発事業	大規模な水素利用、輸送、貯蔵手段を検討し、2030 年頃には世界に先駆け本格的な水素サプライチェーンを構築に資する事業を行う。
P14021	水素利用等先導研究開発事業	2030 年頃の長期的視点を睨み、水素等のエネルギーキャリアについて各種化石燃料等と競合できる価格を狙う。
P15001	固体高分子形燃料電池利用高度化技術開発事業	固体高分子形燃料電池(PEFC)の社会への本格実装に向けて、PEFC の大量普及に必要な要素技術を確立する。

P13001	固体酸化物形燃料電池等 実用化推進技術開発	固体酸化物形燃料電池(SOFC)エネファームの本格普及及び中・大容量システムへの展開のための技術開発及び実証研究を、以下の項目について行う。
--------	--------------------------	--

本事業は、再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に取り組み、水素社会実現のための基盤技術に資するもとともに、我が国のエネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギーの適地等の経済発展に貢献するものである。

また事業内については NEDO および PL が進捗フォロー会議、WG 等へ参加し、直接、実施者との打合せを通じ、必要な場合は他事業の成果の紹介や他 WG への参加等を助言することで、連携を行っている。

2. 4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

(1) 研究開発成果の取扱い

①成果の普及

開発された成果を我が国の産業競争力強化に繋げるため、事業者だけでなく、潜在的なユーザー等の意見を聴いて、標準化戦略や成果の市場への受容を促すための安全・性能証明の方策を含む事業化戦略を策定する。また、途中段階で得られた成果は他の施策と連携しつつ、事業化を図る。

②知的財産権の取扱い

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第 2 5 条の規定等に基づき、原則として、委託先に帰属させることとする。

また、推進体制を構成する企業等が相互に連携しつつ、研究開発及び事業化を効果的に推進するために、知的財産管理規程等を定めることを求める。

(2) 基本計画の変更

N E D O は、関連技術や市場の動向を随時把握し、最新の技術や知見を取り込むこととし、毎年度、必要に応じて、基本計画に掲げられた研究開発プロジェクトの目標や研究開発の内容を評価し、必要に応じて変更するものとする。

(3) 根拠法

本研究開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 1 5 条第 1 項第一号二に基づき実施する。

(4) その他

①他省庁の施策との連携体制の構築

N E D O は、文部科学省が所管する独立行政法人科学技術振興機構の「戦略的イノベーション創造プログラム」における「エネルギーキャリア研究開発計画」など基礎研究の実施体制と緊密に連携するため、各プロジェクトの統括者、所管省庁等の課室長等から構成される連携体制に参画する。当該連携体制では、プロジェクト間の事業計画の調整、成果の共有や取扱いの調整、設備の共用や研究人材交流の促進等について協議を行うものとする。

②大学における人材の流動化等に係る取組

大学の研究者の企業等への出向を容易にするための取組、守秘義務を課した形でのポスドク等のプロジェクト参加など、本プロジェクトを活用した実践的人材の育成への取組を促すこととする。また、大学側も、これらの取組を促進する方策について検討するものとする。

③国立研究開発法人産業技術総合研究所の協力

独立行政法人産業技術総合研究所において独自に実施しているエネルギーキャリアに関連した安全性評価等の成果について定期的に情報共有や意見交換を行い、プロジェクトの研究開発又は事業化の方向性を検討する等の連携を求めていくものとする。

④工業所有権情報・研修館の協力

本プロジェクトにおける知的財産に関する戦略策定や管理方法の検討に当たっては、必要に応じて、独立行政法人工業所有権情報・研修館に知財プロデューサーの派遣を求める。

3. 情勢変化への対応

下記の対応を実施した。

- (1) 2013年6月、戦略的イノベーションプログラム（SIP）が創設された。この情勢に対応し、研究者間の交流が促進されるよう、SIPとの連携を図った。（ワークショップの開催 2015年3月～2017年3月、計4回実施）
- (2) 2016年8月、水素利用拡大を見据えて、「大規模水素利用技術の開発」の公募を実施。水素専焼タービン関連テーマを2件採択。
- (3) トータルシステム導入調査研究のテーマについて、より活動を強化する為、新たに東京工業大学を加えた体制とし、活動の推進を実施。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び技術的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を原則として中間評価を平成27年度（公開済）、事後評価を平成29年度に前倒して実施する。また、中間評価結果、本プロジェクトにおける目標達成度、他省庁における連携事業の進捗状況、内外の研究開発動向の変化、社会・経済情勢の変化、政策動向の変化その他の情勢の変化を踏まえ、本プロジェクトの必要性、目的、目標、研究開発の内容、推進体制等についてゼロベースで見直しを行い、次期の基本計画を改定するものとする。

なお、評価の時期については、当該研究開発に掛かる技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

特に研究開発の最終段階にあるものや早期に成果が見込まれるものは、事業化の促進の取組みも含め、適切に見直しを行うものとする。

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

中間目標に対して、水電解装置の性能およびコストの達成、水素液化貯蔵システムの性能達成、および水素利用における水素専焼型ガスタービン目標達成見込みの結果から、ポイントとなる技術課題はクリアできたと言えることから、目標を達成みこみであり、水素社会に向けての骨格をなす基盤技術を構築した。

☆水素製造：目標コストを見通せる性能を実現し、MW 級大型電解槽を稼働させ、耐久性も良好であった。

☆液体水素タンクシステム：目標性能を実現させ、水素サプライチェーン実証事業に移行する。

☆水素専焼タービン：逆火防止、NO_x 低減の要素技術を開発し、目標達成の目途を得た。

各テーマとも、達成状況は下記の通りであり、当初の目標を概ね達成、達成見込みである。

1. 1 研究開発項目 I：「低コスト水素製造システムの研究開発」

[I - 1] アルカリ水電解水素製造システムの研究開発

先行する欧米のアルカリ水電解と比較して、10%以上高効率な装置を開発、再エネ電力使用時の課題である電力変動追従性・耐久性も確認できた。早期のスケールアップを進めて MW 級の規模に適用できるシステム開発、2 年間／1 万時間超の長期運転を実施し、実用化可能なことを証明した。

・水電解用電力供給装置の設計・製作・運転を実施し、高効率化・低コスト化の目途を得た。

・水電解装置/電力供給装置コストについては現在精査中であるが、(大量生産時) 100MW 以上の大規模設備においてそれぞれ目標値水素 1Nm³あたり 20 万円/6 万円 Nm³-H₂ 以下が見通せる技術の確立の目途が立った。

・水電解装置協調制御の研究開発では、変動出力に対する効果的な風力－水電解協調制御手法を開発し、系統の需給状況に応じた協調制御手法も開発した。これにより、系統受容性を高めつつ、再エネ事業者の収益の最大化を図ることが可能となり、水素製造コストを下げる事が期待できる結果を得た。

[I - 2] 高効率低コスト水素製造システムの研究開発

水電解装置を軸に開発を行い、ラボスケール試験にて電解電圧 1.8V において電流密度 0.6A/cm² 以上の安定運転を達成するとともに、再エネ使用時における寿命改善の見通しも得た。全体システムとしての検討も実施済。

・電極基板の前処理方法やメッキ厚の最適化を行うことにより、ラボスケール試験にて電解電圧 1.8V において電流密度 0.6A/cm² 以上の安定運転を達成した。中型電解槽および大型電解槽の性能を確認中。

・中型電解槽電極 1 式の製作コストを従来の 4 割弱へコストダウンが可能と算出した。大量生産により目標コストを達成する見込み。(約 3 割へのコストダウンが必要)

・電力変換装置コスト 6 万円/Nm³/h 以下を達成した。

・電極面積 $4,000\text{cm}^2$ 、20 セルの電解槽にて電解試験を実施し、ラボスケール試験および電極面積 $2,500\text{cm}^2$ 、20 セル電解試験との比較を実施し、出力変動が水素製造システムに及ぼす影響を明確にした。

1. 2 研究開発項目Ⅱ：「高効率水素製造技術の研究」

〔Ⅱ-1〕高温水蒸気電解システムの研究

セル・スタック技術、水素製造システム、電力貯蔵システムの研究開発を通して、個々の目標を達成するとともに更なる改善へとつながる指針を得た。

- ・高い電解特性および劣化耐久性を持つシステム適用レベルのスタックを開発した。
- ・セル・スタック劣化率を改良し、更に改良指針を提示した。
- ・マルチスタック試験で、連結大型化、複数スタック運転・制御、変動電力対応を実証した。
- ・シミュレータで運転動特性を評価、運転・制御設計。変動電力対応の制御方法を考案
- ・ $10\sim 50\text{Nm}^3/\text{h}$ 級機設計検討、 $<4\text{kWh}/\text{Nm}^3$ 見通しを得た。
- ・SOEC-蓄熱-SOFC 電力貯蔵システム設計で熱循環利用の有効性を検証

〔Ⅱ-2〕次世代水素製造システムの研究

中間電極を有する構成による水電解システムを新規に考案・開発し、その将来的な可能性として、常温動作、低電圧、交流利用等の特長を実験データで示した。

- ・負極に MH、正極に水酸化ニッケルを用いた三次元（粒子）電極からなる新規水電解システムを開発（電気化学反応が二相界面で起こるため、過電圧を低減でき、エネルギー変換効率を大きくできる）
- ・中間電極を用いて水電解反応を水素発生サイクルと酸素発生サイクルの二つの電気化学サイクルに分割した電気化学水分解サイクルの基本的技術を開発（中間電極があるためセパレーターの厚さを薄くでき、抵抗過電圧を低減できる、パルス電流を流すことにより、濃度過電圧を低減できる）
- ・常温で、電解電圧が 1.6V では、エネルギー変換効率は 93% となり、既存のアルカリ水電解をはるかに凌駕する技術を確認した（エネルギー変換効率を高め、電解水素コストを低減できる、ラボスケールにて、 25°C 、電流密度 $0.2\text{A}/\text{cm}^2$ にて、電解電圧 1.6V 以下を確認）。
- ・中間電極を用いた電気化学水分解サイクルの 0.1kW 級プロトタイプの水素製造装置を立ち上げ中（2017年9月時点）。

1. 3 研究開発項目Ⅲ：「周辺技術（水素液化貯蔵システム）の研究開発」（平成 25～27） 「大規模水素利用技術の開発」（平成 28～29）

〔Ⅲ-1〕水素液化貯蔵システムの研究開発

大型真空二重殻タンクをはじめとする、エネルギーキャリア（二次エネルギー用途）としての高効率・大型水素液化貯蔵技術として水素液化システムおよび大型液体水素タンクシステムの開発を実施し、再生可能エネルギー由来水素液化貯蔵システム実現に必要な重要基盤技術を確立した。

- ・5t/d 級液化システム実証および 7°C シミュレーションにより高効率液化プロセス成立確認し、液化効率 25%を見通せる技術を策定した。動特性解析による負荷変動対応の課題を明確化した。
- ・要素試験、1,000 m^3 タンク試験により、大型真空二重殻タンの断熱・構造開発を完了。現在（2017 年 9 月）、タンク試験設備外を開放し、断熱・構造の健全性を確認中。

〔Ⅲ-2〕水素専焼対応型 Dry Low NO x 高温ガスタービンの研究開発

大型バーナの要となる単孔ノズルについて詳細に調査、研究し、形状等の最適化を行うことで、実機へとつながる基礎技術を開発した。

- ・単孔ノズルの解析・検証（単孔ノズルの設計）：断面内最高濃度の低減(低 NO x 化)と壁面濃度の上昇抑制（フラッシュバック耐性確保)を両立する為、単孔ノズルの燃料孔配置を数値解析により検討した。更なる低 NO x 化、フラッシュバック耐性確保のため、ノズル入口形状を改良していく。
- ・単孔ノズルの解析・検証：単孔ノズルの拡大モデルで非燃焼場の水素燃料濃度分布が計測可能な装置を製作。縮小モデルバーナの非燃焼試験にも適用可能である。
- ・単孔ノズルの解析・検証：濃度分布は数値解析結果とほぼ同様であるが、断面内最高濃度の減衰および壁面最高濃度の増加は気流試験の方が緩やかである⇒数値解析では濃度の拡散を速く見積もっている可能性がある。気流試験では燃料孔数が少ないとやや非対称性が生じる。
- ・縮小モデルバーナの解析・検証（燃焼試験装置の製作）：縮小モデルバーナの燃焼試験を実施可能な試験装置を計画中。H30 年度実施予定の燃焼試験では下記の検証が可能である。

（NO x : 50ppm@15%O $_2$ (CC 効率 60%条件) 達成の目途付、フラッシュバック耐性 : 上記 NO x 達成条件においてフラッシュバックしないこと）

- ・大型ガスタービンむけクラスタバーナの構造成立性検討：最適化の結果、大型ガスタービンむけクラスタバーナは天然ガス焚き燃焼器の 1.2～1.4 倍程度の直径サイズになる見込みであることを確認した。

〔Ⅲ-3〕水素ガスタービン燃焼技術の研究開発

実機エンジンの実現につながる要素技術を開発、個々の目標性能を達成するとともに、エンジン実証が可能なレベルに達した。

- ・水素の微細な火炎を形成する水素専焼ドライ低 NO x 燃焼技術を用いたガスタービン用の燃焼器について、燃焼器要素開発段階でのベース技術確立の目途を得た。

- ・高圧水素燃焼試験を実施し、2 MW級ガスタービンエンジンの50%負荷から定格100%負荷運転に相当する燃焼器入口条件において、NO_x 40 ppm(残存酸素16%換算値)以下のレベルになっている。
- ・低圧水素燃焼試験を実施し、2 MW級ガスタービンエンジンの着火、エンジンの回転数上昇時を想定した5%、20%、40%、80%、100%回転数を模擬した各種条件において、水素燃焼で失火や逆火が生じず、500℃以上の燃焼ガスを安定に生成する安定燃焼を達成した。

1. 4 研究開発項目Ⅳ：「エネルギーキャリアシステム調査・研究」

[Ⅳ-1] 高効率メタン化触媒を用いた水素・メタン変換

グリーンメタンプロセスの実現の基になる関連技術を開発し、再エネ水素・メタン変換の大規模変換・輸送事業の可能性を示した。

- ・触媒耐久性試験において、18,000時間後も初期性能を維持し、極めて高い耐久性確認
- ・高メタン変換率および熱回収効率を実現するシェルアンドチューブ型反応器を含む離島モデルのプロセス設計を実施
- ・経済性評価として、貯蔵エネルギー当たりの設備コストがメタン変換/貯蔵が蓄電池貯蔵・水素変換/貯蔵よりも有利であることを示した。
- ・水素処理量50 Nm³/hの実証用メタン製造設備を製作し、定格運転、部分負荷運転、起動/停止を含めた総合運転により高純度のメタン製造が可能であることを検証した。

[Ⅳ-2] 熔融塩を用いた水と窒素からのアンモニア電解合成

要素技術の開発により、陰極の分極特性、陽極の耐久性の向上、アンモニア生成時の反応メカニズム解明、収率の大幅向上など、本方式の実現に向けた多くの成果が得られ、事業化に向けた大きなステップとなった。

- ・陰極電流密度2桁向上、導電性セラミックスの薄膜化陽極作製技術の確立など、電極開発において飛躍的な性能向上を実現（今後の装置大型化に向けた電極製造方針の確定）
- ・H₂O 供給方法確立、アンモニア生成時の反応メカニズムの解明（大型装置稼働時・異常発生時における状況把握）
- ・熔融塩中のN³⁻や溶存アンモニア種の分析手法を確立（装置大型化に向けた開発を加速する分析ツール）
- ・製作した10Aスケール評価装置の稼働試験と、今後の装置大型化に向けた課題抽出は現在進行中（事業化目標（電解電圧2.3V以下達成の目途を得る）は低電流通電領域（5A以下）で達成見込み）

[Ⅳ-3] 水素分離膜を用いた脱水素

個別の目標は全て達成し、設計まで含めて、量産、実用化が見通せるレベルに技術を高めることで、今後につながる成果を得た。

- ・セラミック系水素分離膜の長尺化：既存膜の500mmLへの長尺化を達成し、改良膜については長尺化への課題を把握し、年度内達成見込み

- ・世界最高の性能を有する水素分離膜を開発
- ・分離膜システムの低コスト化／量産化を目指したモジュール化検討を実施、200 mmL×7本、500 mmL×3本のモジュールによる反応検討を実施し、単管膜と同様の水素引き抜き効果を実証するとともに、低コスト化に繋がるモジュール化構造を考案し、試作を実施。
- ・小型・分散型 MCH 脱水素システムとしての経済的実現可能性を確認した。

1. 5 研究開発項目V：「トータルシステム導入シナリオ調査研究」

[V]

新たに学理に根ざした技術評価の観点から、従来シナリオを大幅に補強、強化し、将来のシナリオを検討する際に活用可能な技術開発シナリオが見えてきた。

- ・グローバル水素利用の拡大には、各エネルギーキャリア（液化水素、有機ハイドライド、アンモニア）には特長があり、CO₂ 制約の強さ、技術の成熟度、関連インフラの整備状況、安全性など、（時間軸、規模）によって役割分担が必要。
- ・ローカル蓄エネ水素の利用拡大には、太陽電池＋分散型 PtoG による水素蓄エネシステムが重要である。

詳細については、次表のとおりであり、全テーマ、項目ともに達成可能である。

2. 研究開発項目別の成果

各テーマについての成果および達成度は以下のとおりである。(◎大幅達成、○達成、△達成見込み、×達成困難)

研究開発項目 I : 「低コスト水電解水素製造システムの研究開発」

中間目標 (H29)	研究開発成果	達成度
I-1 : 「アルカリ水電解水素製造システムの研究開発」		
(1) アルカリ水電解装置用高耐久性・低過電圧電極・隔膜の開発 :	各種電極から過電圧の低い陽・陰極の選択を行った。合わせて、電解で用いる隔膜については自社開発した膜製造装置で製造条件を検討し、電気抵抗が小さく且つガス遮断性に優れた隔膜の製造条件を構築した。 変動電源に対する耐久性評価基準 : 以下の条件で電解電圧の上昇率 10%以下 a) 変動電源 (短周期・長周期) 連続 1,000Hr 運転 b) 一定時間通電後、電源シャットダウンの繰り返し 500 回	○
(2) 電解システムの大型化の達成	小型電解装置で目標の電解性能の達成が見込まれたので、数百 KW 級、数 MW 級の規模で使用する電解セルの製作とシステム構築を進めた。電解セルの単セル面積を小型電解装置から、それぞれ約 100 倍、1,000 倍のスケールアップを行った。 100MW 以上の大規模設備において目標値の 20 万円/Nm ³ -H ₂ 以下が見通せる技術の確立の目途が立った。	○
(3) 電解システムの長期運転によるシステム安定性の達成	小型電解装置での変動電源に対する耐久性の基本評価を実施し、良い評価が得られているので (項目 (1))、電解システムの大型化の目的で設置した中型及び大型電解装置を用いて、長期の運転評価を実施した。 電解の基本性能「0.6A/cm ² の電流密度において電解電圧 1.8V」が維持できており、長期運転での耐久性を有することが証明された。	○
(4) 水電解用低電圧・大電流直流電力供給装置開発	水電解整流器のシステム設計、電気回路設計と装置製作 : 小電流 (50A)、中電流 (2,500A)、大電流 (16,200A) の 3 種類の水電解整流器のシステム設計、電気回路設計を実施し、装置を製作した。 半導体スイッチング素子 (IGBT) の高周波スイッチングで出力電流を制御するため、風車発電電力の急峻な変動に追従した水電解装置への電力供給が可能であり、それぞれの規模の水電解装置での稼働が確認できた。	○

中間目標 (H29)	研究開発成果	達成度
(5) 水電解装置協調制御に係る研究開発	1年間のシミュレーションの結果、制御なしの風車では25.4GWh発電するが、電力需要協調制御を入れた場合、系統に13.6GWh、水電解に8.1GWhとなり、出力制御分は3.6GWhとなった。売電単価を22円/kWh、売水素単価を30円/Nm ³ 、電解効率を5kWh/Nm ³ とすると、年間約3.5億円の収入となる。	○
I-2:「高効率低コスト製造システムの研究開発」		
(1) アルカリ水電解の高効率化	ラボスケール試験にて目標達成。 中型・大型セルにて性能を確認中。	○
(2) アルカリ水電解装置の耐久性評価	・変動運転時の電圧上昇に対してめっき条件の改良により解決した。 ・ラボスケール試験にて変動試験を実施し、耐久性を確認中。	△
(3) アルカリ水電解装置の低コスト化	メッキ方法を見直して製造コストの低減を検討中。 電力変換装置コスト6万円/Nm ³ /h以下を確認済み。	○
(4) アルカリ水電解装置の大型化	小型セル(2,500cm ²)および中型セル(4,000cm ²)を製作し、性能確認済み	△
(5) 水素製造システムFSの実施	・システムのFSを実施済み。 ・水素製造システムの出力下限値をラボスケール試験、小型セルおよび中型セルにより把握済み。	△
(6) 水素製造システムの実証試験	・基本設計にて5%以上向上できることを確認済み。	○
II-1:「高温水蒸気電解システムの研究」		
(1) セル・スタック技術 ・平均電圧1.3V以下、平均電流密度0.5A/cm ² の条件で電圧上昇率1%/1,000h程度以下	・劣化率に及ぼす運転条件の影響を評価、劣化率1%/kh以下を達成 ・セル劣化要因を抽出。改良施策で<0.5%へ見通し	○
(2) 水素製造システム ・SOEC水素製造システム検証機的设计、運転・制御方法、系統・機器仕様の具体化。	・マルチスタック試験で拡張性、変動電力応答性を実証 ・シミュレータで運転動特性を評価、変動電力に対応する制御方法を考案 ・検証機を設計。改良方針抽出、4kWh/Nm ³ に見通しを得た。	○
(3) 電力貯蔵システム ・SOEC-蓄熱-SOFC連結システムの概念・運転制御設計	・システム概念構築 ・高温蓄熱の要素特性取得 ・運転・制御方法を考案。熱循環の効率寄与を明確化	○
II-2:「次世代水素製造システムの研究」		
(1) 三次元粒子電極を用いた新規水電解 ・負極及び正極材料の探索 ・正極構造の最適化 ・最適スタック構造の設計 ・ベンチ試験装置の試作と実験	・ベンチ試験の水電解・放電のエネルギー変換効率98.3%、79.6%と高効率を確認した。 ・1kWセルスタックでエネルギー効率95.3%(@0.2C)を確認。	○

中間目標 (H29)	研究開発成果	達成度
(2) 新規電気化学水分解サイクル ・1 kW 級水素サイクル用セル評価 ・電気化学サイクルの基礎研究 ・最適スタック構造の設計 ・0.1 kW 水素製造装置の試作 ・システム設計	・ベンチ試験装置で、周波数 50Hz 以上、25℃、0.2 A/cm ² で、電解電圧 1.69 V を確認 ・0.1 kW セルスタックで 50Nm ³ /h/m ³ を試験中 ・0.1 kW セルスタックで試験中	△
Ⅲ-1: 「周辺技術 (水素液化貯蔵システム) の研究開発」 (平成 25~27) 「水素液化貯蔵システムの研究開発」/「大規模水素利用技術の研究開発」 (平成 28~		
(1) 水素液化システムの開発 液化容量 5~10t/day 程度の水素液化システムに対し、25%以上の液化効果が見通せる技術を開発、水素製造量の時間変動に対応するための解決策を明確化	5 t/day 液化システム実証およびプロセスシミュレーションにより高効率液化プロセス成立確認 動特性解析による負荷変動対応の課題明確化	○
(2-1) 液体水素タンクシステムの開発 ボイルオフ水素発生率 0.1%/day の液化水素タンクシステム (容量 3,000m ³ 程度) を可能とする技術を開発	要素試験、1,000m ³ タンク試験により、大型真空二重殻タンクの断熱・構造開発完了	△
(2-2) 現行のオーステナイト系ステンレス (9~12w t %Ni) に対し、Ni 量を 6w t %まで低減した新鋼材	新鋼材の機械的特性が従来鋼と同様であることを確認、汎用溶接材による溶接特性取得	△
(3-1) 容量 200m ³ /h 以上、ポンプ効率 50% 以上、揚程 260m の液体水素ポンプを可能とする基板技術確立	30m ³ /h 級ポンプによる移送試験完了、絶縁材の浸漬試験性能取得	○
(3-2) 容量 3,000m ³ /h、効率 60%以上のボイルオフ水素用圧縮機を可能とする技術を開発	極低温二相水素解析・設計技術を確立 解析的に目標性能を確認	○
(3-3) エネルギー輸出国の選定、再生可能エネルギー由来等水素ポテンシャル調査	ノルウェー等豊富な水素ポテンシャルと近年の再生可能エネルギー開発を確認	◎
Ⅲ-2: 「水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発」		
(1) 単孔ノズルの解析・検証	・壁面フラッシュバック発生限界の濃度計画値策定 ・非燃焼試験装置の製作完了し、計測実施中	○
(2) 縮小モデルバーナの解析・検証	・NOx50ppm 以下達成の濃度計画値策定中 ・非燃焼試験装置の製作完了 ・燃焼試験装置の概念設計完了	○
(3) 大型ガスタービンむけクラスタバーナの構造成立性検討	・概念図作成	○

中間目標 (H29)	研究開発成果	達成度
Ⅲ-3 : 「水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」		
(1) 高圧水素燃焼試験 NOx 排出特性	・高圧水素燃焼試験を実施し、2 MW級ガスタービンエンジンの50%負荷から定格100%負荷運転に相当する燃焼器入口条件において、NOx 40ppm(残存酸素16%換算値)以下のレベルになっていることを確認した。	○
(2) 水素安定燃焼	・低圧水素燃焼試験を実施し、2 MW級ガスタービンエンジンの着火、エンジンの回転数上昇時を想定した5%、20%、40%、80%、100%回転数を模擬した各種条件において水素燃焼で失火や逆火が生じず、500℃以上の燃焼ガスを安定に生成する安定燃焼を達成した。	○
Ⅳ-1 : 「高効率メタン化触媒を用いた水素・メタン変換」		
(1) 熱回収効率最適化手法の検討 1)ベンチ実証設備および、シミュレーション計算によるリアクタ構造の最適化検討 2)熱回収に適した触媒組成・形状の検討および、耐久評価 実ガス中に含まれる不純物に対し、8,000時間後の反応において水素理論最高転換率90.1%に対し、低下率5%以内 (不純物許容濃度把握) 3) 総合効率最適化プロセス検討 総合効率 75.7%以上	1) 高効率変換および高熱回収率に適したメタン化リアクターを設計し、ベンチ試験機(処理量6Nm ³ /h)にて熱回収率58%、実証試験機(処理量62.5Nm ³ /h)にて73.2%を検証。 2) 純ガスを用いた連続反応試験評価を実施し、18000時間後も初期性能を維持し、高い耐久性を示す。ガス中に含まれる不純物影響および許容濃度を把握した。 3) 処理量100Nm ³ /h規模におけるメタン変換からガスエンジン発電続までの総合効率は77.2%である。	○
(2) 1) CO2 源の選定と物質収支試算とプロセス設計 ・発電規模別の再生可能エネルギーのメタン変換プロセスのFS実施 2) 水素転換率の最適条件検討 ・リアクタ出口における水素濃度5%以下	1) 国内離島を想定した風力発電、アルカリ水電解、メタン化、ガスエンジン発電までを含む離島モデル規模のグリーンメタンプロセスの設計を完了。 経済性評価を行い、メタンへの変換/貯蔵が、水素への変換/貯蔵および蓄電池貯蔵より優位であることを示す。 2) メタン化反応試験により高純度メタンが製造できることを検証し、リアクタ出口の水素濃度は実証試験機(処理量62.5Nm ³ /h)にて0.7%であった。	○

中間目標 (H29)	研究開発成果	達成度
(3) 離島モデル実証試験 1) 離島モデル実証試験 2) プロセス設計	1) メタネーション実証試験機 (処理量 62.5 Nm ³ /h) を設計・製作。高い熱回収効率 73.2%にて高純度メタン (リアクタ出口水素濃度 0.7%) を製造できることを実証。 2) 水素流動変動下においても安定して運転可能であり、起動・運転・停止までを自動制御・運転する技術を構築。	○
IV-2 : 「熔融塩を用いた水と窒素からのアンモニアの電解合成」		
(1) 高性能窒素ガス還元陰極 (一室型・二室結合型共通)	・270 mA/cm ³ を確認済	△
(2) アンモニア生成反応制御 (一室型)	・収率 100%を確認	○
(3) 高性能酸素発生陽極	・溶出成分検出限界以下 ・内部抵抗評価用陽極準備中	△
(4) 高性能水素透過金属膜 (二室結合型)	・改善継続中	△
(5) 評価装置の試作と評価	・10A スケール評価装置を製作・設置 ・評価試験継続中	△
IV-3 : 「水素分離膜を用いた脱水素」		
①セラミック系水素分離膜の長尺化・大面積化	・標準膜で大面積化 (→500mmL) 達成 ・高性能膜の製膜 (条件検討中)	△
②水素分離性能向上	・透過性 3.5×10 ⁻⁶ mol/m ² ・s・Pa、分離係数 16000以上を達成	◎
③単管MRによる反応検討	・外側触媒構造が適用可能であることを見出し、平衡シフト効果確認	◎
④小型MRの設計・試作、データ収集	・装置製作、平衡シフト効果確認	○
⑤モジュール化検討	・ガラスシール法の可能性確認 ・伝熱能力向上のための試作検討中	△
⑥高圧化基礎検討	・供給圧を 500kPa-A 以上にすれば、低コスト化が図れる「透過側常圧」の採用可能があることを確認(シミュレーション)	△
⑦プロセス経済性検討	・100kW SOFC 連携システムの機器コスト、ランニングコストを推算	○
V : 「トータルシステム導入シナリオ調査研究」		
・マクロ分析に基づく現状・近未来技術のシナリオ分析	・マクロ分析を実施した。	○
・技術的革新性 (社会的合理性を付与)	・技術的革新性について分析実施、継続中。	△
・技術開発シナリオの提示 (水素エネルギーシステムの価値を最大化)	・シナリオ策定中 (①グローバル水素利用の拡大、②ローカル蓄エネ水素の利用拡大)	△

3. 研究開発成果の意義

(1) 成果の市場性

- ・一部遅れがあるものの、研究テーマ毎の中間目標は達成及び達成見込みであり、プロジェクトとしての中間目標は概ね達成の見込みである。
- ・本プロジェクトの最終目標（アウトカム目標）は、2030-2040年時点の水素販売価格（20-40円/Nm³）の達成であり、現時点の成果はその達成に直結するものではないが、水素社会の実現に向けた骨格となる技術は形成されたと言える。
- ・旭化成(株)による水電解装置の開発など、完成度が高いものも含まれており、今後拡大が期待される水素関連市場において、その牽引役としても期待される。
- ・川崎重工(株)の水素液化システムおよび液体水素タンクシステムは、ポイントとなる技術は完成したと言える。今後、水素サプライチェーン実証事業で本技術を生かし、実用化に見通しを付ける予定である。
- ・三菱日立パワーシステムズ(株)、三菱重工(株)、および川崎重工(株)の水素専焼ガスタービンの研究開発では、確実に技術は完成されると見込んでいる。2020年頃より徐々に導入が開始され、インフラが整う2030年頃から、水素発電の本格展開がなされると期待される。

(2) 成果の水準

- ・成果は、水素製造装置等をはじめ技術的には世界トップ水準にあるものも存在し、NEDO事業として取り組んだ結果とも言える。

(3) 成果の汎用性

- ・全て汎用性のある成果と考えられるが、今後も水素を取り巻く世界情勢を踏まえた上で、製品化に向けてた開発を進めていく必要がある。

(4) 他の競合技術と比較しての優位性

- ・アルカリ水電解装置の性能、新規水電解技術など世界的に通用する技術と考えられ、今後、如何に市場へとスムーズに移行していくかが重要となる。基礎的な研究開発テーマについては、特長ある技術が生まれており、個別テーマの技術ステージに適した形で、継続したサポートが必要と考えられる。

4. 特許、論文、外部発表等の件数

本事業での特許、論文、外部発表等の件数は H29 年 10 月末で以下の表のとおりである。論文発表、研究発表等は順調に成果をあげ、特許出願については、後半での出願が少ない傾向にはあるが、権利化活動は積極的に行っており、初期のアイデア段階を経て、一通り出尽くした感がある。また、個々の実施体による特許戦略もあり一概には言えない。さらに、基本特許的なものは、既に本プロジェクトを開始する以前に取得済のところが多く、その影響もあると考えられる。

	H25	H26	H27	H28	H29	計
論文	0	0	16	13	10	39
研究発表・講演	0	24	100	173	45	342
受賞実績	0	0	0	2	0	2
雑誌・図書等への掲載 ^(注1)	0	13	14	25	8	60
展示会へ出展 ^(注1、注2)	0	9	13	20	10	52
特許出願	4	10	8	15	2	39
うち外国出願	0	1	0	0	0	1

注 1：NEDO 発表会の講演では、講演とともに抜き刷り集（図書）や出展（パネル）もカウントしております。

。 図書やパネルのみの場合もあります。

注 2：「展示会への出展」が、講演等と同時に実施の時には、同様に展示（パネル）もカウントしております。

※詳細は各項目の成果詳細に記載

5. 研究成果の最終目標の達成可能性について

最終年度である平成 29 年度末までの達成見通しは以下のとおりである。

研究開発項目 I : 「低コスト水電解水素製造システムの研究開発」

	最終目標（平成 29 年度末）	達成見通し
I - 1 : 「アルカリ水電解水素製造システムの研究開発」		
①	低電圧・高耐久性電極の開発	・達成 ・2 年間/連続 1 万時間超の運転で耐久性確認済（内部解析でメンテナンス評価予定）
②	低電圧・高耐久性隔膜の開発	・達成 ・2 年間/連続 1 万時間超の運転で耐久性確認済（内部解析でメンテナンス評価予定）
③	電解ユニットの開発	・達成
④	電解プロセスの開発・実証	・達成 ・百メガワット級の装置であれば、目標コストの達成は可能（年度末までに精査予定）
⑤	水電解用直流電力供給装置開発	・平成 29 年度末までに電力供給装置の仕様を決定し、5%効率化とコスト低減の見通しをつける。
⑥	風力発電と水電解装置の協調制御法検討	・平成 29 年度末までに、系統電源安定化に向けたシステム設計を完成させる。
I - 2 : 「高効率低コスト水電解水素製造システムの研究開発」		
①	アルカリ水電解の高効率化	・達成（ラボスケール試験）
②	アルカリ水電解装置の耐久性評価	・平成 29 年 1 2 月達成予定（ラボスケール試験にて耐久性確認中）
③	アルカリ水電解装置の低コスト化	・達成
④	アルカリ水電解装置の大型化	・平成 30 年 1 月達成予定（小型セル、中型セルでは性能確認済）
⑤	水素製造システム F S の実施	・平成 29 年 1 1 月達成予定（システムの F S を実施済）
⑥	水素製造システムの実証試験	・達成（基本設計にて 5%以上向上できることを確認済）

研究開発項目 II : 「低コスト水電解水素製造システムの研究開発」

	最終目標（平成 29 年度末）	達成見通し
II - 1 : 「高温水蒸気電解システムの研究」		
①	セル・スタック技術	・達成（劣化率に及ぼす運転条件の影響を評価、劣化率 1%/kh 以下を確認）
②	水素製造システム	・達成（マルチスタック試験にて拡張性、変動電力応答性を実証）
③	電力貯蔵システム	・達成（システム概念構築、運転・制御方法を考案、熱循環の効率寄与を明確化）

	最終目標（平成 29 年度末）	達成見通し
II-2：「次世代水素製造システムの研究」		
	①三次元粒子電極を用いた新規水電解	・達成（ベンチ試験の水電解・放電のエネルギー変換効率 98.3%、79.6%）
	②新規電気化学水分解サイクル	・達成見込み（ベンチ試験にて 25℃、1.6V を確認、0.1kW セルスタックで試験中）

研究開発項目Ⅲ：「周辺技術（水素液化貯蔵システム）の研究開発」

「大規模水素利用技術の研究開発」

	最終目標（平成 29 年度末）	達成見通し
III-1：「水素液化貯蔵システムの研究開発」		
	①水素液化システム	・達成（5t/day 級液化システム実証及びプロセスシミュレーションにより高効率液化プロセス成立確認）
	②液体水素タンク	・平成 30 年 2 月達成予定
	③液体水素用新鋼材	・平成 30 年 2 月達成予定
	④液体水素ポンプ	・達成
	⑤ボイルオフ水素圧縮機	・達成
	⑥水素ポテンシャル調査	・達成（ノルウェー等調査）
III-2：「水素専焼型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発」		
	① 単孔ノズルの解析・検証 ・数値解析によるフラッシュバックレス構造設計 ・非燃焼試験による燃料濃度許容範囲内	・平成 30 年 2 月達成予定（単孔ノズルの形状改良により達成見込み）
	② 縮小モデルバーナの解析・検証	・平成 30 年 2 月達成予定（単孔ノズルの解析、検証に関する成果を反映することで達成見込み）
	③ 大型ガスタービン向けクラスタバーナの構造成立性検討	・平成 30 年 2 月達成予定
III-3：「水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」		
	①高圧水素燃焼試験 ・NOx 排出特性	・達成予定（水素バーナ部の形状改良を実施中）
	②水素安定燃焼 ・水素着火性能	・平成 30 年 2 月達成予定（追焚きバーナの形状改良を実施中）

研究開発項目Ⅳ：「エネルギーキャリアシステム調査・研究」

	最終目標（平成 29 年度末）	達成見通し
IV-1：「高効率メタン化触媒を用いた水素・メタン変換」		
	① 熱回収率最適化手法の検討 ・触媒組成・形状検討/耐久評価	・達成（純ガス：18000h 後、初期特性維持）

	最終目標（平成 29 年度末）	達成見通し
	②CO ₂ 源選定と物質収支試算とプロセス設計 ・水素貯蔵、蓄電池との比較	・達成（離島モデルのプロセス設計完了、設備コスト：メタン>水素>蓄電池）
	③プロセス設計 ・大規模システム試設計	・達成見込み（最適化結果を反映し、100MW級プロセス試設計実施）
IV-2：「溶融塩を用いた水と窒素からのアンモニア電解合成」		
	①高性能窒素還元陰極 ・300mA/cm ³	・平成29年12月達成予定（現状：270mA/cm ³ ）
	②アンモニア生成反応制御 ・収率90%以上	・達成（収率100%）
	③高性能酸素発生陽極 ・消耗速度：20μm/y以下 ・電極内部抵抗：0.05mΩm ²	・平成29年12月達成予定
	④評価装置の特性評価 ・大型化に向けた課題抽出 ・2.3V以下に目途	・平成29年12月達成予定（10Aスケール評価装置立ち上げ中）
IV-3：「水素分離膜を用いた脱水素」		
	④セラミック系水素分離膜の長尺化・大面積化	・達成見込み（製膜条件を検討し、年度内の達成を予定）
	⑤水素分離性能向上	・達成（世界最高の性能）
	⑥単管MRによる反応検討	・達成（外側触媒構造が適用可能であることを見出）
	④小型MRの設計・試作、データ収集	・達成（装置製作、平衡シフト効果確認）
	⑤モジュール化検討	・達成見込み（ガラスシール法の可能性確認、熱伝導フィンの効果検証）
	⑥高圧化基礎検討	・達成見込み
	⑦プロセス経済性検討	・達成見込み（他用途展開における経済性概念検討）

研究開発項目V：「トータルシステム導入シナリオ調査研究」

	最終目標（平成 29 年度末）	達成見通し
V：「トータルシステム導入シナリオ調査研究」		
	①マクロ分析に基づく現状・近未来技術のシナリオ分析	・達成見込み（平成29年度末、更なる分析を加え充実）
	②技術的革新性 社会的・組織的合理性を付与	・達成見込み（平成29年度末、更なる検討を加え充実）
	③技術開発シナリオの提示 ・水素エネルギーシステムの価値を最大化	・達成見込み（平成29年度末までに具体的シナリオを提示）

IV. 実用化の見通しについて

先導事業ということで、リスクが高く難しいテーマが多い中、確実に結果も出ており、事業化へと移行が見えるものもある。各テーマ間の難易度にも幅があることから、やむを得ない結果と考えられる。今後、早期に事業化へと移行できるテーマと継続して研究開発が必要なテーマを分類し、将来的なポテンシャルの高いものについては、継続した活動が必要である。

各研究開発項目での実用化、事業化の見通しについて以下に詳述する。

1.1 研究開発項目Ⅰ：「低コスト水電解水素製造システムの研究開発」の実用化、事業化の見通しについて

[Ⅰ-1]：当面は、社会実験や市場開拓が進んでいる欧州市場への参入を目指す。日本国内に関しては、市場の立ち上がり時期が見通せない現状であると捉えている。日本での市場開拓の可能性を協調制御に関する研究開発で検討し、事業性が成り立つ電力価格や水素需要・価格の水準を示したが、市場立ち上がりには何らかの優遇措置が必要である。

電力供給装置についても今後事業化を目指し、設計した 1MW 級水電解整流器の製作・評価を行い、効率、および、コスト試算の妥当性を検証する必要がある。さらに、水電解システムにエネルギーマネージメントを組み合わせることにより、より一層のエネルギーの有効活用を検討して行く。

[Ⅰ-2]：ラボスケール電解槽により確認された性能を中型電解槽および大型電解槽にて維持させるためには多くの課題がある。また、目標とするコストにするためには部材（主に電極）の大量生産が必要になり、電解装置の容量を大きくする必要がある。ただし、本事業の目標が達成されると既存のメーカー（主に海外メーカー）の性能およびコストと比較して大幅に有利になると考えられ、事業化が可能になると考えられる。

特にⅠ-1については完成度も高く、早期の市場投入が期待される。

1.2 研究開発項目Ⅱ：「低コスト水電解水素製造システムの研究開発」の実用化、事業化の見通しについて

[Ⅱ-1]：将来の大型化が見通せる実験機を開発し、運転実証した。今後、高温水蒸気電解システムの商用化に向けて、以下が課題と考えられる。

セル・スタックについては、スタック装荷数低減、交換寿命延伸によるコスト低減のため、一層の劣化率改良と特性再現性が望まれる。そのためには、スタック構成、運転条件、被毒などの影響メカニズムを更に包括的に把握することで、改良を図る必要がある。また、高温モジュールに関して、水素／水蒸気環境における構造材料の耐環境性評価と改良、響と評価と設計指針への反映、および低コスト化技術開発が課題である。これらの技術開発と並行して、検証機、実証機と製作・運転試験を進め、事業化を進める。

[Ⅱ-2]：ラボスケール電解槽により確認された性能を中型電解槽および大型電解槽にて維持させるためには多くの課題が残る。また、目標とするコストの実現には部材（主に電極）の大量生産が必要になり、電解装

置の容量を大きくする必要もある。ただし、本事業の目標が達成されると既存のメーカー（主に海外メーカー）の性能およびコストと比較して大幅に有利になると考えられ、これをポイントに事業化検討を進める。

1.3 研究開発項目Ⅲ：「周辺技術（水素液化貯蔵システム）の研究開発」

「大規模水素利用技術の研究開発」の実用化の見通し等について

[Ⅲ-1]：事業化に向けた具体的な取り組みとしては、2016年2月に川崎重工業(株)、岩谷産業(株)、シェルジャパン(株)、電源開発(株)による技術研究組合「CO₂フリー水素サプライチェーン推進機構」（略称：HySTRA）を設立し、水素サプライチェーン事業の展開を目指している。本取り組みはH27～H32年度（予定）NEDO課題設定型産業技術開発費助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」において実施しており、将来の事業化を目標に2020年までにパイロットスケールでの技術実証に必要な技術開発を行う予定である。

再生可能エネルギー由来水素の導入検討については、わが国における再生可能エネルギーの導入拡大の動き、海外、特に欧州での水素を利用した再生可能エネルギー導入利用をサポートするプロジェクトの進展を鑑み、川崎重工業(株)、九州大学カーボンニュートラル国際研究所、(株)テクノバ、トヨタ自動車(株)、(株)ローランド・ベルガーにより、「HyGrid研究会」を発足しており、再生可能エネルギー大量導入時代をみすえた水素による低炭素社会を2030年までに実現させることを目指し、地域単位で産学官等による検討体制を構築している。以上の取り組みとあわせて、さらなる大型化に必要な技術を確立し、2030年までに商用規模での水素液化貯蔵システムの事業化を目指す。

[Ⅲ-2]：事業化までのマイルストーンとしては、中小型ガスタービン（コージェネ、自家発電）の実機展開の後、大型ガスタービンのリプレイス（天然ガス焚きから水素混焼へ）、水素発電の本格展開（水素専焼ガスタービン導入）の順が想定される。

[Ⅲ-3]：2020年頃の自家発電水素発電の本格導入開始、2030年頃の発電事業用水素発電の本格導入開始を睨み、事業化までのシナリオとして、以下のステップが想定される。

- ・本研究開発事業の完遂により得られる水素ガスタービンの差別化技術、水素の微細な火炎を形成する水素専焼ドライ低NO_x燃焼技術をベースとする水素発電装置の実用化検討を実施する。
- ・実用化検討とし、次の開発ステップである実機エンジン搭載に向けた量産試作設計やエンジン実証に向けた燃料制御技術を確立する。
- ・エンジン実証試験にて事業化に向けた更なる課題抽出と解決、長期的な運用信頼性の向上を図る。

1.4 研究開発項目Ⅳ：「エネルギーキャリアシステム調査・研究」の実用化、事業化の見通しについて

[Ⅳ-1]：2018年を目処に、離島等向けの小型電力エネルギー貯蔵システムの市場投入を進める。次に2023年を目処に大型発電所向けの中型電力エネルギー貯蔵システムへと対応し、さらに2030年を目処に大型燃料製造設備市場への投入を開始する。最終的には、国が計画している海外の再生可能エネルギーを活用したエネルギー貯蔵・輸送事業へ対応する。

[IV-2] : 本アンモニア電解合成技術は、小規模生産においてもハーバー・ボッシュ法と同等以上の効率が見込める特長がある。今後の実用化・事業化においては、本事業の成果を十分に活用し、本事業の延長線上にあるエネルギー貯蔵・輸送媒体としてアンモニア生産の大規模化に向けた実証試験からプラントへの適用までの開発に取り組む。

具体的には、評価装置での一連のオペレーションにより実績を蓄積し、デモンストレーション等により本技術の有効性と用途の広がりについての産・学・官の各方面への認知度向上に努め、大規模設備開発を強力に推進するためにプラントエンジニアリング企業、周辺設備メーカー、および実証試験を実施する風力・太陽光発電所など、多くのパートナーの参加・協力体制の構築を図る。H30年度からH34年度にかけては、60kW級のプロトタイプ設備を開発する。同設備を利用して、風力・太陽光発電所等での電力貯蔵試験を開始し、操業下での性能評価とともに稼働データの蓄積を行う。同時に、発電効率は良いが送電線の敷設が困難な日本領海遠洋での洋上風力への展開等についても検討を開始する。H35年度以降に本技術の本格的な実用化に向け、100MW級の中規模プラントを構築して実証実験に入る。H40年度以降にはさらにステップアップし、大規模再生可能エネルギー施設に対応する1000MW級の大規模プラントを稼働させ事業化を目指す。

[IV-3] : 脱水素装置（実機）では個別技術開発は、すべて目標達成済みあるいは達成見込みであり、H30年度以降、2年間で量産用モジュール構造開発、耐久性評価、エンジニアリングデータ収集及びプロセス検討を進め、実機の詳細設計を経て、順次スケールアップを図る。シリカ膜モジュール量産化技術についてはMCHの脱水素プロセスに適した量産用モジュール構造の開発、耐久性の評価・確認を行い、セラミックメーカーが主体的にシリカ膜MRの開発を進める体制を整備すれば、量産化が促進される。更にSOF Cとの連携、多用途展開へと積極的な事業化活動が好ましい。

1.5 研究開発項目V：「トータルシステム導入シナリオ調査研究」の実用化、事業化の見通しについて

[V] : 本調査研究で開発した分析手法やシナリオ策定のフレームワークを、水素・エネルギー技術全体に拡張することで、より妥当性及び有効性の高い水素エネルギー技術開発シナリオの作成に繋げ、その結果を広く公開することにより、水素関連事業の実用化、事業化を支援することが期待される。その意味においても年度内の確実な目標達成が望まれる。

(添付-2)

プロジェクト基本計画

「水素利用等先導研究開発事業」基本計画

次世代電池・水素部

1 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

水素は、これを燃料とした場合に二酸化炭素を排出しないという環境特性に加え、エネルギーキャリアとして再生可能エネルギー等を貯蔵、輸送、利用することができる特性（貯蔵性、可搬性、柔軟性）を有する。水素を有効利用することで、これまで利用することが困難であった海外の豊富な再生可能エネルギー資源や未利用エネルギー資源、CCS適地等を活用することが可能となる。エネルギー資源の乏しい我が国にとって、水素はエネルギー安全保障と温暖化対策の切り札となる重要な政策である。

2017年12月26日に取りまとめられた『水素基本戦略』（再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議）では、2050年を視野に入れた水素社会実現に向けて将来目指すべき姿や目標として官民が共有すべき方向性・ビジョンが示されている。

②我が国の状況

化石燃料等の天然資源に恵まれない我が国は、1970年代の二度の石油危機以来、国民生活と産業活動の血脈であるエネルギーを海外に依存する構造的脆弱性を抱え続けている。加えて、2016年11月のパリ協定の発効を受け、深刻化する地球温暖化問題に対し、我が国としての責任を一層果たしていくことが求められている。一次エネルギーのほぼ全てを海外の化石燃料に依存する我が国においては、エネルギー安全保障の確保と温室効果ガスの排出削減の課題を解決していくことが必要である。

③世界の取組状況

水素は次世代のエネルギーとして国際的にも注目を集めており、欧米をはじめとする先進国のみならず、中国等のエネルギー需要の増大が続く新興国においても水素利用に向けた様々な取組が進められている。

欧米各国、特にドイツを中心として、再生可能エネルギー由来の電力を水素に変換するPower to Gasの取組が積極的に行われているが、製造した水素はそのまま貯蔵・利用される他、天然ガスパイプラインに供給されており、水素のサプライチェーンを構築する等の取組は現状なされていない。オランダでは440MW天然ガス発電所の一つを水素発電に変換する可能性調査を行っている^(*)。米国においてGE社は、米国エネルギー省（DOE）のAdvanced Energy Systems /Hydrogen Turbine プログラムに参画し、水素ガスタービンの研究開発を行っている。当該プロジェクトでは、2020年頃までに1,450℃級の水素タービン、2035年頃までに1,700℃級の水素タービンの開発・実証を予定している^(*)。ま

た、IEA ANNEX 30等のワークショップでは、水電解に関する情報交換が定期的に行われている。

我が国には、こうしたグローバルな動向を適切に把握して世界と協調しつつ、水素社会の実現へ向けて世界をリードしていくことが求められる。

④本事業のねらい

本事業では、2040年以降という長期的視点を睨み、水素等の「カーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢」としての地位を確立させることを目指す。具体的には、再生可能エネルギーからの高効率低コスト水素製造技術、水素の長距離輸送、長時間貯蔵を容易にするためのエネルギーキャリア技術及び大規模水素利用技術の先導的な研究開発に主として取り組む。

*1 出典：Statoil ニュースリリース（2017年7月）

*2 出典：経済産業省 水素発電に関する検討会 報告書（2015年3月）

（2）研究開発の目標

①アウトプット目標

【中間目標（2015年度末）】

- ・各研究開発テーマの中間目標（2015年度末）の達成
- ・研究戦略を策定し、新規テーマとの入れ替えも含め、各研究開発テーマを再編する。

【中間目標（2017年度末）】

- ・中間目標の達成状況を踏まえ、研究戦略に基づく設定目標（2017年度末）の達成

注：（3）の研究開発項目③、④及び⑤について、研究成果を評価した上で必要性が認められるテーマを本格研究へ移行する。

【研究開発項目継続可否審査（2019年度）】

- ・後期5年間における研究開発項目③「超高効率発電システム基盤技術研究開発」については、研究開発項目継続可否審査によりテーマ継続の可否を判断。

【中間目標（2020年度）】

- ・研究開発項目①「水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発」及び研究開発項目③「超高効率発電システム基盤技術研究開発」については、中間目標の達成。

【最終目標（2022年度末）】

- ・中間目標（2020年度）の達成状況をふまえ、最終目標の達成。

②アウトカム目標

再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に取り組む。

水素製造・輸送については、2030年における水素コスト30円/Nm³を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。

水素発電については、2040年以降、水素コスト20円/Nm³において発電コスト12円/kWh以下の実現を目指す。

また、我が国のエネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギーの適地等の経済発展に貢献する。

③アウトカム目標達成に向けての取組

再生可能エネルギーからの電力を用いて水素を製造する場合には一般に水電解が用いられるが、生成した水素は大規模水力発電を利用する場合を除き、現状では高価格で化石燃料とは競合できない。水素コストの過半は電力変換システムと電解システムから構成される水素製造システムの設備コストと消費電力のコストが占めるため、低コスト水素製造システムの研究開発では、まず、設備コストを5万円/kW程度に低減する低コスト水素製造システムの研究開発を行い、さらに高効率水素製造技術の研究により電解システムの電解効率を向上させ消費電力コストの低減を図る。

次いで製造した大量の水素を効率よく貯蔵及び利用するため、大規模水素利用技術の研究開発において、高効率な水素液化装置やボイロフの少ない水素タンクなどの水素貯蔵に関する周辺機器、水素をエネルギーとする発電技術などの基盤技術を開発する。

エネルギーキャリアシステム研究では、従来プロセスに対し、エネルギー効率、経済性等を飛躍的に向上させる可能性のある新規プロセスについて、基盤技術を開発する。

また、トータルシステム導入シナリオ研究では本事業で開発する技術の速やかな実用化・普及と技術課題の明確化、将来の技術課題・シーズの発掘を目指し、普及シナリオを作成する。

さらに、中間評価における指摘事項を踏まえ、水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発及び従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発に取り組む。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発を実施する。なお、各研究開発項目の具体的な内容は、(別紙)の研究開発計画に示す通りとする。これらの事業は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、原則として委託事業として実施する。

【前期4年間】

- 研究開発項目①低コスト水素製造システムの研究開発
- 研究開発項目②高効率水素製造技術の研究
- 研究開発項目③大規模水素利用技術の研究開発
- 研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究
- 研究開発項目⑤トータルシステム導入シナリオ調査研究

【後期5年間】

- 研究開発項目①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発
- 研究開発項目②大規模水素利用技術の研究開発
- 研究開発項目③従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発
- 研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究
- 研究開発項目⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査

2 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、経済産業省において、2013年度より未来開拓研究プロジェクト「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」にて実施されているものであり、事業開始から5年間の研究開発実施者を経済産業省が2013年度に企業、大学等の研究機関（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって選定し、委託契約等を締結する研究体を構築して開始したものである。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」という。）が本研究開発の運営・管理を承継するに当たっては、その時点までの進捗状況を踏まえて実施体制の妥当性について審議を行い、最適な研究開発体制を構築し、実施する。

本事業のプロジェクトマネージャー（以下「PM」という）に、NEDO次世代電池・水素部 原大周を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を選定し、各実施者は下記プロジェクトリーダー（以下PLという）の下でそれぞれの研究テーマについて研究開発を実施する。

- ・全体共通 栗山信宏氏

（国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域電池技術研究部門 副研究部門長）

- ・知財管理 後藤新一氏

（一般財団法人エネルギー総合工学研究所プロジェクト試験研究部 参事）

なお、2018年度からは、PLは上記栗山信宏氏の1名体制とする。

(2) 研究開発の運営管理

PMは、経済産業省、PL、研究開発実施者等と緊密に連携し、適切な運営管理を実施する。また、外部有識者や産業界の意見等を踏まえ、研究進捗把握等のマネジメントを行う。

(3) その他

後期5年の研究開発項目③従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発は、非連続ナショナルプロジェクトとして取扱う。

3 研究開発の実施期間

経済産業省は、未来開拓研究プロジェクト「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」の事業期間として2013年度から2022年度（10年間）を予定し、2013年度から2017年度までの5年間の実施体制を公募した。同事業がNEDOへ移管することを受け、NEDOは2014年度から2017年度までの4年間の基本計画を策定し、研究開発を実施した。その後2018年度から2022年度の5年間については、2017年度に実施した外部有識者による中間評価の結果等を踏まえ、延長することとした。

4 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び技術的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を原則として中間評価を2015年度、2017年度及び2020年度に、事後評価を2022年度に実施する。

なお、評価の時期については、当該研究開発に掛かる技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

特に研究開発の最終段階にあるものや早期に成果が見込まれるものは、事業化の促進の取組も含め、適切に見直しを行うものとする。

5 その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

開発された成果を我が国の産業競争力強化に繋げるため、事業者だけでなく、潜在的なユーザー等の意見を聴いて、標準化戦略や成果の市場への受容を促すための安全・性能証明の方策を含む事業化戦略を策定する。

また、途中段階で得られた成果は他の施策と連携しつつ、事業化を図る。

② 標準化施策等との連携

得られた研究開発の成果については、国際標準化等との連携を図るため、データベースへのデータ提供等を戦略的かつ積極的に行い、評価プロトコル策定や将来の標準化に繋げる。

③ 知的財産権の帰属、管理等取扱い

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、委託先に帰属させることとする。

また、推進体制を構成する企業等が相互に連携しつつ、研究開発及び事業化を効果的に推進するために、知的財産管理規程等を定めることを求める。

④ 知財マネジメントに係る運用

「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

⑤ データマネジメントに係る運用

本プロジェクトのうち研究開発項目⑤については、「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針（委託者指定データを指定しない場合）」を適用する。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、国内外の関連技術の研究開発、市場の動向を随時把握し、最新の技術や知見を取り込むこととし、毎年度、必要に応じて、基本計画に掲げられた研究開発プロジェクトの目標や研究開発の内容を評価し、必要に応じて変更するものとする。

3) 根拠法

本研究開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第一号二に基づき実施する。

(4) その他

①他省庁の施策との連携体制の構築

NEDOは、内閣府が所管する「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」と緊密に連携するため、各プロジェクトの統括者、所管省庁等の課室長等から構成される連携体制に参画する。当該連携体制では、プロジェクト間の事業計画の調整、成果の共有や取扱いの調整、設備の共用や研究人材交流の促進等について協議を行うものとする。

6 基本計画の改定履歴

- 2014年3月 制定
- 2016年2月 中間評価結果を踏まえ、研究開発項目③④⑤の内容及び目標を改定
- 2017年3月 基本計画マニュアル改訂及び中間評価結果を踏まえ、プロジェクトリーダーの追記及び研究開発項目②、④の目標を改訂
- 2017年6月 3. 研究開発の実施期間及び4. 評価に関する事項を一部改訂
- 2018年3月 中間評価結果（2017年度）を踏まえ、事業期間の延長及び後期5年における実施内容の追加による改訂
- 2018年5月 プロジェクトマネージャー変更による改訂
- 2019年1月 研究開発項目②の達成目標の一部修正及び期間延長、研究開発項目⑤の追加
- 2020年3月 研究開発項目③の実施内容と名称の変更

(別紙) 研究開発計画

【前期4年】

研究開発項目①低コスト水素製造システムの研究開発

1. 研究開発の必要性

我が国の産業競争力を維持・強化していくためには、エネルギー安全保障を確保し、安定的かつ低廉なエネルギーを供給することが不可欠である。そのため、本研究開発項目を実施する。

2. 研究開発の具体的内容

アルカリ水電解、固体高分子型水電解等の水電解システムについて、電解電流密度の向上、電解セル大型化等により設備コストを低減するとともに、従来システムと同等の耐久性を維持しつつ、変動する再生可能エネルギーの有効活用が可能な水素製造システムの研究開発を行う。

3. 達成目標

【中間目標（2015年度末）】

- ・ 風力発電システム等からの交流出力を交直変換して水電解システムに直流電力を供給する従来システムに対し、風力発電システム等の発電機出力を水電解用の直流電力へ変換する効率を5%以上向上させる技術を確立する。
- ・ 電解電圧1.8Vにおいて電流密度0.6A/cm²以上を達成する電解セル技術を確立する。
- ・ 風力発電システム等の変動が水素製造システムに及ぼす影響を明確化する。

【最終目標（2017年度末）】

- ・ 耐久性を低下させずに、変動する風力発電システム等との協調運転を可能とする技術を確立する。
- ・ 電解電圧1.8Vにおいて電流密度0.6A/cm²以上の性能を維持しつつ、単セルの電極面積を1~3m²程度まで大型化する技術等により、大量生産時の水電解装置コスト、電力変換装置コストとして20万円/Nm³/h、6万円/Nm³/h以下が見通せる技術を確立する。

研究開発項目②高効率水素製造技術の研究

1. 研究開発の必要性

水素を利用して、出力変動緩和のための蓄エネルギーシステムの可能性評価及び開発、再生可能エネルギーの調整電源化等を行うことで再生可能エネルギーを効率的、安定的に活用可能とすることとなり、エネルギーセキュリティ、エネルギー産業の国際競争力強化の観点から極めて重要である。そのため、本研究開発項目を実施する。

2. 研究開発の具体的内容

原理的に電解効率に優れた高温水蒸気電解等の技術について、電解セル構成材料、セル構造、セル運転条件等の革新及びセル・スタック製造技術の開発、耐久性向上の研究等により変動する再生可能エネルギーへの追従性を確保するとともに、水素製造効率を飛躍的に向上させる次世代水素製造技術の研究開発を行い、水素製造電力消費の低減、電力貯蔵等への適応可能性を明らかにする。

3. 達成目標

【中間目標（2015年度末）】

- ・高温水蒸気電解システムとして、入力2kW程度の電解スタックにおいて各電解セルの平均電圧1.3V、水蒸気利用率70%程度の時、平均電解電流密度 0.5 A/cm^2 以上を達成するセル・スタック製造技術を確立する。
- ・次世代水素製造システムとして、水素製造電圧1.6Vで電流密度 0.6 A/cm^2 以上または水素製造装置の単位体積あたりの水素生成能力 $50\text{ Nm}^3/\text{h}/\text{m}^3$ を達成する技術を確立する。

【最終目標（2017年度末）】

- ・高温水蒸気電解システムとして、入力2kW程度の電解スタックにおいて各電解セルの平均電圧1.3V以下、平均電解電流密度 0.5 A/cm^2 程度の初期条件でスタックを2,000時間以上電流密度一定で運転した時の1,000時間あたりの電圧上昇率0.5%以下を達成する技術を確立する。
- ・次世代水素製造システムの新しい水素連続製造システムにおいて、温度 25°C 、電流密度 0.1 A/cm^2 の運転条件下で、電力を水素に変換する効率について、90%以上を見通せる技術を確立する。

研究開発項目③大規模水素利用技術の研究開発

1. 研究開発の必要性

大量の水素の貯蔵・輸送に当たり、エネルギー密度を向上させるため、水素を液化、貯蔵することが有効である。現状では、液化のエネルギー効率が低い、液体水素のボイルオフ率が大きい等の課題が普及の障害となっている。また、再生可能エネルギーを利用して水素を製造する場合は、水素生成量の変動するので、その変動に対応した水素液化システムが必要となる。

更に水素エネルギー市場の形成の為に、需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術が必要となる。

2. 研究開発の具体的内容

本事業では、水素生成量の変動に対応可能な大型（ $50\sim 100\text{ t/day}$ ）高効率液化システム、断熱性に優れた大型（ $50,000\text{ m}^3$ 級）液体水素タンク等からなる水素液化貯蔵システムの基盤技術を開発する。

また環境負荷が低く、かつ大量水素の利用に繋がる基盤技術を開発する（但し燃料電池は除く）。

3. 達成目標

③-1 水素液化貯蔵システム

【中間目標（2015年度末）】

- ・液化容量 1 t/day 、液化効率^{※2}20%程度のシステムを試作・開発して高効率化、大型化への課題と解決策を明確化する。また水素製造量の時間変動がシステムに及ぼす影響を把握し、技術課題を明確化する。

・ 3, 000m³程度の液体水素タンクシステムに用いる液体水素ポンプ、ボイルオフ水素用圧縮機について、それぞれ、容量200m³/h以上、ポンプ効率^{※3}50%以上の液体水素ポンプ（揚程260m程度を想定）及び容量3, 000m³/h、効率60%以上のボイルオフ水素用圧縮機（入口圧力110kPaA、入り口水素温度30K、出口圧力200kPaAを想定）を可能とする技術を開発する。

・ 3, 000m³程度の液体水素タンクシステムに使用可能な十分な耐久性を有する断熱材料（熱伝導率0.01W/m・K以下）を開発する。

※2 液化効率（逆カルノー効率）＝液化のための最小仕事／実際の投入エネルギー×100

※3 ポンプ効率＝ヘッド圧×体積流量／投入動力×100

【最終目標（2017年度末）】

・ 想定液化容量5～10t/day程度の水素液化システムに対し、25%以上の液化効率が見通せる技術を開発する。また水素製造量の時間変動に対応するための解決策を明確化する。

・ 液体水素ポンプ技術、ボイルオフ水素用圧縮機技術等と組み合わせ、ボイルオフ水素発生率がタンク容量の0.1%/dayの液体水素タンクシステム（容量3, 000m³程度）を可能とする技術を開発する。

③-2 大規模水素利用技術

【中間目標（2017年度末）】

環境負荷が低く、かつ大量水素を効率的に利用可能な基盤技術を開発する。本項目は提案公募として実施し、目標はテーマごとに決定する。

研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究

1. 研究開発の必要性

国内外の再生可能エネルギー等を効率的、安定的に活用可能とすることは、エネルギーセキュリティ、エネルギー産業の国際競争力強化の点からも極めて重要であり、本事業の一刻も早い取組が求められている。

2. 研究開発の具体的内容

有機ハイドライド、各種の炭化水素、金属など水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、既存の水素附加プロセス、水素脱離プロセスと比較してエネルギー効率、経済性の飛躍的向上が期待できる新規プロセスの有効性を確認する解析評価研究を行う。具体的には、新規プロセスに必要な材料・要素機器の小規模な試作、性能評価やそのプロセスを含むシステムの特長解析などを行い、システム全体の性能・経済性、開発課題、開発目標を把握する。

3. 達成目標

【中間目標（2015年度末）】

本項目は提案公募として実施し、目標はテーマごとに決定する。研究期間は4年以内とし、研究成果を評価した上で、必要性が認められるテーマについては、本格研究へ移行する予定。

【最終目標（2017年度末）】

④-1 高効率メタン化触媒を用いた水素・メタン変換

熱回収効率35%以上の熱回収効率の最適化手法を確立して、総合効率75.7%以上、転換率低下率5%未満（8,000時間後）の最適プロセスを開発、設計を完了する。

④-2 溶融塩を用いた水と窒素からのアンモニア電解合成

窒素還元陰極の高性能化（ $300\text{mA}/\text{cm}^2$ 以上、一室型）、アンモニア生成反応制御の高収率化（収率90%以上）及び酸素発生陽極の高性能化（消耗速度 $20\mu\text{m}/\text{年}$ 以下、電極内部抵抗 $0.05\text{m}\Omega\text{m}^2$ 以下）を達成する。

④-3 水素分離膜を用いた脱水素

セラミックス系水素分離膜の大面积化（水素透過性 $\geq 1 \times 10^{-6} \text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ 、分離係数 $\text{H}_2/\text{SF}_6 \geq 16,000$ ）を達成する。水素分離膜型脱水素プロセスの経済的優位性の確認と多用途展開先の調査、商業化を見据えた水素分離膜型脱水素のパイロットプラントの概念設計を完了する。

研究開発項目⑤トータルシステム導入シナリオ調査研究

1. 研究開発の必要性

本事業の成果（研究開発項目①～④）の速やかな実用化・普及を実現するため、水素・エネルギーキャリア技術が社会に導入されるシナリオを検討し、技術目標の妥当性の確認、更なる具体化を含む本事業の戦略策定の基礎となる情報を収集する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

①再生可能エネルギーのポテンシャル調査（ケーススタディ等による量やコスト等の把握）、②エネルギーキャリア技術のコスト分析、③許容されるコスト（競合する既存システムのコスト等から導かれる）の分析等に基づいてシナリオを策定する。併せて、シナリオが実現した際のエネルギー需給や炭酸ガス排出削減、経済成長への寄与等を検討する。

シナリオは、①本事業で開発する水素製造技術、②液体水素、メチルシクロヘキサン等のエネルギーキャリア技術及び①と②を組み合わせたトータルシステムについて最低限策定する。シナリオの設定や分析にあたっては、秘密情報の確実な管理を前提に、本事業の参加者から技術情報等を収集するとともに、本事業内外の有識者の知見を幅広く得られる適切な体制を構築する。

さらに、水素製造から貯蔵、輸送、利用に至るサプライチェーン全体を通じた経済性・環境影響等の分析・評価、エネルギーシステム全体の中での水素エネルギーの位置付けについての評価、要素・システム技術の将来予測に関する評価について、新たな評価軸の検討を含め、その方法を検討する。

シナリオ作成にあたっては、秘密保持の確実な管理を前提に、本事業の参加者との十分な連携による技術情報等の収集やフィードバックを行うとともに、本事業内外の有識者の知見を反映させることが可能な適切な体制を構築する。

3. 達成目標

【中間目標、最終目標について】

本項目は提案公募として実施し、研究期間は4年とする。前半2年で一通りのシナリオを完成させる。後半2年は、中間評価等も踏まえ、策定したシナリオの精緻化や新たなシナリオの設定、分析を行う。

【後期5年】

研究開発項目①水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発

1. 研究開発の必要性

我が国の産業競争力を維持・強化していくためには、エネルギー安全保障を確保し、安定的かつ低廉なエネルギーを供給することが不可欠である。そのため、本研究開発項目を実施する。

2. 研究開発の具体的内容

アルカリ水電解、固体高分子形水電解（PEM）、高温水蒸気電解法（SOEC）等の水電解各方式において、電極触媒の性能発現と劣化機構の高度解析、電解槽の劣化機構、劣化評価法に関する共通的解析を行い、性能向上へフィードバックする。また各方式に応じた材料やシステムの高度化に向けた指針を確立するとともに、次世代材料等の検討を行う。

また、本研究開発によって得られた設計指針の原案等の成果は、産業界（水電解メーカーや材料メーカー等）と共有することで研究開発を促進するとともに、耐久性等の評価方法については必要に応じて国際間で情報共有を図る。

3. 達成目標

【中間目標（2020年度）】

- ・変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムの解明
- ・劣化等を規定する因子を見出すとともに、材料・セルに関する設計指針の原案を策定

【最終目標（2022年度）】

- ・プラント引渡し価格30円/Nm³に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針の策定や性能等評価方法の確立

研究開発項目②大規模水素利用技術の研究開発

1. 研究開発の必要性

水素エネルギー市場の形成の為に、需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術が必要となる。

2. 研究開発の具体的内容

環境負荷が低く、かつ大量水素の利用に繋がる基盤技術を開発する（但し燃料電池は除く）。

3. 達成目標

3-1. 研究開発の必要性

環境負荷が低く、かつ大量水素エネルギーを効率的に利用可能な基盤技術を開発する。

3-2. 研究開発の具体的内容

＜水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発＞

- ・数百 MW 級の水素専焼ガスタービン燃焼器の開発（低 NOx、安定運用可能なノズル基礎設計）

＜水素ガスタービン燃焼技術の研究開発＞

- ・2 MW 級の水素専焼ガスタービン燃焼器の開発（燃焼器の改良設計・試作）
- ・高圧水素燃焼試験

3-3. 達成目標

【最終目標（2019年度）】

＜水素専焼対応型 Dry Low NOx 高温ガスタービンの研究開発＞

- ・燃焼試験により、シングルクラスターバーナ出口 NOx 50ppm 以下を達成する。
- ・燃焼試験により、フラッシュバックを発生しないことを確認する。
- ・大型ガスタービンに適用可能なクラスターバーナの基礎設計を完了する。
- ・燃焼振動を抑制し、安定燃焼できる条件の閾値を算出し、燃焼器体格を決定する。

＜水素ガスタービン燃焼技術の研究開発＞

- ・50%負荷から定格100%負荷相当条件にて、NOx 35ppm 以下の達成
- ・失火や逆火が生じない、安定燃焼の確認

研究開発項目③：従来技術を凌駕する超高効率発電共通基盤研究開発

1. 研究開発の必要性

水素社会の実現のためには、需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術が必要であり、本事業で目指す2040年以降という長期的視点を睨み、従来の開放系サイクル技術とは一線を隔す超高効率の発電技術を現時点から検討しておく必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

本事業においてこれまで取り組んできた効率追求型1,700℃級発電技術の成果や外部技術委員会での議論を踏まえ、経済性が確保され、かつ従来技術を凌駕する技術を創出する可能性があるとされる1400℃級超高効率発電を対象として、燃焼器やタービン等の業界共通の要素研究を推進する。

3. 達成目標

【研究開発項目継続可否審査（2019年度）】

- ・FSを行い、技術成立性・経済性確保の見通しを提示すること。
- ・上記を通じて、発電効率75%を達成しうるシステム構成を提示すること。
- ・上記を通じて、競合技術の特定及びそれらに対する優位性を提示すること。

【最終目標（2022年度）】

事業終了時に、酸素水素燃焼器（実機レベル）に移行可能な要素技術を確立する。

研究開発項目④エネルギーキャリアシステム調査・研究

1. 研究開発の必要性

国内外の再生可能エネルギー等を効率的、安定的に活用可能とすることは、エネルギーセキュリティ、エネルギー産業の国際競争力強化の点からも極めて重要であり、本事業の一刻も早い取り組みが求められている。

2. 研究開発の具体的内容

有機ハイドライド等、水素を効率的に貯蔵・輸送等できるエネルギーキャリアについて、既存の水素附加プロセス、水素脱離プロセスと比較してエネルギー効率、経済性の飛躍的向上が期待できる新規プロセスの有効性を確認する解析評価研究を行う。具体的には、新規プロセスに必要な材料・要素機器の小規模な試作、性能評価やそのプロセスを含むシステムの特性解析などを行い、システム全体の性能・経済性、開発課題、開発目標を把握する。

3. 達成目標

【最終目標（2019年6月）】

前年度までに開発した大面積化及び水素分離性能向上を行ってきた水素分離膜を用いて、低コストシール法と効率的熱伝導方式を組み合わせた実用的なモジュール構造を開発する。また、1500時間の耐久試験により劣化率を検証し、少なくとも1万5千時間程度（脱水素触媒と同等以上）の実用的な耐久性があることを見通す。水素分離膜型脱水素プロセスの経済的優位性の確認、商業化を見据えた水素分離膜型脱水素のパイロットプラントの概念設計を完了する。

研究開発項目⑤炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査

1. 研究開発の必要性

様々な資源から製造できるという水素の利点を生かすため、二酸化炭素を排出しない水素製造のコア技術の可能性を検討することが必要である。

2. 研究開発の具体的内容

メタン等の炭化水素やバイオマス資源等をはじめとした水素源から安価かつ大量の水素を製造する、二酸化炭素を排出しないコア技術（注）の可能性を調査する（基礎的な実験等を含む）。この際、エネルギー収支や効率、技術成立性、経済性等も検討する。

なお2020年度初頭には、技術成立性と経済性に関する外部有識者からの評価を行い、本研究開発項目の継続可否を判断する。

（注）技術的新規性の低いもの、二酸化炭素を排出しないという意味においてCCS（Carbon dioxide Capture and Storage）を必要とするもの及び水電解水素製造技術等NEDOで既に実施しているものを除く。

3. 達成目標

【中間目標（2020年度）】

基礎研究の可能性調査を行い、技術成立性を理論的・科学的に提示する。また、当該技術を活用して水素を消費者まで安価かつ大量導入する実用化シナリオ原案を構築して経済性を提示する。

科学的根拠をもって実用面を踏まえた上で、長期目標としての20円/Nm³を念頭に置いて、本事業のアウトカム目標である2030年における水素コスト30円/Nm³を目標に、当該技術がどのように貢献するか定量的に示す。当該実用化シナリオ原案を作成するにあたっては、国等が示す関連ロードマップに示す市場規模を用いることとする。

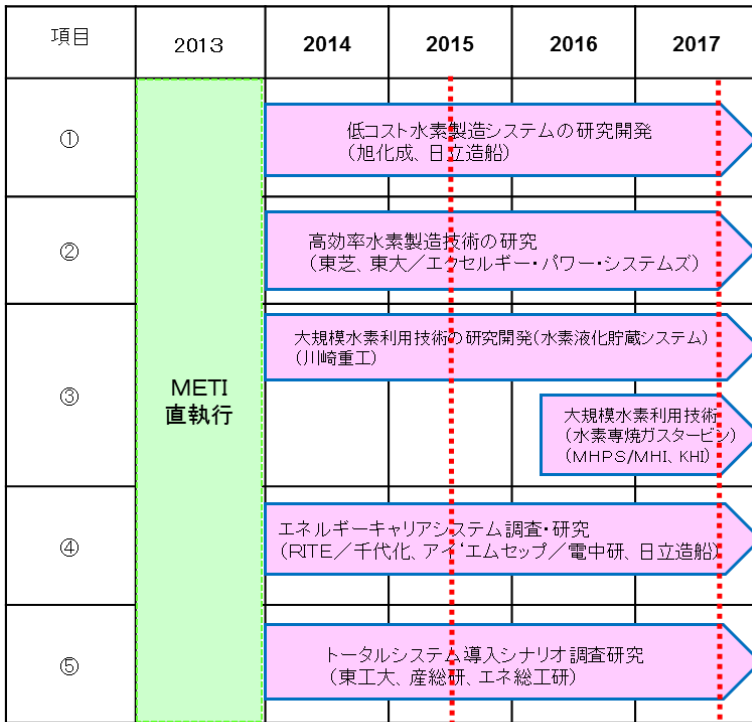
【最終目標（2022年度）】

上記の審査結果を踏まえ、継続することとなった場合には別途定める。

(別紙2)

研究開発スケジュール

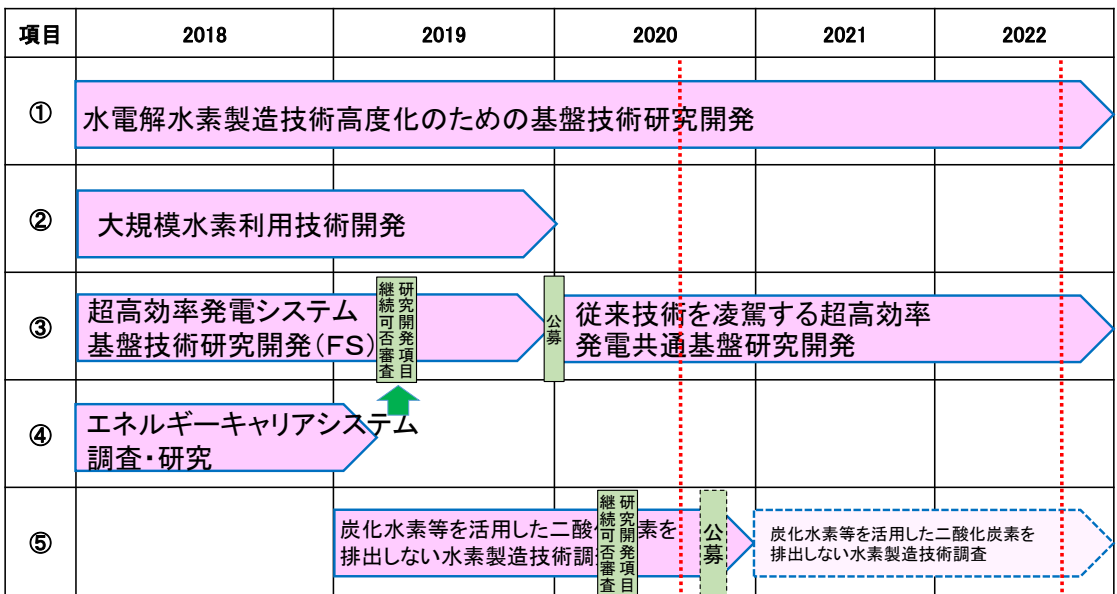
前期5年(2013-2017)



中間評価▲

中間評価▲

後期5年(2018-2022)



研究開発項目
継続可否審査
▲
中間評価

▲
事後評価(P)

(添付-3)

事前評価関連資料

(事前評価書)

再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発
事前評価報告書

平成24年6月
産業構造審議会産業技術分科会
評価小委員会

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」(平成20年10月31日、内閣総理大臣決定)等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」(平成21年3月31日改正)を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

今回の評価は、再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発の事前評価であり、評価に際しては、当該研究開発事業の新たな創設に当たっての妥当性について、省外の有識者から意見を収集した。

今般、当該研究開発事業に係る検討結果が事前評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会(小委員長:平澤 冷 東京大学名誉教授)に付議され、内容を審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成24年6月
産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会
委員名簿

委員長 平澤 冷 東京大学 名誉教授

池村 淑道

長浜バイオ大学

バイオサイエンス研究科研究科長・学部学部長

コンピュータバイオサイエンス学科 教授

大島 まり

東京大学大学院情報学環 教授

東京大学生産技術研究所 教授

太田 健一郎

横浜国立大学 特任教授

菊池 純一

青山学院大学法学部長・大学院法学研究科長

小林 直人

早稲田大学研究戦略センター 教授

鈴木 潤

政策研究大学院大学 教授

中小路 久美代

株式会社SRA先端技術研究所 所長

森 俊介

東京理科大学理工学部経営工学科 教授

吉本 陽子

三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

経済・社会政策部 主席研究員

(委員敬称略、五十音順)

事務局:経済産業省産業技術環境局技術評価室

再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発の事前評価に当たり意見をいただいた外部有識者

牛山 泉 足利工業大学 学長

松橋 隆治 東京大学大学院工学系研究科 教授

山地 憲治 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 理事・研究所長

(敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省産業技術環境局研究開発課

再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発の評価に係る省内関係者

【事前評価時】

産業技術環境局 研究開発課長 福島 洋（事業担当課長）

産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 岡本 繁樹

再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発事前評価
審議経過

- 新規研究開発事業の創設の妥当性に対する意見の収集(平成24年5月)

- 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会(平成24年6月8日)
・事前評価報告書(案)について 6

目次

はじめに

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会 委員名簿

再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発の評価に当たり意見をいただいた外部有識者

再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発の評価に係る省内関係者

再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発事前評価 審議経過

ページ

第1章 技術に関する施策及び新規研究開発事業の概要

1. 技術に関する施策の概要 1

2. 新規研究開発事業の概要及び創設における妥当性について 1

3. 新規研究開発事業を位置付けた技術施策体系図等 4

第2章 評価コメント 6

第3章 評価小委員会のコメント及びコメントに対する対処方針 10

参考資料 再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発の概要(PR資料)

第1章 技術に関する施策及び新規研究開発事業の概要

1. 技術に関する施策の概要

経済産業省では、東日本大震災を契機とした福島第一原子力発電所における事故に対し、現行のエネルギー基本計画をゼロベースで見直し、新たなエネルギーミックスとその実現のための方策を含む新しい計画について議論しているところ。

我が国の産業競争力を維持・強化していくためには、エネルギー安全保障を確保し、安定的かつ低廉なエネルギーを供給することが不可欠である。また、厳しさを増す国際エネルギー情勢や地球温暖化問題などを踏まえ、技術先進国である我が国が、主要国や国際機関等と連携し、いかにして国際的な責任を果たしていくかが重要である。同時に、我が国の成長戦略にも資するという観点から、安定供給確保や技術開発の強化を含めた強靱なエネルギー政策が必要である。

本事業では、将来にわたって国民が安心できる持続可能性のあるエネルギー社会を実現するとともに、世界に貢献する技術を実現する。

2. 新規研究開発事業の概要及び創設における妥当性について

①事業の必要性及びアウトカムについて（研究開発の定量的目標、社会的課題への解決や国際競争力強化への対応等）

1) 事業の必要性（どのような社会的課題等があるのか？）

福島第一原子力発電所における事故に対し「国民の安全の確保」を最優先とした上で、望ましいエネルギーミックスが可能となるようなエネルギー供給体制を構築することが求められている。

エネルギーミックスの実現には、社会インフラの変革をも視野に入れ、省エネルギー・節電対策を抜本的に強化すること、再生可能エネルギーの開発・利用を最大限加速化させること、天然ガスシフトを始め、環境負荷に最大限配慮しながら、化石燃料を有効活用すること（化石燃料のクリーン利用）等が重要である。

このうち再生可能エネルギーについては、出力変動のある太陽光発電、風力発電等を極力有効利用するため電力貯蔵用、電気自動車用の二次電池の開発が進められているが、電池のエネルギー容量が必ずしも十分でないため、変動周期が長い風力発電に対する貯蔵能力向上、電気自動車では航続距離の向上が課題となっている。また、海外では再生可能エネルギーあるいは炭酸ガス貯留技術と組み合わせた未利用化石燃料等の大規模開発が急速に進められているが、エネルギー適地がエネルギー消費地から長距離隔てられている場合には効率的な輸送が難しいことが開発の障害となっている。

本事業において提案する“CO2フリーエネルギーネットワーク技術開発”は、このような問題に対し、①再生可能エネルギー等からの高効率低コスト水素製造技術と②高効率水素-エネルギーキャリア転換・輸送技術等の技術開発により国内外の再生可能エネルギー等の大規模利用、再生可能エネルギー適地等の経済発展を支援するとともに、世界規模での炭酸ガス排出削減を図るものであり、我が国のエネルギーセキュリティの確保、並びに世界的な地球温暖化対策への貢献のために、本事業に国として投資を行うことは極めて重要である。

ロ)アウトカム（目指している社会の姿）の具体的内容とその時期

本提案事業では、再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発、水素の長距離輸送が容易となるエネルギーキャリアへの高効率転換・輸送技術開発に10年間の期間で取り組む。水素については、国内販売価格20～40円/Nm³を目標とし、化石燃料等の他のエネルギー源と競合できる価格の実現を目指す。

また海外の再生可能エネルギー分布状況調査を行い、再生可能エネルギーサイト候補地ポテンシャルを把握するとともに、得られたデータ、機器開発状況を踏まえ、段階的・効率的なCO₂フリーエネルギーネットワークシステム開発のシナリオを作成する。

ハ)アウトカムが実現した場合の経済や競争力、問題解決に与える効果の程度

2011年の世界の風力発電導入量は40GW/年で、今後さらに増大する見込みである。仮にこの5%程度を水素に変換するとした場合、2GW/年程度の水素発生機が必要であり、その市場は2千億円/年（発生機価格として10万円/kWを想定）となる。また、海外の再生可能エネルギー適地としては、アルゼンチン・パタゴニア地方、オーストラリア、サハラ砂漠等が考えられているが、例えばパタゴニアの風力発電については出力23億kW、エネルギー量9.7兆kWh/年（日本の総発電電力量の約10倍）程度と膨大なエネルギーを供給できる可能性がある。これらの1%を水素等に変換し自動車に利用可能とすると、日本の自家用車エネルギー消費量（2010年）の18%程度をまかなうことが可能となる。

このように本提案事業により、炭酸ガスの排出無しに膨大なエネルギー供給が可能なCO₂フリーエネルギーネットワークとそれを構築するためのエネルギー機器市場の形成が可能となる。

ニ)アウトカムに至るまでに達成すべきいくつかの中間段階の目標（技術的成果等）の具体的内容とその時期

再生可能エネルギー等からの低コスト水素製造技術開発では、すでに一部実用化されているアルカリ水電解、固体高分子水電解等に対し、再生可能エネルギーの変動に対する応答性向上ならびに低コスト化等の研究開発を実施する。また、より高効率期待できる水蒸気電解法等の次世代水素製造技術については、事業終了時までにコンセプト実証機を試作する。長距離輸送のための高効率エネルギーキャリア転換・輸送技術開発については、エネルギーキャリア候補材料が複数想定されることから、各エネルギーキャリア候補材料について転換技術、輸送技術等の小規模な技術調査研究を4～5年程度実施して技術のポテンシャル、技術課題を確認後、有望な技術について課題克服のための技術開発を実施する。以上により、事業終了時の2022年には、2～7円/kWh程度の再生可能エネルギー等を用いた場合について、既存の化石燃料と競合可能な20～40円/Nm³の水素価格の実現にめどをつける。

さらに海外再生可能エネルギー分布状況調査では、海外の再生可能エネルギーサイト候補地に小規模な計測システムを設置し、2018年程度までにポテンシャルを把握するとともに、得られたデータ、機器開発状況を踏まえ、CO₂フリーエネルギーネットワークシステムを構成する水素製造、キャリア転換・輸送等の要素技術を段階的、効率的に開発・実用化するシナリオを作成する。

② アウトカムに至るまでの戦略について

イ) アウトカムに至るまでの戦略（研究開発のみならず、知財管理の取扱、実証や国際標準化、性能や安全性基準の策定、規制緩和等を含む実用化に向けた取組）

研究開発については当省が売独で実施するのではなく、エネルギーキャリア転換技術の基礎研究、先進的な水素製造方法（熱化学法など）については、文部科学省と連携し実施することを想定している。

またCO2フリーエネルギーネットワークの実現には、国内水素需要と社会インフラの導入・整備等が不可欠であるが、これまで当省では水素利用技術開発や家庭用燃料電池の規制緩和、水素ステーション等技術開発・整備（2015年までに100ヶ所）等が進められており、本提案事業による技術が確立されれば、整備されたステーション等を利用して再生可能エネルギーを用いた水素エネルギーの社会導入が実現できる。

さらに海外再生可能エネルギー分布状況調査では、ポテンシャル調査とともに再生可能エネルギー開発支援等により、諸外国との協力体制構築も実施する予定である。

ロ) 成果のユーザーの段階的イメージ・仮説（技術開発成果の直接的受け手や社会的インパクトの実現までのカギとなるプレイヤーは誰か）

水素製造技術、水素から輸送用エネルギーキャリアへの転換・輸送技術等の研究開発に対しては、研究開発のみならずビジネス化についても十分な知見を有している企業を中心に独法研究機関、大学が連携する体制を予定している。

また、海外再生可能エネルギー分布状況調査、トータルシステムシナリオ調査に関してはこれまでこの分野に実績のある大学等の成果をベースに風力発電等の再生可能エネルギー開発企業、海外エネルギー情勢に詳しい商社、エネルギー関連企業等から構成される研究体制を構築することを想定しており、上記技術開発とあわせて最終的にビジネス化で勝てる体制を目指す。なお、研究の推進に当たっては風力発電等の再生可能エネルギー開発企業、商社、エネルギー関連企業、有識者等からの意見を十分反映出来る体制を予定している。

③ 次年度に予算要求する緊急性について

これまで当省ではCO2排出の大幅低減を目指し、家庭用燃料電池の規制緩和、水素ステーション等技術開発・整備（2015年までに100ヶ所）等が推進されている状況であるが水素の製造については当面は化石燃料からの製造を想定している。

現在見直されているエネルギー基本計画では、化石燃料のいっそうの有効利用、省エネルギーの推進、再生可能エネルギーの開発・利用等を進める議論が展開されている。本事業はこのような状況を踏まえて、国内の再生可能エネルギーのみならず、海外の再生可能エネルギーをも将来的には利用可能とする技術開発を実施するとともに、このような技術を有するエネルギー産業の競争力強化をはかるものである。

国の内外の再生可能エネルギー等を効率的、安定的に活用可能とすることはエネルギーセキュリティ、エネルギー産業の国際競争力強化の点からも極めて重要であり、本事業の一刻も早い取組が求められている。

④国が実施する必要性について

イ) 科学技術的価値の観点からみた卓越性、先導性（我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野か、また、他の研究分野等への高い波及効果を含む）

我が国は、これまでに水素利用技術開発を行い、世界に先駆けて家庭用燃料電池の市場投入を果たすなど、水素・燃料電池分野の国際競争力を有する。

また、本事業は国内外のCO2フリーエネルギーネットワークの実現を目指した事業であり、新成長戦略におけるグリーンイノベーション関連施策にあたるとともに、我が国のエネルギー政策の重要な部分を担うこととなる。また個別産業に留まる技術開発ではないため、民間企業が取り組むことは、非常にハードルが高く、投資リスクが大きい。国が強いリーダーシップを持って、国家プロジェクトとして実施する必要がある。

さらに、本事業の実現を通じて、国内のみならず海外においても地球環境問題に貢献できると考えられる。

ロ) 未来開拓研究、民間とのデマケの整理等

本研究開発は未来開拓研究として位置づけられている。また、民間企業においては水素関連の種々の要素技術開発は実施されている。しかしながら、本事業がターゲットとするCO2フリーエネルギーネットワークの実現は、民間企業にはリスクや必要資金が大きすぎるため、民間企業のみでの実施は困難である。

⑤省内又は他省庁の事業との重複について

本事業は未来開拓研究のスキームに基づいて、文部科学省と連携して実施する予定である。

省内については、関連事業としてこれまでに、家庭用燃料電池の技術開発を推進し、世界に先駆けて市場へ製品を投入した実績や、燃料電池自動車導入を目指し、水素ステーション等技術開発・整備（2015年までに100ヶ所）を実施しているが、水素製造については化石燃料からの水素を用いる事としており、再生可能エネルギーからの低コスト水素製造技術の開発を目指す本事業とは重複していない。

また、オーストラリアで埋蔵量が豊富な褐炭について、石炭ガス化技術と炭酸ガス貯留技術を用いて水素を生成し、日本に輸入するためのFSをNEDOが実施しているので、本事業ではそれらで得られた知見も取り入れることを予定している。

3. 新規研究開発事業を位置付けた技術施策体系図等

本事業の内容は以下に示すように「運輸部門の燃料多様化」「新エネルギーの開発・導入促進」に寄与する技術として技術戦略マップに位置づけられている。この分野は上で述べたように、これまで燃料電池自動車等の早期導入普及を目指し、水素ステーション等の水素利用技術を中心に技術開発を推進してきており、近々これらの整備が開始される予定である。

本事業では、このような状況を踏まえ技術戦略マップの長期的な展望に沿って新たに水素製造、転換・輸送技術の開発を実施し、従来からの利用技術開発と連携して再生可能エネルギーの大規模導入・有効利用を目指す。

第2章 評価コメント

新規研究開発事業の創設の妥当性に対するコメント ①政策的位置付けの妥当性について
現在は電力の議論が多いが、本来は電力でまかなえない燃料系についてもエネルギー問題、地球温暖化問題に対する対策が必要である。本技術開発はこれらへの対策として考えることができる。また、本技術は再生可能エネルギーシステムとあわせて整備されるものであるため、本技術を海外展開する場合は「技術（再生可能エネルギーシステム）」と「資源（得られるエネルギー）」をバーター交換する政策をとることができるようになる。燃料電池自動車、水素ステーションの開発にめどがついてきた現在、低炭素化をもう一度考えるべき時期に来ている。

なお、まずは第一ステップとして、化石燃料からの水素供給インフラを確立することが大前提。その上で第二ステップとして、海外の風力等再生可能エネルギーからの水素製造・輸送というシナリオであれば、水素社会の実現に向けて再生可能エネルギーがシームレスに繋がる。この部分のシナリオを打ち出し、国の長期的なエネルギー政策の中できちんと位置づけて国主導で実施すべきである。

再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発

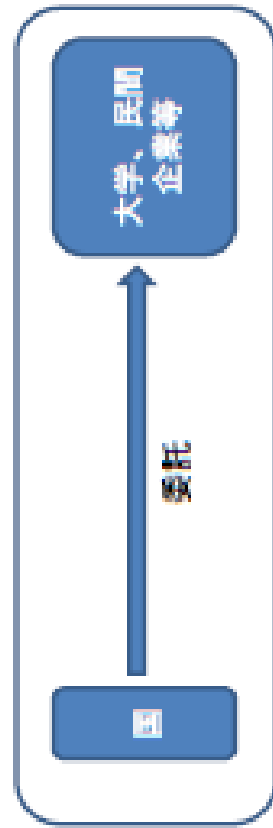
産学技術連携局研究開発課
03-3501-9221

事業の内容

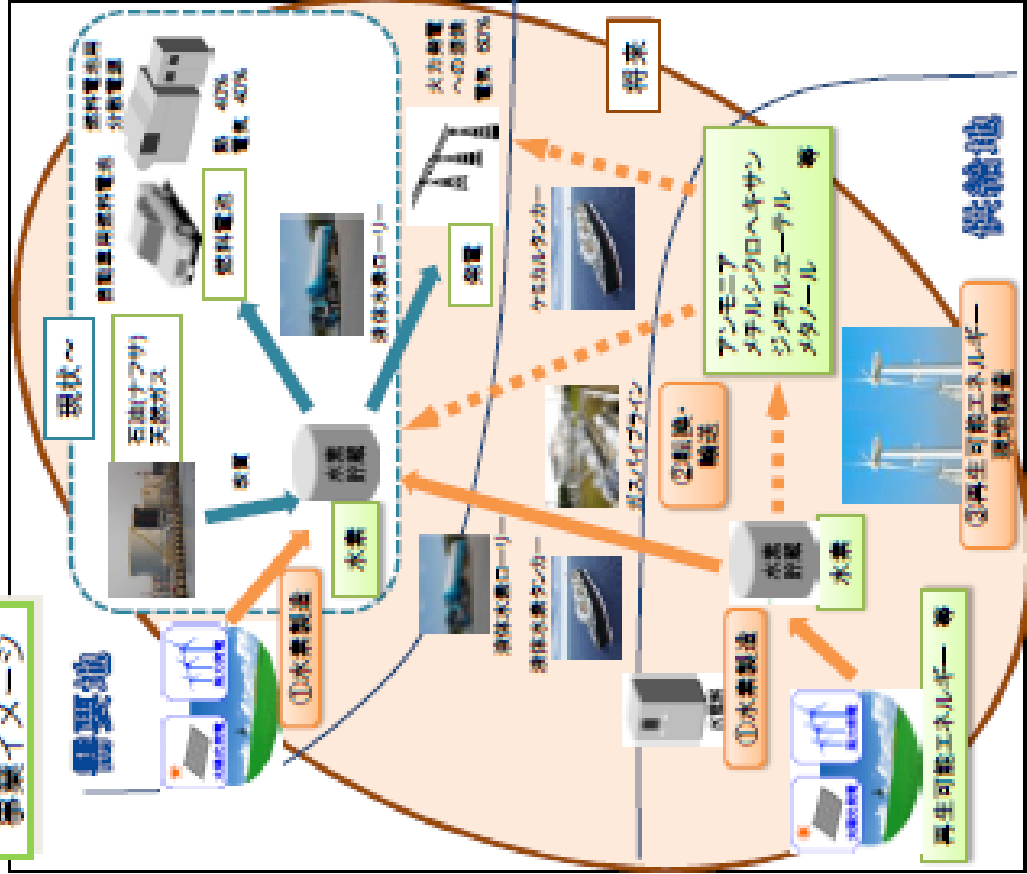
事業の概要・目的

- 本事業では、再生可能エネルギー等からの高効率低コスト水素製造技術、高効率な水素-エネルギーキャリア転換・輸送技術等の技術開発を行います。さらに、国内外の再生可能エネルギーサイト候補において、風況等の現地調査を実施し、得られたデータ等を技術開発に反映するとともに段階的・効率的な再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発のシナリオを作成します。
- これにより、国内外の再生可能エネルギー等の大規模利用を可能とし、我が国のみならず世界規模での炭酸ガス排出削減を図るとともに、我が国のエネルギーセキュリティの確保、再生可能エネルギー一過地等の経済発展を実現します。

条件（対象者、対象行為、補助率等）



事業イメージ



(添付-4)

研究開発項目の成果詳細

課題番号： ①—1

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／アルカリ水電解水素製造システムの耐久検証に係る運用方法確立のための研究開発」

委託先：旭化成株式会社（2019年度終了）

1. 研究開発概要

クリーン、安価、無尽蔵な特徴を持つ再生可能エネルギーは、地球温暖化防止の観点からも全世界的に導入量が急増している。ただ、風力や太陽光など、多くの再エネ電源は天候や季節に左右されやすい特徴を持ち、安定した電力供給が難しい欠点を持つ。これに対し、再エネを水素に転換することで、貯蔵・輸送が可能な二次エネルギーとすることができ、変動性が高いという再エネの欠点を埋めることが可能である。水素エネルギー転換の中核を担うのが水電解装置であり、この高効率化、低コスト化、耐久性向上が、持続的な水素社会実現のカギを握っている。

本研究開発事業では、前身事業「水素利用等先導研究開発事業／低コスト水素製造システムの研究開発／アルカリ水電解水素製造システムの研究開発」で得られた成果を基に、大型アルカリ水電解装置の長期運用における劣化挙動を評価することを目的とする。

2. 研究開発目標（設定の理由も含め）

上記目的の達成のため、「アルカリ水電解装置の劣化挙動の検証」を研究テーマに設定し、目標は次の2つとした。

- 1) 商用仕様の大型電解装置を用いた、変動電源を中心とした運転の実施
- 2) 長期運転でのプロセスの総合評価

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

(1) 大型アルカリ水電解装置の移設

前身事業「水素利用等先導研究開発事業／低コスト水素製造システムの研究開発／アルカリ水電解水素製造システムの研究開発」にて、神奈川県子安で長期運転試験に供した大型アルカリ水電解装置について、2017年度下期に解体し、電解槽をリニューアルした上で、福島県相馬市内の「そうま IHI グリーンエネルギーセンター」に移設した（図1）。2018年3月から、旭化成とIHIの共同研究体制のもと、装置運用を再開している。本装置はIHIのエネルギーマネジメントシステムから運用指令を受け、PV変動出力と連携した再エネ水素製造に供されている。



図1 大型電解装置移設後の建屋外観（左）、電解槽および周辺機器（右）

(2) 運用実績

相馬移設後の運用実績を表1にまとめる。運用開始から約2年間で2655時間稼働し、シャットダウン回数は102回、平均水素製造原単位は4.73kWh/Nm³となった。

表6 大型アルカリ水電解装置の運用実績

データ取得期間	2018年3月22日～2020年3月25日
累計稼働時間	2655時間
シャットダウン回数	102回
累計水素製造量	22,605 Nm ³
累計消費電力量	106,898 kWh
平均水素製造原単位	4.73 kWh/Nm ³

図2に、水電解装置の変動運転例を示す。PV発電量の変動に対し、アルカリ水電解装置が速やかに応答している様子が確認できる。

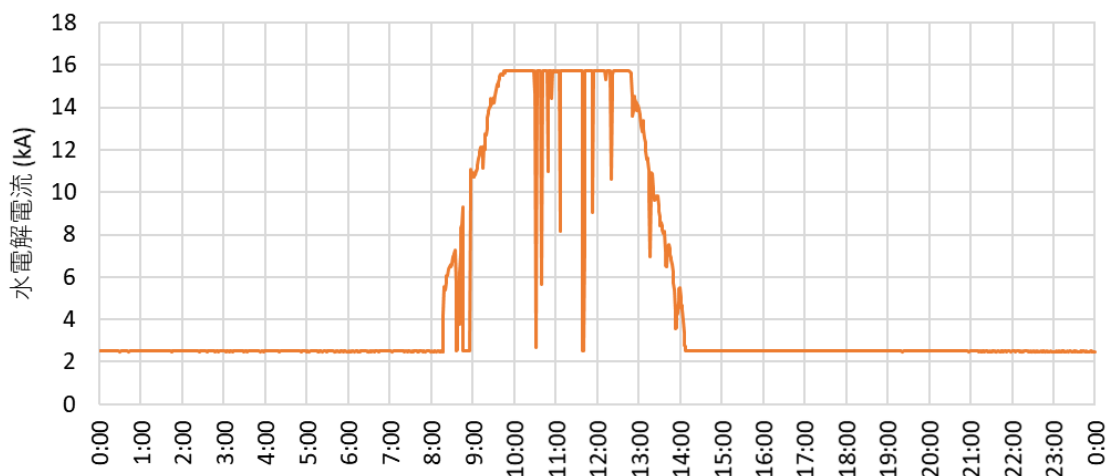


図2 水電解装置出力変動運転の例

(3) 長期運転での劣化評価

稼働開始から 2019 年度末までの、稼働日ごとの水素製造原単位を図 3 にまとめる。約 2 年間の運転期間を通じ、水素製造原単位に顕著な劣化は認められなかった。

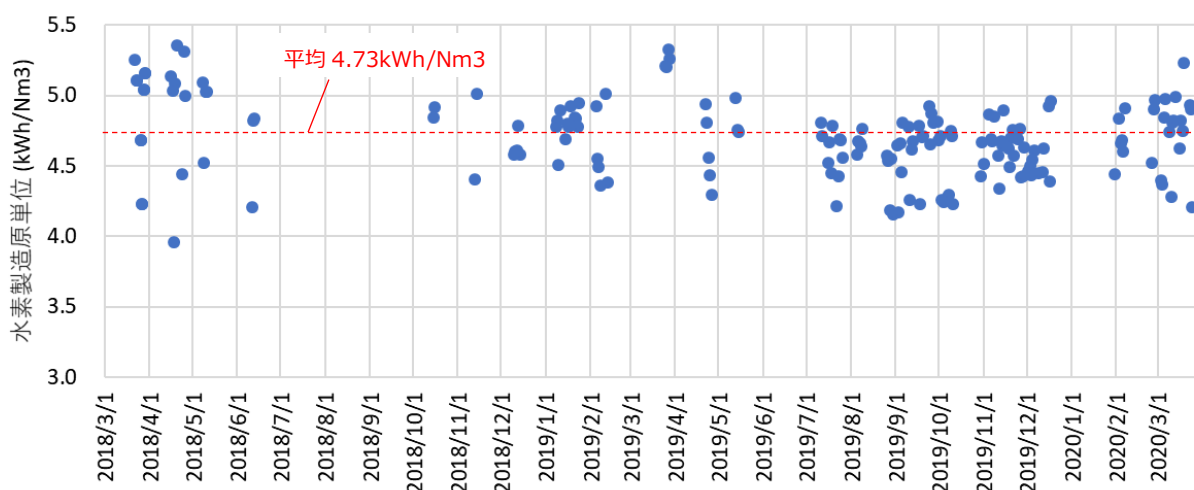


図 3 日平均水素製造原単位の経時変化

なお、本装置は 2020 年 3 月の事業終了後、旭化成が買い取り、引き続きそうま IHI グリーンエネルギーセンターで水素製造に供している。

3.2 成果の意義

本事業での検証結果は、NEDO「水素社会構築技術開発事業／水素エネルギーシステム技術開発／再エネ利用水素システムの事業モデル構築と大規模実証に係る技術開発」において、東芝エネルギーシステムズ（株）より弊社子会社である旭化成エンジニアリング（株）が受注した世界最大級の 10MW 級大型水電解装置の電解槽の設計に、本事業で得られた知見をフィードバックしている。同装置は、福島県浪江町に設置され、2019 年 11 月には水素製造運転を開始し、2020 年 3 月の開所式を迎えることができた。

3.3 残された課題

当初設定した課題は概ね解決できたが、一般的な設計寿命である 10 年間を見据えた長期運転実績の確立が今後の課題となる。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

2025 年の大型水電解装置の上市を目指し、相馬市および浪江町の大型水電解装置の継続運用を通じて、性能・品質・コストの改善を図っていく。

5. 特許・研究発表等

－特許等－

特になし。

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	発表者
1	2018年 4月11日	技術情報センター「再生可能エネルギーを用いた水素などの製造・利用に関する技術開発動向と経済性展望」	旭化成 臼井 健敏
2	2018年 8月9日	触媒学会 60周年記念講演	旭化成 永原 肇
3	2018年 8月28日	技術情報センター「CO2 有効利用技術と事業動向・展望」	旭化成 臼井 健敏
4	2018年 9月12日	電気学会／電力・エネルギー部門（B部門）大会	旭化成 加戸 良英
5	2018年 9月20日	化学工学会第50回秋季大会	旭化成 臼井 健敏
6	2018年 9月26日	2018年度 NEDO 成果報告会	旭化成
7	2018年 10月24日	日独エネルギー・デイ 2018	旭化成 臼井 健敏
8	2018年 11月5日	水素エネルギー協会（HESS）定期研究会	旭化成 臼井 健敏
9	2018年 11月8日	第33回燃料電池セミナー	旭化成 藤本 則和
10	2018年 11月21日	中国経産局「水素・次世代エネルギー研究会セミナー」	旭化成 臼井 健敏
11	2018年 12月21日	技術情報センター「P2G を中心とした水素エネ関連事業と技術開発動向」	旭化成 臼井 健敏
12	2019年 2月19日	技術情報センター「CO2 有効利用技術と事業動向・展望」	旭化成 臼井 健敏
13	2019年 2月27日	FCEXPO 2019 専門技術セミナー	旭化成 臼井 健敏
14	2019年 4月24日	電気化学会燃料電池研究会	旭化成 臼井 健敏
15	2019年 6月4日	World Hydrogen Technology Convention 2019	旭化成 鈴木 悠介
16	2019年 6月26日	神戸市水素クラスター勉強会	旭化成 臼井 健敏

17	2019年 7月18日	2019年度 NEDO 成果報告会	旭化成
18	2019年 9月25日	水素閣僚会議 Sector integration WS	旭化成 高山 茂樹
19	2019年 10月8日	東工大 GHEC 第13回ワークショップ	旭化成 臼井 健敏
20	2019年 11月20日	化学工学会 INCHEM TOKYO 2019	旭化成 臼井 健敏
21	2019年 12月12日	大阪工研協会 特別セミナー	旭化成 臼井 健敏
22	2020年 2月14日	技術情報セミナー CO2 有効利用セミナー	旭化成 臼井 健敏
23	2020年 7月	日本エネルギー学会「えねるみくす」 「グリーン水素製造技術」	旭化成 臼井 健敏

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：①-1を参照

課題番号：①－２

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／高温水蒸気電解技術の研究開発」

委託先：東芝エネルギーシステムズ株式会社、

再委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人ファインセラミックセンター

1. 研究開発概要

株式会社東芝および東芝エネルギーシステムズ株式会社では、高温水蒸気電解の技術開発に早くから取り組み、2013年度からは、経済産業省「未来開拓研究プロジェクト／再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」、2014から2017年度は、NEDO「水素利用等先導研究開発事業／高効率水素製造技術の研究」に参画し、高温水蒸気電解システムの研究を進め、実用を見通すことのできる段階にきている。

残された重要課題の一つとして、固体酸化物電解セル・スタックの一層の耐久性向上が挙げられる。セル・スタックの耐久性は、システム運転中のスタック交換寿命に関係し、その改良が実用化に向けて不可欠である。劣化率の改良には、セル材料、スタック部材、セル・スタック構造、運転条件、被毒などが劣化に及ぼす影響／機構を包括的に検討する必要がある。セルの劣化は、電極・電解質等の構成部材の組成、構造変化が主であり、スタックの劣化はこれに加え、スタックを構成する部材の劣化およびそれら構成部材がセルに与える影響も含まれる。さらに、セル・スタックの劣化特性は、形状や温度、運転条件により大きく影響を受けるため、その評価手法を確立する必要がある。一方で、SOECは、SOFCと類似する技術的観点があり、SOFCセル・スタックの劣化の機構解明／改良に関してのこれまでの技術蓄積を活用することが有効である。

そこで本事業では、SOECセル・スタックの劣化機構を解明し、SOECセル・スタックの設計指針を策定することを目標とする。また、SOEC評価技術／標準化調査を実施する。

2. 研究開発目標（設定の理由も含め）

高温水蒸気電解技術の実用化に向けて基盤技術に立ち戻り、(1)SOECセル・スタックの劣化機構解明、(2)SOECセル・スタック部材の設計指針策定、(3)新規SOEC電極の設計指針策定、(4)SOECスタック運転条件検討、(5)SOEC評価技術／標準化調査を実施する。

初年度から(1)に注力し、得られた成果を逐次(2)、(3)における耐久性向上施策の検討に反映する方針とした。セル・スタック、および高温構造材の劣化機構を解明することで、経済合理的な高耐久化施策、すなわち交換寿命を延伸するセル・スタックの材料／構造、廉価構造材の適用限界および表面処理の効果、等に知見が得られ、実用化にクリティカルな低コスト化につながると考えるからである。

また、システムの実運用条件（入力電力の変動・間隔、水素製造量要求、熱利用、等）と経済性の関係の明確化も実用化・事業化時に競合優位を確保するためのキーとなる可能性があることを認識しており、(4)でそのベースの知見となるスタックの耐久性に及ぼす運転条件の影響を検討することとした。

さらに、現状、ISO/TC197(水素技術)、IEC/TC105(燃料電池)、IEA/Annex30(水電解)、などで、SOEC 性能評価に関する関連規格が検討されており、今後、性能、安全の観点で規格策定が進んでいくと考えられる。また、キーとなる評価技術は、競合の中で差異化を図るポイントとなりえる。そこで(5)において、継続的な標準化動向注視と働きかけ、およびキー評価技術開発を行うこととした。

各項目の具体的な目標（2020 年度末・中間）は、以下である。

(1)SOEC セル・スタックの劣化機構解明：セル各層（酸素極／中間層／電解質／水素極）について、各層間の元素拡散などによる劣化現象を把握し、改良試験と組合せて劣化機構を明らかにする。また、スタック部材（シール材、セパレータ材、集電材、Cr 飛散防止被膜）について、相互接触反応を含め長時間運転における劣化機構を明らかにする。さらに、セルの強度低下要因、および SOEC 特有の複合ガス環境下で起こる高温モジュール構造材の劣化現象を把握・解明する。

(2)SOEC セル・スタック部材の設計指針策定：(1)で解明した劣化機構を基に、耐久性向上施策を創出する。SOEC セル・スタック部材の設計指針の素案を作成する。

(3)新規 SOEC 電極の設計指針策定：層間の安定性、電極活性、熱物性、等の特性から、候補となる新規電極の材料／構造を抽出する。

(4)SOEC 運転条件検討：一定入力および変動入力条件での劣化影響因子を明らかにし、SOEC スタックについて劣化抑制可能な運転方法の素案をまとめる。

(5)SOEC 評価技術／標準化調査：SOEC 性能評価試験で重要な小流量水蒸気の長期安定供給技術を開発する。欧米の国家プロジェクト等における評価技術研究、SOC 性能評価試験法の規格について、動向を調査する。

3. 研究開発成果

SOEC セルおよびスタック部材について、劣化現象を把握し、劣化機構を解明した。解明した劣化機構を基に、長期耐久性を有する SOEC セル構造、およびスタック部材の設計指針素案を策定した。さらに一層の耐久性向上を狙う SOEC 新規酸素極材料の設計指針素案を策定した。また、一定入力および変動入力運転でのスタック劣化現象の把握から、長寿命化可能な SOEC スタック運転方法の素案を策定した。並行して、SOEC 性能評価のキー技術を開発、技術動向調査と先行関連規格の改良検討を行った。

3. 1 研究開発項目別成果及び達成度

(1) SOEC セル・スタックの劣化機構解明

2018年度より、SOEC セル・スタック部材の劣化影響因子を整理し、劣化要因の解明を行った。

セルの劣化機構解明については、Ni-GDC 水素極支持層/Ni-GDC 水素極活性層/YSZ 電解質/GDC 中間層/LSCF 酸素極層の5層構造セルを作製し、各層の劣化要因に注目した。水素極については、Ni 触媒の凝集と、水素極活性層/電解質界面での剥離進行が劣化要因であることが判明した。Ni 触媒の凝集は水素極中の活性層部のみで起こっており、電極反応によって凝集が加速され、触媒比表面積が減少することで水素極特性が低下することが分かった。また、界面の剥離進行については、Ni-GDC

中の Ce と YSZ 中の Zr の相互拡散に起因して界面の空隙が発生し、水素極/電解質界面の接続は、Ni が主となり、界面でのイオン伝導パスが減少することで水素極特性を低下させることが明確になった (図 1)。酸素極については、これまでの検討で明らかにしてきた界面での SrZrO₃ の形成に起因する Co の偏析により酸素極特性が低下することの他、LSCF 酸素極/GDC 中間層界面近傍の酸素極表面に SrSO₄ を主とする硫黄成分の凝集と、LSCF 自身の焼結進行が確認された。SrSO₄ を主とする硫黄成分の分布を FIB-SEM にて分析すると、電極反応が優先的に起こる GDC 中間層界面から数百 nm の三相界面領域に集中していることから、酸素極反応により硫黄成分の凝集が促進されることが明らかになった。また、LSCF の焼結進行はメッシュ状に形成した集電体直下部で起こっていることから、電解時の電流集中によって引き起こされることが判明した。電解質については、SOEC 運転条件での作動時に電解質の結晶構造変化が起こることを明確化した。製造時の電解質はイオン伝導度が高い立方晶であるのに対し、SOEC 運転条件下では電解質の水素極側/酸素極側で大きな酸素ポテンシャル勾配が発生することで、正方晶へと変化し、これに伴い電解質のイオン伝導性が低下してセルの抵抗上昇を導くことを明確化した。

次に、スタック部材の劣化については、スタック構成部材を運転温度付近で、SOEC 運転時の特徴的な雰囲気模擬した複合ガス環境 (表側に空気、裏側に水素+高濃度水蒸気の混合ガス)

で長期間高温曝露する試験を実施した。2019年度までの試験によって、シール材などの金属以外の部材は、複合ガス環境雰囲気の影響をほとんど受けないのに対し、セパレータなどの金属材料では複合ガス環境では空気側で酸化速度が大きく加速する可能性があることが

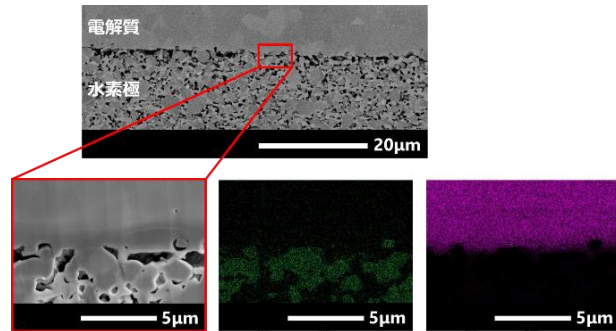


図 1. EC 長時間運転後セルの水素極/電解質界面剥離進行部の SEM-EDX 分析結果.

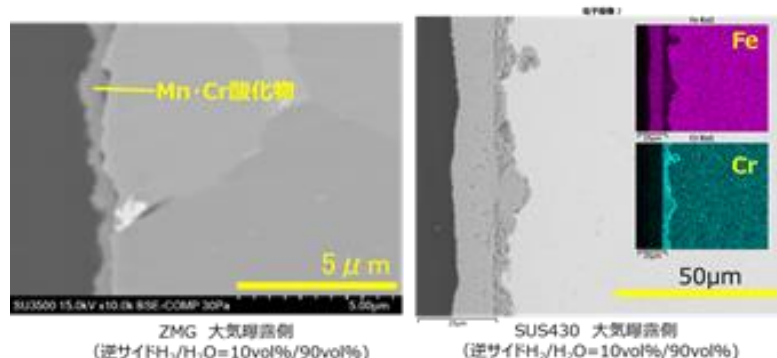


図2. ZMG・SUS430を用いた複合ガス環境曝露後の空気側のSEM観察結果.

判明した。耐酸化性の高い材料では複合ガス環境での酸化の加速はほとんどなく酸化劣化は小さいものの、汎用材（SUS430）では複合ガス環境の影響により空気側の酸化膜が10倍程度に厚くなった。さらに、セパレータからのCr飛散抑制のための被膜としてCo-Ni系、Co-Mn系の2種類についてZMGに塗布した場合、被膜も複合ガス環境の影響を受け、特に空気側の被膜については多孔化し、酸化クロム層が厚くなることが明らかになった。これらの、複合ガス環境の空気側で起こる金属材や被膜の特徴的な劣化は、対面側の水素+水蒸気雰囲気中の水素が金属中を拡散し、空気側で生成した水蒸気による水蒸気酸化であることを明確化した。空気側で生成する水蒸気の濃度は空気側に流す空気の流量に依存すると考えられるため、2020年度は空気側の空気流量を変化させることで、劣化現象がどのように変化するか評価している。

2018年度より、Cr飛散抑制の有力な被膜候補材であるCo系スピネル構造酸化物の劣化要因を抽出し、被膜の電気抵抗上昇、セパレータ／被膜間の元素拡散、形態変化に着目した。被膜の電気抵抗上昇に対しては、被膜材料自体の電気抵抗に加え、セパレータ金属と被膜の界面に形成するCr酸化物層の厚さを制御することが重要であることを明らかにした。また、セパレータ／被膜間の元素拡散により被膜形態が変化することが判明し、Co系金属のその場酸化プロセスで形成する材料構造が、これに影響を及ぼしていることを明らかにした。この元素拡散は、被膜からセパレータへの酸化物イオンの内方拡散と、セパレータから被膜への金属イオンの外方拡散の二種類があり、金属イオンの外方拡散の方がより膜の形態変化を引き起こしやすいことを明確化した。現在、被膜の内方拡散／外方拡散を決定する因子を特定している。

さらに、2019年度より、SOECセル強度の低下要因の解明、および、高温モジュールの配管部材と接手部材の耐食性について、劣化影響因子の整理、劣化影響度の評価手法構築、劣化前後での材料組織、組成等の分析を実施した。

セル強度低下要因解明では、多孔質体である水素極支持層の強度支配因子を整理し、支持体中のガス透過性を付与するために導入している気孔と支持体の強度の関係を検討した。支持体中で気孔が配向することにより、見かけ上の大型欠陥を形成して強度低下を引き起こしていることが判明した。また気孔配列やその他の欠陥導入を抑制することで、セルの平均強度を向上させることが可能になった。

高温モジュール構造材の配管部材と接手の耐食性については、SOECで特徴的な水蒸気を含む環境での劣化影響因子を抽出・整理し、また、その影響度を評価する手法を確立した。水蒸気環境、複合ガス環境、および単純（水素+水蒸気、空気）環境での材料暴露試験を実施している。複合ガス環境では、金属中の水素拡散による水蒸気酸化現象が劣化の主要因であることが判明した。さらに、各雰囲気での劣化評価を総合し、劣化機構を解明していく。

上記のように、SOECセル・スタック部材の劣化要因を抽出し、劣化機構を解明した。また、セルの強度低下要因、およびSOEC特有の環境条件下で起こる高温モジュール構造材の劣化現象を明確化した。

(2) SOEC セル・スタック部材の設計指針策定

(1)SOEC セル・スタックの劣化機構解明で判明した劣化要因、劣化機構を基に、それらを抑制可能な施策について検討を実施している。SOEC セルについては、水素極／電解質界面の元素拡散に起因する界面剥離の進行抑制、酸素極／中間層／電解質間の元素拡散抑制、YSZ 電解質中の水素極側／酸素極側間の酸素ポテンシャル勾配が小さくなる構造を策定した。本構造のセルを製作し、一定入力条件での試験では、安定領域の劣化率（電圧上昇率）を改良前の 0.6%/kh から 0.3%/kh 以下に低減することが可能になった(図 3)。また、矩形波変動入力条件(on/off 比=1h/1h)での試験では、経過時間当たりの劣化率が一定入力運転時の約半分に抑制され、実電解時間当たりの劣化率は同等となった。結果、これらのセル改良構造が、一定入力時の劣化および変動入力による劣化加速の抑制に有効なことを実証でき、高耐久化可能なセルの設計指針の素案を策定した。

スタック部材については、セパレータからの Cr 飛散を抑制するための被膜とセパレータ間の元素

拡散を抑制する構造を策定し、拡散が起こりにくいと考えられる組成を選定した。希土類元素を用いることにより、被膜の形態変化を引き起こす金属イオンの外方拡散を抑制する構造を立案し、その効果を検証している。本構造により、被毒種である Cr の外方拡散速度を抑えることが可能になり、被膜の電気抵抗上昇および、セパレータ／被膜界面に形成する Cr 酸化物層の厚さを制御することが可能になった。

また 2019 年度までに、一部のセパレータ被膜材において、ガスシール材として使用されるガラス材料と反応し、マクロな気泡が多量発生する現象が見られている。2020 年度は複数のガラス材と被膜材料の組み合わせを評価することで反応が起こる組み合わせを特定し、被膜の組成とガラスシール材中に形成する気泡の関係を明確化している。

上記のように、SOEC セル・スタック部材について、(1)で明らかになった劣化機構を踏まえた改良構造を策定し、その効果を検証することで得られた知見から、SOEC セル・スタック部材の設計指針素案を策定中である。

(3) 新規 SOEC 電極の設計指針策定

SOEC 酸素極として使用している LSCF は電子伝導性、酸化物イオン伝導性、触媒活性に優れているものの、電解質に使われるジルコニア系材料との反応性が高く、界面で高抵抗相である SrZrO₃ を形成し、これが劣化要因の一つであることが判明している。そこで、2019 年度より、高抵抗相を形成しない／しにくい酸素極材料系の設計指針策定を行っている。酸素極候補材となる新規ペロブスカイト型材料について、A サイトカチオン種および B サイトカチオン種、A サイト／B サイト比などの材料組成・構造の観点から、劣化との関係性が高い項目を抽出した。また、ペロブスカイト型酸化物と YSZ の反応性について、反応の自由エネルギーを計算し、A サイトカチオンおよび B サイトカチオンを選定し、代表的な酸素極材料である LSCF の Sr を Ca に変え、さらに Co を Mn もしくは Fe に置換えた LCCF、LCCM、LCMF 組成材料、および、SrTiO₃ の、A サイトに Y あるいは La、B サイトに Co あるいは Fe を置換させた YSTC、YSTF、LSTF

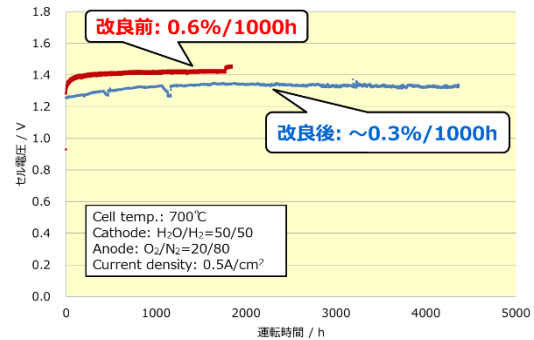


図 3. 改良前後セルの連続運転試験結果。

組成材料を選定した。これらの材料を合成し、YSZ との反応性、熱膨張率、導電性、酸素極特性、等の評価を実施し、既存材料である LSCF と比較した。

A サイトの Sr を Ca に変えた組成の材料系では、自由エネルギー計算から見積もった YSZ との反応性低減効果は得られなかったため、酸素極材料および YSZ の両材料と反応しにくい CeO₂ 系材料から成るナノ粒子と複合化する検討を実施している。これら A サイトの Sr を Ca に変えた組成の材料系では、電解質と熱膨張率が整合した正極材を骨格としてこれに CeO₂ 系材料等の、電解質との反応を抑制する材料や導電性、電極反応活性を高める高導電性材料をナノ化してコートし電極をコンポジット化させ耐久性・性能を向上させることを方針として開発を進めている。

また、SrTiO₃ 系材料では、いずれの組成の材料系においても LSCF と比較すると高抵抗相である SrZrO₃ の形成（図 4 中、Sr と Zr が重なるところ）が大幅に抑制され、YSTC や LSTF ではわずかな SrTiO₃ の形成が、YSTF ではほとんど SrZrO₃ の

形成が起らず、SrTiO₃ 系材料は、LSCF 材料と比較すると、YSZ との材料適合性が優れていることが判明した。しかし、これら SrTiO₃ 系材料の電子伝導性や触媒活性といった酸素極活性度は LSCF 系材料よりも劣っていることが判明した。LSCF 材料との複合化や、酸素極／電解質間に設ける中間層中への複合化の可能性などを検討している。

これら新規 SOEC 酸素極材料の検討には、酸素極／電解質界面に形成される高抵抗相由来の界面抵抗を評価することが重要である。そこで、電解質材料で電極を挟み、種々の端子間距離において交流インピーダンス測定を行う界面由来抵抗測定方法を開発した（図 5）。本方法により、端子間距離に依存して変化する電解質由来の抵抗成分（YSZ のバルク抵抗由来、YSZ の粒界由来抵抗）と、端子間距離に依存しない抵抗成分（電解質／酸素極界面由来抵抗）に分離して評価することが可能になった。

上記のように、主に層間の安定性と電極活性、および熱物性の評価から候補材料／構造を抽出、中間目標を達成した。また、電極／電解質界面由来の抵抗成分を分離評価する手法を確立した。

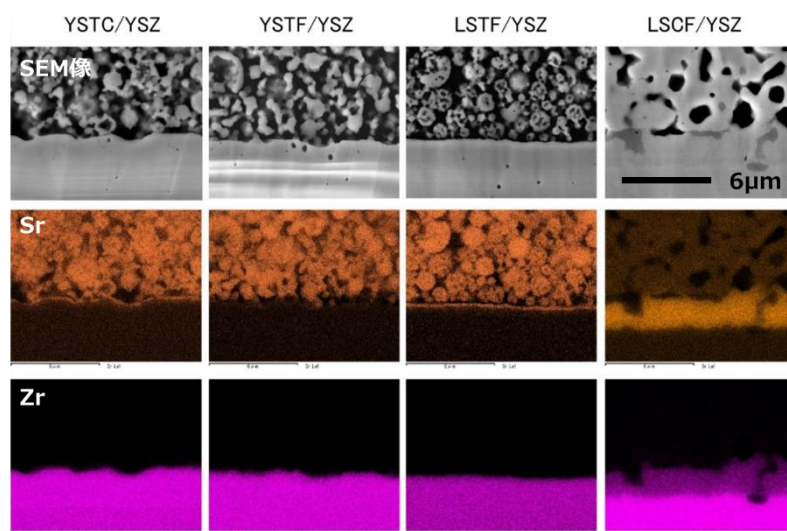


図 4. 種々の SrTiO₃ 系材料を空気極として用いた単セルの発電試験後の空気極／電解質界面近傍の SEM/EDX 分析結果.

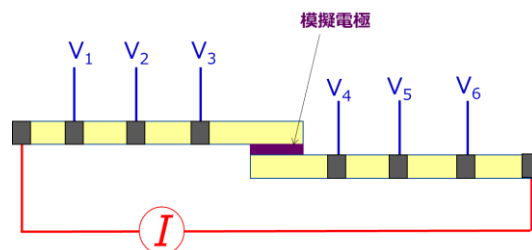


図 5. 界面由来抵抗測定方法模式図.

(4) SOEC スタック運転条件検討

SOEC スタックでは、印加電流に対して水素製造速度の追従性が良好であるものの、印加電流の波形によってスタック劣化速度が異なることが判明している。SOEC スタック運転条件検討では、再生可能エネルギー由来の変動電力を用いて水素製造を行うことを想定し、スタックの劣化を抑制する運転方法を策定している。2018年度は太陽光発電（PV）の出力データの調査を行い、SOEC スタックに変動入力を印加することを想定したときの劣化影響因子を整理し、運転条件パラメータを抽出した。2019年度からは、複数枚のセルを積層した平板型スタックを用いて、一定、および変動入力での運転条件による劣化について評価した。異なる運転条件による評価を行うにあたり、ASRの上昇速度を劣化評価指標として用いることで、運転条件に起因するパラメータ（スタック温度、印加電流の強度、供給ガス流量に起因する水蒸気利用率など）を反映した比較が可能であることを明らかにした。

一定入力での運転条件による劣化影響では、水蒸気利用率が高いほどASR上昇速度が小さくなる傾向が見られ、運転履歴により同一運転条件においてもASR上昇速度が変化することを確認した。さらに、水素製造を行わずに待機運転状態を長時間保持すると、電解再開時にASRが上昇するという事象が見られた。変動入力での運転条件による劣化影響については、最小セル電圧を開回路電圧（電解なしの条件）、最大セル電圧をセルの熱中立電圧である1.3Vとなる条件とし、パラメータを波形（正弦波、矩形波）および変動周期（20秒、2時間）とした評価を実施した。スタックの劣化指標であるASR上昇速度は、変動周期が短い条件では波形による影響は見られないのに対し、変動周期の長い条件での矩形波入力で大きくなる傾向が得られた。さらに、待機運転時間をパラメータとして、矩形波入力運転でのASR上昇速度を比較し、待機運転時間が長いほどASR上昇速度が大きくなることを明らかにした。高水蒸気濃度環境下にセル/スタックがさらされることにより、劣化が進行することを明確化した。

上記のように一定入力および変動入力での運転条件による劣化影響因子を明らかにした。また、劣化抑制可能な運転方法の一次案を立案/検証中であり、中間目標のSOECスタック運転条件の設計指針の素案作成を達成見込みである。

(5) SOEC 評価技術/標準化調査

SOECの劣化評価に必要な技術の一つとして、小流量の水蒸気を精度良く長期間安定に供給する手法の開発を行うとともに、欧州、米国のSOEC開発・評価関連プロジェクト内容、SOECの性能評価に関する国際標準化の取組などを調査した。

小流量の水蒸気供給法の開発では100~1000 sccm程度の水蒸気供給用に、原料水量を送液ポンプあるいは水を数気圧に加圧した後に質量流量制御器（MFC）で蒸発器に供給し発生した水蒸気流量を高温MFCで供給するシステムを開発した（図6）。本システムの性能を試験した結果、水蒸気流量1 slmでは流量変動を±0.1%レベルに抑えられることができ、また高温MFCを矩形波やサイン

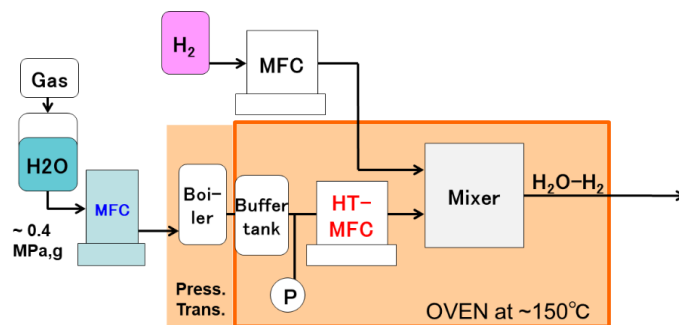


図6. 試作水蒸気供給システム構成.

波などで制御することにより水蒸気流量を応答速度 1 秒程度で制御可能になった。これらにより再生可能電力との接続を想定した急な入力変動を模擬した試験にも本システムが適応できる。さらに、高温 MFC の流量校正方法を開発するとともに、生成ガス流量については、高温質量流量計とガス組成分析を組み合わせることで、広範なガス組成の流量を±1%程度の精度で測定できる手法を開発した。開発した蒸気供給システムを実用サイズ（入力 100W 程度）の単セル試験に用いた結果、開回路電圧の安定性として±0.6 mV が得られ（図 7）、開発した手法が電圧-電流特性など SOEC 性能試験に十分適応できることを確認した。これらの結果を踏まえて現在、同システムの 8-15 slm 級へのスケールアップ化を図っており、8 slm 程度の蒸気を±0.1%で供給できる見通しを得ている。

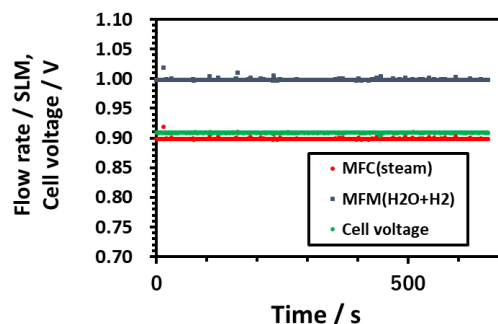


図 7. 1slm 水蒸気供給時のセル電圧の安定性.

SOEC 開発・評価関連プロジェクトの調査については、再生可能エネルギーの導入を積極的に推進し水素製造用の SOEC、SOFC/SOEC 可逆作動固体酸化物セル（RSOC）の開発も進んでいる欧州について、SOEC、RSOC 研究開発プロジェクトの状況、これらのプロジェクトで実施されている試験方法、標準化に向けた取組みを調査した。また、IEC、ISO で現在、作成済みあるいは作成中の関連技術の規格についてその内容を調査し、それらを適用する場合の問題点などを検討した。欧州では従来の SOFC を SOEC に転用した評価法に加え、再生可能エネルギーとの接続などを想定した電力サイクル試験法、SOFC/SOEC サイクル試験方法なども整備し、これらを基礎に国際標準化も推進していることが判明した。しかしながら、作成されている国際規格案では SOEC の性能、耐久性評価方法の開発に不可欠な SOEC からのガスリーク、水素・酸素の製造速度、製造水素の品質などの測定について記載がなく、SOEC の性能規定には不十分と考えられるため、本研究では上記、供給水蒸気を高精度安定に供給する方法、生成ガスの流量・組成を高精度に測定方法する手法を開発し、それらをもとに水素生成量、水素リーク量、電流効率、電解効率の試験方法を含む SOEC セル・スタックの性能・耐久性試験法案を作成した。

上記のように、SOEC 性能評価試験で重要な小流量水蒸気の長期安定供給技術を開発、また先行している SOEC 性能評価試験法 IEC 規格の問題点を調査しこれを改良した試験法規格の素案を作成した。

3. 2 成果の意義

本事業では高温水蒸気電解法を適用した水素製造システム、および電力貯蔵システムの重要構成要素である SOEC セル・スタックおよび高温モジュール構造材の技術開発を行い、SOEC セル各部（水素極、酸素極、電解質）およびスタック部材（シール材、セパレータ材、集電材、Cr 飛散防止被膜）の劣化機構解明、高温モジュール構造材の劣化影響因子抽出・影響度評価、SOEC 運転条件がスタックの劣化に及ぼす影響度を明らかにした。また、上記劣化影響因子の明確化・機構の解明により、高耐久性 SOEC セル・スタック部材の設計指針素案を策定した。また、SOEC 評価技術を調査・開発し、標準化試験方法案を作成した。

これらの成果は、SOEC セル・スタックおよび高温モジュールの高耐久化に向けた改良指針となり、SOEC システム実用化のネックとなっている寿命特性の改善につなげることが可能である。今後、改良指針の検証と一層の最適化検討を行い、技術知見さらには知財権に裏打ちされた高耐久性 SOEC セル・スタックおよび高温モジュールの設計指針を策定することで、SOEC システムの実用に向けた基盤技術を確立することができる。

高温水蒸気電解は、既に実用化されている低温型水電解システムに比べて、原理的に 30%程度の効率向上が期待できる技術で、実用レベルに完成させることができれば、種々水素ソリューションの社会実装拡大に大きく寄与するコア技術となり得る。本技術の開発は、欧州・米国等でも積極的に進められており、グリーン水素の市場拡大時期を睨みながら、競合していく状況にある。本事業で得られる耐久性向上技術は、本格的な実用化への最重要課題の一つであるコスト低減、すなわちセル・スタックの交換寿命や高温部の材料選定に直結するもので、実用化・事業化時に競合優位を確保するためのキーとなる。

3. 3 成果の最終目標の達成可能性

研究課題の全般に対して、2020 年度までの中間目標を概ね達成、あるいは達成見込みである。また、本成果により、耐久性向上施策とその検証工程が明確になってきており、2022 年度までの最終目標に対しても、達成可能と見通している。

以下に、研究課題毎に中間目標の達成状況をまとめ、最終目標の達成可能性について説明する。

「(1)SOEC セル・スタック部材の劣化機構解明」では、セル各層（酸素極／中間層／電解質／水素極）について、各層間の元素拡散、構造変化、および酸素ポテンシャル勾配に起因した主要な劣化機構を明らかにした。スタック部材（シール材、セパレータ材、集電材、Cr 飛散防止被膜）については、部材自体、部材間、および部材／ガス間、の高温保持における反応／劣化機構を明らかにした。加えて、セルの強度低下要因、および SOEC 特有の環境条件下で起こる高温モジュール構造材の劣化現象について、明確化した。高温モジュール構造材の劣化評価を継続する他は、2020 年度で完了し、解明した劣化機構を次項の設計指針策定に反映する。

「(2)SOEC セル・スタック部材の設計指針策定」では、前項で解明した劣化機構を基に耐久性向上施策を創出し、セルについて改良を確認、スタック部材について効果の検証を進めている。中間目標である SOEC セル・スタック部材の素案作成を達成、および一部達成した。2022 年度最終目標の SOEC セル・スタック部材の設計指針策定については、現在の改良施策の最適化、および通電条件下での検証・改良を進めることで、達成の見込みである。

「(3)新規 SOEC 電極の設計指針策定」では、主に層間の安定性と電極活性、および熱物性の評価から候補材料／構造を抽出、中間目標を達成した。今後、実セルによる特性評価で、新規電極の長所を検証することで、最終目標の新規 SOEC 電極の設計指針策定を達成可能と考えている。

「(4)SOEC 運転条件検討」では、一定入力および変動入力条件での劣化影響因子を明らかにし、劣化抑制可能な運転方法を立案／検証予定であり中間目標の SOEC スタック運転条件の設計指針の素案作成を達成見込みである。今後、運転時の変動入力条件（電流・電圧・ガス条件）が劣化に及ぼす影響を更に調査することで、最終目標の SOEC システム実現可能な長寿命 SOEC セル・スタックの設計指針策定を達成する見込みである。

「(5)SOEC 評価技術／標準化調査」では、SOEC 性能評価試験で重要な小流量水蒸気の長期安

定供給技術を開発、また先行している SOEC 性能評価試験法 IEC 規格の問題点を調査しこれを改良した試験法規格の素案を作成した。2022 年度に向けて、国内外の評価技術開発および標準化の動向を継続調査・反映し、SOEC セルおよびスタック構成材料の耐久性を含む性能評価試験方法を確立する見込みである。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

本事業において、SOEC セル・スタック部材、高温モジュール構造材、スタック運転条件の設計指針を策定し、SOEC システム実用化に向けた課題である寿命特性を改善できれば、実用化に向けた基盤技術の一つを確立することになる。残された課題は、セル・スタックの製造技術、コストダウン技術、システムの詳細設計であり、これらの技術開発と並行して、検証機・実証機へと製作と運転試験を進め、実用化につなげていく。

また、事業化においては、本事業の成果および自社での開発、東芝グループが長年培ってきた燃料電池や発電システムに関する技術蓄積を活用し、開発成果を適用した水電解装置や、当社が有するシステムの制御・設計技術、および運転マネジメント技術を活用した総合的な最適水電解ソリューション（システム／運用）を提供する計画である。

5. 特許・研究発表等

※ 2020 年 8 月 25 日時点

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2019/02/08	特願 2019- 021679	水素製造プラントの制御装置及び制御方法	東芝エネルギーシステムズ
2	2019/02/27	特願 2019- 034849	イオン導電体を含む構造体の電気的特性の評価方法及びそのための評価デバイス	ファインセラミックスセンター／東芝エネルギーシステムズ
3	2019/03/04	特願 2019- 038389	電気化学セルスタックおよびそのセパレータ	東芝エネルギーシステムズ
4	2019/03/18	特願 2019- 050090	セラミックス粉末の製造方法、セラミックス粉末及びセラミックス緻密質体の製造方法	ファインセラミックスセンター／東芝エネルギーシステムズ
5	2019/08/30	特願 2019- 158485	蒸気供給装置、蒸気供給方法及び蒸気を用いた試験装置	東芝エネルギーシステムズ
6	2019/09/26	特願	集電体および電気化学セルスタック	東芝エネルギー

		2019-176175	ク	システムズ
7	2020/01/07	特願 2020-001093	固体酸化物形電気化学スタック	東芝エネルギーシステムズ
8	2020/03/18	特願 2020-047270	金属部材、および、その製造方法	東芝エネルギーシステムズ
9	2020/03/18	特願 2020-048003	電気化学セル、電気化学セルスタックおよび電気化学セル用電解質	東芝エネルギーシステムズ
10	2020/07/02	特願 2020-114580	電気化学セルおよび電気化学セルスタック	東芝エネルギーシステムズ

—研究発表・講演、文献等、その他—

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2018/08	セラミックス協会誌	高効率高温水蒸気電解システムの開発	吉野正人(東芝エネルギーシステムズ)
2	2018/08	第 111 回 SOFC 研究会	高温水蒸気電解セル・システムの開発状況	長田憲和(東芝エネルギーシステムズ)
3	2018/09	グラウンド再生可能エネルギー2018 国際会議	DEVELOPMENT OF SOEC STACK FOR HYDROGEN PRODUCTION	小林昌平(東芝エネルギーシステムズ)
4	2018/09	2018 年電気化学会秋季大会	高性能高温水蒸気電解セル(SOEC)の開発(2)	長田憲和(東芝エネルギーシステムズ)
5	2018/09	平成 30 年度 NEDO 次世代電池・水素部成果報告会	高温水蒸気電解システムの研究	吉野正人(東芝エネルギーシステムズ)
6	2018/09	化学工学会 第 50 回秋季大会	再生可能エネルギーを利用する水素エネルギーシステムの開発	吉野正人(東芝エネルギーシステムズ)
7	2018/09	9th IEA Annex 30 Electrolysis Workshop	SOEC activities at Toshiba	亀田常治(東芝エネルギーシステムズ)
8	2018/10	水素の製造,輸送・貯蔵技術(図書)	高温水蒸気電解を利用した水素製造・電力貯蔵システム	吉野正人(東芝エネルギーシステムズ)

9	2018/11	燃料電池・二次電池の電極反応入門(図書)	SOEC による水素製造	吉野正人(東芝エネルギーシステムズ)
10	2019/02	東芝レビュー74 巻 2 号 (技術成果号)	高温水蒸気電解システム -SOEC の研究	亀田常治(東芝エネルギーシステムズ)
11	2019/02	最近の化学工学講習会 67	水蒸気電解による水素製造	吉野正人(東芝エネルギーシステムズ)
12	2019/03	日本セラミックス協会 2019 年年会	長寿命 高温水蒸気電解セルの開発 (3)	長田憲和(東芝エネルギーシステムズ)
13	2019/03	日本セラミックス協会 2019 年年会	LSCF/YSZ 界面に形成された高抵抗相に由来する抵抗の定量評価	川原浩一(ファインセラミックスセンター)
14	2019/03	石油学会新エネルギー部会主催・新エネルギー部会講演会	Power to Gas の現状と課題の概要、取組紹介	中島 良(東芝エネルギーシステムズ)
15	2019/03	2019 年電気化学会第 86 回大会	SOEC スタック部材劣化機構解明 ～セパレータ・シール材の劣化検討～	犬塚理子(東芝エネルギーシステムズ)
16	2019/05	固体酸化物エネルギー変換先端技術コンソーシアム戦略シナリオプロジェクト・2019 年度第 1 回招待講演会	水素社会・低炭素社会に向けた SOEC 技術の開発	吉野正人(東芝エネルギーシステムズ)
17	2019/06	The 6th International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations	Effect of Cathode Firing Temperature on SOFC Performance of Ni-GDC/YSZ/LSCF Single Cell	川原浩一(ファインセラミックスセンター)
18	2019/06	World Hydrogen Technologies Convention 2019	Development Status of High Temperature Steam Electrolysis Technology at Toshiba	吉野正人(東芝エネルギーシステムズ)
19	2019/11	2019 AIChE Annual Meeting	Hydrogen Production System using SOEC – Evaluation of the energy by long-term operation-	土屋直実(東芝エネルギーシステムズ)
20	2019/07	2019 年度 JFCC 研究成果発表会	LSCF/YSZ 界面に形成される反応形成相由来の抵	川原浩一(ファインセラミックスセンター)

			抗評価	
21	2019/07	燃料電池・FCH部会 第 259 回定例研究会	東芝における SOEC に 関する研究開発の取組み	吉野正人(東芝エ ネルギーシステムズ)
22	2019/09	2019 年電気化学秋季大 会	Development Status of Solid Oxide Electrolysis Cells at TOSHIBA	長田憲和(東芝エ ネルギーシステムズ)
23	2019/10	The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies	Long-term Stabilities for Solid Oxide Electrolysis Cells	長田憲和(東芝エ ネルギーシステムズ)
24	2019/10	燃料電池開発情報センタ ー年報(2019 年度版)	産総研における固体酸化 物形セルの研究開発	田中洋平(産総 研)
25	2019/10	第 13 回材料合成ワーク ショップ	噴霧熱分解法の基礎とセ ラミックス粒子合成	川原浩一(ファイセ ラミックスセンター)
26	2019/10	日本セラミックス協会 2020 年年会	LSCF/GDC 界面抵抗に 及ぼす GDC への YSZ 固 溶の影響	川原浩一(ファイセ ラミックスセンター)
27	2019/11	The 2019 Fuel Cell Seminar & Energy Exhibition	Development of Output Gas Measurement Methods for Steam Electrolysis Using Solid Oxide Cells	田中洋平(産総 研)
28	2020/01	東芝レビュー 2020 年 1 月号	高効率水素製造用固体酸 化物電解セル(SOEC)の 長寿命化	長田憲和(東芝エ ネルギーシステムズ)
29	2020/01	第 116 回 SOFC 研究会	東芝における SOEC 開発 状況	長田憲和(東芝エ ネルギーシステムズ)
30	2020/02	電気学会論文誌 B (電 力・エネルギー部門誌) 140 巻 2 号	高温水蒸気電解水素製造 プラントの変動電源対応 制御方法の提案	高木康夫(大同 大)
31	2020/03	日本化学会 第 100 回春 季年会	高耐久化に向けた固体酸 化物形電解セル用インタ ーコネクタへの被膜形成	小林昌平(東芝エ ネルギーシステムズ)
32	2020/05	溶融塩および高温化学 第 88 巻 第 2 号	高温水蒸気電解セル高性 能化に関する取組み	長田憲和(東芝エ ネルギーシステムズ)
33	2020/07	2020 年度 JFCC 研究成 果発表会	GDC/YSZ 界面での相互 拡散が及ぼす単セル抵抗 成分への影響	川原浩一(ファイセ ラミックスセンター)

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：①-2を参照

課題番号：①-3

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／非貴金属触媒を利用した固体高分子型水電解の変動電源に対する劣化解析と安定性向上の研究開発」

委託先：国立研究開発法人理化学研究所

再委託先：東ソー株式会社、ブラザー工業株式会社（2020年1月まで）

1. 研究開発概要

本研究開発では、貴金属触媒を用いない非貴金属系電極触媒を用いた、変動電源への対応が容易な、図1に示す構造を持つ陽イオン交換型の固体高分子型水電解電気化学セル(PEM型水電解セル:PEEC)についての基盤技術開発を実施するものである。すなわち、PEM型水電解セルの大規模普及に向けて、特に難しいとされる水分解酸素生成側の触媒について非貴金属系電極

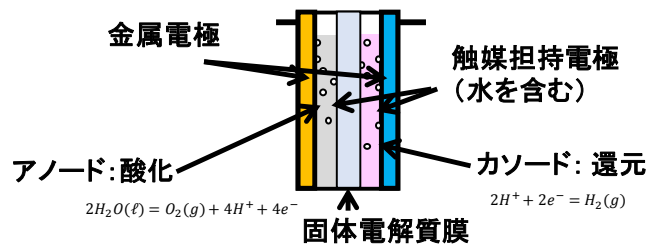


図1 固体高分子型水電解電気化学セル (PEM型水電解セル) の概念図。

触媒の性能発現ならびに劣化機構の解析を行う。より具体的には、理研で開発されたマンガン酸化物触媒等を酸素生成 (OER) 触媒として用いた、固体高分子膜 (PEM) を使った PEM 型水電解セルを設計し、変動電源下における性能発現・劣化機構解析を行う。

2. 研究開発目標 (設定の理由も含め)

水を電解して酸素と水素を製造するための技術の中で、陽イオン交換型の PEM 型水電解セルはエネルギー効率がよく、そして変動電源に比較的耐久性のある手法として知られている。一般的に PEM 型水電解セルでは、酸素生成用のアノード電極にはイリジウム酸化物 (IrO_x) 触媒を用いる。これは、低いセル電圧 (少ない過電圧) で水電解を可能にすると同時に、安定性にも優れているためである。しかし、イリジウムは、地球の資源量としても最も少ない貴金属に属しており、低価格化にも支障があるため、触媒の非貴金属化が求められている。陽イオン交換型の PEM 型水電解セルでは、その電解反応により酸素発生触媒近傍は強い酸性環境となり、非貴金属系触媒を用いた場合、触媒材料の溶解は大きな問題である。本検討では、この PEM 型水電解セルの酸素生成触媒である IrO_x を非貴金属系の触媒、特にマンガン (Mn) 酸化物を中心とした非貴金属系の触媒とすることで資源問題や低価格化の弊害を解決するとともに、非貴金属触媒を用いた PEM 型水電解セルを変動電源下で使用可能な条件を評価し、その実用化に対する使用条件を見出

すものである。

2020年度末までの検討実施項目としては、

- ① 電極触媒の性能発現と劣化機構の解明
- ② MEA とセル構造の最適化
- ③ 変動電源との連結による劣化特性評価

の三つとしている。検討内容の詳細は以下に示すとおりである。

①-1. 触媒・担持材料の安定電位-pH 領域の特定（担当：理化学研究所）

固体高分子型水電解セルの非貴金属酸素生成触媒として有望なマンガン (Mn) 酸化物の熱力学データに基づき作図される Pourbaix Diagram を、触媒の過電圧（速度論情報）を考慮に入れた「安定電位-pH 領域図」に拡張する。また、異種元素ドーピングを行った複合 Mn 化合物系触媒に対しても安定電位-pH 領域図の作成を試み、さらに良い特性を持つ触媒材料ならびに水電解の運転条件を抽出する。

①-2. マンガン系触媒の試作（担当：再委託先：東ソー株式会社）

固体高分子型水電解セルの非貴金属酸素生成触媒の中でも最も有望な Mn 系酸化物の触媒の製造、特に、強酸耐性を有する Mn 系酸化物の試作・提供を行うとともに、試作品のアノード触媒としての評価を行う。また、有望な Mn 系酸化物に関しては、MEA を作成し、固体高分子型水電解セルを用いた水電解特性の評価を行う。

②-1. MEA 劣化機構の直接的証拠の確認（担当：理化学研究所）

固体高分子型水電解セルの膜電極複合体 (MEA) では、電流が集中する部分では反応が多く行われることから発熱が大きいことが予想されるため、セル自体の劣化状況の確認とともにこの発熱分布の測定等を行うことで、貴金属触媒を用いた MEA の劣化原因の推定を行う。この評価結果を非貴金属系触媒の劣化機構解析にも応用し、その推定を行う。

②-2. MEA 劣化機構の確認に基づいた水電解セル構造の解析（担当：再委託先：ブラザー工業株式会社：2020年2月より理化学研究所）

MEA 劣化機構の直接的証拠の確認を受けて、固体高分子型水電解セルの原料である水の経路や発生する酸素・水素気泡の制御等を行うことで、膜電極複合体 (MEA) への電流集中の原因の解析を行う。さらに、他の劣化要因の抽出を行う。また、この結果を基に水電解セルの改良も実施する。

③-1. 太陽電池の電力変動環境下の固体高分子型水電解セルの劣化評価（担当：理化学研究所）

電気化学セルの評価装置を用い、固体高分子型水電解セルの劣化特性評価を、劣化テスト条件として定めた電圧変化や太陽電池の電力変動を模した環境において行い、貴金属触媒を用いた水電解セルにより劣化機構を推定する。これを基に、材料やセルの設計に対する設計原案を検討する。さらに、実際に太陽電池により動作するシステムに非貴金属系触媒を用いた水電解セルを組み込み、実際の電力変動条件下でその安定性を評価する。これらを総合し、水電解セルの劣化原因推定とそれに基づく材料やセル設計に対する設計原案の作成を行う。

③-2. 電力変動環境下の劣化機構の評価に基づいた水電解セル構造の解析（担当：再委託先：

ブラザー工業株式会社：2020年2月より理化学研究所)

太陽電池の電力変動環境下の固体高分子型水電解セルの劣化機構評価を反映して、水電解セル構造から見た電力変動環境下の劣化機構の原因解析を行う。この結果を基にセルを改良する。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

本項を作成している2020年7月までの結果を示す。

(1) 触媒・担持材料の安定電位-pH領域の特定とマンガン系触媒の試作(検討実施項目①)

①-1 触媒・担持材料の安定電位-pH領域の特定

電気化学反応セルを自作し、Ge内部反射プリズムを用いたATR光学系に取り付けることで、オペラント計測可能なシステムシステムの構築を行った。電位に依存した表面種の計測が可能であることを確認した。

<触媒・担持材料の安定電位-pH領域の特定>

オペラント電気化学・紫外可視吸収分光システムを用い、電位に依存したMnイオン(MnO_4^-)の溶出反応について検討を行った。

電極電位を安定電位領域(1.64 – 1.76 V vs RHE)に固定することで、Mn酸化物を用いてもpH2の環境で8000時間にわたり安定的に水電解出来ることを見出している。その知見を踏まえ、本課題では、安定電位領域の拡張を目的とし、電解質組成の影響について検討を行った。

その結果、ある種のアニオン種を電解質に入れることで、 MnO_4^- の溶出電位が1.76 Vから1.85 Vに拡張することを見出した(図2、3)。そして、この100 mVの安定電位の拡張とMn酸化物電極のTafel slope特性を考慮に入れることで、10倍以上高い電流値においても、劣化すること

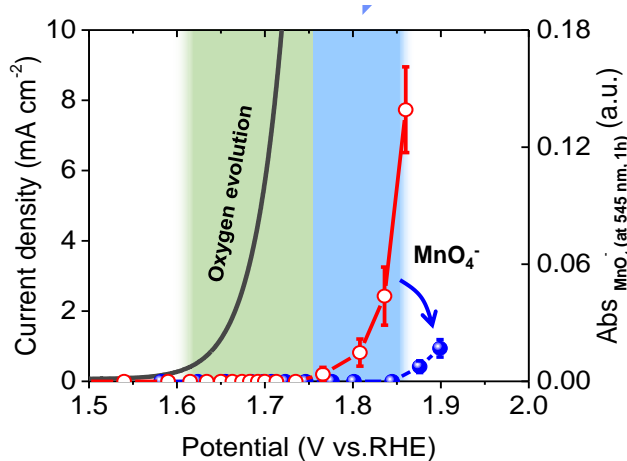


図2 電位に依存したMn酸化物からの MnO_4^- イオンの溶出。

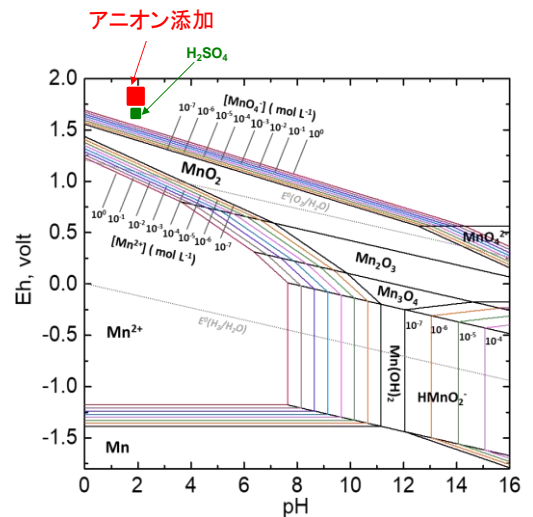


図3 CHNOSZ packageにより計算されたMn系のPourbaix Diagram。

なく水電解が可能であることが示唆された。実際、10 倍電流密度が高い 100 mA/cm^2 においても、Mn 酸化物が、1000 時間にわたり OER 触媒として働くことを確認した(図 3・黒線)。比較として、アニオン種を含まない環境で電解を行うと、僅か 80 時間程度で触媒は完全に劣化した(図 4・赤線)。

以上の成果は、非貴金属触媒の開発においては、安定電位領域の特定と拡張が、有効であることを示すものである。

<異種元素ドーピング Mn 酸化物触媒の開発>

Mn 酸化物への異種元素ドーピングにより、触媒活性の向上、すなわち過電圧の低下を狙い検討を実施した。

具体的には異種元素として、3d ブロックの元素(X)を中心に検討を進めた。その結果、ある種の元素を含むマンガン酸化物においては、ドーピング量に応じて過電圧が減少し、非ドーピングの触媒と比較して 100 mA/cm^2 においては 120 mV もの減少を確認した。そして、材料合成条件ならびに触媒担持条件を最適化することにより、活性はさらに向上し、 2 A/cm^2 の電流密度を 2 V (vs RHE) で達成することに成功した(図 5 非貴金属触媒において、世界最高活性)。また、電流-電位特性の温度依存性より算出した水酸化反応の活性化障壁は、 $29.5 \pm 2.0 \text{ kJ mol}^{-1}$ であった。この値は、Ir 酸化物に匹敵するものである。また、アルカリ電解において実用化されつつある Fe/Ni 酸化物電極と同程度の値であった。

Mn を含まない元素 X からのみ構成される触媒についても、活性ならびに安定性の評価を行った。その結果、純物質の活性は高いが、安定性は低く、 100 mA/cm^2 においては、10 時間程度で完全に活性が失活した。一方で、Mn を含有する系においては、安定性が飛躍的に向上し、 200 mA/cm^2 においても 1000 時間以上にわたり、安定動作した。

以上の結果より、活性を向上するだけでなく、安定性を高めるうえでも Mn 酸化物に対する異種元素ドーピングが有効であることが示された。

以上、「触媒・担持材料の安定電位-pH 領域の特定」では、当初予定した以上に、大きく進捗し、現在、種々の異種元素ドーピング Mn 酸化物系の探索を通して、さらに高効率の酸素生成アノード電極用触媒の開発を継続中である。

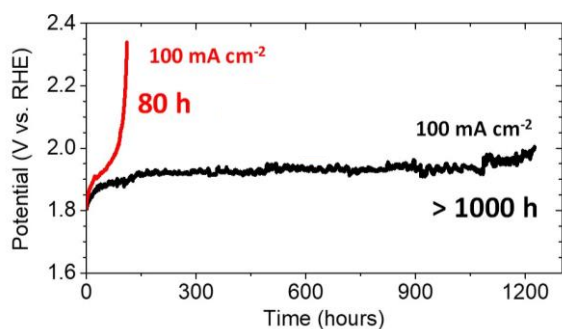


図4 アニオンの添加有(黒)無し(赤)における Mn 酸化物触媒の安定性。電流密度は、100 mA/cm²。pH 1

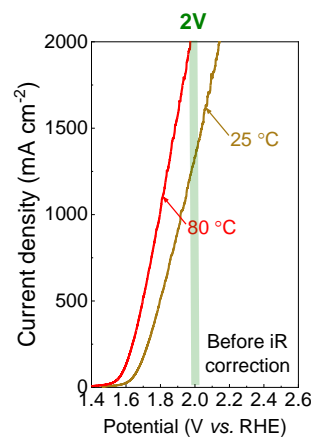


図5 新規触媒の水分解特性。pH1

①-2 マンガン系触媒の試作

強酸環境で高い安定性を示すマンガン触媒の開発を目的とし、高温かつ強酸性環境で電解合成によりマンガン酸化物材料を作成した。また、マンガン酸化物の電解合成時に用いる導電基板の影響、触媒の担持量、担持後の触媒の処理についても最適化を行い、電解合成マンガン酸化物を触媒とした MEA を合成し、固体高分子型水電解セルに組み込み水電解特性の評価を行った。その結果、マンガン酸化物を酸素発生触媒として用いた場合でも、1 A/cm²の電解電流を 2 V のセル電圧で達成できることを確認した。また、安定電位領域を考慮に入れて水電解を運転することで、0.2 A/cm²程度の電流密度を 10 日間にわたって持続できることを確認した。以上は、通常の水熱合成によって得たマンガン酸化物を触媒として用いた水電解と比較して、一桁以上高い活性を示すものである。また、電解合成法を用いることで、触媒の量産化にも目途が立ってきた。

「マンガン系触媒の試作」では、当初予定したより大きく進捗し、2 V の印加電圧において、1 A/cm²の電流密度、及び、0.2 A/cm²の電流密度で 10 日間運転、を達成できている。これは、非貴金属を酸素発生触媒として用いた PEM 型水分解において、世界最高の特性を示したものである。現在は、さらに高い電流密度、さらに長時間の安定性を目指して、マンガン酸化物材料の開発を継続中である。

(2) MEA 劣化機構の確認とそれに基づく水電解セルの構造の解析 (検討実施項目②)

MEA の劣化機構の調査は定常条件下、貴金属触媒を用いて行い、その結果を非貴金属系触媒 MEA へ展開している。

以降、主に貴金属系の MEA についての定常条件下での調査結果を主に述べる。

②-1 MEA 劣化機構の直接的証拠の確認

a. 原料純水の劣化による MEA の特性劣化

MEA の劣化の確認を行うため、電極面積が 12.5 cm^2 ある市販の貴金属触媒固体高分子型水電解セルを用い、室温で 2.0 V 定電圧印加、アノード側の水循環環境下で電流-電圧測定による一時中断を挟みながら、28 日間の連続測定を行った。この際、アノード側の純水は減少した分を追加する形で行った。この測定結果を図 6 に示す。矢印で示した中断後の開始時に電流の増加はみら

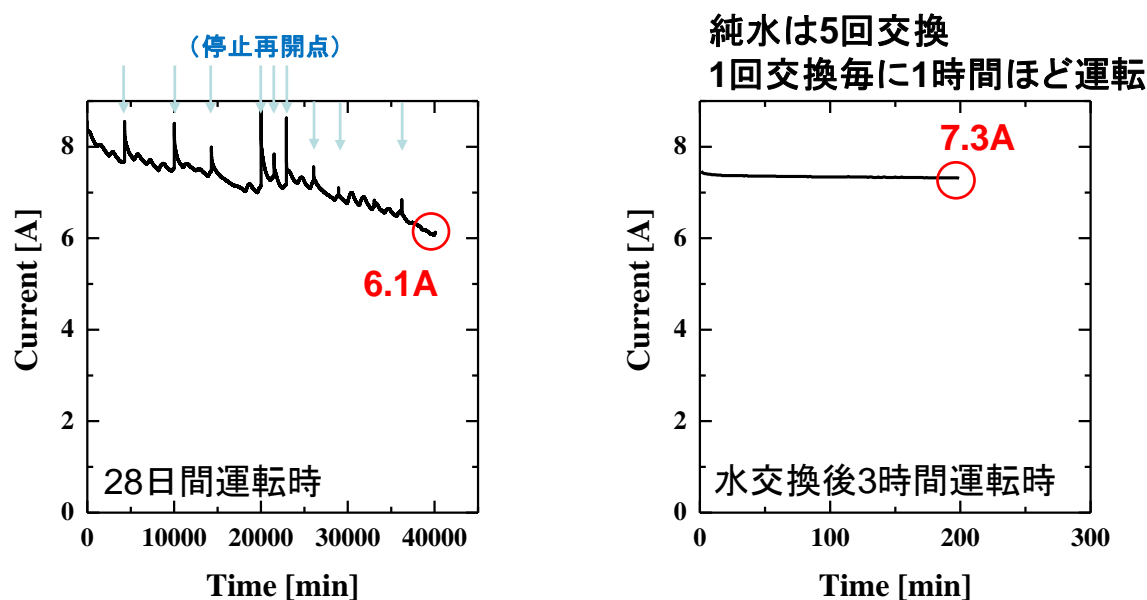


図 6 市販水電解セルを室温 2.0 V 定電圧印加下で運転した電流変化 (左)。この後、純水を 5 回交換したのちの 2.0 V 定電圧印加下での電流変化 (右)。

れるが、傾向的には電流は運転時間とともに減少していく様子が確認された。当初 8 A 以上の電流値が観測されていたものが、28 日間運転したのちには 6.1 A まで 20%以上の電流値低下がみられている。水電解セルを 28 日運転したのち、純水を 5 回交換 (各交換ごとに 1 時間ほど運転) した後の電流値の運転時間依存性の結果も同じ図に示す。純水の交換を行った結果、電流値は 6.1 A から 7.3 A へ改善した。

この水電解セルの運転中にサンプリングしたアノード側を循環させていた純水中の不純物濃度を ICP-MS で測定した結果を表 1 に示す。純水に接触していると思われる金属 8 種類の分析を行ったうち、ルテニウム (Ru)、イリジウム (Ir)、白金 (Pt) といった触媒に用いられている金属の濃度が、運転を続けるに従い増加していることが確認された。同様に固体高分子電解質膜を透過したカソード側に出てきた水の分析も行ったがチタン (Ti) 濃度の若干の上昇は見られるものの、そのほかの金属濃度の上昇は見られなかった。

これらの結果から、水電解を行っている間に、特に触媒に用いられている金属がアノード側を循環している純水の中に溶出し、この溶出した金属が電解質固体高分子膜中に入り込むことで電流値が低下しているものと推察した。電流・電圧特性の測定から確認すると、大きな変化は測定開始後 7 日目から起こっており、この時の純水中の金属濃度は約 0.1 mg/L を超えるレベルにある為、固体高分子型水電解セルの運転条件としては、アノード側を循環する水の純度を常にこの金属濃度が 0.1 mg/L の純度より良い状態に保つことが重要であると考えられる。

表 1 市販水電解セル(電極面積 12.5 cm²)に循環させたアノード側の純水中の金属濃度の ICP-MS 測定結果。

	純水	3 日運転後	7 日運転後	14 日運転後	28 日運転後
<i>Ru</i>	<0.001	0.003	0.006	0.011	0.013
<i>Ir</i>	<0.001	0.082	0.14	0.18	0.19
<i>Pt</i>	<0.001	<0.001	0.001	0.002	0.003

b. MEA 電極部分の温度分布評価

MEA 電極部分の温度分布について、図 7 (左) に示すように、当初市販品において明らかな温度分布が確認されたため、詳細調査を実施した。

MEA の電極構成部の密着度を均一にすることが可能なセルを応用し、同様な構造で MEA 電極部分の温度分布測定が可能なセルを作製し、調査を行った。この結果も図 7 (右) に示す。MEA 電極部分の密着度を高め、均一にすることで、電極部分に顕著な温度分布は見られていない。この結果から、MEA の電極構成部の均一化が電解反応の均一化において重要であることがわかる。これは、後述する極端な変動電源の印加による局所的な MEA の破壊の抑制に効果的であると考えられる。

c. 非貴金属系触媒を用いた MEA の評価

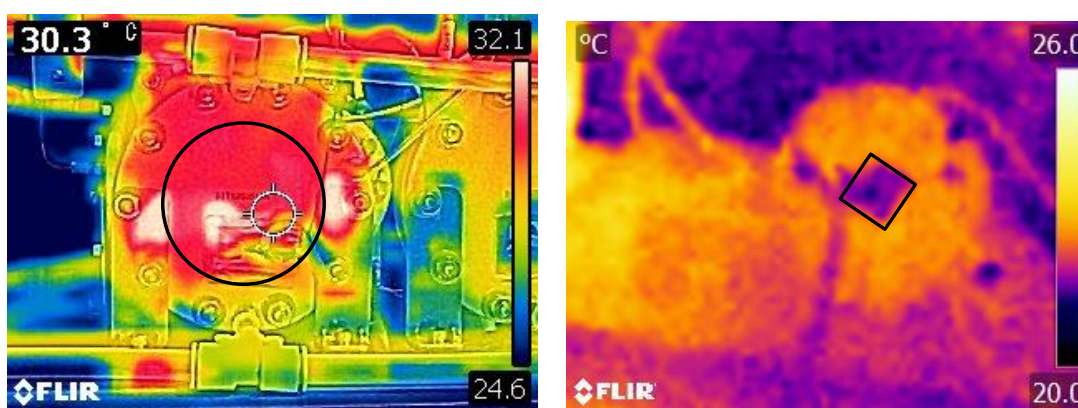


図 7 水電解セルの MEA 電極部分の IR カメラによる温度分布 (定常運転後に測定実施) (左) 市販品、(右) 同、電極構成部の密着度を高めた (均一化) 場合。

電極部分の環境条件を均一にするように改良したセルにより MEA を有効的に評価できるようになったため、この水電解セルを使用して、Mn 非貴金属系触媒を用いた MEA の評価を行っ

た。複数の Mn 非貴金属系触媒を用いた MEA を評価している。2.0 V の印加電圧において、純粋な MnOx アノード触媒で約 1/10 (約 10%)、異種元素ドーパ MnOx 系触媒で約 1/5 (約 20%) から約 1/2.5 (約 40%) の電流密度が得られた。これらの結果は、非貴金属系触媒を用いた場合でも、IrOx 系ほどの性能までは至っていないが、触媒として十分な性能を発揮することを示している。

この様に「MEA 劣化機構の直接的証拠の確認」については、MEA を有効的に評価可能な水電解セルの基本構造を見出すことが出来ており、これによる Mn 非貴金属系触媒を用いた MEA の調査も開始しており、ほぼ予定通りの進捗である。

②-2 MEA 劣化機構の確認に基づいた水電解セル構造の解析

a. 水電解セルの均一性向上の効果

水電解セルの電極部分の不均一性に関しては、当初から問題視されており、図 8 に示すように、水の流れのシミュレーションから局所渦の発生が反応の均一性を損なう要因の一つとして考えられた。このような不均一性が存在する場合、水電解セルへの印加電流が一部分に偏ることによる局所劣化が懸念される。後述する極端な変動電源の印加による局所的な MEA の破壊はこの一例と考えられる。解決方法としては、水電解セルを工夫して MEA の電極構成部を均一にすることが考えられる。これを実施した結果、MEA 電極部分の温度分布で見ると、MEA 電極部分の不

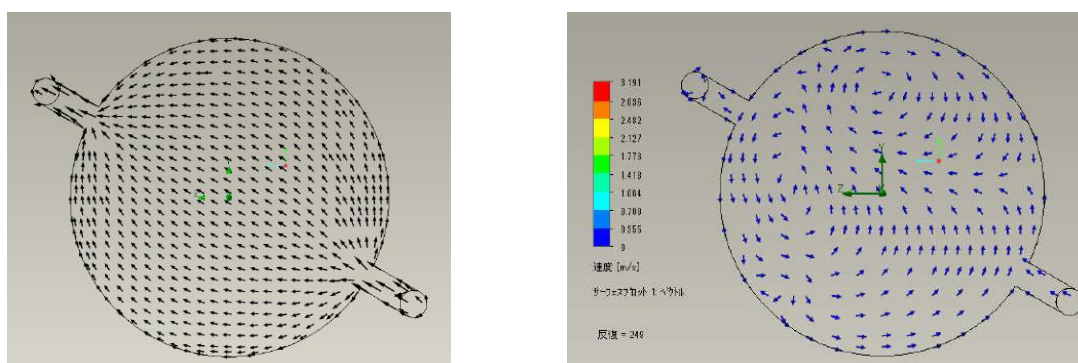


図 8 水電解セルの水の流れのシミュレーション結果。排圧がかかると局所的に渦が発生する。

均一性は解消されており、当初懸念されていた電流の偏りによる電極の局所劣化の抑制に効果的であることが示された。

以上、「MEA 劣化機構の確認に基づいた水電解セル構造の解析」については、水電解セルの電極部分における均一な反応条件を見いだしており、ほぼ予定通りの進捗である。

(3) 変動電源下における固体高分子水電解セルの劣化評価と解析 (検討実施項目③)

水電解セルの劣化機構の評価は非定常条件 (変動条件) 下で行っている。進め方としては、貴金属触媒を用いたセルを用いて評価を行い、この結果を非貴金属系触媒へ展開する予定である。以下、貴金属触媒を用いた水電解セルの特性結果を述べる。

3-① 太陽電池の電力変動環境下の固体高分子型水電解セルの劣化評価

a. 人工的な変動電力下（ステップ変動下）における水電解セルの挙動

本検討は 12.5 cm² の電極面積を持つ市販の固体高分子型水電解セルを用いて行った。水電解セルの制御方法としては、電圧制御もしくは電流制御が考えられる。まず、電圧もしくは電流での変動制御応答の基本動作の確認として、ステップ関数的な制御を行った（電圧は 0.0 V, 15 sec と 2.0 V, 15 sec の繰り返し、電流は 0.0 A, 30 sec と 8.0 A, 30 sec の繰り返し）。結果を図 9 に示す。

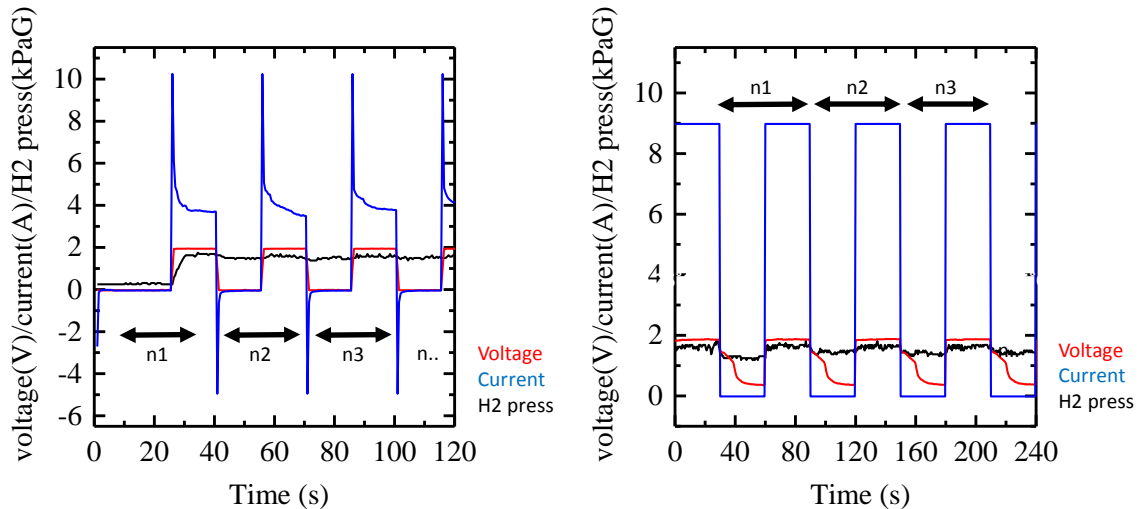


図 9 市販水電解セル（電極面積 12.5 cm²）を用いた水電解セルのステップ関数入力に対する動作。電圧制御（左）及び電流制御（右）を示す。

電圧制御の場合、電圧が上昇する際には非常に大きな過電流が、また、電圧が下降する際には非常に大きな負電流が観察された。一方、電流制御の場合には、電流が上昇する際にはほぼ遅れなく電圧が上昇し、電流が下降する際には緩やかに電圧が下降する現象が観察された。この結果は、水電解セルがコンデンサーであると考えられることで理解できる。電圧制御を行った際の過電流や負電流は水電解セルには好ましくはなく、水電解セルの制御は電流で行うほうが良いと考えられる。

b. 太陽電池の動作を模倣した条件下での水電解セルの挙動

日照を中心とした気象変化条件に基づく水電解セルの動作は、実際に測定した日照量を太陽電池による光電変換を模擬した形で電流もしくは電圧の変化に変換し、水電解セルを動作させるシステムを構築することで実現した。実際の太陽光量変化データに基づく水電解セル動作の結果を図 10 に示す。この例では、日照量を電流量とみなして変換し、経過時間も、実時間の 1/20 と

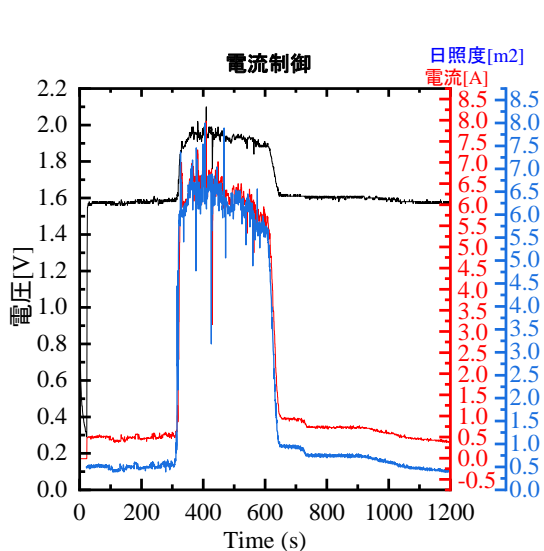


図 1 0 太陽光量を電流に変換し、経過時間を 1/20 とした場合の水電解セルの動作。
(2019.11.21 の実測データに基づく)

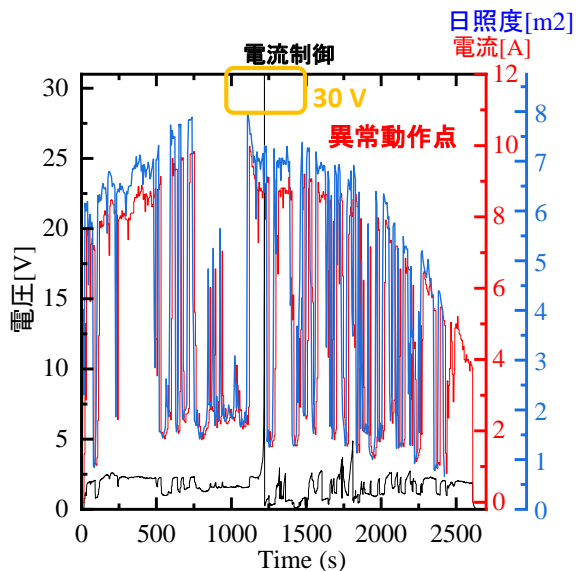


図 1 1 太陽光量を電流に変換し、経過時間を 1/20 とした場合の水電解セルの動作。
(2019.08.05 の実測データに基づく)

して動作を行っている。この結果から、電流の制御は設定どおり、太陽光の変化に対応して行われていることがわかる。ステップ関数的な応答から水電解セルの電流制御を行う場合の電圧変化は緩やかになることが得られているが、実際の日照条件を用いた結果からは、電流制御の場合においても、電圧に大きな振れが生じる事がわかる。

日照変動実験の中には非常に激しい変動を伴うものがあり、その時の動作結果を図 1 1 に示す。なお、測定は電流制御とし、経過時間も実際の 1/20 として動作を行っている。結果から、一部で大きな電圧が印加されたことがわかる（マーク部）。この図 1 1 に示した実データ動作測定の前後の電流－電圧特性を図 1 2 に示す。明らかに、異常電圧がかかった測定後の電流－電圧特性が悪化している。また、異常電圧が観測された後にはカソード側から排出される水量の増加が確認

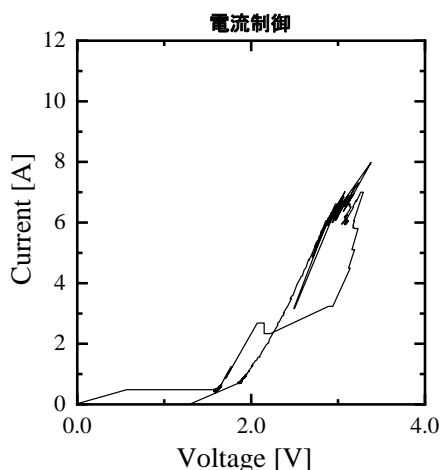
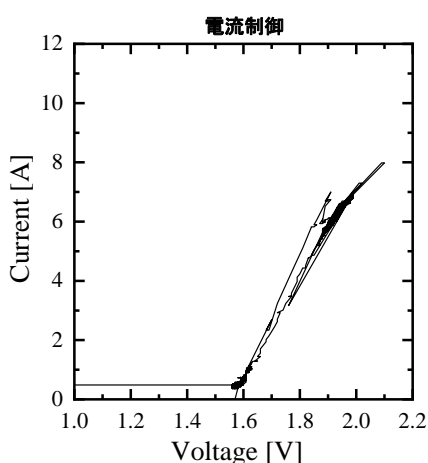


図 1 2 図 1 1 に示す電力変動動作を行う前（左）及び、後（右）に測定した電流－電圧特性。異常電圧が印加した後（右）は立ち上がり電圧も高くなり、微分抵抗も増加している。電流－電圧特性の測定には 2019.11.21 の実測データを用いている。

された。そこで、セル内部を観察したところ、カソード、MEA、アノードの対応する一部分が変色していることが観測された。これらの結果から、変化の激しい変動電源下での動作は局所的に突然劣化を起こす可能性があることが推定された。水電解セルの電極部分の均一性が良好であれば、こういった局所劣化は回避できる可能性があり、この結果からも MEA 電極部分の均一化が非常に重要であると考えている。

以上、「太陽電池の電力変動環境下の固体高分子型水電解セルの劣化評価」については、ほぼ予定通りの進捗である。

3-② 電力変動環境下の劣化機構の評価に基づいた水電解セル構造の解析

これまでの結果を総合すると、水電解セルとシステムに要求される項目は以下のように整理することができる。

1. 水電解セルの電極構成部を電解反応の観点から均一にする
2. 水電解セルの運転時の水の純度は清浄な状態を保つ：Metal ion < 0.1 mg/L
3. 電圧は水電解セルの定格を超えないように制御する
4. 制御方法としては電流制御が望ましい
5. 電流制御であっても極端に激しい変動は避けたほうが良い

これら5つの点は、水電解セルの構成材料にかかわらず水電解セルを長時間安定に動作させる上で重要な要素であるということが出来る。

以上、「電力変動環境下の劣化機構の評価に基づいた水電解セル構造の解析」については、水電解セルの定常状態や変動電源下の解析結果を総合することで、ほぼ予定通りの進捗である。

3.2 成果の意義

○触媒材料

PEM 型電解の酸素発生触媒に貴金属しか利用されていない現在、豊富で利用しやすい非貴金属触媒の実用化を目指す点に優位性がある。

特に、現在用いられているイリジウムは、年間の採掘量が9トン/年であり、1TW レベルの PEM の普及を考えると、イリジウムを本触媒だけに利用が可能であると考えても原料確保に40年以上かかることになる。さらに、既に、電子材料や電解塩素製造にイリジウムが使われていることを考えると、PEM 電解に用いることができるイリジウムは、さらに少なくなる。そのため、TW レベルの普及に向けては、40年以上の年数がかかることになり、現在の地球温暖化対策の時間スケールに対し現実的ではない。このようなイリジウムの資源量に関する問題は、国際的にも広く認知され始めており（Nature Energy 誌など）、非貴金属触媒の開発研究が活発化している。

本事業で開発を進めているマンガン系酸素発生触媒は、他の研究グループの研究結果と比較しても格段に高い活性と安定性を持つ。そのため、PEM の大規模普及においては、大きな優位性を持つ。

一方でコストの点に関しても、大規模普及により全体のコストに占める触媒の割合が25%にな

るとの試算が報告されているため、イリジウムに比較して圧倒的に安価なマンガンの利用は非常に重要かつ有効である。

○システム・デバイス

システムから要請される水電解セルの運用方法と水電解セルの特性から考えられる動作条件の整合性を取り運転条件の最適化を図る点や、MEA の持つ能力を最大限発揮できるセル構造の最適化を行える点で優位性がある。

水電解セルは水を電解して水素を作製するほとんど唯一の実用的な方法と考えられるが、リチウムイオン電池や燃料電池と同様にその取り扱いにはその特性を知り、特性に合わせた運用方法が必要になると考えられる。

そのためには、単に MEA をセル構造やシステムの運用条件に合わせるのではなく、システムの運用条件やセルの構造を MEA の持つ特性に合わせこむ操作も必要となる。この操作は、本事業の中心的な課題である非貴金属系触媒材料に限った話ではなく、貴金属触媒を用いた場合においても必要である。本事業では、貴金属触媒を用いた MEA を使った水電解セルの構造やシステム運用について検討を行った後、これらの検討結果について非貴金属系触媒を用いた MEA のセルへと応用するため、セル構造やシステム運用の立場から見た普遍的な条件や触媒材料特有の条件を提案することが可能である。

3.3 成果の最終目標の達成可能性

今後の目標に向けた検討については、以下のように考えており、十分達成可能である。

マンガン非貴金属系水酸化触媒については、基本目標は達成している。手法は確立しているため、さらに新しい目標とする触媒に対して速度論を考慮した安定電位-pH 領域図を作成し、評価を進める。特に、安定電位-pH 領域図の作成より新規に見出されたマンガン系酸化物触媒について最適な動作条件を抽出することで、1 A/cm² の電流密度において安定的な水分解を達成出来る見込みである。

上記をベースに、その他の開発項目については、評価方法が確定しており、以下の検討を着実に進めることで、最終目標を達成可能である。

定常（一定）条件下における MEA 評価については、5 cm² サイズの非貴金属系触媒を用いた MEA をセルに組み込み、長時間の定常運転による調査を実施し、貴金属触媒 MEA の特性と比較を行うことで定常条件下における劣化機構モデルを評価する。

非定常（変動）条件下における水電解セル評価については、システム運用を考慮した変動電源の評価用パターンを決定し、この条件の下での特性劣化を調査する。さらに、非貴金属系触媒をシステムに組み込んでの調査も実施する。その後、貴金属触媒で得られた条件を非貴金属系触媒へ展開し、非貴金属系触媒特有の劣化要因の有無について調査を進める。

なお、定常条件・非定常条件どちらも基本的な測定条件は明確になっており、測定装置やシステムの整備を行い、測定を行うことで評価可能な段階にある。

4. まとめ及び課題、事業化に向けたシナリオ

今までの研究開発により、マンガン系触媒の活性と安定性が飛躍的に向上し、PEM 電解システム環境において 0.2 A/cm² 以上の電流密度を長期に渡って維持できる新規マンガン系酸化物の発見につながった。これにより、イリジウム酸化物触媒の 30～50%程度の特徴をマンガン系触媒で達成することに目途が立ってきた。今後、電解工業に実績を持つ東ソー株式会社と一層連携を深め、事業化に向けた議論も始める予定である。

水電解システムについては、本研究開発で開発した非貴金属系触媒を用いた MEA を、電極面積 5 cm² の水電解セルに組み込み、その基本特性やシステム運用における評価を行うとともに、今までの研究開発で得られた貴金属触媒の場合と比較を行う。以上を通じて、貴金属触媒に適したセル構造やシステム運用の提案に加え、非貴金属系触媒特有の付加条件の確認を行うとともに、付加条件がある場合は合わせて提案を行う。なお、ここで用いる予定の水素貯蔵のエネルギー供給システムは、水電解セルや燃料電池の特性を考慮して定常状態に近い非常にゆっくりとした変動操作が可能なシステムとして理研独自に開発したものである（基本特許は国際出願済）。

5. 特許・研究発表等

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2019.08.09	PCT/JP2019/31640	水電気分解法及び装置、並びに水電気分解の駆動電位の決定方法	理化学研究所

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019.09	第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	水素貯蔵エネルギーシステムから見た水電解セル開発の課題	小池佳代、他
2	2019.09	東京大学 GSI 公開講座	水素貯蔵エネルギーシステムと固体高分子型水電解セルの研究開発	小池佳代、他
3	2019.09	The 4th Solar Fuel Material Workshop	Identification of the Stable Potential Window of γ -MnO ₂ for Long Term Acid Electrolysis	Ailong Li, 他
4	2019.09	The 4th Solar Fuel Material Workshop	Development of earth-abundant OER catalyst in Acidic	Shuang Kong, 他

			Conditions	
5	2019.10	RIKEN– NCTU Symposium on Physical and Chemical Science	Towards an Everlasting Electrocatalyst: Identification of the Stable Potential Window for γ - MnO ₂ in Acid	Ailong Li, 他
6	2019.10	Research and Development 20 for Clean Energy Technologies	Research and Development 20 for clean energy technologies	松本紘
7	2019.11	3rd International Solar Fuels Conference / International Conference on Artificial Photosynthesis 2019	Over 8000-hour Stability of Oxygen Evolution from MnO ₂ Electrocatalyst	Ailong Li, 他
8	2019.11	3rd International Solar Fuels Conference / International Conference on Artificial Photosynthesis 2019	Challenging Water Oxidation at 1000 mA cm ⁻² in Acid with Manganese- Based Oxides	Shuang Kong, 他

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：①-3を参照

課題番号：①－４

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／
水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／
アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水電解装置の開発」

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、
学校法人早稲田大学、国立大学法人北海道大学大学院工学研究院

1. 研究開発概要

アニオン交換膜（AEM）水電解装置において、電解質内物質移動を含む電解機構を解明し、かつ電極触媒の性能発現を図ることで、電解装置の高効率化を図る。さらに、劣化機構の高度解析、電解槽および補機類の劣化機構、劣化評価法に関する共通的解析を行い、耐久性向上へフィードバックする。また補機を含めたシステム全体のコストを詳細に検討し、精度の高いコスト見通しと低コスト化への課題を明らかにする。

具体的検討実施項目は、下記のとおりである。

1. アニオン交換膜（AEM）水電解装置の高効率化（電解機構の解明含む）
 - 1-1. 電解機構の解明および電解性能の改善
 - 1-2. 水素発生カソード触媒層開発
 - 1-3. 酸素発生アノード触媒層開発
 - 1-4. アノード触媒層気泡離脱挙動解析
2. アニオン交換膜（AEM）水電解装置の耐久性評価（変動電力による影響含む）
 - 2-1. 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価
 - 2-2. 構成部材の耐食性評価および防食技術開発
3. 水素製造コスト評価（補機を含めて全体コスト）
 - 3-1. 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価

2. 研究開発目標（設定の理由も含め）

1. アニオン交換膜（AEM）水電解装置の高効率化
 - 1-1. 電解機構の解明および電解性能の改善（担当：産業技術総合研究所）

触媒層、給集電体（ガス拡散層）、セパレータ（複極板）を中心にセル構成部材の材料、構造、作成方法について種々の検討を行うことで、電解性能の改善を図りつつ、セル設計指針を獲得するとともに、電解機構の解明を目指す。

【2021年3月目標】

- ・（無電解メッキなど）新手法による触媒層作製高度化による電解性能改善
- ・ セル構成部材最適化による性能改善
 - 小型単セルにおける電解電圧 1.90V 以下@1A/cm²

【目標設定理由】

事業開始前の電解性能がおおよそ電解電圧 1.95V@1A/cm² であり、最終目標(2023年3月)をプ

ロトン交換膜 (PEM) 水電解装置と同等の性能 (電解電圧 1.80V 以下@1A/cm²) に設定した。中間時点でのマイルストーンとして本目標値 (電解電圧 1.90V 以下@1A/cm²) を設定した。

1-2. 水素発生カソード触媒層開発 (担当: 早稲田大学)

耐久性の低いアイオノマーを用いる既存の AEM 上触媒層形成法に代替するため、より高い密着性、均一性、構造制御性を有する AEM 上触媒層を作製可能な新規プロセスを確立することを目標とする。ここでは具体的に、還元剤の酸化反応による電子供給により不導体上への金属薄膜形成を可能とする無電解析出プロセスを応用し、水素発生カソード触媒層として機能する Ni 系合金を AEM 上に析出させる新規技術を開発することを目標としている。

【2021 年 3 月目標】

- ・ 微細多孔性導電層の形成方法の確立

【目標設定理由】

形成する触媒層が装置内で高い触媒性能を示すためには、触媒活性に適した組成を有していることに加え、高い比表面積を有することや、膜が高い透過性を保てるような構造を有することも重要となる。こうした構造を形成することが高効率な水素製造装置部材開発に不可欠であるため、本目標を設定した。

1-3. 酸素発生アノード触媒層開発 (担当: 早稲田大学)

水素発生カソード触媒層開発の場合と同様、新規触媒層形成プロセスの確立を目指す。ここでは特に、無電解析出プロセスと電解析出プロセスを複合的に応用し、酸素発生アノード触媒層として機能する合金種を、AEM をはじめとする水電解装置部材の表面に形成する新規技術を開発することを目標とする。

【2021 年 3 月目標】

- ・ 組成制御、構造制御の方法論検討 (遷移金属酸化物の選定及び電解浴の設計)

【目標設定理由】

触媒層形成のための電気化学プロセスの初期製法が確立された以後の課題であり、カソード触媒層開発の場合と目標設定は類似する。特に GDL を基材とすることを念頭に置く場合、構造制御についてはカソードの場合と異なる戦略が要求されるため、特にその点を強調した目標設定とした。

1-4. アノード触媒層気泡離脱挙動解析 (担当: 北海道大学)

プローブ顕微鏡を使い、固気液 (電極/酸素ガス/電解液) 三相界面での気泡成長から離脱過程をナノレベルでリアルタイムに観察し、気泡離脱挙動や表面電位との関係を明らかにすることで、気泡がもたらす電解過電圧の影響を明らかにする。

【2021 年 3 月目標】

- ・ 気泡発生 of 動的挙動評価、および表面電位分布測定と影響評価

【目標設定理由】

AEM 水電解における膜電極接合体 (MEA) 界面におけるナノスケールでの気泡発生挙動や表面電位と気泡成長との関係が明らかでなく、ナノバブルがもたらすオーム損や過電圧等への影響

評価は未だ報告例がないため、その観察や定量的評価に目標を設定した。

2. アニオン交換膜（AEM）水電解装置の耐久性評価

2-1. 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価（担当：産業技術総合研究所）

高耐久性を有しかつ変動入力・起動停止に対してロバストな水電解装置の開発を目指し、アニオン交換膜（AEM）水電解の長期運転に伴う劣化特性評価とその原因の特定、および劣化抑制技術の開発を行う。

【2021年3月目標】

- 一定負荷試験および変動負荷試験における劣化評価と分析
→ 劣化メカニズムの解明と設計指針原案の策定

【目標設定理由】

AEM 水電解装置の劣化挙動評価及びその原因分析は未実施であったため、その評価を行うことを主要な目標とし、それを元に設計指針の原案を作成するものとした。

2-2. 構成部材の耐食性評価および防食技術開発（担当：北海道大学）

AEM 水電解における電解液として想定されるアルカリ性溶液中において金属材料の耐食性を電気化学測定により評価し、汎用の鉄鋼材料で耐食性が保てない場合には金属材料上に耐食性被覆を施し、低コストで耐食性に富む金属材料を見出す。

【2021年3月目標】

- 60°C以上の温度での材料の耐食性評価（腐食速度 0.05mm/year 以下を実現する材料特定）

【目標設定理由】

実験温度の 60°C は、AEM 電解の予想される操業温度が 50°C～60°C であるためより厳しい条件を採用した。腐食速度の 0.05mm/y は、同じ環境における参照データが無い場合、100°C における濃厚 NaOH 溶液の腐食速度から 60°C における腐食速度を概算し（0.1mm/y）その半分の腐食速度を目標値とした。

3. 水素製造コスト評価

3-1. 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価（担当：産業技術総合研究所）

材料費、製造コスト、部品コストを積み上げ、システム全体の装置コスト（¥/kW）の見積もりを行う。さらに（kWh/Nm³-H₂）も加味した水素製造コスト（¥/Nm³-H₂）をより精密に見通し、事業目標（30円/Nm³）到達に向けた課題を明らかにする。

【2021年3月目標】

- 小型（～10kW）AEM 水電解装置のコスト見積

【目標設定理由】

AEM 水電解装置は PEM 水電解装置の代替装置として導入されることが有望視される。現在国内において販売される PEM 水電解装置は 10kW 以下の装置が多いので、まず小型装置のコスト評価に取り組むこととした。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

(1) アニオン交換膜（AEM）水電解装置の高効率化

(1-1) 電解機構の解明および電解性能の改善

アノードについて、多孔質移動体（PTL）上に触媒を担持する従来の多孔電極構造（PTE）を維持しつつ、触媒塗工方法を再度検討することで、触媒層構造の最適化を図った。図1に示すようにアノード PTE 電極は、PTL 上に触媒をスプレー塗工した後、乾燥・焼成を経て作製するが、このスプレー塗工方法について、対象物となる PTL とスプレーの距離や一度にスプレーするインク量などを最適化することで、数 nm の孔径を有する緻密な触媒層が PTL 表面に形成されることを見出した。塗工法を改良して作製した PTE をアノードに適用すると、図 2 に示すように、従来塗工法の場合に比べて電解性能が改善し、 $1\text{A}/\text{cm}^2$ における電圧は約 $80\sim 90\text{mV}$ 低下させることができた。その結果中間目標値 (1.90V 以下@ $1\text{A}/\text{cm}^2$) を約 1 年前倒しで達成することができ、かつ最終目標中間目標 (1.80V 以下@ $1\text{A}/\text{cm}^2$) 実現への足掛かりを得た。

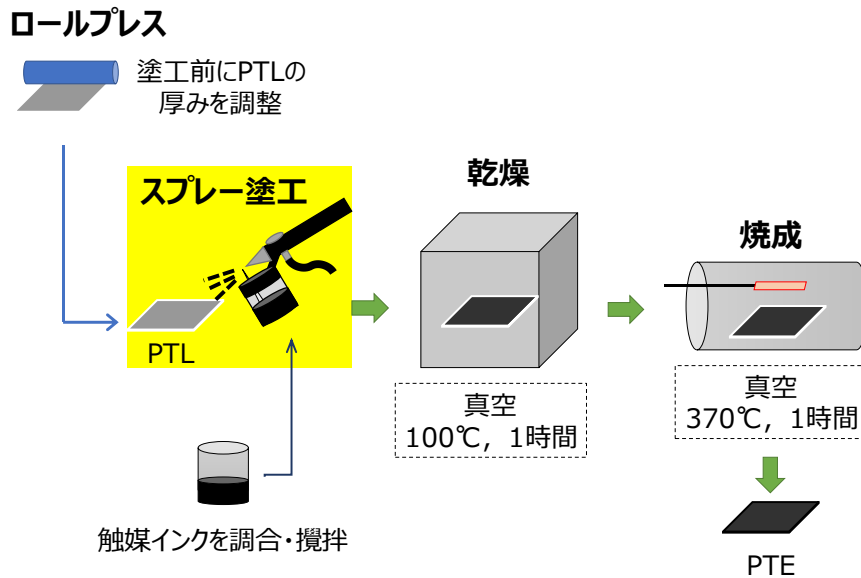


図1 アノード電極(PTE)作製工程

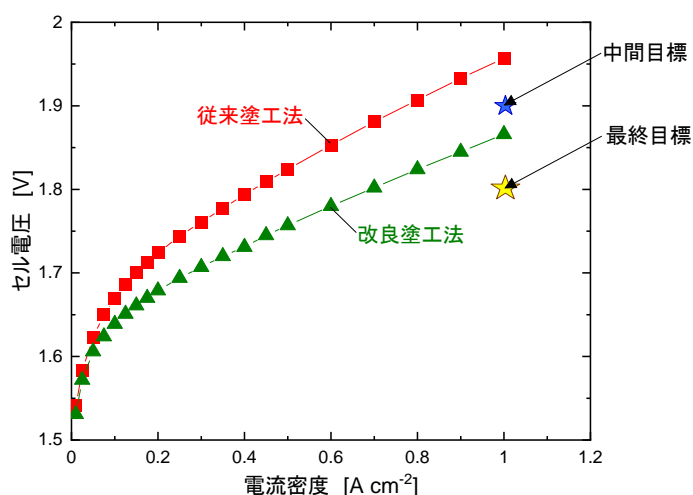


図2 AEM水電解における電流－電圧特性

(1-2) 水素発生カソード触媒層開発

計算化学的な材料設計手法も利用しながら効率的なプロセス開発が可能になるよう検討を進めた。その結果、無電解析出の駆動力となる還元剤反応を促進するための触媒核付与のプロセスをAEM用に最適化することによってNiP、NiCoP、Cuなど種々の金属層または合金層のAEM上への直接形成が可能となることを確認した。特にその触媒核付与の最適化では、AEM膜表面の分子構造レベルからの検討を行い、従来適用されてきたプロセスの中で膜表面を被毒し触媒核形成反応を阻害する成分を明らかにすると共に、それを用いない形でプロセスの最適化を行い、新規処理液を開発した。また、このプロセスにより形成した触媒層は塗布型等既往の手法で得られるものよりも高い密着性を示すことも示唆された。更に、無電解浴中における析出金属前駆体イオン濃度（Ni塩濃度）を調整することで析出速度を調節し、微細多孔性構造についても構築できた。これらの結果に基づきAEM上の高密着金属触媒層の形成を可能にする製法を確立し当初の目標を達成した。

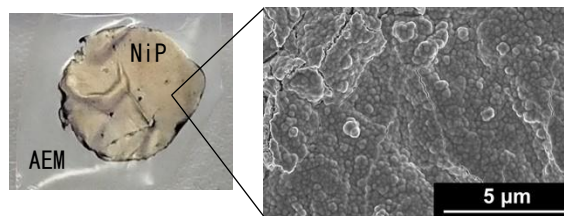


図3 無電解析出により形成したAEM表面上NiP触媒層

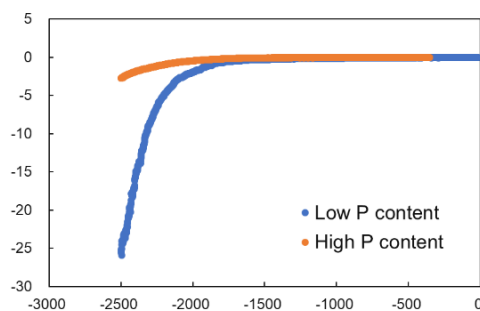


図4 NiP膜の触媒活性の組成依存性

(1-3) 酸素発生アノード触媒層開発

カソード触媒層開発において確立した AEM 膜表面上への無電解析出プロセスがこの場合にも有用であることが確かめられた。即ち、NiFe をはじめとする Fe 系遷移金属合金酸化物触媒層を積層可能とした。また AEM 以外の部材としてガス拡散電極層 (GDL) への直接触媒形成も新たに視野に入れ、電解析出プロセスを用いて NiFe 層の GDL 上への直接形成を実証すると共に、その触媒性能の確認も達成した。同時に組成の浴条件依存性についても観察した。この成果とカソード触媒層の研究結果に基づいて水電解操作による触媒性能を系統的に評価することで組成制御、構造制御の指針を立案した。

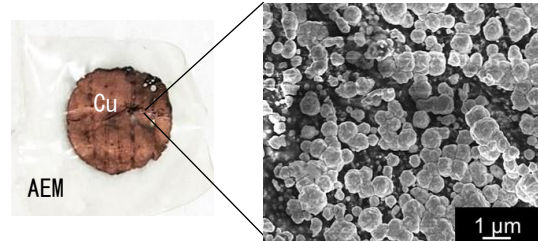


図5 無電解析出により形成した AEM 表面上 Cu 導通層. この層上に NiFe を形成可能

(1-4) アノード触媒層気泡離脱挙動解析

(2- AFM 観察用水電解セルを構築することでナノバブルの観察を可能とした。図 6 のようなセル開発に加え、AFM 装置室の空調管理や電極作成を工夫することで、観察表面が観察範囲から移動する現象 (ドリフト現象) を長時間に渡り抑制でき、そのために高速 AFM 観察も行えた。その観察では (図 7 に示す)、カーボン基板上にカソード電流を流すと電解により発生した水素ナノバブルが比較的均一に発生することが観察された。得られた画像を解析するとナノバブルの大きさは直径 100~200 nm、高さ 20 nm 程度の扁平状であった。このように電解中 (低電流密度) に発生するナノバブルの核発生から成長過程に至る動的挙動の観察に成功し、ナノバブル同士の会合や、電極からの離脱挙動をリアルタイムで観察することを達成した。今後は、ケルビンプローブ顕微鏡を活用した電極表面電位の測定を行い、ナノバブルの気泡成長による動的挙動と表

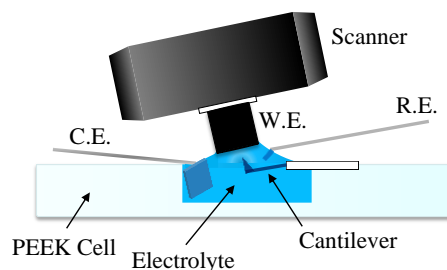
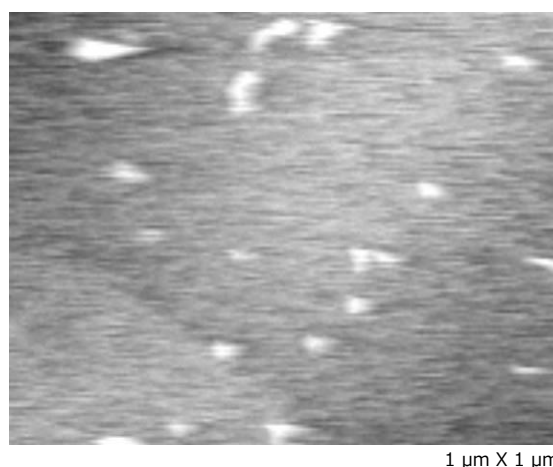


図 6 AFM 観察用水電解セル

高速AFMによるH₂ガス発生過程

定電流電解中のガス発生様子



- バブルサイズ
幅: 100 ~ 200 nm,
高さ: 20 nm



- 離脱・会合サイズ
幅 約100 nm,
高さ 約10 nm

図 7 高速 AFM による H₂ ガス発生過程

面電位との関係を今年度中に明らかにする。

(2) アニオン交換膜 (AEM) 水電解装置の耐久性評価

(2-1) 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価

表 1 に示すセル仕様と運転条件のもと、25cm² の単セルを用いた 100～200 時間の一定負荷連続電解運転を複数回行った、その結果を図 8 に示す。運転初期 10 時間程度は電解電圧の上昇がみられるが、その後はむしろ電解電圧は漸減傾向にあることが分かる。これは主に膜抵抗から成るセル抵抗が漸減傾向にあるためである。セル抵抗の低減は電解反応により OH⁻イオンが膜中に常に供給されるため、膜中 OH⁻イオン濃度が徐々に増加するためであると考えられる。一方で膜や触媒性能の低下や腐食による抵抗増大などはこの時間内では観測されなかった。この試験に加えて、変動負荷による電解試験を 5 時間程度行ったがここでも電解性能の劣化は確認できなかった。結果として、劣化挙動の観察には至らなかったが、本セルの初期安定性を確認することができたことは大きな一歩ではある。今後劣化挙動を観察するため、評価プロトコルの見直しを進め、今年度中に劣化メカニズムの解明と設計指針原案の策定まで至る予定である。

表 1 連続運転試験におけるセル仕様と運転条件

		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
試験時間		100 h	100 h	200 h	100 h
電解質膜		A201	A201	A201	A201
アノード (PTE)	CuCoOx (mg/cm ²)	8.5	9.6	9.7	8.8
	セパレータ	Ti (Pt メッキ)	Ti (Pt メッキ)	SUS	SUS
カソード (CCM)	Pt/C (mg _{pt} /cm ²)	1.7	1.7	1.6	1.8
	セパレータ	Carbon	Carbon	Carbon	Carbon
電流密度		0.5 A/cm ²			
運転温度		50 °C			
電解液		K ₂ CO ₃ 10wt% (pH11.8), 20mL/min			

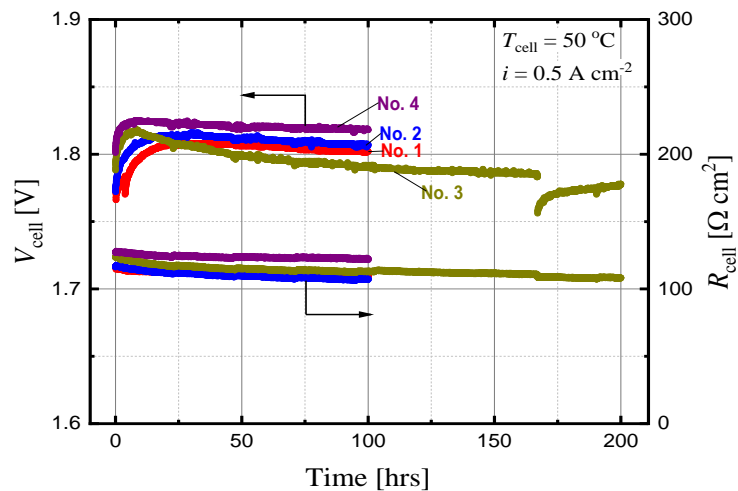


図8 連続運転試験におけるセル仕様と運転条件

(2-2) 構成部材の耐食性評価および防食技術開発

pH=12, 13 の NaOH 水溶液に対する SUS304L の耐食性を電気化学測定により評価した。アノードにおける 1V (vs. Hg/Hg0) での電流値を比較した結果、pH 12 では 1 mAcm^{-2} 程度であるが、pH 13 では、 10 mAcm^{-2} 以上の電流が流れ、気体発生反応が確認できた。pH 13 の NaOH 水溶液中で 1V で 5 時間および 20 時間の定電位電解を行った後の表面の AFM

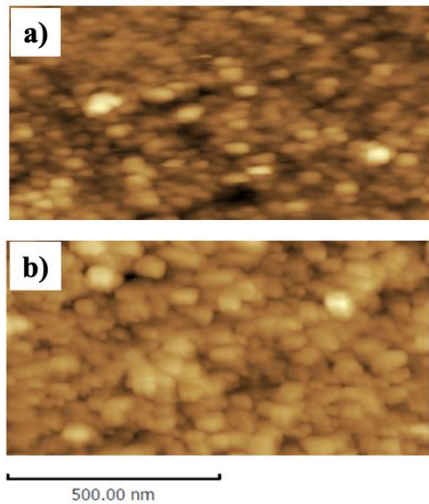


図9 低電位電解後の SUS304L 表面 AFM 画像. (a)5 時間後, (b)20 時間後.

像を図9の a) および b) に示す。この図より電解時間が長くなるのに伴い、表面の凹凸が大きくなっていることがわかった。この結果より、アノードで起こる反応は、酸素発生反応のほかに、SUS304L を構成する金属元素の溶解や溶解した成分が酸化物や水酸化物として表面に皮膜を形成して存在しているものと考えられた。表面の変化が電解中に継続的に起こり続けるのかを確認するために長時間の電解によって調べることにした。

現在、1000 時間の電解を想定した耐食性を評価中であり、今年中に腐食速度を算出予定。他の電解液候補である K_2CO_3 溶液中においても今年度中に耐食性を明らかにできる見込み。

(3) 水素製造コスト評価

(3-1) 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価

AEM 水電解装置をすでに市販しているドイツ・Enapter 社の製品について、性能、仕様、価格などを調査し、同規模の PEM 水電解装置と比較して、性能差がほぼなく、補機類の簡素化などにより半分程度の価格で販売されていることを確認した。また、米国 NREL における PEM 水電解装置コストの解析例を詳細に分析することで、コスト解析手法を会得した。その手法を AEM 水電解に展開することで、すでに PEM に比べたコスト削減の可能性を見出している。さらに解析を進め、今年度中に中間目標である小型装置コスト見積を完了する予定。

3.2 成果の意義

(1) アニオン交換膜（AEM）水電解装置の高効率化

(1-1) 電解機構の解明および電解性能の改善

アノード電極構造の最適化のみによって中間目標値を達成するとともに、参考値とした PEM 水電解の性能に対してセル温度をそろえるとほぼ同等近くの性能に近づけることができた。まだ伸びしろはあると思われ、AEM 水電解装置の高いポテンシャルを示すことができたと考える。

(1-2) 水素発生カソード触媒層開発

本開発を通して確立された新規な無電解析出プロセスによって、既往の触媒層が抱えていた密着性の課題が改善され、AEM 利用水素製造装置の安定運用に向けた技術開発が促進すると期待される。本開発手法は、既往のプロセスとして広く知られるアニオン官能基末端を有する不導体膜上の無電解析出法とは大きく異なることを指摘しておきたい。即ち、従来手法では実現困難なカチオン官能基末端を有する AEM 上の膜形成プロセスを提案しているという点で本研究の意義も高く、電気化学プロセスとしての波及効果も高い手法の開発に成功したと言える。

(1-3) 酸素発生アノード触媒層開発

水素発生カソード触媒層の場合と同様の意義に言及することが可能である。特に本開発では AEM 上のみならず、GDL 上への触媒層形成にも成功しておりその触媒性能の有無も評価できているため、安定且つ高効率な AEM 水素製造装置運用につながる部材開発の新たなアプローチの有効性を確認したという意義も有する。さらに、電気化学プロセスは目的に応じた溶液組成などの形成条件が一旦確立されれば、その特長である高い再現性、生産性を活かすことができる。従って、本研究開発を通して AEM や GDL に対する電気化学プロセスの適用可能性が示されたことは、即、AEM 装置の生産性向上をも意味することになると期待でき、本開発の成果はそうした意義も高いと言える。

(1-4) アノード触媒層気泡離脱挙動解析

未だ報告例がなかった電解中のナノバブルの動的挙動を捉えたことは、とてもインパクトがある。直接観察により、ナノバブルによる真の被覆率を算出することができ、また、バブル発生にともなう触媒脱離の問題にまで議論できる可能性を得た。これらの結果から、今までの経験則に基づいた装置開発ではなく、実用面に即したナノバブルによるオーム損（IR ド

ロップ)を議論することで、効果的な MEA やガス拡散層開発への発展が期待できる。

(2) アニオン交換膜 (AEM) 水電解装置の耐久性評価

(2-1) 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価

AEM 水電解運転における 100-200 時間の一定負荷連続運転や数時間の変動負荷試験の結果、ほぼ電解性能の劣化は見られず、現行セルの初期安定性を確認できたことは大きな一歩であると考えられる。すなわち現行セルの構造や使用材料を大きく改変することなく、高耐久性を実現できる可能性を見出したと言える。

(2-2) 構成部材の耐食性評価および防食技術開発

pH=13 の NaOH 溶液中における 1000 時間電解までの腐食量を調べる事で、10000 時間の電解における腐食量を予想することができる。

(3) 水素製造コスト評価

(3-1) 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価

PEM 水電解装置におけるコスト成分が明らかになり、AEM 水電解装置との材料およびシステム構成の違いから高い精度のコスト見積が可能になる見通しを得た。

3.3 成果の最終目標の達成可能性

(1) アニオン交換膜 (AEM) 水電解装置の高効率化

(1-1) 電解機構の解明および電解性能の改善

過電圧が大きいと予想されるアノード電極構造については、その設計指針を獲得することができたため、さらに触媒材料、電解液の最適化をさらに進めることで、最終目標の達成は十分可能であると見込んでいる。

(1-2) 水素発生カソード触媒層開発

最も開発障壁が高いと予想された還元剤酸化反応のための触媒核付与を目的とする前処理プロセスについて、その初期製法がこれまでの開発を通じて確立された。そのため今後の課題は、この初期製法に基づいて pH や析出金属前駆体としての金属イオンの濃度、温度などをはじめとする析出浴条件を調整することによる金属組成、表面形態の制御である。これらについては研究グループ内にも多くの知見を蓄積しており指針も立てやすいことから、今後開発が加速度的に進展すると予想され、最終目標の達成は十分可能である。

(1-3) 酸素発生アノード触媒層開発

初期製法の確立に成功しておりカソード触媒層の開発と同様の状況である。特にアノード触媒層開発に関しては、GDL 上の触媒層形成についても技術萌芽を得ている。今後、北大の高速 AFM 研究結果を参考にし、また、産総研の電解効率に関する研究結果をフィードバックさせて、両極の触媒層組成の最適化研究が加速し、AEM 水電解装置の高効率化に寄与することが期待される。これらに基づき、最終目標の達成は十分可能と考えている。

(1-4) アノード触媒層気泡離脱挙動解析

プローブ顕微鏡を活用したナノバブル観察に関する技術を取得することができた。今後、

ケルビンプローブ顕微鏡を活用することで表面電位測定を遂行し、最終目標を確実に達成する見込みである。

(2) アニオン交換膜 (AEM) 水電解装置の耐久性評価

(2-1) 電解セル耐久性および変動負荷対応性評価

外部機関が推奨する加速試験プロトコルを適宜取り込みつつ、一定負荷および変動負荷試験を引き続き推進することによって、AEM 水電解装置用の評価プロトコルを確立できると見込んでいる。

(2-2) 構成部材の耐食性評価および防食技術開発

電解条件によって溶液中に溶解する成分、皮膜を形成する成分が解明しつつあり、この知見をもとに最適な表面を設計する事で目標値を達成できる見込みである。

(3) 水素製造コスト評価

(3-1) 水電解装置コストおよび水素製造コスト評価

AEM 水電解装置のシステム構成および製造過程は PEM 水電解装置に類似しているため、PEM 水電解におけるコストデータを参照しつつコスト見積をすることで、装置コストおよび水素製造価格を高精度で算出できると考えている。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

AEM 水電解装置については、本事業開始時に比べると社会的認知度は少しずつ上がってきていると言えるが、まだ十分ではないとも感じている。よって学会、講演会などを通じて、本事業の活動や成果を含め、本装置の有用性をアナウンスすることによって、幅広い分野の方々に広く興味をもってもらうことがいまだに重要な取り組みであると考えている。

ドイツ・Enapter 社は世界に先駆けてすでに小型の AEM 水電解装置を製品化し販売している。2.2kW-0.5Nm³/h と小型であるが、価格は同規模の PEM 水電解装置の半分程度である。同社の装置の電解性能は PEM 水電解装置性能と匹敵するものであり、偶然ではあるが本プロジェクトの最終目標に設定した性能と近い。同社は順調に売り上げを伸ばしている様子で、本プロジェクトでは、同社装置の仕様・性能に目を配りながら、優位性を確保していくことが必要と考えている。具体的には、電解メカニズムや気泡挙動の解析を中心に学術的手法に基づく研究開発を推進し、電極構造、電極作製方法、耐腐食性材料などの分野での知財取得を視野に入れつつ、Enapter 社と同等かそれ以上の性能を持つ装置開発を目指す。

具体的な実用化の道筋を考えると、従来技術としてはアルカリ水電解と PEM 水電解があるが、AEM 水電解は当面 PEM 水電解の代替技術として導入されていく可能性が高い。AEM 水電解装置は PEM 水電解装置と比較して、電解液の循環機構や水素精製ラインを簡素化できるメリットがあり、このメリットを発揮するには、小型装置がより有利である。また、PEM 水電解

装置のマーケットも国内では 10kW 以下の装置が主流であり、この規模の装置での実用化を見据えて、PEM 水電解装置と対等な電解性能を発揮しつつ、コスト優位性を確保できる水電解装置システムの開発を進めていく予定である。

最近 AEM 水電解技術について実施者（産総研）に国内企業数社からの引き合いがあり、すでに秘密保持契約を締結した案件もある。具体的活動については公にできないものの、徐々に本装置に係るプレーヤーが国内においても増える可能性がある。PEM 水電解装置に比べても触媒材料や電解質膜の選択肢はむしろ広いとも言えるため、これまで水電解ビジネスに関わってこなかった事業者にも参入の機会はあるのではないかと考えている。

5. 特許・研究発表等

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2020. 07. 31	特願 2020-129873	水電解装置のアノード電極及びその製造方法	産業技術総合研究所

－研究発表－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019. 03	電気化学会第 86 回大会, 京都	アニオン交換膜水電解におけるアノード触媒材料の検討	井ノ口魁, 伊藤博, 大橋真智, 染矢聡, 宗像鉄雄
2	2019. 06	World Hydrogen Technologies Convention 2019 (WHTC2019), Tokyo, Japan	Catalyst Optimization of Anion Exchange Membrane Electrolysis	伊藤博, 井ノ口魁, 大橋真智, 染矢聡, 宗像鉄雄
3	2019. 06	World Hydrogen Technologies Convention 2019 (WHTC2019), Tokyo, Japan	Hydrogen Gas Bubble Behaviors on Ni Micro-Patterned Electrode during Alkaline Water Electrolysis	T. Fujimura, W. Hikima, Y. Fukunaka, T. Homma
4	2019. 06	2 nd International Conference on Electrolysis. Loen, Norway	Study of design parameters in MEA for AEM electrolysis	大橋真智, 伊藤博, 井ノ口魁, 川口奈月, 染矢聡, 宗像鉄雄

5	2019. 09	表面技術協会第140回講演大会, 福岡	NaOH 溶液中における酸素電極としてのステンレス鋼の挙動	中川卓眞, 松島永佳, 上田幹人, 伊藤博
6	2019. 11	第43回電解技術討論会, 京都	マイクロパターン電極を用いたアルカリ水電解プロセスにおける水素発生反応挙動の解析	藤村樹, 引間稚菜, 國本雅宏, 福中康博, 本間敬之
7	2019. 11	第43回電解技術討論会, 京都	アニオン交換膜水電解におけるアノード電極構造の最適化	大橋真智, 井ノ口魁, 伊藤博, 染矢聡, 宗像鉄雄
8	2019. 11	産総研エネルギー技術シンポジウム2019	高効率水素製造用アニオン交換膜水電解装置の開発	伊藤博
9	2019. 12	熔融塩技術事業化研究会	アニオン交換膜を用いた低コスト・高効率水電解装置開発	伊藤博
10	2020. 03	電気化学会第87回大会, web	アニオン交換膜水電解装置における電解性能向上の取り組み	伊藤博, 井ノ口魁, 大橋真智, 染矢聡, 宗像鉄雄, 王瑞祥, 石田政義
11	2020. 03	表面技術協会第141回講演大会	NaOH 溶液中における定電位電解後の SUS304L 鋼の表面変化	中川卓眞, 松島永佳, 上田幹人, 伊藤博
12	2020. 05	237 th ECS Meeting	Corrosion behavior of SUS 304L steel in high pH NaOH solution	T. Nakagawa, H. Matsushima, M. Ueda, and H. Ito
13	2020. 09	表面技術協会第142回講演大会	高速 AFM による水電解を用いたナノバブルのその場観察	三田摩修, 松島永佳, 上田幹人
14	2020. 09	表面技術協会第142回講演大会	濃厚 K ₂ CO ₃ 溶液中における定電位電解後の SUS304L 表面の解析	中川卓眞, 松島永佳, 上田幹人, 伊藤博
15	2020. 10	PRiME 2020	Corrosion behavior of SUS 304L steel in concentrated K ₂ CO ₃ solution	T. Nakagawa, H. Matsushima, M. Ueda, and H. Ito

16	2020.10	PRiME 2020	Investigation of Anodic Porous Transport Electrode for Anion Exchange Membrane Electrolyzers	王瑞祥, 石田政義, 大橋真智, 伊藤博
----	---------	------------	--	----------------------

－文献発表－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2020.09	Electrochemistry	Corrosion behavior of SUS 304L steel in pH 13 NaOH solution	T. Nakagawa, H. Matsushima, M. Ueda, and H. Ito

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：①－4を参照

課題番号：①－5

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／

水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルの設計開発」

委託先：国立大学法人東京工業大学、[再委託先]株式会社ノリタケカンパニーリミテド（2019年6月から）、地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所

1. 研究開発概要

本事業では、基本目標の達成へ向けて、固体高分子形水電解および固体アルカリ水電解について、変動電源に対する高耐久性・高速応答性、高効率変換を実現するために、高性能・高耐久な材料・セル設計を行う。固体高分子形水電解用の電解質膜では、プロトン伝導性と水素透過阻止性を両立するために、細孔フィリング膜の充填ポリマーおよび多孔質基材（機械特性・膜厚）を選択することにより、水電解に適した特性を示す電解質膜を開発する。固体高分子形水電解用の触媒では、酸素発生極において高電位が印加されるため、担体劣化が起こり、変動電源による電圧変動により劣化が加速される可能性がある。そこで、担体劣化を抜本的に解決し、かつ高表面積・高活性な触媒として、数 nm の金属ナノ粒子を連結させたネットワーク構造を持つ導電担体フリー・Ir 系ナノ粒子連結触媒を開発する。固体アルカリ水電解では、高アルカリ耐久性・高ラジカル耐久性を有する電解質膜開発が必要不可欠である。そこで、本研究グループが発見したアニオン交換膜の分解機構から発案し、その設計指針に従って開発した高耐久な燃料電池用エーテルフリーポリフェニレン系アニオン交換ポリマー・膜を水電解へ応用する。固体アルカリ水電解用の触媒としては、安価で汎用的に用いられる鉄およびアルカリ土類金属を含む複合酸化物触媒、および集電材として用いられる Ni フォームへの卑金属触媒担持により、電解セルへの展開が容易な触媒を開発する。また、電解質膜と触媒を組み合わせた膜電極接合体を用いて水電解セルとしての性能評価を行い、モデルと合わせて性能改善を図る。さらに、セルおよび材料の劣化機構を詳細に解析する。固体高分子形水電解・固体アルカリ水電解について、使い方に応じた材料およびシステム高度化の指針を得る。

2. 研究開発目標（設定の理由も含め）

- ・変動電源に対して高性能・高耐久な固体高分子形および固体アルカリ水電解セルの開発へ向けて、変動電源に対する追随性や耐久性を制限している因子を見出し、変動電源に適した水電解材料および単セルに関する設計指針の原案を策定する。
- ・固体高分子形、固体アルカリ水電解の2つの方式について、変動電源に対して設計・開発した水電解セルの性能評価を行い、各電極・電解質膜に起因する電圧損失を明らかにし、電解特性への影響が大きい電圧損失要因を特定し、電解材料およびセル構造にフィードバックする。
- ・変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムの解明へ向けて、変動電源に対して設計・開発した水電解セルの耐久性試験を行い、電気化学解析および構造解析による劣化機構解析手法を確立する。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

①-1 固体高分子形水電解用電解質膜の研究開発【達成度：○】

固体高分子形水電解用の電解質膜では、プロトン伝導性と水素透過阻止性を両立するために、細孔フィリング膜(図 1)の充填ポリマーおよび多孔質基材(機械特性・膜厚)を選択することにより、水電解に適した特性を示す電解質膜を開発した。片側の電極に水が常に供給されて

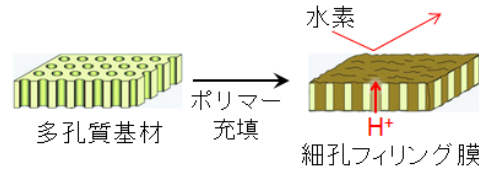


図 1. 細孔フィリング(PF)膜の概念図

湿潤環境となる水電解では、プロトン伝導性より水素透過性が水電解性能へ与える影響が大きいと考え、従来用いられているパーフルオロスルホン酸ポリマーより水素透過性が低い芳香族炭化水素系ポリマー Poly(sulfonated polyether sulfone) (SPES) を厚さ 25 μm のポリエチレン多孔質基材へ充填した細孔フィリング膜を開発した。SPES 充填 PF 膜と SPES キャスト膜、市販 Nafion211 膜の 80℃におけるプロトン伝導度および水素透過係数を図 2 へ示す。SPES 充填 PF 膜は、市販 Nafion 膜より水素透過性を 1/5 まで低減(水素透過阻止性を 5 倍増加)できることを示した。

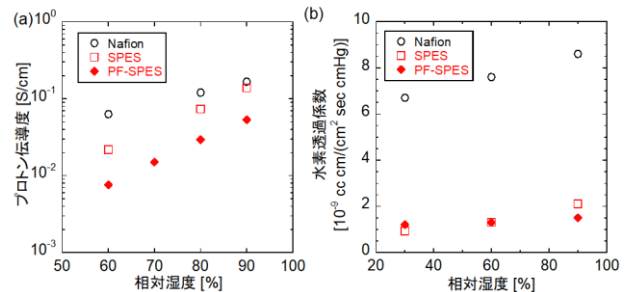


図 2. SPES 充填 PF 膜の(a)プロトン伝導性および(b)水素透過係数

以上の結果より、変動電源に適した固体高分子形水電解用電解質膜の設計指針の原案を、水素透過性を低減した細孔フィリング型プロトン伝導性電解質膜が有効であると策定した。

①-2 固体アルカリ水電解用電解質膜の研究開発【達成度：○】

固体アルカリ水電解では、高アルカリ耐久性・高ラジカル耐久性を有する電解質膜開発が必要不可欠である。そこで、本研究グループが発見したアニオン交換膜の分解機構から発案し、その設計指針に従って開発した高耐久な燃料電池用エーテルフリーポリフェニレン系アニオン交換ポリマー・膜(図 3)を固体アルカリ水電解に応用した。同ポリマー・膜を用いた固体アルカリ水電解セルについて、性能は③-

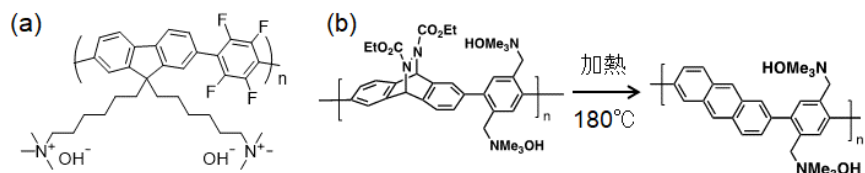


図 3. 高耐久なエーテルフリーポリフェニレン系アニオン交換ポリマー (a) 高分子量ポリフルオレンポリマー(PFOTPh-C₆)、および (b) 加熱変換型ポリフェニレン系ポリマー (TP-V1)

2、耐久性は④-2 で示すように、高性能・高耐久を両立した水電解性能を得ることに成功した。

また、本事業では高分子の機械強度や化学耐久性をさらに向上させるため、3次元ねじれ構造を導入した共重合体、アルカリ耐久性をさらに向上させたポリフルオレン系アニオン伝導膜、側鎖長

が長い 2 次元ジグザグ型のアニオン伝導膜の合成を行った。本研究グループがアニオン交換膜の分解機構を発表し設計指針を明らかにした後、ポリフェニレン系アニオン交換膜の開発に成功しているグループは世界で 4 グループ程度であるが、分子量が大きくなならないポリフェニレン系アニオン交換膜において、10 万を超える重量平均分子量を実現したのは本研究グループのみである。

固体アルカリ水電解用電解質膜の研究開発は⑤と連携して検討を進め、変動電源に適した固体アルカリ水電解用電解質膜の設計指針の原案を、製膜性・機械的強度に優れた高アルカリ耐久性・高ラジカル耐久性を有するポリフェニレン系アニオン交換ポリマーが有効であると策定した。

②-1 Ir 系ナノ粒子連結触媒の研究開発【達成度：○】

固体高分子形水電解用の触媒では、酸素発生極において高電位が印加されるため、担体劣化が起こり、変動電源による電圧変動により劣化が加速される可能性がある。そこで、担体劣化を抜本的に解決し、かつ高表面積・高活性な触媒として、数 nm の金属ナノ粒子を連結させたネットワーク構造を持つ導電担体フリー・Ir 系ナノ粒子連結触媒(図 4)を開発した。

開発した Ir ナノ粒子連結触媒の酸素発生反応(OER)活性を酸溶液(0.1 M HClO₄)中で評価した結果を図 5 に示す。Ir ナノ粒子連結触媒は市販 Ir black 触媒(Alfa Aesar 社製)より 5 倍高い OER 活性を示した。さらに、Ru との合金化による活性向上を図り、組成について検討を行った。Ir_{1.6}Ru₁ ナノ粒子連結触媒は Ir 単体のナノ粒子連結触媒と比較して 3 倍高い OER 活性を示した。

以上の結果より、変動電源に適した固体高分子形水電解用触媒の設計指針の原案を、導電担体フリーかつ高表面積・高活性触媒が有効であると策定した。

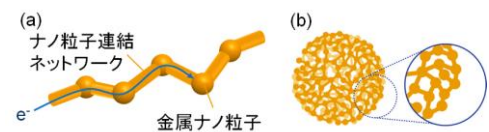


図 4. (a) ナノ粒子を連結した金属ネットワーク構造、および(b) 中空カプセル状 Ir ナノ粒子連結触媒の模式図

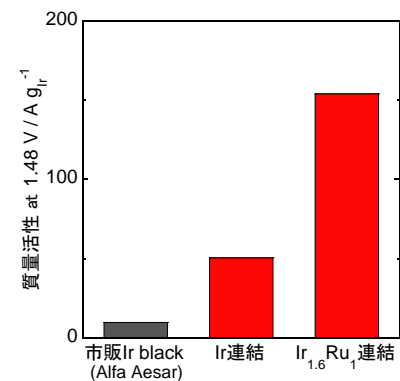


図 5. 酸溶液中における Ir および Ir_{1.6}Ru₁ ナノ粒子連結触媒、市販 Ir black 触媒(Alfa Aesar 社製)の OER 活性

②-2 固体アルカリ水電解用ペロブスカイト・スピネル触媒の研究開発【達成度：○】

固体アルカリ水電解用触媒の脱貴金属化へ向けて、ペロブスカイト・スピネル触媒について研究開発を行った。安価で汎用的に用いられる鉄およびアルカリ土類金属を含む複合酸化物について、溶液中での高い OER 活性を示す触媒の探索を行った。元素組成と結晶構造の系統的な検討を行ったところ、図 6 に示す Orthorhombic 構造を有する

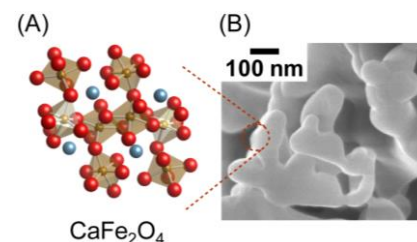


図 6. (A) CaFe₂O₄ の構造. 青: Ca, 茶: Fe, 赤: O 原子; (B) CaFe₂O₄ の SEM 画像.

CaFe₂O₄ が高活性を示すことを見出した。1 M KOH 中での OER 表面比活性を他の鉄系酸化物触媒および標準触媒である IrO₂ と比較した結果を図 7 に示す。CaFe₂O₄ は、他のアルカリ土類金属または希土類を含む鉄系酸化物触媒より遥かに高い活性を示し、また OER の標準触媒である IrO₂ よりも高活性であった。

さらに、OER 領域での電位サイクルによる耐久性試験の結果、CaFe₂O₄ は 100 サイクル後も活性を維持した。またサイクル後も触媒粒子の構造や元素組成に変化がなく、アルカリ中での OER に対する CaFe₂O₄ の高い耐久性が示された。

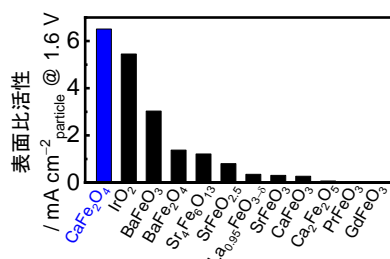


図 7. CaFe₂O₄ と他の鉄系酸化物触媒および IrO₂ の OER 表面比活性の比較。

③-1 高性能固体高分子形水電解セルの開発【達成度：○】

変動電源で求められる特性を考慮して②-1 で開発した高表面積・高活性な導電担体フリー Ir_{1.6}Ru₁ ナノ粒子連結触媒をアノード触媒、Nafion211 膜(厚さ 25 μm)を電解質膜、市販 Pt/C をカソード触媒に用いた水電解セルの水電解性能を図 8 に示す。電解性能評価は、アノードへ純水 10 ml/min を供給し、80°Cで行った。従来研究の標準的な Ir 使用量(1-2 mg/cm²)より少量の Ir 使用量 0.5 mg/cm² で、十分に高い電解特性(2 A/cm² で 1.69 V)が得られた。本事業では、2022 年度の目標として 2 A/cm² において 1.63 V という目標値を設定しているが、現時点で既に 2022 年度の目標に迫る良好な水電解性能が得られた。

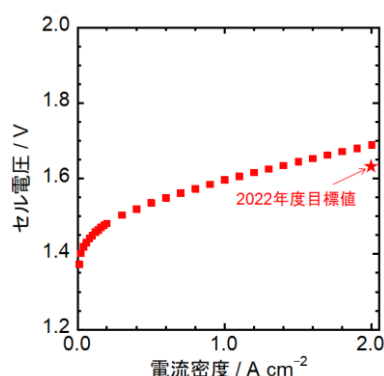


図 8. Ir_{1.6}Ru₁ ナノ粒子連結触媒をアノード触媒に用いた固体高分子形水電解セルの水電解性能

③-2 高性能固体アルカリ水電解セルの開発【達成度：◎】

高耐久なポリフェニレン系アニオン伝導性膜ポリマーである高分子量ポリフルオレンポリマー(図 3a)を用いた固体アルカリ水電解セルを開発し、水電解性能を評価した。側鎖のアルキル鎖長が異なる 3 種類のポリマー(PFOTPh-C_x, x は側鎖アルキル鎖の長さに対応、x = 6, 8, 10)を電解質膜およびアイオノマーに用いて膜電極接合体(MEA)を作製した。アノード触媒には市販 IrO₂、カソード触媒には市販 Pt/C を用いた。

セル温度 80°Cで、1 M KOH 水溶液をアノードに供給した固体アルカリ水電解性能を図 9a に示す。PFOTFPh-Cx を用いた MEA は高い水電解性能を示し、本事業の 2022 年度における最終目標値 (0.6 A cm⁻² で 1.65 V) をほぼ達成した。PFOTFPh-Cx の中では、OH⁻ 伝導性がより高い PFOTFPh-C₆、-C₈ が PFOTFPh-C₁₀ よりも高い性能を示した。

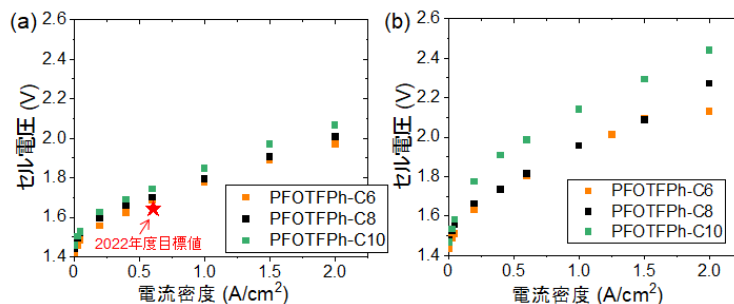


図 9. 高分子量ポリフルオレンポリマー (PFOTFPh-Cx) を用いた固体アルカリ水電解セルの 80°C における水電解性能 (a) 1 M KOH 水溶液、(b) 純水をアノードに供給

さらに、特筆すべきは、図 9b に示す純水をアノードに供給した水電解試験の結果である。1 M KOH 水溶液を供給した場合と比較すると、電解性能は低下するものの、十分に高い水電解性能が得られた。高い OH⁻ 伝導性を有する PFOTFPh-Cx を用いることで、KOH を供給しなくても MEA 内の OH⁻ 伝導が確保され、高い水電解性能を発現したものと考えらえる。

従来は電解質膜の耐久性が低いため、60°C までの短時間でしか作動の報告例がなかった固体アルカリ水電解において、本事業では高耐久なポリフェニレン系アニオン伝導性膜ポリマーを用いることで、固体高分子形水電解と同じ 80°C で安定かつ優れた電解性能を得ることに成功した。④-2 で詳述するように、開発した水電解セルは 80°C における耐久性試験で 120 時間程度性能が維持されており、高性能・高耐久を両立した水電解性能を得ることに成功した。

さらに、固体アルカリ水電解では、アイオノマーに用いるポリフェニレン系アニオン交換ポリマーが触媒金属表面に強固に吸着し、三相界面としての性能が低下する現象が報告されている。主鎖のねじれ構造をさらに強くしたポリフェニレン系アイオノマーとする事で、三相界面での反応が促進されるとの仮説を策定した。

【達成度◎の理由】 高分子量を有するポリフェニレン系アニオン交換ポリマーおよび膜を使用することにより、高耐久性と高性能を両立出来たのは、世界初である。従来の研究は耐久性が無く、最近の研究でも、耐久性と高性能を両立した報告は存在しない。

④-1 固体高分子形水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析【達成度：○】

③-1 で高性能を示した $\text{Ir}_{1.6}\text{Ru}_1$ ナノ粒子連結触媒をアノード触媒、Nafion211 膜を電解質膜に用いた固体高分子形水電解セルについて、耐久性評価として 1 A/cm^2 での定電流保持試験を行った。定電流保持試験中の電圧は、図 10 に示すように緩やかに増加し、性能が低下した。また、初期と 124 時間後のインピーダンス測定により、電解質膜および界面由来の抵抗と、反応由来の抵抗を分離し、劣化機構解析に着手した。現時点までの解析結果より、電解質膜および界面由来の抵抗と、反応由来の抵抗がともに増加していることが明らかとなった。今後さらに解析手法の検討を進め、2020 年度末までに劣化機構解析手法を確立する見込みである。

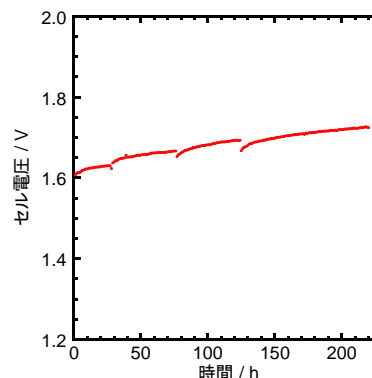


図 10. $\text{Ir}_{1.6}\text{Ru}_1$ ナノ粒子連結触媒をアノード触媒に用いた固体高分子形水電解セルの定電流(1 A/cm^2)保持試験結果

④-2 固体アルカリ水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析【達成度：◎】

③-2 で高性能を示した高分子量ポリフルオレンポリマー(図 3a)を電解質膜およびアイオノマーに用いた固体アルカリ水電解セルについて、耐久性評価として、セル温度 80°C で純水をアノードに供給して 0.2 A/cm^2 の定電流保持試験を行った結果を図 11 に示す。PFOTFPh- C_8 、- C_{10} は 120 時間程度性能が維持された。③-2 で示した高性能と合わせて、高性能・高耐久を両立した水電解特性を得ることに世界で初めて成功した。得られた水電解性能と耐久性の他の研究グループとの比較は 3.2 成果の意義で示す。

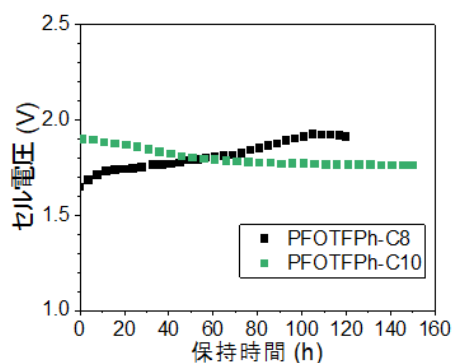


図 11. 高分子量ポリフルオレンポリマー(PFOTFPh-Cx)を用いた固体アルカリ水電解セルの 80°C における定電流(0.2 A/cm^2)保持試験結果(純水供給)

また、加熱変換型ポリマー・TP-V1(図 3b)を用いた固体アルカリ水電解セルを開発し、耐久性評価を行った。はじめに、セル温度 80°C で 1 M KOH 水溶液をアノードに供給して 0.2 A/cm^2 の定電流保持試験を行ったところ、120 時間の運転で電圧は増加せず、120 時間後も水電解性能は初期性能からほとんど変化しなかった。

さらに、変動電圧への耐久性を評価するために電圧サイクル試験を実施した。TP-V1 を用いた固体アルカリ水電解セルでは、1.5-2.0 V の電圧サイクルを 1 万回繰り返したところ、電解性能が大幅に低下した。電圧サイクル試験後の電解質膜の構造変化を FT-IR で評価したところ、官能基(アニオン伝導性の四級アンモニウム基)は劣化していないことが示された。一方で、MEA の表面観察を行ったところ、膜に小さなピンホールが形成していることが確認された。すなわち電圧サイクル中の性能劣化は、電解質膜の機械的強度が低いことに由来すると考えられた。

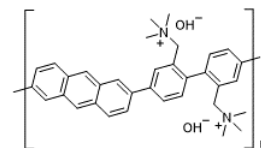


図 12. 機械的強度を改善した加熱変換型ポリフェニレン系ポリマー (TP-V2)

そこで、機械的強度を改善した加熱変換型ポリマーとして、主鎖のフェニル鎖を延長した TP-V2(図 12) を合成した。TP-V2 の機械的強度については⑤で示す。TP-V2 を用いた固体アルカリ水電解セルに対して、1.5-2.2 V の電圧サイクル試験を行った。下限および上限電圧における電流密度は 0.05 と 1.5 $A\ cm^{-2}$ に相当する。TP-V2 では図 13 に示すように 1.5-2.2 V の電圧サイクルを 1 万回繰り返しても水電解性能はほとんど変化しなかった。TP-V1 と同様にサイクル試験後も官能基(アニオン伝導性の四級アンモニウム基)は劣化しておらず、加熱変換型ポリマーが化学的に高耐久であることが示された。また、TP-V1 とは異なりピンホールの形成は確認されず、膜の機械的強度の改善により固体アルカリ水電解セルの高耐久化が可能であることが示された。

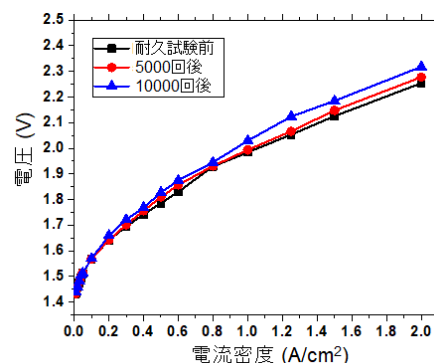


図 13. 加熱変換型ポリフェニレン系ポリマー(TP-V2、図 12)を用いた固体アルカリ水電解セルの電圧サイクル(80°C、1.5-2.2 V)試験結果

以上の結果より、変動電源対応では膜の機械的強度が必要であることを明らかにした。

さらに、水電解は高電圧が印加されるため、電解質ポリマーがラジカルにより酸化されやすい環境である。ラジカルにより水酸基付加が進行するとポリマーが親水化され、電極中のアイオノマー溶出や電解質膜の劣化が課題となる可能性がある。

これらの固体アルカリ水電解セルの耐久性評価・劣化機構解析結果をもとに、耐久性改善に資する材料・セル高度化指針を、機械的強度が高い電解質膜、およびさらに高いラジカル耐久性を有する電解質ポリマー・膜が有効であると策定した。高度化指針に対する電解質ポリマー・膜の開発成果については⑤に示す。

【達成度◎の理由】 今までは高耐久なアニオン交換膜が存在しなかったため、固体アルカリ水電解で変動電源での耐久性を考察できたのは本プロジェクトが世界初であり、膜の化学的耐性だけでなく、機械的強度も重要となることを初めて明らかにした。

⑤ 実セルにおける電解性能・耐久性評価結果を反映した固体アルカリ水電解用の電解質ポリマー・膜の高度化【達成度：○】

③-2、④-2 で示したように、本事業では本研究グループが開発した高耐久なエーテルフリ

ーポリフェニレン系アニオン交換ポリマー・膜を用いて、高性能・高耐久を両立した固体アルカリ水電解セルの開発に成功した。さらに、固体アルカリ水電解セルの電解性能・耐久性評価より、以下の3点について、固体アルカリ水電解用の電解質ポリマー・膜の特性改善が必要であることが明らかとなったため、高度化を図った。

(1) さらに高いラジカル耐性

高電圧が印加される水電解では、ラジカル耐性が高いポリフェニレン系アニオン交換膜であっても、ラジカルによるベンゼン環の酸化が起こることが懸念される。酸化反応の活性化障壁を高くする分子設計により酸化反応を抑制できるとの仮説のもと量子化学計算を行い、適切な部位にフッ素基を導入したポリフェニレン系ポリマーは酸化反応の活性化障壁が高くなるだけでなく、ラジカル付加体の安定化が起こり、高い酸化耐久性が期待されることが明らかとなった。実際に主鎖骨格の適切な部位にフッ素基を導入したポリマーに対して、酸化耐性の評価で用いられるフェントン試験を実施したところ、従来の60℃より高い80℃でのフェントン試験に対しても高耐久であることを示した。なお、従来のアニオン伝導性ポリマーは60℃のフェントン試験で分解する。本研究グループが開発したアルカリ耐久性の高いポリフェニレン系ポリマーであっても、フッ素基を導入していないポリマーは80℃で主鎖の変性が起こり、水に可溶化するなど溶解性が変化する。ラジカルによるベンゼン環の酸化を抑制するために、量子化学計算より分子設計し、ベンゼン環の酸化を抑制する分子構造を提案したことは世界で初めてである。

(2) 機械特性

④-2で示したように、加熱変換型ポリフェニレン系ポリマーを用いた変動電源模擬試験(電圧サイクル試験)に対して、膜の機械的強度が劣るポリマーでピンホール形成による性能低下が観察され、変動電源対応では膜の機械的強度が必要であることが明らかとなった。機械強度の改善方法としては、ポリマーの分子量の向上や主鎖の絡み合い促進が挙げられる。加熱変換型ポリマーについては、主鎖のフェニル鎖を延長して回転自由度を付与したTP-V2(図12)を合成した。引張試験によりTP-V1とTP-V2の機械的強度を評価した結果、TP-V2では機械的強度が約2倍に増加した。機械的強度が改善した加熱変換型ポリマーTP-V2を用いた固体アルカリ水電解セルは、④-2で示したように電圧変動サイクル試験に対して高耐久性を示した。

(3) 触媒の活性表面積の維持(吸着抑制)

固体アルカリ水電解では、ポリフェニレン系アニオン交換ポリマーが触媒金属表面に強固に吸着し、三相界面としての性能が低下する現象が報告されている。主鎖のねじれ構造をさらに強くしたポリフェニレン系アイオノマーとする事で、三相界面での反応が促進されるとの仮説を策定した。

⑥ 固体アルカリ水電解用の卑金属触媒の開発【達成度：○】

本事業では固体アルカリ水電解の触媒として、②-2で示したようにペロブスカイト・スピネル構造を有する複合酸化物触媒の研究開発を行っているが、固体アルカリ水電解セルへの

展開も考慮して、固体アルカリ水電解に適した卑金属触媒の開発も行った。

具体的には、卑金属触媒の中で酸素発生活性が高いことが知られているニッケル(Ni)触媒に着目し、集電体として用いられる Ni フォームへの接着性が良い卑金属触媒担持により、電解セルへの展開が容易な高活性触媒を開発した。

開発した Ni フォーム担持卑金属触媒をアノード触媒として用い、高耐久ポリフェニレン系アニオン伝導性ポリマーを電解質として用いた MEA では、貴金属触媒を用いていないにもかかわらず、高い電解性能が得られた。

以上の結果より、変動電源に適した固体アルカリ水電解用卑金属触媒の設計指針の原案を、集電体として用いられる Ni フォームへの接着性の良い高活性触媒が有効であると策定とした。

なお、今後知財化を進める成果に係る情報に関しては、非公開情報として別途報告している。

3.2 成果の意義

・固体アルカリ水電解は、セパレータ・集電体などの大幅なコスト低減(電解装置価格で約 30 万円/Nm³-H₂/h の低減)が見込まれ期待される技術である。従来は高耐久な電解質膜が存在しないことが課題であった。本事業では、本研究グループが独自に開発した高耐久なポリフェニレン系アニオン伝導性ポリマーを固体アルカリ水電解セルへ応用し、耐久性と高性能を両立する固体アルカリ水電解に世界で初めて成功しており、特に耐久性の観点で優位性がある。

ごく最近、ロスアラモスの研究グループより、電解質膜として高耐久なエーテルフリー芳香族アニオン伝導性ポリマー、電極内のアイオノマーには耐久性が低い脂肪族アニオン伝導性ポリマーを用いた固体アルカリ水電解において高い水電解性能が報告された。しかし、この系は水供給の一定電流保持試験(200 mA/cm², 60°Cまたは 85°C)において 10-20 時間程度で性能の劇的な低下が報告されている。本事業では高分子量のポリフェニレン系アニオン交換ポリマーを用いることにより、同様の水供給・一定電流保持条件(200 mA/cm², 80°C)で 120 時間程度性能が維持されており、高い優位性がある。本事業ではさらに、高耐久性を維持したまま、電極内の三相界面に有利な三次元ねじれ構造などのポリマー設計を行い、高性能化を図る。

なお、その他の固体アルカリ水電解性能の研究では、耐久性が低い脂肪族ポリマーが電解質膜に用いられている例がほとんどであり、高耐久なエーテルフリー芳香族ポリマーが用いられている系では電解性能が低い。すなわち、高性能・高耐久な固体アルカリ水電解は両立されていない。

従来は電解質膜の耐久性が低いため、60°Cまでの短時間でしか作動の報告例がなかった固体アルカリ水電解において、固体高分子形水電解と同じ 80°Cで 100 時間にわたり高耐久性を示す電解質膜・セルの開発に成功したことは、システムが実用的な段階に進んだ事になり、意義が大きいものと考えている。

・固体高分子形水電解では、担体由来の劣化がなく、かつ最終的に Ir 使用量を 1/10 へ低減させることを目的に、Ir 系ナノ粒子連結触媒を開発した。Ir ナノ粒子連結触媒を用いた固体高分子水電解セルでは、現在までに、従来の 1/3~1/4 程度の使用量で同等の水電解性能が得られて

いる。今後の更なる触媒開発により、最終目標としての1/10への低減が実現すれば電解装置価格で約10万円/Nm³-H₂/hの低減が可能となる(現時点で8万円/Nm³-H₂/hの低減に相当する)。

3.3 成果の最終目標の達成可能性

・プラント引渡し価格30円/Nm³に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立へ向けて、以下を実施する。固体アルカリ水電解では本事業で開発する高耐久なアニオン伝導性膜により初めてシステム構成が可能となる。固体高分子形と異なりアルカリ環境となることで、Bipolar plateや集電体の部材を高価なPtコートTiプレートから低価格なステンレス等へ変更することが可能となり、大幅なコスト低減が見込まれる。さらに本事業で開発する卑金属電気化学触媒により、貴金属フリーな触媒層とすることで触媒価格を1/500程度まで低減する。装置規模の増加と併せて、電解装置価格40万円/Nm³-H₂/hの実現が可能であり、海外の低価格な再生可能エネルギーの利用を想定することで、プラント引渡し価格30円/Nm³-H₂/hが見通せるシステムとなる。固体高分子形水電解では本事業で開発する高活性・高表面積なIr系ナノ粒子連結触媒によりIr使用量を1/10へ低減し、細孔フィリング膜により薄膜化で高額な電解質材料の使用量を1/4へ低減する。装置規模の増加や、Bipolar plateコストの低減と併せることによって、電解装置価格43万円/Nm³-H₂/hが実現できれば、海外の低価格な再生可能エネルギーの利用を想定することで、プラント引渡し価格30円/Nm³-H₂/hを見通せる計算となる。

本事業では現段階までに、固体高分子形水電解、固体アルカリ水電解の2つの方式について、変動電源に適した特性を有する触媒・電解質膜の材料開発に成功し、変動電源に適した材料の設計指針の原案策定として、固体高分子形水電解では、電解質膜は水素透過性を低減した細孔フィリング型プロトン伝導性電解質膜、触媒は導電担体フリーかつ高表面積・高活性触媒が有効であると策定した。固体アルカリ水電解では、電解質膜として製膜性・機械的強度に優れた高アルカリ耐久性・高ラジカル耐久性を有するポリフェニレン系アニオン交換ポリマー・膜、触媒としては卑金属系触媒、特に集電体として用いられるNiフォームへの接着性の良い高活性触媒が有効であると策定した。また、水電解セルとしての性能においても良好な電解性能・耐久性が得られている。2020年度末までに劣化機構の解析手法を確立するとともに、固体高分子形および固体アルカリ水電解セルの耐久性試験前後の電圧損失要因の評価により劣化等を規定する因子を特定する。最終目標の達成へ向けて、開発した固体高分子形および固体アルカリ水電解の材料・セルに対して負荷変動や起動停止模擬試験を実施して劣化機構を解明し、材料・セル開発へフィードバックし、高耐久・高性能な電解材料・セルの設計指針を策定する準備は整っている。したがって、最終目標を達成できる可能性は高いものと考えられる。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

本事業では、固体高分子水電解・固体アルカリ水電解ともに水電解の触媒・電解質膜などの材料の研究開発を進め、セルとしての実証・耐久性試験を実施する。固体高分子形水電解ではさらに構造最適化・耐久性実証まで実施し、本事業後に企業と連携したプロジェクトにより、大型実証を行う。また、固体アルカリ水電解では、構造最適化・耐久性実証を進めるプロジェクトを行い、企業と連携したプロジェクトにより大型実証を行う。

5. 特許・研究発表等

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2020年3月31日	特願 2020-062650	水電解装置	東京工業大学

－研究発表・講演・文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2020年1月1日	Nanoscale Advances	Connected iridium nanoparticle catalysts coated onto silica with high density for oxygen evolution in polymer electrolyte water electrolysis	Yoshiyuki Sugita, Takanori Tamaki, Hidenori Kuroki, Takeo Yamaguchi
2	2020年2月27日	ACS Applied Energy Materials	Tuning Palladium Nickel Phosphide Towards Efficient Oxygen Evolution Performance	Sasidharan Sankar, Yuuki Sugawara, S. Assa Aravindh, Rajan Jose, Takanori Tamaki, Gopinathan M. Anilkumar, Takeo Yamaguchi
3	2019年3月15日	化学工学会 第84年会	アルカリ中で高い水素発生反応活性を示すテニウム系ペロブスカイト型触媒	東京工業大学 菅原 勇貴、 鎌田 慶吾、 山口 猛央
4	2019年5月22日	RWTH - Tokyo Tech Joint Workshop on Sustainable Energy	Systematic material design and development for fuel cells and water electrolysis	山口 猛央
5	2019年9月24日	APCChE 2019	Structural and Compositional Design of Fe-based Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Water Splitting	菅原 勇貴、 鎌田 慶吾、 山口 猛央
6	2019年9月24日	APCChE 2019 (ポスター発表)	Pore-filling Electrolyte Membrane with hydrocarbon ionomer for Polymer Electrolyte Water Electrolysis	松野 雄貴、 大柴 雄平、 山口 猛央
7	2019年9月24日	APCChE 2019 (ポスター発表)	Design of Stable Composite Catalyst Composed of Perovskite-Type Oxide and Metal	日原 拓哉、 菅原 勇貴、 鎌田 慶吾、 山口 猛央

			Oxide Support for the Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Solutions	
8	2019年9月26日	APCChE 2019	Carbon-Free Connected Ir Nanoparticle Catalysts for Oxygen Evolution Reaction in Polymer Electrolyte Water Electrolysis	杉田 佳之、 田巻 孝敬、 黒木 秀記、 山口 猛央
9	2019年9月26日	APCChE 2019	Anion Exchange Membrane with Thermally Convertible Polymer System for Alkaline Water Electrolysis Application	Hafis P.R. Graha 、宮西 将史、 安藤 慎治、 山口 猛央
10	2019年10月14日	ECS 2019 (ポスター発表)	Membrane with Thermally Convertible Unit for Alkaline Water Electrolyzer	Hafis P.R. Graha 、宮西 将史、 安藤 慎治、 山口 猛央
11	2019年10月16日	ECS 2019	Influence of Elemental Compositions and Crystalline Structures on Electrocatalytic Activity of Fe-Based Oxides for Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Water Splitting	菅原 勇貴、 鎌田 慶吾、 山口 猛央
12	2019年11月13日	膜シンポジウム 2019	Anthracene-based Anion Exchange Membrane for Solid Alkaline Water Electrolysis	Hafis P.R. Graha 、宮西 将史、 黒木 秀記、 山口 猛央
13	2019年12月9日	3rd International Conference on Advanced Functional Materials (ICAFM 2019) (Distinguished lecture)	Hydrogen Economy and Systematic Material Design for Energy Applications	山口 猛央
14	2019年12月9日	ICAFM 2019 (Invited lecture)	Systematic Material Design for Electrocatalysts Enabling Hydrogen Society	田巻 孝敬
15	2019年12月9日	ICAFM 2019	Strategy for Enhancing Oxygen Evolution Performance of Noble Metal Catalysts for Alkaline Water Electrolysis	Sasidharan Sankar, 田巻 孝敬, Gopinathan M. Anilkumar, 山口 猛央

16	2019年12月12日	International Conference on Energy and Environment (iCEE 2K19) (Keynote lecture)	Systematic material design for energy applications	山口 猛央
17	2019年12月13日	iCEE 2K19 (Invited lecture)	Systematic Material Design for Electrodes of Fuel Cells and Water Electrolysis	田巻 孝敬
18	2019年12月14日	International Conference on Separation Science and Technology (ICST 2019) (Plenary lecture)	Systematic Membrane Design for Fuel Cells and Bio-inspired Materials	山口 猛央
19	2020年3月15日	化学工学会 第85年会	固体高分子形水電解用Ir-Ruナノ粒子連結触媒の開発	杉田 佳之、 田巻 孝敬、 黒木 秀記、 山口 猛央
20	2020年3月16日	化学工学会 第85年会 (依頼講演)	Nanomaterials for Electrodes of Fuel Cells and Water Electrolysis	田巻 孝敬
21	2020年3月16日	化学工学会 第85年会 (ポスター発表)	金属酸化物を担体に用いた酸素発生反応用コンポジット電極触媒の開発	日原 拓哉、 菅原 勇貴、 鎌田 慶吾、 山口 猛央
22	2020年3月17日	化学工学会 第85年会	優れた酸素発生反応活性を示すアルカリ水電解用鉄系アノード触媒の開発	菅原 勇貴、 鎌田 慶吾、 山口 猛央
23	2020年3月17日	化学工学会 第85年会	Noble Metal- Transition Metal Phosphide Catalysts for Alkaline Water Electrolysis: Oxygen Evolution Reaction	Sasidharan Sankar, Gopinathan M. Anilkumar, 田巻 孝敬、 山口 猛央

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：①-5を参照

課題番号： ①－6

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／
水電解水素製造技術高度化のための基盤技術研究開発／
アルカリ水電解及び固体高分子形水電解の高度化」

委託先： 国立大学法人横浜国立大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、
国立大学法人京都大学、公立大学法人大阪、国立大学法人東北大学金属材料研究所、
学校法人立命館、デノラ・ペルメレック株式会社

1. 研究開発概要

変動性の再生可能電力を大量に導入して二酸化炭素排出量を抑制した持続可能なエネルギーシステムを構築するためには、再生可能電力を化学エネルギーに変換するシステムで、電力予備力とするとともに非電力部門を電化する P2G システムが求められている。従来の水電解システムは定常運転が基本であるが、P2G システムの水電解には電力変動に対する追従性が求められる。しかし、従来材料を用いた水電解槽は起動停止を繰り返すと劣化が大きいなどの報告もあり、電解槽の劣化機構の解明と、新材料開発のための起動停止模擬試験法の確立が必要である。また、電解槽の性能向上のためには電極触媒の性能発現機構や電解槽内の気泡の挙動などの物質移動の解明が必要である。さらに、再生可能電力を有効利用する P2G システムを開発するためには、これらの新材料技術と既存技術を組み合わせたモデルで電解槽の性能を表現することと、逆に P2G シ

	アルカリ水電解 (AWE)		固体高分子形水電解 (SPEWE)	
	触媒物質	触媒被覆電極	触媒物質	膜電極接合体
	ハーフセル	ハーフセル/小型電解槽	ハーフセル	小型電解槽
初期性能	< mAcm ⁻²	既存	B < mAcm ⁻²	既存
定格運転での耐久	—	既存 A, G 対起動停止)	—	既存 B, G 対起動停止)
高負荷運転での耐久	—	既存	—	既存
起動停止モデルでの耐久 実機で課題のモード	—	A, D (現象解析とモデル化) C, F (高度解析) G (小型電解槽実証)	—	B (現象解析とモデル化) C, F (高度解析)

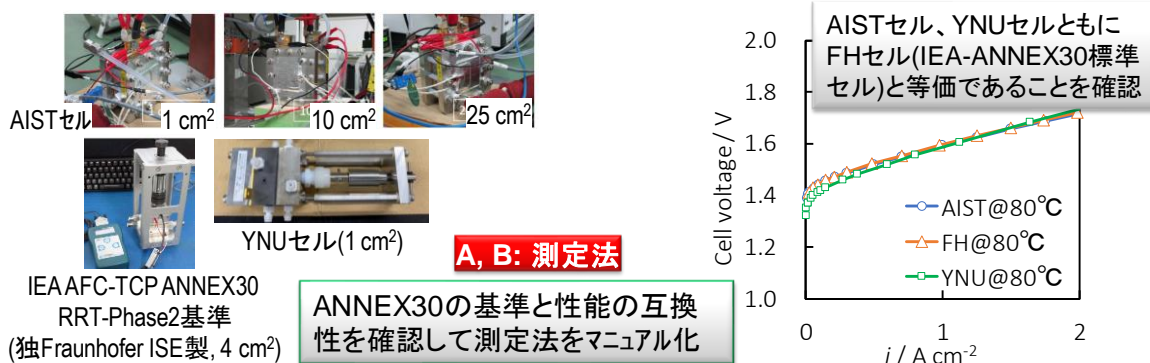


図 1.1 標準的な測定法に関する取り組み

システムの立地条件から最適 P2G システムを構築するための電解槽の基本仕様を設定する設計手法が必要である。以上に関わるアルカリ水電解及び固体高分子形水電解の標準的な試験法の整理や小型電解槽試験法の開発、電解槽の劣化機構の解明とそのモデル化、電解槽の高性能化のための物質移動や電極触媒発現機構の解明、電解槽の電源変動に対する応答性に注目した高効率・コストミニマム P2G システムの設計手法について検討した。

図 1.1 には水電解用電極触媒の評価に関する現状と課題、取り組みについてまとめる。アルカリ水電解では金属基板に触媒物質をめっきしたり焼き付けたりの電極であり、一般的な 3 電極式電気化学セル(ハーフセル)で評価できる。固体高分子形水電解では実機と同じ膜-電極接合体(MEA)を用いた小型電解槽にて評価される。それぞれ、初期性能、定格での耐久試験、加速劣化試験としての高負荷運転での耐久試験が実施されている。本プロジェクトでは未確立の起動停止モデル試験との比較実験として定格試験を実施した。水電解の起動停止モデルは未確立の試験であるため、電解槽の起動停止の現象解析とそのモデル化、ならびに *operando* 計測での解析を実施した。これらの内容については後述する。

固体高分子形水電解の材料評価法の基盤技術として触媒物質の評価法ならびに小型電解槽の標準化に取り組んだ。触媒物質単独の評価法として燃料電池用電極触媒と同じ方法を用いて数 mAcm^{-2} 以下の電流密度での初期性能を評価するときの触媒担持量などの試験条件を明確化した。また、小型電解槽の標準的な評価法として $1\sim 25\text{ cm}^2$ の固体高分子形燃料電池の小型単セルをベースに設計した AIST セル、 1 cm^2 の小型タイプで再現性が容易に得られるように触媒層の締結を独立した構造とした YNU セルを試作し、これらの試作セルの特性が国際エネルギー機関(IEA)Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Program (AFC-TCP)Annex 30

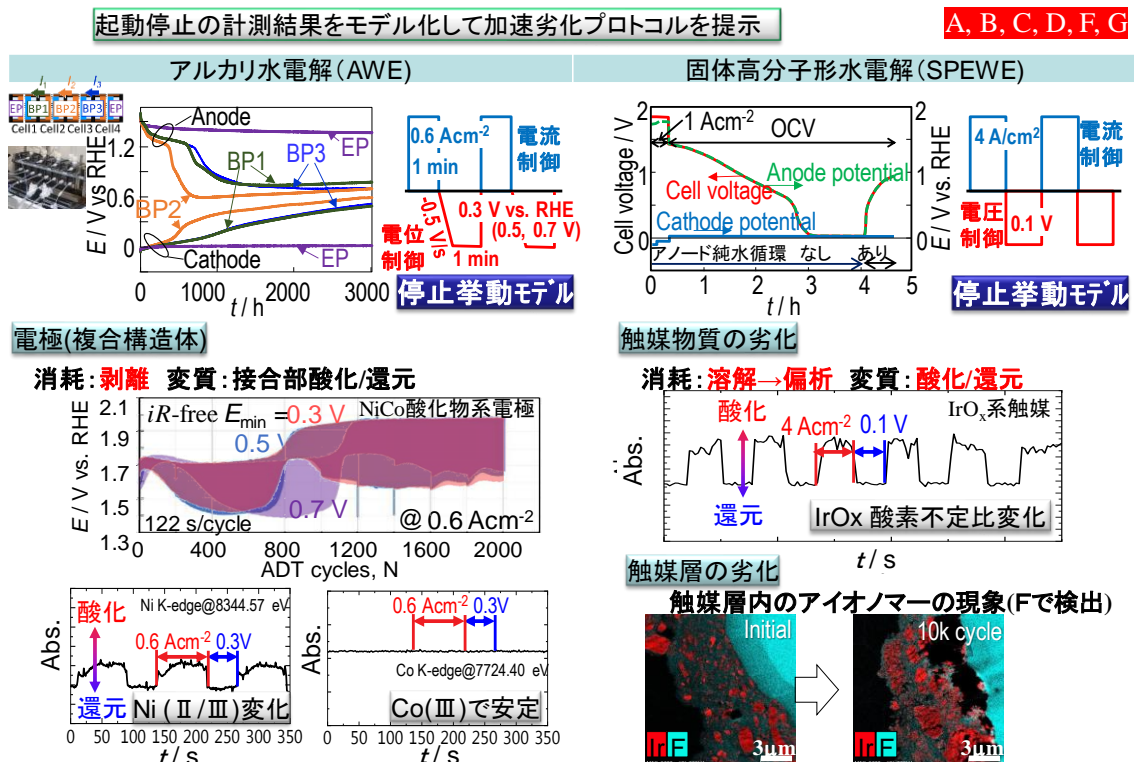


図 1.2 起動停止試験の現象解析とそのモデル化及び高度解析評価

Electrolysis のラウンドロビン試験(Round robin test)のフェーズ 2 で基準セルとして用いられている Fraunhofer ISE 製の 4 cm² 電解槽(FH セル)と同程度であることを確認した。

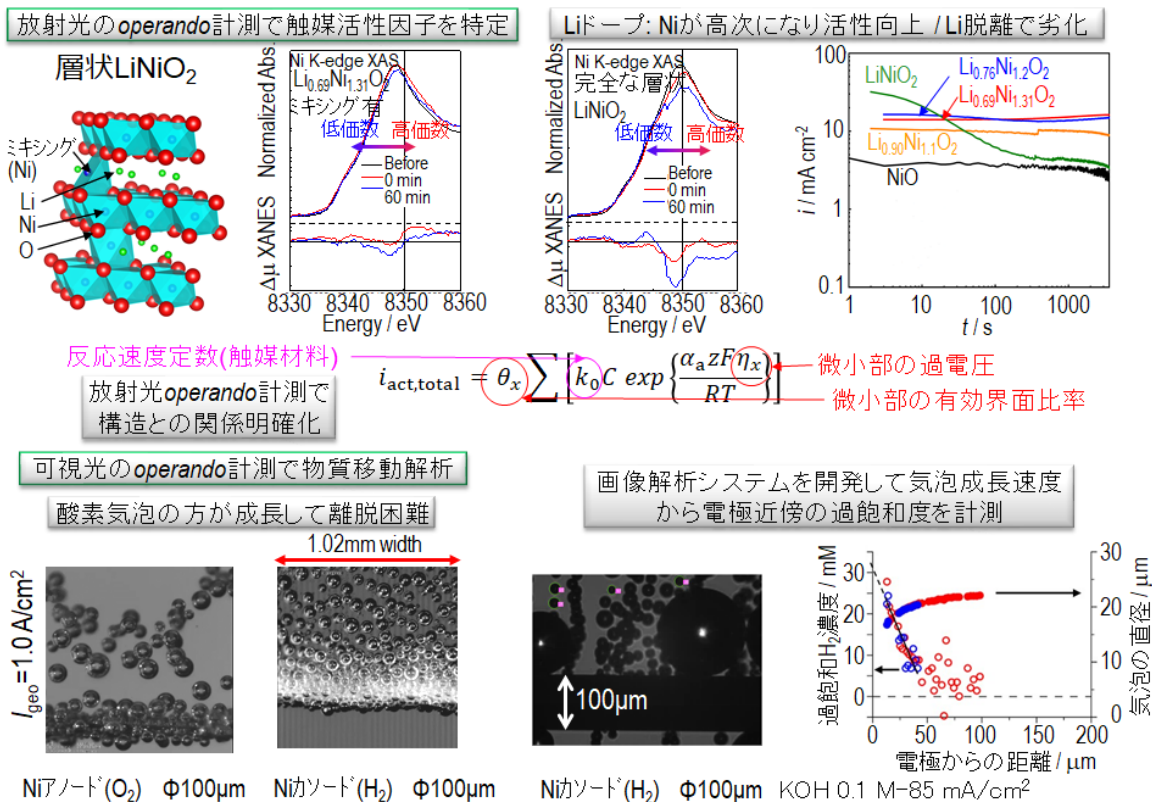


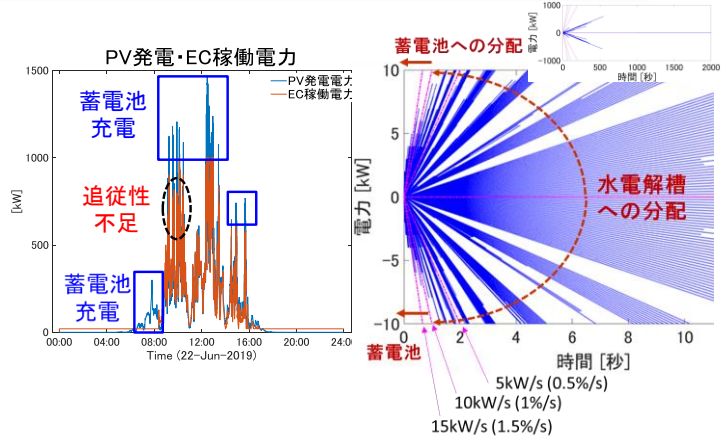
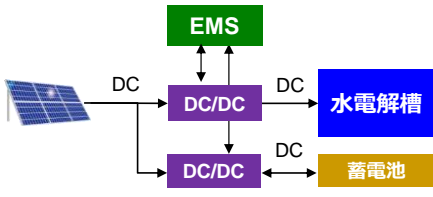
図 1.3 機能発現機構解析に関する高度解析評価

図 1.2 に起動停止試験の現象解析とそのモデル化及び高度解析評価の成果概要をまとめる。アルカリ水電解ではラボスケールの 4 セル積層バイポーラー電解槽の起動停止試験を行い、電解停止後に電解槽内に漏洩電流が流れてバイポーラー板(BP)上のアノードの電位が低下、カソードの電位が上昇することを明らかにした、この状態を模擬して電流制御による運転状態模擬、電位制御による停止時の電位変化模擬のモデルを提案し、従来型の NiCo 酸系電極での耐久評価を実施した。基本プロトコルは 122 s cycle⁻¹ で約 35 h で顕著に触媒層が脱落して触媒活性が失われた。このとき、停止を模擬した電位が 0.3~0.5 V vs. RHE の時よりも 0.7 V vs. RHE の時の方が、約 20%耐サイクル性が高くなった。この起動停止プロトコルを評価するための *operando* 計測手法を確立した。高輝度放射光を用いる X 線吸収法を適用し、水電解時の気体発生の影響を除去するための強制対流するセルを開発し、起動停止プロトコルに厳密に対応させた *operando* 計測手法を開発した。開発した手法を用いることにより Ni は酸化還元を繰り返すが、Co は価数変化しないことを明らかにした。固体高分子形水電解では電解停止後、カソードで発生した水素が電解質膜を透過することによりアノード電位が 0 V vs. RHE 付近まで低下することを明らかにし、これを模擬したプロトコルで耐久試験を実施した。このとき、*operando* 計測により IrO_x 系触媒が酸化還元を繰り返して劣化すること、IrO_x 触媒層中のフッ素(F)/Ir 比の増加等からアイオノマー劣化が進行することが示唆され、これらが電極活性の低下につながるということが分かった。

図 1.3 に機能発現機構に関する高度解析に関する成果概要をまとめる。層状 LiNiO₂ を対象物質

グリーン水素製造のためのアルゴリズム及び蓄電池容量を最小化するアルゴリズムを開発

再エネ水素製造構想システム
DCグリッド+水電解槽+蓄電池



電解槽に対する要求事項の明確化

水素 1 Nm³製造時におけるCO₂排出量をZ [kg-CO₂/Nm³-H₂]とし、
グリーン水素の定義であるZ ≤ 0.39※となるように再エネ水素製造システムを制御

$$\text{CO}_2\text{フリー水素係数: } Z = \frac{\text{電解電力再エネ量[kWh]} \times \text{再エネ原単位[kg-CO}_2\text{/kWh]} + \text{電解電力系統量[kWh]} \times \text{系統原単位[kg-CO}_2\text{/kWh]}}{\text{電解電力量[kWh]} \times \text{水電解原単位[Nm}^3\text{-H}_2\text{/kWh]}}$$

※ CeritifHyのGreen Hydrogenの閾値

Z ≤ 0.39を実現し、蓄電池を最小化してシステムコストを下げるために

- 電解槽側のリーク電流最小化とシステム側の蓄電池容量の最適化
- 耐追従性の向上と値の明確化
- 耐オーバーロード特性の向上と値の明確化

図 1.4 高効率コストミニマムの再エネ水素製造システム設計

として反応速度定数に関する構造因子解析を行った。層状 LiNiO₂ とは Ni 層(水色)の間に Li(緑)層がある層状構造の物質である。Li の一部が Ni 層に置換し、Li と Ni がミキシングしている Li_xNi_{2-x}O₂ と完全な層状岩塩構造の LiNiO₂ を比較した結果、完全な LiNiO₂ の初期活性が最も高く、Li 量が少なくなると触媒活性が低下する。しかし、完全な LiNiO₂ は耐久性に乏しい。そこで発生する酸素を除去しながら放射光の *operando* 計測結果を解析したところ、完全な LiNiO₂ に近い方が Ni の価数が高くて初期活性が高いこと、完全な LiNiO₂ は電解中に容易に Li が脱離して Ni の価数が低くなって活性が低下することが分かった。以上より、本手法が機能発現機構や劣化解析に非常に有用であることが証明された。

電極近傍の物質移動の中で気泡の挙動を理解、制御することが電極の有効比率:α_rを大きくしたり、実効イオン伝導度を高めて抵抗損失を減らして局所の過電圧:η_rを高めたりして反応速度を大きくすることができる。高解像度の高速ビデオカメラシステムを構築して解析した高電流密度でのガス発生の挙動は、酸素の方が電極表面で合体して大きくなってから離脱すること、水素は酸素よりも電流密度が大きくなる時、気泡径より気泡数が大きくなる傾向が強いことが分かった。一方、数百 nm の表面粗度を持つ電極を用いて低電流密度での気泡挙動の解析から求めた電極近傍の過飽和度は 30 mM であった。これは完全な平滑電極を用いた場合の過飽和度よりも一桁小さく、電極表面の凹凸の制御などで気泡脱離挙動を制御できる可能性があることが分かった。

図 1.4 に高効率かつコストミニマムを実現する再エネ水素製造システムの設計モデルを示す。直流エネルギーマネジメントシステム(DC-EMS)を用いて太陽光などの再エネ電力を分配して水電解槽と蓄電池を制御する。この際、水素 1Nm³製造時における CO₂ 排出量を Z [kg-CO₂ Nm⁻³-H₂]とし、グリーン水素の閾値である Z ≤ 0.39 を満足させるためには系統電源電力の利用をでき

るだけ抑えて再生可能電力で水素製造する必要がある。このシステムにおける蓄電池の役割は、夜間など、再エネ電力が得られない際にシステムを保全し、図 1.4 に示した曇天時の出力電力変動の激しい条件で電解槽の追従性が不足する際にインバランスを解消して、水電解の容量を上回る再エネ電力を吸収することにあるが、プラントコストを下げるためには蓄電池を最小化しなければならない。以上の条件を満足させるシステムを構築するため、水電解槽の応答速度やシステム保全の最低電力を設定すると必要な蓄電量と制御方法を決定するアルゴリズムを開発した。今後、この基本アルゴリズムをもとに、様々なプラントの環境に応じて高効率低コスト化のための水電解槽仕様を決定するガイドラインを策定する。

2. 研究開発目標（設定の理由も含め）

再生可能電力を用いた水素製造では、電源変動を吸収して電力網の安定性に寄与しながら水素製造する。このため、従来の工業電解と異なり変動電源に対する耐久性が要求される。また、低コスト化も必須であり、電解槽の高電流密度化、様々な材料開発やシステム開発が必要と考えられる。このためには劣化機構及び物質移動などの水電解槽の機能発現機構を明らかにして、技術開発のガイドラインを策定する必要があり、以下の中間目標及び最終目標を設定した。

【中間目標（2020年度）】

- ・変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムの解明
- ・劣化等を規定する因子を見出すとともに、材料・セルに関する設計指針原案の策定

【最終目標（2022年度）】

- ・プラント引渡し価格30円/Nm³に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立

本目標を達成するために、アルカリ水電解の劣化及び設計の評価指針を策定するための「アルカリ水電解 G」、固体高分子形水電解の劣化及び設計の評価指針を策定するため「SPE 水電解 G」、両者に共通する高度解析を実施する「高度解析 G」と、これらのグループとは独立して利用側から電解槽の条件を解析して各グループにフィードバックする「再エネ対応システム」で研究開発を推進する。

機関ごとの具体的なサブテーマは以下のとおりである。

- A. アルカリ水電解及び固体高分子形水電解槽内の物質移動現象の把握と構成材料評価基盤技術の開発(国立大学法人横浜国立大学)
- B. 固体高分子形水電解触媒の活性・加速評価法開発とそのための劣化要因の解明(国立研究開発法人産業技術総合研究所)
- C. アルカリ水電解及び固体高分子形水電解電極性能・劣化機構／物質移送解明のための高度解析技術開発(国立大学法人京都大学)
- D. アルカリ水電解用電極触媒の活性評価法開発(公立大学法人大阪)
- E. 再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムモデルの開発(国立大学法人東北大学金属材料研究所)
- F. 高度解析による劣化機構解析手法の開発(学校法人立命館)

G. 小型電解槽を用いた評価試験法の開発(デノラ・ペルメレック株式会社)

高度解析 G は A-1、A-2、C-1、C-2 及び F を実施する。アルカリ水電解 G は A-3、A-4、D 及び G を実施する。SPE 水電解 G はアルカリ水電解 G と共通の A-4、B-1、B-2、B-3 及び G を実施する。再エネ対応システムは A-5 のモデリングと連携して E として実施する。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

(1) (項目 A) アルカリ水電解及び固体高分子形水電解槽内の物質移動現象の把握と構成材料評価 基盤技術の開発 (国立大学法人横浜国立大学)

① A-1. 気泡生成挙動の観察方法の構築

本項目では、電極表面でのガス発生挙動をその場で高解像度観察し、気泡の生成挙動（サイズ、個数、成長速度等）と電流密度との関係を明らかにし、電解性能との関係性を整理することを目標とした。7 M KOH 水溶液を対象とした耐高濃度アルカリ性の透明可視化窓付き電解槽を製作し、高速度ビデオカメラと顕微撮影システムを併用したアルカリ水電解槽内の電極近傍での気泡生成挙動の計測システムを開発した(図 3.1.1.1)。同システムでは、電極表面での微細気泡の発生挙動を 1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ の画像解像度、80 μs (12,800 frames/s)の時間分解能で撮影することが可能である。これにより定電流条件下で直径 100~300 μm の電極からの酸素または水素気泡が生成する瞬間から、成長や合一を経て電極から離脱するまでの一連の挙動を十分な時間分解能で *in situ* で明瞭に観察することが可能となり(図 3.1.1.2)、気泡が生成する際の電流密度と平均気泡径の関係を画像解析により定量化する手法を確立した。

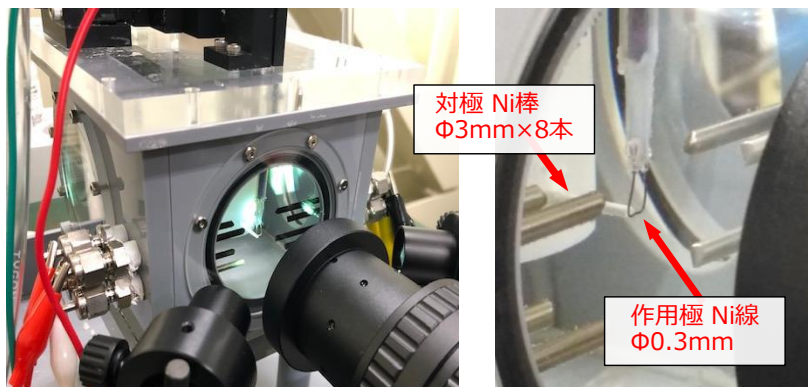


図 3.1.1.1 可視化電解槽と高速度ビデオ撮影システムの概略

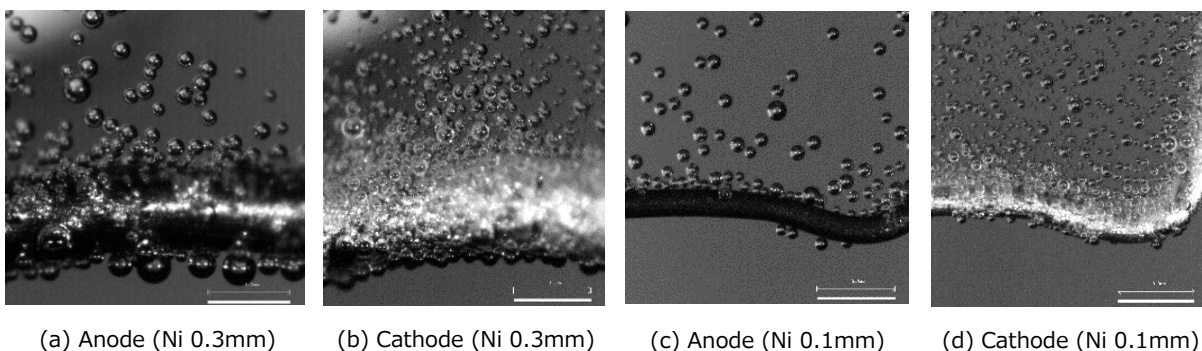


図 3.1.1.2 気泡可視化写真 ($i_{\text{geo}} = 0.1 \text{ A cm}^{-2}$)

円柱線状のニッケル電極を用いて、気泡が電極上で孤立して成長する電流密度 $i_{\text{geo}} = 0.05$

A cm^{-2} から、実用限界値以上で気泡が電極表面を膜状に覆うようになる $i_{\text{geo}} = 1.0 \text{ A cm}^{-2}$ までの広い条件範囲を対象に離脱気泡径を定量化することに成功した。これにより高電流密度において電極上での気泡の離脱状況や被覆が過電圧を引き起こすメカニズムの検討が可能となる。

同じ電極直径、同じ電流密度で比較した場合、アノードから生成する酸素の気泡径はカソードから生成する水素の気泡径より大きくなり、いずれの電極反応においても直径 $300 \mu\text{m}$ の電極から生成した気泡の直径は、直径 $100 \mu\text{m}$ の電極から発生した気泡の直径よりも大きくなることが観察された。ニッケル電極のアノード反応では、電流密度 i_{geo} が大きいほど、また電極直径が大きいほど、酸素気泡の平均径 d_{32} が大きくなることが明らかとなった(図 3.1.1.2、図 3.1.1.3)。また、高速度ビデオカメラによる気泡の動きの直接観察より、酸素気泡は水平に置かれた電極の上端から離脱することが確認された。

図 3.1.1.4 に Ni 円柱線電極の直径ごとの電流-電位曲線を示す。同図より $i_{\text{geo}} > 0.3 \text{ A cm}^{-2}$ では電極径にかかわらず i_{geo} とともに過電圧が上昇することがわかる。また、直径の小さい電極ほど同電流密度における過電圧が小さくなることが確認された。図 3.1.1.3 に示す気泡径測定の結果と気泡の離脱時の気泡の動きを考慮すると、電極表面の曲率が大きくなる直径の小さい電極ほど、電極からの酸素気泡の離脱がスムーズなため、過電圧が小さくなる一因となったと考えられる。

以上より、本項目における開発目標を達成した。さらに、2020 年度末までに種々の電解条件において気泡生成挙動と電流密度の関係をより詳細に明らかにし、電解性能との関係性を整理する見込みである。

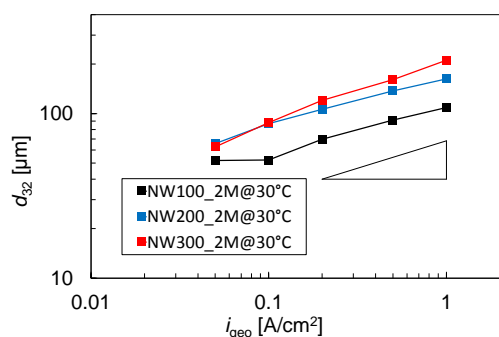


図 3.1.1.3 電流密度 i_{geo} と体積平均気泡径 d_{32} の関係(ニッケルアノード電極)

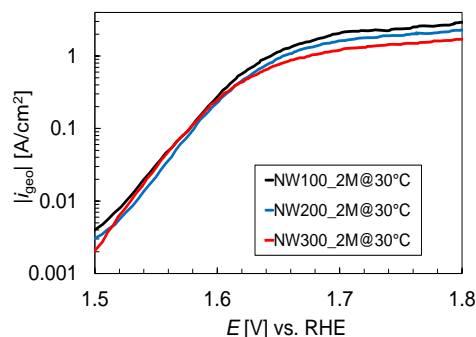


図 3.1.1.4 電流-電位曲線(ニッケル円柱型アノード電極(直径 100, 200, 300 μm , 2 M KOH))

② (項目A-2) 気泡が電極反応に与える影響の評価

本項目ではウルトラファインバブル (UFB) が水電解の性能に与える影響を評価することを目的とした。本年度は気体の加圧溶解と減圧による微細気泡生成を繰り返す加圧溶解式 (GaLF 式) による UFB 発生装置を導入し、UFB を含む電解液の表面張力測定及び気泡発生反応を評価した。表面張力測定の結果、UFB を導入した純水及び電解液ではわずかな表面張力の減少が見られた。

UFBを含む電解液を用い、Pt電極による水素発生分極曲線を比較した(図3.1.1.5)。UFB存在下では、Tafel勾配そのものには大きな変化が無かったが、Tafel領域が約 10 mA cm^{-2} 高電流密度にまで観測され、物質輸送由来の電流低下が緩和されることが示唆された。水素発生反応では、分極曲線のTafel式からのずれは発生した水素気泡によるブロッキングの影響が大きいと考えられるため、UFBによる水素気泡離脱の促進効果を示している可能性がある。一方、アルカリ水電解において重要となるNi系電極を用いた塩基性電解質中での酸素発生反応の評価では、Ni電極の不安定性により、UFBの有無による電極性能の正確な比較が難しく、明確なUFBの影響の確認には至っていない。

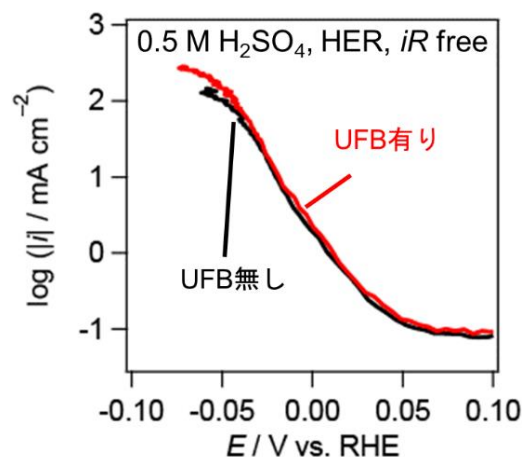


図 3.1.1.5 UFB 存在下における Pt の水素発生分極曲線

以上より、発生器法をUFBのサイズスケールで制御し、気泡排出を促進する電極構造設計が有効である可能性が見いだされたが、その性能向上の程度は現状の結果からはあまり大きくない。今後は、Ni系電極における正確な性能比較と、より大きな性能向上を見通すUFBの状態を見いだすことが課題となる。

③ (項目 A-3) 要素試験法の開発

本項目では $0.5 \sim 1 \text{ cm}^2$ 程度の電極面積で再現性良い締め付け構造を持つ要素試験用小型電解セルを開発し、標準組み立て法および評価法プロシージャの策定を目標とした。この際、標準触媒を用いたアルカリ水電解 0.6 A cm^{-2} および固体高分子形水電解 1.0 A cm^{-2} 条件において要素試験用小型電解セルと 10 cm^2 級小型電解槽との間のセル電圧、アノード及びカソード電位の測定値差5%以下の達成、増設した要素試験用小型電解セル間で起動停止評価プロトコルを実施した際の標準触媒の劣化後の電位測定値差が10%を目標とした。また、触媒劣化要因、劣化事象を包含した起動停止評価プロトコルの策定および電極触媒劣化因子の抽出、燃料電池の評価法に準拠した電解質膜の抵抗及び部材間の接触抵抗の評価法の見直しを行うことを目標とした。

18年度は電極面積 1 cm^2 の要素評価用小型セルを開発し、標準組み立て法を策定した(図3.1.1.6)。セル構造はアノード側とカソード側の独立した各参照極を有し、かつ電極独立締結構造により精度の高い締結圧制御が可能な設計とした。また本セルはアルカリ水電解、PEM水電解の両測定に適用可能とした。PEM水電解において本セルと従来型の電極面積 16 cm^2 電解セルの電流-電圧曲線を比較した結果、評価条件 1.0 A cm^{-2} においてセル電圧の測定値差は1.6%(目標5%以下)であった。

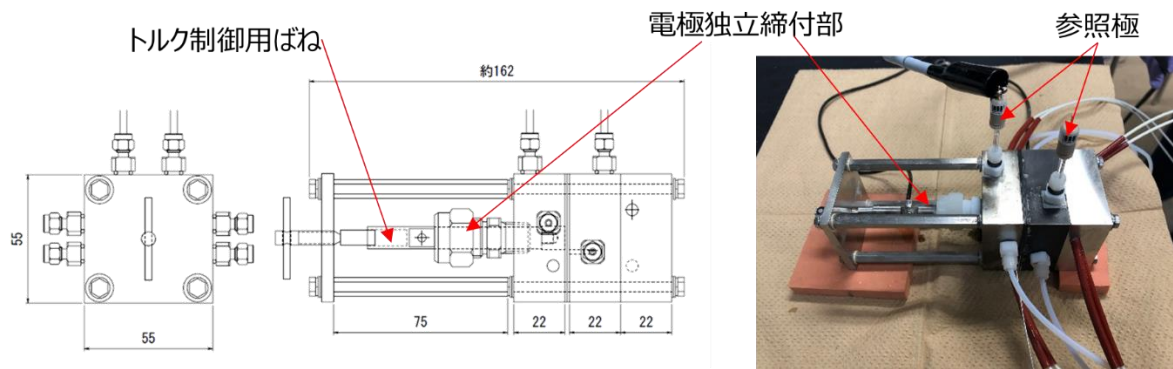


図 3.1.1.6 触媒等評価用 1 cm² 標準電解槽

19年度はアルカリ水電解において気泡影響を排除した粉末電極触媒の評価法を開発した。具体的には定電圧印加時の実測電流から初期微小時間における気泡の影響が排除されたファラデー電流を推定する解析方法と、電解槽流路を楕円型構造にすることで触媒層内に強制的に電解液を通過させ、気泡の影響を極力排除した状態で電気化学測定を行う実験法を開発した。また、加速劣化試験（ADT）のための起動停止評価プロトコル原案を策定し、これを用いて NiCo 系触媒被覆の標準仕様アノードに対する耐久性テストを実施し、活性への影響を評価すると共に、基材選択に対する課題を抽出した。劣化後の電極試料に関して、微視的評価から京都大学、立命館大学との協力による *ex-situ* での放射光分析までの分析プロセスを確立した。その他、改良型 1 cm² 要素評価電解槽、アルカリ水電解ガス分析ライン、アルカリ水電解膜評価装置、アルカリ水電解電極評価用可視化セルおよびその作用極集電体構造パターンに関して設計開発および製作した（図 3.1.1.7）。

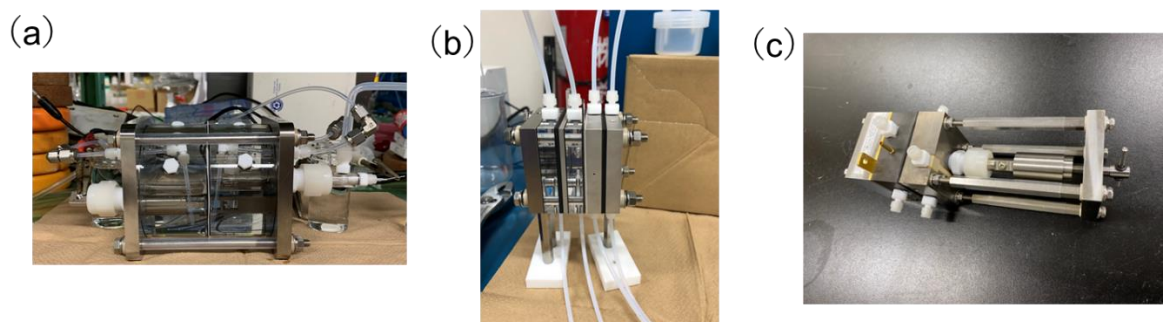


図 3.1.1.7 開発した(a)アルカリ水電解電極評価用可視化セル(b) アルカリ水電解膜評価装置および(c) 改良型 1 cm² 要素評価電解槽

20年度は加速劣化試験（ADT）用起動停止評価プロトコルを策定し、各パラメータと経過時間やサイクル数に対する劣化挙動の関係を調査した。劣化プロトコルの策定に繋がる詳細な特性情報として、電位制御条件や電極の違いと、消耗、剥離等の劣化モードの違いに関する劣化因子関係を明らかにすると共に、実機への応用に繋がる劣化抑制可能な操作条件を明らかにした（図 3.1.1.8）。また、1 cm² 要素評価電解槽に関して、標準組み立て法プロトコルの初版を作成すると共に、本電解槽を用いて測定した標準膜電極接合体（MEA）の性能が

項目 B-1 にて作成したラボ評価用 SPE 水電解セルとほぼ一致する性能を示すことを明らかにし、要素評価用標準セルとしての有用性を示した。以上により本項目の中間目標を達成した。2020 年度末までに電極触媒劣化因子を FTA により整理する見込みである。

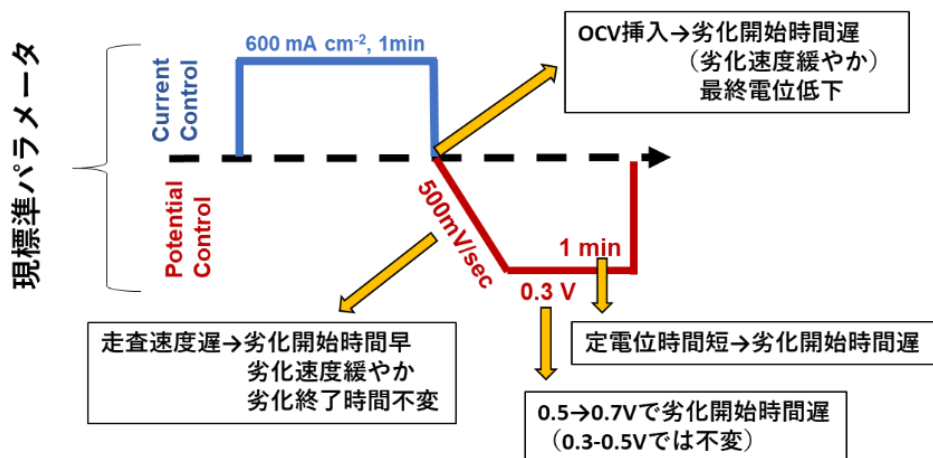


図 3.1.1.8 ADT プロトコルの各パラメータの劣化挙動への影響

④ (項目 A-4) アルカリ水電解槽の評価法の開発

本項目では電位計測可能な小型単セルの電解槽及びバイポーラ電解電解槽を開発し、劣化機構を解明することを目標とした。

18 年度は逆電流評価用バイポーラ型標準電解槽を試作した。本電解槽は透明部材の採用により電解時のセル内部のマクロな気泡挙動を可視化観察する事が可能となっている (図 3.1.1.9)。逆電流評価として、アノード/カソード間で電極表面積を変化させ、参照極を用いた分極測定を行い、電解時間、電解電流、電極面積と逆電流の関係を明らかにした。Ni メッシュ電極を用いた標準小型バイポーラ電解槽を開発し、電位測定精度についてばらつき 2.7%以下を確認し、19 年度目標であるばらつき 5%以下を先行して達成した。



図 3.1.1.9 逆電流評価用バイポーラ型標準電解槽

19 年度はバイポーラ型アルカリ水電解槽に対し、解析、実験両面から逆電流現象を解明する為の検証を行った。逆電流解析においては等価回路を仮定し、連通管および分岐管のイオン抵抗をパラメータとして、実機レベルの 100 セルスタックにおける逆電流をセル数に対し定量的に解析した。この結果、連通管の抵抗が逆電流低減の為の重要なパラメータである事を実証した。標準バイポーラ電解槽の要素部材として既存の各種電極内で ADT プロトコルに対する高耐久電極を提案した。また、実測した電気量データを用いて逆電流時の電流と電位の経時変化の予測解析を行った。逆電流に関する実験として、4 セルスタックバイポーラ型電解槽を用いてスタック数増加に伴う各セルの逆電流挙動の違いを明らかにした (図 3.1.1.10)。またアノードとカソードの流路分離や抜液試験を行い、電解時に生成する溶存ガスの逆電流への影響を明らかにした。また、ADT プロトコルを用いた劣化試験をバイポーラ

型電解槽に適用し、サイクル数に対する放電曲線の劣化挙動を調査した。

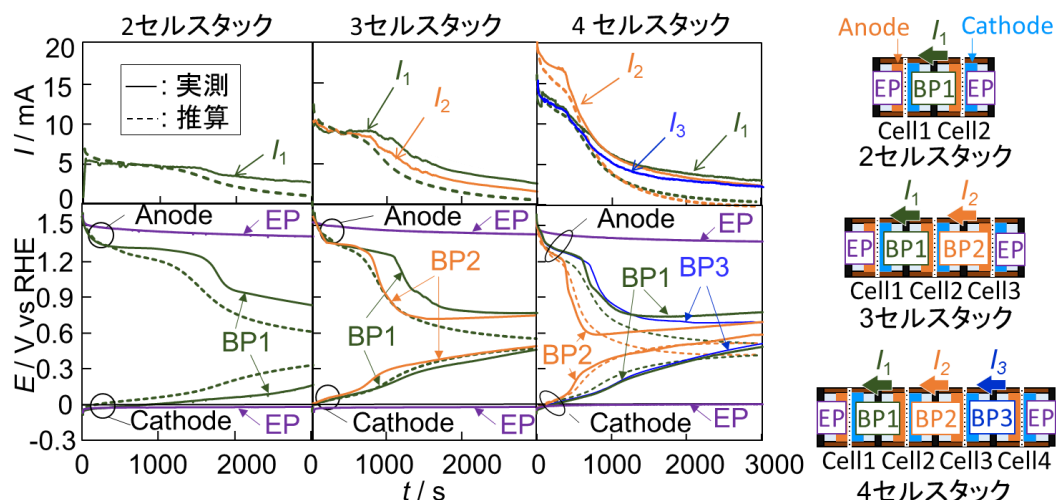


図 3.1.1.10 2, 3, 4 セルスタック電解槽における逆電流と電位の経時変化

20 年度は 19 年度までの知見を元に逆電流を模擬した劣化評価プロトコル及び加速プロトコルを策定した。さらに、バイポーラ型電解槽における逆電流現象および劣化機構の更なる解明を目指し、セルスタック数を 8 まで拡張したバイポーラ型電解槽の設計、製作を行った (図 3.1.1.11(a))。また、アルカリ水電解におけるクロスリーク評価用の発生ガスラインユニットの設計、製作を行った (図 3.1.1.11(b))。以上により本項目の中間目標を達成した。2020 年度末までに逆電流に対する電解槽劣化要因マップを FTA により整理する見込みである。

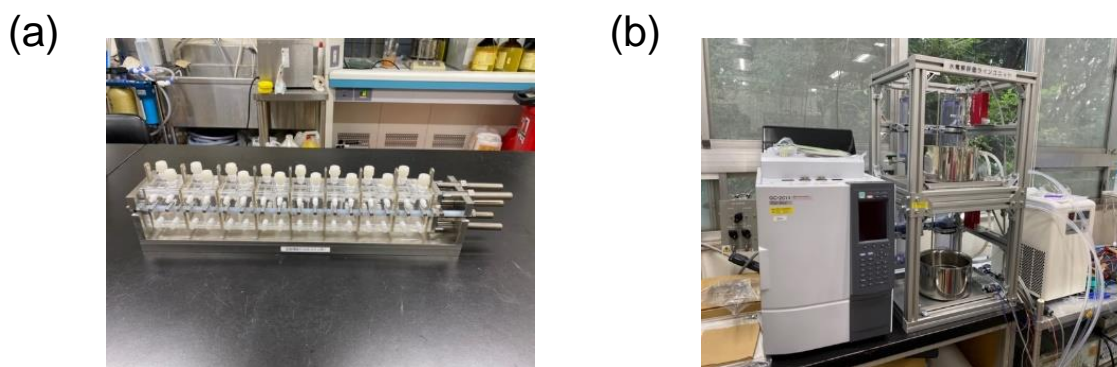


図 3.1.1.11 (a) 8 セルスタックバイポーラ型電解槽, (b) 発生ガス評価用ラインユニット

⑤ (項目 A-5) 電解槽のモデリング

本項目では、電気分解の基本原理である熱・物質・化学反応を連成した数値解析のモデルを構築し、ラボスケールでの試験との比較及び実験結果の活用によるモデルパラメータ決定により、水電解装置の性能予測及び部材の劣化現象の記述が可能なモデルを構築する。当初は実機より小規模なスケールの構造を対象とすることで高速な解析を可能とし、実験との比較+モデルの校正というサイクルを効率よく回転させることを目的としている。

18年度にはソフトウェアを外注し、物質・電子・イオン移動と電極反応 (電流-過電圧モデ

ル) を連成したモデルを構築し、モデルパラメータを決定した。図3.1.1.12に水電解モデリング領域を、図3.1.1.13に解析の結果の一例として溶存イオン濃度を示した。左側は電解液流速が0.1 m s⁻¹, 右側が1.0 m s⁻¹の条件の分布である。これを見ると反応によって生じた溶存イオンの濃度境界層の厚みは流速が速い場合に薄くなっており、マルチフィジックスな解析が実施できていることがわかる。

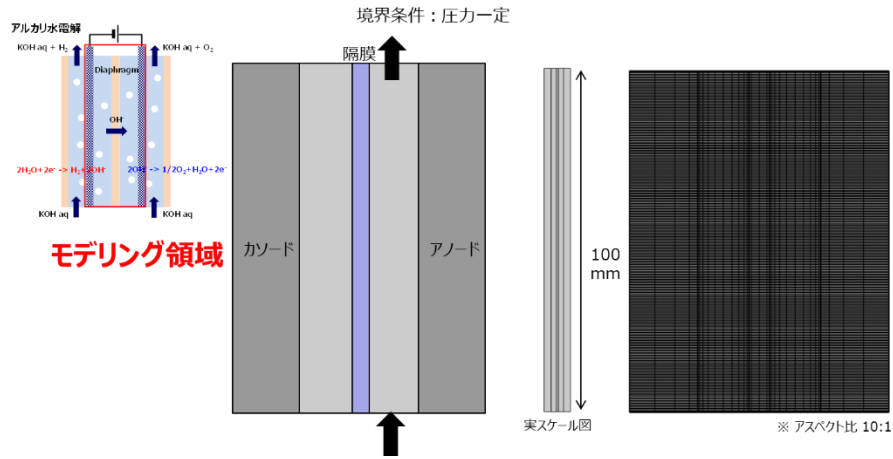


図 3.1.1.12 解析モデリング領域の一例

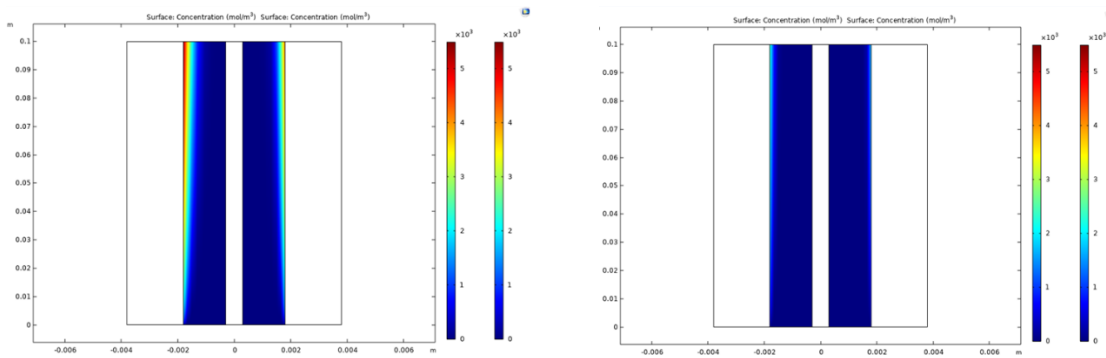


図 3.1.1.13 解析結果の一例 (溶存イオン濃度)

19年度には昨年度に構築した物質・電子・イオン移動と電極反応 (電流-過電圧モデル) を連成したモデルの検証解析および起動停止を含む非定常モデルへの拡張を行った。図3.1.1.14にSPE水電解における過電圧分離に用いるシフト電極を想定したモデルでの電位分布解析例を示す。解析条件としては、すべて実験に揃える形で厚さ約170 μmプロトン交換膜(Nafion 117)を用いたPEM電解とし、電極面積を10 cm²としたまま図3.1.1.14のz軸方向に電極をシフトさせた。これまで用いられてきた電極シフトによる反応電流密

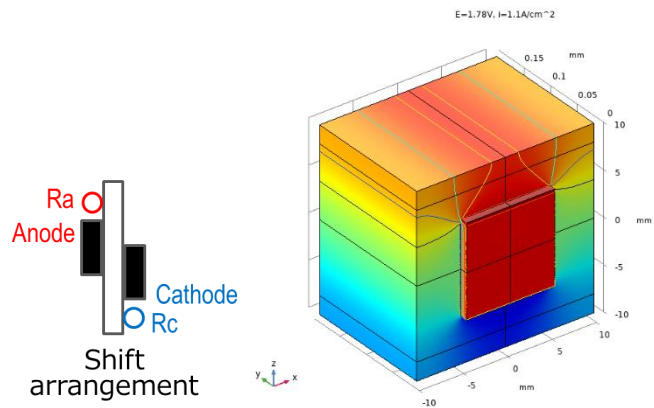
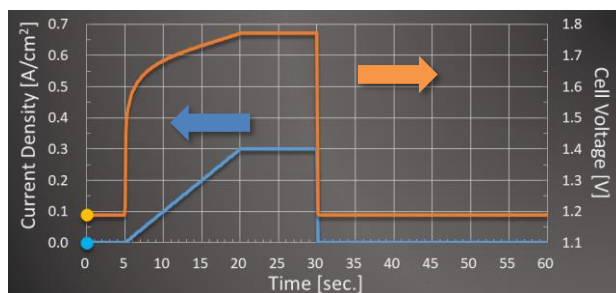


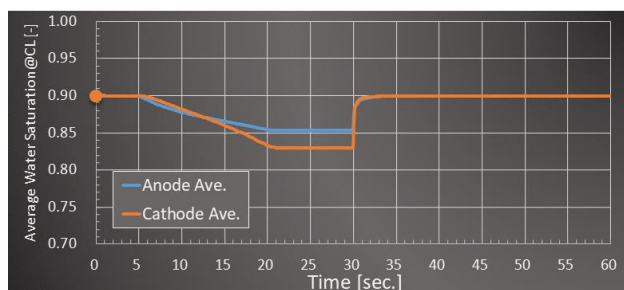
図 3.1.1.14 解析モデル検証解析 (電極シフト配置時の電位分布)

度変化を考慮しないモデルでは電位推定値に50 mV程度の誤差が生じることがわかった。これら数値解析モデルと実験結果を比較することで、一般に難しいとされていたSPE電解における両極過電圧と界面抵抗の定量的な分離および解析モデル構成が可能になった。

図3.1.1.15に非定常に拡張した解析の結果の一例として、電流・電圧の経時変化と液水飽和度変化を示した。まず図3.1.1.15上図から線形に電流を掃引した際に電位が対数的に変化している様子を読み取れる。一方、液水飽和度は電流密度が増加するに従い液水飽和度が低下、すなわち気泡が占める体積が増加している。また、気泡体積率の増加によって空孔内の輸送係数が変化するモデルを採用しているため、液水飽和度の経時変化は線形ではない。さらに、特に30秒における電流・電圧のステップ変化に対し、気泡の輸送は電子の移動速度よりも遅いため、電流・電位の変化に対して遅れて応答していることが読みとれる。このように本年度、マルチフィジックスな解析の非定常への拡張が実施できたことがわかる。以上より、本項目の中間目標を達成した。2020年度末までに実スタックスケールへの拡張を実施する見込みである。また、2020年より新たにアルカリ電解槽負荷変動・シャットダウン時の逆電流を2次元的にモデル化し実機の応答と比較することでより詳しい現象の解明を試みており（図3.1.1.16）、2020年度末までにスタックスケールでの逆電流解析を実施する見込みである。



(電圧および電流の経時変化)



(両電極における液水飽和度経時変化)

図 3.1.1.15 SPE 電解非定常解析結果

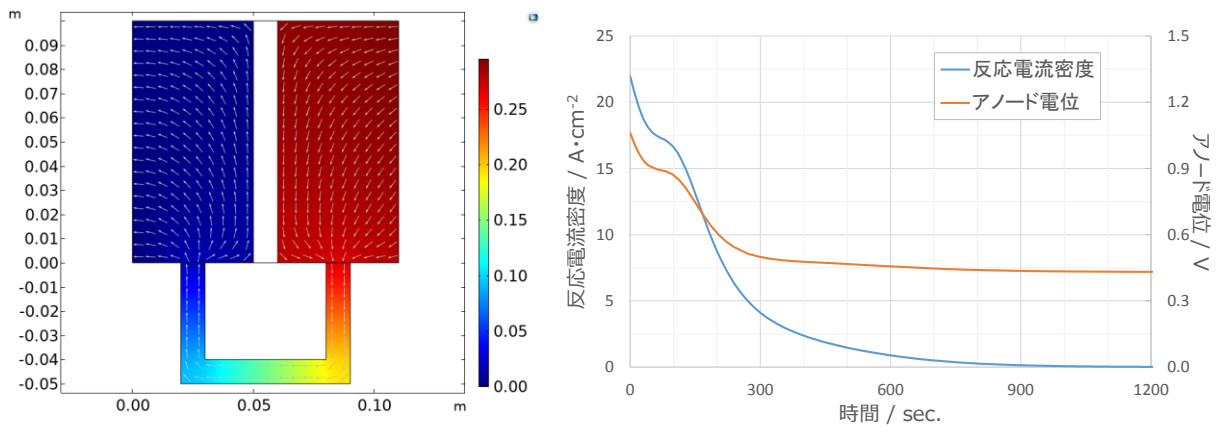


図 3.1.1.16 アルカリ電解槽負荷変動・停止時のイオン輸送 2次元解析

(2) (項目 B) 固体高分子形水電解触媒の活性・加速評価法開発とそのための劣化要因の解明 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

① (項目 B-1) 共通的な触媒活性評価法の提案

本サブテーマでは、①簡便な触媒活性評価法として適用可能な回転電極等のハーフセル試験法の開発と、②実用電解槽に近い条件で評価が可能なラボ用の小型電解セル (MEA) を用いた活性評価法を検討する。①ハーフセル試験では触媒活性を一定の条件下で評価するために、基板電極、触媒分散液組成、触媒塗布方法、電気化学評価条件等の各種パラメータや手順について、適正な数値 (プロトコル) を定める必要がある。各パラメータについての依存性を検討した結果、導き出された条件 (上限電位 1.50 V vs. RHE までのリニアスイープボルタメトリー (LSV) 測定: 0.1M HClO₄, 25°C, 3600 rpm, 1 mV s⁻¹, Nafion/触媒 = 0.1 μgNafion mg⁻¹) における質量活性と金基板電極上の触媒担持量との関係を図 3.1.2.1 に示す。再現性良く評価するためには生成する酸素バブルの影響を避けることが重要であり、LSV の Tafel プロットが直線から逸脱する直前の電位 (標準 IrO_x 触媒では 1.5 V 程度) 付近が触媒担持量の影響を受けにくく、再現性よく評価が可能であることがわかった。図 3.1.2.1 の場合は 80 μgIr cm⁻² までの幅広い担持量範囲で一定の質量活性が得られており、評価条件として適正であることが示されている。今後、一連の手順をまとめ参照可能な形とする予定である。②ラボ評価セルによる活性評価においては、横並びでの評価を可能とするために共通的に使用するセルが不可欠であることから、目的に応じて選択できるような有効電極面積 1 cm²、10 cm²、25 cm² の 3 種類のセルを設計した。図 3.1.2.2 に示すように、同一仕様の MEA、多孔質輸送層 (PTL) であれば、電極面積に関わらず同一の電解特性が得られることを確認している。また、ベンチマークとして International Energy Agency (IEA) - Advanced Fuel Cells Technology

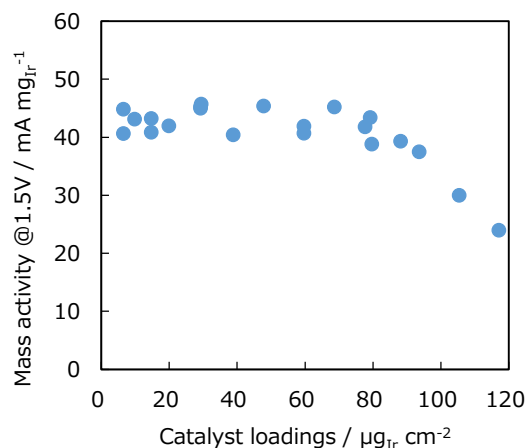


図 3.1.2.1 1.50 V vs RHE における酸素発生電流の触媒塗布量依存性

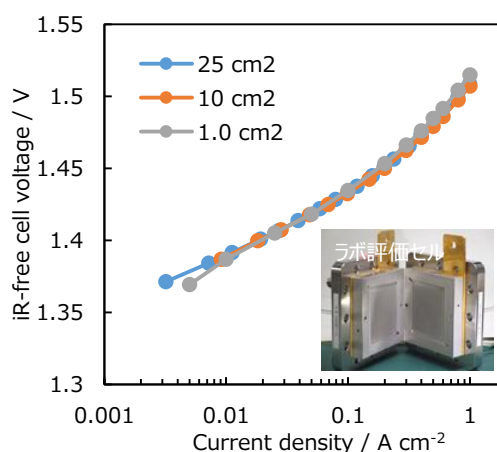


図 3.1.2.2 各サイズのラボ評価セルの水電解特性 (IR フリー@80°C) と 25 cm²セルの外観

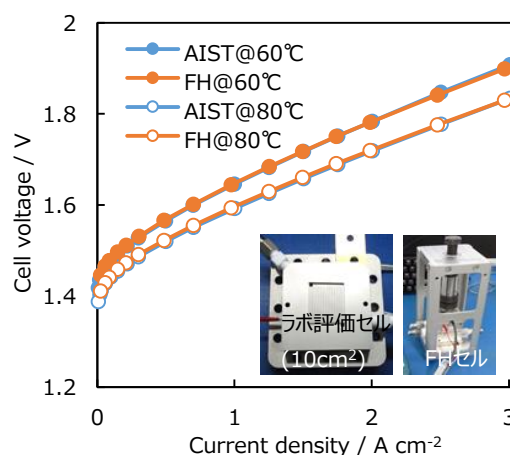


図 3.1.2.3 ラボ評価セル(10 cm²)、FHセルの 80°C、60°Cでの電解特性

Collaboration Programme (AFP TCP) - ANNEX30 で進められている水電解セル評価のラウンドロビントフェーズ 2 (RRT-Phase2) で使用するセル (FH セル、独 Fraunhofer ISE 製) との電解特性の比較を行った結果を図 3.1.2.3 に示す。こちらについても同一仕様の MEA 特性を温度に関わらず差異なく評価できており、開発したラボ評価用セルにより MEA による活性評価を適正に実施できることを明確にした。また、本セルは締結ボルトのトルク管理だけでも繰り返し再現性に優れており、セル電圧は $\pm 0.75\%$ (IR incl.) / $\pm 0.3\%$ (IR free) @ 4 A cm^{-2} ($N=6$ での結果) と安定した評価が可能である。

② (項目 B-2) 劣化要因解析と加速劣化試験法の提案

本サブテーマでは、標準及び加速劣化条件下での触媒劣化挙動の解析と加速劣化試験法を検討する。標準 MEA (1 mgIr cm^{-2} anode/Nafion115/ 1 mgPt cm^{-2} cathode) 及びラボ評価セル (10 cm^2) を用いて $80^\circ\text{C} \cdot 2 \text{ A cm}^{-2}$ の条件下で連続電解 (1000 時間) を実施すると、図 3.1.2.4 に示すように緩やかなセル電圧上昇がみられるとともに、電解水やカソード排水から電解質膜/イオノマー劣化に起因すると考えられるフッ素イオン溶出やアノード電解質膜界面での酸化 Ir 粒子析出等の劣化現象が確認された。停止時の SPE 電解セルでは水素クロスオーバーの影響によりアノード電位が 0 V 付近まで低下しうることから、起動停止時のセル電圧挙動を模擬した電流 (4 A cm^{-2} , 10 秒) - 電位 (0.1 V , 10 秒) のステップサイクルを加速劣化条件として検討した。その結果、図 3.1.2.5 に示すように、定電流負荷条件 (4 A cm^{-2}) に比べセル電圧の上昇 (劣化) が大幅に加速されることがわかった。また、上記電流電位サイクル (10,000 cycles) 後の劣化 MEA の TEM 分析結果 (図 3.1.2.6) より、連続電解時と同様の酸

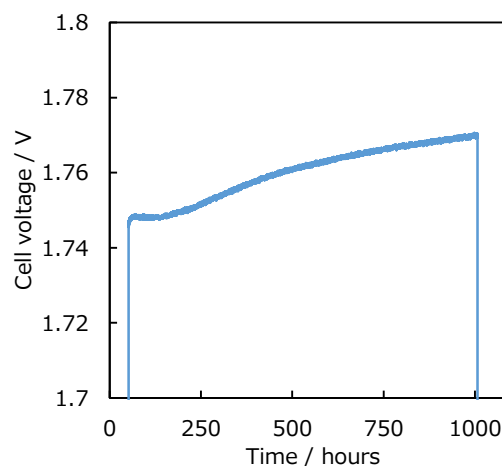


図 3.1.2.4 標準 MEA/ラボ評価セルによる連続水電解試験 (2 A cm^{-2} @ 80°C) におけるセル電圧変化

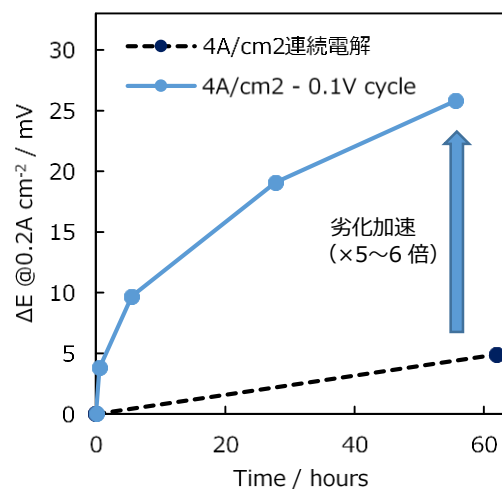


図 3.1.2.5 電流 (4 A cm^{-2} , 10 秒) - 電位 (0.1 V , 10 秒) サイクル @ 80°C による劣化加速 (劣化加速 $\times 5 \sim 6$ 倍)

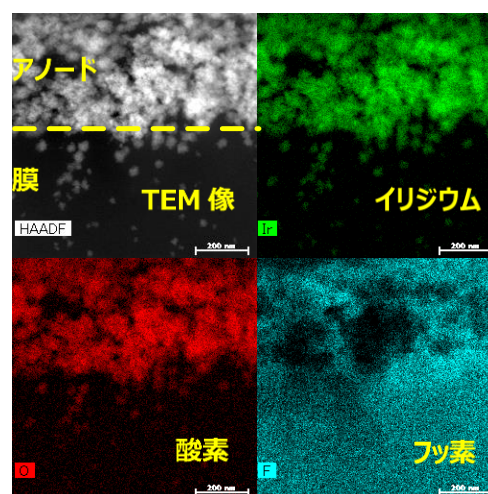


図 3.1.2.6 電流電位サイクル試験 (4 A cm^{-2} / 0.1 V @ 80°C , 10,000 cycles) 後のアノ

(添付-4) 成果

化 Ir 粒子が膜界面近傍に析出することが確認された。電位サイクルによる Ir 溶解挙動を確認するため、プローブ顕微鏡を用いてモデル Ir ナノ粒子の電位サイクルによる形状変化を解析した結果、電位サイクルが Ir 溶出を加速することが示唆され、電位サイクルが Ir 溶解の加速因子であることが確認された。さらに、電流電位サイクル中（特に初期）はセルからのフッ素イオン溶出量も増大していることから、電解質膜/イオンマー劣化も促進されていると想定され、加速劣化試験として起動停止を模擬した電流電位サイクル試験は有効と考えられる。

(3) (項目 C) アルカリ水電解及び固体高分子形水電解電極性能・劣化機構／物質移送解明のための高度解析技術開発 (国立大学法人京都大学)

① (項目 C-1) 電気化学計測と放射光計測による水電解の電極性能発現・劣化機構解明の研究開発

本項目では、放射光 X 線の強い透過能、高い時間・空間分解能を利用し、水電解作動条件下での反応を直接観測することで、反応機構を解明することを目的としている。本年度は、アルカリ水電解、固体高分子形水電解に対して、電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の計測法の確立を目標としている。特に気泡の影響を強制対流により軽減させたセルを試作し、横浜国立大学 (項目 A-3) 及び産業技術総合研究所 (項目 B-2) で開発される共通評価法・試験法のプロトコルに対応した評価法下での X 線吸収計測を行った。図 3.1.3.1 は Ni-Co 触媒における Ni K-edge, Co K-edge の X 線吸収スペクトル変動を経過時間に対してプロットしたものである。横浜国立大学で提案された 600 mA cm^{-2} の通電と 0.3 V vs. RHE での電位保持を繰り返す起動停止評価プロトコルに忠実に対応した、Ni の酸化還元挙動の計測に成功した。一方で Co はプロトコル下においても酸化還元挙動を示さなかった (図 3.1.3.2)。これは、Ni が活性点として機能しており、Co は結晶構造を保持する役割を担っていることが考えられる。固体高分子形電解においても同様の計測を行った。産総研提案の 4 A cm^{-2} の通電と 0.1 V vs. RHE での電位保持を 10 秒おきに繰り返す、起動停止プロトコル下においても気泡の影響なく計測が可能であり、Ir L₃-edge XANES スペクトルから IrO₂ の酸素不定比がプロトコルに応じて変化していることがわかった (図 3.1.3.3)。以上、アルカリ水電解、固体高分子形水電解に対して、電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の計測法の確立ができたことから、今年度の目標を達成できる見込みである。今後は、アルカリ水電解、固体高分子形水電解に対する計測手法を用いた、電位変動に対する電極／電解質界面の構造と電子構造の関係の定量化に着手する。

また、研究開発協力企業の試料に対する放射光解析を 2019 年度は 5 回行い、立命館大学

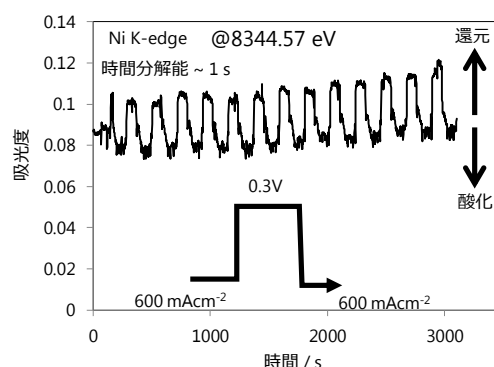


図 3.1.3.1 Ni K-edge

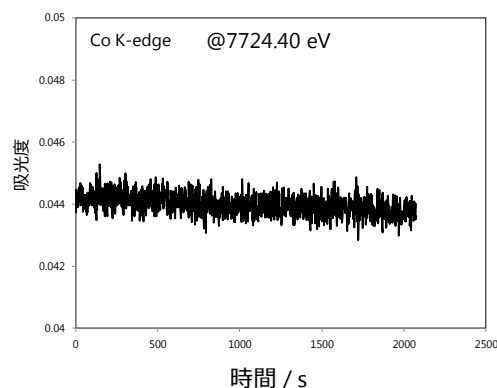


図 3.1.3.2 Co K-edge

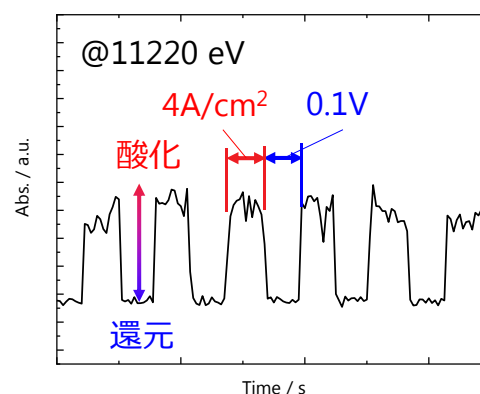


図 3.1.3.3 Ir L₃-edge

(項目 F) と協力し、データ提供とフィードバックを実施した。今年度は既に 2 件の解析を予定しており、年度末までに研究開発協力企業および他の NEDO プロジェクト参画大学の試料に対する解析とそのフィードバックを加速する。さらに確立した計測手法について、他の研究機関が広く用いることができるようにマニュアル化を行う予定である。

② (項目 C-2) 電気化学計測とレーザー計測によるナノバブル成長機構解明の研究開発

電気分解によって発生する気体分子は、当初は電極近傍の電解液に溶存するが、その後は溶存濃度が増大して過飽和状態に至った後に気泡の核形成が起こり、それらがナノマイクロバブルへと成長しながら電解液中を浮上して放出されると考えられる。本項目では、レーザー/光計測と電気化学計測をリンクさせることによって電極近傍におけるナノバブル成長機構を解明することを目的としている。2018 年度は、①レーザー散乱による電極極近傍のナノバブル計測と②2次元

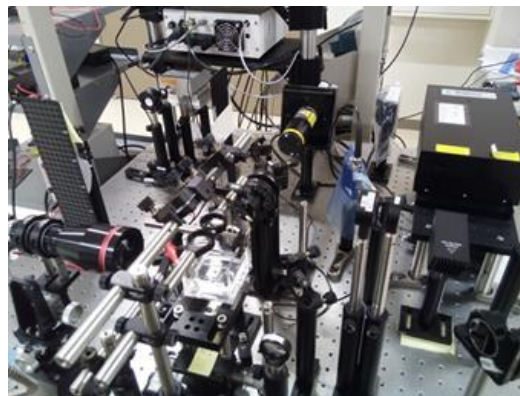


図 3.1.3.4 試作したナノバブル計測システム

光検出器による個々のナノバブル計測システムの試作を行った (図 3.1.3.4)。この計測システムは、Ni 電極を設置した KOH 電解液入りアクリルセル、レーザー散乱用レーザー光源、シャドウグラフ用 LED 光源、結像レンズ、および CMOS カメラで構成される。レーザー光および LED 光は、アクリルセルとカメラを結ぶ光軸に対してそれぞれ側方および後方から入射することにより、気泡からの散乱光と気泡の光学像を単一のカメラで同時に計測することが可能である。ナノバブル計測システムの試作後は、粒径が既知のポリスチレンビーズを用いた検出限界テスト、および検出限界向上に必要なレーザーと CMOS カメラのスペックについての検討をおこなった。

2019 年度は、前年度に試作したナノバブル計測システムをもとに、電極極近傍(電極表面から 1 mm)における気泡を光学的に高速動画計測するシステムへと発展させ、動的振る舞いを分析した。図 3.1.3.5(a),(b)に計測画像の例と独自開発した画像解析ソフトウェアによる画像解析結果を示す。図 3.1.3.5 の計測に用いた電解条件では、電極からの距離 $200 \mu\text{m}$ 以内で気泡径が $20 \mu\text{m} \rightarrow 35 \mu\text{m}$ へ成長することが分かった。2020 年度は、高速動画計測した電極極近傍のバブルの位置やサイズの変化を個別に調べられるように画像解析システムをさらに発展させた。電流密度を変えて気泡計測を行ったところ、電流密度が小さく気泡の合体が起こらない領域においては、電流密度の増加とともに気泡の数密度は増加するが個々の気泡径は小さくなることが分かった。こうして得た個別気泡のサイズおよび成長速度は電極からの距離の関数として関連付けることができるが、拡散モデルを用いるとこれらの情報を電極極近傍における過飽和水素濃度に変換することができる(図 3.1.3.6)。予想されたように、電極に近づくにつれて過飽和水素濃度は増大する。こうして算出した過飽和水素濃度を電極からの距離が $0 \mu\text{m}$ のところまで直線近似によって外挿すると、電極上での過飽和水素濃度

は約 31 mM となり、完全平滑電極においてバブル核が生成すると予想されている濃度より 1 桁低い値になった。その理由として、実験で用いた電極面は完全平滑ではなく、多少（数百 nm）の凹凸があるためにバブル核が形成されやすいのではないかと考えており、現在はその検証を進めている。

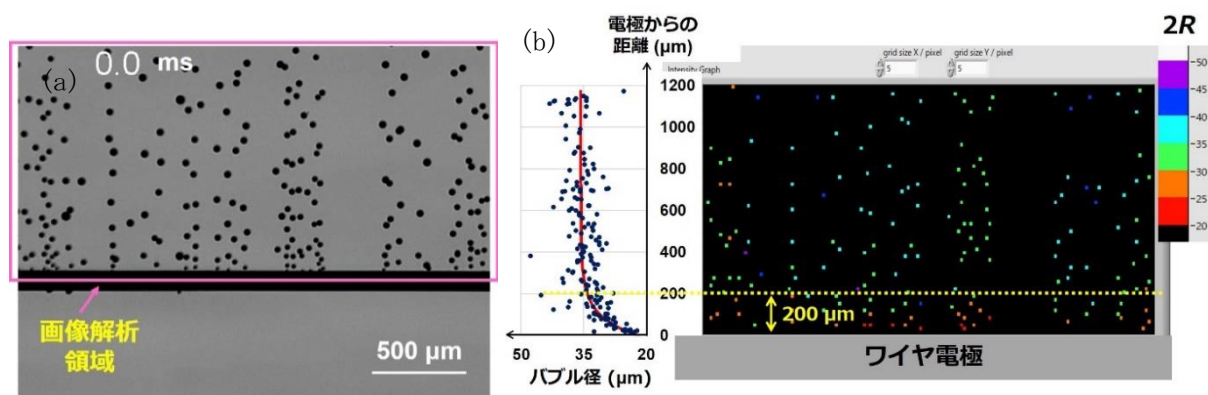


図 3.1.3.5 オペランド計測系によるバブルの(a)動的計測例と(b)画像解析結果

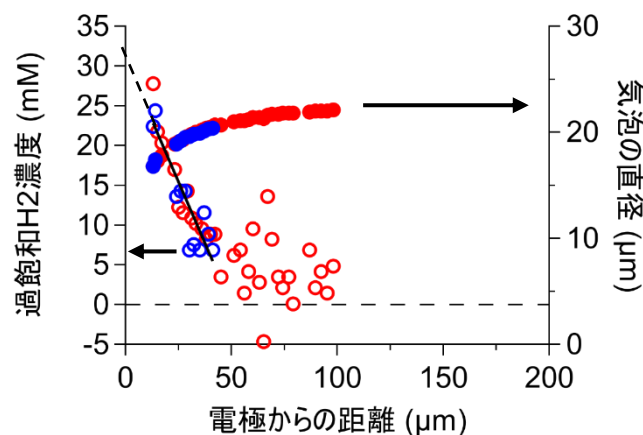


図 3.1.3.6 電極極近傍における過飽和水素濃度. (KOH 濃度は 0.1 M, 電流密度は 85 mA cm^{-2}).

(4) (項目 D) アルカリ水電解用電極触媒の活性評価法開発 (公立大学法人大阪)

アルカリ水電解用の電極触媒には Ni などの比較的安価な遷移金属がよく用いられている。一般に、電極触媒活性の指標として面積比活性 (単位電気化学表面積 (ECSA) 当たりの電流値) がよく用いられるが、遷移金属表面は貴金属表面に比べて遥かに酸化されやすいため、貴金属の ECSA 評価法を適用することは難しい。まず Ni 薄板電極について、電極触媒活性評価法を確立するうえで必要な ECSA を評価するための方法ならびに電極の前処理条件について検討した。

バフ研磨によって鏡面に研磨した Ni (ニラコ製) 電極のサイクリックボルタンメトリー (CV) の結果は、 $-0.6 \text{ V vs. Hg/HgO}$ 付近に表面 Ni 原子の $\alpha\text{-Ni(OH)}_2$ への酸化波と -0.9 V 付近に $\alpha\text{-Ni(OH)}_2$ の Ni への還元波を示した。 $-1.2 \sim -1.8 \text{ V}$ の電極電位で 2 C (クーロン) の電気量になるように Ni 薄板電極を定電位還元した後、CV 測定を行ったところ、酸化波の電気量 (Q_{ox}) は、 -1.4

V までの電位では増大したが、それより負電位側では一定になった。 Q_{ox} 値の増大は表面酸化物/水酸化物の除去に起因しており、この実験から、 -1.4 V で 2 C 分の定電位還元を行うと Ni 電極の表面酸化物/水酸化物はほぼ除去されたと考えられる。Ni 電極の面積を変化させて同様の実験を行うと、図 3.1.4.1 のように Q_{ox} 値は Ni 電極の見かけの面積と直線関係を示した。このことから、鏡面研磨した Ni 電極のラフネスは見かけの面積によらずほぼ一定であると考えられる。

水素発生の過電圧を印加しながら Ni 電極の交流インピーダンス測定を行ったときに得られた Nyquist プロットは半円を示し、この半円は過電圧の増加に伴って小さくなった。また、Nyquist プロットは、溶液抵抗、電荷移動抵抗 (R_{ct})、電気二重層容量 (C_{dl}) からなる単純な等価回路を用いてフィッティングすることができた。 C_{dl} 値は水素吸着・水素発生の影響のためか過電圧の増加とともに減少したが、 0.35 V の過電圧より大きくなるとほぼ一定になった。 $\log R_{ct}^{-1}$ を用いて作成した Tafel プロットにはいずれも直線領域が存在した。直線の傾きから求めた Tafel 勾配は 100 mV dec $^{-1}$ となり、Volmer 反応が律速の場合の値 (120 mV dec $^{-1}$) に近いことが分かった。

C_{dl} 値が水素過電圧により変化したことから、様々な走査速度での CV 測定により電気二重層領域を明らかにし、その領域で C_{dl} 値を求めた。得られた C_{dl} 値も見かけの面積と直線関係を示した (図 3.1.4.2)。また、この領域で交流インピーダンス法により求めた

C_{dl} 値とほぼ一致することも分かった。 C_{dl} 値は ECSA を反映した値である Q_{ox} 値とも直線関係を示すことになるため、 C_{dl} 値を Ni 電極の ECSA の指標として利用できることが明らかになった。

これらの結果を基に、多孔質構造を有する発泡 Ni (住友電気工業製) 電極について、電気二重層領域での CV 測定から C_{dl} 値を評価することを試みた。まず、前処理条件を調べるために、 -1.4 V vs. Hg/HgO で任意の電気量を通電させた後、電気二重層領域での CV 測定から C_{dl} 値を求めた。その結果、 C_{dl} 値と通電量の関係は図 3.1.4.3 のようになり、 C_{dl} 値は 200 C までは増大した

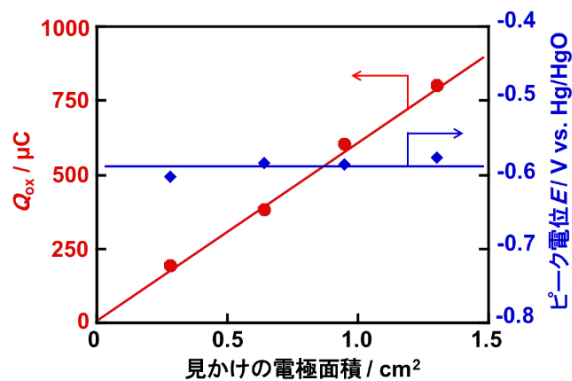


図 3.1.4.1 Q_{ox} 値と見かけの面積の関係

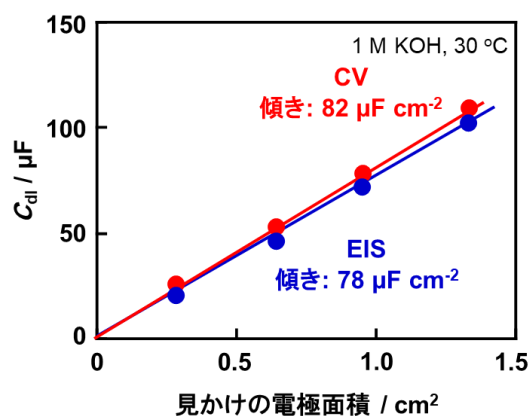


図 3.1.4.2 C_{dl} 値と見かけの面積の関係

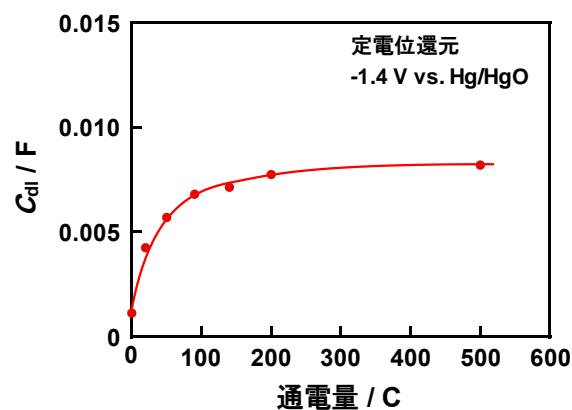


図 3.1.4.3 C_{dl} と通電量の関係

が、200 C を超えるとほぼ一定値に達することが分かった。したがって、 $-1.4 \text{ V vs. Hg/HgO}$ で十分な電気量 (500 C) の定電位還元を行うと Ni 表面酸化物/水酸化物はほぼ除去されると考えられる。Ni 薄板電極の場合に求められた C_{dl} 値 ($82 \mu\text{F cm}^{-2}$) を基に、発泡 Ni 電極の C_{dl} 値から表面積を見積もると約 101 cm^2 となった。この値は、カタログ値から見積もった面積 (約 90 cm^2) に近い値を示すことが分かった。以上のように、本評価法を用いると、多孔質構造を有する発泡 Ni 電極の ECSA を見積もることも可能であることが分かった。

次に、横浜国立大学 (項目 A-3) で提案された起動停止劣化試験用プロトコルに従って、実用アルカリ水電解用カソードである標準仕様カソードの耐久性試験を行った。起動停止を模擬するために、 -0.6 A cm^{-2} で 1 分間電解した後、逆電流試験として上限電位 (E_{MAX}) の 0.2 V vs. RHE まで電位掃引し、その電位で 1 分間保持するプロトコルを 200 回行った。その後、0 から -0.4 V vs. RHE まで LSV 測定を行った。一連の測定を 10 回繰り返したときの LSV 図は図 3.1.4.4(a) のようになり、水素発生電流値は起動停止サイクルを繰り返すと減少した。 E_{MAX} 値が 0.3 V vs. RHE の場合、水素発生電流値は最初の 200 回の起動停止サイクルの間に大幅に減少したが、その後は起動停止サイクルの増加にかかわらずほぼ一定であった (図 3.1.4.4(b))。また、2000 回の起動停止劣化試験後の写真より、触媒は基板から完全に脱落していることが明らかになった。 E_{MAX} 値を 0.1 、 0 V vs. RHE と小さくすると水素発生電流値の減少は抑えられ、触媒の脱落もほとんど認められなかった。また、水素発生電流値の減少が触媒の脱落によるものか調べるために、起動停止劣化試験後の電解液を誘導結合プラズマ質量分析により定性定量した結果、触媒成分と基板成分が検出され、特に触媒成分の溶出量は E_{MAX} 値の増加とともに増加することが分かった。

2020 年度は、2019 年度までに得られた知見を基に、二元系合金などの組成の異なる遷移金属電極について、触媒活性を評価するための電気化学的な C_{dl} 値および ECSA の評価法を確立することを検討する。また、触媒評価用小型電解槽を使用して、横浜国立大学 (項目 B-3) と協同で触媒劣化時の触媒活性評価法についての指針を得る。コロナウイルス感染症対策のため、当初計画より実験が遅れているが、現在、起動停止劣化試験用プロトコルに従って、標準仕様カソードに対してシャットダウン (SD) 耐性を改良した改良仕様 1 カソードの耐久性試験を行っている。今後、触媒活性評価や加速劣化試験において電気化学測定装置やセルの数を増やして実験を行う予定である。

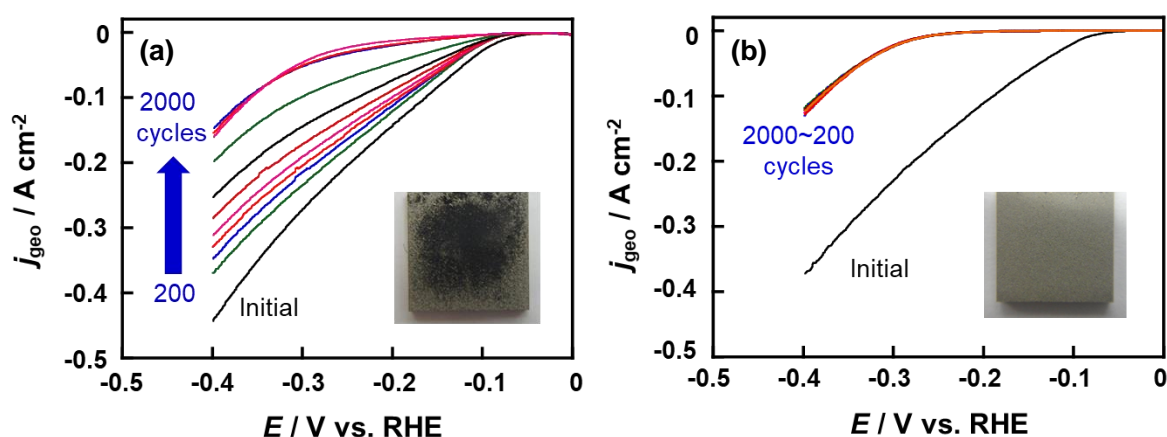


図 3.1.4.4(a) $E_{max} = 0.2 \text{ V}$ および(b) $E_{max} = 0.3 \text{ V}$ で起動停止劣化試験用プロトコルを繰り返したときの LSV 図と電極表面写真

(5) (項目 E) 再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムモデルの開発 (国立大学法人東北大学金属材料研究所)

東北大学では P2G の中核である水電解水素製造技術に関し、再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムのコンセプトを確立すべく、P2G 水素製造システムモデルを開発すると共に最適システム構成を構築することを目標としている。

P2G 水素製造システムをラボスケールから実際の製品ベースまでスケールアップさせるためには、広範囲でのシステムモデル最適化と最適化を導き出すための実データの取得が重要となる。特に再生可能エネルギーの出力電力からの短周期変動に対応する電解セルの反応を評価するためには、気象庁が提供している気象データでは時間分解能が不足しており、シミュレーションに適用するのは困難な状況である。そこでラボスケールでの P2G 水素製造設備を構築し、実機での取得データを解析して、シミュレーションモデルへ適用した。

① ラボスケールでの P2G 装置の導入 (図 3.1.5.1)

太陽光発電は 2 系統に分岐させ、1 系統目は 1 kW として通常 MPPT 制御を行い、余剰電力はシステムの計測制御電源で消費させた。また太陽光発電の 2 系統目は水電解装置へ直結して水電解セルに用いている。更に太陽光発電と並行して、風力発電装置 350 W を導入し、シミュレーションモデルの改良とシナリオの確立を行った。特に重要な因子は再生可能エネルギーでの停止期間頻度であり、風力発電の停止期間頻度は 1 分以下であり、太陽光発電の停止期間頻度は日中では 5~10 分、夜間では 10 時間以上と大きく異なることから、これら時定数の異なる再エネでの実測データを利用して更なるシミュレーションモデルの構築を行った。なお太陽電池の発電状況を正確に把握するために気温、湿度、気圧、風向、風速、日射量、パネル温度を GPS 時間に同期して記録できるよう設計した。

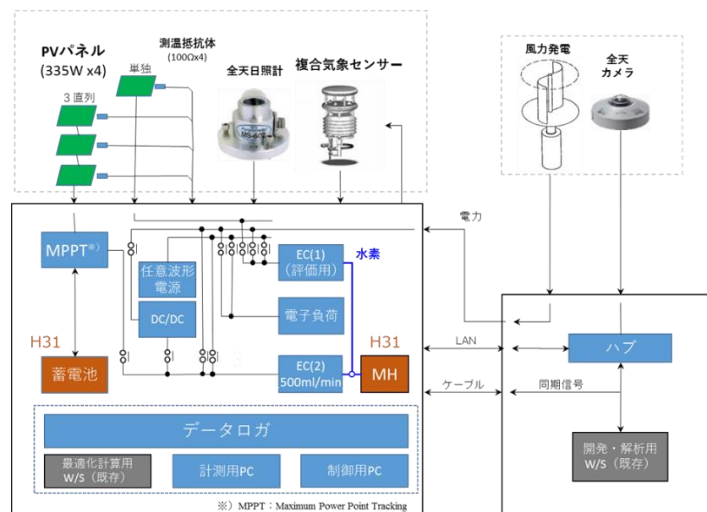


図 3.1.5.1 ラボスケールでの P2G 装置の導入

② 再生可能エネルギーを利用した水素製造システムの電解槽制御モデルの構築

太陽光発電を適用した水素製造システムにおいて、従来のシステムでは図 3.1.5.2 に示す AC グリッドをベースとした制御を行っているため、AC/DC、DC/AC 変換による効率低

下が問題である。太陽光から発電電力の高効率利用を実現するためには、太陽光発電からの電力を直接利用した DC グリッドを構築し、水電解槽で直接変換利用できることが鍵となっている。

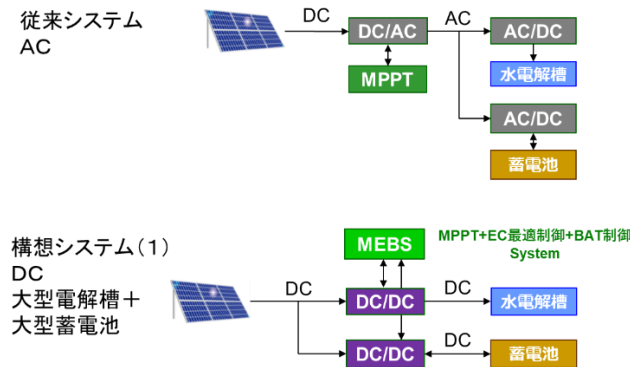


図 3.1.5.2 再エネ水素製造システムモデル(1)

DC グリッドシステムを想定した場合、太陽光発電からの電力は DC/DC を通じて、水電解槽と蓄電池へ印加されるため、PV からの最大電力点追従制御、水電解最適動作制御と蓄電池最適制御を連携し、システムの最適化を実現する MEBS (MPPT-EC-Bat System) が必要であることが明らかとなり、制御モデル開発を行っている。図 3.1.5.2 に示す構想システム(1)においては大型電解槽と大型蓄電池を適用しているが、図 3.1.5.3 の点線で示す効率のプロファイルが想定されると共に、大型の DC/DC が必要となるため、専用の開発及び設備コストの大幅アップが想定される。

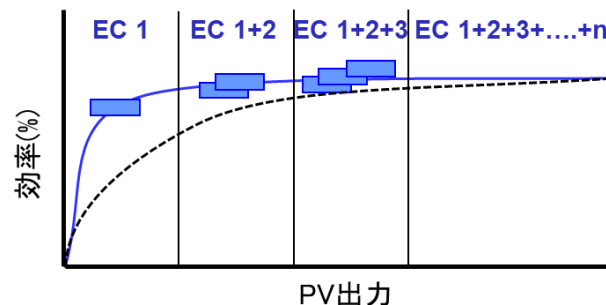


図 3.1.5.3 水電解槽の最適制御モデル案

そこで複数の電解槽と大型蓄電池を用いた構想システム(2)(図 3.1.5.4)を基に、太陽光発電からの発電出力に応じて、水電解槽の動作数を変化させ、電解最適動作点で制御して高効率化を実現する水電解槽の最適制御モデル案を構築した。また蓄電池も同時に充放電させ、PV 出力変化に伴う電解槽での応答性遅れを蓄電池によってカバーすることとした。

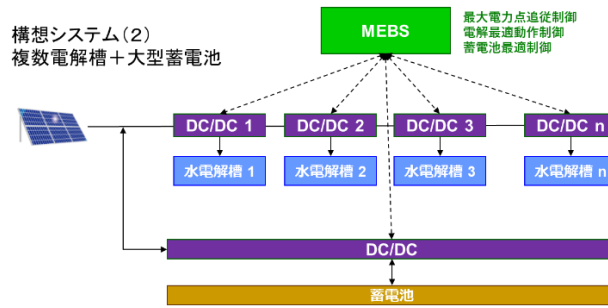


図 3.1.5.4 再エネ水素製造システムモデル(2)

更に図 3.1.5.5 の構想システム (3) では、電解槽+蓄電池を1ユニットとして、複数のユニットの組合せを想定している。このシステムでは現行の PV+蓄電池のシステムをベースに水電解槽を接続して、より応答性の高い制御を実現することが可能となる。既存のPV+蓄電池システムを利用でき、接続すべき水電解槽のスペックが明確となるため、システム開発・導入費用が構想システム1, 2と比べて低く抑えられると想定される。但し蓄電池が分散型で多数必要となるのが大きな課題であり、今後更にモデルの精査を実施すると共に、MEBSの開発推進を加速していく。

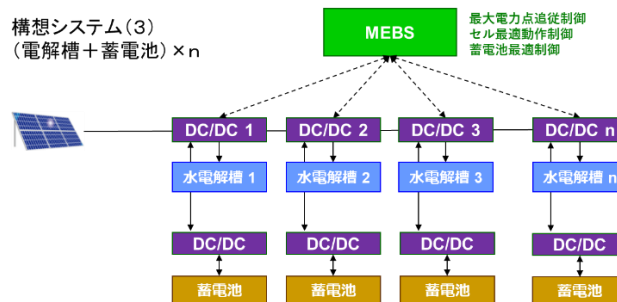


図 3.1.5.5 再エネ水素製造システムモデル(3)

③ 水素製造システムのシミュレーションモデルの構築

上記システムモデル結果に基づき、水素製造システムシミュレーションモデルを構築した。

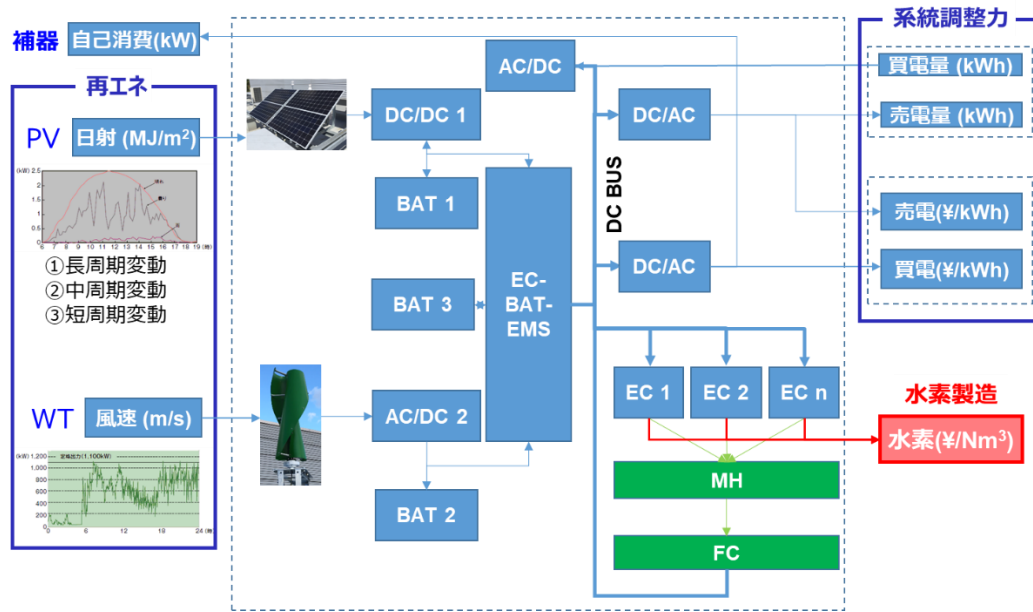


図 3.1.5.6 水素製造システムのシミュレーションモデル

図 3.1.5.6 に示すように、再エネからの発電電力量を入力因子とし、系統調整力である買電、売電と水素製造コストが出力可能なシミュレーションモデルを構築しており、更に水素製造システムに必要な性能を求めていく。

また図 3.1.5.6 のモデルを基に構築した Matlab ベースの開発ソフトに実測のデータを入力し、太陽光発電を 1 MW ヘスケールアップさせた際のシミュレーション結果を図 3.1.5.7 に示している。このモデルを利用して再生可能エネルギー利用効率最大、コスト最小点を求め、水電解槽へ求められる条件及び要求性能と因子を次に検証する。

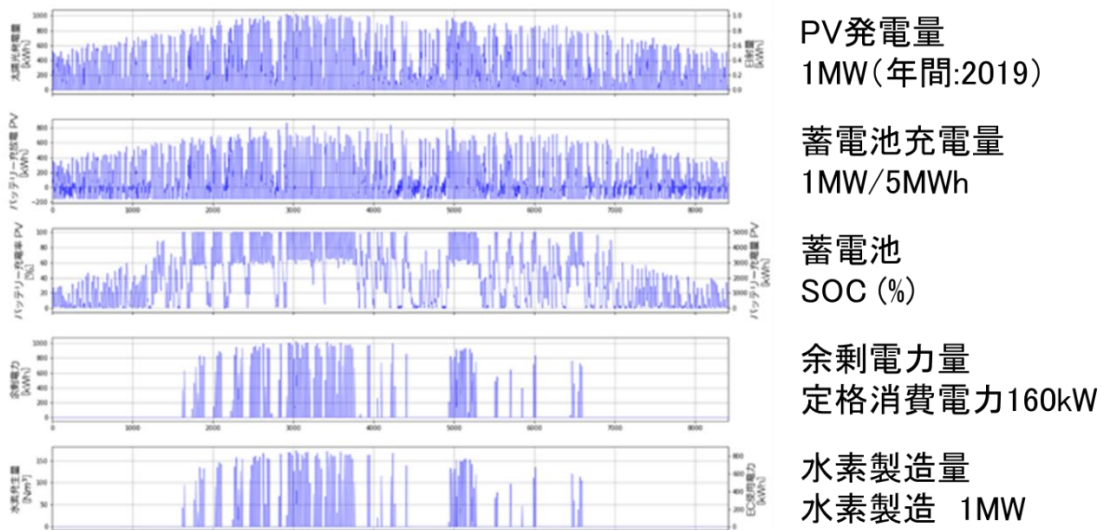


図 3.1.5.7 再エネメガソーラーレベルでの P2G システムシミュレーションデータ

④ 水電解槽に求められる変動電力追従性能の評価

上記図 3.1.5.2 の再エネ水素製造システムモデル(1)を想定して、太陽光発電 1 MW、水電解槽 1 MW、蓄電池入出力 1 MW と設定し、水素 1 Nm³ 製造時における CO₂ 排出量 Z [kg-CO₂/Nm³-H₂] がグリーン水素の定義である Z ≤ 0.39* を満たすよう再エネ水素製造モデルを制御する。

$$\text{CO}_2\text{フリー水素係数: } Z = \frac{\text{電解電力再エネ量 [kWh]} \times \text{再エネ原単位 [kg-CO}_2\text{/kWh]} + \text{電解電力系統量 [kWh]} \times \text{系統原単位 [kg-CO}_2\text{/kWh]}{\text{電解電力量 [kWh]} \times \text{水電解原単位 [Nm}^3\text{-H}_2\text{/kWh]}}$$

※CeritifHy の Green Hydrogen の閾値

上記制御において水電解槽への電力 (kW) / 電力量 (kWh) の分配と水電解槽に要求される電力追従速度 (kW/s) を変数とし、グリーン水素製造のためのアルゴリズム及び蓄電池容量 (kWh) を最小化するアルゴリズムを開発している。図 3.1.5.8 では曇天時における太陽光発電と水電解追従特性について示している。曇天時では青線で示すように太陽光発電からの発電電力は変動が大きく、水電解槽へは赤線で示すような電力追従特性が求められる。なお変動が大きく電解槽での追従が不足する青線内の領域においては再エネからの電力を蓄電池へ分配することになる。

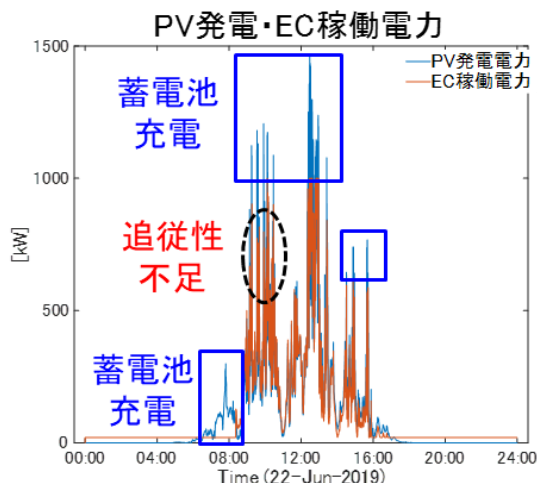


図 3.1.5.8 曇天時における再エネ変動と水電解追従特性

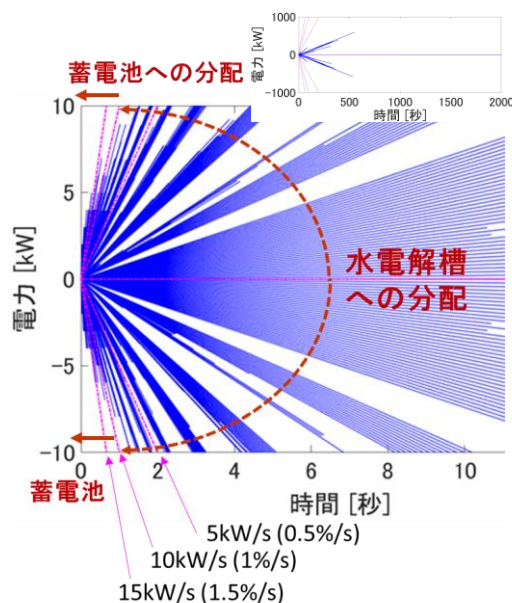


図 3.1.5.9 再エネ変動における電力分配と電力追従特性

図 3.1.5.9 は再エネ変動における電力分配、水電解槽に求められる電力追従性能、蓄電池に求められる電力受入特性を表している。なお縦軸を電力 (kW)、横軸を時間 (s) とし、青線の長さは発生頻度を示している。再エネからの電力変動は青線の傾き (kW/s) で示されており、水電解は定格の 0.1~5%/秒レベルの速度で追従させ、更に速い電力変動領域においては蓄電池へ分配するモデルを評価している。また水素製造量を増やすためには、蓄電池への電力分配/分配量をできる限り抑制する必要がある、 $Z \leq 0.39$ も実現するための蓄電池容量の最小化とシステムコスト評価も行っている。また更に①電解槽側のリーク電流最小化とシステム側の蓄電池容量の最適化、②耐追従性の向上と値の明確化、③耐オーバーロード特性の向上と値の明確化について更なる細かなデータと考察も必要であり、現在最適モデルを構築している。

(6) (項目 F) 高度解析による劣化機構解析手法の開発 (学校法人立命館)

プロジェクト開始時点では、水電解触媒の劣化状態を解析する手順が定まっておらず、各機関から輸送されるまでに劣化状態が変化する可能性が大きく存在していた。立命館大学 SR センターにて各受託機関の触媒試料を計測するにあたり、運転後の触媒試料輸送システムの確立を行った。測定試料はその性質に応じて、1)触媒試料を直接輸送する、2) 各受託機関で試料を封入して送付する、3) 測定用トランスファーベッセルを用いて、輸送中に大気に暴露されない状態で、試料を搬送する 3 種類のパターンを確立した。2019 年度以降に、電解試験前後における触媒試料の輸送に適用される。

アルカリ水電解用の触媒には、Ni、Co をベースにした金属試料が用いられていることを念頭に、それらの元素が含まれる金属、酸化物、水酸化物等の参照試料について、立命館大学 SR センターにて、O-K 殻、Ni-L 殻、Co-L 殻の軟 X 線吸収分光測定を実施して、比較可能な X 線吸収スペクトルを取得した。参照試料は購入可能な粉末試料に加えて、NiOOH 等電解反応により生成が推定されている化合物を京都大学から提供を受け、連携してスペクトルデータを取得した (図 3.1.6.1)。これらのスペクトル情報を解析し、Ni 触媒の電子状態を解析するための基盤情報を整備した。

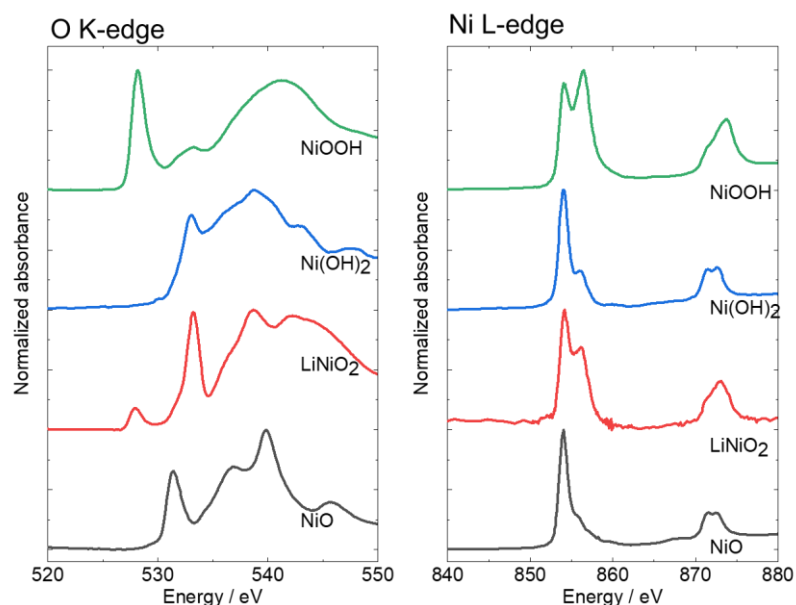


図 3.1.6.1 アルカリ水電解触媒の解析に用いるための Ni 化合物の参照スペクトル

立命館大学 SR センターにて各受託機関の触媒試料を計測するにあたり、各受託機関の試料取扱方法を定めるために、運転後の触媒試料について、洗浄方法の検証を行った。図 3.1.6.2 にサイクル後の生成物である NiOOH を異なる洗浄方法で処理した際のスペクトルを示している。電解試験で生成した触媒表面の化学状態は洗浄方法によって変化することが確認され、適切な洗浄方法についての情報を受託機関内で共有した。この情報は各機関が劣化試料の測定を実施する際の触媒処理の方法として活用される。

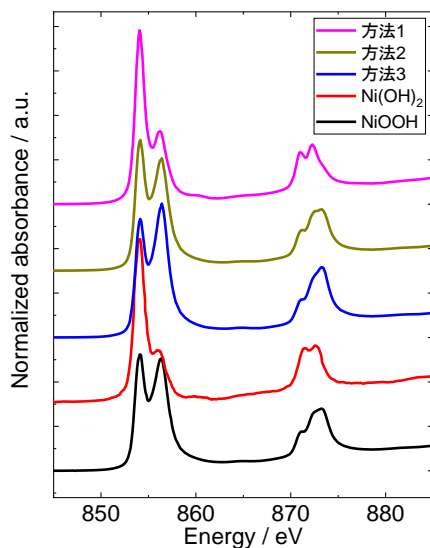


図 3.1.6.2 NiOOH を異なる処理方法で洗浄した試料の Ni-L 殻 X 線吸収スペクトル（生成物として推定される NiOOH と Ni(OH)₂ を参照試料のスペクトルとして掲載）。いずれも全電子収量法により取得したスペクトル。

電解触媒の劣化前後の状態を評価するために、小型の電解試験用測定セルを横浜国立大学の協力の下作製し、電気化学測定により Ni 金属を用いた単純な劣化状態の触媒試料を作製した。劣化前後の触媒試料を立命館大学 SR センターにて、軟 X 線吸収分光測定を実施した。図 3.1.6.3 は初期状態と劣化後の Ni-L 殻の X 線吸収スペクトルである。参照スペクトルと比較することにより、初期状態では表面百ナノメートル程度が酸化皮膜、内部が Ni 金属となっている一方で、劣化後では、表面から数百ナノメートルまで NiOOH 相が成長していることが確認された。本測定では、一度の計測によって、表面と内部の状態を分離して解析することが可能であり、水電解の触媒試料に対して、その劣化状態が深さ違いで解析可能であることを示した。同種の実験を Co 系の電解触媒の劣化前後を模擬した試料へ適用した。Ni 系と同様に初期状態のサンプルでは水酸化物が表面に存在しているのに対して、電位サイクル後ではオキシ水酸化物が生成していることを確認した。

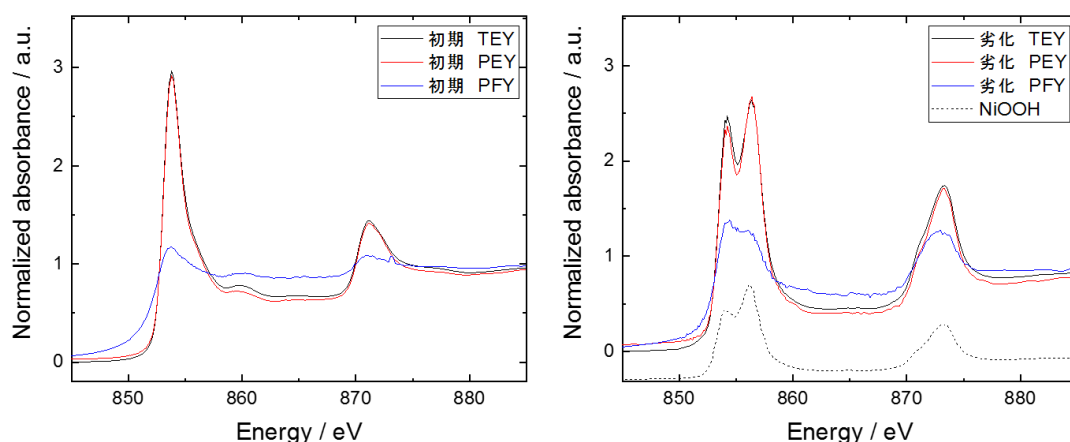
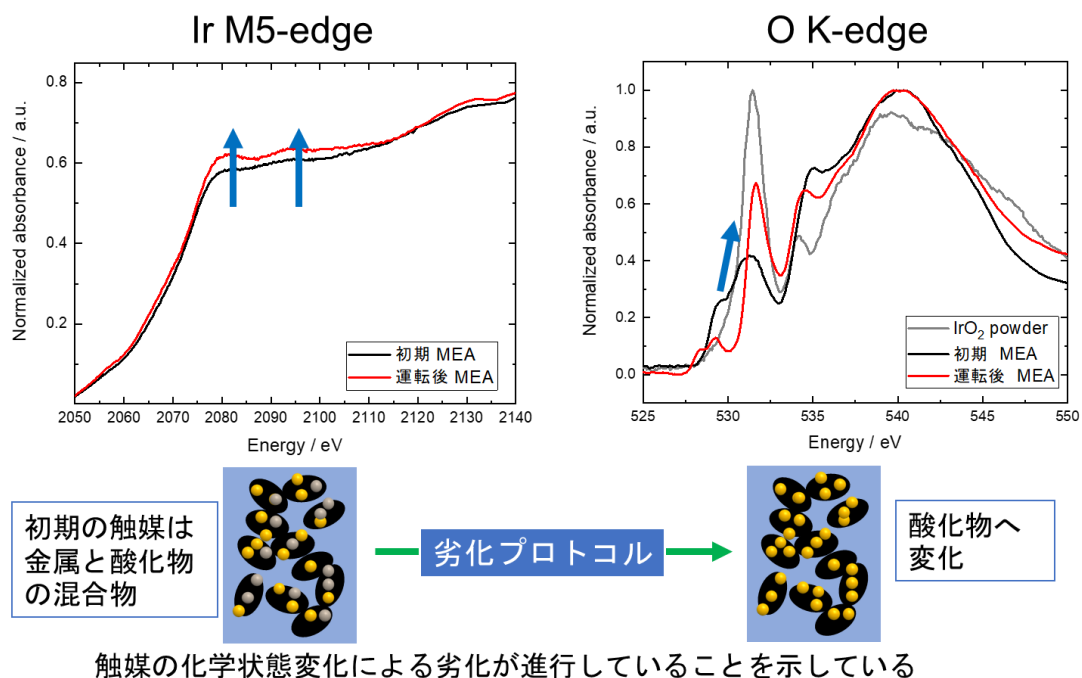


図 3.1.6.3 電気化学測定により作製した劣化前後における Ni 金属板の Ni-L 殻 X 線吸収スペクトル (左: 初期、右: 劣化) TEY、PEY、PFY はそれぞれ、全電子収量、部分電子収量、蛍光収量法による測定結果。参照試料として NiOOH を示している。

立命館大学で実施した参照データを基にして、横浜国立大学、京都大学、デノラ・ペルメレックにて得られた劣化後のアルカリ水電解触媒についても、スペクトルを計測して、その劣化モードを特定しデータをフィードバックした。また、固体高分子形水電解触媒についても、産業技術総合研究所から試料の提供を受け、イリジウムの M 殻および酸素の K 殻の吸収スペクトルを計測した (図 3.1.6.4)。固体高分子形水電解触媒の劣化要因として、初期状態と運転後での酸化状態の違いであることが挙げられた。また、研究開発協力企業の試料に対する測定を 2019 年度は 14 測定行い、京都大学 (項目 C-1) と協力し、データ提供とフィードバックを実施した。今年度の解析を含めて、年度末までに研究開発協力企業および他の NEDO プロジェクト参画機関の試料に対する解析とそのフィードバックを加速する。



触媒の化学状態変化による劣化が進行していることを示している

図 3.1.6.4 産業技術総合研究所で作製した固体高分子形水電解触媒の劣化前後における Ir-M 殻および O-K 殻の X 線吸収スペクトルと推定される劣化機構の模式図

各機関から提供される電極触媒試料を立命館大学 SR センターで解析するための輸送機構を確立し、参照試料のスペクトルデータを取得した後に、模擬的な劣化試験後の触媒試料のスペクトルデータを取得した。その上で、劣化モードを解析するための電子構造情報を整理した。各機関から試料提供を受け、立命館大学 SR センターにて測定後に情報をフィードバックするまでを 20 日以下で実施する体制を整備した。以上から、中間目標を達成した。

(7) (項目 G) 小型電解槽を用いた評価試験法の開発

2019年度において、3エレメントを有するアルカリ水電解セル（電解面積 27.8 cm^2 ）を3台、1エレメントを有する固体高分子形水電解セル（電解面積 10 cm^2 ）4台を立ち上げ、それらの初期100時間での連続電解評価および暫定的に確定した停止起動操作による加速評価を実施し、前者では約7倍、後者では約3倍の電圧上昇速度の増加傾向を得た。加速条件を選定することで、実際のセル運転モードでの劣化挙動を再現する適切な標準セルおよび加速条件を見出せる可能性が示唆された。

2020年度では、異なった起動停止操作による加速評価を実施し、劣化機構について精密な分析手法により解明している。連続電解評価として8,000時間、また、変動模擬電源において1,000時間の稼働評価を達成する計画である。

① アルカリ水電解

アルカリ水電解基準セルおよび設備仕様の確定と製作を行い、停止起動操作による加速評価を実施した。

a. アルカリ水電解実験内容

図3.1.7.1にアルカリ水電解セル設備および使用したセルを示した。アルカリ水電解セルは、3つのユニットセルからなるバイポーラセルで3台（電極評価として同時に3枚評価可能）を作製した。各セルのアノード室、カソード室には、それぞれポンプにより下部タンクの7N、60°CのKOH水溶液を供給している。中央のユニットセル（#2）の電極にはルギン管を裏面に設置して電位測定を常時測定できるようにした。電流密度0.6 A cm⁻²、60°Cで、3つの同仕様ユニットセルの電圧は、2.01~2.07 V程度を示し、ほぼ想定された性能を得た。

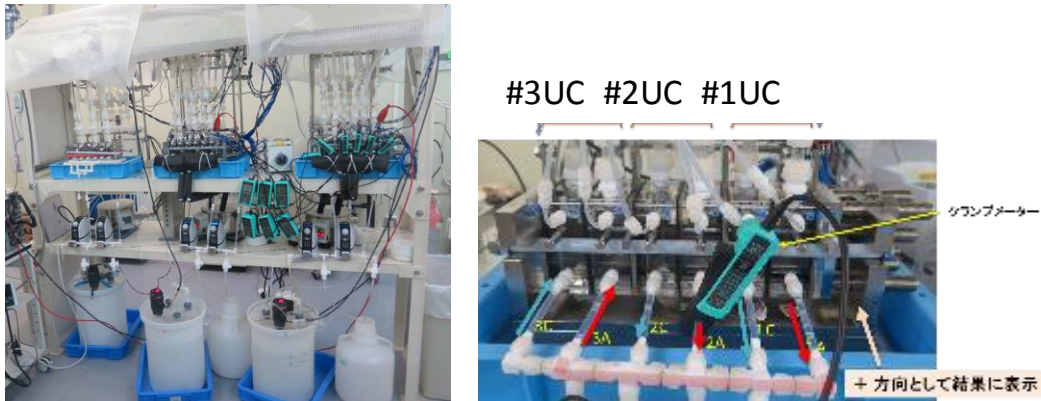


図3.1.7.1 (左)アルカリ水電解セル設備全体および(右) バイポーラ型アルカリ水電解セル

b. アルカリ水電解加速評価 (DNJ2019) 結果

図 3.1.7.2 に DNJ2019 加速評価の稼働モードを示した。定電流時の電流密度を 0.6 A cm⁻² とし、定電圧時の電圧を 0.5 V（3ユニットセル印可電圧としては 1.5 V に制御）とした。5 分毎に定電流⇄定電圧のサイクルを 100 回繰り返した。評価したアノードは、標準仕様、改良仕様 1、2 および 3 の 4 種類、カソード標準仕様である。改良 1 および 2 アノードは SD 耐性を改良した仕様、改良アノード 3 はより高活性な仕様である。

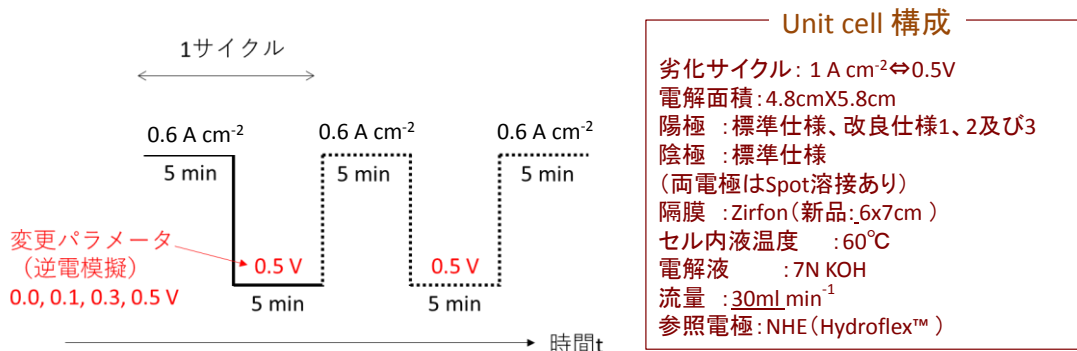


図3.1.7.2 アルカリ水電解セル加速評価条件 (DNJ2019) およびユニットセル構成

図3.1.7.3に標準アノードでの評価結果を示した。定電流時の電圧は、開始約1時間後から徐々に増加した。定電圧時の電圧は、各ユニットセルで少しばらつきが認められたが、0.3~0.6 Vの範囲で安定に推移した。セル電圧増加速度は1.5 mV h⁻¹であり、連続稼働時の0.2 mV h⁻¹に比較して増加した。

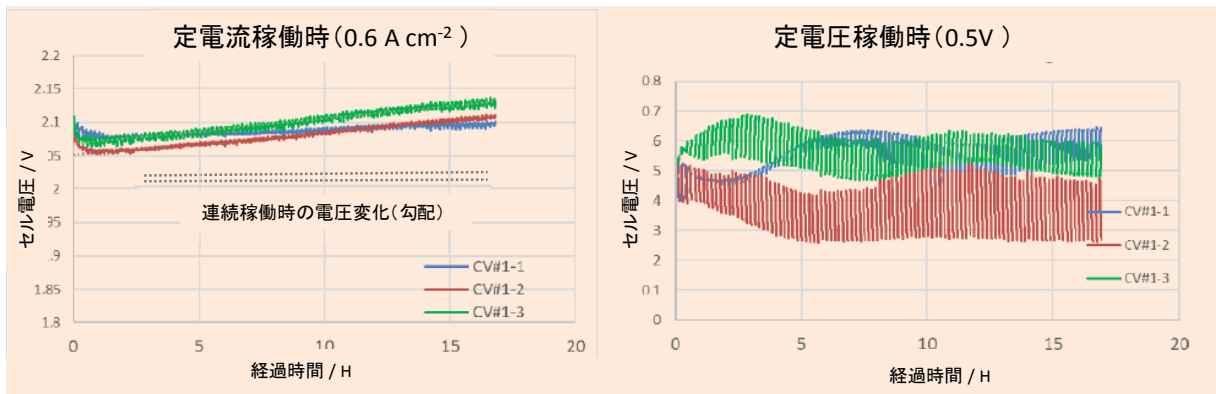


図3.1.7.3 標準アノード加速評価 (DNJ2019) におけるセル電圧 (左：定電流時、右：定電圧時)

図 3.1.7.4(a)に、4 種類のアノードを用いた加速評価前後でのセル電圧および電極電位の変化を示した。改良アノード 1 以外のセル電圧は増加した。図 3.1.7.4(b)に、加速評価における電極電位の変化を示した。定電流時のアノード電位は 1.5~1.6 V 程度、カソード電位は-0.1 V 程度ではほぼ安定な値を維持した。定電圧時のアノード電位は、アノード毎に異なる電位を示し、SD 耐性の優れた電極ほど貴にシフトした。定電圧時のカソード電位も、アノードにより異なる値を示した。

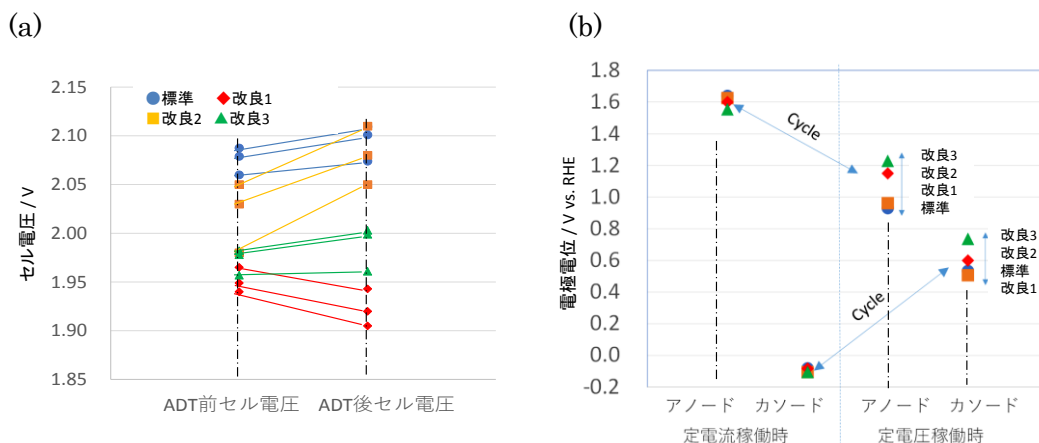


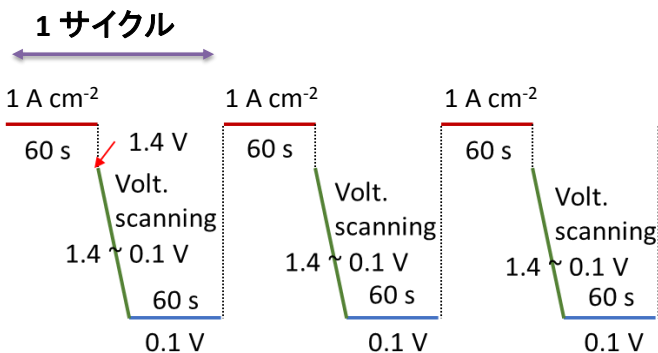
図3.1.7.4 DNJ2019加速評価前後における(a)定電流時のセル電圧および(b)電極電位の変化

標準アノードおよび標準カソードのセルは、定電圧時においてそれぞれ 0.9 V、0.5 V 付近に維持されたが、前者の触媒成分が還元し、後者の触媒成分が溶解する電位領域であった。SEM 像より、加速評価による触媒層形態に顕著な変化が観察された。

c. アルカリ水電解加速評価 (DNJ-V4) 結果

図3.1.7.5に、DNJ-V4の稼働モードを示した。定電流時の電流密度を 1.0 A cm^{-2} とし、定電圧時の電圧を 0.1 V (3ユニットセル印可電圧としては 0.3 V に制御)とした。1分毎に定電流⇄定電圧のサイクルを400回繰り返した。評価したアノードは、標準仕様、改良仕様2および3の4種類、カソードは標準仕様および改良仕様1である。改良カソード1はSD耐性を改良した仕様

である。



Unit cell 構成
 劣化サイクル: $1 \text{ A cm}^{-2} \leftrightarrow 0.1 \text{ V}$
 電圧スキャン: $1.4 \text{ V} \rightarrow 0.1 \text{ V}$
 電解面積: $4.8 \text{ cm} \times 5.8 \text{ cm}$
 陽極: 標準仕様、改良仕様2および3
 陰極: 標準仕様および改良仕様1
 (両電極はSpot溶接あり)
 隔膜: Zirfon (新品: $6 \times 7 \text{ cm}$)
 セル内液温度: 60°C
 電解液: 7 N KOH
 流量: 30 ml min^{-1}
 参照電極: RHE(Hydroflex™)

図3.1.7.5 アルカリ水電解セル加速評価条件 (DNJ-V4) およびユニットセル構成

図3.1.7.6に、標準アノードでの評価結果を示した。各ユニットセル電圧が顕著に増加し安定するまでの時間を図内に記載した。標準カソードでは、開始約2時間後から#2、#3が増加し5時間後に安定化し、#1は7.5時間後から増加し8.5時間後には安定化した。本系は複数回の計測を繰り返したが、ほぼ同等の推移を示した。改良カソード1では、開始後6時間後から#2、#3が増加し7.5時間後に安定化し、#1は遅れて増加し12時間後には0.2 V上昇し、その後も増加傾向を示した。カソードに依らずほぼ同等の変化が観察されたが、SD耐性の優れた改良カソード1では電圧増加の時間帯が遅くなった。電極電位の結果から、電圧変化はアノード電位の貴へのシフト(劣化)に相当することを確認した。

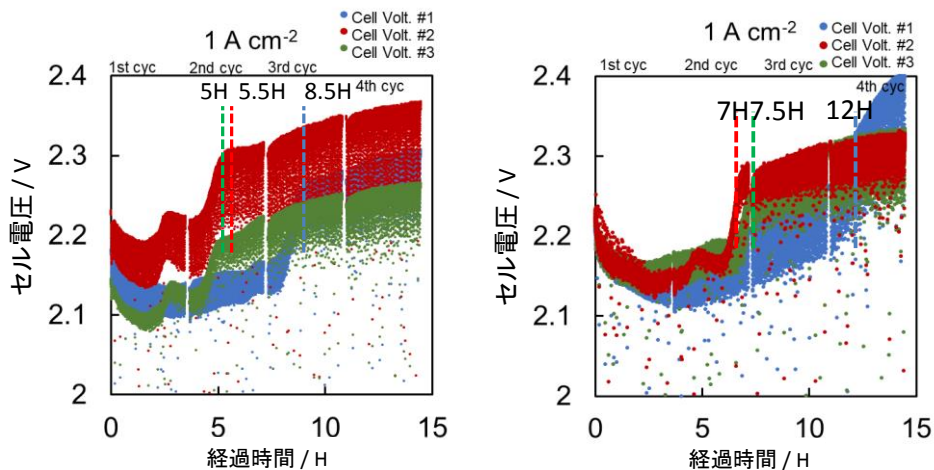


図3.1.7.6 標準アノード加速評価 (DNJ-V4) におけるセル電圧 (左:標準、右:改良カソード1)

d. ユニットセルの耐久サイクル数の比較

ユニットセル電圧が顕著に増加し安定化するまでのサイクル数を耐久サイクル数として、図3.1.7.7に示した。標準カソードにおいては、改良アノード2の#3ユニットセルを除いて、ユニットセル順(番号の小さいセルほど外部電源のプラス側に位置)に時間が短くなる傾向が得られ

た。#3のバイパス電流は還元方向であるため、#3セルのアノードでは還元反応が起こり、劣化速度が大きくなる可能性があり、反対に、#1のバイパス電流は酸化方向であるため、#1のカソードは酸化反応が起こることで劣化が早まる可能性があると推定される。従って、SD耐性の優れた改良アノード3では#3の耐久サイクル数が増加し、また、改良カソード1においては#1の耐久サイクル数が増加する。改良アノード3と改良カソード1からなる#3セルは、SD耐性に優れた電極の使用により、セルの安定性がもっとも向上したと推定される。

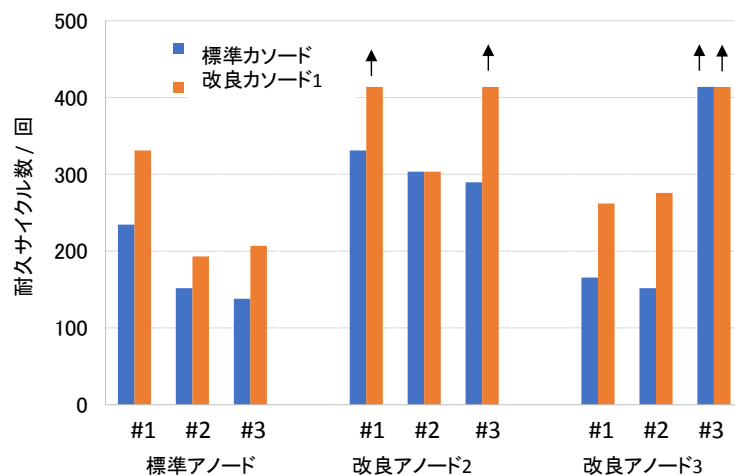


図3.1.7.7 ユニットセル電圧における耐久サイクル数(DNJ-V4)

e. アルカリ水電解加速評価の総括

2つの加速評価方法において、加速的にセル電圧が増加し触媒劣化が進行することを確認できた。SD耐性の優れたアノード、カソードの組み合わせにおいて、耐久サイクル数が増加することから、加速評価方法として妥当であることが示唆された。より詳細には、

1. DNJ2019の条件 (0.6 A cm^{-2} , $+0.5 \text{ V}$) において、定電流時の電圧増加速度は $1 \sim 5 \text{ mV h}^{-1}$ であり、連続稼働時の 0.2 mV h^{-1} に比較して顕著に増加した。
2. DNJ-V4条件 (1 A cm^{-2} , $+0.1 \text{ V}$) において、標準アノードの場合、DNJ2019試験の約7倍に達する加速性を示した。
3. 定電流時のセル電圧の増加は、電極の劣化によるアノード、カソードの電位シフトの和に従って変化し、電極劣化がセル電圧の増大と相関した。
4. 定電圧時の電位は、SD耐性の大きいアノードほど、両極とも貴にシフトした。加速評価後ではその違いがより顕著に変化した。
5. SD耐性を強化した仕様である改良カソード1の定電流時の電圧増加速度 ($8 \sim 10 \text{ mV h}^{-1}$) は、標準カソードの速度 ($10 \sim 19 \text{ mV h}^{-1}$) より小さく、セル電圧はより安定していた。
6. ユニットセル間で、逆電圧を伴う大きなばらつきが発生した。ユニットセルの放電特性のばらつきおよびユニットセル位置の要因 (バイパス抵抗分布) があると推定された。

② 固体高分子形水電解

固体高分子形水電解基準電解セルおよび設備仕様の確定と製作を行い、停止起動操作による加速評価を実施した。

a. 固体高分子形水電解内容

図3.1.7.8に固体高分子形水電解セル設備および使用したセルを示した。セル総数は4台である。各セルのアノード室、カソード室には、それぞれポンプにより純水を供給している。電解セルから戻る純水は活性炭およびイオン交換樹脂カラムに通すことで、電導度を $0.15 \mu\text{S cm}^{-1}$ 以下に維持した。

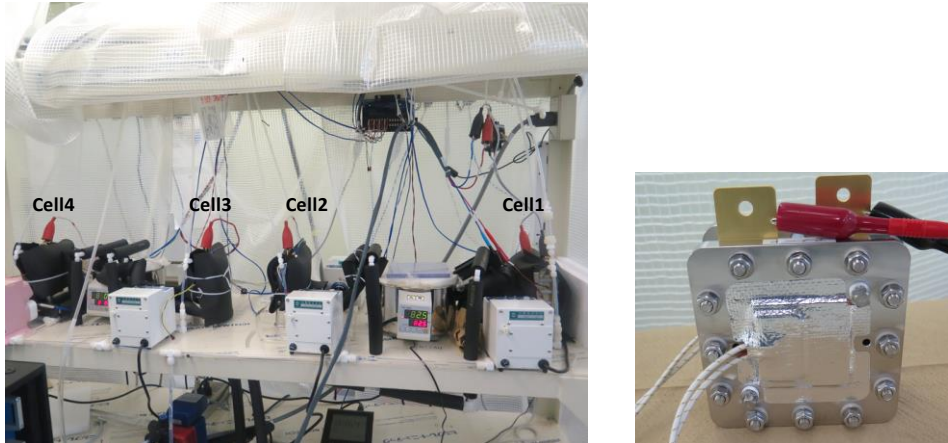


図3.1.7.8 (左) 固体高分子形水電解セル設備全体 (右) 固体高分子形水電解セル

初期運転結果では、電流密度 1.0 A cm^{-2} および 4.0 A cm^{-2} 、 80°C で、2つの同仕様セルの電圧として、それぞれ $1.62 \sim 1.64 \text{ V}$ 、 $1.97 \sim 1.99 \text{ V}$ 程度を示し、ほぼ想定されている性能が再現よく得られることを確認した。

b. 固体高分子形水電解加速評価結果

図3.1.7.10にDNJ02019およびDNJ-V01の稼働モードを示した。定電流時の電流密度を前者は 1.0 A cm^{-2} とし、後者は 4.0 A cm^{-2} とし、定電圧時の電圧を共に 0.5 V とした。定電流から定電圧への移行方法は 1.4 V から定電圧に30秒で電圧スイープとした。定電流および定電圧の保持時間は30秒とし、定電流⇔定電圧のサイクル数を600回繰り返した。評価には標準MEAを用いた。

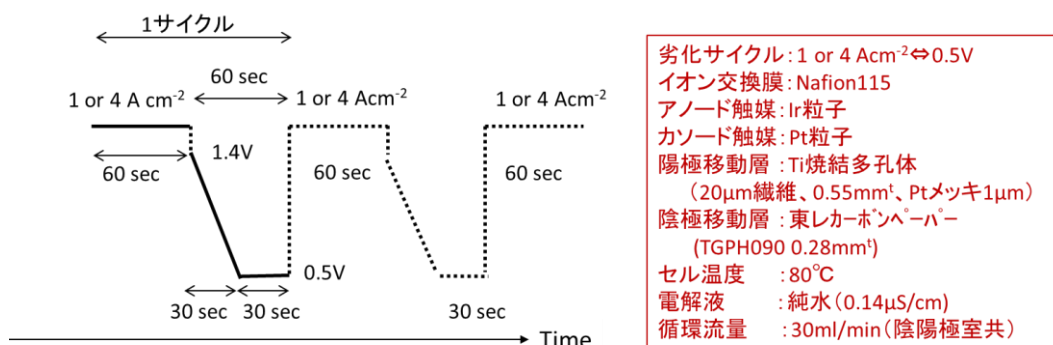


図3.1.7.10 固体高分子形水電解セル加速評価条件 (DNJ02019、DNJ-V01) およびセル仕様

図 3.1.7.11 に評価結果を示した。DNJ02019 加速評価におけるセル電圧増加速度は、安定期において $0.1 \sim 0.2 \text{ mV h}^{-1}$ であり、連続稼働時の 0.05 mV h^{-1} に比較して数倍に増加した。DNJ-V01

加速評価におけるセル電圧増加速度は、安定期において 0.5 mV h^{-1} であり、連続稼働時の 0.23 mV h^{-1} に比較して増加した。

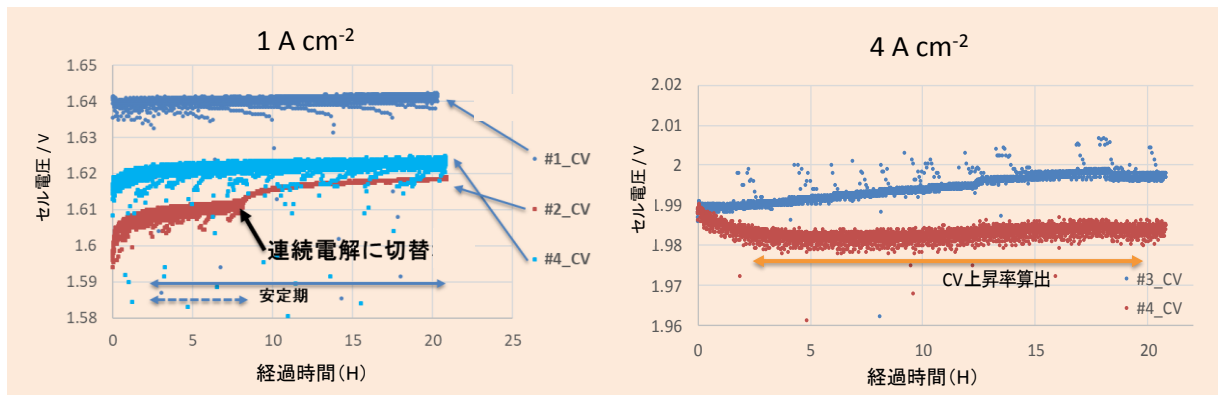


図 3.1.7.11 加速評価におけるセル電圧(左：DNJ02019 条件、右：DNJ-V01 条件)

c. 加速評価における電圧増加速度

図 3.1.7.12 に、連続稼働および加速評価における電圧増加速度を示した。連続電解および劣化加速評価いずれにおいても、電流密度が大きいほどセル電圧の増加速度が大きい結果を得た。連続電解安定期における 1 A cm^{-2} 、 4 A cm^{-2} での電圧増加は、それぞれ 0.06 mV h^{-1} 、 0.24 mV h^{-1} であったのに対して、加速評価ではそれぞれ 0.24 mV h^{-1} 、 0.4 mV h^{-1} であり、電圧増加速度は 2～4 倍程度であった。

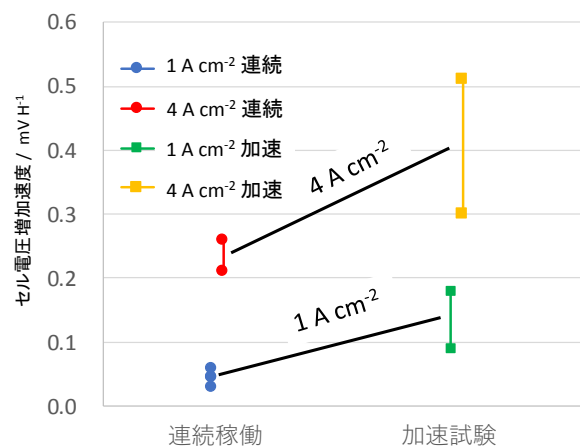


図 3.1.7.12 加速試験におけるセル電圧増加速

d. 固体高分子形水電解加速評価 (DNJ-V02) 結果

定電流時の電流密度を 4.0 A cm^{-2} 、定電圧時の電圧を 0.1 V とし (産総研と同等条件)、サイクル数を 50,000 回とする評価を実施した。図 3.1.7.13 に、加速評価における電圧結果を示した。電圧増加速度は、初期、後期それぞれで 0.35 mV h^{-1} 、 0.07 mV h^{-1} であった。連続電解安定期の速度 0.02 mV h^{-1} に対して、電圧増加速度は 3.5 倍程度であった。

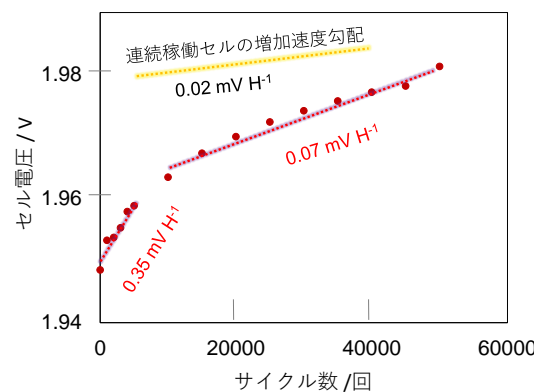


図 3.1.7.13 加速評価におけるセル電圧

e. 固体高分子形水電解加速試験の総括

暫定的に確定した停止起動操作による加速評価において、連続電解に対して加速評価できる可能性が示唆された。

(8) 水電解の研究動向調査

IEA-AFP TCP-ANNEX30、ECS meeting、ISE annual meeting 及び特許を対象として水電解技術の動向を調査した。

IEA-AFP TCP-ANNEX30 では水電解の劣化現象の理解や測定法のハーモナイゼーションを行っており、固体高分子形水電解について標準セル及び標準部材を用いたラウンドロビン試験が行われている。本プロジェクトでも標準セルに関する検討を行っているため、ラウンドロビン試験に参加するために、IEA-AFP TCP-ANNEX30 で標準セルとなっている Franhofer ISE 製のセルを導入した。

特許動向調査については工業所有権情報・研修館(INPIT)の支援を受け、2000 年以降の水電解に関する特許動向調査として、2013 年度特許出願調査報告書 電解式水素製造及びその周辺技術の分類方法を継承し、本プロジェクトで収集した 2010～2019 年の特許の分類を完了し、個別技術の技術動向を解析している。

3.2 成果の意義

本プロジェクトでは 2022 年度の最終目標として、プラント引渡し価格 30 円/Nm³ に資する電解性能、耐久特性、水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法の確立である。通常の工業電解は安定な電源で付加価値の高い化学品を製造するのに対して、このシステムは安価な変動性の再生可能電力を用いて水素を大規模に製造することを目指す。このために

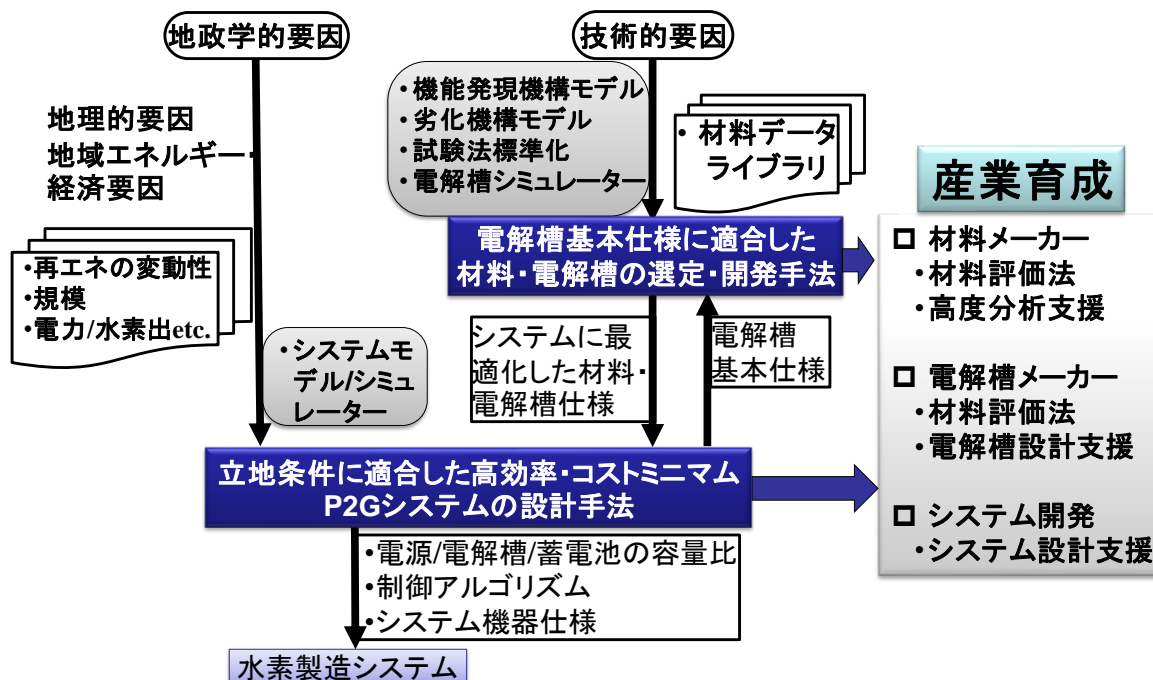


図 3.2.1 本プロジェクトの成果の社会実装に向けた取り組み

はこれらのシステムを製造する素材産業、システムメーカーなどの産業競争力を増すことが必要となる。図 3.2.1 に本プロジェクトの成果の社会実装に向けた取り組みを示す。P2G システムのカギとなる水電解槽では耐変動性、低コスト化、高効率化が必須であり、水電解用電極触媒の性能発現機構や物質移動に関する理解を機能発現機構モデルとして、電源の変動耐性を含めた耐久性について劣化機構モデルとして取り組んでいる。これらのメカニズムの理解に基づき低コスト高機能材料開発をすすめるための標準的な試験法を提案し、材料開発を支援・促進する。また、これらの基盤技術と P2G システムを繋ぐために電解槽のシミュレーターの開発もすすめている。中間目標として、これらの要素技術開発をすすめており、最終目標として、電解槽基本仕様に適合した材料、電解槽の選定・開発手法を提示して材料メーカーや電解槽メーカーの開発支援を行い、産業育成に結び付ける。P2G システムは再エネ電力と電力網や水素エネルギーネットワークを結合するシステムであり、電解槽と蓄電池を制御して再エネ電力の主力電源化と水素を利用した未電化分野の再エネ電化を達成する。このために、電解槽の応答性などの基本仕様を決定するアルゴリズムや電解槽や蓄電池の特性に応じた制御アルゴリズムが必要であり、中間目標としてシミュレーションによるシステム最適化と再エネ電力の予測と実測データに基づく制御シミュレーション実施して、P2G 水素製造システムに必要な電解槽の性能を評価し、最終目標として実機設計のガイドラインとなるようにモデルを拡張する。これらの手法は電解槽メーカーやシステムメーカーの開発支援となり、材料から電解槽にわたる技術的要因の体系化と、再エネポテンシャルの地域的要因や地域エネルギー経済などの地政学的要因と P2G システムを体系化したモデルを産業界全体で共有することは大規模な P2G システムを実用化するために必須であり、他にこのような取り組みは行われていない。本プロジェクトではプロジェクトの成果を速やかに産業界と共有するために図 3.2.2 に示した技術情報管理と産業育成のシステムを構築した。すなわち、プロジェクトを代表して横浜国立大学がプロジェクト外と締結する機密保持契約を通称「NDA1」と呼び、本プロジェクトの成果を逐次 NDA1 締結機関と共有する。さらに、NDA1 締結機関のうち、独自開発の材料などを本プロジェクトに提供し、評価法などの本プロジェクトの成果を利用して、本プロジェクトの評価法に関する研究開発の促進に寄与、評価結果を得る機関と本プロジェクト内の任意の機関のグループで機密保持契約を通称 NDA2 と呼び、本プロジェクトの成果の社会還元を促進している。この2つの NDA を締結して研究開発を推進する新たなオープンイノベーションシステムも他に類を見ないものである。この仕組みは、隔週のプロジェクト内の推進会議、随時行う NDA2 に基づく技術情報及びサンプル交換、半年ごとにプロジェクトメンバーと NDA 1 締結機関で開催する拡大推進会議により機能している。

電解システムの機能発現機構に関する知見として、世界最高レベルの時間及び空間分解能のガス発生電極観測システムを構築し、これまで明らかになっていない電極近傍の発生ガスの気泡径や数、気体の過飽和度などの計測システムを構築し、現象の理解のための基礎的データの取得を始めた(A-1, A-2, C-2)。電極触媒活性の理解として、最も高電流密度の電極上でガス発生反応中の放射光 *operando* 計測システムを開発し、スピネル系酸化物で Ni の酸化度と触媒活性の関係を明らかにし、電極触媒開発の手法モデルを実証した(C-1)。

劣化機構を構築するために、バイポーラー型アルカリ水電解槽及び固体高分子形水電解槽の起動停止に伴う電位変動を明らかにするとともに、放射光計測にて電位変動と連動して電極触媒の酸化度が変動することも実測し(A-4,B-2,C-1,F,G)、モデル化して起動停止プロトコルを提案し、

従来型のアルカリ水電解槽の電極触媒の劣化で剥離モードが深刻であることや、固体高分子形水電解用の IrO_x アノード触媒の溶解や、膜内での析出、触媒層のアイオノマーが分解して溶出するなどの劣化モードを明らかにした。起動停止時の劣化機構解析の重要性については、IEA AFC-TCP ANNEX30 でも議論されているが、実機の電位挙動解析やそのモデル化については情報共有が進んでいない重要技術である。また、これらの実験のためにスループットが高い電解槽や特殊計測用の電解槽を開発、特許出願するとともにマニュアル化して NDA1 締結機関と情報共有をすすめた。なお、固体高分子形水電解用のセルについては IEA AFC-TCP ANNEX30 のラウンドロビン試験にて性能保証するための基準セルとなっている Fraunhofer ISE 製のセルと同等の性能が得られることも確認済みであり、高度解析技術による学術的な理解、効率的な材料探索を可能とする測定技術の開発と情報共有を確実に推進している(A-3, B-1, D, F)。電極触媒活性を調べる化学表面積を評価するための電気二重層容量 C_{dl} に着目し、平滑及び多孔質 Ni 電極の C_{dl} 値を求める方法を構築した(D)。これらと並行して、要素試験結果をベースにして大型電解槽の設計を可能とする電解槽シミュレーターの開発をすすめ、動特性が表現できるモデルを構築した(A-5)。また、システムの高性能、低コスト化のためには電解槽単独ではなく、蓄電池との連携が必須である。水電解システムや蓄電池システムは、通常の電力機器とは異なる非線形な入出力及び動的特性であるにもかかわらず、再エネ出力変動に対応可能な水素製造システムモデルの開発として、再エネ電源/電解槽/蓄電池の容量比、制御方法、システム機器仕様の動的特性も考慮して関係を明らかにするアルゴリズムを構築した(E)。

以上のように、これまでに水電解などを含む P2G 関連技術では例がない体系化した材料、電解槽、システムに関わる材料開発、機器開発、及びシステム開発にまたがる開発手法を提案し、NDA1 締結機関と情報共有して産業育成に資する研究開発を推進した。

これまで本プロジェクトで実施した要素技術の成果の意義をまとめると

- ・ IEA AFC-TCP ANNEX30 の標準セルと同等性能で国内調達可能、スループットが高い評価試験がセルの技術情報を開示
- ・ これまでに報告されていない電解槽停止時の電位変動挙動の計測結果をもとにした起動停止劣化評価モデルを提案
- ・ 燃料電池の実用化に大きく貢献した物質移動の可視化/観察技術を水電解の物質移動の分野に取り込んで世界最高レベルの時間及び空間分解能でガス発生電極を観測、解析
- ・ 放射光を用いたガス発生電極の *operando* 計測で計測を妨害する気泡除去システムを世界最大レベルの電流密度での計測及び電流変動等の過渡現象解析計測技術の開発
- ・ これまでにない電解槽の動的特性をパラメーターとした P2G システムの最適化アルゴリズムを開発

3.3 成果の最終目標の達成可能性

これまで述べてきたとおり、中間目標である変動する再生可能エネルギーに対する劣化メカニズムの解明を行い、劣化等を規定する因子を見出すとともに、材料・セルに関する試験法や設計に関わる要素技術の開発は順調に進んでおり指針原案の目途が立ち、産業界との情報共有の仕組みも確立した。今後、さらに要素技術の精度を高めるとともに、要素技術を結合する電解槽やシ

システムのシミュレーション技術の構築をすすめることにより、最終目標であるプラント引渡し価格30円/Nm³に資する電解性能、耐久特性を有する電解槽と、この電解槽を用いた水素製造システムの開発に向けた指針原案の策定や性能等評価方法が確立できると考えている。

4. まとめ及び課題、事業化に向けたシナリオ

本プロジェクトの最終目標は再生可能電力を用いた高効率・コストミニマムのP2Gシステム及びその電解槽を開発するガイドラインとなる共通評価法や設計手法を提案し、産業育成に資することである。このために、材料技術、電解槽設計技術、ならびにP2Gシステム設計技術にわたる技術の中で未解明な現象や共通認識とすべき事象を取りまとめて体系化すべく、電極表面の水素や酸素の気泡の挙動などの物質移動や電極表面の酸化物の価数などの *operando* 計測技術を開発し、水素の気泡が細かく脱離しやすいのに対して、酸素の気泡は脱離しにくく成長すること、電極近傍の過飽和度の定量化、アルカリ水電解や固体高分子形水電解用のアノード材料が電気化学測定ではガス発生反応との分離が困難な領域でも電源変動に伴い酸化還元を繰り返していること、起動停止時にアルカリ水電解ではバイポーラー電解槽内の漏洩電流により、固体高分子形水電解ではカソードで生成した水素が電解質膜を透過してアノードに達することによりアノードが還元されることが劣化を大きく加速する要因であることを明らかにし、この電位変化を模擬した起動停止劣化プロトコルを提案した。また、これらの電極劣化に対する対策を施した電解槽では標準部材のものより耐起動停止性が向上することも確認した。これらの基盤技術を電解槽設計に反映することを目的とした電解槽のモデル化では非定常状態を含めたモデリングの枠組みを構築し、晴天、曇天、雨天などの代表的な太陽光発電の発電挙動に対して蓄電池容量を最小化して水素製造プラントのコスト削減するためのプラント設計及びそのプラントの制御アルゴリズムの原型を構築した。中間目標としていた各項目の基本原理を確認し、最終目標に向けて各項目の精度を向上して定量化、体系化してP2Gシステム及びその電解槽を開発するガイドラインとなる共通評価法や設計手法を提案する。さらに、電極性能と起動停止劣化挙動の計測データと、それとリンクさせた解析データをデータベース化し、新材料開発及び開発支援に援用する試みについても取り組む。これらの技術情報についてはNDA1を締結した各機関と共有して産業育成に資する活動も継続して実施する。

本プロジェクト終了後には、次期プロジェクトとして再エネの変動対応水電解技術と変動電源

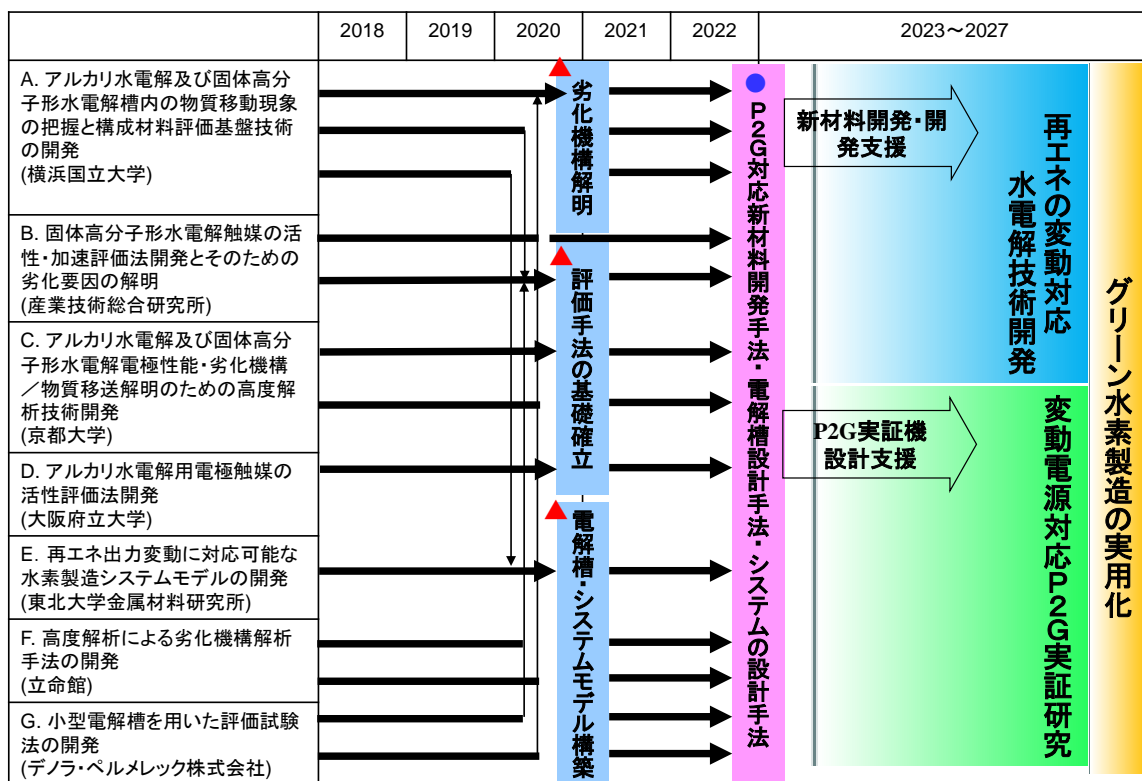


図 4.1 本プロジェクトの事業化への貢献へのシナリオ

対応 P2G 実証研究が必要であると考えている。本プロジェクトの成果は新材料開発及び開発支援や実証研究用プラントの設計支援技術として次期プロジェクトに貢献し、低コストグリーン水素製造 P2G の実用化に向けて技術開発をすすめる。

5. 特許・研究発表等

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2020年3月31日	特願 2020-62101号	電気化学単セル	横浜国立大学
2	2020年7月30日	特願 2020-129161号	アルカリ水電解用アノード及びその製造方法	デノアラ・ペルメレック、京都大学、横浜国立大学

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2018年11月	第42回電解技術討論会	アルカリ水電解における電極の構造の逆電流への影響	日野壮貴、長澤兼作、黒田義之、光島重徳
2	2019年3月	日本化学会第99春季年会	再生可能エネルギーを用いたアルカリ水電解の開発の課題とその解決	光島重徳、長澤兼作、黒田義之
3	2019年3月	電気化学会第86回大会	粉末触媒の酸素発生能評価法	松浦一生、長澤兼作、塚田雄大、黒田義之、光島重徳
4	2019年3月	電気化学会大86回大会	アルカリ水電解の電解停止時間がNi及びNiCo系アノード電極の劣化に及ぼす影響	北村優、徐瑤、長澤兼作、黒田義之、加藤昭博、錦善則、辻井文哉、Zaenal Awaludin、光島重徳
5	2019年3月	第21回化学工学会学生発表会(東京大会)	アルカリ水電解槽における水素・酸素微小気泡の生成挙動の高速度ビデオによる直接計測	小嶋祐大、三角隆太、上ノ山周、光島重徳
6	2019年5月	第26回燃料電池シンポジウム	固体高分子形水電解性能評価用の小型セルの開発	柏木勇人、井上陽介、長澤兼作、黒田義之、光島重徳

7	2019年6月	WHTC2019	Degradation of Ni and NiCo/Ni anode for alkaline water electrolysis simulated start and stop operation	光島重徳
8	2019年6月	第24回動力・エネルギー技術シンポジウム	固体高分子形水電解で発生する酸素気泡の可視光カメラによる挙動観察	中山武志、渡邊 孝之介、荒木拓人
9	2019年6月	北関東地区化学技術懇話会記念講演会	再生可能エネルギー導入のための電解及びエネルギーキャリア技術	光島重徳
10	2019年8月	第29回電極材料研究会	層状岩塩型 LiNiO ₂ のカチオンミキシング量と酸素発生活性との関係	山口竜晴、内山智貴、山本健太郎、中西康次、松永利之、内本喜晴
11	2019年8月	第29回電極材料研究会	アルカリ水電解の起動停止を模擬した劣化プロトコルがNi系アノード電極に及ぼす影響	北村優、徐瑤、長澤兼作、黒田義之、加藤昭博、錦善則、辻井文哉、Zaenal Awaludin、光島重徳
12	2019年9月	第22回XAFS討論会	アルカリ水電解用 LiNiO ₂ アノード電極のカチオンミキシング量制御による触媒劣化抑制	山口竜晴、内山智貴、山本健太郎、中西康次、松永利之、内本喜晴
13	2019年9月	2019年電気化学秋季大会	バイポーラ型アルカリ水電解槽におけるセルスタック数と逆電流の関係	日野壮貴、長澤兼作、黒田義之、加藤昭博、錦善則、真鍋明義、光島重徳
14	2019年9月	Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCChE) 2019	High-speed video measurements of hydrogen and oxygen microbubble formation in vicinity of electrode in	小嶋祐大、三角隆太、上ノ山周、光島重徳

			alkaline water electrolysis	
15	2019年9月	IEA-ANNEX30	Introduction of “Advancement of Alkaline and Polymer Electrolyte Electrolysis”, a NEDO project	光島重徳
16	2019年10月	236th ECS Meeting	Separation of Polarization for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers	光島重徳、柏木勇人、長澤兼作、黒田義之
17	2019年10月	236th ECS Meeting	Evaluation Method of Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Media	松浦一生、長澤兼作、塚田雄大、黒田義之、光島重徳
18	2019年10月	The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies	The effect of Cation Mixing on Activity and Durability toward Oxygen Evolution Reaction in LiNiO ₂	山口竜晴、内山智貴、山本健太郎、松永利之、中西康次、内本喜晴
19	2019年11月	東北大学産学連携先端材料研究開発センター活動報告書平成30年度版	水素エネルギーシステムの開発	河野龍興
20	2019年11月	第43回電解技術討論会ーソーダ工業技術討論会ー	遷移金属電極の電気化学的表面积評価法	片石智義、知久昌信、樋口栄次、井上博史
21	2019年11月	第43回電解技術討論会ーソーダ工業技術討論会ー	アルカリ水電解におけるセルスタック数の逆電流への影響	日野壮貴、長澤兼作、黒田義之、加藤昭博、錦善則、真鍋明義、光島重徳
22	2019年11月	第43回電解技術討論会ーソーダ工業技術討論会ー	アルカリ水電解における水素・酸素微細気泡の高速ビデオ計測と作用極の形	小嶋祐大、三角隆太、上ノ山周、光島重徳

			状の違いによる比較	
23	2019年11月	第43回電解技術討論会ーソーダ工業技術討論会ー	軟X線吸収分光法を用いたアルカリ水電解触媒の劣化解析	折笠有基、高田尚輝、内山智貴、内本喜晴、山岸弘奈、太田俊明
24	2019年11月	The 10th Asian Conference on Electrochemical Power Sources	X-ray Absorption Spectroscopic Analysis on Degradation State of Catalysis for Alkaline Water Electrolysis	高田尚輝、内山智貴、内本喜晴、山岸弘奈、太田俊明、折笠有基
25	2019年12月	The Fall Symposium of the Canadian Section of the Electrochemical Society	Reverse current mechanism and ADT protocol for alkaline water electrolyzer	光島重徳
26	2020年1月	レーザー学会学術講演会第40回年次大会	斜め前方散乱による水溶液中に分散したナノ粒子の個別検出	安東航太、内本喜晴、中嶋隆
27	2020年2月	第16回国際水素・燃料電池展 FCE X P O 2020 専門技術セミナー	再生可能電力導入のための水電解技術	光島重徳
28	2020年3月	第22回化学工学会学生発表会(東京大会)	アルカリ水電解における気泡発生挙動の観察と気泡成長速度の検討	池田隼太、小嶋 祐大、三角隆太、上ノ山周、光島 重徳
29	2020年3月	電気化学会第87回大会	Bubble behavior characterization and current measurement by using RRDE	包イン、長澤兼作、黒田義之、光島重徳
30	2020年3月	電気化学会第87回大会	4セルバイポーラ型アルカリ水電解槽における逆電流測定と	長澤兼作、日野壮貴、黒田義之、加藤昭博、錦善則、真鍋明義、光島重徳

			解析	
31	2020年3月	電気化学会第87回大会	アルカリ水電解用アノードの起動停止模擬での停止時の電位依存性	松浦一生、北村優、長澤兼作、黒田義之、光島重徳
32	2020年3月	電気化学会第87回大会	固体高分子形水電解触媒の評価手法の開発	五百蔵勉、城間 純、永井つかさ、秋田知樹、安田 和明
33	2020年5月	237th ECS Meeting	Reverse Current Behavior and ADT Protocol for Start & Stop Operation of Bipolar Alkaline Water Electrolyzer	光島重徳、日野壮貴、長澤兼作、黒田義之、加藤昭博、Zaenal Awaldin、錦善則
34	2020年6月	第57回日本伝熱シンポジウム	PEM水電解における参照極を用いた過電圧分離に関する数値解析	渡邊孝之介、井上翔輝、柏木勇人、長澤兼作、黒田義之、光島重徳、荒木拓人

—論文—

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019年6月	立命館大学SRセンター紀要 第21号	Soft X-ray Absorption Spectroscopic Study on Nickel Electrode for Alkaline Water Electrolysis	高田尚輝、内山智貴、内本喜晴、山岸弘奈、太田俊明、折笠有基
2	2020年1月	Optica	Pushing the detection limit of single nanoparticles and nanobubbles in bulk water with time- and space-resolution	安東航太、内本喜晴、中嶋隆
3	2020年2月	Electrocatalysis (Springer)	Current Measurement in Electrochemical Characterization of Gas Evolution Reactions on a Rotating Ring-Disk Electrode	包イン、長澤兼作、黒田義之、光島重徳

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：①-6を参照

課題番号：②－１

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／大規模水素利用技術の研究開発／水素専焼対応型 Dry Low NO_x 高温ガスタービンの研究開発」

委託先：三菱日立パワーシステムズ株式会社、三菱重工業株式会社（２０１９年度終了）

１．研究開発概要

日本の産業競争力を維持・強化していくためには、エネルギーの安定供給を確保し、安定かつ低廉なエネルギーを供給することが不可欠である。また、厳しさを増す国際エネルギー情勢や地球温暖化問題を踏まえ、技術先進国である日本が、主要国や国際機関等と連携し、いかにして国際的な責任を果たしていくかが重要である。同時に、日本成長戦略にも資するという観点から、安定供給確保や技術開発の強化を含めた強靱なエネルギー政策が必要である。

地球温暖化、化石燃料の枯渇等の課題に対して、省エネルギー・節電対策の抜本的強化、再生可能エネルギー導入・普及の最大限の加速、環境負荷に最大限配慮した化石燃料の有効活用が求められている。また、将来の二次エネルギーとして、電気、熱に加えて、水素が中心的役割を担うことが期待されており、水素を本格的に利活用する水素社会の実現が求められている。

再生可能エネルギーの導入については、例えば、風力発電の導入量は、世界では 2011 年以降 40.5 GW／年で増加し、2030 年には最大 2500 GW 程度まで拡大するとの予測がある。再生可能エネルギーは出力変動が大きいため、再生可能エネルギー発電設備の増大とともに、余剰電力量も増大していく見込みである。このような余剰電力量の有効利用には、蓄電池あるいは水素等への変換によるエネルギー貯蔵技術が不可欠であり、特に変動周期が長く、容量が必要とされる場合には、水素に変換して利用することが有効である。

水素を利用して発電する水素発電について、水素基本戦略で掲げる年間水素消費目安量 500 万～1000 万トンは発電容量で 15～30 GW に相当し、大型ガスタービンによる水素専焼技術開発および商用化が不可欠となる、水素専焼大型ガスタービンの導入は、水素需要を大幅に拡大し、水素インフラの充実と普及拡大に対しても、大きな波及効果をもたらすと考える。

水素は、ガスタービンの燃料として一般的に使用される天然ガスと比べて燃焼特性が大きく異なり、特に燃焼速度が水素は速い。そのため、大型ガスタービンの天然ガス焚きドライ低 NO_x 燃焼器に一般的に採用される旋回流を利用した予混合燃焼方式では、水素燃焼時に火炎が燃料噴射ノズルに接近（逆火、フラッシュバック）することにより生じるノズル焼損の発生を完全に防止することは困難と考える。そこで、水素燃焼には、旋回流を伴わず逆火に対して高い耐性をもつ多孔噴流燃焼方式（クラスタバーナ）が有効と考える。

本事業では、二次エネルギーとしての水素を最大限に活用するため、2030 年といった長期的視点を睨み、数百 MW 級の発電事業者向け大型ガスタービンに適用可能な水素専焼ドライ低 NO_x 燃焼器の技術開発を目的に「大型ガスタービンに適用可能な燃焼器の設計」を達成するために必要な研究開発項目を実施した。燃焼器のバーナとして高い逆火耐性のあるクラスタバーナを採用し、水素専焼条件における安定運用と低 NO_x 性を両立するガスタービンを実現するために必要な課題の抽出と、その解決に向けた研究開発を実施した。

2. 研究開発目標（設定の理由も含め）

本事業で開発する燃焼器は、日本国内の発電事業において一般的に要求される脱硝前 NOx 50 ppm（15%酸素濃度(O₂)換算）を低位発熱量（Lower Heating Value : LHV）基準の発電端コンバインド効率 60%が達成可能な燃焼条件において、フラッシュバックの発生を伴わず、安定運用が可能な性能を目標とした。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

開発項目は、単孔ノズルの解析・検証、縮小モデルバーナの解析・検証、大型ガスタービン向けクラスタバーナの構造成立性検証、燃焼振動抑制の検討 の4項目あり、いずれも目標を達成した。以下、その成果の詳細を述べる。

燃焼器に採用するクラスタバーナの設計フローを図1に示す。クラスタバーナでは、空気流中に燃料を噴射して空気と燃料を混合する混合管1本を単孔ノズルとし、これを基本構成要素とする。次に、単孔ノズルを複数本配置してモデルバーナを構成し、さらにモデルバーナを複数配置して燃焼器1缶（マルチクラスタ燃焼器）を構成する。単孔ノズルはモデルバーナの切り出し要素であり、モデルバーナはマルチクラスタの切り出し要素となるため、クラスタバーナはそれぞれの切り出しモデルで設計や検証が可能である。したがって、開発順序は単孔ノズル、モデルバーナ、燃焼器の順となる。

ガスタービン燃焼器の技術課題として、窒素酸化物（Nitrogen Oxides、NOx）、フラッシュバック、燃焼振動が挙げられる。それらの課題の中で、水素は燃焼速度が速いため、特にフラッシュバックの発生が懸念される。クラスタバーナは単孔ノズル（混合管）ごとに独立した短小火炎となるため、混合管の水素燃料濃度分布が燃焼特性に対して重要となり、低NOx性能とフラッシュバック耐性を両立させる必要がある。そこで、クラスタバーナでは水素燃料濃度分布を制御することで低NOxとフラッシュバック耐性を図る。図2にクラスタバーナのコンセプトを示す。燃料濃度分布で特に断面内の最大値、および壁面での最大値が重要であり、NOxは断面最高濃度、フラッシュバック耐性は壁面最高濃度で決まると考えられる。NOx目標を満足する断面最高濃度としてNOxリミットが決まり、断面最高濃度をNOxリミット以下の濃度とする必要がある。一方、フラッシュバックが発生しない壁面最高濃度として、壁面フラッシュバックリミットが決まり、壁面最高濃度を壁面フラッシュバックリミット以下の濃度とする必要がある。以上から、燃料濃度をNOxリミットと壁面フラッシュバックリミットを両立させる範囲とするように設計し、低NOx性能とフラッシュバック耐性を満足させる。

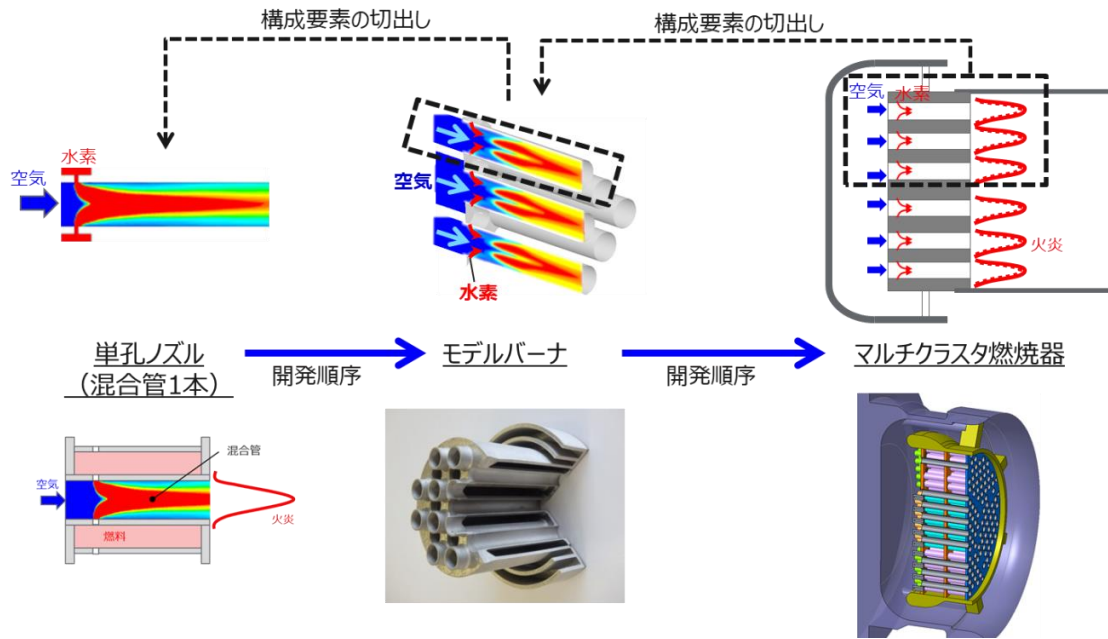


図1 クラスターバーナの設計フロー

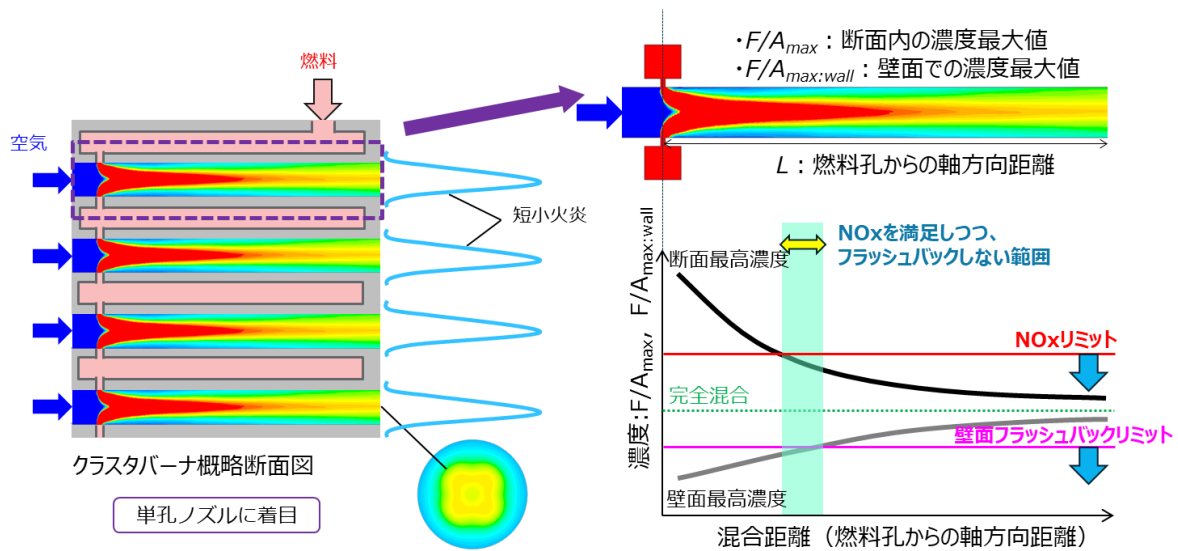


図2 クラスターバーナのコンセプト

クラスタバーナの研究開発は単孔ノズル、モデルバーナ、燃焼器の順に進め、それぞれの開発項目の成果の詳細を以下に述べる。

(1) 単孔ノズルの解析・検証

本項目では、クラスタバーナの基本構成要素である単孔ノズルの形状について、数値解析（非燃焼 CFD 解析(CFD：数値流体力学、Computational Fluid Dynamics)）によりフラッシュバックを発生しないノズル構造を設計し、非燃焼試験（気流試験）によりフラッシュバックを発生しない許容範囲にあることを検証した。

クラスタバーナの設計パラメータを図3に示す。設計パラメータとして、燃料孔配置（燃料噴孔数、燃料噴射角度）、混合管入口形状（ベルマウス、切欠き形状）、および燃料噴射方式（壁面燃料噴射方式、上流突出噴射方式）を検討した。燃料噴孔数、燃料噴射角度や混合管入口形状を調整することで、断面と壁面の最高濃度ともに低減でき、低 NOx 性能とフラッシュバック耐性をともに確保できることを確認した。次に、燃料噴射方式の影響を検討した。両方式の断面と壁面の最高濃度の CFD 解析結果を図4に示す。壁面燃料噴射方式の NOx・フラッシュバック両立範囲を水色の領域、上流突出噴射方式の両立範囲を茶色の領域で示す。両者を比較すると、上流突出噴射方式の方が壁面燃料噴射方式よりも両立する範囲が拡大しており、混合管の上流に位置する突き出し部から燃料を噴射することで、低 NOx 性能とフラッシュバック耐性を満足する領域を拡大できることを確認した。

CFD 解析で検討した構造について、気流試験によりフラッシュバックを発生しない許容範囲にあることを検証した。上述の燃料噴射方式を変えた2ケースを対象に、気流試験により燃料濃度分布を計測した。図5に両方式の気流試験の断面コンター、および断面最高濃度と壁面最高濃度を比較する。断面最高濃度については壁面燃料噴射方式の方が低くなり、低 NOx 性能は有利といえる。一方、壁面最高濃度については、解析結果、気流試験結果ともに上流突出噴射方式の方が壁面濃度が低下するため、フラッシュバック耐性に対して有利であることを確認した。以上の結果から、気流試験によりフラッシュバックを発生しない許容範囲にあることを検証できた。

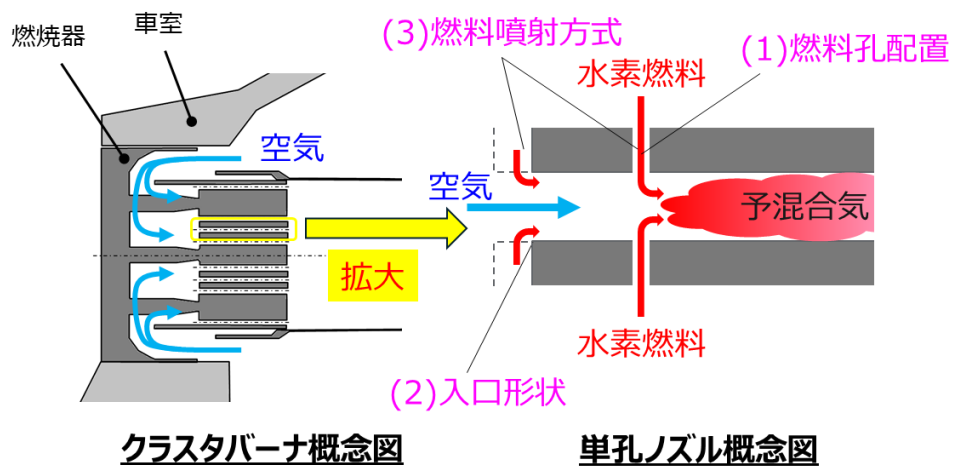


図3 クラスタバーナの設計パラメータ

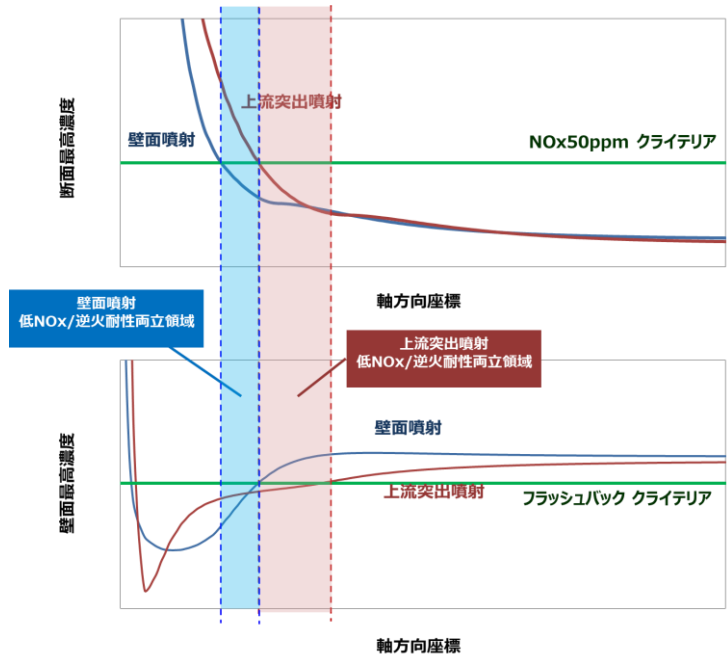


図4 燃料噴射方式の影響（非燃焼 CFD 解析結果）

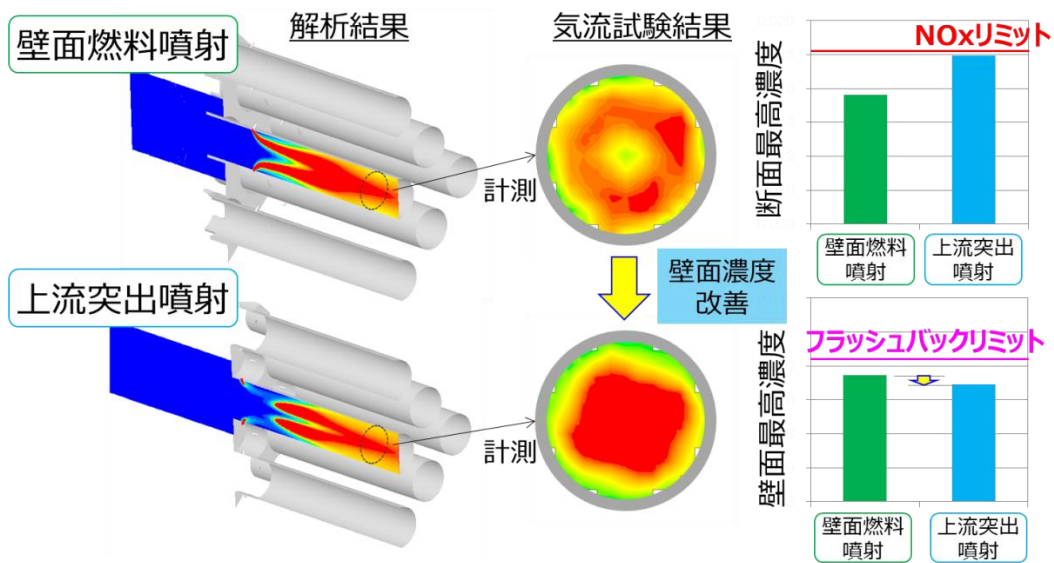


図5 燃料噴射方式の影響（非燃焼 CFD 解析と気流試験結果）

(2) 縮小モデルバーナの解析・検証

本研究開発項目では、解析・気流試験により基本設計した単孔ノズルを複数本配置した縮小モデルバーナについて、燃焼試験によりその NO_x 性能、フラッシュバック耐性を検証した。

縮小モデルバーナの燃焼試験供試体を図 6 に示す。縮小モデルバーナは、単孔ノズルを 9 本配置した構成とし、着火および燃焼試験条件を変化させるときに、火炎を安定に保持するためのパイロット用の燃料孔を設けた。このモデルバーナの燃焼試験が可能な燃焼試験装置を設計・製作（図 7）し、本装置を用いて縮小モデルバーナの燃焼特性を確認した。図 8 に NO_x 計測結果を示す。低圧・中圧試験条件において、フラッシュバックの発生無く、安定燃焼を実現し、ターゲット計画条件において NO_x が 50 ppm(15%O₂ 換算)以下を確認した。なお、低圧条件と中圧条件で NO_x カーブの傾向が異なっており、火炎形状が異なっていることが考えられるため、今後、さらに高圧の実機相当圧力条件においても燃焼特性を確認する必要がある。

次に、空気流速の影響を調べた試験における火炎観察結果を図 9 に示す。可視化計測を試みたが、水素燃焼で生成する水分による赤色発光が強まり、希薄予混合水素火炎の微弱な可視光は確認できなかった。ターゲットの計画空気流速条件では、バーナが全体に赤熱しておらず、フラッシュバックの発生無く、安定燃焼を実現できた。一方で、ターゲットの計画条件の 60%の空気流速の条件では、バーナが赤熱して、フラッシュバックの発生が確認された。このフラッシュバック発生の限界空気流速をさらに低下させることができれば安定運用範囲が拡大する。そこで、今後、フラッシュバック耐性の向上を図ったモデルバーナ構造の改良が必要である。

ガスタービン燃焼器の燃焼性能のひとつとして、パーミアウト耐性がある。これはフラッシュバックが瞬間的に発生しても回避可能な耐性のことで、燃焼器としてこのパーミアウト耐性も必要となる。そこで、クラスタバーナの単孔ノズル 1 本を対象とし、大気圧条件において、そのパーミアウト耐性を検証した。試験では、評価対象となる水素燃料噴流を形成し、その上流に設置した点火トーチで強制的に着火して、トーチ火炎遮断後の火炎保持の可否を判断する。混合管内で保炎されなければ、パーミアウト可能となりパーミアウト耐性があると判断し、混合管内で保炎されれば、パーミアウト不可となりパーミアウト耐性が無いと判断する。パーミアウト試験の結果を図 10 に示す。空気流速が増加していくとパーミアウト不可の領域が縮小していき、ある空気流速に達するとパーミアウト不可領域は消失する。このパーミアウト限界となる空気流速以上で、種々の燃料流速条件においてパーミアウト耐性が確保される。クラスタバーナの計画運用範囲はこのパーミアウト限界空気流速よりも十分高いため、計画運用範囲でのパーミアウト耐性を確認した。今後は、実機相当圧力条件でのパーミアウト耐性を確認する必要がある。

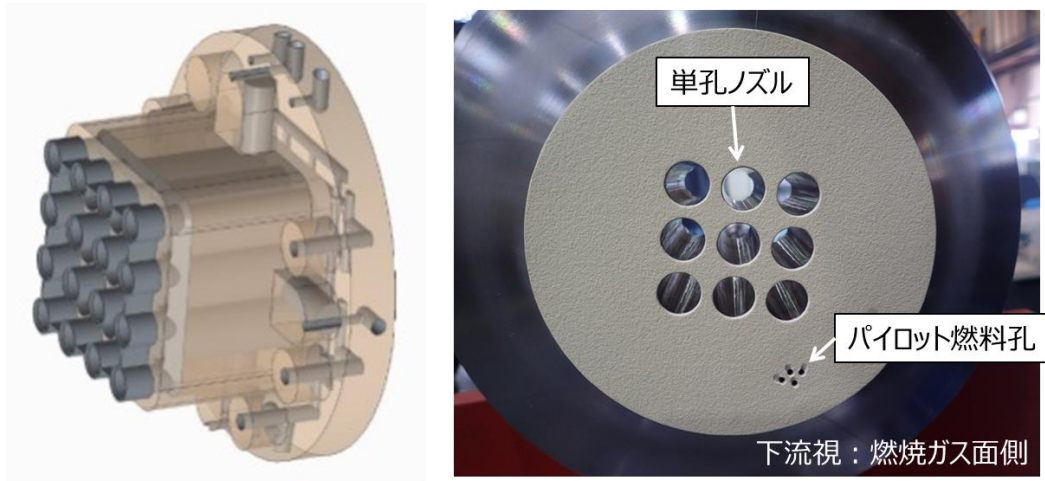


図6 縮小モデルバーナ燃焼試験供試体

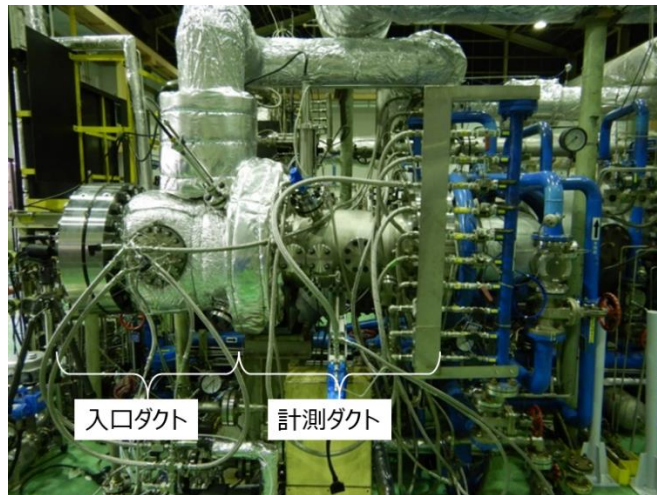


図7 燃焼試験装置

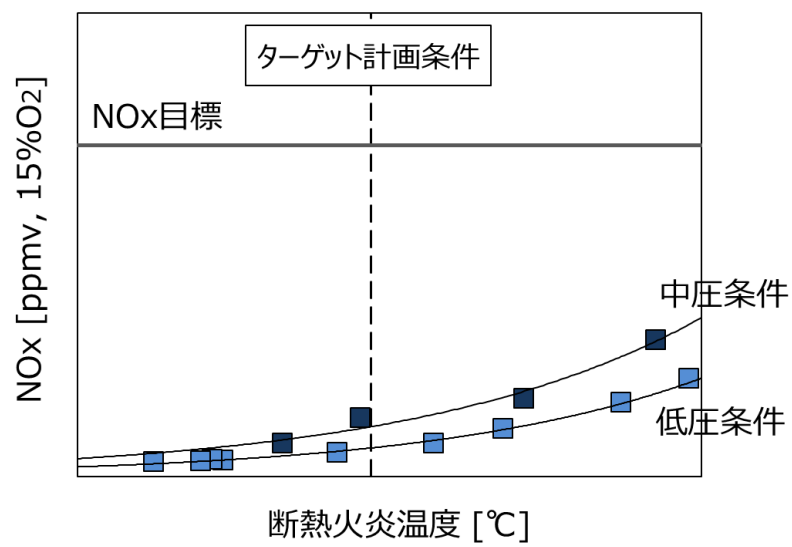


図8 NO_x 計測結果

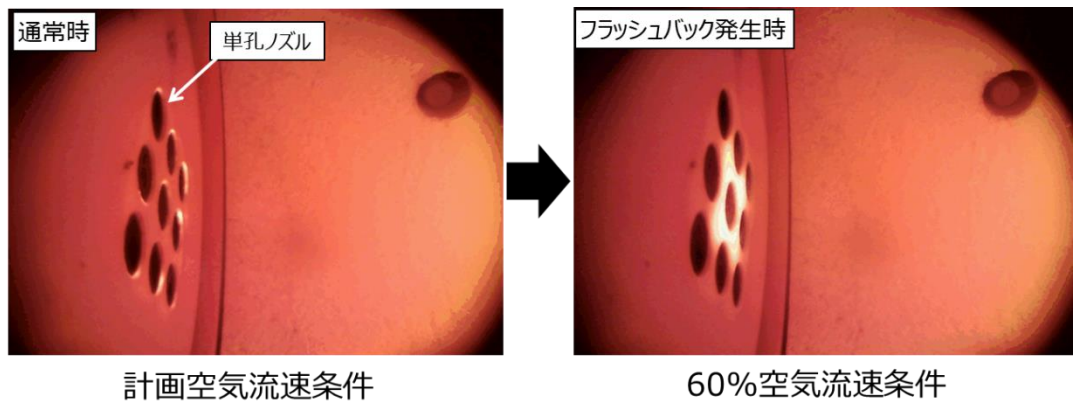


図9 火炎観察結果

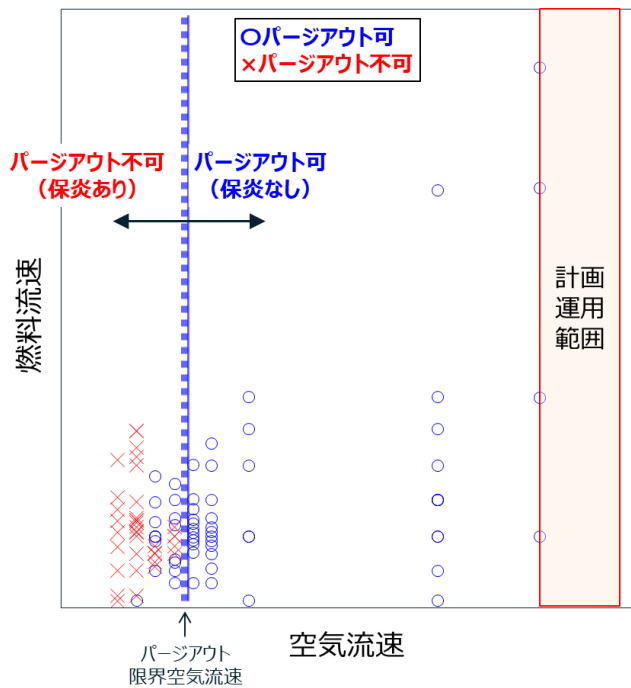


図10 パーリアウト試験結果

(3) 大型ガスタービン向けクラスタバーナの構造成立性検証

本研究開発項目では、大型ガスタービンへのクラスタバーナの適用性を検討した。はじめに燃焼器の体格について、ガスタービン効率が天然ガス燃料適用時と同等となる条件として検討した結果、従来の予混合燃焼器と比較して1.2～1.4倍の体格が必要なことを確認した。次に、水素専焼クラスタバーナを適用した際に、ガスタービン全体の開発を短期間で済ませるために、既存のタービンおよび圧縮機が流用可能なように燃焼器全体の計画図を作成した。図11に燃焼器全体の計画図を示す。

ガスタービンの運用を考えて、着火から定格負荷まで安定に燃焼させるために燃料系統の分割および燃料のステージングを検討した。検討した各燃料系統のバーナ配置の一例を図12に示す。燃料系統は保炎に重要となる拡散パイロット系統、予混合パイロット系統、大部分の燃料を供給するクラスタ（予混）系統に分割した。燃料ステージングは、着火、昇

速時には拡散パイロットとクラスタノズルの一部から燃料を供給して燃焼安定性を確保し、負荷併入後の負荷上昇時には残りの拡散パイロットおよびクラスタノズルに燃料を供給し、定格負荷条件への到達前の安定負荷帯において拡散パイロットから予混合パイロットに切り替えることでNOxを低減させ、定格負荷条件に到達させる方法とした。

今後、大型ガスタービンに適用可能なクラスタバーナ燃焼器、および燃料系統・燃料ステージングの詳細設計を進める必要がある。さらにその次のステップとして、フルスケールの燃焼器を製作し、その燃焼試験により燃焼器性能を検証する必要がある。

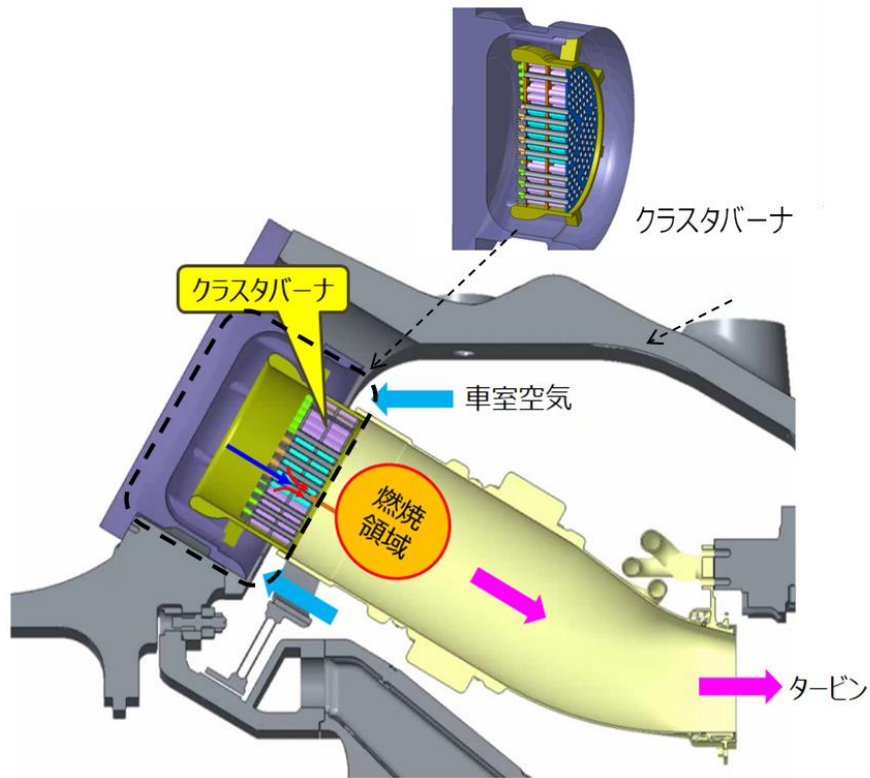


図 1 1 水素専焼クラスタバーナ燃焼器全体の計画図

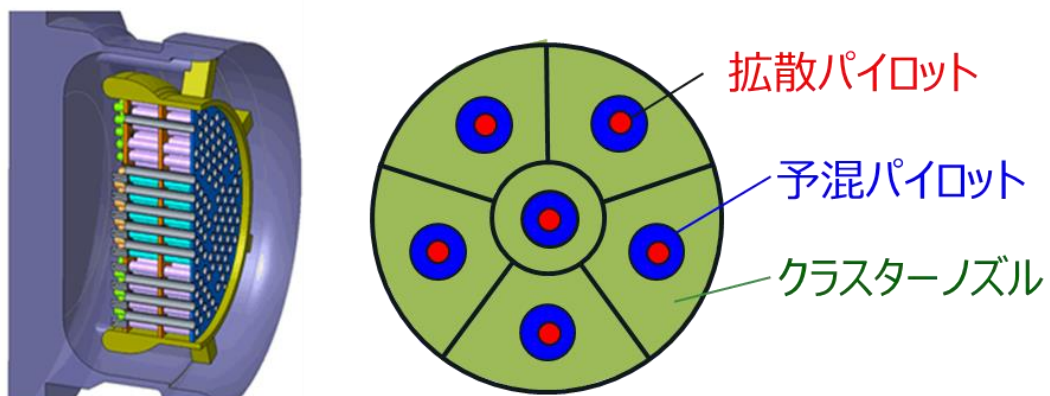


図 1 2 水素専焼クラスタバーナの燃料系統分割例

(4) 燃焼振動抑制の検討

水素燃焼クラスタバーナの混合管は天然ガス燃焼予混合燃焼器に比べて小さく、さらに水素は燃焼速度が速いことから、形成される火炎は短火炎になるため、燃焼振動の特性に影響を与えることが懸念される。そこで、本研究開発項目では、シングルクラスタバーナの非定常数値解析により、燃焼振動を予測する技術を開発し、さらに燃焼振動を抑制して安定燃焼を実現するための方法を検討した。

数値解析に用いたクラスタバーナのモデルを図13に示す。本モデルではプレナム、噴射器、燃焼器を模擬し、プレナム上流から空気、噴射器側面から水素燃料を供給し、燃焼器内部で燃焼させた。図14に噴射器出口（燃焼器入口）における圧力の時刻歴を示す。計算を進めていくと、圧力の変動振幅が徐々に増加していき、周期的に振幅が変化する波形が得られた。このように数値解析により燃焼振動を捉えることができた。次に、図14に示した圧力時刻歴波形の圧力スペクトル分析結果を図15に示す。本解析により発生した燃焼振動の周波数はひとつの大きな圧力ピークを示す点であり、天然ガス燃焼予混合燃焼器と比べて高い周波数で発振している。水素燃焼クラスタバーナでは天然ガス燃焼予混合燃焼器に比べて短火炎になると予想される。本解析の結果、この火炎形状の違いにより、水素燃焼クラスタバーナではより高い周波数での燃焼振動が発生する可能性があることがわかった。以上から、水素燃焼の燃焼振動を予測できる燃焼解析技術を開発した。

以上の解析結果から、水素燃焼クラスタバーナで安定燃焼を実現するためには高周波の燃焼振動の抑制が必要であることがわかった。そこで、その高周波の燃焼振動の抑制対策のひとつとして、既存技術の音響ライナで振動対策できることがわかった。

今後、本研究開発で開発した燃焼解析技術の検証試験の実施、および燃焼振動の抑制方法の効果の検証が必要である。

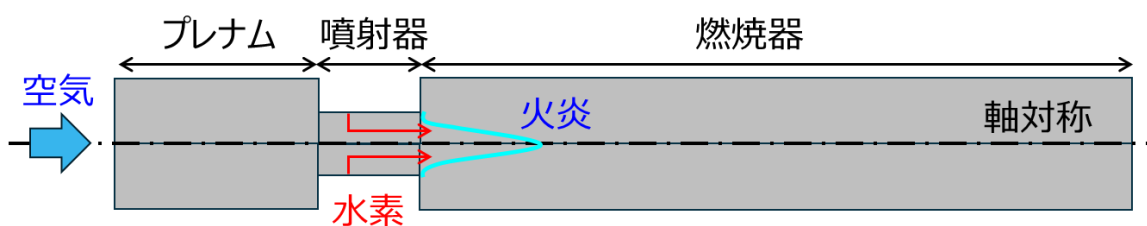


図13 数値解析に用いたクラスタバーナモデル

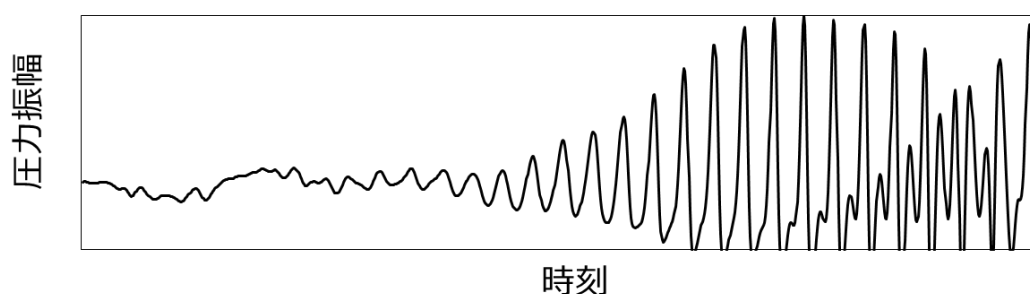


図14 噴射器出口における圧力の時刻歴

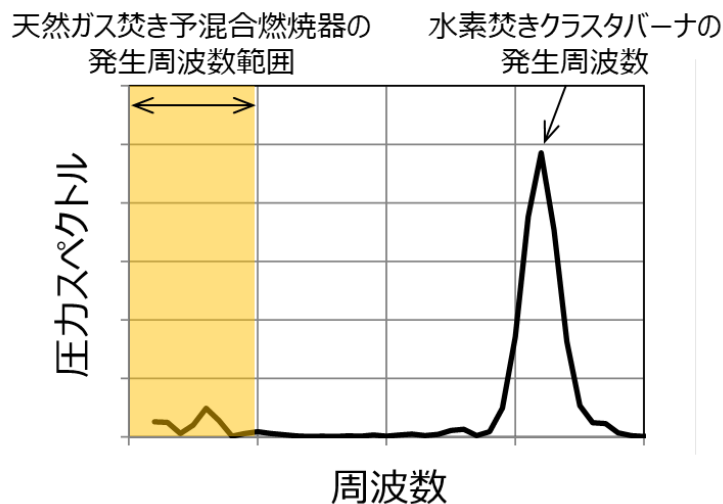


図 15 圧カスペクトル分析結果

3.2 成果の意義

本研究開発では、水素専焼の低 NOx 性能とフラッシュバック耐性を両立するため、数値解析と気流試験により抽出・検証したクラスタバーナのノズル構造をもとに、モデルバーナを設計・製作し、燃焼試験によりフラッシュバックを発生させず、NOx 50 ppm (15%O₂ 換算) 以下の成果を得た。今後、実機相当圧力条件におけるバーナの燃焼特性の確認、フラッシュバック耐性の向上を図ったモデルバーナ構造の改良、およびフルスケール燃焼器の詳細設計、燃焼器性能の検証を進めていく必要がある。本研究開発で得られた成果は今後の改良のためのすべてのベースとなる技術であり、その成果により実用化に向けた取り組みを継続でき、研究開発を加速できる。

これまで大型ガスタービンで水素専焼を実現した例は無く、水素専焼を実現できれば、世界初の技術となる。水素専焼大型ガスタービンの導入は水素需要を大幅に拡大できるため、水素社会の実現不可欠な水素インフラの充実と普及拡大に対して大きな波及効果をもたらし、将来の水素市場の拡大に大きく貢献できる。

3.3 残された課題

研究開発項目毎に、残された課題を以下に述べる。

(1) 単孔ノズルの解析・検証

本研究開発項目では、数値解析により低 NOx 性能とフラッシュバック耐性をともに確保できるノズル構造を抽出し、その妥当性を気流試験により検証した。今後、設計裕度範囲をさらに拡大するため、単孔ノズル構造の更なる改良が必要である。

(2) 縮小モデルバーナの解析・検証

本研究開発項目では、縮小モデルバーナの燃焼試験により、フラッシュバックの発生無く、安定燃焼を実現し、ターゲット計画条件において NOx 50 ppm (15%O₂ 換算) 以下を達成した。さらに単孔ノズルを対象としたパーミアウト試験により、計画運用範囲でのパーミアウト耐性を確保できることを確認した。今後、実機相当圧力条件におけるバーナの燃焼特性

を確認し、フラッシュバック耐性の向上を図ったモデルバーナ構造の改良が必要である。また、パーミアウト耐性についても、実機相当圧力条件でのパーミアウト耐性を確認する必要がある。

(3) 大型ガスタービン向けクラスタバーナの構造成立性検証

本研究開発項目では、大型ガスタービンに適用可能な水素専焼クラスタバーナ燃焼器の全体計画図を作成し、燃料系統・燃料ステーキングを設計した。今後、大型ガスタービンに適用可能なクラスタバーナ燃焼器、および燃料系統・燃料ステーキングの詳細設計を進める必要がある。さらにその次のステップとして、フルスケールの燃焼器を製作し、その燃焼試験により燃焼器性能を検証する必要がある。

(4) 燃焼振動抑制の検討

本研究開発項目では、水素燃焼の燃焼振動を予測できる燃焼解析技術を開発し、その燃焼振動の抑制に有効な対策方法（音響ライナ）を策定した。今後、本研究開発で開発した燃焼解析技術の検証試験の実施、および燃焼振動の抑制方法の効果の検証が必要である。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

本研究開発での成果の実用化に向けて、本研究開発の成果を反映しながら、フラッシュバック耐性の向上を図ったモデルバーナ構造の改良、およびフルスケール燃焼器の詳細設計、燃焼器性能の検証を順次ステップを進めていく。本研究開発の成果は今後の改良のためのすべてのベースとなる技術であり、その成果により実用化に向けた取り組みを継続でき、研究開発を加速できる。この実用化に向けた取り組みは、本研究開発で得られたノウハウを有する委託事業者（三菱日立パワーシステムズ株式会社、三菱重工業株式会社）が進めていく。

本研究開発成果の波及効果については、クラスタバーナは水素燃焼に適した燃焼方式であり、ガスタービンにとどまらず、ボイラなど他の燃焼機器において水素専焼する場合にも適用可能であり、他製品へのクラスタバーナ燃焼技術の波及効果は大きい。

5. 特許・研究発表等

—特許等—

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2017年4月28日	特願2017-090705	燃料噴射器及びガスタービン	三菱日立パワーシステムズ株式会社
2	2017年11月30日	特願2017-231143	燃料噴射器、燃焼器、及びガスタービン	三菱日立パワーシステムズ株式会社
3	2018年3月26日	特願2018-058233	燃焼器及びそれを備えるガスタービン	三菱日立パワーシステムズ株式会社
4	2018年4月27日	PCT/JP2018/017189	燃料噴射器及びガスタービン	三菱日立パワーシステムズ株式会社
5	2018年11月27日	PCT/JP2018/043634	燃料噴射器、燃焼器、及びガスタービン	三菱日立パワーシステムズ株式会社
6	2019年1月24日	PCT/JP2019/002217	燃焼器及びそれを備えるガスタービン	三菱日立パワーシステムズ株式会社
7	2019年1月31日	特願2019-015574	バーナ及びこれを備えた燃焼器及びガスタービン	三菱日立パワーシステムズ株式会社
8	2020年1月22日	PCT/JP2020/002042	バーナ及びこれを備えた燃焼器及びガスタービン	三菱日立パワーシステムズ株式会社
9	2020年4月22日	特願 2020-076123	バーナー集合体及びガスタービン燃焼器	三菱日立パワーシステムズ株式会社
10	2020年4月22日	特願 2020-076141	バーナー集合体及びガスタービン燃焼器	三菱日立パワーシステムズ株式会社
11	2020年4月22日	特願 2020-076142	バーナー集合体及びガスタービン燃焼器	三菱日立パワーシステムズ株式会社

—研究発表・講演、文献等、その他—

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2017年2月	日本機械学会関西支部定期講演会	発電用大型ガスタービン燃焼器における燃料多様化対応技術	谷村 聡 (MHPS)
2	2018年2月	ガスタービン学会若手交流会講演	発電用大型ガスタービン燃焼器における燃料多様化対応技術	谷村 聡 (MHPS)
3	2018年2月	FC EXPO 国際水素・燃料電池展	大型水素ガスタービンの実用化に向けた取組	谷村 聡 (MHPS)
4	2018年3月	日本化学会第98春季年会	発電用大型ガスタービンにおける水素利用	谷村 聡 (MHPS)
5	2018年4月	4 th EU ENERGY SUMMIT	Hydrogen-firing Gas Turbine	谷村 聡 (MHPS)
6	2018年5月	雑誌記事 (Gas turbine world)	30 per cent hydrogen gas turbine test	MHPS
7	2018年5月	火力原子力発電技術協会大学	大型ガスタービンの最新	安威 俊重

		講座	開発動向	(MHPS)
8	2018年6月	日本工業出版株式会社 日工技術セミナー	ガスタービン設備	由里 雅則 (MHPS)
9	2018年7月	第91回 大阪大学工業会機械工学系 技術交流会	ガスタービンにおける水素利用	谷村 聡 (MHPS)
10	2018年8月	火力原子力発電技術協会講習会	ガスタービンにおける水素利用	高田 和正 (MHPS)
11	2018年9月	火力原子力発電大会	発電用大型ガスタービンにおける水素利用	川上 朋 (MHPS)
12	2018年10月	European Turbine Network 9th International Gas Turbine	Technology Development for a Low Carbon Society	正田 淳一郎 宮本 健司 (MHPS)
13	2018年10月	三菱重工技報	CO2 フリー社会の実現に向けた水素燃焼ガスタービン	野勢 正和 (MHPS)
14	2019年1月	World Future Energy Summit (WFES) 2019	World Future Energy Summit (WFES) 2019	谷村 聡 (MHPS)
15	2019年1月	火力原子力発電技術協会大学講座	大型ガスタービンの最新開発動向	安威 俊重 (MHPS)
16	2018年2月	愛知県 水素エネルギー社会形成研究会 第4回セミナー	発電用大型ガスタービンにおける水素利用	宮本 健司 (MHPS)
17	2019年2月	日本燃焼学会誌	水素焚きガスタービン燃焼器の開発	市川 雄一郎 (MHI)
18	2019年4月	技術情報センターセミナー「低炭素発電技術と事業動向」講演	ガスタービンにおける水素エネルギー利用の取り組みと展望	斉藤 圭司郎 (MHI)
19	2019年4月	日 EU エネルギービジネスセミナー	H2 Gas Turbine for Hydrogen Society	谷村 聡 (MHPS)
20	2019年6月	KEPCO GT Conference 2019	MHPS Gas Turbine Technologies and Strategies for a Low-Carbon Society with Hydrogen-fired Combustion	斉藤 圭司郎 (MHI)
21	2019年6月	G20 イノベーション展 模型及びパネル展示	水素ガスタービン	西岡 映二 (MHPS)
22	2019年5月	中国 NexTurbine2019	H2 Gas Turbine for Hydrogen Society	谷村 聡 (MHPS)
23	2019年9月	水素関係会議 模型及びパネル展示	水素ガスタービン	西岡 映二 (MHPS)

24	2019年10月	機械学会関西支部秋季技術フォーラム講演	水素ガスタービンの開発について	谷村 聡 (MHPS)
25	2019年12月	COP25 模型及びパネル展示	水素ガスタービン	西岡 勝樹 (MHPS)
26	2019年11月	International Gas Turbine Congress 2019 (IGTC2019) パネル展示	Hydrogen Gas Turbine	谷村 聡 (MHPS)
27	2019年11月	International Gas Turbine Congress 2019(IGTC2019) 講演	H2 Gas Turbine for Low Carbon Society	谷村 聡 (MHPS)
28	2020年1月	第48回ガスタービンセミナー	発電用ガスタービンにおける水素利用	岸田 宏明 (MHPS)
29	2020年2月	Japan-Norway Hydrogen Seminar 2020	MHPS H2 Gas Turbine for Low Carbon Society	Haavard Oevernes (MHPS)
30	2020年2月	火力原子力発電技術協会 東北支部 令和元年度技術講演会	発電用ガスタービンにおける水素利用	宮本 健司 (MHPS)

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：②-1を参照

課題番号：②－２

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／

大規模水素利用技術の研究開発／水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」

委託先：川崎重工業株式会社（２０１８年度終了）

１．研究開発概要

本事業では、二次エネルギーとしての水素等を最大限に活用するため、2030年といった長期的視点を睨み、水素等のエネルギーキャリアについて各種化石燃料等と競合できる価格の実現を目指す。本事業を構成するテーマのうち、本研究開発では、水素エネルギー市場の形成に向けて、需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術に着手し、環境負荷が低く、かつ大量の水素利用につながる基盤技術を開発した。

将来の水素社会の普及および水素エネルギー市場の拡大・市場形成には、水素の需要を大幅に拡大するための大規模水素利用技術、特にガスタービンやガスエンジンといった水素を多量に利用するエネルギー機器を用いた水素発電ならびにそれらに必要となる水素燃焼技術が必要不可欠である。また、水素社会の初期および普及期における水素発電は、工場等での出力数 MW から数十 MW の水素ガスタービンを用いた小中規模の分散型発電による電気と熱（水蒸気）の供給が主と予想される。

本研究開発事業は、ガスタービンエンジンにて水素および高濃度に水素を含むガスを燃料として運用する（以下、水素ガスタービンとする）際に必要となる水素燃焼技術のうち、水や水蒸気を用いない水素専焼ドライ低 NO_x 燃焼技術の開発に関するものである。

２．研究開発目標（設定の理由も含め）

2.1 研究の背景と目的

ガスタービンエンジンにて水素および高濃度に水素を含むガスを燃料として運用する（以下、水素ガスタービンとする）際、窒素酸化物：NO_x を環境規制値以下にするため、水や水蒸気を噴射するいわゆるウェット方式を用いるのが一般的である。しかしながら、純水製造設備の導入および運用のための費用増加、燃料消費の増加等、経済的なデメリットが生じる。

このため、将来の水素社会に向けて、水や水蒸気を用いなくてもドライな状態で水素を安定でかつ低 NO_x 燃焼させることが大きな差別化技術となる。

本研究開発事業は、水や水蒸気を用いない水素専焼ドライ低 NO_x 燃焼技術を用いたガスタービン燃焼器の要素技術開発、基盤技術の開発を目的とし、試作燃焼器の改良ならびに各種の水素燃焼試験による燃焼特性の評価を実施した。

2.2 微小水素火炎を用いたドライ低 NOx 燃焼技術とガスタービン燃焼器の概要

図 1 に微小火炎を用いたドライ水素低 NOx 燃焼を示す。直径約 1.0mm の噴射孔から水素を噴射、直行する高速空気流れと急速に混合し、微小な水素火炎を形成する。NOx の発生原となる水素火炎の局所的な高温部発生を抑制し、高温部の滞留時間を短くすることで低 NOx 化を図っている。

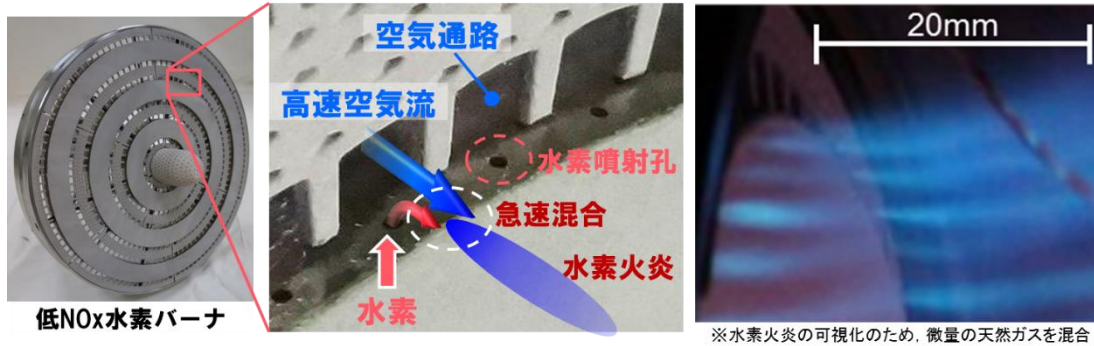


図 1. 微小火炎を用いた水素ドライ低 NOx 燃焼

図 2 に 2MW 級ガスタービンと試作燃焼器の全体図を示す。図 3 に燃焼器設計時に活用した CFD 数値解析の結果例を示す。ケーシングと燃焼器の隙間を通過した高温、高圧の空気は、整流板により一様化され水素バーナに供給される。水素バーナの水素供給リングの背後に循環域が形成され、水素火炎を安定化させる役割を果たす。

また図 4 にエンジン運転を想定した水素燃料供給の模式図を示す。着火は、三つある水素供給リングのうち、一番外側に着火用燃料を供給する。エンジン起動時（低回転数）ならびに低負荷時には、内側のリングのみに水素を供給する。高負荷時には、全ての水素供給リングに水を供給する。この様な燃料ステージング方式を用いることにより、安定した水素燃焼と高負荷条件相当での低 NOx 化を図る。

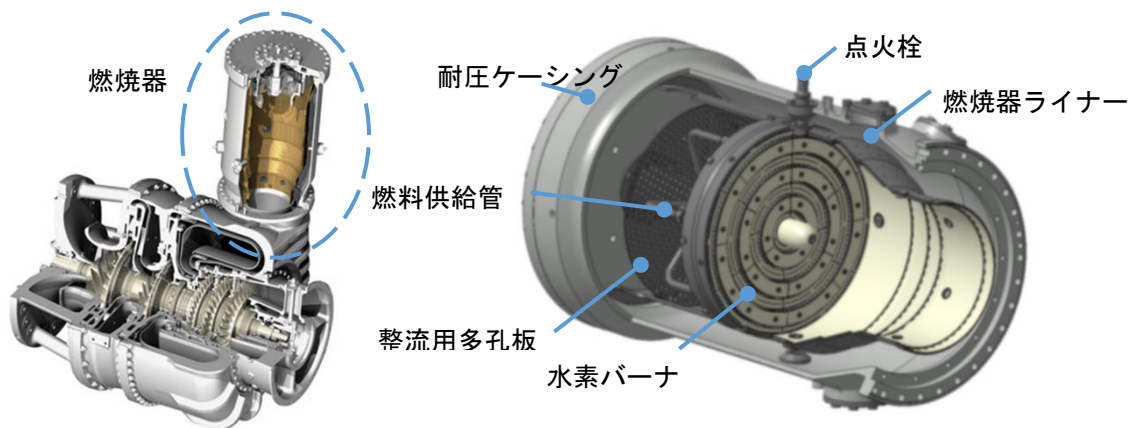


図 2. 2MW 級ガスタービンと試作燃焼器の全体図

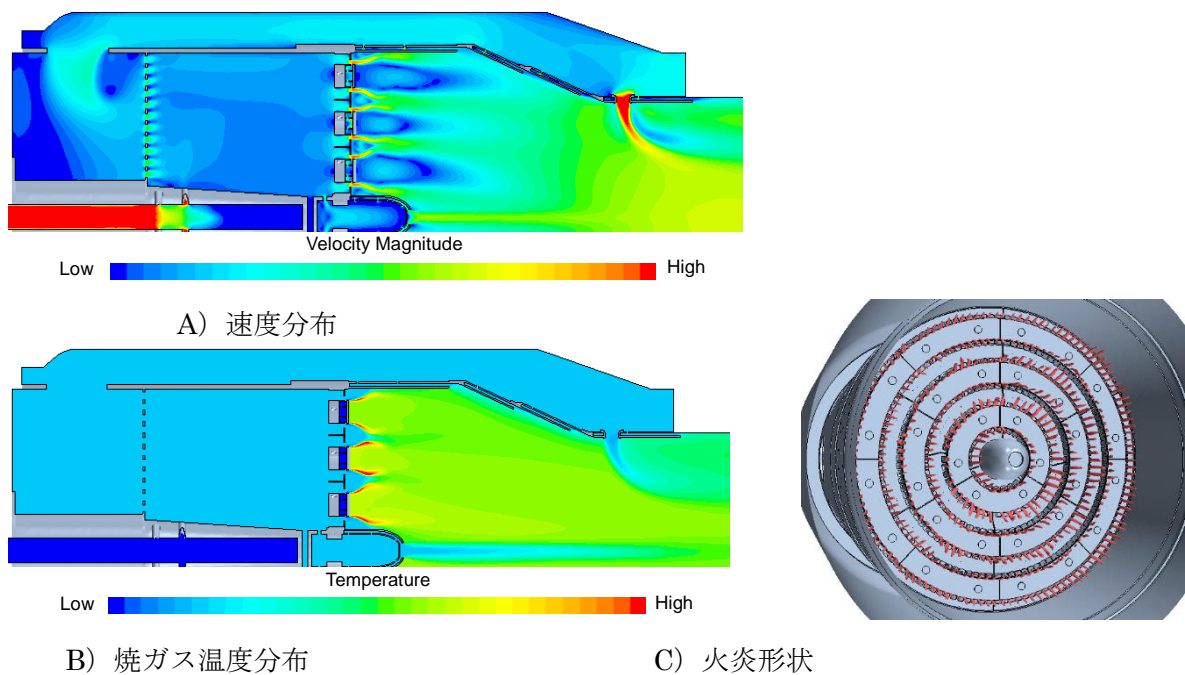


図 3. CFD 数値解析の結果例

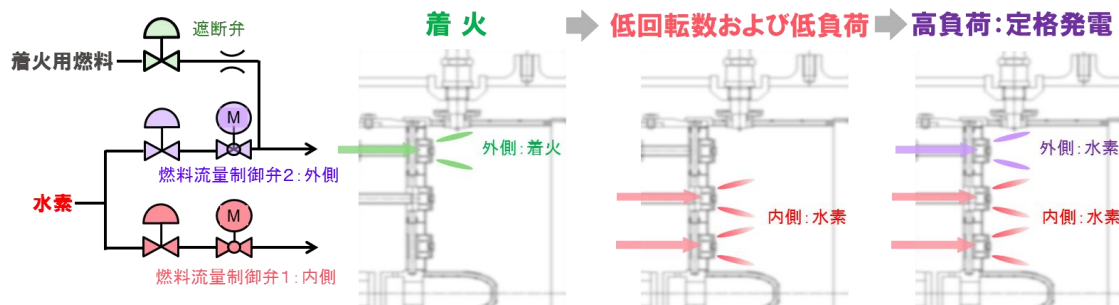


図 4. エンジン運転の際の水素供給

2.3 研究開発目標の設定

本研究開発事業は、開発目標を次の二つとし、2MW 級ガスタービン用の水素専焼ドライ低 NO_x 燃焼器の改良試作、水素燃焼試験による NO_x 性能ならびに燃焼安定性の確認を実施した。

(1) NO_x 性能

高圧水素燃焼試験を実施し、2MW 級ガスタービンエンジンの 50%負荷から定格 100%負荷運転に相当する燃焼器入口条件において、NO_x 35ppm（残存酸素 16%換算値）以下を達成する。

(2) 水素安定燃焼

低圧水素燃焼試験を実施し、2MW 級ガスタービンエンジンの着火、エンジンの回転数上昇時を想定した 5%、20%、40%、80%、100%回転数を模擬した各種条件において、水素燃焼で失火や逆火が生じず、500℃以上の燃焼ガスを安定に生成する安定燃焼を達成する。

3. 研究開発成果

図5に本研究開発事業での取り組みを示す。CFD解析技術や特殊計測技術を用いて燃焼器形状を検討し、試作部品を製作した。試作部品を低圧環境下（2気圧）で水素燃焼試験を実施し、NOx値や燃焼安定性等の基本的な燃焼特性を把握した。取得した試験データを燃焼器部品の改良検討にフィードバックし、燃焼器部品形状および燃焼特性の改善を図った。高圧環境下（エンジン条件と同等の高温・高圧）での水素燃焼試験に供する燃焼器部品を選定し、各種条件におけるNOx値や燃焼安定性を評価した。

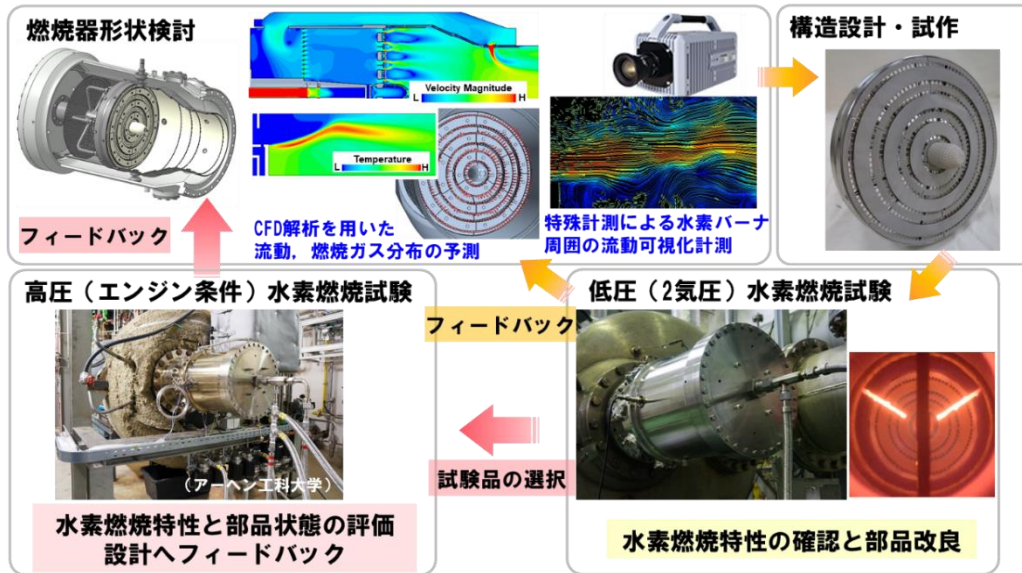


図5. 本研究開発事業での取り組み

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

燃焼器圧力損失率を天然ガス焚き用の燃焼器と同等に保ち、かつNOx値も35ppm以下にするため、水素バーナ部の空気部通過形状等の形状改善を図ると共に、水素噴射孔直径をより小さくし、水素火炎を微細化することによりNOx低減を図った。図6に高圧水素燃焼試験に供した水素バーナ部形状を示す。

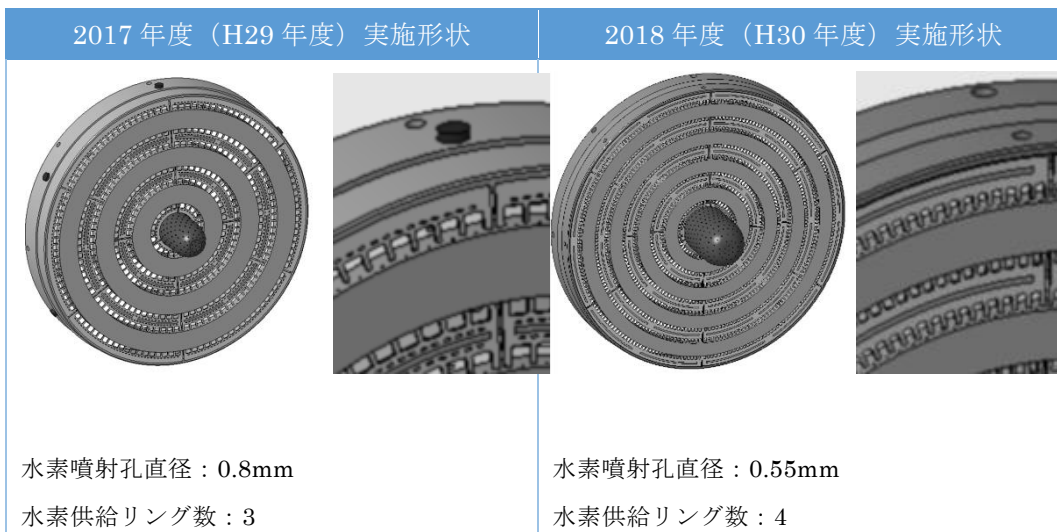


図6. 水素バーナ部形状

(1) NO_x 性能

「50%から 100%負荷運転に相当する条件で NO_x 35ppm（残存酸素 16%換算値）以下を達成した。」

ガスタービン燃焼器に導入される空気は、高温・高圧（温度、圧力は発電出力や機種により異なる）な状態である。水素燃焼時の NO_x 値ならびに水素燃焼安定性の評価には、高温・高圧な空気状態ならびに空気流量が設定可能で、かつ水素ガスを試験内容に応じて供給可能な試験設備が必要となる。これらの空気と水素の供給が可能で、燃焼状態を評価することが可能なアーヘン工科大学 産業用ガスタービン、蒸気タービン、プラント研究所のガスタービン燃焼器試験設備にて高圧水素燃焼試験を実施した。

図 7 に高圧水素燃焼試験時の様子を示す。試験設備に試作燃焼器を設置し、各種の条件に応じて水素を燃焼させた。高圧水素燃焼試験用ガス温度計測プローブにより燃焼ガス温度を計測、ガスサンプリングプローブにより燃焼ガスを採取し、NO_x 等の燃焼ガス組成をそれぞれ評価した。

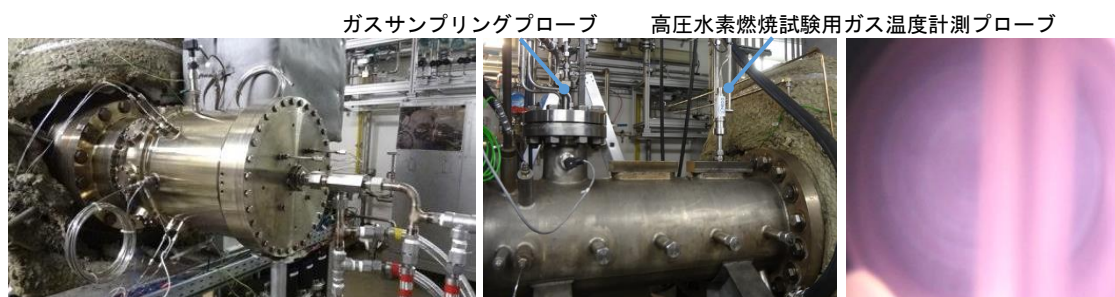


図 7. ガスタービン燃焼器試験設備に設置した試作燃焼器（左）、燃焼状態監視用の高圧水素燃焼試験用ガス温度計測プローブとガスサンプリングプローブ（中央）、水素燃焼試験時の燃焼器内部（右）

図 6 に示した水素バーナを搭載した試作燃焼器を用いて、空気条件を 2MW 級ガスタービン定格負荷相当条件とし、水素の燃焼量を無負荷相当から定格負荷相当の範囲で調整し、データを取得した。図 8 に NO_x 評価試験結果を示す。横軸に水素燃焼ガス温度（ここでは負荷相当として示す）、縦軸左に NO_x 値、縦軸右に燃焼器圧力損失率（ここでは、既存の燃焼器との比較）をそれぞれ示す。

2016 年度の試験時の初期形状では、NO_x 値は 35ppm レベルであったが、燃焼器圧力損失率：PLR が、既存の燃焼器よりも約 1%高い結果であった（図 8 中、NO_x▲、燃焼器圧力損失率△）。2017 年度の試験では、燃焼器圧力損失率：PLR を既存の燃焼器と同等にした形状を試験したが、70%負荷相当から NO_x 値が 35ppm を上回る結果となった（図 8 中、NO_x●、燃焼器圧力損失率○）。2018 年度に低 NO_x 化を図った形状を試験し、50%負荷相当から 100%負荷相当で NO_x 値を 35ppm 以下、燃焼器圧力損失も既存の燃焼器と同等を達成した（図 8 中、NO_x■、燃焼器圧力損失率□）。

圧力損失率を維持しながら高負荷相当時の NO_x 値を低減することは困難であったが、水

素火炎をより微細にすること、各水素供給リングからの水素流量割合を調整することで35ppm以下を得ることができた。

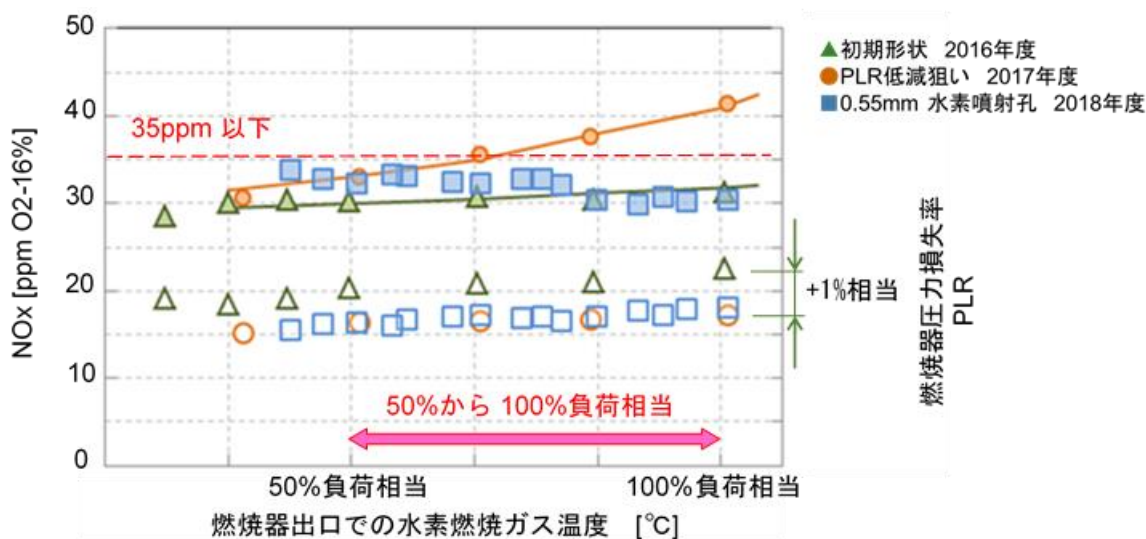


図 8. 高圧水素燃焼試験時の NOx 値

試作燃焼器部品の耐久性を確認するため、100%定格相当条件を2時間保持する試験を実施した。図9にその試験時のNOx値と水素燃焼ガス温度の履歴を示す。横軸に経過時間、縦軸左にNOx値、縦軸右に水素燃焼ガス温度（ここでは負荷相当として示す）をそれぞれ示す。また、図10に試験後の燃焼器部品を示す。

100%定格相当条件を保持していた2時間のあいだ、水素燃焼状態は安定しており、NOx値も35ppm以下を維持していた。また、試験後の燃焼器部品にも焼損や破損といった不具合が生じていないことを目視確認した。

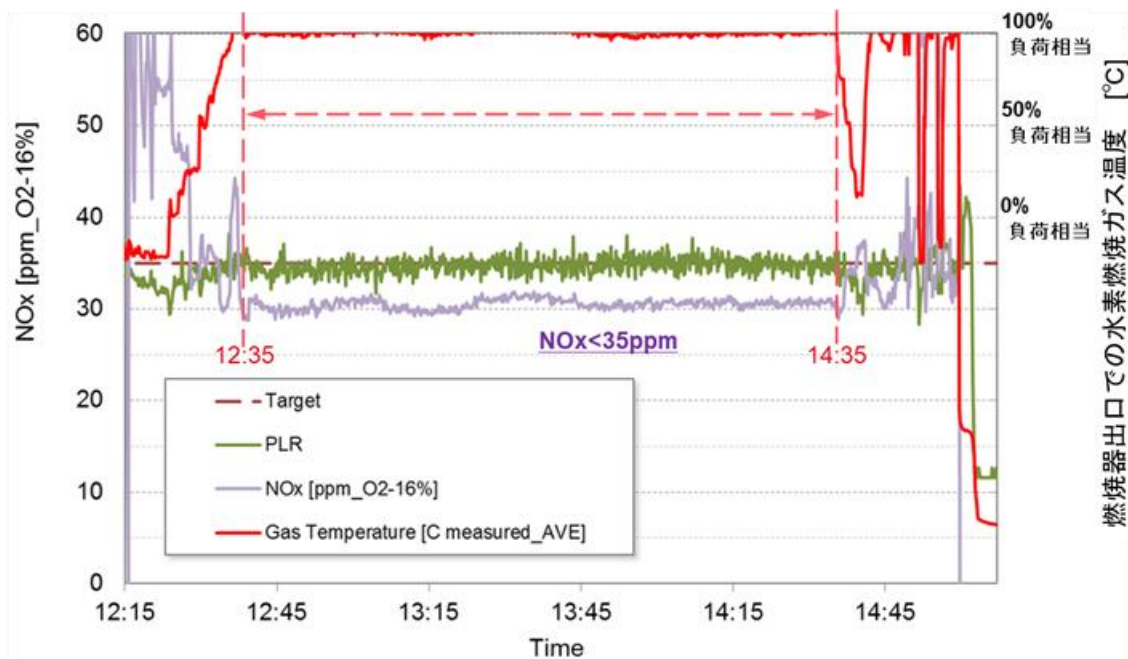


図 9. 100%定格相当条件2時間保持試験時の履歴



図 10. 試験後の燃焼器部品の状態 水素バーナ部（左）、燃焼器ライナー（右）

(2) 水素安定燃焼

「水素での着火・エンジン起動を想定し、水素着火試験を実施。安定した着火性を確認、エンジンの起動（エンジンの低回転数）に相当する条件においても安定した燃焼状態を確認し、水素安定燃焼を達成した。」

2MW 級ガスタービンでの起動（着火から回転数上昇）を想定し、着火条件相当における水素着火試験、回転数上昇を想定した水素保炎確認試験を実施した。

図 11 に着火試験装置と試作燃焼器を示す。2MW 級ガスタービンの着火条件に相当する空気流量を設定し、点火栓（イグナイター）により水素に着火した。



図 11. 着火試験装置と試作燃焼器

図 12 に水素着火試験時の火炎写真を示す。比較のため、天然ガスを用いた着火時の火炎

写真も併せて示す。2MW 級ガスタービンの着火条件相当において、安定した着火性能を確認した。水素は天然ガスに比べ可燃範囲が広い（天然ガス：4.3 から 14.5vol%，水素：4.0 から 75.6vol%）ことから着火性については、良好な結果を得た。

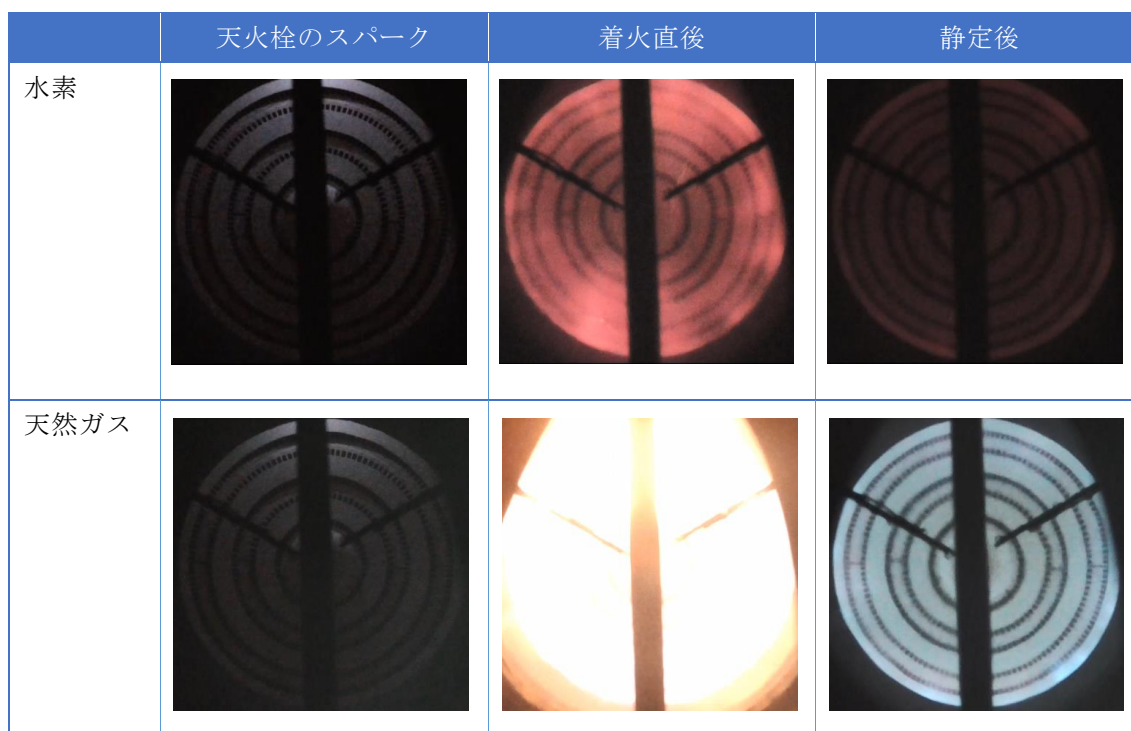


図 12. 着火試験時の火炎写真

2MW 級ガスタービンの低回転数条件に相当する空気流量を設定し（一定量）、失火等なく安定して 500℃以上の水素燃焼ガス生成することを確認する保炎確認試験を実施した。

図 13 に低回転数条件相当での保炎確認試験結果を示す。20%、40%、60%、80%回転条件相当において、安定した水素燃焼を確認した。

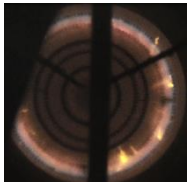
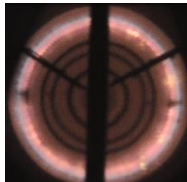
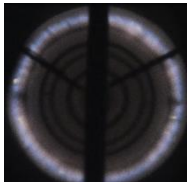
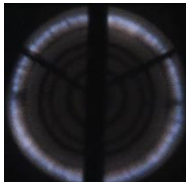
エンジン %回転数相当	20	40	60	80
試験結果 燃焼安定性の判定	○	○	○	○
燃焼ガス温度	500℃以上で保持	500℃以上で保持	500℃以上で保持	500℃以上で保持
火炎写真				

図 13. 保炎確認試験時の火炎写真と燃焼安定性の判定

3.2 成果の意義

ガスタービンエンジンにて水素および高濃度に水素を含むガスを燃料として運用する際に必要となる水素燃焼技術のうち、2MW級ガスタービン用の水素専焼ドライ低NO_x燃焼器の燃焼器要素技術、基盤技術を構築することができた。

(1) NO_x 性能

微細な水素火炎を用いた水素燃焼方式により NO_x 値を規制値の半分に抑制し、実際のガスタービンエンジン運転においても規制値を十分に下回る見通しを得た。

(2) 水素安定燃焼

着火から各回転数条件、低負荷から高負荷での燃焼安定性を確認し、エンジン運転時の燃料制御の方針、制御機器構成の検討が可能となった。

3.3 実用化に向けた課題

図 14 に水素ガスタービンの製品化ならびに将来の水素社会に向け必要となる開発ステップの概要を示す。本委託研究事業では、燃焼器要素技術を確認した。次の開発ステップであるエンジン実証では、実機エンジン搭載に向けた設計や水素供給系の設計を行い、エンジン起動から発電、停止に至るエンジン運転のための燃料制御技術を確認する必要がある。また、エンジン実証試験を通じて燃焼器要素開発時点では顕在化されなかった課題を抽出し、製品化に向けた更なる改良を図ることも重要である。フィールド実証にて数千時間に渡る運用を通じ、燃焼器部品等の耐久性の確認ならびに長期的な水素ガスタービン発電システムとしての信頼性の向上を図る必要がある。

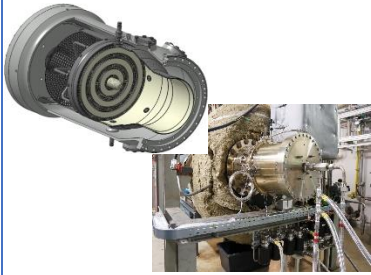


【本委託研究事業】 燃焼器要素技術の確立	【次の開発ステップ】 エンジン実証	【製品化、将来の水素社会】 フィールド実証
		
主な技術課題 <ul style="list-style-type: none"> 安定した着火性能の確立 燃焼安定性能の確立 高負荷時の排ガス性能の改善 (NO_x, 燃料未燃分等) 	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼器の実機適用設計 水素供給系統の設計 エンジン起動から発電、停止に至る燃料制御技術の確立 製品化に向けた改良 	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼器部品等の耐久性確認 長期的な水素ガスタービン発電システムとしての信頼性向上

図 14. 実用化に向けて必要となる開発ステップ概要

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

CO2 排出削減の必要性から水素利用への関心が高まっている。欧州・アジアでも水素戦略や水素ロードマップの策定がされ、水素製造・利活用の研究開発が活発になっており、水素発電事業もアナウンスされている。

このような状況下、いち早くドライ低 NOx 水素専焼ガスタービン発電を実用化し、市場投入することは、水素社会構築が進む中で強い産業競争力となる。

本委託研究事業終了後、NEDO 課題設定型産業技術開発費助成事業「水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発／ドライ低 NOx 水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」に採択され、エンジン実装用の燃焼器の開発、水素供給系の設計と燃料制御技術の開発、エンジン運転試験を実施中。

2020年5月、本燃焼技術を実装した1MW級ガスタービンの運転試験を開始。安定した起動ならびに100%定格負荷到達。世界で初めてドライ低 NOx 水素専焼ガスタービンの技術実証に成功した。7月21日、NEDO、大林組、川崎重工業でプレスリリースを実施した。



図 15. 「世界初、ドライ低 NOx 水素専焼ガスタービンの技術実証試験の成功」のプレスリリース
NEDO 様 HP より https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101337.html

5. 特許・研究発表等

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2018年12月28日	特願 2018-247952	燃焼装置	川崎重工業株式会社

－研究発表・講演、文献等、その他－

研究発表・講演

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2016年11月	第8回メタン高度利用技術シンポジウム	分散型発電システムの開発動向：川崎重工の活動を例にとり	合田 真琴
2	2017年3月	第4回 SIP-NEDO 情報・意見交換会	【NEDO】「水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」	堀川 敦史
3	2017年6月	東京工業大学グローバル水素エネルギーコンソーシアム	国際液化水素サプライチェーン実現への取り組み	西村 元彦
4	2017年6月	日本計画研究所セミナー	脱炭素社会に向けた世界初となる液化水素サプライチェーン構築における川崎重工業の取組について	西村 元彦
5	2017年9月	29年度成果報告会(燃料電池・水素)	水素ガスタービン燃焼技術の研究開発	堀川 敦史
6	2017年9月	川崎重工 HP	近い将来、CO2削減の切り札になる水素発電	川崎重工
7	2017年10月	第45回日本ガスタービン学会定期講演会(松山)	2MW級ガスタービン用ドライ水素専焼低 NOx 燃焼器の開発	古賀 和樹
8	2017年9月	川崎重工業株式会社ホームページ Hydrogen Road	近い将来、CO2削減の切り札になる水素発電	川崎重工業株式会社
9	2017年10月	創エネ時報 10月15日号	水素20年が大きな一歩	西村 元彦
10	2017年12月	エネルギーの新潮流*12月号	"川崎重工業 西村元彦 技術開発本部水素チェーン開発センター副センター長	西村 元彦
11	2017年12月	一般社団法人水素エネルギー協会 第37回水素エネルギー協会大会	川崎重工業における水素ガスタービンの開発	堀川 敦史
12	2017年12月	"一般社団法人 日本産業機械工業会 環境ビジネス委員会 有望ビジネス分科会&講演会"	川崎重工における水素専焼・混焼タービンの開発状況について	堀川 敦史
13	2018年1月	第5回 SIP-NEDO 情報・意見交換会	【NEDO】「水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」	西村 元彦
14	2018年2月	H29年度千葉県水素エネルギー関連産業振興プラットフォーム第1回会議	水素ガスタービン発電最前線	西村 元彦

15	2018年2月15日 (取材日)	ガスレビュー(ハイドリズム)	褐炭由来水素は、水素社会のキックスターター	西村 元彦
16	2018年5月	"エネルギージャーナル社「創省蓄エネルギー時報」産業ジャーナリスト(創エネ時報編集) 駒橋 徐記者の取材"	川崎重工における水素ガスタービン開発	饒 雅英
17	2018年5月	電気設備学会 学会誌 2018年5月号	水素焼きガスタービン発電装置の紹介	堂浦 康司
18	2018年3月	日経BP社「日経エコロジー」2018年4月号(3月8日発売号)	水素ガスタービン発電最前線	西村 元彦
19	2018年4月	東京大学 GSI セミナー	国際水素サプライチェーンの実現に向けた川崎重工の取組み	千代 亮
20	2018年5月取材日	電気新聞	日豪液化水素サプライチェーンおよび水素発電の実現を目指した取組み	西村 元彦
21	2018年8月	VID Gas for Energy, Essen (Germany)	"Enhancement of Fuel Flexibility of Industrial Gas Turbines by Development of innovative Combustion Systems"	KGE(Kawasaki Gas Turbine Europe), Dr. Tekin
22	2018年6月	東京工業大学 グローバル水素エネルギーコンソーシアム	水素ガスタービンのエクセルギー解析と将来サイクルの展望	山下 誠二
23	2018年5月取材日	株式会社 朝日新聞	水素サプライチェーン構築と水素ガスタービン発電の実現に向けた開発および技術実証	西村 元彦
24	2018年6月	矢野経済研究所 月刊誌 Yano E Plus 2018年6月号	水素発電技術動向 7-1. 川崎重工業株式会社	川崎重工業株式会社
25	2018年6月	第45回水素研究会 井之上パブリックリレーションズ会議室	国際水素サプライチェーンの実現に川崎重工の取組み	千代 亮
26	2018年6月	大阪商工会議所 環境・エネルギービジネス研究会	国際液化水素サプライチェーン構築への川崎重工の取組み	西村 元彦
27	2018年6月	"大阪科学技術センター エネルギー技術対策委員会スマートグリッド/スマートコミュニティ研究会"	川崎重工における水素専焼・混焼タービンの開発状況について	堀川 敦史
28	2018年9月	エネルギー・資源学会 学会誌 9月号	川崎重工における水素焼きガスタービンの開発状況	堀川 敦史
29	2018年8月	PEI:Power Enginering International	Enhancement of Fuel Flexibility of Industrial Gas Turbines by Development of innovative Combustion Systems	KGE(Kawasaki Gas Turbine Europe), Dr. Tekin
30	2018年7月	日本計画研究所	"国際液化水素サプライチェーン構築"	西村 元彦
31	2018年8月	技術情報センター	水素燃料に対応する燃	堀川 敦史

		-アンモニア利用発電, 水素発電, 超臨界 CO2 サイクルなど- 低炭素 発電技術と事業動向	焼技術とガスタービン 開発状況	
32	2018年10月	Bayern innovativ “Cluster Energieumstieg”	Entwicklung innovativer Wasserstoff- Verbrennungssysteme für Industriegasturbinen - H2 Mirco-Mix Brennkammer -	KGE(Kawasaki Gas Turbine Europe), Dr. Tekin
33	2018年9月	Powergen 2018 Jakarta	Hydrogen Gas Turbine	明日 芳浩
34	2018年11月	INNOVATIONSPREIS DER DEUTSCHEN GASWIRTSCHAFT	"Entwicklung innovativer Wasserstoff- Verbrennungssysteme für Industriegasturbinen - H2 Mirco-Mix Brennkammer -	KGE(Kawasaki Gas Turbine Europe), Dr. Tekin
35	2018年6月	World hydrogen Technology Convention 2019 Tokyo	APPLICATION OF LOW NOX MICRO- MIX HYDROGEN COMBUSTION TO INDUSTRIAL GAS TURBINE AND DLN COMBUSTOR DEVELOPMENTS FOR 2MW CLASS GAS TURBINE	堀川 敦史
36	2019年1月	日本ガスタービン学会 主催 第47回ガスター ビンセミナー	水素焼きガスタービン 開発の取り組み	柏原 宏行
37	2019年2月	"愛知県産業労働部産業科 学技術課主催水素エネル ギー社会形成研究会 平 成30年度第4回セミナー	水素焼きガスタービン 開発の取り組み	柏原 宏行
38	2019年2月 日	エネルギー・資源学会 見学会	川崎重工における水素 専焼・混焼タービンの 開発状況について	堀川 敦史
39	2019年2月	兵庫県電気協会姫路支部 開催第5回技術講習会	水素エネルギー社会実現に 向けた川崎重工の取組み	吉山 孝
40	2019年5月	34th INTERNATIONAL SCIENTIFIC & EXPERT MEETING OF GAS PROFESSIONALS, 2019, Opatija, Croatia	Enhancement of Fuel Flexibility of Industrial Gas Turbines by Development of innovative hydrogen Combustion Systems	KGE(Kawasaki Gas Turbine Europe), Dr. Tekin
41	2019年6月	川崎重工業株式会社ホ ームページ	川崎重工業 H P Kawasaki Hydrogen Road	川崎重工業株 式会社
42	2019年10月	火力原子力発電技術協 会 会誌「火力原子力発 電」10月号	川崎重工における水素 焼きガスタービンの開 発状況	堀川 敦史
43	2019年8月	日本計画研究所セミナー	「国際液化水素サプライ	西村 元彦

			チェーン構築」の進捗と今後の更なる展開について	
44	2019年9月	福岡水素エネルギー戦略会議人材育成事業技術者育成セミナー	水素ガスタービン発電の実現に向けた取組み	吉山 孝
45	2019年9月	Powergen 2019 Kuala Lumpur	Hydrogen Gas Turbine	青木 茂樹
46	2019年9月	関西火力発電 EXPO 技術 次世代火力発電セミナー	国際水素サプライチェーン構築と水素ガスタービン開発への取組み	吉山 孝
47	2020年3月	ASME の "Mechanical Engineering" 3月号	HYDROGEN ENERGY SUPPLY CHAIN FOR DECARBONIZATION	川崎重工業株式会社
48	2020年6月	ASME Turbo Expo	"30 YEARS OF DRY LOW NOX MICROMIX COMBUSTOR RESEARCH FOR HYDROGEN-RICH FUELS . AN OVERVIEW OF PAST AND PRESENT ACTIVITIES	FHアーヘン大学 Prof. Harald H-W Funke
49	2020年8月	技術情報センター-アンモニア利用発電, 水素発電, 超臨界 CO2 サイクルなど- 低炭素発電技術と事業動向	水素燃料に対応する燃焼技術とガスタービン開発状況	堀川 敦史

その他：展示会出展

50	2017年3月	第1回次世代火力発電 EXPO	GAS TURBINE Hydrogen gas turbine	川崎重工業株式会社
51	2018年2月	第2回次世代火力発電 EXPO	水素専焼ドライ低 NOx 燃焼技術	川崎重工業株式会社
52	2020年3月	次世代火力発電 EXPO	CGS コージェネレーションシステム THE NEXT 火力発電	川崎重工業株式会社

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：②-2を参照

研究開発項目③－1

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／超高効率発電システム基盤技術研究開発／酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発」

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人東京工業大学、一般財団法人エネルギー総合工学研究所、川崎重工業株式会社（2019年度終了）

1. 研究開発概要

クローズドガスタービンは、既存の開放系ガスタービンとは一線を隔す超高効率の発電システムとして期待されている。このため、水素基本戦略で示す2030年以降の水素発電商用化政策も踏まえ酸素水素燃焼によるクローズドガスタービンシステムの実現性を検討する。具体的には、2018年度から2019年度までの2年間で発電効率75%を達成可能なシステムの技術成立性・経済性確保の見通しを検討するとともに、それらを競合技術と比較するフィージビリティスタディ（FS）を実施する。

委託期間：2018年6月22日～2020年2月28日

技術評価委員会：2019年5月16日

2. 研究開発目標（設定の理由も含め）

目標1：FSを行い、技術成立性・経済性確保の見通しを提示すること。

目標2：上記を通じて、発電効率75%を達成しうるシステム構成を提示すること。

目標3：上記を通じて、競合技術の特定及びそれらに対する優位性を提示すること。

- ・設定根拠：水素基本戦略で示す2030年以降の水素発電商用化政策も踏まえ酸素水素燃焼によるクローズドガスタービンシステムについて、技術成立性、経済性が成り立つことを示し、超高効率発電となる可能性と、競合技術に対する優位性を示すことで、システムの実現性を示すため。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

発電効率75%を達成可能なシステムの技術成立性・経済性確保の見通しを検討するとともに、それらを競合技術と比較するフィージビリティスタディ（FS）を行った。具体的には以下の2項目を下記のように分担して実施した。

<実施項目>

I. システムとりまとめ

I-1. 技術的成立性の検討（担当：全機関、取りまとめ：産業技術総合研究所）

I-2. 経済成立性の検討（担当：エネルギー総合工学研究所、川崎重工業株式会社）

I-3. 実用化シナリオ検討（担当：エネルギー総合工学研究所）

II. 要素研究

II-1. 酸素水素高圧燃焼技術の研究（担当：産業技術総合研究所、東京工業大学）

Ⅱ-2. 酸素水素燃焼タービンサイクルの研究（担当：東京工業大学）

Ⅱ-3. システム最適化・合理化検討（担当：川崎重工業株式会社）

<達成目標と実施項目の関連>

目標 1：FS を行い、技術成立性・経済性確保の見通しを提示すること。

- ・技術成立性については「Ⅰ-1. 技術的成立性の検討」、経済性確保については「Ⅰ-2. 経済成立性の検討」において検討作業を行い、見通しを提示する。「Ⅰ-1. 技術的成立性の検討」は、「Ⅱ. 要素研究」の成果及び収集した技術情報を用いて検討を行う。

目標 2：上記を通じて、発電効率 75% を達成しうるシステム構成を提示すること。

- ・発電効率 75% を達成しうるシステム構成については「Ⅱ-2. 酸素水素燃焼タービンサイクルの研究」において、候補サイクルを検討し、提示する。

目標 3：上記を通じて、競合技術の特定及びそれらに対する優位性を提示すること。

- ・競合技術の特定と優位性については「Ⅰ-3. 実用化シナリオ検討」にて実施する。

これらの目標達成のため、実施項目毎に中間的な目標を立てて研究開発を実施した。

<成果>

(1) Ⅰ. システムとりまとめ

Ⅰ-1. 技術的成立性の検討

- a) 目標：酸素水素燃焼タービン発電システムが技術的に実現可能であることを示す。

成果：国内外の学会、研究会などに参加し、情報収集を行った。「Ⅱ. 要素研究」以外 の課題も含めて技術情報を収集した。その結果、技術成立性については、高圧でも酸素水素燃焼が可能であることを示した。技術的課題、検証方法を示した。

a) 技術成立性の検討

評価項目	現在の状況	今後の技術課題
酸素水素燃焼タービン発電システムの効率	<ul style="list-style-type: none"> 候補サイクルの概念設計を検討し、タービン入口温度1700℃で発電端効率75%以上のサイクルが成立することを示した。 これは従来の火力発電と比較して、飛躍的に高い発電効率を得つつ、CO₂フリー、NO_xその他エミッションフリーという付加価値を有するシステムである。 効率を訴求するシステムにおいて、酸素製造設備や熱交換設備の付加・増大が原因となる経済的な課題を明らかにした。 他方、タービン入口温度を1400℃、発電端効率68.3%の合理化型システムを見出した。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼器、耐熱・耐高温水蒸気材料の本格的開発により実現可能なシステムとなる。
酸素酸素水素燃焼タービン発電システム水素GTシステム固有の技術	<ul style="list-style-type: none"> バーナ単体での要素試験とシミュレーションにより、三原子分子で高希釈された水素と酸素の燃焼において、燃焼の完結性や混合が課題であることが明確化。 調査により、水素と酸素の噴流衝突火炎を水蒸気流で希釈する方式での実証例を確認。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼、熱伝達、材料など基盤技術研究等が必要。

b) 目標：将来の実用化に向けて研究開発が必要な技術課題を明確化する。

成果：酸素水素燃焼、耐熱・耐高温水蒸気材料、不凝縮ガス、漏洩・シール、爆発安全性について、技術課題を示した。基本的なサイクル構成を仮定して、起動手順の一案を示した。

b) 技術課題の明確化

評価項目	開発課題の優先順位
耐熱・耐高温水蒸気材料	<p>○: 水蒸気による冷却により燃焼器において対応技術有り。</p> <p>△: CMCの高温水蒸気への対応として、耐環境コーティング技術が開発中。高圧水蒸気に対応する技術として、A-USC蒸気タービンの技術開発中。高温かつ高圧の水蒸気への対応技術はない。材料開発及び冷却技術開発が必要。</p>
不凝縮ガス	<p>○: 水素もしくは酸素のどちらかを一定割合残す制御方式の適用可能性有り。</p> <p>○: 不凝縮ガスの系外除外は真空ポンプで対応可。</p> <p>△: 水素・酸素の双方ができる限り残留しない燃焼条件について、モデル試験等により確認する必要がある。燃焼器の構造にも関連するため、燃焼技術レベルの向上が課題。</p>
漏洩・シール	<p>○: 蒸気タービンと共用できる部分は、既存技術の適用の可能性有り。</p> <p>△: 酸素・水素・水蒸気混在時のシール技術の成立性確認は今後の課題。</p> <p>△: 表面の化学反応・浸食の要素研究が必要。</p> <p>※水素冷却方式発電機のシール技術等を今年度調査。</p>
爆発安全性	<p>○: 大気圧条件での水素の安全性については研究開発有り。</p> <p>△: 着火失敗時・失火時のシステムの制御などは今後の課題。</p> <p>△: 水素・酸素の残存/漏洩時の安全指針や技術基準を制定するための基盤技術の研究開発も課題。</p>

c)目標：技術課題の検証方法を提示する。

成果：先ず酸素水素燃焼技術を先行して開発を進めて、高温水蒸気を発生可能として、技術課題の検証案を提示した。

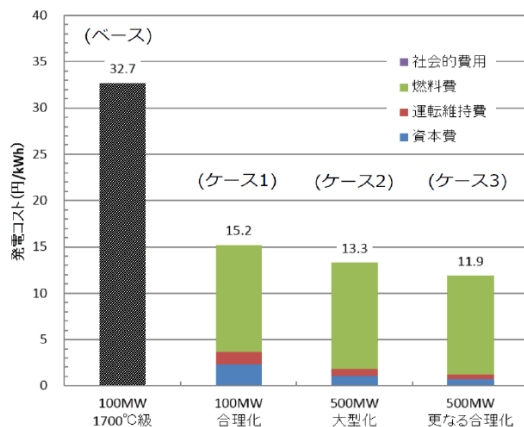
d)目標：フェーズ毎のターゲットを検討・設定し、次の開発ステップの小型検証実験に関して、目的や検証すべき実験内容等を検討して実験機の仕様を検討・設定する。

成果：酸素水素燃焼タービン発電システムの実用化に向けた開発のゴールとして 1700℃級効率追求型（ベースロード電源用）と 1400℃級合理化案を想定した。研究開発の全体像を提案した。

I -2.経済成立性の検討

a) 目標：水素コスト 20 円/Nm³ で 12 円/kWh 以下の発電コストを示す。

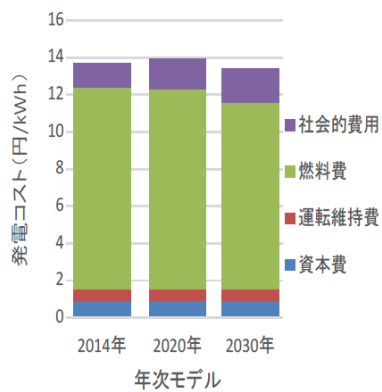
成果：酸素水素燃焼タービン発電システム（商用機）の経済性確保の見通しを得るために、発電コスト計算ツールを整備した上で、選定された高効率発電システムの発電コストを試算した。その試算結果が目標発電コストよりも大幅に高くなったため、目標値を達成するためのコストダウン検討を行い、発電効率 75%で目標発電コストを達成する発電コスト 11.9 円/kWh が試算された。そのためには、酸素水素燃焼器やタービンなどの主要機器の他に、高温高圧熱交換器、酸素製造設備の設備費や所要動力などの低減化に技術開発が不可欠である。



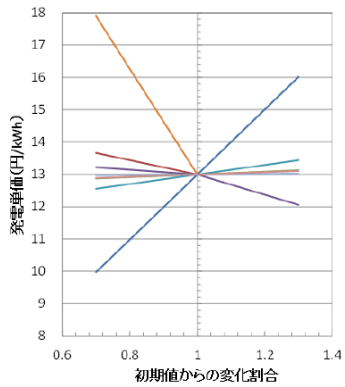
発電コスト試算

b) 目標：主な競合技術の経済性データ（発電コスト）を示す。

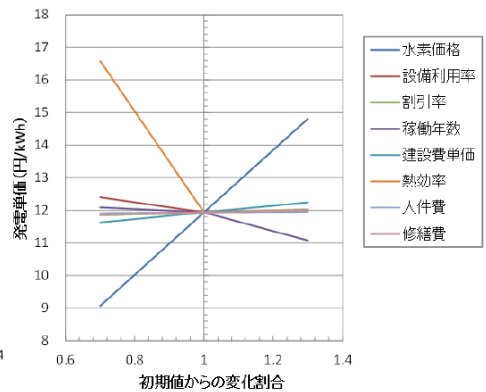
成果：競合技術と想定される各種発電方式の水素発電コストを試算し、当該システムと比較した結果、将来的には当該システムが競争力を有する可能性が期待できることを示した。更に、酸素水素燃焼タービン発電システムの国内への経済波及効果に関する評価手法を検討した。その結果、経済性確保については、1700℃級発電では大出力化とコストダウンにより、発電単価を下げうることを示した。また、1400℃級合理化案を提示した。



LNG 火力
競合技術発電コスト



水素専焼 GTCC



酸素水素燃焼タービン

感度分析結果

I-3. 実用化シナリオ検討

a) 目標：将来の水素燃焼タービン発電システムの普及を想定したときの、実現性が高い水素サプライチェーン（供給側、需要側）の候補を提示する。

成果：世界のガスタービン関連技術の研究開発動向や水素サプライチェーンの開発動向の調査を実施し、水素サプライチェーンの将来像を検討した。NEDO 実証事業実施中の MCH を媒体としたサプライチェーンと液化水素によるサプライチェーンが有力候補と判断。両サプライチェーンとも水素製造時に発生する CO₂ 処理が不可欠のため、再生可能エネルギーによる水素製造に関する実証プロジェクト等の動向を継続的に把握する必要がある。

b) 目標：当該システムの技術開発から実用化に至るシナリオ案を検討・提示する。また、将来の電源構成における酸素水素燃焼タービン発電システムの位置付けを検討・提示する。

成果：当該システムの技術開発から実用化に至るシナリオ案 2 案を提示した。両シナリオに共通する基盤的な研究開発項目（サイクル検討、燃焼技術開発、高温材料開発、運転制御、安全性、経済性など）の継続的な推進、適用法規類や技術基準の確認と規制緩和の動向調査、などが必要。また、将来の電源構成における酸素水素燃焼タービン発電システムの位置付けとして、ベースロード電源及びミドル電源として適用可能である。

c) 目標：競合技術を選定し、多面的な比較評価により当該システムの優位性を提示す

る。

成果：水素専焼技術と多面的な比較評価を行い、当該システムは、実用化段階において、完全なゼロエミッションと高い発電効率（10%ポイント程度）を実現できることに優位性があることを示した。ただし、経済性について今後も前提条件に関する検討作業を続け、適宜、再評価する。

競合技術との比較

項目	酸素水素燃焼タービン発電システム (酸素水素燃焼技術)	ガスタービン発電システム (水素専焼技術)
社会性 (有用性)	◎脱炭素化を達成できる安定電源となりうる。ベースロード、ミドル（調整電源）	◎脱炭素化を達成できる安定電源である。ベースロード、ミドル、ピーク（調整電源）
社会性 (受容性)	◎排ガス規制とは関係しない。 △高温高压での酸素水素燃焼に関わる安全対策が不可欠。（酸素水素の漏洩）	△十分な NOx 対応を行うとしてもエミッションフリー化は困難。天然ガスとの水素混焼時は CO ₂ 対策が必要。
政策性	○本 FS を NEDO 事業として推進中。	◎我が国の水素基本戦略に「電力分野での利用」として位置付けられている。
環境性	◎CO ₂ フリーの水素を燃料とすることでエミッションフリーを実現できる。 ○振動は殆ど発生せず、騒音は高周波等の対策が不可欠。	○空気燃焼方式のため、NOx 発生を避けられず、低 NOx 化が主な開発課題となっている。 ○振動は殆ど発生せず、騒音は高周波等の対策が不可欠。
技術性	◎発電端効率 75%以上(LHV)を実現できる可能性を有する。 △開発課題が多く、高温高压燃焼技術、タービン設備及び熱交換器などの開発、構成機器類の所内動力の低減化、高温高压蒸気や低濃度ではあるが未燃の酸素及び水素による腐食対策、システム全体の安全対策などが必要。	△発電効率は当該システムより 10%（ポイント）程度低い。高効率化のための研究開発を推進中。 ◎過去数十年の研究開発により、発電システムとしての完成度は高い。水素専焼に関する開発課題は少なく、主に低 NOx 燃焼器の開発を推進中。
経済性	○燃料費削減に繋がる発電効率は 10%（ポイント）程度高い。 △構成機器数が多く、高い設備費と所内率がコストアップ要因となっており、大幅な低減化が課題。 なお、水素コスト 20 円/Nm ³ での発電コスト試算結果は、WE-NET ベースでは 13.9 円/kWh、当該システムでは設備費のコストダウンと所内率の大幅な低減化を実現することで 12 円/kWh 以下が期待できる。	△発電効率は当該システムよりも 10%（ポイント）程度低い。発電コストに占める燃料費の比率が高いため、発電効率の向上が課題。 ○発電コストに占める設備費や所内率の比率は低い。 なお、水素コスト 20 円/Nm ³ での発電コスト試算結果は 13 円/kW となった。

(2) II. 要素研究

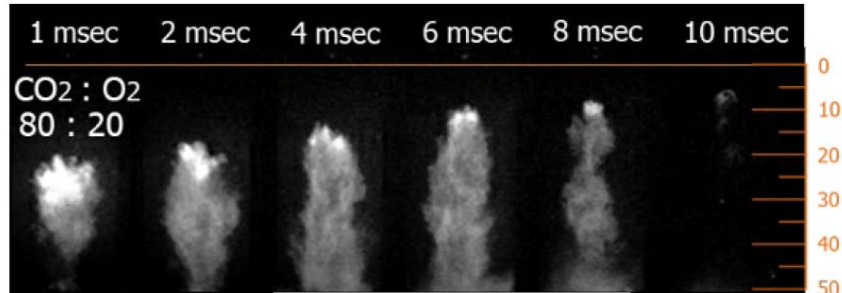
II-1. 酸素水素高压燃焼技術の研究

目標：ガスタービン内を模擬した高压場での酸素水素小型バーナの成立性を確認するとともに、タービン入口での熱化学特性を明らかにし、「②-2. 酸素水素燃

焼タービンサイクルの研究」と連携することでサイクル成立性を検討するための燃焼特性を取得・提供する。

成果：定容燃焼器と急速圧縮膨張装置（RCEM）により高圧での水素噴流および水素拡散火炎を観察した。

経過時間（点火後）



- **ノズル径：φ0.5**
- 雰囲気条件（点火開始時）
圧力：3.0 MPa(abs.)、温度：355~360 K
組成：CO₂: 80~84, O₂: 20~16 mol%
- 水素供給圧力初期値：3.9~4.0 MPa(abs.)
- 撮影条件:速度10,000 fps, 露光期間90 μs, ゲイン60%

希釈率 80%以上, 3MPa 以上の高圧場でも, 適切な希釈条件を選択することで保炎できることが確認できた。

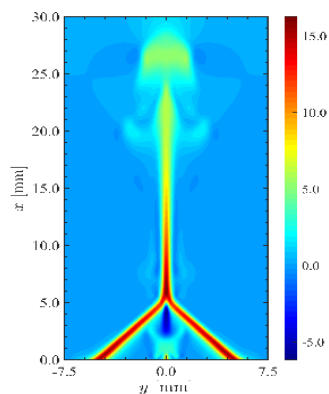
RCEM を用いた実験

数値シミュレーション結果から、水蒸気希釈酸素と水蒸気希釈水素を並行に噴射すると保炎性が良くないことが示唆された。このため、マルチクラスターバーナの構成要素となるシングルバーナを衝突火炎混合型で試作し、1MPa 以下、水蒸気希釈条件での酸素水素燃焼試験を行い、噴射流速、水蒸気希釈率や雰囲気圧力などの試験条件が火炎の外観や保炎性に与える影響を調べた。ノズル部分の詳細設計や配列が保炎性に与える影響は、今後の研究課題である。

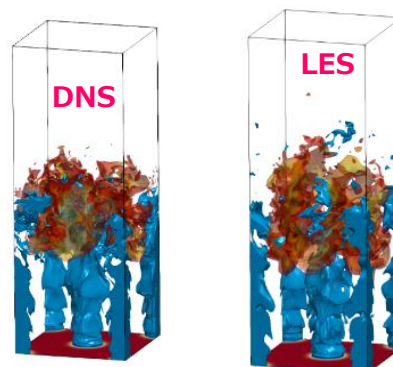
タービン入口（燃焼器出口）での熱化学特性の解明、高圧酸素水素層流非予混合燃焼の火炎保持機構の解明、高圧酸素水素乱流非予混合燃焼の熱化学特性の解明、Large Eddy Simulation (LES)のための乱流燃焼モデル開発と検証に取り組み、マルチクラスターバーナを構成するバーナでの火炎干渉に関する知見を得た。



ノズル試作例



衝突型バーナ単体の流速シミュレーション



複数酸素水素噴流火炎干渉のDNS、LES比較

マルチクラスターバーナノズル

以上の結果、技術成立性について、高圧でも酸素水素燃焼が可能であることを示した。

II-2.酸素水素燃焼タービンサイクルの研究

目標：発電効率 75% を達成可能な酸素水素燃焼発電サイクルを提案する。

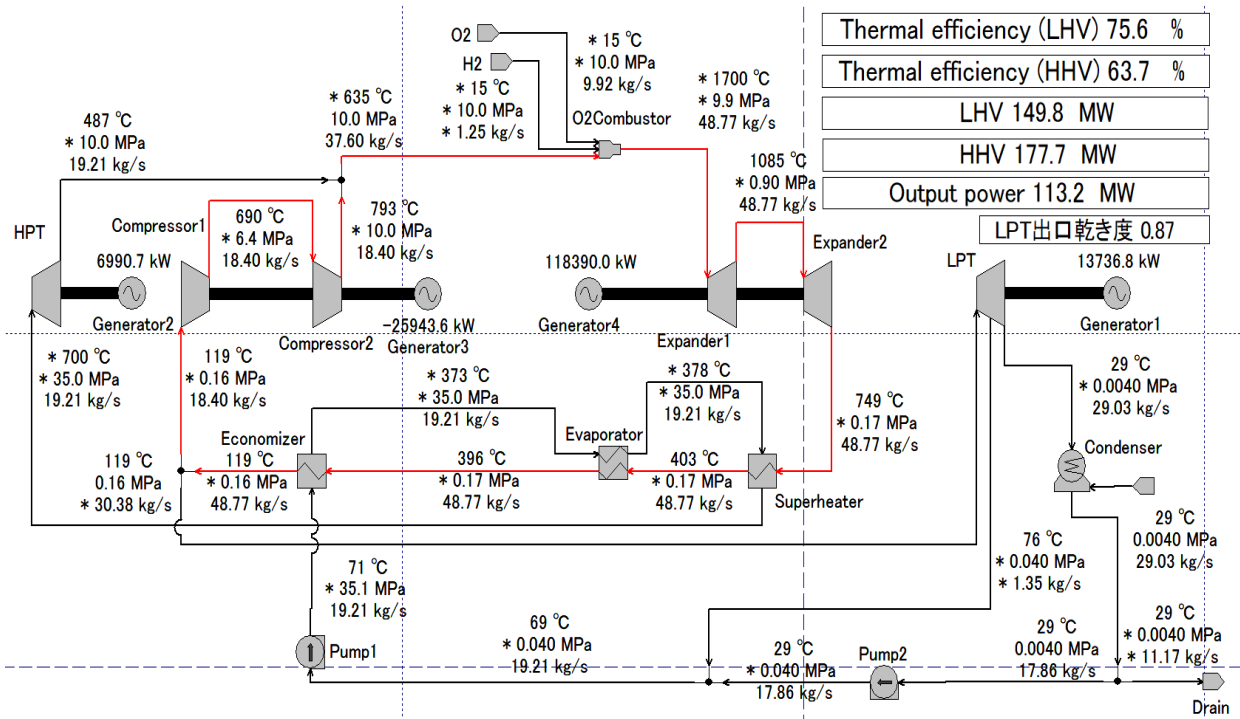
成果：酸素水素燃焼タービンサイクルを対象に、熱効率解析及びエクセルギー解析を行うことで、熱効率 75% 達成可能な発電システムを提案するための検討を行った。コンバインドサイクルと比較し、酸素水素燃焼タービンサイクルの優位性を示した。

ガスタービン入口温度 1700°C の酸素水素燃焼タービンサイクルについて最適化により最大熱効率 75% が得られた。

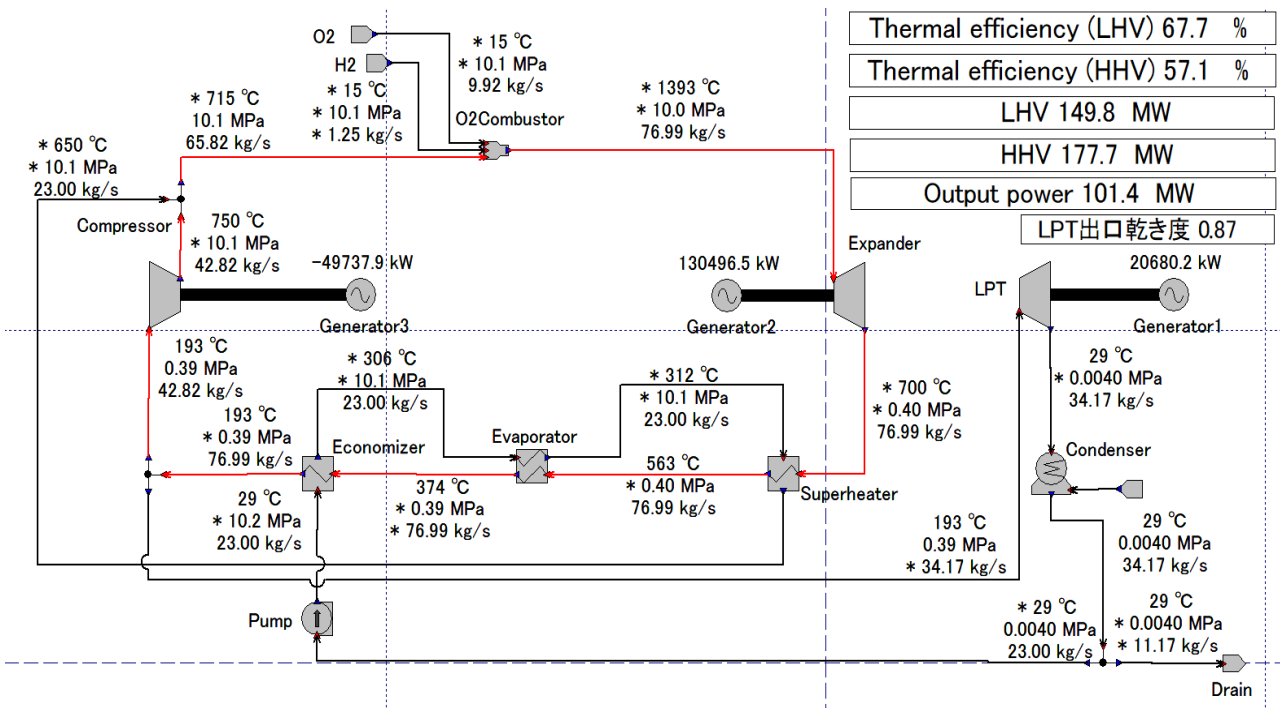
さらに不凝縮ガスを含む酸素水素燃焼タービンサイクルの発電システムについても検討し、脱気器の設置場所の提案、各流路での残存酸素濃度を明らかにした。

熱効率および設備費を考慮した上で、経済的に優れた酸素水素燃焼タービンサイクルのシステム案 (1400°C 級合理化案) を提案し、基本構成を示すことができた。

以上のように、発電効率 75% を達成しうるシステム構成を示した。



効率訴求型の例（発電効率(LHV)75.6%，燃烧
 圧力・温度：100気圧，1700°C）



合理化案の例（発電効率(LHV)67.7%，燃烧圧
 力・温度：100気圧，1400°C）

II -3. システム最適化・合理化検討

目標：酸素製造設備等の付帯機器を含む総設備費および送電端効率について、経済的に合理的な酸素水素燃焼タービン発電システムプラント仕様案を提示するとともに、その実現に必要な技術課題を明らかにする。

成果：酸素製造設備等の付帯機器を含む総設備費および送電端効率について、経済的に合理的な酸素水素燃焼タービン発電システムプラント仕様案を提示するとともに、その実現に必要な技術課題を明らかにした。

①酸素製造設備の設備費検討

II-2 で提案した酸素水素燃焼タービンサイクルを発電システムとして実現するために必要な主要付帯機器のうち、酸素製造設備について深冷分離器メーカーに外注して機器費情報を取得した。また、当該機器を設置するための工事費等を検討し、酸素製造設備の設備費を明らかにした。酸素水素燃焼タービン発電システムの効率を訴求した場合、熱交換器の設備費が過大になりがちなので、この仕様の合理化が設備費低減において重要であることを明らかにした。また、大幅な設備費低減となる経済的に合理的な仕様案を提示した。

酸素水素タービン発電システムの合理化案

	酸素水素タービン 発電システム (効率訴求型)	酸素水素タービン 発電システム (合理化案)
送電端効率	63.1%(LHV)	56.7%(LHV)

②酸素水素燃焼タービン発電システムの付帯機器および所内動力の検討

II-2 で提案した酸素水素燃焼タービンサイクルを発電システムとして実現するために必要な付帯機器（酸素製造設備、燃料圧縮機、給水ポンプ、復水ポンプ、冷却水ポンプ、冷却塔）の機器仕様および消費電力の検討を行い、当該発電システムの所内動力を明らかにするとともに、酸素水素燃焼タービン発電システムの送電端出力および送電端効率を明らかにした。100MW 級のガスタービンコンバインドサイクルと比較した場合、酸素水素燃焼タービン発電システムの送電端効率は 10.5pt%程度高いポテンシャルがある。

酸素水素タービン発電システムの送電端性能

	酸素水素タービン 発電システム (効率訴求型)	ガスタービン コンバインドサ イクル (参考)
発電端出力	112.5MW	104.2MW
発電端効率	75.1%(LHV)	54.9%(LHV)
送電端出力	94.6MW	100MW
送電端効率	63.1%(LHV)	52.6%(LHV)

③タービン・復水器開発の基本目標設定および主要付帯機器の技術課題の明確化

タービン排気損失の検討を行った。また、提案したタービンサイクルに対し、タービン膨張線図や復水器凝縮熱伝達、復水器の脱気方法等の検討

を完了した。さらに、蒸気圧縮機、酸素圧縮機、水素圧縮機などの主要付帯機器の技術課題を明確にした。

酸素水素タービン発電システム（効率訴求型）の
タービン基本仕様のまとめ

	タービン1 高温タービン	タービン2 高圧タービン	タービン3 低圧タービン
タービン形式	多段軸流タービン		多段軸流 復水タービン
発電機回転数	3,000rpm		
タービン回転数	3,000rpm (直結式)	15,000rpm (減速式)	3,000rpm (直結式)
蒸気流量	50kgs	20kgs	30kgs
入口温度	1,700°C	700°C	119°C
入口圧力	9.9MPa	35MPa	0.16MPa
出口圧力	0.17MPa	10MPa	0.005MPa
膨張比	58	35	32
段数	14段	4段	4段
概出力	120MW	7MW	13MW

<達成度>

目標 1 : FS を行い、技術成立性・経済性確保の見通しを提示すること。

○達成した。

目標 2 : 上記を通じて、発電効率 75% を達成しうるシステム構成を提示すること。

○達成した。

目標 3 : 上記を通じて、競合技術の特定及びそれらに対する優位性を提示すること。

○達成した。

3.2 成果の意義

酸素水素燃焼によるクローズドガスタービンシステムの実現性を、技術的成立性、経済性確保の見通しを提示することができた。

さらに、発電効率 75% を達成しうるシステム構成を示した。

酸素水素燃焼タービン発電システム（商用機）の経済性確保の見通しを得るために、発電コスト計算ツールを整備した上で、選定された高効率発電システムの発電コストを試算し、コストダウン検討を行い、今後の技術開発課題を示した。

また、競合技術と想定される各種発電方式の水素発電コストを試算し、更に、酸素水素燃焼タービン発電システムの国内への経済波及効果に関する評価手法を検討した。なお、経済性については今後も前提条件に関する検討作業を続け、適宜、再評価していく。

酸素水素燃焼タービン発電システムの将来の実用化に向けた開発シナリオ案を検討した。

高圧でも酸素水素燃焼が可能であることを示した。タービン入口（燃焼器出口）での熱化学特性の解明、高圧酸素水素層流非予混合燃焼の火炎保持機構の解明、高圧酸素水素乱流非予混合燃焼の熱化学特性の解明、Large Eddy Simulation(LES)のための乱流燃焼モデル開発と検証に取り組み、マルチクラスターバーナを構成するマルチクラスターバーナでの

火炎干渉に関する知見を得た。

酸素製造設備等の付帯機器を含む総設備費および送電端効率について、経済的に合理的な酸素水素燃焼タービン発電システムプラント仕様案を提示するとともに、その実現に必要な技術課題を明らかにした。

3.3 成果の最終目標の達成可能性

本FSにおいて、実用化シナリオ案が示され、基盤技術開発などの今後の研究開発ステップにおいて取り組むべき項目が、下図のように示された。示された技術課題の研究開発に取り組み、開発した技術を検証していくことで、実用化が可能になる。

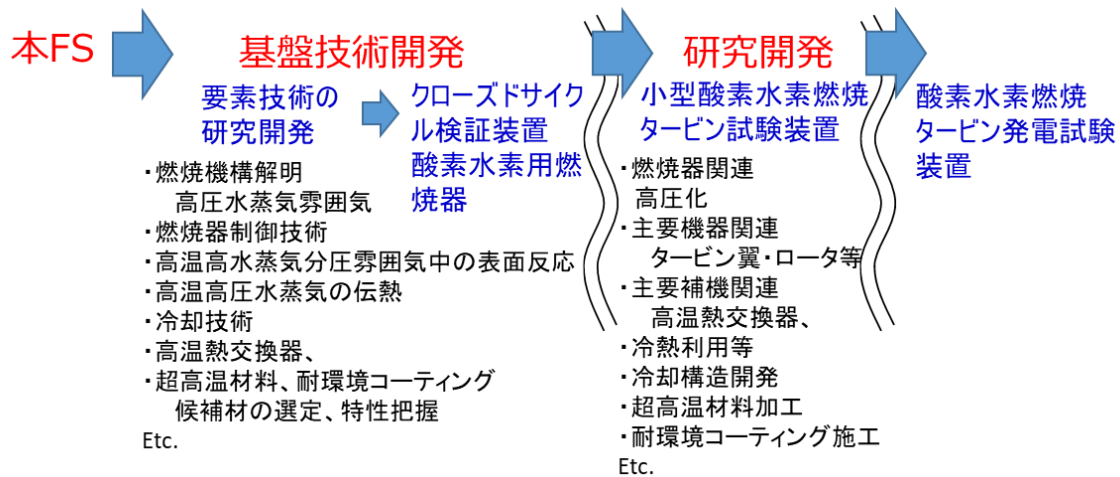


図 酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発イメージ

商用機としてはまず 1400℃級を目指すことを提案し、下図のように実用化までの課題を示した。

1400°C級酸素水素燃焼タービン発電の実用化までの課題

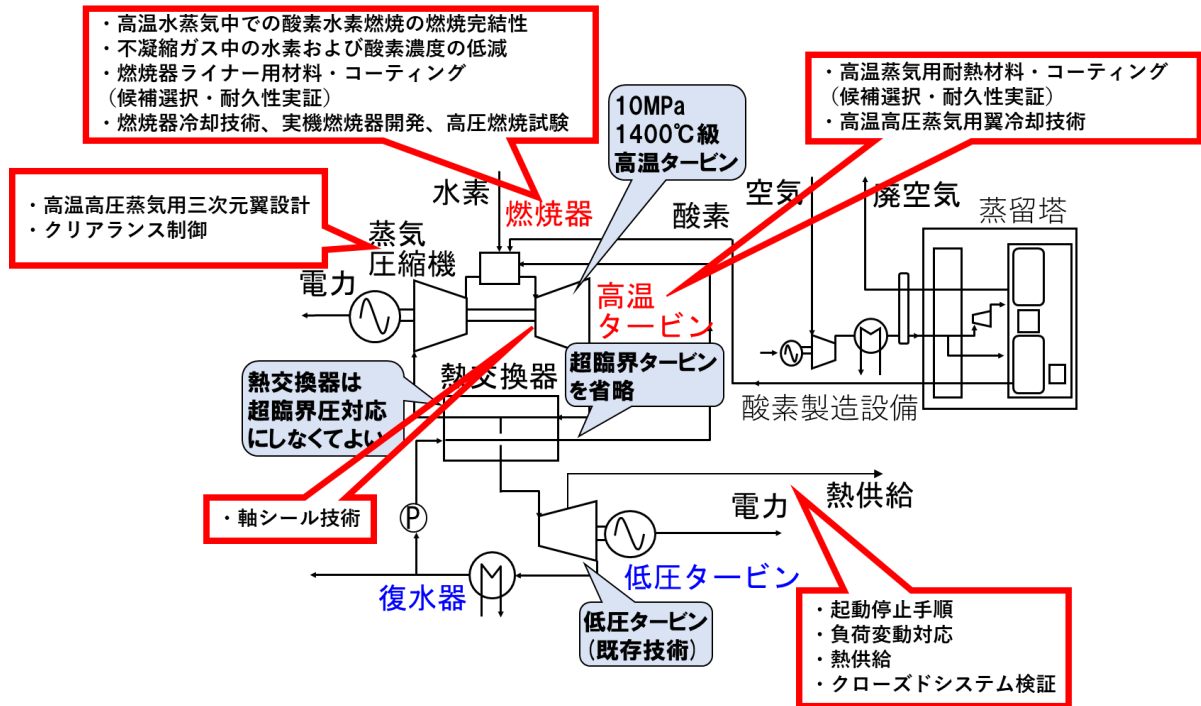


図 実用化までの課題

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

本FSにおいて技術成立性・経済性確保の見通しを提示し、競合技術の特定と優位性について示し、実用化シナリオが検討された。これらの成果を踏まえ、基盤技術開発が進められる見通しである。次期フェーズで基盤技術開発を実施する。経済性については今後も前提条件に関する検討作業を続け、適宜、再評価していく。

5. 特許・研究発表等

—特許等—

なし

—研究発表・講演、文献等、その他—

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019年1月31日	東京工業大学グローバル水素エネルギー研究ユニット 第4回公開シンポジウム	酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発	店橋護、野崎智洋
2	2019年6月2日	WHTC2019、東京国際フォーラム	Direct numerical simulations of hydrogen-oxygen lifted flames at gas turbine relevant conditions	Mohamed Shamma、Defne Kiran、源 勇氣、志村 祐康、

				店橋 護
3	2019年6月20日(木)～21日(金)	第24回 動力・エネルギー技術シンポジウム、東京大学生産技術研究所(目黒区駒場)	水素燃焼タービン発電システムの基本特性に関する研究	武埴浩太郎、岡崎健、野崎 智洋
4	2019年6月30日	水素エネルギーシステム 第44巻第2号	酸素水素燃焼タービン発電への期待	松本俊一
5	2019年5月23日	RWTH - Tokyo Tech Joint Workshop on Sustainable Energy	DNS and Advanced Laser Diagnostics of Hydrogen-Oxygen Combustion for Future Electric Power Generation	店橋 護
6	2019年7月18日	2019年度 NEDO 次世代電池・水素成果報告会	酸素水素燃焼タービン発電システムの研究開発	古谷 博秀
7	2019年10月12日	熱工学コンファレンス 2019	浮き上がり火炎の安定性に対する水蒸気希釈の影響	Defne Kiran、大沢 耕介、Mohamed Shamma、源 勇氣、志村 祐康、店橋 護
8	2019年11月3日	IEA combustion agreement TLM 2019	Mesoscale combustion for hydrogen gas turbine applications	壹岐典彦、范 勇、倉田修
9	2019年11月	IGTC2019 展示会	産業技術総合研究所	壹岐典彦、范 勇、倉田修、井上貴博、松沼孝幸
10	2019年11月21日	第57回燃焼シンポジウム	Effects of pressure, shear and diluent on the stabilization of hydrogen-oxygen lifted flames	Defne Kiran、大沢 耕介、Mohamed Shamma、源 勇氣、志村 祐康、店橋 護
11	2019年12月13日	The 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC)	Direct Numerical Simulation of Steam Diluted Hydrogen-Oxygen Lifted Flames	Defne Kiran、大沢 耕介、Mohamed Shamma、

				源 勇気、 志村 祐康、 店橋 護
12	2019年12 月13日	The 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC)	THERMODYNAMIC ANALYSIS OF HYDROGEN COMBUSTION POWER GENERATION SYSTEMS	武埜 浩太郎、 岡崎 健、 野崎 智洋
13	投稿中	日本機械学会論文集	水素燃焼発電サイクルの 基本特性解析	武埜 浩太郎、 岡崎 健、 野崎 智洋

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：③-1を参照

課題番号：④－１

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／

エネルギーキャリアシステム調査・研究／水素分離膜を用いた脱水素」

委託先：公益財団法人 地球環境産業技術研究機構、千代田化工建設株式会社

(2019年6月終了)

1. 研究開発概要

有機ケミカルハイドライド法とは、トルエンなどの芳香族化合物を水素化することによって、メチルシクロヘキサン（MCH）などの飽和管状化合物として水素を固定し、常温・常圧の液体状態で貯蔵輸送を行い、水素の需要地において脱水素反応により水素を取り出して利用する方法である。従って、水素エネルギーの安定な貯蔵・輸送という点で大きな可能性を有するエネルギーキャリアである。

水素供給側で行われるトルエンの水素化反応は類似の反応であるベンゼンの水素化反応として、1970年代から商業実績のある技術であり、既に確立された技術である。一方、水素生成反応である脱水素反応については、共同提案者である千代田化工建設(株)にて1万時間を超える長寿命の触媒が開発され、同じく1万時間程度の実証試験を終了している段階にある。

但し、現在開発されている脱水素反応技術は大規模の水素製造を想定して、研究開発/実証試験がなされており、将来の再生可能エネルギーの一層の普及に際しては、小型・分散型の脱水素装置を実用化し、商業設備／一般家庭／水素ステーションといった分野への適用も促進すべきと考えられる。本事業では、2019年度末に、メンブレンリアクターの実用化に必須な要素技術を確立することを目標に、装置の小型化を可能とする水素分離膜およびそれを用いたメンブレンリアクターのシステムについて技術課題及び経済性の検討を行うとともに、2016年11月1日付の高圧ガス保安法の運用及び解釈の変更によって、高圧ガス保安法の対象とならずに運用できる圧力の上限が引き上げられたことに伴う、使用圧力の高圧化についても検討を行う。

2. 研究開発目標

(1) セラミック系水素分離膜（単管膜）の長尺化技術課題の明確化

2014年度は、対向拡散 CVD 法を用いて、セラミック系水素分離膜（単管膜）の長尺化（70 mm→200 mm）を達成する。また、2013年度に検討した温度分布、プレカーサ・酸素濃度分布等の、長尺化に伴う技術課題について引き続き検討を進め、長尺 CVD シリカ膜の製膜条件の知見の蓄積を行う。

(2) 単管メンブレンリアクターによる反応検討

2014年度は、(1)で作製した単管膜と触媒を組み合わせ、メンブレンリアクターとしての性能を評価し、反応温度低減効果を確認する。また、単管メンブレンリアクター内のガス流れ、温度分布等に関するシミュレーション検討を行い、実験値との比較検討を行う。

2015年度は、メンブレンリアクターとしての温度依存性、圧力依存性等の詳細な基礎データを取得する。

(3) 小型メンブレンリアクターの設計・試作、技術課題の明確化

2014年度は、実用化実証試験への基礎データを取得するために、(2)で作製した単管メンブレンリアクターを用い、膜材料やメンブレンリアクターの要素部材(250~300℃対応シール部材等)の耐久性等の技術課題の検討を行う。また、メンブレンリアクターのモジュール構造のガス流れ、温度分布への影響等に関するシミュレーション検討を行い、モジュール構造の最適化に関する知見を得て、小型メンブレンリアクター試験装置の設計検討を行う。

2015年度は、小型メンブレンリアクター試験装置を作製し、運転研究を行い、熱収支・総括伝熱係数の算出を行う。

なお、(1)~(3)の検討において、京セラ株式会社との技術協力を行う。また、国内外の水素分離膜、メンブレンリアクターの技術動向について情報収集を実施する。

(4) 水素分離膜型脱水素プロセスの経済性検討

2014年度は、2013年度の検討にて作製した水素分離膜型脱水素プロセスに関して、分散型/小型プラントの概略コストを把握する。あわせて、将来のコージェネ/燃料電池市場の調査を継続する。

2015年度は、2014年度の概略コスト試算に基づいて、分散型コージェネを対象とした水素利用事業についてフィージビリティスタディを実施する。

(5) 小規模脱水素プロセスのシステム検討

2014年度は、2013年度の検討にて作製した水素分離膜型脱水素反応器シミュレーターについて脱水素反応の進行に伴う伝熱の影響を簡易的に評価できる反応シミュレーターへの改良を実施する。また、同じく2013年度に実施した、既存脱水素プロセス情報に基づく小型発電設備(SOFC、ガスタービン)と組み合わせたシステムの熱バランス検討結果を水素分離膜型脱水素プロセスへの適用を図る。

2015年度は、コスト低減に向けたプロセス改良/技術課題の抽出の検討を行う。

(6) エネルギー総合工学研究所と実機に向けた協同会議への参加と検討

実機の想定、及び(特性)解析(経済性)評価に必要なデータ等を設定し、開発課題と開発目標を把握するため、実機に向けた協同会議(2回/年程度:7月、12月)に参加し、現状を示し、検討を行う。

なお、各協同会議では、参加担当事業者及び参加の了解が得られた専門家内で秘密の保持を行う。

(7) セラミック系水素分離膜(単管膜)の大面積化

2015年度までの検討で、対向拡散CVD法を用いて、従来($\phi 6\text{ mm} \times \text{L}70\text{ mm}$)よりも長い単管膜($\phi 6\text{ mm} \times \text{L}200\text{ mm}$ 、および $\phi 10\text{ mm} \times \text{L}200\text{ mm}$)を再現性良く製膜することが可能となった。また、水素分離性能についても水素透過性 $1 \times 10^{-6}\text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ 、分離係数(H_2/SF_6)16000以上の良好な特性を実現した。

実機に必要な水素分離膜(単管膜)は、2015年度に実施したシミュレーション結果、取り扱いやすい膜本数、流通している支持体の長さ・口径等を考慮すると、さらなる長尺化(500 mL程度)が必要である。2016、2017年度は、2015年度までに蓄積した知見を活用して、500 mLの長尺化を図る。口径に関しては、支持体の口径、品質、将来想定されるコスト等を考量して、 $\phi 10 \sim 20\text{ mm}$ の間で選択する。

高品質な分離膜を得るためには、長さ方向に均質な中間層の形成、製膜温度の制御が重要であることがこれまでに分かっており、さらにシリカ前駆体の濃度を長さ方向に均一に保つための前駆体投入方法の検討も必要になると考えられる。2016年度上期に製膜装置の改良を行い、その後、これら諸条件の検討を進め、500 mmL長尺化を達成する。

2016年度は原料にジメトキシジフェニルシラン（DMDPS）を用いて、500 mmLシリカ膜の製膜を検討し、水素透過性 $1 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ 、分離係数（ H_2/SF_6 ）16000以上の標準性能を有するシリカ膜 500 mmL、 $\phi 10 \sim 20 \text{ mm}$ の製膜を実現する。

2017年度は、(8)-2で開発した高分離性能のシリカ膜を用いて500 mmL長尺化を実現するとともに、製膜の量産性を考慮して、製膜時のキーフクターを明確化して再現性（歩留まり）の向上を検討する。

(8) 膜モジュールおよびメンブレンリアクターの開発

(8)-1 モジュール化検討

2015年度は200 mmL、 $\phi 10 \text{ mm}$ 膜のメンブレンリアクター7本のモジュール化を検討した。その際、シール方法については、金属製の継ぎ手（ウルトラトル）+Oリングを組み合わせ使用し、十分な気密性を確保している。メンブレンリアクター実用化の際には、量産性を備えたより低コストのシール方法の開発が必要となる。また、同時に、モジュールへの効率的な熱供給を可能とする構造の開発も必要である。

シール方法については、ガラスシール技術など、安価で量産性のある方法を開発する。検討にあたってはセラミックメーカーの協力が不可欠であり、外注によって当該セラミックメーカーのノウハウを活用しつつ、開発を進める。また、効率的な熱供給には、触媒量との関係を考慮しつつ、熱媒から触媒層への効率的な熱供給を図る熱伝導フィンなどの機構を開発する。熱供給の方式の検討には、小型メンブレンリアクター装置を用いて、物質・熱収支を評価して最適な構造を検討する。

(8)-2 水素分離性能向上

水素分離膜については、これまでDMDPSを原料として一定の処方（標準処方）で製膜したシリカ膜を用いてきた。しかしながら、2015年度に実施したシミュレーション検討の結果、水素分離膜の水素分離性能が向上すれば、非透過ガス側の水素リサイクルが不要となり、また透過側の減圧が緩和されるなどプロセスの改善が可能となって、システムの経済性が向上する可能性が見い出された。水素透過性を現状の $1 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ から $3.4 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ まで向上させると、原料MCH量が12～16%程度削減できるとともに、設備投資額や動力原単位の低減が期待される。

そこで、2016年度末までに水素透過性を $3.4 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ 以上、分離係数（ H_2/SF_6 ）16,000以上の水素分離膜を開発する。具体的には、シリカプレカーサの種類、製膜条件、支持体種類、中間層種類・形成方法を含め検討を行う。シリカプレカーサの種類の検討に当たっては、DMDPSより大きな細孔径の形成可能性が基礎検討により確認されているトリフェニルメトキシシラン（TPMS）に関し豊富な技術・知見を有している工学院大学への再委託により、TPMSその他の新規プレカーサの検討を行う。

2017年度は、水素分離性能の向上したシリカ膜について、500 mmL長尺製膜に対応した材料のチューニングを行う。

(8)-3 小型メンブレンリアクター装置によるデータ収集

2015年度は200 mL、φ10 mmの水素分離膜7本を用いたモジュールを用いて運転研究を行い、装置面ではシール、加熱、減圧などの動作確認、プロセス面では反応率や水素会流量の確認を行った。

2016年度は引き続きDMDPS 200 mL膜を用いて、熱供給量、熱媒と反応管の温度差等を測定し、総括伝熱係数の算出を行うとともに、500 mLの水素分離膜に対応した反応管を作製し、DMDPS 500 mL、φ10 mmの水素分離膜を用いて、シールに加えて、熱応力、耐久性の確認を行うとともに、操作条件の検討を行い、概念設計に必要な各種データを収集する。なお、2017年度については、本項目は実施しない。

(9) 高圧化基礎検討

2016年度11月1日付の高圧ガス保安法の運用及び解釈の変更により高圧ガス保安法の対象とならずに運用できる圧力の上限が引き上げられたことに伴って、使用圧力の高圧化が脱水素反応に及ぼす影響について、基礎検討を行う。単管メンブレンリアクターを高圧対応に改造し、標準性能シリカ膜および高性能シリカ膜について、供給圧300 kPaGから600 kPaG（状況に応じて最大1000 kPaG未満）の範囲で、転化率、純度、回収率、分離膜の耐圧性、装置のシール性などに関する検討を行い、適用範囲に関する知見を得るとともに、高圧化の有効性を検証する。

(10) 水素分離膜型脱水素プロセスの概念設計及び他用途展開

2015年度までに、SOFCとの連携による中小規模の発電設備を想定した、将来の運転コスト/設備コストの概算を実施し、水素分離膜型脱水素プロセスの優位性を確認した。

2016年度では、2020年度以降を想定している分離膜反応器のパイロット試験（7 Nm³-H₂/hr程度）による水素分離膜型脱水素反応装置の検証運転に向けて、2016年11月1日付の高圧ガス保安法の運用及び解釈の変更を反映したパイロットプラントの概念設計（PFD、物質/熱収支、機器リスト等の作成）を実施する。

2017年度には、将来の適用拡大に向けて、FCV、他メーカーのSOFC/PEFC等の水素利用用途向け、及び、本研究の成果の応用によりメンブレンリアクターの実用化に必須な要素技術が確立することを予想した水素利用以外の用途も対象とした分離膜システムの概念検討を実施する。

(11) 実用的モジュール構造の開発

上記(8)-1で選定した低コストシール法と効率的な熱供給方式（熱伝導フィン）を組み合わせたモジュール構造を検討し、量産時の構造案を提示する。具体的には、200 mL膜を用いて膜本数の異なる新たなモジュール（熱伝導フィン付き）を製作し、モジュールに対する昇降温、圧力等の影響を評価し、本数の違いによる課題を抽出する。また、形状についても丸型、角型、その他組み合わせ等の可能性について調査・検討する。

抽出された課題等に対する対策を検討した上で、MCH脱水素試験を行ってその有効性を検証する。

モジュール構造の検討に当たっては、引き続きセラミックスメーカーのノウハウを活用しつつ開発を進める。

(12) 耐久性評価

これまでに開発したシリカ膜について、その劣化因子を絞り込み、因子別に 100 時間程度の耐久性試験を実施するとともに各種分析を行い、劣化機構を考察する。また、得られた劣化機構について確認試験を実施する。

劣化機構に関する考察に基づき、MCH（実液あるいは模擬液）を用いて単管メンブレンリアクターによる耐久性評価試験を実施する。実液は組成変動があり、適用する実液の選定あるいは模擬液の作製には、劣化機構考察で得られた知見を反映する。1,000 時間の耐久性試験を行って劣化率を検証し、劣化予測方法を検討して耐久性の予測を行う。

さらに、評価試験結果および劣化機構に関する考察に基づいて、材料の改良を含めた耐久性向上に向けた対策指針を策定する。

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

(1) セラミック系水素分離膜（単管膜）の長尺化技術課題の明確化

H26 年度に、 $\phi 6$ mm-200 mmL の長尺化製膜を行い、水素透過性 $1.0 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ 、分離係数 (H_2/SF_6) 16,000 以上を達成した。

H27 年度は、さらにチューニングを行い、図 1 に示す様に $\phi 10$ mm、200 mmL でも同等の性能を達成し、H28 年度からの、 $\phi 10$ mm、500 mmL に向けた「セラミック系水素分離膜（単管膜）の大面积化」実現のための知見を蓄積した。

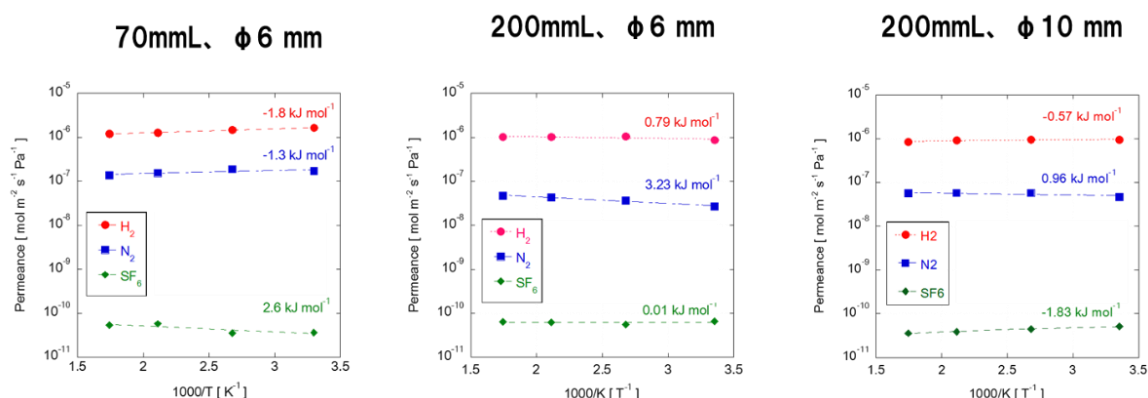


図 1 水素分離膜の長尺化と水素透過性能

(2) 単管メンブレンリアクターによる反応検討

H26 年度は、単管メンブレンリアクターを構築し、種々実験条件での転化率を検討した結果、平衡シフトによる反応温度の低減を確認（約 310→280℃@転化率 90%）し、シミュレーターを使った検討結果との比較でも、実験値と良好に一致する結果を得た（図 2）。

H27 年度は、対向拡散 CVD 法を用いれば、保護膜等なしで熱供給に有利な外側触媒の構成を採用することが可能であることを見出した。

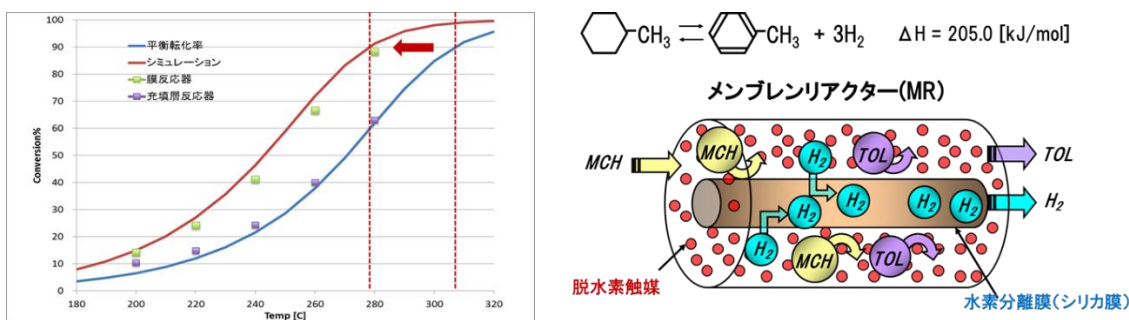


図2 単管メンブレンリアクターの平衡シフト効果と構造

(3) 小型メンブレンリアクターの設計・試作、技術課題の明確化

H26年度は、シミュレーションにより実機イメージを構築、設計した。これをもとに、H27年度は、図3のような200 mmL x 7本のメンブレンリアクター試験装置を構築し、MCH供給量2.4 mol/hで平衡シフト効果を確認し、H28年度からの、「(8)-3 小型メンブレンリアクター装置によるデータ収集」の準備を完了した。

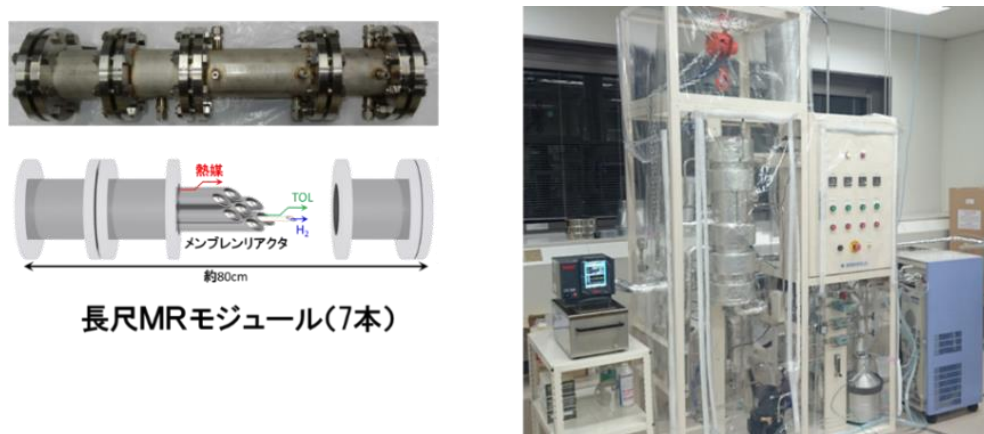


図3 小型メンブレンリアクター (200 mL x 7本) 試験装置の構造と外観

(4) 水素分離膜型脱水素プロセスの経済性検討

(5)にて検討した既存脱水素システム及び水素分離膜型脱水素システムに関して、分散型/小型プラントの概略コストを試算した。その結果、水素分離膜型脱水素プロセスはランニングコストで既存脱水素システムよりも優位となり、また、分離膜のコストが半減することで、機器コスト(≒初期投資)の面でも優位となることがわかり、分離膜の製造コストの目標を設定できた。

あわせて、将来のコジェネ/燃料電池市場の調査を行い、重油/LPG型コジェネ市場が有望であることを報告した。(後述の(10)にて高压化の影響を加味して、再解析を実施しており、効果は(10)を参照願う。)

(5) 小規模脱水素プロセスのシステム検討

既存脱水素システム及び水素分離膜型脱水素システムについて、図4の様にシステムを構築し、SOFCとの連携を想定した、物質収支・熱収支を算出し、水素分離膜の優位性を確認した。あわせて、水素分離膜反応器シミュレーターを改良し、伝熱の影響を簡易的に評価可能にした。

既存の脱水素プロセスと膜反応器プロセスの比較 MCH : メチルシクロヘキサン
TOL : トルエン

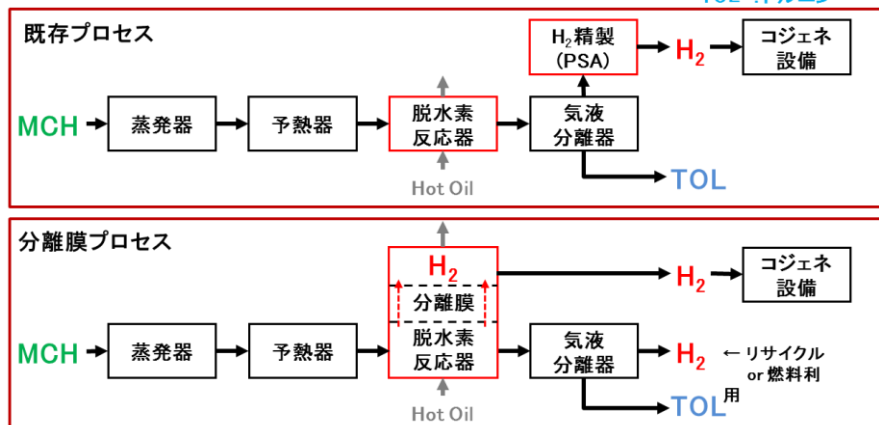


図 4 既存脱水素プロセスと水素分離膜型脱水素プロセスの比較

(6) エネルギー総合工学研究所と実機に向けた協同会議への参加と検討

計 6 回の協同会議に参加し、情報交換を行い、MCH からの脱水素の有用性を確認した。

(7) セラミック系水素分離膜（単管膜）の大面積化

500 mL、φ10 mm の大面積化を達成し、良好な分離性能を確認した（図 5）。

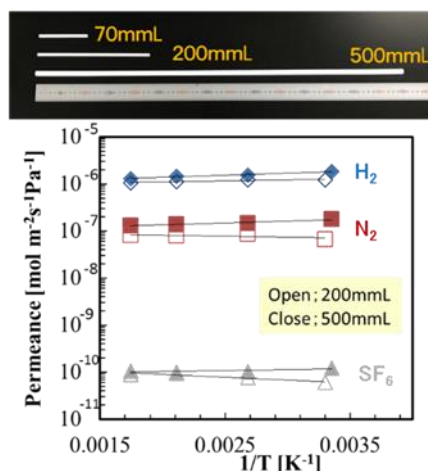


図 5 大面積化した水素分離膜の透過分離性能

(8) 膜モジュールおよびメンブレンリアクターの開発

(8)-1 モジュール化検討

図 6 に示す新コンセプトのモジュール構造を考案試作し、その可能性を確認した。これにより、MCH 脱水素装置、およびそれ以外の多様な用途に適用できる要素技術確立の可能性を確認した。

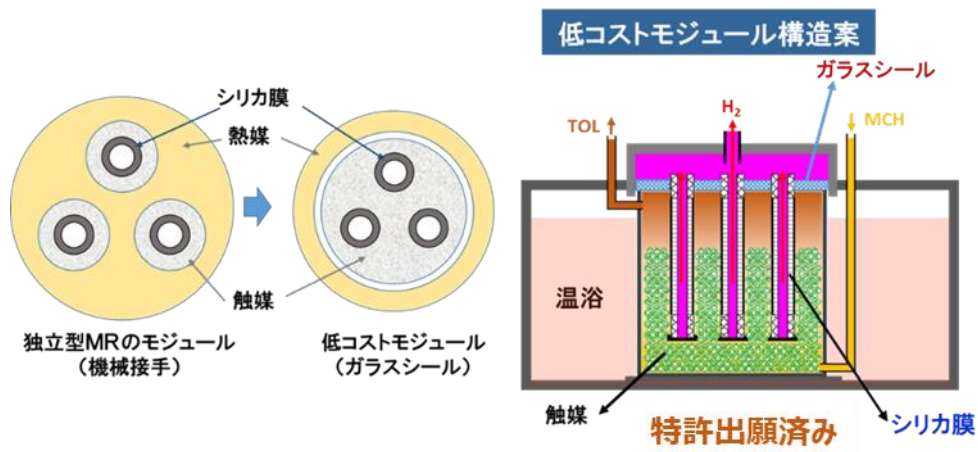


図6 低コストモジュール構造

(8)-2 水素分離性能向上

製膜条件、支持体種類、中間層種類・形成方法等を検討することにより、世界最高性能の水素分離性能である水素透過性 $3.5 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ 、分離係数 (H_2/SF_6) 63,700 以上を有するシリカ水素分離膜を得た (図7)。

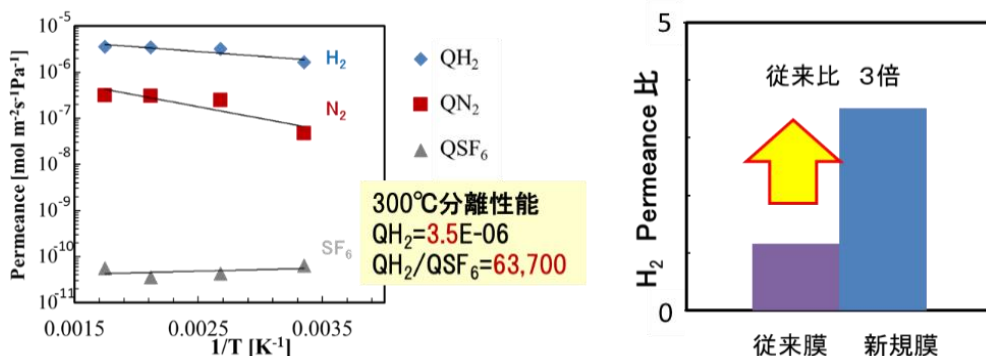
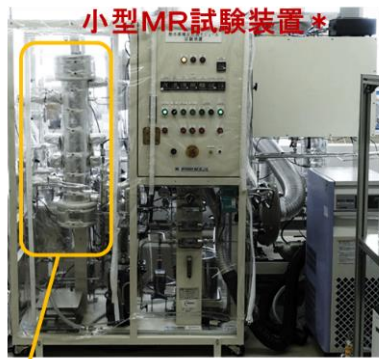


図7 性能向上検討における、世界最高水準の水素分離性能

(8)-3 小型メンブレンリアクター装置によるデータ収集

水素分離膜 200 mmL x 7 本、500 mmL x 3 本のメンブレンリアクターを作製し、いずれにおいても図8に示す様に良好な平衡シフト効果が得られることを確認した。



MRモジュール部分

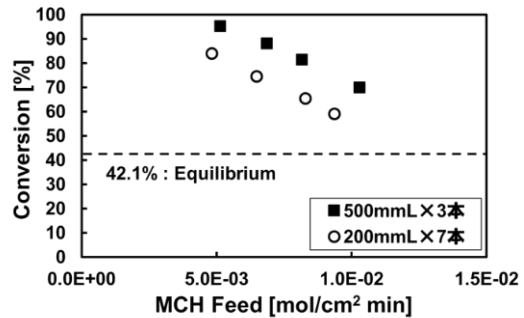
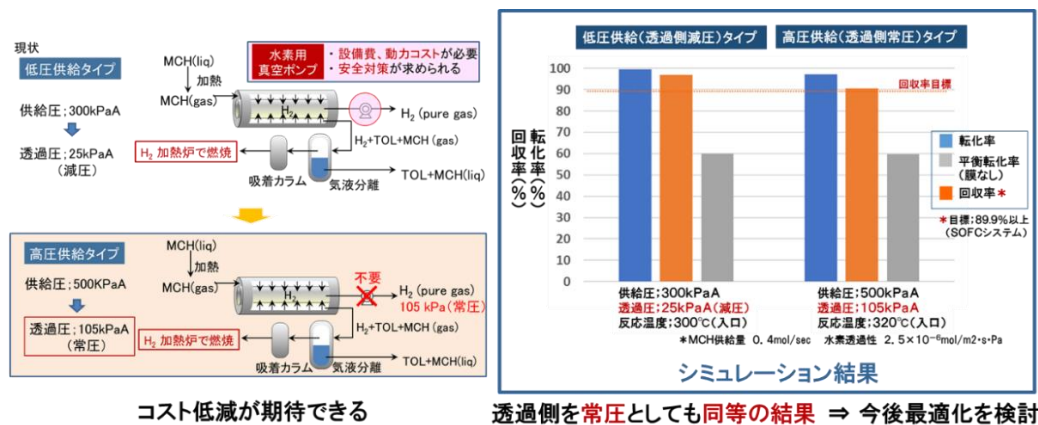


図 8 小型メンブレンリアクター (500 mL x 3 本) 試験装置の外観と運転結果

(9) 高圧化基礎検討

従来からの真空ポンプを用いた標準運転条件に比べ、反応側を高圧にすることで MCH 原料量を 10%削減できる条件をシミュレーションにより見出すとともに、高圧供給の有効性を確認した (図 9)。



コスト低減が期待できる

透過側を常圧としても同等の結果 ⇒ 今後最適化を検討

図 9 高圧化基礎検討におけるシミュレーション検討

(10) 水素分離膜型脱水素パイロットプラントの概念設計及び他用途展開の検討、及び他用途展開に向けた分離膜型脱水素反応器の優位性の把握

水素分離膜型脱水素プロセスについて、H28 年の高圧ガス保安法の運用及び解釈の変更の反映及び、SOFC の水素許容純度を反映した、水素分離膜型脱水素プロセスの優位性について再検討を実施した。その結果、図 10 に示す様に、ランニングコスト (消費 MCH 量として比較) において、分離膜の優位性及び規制緩和の効果 (透過側常圧) が示された。一方、図 11 に示す機器コスト (図中では反応器周りのみを比較) では、SOFC 要求純度の制約により、現状 (透過側減圧) では、分離膜のコストを試作時の 1/2 とすることで既存法と同等、透過側を常圧にすることで、機器コストでも優位性が表れる結果となった。

多用途展開先として、低温コジェネ (固体高分子型燃料電池)、水素ステーションへの適用を検討し、低温コジェネ/水素ステーションへの適用に際しては、SOFC コジェネと異なり脱水素熱源が不足することから、反応熱供給に使用される水素量が増加するため、水素分離膜型脱水素プロセスの優位性は図 10 よりも低下するものの依然として優位であること、水

素ステーションへの適用に際しては、熱源の不足に加えて、分離膜を透過した水素の再圧縮のエネルギーが加わるため、既存法とほぼ同程度となることを確認した。また、新規適用先として、メタンからのカーボン製造を想定した用途展開について検討を実施し、メンブレンリアクターシステムの優位性を確認した。

あわせて、図 12 に示す様にパイロットプラントについて、ベースケースの $7 \text{ Nm}^3\text{-H}_2/\text{h}$ 、とモジュール試験向けの $2 \text{ Nm}^3\text{-H}_2/\text{h}$ についての設計を実施した。

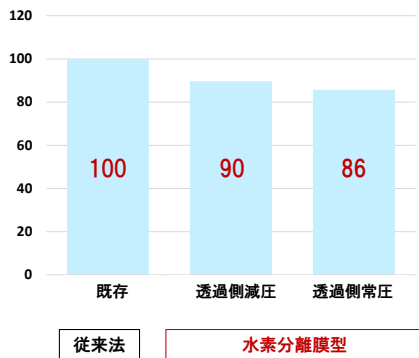


図 10 ランニングコストの比較

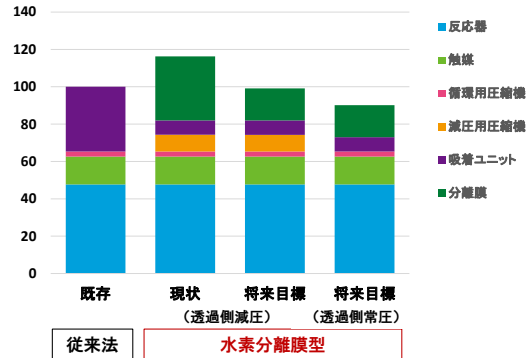
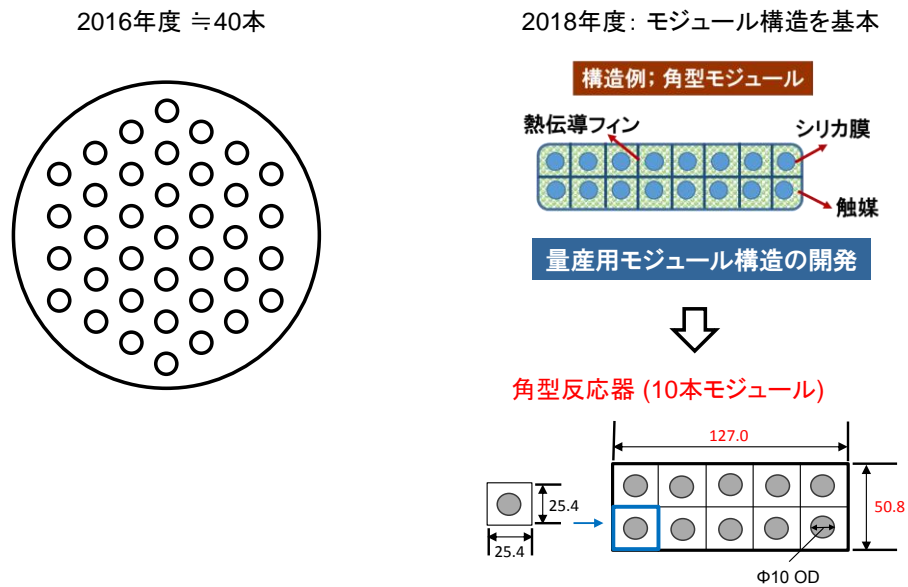
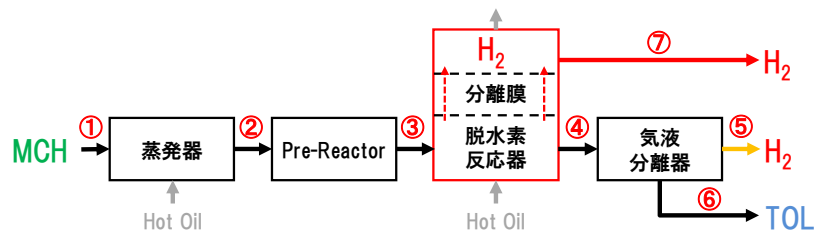


図 11 機器コストの比較 (反応器周り)





No.		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
流量*	[Nm ³ /h]	0.8	0.8	1.0	1.0	0.2	0.8	2.0
組成	[mol%]							
H ₂		0.0	0.0	22.2	23.2	98.4	1.0	99.8
MCH		100.0	100.0	70.4	3.9	0.1	5.0	0.1
TOL		0.0	0.0	7.4	72.9	1.5	94.0	0.1
Total		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

※液相の部分も蒸発時のガス流量として表記

図 12 パイロットプラント反応器の検討（上図）、パイロットプラントの設計結果（下図）

(11) 実用的モジュール構造の開発

量産性を見据え、(8)-1 において開発したモジュール構造を改良し、メンブレンリアクターとしての有用性を評価した。改良したモジュール構造は図 13 に示す通りである。また、吸熱反応である脱水素反応においてモジュール内部に効率よく熱供給を行うための熱伝導フィン構造についても評価を行い、フィン形状によりモジュール内部への熱供給が効率的になされ、転化率が向上することを確認した（図 14）。さらに、これらの結果をもとに、実用的なモジュール構造を提案した。

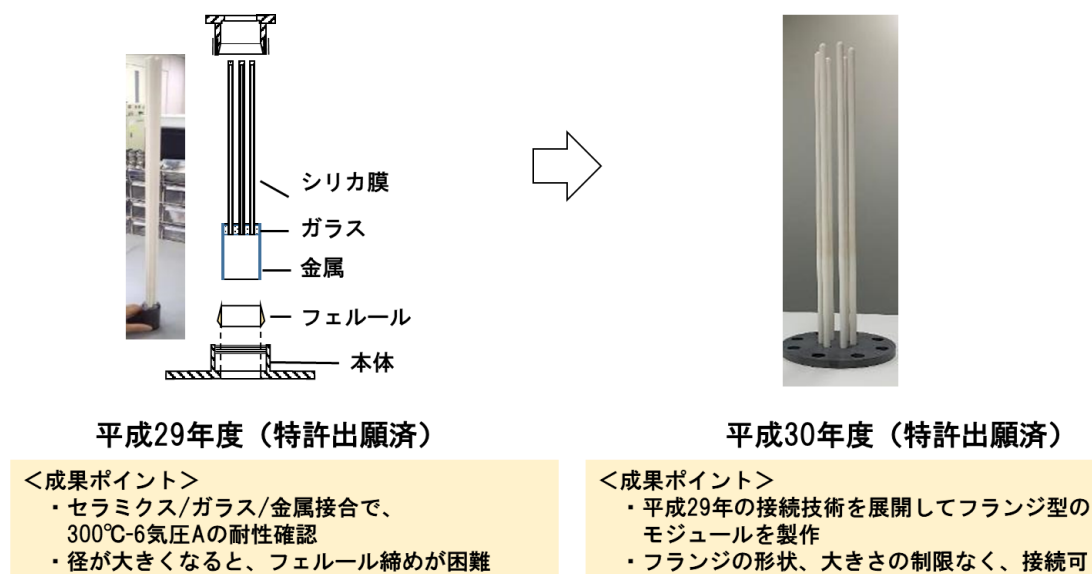


図 13 改良したモジュール構造

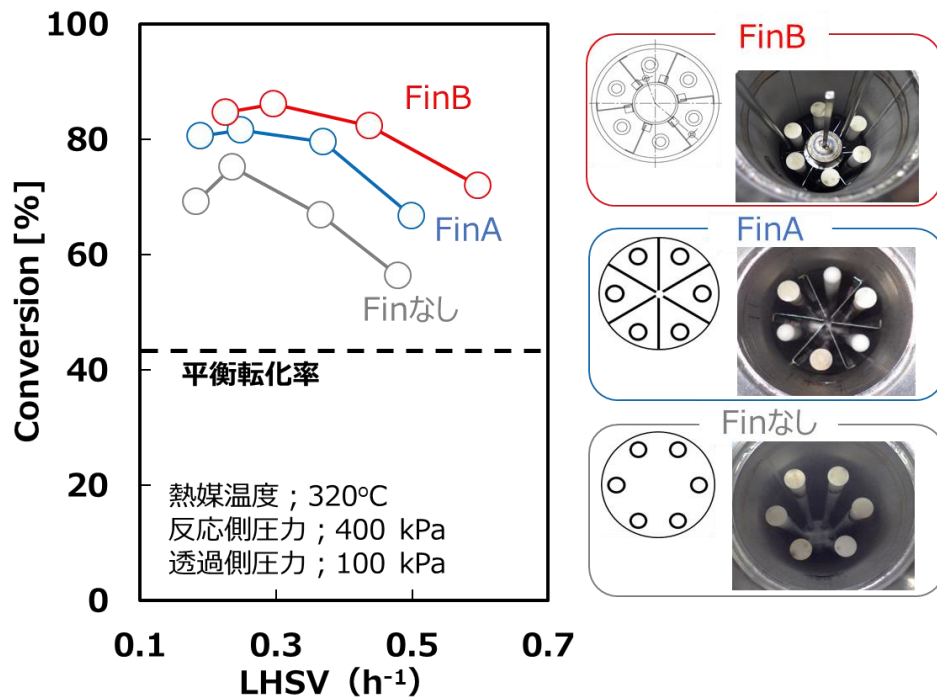


図 14 熱伝導フィンの形状による転化率向上効果

(12) 耐久性評価

MCH 脱水素反応において、シリカ膜の劣化要因を MCH に溶存する微量水分と脱水素 ⇌ 水添を繰り返すことにより生成するビフェニルに絞り込み、膜の耐久性評価 (100 h 以上) を行った。ビフェニルについては、膜面に吸着し、水素の透過阻害が起こると予測されたが、時間によらず水素透過量は一定の値を示し、脱水素 ⇌ 水添の繰り返しにより生成する副生成物の影響はほとんどないことが示された。一方で、微量水分に関しては、時間とともに水素透過量が減少する傾向が見られ、原因は膜の構造欠陥に由来するシラノール基 (Si-OH) であることが示され、構造欠陥を少なくすることで耐水蒸気性が向上する結果が得られた (図 15)。

また、MCH 脱水素メンブレンリアクター (単管) の 1,500 h の耐久性試験を行い、試験開始初期に低下する傾向を示したが、その後はほぼ一定の転化率を示しており、少なくとも 1,500 h の耐久性を有していることを明らかとした (図 16)。試験結果をもとに、15,000 h 後の転化率予測を検討したところ、約 2 割の減少であると予測された。

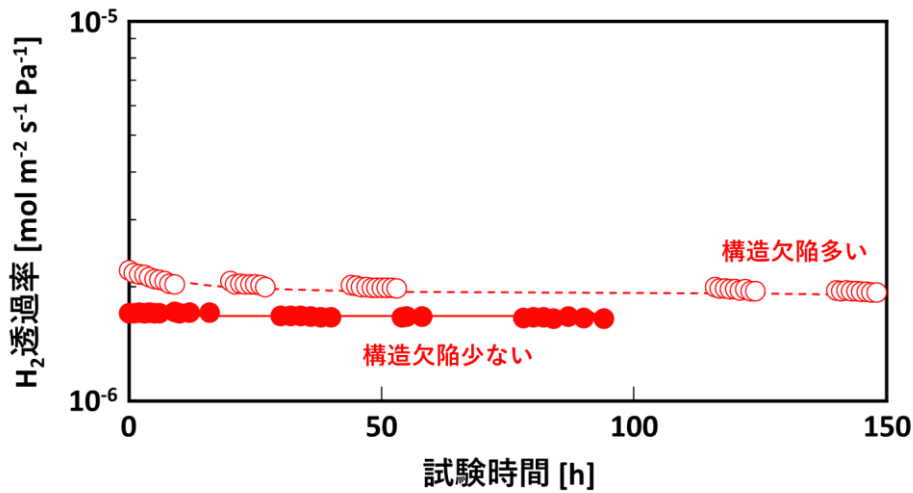


図 15 シリカ膜の耐水蒸気試験の結果

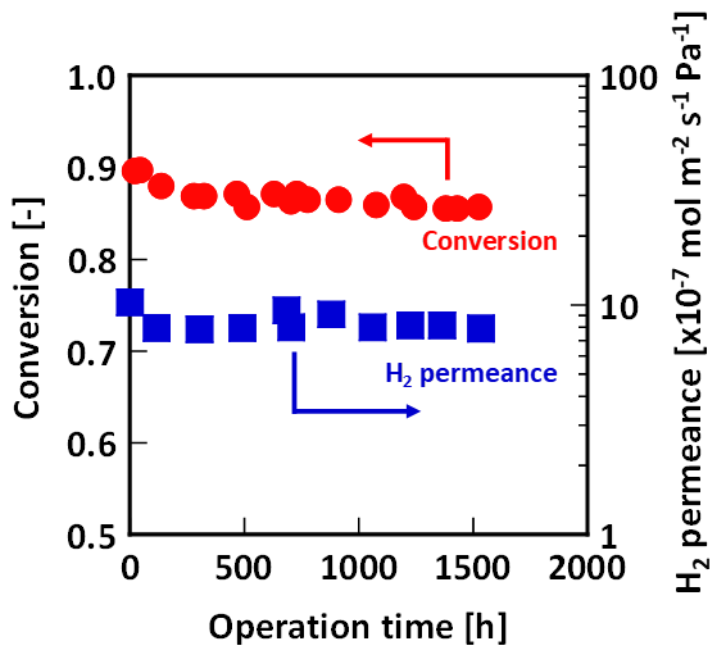


図 16 MCH 脱水素メンブレンリアクターの耐久性試験の結果

3.2 成果の意義

高純度水素を得る小規模・分散型 MCH 脱水素技術の基盤が構築できるとともに、多様な展開が可能なモジュール化技術を確立できた。

3.3 成果の最終目標の達成可能性

残された課題については、4. にまとめて示す。

- (1) セラミック系水素分離膜（単管膜）の長尺化技術課題の明確化
目標を達成した。
- (2) 単管メンブレンリアクターによる反応検討
目標を達成した。

- (3) 小型メンブレンリアクターの設計・試作、技術課題の明確化
目標を達成した。
- (4) 水素分離膜型脱水素プロセスの経済性検討
目標を達成した。
- (5) 小規模脱水素プロセスのシステム検討
目標を達成した。
- (6) エネルギー総合工学研究所と実機に向けた協同会議への参加と検討
目標を達成した。
- (7) セラミック系水素分離膜（単管膜）の大面积化
目標を達成した。
- (8) 膜モジュールおよびメンブレンリアクターの開発
 - (8)-1 モジュール化検討
目標を達成した。
 - (8)-2 水素分離性能向上
目標を達成した。
 - (8)-3 小型メンブレンリアクター装置によるデータ収集
目標を達成した。
- (9) 高圧化基礎検討
目標を達成した。
- (10) 水素分離膜型脱水素プロセスの概念設計及び他用途展開
目標を達成した。
- (11) 実用的モジュール構造の開発
目標を達成した。
- (12) 耐久性評価
目標を達成した。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

(1) 脱水素装置（実機）

計画していた個別技術開発はすべて達成済みであり、H30年度以降、2年間で量産用モジュール構造開発、耐久性評価、エンジニアリングデータ収集及びプロセス検討を進めた。今後、実機の詳細設計を経て、順次スケールアップを図る。

(2) シリカ膜モジュール量産化体制

(1)に記載のMCHの脱水素プロセスに適した量産用モジュール構造の開発、耐久性の評価・確認を行い、セラミックメーカーが主体的にシリカ膜MRの開発を進める体制を整備すれば、量産化が促進される。

(3) SOFCとの連携

SOFCメーカーの懸念事項である実MCH（不純物あり）がMR脱水素システムに与える影響は耐久性評価（3.(12)）にて評価済み。一方、SOFC側のMCH由来の許容不純物量（本事業の枠外で確認）から、吸着ユニットの追加が必要なことが判明した。この吸着ユニットの追加による

経済的な影響は限定的であることを確認したが、成果の実用化に向けて、吸着ユニットの性能確認を含めた MCH メンブレンリアクターシステムとしてのパイロット評価が必要と考える。また、実用化に向けては、大量の MCH 供給されていること、SOFC 側の低コスト化が達成されていることも必要である。

(4) 他用途展開

本 MR 技術を、低温水素燃料電池や水素ステーション用 MCH 脱水素装置に加え、メタンからのカーボンの同時製造に本メンブレンリアクター技術の適用について概念的な経済性検討を実施し、有効性が確認されている。本技術の展開についても要求に応じた、製膜技術のさらなる改良やパイロット試験が必要と考えている。

5. 特許・研究発表等

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2018年9月12日	特願 2018-170566	ガス分離装置および膜反応器	公益財団法人地球環境産業技術研究機構
2	2019年3月4日	特願 2019-038304	ガス分離装置、および、膜反応器	公益財団法人地球環境産業技術研究機構

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2014年9月17日	平成26年 NEDO 新エネルギー成果報告会 要旨集/ポスター発表	エネルギーキャリアシステム調査・研究/水素分離膜を用いた脱水素	甲斐 照彦 斉藤 崇 西田 亮一
2	2014年9月18日	化学工学会第46回秋季大会 ポスター発表	対向拡散 CVD シリカ膜の分離性能に対するアルミナ中間層の影響	斉藤 崇 浦井 宏美 甲斐 照彦 西田 亮一
3	2015年3月	水素エネルギーシステム, 40 (2015) 15	膜分離技術を用いた有機ハイドライドからの水素の分離・精製	西田 亮一 中尾 真一
4	2015年7月13日	大阪科学技術センター 燃料電池・FCH 部門 第231回定例研究会	無機系水素分離膜および膜反応器の開発について	西田 亮一
5	2015年7月24日	化学工学会 関西支	RITE が保有する水素分	西田 亮一

		部 化学工学イノベーション研究会	離膜技術	
6	2015年8月31日	平成27年度NEDO新エネルギー成果報告会(燃料電池・水素分野)	水素利用等先導研究開発事業/エネルギーキャリアシステム調査・研究/水素分離膜を用いた脱水素	沼口 遼平 西田 亮一 中尾 真一 今川 健一 他
7	2015年9月11日	化学工学会第47回秋季大会	メンブレンリアクターを用いたメチルシクロヘキサン脱水素プロセスの検討	松山 絵美 西田 亮一 中尾 真一 他
8	2015年9月30日	NEDO-SIP 情報・意見交換会	水素利用等先導研究開発事業/エネルギーキャリアシステム調査・研究/水素分離膜を用いた脱水素	中尾 真一 西田 亮一 今川 健一 他
9	2016年1月1日	日本工業出版「配管材料」1月号 エネルギーと環境の調和を目指して	無機系水素分離膜を用いたメンブレンリアクターの開発	西田 亮一 中尾 真一
10	2016年3月3日	FC EXPO2016 専門技術セミナー(エネルギーキャリア)およびHySUT内プレゼンテーション	千代田化工建設の水素の取り組み	岡田 佳巳
11	2016年3月13日	化学工学会 第81年会	シリカ膜反応器モジュールによるメチルシクロヘキサンからの脱水素の検討	西田 亮一 松山 絵美 中尾 真一 他
12	2016年3月24日	日本バルブ工業 技術研修会	水素エネルギーの大規模貯蔵輸送技術と展望	岡田 佳巳
13	2016年4月15日	無機膜研究センター 設立記念シンポジウム	NEDO 水素分離型脱水素反応器の開発	中尾 真一
14	2016年5月27日	無機膜研究センター 産業化戦略協議会 H28年度第1回セミナー	CVD シリカ膜及び膜反応器の現状と今後の展望	中尾 真一
15	2016年5月27日	無機膜研究センター	有機ハイドライドを用い	今川 健一

		産業化戦略協議会 H28年度第1回セミナー	た水素の大量貯蔵・輸送 技術と将来展望	
16	2016年6月14日	21th World Hydrogen Energy Conference 2016	Development of Practical Membrane Reactors for Dehydrogenating Methylcyclohexane Supply High-purity Hydrogen	西田 亮一 松山 絵美 沼口 遼平 浦井 宏美 中尾 真一
17	2016年6月15日	21th World Hydrogen Energy Conference 2016	Massive H2 Storage and Transportation Technology -“SPERA Hydrogen®” System-	岡田 佳巳
18	2016年6月29日	グレーター東大塾	有機ハイドライドのご紹介	伊藤 正
19	2016年7月1日	JFCC 研究成果報告 会	CVD シリカ膜のガス分 離特性と膜反応器への応 用	中尾 真一
20	2016年9月7日	秋田水素コンソーシ アム設立総会	千代田化工建設における 水素の取り組み事例のご 紹介	伊藤 正
21	2016年9月12日	日本機械学会 年次 大会	水素の大規模貯蔵輸送技 術の展開 -SPERA 水素 システムと応用技術開発 -	岡田 佳巳
22	2016年9月30日	雑誌「時評」	水素の大規模貯蔵輸送技 術の展開 -SPERA 水素 システムと応用技術開発 -	岡田 佳巳
23	2016年9月30日	海外投融資誌	千代田化工の水素社会に 向けた取り組み	岡田 佳巳
24	2016年10月4日	JPI セミナー	各分野における水素の大 規模利用技術と“SPERA 水素”システムの応用展 開	岡田 佳巳
25	2016年10月5日	第1回 [関西] 高機 能セラミックス展	シリカ膜による水素分 離・精製	西田 亮一 西野 仁

26	2016年10月7日	第1回 [関西] 高性能セラミックス展 専門技術セミナー	セラミックス系ガス分離膜の現状と将来展望 ～革新的環境・エネルギー技術の実用化に向けて～	西田 亮一
27	2016年10月26日	NEDO H28 年度 成果発表会	水素利用等先導研究開発事業/エネルギーキャリアシステム調査・研究/水素分離膜を用いた脱水素	西野 仁 西田 亮一 浦井 宏美 中尾 真一 今川 健一 他
28	2016年10月28日	第33回ニューメンブレテクノロジーシンポジウム	RITE における水素分離膜の開発と産業化に向けた取り組み	西田 亮一
29	2016年10月28日	スマートエンジニアリング TOKYO2016	有機ハイドライドを用いた水素の大量貯蔵輸送技術	三栗谷 智之
30	2016年12月1日	先進無機高分子材料の開発 第2章 1.	水素を作る膜・無機系水素分離膜を用いたエネルギーキャリアの脱水素・	西田 亮一 中尾 真一
31	2016年12月7日	革新的環境技術シンポジウム	無機膜研究センターが目指すもの	中尾 真一
32	2016年12月22日	水素社会実現に向けた触媒反応工学の基礎と実践	水素の輸送・貯蔵技術	志村 光則
33	2017年3月7日	化学工学会 第82年会	水素選択透過メンブレンリアクターのスケールアップ	西野 仁 浦井 宏美 沼口 遼平 西田 亮一 中尾 真一
34	2017年3月8日	化学工学会 第82年会	CVD シリカ膜の実用化に向けた検討	浦井 宏美 西野 仁 西田 亮一 中尾 真一
35	2017年3月28日	第4回 SIP-NEDO 情報・意見交換会	水素分離膜を用いた脱水素	中尾 真一
36	2017年5月23日	第4回 SIP-NEDO 情報・意見交換会	水素分離膜を用いた脱水素	中尾 真一
37	2017年5月17日	日本ゼオライト学会	CVD 法によるアモルフ	中尾 真一

		ゼオライトフォーラム	アスリカ水素分離膜の製膜と膜反応器	
38	2017年5月17日	高分子学会 水素・燃料電池材料研究会	CVD アモルファスシリカ膜と膜反応器による水素製造	中尾 真一
39	2017年6月2日	第10回工業触媒研究会 研修会	水素エネルギーの大量貯蔵・輸送技術 (SPERA 水素) の開発	今川 健一
40	2017年8月23日	第2回 [関西] 高性能セラミックス展	① (公財) 地球環境産業技術研究機構の紹介 ②RITE・無機膜研究センター ③産業化戦略協議会 ④細孔内充填型の Pd 膜の開発 ⑤ピュアシリカゼオライト膜	無機膜研究センター
41	2017年9月8日	NEDO H29 年度成果発表会	水素利用等先導研究開発事業/エネルギーキャリアシステム調査・研究/水素分離膜を用いた脱水素	浦井 宏美 西田 亮一 今川 健一
42	2017年7月26日	化学工学会 第49回秋季大会	水素選択透過メンブレンリアクターの大型化	西野 仁 西田 亮一 中尾 真一
43	2017年10月17日	KRI クライアントコンファレンス&ワークショップ'17	ガス分離膜のこれからを展望する ~革新的環境・エネルギー技術の実用化に向けて~	西田 亮一
44	2017年12月4日	第37回水素エネルギー協会大会	大規模水素貯蔵輸送技術と今後の展望	岡田 佳巳
45	2018年3月14日	化学工学会 第83年会	対向拡散 CVD 法による高水素選択透過性シリカ膜の開発	浦井 宏美 西野 仁 瀬下 雅博 西田 亮一 中尾 真一
46	2018年4月11日	再生可能エネルギーを用いた水素などの製造・利用に関する	大規模水素貯蔵技術による Power-to-Gas 実現への展望	岡田 佳巳

		経済性・展望		
47	2018年4月24日	日本溶接学会シンポジウム「エネルギー社会を支える溶接・接合・構造化基盤技術」	『創る・運ぶ』水素製造・運搬・利用技術-SPERA水素システム-	岡田 佳巳
48	2018年5月30日	第3回 水素・再エネ社会の新事業創出フォーラム	SPERA 水素システムの開発状況と展望	岡田 佳巳
49	2018年6月19日	World Hydrogen Energy Conference 2018	Large-Scale Hydrogen Storage and Transportation System –“SPERA Hydrogen System”-	岡田 佳巳
50	2018年6月22日	18 th The International Conference on Inorganic Membranes	Operation of small scale membrane reactors with CVD silica membranes for MCH dehydrogenation reaction	中尾 真一 浦井 宏美 佐々 和明 西野 仁 西田 亮一
51	2018年7月6日	RITE 交友会	RITE 研究活動のトピックス（水素分離技術）	都築 秀明
52	2018年8月9日	8 th Tokyo Conference on Advanced Catalytic Science and Technology	Development of Novel Dehydrogenation Catalyst for Hydrogen Carrier System	岡田 佳巳
53	2018年8月28日	月刊 ビジネスアイ エネコ	水素サプライチェーン構築へ SPERA 水素 システムによる千代田化工建設の展開	長井 雅史
54	2018年9月5日	Hydrogen Forum In Brunei Darussalam	Global Hydrogen Technology Trend and Development of SPERA Hydrogen system	岡田 佳巳
55	2018年9月19日	化学工学会 第50回秋季大会	DMDPS 由来シリカ膜の水素透過性能におよぼす水蒸気の影響	瀬下 雅博 浦井 宏美 西野 仁

				山口 祐一郎 中尾 真一
56	2018年9月26日	未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西	低炭素社会への貢献を目指す無機膜研究センターの取り組み	山口 祐一郎
57	2018年10月26日	第17回無機膜研究会	シリカ膜を用いた膜反応器の開発 -RITE 無機膜研究センターの取り組み-	瀬下 雅博
58	2018年11月6日	未来を拓く無機膜環境・エネルギー技術シンポジウム	無機膜研究センターの研究成果と今後の計画	中尾 真一
59	2018年12月5~7日	高機能セラミックス展	シリカ膜による脱水素メンブレンリアクターの開発 -水素社会構築への貢献-	無機膜研究センター
60	2018年12月19日	革新的環境技術シンポジウム	水素社会を支える無機膜実用化への取り組み	中尾 真一
61	2018年12月20日	第28回 日本MRS年次大会	新しい膜分離技術の開始と応用	中尾 真一
62	2019年3月14日	化学工学会 第84年会	片端を封止した基材上へのCVDシリカ膜の製膜	浦井 宏美 西野 仁 瀬下 雅博 山口 祐一郎 中尾 真一
63	2019年3月14日	化学工学会 第84年会	水蒸気共存下におけるシリカ膜の劣化挙動に関する検討	瀬下 雅博 浦井 宏美 西野 仁 山口 祐一郎 中尾 真一
64	2019年5月9日	日本膜学会 第41年会	シリカ膜を用いた膜反応器の開発と耐久性に関する検討	瀬下 雅博 中尾 真一
65	2019年6月3日	World Hydrogen Technologies Convention 2019	Dehydrogenation of methylcyclohexane by a membrane reactor with silica membranes	中尾 真一 浦井 宏美 佐々 和明 瀬下 雅博 西野 仁

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：④-1を参照

課題番号：⑤－1

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業」

炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査／
膜反応器を用いたメタン直接分解による CO₂ フリー水素製造技術」

委託先： 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

1. 研究開発概要

水素社会の構築のためには、水素を低コストでかつ大量に製造する方法の確立が重要である。また、温暖化の原因とされる CO₂ の有効利用 (CCU) の観点からも、水素を低コストで製造・供給することが急務である。水素の低コスト化を実現するためには、シェールガス革命以降、長期的に安定供給が可能なメタンを用いた水素製造が考えられるが、現在行われている水素製造方法は、メタンの水蒸気改質反応が主流となっており、製造工程で CO₂ が排出される。

一方、メタン直接分解 ($\text{CH}_4 \rightarrow \text{C(s)} + 2\text{H}_2$ $\Delta H = 75 \text{ kJ/mol}$) により水素を製造する場合、水素生成反応による CO₂ 排出はなく、また、水素選択透過膜を用いた膜反応器を適用することができれば、反応温度の低温化を見込むことができ、エネルギー投入による CO₂ 排出抑制も期待することができる。膜反応器 (MR) の適用により、高効率で省エネルギーな水素製造が可能となる。さらに、水素と同時に生成するカーボンを高付加価値化することにより、その収益を加味すれば水素製造コストを大幅に低減することが可能となる。

そこで、本事業ではメタン直接分解反応を水素生成側に促進できるよう、精密に細孔制御されたシリカ膜およびパラジウム (Pd) 膜などの水素選択透過膜を開発する。また、メタン直接分解を可能にする Ni-Fe-Al 系触媒などを調製するとともに、コーキング等触媒に起因する課題を整理し、高効率反応器に適した触媒の探索と開発を行う。これら水素選択透過膜と触媒の組み合わせによる膜反応器としての特性を把握するための単管膜反応装置を試作し、本反応系における膜反応器の有用性を実証する。実施する研究開発項目は、①精密に細孔制御されたシリカ膜および Pd 膜などの水素選択透過膜の開発および評価、②膜反応プロセスに好適な触媒の探索および開発、③膜反応装置の開発および有効性の実証検討とする。

2. 研究開発目標

(1) 精密に細孔径を制御したシリカ膜および Pd 膜の開発および評価

膜反応器を本反応系に適用するためには、反応温度が 500℃以上になることが予測されるため、500℃以上の耐熱性と生成する水素 (動的分子径 ; 0.289 nm) と未反応メタン (動的分子径 ; 0.38 nm) を分離することのできる分離膜の開発が必要であり、高い水素透過性を発揮するシリカ膜および理論的には水素のみを透過する Pd 膜の開発を行う。

いずれの分離膜においても、2020 年度末までには薄膜化など、性能向上に関する検討を行

い、水素透過率 $5 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、透過率比 (H_2/CH_4) 3,000 以上の透過分離性能を有するメタンと水素を分離する膜を開発する。

(2) 膜反応プロセスに好適な触媒の探索及び開発

本反応系に膜反応器を適用した場合、反応温度の低温化が予測されるため、低温において活性の高い触媒を開発する必要がある。比較的低温活性があると考えられる Ni-Fe-Al 系の触媒を中心に、組成比の変更、触媒調製方法の検討などを行い、2020 年度末までに、低温活性 ($500\sim 600^\circ\text{C}$) を有し、メタン直接分解用膜反応器においてメタン転化率 60%以上の触媒を見出すとともに、コーキング対策の指針を得る。

(3) 膜反応装置の開発及び有効性の実証検討

上記事業項目(1)および(2)で開発された分離膜と触媒を用いて、メタン直接分解用膜反応器の有効性の実証および最適反応条件の検討を行う。膜反応装置を試作し、膜と触媒を組み合わせた膜反応器の有効性の確認（反応温度の低温化、反応効率の向上）を行い、2020 年度末までに、反応温度・圧力、原料供給量などをパラメータとして膜反応器における最適反応条件を見出す。

(4) 水素製造および分離膜技術に関する情報収集・発信

水素製造に関しては、現状、メタンから水素を製造する場合、水蒸気改質で CO_2 が発生する。本事業では、メタンから直接水素を製造するプロセスを対象としており、そのプロセスの簡易な LCA 評価を行い、従来方法との比較などを行う。また、水素製造および分離膜技術に関する国内外の最新の研究動向について広く情報を収集するとともに、様々な機会を通じて、国民との対話を行い、研究活動内容・成果を社会・国民に対してわかりやすく説明する。

3. 研究開発成果

製膜条件等を精査することにより、 500°C 以上の耐熱性を有する水素透過膜を開発し、最終目標である水素透過率 $5 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、透過率比 (H_2/CH_4) 3,000 以上に目途を得た。また、Pd 膜と Ni/Fe/ Al_2O_3 触媒を組み合わせた膜反応器にて、反応温度 600°C の条件下でメタン転化率 90%以上を達成し、膜反応器の有効性を示した。

3. 1 研究開発成果

(1) 精密に細孔径を制御したシリカ膜および Pd 膜の開発および評価

シリカ膜の開発については、種々のシリカ源を用いて検討を行い、透過分離性能を評価することで、シリカ源の選定を行った。その結果、DMDMS (Dimethoxydimethylsilane ; Si を中心にメチル基 2 つ、メトキシ基 2 つが結合しているケイ素化合物) をシリカ源とした膜は本プロジェクトが目標とする性能を発揮できる可能性が示された。さらに、DMDMS の製膜条件を精査することにより、高い耐熱性を発揮するシリカ膜の製膜を可能とした (図 1)。

Pd 膜の開発については、高い水素透過性を維持しつつ、耐熱性の向上が見込まれる Pd-Cu 合金膜の製膜条件を検討し、RITE 無機膜研究センターの技術である細孔内充填型で

Pd-Cu 合金膜の製膜を可能とした。製膜した膜の SEM-EDX から狙い通りの組成 (Pd60-Cu40wt%) で製膜できていることを確認している。さらに、製膜条件を精査することにより、細孔内充填型 Pd 膜の 500°C における水素透過率が $1.3 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ (これまでは $8 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 程度) に向上することができた。

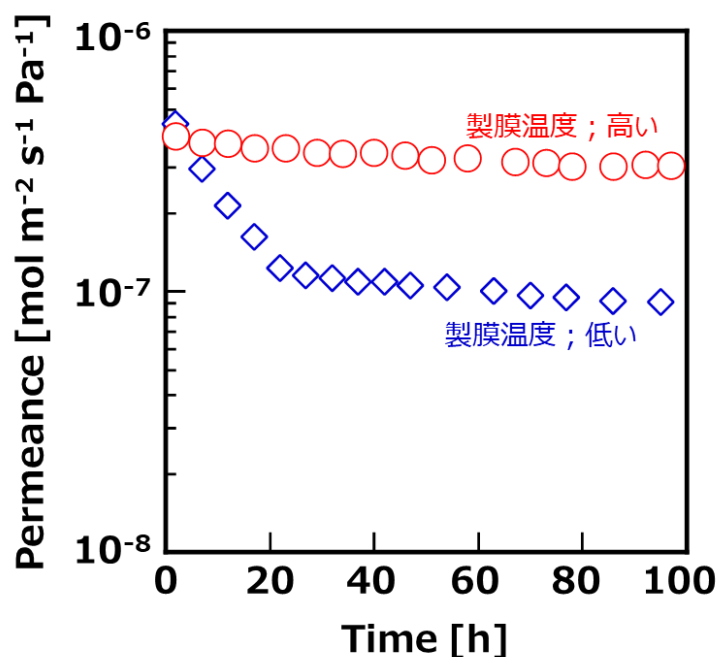


図1 製膜条件の異なるシリカ膜の耐熱試験の結果

(2) 膜反応プロセスに最適な触媒の探索及び開発

国内外のメタン直接分解による水素製造を対象として文献調査を行い、技術開発動向を把握した。その結果、比較的低温で高い収率が得られると報告のある Ni/Fe/Al₂O₃ 系の触媒を候補として選定した。その触媒について、調製条件、組成などを変更し、それぞれについて反応性を評価した結果、組成比は Ni : Fe : Al は 2 : 1 : 1 が適していると考えられる。一方で、触媒反応器試験において、反応中に入口圧力が上昇、閉塞し、反応後の触媒は固着していた。これは後述の(3)の膜反応試験においても同様の現象が確認されている。この固着・閉塞に対し、触媒粒径を大きくすることで現象が緩和することが確認できたが、根本的な解決にはなっていないため、文献等を調査し、課題解決のための指針を得た。たとえば CNT 製造方法のひとつであるスーパーグロース法では触媒の失活を引き起こすカーボンを除去するために微量水分を添加しており、別の文献では CO₂ を反応原料に添加することで CNT の成長を促進していた。これらの方法は膜反応器を用いたメタン直接分解でも適用できる可能性があると考えられる。

水素と固体カーボンの同時製造にて低コスト水素を実現することを考えると、固体カーボンの付加価値の向上に伴い、水素コストの低減が期待できる。そのため、CNT 合成などで一般的に用いられているフェロセン (Fe がシクロペンタジエンでサンドイッチされているメタロセン) を触媒としてメタン直接分解 (触媒反応器 ; PBR) により生成したカーボンの性状を評価した (図 2)。反応試験において、反応器へのフェロセン導入量の増加にと

もない、メタン転化率が向上（最大の転化率を示したフェロセン量でも Ni/Fe/Al₂O₃ の転化率と比較すると若干低い）し、SEM 観察結果から Ni/Fe/Al₂O₃ 触媒を用いた場合よりも細い径の繊維状カーボンが得られていることが明らかとなった。さらに、得られたカーボンを TEM、N₂ 吸着などにより評価した結果、繊維状カーボンは多層・中空構造を有した MWCNT のような構造であった。

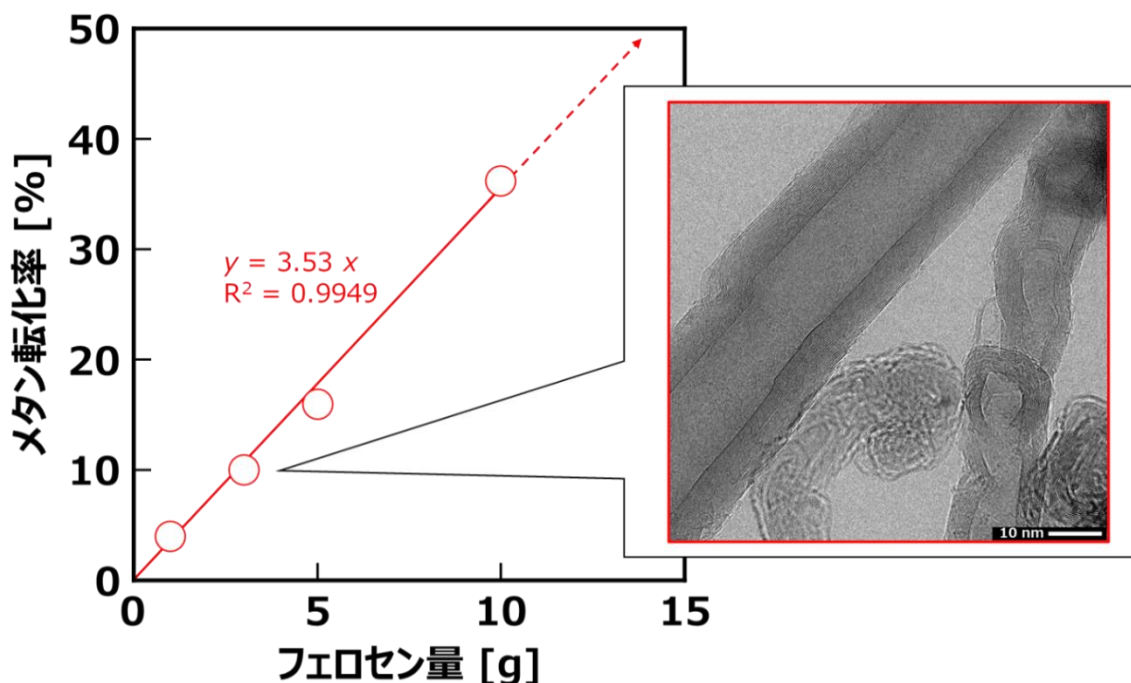


図2 フェロセンを触媒としたメタン直接分解試験（PBR）の結果
（左；導入量と転化率の関係、右；フェロセン 3 g にて生成したカーボンの TEM 像）

(3) 膜反応装置の開発及び有効性の実証検討

膜反応装置を設計・製作（図 3）し、(2)において本反応系に適していると考えられる Ni/Fe/Al₂O₃ 触媒、水素分離膜として Pd 膜を用いた膜反応試験を行った。反応温度 600℃、反応圧力 0.4 MPa の条件において、メタン転化率 93～99%を確認し、膜反応器の有効性を実証することができた（図 4）。一方で、試験後の Pd 膜の水素透過性能がおよそ 1/2 に低下していた。試験後の膜の SEM-EDX 結果より Pd 層内にカーボンが固溶している様子が確認され、水素透過性能の低下はカーボンの固溶によるものであることが示唆された。

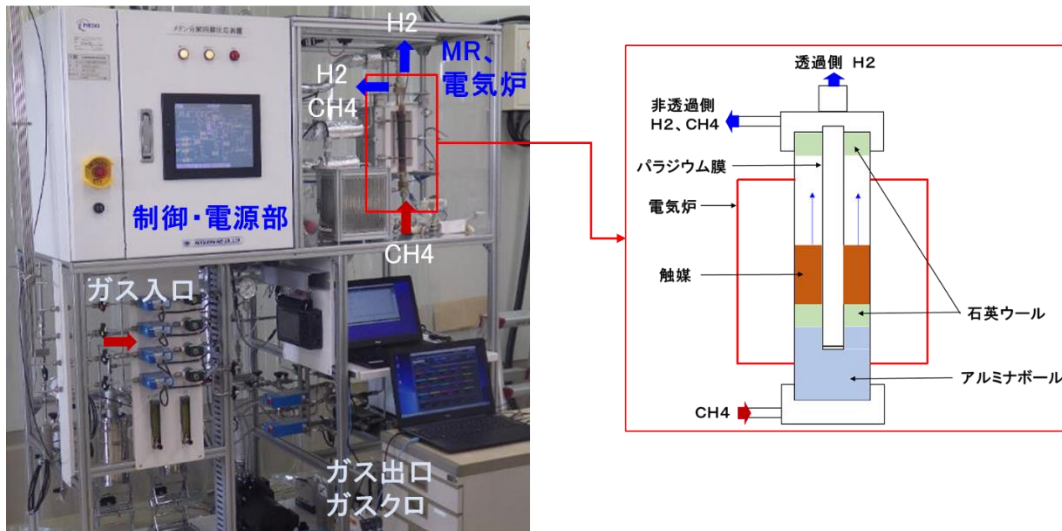


図3 メタン直接分解用膜反応装置の外観と膜反応器の概略図

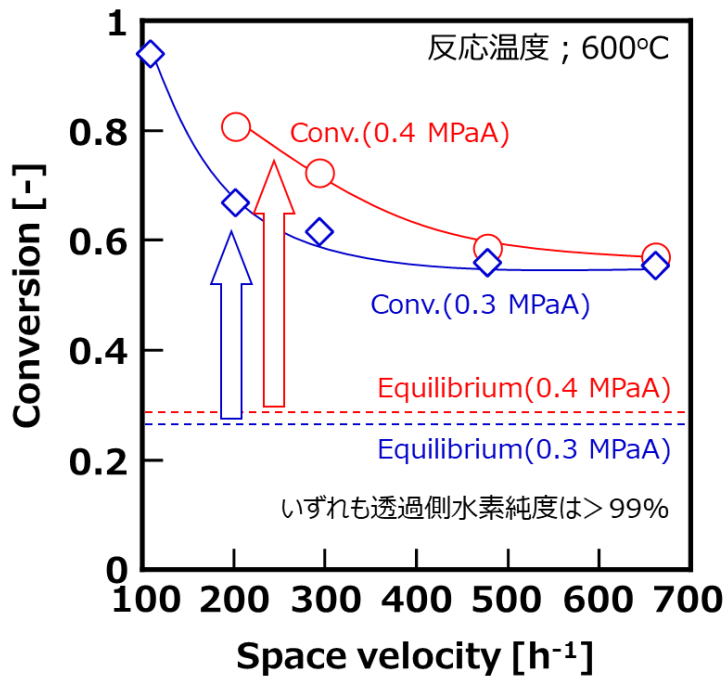


図4 膜反応試験の結果 (Pd 膜、Ni/Fe/Al₂O₃ 触媒)

(4) 水素製造および分離膜技術に関する情報収集・発信

メタン直接分解による水素および固体カーボン同時製造プロセスについて、簡易的なプロセス評価を行った。触媒反応器 (PBR) と膜反応器 (MR) のプロセスとを比較して、反応温度 500~600°Cにおいて MR は水素製造効率、CO₂ 排出量が優位であることを確認した。また、メタン直接分解による水素製造は、一般的な水素製造方法であるメタン水蒸気改質反応と比較して、PBR、MR いずれの場合も CO₂ 排出量で有利であることも確認できた (図5)。

情報発信については、2020年2月26~28日に開催されたFC-EXPO (主催; リード エグジビション ジャパン株式会社)において、広く成果を公表し、国民との対話を果たした。

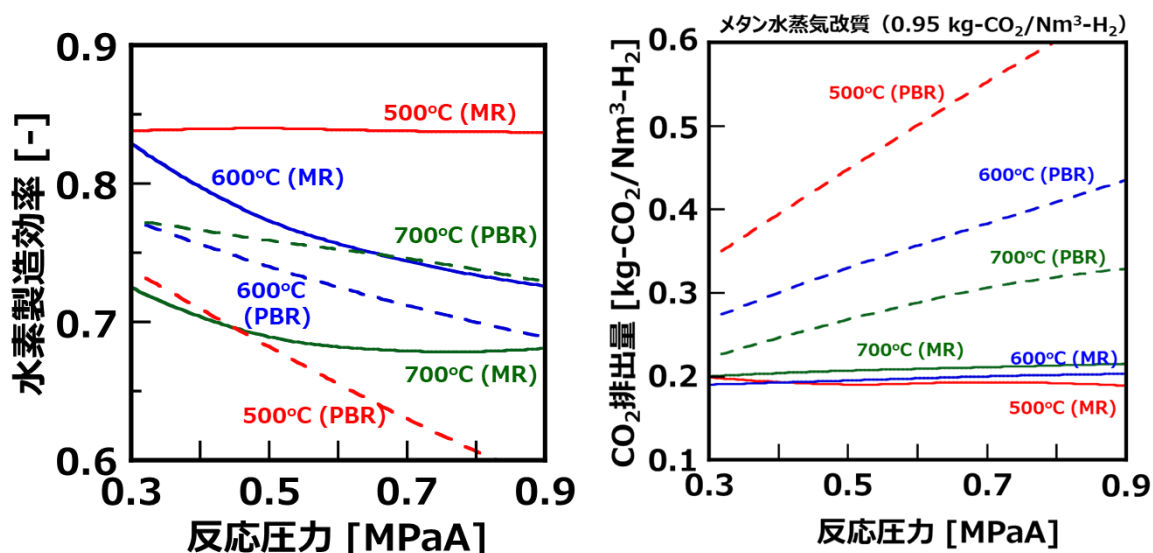


図5 メタン直接分解におけるPBRとMRの水素製造効率およびCO₂排出量の比較
(左；水素製造効率、右；CO₂排出量)

3. 2 成果の意義

水素と高付加価値製品の同時製造により、低コスト水素の供給に資することが可能である。また本反応は温度が高い系であるため、これに適用可能な分離膜を開発することで、メタン分解以外の難反応系（たとえばMethane to Benzene）など、多様な反応系に適用が可能となる。

3. 3 成果の最終目標の達成可能性

(1) 精密に細孔径を制御したシリカ膜およびPd膜の開発および評価

膜開発においては、耐熱性の確認は完了しており、最終目標である透過分離性能もプロジェクト終了までには達成できる見込みが得られている。

(2) 膜反応プロセスに好適な触媒の探索及び開発

膜反応器において、従来のメタン直接分解の反応温度よりも低い温度において比較的高い活性を示す触媒を選定した。また、触媒のコーキングによるものであると考えられる固着・閉塞現象を実験で確認し、文献調査等で対策指針を得ることができており、最終目標達成の見込みが得られている。

(3) 膜反応装置の開発及び有効性の実証検討

Pd膜を用いた膜反応試験において、膜反応器の有効性を実証し、メタン転化率90%以上を達成することができた。今年度、最適な操作条件について、温度・圧力などをパラメータとして検討することで最終目標を達成する予定である。

(4) 水素製造および分離膜技術に関する情報収集・発信

簡易的なLCA評価を行い、メタン直接分解に膜反応器を適用することで、水素製造効率の向上およびCO₂排出量の低減が可能であることを明らかとした。またFC-EXPOにおいて研究の成果を広く公表し、国民との対話を行っており、最終的な目標はプロジェクト終了時には達成している見込みである。

4. 成果の実用化に向けた取組および見通しについて

(1) 精密に細孔径を制御したシリカ膜および Pd 膜の開発および評価

3.1 (2)において、反応による固着・閉塞が確認されており、それを抑制するために微量水分あるいはCO₂を導入することによりコーキングが抑制できる可能性が考えられる。一方で、シリカ膜の場合、一般的には高温水蒸気に弱いといわれており、本プロジェクトで開発した高い耐熱性を有するシリカ膜が高温水蒸気共存下においても高い耐久性を示すかを評価する必要がある。また、CO₂を添加した場合、 $C(s) + CO_2 \rightarrow 2CO$ の反応が起き、コーキングを抑制可能であると考えられるが、Pd膜ではCO共存下でPd層内にカーボンが固溶し、水素透過率が減少することが知られている。そのため、開発したPd-Cu合金膜においてカーボンの固溶抑制効果が得られるかを確認する必要がある。

(2) 膜反応プロセスに好適な触媒の探索及び開発

文献調査等で触媒のコーキングにより引き起こされると考えられる固着・閉塞に対し、微量水分の添加あるいはCO₂添加が効果的である可能性が出てきた。一方で、膜反応器は従来法と比較して低温であるが、膜分離は供給側と透過側の分圧差により駆動するため、従来法と比較すると高圧にする必要がある。文献調査等で得られた知見が膜反応器の反応条件下においても有効であることを、実験を通じて確認する必要がある。

(3) 膜反応装置の開発及び有効性の実証検討

Pd膜を用いて反応温度600°Cにおいて膜反応器が有効であることを実証することができたが、シリカ膜についてはPd膜と比較して、水素透過性能が低いため、十分な引き抜き効果が得られず、大きな転化率の向上効果は確認できていない。そのため(1)において、再度製膜条件の精査を行い、シリカ膜の水素透過性能の向上を検討する必要がある。またPd膜については、膜反応試験終了後に水素透過性能が約1/2に減少していることが確認された。これは生成したカーボンがPd層内に固溶することで性能低下が起きていると考えられるため、開発したPd-Cu合金膜を用いてカーボンの固溶抑制効果を確認する必要がある。

膜反応試験については、(2)と同様に固着・閉塞現象が確認されているため、微量水分あるいはCO₂を添加することによる抑制効果を確認する必要がある。

・事業化までのシナリオ

これまでの検討において、メタン直接分解用膜反応器の有効性が明らかとなった。一方で、触媒のコーキングによる固着・閉塞現象も確認されており、これらの対策が実用化のために必要不可欠である。また、固体カーボンが生成する反応系であるため、大量に水素を製造する場合、連続的にカーボンを取り出すプロセスを考える必要がある。膜反応器の観点からは、高温・高圧に耐え得るモジュール構造を考える必要がある。固着・閉塞対策については、本プロジェクト内で微量水分あるいはCO₂の添加効果をラボレベルで確認する。その結果を受けて、順次スケールアップしていくことにより実用化を図る。また連続的にカーボンを取り出すプロセス構造に関しては、本プロジェクト内で簡易的なフローを提案することを予定している。その後、経済性等のプロセス検討を通じて実用化を図る。そのためにはエンジニアリング会社の協力が必要であると考えている。モジュール構造については、「水素利用等先導研究開発事業／エネルギーキャリアシステム調査・研究／水素分離膜を用いた脱水素」にお

いて、MCH 脱水素ではあるが実用的なモジュール構造を提案している。その知見を本反応系に適用・検討することで実用化を図る。モジュールに装填する膜については、スケールアップ（最終的には 1 mL）とすることで実用化を図るが、これらについては膜メーカー（Pd 膜についてはめっき会社なども想定している）の協力が必要である。

同時に製造されるカーボンについては、これまでの検討において MWCNT のような繊維状カーボンが得られていることが確認できている。今後、そのような繊維状カーボンの市場性調査などを通じて、水素の低コスト化に資するカーボンの性状などを明らかにすることで実用化を図る。これについてはカーボンを製造している化学会社などの協力が必要である。

上述の企業の協力については、RITE 無機膜研究センター内にある産業化戦略協議会に参加いただいている企業を中心として協力を仰ぐ。

5. 研究発表・特許等

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019年7月5日	RITE交友会	「世界の化学・エネルギー産業を革新する（無機膜研究センター）」	堀尾 容康
2	2019年9月26日	未来社会を支える温暖化対策技術シンポジウム in 関西	「メタン直接分解によるCO ₂ フリー水素製造技術に関する検討」（ポスター発表）	安原 健一郎
3	2019年11月7日	未来を拓く無機膜環境・エネルギー技術シンポジウム	「無機膜研究センターの研究成果と今後の計画」	中尾 真一
4	2019年12月18日	革新的環境技術シンポジウム2019 ～脱炭素社会に向けたチャレンジ～	「無機膜の実用化開発と脱炭素社会に向けた取り組み」	中尾 真一
5	2020年2月26～28日	スマートエネルギー Week 2020 第16回 国際水素・燃料電池展	「メタン直接分解によるCO ₂ フリー水素製造技術に関する検討」（ポスター発表）	無機膜研究センター

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：⑤－1を参照

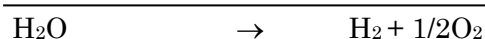
課題番号： ⑤－２

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査／アルカリ金属を用いたレドックスサイクルによる熱化学水素製造」

委託先：国立大学法人 広島大学（2019年度終了）

1. 研究開発概要

本事業では、ナトリウムレドックスサイクルを用い、500℃以下の熱エネルギーと水から水素を製造する技術の研究開発を目的とし、現状の課題を解決するための要素技術に関する研究を行った。以下に、ナトリウムレドックスサイクルの素反応式を示す。



この熱化学サイクルは500℃以下の熱エネルギーで制御可能であり、太陽熱や排熱を利用することができ、現存する蓄熱システムと組み合わせることが可能であるため連続運転が可能である。このため、高効率でかつスケールアップ可能なCO₂を排出しない革新的な水素製造技術であるといえる。一方で、本サイクルを用いた水素製造プロセスで生成する酸化物及び過酸化物は極めて強い腐食性を示し、反応容器が腐食されることが実用化に向けた発展を妨げる最大の課題となっている。これまで、腐食に関するデータベースや論文等を基に、アルカリ環境において高い耐食性を示す材料を用いた試験を行ってきたが、実用が期待できるような耐腐食性を示す材料を見出すには至っていない。当該事業では、高い耐食性を有する反応場を実現し、実用化に繋げるための知見を得るために、以下の2つの項目を掲げ研究を実施した。

（1）反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討

反応容器として利用できる材料を探索することを目的に、種々のセラミックス系材料の耐腐食性に関する研究を行った。結果として、酸化物、Al化合物、及び安定な構造を有するグラファイトや窒化ホウ素が比較的高い耐腐食性を示すことが明らかとなった。また、焼結体や粉体に比べ、表面平滑化処理を施した多結晶体を用いることで、腐食を劇的に抑制できることを見出した。

（2）反応制御技術の検討

Na₂O及びNa₂O₂による容器腐食を回避しつつ反応を制御する技術として、部分加熱方式を用いて反応場に温度勾配をつくり出す反応装置を設計、作製した。この反応装置を用いることで、酸化物と容器壁面の腐食を抑制しつつ反応を進行させることができる可能性が示唆された。また、本熱化学水素製造を用いた水素製造コスト試算を行ったところ、20円/Nm³程度と見積もられた。

2. 研究開発目標（研究開発全体の目標）

水素製造技術としては、現状発電と水の電気分解を組み合わせた方法が代表的であり、その他光触媒を用いた方法等が検討されている。これらの方法は小規模で高効率な水素製造技術としては非常に有用だが、反応場が2次元的な電極表面であるため、スケールアップによるコストメリットが得にくく、水素の大量生産の手法としては不向きである。一方、本研究で注目する熱化学水素製造技術は、多段階の化学反応を用いて、熱エネルギーと水から三次元的な反応によって水素を製造するため、化学プラントとしてスケールアップによるコストメリットが期待できる。多段階の化学反応を用いて熱エネルギーと水から水素を製造する熱化学水素製造技術において、低温領域（500℃以下）で動作する金属レドックスサイクルが存在する。その中でもNa-レドックスサイクルはアルカリ金属の相変化を効率的に制御し、化学反応におけるエントロピー変化を増大させることで反応温度を低温化できる可能性があるが、実用化に向けては未だ多くの課題を有している。特に、反応生成物の酸化物及び過酸化物は極めて強い腐食性を示し、反応容器が腐食されることが最大の課題である。これまで、腐食に関するデータベースや論文等を基に、アルカリ環境において高い耐食性を示すとされるインコネルやハステロイといったNi系合金をはじめとし、Auメッキ、純Ni、W、Moといった反応容器を用いた試験を行ってきたが、実用が期待できるような耐腐食性を示す材料を見出すには至っていない。当該事業では、これまでの研究から方向性を変え、高い耐食性を有する物質の探索及び腐食を回避する反応場の検討を行った。Naの腐食性は微量の酸素存在下で劇的に高まることが報告されていることから、一連の反応においては、酸化物や過酸化物(Na_2O や Na_2O_2)が高い腐食性に強く関与していると考えられる。そこで、本研究では、酸素或いは酸素と化学的性質の近い元素を含むセラミックス系材料に注目する。候補材料について、高純度粉末試薬、或いは容器型に成形した試料を用意し、各ナトリウム酸化物と接触させた状態で、想定される利用温度(500-600℃)まで加熱することで、その反応性を調査し、反応温度、反応速度、反応プロセスといった腐食に関する特性を理解する。

上記耐腐食材料の探索と並行して、反応制御技術の検討も行う。図1にNaレドックスサイクルの反応プロセスの概略を示す。左から金属分離反応、加水分解反応、水素生成反応である。いずれの反応も1種類の固体が変化し、反応物や生成物であるガス(流体)を出し入れすることで制御可能である。例えば、全体にAr等の不活性ガスを流しながら、金属分離反応でNa蒸気を回収した後、水蒸気をArに混ぜて流すことで加水分解反応を進行させ O_2 を分離回収する。最後に、回収したNaを再度蒸気(或いは液体)にし、加水分解反応の生成物であるNaOHと反応させることで、水素を得る。このようなプロセスを実現するには、固体を動かしつつ、流体を流すことができる流動層が適していると考えられる(図2)。また、流動層に用いる試料加熱方法を検討することにより、反応性の高い反応中間体である酸化物や過酸化物が高温で容器と接触する頻度を下げ、腐食を可能な限りの抑制できることが期待される。この際、一般的な流動層と異なり、各反応で変化する反応体自身が流動層媒体とみなされるため、気体の圧力や流量といった条件の最適化及び反応過程に合わせた制御が必要になると考えられる。そこで、実際に小型の流動層反応容器を作製し、加熱方法や反応条件に関する基礎データを取得し、反応制御技術の確立を目指す。

上記を主たる事業課題としてフォーカスし、反応容器用耐腐食性材料の決定による反応制御技術の確立し、詳細な熱力学データの取得を進め、それらを基にスケールアップ後のコスト試算を行う。

(1) 実施項目①：反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討

酸化ナトリウムから熱によってナトリウム蒸気を発生させる際に発生する過酸化ナトリウムと、原系である酸化ナトリウムの混合物が高い腐食性を有しているため、この反応を安全に管理するために、腐食試験と腐食回避の可能性を探る。本試験を安全に実施するために、高度に管理されたグローブボックス（純化されたアルゴン雰囲気）を用いる。

- ①-1 セラミック材料粉末を用いた酸化ナトリウム・過酸化ナトリウムとの反応性評価(2019-2020年度)
- ①-2 セラミック材料の焼結体を用いた酸化ナトリウム・過酸化ナトリウムとの反応性評価(2019-2020年度)
- ①-3 気相および液相のナトリウムについて、配管部材との腐食性能評価(2019-2020年度)
- ①-4 腐食反応後試料の微細組織観察及び生成物の分析(2019-2020年度)

(2) 実施項目②：反応制御技術の検討

3段階の熱化学水素製造の反応を制御する上で、反応の腐食回避の方法と加熱方法には密接な関係が存在する。したがって、反応制御技術の検討として、流動層を用いた際の加熱方法について以下の2点について検討を行う。ステージゲート審査で評価される、腐食回避可能性について技術目標が達成された場合は、直ちに熱力学データの取得とスケールアップ後のコスト試算に重心を移す。

- ②-1 熱風流入式の流動層を用いた反応容器の設計を行い、反応制御技術を検討する。(2019-2020年度)
- ②-2 点集熱式の加熱方法を用いた反応容器の設計を行い、反応制御技術を検討する。(2019-2020年度)
- ②-3 不活性ガスと水素の分離法の検討(2020年度)
- ②-4 三段階の熱化学水素製造における熱力学データの取得(2020年度)
- ②-5 スケールアップ後のコスト試算と本技術の成立性検討(2020年度)

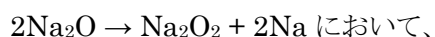
(3) 実施項目③：助言委員会の開催

本事業を研究段階から実用段階にスムーズにシフトできるよう、助言委員会を設ける。助言委員会は、安全体制及び技術成立性についてエンジニアリグ会社、材料強度評価会社、エネルギー関連会社等を中心とした外部有識者で構成され、本事業の実用可能性を高める。

<2019年度の目標>

(1) 実施項目①：反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討

ターゲットとする以下の反応



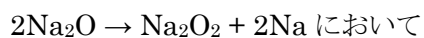
現状キャラクターゼーションが行われていない反応生成物の過酸化ナトリウム (Na_2O_2) 或いは、起こりうる反応生成物のキャラクターゼーションがなされること。

(説明) 仮に腐食反応が進行すれば、ターゲットとなる反応以外の反応が見られるため、反応生成物が明らかになることで反応容器の腐食回避の可能性が示せる。また、①-1、2、3は同様

の目的であり、方法論が異なるのみであるため共通の目標とした。

(2) 実施項目②：反応制御技術の検討

ターゲットとする以下の反応、あるいは水分解に資する反応



$2\text{Na}_2\text{O}$ の 70% 以上の Na_2O_2 への反応進行が確認できることを目標とする。

(説明) ②-1, 2は反応制御技術の確立を目的としたアプローチであり、このアプローチによって反応率 70% 以上が示せれば、反応制御技術の第一歩と評価できるため目標とした。

(3) 実施項目③：助言委員会の開催

2019 年 7 月および 11 月に広島大学あるいは広島大学東京オフィスにて開催し、研究進捗の報告や方向性の微調整を行った。

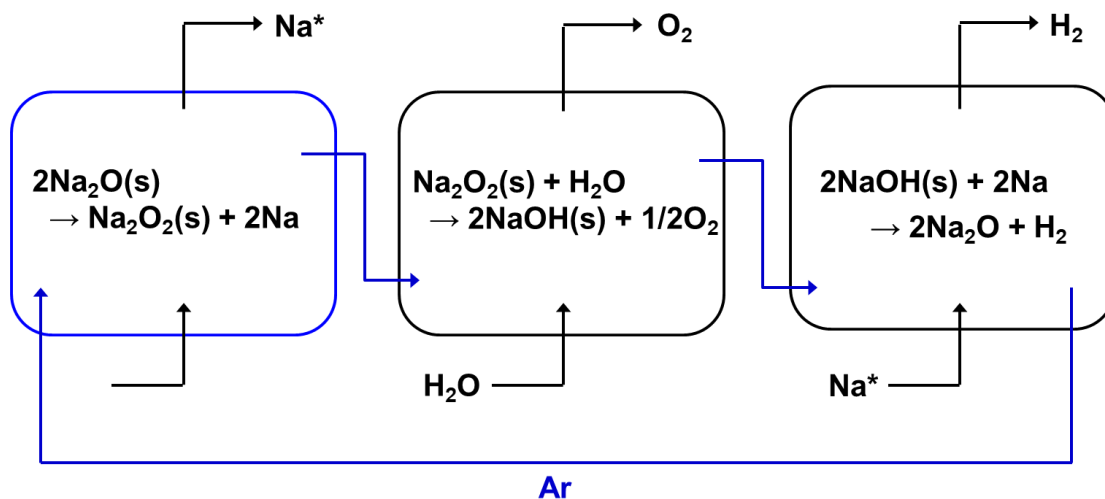


図1 Na レドックスサイクルの反応プロセス概略図

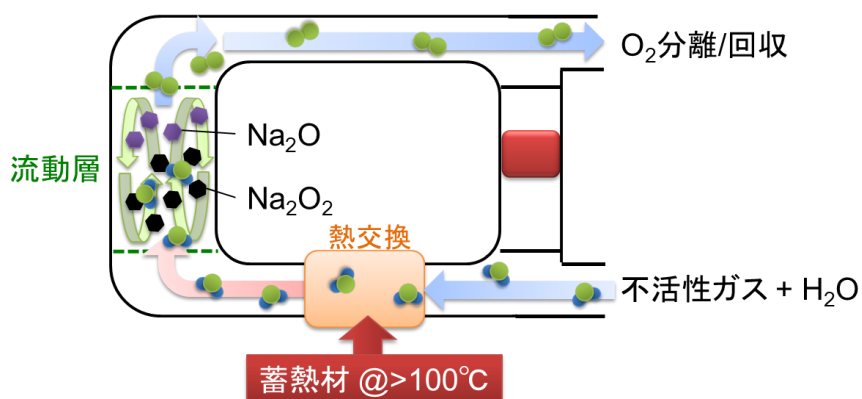
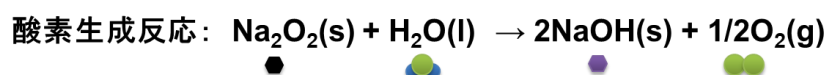
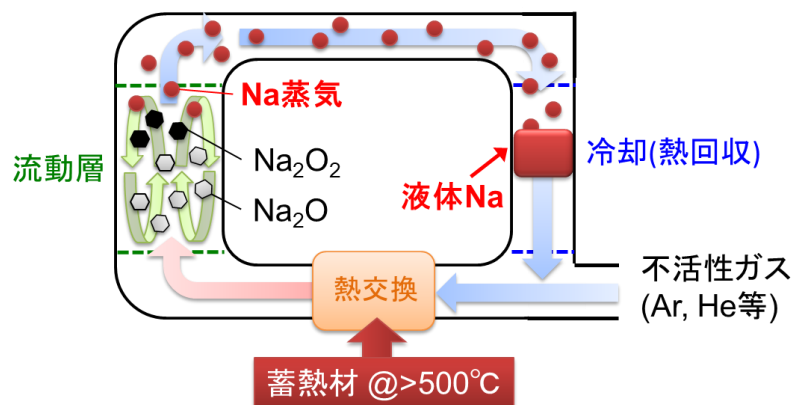
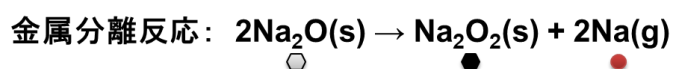
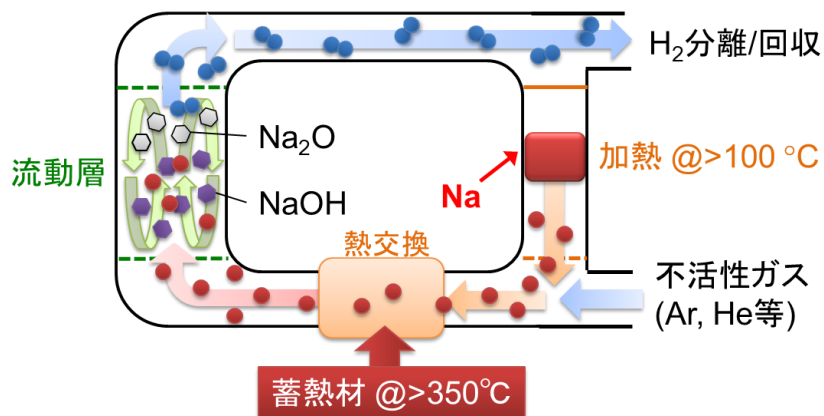
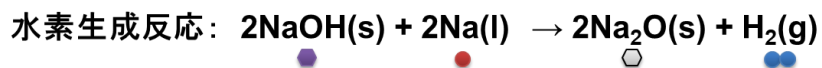


図2 Na レドックスサイクルの流動層を用いた反応プロセスのイメージ図

3. 研究開発成果

3. 1 研究開発項目別成果及び達成度

本事業で得られた研究成果の概要を以下に示す。(詳細については、成果報告書参照)

(1) 実施項目①：反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討

酸化ナトリウムから熱によってナトリウム蒸気を発生させる際に発生する過酸化ナトリウムと、原系である酸化ナトリウムの混合物が高い腐食性を有しているため、この反応を安全に管理するために必要となる耐腐食性材料の探索及び評価を行った。得られた結果を以下にまとめる(表 1)。

表 1 実験に用いた物質の耐腐食性

物質		腐食相、量	耐腐食性
炭化物	SiC	未同定相、多量	×
	WC	Na ₂ WO ₄ 、多量	×
	TiC	未同定相、多量	×
	Graphite	(*CO ₂ 、NaCO ₃ 等)、検出限界以下	◎
窒化物	AlN	NaAlO ₂ 、少量	△
	AlN 多結晶	(*NaAlO ₂)、検出限界以下	○
	TiN	Na ₄ TiO ₄ 、多量	×
	Si ₃ N ₄	Na ₄ SiO ₄ 、多量	×
	hBN	(NaBO ₃)、検出限界以下	○
酸化物	Al ₂ O ₃	NaAlO ₂ 及び未同定相、少量	△
	Al ₂ O ₃ 多結晶	(*NaAlO ₂)、検出限界以下	◎
	ZrO ₂	Na ₂ ZrO ₃ 、多量	×
	TiO ₂	Na ₂ ZrO ₃ 、多量	×
その他	単結晶 Si	(*Na ₄ SiO ₄ 等)、検出限界以下	◎
	Ti 合金	(Na ₄ TiO ₄ 等)、検出限界以下	◎

*熱力学的安定性から生成が予測される相

- ・酸化物及び Al 化合物が比較的高い耐腐食性を示す。
- ・単結晶体、多結晶体は粉体や焼結体に比べ耐腐食性が高い
- ・化学的特性では腐食が予想される物質でも、グラファイトのような安定構造を有する物質は高い耐腐食性を示す。(熱力学計算のみでは予測できない腐食抑制因子が存在)

上記の結果から、酸化ナトリウム・過酸化ナトリウムとの反応性には、材料の化学的性質だけでなく、表面の形状等の物理的性質の効果も大きいことが明らかになり、表面を研磨した Ti 合金や安定な構造を有するグラファイトが耐腐食材として期待できることが分かった。また、耐腐食性が高い多結晶体や単結晶を見出し、分析を進めていく中で、 Na_2O の熱分解反応は、当初想定していた金属分離反応($\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na} + \text{Na}_2\text{O}_2$)とは異なり、単独熱分解($\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na} + \text{O}_2$)により進行することが示唆された。

上記のように、材料の化学的性質や物理的性質と腐食反応性について定性的な分析により、材料と腐食反応性の傾向は理解できたため、実施項目①については概ね目標は達成されたと判断される。

(2) 実施項目②：反応制御技術の検討

図3に本事業で作製した流動層型反応装置の設計概要図、図4に実際の写真を示す。試料を入れる胴体部分は SUS316 製のフランジで内径 $\phi 63 \text{ mm}$ となっている。上部はビューポートになっており、集光式ハロゲンスポットヒーターの光を透過し、試料中央を集中的に加熱する事が出来る。下部は加熱ガスを流通できる加工を行っており、ガス加熱ヒーターを接続する事で高温のガスを導入する事が出来る。本装置を用いることで、部分加熱により反応部と腐食が懸念される容器壁面の間に温度勾配を作製することができ、これにより容器腐食を回避しつつ、 Na_2O の反応が制御可能となると考えられる。実際に本装置を用いて Na_2O を $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度に加熱すると、反応容器側面では変化がないが、試料中心部に変化が見られ、ヒーターの焦点付近で反応を進行させることができた(図5)。また、図6に示したように、加熱後に、反応容器や生成物をトラップするためのフィルターに目視できるほどの多量の生成物が得られ、元素分析からこの生成物に Na が含まれることがわかった。想定する反応が進行した場合、 Na_2O から Na_2O_2 が生成するはずであるが、生成物の X線回折測定では Na_2O_2 の存在は確認されなかった。これは、前述した Na_2O の単独熱分解 ($\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na} + \text{O}_2$) が進行している可能性を示唆している。

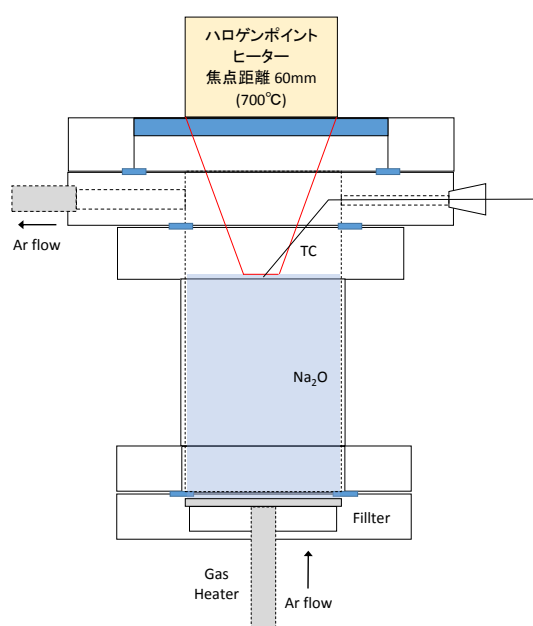


図3 流動層型反応装置の設計概略図

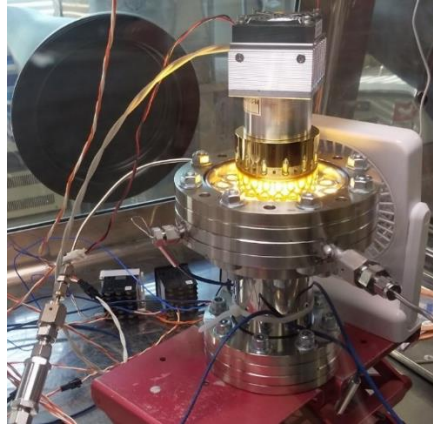


図4 流動層型反応器の写真

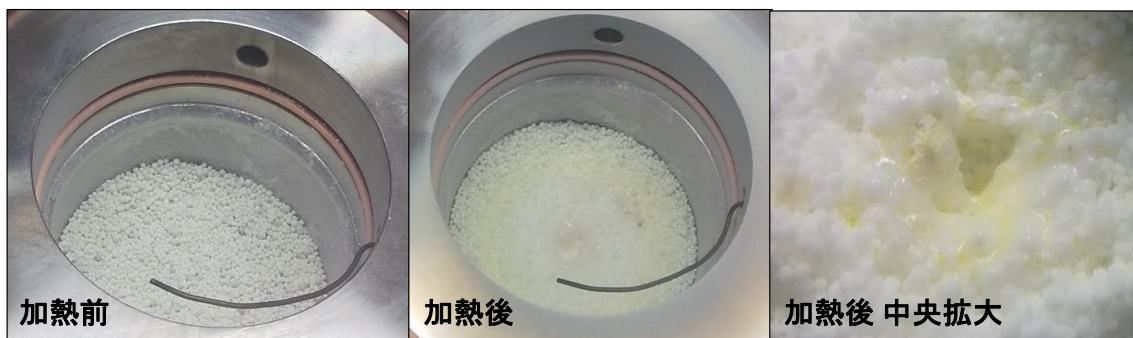


図5 反応試験前後の試料の状態

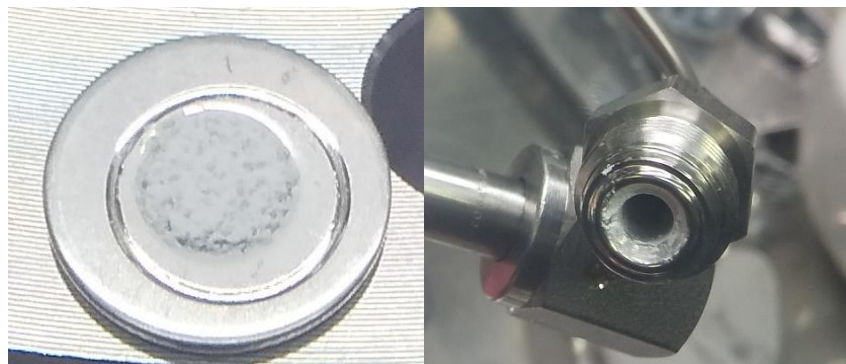


図6 (上)反応容器、(左下) 試料トラップ用のフィルター、(右下) フィルター部分に繋がる配管側の写真。

Na レドックスサイクルを用いた水素製造におけるコスト試算を行った。反応プロセスの制御方法や反応容器等の設計が行われておらず、最終的なコスト試算には程遠いが、現状、机上でできる粗い見積もりを行った。参考、比較対象とする太陽熱利用施設として、スペインのハマソラールを選定した。仮定として、

- ① ハマソラールでの発電コストを 10 円/kWh とした
- ② ハマソラールでの蒸気タービン設備と同等の Na レドックス反応設備であるとした
- ③ 直接利用できる熱は蓄熱も含め 30%の効率とした
- ④ 反応時に利用する熱から水素への転換効率を 60%とした

この計算によると、1 Nm³あたりの製造コストは 20 円程度となり、スケールメリットの期待できる①と②、開発要素である④に注力することによって、20 円以下の水素製造コストとなることも見通せる手法である事が明らかとなった。

以上のように、反応制御技術として点集光システムを用いた加熱方式により、容器腐食を回避し、且つ 500 °C 付近で Na を生成することに成功した。従って、概ね初年度の目標は達成できたと考えられる。加えて、次年度に実施要諦であった水素製造コストの見積もりを前倒しに行った。

(3) 実施項目③：助言委員会の開催

2019 年 8 月に広島大学、2019 年 10 月に広島大学東京オフィスにて助言委員会を開催し、事業の進捗確認、及び安全体制、技術成立性等について議論し、反応容器材料の腐食性試験と腐食回避及び反応制御技術についての助言を得ることができた。また、当初の実施計画では 2020 年度の実施項目予定であった「コスト試算」について、2019 年 8 月の助言委員会において、耐腐食性材料や腐食回避等の技術が確立していない早い段階ではあるが、20 円/Nm³ 以下の水素製造コストを見通すべきだとの助言により、実施項目②-5 「スケールアップ後のコスト試算と本技術の成立性検討(2020 年度)」を年前倒しで検討した。

(4) 成果の普及、知的財産権等の確保に向けた取組

本事業において得られた成果のうち、知的財産としての価値が見込まれる実施項目②の反応制御技術については、特許出願を行った。

本事業で得られた成果を国際会議にて公表した。今後も国内外の学会にて積極的に成果公表を行う予定である。

実施項目①で得られた耐腐食材料に関する成果については、現在論文として科学雑誌に投稿する準備を進めている。

3. 2 成果の意義

本事業で研究対象とした Na-レドックスサイクルは比較的低温(500 °C 以下)の熱エネルギーを用いて、水から水素を製造する技術であり、既存の発電と水電解を組み合わせた方法に比べ、高効率な大量製造技術として優位性がある。また、既存の太陽熱を用いた熱化学水素製造が 900-1500 °C の制御温度が必要であるため、高い集光度の太陽熱或いは次世代原子炉の利用が必要となるのに対し、500 °C で制御できる本技術では、排熱を含む様々な熱源を利用でき、且つ蓄熱技

術との併用も可能である。

(1) 実施項目①：反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討

本研究において、Na-レドックスサイクルにおける最大の課題であったナトリウム酸化物の腐食を抑制する材料の設計指針が得られたことは、本技術の実用化において大きな前進であるといえる。

(2) 実施項目②：反応制御技術の検討

本研究では、部分加熱方式を用いた容器腐食を回避する反応制御技術を提案・作製し、その有用性を評価した。その結果、反応容器の腐食を抑え、反応体のみを加熱することが可能であることが明らかになった。この反応制御技術と実施項目①で得られた指針を基に選定した耐腐材料を組み合わせることで、腐食を最小限に抑えた状態での Na-レドックスサイクルを用いた水素製造が実現できる可能性を見出した。また、既存の太陽熱利用技術を基にした水素製造コストの試算を行ったところ、実用化の一つの目標値とされている 1 Nm³あたり 20 円程度という低コストでの水素製造が可能であるという結果を得た。

加えて、近年 NaS 電池に代表されるようなナトリウム利用技術の研究開発が進められており、これらの実用性においても、安全性を確保するための耐腐食材料或いは腐食を回避できる反応制御技術の研究は必要不可欠であると考えられる。従って、本研究の成果は、Na-レドックスサイクルのみならず、関連分野の発展にも貢献し得る点でも意義があるといえる。

3. 3 成果の最終目標の達成可能性

(1) 実施項目①：反応容器用材料の腐食性試験と腐食回避の可能性の検討

本研究で得られた成果は、候補材料とナトリウム酸化物の反応を短時間で実施し、定性的な議論を行った。残された課題として、実用的な時間スケールでの利用可能性を議論するため、腐食環境下への暴露時間と腐食反応の進行度といった相関を得るための定量的な分析・評価を進める必要がある。

(2) 実施項目②：反応制御技術の検討

本研究では、部分加熱方式を用いた反応装置を用いることで、反応容器の腐食を回避することが可能であることが実証された。次のステップでは、目的とした Na₂O の熱反応に関する生成物の分析や反応条件の最適化等と本技術の流動層への適用についても検討する必要があると考えており、これらは今後の課題として、当研究グループで引き続き研究開発を進める予定である。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

熱化学水素製造法は高い製造効率が期待できるため、光電変換材料研究と同様に、世界中で注目されて研究が進められている。これらの多くは、反応を進行させるために必要な 900 °C 以上の温度を得るための熱源として原子炉排熱等を想定した研究である。一方で Na-レドックスサイクルは、より低温(500 °C 以下)の熱エネルギーを利用する技術であり、蓄熱との併用も可能である

ために自然エネルギー由来の熱や排熱を水素に変換する技術としての利用が考えられる。現状のコスト試算においては、20 円/Nm³程度での水素製造が可能であり、次世代の大量水素製造技術としての展開が期待できる。

実用化及び事業化については、本技術の展開が想定される本事業の助言員会メンバー企業や関連研究機関と引き続き連携して議論を進めたいと考えているが、現状 FS (Feasibility Study) 的な研究要素が残されているため、実用化フェーズへの移行を目指した研究開発を進める予定である。

本研究は、持続的且つクリーンな「水素」を媒体とした新たなエネルギー体系の構築に向けた「自然 1 次エネルギー変換技術」の一つとしての利用が期待される。特に、太陽光で得られる熱を利用する技術であるため、日照時間の長い砂漠地域等の太陽エネルギーを得やすい場所においての利用が想定され、これら地域の経済的な活性化が期待される。

現在、水素エネルギー利用に向けた要素技術として、本水素製造分野以外に、高圧タンクや貯蔵材料等の水素貯蔵/輸送分野、燃料電池や内燃機関等の水素利用分野においても精力的な研究開発が進められている。本研究により、有用な水素製造技術が確立され実用化が進められれば、現在国を挙げて開発が進められているエネルギーキャリアの利用を通じた水素エネルギーの普及が飛躍的に促進され、ひいては上述の関連分野の活性化に繋がると考えられる。

5. 特許・研究発表等

—特許等—

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
5-1	2020年3月10日	特許 2020-40411	酸化ナトリウムの分解方法	国立大学法人広島大学

—研究発表・講演、文献等、その他—

No.	年月	発表先	題目	発表者
5-2	2020年3月13日	HU-ACE 自立化記念シンポジウム「カーボンリサイクル時代へのエネルギー戦略」	ナトリウムレッドックス反応を用いた熱化学水素製造の新展開	市川貴之

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：⑤-2を参照

課題番号：⑤－3

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／
炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査／
メタン直接分解による水素製造に関する技術調査」

委託先：株式会社伊原工業、国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学

再委託先：愛知県（あいち産業科学技術総合センター）、学校法人東京理科大学

1. 研究開発概要

本技術調査では、メタン直接分解による CO₂フリー水素製造装置の実用化に向け、小型反応テスト炉において、水素製造効率を向上させるための、新たな技術の可能性を探る。メタン直接分解では、生成炭素による担体孔部の閉塞やシンタリング等の影響で触媒が失活してしまう問題が生じ、さらに、触媒と生成炭素を分離しようにも触媒表面に化学吸着する炭素の脱離は困難である。先行研究における Ni 金属触媒を用いたメタン直接分解では、800℃における排出ガス中水素濃度（以降、水素濃度と呼ぶ）は約 18%と低い。

そこで本技術調査では、Ni 系板状金属触媒の表面に異種金属を複合化し、表面微細構造と組成を変化させることによる水素収率の向上を試みた。また、メタン直接分解では、純度の高い生成炭素が排出されるため、その用途の可能性を調査した。さらに、反応炉形状と炉内流動挙動の最適化により、メタンを効率良く加熱する伝熱促進技術を調査した。これらの成果をもとに、将来の水素の大量供給を想定した水素製造装置を検討し、その性能を評価する。

2. 研究開発目標（設定の理由も含め）

- (1) 水素製造効率を向上するための板触媒の調査（担当：委託先／株式会社伊原工業）

800℃での平衡状態における水素濃度は 94%と高いため、反応炉温度 800℃の時、Ni 系板状金属触媒の水素濃度 50%を目指す。

- (2) 反応炉設計のための基礎データ収集実験（担当：委託先／株式会社伊原工業）

メタン直接分解反応炉設計に向けた板触媒の配置法を検討と、板触媒から剥離する生成炭素の状態調査のため、外加熱式試験装置を製作し、板触媒の配置による水素濃度と生成炭素の状態を調査する。

- (3) 内加熱式反応炉の小型試験装置を製作実験（担当：委託先／株式会社伊原工業）

実機と同様な内加熱式反応炉の小型試験装置を製作し、長時間稼働時の水素濃度データを収集する。

- (4) 生成炭素及び生成ガスの特性解析（担当：再委託先／愛知県（あいち産業科学技術総合センター））

メタン直接分解により生じた生成炭素及び生成ガスの分析を行い、生成炭素の利用法を検討する。

- (5) 板触媒の微細構造の解析（担当：再委託先／東京理科大学）

反応炉の高温雰囲気中の生成炭素が板状触媒に与える影響、及び、加飾された母材金属のど

のような変化が触媒効率に影響を与えるのかを解析する。

- (6) ガスの滞留防止と加熱促進による水素製造効率向上技術の調査 (担当: 委託先/岐阜大学)
生成水素の炉内滞留抑制と流入メタンの加熱効率向上を同時に達成する「触媒フィン」を開発し、水素製造効率が良い反応炉を提案する。
- (7) 熱流体シミュレーションによる水素大量製造装置の概念検討 (担当: 委託先/岐阜大学)
熱流体シミュレーションにより、水素を大量に製造するための反応炉を検討し、メタン直接分解反応装置の設計指針を示す。

3. 研究開発成果

3.1. 研究開発項目別成果及び達成度

(1) 水素製造効率を向上するための板触媒の調査

Ni 触媒の働きが、Ni 板の生地の状態と、Ni メッキを付加した場合とでは、触媒としての働きが異なることが判明した。また、Ni メッキの下地として Cu を付加することにより、触媒能力は著しく向上することが判明した。

Ni 板生地では水素濃度 11%まで低下したものが、Cu 板に Ni メッキを付加した触媒では、温度と水素濃度の平衡計算から導かれる 800°Cの理論値である水素濃度 94%に対し、93%と非常に高い値を実現できた。しかし、Cu は耐熱性に劣る為に実用的ではないため、実用炉では不採用とした。しかし、Ni 板に Cu をメッキした後、Ni メッキを施すことにより、800°Cで水素濃度 83%を達成でき、実用化の目処をつけることができた (図 1)。

加熱前の Ni メッキ層表面は平滑なことから、微細結晶粒もしくはアモルファスが形成されていると考えられる。図 2 から加熱により Ni メッキの組織が 2 次再結晶する時に、結晶粒の粗大化と、優先成長方向への成長に伴い、結晶粒内ですべりが発生し、表面にステップが形成された。そこへ、Ni 原子が表面拡散により供給されたことにより、優先成長方向へのステップフロー成長が続き、ステップーテラス構造が重畳したことにより隆起した可能性がある。面粗度の変化が大きい触媒程、水素濃度が大きく上昇したが、面粗度の変化は隆起の結果であり、多数のステップ構造が形成されたことが、純 Ni よりも Ni メッキの触媒性能が高い原因と考えられる。

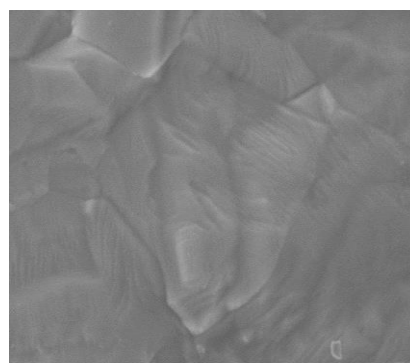
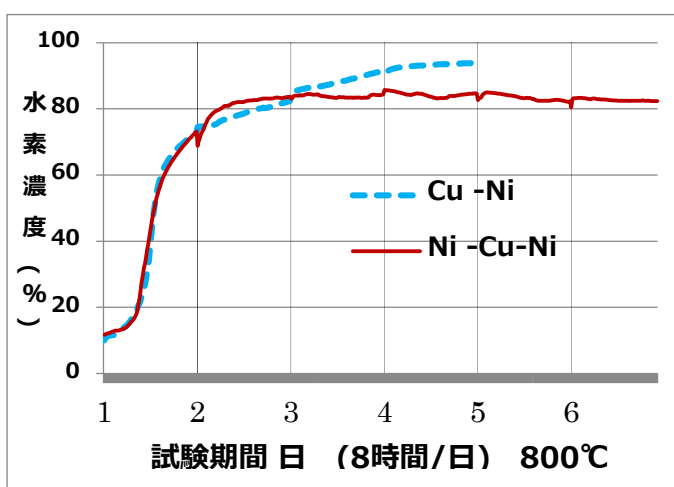


図 2 800°Cで15分間加熱した Cu-Ni メッキ触媒の SEM 画像

図 1 Cu-Ni/Ni-Cu-Ni メッキの試験結果

(2) 反応炉設計のための基礎データ収集実験

金属触媒板とメタンガス流路との間隔が狭い方が、水素濃度の上昇が見られた。また、金属触媒板に付加したランス加工、突起等の効果はあったが限定的であった。

反応炉試験では、圧力 0.3Mpa、メタン 1L/min (3NL/min) の時、反応炉温度 800°C で水素濃度約 55%を得ることができた (図 3)。使用した触媒は Ni-Cu-Ni メッキしたものであり、触媒筒のサイズは内径 34mm、外径 90mm、長さ 200mm、触媒面積 0.68m²であった (図 4)。

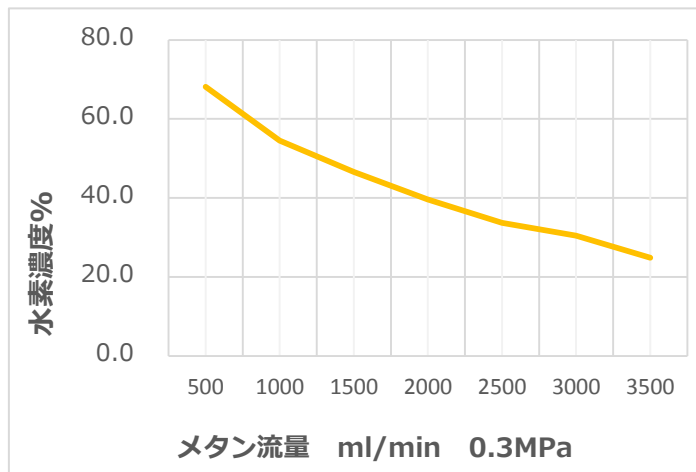


図 3 反応炉温度 800°C 触媒 Ni-Cu-Ni メッキ



図 4 触媒筒外観

反応炉内の触媒筒は、生成炭素により完全に閉塞されていた (図 5)。固着した生成炭素は板触媒表面に強固に固着していて容易に落ちなかった。そこで、反応炉内の金属触媒板を定期的に揺動させることにより、生成炭素の固着を一定量以下に収め、金属触媒板から生成炭素を離脱させることができた。

実験終了後の Ni-Cu-Ni メッキした触媒板から、生成炭素を空气中で加熱し、燃焼除去後 SEM 観察したところ、Ni 表面がモノリス状構造を形成していた (図 6)。

このように、触媒表面がモノリス状の構造に変化することが、生成炭素を触媒板に強固に固着させ、また表面積が飛躍的に増大することが触媒能力を高めている可能性がある。



図 5 触媒筒に固着した生成炭素

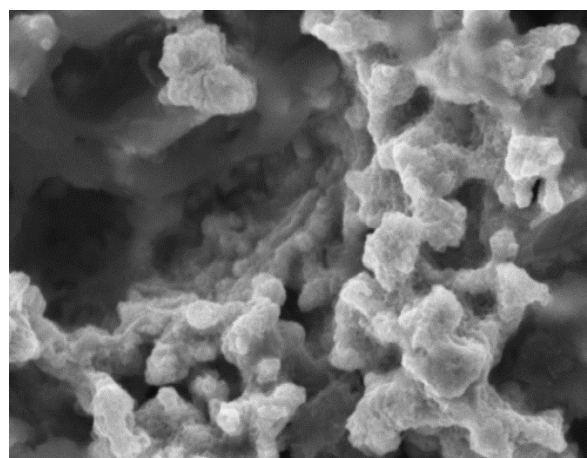


図 6 Ni-Cu-Ni メッキ触媒生成炭素除去後の表面 SEM 画像

生成炭素としては、滞留型反応炉では球状炭素が多く観察されたが、透過型反応炉ではナノファイバー状の炭素が多く観察された。

(3) 内加熱式反応炉の小型試験装置を製作実験

(1)、(2)の実験で得られた知見を基に実用炉を想定した内加熱式の小型反応炉を製作した(図7)。この炉を用いて総合試験を行う。金属触媒筒のサイズは内径 36mm、外径 145mm であり、長さは 400mm、反応炉温度 800℃、メタンガス圧力 0.3MPa、メタン 4L/min (≒12NL/min=0.72Nm³) の時の水素濃度 50%を想定する。生成炭素の離脱装置、生成炭素の排出実験、積算電力計によるエネルギー効率の測定も同時に行う。

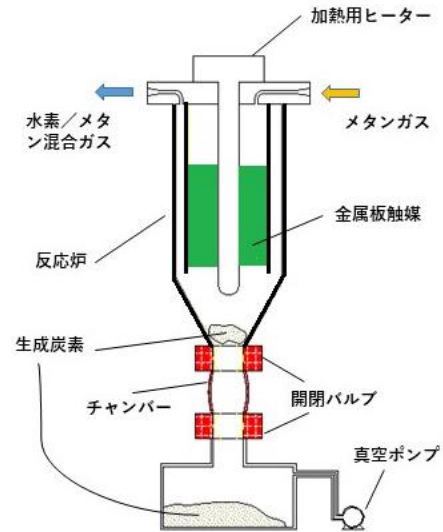


図7 内加熱式反応炉

(4) 生成炭素及び生成ガスの特性解析

ナノファイバー状生成炭素の体積抵抗率を測定したところ、ケッチェンブラック並みの値が得られた。

高熱伝導性樹脂フィラーとしての可能性を探るために、生成炭素(CF03)と熱可塑性樹脂PPSを8:2に混合し、試験片を作製した。そして、試験片の電気伝導度と熱伝導率の測定を行った(表1)。

表1 各種試験片の電気伝導度・熱伝導率

	単位	生成炭素	グラファイト
CF03	wt%	80	0
グラファイト	wt%	0	80
PPS	wt%	20	20
電気伝導度 (断面方向)	(Ωcm) ⁻¹	11.2	15.3
熱伝導率 (ホットディスク法)	W/mK	20.3	16.9
熱伝導率 (定常法)	W/mK	12.5	13.8

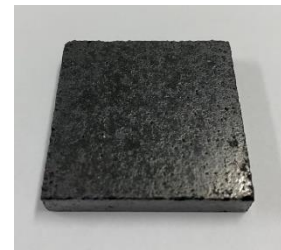


図8 生成炭素を混合した試験片
(50mm×50mm×10mmt)

←厚さ方向
←面方向

比較対象はグラファイト(鱗片状・粒状混合)である。グラファイトと同等の性能が得られた。

図9に透過式反応炉により生成された炭素生成炭素の粒子径分布測定した結果を示す。本実験で使用した生成炭素は、各種の運転条件で行った物であり粒度が広く分布している。今後、最適な反応条件(温度、ガス流量、触媒、反応炉構造)を探り、一定化することにより、生成炭素の形状・性質の均一化を図る。そして、得られた特性を考慮し、電池材料や高熱伝導性樹脂などの更なる利用法の検討を行う。

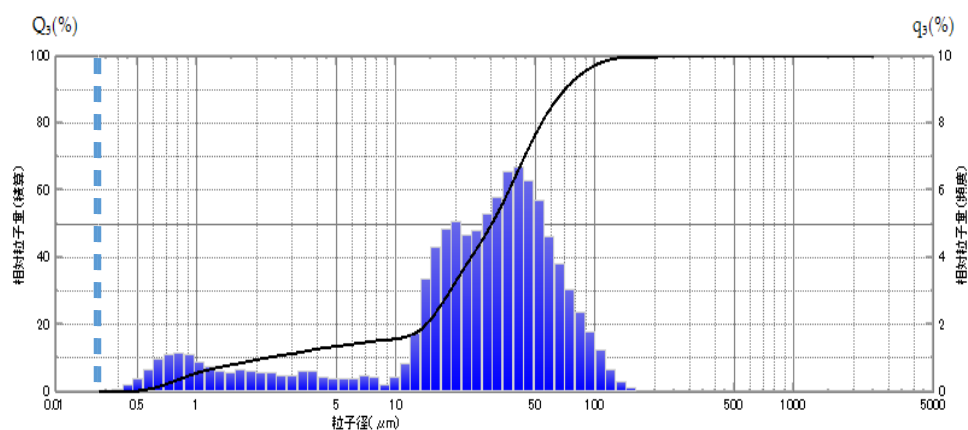


図9 生成炭素の粒度分布測定

GC/MS に直結した触媒評価装置を用いて、各種ニッケル鉄合金線材のメタン直接分解活性を評価した。ニッケル鉄合金は Ni、Fe の比率によらず Ni と同程度の活性となった。Ni は反応開始直後に非常に高い活性を示した。しかし、最終的なメタン分解活性では Fe が最も高かった。

(5) 板触媒の微細構造の解析

Ni 板触媒とメタンの高温反応により、カーボンナノカプセル、カーボンナノチューブ等多様なナノカーボンが確認された。図 10 に、銅板上に Ni メッキした触媒を、800°C でメタンと反応させた後の、HRTEM 像を示す。メタンとの高温反応により、Ni 板触媒がナノメートルサイズに微細化した様子が見て取れる。また、微細化したニッケルナノ粒子が集合してニッケル核が成長し、周囲にグラフェン層が同心円状に結晶化した。ナノカーボン形成の初期構造が明らかになった (図 11)。

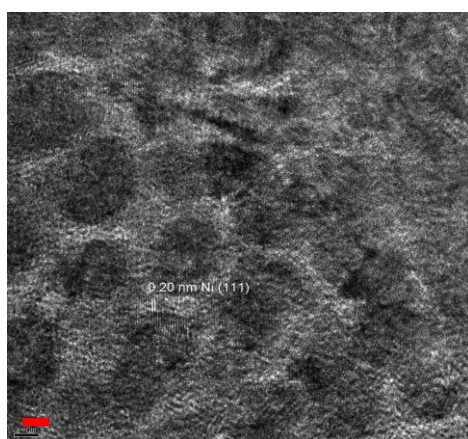


図10 Cu+Ni メッキ触媒の HRTEM 像

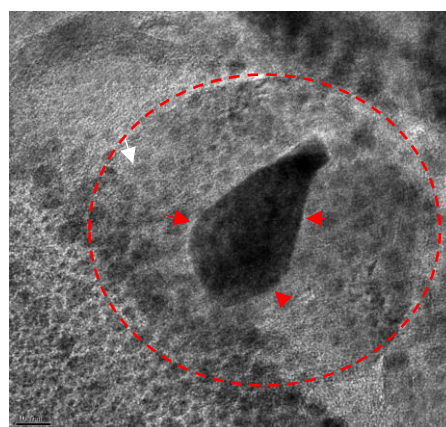


図11 Ni ナノ粒子中央の拡大

分子動力学計算ソフト LAMMPS を用いて、反応初期の様子をシミュレートした。異なった Ni 原子数とメタン分子数を含む系 3 個によるメタン分解の活性化エネルギーは、46.0～

59.9 kJ/mol となり文献値 (52.7~74±10 kJ/mol) に近い値が得られた。

また、同じポテンシャルファイルを用いて、高温で分解生成した炭素と水素がニッケルナノ薄膜によりどのように捕捉されるかをシミュレートした。その結果、反応の進行により、水素が Ni 中に拡散した。また、さらに炭素の侵入により Ni 表面がアモルファス化した。中央部分に水素の集積によりボイドが形成され、やがて Ni ナノ薄膜が分解した。また、炭素の表面への堆積が観察された。

反応温度 1173K(900°C)で、単位胞にメタンを 20 分子導入、30 ps 反応させ、遊離原子を除去後、新たにメタンを 20 分子導入、30 ps 反応させるプロセスを繰り返した。炭素と水素の内部拡散によって、Ni 薄膜触媒の膨張、アモルファス化、水素の中央への集積が生じ、分解した。炭素と水素の拡散によって Ni が微細化することがわかった。

炭素原子の Ni ナノ薄膜による捕捉は、計算開始後 840ps で弱まったが、それ以降は緩やかに捕捉が継続し、メタンが分解しつつ炭素の集積が進むことがわかった (図 12)。

高温でのメタンとの反応により、Ni 板触媒の表面が炭素で速やかに覆われ、触媒活性が低下することがわかった。

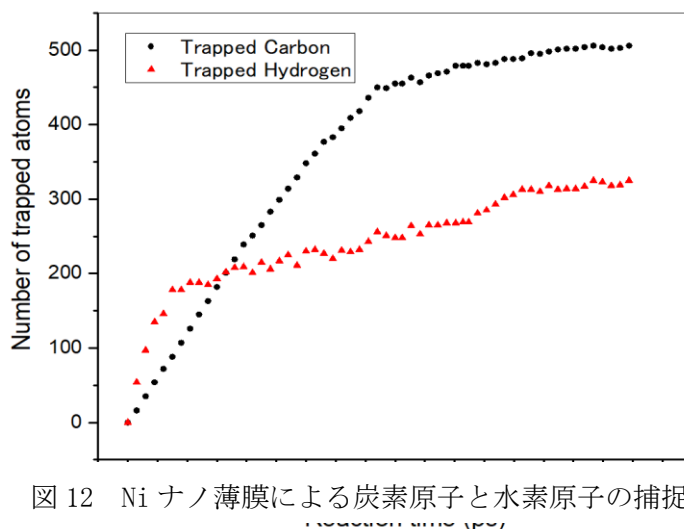


図 12 Ni ナノ薄膜による炭素原子と水素原子の捕捉数

(6) ガスの滞留防止と加熱促進による水素製造効率向上技術の調査

炉内ガスの経路短縮と滞留(よどみ)の防止策として、「ガス流入部への多孔板設置」および「触媒の放射配置」の 2 つの方法を検討し、流動可視化試験により、炉内ガスの経路短縮と滞留(よどみ)の抑止を確認した (図 13)。

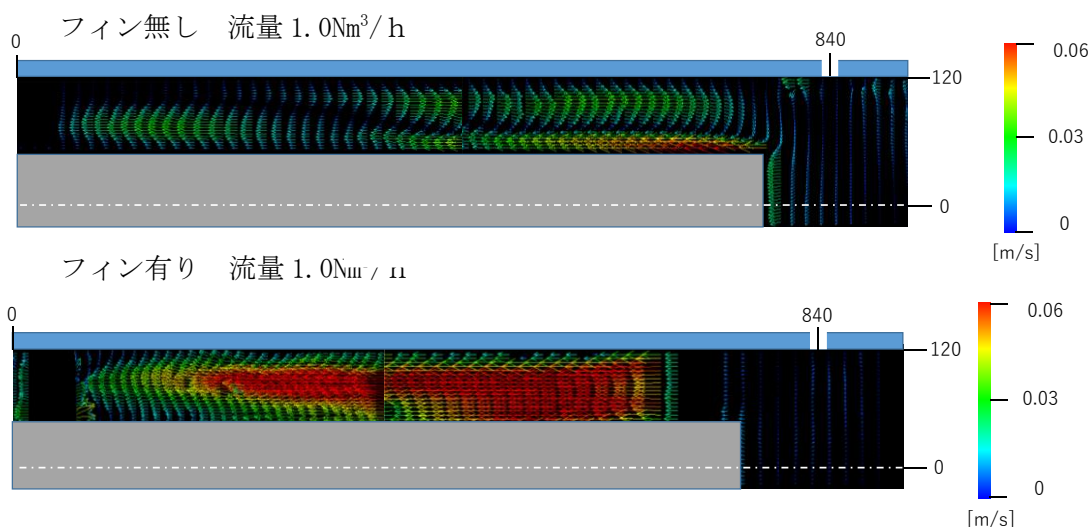


図 13 炉内流動挙動

続いて、40L 級反応炉を製作し、流入メタン流量 0.5 Nm³/h、ヒーター温度 800～1000℃の条件での排出ガス中水素濃度と消費電力を測定し、エネルギー効率を求めた。その結果、800℃以上のヒーター温度において水素濃度ピーク値が 50%以上を達成し、ヒーター温度 800℃において最大エネルギー効率を得た(図 14)。さらに、900℃の条件において流入メタン流量をパラメータとした試験を実施し、流入メタン流量が 0.1～1.0 Nm³/h の範囲において大流量なほどエネルギー効率が高い結果を得た。

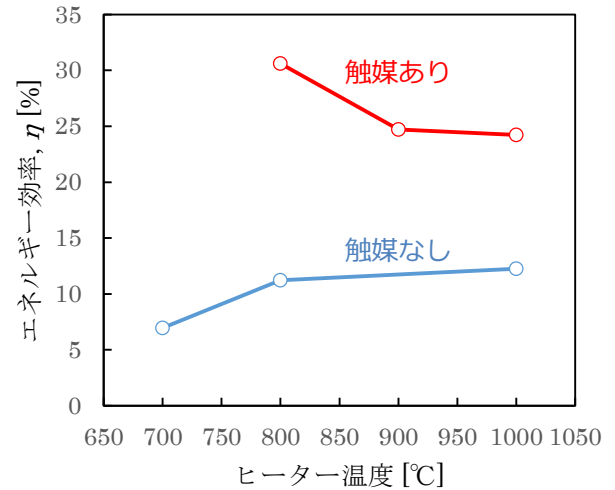


図 14 エネルギー効率 (メタン流量 50Nm³/h)

(7) 熱流体シミュレーションによる水素大量製造装置の概念検討

将来的な水素大量製造装置の概念検討に向け、メタン直接分解反応モデルを構築した。このモデルは、気相反応と触媒反応をカップリングされたモデルで、項目(1)に倣い、触媒性能が持続すると仮定し、項目(6)で得られた水素濃度ピーク値にフィッティングするようにチューニングされている。図 15 に滞留時間と炉内温度に対する水素濃度を示す。この図より、製品の要求仕様 (水素製造量等) に対し、最適な反応炉サイズや運転条件 (原料ガス流量、反応温度など) が検討可能である。一例として、200 L 反応炉を想定した場合の流入メタン流量と炉内温度に対する水素生成流量を図 16 に示す。図より、高温かつ大流量なほど水素生成流量が大きいことがわかる。しかし、図 14 が示すように、エネルギー効率を考えると高温かつ大流量条件が良いとは限らない。そこで、エネルギー効率をパラメータとしたマップを作成し、水素大量製造装置の設計ツールとする。

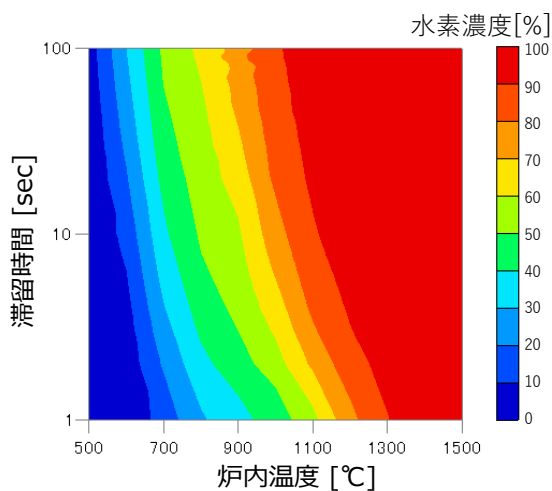


図 15 水素濃度マップ

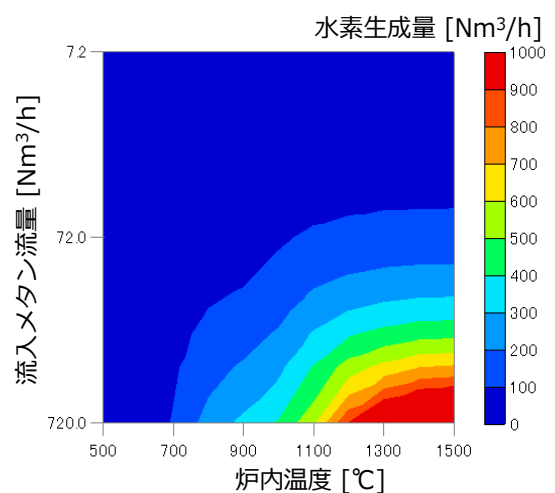


図 16 水素生成流量マップ

3.2. 成果の意義

水素社会へ移行する過渡期の技術として、メタンから二酸化炭素を発生させずに水素を製造する技術が望まれている。本研究調査により、800℃で水素濃度 50%を達成する金属板触媒を開発し、高純度の炭素を生成する技術の開発に成功した。金属板触媒にて反応炉内に構造体を形成することにより、反応炉運転中でも、固体の生成炭素を離脱させ排出するシステム等は、PCT/JP2019/35790 として出願済みであり、世界初の技術である。本研究で開発した金属板触媒も、従来にない新規性の高いものである。

本技術を活用すれば、既存の都市ガス導管網、LNG チェーンを利用して、需要地で水素を製造することが可能となるため、新たな水素供給インフラの整備が不要となり、社会インフラ投資を抑えつつ分散水素社会を漸進的に実現できる。さらに、本水素製造装置は小型でDSS運転に対応できるため、小規模水素需要家にも導入可能である。

化石燃料利用から水素利用への移行時に問題となる経済性の点からも、生成炭素の高付加価値化は必須である。本技術による水素製造時の副産物である生成炭素は、純度が高く固体の状態での排出されるため、工業用材料として利用価値が高く、経済性を大きく改善する。また、バイオガスを原料にすることにより、カーボンマイナスを実現できる。

3.3. 成果の最終目標の達成可能性

本調査研究により、メタンから水素を製造する装置の目処が立った。本方式による水素製造装置は構成が簡素であり、小型化に適すること、DDS 運転に向いていること、既存の社会インフラを利用できることから、オンサイト型水素利用システムに適用できると考えられる。これにより、水素社会の実現を漸進的に進めることができる。

さらに、生成炭素の有価値物としての利用が実現できれば、熱利用においてもメタンを直接燃焼するよりも経済的かつ環境的に有利となり、普及が進むと思われる。

商品化に向けた課題としては、反応炉を構成するバルブ等機器は過酷な雰囲気（高温、炭素粉、水素）中で、長時間安定して作動しなければならない。そこで、小型反応炉で耐久試験を行い、問題点を顕在化し、技術課題を抽出する必要がある。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

化石燃料を利用している産業向けに、本事業で開発した装置から得られる水素濃度 50%の混合ガスを販売する。この混合ガスは、メタン直接燃焼時と同一の熱量を発生させた場合において、CO₂ を約 24%削減できる。水素ガスのコストアップ分は、副産物の生成炭素の販売で補う。

水素分離装置の開発を行うことで、熱利用分野への導入に続き、オンサイト型水素ステーション等の純水素利用分野に導入する。本事業で開発したメタン直接分解装置は生成ガス中に CO を含まないため、水素を分離する PSA を小型・簡素化できる。

5. 特許・研究発表等

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2019/10/23	特願 2019-192383	炭化水素分解用触媒	株式会社伊原工業
2	2020/4/1	特願 2020-065450	炭化水素分解用触媒	株式会社伊原工業

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2020/09/24	化学工学会 第51回秋季大会	メタン熱分解を用いた水素製造装置実用化の検討	武藤智大、朝原誠、宮坂武志、安里勝雄、越光男

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：⑤－3を参照

課題番号：⑤－４

研究開発名：「水素利用等先導研究開発事業／炭化水素等を活用した二酸化炭素を排出しない水素製造技術調査／メタンの熱分解による水素製造技術の研究開発」

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、株式会社 IHI、国立大学法人京都大学

1. 研究開発概要

低炭素化社会の実現に向け、二酸化炭素を排出しない水素製造技術として、触媒を用いた熱化学的メタン分解 ($\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$) による水素製造プロセスの開発を行う。メタン熱分解技術の社会実装を推進するため、特に重要な開発要素に注目しながら、実用化に向けて必要となる基盤技術を開発する。

2. 研究開発目標

メタンを水素と固体炭素に分解することで、二酸化炭素を排出しない水素製造プロセスの構築を目指し、それを実現するための触媒の探索及び当該触媒を適用した高効率水素製造プロセスの基本設計に資する実験的・理論的研究を行う。要素技術となる触媒の開発、反応器形式の探索、炭素の生成特性評価に取り組む。また、触媒反応で生成する固体炭素の物性評価・安全性評価を行い、利活用の可能性について検討する。さらに、提案するメタン分解プロセスの熱・物質マネジメント検討を行い、プロセスの技術成立性を評価する。加えて当該技術の社会実装のためのシナリオ検討を行うことを目指し、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、「産総研」とする）、株式会社 IHI（以下、「IHI」とする）、国立大学法人京都大学（以下、「京大」とする）が連携して、下記の研究調査を行う。

- ① メタン熱分解 CO_2 フリー水素製造に適した新規触媒の開発（産総研、IHI）
- ② 炭素回収型メタン熱分解を実現する反応器およびシステムに関する具体的検討（産総研、IHI、京大）
- ③ 固体炭素の有効利用に向けた調査、分析、評価（産総研）
- ④ 提案技術の社会導入を想定した固体炭素の安全性評価（産総研）
- ⑤ メタン分解による CO_2 フリー水素製造プロセス構築のための効率および熱・物質マネジメント検討（京大）
- ⑥ 新規プロセスの技術成立性および事業性検討（IHI）
- ⑦ 提案技術の社会実装のためのシナリオ策定・開発計画検討（産総研）

3. 研究開発成果

3.1 研究開発項目別成果及び達成度

(1) メタン熱分解 CO_2 フリー水素製造に適した新規触媒の開発

CO_2 フリー水素製造に適した触媒を探索するべく、種々の方法および条件で調製した触媒を用いたメタン熱分解実験を異なる条件で行い、その性能を評価した。また、固体炭素回収型メタ

ン熱分解プロセスに適応可能な触媒について検討を行った。

図1に、開発した触媒の活性評価結果の一例を示す。流通式反応器を用いて種々の方法で調製した触媒を用いてメタン熱分解反応を行い、各反応条件における基本的な性能を把握した。この中で、固体炭素の生成および成長に対し、適した触媒担持量・調製方法、また反応における温度・流量等反応条件について明らかにするとともに、目標（反応温度 800~900°C、メタン転換率 80%以上、炭素生成量 10倍以上-重量比）達成に資する成果を得ている。また、固体炭素回収型プロセスの開発に向けて、非多孔質ジルコニアビーズを用いた触媒を開発した。本触媒を用いることで、マイルドな酸化処理と磁石分離方法を用いて、触媒担体と炭素の分離及び担体の回収が可能であり、さらに、回収した触媒担体を Fe で再コーティングすることで触媒担体もリサイクルできることを見出した（図2）。

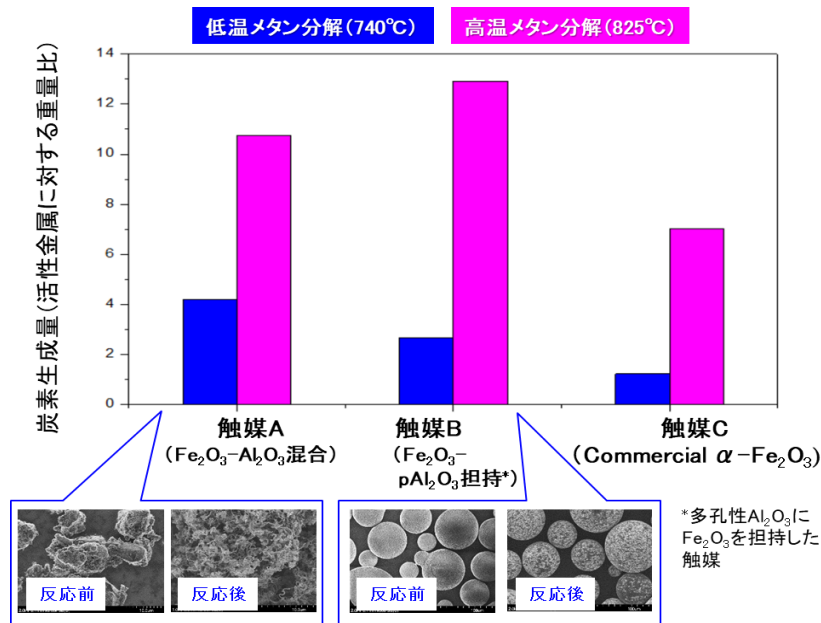


図1 開発した触媒の活性評価の一例

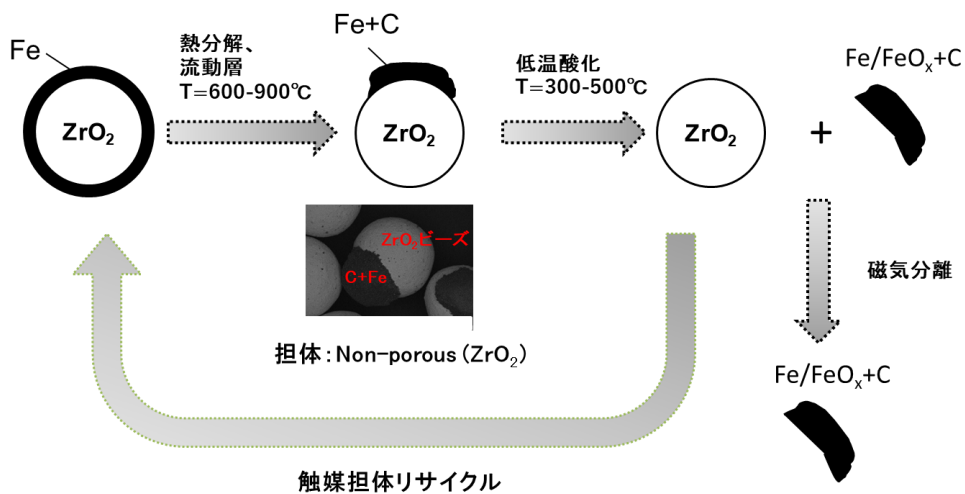


図2 触媒担体と固体炭素の分離及び担体の回収方法検討

(2) 炭素回収型メタン熱分解を実現する反応器およびシステムに関する具体的検討

反応器およびシステムに関する検討を行うべく、一般的に用いられる気固接触反応器を用いたメタン熱分解実験を実施し、各反応器におけるメタン熱分解特性および炭素成長挙動と操作条件の関係を調査した。

固体燃料の焼却・ガス化やセメント焼成などで実績を有する回転炉型反応器（ロータリーキルン）を用いてメタン熱分解実験を行った。図3には、開発した触媒A（図1参照）を用いた評価結果を示す。その結果、固体炭素生成速度は、7g/h (0.1MPa)、16 g/h (0.3 MPa)、23 g/h (0.5 MPa) であり、加圧条件の方がより生成速度は速くなることが明らかとなった。一方で、炭素の分離操作と加熱方法に関する課題も見出された。

合わせて、温度・反応雰囲気均一性やスケールアップ性等においてより優位性を有する流動層反応器について評価を行った。産総研において、開発した触媒を用いて各温度、圧力においてメタン熱分解反応を行い、反応モデルを用いた解析により、反応速度定数を算出するとともに、その成果を国際誌で公表した (Chemical Engineering Journal 398 (2020) 125612)。さらに IHI において、産総研で開発した触媒を用いた評価を行い、後述する項目(6)において試算の前提となる条件等を見出した。

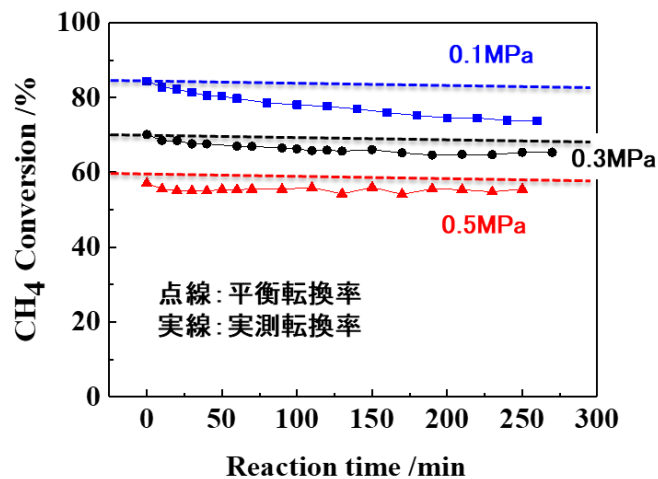


図3 ロータリーキルンを用いたメタン熱分解反応結果 (740°C)

(3) 固体炭素の有効利用に向けた調査、分析、評価

メタン熱分解水素製造に伴って製造される固体炭素の有効利用検討について、既存の産業素材であるカーボンブラックの部分的な代替に向けた市場調査および経済性評価を行った。また、メタン熱分解炭素の構造材料等としての利用可能性検討について、複合材料を作製し、特性評価を行うことで、今後の見通しを明らかにすべく取り組んだ。

カーボンブラックの国内生産量は50-60万トン/年で安定しており、本研究開発で想定する中規模水素製造の際に併産される固体炭素量の10倍程度であることから、市場への参入可能性があることを確認した。また、国内市場は上位5社が占めており、そのうち3社のコスト構造評価を行い、メタン熱分解炭素の市場適合性に関する知見を得た。

図4に示すようにメタン熱分解炭素を強化用フィラーとする複合材料用途の開発を進めた。

抄紙法によりフィルムを製造してプリプレグ（中間基材）とし、積層型の熱硬化性樹脂複合材料を作製し、強度を評価した。その結果、2019年度目標とした性能（曲げ強度 150MPa）を有するガラス繊維強化複合材料の作製が可能であることを明らかにするとともに、最終目標（曲げ強度 400MPa）達成に向けた課題・見通しを得た。さらに、セメント補強材としての検討を行い、熱分解炭素/触媒複合体の混合により、普通コンクリートと同等の強度が得られることを見出した。

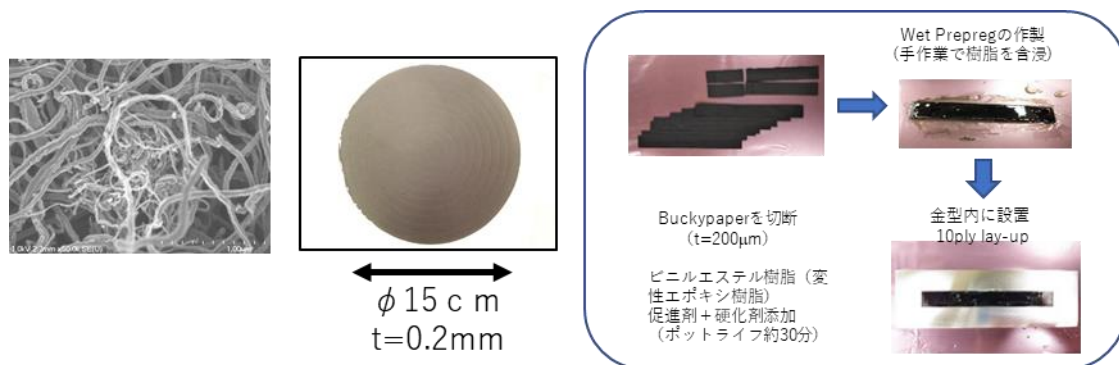


図4 メタン熱分解炭素を用いた複合材料の開発

(4) 提案技術の社会導入を想定した固体炭素の安全性評価

製造される固体炭素の安全性について、回収・加工・利用も含めたライフサイクル全体で、ヒト健康リスクが懸念レベルか否かを明らかにし、自主管理や規制に向けたリスク管理手法を提示することを目標として、取り組んだ。ナノ物質に対応する世界の曝露モデルを、労働環境と一般環境で各十個程度整理し、固体炭素の曝露解析に有効なパラメータ等を取得した。次に、メタン熱分解事業所の労働者のヒト健康リスクについて、リスク優先順位付けツールを用いてスクリーニング評価を行った結果、リスク優先度中の判定となり、プラント設計・構築時に、取扱い作業や作業環境等での配慮による曝露低減を図ることが重要であることを明らかにした。

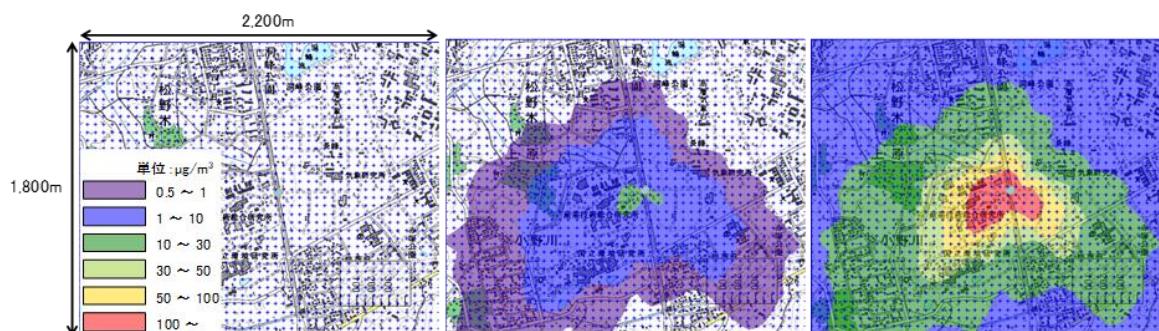


図5 メタン熱分解事業所周辺での固体炭素の大気拡散シミュレーション結果
(HEPA フィルター有、左：小規模事業所、中央：中規模事業所、右：大規模事業所)

図5に事業所周辺の住民のヒト健康リスクについて、低煙源工場拡散モデル（METI-LIS）を用いて、メタン熱分解事業所周辺の大気拡散シミュレーションを行った結果を示す。小・中

規模事業所の周辺ではHEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) フィルター設置によって、周辺大気中濃度がカーボンナノチューブ(CNT)の許容曝露濃度(30 μ g/m³, 産総研, 2012)を下回り、周辺住民のリスクを十分に低減できる。大規模事業所では500m周辺まで許容濃度を超える可能性があるが、最悪でも超過範囲が工場敷地内に留まることが明らかとなった。

(5) メタン分解によるCO₂フリー水素製造プロセス構築のための効率および熱・物質マネジメント検討

本事業で提案するメタン熱分解による水素製造プロセスは、吸熱かつ高温反応であり、熱回収を行わない場合、多量の熱損失を製品である水素の燃焼で賄うことになる。よって、熱・物質マネジメントを検討し、効率的なプロセスを構築することが必要となる。本項目では、熱的自立操作のためにプロセス内の熱交換スキームを検討し、プロセスシミュレータを用いて、水素損失率(メタン中の水素のうち、プロセス内で消費される割合)を試算した。

メタン分解率100%は高い反応温度域と固気二相流である(熱交換が難しい)ことから困難と判断し、950 $^{\circ}$ C以下で水素を含めてリサイクルするプロセスの提案を行った。図6に、バイオガスなどの小規模メタン源を想定し、固気向流接触型反応器を含むメタン分解プロセスの効率化検討を行った結果を示す。水素回収率(R_{H_2})に対する、メタン転化率(x_{CH_4})、反応器入口でのCH₄/H₂(θ_A)および熱交換器における最小接近温度差(ΔT_{min})の影響について示したものである。反応率が高くなると、リサイクルされるガスの流量が少なくなることから R_{H_2} が高くなる傾向にある。この傾向は反応器形式によらないことから、流動媒体で熱供給が可能な流動層を用いることができれば、メタン転化率を高くできる可能性があるが、小規模プロセスに対し流動層の適用は容易ではない。 ΔT_{min} については、反応熱分は必ず供給する必要(理論回収率: 0.834)があることから、 $\Delta T_{min} = 10^{\circ}$ Cであれば、真の水素ロスは反応に必要な熱量の1/3程度に抑えることができ、 $\Delta T_{min} = 30^{\circ}$ Cでも $R_{H_2} = 0.7$ 以上となっている。以上のように、本提案システムにおける熱マネジメントの重要性とともに、水素損失率を30%以下にするプロセスの成立可能性について有益な知見を得た。

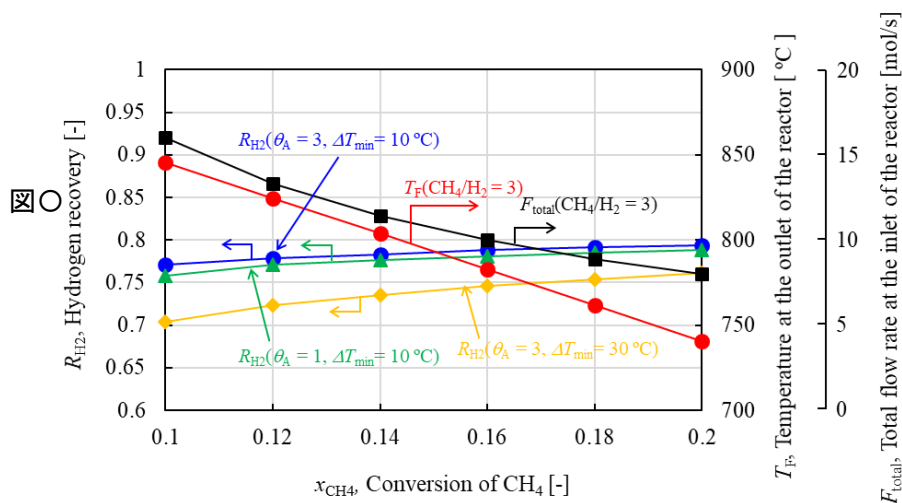


図6 メタン分解プロセスの効率化検討

(6) 新規プロセスの技術成立性および事業性検討

新しいメタン熱分解による水素製造プロセスの提案に向けては、熱分解反応器だけではなく、触媒再生、固気分離、熱供給など様々なエンジニアリングプロセスが必要となる。本項目では、プロセスフロー図を作成し、メタン熱分解プラント全体の概念設計を行った。プロセスにおける水素製造原価試算を行い、IRR10%以上を達成するために必要な条件を見出すことを目標として、検討を行った。

図7に、構築・検討を行った循環式流動層をベースとしたプロセス概要を示す。炭素価格0円/kgにおいて、水素製造原価30円/Nm³以下となる条件、また、IRR10%以上を達成するための条件を把握した。反応において供給するメタン濃度、加熱方式が重要となり、メタン濃度を80%以上とすることで、水素を用いた加熱の場合でも30円/Nm³以下が達成できることを明らかにした。さらに、水素製造原価に対して天然ガス価格が大きな影響を与えることを示した。

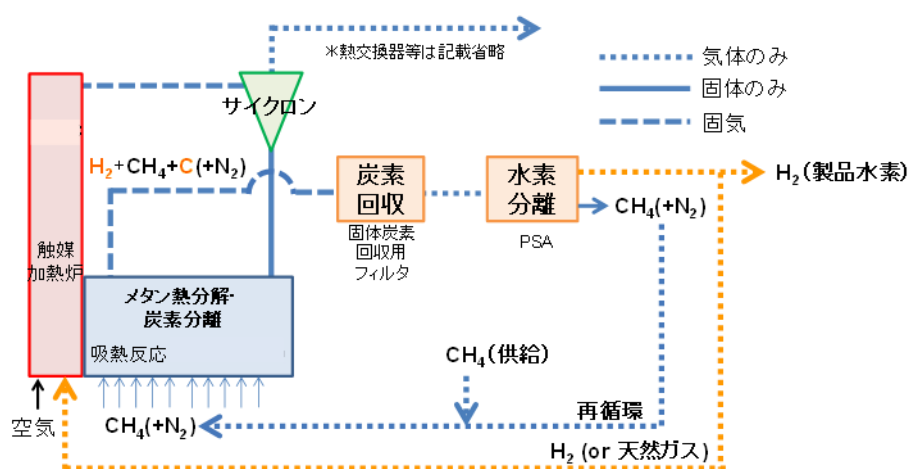


図7 循環式流動層をベースとしたプロセス概要

(7) 提案技術の社会実装のためのシナリオ策定・開発計画検討

これまでの報告の調査および成果を整理し、大規模利用、分散型利用において、シナリオ検討のために必要となる条件等を把握するとともに、本研究の各項目における成果を取り纏め、開発した水素製造システムの社会導入に向けたシナリオ検討を行うことを目標として、取り組んだ。

表1にこれまでの関連するプロジェクト例を示す。特に、豪州 Hazer 社および欧州 BASF・Linde・ThyssenKrupp 社による事業を中心に特許動向調査、また論文・学会発表調査も行い、これらの成果を特許出願にも繋げた。また、大規模・中規模・小規模を想定した検討を行った。大規模は火力発電、中規模は水素タウン、小規模はバイオガス利用を想定した規模感となり、社会導入における効果、項目(1)(2)(5)および(6)における成果等から、本事業では中規模および流動層反応器を用いた検討に重点をおいて進めることとした。

表 1 これまでの関連するプロジェクト例

プロジェクト	参画団体等	特徴
Nebraska Project	Monolith (米)	<ul style="list-style-type: none"> ・プラズマ熱分解 ・カーボンブラックの製造と製品化が主目的 ・水素は隣接する発電プラントにて燃焼・発電
Hazer Process	Hazer (豪)	<ul style="list-style-type: none"> ・流動層型反応器 ・触媒に安価な鉄鉱石を使用、電池グレードの炭素製品を目指す ・国内企業と水素製造に関する商業展開の覚書を締結
GtF&S Gas to Fluids and Solids	BASF, Linde, ThyssenKrupp	<ul style="list-style-type: none"> ・流動層型反応器 ・炭素は原料炭/燃料炭として使用、発生するCO₂を水素と反応させ合成ガスを製造
Methane Cracking	カールスルーエ工科大学ほか	<ul style="list-style-type: none"> ・熔融金属あるいは熔融塩を用いて加熱および熱分解を実施
SOLHYCARB	ETH (スイス), CNRS (仏)ほか	<ul style="list-style-type: none"> ・ソーラーリアクターの開発

3.2 成果の意義

(1) メタン熱分解 CO₂ フリー水素製造に適した新規触媒の開発

メタン熱分解触媒について、目標性能を有する触媒を開発した。流通式反応器を用いて、固体炭素の生成・製造に適した触媒および反応条件を見出すとともに、その成果を項目(2)に展開した。さらに、固体炭素回収型プロセスの開発に向けて、非多孔質ジルコニアビーズを用いることで、触媒担体と炭素の分離・回収および担体のリサイクルが可能であることを見出した。これは、これまでにはない新しい成果であり、特許出願を行った（特願 2020-054296）。

(2) 炭素回収型メタン熱分解を実現する反応器およびシステムに関する具体的検討

反応器として、回転炉型反応器（ロータリーキルン）および流動層反応器を用いてメタン熱分解反応を行い、それぞれの反応器における特徴や課題を明らかにした。この中で、流動層反応器がより適しているという方向性を見出し、これらの成果を項目(6)での検討に展開した。

(3) 固体炭素の有効利用に向けた調査、分析、評価

既存の産業素材であるカーボンブラックの部分的な代替に向けて調査・評価を行い、市場適合性に関する知見を得た。メタン熱分解炭素の構造材料等としての利用可能性について検討すべく、積層型の熱硬化樹脂複合材料を作製し、最終目標達成に向けた課題・見通しを得た。さらに、セメント補強材としての検討を行い、熱分解炭素/触媒複合体の混合により、普通コンクリートと同等の強度が得られることを見出した。

(4) 提案技術の社会導入を想定した固体炭素の安全性評価

製造される固体炭素の安全性評価について、ナノ物質に対応する世界の暴露モデルを適用することで、固体炭素の暴露解析手法を構築した。メタン熱分解事業所周辺の大気拡散シミュレーションにより、フィルター設置による局所排気対策で、十分にリスク低減が図れる可能性を示した。

(5) メタン分解による CO₂ フリー水素製造プロセス構築のための効率および熱・物質マネジメント検討

プロセスシミュレータを用いた熱・物質マネジメント検討により、950℃以下で水素を含めてリサイクルするプロセスの提案を行った。流動媒体で熱供給が可能な流動層を用いることができれば、メタン転化率を高くすることができるが、小規模・熱自立型プロセスに対し流動層の

適用は難しいことから、中規模・熱回収型システムを中心にエンジニアリングの面からの検討を行っていく方向とし、その成果を他項目へも展開した。

(6) 新規プロセスの技術成立性および事業性検討

メタン熱分解プラント全体の概念設計に取り組み、循環式流動層をベースとしたシステムの構築・検討を行った。その結果、炭素価格 0 円/kg でも水素製造原価 30 円/Nm³ 以下、また、IRR10%以上を達成するための条件を見出した。本システムは、主に海外企業等において開発が進められている競合技術に対し、加熱、熱源、ガス再循環などにおいて新規性・優位性を有するものであり、特許出願を行った（特願 2020-049291）。

(7) 提案技術の社会実装のためのシナリオ策定・開発計画検討

特許動向などこれまでの報告の調査、成果の整理を行い、特許出願に繋げた。また、本事業の各項目における成果を取り纏めるとともに、社会導入に向けたシナリオ検討を行い、中規模および流動層反応器を用いた検討に重点をおいて進めることとした。

3.3 成果の最終目標の達成可能性

メタン熱分解による水素製造に適した触媒および反応器開発において、開発した触媒の流動層反応器での評価・検討を引き続き行い、炭素分離が可能な条件等を明確化することで、他項目への展開も含め、最終目標の達成が可能となる。

固体炭素の有効利用および安全性評価・検討において、項目(1)(2)で得られた成果により、触媒金属の含有など種々の熱分解炭素に対する評価・検討を行うとともに、対象法令等の扱い・見直しにむけた提案内容を示していく。

新規プロセスの効率および熱・物質マネジメント検討、また技術成立性および事業性検討において、水素分離システムも含めた総合的な検討における熱交換スキームの最適化、またワンパス型システムを含むプロセスの最適化を行うことで、最終目標の達成が可能となる。

シナリオ検討において、炭素価格を 0 円/kg とした試算が可能であったことから、炭素材料利用としてこれまで想定していた用途のほか、鉄鋼利用（コークス代替）や埋設を含めた検討を実施するとともに、海外を含めた導入可能性検討を行うことで、調査研究として今後に展開可能な成果として取り纏めていく。

3. 成果の実用化に向けた取組及び見直しについて

本事業は、現時点で実用化されていない革新的な技術の開発に関する調査事業であり、技術の社会導入に向けて、触媒開発等要素技術からシステム、シナリオに至るトータルでの研究開発を実施している。従って、成果の実用化に向けては、まず、要素技術に関する成果を活かしながらシステム・プラント概念の提案を行うとともに、ラボレベルでの小型反応装置を用いた評価を実施していく必要がある。その成果を元に、反応器だけではなく、炭素分離、水素分離および熱供給システムなどを含めた全体システムを構築し、評価を行う。その後、スケールアップに向けて、ベンチ・パイロットプラントを用いた評価を行い、プラントとしての性能を把握することで、事業化に向けた検討が可能となる。

5. 特許・研究発表等

－特許等－

No.	出願日	出願番号	発明の名称	委託機関名
1	2020年3月19日	特願 2020-049291	水素製造装置	株式会社 IHI
2	2020年3月25日	特願 2020-054296	触媒担体と固体炭素の分離及び担体の回収方法	産業技術総合研究所

－研究発表・講演、文献等、その他－

No.	年月	発表先	題目	発表者
1	2019年12月13日	日本エネルギー学会関西支部第64回研究発表会	CO ₂ を原料としたバイオガスからのオレフィンの製造プロセスの設計	京都大学 中川 浩行
2	2020年2月19日	大阪科学技術センター地球環境技術推進懇談会	水素エネルギーに関する産総研での取り組み	産業技術総合研究所 高木 英行
3	2020年5月25日	Chemical Engineering Journal	Spray-dried Fe/Al ₂ O ₃ as a carbon carrier for CO _x -free hydrogen production via methane cracking in a fluidized bed process	産業技術総合研究所 Martin Keller、Akimitsu Matsumura、Atul Sharma

6. プロジェクト用語集

事業原簿本文のプロジェクト用語集 課題番号：⑤-4を参照