

水電解による水素製造技術～各種水電解法の基本・最新技術と世界の水素政策動向

Hydrogen Production Technologies by Water Electrolysis

- Basics and state-of-the-art technologies of various water electrolysis methods, and trends of global hydrogen policies

監修：森田敬愛

- 化石資源に依存しない「グリーン水素」製造を担う各種水電解技術の、基本から最新開発状況、世界中の水素関連政策動向までの全体像を俯瞰！
- 「技術編」では水電解技術の原理から、「アルカリ水電解（AWE）」「プロトン交換膜形水電解（PEMWE）」「アニオン交換膜形水電解（AEMWE）」「高温水蒸気電解（HTSE）」の各種材料技術や開発動向について論じる！
- 「政策・開発動向編」では日本国内から NEDO プロジェクト、米国・欧州・中国の政策、技術開発動向まで！
- 今後さらに発展していく水素ビジネス、水電解技術にむけて、基礎から現状までを俯瞰し、未来のビジネス参入を目指すことのできる必携の一冊！

＜発行要項＞

- 発行：2023年6月8日
- 監修：森田 敬愛
- 定価：本体（白黒） 99,000 円(税込)
本体+CD（カラー） 132,000 円(税込)
- 体裁：A4判・並製・本文 245 頁
- ISBN：978-4-910581-40-8 C3058

巻頭言

「全ての人々にとって住みやすく持続可能な将来を確保するための機会の窓が急速に閉じている（確信度が非常に高い）」。
これは、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が 2023 年 3 月 20 日に発表した第 6 次評価報告書統合報告書に関して、「政策決定者向け要約」の中に記述された一文である。さらに「この 10 年間に行う選択や実施する対策は、現在から数千年先まで影響を持つ（確信度が高い）」と同要約に記述されている。現在に至るまで地球温暖化対策として世界中で様々な施策が行われてきているが、さらに多くの対策を加速的に講じていかねばならない。地球温暖化対策としての温室効果ガス排出量削減を目指す中で、我が国を含め世界各国の政策動向の詳細は本文に譲るが、水素の需要が今後飛躍的に増加していくことは間違いない。化石資源に依存しない「グリーン水素」の製造を担う水電解技術は、ビジネスとしても今後大いに発展していくと期待される。以上のような状況の中で、水電解分野の全体像を俯瞰したいというニーズに対して、当該分野に特化した専門書が現状ではほとんど見当たらない。このような状況に鑑みて本書は、各種水電解技術の基本から最新の開発状況、さらに世界中の水素関連政策動向を 1 冊で俯瞰できる書籍を目指して企画された。

本書は、前半の「技術編」と後半の「政策・開発動向編」で構成されている。「技術編」ではまず「水電解の原理」にて、熱力学や電気化学の基本を踏まえて水電解技術の原理が解説されている。その後には「アルカリ水電解（AWE）」「プロトン交換膜形水電解（PEMWE）」「アニオン交換膜形水電解（AEMWE）」「高温水蒸気電解（HTSE）」の章が続いており、各種水電解技術の基本から技術開発の現状までを本書 1 冊で俯瞰できる内容となっている。後半の「政策・開発動向編」では、初めの「日本国内の動向」において、グリーン水素関連の国内政策動向全般および NEDO プロジェクトでの技術開発動向を把握することができる。その後の章では海外の動向に視点を移し、水素に関連する国際組織の動向、そして「米国」「欧州」

「中国」の動向について解説されている。今後の世界的なグリーン水素に関連する政策や技術動向を注視していくために、本書を活用して現状を理解することに役立てていただきたい。なお、本書での各種水電解方式の日本語表記に関して、各種燃料電池の方式が JIS において「形」を付ける表記になっていることを鑑み、本書の各章のタイトルでは「プロトン交換膜形水電解」「アニオン交換膜形水電解」のように「形」を付けている。ただし、現状では水電解に関しては「形」を付けるかどうかの統一基準がなく、本文の中で執筆者によっては「形」を付けない表記となっている。表記に揺れがあることをご容赦いただきたい。

本書が無事刊行できることになったのは、何よりもご協力いただいた全執筆者の皆様のおかげである。日々の忙しい業務の中で本書の執筆を受けてくださったすべての方々にご心より感謝申し上げたい。なお、本書の監修については株式会社シーエムシー・リサーチの坂田直也氏から筆者に依頼があった。このような貴重な機会を筆者に下さった坂田氏に感謝申し上げます。

水電解技術の基本から現状までを俯瞰したい研究者・技術者だけでなく、今後の水素ビジネスを検討しているすべての方々に是非本書を手にとっていただきたい。水電解分野へ多くの方が様々な形で新たに参入し、当該分野がますます発展していくことに本書が役立てば幸いである。今後 10 年間でさらに発展していく水電解技術が、「すべての人々にとって住みやすく持続可能な将来」の実現に大きく寄与することを確信しつつ巻頭言としたい。

敬愛技術士事務所 森田敬愛

注文書		メルマガ登録	登録済み	登録希望	お申込み・お問合せ
品名	水電解による水素製造技術 ～各種水電解法の基本・最新技術と 世界の水素政策動向	価格	本体 90,000 円 (税込 99,000 円) 本体+CD 120,000 円 (税込 132,000 円) ※メルマガ会員 は定価の 10%OFF		
会社名		TEL			
部課名		FAX			
お名前		E-mail			
住所	〒				

*書籍はご注文を受けた翌営業日以降順次発送いたします。請求書は別途送付いたします。*お支払いは請求書指定口座に納品日の翌月末日までに振り込みをお願いします。

辻 悦司	鳥取大学 工学部 化学バイオ系学科 准教授	伊藤 博	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 研究グループ長
八木政行	新潟大学 自然科学系 教授	菅原勇貴	東京工業大学 科学技術創成研究院 化学生命科学研究所 助教
Nick Valckx	Agfa Gevaert NV, Mortsel, Belgium	柿沼克良	山梨大学 水素・燃料電池ナノ材料研究センター セラミック研究部門 教授
Hanne Verwaest	Agfa Gevaert NV, Mortsel, Belgium	史 国玉	山梨大学 水素・燃料電池ナノ材料研究センター セラミック研究部門 助教
Elke Dom	Agfa Gevaert NV, Mortsel, Belgium	宮西将史	東京工業大学 科学技術創成研究院 化学生命科学研究所 特任准教授
Raymond Thuer	Agfa Gevaert NV, Mortsel, Belgium	富田有義	東京工業大学 物質理工学院応用化学系 教授
Ruben De Bruycker	Agfa Gevaert NV, Mortsel, Belgium	一三違祐	東京工業大学 物質理工学院応用化学系 助教
内野陽介	旭化成株式会社 環境ソリューション事業本部 グリーンソリューションプロジェクト クリーンエネルギープロジェクト 電解システム開発 Gr 長, リードエキスパート (電気化学)	宮田佳典	株式会社日本触媒 コーポレート研究本部 研究センター アシスタントマネージャー
藤田泰宏	旭化成株式会社 環境ソリューション事業本部 グリーンソリューションプロジェクト クリーンエネルギープロジェクト 設計エンジニア Gr 長, エキスパート (電気化学)	石原達己	九州大学大学院工学研究院 応用化学部門 教授
松澤幸一	横浜国立大学大学院工学研究院 准教授	長田憲和	東芝エネルギーシステムズ株式会社 エネルギーシステム技術開発センター 化学技術開発部 エキスパート
黒木秀記	東京工業大学 科学技術創成研究院 化学生命科学研究所 准教授	松本広重	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 エネルギー変換科学ユニット 教授
山口猛央	東京工業大学 科学技術創成研究院 化学生命科学研究所 教授	Leonard Kwati	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 エネルギー変換科学ユニット 助教
早部慎太郎	AGC 株式会社 化学品カンパニー 企画部 市場戦略室 水素・エネルギー材料開発グループ 主任	Bhuvaneshwari Manivannan	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 エネルギー変換科学ユニット 学術研究員
奥山 匠	AGC 株式会社 技術本部 材料融合研究所 有機材料部 有機化学チーム 主任研究員	Veeramani Vedyappan	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 エネルギー変換科学ユニット 学術研究員
角倉康介	AGC 株式会社 化学品カンパニー 企画部 市場戦略室 水素・エネルギー材料開発グループ グループリーダー	西脇文男	武蔵野大学 政治経済研究所 客員教授
西尾拓久央	AGC 株式会社 化学品カンパニー 基盤技術部 機能膜素材開発室 室長	石本祐樹	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 副部長 主管研究員
中尾末貴	株式会社神鋼環境ソリューション 新規事業推進部 水素事業推進室 課長	九田昭輝	株式会社テクノバ エネルギー研究部 研究第3グループ 統括主査
吉永典裕	株式会社東芝 研究開発センター スペシャリスト	原 大周	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ワシントン事務所 主幹
菅野義経	株式会社東芝 研究開発センター スペシャリスト	若林節子	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 欧州事務所 主幹
霜島宗一郎	東芝エネルギーシステムズ株式会社 エネルギーアグリゲーション事業部 エキスパート	山下恭平	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 国際部 主査
針生栄次	株式会社本田技術研究所 先進パワーユニット・エネルギー研究所 先進エネルギー研究ドメイン チーフエンジニア		
橋本 勝	東レ株式会社 HS 事業部門 主任部員		
出原大輔	東レ株式会社 HS 事業部門 主幹		

構成および内容 (1)

第 I 編 技術編

第 1 章 水電解の原理

- はじめに
- 水の電気分解反応 (水電解)
- 水電解に必要な熱力学的エネルギー
- 水電解に必要な電気化学的エネルギー
 - 理論電解電圧と熱的平衡電圧
 - 実際の電解電圧
 - 効率
 - 性能向上の指針
- 反応機構
 - 水素発生反応機構
 - 酸素発生反応
- おわりに

辻 悦司

第 2 章 アルカリ水電解

(AWE : Alkaline Water Electrolysis)

第 1 節 アルカリ水電解の基本、特徴

- はじめに
- アルカリ水電解の歴史
- 特徴
- コスト
- おわりに

辻 悦司

第 2 節 電極触媒

第 1 項 全般、金属酸化物系

- はじめに
- カソード触媒
- アノード触媒①: ペロブスカイト型複合酸化物
- アノード触媒②: ブラウンミラーライト型複合酸化物
- おわりに

辻 悦司

第 2 項 NiSx/C3N4 ナノワイヤー酸素発生触媒

- はじめに
- NiSx/C3N4 触媒の合成と構造
- NiSx/C3N4 触媒の酸素発生アノード特性
- NiSx/C3N4 酸素発生アノードを用いた水電解実証実験

八木政行

Chapter 3

Agfa's ZIRFON UTP 220 separator for the production of green hydrogen

Nick Valckx, Hanne Verwaest, Elke Dom, Raymond Thuer, Ruben De Bruycker

- ABSTRACT
- THE ZIRFON SEPARATOR

- Width needed by the market
- 400% higher efficiency
- Lower cost
- Excellent gas purity
- Dispersion preparation
- Mechanical properties
- Sustainable production
- CONCLUSIONS
 - Unlocking the full potential of H2 thanks to cost reduction.
 - Sustainable production of green hydrogen
 - Sustainable production of ZIRFON

第 4 節 旭化成の水電解装置の現状と課題

内野陽介, 藤田泰宏

- はじめに
- アルカリ水電解システムの要素技術開発
 - 通電停止に伴う電力原単位上昇の抑制技術
 - 変動運転に伴う圧力変動の抑制技術
- アルカリ水電解システムの実証試験
 - 大型電解槽実証試験
 - ALIGN-CCUS/TAKE-OFF プロジェクト
 - 福島水素エネルギー研究フィールド
- アルカリ水電解システムの技術課題と今後の展望
 - 技術課題
 - 今後の展望
- おわりに

第 3 章 プロトン交換膜形水電解

(PEMWE : Proton Exchange Membrane Water Electrolysis)

第 1 節 PEM 形水電解の基本、特徴

- はじめに
- PEM 形水電解の特徴と現状
- 今後の PEM 形水電解

松澤幸一

第 2 節 酸素発生触媒の高性能化に向けた Ir ナノ粒子連結触媒の開発

黒木秀記, 山口猛央

- はじめに
- 酸素発生反応用 Ir ナノ粒子連結触媒の開発
- まとめと今後の展望

第 3 節 フッ素系電解質膜

早部慎太郎, 奥山 匠, 角倉康介, 西尾拓久央

- はじめに
- パーフルオロスルホン酸ポリマー
- イオン交換容量が大きいポリマーを用いる事による膜性能の向上
- PEM 形水電解中の膜の劣化機構

5 電解質膜の更なる化学耐久性向上

6 おわりに

第 4 節 水電解装置の現状と課題

第 1 項 PEM 水電解装置の現状

中尾末貴

- はじめに
- 水素の利用
 - 水素の用途
 - 水素の供給方式
- PEM 水電解
 - PEM 水電解の原理・特長
 - PEM 水電解装置の概略構成と基本制御
- PEM 水電解装置の製品例と適用分野

第 2 項 PEM 水電解 MEA の現状と課題

吉永典裕, 菅野義経, 霜島宗一郎

- はじめに
- PEM 水電解セルおよび MEA の構成
- スパッタリング法による触媒層形成技術
- スパッタリング法による電極作製方法および水電解効率の比較
- 粉末触媒との比較
- 耐久性評価
- 水素リーク抑制技術
- スパッタ電極大型化技術
- おわりに

第 3 項 高圧水電解技術の原理と特徴

針生栄次

- はじめに
- 差圧式高圧水電解の原理
 - 基本原理
 - 技術的特徴
- 高圧水電解スタック
 - 技術的課題
 - 基本セル構成
 - 2.1 耐圧, 差圧保持構造
 - 2.2 気密構造
 - 電解性能評価
- 高圧水電解システム
 - 製造される水素の特徴
 - 基本システム構成
- 高圧水電解システムを適用した水素製造装置
- おわりに

第 4 項

水素社会実現に向けた東シの取り組み—CO2 フリーの水素社会構築を目指した P2G システム技術開発—

橋本 勝, 出原大輔

- 水素社会実現に向けた東シの取り組み

構成および内容(2)

- 2 東レ独自の炭化水素系 (HC) 電解質膜
- 3 CO₂ フリーの水素社会構築を目指した P2G システム技術開発 (東レ, 山梨県, 東京電力 HD の 3 者共同研究)
- 3.1 米倉山太陽光発電所 (電力貯蔵技術研究サイト)
- 3.2 Power to Gas の「やまなしモデル」
- 3.3 やまなしハイδροジェンカンパニー (YHC)
- 3.4 グリーンイノベーション基金事業
- 4 2050 年カーボンニュートラルに向けて

第4章 アニオン交換膜形水電解 (AEMWE : Anion Exchange Membrane Water Electrolysis)

第1節 AEM 形水電解の基本と特徴

伊藤 博

- 1 はじめに
- 2 AEM 形水電解の原理と特徴
- 3 AEM 形水電解セル構成部材と電解液供給方法
 - 3.1 アニオン交換膜
 - 3.2 水素発生電極 (カソード)
 - 3.3 酸素発生電極 (アノード)
 - 3.4 電解液供給方法
- 4 まとめ

第2節 電極触媒

第1項 アニオン交換膜形水電解アノード反応に用いる高性能電極触媒の設計論

菅原勇貴, 山口猛央

- 1 はじめに
- 2 結晶の高次構造に着目した水電解アノード反応用コバルト-マンガン複合酸化物触媒の設計
 - 2.1 アルカリ水電解用卑金属酸化物触媒の研究動向
 - 2.2 コバルト-マンガン複合酸化物のアノード触媒活性に対する高次構造依存性の調査
 - 2.3 層状コバルト-マンガン複合酸化物微粒子のグラフェン上での直接成長による高性能化
- 3 結晶構造に基づく鉄系複合酸化物型触媒の設計論の提案と実験・計算・データを活用した高性能触媒の開発
 - 3.1 鉄系複合酸化物触媒の結晶構造と水電解アノード反応活性の間に眠る法則の発見
 - 3.2 触媒作用のメカニズムの切り替えによる鉄系酸化物触媒の高性能化
- 4 おわりに

第2項 アニオン交換膜形水電解用アノード触媒の開発

柿沼克良, 史 国玉

- 1 はじめに
- 2 NiCo 触媒の結晶構造と微細構造
- 3 NiCo 触媒の電子状態
- 4 NiCo 触媒の電気化学的特性
- 5 おわりに

第3節 電解質膜

第1項 高耐久性アニオン伝導膜の開発とアニオン交換膜型水電解への展開

宮西将史, 山口猛央

- 1 水電解を用いたグリーン水素の製造
- 2 水電解によるグリーン水素の製造手法とその特徴
- 3 アニオン伝導膜の化学耐久性
- 4 芳香族アニオン伝導膜のアルカリ劣化機構の解析
- 5 高耐久性エーテルフリー型芳香族アニオン伝導膜の開発
- 6 エーテルフリー型芳香族アニオン伝導膜を用いたアルカリ水電解セルの開発
- 7 まとめ

第2項 優れた耐アルカリ性をもつカチオン官能基の設計とこれに基づく高ロバスト性アニオン交換膜材料の設計・合成

富田育義, 一三遠祐, 宮田佳典

- 1 はじめに
- 2 カチオンの設計・合成
- 3 高分子化技術
- 4 成膜・評価
- 5 おわりに

第4節 水電解装置コスト

伊藤 博

- 1 はじめに
- 2 水電解システム仕様と前提条件
- 3 PEM 形および AEM 形水電解システムコスト解析
 - 3.1 セル・スタック製造コスト
 - 3.1.1 Catalyst coated membrane (CCM)
 - 3.1.2 Porous transport layer (PTL)
 - 3.1.3 シール・フレーム
 - 3.1.4 BPP および締結板
 - 3.1.5 スタック組立
 - 3.2 BOP コスト
 - 3.3 設置・導入コスト
- 4 システムコスト試算結果
- 5 まとめ

第5章 高温水蒸気電解

(HTSE : High Temperature Steam Electrolysis)

第1節 高温水蒸気電解の基本, 特徴

石原達己

- 1 はじめに
- 2 水蒸気電解の特徴
- 3 水蒸気電解セルの課題
- 4 おわりに

第2節

固体酸化物形電解セル (SOEC : Solid Oxide Electrolysis Cell) の基本, 特徴, 可逆型

石原達己

- 1 はじめに
- 2 酸化物形セルの構成材料
 - 2.1 酸化物電解質
 - 2.2 カソード触媒
 - 2.3 アノード触媒
 - 2.4 インターコネクター等
- 3 可逆型運転によるエネルギー貯蔵
- 4 おわりに

第3節

高温水蒸気電解システムの現状と課題

長田憲和

- 1 高温水蒸気電解の開発動向
- 2 高温水蒸気電解システムの課題
- 3 高温水蒸気電解システムの開発状況

第4節 プロトン伝導体を用いた水蒸気電解

松本広重, Leonard Kwati, Bhuvaneshwari Manivannan, Veeramani VEDIYAPPAN

- 1 はじめに
- 2 プロトン伝導性電解質
- 3 水蒸気電極
- 4 水素発生電極
- 5 水蒸気電解作動特性

第II編 政策・開発動向編

第1章 日本国内の動向

第1節 グリーン水素に関する政策

西脇文男

- 1 はじめに
- 2 将来の水素需要とコスト見通し
 - 2.1 将来の水素需要見通し
 - 2.2 グリーン水素の製造コスト見通し
- 3 世界で進むグリーン水素の大規模プロジェクト
 - 3.1 オーストラリア
 - 3.2 テリ
 - 3.3 UAE
- 4 日本のグリーン水素政策
 - 4.1 再エネ余剰電力の活用
 - 4.2 海外の低コストグリーン水素の輸入
 - 4.3 水電解技術開発への支援政策

第2節 NEDO プロジェクト

石本祐樹

- 1 水電解に関連する NEDO プロジェクトの概要
- 2 代表的なプロジェクト
 - 2.1 グリーンイノベーション基金
 - 2.2 水素利用等先端研究開発事業
 - 2.3 水素社会構築技術開発事業
- 3 まとめ

第2章 国際組織の動向

丸田昭輝

- 1 はじめに
- 2 IEA の 2050 年のネットゼロシナリオ
- 3 IRENA の Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor
- 4 Breakthrough Agenda
- 5 Breakthrough Energy の Catalyst Program
- 6 First Movers Coalition (FMC)
- 7 Hydrogen Council の「Hydrogen for Net Zero」レポート
- 8 まとめ

第3章 米国の動向

原 大周

- 1 長期的戦略
- 2 日本との関係
- 3 主な水素関連研究開発プログラム
- 4 連邦政府による主な水素関連政策
- 5 今後に向けて

第4章 欧州における水素関連政策動向

若林節子

- 1 欧州における水素関連政策
 - 1.1 グリーンディール政策
 - 1.2 欧州クリーン水素戦略
 - 1.3 ウクライナ侵攻を受け, 加速化する再エネ導入拡大と水素の利用
- 2 水素の導入拡大に向けた論点
 - 2.1 クリーン水素の定義
 - 2.2 域外からの水素調達
 - 2.3 欧州水素バックボーン
- 3 EU の戦略的自律に向けた取り組み
 - 3.1 欧州クリーン水素アライアンス
 - 3.2 欧州共通利益に適合する重要プロジェクト (IPCEI)
- 4 欧州クリーン水素パートナーシップ
 - 4.1 HEAVENN プロジェクト
 - 4.2 HYBRIT プロジェクト
- 5 おわりに

第5章 中国の動向

山下恭平

- 1 水素に関する政策動向
 - 1.1 中国の再生可能エネルギー
 - 1.2 中国の水素エネルギー産業の発展に関する中長期計画
 - 1.3 中国の燃料電池車と水素充填に関する奨励金政策
- 2 水電解の企業動向
 - 2.1 中国の水電解企業

お問い合わせ シーエムシー・リサーチ

TEL : 03-3293-7053 FAX : 03-3291-5789

URL : <https://cmcre.com>

E-mail : re@cmcre.com