

「カーボンニュートラルのための SOFC/SOEC 技術

～基礎・評価法から熱利用を含むシステム応用まで～

目 次

第1章 概要

第1節 SOFC/SOEC 技術の概要 川田達也

- 1 固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の特徴
 - 1.1 高温作動に起因する特徴
 - 1.2 セラミックス材料の使用に起因する特徴
 - 1.3 O₂-イオン導電体に起因する特徴
 - 1.4 H-SOFC (PCFC) の可能性
- 2 固体酸化物形電解セル (SOEC) の特徴
- 3 SOFC/SOEC の構成
 - 3.1 電解質
 - 3.2 燃料極
 - 3.3 空気極 (酸素極)
 - 3.4 インターコネクト材料
- 4 SOFC/SOEC のセルとスタックの形状
- 5 平板セル構造のバリエーションについて
 - 5.1 電解質支持セル
 - 5.2 燃料極支持セル
 - 5.3 金属支持セル

参考文献

第2節 SOFC 開発の歴史と SOEC への展開 横川晴美

- 1 はじめに
- 2 概観 世界と日本での SOFC 開発の特徴
 - 2.1 SOFC 技術開発の特徴—PEFC との比較
 - 2.2 SOFC スタックの特徴付けと歴史的な進展
 - 2.3 主な歴史的トピックス
 - 2.4 何が難しかったのか？
- 3 第1世代はセラミックスセル
 - 3.1 定置型中大容量 SOFC ハイブリッドシステムを目指した動き : Westinghouse の成功とインパクト
 - 3.2 WH セルのデメリット解析と一つの疑問
 - 3.3 WH セルの欠点克服法と国内企業の湿式法への適用
 - 3.4 Dornier SOEC からの出発
 - 3.5 三菱重工業長崎造船所 円筒横縞形セル
 - 3.6 Rolls Royce およびその他の筒状横縞形セル
 - 3.7 セラミックス平板形セルの基本的課題
 - 3.8 三菱重工業神戸造船所 MO
 - 3.9 村田製作所 平板形 2 種の開
 - 3.10 Dornier の SOFC 用平板形セル
 - 3.11 一括焼結セラミックスセル
 - 3.12 第一世代で明らかになった課題とその解決法
 - 3.12.1 材料コスト
 - 3.12.2 SOFC スタック製造法と材料両立性 (1) LSM-YSZ 界面
 - 3.12.3 SOFC スタック製造と材料両立性 (2) 酸化物 IC の選択
- 4 第2世代 金属インターワニクスの利用
 - 4.1 異なる二つの戦略
 - 4.2 Siemens の先見性と戦略性
 - 4.2.1 Hexis, Sunfire
 - 4.2.2 Bloom Energy (BE) の成功
 - 4.3 アノード支持セルの譜系
 - 4.3.1 Jülich のアノード支持セルの特徴
 - 4.3.2 Fuel cell energy (前 Versa Power, 元 Global

Thermoelectric)

- 4.3.3 SolydEra (前 SOFCPower, HTceramics)
- 4.3.4 Delphi, BMW
- 4.4 京セラ SOFC セル・スタックの革新性とインパクト
- 4.5 日本におけるアノード支持セル
- 5 第3世代 金属支持セル
- 6 トピックスとしての PCFC
- 7 SOFC の実用化
- 8 SOEC への展開
 - 8.1 電解における注意点
 - 8.2 各セルスタック構造の SOEC への適用
 - 8.2.1 第1世代：高温セラミックスセル
 - 8.2.2 第2世代：電解質支持形セル
 - 8.2.3 第2世代：燃料極支持形セル
 - 8.2.4 第3世代：金属支持セル形
- 9 おわりに

参考文献

第3節 水素エネルギー社会での SOFC/SOEC の位置付け 重松良祐, 立川雄也, 松崎良雄, 佐々木一成

- 1 カーボンニュートラル実現への固体酸化物形セルの重要性
- 2 水素社会における SOFC と SOEC のポテンシャル
- 3 固体酸化物形可逆セルのポテンシャル
 - 3.1 高いエネルギー出力密度に起因した柔軟なシステムサイズの選択が可能
 - 3.2 需要に応じた SOFC/SOEC モード選択により柔軟なデマンドリスピングスが可能
 - 3.3 高い往復効率での運用が可能
 - 3.3.1 コスト低減
 - 3.3.2 セルおよびシステム部材の劣化
- 4 炭化水素系燃料を用いた SOFC と水蒸気-二酸化炭素共電解 SOEC および二酸化炭素電解 SOEC のポテンシャル

参考文献

第4節 SOFC-SOEC の研究開発プロジェクト 堀田照久

- 1 はじめに
- 2 克服すべき技術課題の整理
- 3 SOFC-SOEC 研究開発プロジェクトの経緯と概要
 - 3.1 1990 年代から 2000 年の基盤・システム構築期
 - 3.2 2000 年台の燃料電池システム導入期
 - 3.3 2013 年度～2019 年度の NEDO プロジェクト
 - 3.4 2020 年度～2024 年度の NEDO プロジェクト
- 4 固体酸化物形電解セル (SOEC, 高温水蒸気電解セル) のプロジェクト
- 5 まとめ

参考文献

第5節 プロトン伝導セラミック燃料電池／電解セルの開発と課題 水谷安伸

- 1 はじめに
- 2 国内外における PCC 研究開発の現状
 - 2.1 国内 (NEDO プロジェクト)
 - 2.2 米国
 - 2.2.1 コロラド鉱山大学・フェュエルセルエナジー社

- 2.2.2 ジョージア工科大学・フィリップス
 2.2.3 HydroGEN コンソーシアム
 2.2.4 2024 年からの新規 DOE プロジェクト
 2.3 欧州
 2.3.1 ノルウェーを中心とした取り組み
 2.3.2 ドイツにおける金属支持プロトン伝導セル (MS-PCC) 開発
 3 PCEC (電解セル) への期待と課題
 3.1 PCEC のメリット・デメリット
 3.2 今後の課題
 4 おわりに
 参考文献

第2章 基礎

- 第1節 固体酸化物による発電・電解の原理と動作** 川田達也
 1 火力発電と燃料電池、電気分解
 2 SOFC/SOEC の動作原理
 3 SOC の起電力とガス分圧
 4 電圧 vs. 電流の挙動
 5 SOC の活性化過電圧の考え方
 6 多孔質電極の挙動
 7 電解質の電子輸送と酸素ポテンシャル分布
 脚注
 参考文献

- 第2節 電解質材料と酸化物イオン伝導体** 石原達己
 1 はじめに
 2 酸素イオン伝導性の発現
 3 新しい酸素イオン伝導体の動向
 4 高イオン伝導体 LaGaO₃ 系酸化物の薄膜化と電解セル
 5 おわりに
 参考文献

- 第3節 空気極材料の物性・輸送現象と反応** 高村 仁
 1 はじめに
 2 空気極材料の要件と反応
 2.1 空気極の要件
 2.2 空気極における表面交換反応
 3 混合導電性空気極材料
 3.1 ペロブスカイト型及び関連材料
 3.2 複合体型混合導電体
 4 空気極材料の特性と課題
 4.1 電極構造と特性
 4.2 空気極材料の課題と開発動向
 5 まとめ
 参考文献

- 第4節 燃料極材料の物性・微細構造と反応** 松井敏明
 1 燃料極反応
 2 燃料極材料に求められる条件
 3 燃料極材料の種類
 4 サーメット燃料極
 4.1 熱膨張挙動
 4.2 混合比と導電率の相関
 4.3 燃料極の微細構造と電極性能
 4.4 サーメットに用いる酸化物イオン伝導体と電極反応
 4.5 サーメット中の Ni / 酸化物イオン伝導体界面の安定

- 性
 5 その他の電極設計指針
 6 おわりに
 参考文献
- 第5節 インターコネクト用合金材料** 谷口俊輔
 1 SOFC スタックにおける合金インターネクター
 2 インターコネクト用合金材料の種類
 3 空気中での酸化と表面保護皮膜
 4 合金インターネクターからのクロム拡散の問題とコーティング
 5 燃料中での水蒸気酸化と表面保護皮膜の重要性
 6 FeCrAl 合金の表面アルミナ皮膜への導電性付与
 参考文献

- 第6節 SOFC/SOEC 材料の機械的特性** 佐藤一永
 1 様々な応力場
 2 脆性・延性とは
 3 欠陥許容性
 4 製品 (材料) ごとのバラツキ
 5 破壊判定基準
 6 部材内の化学ポテンシャル (酸素ポテンシャル) 分布と酸素不定非性による材料物性変化
 7 製造セルの微小変形評価
 8 製造セルの微小欠陥評価
 9 セルの応力変化のその場観察
 参考文献

- 第7節 SOFC/SOEC システムの熱設計** 鈴木 稔
 1 はじめに
 2 SOFC システムの発電効率の概観と基本事項
 2.1 SOFC システムの効率
 2.2 SOFC システムにおける炭化水素燃料の改質
 2.2.1 改質反応に用いる水 (水蒸気) の供給方法
 2.2.2 改質反応による吸熱の活用または悪影響の回避
 2.2.3 運用中の触媒上やセル燃料極側での炭素析出の防止
 3 いくつかの SOFC システムの構成と特徴
 3.1 天然ガス等炭化水素燃料 基本的な SOFC 発電システム構成
 3.2 天然ガス等炭化水素燃料 高温燃料リサイクル
 3.3 天然ガス等炭化水素燃料 加圧 SOFC/GT ハイブリッドシステム
 3.4 天然ガス等炭化水素燃料 常圧高発電効率構成
 3.5 水素での SOFC システム構成と効率
 4 SOEC システムの熱設計
 4.1 エンドサーマル (吸熱) 動作
 4.2 サーマルニュートラル (熱中立動作)
 4.3 エキソサーマル (発熱動作)
 参考文献

第3章 評価・解析

- 第1節 単セル試験法～直流・交流測定** 八代圭司
 1 はじめに
 2 単セル評価試験
 3 セル構造の影響
 4 劣化耐久試験
 5 ボタンセルによるセル材料特性の評価

- 6 三電極法による単セル評価
 - 7 交流インピーダンス法
 - 8 参照電極電位への電極配置・特性の影響
- 参考文献

第2節 緩和時間分布(DRT)法による電気化学インピーダンス解析 驚見裕史

- 1 DRT法の原理
 - 2 SOFC/SOECへのDRT法の応用
 - 3 おわりに
- 参考文献

第3節 スタック試験と性能評価 浅野浩一

- 1 スタック試験に関する留意事項
 - 2 試験における燃料ガス組成について
 - 3 試験装置
 - 3.1 試験装置構成
 - 3.2 使用する機器準備
 - 3.3 使用する試験装置の準備
 - 4 スタック試験
 - 4.1 スタック健全性の確認
 - 5 スタックの発電試験
 - 5.1 スタック特性試験
 - 5.1.1 セル電圧Vの測定の重要性
 - 5.1.2 スタックの発電試験
 - 5.2 内部抵抗の測定試験
 - 5.2.1 測定装置の選定
 - 5.2.2 電流遮断法
 - 6 SOFCの性能要因評価
 - 6.1 性能要因分析手法
 - 6.2 性能要因評価
- 参考文献

第4節 FIB-SEMと機械学習を利用した電極微細構造の評価 鹿園直毅, シチヨンシコ アンナ

- 1 はじめに
 - 2 FIB-SEMによる電極3次元構造再構築
 - 3 機械学習による構造評価
 - 3.1 自動セグメンテーション
 - 3.2 電極3次元構造の人工的生成
 - 3.3 電極微細構造変化の予測
 - 4 おわりに
- 謝辞
参考文献

第5節 二次イオン質量分析計を利用した界面と反応の評価 山地克彦

- 1 はじめに
 - 2 SIMSの特徴
 - 3 バレク中の物質移動の評価
 - 3.1 酸化物イオン導電体の表面交換反応速度定数と拡散係数の評価
 - 3.2 陽イオンの拡散(Ga蒸発)
 - 3.3 元素分布のイメージング
 - 4 劣化機構解明
 - 4.1 材料の劣化とSIMS不純物分析
 - 4.2 共電解セルにおける炭素析出の評価
 - 5 おわりに
- 参考文献

第6節 放射光を利用した電極反応場の評価 雨澤浩史

- 1 はじめに
 - 2 オペランド XAFS測定によるSOFC空気極反応の解析
 - 2.1 放射光X線を用いたオペランド分光測定の必要性・有用性
 - 2.2 SOFC/EC緻密薄膜空気極のXAFS測定
 - 2.3 硬X線マイクロXAFS測定によるSOFC空気極反応の反応分布評価
 - 3まとめ
- 参考文献

第7節 マイクロカンチレバー曲げ試験による電解質の機械的特性 多々見純一

- 1 はじめに
 - 2 マイクロカンチレバー曲げ試験
 - 3 マイクロカンチレバー曲げ試験で測定したメソスケール力学特性
 - 3.1 SOFCセル中の電解質層の力学特性
 - 3.2 単結晶8YSZの力学特性
- 参考文献

第8節 電極シミュレーション 岩井 裕

- 1 はじめに
 - 2 特性長さ解析
 - 3 電極1次元数値解析
 - 3.1 イオン・電子の輸送
 - 3.2 ガスの輸送
 - 3.3 電気化学反応
 - 3.4 境界条件と解析例
 - 4 電極3次元数値解析
 - 5 様々な電極解析
- 参考文献

第4章 製造技術

- ### 第1節 家庭用SOFCスタックの開発から普及に向けた取り組みについて 藤本哲朗
- 1 はじめに
 - 2 京セラにおけるSOFCセルスタックの開発の歴史
 - 2.1 初期の取り組み(1985年～2004年)(大型→小型化コンセプト)
 - 2.2 実用化への進展(2005年～2012年)(エネファームtype Sの誕生)
 - 2.3 繙続的な改良と普及への取り組み(2012年～)(スタックの進化)
 - 2.4 京セラ製SOFCセルスタックの稼働実績について
 - 3まとめ
- 参考文献

第2節 高性能SOFC開発の取り組み 島津めぐみ

- 1 はじめに
- 2 森村SOFCテクノロジー製セルスタックの特徴
- 3 セルスタック開発状況
 - 3.1 セルスタック開発経緯
 - 3.2 HPDS61仕様セルスタックの開発状況
 - 3.2.1 HPDS61仕様セルスタック初期性能
 - 3.2.2 HPDS61仕様セルスタックの信頼性
- 4 ホットモジュール開発状況

- 4.1 ホットモジュール設計思想
- 4.2 ホットモジュールの信頼性評価
- 4.3 水素・都市ガス混合燃料でのホットモジュール発電試験
- 5 システム開発事例
 - 5.1 カナデビア㈱様 20kW 級システム
 - 5.2 東京ガス㈱様・三浦工業㈱様 5.8kW システム
- 6まとめと今後の展望
 - 6.1 まとめ
 - 6.2 今後の展望
- 謝辞

- 第3節 金属支持 SOFC/SOEC 開発の動向** 鶴見裕史, 山口祐貴
- 1 平板形 SOFC/SOEC 支持体の種類
 - 2 粉末冶金とセラミックス共焼結による金属支持 SOFC/SOEC の開発
 - 3 おわりに
 - 参考文献

- 第4節 セル製作から運転までの全工程を通した機械的信頼性の向上** 田中順也
- 1 はじめに
 - 2 焼結工程
 - 3 運転工程
 - 4 応力発生要因のばらつきが発生応力に与える影響
 - 5 材料強度と故障率について
 - 参考文献

第5章 応用

- 第1節 SOEC 技術の現状と課題** 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
 - 謝辞
 - 参考文献

- 第2節 SOEC 実証試験と高温排熱利用の展望** 小阪健一郎
- 1 はじめに
 - 2 近年の SOEC 実証試験の状況
 - 3 三菱重工業での SOEC 実証運転のとりくみ
 - 3.1 円筒焼結形 SOEC セルスタック
 - 3.2 SOEC システム
 - 3.3 400kW 級展示デモ機の運転状況
 - 4 SOEC 高温排熱利用の展望
 - 4.1 热機関としての SOEC の考察
 - 4.2 SOEC 高温排熱の利用の一例
 - 4.3 外部高温熱源の利用
 - 5 おわりに
 - 参考文献

- 第3節 工場のカーボンニュートラル化に向けた水素 SOFC システムと低温排熱利用水蒸気電解 SOEC システムの展望** 渡邊秀貴
- 1 はじめに
 - 2 日本の産業界における二酸化炭素排出量
 - 3 未利用低温排熱を活用した SOEC による水素製造技術開発

- 3.1 未利用低温排熱を利用する要素技術開発
- 3.2 水蒸気電解 SOEC システムの技術開発
- 4 業務用純水素 SOFC システムの開発状況
 - 4.1 SOFC システムにおける高効率発電化技術
 - 4.2 低温型アノードオフガスリサイクル技術の検証
 - 4.3 業務用 SOFC システム開発による技術展望
- 5 工場・事業所のカーボンニュートラル化への展望
- 6 おわりに
- 参考文献

- 第4節 SOEC 水素製造システムの開発と展望** 林 真大
- 1 はじめに
 - 2 グリーン水素製造技術
 - 3 SOEC 水素製造システムの開発領域
 - 3.1 システム開発
 - 3.2 ホットモジュール開発
 - 3.3 セルスタック開発
 - 4 国内外での実証事例
 - 4.1 実用化に向けた取り組み
 - 5 おわりに
 - 参考文献

- 第5節 SOEC メタネーション技術による超高効率エネルギーキャリア, P2G システムの実現** 大西久男
- 1 はじめに
 - 2 天然ガスによる低炭素化と e-メタンによる CN 化の推進
 - 3 エネルギーの CN 化実現に向けたエネル ギーキャリアの必要性と e-メタン
 - 4 バイオマス, e-メタンの製造・利用サイクル, CO₂ 削減効果
 - 5 SOEC メタネーション技術の概要と特長
 - 6 SOEC メタネーション技術革新に関する大阪ガスの取り組み
 - 7 SOEC メタネーションによる e-メタンの再エネ輸入キャリアとしての優位性
 - 8 SOEC メタネーション技術が切り拓く “e-メタン革命” の姿
 - 9 おわりに
 - 謝辞
 - 参考文献

- 第6節 SOEC 共電解と e-fuel 合成** 根本和昌
- 1 はじめに
 - 2 SOEC 共電解による合成ガス製造
 - 2.1 SOEC (固体酸化物形電解セル) 電解技術
 - 2.2 SOEC 共電解による FT 用合成ガス製造
 - 2.3 SOEC 共電解における課題
 - 2.3.1 SOEC の耐久性向上
 - 2.3.2 スケールアップ
 - 3 FT 合成による合成粗油生成
 - 3.1 FT 合成とは
 - 3.2 生成物選択性制御への取り組み
 - 3.3 FT 反応器の設計
 - 4 おわりに
 - 謝辞
 - 参考文献

第6章 市場

燃料電池・水電解装置関連市場の世界動向と展望 (SOFC・SOEC とアジアの動向を中心に) 吉田優香

1 燃料電池と水電解装置の種類と概要

1.1 燃料電池の種類と概要

1.2 水電解装置の種類と概要

1.3 SOEC 共電解

2 燃料電池の市場規模と市場動向概要

2.1 燃料電池の市場規模推定

2.2 燃料電池種類別の市場規模と市場動向

2.3 燃料電池用途別の動向

2.3.1 燃料電池自動車 (FCV)

2.3.2 定置型燃料電池の概要

(1) 国別・地域別の導入規模と特徴の概要

(2) 定置型燃料電池タイプ別の特徴と概要

(3) 定置型燃料電池の成長要因

2.3.3 家庭用燃料電池 (エネファーム等)

2.3.4 産業用燃料電池

2.4 燃料電池のメーカー動向

2.4.1 日本国内の動向

2.4.2 中国の動向

(1) FCV および PEFC の動向

(2) SOFC の動向

(3) DMFC, PAFC, MCFC の動向

2.4.3 韓国の動向

2.4.4 世界の動向 (日本・中国・韓国以外)

3 水電解装置の市場規模と市場動向概要

3.1 グローバルの水素製造の動向

3.2 グローバルの水電解装置導入の推移と見通し

3.2.1 現状

3.2.2 水電解装置の生産動向

(1) 固体酸化物形電解セル (SOEC)

(2) AEM

3.2.3 水素関連プロジェクトの動向

3.2.4 トランプ政権発足後の概要

(1) DOE などの国家予算関連

(2) 水素製造装置メーカーの動向例 : thyssenkrupp nucera

3.3 水電解装置メーカー動向

3.3.1 日本国内の動向

3.3.2 中国企業の動向

3.3.3 韓国企業の動向

3.3.4 海外企業の動向 (日本・中国・韓国以外の海外)

3.3.5 SOEC 関連企業の動向

参考文献