

「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 金属インターコネクトの利用
 - 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レスポンスが可能
 - 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見
 - 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コネクター
 - 2 インターコネク用合金材料の種類
 - 3 空気中での酸化と表面保護皮膜
 - 4 合金インターコ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 鷲見裕史

- 1 DRT 法の原理
- 2 SOFC/ SOEC への DRT 法への応用
- 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, シチョンシコ 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 パル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 継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
 - 3.3 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 鷲見裕史, 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 熱機関としての 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