

連成解析に基づく固体酸化物形燃料電池の発電・水蒸気電解システムの技術および経済性評価

環境システム学専攻 大友研究室 47-156660 岡村 晋太郎 (指導教員 大友 順一郎 准教授)

Keywords: Solid oxide fuel cell, Steam electrolysis, Coupled analysis, Techno-economic evaluation

1.緒言 高効率発電技術として燃料電池が注目されている。高温作動の固体酸化物燃料電池 (SOFC) は複合発電で発電効率70%の達成が見込まれ^[1]、我が国でも期待が高まっている。また、水素ステーション建設や家庭用 SOFC の価格・普及台数の目標値が政府によるロードマップで設定されている^[2]。当研究室の先行研究^[3]では、円筒横縞形 SOFC^[4]を評価するため、発電性能を有限要素法に基づく連成解析モデルによる評価を行ってきた。

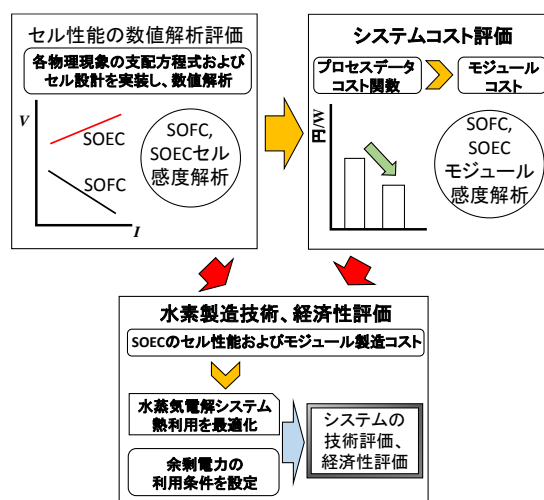


図1 数値解析を用いた水蒸気電解システムの評価手順

た。一方、発電に必要な水素を大量供給する手段として、再生可能エネルギー由来の水電解が検討されているが^[5]、再生可能エネルギーを用いた低い稼働率では採算性に問題がある。そこで SOFC の逆反応に基づく水蒸気電解セル (SOEC) が高変換効率の水素製造装置として期待され、海外の安価な余剰電力を利用して国内向け水素を製造し、有機ハイドライドや高圧・液化水素の形で輸送する方法が提案されている^[2]。以上を踏まえ、本研究では数値モデル解析により SOFC 及び SOEC の解析を行い、セル性能の予測、議論を行った。並行して、当研究室で構築を進めているコスト評価手法を用いて SOFC 及び SOEC モジュールの製造コストの評価を行った。以上の検討から、水素製造に関する技術評価および経済性評価を行った。

3.研究方針 円筒横縞形 SOFC^[4,6]について、有限要素法に基づく数値モデルによる解析を行い、性能予測モデルを構築した。さらに、交換電流密度や電解質厚さ等の物性値やセルデザインに基づく感度解析によりセル性能評価を行い、SOFC の現在と将来のセル・スタック性能について議論した。構築した SOFC モデルを基に、SOEC についても同様の数値モデルを作成した。SOEC の性能評価に基づき、SOEC モジュールおよびシステムの設計を行い、水蒸気電解効率及び水素製造原単位の予測を行った。並行して、SOEC システムのコスト評価を行い、将来の水素製造の経済性について議論した。

3.解析方法

3-1. 単セル性能評価

SOFC 発電および SOEC による水蒸気電解は以下の支配方程式で表される。

A. 活性化過電圧

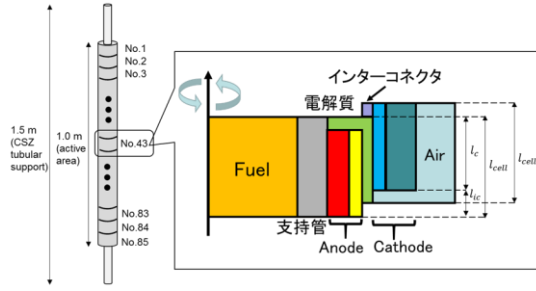


図 2. 円筒横縞形セルスタック構造と単セルモデル

$$i = i_0 \left\{ \exp\left(\frac{(1 - \alpha_t)n_e F \eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_t n_e F \eta_{act}}{RT}\right) \right\} \quad (1.1)$$

(i : 電流密度[A/m²] i_0 : 交換電流密度[A/m²] α_t : 輸送係数[-] n_e : 反応電子係数[-] F : ファラデー定数[C/mol] η_{act} : 活性化過電圧[V] R : 気体定数[J/(mol K)] T : 温度[K])

B. 抵抗過電圧

$$\eta_{ohm} = (i S_e) R_e = \frac{l_e}{\sigma} i \quad (1.2)$$

(η_{ohm} : 抵抗過電圧[V] S_e : 電極面積[m²] R_e : 電解質のイオン抵抗[S⁻¹] l_e : 電解質厚さ[m] σ : 電解質導電率[S/m])

C. 濃度過電圧

$$\eta_{conc,a} = \frac{RT}{n_e F} \ln\left(\frac{p_{H_2O,TPB} p_{H_2}}{p_{H_2,TPB} p_{H_2O}}\right), \quad \eta_{conc,c} = \frac{RT}{n_e F} \ln\left(\frac{p_{O_2}}{p_{O_2,TPB}}\right) \quad (1.2)$$

(η_{conc} : 濃度過電圧[V] p_{H_2} : 水素分圧[Pa] p_{O_2} : 酸素分圧[Pa] p_{H_2O} : 水蒸気分圧[Pa] $p_{H_2,TPB}$: 三相界面 (TPB) 上の水素分圧[Pa] $p_{O_2,TPB}$: 三相界面上の酸素分圧[Pa] $p_{H_2O,TPB}$: 三相界面の水蒸気分圧[Pa])

電極内の物質拡散を取り扱うために、多孔質内の多成分系拡散を扱うために、以下の混合平均拡散式を用いた。

$$D_i^{eff} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{1 - \alpha_{i,n} y_i}{D_{i,n}} + \frac{1}{D_{i,k}} \right)^{-1}, \quad \alpha_{i,n} = 1 - \left(\frac{M_i}{M_{av}} \right)^2, \quad D_{i,n} = \frac{1 - y_i}{\sum_{i \neq j} \frac{y_i}{D_{i,j}}} \quad (1.4)$$

(D_i^{eff} : 化学種 i の有効拡散係数[m²/s] ε : 空孔率[-] τ : 屈曲率[-] y_i : 化学種 i の質量分率[-] $D_{i,n}$: 分子相互拡散係数[m²/s] $D_{i,k}$: Knudsen 拡散係数[m²/s] M_i : 化学種 i のモル質量[kg/mol] M_{av} : 平均モル質量[kg/mol])

これらの支配方程式を用いて円筒横縞形 SOFC 単セルの性能評価を行った。セル構造や材

料物性を変化させることで、セル性能に対する感度解析を行った。

3-2. SOFC-SOEC システムコストおよび水素製造コスト評価 SOFC の製造プロセスデータおよび機器コスト関数を用いて、モジュール製造コストを、年産スケールを仮定し、評価を行った。これらの結果を統合して SOEC プロセスの設計ならびに水素製造コスト評価を行った。具体的には、1500 kW 級 SOEC の作動における一連の物質フローを元に、電力投入を最小限に抑える熱交換プロセスを作成した。製造した水素を圧縮機で高压タンクに貯蔵する工程までを考慮し、水素変換効率や機器の必要能力値、設置費、用役について検討すると共に、余剰電力の価格や稼働率からシステム全体の水素製造コストを評価し、将来の普及に向けた経済性について検討した。

4.解析結果と考察

4-1. セル性能解析 SOFC の実機の報告値^[4,6]を基に、標準セルモデルの構築を行った。図 2 にその電流電圧特性の解析結果を示す。また、SOEC 性能評価も使用している。それぞれについて過電圧分離や採用電流密度に対するチューブ出力が求められるようになっている。過電圧数値解析結果は実測値を精度よく再現することができた。

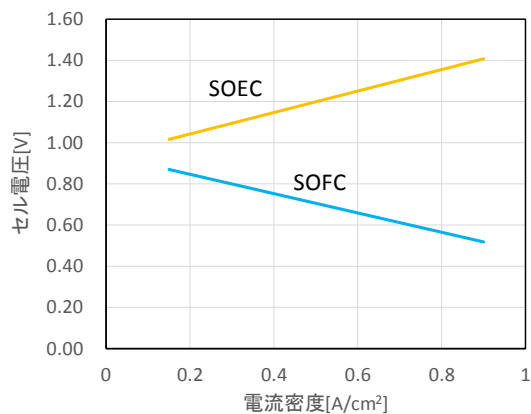


図 2 円筒横縞形 SOFC/SOEC の電流-電圧曲線
(作動温度：900°C)

4-2. SOFC システムコスト 4-1 の SOFC 単セルの解析結果から、電流密度 0.2 A/cm² の発電条件で 1 セルスタックあたり約 100 W の出力を得られることがわかった。このセルモデルを基準として、総出力 220 kW(AC)の SOFC モジュール製造プロセスについて検討した。各工程に設けられる全機器について、生産スケールを内包する設備コスト関数、および床面積データ、原材料費（供給する粉体や溶剤の材料費等）、設備規模に応じて割り当てる人件といったコスト計算用のモデルを作成した。構築したモデルに生産計画の条件を入力することで、製造コストを決定する主工程や経費の特定、及び製造コストの感度解析が可能となった。将来予測として年産規模を拡大した際の感度解析を行った結果、原材料費が製造コスト削減の余地が残されていることがわかった。

4-3. 水蒸気電解セル評価 SOEC 単セルの数値解析の結果、単セルの電解条件：約 1.3 V - 約 0.8A/cm² の電力投入条件のもとで、セルスタック 1 本あたり、630 W 入力 SOEC セルスタックを設計した。モジュール換算では、21460 kW の SOEC モジュールとして作動し、5.58 mol/s の水素を水蒸気電解により製造することができることがわかった。この

SOEC モジュールを用いて、水蒸気電解プロセスの設計を行った。

本プロセスでは、燃料極に供給する水（還元雰囲気維持のため微量水素含む）と空気極に供給する酸素（空気）を SOEC 作動温度である 900℃まで昇温するために、図 4 に示すように、熱の有効利用を考慮した向流型熱交換器を含むプロセスを設計した。ここで、図中の 3 つの熱交換器の性能は高温

側熱交換効率が 0.9 以内として設計を行った。また、モジュール中で発生する過電圧に起因する廃熱は、水蒸気電解時の吸熱に対し、過剰に供給して計算になるため、水および酸素のモジュール投入時温度を 850℃まで下げる余地があることがわかった。モジュール価格にタンクやコンプレッサなどの設備費、そして投入用役を含めたコスト計算を行うことで、コンプレッサ原単位 0.3 kWh/Nm³-H₂ の条件化で、水素変換効率 72%(LHV)、システムの水素製造原単位 4.2 kWh/Nm³-H₂ の結果を得た。システムのコスト内訳としては熱交換器のコスト割合は非常に小さく、モジュール、高压タンク、および圧縮機が大部分のコストを占めることがわかった。SOEC モジュールの製造コストは、将来的に、現状の 230 円/W から 146 円/W 程度までの改善が見込まれた。50 円/Nm³-H₂ 程度に水素製造コストを抑えられれば、都市ガス等と価格競合できるとされる。再生可能エネルギーは余剰電力量や稼働率に課題があるが、システムコスト 150 円/W - 0 円/kWh 電力などの組合せが実現すれば採算性を検討できるようになると推測される。

5. 結言

本研究では SOFC/SOEC セルスタックの性能評価を検討するため、有限要素法による連成解析を行った。得られた性能分析の結果は、SOFC/SOEC モジュールコスト計算に使用され、SOFC/SOEC モジュールの性能から経済性評価まで体系的に扱うことができる方法論を構築することができた。さらに、SOEC による水蒸気電解プロセスのシステム評価を行い、水蒸気電解効率や水素製造原単位の予測を行った。以上を基に、水素製造コストをシステムの性能、設備コスト、入力電力コスト、及び稼働率と関連付けて評価することができた。本研究の知見を利用することで、SOFC ならびに SOEC の将来の普及に向けたシナリオの議論できるようになると期待される。

参考文献[1] 三菱重工技報 Vol.48 No.3 (2011) 発電技術特集[2] 経済産業省 水素・燃料電池ロードマップ改訂版 (2016) [3] 宮崎顕也 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文(2015)[4] N. Watanabe et al., *Electrochemistry*, **8**(2010)[5] 福岡県経済・産業情報 <http://www.pref.fukuoka.lg.jp/contents/0628-greenh2.html>[6] K. Tomida et al., *Electrochemistry*, **5**(2009) 379-387

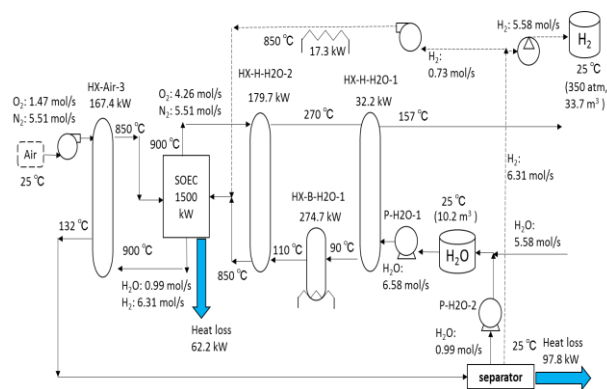


図 3. SOEC プロセス設計図