

TED Plaza

燃料電池の性能目標達成に向けた材料課題に関する研究



柴田 昌男

株式会社豊田中央研究所  
環境・エネルギー1部  
燃料電池第1研究室  
masao-shibata@mosk.tytlabs.co.jp



鈴木 孝尚

株式会社豊田中央研究所 主任研究員  
環境・エネルギー1部  
燃料電池第1研究室  
takahisa@mosk.tytlabs.co.jp



兒玉 健作

株式会社豊田中央研究所 室長  
環境・エネルギー1部  
燃料電池第1研究室  
kkodama@mosk.tytlabs.co.jp



鈴木 稔幸

トヨタ自動車株式会社 主査  
トヨタ ZEV ファクトリー  
FC 製品開発部  
toshiyuki\_suzuki\_ab@mail.toyota.co.jp

## 1. はじめに

自動車の二酸化炭素排出量低減と燃料多様化とを実現する技術のひとつとして、水素を燃料とする燃料電池自動車 (FCV) に期待が寄せられている。水素は多様なエネルギー源から製造可能であり貯蔵・輸送も比較的容易であることから、FCV 普及とそれによる水素の利用拡大は、持続可能な開発目標 (SDGs) のひとつである「すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的エネルギーへのアクセスを確保する」という目標の実現に大きく貢献するものと考えられる。

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) では水素利用拡大を促進する技術に関する戦略ロードマップを策定している (NEDO, 2017)。この戦略ロードマップの中では、2030 年頃に累計 80 万台の FCV を普及させる目標が掲げられている。これは FCV の国内年間販売台数が約 1000 台を推移している現在の状況 (米田, 2020) を踏まえると、非常に高い目標といえる。この普及目標達成を見据えた FCV の目標性能を表 1 に示す。航続距離の増加は FCV の需要拡大に、白金使用量低減は燃料電池システムのコスト低減と資源リスク低減に、そしてスタック出力密度増加は多様な車種への展開に、それぞれ重要な役割を担うと考えられる。

しかし、これらの目標性能と現状性能との間の技術的なギャップは大きい。このギャップの大きさを簡単に説明するために燃料電池の I-V 特性を表す最も簡単な式 (式(1)) を使用する。

$$V = U + b \log\left(\frac{I_0}{I}\right) - RI + b \log\left(1 - \frac{I}{I_{lim}}\right) \quad (1)$$

ここで、 $U$  は酸素還元反応 (ORR) の熱力学的平衡電位、 $b$  は ORR ターフェル勾配、 $I_0$  は ORR 交換電流密度 ( $\propto$  カソード触媒表面積 $\times$ 面積比活性)、 $R$  はオーム抵抗 (= 電子抵抗 + プロトン抵抗)、そして  $I_{lim}$  は限界電流密度 ( $\propto$  (ガス輸送抵抗)<sup>-1</sup>) をそれぞれ表す。この式から、最大負荷点電圧 ( $V$ ) とスタック出力密度 ( $\cong I \times V$ ) とを向上させるには、 $I_0$  を大きく、 $R$  を小さく、そして  $I_{lim}$  を大きくすることが有効であることが分かる (図 1)。貴金属使用量低減は反応表面積低下により  $I_0$  だけでなく  $I_{lim}$  も低下させる (Weber and Kusoglu, 2014) ことが知られており、セル電圧や出力密度の向上とトレードオフ関係にある。表 1 の数値目標では貴金属使用量を 1/3 以下に低減しつつスタック出力密度を 2 倍にすることが要求されており、このトレードオフ解決を含む材料技術の進展が必要となる。航続距離目標を 650 km から 800 km に向上することは一見すると比較的容易に見えるかもしれないが、実際には大幅な材料特性の改良が必要とされる可能性がある。例えば、I-V 特性改良によって発電効率を 5% だけ向上して航続距離を伸ばす場合を考える (5% では 800 km に届かないので水素搭載量増加、補機効率向上、透過水素低減などの対策を併せておこなうことを前提とする)。単純化した議論をすると、発電効率を 5% 向上するにはある電流密度におけるセル電圧を 5% 向上する必要がある。従って、元のセル電圧を仮に 0.80 V とすると目標セル電圧は 0.84 V となる。ORR ターフェル勾配として典型的な値  $b = 70\text{mV/decade}$  を用いるとこの電圧向上代は約 4 倍もの  $I_0$  向上に相当する。貴金属使用量を 1/3 以下に低減させながら  $I_0$  を 4 倍に向上することは非常にハードルの高い目標である。図 2 に燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ) にて試算された目標 I-V 特性を示す (Suzuki, et al., 2019)。この図からも 2030 年目標と現状とのギャップが大きい様子が見て取れるであろう。

他方、近年の研究開発により有望な材料種が提案されている。例えば、白金系触媒の形状を制御すると大幅に ORR 活性が向上することが知られており、特に白金ナノワイヤと呼ばれる触媒の面積比活性は従来触媒のその約 10 倍と非常に高いことが報告されている (Li, et al., 2016, Shinozaki, et al., 2016)。また、メソポーラスカーボン担体として使用することで触媒層電解質 (アイオノマ) による触媒被毒を抑制して、貴金属使用量低減と出力密度向上とを同時に実現したという報告もある (Yarlagadda, et al., 2018)。さらに、高酸素透過性のアイオノマを使用することで I-V 特性を大きく改善できる可能性も示されている (Kinoshita, et al., 2016)。

これらの有望な技術を組み合わせる場合にどのような I-V 特性が期待されるのだろうか。そして、2030 年目標を実現するためにどのような材料研究が重要な役割を担うのだろうか。本稿では I-V 特性の数値シミュレーション結果に基づいて、これらの点について議論する。

Table 1 Comparison of vehicle performance between current FCVs and 2030 FCCJ target.

	Current FCVs <sup>*1</sup>	2030 FCCJ target
Drive Distance	650 km <sup>*2</sup>	800 km <sup>*2</sup>
Amount of Precious Metal	~0.3 g kW <sup>-1</sup> <sup>*3</sup>	0.05 – 0.1 g kW <sup>-1</sup> <sup>*2</sup>
Stack Power Density	~3 kW L <sup>-1</sup> <sup>*2</sup>	~6 kW L <sup>-1</sup> <sup>*2</sup>

<sup>\*1)</sup> At Nov. 2020. <sup>\*2)</sup> NEDO, 2017. <sup>\*3)</sup> Yoshida and Kojima, 2015, Borup, 2019.

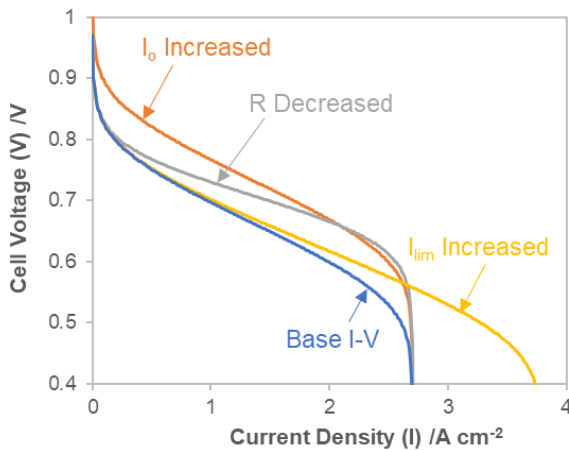


Fig. 1 Effects of  $I_0$ ,  $R$ , and  $I_{lim}$  on I – V curve.

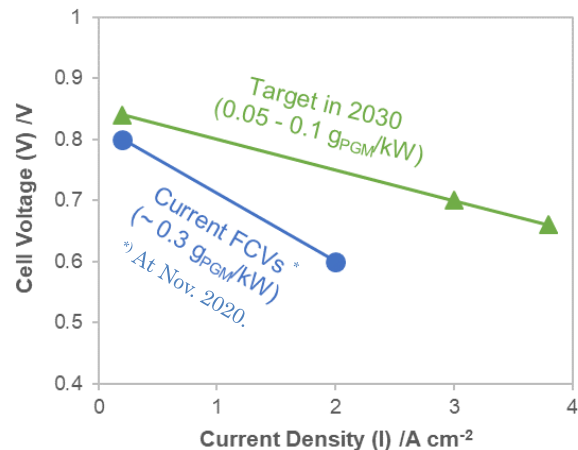


Fig. 2 Target I – V curves by FCCJ.

## 2. 数値シミュレーション

本稿では数値シミュレーションモデルを用いて、現在までに報告されている最も特性値の高い材料 (Early-Stage Materials) を相殺なく組み合わせた場合の I – V 特性を計算して目標値と比較した。ここで、発電性能は式(1)でも計算可能であるが、この式では反応中間体被覆率の電位や温度に対する依存性や面内・面直方向の環境分布の影響などを正確に見積もることが困難である。そこで、本稿では ORR と物質輸送に関わるより詳細なモデルを使用した。本節では計算モデルと前提とした材料について簡単に説明する。なお、動作条件は固定とした (温度: 60 °C. 入口圧力: 空気極・水素極共に 2 A cm<sup>-2</sup> 以上で 200 kPa.abs, 0.2 A cm<sup>-2</sup> 以下で 110 kPa.abs, その間は線形補完。供給ガスのストイキメトリー比 空気: 1.5, 水素: 1.25. 水素極は循環系で循環比 5 とした)。

### 2・1 酸素還元反応 (ORR) モデル

ORR は燃料電池の性能を律速する反応であり、その反応速度の表現手段はシミュレーションモデルの精度に重大な影響を与える。多くの燃料電池数値シミュレーションモデルでは、ORR は単一の反応過程とみなされて、一本のバトラー・ボルマー式で反応速度が表現される。この手法は既存の触媒の発電性能に基づいてパラメータフィッティングをおこなうことで妥当な結果を与えられとされる。しかし、本稿では必ずしも我々の手元にはない材料を検討する必要があるため、パラメータフィッティングを実施することができない。このため、パラメータフィッティングが不要なモデル、すなわち可能な限り理論に基づくモデルを使用することが望ましい。

理論的な酸素還元反応の解析は盛んにおこなわれており、既にいくつかのモデルが構築されている (Jinnouchi et al., 2011, Hansen et al., 2014)。いずれのモデルでも、酸素還元反応は複数の素反応の組み合わせによって表現される。第一原理シミュレーションにより得られたパラメータを使用して各々の素反応に関するバトラー・ボルマー式を解くことで全体としての ORR 速度が算出される。更に、様々な触媒表面における反応中間体の自由エネルギーや反応障壁の高さに関わる相互相関関係 (Scaling 則および Bronsted – Evans – Polanyi 則) を適用することで、実験的に得られた様々な触媒表面における室温水溶液中の反応活性のトレンドが再現される。一部の反応障壁の高さの見積もりや実触媒への理論の応用などに課題が残るものの、これらのモデルは反応活性の理論的な理解を与えて反応活性向上指針を示すことで触媒開発に貢献している。

本稿では前記の Hansen らの理論モデルを温度や湿度が変化した場合に適用できる形に拡張し

たモデル (Shibata et al., 2020) を使用した。ここでは、温度や湿度が変化した場合の反応中間体の自由エネルギーと反応障壁の高さとの変化については現時点では不明点が多いため、いくつかの仮定を用いて計算した (仮定の詳細は前記文献を参照されたい)。目下開発中のモデルであるが、現時点で使用できる最も妥当な手法であると考えた。このモデルを使用することで、室温溶液中でおこなわれた触媒のモデル評価で得た活性から実際の燃料電池環境下での活性を見積もることが可能となる。また、セル性能推定においてはアイオノマ被覆による性能低下を考慮する必要がある。そこで、酸素輸送抵抗の電位依存性に関する報告 (Suzuki, et al., 2018) を参考にして電位に依存したアイオノマのアニオン部位の白金上被覆率を簡易的に表現した。

## 2・2 物質輸送モデル

物質輸送モデルでは分子 (酸素, 水素, 窒素, 水), 電荷 (プロトン, 電子), そして熱の輸送を偏微分方程式の形で記述し, 2・1 節の ORR モデルと連成させることで燃料電池としての発電性能を算出する。セパレータや材料の立体的な形状を模擬する 3D モデル (例えば Inoue and Kawase, 2016) から, 立体的な形状情報を少数のパラメータで表現することで簡素化した形の 1D モデル (例えば Weber and Newman, 2006) まで, 多様な物質輸送モデルが開発されている。これらの中から目的に応じて適切なモデルを選択する必要がある。

本稿では燃料電池におけるセパレータ流路のガス流れ方向の 1 次元輸送モデルと, 面直方向の 1 次元輸送モデルとを連成させた“1+1D”モデル (Nonoyama and Ikogi, 2008) を使用した。これは, 本稿の議論の範囲では燃料電池や材料の 3D 構造までを規定する必要はないと考えたためである。他方, 燃料電池における面内・面直方向の発電環境の不均一性が発電性能に大きな影響を及ぼすことが分かっているため, この不均一性を考慮に加える目的で“1+1D”モデルを使用した。計算に使用する輸送パラメータは現状品の評価結果を参考に設定した。

## 2・3 前提とした材料

活性種として形状制御触媒の中で最も高い白金重量活性が報告されている白金ナノワイヤ (Li, et al., 2016) を, 触媒担体としてアクセシブルポーラスカーボン (Yarlagadda, et al., 2018) を, 触媒層電解質として高酸素透過アイオノマ (Kinoshita, et al., 2016) を, 電解質膜として EW (等価重量) が低い PFSA 膜 (Kusoglu and Weber, 2017) を, ガス拡散層として基材レス拡散層 (Park, et al., 2014) を, セパレータとして低接触抵抗品 (Avasarala and Haldar, 2008) を, それぞれ前提とし, 各々の文献に記載されている従来品からの特性向上代を参考に材料特性値を設定した。本来は各々の報告値の妥当性を議論した上で使用する値を決定することが望ましい。例えば, 白金ナノワイヤはモデル評価時には高い活性が計測される一方で燃料電池環境下では活性の向上代が限定的であるという報告もなされている (Mardle, et al., 2020)。また, 溝形状の流路の場合には基材レス拡散層を用いるとリブ下へのガス供給が抑制されるというトレードオフが懸念される。今後これらのトレードオフ関係を定量化することが必要である。本稿では上記のようなトレードオフ関係を十分に考慮できていないが, このような解析であっても性能向上に対する重要な役割が期待される材料技術を抽出するためには十分な精度が得られると考えた。なお, カソード触媒極の貴金属使用量を  $0.1 \text{ mg cm}^{-2}$  と仮定して計算をおこなった (貴金属使用量を  $0.05 \text{ g kW}^{-1}$  (表 1), 出力密度を  $2.5 \text{ W cm}^{-2}$  (図 2), アノード極の貴金属使用量を  $0.025 \text{ mg cm}^{-2}$  とした)。

## 3. 結果

図 3 に計算の結果得られた I-V 特性を示す。この図から, “Early-Stage Materials”を前提とすることで I-V 特性が大きく改善して 2030 年目標と同等の特性になる結果を得たことが分かる。また, 材料構成をひとつずつ代えたときの過電圧分離解析の結果 (図 4) から, 低電流密度領域では高酸素透過アイオノマ, アクセシブルポーラスカーボン, および白金ナノワイヤを用いたことの影響が, 高電流密度領域では前記の材料に加えて基材レス拡散層の寄与が大きいことが分かる。

低電流密度条件で高酸素透過アイオノマ, アクセシブルポーラスカーボン, および白金ナノワイヤによる電圧向上代が大きいことは, これらの材料による反応抵抗過電圧低減 (式(1)の  $I_0$  向上に対応) に紐づけられる。高酸素透過アイオノマとアクセシブルポーラスカーボンの使用はアイオノマによる触媒被毒 (Kodama, et al, 2018, Takeshita, et al., 2020) を軽減することで, 白金ナノワイヤの使用は触媒自体の重量活性を向上させることで, いずれも反応過電圧低減に寄与すると期

待される。低電流密度では全過電圧の中で反応抵抗過電圧が占める割合が大きい (図 4(a)) ため、これらの影響が支配的であったと考えられる。

高電流密度条件においてガス拡散層の寄与が大きいのは電子抵抗過電圧低減 (式(1)の $R$ 低減に対応) と酸素濃度過電圧低減 (式(1)の $I_{lim}$ 向上に対応) の影響に紐づけられる。高酸素透過イオノマも酸素濃度過電圧低減に寄与すると考えられるため、高電流密度における電圧向上への貢献が大きい。図 4(b)からは低 EW 電解質膜と低接触抵抗セパレータも高電流密度条件の性能向上に貢献していることがわかる。特に低 EW 電解質膜は放熱制約を考慮して高温運転化を検討する際には非常に重要な役割を果たすと推測される (本稿では運転温度を  $60^{\circ}\text{C}$  に固定)。なお、各材料による性能向上代 (特に非線形性が強い成分である酸素濃度過電圧低減に寄与するもの) は  $I-V$  特性を計算した順番に依存するので、その定量値の取り扱いには注意が必要である。

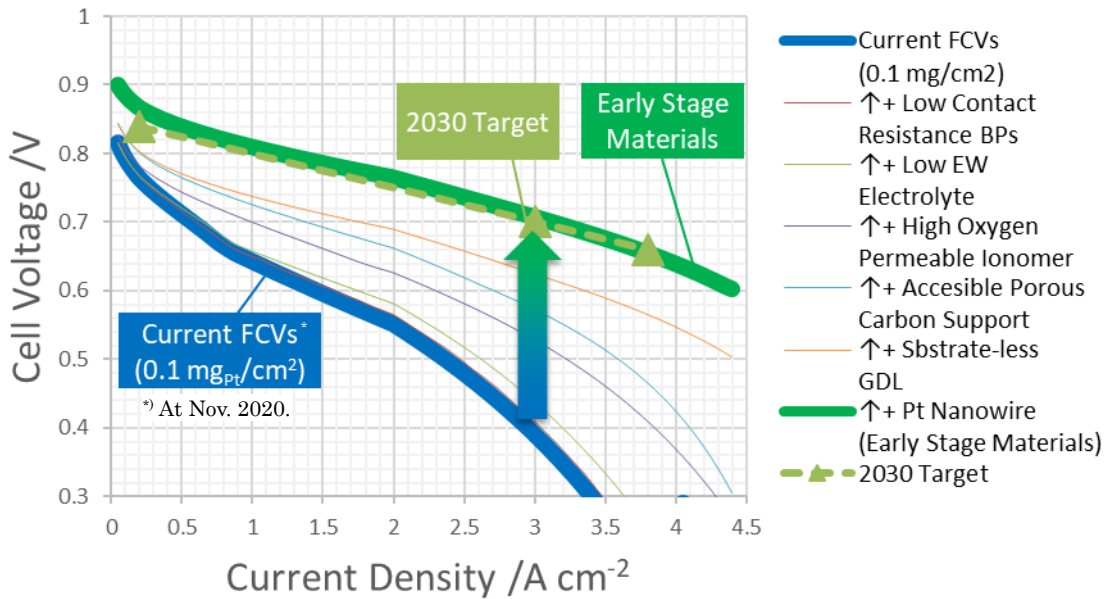


Fig. 3 Results of  $I-V$  performance calculations.

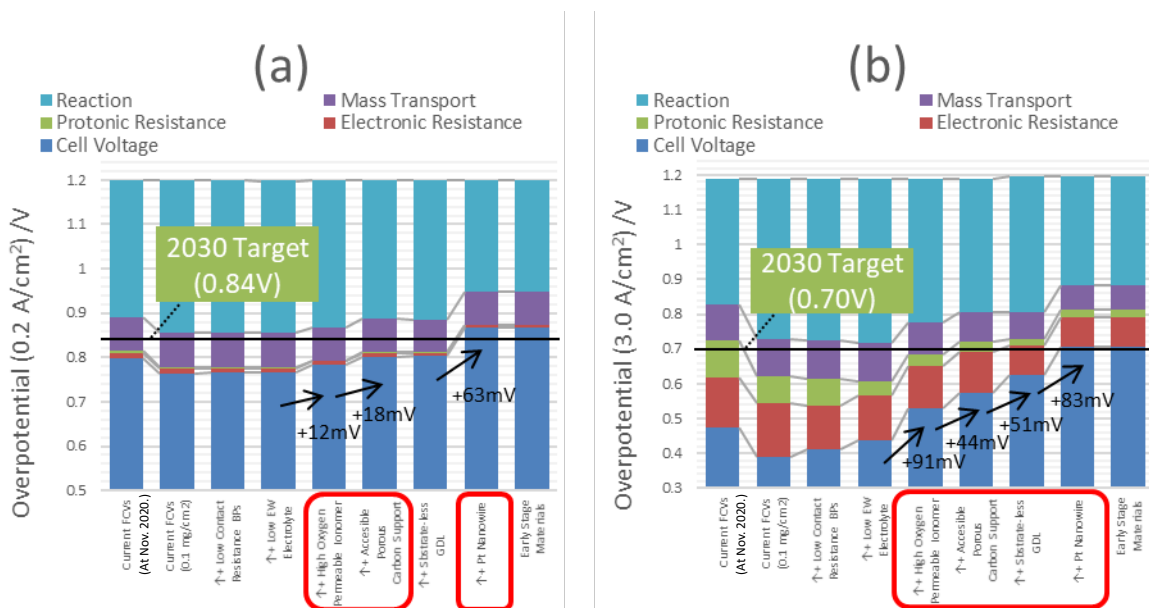


Fig. 4 Overpotential analyses at (a)  $0.2 \text{ A cm}^{-2}$ , (b)  $3.0 \text{ A cm}^{-2}$ .

Titles of bars represent changed materials from previous (left side) material sets. Arrows indicate cell voltage increases more than 10 mV in (a) and 20 mV in (b).



#### 4. 議論

第3章で述べた通り、数値シミュレーションにより、“Early-Stage Materials”を相殺なく組み合わせることができた場合に2030年目標と同程度のI-V特性が得られる可能性が示された。しかし、このことは2030年目標に向けた技術課題が解決したということを示さず、むしろ、“Early-Stage Materials”を実用的な燃料電池スタックとして成立させるためには多くの研究課題が残存しており、幅広い分野からのアプローチが必要である。以下にその例を示す。

触媒種は低電流密度域から高電流密度域に至るまでのI-V特性を向上させることが期待される(図4)ため、この分野の技術開発は重要である。特に白金ナノワイヤなどの形態制御触媒は非常に活性が高いことが数多く報告されておりその実用化が期待される。しかし、これらの触媒種は劣化により形態が変化し、触媒活性が著しく低下することが知られている。従って、これらの触媒種を実用化するには形態安定化技術(例えば第三元素のドーピング(Beermann, et al., 2016)、触媒の表面修飾(Kodama et al., 2016, Yamada, et al., 2020))が必要であると考えられる。また、モデル評価で高い活性が計測された触媒種が必ずしも実際の燃料電池環境下で同様に高い活性を発現しないことが報告されており(Stephens, et al., 2016)、その原因解明と対策、および実環境で高活性な触媒を探索するための触媒評価手法の確立も重要と考える。

アイオノマと担体の種類も大幅な性能向上に寄与することが期待される(図4)ため、これらの技術の重要度は高いと考える。これらの材料はアイオノマによる触媒被毒を軽減することで効果的にI-V特性を向上させていると考えられ、アイオノマと触媒との相互作用・界面状態を考慮に入れた触媒層構造設計(Yoshino et al., 2020)が重要であることを示している。

ガス拡散層に関しては流路形状と合わせた構造設計が重要となる。流路リブ下への酸素供給が妨げられるような構造では基材レス拡散層がかえって性能を低下させる要因となり得る。多孔体流路の利用、あるいは基材レス以外の形でガス輸送抵抗と電子輸送抵抗を低減できる拡散層構造の実現が待たれる。また、発電による生成水の排水機能向上も重要な課題であり、近年の分析技術の開発が果たす役割は大きいと期待される(Nagai, et al., 2019)。

低EW電解質のように低湿度でプロトン伝導度の高い電解質材料も将来のFCV開発への重要性が高いと考える。これは、本稿ではセル温度を60°Cに固定したシミュレーションを実施したが、より温度の高い条件で低EW電解質の効果代が大きくなると期待されるためである。運転温度を高温化すると、放熱と発熱とのバランスを取りやすくなる点でシステム目線でのメリットがある。基本的には燃料電池は内燃機関と比較して効率がいため発熱量は小さいが、内燃機関と異なり冷却水や排気ガスの温度が低いために放熱量が小さくなりやすく、結果として大型の放熱装置(ラジエータ)が必要となる場合や、燃料電池の出力を制限する必要が生じる場合がある。その対策として燃料電池の運転温度を上昇させることが有効であり、その際には低EW電解質のような低湿度で高いプロトン伝導度を発現する材料が性能向上に大きく貢献すると期待される。しかし、低EW電解質は一般に化学的な安定性が低いため、電解質耐久性向上技術(ラジカルクエンチ剤など)の開発も同様に重要であると考えられる。

また、FCCJからは更に高い目標である2040年目標も提示されている。これに向けた材料開発の可能性についての議論を深めることも必要である。図4の解析から分かるようにEarly-Stage Materialsの時点で反応抵抗過電圧以外の過電圧成分が小さい。このことから、更なる性能向上には反応活性向上に関わる新規技術の開拓が必要になると考えられる。

以上ではI-V特性向上に主眼を置いて議論をしたが、それ以外にもシール部材、燃料電池の生産技術、水素貯蔵方法、システム補機(エアコンプレッサ、昇圧インバータ、放熱用ラジエータ)性能向上、そして耐久性向上・劣化予測など様々な面で課題が残存する。特に、大型商用車(乗用車に比べて長い距離の耐久性が求められる)への燃料電池技術の展開を見据えると、耐久性向上と劣化予測の技術が非常に重要となる。

#### 5. まとめ

本稿では現在までに報告されている最も特性値の高い材料(Early-Stage Materials)を相殺なく組み合わせることができた場合を想定して、数値シミュレーションによりそのI-V特性を解析した結果を紹介した。我々の数値シミュレーションの結果は、Early-Stage Materialsの実用化によりFCCJから提案された2030年目標と同程度のI-V特性を実現できる可能性を示した。この性能向上には触媒・担体・アイオノマ・ガス拡散層に関わる研究開発が重要な役割を担うと試算された。

これらの技術に加え、熱制約や耐久制約を踏まえると低 EW 電解質や各種耐久性向上・予測技術も同様に重要な技術になると考えられる。本稿では初期の発電性能に主眼を置いて議論を進めたが、シール部材、システム補機、燃料電池生産、水素貯蔵方法に関わる技術もコスト低減、多車種展開性向上に向けて重要な役割を担うことになる。これらの多岐にわたる技術課題を解決するために、幅広い分野からのアプローチが必要である。

## 謝 辞

本田技術研究所の田中慎太郎様、トヨタ自動車の佐野誠治様、豊田中央研究所の葛谷孝史様には研究を進める上で貴重なご意見を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

## 文献

- Avasarala, B. and Haldar, P., Effect of surface roughness of composite bipolar plates on the contact resistance of a proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 188 (2009) pp. 225-229.
- Beermann, V., Gocyla, M., Willinger, E., Rudi, S., Heggen, M., Dunin-Borkowski, R., Willinger, M., and Strasser, P., *Nano Lett.*, 16, 1719 (2016)
- Borup, R., Water Imaging in Mirai Short-Stack provided by USCAR, Presentation to USCAR, LA-UR-19-22972 (2019) available from <<https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-19-22972>>, (参照日 2020 年 11 月 13 日).
- Borup, R., Meyers, J., Pivovar, B., Kim, Y., S., Mukundan, R., Garland, N., Myers, D., Wilson, M., Garzon, F., Wood, D., Zelenay, P., More, K., Stroh, K., Zawodzinski, T., Boncella, J., McGrath, J. E., Inaba, M., Miyatake, K., Hori, M., Ota, K., Ogumi, Z., Miyata, S., Nishikata, A., Siroma, Z., Uchimoto, Y., Yasuda, K., Kimijima, K., and Iwashita, N., *Chemical Reviews*, 107 (2007), pp. 3904-3951.
- Hansen, H. A., Viswanathan, V., and Nørskov, J. K., Unifying Kinetic and Thermodynamic Analysis of 2 e<sup>-</sup> and 4 e<sup>-</sup> Reduction of Oxygen on Metal Surfaces, *Journal of Physical Chemistry C*, 118 (2014), pp. 6706-6718.
- Jinnouchi, R., Kodama, K., Hatanaka, T., and Morimoto, Y., First principles based mean field model for oxygen reduction reaction, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13 (2011), pp. 21070-21083.
- Kinoshita, S., Shimohira, T., Watakabe, A., Hommura, S., Saito, A., Tanuma, T., and Yamada, K., Development of PFSA Ionomers and Their Use in Fuel Cells, *ECS Transactions*, 75, 14 (2016), pp. 575-580.
- Kodama, K., Jinnouchi, R., Takahashi, N., Murata, H., and Morimoto, Y., Activities and Stabilities of Au-Modified Stepped-Pt Single-Crystal Electrodes as Model Cathode Catalysts in Polymer Electrolyte Fuel Cells, *Journal of the American Chemical Society*, 128 (2016), pp. 4194-4200.
- Kodama, K., Motobayashi, K., Shinohara, A., Hasegawa, N., Kudo, K., Jinnouchi, R., Osawa, M., and Morimoto, Y., Effect of the Side-Chain Structure of Perfluoro-Sulfonic Acid Ionomers on the Oxygen Reduction Reaction on the Surface of Pt, *ACS Catalysis*, 8 (2018) pp. 694-700.
- Kusoglu, A. and Weber, A., Z., New Insights into Perfluorinated Sulfonic-Acid Ionomers, *Chemical Reviews*, 117 (2017), pp. 987-1104.
- Li, M., Zhao, Z., Cheng, T., Fortunelli, A., Chen, C., Yu, R., Zhang, Q., Gu, L., Merinov, B. V., Lin, Z., Zhu, E., Yu, T., Jia, Q., Guo, J., Zhang, L., Goddard III, W. A., Huang, Y., Duan, X., Ultrafine jagged platinum nanowires enable ultrahigh mass activity for the oxygen reduction reaction, *Science*, 354, 6318 (2016), pp. 1414-1419.
- Mardle, P., Thirunavukkarasu G., Guan Shaoliang, Chiu, Y., and Du, S., Comparative Study of PtNi Nanowire Array Electrodes toward Oxygen Reduction Reaction by Half-Cell Measurement and PEMFC Test, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12 (2020), 42832-42841.
- Park, J., Pasaogullari, U., and Bonville, L., A New CCM/MPL Structure for High Power Density Polymer Electrolyte Fuel Cells, *ECS Transactions*, 64, 3 (2014), pp. 353-359.
- Nagai, Y., Eller, J., Hatanaka, T., Yamaguchi, S., Kato, S., Kato, A., Marone, F., Xu, H., and Büchi, F., N., Improving water management in fuel cells through microporous layer modifications: Fast operando tomographic imaging of liquid water, *Journal of Power Sources*, 435 (2019), 226809.
- Nonoyama, N., Ikogi, Y., PEMFC model development for designing MEA: Model Validation and a Parameter Study for Low Humidity Operations, *ECS Transactions*, 16, 2 (2008), pp. 13-21.
- Shibata, M., Shinozaki, K., Kodama, K., and Jinnouchi, R., Modeling Temperature- and Humidity-Dependent Kinetics of Oxygen Reduction Reaction, *ECS Meeting Abstract*, I01D-2307 (2020).

- Shinozaki, K., Morimoto, Y., Pivovar, B., S., Kocha, S., S., Re-examination of the Pt Particle Size Effect on the Oxygen Reduction Reaction for Ultrathin Uniform Pt/C Catalyst Layers without Influence from Nafion, *Electrochimica Acta*, 213 (2016), pp. 783-790.
- Stephens, I., E., Rossmeisl, J., Chorkendorff, I., Toward sustainable fuel cells, *Science*, 354, 6318 (2016), pp. 1378-1379.
- Suzuki, T., Iiyama, A., Kubo, N., Saito, N., Shinohara, K., Shimotori, S., Sugawara, Y., and Yamada, K., Toward the Future Fuel Cell -Challenge for 2040-, *ECS Transactions*, 92, 8 (2019), pp. 3-7.
- Suzuki, T., Yamada, H., Tsusaka, K., and Morimoto, Y., Modeling of Oxygen Diffusion Resistance in Polymer Electrolyte Fuel Cells in the Intermediate Potential Region, *Journal of The Electrochemical Society*, 165, 3 (2018), pp. F166-F172.
- Takehita, T., Kamitaka, Y., Shinozaki, K., Kodama, K., and Morimoto, Y., Evaluation of ionomer coverage on Pt catalysts in polymer electrolyte membrane fuel cells by CO stripping voltammetry and its effect on oxygen reduction reaction activity, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 871, 15 (2020), 114250.
- Weber, A. Z. and Kusoglu, A., Unexplained transport resistances for low-loaded fuel-cell catalyst layers, *Journal of Materials Chemistry A*, 2 (2014), pp. 17207-17211.
- Weber, A. Z. and Newman, J., Coupled Thermal and Water Management in Polymer Electrolyte Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society*, 153, 12 (2006), pp. A2205-2214
- Yamada, H., Kato, H., and Kodama, K., Cell Performance and Durability of Pt/C Cathode Catalyst Covered by Dopamine Derived Carbon Thin Layer for Polymer Electrolyte Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society*, 167 (2020), 084508.
- Yarlagadda, V., Carpenter, M., K., Moylan, T. E., Kukreja, R., S., Koestner, R., Gu, W., Thompson, L., and Kongkanand, A., *ACS Energy Letters*, 3 (2018), pp. 618-621.
- Yoshida, T., and Kojima, K., Toyota MIRAI Fuel Cell Vehicle and Progress Toward a Future Hydrogen Society, *The Electrochemical Society Interface*, 24, 45 (2015), pp. 45-49.
- Yoshino, S., Shinohara, A., Kodama, K., and Morimoto, Y., Fabrication of catalyst layer with ionomer nanofiber scaffolding for polymer electrolyte fuel cells, *Journal of Power Sources*, 476 (2020), 228584.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ詳細版 (燃料電池分野) (2017). available from < <https://www.nedo.go.jp/content/100871976.pdf>>, (参照日 2020年11月13日).
- 米田 雅一, アフターコロナに向けて加速する世界のグリーンリカバリー政策, 第1回 FC-Cubic オープンシンポジウム講演会資料 (2020), available from < [https://fc-cubic.or.jp/wordpress/?page\\_id=121](https://fc-cubic.or.jp/wordpress/?page_id=121)>, (参照日 2020年11月13日).