

最先端・次世代研究開発支援プログラム  
事後評価書

|            |                                 |
|------------|---------------------------------|
| 研究課題名      | ナノプロトニクス燃料電池の創成                 |
| 研究機関・部局・職名 | 北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・准教授 |
| 氏名         | 長尾 祐樹                           |

## 【研究目的】

本研究提案では、本申請者が独自に見出すことができたナノ・サブマイクロ領域で観測されるプロトンキャリアーの高速輸送現象（ナノプロトニクス現象）を利用し、そのメカニズムを明らかにすることで、ボトムアップとトップダウンプロセスの融合を通じて、機能性分子の素子化をはかりながら化学素子化燃料電池の開発をめざすことを目的とした。

携帯電子機器が小型化される一方で、必要な電力は増加しており、実際のデバイス開発では、限られた寸法内で電源の出力密度をより高くすることが望まれている。リチウムイオン電池の出力密度が  $200\text{--}400\text{mW/cm}^3$  程度であるのに対して、固体高分子形マイクロ燃料電池 ( $\mu$ PEFC) のそれは、 $800\text{ mW cm}^{-3}$  と、実は出力密度が2倍以上にも及ぶことは、 $\text{CO}_2$  を排出しないグリーンなイメージの浸透と比較して十分に知られていない。このことから、本来あるべき産業構造の姿は、機器の小型化に比例して、より高い出力密度が求められる結果、リチウムイオン電池よりも  $\mu$ PEFC のニーズが増加するはずであるが、現状では充放電が容易で扱いが便利である「使い勝手」が産業のニーズにマッチしていると思われる。もし仮に、 $\mu$ PEFC がリチウムイオン電池に対して、10倍以上の圧倒的な出力密度を示すことが可能となれば、そこにイノベーションが生じるはずである。

この高出力密度化のイノベーションをもたらすためには、微細加工技術であるMEMS (Micro Electro Mechanical System) プロセスが有効であることは誰もが想像するところである。しかしながら、 $\mu$ PEFC では固体酸化物形燃料電池 (SOFC) と異なり、水素と酸素を隔てる電解質膜や溝に水素や酸素が存在するセパレータは、高出力密度化（体積を稼ぐ）のためにそれらのある程度まで薄くしてしまうと酸素極側への水素透過による極端な特性低下を引き起こしてしまう。このため、発電方向が電解質膜やセパレータ面に対して垂直方向であるセルデザインでは、MEMS プロセスを十分に活かすことができず、出力密度が  $800\text{ mW cm}^{-3}$  程度で頭打ちになってしまう傾向がある。

その一方で、セルデザインが発電方向とスタック方向が異なる方向であれば、膜厚を発電方向に十分とることで水素ガスクロスオーバーを防ぐことができるため、MEMS 技術を利用すればするほど、高出力密度化が可能となる。しかしながら、この実現のためには、側面の表面積の不十分さを補うだけの、Nafion を遥かに超える高いプロトン伝導性 (室温で  $1 - 10\text{ S cm}^{-1}$ ) を示す電解質膜が不可欠となる。そのため、次世代の移動型電源とし

での  $\mu$ PEFC の開発には何らかのブレークスルーが必要であった。

申請者は、幸運にも薄膜化によるナノ・サブマイクロメートル領域において、自己組織化電解質膜の面内方向のプロトン伝導性がバルクのそれと比較して 10 - 2000 倍も向上する プロトン伝導促進現象 (ナノプロトニクス現象) を世界にさきがけて見出すことができた。そのため、これまで  $\mu$ PEFC では絶対に不可能とされてきた MEMS 技術の極限利用を可能性が示唆された。本申請課題では、必要な高プロトン伝導性はプロトン伝導促進現象を利用することで可能にし、トップダウンプロセスであるインプリント技術 (MEMS) とボトムアッププロセスである自己組織化技術 (高分子化学) および異種機能接合技術 (錯体化学) を駆使することで、将来の携帯電子機器にリチウムイオン電池代替としてイノベーションを与えることができる、10 倍以上の圧倒的な出力密度 ( $4000 \text{ mWcm}^{-3}$ ) の新デザイン  $\mu$ PEFC (ナノプロトニクス燃料電池) の開発を目指す。

### 【総合評価】

|                          |                |
|--------------------------|----------------|
| <input type="checkbox"/> | 特に優れた成果が得られている |
| <input type="checkbox"/> | 優れた成果が得られている   |
| <input type="radio"/>    | 一定の成果が得られている   |
| <input type="checkbox"/> | 十分な成果が得られていない  |

### 【所見】

#### ① 総合所見

研究代表者が独自に見出したプロトン高速輸送現象と MEMS 技術とを組み合わせ、高出力密度の燃料電池を生み出そうとする当初の計画は大変優れたものであるが、実際の研究内容は現象解明と触媒形成に重点が置かれており、ナノインプリント法によるセル作製に関する検討が不十分であると言わざるを得ない。漏れのないセル作製に今後とも研究を重ね、当初の優れたアイデアの実現の道を切り開いてほしい。

#### ② 目的の達成状況

・ 所期の目的が

( 全て達成された ・  一部達成された ・  達成されなかった)

研究代表者が独自に見出した高速プロトン輸送現象そのものについては様々な知見が得られ、応用上の指針を与える段階にまで達してきており、安定性の問題がクリアできれば数値目標としている  $1 \text{Scm}^{-1}$  にも達しつつある。その一方で、トップダウンプロセスについては、当初見込んでいた段階には達しておらず、更なる研究の遂行を期待する。

### ③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が  
(ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が  
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

プロトンの高伝導性をもたらすメカニズムが解明できており、伝導性を制御する知見を与えたことは今後の材料設計に対して貢献するものであり、先進的な成果である。また、実際に高伝導性の部材を実現したことは優位性が高い。その意味において、プロトンの高伝導性の機構を明らかにしたことを高く評価する。今後はさらに、燃料電池セルとして実現し、当初の目標である出力密度が大幅に向上する点の実証されることを期待する。

また、MEMS 技術を用いて燃料電池を水平方向に製作する方法は新規性がある。MEMS やインクジェットを用いた製造法は大量生産に向いており、本研究が提案する燃料電池は工業的な観点からメリットが大きいと予想される。

### ④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が  
(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が  
(見込まれる ・ 見込まれない)

現状の燃料電池開発で大きな課題であった、効率アップと白金触媒量低減に対して、本研究で得られている、効率 10 倍以上、脱白金触媒化という成果は、画期的なもので十分当該研究分野の進展に寄与するものである。

今後のグリーン・イノベーションの中核をなす大電力エネルギーのグリーン化に向けて本研究成果の寄与は大きい。

### ⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

セルとしての実現がまだ完成しておらず、研究の遅れが生じているが、対策はとられていることからマネジメントは適切と判断される。セルの実現は必須であることから、残り期間において適切な研究の管理が必要である。研究成果の発信に関しては、数多くの論文発表、会議発表がなされており十二分である。

基本特許は出願しているようであるが、もう少し、応用特許を出して知的財産権を強化していくことが重要である。