

プレスリリース

令和8年2月9日

各報道機関 御中

山梨大学
早稲田大学
信州大学

高性能高耐久性燃料電池を可能とする電解質膜を開発

～フッ素を全く含まない高分子複合膜でPFAS規制にも対応～

山梨大学クリーンエネルギー研究センター／水素・燃料電池ナノ材料研究センター・早稲田大学理工学部院の宮武 健治（みやたけ けんじ）教授、信州大学社会実装研究クラスター 繊維科学研究所の金 翼水（きむ いくす）卓越教授、山梨大学クリーンエネルギー研究センターのLiu Fanghua（りゅう ふあんふあ）研究助教（元早稲田大学ナノ・ライフ創成研究機構次席研究員）の研究グループは、水素と酸素を用いて発電する固体高分子形燃料電池（PEFC）※1の性能と耐久性を大幅に向上させる新たなプロトン導電性電解質膜※2の開発に成功しました。この電解質膜は、親水部構造としてスルホン酸基を持つフェニレン基、疎水部構造としてベンゼン環が5つ連結したキンケフェニレン基と脂肪族基の3成分からなる高分子電解質と、補強材として多孔性のポリエチレン基材を組み合わせた複合膜で、高いプロトン導電率、大きな伸び率、優れたガスバリア性を併せ持ち、高温（120°C）での高性能な燃料電池発電と、過酷な加速劣化試験で100,000サイクル以上の耐久性を達成しました。

高分子電解質およびポリエチレン（PE）いずれにもフッ素が全く含まれないことから、人体や環境に対する悪影響が懸念されているPFAS※3にも該当することが無く、次世代の固体高分子形燃料電池用の電解質膜として大変有望な新材料です。低炭素社会の早期実現にも大きく貢献しうる技術として、早期実用化が期待されます。

発表のポイント

- スルホン酸基、フェニレン基、脂肪族基の組み合わせと組成を最適化したフッ素を全く含まない高分子電解質の開発に成功した。
- 高分子電解質と多孔性ポリエチレン基材を組み合わせて作製した複合電解質膜は、80～120°Cの温度範囲で0.3～0.7S/cmという高プロトン導電率を達成した。
- 開発した複合電解質膜を用いた燃料電池は、120°C、30%相対湿度の条件において、市販のフッ素系電解質膜を凌駕する性能(>150mW/cm²)と耐久性(>100,000サイクル)を達成した。
- 電気自動車（特に、トラックなどのヘビーデューティービークル）や家庭用の燃料電池用電解質膜としての応用が期待できる。

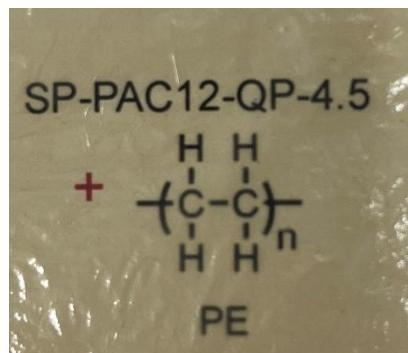
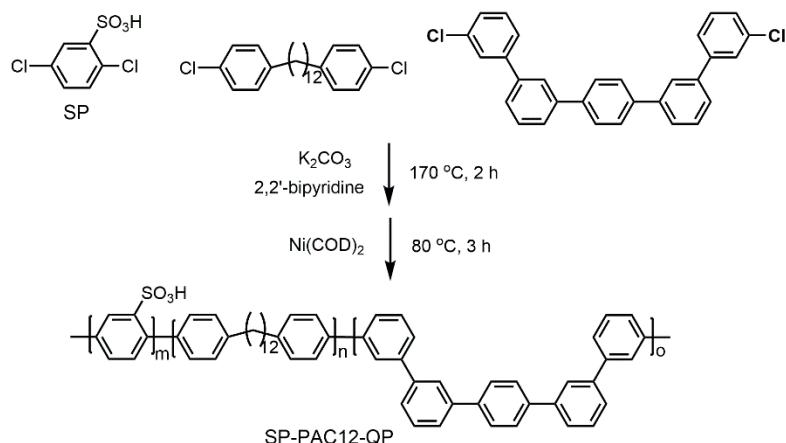


図1：本研究で開発したプロトン導電性高分子電解質（SP-PAC12-QP）の合成方法、およびそれと多孔性ポリエチレンを組み合わせた複合膜の写真。茶色透明で均一な薄膜構造が、高プロトン導電率と化学的・機械的安定性の両立を可能にする。

本研究成果は、2026年2月3日にドイツ化学会が発行する学術雑誌『Advanced Materials』のオンライン版で公開されました。

【論文情報】

雜誌名 : Advanced Materials

論文名 : Universal Fluorine-free Proton Exchange Polymers for High-performance and Durable Fuel Cells Operable under Severe Conditions

DOI : 10.1002/adma.202520137

(1) これまでの研究で分かっていたこと

プロトン導電性高分子を電解質膜として用いる PEFC は、常温から 80°C 程度の温度で発電することができる所以使いやすく、電気自動車や家庭用の電源として商品化されています。これまでの PEFC はフッ素原子と炭素原子を主成分とするフッ素系高分子電解質と、延伸したポリテトラフルオロエチレン (ePTFE) からなる多孔材基材を組み合わせた複合膜が用いられていますが、合成方法が限られており高価であること、ガスバリア性（気体の通しにくさ）が不十分であること、フッ素原子を多く含むことから PFAS の一種として人体や環境への長期的な影響が懸念されること、が課題とされています。

これまでにフッ素原子を含まない高分子電解質膜が数多く開発されてきましたが、フッ素系高分子電解質膜に比べてプロトン導電率や化学的安定性が劣っており、PEFC 用に適した材料は見つかっておりませんでした。

(2) 今回の研究で新たに実現しようとしたこと、明らかになったこと

プロトン導電性を発現するための構造（スルホン酸基を持つフェニレン基）、化学的安定性を発現するための構造（5つのベンゼン環が連結したキンケフェニレン基）、機械的安定性を発現するための脂肪族基に着目し、これら3つの成分を組み合わせた高分子電解質を設計しました。各成分の組成比と脂肪族基の長さを変えた一連の高分子電解質を合成し、それらが電解質物性に及ぼす効果を明らかにしました。これにより得られた最適構造をもつ高分子電解質を多孔性のポリエチレン基材と複合させることにより、従来までの非フッ素系高分子電解質膜や市販のフッ素系高分子電解質膜と比べても優れた性能を達成することができました。

(3) 今回、新しく開発した手法

三成分からなる高分子電解質の物性は、その組成に加えて脂肪族基の長さによっても大きく変化することを見出しました。今回検討したなかでは、炭素数が 12 のドデシル基が疎水部の中で 67 mol%含まれる時（スルホフェニレン基：ドデシル基：キンケフェニレン基=15.5:2:1）に高分子量体（重量平均分子量が 141,500）として得られ、エタノールなどの低級アルコールにも可溶でした。この高分子電解質を膜厚が 7 μm、空隙率が 44% の PE 基材と組み合わせたところ、高分子電解質が均一に含浸した複合膜（SP-PAC12-QP-PE7）を得ることができました。この複合膜は 80~120°C の温度範囲において優れたプロトン導電特性を示し、フッ素系電解質膜と同等の性能でありました。また、80°C、60%RH 条件下における破断伸びは 300% を超えており、薄膜でありながら伸縮性にも富んでいます。複合電解質膜の両面に電極触媒層を塗布して燃料電池特性を測定したところ、フッ素系電解質複合膜に比べて水素透過率は 1/4 程度でありガスバリア性に優っていました。また、プロトン導電率と同じ温度範囲で優れた発電特性が得られること、開回路条件（電流を流さない条件）で乾燥と湿潤を繰り返す加速劣化試験では 100,000 サイクルを超えることを実証しました。この耐久性はフッ素系電解質複合膜の 1.3 倍であり、フッ素を全く含まない材料では異例の安定性を確認出来ました。

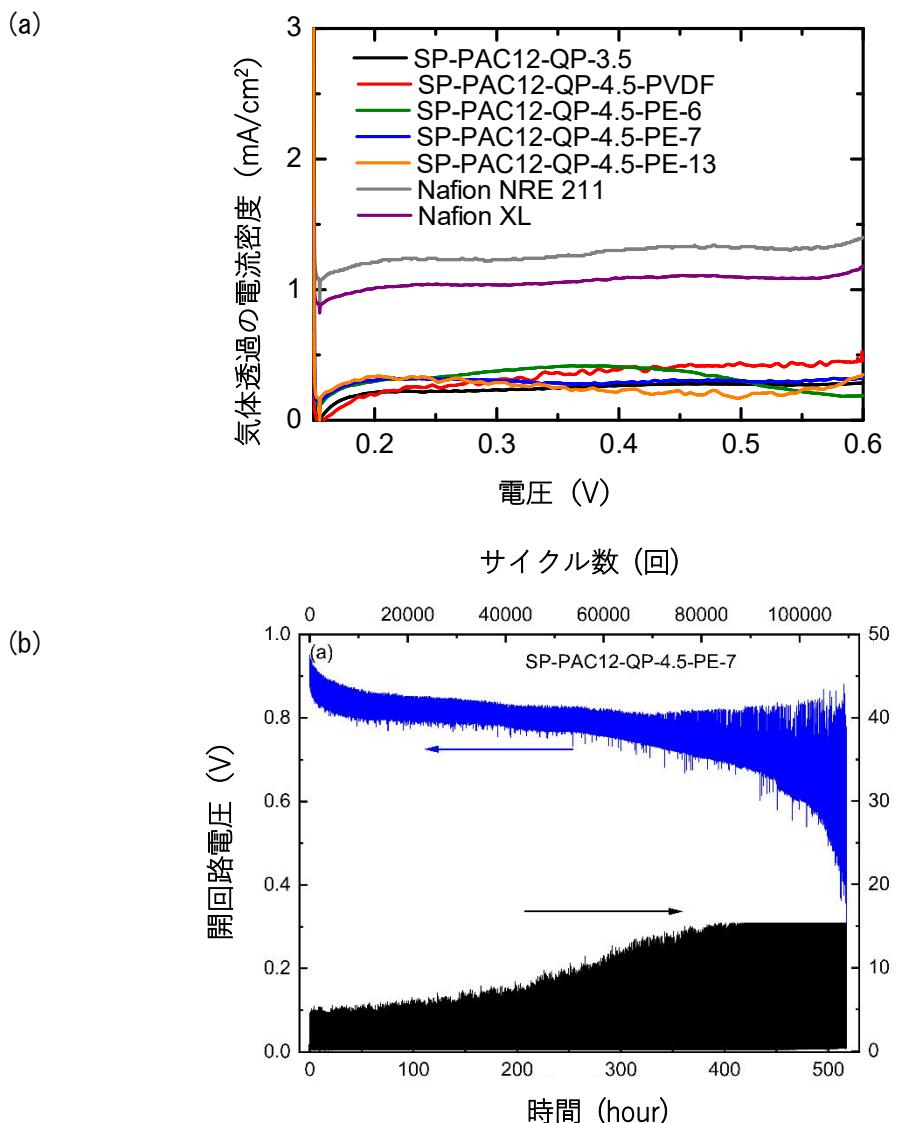


図 2 : (a) SP-PAC-QP 複合膜の気体透過率（フッ素系複合電解質膜との比較）と (b) 加速劣化耐久試験。

(4) 研究の波及効果や社会的影響

市販されている Gore Select や Nafion などのフッ素系高分子電解質は優れた耐久性を持ちますが、その優れた物性はフッ素原子が共有結合で炭素原子に結合した高分子構造に由来します。フッ素原子を含まない高分子電解質は構造の自由度が高く合成方法も多様であるため、非常に多くの材料が提案されていますが、フッ素系高分子電解質にはかなわないと考えられてきました。

本研究で開発したプロトン導電性高分子電解質である構造と組成を最適化した SP-PAC12-QP-4.5 に、PE 多孔基材を複合させた電解質膜は、従来の非フッ素系高分子電解質膜が抱えていた欠点を克服し、しかもガスバリア性などの利点も併せ持っています。実用的な運転条件や、今後、商用自動車などのヘビーデューティーバイクル（タクシー、トラック、バスなど）への応用を想定した高温運転や過酷な劣化試験条件での運転でも優れた発電特性と耐久性を示し、新材料の可能性を実証することができました。

今回の成果は基礎研究であるため小さなセル（電極面積が 4.41cm²）であります、今後、より大きなセルでの性能確認に加えて、複数のセルを積層したスタックでの検証を関連企業との共同研究で実施する予定であり、実用化に向けた検討を加速して進めます。

(5) 今後の課題

本研究で開発した SP-PAC12-QP-4.5 の合成には、重合促進剤として 0 倍のニッケル錯体（ビスシクロオクタジエニルニッケル）を用いています。この錯体は重合反応に対する活性が高く、高分子量体の高分子電解質を合成するのに適しているのですが、量産化されておらず試薬ベースでも高価です（1g あたり数千円程度）。この錯体を用いずに重合を促進することによって、低コスト化を進める検討を行っています。これら課題に加えて、量合成や連続製膜などへもチャレンジしていきます。

(6) 研究者のコメント

フッ素を含まないプロトン導電性高分子電解質膜のブレークスルー技術として、学術的な意義はもちろん、実用的な観点からも大きな成果であると考えております。3種類の構造を含む三元共重合体は様々な組み合わせが可能であるため、今回とは異なる成分を用いることにより、より多機能な高分子電解質が創出できる可能性があります。PEFC に限らず水素製造のための水電解セルや二次電池、センサーなど、様々な固体電気化学デバイスへの展開に繋げていきたいと思います。

(7) 用語解説

※1 固体高分子形燃料電池（PEFC）

PEFC は Polymer Electrolyte Fuel Cell の略称であり、負極と正極で高分子電解質膜を挟み、負極に水素、正極に酸素を供給して電気を発生させる電池。1つのセルでセル電圧（開回路電圧）は 1.0V 程度であり、実用的には積層（スタック）させて高電圧を得る。

※2 プロトン導電性高分子電解質膜

酸性基を含む高分子から構成され、水素イオン（プロトン）が選択的に透過する薄膜。燃料電池や電解セル、センサーなどの電気化学デバイス用の固体電解質として用いられている。PEFC 用の電解質膜は、負極で発生したプロトンを正極に運ぶ役割を担っており、プロトン導電率、ガスバリア性、機械強度、耐久性などの物性が必要とされる。

※3 PFAS

Per- and polyfluoroalkyl substances の略称であり、アルキル基に複数のフッ素原子が結合した有機フッ素化合物の総称である。人体や環境への長期的な影響が懸念されるため、製造、使用、販売への規制が世界中で検討されている。

(8) 論文情報

雑誌名 : Advanced Materials

論文名 : Universal Fluorine-free Proton Exchange Polymers for High-performance and Durable Fuel Cells Operable under Severe Conditions

執筆者名 (所属機関名) : Fanghua Liu*、Kenji Miyatake (宮武 健治) *、**、Ick Soo Kim***、Ahmed Mohamed Ahmed Mahmoud*、Vikrant Yadav*、Fang Xian*

*山梨大学クリーンエネルギー研究センター/水素・燃料電池ナノ材料研究センター

**早稲田大学理工学術院

***信州大学社会実装研究クラスター 繊維科学研究所

掲載日時 : 2026年2月3日

掲載 URL : <https://doi.org/10.1002/adma.202520137>

DOI : 10.1002/adma.202520137

(9) 研究助成

研究費名 : 文部科学省 科学研究費補助金

研究課題番号 : 23H02058

研究課題名 : 全固体空気二次電池の創製 : 原理実証と有機負極活物質の検討

研究分担者名 (所属機関名) : 宮武 健治 (山梨大学)

研究費名 : 文部科学省 データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト

研究課題番号 : JPMXP1122712807

研究課題名 : 再生可能エネルギー最大導入に向けた電気化学材料研究拠点 (DX-GEM)

研究分担者名 (所属機関名) : 宮武 健治 (山梨大学)

【研究内容に関するお問い合わせ先】

山梨大学クリーンエネルギー研究センター・早稲田大学理工学術院

教授 宮武 健治

Tel: 055-220-8707 E-mail: miyatake@yamanashi.ac.jp

Tel: 03-6273-9470 E-mail: kmiyatake@aoni.waseda.jp

【発信元】

山梨大学総務企画部総務課広報・渉外室

Tel: 055-220-8005, 8006 E-mail: koho@yamanashi.ac.jp

早稲田大学広報室広報課

Tel: 03-3202-5454 E-mail: koho@list.waseda.jp

信州大学総務部総務課広報室

Tel: 0263-37-3056 E-mail: shinhp@shinshu-u.ac.jp