



配布先:文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

2026 年 9 月 30 日

報道機関 各位

高活性・高耐久な燃料電池用触媒を開発 ～白金をグラフェンで包み長寿命化、自動車など燃料電池の利用拡大へ道～

【本研究のポイント】

- ・白金ナノ粒子を窒素ドーピング数層グラフェン^{注1)}で包み、単層カーボンナノチューブ^{注2)}上に固定した新しい燃料電池用触媒を開発。
- ・グラフェンと白金の相互作用により、市販触媒を上回る酸素還元反応^{注3)}活性を実現。
- ・実際の燃料電池を模した膜電極接合体^{注4)}を用いた試験で、30,000 サイクル後も触媒表面積の 96.9%を維持する高い耐久性を実証。
- ・燃料電池の高性能化・長寿命化を通じて、自動車や大型輸送機械への普及拡大に貢献。

【研究概要】

名古屋大学大学院工学研究科および未来社会創造機構マテリアルイノベーション研究所の Miftakhul Huda(ミフタフル フダ)特任講師、于 初陽(ウ チューヤン) 博士後期課程学生、松尾 豊 教授らの研究グループは、株式会社名城ナノカーボンと共同で、窒素を導入した数層グラフェンで白金ナノ粒子を包み込み、単層カーボンナノチューブ(SWCNT)上に固定した新しい燃料電池用電極触媒「Pt@N-FLG/SWCNT」を開発しました。固体高分子形燃料電池(PEFC)^{注5)}は、水素と酸素から電気を生み出し、発電時に二酸化炭素を排出しないことから、水素社会を支える重要なエネルギー変換技術として期待されています。一方、その普及には、電極に用いる高価な白金触媒の高活性化と長寿命化、さらに白金を固定するカーボン材料の腐食抑制が重要な課題となっています。本研究では、白金ナノ粒子を窒素ドーピング数層グラフェン(N-FLG)で包むことで白金自体を保護すると同時に、従来のカーボンブラックに代えて、化学的耐久性に優れる SWCNT を触媒担体として利用しました。さらに、窒素ドーピンググラフェンと白金との強い相互作用が白金の電子状態を変化させ、酸素還元反応に適した状態を形成することを明らかにしました。その結果、開発した触媒は市販の白金/カーボン(Pt/C)触媒を上回る高い酸素還元反応活性を示しました。実際の燃料電池を模した膜電極接合体(MEA)で評価したところ、30,000 サイクルの加速耐久試験^{注6)}後も電気化学的表面積^{注7)}の 96.9%を保持しました。また、1.0～1.5 V という厳しい高電位条件で 5,000 サイクルの耐久試験を行った後も、電気化学的表面積の低下は 27.2%に抑えられ、高電流密度 1.5 A/cm²において電圧低下が観測されませんでした。

これらの結果は、米国エネルギー省(DOE)が 2025 年目標として設定した電極触媒とカーボン担体の両方の耐久性基準を上回るものであり、高性能かつ長寿命な次世代燃料電池の実現につながる成果です。

本研究成果は、2026 年 8 月 24 日付で米国化学会の触媒専門誌『ACS Catalysis』にオンライン掲載されました。

【研究背景】

固体高分子形燃料電池(PEFC)は、水素と空気中の酸素を電気化学的に反応させることで発電するエネルギー変換デバイスです。高い発電効率を持ち、発電時の生成物が基本的に水であることから、カーボンニュートラル社会の実現に向けた重要な技術の一つとされています。特に、自動車だけでなく、大型トラック、船舶、鉄道、建設機械などへの燃料電池の利用拡大が期待されています。こうした用途では、燃料電池を長期間使用する必要があるため、これまで以上に高い耐久性が求められます。

PEFC のカソード(空気極)では、酸素を水へと還元する酸素還元反応(ORR)が起こります。しかし、この反応は進行が遅いため、現在は主として白金(Pt)ナノ粒子をカーボンブラック上に固定した Pt/C 触媒が用いられています。白金は高価な貴金属であるだけでなく、燃料電池を長期間作動させると、白金ナノ粒子の溶解、凝集、移動などによって有効な触媒表面積が減少します。また、白金を支えるカーボン担体も高電位条件で腐食するため、触媒層の構造自体が劣化します。

そのため、燃料電池の長寿命化には、白金触媒そのものを劣化から守ること、白金を支えるカーボン担体を腐食から守ること、という二つの課題を同時に解決する必要があります。本研究グループは、この課題に対し、「白金をグラフェンで保護し、それを高耐久なカーボンナノチューブで支える」という新しい触媒構造に着目しました。

【研究成果】

1. 白金ナノ粒子を窒素ドーピンググラフェンで包む

本研究では、単層カーボンナノチューブ(SWCNT)上に白金ナノ粒子を固定し、その周囲を窒素ドーピング数層グラフェン(N-FLG)で覆った Pt@N-FLG/SWCNT 触媒を作製しました。グラフェン層は白金ナノ粒子を外部環境から保護する役割を果たし、白金の溶解や凝集を抑制します。一方、単に白金を炭素層で覆うだけでは、反応物である酸素が白金表面へ到達しにくくなり、触媒活性が低下する可能性があります。本研究では、グラフェンに窒素原子を導入することで、白金とグラフェンとの間に強い相互作用を形成しました。

2. Pt-N 相互作用により白金の電子状態を制御

X 線光電子分光法(XPS)や X 線吸収分光法などによる詳細な解析から、窒素ドーピンググラフェンと白金との相互作用によって、白金の 5d 軌道の空孔数および酸化状態が低下し、白金の d バンド中心^{注8)}が変化することが分かりました。この電子状態の変化によって酸素還元反応に適した触媒表面が形成され、高い触媒活性につながったと考えられます。

回転ディスク電極を用いた酸素還元反応試験では、Pt@N-FLG/SWCNT は 96.3 m²/g の電気化学的表面積(ECSA)と、0.9 V において 369 mA/mg の質量活性を示し、市販 Pt/C 触媒を上回る性能を示しました。

3. 30,000 サイクル後も触媒表面積を 96.9%保持

さらに、開発した触媒を実際の燃料電池のカソード触媒層として膜電極接合体(MEA)に組み込み、0.6~0.95 V の電位サイクルによる加速耐久試験を行いました。その結果、30,000 サイクル後にも初期 ECSA の 96.9%を保持しました。また、0.8 A/cm²にお

ける電圧低下は 22.8 mV に抑えられました。これは、窒素ドーピンググラフェンによる白金ナノ粒子の保護が、燃料電池の実使用に近い環境においても有効であることを示しています。

4. SWCNT によりカーボン担体の腐食も抑制

燃料電池の起動・停止時などには、カソード側が一時的に高い電位にさらされ、カーボン担体の腐食が急速に進行することがあります。そこで、1.0～1.5 V の三角波を用いる厳しい高電位加速ストレス試験を行いました。5,000 サイクル後でも ECSA の低下は 27.2%に抑えられ、さらに 1.5 A/cm² という高い電流密度において電圧低下は観測されませんでした。

SWCNT は一般的なカーボンブラックと比較して結晶性の高い炭素構造を有しており、高電位条件でも腐食しにくいことが、この高い耐久性につながったと考えられます。この結果、Pt@N-FLG/SWCNT は、米国 DOE が 2025 年目標として設定している電極触媒の耐久性とカーボン担体の耐久性という二つの目標をともに上回る性能を示しました。

【今後の展開】

燃料電池の本格普及に向けては、高価な白金の使用量を低減するとともに、触媒を長期間使用できるようにすることが重要です。本研究では、「窒素ドーピンググラフェンによる白金ナノ粒子の保護」と「SWCNT による高耐久な触媒担体」を組み合わせることで、触媒活性と耐久性を同時に向上できることを示しました。

今後、白金使用量のさらなる低減、触媒層構造の最適化、実用的な燃料電池運転条件での長期評価を進めることで、高性能かつ長寿命な燃料電池への応用が期待されます。特に、長時間の連続運転や頻繁な起動・停止が求められる大型トラック、船舶、鉄道、建設機械などへの燃料電池の利用拡大に貢献することが期待されます。

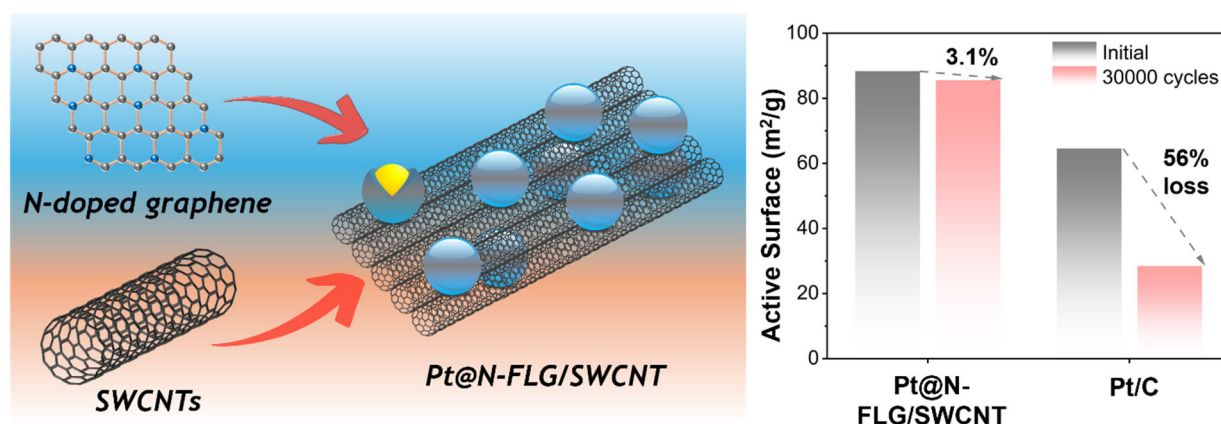


図1. 開発した高耐久燃料電池触媒の概要. 窒素ドーピング数層グラフェン(N-FLG)で白金(Pt)ナノ粒子を包み、単層カーボンナノチューブ(SWCNT)上に固定した Pt@N-FLG/SWCNT 触媒の概念図(左)。30,000 サイクルの加速耐久試験後も電気化学的表面積(ECSA)の低下は 3.1%にとどまり、市販 Pt/C 触媒(56%低下)と比べて高い耐久性を示した(右)。

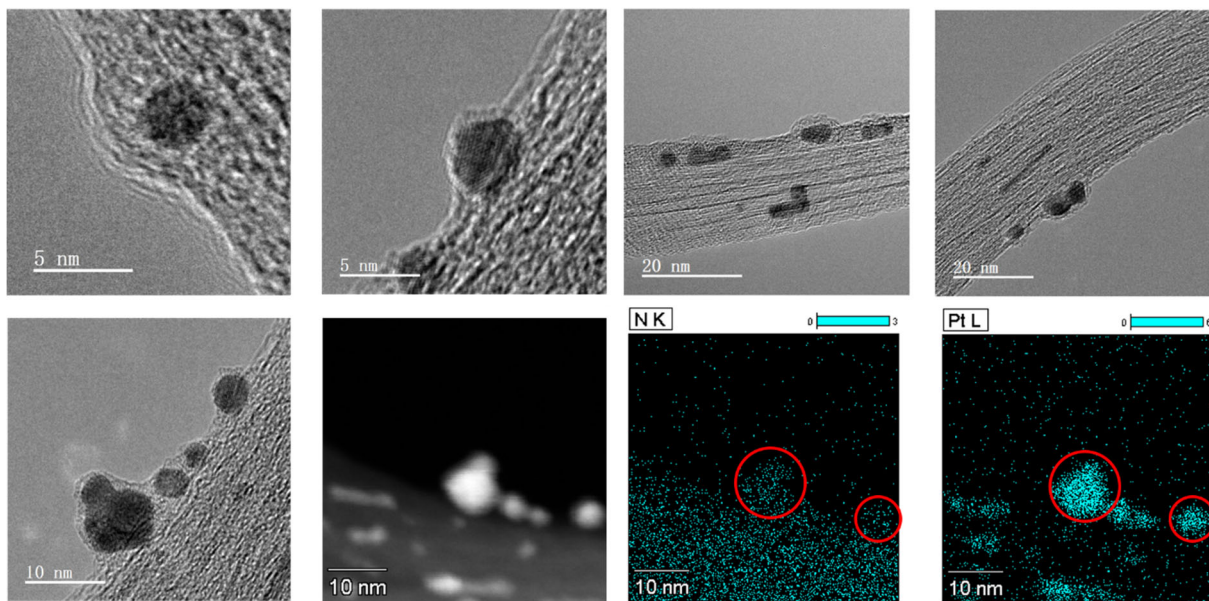


図2. 電子顕微鏡による Pt@N-FLG/SWCNT 触媒の構造解析. 透過型電子顕微鏡(TEM)観察により、SWCNT 上に固定された Pt ナノ粒子の周囲を数層のグラフェンが覆う構造を確認した。走査透過型電子顕微鏡(STEM)像および元素マッピングから、Pt ナノ粒子とその周辺に窒素(N)が分布していることが示された。

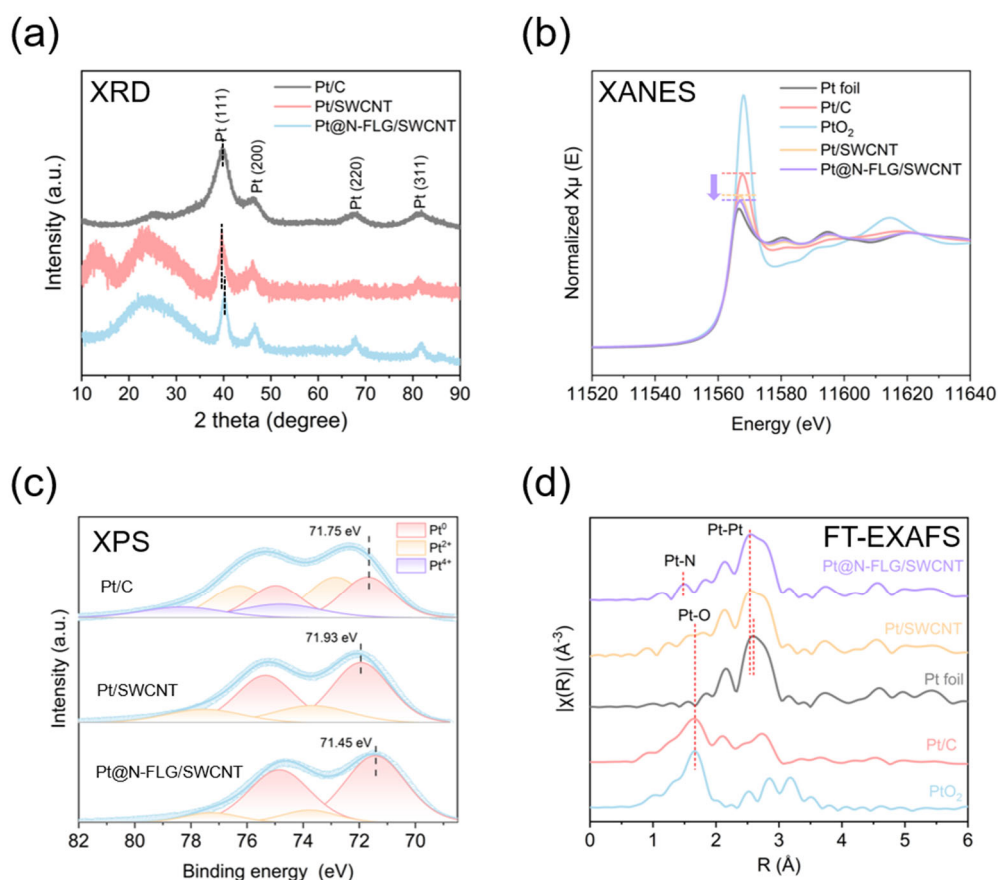


図3. 窒素ドーピンググラフェンと Pt の相互作用の構造・電子状態解析. (a) X 線回折(XRD)、(b) X 線吸収端近傍構造(XANES)、(c) Pt 4f X 線光電子分光(XPS)、(d) フーリエ変換広域 X 線吸収微細構造(FT-EXAFS)。これらの解析から、Pt@N-FLG/SWCNT では Pt-N 相互作用が形成され、Pt の酸化状態や電子状態が変化していることが示された。この電子状態の制御が酸素還元反応(ORR)の高活性化に寄与すると考えられる。

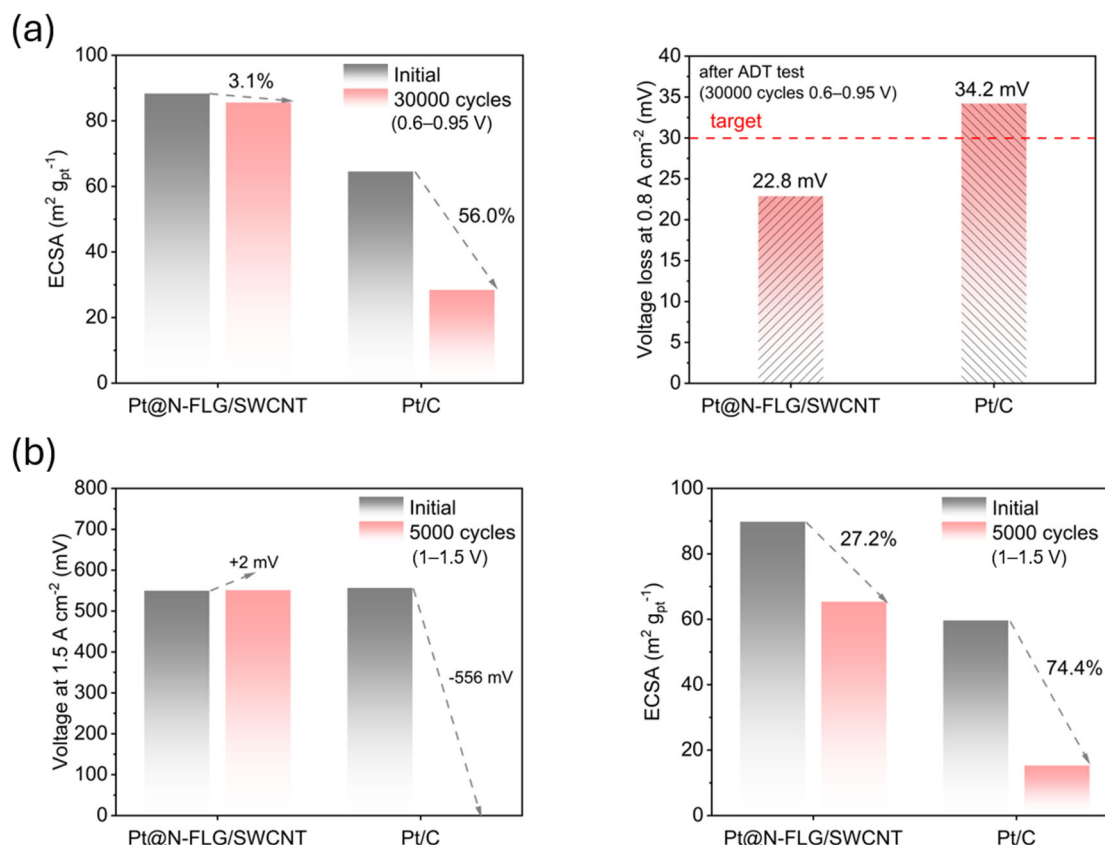


図4. 実際の燃料電池(MEA)における Pt@N-FLG/SWCNT 触媒の耐久性. (a) 0.6~0.95 V の電位サイクルによる触媒耐久試験. 30,000 サイクル後も ECSA を 96.9%保持し、0.8 A/cm²での電圧低下は 22.8 mV に抑えられた。(b) 1.0~1.5 V の高電位サイクルによるカーボン担体耐久試験. 5,000 サイクル後の ECSA 低下は 27.2%で、1.5 A/cm²における電圧低下は観測されなかった。比較として市販 Pt/C 触媒の結果を示す。

【用語説明】

- 注 1)窒素ドーパ層グラフェン(N-FLG:Nitrogen-Doped Few-Layer Graphene):
炭素原子が六角形状に配列したグラフェン数層からなる構造に、一部の炭素原子を置き換えるなどして窒素原子を導入した材料。窒素の導入によって電子状態や化学反応性を制御することができる。
- 注 2)単層カーボンナノチューブ(SWCNT:Single-Walled Carbon Nanotube):
炭素原子からなるグラフェンシートを直径数ナノメートル程度の筒状にしたナノ材料。高い電気伝導性、機械的強度、化学的安定性を有する。
- 注 3)酸素還元反応(ORR:Oxygen Reduction Reaction):
燃料電池のカソード(空気極)で酸素が還元され、水を生成する反応。反応速度が比較的遅いため、白金などの高性能な触媒が必要となる。
- 注 4)膜電極接合体(MEA:Membrane Electrode Assembly):
高分子電解質膜の両側に触媒層を配置した、燃料電池の発電反応が実際に起こる中核部品。

注 5) 固体高分子形燃料電池(PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell):

水素と酸素の電気化学反応によって電気を取り出す燃料電池。比較的低温で作動し、高い出力密度を持つことから、自動車用をはじめ幅広い用途への応用が進められている。

注 6) 加速耐久試験(ADT/AST):

燃料電池を長期間使用した際に生じる触媒や担体の劣化を、電位を繰り返し変化させるなどの方法によって短時間で評価する試験。

注 7) 電気化学的表面積(ECSA: Electrochemically Active Surface Area):

触媒中の白金表面のうち、実際に電気化学反応に利用できる表面積。燃料電池触媒の性能や劣化を評価する代表的な指標の一つ。

注 8) d バンド中心:

金属中の d 電子が持つエネルギー状態を表す指標。触媒表面への酸素などの吸着の強さと関連しており、金属触媒の活性を理解するための重要な指標となる。

【論文情報】

雑誌名: ACS Catalysis

論文タイトル:

Pt-N Interactions and Nitrogen-Doped Graphene-Shell Encapsulation in Platinum Electrocatalysts Supported by SWCNTs for Enhanced ORR Activity and Durability

著者:

Chu-Yang Yu, Qiao Chen, Xue-Lin Zheng, Kiho Yamada, Takeshi Hashimoto, Nagahiro Saito, Masaya Kawasumi*, Miftakhul Huda*, Yutaka Matsuo*

(*責任著者)

掲載日: 2026 年 8 月 24 日(オンライン)

DOI: 10.1021/acscatal.6c03908

URL: <https://doi.org/10.1021/acscatal.6c03908>

【研究支援】

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援(JPNP20003)を受けて実施されました。また、本研究の一部に、愛知県が公益財団法人科学技術交流財団に委託し実施している「知の拠点あいち重点研究プロジェクト V 期」の研究成果が使われています。



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

