

# NEDO 海外レポート

2016.4.22

1116

1	【材料・ナノテクノロジー分野】 新方法が燃料電池触媒の研究を促進(独)	2015/10/8 公表	1
2	【蓄電池・エネルギーシステム分野(蓄電池)】 「究極の」バッテリーに向けた新設計(英国)	2015/10/29 公表	4
3	【省エネルギー分野】 エネルギー長官がパリの COP21 に先立って革新的エネルギー技術プロジェクト 41 件に 1 億 2,500 万ドルを提供(米国)	2015/11/23 公表	7
4	【材料・ナノテクノロジー分野】 ドーピングで新たな熱電材料をパワーアップ(米国)	2015/11/30 公表	11
5	【電子・情報通信分野】 ナノエレクトロニクスエンジニアらが電力限界を克服したトランジスタを開発(米国)	2015/12/7 公表	14
6	【材料・ナノテクノロジー分野】 1/100のコストで作るナノデバイス(米国)	2015/12/18 公表	18
7	【蓄電池・エネルギーシステム分野(蓄電池)】 安定した「超酸化物」が新型蓄電池への扉を開く(米国)	2016/1/12 公表	22
8	【新エネルギー分野(太陽光発電)】 エネルギー変換効率20.2%の安価な太陽電池(スイス)	2016/1/18 公表	25

※ 各記事への移動は Adobe Acrobat の「しおり」機能をご利用ください

URL : [http://www.nedo.go.jp/library/kankobutsu\\_report\\_index](http://www.nedo.go.jp/library/kankobutsu_report_index)

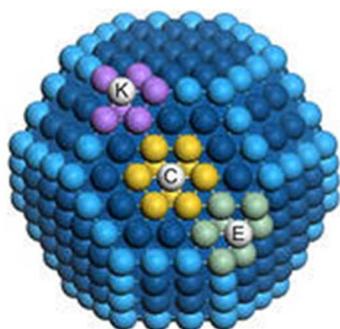
《本誌の一層の充実のため、ご意見、ご要望など下記宛お寄せください。》  
海外レポート問い合わせ E-mail : [q-nkr@ml.nedo.go.jp](mailto:q-nkr@ml.nedo.go.jp)  
NEDO は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の略称です。

【材料・ナノテクノロジー分野】

仮訳

## 新方法が燃料電池触媒の研究を促進 より迅速な設計でより優れた触媒を(独)

2015年10月8日



類似した隣接原子の異なる数がナノ粒子の表面の原子の触媒活性に重要な影響を与えている。

Image: Davod Loffreda, CNRS, Lyon

よく知られた触媒の利用法に自動車の排気ガスの浄化があるが、これはほんの一例である。実際に化学産業全体が触媒反応利用に依存しており、触媒設計はこの触媒反応プロセス向上において重要な役割を担う。国際的な研究チームの科学者らは、この度、形状と吸着の特性を明確に相関させるコンセプトを開発した。そして燃料電池用の白金ベース触媒を新たに設計してこのアプローチを実証した。

水素は理想的なエネルギーキャリアとなり得る。風力発電エネルギーの余剰分を使った水をその構成元素に電気分解することができる。水素は極めて高効率に、燃料電池自動車にエネルギーを供給できる。走行距離は変わらずに、排出されるのは水のみである。しかし、燃料電池自動車はいまだに例外である。これに要する白金(Pt)は大変高価であり、世界の年間白金生産量はすべての燃料電池車を賄うには十分な量でないためである。

燃料電池の主要な構成要素は、酸素を還元する白金触媒である。触媒的に活性であるのは触媒全体の表面ではなく、活性中心と呼ばれるわずかにさらされた特定部分のみであることはよく知られている。

ドイツ、ミュンヘン工科大学 (TUM) とルール大学ボーフム、フランス国立化学研究センターとクロード・ベルナル・リヨン1大学、そしてオランダ、ライデン大学の科学者らの研究チームは、活性中心を形成するものの特定を試みた。

## モデルの研究

触媒開発、及び触媒表面で起こるプロセスのモデリングの一般的な方法は、コンピュータ・シミュレーションであるが、原子数が増えると量子化学計算が直ちに高度に複雑化する。

今回新たに開発された”coordination-activity plots”と呼ばれる手法で、研究チームは形状と吸着特性を精緻に相関させるソリューションを提案している。この手法は最も隣接した原子とそれに隣接する原子の配位数をカウントする”generalized coordinate number (GCN)”に基づいている。

この新手法で計算した結果、標準的な Pt (111)面では GCN 値が 7.5 であったが、coordination-activity plot によれば、最適な触媒ではこの値が 8.3 になるとしている。例えば白金触媒の表面に原子サイズの空洞を導入することで、さらに大きな配位数を得ることができる。

## 実証試験に成功

この新方法論の正確性を実証するために、研究者らは燃料電池用の新しい白金触媒をコンピュータで設計した。このモデル触媒は 3 タイプの合成方法を使って実験的に作成され、すべてのタイプの触媒において最大 3.5 倍の触媒活性を観察した。

「この研究はまったく新しい触媒開発方法を切り拓くものです。これはエネルギーを利用する従来の方法よりもさらに深い見識を提供してくれる、幾何学的有理数に基づいた材料設計なのです。」と Federico Calle-Vallejo は述べ、次のように続ける。「この方法のもう一方の利点は、配位数という化学の基本原理の一つに明確に則ったものであるということです。これがコンピュータ設計の実験実施を大幅に促進します。」

「私たちはこの知識を以て、白金使用量を大幅に減らしたナノ粒子、さらに他の触媒活性金属を含有したナノ粒子を開発できるかもしれません。」と TUM の Aliaksandr S. Bandarenka テニユア・トラック教授は説明し、次のように続ける。「将来的にはこの方法を他の触媒や触媒プロセスにも応用できるかもしれません。」

Science 掲載論文 :

Finding optimal surface sites on heterogeneous catalysts by counting nearest neighbors, Federico Calle-Vallejo, Jakub Tymoczko, Viktor Colic, Quang Huy Vu, Marcus D. Pohl, Karina Morgenstern, David Loffreda, Philippe Sautet, Wolfgang Schuhmann, Aliaksandr S. Bandarenka. Science, october 9., 2015; DOI : 10.1126/science.aab3501

連絡先 :

Prof. Dr. Aliaksandr S. Bandarenka  
Technical University of Munich  
Physics of Energy Conversion and Storage  
James-Franck-Str. 1, 85748 Garching, Germany  
[Tel.: +49 89 289 12531](tel:+498928912531) – [E-mail](#) – [Web](#)



吊るされたメニスカスによる白金電極の計測。

Photo: Wenzel Schürmann / TUM

翻訳 : NEDO (担当 技術戦略研究センター  
松田 典子)

出典 : 本資料は独・ミュンヘン工科大学  
(Technische Universität München (TUM))の  
以下の記事を翻訳したものである。

“New method facilitates research on fuel cell  
catalysts”

<http://www.tum.de/en/about-tum/news/press-releases/short/article/32645/>

(Used with Permission of Technische  
Universität München)

【蓄電池・エネルギーシステム分野】

仮訳

「究極の」バッテリーに向けた新設計(英国)

「究極の」蓄電池の実用的開発を妨げる諸問題の一部を克服する方法を実証

2015年10月29日

非常に高いエネルギー密度と90%を上回る効率を有し、現時点で2,000回超の充放電が可能ナリチウム酸素蓄電池の実験用実証機を、科学者らが開発した。これにより、同蓄電池デバイスの開発を阻む問題の一部について、解決策が示された。

リチウム酸素(リチウム空気)蓄電池は、理論エネルギー密度がリチウムイオン蓄電池の10倍であることから「究極の」蓄電池とうたわれてきた。このエネルギー密度の高さはガソリン並みである。もしこれが実現すれば、現在市場に出回っている蓄電池と比較して、コスト、重量とも5分の1の蓄電池を搭載した電気自動車が、たった1回の充電でロンドンからエジンバラまで(訳注:直線距離で約500km)走行できるようになるだろう。

しかし、他の次世代蓄電池と同様、リチウム空気蓄電池がガソリンに取って代わる前に、対処すべき現実的課題がいくつかある。

今回、ケンブリッジ大学(University of Cambridge)の研究者らは、これらの障害の一部を克服する方法を実証し、従来よりも高容量でエネルギー効率が高く、安定性に秀でたリチウム酸素蓄電池の実験用実証機を開発した。

開発された実証機は、グラフェン(1原子厚の炭素原子シート)製の高多孔質で「フワフワした」炭素電極と、蓄電池内の化学反応を変更することで安定性と効率を改善する添加剤を特徴とする。『サイエンス』誌で報告された[研究結果](#)は期待を抱かせるものだが、同研究に関わった研究者らは、リチウム空気蓄電池の実用化には少なくともあと10年を要すると言及する。

「私たちが達成した研究成果は、リチウム空気蓄電池技術に関する重大な進歩であり、全く新しい研究領域を示唆しています。この蓄電池の化学的構造に特有の問題をすべて解決したわけではありませんが、今回の結果は、実用的なデバイス開発に向けて前進するた

めの道筋を確かに示すものです。」と、同論文の首席著者で同大学 Department of Chemistry の Clare Grey 教授は話した。

我々が日々使用する技術の多くは、年を追うごとにより小さく、速く、安価になっているが、その明らかな例外が蓄電池である。充電せずに何日間も使用できるスマートフォンが開発される可能性を別にすれば、より優れた蓄電池の開発に伴う数々の課題は、2つの主要なクリーン技術、すなわち電気自動車と、太陽光発電用グリッドスケール電力貯蔵の広範な普及の妨げとなっている。

「最も単純な構造の蓄電池は、正極、負極、電解質の3要素から構成されます。」と話すのは、同論文の第一著者で、同じく Department of Chemistry の Tao Liu 博士である。

ノートパソコンやスマートフォンで使用されているリチウムイオン蓄電池では、負極は炭素の一形態であるグラファイトから、正極はリチウムコバルト酸化物等の金属酸化物から作られ、電解質は有機溶媒に溶解させたリチウム塩である。その動作は、両電極間のリチウムイオンの動きによって決定される。リチウムイオン蓄電池は軽量だが、その容量は経年劣化する。また、エネルギー密度が比較的低いため、頻繁に充電する必要がある。

過去10年間にわたり、リチウムイオン蓄電池の様々な代替品が開発されてきたが、リチウム空気蓄電池はその非常に高いエネルギー密度から、究極の次世代エネルギー貯蔵と考えられている。しかし、実証機を目指したこれまでの試作品は、効率とレート性能が低く、望ましくない化学反応を伴ううえ、純酸素中でしか充放電サイクルを実行することができない。

Liu 氏と Grey 氏の研究チームが開発した蓄電池は、過酸化リチウム( $\text{Li}_2\text{O}_2$ )ではなく水酸化リチウム( $\text{LiOH}$ )を利用しており、従来型の非水リチウム空気蓄電池とは大きく異なる化学反応に基づいている。水の添加と「メディエーター」としてのヨウ化リチウム使用によって、セルの機能停止の原因となる化学反応が激減し、充放電サイクルを繰り返した後の安定性が著しく向上した。

電極の精密な構造設計と高多孔質グラフェンへの形状変更、ヨウ化リチウムの添加、そして電解質の化学組成の変更を通じて、研究者らは充電時と放電時の「電圧差(voltage gap)」を0.2ボルトに低減した。電圧差が小さいということは、蓄電池の効率が高いということだ。過去に作製されたリチウム空気蓄電池では、この電圧差を0.5~1.0ボルトに減少させるのがやっとであった。それに対して0.2ボルトという値はリチウムイオン蓄電池の電圧差に近く、エネルギー効率93%に相当する。

高多孔質グラフェン電極は同実証機の大幅な蓄電容量増大にも貢献するが、これは特定の充放電レートの場合のみに限られる。他に取り組むべき課題としては、デンドライトと呼ばれる細長いリチウム金属繊維の形成防止を目的とする金属電極の保護方法の発見等がある。デンドライトは過度に成長すると蓄電池を短絡させ、爆発を引き起こすことがある。

さらに、同実証機は純酸素中でのみ充放電が可能であるが、私たちを取り巻く空気は二酸化炭素や窒素、水分を含んでいる。これらは総じて金属電極に損傷を与える。

Liu氏は次のように語った。「やるべきことはまだまだたくさんあります。しかし今回の研究結果は、これらの問題を解決する方法があることを示唆しています。物事を少し違う角度から眺める必要があるのかもしれない。」

「メカニズムの細部を固めるために今後も多くの基礎研究を行う必要がありますが、この研究結果は非常に興味深いものです。今はまだ開発段階に過ぎませんが、この技術に関連する困難な問題の一部について、解決策の存在が明らかになったのです。」と Grey氏は述べた。

同論文の著者らは、米国エネルギー省(Department of Energy: DOE)、英国工学・物理科学研究評議会(Engineering and Physical Sciences Research Council: EPSRC)、ジョンソン・マッセイ社(Johnson Matthey)および、マリー・キュリー・アクション(Marie Curie Actions)とグラフェン・フラッグシップ(Graphene Flagship)を通じた欧州連合(European Union: EU)からの支援に感謝の意を表している。本技術は特許取得済みであり、同大学の商業化担当組織であるケンブリッジ・エンタープライズ([Cambridge Enterprise](#))を通じて商用化が進められている。

#### 参考情報

Liu, T et. al. '[Cycling Li-O2 Batteries via LiOH Formation and Decomposition.](#)' Science (2015). DOI: 10.1126/science.aac7730

マスメディア対応窓口 [Sarah Collins](#) [Communications Office](#)

翻訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター 多胡 直子）

出典：本資料は、ケンブリッジ大学(University of Cambridge)の以下の記事を翻訳したものである。

“New design points a path to the ‘ultimate’ battery”

<http://www.cam.ac.uk/research/news/new-design-points-a-path-to-the-ultimate-battery>

(Used with Permission of the University of Cambridge)

【省エネルギー分野】

仮訳

**エネルギー長官がパリの COP21 に先立って革新的エネルギー技術  
プロジェクト 41 件に 1 億 2,500 万ドルを提供(米国)**

*ARPA-E の OPEN2015 プログラムが米国のエネルギー安全保障を前進させ*

*温暖化対策目標の達成に貢献する革新的エネルギー技術を選出*

2015 年 11 月 23 日

ニュースメディア連絡先 : +1(202) 586-4940

ワシントン – アーネスト・モニツ(Ernest Moniz)米国エネルギー長官は本日、エネルギー省 (DOE) のエネルギー高等研究計画局(ARPA-E)より採択された 41 の最先端エネルギー技術に対し 1 億 2,500 万ドルの提供を発表した。今回の新プロジェクトは ARPA-E の OPEN2015 プログラムの下支援を受ける。なおこれは来週パリで開催される COP21 国連気候変動枠組条約締約国会議を前に公表された。発表はワシントン D.C. の technology incubator 1776 にて、地球を取り巻く気候変動への取り組み、安全保障の強化と喫緊のエネルギー課題解決のためのソリューション技術の発見を米国有数のイノベータに促す目的のイベントに際して行われた。

オープン公募(2009 年と 2012 年にも募集)は、ARPA-E のミッション全領域を対象に、変革をもたらす技術に向けて科学者と技術者を広く募るものである。オープン型と設定型両方の公募を通じて ARPA-E は、技術的かつ商業的なインパクトが見込めるものの民間投資には時期尚早である革新的技術に資金援助を行っている。今回の OPEN2015 プロジェクトは 21 の州から参加者が集い、運輸、発電および配電、省エネルギーを含む 10 の技術分野で展開する。

「今日選ばれた ARPA-E プロジェクトは、国家の喫緊のエネルギー課題に取り組むため、米国の技術の粋を結集するとどのようにイノベーションが加速され、広範な技術的選択肢の創出が可能になるのかを如実に示すものです。」アーネスト・モニツ米国エネルギー長官はこう語る。「COP21 の先を見据えると、今日エネルギー省が投資するエネルギー技術は将来、気候変動と闘い、グローバルな低炭素経済を発展させるのに必要な解決策を与えてくれるでしょう。」

OPEN2015 全採択プロジェクトの閲覧はこちら : <http://go.usa.gov/cTHVW>

OPEN 2015 に採択された 41 プロジェクトは、エネルギー技術全般にわたり、イノベーションへの新規アプローチを追及する。プロジェクトを主導するのは、大学約 36%、中小企業 39%、大企業 10%、国立研究所 10%、非営利団体 5%。

以下、新プロジェクトの一部 :

**Dioxide Materials, Inc.、(所在地) フロリダ州ボカラトン (提供資金 : 200 万ドル) : グリッド規模のエネルギー貯蔵向け高効率アルカリ水電解装置**

Dioxide Materials 社は、改良型 Power-to-Gas システム向けアルカリ水電解装置を開発。これはエネルギーを水素の化学結合の形で貯蔵するために使用。アルカリ性の状況下で機能する高導電性の分離膜が高い電流密度を許容し、白金触媒を必要としないシステムとすることで、スタックの 10 分の 1 の低コスト化が可能となる。

**The Mackinac Technology Company、ミシガン州グランドラピッズ (250 万ドル) : 一重窓ガラス用後付型システム**

The Mackinac Technology Company は、暖房のエネルギーロスを大幅に低減させる、コスト効果的な新型後付型断熱窓システムを開発。この断熱窓システムは、高い可視光透過率 (90%超) ながら紫外線と熱赤外線エネルギーを反射させ、冬場のヒートロスを減少させる高耐久性導電性酸化物質フィルムを使用。米国全土でもれなく導入された場合、この後付型技術は 4 分の 1 近い省エネルギーに繋がる。

**Marine BioEnergy, Inc.、カリフォルニア州サンディエゴ (2,146,988 ドル) : 外海で生育した安価なバイオマスフィードストックの破壊的供給技術**

Marine BioEnergy 社は、液体燃料の前駆体に変換が可能な微細藻類バイオマスの外海培養システムを開発。このシステムは滋養豊富な深海の水と海面の太陽光の間でサイクルを行い、バイオマスを生産。また嵐や船舶の回避のため沈めることも可能。同社の技術は広範な海域でのエネルギー作物生産を実現し得るものだが、当初はカリフォルニア沖の米国の排他的経済水域に照準。

**Ocean Renewable Power Company、メイン州ポートランド (2,248,223 ドル) : クロスフロー型水力タービンの設置・回収システム**

Ocean Renewable Power Company (ORPC)は、潮流、河川のいずれかにより発電するクロスフロー型海洋エネルギー発電システムの大幅なコスト削減を図る、革新的な設置・回収機能を開発。このタービンのブレードは、設置/回収モードでは推力の発生、発電モードでは高効率化を可能にするアクティブピッチ制御を採用。ORPC のタービンは、海岸付近の水中へ搬入可能で、設置場所まで自走するうえ、下方への推力変更による海底への設置ができるため、開発に成功の場合、設置プロセスのコストの削減が見込まれる。

#### **Texas A&M AgriLife Research、テキサス州カレッジステーション (460 万ドル) : 高度根圏・土壌有機炭素画像のための地中探査レーダー**

Texas A&M AgriLife Research は、根圏・土壌有機炭素の 3D 撮影と計量のための地中探査レーダーのアンテナレイを開発。土中の根の特性をmm単位の分解能で可視化するため、育種家がより高収量で必要とするインプットが少なく、土壌の健全性向上や炭素隔離の促進に寄与する、悪天候に強いバイオエネルギー作物を選抜できるようになる。

#### **コロラド大学、コロラド州ボルダー (3,955,218 ドル) : 低コスト・高エネルギー効率の窓用塗布型熱反射コーティング**

コロラド大学ボルダー校が主導する研究チームは、窓に使用可能な、廉価なポリマーベースの省エネルギー材を開発。このコーティングは近赤外光領域を反射し可視光を通すフォトリソグラフィ結晶へと自己組織化。多くの窓で太陽光からの入熱量を減少させ、これにより建物の冷房に要するエネルギーを削減する。この技術は塗布型であることから、迅速かつ低価格、広範囲な普及が見込める。

#### **バージニア大学、バージニア州シャーロットツビル (3,569,580 ドル) : 風力発電用 50MW 超軽量形状可変型分節ローター**

バージニア大学が主導の研究チームは、ブレードへの負荷を軽減し超軽量分節ブレードを実現する、ダウンウィンド方式形状可変構造の 50MW タービンを設計。またこの新技術の実証のため、空力弾性的設計によるモデル機の建設、フィールドテストを実施。50MW タービンの設計は現在最大級のタービンの 10 倍の発電量増加に資する。この 200 メートル長のブレードは、5 から 7 のパーツに分けての製造、敷設地での組み立てが可能。耐ハリケーン設計により、米国での低コストな洋上風力発電の実現に繋がる。

翻訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター 渡邊 史子）

出典：本資料は米国・DOE エネルギー高等研究計画局(ARPA-E)の以下の記事を翻訳したものである。

“Secretary Moniz Awards \$125 Million for 41 Transformational Energy Technology Projects Ahead of COP21 in Paris”

<http://arpa-e.energy.gov/?q=news-item/secretary-moniz-awards-125-million-41-transformational-energy-technology-projects-ahead>

【材料・ナノテクノロジー分野】

仮訳

**ドーピングで新たな熱電材料をパワーアップ(米国)**  
ナトリウムを加えて最も効率的に熱を電力に変換する材料を製造  
2015年11月30日

イリノイ州エバンストン --- エネルギー生産時に、化石燃料から投入されたエネルギーの約3分の2は、廃熱として失われる。産業界は、この廃熱を有用な電力に変換する材料を求めているが、良い熱電材料はなかなか見つからない。

熱電材料の性能の向上は、商業的に利用されるのに必須である。今回、ノースウェスタン大学の研究者たちは、ナトリウムでドーピングされたセレン化スズが熱電材料としての性能を引き上げて実用性を推進することを報告した。このドーピングされた材料は、同量の熱を投入したとき、ドーピング処理しない同材料と比べて非常に多くの電力を生成する。

これまでで最も効率的に廃熱から電力を生成する熱電材料である[ナトリウムでドーピングされたセレン化スズの詳細](#)は、Science 誌に11月26日に掲載された。

このノースウェスタン大学の開発は、自動車産業、ガラス・れんが製造工場、製油所、石炭・ガス火力発電所、大型内燃機関が継続的に稼働する場所（例えば、大型船やタンカーなど）において応用可能な新しい熱電デバイスにつながる。

シリコン等のほとんどの半導体材料はドーピングのための連動する伝導バンドを一つしか持たないが、セレン化スズは独特で多重バンドを持つ；研究者たちは、これらのバンドをうまく利用した。ナトリウムを用いてチャンネルに接続し材料を介して素早く電子を送ることにより、熱変換効率を向上できることを示した。

「我々の材料の秘訣は、多重バンドのドーピングが強い電気特性を生じることです」と、学際的チームを率いる無機化学者の [Mercuri G. Kanatzidis](#) 氏は言う。「多重バンドをドーピングすることにより、プラスの効果を拡大することができます。効率を高めるためには、電子ができるだけ可動的であることが必要です。セレン化スズは、混雑したレーン1つの代わりに少なくとも4つの高速レーンを備える高速道路を正孔キャリアに提供するのです。」

[Weinberg College of Arts and Sciences](#) の Charles E. and Emma H. Morrison Professor of Chemistry である Kanatzidis 氏は、熱電材料研究の世界的なリーダーである。彼は、本論文の責任著者である。

電圧を発生させるために、良い熱電材料は、片側が（例えば廃熱で）熱くなっており反対側が冷たいままである状態を維持する必要がある。（電圧は、電力として取り出される。）2年前弱、Kanatzidis 氏とそのチームは、主唱者である博士研究員の Lidong Zhao 氏と共に、セレン化スズが驚異的な熱電材料であることを確認した；セレン化スズは、（木材に似て）熱を伝導しないが、これは熱電材料として望ましい特性である。一方で、高い電気伝導性を維持する。

Kanatzidis 氏の同僚である計算理論家の [Christopher M. Wolverton](#) 氏は、セレン化スズの電子構造を計算した。彼は、ドーピング材料を加えることにより電気特性の向上が可能であることを発見した。

「セレン化スズは、その極めて低い熱伝導性だけでなく、多くの伝導レーンを有する点においても非常に独特です」と、本論文のシニア著者で [McCormick School of Engineering and Applied Science](#) の材料工学教授の Wolverton 氏は言う。「我々の計算によると、材料がドーピング処理されればその熱出力と電気伝導性が増加することは分かっていました。しかし、ドーパントとして何を使えばよいのか分からなかったのです。」

ナトリウムは、研究者たちが初めて試したドーパントであり、彼らが探し求めていた結果を示した。「Chris の計算がドーピングに我々の目を向けさせたのです」と、Kanatzidis 氏は言う。彼と Zhao 氏は、ドーピングされた新材料の結晶を成長させることに成功した。

研究者たちはまた、ナトリウムを加えても材料のもともと非常に低い熱伝導性には影響がなかったことにも満足した。熱伝導性が低いままであるため、熱は熱電材料の片側に留まる。電子は低エネルギー状態にある方を好むので、熱い側（高エネルギー側）から冷たい側へと移動する。この熱い側が正極、冷たい側が負極となり、電圧を生み出す。

「これまで、改良された熱電の発見に至る明らかな道筋はありませんでした」と、Wolverton 氏は言う。「今回、新材料を開発したことにより、いくつかの価値ある扉を開けるノブを発見できました。」

廃熱を熱電に変換する効率、 $ZT$  と呼ばれる「(無次元) 性能指数」で表される。2014年4月に研究者たちは、セレン化スズが約  $650^{\circ}\text{C}$  で  $ZT2.6$  を記録することを報告し

た。これは、これまでの ZT 最高値 -- 世界記録 -- である。しかし、ドーピング処理しない材料は、この温度でしか記録的な ZT 最高値を出せない。(ZT 値は、温度毎に異なる。)

ドーピングされた新材料は、室温から 500°C までの広い温度領域において高い ZT 値を示す。つまり、このドーピングされた材料の ZT 平均値は極めて高く、より高い変換効率をもたらす。

「現在、我々は、広い温度領域において ZT 値の最高記録を保持しています」と、Kanatzidis 氏は言う。「熱電デバイスの温度差が大きければ大きいほど、効率は良くなります。」

本研究は、アメリカ合衆国エネルギー省 (DOE) 科学部基礎エネルギー科学部門より一部資金提供を受けた (授与番号 DE-SC0014520)。

本論文のタイトルは、“[Ultra-high power factor and thermoelectric performance in hole doped single crystal SnSe](#)” である。現在、北京航空航天大学の教授である Zhao 氏が本論文の筆頭著者である。

上述の Kanatzidis 氏、Wolverton 氏、Zhao 氏に加え、本論文のその他の著者は次のとおり： ノースウェスタン大学の Gangjian Tan 氏、Shiqiang Hao 氏、Vinayak P. Dravid 氏、G. Jeffrey Snyder 氏； 南方科技大学の Jiaqing He 氏； 北京航空航天大学の Yanling Pei 氏、Shengkai Gong 氏、Huibin Xu 氏； ミシガン大学の Hang Chi 氏、Ctirad Uher 氏； カリフォルニア工科大学の Heng Wang 氏。

翻訳：NEDO (担当 技術戦略研究センター 山本 恭子)

出典：本資料は、ノースウェスタン大学 (Northwestern University) の以下の記事を翻訳したものである。

“Doping Powers New Thermoelectric Material”

<http://www.northwestern.edu/newscenter/stories/2015/11/doping-powers-new-thermoelectric-material.html>

(Used with Permission of Northwestern University)

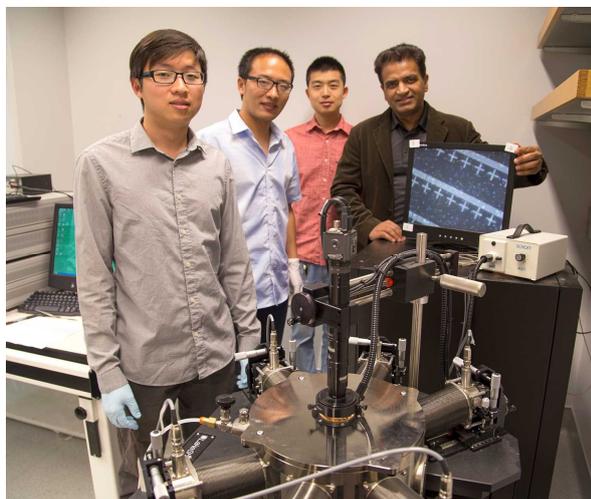
【電子・情報通信分野】

仮訳

ナノエレクトロニクスエンジニアらが  
電力限界を克服したトランジスタを開発(米国)  
カリフォルニア大学サンタバーバラ校のエンジニアらが従来のトランジスタの  
基本的な限界を克服して電力損失を 90%超低減

2015 年 12 月 7 日

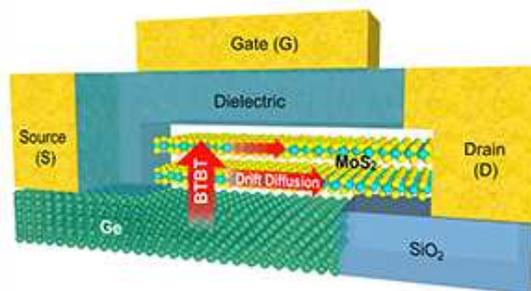
トランジスタの切り替え作動時の消費電力を低減することが、エレクトロニクスの発展における主要な課題の一つとされてきた。米国・カリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)とライス大学は、共同で開発した新しいトランジスタで、わずか 0.1V の電圧でオン・オフ動作し、最先端のシリコントランジスタ(MOSFETs)に比して電力損失を 90%超低減することを実証。この研究結果は、科学誌『Nature』で発表された。



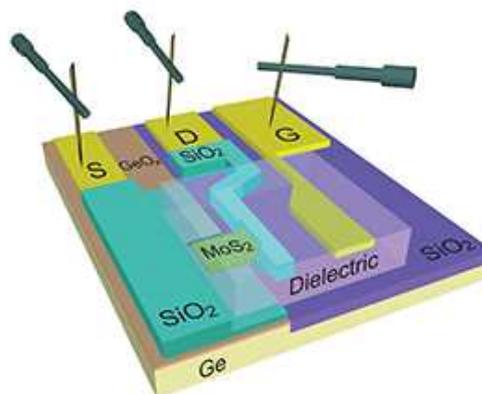
MOSFETs は、1970 年代より一般的なエレクトロニクス製品の構成要素となっている。しかし、トランジスタ高密度化のこれまで以上の必要性から MOSFETs が微細化され、そのオン特性の基本的な限界に起因する電力損失が引き起こされるようになった。

「トランジスタのオン動作の急峻さは、サブスレッショルド・スイング(SS)として知られるパラメータによって決まります。このパラメータは、MOSFETs では特定のレベル以下にはなりません。」と UCSB の電子・コンピュータ工学の [Kaustav Banerjee](#) 教授は説明する。MOSFETs で電流を 10 倍に変えるには、室温下で最低 60mV のゲート電圧の変化が必要である。つまり、現時点のトランジスタ技術はデジタル回路全般におけるエネルギー効率向上の可能性を制限しているということだ。

この根本的な限界を打ち破るため、Banerjee 教授が率いる研究グループはバンド間トンネリングの量子力学現象という新たな手法を採用し、60mV/桁を下回る SS を有するトンネル電界効果トランジスタ(TFET)を開発した。



「オフ時でもソース/チャンネルバリアを超えて拡散する高エネルギーの電子を除去するために、トランジスタのソース-チャンネル接合を再構築しました。これでオフ時の電流が極めてわずかになりました。」と Banerjee 教授は説明する。同教授の [Nanoelectronics Research Lab](#) に



は、Deblina Sarkar、Xuejun Xie、Wei Liu、Wei Cao、Jiahao Kang、および Stephan Kraemer、そしてライス大学の Yongji Gong および Pulickel Ajayan が所属する。

Banerjee 教授と同僚らの研究は、電力損失によるチップ価格や信頼性への影響で毎年何十億ドルもの損失を被る世界のエレクトロニクス産業に動機づけられている。「これは携帯電話やラップトップ等のパーソナルデバイスのバッテリー寿命の短縮や、大規模なデータセンターでのサーバーによる電力の大量消費につながります。」と世界規模のエネルギー需要を指摘しながら同教授は言い添える。

TEFTs のチャンネル材料としてシリコンやⅢ-Ⅴ族化合物半導体のような従来の半導体に依存している産業は、「それらの材料が漏れ電流を増加させて SS を低減させる高密度な表面エネルギー準位を有することから、限界に直面している」と Banerjee 教授は説明する。

同大学研究チームが開発した TFET では、いくつかの方法でこの課題を克服しており、その中でも主要なものは 2 次元の層状材料である二硫化モリブデン(MoS<sub>2</sub>)の利用である。ソース電極として高度にドーピングされたゲルマニウム(Ge)上に配置された、電荷を運ぶチャンネルの役割を担う MoS<sub>2</sub> は、たった 1.3nm という理想的な表面と薄さをもつ。このような縦型ヘテロ構造が、超極薄(~0.34nm)のファン・デル・ワールスギ

チャップを通り電荷が Ge から MoS<sub>2</sub> へとトンネリングできる低い障壁の歪みの無いユニークなソース—チャンネル接合、そして広いトネリング領域を提供している。

「私たちのアイデアの核心は、3次元と2次元の材料を組み合わせて独特なヘテロ構造を作り、両材料の優れた点を利用したことです。3次元構造の高度なドーピング技術が超極薄で純粋なインターフェイスを持つ2次元材料層と結びついて、ゲートで容易に調節できる効率的な量子力学的トンネリング障壁を手に入れたのです。」と Banerjee 教授の研究室の博士課程に在籍し、本研究の論文の筆頭著者である Dablina Sarkar は説明する。

Banerjee 教授は「私たちが開発したのは、現時点で最も薄いチャンネルを持つサブサーミオニック・トランジスタです。」と説明する。この原子レベルの薄さの層状半導体チャンネルトンネル FET (または ATLAS-TFET) は、4桁のドレイン電流でサブサーミオニック SS (室温下で $\sim 30\text{mV/桁}$ ) を達成した唯一の平面構造 TFET であり、極めて低い 0.1V のドレイン—ソース電圧でそれを達成した唯一のトランジスタである。

本研究論文の共同著者であるライス大学の Ajayan 化学・生体分子工学教授は次のようにコメントしている。「今回の開発は、従来の材料では達成不可能なデバイス性能を可能にする2次元の原子層材料のユニークさを示す素晴らしい実例だ。おそらく、一連の新デバイス開発における最初のブレイクスルーであり、誰もが2次元材料を使ったデバイス構築をするようになるだろう。」

パデュー大学、Mark Lundstrom 電子・コンピュータ工学教授は「本研究は、低電圧のロジックトランジスタ研究における主要な進捗を示すもの。ドレイン電流が4桁増でのサブサーマル作動を実証したことは見事であり、オン電圧値も最先端に行くものだ。今後の道りは長いものの、本研究は長い間研究されてきた低電圧デバイスを実現する2次元材料の可能性を実証するものだ。」とコメントしている。

Banerjee 教授の研究チームの博士課程に在籍し、本研究論文の共同著者である Wei Cao は「私たちは、ITRS の要件を満たす急峻な SS の最も重要な測定基準を達成した。私たちが開発したトランジスタは、バイオセンサーやガスセンサー等、急峻な SS が主要要件である分野を含んだ多様な低電力消費アプリケーションで利用することができる。性能を向上させれば、このトランジスタのアプリケーション範囲はさらに広がるだろう。」と説明している。

マンチェスター大学、物理学教授の Konstantin Novoselov 博士は「本研究は 2 次元材料をエレクトロニクスでの実際のアプリケーションへとさらに近づける重要な一歩である。トンネル電界効果トランジスタでの 2 次元材料利用はまだ始まったばかりであり、この研究論文はこのようなデバイスの特性のさらなる向上において、この研究分野をさらに強力に後押しするものだ。」とコメントしている。同博士は、2010 年のグラフェン発見によるノーベル物理学賞受賞者の一人である。

2012 年に AFOSR プログラムのマネージャーとして本研究の資金調達に携わったリバーハイ大学、James Hwang 電子工学教授は次のようにコメントしている。「当時、インターバンド・トンネルトランジスタの設計に 2 次元材料を利用するアイデアを Banerjee 教授から初めて聞いたときに、その利点と超低電圧エレクトロニクスでの測り知れない可能性は理解していた。Banerjee 教授のビジョンが実現したのを知って喜んでいる。」

関連リンク：

[Nature publication](#)

[Flat transistor defies the limit \(Nature News\)](#)

メディア連絡先：

Kaustav Banerjee

kaustav@ece.ucsb.edu

(805) 893-3337

翻訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター 松田 典子）

出典：本資料は米国・カリフォルニア大学サンタバーバラ校(University of California, Santa Barbara (UCSB))の以下の記事を翻訳したものである。

“Nanoelectronics Engineers Develop Transistor that Overcomes Fundamental Power Limitations”

<http://engineering.ucsb.edu/news/869/>

(Used with Permission of the University of California, Santa Barbara)

【材料・ナノテクノロジー分野】

仮訳

### Nanodevices at one-hundredth the cost

New techniques for building microelectromechanical systems show promise.

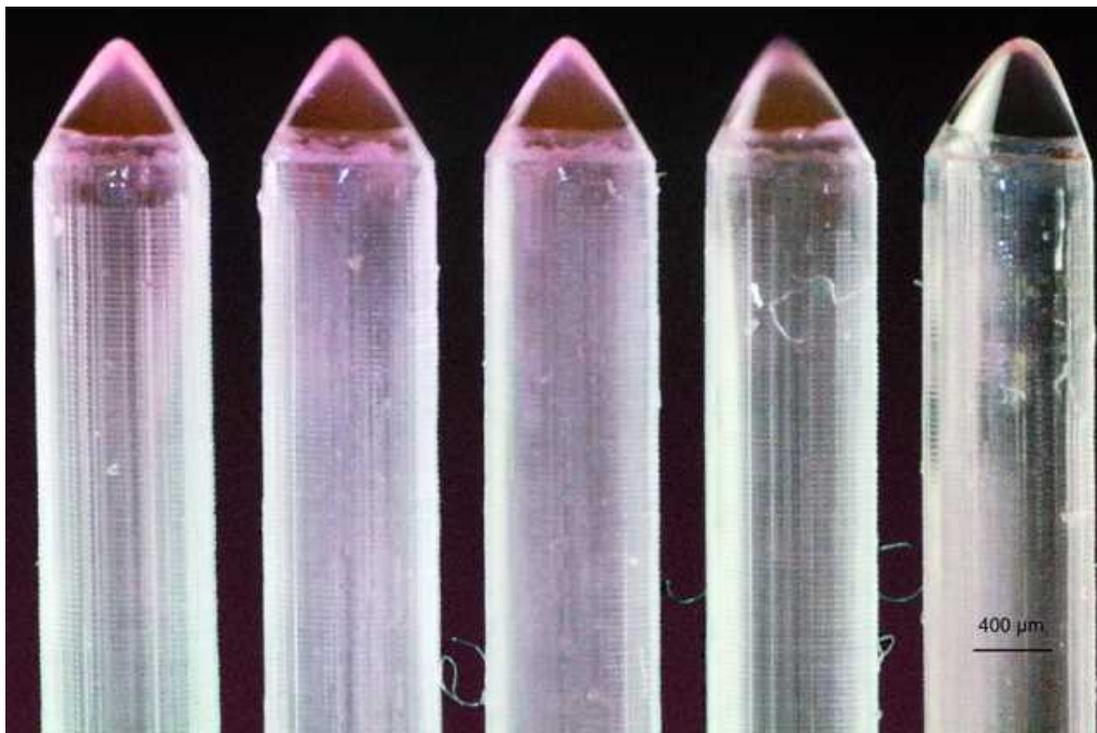
Larry Hardesty | MIT News Office

[MIT News](#)

### 1/100のコストで作るナノデバイス(米国)

新たなMEMS製造技術が有望

2015年12月18日



49個のエミッタから成るアレイの、外側の列に並ぶ7個のエミッタ。各エミッタの表面には、積層造形により生じた帆立貝の殻のような（年輪状の）模様が確認できる。

画像：Anthony Taylor and Luis F Velásquez-García (edited by MIT News)

微小電気機械システム(microelectromechanical systems: MEMS)は、2014年には120億ドル規模の産業となった。しかしこの市場は、スマートフォンの画面を回転させるための加速度計を初めとする、わずか数種のデバイスに独占されている。

その理由は、MEMS の製造には、建設コストが数千万ドルにも上る高精度の半導体製造設備が必要とされることにある。これまでに、有用と期待された数々の MEMS が、製造設備の初期投資に見合うだけの大きな市場を持たないことから、開発段階で棚上げされてきた。

マサチューセッツ工科大学(Massachusetts Institute of Technology: MIT)マイクロシステム技術研究所(Microsystems Technologies Laboratories: MTL)の研究者らが最近発表した 2 本の論文は、この状況が変わるかもしれないという希望を与えるものである。同研究者らは一方の論文で、デスクトップ型装置で作製した MEMS ベースのガスセンサが、従来の製造設備で作られた商用センサに比して、少なくとも同等の性能を有することを示した。

もう一方の論文では、同デスクトップ型製造装置の中心的な部品が 3D プリンタで製造可能であることが示されている。両論文を組み合わせると、現在広く普及しているものと同種の MEMS ガスセンサを、品質を損なうことなく 100 分の 1 のコストで製造できることが示唆される。

この製造装置を用いれば、従来の MEMS 製造コストが増大する原因となる前提条件の多くを回避できる。MTL の主任科学研究員で両論文の首席著者である Luis Fernando Velásquez-García 氏は次のように話す。「私たちが用いた積層造形(additive manufacturing)技術は低温で利用可能であり、真空を必要としません。使用した最高温度は、おそらく 60°C です。(半導体)チップでは、1,000°C 前後で酸化物を成長させなければならない上、多くの場合、汚染を防ぐために反応炉で高真空が必要となります。さらに、この製造装置はごく短時間で作れます。今回報告したものは、初めから終わりまでわずか数時間で作製されました。」

### 望ましい抵抗

同氏は、強電場にさらされた際に流体の微細な流れを放出する高密度エミッタアレイの製造技術を長年にわたり研究してきた。今回のガスセンサ開発にあたり、同氏と英国・Edwards Vacuum 社からの客員研究者 Anthony Taylor 氏は、いわゆる「内部供給型エミッタ(internally fed emitters)」を使用した。これは、流体が通過できる円筒穴を有するエミッタである。

本研究では、酸化グラフェンの微細片を含む流体を用いた。2004 年に発見されたグラフェンは、優れた電気特性を有する 1 原子厚形状の炭素である。両氏は新開発したエミッタで、シリコン基板上の所定のパターンに流体を噴霧した。その流体が急速蒸発した後に残るのが、厚さ数十ナノメートルの酸化グラフェンコーティングである。

同微細片は非常に薄く、ガス分子との相互作用によってその（電気）抵抗が測定可能な形に変化するため、センサとして有用である。「私たちは、このガスセンサを価格が数百ドルの商用製品と直に対決させました。その結果、このガスセンサが商用製品と比べて精度面で遜色なく、より高速であることが判明しました。おそらく数セントというごくわずかなコストで、商用製品に勝るとも劣らない性能のセンサを作製したのです。」と、Velásquez-García 氏は述べた。

同センサを製造する際に両氏が用いたのが、従来プロセスで作製されたエレクトロスプレー（電子噴霧）エミッタである。しかし、Velásquez-García 氏は『Journal of Microelectromechanical Systems』誌の12月号で、同ガスセンサを生み出したエミッタと同等のサイズと性能を備えた樹脂製のエレクトロスプレーエミッタを、安価で高品質の3Dプリンタで製造したことを報告している。

### オーダーメイド

3Dプリンティング技術によって、エレクトロスプレー装置をよりコスト効果的に作製できるだけでなく、同装置を特定のアプリケーション向けにカスタマイズすることもより容易になると同氏は話す。「設計を開始した当初は何もわからない状態でしたが、1週間後にはおよそ15世代の装置が出来上がりました。そして、各世代の設計は、その直前のバージョンよりもうまく機能したのです。」

同氏によれば、実際のところ、エレクトロスプレーの利点は既存のMEMSデバイスをより低コストで作れることよりも、むしろ、全く新しいデバイスが実現可能になることだという。エレクトロスプレーによって、市場が小さいMEMS製品のコスト効果を高めるだけでなく、既存の製造技術では実現不可能な製品を製造できるようになるだろう。

同氏は次のように語った。「MEMS製造者は時として、自らがモデルに基づいて作ろうと意図するものと、微細加工技術によって作れるものとの間で妥協しなければなりません。これまでに成功した製品は、大きな市場があり、標準を下回る性能は有さないという種類に当てはまるごく少数のデバイスのみです。」

エレクトロスプレーは、新型の生体センサ開発にもつながる可能性があると同氏は話す。「この技術を用いれば、生体分子など、高温の半導体製造技術と相容れない材料を蒸着することもできます。」

ポーランド・ヴロツワフ工科大学(Wroclaw University of Technology) Division of Microengineering の長である Jan Dziuban 氏は、次のように述べた。「確かに、この論

文はガスマイクロセンサ製造技術の新たな道を拓くものです。技術的な観点から見ると、今回開発されたプロセスは容易に量産化に適用できる可能性があります。」

「しかし、有望な研究結果は統計的に証明されなければなりません。」と同氏は警告する。「個人的な経験から言えば、ナノ構造材料を利用した新しいセンサ向けの非常に有望な材料が、高水準の科学論文でこれまで多数発表されてきたにもかかわらず、いまだに信頼できる製品になっていません。」

翻訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター 多胡 直子）

出典：本資料は、マサチューセッツ工科大学(Massachusetts Institute of Technology)の以下の記事を翻訳したものである。

“Nanodevices at one-hundredth the cost”

(<http://news.mit.edu/2015/nanodevices-one-hundredth-cost-1218>)

(Reprinted with permission of MIT News: <http://news.mit.edu/>)

【蓄電池・エネルギーシステム分野】

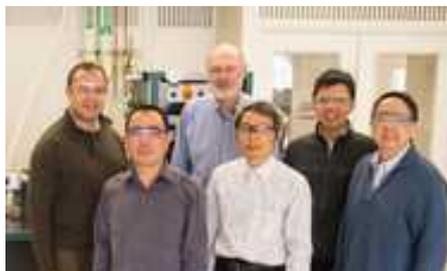
仮訳

## 安定した「超酸化リチウム」が新型蓄電池への扉を開く(米国)

2016年1月12日

Jared Sagoff · 2016/1/12

リチウムイオン蓄電池は私達の日常生活を変貌させたが、研究者達は目下のところ、これよりもさらに優れたエネルギー技術の展開に繋がる新たな化学反応の発見に挑んでいる。こうした化学反応の一つ、リチウム-空気には膨大なエネルギー密度が期待できるのだが、同時にいくつかの欠点も存在する。



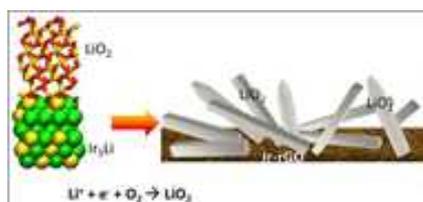
アルゴンヌの研究チーム(左からKhalil Amine、Jun Lu、Larry Curtiss、Zonghai Chen、Kah Chun Lau、Hsien-Hau Wang)がリチウム空気蓄電池システム内で安定した超酸化リチウムを生成させる方法を開発。

だが今、米国エネルギー省(DOE)のアルゴンヌ国立研究所の研究によってその欠点の一つが克服される可能性が見えてきた。

リチウム空気蓄電池に関する先行研究では全て同じ現象、電極の細孔を目詰まりさせる析出物・過酸化リチウム(Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)の形成、が観測されていた。

しかし最近の実験において、アルゴンヌの蓄電池研究者 Jun Lu、Larry Curtiss と Khalil Amine が米国と韓国の研究者との共同で、蓄電池の放電中、過酸化リチウムではなく、安定した超酸化リチウム (LiO<sub>2</sub>)結晶の生成に成功した。過酸化リチウムと異なり、超酸化リチウムはリチウムと酸素への解離が容易なため、高い効率と良好なサイクル寿命が得られる。

「この発見は新型蓄電池の潜在能力開拓の端緒を本格的に開くものです。」 Curtiss はこう話す。「まだ多くの研究が必要ではありますが、このバッテリーのサイクル寿命こそ私達が探し求めていたものでした。」



Ir-rGO 正極材の放電生成物  $\text{LiO}_2$  の発生は、 $\text{LiO}_2$  と  $\text{Ir}_3\text{Li}$  の格子整合に起因すると考えられる。

超酸化リチウムベースの蓄電池の主な利点は、Curtiss と Amine が説明するところ、少なくとも理論上、化学者が「クローズドシステム」と呼ぶ構成のリチウム空気蓄電池の作成を可能にするということ。オープンシステムは環境から過剰な酸素の恒常的な摂取を必要とするが、クローズドシステムはこの限りでなく、より安全で高効率である。

「超酸化物相の安定化は、超酸化リチウムをベースにした新たなクローズドバッテリーの開発に繋がるかもしれません。これはリチウムイオンの実に 5 倍のエネルギー密度の蓄電池を提供する可能性を秘めているのです」と、Amine は語る。

Curtiss と Lu は、超酸化リチウムの成長は実験で使用された電極中のイリジウム原子同士の間隔によるものとしている。「イリジウムは超酸化物の成長にとって良いテンプレートとして機能するように思われます。」 Curtiss はそう明かす。

「しかしこれはまだ途中の段階です」と、Lu が付け加える。「具体的に何がリチウム空気蓄電池に関わっているのか理解するためには、触媒の設計方法を学ばなければなりません。」

研究チームはアルゴンヌ研究所に設置された DOE 科学局(Office of Science)の共用設備・Advanced Photon Source が提供する X 線回折により、過酸化リチウムの不在を確認。また同じく DOE 科学局の共用設備であるアルゴンヌ・リーダーシップ・コンピューティング施設(Argonne Leadership Computing Facility)のスーパーコンピュータ・Mira の利用時間の割り当てを授与された。なお研究の一部は、アルゴンヌ構内の別の DOE 共用施設、ナノスケール材料センター(Center for Nanoscale Materials)にて実施。

本研究に基づく考察は、1 月 11 日刊行の *Nature* に掲載されている。

今回の研究は DOE エネルギー効率・再生可能エネルギー局(Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)および科学局からの資金援助によるもの。

アルゴンヌ国立研究所は科学技術における喫緊の国家的課題への解決策を模索している。米国で最古の国立研究所である同研究所は、科学のほぼ全領域において最先端の

基礎・応用研究を実施。アルゴンヌの研究者は数百の企業、大学、連邦・州・地方の行政機関の研究者と密に連携して特定課題の解決を支援し、科学における米国の主導的役割を強化すると同時に、より良い未来に向けた環境整備を行っている。60以上の国から職員を集める同研究所は、DOE 科学局の委託により [UChicago Argonne, LLC](#) が運営。

**DOE 科学局**は米国最大の物理科学基礎研究の支援機関であり、現代の喫緊の課題の数々に取り組むべく努めている。詳しくは[科学局のウェブサイト](#)を参照のこと。

翻訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター 渡邊 史子）

出典：本資料は米国・アルゴンヌ国立研究所の以下の記事を翻訳したものである。

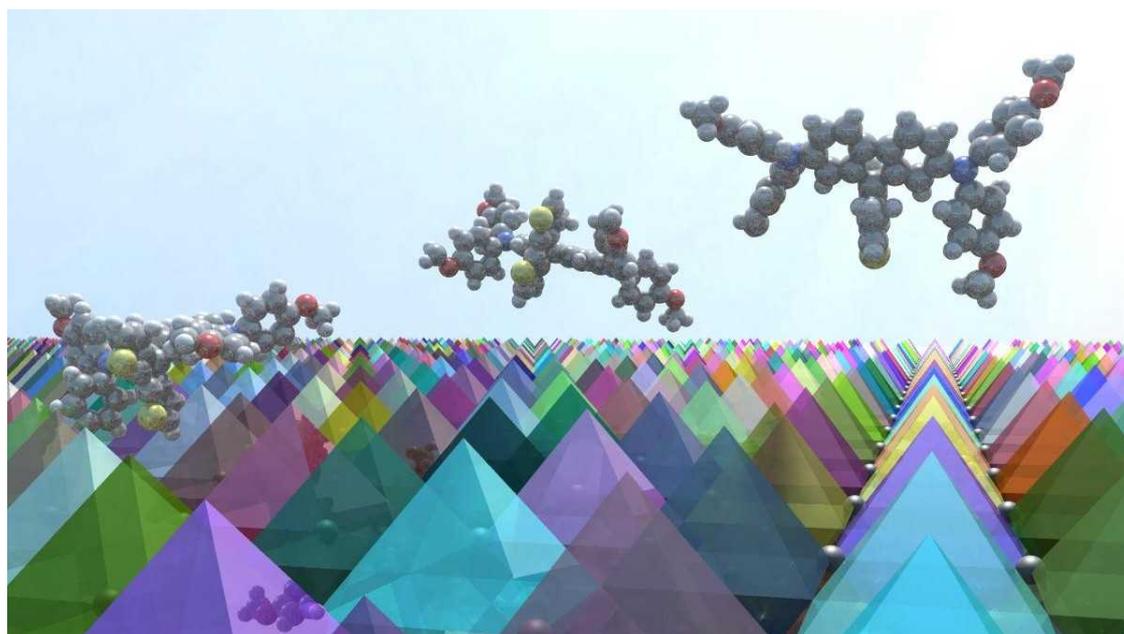
“Stable "superoxide" opens the door to a new class of batteries”

<http://www.anl.gov/articles/stable-superoxide-opens-door-new-class-batteries>

【新エネルギー分野（太陽光発電）】

仮訳

エネルギー変換効率 20.2%の安価な太陽電池（スイス）



ペロブスカイト結晶表面における FDT 分子の 3 次元イラストレーション（出典：Sven M. Hein）  
© EPFL

2016 年 01 月 18 日 — スイス連邦工科大学ローザンヌ校（EPFL）の科学者らが、20.2%という競争力の高い電力変換効率を達成しつつ太陽電池コストを削減できるソーラーパネル材料を開発した。

今日、最も有望な太陽電池のなかには、ペロブスカイト（特徴的な分子構造を有する材料グループ）でできた光捕集薄膜が用いられている。しかしながら、ペロブスカイトをベースにした太陽電池は、光がペロブスカイト薄膜に当たると生成される正電荷を移動させる機能をもつ高価な『ホール輸送』材料を用いる。Nature Energy 誌に掲載されたとおり、EPFL の科学者らは、このたび、20%を超える太陽電池の変換効率を維持しつつ既存のものに比べてたった 5 分の 1 のコストでできる大幅に安価なホール輸送材料を開発した。

ペロブスカイト薄膜の質が向上するに伴い、研究者らは、太陽電池の全体的な性能を向上させる他の方法を探求している。意図せずして、この探求は、ソーラーパネルのもう一つの重要要素であるホール輸送層、具体的にはその構成材料が対象となる。現在のところ、ペロブスカイトをベースにした太陽電池に使用可能なホール輸送材料は、たった2種類である。両タイプとも合成にかなりのコストがかかり、太陽電池の全体的な費用を増大させる。

この問題に対処するため、EPFL の Mohammad Nazeeruddin 氏が率いる研究者らのチームは、競争力の高いレベルで変換効率を維持しつつコストを削減できる分子的に設計された FDT と呼ばれるホール輸送材料を開発した。テストによると、FDT の変換効率は 20.2% に上昇し、他の 2 種類の高価なタイプよりも高効率であった。また、FDT は簡単に変更できるため、新しい低価格のホール輸送材料の全体的な生成の青写真の役割を果たす。

「最高性能のペロブスカイト太陽電池は、製造と精製が難しく 1g あたり 300 ユーロ以上という市場浸透を妨げるほど著しく高価なホール輸送材料を使用します」と、Nazeeruddin 氏は言う。「それに対して FDT は、合成と精製が簡単で、既存材料の性能に匹敵または上回りさえする材料でありながら 5 分の 1 のコストであると見積もられています。」

本研究は、the Istituto di Scienze e Tecnologie Molecolari del Consiglio Nazionale delle Ricerche (イタリア)、パナソニック株式会社 (日本)、EPFL の Laboratory for Photomolecular Science and Laboratory of Photonics and Interfaces、the Qatar Environment and Energy Research Institute と協力して EPFL の Molecular Engineering of Functional Materials グループが率いて行った。欧州連合の第 7 次フレームワーク計画 (MESO; ENERGY; NANOMATCELL)、スイス科学財団 (SNSF)、Nano-Tera 社より資金提供された。

#### 参考文献

Saliba M, Orlandi S, Matsui T, Aghazada S, Cavazzini M, Correa-Baena J-P, Gao P, Scopelliti R, Mosconi E, Dahmen KH, De Angelis F, Abate A, Hagfeldt A, Pozzi G, Graetzel M, Nazeeruddin MK. 「効率的なペロブスカイト太陽電池のための分子的に

NEDO 海外レポート NO.1116, 2016.4.22.

設計されたホール輸送材料」 Nature Energy 15017, 2016 年 1 月 18 日. DOI:  
10.1038/NENERGY.2015.17

翻訳：NEDO（担当 技術戦略研究センター 山本 恭子）

出典：本資料はスイス連邦工科大学ローザンヌ校（EPFL）の以下の記事を翻訳したものである。

“Cheaper solar cells with 20.2% efficiency”

<http://actu.epfl.ch/news/cheaper-solar-cells-with-202-efficiency/>

(Used with Permission of EPFL)