

# JST news

未来をひらく科学技術

2022

12

December



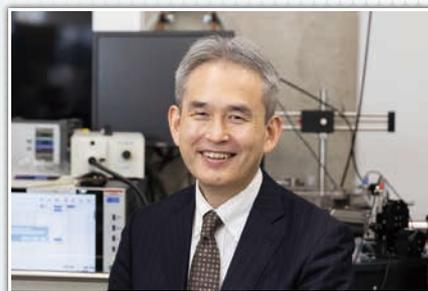
**SiCパワー半導体の性能が大幅に向上  
効率的なエネルギー利用を可能に**



**高齢者や障がい者も取り残さない防災  
当事者、地域、社会の力を結集し挑む**

## 03 – 特集1

SiCパワー半導体の性能が大幅に向上  
効率的なエネルギー利用を可能に



## 08 – 特集2

高齢者や障がい者も取り残さない防災  
当事者、地域、社会の力を結集し挑む



## 12 – 連載 どうやって実現する? 明るく豊かなゼロエミッション社会

第6回 開発が進むさまざまな蓄電技術



## 14 – NEWS & TOPICS

- ◆ 希少な金属を使わず固体光触媒を開発
- ◆ 「愛情ホルモン」の作用メカニズムを解明  
ほか

## 16 – さきがける科学人

研究者同士のつながりを作り  
「新たなひらめき」を生む架け橋に

大阪大学 大学院医学系研究科  
放射線総合医学講座核医学 特任助教  
角永 悠一郎



JSTは、シンクタンク機能、研究開発、産学連携、次世代人材育成、科学と社会との対話など、多岐にわたる事業を通じて、持続可能な開発目標(SDGs)の達成に積極的に貢献していきます。



▶ P.8



▶ P.15上



▶ P.12



▶ P.12



▶ P.8



▶ P.8



▶ P.8, P.12

編集長：安孫子 満広

科学技術振興機構(JST)広報課

制作：株式会社エフピーアイ・コミュニケーションズ

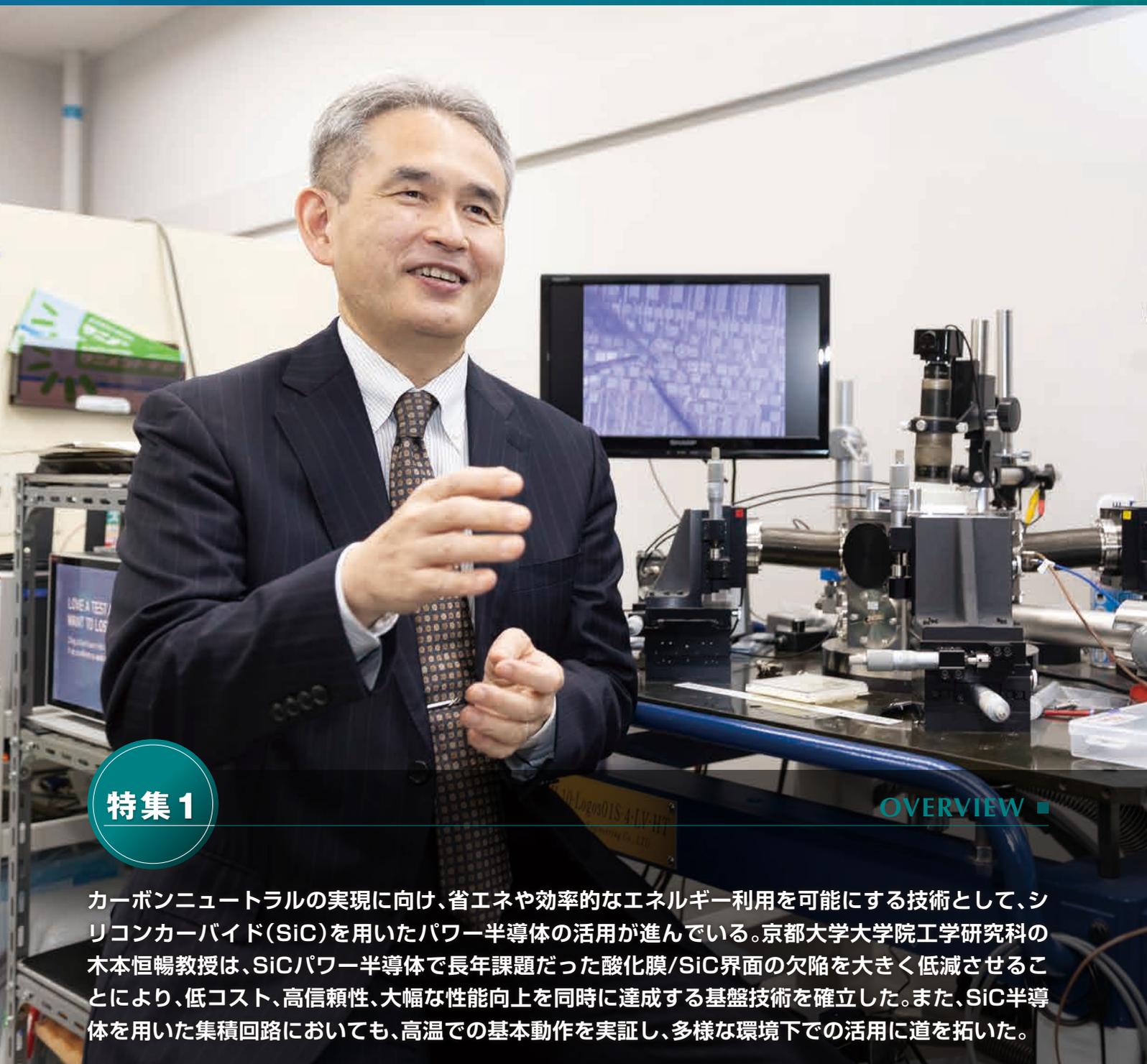
印刷・製本：株式会社丸井工文社

# SiCパワー半導体の性能が大幅に向上 効率的なエネルギー利用を可能に

木本 恒暢 Kimoto Tsunenobu

京都大学 大学院工学研究科 教授

2018年よりOPERA「超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアム」領域統括



特集 1

OVERVIEW ■

カーボンニュートラルの実現に向け、省エネや効率的なエネルギー利用を可能にする技術として、シリコンカーバイド(SiC)を用いたパワー半導体の活用が進んでいる。京都大学大学院工学研究科の木本恒暢教授は、SiCパワー半導体で長年課題だった酸化膜/SiC界面の欠陥を大きく低減させることにより、低コスト、高信頼性、大幅な性能向上を同時に達成する基盤技術を確立した。また、SiC半導体を用いた集積回路においても、高温での基本動作を実証し、多様な環境下での活用を拓いた。

## 産学コンソーシアムで目指す 学理研究と高度技術の融合

日本政府は2016年1月、日本が目指すべき未来社会の姿として「Society 5.0」を提唱した。これは、狩猟社会(Society 1.0)、農耕社会(Society 2.0)、工業社会(Society 3.0)、情報社会(Society 4.0)に続く、人間中心の新たな社会の実現を目指すものだ。IoT(Internet of Things)で全ての人とモノがつながり、さまざまな知識や情報が共有され、今までにない新たな価値を生み出すことで、経済発展と社会的課題の解決を目指している。

京都大学は、このSociety5.0およびその先に到来する極限的な省エネ・低環境負荷・安全かつ高機能社会の実現に向け、19年1月に革新的半導体技術の開発を行うOPERA「超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアム」を立ち上げた(図1)。領域統括を担うのは、京都大学大学院工学研究科の木本恒暢教授だ。コンソーシアムは、イノベーション創発のカギを握る学理研究と普遍性のある高度技術の融合を推進するとともに、次世代研究者の育成を図ることを目的としている。

半導体分野で高い国際競争力を発揮するには、技術的な優位性を生かしつつ、デバイスだけでなく周辺装置も含めた研究開発を展開していくこと

が重要だ。「コンソーシアムでは、初期段階においては非競争領域で参画機関が協力して研究開発し、事業化の見込みが立ったら競争領域で個別の共同研究に発展する仕組みになっています」と木本さんは説明する。

また、大型共同研究を企画・実施する京都大学オープンイノベーション機構や京都府、京都市といった自治体とも連携し、省エネ・高効率エネルギー利用技術の開発に取り組む地元企業に対して、コンソーシアム研究者が技術指導を行うなど、地域との協働によるスマートエネルギーイノベーションの創出にも取り組んでいるという。

課題解決のカギとなる技術テーマは、イノベーション創発のカギを握る学理研究と普遍性のある高度技術

の融合を見据えた6つを設定した。「SiCパワー半導体信頼性向上のための設計技術」「耐環境SiC複合材料基盤技術」「ワイドギャップ半導体を用いた超高感度センサー技術」「高効率・大電力変換パワーモジュール・受動素子技術」「パワープロセッシング技術・次世代システム応用」「電力パケット化・ルーティング技術」である。

このうち木本さんが主導する「SiCパワー半導体信頼性向上のための設計技術」では、革新的半導体技術を基盤としたエネルギーイノベーションとなる2つの研究成果が相次いで生まれている。長年の課題であった「非酸化の酸化膜形成によるSiCパワー半導体(トランジスタ)の高性能化」と「低消費電力集積回路の350度基本動作実証」だ。

図1 超スマートエネルギー社会基盤技術共創コンソーシアムの概要



図2 SiとSiCの特性の比較

	Si		SiC
バンドギャップ (eV)	1.12	約3倍	3.26
熱伝導率 (W/cmK)	1.5		4.9
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	約10倍	2.8

### 理論限界に達しつつあるSi SiCなら絶縁破壊電界強度10倍

エネルギー問題の解決は今世紀の最重要課題の1つだが、再生可能エネルギーの活用と同様に、エネルギーを効率的に利用する技術の確立が重要となっている。そのカギを握るのが、半導体パワーデバイスだ。家電から太陽光発電、電気自動車など、電源回路を持つ全ての電子機器に使われており、私たちの暮らしを支える身近な機器だ。

現在、半導体パワーデバイスには主にシリコン(Si)が使われているが、Siのデバイス性能は理論限界に達しつつあると木本さんは指摘する。「近い将来、新しい半導体材料の利用が不可欠になるでしょう。その中でも、最も有望視されているのがSiと炭素(C)の化合物であるシリコンカーバイド(SiC)です」。SiCは、物質の強度を表す指標の1つとなる絶縁破壊電界強度がSiの10倍、動作上限温度を左右するエネルギーバンドギャップがSiの3倍と優れている。さらに、150ミリメートルの大口径・高品質ウエハーが広く市販され、デバイス作製に必要なp型、n型を広い範囲で制御できることから、Siの限界を超えるパワーデバイス用材料として期待されている(図2)。

国内外の企業も1998年頃からSiCパワー半導体の研究開発に本格的に着手し、01年にSiCを用いたダイオードの量産が、10年にはSiCトランジスタの量産が開始された。ワー

クステーションなどの電源を皮切りに、エアコンや太陽光発電用電力調整器、急速充電器、産業用モーターなどの機器にも搭載された。SiCパワー半導体を搭載した鉄道車両や電気自動車なども大きな話題になった。

### 酸化せずに酸化膜を作る 逆転の発想で欠陥を低減

Siパワー半導体で最も基本的かつ重要なトランジスタは、金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)である。このトランジスタは、Siの表面を熱酸化することによって形成した酸化膜(SiO<sub>2</sub>)とSiの接合界面が心臓部となる。SiC MOSFETも同様に熱酸化することで表面にSiO<sub>2</sub>の酸化膜を形成するが、

その際に酸化膜とSiCの接合界面にSiの100倍以上の欠陥が生じ、デバイスの性能を大きく制限してしまう。

この欠陥を減らすために、20年以上にわたり多くの研究者が試行錯誤を重ねてきたが、ほとんど進展が見られなかった。だが木本さんらは「酸化せずに酸化膜を作る」という逆転の発想で、欠陥の大幅な低減に成功した。SiCを熱酸化すると、必ず界面に炭素原子に起因する欠陥が高密度に形成されることを、東京工業大学物質・情報卓越教育院の松下雄一郎准教授らが第一原理計算により突き止めた。

この計算結果を基に、学理に基づく思考と実験を重ねた結果、いくつかの工程が欠陥低減に有効であることを見出した。1つは酸化膜を形成する前に、SiCウエハー表面に残っている欠陥を水素エッチングによって除去した後、基材の表面に化学的に成膜するCVD法を用い、SiO<sub>2</sub>を堆積するというものだ。SiC表面に良質の酸化膜を形成すれば、酸化膜形成時に新たな高密度の欠陥が発生しないというアイデアだ。

さらに、酸化膜を堆積後に一酸化窒素(NO)ガスを用いて界面窒化を行い、界面の高品質化を図った(図3)。これらにより、従来の世界標準と

図3 新たに提案したSiO<sub>2</sub> / SiCの作製方法

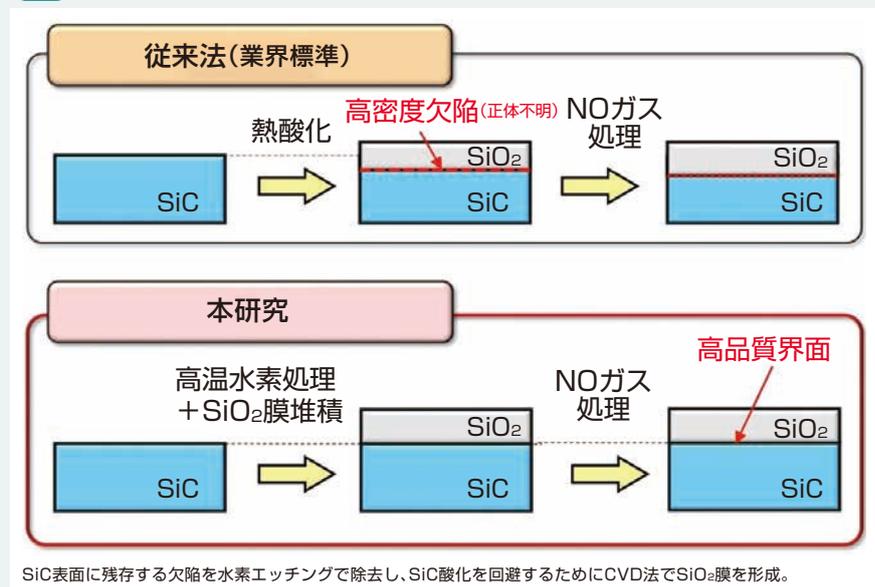
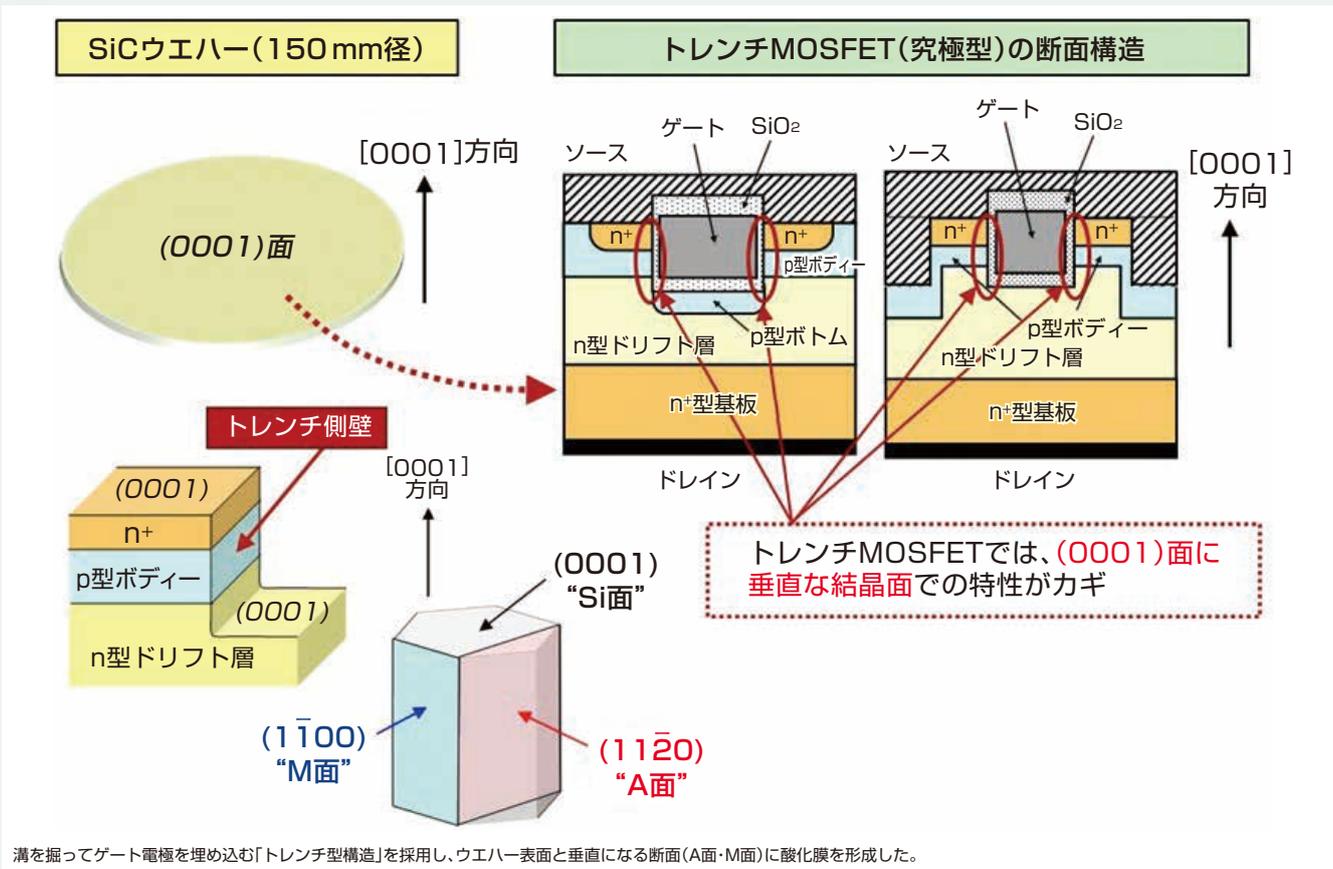


図4 トレンチ型MOSFETの断面図



比較して、欠陥を約5分の1に低減する高品質化に成功し、キャリアの移動しやすさを表すチャネル移動度も約2倍に向上した。

### 微細な溝・トレンチ構造を採用 チャネル移動度が6~80倍に

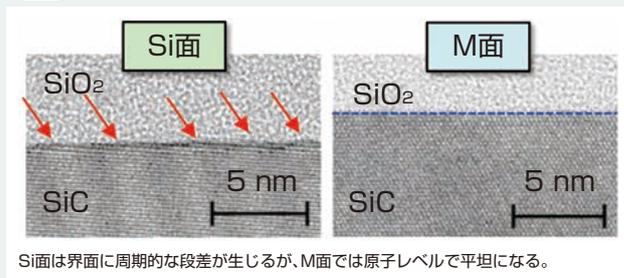
木本さんらは、その後もさらなる性能向上を図った。チップの構造を、ウエハーの表面にゲート電極を付ける従来の「プレーナ型」から、表面に微細な溝を掘ってゲート電極を埋め込む「トレンチ型」に変更し、ウエハー表面の(0001)面と表されるSi面と垂直になるA面・M面に酸化膜を形成した(図4,5)。これにより、従来の酸化膜形成法に比べ、チャネル移動度を約6~7倍に向上させた。

また、実際に製造されるSiCトランジスタと同様、アクセプタ型不純物であるアルミニウムを比較的高濃度に添加したp型領域を形成し、

A面・M面上にMOSFETを作製した。その結果、従来法に比べ6~80倍となるチャネル移動度の向上を実現した(図6)。これによって信頼性を大きく向上させるとともに、チップ面積縮小により従来の3分の1程度にコストダウンできることを示した。

木本さんの30年にわたる研究では、常に酸化膜とSiC界面の欠陥に悩まされてきたという。「これまで100以上の仮説を立てましたが失敗ばかり。暗中模索の状態が続いていました。今回、初めて本質が見えてきて、根本的な解決ができたと考えています」と笑顔を見せる。現在、SiCパワー半導体の世界市場は約1200億円。5年後には3000~6000億円に増え

図5 SiC MOS界面の電子顕微鏡像

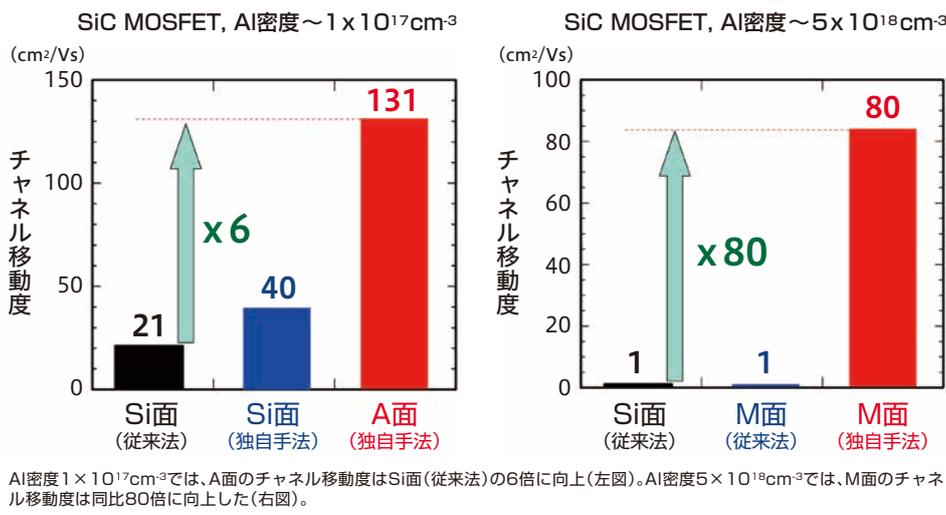


ると予想されており、これを機にSiCパワー半導体の実用化が加速すれば、社会の省エネに大きく貢献できるだろう。

### 350度で基本動作実証に成功 消費電力1万分の1も視野に

近年、集積回路の適応範囲を人の手が届かない高温環境にも広げようという機運が高まっている。石油・ガスなどの掘削作業では、地中温度が300度以上の中、地盤情報をリア

図6 チャネル移動度の比較



ルタイムでセンシングする必要がある。惑星探索では、例えば金星表面の圧力は約70気圧、温度は400度以上に達しており、探索機の着陸を困難にしている。また、航空機や自動車のエンジン燃焼室内は600度に達することもあるが、その中での細かな燃料混合比の制御が求められている。

現在主流のSi半導体では、約250度で誤動作を起こしてしまうため、これらの高温環境への適用は理論上不可能だ。一方、SiCは約800度まで正常に動作する耐性を持つことから、注目を集めている。「SiC MOSFETは心臓部である酸化膜の高温耐性限界が250~300度付近にあり、かつ放射線にも弱いため、極限環境下での安定動作は困難と考えられます」と木本さんは当初の課題を挙げる。

そこでクローズアップされたのが、pn接合を用いた接合型電界効果トランジスタ(SiC JFET)である。このデバイスは構造的に酸化膜が存在しないため、高温動作SiC集積回路を構成するトランジスタとして有望である。しかし、一般的な方法で作製したJFETは相補型回路の構成が不可能なため、大きな待機電力が必要になる。SiC集

積回路の応用が期待される300度以上の高温環境では供給電力も限られることが予想され、低消費電力化が大きな課題だった。

一般的なJFETの作製方法ではn型、p型どちらか一方しか作製できないが、木本さんは同じ研究室の金子光顕助教らと共に、イオン化した原子を高電圧で加速し衝突させて半導体内部に埋め込むイオン注入法でデバイスを作製することにより、同一基板上にn型とp型のJFETを作製することに成功した。イオン注入は工業的に広く使われている技術であり、量産の観点でも有望な作製方法といえる。

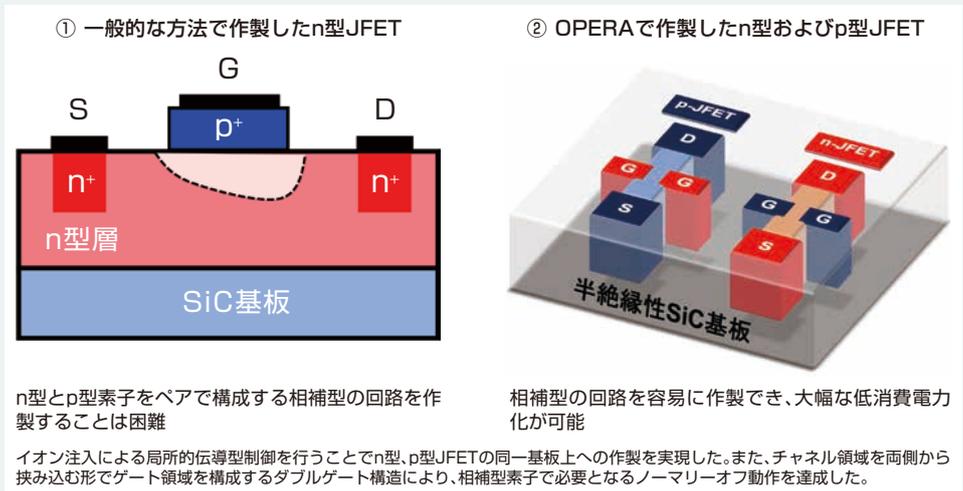
さらに、実用的な集積回路作製には、相補型の回路を構成し、待機電力

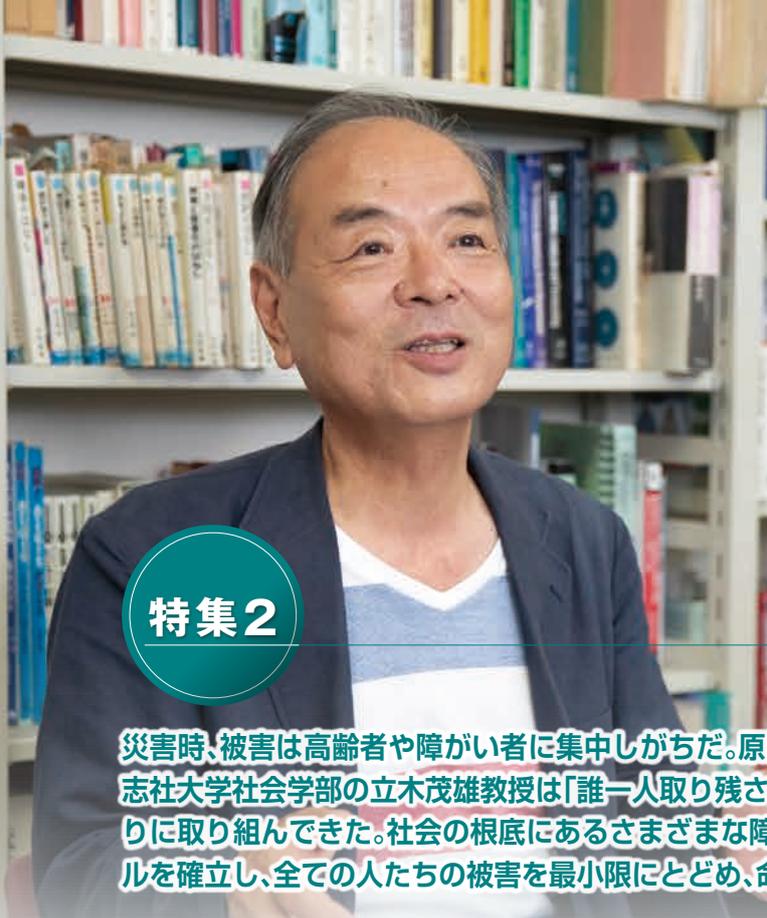
を削減する必要がある。このためには、ゲートに電圧を印加しないときにはトランジスタに電流が流れないノーマリーオフの特性が必須となる。従来の作製方法では実現困難とされていたが、JFETのチャネル領域を両側から挟み込み、2つのゲートを設けた構造にすることでノーマリーオフ特性を達成し、待機電力を削減したのだ(図7)。「作製した相補型JFETは、期待通り室温から350度の温度範囲で正常に動作し、待機状態の消費電力は最大でも数十ナノワット以下に抑えられました」と胸を張る。

海外で提案されているJFETを使用した回路と比べても、1万分の1以下の消費電力だといい、実用化に向けた大きな第一歩であることは間違いない。集積回路とは異なる分野で市場形成が進んでいるSiC半導体の標準的なプロセスで回路が作製することも特筆すべき点だろう。「微細化による小型化、高速化、高機能化がJFETでも可能かどうか、さらなる基礎研究が必要であり、引き続き検討を進めていきます」とすでに木本さんはその先を見据えている。

(TEXT:片柳和之、PHOTO:石原秀樹)

図7 JFETの模式図





## 特集2



## OVERVIEW

災害時、被害は高齢者や障がい者に集中しがちだ。原因の1つは、平時と災害時における取り組みの分断だ。同志社大学社会学部の立木茂雄教授は「誰一人取り残さない防災」の実現を目指し、自治体と二人三脚で仕組み作りに取り組んできた。社会の根底にあるさまざまな障壁を越えて、当事者、地域、社会の力を結集した事業モデルを確立し、全ての人たちの被害を最小限にとどめ、命を守るインクルーシブ防災の全国的な実装を目指す。

# 高齢者や障がい者も取り残さない防災 当事者、地域、社会の力を結集し挑む

**立木 茂雄** Tatsuki Shigeo

同志社大学 社会学部 教授  
2019年よりRISTEX研究代表者

**村野 淳子** Murano Junko

別府市防災局 防災危機管理課 防災推進専門委員  
2019年よりRISTEX協働実施者

### 21年、災害対策基本法が改正 個別避難計画作成を努力義務化

日本は地形や気象などの影響で、世界でも災害の多い国の1つといえる。自助の観点から見れば、1人1人が状況に応じて、災害に備える必要がある。一方で、さまざまな事情で容易に避難できない人も少なくない。高齢者や障がい者、乳幼児、外国人など、配慮を必要とする社会的弱者が安全に避難し、安心して避難所で過ごせるよう、社会全体として「公助」の仕組みを整えていくことも重要だ。

しかし、一口に災害時要配慮者と言っても、自力で避難できない人、救助の声さえ上げられない人、避難所生活で支障をきたす恐れのある人な

ど、必要とする支援や配慮はさまざま。それゆえ1人1人の事情に合わせた個別支援が欠かせない。超高齢社会の日本では、今後も災害時要支援者の増加が見込まれているが、障がい者を含めた対象者全員の個別支援計画ができていない市町村は全体の1割程度にとどまっている。

こうした背景から、内閣府は2021年5月に公布・施行した「改正災害対策基本法」で、「真に支援が必要な人」の個別避難支援計画の作成を努力義務化した。「04年7月の新潟・福島豪雨災害から本格的な研究を続けてきましたが、『真に支援が必要な人』の個別支援計画作成を努力義務化したのは大きな一歩です」と口にするのは、RISTEX「福祉専門職と共に進める

『誰一人取り残さない防災』の全国展開のための基盤技術の開発」で研究代表者を務める同志社大学社会学部の立木茂雄教授だ。

立木さんと共に法改正を働きかけてきたのは、RISTEXプロジェクトで協働実施者を務める、大分県別府市防災局の村野淳子防災推進専門員だ。村野さんらが中心となり、別府市では当事者である要支援者、介護・福祉事業者、地域、行政が加わった5者協働による災害時の個別支援計画作成に早くから取り組んできた。ポイントは、平時の福祉サービスの利用計画を担う支援専門員らが、要支援者ごとに災害時の個別支援計画を作成し、当事者と近隣住民とをつなぐことである。

図1 立木さんが立ち上げたウェブページ「i-BOSAI」



防災をどのように考えるのか、あるいは私たちはそれぞれの立場から要支援者などどのように関わることができるのかを学べるサイトとして、2020年に作成された。専門職向けの研修資料や、災害時ケアプランの見本なども見ることができる。  
URL: <https://i-bosai.inclusive-drr.org/>

法改正議論でも、こうした別府市の事例がモデルの1つとして報告された。全国展開に向けた検証や準備も、立木さんと村野さんがRISTEXで進めてきたもので、支援員向けにノウハウをまとめたウェブページもすでに公開されている(図1)。「私たちが立ち上げた『i-BOSAI』のiには、包摂的を意味する『inclusive』、『愛のある防災』、『私(1)から始める』、3つの『アイ』の意味を込めています」。これまでの教訓を生かし、「誰一人取り残さない防災」の実現に向け、各自自治体の動きが加速している。

## 阪神大震災の経験がきっかけ「福祉防災学」研究の道へ

立木さんが防災に軸足を置くようになった原点は、1995年1月に起きた阪神・淡路大震災だ。当時関西学院大学社会学部の助教授だった立木さんは、身内の安全を確保するとすぐに大学に向かった。その道すがら目にしたのは、関西学院大学のアメリカンフットボール部員たちが信号機の壊れた交差点で自主的に交通整理を行う姿だった。スクールモットーである「Mastery for Service(奉仕のための練達)」の実践そのものだった。

「これには心を動かされました。私もできることをしなければと、大学内に救援ボランティア委員会をすぐに立ち上げました」と振り返る。3カ

月ほど、地域と大学をつなげた支援活動を展開してきた立木さんだったが、一段落した後も「被災者の心の傷を癒やすには10年かかる」と考え、その後もソーシャルワークの専門家として仮設住宅で暮らす被災者の声に耳を傾け、心のケアや生活再建施策の提言を続けた。

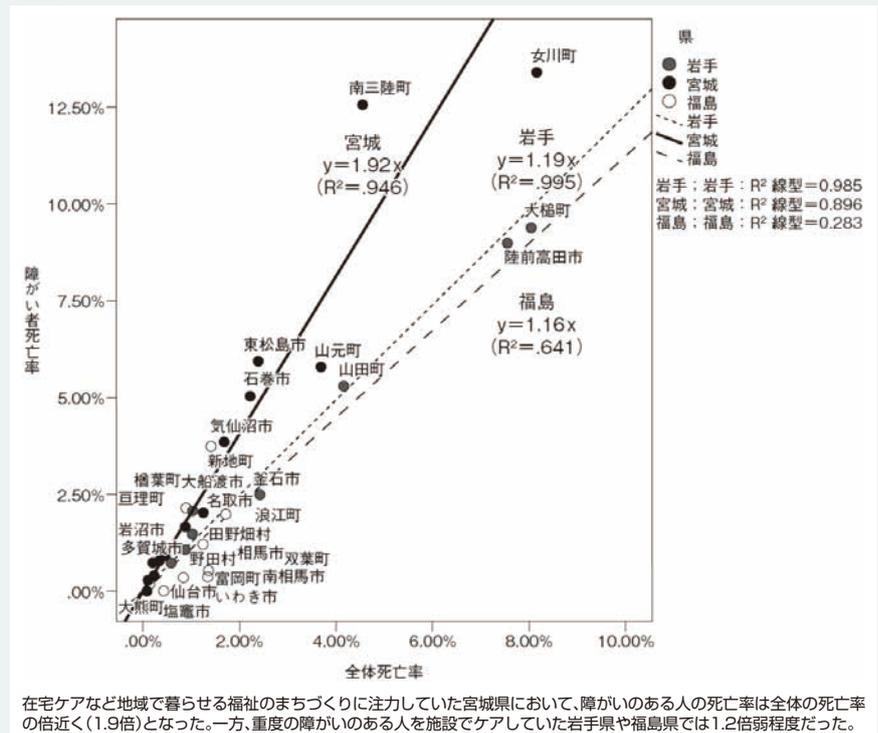
その後、01年に同志社大学へ移ったことをきっかけに、ソーシャルワークに災害社会学を融合した福祉防災学の研究に軸足を移した。11年の東日本大震災でも被災地調査と支援に向かった立木さんだったが、あるデータが目にとまった。東北3県での死亡率が0.78パーセントだったのに対し、障害者手帳所有者の死亡率は1.43パーセントと約2倍に達し、特に宮城県ではその差が顕著だった(図2)。

分析を進めると、福祉が進んでいる宮城県は在宅でサービスを受けている人が多く、それゆえに被災時の支援が十分に届かなかった可能性が浮かび上がってきた。平時であれば相談支援専門員や介助者などの適切な支援を在宅で受けられるが、ひとたび災害が起これば、1人の専門職が全ての利用者を同時に支援することはできなくなると立木さんは指摘する。「要支援者のことを熟知し、信頼されている専門職が、平時から家族や当事者と一緒に、専門職が駆けつけられない災害時に近隣からの支援をあらかじめマッチングした災害時ケアプランを作成しておくことが重要だと考えるようになりました」。

## 境界を越えて人をつなぐIM 全国実装のカギは人材育成

一方、村野さんは00年に社会福祉協議会災害ボランティアネットワークの事務局を担当し、医師会や看護協会などの専門職を対象とする研修業務に携わってきた。各地の被災地

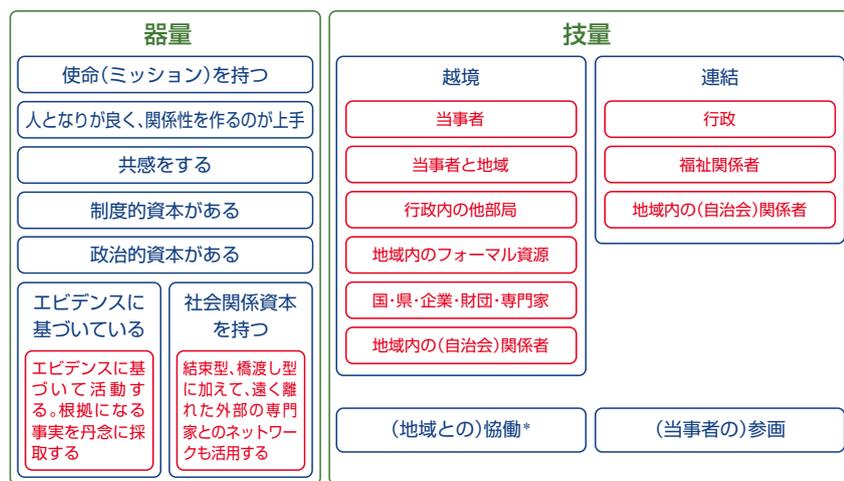
図2 東日本大震災における全体死亡率と障がい者死亡率の比較



出典:Tatsuki, S., Earthquake Spectra, Vol. 29, No. S1, pp. S403-S432, 2013



図5 インクルージョン・マネージャーに求められる器量と技量の例



村野さんの講義・講演などの発言を収集し、KJ法(親和図法)分析を通じてインクルージョン・マネージャーに求められる器量(個人的態度・姿勢)と技量をマップ化した。  
\*当事者力、地域力、行政力の三つ力を「誰一人取り残さない」というマインドで束ねる、という意味を強調するために立心偏の「協」を用いている。

出典:辻岡 綾他, 地域安全学会論文集, No39, 2021.11, pp.351-361より抜粋

## 災害は格差を拡大する「レンズ」 平衡法の視点から考える防災

こうした実証を積み重ね、立木さんは19年からRISTEXのプロジェクトを運営している(図4)。同志社大学i-BOSAI研究センターを主体としてさまざまな組織が参画し、「災害時ケアプラン・アウトリーチ技術開発ユニット(別府プラン展開ユニット)」「ツール開発ユニット」「事業定着化ユニット」の3ユニットに分かれて活動を展開している。

村野さんの持つ「器量」と「技量」の分析も、このRISTEXで行われた成果の1つだ。i-BOSAI研究センターの辻岡綾特任助教を中心に、村野さんへのロングインタビューを行い、100以上のキーワードを抽出してきた。その中で見えてきたのは、境界間を連結し、境界間関係を運営・管理するインクルージョン・マネージャー(IM)の働きだ(図5)。

「IMには、自分の所属・役割を越えて他部門・他分野の領域に『越境』し、関係者を『連結』し、『協働』により物事を動かし、当事者の『参画』を促すという、『越境—連結—協働—参画』のサイクルを回す『技量』が重要です」と立木さんは語る。これに、使命感と覚悟、

幅広い人脈といった「器量」が備われば、確かにリーダーシップを発揮できる存在になるだろう。「改正災害対策基本法」とともに公開された「避難行動要支援者の避難行動支援に関する取組指針」でも、こうしたIMの必要性が明文化されている。

また、「別府モデル」のさらなる深化として、別府市内を地域包括支援センターの7つの圏域に分けてそれぞれの地域の特性に合わせ、よりきめ細かな制度・システムの構築を進めている。他にも、福祉専門職向けの4冊にわたるi-BOSAIブックレットの刊行、研修の映像化などe-ラーニング教材開発、「自分でつくる安心防災帳」のアプリ化も実現した(図6)。

これらの教材やツールを活用して、兵庫県ではこれまでに約3000名近い福祉の専門家に対する研修を終えている(図7)。また、福祉の専門家が「災害時ケアプラン」を

作成すると報酬を加算する制度がスタートするなど、事業化のためのシステムづくりも加速している。さらに、「i-BOSAI」に取り組む自治体も兵庫県や滋賀県、京都府、静岡県、各市区町村をはじめ、日田市、長崎市、岡山市、古河市、常総市、北海道音更町など全国の自治体にも着実に広がっている。

災害はもともとある格差を拡大する「レンズ」であり、社会格差は正を希求する<sup>エクイティ</sup>平衡性の視点から防災を考える必要があるという立木さん。「今後は『どんな人も誰一人取り残さない』防災へと支援モデルの枠組みを広げるとともに、世界にも展開していきたいですね」と展望を語る。すでに英語版やスペイン語版i-BOSAIブックレットを作成し、JICAと連携してエクアドルやマレーシアの専門家研修もスタートしている。「誰一人取り残さない防災」に向け、立木さんと村野さんはこれからも歩み続ける。

(TEXT:森部信次, PHOTO:石原秀樹)

図6 RISTEXから生まれた成果



i-BOSAIの教材は書籍のほか、オンライン研修用にも編集され、受講者へ公開されている(左)。チェックキットの説明に沿って情報を入れるだけで、避難行動要支援者自身の状態や必要な備え、支援ルートを確認できる「自分でつくる安心防災帳」のアプリ化も行った(右)。

図7 専門家向け研修風景



災害対策をはじめ、具体的な個別避難計画づくりに使える標準的なツール活用など、基本的な教育・研修システムを提供。これまでに自治体など3000名近い専門職員が受講している。写真はマレーシアからの研修団を滋賀県危機管理センターに迎える研修風景。

どうやって  
実現する？

# 明るく豊かな ゼロエミッション 社会

連載  
【第6回】

谷口 昇 Taniguchi Noboru

低炭素社会戦略センター 副センター長

大友 順一郎 Otomo Junichiro

東京工業大学 環境・社会理工学院 教授 /  
低炭素社会戦略センター 特任研究員

## 開発が進むさまざまな蓄電技術

若手商社員・皆川豊を主人公としたストーリー仕立てで、低炭素社会戦略センター(LCS)が発行する提案書を読み解く連載の第6回。今回は2050年の電源構成を実現するために不可欠な蓄電技術として揚水発電について学んだ皆川。今回は揚水発電と並んで再エネによる脱炭素に不可欠な蓄電池と水素の現状における技術や将来性について、谷口昇副センター長と大友順一郎特任研究員にお話を伺った。

### 技術は用途や目標で使い分け コストも環境負荷も低減へ

**皆川**：今日は蓄電池と水素利用について伺いに来ました。よろしくお願ひします。はじめに、蓄電池の現状について教えていただけますか？

**谷口**：蓄電池には、電解質と正負極材料の組み合わせによってさまざまな種類があります。例えば、パソコンに使われているのはリチウムイオンバッテリー(LIB)ですね。蓄電池の開発は、鉛、ニッケル水素(Ni-H)、LIBと用途によって小型・大容量化が進められ、現代のモバイル機器の需要増に伴って、急速にLIBの開発が進んできました(表1)。現在は、より大容量で長寿命、そしてより安全で発火しにくい固体電池など、電気自動車(EV)の普及を見据えた研究に注目が集まっています。

**皆川**：表を見ると、現状ではLIBは他の蓄電池に比べてコストが高いので、導入するとなると電気代が気になります。

**谷口**：そこでカギになるのが、最適な電池の使い分けです。EVや携帯電話などの持ち運べる電源には、今後もLIBの進化が続くでしょう。でも、例えば再エネ発電所に隣接した蓄電施設を設置する場合、大きさや重さはさほど重

要ではなくなります。スペースや耐荷重に余裕があるところでは、鉛蓄電池が適していると考えています。構造が比較的単純で、材料となる鉛が安価なので低コスト化が可能ですし、CO<sub>2</sub>排出量もLIBの4分の1に抑えられます。

**皆川**：鉛蓄電池は、自動車のバッテリーに古くから使われていますし、目新しさはないですね。

**谷口**：古くから使われているから、導入しやすいとも言えますよ。製造技術が確立されており、生産、使用、廃棄やリサイクルのための法整備も既にできているのは大きな利点です。鉛をリサイクルすることにより、日本国内で再生蓄電池を持続供給することも可能になります。今後の大規模蓄電設備には有用でしょう。

### 長期貯蔵に適した水素の活用 福島県では大規模実証実験も

**皆川**：再エネの普及を前提に電池の効率や価格を考えると、最新技術が一番良いとは限らないんですね。

**谷口**：電池は常に出口の用途に合わせて開発されてきました。用途によって最適な電池は変わるので、さらに大容量の蓄電になると、ナトリウム硫黄電

池(NaS)やレドックス・フロー電池(RF)も有用です。試算上は大容量になれば初期コストが下がり採算が取れるので、大容量需要や設置環境が整えば鉛蓄電池やLIBに代わるメリットが出てきます。また、LIBでも電極に高価なコバルトやNiを使わないリン酸鉄系LIBにも注目しています。

**皆川**：開発が進めば、「明るく豊かなゼロエミッション」に近づきますね。

**谷口**：いくらCO<sub>2</sub>が削減できても電気代が高すぎるとは産業として発展しません。脱炭素という目標を達成しながら、電池の耐久性や製造コストなどの経済面の数字を積み上げ、2050年にコストミニマムになる電源構成を試算するのは、日本経済にとっても環境にとっても最善・最適なシナリオを提案するためです。具体的には、再エネ発電と蓄電は一体で考えるべきといった将来の方向性を示すこともLCSの役割の1つです。

**皆川**：蓄電池だけでも良さそうに見えますが、水素利用もシナリオに含めているのはなぜでしょうか？

**大友**：そちらは私から説明しましょう。水素は長期的な貯蔵と移動性が強みです。例えば、夏に太陽光発電で作った水素を貯めておいて冬に使う、海外で貯めて日本で使うといった長時間の貯蔵や移動性を考えると、再エネを水素の形にして貯める技術はコスト面を差し引いても有用です。

**皆川**：再エネを水素の形にして貯めるとはということでしょうか？

表1 各種電池の性能比較

電池の種類	鉛	Ni-H	LIB	NaS	RF	
エネルギー密度 (Wh/kg(L))	40(82)	100(390)	250(720)	130	10	Ni-H：ニッケル水素電池
システムコスト (万円/kWh)	1.5~3	10	4~9	4.3	9	LIB：リチウムイオンバッテリー
セルコスト (円/Wh)	5~15		16~25			NaS：ナトリウム硫黄電池
サイクル(回)	4500回	2000回	4000回	4500回	制限なし	RF：レドックス・フロー電池
エネルギー効率	87%	90%	95%	90%	100%	

出典：2021年6月11日開催 LCS ウェビナー「2030年、温室効果ガス46%減社会の姿」、「各種電池の供給可能量」より抜粋

**大友:** 再エネで発電した電気を使って燃料電池で水を電気分解して水素を作り、再び電気として使う時には燃料電池を通して発電に利用したり、水素タービンを使って火力発電の燃料にしたりすると理想的ですね。

**皆川:** 燃料電池の開発はどれくらい進んでいるのでしょうか？

**大友:** 現在、福島県ではアルカリ電解質形燃料電池で大規模な電気分解を行う水素供給施設の実証実験が行われています。次の段階としては、燃料電池水素自動車に使われている「固体高分子形燃料電池(PEFC)」を用いた大規模な水電解システムによって、安全性や発電効率を高めるための研究開発が進み、さらに先には「固体氧化物形燃料電池(SOFC)」を使用した水蒸気電解システム(SOEC)の開発が進むと思います。

**皆川:** PEFCとSOFCにはどのような違いがあるのでしょうか？

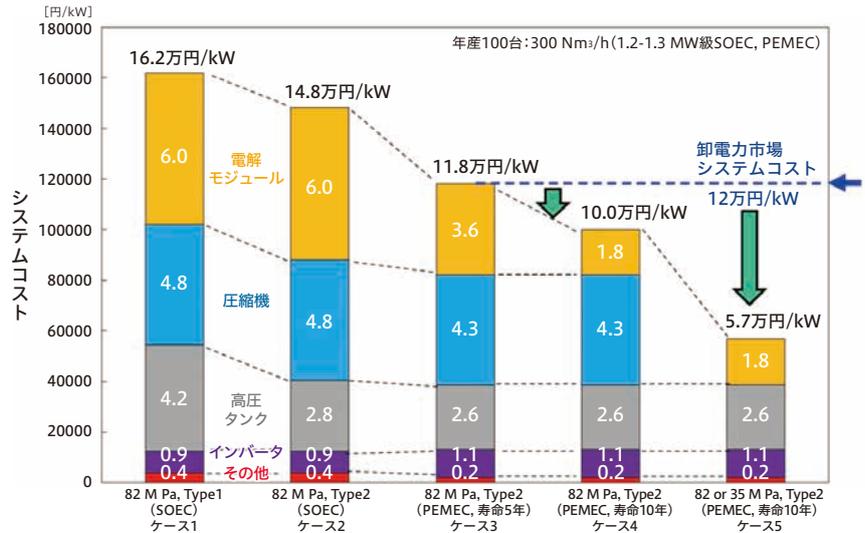
**大友:** 稼働するのに得意な環境が違います。PEFCは動作温度が80度程度と低く、起動・停止が容易なので短時間の運用でも能力を発揮できます。例えば、よく晴れていて太陽光発電の余剰が多いときだけ稼働させるといった柔軟な運用に向いています。一方、SOFCは700度以上の高温で働くので、短時間の稼働では効率が悪いのですが、長期で定常的に稼働させる場面ではPEFCよりも高い効率を発揮します。どちらのタイプも燃料電池システムを構成する個々の要素の改良を進めればさらにコストは下がり、発電と電解の組み合わせによっては現在の卸電力市場での活用も夢ではないことが試算されています(図1)。

**皆川:** 適材適所で使用する燃料電池が変わってくるということですね。

**ゼロエミッションの先の未来  
CO<sub>2</sub>を回収し化成品や燃料に**

**大友:** 水素の低コスト化のカギは、水素製造に使用される電力コストの低減とともに、最もエネルギーを使う水電解で水素を作る工程をいかに効率

図1 技術革新とコスト低減の道筋



出典:大友先生提供資料「燃料電池、水素およびエネルギーキャリア製造技術の技術シナリオ」より抜粋

化できるかです。将来を見据えた技術開発と同時に、水素という新しいエネルギーキャリアを利用する素地を社会の中に作っていくことも必要です。

再エネ発電コストも水素製造コストも、いきなり先ほどお話しした理想的な利用方法を導入するのではなく、まずは供給方法や使用方法の幅を広げて水素の市場を成立させることが普及のカギとなります。初めは海外の大規模な再エネ発電で作られた安価な水素を輸入して、火力発電の際に化石燃料に水素を混ぜる混焼で発電時のCO<sub>2</sub>排出を減らすために使う、あるいは常温で輸送が可能なアンモニアの形に変えて水素を運び、そのまま燃料にするという案も出ています。

**皆川:** サプライチェーン全体を見てトータルで利益を出すのは、商社の得意とするところですよ。

**大友:** 頼もしいですね。東京工業大学の私の研究室でも、材料設計から社会実装のためのコスト試算まで全体を見通せるより広い視野で研究開発

を実行できる人材育成に力を入れています。今日は2050年頃までを見据えた話でしたが、さらに遠い将来、さまざまな技術開発が進んでコストも下がれば、排出されたCO<sub>2</sub>を回収して水素と反応させ、日常で使う化成品や燃料を作るなんてことも実現するかもしれません。

**谷口:** 日本は地域ごとに太陽光、風力、地熱などの再エネのポテンシャルがあります。将来的に地域の特性を生かした再エネ発電と蓄電技術がセットになった施設が日本中にできてエネルギーの地産地消が進めば、脱炭素だけでなく安全保障の観点でも安心な社会が実現できるでしょう。

**皆川:** LCSのシナリオは経済性と環境負荷の両方を考慮したものだとわかり、未来への希望も膨らみました。谷口さん、大友さん、ありがとうございました。

ーなお、物語は取材を元にしたフィクションである。(TEXT:高橋麻美、PHOTO:石原秀樹、楠聖子)



東北大学 多元物質科学研究所 教授  
**雨澤 浩史**

ワンポイントアドバイス

「電池」と聞くと、携帯機器用の電源というイメージをお持ちの方が多いと思いますが、再エネの安定利用にとっても欠かせない技術です。ただ、一口に「電池」「燃料電池(水電解)」と言っても、ここで示されている通り、さまざまなタイプがあり、それぞれ、特性、経済性、環境適応性に得手不得手があります。そのため、これらのベストミックスにより、小～大規模、短～長期の蓄電ニーズにフレキシブルに対応できるシステムを考えていくことが大切なのです。

## 研究成果

戦略的創造研究推進事業CREST

研究領域「新たな生産プロセス構築のための電子やイオン等の能動的制御による革新的反応技術の創出」  
研究課題「ヒドリド含有酸化物を活用した電気化学CO<sub>2</sub>還元」

## 希少な金属を使わず固体光触媒を開発

可視光で高選択的にCO<sub>2</sub>をギ酸に変換

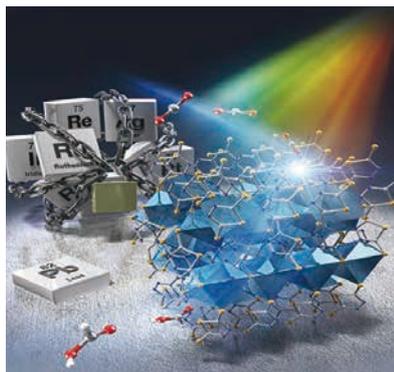
温室効果ガスの二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を有用な化学物質に変換する「人工光合成」の技術は、脱炭素化に向けた基盤技術として注目を集めています。中でも再生可能エネルギーの有効利用という観点から、太陽光のおよそ半分を占める可視光を活用する光触媒システムが盛んに研究されてきました。しかし、その多くが高価な貴金属や希少金属を必要としているため、安価な元素を使った固体光触媒の開発が求められていました。

東京工業大学理学院化学系の前田和彦教授らの研究グループは、ありふれた元素である鉛を中心金属とし、鉛-硫黄結合を持つ配位高分子からなる固体光触媒「KGF-9」を開発しました。さらにこの触媒に可視光を照射し、CO<sub>2</sub>を水素の生成・貯蔵に有用なギ酸へと高選択的に変換することに成功しました。また、反応に関与した電子の個数と、吸収された光子の個数の割合を表す「みかけの量子収率」については、420ナノ(ナノは10億分の1)メートルにおいて2.6パーセントに達しました。これは、単一成分の貴金属・希少金属を使わない固体光触媒によるCO<sub>2</sub>からギ酸への変換で

は、現時点の世界最高値です。

希少な金属を使わず低コストでCO<sub>2</sub>を効率的に変換できる固体光触媒の開発は、脱炭素社会の実現に道を拓くものと期待されます。今後は、光触媒KGF-9を用いて光触媒機能の発現をもたらす因子を明らかにすることで、鉛の仲間であるスズなどを用いた物質設計も可能となります。将来的には、毒性を持つ鉛を必要としない高性能光触媒の開発が望まれます。

## 光触媒KGF-9のイメージイラスト



銀(Ag)、レニウム(Re)、ルテニウム(Ru)といった貴金属・希少金属を使用することなく、安価な鉛(Pb)を用いた配位高分子を光触媒として利用し、CO<sub>2</sub>からギ酸へ還元する様子を表現している。

## 研究成果

戦略的創造研究推進事業ERATO

山内物質空間テクトニクスプロジェクト

## 有機金属構造体を直接炭化、多孔性粒子創製へ

## 形態と細孔構造の高度な制御が可能

炭素を含む物質・材料は熱的・化学的安定性が高く、軽量で優れた導電性を備えていることから、エネルギー・環境分野への応用研究が進められています。カーボンナノチューブやグラフェンなどに代表される非常に小さなナノ炭素物質は、凝集すると有効表面積が小さくなることから機能が低下するという欠点があります。そこで、表面積が大きい多孔性炭素材料を用いる方法が模索されていますが、既存の合成法では均一な粒子形態の達成などが困難でした。

早稲田大学理工学術院の客員上級研究員兼客員研究院教授の山内悠輔先生らの研究チームは、有機金属構造体(MOF)粒子を出発物質として、これを直接炭化することにより、多孔性炭素粒子を合成する方法論を確立しました。MOF粒子の内部をエッチングしたり、MOF粒子の表面に別の組成のMOF粒子を被覆したりすることで、形態と細孔構造の高度な制御が可能になりました。

また、多孔性炭素材料を4つに分類し、それぞれのタイプの炭素材料を合成する方法論を作りました。さらに実験結果から、出発物質MOFに対する多孔性炭素材料の収率が30～50パーセント程度で、その合成物も約90パーセント以

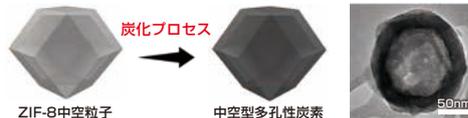
上の炭素原子からなる炭素質であることを確認しました。

これまでMOFそのものは化学的安定性や電気伝導率が低く、電気化学的な応用展開には不向きとされていました。しかし、今回確立したMOFの直接炭化法はこれらの欠点を克服しうるため、蓄電池や触媒などへの応用が期待されています。

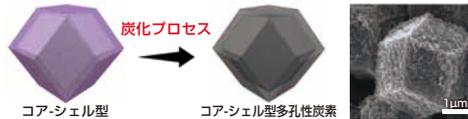
## (1)単純型



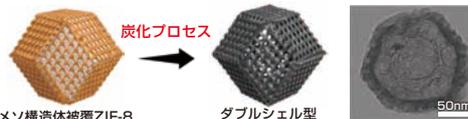
## (2)中空型



## (3)コア-シェル型



## (4)ダブルシェル型



MOFを出発物質に用いた単純型、中空型、コア-シェル型、ダブルシェル型多孔性炭素材料の合成法と電子顕微鏡写真。いずれの型も、均一な粒子形態が達成されている。

## 研究成果

ムーンショット型研究開発事業

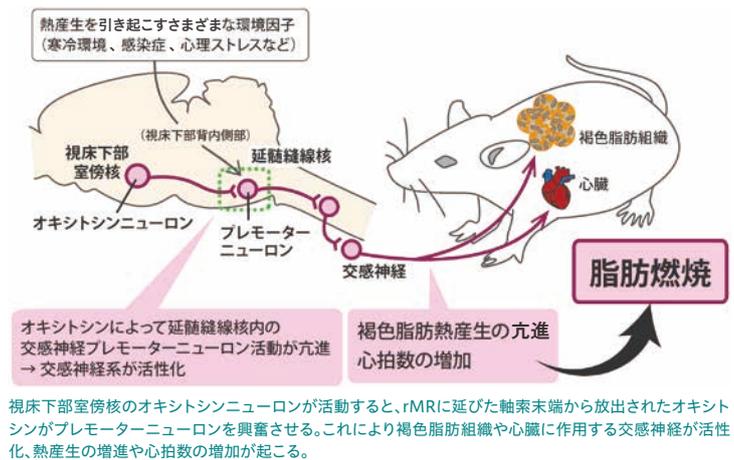
研究開発プロジェクト「恒常性の理解と制御による糖尿病および併発疾患の克服」

## 「愛情ホルモン」の作用メカニズムを解明 自律神経や肥満メカニズムの研究展開に期待

哺乳類は気温や栄養状態などに応じて、臓器・器官の機能を調節して体温や血圧、心拍数などを適切に保っています。この生体調節の司令塔とも言える視床下部では、多様な神経ペプチドが産生されていますが、その1つに「愛情ホルモン」とも呼ばれるオキシトシンがあります。出産や社会的行動の際に脳内および血中に放出され、鎮痛作用や抗ストレス作用などを示すことが知られていますが、近年オキシトシンがうまく働かないと、体温調節ができず肥満になりやすいこともわかってきました。

名古屋大学大学院医学系研究科の中村和弘教授らの研究グループは、オキシトシンが「脳のどこで」「どのような機構で」作用するのかを明らかにするために、ラット視床下部でオキシトシンを産生する神経細胞「オキシトシンニューロン」の軸索（神経線維）を、緑色に光る蛍光たんぱく質で可視化しました。その結果、この軸索は脂肪燃焼などを司令する信号を出力する吻側延髄縫線核領域「rMR」という延髄の一部に伸び、神経伝達することを確認しました。

また、光遺伝学的手法を組み合わせた生理学的な実験によって、オキシトシンがrMRに作用して交感神経系を活性化させ、熱産生や心拍数の増加を促すことを明らかにしたほか、オキシトシンが寒冷刺激、ストレスなどによる日常的な熱産生をも増強している可能性も示しました。オキシトシンの新たな作用が明らかになったことから、感情に関連した体温の上昇や心拍数の増加などの自律神経反応の解明や、新たな肥満関連の治療法の開発につながりそうです。



## 研究成果

戦略的創造研究推進事業 さきがけ 研究課題「超核偏極ナノ空間の創出に基づく高感度生体分子観測」

創発的研究支援事業 研究課題「MRI・NMRの未来を担う「トリプレット超核偏極の材料化学」」

## 室温で水の高核偏極状態化に成功 薬物スクリーニングや細胞内たんぱく質の解析に道

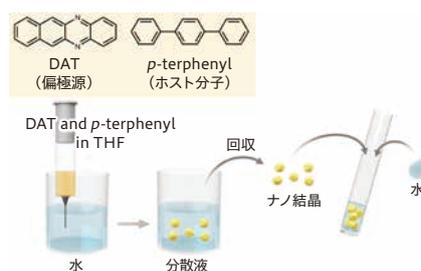
原子や分子は、核スピンと呼ばれる磁石のような性質を持っており、これを利用して分子の情報を得る方法が核磁気共鳴(NMR)や磁気共鳴イメージング(MRI)です。MRIでは体内水分子の信号を利用しますが、室温下で検出できる核スピンは0.001パーセント(10万個に1個)と非常に少なく、信号が弱いことが難点でした。解決法として、検出できる核スピンを増やす「動的核偏極」がありますが、マイナス150度以下の極低温測定、または測定に悪影響を及ぼすラジカル分子を加える必要がありました。

九州大学大学院工学研究院応用化学部門の楊井伸浩准教授らの研究グループは、有機結晶中の核スピンの向きがそろった核偏極を水分子に移行する新たな手法として「核偏極リレー」を開発し、室温で初めて水を高核偏極状態にすることに成功しました。結晶サイズが小さくなると、単位体積あたりの表面積が

大きくなり、水分子と接触して核偏極リレーに利用できる面積が大きくなることで偏極移行の効率が上がると考えられます。そこで再沈殿法を用いて大きさの異なる有機ナノ結晶を作製・解析し、結晶サイズと水分子に対する核偏極リレー効率の関係を明らかにしました。

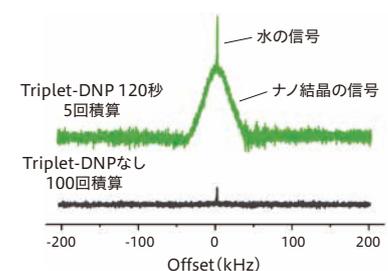
これまで結晶を偏極する例はあっても偏極を液体に移した例はなく、今回の結果は不可能を可能にする、まさに0を1にした成果といえるでしょう。今後はさまざまな生体分子に対するNMR/MRIの感度向上につなげ、薬物のスクリーニングや生きた細胞内たんぱく質の構造解析を行う新たな手法として注目が集まります。

## 再沈殿法を用いた有機結晶の作製方法



有機溶媒に溶かした偏極源とホスト分子を水中に注入し結晶分散液を得た後、ナノサイズの有機結晶を回収、水と混合する。

## MM信号強度の観測結果



動的核偏極により核偏極がナノ結晶から水へ移ることによって、線幅の広いナノ結晶に加えて、線幅の狭い水でも信号強度の増強が観測された。

# さがける 科学人

vol.122

角永 悠一郎 Kadonaga Yuichiro

大阪大学 大学院医学系研究科  
放射線統合医学講座核医学 特任助教

Profile

大阪府出身。2014年大阪大学大学院理学研究科博士後期課程修了。博士(理学)。北京大学化学与分子工程学院ポストドクター、大阪大学放射線科学基盤機構特任助教などを経て、22年度より現職。同年度よりERATO「片岡ラインX線ガンマ線イメージングプロジェクト」研究員。



滋賀県甲賀市の信楽にて。旅先の風土や文化に触れて、息抜きと同時にさまざまな見識を深めています。

Q1. 放射線医学の道に進んだきっかけは？

A1. 有機合成の知識と技術を活用  
大きな刺激を受けた中国留学

学士からポストドクターまで一貫して有機合成、特に生体内で重要な役割を担う天然有機化合物の合成を行ってきました。天然有機化合物は自然界に存在しますが、単離し、大量に得ることは難しいです。そのため、合成化学的手法を用いて単一化合物を得るにより、初めて詳細な機能解析・解明が可能になります。研究を重ねていくうちに、もの作りや、自分なりに化合物をデザインする面白さに夢になりました。

一方で、有機合成の知識と技術を生かしていずれは世の役に立つ薬剤を生み出したいとも考えていました。そうした中で、例えば陽電子断層撮像(PET)の画像診断で使われる薬剤のように、有機分子に放射性同位体を結合した薬剤があることを知り、放射線医学の道に進みました。

大きな刺激を受けたのが中国への留学です。競争が激しく、プレッシャーも大きい環境でしたが、研究者として成長できたと感じています。

Q2. 具体的な研究内容を教えてください

A2. 体内からがんを攻撃する核医学  
<sup>211</sup>Atと金ナノ粒子で薬剤を合成

がん治療には「外科療法」「化学療法」「放射線治療」などがありますが、それぞれ高侵襲、高副作用、放射線被ばくなどの問題があり、より安全で効果的な治療法が必要とされています。私が参加しているERATOのプ

ロジェクトでは、生体内から放射線ががんを攻撃する核医学治療の研究をしています。

具体的には「アスタチン-211(<sup>211</sup>At)」を血管から注入しています。<sup>211</sup>Atはα線を放出する原子です。α線の飛距離はβ線やγ線などよりも短く、エネルギーが強いため、周辺の正常細胞にほぼ影響を与えず、目的の腫瘍だけに強く作用するというメリットがあります。

また<sup>211</sup>Atには甲状腺に集まる性質もあります。そのため、甲状腺がん以外の治療では、この性質を打ち消す必要があります。そこで、狙った腫瘍に<sup>211</sup>Atを到達させるために<sup>211</sup>Atを固定できる金ナノ粒子を用いた薬剤の分子デザインと合成を行っています。

一方で金ナノ粒子は、代謝されずに長期間体内に残るので、その後の分布状況を評価することも重要です。現在は、プロジェ

クト研究総括で早稲田大学の片岡淳教授が開発したコンプトンカメラを用いて、金ナノ粒子を放射化すると放出されるγ線をイメージングする方法も検討しています。



チューブの中の金ナノ粒子にポリエチレングリコールを加えている様子。これにより金ナノ粒子の表面修飾が行えます。



研究者同士のつながりを作り  
「新たなひらめき」を生む架け橋に

Q3. 研究者を目指している人に一言

A3. 幅広い知識を学んで欲しい  
新しい世界に飛び込む勇気を

私は中国から戻ってすぐは大阪大学の理学研究科にいましたが、途中から医学系研究科に移り、分野連携の難しさを実感しました。がんの薬を作るという目標は同じでも、理学と医学ではアプローチが違います。植物で例えると、理学は良い実がなる条件を調べるのに対し、医学はできた実を食べて味を評価します。

今は両研究科への所属経験を生かして、研究チーム全体がスムーズに連携できる仕組み作りにも力を入れています。研究者同士をつなげて「新たなひらめき」が生まれる架け橋になればうれしいですね。

研究者を志す人は、食わず嫌いをせず、興味を引かれたことに挑戦してみてください。そのためには、専門性を掘り下げると同時に、積極的に周辺分野にも触手を伸ばして幅広い知識を学んで欲しいと思います。たとえ失敗したように見えても、それは今後の人生の大切な経験になります。臆することなく、新しい世界に飛び込む勇気を持ってください。

(TEXT: 片柳和之)



JSTnews

December 2022

発行日/令和4年12月1日  
編集発行/国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)総務部広報課  
〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3サイエンスプラザ  
電話/03-5214-8404 FAX/03-5214-8432  
E-mail/jstnews@jst.go.jp JSTnews/https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/



最新号・バックナンバー