

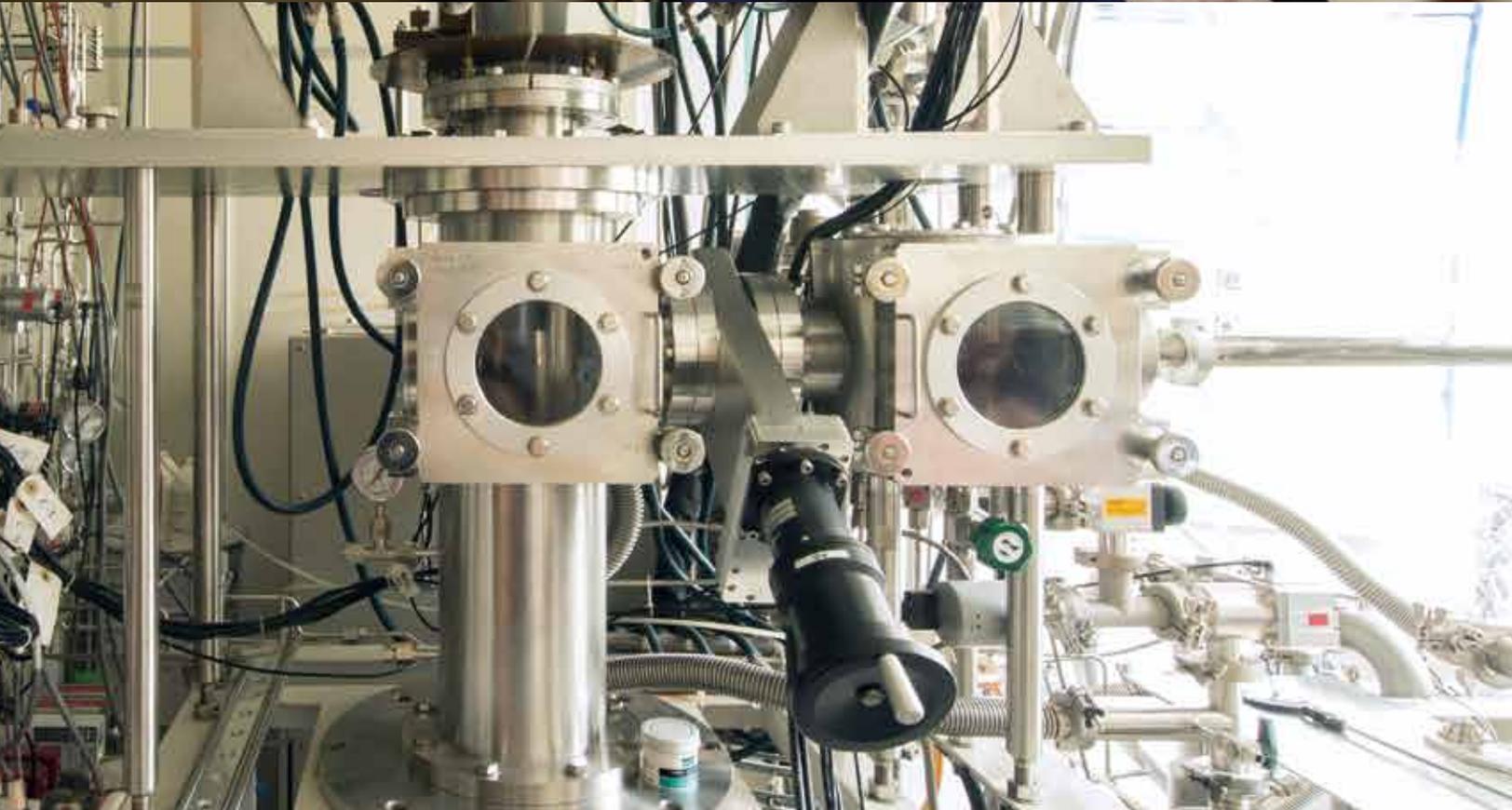
NIMS NOW

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

No. 3
2016

新たなる 太陽電池革命

— 新素材・新技術が拓く未来 —

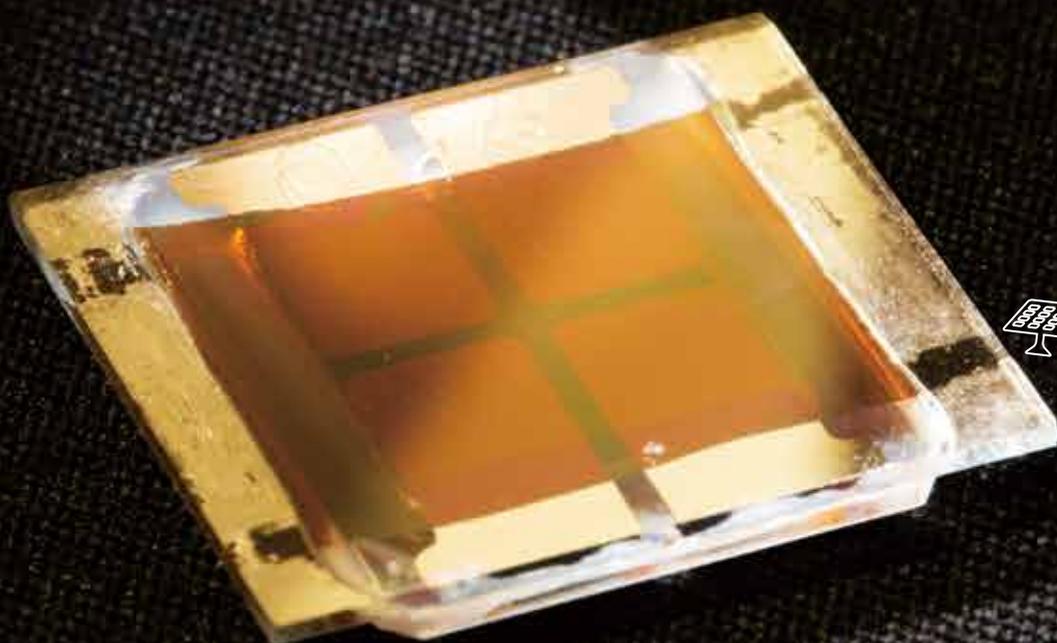


新たなる 太陽電池革命

—— 新素材・新技術が拓く未来 ——

エネルギーを取り巻く環境は、大きな変化の時代を迎えている。
電力小売全面自由化をはじめ、さまざまな電力システム改革が進む日本でも、
太陽光・風力・地熱・バイオマスなど
地球にやさしい再生可能エネルギーへの期待が高まっている。
特に、太陽光発電は日本での総導入容量も30ギガワットを超え、中国、ドイツに次ぐ世界第3位だ。
世界的にみても市場は成長を続けており、
太陽光発電は世界の電力需要の約1.3%を占めるようになった。

一方、それでもまだ、火力発電・原子力発電等に比べ、
コストや発電効率など課題が多いのも事実だ。
そんな中、新たに注目される高効率・低価格な材料や手法がNIMSで生まれている。
課題解決に向け、新素材の開発・既存材料の改良に取り組む
NIMSの太陽電池研究最前線に迫る。



太陽電池研究を展望する

2015年末現在、日本における太陽電池の累積導入量は30ギガワット(GW)に達している。2050年には100GWに達すると予測され、基幹エネルギーになることが期待されている。しかし、その実現には、高効率で信頼性が高く、発電コストの低い革新的な太陽電池の開発が不可欠である。そのためには今何をすべきか。薄膜シリコンと結晶シリコンを中心に太陽電池の研究開発を牽引してきた小長井誠教授と、NIMSペロブスカイト太陽電池特別推進チームを率いる宮野健次郎フェローが、太陽電池研究の現状、そして展望を語り合う。

小長井 誠

東京都市大学 総合研究所 教授

Makoto Konagai

宮野健次郎

物質・材料研究機構 フェロー

Kenjiro Miyano

日本の太陽電池研究の始まり

宮野 小長井先生は、日本における太陽電池研究を初期からご存じですね。

小長井 私が太陽電池の研究を始めたのは東京工業大学大学院の修士1年生だった1972年ですから、もう45年になります。さまざまな太陽電池材料を扱いましたが、最初はガリウムヒ素(GaAs)でした。日本の新エネルギー技術研究開発についての長期計画である「サンシャイン計画」が始まったのが1974年。そして1980年に新エネルギー総合開発機構

(NEDO、現在の新エネルギー・産業技術総合開発機構)が発足し、太陽電池の研究開発は産学連携で進んできました。

シリコンの変換効率を極限まで上げるには

小長井 世界では現在、年間40GW分の太陽電池が生産されていますが、主流はシリコン(Si)で90%を占めます。しかし、結晶Siのエネルギー変換効率は25%前後で伸び悩んでいます。28~29%といわれる理論限界まで上げるには、かな

り挑戦的なことをやらなければならないでしょう。

宮野 NIMSでは、Siについて経済性に注目した研究をしています。Siの単結晶を種結晶から成長させる新しい結晶育成法を開発しました。これまでは集積回路に使う場合と同じ方法でSi単結晶をつくっていましたが、新しい方法ははるかに安くできて、しかも変換効率はほとんど変わりません。

小長井 コスト低減は非常に重要です。一方で変換効率の面ではSi単独での大幅な向上はかなり難しいでしょう。そ

ここで期待しているのが、Siのセルの上にSiとは異なる波長を吸収する複数の半導体材料を積層したタンデム型（多接合型）です。Siだけより幅広い波長の太陽光を有効に利用することができるようになります。急成長している中国企業もタンデム型に注目しており、「ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaic)」という太陽電池の報告書でも、2025年にはSi太陽電池の10%はタンデム型になると予測されています。

太陽電池は、
実はトランジスタより
LEDより難しい。
だからこそ面白い。

小長井 誠



新しいコンセプトで 革新的な材料を

宮野 太陽電池のこれからのトレンドは、「Siを超える」です。これは、価格面と、変換効率の二つの側面があります。

そのためにNIMSでは、元素周期表のⅢ族に属するアルミニウム (Al)、ガリウム (Ga)、インジウム (In) など、V族に属するヒ素 (As)、窒素 (N) などとの化合物であるⅢ-V族化合物半導体系の研究を進めています。吸収できる波長が異なるⅢ族とV族の化合物は、幅広い波長の太陽光を利用することができて、発電効率が上がるのです。しかし半導体の上に異なる半導体をきれいに積層させるには界面の制御が難しく、その技術を開発しています。その技術はタンデム型に必須です。

量子ドットにも取り組んでいます。結

晶の中に量子ドットと呼ばれるナノメートルサイズの構造をつくることで、量子効果を利用して高い変換効率を達成しようというものです。

小長井 Siが主流だからといってSiだけを研究していればよいのではなく、常にいくつもの新しいコンセプトで材料開発を続けていくことが太陽電池の発展には不可欠ですね。

画期的な材料、 ペロブスカイトの登場

小長井 3年ほど前、突如ペロブスカイト系が出てきました。それはペロブスカイトと呼ばれる結晶構造を持つヨウ化鉛

のイオン性結晶で、変換効率が最初から12%も出ていて驚きました。私がもう少し若かったら、ペロブスカイトを絶対やっていたよ。これほどポテンシャルの高い材料がよく今まで眠っていたな、と不思議に思います。

宮野 実は、ペロブスカイトは、日本では1990年代から研究されていました。しかし、発光材料としてだったのです。光を出すのだったら、光を吸収して電気を取り出すこともできるのですが、その頃は誰もそれを考えなかったのですね。

NIMSでは、二つのアプローチでペロブスカイトに取り組んでいます。一つは、高い変換効率を狙うもので、韓 礼元さんのグループが18%超を達成しています。もう一つは、基礎研究を重視したナノ材料科学環境拠点 (GREEN) です。発電効率の高さは、材料そのものに秘密があるはず。そのメカニズムを明らかにして、応用への指針を示すことを目指しています。(GREENの詳細はP6へ)

小長井 発電コストを下げるためには、信頼性も重要です。すぐに壊れては長期的なコストは高くなってしまいます。

宮野 ペロブスカイトは長持ちしないとされています。しかし、NIMSで基礎研究を重ねてきたこともあり、安定性に関わる要因はかなり解明されてきました。今後は、長期の安定性を実現するには何をすべきかを明らかにしていきます。

変換効率はシステムマッチクに
攻略しなければ。
NIMSには
それを支える計測技術がある。

宮野 健次郎



分野を超えて交流し、 もっとアイデアを

小長井 日本では研究機関がばらばらに太陽電池研究を進めているという印象があります。NIMSには、ぜひ中心的な役割を担って欲しいと期待しています。

宮野 太陽電池は材料ごとに分野が違い、ほとんど交流がありません。もったいないことだと思います。ある分野で問題になっていることは、別の分野ではもう解決されていたりします。研究者は分野

を超えていろいろな人と交わるべきです。NIMSがその交流の場にもなればいいですね。

また変換効率を上げるにはやみくもにやってもだめで、システムチックにやる必要があります。NIMSには、さまざまな計測技術がそろっています。新しい試料をつくったらすぐ、元素の分布を解析することもできます。急に高い変換効率が出たときは意図しない構造になっていることも多いものです。試料作製のパラメータと得られた変換効率、そして構造の関係

を理解できれば、最良の構造を意図的につくることも可能になります。そういうNIMSの強みも活かしたいですね。

小長井 太陽電池はすでに一般の家庭に実装されているものですが、基幹エネルギーになるには、まだ革新的なアイデアが足りていません。若い人はぜひアイデアを出して、夢をもって太陽電池に取り組んでほしいですね。

(文・鈴木志乃/フotonクリエイト)

ナノ材料科学環境拠点 (GREEN) の太陽電池研究

ペロブスカイト太陽電池の性能向上とメカニズムの解明に注力

高効率で安価に作製が可能なおかげで、現在、次世代太陽電池として注目を集めているのがペロブスカイト太陽電池だ。しかし実用化に向けては再現性や安定性、耐久性が低いなど課題が多い。そこで、GREENは2014年10月に「ペロブスカイト太陽電池特別推進チーム」を発足。これまで有機系太陽電池の研究開発に携わっていた研究者を中心に、GREENが誇る計算手法、計測手法、材料開発技術を駆使してペロブスカイト太陽電池の基礎研究を進めている。いくつか成果が出ているので紹介しよう。

ペロブスカイト層は、ペロブスカイト材料を含む溶液を塗布して作製している。従来の方法では、結晶化を容易にするため複雑な多孔構造の酸化チタンに塗布しなければならないことや、塗布の際に水分や酸素が混入するなどの理由で、安定性や再現性に問題があった。GREENでは、周囲の環境を厳密に管理する有機薄膜太陽電池の作製手法を導入し、さらに多孔構造を使わずにペロブスカイト層を形成することに成功。性能の向上を果たした。

また、ペロブスカイト材料を塗布するプロセスの改良にも取り組む。塩素を添加

する新しい作製法を開発し、均一な厚みで平らなペロブスカイト層を形成することで、再現性や安定性の高いペロブスカイト太陽電池を作製できるようになった。

「ペロブスカイト層は140°C未満の低温で作製できることから、プラスチックなど軽量でフレキシブルな基板に使用できるため、産業界からも注目を集めています。しかしペロブスカイト太陽電池は発電機構そのものが解明されていないなど基礎研究の段階です。1日も早い実用化に向け研究を加速させていきます」。チームメンバーの白井康裕と柳田真利はこう意気込む。



ナノ材料科学環境拠点ペロブスカイト太陽電池特別推進チームの白井(左)と柳田(右)。

(文・山田久美)

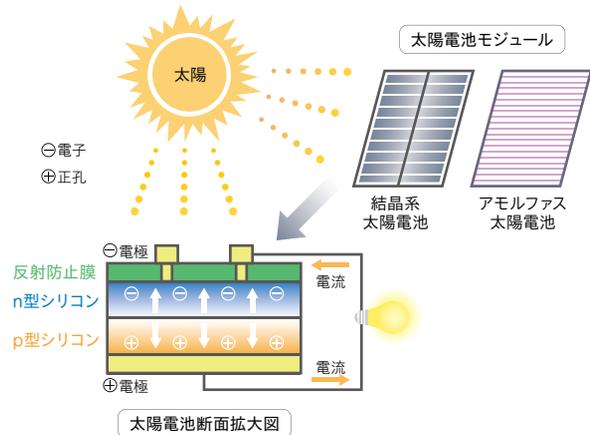
太陽電池の基礎知識

太陽電池の原理

太陽光発電は半導体のバンドギャップを利用して、太陽の光エネルギーを電気エネルギーに変換し、発電するシステム。バンドギャップとは、半導体の中にある価電子帯と伝導帯とのエネルギー差のことで、その値は半導体の種類によって異なる。

太陽電池本体は、n型半導体とp型半導体という2種類の半導体

が接合した構造で、その前後を2枚の電極で挟んでいる。太陽光パネルに光が当たると、光のエネルギーを吸収して接合部に電子と正孔のペアが生じる。さらに電子と正孔はそれぞれn型、p型半導体の伝導体に移動することで電位差が生じる。そこで生じる電圧を、電極につないだ導線で電力として取り出しているのだ。

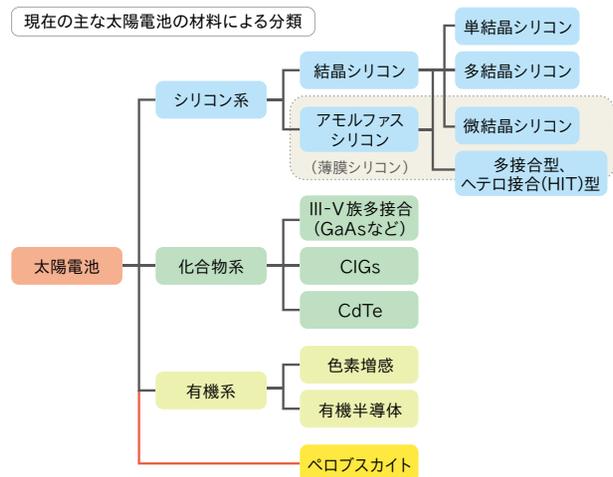


太陽電池の種類

太陽電池は、最も一般的な「シリコン太陽電池」、「化合物太陽電池」、そして「有機太陽電池」の3種類に大別される。さらにシリコン太陽電池は「単結晶シリコン」、「多結晶シリコン」、「アモルファスシリコン」などに分かれる。その中で現在最も普及しているのは、多結晶シリコン太陽電池だ。

化合物太陽電池はエネルギー変換効率が高いものの非常に高

額なことから用途に限られ、主に人工衛星に採用されている。一方、有機太陽電池では、これまで色素増感太陽電池と有機薄膜太陽電池の研究開発が進められてきたが、有機材料は安定性や耐久性が低いことから実用化が進まず、一部の研究は、ペロブスカイト材料を使ったペロブスカイト太陽電池へと移行しつつある。



太陽電池の研究課題

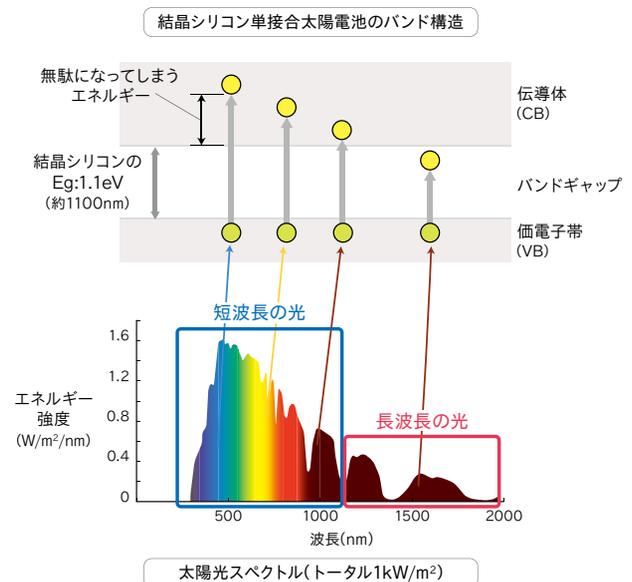
太陽電池の最大の課題はエネルギー変換効率の向上だ。

太陽光には、波長の長い赤外線から波長の短い紫外線までさまざまな波長の光が含まれる。波長の長さによって、光の持つエネルギーが異なり、波長の短い光ほどエネルギーが高い。

しかし、シリコン太陽電池の場合、波長の長い赤外線では光エネルギーが低すぎて、価電子帯にいる電子を伝導帯に押し上げることができない。従って、赤外線を電気エネルギーに変換することができない。一方、電気として取り出すことができるエネルギーはバンドギャップ分だけなので、バンド

ギャップよりも高いエネルギーを持つ紫外線のような光が入ってきた場合、その差分は熱となって逃げてしまう。そのため、シリコン太陽電池の理論上の変換効率は約30%が限界だ。

そこで現在、バンドギャップの異なる半導体同士を複数組み合わせる多接合型(タンDEM型)太陽電池や、バンドギャップの間に中間バンドを作ることで、光エネルギーが電気エネルギーに変換するのを助ける中間バンド型太陽電池などの研究開発が盛んに行なわれている。



高品質・低価格を実現する 単結晶シリコンの製造方法を開発

価格競争力のある太陽電池で市場の奪還を目指す

近年、太陽電池市場は、低価格だが、品質の低い多結晶シリコン太陽電池が席巻している。そんな中、高品質でエネルギー変換効率の高い単結晶シリコン太陽電池をより安価に製造する方法を開発したのが、NIMSの関口隆史を中心とする産官学の研究チームだ。

現在、普及している太陽電池のほとんどはシリコン太陽電池だ。シリコンは半導体材料としてコンピュータのCPUやメモリーにも使われているが、高品質であることが求められるため、単結晶シリコンが使われている。一方、太陽電池の場合、品質よりも価格が重視されるため、より安価な多結晶シリコンが主流となっている。しかし、多結晶シリコンのエネルギー変換効率は約18%と、一般に市販されている単結晶シリコンの約20%に比べて1割ほど低い。そのため、単結晶シリコンの安価な製造方法が求められている。

そうした中、2010～2014年度に実施されたNEDOプロジェクト「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の下、国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)の上席研究員関口隆史をグループリー

ダーとするNIMS、九州大学、日本メーカー各社、豊田工業大学、明治大学などによる産官学連携の研究チームが、高い変換効率を維持しつつ、より安価な単結晶シリコンの製造方法の開発に成功した。

多結晶シリコンの製造方法を改良

「NEDOプロジェクト発足の背景には、日本企業が先導してきた太陽電池市場が、安価な外国製の多結晶シリコン太陽電池に奪われる中、安価かつ変換効率の高い単結晶シリコン太陽電池を開発することで、日本の競争力を取り戻したいという思いがありました」。関口はいきさつをこう説明する。

そこで、関口らの研究グループが着目したのが、現在、多結晶シリコンの製造に使

われている「キャスト(鋳造)法」の改良だ。

通常、単結晶シリコンの場合、まず高純度のシリコンをろつぽに入れ、約1600℃に加熱して液体にする。ここに上からつるした小さなシリコン単結晶を接触させ、これをシード(種)にして、周囲に結晶成長させていく。この塊をゆっくりと引き上げると、結晶が成長しながら現れてくるのだ。これは「CZ(チョクラルスキー)法」と呼ばれる製造方法で、長い時間と高度な技術が必要となるため、どうしてもコスト高になってしまう。

一方、多結晶シリコンは、電気炉内に置かれた四角い鋳型の中で溶かしたシリコンを底から凝固させている。この方法を改良し、種を入れて単結晶を育成するのがシードキャスト法である。シードとなる約20センチ角の単結晶シリコン板をろつぽ底に敷

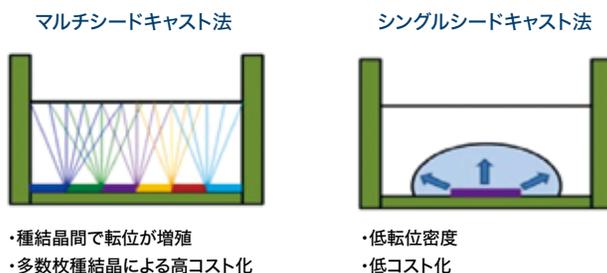


図1 従来のマルチシードキャスト法(左)と、開発したシングルシードキャスト法(右)。

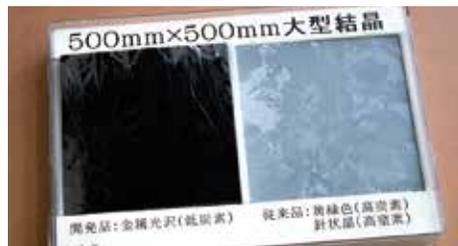
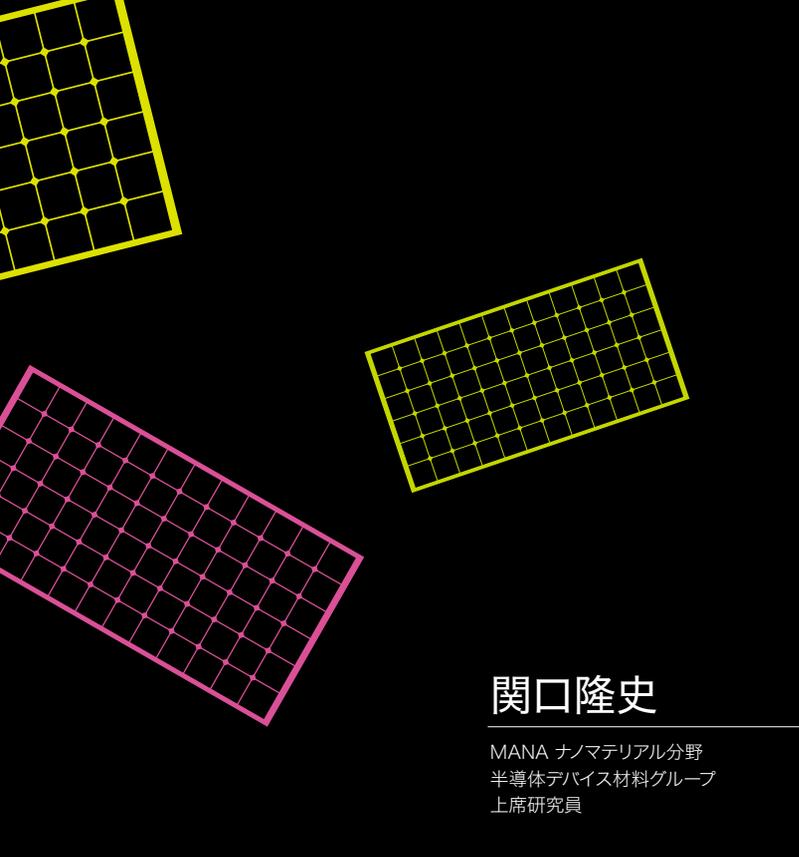
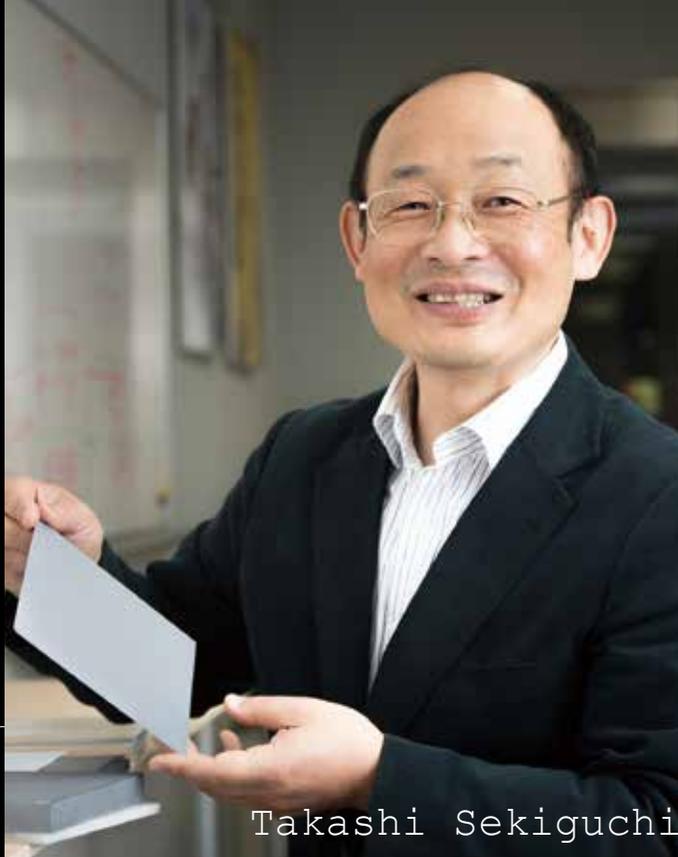


図2 シングルシードキャスト法で作成された単結晶シリコン(左)は、従来品(右)のような結晶粒界がなく、金属のようななめらかな光沢を持つ。



関口隆史

MANA ナノマテリアル分野
半導体デバイス材料グループ
首席研究員



Takashi Sekiguchi

き詰め、その上のシリコン原料を溶かして固めることで、単結晶を育成する。この方法は、複数のシードを使うことから、「マルチシードキャスト法」と呼ばれる(図1)。シリコン融液を冷やして固めるだけなので、CZ法に比べて作りやすい一方で、シードを複数使うため、価格が高くなり、またシードの境界から欠陥が発生してしまう。

それに対し、関口らがめざしたのが、シードを1つにした「シングルシードキャスト法」だ。鋳型の中央にシードとなる単結晶シリコン板を1枚だけ置き、ここからシリコンを結晶成長させていくので、種同士の境界を気にせず、単結晶を育成することができる(図2)。

「低コスト化を実現する上で工夫した点は、電気炉内の熱設計と温度管理でした。特にシリコン融液を固めていく際に、熱ひずみがかかって結晶に欠陥が入らないように、冷却を最適化することがポイントでした」と関口は語る。

実は、欧州でも同様の研究を行っていたがうまくいかず、多くの機関が撤退していた。一方、関口らの専門分野は「結晶欠陥」で、結晶に欠陥が生じる要因を、長年にわたりNIMSで研究してきた。今回はその技術や知識、ノウハウが太陽電池開発においても存分に生かされたとい

うわけだ。

「加えて、電気炉の内部構造を新たに設計するにあたっては、結晶成長のコンピューター・シミュレーションを得意とする九州大学グループの活躍が欠かせませんでした」と関口。

さらに、関口らは、シードキャスト法の欠点となっていた結晶成長時の不純物の混入を抑制することにも取り組んだ。

「従来のシードキャスト法では、鋳型と原料シリコンとの間に離型剤として窒化ケイ素などを塗っています。また、ヒーターと断熱材には炭素が含まれます。さらに、鋳型は石英なので、どうしても酸素が混入してしまいます。そのため、シリコンが結晶成長する際に、窒化ケイ素や炭化ケイ素、二酸化ケイ素が析出してしまい、それがシリコン太陽電池の性能低下の原因になっていたのです。そこで今回、不

純物が極力混入しないように工夫して、高品質の単結晶シリコンの製造に成功しました」と関口は語る。

その結果、できた太陽電池は、CZ法で製造された単結晶シリコンに迫る高い変換効率を達成した。しかも、CZシリコンは、酸素濃度が20ppm程度あるのに対し、この製造方法では6ppm程度に抑えられたという。

「現在のところ、製造コストはCZ法と鋳造法の間くらいになると予想しています。今後製造方法のさらなる最適化を図っていくことで、CZシリコンを超える変換効率が期待できます。そうなれば付加価値はさらに高まっていくでしょう」と関口。

高品質・低価格の単結晶シリコン太陽電池が、地球温暖化防止に貢献する日が1日も早く来ることを期待したい。(文・山田久美)



図3 このプロジェクトには、日本のシリコンメーカー出身のスタッフに加え、中、独、仏、韓、フィジーなど多国籍の研究者・学生が参加し、高いモチベーションで太陽電池研究を行なっている。

実用化に向けて

変換効率 18%超の 大面積ペロブスカイト太陽電池を開発

「オール無機化」で2020年の実用化を目指す

製造コストが安価で、かつ変換効率が高いことから、次世代太陽電池としての期待が高まっているペロブスカイト太陽電池。世界各国で実用化に向けた開発競争が激しさを増している。そんな中、頭角を現しているのがNIMS韓礼元の研究グループだ。

シリコン太陽電池に匹敵する高いエネルギー変換効率を示しながら、使用する材料が廉価。さらに、高温・高圧・高真空プロセスを使わず、安価に量産できるとあって、にわかに注目を集めているのがペロブスカイト太陽電池だ。しかし、再現性、安定性、耐久性など性能面で解決すべき課題もまだ多く、現在、世界各国で実用化に向けた開発競争が激化している。

NIMSでもいち早く開発に取り組んでいる研究者がいる。エネルギー・環境材料研究拠点太陽光発電材料グループの韓礼元だ。韓の研究グループが開発したペロブスカイト太陽電池の変換効率15%は、2015年2月27日に世界で初めて、国際的に認知された中立な太陽電池評価機関により確認され、公式記録として登録された。さらに、2015年10月には、変換効率18.2%を達成した(図1)。これは単結晶シリコンや多結晶シリコン太陽電池に匹敵する高い値で、世界中から大きな注目を集めている。

実は、これまで発表されてきたペロブスカイト太陽電池の変換率はほとんどが0.1cm²の小さな面積のセルで測定したもので、測定方法も未公開だった。面積が小さいと測定誤差が大きく、信頼性

に欠ける。それに対し、韓のグループはペロブスカイト太陽電池を構成している各層の材料と作製方法を改良することで、1センチ角以上の大面積化に成功した。また、光を1000時間照射し続けても、性能が1割弱までしか低下しない優れた耐久性を示した。

最大の課題であった耐久性を無機材料で克服

そもそもペロブスカイトとはチタン酸カ

ルシウムの鉱物名で、同じ結晶構造をとる化合物を総称して、ペロブスカイト型化合物と呼んでいる。

ペロブスカイト太陽電池は図2のように、ガラス基板、透明導電膜、ホール抽出層、ペロブスカイト層、電子輸送層、電子抽出層、そして、裏面電極で構成されている。ペロブスカイト層で光を吸収し、光励起により電子とホールの電荷を発生させることで発電するしくみだ。現在、光吸収材料としてペロブスカイト構造を持つ有機無機ハイブ

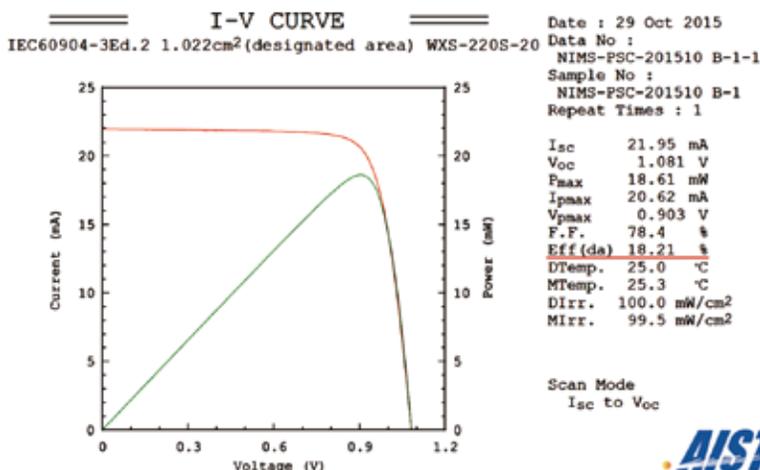
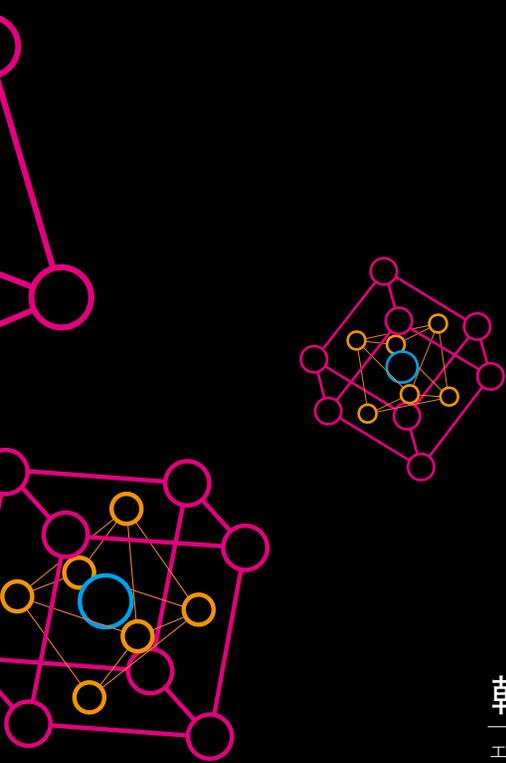


図1 産業技術総合研究所(AIST)太陽光発電研究センター 評価・標準チームによって計測されたペロブスカイト太陽電池の電流-電圧特性。赤い下線の部分が18%を超える変換効率を達成したことを示している。



韓 礼元

エネルギー・環境材料研究拠点
太陽光発電材料グループ
首席研究員



Han Liyuan

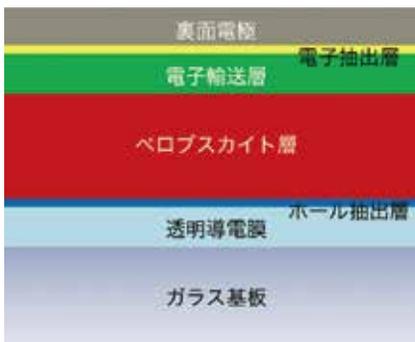


図2 ペロブスカイト太陽電池の構造

リッド材料のヨウ化鉛メチルアンモニウム ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) の薄膜が使われている。このハイブリッド材料を溶液に混ぜ、塗布プロセスによって製膜することで作製できる。印刷により大量生産できる上、基板をフィルムに替えれば、フレキシブル化も可能となる。

しかし、これまでのペロブスカイト太陽電池は、製膜条件によって発電特性にばらつきが出たり、電圧のかけ方によって変換効率が変わってしまったりするなど、性能面でさまざまな課題を抱えていた。安定性や耐久性も低く、光を照射し続けるとすぐに劣化していた。

そこで、韓が目をつけたのが、電子抽出層とホール抽出層だった。これまでこの二つの層には有機材料が使われてい

た。それを無機材料に変更することで、安定性と耐久性が飛躍的に高まると考えたのだ。着目した無機材料は、ペロブスカイト材料のエネルギー準位に適合した酸化ニッケルと酸化チタンである。

これらの無機材料は電気抵抗が高いため、抽出層にするにはできるだけ薄く作る必要があった。ところが、薄く作ると今度はピンホールと呼ばれる欠陥が増え、変換効率が低下してしまう。このジレンマを克服するため、韓は無機材料を厚くしピンホールを減らすと同時に、電子抽出層にはニオブイオンを、ホール抽出層にはリチウムイオンとマグネシウムイオンを高濃度で添加して導電性を高めた。実際に実験したところ、想定通り、高い変換効率と耐久性を示していることが確かめられた。また、この厚さであればピンホールの少ない層が形成できることから大面積化にもつながった。

作製にあたり、工夫した点を韓はこう説明する。「現在、電子輸送層には有機材料が使われていますが、この上に無機材料の厚い層を形成していく際には、その有機材料が壊れないように配慮しなければなりません。また、ペロブスカイト層は水に接すると分解してしまいますので、水をすべて除去した環境で無機材

料を塗布しなければならず、この点も細心の注意を払いました」

一方、添加したニオブイオンやリチウムイオン、マグネシウムイオンに関しては、無機材料の膜厚に応じて添加する量や割合を最適化する必要があった。その点において、韓が長年にわたって蓄積してきた知見や独自のノウハウを存分に生かしたことも、同研究チームの強みとなった。

韓は今後の展望をこう語る。「実用化に向けて最も重要なことは、変換効率と耐久性の向上です。耐久性を高めるには、やはり有機材料を無機材料に替える必要があります。そのため、今後は、電子輸送層に関しても無機材料に替え、『オール無機』のペロブスカイト太陽電池を目指します。一方、変換効率に関しては、ペロブスカイト材料を改良することで、2016年度中には20%を達成できると予想しています。さらに、シリコン太陽電池の上にペロブスカイト太陽電池を形成してタンデム型にすれば、より幅広い波長の光を電気に変換できるので、変換効率30%を超える太陽電池も夢ではありません。2020年頃には、何らかの形で実用化されていることでしょう」

(文・山田久美)

“中間バンド”で究極の変換効率を

太陽電池のエネルギー変換効率は電気に変換するために必要なエネルギー（バンドギャップ）によって決まる。今NIMSでは、バンドギャップの間に“中間バンド”を形成することで、より広い波長域の光を電気エネルギーに変換する研究が進められている。

注目のIII-V族窒化物半導体では全波長範囲の光の利用も可能に

一般的な結晶シリコン太陽電池の変換効率は理論的に約30%が限界だ。変換効率をさらに高めるには、より多くの波長の光が電気エネルギーに変換できるように工夫する必要がある。そこで現在、研究開発が盛んに進められているのが、化合物半導体を使った太陽電池だ。

中でも、周期表13族(III族)と15族(V族)元素でできたIII-V族化合物半導体のGaAs(ガリウムヒ素)やInGaP(インジウムガリウムリン)は、変換効率が最適なバンドギャップエネルギー1.5eV(エレクトロンボルト)に近く、放射線に強いことから、すでに宇宙用として一部実用化もされている。加えて、III-V族化合物半導体は、光の吸収効率が高い上、吸収しない光に対しては高い透過効率を示す。そのため、バンドギャップの大きさが異なる複数の種類の化合物半導体を積層して、多接合にしたタンデム型にすることで、変換効率を大幅に上げることができる。しかしながら、タンデム型は構造が複雑で、製造するのがむずかしいなど製造技術の面で課題を抱えている。

このような中、ノーベル賞受賞で脚光

を浴びた青色発光ダイオードの材料となっているGaN(窒化ガリウム)と、InN(窒化インジウム)に着目したのが、ワイドギャップ材料グループの角谷正友とMANA独立研究員サン・リウエンの研究チームだ。

III-V族窒化物半導体であるGaNは大きなバンドギャップ(ワイドギャップ)を持ち、InNと混合してInGaN結晶を作ることでバンドギャップを制御しやすくなる。ワイドギャップ半導体材料でバンドギャップ内にミニバンド(中間バンド)を形成できれば、タンデム構造を用いなくても太陽光スペクトルの広い波長範囲の光を活用できる。そこで角谷らは、n型半導体のInGaN層の上に、Inの組成がそれぞれ異なるInGaNの薄膜を30層ほど積層していった。

その結果、本来のInGaNのバンドギャップエネルギーに相当する太陽光だけでなく、それよりも長い波長の可視光も電気エネルギーに変換でき、変換効率は1割程度向上していることを確認した。これはIII-V族窒化物半導体材料で中間バンド形成を示す初めての事例である。

また現在は、最高変換効率を示すGaP系集光型太陽電池の上部に、より大きなバンドギャップを持つIII-V族窒化

物太陽電池を重ね合わせることも考えている。それぞれの太陽電池から独立に電力を取り出すことで変換効率向上が見込めるからである。「集光型太陽電池と組み合わせて世界最高効率の太陽電池を目指したい」と角谷は語る。

太陽電池は材料そのものや界面に形成される欠陥の影響を受けやすい。III-V族窒化物太陽電池の変換効率を向上させることは材料のみならず、界面制御、デバイス作製プロセスの高度化につながる。今後は、太陽電池の研究開発を通して培った技術やノウハウを生かし、III-V族窒化物を使ったパワー半導体デバイスの研究開発も並行して進めていく計画だ。

量子ドット、量子井戸で変換効率向上を目指す

一方、同じIII-V族化合物半導体の一種であるGaAsとAlGaAs(アルミニウムガリウムヒ素)をベースに、量子ドットによる中間バンドを形成することで、変換効率の向上に取り組んでいるのが、太陽光発電材料グループの野田武司だ。

量子ドットとは、電子を3次元方向から閉じ込めることができる極小のドット



Masatomo Sumiya

角谷正友

機能性材料研究拠点
電気・電子分野
ワイドギャップ材料グループ 主席研究員



Sang Liwen

サン・リウエン

国際ナノアーキテクニクス研究拠点
(MANA)
MANA独立研究員



Takeshi Noda

野田武司

エネルギー・環境材料研究拠点
太陽光発電材料グループ
グループリーダー

(粒) のこと。量子ドットを形成した薄膜を積層していくことで、この層が中間バンドに相当する役割を果たす。

量子ドットの作成方法はいくつかあるが、野田が取り組んでいるのは「液滴エピタキシー法」と呼ばれる方法だ。作り方はこうだ。まず、基板を低温にした状態でGaを照射し、基板上に直径10ナノメートル程度のGaの液滴を作る。そこに、Asを照射するとGaとAsが反応して、GaAsの量子ドットが形成される。高密度で近接した量子ドットを積層できるというの

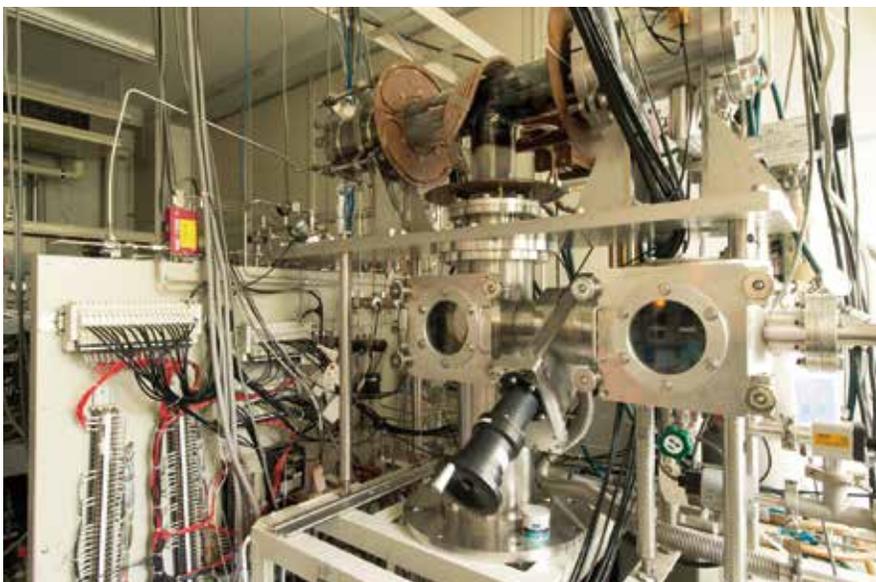
がメリットだ。「液滴エピタキシー法は、NIMSが長年にわたり研究開発を進めてきた方法です。技術やノウハウの蓄積があり、NIMSの強みとなっています。中間バンドというコンセプトの太陽電池は構造がシンプルなので、安価な製造が可能になると考えています」と野田は語る。

さらに野田は、同じGaAsとAlGaAsを使い、結合量子井戸構造でできるミニバンドに着目し、その素子特性から中間バンドを持った太陽電池の特徴に迫る研究にも取り組んでいる。量子井戸は、電子

を1方向から閉じ込めた構造で、分子線エピタキシーなどの超薄膜結晶成長装置で容易に作製できる。

「中間バンドのコンセプトに合う太陽電池ができると、理論的には、変換効率60%も夢ではありません。現状では開放電圧の低下などまだまだ多くの課題があります。構造の見直しを図るとともに、新たな材料開発も進めていくことで、課題を克服していきたいですね」と野田は語る。

(文・山田久美)



III-V族窒化物薄膜成長装置

“シリコンを超える 変換効率と低コスト化の 実現に向けたハブ拠点に”

2015年11月現在、企業を中心に51団体が加盟し、日本の太陽光発電産業の発展を目指す太陽光発電技術研究組合(PVTEC)。その森本弘理事長に、産業界の立場から日本の太陽電池開発の現状とNIMSへの期待を語ってもらった。

森本 弘
PVTEC理事長

HIROSHI Morimoto



ペロブスカイトと III-V族化合物に期待

—現在の日本の産業界における太陽電池の開発状況を聞かせて下さい。

森本 まず、シリコン太陽電池に関しては、光から電気への変換効率の向上と低コスト化の二つを同時に実現するデバイスの開発、次に、太陽光発電システムを既存の電力系統へ組み込む技術の開発、この二つが産業界における重点課題となっています。

変換効率の向上に関しては、20%以上を目指して国家プロジェクトが推進中です。コスト面では、従来の火力発電を下回る7円/kWhの実現を目指した開発が行なわれています。

一方、後者に関しても、電力自由化が開始される中、技術開発が加速しています。また、2015年12月にはCOP21で「パリ協定」が採択されましたので、今後世界規模で再生可能エネルギーの導入が進むものと思われれます。それに伴い、太

陽電池をいかに社会システムの中に組み込んでいくか、いわゆる「スマートシティ」への関心が高まっています。

—新材料の開発についてはいかがでしょうか。

森本 シリコンに代わる新材料としてペロブスカイトと、III-V族化合物をはじめとした化合物半導体が期待されています。特にペロブスカイトはここ2、3年で、変換効率が大幅に向上していますので、注目しています。一方、III-V族化合物は、高い変換効率を示すものの、製造コストが高いため、宇宙向けなど用途が限られるのが課題です。いずれもシリコン以上の変換効率と低コスト化が実現されれば一気に普及すると思われれます。

—日本企業の太陽電池市場シェアは中国企業に押されています。

森本 近年、日本が太陽電池市場を中国に奪われた背景には、安価でそこそこ

の性能のシリコン太陽電池を簡単に製造できる装置をドイツ企業が開発し、それを中国が導入したことにあります。今後、日本の産業界としては、新材料を開発すると同時に、その材料を使って安価で高性能なデバイス製造できる装置の開発にも取り組んでいく必要があります。

—NIMSに期待することをお聞かせ下さい。

森本 世界的にもより低コストで高い変換効率を示す太陽電池の開発が強く求められています。しかし、材料開発は大変息の長い事業で、企業だけで進めるのは困難です。そのためNIMSには、是非とも画期的な新材料を開発していただきたいと願っています。加えて、日本における物質・材料研究のハブ拠点として、産官学連携を強力に推し進めていただきたいですね。

(文・山田久美)

エネルギー・フリーの時代がくる!

文:えとりあきお

題字・イラスト:ヨシタケシンスケ

エネルギー大量消費時代の今日、ますます増大するエネルギー供給をどのようにまかなっていくかは、世界全体にとってきわめて深刻な問題です。その解決のため、世界中の国々が知恵をしばり、しばしば首脳会議や専門家による議論も行なわれていますが、なかなかまとまった解決策は出てきません。

現在のエネルギー資源には、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料、太陽光、太陽熱、風力、水力、地熱などの自然エネルギー、それに原子力やバイオマスなどがありますが、エネルギーとして使う場合、それぞれに課題を抱えています。

化石エネルギーは値段も安く、手に入れやすいエネルギーですが、資源的に限りがあるうえ、CO₂を多量に排出するので環境問題を生じます。自然エネルギーは、資源的には無尽蔵でクリーンなエネルギーですが、その効率的利用が難しく、現在の技術ではコストが高くなります。原子力は安く大量に、しかもCO₂排出なしに電気エネルギーを得られるすぐれた手段ですが、東日本大震災でもみられたように、日本のような国では安全性の確保が問題となります。

バイオマスや地熱も、生産量に制約があり、エネルギー供給の表舞台に立つには力不足です。

「温暖化」と「大気汚染」という人類にとっての難題を克服して、エネルギー問題を解決する道はないのでしょうか。

その答えは最新の情報技術にあるのかもしれません。



たとえば、リチウムイオン電池。かつての電池に比べればずいぶん高性能になったものの、まだまだ高価で大きく、重い。劣化もしやすく、充電時間が長いという欠点があります。これを「導電性高分子電池」にすれば軽量化、小型化が図れて、その結果、全国で7500万台も走っている自動車を、「移動可能な大容量蓄電池」にできる可能性も秘めています。ですが、導電性高分子電池は3次元的なネットワーク構造をもっているのです。これまでの二次電池に比べ、その物質構造の解析が極めて複雑になります。そのため超高速の計算処理の実現が必要になってくるのです。次世代太陽電池として40%以上の変換効率をもつと期待されている量子ドット太陽電池の開発にも同じことがいえます。

さらに、炭酸ガスと水から燃料を生成

できるようになる重油産生藻類。大量の炭酸ガスを必要とするので、CO₂規制も必要なくなります。こうした実用可能な重油産生藻類を効率的に確保するために、遺伝子解析・遺伝子操作といった情報技術を駆使し、人工藻類を作るというアイデアも出てきているのです。そのほか、実現が難しいと言われている熱核融合の実用化にも、膨大な計算を瞬時にこなす演算処理が欠かせません。

情報技術の加速度的進歩がこういったことをすべて可能にするのです。

以前、柏崎の原子力発電所を視察に行ったとき、ノーベル賞学者の利根川進先生は、人類がほろびるとしたら、そのもっとも大きな原因はエネルギー問題だと予言されましたが(私もその意見に同調しました)、その心配はどうやら杞憂に終わりそうです。

えとりあきお: 1934年生まれ。科学ジャーナリスト。東京大学教養学部卒業後、日本教育テレビ(現テレビ朝日)、テレビ東京でプロデューサー・ディレクターとして主に科学番組の制作に携わったのち、『日経サイエンス』編集長に。日経サイエンス取締役、三田出版株式会社専務取締役、東京大学先端科学技術研究センター客員教授、日本科学技術振興財団理事等を歴任。

Mi²i

情報統合型物質・材料開発イニシアティブ “Materials research by Information Integration” Initiative コンソーシアム会員募集中

世界に先駆けた新たな材料開発手法、
マテリアルズ・インフォマティクスの確立を目指して

データ科学をこれまでの物質・材料研究に融合させることで、
新物質・材料科学研究を加速する取り組みの場としてスタートしたMI²i。
産学官オープンイノベーションのハブとして、
企業・組織の枠を超えたデータ利活用プラットフォームの構築を目指し、
産学官の力を結集させるコンソーシアムを開設します。
活動理念に賛同する企業、研究機関、
および大学を会員として募ります。

コンソーシアム趣意書(活動理念)、会則や登録方法については
NIMSのホームページをご覧ください。
http://www.nims.go.jp/MII-I/consortium_info.html

【お問い合わせ先】

情報統合型物質・材料研究拠点運営室
〒305-0047
茨城県つくば市千現1-2-1 研究本館居室棟 6階 609号室
TEL: 029-859-2472
E-Mail: CMI2@nims.go.jp



NIMS NOW vol.16 No.3 通巻158号 平成28年6月発行

国立研究開発法人 物質・材料研究機構



古紙配合率100%再生紙を
使用しています



植物油インキを
使用し印刷しています