

第 11 回ナノテクノロジー総合シンポジウム (JAPAN NANO 2013) 開催報告



2013年1月下旬のNanotech Weekの中、1月30日から2月1日まで東京国際展示場（東京ビッグサイト）において第12回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議が開催された。最終日の2月1日に、このイベントを締め括るものとして、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム「第11回ナノテクノロジー総合シンポジウム (JAPAN NANO 2013)」が同展示場会議棟1階レセプションホールで開かれた。このシンポジウムは、新しい科学技術を創出する研究環境の整備・充実・共用に向けて開始された文部科学省のナノテクノロジープラットフォーム事業により開催されたものである。このプロジェクトは、大学、公的機関、企業の研究者が全国規模で研究分野や機関を越えて研究ネットワークを構成するもので、2002年より実施されたナノテクノロジー総合支援プロジェクトに始まり、ナノテクノロジー・ネットワークプロジェクトを経て、平成24年度より開始された。今回は、世界がエネルギー、有用資源の確保、環境負荷低減など地球規模の課題に直面している状況をふまえて、環境に調和したエネルギー・資源の確保に向けた挑戦的な技術開発へのナノテクノロジーの取り組みに的を絞って最新の研究開発の進歩について展望することを目指した。「エネルギー・資源・環境へのナノテクノロジーの多面的展開」と銘打ち、東京ビッグサイト会議棟レセプションホールで、午前10時から午後5時半の長時間にわたり、熱気を帯びた講演と討論が行われた。プログラムは開会挨拶、2件の基調講演、再生可能エネルギー、省エネ・環境、資

源の3セッション（合計10件）の講演から構成され、3人の海外研究者も講演に招かれた。また、レセプションホール前のロビーではポスター展示が行われた。その内容は、「微細構造解析」「微細加工」「分子・物質合成」の3プラットフォームで構成され、合計25機関が参加するナノテクノロジープラットフォームの紹介と、前身のナノテクノロジーネットワークにおける平成23年度の5大成果である。



開会の挨拶 (Opening Remarks)

シンポジウムは、主催者と文部科学省からの開会の挨拶から始まった。

主催者：潮田 資勝 (物質・材料研究機構理事長)

第11回ナノテクノロジー総合シンポジウムの開会に当り主催者としてご挨拶申し上げます。

平成14年に、新しい科学技術を創出する研究環境の整備・充実・共用に向け、大学、公的機関、企業の研究者が全国規模で研究分野や機関を越えて研究ネットワークを構成することを狙って、文部科学省の委託事業として「ナノテクノロジー総合支援プロジェクト」が始まった。この事業は、平成19年からの「ナノテクノロジー・ネットワークプロジェクト」に引き継がれ、さらに、平成24

年7月からは共用施設を研究開発のプラットフォームとする「ナノテクノロジープラットフォーム」プログラムとしてスタートし、産学連携して推進するナノテクノロジーの研究開発を支援することとなりました。これらの事業の一環として、最先端の技術を披露して、将来の方向を議論する場として、平成15年よりこのシンポジウムを開催し、今回は第11回になります。

第4期科学技術基本計画では、ナノテクノロジーは共通基盤の役割を担い、「微細構造解析」、「微細加工技術」、「分子・物質合成」は重要な基本技術分野です。そこで、プラットフォームにはこの3つの研究領域を設けています。一方、地球規模の課題であるエネルギー、資源、環境の問題解決には科学技術の寄与が欠かせません。環境に調和したエネルギーや資源の利用には多面的な取り組みが必要になります。ナノレベルでの物質合成、合成された物質の加工、計測等、関連の技術をシステム化することにより、地球規模での課題の革新的な解決が進むことを期待しています。

本シンポジウムではナノテクノロジーを活用した、エネルギー、資源、環境問題解決の試みについて現状と今後の展望を専門家の方々からご報告いただくこととしました。また、ナノテクノロジープラットフォームの概要と、ナノテクノロジー・ネットワークの昨年度の成果は、シンポジウム会場入口のロビーでポスター展示により紹介します。基調講演として、科学技術振興機構中村道治理事長にナノテクノロジーへの期待を語って頂き、東京工業大学柏木孝夫教授にエネルギー問題を論じて頂く予定です。引き続き、再生可能エネルギー、省エネルギーと環境、資源について10人の方に講演をお願いしています。ご多忙の中、講演をご快諾頂いたことに御礼申し上げます。本シンポジウムが参加頂いた方々にとって、エネルギー、資源確保に向けて有用な方向を探る手がかりとなり、新たな協力関係が生まれることを期待します。



文部科学省：
文部科学省研究振興局 基盤研究課 柿田 恭良 課長



安倍政権が誕生し、富の創出のための一気通貫の仕組みを作ろうとしています。本シンポジウムでエネルギー、資源、環境のためのナノテクノロジーを採り上げることは意義深く、第4期科学技術基本計画の策定に携わった者として感慨深いものがあります。第2期、第3期基本計画では4つの重点分野が示され、その一つは「ナノテクノロジー」でしたが、第4期計画でこの指定席はなくなりました。第4期計画が技術開発から、地球規模の課題解決指向へと方向転換を行ったためであります。しかしながら、ナノテクノロジーは東日本大震災後の復興、資源などの問題解決に欠かせない基盤技術と位置づけられ、産学共同で取り組むべき重要な課題であることに変わりありません。このシンポジウムのプログラムを見ると、研究開発がその方向に進んでいることに第4期計画策定に携わったものとして安堵しているところです。課題解決には優秀な人材が欠かせません。文部科学省は、ナノテクノロジーと人材育成に尽力するため、ナノテクノロジープラットフォームをスタートさせました。平成24年度補正予算案にも最先端研究設備の高度化を盛り込んでいます。このシンポジウムが新たな方向を話し合い、よいパートナーを見つける場となることを期待します。



基調講演 (Plenary Session)

開会の挨拶に引き続き基調講演に入った。

基調講演 I
「持続的社會に向けてナノテクノロジーへの期待」
(Expectation for Nanotechnology to Sustainable Society)
中村 道治 科学技術振興機構理事長



東日本大震災後の復興や再生には科学技術のイノベーションが欠かせません。地球規模の課題も科学技術ベースの解決が求められますが、日本は20年に亘る停滞のため閉塞感があります。科学技術イノベーションの主役は社会との結びつきの強い企業ですが、企業がリスクの高い研究を行うことは難しくなっています。そこで、大学や独立行政法人の努力が必要になる。大学や独立行政法人などの数々の努力の中から、たとえば多能性幹細胞を作製できるiPS細胞も生まれ、ノーベル賞受賞となったわけです。iPS細胞は2003年3月から2009年3月まで科学技術振興機構（JST）の創造的研究推進事業CRESTの中で開発が行われたものです。JSTは今後もサポートを続けますが、安倍政権の下で今後10年間に1200億円が投じられ、基礎から、臨床、実用化まで開発過程全般を支援することになっています。学問の進展と共に、難病の治療法、創薬などのイノベーションも期待しています。材料でもイノベーションの芽が出始めています。このように日本発のイノベーションは始まっており、今後もそれを期待したいと思います。

このところ、経済活動のグローバル化が叫ばれ、企業は国境を越えて活動しています。しかし、人は大きく動かせないから、雇用は国の中で確保しなければなりません。それには我が国でなければできないものづくりが必要になります。これまでも、カーボンナノファイバ、電子顕微鏡、内視鏡など、サイエンスベースでの、長年の研鑽によって生まれた独自の技術や製品があります。一方、この10年間の研究開発費の投資額の動きを見ると、新興国の中国は5.6倍、先進国のアメリカでも1.6倍になっていますが、日本は年間16兆円で横ばいになっています。このためか、日本からの論文数は世界3位から4位に後退しました。これを挽回するために、第4期科学技術基本計画ではGDPの1%を研究開発に投資することになっています。政府の研究開発予算の1/3は文部科学

省に割り当てられ、大学等の研究を支援する科学研究費補助金は、10年間に亘り増加して2400億円になっています。ただし、研究開発費は闇雲に増やすのではなく、最大効率化が必要です。一方、研究開発費16兆円の内12兆円は民間が占めていますから、研究開発に民間の活力が欠かせません。民間の活力を強化するため、研究開発投資に対する減税が考えられているのは方向性として有難いと思います。

第4期科学技術基本計画は地球規模の課題解決という、社会ニーズを基にしたアプローチに変わりました。Technology drivenからIssue drivenへの転換であります。ナノテクノロジーは課題解決の基盤技術と位置づけられ、総合科学技術会議にワーキンググループが設置されています。国としての方向をVisionaryに出来ないかの議論を行っており、総合科学技術会議はこれに応えられるよう、吉川東大名誉教授をヘッドにして、昨年12月に科学技術戦略の具体的提案を行いました。総合科学技術会議が府省連携の下、産学連携の道づくりを行うことが必要で、総司令塔の中に産業部門がコミットすることが求められています。

この機会に科学技術振興機構の状況と運営についてお話ししておきます。JSTは、科学技術政策の下に、総合性、機動性等を発揮しつつ戦略的基礎研究を推進しています。その形態にはCRESTなどがあり、iPS細胞や肺がん治療法などが生まれています。基礎研究から事業化への技術移転型研究まで一貫通貫に推進します。平成24年度には大学の研究と企業を結びつけるよう、起業支援のために600億円の融資制度を設けました。新技術・新製品では価格で争うのではなく、違いを如何に作り込むかが大切になります。日本には特徴ある技術が多数あるので、これをトップサイエンスに繋ぎ、真似のできないものを作ることを目指します。

イノベーションは新しい価値のデザインになるから人文科学・社会科学の参画も必要になります。イノベーションには生態系の活動の理解も役立ちます。バーチャルネットワークワークインスティテュートといったものを作り、イノベーションを推進し、大規模データを活かすプラットフォームを用意する。さらに、次世代に向けた取り組みが大切で、できる子を育てる仕掛けを用意する。その一つとしてスーパーサイエンスハイスクールの指定・科学教育支援を行い、科学甲子園でその成果を競わせる。などが考えられます。

研究開発テーマはいずれ社会に受け入れられねばなりません。そのためには未来社会の姿を追求する必要があります。開発された技術の何を選ぶか決めるのは市民だから、科学と社会とのコミュニケーションが大切になります。国がビジョンを持ち、日の丸チームとして進める雰囲気大切です。JSTはファンディング機関としてイノベーションの触媒になりたいと考えています。

基礎研究は国力の源泉で、海図なき道を進む基礎研究

を社会が評価すべきです。これまでも基礎研究から iPS 細胞の他にも、有機半導体、TMR（巨大磁気抵抗効果）など多くの成果が生まれました。産業界には基礎研究の成果を受け取る力があるから、基礎から応用までがうまく回るようにする仕組みが大切です。成果は論文にするだけでなく、知財としても確保する必要があります。大学からの特許出願は企業とのパイプを太くします。1999年に大学の特許に対し、日本版バイドール法が施行され、さらに大学の法人化に伴い、大学が特許を管理するようになりました。しかし問題は大学に管理・活用のための人材が少ないことです。JSTは周辺特許取得、海外への戦略的出願などをサポートします。日本で生まれたよい知財は、日本の企業が使うことが望ましい。しかし、日本の企業にスピード感が欠けていると、海外企業が日本の大学の成果を先に利用してしまうことも起る。日本の企業には、従来以上、積極的に大学を活用することを期待しています。

研究開発拠点とネットワーク整備がこれからの課題です。その継続性確保のため、COI（Center of Innovation）構想がスタートしました。これらの事業では産学連携により Technology Push と社会のニーズを組み合わせ、ハブとなって日本の研究開発ネットワークを作っていく。たとえば元素戦略では、文部科学省と経済産業省が話合っ一つの Government Board で研究開発を推進しようとしています。もう一つの例はつくばイノベーションアリーナ ナノテクノロジー拠点：TIA nano です。中核機関は筑波大学、産業技術総合研究所、物質・材料研究機構の当初3機関に、高エネルギー加速器研究機構が加わり、4機関となりました。つくばに位置した機関が纏まり、オープンイノベーションハブとなって、アンダー・ワン・ルーフでナノテクノロジー研究開発を推進しています。TIA nano は日本の研究開発モデルとして成功させたいものです。

研究開発のトピックスとして、ナノテクノロジーはエネルギー、エレクトロニクス、情報関係が多いが、今後は医工連携を進めるべきだと思います。計測・分析は世界をリードしているが、医療・バイオ計測の進歩は期待ほどでない。文部科学省は医療・バイオ計測のプログラムを作ったので、ナノテクノロジーの研究者の参画を望みたい。島津製作所の顕微質量分析計、東北大の X 線による組織変化観察、シャープの 2 次元電気泳動自動計測などの今後が期待されます。

グローバル化に応え、2 国間、多国間の連携の仕組みも用意する必要があります。e-Asia Joint Program（東アジア共同研究構想）には 17～8 ヶ国の参加を予定しています。地域や地球を結んで科学技術振興に取り組んで行く。既にタイ、ベトナムとナノテクノロジーと材料のパイロットプロジェクトを始めました。

研究開発で重要なことは、先ず、Visionary Approach をとることです。将来社会のイメージを共有し、進め方

には自由度を持たせる。次に、開発拠点の整備とネットワーク化があります。最後は、グローバル化を可能にする新しい研究開発システムの構築です。ミャンマーなどを回ると日本の大学の卒業生が重要な地位にいます。世界の国々と交流を深め、日本が孤立しないようにするためには、人材育成がその基本になり、連携の取り組みの中で強化を図りたいと考えます。

【質疑】

Q（司会者）：研究開発投資額を見ると、米中が増えているのに韓国は日本同様横ばいになっている。韓国と日本とで事情は違っているのでしょうか？

A：韓国は李政権が研究開発を重視し、次期の朴政権も新しい省庁を作ってダイナミックに動こうとしている。大統領主導で研究開発を進めようという意気込みが見られます。

基調講演 II

「エネルギーのスマート化と課題」(Smart Energy Networks and Their Future)

柏木 孝夫（東京工業大学ソリューション研究機構教授）



2011年3月の東日本大震災とそれに続く原子力発電所事故は、日本のエネルギーシステムに衝撃を与えました。今日原子力をどこまで受け入れるかが最も重要な政治課題の一つとなり、エネルギーのベストミックスを改めて考える必要が増しました。原子炉事故はあったが、原子力に関するきちんとした技術開発を行い、原子力の意味付け、安全性確保を、我が国が中心になって、日仏米共同で進めるべきではないだろうか。しかし、科学が先行すると工学まで下りて来ない。科学と工学が共鳴して規

準を作る必要があります。原子力規制委員会が発足してその方向に動いていると思っています。

低炭素社会の実現にはエネルギーシステムのパラダイムシフトが必要になります。その第一歩はエネルギーと電力の節約で、これはある程度まで早急に達成できるだろう。それでも工業国ではエネルギーの大量供給が欠かせないから、大容量エネルギー源が必要になる。大規模集中型電源のフル・フラット運転を供給の中心とし、デマンド側のスマート化を行い、エネルギーの高度利用を行った上で、自然エネルギー利用、コージェネレーションを取込むことが解の一つではないだろうか。デマンドシステムの開発によるデジタル革命が求められる。白物、黒物とも家電はデジタル化が必要になります。黒物家電のテレビは既にデジタル化しているから、これからは白物家電のデジタル化が求められ、デマンドレスポンス対応エネルギーシステムというパラダイムシフトが起ると考えてよいでしょう。

新興国の産業力が強くなるのに対して、日本は超省エネ社会の革命を起こす必要があります。ある時間帯に限って省エネルギーを行うことにより、企業活動を制約しないよう工夫し、供給側にはコージェネレーションなどの分散型電源、シェールガスなどの天然ガスシフト、再生可能エネルギーの利用を取込む。当面は、化石燃料から非化石燃料への転換と、よりクリーンで進んだ利用技術を加速して化石燃料を使い続けることが必要になります。その先には燃料電池があり、固体酸化物セルが期待できます。分散型電源では規模のメリットがなくなるので、コージェネレーションが需要地にあれば、廃熱利用も可能であろう。これらの電源をどう組み合わせるかが鍵になります。一方、デマンド側の最小単位はスマートハウスで、スマートフォンの子機が制御の役をし、スマートテレビに入った子機が HEMS (Home Energy Management System) の司令塔になるであろう。各家庭にはスマートメーターが入り、10年間で80%の家庭に普及すると考えられる。原子力の扱いが明確化されるまでの間にも電力、農業、医療等のシステム改革は進められるし、電力システムでは、規制を残した自由化から全面自由化への道を考えることになる。公益運用、自由化、発送電分離等、オールジャパンで、地域独占から脱却し、効率化を図って行く必要があります。

デマンドサイドでのデジタル化革命が行われると、ICTによって細かな需給調整ができるようになると考えられます。スマートグリッドには、社会コストとして自然エネルギーを取込めるかが課題で、省エネルギーを行った上で、7割が大規模集中型電源、3割がオンサイト電源になるであろう。政府は2030年に全電力の15%までをコージェネレーション装置で供給するよう計画しているから、残る15%が太陽光、風力、中小水力になるだろう。上位の集中型電源だけでエネルギーシステムをフル・フラットに動かそうとすると、ピークに合せた大きな電源が必

要になるから、閑散期を含めた上位電源の平均稼働率は56%に落ちる。これは大きな問題となるだろう。日本はその先に行く必要があります。

イノベーションは構造改革である。そこで新しい価値を産み出す。ピーク時の省エネを図るということです。屋根に太陽電池、階下にエネファームを置けば、エネファームによる貯湯は蓄エネルギーになる。家電品はデジタル化され、ピーク時の電力価格を高く設定する動的価格設定によりエネルギー源が選択されることとなります。自販機でも蓄冷材、蓄熱材を入れておき、電力ピーク使用時は送風モードで運転するようにしたものがでています。エアコンに蓄冷材を入れ、ピーク時は送風モードにして、蓄冷材で冷やす。このようにピークの出ない家電品が新しい流れになると考えられます。家庭内の司令塔が HEMS によって家庭内機器を制御し、スマートメーターで電力会社とやり取りし、電力を買ってもらえない時間帯に太陽電池の発電電力で家庭内機器を動かす、電力を買ってもらえる時は家庭内機器を動かさない。このようにして供給側の電力を需要側がコントロールすることができます。消費者が上位の供給側をコントロールする仕組みにはエネルギー情報が必要になるから、インターネットの会社がこのシステムに参画するかも知れません。

エネルギー革命は安全・安心に繋がる。スマートフォンの子機を高齢者に渡しておく、その電力使用状況から、行動や健康状態の確認ができると考えられます。食のバリューチェーンにも繋がる。誰がイニシャチブをとって進めるかが問題で、コンソーシアムを組んで旗を振って行くことになるでしょう。

【質疑】

Q (司会者)：日本の電力に 50Hz と 60Hz のあることはネットワーク構成上障害にならないでしょうか？

A：日本は南北に長い国だから2つのシステムがあってもよいのではないかと。東と西とで別のシステムを構成する。電源については、釜山と北九州の距離は 200km に過ぎない。韓国の原子力を直流送電で利用するなどパイを大きくすることも考えられよう。当面は2分したシステムごとのネットワークでしょう。

Q (会場)：エネルギーネットワークがクラウドと融合したら守秘の役割を誰が担うのでしょうか？

A：守秘義務は Security Check 機能として、新たな価値を創造し、重要なビジネスアイテムになると思います。



Session 1 : 再生可能エネルギー (Renewable Energy)

基調講演に続き、Session 1 に入った。

1-1 再生可能エネルギー用新規ナノ材料とその応用 (Novel Nanostructured Materials for Renewable Energy Applications)

Prof. P. Craig Taylor (Renewable Energy Materials
Research Science and Engineering Center, Colorado
School of Mines, USA)



Taylor 教授は、Colorado School of Mines に設けられた Renewable Energy Materials Research Science and Engineering Center (REMRSEC) に所属する。このセンターは米国科学財団 (National Science Foundation, NSF) の資金で設立され、再生可能エネルギーに絞ったセンターとしては米国内唯一のものである。その役割は、(1) 先端基礎研究の遂行、(2) 主要国立研究所や産業、国際的なパートナーとの関係維持、(3) あらゆるレベルの研究と教育の統合である。米国エネルギー省 (Department of Energy, DOE) の National Renewable Energy Laboratory (NREL) などの主要国立研究所、産業界、海外とも協力して研究開発を行っている。基礎研究によって新しい概念を創出し、次世代専門家を育成する学際的な組織である。コロラド州、ロッキー山脈を間近に望む景勝地に位置している。

REMRSEC の研究は漸進的なものより大きな変化をもたらすものを指向し、多くの新規なナノ構造材料を手掛けているが、この講演では、
(1) 高効率薄膜太陽電池用の非晶質シリコン (a-Si) マトリックス中のナノ結晶シリコン (nc-Si)

(2) 再生エネルギー応用 Open Cage 型クラスレート (Clathrate) シリコンの研究が紹介された。

クリーンで安価なエネルギーの探索では、劇的に太陽電池の効率を向上させる低コストの方法に関心が集まっています。標準的な太陽電池の効率には理論的限界がありますが、限界を与える原理の一つに、バンドギャップ以上のエネルギーの光で励起されたキャリアは急速に過剰のエネルギーを熱として失う過程 (thermalize, 熱平衡化) があるというものです。ところが、水素化非晶質 Si (a-Si:H) 中に 5 ~ 20nm のナノ結晶 Si (nc-Si) が埋込まれたナノ構造膜の中では、a-Si 中で生成したキャリアは短時間のうちに、近接した nc-Si に集められてしまう。EPR (常磁性共鳴) と PL (フォトルミネセンス) 測定を行うと、非晶質相からの信号は、nc-Si の体積分率が 30% を越えると急激に減少し、nc-Si への電子移動が起っていることが分る。熱平衡化する前に、結晶相に電子・正孔を運び出すことによって太陽電池の開放電圧を劇的に増加させられると考えられます。

a-Si マトリックス中の nc-Si は、多くの企業が研究しているタンデム型太陽電池に代るものです。光によって励起された電子・正孔はフォノンを励起し、熱としてエネルギーを失うか、a-Si に捕捉される。a-Si マトリックス中のキャリア移動度は小さく、これを用いた太陽電池の効率は低いですが、ナノスケールになると熱になる前に結晶質 Si に到達するのでキャリアは有効利用される。タンデム構造ではバンドギャップの異なる層を重ねるが、a-Si と nc-Si の組合せだと 2.5eV の光で a-Si が励起され、1.5eV の光で nc-Si が励起される。PL, 電子スピン共鳴, テラヘルツ分光による短時間の光伝導度変化から、1.5eV の励起ではキャリア生成が nc-Si 内で行われ、nc-Si 内でキャリアが移動していることが確かめられています。

この結果は、広範囲のナノ構造非晶質 Si マトリックスを太陽電池効率の劇的向上に用いる可能性を確信させるものです。非晶質材料は結晶質に比べ、広範囲な組成で成長させられるから、太陽電池効率向上に用いる吸収材料の範囲を拡大します。また、ホットキャリアの捕集は移動時にエネルギーと運動量の双方が保存される結晶質半導体には困難だが、非晶質吸収体では結晶運動量が適用されないから、ホットキャリア捕集が容易に行なわれます。このことはバンドギャップより高いエネルギーの光で励起され、過剰なエネルギーを持つキャリアの捕集の可能性があり、この結果としての太陽電池の効率向上を期待できるわけです。

次に、クラスレートシリコンはモンテカルロ法で水の研究を行って来たところから生まれた異分野融合研究の産物です。ダイヤモンド構造の Si はよく知られているが、Si はいくつかの型のクラスレート (結晶格子によって作られた空間の中に小さな分子が取込まれ、共有結合によらず安定に存在する物質) 構造をとれる。これらの構造

は 20, 24, 28 個の Si 原子が開いたカゴ (cage) を作っている。II 型クラスレート構造は、20 か 28 原子のカゴで分子状の水素を蓄えられ、水素貯蔵に使うと、2.5 重量 % までの水素を貯蔵できます。クラスレートシリコンは、Na のような原子又は分子を囲んだ核生成 (nucleation) によって作られます。この材料は焼結で作られるから、凝集性フィルム (cohesive film) を作ることが問題になるが、Na の入った材料はバンド幅 1.2eV の直接遷移半導体のため、光デバイスに応用できると考えられる。Ge をかごに入れると Si-Ge 合金の組成が自由に変えられる。ハロゲンを加えることもでき、Na と Cl を別のカゴに収めることができる。効果的な半導体のできる可能性があります。この研究はミリグラムのレベルで始め、グラムのレベルになっている。Si 基板上に薄膜も作れるようになった。新たな材料創出・展開の例であると考えています。

【質疑】

Q (司会者)：非晶質シリコンと結晶質ナノシリコンを組み合わせて太陽電池の効率は高くなったのでしょうか？

A：12%の効率が得られている。ナノシリコンをもっと小さくし、バンドギャップを大きくすると開放電圧を大きくできます。

Q (司会者)：太陽電池にするには、p, n ドーピングが必要にならないでしょうか？

A：ドーピングは重要な課題です。層間に生じるドナを除く必要もある。ハロゲンを添加するなど、持っているアイデアをいろいろ試して行くことになるでしょう。

1-2 量子ドット太陽電池技術の展望 (Prospect of Quantum Dot Solar Cells)

荒川 泰彦 東京大学生産技術研究所教授

近年、エネルギーと環境問題が重要になっています。特に、再生可能エネルギーとして、太陽エネルギーの利用は大いに期待されており、日本では、NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) が太陽電池技術のロードマップ 2030+ を策定しました。このロードマップによると、2025 年には 7 円 /kWh のコスト実現が求められています。

太陽電池実用化に向けての重要な要素に効率とコストがあります。効率向上が困難なため、コスト競争に陥っている現状を、効率向上により脱却したい。また、フレキシブルになれば、家の屋根に載せるだけでなく、自動車にも貼付けられる。安いから使うのではなく、便利だから使おうとなるのではないのでしょうか。効率が上がれば、スマートフォンに持ってバッテリーレスにもできます。このような観点から、技術によってコスト競争から脱却



するのが量子ドット太陽電池研究の狙いであると考えます。

光起電力効果を利用する太陽電池は pn 接合ダイオードを逆バイアス状態で使います。超高効率太陽電池に関しては、主に 2 つのタイプが研究されています。多接合太陽電池 (いわゆるタンデム電池) と量子ドット太陽電池です。量子ドット太陽電池は、(1) 多重励起子生成 (Multiple Exciton Generation, MEG) 型、(2) ホットキャリア型、(3) 中間バンド (Intermediate Band, IB) 型に分類されるが、この講演では IB 型太陽電池 (IBSC) に焦点を当てて、量子ドット太陽電池の展望を行います。

量子ドットの研究は榊・荒川の 1982 年の論文に始まる。その後、SK グロース法の創出により研究が進みました。太陽光が半導体に吸収された時、バンドギャップより大きいエネルギーの光によって励起された電子は過剰なエネルギーを熱として失い、バンドギャップより低いエネルギーの光は半導体を通り抜けて、損失となる。量子ドットによって中間準位を作れば、吸収されなかったフォトンも中間バンドを介して励起されるから効率向上が期待されるわけです。

1997 年に、Leque と Martil は、フルコンセントレーション (完全集光時)、すなわち、46,000suns (1sun は 100mW/cm² の光量で太陽電池評価の標準的の光量) において、従来の単接合セルの 41% に対し、IBSC の熱力学限界として 63% の効率を予測しました。我々は、IB エネルギー準位を最適化した多重中間バンドを持つ量子ドット IBSC の効率を詳細均衡の限界 (detailed balance limit) で計算しました。結果は 4 つの IB を持った IBSC の熱力学限界は 74.6% となり、単一 IB の場合の 63% を超えることが分かりました。さらに IB の総数を増すと、IBSC の熱力学限界は 80% に近づくと考えられました。多重準位中間バンド太陽電池のより詳細な特性はドリフト拡散モデ

ルで解析され、太陽電池の効率、あるバンドギャップを持った半導体の吸収スペクトルで太陽光スペクトルをどれだけ埋め尽くせるかで決まります。したがって IBSC では複数の、バンドギャップの異なる半導体を組み合わせ、太陽光のスペクトルを埋め尽くす割合を大きくできるので効率が向上すると結論できるわけです。

量子ドット太陽電池の課題は励起したキャリアを電極まで引き出し、損失なく外部回路に取り出すことです。そこでナノワイヤを利用する。ナノワイヤにすればフレキシブル基板にも適用できる。実験では、高密度自己集合 InAs 量子ドット 5 層を含む高効率 InAs/GaAs 量子ドット太陽電池を作りました。多層にすると吸収は増加するが、狭いバンドギャップだと電流は大きくても電圧が取れないため効率は下がる。このため量子ドットのエネルギー準位の制御が重要になる。量子ドットの高さ、形を変えて、フォトルミネセンスを測定するとピークがシフトするので、小さいドットだと電圧を保ちながら、電流を大きくできる。小さいドットのエネルギー準位は量子井戸の上の方であって電子が励起されるが、大きいドットでは量子井戸の下の方に準位があって、励起された電子がトラップされてしまう。バンドギャップの設計、デバイス設計が重要になります。このような考慮をし、最適厚さの二重層反射防止膜も開発した結果、量子ドット太陽電池において 1sun で 18.7%、2sun では 19.4% の効率を達成できました。

次に、薄膜 InAs/GaAs 量子ドット太陽電池を Si 基板上に作り、ボンド-トランスファープロセスでプラスチックフィルムに量子ドット太陽電池を転置 (transfer) することを試みました。プラスチック、及び Si 基板上の薄膜太陽電池の開放電圧は GaAs 基板上に成長させたバルクセルと等しく、ボンド-トランスファープロセスでの材料劣化のないことが分かりました。量子ドットは小さくなると歪みが入るのでナノワイヤにして横方向の歪みをなくす。結晶成長の工夫で 10 層の量子ドットを持つナノワイヤを作ると、フォトルミネセンススペクトルの広がりがなく、歪みが緩和されていることが確かめられました。GaAs ナノワイヤ中に量子ドットが並んだ構造です。GaN ナノワ

イヤも検討しています。2 光子吸収は単一量子ドットを作り分光法で調べるなど、量子ドットを利用する様々な試みに挑戦しています。

量子ドット太陽電池の狙いは、先ず効率向上です。しかし、レーザーのような光源と異なり、太陽電池用量子ドット技術は極めて未成熟な状態にあり、量子ドット太陽電池のためのナノテクノロジーでは量子ドットの様々な問題に挑戦する必要があります。ドットサイズの均一性、位置の制御、材料最適化などです。これらの問題に挑戦するため、量子ドット太陽電池の研究は長期研究戦略の下で、革新的な技術を目指さねばならないと考えています。

【質疑】

Q (会場 A) : 将来はプリンタブルで低コストにできるのででしょうか？

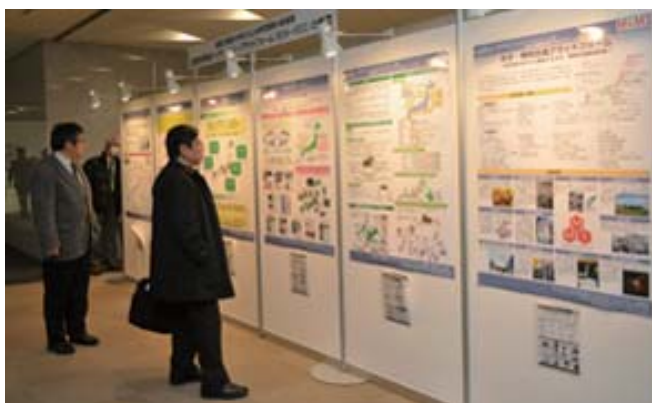
A : GaAs, GaN 系だと CVD 成長になるのでプリンタブルになるか分らない。今回フレキシブル基板の例を示したのは量子ドット太陽電池の基板を替えられることを示すためであります。

Q : (会場 B) 中間バンドを利用すると、中間バンドにおけるキャリアの寿命が問題になるのではないかと。また、量子ドット太陽電池の特性評価は、太陽光によるものか、レーザー光を用いたものなのでしょうか？

A : 中間バンドを用いた 2 段励起では吸収と再結合の競合になる。特性評価はレーザー光によって行っている。再結合寿命を長くする工夫もあるので、強いレーザー光を使わずに、弱い太陽光でも評価できます。

ここで午前の講演を終わり、昼食休憩に入った。休憩時間中にはパネル展示に多くの人が訪れていた。

昼食休憩後に、Session 1 の後半が開始された。



1-3 電気化学的エネルギー変換における材料研究の進展ー ナノスケールイオン輸送 (Materials Advances for Electrochemical Energy Conversion : Ion Transport at the Nanoscales)

Prof. John Kilner (Department of Materials, Imperial College London, UK)



Kilner 教授は、九州大学に新しく設けられたカーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (International Institute for Carbon-Neutral Energy Research) にも籍を置き、国際協力研究 (Collaborative Research) を行っている。

世界の炭素放出を低減するため、クリーンで持続可能なエネルギー変換の重要性が増しています。炭素放出を低減し、炭素ベースから水素ベース経済への重要な橋渡しをするのがイオン伝導を基にした高温電気化学デバイスである。その一つに固体酸化物燃料電池 (SOFC) があります。SOFC は酸素と水素の 2 つの反応室を持ち、700 ~ 1,000 °C で動作、反応室を隔てる膜は酸素の伝導体である。SOFC は酸素が水素と結合する電気化学反応で発電するが、逆反応の分解の過程は固体酸化物電解セル (Solid Oxide Electrolytic Cell, SOEC) になる。SOEC では酸素が逆に動いて、水分子を酸素と水素に分解するものである。

SOFC では、カソードで還元、アノードで酸化・燃焼が起こります。SOFC はセラミックスだけで構成され、効率が高く、稼働部がないため静かで、信頼性も高い。数 mW から 10MW までの発電が可能で、局所的なガス排出はない。MW 級の SOFC はガスタービンと組み合わせ、kW のものは住宅や病院に電力を供給することが可能です。その商用化に向け、Kilner 教授は英国ロンドンの Imperial College からのスピンアウト企業 Ceres Power Ltd. の設立に参加した。SOFC パワーユニットとして、トラックやノートパソコンに搭載する小さいものも手掛けています。九

州では 1kW SOFC ユニットを天然ガスのパイプラインに接続して、45% の効率を達成しています。

SOFC の課題は酸素伝導体です。通常 700 °C 以上の高温で動作するから、劣化を起こし易い。酸素伝導体にジルコニアやイットリウム・ジルコニアを用いるが、電気抵抗が重要なパラメータになります。厚さは 100 μm でセラミックセルに保持されるが、薄くする限界は 50 μm 程度です。最終的にはステンレスで保持するから動作温度も低くしたいが、イットリウム・ジルコニアだと 700 °C が限界、ガドリニアだと 500 °C まで下がるがそれ以上は難しいと考えられる。50 μm の電解質を使い、多孔性アノードを用いると、700 ~ 800 °C の中温度域で動作させられる。金属や酸素イオンは 1.5 Å の大きさがあり、高温でないと固体中を動けない。電解質を探すと、ピスマスなど導電率の高いものもあるが、実用に必要な 10^2S/cm の領域に適当な材料がなく、新材料への期待は非常に大きい。

そこで、この 10 年間、ナノスケール効果の研究に高い関心が寄せられ、ナノ材料やナノ構造の利用によるイオン伝導度増加の可能性が求められています。2000 年に、Max Planck 研究所の Sata たちは MBE で作られた $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$ 薄膜ヘテロ構造をレーザーアブレーションで薄くすると F イオン伝導度が増加すると発表した。この増加の原因はヘテロ構造の層が薄くなるにつれ、2 つの物質の間の界面に生じる空間電荷層が重なり合うためと説明された。この発表に続き、多くの研究グループが薄膜酸化物ヘテロ構造の研究を始め、酸素イオン伝導体でも同じ効果が見られないか調べた。Janek らはイットリウムドープ・ジルコニアエピタキシャル薄膜で、酸素イオン伝導度の増加を見出している。Schichtel はこの結果を解析し、観察された伝導度の変化が空間電荷によるものではなく、エピタキシャル成長に伴う格子歪みによるものと結論した。引張り歪み (tensile strain) が薄膜中のイオン伝導度を高め、圧縮歪み (compressive strain) はイオン伝導度を抑制するという。観察された変化の起源についての論争はまだ残っています。

これに対し、特に注目すべき最近の結果は SrTiO_3 (STO) / イットリア安定化ジルコニア (YSZ) 多層構造に関するものです。米国の Oakridge National Lab. は YSZ を使い、50nm にすると導電率の上がることを見出した。スペインで基礎科学、Oakridge で材料を分担し、数原子厚の 1nm にすると、8 桁くらい導電率が上がる。YSZ の交流インピーダンスを測定すると、薄膜の導電率はバルクの導電率に比べ大きく下がっている。基板を変えると、イオン伝導体にかかる力が変わり、圧縮と引張りで導電率は異なる。引っ張ると格子間が広がり、酸素イオンが動き易くなる。しかし、一連の実験がすべて同じ結果をもたらしてはいない。Imperial College でデータを纏めているが、導電率が 8 桁上がるものがある一方、動作温度を 100 °C 下げられるものもあるようです。

ここ 5 年間の多くの努力にも関わらず、酸素イオン伝

導体のナノ効果への理解は十分でないと考えられます。基板終端効果、成長法、エピタキシャル膜組成の不整合、そして恐らく汚染 (contamination) の影響を除くなど、さらに多くの研究が必要であろう。界面転位や、置換イオンの界面析出効果の考慮も、現在得られている実験結果の包括的説明には必要となる。これらの材料が信頼出来る形でデバイスに組み込まれる前に、これらのナノ効果を基本的に理解しておかねばならない。学際的な多分野研究が必要な分野です。

【質疑】

Q(司会者):燃料電池では白金フリーが求められる。SOFC では温度が重要でしょうか？

A: 耐久性向上が第一である。SOFC は初期性能が上がっても、起動・停止回数何万回か後にどんな性能を示すかが重要である。動作温度を下げないと寿命は伸びない。500℃の動作温度の可能性は見つかったが、300℃は難しい。現在は1000時間で性能が0.1%低下するのをもっと少なくしたいと思っています。

1-4 レアメタルフリー有機電極材料を用いた高エネルギー密度型の次世代二次電池 (High Energy Density Secondary Battery Employing Organic Electrode Materials)

本問 格 東北大学多元物質科学研究所教授



携帯電話やノートパソコンに使われているリチウム電池はソニーが1991年に初めて発売した。それ以前に使われていたNi-H電池の2倍の容量を持つため、携帯機器に広く用いられるようになった。炭素電極、電解液、層状化合物LiCoO₂電極で構成され、4Vのコバルト電極電

位に対応するよう、有機電解液が用いられるようになった。

近年、エレクトロニクスが、リチウム電池を再生可能エネルギーシステムの重要な要素にしようとしています。自動車用での利用が増加し、さらにスマートグリッドで風力発電などの電力変動を平準化するのに用いられたいして、2~3年のうちに1兆円産業に成長するであろう。課題は、電源の巨大化、セルの大型化、安全性、液体燃料との価格競争などである。NEDOの次世代自動車用蓄電池技術開発ロードマップには、2030年までに、5倍のエネルギー密度、1/20のコスト目標が示されているが、コスト達成は問題が大きいと考えられます。今日市場に出ている金属酸化物カソードは、Co, Ni, Mnのようなレアメタルを必要とし、その製造に要するエネルギーは大きい。鉄と白金の値段は5桁違い、Li, Coの値段はその中間にある。資源量は鉄と白金で7桁違い、Li, CoはFeの数十分の一です。

そこでレアメタルフリーを狙い、有機化合物のみで構成することが考えられます。有機化合物は、金属元素を含まなくても、高いエネルギー密度を持ち、環境負荷が小さく、機能性に富むことが期待されています。有機物結晶の電極応用は40年前から行われ、金属錯体によって有機超伝導体も発見されています。電池材料の候補となる化合物の例は有機キノン (organic quinone) 分子で、1分子に1電子が蓄えられるモノアニオン状態に加え、1分子に2電子を蓄えられるダイアニオン状態があるため、大きな酸化還元容量 (Large Redox Capacity) を持つ。正極材料として用いた時、2つの電子の出し入れができるので電流密度は1分子当り1電子のLiFePO₄などの無機系に匹敵する。理論的には、LiFePO₄のような無機カソードより大きな比容量を持っているが、低い充放電サイクル特性 (cycleability) のため積極的に研究されてこなかった。放電時に、モノアニオンラジカル (1-) やダイアニオン (2-) 状態の溶解度の高い物質を生成し、電解質中に溶け出してしまうためです。

FIRSTプログラム (高性能蓄電デバイス創成に向けた革新的基盤研究) では、有機結晶全固体リチウム電池の開発を目標とし、溶解過程を抑制することにより、よりよい充放電サイクル特性を持った高エネルギー密度全固体Li電池セルを作ることによって成功しています。有機結晶性カソードの界面に準固体電解質を適用してアニオン化合物の溶解を避ける。セルは完全密閉有機カソード、PEO (Polyethylene oxide) 層、準固体電解質、コントロールされた電解質-アノード界面から成り、シリカナノ粒子と室温イオン液体 (room temperature ionic liquid, RTIL) から成る準固体電解質は、有機カソード界面を安定化して溶解を防ぐ必要があります。有機カソードにテトラシアノキノジメタン (tetracyanoquinodimethane, TCNQ) の分子結晶を用いると262mAh/gに相当する2電子酸化還元容量を持ち、容量に対する第1酸化還元ポテンシャル

平坦部は Li/Li⁺ に対し、3.2V、第 2 平坦部は 2.8V を達成することができる。この種の化合物の多くは、230mAh/g を越える 2 電子酸化還元容量を持ち、2,3,5,6-tetrahydroxy benzoquinone (THBQ)、2,6-dichloro-5,6-dicyano-benzoquinone(DHBQ)は元々 LiFePO₄ より高いエネルギー密度を持っている。このようにキノンファミリーの有機カソードによって、セルのエネルギー密度を高めることに成功すれば、レアメタルを大幅に減らすことができると考えられます。

以上に基づいて、電流集電極、300 μm 厚の有機カソード、PEO 膜、シリカ複合固体電極で電池を構成し、厚さ約 100 μm、直径 10mm のコイン型バルク有機全固体 Li 電池を作りました (TCNQ/PEO/(Li-TFSA)/(SiO₂/ionic liquid)/SEI/Li Metal)。固体カソードは TCNQ、炭素電流集電極、RTIL から成り、TCNQ ペーストの中には約 50 μm の TCNQ 結晶が見られる。3 層の電解質は、PEO 膜、シリカ-RTIL 複合準固体電解質、人工 SEI (Solid Electrolyte Interface、固体電解質界面) から成り、カソードを金属 Li アノードから隔離しています。TCNQ カソードの充放電サイクル特性を求めると、220mA/g_{TCNQ} の初期容量が、室温、0.2C の条件において、170 回以上の充放電サイクルの後に 170mA/g_{TCNQ} までの低下にとどまりました。電解質中への分子溶解を抑えることにより有機物が二次電池電極に使えることを示しており、低い充放電サイクル特性のため見捨てられていた多数の分子化合物を再検討することの有用性を確かめるものとなりました。

航空機 B787 は Li 電池のトラブルで飛行停止になりました。エネルギー燃費効率を上げるため、大容量電池を搭載した結果起った事故です。安全性の高い電池が一層求められるようになってきています。そこで有機物より水系の電解質、Li イオンに代りプロトンを使用すべく、H、C、O、S の 4 元素で構成する電池を求めて基礎研究を行っています。Proton/H₂SO₄ の構成で、プロトン型スーパーキャパシタを作りました。水系のため起電力は 1V になるが、TCNQ を使い大量の水素貯蔵のできる事が分かりました。プロトンをマルチで貯蔵し、大容量電極材ができれば大容量化も可能です。今後は分子設計、結晶工学アプローチにより、多分子反応によって、より高い電圧になるものを探して行こうと考えています。

【質疑】

Q (会場 A) : シリカナノ粒子をイオン液体に混ぜたものを使うのは何故ですか？

A : 有機結晶は界面安定性が問題で溶けてしまうことがあるので界面の固体化を図ります。シリカを混入することで粘度が 1000 倍になり、溶解することなく電子の出し入れができるようになるためです。

Q (会場 B) : TCNQ は安定ですか？

A : Li-TCNQ というイオンラジカル結晶になっているため、不安定性は軽減されています。

1-5 ナノワイヤー・フレキシブル熱電素子 (Nanowires and Nanowire Heterostructures for Thermoelectric Energy Harvesting)

Prof. Yue Wu (School of Chemical Engineering, Purdue University, USA)



ナノワイヤー・フレキシブル熱電素子の研究は 3 年前から行っているものです。熱電素子は p 領域と n 領域を縦に接合させ、柱状にしてデバイスを組立ています。熱によって電子が生成して移動するので回路に電流が流れる。熱電効果としては熱を電気に変換する Seebeck 効果と電流によって冷却する Peltier 効果とがあり、それぞれ発電と冷却に使われます。

2010 年 8 月に行われた Lawrence Livermore 国立研究所のサーベイによると、2009 年に米国で生成された全エネルギーの 57.8% は使われずに環境に放出されたということです。主な排出源は発電所、輸送機器、製造業です。この無駄になった熱の多くは 40 ~ 200℃ の低品位のもののため、高い効率で経済的に再利用することは難しいと考えられ、従って、様々な冷却過程を通して環境に投棄され、その主な先は水生生態系 (aquatic ecosystems) があります。環境への廃熱の放出は周囲の水生生態系に悪い影響を与え、このシステムの非効率性は全体のエネルギーコストを押し上げています。

過去 10 年における熱電材料の急速な進歩は Seebeck 効果により、廃熱を電気に戻す可能性に希望を与えました。熱電材料の性能は無次元量の性能指数、すなわち ZT ($ZT = \sigma S^2 T / \kappa$, ここで σ : 電気伝導度, S : Seebeck 係数, κ : 熱伝導率, T : 高温側と低温側の平均温度) で評価されま

すが、金属の σ と κ の間には相関があって、同時に増加・減少するから、大きなZTを得ることは難しいと考えられます。

一方、ナノワイヤやナノ結晶などナノ構造にすると、ナノスケール表面と界面におけるフォノン散乱で熱伝導率が劇的に下がる。例えば、Te ナノワイヤの両端や、両側にPbTeやBi₂Te₃の超格子ヘテロ接合を設けて、熱電ナノワイヤヘテロ構造を作ると同じ化学組成のバルク結晶と同等か、より優れた性能を示します。しかし、超格子作製にMBE法を用いるなど製造コストが高く、バッチごとの特性が異なるなど再現性ある合成法に欠点を抱えています。

熱電材料の開発では、量産可能・経済性、既存製造基盤との両立、高性能といった条件を満たす必要があります。このため、エチレングリコール溶媒中、1気圧、低温で、ナノ材料を工業規模（少なくともキログラムレベルを比較的短時間に）で作製する溶液相成長法を創出し、93%の収率でナノワイヤを作りました。Bi₂Te₃のナノワイヤはテンプレートの形を維持して±2nmの精度で作られ、特性は結晶に比べ改善されています。このナノワイヤはプラットフォームになり、内部に超格子を作ったり、Bi₂Te₃ナノワイヤの先端にPbTeのプレート載せてヘテロ接合を作ることができます。組成、径、長さがコントロールでき、2つの相の存在によって熱伝導率の振舞が変わるから、界面の最適化を行うことができます。

熱電モジュールをフラットな面に貼付けると剥離し易

いので、フレキシブル熱電素子を考えました。ファイバ素材を探し、ガラスファイバの上に、PbTeナノ粒子をコーティングします。コーティングの厚さは300nmで、PbTe使用量は少ない。ZTは0.8になりました。このファイバは気体の流れを電気に変換できます。気流の速度、圧力が変わると温度が変わって電位差を生じ、窒素、空気など気体の種類によって信号の大きさが変わります。このファイバを置いたところの近くを人が通ると、信号が発生し、モーションセンサになり、歩く速さによって信号が変わります。フレキシブルで、目に見えない太さのため、赤外検知器のようになり、その存在を知られることがない。モーションセンサとしての応用を米国防省(DOD)に提案しているところです。

【質疑】

Q (司会者)：超格子を何故、どのように使うのですか？

A：超格子によってバンドオフセットを作れる。サイズの違うプレートを付ければエネルギーフィルタリングができる。S大、 κ 小にできるかも知れない。PbTe/Bi₂Te₃インタフェースでフォノンの散乱が起って熱伝導率が下がり、ZTが大きくなると考えています。

Session 1 が終わり、休憩に入った。





Session 2 : 省エネ・環境 (Energy Saving & Environment)

午後の休憩後, Session 2 が始まった.

2-1 サイアロン蛍光体による高効率長寿命発光ダイオード (Highly Efficient and Reliable Light-Emitting Diodes (LEDs) by Using SiAlON Phosphors)

広崎 尚登 物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門 サイアロンユニット ユニット長



照明には, 電球, 蛍光灯が多く用いられて来たが, 電球の生産は終わり, 蛍光灯も水銀を使うために使用上の制約が加わるようになりました. これに変わるものとして白色 LED が浮上しています. 一方, かつてのディスプレイの主役はブラウン管で, カラーテレビに用いられてきましたが, テレビは液晶に変わり, そのバックライトは冷陰極蛍光放電管 (CCFL) から, LED に変わりつつあります.

白色 LED ランプは青色 LED をイットリウムアルミガーネット (Yttrium Aluminum Garnet, YAG) 黄色蛍光体の混ざった樹脂で覆ったものです. 明るさは LED の青の発光が担い, 蛍光体が色を担う. 外から見える色を担うにもかかわらず, 蛍光体がランプの名に含まれることはなく, 蛍光体が表に出ることは少ない. 10 年前に青色 LED が世に出て, 白色 LED ランプができたが, LED の青とその補色である黄色の蛍光体を組み合わせたもので, スペクトルには赤と緑が欠けていました. 太陽光とは異なるため, 照明やディスプレイには使えなかった. その後, 様々な蛍光体が作られ, 色の調整ができるようになっていきます.

LED ランプに使う蛍光体の条件は, 蛍光灯における紫外線と異なって青の光で励起され, 耐久性と共に, LED

の発熱に耐える耐熱性がある, 多彩な発色が可能なことです. 一方, サイアロン (SiAlON) は, 元々蛍光体でなく, エンジンなどに使う耐熱構造セラミックスとして知られていました. SiN_4 三次元四面体の骨組みをベースとした金属固溶体です. サイアロン蛍光体は出発材料を $1500 \sim 2000^\circ\text{C}$ の高温, $0.5 \sim 1.0\text{MPa}$ の窒素雰囲気中で焼いて作ります. 例えば, SiN_x , AlN , Eu_2O_3 などを 10 気圧のガス中で焼成します. 強い結晶場分離と電子雲膨張効果により, 励起と発光スペクトルは長波長にシフトし, 量子効率が高く, 温度上昇による発光強度低下は小さい. 様々なサイアロン材料があるので, 様々な発光色を得ることができます. 赤から青までの多数のサイアロン蛍光体を NIMS で開発しています. Ca 添加サイアロン Eu^{+2} は黄色蛍光体で, 波長 450nm の青色光で励起され 586nm の黄色の発光をします. Sm を用いると赤, Dy で白になる. その中で, β -サイアロン:Eu (緑), α -サイアロン:Eu (黄), CaAlSiN_3 :Eu (赤) を組み合わせて, 演色性の優れた白色 LED が作られています.

サイアロン使用白色 LED ランプは $2800 \sim 6500\text{K}$ の範囲で色温度を調整できます. 以前の LED ランプの色温度は 6500K に限られ, スペクトルには 2 つのピークしかなかったが, サイアロン使用白色 LED ランプは, 例えば色温度 3500K の暖かい白色を示し, その発光スペクトルには幅広い 3 色のピークが見られます. $\text{RA}=100$ を満点とする演色性評価で $\text{RA} > 95$ の高演色性が得られています. ディスプレイ応用では, バックライトに赤, 青, 緑の 3 色が求められ, 従来の YAG 蛍光体を用いた場合は青と黄色だけだったため, 色相の NTSC 評価が 70% だったのに対し, サイアロン蛍光体は R, G, B の 3 色を再現し, NTSC 評価 90% になりました. 色再現性が良好なため, バックライトを冷陰極蛍光放電管 (CCFL) から LED に替えることが可能になりました. 液晶バックライトは携帯機器, ゲーム機から, テレビへと適用が進む. 今後は自動車の表示などへの展開を期待しています.

【質疑】

Q (司会者): エネルギー消費は, 自動車が 62% , 照明は 20% を占めるといふ. LED による照明の省エネルギーに期待したいが, 材料潤渇問題はないのでしょうか?

A: Eu はレアアースだが, 含有させる量は 0.1% と少ない. できるだけ少なくするよう心がけています.

Q (会場 A): $\text{RA} > 95$ だが, 20lm/W のデータが出ていたので明るさが心配になるが, どうでしょうか?

A: スペクトルを示した図の数値がそうになっていたが, 100lm/W の明るさが出ています.

Q (会場 B): 劣化はしないのでしょうか?

A: 以前の蛍光体は劣化したが, サイアロン蛍光体

は長期に安定しています。

Q (会場 C) : 発光スペクトルの半値幅を狭めることはできるのですか？

A : スペクトル線幅には緑色蛍光スペクトルの 50nm が効いている。スペクトル幅は Eu のおかれた環境で決まるので、狭めることができます。

2-2 LED 照明による害虫の本能誘発とナノ構造模倣体による捕獲 (Insect Pests Control Using Innate Behavior and Nanostructure)

針山 孝彦 (浜松医科大学医学部教授)



本講演で採り上げるのはバイオミメティクス (Biomimetics, 生物模倣) の分野の研究です。持続可能な食品安全性を高め、人間や家畜の健康を低いエネルギー消費で向上させるために、害虫の生得の振舞、本能を調べ、生物表面ナノ構造模倣体によって害虫を制御する道具について述べます。

地球ができて 46 億年になるが、5 億 5000 万年前のカンブリア爆発で生物が発生しました。酸素が放出され、バクテリアが生まれ、様々な生物に進化して来ました。バイキンマン (バクテリア) から生まれた生物の中で、120 万種が生き残っていると言われます。カンブリア爆発で節足動物が海中に増え、食うか食われるか、相手に認められるかの時代が続いて、淘汰された結果であります。その結果、種独自の情報世界ができた。反射、走性、学習、知能、本能などで、行動には生得的行動と習得的行動があります。400 万年前に人間が誕生するが、現代人に繋がるホモサピエンスの誕生は 20 万年前になります。1 万年前に農業が始まり、時間の余裕ができた。文化、文明が発達し、産業革命に至っています。この間に、動物の家畜化が起き、農業が進んで沙漠が増えた。人間が潤った生活をしようと化石燃料を使い、産業革命後、巨

大なエネルギーを使ってきました。囲われた人間世界の壁の中だけで最適化がされて来たため、そこで生じた問題を解決するには先ず人口増加の抑制など壁の中を片付けなければならないことになった。そして、さらに壁の外にいる生物に学んでネオ産業革命を行おうというのがバイオミメティクスです。

どこにでも住める生物にヤモリがあります。垂直な壁も登れる。この登攀機能を調べたら、垂直な壁を登れる手袋ができるかも知れない。数多くの動物を調べたら、特徴的な行動や手段を見付けることができるかも知れない。虫は、世界規模の経済現象の中で、生命を伴うものの一つである。しばしば収穫する作物をすべて食べ尽くし、貯蔵している食糧を失わせる。この問題は開発途上国の基本的な貧困をもたらし、すべての国家の経済を低下させる大きな問題です。食糧の問題に加え、害虫は多くの健康障害 (hazard) を引き起こします。従って、害虫と益虫とを制御する道具を開発し、広めることにより、食品安全を確保し、人間の健康状態を改善することは極めて重要です。農業は害虫のコントロールに有用な道具だが、環境や健康上のリスクを伴い、時には薬物耐性をもたらす。その虫自体が生来持っている振舞で、害虫をコントロールできれば、害虫による障害 (damage) を減らす持続可能な方法又は装置を手にするようになります。

虫の視覚行動は長い間研究され、5 つの様式に分類されています：(1) 強度識別、(2) 運動検知、(3) 色感覚、(4) 偏光検知、(5) パターン認識。最も基本的な視覚行動は光軸 (photoaxis) であって、光の出る方向に動きます。虫は光源の強度識別を行い、太陽や月のような天空からの合図 (cue) を航行標識 (navigational beacon) に使って行動すると説明されて来ました。ケニアには眠り病を媒介する虫がいますが、視覚生理学の立場からこの虫を減らすことが考えられます。

虫が光に向かう時の運動は直進だけではないことも分って来ました。我々の最近の研究では、虫は光に近くまで光に向かって真直ぐ飛ぶ。そこで方向を変えるか多かれ少なかれ一定の距離を置いて光の周囲をぐるぐる回る。そこで、虫はランプと暗い背景の間に存在する視覚の縁 (edge) に引き寄せられるという仮説を立てました。飛んでいる虫の前に、平らな光の板を置くと、虫は明らかにエッジに向かって飛ぶ。従って、LED か光沢紙を使って、縁検出理論に従い、視覚誘導トラップ (罟) を作ったところ、捕獲効率の増加には成功したが、捕獲された虫はトラップ表面に止まるだけで、逃げ去ってしまった。

そこで、布張りの衝立の上に三角に糸を張り、その上に袋を置く。暗黒空間と青の衝立の間にある縁に向かって、虫が飛んで来て衝立に止ると、上に登る習性を持つため、糸を伝って衝立の上の袋に入る。袋の中は蒸し風呂状態になっているので虫は死んでしまう。この方法で有害な虫を激減させることができました。虫が色と形を見て行動する習性を利用したもので、効率よく虫を集め

る道具になったわけです。

昆虫の複眼は多数のレンズ系に当る子眼から成ります。一つの子眼でもなくなると目が見えなくなる。虫の羽根の色は多層構造色で、屈折率の異なる多数の層による多層膜干渉によって色がついている。高い反射率を持っているのでその干渉の意味するところを探りました。玉虫の鞘羽根に飛んで来るか調べたが失敗しました。フィルムの成分を鞘羽根に合せたところ虫が集まって来ました。エッジには3倍多く集まり、虫の集まる面が用意できた。次に虫が滑らかな表面に止まるメカニズムを調べました。走査、及び透過電子顕微鏡観察の結果、虫は2種類の摩擦、及び付着法を持ち、ミクロンオーダーの構造により、ファンデルワールス力を利用している。そこでミクロンオーダーの構造がナノメータになったら、摩擦力は減退するという仮説を立てました。ナノ構造を持ったモスアイ（蛾の目）フィルムは、16目（biological order）、33種の虫に対して滑り易い面となる。そこで、モスアイフィルムを虫の集まる面の表面に取り付けると、虫はその面から滑り落ちる。その下に水を置くと、水中に落ちる害虫の数は増加し、仮説を確かめることができました。

このような本能的振舞と、ナノテクノロジーの組合せは、殺虫剤を用いない方法として、害虫の損害を低減し、一度設置すれば連続して虫をコントロールできるので環境持続性に貢献するものと考えられます。さらに、生物の中にある様々な仕組みを産業に応用できないかと考えています。

【質疑】 特になし。

講演者コメント：害虫駆除のため農薬を撒くと害になるが、ある程度の間隔で田の中にLEDを置くと虫が落ちて駆除できるという話もある。生き物たちにとって情報とは何か、生き物たちの環世界を探り、その行動と情報戦略の関係を探ろうと、「生き物たちの情報戦略」という本を化学同人社から出版した。



Session3：資源（Natural Resources）

引き続き、Session 3 が開始された。

3-1 オイル産生藻類によるグリーンイノベーションの可能性について（Green Innovation Potential of Oleaginous Algae）

渡邊 信（筑波大学生命環境科学研究科教授）

燃料となる藻類オイルに注目している。生産効率は陸上植物の約10倍です。トウモロコシは170 l /ha、パーム油でも5,950 l /haだが、藻類だと58,000～139,000



l /haの生産量にもなる。次世代エネルギー資源にしようとして全世界でプロジェクトが組まれています。多くの研究はトリアシルグリセロール（triacylglycerol, TAG）を蓄積する独立栄養（autotrophic）微細藻類（microalgae）に集中しています。TAGは脂肪酸メチルエステル（FAMES）に転換し、輸送機器用バイオディーゼル燃料（biodiesel fuel, BDF）になります。しかしながら、FAMESは、石油ディーゼル燃料に比べ、酸化され易く、NO_x排出が多く、低温で凝固します。そこで、水素化し、ハイドロカーボンにして利用するが、直鎖C16のため水素添加しても異性化しないと低温凝固します。

これに対し、C25以上のトリコソール系のオイルを出す藻類があります。NO_xを発生せず、液状で安定しています。ボトリオコッカス（*Botryococcus braunii*）という群生（colonial）微細藻類で、大量の液体炭化水素を生産し、細胞から炭化水素の大半を排泄して、群生細胞外マトリックスに蓄えられます。顕微鏡下に置き、指で擦すだけで油が出る。新しく分離された系列BOT-022はトリテルペン炭化水素（triterpenic hydrocarbon, C₃₄H₅₈）を90%以上の純度で蓄積します。この系列は、混合栄養で、光と化学資源の双方を成長のエネルギーに使うから、炭化水素生産システムの潜在能力が高まります。さらに、有機物を与えると増殖するため、有機廃棄物の利用が考えられます。一つは豆腐を作る時の廃水で無機塩類培地に1～2%加えると増殖が加速されるので、大量培養適用が考えられています。

また、従属栄養性（heterotrophic）藻類のオランチオクリトリウム（*Aurantiochytrium* sp.）という光合成しない藻類が新たに、日本の海岸で見つかりました。サメの肝油に存在するステロイドの中間体であるスクエアレン（squalene）を高い比率で蓄積し、分離します。スクエアレンは動物、植物のステロイドの前駆体で、酸化剤、保湿剤として現在、化粧品業界で使われています。

優れた皮膚柔軟化力，治療効果を持つので，薬剤用途に大きな可能性を持ちます。スクエアレンの市場における入手先はこれまで，深海のサメの肝臓にほぼ限られていました。サメの継続的供給は，海洋生物保護と保存の国際的関心のため，将来は困難になるので，スクエアレンの代替入手先を植物や微生物に求める研究が推進されています。標準の培養条件で，この新しい系統の藻類は急速に成長し，接種後4時間で2倍になり，3日目に初期の安定期に入る。4日目のスクエアレンの収率は， $1.29 \pm 0.13\text{g/L}$ で，バイオマスの約20%に当り，従来の報告に比べ例外的に大きい。このオランチオクリトリウム系統の炭化水素生産性はボトリオコッカスの10倍以上です。

有機植物性の藻類からとった油の燃料物性を調べると，炭素数は重油並みだが，動粘度は軽油に近い。ディーゼル油と比較して自然燃焼テストを行うと，内燃機関内の爆発燃焼が確認されました。しかしながら，実用化には有機物質の費用対効果を調べる必要があります。藻類からとったオイルの価格は2020年に130円/lとなり，使用量は化石燃料を上回ると見えています。光合成藻類ボトリオコッカスと従属栄養性藻類オラントリクリトリウムの炭化水素生産性を高める統合生産システムが必要となるでしょう。

【質疑】

Q (会場)：炭酸ガス排出に関する収支はどうか，バイオマスは炭酸ガス排出が多いのではないのでしょうか？

A：エネルギー収支については意見が分れています。発生量/使用量の見積の報告は0.2から7まで様々である。小規模実験の結果から大規模実用化時を推定するので，推測に使うモデルによって，結果が違ってしまう。我々は2000m²の生産規模まで拡大してモデルを実証しようとしています。

3-2 最近の海底熱水鉱床の探査・商業開発に向けた官民の取り組み (Recent Activities on Exploration of Seafloor Massive Sulfides in Japan)

飯笹 幸吉 (東京大学大学院環境学研究系教授)

海底熱水鉱床 (seafloor massive sulfides, SMS) の利用は商業化の手前まで来ています。海底熱水鉱床は海底面から噴出する熱水に含まれる金属成分が沈殿してできた多金属硫化物鉱床です。海水熱水鉱床からは煙のように銅などの金属微粒子を含んだ，300℃以上の水が，煙突のような筒状岩石 (Chimney) から噴出している。鉱床を構成するチムニーやマウンドからは，ベースメタル (Cu, Pb, Zn)，貴金属 (Au, Ag) の他，レアメタル (Ga, Ge, Cd, Se, Te) などの採取が期待できます。付近には



特殊なエビ，カニなどの熱水特有生物が棲息し，熱水特有生物は遺伝子源になり，その存在は熱水鉱床を探す手がかりとなります。1960年代以降，プレートテクトニクスの検証から発見され，マグマが裂け目から噴出する海底に存在することがわかっています。そこで，そのような海底を調べて，熱水鉱床の存在を探ることになりました。

熱水鉱床は海溝の火山活動が活発な地域にあり，国連に申請し認可を受けて，海域調査を行います。インド洋で中国など，太平洋ではカナダなどが調査しているが，公海でない場合は，領有する国と契約して調査します。日本は独立行政法人石油資源・金属鉱物資源機構 (JOGMEC, Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) などが鉱区を申請しています。日本の排他的経済水域 (Exclusive Economic Zone, EEZ) の周辺のSMSは，第四紀火山前線，マグマが噴出するような火山活動活発領域に分布することが知られています。日本周辺では10数カ所の候補地があり，海溝沿いが多く，海底火山のあるところで5ヶ所見つかっています。明神海域，サンライズ，沖縄トラフなどです。沖縄のサイトは水深1,700mにあります。調査が進むに従い，数の増えることが見込まれています。鉱床にある鉱物の組成は地域によって異なり，海底火山の活動期によっても組成は変わります。埋蔵量は商業化に十分な量があり，一つの鉱床で500万トン以上の埋蔵量が推定されていることもあります。

海洋基本計画は，平成19年7月施行の海洋基本法に基づいて，平成20年3月に閣議決定されました。10年間の計画で，2013年から第2期に入ります。第1期基本計画 (1st BPOP, Basic Plan on Ocean Policy) の5年間に日本政府は海底熱水鉱床SMSについて，主に4つのプロジェクトを推進して来ました。(1) 潜在鉱物資源の評価，(2) 環境影響評価，(3) 小規模採鉱機械製造と海洋実験，(4) 小規模鉱石選鉱と製錬，です。この時期はSMSの商用化の可能性評価とインフラ整備の期間と位置づけられ

ます。第1期では、海洋開発がものになるか、どんな課題があるか調べて来ました。鉱床のを見つけ方、調査、選鉱、精錬などをどのように行うかの調査です。計画推進策は、経済産業省資源エネルギー庁が策定し、文部科学省のプロジェクトはJAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 独立行政法人 海洋研究開発機構) が船会社を含む民間委託で推進してきました。そのとき以来、経済産業省とその関連機関が潜在鉱物資源の評価の主役になっています。一方、文部科学省といくつかの大学は、地球物理学的、地球化学的センサの開発を主導しています。第1期基本計画の間に得られた結果を基に、次のフェーズの第2期基本計画の間に、新しい海洋産業創出に向け、大量の潜在鉱物資源の確保を図ることとしています。

平成25年4月からは新しい第2期計画に従い、官邸におかれた海洋政策本部の参与会議を強化して推進しようとしています。商業化のスピードアップに民間の参加は欠かせません。民間はすでに開発された技術の移転を受けて調査に参加し、机上から現場に向かう必要があります。海中の立ち上がる煙から見つけることにもなりますが、重金属の宝の山です。モデル化、ボーリング調査を産学共同で推進する必要があります。現在既にSMSが発見されているのは火山活動が活発な地域にあるが、SMS形成が地質学的に可能な領域は、日本の排他的経済水域の火山活動休止地域のような新しい場に、なお存在します。不活性SMSの発見は、潜在鉱物資源の量を増すことに止まらず、環境影響を緩和し、生物多様性保存にも寄与します。第2期基本計画では日本の排他的経済水域の新しい場の建設的調査が産官学の協力関係によって加速されるでしょう。従来調査して来た海溝に挟まれる海域にも鉱床発見の可能性があり、鉱床の発見は資源外交にも役立つと期待しています。

【質疑】

Q (会場)：リスクアセスメントが必要ではないか。地震誘発予防など必要ないのでしょうか？

A：まだそこまで進んでいないが、将来は生物環境保全も考える必要があります。

司会者コメント：採掘手段の安全確保も必要だろう。

3-3 メタンハイドレート資源開発の現状及び今後の課題 (Recent Status of Methane Hydrate R&D Program and the Future)

成田 英夫 (産業技術総合研究所メタンハイドレート研究センターセンター長)

日本の電力需要に応えるエネルギー源は、2010年において、石炭、原子力、石油がそれぞれ約1/4を占めてい



ました。2011年には天然ガスが多くなり、5.4兆円を輸入した結果、貿易赤字が1.9兆円に上るのに影響を与えました。日本の天然ガス購入価格は世界の4倍になっています。これらの在来型エネルギー源に対し、シェールガスやメタンハイドレートは非在来型のエネルギー源として期待されています。特に、日本にとって重要なのはメタンハイドレート資源が排他的経済水域に存在することです。排他的経済水域内にあるため、自由な開発が可能で、エネルギー自給、安定供給、資源外交の有力なカードとなります。

メタンハイドレートは水のような固体形状で、水とメタンガスから成り、 1m^3 のメタンハイドレートは 0.8m^3 の水と 160m^3 のメタンガスに分離します。高压、低温で安定し、主に凍土や大陸周辺の深海に存在します。メタンハイドレートは深海の海底にある砂質堆積層の間隙空間 (pore space) にあり、メタンハイドレートと間隙空間の体積比である飽和度 (methane hydrate saturation) は一般に40%です。日本近辺で確認された場所は、東南海トラフ、東北地方などで、東南海トラフ領域には40tcf ($1,140 \times 10^9\text{m}^3$)のメタンガスがあると見積られています。

メタンハイドレート開発は世界各国で国家プロジェクトとして推進されています。米国、中国、韓国、インドなどが力を入れているが、米国はシェールガス開発のため、メタンハイドレートに力がかけて弱まっています。中国は南沙諸島、チベット高原などで開発を進めています。日本は2001年から18年のプロジェクトを3フェーズに分けて進めています。フェーズ1は基礎段階で環境省と産総研が中心になっていました。その後JOGMEC (独立行政法人 石油資源・金属鉱物資源機構) を中心に、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) が組織されました。経済産業省の計画のもとで平成13年に発足し、2009年から海洋産出試験を含む第2フェーズに入っています。第1フェーズでは南海トラフに国内11

年分の使用量が埋蔵されていることを明らかにしています。第3フェーズでは企業の参加の下、商業的産出準備と環境影響を含む総合評価が予定されています。

メタンハイドレートには海底析出の表層型、岩の割れ目、砂層の間の3つの埋蔵形態があります。この中では特に砂質堆積層に着目しています。マイクロフォーカスX線CTなどでメタンハイドレートを確認します。採掘は、従来の石油や天然ガスの生産技術が基本です。しかしながら、メタンハイドレートは堆積層中に固体の状態が存在するのに対し、従来の天然ガスは高压ガスです。天然ガスは砂岩の中であって自噴するが、メタンハイドレートは例えば海中1000mの深海の底から200～300m下の砂層であって自噴はしない。メタンハイドレート水を汲上げて分解させる必要があります。メタンガスと水に分離する時、浸透性、機械的性質、熱的性質などの貯蔵器(reservoir)に関するパラメータは分離が進むに従って変化し、分離が吸熱反応のため貯蔵器は急速に冷却される。そこで、生産法の開発と同時進行で、砂質堆積層にあるメタンハイドレートの物理パラメータと分離の振舞を分析する必要があります。

低温・高压でメタンハイドレートは安定なので、高温・低压にして分解します。生産方法は大きく分けて、加熱法と減圧法になりますが、加熱法のエネルギー効率は低い。減圧法のエネルギー効率は加熱法の数十倍になるので、減圧法が効率的な生産法として開発されています。この方法では、生産用の井戸に、メタンハイドレートの入った堆積物が送り込まれ、井戸の水を抜くことにより減圧する。減圧されると、堆積物中の間隙の圧力が下がり、メタンハイドレートは水とガスに分離する。ガスと水が井戸に流れ込んでガスが生産される。しかし吸熱反応のため、水になる時に温度が下がって、反応速度が落ちるため、新しい生産方法が求められています。これに対応して、生産シミュレータが開発され、3次元でメタンハイドレートの初期条件を入力すると、生産方法やどれだけ生産可能かを予測することが出来るようになりました。

生産方法については、陸上のメタンハイドレートを保持する堆積物で減圧法を試験し、連続生産性とエネルギー効率を確認しています。掘削して、海水を汲上げるので、水位が下がり、圧力が低下するから水位の制御も必要になります。2008年にはカナダの極北地で600mの凍土の下、地上から1,700mのところメタンハイドレートが見つかり、試掘して水とメタンの分解が進むことを確認しました。

日本は2013年から第2フェーズの第2段階に入り、海洋産出試験費が支出されます。沖合の生産試験を2013年はじめに東南海トラフにある第二渥美砂洲で、鑿岩船「地球」を使い、減圧法を適用して行います。井戸は1000mの深水にある緩い堆積層に建設するので、減圧時の分離に特別の注意が必要です。

沖合の生産試験は世界で初めての挑戦です。安定した

稼働には多くの困難があります。例えば、貯蔵器は深水の比較的浅い位置に設けられる。このため、温度と圧力の条件は、従来の石油や天然ガス探索の条件より厳しく、底の孔に大きな圧力がかかる。これに対し、メタンハイドレート貯蔵器の解析と評価技術、生産状況のシミュレーション技術は商用生産技術の実証段階にあります。成功、失敗の如何によらず、商用の可能性は沖合試験結果の解析を通して確認しなければならないと考えられます。



【閉会挨拶】 野田 哲二 (JAPAN NANO 2013 組織委員長, 物質・材料研究機構ナノテクノロジープラットフォームセンター長)



今回は「エネルギー・資源・環境へのナノテクノロジーの多面的展開」をテーマにシンポジウムを開催しました。長時間の参加に感謝します。開会の冒頭では文部科学省柿田課長からナノテクノロジーに対する力強い応援の言葉を、基調講演では科学技術振興機構中村理事長から持続可能な社会に向けてのナノテクノロジーへの期待のお話を、柏木東京工大教授からはICTと融合したスマートエネルギーネットワークの展望を話して頂きました。これに続く10件の講演では再生エネルギー、省エネと環境、資源についてナノテクノロジーの成果や期待を語って頂き、将来の展望を描くことが出来たのではないかと思います。本日は574名の方に出席頂き、盛会となりました。参加者、講演者、準備に当たった方々に深謝して本シンポジウムを閉じることといたします。

以上で、シンポジウムは終了したが、開期中に開催された組織・プログラム合同委員会において、次年度も同様なシンポジウムを開催することが決まった。

(古寺 博)