ISSN 1349-6085

JST news

未来をひらく科学技術

2
February
2016

アンモニアから電気をつくる
新触媒でアンモニアをつくる

国立研究開発法人
科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency

JSTnews 2 February 2016

3 FEATURE
アンモニアから電気をつくる
新触媒でアンモニアをつくる

4 01 アンモニアが燃料のガスタービン発電

6 02 アンモニアによる燃料電池発電

8 03 100年不変のアンモニア合成法を大きく変えるか？
新触媒の開発

12 マンガ家おがちゃんの研究室訪問
塗る太陽電池！

14 NEWS & TOPICS
胃だけじゃない？
ピロリ菌の病原たんぱく質を全身に運ぶ小胞を発見 ほか

16 さきがける科学人 Vol.46
地球を救う「決めの一手」を見極める
陳 怡靜（チン イーチン）
科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター（LCS）研究員

表紙写真

開発した燃焼装置でアンモニアの燃焼状態を確認する「アンモニア直接燃焼」研究責任者の小林秀昭さん。この研究をガスタービンに応用し、世界初のアンモニアを燃料とするガスタービン発電に研究チームで成功。二酸化炭素を出さない火力発電の実用化に向け、より大型な装置開発への期待がかかる。

編集長：上野茂幸／企画・編集：浅羽雅晴・安藤裕輔・菅野智さと・佐藤勝昭・多田羅尚子・鳥井弘之・松元美香・松山桃世・山下礼士　制作：株式会社学研プラス・株式会社麹町企画／印刷・製本：北越印刷株式会社

研究監メッセージ

健康長寿

JST研究監
古市喜義
（ライフイノベーション担当）

日本の平均寿命が世界一を記録しているのはよく知られています。しかし、寝たきりにならず健康で長生きのできる健康長寿となると、シンガポールに抜かれ第2位に甘んじている状態です。2012年に策定された国民の健康づくりの指針となる第2次「健康日本21」では、平均寿命のみならず、介護を受けたり、病気で寝たきりになったりせず、日常生活を健康的に送ることのできる健康寿命にも着目し、その期間を延ばす方針を打ち出しています。

2013年度の「健康日本21」では、日本人男性の平均寿命が80.21歳に対して健康寿命が71.19歳、女性は86.61歳に対して74.21歳と、男性で9.02歳、女性で12.4歳の差が出ています。この差を縮めることは、元気な高齢者が増え、医療費や介護費の増加を抑える大きな効果にもつながるのです。

健康長寿の実現には、特定健診やがん検診などの受診率向上による早期発見・早期治療、メンタルヘルスケアや適度な運動と共に、日常の食習慣が重要です。昨今は、種々の健康食品が開発され、国内市場は1～2兆円規模となっています。植物や微生物に特有の代謝経路についての研究などから、今後も多種多様な天然化合物が発見されるでしょうが、まずその機能や安全性を科学的に評価・検証することが求められます。

“機能性食品”を含む、新たなコンセプトの高付加価値食品を創出するための研究と共に、老化のメカニズムを科学的に解明する大きなチャレンジが欠かせません。欧米先進国だけでなく、中国を始めアジアの国々も続々と高齢化の難題を迎えているだけに、日本の果たす役割は世界が固唾をのんで見守っているのです。

アンモニアから電気をつくる 新触媒でアンモニアをつくる

アンモニアで「ガスタービン発電」や「燃料電池」を実現
効率的なアンモニア合成の「新触媒」を発明
個性派の活躍に期待

その昔、アイスキャンディー屋さんが幟（のぼり）旗を立て、鐘を鳴らしながら旧式のアンモニア式冷凍庫を載せたリアカーを引いて町中を巡っていた。また、アンモニアは虫刺されの解毒剤として家庭の常備薬にも使われていた。

鼻をつく強烈な臭いには、つい顔を背けてしまう。旧式トイレも連想させて決して威張れるものではなかった。こんな“昭和の風景”は今ではほとんど見かけなくなったものの、法律では劇物に指定されており、相変わらず近寄りがたい気体である。

そのアンモニアが最近、大きく注目を浴びている。うまく燃焼させれば温室効果ガスの二酸化炭素を排出せずに、直接発電の燃料になる。燃料電池の水素に代わる燃料としても使える。遠い夢と思われていた水素社会の実現性をグイと引き寄せようとしている。

国家プロジェクトが動き出した。日本の科学技術の司令塔である総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）は2014年度に「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」をスタートさせた。その1つに「エネルギーキャリア」が入った。エネルギーを輸送（キャリア）し、貯蔵できる化学物質としてアンモニアに白羽の矢を立てた。

アンモニアを直接燃焼させる「ガスタービン発電」には、小林秀昭・東北大学流体科学研究所教授が、産業技術総合研究所やIHI社と共に取り組んでいる。水素の代わりにアンモニアを使った世界最大規模の「固体酸化物形燃料電池」の開発に、江口浩一・京都大学大学院工学研究科教授らが成功した。

さらにJST戦略的創造研究推進事業ACCELでは、細野秀雄・東京工業大学元素戦略研究センター長らのグループが発明した「新触媒」が、小規模で効率的なアンモニア製造や、新たな合成化学産業に変革をもたらそうとしている。

昨年12月、パリで開かれた「第21回国連気候変動枠組み条約締約国会議」（COP21）で合意された「パリ協定」は、各国に世界の気温上昇を1.5度に抑えるよう要請している。低炭素社会や省エネルギーの実現という難しい課題の解決なくしては、もはや人類の持続可能な未来は考えられないところまで来ている。

地球環境新時代に、ますます期待が高まっているアンモニア関連のプロジェクトを特集した。

アンモニアが燃料のガスタービン発電

**二酸化炭素を出さない火力発電の実用化をめざす。
東北大学の小林秀昭教授は、アンモニアを直接燃焼させる基盤技術を研究し、
産業技術総合研究所と共同で、世界で初めてアンモニアを燃料とした
ガスタービン発電に成功した。**

2015年9月、産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所に設けられたアンモニア燃焼実験装置。アンモニア100パーセントの燃料を用いたガスタービン発電に成功した。

安定して燃焼させるバーナーを開発

アンモニアが燃えることは古くから知られているが、その燃焼速度は非常に遅い。都市ガスの主成分であるメタンのわずか5分の1に過ぎず、燃料としてはほとんど利用されてこなかった。

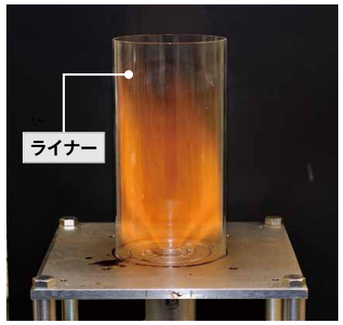
燃えても二酸化炭素を出さないアンモニアは、低炭素社会の実現に向けて有望視されている。小林さんは、アンモニアを安定かつ効率よく燃焼させる燃焼方式の開発にチャレンジし、見事成功させた。

「燃焼科学が専門なので、アンモニアに適した燃焼方式や装置を考えるための基本的な知識は持っていました。スワール流（シリンダー内や燃焼室での気体の渦状の流れ）を利用した燃焼装置で、アンモニアと空気の混合気体の流れをコントロールすることで、燃焼を安定させようと考えました」。

小林研究室の「旋回流バーナー」には、ライナーと呼ばれるガラス筒が据え付けられている。

「最初はライナーなしで燃やしてみましたが、火炎が不安定でした。ライナーを付けることで、渦流が縦横に安定して形成され、反応が完了するまで十分な時間、ライナーの中に混合気体が留まるようになった結果、火炎が安定し、未燃のアンモニアも減らすことができました」。

右上の写真のように、燃えにくいはずのアンモニアが、オレンジ色の美しい炎を上げて勢いよく燃えている。流速を上げることで、小さなバーナーでも大きな熱をエネルギーとして取り出すことができる。アンモニアが燃えると、有害な窒素酸化物が排出されやすく、酸性雨など大気汚染の原因となる。窒素酸化物を取り除く脱硝装置や触媒技術はすでに確立されているが、排気ガス中の窒素酸化物を最小限にするための工夫が今後の課題だ。



安定して燃えるアンモニア。オレンジ色の炎がライナーの中で渦を巻いているのがわかる。

都市ガスの主成分であるメタンは青色の炎を出す。

小林 秀昭 こばやし・ひであき　東北大学流体科学研究所 教授

1983年、東北大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了、工学博士。東北大学流体科学研究所助教授を経て、2003年より現職。2014年よりSIP課題「エネルギーキャリア」研究開発テーマ「アンモニア直接燃焼」研究責任者。

実用化をめざし、より大きな発電装置へ

小林さんの研究チームは、アンモニアの直接燃焼技術をガスタービンに応用し、2014年8月、世界で初めてアンモニアを燃料とした発電に成功した。燃焼した高温高圧のガスで、たくさんの羽根を付けた回転式原動機（タービン）を回して発電する仕組みだ。

最大出力50キロワットのガスタービン発電装置を用いて、熱量比灯油70パーセント、アンモニア30パーセントで燃焼させたところ、21キロワットの安定した発電出力を維持できた。2015年9月には、メタンとアンモニアの混合気体、さらに燃料をアンモニア100パーセントにしたガスタービン発電にも成功した。発電出力はいずれの場合も、41.8キロワットに達した。

「2014年は50キログラムのボンベからアンモニアを供給していたので、アンモニア100パーセントで燃やすことができませんでした。今は、1トンのボンベを備えたので、大量のアンモニアを利用できるようになりました。8.5気圧の液体アンモニアを蒸発させてガスタービンに送るために熱を供給する装置も設置しました」。

アンモニアを燃料にしたガスタービン発電の開始は近そうに思えるが、すぐに火力発電に置き換えられるわけではない。

「実証研究用のガスタービンと大型発電所で稼働しているガスタービンでは設備のスケールがまったく違います。アンモニア100パーセントでの発電実験に用いたガスタービンは、最大出力が50キロワット。これに対し大型火力発電所で使われているのは数万～数十万キロワットです。大型発電所のガスタービンには多数の燃焼器が取り付けられていますが、1個の燃焼器でも数百倍以上の差があります。同じ燃焼器の構造でいきなり50キロワットから数十万キロワットに持っていくことはできません。スケールアップには、いくつかの段階を踏んで、大型の装置を開発していく必要があります」。

ただしアンモニアには、供給するためのインフラや発電所内の設備に関して有利な条件が揃っている。トラック輸送の方式は確立され、アンモニアを運び出す基地もたくさんあり、既存の輸送・貯蔵インフラが使える。火力発電所に不可欠な脱硝装置は、アンモニアを触媒と共に利用することで窒素酸化物を取り除いている。そのため火力発電所にはすでに必ずアンモニアのタンクがあり、燃料として使うことになっても、一から設備を作る必要がない。

「燃料のすべてがアンモニアに置き換わる必要はないと思います。発電所のように大型のタンクや装置を置ける場所ではアンモニア燃焼による火力発電を、家庭や車などでは水素を利用した小型の燃料電池を用い、それぞれに低炭素社会を実現するのが良いと思います」。

まずは天然ガス用のガスタービンと同じ燃焼効率まで持っていくことをめざす。そして近い未来、アンモニアを燃料にしたガスタービン発電を実用化することが、小林さんの願いだ。

紫外線レーザーをアンモニア火炎に当て、瞬間の構造を超高感度カメラで撮影する装置。手前の画像の白く光った明るい部分にはOHという化学種が豊富にある。黒いところはまだ燃焼していないガス。黒い部分と白い部分の境界で発熱している。

TEXT：上浪春海　PHOTO：櫻井逸生　編集協力：江寺勝（JST SIP担当）

アンモニアによる燃料電池発電

燃料電池は、一般的には水素と空気中の酸素で発電するものが用いられている。京都大学の江口浩一教授は、水素の代わりにアンモニアを燃料とする燃料電池を研究し、成果を上げている。

固体酸化物形燃料電池で世界最大規模の発電に成功

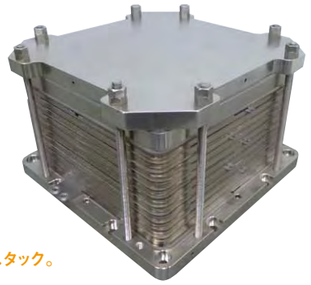
燃料電池には、固体高分子形（PEFC）、りん酸形（PAFC）、溶融炭酸塩形（MCFC）、固体酸化物形（SOFC）などいくつかの方式がある。このうちSOFCは、700～900度で動作する酸化物セラミックスを構成材料とする燃料電池で、発電効率が高く、将来、大電力発電として活躍することが期待されている。燃料極、電解質、空気極から構成され、燃料には水素の他に天然ガスなどが用いられる。

このSOFCの燃料にアンモニアを使う研究を、江口さんらのチームが進めている。2015年7月、アンモニアを燃料としたSOFCとしては世界最大規模（200ワットクラス）の発電に成功した。

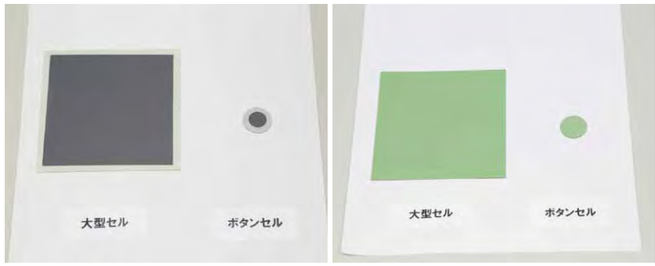
「30年間、天然ガスや水素を燃料に使ってSOFC燃料電池の研究をしてきました。アンモニアを燃料に使う小規模な実験は他にもありましたが、アンモニアをエネルギーキャリアとしてとらえ、今回ほどの規模で発電する実験は初めてです」。

下の写真の丸いものが、江口さんらの開発したSOFCの基本単位で、ボタンセルと呼ばれる。見た目には薄いプラスチック板のようだが、ボタンセルには燃料極、電解質、空気極の3層があり、いずれの層も酸化物セラミックスという材料でできている。

写真の黒い面は空気極で、ここに空気中の酸素が供給される。緑の面は燃料極で、こちらにはアンモニアなどの燃料が供給される。ただし、1個のボタンセルの出力は1ワット程度と低い。そこで、セルの面積を拡大して電流を大きくし、セパレータと呼ばれる導電性の材料とセルとを交互に直列につないで、電圧と出力を増加させたスタックと呼ばれる燃料電池の集合体が作られた。



大型のセルをセパレータで挟んだものを10段重ねたスタック。



大型セルとボタンセル。黒い面は空気極、緑の面は燃料極。

江口 浩一 えぐち・こういち　京都大学大学院工学研究科 教授

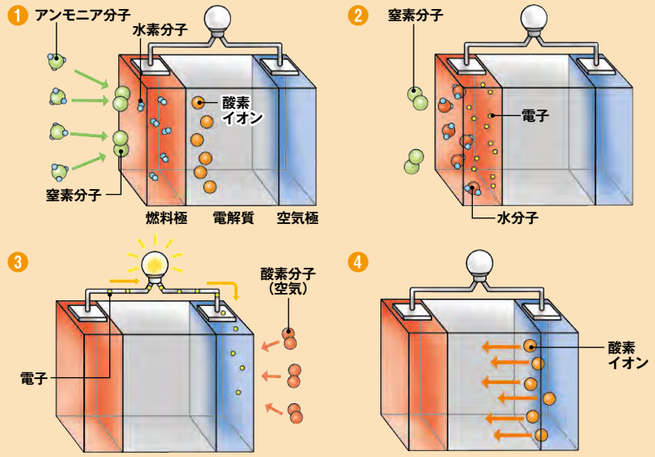
1984年、九州大学大学院総合理工学研究科博士課程修了、工学博士。九州大学大学院総合理工学研究科教授を経て、2000年より現職。2014年よりSIP課題「エネルギーキャリア」研究開発テーマ「アンモニア燃料電池」研究責任者。

電流が発生するメカニズム

アンモニアを使うSOFCの発電メカニズムは、基本的には水素や天然ガスを使うものと同じだが、江口さんが開発した燃料極は、アンモニアを分解して水素分子を作る触媒の働きをしている。電力発生のメカニズムは次のようなイメージになる。

❶燃料極に送り込まれたアンモニア分子は、水素分子と窒素分子に分かれる。
❷窒素分子は空気中に放出され、水素分子は電解質を移動してきた酸素イオンと結び付いて水になる。そのとき、電子を放出する。
❸電子は回路を経由して空気極に移動する（回路に電流が流れる）。
❹空気極に移動した電子は、空気極に供給された酸素と結び付き、酸素イオンを作る。酸素イオンは、電解質を通って燃料極に移動する。

図　アンモニアを使う固体酸化物形燃料電池（SOFC）の仕組み



アンモニアを効率よく電気に変換する

江口さんがアンモニア燃料電池で世界最大規模の出力を達成できたポイントは、どこにあるのだろう。

「私たちは、アンモニアの扱いづらい性質を克服してうまく発電できるように、セラミックメーカーと共同でスタックを作りました。アンモニアは腐食性があるので、触れても腐食しないガラスを原料とした封止材を、セラミックメーカーの技術を生かして開発しました。この封止材でアンモニアは漏れ出ないようになっています。燃料電池のセルを挟み燃料や空気を電極全体に供給する、セパレータの開発に成功したことも、封止材と並ぶ大きなポイントといえるでしょう」。

この装置は、アンモニアの直流発電効率53パーセントを達成した。直流発電効率は、アンモニアが本来持っている発熱量に対して、どれだけエネルギーを電気として取り出せたかを示すものだが、53パーセントは非常に効率のよい数値だ。

「大規模にすれば発電効率が高くなるのは普通ですが、小さい規模でこれだけ高い効率を得られる点が、この燃料電池の特長です。アンモニアが将来エネルギーキャリアとして認められたとき、一番効率の高い電気への変換方法は、この燃料電池になるでしょう」。

実用化に向けて克服しなければならない点は何だろうか。

「順調に開発が進んできましたが、より大きくして発電量を増やすには、耐久性も必要です。アンモニアという未知の燃料を使うので、装置の劣化の研究も欠かせません。これまで観察してきた数百時間で、電極に大きな劣化は起きていませんが、さらに長く経ったらどうなるか見極める試験を行っています」。

アンモニア燃料電池に実現性があることを世の中に広く紹介したいと江口さんは考えている。そのためには、ある程度大きな規模で、長く運転できる装置を作らなければならない。ごく限られた地域をモデル地区として運用し、実現性をアピールしたいという。「2020年のオリンピック・パラリンピックのころには小規模のものを運転したい。それが1つの目標です」。

低炭素社会の実現に向けて、燃料電池の新しい可能性を示そうとしている。

ガラス封止材

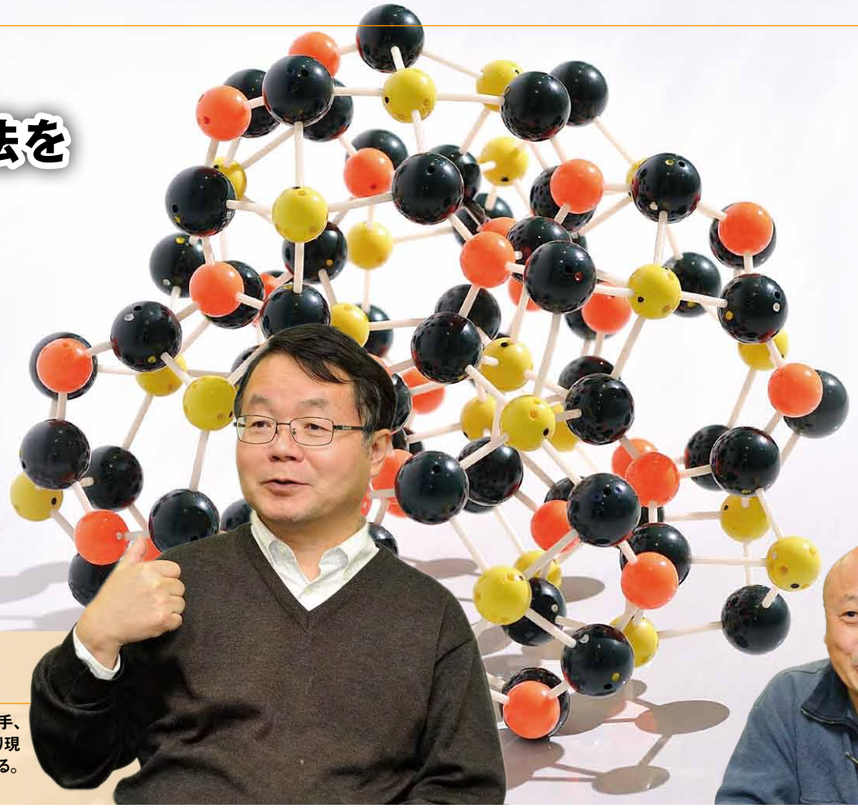
燃料電池のセル（左）とスタック（右）の模型。燃料極（赤）、電解質（白）、空気極（青）の3層を挟むセパレータ（銀）は、燃料と空気を極全体に供給する通路の役割も果たしている。これを複数組重ねたものがスタック。

TEXT：上浪春海　PHOTO：田中昭俊（麹町企画）　編集協力：梅沢順子（JST SIP担当）

100年不変のアンモニア合成法を大きく変えるか？

新触媒の開発

1913年、ドイツで発明されたアンモニア合成法「ハーバー・ボッシュ法」は、空気から窒素を取り込み、穀物の肥料となるアンモニアを作ることから「空気からパンを作る」と表現された。以来100年、これを超える方法は出てきていない。東京工業大学の細野秀雄教授らの研究グループは、新しい化合物を使った高性能触媒を開発し、アンモニア合成法に新たな道を開いた。



細野 秀雄 ほその・ひでお
東京工業大学 元素戦略研究センター長
応用セラミックス研究所 教授

1982年、東京都立大学大学院工学研究科博士課程修了、工学博士。名古屋工業大学工学部助手、東京工業大学助教授などを経て1999年東京工業大学応用セラミックス研究所教授。2012年より現職。専門は無機材料科学。藤原賞、仁科記念賞、恩賜賞・日本学士院賞など、多数の受賞歴がある。

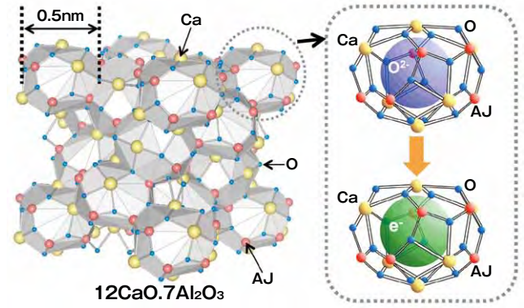
原 亨和 はら・みちかず
東京工業大学 応用セラミックス研究所
教授

1992年、東京工業大学総合理工学研究科電子化学専攻博士課程修了、博士（理学）。株式会社東芝研究開発センター、東京工業大学資源化学研究所触媒化学部門、米国ペンシルベニア州立大学、東京工業大学資源化学研究所触媒化学部門助教授を経て2006年より現職。

北野 政明 きたの・まさあき
東京工業大学 元素戦略研究センター
准教授

2006年、大阪府立大学工学研究科応用化学分野博士課程修了、博士（工学）。同年大阪府立大学博士研究員、07年神奈川科学技術アカデミー常勤研究員、09年東京工業大学特任助教を経て13年1月より現職。

図1 「C12A7エレクトライド」の構造



上がルテニウムを付着させたC12A7エレクトライドで、下が通常のC12A7エレクトライド。

電気を通す酸化物「C12A7エレクトライド」を触媒に

ハーバー・ボッシュ法は大量にアンモニアを作る方法として産業に貢献する重要な反応である。空気中に無尽蔵にある窒素を水素と直接反応させて生成するからだ。

しかしアンモニア合成では窒素分子の強固な三重結合を切断する必要があり、この反応は容易ではない。これまでいろいろな改良がなされてきたが、現在でも摂氏400～500度の高温と100～300気圧の高圧など厳しい反応条件が必要となる。また、73億人の人類を支える化学肥料などアンモニアの需要は年間1.7億トンを超える。今後、アンモニアのエネルギー分野への利用も期待される中、アンモニア製造コストの大幅な低減が急務である。

解決策の1つが新たなアンモニア合成触媒の開発である。ハーバー・ボッシュ法では鉄を主体とする化合物が触媒に使われるが、より高効率な触媒の開発により、反応器が小さくなり、原料ガスリサイクル比も小さくなるため、反応プラント全体がコンパクト化する。最近では、ルテニウムをカリウムなどのアルカリ金属と一緒にカーボンの表面に付着させた触媒を使い、より高効率でアンモニアを合成する方法も一部工業化された。

アンモニアは液化して回収する方が工業的に有利なため、室温で液化する圧力（約8.5気圧）以上の条件下で合成することが望まれる。しかし、ルテニウム触媒は、水素原子が触媒表面を覆って反応が邪魔されるため、圧力が上がっても反応が効率よく進まなくなる問題があった。

細野さんらの研究グループが触媒の材料として使ったのは、「C12A7（$12CaO \cdot 7Al_2O_3$）エレクトライド」という石灰とアルミナから構成された化合物で、市販のアルミナセメントの成分の一種である。

C12A7は直径0.5ナノ（1ナノは10億分の1）メートルのかご状の構造で、その中に酸素イオンO^{2-}が入っている。2003年にドーピングという手法で、かごの中の酸素イオンに代えて電子e^-を入れると、絶縁体から電気がよく流れる状態に変化し、電子を外部に与える供給能力を持つことを発見し、C12A7エレクトライドと命名した（図1）。

C12A7に還元剤として金属チタンを加え、摂氏1,000度で焼くことによってかごの中が電子に入れ替わる。通常このような物質は化学的に不安定だが、C12A7エレクトライドは安定しており、扱いが容易なのも特長だ。

今回、アンモニア合成のために開発された触媒は、C12A7エレクトライドの表面にナノサイズのルテニウムを付着させたもので、これまでのルテニウム触媒と比べて活性が10倍高く、反応に必要な活性化エネルギー[※1]は2分の1で済む。さらに10気圧程度に加圧すると活性が向上し、触媒として効率よく働く。

細野さんはこれまで、一貫して電気を通す酸化物を研究テーマにしてきた。アモルファス酸化物のガラス半導体を使ったIGZO薄膜トランジスタなどがその代表例で、液晶ディスプレイや有機ELの駆動技術として大きな注目を集めた。しかし「もっと世の中に必要なもの、生活の質を向上させるようなものを作りたい」との強い思いがあった。

「食糧を作るための肥料として不可欠なアンモニアの合成は、私の思いにぴったりのテーマでした。触媒性能のポイントが仕事関数[※2]にあることもわかっていました。C12A7エレクトライドは金属カリウムと同じくらい電子を出しやすい。これは使える、と思いました。ただ、触媒は物質の表面で働くので、まず、ここを徹底的に研究しないといけない。塊の状態なら本来の性質は失われないのですが、割って表面積を増やすと絶縁体に戻ってしまいます」。3年研究して、割っても表面が塊と同じ状態にできる条件を見つけ出し、すぐに触媒の専門家である原さんに相談した。

手ごわい窒素の三重結合を切る

原さんは最初に話を聞いたとき、「正直、これは困ったな」と思ったという。アンモニア合成は触媒の専門家にとっては憧れのテーマの1つだが、結果を出すのは非常に難しい。それがわかっていたので困惑したのだ。ただ、遷移金属の側からの研究はやり尽くされていたが、電子注入に着目したアプローチはなく、「これなら可能性がある」と考えて共同研究に踏み切った。

「ハーバー・ボッシュ法では鉄を触媒にしてきましたが、高温・高圧の条件は基本的に外せなかった。ところが、このC12A7エレクトライドにルテニウムを付着させた触媒は、窒素分子に電子を与える効果がたいへん高く、比較的低温でも窒素分子の三重結合が切れやすくなることがわかりました。また、ルテニウムだけだと水素が触媒表面を覆って反応が邪魔される被毒を避けられませんが、この触媒では水素をエレクトライドが吸収するのでルテニウム上に水素が残らず、被毒が起きないことも突き止めました。これらの働きで、活性化エネルギーが従来の半分で済むとわかったのです。実際に実験で確かめたのが北野さんでした」。

※1 活性化エネルギーとは、化学反応を起こすのに必要なエネルギー。

※2 仕事関数とは、物質表面において1個の電子を無限遠まで取り出すのに必要な最小エネルギー。

窒素化学プラント（ポーランド）

アンモニア合成のハーバー・ボッシュ法

鉄鉱石などを触媒に大気から窒素を取り出し、水素と反応させてアンモニアを合成する方法は、発明したフリッツ・ハーバー（1868-1934）とカール・ボッシュ（1874-1940）の2人のドイツ人科学者の名をとって「ハーバー・ボッシュ法」と呼ばれる。20世紀初頭に生まれたこの合成法は高温・高圧下でメタンから単離した水素と大気中の窒素から、鉄を主体とした触媒を用いて合成し、液体のアンモニアを得ることができる。現在でも工業的なアンモニア合成法の主流である。

これまでの触媒による反応

鉄を主体とした従来の触媒では、高温・高圧下で切断された窒素原子を水素と反応させてアンモニアを得る。

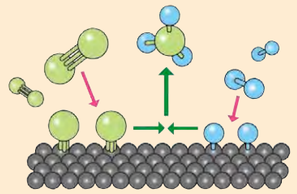
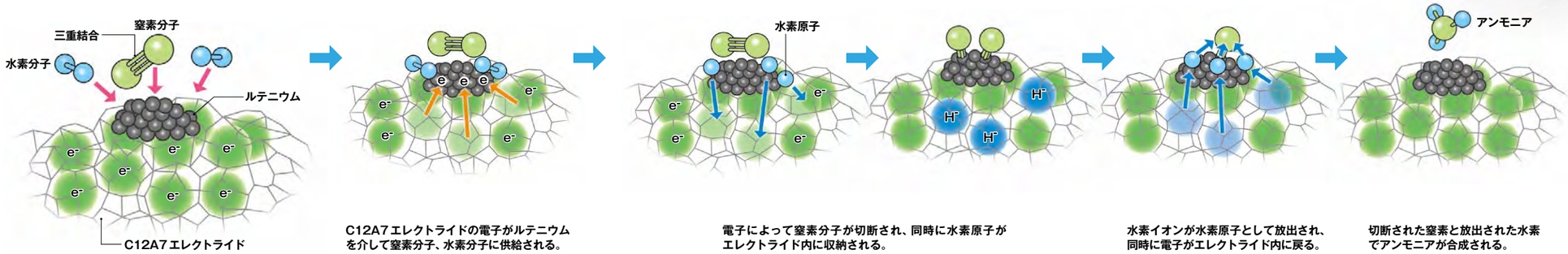


図2　C12A7エレクトライドを使ったアンモニア合成のメカニズム



新しいアンモニア合成のメカニズムは次のようになる。まず、C12A7エレクトライドのかご内の電子がルテニウムを通して窒素分子に供給されて三重結合を切断する。同様に水素分子も切断され、水素イオンとなって空いたかごに取り込まれる。窒素分子の三重結合を切断した電子は、再びエレクトライドのかご内に吸収され、入れ替わりに水素イオンが水素原子として放出され、切断された窒素原子と反応してアンモニアが合成されるのである（図2）。

解析データが示した新触媒の反応メカニズム

ルテニウムを付着させたC12A7エレクトライドの触媒効果のメカニズムを明らかにしたことは、大きな成果だ。通常、触媒には広い表面積が必要だが、C12A7エレクトライドはそれほど広い表面積を形成できない。

北野さんは半信半疑のまま、化学反応の速度を解析して反応のメカニズムを知ることができる速度論解析で、実際の反応速度のデータをとって解析した。すると、それまで知られていた鉄やルテニウム触媒を使ったアンモニア合成とは違うデータが得られた。

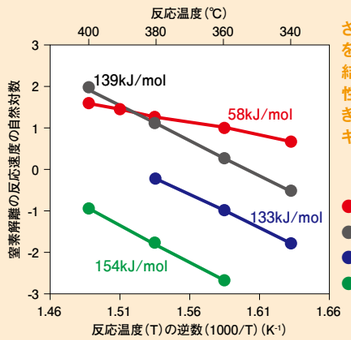
「最初は自分のやり方が間違いだったのでは、とも思ったのですが、何度やり直しても結果は変わりませんでした」。

触媒反応では、窒素の三重結合を切断するのに最も反応時間がかかっていた。一般に化学反応の中で最も時間がかかる反応を「律速段階」というが、活性化エネルギーが高いとそれだけ反応に時間がかかり律速段階になる。これまでは窒素分子の切断が律速段階と考えられていたが、新触媒では窒素分子の切断反応の活性化エネルギーが従来の触媒の半分になった（図3）。

北野さんはさらに、さまざまな温度でのアンモニア合成の活性化エネルギーを解析し、摂氏320度前後を境にして活性化エネルギー（グラフの傾き）が変化していることを突き止めた（図4）。

これは新触媒が電子を放出して窒素分子の三重結合を切断すると同時に、水素原子をイオンとして吸蔵するという形で反応メカニズムが変化し、律速段階が窒素の三重結合の切断からアンモニア合成の窒素ー水素結合に移ったことを表していたのである。

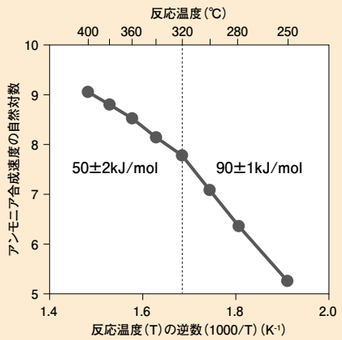
図3　窒素分子切断反応



さまざまな材料にルテニウムを付着させた触媒を用いた結果。グラフ中の数値が活性化エネルギー（グラフの傾きが小さいほど活性化エネルギーが小さい）を表す。

- C12A7エレクトライド
- セシウムを添加したMgO
- 電子を含んでいないC12A7
- カルシウム アルミニウム複合酸化物

図4　温度と活性化エネルギーの関係



東工大の伝統と人脈が発明の力に

ハーバー・ボッシュ法の研究から、電子を注入することが重要であることはわかっていたが、窒素分子の三重結合を簡単に切断でき、しかも水素被毒を受けにくい触媒は100年もの間、生まれてこなかった。

ハーバーとボッシュの時代には既存の物質を触媒に使うしかなかったため、電子注入効果を追求する手立てがなかったからだ。しかし今回は、C12A7エレクトライドによって新触媒を開発できた。物質科学の進展が成果をもたらした。

「基本は物質の力です。画期的な触媒は新物質から生まれる可能性が高い。そして人の力も重要です。東工大には、分野の異なる研究者同士が互いに交流を図りながら研究を進める伝統があります。今回も原さんや北野さんとすぐに共同の研究体制がとれた。触媒の専門家がふらりとアドバイスに立ち寄ってくれたり、古い文献を紹介してくれた。こうした人の力が新しい分野に挑戦するときに非常に大切だと感じました」と細野さんは締めくくった。

新触媒が開く無限の未来

より低温・低圧でアンモニア合成が実用化されると、従来よりもかなり小規模な施設でアンモニアを作ることができる。必要な場所でアンモニアが合成できるため、今までのように沿岸部の大規模工場から内陸の消費地へ運ぶ必要がなくなり、輸送コストも削減できる。アフリカの奥地など本当に肥料が必要な場所に、現地でアンモニアを供給できる。アンモニアは、取り扱いに注意を要する化合物だ。使う現地で小型の設備で合成できればその必要もなくなる。将来、農業の形を大きく変える力を秘めている。

しかし、「この新手法がハーバー・ボッシュ法に取って代わるということではない」と細野さんは断言する。

「大量にアンモニアや窒素化合物を製造するには、やはりハーバー・ボッシュ法が優れています。ハーバー・ボッシュ法を大型コンピューターとすれば、新触媒によるアンモニア合成法はパソコンに相当します。それぞれの用途に応じて使い分けることが重要ですね」。

「研究の面から言えば、窒素の三重結合が容易に切断できたことは大変に大きな成果だと思います。窒素を含む化合物を複雑な工程を経ずに作ることができる可能性が出てきたわけですから。もし水素と窒素と二酸化炭素でいろいろな分子が容易に合成できるようになれば、有機合成の世界が変わるかもしれない。そんな可能性も秘めているのです」。

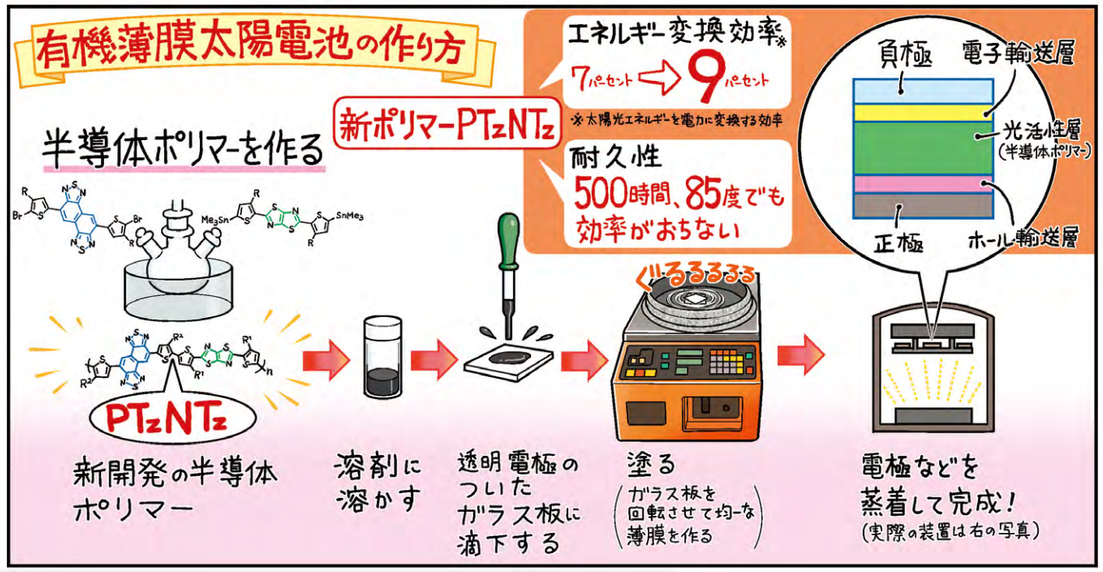
期待の新触媒は合成化学産業に、無限の夢を乗せている。

TEXT：SHIGS　PHOTO：櫻井逸生　編集協力：工藤慶子（JST ACCEL担当）

マンガ家おがちゃんの研究室訪問

塗る太陽電池！

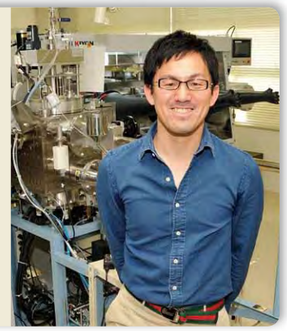
尾坂 格 おさか・いたる
理化学研究所 創発物性科学研究センター
超分子機能化学部門 創発分子機能研究グループ 上級研究員
戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA)
2014年度採択（課題：高効率ポリマー系太陽電池の開発）

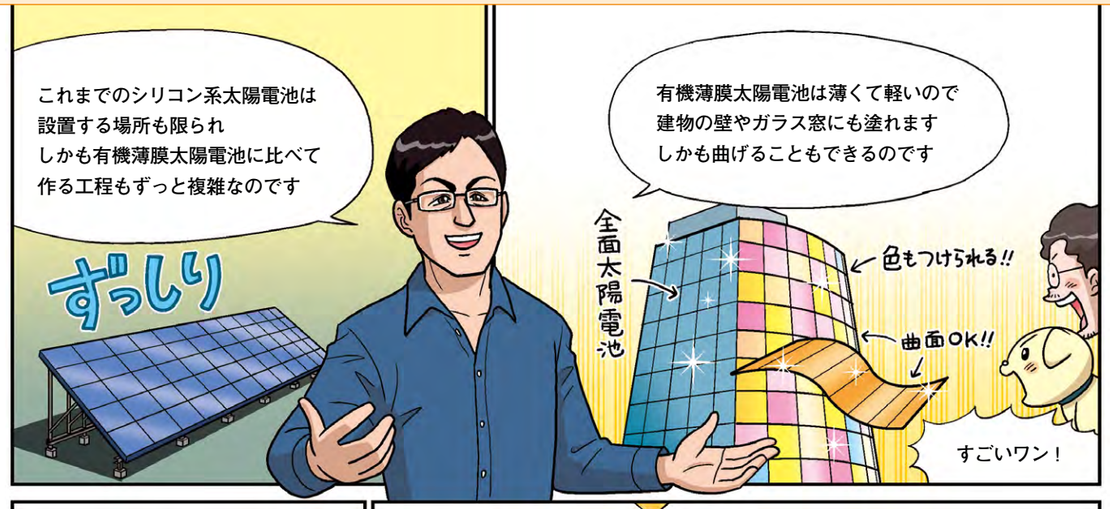


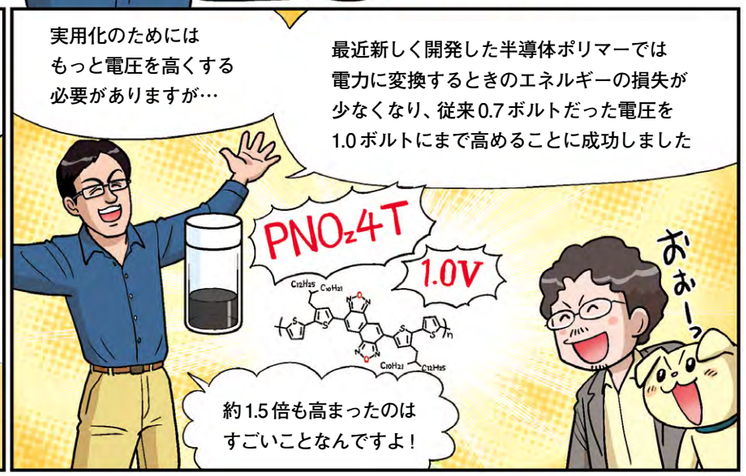
高効率ポリマー系太陽電池の開発

［戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発（ALCA）「太陽電池および太陽エネルギー利用システム」技術領域 2014年度採択］

半導体ポリマーを塗って作る有機薄膜太陽電池は、低コストで環境負荷が少ないプロセスで作製できる。軽量で柔軟な特長を持つ次世代太陽電池として注目される一方、エネルギー変換効率と耐久性の向上が重要な課題となっていた。尾坂上級研究員らは、エネルギー変換効率に加え、耐久性をも向上させる新しい半導体ポリマー「PTzNTz」の開発に成功し、実用化に向けた研究開発の加速が期待される。







手前は実際に作製した太陽電池。後ろの装置で半導体ポリマーを塗り、電極などを蒸着させる。

ILLUSTRATION：おがたたかはる　PHOTO：櫻井逸生　編集協力：有本由弘（JST ALCA担当）

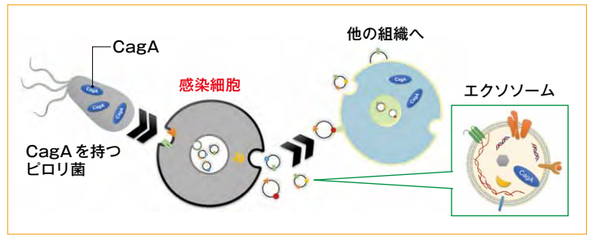
NEWS 01

研究成果 | 戦略的創造研究推進事業 秋吉バイオナノトランスポータープロジェクト

胃だけじゃない？ ピロリ菌の病原たんぱく質を全身に運ぶ小胞を発見

胃潰瘍や胃がんの原因というイメージが強いピロリ菌ですが、最近の研究では心臓や血液、神経など胃以外の病気との関連が報告されています。胃粘膜のみに感染するピロリ菌がどのようにして胃から離れた組織や臓器に影響するのでしょうか。

京都大学大学院工学研究科の下田麻子博士研究員、秋吉一成教授らは、エクソソームと呼ばれる、細胞が分泌する150ナノメートル（ナノは10億分の1）程度の小胞に着目しました。エクソソームは血液や唾液など体液中を移動して、たんぱく質やDNAの情報を細胞から細胞へと運びます。秋吉教授らは、ピロリ菌の病原たんぱく質もエクソソームによって他の組織や臓器へと運ばれるのではないかと考えました。



ピロリ菌表面のトゲから細胞内に分泌されたCagAは、エクソソームとして感染細胞外へ放出されて血液中を移動し、胃以外の組織や臓器へと運ばれると考えられる。

胃がんを始めとする胃粘膜の病気を発症させるのは、病原たんぱく質CagA（キャグエー）を持つピロリ菌です。日本人が感染しているピロリ菌のほとんどはCagAを持っています。ピロリ菌に感染した胃がん患者の血清から集めたエクソソーム中のたんぱく質を調べたところ、CagAが含まれていました。さらに人間の胃がん上皮培養細胞から分泌されたCagAを含むエクソソームを他の細胞に加えると、CagAが細胞内に入ることで引き起こされる細胞運動能の高まりや細胞の形態変化が見られました。

エクソソームが生体由来の運び屋としてCagAを全身に送る機能が明らかとなり、胃に感染したピロリ菌が胃以外で疾患を引き起こすメカニズムの解明の第一歩となることが期待されます。

NEWS 02

話　題 | ライフサイエンスデータベース統合推進事業「NBDC RDFポータル」

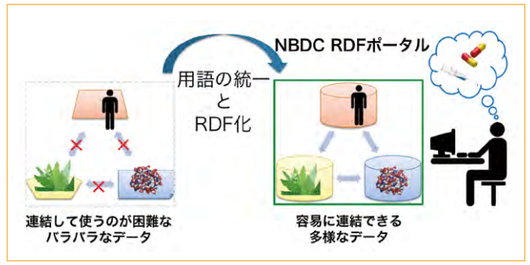
生命科学分野のデータをより使いやすく

研究者にとって、実験をするのと同じくらい重要なことは何だと思いますか。それは、情報を活用することです。たんぱく質の立体構造やがんのゲノムなどの貴重な情報が詰め込まれたデータベースは、生命科学分野の研究には欠かせない情報基盤であり、研究の最前線です。

生命科学分野にはさまざまなデータベースがあり、それぞれが別々の用語や形式で記述されています。まちまちの情報を集約して誰もが使えるように関連付けるには、極めて高度な専門知識が必要です。手間も時間もかかります。こうした問題解決に、データを記述するに当たってRDF（Resource Description Framework）形式を利用しようという動きが国内外で進んでいます。RDF形式はインターネット上にあふれる情報を活用するためにWWWコンソーシアムが提案した形式です。データの意味をふまえた検索と自動処理ができるようになると見込まれています。

JSTバイオサイエンスデータベースセンター（NBDC）と情報・システム研究機構ライフサイエンス統合データベースセンター（DBCLS）は、多くの研究機関がRDF形式に変換したさまざまなデータベースを集積して公開するポータルサイトを開設しました。このサイトは、オープンサイエンスを推進し、日本の先進的な取り組みの国際的な理解を高めるものであり、今後も新たなRDFデータの登録を進めていく予定です。

各国で公開されているデータを簡単に参照したり連結したりできるようになり、新薬の開発や患者1人1人に合わせた医療など、多種多様なデータを必要とする研究に貢献できます。また、RDF形式のデータはコンピューターが理解（処理）しやすくなっているので、人工知能技術を応用すれば、これまで解き明かせなかったような生命科学の問題解明にもつながることが期待されます。



NBDC RDF ポータルの概要
さまざまな生命科学分野のデータを、用語を統一しRDF形式に変換することで、簡単に参照したり連結したりできるようになり、多種多様なデータを必要とする研究に貢献できる。NBDC RDFポータルではこのようなRDFデータを集積し公開している。（関連記事：JSTnews2014年12月号『生命科学データベースを未来の産業革命に』）

- NBDC RDFポータル http://integbio.jp/rdf/
- DBCLS RDFガイドライン http://wiki.lifesciencedb.jp/mw/RDFizingDatabaseGuideline

NEWS 03

イベント | 日本科学未来館 企画展「GAME ON ～ゲームってなんでおもしろい？～」

ゲームの教育・スポーツへの応用 懐かしのゲーム体験などが満載

コンピューターゲームは、1970年代に大ブームを巻き起こした「スペースインベーダー」が火付け役となり、家庭用ゲーム機から、インターネットで動作するオンラインゲームへと、さまざまに進化しました。近年のスマートフォンの普及を追い風に、子どもから大人まで、気軽に楽しめるようになっています。

日本科学未来館（東京・お台場）は、3月2日（水）から5月30日（月）まで、企画展「GAME ON ～ゲームってなんでおもしろい?～」を開催します。世界中のエンターテインメントを変えたコンピューターゲームの進化を一望できます。2002年にイギリスから始まり、世界中を巡回し、200万人以上を魅了した展覧会が日本に初上陸します。

貴重なマシンが勢ぞろいするアーケードゲームのほか、家庭用ゲーム機やブラウザーゲーム、スマホゲームまで、「スペースインベーダー」や「パックマン」、「パラッパラッパー」や「ヘイロー マスターチーフコレクション」などゲーム先進国・日本の話題になった作品の数々を集め、実際に遊ぶことができます。

今年発売が予定されているバーチャルリアリティ（VR）システムの「PlayStation®VR（ヴィーアール）」も設置し、少し先のゲームの世界を先行体験できます。

また、日本開催の独自企画として、「なんで、ハマってしまうのか?」「開発者たちはどんな工夫をしているのか?」など、各界の研究者や文化人、開発者の声を展示します。

ポイントやスコア、アイテムの獲得で利用者同士の競争意識を高めるゲーム的手法が、教育、スポーツ、コミュニティの形成など、実社会にさまざまな形で活用され始めています。なぜ、ゲームが面白いのかを体験しながら、ゲームの未来について考えましょう。

NEWS 04

話　題 | 国際科学技術共同研究推進事業 戦略的国際共同研究プログラム 日本・アジア青少年サイエンス交流計画　さくらサイエンスプラン

インドとの協力関係は新たなステージへ

新興国の中でも躍進し続けているのがインドです。この成長を支える要因の1つが高い科学技術水準です。科学技術分野で同国との連携を強化、戦略的な共同研究を進める事は、日本、インドの2国間のみならず、さまざまな地球規模の課題解決につながると期待されます。

昨年の12月11日（金）から3日間、安倍内閣総理大臣とインドのモディ首相の首脳会議がインドで行われ、このタイミングに合わせてJSTの濵口道成理事長らがインドを訪問しました。安倍総理が参加した日印イノベーションセミナーでは、濵口理事長が、科学技術分野における両国の連携の必要性を訴えました。

JSTはインド科学技術省との連携を強化するため、共同研究の実施、共同研究拠点の設置などの基本合意書への署名式を行いました。ICT分野の日・印の象徴的な研究拠点構築につながる共同研究を開始するため、今月から公募を開始する予定です。

JSTでは、インド、中国を含むアジア地域から高校生や大学生、大学院生、ポストドクターの研究者ら、若手を短期で招き、日本の科学技術に興味を持ってもらう「さくらサイエンスプラン」を行っています。ここに参加したインドの高校生と、濵口理事長、戸谷文部科学審議官の懇談会が持たれ、高校生から、「将来は日本に留学し学位を取得したい」などと口々に憧れの声が出ました。

昨年11月にはJSTの現地連絡拠点としてインドの首都・ニューデリーにリエゾンオフィスを新設しました。これを機に、両国間の共同研究、人材交流を加速していきます。

合意書への署名後、握手を交わすインド科学技術省シャルマ長官と濵口理事長。

インドの高校生から「日本語を学びたい」などの期待の声が聞かれた。

さきがける
科学人 Vol.46

地球を救う「決めの一手」を見極める

Chen I-Ching
陳 怡靜
チン イーチン

科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター(LCS)
研究員

Profile

1985年台湾台南市生まれ。2007年、台湾国立成功大学環境工程学系卒業。国際学会やワークショップでの日本人研究者との熱い議論に感動し、日本への留学を決意。14年に東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、博士(工学)。14年より現職。趣味は楽器演奏や旧跡散策。

PHOTO：田中昭俊（麹町企画）

公害に心を痛め、憧れの日本へ

台湾でも公害問題が起きていることをご存知ですか? 私が高校生の頃、規模はさほど大きくはありませんが、川が濁り嫌な臭いが漂っていました。そんな故郷の自然を回復させたいと、環境工学分野をリードする台湾国立成功大学に入ったのが私の出発点です。大学では、水処理や廃棄物処理など汚れた「後」の始末について、講義を受けました。その考えが福島康裕先生の講義を受けて一変しました。先生が紹介した「ライフサイクルアセスメント(LCA)」は、製造から廃棄まで製品の「一生」を扱っていたのです。

例えば、エコバッグとビニール袋、どちらがエコだと思いますか? エコバッグの方が何度も使えて、一見エコです。しかし製造工程で多くの二酸化炭素を排出するので、物にもよりますが、最低15回以上は使わないとエコにはなりません。

成功大学の福島研究室に飛び込み、学部と修士の3年間を過ごしました。初めて参加した日本のLCA学会の前、福島先生と研究室メンバーで研究室に泊まり込み、徹夜で準備をしました。学会後、ヘトヘトになっている私たちを尻目に、福島先生が流暢な英語でさまざまな国の研究者と議論を楽しんでいる姿を見て、「こういう研究者になりたい!」と環境工学の分野でトップを走る日本での研究を決意しました。

台湾で修士論文を書きながら、東京大学の博士課程入試の準備をしました。希望した化学システム工学専攻はこれまでの環境工学とは畑が違い、ゼロからの学び直しでした。自分でもよく乗り越えられたと思います。それほど日本での研究生活への憧れが強かったのです。

博士課程に進んだ直後、東日本大震災が起き、エネルギー技術をどう組み合わせれば二酸化炭素の排出とコストが抑えられるかの比較研究に没頭しました。LCSに移ってまだ日が浅いですが、現在は蓄電池システムを比較する研究を進めています。

恩師の福島先生と。

バンド演奏で心を躍らす

新しい世界での「人のつながり」に強い力を感じます。ホームシックになったことなどありません。台湾に帰るのは1年に1度ほど。先輩や、学会で知り合った日本の学生たちとの交流に支えられました。社会人2年目にはボーカルのレッスンに通い始めました。

今の一番の楽しみは、音楽サークルの仲間とのバンド演奏です。オリジナル曲を中心に、ステージでライトを浴びながら、友人たちと歌いキーボードを弾く時には、心が躍ります。違う世界に飛び込むのは本当に楽しい。うまくいかない時もある。でも同じところに留まらず外に出てみると思わぬ世界が広がっています。

学会でも、分野の違う企業の方を見つけては、つながりを求めて話しかけます。研究成果を、生活に役立てたいからです。二酸化炭素排出量もコストも劇的に下げる、製造工程の「ホットスポット」をLCAの手法で見つけ出し、工程を改善すれば環境への配慮を社会にアピールでき、企業にとっても有益なはずです。

JSTは情報を発信しやすい組織ですね。LCSの成果が、ALCA(先端的低炭素化技術開発)プログラムの支援テーマに生かされた例もあります。新たな人とのつながりで研究の出口を探すことは、環境改善への近道です。誰もが、故郷の自然も、そして地球全体も傷つけずに発展し続ける未来を望んでいるはずですから。

(執筆：松山桃世 JST 広報課)

低炭素社会の実現に向けた蓄電池システム評価

蓄電池が普及するには、コストや環境負荷の低下と、電池性能の向上を両立する技術開発が必要です。これらを達成するための要因や効果を定量的に分析し、将来必要となる具体的な研究課題を明確にしようとしています。

昨年末のライブステージにて。

リサイクル適性Ⓐ
この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。
R70 古紙パルプ配合率70%再生紙を使用

JSTnews
February 2016

発行日／平成28年2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　ホームページ／http://www.jst.go.jp
JSTnews／http://www.jst.go.jp/pr/jst-news/

最新号・バックナンバー