

# Energy Outlook

International Institute for Carbon-Neutral Energy Research

## 炭素のサイクルから 水素のサイクルへ

～すぐそこまで来た  
近未来エネルギーへの転換を加速する～

### Special Interview

一橋大学 特任教授  
兼 資源エネルギーPJディレクター  
電気通信大学 客員教授  
RIETI コンサルティングフェロー

**安藤 晴彦**

*Haruhiko Ando*

九州大学カーボンニュートラル・  
エネルギー国際研究所  
水素適合材料研究部門 主任研究者 教授

**杉村 丈一**

*Joichi Sugimura*

# 炭素のサイクルから水素のサイクルへ

～すぐそこまで来た近未来エネルギーへの転換を加速する～

1859年、アメリカ・ペンシルバニア州で石油が掘り当てられた。これ以降、人類と石油の蜜月時代が始まる。その後約150年間、我々は石油から膨大な恩恵を受けてきたけれども石油は諸刃の剣。いま世界に、資源枯渇問題と地球温暖化問題を突きつけている。近未来のクリーンなエネルギー媒体、「水素」への転換は、どう進めれば良いのだろうか。

## Haruhiko Ando

安藤 晴彦

一橋大学 特任教授 兼 資源エネルギーPJディレクター  
電気通信大学 客員教授  
RIETI コンサルティングフェロー



### 燃料電池や水素に関わるサムライが集まる梁山泊

杉村丈一（以下・杉村） 安藤先生が燃料電池や水素に関わることになった、そもそもそのきっかけは何だったのでしょうか。

安藤晴彦（以下・安藤） 1984年頃、大学生時代に書店の本棚で『燃料電池』を見かけて読んだのが最初の出会いです。面白い技術だと思いました。

杉村 私は十代で経験したオイルショックにより、エネルギーに対する関心が芽生えました。1974年、サンシャイン計画がスタートした時

には、まだ学生でしたが太陽光発電や水素に興味を持ちました。

安藤 仕事として燃料電池と関わるようになったのは2003年からです。資源エネルギー庁の新設の企画官に就任し、燃料電池と国際戦略の担当となりました。ブッシュ大統領が年頭の一般教書演説で「クリーンな水素燃料電池自動車の開発で世界の先頭に立つ」と打ち上げたのを受けて、日本も早急な対応を迫られたのです。

杉村 そこで材料としての水素研究を進める施設造りに奔走されたのですね。

安藤 何としても世界で唯一無二の

水素先端材料の研究機関を創るんだと。これが後の産業技術総合研究所水素材料先端科学研究センター（現：九州大学水素材料先端科学研究センター（HYDROGENIUS））となるわけですが、そのためには日本でも水素研究が最も進んでいた九州大学のお力が欠かせないと考えました。

杉村 茨城県つくば市の産業総合技術研究所におられた秋葉悦男先生にも、安藤さんが勧誘に行かれたと伺いました。

安藤 大雪の日に伺ってやんわりと断られたのに、いつの間にかICNERにいらっしやる（微笑）。燃料電池や水素に熱い志を持つサムライ

研究者が自然に集まってくる場、それがFCNERだと納得しました。

## 今そこにある

### エネルギー危機と

### 救世主としての水素

杉村 いよいよ2015年から燃料電池自動車市場投入されます。これに備えて、今年度から水素ステーションの整備が本格化し、

水素時代の幕開けを迎えるわけですが、改めて水素エネルギーの位置づけについてお聞かせください。

安藤 水素はクリーンな近未来の

エネルギー媒体として、極めて重要なポジションにあります。日本ではあまり知られていませんが、

原油輸入の生命線となるホルムズ海峡は、イラン問題で危機的状況にあります。万一、ここが封鎖されれば日本への原油・天然ガス

輸送がほぼストップするでしょう。原子力発電所も停止している現状を踏まえるなら、たちまち日本中が計画停電に陥りかねません。

杉村 そこまで切羽詰まった状況だとは、ほとんど認識されていませんね。それだけでなく発電用の燃料費高騰で、日本の貿易収支は赤字になっています。石油や天然ガスに替わるエネルギー開発は、日本に

とって喫緊の課題です。

安藤 エネルギーの安全保障を考える時、最も重要な論点は多様性の確保です。例えば、ドイツのメルケル首相が進めている「デザイナテック計画」があります。

杉村 北アフリカのサハラ砂漠で太陽光発電を行い、その電力をドイツまで引っ張ってくる壮大なプランですね。

安藤 欧州と北アフリカが一体となって実に52兆円もの投資を企てています。しかも環境先進国でありながら、その主目的はCO<sub>2</sub>削減だけではない。ロシアに依存する天然ガスの途絶に対するエネルギーセキュリティ確保こそが第一で、

第二が大型投資による欧州と北アフリカ経済の活性化、第三が水資源の創出で、CO<sub>2</sub>削減は最後です。

## 求められる

### 炭素のサイクルから

### 水素のサイクルへの転換

杉村 エネルギーセキュリティ上、水素は間違いなくキーファクターです。水素の入手方法については、どうお考えでしょうか。

安藤 画期的技術を日本企業が開発済みです。触媒を使って水素をトルエンに添加し、通常のタンカーで常温・常圧で運べます。デモプラントを既に自力で作作り、東京湾にクリーンな水素発電所を建設します。当面は中東や東南アジアの余剰水素を活用しますが、世界中の膨大な未活用水力・風力からの「カーボンフリー水素」が視野に入ります。

杉村 ただ、水素普及を進める上では、まだいくつか課題があります。水素を貯蔵するタンクや配管などのインフラ整備をどう進めていくか。我々の研究テーマの一つ、金属材料の水素脆化など悩ましい問題があります。

Joichi Sugimura

杉村 丈一

九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所  
水素適合材料研究部門 主任研究者 教授

## Special Interview

安藤 ノーベル物理学賞受賞者でもあるスティーブン・チュー前米国エネルギー省長官は、着任当初、水素社会の実現には製造、貯蔵、供給インフラ、燃料電池という4つの課題を同時解決しなければならず、「大使だってミラクルは3回まで」と否定的でした。ご退任前には少し前向きに変わられたようですが。

杉村 水素脆化のほか、シールなどの部品の材料特性やトライボロジー、水素の物性自体なども十分に解明されていないとは言えないのが現状です。

安藤 九州大学のご奮闘に大いに期待しております。水素問題に関するあらゆる研究領域に横断的かつ総合的に取り組む世界で唯一無二のラボが、ここ九州大学にあります。燃料電池と水素の問題は、日本のためではなく、人類の未来のために解決すべき重要課題だと考えています。

## 今後のICNERを 求める

杉村 今後、燃料電池を一般家庭に普及させていくには、どんな課題があるでしょうか。

安藤 利便性、経済性を語る前に、まず安全性です。安全性が確保されない技術を、一般に普及させてはならない。そこで考えなければならぬのは、確保すべき安全性のレベルです。普及のためには経済合理性も併せて考慮す

ることが必要です。安全性に関する合理的な線引が求められます。

杉村 安全性に関する国際的な基準が必要になるわけですが、そこがごとの思惑が絡んでくると話がややこしくなりますね。

安藤 国際標準をまとめる際にはサイエンティストによる世界共通の理解がベースとなります。九州大学は、既に世界のコアとして活躍されています。

杉村 国レベルの価値観の違いをクリアするためにサイエンスによる基準を予め用意しておく。その国際標準の礎を作る世界的機関として、まずHYDROGENIUSを構想された。

そして、材料問題を研究するHYDROGENIUSに加えて、低炭素社会実現に向けた取り組みを行うI<sup>2</sup>CNERも具現化されました。

安藤 日本の規制レベルが世界と比べて高すぎるとい話もあります。科学の目で合意した世界的な共通理解があれば、いずれそのラインに向けた合理化が進むはず。そうなれば日本企業が世界で活躍する機会も一気に広がるでしょう。

杉村 水素に対するネガティブなイメージを払拭することも、私たち科学者の義務ですね。

安藤 安心は情緒的な問題、安全は科学的な問題であり、この2つは切り離して議論する必要があります。

福岡県の麻生渡前知事がリードされ、小川洋知事が引き継がれた「福岡水素戦略(H<sub>2</sub>-Lifeプロジェクト)」は、水素の安全性を訴求する素晴らしいプロモーションだと思います。

杉村 一般家庭への普及を考えれば、エネファームの存在も大きいですね。まだ使ったこともない人に、水素は安全だから安心しなさいといっても説得力がありません。けれども隣の家がエネファームを使っているならば、安心できます。

安藤 エネファームには、産業界も経済産業省も力を入れており、8万台までの普及は見込まれています。こうした普及活動の一方で、I<sup>2</sup>CNERではぜひ最先端研究を強力に推進していただきたいのです。水素脆性、き裂進展、延性破壊などの問題を更に解明するには、量子力学まで踏み込む必要も出てくるでしょう。

最先端の水素研究に関して、引き続き世界をリードしていただきたいです。そのためにも若い研究者を、どんどん世界に送り出したいと考えています。

杉村 未来を創るのは、間違いなく若者です。I<sup>2</sup>CNERには海外から着任している研究者も多く、コスモポリタンな雰囲気にかけています。恵まれた環境を活かして、世界で勝負できる研究者を育てること、これが我々の義務と心得ています。

## 杉村 丈一

工学博士  
九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所  
水素適合材料研究部門 主任研究者 教授  
九州大学水素材料先端科学研究センター長

### Profile

1981年東京大学工学部航空学科卒業、1983年東京大学大学院工学系研究科航空学専門課程修士課程修了、1986年東京大学大学院工学系研究科航空学専門課程博士課程修了後、九州大学工学部講師、1988年同助教授、2004年同大学院工学研究科教授。2006年から、(独)産業技術総合研究所水素材料先端科学研究センター(HYDROGENIUS)の水素トライボロジー研究チーム長を兼務。2010年九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所(I<sup>2</sup>CNER)主任研究者を兼務。2013年から現職。

## 安藤 晴彦

一橋大学 特任教授  
兼資源エネルギーPJディレクター  
電気通信大学 客員教授  
RIETI コンサルティングフェロー

### Profile

1985年東京大学法学部卒業後、通産省入省。2001年内閣府企画官(経済財政)、2003年資源エネルギー庁企画官(国際戦略・燃料電池担当)、2004年燃料電池推進室長、2005年新エネルギー対策課長、2008年内閣府参事官(科学技術)、2010年内閣参事官(知的財産)などを経て、2012年から現職。



## 熱活性化遅延蛍光を利用した 高効率有機発光ダイオードの 有望な動作安定性

Hajime Nakanotani, Kensuke Masui, Junichi Nishide, Takumi Shibata, Chihaya Adachi  
Scientific Reports, 3, 2127, P.1-5 (2013) DOI: 10.1038/srep02127

**有**機発光ダイオード (OLED) は、高い EL 効率、フレキシビリティ、低コスト製造が見込まれることから、次世代ディスプレイや照明用途として魅力的な発光デバイスである。最近、熱活性化遅延蛍光 (TADF) 過程により発光する材料を用いて高効率な OLED を実現する新しい手段が実証された。しかし、TADF 過程で発光するデバイスに信頼性があるかどうかは不明であった。今回、我々は、キャリア再結合位置を制御することによって、トリス (2-フェニルピリジナト) イリジウム (III) を用いた従来のリン光 OLED に匹敵する耐久寿命が得られることを実証した。この結果は、TADF が電気励起下において本質的に安定であることを示しており、今後、周囲材料を最適化していくことによって、デバイスの信頼性はさらに向上すると期待される。

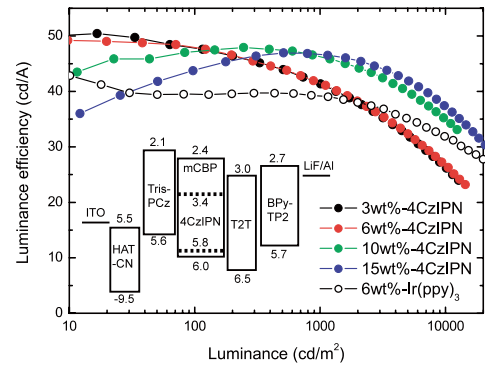


図 1. TADF-OLED の発光特性

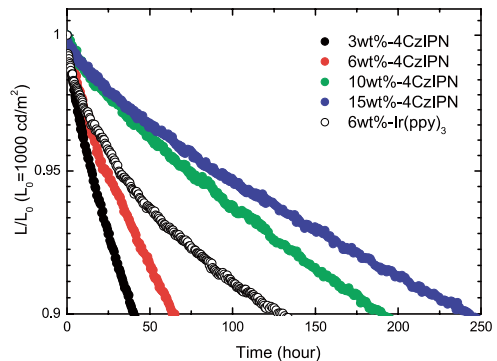


図 2. TADF-OLED の輝度減衰特性

## 高圧水素ガス用 耐水素透過皮膜

Junichiro Yamabe, Saburo Matsuoka, Yukitaka Murakami  
International Journal of Hydrogen Energy, 38, P.10141-10154(2013)  
DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.05.152

**独**自の配合を施したアルミ合金を用いて、アルミ系二層皮膜 (アルミナ / Fe-Al 合金) とアルミ系三層皮膜 (アルミナ / アルミニウム / Fe-Al 合金) を基材 (SUS304) の全面に形成した。皮膜試験片を圧力 10 ~ 100 MPa、温度 270 °C の水素ガス中に 200 時間曝露し、皮膜の耐水素侵入特性を調査した。アルミ系二層皮膜では、水素ガス圧力の増加に伴い、皮膜の耐水素侵入特性は低下した。これに対して、アルミ系三層皮膜では、圧力 10 ~ 100 MPa において、優れた耐水素侵入特性を示した。

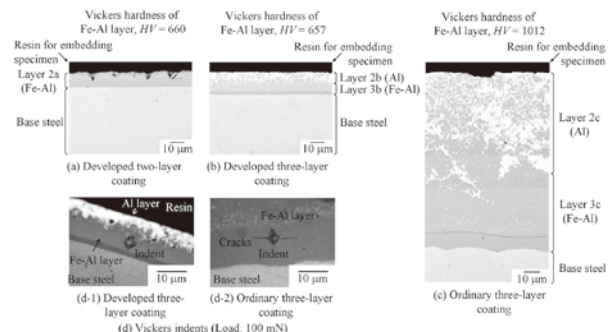


図 1. 皮膜構造とビッカース圧痕の光学顕微鏡写真 (基材: SUS304)。アルミナ層は薄い (~1 nm) ため、光学顕微鏡では観察できない。純アルミニウムを用いた皮膜と比べて、独自の配合を施した皮膜は薄く、皮膜を構成する Fe-Al 合金層の韌性が高い。

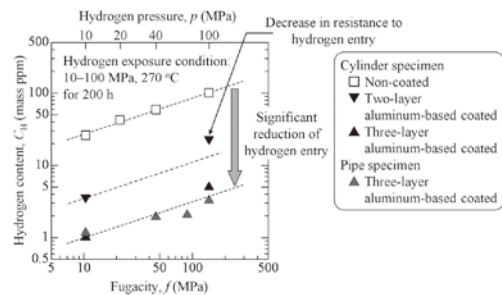


図 2. 水素侵入量 ( $C_H$ ) とフガシティー ( $f$ ) の関係。アルミ系二層皮膜とアルミ系三層皮膜を全面に付与した円柱試験片 (基材: SUS304) とパイプ試験片 (基材: SUS304) を圧力 10 ~ 100 MPa、温度 270 °C の水素ガス中に 200 時間曝露し、皮膜の耐水素侵入特性を調査した。

## 化学的膨張と ホスト陽イオン半径に対する依存性

Dario Marrocchelli, Sean R. Bishop, John Kilner

J. Mater. Chem. A, 1, P.7673–7680(2013) DOI: 10.1039/c3ta11020f

**電** 極の格子欠陥（化学的膨張）は、触媒作用を利用している固体酸化物形燃料電池（SOFC）の電極および酸素吸蔵材のようなエネルギー関連材料の破壊の原因になりうる。我々は、酸素欠陥の周囲の緩和パターン（図 1）における蛍石型立方晶構造の酸化物によるホスト陽イオン・イオン半径（ $r_h$ ）の機能を調べた（図 2）。計算的アプローチにより、酸素空孔周辺の格子緩和は、陽イオンサイズに著しく依存することを示した。空孔緩和が、酸素イオン伝導性におよぼすインパクトについて考察した。

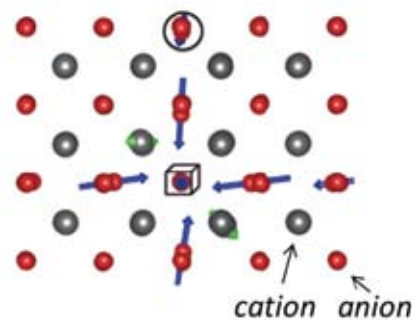


図 1. ZrO<sub>2</sub>における空孔周囲のイオン緩和

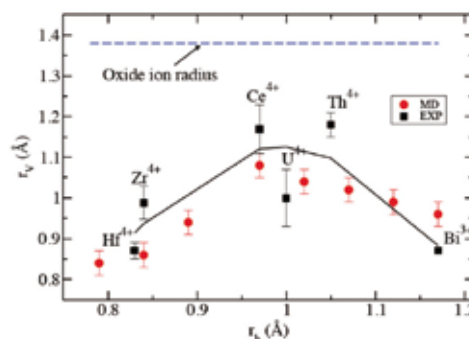


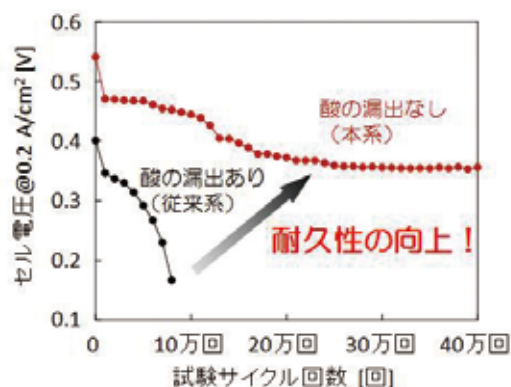
図 2. 酸素空孔半径が Ce<sup>4+</sup>の近くで最大

## ポリビニルホスホン酸を ドーブしたポリベンズイミダゾールからなる 超高耐久性の高温型固体高分子形燃料電池開発

Mohamed R. Berber, Tsuyohiko Fujigaya, Kazunari Sasaki, Naotoshi Nakashima

SCIENTIFIC REPORTS 3 : 1764 P1-7(2013) DOI: 10.1038/srep01764

**燃** 料電池の低コスト化のために、高温・無加湿運転が必要である。ポリベンズイミダゾール（PBI）にリン酸を含浸した電解質は高温無加湿でも水素イオンを輸送するため有望であるが、液体リン酸の漏出により劣化が生じる。そこで、リン酸に替えて固体のポリビニルホスホン酸を導入した新規電極触媒および電解質膜を開発し、リン酸使用時より飛躍的な耐久性向上を実現した。現行触媒を使った燃料電池と比較し、100 倍以上の耐久性を達成した。



開発した燃料電池の耐久テスト結果。  
(赤) ポリビニルホスホン酸を用いた燃料電池、(黒) リン酸を用いた燃料電池。

## メタルボロハイドライドの水素再吸蔵特性に関する比較研究

Hai-Wen Li, Etsuo Akiba, Shin-ichi Orimo

Journal of Alloys and Compounds, in press (2013) DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.03.264

**高** 密度水素貯蔵材料として期待される  $Mg(BH_4)_2$  と  $Ca(BH_4)_2$  において、40 MPa の水素を用いた水素再吸蔵特性の比較を実施した。473 K の比較的低い水素再吸蔵温度でも  $Mg(BH_4)_2$  の生成が確認され、再吸蔵温度の上昇に伴い水素再吸蔵量が増加し、673 K で最大値 (7.6 質量%、51% の  $Mg(BH_4)_2$  に相当) となった。一方、 $Ca(BH_4)_2$  では、90% 以上の水素再吸蔵量が確認され、 $Mg(BH_4)_2$  より優れた水素再吸蔵特性を示した。両者の水素放出・再吸蔵特性の比較から、水素放出生成物の制御が再吸蔵特性を向上させるために重要なアプローチであると示唆される。

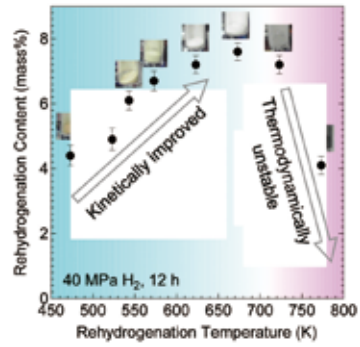


図1.  $Mg(BH_4)_2$  における水素再吸蔵量の温度依存性

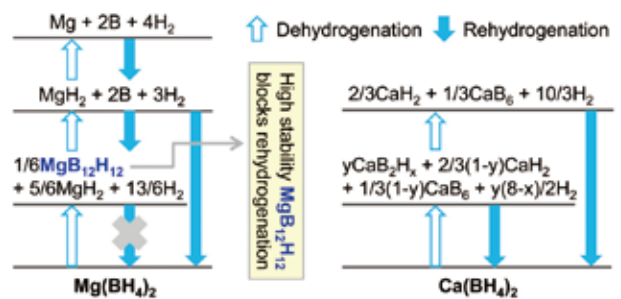


図2.  $Mg(BH_4)_2$  および  $Ca(BH_4)_2$  の水素放出・再吸蔵反応

## 海底地震計データへの波形トモグラフィの適用：高精度化に向けた手法開発

R. Kamei, R. G. Pratt and T. Tsuji

Geophys. J. Int., 194, P.1250–1280(2013) DOI: 10.1093/gji/ggt165

**圧** 入  $CO_2$  をモニタリングする際には、地下の弾性波速度の変化を利用することが有効であることから、弾性波速度を高解像度に推定することが求められている。我々は波形トモグラフィとよばれる手法を改良することにより、深部の弾性波速度を超高解像度に推定することを可能にした。本手法を南海トラフの海底地震計データに適用した結果、深部地震断層周辺の弾性波速度構造を高精度に推定することに成功した。推定された弾性波速度構造から、深部地震断層やプレート境界の位置が初めて明らかになり、これまでの巨大地震断層の解釈が見直された。

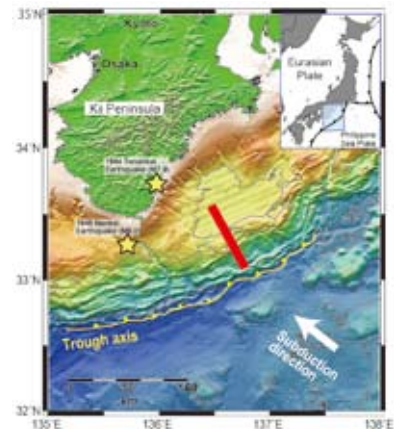


図1. 地震探査データの位置

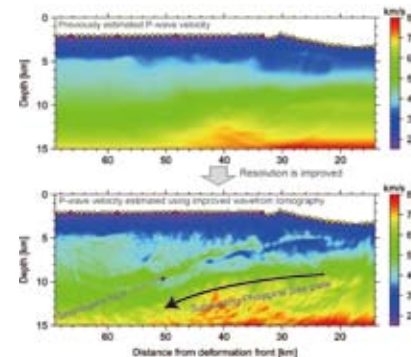


図2. これまでの弾性波速度(上)と本研究で推定した弾性波速度(下)

Event  
02

## Catalytic Concepts for Energy

2013年9月13日(金)、米国イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校において I<sup>2</sup>CNER サテライトが主催した「Catalytic Concepts for Energy」を開催しました。このシンポジウムは、触媒を利用したエネルギーについて、最新の研究成果を発表することを目的としており、英国オックスフォード大学 Fraser Armstrong 教授の基調講演をはじめ、米国内外の著名な研究者が講演しました。I<sup>2</sup>CNER からは中嶋直敏教授(燃料電池研究部門主任研究者)、Aleksandar Staykov 助教(水素製造研究部門)、松本崇弘助教(触媒の物質変換研究部門)が参加し、I<sup>2</sup>CNER での研究実績を発表しました。参加した50名以上の研究者・学生は、活発な質疑応答、意見交換を行いました。

Event  
01International Symposium  
on Innovative Materials for Processes  
in Energy Systems (IMPRES) 2013

2013年9月4日(水)から9月6日(金)の3日間、カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所(I<sup>2</sup>CNER)において「International Symposium on Innovative Materials for Processes in Energy Systems (IMPRES) 2013」が開催されました。このシンポジウムは、エネルギー変換における多相プロセスの様々な側面に着目し、研究分野を超えた活発な意見・アイデアの交換を促進することを目的として開催されています。IMPRESは、2007年に京都、2010年のシンガポールに続き、今回で3度目の開催となりました。実行委員長を高田保之教授(副所長、熱科学研究部門長)が務め、各分科会・ポスターセッション等を催しました。180名以上の国内外の研究者・学生が参加し、大盛況のうちに閉会しました。

第67回(平成24年度)  
日本セラミックス協会学術賞

石原 達己 教授

(副所長 水素製造研究部門長 主任研究者)

「ペロブスカイト類縁化合物のイオン伝導性と燃料電池への応用」の研究成果が、セラミックスの科学・技術に関する貴重な研究であり、その業績が特に優秀であるとして、学術賞を受賞しました。

## Awards

第10回  
本多フロンティア賞

堀田 善治 教授

(水素貯蔵研究部門 主任研究者)

「巨大ひずみ加工による高性能材料の創製」の研究成果が、金属材料などの無機材料、有機材料及びこれらの複合材料の分野で学術面・技術面において画期的な発見・発明を行ったとして、本多フロンティア賞を受賞しました。

第39回(平成24年度)  
繊維学会学会賞

田中 敬二 教授

(水素製造研究部門)

「固体界面における高分子の凝集状態と熱運動特性に関する研究」の研究成果が、繊維科学において独創的で優秀な研究であり、今後の研究の発展が期待されるとして、学会賞を受賞しました。

2012-2013  
Hydrogen Student Design  
Contest Grand Prize

木村 誠一郎 ポスドク研究員

(エネルギーアナリシス研究部門)

本学大学院工学府水素エネルギーシステム専攻の修士課程の学生が、Hydrogen Education Foundation が主催する Hydrogen Student Design Contest で Grand Prize (最優秀賞)を受賞しました。木村ポスドク研究員はアドバイザーとして参画し、チームの受賞に貢献しました。

日本物理探査学会  
奨励賞

辻 健 准教授

(CO.貯留研究部門長 主任研究者)

日本物理探査学会の会誌に発表した「Global optimization by simulated annealing for common reflection surface stacking and its application to low-fold marine data in southwest Japan」が、若手会員の論文等の中でも特に今後の研究成果が期待されるとして、奨励賞を受賞しました。