

Energy Outlook

International Institute for Carbon-Neutral Energy Research

MAY
2014

燃料電池自動車の 展望と課題

～ 水素エネルギー社会実現への舵取り～

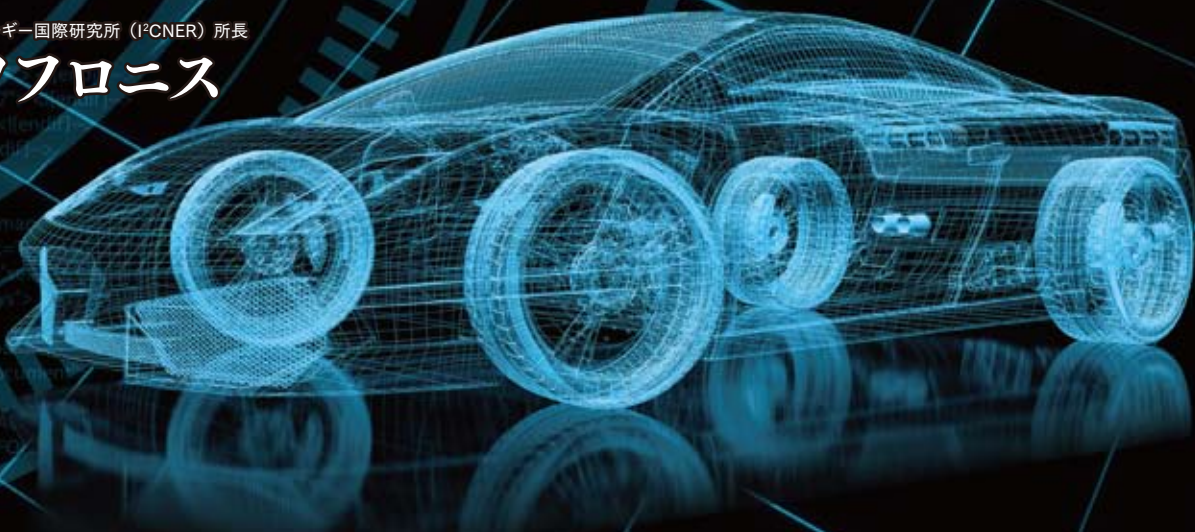
Special Interview

九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (I²CNER) 所長

ペトロス・ソフロニス

トヨタ自動車株式会社
技術統括部 主査

広瀬 雄彦



ペトロス・ソフロニス(以下、ソフロニス)

トヨタは1997年にプリウスを発表し、2010年には世界市場を席巻しました。燃料電池自動車(FCEV)についてはどのような展望をお持ちですか？

広瀬雄彦(以下、広瀬) 私たちは、FCEVの発表がプリウスのときと同じような成功を収め、プリウス同様の軌跡を辿ることを期待しています。ただし、当初10年間ライバルが存在せず、インフラ開発の課題もなかった当時とは異なり、今ではライバルの追い上げも厳しく、開発途上のインフラ面での課題にも直面しています。しかし、市場の形成にはライバルの存在が重要であり、私たちは最初からライバルが存在することを好都合と考えています。

ソフロニス 市場の競争に関する考え方には私も賛成です。市場の競争は技術開発を向上させ、革新をもたらします。トヨタはFCEV導入の具体的なスケジュールを定めていますか？

広瀬 2015年内には日本、米国、欧州向けに発売します。

ソフロニス そうですか。その開発に関して、直面している技術的課題を教えてください。FCERはそのような課題の解決にどのように貢献できるでしょうか？

広瀬 トヨタがFCEVを市場に投入する理由は、将来的なエネルギー問題を解決するためです。そのためには未来への長期的なビジョンをもつことが重要であり、水素の貯蔵や再生可能エネルギーからの水素製造といった自動車のための技術開発に関して

Special Interview

Katsuhiko HIROSE
Petros SOFRONIS

燃料電池自動車の展望と課題

~水素エネルギー社会実現への舵取り~

日本における二酸化炭素排出量の約20%は輸送部門単体から生み出されているという事実を踏まえ、温室効果ガス削減に向けた取り組みの緊急性がかってないほどに高まっている。初期費用による足かせはあるが、1966年に初めて開発された燃料電池自動車は、化石燃料に対する社会の依存度を下げる大きな可能性を秘めている。以降、水素技術は急速に進化し、費用の高さはいくらか軽減された。しかし、インフラの統合など燃料電池自動車の進展の妨げとなる問題についてはまだ考慮が必要だ。燃料電池の普及を確立し、社会をより環境に優しい未来に向かって前進させる上で、主な課題と重要なステップにはどのようなものがあるだろうか？

ペトロス・ソフロニス

九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所(I²CNER)所長
米国イリノイ大学機械理工学部教授

1983年及び1987年にイリノイ大学において理論応用力学の修士及び博士を取得。1991年、イリノイ大学助教となる。以降、材料研究所の主任研究者を務め、材料の環境劣化の研究分野において積極的役割を果たしている。材料力学と原子スケールでの実験観察を組み合わせることで材質の水素脆化を調査。ソフロニス氏による欠陥相互作用の水素誘起遮蔽に関する理論は、水素誘起割れの初めての合理的な説明である。2010年からI²CNERで現職を務める。



広瀬 雄彦

トヨタ自動車株式会社
技術統括部 主査、FC 開発部 主査
エネルギー調査企画室 主査、担当部長

名古屋大学工学部において理学士及び応用物理修士を取得。1981年からトヨタ自動車株式会社のエンジン技術者を務め、自動車のエンジン、ハイブリッド、排出制御技術に精通。2003年終わり、米国、日本、欧州で第2世代のプリウスを成功裏に発表し、燃料電池開発という新しいチャレンジに取り掛かる。以降、先進の燃料電池システムの開発、最先端の水素技術、水素戦略に取り組んでいる。現在は水素エネルギーとインフラの推進を担当。



だけではなく、新しいエネルギーシステムを既存のインフラに導入するための技術も考える必要があります。確立されているエネルギーシステムはすでに投資費用のほとんどを償却していますが、それでも私たちは生産、運搬、販売の費用を踏まえて水素に値段を付ける必要があります。この側面は大学や研究機関からは無視されがちですが、将来的なエネルギーを考慮する上で非常に重要な部分です。I²CNERにはカーボンニュートラルなエネルギーシステムの研究機関として、この問題を考慮していただけることを期待します。

サイクルについて、I²CNERの研究は貢献できるでしょうか？また、それはI²CNERが投資できる領域であるとお考えでしょうか？

広瀬 現時点で最大の障壁となっているのが、新しいシステムの初期投資費用です。低価格の高効率圧縮機の技術開発が進めば、この障壁を取り除くことができます。先日、I²CNERのプレゼンテーションや他の研究機関から、標準的な機械圧縮機とは異なる先進的な電気化学圧縮機のことを聞きました。既存技術の改善という点でも、

私たちはI²CNERの革新的な取り組みに期待しています。

ソフロニス それはまさに私たちの使命です。おっしゃる通りに、私たちは単に既存技術に付加的影響を与えるだけでなく、大きな効果を生じるような科学の追求を目指しています。

広瀬 I²CNERには水素や再生可能エネルギーの製造から消費までのプロセスを示すロードマップがありますか？このような分析は、開発の各段階における弱点や欠点の特定に必要です。エネルギーの問題は始まりから終わりまで長きにわたりますので、解決のためには一か所の不備が致命的になりかねません。

ソフロニス 全く同感です。I²CNERのロードマップは動的なプロセスです。その作成のため、私たちは産業界、経済産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構そして米国エネルギー省等多方面の関係者と議論し、水素社会がどのようなものか、またどのように進展するべきかという意見を集約しています。まもなくI²CNERの各研究部門におけるロードマップを完成させる予定です。

広瀬 私たちは積極的な目標を定め、そこに至るまでのロードマップを作成するべきです。例えば、2050年までに二酸化炭素を80%削減する計画をたてる場合、必要となるすべてのステップを確実に特定しなければなりません。現在定められている多くの目標では、水素の価格は現在のガソリンや軽油の価格と同程度ですが、より大規模に改善するためには、人々に水素の使用を促

すシステムが必要です。水素の価格がガソリンと同じでは、積極的に使用したいと考える人は少ないでしょう。

一般社会への水素の普及

ソフロニス 一般社会が関心をもち新しい技術を理解することは、研究を進める上で非常に重要です。

広瀬 確かにエネルギーがクリーンであることだけでは、お客様を納得させるには不十分です。安価であるか、もしくは何らかの形でお客様に利益をもたらさなければなりません。

ソフロニス そのとおりです。新しい技術について必ず関心の的になるのが、安全性と信頼性です。この件について現在の規格の調整はどのような状況でしょうか？

広瀬 車体側については技術開発が進んでいます。インフラ側については必要な安全手順や条件の標準化が十分に議論されておらず、未だ合意に至っていません。これは主に水素ステーションが国や地域の建築基準法の制約を受けることに起因します。どのように促進するかについては調整がなされていますが、水素エネルギーがいかに人々を満足させるかということについては種の共通理解が必要です。そのためには一般社会とのコミュニケーションが大切です。私はこの要素が現在ほとんどの研究機関に欠けていると考えています。

ソフロニス エネルギー研究機関と名乗るのであれば、基礎科学を超えた問題に対処すべきだということですね。私たちは一般

社会に対して技術理解の促進に努める必要
があります。その点において、ICZERは大学
に拠点を置く研究機関であるという強みを
活かし、異なる分野から専門家を招き、
ICZERでの研究が自然科学や社会科学に
どう影響を及ぼすかなど、一般社会の理解
を得るため活発な意見交換を促せるという
利点があります。

広瀬それが可能であれば、とりわけ日本で
は非常に独自性の高い基礎科学から実践に
至るまでの取り組みになるでしょう。今後
のICZERに大きく期待しています。

ソフロニス2010年からトヨタが提携
している「ロンドン水素パートナーシップ
(LHP)」についてお聞かせください。

広瀬LHPは水素燃料電池(HFC)投資
家のネットワークの策定とロンドンにおけ
るHFC技術開発の支援のため、2002
年に設立されました。LHPは極めて初期
の段階からロンドンにおける水素の導入に
非常に意欲的で、長期的なビジョンを持っ
ています。ロンドンオリンピックの際には
ステーションを建設してバスを受け入れ、
現在はタクシー会社と提携して水素駆動の
ブラックキャブを開発しています。作動時
の静かさもFCVの最大のメリットの一つ
です。LHPは将来に向けた街のクリーン
アップのため、排気ガスだけでなく騒音対
策なども含めた包括的なビジョンを持って
います。最も重要なのは、水素エネルギーの開
発普及を目指す福岡県と研究機関の密接な
連携やハンブルク市(ドイツ)の取り組み
のように、このパートナーシップは地方自治

体と協力して水素を推進しているというこ
とです。これらの大都市において、公共輸送
と個人輸送を組み合わせることで利用できること
は来たるべき高齢化社会にとって、とて
も重要です。

ソフロニスもう一度、技術の社会的側面に関
するトヨタの考え
について伺います。
水素の再生可能な
エネルギーの側面
をどのように考え
ていますか？

広瀬一部の人た
ちはトヨタが燃料
電池を作ったエネ
ルギーシステムを
変えることができ
ると誤解している
ように思われます。
実際には、エネル
ギーの種類は社会
によって選ばれる
のです。しかし、私
たちはすべての個
別の要望に従うこ
とはできませんの
で、最善の解決策として合理的なハイブ
リッドを提供しています。再生可能エネ
ルギーについては、経済に与える影響をさら
に分析する必要がありますと考えています。ガ
ソリンスタンドで1000円を支払う場合、
そのほとんどは税金または産油国へ回され、
そのことは日本(またはほとんどの国)に



とって望ましくありません。再生可能エネ
ルギーはそのような方向を転換し、国内にう
るおいを与える解決策にもなり得ます。繰
り返しますが、設備投資に高額の費用がか
かるため、再生可能エネルギーは高価です。
しかし、長期的には再生可能エネルギー
はガソリンや石油
よりも安価になる
かもしれません。

若い世代と 研究の未来

ソフロニストヨタ
では常に革新が起
こっています。この
革新の精神と大学
環境の関係につい
て教えてください。
私たちの基礎科学
研究を社会に役立
てるために、どのよ
うに技術移転に携
わるべきでしょう
か？

広瀬社会は日々進
歩し、産業にとって

変化は必死です。研究に終わりはなく、技術
者や科学者は懸命に努力しています。

ソフロニス適宜変化を受け入れる必要が
あるというのは事実ですね。大学レベルで
もこのことを自覚しつつあります。私たち
は問題に対処するとき、チームでの取り組
みと異なる角度からのアプローチによる

革新を試みます。産業界や地方自治体など、
研究所外の機関との連携も必要です。

広瀬未来を思い描くことが重要です。私た
ちが多くのリソースを燃料電池に投資する
理由は、長期にわたり、エネルギー問題と
持続可能な社会を築くことが大きな課題に
なるからです。普遍的な目標を見出し、その
方向に狙いを定め邁進します。

ソフロニス大学には将来への高い志を持
つ多くの若者や研究者がいます。水素経済
における求人市場は若い世代にとってどの
ようなものになると考えていますか？

広瀬これまでエネルギー問題の解決とい
うのは非常にシンプルでしたが、今後は
環境問題と経済的圧力が求人市場を拡大す
ることで、かなり複雑なものになるでしょ
う。ひとつの技術を専門的に扱うことは重
要ですが、エネルギー問題は経済的または
社会的な知識がなくては解決に導くこと
が必要で、様々な分野に興味を持つこと
が重要です。私たちが求人をする場合、ス
ペシャリストはもちろん、広範な知識を持
つ人も希望します。ICZERには、そのよう
な注目すべき人材を育成することで重要な
役割を担い、革新の基盤となることを期待
します。



1 低エネルギーイオン散乱分光法による固体酸化物形燃料電池の活性表面観察

John Kilner, Tatsumi Ishihara, John Druce and Helena Tellez
燃料電池 (The Journal of Fuel Cell Technology), 13(2), pp 20 – 26, (2013)

電極表面の組成は電極(デバイス)—ガス間での酸素交換を支配し、固体酸化物形の電解セルや燃料電池の性能を決定している。本研究では、固体酸化物電極の最表面原子層の組成を分析するため、低エネルギーイオン散乱分光法を適用する方法を提示した。ランタン—ストロンチウム—コバルト—鉄組成の酸化物($\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-d}$)の電極材料を、空气中で8時間、400°Cから800°Cまで温度を変化させて焼鈍処理し、表面を分析したところ、800°Cで酸化ストロンチウムの表面偏析のみが観察された。今回初めて実際の電気セルに低エネルギーイオン散乱分光法を適用し、電極から電解質へランタンが拡散していく証拠を見つけた。本研究の成果は、同様の固体酸化物形の電解セルや燃料電池及び今後新しく作製される酸化物に適用できる。バルク材料と実際のセルの分析により、電極表面組成がどのように固体酸化物形の電解セルや燃料電池の性能・劣化に影響するかを理解し、これらの原因を探ることで、将来的には燃料電池の耐久性や性能の向上が期待できる。

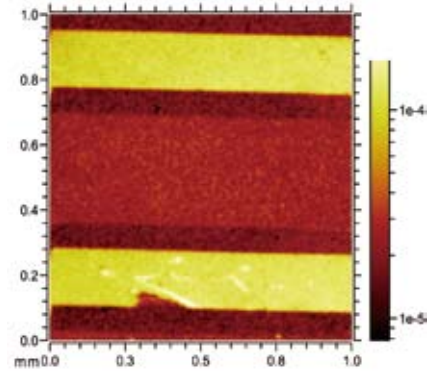


図1 半電池のポジティブイオンイメージ:ランタン—ストロンチウム—コバルト—鉄酸化物($\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-d}$)電極(黒色)、単結晶イットリア安定化ジルコニア電解質(赤色)、金電流カウンター(黄色)

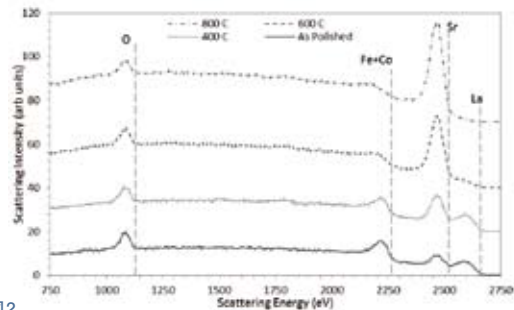


図2 焼鈍温度を変化させ、空气中で8時間焼鈍処理したランタン—ストロンチウム—コバルト—鉄酸化物($\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-d}$)の表面組成

2 電荷移動錯体ポリイミド複合膜の分光学的解析と理論計算による構造決定

Masamichi Nishihara, Liana Christiani, Aleksandar Staykov and Kazunari Sasaki
Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics
DOI: 10.1002/polb.23411

西原らは、効率良く発電可能な高温稼働型の固体高分子形燃料電池に応用するため、新しい高分子電解質膜である電荷移動錯体高分子複合膜(CT膜)を開発し研究を進めている。本研究では、CT膜は添加する電子供与(ドナー)性分子の種類によりその錯体構造が変化し、光学特性が変化する事を分光学的手法と計算化学的手法で明らかにした。ヒドロキシル基の位置が異なる2つの構造異性体ドナー分子を電子吸引性のスルホン化ポリイミド(SPI)にそれぞれ混合し製膜したところ、得られたCT膜はドナー分子の構造の違いがわずかであるにもかかわらず、異なる最大吸収波長を示した。この結果をもとにDFT計算を行ったところ、CT錯体形成に加え、ドナー分子の構造に依存した水素結合の形成も見られた。この複合的な相互作用により、異なるドナー分子をSPIが認識し異なる光学特性を示したものと思われる。得られた知見から、高耐久性架橋膜の作製の指針を示す事ができた。



図1 構造異性体ドナー分子(2,6-DHN、1,5-DHN)から作製されたCT膜と最大吸収波長

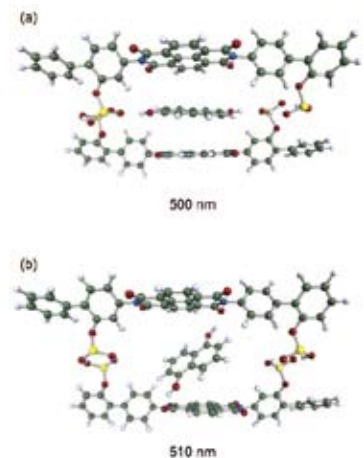


図2 (a) 2,6-DHNとSPI、(b) 1,5-DHNとSPIからなるCT膜の分子構造

3

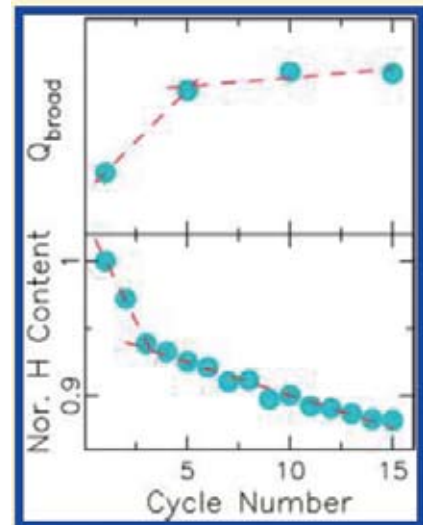
二体分布関数解析によるV_{1-x}Ti_x合金の繰り返し水素貯蔵量減少メカニズムの解明

Hyunjeong Kim, Kouji Sakaki, Hiroshi Ogawa, Yumiko Nakamura, Jin Nakamura, Etsuo Akiba, Akihiko Machida, Tetsu Watanuki and Thomas Proffen

The Journal of Physical Chemistry C 2013, 117, 26543–26550
DOI: 10.1021/jp408766r

水素吸蔵放出サイクルに伴う水素貯蔵容量の減少は、多くの水素貯蔵材料で見られるが、その原因についてはまだ明らかになっていない。本研究ではV_{1-x}Ti_x合金の繰り返し貯蔵量減少のメカニズムを解明するため、シンクロトロン放射光X線全散乱を用いて局所構造の変化を調べた。V_{1-x}Ti_x(x=0.2, 0.5)の二体分布関数(PDF)のピークは原子間距離が長くなるとブロードになり、この傾向はサイクル数増加とともに大きくなった。さらにPDF解析と分子動力学(MD)計算の結果から、PDFピークのブロードニングには転位形成が関係することが示され、転位密度はサイクル数とともに増えるものと考えられた。特にV_{0.8}Ti_{0.2}の繰り返し貯蔵量の減少と転位密度の増大が関連付けられた。この研究成果は、水素エネルギーをコンパクトかつ安全に貯蔵・運搬することのできる水素貯蔵材料の開発と関連する。V-Ti系の体心立方型合金については水素吸蔵放出サイクルとともに水素貯蔵量が減少することが応用上の課題となっており、本研究は燃料電池自動車用水素タンクに応用する材料の繰り返し貯蔵容量減少の原因を解明し、高性能水素貯蔵材料の開発に貢献しようとするものである。

なお、本研究は水素貯蔵研究部門のロードマップにおいて移動体用水素貯蔵材料の開発に位置付けられるものである。



縦軸は規格化した有効水素吸蔵量及びQ_{broad}値を、横軸は反応サイクル数を示す

4

光合成の酸素発生中心の水の酸化及び自己修復機能のモデル

Takeshi Yatabe, Mitsuhiro Kikkawa, Takahiro Matsumoto, Hidetaka Nakai, Kenji Kaneko and Seiji Ogo

Dalton Transactions (Dalton Trans.), 2014, 43, 3063
DOI: 10.1039/c3dt52846d

持続可能な環境調和型社会を実現するためには、化石燃料に依存しない新しいエネルギーシステムの構築が必要である。自然界に存在する光化学系II(PSII)は、光エネルギーを利用して水から電子を抽出(=水を酸化)できる非常に魅力的な触媒である。PSIIは光照射によって水の酸化を触媒するが、その過程で酸素発生中心(OEC)とD1・D2タンパクがダメージを受けることが知られている(図1)。D1・D2タンパクは遺伝子レベルで修復されるが、OECの修復過程はまだ明らかとなっていない。本研究では、OECのモデル錯体である二核マンガン錯体を用いて、OEC修復過程の新しいメカニズムを提案した(図2)。即ち、水の酸化過程で発生した酸素分子が、光でダメージを受けたマンガン触媒の修復に利用されるというメカニズムである。本研究の成果は、OECの反応メカニズム解明へフィードバックできるだけでなく、自己修復機能を持つ新しい水の酸化触媒の開発につながることを期待できる。

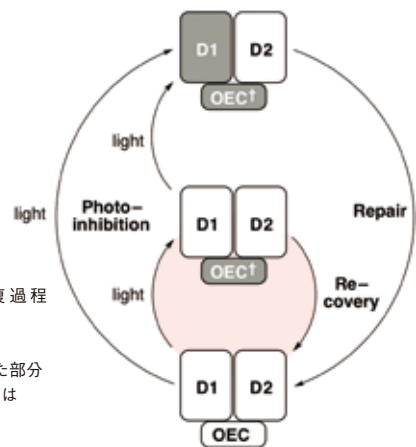


図1
光化学系IIの光阻害と修復過程
OEC:酸素発生中心
D1, D2:タンパク
灰色箇所:光でダメージを受けた部分
↑:光でダメージを受けたOECはマンガン(II)種を含む

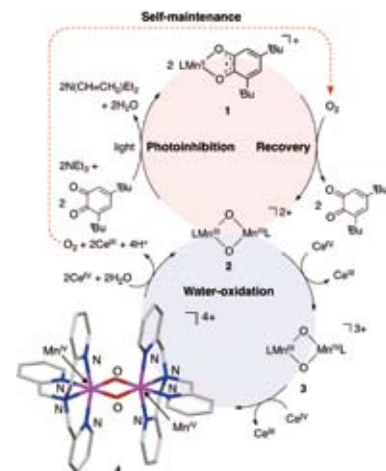


図2
モデル錯体を用いた水の酸化と自己修復過程



5 二酸化炭素回収・貯留に向けた臨界点近傍CO₂の管内流及びジュールトムソン絞り膨張に関する実験的研究

Farzan Kazemifar, Dimitrios C. Kyritsis
Experimental Thermal and Fluid Science 53 (2014) 161-170
DOI: 10.1016/j.exptthermflusc.2013.11.026

いかなる CCS 技術においても高圧 CO₂ 流体力学は重要である。単相と多相流れにおける差異が不明瞭になる臨界点近傍での加圧 CO₂ は大変重要な課題である。事実、圧力と流速に関する原データは興味深い。本論文では、適切な無次元量で解析すれば、パイプ流れは古典的な水流体力学のムーディー線図で解析可能であることを示した。シャドウグラフ法は流れ分離がいつに発生するかを示す方法であるが、これにより従来の方法で合理的に流れ分析が可能となった。これは CO₂ 流体力学に関する研究領域でブレイクスルーであり、CCS 技術において CO₂ を輸送するパイプシステム設計を相対的に簡易化することが可能である。

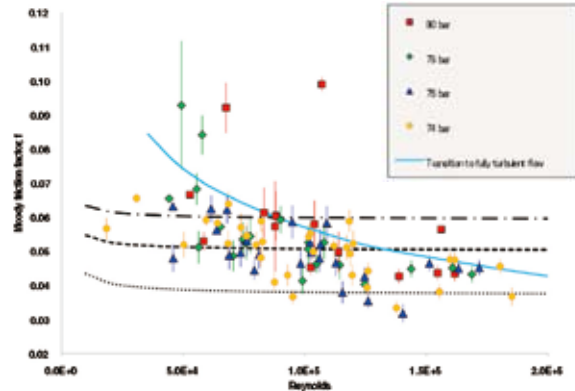


図1
ムーディー線図

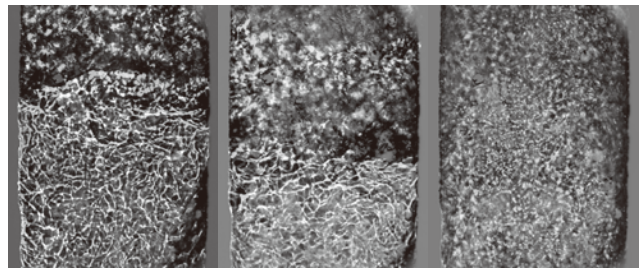
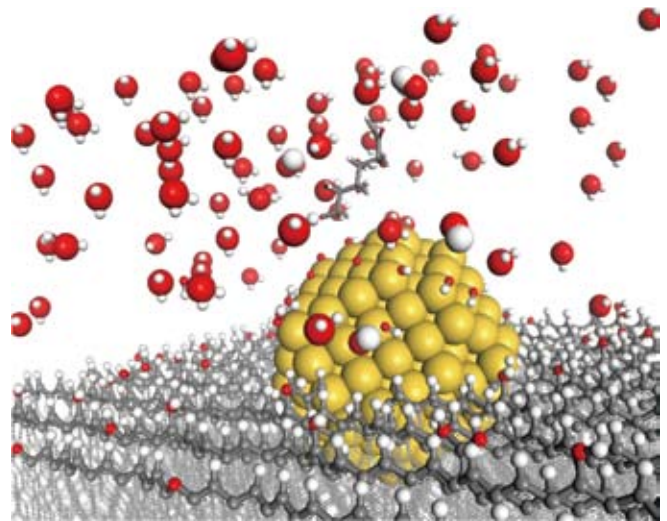


図2
臨界点近傍の CO₂ フローのシャドウグラフ

6 アルカリ形燃料電池用金触媒における酸化反応メカニズムに関する理論研究

Takayoshi Ishimoto, Hiroki Kazuno, Takayuki Kishida and Michihisa Koyama
Solid State Ionics
DOI: 10.1016/j.ssi.2013.10.020

バイオマスの利用は将来のカーボンニュートラル社会に向けて重要な選択肢の一つである。バイオマスエネルギーの高度利用のための有望な技術としてアルカリ形燃料電池がある。本研究ではバイオマスとしてグルコースに、燃料極触媒として塩基環境下で特異な活性を示す金にそれぞれ着目して理論的解析を行い、1) グルコースは塩基環境下で解離状態にあり初期のプロトン活性化が不要であること、2) OH⁻ は金触媒表面を被覆し、グルコースの良好な吸着場を形成していること、3) 表面及び電解液中の OH⁻ がグルコースの酸化反応種として寄与していることの3つの要因が塩基環境下における高活性・高反応性発現の起源であるとの示唆を得た。塩基環境下における特異な反応活性は他のバイオマスにも通ずる基本的メカニズムであり、アルカリ形燃料電池によるバイオマス直接利用における基盤的かつ有用な知見を得ることに成功した。



アルカリ形燃料電池用金燃料極触媒の模式図



I²CNER Event Reports

2014.2
13-17
(THU.) (MON.)

アメリカ科学技術振興協会 (AAAS) 年次大会 シカゴ(アメリカ)



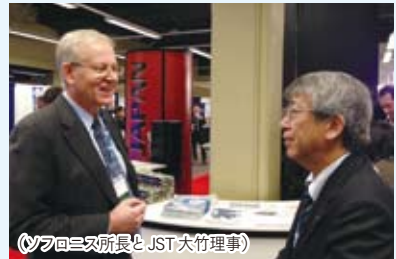
(賑わうWPIブースの様子)

2月13日(木)から17日(月)の5日間、シカゴ(アメリカ)で開催された「アメリカ科学技術振興協会(AAAS)年次大会」に文部科学省と世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)9拠点が参加しました。AAASは、科学雑誌「Science」を発行していることで知られており、科学の発展と社会還元を振興するための様々な活動を

行っている非営利団体です。180回目となる今回のAAAS年次大会は、「Meeting Global Challenges: Discovery and Innovation」をテーマに開催されました。

I²CNERは科学技術振興機構(JST)が主催する日本パビリオンの一環としてブースを出展し、最新の研究成果やWPIの特徴である国際的、学術的な

(オールジャパンとして日本の研究機関の魅力を発信)



(ソフロニス所長とJST大竹理事)

研究環境について紹介しました。また、WPIと理化学研究所が共同で「Build a Career in Japan!」と題したワークショップを開催し、日本には国際的に開かれた研究機関が多数あることや、海外の若手研究者を対象とした公募情報等を紹介しました。

2014
1.30
(THU.)

I²CNER & ACT-C Joint Symposium ~Advanced Molecular Transformations for Sustainable Energy Future~ 九州大学伊都キャンパス



(ソフロニス所長による挨拶)

1月30日(木)、I²CNERは伊都キャンパスI²CNERホールにおいて、科学技術振興機構(JST)の先導的物質変換領域(ACT-C)との共催により「I²CNER & ACT-C Joint Symposium」を開催しました。九州大学理事 藤木幸夫氏による開会の挨拶の後、ペトロス・ソフロニスI²CNER所長、國武豊喜ACT-C研究総括がそれぞれの研究活動の目的と活動

内容の紹介を行い、続いてパデュー大学特別教授でノーベル化学賞受賞者である根岸英一氏及びテキサス大学オースティン校教授Benny D. Freeman氏が基調講演を行いました。午後には、I²CNER及びACT-C所属の研究者らが低炭素社会の実現に向けた触媒による先導的な物質変換技術や、効率的な二酸化炭素の分離・転換技術に関



(参加者による集合写真)



(基調講演を行ったFreeman氏)

する研究成果の発表を行い、質疑応答では各講演者と参加者による活発な意見交換が行われました。講演後のポスターセッションでは、各研究分野から約70名が発表を行い、参加者と熱心に議論を交わしました。当日は海外からの参加者を含む177名が参加し、シンポジウムは盛況のうちに終了しました。