

# Energy Outlook

International Institute for Carbon-Neutral Energy Research

March  
2020

## I<sup>2</sup>CNER 10周年記念号

Special Interview

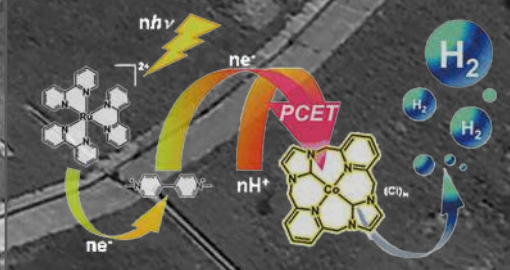
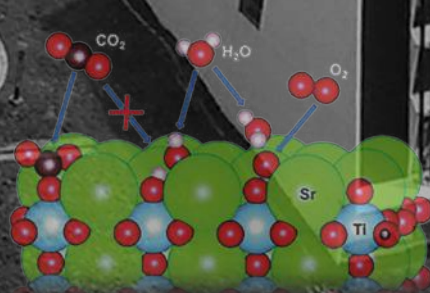
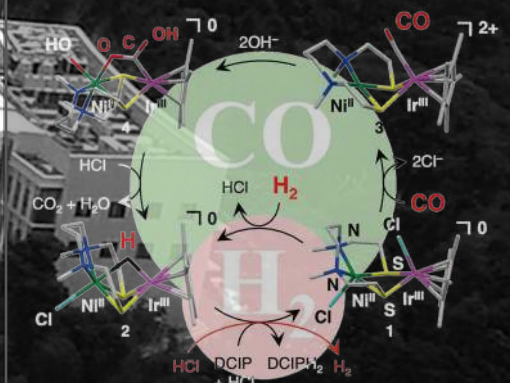
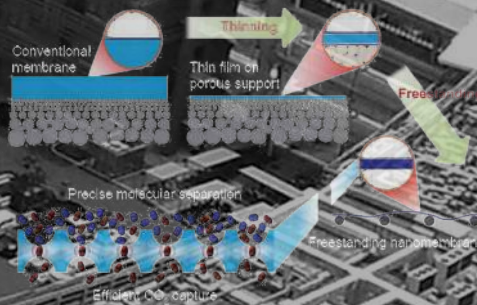
未来のエネルギーの  
選択肢

George W. Crabtree

米国アルゴンヌ国立研究所  
エネルギー貯蔵共同研究センター(JCESR)センター長

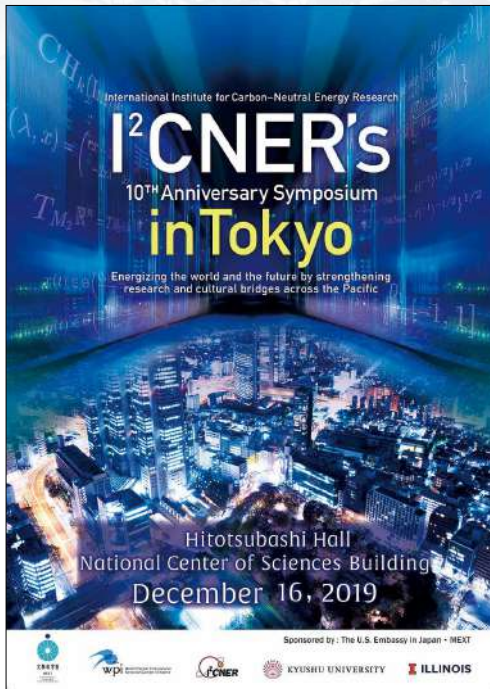
James Stubbins

イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校(UIUC)教授  
I<sup>2</sup>CNER





# I<sup>2</sup>CNER's 10<sup>th</sup> Anniversary Symposium in Tokyo



I<sup>2</sup>CNER では、世界トップレベル研究拠点として行ってきた 10 年間の研究の成果を広く社会に発信するため、2019 年 12 月、10 周年記念シンポジウムを開催しました。テーマを「エネルギー研究の最前線：地球全体の未来のために」、会場は九州を離れて東京一橋講堂とし、多くの企業研究者や一般の方にご来場いただきました。

九州大学総長らによる挨拶を皮切りに、各研究部門の研究者が発表し、I<sup>2</sup>CNER ならではの「研究の深い専門性」と「研究領域の融合」を紹介しました。続く第二部ではエネルギー需要の変遷や最新の状況について、日本と世界、米国の事例を取り上げました。第三部では脱炭素社会実現を目標とした、水素利活用促進、蓄電池、CO<sub>2</sub> 回収・貯留技術などの研究内容や取り組みに関し、国内外から招いた専門家が講演を行いました。



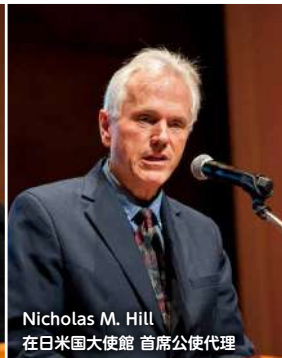
久保 千春 九州大学 総長



山脇 良雄  
文部科学省 文部科学審議官



宇川 彰 日本学術振興会  
世界トップレベル拠点形成推進センター長



Nicholas M. Hill  
在日米国大使館 首席公使代理



Petros Sofronis  
九州大学 I<sup>2</sup>CNER 所長



久保田 祐信 九州大学 I<sup>2</sup>CNER 教授



長尾 彰英  
九州大学 I<sup>2</sup>CNER 研究員



山内 美穂 九州大学 I<sup>2</sup>CNER 教授



石原 達己 九州大学 I<sup>2</sup>CNER 教授、  
Nicola Perry イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校 助教



藤川 茂紀 九州大学 I<sup>2</sup>CNER 准教授



辻 健 九州大学 I<sup>2</sup>CNER 教授



小江 誠司 九州大学 I<sup>2</sup>CNER 教授





Michael Celia  
米プリンストン大学環境研究所 所長



George W. Crabtree  
米エネルギー貯蔵共同研究センター所長



Ross Matzkin-Bridger  
在日米国大使館 エネルギー首席担当官



広瀬 雄彦 株式会社 HyWealth 代表



岡崎 健 東京工業大学 名誉教授



國武 豊喜 九州大学高等研究院 特別主幹教授



講演の中で米国エネルギー貯蔵共同研究センターの Crabtree 所長は、地球の気候変動の現状を鑑みるとエネルギーの脱炭素化が喫緊の課題であるとし、民間企業、社会、行政がともに協力する重要性を訴えました。蓄電池や水素エネルギーの可能性など科学者の取り組むべき課題、気候変動によって影響を受け得る地球に住むわたしたちへの問題提起も行われ、参加者は熱心に耳を傾けていました。

パネルディスカッションではエネルギーシステムや熱科学の専門家も加わり、二酸化炭素排出削減という命題を解決するための多様なアプローチの一部を壇上での議論で示しました。



James Stubbins  
イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校 教授



Kathryn Huff  
イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校 准教授



東之弘 九州大学 I<sup>2</sup>CNER 教授



Andrew Chapman  
九州大学 I<sup>2</sup>CNER 准教授



Rashid Bashir  
イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校 工学部長



# Special Interview

## 未来のエネルギー選択

効果的なエネルギー貯蔵と脱炭素社会の実現

気候変動による影響が深刻化する中、研究者は科学的アプローチで大気中に排出されるCO<sub>2</sub>を削減する方法を模索している。主に水素の利活用や、再生可能エネルギーを最大限活用できる長時間放電バッテリーの開発に取り組む研究の最前線ではどのような課題を見据えているのだろうか。I<sup>2</sup>CNERの10周年記念シンポジウムに合わせ、イリノイ大学アーバナシャンペーン校及びI<sup>2</sup>CNERのジェームズ・スタビンス教授が、米国アルゴンヌ国立研究所エネルギー貯蔵共同研究センター(JCESR)のジョージ・クラブツリーセンター長にお話を伺った。

### バッテリー研究の最新動向

**ジェームズ・スタビンス:** 今日はお越しいただきありがとうございます。早速ですがJCESRの目指すゴールと現時点での成果についてお聞かせください。

**ジョージ・クラブツリー:** 電力グリッド・電気自動車・航空産業。今最もポピュラーで優れているといわれるリチウムイオン電池でさえ、すべての目的に合わせたエネルギー貯蔵はカバーできません。そこで、私たちの使命は多様な用途に合わせた様々なバッテリーを開発することにあると考えています。

**スタビンス:** 具体的に、それぞれのバッテリー開発において現在の進捗はいかがですか。

**クラブツリー:** リチウム硫黄やマグネシウムなどの特定の

バッテリーについての研究は近年進みつつあります。マグネシウムバッテリーは、リチウムイオンに似ていますが、2つの充電器を備えており、化学反応が起こるたびに2倍のエネルギーが蓄積または放出されます。また、呼吸型硫黄フローバッテリーにはコストと長期貯蔵という2つの利点があります。硫黄、水を電解質として使用し、空気からの酸素をカソードとして使用するため、試作中のバッテリーの中では、材料が最も安価です。また、リチウムイオンでは難しかった50時間から100時間もの長時間に渡る放電が可能です。より高度な電力グリッド(送電網)システムへと移行が進むにつれて、再生可能エネルギーが導入されると考えられます。ご承知の通り、風力発電では無風、太陽光発電では曇天・雨天時、夜間など電気を生成できない時間があります。電力供給の安定のためにも



**ジョージ クラブツリー**

米国エネルギー貯蔵共同研究センター  
センター長



**ジェームズ スタビンス**

イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校  
教授

エネルギーを長時間貯蔵する技術が待望されているのです。

**スタビズ:** バッテリーは個人や家庭の小規模な用途から車、飛行機にもすでに応用されていますが、大規模集中型電源ではどのように活用できるとお考えでしょうか。

**クラブツリー:** リチウムイオン電池が誕生したとき、パーソナル家電の起爆剤になるとはだれも予見していませんでしたが、今では携帯電話をはじめ身の回りの多くのものに利用されています。電気自動車(EV)もこれから5年以内にさらに大きな発展を遂げると考えられています。一方で電力グリッドにエネルギーを蓄えるにはEVの1000倍ものパワーのあるバッテリーが必要になります。フローバッテリーと呼ばれる別のタイプのバッテリーがあり、これには、アノードとカソードの固体電極に代わり液体の入ったタンクが使われています。すべての化学反応は液体内で起こり、酸化還元活性物質が電子を溶液に放出します。エネルギーは電解質に保存されるため、保存容量は直線的にスケールアップできます。10倍のエネルギーが必要な場合は、タンクを10倍の大きさにするだけです。理論上は大規模なタンクを作れば大規模電源にも活用できそうですが、問題はコストがかかりすぎるにあります。

JCESRは、他の科学者とともに、フローバッテリーで使われるバナジウムの代わりに、豊富で安価で環境に優しいとされる水素、酸素、窒素などの有機活性物質を使うことに取り組んでいます。

## 脱炭素エネルギーへの挑戦

**スタビズ:** 産業活動の脱炭素化についてはいかがでしょうか。多くの産業の現場において、高温処理過程が炭素排出の主要原因となっているようですが、バッテリーはどのように役に立つのでしょうか。

**クラブツリー:** ご指摘の通りセメントなどでは1,000~1,400°Cという高温を伴う生産過程で副次的に二酸化炭素を発生していて、脱炭素化には困難を伴います。ただ

二酸化炭素は単に熱と共に発生するのではなく、生産中のある固有の過程で生じるものです。ここに、バッテリーが役割を果たす余地があります。低温の場合は、余剰熱を電気サイクルに組み入れることで熱効率を改善できますし、抵抗加熱として利用することも可能です。少し高い温度では、電気アーク加熱を採用することもできます。バッテリーは、温度の調整に強みを発揮します。

バッテリーとは離れますが、生産過程で出る二酸化炭素を回収・分離し他のガスに置換する技術も注目されています。二酸化炭素を使用した有用で価値の高い化学物質を製造することが、コストにシビアな産業界にも受け入れられる脱炭素の解決策となり得るのです。

**スタビズ:** なるほど。では全てのエネルギー源から排出される二酸化炭素の量は、今後10-20年の間にどのように変化していくとお考えですか。

**クラブツリー:** いくつかの分野での脱炭素化は比較的イメージしやすいと思います。

1つは電力グリッドですが、将来的に85~90%の電力を太陽光と風力による発電で賄うことが期待されます。この構想には前述のとおりバッテリーが不可欠です。効率的なグリッド運用に役立つバッテリーの基礎は解明され始めていますが、本格運用への道はまだ長そうです。

2つめの大きな分野は電気自動車です。この技術は発展の余地が大きく、二酸化炭素排出の問題を緩和するのみならずガソリンエンジンと同等のコストになれば経済的な解決策ともなり得るでしょう。ただし、長距離トラックによる輸送や配送については、大容量の電力チャージに長時間を費やす必要があり、不便さを払拭することは難しいかもしれません。トラックに、数時間単位で稼働不可能な時間が生まれるとすれば従来のガソリン車で十分だと思っ荷主やドライバーもいることでしょう。

**スタビズ:** 飛行機も大量のジェット燃料を使用し炭素を排出します。排出削減に有効策はありますか。

**クラブツリー:** 水素が解決策となり得ます。水を分解し、電解的に生成することで炭素を含有しない燃料としての







使用が可能です。水素の活用は、世界経済のさらなる脱炭素化に貢献します。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、2050年までに十分な脱炭素化を実現させる必要があると述べており、技術開発に費やせる時間はまだ残されています。水素の活用は脱炭素化に最も有望な分野の1つと言えるでしょう。

## 未来のエネルギーシステムへの移行

**スタビンス：**水素の活用は、I<sup>2</sup>CNERでも注力している分野の1つです。特に日本では、燃料電池自動車や水素実用化の研究の一方、冷暖房や給湯などの家庭用エネルギー機器の開発にも多大な努力が重ねられてきました。両分野での技術開発をどう補完し結び付けていくことができるでしょうか。

**クラブツリー：**水素は、電気システムに完全に組み込まれ、脱炭素化モデルを新たな高みへと導くことができます。余剰電力がある場合、水を分解して水素を生成できますし、より多くの電気が必要な場合は燃料電池を介して水素を電気に戻すか、単に天然ガスを水素に置き換えて燃焼タービンで燃やすだけで発電することができます。これは非常に柔軟なシステムであり、エネルギーシステム全体にとって非常に有益だと考えられます。

**スタビンス：**開発競争著しい先進国のみでなく、大規模な電力グリッドシステムを有しながら化石燃料依存度の高い中国、インド、その他の経済大国で導入されれば炭素排出削減に大きく貢献すると考えられます。研究所で取り組まれている最先端のテクノロジーは国際社会にどう影響を与えるのでしょうか。

**クラブツリー：**特に発展途上の国々では、炭素排出量を減らしながらエネルギー需要の増加に対処するという難しい課題に直面しています。しかし見方を変えれば過去にとらわれず最新研究の英知で明日のグリッドを構築できるということです。最先端テクノロジーはこれらの国々にEUや米国がたどった道を繰り返さずとも、風力、太陽

光、そしてバッテリーを利用し脱炭素化の進んだモデルへの転換を促します。

## 気候変動問題の解決に向けて

**スタビンス：**所長をお務めのJCESRは科学的な切り口で炭素と気候変動の課題研究をリードしてこられました。世界の人々がこれらの課題を十分理解するにはどのような工夫が必要でしょうか。

**クラブツリー：**より多くのコミュニケーションが求められていると思います。科学者は、政策立案者や各国の意思決定者、そして、一般の人々にもっと効果的で、分かりやすい情報を発信しなくてはなりません。もう一つ科学者にできることは、水素、バッテリー、燃料電池などに関する技術的貢献です。太陽光と風力による発電のコストが過去10年間で劇的な低下を見せたように、科学者は技術者と協力して政策立案者たちに新技術でのコスト削減の可能性を認識してもらう必要があります。炭素と気候変動の問題が他人ごとではないと、あらゆる方向から意識づけることが重要です。

**スタビンス：**新しい技術への投資は適切なレベルにあると思いますか。もっと投資が必要でしょうか。

**クラブツリー：**もっと積極的に投資するべきです。JCESRは、安価で環境に優しい長時間放電バッテリーを開発しましたが、この種の多くの技術はまだ商業ベースに乗っていません。バッテリーと水素利活用分野を含め、炭素排出削減に有効な新しい技術を政策として支援し、民間企業にとっても魅力的な投資先にしていかなくてはなりません。

最も重要なことは、気候変動の現実を多くの人に伝え、皆がその事実に基づいて行動することです。「炭素の放出を止めること」と、「その影響を緩和すること」です。住みやすい地球を保ち続けるためには気候変動の影響を今すぐ最小限に抑えなければなりません。つい遠い未来のこと、いつかやればいいことと考えがちですが、本当にそうでしょうか。私たち地球市民は、この問題に対する自身の考え方を今一度見直す必要があるのです。



# I<sup>2</sup>CNER 10 Years Accomplishments

## 高温電気化学デバイス内の空気電極 —化学組成とメカニズムの原子論的研究

Tatsumi Ishihara, Molecular Photoconversion Devices Division

固体酸化物燃料電池は、高効率、高信頼性の電源として既に市場に導入されている。しかし、寿命の向上とコスト削減のため、作動温度の低下と電力密度の向上が求められており、空気電極のパフォーマンス向上は極めて重要な課題である。

I<sup>2</sup>CNERの分野横断型研究チームは、大気中の複雑なガス雰囲気における多成分系酸化物空気電極の表面特性を解明するという非常に困難な問題に取り組んだ。空気電極が作動時に劣化するので、高効率エネルギー変換のための高温電気化学デバイスの商業化の妨げになっている。

表面の化学組成、表面反応、劣化メカニズムの解明は、空気電極として使用される最も一般的な物質は、一般式A<sub>1-x</sub>A'<sub>x</sub>BO<sub>3</sub>で表されるイオン電子混合伝導性ペロブスカイト酸化物の空気電極である。これらの材料ではCoやFeのような遷移金属BカチオンはORR/OERプロセスに不可欠であると考えられており、AとA'の大きな原子（一般的にはそれぞれLaとSr）は両方とも不活性であると考えられてきた。

作動時において急速に表面の再編成が起こり、表面はAタイプカチオンとOイオンのみとなり、触媒的に活性なBタイプカチオンは覆われてしまう。さらに、このような表面イオンの偏析により、表面にA'O (SrOなど)リッチな層が形成される。

この表面組成の知見をもとに、我々は計算科学により電極表面への分子酸素の吸着と取り込みをモデル化した。我々のこのような分析により、初期にSrO表面濃縮層が酸素吸着に対して不活性であり、表面の酸素空孔が活性Bサイト遷移金属にアクセスするための経路を提供することを示している。

これらの研究結果により、La<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub>のようなA'フリー材料では、表面がAOで覆われても、従来の予想に反して、表面のLaカチオンはORR反応に積極的に関与していることが分かった。

### References

- J. Druce, H. Tellez, M. Burriel, M.D. Sharp, L.J. Fawcett, S.N. Cook, D.S. McPhail, T. Ishihara, H.H. Brongersma, J.A. Kilner (2014) Surface termination and subsurface restructuring of perovskite-based solid oxide electrode materials, *Energy & Environmental Science*, 7(11), 3593-3599.
- A. Staykov, H. Tellez, T. Akbay, J. Druce, T. Ishihara, J. Kilner (2015) Oxygen Activation and Dissociation on Transition Metal Free Perovskite Surfaces, *Chemistry of Materials*, 27(24), 8273-8281.

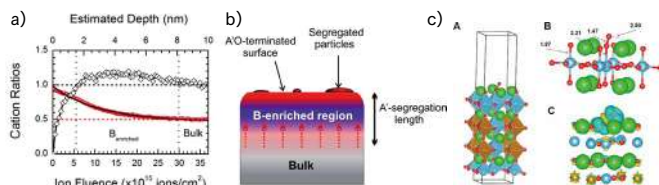


図 a) 測定により得られた組成プロファイルは、陽イオンの表面への偏析を示している。b) 測定により得られた組成プロファイルのイメージ。偏析は、パフォーマンスの劣化と密接に関わっている。c) 原子論的モデリングは、「空孔」により促進される表面交換メカニズムを示している。

## 水素脆性の緩和

Brian P. Somerday, Masanobu Kubota, Hydrogen Materials Compatibility Division

水素燃料技術の安全性に対して考慮すべき事柄の一つは、水素が水素容器の部材に侵入して、部材の材料強度を低下させる水素脆化である。多くの水素脆化防止法は材料特性の調整に焦点を合わせているが、水素脆化を材料への水素侵入を抑制することにより防止することができる。水素侵入を防止する従来の方法は材料表面のコーティングであるが、コーティングの性能はき裂ができたり剥離が生じたりして悪化する恐れがある。I<sup>2</sup>CNERの研究者は設立当初から「ケミカルインヒビター」を含む水素侵入を防止する別の方法に焦点を合わせてきた。この方法の原理は、非常に少量(ppmレベル)の、普通は水素ガスの不純物として考えられているような特定の物質が、実際には水素の侵入を阻害するというものである。分子レベルの最先端のモデリングを適用して、I<sup>2</sup>CNERの研究者は、酸素や一酸化炭素という物質が材料表面での水素分子の水素原子への解離を抑制することを明らかにした。水素は原子状のみ材料に侵入できるために、酸素や一酸化炭素は有効に水素脆化を抑制する。ケミカルインヒビターがどのように機能を発揮するかについて本質的な理解を深めることに加え、I<sup>2</sup>CNERの研究者は、この方法の実用化を可能とするために、広範囲にわたる様々な材料強度試験を実施し、また、物理学に基づく解析モデルを開発している。この結果として、I<sup>2</sup>CNERの産業界のパートナーは、このケミカルインヒビターの発想を、水素ガスを貯蔵・輸送する部材の安全性を高めるために実際に使用しようと考えている。

### References

- B.P. Somerday, P. Sofronis, K.A. Nibur, C. San Marchi, R. Kirchheim (2013) Elucidating the Variables Affecting Accelerated Fatigue Crack Growth of Steels in Hydrogen Gas with Low Oxygen Concentrations, *Acta Materialia*, 61(16), 6153-6170.
- R. Komoda, M. Kubota, A. Staykov, P. Ginet, F. Barbier, J. Furtado (2019) Inhibitory Effect of Oxygen on Hydrogen-Induced Fracture of A333 Pipe Steel, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42(6), 1387-1401.

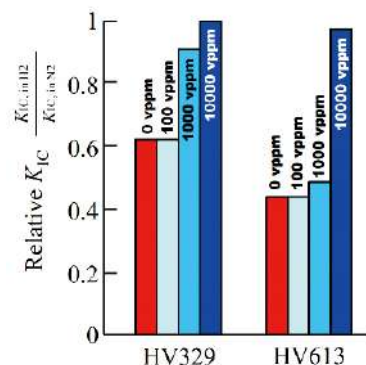


図 少量(100~10000 ppm)の一酸化炭素が水素ガス中の鋼材の破壊の抵抗力を向上させることを示す材料強度試験の結果。一酸化炭素の水素脆化抑制効果は、高強度鋼(HV613)よりも、低強度鋼(HV329)で顕著である。



## 高プロトン伝導性酸化物による中温水蒸気電解

Hiroshige Matsumoto, Electrochemical Energy Conversion Division

水素は再生可能エネルギーの有効な貯蔵媒体であるが、その生産プロセスである水蒸気電解は、水電解の手法の中で最もエネルギー効率の良い方法である。我々は、400～600℃の中間温度で高い性能を発揮する理想的なプロトン伝導性電解質材料 BZCY54<sub>8/9</sub>2 を新たに開発した。この温度領域でのイオン伝導度は、他の最先端の固体電解質よりも高くなっている。この材料組成は、ペロブスカイト型 BaZr<sub>x</sub>Ce<sub>1-x-y</sub>Y<sub>y</sub>O<sub>3-δ</sub> (BZCY) 電解質材料の中でイオン伝導度と熱力学的安定性の点から最適な組成である。これまでに報告された BaZr<sub>0.1</sub>Ce<sub>0.7</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>3-δ</sub> (500℃で 9×10<sup>-3</sup> S/cm) はイオン伝導度のベンチマークであるが、CO<sub>2</sub> および H<sub>2</sub>O 環境での安定性が低いことが欠点である。われわれは、ペロブスカイトの B サイトにおける 5/4 のセリウム/ジルコニウム比が、ベンチマークよりも高い導電率と安定性の両方を示すことを発見した。

われわれはまた、水素生成速度を損なうことなく、水蒸気電解の作動温度を 500℃ に下げることにも成功した。水素は、電流密度 0.5 A/cm<sup>2</sup>、500℃ および 600℃ でそれぞれ、1.45 V および 1.2 V の印加電圧で直接生成された。そして、高効率中温水蒸気電解の標準プロトコルを確立し、そのアプローチは 2013 年に開始された株式会社日本触媒との共同研究を通じて同社と共有され、商業化に向けた研究が進められている。

### References

K. Leonard, Y. Okuyama, Y. Takamura, Y.-S. Lee, K. Miyazaki, M. E. Ivanova, W. A. Meulenberg, H. Matsumoto, "Efficient intermediate-temperature steam electrolysis with Y: SrZrO<sub>3</sub>-SrCeO<sub>3</sub> and Y: BaZrO<sub>3</sub>-BaCeO<sub>3</sub> proton conducting perovskites" *J. Mater. Chem. A*, 6, pp19113 (2018)  
 K. Leonard, Y. Okuyama, Y. Lee K. Miyazaki, H. Matsumoto, "The Influence of Dopant Levels on the Hydration Properties of SZCY and BZCY Proton Conducting Ceramics for Hydrogen Productions" *Int. J. Hydrogen Energy*, 42, pp3926 (2017)

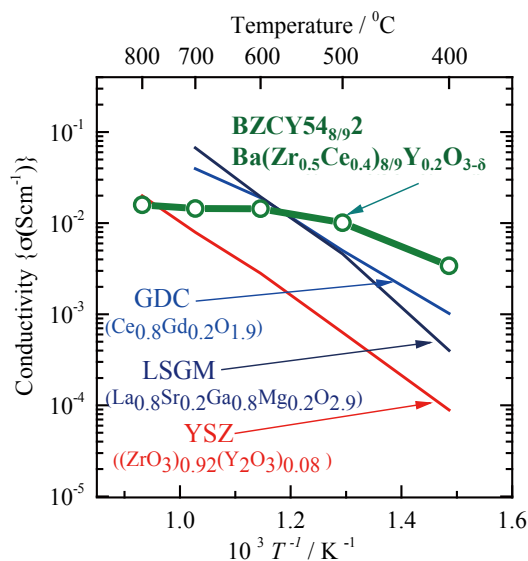


図 既存の酸化イオン伝導性電解質と比較した (BZCY54<sub>8/9</sub>2) のイオン伝導率

## カーボン担体のポリマーラッピングによる新しい電極触媒の設計

Tsuyohiko Fujigaya, Electrochemical Energy Conversion Division

中嶋教授と藤ヶ谷教授は、高い耐久性と高活性を兼ね備えた高分子電解質燃料電池 (PEFC) 用の電極触媒を実現するために、カーボン担体を触媒担持前にポリマーで被覆する新しい電極触媒構造を開発した。本手法の強力な利点の1つは、さまざまなタイプの炭素材料上に、白金に代表される触媒ナノ粒子を均等かつ均一に担持できることである。(長所1)

研究チームはこのアプローチによって、カーボン担体として未酸化状態のカーボンナノチューブ (CNT) を使用することに初めて成功し、世界で最も耐久性のある PEFC 触媒構造を実現した。(長所2)

加えて、この新しい構造により、電極触媒表面に高分子電解質を均一かつ安定してコーティングすることが可能となり、電極触媒の著しく安定した分散が可能となった。(長所3)

提案した均一なコーティング手法により、従来の電極触媒と比較して 20～30% 高い白金利用効率を達成することができ、PEFC のコスト削減を可能にした。(長所4)

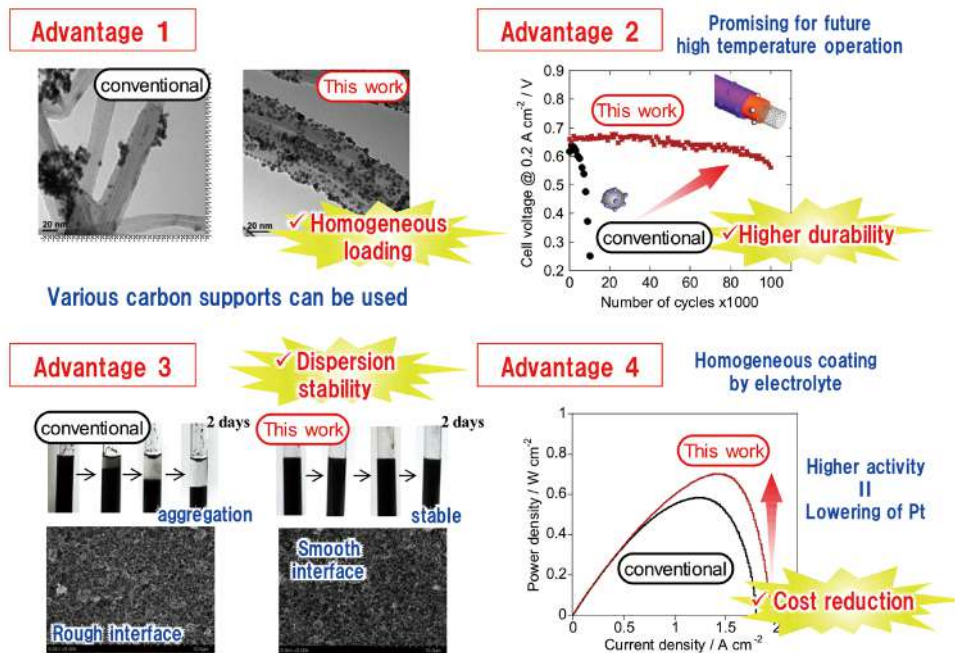


図 ポリマーラッピングに基づく高分子電解質型燃料電池用の高耐久性電極触媒とその長所

### References

T. Fujigaya et al., *Sci. Rep.* 5, art. no. 16711 (2015).  
 T. Fujigaya et al., *Electrochimica Acta*. 312, 349-357 (2019).



# 発電における熱伝達を促進するための表面工学

Yasuyuki Takata, Nenad Miljkovic, Thermal Science and Engineering Division

撥水性フィルムでコーティングされた金属表面における蒸気の滴状凝縮は、飛躍的な熱伝達係数を達成する可能性があるため、世界中のベースロード発電インフラの85%において、4%の効率向上をもたらす。しかし、過去1世紀において、これらコーティングを使用する際の主たる解決課題は、長期耐久性の欠如であった。

Miljkovicと高田の研究チームは、凝縮中の撥水性薄膜の劣化に関する世界初的基本的な理解を発展させた。ナノスケールのピンホールに起因する撥水性薄膜下のふくれ形成のメカニズムによって支配される基本的な破損メカニズムを定量的に解明した。得られた成果を活用し、幅広い産業エネルギーシステムに適用できる世界最大のコーティングおよび塗料会社 (PPGおよびChemours) と共同で、初めてスケラブルで耐久性のある撥水性のコーティング手法を開発した。

エネルギー分野におけるもうひとつの大きな課題は、低表面張力作動流体 (冷媒) で、凝縮熱伝達を促進できる人工的な表面の開発が困難なことである。Miljkovicの研究グループは、液体浸潤表面 (LIS) を利用することにより、この課題を初めて克服した。潤滑剤と凝縮液のペアを綿密に調査研究し、世界初となる、低表面張力流体用のLISの合理的な設計ガイドラインを提案した。さらに、アルカン (飽和炭化水素) の安定した液滴凝縮を実現できる表面コーティング技術を開発することによって、双方の流体の凝縮熱伝達係数を、撥水性表面での膜状凝縮と比較して200%向上させた。

滑らかな人工的表面での凝縮と沸騰は、熱伝達率が本質的に高いため、過去1世紀にわたって多くの注目を集めた。余りにも多くの産業で広く使用されている一方で、相変化熱伝達の物理を支配する基本的なメカニズムはほとんど理解されていない。高田らの研究グループは、国際的な共同研究者と協力しながら、直径数十ナノメートルのオープンな親水化したCNTに閉じ込められた水を、透過型電子顕微鏡で観察することに挑戦している。これらの水相の安定性は、熱力学に基づく既存の理論では説明できていなかった。研究結果は、ナノスケールでの水の挙動の理解を促進し、相変化熱伝達の新しいアプリケーションへの扉を開くものである。

## References

- Ma, J., Cha, H., Kim, M.-K., Cahill, D. G., and Miljkovic, N., Condensation Induced Delamination of Nanoscale Hydrophobic Films. *Advanced Functional Materials* 2019, 29 (43), 195222.
- Sett, S., Sokalski, P., Boyina, K., Li, L., Rabbi, K. F., Auby, H., Foulkes, T., Mahvi, A., Barac, G., Bolton, L. W. and Miljkovic, N., Stable Dropwise Condensation of Ethanol and Hexane on Rationally Designed Ultrascale Nanostructured Lubricant-Infused Surfaces. *Nano Letters* 2019, 19 (8), 5287-5296.
- Tomoo, Y., Askounis, A., Ikuta, T., Takata, Y., Sefiane, K. and Takahashi, Superstable Ultrathin Water Film Confined in a Hydrophilized Carbon Nanotube. *Nano Letters* 2018, 18 (3), 1869-1874.

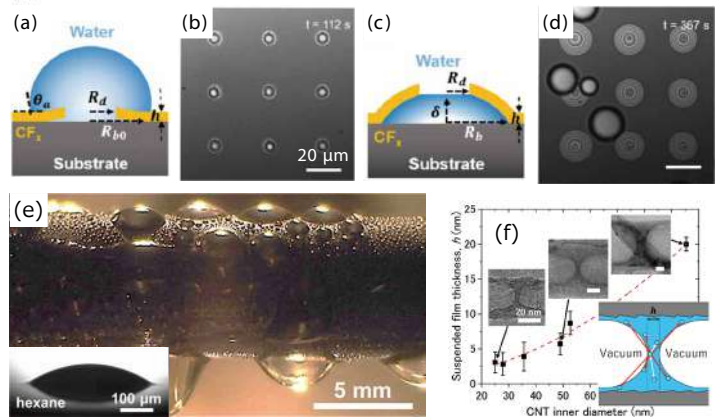


図 (a-b) 水滴の成長と(c-d) 疎水性薄膜の水泡形成。(e) 低表面張力流体 (ヘキサン) の滴状凝縮。(f) 高真空条件下におけるCNT浮遊水膜のTEM画像。

# 燃料電池技術のための水素と一酸化炭素の生体模倣活性化

Seiji Ogo, Catalytic Materials Transformations Division

小江教授と研究グループは、燃料電池において水素と一酸化炭素の両方を酸化できる触媒反応を世界で初めて成功させた。

白金触媒では、燃料である水素に含まれる極微量の一酸化炭素で被毒され、燃料電池での触媒活性を著しく低下させるという問題がある。

しかし、I<sup>2</sup>CNER触媒グループでは、水素酸化酵素と一酸化炭素酸化酵素、2つの自然に存在する酵素の機能を融合した新しい触媒を開発した。小江グループは、一酸化炭素から触媒を保護するという従来の観点から問題に取り組む代わりに、水素と同様に燃料 (電子源) として一酸化炭素の使用を促進する触媒を設計した。グループは、有毒な一酸化炭素を燃料として使用して、2つのガスの50:50混合物からエネルギーを生成する燃料電池の概念実証を明らかにした。さらに重要なことは、このシステムは水中で動作できるため、環境にも優しいということである。

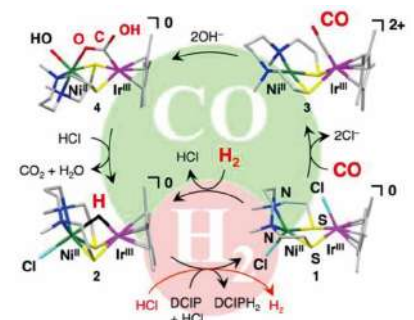


図 水素と一酸化炭素の50:50混合物を燃料として使用する燃料電池のアノード

## References

- S. Ogo, Y. Mori, T. Ando, T. Matsumoto T. Yatabe, K-S Yoon, H. Hayashi, M. Asano. One Model, Two Enzymes: Activation of Hydrogen and Carbon Monoxide. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2017, 56(33), 9723-9726.



## 発電および工業プロセス用のCO<sub>2</sub>分離ナノ膜

Shigenori Fujikawa, CO<sub>2</sub> Capture and Utilization Division

効率的なCO<sub>2</sub>回収技術の確立は、カーボンニュートラルエネルギーシステム構築のために必要不可欠である。選択透過膜によるCO<sub>2</sub>回収は、有望な技術であるが、経済的にはまだ満足のいく段階ではなく、実用に求められるガス透過性能をもつ分離膜の開発を目指し進めている。

火力発電所から排出されるCO<sub>2</sub>回収にかかるコストを下げるためには、ガス選択性よりガス透過性の改善が重要であり、その透過度はI<sup>2</sup>CNERの目標値でもある4,000GPUを超える必要がある。

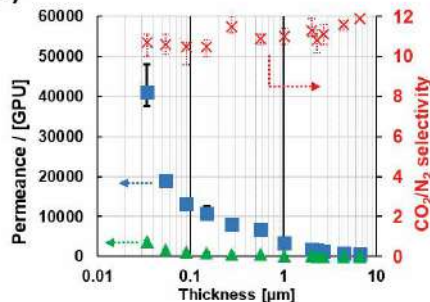
藤川准教授とその研究グループは、ガス透過性に対する厚さの影響を体系的に調査するために、厚さが34~6700nmの領域で膜厚が明確に規定された自立性を有するポリジメチルシロキサン (PDMS) ナノ膜を開発した。一般に、ガス透過はポリマーマトリックス内のガス拡散が律速段階になることが多いため、ポリマー分離膜のガス透過性は膜厚に反比例し、透過係数は分離膜材料によって一定の値を示すことが知られている。より薄膜化された厚み領域、この場合1μm以下の厚みをもつ分離膜のCO<sub>2</sub>透過係数は、厚さの減少とともに減少することが確認された。

この結果は、きわめて薄膜化された分離膜の場合、ガス透過全体の速度は、明らかに表面吸着プロセスによって決定され、ガス選択性は主に表面吸着プロセスによって制御されることを示すものである。藤川准教授のグループは、厚さ34nm、CO<sub>2</sub>透過率が40,000GPU以上の自立膜の製造に成功した。このCO<sub>2</sub>透過性は世界最高であり、米国のMTR Inc.が保有する現在の2,000GPUベンチマークよりも優れていた。CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>選択性も10~11と中程度の選択性を備えており、大気圧条件下で選択分離透過テストを行った結果、CO<sub>2</sub>濃度が1000ppmという極めて低濃度条件でも、CO<sub>2</sub>を選択的に回収した。この発見によって、火力発電所から排出されるCO<sub>2</sub>の回収だけでなく、分離膜を使って大気から直接CO<sub>2</sub>を回収するというまったく新しい領域へと研究展開が可能となる。

(a)



(b)



### References

S. Fujikawa, M. Ariyoshi, R. Selyanchyn, T. Kunitake (2019) Ultra-fast, selective CO<sub>2</sub> permeation by free-standing siloxane nanomembranes, *Chemistry Letters*, 48(11), 1351-1354.

図 CO<sub>2</sub>分離ナノ膜とそのガス分離性能:(a) 自立型で厚さ150nmのPDMSナノメンブレン(オレンジ色のリングはフレーム); (b) 分離膜の厚みとガス透過性及びCO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>選択性の関係。CO<sub>2</sub>(青の四角形)、窒素(緑の三角形)の透過性、およびCO<sub>2</sub>と窒素の選択性(赤の×字)。

## CO<sub>2</sub>固定化の経済的実現性向上のためのCO<sub>2</sub>と廃棄グリセロールの共電解

Paul Kenis, CO<sub>2</sub> Capture and Utilization Division

Kenis教授は、工場から排出されるCO<sub>2</sub>を、化成品や燃料などの付加価値資源に化学変換するために必要とされる変換エネルギーの低減化に関する研究を行っている。この過剰に排出される産業用CO<sub>2</sub>は、付加価値商品へと転換できる機会となりえる。この排出CO<sub>2</sub>は、化石資源から得られる化学物質と同じような化成品原料になりえるが、しかしながらその変換プロセスには大量のエネルギーが必要であり、またプロセスも高価なことが問題となっている。

そこで、I<sup>2</sup>CNERの研究チームでは、廃棄物から付加価値資源に変換するまでのプロセス全体のエネルギー消費を50%削減するために、安価なバイオ燃料副産物であるグリセロールの酸化を利用する新しい共電解手法の経済的実現可能性を評価した。

プラスチック用エチレンなどへのCO<sub>2</sub>化学変換は、電気化学的還元と呼ばれるプロセスを通じて可能である。通常このプロセスでは、CO<sub>2</sub>ガスと電解質液は、電解セル内を移動し、カソード側でCO<sub>2</sub>がエチレンなどに変換され、アノード側では水から酸素が生成する。しかしながら、従来の方法では、このCO<sub>2</sub>還元に必要なエネルギーの約90%は、アノード側での酸素発生で消費されてしまう。この余剰に生成する酸素は、(それを売する)大きなマーケットがないため、結果としてエネルギーの90%が無駄になってしまう。

Kenis教授の新しいアプローチでは、このエネルギーが集中する酸素生成の代わりに、サトウキビ由来のバイオ燃料生産における副産物であるグリセロールの酸化に用いられている。

ライフサイクル分析の結果、現在の熱化学プロセスで化石燃料から同じ化成品を得る場合には、カーボンポジティブになるのに対し、この共電解アプローチは、CO<sub>2</sub>変換プロセスをカーボンニュートラルに近づける可能性があることが明らかになった。

分析には、最善及び最悪のCO<sub>2</sub>排出とエネルギー消費のシナリオが考慮されており、CO<sub>2</sub>排出と経済性の観点から、このCO<sub>2</sub>還元法は、従来のアノード反応(酸素発生)を有機廃棄物の酸化に置き換えることで大幅に改善できると結論付けている。アノードにおける酸素発生を掘り下げると、この改善によって、プロセス全体のエネルギー消費を40~50%削減するだけでなく、資源の再利用ができるポテンシャルを有しており、Win-Winの関係になっている。

### References

S. Verma, S. Lu, P.J.A. Kenis (2019) Co-electrolysis of CO<sub>2</sub> and glycerol as a pathway to carbon chemicals with improved technoeconomics due to low electricity consumption, *Nature Energy*. (DOI: 10.1038/s41560-019-0374-6)

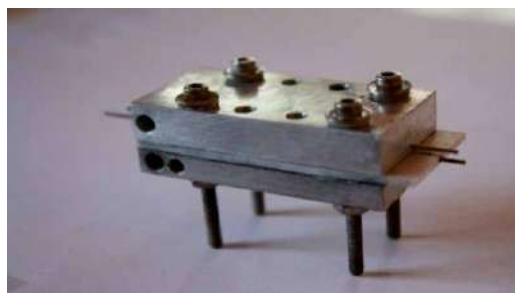


図 フロー電解装置:CO<sub>2</sub>をCOまたはカソード電極におけるエチレンに、アノードにおいてグリセリン(グリセロール)から乳酸などに共電解する



# 圧入されたCO<sub>2</sub>の連続かつ高精度のモニタリングシステム

Takeshi Tsuji, CO<sub>2</sub> Storage Division

二酸化炭素回収・貯留 (CCS) では、i) 貯留層からのCO<sub>2</sub>の漏洩リスクの予測、ii) CO<sub>2</sub>の効率的な貯留によるコストを削減、iii) 貯留に伴う地震リスクを低減するために貯留CO<sub>2</sub>をモニタリングすることが重要である。これまで、CO<sub>2</sub>分布をモニタリングすることを目的に、タイムラプス地震探査が使用されてきた。しかし、この探査はコストが高いことから探査の時間間隔が長く、貯留CO<sub>2</sub>を継続的に監視することは困難であった。さらに、CO<sub>2</sub>漏れなどの偶発的な事故を検出するためには、CO<sub>2</sub>の挙動を継続的に監視することが重要である。

これらの問題に対処するために、まず、環境騒音(または微動)を利用して地震波速度の時空間的変動を推定する連続モニタリング手法を開発した。この方法は微動から仮想的な地震データを構築するため、地震計から得られる受動的なデータのみを使用して地下をモニタリングすることができる。ただし、自然微動に依存するこのシステムの欠点は、微動の時間変動によって、モニタリングの精度が低下することである。この問題を解決するために、連続かつ制御された振動を発生させることによって、貯留CO<sub>2</sub>のモニタリングを行う新しい方法を開発した。

制御された地震信号を発振するこの新しいモニタリングシステムは、費用対効果が高く、高い時間分解能と精度を備えている。このシステムをカナダで進行中のCCSプロジェクトに使用することにより、地下の空間的および時間的変動を推定することに成功した。さらに、地震計のコストを削減するために、光ファイバー式地震計(DAS)を九州の地熱地帯に配備した。DASによって連続震源モニタリング装置からの信号を記録することにより、地熱貯留層を高精度で監視することに成功した。また、今回開発したモニタリングシステムの低コストと、高い時間分解能は、貯留CO<sub>2</sub>の長期モニタリングにおいて注目されている。

## References

- T. Tsuji, T. Ikeda, T.A. Johansen, B.O. Ruud (2016) Using seismic noise derived from fluid injection well for continuous reservoir monitoring, *Interpretation*, 4(4), SQ1-SQ11.  
(DOI: 10.1190/INT-2016-0019.1)
- H. Nimiya, T. Ikeda, T. Tsuji (2017) Spatial and temporal seismic velocity changes on Kyushu Island during the 2016 Kumamoto earthquake, *Science Advances*, 3(11), e1700813.
- T. Ikeda, T. Tsuji, M. Nakatsukasa, H. Ban, A. Kato, K. Worth, D. White, B. Roberts (2018) Imaging and monitoring of the shallow subsurface using spatially windowed surface-wave analysis with a single permanent seismic source, *Geophysics*, 83(6), EN23-EN38.

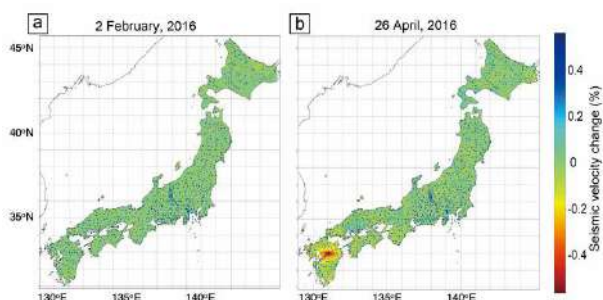


図 連続モニタリングシステムによる日本列島全国の地震波速度の記録結果(a) 2016年2月2日、(b)2016年4月26日。暖色は地震波速度が低下した地域を示す(物質の弱化)。パネル(b)は、4月16日の熊本地震(Mw7)による地下応力の変化により、九州地方の地震速度が低下したことを示している。

# 燃料電池自動車のための水素ステーションの配置

Kenshi Itaoka, Andrew Chapman, Energy Analysis Division

燃料電池自動車(以降FCVと呼ぶ)の普及は、バッテリー駆動電気自動車の開発と同様、輸送分野でのエネルギー移行に必要不可欠である。FCVの普及は、水素供給ステーションの効率的な配置に大きく依存する。本研究の目的は、国内の水素ステーションの配置のために効率的なモデルを構築すること、そしてFCVへの水素補給の将来需要を満たすことができるよう、水素ステーションの候補地を明らかにすることである。

水素ステーションの利用者の利便性やFCVの普及段階を考慮し、GIS(地理情報システム)を用いたロケーションアロケーション理論を採用した配置モデルを開発し利用した。

我々のモデルでは、最も効果的なアプローチは、潜在需要者と最寄りのステーション間の平均距離を最小化するよう、水素ステーションを設置することであると結論づけた。本研究ではさらに、既存・建設予定のステーションと、建設すべき候補地のギャップを示した。本分析により、特定の都市、特に県庁所在地で水素ステーション設置が必要とされていることが示された。日本における水素普及政策・計画を進めるため、上記の研究結果は経済産業省に報告され、ステークホルダーと共有された。

この分析をフォローアップしたモデル分析結果は現在、日本水素ステーションネットワーク合同会社(JHyM)が活用している。JHyMは、将来の水素補給インフラ整備促進を目的に、主要自動車メーカーとエネルギー会社によって設立された。本研究に加え、I<sup>2</sup>CNERのエネルギー分析チームは、世界水素普及モデル分析を実施しており、2050年までに乗用車の50%近くがFCVになる将来的可能性を明らかにした。

特に興味深いのは、多くの「水素社会」シナリオによるモデル分析においてFCVが一貫して最終用途の重要な位置を占めることであり、改めてこの水素ステーション配置に関する研究の重要性を示している。

## References

- K. Itaoka, S. Kimura, K. Hirose (2019) Methodology Development to Locate Hydrogen Stations for the Initial Deployment Stage, *E3S Web of Conferences*, 83(01014), 18.  
(DOI: 10.1051/e3sconf/20198301014)
- A. Chapman, K. Itaoka, H. Farabi-Asl, Y. Fujii, M. Nakahara (2020) Societal Penetration of Hydrogen into the Future Energy System: Impacts of Policy, Technology and Carbon Targets. *International Journal of Hydrogen Energy* (Accepted)

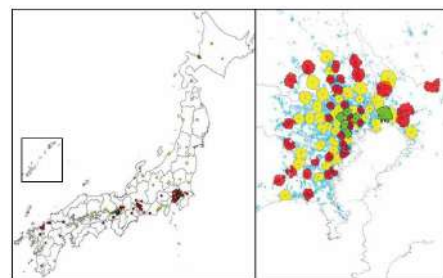


図 赤色の点・エリアは、既存/計画中のステーションと10分到達圏である。初期に計100基の水素ステーションを配置する場合は、緑色の点で示している地点(緑色のエリアは、10分到達圏である)が既存ステーションに加えて配置すべき点となる。初期の100基から200基へとさらに追加配置する場合の地点と10分到達圏は黄色の点とエリアで示している。初期の5000人の潜在利用者は、青色エリアで示している。利用者が15,000人増加した結果、初期の利用者総数は20,000人となる見込みで、水色のエリアで示している。さらに利用者が30,000人増加すると、初期の利用者総数は50,000人となり、薄い青色で示している。