



ナノ材料デバイス化研究チーム
Nanomaterial Device Research Team

重水素国産化への挑戦
エネルギーと産業を支える次世代基盤技術

- 保田 諭 Yasuda Satoshi[チームリーダー]
- 矢野雅大 Yano Masahiro
- 久保真治 Kubo Shinji
(大洗原子力工学研究所 高温工学試験研究炉部/バイオナラボ兼務)
- 佐川明美 Sagawa Akemi
(研究開発推進部研究推進課/バイオナラボ兼務)
- 島根江梨子 Shimane Eriko
- 片岡奈緒 Kataoka Nao
- 金澤広大 Kanazawa Takehiro

我々のチームは、従来の原子力技術である水素同位体科学と、ナノ材料作製技術および電気化学技術を融合し、先端材料・エネルギー・環境分野への応用を目指した研究を進めています。

その中で、半導体や医薬品、将来の核融合に欠かせない希少な水素の同位体「重水素(D)」を、国産で安定的かつ低コストで製造する技術を開発しています。

我々は、水を分解して「水素(H)」を作る電気分解装置を活用し、カーボンニュートラル実現に重要な水素を作るだけでなく、その過程でごくわずかに得られる重水素も回収する仕組みを構築中です。

重水素を効率よく回収する仕組みを基礎科学から解明し、回収効率を高めた材料開発の研究を進めています。これにより、カーボンニュートラルや国内産業の発展に寄与し、持続可能な社会の構築に貢献することを目指します。

我々のチームでは、ナノ材料の作製技術、電気化学、水素同位体科学といったコア技術を基盤に、先端材料、エネルギー、環境分野への応用を目指して、基礎研究から応用デバイスの開発まで一体的に取り組んでいます。その一環として、水素(H)と重水素(D)の同位体分離を可能にする新たな電気化学的手法の開発にも挑戦しています。

重水素は、陽子と中性子を1個ずつ持つ水素の同位体(水素は陽子1個のみ)で、天然水中に約0.015%しか存在しない希少元素です。かつては原子力発電の材料として使われてきましたが、近年では材料科学、情報通信、医療、エネルギーなど幅広い分野で重要性が増しています。たとえば、半導体デバイスや有機ELの寿命向上、光ファイバー通信の長距離伝送、医薬品の薬効持続化などに利用され、将来的には核融合炉の燃料としても期待されています。

現在、重水素は主に軽水(H₂O)から濃縮・精製されて重水(D₂O)として利用されますが、濃縮過程には多大なエネルギーが必要で、日本ではほぼ輸入に頼っているのが現状です。さらに、重水は原子力施設で利用可能なため、戦略物質として輸出入が厳格に管理されており、国際情勢の変化による価格変動や供給途絶リスクを常に抱えています。一方で、半導体や光ファイバー

製造は日本の重要な基幹産業であり、将来的には核融合の燃料としての利用も見込まれていることから、重水素を国内で安定的に製造・供給できる体制の確立は、国内産業の発展とエネルギー安全保障の両面で極めて重要となっています。

このような背景から、我々のチームでは、天然水から重水素を低コストで濃縮・精製し、産業用途に利用可能な高純度の重水を国内で安定的に製造するための基盤技術の開発に取り組んでいます。同時に、これらの技術を活用することで、国産重水素のサプライチェーンを構築するという壮大な目標の実現を目指しています。

この夢の実現に向け、私たちはPEM(高分子電解質膜)型電気化学デバイスに注目し、重水素の濃縮・精製技術の開発を進めています。PEM型デバイスは、陽極・陰極・固体電解質膜からなる三層構造で、コンパクトかつ安全性が高く、水の電気分解や燃料電池として利用される技術です(図1)。特にPEM型水電解は、余剰電力や再生可能エネルギーを利用し、二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギー源である水素を製造できるため、カーボンニュートラル実現の重要技術として世界的に導入が進んでいます。

我々は、このPEM型水電解による水素製造過程で副産物として得られる重水に着目し、それを効率的に

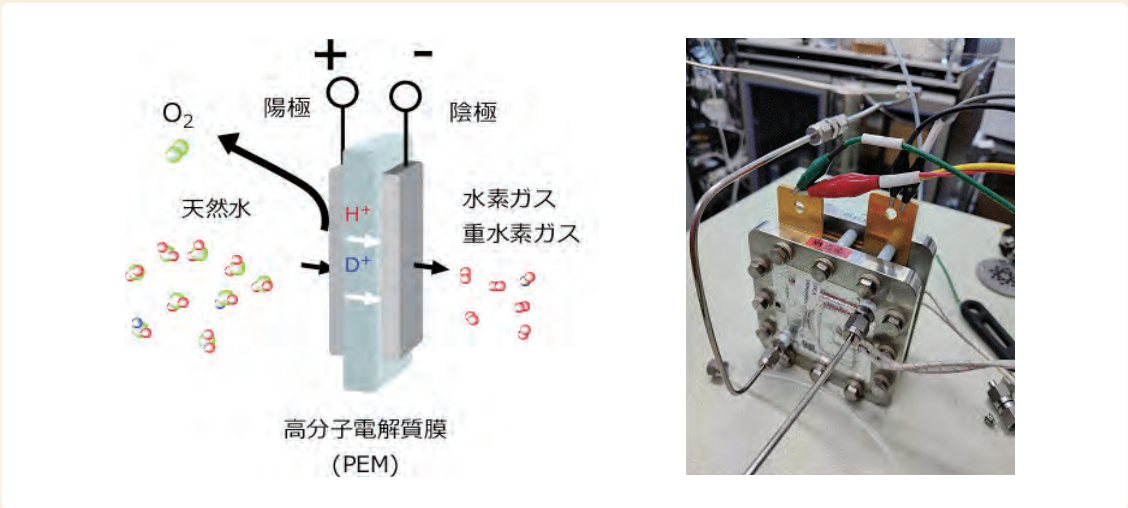


図1

図1:PEM型水電解システムの概念図と写真

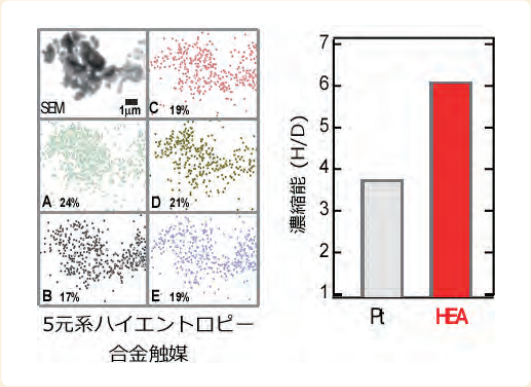


図2

回収することで、水素製造と同時に高付加価値な重水素を生産することを目指しています。日本政府は、水素の供給コストを2030年に30円/Nm³(Nm³は1気圧、0℃に換算した1m³のガス量)、2050年に20円/Nm³にすることを目標にしています。水素1Nm³の製造過程で理論的に得られる重水は目薬数滴分ですが、その価値は数十円分に相当します。この重水を副産物として回収し販売することで、水素製造コストを補いカーボンニュートラル社会の実現に貢献するとともに、重水素の国産化を実現することが可能であると考えています。

もちろん、すべての重水を回収することは技術的に容易ではありませんので、我々はこのPEM型水電解を改良し、少しでも多くの重水を効率的に回収する研究を進めています。PEM型水電解のプロセスでは、陽極に導入された天然水中の水分子(および微量の重水分子)が電解により酸素と水素同位体イオン(H⁺、D⁺)に変換され、これらのイオンがPEMを通して陰極で水素ガスおよび重水素ガスとして放出されます。この際、触媒の性質によって水素ガスが優先的に生成され、相対的に重水素ガスの放出が抑制されることで重水が濃縮される効果が得られます。すなわち、水素ガスへの変換選択性を高めることで、重水の濃縮効率も向上します。このような水素・重水素の変換選択性は、水素同位体と陰極の触媒との相互作用の強さに依存すると考えられており、その制御が重要です。我々はこの点に着目し、水素ガスへの変換選択性を高めるための新規触媒

の開発に取り組んでいます。特に、複数の金属元素を等モル比で組み合わせたハイエントロピー合金(High-Entropy Alloy: HEA)触媒に注目しています。最近では、特定の元素組成で合成したHEA触媒が、従来触媒と同様の水素同位体ガスの生成能力を維持しつつ、水素ガスへの変換選択性を高め、重水の濃縮効果を向上させることを実証しました(図2)。現在は、さらなる性能の向上を目指し、変換選択性の発現機構を解明するための第一原理計算に基づく理論解析も進めています。

しかし、その変換選択性の向上にも限度があるため、一部の重水素ガスは水素ガス中に混在して放出されてしまいます。このため、混在した少量の重水素ガスだけを再度液体の重水として回収する必要があります。古くから原子力分野で利用されてきた重水素ガスと水との間の化学交換反応を用いた回収法が知られていますが、我々はこの原理をPEM型電気化学デバイスに組み込み新たな回収技術の開発に成功しました。化学交換反応に電気化学反応を組み合わせると、従来法よりも回収効率が向上できるだけでなく大幅な小型化が可能であることを基礎的実験により明らかにし、現在は、さらなる検証を進めつつラボスケールの回収システムの開発を進めています。

さらに、産業用途の一つに高純度の重水素ガスが求められる場面がありますが、製造過程で重水素ガス中に水素ガスが不純物として混入する課題があります。これに対し、我々はPEM型電気化学デバイスを活用し新たな分離技術を開発しました。本技術では、二次元材料である単原子層グラフェン膜とその上に形成したパラジウム薄膜からなる二層構造からなる触媒を新たに開発しました。パラジウムは水素同位体ガスを電気化学的にイオン化する性質を持ち、グラフェン膜はH⁺をD⁺よりも選択的に透過する性質を持ちます。この触媒に水素と重水素の混合ガスを導入すると、電気化学的にイオン化したのち、グラフェン膜によってH⁺を選択的に透過することで、水素ガスの選択的除去が可能となります。初めに、我々は、未だ解明されていないグラフェン膜の選択的透過性の性質を実験と理論の両面

図2:開発したハイエントロピー合金触媒の元素分布イメージと従来触媒との濃縮能の比較

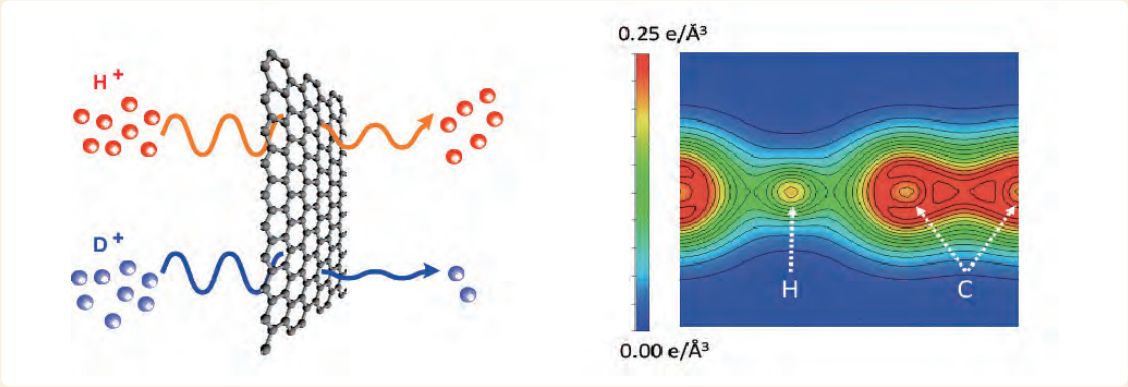


図3

から検証した結果、透過過程においてイオン間の質量差に起因する量子トンネル効果が主要因であることを明らかにしました。さらに、この分離技術をラボスケールのPEM型電気化学デバイスに組み込むことで、実際に重水素ガス中の水素ガスを選択的に除去可能であることを実証しました。

このように我々は、PEM型電気化学デバイスを活用して水素と重水素の同時製造を実現し、重水素の国産化と安定供給を可能にするサプライチェーン構築に向けて、要素技術の研究開発を着実に進めています。今後は、得られた知見をもとに基礎的観点から要素技術のさらなる性能向上を図りつつ、関連企業との連携を深め、社会実装に向けた開発を加速させていく予定です。

本研究は、従来の原子力技術である水素同位体科学と、先端的な材料・電気化学技術を融合し、進化させた次世代原子力研究であり、機構が掲げる「ニュークリア×リニューアブル」の理念に沿うものです。カーボンニュートラル社会の実現や国内産業の発展、さらには次世代エネルギー社会の構築に貢献しうるので、持続可能な社会の実現に向けた技術基盤の確立につながることを期待されます。

チームリーダーの自己紹介

私はこれまで、産業技術総合研究所および北海道大

学において、ナノ分析技術、ナノ材料合成、電気化学などの分野で研究を進め、2017年より本機構に所属しています。ナノ材料の基礎的な物性評価に取り組む中で、水素同位体科学に関心を持つようになり、これまでに培ってきた知識や技術を活かして、水素と重水素の分離技術に関する研究に取り組んでいます。

研究者を志すようになったきっかけは、量子効果が顕著に発現するナノの世界の面白さに惹かれたことです。水素同位体はまさにそのような量子効果が顕著に現れる系であり、大変興味深く感じながら研究を進めています。

また、国立研究機関において社会実装に関する研究に触れてきた経験から、現在取り組んでいる成果についても、産業界との連携を通じて社会に還元していきたいと考えています。



(写真左から) 矢野雅大研究員、佐川明美イノベーションコーディネータ、保田諭チームリーダー、久保真治研究主席、金澤広大研究開発アシスタント

図3:量子トンネル効果により、重水素イオンよりも水素イオンがグラフェン膜を優先的に透過する様子を示す概念図とその理論計算結果