

高効率発電システムを目指した 重水素燃料電池の開発

今回、重水素を燃料とする固体高分子形燃料電池システムを開発し、その発電試験を行った結果、水素を燃料とした場合と比較して起電力が増大することが実証されました。

燃料電池の研究における課題についてお聞かせください

二酸化炭素の温室効果による地球温暖化問題を回避する代替システムの1つとして注目されているのが燃料電池です。燃料電池は、燃料のエネルギーを直接電気エネルギーに変換する電気化学的システムで、約170年前に発明されました。これまで、さまざまな燃料について研究されてきましたが、水素が最も性能が高く、これを凌駕する燃料電池はありませんでした。

水素を利用する場合、水の電気分解反応の逆反応を利用するもので、化学反応式、

$$\text{H}_2 [\text{g}] + (1/2)\text{O}_2 [\text{g}] \rightarrow \text{H}_2\text{O} [\text{L}]$$
に伴うギブスエネルギー変化 $\Delta G^\circ = -237.2 [\text{kJ/mol}]$ に相当する電力を生成します。すなわち理想的には、この反応によって $E^\circ = 1.23 [\text{V}]$ を得ることができます。

固体高分子形燃料電池 (PE(M) FC、Polymer Electrolyte (Membrane) Fuel Cell) は、高分子電解質膜を挟んで、カソード極に酸化剤(酸素)を、アノード極に還元剤(水素)を供給することにより発電します。

高分子電解質膜は燃料電池の心臓部です。この膜の厚みは数十 μm で、両面は白金触媒層でコートされ、膜電極接合体(MEA)と呼ばれる積層膜として利用されています。燃料の水素ガスは、アノード極の

白金触媒で活性化されプロトンになり、高分子電解質膜内部の水路(チャンネル)を経てカソード極へ伝導、酸素と反応し水になります。

実際の燃料電池では、電極反応速度や電解質膜抵抗が有限であるために、起電力は理論起電力より小さいものになります。そのため燃料電池の研究では、電極に用いる触媒を改質して電極反応速度を速めたり、電解質膜の性能を高めることで抵抗値を減らしたりして起電力を理論起電力に近づける努力がなされています。

重水素を採用したきっかけを教えてください

重水素燃料電池に至ったきっかけは中性子線による燃料電池研究でした。

我々は、茨城県東海村で中性子小角散乱による物質研究を行っています。原子炉や加速器で発生した中性子は、物資の内部で散乱し互いに干渉します。この小さな散乱角に現れる干渉縞(小角散乱)を解析すれば物質のナノスケールの構造を解析することができます。この原理はX線や光とまったく同じです。

しかしながら、中性子は電荷を持たない中性子であるため、電子雲

小泉 智*¹ (こいずみ・さとし)
堤 泰行*² (つつみ・やすゆき)

(独)日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 強相関超分子研究グループ グループリーダー*¹
茨城大学 名誉教授*²

を突き抜けた原子核近傍において核力を介して相互作用し散乱する訳です。つまり、中性子は、原子核構造の異なる同位体同士で優れたコントラストを持ち、例えば、水素と重水素を効率よく識別することができます。

燃料電池は、そもそも水素が燃料です。そこで重水素で発電を行えば重水素はアノード極で触媒の助けをかり重陽子になり、やがて高分子電解質に入ります。そして、カソード極で酸素と反応し重水になり、再び高分子電解質膜を膨潤させます。発電途中で燃料を水素/重水素に切り替えると、中性子小角散乱のシグナルがどんどん変化します。そして、高分子電解質膜のイオンクラスター・チャンネル構造や、水の動きが追跡できるというアイデアです。

電荷を持たない中性子は優れた物質透過性を示します。そこで、作



写真1 日本原子力研究開発機構の中性子超小角散乱装置(SANS-J-II) 中性子レンズを使ってナノからマイクロメートルの構造を評価できる



小泉 智



堤 泰行

動中の燃料電池に中性子線を打ち込むと内部の膜電極接合体 (MEA) を透かして見るができます。ここで主役を演じているのは茨城県東海村にある日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 (JRR3) における中性子超小角散乱装置 (SANS-J-II) (写真1) です。この装置は、発電中の燃料電池が評価できる「生きたままを見る分析技術」と言えます。

重水素を燃料としたときの結果について教えてください

今回、我々は水素ガスの代わりに同位体である重水素ガスを用いて燃料電池を動作させて、その発電特性試験を行いました。その結果、重水素ガスを燃料とする燃料電池は、水素ガスのものと比較して約4%高い発電特性があることが実証されました。カソード極に空気を、アノード極に重水素ガスまたは水素ガスを用いた場合の電流密度-電圧特性 (I-V 特性) の比較結果を図1に示します。電流密度 I が $300\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以下の広い範囲で、起電力の値は重水素ガスを用いた場合の方が20~30mV高いこと(約4%の効率増)が明らかになりました。

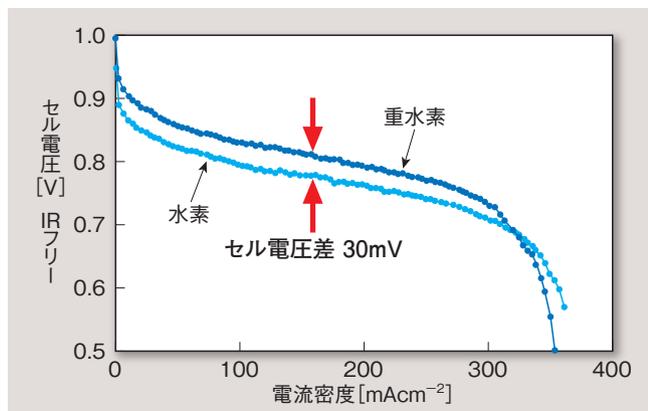


図1 重水素燃料電池の発電結果

重水素ガスと酸素ガスから液体の重水が生成される反応は、

$\text{D}_2[\text{g}] + (1/2)\text{O}_2[\text{g}] \rightarrow \text{D}_2\text{O}[\text{L}]$ です。文献によれば、このときギブスエネルギー変化は、 $\Delta G^\circ = -243.4 [\text{kJ/mol}]$ であり、相当する理論起電力は $E^\circ = 1.26 [\text{V}]$ になります。今回の実験による重水素ガスの燃料電池と水素ガスの燃料電池との起電力の差20~30mVは、両者の理論起電力の差 $1.26 [\text{V}] - 1.23 [\text{V}] = 0.03 [\text{V}]$ と良く一致しており、反応のギブスエネルギーの差を反映して、重水素燃料電池の性能が高くなっているものと説明できます。

重水素燃料電池の今後の展開についてお聞かせください

地球上での水素原子と重水素原子の存在割合は、水素が99.985%、重水素が0.015%です。そのため、重水素は水素に比べ、たいへん貴重で高価なガスです。今回の研究で、重水素による発電効率は水素に比べて高いことが実証されましたが、コスト面を考えると大量に重水素ガスを消費する燃料電池は、一見、現実的ではないように思われます。

しかし、重水素燃料電池システ

ムで生成した重水を回収するリサイクルシステム(図2)と組み合わせることができればどうでしょうか。すなわち、重水素は燃料として消費して捨ててしまうのではなく、電気エネルギーを取り出すための作動媒体として循環させる発想です。この場合、重水を重水素へ再変換する際に、別途エネルギーコストを負担することにはなりますが、重水素がより高いエネルギー密度をもった作動媒体であるとの見方に立てば、その長を活かした利用が期待できます。

重水素燃料電池の利用先として、例えば、限られたスペースに高効率で燃料を搭載する必要のある潜水艦が考えられます。遠洋や深海のような空間では、同じ量の燃料であれば、少しでも高い発電効率が求められます。燃料電池の最初の実用化例として注目を集めたのは、宇宙船(1965年アメリカのジェミニ5号)でしたが、今回、提案した重水素燃料電池が最初に注目を浴びるのは、海洋空間からかもしれません。

*本研究の一部(中性子小角散乱による重水素燃料電池解析)は新エネルギー・産業技術総合開発機構の支援を受けた成果です。

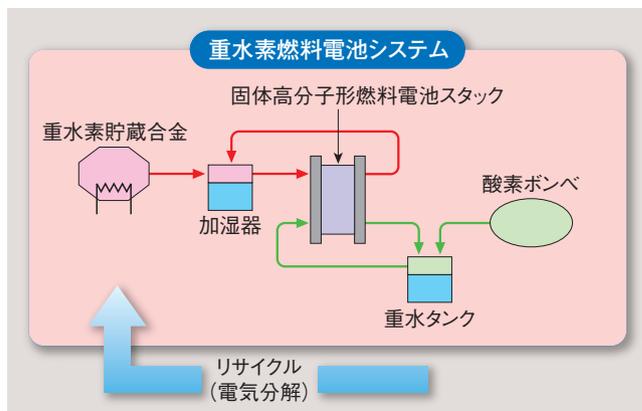


図2 重水素燃料電池システムの模式図