

カーボンニュートラルに貢献する水素エネルギー

— 炭化水素系ポリマー電解質膜 —

NIMS 資源循環材料グループ 主幹研究員
金 濟徳

요약

2050 년 탄소중립 실현을 위해서는 재생가능에너지 이용과 수소에너지의 제조 및 저장기술과 이용기술이 필수적이다. 세계 각국에서는 수소에너지의 자원정책이 활발히 이루어지고 있다. 다양한 수소 제조법 중에서 재생 가능 에너지로부터 그린 수소를 제조하는 수전해 기술과 수소 에너지를 활용하여 CO₂ 배출 제로를 목표로 한 이동체 연료 전지에의 응용이 활발히 진행되고 있다. 한편, 현재, 수전해나 연료전지의 소재 중에서 핵심적으로 사용되고 있는 불소계 전해질은 PFAS (Poly- and perfluoroalkyl substances) 규제에 의해 대체 전해질의 개발이 급선무이다. 다양한 비불소계 전해질 중에서, SPPSU (Sulfonated polyphenylsulfone) 폴리머 전해질은 높은 이온교환용량과 기계적 화학적 안정성으로 인해 차세대 탄화수소계 전해질로서의 가능성이 기대된다. PEM (Polymer electrolyte membranes)형 수전해나 연료전지의 전해질로서 불소계 전해질의 대체 재료는 탄소 중립 실현에 필수 불가결하며, 차세대에는 탄화수소계 전해질이 상용적으로 사용되기를 기대해 본다.

要約

2050 年カーボンニュートラル実現には再生可能エネルギー利用や水素エネルギー源の製造・貯蔵と利活用が必須であり、水素資源としての政策が世界的で活発に行われている。様々な水素製造法の中で再生可能エネルギーからのグリーン水素を製造する水電解技術や水素エネルギーを利活用し、CO₂ 排出ゼロを目指した、移動体燃料電池への応用が進められている。一方、水電解や燃料電池素材の中で核心的で使われているフッ素系電解質は PFAS (Poly- and perfluoroalkyl substances) 規制により、代替電解質の開発が急務である。様々な非フッ素系電解質の中で、SPPSU (Sulfonated Polyphenylsulfone) ポリマー電解質は次世代炭化水素系電解質としての可能性が期待される。PEM (Polymer Electrolyte Membranes) 形水電解や燃料電池の素材としてフッ素系電解質の代替材料はカーボンニュートラル実現に必要不可欠であり、新たな非フッ素系電解質が新時代に遂げる時が来ると期待する。

1. 脱炭素社会へ

近年、世界規模で異常気象が発生し、大規模な自然災害が増加するなど、気候変動問題に対応する対策が急速に進められている。気候変動の主な原因は人為起源によるガス(二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、二酸化窒素(N₂O)、フッ素系)からなる地球温室効果によるものであると考えられている(図1)[1]。これらの排出ガスの中で特に石油や石炭などの化石燃料由来の二酸化炭素による影響が大きく、脱炭素社会の

実現に向けての取り組みが進められている。

国際的には COP3 (国連気候変動枠組条約第 3 回締約国会議、1997 年 12 月) 京都議定書で初めて温暖化防止のための協定が採択され、COP21 (2015 年 12 月) パリ協定ではすべての国が参加し、今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源(植物の光合成などによる吸収量)による除去量との間の均衡(世界全体でのカーボンニュートラル(Carbon Neutral):炭素中立)を達成することを目指すこと、世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも 2℃高い水準を十分に下回るものに抑えること、並びに 1.5℃高い水準までのものに制限する努力を継続すること、主要排出国を含むすべての国が気候変動に対する世界全体での対応に向けた NDC(国家決定寄与: Nationally Determined Contribution)を 5 年ごとに提出・更新すること、共通かつ柔軟な方法での実施状況を報告しレビューを受けることなどを定めている[2]。従い、世界各国は 2050 年カーボンニュートラルを目指し、持続可能な経済成長や環境保護やエネルギー安全を含んだ安全な社会の実現に取り組んでいる。また、産業界でも、環境・社会・ガバナンスを重視する ESG(Environment, Social, Governance)経営が活発化している。日本では 2020 年 10 月、菅義偉政権(当時)は「2050 年カーボンニュートラル」を目指すことを宣言し、具体的に 14 重点分野グリーン成長戦略を提示した[3]。この重点分野の一つが水素エネルギーである。このような流れは現在(岸田政権)にも引き継がれ、グリーントランスフォーメーション(GX)政策として進めている。

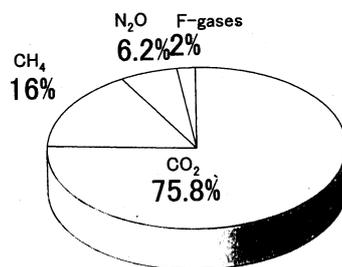


図 1. 温室効果ガス総排出量に対するガス別排出量 (F-gases: 人工的に合成したフッ素系ガス)
[1]

2. カーボンニュートラルでの水素エネルギー

水素エネルギーは石油や石炭などの化石燃料による地球環境問題とエネルギー資源の枯渇課題の解決策として提案された。水素を利用したエネルギーを中心とする、水素経済(Hydrogen Economy)という用語はジョン・ボクリス(John O' M Bockris)が 1970 年にゼネラルモーターズ(GM)テクニカルセンターで行った講演中に初めて使われたと言われている[4]。公式的には 1975 年発行した、著書「Energy: The Solar Hydrogen Alternative」に言及された。化石燃料又は水からクリーンエネルギー源である水素を製造し、その水素を利活用して社会の経済生活に有用な電気エネルギーとして変換使用できる「水素エネルギーシステムや経済」を予測した。その後、2002 年ジェレミー・リフキン

(Jeremy Rifkin)の著書「The Hydrogen Economy」や2003年米国ジョージ・W・ブッシュ(George W. Bush)政権での水素経済イニシアティブ(Hydrogen Fuel Initiative)により一般に広がるようになった。2000年初の水素エネルギーは化石燃料の枯渇による代替エネルギーとして水素社会を構想したが、現在は、地球温暖化対策としたカーボンニュートラル実現に向け、新時代のエネルギーとして水素を考えるようになった。水素の原子番号は1であり、元素記号はHである。原子量は1.00794g/molであり、常温では気体(液化温度:-252.6℃)として存在する。水素ガスは燃える性質があり、火を近づけると音を出しながら燃える。また、一定条件で爆発する性質もある。しかし、安全に使えばガソリン等の石油と同じレベルでの認識で良いのではないかと思われる。水素は宇宙で最もたくさん存在する物質(約70%)であるが、水素単体では自然系にほとんど存在せず、地球上では化合物として存在する(水、化石燃料、有機化合物など)。水素は単位重量(kg)当たり熱量が高いが分子量が軽くて体積が大きい(表1)。ガソリン1L(約750g)と同じエネルギーを得るために必要な水素は1m³(約90g)である。水素は気体のためガソリンに比べて体積が大きい、圧縮することで体積を小さくして、貯蔵、輸送することができる。水素は燃焼させることで熱や電気エネルギーとして利用できる。水素をエネルギーとして使用する際、最大の利点がある、二酸化炭素が発生しない(CO₂ゼロ)ことである。しかも、水素のエネルギー効率は高く、ロケットの燃料としても利用される。

表1. エネルギー貯蔵法によるエネルギー密度 [5]

Storage material	Specific energy (MJ/kg)	Energy density (MJ/L)
Hydrogen (700 bar)	142	9.17
Methane (compressed)	55.5	22.2
Diesel	48	35.8
LPG	46.4	26
Gasoline	46.4	34.2
Coal	~ 30	~ 38
Lithium metal battery	1.8	4.32
Lithium-ion battery	0.36 - 0.875	0.9 - 2.63
Alkaline battery	0.5	1.3
Supercapacitor (EDLC)	0.01 - 0.036	0.05 - 0.06
Flywheel	0.36 - 0.5	-

水素は天然ガス、石炭、バイオマスのような供給原料や再生エネルギー、原子力から製造できる。水素の製造方法によって色で区別しており、表2のように分類される。「グリーン水素」は、水(H₂O)を風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの電力によって、酸素(O₂)と分解することで作られる水素であり、製造過程で二酸化炭素を排出しないのが特徴である。一方、化石燃料を分解して水素を作る方法もあり、これには副産物としての二酸化炭素が発生する。この二酸化炭素をそのまま大

気に放出する方法で作られる水素を「グレー水素」、大気に排出されないように回収し、地中に貯蓄する方法(CCUS: carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)で作られる水素を「ブルー水素」と呼んでいる。他、イエロー水素、ターコイズ水素、ブラウン水素、ホワイト水素製造方法がある。まだ、世界で生産されている水素のうち、約 95%を占めているのはグレー水素であり、カーボンニュートラルを実現するためにはグリーン水素とブルー水素への技術開発が進められている。

水素協議会(Hydrogen Council:エネルギーの移行に資する水素について、統一した長期的なビジョンを持つ大手エネルギー、輸送機器、産業の企業によるグローバルなイニシアティブ、本社、ベルギー)は 2050 年までに世界水素市場は 2 兆 5 千億ドル以上の市場規模に成長し、約 3 千万人の雇用が創出されると予想した。更に、水素エネルギーがエネルギー需要全体の 18%を占めるようになり、それに伴い、世界の二酸化炭素排出量は約 60 億トン(2018 年の世界の二酸化炭素排出量の約 18%に相当)削減されると見込んでいる(図 2)。しかし、水素をエネルギーとして活用するには製造コストが高いことが大きな課題である。グリーン水素は化石燃料を原料とする水素に比べ、およそ 3 倍のコストがかかることとされる[6]。しかし、水素より先に普及し始めたクリーンエネルギーである風力発電や太陽光発電などは約 10 年前から大幅にコスト低下が進んでいることから、グリーン水素も製造コストのスケールメリットが出てくれば、脱炭素社会ではグリーン水素が中心的なエネルギー源としての役割を担うことになると予測している(図 3)。現在、EU やドイツやオランダ、豪州など多くの国で水素の国家戦略が策定されるなど、世界中で取り組みが本格化し、脱炭素化が困難な商用車や産業分野での水素利用や、水素発電の導入、水素輸入に向けたサプライチェーンの検討などの動きが活発化している[7]。

表 2. 水素の分類と製造方法

水素の種類	特徴
グリーン水素	再生可能エネルギーの電力で水(H ₂ O)を電気分解して水素(H ₂)と酸素(O ₂)を製造 CO ₂ 排出ゼロ
ブルー水素	化石燃料、特に天然ガスと水蒸気を反応させ、水素(H ₂)と二酸化炭素(CO ₂)を製造 製造時に発生するCO ₂ は回収貯留(CCS) CO ₂ 排出ゼロ
グレー水素	化石燃料、特に天然ガスと水蒸気を反応させ、水素(H ₂)と二酸化炭素(CO ₂)を製造 製造時に発生するCO ₂ は回収せず、大気中に放出
イエロー水素	原子力発電を使い、水(H ₂ O)を電気分解して水素(H ₂)と酸素(O ₂)を製造 CO ₂ 排出ゼロ、しかし、核廃棄物生成
ターコイズ水素	都市ガス主成分であるメタン(CH ₄)を熱分解して水素製造 カーボン(C)は固体生成 高温反応炉は再生エネルギー利用 CO ₂ 排出ゼロ
ブラウン水素	石炭を使い、製造する水素 グレー水素より沢山のCO ₂ 排出 ブラック水素に近い
ホワイト水素	製品生産(例えば、製鉄所)工程中での副産物として出る水素(H ₂) 生産量の制御が困難

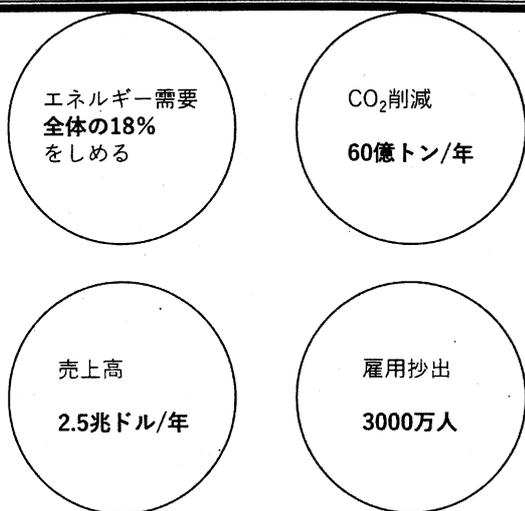


図 2. 2050 年の水素市場のビジョン[6]

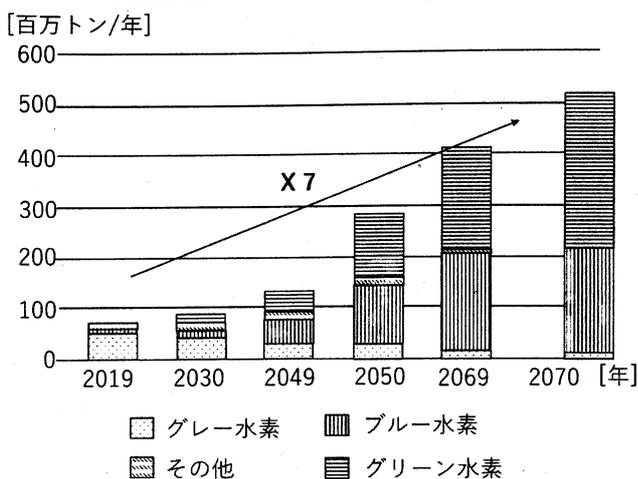


図 3. 水素生産量[7]

3. CO₂ゼロ水電解と燃料電池

水素に炭素(C)が含まれていないため、水素を利用する際にはCO₂が排出されない。また、水電解に太陽光や風力などの再生可能エネルギー由来の電力を用いれば、水素製造時においてもCO₂が排出されない(グリーン水素)。更に、このグリーン水素を用いた燃料電池はCO₂を排出せずに熱や電気を作り出し、様々な用途に利用できる(図4)。

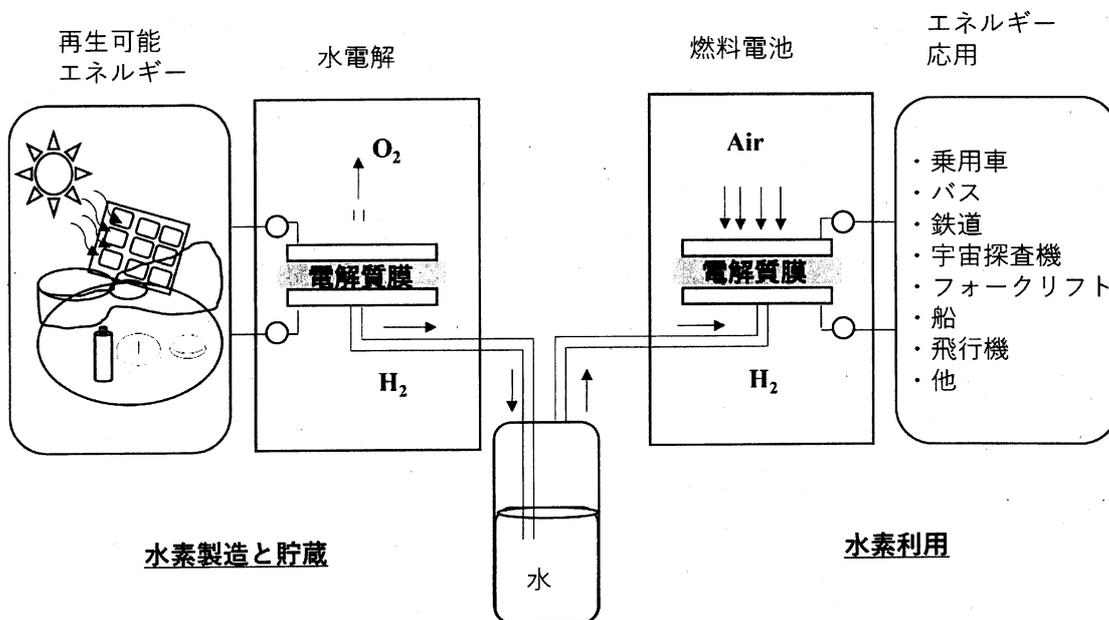


図 4. 再生可能エネルギーによる水素製造・貯蔵と応用

水電解(水の電気分解)は、原理としてはよく知られており、実用技術としてはアルカリ水電解法と固体高分子形(PEM形: Polymer Electrolyte Membrane 又は Proton Exchange Membrane、PEMFC 又は PEFC とも呼ぶ)水電解法がある。アルカリ水電解法は、水酸化カリウムの強アルカリ溶液を用いて水電解を行うものであり、大規模水素製造用として工業分野で実績がある。固体高分子形水電解法は

1970 年代初期に GE (General Electric Company) が燃料電池の技術を適用したもので、電解質膜・電極接合技術が研究され、実用化されている。表 3 にアルカリ水電解法と固体高分子形水電解法と固体酸化物形水電解法の比較を示す。現状技術による比較であるが、一般に固体高分子形水電解は同じ面積に流す電流(電流密度)がアルカリ水電解に比べて高いため電解槽を小型化できるが、高価な材料を使用する。水素製造におけるコスト(設備費含む)に関しては、固体高分子形水電解はアルカリ水電解の 2~3 倍であるが、将来のコスト低減も期待される。

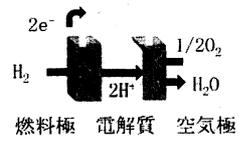
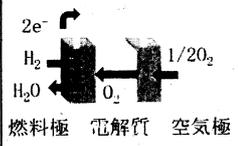
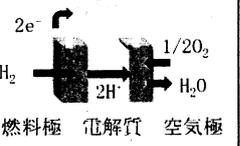
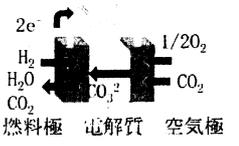
表 3. アルカリ水電解、固体高分子形水電解、固体酸化物形水電解の比較 [8, 9]

	アルカリ水電解	固体高分子形水電解	固体酸化物形水電解
電解質	隔膜+アルカリ水溶液 (25-30% KOH、NaOH 溶液)	・カチオン交換膜 (Nafion 膜等)	イオン伝導性固体酸化物 (YSZ 等)
触媒	Ni/Fe など	Pt, Ir など	Ni dope セラミック など
作動温度(°C)	60 - 90	50 - 80	650 - 1,000
必要電力	4.5 - 6.5 kWh/Nm ³	5.0 - 6.5 kWh/Nm ³	4.1 kWh/Nm ³
システム規模	大型化可能	50Nm ³ /h 程度	大型化可能
水素純度(精製プロセス含む)	99.99%	> 99.99%	> 99.99%
メリット	確立された技術 非貴触媒 長期安定性(<90,000h) 比較的 low コスト 費用対効果の高い	高い電流密度 高電圧効率 良好な負荷レンジ 早いシステム応答 コンパクトシステム 高純度	効率 100% アップ: 熱中性効率 >100% (w/hot スティーム) 非貴触媒 高圧
デメリット	低い電流密度 ガスのクロスオーバー(純度) 狭い負荷レンジ 低い作動圧力 腐食性液体電解質	コンポーネントの高コスト 酸性腐食環境 低い安定性(<20,000h) 商品化(大型化)	ラボスケール かさばるシステム設計 耐久性(脆いセラミック) コスト不透明

一般に水電解は、温度が高いほうが理論電解電圧は低くなるので高効率となる。よって、高温水蒸気の水電解する技術として水蒸気水電解(800~1000°C レベル)が研究されている。熱源としては、固体酸化物形燃料電池(SOFC: Solid Oxide Fuel Cells)の排熱を有効活用し、これを電解時に活用する固体酸化物形水電解セル(SOEC: Solid Oxide Electrolyser Cells)の研究が行われている[8]。現在は、カーボンニュートラル実現に向けた再生可能エネルギーの導入拡大により、余剰電力を水素やメタンに変換・貯蔵して活用する研究開発や水電解技術開発が活発化している。特に、アルカリ水電解法の隔膜問題(リークにより出力低下や水素純度低下)や PEM 形水電解法のコスト課題の解決策として PEM 形水電解法と同様にアノード側とカソード側の間に電解質膜(図 4)を用いるアニオン交換膜形(AEM: Anion Exchange Membrane)についての研究開発が進められている。また、NEDO 燃料電池・水素技術ロードマップ[10]ではアルカリ水電解法、PEM 形水電解法、AEM 水電解法、SOEC 法についてそれぞれ課題解決や高性能・高効率化を目指した研究開発が行われている。水電解法以外にもグリーン水素製造として、光化学反応による水素製造、バイオマスを用いた水素製造、熱化学法による水素製造などが研究されている。

グリーン水素を利用し、電気を発電する CO₂ 排出ゼロ電池に燃料電池がある。燃料電池は燃料として水素と酸素(又は空気)を化学反応させて、直接電気を作り出す発電装置である。一般に認識している電池である、蓄電池のように充電して電気を利用するのではなく、「電池」という名前で呼んでいるが、発電機である。最初の燃料電池は 1839 年にイギリスのグローブ卿により発明された。その後、多様なタイプの燃料電池が開発されて行き(表 4)、進化を遂げている。現代燃料電池の先駆者は 1952 年にアルカリ(Alkaline)電解質を利用し、5kW 級燃料電池を開発した F. T. Bacon である。最初の実用化燃料電池は 1965 年ジェミニ(Gemini)宇宙計画及び 1966 年アポロ(Apollo)宇宙計画により開発された燃料電池であり、主に宇宙利用などのニッチな用途で利用された。1987 年に画期的なプロトン(Proton)導電性を示す、フッ素系 DOW 膜(図 5)の開発によりカナダのベンチャーバラード社(Ballard Power Systems Inc.)が高性能燃料電池を開発した。これを契機に熱機関では高効率化が困難であった比較的コンパクトな定置用や移動体などの様々な用途への展開が示唆されるようになり、世界的に PEFC 開発が本格化していくことになる[11]。その後、日本ではミレニアムプロジェクトや大規模実証など多くの国プロジェクトが進められ、2009 年にはエネファーム(家庭用燃料電池コジェネレーションシステム)が世界で初めて実用化され、2014 年にはトヨタ MIRAI(燃料電池自動車)が発売された。現在は、カーボンニュートラル実現に向けて、CO₂ 排出ゼロ社会の大型・商用モビリティ(HDV: Heavy Duty Vehicle)や多用途化に向けた燃料電池開発が進められている[3]。将来的に、モビリティマーケットは燃料電池車だけではなく水素を利活用する水素電気車とバッテリー電気車が共存すると考えられる。水素電気車は長距離運行や商用車に適合し、バッテリー電気車は短距離運行や乗用車に適合するからである。

表 4. 燃料電池の種類と特徴[12]

種類	固体高分子形 (PEFC)	固体酸化物形 (SOFC)	リン酸形 (PAFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)
電解質	陽イオン交換膜 (フッ素樹脂系)	セラミック	リン酸	リチウム・カリウム炭酸塩 リチウム・ナトリウム炭酸塩
媒体イオン	H ⁺	O ²⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻
作動温度	80~120℃	600~1000℃	190~200℃	600~700℃
作動原理				
反応式	燃料極 H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻ 空気極 1/2O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O 全体 H ₂ + 1/2O ₂ → H ₂ O	燃料極 O ²⁻ + H ₂ → H ₂ O + 2e ⁻ 空気極 1/2O ₂ + 2e ⁻ → O ²⁻ 全体 H ₂ + 1/2O ₂ → H ₂ O	燃料極 H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻ 空気極 1/2O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O 全体 H ₂ + 1/2O ₂ → H ₂ O	燃料極 CO ₃ ²⁻ + H ₂ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻ 空気極 1/2O ₂ + CO ₂ + 2e ⁻ → CO ₃ ²⁻ 全体 H ₂ + 1/2O ₂ → H ₂ O
主な用途	・家庭用(小規模発電) ・携帯・可搬用 ・車載用	・家庭用(小規模発電) ・産業・業務用 ・可搬用 ・事業用(大規模発電)	・産業・業務用 ・事業用(大規模発電) ・非常電源用	・産業・業務用 ・業務用(大規模発電) ・非常電源用
システムの燃料	都市ガス、LPガス、純水素、メタノール、バイオガス、等			
システム発電効率 水蒸気改質 LHV*基準 (純水素の場合)	33~44% (50~60%)	45~65%	40~48% (48%)	44~66%

*LHV: 低位発熱量(燃料ガスを完全に燃焼させた時に水蒸気の凝縮潜熱を差し引いた発熱量のこと)

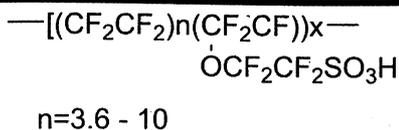


図 5. DOW フッ素系電解質ポリマー膜の化学構造

4. PEM 形水電解と PEM 形燃料電池の心臓；プロトンイオン交換電解質膜

PEM 形水電解と PEM 形燃料電池は発電効率が高い、作動温度が低い、軽量・コンパクトなどのメリットがあり、水素社会に向けて大きく貢献できると期待されている。PEM 形水電解と PEM 形燃料電池は図 4(表 3、表 4)で示すように電極(アノード)と電極(カソード)の間にプロトン(Proton; H⁺)イオンが移動(拡散)できるプロトンイオン交換ポリマー電解質膜が必須である。水電解や燃料電池の性能はこの電解質膜の抵抗(イオン伝導度)や機械的・化学的安定性に大きく依存する。従い、現在、実用化されたポリマー電解質はテフロン(PTFE: poly(1, 1, 2, 2-tetrafluoroethylene), ポリテトラフルオロエチレン)骨格にスルホン酸基を末端につけた側鎖がぶら下がった構造を持つ、パーフルオロスルホン酸(PFSA: Perfluorosulfonic acid)ポリマーであり、図 6a で示すような類似ポリマー電解質がある。PFSA ポリマー電解質膜は架橋されておらずテフロン骨格部分がファンデルワールス力(van der Waals force)で結合した結晶を形成し、膜の形状を保つ。一方、含水状態では骨格の強い疎水性により、疎水・親水相分離が起こり、側鎖のスルホン酸基同士は凝集し、イオンクラスター構造を取る。このイオンクラスター構造が 3 次元でつながり、高速イオン伝導パスになる(図 6b)。イオンクラスター中ではスルホン酸基の水素イオン(プロトン:H⁺)は解離して電荷担体となり、高速で移動(Vehicular, Grotthuss 機構)でき、高い伝導特性(0.1S/cm, pKa = -6 [13])を示す。また、強い CF 結合により機械的・耐化学的特性に優れている。現在、PFSA ポリマー電解質膜は高伝導度や高機械的安定性や高化学的安定性や高耐久性により、主に、商用化された水電解や燃料電池などの分野で採用されている。

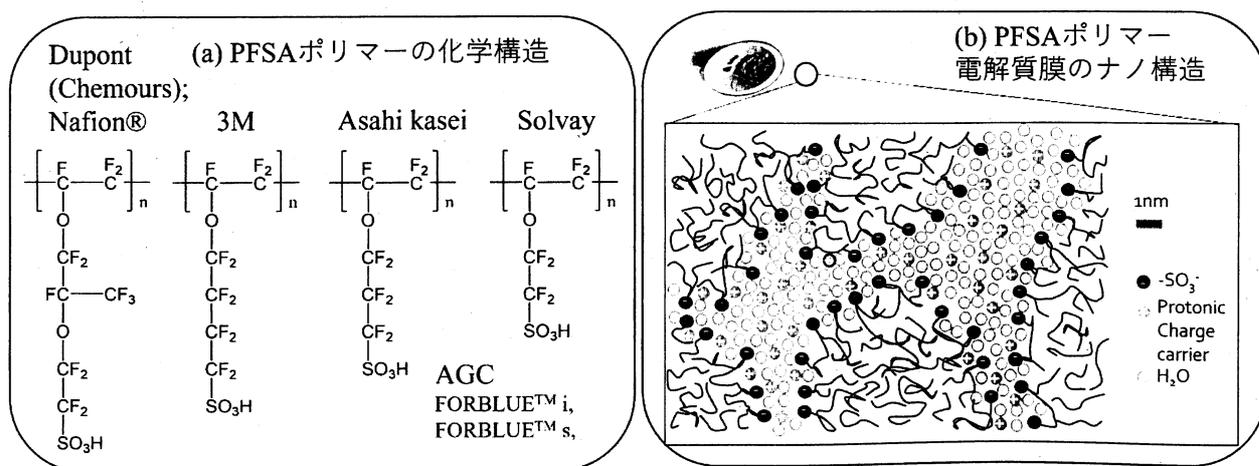


図 6. (a)パーフルオロスルホン酸ポリマーの化学構造と(b)PFSA ポリマー電解質膜のナノ構造[14]

一方、近年、気候変動対策によるカーボンニュートラル実現に向けて欧州や米国ではグリーン政策として有機物質禁止(ゼロ・ポリューション)を行っており、その規制の中にフッ素系化合物

(PFAS: poly- and perfluoroalkyl substances、パーフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物、約 4,500 種類の合成化学品の総称)が含まれている[15]。図 7 は有機フッ素系化合物材料の主な特性を示す。PFAS の定義によればほぼすべての有機フッ素化学製品が含まれることになり、フッ素系イオン交換電解質膜の使用が禁止される可能性があり、代替イオン交換ポリマー材料として炭化水素系電解質の開発が急務である。

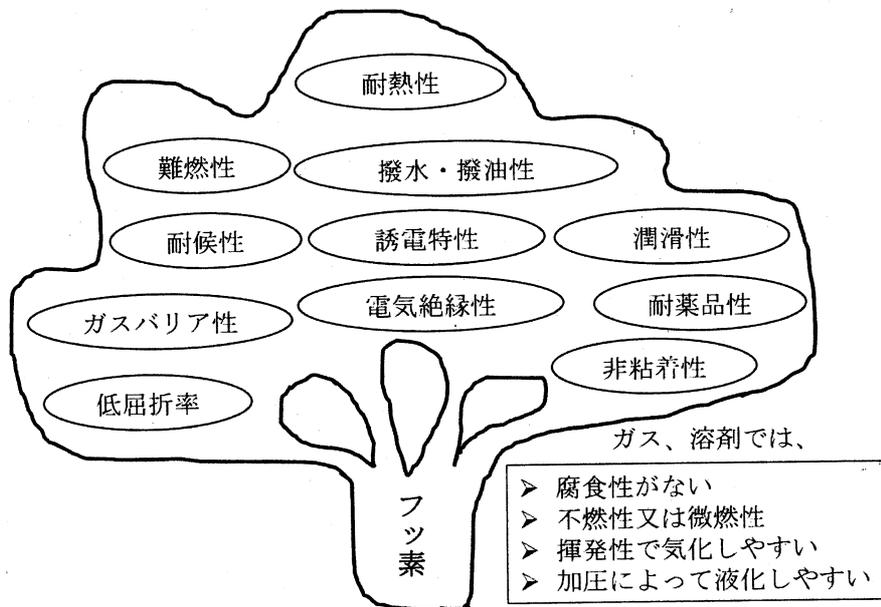


図 7. 有機フッ素系化合物材料の主な特性[16]

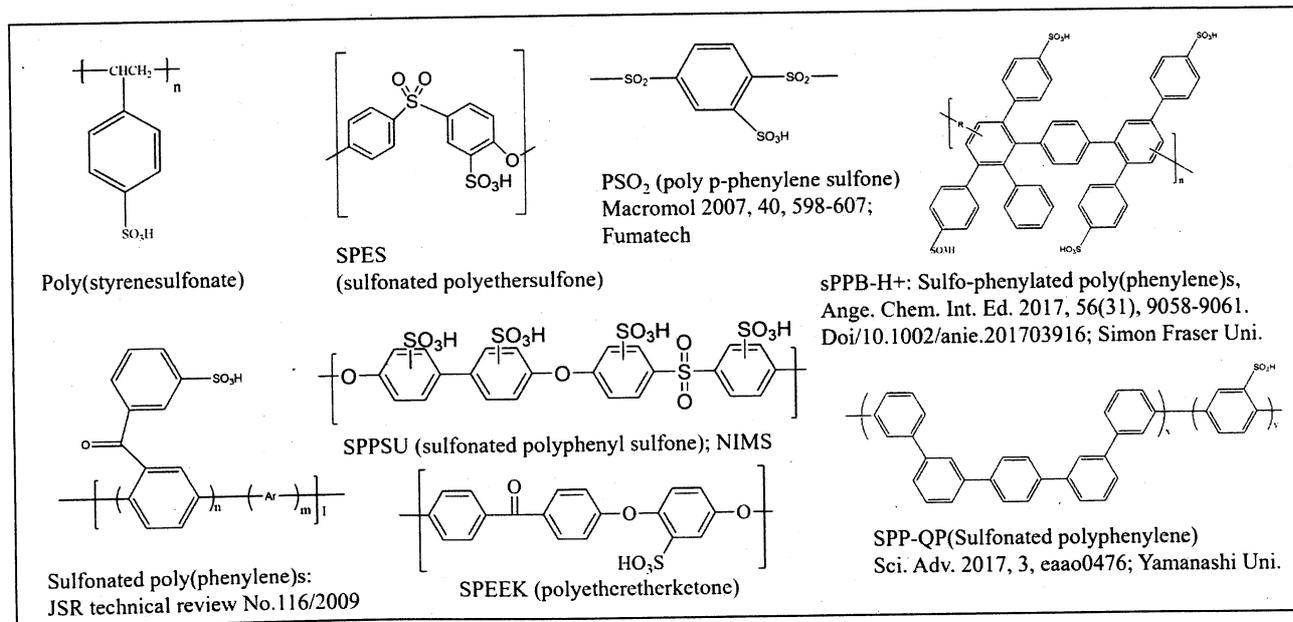


図 8. 多様な炭化水素系電解質の化学構造

5. 炭化水素系ポリマー電解質膜への期待

歴史的で見ると、PEM 形燃料電池の高分子電解質は炭化水素系 (HC: Hydrocarbon polymer electrolytes) のプロトンイオン交換膜が先に用いられた。しかし、酸化雰囲気下での耐久性が不十分

で、Dupont 社の Nafion (図 6a) が登場して以来、現在まで、フッ素系の電解質膜が用いられるようになった。多様な炭化水素系電解質 (図 8) の研究が今まで行われて来ているが、まだ、商用化燃料電池用電解質としては採用されていない。Nafion 膜として代表されるフッ素系電解質については 1960 年代から今でもその電解質を用いた、材料側からデバイス側まで、物理的・化学的な特性評価を行い、改善を遂げ続けている。一方、炭化水素系電解質に関しては長い研究歴を持っているにも関わらずフッ素系電解質である Nafion 系のように、材料側からデバイス側まで深い研究実績が行われていないことで耐久性課題の未解決が一つの理由として挙げられる。近年、カーボンニュートラルや PFAS 規制により、炭化水素系電解質の本格的な研究開発が行われることを期待している。

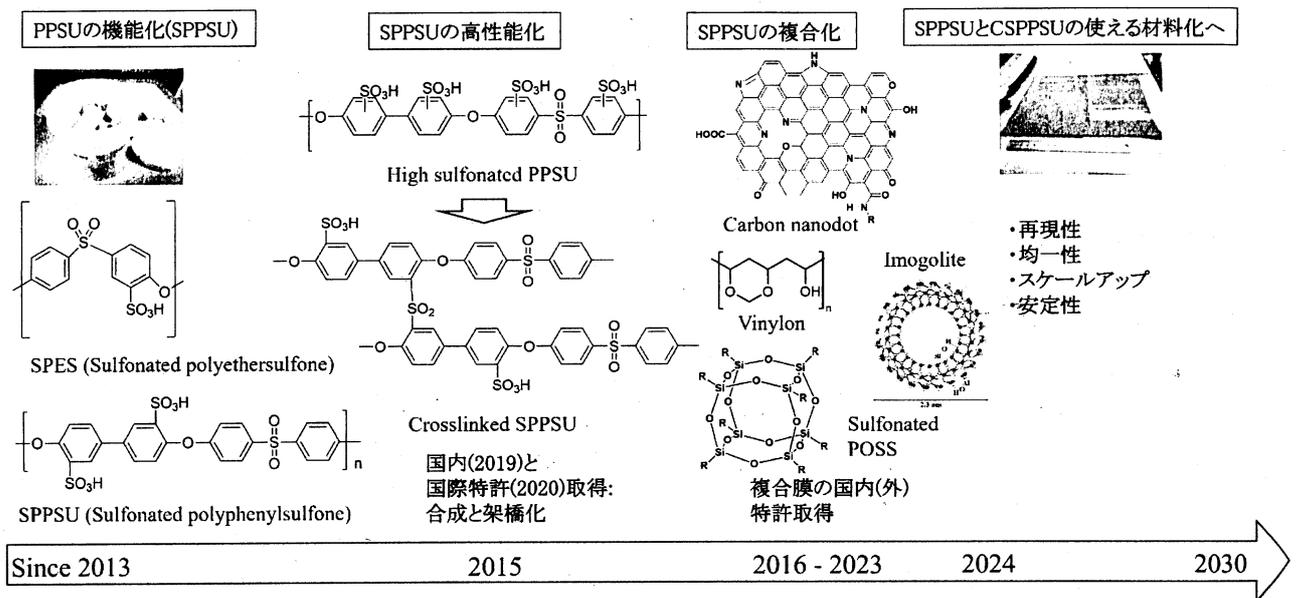


図 9. NIMS の炭化水素系 SPPSU 電解質の開発状況

我々は炭化水素系ポリマーの中でエンジニアリングプラスチックであるポリフェニルスルホン (PPSU: polyphenylsulfone) を用いて実用可能な電解質材料として研究開発を 2013 年から行っている (図 9) [17]。PPSU ポリマーはビスフェノールとジフェニルスルホンがエーテル基で結合されたものである。アリーレンエーテルセグメントは無極性であり、柔軟性を有する電子リッチな部分である。アリーレンスルホンセグメントは極性であり、リジッドであり、電子プアな部分である。PPSU は高い化学的、熱的、機械的安定性を有する。更に、プロトンイオン交換電解質膜の主な目的である、高プロトン伝導性を付与できる、化学修飾 (新電子置換や救電子置換など) 反応サイトが繰り返しユニットにたくさん存在する。従い、高いイオン交換容量を持つ、スルホン化 PPSU (SPPSU) の合成ができる。例えば、フッ素系電解質である Nafion のイオン交換容量は約 1meq/g に対して、PPSU にスルホン基が 4 個ある場合のイオン交換容量は 5.35meq/g であり、Nafion より 5 倍以上高く、電解質材料として期待できる。しかし、実用化材料としては膜の水和安定性や機械的・化学的安定性など、改善しなければならない課題が多く存在している。現在、その課題の改善研究を行いながら使える材料としての開発を続けている。

6. まとめ

気候変動問題に対応するために世界的で 2050 年カーボンニュートラル実現を進めている。ここでは、カーボンニュートラルに貢献する新エネルギー源として水素について述べた。再生可能エネルギーから得られるグリーン水素製造方法や CO₂ 回収・貯蔵・利用から得られるブルー水素製造方法などについて概略した。更に、再生可能エネルギーから水素を製造方法としては水電解が有望であることや貯蔵した水素は CO₂ 排出が多い移動体への応用が期待でき、CO₂ 排出ゼロの燃料電池が有望であることについて概略した。また、現在、水電解や燃料電池装置の核心的素材として使われているフッ素系電解質の PFAS 規制について述べた。最後に、代替電解質として非フッ素系電解質である、炭化水素系電解質の紹介と私たちが研究開発している SPPSU ポリマー電解質について紹介した。

参考文献

1. <https://www.city.minamiboso.chiba.jp/0000000779.html>
2. 経産省、第 6 次エネルギー基本計画、
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>
3. 日本エネルギー白書 2021, 2022
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy
5. S.-B. Han, The trend of polymer electrolyte membrane water electrolysis, KIC News, 21(3), 2018.
6. https://www.nomura.co.jp/el_borde/view/0052/
7. 経済産業省「水素社会実現に向けた経済産業省の取り組み、2020 年 1 月、資料 6
8. 日本エネルギー白書 2015、第 6 章
9. M. Carmo, D.L. Fritz, J. Mergel, D. Stolten, A comprehensive review on PEM water electrolysis, International Journal of Hydrogen Energy, 38(2013) 4901; M.F. Vostakola, H. Ozcan, R.S. El-Emam, B.A. Horri, Recent advances in high-temperature steam electrolysis with solid oxide electrolyzes for green hydrogen production, energies 16(2023) 3327.
10. NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ、「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理(解説書)」、2023 年 2 月公開
11. 燃料電池開発情報センター(FCDIC)ホームページ
12. 日本電機工業会ホームページ
13. K.D. Kruer, On the development of proton conducting polymer membranes for hydrogen and methanol fuel cells, Journal of Membrane Science 185 (2001) 29.
14. J.D. Kim, Development of polymer electrolyte membranes for use at high temperatures, 燃料電池(The Journal of Fuel cell Technology)、FCDIC社、vol16(2) (2016), 8.
15. 内閣府、戦略策定に向けた主な視点について、①国際動向 資料 1
16. ダイキンフッ素塾、フッ素化学: daikinchemicals.com
17. J.D. Kim, et al. International Journal of Hydrogen Energy, 38(2013) 1517-1523; Int. J.

Hydrogen Energy, 41(2016) 11794-11800; J. Applied Polymer Science, 133(46)(2016) 44218-44225; Solid State Ionics 316(2018) 102-109; Int. J. Hydrogen Energy, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.142, 45(2020) 9979-9988; membranes, DOI: 10.3390/membranes10020031, 10(2020) 31-44; J. Solid State Electrochemistry, DOI: 10.1007/s10008-020-04594-2, 24(2020) 1185-1195; polymers, DOI: 10.3390/polym12061354, 12(2020) 1354-1367; polymers, DOI: 10.3390/polym12081730, 12(2020) 1730-1735; Arabian Journal for Science and Engineering, DOI: 10.1007/s13369-020-05088-z; membranes, DOI: 10.3390/membranes11050330; 国内・国際特許 No 6548176, No 6652766; EP3340350, EP3490043, US10862151, US10868322; polymers, DOI: 10.3390/polym12081730, 12(2020) 1730-1735; membranes, DOI: 10.3390/membranes11050330, 11(2021) 330-342; J. Environmental Chemical Engineering, DOI: 10.1016/j.jece.2021.105641, 9(4)(2021) 105641-105648; membranes, 11(2021) 861-873 DOI: 10.3390/membranes11110861.

金 濟徳のプロフィール

2000年9月 金沢大学自然科学研究科 博士課程修了(工学)

2000年10月 名古屋大学リサーチアソシエート

2002年4月 つくば産業技術総合研究所(AIST)ポスドクター

2005年4月～現在 物質・材料研究機構(NIMS)

2008年～2009年 Imperial College London, Visiting researcher

2011年～2013年 University of Rome Tor Vergata, Visiting researcher



〒305-0044

茨城県つくば市並木1-1

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 電子・光機能材料研究センター、機能材料分野、資源循環材料グループ

Tel: 029-860-4764

E-mail: Kim.Jedeok@nims.go.jp

