

【燃料電池・水素特集】 研究開発政策 技術開発

## 米国エネルギー省「水素プログラム」における研究開発 - DOE水素プログラム 2008年次成果評価会議より -

NEDO技術開発機構 燃料電池・水素技術開発部  
吉澤 幸大

### はじめに

米国エネルギー省( Department of Energy : DOE )は NEDO 技術開発機構と同様に、国立研究所、大学及び企業に研究開発資金を提供し、燃料電池・水素関連の技術開発を行っている。筆者は今年 6 月、米国ワシントン DC で開催された水素プログラムの年次成果評価会議 ( Annual Merit Review & Peer Evaluation Meeting ) に参加した。この会議は NEDO 燃料電池・水素技術開発部の成果報告会と評価会議を兼ね合わせたような会議となっている。世界中から関係者が集まり、参加登録者も約 1,000 名と燃料電池・水素技術開発に携わる者にとって大変関心の高い会議となっている。本稿では、水素プログラム・年次評価会議の概要、全体の予算、各テーマの目標について述べる。引き続いて、主要な個別テーマの一つである「燃料電池」を取り上げ、予算、研究開発成果、今後の展望に関して筆者の所感を交えながら報告する。

### 目次

1. DOE 水素プログラム 年次成果評価会議の概要
  - 1.1 DOE 水素プログラム
  - 1.2 DOE 水素プログラムの使命
  - 1.3 年次成果評価会議の位置づけ
  - 1.4 評価とその基準
2. 2008 年次成果評価会議の概要
  - 2.1 開催日時等
  - 2.2 全体会議における報告
  - 2.3 個別テーマの報告
3. DOE 水素プログラムの全体像
  - 3.1 水素燃料イニシアティブ予算
  - 3.2 組織別の予算推移
  - 3.3 組織別・分野別に見た 2009 年予算 ( 概算要求 )
  - 3.4 個別テーマの目標
4. 個別テーマ「燃料電池」の主な成果概要
  - 4.1 燃料電池に関する技術開発プログラムの概要
  - 4.2 DOE 水素プログラムにおける PEFC 研究開発の成果の概要
  - 4.3 DOE 水素プログラムにおける PEFC 研究開発の今後の展望
5. おわりに

## 1. DOE水素プログラム 年次成果評価会議の概要

### 1.1 DOE水素プログラム

DOE水素プログラムとは、DOEが実施している燃料電池および水素に関する研究開発の総称である<sup>1</sup>。2003年1月にブッシュ大統領が水素イニシアティブの声明を行って以降、水素プログラムとして活発に取り組みられてきている。

DOE水素プログラムは、産業界、学会、国立研究機関、連邦政府及び国際機関とのパートナーシップのもとで取り組まれている。対象とする範囲は、水素の製造・輸送・貯蔵技術、輸送用および分散型定置式発電、携帯用機器の電源のための燃料電池技術の開発である。また、安全性や標準化、実使用環境下での水素や燃料電池技術の実証、重要なステイクホルダーへの教育にも取り組んでいる。

### 1.2 DOE 水素プログラムの使命

輸送分野における石油使用と炭素排出を削減し、定置式及び可搬式発電のためのクリーンで信頼性のあるエネルギーを可能にする。プログラムは、水素・燃料電池技術の研究開発、検証、及び商業化に関する技術及び技術以外の障壁を克服し、この使命を達成する。

### 1.3 年次成果評価会議の位置づけ

本会議は、水素プログラムの成果・進捗の報告会であり、またピアレビュー（専門家による評価。"peer"は同僚の意）を受ける場であり、毎年開催されている<sup>2</sup>。

この会議の場で、それぞれのプロジェクトの研究責任者は、プロジェクトの現状と成果をスライドやポスターセッションで報告する。評価者はプロジェクトの評価を行い、助言を行う<sup>3</sup>。これらの評価を受け、DOE は次年度の研究開発計画や資金の決定を行うこととなっている。

以上に述べた目的以外に、この会議は下記に記すような「研究者同士の貴重なコミュニケーションの場」を提供している。

- ・ 技術、進捗、将来計画の状況について意思疎通を図る。
- ・ ネットワーキングの貴重な機会を提供し、協同研究を促進する。
- ・ 議会と納税者に、説明責任を果たす。

### 1.4 評価とその基準

評価とは、「水素プログラムの使命に照らし合わせて、それぞれのプロジェクトの貢献

<sup>1</sup> DOE 内の関連部局は4つ（後出）あり、それぞれがプログラム計画を作成している。

<sup>2</sup> DOE の web サイトによると、現在の方式の報告・評価会議は2003年以降毎年開催されている。

<sup>3</sup> 通常、評価者のコメントについては、その年の9～10月頃に、正式な文書「Annual Merit Review and Peer Evaluation Report」として公表される。報告内容をまとめたものは11月に「DOE Hydrogen Program Annual Progress Report」として公表される。

度を判断する」ことである。具体的には、それぞれのプロジェクトに関して、次の観点から評価が行われる。

- ・ 技術的な成果と進歩の状況
- ・ 水素プログラムの全般的な目標に対する関与の度合い
- ・ 研究開発手法
- ・ 他の研究機関との協同状況
- ・ 将来の研究計画の提案内容

## 2. 2008年次成果評価会議の概要

全体会議（Plenary Session）でDOEの担当者からプログラム全体の進捗報告が行われ、その後分科会に分かれて、各プロジェクトの報告が行われた。

### 2.1 開催日時等

日時： 2008年6月9日～13日

開催地：米国バージニア州アーリントン クリスタルゲートウェイマリOTT

### 2.2 全体会議における報告

DOEの担当者から以下のテーマで報告が行われた。

- ・ 水素プログラムの概要
- ・ 個別テーマ概要
  - 基礎研究
  - 水素の製造と輸送
  - 原子力エネルギーを利用した水素の製造
  - 石炭からの水素製造
  - 水素の貯蔵
  - 燃料電池
  - 技術検証
  - 製造技術の研究開発、及び市場の変革
  - 教育
  - 安全、規格
  - システム解析
  - 「水素燃料電池自動車への移行、及び水素インフラ要件」の解析

（注）プレゼンテーション資料は下記を参照

[http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_review08\\_plenary.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review08_plenary.html)

### 2.3 個別テーマの報告

全体会議の後、個別テーマの報告（約300件、ポスターセッションを含む）が行われ

た。

### 3. DOE水素プログラムの全体像

DOE の水素プログラムの全体像について、全体会議のプレゼンテーション資料を基に紹介する。

#### 3.1 水素燃料イニシアティブ<sup>4</sup>予算

ブッシュ大統領は、2015 年までに技術的な準備が整えられるよう研究開発を加速するために、2004～2008 年の 5 年間で 12 億ドルの予算を投入することを約束した。各年度の予算は下記の通りで、累計額は大統領の約束と一致した。

表 1 水素燃料イニシアティブの予算 (単位: 百万ドル)

2004	2005	2006	2007	2008	合計 (2004～2008)
157	222	232	268	281	1,159

#### 3.2 組織別の予算推移

水素燃料イニシアティブに基づく予算のうち、2004 年からの 5 年分について、政府組織別にみると次の通りであり、ほとんどが DOE 関連となっている。

表 2 政府組織別の水素燃料イニシアティブの予算 (単位: 千ドル)

	2004	2005	2006	2007	2008	2009 (概算要求)
DOE EERE * 1	144,881	166,772	153,451	189,511	211,062	177,713 * 2
DOE 化石燃料局	4,879	16,518	21,036	21,513	21,773	11,430
DOE 原子力エネルギー局	6,201	8,682	24,057	18,855	9,909	16,600
DOE 基礎エネルギー科学局	0	29,183	32,500	36,388	36,388	60,400
DOE 合計	155,961	221,155	231,044	266,267	279,132	266,143
運輸省	555	549	1,411	1,420	1,425	1,425
合計	156,516	221,704	232,455	267,687	280,557	267,568

\* 1 : Energy Efficiency and Renewable Energy : エネルギー効率・再生可能エネルギー局

\* 2 : 内訳は、水素技術 (146,213) 及び車両技術 (31,500)

2009 年度の予算 (概算要求) は全体として前年度比 - 5% となった。個別に見ると、石炭を原料とする水素製造の研究開発を行う DOE 化石燃料局 (- 48%)、応用研究、開発及び実証を担当する DOE EERE (- 16%) となっている。

<sup>4</sup> 水素燃料電池自動車や基盤技術の開発促進を行う 5 カ年計画

しかし、原子力による水素の製造に関する研究開発を担当する DOE 原子力エネルギー局 (+68%)、基礎研究<sup>5</sup>を行う DOE 基礎エネルギー科学局 (+66%) と大幅に増加した組織もある。特に基礎エネルギー科学局は過去一度も予算の減少を記録しておらず、このことは基礎研究が重要視されていることの一端を表していると考えられよう。

水素を動力源とする車両の安全基準制定を担当し、燃料電池バスの実証試験を実施している運輸省は 2008 年と同額になった。

以上のように個別に見れば事情は様々であるが、全体的に見ると図 1 に示すように水素プログラムに対する予算は、堅調に推移していると言えよう。

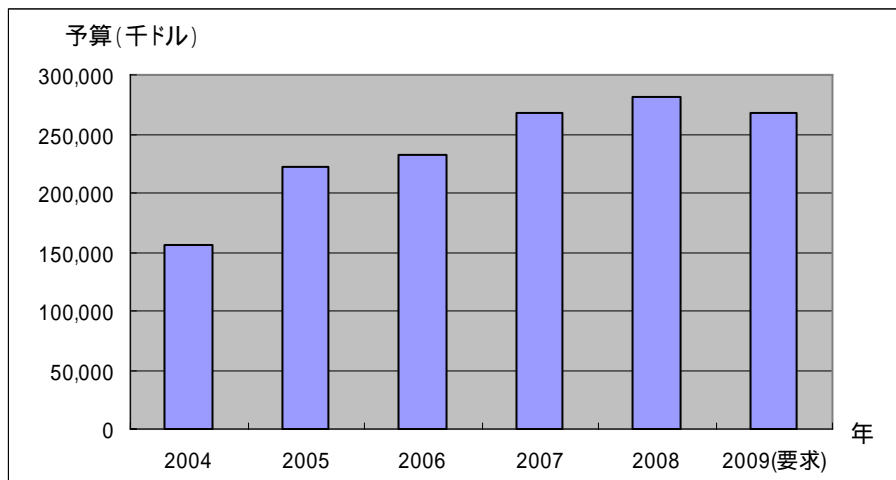


図 1 DOE 水素プログラムの予算推移

### 3.3 組織別・分野別に見た 2009 年予算 (概算要求)

表 3、図 2、図 3 は、2009 年予算(概算要求)を組織別・分野別に表示したものである。表 3 より、一つの分野の研究開発に関して、複数の機関・部局で分担していることがわかる。たとえば水素製造の研究開発に関して、DOE 化石燃料局(担当:石炭からの水素製造)、原子力エネルギー局(担当:原子力エネルギーを利用した水素の製造)、基礎エネルギー科学局(担当:基礎研究)である。

図 2 より、予算の多い順に、DOE(EERE HFCIT)、DOE(基礎エネルギー科学局)、DOE(EERE VT)、DOE(原子力エネルギー局)、DOE(化石燃料局)となっている。組織としては、DOE(EERE)が全体の 67%と半分以上を占める。

また図 3 より、予算の多い分野順に、燃料電池、水素貯蔵、水素製造、技術検証、安全・規格、システム解析、教育となっている。燃料電池、水素関連(貯蔵、製造)、技術検証の予算額が多いのは当然のことながら、実用化に向けて安全・規格、システム解析、教育といった分野への予算も見逃せない。

<sup>5</sup> ナノ素材による水素貯蔵、燃料電池のための触媒作用、バイオ及び太陽エネルギーによる水素製造等の基礎研究。また、ナノ構造の設計、新規の合成法、及び水素と材料との物理的・化学的相互作用の理論化など。

表 3 DOE 2009 年度概算要求の分野別・組織別内訳

分野	概算要求 (1000 ドル)					
	EERE (HFCIT)	EERE (VT)	DOE 化石燃料局	DOE 原子力エネルギー局	基礎エネルギー科学局	合計
水素製造			11,430	16,600	20,133	48,163
水素貯蔵	59,200				20,134	79,334
燃料電池	79,300				20,133	99,433
技術検証		15,000				15,000
安全、規格		12,500				12,500
教育		4,000				4,000
システム解析	7,713					7,713
合計	146,213	31,500	11,430	16,600	60,400	266,143

注： HFCIT : Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program

VT : Vehicle Technologies Program

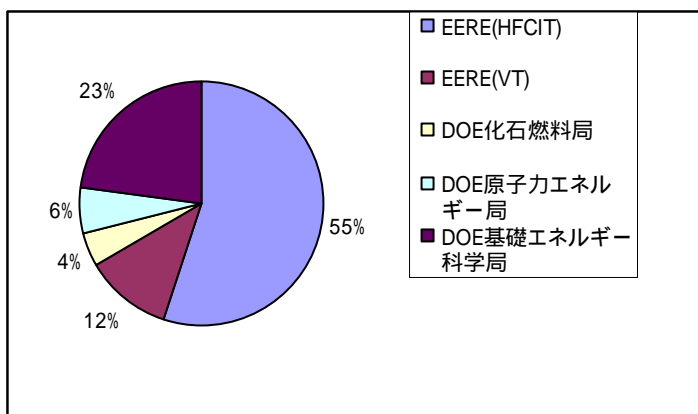


図 2 組織別の 2009 年予算 (概算要求)

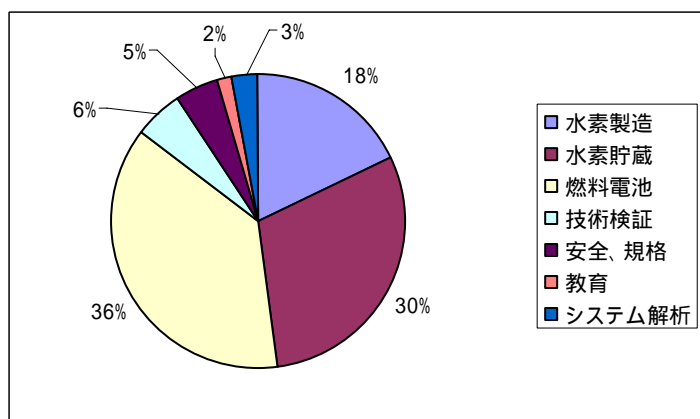


図 3 分野別の 2009 年予算 (概算要求)

### 3.4 個別テーマの目標

#### 3.4.1 基礎研究

革新的な技術により、コスト・性能・信頼性に関し、水素と化石燃料社会を隔てるギャップを埋める。この為に必要な事項には下記がある。

- ・水素の製造、貯蔵、利用に関係する化学的及び物理的プロセスを理解し、制御する。
- ・特に重要な事項として、水素と物質の境界面で起きる分子、原子、量子的なプロセスの理解がある。このことにより、性能・コスト・寿命の点で優れ、水素社会での利用に適した新しい物質（膜、触媒、燃料電池アセンブリ）を開発する。
- ・新しい化学プロセス、合成技術を開発する。

具体的な実施事項として、下記がある。

- ・水素貯蔵用の新しい物質の研究
- ・分離、浄化（purification）イオン輸送（transport）用の膜の研究
- ・ナノスケールレベルでの触媒の設計
- ・太陽光を利用した水素生産（solar hydrogen production）
- ・生体からヒントを得、あるいは生体を模倣した（bio-inspired、biomimetic）<sup>6</sup>物質、プロセス（水素生産等）の研究

#### 3.4.2 水素の製造と輸送

- ・米国内の様々な資源（化石燃料、原子力、再生可能資源等）から、低価格、クリーン、かつ高度に効率的な方法で、水素を製造する技術を研究・開発する。
- ・水素のコストを 2.00～3.00 ドル/gge<sup>7</sup>（税抜き、輸送済み価格）へ下げる。
- ・水素のトータル輸送費用を 1.00 ドル/gge 以下にする。

短期目標：分散型生産（低コスト輸送のための補給ステーションでの生産）

- ・天然ガス改質
- ・再生可能液体燃料の改質
- ・電気分解

長期目標：集中生産（輸送インフラへの大規模な投資が必要）

- ・バイオマスガス化
- ・石炭からの水素生産（CO<sub>2</sub>は隔離）
- ・風力、太陽、原子力を利用した電気分解による水素生産
- ・太陽光/原子力 高温熱化学的水分解
- ・光電気化学的及び生物学的水素生産

<sup>6</sup> 一般的に環境への適応、自己修復、自己複製、光合成などの模倣を指す用語。

<sup>7</sup> "Gallon Gasoline Equivalent"の略で、水素 1kg のエネルギーにほぼ等しい。

### 3.4.3 原子力エネルギーを利用した水素の生産

2019 年までに水素製造プラントを操業し、他の代替輸送燃料に対して競争力のある価格で水素を生産する。

主なマイルストーンは：

2007 年度：実験室規模の設備を建設

2011 年度：次世代原子力プラントと組み合わせた水素生産技術を選定

2013 年度：パイロット規模の水素製造実験装置を稼働させる

2019 年度：商業規模の原子力水素製造システム(先端的な原子炉を使用)の実証試験を行う。

### 3.4.4 石炭からの水素生産

クリーンな石炭（石炭は、米国産の最大の化石エネルギー源）の使用を通し、持続可能な水素経済への移行を促進する。

集中生産経路：

2016 年までに、ほぼゼロエミッションの、石炭を原料とする水素・電力の双方を製造する設備(水素製造のコストは現在の石炭ベースの製造コストから 25%削減する)の、実現可能性を検証する。

代替生産経路：

2014 年までに、高水素含有液体燃料、及び/あるいは合成ガス（syngas）からの分散型水素製造を目指した代替水素生産経路（改質システムを含む）が利用できるようにする。

### 3.4.5 水素の貯蔵

荷物や乗車用のスペース、また自動車の性能に無理を与えることなしに、様々な車種で 300 マイル（483km）以上走行可能な自動車搭載型（オンボード）水素貯蔵を実現する（重量、容積、動力、安全性、コストの要件を満たしつつ）。

詳細：

下記の DOE 目標を満たすオンボード水素貯蔵システムを開発すること

- ・ 容量
  - 重量あたり貯蔵量：6wt.%
  - 容積あたり貯蔵量：45g/L
- ・ 動作温度（ - 40 ~ 85 ）
- ・ 水素供給速度/補給速度
  - 0.02gH<sub>2</sub>/秒/kW
  - 補給速度 < 3 分（5kg の H<sub>2</sub> 補給につき）
- ・ システムコスト
- ・ 燃料コスト



- ・安全性、信頼性、サイクル寿命、効率他

### 3.4.6 燃料電池

輸送、定置、可搬型電力アプリケーション向けの燃料電池技術を開発し、実証試験を行う。

輸送アプリケーション：

ピーク効率 60%のダイレクト水素燃料電池システム（コスト：45 ドル/kW、耐久性：5,000 時間）を 2010 年までに開発する。2015 年までにコストを 30 ドル/kW まで下げる。

定置型及びその他の初期市場向け燃料電池アプリケーション：

- ・2011 年までに分散型発電 PEFC 燃料電池システムを開発する（燃料：天然ガスあるいは LPG、40%の発電効率、40,000 時間の耐久性、750 ドル/kW）
- ・2010 年までに、家庭用電化製品向けの燃料電池システム（出力<50W、エネルギー密度：1,000Wh/L）を開発する。
- ・2010 年までに補助電源装置用燃料電池システム（出力 3～30 kW、出力：100W/kg、出力密度：100W/L）を開発する。

### 3.4.7 技術検証

輸送、インフラ、発電アプリケーション向けの水素・燃料電池技術のシステム一式を、実動作環境の下で検証する。

- ・水素燃料電池自動車およびインフラを、並行して同時に検証する。
  - ・技術の現状を明らかにする。
  - ・「技術的に準備が完了している状態」に向けた進捗を評価する。
- この評価結果を水素の研究開発にフィードバックする。

表 4 技術検証の主な目標値

性能	2009 年	2015 年
燃料電池スタックの耐久性	2000 時間	5000 時間
走行距離	250 マイル強 (402km)	300 マイル強 (483km)
補給ステーションでの水素のコスト	3 ドル/gge	2～3 ドル/gge

### 3.4.8 製造技術の研究開発、及び市場の変革

#### 製造技術

製造技術及びプロセスを開発・実証する。

- ・燃料電池、貯蔵、水素製造用の部品とシステムのコストを削減
- ・米国内の供給業者を育成

#### 目標値

燃料電池製造コストの削減。

- ・ 30 ドル/ kW    ( 移動用 )
- ・ 400 ドル/ kW    ( 定置用 )

炭素複合材高圧貯蔵タンクのコストを削減する。

- ・ 2 ドル/kW・h

#### 市場の変革

障壁（技術に関するものは他の個別テーマで扱われる）を取り除き、水素と燃料電池技術の商業化を促進する。

連邦政府機関の燃料電池利用を支援・促進し、下記要件を達成する。

- ・ 米国エネルギー政策法 E P A C T 2005 Sec. 782、及び 783
- ・ 実行命令 Executive Order 13423

燃料電池の配備数を増やし、スケールメリットを達成する

米国内のインフラ整備を支援し、米国産ベースの開発を基本とする。

稼働データを収集し、ユーザーの燃料電池に関する信用を増進する。

#### 3.4.9 教育

主な関係者に、水素・燃料電池技術の教育を実施し、短期目標としては実証試験及び商業化を促進する。長期目標としては、市場の受容を促進する。

2009 年までに、水素・燃料電池技術の知識を 2004 年比で下記の通り増加させる（人口）。

- ・ 連邦政府、州の勤労者、及び学生（年齢 12～17） 10%増加
- ・ 一般国民、潜在的なエンドユーザー（輸送分野、無停電電源、エネルギーの大量使用者） 15%増加

2012 年までに、水素・燃料電池技術の知識を 2004 年比で下記の通り増加する（人口）。

- ・ 連邦政府、州の勤労者、及び学生（年齢 12～17） 20%増加
- ・ 一般国民、潜在的なエンドユーザー（輸送分野、無停電電源、エネルギーの大量使用者） 30%増加

#### 3.4.10 安全、規格

##### 安全

水素及び水素関連システムの操作、取り扱い、使用における安全（すべての DOE 資金拠出プロジェクトを対象とする）を確保するルールと手順を開発し、実行する。ここで得られたルールや教訓を水素の安全な利用促進に役立てる。

## 規格

基礎研究を実施し、あらゆるアプリケーション分野における水素の安全な利用を目指し、規格を開発する。タイムリーな開発、国内規格と国際規格の調和を促進する。

### 3.4.11 システム解析

システムレベルの解析を行い、水素インフラ開発や技術的な準備を支援する。これは技術と経路の評価、研究開発・配備技術アプローチやオプションの選択をガイドすること、研究開発・配備による潜在的な価値を見積もることにより、行われる。

2008 年までに

水素燃料インフラ解析のために、マクロシステムモデルを開発し、輸送システムを支援する。

2011 年までに

長期のアプリケーション解析に向けてモデルを強化し、定置用発電及びインフラを含むものとする。

2009 年までに

インフラ、水素リソースも含めた初期市場への移行シナリオを明らかにし、評価する。

2014 年までに

技術的な準備 (readiness) に必要な環境面の研究を完成させる。

水素プログラムの技術と経路に向けて、Well-to-Wheels<sup>8</sup>解析を更新し、年度ベースの技術的な進歩や変化を反映させる。

### 3.4.12 「水素・燃料電池自動車への移行、及び水素インフラ要件」の解析

これは、水素・燃料電池自動車への移行の要件を解析した初めての包括的なレポートである。3つの普及シナリオ、3つの政策例を元に考察を行ったレポートである。

普及シナリオ：水素・燃料電池自動車の生産高、燃料補給ステーションの設置数

政策例： 燃料電池自動車のコスト分担(官民)・税額控除、水素インフラのコスト分担(官民)・水素燃料の税額控除

レポートの概要は、本特集号の別記事「水素・燃料電池自動車への移行、水素インフラ要件の解析(米国)」を参照されたい。

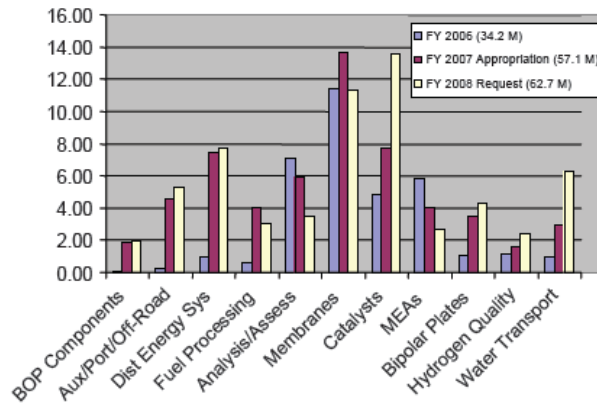
## 4. 個別テーマ「燃料電池」の主な成果概要

本章では、DOE 水素プログラムの主要な個別テーマの一つである「燃料電池」に関して、概要を紹介し所感を述べる。

<sup>8</sup> well-to-wheels: 「燃料の採掘から消費まで」という意味。トータルの燃料コスト、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量を論じる際に、よく使用される概念。

#### 4.1 燃料電池に関する技術開発プログラムの概要

2008 年における DOE 水素プログラムの燃料電池研究開発に関する事業予算は 6,210 万ドル（約 65 億円）である。予算の内訳を図 4 に示す。2007 年度までは、膜に関する予算が 1,400 万ドルで一番多かったが、2008 年度には、触媒に関する予算が大幅に増額されており、触媒研究が強化されることがわかる。成果報告会では口頭発表 49 件、ポスター発表 15 件の合計 64 件の発表があった。2007 年度の発表総件数 66 件と比較しても同等規模であり、燃料電池に関するプログラム規模は同等レベルで推移していることがわかる。表 5 には著者が分類した発表内容を示す。固体高分子型燃料電池（PEFC）に関する発表が大多数を占め、固体酸化物型燃料電池（SOFC）、ダイレクトメタノール型燃料電池（DMFC）の両方を併せても 4 件のみの発表となっている。PEFC では、電解質膜に関する発表が最も多く 18 件、次いで電極触媒 9 件、物質移動（氷点下起動含）7 件の順となっている。電解質膜、電極触媒および物質移動で発表総数全体の約 60% を占め、PEFC の基幹技術である上記 3 分野が研究開発の中心となっている様子がわかる。



出所：参考資料

図 4 テーマ別予算の推移

表 5 テーマ毎の発表件数

テーマ	PEFC	口頭	ポスター	計
電解質膜		14	4	18
電極触媒		6	3	9
物質移動（氷点下起動含）		7	0	7
スタック、実証試験		4	1	5
不純物		4	0	4
セパレータ、シール		2	1	3
その他		8	6	14
SOFC、DMFC	4	0	0	4
合計		49	15	64

#### 4.2 DOE 水素プログラムにおける PEFC 研究開発の成果の概要

発表件数の多かった電解質膜、電極触媒、物質移動それぞれに関して、トピックとして主だった成果の概要を紹介する。尚、トピックの紹介については主としてプレゼンテーションで詳しい説明が聴講できた口頭発表からの紹介とする。

##### 4.2.1 電解質膜

電解質膜に対する産業界の主要ニーズの 1 つは高温低加湿運転である。これを受けて DOE では 2007 年度から高温低加湿用膜のプロジェクトをスタートし、企業 14 社、14 大学 3 つの国立研究所が参加している。DOE の電解質膜の目標を表 6 に示す。表から

わかるように 120℃、相対湿度(RH) 25%が高温低加湿の条件となっている。プロジェクト中間期にあたる本年は主に 30℃、85%RH での性能評価が多いが、120℃における目標達成に向け、着実に研究開発が進展しているように感じられた。表 7 に電解質膜に関する口頭発表 14 件の分類を示す。目的はすべて高温低加湿運転である。材料系では、フッ素系ポリマーより炭化水素系ポリマーの研究が多い。動向を注目すべきはメーカー（Arkema、3M）を巻き込んだ大型プロジェクト 2 件（FC12、FC13）とプロトン伝導度の DOE 目標（マイルストーン）を達成した Nanofiber（マット状）膜（FC20）の結果である。

表 6 DOE目標値（電解質膜）

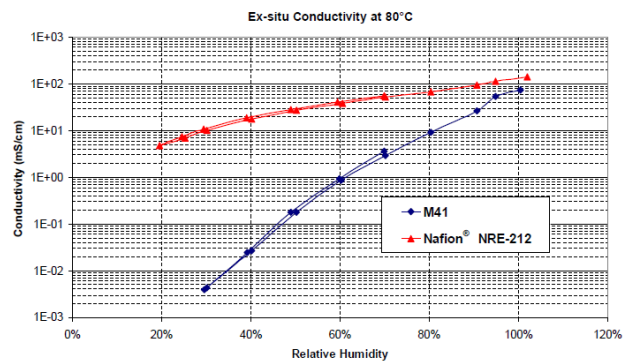
Category	Target
Conductivity at 120 degC, 25%RH	0.1 S/cm
Conductivity at 80 degC, 50%RH	0.1 S/cm
Conductivity at 30 degC, 80%RH	0.07 S/cm
Conductivity at -20 degC	0.01 S/cm
O <sub>2</sub> cross-over	2 mA/cm <sup>2</sup>
H <sub>2</sub> cross-over	2 mA/cm <sup>2</sup>
Durability	5000hrs(80degC)
	>5000hrs(12degC)

表 7 電解質膜の口頭発表

目的	アプローチ、材料系	件数
高温低加湿膜	ブレンド膜（補強）	5
高温低加湿膜	新ポリマー（低 EW ポリマー、架橋）	7
高温低加湿	イオン液体	1
高温低加湿	有機無機混合	1
合計		14

【FC12】”Improved Low-Cost, Durable Fuel Cell Membranes”, Arkema, Virginia Tech, ORNL, Johnson Matthey, University of Hawaii, Hawaii’s Natural Energy Institute

炭化水素系膜として 2 種類のポリマーをブレンドし、膜の特性を確保するコンセプトである。膜の機械強度、化学耐性は PVDF（Kyner）で確保し、プロトン伝導度、保水性は炭化水素系プロトン導電性ポリマーで発現させる。既製品の Kyner と炭化水素系ポリマーを使用することによって低コストを実現する。プロトン伝導度を上げるため、EW（Equivalent Weight）800 と低 EW 化している。Creep テストでは、PFSA 系に対して、伸びを 140% → 9% と大幅に低減できている。RH100%条件のプロトン伝導度は Nafion 並で（図 5）水素透過性は 1/3 となっている。OCV（Open Circuit Voltage）ホールド試験とサイクル試験でも良好な結果を得ている。しかしながら、低 RH 条件（RH30%）ではプロトン伝導度が Nafion の 1/1000 となり、低加湿条件での伝導度向上が課題となっている（図 5）。



出所：参考資料

図 5 プロトン伝導度(M41 膜)

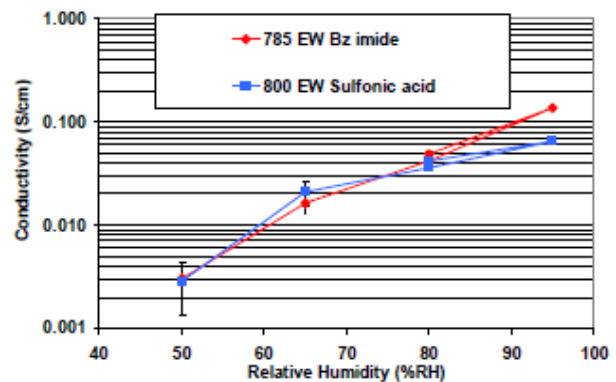
“低加湿での伝導度を向上させるためには、さらに低EW化することが有効であるが、機械強度の低下が危惧される。補強体およびプロトン導電性ポリマーの素材選定がキーとなると考えられる。”

【FC13】”Membrane and MEA’s for Dry, Hot Operating Conditions”, CWRU, Colorado School of Mines, University of Detroit Mercy, University of Tennessee

フッ素系プロトン導電性ポリマーの分子設計に関する研究であり、側鎖の変更により性能向上を図る。基本的な狙いは低EW化であり、最小EWとしてはEW640を達成している。最終的なEW目標は480としている。側鎖の改良として、側鎖に芳香族イミド導入した結果、25、80%RHにおいて、0.05S/cmのプロトン伝導度を示した(図6)。

側鎖のベンゼン環にスルホン酸基を導入することでさらに低EW化が可能であり、検討中である。しかしながら、50%RH条件まで湿度を下げるとプロトン伝導度が一桁低下し、低加湿条件でのプロトン伝導度向上が課題となっている。

“分子設計のアイデアは非常に多く紹介されたが、優先順位あるいは、どのように各コンセプトを絞り込んでいくかが不明確であり、発散せずにうまくまとまっていくのが懸念された。”

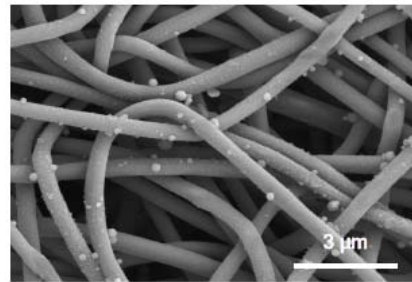


出所：参考資料

図6 プロトン伝導度(フッ素系芳香族イミド膜)

【FC20】”NanoCapillary Network Proton Conducting Membranes for High Temperature Hydrogen/Air Fuel Cells”, CWRU, Wright State University

機械的強度、化学耐久性を持たせる部分とプロトンを動かす通り道を分けるコンセプトである。スルホン酸基を付加したポリマーでナノレベルのファイバーを作成し、プロトンパスとする。エレクトロスピニングにより、図7に示すように、ナノファイバーでマット状に膜を形成する(Nano-Capillary Membrane)。プロトンはファイバー内部を通る。それ以外の部分は不活性なポリマーで埋め、強度を確保しつつ、化学耐久性を図る。ファイバー部の比率を70~75%とすることによってDOE目標(マイルストーン)の0.07S/cm(30、80%RH)を達成した(図8)。

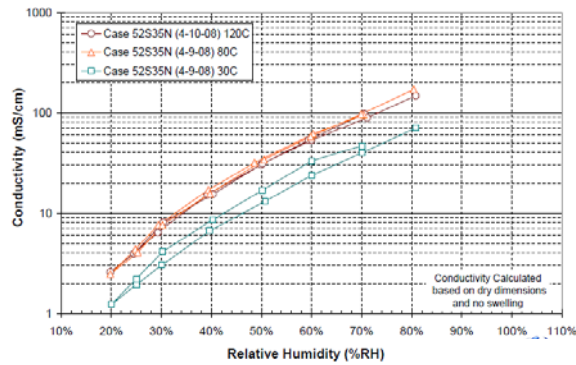


出所：参考資料

図7 マット状ナノファイバー



“高加湿条件のプロトン伝導度は高いが、湿度感度が大きく低加湿条件では伝導度が大きく低下している。低加湿条件での性能向上には、スルホン酸ポリマー部の低EW化が必要になると考えられる。”



出所：参考資料

図8 プロトン伝導度(マット状ナノファイバー膜)

#### 4.2.2 電極触媒

電極触媒に対する産業界の主要ニーズの1つは白金(Pt)使用量の低減である。これを受けける形で、白金代替触媒、高活性触媒、カーボン腐食に関する研究開発が行われている。表8に電極触媒に関する口頭6件の分類を示す。高い関心を集めたのは、

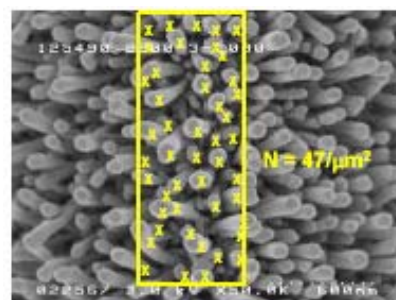
表8 電極触媒の口頭発表

目的	アプローチ、材料系	件数
高活性触媒	貴金属系触媒(2元系、3元系)	1
白金代価触媒	非貴金属系触媒	2
カーボン腐食	高結晶化度、カーボン代替材料	2
微細構造	触媒のTEM観察	1
合計		6

DOE2010年目標の5000時間耐久を達成した3MのNano-structured Thin Film (NSTF)を用いたMEA(FC1)とPt重量当たりの活性向上に成功した三元合金系触媒(FC3)、コアシェル触媒(FC5)およびカーボン触媒(FCP15)の結果である。

【FC1】”Advanced Cathode Catalysts and Supports for PEM Fuel Cell”, 3M, LANL, ORNL, BASF

ウィスカーと呼ばれるナノファイバーを使った電極構造 NSTF (図9) を使って、ファイバー先端のみに白金を担持することによって、触媒の利用率向上を狙う。MEA トータルの白金担持量を 0.25mg/cm<sup>2</sup> としても、0.61V @1.5A/cm<sup>2</sup> の高性能が維持できている。DOE プロトコルである 0.9 ~ 0.7V の負荷サイクル試験 30,000 サイクル後でも ECA (Electro Chemical Area) の低下は見られない。また自動車を想定したロードサイクル運転において 7300 時間の耐久性を実証し、現在も運転を継続

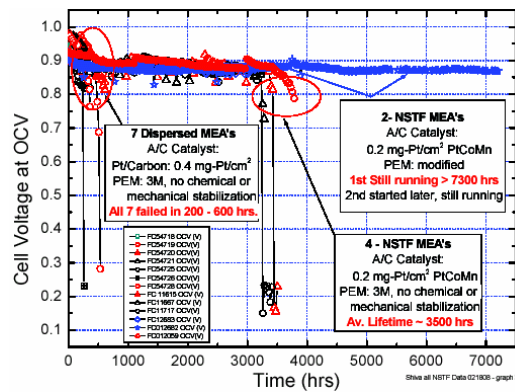


出所：参考資料

図9 Nano-structured Thin Film (NSTF) 触媒層

中である (図 10)。

“ 従来にないユニークな電極構造であるが、接触を確保するため、かなりの面圧で圧縮する必要がある点が懸念される。しかしながら高性能な結果が得られており、今後の更なる進展に期待したい。”



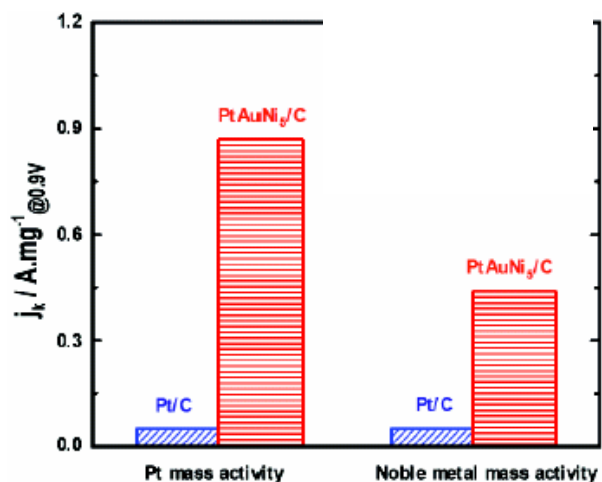
出所：参考資料

図 10 NSTF 触媒層を用いた MEA の耐久性

【FC3】”Advanced Cathode Catalysts”,

Brookhaven NL, Cabot, University of New Mexico, ORNL, ANL, University of Illinois, University of California, LANL

白金代替として合金系触媒を検討しており、活性を向上させることによって白金量低減を狙う。PtAuNi<sub>5</sub> の 3 合金系触媒は、回転電極評価で 80mV の活性向上を実証した。質量活性で見ると、Pt 単体に対して 16 倍向上、貴金属量当りでも 8 倍活性を向上できている (図 11)。また Pt 量の大幅低減を狙い、コアシェル触媒化も検討している。ベースの Fe の周りに Ru 層を設け、その周りを Pt 層とする 2 重構造のコンセプトを取っている。現在は作成した触媒の Ru と Fe の分布等の構造分析を行っている。



出所：参考資料

図 11 Pt と PtAuNi<sub>5</sub> の質量活性比較

“ 大幅な活性向上ができていて、耐久性等、今後の評価結果が待たれる。一方、コアシェルのベースとして Fe を選んでいるが、Fe は電解質膜に対してコンタミ (汚染物質) となるので、流出等が防げるかが課題と考えられる。”

【FC5】”Highly Dispersed Alloy Cathode Catalyst for Durability”, UTC Power, Johnson Matthey, Texas A&M University, Brookhaven NL

3 合金系触媒とコアシェル化によって、Pt 量を低減しつつ、活性の向上と耐久性向上を狙う。PdCo をコアとして、3 合金系触媒によりシェル構造を構成する。PdCo 系コア

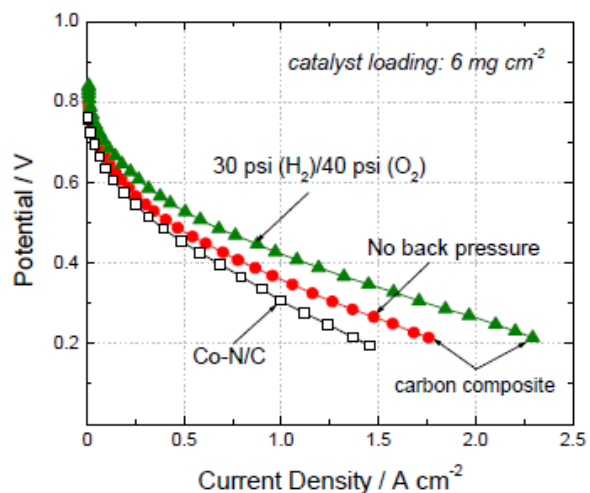


では Pd<sub>3</sub>Co が最も高い活性を示した。また電位サイクル 3000 回までは顕著な劣化は見られていない。また、3 合金系触媒として、Pt<sub>2</sub>IrCr、Pt<sub>2</sub>IrCo 等に注目している。

“イリジウムとの合金化で耐久性向上は期待できるが、活性の大幅向上は困難に思われる。コアシェル化によってどこまで白金量が低減できるかに期待したい。”

【FCP15】”Novel Non-Precious Metals for PEMFC: Catalyst Selection through Molecular Modeling and Durability Studies”, University of South Carolina, CWRU, Northeastern University

貴金属フリー触媒として Ru、Co、Cr、Cu 系等の触媒を開発してきたが、近年はカーボン触媒に注力している。燃料に H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> を用いた結果ではあるが、0.4V @ 1A/cm<sup>2</sup> の性能が出ており、これまで開発してきた Co-N/C よりも良い性能を示している(図 12)。また 0.5V ホールド試験 80 時間においても、劣化の兆候は見られず、ある程度の耐久性が期待できることも確かめられた。またカーボン触媒に対しては、化学リーチを実施することにより性能が向上することが明らかとなった。今後はカーボンの撥水性の制御、触媒活性向上、触媒層の厚さ低減により、更なる耐久性向上を図る。



出所：参考資料

図 12 カーボン触媒の IV 性能

“日本で発見されたカーボンアロイ触媒は、早くも米国で研究開発が行われている。カーボン触媒は白金フリーあるいは白金量の大幅低減を実現するための有力な触媒候補として脚光を浴びつつある。性能、耐久性ともに日米同等レベルの結果となっており、今後の進展が最も期待される貴金属フリー触媒の 1 つである。”

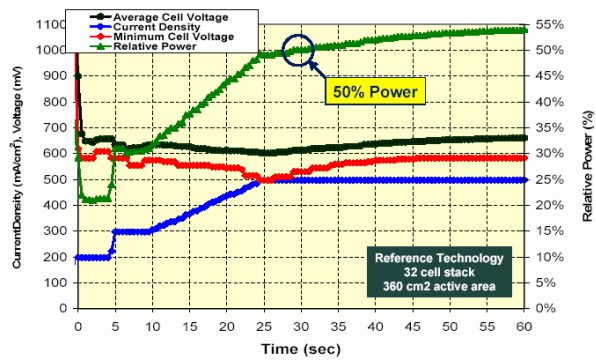
#### 4.2.3 物質移動

物質移動に関しては、氷点下起動を含めて、7 件の口頭発表があった。MEA、GDL、流路等、セル内における物質移動に関する発表が 5 件、残り 2 件がセル外での吸気と排気の熱/湿度交換に関する発表であった。研究の進展が見られたのは DOE2010 年ターゲットをほぼ達成した氷点下起動 (FC32) と中性子線を用いたセル内水分の可視化 (FC35) である。以下に概要を紹介する。

【FC32】”Subfreezing Stack/Stop Protocol for an Advanced Metallic Open-Flowfield

Fuel Cell Stack”, Nuvera, GORE, SGL, University of Delaware

金属多孔体を使ったスタック（ショートスタック）での氷点下起動性を検証した。起動後 30s で 50% の負荷が取れており、DOE2010 年の目標を達成した（図 13）。停止起動エネルギーは 5.6MJ であり、DOE 目標の 5MJ には若干未達である。氷点下起動が成功に至った要因は、熱容量の低減と停止時の水排水オペレーションの改良である。シミュレーション結果ではあるが、DOE のパワー密度の目標値である 1W/cm<sup>2</sup>（電密 2A/cm<sup>2</sup> 相当）が達成できれば、- 40 からの起動も可能との見解が示された。



出所：参考資料

図 13 -20 からの起動実験

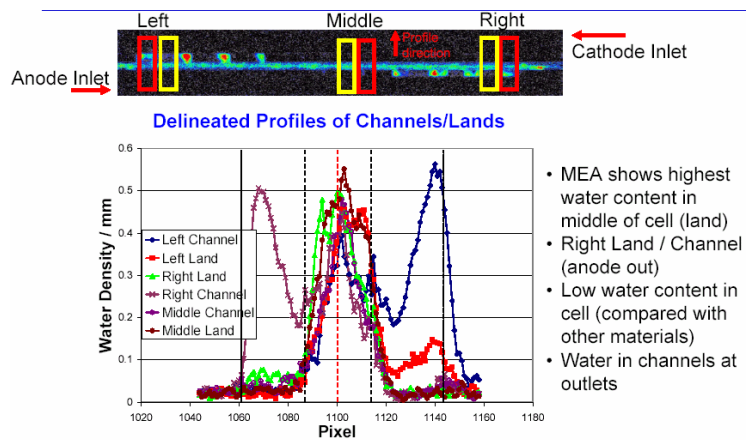
“各自自動車メーカーからも - 30 からの起動は可能との見解が出されているものの、- 40 からの起動の可能性についてはまだ見解が示されていない。コスト低減のため 2A/cm<sup>2</sup> 程度の高電密化は必要と言われており、パワー密度の目標値を達成できれば、- 40 からの氷点下起動も可能となるという見解は朗報である。”

“各自自動車メーカーからも - 30 からの起動は可能との見解が出されているものの、- 40 からの起動の可能性についてはまだ見解が示されていない。コスト低減のため 2A/cm<sup>2</sup> 程度の高電密化は必要と言われており、パワー密度の目標値を達成できれば、- 40 からの氷点下起動も可能となるという見解は朗報である。”

【FC35】”Water Transport Exploratory Studies”, LANL, NIST, Sandia NL, ORNL, SGL, GORE, CWRU, University of Texas, 3M, Nuvera

中性子線を用いたセル内水分の可視化に関する研究である。分解能が昨年の 25 μm から 10 μm に向上し、セル内のさまざまな現象を取らえることが可能になってきた。まず、セルの厚さ方向の水分布を測定した。MEA 内では膜中央部の水分量が最も多いことがわかった。またガス流れ方向で見ると入口部に比べ、出口部の水の量が多いことが確認された（図 14）。また MEA によって（3M、Nafion、GORE）、GDL 内の水分量に大きな違いがあることがわかったが、原因は特定できていない。

アノード RH100%、カソードドライ条件では co-flow よりも counter-flow の方がセル内水分量が多くなっており、counter-flow では水の内部循環ができている



出所：参考資料

図 14 厚さ方向の水分布

ことが確認された。重力の影響を見るため、アノード上/カソード下とアノード下/カソード上を比較すると、アノード上/カソード下の方が水分量が少なく、重力による排出効果があることがわかった。氷点下起動時の氷のつき方も観察できるようになった。RHをステップ的に変化させ、過渡時のセル内の水分変化を捉えた。その結果、膜は水分を吸収する方向に比べて、水分を排出する方向の方が時定数が大幅に大きいことがわかった。

“解像度が25 $\mu\text{m}$ から10 $\mu\text{m}$ に向上したことによって、上述したようなさまざまな現象を取られることができるようになってきた。このような可視化結果を利用すれば、シミュレーションの検証も容易になり、モデルリングのレベルアップも期待できるものと思われる。NEDOプロジェクトにおいても、日本原子力研究開発機構と神戸大学が共同して分解能10 $\mu\text{m}$ を目指している。

#### 4.3 DOE水素プログラムにおけるPEFC研究開発の今後の展望

2007年度のDOE水素プログラムの燃料電池研究開発に関する事業予算は5,710万ドルであった。前述したように2008年度の事業予算は6,210万ドルとやや増加しており、DOEが燃料電池の研究開発に対して強い支援を継続しようとする姿勢が伺える。予算レベルから推察して、2008年度も今回の成果報告会と同等レベルの研究進展が期待できると思われる。とりわけ、PEFCの基幹技術である電解質膜、電極触媒、物質移動の3分野については多くの予算が割り当てられており、プログラムのさらなる進展に期待したい所である。

燃料電池の大量普及を妨げている主要因の1つはコストが高いことである。電極触媒については、白金使用量の大幅な低減が求められている。これに対するアプローチもDOEプログラムからは以下のように絞られつつあることがわかる。

- ・活性向上を狙った他金属との合金化、あるいは他金属をコアとしPt合金系をシェル化したコアシェル化による白金使用量低減

- ・Pd系、Ti系およびカーボン触媒による白金代替
- ・白金使用量増加の要因となっている白金溶解、カーボン腐食の防止

したがって、今後のプログラムの進展から、複数のアプローチの組み合わせもあり得るが、どのアプローチが有力であるのかが見えてくるものと思われる。

電解質膜については、燃料電池システムの簡素化を実現するための高温低加湿膜の研究開発がメインテーマとなっている。2007年度に開始したばかりのプロジェクトであり、ようやく成果が出始めた所といった感じである。2008年度にはさらなる進展が期待できると思われる。材料系としては、扱い易い炭化水素系膜が多いが、アプローチはさまざまであり、電極触媒に比べると混沌とした様相を示している。今後の進捗から、有力な材料が絞られてくるものと思われる、各テーマの動向に注目したい。

物質移動については、移動現象を直接捉えようとする中性子をはじめとした可視化技術に大きな進展が見られた。今後は、実験で得られた結果をモデルに反映させ、シミュ

レーションを実施していくことより、さらに移動現象のメカニズム解明を進んでいくものと思われる。また可視化等の実験系については、流路や GDL 基材内での移動現象の解析が主であったが、解像度の向上により、解析の関心は MPL ( Micro Porous Layer ) や触媒層へと移っていくものと思われる。

## 5. おわりに

CO<sub>2</sub> 排出量低減の実現手段として燃料電池に対する期待は高い。2009 年に日本政府主導で創設する「イノベーション創造機構」においても燃料電池は太陽光、風力等とならんで重点投資の 1 分野に掲げられている。燃料電池の大量普及を阻害している要因はコストである。燃料電池車ではコストを 1/100 にする必要があると言われている。このような高い目標を実現するためには、Back to Basic ( 基礎に立ち返った研究 ) が重要であり、政府が主導となった支援が必要であると思う。

今回 DOE の成果報告会に参加し、DOE と NEDO 技術開発機構両者とも、ほぼ同様な研究テーマについて支援しているように感じた。お互いに良い意味で刺激し合い、燃料電池の大量普及実現に向けて、我々も一層努力していきたいと考えている。

### 参考：

DOE 水素プログラム 年次成果評価会議のトップページ

Annual Merit Review & Peer Evaluation

[http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_review.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review.html)

2008 年 全体会議、個別テーマプレゼンテーションのトップページ

2008 Annual Merit Review Proceedings

[http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_review08\\_proceedings.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review08_proceedings.html)

Fuel Cell Subprogram Overview

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review07/pl\\_2\\_garland.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review07/pl_2_garland.pdf)

Improved, Low-Cost, Durable Fuel Cell Membranes

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc\\_12\\_goldbach.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc_12_goldbach.pdf)

Membranes and MEA's for Dry, Hot Operating Conditions

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc\\_13\\_hamrock.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc_13_hamrock.pdf)

NanoCapillary Network Proton Conducting Membranes for High Temperature Hydrogen/Air Fuel Cells

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc\\_20\\_pintauro.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc_20_pintauro.pdf)

Advanced Cathode Catalysts and Supports for PEM Fuel Cells

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc\\_1\\_debe.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc_1_debe.pdf)

Advanced Cathode Catalysts

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc\\_3\\_zelenay.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc_3_zelenay.pdf)

Novel Non-Precious Metals for PEMFC: Catalyst Selection through Molecular

**Modeling and Durability Studies**

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fcp\\_15\\_popov.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fcp_15_popov.pdf)

**Subfreezing Start/Stop Protocol for an Advanced Metallic Open-Flowfield Fuel Cell Stack**

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc\\_32\\_cross.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc_32_cross.pdf)

**Water Transport Exploratory Studies2008**

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc\\_35\\_borup.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review08/fc_35_borup.pdf)