

4. 燃料電池車に関する技術開発等の動向

本章では、燃料電池に関する技術開発動向や課題、燃料問題等について、海外・国内でのインタビュー調査や既存の文献等をもとに整理する。

4-1 燃料電池関連技術の研究開発動向と課題

4-1-1 「燃料電池実用化戦略研究会」による技術課題の整理

2001年8月に開催された平成13年度の「燃料電池実用化戦略研究会」において「固体高分子形燃料電池／水素エネルギー利用技術開発戦略」が示され、この中で現状の技術水準と課題、目標水準が提示された。この内容は、わが国において唯一オーソライズされたものであると考えられる。以下、表4-1-1、表4-1-2、表4-1-3にこの内容を要約する。

表 4-1-1 燃料電池スタック, 改質器の技術課題

	現 状	主な課題	目標値	主な技術開発の方向性	役割分担	目標時期
電解質膜	ハーフフルオロ系イオン交換膜 イオン伝導率: 0.1~0.2S/cm 膜厚: 20~50 μm 温度サイクル耐性(-40 ~80°C): 50回 耐熱性: 約80°C 価格: 5~15万円/m ²	機械強度向上		・既存膜(ハーフフルオロ系)の改良 ・補強膜の開発 ・新規膜材料の開発(非ハーフフルオロ系等) ・プロトン伝導機構/劣化機構の解明 ・量産化技術の開発 ・廃棄処分対応	産官 産 産学官 産学官 産官 産	短期 中期 短期 中期
		耐久性向上	自動車用5千時間 定置用 4万時間			
		温度サイクル耐性 向上	(常温~使用温度) 自動車用3~6万回 定置用 4千回			
		耐熱性向上	120~150°C			
電極触媒	白金担持量: 2~4g/kW CO被毒耐性: 10ppm 価格: 4~8千円/kW	白金担持量の低減	0.2~0.4g/kW	・白金担持量低減技術の開発 ・新規触媒の開発(白金代替) ・耐CO被毒性ノード触媒の開発 ・高活性ノード触媒の開発 ・劣化機構解明	産学官 産学官 産 産学官 産学官	短期 中期 短期 中期 短期
		CO被毒耐性向上	10~50ppm			
		耐久性向上	(電解質膜に同じ)			
ガス拡散 基材	カーボンペーパー 価格: 数千円/m ²	低コスト化	500円/m ²	・量産化生産技術の開発 ・基材形態の改良	産 産	短期 短期
		作業性向上				
MEA技術	ホットプレス法	低コスト化	—	・MEA内現象の解析 ・MEAの新しい製造技術開発 ・リサイクル技術の開発	産学官 産 産	短期 短期 中期
		信頼性向上				
		廃棄物処理対応 白金回収				
セパレーター	カーボングラファイト 伝導率: 2X10 ⁵ S/cm 密度: 2g/cm ³ 厚さ: 1~5mm 価格: 4千~数万円/枚	薄型化	1mm以下	・新規材料の開発 ・金属セパレーターの被覆技術の開発 ・樹脂系セパレーターの量産化技術開発 ・溝形状等の成形加工技術の開発	産学官 産官 産 産	中期 短期 短期 短期
		高強度化				
		耐腐食性向上 接触抵抗低減				
		低コスト化	100~200円/枚			
スタック技術	—	高効率化	—	・加湿方法, 冷却, ガス配流等の管理技術の開発 ・シール材・シール構造の開発 ・劣化診断技術の確立	産 産学官	短期 短期
		耐久性向上 信頼性向上				
改質器	[自動車用] メタノール ・試作車あり ・改質効率80%以上 ・容量40~150L/台 液体炭化水素系燃料 ・研究室レベル ・基礎的課題多い ・2001年秋試作車発表 予定	耐久性向上	5千時間以上かつ 起動停止: 3~6万回/10年	・クリーンカー/リン、GTL向け改質器の開発 ・新規触媒の開発 ・オートサーマル改質器の開発 ・燃料成分, 汚染物質が各種触媒に与える影響の分析	産 産学官 産 学官	短期 中期 短期 短期
		小型・軽量化 高効率化	30L/台以下 83%程度(LHV) [定格の25%出力時]			
改質器	[定置用] ・天然ガス・LPガス等の改質はりん酸形燃料電池の技術と基本的に共通	始動性・負荷応答性向上	応答は数秒以内	・多様な燃料に対応した改質器の開発(天然ガスから灯油まで) ・新規触媒の開発 ・高効率熱交換技術の開発 ・分離膜型CO除去器の開発 ・燃料成分, 汚染物質が各種触媒に与える影響の分析	産 産学官 産 産学官	短期 中期 短期 短期
		低コスト化	1,000円/kW以下			
		耐久性向上 小型・軽量化	4万時間以上 10~30L/kW			
		高効率化	87%程度(HHV)			
改質器		起動性・負荷応答性向上	5~30分			
		低コスト化	2万円/kW以下			
		燃料柔軟性				

出典: 燃料電池実用化戦略研究会「固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用技術開発戦略」
(2001年8月8日)を基に作成

表 4-1-2 水素燃料貯蔵・製造等に関する技術課題

	現状	主な課題	目標値	主な技術開発の方向性	役割分担	目標時期	
水素貯蔵技術	圧縮水素方式	25MPa商用化、35MPa実用化 海外でステーション貯蔵／FCEV走行試験中	高圧化 軽量化 低コスト 安全性の確保	～70MPa 10wt%	・耐圧容器の開発 ・周辺機器の開発 ・新素材の開発	産官 産官 産学官	短期 短期 中期
	液体水素方式	蒸発率：2～5%/日 海外で液体水素タンク自動車の実走中	断熱性能向上（ボイルガス低減） 低温脆化対策	車載用1%/日以下 定置用0.1%/日以下 4K～室温域	・断熱容器・断熱材料開発 ・耐低温溶接技術開発	産学官 産学官	短期 短期
	水素吸蔵合金	吸蔵量：1～3wt% サイクル寿命：100サイクル 満充填1時間以上	貯蔵密度向上 耐久性向上 貯蔵速度向上 被毒耐性向上 小型・軽量化 低コスト 水素放出温度の低減	5.5wt%以上 5,000サイクルで低下10%以内 満充填5分以内	・熱交換技術の最適化 ・新規材料の開発	産官 産学官	短期 中期
	水素貯蔵化学物質	水素含有率：7～10wt% 再水素化施設への回収必要	反応速度・ 反応制御性向上 反応温度低減 シフト化	(5.5wt%) システムとして達成	・触媒・システムの開発	産学	短期
	炭素材料	吸蔵量：数～20wt% カーボンナノチューブ 再現性乏しい ゲラフィト 水素吸蔵法の開発	貯蔵密度向上 精製技術確立 低コスト化	5.5wt%以上	・吸蔵・放出メカニズムの解明 ・計測法の確立 ・合成技術の開発 ・大量生産技術の開発	学官 学官 産学官 産官	短期 短期 中期 中期
	新規材料	—	貯蔵密度・利便性の飛躍的向上	—	革新的水素貯蔵技術の開発	産学官	長期
水素製造技術	副生水素利用	コークス炉ガス 水素回収率：60%	回収率向上 低コスト化	90%以上	・精製等システムの最適化	産官	短期
	固体高分子形水電解	変換効率：90%程度（1A/cm ² ） セル面積：0.25m ²	高性能化 耐久性向上 スケールアップ 低コスト化	90%以上（2～3A/cm ² ） 10年程度 セル面積：0.6～1.0m ²	・高性能高分子膜の開発 ・触媒の開発 ・セルの大面积化、積層化	産官 産学官 産	短期 短期 短期
	気体燃料・液体燃料改質	気体燃料の改質精製効率：55～70% 液体燃料は本格的な開発に至っていない	高効率化 低コスト化 信頼性向上	70%以上 建設費50%減	・気体燃料システムの最適化 ・液体燃料システムの開発	産 産官	短期 短期
	輸送関連技術	パイプラインに莫大な費用 圧縮・液化過程の損失大	低コスト化 高効率化	—	・圧縮機・液化機の改良・開発	産官	短期
	水素の安全に係る技術	検討項目 ・タンク衝撃試験 ・ガス漏洩拡散シミュレーション等	安全性向上 精度向上 信頼性向上	—	・水素漏洩や爆燃に係るシミュレーションモデルの開発 ・安全なタンク、セルスタック、システムの開発	産学官 産学官	短期 短期
液体燃料精製・製造	グリーンガソリン	・開発段階	硫黄分等の除去 低コスト化 エネルギー消費の低減	—	・製造プロセスの改良・開発	産官	短期
	GTL (Gas to Liquid)	・海外に製造プラント ・効率60～65%	製造プロセスの高効率 特定留分の成分選択率向上 低コスト化	5～10%程度向上	・製造・精製プロセスの改良・開発 ・大規模プラント技術の確立	産学官 産	中期 中期
	メタノール	・全量輸入 ・海外では商用化 ・製造効率：60～65%	製造の技術的な観点では特段問題なし*	—	—	—	—
	DME (ジメチルエーテル)	・ディーゼル燃料代替及びLPガス代替として開発中	高効率化 低コスト化	65～70%	・触媒・システムの開発 ・大規模プラント技術の確立	産学官 産	短期 短期

(注) *：メタノールは、現在バイオマス資源からの液体燃料製造技術開発の主要な生成物として技術開発に取り組まれているところである。

出典：燃料電池実用化戦略研究会「固体高分子形燃料電池／水素エネルギー利用技術開発戦略」（2001年8月8日）を基に作成

表 4-1-3 FCシステムの普及・性能・コスト目標

項目		目標	
自動車用燃料電池	実用化と普及の タイムスケジュール	【実用化時期目標】2003～2004年 【普及時期目標】2010年以降	
	普及時期における 目標	燃料電池スタック	・発電効率：65%以上（LHV），55%以上（HHV） 【定格の25%出力時】 ¹⁾ ・出力密度：1.3kW/L以上 ・耐久性：5,000時間以上（バス等1～2万時間）， 起動停止3～6万回/10年 ・コスト：4,000円/kW以下
		改質器	・体積：30L/台以下 ・改質効率：83%程度（LHV），92%程度（HHV） 【定格の25%出力時】 ²⁾ ・コスト：1,000円/kW以下
		システム全体	・コスト：5,000円/kW以下（改質器その他周辺機器含む）
		車両効率 ³⁾	・水素搭載形：60%程度（LHV），51%程度（HHV） ・ガソリン車上改質形：48%程度（LHV），45%程度（HHV）
		水素貯蔵 （2010年以降 極力早期）	・乗用車において、航続距離500km以上走行可能な水準を 目標とし、そのために必要な水素5kgを貯蔵しうる重量・ 体積が普通自動車のガソリンタンクと同等程度である貯 蔵方法を開発を行う。
定置用燃料電池	実用化と普及の タイムスケジュール	【実用化時期目標】2003～2004年 【普及時期目標】2010年以降	
	普及時期における 目標	燃料電池スタック	・発電効率：55%以上【定格時】 ・コスト：80,000円/kW以下
		改質器	・改質効率：87%程度（HHV）【定格時】 ²⁾ ・コスト：20,000円/kW以下
		システム全体	・発電効率：40%以上（HHV，受電端）【定格時】 ・総合効率：80%以上（HHV） ・体積：150L/kW以下 ・耐久性：40,000時間以上 ⁴⁾
		システム全体の 経済性目標	・家庭用システム価格：30万円/台以下 ・業務用システム価格：15万円/kW以下 ・ランニングコスト：効率向上により削減される燃料費（累 積）で追加的なシステムコストを概ね3～5年以内に回収で きるようなランニングコストとなること

出典：燃料電池実用化戦略研究会「固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用技術開発戦略」
2001年8月8日

1) (原注) 燃料は水素とし、カソード極には空気を送るものとした場合の値。

2) (改質効率) = [(改質器から出力された水素の熱量) - (燃料電池から改質器に戻す水素の熱量)]
/ (改質器に入力された燃料の熱量)。

効率値はガソリンを燃料として算出。

3) 水素搭載形およびガソリン車上改質形の場合の車両効率 (tank to wheel) をそれぞれ示す。
なお、車両効率は、燃料電池と車上搭載蓄電池 (2次電池) との組合せ (ハイブリッド) による効率向
上を考慮し達成される目標とする。

4) 1日12時間運転で10年間 (約3650日) のトータル運転時間は43,800時間となり、10年以上の寿命
に相当する。

4-1-2 燃料電池システム

図 4-1-1 に一般的な燃料電池システムの構成を示す。システムは、電池スタックなどから構成される電池本体システム、燃料を改質し、供給量や加湿量などを制御する燃料供給システム、空気供給量を制御する空気供給システム、電池温度を一定に保つための熱管理システム、電池反応で生成される水の排出およびシステムでの再利用を行う水処理システム、未利用燃料処理、インバータ、コンバータ等の直流・交流電力変換システム、排熱回収などから構成されている。全体は制御プログラムによってコントロールされ、ひとつの電源システムとして機能する。

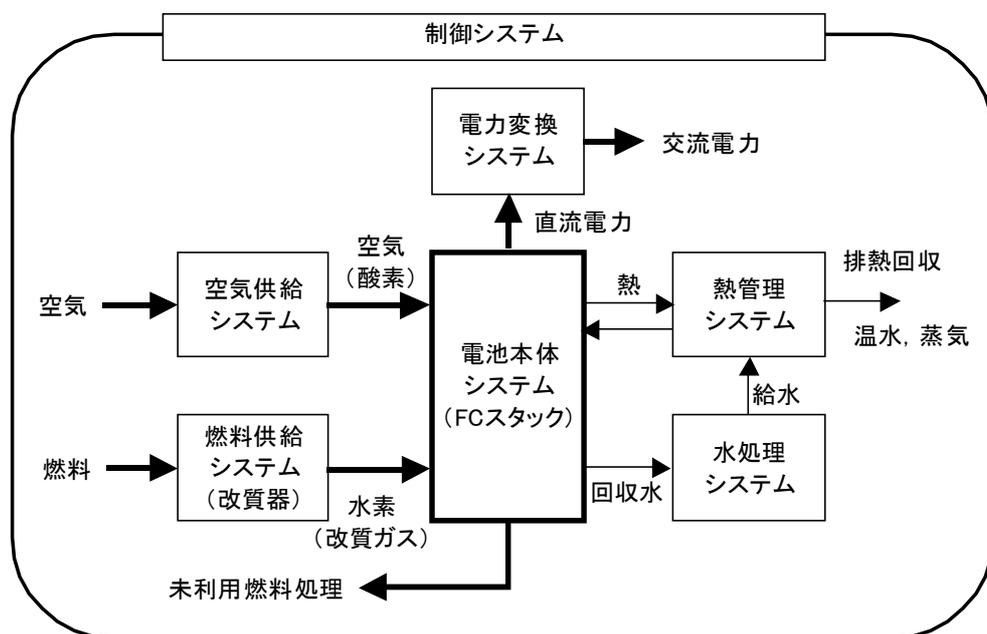


図 4-1-1 一般的な燃料電池システムの構成

FC システムの性能は飛躍的に向上してきている。図 4-1-2 は Ballard 社の最新 FC スタック「Mark 902」の仕様であり、電池本体システムの出力密度は、 $1.13\text{kW}/\text{リットル}$ に達している^{注)}。ただし、Ballard 社の FC スタックを搭載した Honda FCX の重量が $1,680\text{kg}$ に達しているように、自動車用途の場合には、さらなる小型軽量化は依然として重要な課題であると考えられる。

^{注)} 2001 年 10 月の発表では、「Mark 902」の出力密度は最大 $2.2\text{kW}/\text{リットル}$ 。

項目	内容	
外形	全長×全幅×全高	805×375×250 mm
	重量	96 kg
	容量	75 リットル
燃料	水素ガス	商用レベルの純度
	改質	とくに指定はない
作動条件	温度	80 °C
	燃料供給圧力	1～2 bar
	空気供給圧力	1～2 bar
性能	定格出力	85 kW
	最大電流	300 A
	電圧	284 V
	出力密度	1.13 kW/リットル
	エネルギー密度	0.89 kW/kg



図 4-1-2 Ballard Power Systems 社製 FC スタック「Mark 902」

出典：Ballard Power Systems 社プレスリリース

現状の FC スタックの性能は、以上のように要求性能の厳しい自動車適用上の要求をおおむね満たしつつあるが、コストは非常に高い。自動車用 FC の場合、それが内燃機関自動車 (ICEV) に対して競争力を持つためには、そのコストがシステムで\$50/kW^{注1)}、スタックベースで\$30/kW にまで低下する必要があるといわれている。「燃料電池実用化戦略研究会」の「固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用技術開発戦略」

(以下「技術開発戦略」という) では、自動車用では、改質器等を含むスタックシステムで 5,000 円/kW、スタックベースで 4,000 円/kW という目標値が示されている (表 4-1-3 参照)。一方定置用では、目標とされるコストの水準は自動車用に比べてそれほど厳しくない。「技術開発戦略」では、スタックの目標が 8 万円/kW、改質器が 2 万円/kW となっている。ただし、今後数年以内に商品化されると考えられる家庭用 FC システムの導入当初においては、量産効果が見込めないため、コスト削減に向けたハードルは現状では非常に高いと考えられる。

DOE では、自動車用の FC システムについて、現在の技術レベルを想定し、年間 50 万ユニットの FC システムが生産された場合で、直接水素型 FC システムで\$200/kW、ガソリン改質型では\$300/kW (改質器等を含む) になると見積っている (表 4-1-4、表 4-1-5)。この将来目標値は 2010 年で、どちらも\$45/kW であり、「技術開発戦略」とほぼ一致している。また、Ballard 社も FreedomCAR プログラムと同じ\$45/kW を目標にしている (表 4-1-6)^{注2)}。

スタックの主要な高コスト要因としては、セパレータおよび固体高分子膜、触媒に担持される白金等の貴金属、電極の基材となるカーボンペーパー、カーボンクロス等のカー

注1) 内燃エンジンのコストについては\$2,000～3,000 とされ、\$50/kW がほぼこれに相当する。

注2) 表 4-1-4、表 4-1-5 に示す DOE の目標値も FreedomCAR プログラムの目標に準じている。

ボン製品が挙げられる。

表 4-1-4 自動車用直接水素型燃料電池システムの DOE 目標値

	単位	現状	2005年	2010年
エネルギー効率 (@25%ピーク出力)	%	59	60	60
エネルギー効率 (@ピーク出力)	%	50	50	50
出力密度 (ネット)				
水素貯蔵容器含まず	W/L	400	500	650
水素貯蔵容器含む	W/L	—	150	220
比出力 (ネット)				
水素貯蔵容器含まず	W/kg	400	500	650
水素貯蔵容器含む	W/kg	—	250	325
コスト (水素貯蔵容器含む) 注)	\$/kW	200	125	45
負荷応答性 (出力: 10%→90%)	秒	3	2	1
コールドスタートアップ (-20°C)	秒	120	60	30
コールドスタートアップ (20°C)	秒	60	30	15
サバイバビリティ (survivability)	°C	-20	-30	-40
エミッション		Zero	Zero	Zero
耐久性	時間	1,000	4,000	5,000

注) 年間 50 万ユニットが生産される場合を想定。

出典: DOE「FY2002 Progress Report for Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies Program」2002年11月

表 4-1-5 自動車用ガソリン改質型燃料電池システムの DOE 目標値

	単位	現状	2005年	2010年
エネルギー効率 (@25%ピーク出力)	%	34	40	45
エネルギー効率 (@ピーク出力)	%	31	33	35
出力密度 (ネット)	W/L	140	250	325
比出力 (ネット)	W/kg	140	250	325
コスト*	\$/kW	300	125	45
負荷応答性 (出力: 10%→90%)	秒	15	5	1
コールドスタートアップ (-20°C)	分	—	2	1
コールドスタートアップ (20°C)	分	<10	<1	<0.5
サバイバビリティ (survivability)	°C	—	-30	-40
エミッション		<Tier2・Bin2	<Tier2・Bin2	<Tier2・Bin2
耐久性	時間	1,000	2,000	5,000

注: ・燃料プロセッサ, スタック, 周辺機器, スタートアップ用装置を含み, ガソリンタンク, ドライブトレイン関連電子装置は含まない。

・Tier2 はカリフォルニア州の規制で, Bin2 は連邦の規制。ともに ULEV に相当。

*年間 50 万ユニットが生産される場合

出典: DOE「FY2002 Progress Report for Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies Program」2002年11月

表 4-1-6 Ballard Power Systems 社の FC システムの性能・コストの目標

	定置用	自動車用
性能	<ul style="list-style-type: none"> 安定した始動 安定かつ短時間の始動 (高頻度運転) スタック効率 (高頻度運転) 	<ul style="list-style-type: none"> 出力密度が ICEV 相当 低温始動：-40℃ 負荷応答性 (起動・停止)
信頼性・耐久性	<ul style="list-style-type: none"> 1,500 時間 (低頻度運転) 5,000 時間 (高頻度運転) 40,000 時間 (連続運転) 	<ul style="list-style-type: none"> 5,000 時間以上 (light duty) 20,000 時間以上 (heavy duty) 問題発生時でも適切な場所まで運転できる能力の確保
コスト	\$100~1,500/kW (用途による)	\$45/kW (FreedomCAR に同じ)

FC システムの耐久性に関しては、乗用車用では 5,000 時間、バス・トラックでは 10,000 ~20,000 時間、定置用では 40,000 時間(またはそれ以上)とみなされている(表 4-1-7)。自動車用は、定置用に比べて稼働時間で測った耐久性は厳しくないが、起動停止が不可避であり、利用されずに放置される時間も長い。そのため、こうした利用形態に対する耐久性も求められる。また、FCV が完全な実用車となるためには、例えば乗用車の場合、従来車と同様に様々な用途や使用環境のもとで 10 年以上の耐久性・信頼性を確保する必要がある。そうした耐久性・信頼性を実証するには、少なくとも 10 年以上の試験走行が必要と考えられるため、定置用も含め現状における耐久性と信頼性の確保とその実証は、コストと並んで非常に大きな課題となっている。耐久性を効率的に評価するための加速試験方法の確立も重要な課題である。

表 4-1-7 FC システムの耐久性の目標値(延べ運転時間)

用途	耐久性目標
乗用車	<ul style="list-style-type: none"> 5,000 時間以上 起動停止 3~6 万回/10 年
バス, トラック	1~2 万時間
定置用	40,000 時間またはそれ以上

また、2002 年末に限定リース販売されたトヨタ FCHV, Honda FCX においては、0℃以上での保管が義務づけられており、実用化に向けた当面の課題として氷点下での始動性の確保が挙げられる。これは主に FC で生成される純水の凍結に起因する問題であり、早期に解決を図るべき重要な課題となっている。しかし、2003 年 10 月 Honda は氷点下 20℃での始動が可能な燃料電池スタック「Honda FC STACK」(表 4-1-8)を開発したと発表した。この「Honda FC STACK」は、水素イオン伝導性に優れたアロマトニック電解質膜と導電性・熱伝導性に優れた金属プレスセパレータを採用することにより氷点下での始動を可能にした。「Honda FC STACK」を搭載した「FCX」は、2004 年 11 月に米ニューヨーク州に販売され、2005 年 1 月には北海道庁に納車されている。

表 4-1-8 ホンダ製燃料電池スタック

	第1世代	第2世代	次世代
発表年月	1999年9月	2001年2月	2003年10月
スタック出力 (kW)	30	35	50
サイズ (L) (ft ³)	67 (2.4)	48 (1.7)	35 (1.2)
重量 (kg) (lb)	101 (223)	78 (172)	48 (106)
膜のタイプ	フッ素系電解質膜	フッ素系電解質膜	アロマトミック電解質膜
最大作動温度 (°C)	80	80	95
バイポーラプレート /セパレータ	機械加工カーボン グラフィイト	成形加工カーボン グラフィイト	プレス加工 ステンレススチール
シール	Separate seals	Plaster-sealing and separate seals	Rubber seals unitized with separators
構造	ボルト固定	ボルト固定	パネルボックス

出典：FEBRUARY 2004 Automotive Engineering International (aei)

ホンダの開発した FC スタックの特徴は、世界で初めて金属プレスセパレータを使った独自の構造と、アロマトミック電解質を採用したことである。アロマトミック電解質は、耐久性や低温での発電性能に特徴があり、金属セパレータは、薄くコンパクトであることに加え、熱容量が小さく、低温でも暖機特性に優れているという特長があるという。また、高温耐久性についても 95°Cでの作動を実現しており、この結果、スタックの作動範囲は-20°Cから 95°Cまで拡大し、この広い温度領域で耐久性を向上させていると発表している^{注)}。ホンダ内製スタックの出力密度の推移を図 4-1-3 に示す。体積出力密度、重量出力密度ともに第 2 世代の 2 倍以上の性能を実現している。

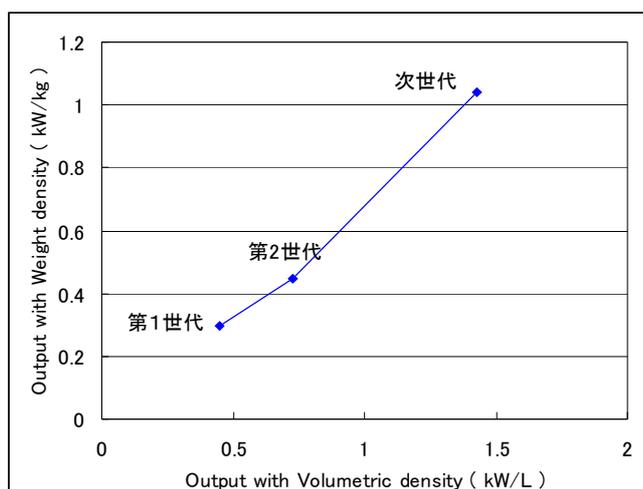


図 4-1-3 ホンダ FC スタックの出力密度(表 4-1-8 より作成)

注) JARI 次世代自動車フォーラム (平成 16 年 1 月) 資料より。

4-1-3 燃料電池スタック

固体高分子形燃料電池スタックは、一般に図 4-1-4 に示すように、電解質である固体高分子膜（水素イオン交換膜）と触媒を担持させたシート状の電極 2 枚で 1 つのセルを構成する。実運転における 1 セル当たりの起電力は 0.6～1.0V 程度であるため、300V 前後のモータに電気を供給するために、通常 300～500 枚程度のセルを直列に接続する。固体高分子膜と 2 枚の電極を一体化したものを膜・電極接合体（MEA）と呼び、これとセパレータ（バイポーラプレート）とを交互に配置したものがスタックである。

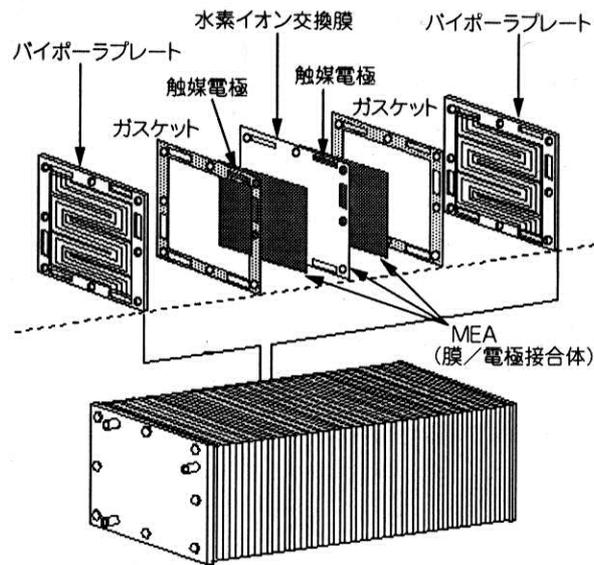


図 4-1-4 燃料電池スタックの構成例

(1) 固体高分子膜

1) 固体高分子膜の課題と開発の動向

固体高分子電解質膜（水素イオン交換膜）としては、現在、パーフルオロスルホン酸膜が標準的に用いられている（表 4-1-9）。パーフルオロスルホン酸膜は、1970～1980 年代に開発され、化学的安定性が高いなどの優れた特性を有し、現在 PEFC の電解質として最も一般的に用いられている。しかし、パーフルオロスルホン酸膜については後述するような課題もあり、現在、これに代わる電解質膜の開発も鋭意進められている。

表 4-1-9 商品化されているパーフルオロスルホン酸膜

膜名	メーカー
ナフィオン®膜	DuPont
フレミオン®膜	旭硝子
アシプレックス®膜	旭化成
GORE-SELECT®膜	W.L.GORE, ジャパンゴアテックス

パーフルオロ系の固体高分子膜は化学的安定性に優れるという有利な特性を有するものの、

- ① 低加湿化・無加湿化（導電性・強度を確保するために水分管理が必要）
- ② 耐熱性の向上（高温で強度が低下，常圧での高温化は水が蒸発し伝導度が低下）
- ③ 低コスト化
- ④ メタノールの透過（DMFC用）

といった課題がある。

図 4-1-5 にパーフルオロスルホン酸膜の課題に対する現状の研究開発の方向性を示す。

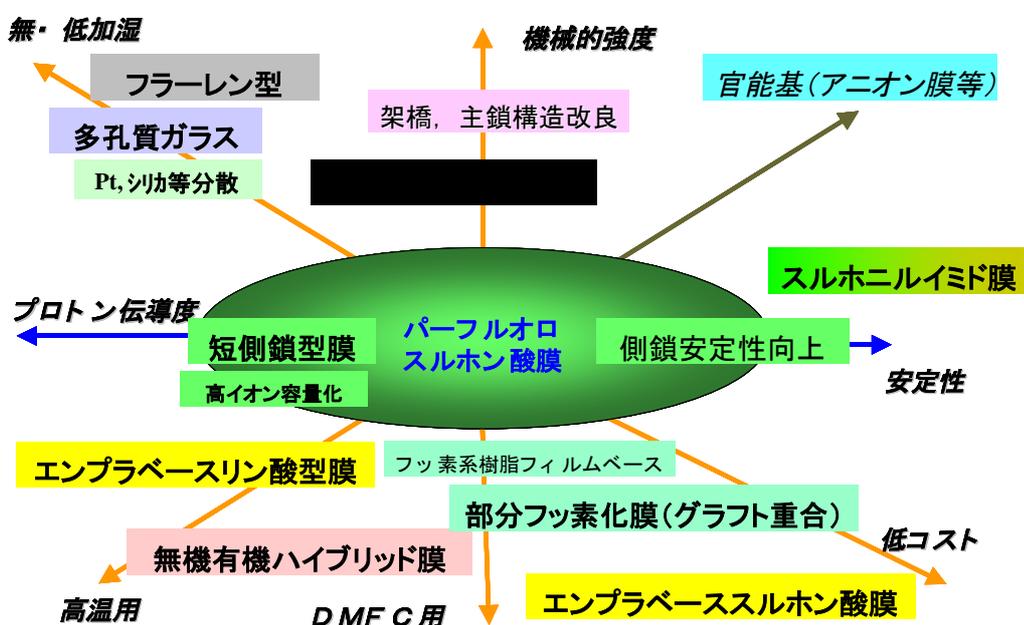


図 4-1-5 パーフルオロスルホン酸膜の研究開発の方向性

資料提供：旭硝子（株）

以下に、以上の課題を踏まえた現状の技術動向を整理する。

2) 低加湿化・無加湿化

パーフルオロスルホン酸膜において優れたイオン導電性を得るには、飽和水蒸気圧雰囲気に近い条件で膜を保持する必要があるため、水分管理（加湿）が必要となる。水分管理の方法としては、外部から加湿する方法があるが、システムの簡略化とコストの低減のため、無加湿、あるいはより低加湿で利用可能な膜の開発が進められている。これは、カソード側で生成した水の一部がアノード側に拡散する水分や、アノード側に供給される加湿した燃料ガスからの水分を、膜内で高く維持管理する試み等である。表 4-1-10 に示すように、ナフィオン®膜をベースに白金を入れて水素と酸素の反応が

ら水を生成するものや、膜内に親水性を有するシリカ等を含有させた膜、プロトン伝導性を有する多孔質ガラス^{注1)}を電解質として利用する方法^{注2)}などが提案されている。さらに、ソニーではフラーレンにOH基をつけて水分ゼロでプロトン伝導性を出せると発表している。また、ポリベンゾイミダゾールのような基を膜の分子の末端につけて無加湿膜を検討する研究や、薄膜化して低加湿に対応するというような動きもみられる。

表 4-1-10 パーフルオロ系複合膜の開発動向

材料	特徴・狙い	開発機関
触媒分散パーフルオロ型スルホン酸膜	自己加湿	山梨大
シリカ分散パーフルオロ型スルホン酸膜	自己加湿	山梨大, 燃料電池開発情報センター, Stonehart
パーフルオロスルホン酸樹脂含浸 PTFE 多孔体膜 (GORE-SELECT®)	補強膜	W.L.GORE and J.G.I.
布補強パーフルオロスルホン酸膜	補強膜	旭硝子, 旭化成
フィブリル補強パーフルオロスルホン酸膜	補強膜	旭硝子
パーフルオロスルホン酸/無機複合膜	高温作動	Princeton University

出典：「固体高分子型燃料電池の開発と実用化」(第2版)技術情報協会 2000.2 を基に作成

また、東洋紡では後述するように2003年5月、低湿度、高温下でも作動可能な炭化水素系ポリマー「SPNポリマー」の開発に成功し、今後、詳細な実証試験を実施していくと発表している。

3) 薄膜化と補強膜の動向

パーフルオロスルホン酸膜は、膜厚が薄いほど膜抵抗が低下し、発電性能が向上するために、薄膜化が図られてきた。しかし、薄膜化は逆に機械的な強度や寸法安定性、操作性の低下等の問題を生じさせるため、薄膜化とともに機械的強度、寸法安定性に優れた膜の開発が進められている。また、薄膜化によって水素の透過量が増加し、透過した水素が空気極で酸素と反応し効率を低下させるという問題が生じる。そのため、現状では20~40 μ m程度の膜厚が適正と考えられている。

現在、表4-1-10に示したように、各種補強膜が開発されている。補強の方法とし

注1) 分相によって生成した第二相を溶解・除去するとその部分が空隙となりできる微細な空隙を多数有するガラス。多孔質ガラスの用途としては各種の分離膜、無機触媒および酵素の担体などがある。多孔質ガラスは次のような特徴を持っている。

- ・径が数nm~数 μ mの貫通細孔を無数に有し、比表面積も最大数百 m^2/g と大きい
- ・細孔径や比表面積を熱処理過程で容易に制御できる
- ・高ケイ酸質であるため耐化学性・耐熱性が優れている

注2) 例えば、名古屋大学の野上正行教授の研究グループは、ゾルゲル法と呼ばれる方法で作成したリン・ケイ酸塩ガラスが、130 $^{\circ}\text{C}$ から-20 $^{\circ}\text{C}$ の広い温度範囲で安定したプロトン伝導性を示すことを発見した。

ては、現状では化学的に安定な PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）を補強材に用いる方法が主流である。ジャパングアテックス社からは PTFE 多孔体にパーフルオロスルホン酸樹脂液を含浸した膜（Gore-Select®膜）で、膜厚 15～40 μm 程度のものが市販されている（表 4-1-17 参照）。また、旭化成、旭硝子は、それぞれ NEDO のプロジェクトにおいて PTFE を用いた補強膜の開発を行っている。旭硝子が開発した PTFE フィブリルを用いた補強膜は、わずかな PTFE 添加量で、実用上十分な機械的強度が得られることが確認されている^{注1)}。

4) 耐熱性の向上

FC の運転温度は約 80℃が一般的であるが、自動車用 FC における廃熱効率の向上や、改質ガス中の CO による電極触媒被毒の軽減のために、より高温で作動可能な耐熱性膜の開発が進められている。例えば 80℃から 120℃への高温運転化は、外気温との差が 2 倍になり、ラジエタの容量を半減できる可能性がある。また、改質ガス用 FC の場合、130℃での運転により CO の被毒がほとんど問題にならなくなるという^{注1)}。

現状の FC システムの標準的運転条件である常圧 80℃では、飽和水蒸気圧が約 0.5 気圧であり、100℃を超えると飽和水蒸気圧が 1 気圧を超え、加圧しないとガスが入らないことになる。120℃では飽和水蒸気圧が約 2 気圧になるので、常圧 80℃と同じ燃料ガス分圧を狙うと 4～5kg/cm²の加圧が必要になる。また、高温によって PEM の理論起電力が低下するというデメリットもある。したがって、各システムにおいて以上のようなメリット・デメリットを勘案して適切な運転温度を探る必要がある。この点に関して複数の膜メーカーに対するインタビューによると、固体高分子膜の耐熱性としては、120℃が一つの目標水準となっていることがうかがえる^{注2)}。例えば、DuPont 社では、100ppm でも CO の被毒の影響を受けない 120℃が固体高分子膜の最適な温度領域であると述べ、高温膜の開発に取り組んでいる^{注3)}。素材に関しては、ナフイオン®の改良と新規素材の両面から開発を行っているという。ジャパングアテックス^{注1)} や 3M^{注4)} においても高温耐性膜の開発が進められている。

Clemson University では、パーフルオロスルホンイミド膜が従来のパーフルオロスルホン酸膜より耐熱性が約 100℃向上すると報告している。Princeton University におけるパーフルオロ系複合膜による耐熱性の向上を目指した開発もある（表 4-1-10）。また、Celanese は、固体高分子膜製造メーカーである Celanese Ventrures 社を通じて、200℃で使用可能な PBI 高温膜を用いた MEA のパイロット生産を 2002 年 9 月から

注1) 2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

注2) 旭硝子は、耐熱性に関して 120℃が一つのターゲットと述べている（2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」）。デュポン、ジャパングアテックス社も 120℃を一つの目標にしていると述べている（2002 年度 NEF 「FC 動向調査報告書資料編」）。

注3) 2002 年度 NEF 「FC 動向調査報告書資料編」

注4) 2001 年度 JEVA 海外調査報告書

開始した^{注1)}。

東洋紡では、「ザイロン[®]」^{注2)}の微多孔支持フィルムと「SPN ポリマー」を複合化したナノコンポジットイオン交換膜を開発中であり、100℃以上の高温下でも安定的な機械特性を示すことが期待できると発表している。また、2000年度のJEVAによる海外調査によると^{注3)}、W.L.Goreでは、現在130～150℃に耐えられるPEM膜を開発中であり、2001年中には供給が可能になると述べている。

旭硝子は、2004年9月末にフッ素系固体高分子膜を用いた膜・電極接合体(MEA)で高温耐久性を大幅に高めることに成功したと発表した。世界ではじめて120℃で2,000時間を超える連続運転を実証したという。また、旭化成においてもナフィオンタイプの膜とともにそれよりも40℃くらい耐熱性の高いポリマーを用いた電解質膜を開発している^{注4)}。100℃で1,000時間の連続運転を既に実証しているという。この膜の特長は、耐熱性とプロトン伝導性が高いことで、従来並みの伝導性であれば湿度を30～40%下げられるという。また、マイナス30℃といった低温始動性についても伝導度が高いという評価を得ているという。

5) 耐久性

膜の耐久性については、利用温度や利用するガス、ガスの入れ方、冷却の方式、加湿の方法、セパレータ等との相性の問題があり、スタックシステムやMEAとしての耐久性に深く関わっている。現在、MEAが急激に劣化することが問題になっており、膜に穴があいてしまうことがその原因として推測されている^{注5)}。現状ではこうした劣化要因の解明と耐久性の確立、ならびにその実証はコストと並んで最大の課題となっている。現在、劣化要因の解明に向けた産官学共同の取り組みも活発化してきており、後述するとおり、いくつかの有用な知見も得られつつある。

6) コスト

パーフルオロ系固体高分子膜は、食塩電解事業用として現在量産されているが、イオン交換基を有するモノマーの合成工程が多段にわたり、また製膜までの工程が多く、このことが高コストの原因といわれている。現状の標準的なパーフルオロ系固体高分子膜であるDuPont社のナフィオン[®]膜の価格は1㎡あたり\$500～\$900程度であり(表4-1-11)、例えば、セル面積あたりの出力を5kW/㎡と仮定すると、膜のコスト

注1) (財)新エネルギー財団「平成15年度新エネルギー等導入促進基礎調査－燃料電池の技術及び政策の動向調査(資料編)」平成16年3月(以下「2003年度NEF『FC動向調査報告書資料編』」と記す)

注2) 「ザイロン」はポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール(PBO:芳香族環を有する耐熱性高分子材料)。

注3) 2000年度JEVA海外調査報告書

注4) 今年度旭化成への訪問インタビュー調査より(詳細は、本調査報告書参考資料参照)

注5) 2003年度JARI「FCVに関する調査報告書」

だけで\$100/kW～\$180/kW となり、さらなるコストダウンが必要とされている。

表 4-1-11 Nafion[®]膜の価格(1998年1月現在)

(US\$/m²)

量 (m ²)	N-117	NF-115	NF-1135	NF-112	NE-105	NE-1035
<100	\$900	\$800	\$750	\$550	\$950	\$900
100-1000	\$850	\$750	\$680	\$500	\$900	\$850
1001-5000	\$800	\$700	\$620	\$450	\$820	\$780

出典：DuPont 社

DuPont 社は、米国 Fayetteville に大量生産と低コスト化を可能とするプラントを建設し、2001年春よりキャスト法によるナフィオン[®]膜（無補強ナフィオン溶剤成形膜）の生産を開始している^{注1)}。当社は年間 200～300 万 m² の出荷量があるならば、価格として\$30/m²以下が可能と述べている^{注2)}（表 4-1-12）。

表 4-1-12 固体高分子膜の価格の見通し(DuPont 社 2000 年発表)

	生産量	価格	備考
現状	?	\$500～\$900/m ²	
将来	200～300 万 m ² /年 (FCV 約 20～30 万台/年)	\$30/m ² 以下	FCV の普及台数は 50kW, 5kW/m ² を仮定

「技術開発戦略」では、現状の固体高分子膜の価格を 5～15 万円/m²とした上で、2010年の目標を 3～5 千円/m²としている（表 4-1-1 参照）。旭化成は今回の訪問インタビュー調査において、膜の厚さや複雑さによって異なるものの、年間 200 万 m² の生産量であれば 30～50 ドル/m² は可能であると述べている。ただし、定置用だと、使用される量が少ないため、現状ではコストよりも性能向上が優先事項であるという^{注3)}。

7) 非パーフルオロ系代替膜の開発動向

大幅なコストダウンや性能の向上が見込める非パーフルオロ系代替膜の開発も 1995 年頃から始められている（表 4-1-13）。それらは、膜材料の視点から分類すると、主に以下のようなものがある^{注4)}。

① 部分フッ素化固体高分子膜

一般にスチレンージビニルベンゼン等の炭化水素系膜において、化学的に不安定な α 位の水素をフッ素に置き換えた構造のものをいう。代表的なものでは、Ballard Power Systems 社によって開発されたトリフルオロスチレン誘導体共重合膜（BAM[®]）

注1) 2002 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

注2) 「日経メカニカル」2000 年 12 月号, No.555, および 2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

注3) 今年度旭化成への訪問インタビュー調査より（本調査報告書参考資料参照）

注4) 特許庁「平成 12 年度特許出願技術動向調査報告書ー燃料電池」平成 13 年 3 月

グラフト^{注1)}重合膜)がある(図4-1-6)。この膜は低価格化を狙ったものとされているが、Ballard社によると^{注2)}、性能面でもナフイオン[®]膜より優れると述べている(図4-1-7)。現在英国のポリマーメーカーであるVictrex社と共同で生産プロセスを開発中である。また、2002年5月には、荏原製作所とBAM[®]グラフト重合膜のパイロットスケールで製造するプロセスおよび装置の独占的な開発契約を締結したと発表している^{注3)}。

その他には、放射線グラフト重合膜^{注4)}などが開発されている。(表4-1-13)

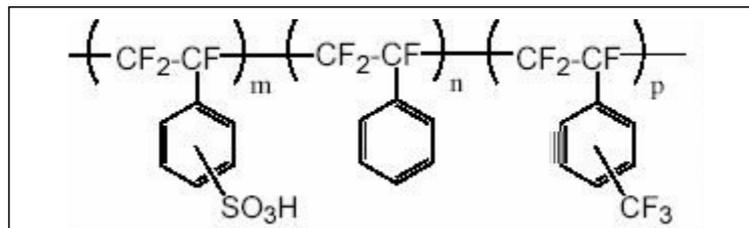


図 4-1-6 BAM[®] Ionomer

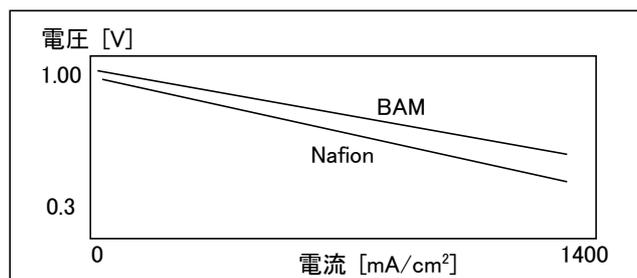


図 4-1-7 BAM[®]膜とNafion[®]膜の電流-電圧特性

注：プレゼンテーションを参考に再構成したものであり、実際のデータとは異なる。

② 炭化水素系固体高分子膜

炭化水素系膜の主な狙いは、低コスト化と高温耐熱性である。PBI(ポリベンゾイミドゾール)等の耐熱高分子にりん酸を含浸した膜やスルホン酸基を付加した膜が検討されている。

自動車用として、CelaneseがホンダとPlug Powerと共同で開発中のPBIを用いた

注1) グラフト重合膜技術：グラフトは「接木」, 「結合」を意味する。化学的な作用を利用して、フィルムや布の膜にイオン交換などの機能を新たに付与(重合)する技術。

注2) 2002年度JEVA海外調査報告書

注3) <http://www.ebara.co.jp/news/news20020522.html>

注4) 放射線を使って新しい機能を化学的にグラフト(接ぎ木)する方法を言う。グラフト重合は、高分子鎖の幹に枝をつけるようにして異なったモノマーを側鎖として導入するような高分子反応であり、高分子の機能化の有効な手段のひとつである。例えば、親水・疎水性、高吸水性、温度応答性などといったモノマーの持つ機能を既存の高分子に付与することができる。

膜がある。(表 4-1-13)

また、日立製作所では、NEDO の委託により、現在低コスト、長寿命を狙った芳香族系エンジニアリングプラスチック（エンプラ）を原料とする炭化水素系膜の開発を行っており、2004 年 3 月には、この膜を用いた MEA が 4,000 時間の連続運転を実現したと発表している。さらに Honda は、Honda が新しく開発した「Honda FC STACK」にエンプラを原料とするアロマティック電解質膜を採用し、マイナス 20℃から 95℃までの発電が可能となったと発表している。この電解質膜を搭載した FCX はすでにリース販売を開始している。

③ 混合固体高分子膜

樹脂とイオン導電性を混合して成膜したものを混合固体高分子膜として分類した。特許庁の調査^{注)}によると、わが国では、松下電器や旭化成、日本電気などで研究開発が行われている。

表 4-1-13 非パーフルオロ系代替膜の候補

	材料	特徴・狙い	開発機関
部分フッ素化膜	放射線グラフト重合膜	基材：FEP スレン/DVB	架橋，低コスト化 PSI
		基材：ETFE トリフルオロスレン	架橋，低コスト化 クロリンエンジニアリング
		基材：ETFE スレン	架橋，低コスト化 IMRA Materials R&D PSI
		基材：ポリエチ SSS/AAc	旭化成
	トリフルオロスチレン重合樹脂含浸多孔体膜“BAM®”	低コスト化	Ballard Power Systems Inc.
炭化水素系膜	りん酸含浸 PBI (ポリベンゾイミダザール)	高温使用	Case Western Univ.
	PBI 系スルホン酸膜		上智大学
	PBI 系膜	高温使用，CO 耐性	Celanese・Honda ・Plug Power
	芳香族ポリエーテルケトンスルホン酸膜	低コスト化	Hoechst (現 Aventis)
	無機・有機ハイブリッド膜	高温使用	電総研
	ブロック構造膜	機能性向上	物質研
	バイポーラ膜	加湿，排水性	物質研，豊田中研

出典：「固体高分子型燃料電池の開発と実用化」(第 2 版)技術情報協会 2000.2 を基に作成

(2) 電極触媒

PEFC の電極の触媒には高価な白金を用いるため、白金担持量の低減が主要課題である。また、改質ガス用 PEFC では、改質ガスに含まれる CO による耐被毒性能の向上が課題となっている。

一般に PEFC の電極触媒は、カーボンブラックの粒子表面に数Åの白金粒子等を均一にばらまいたものであり、これを固体高分子膜に塗りつけて、MEA (膜・電極接合体；

注) 特許庁「平成 12 年度特許出願技術動向調査報告書－燃料電池」平成 13 年 3 月

後述)として加工する。粒子表面に白金をどれだけ均一に細かくばらまくかが重要な課題となっている。カーボンブラックについては、いろいろな種類(成分、粒子の大きさ、出発物質等)があり、どのようなものがFCに適当かについて研究が行われている。

1) 触媒の塗布方法

触媒の塗布方法については、大きく固体高分子膜に塗布する方法と、電極基材に塗布する方法がある。現状では、電極基材への塗布方法が主流と考えられるが、近年、触媒量の低減を狙った固体高分子膜への塗布方法に関する特許の出願が増える傾向があり、膜への塗布方法が見直されてきていると考えられる^{注)}。

2) 白金量の低減化

電極触媒の最大の課題の一つは貴金属量の低減化である。「技術開発戦略」では電極触媒における現状の白金担持量を $2\sim 4\text{g/kW}$ とした上で、2010年の目標をこの10分の1としている。白金量の低減化に向けては、貴金属量の低減のために触媒層を薄膜化していくと均一な触媒層を形成するのが難しいといった課題が顕在化している。また、白金量の低減は、耐久性とトレードオフの関係にあり、耐久性を確保した上で白金量の低減が重要な課題となっている。

日本電池は、従来のチャンピオンデータの10分の1の白金使用量(約 0.2g/kW)のものができたと1999年の電池討論会で発表している。この方法は、電極を触媒金属の錯体イオンと触媒未担持電極注の電解質の対イオンとのイオン交換反応に続いて、その錯体イオンを水素により科学還元するという独自の触媒担持技術によって製作するものである^{注1)}。2000年度からNEDOのプロジェクトとして実用化技術の確立を目指して開発が進められている。

米国では、DOEの「2003年会計年度水素製造・水素貯蔵・燃料電池プログラム」において、3M、Ballard等が中心となって、非貴金属触媒の開発を開始している^{注2)}。また、山梨大学の渡辺教授は、今年度の訪問インタビュー調査において、白金使用量を $1/10$ にするには、1つの触媒を見つけることによって達成され得ず、あわせて活性を上げる、温度を上げる、触媒の利用率を上げるような拡散層の作り方等を組み合わせるしかないと述べている。

図4-1-8は、Johnson Matthey (JM)社によるFCVの白金の使用量の低減見通しを示しており、現状のFCV(PEFC出力 75kWe を仮定)では、1台当りの白金族の担持量は $60\sim 120\text{g}$ であるが、2010年においては、 25g 程度に低減できると考えている(図4-1-8)。Johnson Mattheyでは、白金以外のもので代替することは不可能と

注1) NEDO「平成12年度PEFC研究開発成果報告会講演要旨集」平成12年3月9日

注2) 2003年度NEF「FC動向調査報告書資料編」

考えており、白金使用を前提に担持量を低減するべく開発を行っているという。

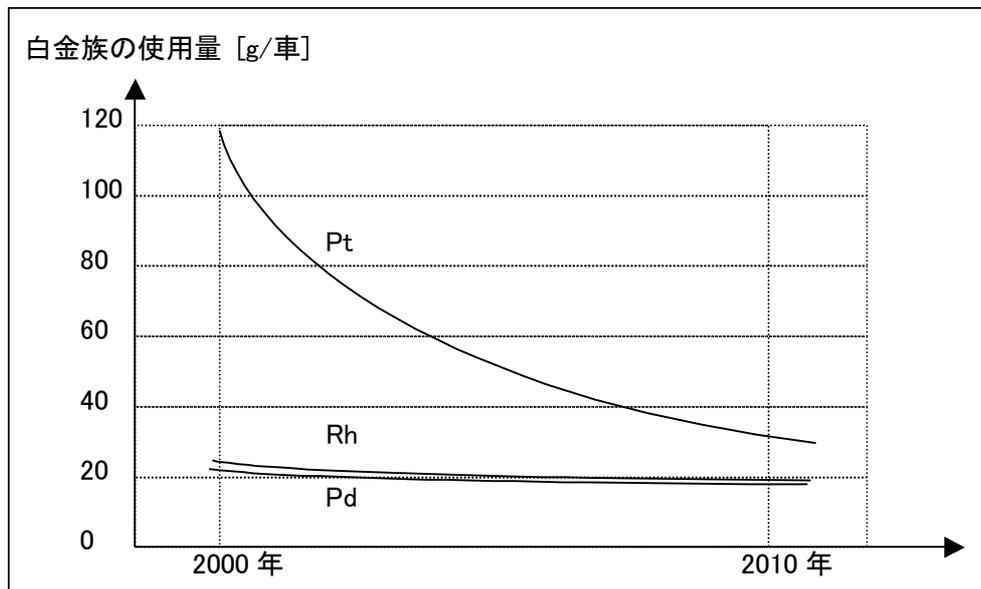


図 4-1-8 Johnson Matthey 社による FCV の白金族使用量低減の見通し

出典：2003 年度 JARI 海外調査報告書

3) アノード(水素極)触媒における CO 被毒に関する課題

メタノールや炭素系燃料の改質ガスを用いる PEFC においては、改質ガス中に含まれる CO によるアノード触媒の耐被毒性能の向上が課題となっている。これとともに、貴金属量の低減が最大の課題である。従来から純水素用の 5 倍から 10 倍程度の白金量が必要とされている。触媒の被毒に対しては、触媒の改良に加えて、高温化や改質ガス中の CO 濃度の低減、エアブリーディング^{注1)}などのいくつかの方法が考えられている。触媒の改良としては、白金とルテニウムの合金（白金とルテニウムの担持量（重量）の比は 1 : 1 が基本）を触媒に用いることが主流となっている。

最近の動向としては、触媒そのものの技術的な変化は大きく変わっていないが、白金量を減らすために、高温運転化や改質ガスの CO 濃度の低減が検討されているという^{注2)}。改質ガス中の CO 濃度としては 10ppm が一般的になりつつある。

最近では、FC 運転中におけるルテニウムの安定性も問題となってきており、ルテニウムをどう安定に存在させるかといった課題が顕在化してきている。

山梨大学の渡辺教授らは PtFe, PtNi, PtCo, PtMo 系電極触媒が優れた耐 CO 性

注1) 水素極の中に空気を入れること。エアブリーディングの効果は次のとおり。CO の被毒は CO が触媒表面を通過していく過程で、触媒表面と CO が離れなくなる現象。そこに空気があると、水素とも反応するが、触媒上にある CO を CO₂ にして分離できる。それを利用して CO 被毒を低減しようというもの。通常 0.5% から 5% ぐらいまでの空気を水素に混ぜて回避する。デメリットは安全性と効率低下である。

注2) 2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

(100ppm) を有することを発表した。製法についてもスパッタリング法^{注1)}を含めて検討し、成果を挙げている。また、産業技術総合研究所の五百蔵らは Pt/MoO₂/C などの酸化物修飾触媒が耐 CO 性を示すことを報告している^{注2)}。海外では、カナダ INRS の C.Gouerec 等は PtMo を含むコロイド型電極触媒の製造で AlH₃, MgH₂ などの金属水素化物を還元剤に用いる方法を開発し、100ppm CO 耐性試験に成功している。

4) カソード(空気極)触媒特有の課題

FC のエネルギー損失の内訳を見ると、全損失の 8 割をカソードが占め、高効率カソード触媒は重要な課題となっている (図 4-1-9)。

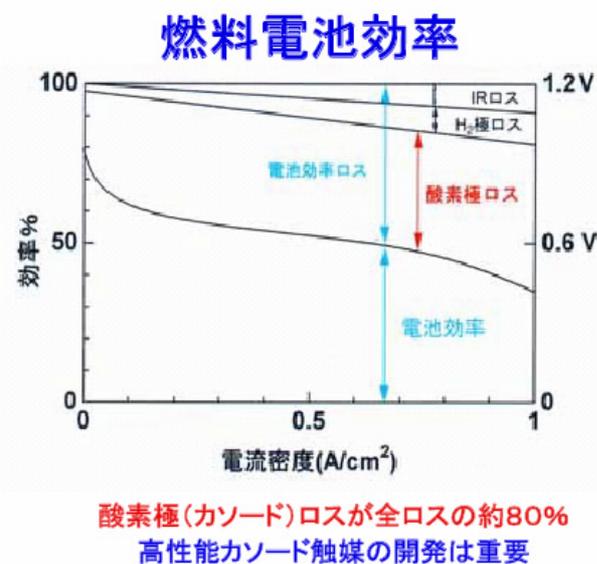


図 4-1-9 燃料電池ロス

(出典：山梨大学渡辺研究室；参考資料参照)

このような課題に対して、例えば山梨大学の渡辺教授の研究グループでは、カソード触媒に卑金属の合金を用いて、酸素の還元性能を向上させる取り組みを行っている。^{注3)} 鉄などの卑金属を Pt に混ぜると還元反応を促進させる効果があることが明らかにされている。

カソード触媒特有のその他の課題としては、空気中の不純物に対する問題が挙げられる。前段階で不純物質の除去も必要となるが、これと触媒の耐久性の向上との兼ね

注1) 加速されたイオンをターゲット (固体) に照射すると、ターゲット表面の原子・分子が外部に放出される。これをスパッタ蒸発 (Sputtering evaporation) と呼び、スパッタ蒸発したターゲット物質をウエハーやガラスなどの基板上に付着させて薄膜を形成することをスパッタ蒸着 (Sputtering deposition) と称している。これを称してスパッタリング法と言う。

注2) 2002 年度 NEF 「FC 動向調査報告書資料編」

注3) 今年度山梨大学渡辺教授への訪問インタビュー調査より (詳細は、本調査報告書参考資料参照)

合いの最適化も課題である。今後、触媒量の低減を図ることにより、より大きな問題として顕在化する可能性もある。

また、運転していくと、きれいに分散しているものが塊になってくるシンタリングの問題も課題の一つになっている。最近、田中貴金属工業ではこうした問題に対処するため、白金・コバルト合金触媒を開発し、耐久性、出力密度向上に極めて有効な成果が出つつあり、自動車用、定置用にその性能評価と開発が活発に進められているという^{注1)}。

5) 電極触媒の加工費

表 4-1-14 に田中貴金属工業による触媒加工費に関する情報を整理する。市場における触媒の現状の加工費は、触媒のロットサイズが 1kg～数 10kg で、触媒 1g 当たり 600～1,000 円程度であるという。今後、燃料電池の普及時には 1/5 程度が目標になるという。^{注2)}

表 4-1-14 電極触媒の加工費(田中貴金属工業提供)

	ロットサイズ	加工費 (材料費除く)
現状	1kg～数 10kg	600～1,000 円/g
目標	普及時	120～200 円/g

注) 重量は全て貴金属を含む触媒の重さ
出典：2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

田中貴金属では、触媒材料から FCV まで、貴金属を容易にリサイクルできる、現実的な流通の仕組みが重要であると述べている^{注2)}。例えば、以下のような仕組みを提案している。また、同様の提案をジャパングアテックスも行っている^{注3)}。

触媒中の貴金属のみリースにする。使用済み触媒中の白金はリサイクルにより 96～98% 戻すことが可能であるため、回収精製した白金をクレジットにして電極触媒を製作する。このとき、2～3% の不足分の白金を新たに調達投入する。FCV の購入者は、金利分と加工費、減耗する白金のコストをリース代として負担することになる。こうすることによって電極触媒の価格が白金の相場変動を大きく受けずに済むことになる。

6) FCV 普及時における貴金属の資源制約について^{注3)}

FCV 普及時に必要な白金量については、全世界の車 (年産 7,000 万台) が全て短期間に FCV になれば厳しいと考えられるが、数パーセントのレベルで FCV が導入されても、リサイクルを前提にすれば、資源制約上の問題はないと考えられている。また、

注1) 2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」および 2003 年度田中貴金属工業からの情報より。
注2) 2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」
注3) 2002 年度 NEF 「FC 動向調査報告書資料編」

白金については需要の増大が明確になれば鉱山の生産量を増産できるとも言われている。Johnson Matthey は昨年の海外調査において、FCV が大量普及しても白金族は供給不足になることはないとしている^{注)}。図 4-1-10 は参考のため、近年の白金の需要と供給量の推移を示している。

一方、ルテニウムについては、現状の全世界の生産量は十数トン程度であり、今後 FCV によってルテニウムの需要が増加した場合、資源的制約が発生することが懸念されている。ルテニウムの安価なりサイクル技術の開発と、ルテニウムに替わる物質の開発が課題である。

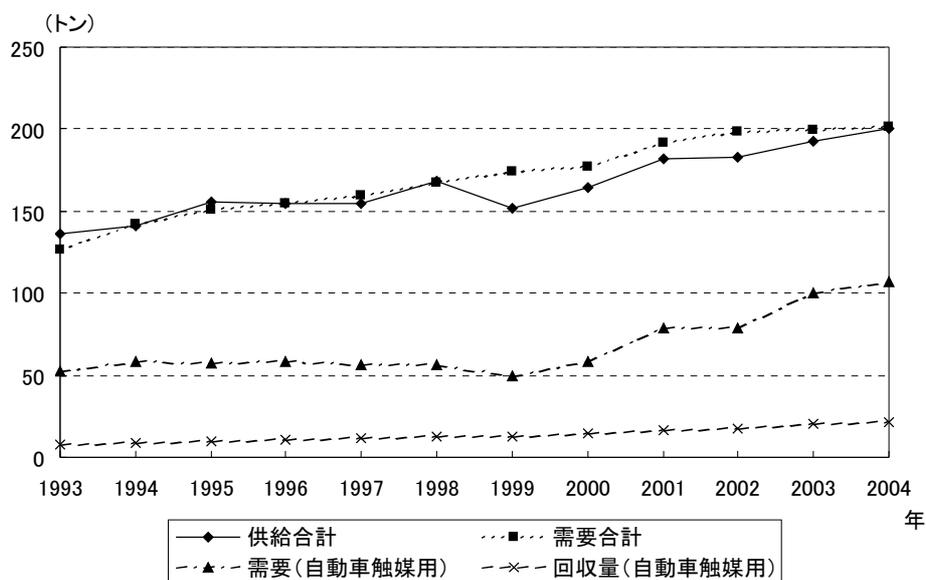


図 4-1-10 全世界の白金の需要と供給
出典：Johnson Matthey 社 HP におけるデータを基に作成

7) 貴金属の価格の動向

図 4-1-11 は最近の白金価格相場を示しており、1995 年から 1999 年中頃までは、おおむね \$11～\$14/g で取引されていたが、その後は高騰し、2001 年に入り下落傾向に転じた。しかし 2001 年後半から 2002 年に再び高騰し、2004 年 4 月には高値で \$30/g まで高騰したが、2005 年 1 月現在で \$27/g 前後となっている。

図 4-1-12 にルテニウムの価格の推移を示す。2001 年から下落傾向を示していたが、2004 年に入って上昇に転じていたが、2005 年に入り再び下落傾向を示している。

注) 2003 年度 JARI 海外調査報告書



図 4-1-11 プラチナの月間の高値, 安値および平均価格(1995年～2005年1月)

出典：Johnson Matthey HP 「Platinum 2003 Interim Review」ほか

注) 1オンス = 約31.1035gとして計算してグラフ化

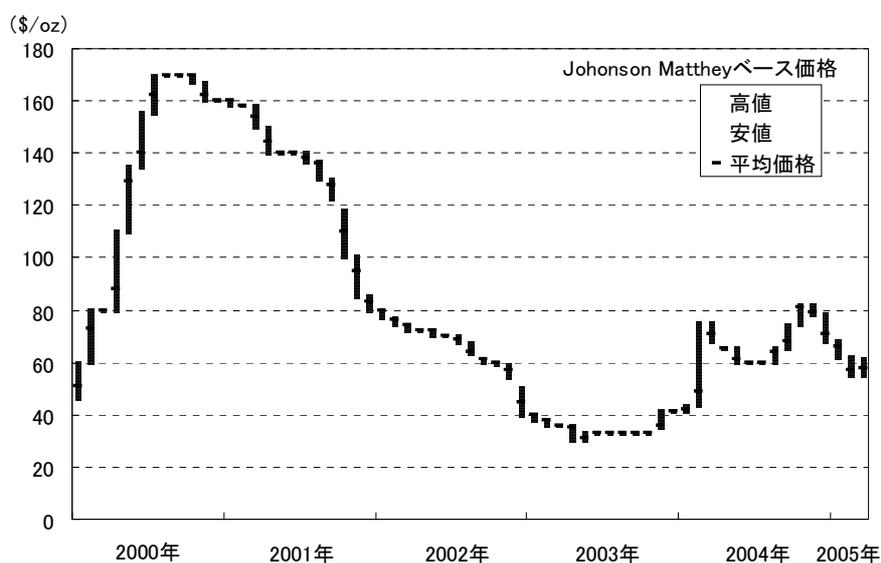


図 4-1-12 ルテニウムの月間の高値, 安値および平均価格(2000年～2005年3月)

出典：Johnson Matthey HP

(3) ガス拡散基材

電極の基材(ガス拡散層:GDL)としては、カーボンペーパー、カーボンクロス、カーボンフェルト等が用いられている。従来、東レ製のカーボンペーパーが標準品とされていたが(表 4-1-15)、現在同じ炭素繊維メーカーである三菱レイヨンからはロール状のカー

ボンペーパータイプの製品（図 4-1-13），東邦テナックスからはカーボンクロス／フェルトタイプの製品が提供されるなど，新たな参入も進んでいる^{注)}。2002 年度の海外調査によると^{注)}，Ballard 社の子会社である BMP（Ballard Material Products）からも連続ロール状生産が可能な GDL「AvCarb Grade-P50T」が販売されているが，Ballard 社では三菱レイヨン製の GDL を採用しているという。

電極の基材として用いられるカーボンペーパーの価格は，現状で 5,000 円/m²程度であり，出力 5kW/m²を仮定すると，カーボンペーパーの価格は，

$$5,000[\text{円}/\text{m}^2]/5[\text{kW}/\text{m}^2]\times 2(\text{正負極})=2,000[\text{円}/\text{kW}]\div 17[\$/\text{kW}]$$

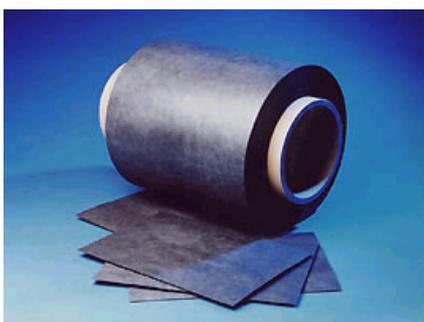
となって，現状ではかなり高価である。今後のコストダウンに向けた取組みが大きな課題となっている。「技術開発戦略」では，2010 年のコスト目標を 500 円/m²としている（表 4-1-1 参照）。

表 4-1-15 東レ製カーボンペーパーの物性値

物性	単位	TGP-H-060	TGP-H-090
厚さ	mm	0.19	0.28
蓄密度	g/cm ³	0.45	0.45
空隙率	%	78	78
気体透過性	mmaq/mm (14cm/secの空気流量での差圧を厚さで除した数値。)	27	30
体積抵抗率			
面厚方向	Ω cm	0.08	0.08
面内方向		0.005	0.005
熱伝導率	cal/cm·sec·°C	(4×10 ⁻³)	(4×10 ⁻³)
曲げ強度	kgf/cm ²	400	400
	MPa	39.2	39.2
曲げ弾性率	kgf/cm ²	(1.0×10 ⁵)	(1.0×10 ⁵)
	MPa	(9800)	(9800)

* 上記データは実験値。()は，厚いサンプルからの推定値。

資料提供：東レ株式会社



厚さ	160 μm
密度	70 g/m ²
曲げ強度	85 MPa
ガス透過率	1500 ml/hr·cm ² ·mmAq
抵抗率	4.3 mΩ·cm ²
ロールの長さ	50, 100, 200 m
ロールの幅	300, 800 mm

図 4-1-13 三菱レイヨン製ロール状 FC 用ガス拡散層(PYROFIL™ MGF-070)

注) 2002 年度 JEVA「FCVに関する調査報告書」

(4) 膜・電極接合体(MEA)

膜・電極接合体 (MEA) の代表的な製法であるホットプレス法を図 4-1-14 に示す。電極は白金担持カーボン粉（水素電極には白金-ルテニウム担持カーボン粉を用いる場合あり）と結着材としてのテフロン液を混合攪拌してペースト状にし、これを電極基材であるカーボンペーパー等の片面にコートして電極層とし、熱処理を施す。これを水素電極、酸素電極の 2 枚作成する。次に、固体高分子膜と同じ成分の溶液（膜溶液）を 2 枚のそれぞれの電極層に塗布し、固体高分子膜をこの 2 枚の電極でサンドイッチしてホットプレスで一体化し、MEA とする。

現在、表 4-1-16 に示すような様々な MEA の製法が提案されている。また、ゴアテックス社 (W.L.Gore, ジャパンゴアテックス) からは、現在表 4-1-17 に示すような MEA 製品 Primea[®] が販売されている。この Primea[®] の構成図を図 4-1-15 に示す。2000 年度の JEVA の海外調査によると^{注)}、Primea[®] の特長としては、量産性に優れ、すでにこの低コスト・量産技術（連続生産技術）を確立したという。また、白金担持量が少なく（将来の目標は 0.1 mg/cm²）、長寿命であるという。調査時点において、すでに定置用では 1,000～10,000 時間を達成し、自動車向けの寿命テストでは、すでに 6,000 時間を達成したと述べている。

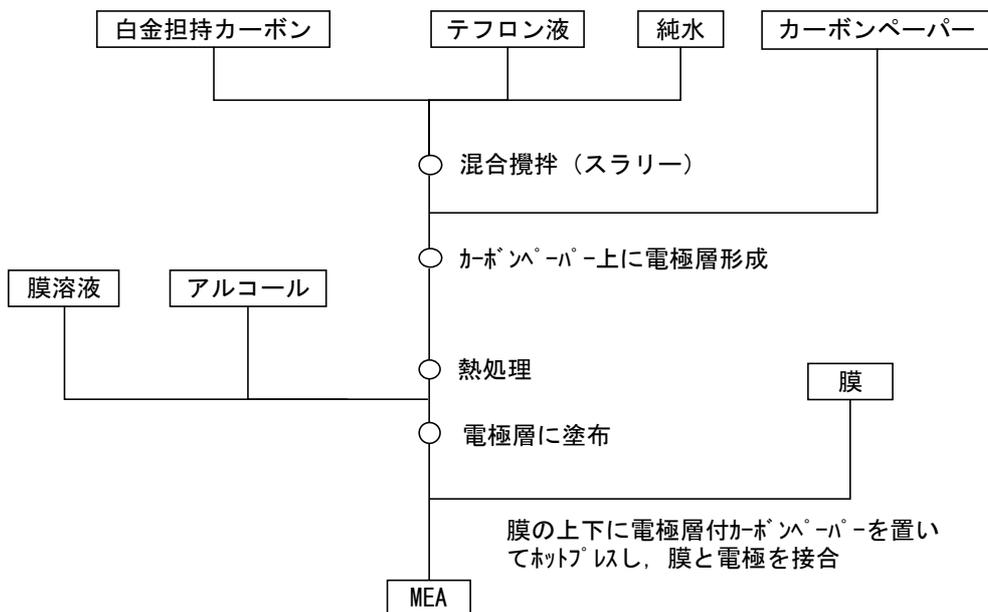


図 4-1-14 代表的な MEA 製法の例(ホットプレス法)

出典：水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) サブタスク 7 水素利用技術に関する調査・検討 (平成 11 年 3 月)

表 4-1-16 MEAのその他の製法

方法	開発機関
Decal 法 (膜に触媒層フィルムを転写する方法)	Los Aramos National Laboratory
延伸多孔質 PTFE シートをベースとするものと さらなる改良を加えた方法	ジャパングアテックス
電極または MEA の形成過程で 2 種類以上の触 媒層を層状に被覆するもの	ジョンソンマッセイ
高分子電解質樹脂と触媒からなる水系の電極調 整用インクの考案	ジョンソンマッセイ バラード
白金をドライプロセスで担持させるもの	S. Chalk et. al.

出典：「固体高分子型燃料電池の開発と実用化」 技術情報会 1999.5

表 4-1-17 ジャパングアテックス社の製品

補強材	GORE-TEX®	延伸多孔質ポリテトラフルオロエチレン
固体高分子膜	GORE-SELECT®	GORE-TEX®を補強材に持つ
MEA	PRIMEA®	GORE-SELECT®に電極層を形成したもの。ガス拡散層 CARBEL と組み合わせて発電に供せられる。
ガス拡散層	CARBEL-CFP®	カーボンペーパーに特殊加工を施したもの
	CARBEL-CL®	CARBEL-CFP®の改善品（高電流域での高効率維持が可能）

出典：ジャパングアテックス（株）藤本他「イオン交換膜と MEA の最近の開発状況」，
水素エネルギー協会特別講演会予稿集（1999 年 11 月 17 日）を基に作成

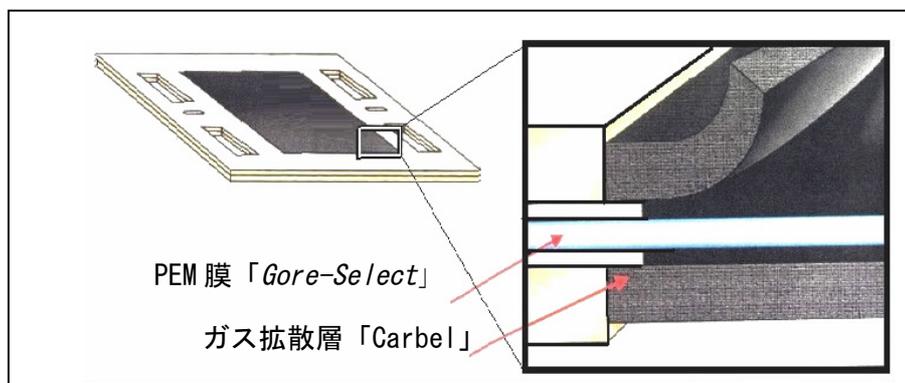


図 4-1-15 Primea®の構造

出典：W.L.Gore 社資料

前章の表 3-3-23 に示したように、海外の多くの化学系メーカーが MEA の製品化を検討している。現在、確認できているところで上記の Gore に加えて、3M, Johnson Matthey, dmc2 が MEA を製品として販売している。3M では、5 層 (GDL・触媒・膜・触媒・GDL)，7 層 (5 層+シール・ガスカート) の MEA を製品化・販売しているが、現在、バイポーラプレートまでを統合し、ユニット化した 9 層 MEA (Unitized Cell Assembly : UCA)

注) 2000 年度 JEVA 海外調査報告書

の開発を行っている^{注1)}。また、DuPontにおいても3層、5層、7層のMEAを、Johnson Mattheyでも、5層、7層のMEAの販売を行っている。今後、多くのメーカーがMEA市場に参入し、競争が激化するものと考えられる。

わが国のメーカーでは、旭硝子がMEAの製品化に向けた取組みを行っており、現在装置用を主たるターゲットとして特定メーカーに製品をサンプル出荷している^{注2)}。旭硝子によると、現状における最大の課題は耐久性にあり、利用を続けていると突然急激に電圧が低下することがあると述べている。この原因として、固体高分子膜に穴があくことが推測され、その原因はほぼ解明されてきている段階にあるという。

NEDOの委託により、京都大学、同志社大学を中心とした産官学の研究グループが現在、MEAの劣化要因の解明に取り組んでおり、その中で、白金担持カーボン触媒上に過酸化水素が副生することが見出され、これがパーフルオロスルホン酸系固体高分子膜の分解を加速することなどが解明されてきている^{注3)}。今年度の訪問インタビュー調査の中で同志社大学の稲葉助教授は当プロジェクトの中で、過酸化水素に関わるMEAの劣化要因の解明に取り組んでいる。今年度の訪問インタビュー調査によると^{注4)}、本NEDOプロジェクトの中で、過酸化水素は空気極、燃料極のどちらでも発生する可能性があるが、この際、白金量が少ないほど、多くの過酸化水素が発生しやすいこと、とくに燃料極側では、酸素がクロスリークすることによって、過酸化水素を発生させやすいこと等が明らかになったという。また、過酸化水素下におけるナフィオン膜の劣化に関しては、とくに鉄イオンや銅イオンの存在によって過酸化水素の分解反応（フェトン反応）が生じ、生成されるラジカルが膜をアタックすることが明らかになったという。このことは、金属セパレータとパーフルオロ系の膜の組み合わせにおいて問題になると考えられる。また、高分子膜は欠陥構造を有するほど、ラジカルに対する攻撃を受けやすく、ポリマーの分解が進行するという。この知見によれば、不純物の少ない膜の製造が劣化に対して有効であることを示している。現在、各パーフルオロ系膜メーカーでは、こうした取組みによって、耐久性の高い膜を提供しつつあるという。

(5) セパレータ

セパレータ（バイポーラプレート）には、①水素や酸素を供給するための流路を確保する、②双方が交じり合わないよう仕切る、③隣り合うセルを電氣的に接続するなど役割が求められる。そのため、性能としては様々な動作環境における機械強度、安定性、低い電気抵抗、成形性などが要求される。FCの出力密度向上のためには、より軽く薄くすることが課題である。また、低コスト化も課題である。

注1) 2003年度JARI海外調査報告書

注2) 2003年度JARI「FCVに関する調査報告書」

注3) NEDO「固体高分子形燃料電池の劣化要因に関する研究」平成15年3月

注4) 今年度同志社大学稲葉助教授への訪問インタビュー調査より（詳細は、本調査報告書参考資料参照。）

セパレータの材料としては、古典的にはカーボングラファイトの機械加工製品であるが、非常に高コストである。最大の課題であるコストの削減について「技術開発戦略」では、2010年目標値を100～200円/枚としている（表4-1-1参照）。

各メーカーともスチール製やカーボンコンポジット材料といった代替素材、安価な製造方法の研究開発を進めている（表4-1-18）。

現在検討が進められているセパレータの種類には、大きくグラファイト製、金属製、コンポジット製がある。通常のグラファイト製は機械加工が必要となるため、現在カーボン製として主流となっているのは、導電性のある黒鉛の粉を樹脂で固めたコンポジット製の製品である。コンポジット製メーカーである日清紡に対するインタビュー調査によれば^{注1)}、軽薄化、低コスト化に向けての大きな技術的課題はすでにクリアしていると述べている。日清紡では、溝を含めた厚さで0.4mm、溝を含めない厚さで0.2mmの製品が製造可能と述べている^{注1)}。金属製と同様の0.1mm以下を目標にしているという^{注2)}。

図4-1-16は、日清紡からの情報によるセルの構造を示すが、カーボンモールド製セパレータでは、一般的に1つのMEAにつき2枚のセパレータを用いる構造であり、セパレータの背面は水冷のための水の流路とする構造が標準的であるという。

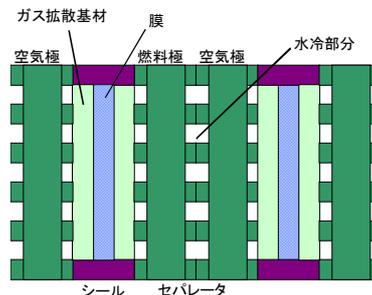


図 4-1-16 セルの構造(資料提供:日清紡)

これらに分類できないタイプとして、ユニチカが製造しているアモルファスカーボン製のものがある。これは、原料となる樹脂を成形したのち、炭化焼成することによって製造するものである。アモルファスカーボンの素材そのものの物性は、コンポジット製に比べて優れるが、炭化焼成によってサイズが変化するため、精度が出しにくいという欠点がある。ユニチカでは、この精度の出し方に独自のノウハウがあると述べている^{注3)}。

現在、樹脂メーカーを中心にコンポジット製セパレータ市場に30社以上が参入していると考えられ、市場競争がますます激化していくものと考えられる。

カーボンセパレータの課題については、2005年1月に開催されたFC EXPO 2005に

注1) 2001年度JEVA「FCVに関する調査報告書」

注2) 2003年度JARI「FCVに関する調査報告書」

において、腐食のメカニズムが示された。それによると水素燃料が不足した場合、カーボンセパレータのカーボンを消費して、水素の代わりにプロトンと電子を放出するという。水素燃料欠乏時にこういった現象が確認されている。

表 4-1-18 セパレータに関する主な研究開発動向

メーカー	内容	出典
SGL-Carbon	2001年に射出成形によるコンポジット製セパレータの大量生産を開始。5万枚以上の生産規模で\$3/枚を目指す。	2001年度JEVA海外調査報告書
ユニチカ	原料樹脂を成形し、炭化焼成することによって製造するアモルファスカーボン製セパレータの量産化を計画。NEDOのプロジェクトにセパレータの実用化技術開発ということで参画した。(平成12~14年度)	2001年度JEVA「FCVに関する調査報告書」
日清紡	コンポジット製セパレータを供給中。2002年5月稼働を目標に岡崎市に生産拠点を移し、年産5,000~7,000万枚まで対応可能なスペースを確保する。	2001年8月プレス発表 2001年度JEVA「FCVに関する調査報告書」
三菱電機	NEDOの委託により、カーボン樹脂モールドセパレータを研究開発中。	NEDO「第22回事業成果報告会予稿集」2002年9月19日
大同特殊鋼	NEDOの委託により、金属ガラスを用いた高性能セパレータの材料と製造技術を研究中。	NEDO「第22回事業成果報告会予稿集」2002年9月19日
日立製作所, 日立電線	日立製作所と日立電線の共同でNEDOの助成事業として開発を進め、DMFCに使用可能な耐食金属セパレータ材開発。(1)クラッド材の表面にナノメートル単位で貴金属を蒸着したのち、独自開発の表面処理方法により表面の強度を高めることに成功(ナノメタル導電処理法:Mコート)。これにより、クラッド材を高導電性表面で耐メタノール性の基材に改質。(2)クラッド材そのものも耐食性の高いチタン系を適用することで、Mコートによる表面処理ができない加工部の耐食性も高めた。(3)独自の加工技術により、微細な型成形が可能。この結果従来の黒鉛セパレータ材の50分の1~100分の1の低コストが期待できる。	日立電線プレスリリース2004年5月20日
住友金属工業	NEDOの委託事業により、金属セパレータ用の高性能ステンレス薄鋼板の量産化の見通しを得たと発表。このセパレータは、中に多数分散析出し、鋼板表面に露出する微細な導電性金属析出物の導通効果により、燃料電池セパレータとして機能させるに十分な導電性(低接触抵抗値)を確保。母材耐食性は高耐食ステンレス鋼である標準規格品のSUS316Lより優れており、燃料電池セパレータとして十分な耐食性を有する。	住友金属工業プレスリリース2003年10月28日
Intelligent Energy & Microponent	メタル製セパレータを開発。SS316(0.3mm厚)をベースにMicroponent社がSSスプレーエッチング加工を行う。コーティング材はINEOS ChlorのPEM coat。	2002年度NEF「FC動向調査報告書資料編」
GTI	DOEプロジェクトにより、\$10/kWを目標にした圧縮成形グラファイトセパレータの量産技術を確立。ノンコートメタルセパレータの開発にも取り組む。	2002年度NEF「FC動向調査報告書資料編」
DuPont	圧縮成形によるカーボンセパレータを2002年半ばより出荷。2mm厚で密度は1.8gm/cc。	2002年度NEF「FC動向調査報告書資料編」
Nuvera Fuel Cells	コーティングのないステンレスプレートとポーラス(多孔質)な金属から構成される金属セパレータを開発。特許も取得している。	2004年度海外調査

金属製セパレータについても、様々な機関で研究開発が進められている。NEDO のプロジェクトでは、アイシン精機が様々な金属（ステンレス鋼板、アルミ板、チタン板など）を基板としたセパレータの開発に取り組んだ。現在では、NEDO の委託により、日立製作所、住友金属工業が金属製セパレータの検討を行っている。2002 年度の海外調査でも、Intelligent Energy 社や GTI (Gas Technology Institute) でもステンレス鋼板をベースとした金属製セパレータの開発が進められている^{注1)}。

住友金属工業は、2003 年 10 月に、世界初の金属セパレータ用の高性能ステンレス薄鋼板の量産化の見通しを得たと発表した^{注2)}。住友金属工業は、NEDO との 2000 年度から 5 年間の受託研究に採用され、PEFC 用金属製セパレータの開発を進めてきた。NEDO 事業の目標は、a)高性能燃料電池セパレータ用低コストステンレス薄板材料生産技術の確立、b)ステンレス製燃料電池セパレータ低コスト量産方法の確立、c)燃料電池内 3,000 時間耐久性の確認（耐久寿命 5 万時間の見通しの確認）であり、これらの目標をすべて達成できているという。住友金属工業によると、通常のスチレンス鋼では、表面の不動態皮膜が接触抵抗を高めるためセパレータに不適であったものが、新開発の素材では、鋼中に多数分散析出し、露出する微細な導電性金属析出物の導電効果により、十分な導電性を確保することができ、また、母材耐食性は高耐食ステンレス鋼である標準規格品の SUS316L より優れており、燃料電池セパレータとして十分な耐食性を有するという（図 4-1-17, 18, 19）。このセパレータは、「Honda FC STACK」に採用されており、ホンダは、この金属プレスセパレータの採用により、セパレータ接触面の導電性が向上すると公表している。



図 4-1-17 住友金属工業が開発した金属セパレータ

注1) 2002 年度 NEF 「FC 動向調査報告書資料編」

注2) 住友金属工業プレスリリース（2003 年 10 月 28 日）、今年度住友金属工業への訪問インタビュー調査の結果より。（詳細は本調査報告書参考資料参照）

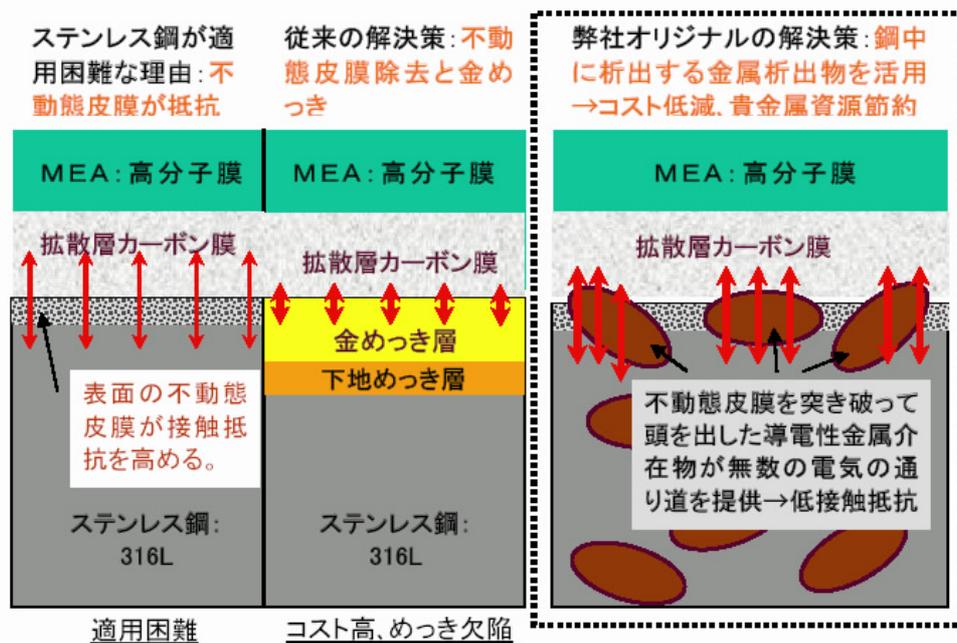


図 4-1-18 住友金属のステンレスにおける新しい表面接触抵抗の低減方法

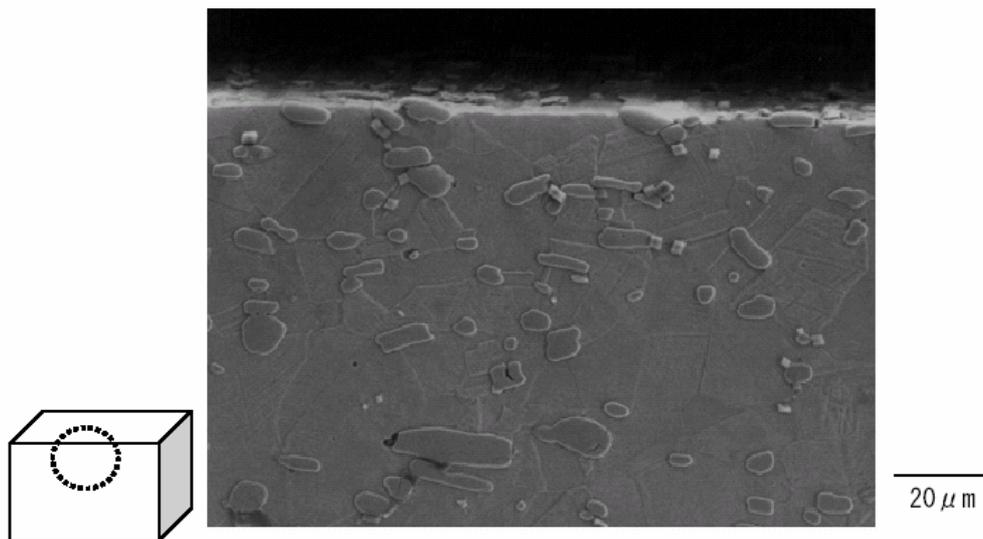


図 4-1-19 開発したステンレス鋼の実際の金属マイクロ粒子

また、2004年5月、日立製作所と日立電線は共同でNEDOの助成事業として開発を進め、DMFCに使用可能な耐食金属セパレータ材を開発したと発表した^{注)}(図4-1-20)。特徴は、(1)表面処理方法として新たにナノメタル導電処理法(M-コート)を開発、(2)

^{注)} 日立電線プレスリリース(2004年5月20)より

チタン系の耐食金属クラッド材を適用，(3)DMFCに適したコンパクト構造のセパレータに型成形にあるという。(1)のM-コートの開発により，クラッド材の表面の強度を高めることに成功し，クラッド材を高導電性表面で耐メタノール性の基材に改質できるという。また，クラッド材そのものも耐食性の高いチタン系を適用することで，M-コートによる表面処理ができない加工部の耐食性も高めることができたという。以上により，新開発の金属セパレータ材は，メタノールに関する高い耐久性と低抵抗特性が達成され，かつ量産時には，従来の黒鉛セパレータ材の50分の1～100分の1の低コストが期待できると発表している。

今年度の海外調査においても Nuvera FC において，ステンレスとポーラスな金属を用いたコーティングのない金属セパレータが開発されていることが明らかになり，かなり実用的な完成度が高いという印象を受けている^{注1)}。

以上のように金属性セパレータに関する技術開発は活発化してきており，実用域に近づきつつあるものと考えられる。

また，近年新しい素材として注目を集めている金属ガラス^{注2)}を用いたセパレータについても，NEDOの委託により大同特殊鋼によって検討が行われている。

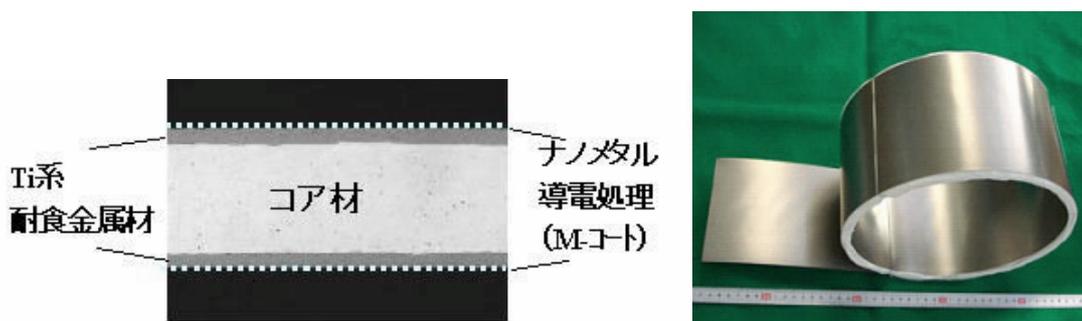


図 4-1-20 ナノメタル導電処理したセパレータ材断面構造(左)と耐食金属クラッド材(右)

注1) 2004年度 JARI 海外調査報告書

注2) 金属ガラスは機械的特性などにおいて優れた性質を示し，またガラス転移温度以上では成形性が非常に容易になることから，種々の分野での応用に期待が高まっている新しい材料である。

4-1-4 改質器

(1) 改質技術の動向

改質器（システム）は、一般に燃料を改質して水素化する改質反応器、改質ガス中のCOを低減するCO変成器（高温変成器，低温変成器），COを除去するCO選択酸化反応器からなり，それぞれにおいて性能向上に向けた各種検討が行われている。

1) 改質方式の比較

改質方式には，一般に水蒸気改質，部分酸化改質，オートサーマル改質方式がある。それぞれの改質反応の反応熱による比較を図4-1-21，表4-1-19に示す。酸素量X=0の場合が水蒸気改質反応であり，これは吸熱反応であるため，反応を進行させるためには熱を加える必要がある。部分酸化反応は発熱反応であり，CH₄の改質を例にすると，X=0.44の場合，全反応での反応熱がちょうど0となり，最も熱バランスがよくなる。このような水蒸気改質反応と部分酸化改質反応を併用した改質方式をオートサーマル改質（併用改質）と呼んでいる。

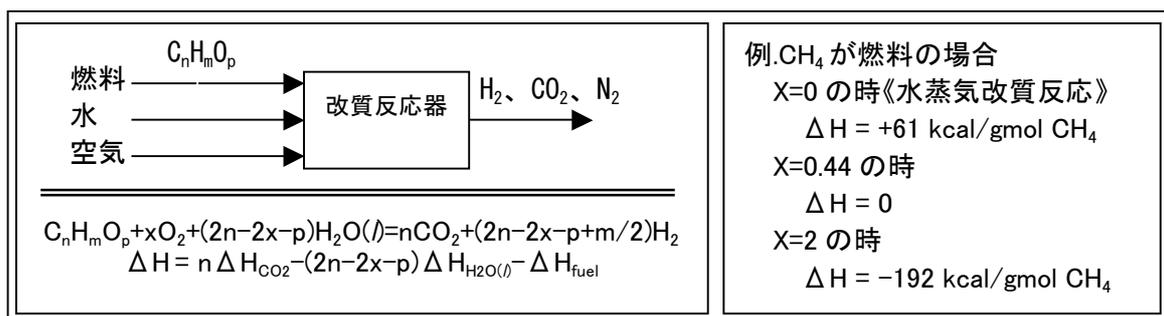


図 4-1-21 改質反応の反応熱・改質効率による比較

表 4-1-19 改質反応の反応熱・改質効率による比較

水蒸気改質反応 (Steam Reforming)	$C_nH_mO_p + (2n-p)H_2O + \Delta H$ $\rightarrow nCO_2 + (2n-p+m/2)H_2$	吸熱反応 ($\Delta H > 0$)
部分酸化反応 (Partial Oxidation)	$C_nH_mO_p + (n-p/2)O_2 + \Delta H$ $\rightarrow 2nCO_2 + (m/2)H_2$	発熱反応 ($\Delta H < 0$)
オートサーマル改質 反応 (ATR)	$C_nH_mO_p + xO_2 + (2n-2x-p)H_2O + \Delta H$ $\rightarrow nCO_2 + (2n-2x-p+m/2)H_2$	$\Delta H = \text{ゼロ可能}$

出典：2002年度NEF「FC動向調査報告書資料編」

水蒸気改質反応による改質システムはシステムの小型化が難しい。ただし，システムスペースの制約がなく，運転が安定しているため，化学産業分野では多くの実績がある。部分酸化反応による改質は，システムの小型化が可能であり，スタート/ストップ

プに対するレスポンスも高い。しかし、発熱反応であるため、コーキングを防ぐためにインレット側に水を供給する必要がある。また、熱効率上も不利である。

水蒸気改質と部分酸化改質を併用するオートサーマル改質は、温度の制御が重要となるが、触媒を適切に選択することによって、燃料の対応性を高め、リアクタを小型化し、さらに反応温度を低下させることも可能である。そのため、車上改質方式としては主流とみられている。定置用の場合には、想定される運転条件にもよるが、水蒸気改質あるいはオートサーマル改質のいずれかの方式が採用されている。

図 4-1-22 は、水蒸気（スチーム）改質とオートサーマル改質の熱効率を比較したものである。改質反応だけを取り上げると、一般には水蒸気改質の熱効率が上回るが、水蒸気改質では、バーナー等による熱供給が必要であり、全体の熱効率では、オートサーマル改質の方が優れる可能性も考えられる。

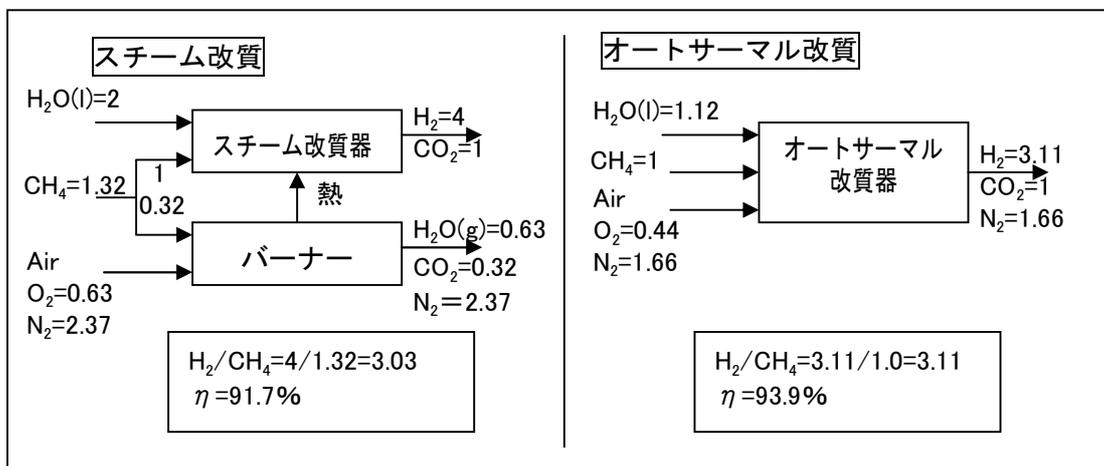


図 4-1-22 スチーム改質とオートサーマル改質の反応熱による比較の例(燃料がメタンの場合)

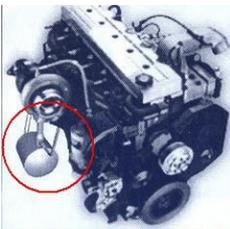
2001年6月にUTC-FCとShellの合弁で設立されたHydrogenSource(HYS)は、CPO(Catalytic Partial Oxidation)改質と呼ばれる技術を有しており、この技術を用いた小型定置用改質器「Vega5」を開発し、2004年以降の商品化を目指している^{注1)}(表4-1-20)。CPO改質はオートサーマル改質と原理上は似ているが、水蒸気がなくても改質が可能であるという。改質燃料としてはガソリン、ナフサ、メタン、FTディーゼル油、エタノールなど様々な炭化水素系燃料に対応可能であり、とくにガソリンとナフサの改質に優れているという。HYSでは、水蒸気改質やオートサーマル改質に比べてサイズ、コスト、スタートアップの点で優れており、効率についても理論値では83%(LHV)、測定値で80%(LHV)を達成しているという。現在、CPO改質システムを車載用改質のほかに、APU用として開発することを検討している。その

注1) 2002年度JEVA「FCVに関する調査報告書」

背景には、ビジネス面で車載改質システムに興味を示す自動車メーカーが少ないことが大きいからだと述べている^{注2)}。

なお、HydrogenSource社は、2004年6月にその役割が終了したとの理由で解散した。

表 4-1-20 HydrogenSource の製品

<p>150 kWe 定置用発電システム (商業用)</p>		<p>PEM を使用 燃料は天然ガス，またはプロパン 稼働時間目標：4万時間</p>
<p>5 kWe 定置用発電システム (家庭用)</p>		<p>燃料は天然ガス，またはプロパン</p>
<p>工業用水素製造システム</p>		<p>改質方式は，スチーム改質 (PureCell200 の技術)，あるいは CPO (Shell の技術) が利用可能</p>
<p>車載燃料改質システム</p>		<p>50 kWe 製品化まで，さらに1世代の研究開発が必要</p>
<p>燃料電池 APU</p>		<p>燃料電池APUを利用したクリーンICEの開発</p>

出典：2003年度 JARI 海外調査報告書

注2) 2003年度 JARI 海外調査報告書

2) 改質器に用いられる触媒の動向

各段階の性能向上には、優れた触媒の開発が鍵となっている。表 4-1-21 に各段階に用いられる触媒の動向を整理する^{注1)}。

表 4-1-21 改質器に用いられる触媒の動向

段階	触媒の動向
改質反応器	改質触媒には、燃料ごとに色々なタイプがある。従来はニッケル系の触媒が用いられたが、炭素数が多いガソリン等ではもたないため、耐久性の面から[Pt, Ru]系に移ってきていると考えられる。
変成器	変成触媒は世界的に[Cu/Zn]が主流であり、[Fe, Cr]は少ない。ところが[Cu/Zn]は活性はよいが、FCをon-offすると酸化雰囲気が発熱して、触媒が性能を失うという問題がある。そのため、[Pt, Ru, Rh]を用いる系に変わりつつある。
CO 選択酸化反応器	CO 除去触媒（選択酸化触媒）は、従来から[Pt, Ru]系、[Pt-Ru]が主流。

出典：田中貴金属工業（2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」）

現在、独立行政法人産業技術総合研究所では、経済産業省の委託により、平成 14 年度から 5 ヶ年の計画で改質器で用いられる触媒に関する触媒反応のデータベースを構築する取組みを行っている^{注2)}。これは、基本的に触媒を構成するすべての成分、反応条件の組み合わせに対して、迅速な評価技術を用いて総あたりでその反応を調べていき、データベース化していくというものである。改質器の触媒の設計指針とすることを目的としたものである。

(2) 改質器にかかる課題

改質器にかかる課題としては、効率の向上、軽量・コンパクト化、始動性・負荷応答性の向上、コストの低減が挙げられる。表 4-1-22 に改質形 FC に特有の問題点を整理する。

とくに、車上改質技術における最大の課題は始動性といわれている。改質器は、一般に燃料の改質反応を行う改質反応器、改質ガス中の CO を低減させる CO 変成器、CO を除去する CO 選択酸化反応器から構成されるが、このうちとくに CO 変成器において小型軽量化が進まず、必要な温度まで加熱するのに時間とエネルギーが必要とされ、始動性とエネルギー効率を悪化させている^{注3)}。たとえ二次電池等によるエネルギー供給によってすみやかな始動が可能になったとしても、エネルギー効率の向上は望めない。ガソリン改質形の FCV はエネルギー効率で内燃機関車(ICEV)や ICEV とのハイブリッド車を上回らないと存在意義が失われるため、この問題の解決が最大の課題であり、何らかのブレイクスルーが必要とされている。

注1) 2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

注2) 2002 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

注3) 2002 年度 NEF 「FC 動向調査報告書資料編」

表 4-1-22 車上改質に関する問題点

(低温) 始動性	改質器装置全体が大きな熱容量を持つために、各反応が適正な運転温度に達し燃料電池スタックが許容する濃度まで CO を除去するようになるためには、現状では数分の始動時間を要する。また、この始動のための熱は燃料の燃焼によって得ることになるため、効率悪化と始動時の大気汚染物質排出量を増加させる。
負荷応答性	改質器の負荷応答性に問題があり、PEFC に供給される水素の応答性に問題が生じる可能性がある。改質は反応が遅く、1, 2 秒の遅れがあるといわれている。このような始動性や負荷応答性については、わが国メーカーにおいては、主に二次電池等とのハイブリッド構成にすることによる解決が図られている。

米国 DOE によるガソリン型改質器の目標値を表 4-1-23 に示す。DOE はここに示された 2010 年の始動性に関する目標値の達成可能性を 2004 年 6 月の時点で判断し、その如何によっては、オンボード改質技術に対する支援を打ち切るという方針を打ち出した。その結果、目標達成の可能性は低いと判断され、支援の打ち切りが決定した。

表 4-1-23 DOE によるガソリン型改質器の目標値

項目	2003 年現状	2004 年目標	最終目標
負荷応答性 (10%⇔90%)	60 秒	<5 秒	<1 秒
スタートアップ時間	<600 秒	90%出力:<60 秒	10%出力:<2 秒 90%出力:<30 秒
スタートアップエネルギー (50kWe)	—	< 2 MJ	< 2 MJ
効率	78%	78%	> 80%
出力密度	700 W/L	700 W/L	2,000 W/L
耐久時間 (停止・始動回数)	2,000 時間	2,000 時間 > 50 回	5,000 時間 > 20,000 回
耐硫黄性能	—	入口 : 30 ppm 出口 : < 50ppb	入口 : 30 ppm 出口 : < 10ppb
ターンダウン比	—	20 : 1	> 50 : 1
コスト	\$65/kWe	—	<\$10/kWe

出典 : Federal Register / Vol. 69, No. 23 / February 4, 2004 / Notice (P.5331)

(3) メンブレンリアクタ型改質器

燃料電池用の水素を供給する方式としては、FCV での車上改質や、家庭用のコージェネ機での改質システムのように二酸化炭素や窒素を含む改質ガスを FC に投入する方式と、水素ステーションでの水素供給のように、純水素を FC に供給する方式がある。後者の場合、PSA (Pressure Swing Adsorption) などによって改質ガスをさらに精製する必要があるが、これに代わるシステムとして、パラジウム膜やその他のより安価な水素分離膜を用いたメンブレンリアクタ型改質器の研究開発も東京ガスなどによって進められている。東京ガスと三菱重工が共同で開発しているメンブレンリアクタ型改質器は、都市ガスを燃料とし、パラジウム膜を用いた水素分離型改質器によって、高純度の水素を製造するものである。この方式では、改質と水素の精製が一体化した反応器で同時に

行われるため、通常の PSA 方式に比べて、3 分の 1 から 5 分の 1 のスケールへのコンパクト化が可能になるといった特長があるという^{注1)}。

また、日本ガス協会では、水素分離膜を用いたメンブレンリアクタ型改質器と水素吸蔵合金利用水素吸引ユニットを搭載した純水素製造システムを組み上げ、運転試験を実施している。現在 20Nm³/h から 40Nm³/h 級システムにスケールアップした試験機を製作し試験を実施し、その結果、水素純度 99.999%、水素製造効率 70%の見通しを得ているという^{注2)}。

(4) メタノール改質形 FCV の動向

メタノール改質は低温での改質が可能であり、改質形の中では実用化への障壁が最も低いと考えられる。平成 12 年度から 13 年度にかけて日本では、メタノール改質形 FCV として、マツダ「プレマシーFC-EV」と DaimlerChrysler「Necar5」が大臣認定を取得し、公道走行試験を行っている。

2001 年度の JEVA 国内訪問インタビュー調査によると、公道走行によって、雨、風、周りの走行車の影響等様々な環境下でテストでき、ベンチテストだけでは得られない多くの知見が得られたという。また、市販するまでには、解決すべき数多くの課題があると述べている^{注3)}。

メタノール改質形 FCV の全体的な課題としては、現状ではメタノール製造時の効率の低さ等から総合エネルギー効率上の優位性が低いことが挙げられる。また、新たにインフラ設備に対する投資が必要なほか、走行時にゼロエミッションではないといった不利な点もある。改質器を車載することはシステム構成や制御の複雑さ、燃料電池性能の低下、改質器の容量や重量からくるパッケージング等の不利な点もある。

メタノール改質形 FCV については、現状ではメタノールを燃料としてインフラを整備しようとする機運がなく、すでに開発の重点が他に移っているものと考えられる。

(5) ガソリン改質形 FCV の動向

ガソリンを FCV の燃料として用いることが可能ならば、極めてメリットが大きい。

2001 年 1 月、GM とトヨタ自動車は共同で「短中期の水素への移行期間を担う燃料として、ガソリン系の燃料である Clean Hydrocarbon Fuel を研究の主要な候補とすることを GM と合意した」と発表し、にわかにガソリン改質形 FCV の実現可能性に対する期待が高まった。

GM は ExxonMobil とのジョイントチームによる改質器の開発を進め、2002 年にはガソリン改質 FCV のフリーテストを開始すると発表し、2001 年 8 月に GM は、この

注1) 2000 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

注2) 第 11 回燃料電池シンポジウム講演予稿集（平成 16 年 5 月 18 日）

注3) 2001 年度 JEVA 国内訪問インタビュー調査

試作車「シボレーS10」を発表した。

また、米国 Argonne National Laboratory (ANL) も DOE の燃料電池開発プロジェクトに参加し、燃料フレキシブル (マルチ燃料) 対応の改質器の開発を行っている。

2001 年 10 月にトヨタ自動車は、東京モーターショーにおいて、CHF 改質形 FCV の試作車「FCHV-5」を発表している。

前述のとおり、ガソリン改質形 FCV については、その技術的ハードルの高さのため、現状では早期の実用化は不可能と考えられる。今回の海外調査では、GM は今後直接水素形 FCV の開発に資源を集中させ、ガソリン改質の開発を中止したと述べている^{注1)}。

(6) 直接メタノール形燃料電池

メタノールについては、改質器なしで直接電力への変換が可能な直接メタノール形燃料電池 (DMFC) に関する研究開発もここ数年で大きく進展しており、主に携帯用可搬電源や車載用として期待されている (3-6 節参照)。ただし、車載用としてはエネルギー効率面や耐久性の面での課題も多く、一般普及車としての実用化は現状では非常に困難であると考えられる。

固体高分子電解質を用いた DMFC は、図 4-1-23 に示すように、固体高分子膜を電極で挟んだ構造であり、通常の PEFC と同様であるが、水素極側にメタノール水溶液を供給するところが異なる。

DMFC のメリットは、直接メタノールを燃料として使えるために、改質器が不要なくシステムが簡素化できる点であるが、問題点としてメタノールが電解質膜を透過してしまい、出力を低下させる問題 (クロスオーバー) と、反応過程で CO が発生して触媒が劣化する問題 (CO 被毒) の 2 点が挙げられる。

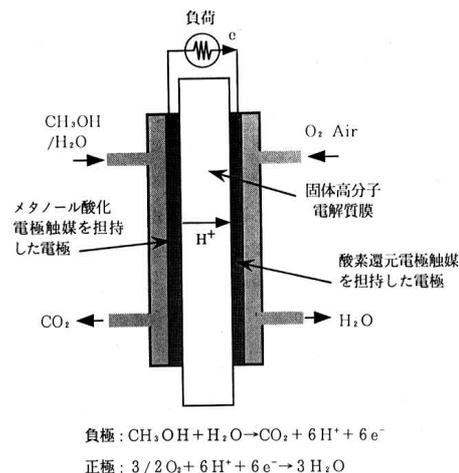


図 4-1-23 DMFC の原理

出典: 「固体高分子型燃料電池の開発と実用化」技術情報協会 1999.5

注1) 2003 年度 JARI 海外調査報告書

DaimlerChrysler は、2000 年 11 月にドイツ・シュツットガルトで開催した「DaimlerChrysler Innovation Symposium」で、Ballard Power Systems 社と共同開発したダイレクトメタノール燃料電池車（図 4-1-24）を公開した。一人乗りのゴーカートにスタック出力 3kW，体積出力 500W/l の DMFC を搭載したもので、最高速度は時速 22 マイル（35.4km/h），1 回の給油で 9 マイルの走行が可能である。また、始動のために小型のバッテリーを搭載している。供給されるメタノール濃度は 10wt% であり、Tank-to-Wheel でエネルギー効率 40% を達成したという。

また、ヤマハ発動機は DMFC の二輪車「FC06」を 2003 年 10 月に開催された東京モーターショーで初公開した（図 4-1-25）。ベース車は電動スクータ「パッスル」で、リチウムイオンバッテリーの代わりに、DMFC を搭載した。このセルスタックはユアサと共同開発したもので 500W である。試作段階であるが、実用化に堪え得る基本性能は満たしており、重量はおよそ 64kg で、ガソリンエンジン車が 70～80kg であるのに対し 1～2 割程度軽い。ヤマハ発動機では、社内での走行テスト、公道での試験を経て FC06 の販売を急ぐ予定であるという。

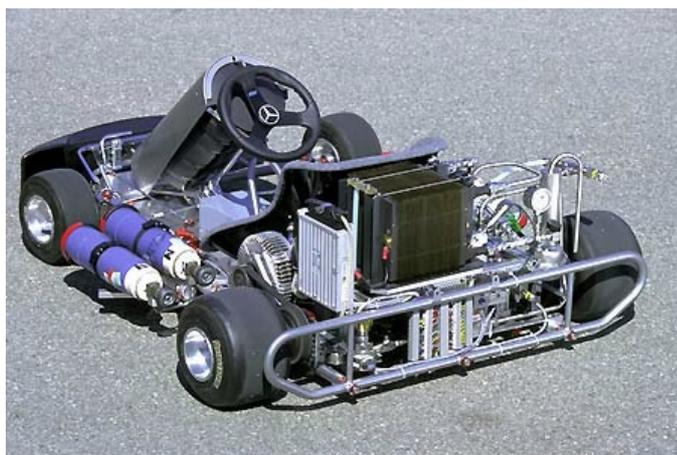


図 4-1-24 DaimlerChrysler が発表した DMFC 車



図 4-1-25 東京モーターショーに出品されたヤマハ発動機「FC06」(出典:プレスリリース)

4-1-5 周辺機器

FCVに関するその他の主要な周辺機器としては、主に空気供給システムと熱管理システムがある。

(1) 空気供給システム

空気供給システムの主な課題は、エアコンプレッサ（圧縮機）の効率の向上と消音、小型化である。FCは高圧力で効率が上がるが、それだけ圧縮機のパワーを必要とし、ある程度以上の圧力にするとシステム全体の効率は低下するというトレードオフの関係がある。コンプレッサの方式にも様々なものがあり、その選択も課題の一つである。

米国エネルギー省（DOE）では、FCV用のコンプレッサとして、従来技術の延長では目標効率の達成が困難と判断し、性能向上のための研究を行っている。図4-1-26はDOEが検討しているコンプレッサの種類である。JEVAが実施した海外調査によると^{注1)}、現状の技術では、ピストン型、スクロール型が最も技術的に成熟しているが、一長一短があり、最も短所が少ない選択としてタービン型に期待していると述べている。

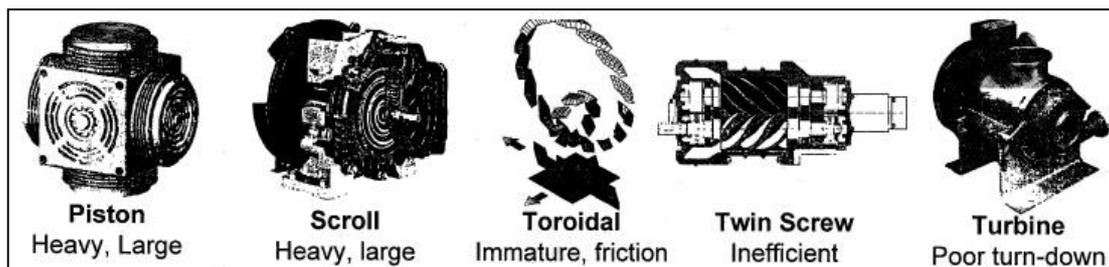


図 4-1-26 米国 DOE で検討しているコンプレッサの種類

出典：2000年度 JEVA 海外調査報告書

(2) 熱管理システム

熱管理が直面する課題は、FCスタック本体の冷却のみならず、主機モータとインバータの冷却、およびFCスタックの早期暖機である。FC本体については、PEMから放出される低い温度での廃熱を処理するためにラジエータやファンの負担が大きくなる^{注2)}。そのため、ラジエータの大型化、ファンの大容量化が必要になる。しかし、ラジエータの大型化は搭載性を悪くするという弊害があり、また、ファンの大容量化は消費電力の増大という弊害がある。また、冷却水では、電気伝導度が重要となるが、防腐剤を入れると伝導度は上がり、入れないと部品の腐食につながるという問題があるという。これ

注1) 2000年度 JEVA 海外調査報告書

注2) ICEVでは熱を排出ガスとともに放出できるが、FCVではすべてをラジエータで負担する必要がある。また、低温をそれ以上に下げると、外気温との温度差が小さいため、ラジエータの負担が大きくなる。

らの課題に対し、今後の技術革新が求められている。

(3) その他の周辺部品

図 4-1-27 に示すように、その他の周辺部品も低コスト化と性能改善のための開発が求められる。商品化にあたっては、コストと耐久性を達成するための開発が求められている。

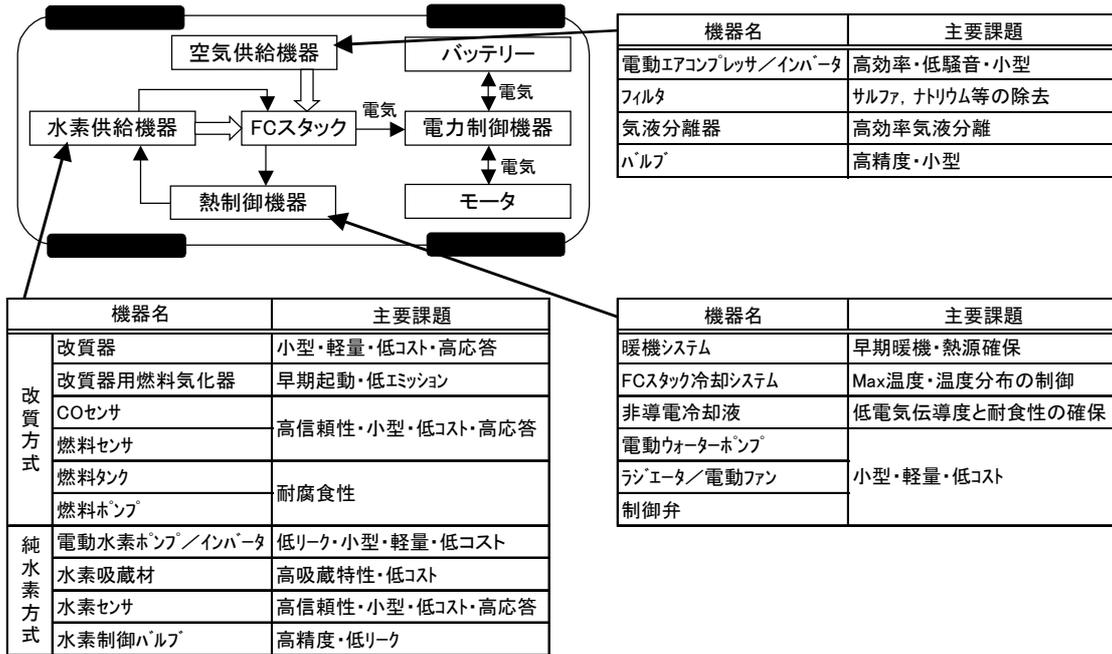


図 4-1-27 FCV 用周辺機器の主要課題

資料提供：(株)デンソー

4-1-6 水素の車上天載方法

(1) 水素の性状と車上天載方法

水素の性質を表 4-1-24 に整理する。水素は最も軽い燃料であり、質量あたりのエネルギー密度はガソリンなどに比べて非常に小さく、車上天載のために効率的に貯蔵するための方法が課題となっている。

表 4-1-24 水素ガスの性質

分子量	2.016
沸点	-252.8℃
融点	-259.1℃
比重（空気を 1 として）	0.0695
臨界圧力	12.759 気圧
臨界温度	-259.9℃
液体の密度（沸点）	70.8kg/m ³
気体の密度（20℃，1 気圧）	0.083764 kg/m ³
熱伝導度（20℃，1 気圧）	1.897mW/cm・K
蒸発熱	445.59kJ/kg
燃焼熱（HHV）	141.86MJ/kg
拡散定数（空气中）	0.634cm ² /s

出典：「固体高分子型燃料電池の開発と実用化」技術情報協会 1999.5

水素を車上天載する方法としては、現在では大きく 3 つの方法がある。高圧ガス、液体水素、および水素吸蔵合金を用いる方法である。それらの特徴を表 4-1-25 に整理する。高圧ガス方式は、実用上最も現実的な方式であるが、体積密度が小さいのがデメリットであり、現状では、航続距離を十分に確保できない。液体水素は、この中では唯一ガソリン車並みの航続距離を確保できる方式であるが、貯蔵時のボイルオフが避けられないことや、液化時のエネルギー損失の問題、システムが複雑になることによるコストの増大などのデメリットがある。わが国でこの方式を選択しているメーカーはない。一方、水素吸蔵合金を用いる方式は、吸蔵能力が不十分であり、重量密度が小さいのがデメリットである。材料が比較的高価であることやシステムが複雑になるといったデメリットもある。

いずれの方法においても問題があり、安価で貯蔵密度の高い水素吸蔵材料の開発が求められている。

表 4-1-25 主な水素の車上天載方法

搭載方式	長 所	短 所
高圧ガス	<ul style="list-style-type: none"> 重量比のエネルギー密度は比較的高い。 スペースの問題が少ないバス、トラックなどに向く。 	<ul style="list-style-type: none"> ガソリン貯蔵の 1/4～1/5 と容量比のエネルギー密度が低く、車載時のレイアウトに制約を受ける。 わが国では、高圧ガス保安法の適用を受ける。
液体水素	<ul style="list-style-type: none"> 体積密度、重量密度でガスよりも優れる。 航続距離の確保が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 蒸発が避けられなく液化にエネルギーを損失するため総合効率が低下する。 わが国では、高圧ガス保安法の適用を受ける。 安全性の問題が比較的大。 高圧ガスと同様、レイアウトに制約を受ける。 プロセスが複雑でコスト大。
水素吸蔵合金	<ul style="list-style-type: none"> 低圧での取り扱いが可能のため、高圧ガス保安法の適用を受けない。 安全性が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状では貯蔵能力が小さい。現状重量比で 1～2.8%。 タンクの重量エネルギー密度が大きい。 水素の充填・放出に温度管理が必要なためシステムが複雑になる。 吸蔵能力が大きい材料は耐久性が悪く、コストも大きい。

現状において検討が行われている水素の貯蔵方法について整理・比較したものを表 4-1-26 に示す。水素吸蔵材料は大きく水素吸蔵合金と、無機系水素吸蔵材料、有機系水素吸蔵材料、炭素系材料に分けられる。このうち有機系水素吸蔵材料と無機系水素吸蔵材料は、合わせてケミカルハイドライドと呼ばれることが多い。

表 4-1-26 水素貯蔵方法の比較

方法	圧縮水素	液体水素	水素吸蔵材料				
			水素吸蔵合金	無機系水素吸蔵材料		有機系水素吸蔵材料	炭素系材料
				可逆型	加水分解型		
内容	高圧 常温 軽量高圧タンク(小容量) 20~70MPa, 数10Nm ³ ボンベ・ローダー 15~20MPa, ~2,800Nm ³ 耐圧タンク(大容量) 1~3MPa, ~25,000Nm ³	常圧 極低温(-253°C) 断熱容器 容量:数10Nm ³ ~3200Nm ³	常圧近傍 常温~300°C 熱交換器付容器 金属水素化物状態 LaNi ₅ 等の合金 体積:気体状態 の1/1000 容量:0.03 ~2000Nm ³	10~20MPa 100~200°C 高圧容器 (熱交換要) 例 NaAlH ₄ 錯陰イオン(AlH ₄ ⁻) 状態 小容量容器試作の 段階:~0.1Nm ³	常圧 常温 FRP容器 (要耐アルカリ性) 例 NaH NaBH ₄ 小規模システム 試作段階~0.1Nm ³	常圧 200~400°C ガソリンタンク程度 の容器 例 シクロヘキサン -ベンゼン デカリン -ナフタレン等の系	常圧~10MPa 常温~300°C 高圧容器に充填 カーボンナチューブ等
長所	高質量水素密度 低エネルギー消費 常温貯蔵 普及技術	高質量水素密度 高体積水素密度 高純度水素源	高体積水素密度 高安全性 高純度水素源 常温貯蔵	高質量水素密度 運搬・充填等 取扱容易	高質量水素密度 運搬・充填等 取扱容易	高質量水素密度 高体積水素密度	水素貯蔵特性不明 ^{f)} 高質量水素密度?
短所	低体積水素密度 高圧	液化動力大(高コスト) 自然蒸発(ボイルオフ) 充填時の蒸発	低質量水素密度 被毒・劣化現象 初期活性化	遅い吸蔵放出速度 サイクル特性 禁水性物質	強アルカリ性 廃液タンク必要 水素化物再生に多量の エネルギーが必要	反応器, 精製器, 廃液 タンクが必要 反応熱大 有害性を持つものも有	水素貯蔵特性不明 ^{f)}
所要動力	理論: 0.163kWh/Nm ^{3a)} 現状: 0.25 ~0.5kWh/Nm ³	理論: 0.31kWh/Nm ^{3b)} 現状: 1.2 ~2.0kWh/Nm ³	0.37kWh/Nm ^{3c)}	0.43kWh/Nm ^{3e)}	0.94kWh/Nm ³	理論: 0.85kWh/Nm ^{3d)}	圧縮水素と同程度
充填時間 ^{g)}	5~10分	3~10分	10分(WENET目標)	数時間	数分	数分	圧縮水素と同程度

a) 1気圧から35MPaへの等温圧縮に必要な動力(実際には, この1.5~3倍の電力が必要)

b) 液化に必要な動力(実際には4~6倍の電力が必要)

c) 水素化熱(30kJ/molH₂)で算出

d) シクロヘキサン-ベンゼン系

e) NaAlH₄系, NaHまで脱水素

f) 水素吸蔵性能にはまだ議論がある。

g) 自動車用小型容器の場合

資料提供: (独) 産業技術総合研究所関西センター (2002年度 NEF「FC 動向調査報告書資料編」)

一般に FCV がガソリン車並の航続距離を有するためには、車上に 5kg の水素を貯蔵することが必要とされている。表 4-1-27 は水素 5kg を貯蔵するための各種燃料，貯蔵物質別の特性を比較したものである。いずれの方法もガソリンに比べて体積や重量の面で不利であることがわかる。

表 4-1-27 水素 5kg の貯蔵性の比較

燃料	中身燃料 ^{l)}		容器重量 ^{m)}		容器体積 ⁿ⁾
	重量(kg)	体積(L)	容器のみ(kg)	水素込み(kg)	体積(L)
ガソリン ^{a)}	14	20	4	18	21
メタノール ^{a)}	30	38	6	36	42
シクロヘキサン ^{b)}	70	90	76	81	95
NaBH ₄ ^{c)}	71	68	77	82	72
NaAlH ₄ ^{d)}	89	71	104	109	89
圧縮水素(鋼製) ^{e)}	5	320	400	405	390
圧縮水素(軽量小型) ^{f)}	5	214	113	118	273
圧縮水素(軽量大型) ^{g)}	5	214	54	59	250
圧縮水素(超軽量) ^{h)}	5	214	39	44	278
液体水素 ⁱ⁾	5	71	20	25	96
MH(1wt%) ^{j)}	505	73	600	605	228
MH(3wt%) ^{k)}	172	33	197	202	96

a) ガソリン及びメタノールは水素5kgと等しい発熱量を示す量

b) 「容器のみ」の重量は、容器そのものの重量(11kg)とベンゼンの重量(65kg)の和とした。

また、脱水素反応装置は含まず

c) アルカリ性水溶液(NaBH₄濃度35%)，脱水素反応装置含まず(脱水素反応装置:50kg程度)

d) NaAlH₄→NaH+Al+3/2H₂，軽量高压容器の使用を仮定，NaAlH₄充填率:80%

e) 内容積47L，20MPa，1.3wt%

f) 内容積33L，35MPa，4.2wt%

g) 126L，35MPa，8.5wt%

h) 内容積144L，35MPa，11.3wt%

i) 断熱容器，20wt%

j) 合金(MH):500kg，容器(鋼製):150kg

k) 合金(MH):167kg，容器(Al製仮想容器):30kg

l) 水素+貯蔵媒体

m) 貯蔵媒体重量を含む(水素貯蔵材料使用の場合)

n) 外容積推定値

資料提供：(独)産業技術総合研究所関西センター(2002年度JEVA「FCVに関する調査報告書」)

以下にこれらの材料についての研究開発動向の概要を整理する。

(2) 高压ガス

現在わが国では、3車種の高圧水素型FCVが限定リース販売を行っており、それらを含めた8車種の高圧水素型FCVの試作車が大臣認定を取得し、公道走行試験を開始している。現状の技術水準を前提にすると、高圧ガス方式が最も実用的な水素の車載方法であると考えられる。

現状主流となっている充填圧力は 35MPa (トヨタ FCHV, ホンダ FCX など) であり, 現状では高圧水素方式の FC 乗用車の航続距離は, 最大でも 300~350km 程度であると 考えられる。そのため, 航続距離を伸ばすために, 50~70MPa といった高圧化の検討 が行われている。

CNG 車や FCV に用いられている軽量高圧容器としては, Type3 と Type4 と呼ばれる タイプがある。Type3 はライナーがアルミニウムで強化繊維にカーボンファイバーを用 いたもので, カナダの Dynetek 社とアメリカの SCI 社等が開発・供給を進めている。 一方, Type4 はライナーに熱可塑性樹脂を用い, 強化繊維には同じカーボンファイバー を用いたものであり, アメリカの Lincoln 社, Quantum 社等が開発を進めている。こ のうち Dynetek 社の Type3 容器は, DaimlerChrysler 社の FC バスや MAN 社の水素 バスの路上試験等で採用されており, 2 年以上の実績がある。Ford 社の FCV や日産の 実証試験車等にも搭載されている。

水素用高圧容器における課題は, 低コスト化と高圧化への対応である。高圧化に対し ては, バルブやレギュレータ類における水素のリークの問題が大きいという^{注1)}。

こうした背景の中, 70MPa の実現に向けた取組みが活発になっている。2002 年 7 月 には GM 社と Quantum 社が世界初となる 70MPa タンクの開発に成功したと発表した。 その後, GM 社とスズキは, 日本における高圧ガス保安協会の認証を得て, 開発した 70MPa 圧縮水素貯蔵システムを搭載した「MR ワゴン-FCV」を開発し, 国土交通大臣 認定を取得している。

また, カナダでは, 70MPa 仕様の燃料電池車用水素容器やバルブ等の開発, 標準化を 目的とした Hydrogen P700 プロジェクトが実施されている^{注2)}。

水素の高圧化に関しては, 高圧力化するにしたがって圧力と体積の関係が線形領域を 外れていき, 70MPa 以上に高圧化してもそのメリットはほとんどないといわれている。 また, 高圧化に伴い, 圧縮に要するエネルギーのロスも大きくなるため, 今後高効率な コンプレッサの開発も重要な課題である。

(3) 水素吸蔵合金

法規制や安全性等の面からは水素吸蔵合金による貯蔵方式が有利であり, より安価で 大きな吸蔵力のある材料開発が進められている。自動車用水素タンクとして仕上げた ベースで理想的には 5 重量%程度の貯蔵能力が必要と考えられている。

現在までに開発された水素吸蔵合金は 100 種類を超えていると言われ, 組み合わせと しては, 水素吸蔵量の多い金属元素単体と, 吸蔵量は少ないが水素化反応が早くしかも 反応温度を低く抑えられる元素との組み合わせが基本となっている。水素吸蔵量の多い

注1) JEF コンテナ (旧鋼管ドラム) は, こうした問題から, 50MPa が現実的と述べている。(2001 年度 JEVA「FCVに関する調査報告書」)

注2) 詳細は 3-2-5 (4) 参照。

元素として、Ca, Mg のグループ、希土類金属のグループ、Ti のグループ、Pt, Pd のグループなどが挙げられる。2 つの元素の組み合わせ (2 元素系合金) を基本とし、その合金の持つ性質をさらに向上させるために、第 3 の元素、第 4 の元素と次第に複雑化する方向へ進んでいる。水素吸蔵合金の吸蔵量の例を表 4-1-28 に整理する。

表 4-1-28 水素吸蔵合金の吸蔵量の例

水素吸蔵合金	吸蔵量 (重量%)
LiH	12.7
MgH ₂	7.6
LaNi ₅ H _{6.0}	1.4
Ti _{0.9} Zr _{0.1} Mn _{1.4} V _{0.2} Cr _{0.4} H _{3.2}	3.0

現在、自動車車載用として最も高い貯蔵能力を有するのは、トヨタ自動車が開発した常温で作動する 2.3 重量%の BCC 合金 (Ti-V-Cr 系) である。最近の技術動向としては、2.8 重量%程度の吸蔵能力を有する合金が開発されつつあるという^{注1)}。

最近発表された研究成果としては、広島大学、広島県立西部工業技術センター、マツダの共同研究である RF 支援スパタリング薄膜法^{注1)}がある。Mg はもともと 7.6 重量%の多量の水素を吸蔵することができるが、水素の吸収・放出に 300°C の高温が必要となる。そこで、水素吸蔵量は 0.6% と少ないが放出温度が 100°C 以下である Pd 薄膜と Mg 薄膜を交互に積層した多層膜を形成した。その結果、Pd 4 層と Mg 3 層を積層した 7 層膜では、100°C 以下で 5 重量%の水素を吸蔵し放出することが確認されたという。現状では、薄膜の大量製造方法やコスト面からみて、実用化へのハードルは高い。

また、東北大学の岡田教授の研究グループでは、重量比で 3% の吸蔵能力を持つチタン系の吸蔵合金を開発したという報告もある。

以上のように、最近になって、いくつかの研究成果が報告されているものの、吸蔵合金タンクとしてのコスト、吸蔵能力に関してはこれからの課題であり、現状では貯蔵能力、コストとも実用化には程遠いといえる。そのため、現状では何らかのブレークスルーが必要と考えられている。

産業技術総合研究所では、NKK, JEF コンテナと共同で水素吸蔵合金と高圧水素容器の両者の特性を活かしたハイブリッド水素貯蔵容器の研究開発を行っている。これは高圧容器の中に吸蔵合金を入れ、高圧水素の一部を吸蔵合金に貯蔵することによって、両者の重量と体積に関する特性を活かし、従来の高圧容器以上の体積密度の向上を狙ったものである (図 4-1-28)。現段階では、水素 5kg を貯蔵した場合、質量 161kg (水素込み)、容器体積 134L となっており、従来の高圧容器 (表 4-1-27) よりも体積密度の

注1) 2001 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

向上が図られている。圧力としては 35MPa までを検討しているという^{注1)}。

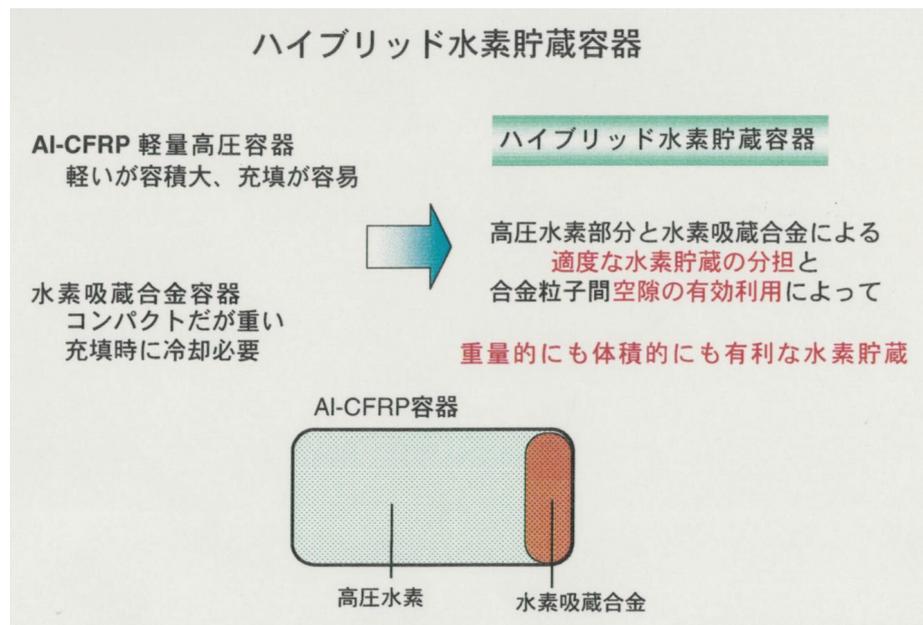


図 4-1-28 ハイブリッド水素貯蔵容器

資料提供：(独)産業技術総合研究所関西センター(2002年度 JEVA「FCVに関する調査報告書」)

(4) カーボンナノチューブ

1997年に A.C.Dillon らは、カーボンナノチューブが常温で 5~10 重量%という極めて高い水素吸蔵能力を有する可能性を指摘し、1999年には C.Liu らによって精製による 50%純度のカーボンナノチューブが作製され、その水素吸蔵量が 4.2 重量%であると報告されるなど、カーボンナノチューブの水素吸蔵材料としての期待が高まった。

大阪ガスでは積極的にカーボンナノチューブの研究開発に取り組んでおり、現在、アモルファスカーボンナノチューブ(α -CNTs)と呼ばれる物質の研究開発に取り組んでいる^{注2)}。通常の CNTs は中央の穴の周りの層が多層のグラファイトで構成されているのに対し、 α -CNTs ではグラファイトの層が認められず、結晶性がほとんどないのが特徴である(図 4-1-29)。

水素吸蔵に関しては、通常が多層 CNTs は、論文等で 5wt%や 10wt%と発表されているが、発表後に確認できておらず、研究者の中では 0.1wt%~0.5wt%程度という見解に固まりつつあるという。しかし、 α -CNTs の水素貯蔵量は、室温、10MPa で 3wt%が確認され、現状ではサンプルによってバラツキがあるため 1~3wt%の間にあるという^{注)}。

以上のようにカーボンナノチューブは水素吸蔵合金と比較してやや大きな重量密度を有しているが、実用化に向けては、吸蔵能力を上げるための構造の最適化、効率良くボ

注1) 2002年度 JEVA「FCVに関する調査報告書」

注2) 2003年度 JEVA「FCVに関する調査報告書」

ンベにパッキングする技術の開発などが課題であり、基礎的な研究段階にあるのが現状である。

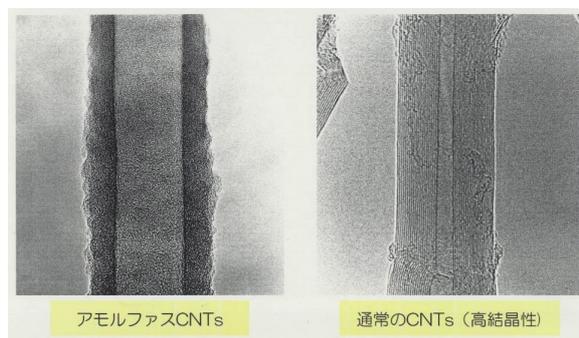
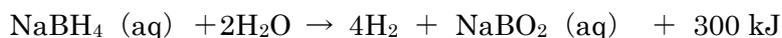


図 4-1-29 α -CNTs の写真

(5) ケミカルハイドライドを用いた水素供給システム

無機系のケミカルハイドライドについては、アメリカやドイツで数多く研究されている。アメリカの Millennium Cell 社では、燃料電池向けの水素貯蔵材料として NaBH_4 を検討しており^{注1)}、同社の技術を用いた FCV「Town&Country Natrium」が DaimlerChrysler より発表されている。これは、以下の加水分解反応を利用したものである。



これは燃料タンクに NaOH (5%) を含む NaBH_4 (35%) の水溶液を入れ、冷却システムを備えたルテニウム触媒層へ導入して水素を発生させ、生成される NaBO_2 を廃液回収タンクに収容するシステムである。 NaBO_2 は回収されてリサイクルされる。

同様に、加水分解を利用した水素の生成方法としては、Powerball 社の NaH と NaOH を利用したもの、Herbst 社の Si と SiO_2 を利用したもの、Graz 大学の Fe と FeO_2 を利用したものなどが提案されている。

その他には、ハワイ大学の C.M.Jensen らによる NaAlH_4 を用いた水素貯蔵の研究などがある。

有機系のケミカルハイドライド (有機ハイドライド) については、北海道大学の市川勝教授らにより、水素の吸蔵方法としてシクロヘキサンやデカリンなどを用いる方法が提案されている^{注2)}。水素とベンゼン、および水素とナフタレンを反応させるとそれぞれシクロヘキサン、デカリンが生成される。シクロヘキサンやデカリンは常温常圧で液体なので、水素が必要なところで触媒を使って水素を取り出し利用するということが考

注1) 日本では、工学院大学の須田教授が同様の研究を行っている。

注2) 技術情報協会セミナーテキスト「固体高分子型燃料電池における燃料の選択・供給システムの動向」(平成 13 年 1 月 30 日)

えられている。すなわち、シクロヘキサンやデカリンを水素キャリアとして利用するというものである。

メタノールや液体水素に比べて、シクロヘキサンやデカリンは、ガソリンスタンド設備が使える、価格が安い、すぐに水素が取り出せる、という優れた面を持っていると市川教授は述べている^{注)}。北海道大学市川研究室では、極めて高性能な機能集積型貴金属触媒の研究開発がなされ、シクロヘキサンやデカリンから水素を高速で効率的に取り出す反応器の開発に成功したと発表している^{注)}。

有機ハイドライドの特性を図 4-1-30 に示す。シクロヘキサンの沸点は 90～125℃であり、ガソリンの 80～125℃と同等であり、メタノールのような腐食の問題もない。

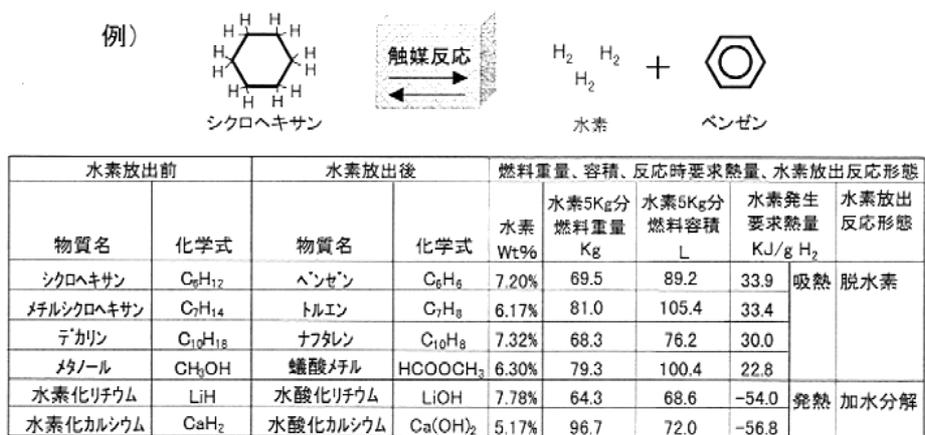


図 4-1-30 ケミカルハイドライドの特性

出典：「固体高分子型燃料電池における燃料の選択・供給システムの動向」（平成 13 年 1 月 30 日）

また、市川教授らは、ゼオライトの表面にモリブデンやレニウムなどの金属をのせた独自の触媒によってメタンガスから水素とベンゼンを同時に取り出すシステムについても提案している。この方式では、とくに炭素を CO₂ として空気中に排出せずにベンゼンとして固定することに意味があるという。この方式については、平成 12 年度地域コンソーシアム研究開発事業に採択され、北海道地域技術振興センター等と共同で、「メタン直接改質法によるクリーン水素等の製造技術開発」として研究開発が進められている。

こうしたケミカルハイドライドを用いた水素供給システムについては、現状では社会的認知度が低く、また、例えばシクロヘキサンから水素を取り出した後のベンゼンの処理方法、ベンゼンによる環境汚染対策や安全性の確保などに対する具体的な提案がないため、これを具体的に評価できるようになるまでには、まだまだ時間がかかるものと考えられる。

^{注)} 技術情報協会セミナーテキスト「固体高分子型燃料電池における燃料の選択・供給システムの動向」（平成 13 年 1 月 30 日）

4-1-7 二次電池等

FCVにおける始動性の向上や減速時のエネルギー回生、あるいは低負荷領域で高効率という燃料電池の特性を最大限に発揮させるために、エネルギーバッファとしての二次電池やキャパシタを利用することが主流となっている。このようにいわゆるハイブリッド化することで、FCVの車両効率の向上を図ることが可能となる。現在では、開発されているほとんどのFCVにはこのようなエネルギーバッファが搭載されており、二次電池等は、FCVにおける重要な構成要素となっている。

(1) 二次電池

現在、トヨタFCHVにおいてはプリウスと同スペックのパナソニックEVエナジー製ニッケル水素電池が使用されており、DaimlerChrysler社のF-Cellにおいても三洋電機製ニッケル水素電池が採用され、また、FordのFocus FCVにおいても三洋電機製ニッケル水素電池が搭載されている。三洋電機では、1997年からHEV用ニッケル水素電池の開発を開始し、2001年にはFordが2003年に発売するHEV用バッテリーシステムに独占供給すると発表している。また、日産X-TRAIL FCV(2003年モデル)では、独自に開発した薄型ラミネート型セルを採用したコンパクトリチウムイオン電池が搭載されている。従来の円筒型リチウムイオン電池に比べ重量、体積が約半分になり、パワーは1.5倍という高性能を達成したとしている。

以上のように現状のほとんどのFCVにおいては、ハイブリッド車(HEV)用と同スペックの二次電池が用いられている。この点についてトヨタ自動車は、FCVはHEVに比べて電池そのものよりも制御方法が異なると述べている^{注)}。参考として、三洋電機製HEV用ニッケル水素電池(2002年モデル)の仕様を表4-1-29に示す。

表 4-1-29 三洋電機製 HEV 用二次電池(HR-DP)の仕様

	HR-DP (2002年)
公称容量	6.0Ah
公称電圧	1.2V
セルサイズ	φ 32.3×H58.5mm
セル質量	180g
最大放電出力(10秒) ^{注)} (SOC50% 25℃ 0.9V)	185W
最大充電出力(10秒) ^{注)} (SOC50% 25℃ 1.6V)	150W
放電出力密度(10秒) ^{注)} (SOC50% 25℃ 0.9V)	1,030W/kg
推奨電圧範囲	0.9~1.6V
推奨温度範囲	-30~+50℃

注) 使用条件、使用履歴により異なる。

資料提供：三洋電機株式会社

注) 2002年度JEVA「FCVに関する調査報告書」

ニッケル水素電池の課題としては、高出力化、温度特性、コスト、寿命が挙げられる。三洋電機によれば^{注1)}、寿命については、累積走行距離 15 万マイル、使用年数については放置を含めて 10~15 年という要求が自動車メーカから出されているという。距離については目標水準が達成されつつあるが、使用年数については、あらゆる環境条件において目標を達成するためのハードルが高い上に、コスト削減についても厳しい状況であるという。

ニッケル水素電池と並んで期待されているリチウムイオン電池の課題としては、ニッケル水素電池と同様、高性能化（高出力・高エネルギー密度）、寿命、コストがあり、さらにリチウムイオン電池には安全性が挙げられる。とくに高性能化と安全性はトレードオフの関係にあり、この両立は難度の高い課題となっている^{注1)}。

なお、現在の FCV あるいは HEV 用二次電池としては、ほとんどの車両で日本企業製が採用されており、この分野の二次電池における日本企業の優位性は揺るぎないものとなっている。

(2) キャパシタ

FCV や HEV で用いられているキャパシタ（別名コンデンサ）は、電気二重層コンデンサであり、ウルトラキャパシタ、スーパーキャパシタとも呼ばれる^{注2)}。ホンダが独自開発したウルトラキャパシタが Honda FCX のエネルギーバッファとして採用されている。このホンダ製ウルトラキャパシタは二次電池に比べてエネルギー密度は小さいが出力密度は高く（1,500W/kg 以上）、また、二次電池のような化学反応を伴わないため、内部抵抗が小さくエネルギー効率が低いことが特長である。さらに、ウルトラキャパシタを用いたシステムでは、FC スタックの電圧変動に対応して充放電を行うことから、二次電池のシステムのような電圧調整のためのコンバータが不要となり、エネルギー伝導効率が高くなるメリットもある^{注1)}。

トヨタによれば^{注1)}、キャパシタは瞬間的なパワーを出すためには有利だが、容量が小さいので継続的なパワーを出すことは難しく、トヨタが採用しているような停止時にはスタックを止め、二次電池のみでの走行モードがあるというシステムに用いることは現状では難しいという。したがって、都市走行のような低中速走行で、スタックを止める機会が多いときは二次電池の方が効率はよくなり、逆に、高速走行などのスタックを止める機会が少ないときは、エネルギー効率が良いキャパシタを使った方が有利であるという。走行条件によってお互いメリットとデメリットがあると述べている。

注1) 2002 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」

注2) 一般にコンデンサは、対向する 2 つの電極間に誘導体を挟んだ形で構成されるが、電気二重層コンデンサには誘導体はなく、その代わりに電気二重層という状態を誘導体の機能として利用している。

4-1-8 FCV のシステム上の技術課題

燃料電池車全体システムの課題としては、始動性や負荷応答性、寒冷地や砂漠等のあらゆる環境条件下における耐久性、信頼性といった自動車としての基本性能の確保が重要課題である。2002 年末に限定リース販売されたトヨタ FCHV, Honda FCX においては、0℃以上での保管が義務づけられており、実用化に向けた当面の重点課題としてこの氷点下での始動性の確保が挙げられる。現在、国内外のメーカーにおいてこの問題の解決に向けた努力が進められている^{注)}。なお、前述のとおり、ホンダは、氷点下での始動を可能にした「Honda FC STACK」を搭載した「FCX」を 2005 年に日米で販売すると発表している。

^{注)} 2002 年度 JEVA 「FCV に関する調査報告書」