

(5) 水素安全利用技術の基礎研究 ((独)産業技術総合研究所)

① 高圧水素ガスの漏洩時の着火性に関する研究 (産業技術総合研究所、青山学院大学)

a. 水素噴流の拡散濃度特性と着火性の計測

水素と空気の流動混合気および水素噴流の着火性を明確にするために、噴流中の濃度分布と速度分布を解析した。また、均一な水素-空気の流動混合気の爆発下限界を実験的に計測し、流動状態の爆発下限界に及ぼす影響を調べた。その結果、流動状態においては爆発下限界濃度が高濃度側にシフトすることが明らかになり、静止状態での爆発下限界濃度の4分の1を基準として定められている火気離隔距離の見直しに役立つ成果が得られた。

高圧水素ガス配管等が破断して瞬間的に大量の水素が漏洩噴出した場合の拡散挙動の測定は野外実験で行ったが、高圧水素ガスが微小漏洩を続けた場合の水素の拡散挙動については、風洞内での漏洩実験とともに流体解析ソフト FLUENT を用いた計算を行い、水素圧、放出口及び周囲風速の影響について整理した。実験データとシミュレーションによって、例えば図 2.3(5)①a-1 に示すように水素圧 35MPa、放出口 0.8mm で風速 0.5 および 3.0m/s の時に風下に向けて放出した場合の水素の濃度分布は、風速が増加すると高濃度領域が短くなる傾向が一致した。また、風速 0.5m/s の場合、計算では上方への拡散が認められた。

流体解析ソフトを用いて、様々なノズル径の大きさについて、圧力 40MPa の貯槽から漏洩した場合のシミュレーションを行い、拡散濃度特性を評価した。ノズル径で整理すると 6m の位置で可燃範囲以下の濃度になるのはノズル径が 0.8mmφ 以下であった。また、周囲の空気流速が速くなると希釈が促進されるが、ノズル径が小さくなると周囲の空気流速の影響が小さくなることがわかった。噴出圧力の依存性については、圧力が小さくなると噴出流量が減少し、高濃度領域も縮小することがわかった。

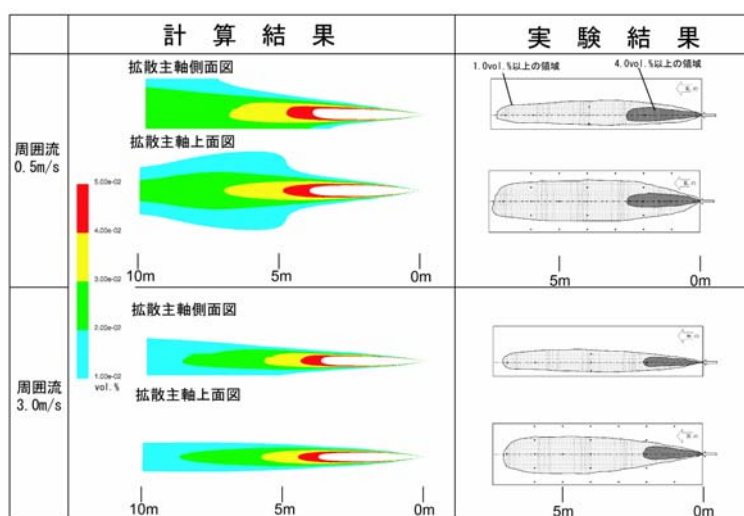


図 2.3(5)①a-1 漏洩噴出水素の拡散挙動

(実験結果と計算結果の比較)

一方、高圧水素ガスが漏洩噴出した場合高速の噴流となるため、水素の爆発下限界以上の濃度になっても着火しないことが予想される。そこで、水素濃度および流速と着火性との関係を解析するために、ダクト中を流れる一定流速の混合気流中の爆発下限界濃度の測定を行った。結果を図 2.3(5)①a-2 に示す。静止混合気の場合は、爆発下限が 4.1vol%(上方伝播火炎)および 8.9vol.%(下方伝播火炎)であるが、実験の結果低流速条件においても、混合気流中では上方伝播火炎の下限界は高濃度側へシフトし、下方伝播火炎では低濃度側へシフトした。実際の漏洩で爆発下限界と予想される地点での流速に近い条件で爆発下限界濃度を測定した結果、流速が 25m/s の場合では爆発下限界濃度が 6vol.%になることがわかった。このことから水素濃度だけでなく混合気流速も考慮することにより、着火危険領域の縮小が期待できる。

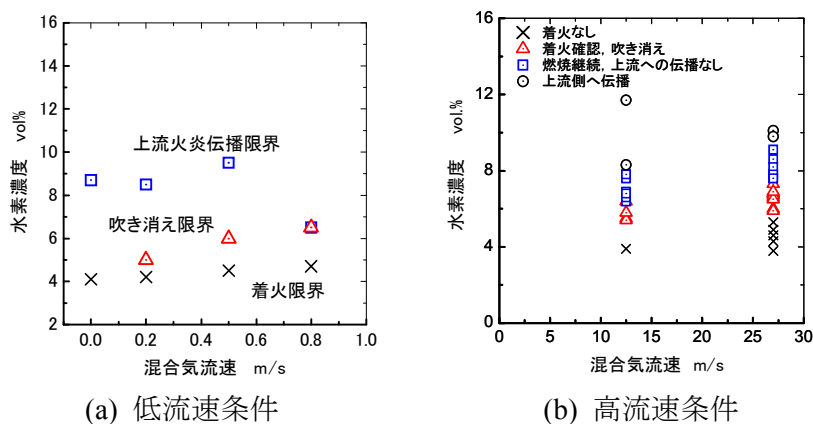


図 2.3(5)①a-2 爆発下限界と上流側火炎伝播限界

b. 水素噴流の噴流特性と着火性の計測および数値解析

高圧水素ガスが急激に噴出すると自然着火を起こす場合があることが知られているので、着火条件を明確にすることを試みた。これまでに急激な噴出を実験的に再現し、実際に自然着火することを確認するとともに着火条件を実験的に、また数値計算によって明らかにした。今後、自然着火しない条件を明確化することにより、ベント配管などの安全な水素放出口の形状の提案が可能になると考える。

実際の水素スタンドの設備を想定して水素の噴出圧力、噴出口径およびノズル長さなどの噴出条件の違いによる自然着火への影響を実験的に検討し、着火の起こりやすい条件を明らかにした。また、着火した場合の水素噴流への火炎伝播挙動も観測した。

実験は、配管内に水素を供給し徐々に圧力を高くしていき、破裂板を破膜させることによって水素を大気中へ急激に噴出させた。実験結果の例を図 2.3(5)①b-1 に示す。水素の圧力が高くなると破裂板の破膜とともに自然着火し、大きな音を伴って火炎が広がった。自然着火が起きた場合、噴流火炎になるケースと、火炎の吹き飛びが見られるケースがあった。噴流火炎が形成される場合は、ノズル内で形成された火炎が噴流の外側の流速の遅い部分で保炎された。

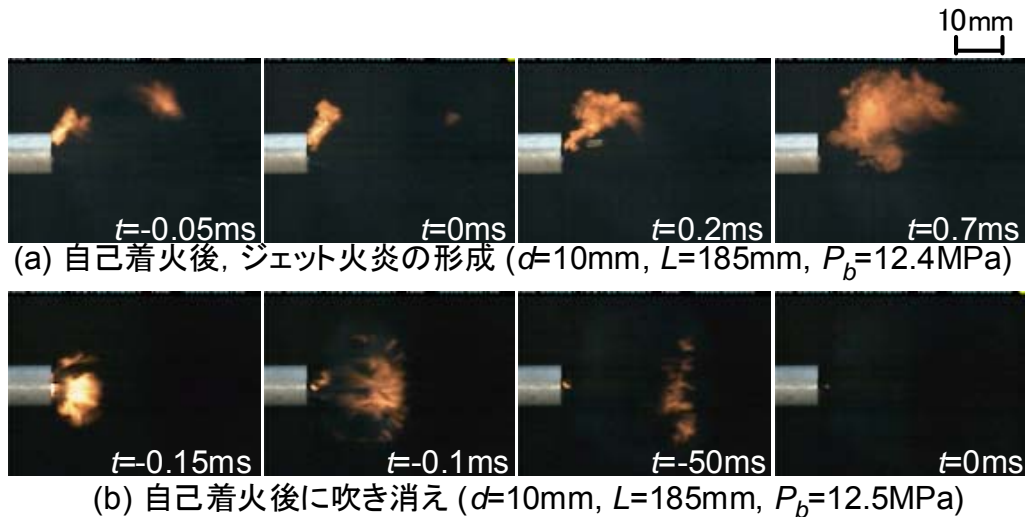


図 2.3(5)①b-1 ノズル出口における自然着火

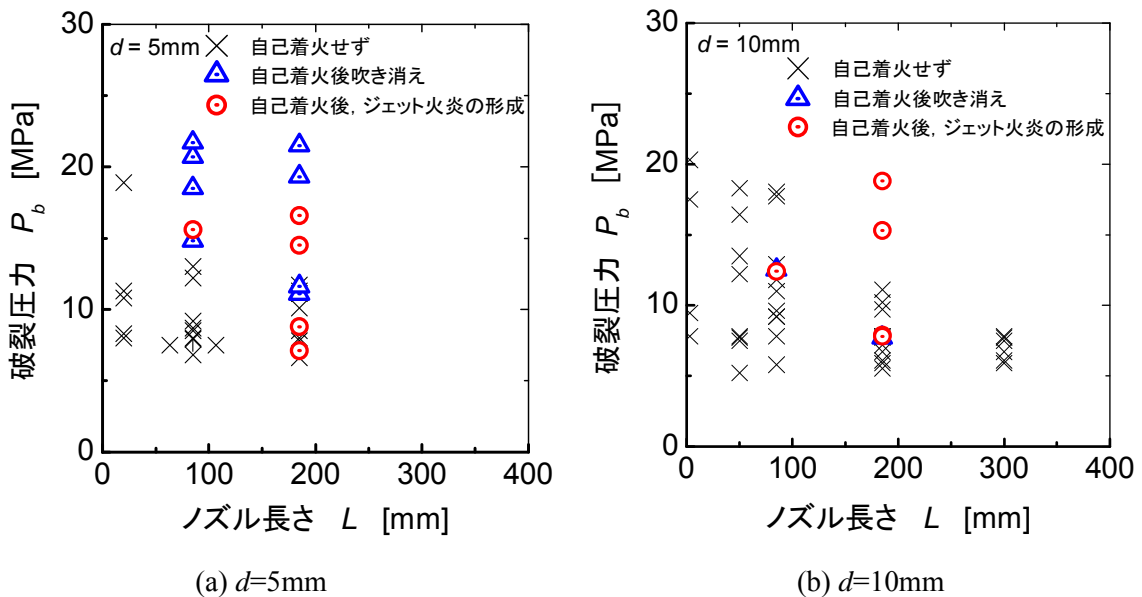


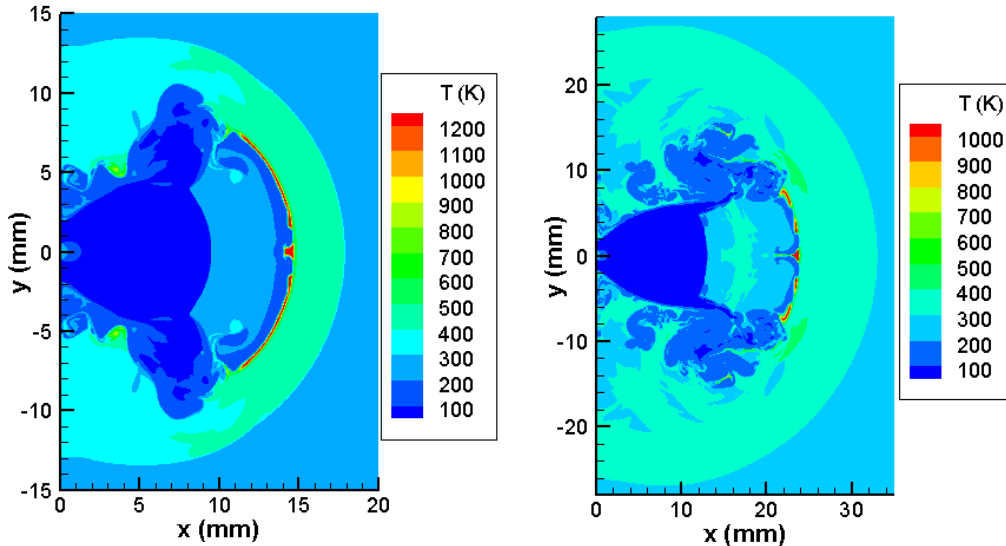
図 2.3(5)①b-2 水素の噴出による自然着火に及ぼす破膜圧力とノズル長さの影響

自然着火した場合のノズルの長さとお破膜時の圧力との関係を図 2.3(5)①b-2 にまとめた。ノズルが短い場合は自然着火が起こりにくく、ノズルが長くなると低い圧力でも自然着火が起こる可能性が高くなることがわかった。

高圧タンクにあいた小さい穴から漏洩する水素噴流とノズルから噴出する水素噴流の数値解析を行った。解析結果の一例を図 2.3(5)①b-3 に示す。

図 2.3(5)①b-2(a)に示すように、高圧タンクから噴出した水素ジェットによって、ジェット先端に先行衝撃波が生じ、その背後の高温になった空気と水素ジェットとの接触面で自然着火が起こることが示された(図の赤い部分)。1mm、3mm、5mmの小孔を用いた場合に、この自然着火は、ジェットの脇の部分でも見られた。しかしながら、この自然着火による火炎は非常に薄く、そこで発生する生成物によって、

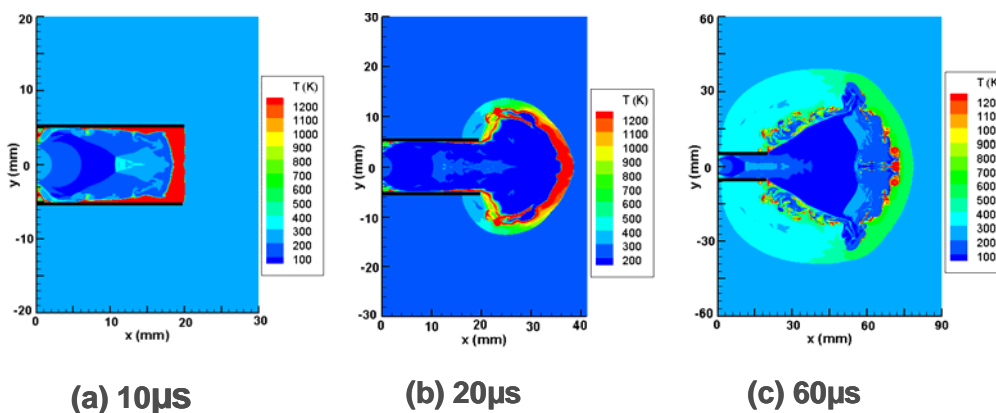
また急速に弱まった先行衝撃波によって弱められ、図 2.3(5)①b-2(b)に示すように、非常に短い時間に消炎する。この消炎現象は、水素圧力が約 70MPa まで上昇しても起こることが予測された。



(a) 噴出から 20 μ 秒後の温度分布 (b) 噴出から 50 μ 秒後の温度分布

図 2.3(5)①b-3 噴出着火の数値解析結果(圧力: 40MPa、噴出口径: 1mm Φ)

ノズルを用いた場合の解析結果を図 2.3(5)①b-4 に示す。高压水素の噴流はノズル内でも先行衝撃波を作るが、この衝撃波はノズル内を伝播している間は減衰せず、むしろ強化され、その背後の空気は非常に高温になる。この高温空気とさらに背後の水素噴流が混合し自然着火を誘発する(図 2.3(5)①b-4(a)の赤い部分)。この自己着火による火炎は、ノズル出口に浮き上がり火炎を生み出し、管出口で着火を継続する(図 2.3(5)①b-4(b))。この事実は実験結果と定性的に一致しており、ノズルから噴出した水素は着火するという現象を解明できたことになる。



(a) 10 μ s

(b) 20 μ s

(c) 60 μ s

図 2.3(5)①b-4 ノズルからの噴出着火の数値解析結果(圧力: 40MPa、ノズル径: 4.8mm Φ)

② 水素ガス漏洩時における静電気着火に関する研究（産業技術総合研究所、東京大学大学院工学系研究科）

a. 水素ガス漏洩時における静電気着火の実験的解明

水素が大気中へ放出される場合、水素ガスのみが単独で噴出した場合には帯電は発生しないが、例えばベント放出口付近や配管・ホース亀裂付近にダストが蓄積していて、それを巻き込んで噴出した場合は、ダストの導電率によらず多量の静電気を発生することが知られている。そこで、水素供給用ディスペンサー配管に発生した亀裂から水素が噴出漏洩した場合を想定して、帯電機構の把握及び着火危険性の有無について、実験的に検討した。今後、ベント配管などの水素放出口において、静電気着火が発生しない条件を明らかにすることにより、安全な水素放出口の形状の提案が可能になると考える。

ダストのモデルとして、酸化鉄および赤土を用い、水素と一緒に噴出させる実験の様子を図 2.3(5)②a-1 に、測定装置の概略を図 2.3(5)②a-2 に示す。水素と酸化鉄がともに噴出すると、酸化鉄は帯電し、水素を着火させるエネルギーを有した静電気を発生し、実際に水素が着火する場合があった。実験中に着火した例を図 2.3(5)②a-3 に示す。酸化鉄と赤土の混合ダストを使用した場合も、水素を着火させるエネルギーを有した静電気が発生した。帯電量の鉛直方向の分布を帯電量の最大値との比で整理すると図 2.3(5)②a-4 が得られた。水素とダストによって形成される帯電雲の分布は、ノズル径、噴出圧力といった噴出条件に依存せず相似であり、ダストの種類に依存しないことが明らかになった。また、水素と酸化鉄が噴出する場合に電荷雲の形成に大きな影響を及ぼす要因は、ノズル部分での酸化鉄の衝突帯電であった。すなわち、水素放出口において衝突帯電が起こらないような形状にすることにより静電気着火の可能性を低くすることが可能と考えられる。



図 2.3(5)②a-1 水素による酸化鉄の噴出実験の様子

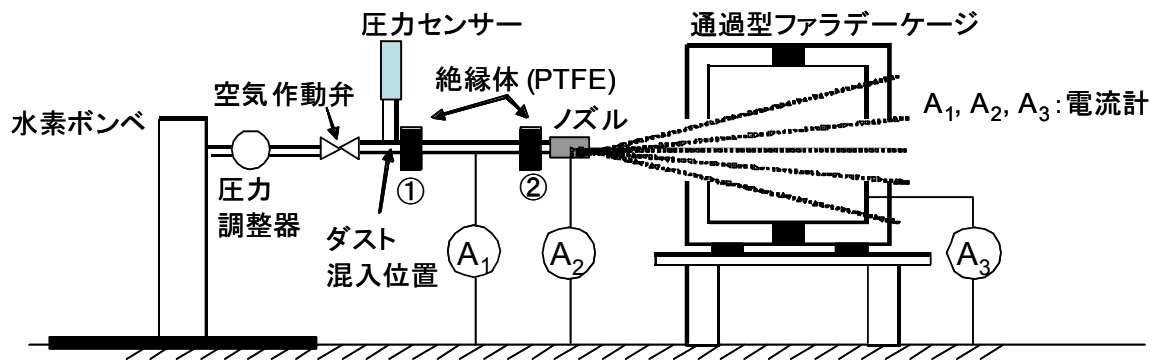


図 2.3(5)②a-2 静電気計測装置の概要と写真

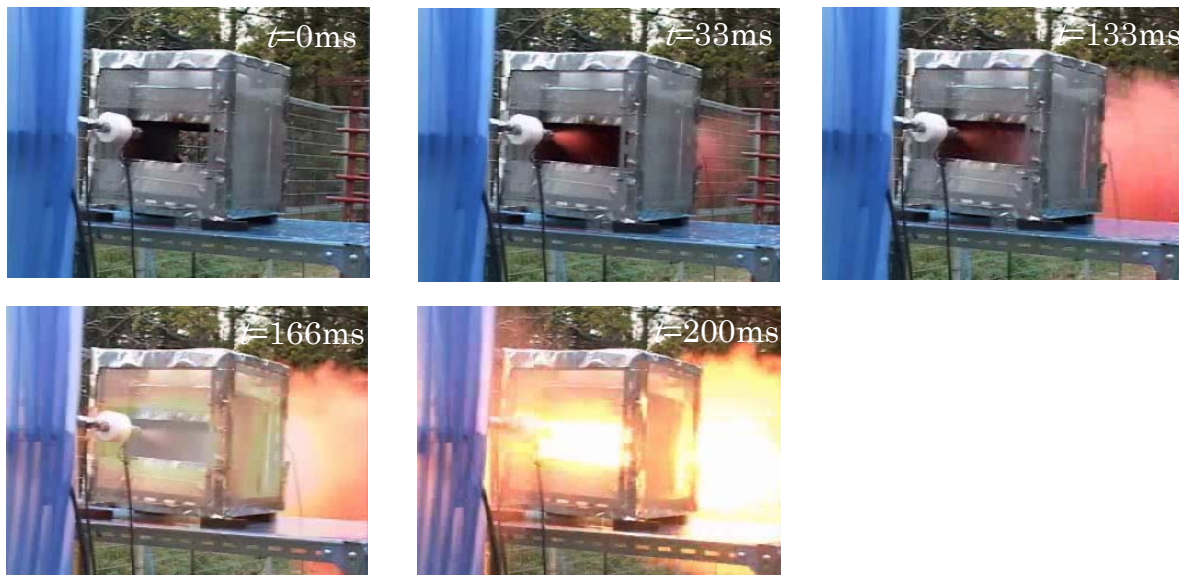
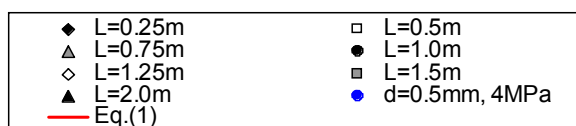
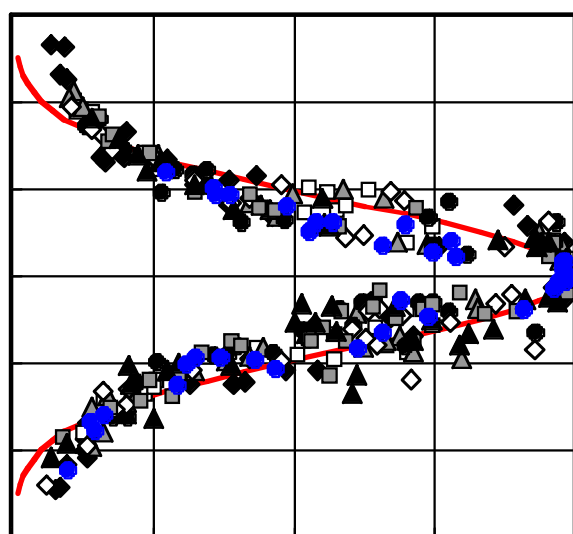


図 2.3(5)②a-3 実験中の静電気着火の例



Lは噴出口からの水平距離、

横軸: q/q_{\max} は各点の帯電量と最大帯電量との比、

縦軸: r/b は鉛直方向の位置を示す無次元数、噴出口の高さが 0

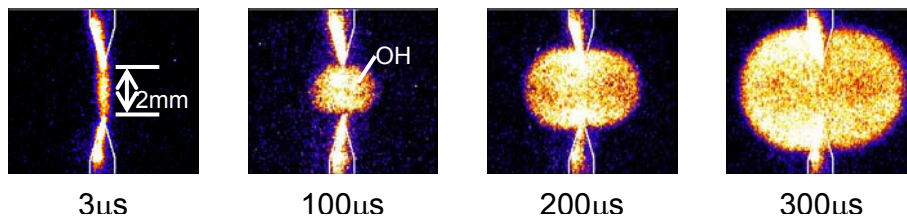
図 2.3(5)②a-4 帯電量の鉛直分布の測定結果

b. 水素の静電気着火過程における OH ラジカル密度およびガス温度計測

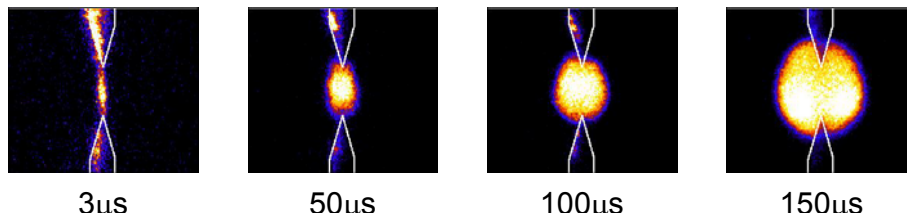
水素を含め、様々な可燃性ガスの放電着火機構が、これまで実験的計測、反応モデル、数値計算などにより調べられてきた。しかし放電着火過程における二つの重要な要素、ラジカル（化学活性種：化学的に非常に活発に反応する分子や原子）密度とガス温度を定量的に計測した例はなく、着火反応モデルを構築する上で実験データが不足しているのが現状であった。本研究では水素の静電気着火に対する基礎過程の検証を目的とし、水素-空気混合気中で放電が発生してから火炎が形成されるまでの $10\mu\text{s}$ オーダの時間領域において、OH ラジカル密度とガス温度をレーザー誘起蛍光法（LIF: laser-induced fluorescence）で計測することを試みた。本研究で得られた基礎データは、水素の静電気着火をモデル化するうえで必要不可欠であり、水素の静電気安全性の評価に対して大きく寄与するものである。

OH の二次元 LIF の測定の結果を図 2.3(5)②b-1 に示す。水素濃度 50% と 30% では、放電のフィラメント状に発生した OH が、時間の経過とともに球状に進展している様子が観測された。一方水素 15% では、針電極先端の微小領域で発生した OH が、

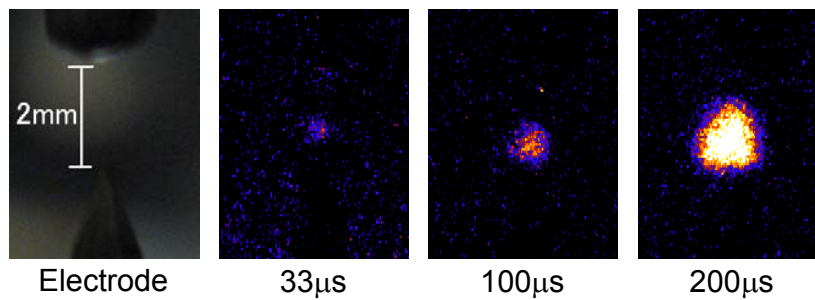
時間とともに進展する様子が観測されている。このように水素濃度 15%では、30%や 50%と比べて非常に小さい領域で火炎核が形成されることが観測された。これが水素濃度の変化に対する本質的なものか、あるいは電極形状を変えたために生じたものかは、今後検討の必要がある。また、OH 密度は放電後減少もしくは一定を保っているが、この間に火炎核の体積が増加しているため、火炎核に含まれる OH ラジカルの総数は放電後に増加していることが明らかになった。



(a) $\text{H}_2(50\%)\text{-air}$, $E = 3.0E_{\min}$ ($E_{\min} = 0.075\text{mJ}$)

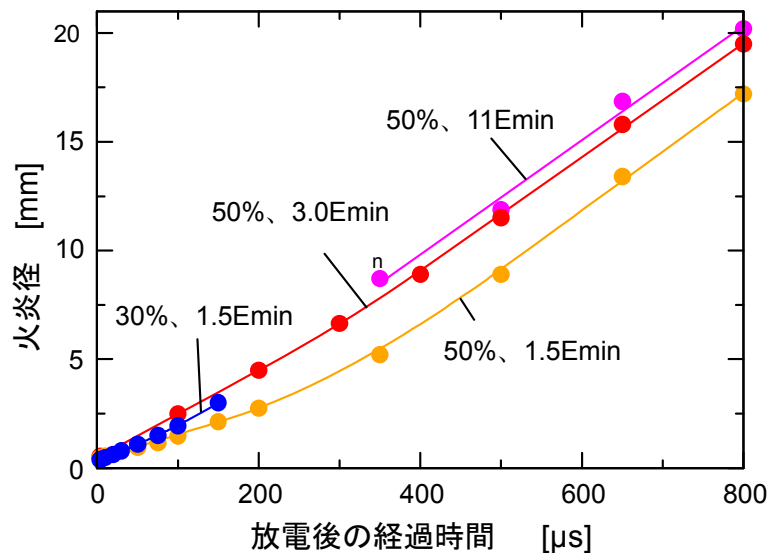


(b) $\text{H}_2(30\%)\text{-air}$, $E = 1.5E_{\min}$ ($E_{\min} = 0.048\text{mJ}$)



(c) $\text{H}_2(15\%)\text{-air}$, $E = 1.4E_{\min}$ ($E_{\min} = 0.070\text{mJ}$)

図 2.3(5)②b-1 OH ラジカルの二次元 LIF 測定結果



横軸：着火後の時間、縦軸：火炎の直径

図中の%は水素濃度、着火エネルギーは $E_{min}=0.075\text{mJ}$ の倍数で表示

図 2.3(5)②b-2 火炎進展速度の計測結果

さらに、放電着火直後に火炎球の直径が増加する様子を観察した。その結果を図 2.3(5)②b-2 に示す。着火エネルギーが大きいほど火炎の進展速度は速いが、その後は着火エネルギーによらず直線の傾きは同じになり、進展速度は一定になった。すなわち火炎進展速度が着火エネルギーの影響を受けるのは、放電後のわずかな時間だけであることが分かる。どの水素濃度においても、着火エネルギーが最小着火エネルギーに近づくと、急激に着火遅れ時間が増加した。このように最小着火エネルギー付近での着火では、着火・不着火を分ける大きな要素が潜んでおり、今後この領域の着火現象を詳細に調べることにより、水素の着火と不着火を分ける要因が分かるものと期待できる。

③ 水素燃焼火炎特性に関する研究（産業技術総合研究所、横浜国立大学）

a. 水素噴出火炎の吹き消え現象の解明

高圧水素の噴出で着火した火炎の場合、ある条件では消炎(吹き消え)することが知られているが、その詳細は明らかになっていない。高圧水素の噴出時のノズル口径と放出圧力による吹き消え領域を明らかにすることにより、ジェット火炎による影響度を再評価し、保安距離の見直しに役立つ可能性がある。

水素の噴流火炎の状態について、ノズル口径と放出圧力とを変化させて水素を噴出させ、点火する実験を行った。結果を図 2.3(5)③a-1 に示す。火炎を維持できる領域と吹き消える領域が明らかになった。ノズル口径が約 1mm 以上の大きになると

吹き消えは起こらず放出圧力によらず火炎は維持されるが、例えば水素ステーションのリスク評価においてピンホール漏洩の代表口径である 0.2mm のノズル口径では 0.1MPa 以上では火炎を維持することはできず、実験を行った 40MPa までの範囲で火炎を維持できないという結果となった。今後さらに着火位置、着火方法の影響などを評価して、火炎を維持できる条件との境界を明確にすることにより、リスク評価の見直しに資するデータを蓄積する。

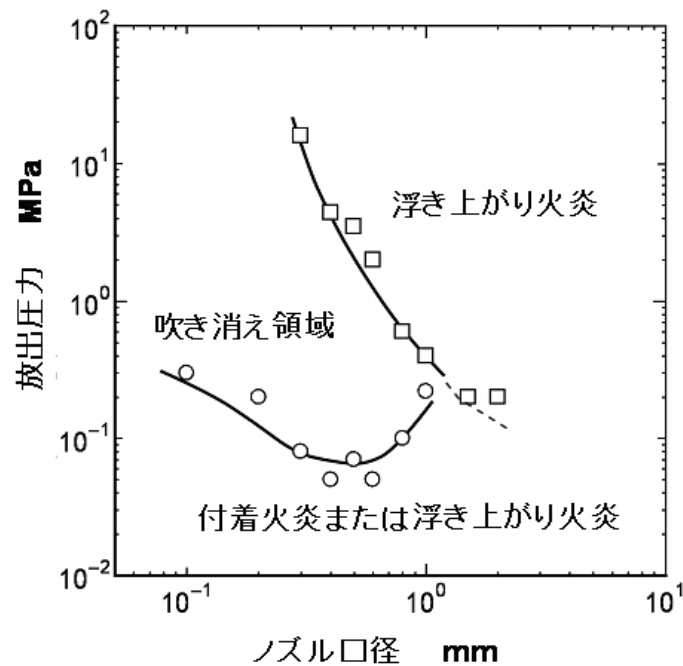


図 2.3(5)③a-1 ノズル口径と火炎の状態との関係

b. 水噴霧による水素火炎の熱影響の低減効果に関する実験

消火用に使用される既存の水噴霧設備を用いて、水素火炎の大きさ及び水素火炎下流側の熱影響の低減効果を把握することを目的として実験的な検討を行った。この成果は、水素ステーションの設置時の住民とのリスクコミュニケーションにおいて、事故の際に緊急遮断弁が作動しなかった場合などにも、隣接家屋などへの放射熱などによる影響を低減する効果的な防火設備の配置設計の提案に資するものである。

水素の噴出火炎に対する水噴霧実験の配置図を図 2.3(5)③b-1 に示す。今回用いた水噴霧方法で、火炎に直接水を噴霧しても火炎の大きさ自体を大きく低減することはできなかったが、火炎下流側の放射強度、温度上昇については有意な低減効果がみられ、特に放射強度については火炎先端から下流側に水噴霧を行うとより有意な低減効果がみられた。

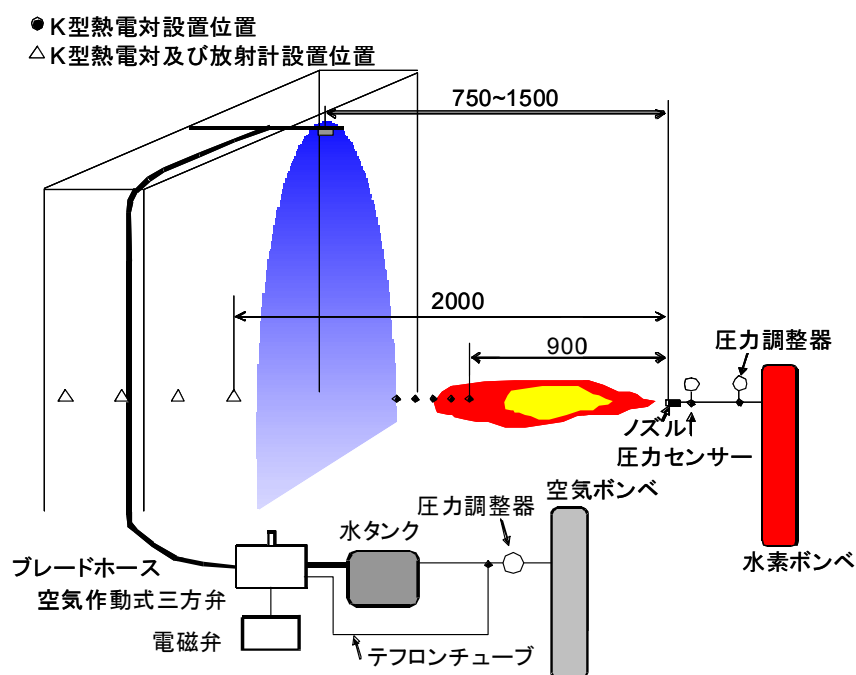
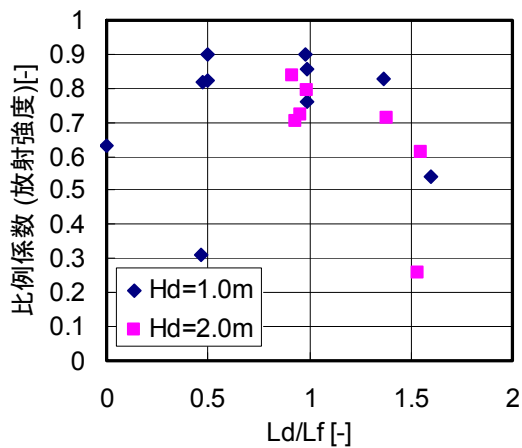


図 2.3(5)③b-1 水噴霧実験の配置図

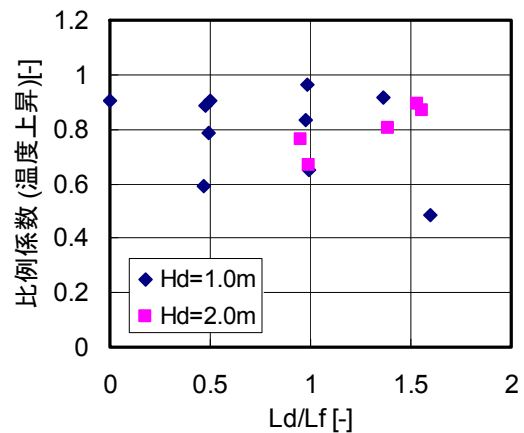
c. 水噴霧による火炎・熱影響の抑制効果の解析

上記実験結果を用い、より効果的な水噴霧方法についての知見を得ることを目的として定量的な解析を行った。

水噴霧の散水分布について解析した結果、今回用いた水噴霧設備では中心部よりも周縁部に散水量が多いことが明らかになり、より効果的な水噴霧のためには設備の再検討の必要性が示された。水噴霧による火炎の大きさ(火炎長および火炎幅)の変化を火炎画像より解析した結果、火炎大きさの低減効果は5%から10%で、水を火炎に直接噴霧させてもその効果はあまり大きくないことが明らかになった。火炎の放出方向のさらに下流への熱影響について解析した結果、火炎の先端よりも遠い位置に水噴霧した場合に40%から70%の放射熱の低減効果が認められた。これらをまとめた結果を図2.3(5)③C-1に示す。今後、放射熱と対流熱の効果を検討し、より効果的な防火設備の提案に資するデータを蓄積する。



(a) 放射強度に対する効果



(b) 温度上昇に対する効果

Hd : 水噴霧位置の高さ

横軸 : Ld/Lf は水素放出口からの火炎の長さに対する水噴霧の位置の比

Ld/Lf=1 の位置が火炎の先端位置で噴霧していることを示す

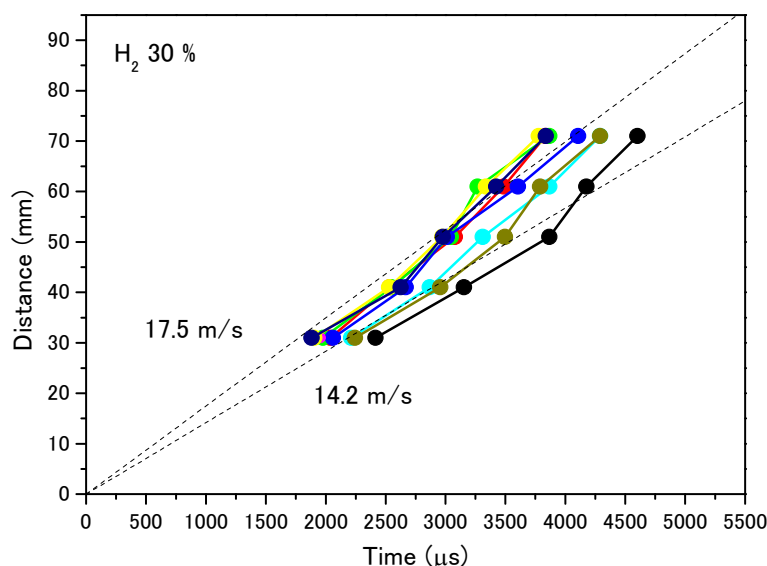
図 2.3(5)③c-1 水噴霧による火炎の影響の低減効果

④ 水素の着火による火炎伝搬と爆ごう転移に関する研究

a. 開放空間における水素の着火と火炎伝播に関する研究 (産業技術総合研究所)

火炎の伝搬速度は、爆発により発生する爆風圧と相関があると考えられていることから、火炎面を高速度で検出する手法を検討した。そのために、一般的なガラス製光ファイバと高速応答性を持つ赤外線検出器を組み合わせた水素火炎面検出方法 (火炎検出ピン) を開発した。小型の水素ハウス(0.016 m³)の中に、火炎検出ピン 5 本を 15 mm 間隔で並べ、水素濃度 30%の水素/空気混合気を着火し、火炎伝搬速度を計測した。結果を図 2.3(5)④a-1 に示す。比較のため高速度カメラで火炎伝搬状況を計測した結果、火炎検出ピンによる方法は、高速度カメラによる方法 (高速度カメラ法) と良く一致し火炎伝搬速度として 14 m/s~18 m/s を得ることができた。高速度カメラ法の空間分解能は 0.5mm 程度であることから、本方法は空間分解能の点で高速度カメラ法より優れていることが確認された。構造物により火炎が擾乱を受けて火炎が加速されることが知られているが、構造物の影になる領域でも本方法は適用可能である。本方法は、このような場合の火炎伝搬挙動の解明のためのツールとして活用されることが期待できる。さらに、高速度カメラ法では、撮影の直前に、水素ハウスの内部に塩化ナトリウムの水溶液を噴霧し、その炎色反応により火炎を可視化している。水噴霧した場合に火炎伝搬速度が影響を受ける場合にも、本方法

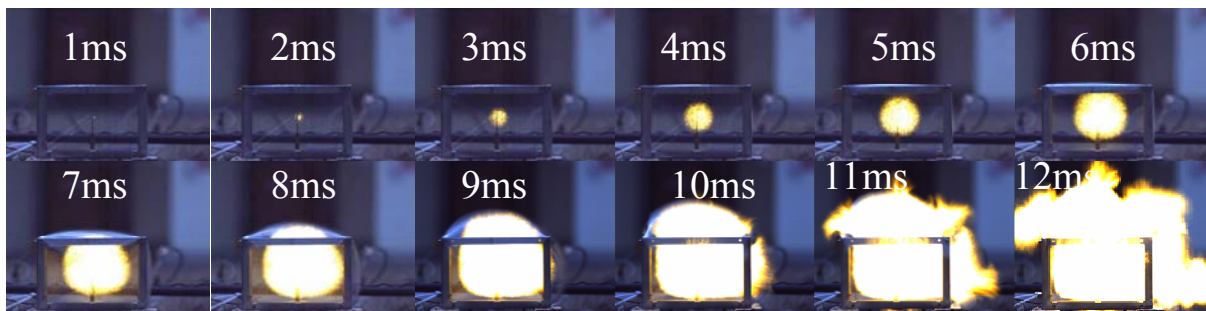
は有用な計測方法となる。



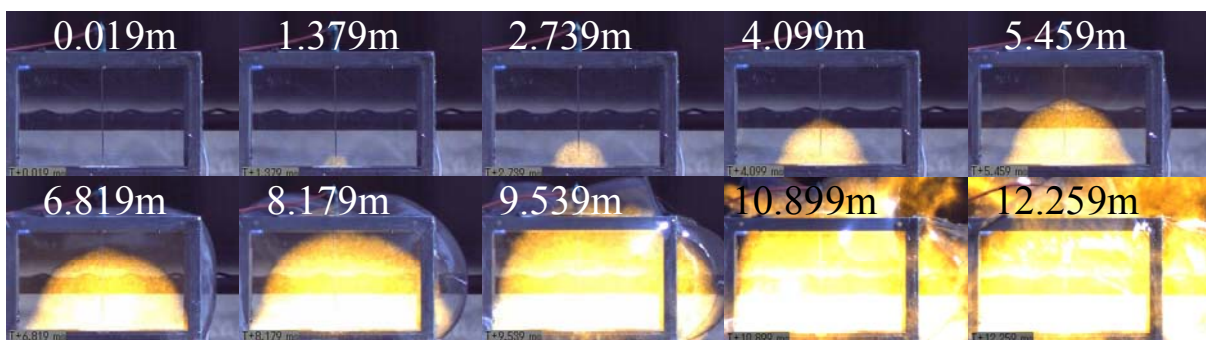
横軸：時間(μ秒)、縦軸：着火点からの距離

図 2.3(5)④a-1 火炎検出ピンによる水素火炎の距離と時間との関係

火炎伝搬に及ぼす着火位置の効果については、小型水素ハウス(0.016 m³)の中心または床面で電気放電し、水素/空気混合気を着火した。側面の1箇所は壁を設置し、その他の側面と天井には薄いビニールシートを設置した。火炎の伝搬状況は高速度カメラ法により計測した。結果を図 2.3(5)④a-2 に示す。水素ハウスの中心で着火した場合、火炎は球状に広がった。しかし、床面着火した場合は、火炎伝搬速度の速い順に、底面シート側>上方向、シート側45度>壁側となった。これは、底面平板に沿った方向では、床面の存在のため、壁側は燃焼面に先行する混合気の堰きとめの影響があったためと考えられる。さらに、床面着火の火炎伝搬速度は中心着火のそれよりも総じて大きかった。火炎伝搬速度と爆風圧の間に相関関係があることから、床面着火の場合は、中心着火と比較して爆発の威力が増すことが示唆される。これは、構造体近傍で着火された場合の火炎伝搬は、自由空間の場合より速くなることに相当する。水素ハウスが障壁で囲まれたコーナー部で着火された場合、その火炎伝搬速度は増加することが予想される。今後、着火位置と爆風圧との関係を明らかにすることが重要であると考えられる。

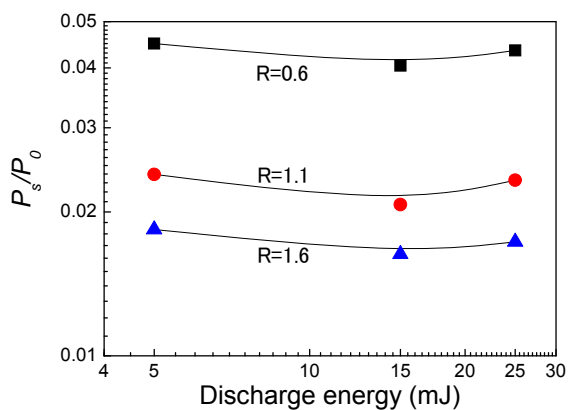


(a) 水素ハウスの中心で着火、左端面はステンレス板壁、端面はシート

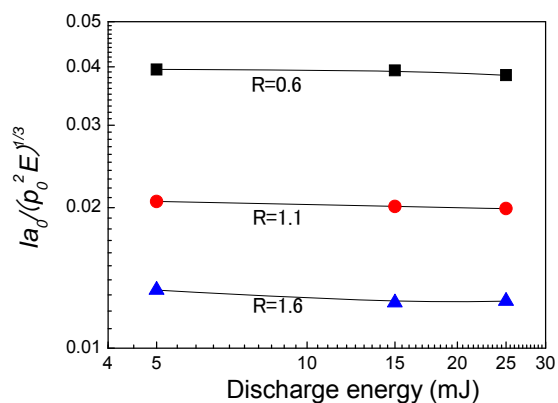


(b) 水素ハウスの床面で着火、左端面はステンレス板壁、右端面はシート

図 2.3(5)④a-2 燃焼状況の撮影結果



(a) ピーク圧への影響



(b) インパルスへの影響

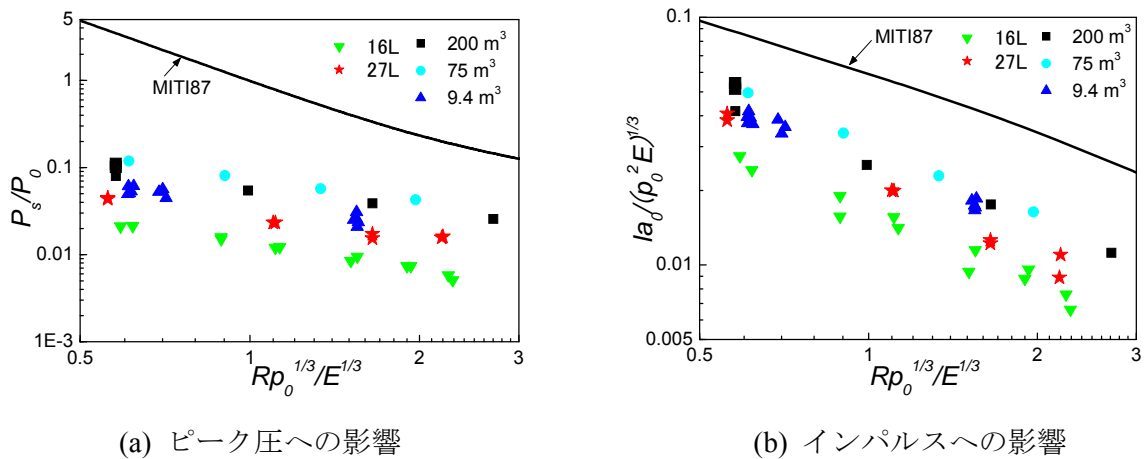
R:容器中心からの距離、横軸：着火エネルギー

縦軸： P_s/P_0 はピーク圧と大気圧との比、 $I_{a0}/(\rho_0^2 E)^{1/3}$ はインパルスを無次元化した値

図 2.3(5)④a-3 着火エネルギーの効果

火炎伝搬に及ぼす着火エネルギーの効果については、小型水素ハウスを使用して、放電エネルギーを 1mJ から 1000mJ まで変化させて実験を行った。結果の一部を図 2.3(5)④a-3 に示す。着火エネルギーが 3 桁程度変化しても、爆風のピーク圧やインパルスに及ぼす影響は小さいことが確認された。着火源の種類の効果については、同じ水素ハウスを使用して、電気火花着火と細線加熱着火の場合の爆風圧と火炎伝搬速度を計測した。その結果、火炎伝搬速度は、電気火花着火の場合が 13.1m/s、細線加熱着火の場合が 14.2-15.1m/s となり、細線加熱着火の方が若干速いことが確認された。しかしながら、爆風のピーク圧やインパルスは、ほぼ同等であることが確認された。着火エネルギーそして着火源の種類を変えても、爆風圧に与える影響は小さいことが明らかとなった。本結果は、水素の取り扱いの際の安全性を考慮する際に重要な知見と考える。

水素ハウスの体積と爆風圧の関係については、過去の結果を含めて図 2.3(5)④a-4 にまとめた。小型水素ハウス(0.016 m³ と 0.027 m³)を使用し、ハウス中心で電気火花着火し、内外の圧力や音圧を計測した。27 リットル規模の爆発によって発生した爆風のピーク圧ならびにインパルス (圧力を時間積分した値) は、16 リットル規模の値を上回ることが確認された。これまでに野外において水素ハウスの体積が 9.4m³ ~200m³ の実験を行ってきた。これらの結果を今回の 27 リットル規模と比較すると、同様に体積の効果が確認された。本実験結果は、実規模での爆風圧を予測するための数値シミュレーション手法を開発する際の検証用データとして活用されることが期待される。



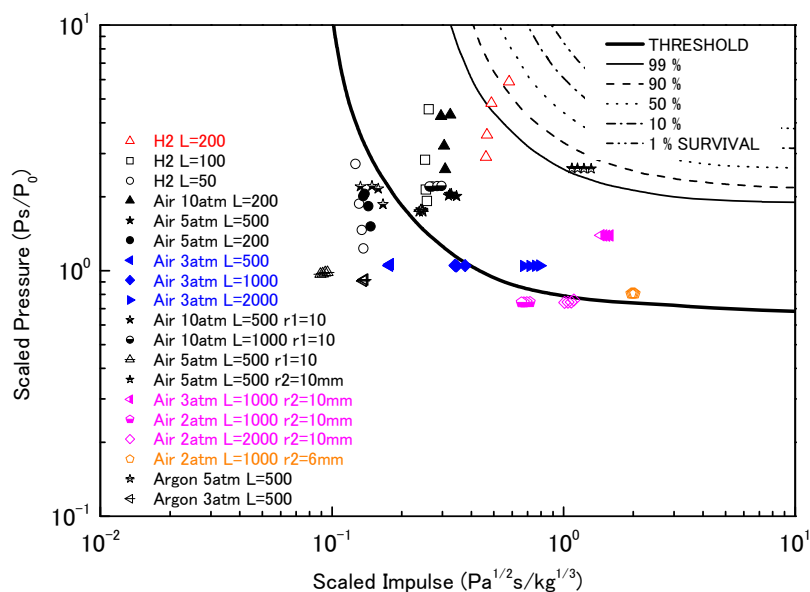
横軸：無次元化された距離

縦軸： P_s/P_0 はピーク圧と大気圧との比、 $I_{a0}/(p_0^2 E)^{1/3}$ はインパルスを無次元化した値

図 2.3(5)④a-4 着火エネルギーの効果

気相爆発に特徴的な被害の指標として爆風のインパルスに着目し、肺損傷に関する基礎的なデータを収集するために、モデル気泡群に爆風を作用させて、その変形・

崩壊挙動と爆風のインパルス値の関係について検討することを開始した。その準備段階として、爆燃波管の性能を検討するために、2次元軸対称の衝撃波管問題として数値解析を行った。水素/酸素混合気の爆轟と高压気体の膨張による爆風のインパルスを解析した。火薬類の爆発に関しては肺損傷の閾値（文献値）が知られている。本解析で得られた爆風のピーク圧とインパルスをその文献値と比較した。その結果を図 2.3(5)④a-5 に示す。本方法は、肺損傷の閾値を含めてある程度広い範囲のインパルスを有する爆風を生成できることが明らかとなった。特に、高压室に水素/酸素混合気を使用しなくても、高压室の長さや内径の細い低压室を選択することなどで、インパルス値の高い爆風を生成できる見通しが得られた。これらの解析結果は、爆風インパルスの効果を実験的に検討する際の設定条件として活用される。



横軸：無次元化されたインパルス値、縦軸：無次元化されたピーク圧値

図 2.3(5)④a-5 実験値(各種点)と肺損傷文献値(各種線)との比較

b. トンネル内で水素が燃焼から爆ごうへの転移を起こす着火条件に関する研究
(産業技術総合研究所)

本研究は、トンネル内で水素タンクローリが事故に遭遇し、水素が漏洩してトンネル内部に拡散し、燃焼した場合の危険性を予測し、安全対策を提案することを目的としている。そのために、トンネルを模した直径 25mm、50mm、100mm の金属製の管(デトネーションチューブ)を用いて、水素と空気の可燃性混合気が管内を流通している状態あるいは空気が流通している管の途中から水素が噴き出している状態の実験を行い、可燃性混合気に点火して燃焼させ、燃焼が加速されて高い圧力の衝撃波を伴う激しい燃焼(爆ごう)に転移する条件について検討した。この燃焼から爆ごうへの転移を DDT(Deflagration to Detonation Transition)と呼ぶ。

実験装置図を図 2.3(5)④b-1 に示す。また、野外実験の写真を図 2.3(5)④b-2 に示す。

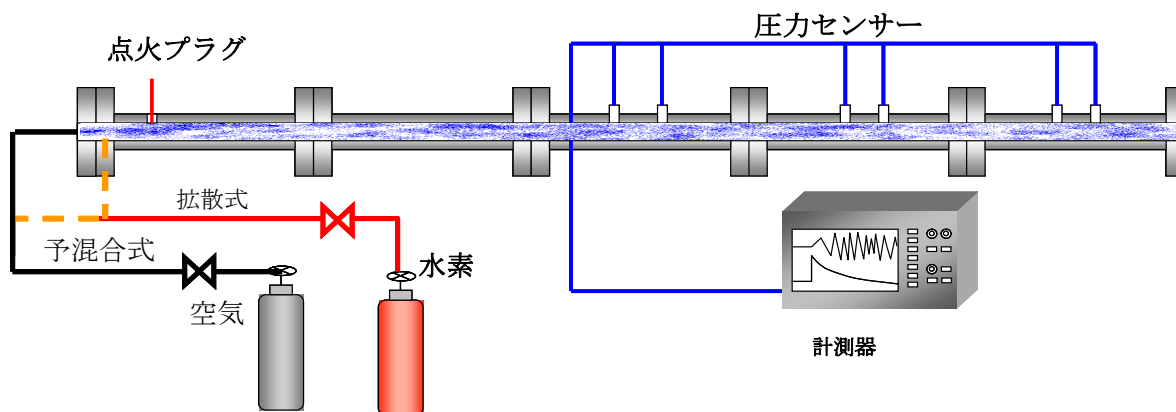


図 2.3(5)④b-1 DDT 実験装置の配置 (予混合式の場合)



図 2.3(5)④b-2 100mm 径デトネーションチューブの野外実験の配置図

平成 17-18 年度に実施した実験結果より、図 2.3(5)④b-3 に示すように、DDT を起こす下限界の水素濃度は、管径 25mm では約 24vol.%であったのに対し、管径 50mm では約 19vol.%となり、管径が大きくなるとより低い水素濃度で DDT を起こすことが明らかになった。また、同じく図 2.3(5)④b-3 より、デトネーションチューブの直径(管径： D)が大きくなると、燃焼から爆ごうに転移するために必要な距離(DDT 距離： L)は長くなったが、図 2.3(5)④b-4 に示すように管径が大きくなると DDT 距離と管径との比(L/D)は小さくなり、例えば、管径 25mm では DDT が起こるためには管径の約 100 倍の距離が必要であったのが、管径 100mm では管径の約 60 倍の距離で DDT が起こるといのように、管径が大きくなるとスケール効果によって DDT が起こり易くなることが明らかになった。流量の効果については、現在実験中であるが、これまでの結果からは、直径 50mm のデトネーションチューブで流量を 10L/min から 140L/min に増加させた場合に 20cm 程度 DDT 距離が短くなり、流量が多くなると DDT 距離が短くなる傾向がみられた。

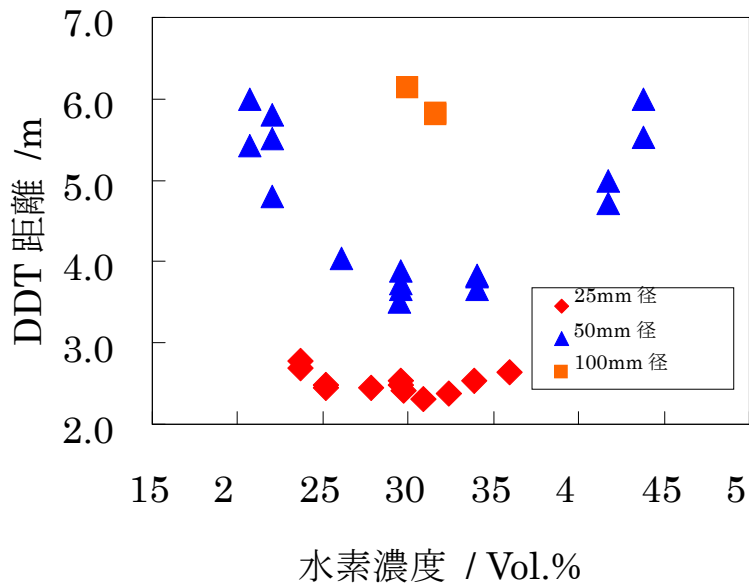


図 2.3(5)④b-3 DDT 距離と水素濃度との関係

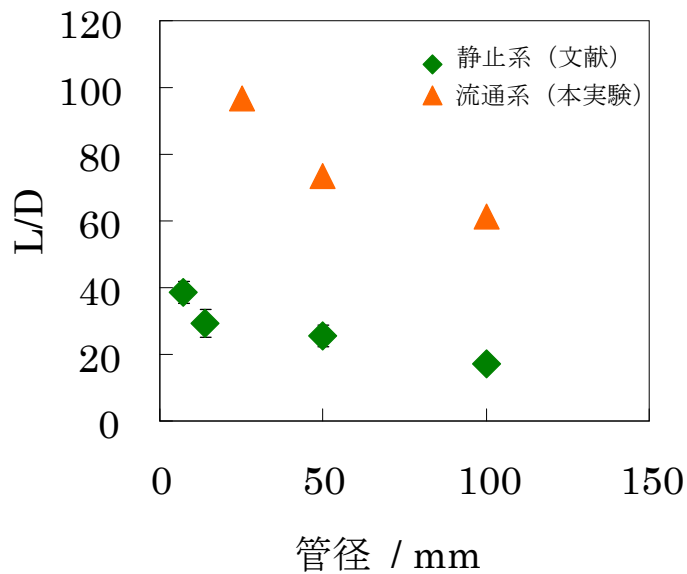


図 2.3(5)④b-4 L/D と管径との関係

以上の結果は、いずれも実規模トンネルの事故を想定する際に、スケール効果によってより危険になる、といったことを示す結果であるが、実験を進めていく中で水素濃度が下限界濃度に近い領域では DDT が起こる確率が小さくなるという現象が起きている。このことは、例えば、実規模トンネルで DDT が起こりうると想定され

る距離よりも短い距離で、局所的にでも水素濃度の薄い部分を作り出せれば、DDTの発生を防止できる可能性があることを示しており、DDT 距離をきちんと予測することができれば、効果的な安全対策を立案する際のヒントになると考えている。

⑤ 化学反応論に基づく水素の着火・燃焼制御に関する研究（産業技術総合研究所、東京大学大学院工学系研究科）

水蒸気や水ミストが存在する場合の水素－空気化学量論組成混合気の燃焼挙動への影響を調べるために、開放空間で燃焼実験を行った。50cm 立方のビニールシート容器に混合気を入れ、水蒸気は温水中での混合気のパブリング、またミストは容器内に設置したノズルから水を噴霧（水滴の直径は数十 μm ）することにより供給した。着火方法は、線爆発方式、ニクロム線溶断方式、ニクロム線加熱方式の3方式で行い、火炎の伝搬を見るために容器内に極細熱電対を設置し、また容器外での圧力波の伝搬を見るためにピエゾレジスタンス方式の圧力センサーを使用した。着火時にガスに与えるエネルギーは、線爆発、ニクロム線溶断、ニクロム線加熱の各方式の順に小さくなり、火炎や圧力波の伝搬挙動から求めた着火遅れ時間はこの順番に大きくなる。ニクロム線加熱方式で着火した時、乾燥混合気の場合と比較して、高湿度あるいは水ミストが存在する場合には、乾燥混合気の場合と比較して着火遅れ時間が数倍大きくなること、また着火に必要なニクロム線で発生するジュールエネルギーも、数倍大きくなることを見いだされた。一方、線爆発方式で着火した場合には、乾燥混合気と高湿度の混合気の着火遅れ時間には大きな差はみられなく、水蒸気あるいは水ミストが水素の燃焼に与える効果は、着火時に与えるエネルギーに大きく依存することが示唆された。

さらに、水素－空気混合気の水素濃度を15%から40%の範囲で変化させた混合気を、乾燥状態および高湿度状態にすることにより水添加効果の水素濃度依存性を調べた。着火方式は、ニクロム線加熱方式である。その結果（図 2.3(5)⑤-1～⑤-3）、火炎伝搬速度と爆風圧／爆風インパルスは組成変化に対して同じような変化を示した。また、乾燥ガスに比べ、高湿度状態では、火炎伝搬速度、爆風圧、爆風インパルスとも有意に小さくなる傾向が見られた。

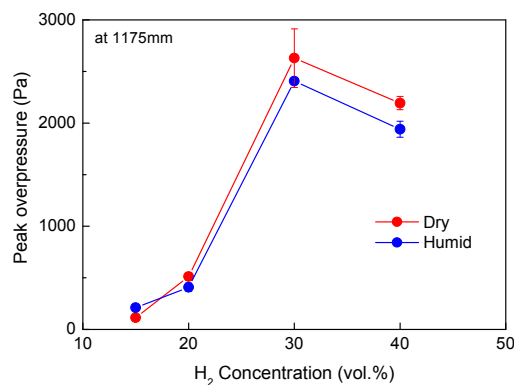
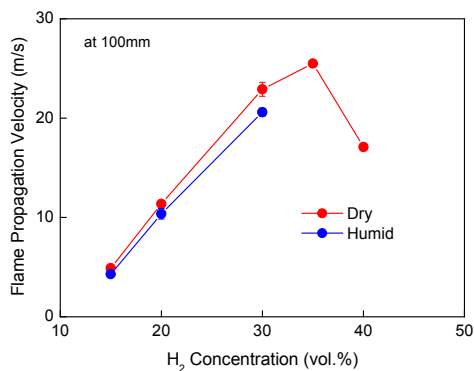


図 2.3(5)⑤-1 火炎伝搬速度（区間平均）
の水素濃度依存性

図 2.3(5)⑤-2 爆風圧の水素濃度依存性

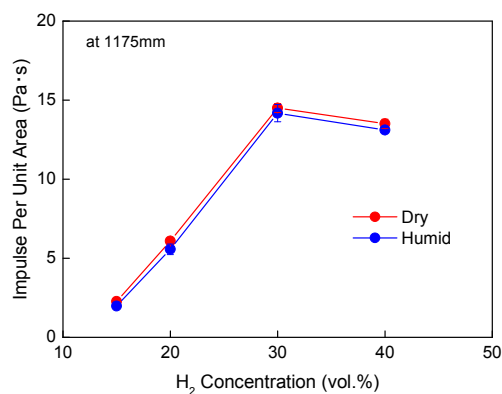


図 2.3(5)⑤-3 爆風インパルスの水素濃度依存性

水素に水などの分子を共存させる方法として、水素－水クラスレート化合物（水素ハイドレート）が本質的に有望と思われ、そのため高圧下での合成を試みた。圧力発生にはダイヤモンドアンビルセル法、またはより試料体積が大きくすることができるモアッサナイト(SiC)アンビルセル法を用いた。これらの方法では試料空間の圧縮比を大きくすることは難しいので、圧縮前の水素の密度を高くするため、低温下で液体水素を水（氷）とともに試料空間に封入する方法および装置を開発した。封入後、常温下で加圧することにより、水素ハイドレートの合成を確認した。

水素の着火挙動に関する数値計算精度を改善することを目的として、水素－空気混合気の着火挙動を熱対流の影響がない微小重力下で精密測定を開始した。有効高さ 10m の落下塔（微小重力持続時間 1.4 秒）を使用して水素－空気混合気の着火遅れ時間を測定する装置を試作した（図 2.3(5)⑤-4）。着火は着火電極を一定温度まで加熱して行う方式である。微小重力下で予備的な実験を行い、微小重力下では着火遅れ時間が明らかに小さくなる挙動を示し、熱対流の効果が無視できないことが分かった（図 2.3(5)⑤-5）。

現在予備的なデータを得たばかりであるが、今後より詳細な実験を継続して行うことにより、熱対流の影響と化学反応過程を分離して考察することが可能になるため、数値計算の精度を高めることや水添加効果の化学反応における効果を明確にすることが可能になると期待される。



図 2.3(5)⑤-4 微小重力実験落下カプセル (二重構造) とその中に組込まれた燃焼実験装置

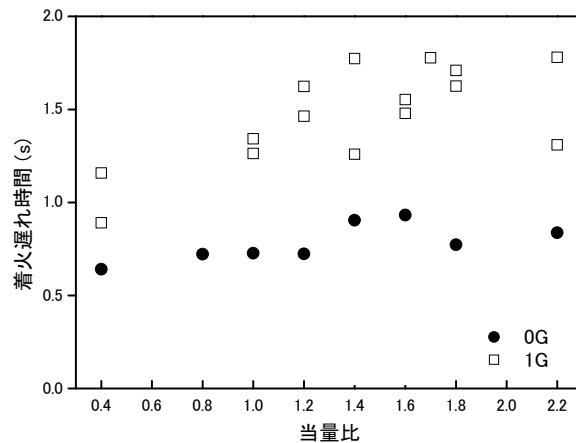
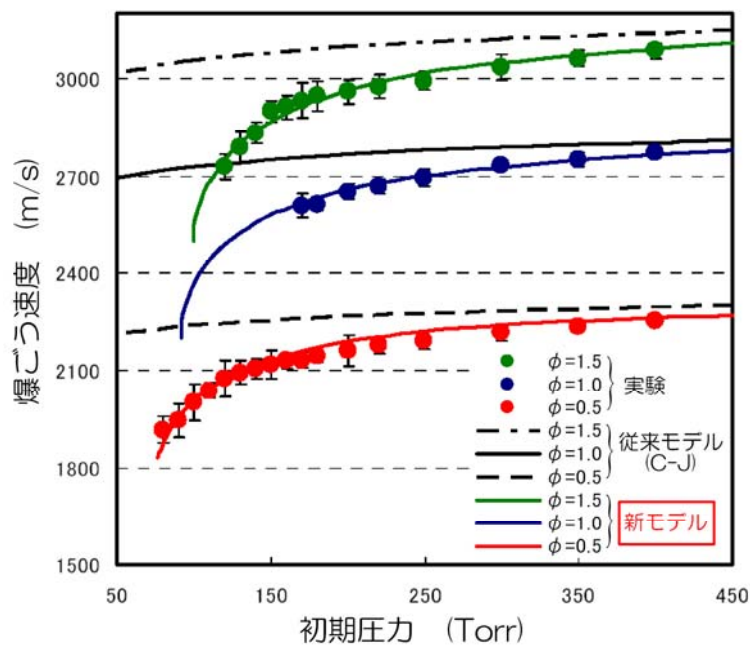


図 2.3(5)⑤-5 着火遅れ時間—当量比の関係における重力効果 (着火電極温度：742°C、圧力：100kPa)

水素の爆発性の制御を目指し爆ごう限界に及ぼす添加物の効果を明らかにすることを目的として、爆ごう限界の着火エネルギーの効果および圧力限界を測定した。爆ごう波面の伝搬は、ガラス管中を伝播する爆ごう波の自発光を多点で検出することにより計測した。着火エネルギーを 0.1 - 5mJ の間で可変して、その効果を調べた結果、定常爆ごうに至るまでの距離は影響を受けるが、定常になったときの爆ごう速度は添加エネルギーには依存しないことが見出された。また、爆ごうの圧力限界を計測した結果、予想されるように管径が細いほど爆ごう限界圧力は高くなること、限界付近の定常爆ごう速度は管径が細いほど遅いことがわかった。爆ごう限界に対する添加効果を調べるため、酸素—水素混合気アルゴン及窒素を添加した。爆ごう限界がどのように変わるかを調べた結果、初期圧力の低下とともに爆轟伝播速度は低下するが、C-J 速度の 85%程度が伝播限界であることが明らかになった。

爆ごう限界を一次元 ZND (Zel'dovich, von Neumann, Döring) モデルで予測するためのプログラムを開発し、詳細反応機構に基づき、熱損失および運動量損失を考慮して圧力限界を予測し、実験値と比較した。運動量損失をあらゆる抵抗係数の値はレイノルズ

数だけに依存するとするブラウジウスの式が従来よく用いられていたが、新しいモデルでは抵抗係数のマッハ数に対する依存性を考慮した。その結果、従来のモデルでは爆ごう伝播速度の限界付近での挙動は実験結果と大きく異なり、爆ごう限界を予測することは不可能であったが、このモデルにより爆ごう限界を精度よく予測することができるようになった（図 2.3(5)⑤-6 参照）。抵抗係数のマッハ数依存性の理論的意味を明確にすることは未だできていないが、爆ごう波の三次元的構造と関係がある可能性がある。そこで、限界付近での爆轟波の三次元構造を観測するために煤模様の観測を行い、爆燃から爆ごうへの転移や、多頭構造からシングルスピンへの遷移など、興味ある現象が観測できた。



※「新モデル」は運動量損失のマッハ数依存性を考慮

図 2.3(5)⑤-6 定常爆ごう速度の初期圧力依存性 (H₂/O₂、ガラス管径 6mm)

⑥ 研究発表・講演・論文投稿等

a. 発表件数

年度毎の研究発表等の件数は以下の通りである。

平成 17 年度

誌上発表 5 件 国際誌 1 件、国際会議プロシーディングス 1 件

口頭発表 15 件 国際会議 4 件

- ・水素安全国際会議(International Conference on Hydrogen Safety)での発表 1 件を含む

平成 18 年度

誌上発表 4 件 国際誌 4 件

口頭発表 23 件 国際会議 4 件

- ・静電気の国際誌(Journal of Electrostatics)の論文 1 件を含む
- ・国際燃焼シンポジウム(Symposium on Combustion)での発表 3 件を含む

平成 19 年度

誌上発表 4 件(投稿中) 国際誌 2 件

口頭発表 7 件(予定) 国際会議 5 件

- ・損失防止の国際誌(J. Loss Prevention in the Process Industries)の論文 2 件を含む
- ・アジア太平洋安全シンポジウム(Asia Pacific Symposium on Safety)の発表 2 件を含む

講演会の開催

平成 19 年 3 月 29 日に「水素の安全基盤研究に関する講演会」を開催し、自動車関係業界、ガス関係業界、地方自治体、警察関係、大学および研究機関などから約 180 名の参加があった。

b. 研究発表・講演・論文投稿

年度毎のリストを表 2.3(5)⑥-1～⑥-6 に示す。

表 2.3(5)⑥-1 研究発表・講演等リスト (平成 17 年度)

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
(誌上発表)			
2005 年 9 月	Proceedings of International Conference on Hydrogen Safety	A field explosion test of hydrogen-air mixtures	若林邦彦、茂木俊夫、金東俊、安部尊之、石川 弘毅、黒田英司、松村 知治、中山良男、堀口 貞茲、大屋正明、藤原 修三
2005 年 12 月	安全工学, vol.44(6), pp.412-420	水素爆発を事例研究とした大規模野外爆発実験 高圧水素ガスの大規模漏	中山良男
2005 年 12 月	安全工学, vol.44(6), p.440	高圧水素ガスの大規模漏洩拡散実験に関する野外実験	茂木俊夫、西田啓之、堀口貞茲
2006 年 2 月	Sci. Tech. of Energetic Materials, vol.67, p.1	Numerical Simulation on Hydrogen Fuel Jetting from High Pressure Tank	刘云峰, 佐藤博之, 坪井伸幸, 東野 , 林光一
2006 年 3 月	日本機械学会論文集 B 編、vol.72(715)	水素／空気予混合気の爆風圧の計測 (熱影響低減の検討)	西田啓之、堀口貞茲、茂木俊夫、金東俊、中山良男
(口頭発表)			
2005 年 5 月 26 日	2nd Int. Symp. on Energetic Materials and their Applications	Numerical Simulation on Hydrogen Fuel Jetting from High Pressure Tank	刘云峰, 東野 , 佐藤博之, 林光一
2005 年 7 月 8 日	第 35 回安全工学シンポジウム	高圧水素の噴出と着火に関する実験	茂木俊夫、金東俊、西田啓之、若林邦彦、松村知治、中山良男、堀口貞茲

2005年7月 8日	第35回安全工学シン ポジウム	水素・空気混合気爆 発からの爆発音(ス ケール効果)	黒田英司、石川弘毅、 金東俊、若林邦彦、 松村 知治、中山良男、 堀口 貞茲、吉田正典、 藤原 修三
2005年7月 8日	第35回安全工学シン ポジウム	水素の小規模爆燃 実験による威力評 価	中山良男、茂木俊夫、 若林邦彦、松村知治、 水田有人、三宅淳巳、 小川輝繁
2005年7月31 日	20th Int. Colloq. on Dynamics of Explosions and Reactive Systems	Direct Numerical Simulation on Hydrogen Fuel Jetting from High Pressure Tank	刘云峰, 坪井伸幸, 佐 藤博之, 東野 , 林 光一
2005年9月8 日	1st International Conference on Hydrogen Safety	Flame Characteristics of High-Pressure Hydrogen Gas Jet	茂木俊夫、西田啓之、 堀口貞茲
2005年9月9 日	1st International Conference on Hydrogen Safety	A field explosion test of hydrogen-air mixtures	若林邦彦、茂木俊夫、 金東俊、安部尊之、 石川 弘毅、黒田英司、 松村 知治、中山良男、 堀口 貞茲、大屋正明、 藤原 修三
2005年11月 17日	2005年火薬学会秋季 大会	水素空気混合ガス の爆薬点火による 爆風	中山良男、若林邦彦、 金東俊、茂木俊夫、 松村 知治、堀口貞茲
2005年11月 17日	2005年火薬学会秋季 大会	光ファイバと赤外 線ディテクターを 用いた水素ガス爆 燃時の火炎伝播 速度計測	保前友高、黒田英司、 若林邦彦、松村知治、 中山良男
2005年11月 25日	第38回安全工学研究 発表会	水素ガス漏洩時に 形成される帯電雲 の電荷分布特性に 関する実験的考察	今村友彦、荷福正治、 茂木俊夫、西田啓之、 堀口貞茲

2005年12月5日	第43回燃焼シンポジウム	高圧水素噴流の燃焼特性に関する研究	茂木俊夫、西田啓之、椎名拓海、堀口貞茲
2005年12月5日	第43回燃焼シンポジウム	高圧タンクからの水素漏洩による着火のシミュレーション	林光一、劉云峰、坪井伸幸、相澤圭介、佐藤博之
2006年1月27日	第2回国際水素・燃料電池展、研究成果発表フォーラム	水素安全のための大規模燃焼・爆発実験	中山良男、堀口貞茲
2006年3月6日	第7回静電気学会春季講演会	ダストを含む水素ガス噴出時の静電気発生現象	今村友彦、荷福正治、茂木俊夫、西田啓之、堀口貞茲
2006年3月17日	平成17年度衝撃波シンポジウム	大規模な水素/空気混合気体の爆発により発生する爆風の可視化	若林邦彦、黒田英司、石川弘毅、保前友高、松村知治、中山良男、茂木俊夫、西田啓之、堀口貞茲

表 2.3(5)⑥-2 研究発表・講演等リスト (平成18年度)

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
(誌上発表)			
2007.1	AIAA Paper 2007-1426	Ignition of hydrogen suddenly leaked from a high pressure tank	相澤圭介、D. Pinto、劉云峰、佐藤博之、林光一
2007.2	Journal of Electrostatics、vol.65、p.87	Minimum ignition energy of hydrogen-air mixture: Effects of humidity and spark duration	小野 亮、荷福正治、藤原修三、堀口貞茲、小田哲治

2007. 2	Journal of Science and Technology of Energetic Materials, Vol.68, p.25.	Experimental study on blast wave generated by deflagration of hydrogen-air mixture up to 200 m ³	若林邦彦、中山良男、茂木俊夫、金東俊、安部尊之、石川弘毅、黒田英司、松村知治、堀口貞茲、大屋正明、藤原修三
2007. 3	Journal of Science and Technology of Energetic Materials	Blast waves generated by detonation of 31 m ³ hydrogen-air mixtures	若林邦彦、中山良男、茂木俊夫、金東俊、安部尊之、石川弘毅、黒田英司、松村知治、堀口貞茲、大屋正明、藤原修三
(口頭発表)			
2006.5.11.	火薬学会 2006 年度年会	トンネルを模擬したデトネーションチューブ内での水素の DDT について	吉野悟、相澤圭介、茂木俊夫、椎名拓海、和田有司、緒方雄二
2006.5.12	火薬学会 2006 年度年会	熱電対による水素火炎伝搬特性の測定	金東俊、椎名拓海、茂木俊夫、薄葉州、角舘洋三
2006.6.6.	ESA/IEEE-IAS/IEJ/SFE Conference on Electrostatics 2006	Minimum Ignition Energy of Hydrogen-Air Mixture: Influence of Humidity and Spark Duration	小野 亮、荷福正治、藤原修三、堀口貞茲、小田哲治
2006.7.7.	第 36 回安全工学シンポジウム	水素-空気希薄混合気流れの着火特性	茂木俊夫、西田啓之、椎名拓海、今村友彦、堀口貞茲
2006.7.7.	第 36 回安全工学シンポジウム	水素ガス噴出時の静電気発生特性に及ぼすダスト種類の影響	今村友彦、荷福正治、茂木俊夫、西田啓之、堀口貞茲
2006.8.7.	31st Symposium on Combustion	Ignition of High Pressure Hydrogen by a Rapid Discharge	茂木俊夫、金東俊、椎名拓海、堀口貞茲

2006.8.7.	31st Symposium on Combustion	The Effect of Water Vapor on the Blast Wave Pressures in the Explotions of Hydrogen-Air Mixtures	椎名拓海、金東俊、大屋正明、藤原修三
2006.8.7.	31st Symposium on Combustion	A Numerical Analysis of the Auto-ignition of a High Pressure Hydrogen Jet into Air	劉云峰、佐藤博之、坪井伸幸、林光一
2006.9.25.	第30回静電気学会全国大会	水素-空気混合気の放電着火：レーザー誘起蛍光法によるOH密度とガス温度計測	小野亮、小田哲治
2006.10.28.	日本機械学会流体工学部門講演会	空气中漏洩した高圧水素噴流の着火に関する実験研究	相澤圭介、劉云峰、佐藤博之、林光一
2006.11.30.	第39回安全工学研究発表会	高圧水素ガス噴出時の着火・燃焼危険性	茂木俊夫、金東俊、堀口貞茲、中山良男
2006.11.30.	第39回安全工学研究発表会	ダストを含む水素ガス噴出時の帯電要因の分離	今村友彦、小野亮、茂木俊夫、堀口貞茲
2006.12.1	第39回安全工学研究発表会	流通状態の管状構造物内における水素漏洩時のDDTの可能性について	相澤圭介、吉野 悟、茂木俊夫、椎名拓海、和田有司、緒方雄二
2006.12.8.	第44回燃焼シンポジウム	水素-空気混合気の放電着火：レーザー誘起蛍光法によるOH密度とガス温度計測	小野亮、小田哲治

2006.12.8.	第 44 回燃焼シンポジウム	高圧水素ガス放出時の自己着火および爆発現象	茂木俊夫、金東俊、椎名拓海、今村友彦、堀口貞茲
2006.12.8.	第 44 回燃焼シンポジウム	流通状態のデトネーションチューブ内での水素の DDT について	相澤圭介、吉野 悟、茂木俊夫、椎名拓海、和田有司、緒方雄二、林光一
2006.12.6-8	第 44 回燃焼シンポジウム	水素空気予混合爆発の爆風圧に対する水の添加効果の研究	椎名拓海、金東俊、大屋正明、藤原修三
2006.12.6-8	第 44 回燃焼シンポジウム	H ₂ /O ₂ 燃料のデトネーションの伝播限界の測定	深尾将士、高西研多、須佐秋生、越光男
2006.12.6-8	第 44 回燃焼シンポジウム	数値シミュレーションによる水素／酸素の爆轟限界の予測	富塚孝之、毛利昌康、吉田正典、越光男
2006.12.14.	平成 18 年度宇宙航行の力学シンポジウム	高圧水素漏洩の着火条件について	林光一、D.Pinto、相澤圭介、劉云峰、坪井伸幸、佐藤博之
2006.12.15-16	第 20 回数値流体力学シンポジウム	数値シミュレーションによる水素／酸素の爆轟限界の予測	富塚孝之・毛利昌康・吉田正典・越光男
2006.12.18.	第 20 回数値流体力学シンポジウム	空気中に噴出する高圧水素の自着火の数値シミュレーション	林光一、劉云峰、坪井伸幸、相澤圭介、佐藤博之

表 2.3(5)⑥-3 研究発表・講演等リスト（平成 19 年度）

(誌上発表)			
2007.6	安全工学, 46, pp.188-189	水素の安全基盤研究に関する講演会	茂木俊夫, 今村友彦
2007.7	Proceedings of the 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, pp.1-4	Study on Detonation Initiation in Hydrogen/Air Flow	相澤圭介, 吉野 悟, 茂木俊夫, 椎名拓海, 和田有司, 緒方雄二, 林 光一
2007.7	Proceedings of the 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems	The Effect of Water Vapor on the Blast Wave Pressures in the Explosions of Hydrogen-Air Mixtures	椎名拓海, 金 東俊, 大屋正明, 藤原修三
2007.7	Proceedings of the 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems	Auto-ignition of high pressure hydrogen release	D.Pinto, 相澤圭介, 劉 云峰, 佐藤博之, 林光一, 坪井伸幸
2007.10	Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety, pp.273-276	Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Hydrogen Jet Flame at Downstream Region - Part I Dependence of Flame Shape and Thermal Characteristics on the Spouting Conditions	今村友彦, 濱田祥大, 茂木俊夫, 和田有司, 堀口貞茲, 三宅淳巳, 小川輝繁
2007.10	Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety, pp.385-388	Experimental Investigation on Thermal Characteristics of	濱田祥大, 今村友彦, 茂木俊夫, 和田有司, 堀口貞茲, 三宅淳巳, 小川輝繁

		Hydrogen Jet Flame at Downstream Region - Part 2 Influence of Water Spray on the Reduction of Thermal Radiation -	
2008.3	Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 21, pp.199-204	Self-ignition and explosion during discharge of high-pressure hydrogen	茂木俊夫、金東俊、椎名拓海、堀口貞茲
(口頭発表)			
2007. 7. 6	安全工学シンポジウム 2007	水素ガス噴出時の帯電を支配する主要因の一考察	今村友彦, 茂木俊夫, 堀口貞茲, 小野 亮
2007. 7. 6	安全工学シンポジウム 2007	水噴霧による水素火炎抑制効果の検討	濱田祥大, 今村友彦, 堀口貞茲, 三宅淳巳, 小川輝繁
2007.7.24	The 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems	Study on Detonation Initiation in Hydrogen/Air Flow	相澤圭介, 吉野 悟, 茂木俊夫, 椎名拓海, 和田有司, 緒方雄二, 林 光一
2007.7.24	The 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems	The Effect of Water Vapor on the Blast Wave Pressures in the Explosions of Hydrogen-Air Mixtures	椎名拓海, 金 東俊, 大屋正明, 藤原修三
2007.7.24	The 21st International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems	Auto-ignition of high pressure hydrogen release	D.Pinto, 相澤圭介, 劉 云峰, 佐藤博之, 林光一, 坪井伸幸

2007.11.1	Asia Pacific Symposium on Safety 2007	Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Hydrogen Jet Flame at Downstream Region - Part I Dependence of Flame Shape and Thermal Characteristics on the Spouting Conditions	今村友彦, 濱田祥大, 茂木俊夫, 和田有司, 堀口貞茲, 三宅淳巳, 小川輝繁
2007.11.1	Asia Pacific Symposium on Safety 2007	Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Hydrogen Jet Flame at Downstream Region - Part II Influence of Water Spray on the Reduction of Thermal Radiation	濱田祥大, 今村友彦, 茂木俊夫, 和田有司, 堀口貞茲, 三宅淳巳, 小川輝繁
2007.12.5	第 45 回燃焼シンポジウム	水素・空気混合気において管内流れがデトネーションへ与える影響	相澤圭介, 茂木俊夫, 椎名拓海, 和田有司, 林 光一
2007.12.6	第 27 回水素エネルギー協会大会	水噴霧による水素火炎下流側の熱負荷低減効果	今村友彦, 濱田祥大, 茂木俊夫, 和田有司, 堀口貞茲, 三宅淳巳, 小川輝繁
2007.12.7	第 40 回安全工学研究発表会	水素火炎下流側の熱気流性状に対する水噴霧の影響	今村友彦, 濱田祥大, 茂木俊夫, 和田有司, 堀口貞茲, 三宅淳巳, 小川輝繁

2008.3.18	平成 19 年度衝撃波シンポジウム	流通状態の管内流れ場が水素の DDT に与える影響	茂木俊夫, 相澤圭介, 椎名拓海, 和田有司, 林 光一
-----------	-------------------	---------------------------	------------------------------

表 2.3(5)⑥-4 研究発表・講演等リスト (平成 20 年度)

発表年月日 (誌上発表)	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008.4	安全工学, 47, pp.77-83	ダストを含む水素ガス噴出時の噴出システムでの帯電特性の考察	今村友彦, 茂木俊夫, 堀口貞茲, 小野 亮
2008.5	水素エネルギーシステム, 33, pp.54-59	水素イオンセンサ	能美 隆, 前川麻弥, 茂木俊夫
2008 年 06 月	Proc. of 7th ISHPMIE, 322 頁 ~ 329 頁	Study on Consequence Analyses of Blast Wave Generated by Gaseous Deflagrations	土橋 律, 河村 智史, 中山 良男
2008.6	セイフティダイジェスト, 54, pp.2-8	水素の静電気着火危険性とその対策	今村友彦, 堀口貞茲
2008.6	高圧ガス, 45, pp.439-446	高圧水素ガス漏えい時の拡散特性と着火および火炎特性	茂木俊夫, 堀口貞茲
2008.9	Shock Waves, 18-4, pp.299-305	Study on Detonation Initiation in Hydrogen / Air Flow	相澤圭介, 吉野 悟, 茂木俊夫, 椎名拓海, 緒方雄二, 和田有司, 林 光一
2008.7	International Journal of Hydrogen Energy, 33-13, pp.3426-3435	Experimental Investigation on the Thermal Properties	今村友彦, 濱田祥大, 茂木俊夫, 和田有司, 堀口貞茲, 三宅淳巳,

		of Hydrogen Jet Flame and Hot Currents in the Downstream Region	小川輝繁
2009.2	International Journal of Hydrogen Energy, 34-6, pp.2815-2823	Control of the Ignition Possibility of Hydrogen by Electrostatic Discharge at a Ventilation Duct Outlet	今村友彦, 茂木俊夫, 和田有司
2008.7	Proceedings of 7th ISHPMIE, 3, pp.256-266	Reduction Effects of Water Spray to the Thermal Hazard of Hydrogen Jet Flame	今村友彦, 濱田祥大, 茂木俊夫, 和田有司, 堀口貞茲, 三宅淳巳, 小川輝繁
2009.1	Journal of Loss Prevention in The Process Industries, 22, pp.45-51	Experimental study on the hazards of high-pressure hydrogen jet diffusion flames	茂木俊夫, 堀口貞茲
2009.2	火災, 59, pp.42-47	水素の着火危険性と火炎性状	今村友彦
	(口頭発表)		
2008.4.28	International workshop on Detonation / Detonation Engine	Ignition and Flame Propagation during Discharge of High-pressure Hydrogen Gas	茂木俊夫
2008.5.22	平成 20 年度日本火災学会研究発表会	水素噴流火炎前方に形成される熱気流の温度性状	今村友彦, 濱田祥大, 堀口貞茲, 和田有司, 三宅淳巳, 小川輝繁

2008年07月 07日	Seventh International Symposium on Hazards, Prevention,and Mitigation of Industrial Explosions(ISHPMIE)	Study on Consequence Analyses of Blast Wave Generated by Gaseous Deflagrations	土橋 律、河村 智史、 中山 良男
2008.7.8	7th International Symposium on Hazards, Prevention,and Mitigation of Industrial Explosions	Reduction Effects of Water Spray to the Thermal Hazard of Hydrogen Jet Flame	今村友彦, 濱田祥大, 茂木俊夫, 和田有司, 堀口貞茲, 三宅淳巳, 小川輝繁
2008.7.10	7th International Symposium on Hazards, Prevention,and Mitigation of Industrial Explosions	Ignition and Flame Propagation during Discharge of High-pressure Hydrogen Gas	茂木俊夫, 椎名拓海, 今村友彦, 和田有司
2008.9.18	静電気学会大会	水素放出口形状が 静電気着火危険性 の低減に及ぼす効 果	今村友彦, 茂木俊夫, 和田有司, 緒方雄二
2008.11.27	第41回安全工学研究発 表会	水幕による水素火 炎熱影響の低減に 関する水噴霧条件 の検討	濱田祥大, 今村友彦, 和田有司, 三宅淳巳, 小川輝繁

表 2.3(5)⑥-5 研究発表・講演等リスト（平成 21 年度）

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
(誌上発表)			
2009.7	International Journal of Hydrogen Energy, 34-14, pp.5810-5816	Self-Ignition and Flame Propagation of High-Pressure Hydrogen Jet During Sudden Discharge from a Pipe	茂木俊夫, 和田有司, 緒方雄二, 林 光一

表 2.3(5)⑥-6 研究発表・講演等リスト（平成 22 年度）

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
(口頭発表)			
2010年8月 3日	第33回国際燃焼シンポジウム	Consequence analysis of blast wave from accidental gas explosions	土橋 律、河村 智史、中山 良男

IV. 実用化の見通しについて

1. 「燃料電池自動車に係る規制再点検及び標準化のための研究開発」の実用化見直し

本事業では、自動車用圧縮水素容器および附属品の基準合理化項目として、容器については高圧化、最小破裂圧力および圧力サイクル数の見直しおよび使用温度範囲の拡大などに資するデータ取得を、また、附属品に関しては、高圧化対応、使用温度範囲拡大に資するデータ取得を、業界団体がニーズを明確にする 2007 年 3 月以前から自主的に計画立案し実施してきた。

容器および附属品の合理化に関しては、本事業の高圧容器技術 WG にて、技術基準適正化シナリオ策定の必要性が指摘され、業界団体である燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)ならびに社団法人日本自動車工業会に対し、技術基準適正化のシナリオ作成を推進させてきた。その結果として、2007 年 3 月に自動車業界内で 2009 年度の技術基準発行を目標とする技術基準適正化シナリオが合意され、これまで本事業で自主的に計画立案しながら進めてきた技術基準改訂に向けたデータ取得項目がより明確になったことから、基準適正化シナリオに沿った自動車用圧縮水素容器の安全性評価試験データを取得し、Step 1 策定に貢献した。

道路運送車両法に関連して、UN-ECE/WP29/AC3 gtr（世界統一基準）化活動の第 1 フェーズが、日本の道路運送車両法の技術基準ベースで進められることが合意された。また、2010 年以降の第二フェーズでは、さらに国際基準調和と燃料電池自動車に特化した基準の見直しが計画されている。本事業では、gtr 策定・見直しに向けた車両および水素安全に関するデータ取得を推進しており、継続して gtr 策定および見直しに資するデータ取得を進める。

燃料電池自動車用水素品質規格に関しては、FCV 用を新たに Part2 (ISO/TS14687-2) TS として策定、2008 年に発行され、導入期の FCV のための仕様書として実用化された。また、2012 年までの IS 化に向けた各国研究協力を進め、DIS 原案が策定された。今後の燃料中の不純物影響評価に資する。

燃料電池自動車の燃費試験法に関しては、本研究開発の成果である圧力法、質量法、流量法、電流法が ISO/DIS 23828-1 に採用された。2008 年度に IS が発行され、一般の利用に広く供される見込みである。

今後も、水素・燃料電池自動車の普及促進のために、各種基準・標準化活動を継続して推進する必要がある。

2. 「定置用燃料電池システム等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発」の実用化見通し

定置用燃料電池システムに係る規制再点検及び標準化のための研究開発については、電気出力10kW未満の小形燃料電池システム（PEFCとSOFCシステム）の一般家庭への普及に必要とされている13項目の規制再点検に向けた安全性データ取得は終了し、データを公的委員会に提供した。その結果、3項目が改正され、残り10項目については、公的委員会での審議が終了し規制緩和の見通しを得た。標準化に資する安全性試験法案と性能試験法案の策定は順調に推移しており、前者の安全性試験法案は完成し、性能試験法案の策定は平成19年度より実施する計画である。これらは、日本の現状製品を評価する上で開発されたもので、今後日本の不利とならないよう国際標準策定の場で活用される。更に、系統連携時の単独運転防止方法のひとつである「スリップモード周波数シフト方式」の「系統連携関連規程」等への反映の道筋ができつつある。

本事業の成果である安全性評価データ、試験方法、性能試験方法及び単独運転防止にかかる各種試験は平成19年末に2000台を超える10kW未満の小形燃料電池システム（PEFCとSOFCシステム）の国内でのさらなる普及促進効果および国際競争力確保に向けた活動に使用されつつある。

マイクロ燃料電池システム等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発については、発IEC TC105 WG8（マイクロ燃料電池 安全）では、平成22年3月に国際規格（IS）第1版が発行された。これを基に欧州規格が発行された。しかし現状では、消費者の口・鼻の近傍で使用されるローカルイフェクト（LE）機器に応用される燃料電池からの排出物濃度に対する試験方法に関しては、試験条件の細部において必ずしも明確な記述がなされていない点が残されている。例えば、現状のLE試験方法に関し、ギ酸のような高吸着性ガスでは今回の研究により活性炭捕集管法に比べてインピンジャー捕集法の方がより好適であることが示された。このような基盤データの収集により、LEのある場合の望ましいガス分析技法が明確にされ、今後見込まれるIEC62282-6-100改定作業に向けた指針が得られた。また、試験チャンバー内の気流（風速）の値が試験結果にどのように影響するか等、実際に型式試験を行う上で残されていると思われる課題についての検討も必要と考えられる。

IEC TC105 WG10（マイクロ燃料電池 互換性）では、平成21年6月にIS第1版が発行された。一部、未検証部分を残すものの、日本の意見が取り入れられた燃料カートリッジ互換性の国際規格第1版が完成した。これを基に欧州規格が発行された。また、日本電機工業会にて、JIS化作業が開始された。燃料基準に関する未検証部分、メタノール燃料基準案における長期間にわたる試験方法等については、妥当性や再現性等がある方法であるかなどを検証する必要があると考えられる。さらに実用性の有る試験方法の確立を目指して試験期間等についても性能低下機構を含めて検討を加えられれば望ましいと考えられる。

本事業の成果の実用化見通しとしては、現在行われているマイクロ燃料電池の国際規格の改定作業（第2版の作成）への反映が期待される。それらを通じてマイクロ燃料電池の市場導入を促進し、早期の燃料電池市場の創生に寄与し、さらに、認証にも影響を及ぼすと考えられる国際規格が我が国主導で作成でき、国際競争力強化につながると期待される。

3. 「水素インフラに係る規制再点検及び標準化のための研究開発」の実用化見通し

(1) 水素インフラに関する安全技術研究

① 成果の実用化見通し

- a. 70MPa 充填対応水素スタンドについては、収集したデータを基に安全性検証検討を実施し、水素スタンドの安全性を確保するために必要な安全対策を取りまとめた。高圧ガス保安法関連の省令及び例示基準見直し案を作成し、規制監督官庁に提出し受理された。今後、規制監督官庁による審査を経て、早期の規制見直しが期待される。
- b. 液体水素スタンドの安全性検証が終了し法令案が完成していることから、業界団体（FCCJ等）と連携し業界ニーズを見極めた上で、官庁折衝を行う。

② 波及効果

- a. 安全性を確保しつつ、水素スタンド設置者、機器開発者の意見を反映しており、当然のことながら水素スタンド導入・普及への効果は大きい。
- b. 本成果に基づき、省令・例示基準作りが進展することから、規制当局側の動きとして、消防法、建築基準法にも反映されると考えられる。
- c. 本事業を実施することにより、水素インフラに関連する研究開発が進展しており、実験検証実績を重ねることにより、関係者の人材育成も促進している。また培った実験技術や安全手法は、たとえば、本事業内の「水素基礎物性の研究」にて推進中の「水素の有効利用ガイドブック」反映された。
- d. 燃料電池自動車と水素スタンドの普及を一層促進させるために、更なる規制見直し検討が関連業界で行なわれているが、本研究結果は今後の規制見直し検討の基礎データとして大いにその活用が見込まれる。

(2) 水素用材料基礎物性の研究

① 鉄鋼材料を中心とした金属材料に関して

- a. 本研究開発の成果は、(社)日本自動車工業会、(財)日本自動車研究所、(財)石油産業活性化センター、高圧ガス保安協会等にて検討されている 70MPa 級機器の基準・標準化に向けた一連の活動に対し、技術的な裏付けデータとして活用、反映される。(車載容器に関しては KHK 基準制定済み H22.7)
- b. さらに、基礎解析も含めた一連の研究開発を継続することにより、関係産業界による水素社会構築に向けた基準・標準化の進展が図られるものと考えられる。
- c. 加えて本研究開発で得られた基礎知見を活用し、近い将来、耐水素脆性に優れ、特性面およびコスト・製造性などの工業的観点から利点の多い新しい水素用材料が実用化される見通しである。

② 非金属複合材料に関して]

本研究開発の成果は、容器設計の安全率・寿命決定に必要な根拠データとして、車両搭載用容器や FRP 製水素貯槽の設計に反映される見込みである。

以上、本研究開発成果は、2015 年に普及開始期を迎えるとされる水素燃料電池自動車の実用化、およびその後の本格普及に直接的に寄与することができる。

(3) 水素用アルミ材料の基礎研究

- a. ライナー用アルミ材として有望な 6061 系合金の水素脆性感受性データを取得し、高圧ガス保安協会による 70MPa 用車載用高圧水素用容器の基準・標準の策定に活用された。
- b. 加えて(社)自動車工業会及び容器メーカーから要請のあった 7175, 7N01、7003、7050 及び高強度 6000 系合金 (6061HS、6066、6069) について水素脆性感受性データを取得しており、燃料電池車普及に向けて、軽量・低コストの高圧水素容器および附属品への採用に向けた基準・標準化に資するデータとして今後活用される見込みである。
- c. また高圧水素環境の代替評価法 (たとえば高圧水素環境下と同等の過酷さとなる代替評価条件 (静的負荷条件) など) の可能性を見出した。これは水素用材料評価技術を普及させる重要技術と期待される。

(4) 水素基礎物性の研究

- a. 本事業において取得した「水素ガスの拡散・爆発挙動、液体水素の蒸発・拡散挙動のデータ」や開発したシミュレーション技術等の基盤技術は、規制見直しのためのデータとして、広く用いられている。
- b. また、これらのデータと安全基礎データの調査において収集した「水素安全に関するデータおよび水素インフラ関連技術の現状」を平成 19 年度作成の「水素の有効利用ガイドブック」として取りまとめ、関係者に公開・配布している。これは水素取扱者の安全確保および水素の有効利用に関する知見の集大成として水素関連技術開発の現場において活用されている。

(5) 水素安全利用技術の基礎研究

①成果の実用化可能性

水素噴出時の流動混合気の着火性についての検討の結果は、水素と空気の混合気の流速が大きくなると燃焼下限界濃度が高濃度になり、一般に燃焼下限界濃度として用いられる 4%では着火せず、着火可能性範囲はより高い濃度で拡散する範囲、すなわち、より狭いエリアに限定される。このことは、燃焼下限界濃度の 4 分の 1 の濃度を基準に定められている火気離隔距離の短縮化、すなわち、水素ステーションのコンパクト化に役立つと期待されている。

また、水素放出配管などから水素を放出する際の静電気着火や自然着火の条件とメカニズムを明らかにすることにより、着火可能性の小さい、より安全な水素放出配管の放出口の形状の設計が可能となり、このような技術は水素ステーションの社会的受容性の向上のために、すぐにでも実用化される見通しである。

水素噴出時の吹き消え条件を明確にし、水噴霧による水素火炎の熱影響の低減化のための防火設備を提案することは、水素ステーションのリスク評価の見直しや住民とのリスクコ

コミュニケーションの際の影響度緩和措置として有効であり、水素ステーションの社会的受容性の向上のために、役立つものである。

水素が燃焼から爆ごうに転移する条件を明らかにし、実規模トンネルで水素タンクローリが事故に巻き込まれた際の危険性を予測することは、被害を軽減するための安全対策の立案に役立ち、水素の輸送インフラの構築の際にやはり社会的受容性を向上するために役立つものである。

また、爆風インパルスを指標として用いた被害予測に関しては、国際エネルギー機関(IEA)の水素安全専門家会議において、国際標準化に向けての議論が行われているところである。

一般向けの広報に関しては、平成 18 年度末に「水素の安全基盤研究に関する講演会」を開催した。自動車関連業界、ガス関連業界、地方自治体などから 180 名の参加者があった。安全工学会、火薬学会、日本燃焼学会、日本エネルギー学会、を通じて案内を出したため、参加者以外に資料集の入手に関する問い合わせも多く、本研究について広く社会に知られるきっかけとなった。

事前評価書

		作成日	平成16年10月20日
1. 事業名称 (コード番号)	水素社会構築共通基盤整備事業		
2. 推進部署名	燃料電池・水素技術開発部		
3. 事業概要	<p>(1) 概要：固体高分子形燃料電池システム等の普及・促進のためには、実用化に必要な要素技術開発を行うとともに製品の普及を側面から支援する共通的なソフト基盤整備(評価試験・評価手法の確立、国内外における標準化、技術基準設定等)が必要である。</p> <p>本事業においては、今後、実用化を目指す燃料電池自動車、定置用燃料電池、水素インフラ等に必要な下記のソフト基盤整備事業を実施する。</p> <p>1. 燃料電池自動車基盤整備</p> <p>燃料電池自動車の実用化のためには、様々な角度からの安全性・信頼性の確保が重要である。このため、安全・信頼性に係わるデータ取得や、評価手法の提案を行うとともに、当該データを法規制の技術基準案や国際基準案に反映し、安全性に係わる国際的ルールを確立すること等により、燃料電池自動車の安全性や信頼性を確保する。</p> <p>具体的には、70 MPa レベルの高圧水素利用に係わるデータ取得を行い、燃料電池自動車の燃料となる水素の貯蔵技術の安全性を確認して、必要な技術基準に反映したり、国際標準化する等、燃料電池自動車の安全に係る法規制の技術基準案及び国際基準案への反映を行う。</p> <p>2. 定置用燃料電池システム基盤整備</p> <p>定置用燃料電池の本格的普及のためには、一般利用者を念頭に置いた安全性、信頼性、環境性、経済性のデータを取得し、及び、試験評価手法を確立することにより、適切な法規制の技術基準や規格の制定を促し、円滑な定置用燃料電池の市場導入環境を整備することが必要である。具体的には、燃料利用率、耐久性等の定義・指標の標準化やシステムの簡素化、過剰な安全装置の省略等低コスト化のための基準・標準の整備のために必要な試験データ取得、基準案の作成等を行う。</p> <p>3. 水素インフラ等に係わる基盤整備</p> <p>燃料電池自動車の導入・普及を推進するためには、水素ステーション等の水素供給・輸送インフラ普及のための各種基準を整備する必要がある。そのために、70 MPa レベルの高圧水素を利用する燃料電池自動車に対応できる水素インフラの安全性の評</p>		

	<p>価、拡散・漏洩・燃焼などに関する基礎物性データの取得及び水素雰囲気下で使用可能な材料の評価等を行う。</p> <p>(2) 事業規模：平成17年度事業費 35.8億円</p> <p>(3) 事業期間：平成17年度～21年度(5年間)</p>
<p>4. 評価の検討状況</p>	
<p>(1) 事業の位置付け・必要性</p> <p>新エネルギー技術の実用化によって、我が国のエネルギー供給の安定化・効率化、地球温暖化問題(CO₂)・地域環境問題(NO_x、PM等)の解決、新規産業・雇用の創出等を図ることが必要。</p> <p>燃料電池は、エネルギー自給率の向上や地球温暖化対策に資するほか、分散型エネルギーシステムとしても期待できる次世代エネルギーであり、経済産業省の「新産業創造戦略」においても重点7分野の1つに挙げられているが、現時点では、耐久性、信頼性、高コスト等に課題を抱えており、その技術開発には産学官等関係者が協力して戦略的に取り組むことが必要である。一方、確実な実用化のためには、技術開発とともに、法規制や規格化等の導入環境整備が重要であり、燃料電池市場形成に向けて早期の基準・標準等の基盤的な整備を行う必要があることから、本事業は極めて重要な事業として位置付けられる。</p> <p>なお、本技術開発は、新エネルギー技術開発プログラムに則って推進する。</p>	
<p>(2) 研究開発目標の妥当性</p> <p>本事業の研究開発目標は、現状において推進すべき基準・国際標準、規制の再点検の項目に対応したデータ取得を2007年度までを目途に行い、そのデータを基に2009年までに国際標準の提案、規制の例示基準案の作成等を行うことであり、2007年度末時点での目標は以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 基準、(国際)標準：国際標準提案のためのデータ取得。 (例：燃料電池車の燃費や走行性能、燃料電池の特性試験方法、水素の純度) ・ 規制の再点検：電気事業法、高圧ガス保安法関連のデータ取得。 <p>本事業は、これまでに行ってきた規制再点検や標準化について、さらに推進するだけでなく、現状における国内の規制再点検の作業見通しや国際的な標準化活動の動向を踏まえて、現状の35 MPa レベルから70 MPa レベルの高圧水素の利用を検討するなどしており、目標として妥当である。</p>	

(3) 研究開発マネジメント

本整備事業で行う基準・標準の整備、法規制の見直しは、1社、1業界によってなし得るものではなく、関係業界の参加を得て、官民共同で推進していく必要があることから、燃料電池自動車、定置用燃料電池、水素供給インフラ等の各分野の関係業界にて推進する。

また、担当部である燃料電池水素技術開発部が、燃料電池の普及動向及び技術開発の進捗を見つつ、国内外の産官学の知見を活用し、積極的に関与して推進する。プロジェクト開始後に外部有識者を含めて評価を実施し、その結果を反映して全体の進め方を見直す予定。

(4) 研究開発成果

固体高分子形燃料電池の早期導入・普及のためには、燃料電池自動車、定置用燃料電池システム、水素供給等のインフラを統一的・体系的に基準化・標準化し、ソフト基盤を整備することが必要である。これらの実用化環境整備が確実に実施されるとともに、飛躍的な技術の進展によって燃料電池の実用化技術及び水素供給インフラが確立し、水素エネルギー社会が実現した場合には、社会におけるエネルギー利用の大転換をもたらす、その波及効果は図りしれないほど大きい。

また、70 MPa レベルの高圧水素利用により燃料電池車の航続距離が2倍になる等、技術の進展がもたらす効果に着目して、常に先端分野で、積極的な国際標準化活動を展開することにより、国際的なリーダーシップを発揮し、国際マーケットで有利な立場を確保できると考えられる。

ちなみに、燃料電池自動車については、2010年には5万台、2020年には500万台、2030年には1,500万台を、定置用燃料電池については、2010年には220万kW、2020年には1,000万kW、2030年には1,250万kWの導入が政府の目標であり、経済省の「新産業創造戦略」によれば、燃料電池の市場規模は2020年で8兆円と試算されている。

(5) 実用化・事業化の見通し

本整備事業は、固体高分子形燃料電池の早期導入のための基盤整備を行うものであり、燃料電池の実用化に直結するものではないが、着実に実施することによって、固体高分子形燃料電池の円滑な実用化に大きく資するものである。

(6) その他特記事項

特になし。

5. 総合評価

燃料電池の導入・普及には、燃料電池の技術の確立、評価手法等の基準・標準の整備、実用化に向けた課題調査・広報活動、水素・燃料電池に関する法整備、導入支援策としての補助金・税制、財政投融資等様々な政策手段があるが、本事業の実施による法規制や規格化等の燃料電池導入環境整備は、燃料電池市場形成に向けて極めて重要な事業として位置付けられ、NEDOとして実施することが妥当であると考えられる。

NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010

平成 22 年 6 月

NEDO燃料電池・水素技術開発部

目次

・燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010 について	3
・燃料電池・水素技術開発ロードマップ 改訂ポイント	4
・はじめに	5
・燃料電池分野	7
・水素分野	26

燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010 について

我が国におけるエネルギー供給の安定化・効率化、地球温暖化問題、地域環境問題等の解決のためには、国全体として省エネルギーを推進するとともに、新エネルギー技術の開発、コスト削減及び利便性や性能の向上に積極的に取り組むことが必要です。

燃料電池技術及び水素技術(水素を製造・輸送・貯蔵・供給する技術)は省エネルギー、環境負荷低減、エネルギー多様化、新規産業創出等に資する水素エネルギー利用社会を構築するための中核となる技術であり、地球温暖化問題の深刻化等によりその重要性が増しております。2008年3月5日に策定された「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」において当該技術が重要技術に選定される等、政策的な位置付けも高いです。

NEDOは研究開発等の事業を産学官連携の体制の下で推進しておりますが、常にステークホルダー(利害関係者)間で「技術開発シナリオ」を共有することが、事業を効率的、効果的に推進する上で不可欠だと考えております。

上記を踏まえ、我が国燃料電池・水素技術開発において取り組むべき技術課題を明確にし、技術開発の方向性を示すとともに、本分野における産業界・学术界の効率的かつ的確な研究開発への取り組みを先導するために、燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010 を策定いたしました。

なお、NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップは 2005 年に第一版を作成し、今回は 3 回目の改訂となります。

燃料電池・水素技術開発ロードマップ 改訂ポイント

【ロードマップ全体】

- 前回のロードマップ策定時(2008年6月)以降に達成された技術開発成果、及び産業界から公表された事業化シナリオ等をロードマップに反映
- 燃料電池分野／水素分野ともに、技術のコスト構造分析及びコスト予測を実施し、(発電効率や耐久性等の向上に加え、)コストダウンを図るために解決すべき技術課題を洗い出し、ロードマップに反映
- 時間軸の変更(2010年(現在)、2015年、2020年、2030年に設定)、及び概要版と詳細版の時間軸を整合
- 標準化、規制見直しに係る内容を追記
- ロードマップにおける目標設定の考え方、目標達成に向けた各技術開発の関連等を説明した「解説書」を作成

【燃料電池分野】

- 前回のロードマップ詳細版において「マイクロ・ポータブル・小型移動体用FC」に係る技術課題等を個別に記載していたが、全体に統合

【水素分野】

- 「オンサイトステーション」と「オフサイトステーション」の区分けをなくし、「水素の製造・輸送・供給」に係るロードマップを1枚絵にまとめ、両方式の共通項目と個別項目を明確化
- 燃料電池自動車(FCV)の普及期における水素供給コスト(以前は「水素価格」と表記)は、FCVのハイブリッド自動車に対する燃費優位性、原油の将来の価格上昇を考慮した上で、FCVとハイブリッド自動車の走行燃費が等価になるよう設定
- 水素供給コストとステーション建設・運用に係るコストの相関を明確化し、それに基づきあるべきステーションコスト等を算出



図3 Cool Earth—エネルギー革新技術計画

次世代自動車に係るFCVの位置付け

経済産業省が2010年4月に発表した「次世代自動車戦略2010」では、新車販売に占める次世代自動車の割合を2020年で最大50%、2030年で最大70%と目標を定め、中長期的には自動車の棲み分けが進展することも考えられるとしている。FCVに関しては、水素由来のメリット（燃料多様化に寄与、EVと比較しての航続距離・充填時間の優位性、総合効率の高さ）とともに、インフラ整備のコストや各種規制等に係る課題も指摘している。

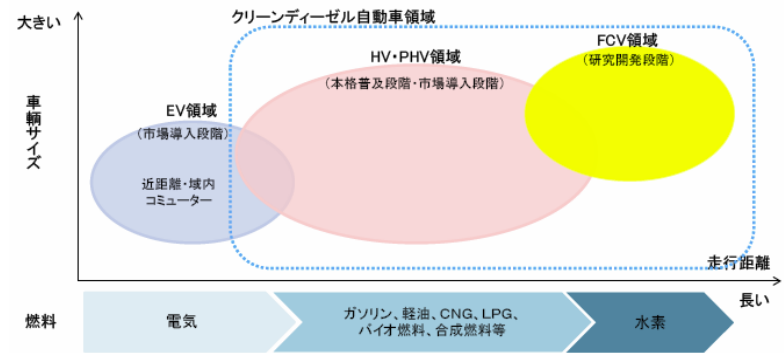


図4 車両毎の棲み分け観念図(次世代自動車戦略2010より)

固体高分子形燃料電池 (PEFC) と固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の特徴

燃料電池は電解質の種類によっていくつかの種類が存在するが、NEDOでは現在、その中で特に固体高分子形燃料電池 (PEFC) と固体酸化物形燃料電池 (SOFC) に注目して研究開発を進めている。それぞれの特徴を表1に示す。

PEFCは固体高分子を電解質に用いるもので、70～80℃前後の低温で作動し、起動性等の操作性と小型軽量であることが主な特徴である。このことからFCVと定置用 (家庭用) コージェネシステムに用いられ、前者はガソリン車と遜色ない商品性を実証し、後者は総合効率 80% を実証してエネファームとして商品化されている。エネファームの本格普及、FCVの実用化に向けてはコストダウンが最大の課題である。

一方、SOFCは固体酸化物 (セラミックス) を電解質に用い、およそ700～1000℃で作動させるもので40%以上の高い発電効率が得られることが最大の特徴である。このことから家庭用から大型事業用まで高効率の発電システムとして期待されている。SOFCは現在、信頼性・耐久性を含めた性能の開発・実証段階であるが、一部、家庭用 (小容量) システムは発電効率 45% (LHV) でPEFCに迫る4万時間の耐久性の見通しを得るなど発展はめざましく、これによって中大容量が進展することも期待されている。

表1 PEFC と SOFC の主な特徴

	PEFC	SOFC
電解質 動作温度	固体高分子 約 70～80℃	固体酸化物 (セラミックス) 約 700～1000℃
特徴	起動性、操作性、小型軽量	高発電効率
主な用途	燃料電池自動車 (FCV) 家庭用コージェネシステム (定置用システム)	家庭用 (小容量) 発電システム (1kW) 中容量発電システム (数 10kW ～数 MW) 大容量コンバインド発電システム (数 10MW 以上)
開発進展 レベル	FCV: 商品性能を実証完了 定置用: エネファームとして 商品化	開発・実証段階 (耐久性、信頼 性実証中)
主な性能の ポテンシャル	都市ガス改質型: 発電効率 33%前後 (コージェネ時の総 合効率 80%前後) 直接水素型: 発電効率 50%以 上 燃料電池自動車: 車両効率 60%	発電効率 40～50% コンバインドシステム: 60% 低い材料コスト (貴金属使用なし) 燃料多様性 (CO、CH ₄ の直接 利用)
当面の課題	普及に向けたコストダウン	耐久性、信頼性の実証、効率 向上、製造プロセスの確立

PEFC のこれまでの研究開発成果と普及のシナリオ

- 定置用 PEFC システム

定置用PEFCシステムについては、2005年度～2008年度の大規模実証事業において累計3307台（都市ガス1379台、LPG1614台、灯油314台）の家庭用燃料電池を設置して実証試験を行い、省エネ性、信頼性、耐久性などを実証した。これより、トップランナー機種で年間平均での発電効率33.4%HHV、熱回収効率46.1%HHV、一次エネルギー削減量11,580MJ/年、CO₂削減量1160kg-CO₂/年という良好なデータが得られている。また、耐久性についても、各種材料の改善、作動条件の最適化などにより、2008年度に導入された機種では商品化に向けた一つのマイルストーンである4万時間の寿命を達成した。さらに、一部機種に関しては、4000回の窒素レス起動停止への対応が可能となっている。信頼性（故障発生率）についても、大規模実証事業を活用しつつ向上が図られ、着実に改善された。

こうした成果を受け、家庭用燃料電池の業界統一ネーミングが「エネファーム」と定められ、2009年度より経済産業省の導入補助金の下、世界初の一般販売がスタートし、2009年度は5258台の補助金申請を受付けた。今後の導入・普及シナリオとしては、2020年度に累積導入250万台、CO₂削減年間300万トンを目指している。

エネファームのシステム価格は2009年の初期導入時点で200万円（システムメーカー出荷価格）を超えるが、本格的な製造設備を導入した量産効果と技術革新によって普及期の2015年頃には50～70万円（10万台/年/社 生産ケース）を目指している。なお、普及拡大期である2020年頃には40万円台（20万台/年/社 生産ケース）、本格普及期である2030年頃には40万円以下（100万台/年/社 生産ケース）

を目標とした研究開発が進められている。

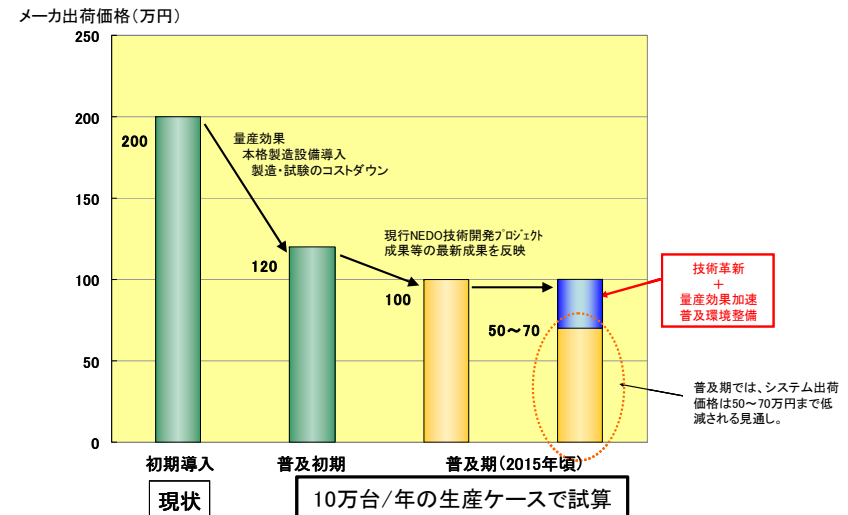


図5 定置用PEFCシステムのコスト見通し

- 燃料電池自動車(FCV)

燃料電池自動車開発の動きは90年第後半に活発化し、国内自動車メーカーでは2007年後半から2008年にかけて、新型モデルの発表や、新型セルスタックの発表が行われた。トヨタは2008年6月にFCHV-advを発表した。FCHV-advはエネルギー効率を向上した新型のPEFCシステムと70MPa水素貯蔵システムを搭載し、1充填の航続距離で830km（10・15モード）を達成している。また、本車両は-30℃の低温環境でも始動・走行が可能であり、電極触媒の劣化抑制などを織り込み、耐久性も向上している（50万km相当の走行でも出力低下は30%にとどまる）。ホンダは2007年11月のロサンゼルスモーターショーで

FCXクラリティを発表した。FCXクラリティはFCV専用ボディの車両であり、搭載するPEFCは小型化がはかられている。水素貯蔵システムは35 MPaの大型の水素貯蔵タンク1個を搭載し、その航続距離は620 km（10・15モード）を得ている。FCXクラリティは2008年8月から米国で、11月から日本でリース販売が開始され、日米を合わせた販売計画台数は、3年間で約200台である。

以上の成果も踏まえ、2010年3月、FCVの普及のシナリオが主要な自動車メーカー、水素インフラメーカー等が参加するFCCJから公表されている（図6）。2015年に一般ユーザーへのFCVの普及と商用水素ステーションの設置を開始し、2025年よりFCVと自立的拡大を目指している。目標規模として、2025年頃のFCVの累積普及台数は200万台程度、水素ステーションは1000箇所程度となっている。

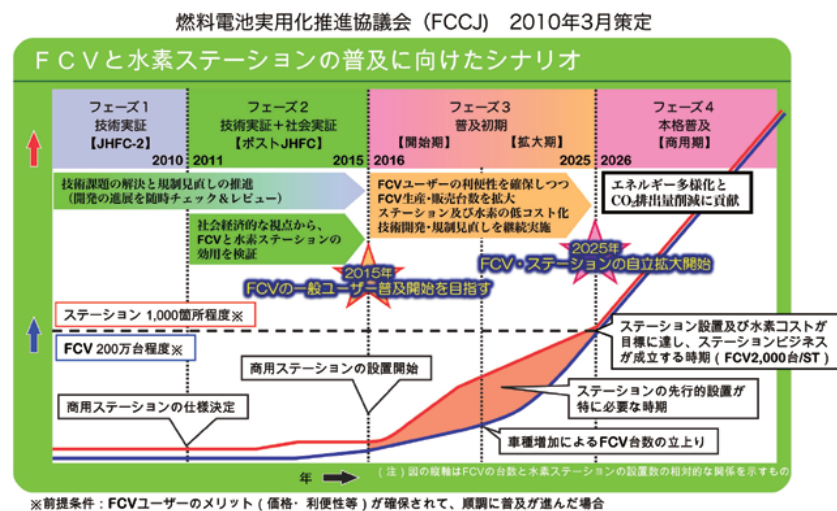


図6 FCCJの改訂シナリオ

なお、FCVについても普及に向けての最大の課題はコストダウンである。システムメーカーからのヒアリングによると、メーカー毎にシステム構成が違う等により幅を持った回答であるが、概ね現状の燃料電池システムの製造コストは数千万円である。2015年頃の初期導入のコストとして現状技術ベースで量産化技術の導入（量産50万台）を仮定すると100万円程度、本格商用化に向けた2025年頃には同一の量産規模で50万円以下を目標としている（図7）。

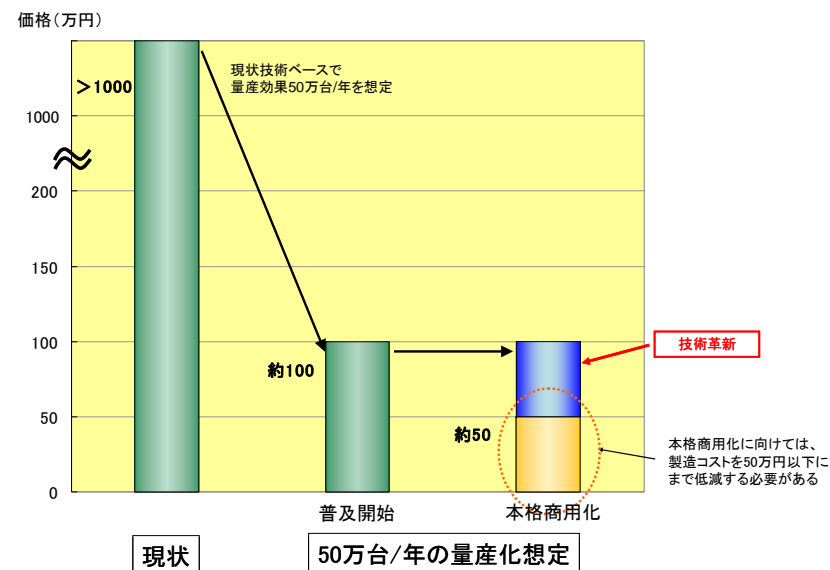


図7 燃料電池自動車(FCV)のコスト見通し

SOFC のこれまでの研究開発成果と普及のシナリオ

SOFCの研究開発の歴史は古く、1960年代にWestinghouse Electric Corporation（現Siemens Westinghouse Power Corporation：SWPC）が1000℃の作動温度で1mA/cm²の発電を行うことに成功し、1970年代の石油危機の後には、すべての燃料電池の中で潜在的に最も安いコストで発電できる燃料電池として、米国DOEの2000年までの長期開発計画が立案された。また、2001年から米国のSiemens、GE、Delphiなどのメーカーと国立研究機関によって、SECA(Solid State Energy Conversion Alliance)プロジェクトが立ち上った。

欧州においてもRolls Royce、Hexis、BMWなど民間による開発も進展し、1kW～数kW級の小容量（家庭用コージェネ）システムから数百kW中容量システム、さらにガスタービン、蒸気タービンなどと組み合わせて発電効率60%～70%の超高効率発電を目指す数百kW～数MW級中容量ハイブリッドシステム、数10MW級事業用大容量コンバインドシステムまで幅広い範囲で研究開発が行われている。

日本でも1981年から当時の工業技術院によるムーンライト計画が始まり、これまでに継続的かつ精力的な研究開発が行われてきている。2008年度からは早期の市場導入に向けて、小容量システムを対象とした実証研究とともに、中・大容量システムを含めて、耐久性・信頼性向上のための基礎研究、原料・部材・セルスタック・モジュールの低コスト化技術の開発、運用性向上のための起動停止技術、超高効率運転のための高圧運転技術などが、NEDOプロジェクトで進められている。

小容量システムの実証研究として2009年までに132台が一般家庭

を想定して設置され、都市ガスを用いた700Wシステムのトップランナーでは、高効率化対応により45%(LHV送電端)の発電効率を達成するとともに、負荷変動の大きい実住宅において、発電効率42%、熱回収効率40%、電力カバー率75%の高い運用結果が報告されている。耐久性・信頼性については実証段階ではあるが、現在、最長運転時間は2万時間(連続運転)となり、4万時間が見通せる状況になってきている。また、燃料多様化への対応として、LPGと灯油による運転も開始し、LPGでは6000時間、灯油では5000時間の運転実績を蓄積してきている。

これらの進展によって小容量定置用システムについては、速やかな商用化に向けての取り組みが始まっている。普及のための課題は耐久性・信頼性の実証、および量産化に向けた製造プロセスの確立である。2015年前後の初期導入期において50～100万円/kWへのコストダウン（生産ケースを年間数十MW規模と仮定）を目指し、将来的には9万時間（連続運転）の耐久性の見通しと40万円/kWのコストダウンによる本格普及を目指した研究開発が進められている。

一方、分散型電源、発電事業用の中・大容量システムについても、200kW級の中容量コンバインドシステムにおいて高圧運転技術の開発等により発電効率52%(LHV送電端)、3000時間の運転時間を達成するなど、着実に開発が進展している。小容量システムと同様に、耐久性・信頼性の実証、セルスタック・モジュールの発電性能向上、部材の低コスト化等が今後の課題であるが、耐久性・信頼性の実証は小容量システム以上の高いレベルが要求される。加えて複合発電システム制御技術等、取り組むべき課題は多いが、2015年以降の初期導入を目指して研究開発が進められている。さらに、大容量発電

システムに向けては、高効率天然ガス火力発電所にSOFCを設置する「部分トッピングシステム」の検証、将来的には天然ガス焼きSOFC-コンバインドサイクル発電の検証が検討されており、さらに、燃料多様化への対応として、将来のIGFC（石炭ガス化燃料電池複合発電）への適用を睨んだ研究開発についても検討が進められている。

＜PEFC の実用化・普及に向けての課題＞

材料コスト低減とシステム簡素化によるコストダウンの重要性

PEFCの実用化・普及に向けた課題を図8に示す。定置用PEFC及び燃料電池自動車は反応・劣化現象の理解の進展によって、低加湿、高温、高電流密度、高電位、高負荷変動、不純物影響など、劣化しやすい環境条件の抽出が進み、劣化対策を含めてシステムを最適化することによって、先に述べた実用性能を実証するに至っている。

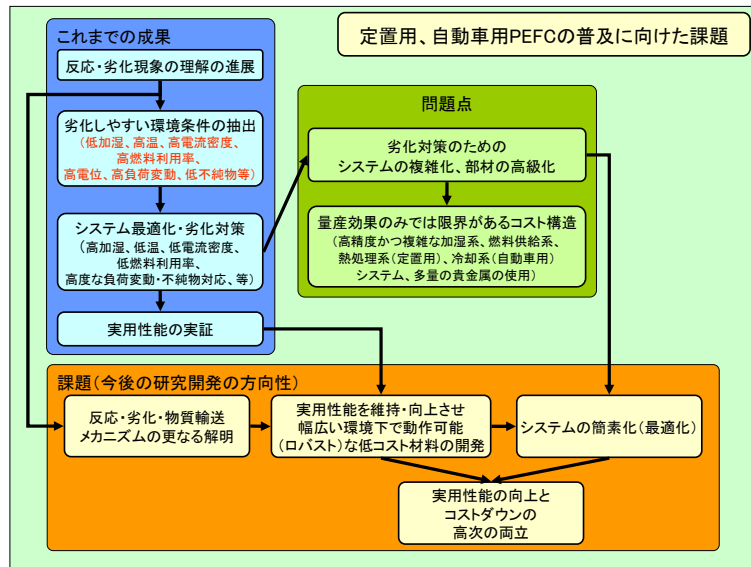


図8 定置用、自動車用PEFCの普及に向けた課題

しかし、劣化対策含めた性能向上のためにセルスタック、加湿系、

燃料供給系、熱処理系（定置用）、冷却系（自動車用）は高精度な制御を行う複雑なシステムになり、また多量の貴金属を用いるなど材料コストが大きくなっている。このことから、現状価格は普及価格を大幅に超えており、量産効果だけでは市場競争力を持つ価格実現へのコストダウンに限界がある。

コストダウンのためには、実用性能を維持向上させながら幅広い環境下で動作可能なロバストかつ低コストな部材が必要であり、反応・劣化・物質輸送などの動作メカニズムの更なる解明に裏打ちされた革新的な材料の開発が不可欠である。それらによるシステムの簡素化と最適化により、信頼性・耐久性・発電効率の更なる向上と、燃料多様化・寒冷地対応・自立形対応等の市場拡大に向けた付加価値向上が可能となる。

コスト構造の分析と必要な技術開発課題

- 定置用PEFCシステム

図9に示す定置用PEFCシステムを対象として主要システムメーカーのヒアリング等により収集した情報をもとに、定置用PEFCシステム（量産10万台を想定）のコスト分析を実施した（図10）。

この結果から分かるように、スタック、燃料改質装置、熱交換・水処理系、インバータ、給湯ユニットの各モジュール、組立て等その他のコスト割合が均衡しており（スタックのコスト割合は20%程度）、スタックのコスト低減と同時に、周辺機器も含めて総合的にコストを低減することが必要である。そのためには、スタックのロバ

スト性を向上させ、周辺機器への依存を軽減し、システムを簡素化するための技術開発が必要である。

具体的には、低加湿作動化（加湿関連機器や制御の簡素化）、高温作動化（排熱温水高温化による貯湯槽サイズ低減）、一酸化炭素（CO）耐性向上（CO処理関連触媒使用量軽減、選択酸化器の削減）、不純物耐性向上（各種フィルター簡素化、メンテナンスサイクル伸長）等を可能にするMEAの高性能・高耐久化技術が求められる。さらに、白金等の使用量削減等によるセルスタック材料低コスト化、作動電圧向上（セル積層枚数低減）等が具体的な技術開発課題となる。表2～表7に、NEDOプロジェクト等による基盤技術の強化、メーカー主体の実用化技術開発の技術開発課題に分類して示す。また、コスト低減と技術開発課題の相関を図11に示す。

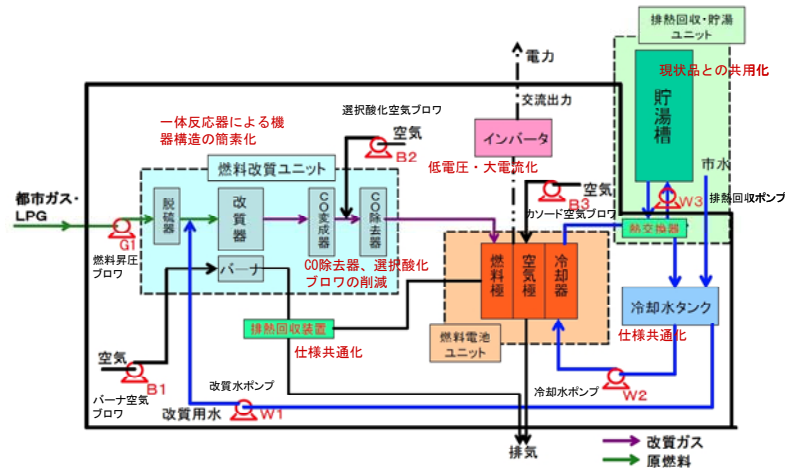


図9 定置用PEFCシステム構成

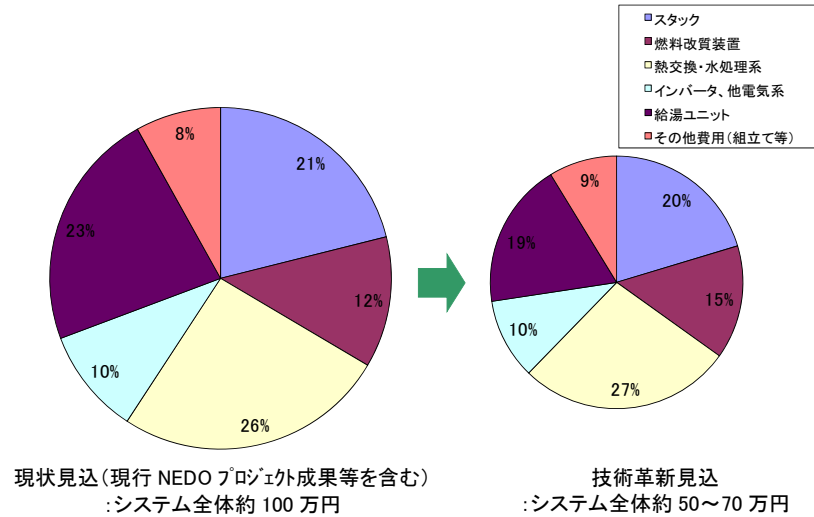


図10 定置用PEFCシステムのコスト構造

これらの技術革新によって、10万台量産時には50～70万円までコスト低減が達成される見込みである。更なるコスト低減のためには、MEAのロバスト性と耐久性、発電効率の向上に加え、FCVの普及に応じた部材の高性能化・大量生産によるコスト低減効果、純水素型システム等が必要である。

表2 セルスタック低コスト化への技術課題

項目	基盤技術強化	実用化開発(メーカー主体)	補足
電極触媒	<ul style="list-style-type: none"> ・低白金化 ・非白金化(酸化物系・カーボンアロイ) ・構造・反応・物質移動機構解明・解析 ・高電流密度化(セル数低減) 	<ul style="list-style-type: none"> ・低コスト触媒層プロセス技術 ・触媒量低減技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・白金使用量 0.2mg/cm² に低減 ・白金リサイクル技術確立 ・電流密度現行比 25～50% アップ
電解質膜	<ul style="list-style-type: none"> ・高耐久・低コスト膜開発 ・高電流密度化(セル数低減) 	<ul style="list-style-type: none"> ・低コスト量産技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・膜形成技術革新による低コスト化必要(コスト低減効果に含めず)

	・構造・物質移動機構説明・解析		・FCV 実用化による量産効果 (コスト低減効果に含めず)
GDL	・高電流密度化 (セル数低減)	低コスト製造技術	・FCV 実用化による量産効果 (コスト低減効果に含めず)
セパレータ・ガスケット等	・高電流密度化 (セル数低減)	・低コストセパレータ製造技術 ・大面積セパレータ構造 ・低コストガスケット材料探索、形成方法 ・低廉材料適用、部品点数低減	

表 3 燃料改質装置低コスト化への技術課題

項目	基盤技術強化	実用化開発(メーカー主体)	補足
断熱材	・高機能・超低熱伝導断熱材開発	・反応器小型化 ・外層温度低減	・安価な断熱材
触媒	・改質系触媒開発 (低コスト/高耐久、CO メタン化)		
構造部材	・改質系触媒開発 (低コスト/高耐久、CO メタン化)	・シフト/CO メタン化一体反応器	・一体反応器による機器構造の簡素化、中間冷却熱交換器の削減 ・CO 除去器、選択酸化空気フローの削減
	・改質器クリープ挙動説明	・小型化・低廉材料適用	

表 4 熱交換器・水処理装置低コスト化への技術課題

項目	基盤技術強化	実用化開発(メーカー主体)	補足
低コスト機器開発	・熱交換器開発 ・水処理装置開発		・凝縮器単体コスト低減と他熱交換への展開考慮 ・仕様共通化 ・10 年のライフサイクルコストでコスト低減 ・仕様共通化
配管・部材		・配管・材料見直し	・SUS 材料の見直し、等
システム・パッケージ		・モジュール化推進	・複合配管化等の採用を大幅加速
		・センサー追加削減	・システム簡素化

表 5 インバータ・電気装置低コスト化への技術課題

項目	基盤技術強化	実用化開発(メーカー主体)	補足
共通機器開発	・電極変換器開発		・低電圧・大電流インバータ開発に伴うスタックコスト

検査		・組立、検査の合理化加速	低減
その他部品		・部品共通化	・SUS 材料の見直し、等

表 6 給湯ユニット低コスト化への技術課題

項目	基盤技術強化	実用化開発(メーカー主体)	補足
エコウィル共用化	・高耐久膜 (高温、低加湿作動) の開発	・エコウィルとの共通化	・現状エコウィルレベルへのコスト低減 ・スペック、機能の最適化
FC 本格普及による量産効果		・給湯器メーカーの製造・材料コスト低減 ・システムメーカーのコスト低減	・給湯ユニットの量産規模がエコウィルの 10 倍と想定
競争原理加速		・FC-給湯ユニットの標準化	・競争原理によるコスト低減

表 7 その他 (組立て等) 低コスト化への技術課題

項目	基盤技術強化	実用化開発(メーカー主体)	補足
全体組立		・モジュール化推進	・組立工数大幅低減、部品数削減 ・制御、センサーの簡素化

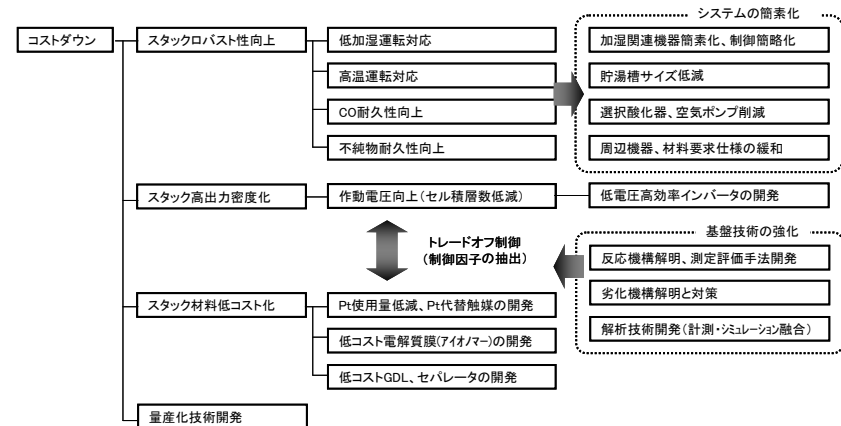


図11 定置用PEFCシステムのコスト低減と技術開発課題の相関マップ

－ 燃料電池自動車(FCV)

図12に示すスタックと周辺機器（高圧水素タンク、駆動モーター、バッテリー等を除く）（システム出力100kW）について、2008年度DOE調査報告結果を参考として、主要な自動車メーカーのヒアリング等により収集した情報をもとに、自動車用燃料電池システムのコスト分析を実施した。ここでは、現状技術ベースで量産効果（量産50万台／年）を見込んだ場合のコストと本格商用化に向けた技術革新によるコストを試算した。コスト分析は各社のシステム構成が違うなど幅を持った回答ではあるが、平均的なコスト構造を図13に示す。

システム全体のコストのうち、現状技術ベースではスタックが約60%、その中で電極触媒のコストが半分以上を占める。現状の触媒における白金使用量は0.5～1.0g/kWとなっており、大きなコスト高となっている。一方で、燃料電池作動を制御する周辺機器のコストも全体で約40%を占め、この部分のコストを下げなければ大幅なコスト低減は実現しない。したがって、定置用PEFCシステムと同様、スタックの低コスト化と同時に、スタックのロバスト性を向上させ、システムを簡素化するための技術開発が必要である。

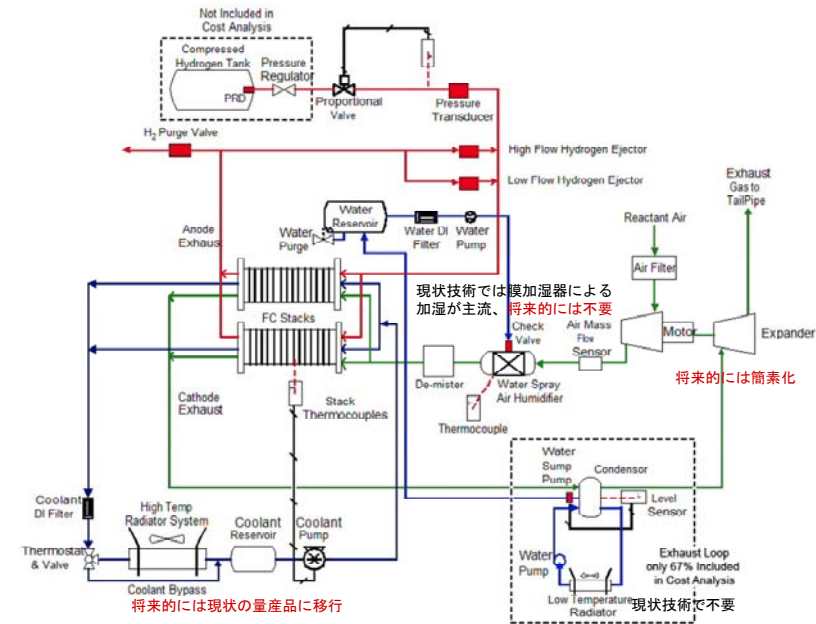


図12 FCVシステム構成

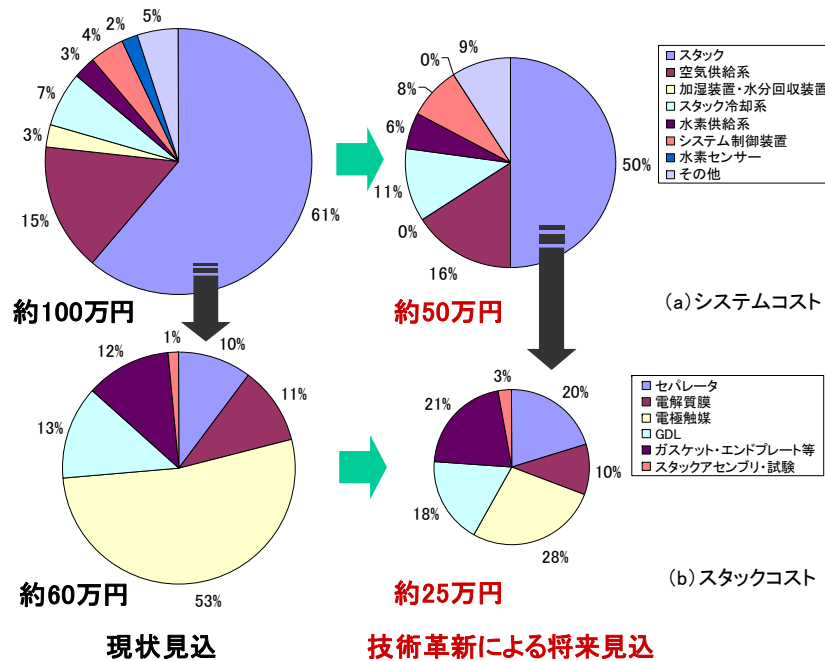


図13 FCVのシステム・スタックコスト構造

具体的には、耐久性を確保しつつ白金の触媒活性、利用率を高めて白金使用量を現状の1/10レベル（～0.1g/kW）まで大幅低減する低白金化技術、白金を全く使用しない新規触媒（白金代替触媒）の開発をはじめ、高耐久性かつ低コストな新規電解質材料の開発、高温作動化（ラジエータ等の小型化、現状品への移行）、加湿器レス作動化（加湿装置の削減）を可能にするMEA内水分管理技術等が求められる。また、スタックの高出力密度化による電解質・GDL・セパレータ等の部材使用量の低減も重要である。

表8と表9に、NEDOプロジェクト等による基盤技術の強化、

メーカー主体の実用化技術開発の技術開発課題に分類して示す。また、コスト低減と技術開発課題の相関を図14に示す。

表8 セルスタック低コスト化への技術課題

項目	基盤技術強化	実用化開発(メーカー主体)	補足
電極触媒	・低Pt化 ・非白金化(酸化物系・カーボンアロイ) ・構造・反応・物質移動機構解明・解析 ・高電流密度化(セル数低減)	・低コスト触媒層プロセス技術 ・触媒量低減技術	・アノード、カソード合わせて白金使用量を0.1mg/cm ² に低減(現状レベルはFCV1台あたり50～100g、本格商用化までの中間目標では約半減) ・電流密度現行比約40%アップ ・原材料コストのみでなく、要求性能に応じた電極構造とその製造技術にコストが依存
電解質膜	・高温・低(無)加湿対応膜開発 ・高電流密度化(セル数低減) ・構造・物質移動機構解明・解析	・低コスト量産技術	・量産時2000円/m ² 目標(エンブラ系樹脂の市場価格等を想定) ・機械強度、MEA製造方法とのトレードオフの解決が必要
GDL	・高電流密度化(セル数低減)	低コスト製造技術	・量産時2-3000円/m ² 目標 ・GDL製造工程の自動化、製造方法の改善が必要
セパレータ	・高電流密度化(セル数低減)	・低コストセパレータ製造技術	・表面処理を含めて100円/枚前後目標
ガスケット等	・高電流密度化(セル数低減)	・低コストガスケット材料探索、形成方法 ・低廉材料適用	・高温化とのトレードオフの解決が必要
スタックアセンブリ・試験		・組立て、検査の自動化 ・性能試験の高速化、自動化	

表9 周辺機器低コスト化への技術課題

項目	基盤技術強化	実用化開発(メーカー主体)	補足
水素循環系		・低ストイキ作動化による簡素化	・左記課題の解決等により量産時2-3万円程度が目標
水素センサー		・安全性評価	・量産時2-3000円/個が目標 ・安全性に関する部品のため、個数削減には法整備が必要(コスト低減効果として含む)
システム制御装置		・セルスタックロバスタ性向上による簡素化	・FCの電圧計測装置等を含む
空気供給系		・低圧、低ストイキ作動化による簡素化	・構成上、コンプレッサ等の駆動モーターとインバータを含む
スタック冷却系	・高温対応MEA開発	ラジエータ、ファン等の小型化、現状品への移行	

加湿装置	・加湿器レスを可能とする 新規電解質材料の開発	・加湿器レスを可能とする MEA 水分管理技術	
その他部品		・部品点数低減	・搭載車両、システム形状によ って部品構成が決定

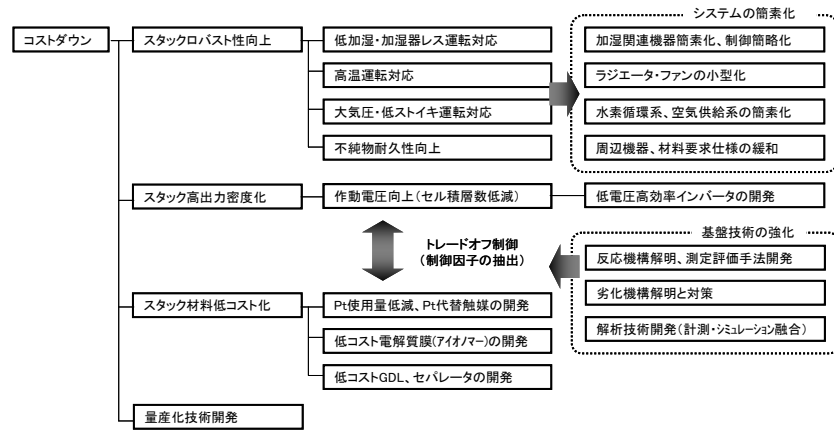


図 14 FCVのコスト低減と解決すべき研究開発課題の相関マップ

－ 部材開発の課題

自動車燃料電池、定置用 P E F C システムともに、広温度範囲・低湿度で高性能な電解質膜材料及び低白金若しくは非貴金属で高活性な電極触媒の開発が鍵を握っており、最も開発が期待される項目である。

(1) 電解質膜・アイオノマー

現状最も実用的で主に用いられているフッ素系電解質膜は、性能や耐久性の向上が進み P E F C の実用性を高めてきた。低湿度下で

のプロトン伝導性や耐久性についても進歩してきている。しかしながら、さらなる高温・低加湿条件下での高性能化や耐久性向上、低温でのプロトン導電率の向上が強く求められている。特に自動車用には120℃での作動や氷点下起動が求められ、一層の技術的な飛躍が望まれる。さらに、空気や水の浄化装置を簡素化し廉価な部材を使用できるようにするため、不純物耐性の向上も望まれる。

一方、種々の炭化水素系膜も性能が高まってきており、コストが比較的安い、ガス透過性が小さい等の利点があり期待が持たれている。

電解質膜・アイオノマーは、高温低加湿や無加湿、低温等といった広範囲の運転条件において現状のフル加湿運転時と同等以上の性能と耐久性を有する材料の開発が強く求められている。また、長期的な視野で革新的な新材料探索を行うことも重要である。

(2) 電極触媒・担体

将来の燃料電池自動車や定置用 P E F C システムの広範な普及には、資源量とコストの両面から白金使用量の大幅な削減が不可欠である。これにはまず合金化をはじめ、種々のアプローチによる触媒活性の飛躍的向上に向けた試みが必要であるとともに、触媒利用率を極限まで向上させる取り組みが求められる。尚、これには耐久性との両立が必須である。耐久性については特に白金溶解・凝集の抑制技術、耐食性担体開発、不純物耐性の向上等が求められる。

また、資源的に豊富で安価な材料を用いて白金代替触媒を開発することは、技術難度は高いが実用化できれば効果は極めて大きい。この分野では最近、カーボンアロイや酸化物系材料で期待の持てる

シーズが出てきており、性能向上と反応機構解明を行うとともに実用化を視野に入れた研究開発の促進が望まれる。

なお、改質ガスを燃料とする定置用システムでは、白金触媒のCO被毒耐性を大幅に向上すれば燃料処理システムの簡素化につながり、そのコスト削減効果は大きい。

一基盤技術の強化

上記の部材を実用化するには、燃料電池の反応・劣化・物質移動現象の解明を図ることが必要不可欠である。具体的には、大型放射光施設や高強度中性子全散乱装置等を活用した高度な実験解析、及び数値解析手法を駆使し、電解質の分子構造、電極触媒の原子構造・電子状態、触媒層内の物質輸送（プロトン・水・ガス）といった現象の解明に取り組むことが必要である。また、新規材料開発を効率的に推進するため、各方面で開発される新規 MEA 材料の共通的な評価基準・手法を構築し、燃料電池セルとして適切に評価することも重要である。

＜SOFC の実用化・普及に向けての課題＞

SOFC の研究開発の特徴と普及に向けた課題

SOFCの実用化・普及に向けての課題は①耐久性・信頼性の向上、②低コスト化、③高性能化（高効率化）、④利便性の向上、である。なお、SOFCについては高効率の発電システムとして競合技術（ガスエンジン、ガスタービン、等）が多く、これらの課題を同時に高いレベルで解決することが求められている。

これらを解決するためには、(I)材料・製造プロセス、(II)セルスタック、(III)システム、(IV)アプリケーションに対する総合的な取り組みが必要となるが、SOFCは、「セルがすべて固体で構成されるため形状の自由度が高い」、「低温で作動する電解質などの新規材料の開発が進み材料の選択岐が多い」など、最適化の自由度が大きく、問題解決の潜在性が高い。

例えば、小容量定置用のシステム開発では、運転条件・起動停止特性・負荷追従性・システムサイズなどアプリケーションに求められる仕様を決めた上で、低温で高電流密度が得られる材料の選択、アノード支持・平板型採用による電解質薄膜化、熱管理の最適化など、材料からセルスタック・システム設計までの総合的な取り組みが行われている。

このようにSOFCの研究開発は、①～④の高い要求課題に対応するために、その最適化の自由度を生かし、(I)～(IV)のテーマに総合的に取り組みながら螺旋的に研究開発が進展することが特徴である。これによって小容量から中容量まで多様なシステムに対応した技術の蓄積が進んでいる。一方、これまで、SOFCは高温の特徴を活

かす観点から、中容量以上の定常運転システムを中心に研究開発が行われてきた。しかしながら、中容量以上のシステムの試作には多大な費用が必要であり、また、(I)～(IV)のサイクルを1回まわすのに数年を要すること等、種々の課題があった。

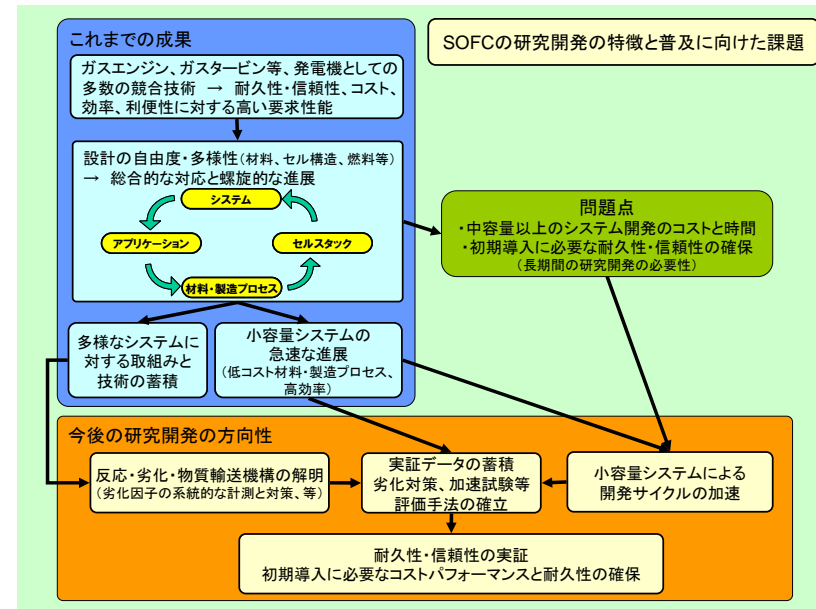


図 15 SOFC の研究開発の特徴と普及に向けた課題

これに対して、近年の家庭用コージェネシステムに焦点を当てた小容量システムの急速な進展は、他のシステムに先駆けて①～④の課題が高いレベルで満足される可能性を示している。小容量システ

ムは試作コストが小さいために(I)～(IV)のサイクルが速く、ここで検討される材料技術、システム化技術などの成果を中容量以上のシステム開発へフィードバックして開発を加速できる可能性も出てきている。

実用化に向けて必要な技術開発課題

表 10 に示す実用化・普及に向けての目標性能に対して、現在、発電効率などの基本的な性能は達成されている。また、SOFCは他の燃料電池に比べて貴金属を用いず、製造プロセスも大量生産が可能な湿式法の採用に成功するなど、コストダウンへの可能性が期待される。

このような現状で、初期導入段階に向けて最も優先順位が高い課題は耐久性・信頼性の確保と実証であり、本格普及に向けてはコストダウン、効率向上、利便性が課題となる。これらに向けた主な研究開発課題の概要を表 11 に示す。耐久性とコスト、効率、利便性はトレードオフの関係にあり、これらの課題解決のためには、反応・劣化・輸送機構の解明などの基盤技術開発、熱管理や燃料供給・排出の最適化などシステム関連技術の開発、さらに、利便性・運用性向上のための取組みが必要である。以下、耐久性向上、コストダウンを軸に技術開発課題についての概要を示す。

表 10 実用化・普及に向けての SOFC システムの目標性能

＜小容量定置用システム＞			＜中容量定置用システム＞		
	初期導入	普及～本格普及		初期導入	普及
システム価格	50～100万円/kW	40万円/kW以下	システム価格	約100万円/kW	20万円/kW以下
出力密度	0.2kW/L	0.4～1kW/L	出力密度	0.2～0.5kW/L	0.5～2kW/L
発電効率	40%HHV/45%LHV以上	50%HHV/55%LHV以上	発電効率	40%HHV/45%LHV以上	50%HHV/55%LHV以上
総合効率	75%HHV/82%LHV以上	80%HHV/89%LHV以上	総合効率	75%HHV/82%LHV以上	80%HHV/89%LHV以上
耐久性	4万時間(連続運転、5年)以上の見通し	9万時間(連続運転、10年)以上の見通し	耐久性	4万時間(連続運転、5年)以上の見通し	9万時間(連続運転、10年)以上の見通し
その他	負荷追従性、低負荷運転特性が良好であること	同左	その他	設置面積当りの容量 5～13kW/m ²	設置面積当りの容量 13kW/m ² 以上

＜中容量ハイブリッドシステム＞			＜大容量コンバインドシステム＞		
	初期導入	普及		初期導入	普及
システム価格	約100万円/kW	15万円/kW以下	システム価格	数10～100万円/kW	15万円/kW以下
出力密度	0.2～0.5kW/L	0.5～2kW/L	出力密度	0.2～0.5kW/L	0.5～2kW/L
発電効率	50%HHV/55%LHV以上	55%HHV/60%LHV以上	発電効率	60%HHV/55%LHV以上	65%HHV/70%LHV以上
耐久性	4万時間(連続運転、5年)以上の見通し	9万時間(連続運転、10年)以上の見通し	耐久性	9万時間(連続運転、10年)以上の見通し	9万時間(連続運転、10年)以上の見通し
その他	設置面積当りの容量 5～13kW/m ²	設置面積当りの容量 13kW/m ² 以上	その他	設置面積当りの容量 5～13kW/m ²	設置面積当りの容量 13kW/m ² 以上

表 11 SOFC の研究開発課題の概要

研究開発課題 (耐久性向上、他、基盤技術開発)	効果			対象アプリケーション				対象部位			備考	
	耐久性向上	低コスト化	高効率化	利便性向上	小容量 定置用	中容量 定置用	中容量 ハイブリッド	大容量 コンバインド	システム	セルスタック		部材
反応・劣化・物質輸送機構の解明	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	基盤的技術
不純物、熱サイクル耐久性の把握、対応 熱力学的・化学的・機械的解析による劣化 機構の解明、加速試験法の開発	○	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	基盤的技術、要総合対応 システムメーカー・大学・国研連携
システム評価手法の確立 劣化の非破壊検査 セルスタックの標準的な試験方法	○	△	△	-	○	○	○	○	○	○	○	基盤的技術、要総合対応 システムメーカー・大学・国研連携
モデリング・シミュレーション技術の開発 (温度、電流密度、熱応力解析技術の開発)	△	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	基盤的技術(他の研究課題と平行して横断的に開発)
新規材料開発(電解質、電極、インターコネク ト)	○	○	○	△	○	○	△	△	△	△	○	基盤的技術、要中長期対応 要、関連劣化対応

研究開発課題 (高性能と低コストの両立)	効果			対象アプリケーション				対象部位			備考	
	耐久性向上	低コスト化	高効率化	利便性向上	小容量 定置用	中容量 定置用	中容量 ハイブリッド	大容量 コンバインド	システム	セルスタック		部材
システム最適化(運転条件、熱管理の最適化)	○	○	○	△	○	○	○	○	○	△	△	共通課題、要総合対応
高出力密度化	☆	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	共通課題、要総合対応 (基盤的技術の活用) 要、関連劣化対応
システム簡素化	☆	○	☆	○	○	○	○	○	○	△	△	共通課題、要総合対応 要、関連劣化対応
量産のための低コスト製造プロセスの確立 (乾式法から湿式法への転換)	☆	○	△	☆	○	○	○	○	○	○	○	共通課題、普及対応 要、関連劣化対応

研究開発課題 (利便性・運用性の向上)	効果			対象アプリケーション				対象部位			備考	
	耐久性向上	低コスト化	高効率化	利便性向上	小容量 定置用	中容量 定置用	中容量 ハイブリッド	大容量 コンバインド	システム	セルスタック		部材
起動停止、負荷変動対応	☆	☆	△	○	○	△	△	△	○	○	○	小容量システムにける重要性大 要、関連劣化対応
部分負荷運転対応	☆	☆	○	○	○	△	△	△	○	○	○	小容量システムにける重要性大
高圧運転	☆	☆	○	○	-	-	○	○	○	△	△	コンバインドサイクル対応 要、関連劣化対応
高温排熱の高度利用	-	△	○	-	△	△	○	○	○	△	△	コンバインドサイクル対応中心
大容量化	☆	☆	△	○	-	△	△	○	○	△	△	コンバインドサイクル対応中心
コンパクト化	-	△	△	○	○	○	○	△	○	○	△	共通課題、要総合対応
耐振動、耐衝撃対応	△	☆	-	○	○	△	△	△	○	○	○	移動体用、小容量システムにける 重要性大
燃料多様化	☆	☆	☆	○	○	○	○	○	○	○	○	共通課題、普及対応 要、関連劣化対応
自動車用搭載補助電源(APU)等、移動体 用への対応	☆	☆	☆	○	○	-	-	-	○	○	○	トラック、鉄道、船舶などの電源の 効率化に加えて、電気自動車(EV) の航続距離拡大への検討が進行中

(○:直結する技術課題、△:間接的に寄与する技術課題、☆:トレードオフ関係にある技術課題)

- 耐久性・信頼性の向上

SOFCは全て固体で構成されるため、本来劣化要因は少ない。Siemens-Westinghouse PC社がEVD法で作成したセルは定常運転下で7万時間以上の耐久性を示した。しかしその後、製造方法の低コスト化(湿式法の採用)、低温形セルとそのための新規材料の開発、負荷変動運転、燃料多様化など、コストダウンと性能向上のためのさまざまな研究開発が行われており、トレードオフの関係にある耐久性・信頼性の向上が重要な課題となっている。図16に劣化の出現と対策について模式的に示す。劣化については、金属インターコネクト、シール材、新規材料(セリア系、等)の材料起因、湿式法採用などによる製造方法起因、燃焼ガスへの空気混入、熱サイクル、負荷追従運転などのスタック運転状況起因、気相に存在する微量な不純物や原材料内の不純物起因など、様々な要因が存在する。これらに対して実システムの実証試験によって劣化に関するデータを蓄積するとともに、熱力学的・化学的・機械的解析、三相界面の微細構造変化の解析などの基礎研究を平行して行う必要がある。基礎研究では劣化因子を系統的に測定した上で、各因子が劣化に与える影響を定量的に評価し、劣化機構を明らかにすることが重要である。さらに、劣化対策を立案し、システム開発と連携してその効果の検証を行うとともに、劣化の加速試験方法を確立することが必要である。

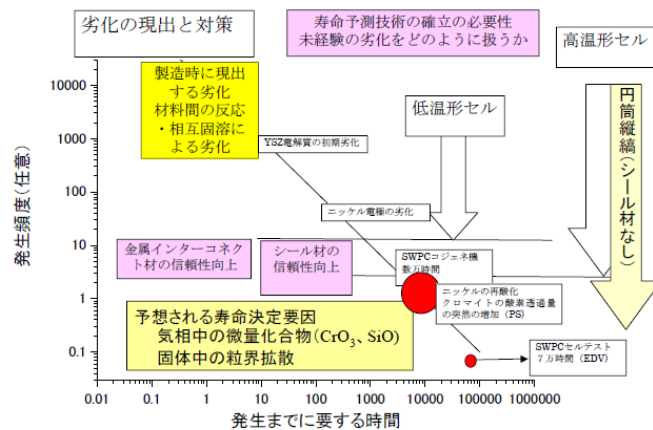


図 16 劣化の出現と対策

- コストダウン

SOF Cは貴金属等を用いないため、原材料コストに関しては他の燃料電池と比べて低く抑えられる。また、当初は製造コストが問題になったが、日本では既に高価な EVD などの乾式法から低価格で大量生産に適した湿式・焼結法を採用することに成功しており、耐久性が確保されれば、初期導入に向けてのコスト目標のハードルは高くない。しかし、本格普及に向けての更なるコストダウンについては、ランタン等、原料価格の高い成分を含む部材の薄膜化、湿式法を用いてさらに焼結回数を削減するなどの製造プロセスの低コスト化、出力密度の向上によるセル材料の大幅削減などの取組みが必要である。コストダウンに関するほとんどの取組みは耐久性とトレードオフの関係にあるため、前述の耐久性・信頼性向上に関する取

組みと並行して進める必要がある。

- 高効率化・出力密度の向上(システム最適化)

出力密度の向上は、材料使用量の削減によるコストダウンに繋がるだけではなく、高効率化、利便性の向上など全てに共通する課題であり、耐久性とはトレードオフの関係にある。したがって、その向上のためには、運転条件・熱管理の最適化からセルスタック構造・部材の最適化まで、総合的なシステム最適化への取組みが必要である。

そのためには、温度分布、電流密度分布、熱応力分布など把握と解析が重要であり、内部状態の計測技術とともにモデリング・シミュレーション技術が重要となる。また、先に述べたように中容量以上のシステムではシステム最適化のための試作回数はコストと時間から限られてくるため、システム構築の最小単位（大型基本スタック）の最適化等の検討も重要である。さらに、コストダウンと性能をより高いレベルで両立させるためには、電解質・電極・インターコネクタなどの新規材料の開発も中長期的課題として取り組む必要がある。

-運用性の向上、燃料多様性、ほか

運用性向上のためには起動停止・負荷変動対応が必要である。起動停止・負荷変動については、運転制御や熱管理などのシステム最適化に加えて、耐久性とトレードオフの関係にあることから、耐久性の向上が不可欠である。

燃料多様化については、LPG や灯油への対応に向けた取組みが始まっており、小容量システムで現在実証データが蓄積されつつある。今後は、炭素の析出、不純物元素による劣化の克服が課題となる。また、将来的な IGFC（石炭ガス化燃料電池複合発電）への適用に向けたセル・スタック開発、高圧運転のデータ整備等も重要である。

なお、小容量システムの進展によって、トラック、鉄道、船舶などの移動体への応用の可能性が出てきている。特に自動車用については補助電源（APU）の用途に加えて、電気自動車（EV）の航続距離拡大を狙った適用が検討されている。移動体用にはコンパクト化、耐振動・耐衝撃対応が課題である。

＜標準・規格・基準＞

－ 定置用 PEFC システム

燃料電池の国際標準化活動は、1998年10月にIEC(International Electrotechnical Commission: 国際電気標準会議)の中に設置されたTC105(Technical Committee 105: 第105専門委員会)において進められており、これまでに7件のIEC規格(IEC62282シリーズ: 燃料電池用語、燃料電池モジュール、定置用燃料電池システム(安全要件/性能試験法/設置要件)、ポータブル燃料電池システム(安全要件)、マイクロ燃料電池(性能試験法))が発行されている。これらの規格は、TC105の中に設置された11の作業会(WG)の中で検討が行われ、4つのWGで日本からコンビナを出していること、TC105の議長が日本人であることから、この分野で我が国は中心的な役割を果たしてきている。また、国内の標準規格であるJIS規格については、2008年7月に安全基準など8件のJIS規格が発行され、一通り規格体系として整備された。現在は、国際認証制度なども念頭に入れながら、より詳細な内容を盛り込んだ技術内容を国際標準化していくことが重要となっており、2008年12月には小形PEFC性能試験法のJIS規格の内容をIECに新規提案した。

将来、国際市場での優位性確立、国際間取引の円滑化を図るためには、IEC62282シリーズの改訂作業の実施、国際標準化(IEC/TC105への新規提案)等に資する基準案の作成に取り組むことが必要である。

また、将来的なコスト低減に向けた燃料電池の新規材料開発を加

速するため、標準的MEA評価手法(標準的なMEA試作手法、標準セル構成、性能・耐久性評価プロトコル等)の構築、新規材料の技術課題を明らかにするためのセル解析評価技術と組み合わせた標準現象解析フローチャートの構築が必要である。

－ 燃料電池自動車(FCV)

FCV普及のためには、FCVに関わる技術開発と並行して、国際規格の整備が重要である。FCVの安全性、燃費などの性能測定方法、燃料品質などの標準化により、FCVの開発と普及を促進することができる。これまで、ISO/TC22/SC21「電気自動車」の国内審議団体として(財)日本自動車研究所(JARI)内にWG体制が構築され、また、これまでNEDOの関連プロジェクトにおいて燃料電池性能評価方法、FCVの安全性評価等に係る研究開発を推進してきた。具体的には、安全分野に関しては、自動車用圧縮水素容器(70MPa対応)の基準の合理化、車両火災や水素漏洩引火といった車両安全(UN-ECE/WP29 AC3 HFCV gtr)関連の試験等が実施され、性能分野に関しては、ISO23828(FCV燃費試験方法)の発行、FCV水素規格の技術仕様書ISO/TS14687-2の発行(ISO/TC197/WG12「水素燃料仕様」、PEM形単セル標準試験法の提出(IEC/TC105/WG11「単セル標準試験法」)等、日本が先導的な役割を果たしてきた。

今後は、一般ユーザーへの普及に備えた基盤整備として、安全分野に関しては、破裂強度、寿命、充填量の最適化(87.5MPa@85℃)

等の自動車用圧縮水素容器の次期基準の合理化や充填プロトコルの整備に資するデータ、事故や火災時等のさらなるデータ取得、性能分野に関しては、車両改造不要な燃費測定方法の開発と標準化、国際規格（ISO/TC22/SC21/WG2）維持・改定、未調査の不純物成分の影響や材料仕様や運転条件が不純物による性能低下に及ぼす影響等の調査に取り組むことが必要である。さらに、前述の標準的 MEA 評価手法および標準現象解析フローチャートの構築により、材料単体特性、MEA 特性のデータベース、水素燃料等の国際標準対応およびセル評価に必要な燃料電池に関する不純物データベース等を構築していくことが必要である。

- SOFC

定置用 P E F C システムについては既に標準化が進んでおり、安全基準等の JIS 規格が既に発行されている。S O F C についても規格整備が必要となっており、10kW 未満の小容量 S O F C の JIS 規格開発および関連 JIS 規格の見直し（7 件）を行う目的で、日本電機工業会（J E M A）「定置用燃料電池標準化委員会」の下に「S O F C 標準化分科会」を設置して S O F C 標準化に向けた活動を開始し、2010 年度末までに規格審議が終了する予定である。規格体系は基本的に定置用 P E F C に準ずるが、P E F C では安全に係わる内容が C8822（安全基準）と C8823（安全性及び性能試験方法）の二つの規格に分かれて規定されているのに対して、S O F C では、IEC 規格に合わせる形で一本化する方向で検討が進められている。また、EMC（電磁両立性）及びパワコンに関する規格については、P E F C と S O F C でほとんど相違点がないと思われるため、P E F C の規格

を S O F C も適用範囲に含むような形に改定する方向で検討されている。

さらに、国際競争力を維持する観点から、J E M A 「燃料電池国際標準化委員会」の下に「試験法調査 WG」を設立し、標準化で先行する定置用 P E F C の標準化を参考に、小容量 S O F C の安全試験法及び性能試験法の国際標準化に向けた検討を行い、2009 年度末に国際標準との整合化原案を提示した。今後も引き続き国際標準化を推進し、将来の国際市場での優位性を確立することが必要である。

＜研究開発課題の解説＞

水素貯蔵技術ロードマップ

今回のロードマップでは、2030年までの水素貯蔵技術（水素車載技術）を俯瞰し、その技術の現状・成果と主な課題、さらに実用化時期を特定した。表12にロードマップにおける目標値を示す。

なお本ロードマップは主にFCVへの水素車載のための技術を研究開発対象としているが、その成果は水素ステーションでの水素貯蔵（例、蓄圧器）や水素輸送容器にも応用することが可能である。

表12 水素貯蔵技術ロードマップの目標

	現状 (技術実証)	2015年 (普及開始)	2020年 (普及初期)	2030年 (本格商用化)
システム貯蔵密度	5 wt%	5.5 wt%	6 wt%	7.5 wt%
システム体積(5kg 搭載)	178L	125 L	100 L	70 L
貯蔵容器コスト	約300～ 500万円	100～200 万円	数10万円	10万円 程度

注：本ロードマップでは、システム貯蔵密度は「wt%」で、水素貯蔵材料の貯蔵密度は「mass%」で表記する。

－ 水素貯蔵技術の概要

水素貯蔵技術は以下のように分類することができる。

- ・ 圧縮水素容器（水素を高圧で貯蔵）
- ・ 液体水素容器（水素を液体で貯蔵）

- ・ 水素貯蔵材料容器（水素を固体または液体の貯蔵材料で貯蔵）
 - ・ 水素吸蔵合金
 - ・ 無機系貯蔵材料
 - ・ 革新的貯蔵材料
 - ・ MOF、炭素系吸着材料、クラスレート、など（車載のまま水素充填が可能）
 - ・ 有機ハイドライド、オフボード再生式水素充填技術、など（再水素化をオフボードで行うなどの体系的アプローチが必要）

－ 技術の全体的課題

水素貯蔵技術は、FCV用燃料として水素を活用するために、以下のような視点から技術の実用性を判断する必要がある。

- ・ FCVが要求する水素貯蔵量：

最新のFCVは水素1kgで141kmを走行するので（2009年度JHFCプロジェクトでのトップランナー、JC08 台上燃費測定）、700kmを走行するには水素搭載量は5kgでよいことになる。

将来的には、FCVの更なる効率向上によって車載水素量が少なくてすむようになる可能性もあるが、その一方で開発の優先度がシステムコストの低減に移る可能性もある。

今回のロードマップでは水素貯蔵量5kgを前提に検討を行い、水素貯蔵目標を2015年時点で5.5wt%、2020年時点で6wt%、

2030年時点で7.5 wt%と設定した¹。

・ F C V搭載のための貯蔵密度：

水素貯蔵システム全体としての貯蔵密度は重要な指標である。システム重量密度も重要な視点であるが、限られた車両スペースに水素を貯蔵するという点では、システム体積密度も重要である。本ロードマップでも、システム重量密度、システム体積密度、また水素貯蔵量を記載した。

・ 水素充填に係る特性：

水素充填では、ガソリン給油に匹敵する3分以内での充填（充填速度5kg/3分）が望まれる。このためには、水素ステーション側ではより高圧での充填が必要であると同時に、プレクールにより車載容器温度は85℃以下に抑えるようにしなければならない。

・ 水素放出に係る特性：

水素放出では、F C Vの負荷に合わせた水素の放出（負荷追従性）が重要であるとともに、車両で得られる適切な温度範囲で速やかに水素が放出できることが重要である。水素貯蔵材料では水素放出に熱を必要することが多いが、150℃以下（できれば100℃以下）で放出できることが望ましい。

¹ 米国DOEは2009年に水素貯蔵目標を見直し、水素密度（システム）目標を2015年で5.5 wt%（55 g-H₂/k）および40 g-H₂/L、また究極目標を7.5 wt%（75 g-H₂/kg）および70 g-H₂/Lに設定した。なお700気圧の水素の密度は40g/L（5kgで125L）なので、将来的にはよりコンパクトに水素貯蔵ができる水素貯蔵材料の開発が必要である。

・ システム寿命・耐久性：

水素貯蔵システムのサイクル寿命と耐久性が、F C V自体の寿命よりも十分に長いことが重要である。水素貯蔵材料ではサイクル寿命が一応の目安として1000回以上が示されている。

・ コスト：

水素貯蔵システムコストはF C V価格に直結するため、大幅なコスト低減が必要である。現状の700気圧容器は300～500万円だが、2015年には100～200万円に、2020年には数10万円に、さらに2030年には10万円程度まで低減させる必要がある。

・ 安全性の確保：

水素を車載する以上、安全性の確保は最優先されるべきである。特に水素リークへの対応、衝突安全性の確保、容器の水素脆化への対応や劣化・損探傷検知などが重要である。

－ 個別技術

（1） 圧縮水素容器

【特徴・現状】

圧縮水素容器は、水素を高圧で貯蔵するもので、複合容器（コンポジット容器）とも呼ばれる。現状では、F C V用水素貯蔵技術として最も一般的である。

水素圧力で区分すれば350気圧容器と700気圧容器に分けることができ、またライナー材料で区分すれば、アルミ合金ライナー（Type3）と高密度ポリエチレンライナー（Type4）に分けることができる。なおType3、Type4ともに、水素圧力に対抗するために高強

度材料である炭素繊維が樹脂とともに容器表面に巻かれている。

【技術課題】

最大の課題は炭素繊維のコストであり、現状で 350 気圧容器コストの 65%、700 気圧容器コストの 80%が炭素繊維コストとされる。炭素繊維使用量の大幅な低減や安価な炭素繊維材料の利用、システムの最適設計、さらに生産性向上によるコスト低減が望まれる。また Type3 では、ライナー材に高強度材料（高強度アルミなど）を用いることで炭素繊維の削減が図れる可能性がある。強度や水素脆化耐性などの点での広範なライナー材の検討が必要である。

現在高圧ガス保安法の常圧圧力サイクル試験基準は 11,250 回であるが、これを 5,500 回に見直すことが行われており、その場合は炭素繊維使用量が 1 割程度低減するとされる。合わせて、安全性を担保するための容器劣化診断・探傷検知技術の開発も必要となる。

将来的には、複合容器のリサイクル技術の確立、容器付属品（減圧弁や安全弁、等）の高性能化と低コスト化、さらに量産技術の開発が必要となる。

なお複合容器は、水素ステーション用の蓄圧器（700 気圧級）への適用が検討されている。これはステーション用の 700 気圧級鋼製蓄圧器がコスト高であるため、すでに米国などでは利用され始めている（主に Type4）。また軽量であることから、水素の輸送用容器（400 気圧級）への適用も検討されている（今後の課題）。

【実用化時期】

すでに F C V では 350 気圧容器と 700 気圧容器が実用化されている。2015 年（F C V 普及開始）から 2020 年にかけては、本技術が F

C V における水素貯蔵技術の主流になると見られている。2030 年に向けては、さらなるコスト低減が求められる。

ただし 2030 年の貯蔵目標（7.5wt%、貯蔵量 5kg で 70L 以下）は圧縮水素容器では達成が困難と考えられ、将来的にはその他の貯蔵技術との複合化も開発課題である。

（2）液体水素容器

【特徴・現状】

水素は液化すると体積が約 1/800 程度になるため、5kg の水素の体積は 80L ほどになり、既存のガソリン容器に近い体積となる。このコンパクトさが液体水素貯蔵の最大の利点である。しかし車両用液体水素容器の開発や、車両への応用例はわが国では少ない。また海外でも一時期 GM や BMW が液体水素貯蔵容器の車載を研究していたが、現状では積極的に液体水素貯蔵を採用する動きは少ない。

【技術課題】

極低温（-253℃）で水素を貯蔵するため、積層真空断熱（スーパーインシュレーション）などの効率的な断熱技術が必要となる。

また液体水素の気化速度（ボイルオフ速度）は現状で 3~6%/日であり、停車時でも 30 時間程度で脱圧のために気化した水素（ボイルオフガス）を排出しなくてはならない。このボイルオフガス量の低減が必要で、2015 年頃には 1~2%、2020 年頃には 0.5~1%までの低減が望まれる。

また車載に適した扁平型液体水素容器の開発も課題である。

【実用化時期】

液体水素貯蔵技術は、液体水素コンテナ・ローリーによる輸送技術として確立した技術である。ただしボイルオフガスの課題もあり、F C V用としての実用化は2020年以降と考えられる。

液体水素は小型・少量貯蔵より大型・大量貯蔵に適した技術であるため、バスなどの大型車両用から実用化が始まると見られる。

(3) 水素貯蔵材料容器

【特徴・現状】

水素貯蔵材料容器で30気圧程度のものは水素吸蔵合金を主体に水素を貯蔵するもので、小型車両などに使用される。一方350気圧程度の高圧のものは「ハイブリッド容器」とも呼ばれ、F C V用である。高圧部分と水素吸蔵合金部分が半分ずつの水素貯蔵を分担する。

このハイブリッド容器の利点はコンパクト性であり（複合容器と比較して高い体積密度）、車載の点では有望な技術である。さらに水素貯蔵量4mass%以上の水素吸蔵合金が開発されれば、システム重量の点でも700気圧級複合容器に対して競合性を持つようになる。

【技術課題】

ハイブリッド容器をF C Vに車載するための技術的な研究課題は多い。最大の課題はコストである（基本的に水素吸蔵合金のコストで決まる）。また、複合容器に匹敵する耐久性と安全性が求められるとともに、高圧容器内に熱交換器を設置することから、その安全・振動対策、熱交換器の性能向上（特に熱交換流路の改善）、さらに、衝突・落下時の耐久性確保や火炎暴露時の安全性確保も課題である。

そのような特徴から、容器付属品（減圧弁や安全弁、等）も複合容器とは異なる仕様が求められる。

また現状で法的には「反応器（高圧ガス保安法での特定設備）」であるが、これを「車載容器」に変更することも課題でもある。

【実用化時期】

F C V用ハイブリッド容器は、重量貯蔵密度的には複合容器に劣るが、体積貯蔵密度が高い（コンパクト）ことがメリットである。2015年まではシステム技術と水素吸蔵合金の技術開発を進め、その後にはコストダウンが進むことが期待される。

また実用化は2020年以降と想定されるが、それまでに安全性の確認や運用面での検討が必要である。

(4) 水素貯蔵材料

【特徴・現状】

水素貯蔵材料には多様なものがあるが、水素の吸放出が可能な材料としては水素吸蔵合金と無機系水素貯蔵材料がある。

水素吸蔵合金は可逆的に水素を急増して金属水素化物を生成するもので、3mass%以下級のBCC構造合金や、4mass%級のMg系合金がある。基礎研究レベルでは6mass%級合金の開発も行われている。

無機系水素貯蔵材料は、錯イオンが水素貯蔵能力を担い、アルカリ金属やアルカリ土類金属とともにイオン性結晶を形成しているもので、アラネート系(3~3.5mass%)、アミド・イミド系(4~9mass%)、ボロハイドライド系(5~13%)などがある。

現在、貯蔵メカニズムの解明や、計算科学を用いた新規材料の探

索も進められている。

【技術課題】

一般に高貯蔵量な系ほど水素放出温度が高い（水素吸蔵合金：80～300℃程度、無機系水素貯蔵材料：100～400℃程度）。車内でそのような高温を得ることは難しく、水素放出温度の低減が必要である。

また放出された水素の純度を確保するための副反応の抑制や、負荷追従性の向上が必要である。特に車載で水素を吸蔵・放出するため、サイクル寿命の確保と劣化抑制も課題である。

水素吸蔵合金では、第一にコストが課題である。長期的には1000円/kg以下を達成することが望まれる。

さらに水素貯蔵材料容器の高圧容器に対する優位性を確保するために、4mass%級貯蔵材料の開発が望まれる。

【実用化時期】

水素吸蔵合金では、3mass%以下級は試用段階にあり、水素貯蔵材料容器に組み込んでテストが実施されている。

しかし水素貯蔵システムとして優位性を有する水素貯蔵材料の実用化は2020年以降、本格的な利用拡大は2030年以降と考えられる。

（5）革新的貯蔵材料

【特徴・現状】

革新的貯蔵材料としてはMOF、炭素系吸着材料、クラスレート、カーボンナノチューブなどがある。

【技術課題】

理論的水素貯蔵量が高いものもあるが、現状では低貯蔵量であり、

その貯蔵量向上が望まれる。また極限条件（液体窒素温度や高圧）での貯蔵研究が行われているものが多いが、FCV使用環境でも利用できるように改良を行うことも必要である。

【実用化時期】

現状では基礎研究レベルであり、本格実用化は2030年以降と考えられる。

水素製造・輸送・供給技術ロードマップ

前回のロードマップでは「オンサイト方式水素ステーション技術」と「オフサイト方式水素ステーション技術」に分けているが、今回は両者を統合し、1つで水素製造・輸送・供給技術を包括して示すこととした。表13にロードマップにおける目標値を示す。

表13 水素製造・輸送・供給技術ロードマップの目標

	現状 (技術実証)	2015年 (普及開始)	2020年 (普及初期)	2030年 (本格商用化)
水素供給コスト ^{注1}	120 円/Nm ³ <small>オンサイト 5 億円ステーション (300Nm³/h) での水素供給コスト (ステーションコストから計算)</small>	90 円/Nm ³ <small>オンサイト 3 億円ステーション (300Nm³/h) での水素供給コスト (ステーションコストから計算)</small>	約 60 円/Nm ³ <small>目標: HEV と競合しうるコスト (ガソリン等価燃費)、オンサイト 2 億円ステーション (500Nm³/h) で達成</small>	約 60-40 円 /Nm ³ <small>目標: 大幅低減 (ガソリン等価燃費以下)</small>
オンサイトステーション ステーションコスト				
300 Nm ³ /h (充填圧力)	10~5 億円 (700、350 気圧)	4~3 億円 (700、350 気圧)	1.5 億円 (最適充填圧)	さらなる 低コスト 化
500 Nm ³ /h (充填圧力)	—	—	2 億円 (最適充填圧)	
うち水素製造 装置コスト				
300 Nm ³ /h	1.8 億円	約 0.9 億円	約 0.5 億円	—
500 Nm ³ /h	—	—	約 0.8 億円	—
オフサイトステーション ^{注2}				
水素輸送コスト				
圧縮水素	約 20 円/Nm ³	約 15 円/Nm ³	約 10 円/Nm ³	—
液体水素 (液化コスト除く)	約 6 円/Nm ³	約 3~6 円 /Nm ³	約 3 円/Nm ³	—

オフサイト水素 製造コスト	約 30 円/Nm ³	—	20~30 円 /Nm ³	—
------------------	------------------------	---	--------------------------	---

注1: 水素供給コストは、オンサイトステーションとオフサイトステーションに共通。ただしオフサイトステーションの場合、水素輸送コストとオフサイト水素製造コストを含む。

注2: 本ロードマップではオフサイトステーションコストは明示しないが、オンサイトステーションコストからオンサイト水素製造装置コストを除外したコストと同程度と考えられる。

水素インフラ技術の概要

水素供給技術:

水素供給技術は、基本的にオンサイトステーションとオフサイトステーションにおける共通技術であり、水素充填機（ディスペンサ）、蓄圧器、圧縮機、プレクーラー、水素ステーションシステム化技術（システム構成、配管、センサー類）から構成される。

オンサイト水素製造技術:

オンサイト水素製造技術は、天然ガス、ナフサ、軽油等の改質装置や水電気分解装置が含まれる。またメンブレンリアクターなどの新規の技術も開発されている。さらにオンサイトでのCO₂分離技術の適用も検討されている。

オフサイト水素製造技術:

オフサイト水素ステーション向けには、プラントで大規模に水素を製造する必要がある。その場合天然ガスやナフサの改質（将来的には炭素回収を併用）に加え、大規模水電解（将来的

には再生可能エネルギー由来電力利用)の利用が考えられる。さらに2030年に向かっては、原子力熱利用やバイオマス由来のような低炭素の水素製造技術も可能性がある。

- ・ オフサイト水素輸送技術：

オフサイトで水素を製造した場合、各水素ステーションに輸送する技術が必要である。現状では高圧水素輸送(トレーラー)と液体水素輸送が主な方法であるが、将来は欧米のような水素パイプラインも可能性がある。また水素輸送技術には、プラントでの水素の高圧化・液化技術や設備も含まれる。

一技術の全体的課題

- ・ 最適充填方式・最適充填圧力の検討：

現在までに350気圧充填と700気圧充填が実施されている。特に現在は700気圧充填の必要性が強調されており、それに適した構成要素技術の開発が必要となってきた。

さらに最近では、充填後にFCV車載容器が室温付近まで冷却された後も「満タン」を確保するために、700気圧フル充填や350気圧フル充填のための技術開発の必要性が指摘されている。

その一方で、2020年に向かっては水素貯蔵材料の開発により、充填圧力が低下する可能性もある。基本的に低圧ほどインフラ関連の部品・装置コストは低減するので、水素ステーションコスト低減さらに水素供給コスト低減の点では望ましい。

- ・ トータルシステムとしての耐久性等確認と最適性：

ステーションは個別要素だけでなく、統合システムとして最適化されなければならない。たとえば700気圧充填用ステーションでも、高圧用蓄圧器(700気圧級)での貯蔵を主体とすべきなのか、それとも低圧蓄圧器(400気圧級)を主体にして、直接圧縮充填で700気圧まで充填を行うのか、といったシステム仕様の検討が考えられる。

また水電解ステーションでも、高圧水電解装置は単体としては効率が高いが、圧縮機を用いるほうが全体効率は高くなるとも指摘されている(その一方で700気圧級では高圧水電解を用いて圧縮機を不要化したほうが、全体コストが低減するとの意見もある)。

さらに稼働率を高めて水素価格を低減させるためには、水素製造装置のDSS(Daily Start and Stop)運転の採用に加えて、熱サイクル耐久性の向上が必要となる。

このようにステーションは、あらゆる水素技術要素とその組合せ方が全体のコスト・効率に影響するので、総合的なシステムとして捕らえ、全体としての最適化を目指す必要がある。

一個別技術

- (1) 水素供給技術：水素充填機(ディスペンサ)

【特徴・現状】

わが国の水素ステーションでも350気圧用充填機と700気圧用充填機が開発され、すでに実用化されている。

また現状のJHFCステーションでも、5kg/3分の充填速度確保のた

めにプレクール（-20℃レベル）が実施されている。またFCV車載容器の状況をリアルタイムに把握しつつ、充填速度を向上させるために通信充填（赤外線通信利用）の必要性が指摘されている。

【技術課題】

すでにわが国でも700気圧用充填機が開発されているが、FCVに望まれる流量が確保できていないという問題が指摘されている。これは主に、配管などに使用される材料に制限があるためである。これまでに水素脆化に強いとして水素ステーションに利用されているのはSUS316Lであるが、SUS316等と比べて強度が劣るため、肉厚が増大する分だけ内径が細くなり、圧力損失が発生するためである。よって今後、ステーション用に使用できる材料の拡大が望まれる。

通信充填では、現在国際規格としてSAE TIR J2601（プロトコル）、同TIR J2799（通信方式）が定められており、わが国もこれに準拠した水素充填方式の採用と国際基準に準拠した製品（ノズル・レセプタクル）の開発が必要である。さらに充填機においては、通信用の電装品・制御装置を充填機内で格納する防爆ボックスの開発が必要である。

プレクールに関しては、SAE TIR J2601では-40℃までの冷却が求められているうえ、700気圧級ステーションでの5kg/3分の流量確保のためには必須と考えられている。よって-40℃級のプレクーラー装置を開発する必要があり、電氣的に冷却する方法や、液体窒素を使う方法が提案されているが、それぞれに一長一短があるので、ステーション規模やエネルギー効率、液体窒素の入手可能性などを考えて最適なシステムとする必要がある。またプレクール温度でも作動

できる緊急離脱カプラの開発や、ノズルとホースの霜・氷対策も必要となる。

なお、700気圧フル充填のためには、現状で700気圧用に設計されている充填機を、875気圧で再設計する必要がある（特にホース、流量計、ノズル・レセプタクル、緊急離脱カプラ、配管等）。配管等の材料には、依然として強度の低いSUS316Lのみが耐水素脆化材料として推奨されているが、875気圧（設計圧100気圧以上）では強度計算式に乗らない（無限の厚さになる）ことも知られている。875気圧システムを実現するには、利用できる材料の拡大あるいは利用する材料の法的な位置づけを明確にする必要がある。なお、充填圧力が極めて高いことから、充填時に容器温度が上限温度近くまで上昇する可能性が高く、通信充填の採用（車載容器温度の計測）が不可欠とされる。また、350気圧フル用充填機も設計見直しとなるが、現状では適切な材料がないのが課題である（700気圧用の材料はもちろん使用できるが、オーバースペックになるとされる）。

なお、現状で水素は課金されていない場合が多いが、将来の課金の場合には、水素充填量の正確な把握が必要となる（ホースやノズルでの残水素量も影響してくる）。計量法が定める2%以内の精度を担保するために、充填機としては1%程度の流量精度が求められる。

水素ステーションの規模拡大（300Nm³/h→500Nm³/h、それ以上）に関しては特に充填機としての対応項目はないが、バスなどの大型車両に水素を充填する場合は大容量（5kg/3分以上）が必要となる可能性がある。その場合は新規の設計が必要となる可能性がある。

【実用化時期】

通信充填は、現在 JHFC で 2010 年半ばから日本でも実証が行われる予定である。基本的に通信充填は国際規格であるため、今後設置されるステーションには必須と考えられる。

700 気圧フル充填は、その必要性が指摘されたばかりであり、今後技術実証等を行い、基本的に 2015 年までには整備されることが望ましい（ただし、700 気圧フル充填が、700 気圧級水素ステーションの標準仕様となるか、あくまでステーションのオプションの一つとするかは、検討は必要である）。

（2）水素供給技術 蓄圧器

【特徴・現状】

蓄圧器は高圧水素を貯蔵するもので、350 気圧級また 700 気圧級とも実用化されている。

次世代技術として、FCV 車載用に開発されている複合容器（Type3）を長尺化し、蓄圧器に利用することが研究されており、鋼製容器よりも軽量となると期待されている。なお米国ではすでに Type4 蓄圧器での運用が始まっている。

また将来的には、水素吸蔵合金も搭載したハイブリッド容器技術の適用も考えられる。

【技術課題】

鋼製蓄圧器では材料開発が課題である。現状で、350 気圧級でクロムモリブデン鋼（SCM435）が使用されており、700 気圧級ではニッケルクロムモリブデン鋼（SNCM439 リテンパー材など）が利用されているが、水素脆化耐性と耐久性の確保が必要である。

また非破壊検査技術の確立も望まれる。現状でアコースティックエミッション法などが提案されているが、まだ実証段階である。さらに商用ステーション向けに大容量化も必要であるが、長尺化は製造・輸送・設置が困難になるという問題もある。

複合容器製蓄圧器はまだ研究開発段階であり、今後実証が必要である。基本的には車載用高圧水素容器と同じ技術であり、ステーションに設置するために車載容器よりも安全性や耐久性の技術要求は低い（ほぼ最高圧力付近を常時維持するため、圧力サイクル的にも車載容器よりも負荷は低いと考えられている）。その一方で長尺ライナーの製造技術（熱処理技術）、CFRP のワインディング技術の開発が必要となっている。また車載容器と同様に、広範なライナーの検討も必要と考えられる。特に蓄圧器は固定設置されるため、重量面での制約が低いことから、鋼製ライナーの複合容器も検討される可能性がある。

金属吸蔵合金を用いてハイブリッド化する場合は、内部に搭載する大型カートリッジと熱交換器の開発、さらに熱マネジメント技術の開発も必要となる。

鋼製蓄圧器、複合容器製蓄圧器とも、低コスト化は共通の課題である。特に 700 気圧級水素ステーションでは、圧縮機を持った直接充填方式が提案されていることもあり、蓄圧器のコスト低減の可能性を十分に見極める必要がある。

【実用化時期】

鋼製蓄圧器はすでに実用化されているが、さらなる低コスト化が求められる。特に材料面の開発が望まれている。

複合容器製蓄圧器は開発段階であり、今後、実証が進み、本格利用は2015年以降と考えられる。

また将来は車載用ハイブリッドタンクの開発の進展によっては蓄圧器にも展開が可能であろう。

(3) 水素供給技術：水素圧縮機

【特徴・現状】

400気圧級圧縮機はすでに実績が多くあり、1000気圧級圧縮機も開発され、いくつかのステーションで試用されている。

2009年度以降、700気圧水素ステーションのコスト低減のために、大容量高压用蓄圧器を設置するかわりに、800～1000気圧級圧縮機による直接充填（400気圧蓄圧器を元圧とし、1000気圧レベルに加圧すると同時にFCVに充填する）ことが提案されており、それに対応した圧縮機の開発の必要性が高まっている²。

直接充填用圧縮機としては、従来のレシプロ式圧縮機とともに、ドイツで実績のあるイオニックコンプレッサ（ピストンの代わりにイオン液体を利用して加圧する）の開発も検討されている。

【技術課題】

レシプロ式圧縮機では、さらなるコストダウンと耐久性向上が必要である。耐久性については、装置として1万時間以上が望ましい

² 直接充填では、高压蓄圧器を持たずに圧縮機のみで充填するパターンや、ある程度まで高压蓄圧器による差圧充填を行い、最後だけ圧縮機による直接充填を行う（押し込み充填）などのパターンが考えられており、今後最適なシステム構成に関する検討が進むと期待される。

が、可動部（ピストンリングなど）はあえて消耗品と考え、メンテナンスで対応するという考え方もある。

また効率（圧縮効率・圧縮エネルギー）という指標も重要であるが、同時に寿命やコストともトレードオフがある。

最近提案されている直接充填用圧縮機は、既存のレシプロ式圧縮機でも対応できるとも考えられるが、それでも負荷変動対応、高耐久性の確保が課題である。また、FCVが急に発進してしまった場合の安全対策の検討が必要である。

わが国にもイオニックコンプレッサのための基本的な要素技術はあるが、水素圧縮に適したイオン液体の開発が課題となっている。

【実用化時期】

レシプロ式圧縮機はすでに実用化されているが、2015年～2020年に向かって、更なるコストダウンが望まれる。

わが国におけるイオニックコンプレッサの実用化は2015年以降になると考えられる。

また直接充填方式に適した圧縮機の開発・実証は商用ステーションの展開前には完了することが期待される（2015年頃）。

将来（2020年～）においては、低コスト化とコンパクト化、さらに圧縮効率の向上が不可欠である。

(4) オンサイト水素製造技術：水蒸気改質・膜反応器

【特徴・現状】

天然ガスやLPGを水素ステーションで改質して水素を製造するオンサイト水蒸気改質（PSAを含む）は、現状で小型（100Nm³/h）のも

のが実用化されている。

またメンブレンリアクターのように、改質と同時に水素精製を行う水素製造技術装置も開発中である。

【技術課題】

まずは水素製造効率の向上とコスト低減が望まれる。コストは、現状の 50Nm³/h 規模のシステムで約 8 千万～1 億円と言われているが、その大幅な削減が望まれる。水素製造効率は現状で 70%HHV 程度であるが、将来は 75～85%HHV 以上が望まれる。

また、商用ステーションとしては 300Nm³/h レベルの能力が必要とされており、スケープアップとともにコンパクト化が必要である。

なお、現状では夜間など低需要時には水素製造装置を停止させずにアイドル状態で運転を持続させているが、ステーションとしての正味効率が低下する。そのため DSS (Daily Start and Stop) 運転の実施が求められているが、熱サイクルに対する耐久性やスタートアップ時間の短縮が必要である。

次世代技術であるメンブレンリアクターは、実用化のための実証が必要であるとともに、低コスト化と耐久性の確保が必要である。

さらに、低炭素水素の供給の点ではオンサイト二酸化炭素回収技術も必要であり、低コストな水素分離技術が望まれる。

【実用化時期】

現状の水素製造装置に関しては、コスト・製造効率面での改良が今後とも必要である。本格商用ステーション (300Nm³/h) 用として、コンパクト・高効率・DSS 対応機も 2015～2020 年には実用化されると考えられる。

次世代技術であるメンブレンリアクターの本格実用化は 2015 年以降と考えられるが、引き続きコストダウンが望まれる。

オンサイト二酸化炭素回収は今後実証が行われる予定で、2020 年～2030 年には本格運用が開始されると考えられる。

(5) オンサイト水素製造技術：水電解

【特徴・現状】

水電解 (アルカリ水電解) は工業的に実績のある技術である。また水素ステーション用では、すでにわが国の相模原水素ステーションで運用が行われている。

将来技術として固体高分子型 (PEM 型) 水電解装置の開発も進められている。

【技術課題】

水電解は電力を利用するため、まずは高効率化が最大の課題であり、同時に低コスト化が必要である。

高効率性のためには、高圧水電解方式も検討されているが、システムの耐久性の確保とともに、高圧で発生する水素・酸素を適切に制御する技術の確立が必要である。なお、高圧の場合、効率向上とともにコスト高になるとも考えられ、外部加圧 (圧縮機利用) とのコストバランスを検討する必要がある。また、水素ステーションの DSS 運用に適した耐久性も必要である。

再生可能エネルギー由来電力を直接利用して、低炭素排出の水素を製造することも期待されているが、その場合は揺らぎの大きい電力を使うことになるため、膜・電極の耐久性向上とともに、補機の

定常運転を確保する必要がある。

【実用化時期】

アルカリ水電解は大型プラントで実用化されており、水素ステーション用にコンパクト化・高効率化・低コスト化が必要である。

一方、固体高分子型水電解は現在技術開発が進められており、水素ステーション用システムの実用化は2020年頃と考えられる。

さらに再生可能エネルギー由来電力を利用する技術の確立も2020年以降に望まれる。

(6) オフサイト水素製造技術：水蒸気改質

【特徴・現状】

オフサイトの水蒸気改質は、すでに製油所などで商業運転されている。

【技術課題】

製油所で使用される水素の純度は97%程度であるため、そのままでは水素ステーションには適さない。よって新たにPSAなどの水素精製装置を設置して99.99%以上の純度を確保する必要がある。さらに大規模出荷のために、輸送用トレーラへの積み込みのための出荷設備（200気圧級あるいは400気圧級の圧縮機と、蓄圧器）をプラントに設置することが必要となる。

さらに将来に向かっては水素製造の低炭素化が求められ、大規模プラントの利点を生かした炭素隔離も行う必要がある。一方、それは水素供給コスト（出荷コスト）の上昇要因となるため、今後炭素隔離技術のコスト検討が必要である。

【実用化時期】

すでに技術的には完成しているが、2015年に向かっては規模の拡大による低コスト化が望まれる。また炭素隔離による低炭素水素の供給は2020年以降と予測される。

(7) オフサイト水素製造技術：水電解、その他の製造技術

【特徴・現状】

将来の低炭素社会に貢献するためには、水素製造における再生可能エネルギーの利用は不可欠と思われる。そのための技術としては、大規模水電解、バイオマスガス化、バイオ利用（水素生産酵素など）、光化学的生産などがある。また、再生可能エネルギーではないが、原子力由来電力を利用した水電解や、第四世代原子炉の排熱を利用した水直接熱分解などが考えられる。

ただし、2015～2020年を見据えた大規模な低炭素水素の製造技術としては、基本的に水電解が本命といえる。

【技術課題】

アルカリ型水電解はすでに産業規模で実現されており、実用レベルの技術である。また将来的には固体高分子型水電解の技術も実現されると考えられる。

再生エネルギーとの組合せでは、特に電力変動への対応が不可欠である。アルカリ水電解の場合は電解槽や電極自体には特に工夫は不要だが、制御系や補機の電力変動対応（あるいは系統電力利用）が必要である。固体高分子型水電解は、制御系や補機の対応に加えて、変動電力が電極触媒に与える影響についての評価が必要である。

【実用化時期】

アルカリ型水電解はすでに実用化されているが、再生エネルギーとの組合せによる大規模水素製造は2020年以降と考えられる。固体高分子型水電解は2015年にかけて実証が進み、2020年に商用化され、再生エネルギーとの組合せによる大規模水素製造も可能になると思われる。

水電解以外では、第四世代原子炉の排熱を利用した水直接熱分解は2030年以降に実現されると考えられるが、わが国の原子力政策とも足並みをそろえて展開される必要がある。

(8) 水素輸送技術

【特徴・現状】

集中的に製造された水素は効率よく各ステーションに輸送する必要がある。輸送技術としては

- ・ 高圧水素輸送
- ・ 液体水素輸送
- ・ パイプライン輸送
- ・ 有機ハイドライド輸送

などが考えられる。

【技術課題】

高圧水素輸送は確立した技術であるが、最近では車載用複合容器技術を用いた軽量輸送用容器の開発が検討されている。その場合には複合容器製蓄圧器と同様に、長尺ライナーの製造技術（熱処理技術）、CFRPワインディング技術が必要である。高圧水素輸送では、現

状の200気圧での輸送に加え、400気圧での輸送技術も開発されているが、鋼製容器では重量が大きくなってしまうので、より軽量の複合容器を利用した輸送技術の開発が必要である。

液体水素輸送も大規模水素輸送では実績がある技術であるが、水素の液化で、それ自身が有するエネルギーの1/3程度を失うことが最大の問題である。LNGの冷熱を使える場合はより効率よく冷却できるが、常に冷熱の利用が可能とは限らない。今後、高効率液化装置（磁気冷却技術）などの開発が望まれる。また、液体水素輸送のコスト面での優位性は、液化コストも加味して評価さえる必要がある。

なお、液体水素容器でも、よりボイルオフガスが少ない液体水素コンテナの開発も行われている。特に運用圧力が1気圧G³程度と低圧であるため、CFRP（ガラス繊維強化プラスチック）を用いた複合容器の研究開発が進められている。

パイプラインは、低圧のものはプラントなどで我が国でも実績がある。欧米では高圧のパイプラインの例もあるが（例、フランクフルト水素ステーションでの1000気圧パイプライン）、基本的には設置に係る法規制のみで、技術的ハードルは低い。

有機ハイドライドはまだ基礎研究レベルである。発がん性の問題がないメチルシクロヘキサン＝トルエン系の採用が有力だが、今後

³ ゲージ圧（大気圧との差圧）。

はリアクタの開発、エネルギー効率の検討、本技術を適用するための水素インフラの構築などの課題を検討する必要がある。

水素の輸送は、輸送規模が大きくなり、また輸送距離が大きくなれば、圧縮水素輸送よりも液体水素輸送のほうが低コストになる。しかし水素製造設備での水素液化が必要となるため、将来的には液化コストの低減（液化装置の低コスト化）が必要である。基本的には液化コストは、圧縮水素輸送コストと液体水素輸送コストの差に収まることをめざすべきである。ただし液体水素式オフサイトステーションを低コストで実現できれば、輸送段階での液化コスト目標を緩和することもできると考えられる。

【実用化時期】

高圧水素輸送における複合容器の実用化は、2020年以降と想定されるが、FCV普及と車載用容器の量産によって、技術が進展し、導入が促進される可能性もある。

液体水素輸送はすでに実用化段階技術であるが、高効率な液化装置の実用化による低コスト化の実現は2020年以降になると思われる。

有機ハイドライド輸送は基礎研究レベルであり、実用化は2030年以降と思われるが、特に超長距離（海外）からの輸送ではコストメリットが出てくると思われ、2015年以降に技術実証が行われると期待される。

＜水素供給コストとステーションコストの考え方＞

水素供給コストとステーションコストの目標

(1) 水素供給コストとステーションコストの関係

水素供給コストは、ステーションの年間固定費と年間変動費、さらに年間水素供給量から、以下の計算式で算出することができる(図17)。

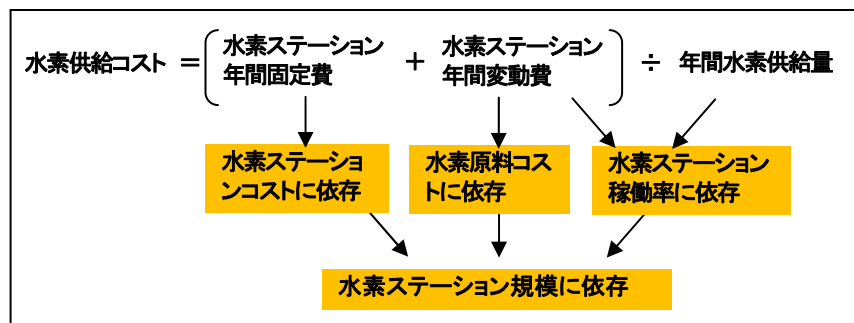


図17 水素供給コストと水素ステーションコスト・規模との関係

また水素供給コストと水素ステーションコストに関しては、水素ステーションコストから水素供給コストを求める方法(ボトムアップアプローチ)と、水素供給コストからそれを実現可能な水素ステーションコストを求める方法(トップダウンアプローチ)がある(図18)。本ロードマップでは、現在と2015年に関してはボトムアップアプローチを、2020年以降に関してはトップダウンアプローチを採用した。

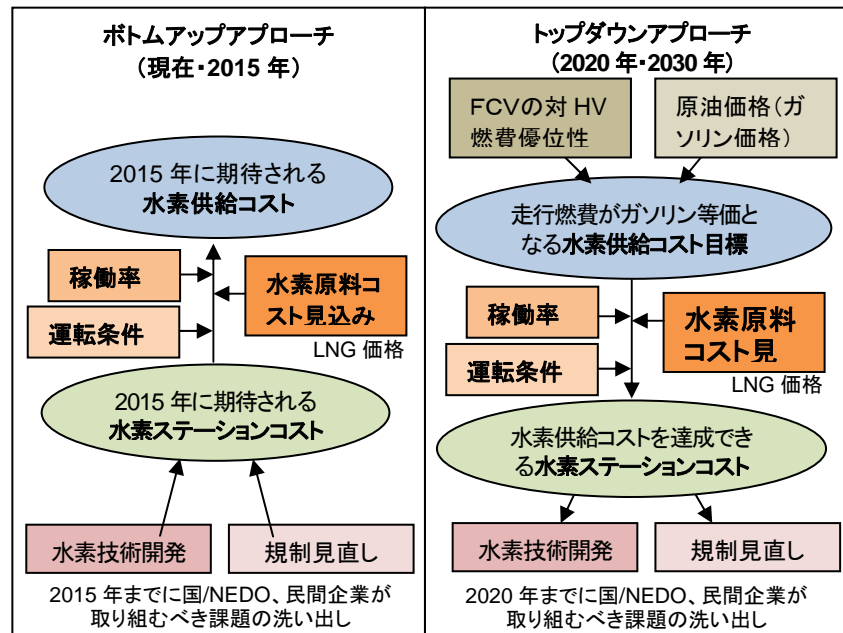


図18 水素供給コストと水素ステーションコストの考え方

以上の考えに基づき、ステーションコストと水素供給コストの関係を試算した。試算では以下の仮定を設定した。

- ・ ステーションコスト：
ステーションコストは装置コストとエンジニアリング費用の合計とし、充填圧力、充填方式(差圧、直接)、プレカールの

有無などの仕様の違いは全てコストに反映されるとした。

・ 水素ステーション年間固定費：

固定費は、以下のものを考慮した。

- ・ 減価償却（10年）
- ・ 修繕費（建設費の3%）
- ・ 保険料（建設費簿価の0.77%）
- ・ 固定資産税（建設費簿価の1.4%）
- ・ 人件費（700万円×人数）
- ・ 労務費（人件費の20%）
- ・ 土地代（1万円/Nm²×ステーション敷地面積）

・ 水素ステーション年間変動費：

変動費は以下のように計算される。

オンサイト変動費＝都市ガス代＋電気代＋上水道代＋下水道代

オフサイト変動費＝電気代

ここで、各項目の消費量については、JHFC 商用インフラ WG における 300Nm³/h ステーションの試算（稼働率 100%）を参考にした（オンサイトの場合：都市ガス使用量 54.6 万 kg/年、電気使用量 153 万 kWh/年、上水道使用量 3400 トン/年、下水道使用量 1700 トン/年。オフサイトの場合：電気使用量 110 万 kWh/年）。なお、500Nm³/h ステーションの試算は十分に行われていないため、300Nm³/h から 500Nm³/h への拡大率として、都市ガス代は 5/3 倍、電気代・上水道代・下水道代は 1.3 倍を仮定した。また、各項目の価格については、都市ガス料金は LNG 価格に比例して上昇すると仮定し、電力料金・上水道料金・下水道料金

は、2020 年には 1 割、2030 年には 2 割上昇すると仮定した。

・ 年間水素供給量：

年間水素供給量は規模、稼働率、運用時間に依存する。ここでは稼働率 80%（参考で 100%）、運用時間 13～15 時間とした。

表 14 に、試算における仮定を整理する。

表 14 水素供給コスト、水素ステーションコストの試算の仮定

エネルギーにおける仮定	現状・2015年	2020年	2030年	注
原油価格（ドバイ）	85 ドル/バレル	95 ドル/バレル	105～120 ドル/バレル	IEA、DOE/EIA、エネ研の予測を勘案。
輸入LNG 価格	520 ドル/トン	800 ドル/トン	1075 ドル/トン	エネ研の予測による。
都市ガス価格	50 円/kg	75 円/kg	100 円/kg	LNG 価格に連動。
電気代	12 円/kWh	13 円/kWh	14 円/kWh	現状に比較し、2015年は同等、2020年は1割高、2030年は2割高。
上水道	300 円/トン	330 円/トン	360 円/トン	
下水道	200 円/トン	220 円/トン	240 円/トン	
稼働時間	13 時間	14 時間	15 時間	セルフ充填により稼働時間は増え、作業員人数は減少する。
作業員人数	2.0 人	1.5 人	1.0 人	
オンサイト水素製造効率	75%	80%	85%	
敷地面積				2015年以降、年間5%程度のコンパクト化を想定。
300Nm ³ /h規模	600 m ²	450 m ²	300 m ²	
500Nm ³ /h規模	800 m ²	600 m ²	400 m ²	

試算されたステーションコストと水素供給コストとの関係を図 19～図 22 に示す。本グラフが示すように、水素供給コストに与える稼働率の影響は大きい。なおオフサイトステーションでは、別途プラントでの水素製造コスト、水素輸送コストを加味する必要がある。

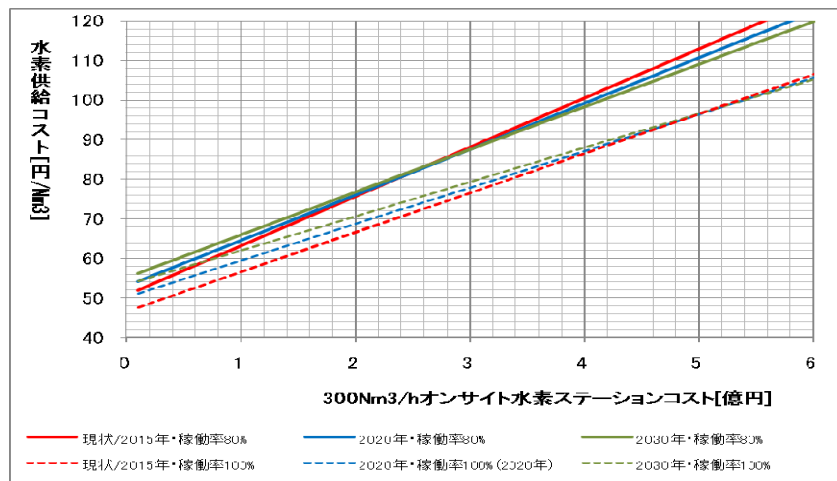


図 19 水素供給コストとステーションコストの関係
(オンサイト、300Nm³/h の場合)

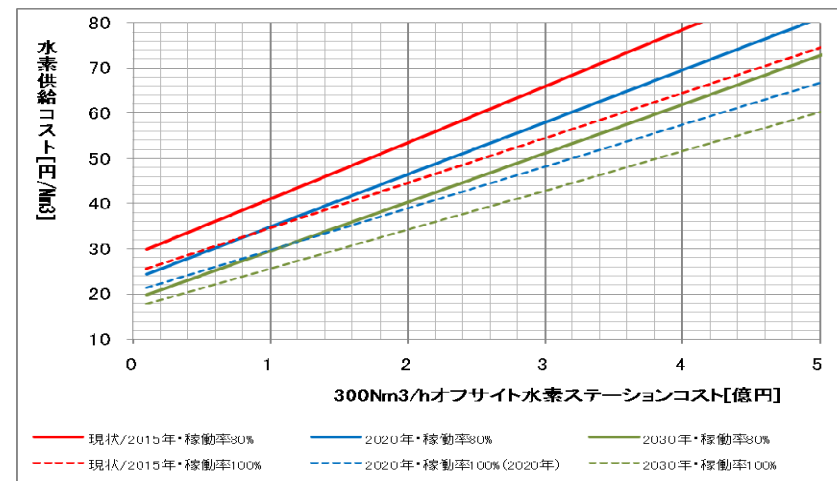


図 21 水素供給コストとステーションコストの関係
(オフサイト、300Nm³/h の場合)

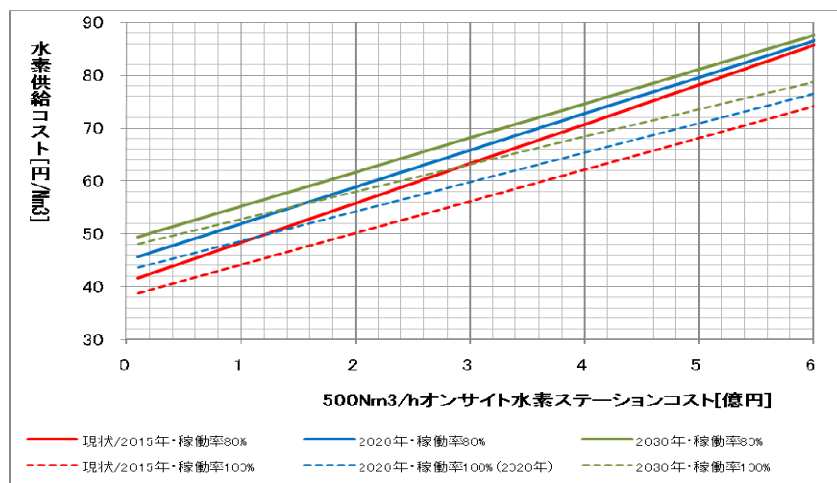


図 20 水素供給コストとステーションコストの関係
(オンサイト、500Nm³/h の場合)

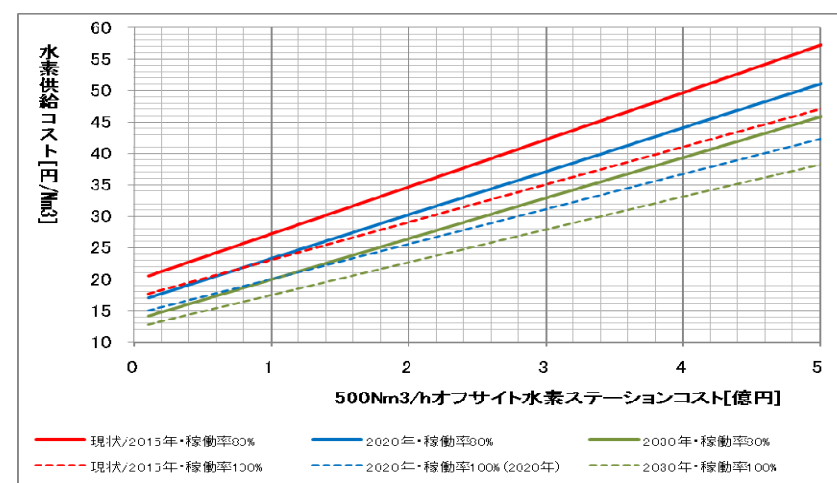


図 22 水素供給コストとステーションコストの関係
(オフサイト、500Nm³/h の場合)

(2) 現状・2015年（ボトムアップアプローチ）

JHFC プロジェクトにおいて、商用規模の水素ステーションのコストが試算されている。

本試算では、商用規模（300Nm³/h）のオンサイトステーションにおいて、現状の350気圧ステーションで5億円程度、700気圧ステーションで6～10億円と試算されており、2015～2020年の本格商用化時期の350気圧ステーションで3億円程度、700気圧ステーションで4～7億円と試算している。またそのステーションコストから試算される水素供給コスト（稼働率100%を想定）は、現在で90円/Nm³（350気圧）～140円/Nm³（700気圧）、将来で70円/Nm³（350気圧）～80円/Nm³（700気圧、直接充填）と試算されている。

水素ステーション コスト		35MPa		70MPa			
		(差圧充填)		(差圧充填)		(直接充填)	
		現在	将来	現在	将来	現在	将来
オンサイト ステーション 建設費(億円)	300Nm ³ /h オンサイト水素 ステーション	4.8→2.9		10→6.8		6.3→3.8	
水素コスト (円/Nm ³)	フル稼働 (13h、365日)	90→70		140→110		100→80	

*原料都市ガス:44円/Nm³ *将来:2015-2020の間 *オフサイトステーションコスト検討中

図 23 JHFC プロジェクト商用インフラ WG における
試算結果（2009 年度）

出所：2009 年度 JHFC セミナーにおける報告

このような試算を参考に、本ロードマップでは現状と2015年のオンサイト水素ステーションコストと水素供給コストを表15（図24）

のように定めた。水素供給コストは、稼働率80%、変動費は現状のコスト（例、都市ガス価格：50円/kg）を想定した。

表 15 オンサイト水素ステーションコスト目標と水素供給コスト
目標（現在・2015年）

年度	現状	2015年
オンサイト水素ステーションコスト (300 Nm ³ /h の場合)	10 億円 (700 気圧、差圧充填) ～5 億円 (350 気圧、差圧充填)	4 億円 (700 気圧、直接充填) ～3 億円 (350 気圧、差圧充填)
	↓	↓
水素供給コスト ・稼働率 80% ・変動費は現状のコストを適用	120 円/Nm ³ 〔5 億円ステーションの場合〕 〔図中の A 点〕	90 円/Nm ³ 〔3 億円ステーションの場合〕 〔図中の B 点〕

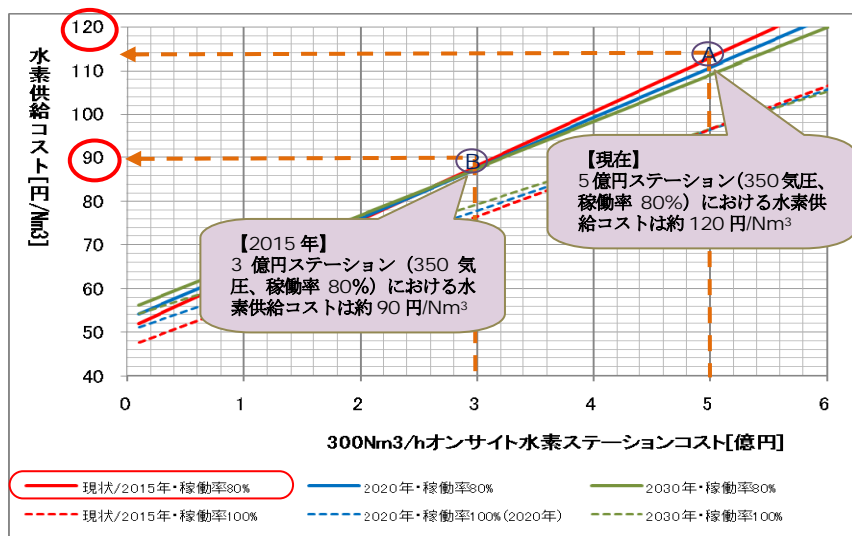


図 24 オンサイト水素ステーションコスト目標と水素供給コスト目標（現状と 2015 年）

300Nm³/h オンサイト水素ステーション（コスト 3 億円）に関して、主要な条件の変動が水素供給コストに与える影響を図 25 にまとめる。最も水素供給コストに影響を与えるのは稼働率であり、80%から60%に低下すると水素供給コストは 90 円/Nm³ から 108 円/Nm³ に上昇する。営業時間の影響も大きく、2 時間延長すると水素供給コストは 78 円/Nm³ に低下する。都市ガス価格が 50 円/kg から 60 円/kg に上昇すると、水素供給価格は 94 円/Nm³ に上昇する。また比較的影響が大きいのが人件費であり、スタッフが 2 名（700 万円/年×2）から 3 名（700 万円/年×3）に増えると、水素供給コストは約 1 割上昇する。電気代や土地代の影響は比較的小さいと言える。

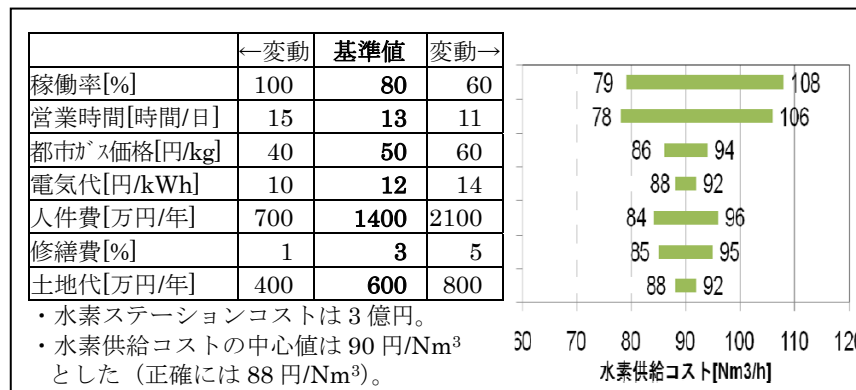


図 25 感度分析：各要素が水素供給コストに与える影響

(3) 2020年の水素供給コストと水素ステーションコスト

2020 年に関しては、トップダウンアプローチ（水素供給コスト目標から水素ステーションコストを求める方法）を採用した。まず F C V の燃費優位性を考慮した上でのガソリン等価となる水素供給コスト（走行燃費がガソリン等価となるコスト）を求める（次式）。

$$\text{水素供給コスト} = \text{ガソリン価格} \times \text{水素/ガソリンの熱量比} \times \text{競合車両に対するFCVの燃費優位度}$$

さらにガソリン価格と F C V の燃費優位度を以下のように仮定した。

- ・ 2020 年時点でのガソリン価格（税抜）：
2020 年における輸入原油価格（ドバイ原油）を 95 ドル/バレル

ルと想定、その時の税抜ガソリン価格を 100 円/L と設定した⁴。
 なお水素供給コストは、当面は税込ガソリン価格と比較すべき
 との意見もあるが、本格商用化時期では水素もガソリン同様に
 課税される可能性も高いため、税抜ガソリン価格と比較した。

- ・ 2020 年時点での競合車両に対する F C V の燃費優位度：
 2020 年時点での F C V の対抗車種はハイブリッド車と仮定し、
 F C V の対ハイブリッド車燃費優位度を 1.7~2 と仮定した⁵。

この結果、2020 年のガソリン等価水素供給コストは 55~65 円/Nm³
 と試算されるので⁶、目標を中間値の約 60 円/Nm³に設定した。さらに
 図 26 に基づき、水素供給コスト 60 円/Nm³を実現できるオンサイト
 ステーションコスト目標を約 2 億円 (500 Nm³/h 規模) と定めた。ま
 た約 2 億円で 500Nm³/h ステーションを実現できた場合には、300Nm³/h
 ステーションは約 1.5 億円程度で実現可能と考えられる⁷。

⁴ 2006~2009 年における税抜ガソリン価格 (y、円/L) とドバイ原油価
 格 (x、ドル/バレル) の実績データの回帰分析より、両者の関係を y
 $= 0.621x + 43.3$ ($R^2=0.67$) とした。

⁵ 2009 年度 JHFC セミナーにおける報告では、F C V 最新車両の燃費は
 32~43.6 km/L (ガソリン等価燃費) であり、現状の同等車種のハイ
 ブリッド車の燃費の 2~2.4 倍である。しかし今後中大型ハイブリッ
 ドも燃費向上する余地もあるため、燃費優位度を 1.7~2 倍と設定し
 した。

⁶ 水素供給コスト=税抜ガソリン価格(100 円/L)×F C V の燃費優位度(1.7
 ~2)= 170~200 円/L= 55~65 円/Nm³。なおガソリン 1 L=3.07
 Nm³-H₂ とした (熱量はガソリン 45.1MJ/kg、水素 120MJ/kg)。

⁷ 一般にプラントの規模拡大時のコスト上昇では 0.7 乗則が当てはまる
 (300Nm³/h→500Nm³/h でのコストアップは $(5/3)^{0.7}=1.4$)。よって：

2020 年の水素供給コスト目標とオンサイト水素ステーションコス
 ト目標を表 16 にまとめる。なお 2020 年の水素供給圧力は定めない。

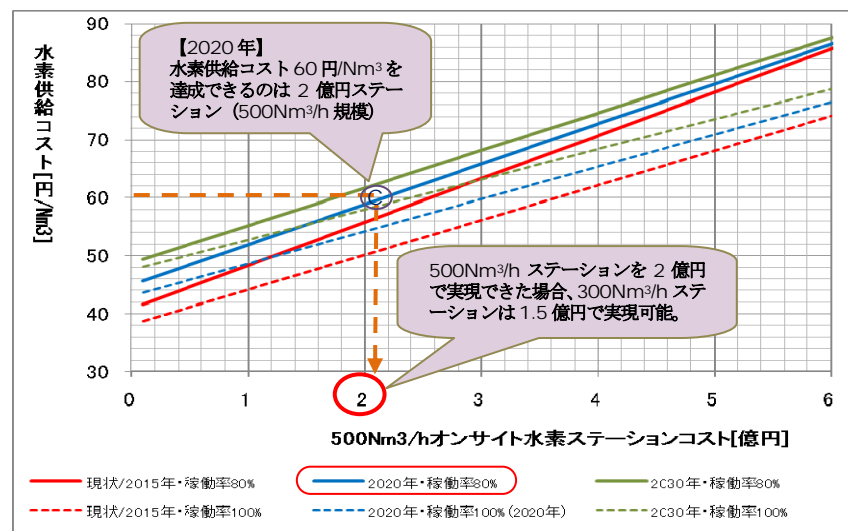


図 26 水素供給コスト目標とオンサイト水素ステーションコスト
 目標 (2020 年)

$$300\text{Nm}^3/\text{h ステーションコスト} = 500\text{Nm}^3/\text{h ステーションコスト} \div 1.4$$

$$= 2 \text{ 億円} \div 1.4 = \text{約 } 1.4 \text{ 億円。}$$

表 16 水素供給コスト目標とオンサイト水素ステーションコスト
目標 (2020年・2030年)

年度	2020年	2030年
水素供給コスト	60 円/Nm ³ (ガソリン等価燃費 による目標値)	60~40 円/Nm ³ (ガソリン等 価燃費以下)
	↓	
オンサイト水素ステーションコスト ・500 Nm ³ /h の場合 ・300 Nm ³ /h の場合	2 億円 (図中のC点) 1.5 億円	(さらなる低 コスト化)

水素供給コスト約60円/Nm³を実現できるオフサイトステーションの試算を図に示す。仮に500Nm³/h規模のオフサイトステーションコストを1.2億程度とした場合(水素製造設備コストを0.8億円程度と想定)、ステーションでの水素供給コストは約25円/Nm³程度となり、許容される水素製造コスト(プラント)・輸送コストの目標は約35円/Nm³となる。

本ロードマップでは、2020年におけるプラントでの集中型水素製造コスト目標を20~30円/Nm³、また水素輸送コスト目標を高圧水素輸送の場合で10円/Nm³(液体水素輸送の場合は3円/Nm³)としており、前述の許容される製造・輸送コスト目標に収まっている。

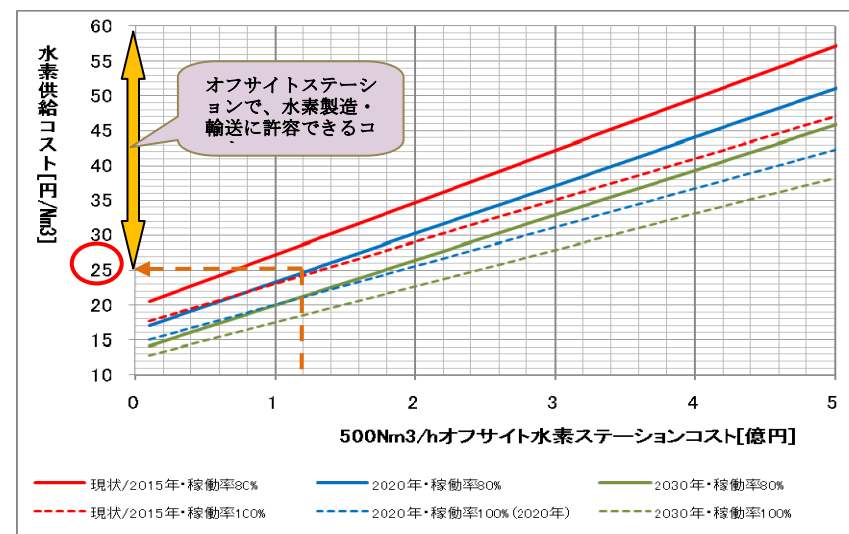


図 27 オフサイトステーション (500Nm³/h) での
水素供給コスト試算結果

規制見直し等の必要性

2020年に向けての技術開発目標を達成するには、水素技術(水素貯蔵、水素製造、水素輸送、水素供給)の技術開発に加え、規制見直しの推進によって水素インフラや水素車載容器の大幅なコストダウンを進める必要がある。

これまでに FCCJ において規制見直し項目(44項目)が整理され、またこの見直し項目を元に、JHFC 安全性・規制見直し検討会にて緊急性の高い重点項目が整理されている(表 17)。

表 17 水素ステーションに関する規制見直しの重点項目

ランク	重点課題	法令	
特A	70MPa法整備	高圧ガス保安法	
	・保安距離の見直し	高圧ガス保安法	
	・保安統括者の常駐義務見直し	高圧ガス保安法	
	・ガソリンスタンドとの併設許可	消防法	
	・水素スタンドの建設可能地域拡大	建築基準法	
	使用可能鋼材の拡大	鋼材規制 の見直し	高圧ガス保安法
	設計基準(耐圧安全係数)の見直し		高圧ガス保安法
	容器則の複合容器の範囲拡大(輸送用)		高圧ガス保安法
	市街地における水素保有量の増加		建築基準法
	CNGと水素スタンドの保安距離不整合見直し		高圧ガス保安法
A	開放検査の周期延長、保安検査の簡略化	高圧ガス保安法	
	容器則の複合容器の範囲拡大(スタンド用)	高圧ガス保安法	
	保安距離の更なる見直し	高圧ガス保安法	
	改質器の無人暖気運転の許可	消防法	
	防爆性能の見直し	高圧ガス保安法	
	蓄圧器、圧縮機等のキャノピー上設置	高保法、消防法	
B	ディスペンサー並列設置	消防法	
	公道でのFCVへの充填	高保法、道交法	
	基準温度の見直し/海外との整合	高圧ガス保安法	

注)ハッチング部：新たな試験法およびデータ取得が必須と思われる項目

出所：JHFC 安全性・規制見直し検討会

また、エンジニアリングコスト（工事・設計費）は 700 気圧ステーションで現在3億円程度であるが、将来はステーションの規格化、スキッド化によって、2015年には1億円程度に、2020年には数千万円レベルに低減させることが必要である。

固体高分子形燃料電池 (PEFC) ロードマップ (定置用燃料電池システム)

～世界最先端の、家庭での高効率発電・給湯システムを早期に実用化し、CO2削減へ貢献～

	現在 (2010年時点)	2015年頃 普及期	2020年頃 普及拡大期	2030年頃 本格普及期
発電効率*	約33%/37%	33%/37%	33%/37%	>36%/40%
耐久性** (起動停止回数)	4万時間	6万時間(起動停止4000回)	9万時間(起動停止4000回)	9万時間(起動停止4000回)
最高作動温度	約70℃	約90℃	約90℃	約90℃
システム価格***	200～250万円	約50～70万円 (10万台/年/社**** 生産ケース)	約40～50万円 (20万台/年/社 生産ケース)	<40万円 (100万台/年/社 生産ケース)

定置用PEFCシステムの現状・成果

- 家庭用燃料電池システム「エネファーム」の一般販売開始(2009年度販売実績5258台)
- 発電効率約33%/37%
総合効率約79%/85%達成
- 耐久性4万時間達成(起動停止4000回)
- スタック・部材低コスト化の進展
- 周辺機器の共通仕様化・連携開発によるシステム低コスト化の進展
- 反応・劣化機構解明、各種基礎解析・評価手法の進展

普及期に向けた技術課題

- MEAの高温・低加湿運転対応(電解質・イオンマー高性能化)
・最高作動温度90℃
・相対湿度<30%RH
- MEAのCO耐性向上(高CO濃度耐性アノード触媒)
・改質ガスCO濃度500ppmで運転可
- MEAの不純物耐性向上(性能への影響度データベース化)
- 低白金化技術(1g/kW)
- 白金代替の電極触媒(カーボンアロイ触媒、酸化物系非金属触媒、等)
- 燃料改質系触媒の高性能化(CO変性触媒、CO選択メタン化触媒)
- 適用分野の拡大
・燃料多様化(国産/海外天然ガス、一般灯油、等)
・用途拡大(自立型システム、防災対応システム、等)

普及拡大に向けた技術課題

- MEAのロバスト性・耐久性
更なる向上

本格普及期に向けた技術課題

- 発電効率の向上(スタック性能向上)
- 適用分野の拡大(純水素型システム****、等)

基盤技術強化

- MEA材料の構造・反応・物質移動解析技術
- 劣化機構解析技術(連続運転・起動停止・負荷サイクル、等)
- セル評価解析技術(共通基盤的な評価・解析技術)

実用化技術開発(民間主体)

- システムコスト低減
- セル大面積化、スタック低積層化、周辺機器の開発
- システム大幅簡素化、低廉材料・部品の採用
- コスト低減のための生産技術開発
- 量産技術開発

標準・規格・基準

- 国際標準化推進中(TC105、IEC62282シリーズ7件発行)
- MEA耐久評価試験方法の標準化
- 国際標準規格への反映
- 国際標準(IEC62282シリーズ)の改訂
- 国際市場での優位性確立、国際間取引の円滑化

反応・劣化・物質移動現象の解明によるMEA開発の加速

備考

*「発電効率」は、HHV/LHVで記載。
**「耐久性」は、連続運転時間に加え、括弧内に記載の起動停止を含めた運転時における運転可能時間を示す(メーカー各社の試験方法に基づく)。

備考

***「システム価格」は、1kW級家庭用燃料電池システムのメーカー出荷価格。
(価格に関するカッコ内の生産ケースは、システム価格試算のためのものであり、各年度での市場規模を指すものではない)

**** 10万台/年/社 生産ケースでのメーカー出荷価格である。
実市場価格については販売戦略も含めて価格設定がなされると考えられる

*****純水素型システムでは発電効率50%以上、更なる低コスト化が達成される見込み

固体高分子形燃料電池 (PEFC) ロードマップ (燃料電池自動車 (FCV))

～究極の次世代クリーン自動車である、FCVを将来的に普及し、CO2削減へ貢献～

	現在 (2010年時点)	2015年頃 普及開始	2020年頃 普及期	2030年頃 本格商用化
車両効率*	約55～60% (45～51%)	60% (51%)	60% (51%)	60% (51%)以上
耐久性**	約2000時間	5000時間(15年)	5000時間(15年)	5000時間(15年)以上
作動温度 (始動温度含む)	約-30～80℃	-30℃～約90-100℃	-30℃～約100℃	-40℃～約100-120℃
システムコスト スタックコスト 周辺機器コスト (***量産50万台生産ベースの試算)	数千万円	約100万円 約60万円 約40万円	約80万円 約45万円 約35万円	<50万円 <25万円 <25万円
FCシステム仕様		・作動温度-30～90-100℃、30%RH ・作動圧力1.2atm、水素ストイキ****1.1	・作動温度-30～100℃、30%RH ・作動圧力<1.2atm、水素ストイキ<1.1	・作動温度-40～120℃、加湿器レス ・大気圧作動、水素循環なし

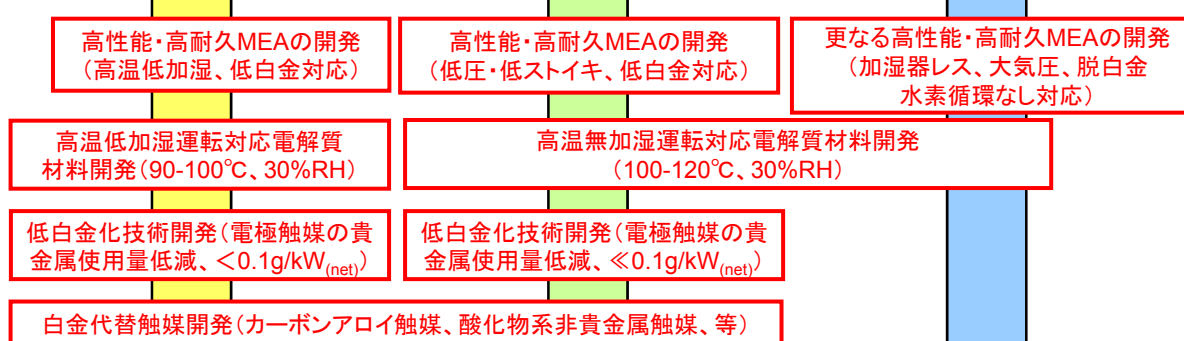
燃料電池自動車の現状・成果

- スタックの軽量化・コンパクト化・高出力化等の高性能化が進展
- JHFCでは2002年からこれまで約120台が登録・参加し、約60万km走行とデータを着実に蓄積。
FCVの車両効率は、シャシダイナモ燃費測定で約50%('04)→約56%('07)、約61%('08)へ向上。(実証事業トランナー値)
- 低温始動性の向上 (-30℃始動の技術確立)
- 航続距離の向上 (最高830km/70MPaタンク、最高620km/35MPaタンク、10・15モード)
- 反応・劣化機構解明、各種基礎解析・評価手法の進展

初期導入に向けた技術課題

普及初期に向けた技術課題

本格商用化に向けた技術課題

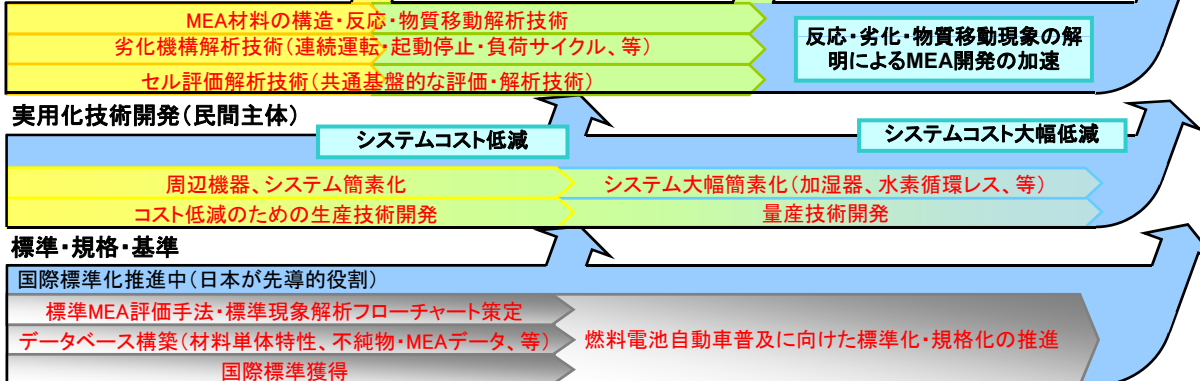


基礎技術強化

成果の適用

成果の適用

成果の適用



備考

*「車両効率」は、LHVであり、HHVは参考値として記載。

また、2007年度より燃費測定モードが、10・15モードからJC08モードへの移行が始まったところであるが、現時点では、両モードの数値換算に関するデータが十分に揃っていないことから、10・15モードで表記。

備考

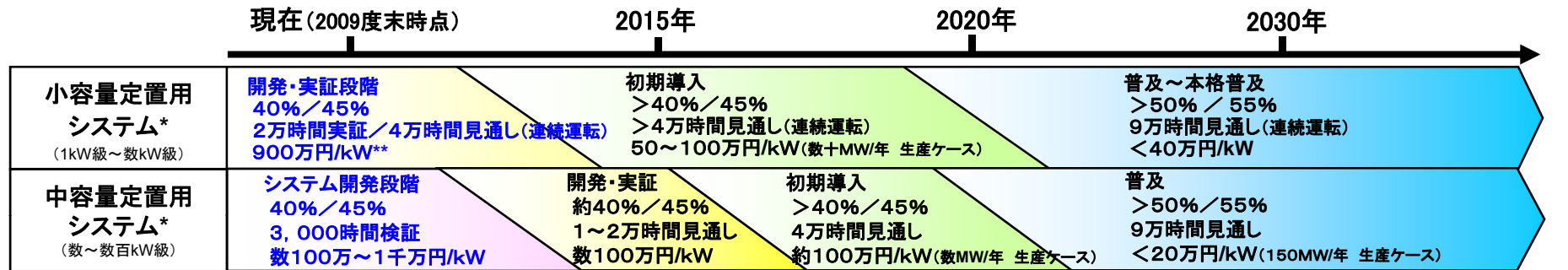
**「耐久性」には、必要とされる運転条件に応じた起動停止回数に対応することも含まれる。(メーカー各社の試験方法に基づく)

***「システムコスト」、「スタックコスト」、「周辺機器コスト」は生産台数を50万台(システム出力100kW、水素タンクを除く)と想定した場合の製造コストを示す。

****「ストイキ」とは電池反応における理論上の燃料消費量に対する燃料供給量の比率を示す。(余剰燃料は再循環することで利用率を100%近くにする)

固体酸化物形燃料電池(SOFC)ロードマップ

～小容量システムでの技術確立から中・大容量システムへの展開により最高効率発電を実現～



小・中容量定置用システムの現状・成果とSOFCシステムの共通技術課題

- ・1kW級の小型SOFCシステム実証の進展 → 平成21年度まで累計132台設置、最長運転時間は2万時間
- ・数10kW級システムで3,000時間運転試験 → 耐久性等の技術課題を抽出
- ・劣化機構解明などの耐久性・信頼性向上のための産学官連携基礎研究開始

開発・実証段階

- 耐久性・信頼性の向上
- セルスタック・モジュールの発電効率向上
- セルスタック原料・部材の低コスト化
- 運用性向上
(起動停止技術、負荷追従性、等)
- 燃料多様化技術確立
(都市ガス、LPG、灯油)

初期導入時

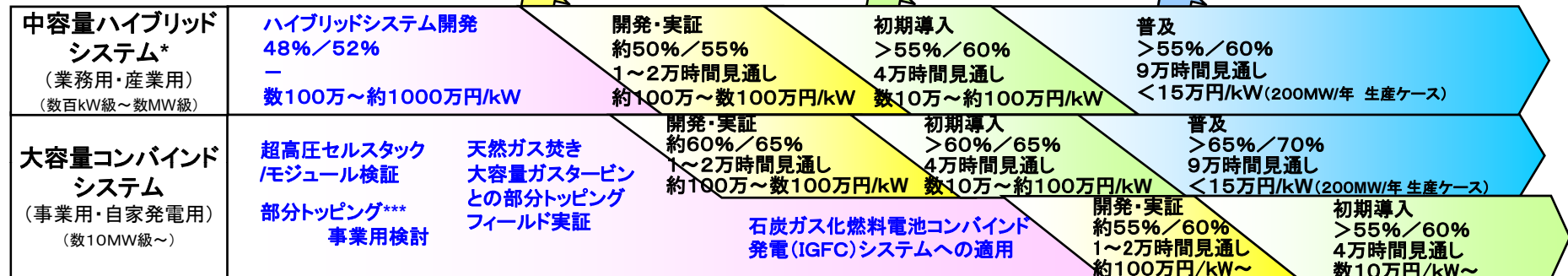
- スタック高耐久化対策技術の適用
- セルスタック・モジュールの高性能・低コスト化
(高出力密度化、等)
- システム構成の最適化・周辺機器簡素化によるコスト低減

普及時

- 次世代スタックに向けての高性能・高耐久化
- 大量生産技術確立 → コスト低減

備考

* 小容量定置用システム、中容量定置用システムおよび中容量ハイブリッドシステムにはコージェネを含む
** システム価格の範囲は、熱利用設備は含まず、発電装置部の範囲の価格。(家庭用は貯湯槽等を含む想定価格。) また、カッコ内の「OMW/年 生産ケース」は、システム価格試算のためのものであり、各年度での市場規模を指すものではない



中容量ハイブリッド・大容量コンバインドシステムの現状・成果と技術課題

- ・200kW級の複合発電システムの進展 → 発電効率52.1%、3000時間運転達成

開発・実証段階

- 高压***運転技術、複合発電システム制御技術の確立
- 超高压****運転技術の確立

初期導入時

- 燃料多様化技術確立
(石炭ガス、バイオガス)
- 大容量複合発電システム最適化

普及時

- 石炭ガス化ガス
クリーンアップ
システム最適化

備考

*** 部分トッピングとは、既設発電設備のGTCCに、SOFCを部分的に追加することにより、その分だけ増出力・効率アップを図るレトロフィット改造

**** 中容量のマイクロGTとのハイブリッドシステムにおける運転圧力レベル0.3～0.4MPaを高压運転、事業用大型GTとのコンバインドシステムにおける運転圧力レベル2～3MPaを超高压運転と定義

備考

各システムにおける矢印内の記載説明は次のとおり
研究・事業段階
送電端効率(HHV/LHV)
耐久性(運転時間)
システム価格

スタック・システムの展開

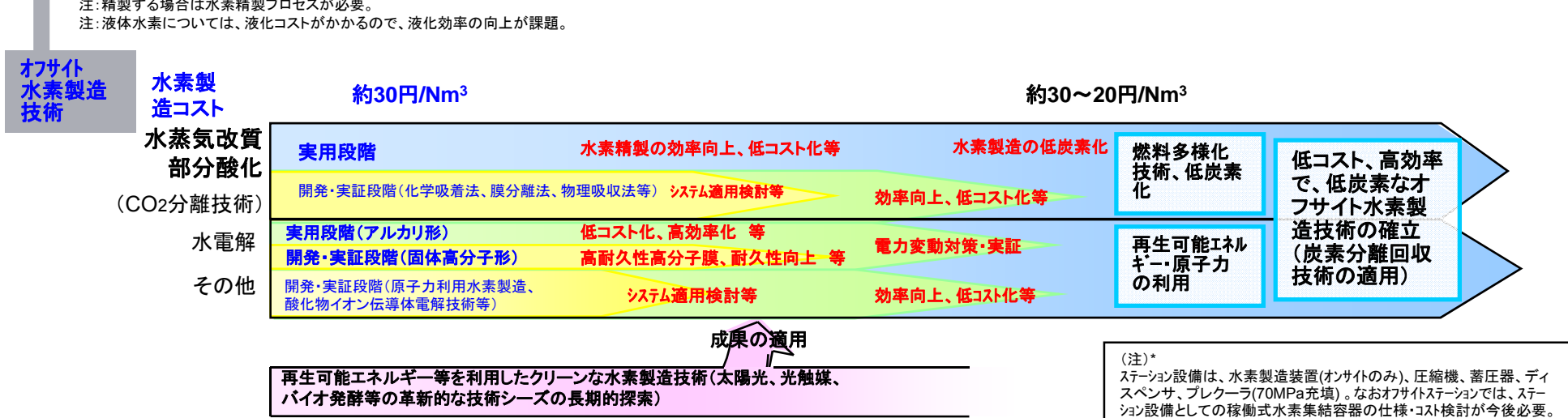
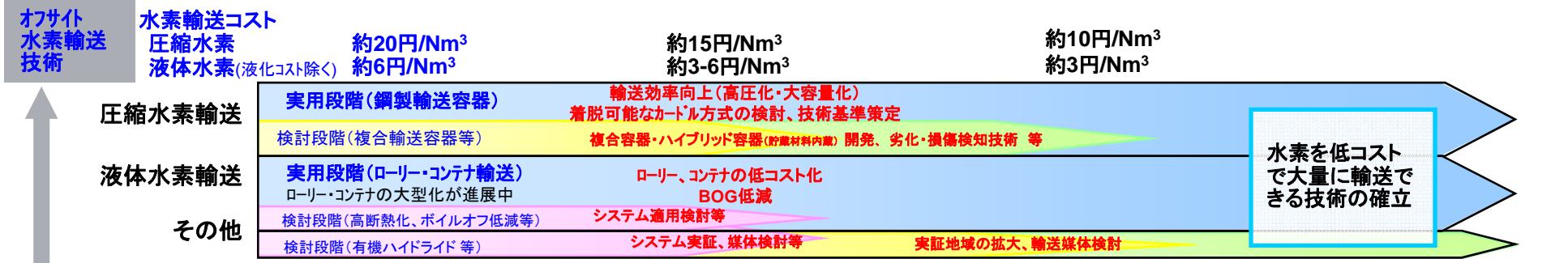
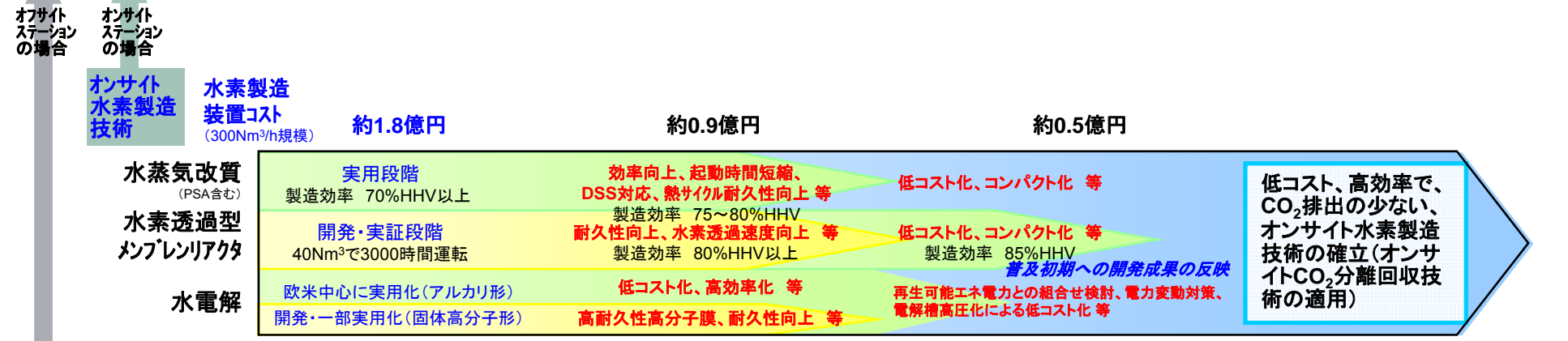
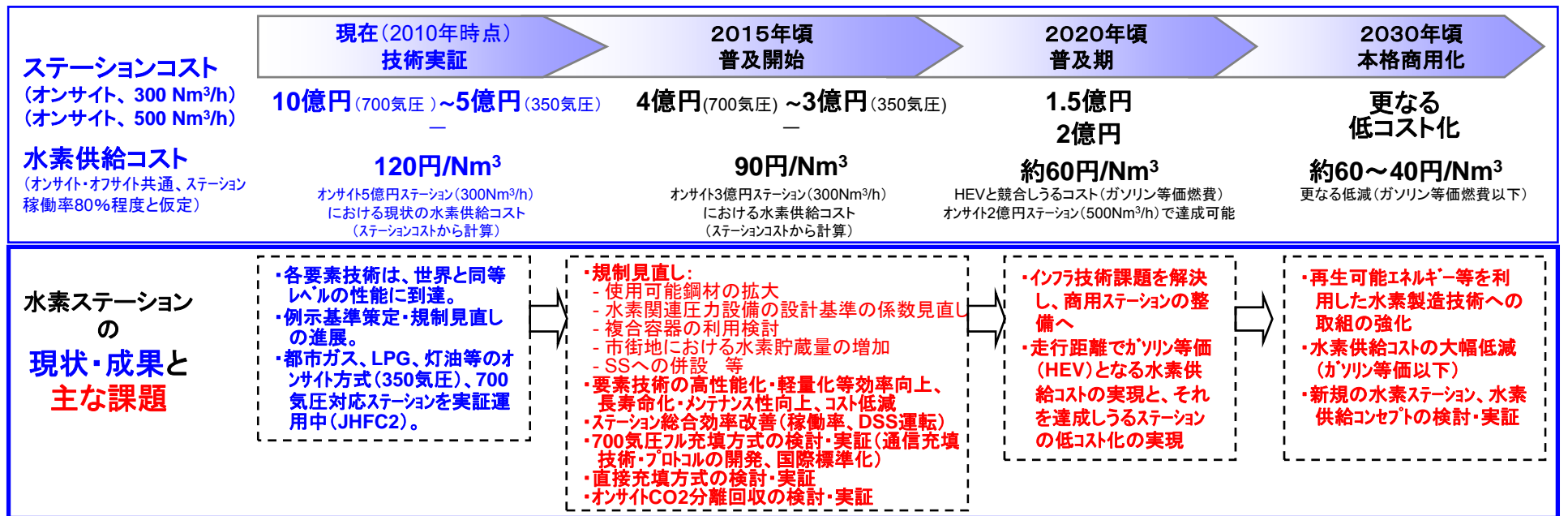
- 大容量化(小容量から中容量、中容量から大容量)、1kWシステム開発サイクルの加速、等
- 基盤技術の強化
劣化機構解明(熱力学的・化学的・機械的課題・三相界面の集学的解析)
加速劣化試験法・耐久性向上・余寿命評価方法・解析手法、不純物・燃料種影響対策、等
- 標準・規格・基準

SOFC標準化
JIS原案提示
定置用PEFCシステムとの共通化
国際標準(IEC62282シリーズ)の改訂

国際標準規格への反映
国際市場での優位性確立、国際間取引の円滑化

水素製造・輸送・供給技術ロードマップ

想定:原油価格 \$85/バレル(2010)→\$95/バレル(2020)
LNG価格 \$520/トン(2010)→\$805/トン(2020)



(注)*
ステーション設備は、水素製造装置(オンサイトのみ)、圧縮機、蓄圧器、ディスペンサ、プレクーラ(70MPa充填)。なおオフサイトステーションでは、ステーション設備としての稼働式水素集結容器の仕様・コスト検討が今後必要。