

# 米国における新エネルギーを利用した 動力機関に関する技術開発動向調査

2007年3月

社団法人 日 本 船 用 工 業 会

## 刊行によせて

当工業会では、我が国の造船関係事業の振興に資するために、競艇公益資金による日本財団の助成を受けて、「造船関連海外情報収集及び海外業務協力事業」を実施しております。その一環としてジェットロ船舶関係海外事務所を拠点として海外の海事関係の情報収集を実施し、収集した情報の有効活用を図るため各種調査報告書を作成しております。

本書は、当工業会が日本貿易振興機構と共同で運営しているジェットロ・ニューヨーク・センター船舶機械部にて実施した「米国における新エネルギーを利用した動力機関に関する技術開発動向調査」の結果をとりまとめたものです。

関係各位に有効にご活用いただければ幸いです。

2007年3月

社団法人 日本船舶工業会

## はじめに

最近、新エネルギー源のひとつである水素燃料を輸送機関のエネルギー源として実用化するための技術開発が世界各国で進め始められています。この動きは、これまで輸送機関のエネルギー源は石油を中心とした化石燃料に依存してきましたが、地球温暖化、大気汚染といった環境問題、高効率なエネルギーの安定供給といったエネルギー安全保障の観点から、燃料電池を用いてクリーンで高効率な水素燃料に転換するというものである。

水素燃料の実用化に向けては、燃料電池、改質器、水素貯蔵装置等の要素技術の開発が不可欠である他、色々な種類の要素技術を社会システムの中で如何に組み合わせるとどのような形で水素を生成し供給するかと言った水素燃料供給システムの構築が必要で、またそのための大規模なインフラの整備が必要です。

今米国では、ブッシュ政権が水素燃料を実用化し輸送エネルギーを化石燃料から水素燃料に転換するため、2020年を目標にそのインフラ整備をはじめ燃料電池、水素燃料供給システム等の技術開発を進めており、それに向けて水素燃料の生産、貯蔵、輸送、供給といった総合的な研究開発が実施されているところです。また、船用部門への応用については、運輸省海事局で研究開発が行われている他、海軍では潜水艦に燃料電池が適用されています。

本調査では、世界のエネルギー政策をリードする米国での水素燃料実用化について、社会全体でどのような体制で研究開発が行われているか調査しました。そして、運輸省や海軍で具体的にどのような船用燃料電池が研究開発されているか調査しました。

我が国の造船、船用メーカーが、世界の水素燃料実用化動向をキャッチアップしつつ、今後とも国際競争力を保持するために技術開発をなされるに際しまして、この調査結果がお役に立てば幸いです。

ジェトロ・ニューヨーク・センター 船用機械部

Director 渡田 滋彦

Researcher 上野 まな美

# 目 次

1. 米国における水素燃料実用化のための要素技術開発に関する背景	1
1-1 概要と背景	1
1-2 水素の生産方法	1
1-2-1 化石燃料 (fossil fuels)	1
1-2-2 電気分解 (electrolysis)	2
1-2-3 熱化学製造 (thermochemical production)	2
1-3 水素の貯蔵 (storage)	2
1-3-1 アンモニア・ストレージ (ammonia storage)	3
1-3-2 金属水素化物 (metal hydrides)	3
1-3-3 合成炭化水素 (synthesized hydrocarbons)	4
1-4 輸送 (transportation)	4
2. 燃料電池に関するブッシュ政権の動き	6
2-1 年頭教書で強調された水素燃料イニシアティブ	6
2-2 水素燃料イニシアティブ	6
2-2-1 水素燃料イニシアティブの課題	6
2-2-2 米国のエネルギー保障	6
2-2-3 水素燃料の利点	7
3. 議会による水素経済の推進環境の整備	9
3-1 2005年エネルギー政策法	9
3-2 作業部会の発足	9
3-3 予算	9
4. エネルギー省の水素燃料関連政策	10
4-1 エネルギー省の水素プログラム (DOE Hydrogen Program)	10
4-2 水素プログラムの新規プロジェクト	11
4-3 水素経済国際パートナーシップ (IPHE)	11
4-4 連邦水素諮問委員会と連邦合同作業部会	12
4-5 全米研究評議会 (National Research Council) による精査	12
4-6 21世紀トラック・パートナーシップ (21st Century Truck Partnership)	14
4-7 水素コストの見通し	15
4-8 燃料電池の大量生産コスト	16
4-9 カギとなる技術的課題に関する基礎研究	16
4-10 石炭から水素を作るプロジェクト	17
4-11 2005会計年度の原子力水素研究 (Nuclear Hydrogen Research)	19

4-12 H2A モデル・サポートの透明性	20
4-13 水素プログラムの開発能力	20
4-14 DOE 水素プログラムのウェブサイト	21
4-15 2005 年の実態精査	21
5. カリフォルニア州燃料電池パートナーシップ (The California Fuel Cell Partnership)	22
5-1 カリフォルニア州燃料電池パートナーシップの組織	22
5-2 カリフォルニア州燃料電池パートナーシップの動向	23
5-3 カリフォルニア州燃料電池パートナーシップの目標	23
6. UC デイビスの H2 パスウェイズ・プログラム (Hydrogen Pathways Program)	24
6-1 H2 パスウェイズ・プログラム	24
7. MARAD のエネルギー技術プログラム	25
7-1 エネルギー技術プログラムの概要	25
7-2 エネルギー技術プログラム(排ガス対策一般)	26
7-2-1 サンディエゴでの水中翼船	26
7-2-2 バイオディーゼルと水噴射システム	26
7-2-3 ニューヨーク市港湾民間フェリー排ガス抑制プログラム	26
7-2-4 大型船の旧式ディーゼル・エンジン改造 (Large Vessel Diesel Engine Retrofit)	27
7-3 燃料電池の安全基準適合性	27
7-3-1 試験の結果	27
7-3-2 試験結果の概要	27
7-3-3 結論	28
7-4 MARAD の燃料電池開発	29
7-4-1 米商船アカデミーでの研究	30
7-4-2 サンフランシスコの排ガス・ゼロ・フェリー	30
7-5 米海軍艦艇システム司令部 (Naval Sea Systems Command : NAVSEA)	31
8. 米海軍の燃料電池研究開発	33
8-1 概要	33
8-2 フュエルセル・エネルギーと海軍の契約	36
8-3 フュエルセル・エネルギーとの新契約	36
8-4 海軍研究局による燃料変換機の研究	39
8-5 米エネルギー技術研究所	39

# 1. 米国における水素燃料実用化のための要素技術開発に関する背景

## 1-1 概要と背景

水素経済 (hydrogen economy) は、貯蔵可能なエネルギーとして水素を活用し、各種輸送機関にそれを適用することを狙う近未来のエネルギー・システムである。現段階では、ガソリンやディーゼルで走る自動車の代替燃料として研究されている。

水素の生産は急成長中の産業であり、特にアイスランドやドイツ、日本、カナダ、そして米国（主にカリフォルニア）で研究が盛んに行われている。2004年、水素は全世界で約5000万トン（200ギガワットに相当）が生産された。現在、年間増産率は約10%と言われている。米国の水素生産量は2004年、約1100万トンで、それは48GW（ギガワット）に相当する。2003年の米国の電力生産量が442GWだったことを考えると、約1割の電力をまかなうのに相当する量の水素が生産されたことになる。

米国では現在、水素の貯蔵器 (storage) 及び輸送 (transport) にかかる費用が非常に高くつくため、ほとんどの水素は生産地ですぐに使用される。実際には、生産する会社があるまま自社で消費しているのが実態である。2005年初頭、水素の経済価値は1年当たり約1350億ドルと見られる。生産される水素の48%は天然ガスから作られ、30%が油、18%が石炭、そして4%が電気分解による。

今日、水素の主要用途には二つある。一つは、ハーバー製法 (Haber process) によるアンモニア (NH<sub>3</sub>) 生産（化学肥料の生産が目的）で、生産される水素の約半分がそれに使われる。残り半分は、重油を燃料向けの軽い石油に変換 (hydrocracking) するために使われる。

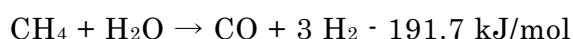
## 1-2 水素の生産方法

水素を生産する主要方法には、化石燃料の改質をはじめ、水の電気分解、そして熱化学製造という三つがある。

### 1-2-1 化石燃料 (fossil fuels)

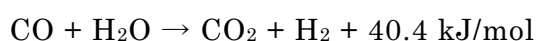
#### ■水蒸気改質 (steam reforming)

商業向けに生産される大量の水素は通常、天然ガスの水蒸気改質による方法が用いられる。水蒸気が摂氏700～1100度でメタン (CH<sub>4</sub>) と化学反応を起こし、合成ガス (syngas) が作られる。合成ガスは、主に水素と一酸化炭素 (CO) で構成される。つまり、合成ガスを作ることは水素を作ることでもある。化学反応に必要な熱は、天然ガスを燃やすことで得られる。次にその化学式を示す。



#### ■一酸化炭素 (carbon monoxide)

摂氏130度前後で水蒸気と一酸化炭素 (CO) が有機反応を起こし、水素と二酸化炭素を作ることによる方法である。換言すれば、酸素原子が水蒸気から離脱し、炭素を酸化させ、もともとは炭素と酸素と結合していた水素を自由にさせる化学反応を起こさせるというものである。



## ■石炭 (coal)

石炭のガス化（気化）によって石炭を合成ガスとメタンに変換する。

### 1-2-2 電気分解 (electrolysis)

水を電気分解することで水素を作る方法である。水素を作るためのエネルギーの元になるものが化学物質なら化学反応によって水素を作るのが最も効果的かつ安価だが、それが機械（例えば風力タービンなど）の場合、水を電気分解するしかない。電気分解のために必要な電力は、電気分解によって生産される水素より高価なため、現在、電気分解による水素生産は極めて少量である。

一方、エネルギーの元になるものが熱（例えば太陽熱や原子核など）の場合、現段階では高温電気分解 (high-temperature electrolysis:HTE) が唯一の方法である。低温電気分解と比較すると、水の HTE は、より多くの最初の熱エネルギーを化学エネルギー（つまり水素）に変換するため、効率性を 2 倍にする潜在的可能性がある。HTE でのエネルギーのいくつかは熱という形で供給されるため、熱から電気へと電気から化学フォームへと 2 回変換され、エネルギーが失われる。HTE は研究室で実験されているが、商業利用されるにはほど遠い段階である。

### 1-2-3 熱化学製造 (thermochemical production)

ヨウ素－硫黄反応 (iodine-sulfur cycle) のような熱化学製造法によっても電気を使わずに水素と酸素を作ることができる。

IS 反応による同方法には三つの過程がある。まず、摂氏 100 度で水とヨウ素の混合物により二酸化硫黄を吸収し、ヨウ化水素と硫黄を作る反応を起こさせ、次に、摂氏 400～500 度でヨウ化水素を熱分解して水素を得て、最後に、摂氏 850 度の熱を使って硫黄を分解することで酸素を作る。

この方法に必要なエネルギーは熱だけであるため、高温電気分解よりも効率が良い。石炭や天然ガスといった化学エネルギーを使った熱化学反応による水素生産は、直接化学反応 (direct chemical path) の方が効率的であることから一般的には考慮されない。また、研究室では何種類かの熱化学水素製造法が実験されたが、実際の水素生産ではいまだ実用されていない。

### 1-3 水素の貯蔵 (storage)

水素経済にとって水素の貯蔵方法は主要課題の筆頭である。風力のように予測困難なエネルギー源の場合、グリッド・エネルギー・ストレージ (grid energy storage) を供給するために水素が果たす役割に着眼する動きもある。グリッド・エネルギー・ストレージとは、発電所の電力輸送グリッドを補足するために用いられる多種多様なエネルギー貯蔵技術の総称である。グリッド・エネルギー・ストレージのために水素を使うことの難しさは、パワーを水素に変換したり水素をパワーに変換することが非常に高くつくことである。

例えば、炭化水素 (hydrocarbons) は通常、使われる場所で貯蔵される。自動車のガソリン・タンクや、バーベキュー・グリルの側面に取り付けられているプロパン・タンクと同じである。その点、水素は、現段階の技術を持つてると、貯蔵したり輸送することが

非常に高価となる。水素ガスのエネルギー密度は、炭化水素と比べた場合、重量で見ると非常に高いが、体積で見ると密度はかなり低い。つまり、貯蔵するには非常に大きなタンクが必要になる。換言すれば、水素タンクは、同じエネルギーを持つ炭化水素を貯蔵するのに必要なタンクよりはるかに大きく重くなる。

ガス圧を増せば、体積当たりのエネルギー密度は高まり、従ってタンクを小さくできるものの、タンクを軽くすることはできない。ガスに圧力を加えるには、圧力機を働かせるためのエネルギーが必要となる。高い圧力をかけることは、加圧段階でのエネルギー喪失を意味する。

そこで、体積当たりのエネルギー密度が高い液体水素（スペース・シャトルに使われる燃料）を使うという代替案が浮上する。しかし、液体水素は低温で、摂氏マイナス 252.882 度で沸騰してしまうため、その沸点以下に冷却するのにエネルギーを使うことになる。ということは、液化時点でエネルギーがすでに失われている。そのため、液体水素タンクの場合、燃料の沸騰を妨げるためにタンクやその周囲に断熱加工を施す必要があり、さらに、断熱加工がきちんと機能しない場合、タンクが凍るため金属疲労や腐食が激しくなる。仮に、それらの問題が解決されたとしても、現段階においてはエネルギー密度の問題を解決することはできない。

現段階では、水素の主な貯蔵手段には、アンモニア、金属水素化物、合成炭化水素の活用が考えられる。

### 1-3-1 アンモニア・ストレージ (ammonia storage)

アンモニアは、水素を化学的に保存して改質器に入れるのに使われる。また、アンモニアは水素保存の密度を非常に高くできるだけでなく、水と混合させることで液体として室温で保存できる。しかも、有害物質を出すことなく水素を作り、さらに、現存の燃料と混ぜることもでき、効率よく燃焼する。しかし、純粋なアンモニアの燃焼効率は通常の気圧の中では非常に悪い。自動車エンジンの中で加圧された状態なら、ガソリン・エンジンを少し改良すれば燃料としても使える。

アンモニアの問題は生産コストが非常に高いことと、現存する輸送の基幹設備を巨大な新しい輸送設備に取り替える必要があることである。また、アンモニアは通常の温度と圧力下では有害ガスであり悪臭を放つという問題点もある。

### 1-3-2 金属水素化物 (metal hydrides)

水素を貯蔵するため、純粋な水素の代わりに金属水素化物を媒体として使う方法も考えられている。水素化物は扱いやすく、水素を吸収したり放出するのも簡単である。何種類かの金属水素化物は、燃料補充に便利な液体状にもなり得るし、その他の種類は小球状の固形にもなる。現在、水素経済のために提言されている金属水素化物はホウ素とリチウムを含有するものである。体積当たりのエネルギー密度も高いのが長所だが、炭化水素燃料に比べて重量当たりのエネルギー密度が低いことが難点である。

固形型金属水素化物は、自動車エンジンにとっては期待の大きな燃料として考えられる。金属水素化物のための燃料タンクは、ガソリン・タンクに比べると、同じエネルギー量を出すためには体積で 3 倍、重量で 4 倍になる。従来型ガソリン・タンクは鉄から作られ何



十キロの重さでおさまり、製造費も1キログラム当たり2.20ドルしかかからない。しかし、金属水素化物タンクは現在、リチウムを多用して作られ、1キログラム当たり90ドルもの製造コストがかかる。

金属水素化物は燃焼によって反応を起こし、人体にとって有害でもある。研究者の間で提案され続けているものの、ほんの一部でさえもまだ実用化に至っていないのはそのためである。反応の過敏さは金属水素化物の種類によって異なるが、人体に安全な反応水準の金属水素化物は皆無である。

### 1-3-3 合成炭化水素 (synthesized hydrocarbons)

金属水素化物の代替策としてもう一つ考えられるのが、水素を運ぶ媒体として通常の炭化水素を使う方法である。小さな改質器で炭化水素から水素を抽出し燃料電池に送るというものである。ただ、改質機の処理速度は非常に遅い上、改質段階におけるエネルギー喪失も大きく、さらに、燃料電池の価格も高つく。

直接メタノール燃料電池 (direct methanol fuel cells) は改質器を必要としないが、現在の燃料電池に比べてエネルギー効率もパワー密度も低い。

固形酸化物燃料電池 (solid-oxide fuel cells) は、改質器なしでプロパンやメタンのような軽炭化水素を燃料にできる。あるいは、部分的に改質器を使うことで高炭化水素を燃料にできる。しかし、電池が高温になることと作動するのに時間がかかるため、自動車に使える電池ではない。

### 1-4 輸送 (transportation)

近未来における長距離走行の場合、水素はエネルギー源として輸送するには非常に高つく。燃料電池の技術開発はその点をまだ解決するに至っていない。

2005 年末現在、エネルギーを運ぶ手段として最も安いのがウラニウムを鉄道で輸送することだが、原子力には放射能という問題が常につきまとう。次に安いのが、パイプラインか巨大タンカーによる石油又はパイプラインによる輸送である。石炭を鉄道又はタンカーで運ぶのも同等に安価である。液体天然ガス (LNG) をタンカーで運ぶのはやや高価になると同時に、LNG の需要がもっと安定し浸透する必要がある (つまり、LNG を使う機器がもっと増えなければならない。特に住居向け暖房用燃料や台所の料理用火元として)。

水素は、現存するいかなるエネルギーよりも輸送コストが高くなる。天然ガスと比較すると、同じエネルギーを輸送する場合、体積の面で水素は天然ガスの3倍にもなる。しかも、水素は鉄の劣化を加速させるため特殊加工の容器が必要となり、保管費用も高い上水素漏洩発生率も高い。

### Preliminary Hydrogen Delivery Technical Targets

	Current Status <sup>a</sup>	2005 Target	2010 Target	2015 Target
<b>Pipelines: Transmission</b>				
Total Capital Cost (\$/mile) <sup>b</sup>	1.20	1.20	1.00	0.80
<b>Pipelines: Distribution</b>				
Total Capital Cost (\$/mile) <sup>b</sup>	0.30	0.30	0.25	0.20
<b>Pipelines: Transmission and Distribution</b>				
Reliability (relative to H <sub>2</sub> embrittlement concerns and integrity) <sup>c</sup>	Undefined	Undefined	Understood	High (Metrics TBD)
H <sub>2</sub> leakage <sup>d</sup>	Undefined	Undefined	<2%	<0.5%
<b>Compression: Transmission</b>				
Reliability <sup>e</sup> (%)	92	92	95	>99
Hydrogen Energy Efficiency (%) <sup>f</sup>	99	99	99	99
Capital Cost (\$/compressor) <sup>g</sup>	18	18	15	12
<b>Compression: At Refueling Stations</b>				
Reliability <sup>e</sup> (%)	Unknown	Unknown	90	99
Hydrogen Energy Efficiency (%) <sup>f</sup>	94	94	95	96
Contamination <sup>h</sup>	Varies by design	Varies by design	Reduced	None
Cost Contribution (\$/gge of H <sub>2</sub> ) <sup>ij</sup>	0.60	0.60	0.40	0.25

<sup>a</sup> All dollar values are in 2003 U.S. dollars

<sup>b</sup> The 2003 status is based on data from True, W.R., "Special Report: Pipeline Economics," Oil and Gas Journal, Sept. 16, 2002, pp. 52–57. This article reports data on the cost of natural gas pipelines as a function of pipe diameter. It breaks the costs down by materials, labor, misc., and right-of-way. It is based on a U.S. average cost. A 15-inch pipe diameter was used for transmission and 2.5 inch for distribution. It was assumed that hydrogen pipelines will cost 30 percent more than natural gas pipelines based on advice from energy and industrial gas companies and organizations. The targeted cost reductions for 2010 and 2015 assume the right-of-way costs do not change.

<sup>c</sup> Pipeline reliability used here refers to maintaining integrity of the pipeline relative to potential hydrogen embrittlement or other issues causing cracks or failures. The 2015 target is intended to be at least equivalent to that of today's natural gas pipeline infrastructure.

<sup>d</sup> Hydrogen leakage based on the hydrogen that permeates or leaks from the pipeline as a percent of the amount of hydrogen put through the pipeline. The 2015 target is based on being equivalent to today's natural gas pipeline infrastructure based on the article: David A. Kirchgessner, et al, "Estimate of Methane Emissions from the U.S. Natural Gas Industry", *Chemosphere*, Vol.35, No 6, pp. 1365–1390, 1997.

<sup>e</sup> Compression reliability is defined as the percent of time that the compressor can be reliably counted on as being fully operational. The 2003 value for transmission compressors is based on information from energy companies that use these types and sizes of compressors on hydrogen in their own operations.

<sup>f</sup> Hydrogen energy efficiency is defined as the hydrogen energy (LHV) out divided by the sum of the hydrogen energy in (LHV) plus all other energy needed for the operation of the process.

出典 : Hydrogen from Coal Multi-Year RD&D Plan  
([www.fossil.energy.gov/.../fuels/publications/programplans/2005/Hydrogen\\_From\\_Coal\\_RDD\\_Program\\_Plan\\_Sept.pdf](http://www.fossil.energy.gov/.../fuels/publications/programplans/2005/Hydrogen_From_Coal_RDD_Program_Plan_Sept.pdf))

図 1-1 水素燃料輸送コスト

## 2. 燃料電池に関するブッシュ政権の動き

### 2-1 年頭教書で強調された水素燃料イニシアティブ

ブッシュ大統領は 2003 年、施政演説（年頭教書）の中で、予算総額 12 億ドルの水素燃料イニシアティブ (hydrogen fuel initiative) を発表した。自動車及びトラックをはじめ、一般家屋や企業活動の電力源を、外国産の原油に依存せず、かつ、公害や温暖化ガスの排出を最小限に抑えながら、商業化可能な技術による水素燃料でまかなうための技術開発を目指すものである。

水素燃料イニシアティブの予算には、向こう 5 年間に新たに投じられる 7 億 2,000 万ドルが含まれる。その追加予算は、燃料電池に必要な水素の生産、貯蔵及び輸送するための技術及び基幹設備の開発のために費やされる。

水素燃料イニシアティブを既存のフリーダムカー (FreedomCAR (Cooperative Automotive Research)) イニシアティブと組み合わせることで、水素燃料電池や関連の基幹設備、そして、より高度な自動車技術を開発するために向こう 5 年間に総額 17 億ドルを投じることを提唱した。

### 2-2 水素燃料イニシアティブ

#### 2-2-1 水素燃料イニシアティブの課題

ブッシュ大統領のイニシアティブが技術的にもコスト的にも直面する課題は次のとおりである。

##### ■水素の生産コスト削減

現段階では、水素生産コストは、最も一般的な資源からガソリンを生産するのにかかるコストの 4 倍である。水素燃料イニシアティブでは、ガソリン車と比べてもそれほど高額でない燃料電池自動車を製造できるようにするために、2010 年までに水素生産コストの低下を目指す。それと同時に、再生可能なエネルギー源や、核エネルギー、あるいは石炭からも水素を生産できるように技術を発展させる。

##### ■水素の効果的貯蔵

水素は従来のエネルギーと比べて貯蔵効率が悪い。水素燃料電池を自動車に適用し、消費者の需要に対応するためには、水素貯蔵システムを劇的に発達させなければならない。

##### ■手ごろな価格で供給できる水素燃料電池の開発

現段階での燃料電池の価格は、一般的な内燃エンジンの 10 倍以上もする。燃料電池を普及させるためには、消費者がガソリン車と燃料電池車とを比較できるくらいに燃料電池の価格が安くならなければならない。その点については、FreedomCAR イニシアティブが重点を置いて研究中である。

#### 2-2-2 米国のエネルギー保障

米国のエネルギー保障 (Energy Security) は、外国産石油への依存度上昇によって脅かされている。具体的な実態は次のとおりである。

■米国は現在、消費する石油量の 55% を輸入しており、現状のままでいけば、2025 年までにはそれが 68% にまで上昇する。

■現在、米国内を走るほとんどの普通乗用車とトラックはガソリン車であり、それが、米国の外国産石油依存度を高めている主因である。米国が1日に消費する2,000万バレルの石油のうち3分の2はガソリン車の燃料のために使われている。ガソリン車の燃料として石油をこれまでのように消費するのは、米国のエネルギー保障のためには危険であり、外国産石油への依存度を下げる最も効果的かつ現実味のある手段が、燃料電池車の普及である。

### 2-2-3 水素燃料の利点

水素燃料を普及させることが米国にもたらす利点は次のとおりである。

■水素燃料イニシアティブと FreedomCAR イニシアティブを通して、連邦政府をはじめ、自動車メーカーやエネルギー各社が相互協力しながら、技術的かつコスト的な課題を乗り越え、排ガスを出さない車を商業化させることで、外国産石油への依存度を大幅に低める。

■水素は、天然ガスや石炭から生産できるだけでなく、バイオマス（生物資源）や水からでも生産可能であるため、国内調達しやすい。

■エネルギー省の試算によると、水素燃料イニシアティブと FreedomCAR イニシアティブの成功は、米国が消費する石油量を2040年に1日あたり1100万バレル節減できる。その量は、米国が今日、輸入している量にほぼ等しい。

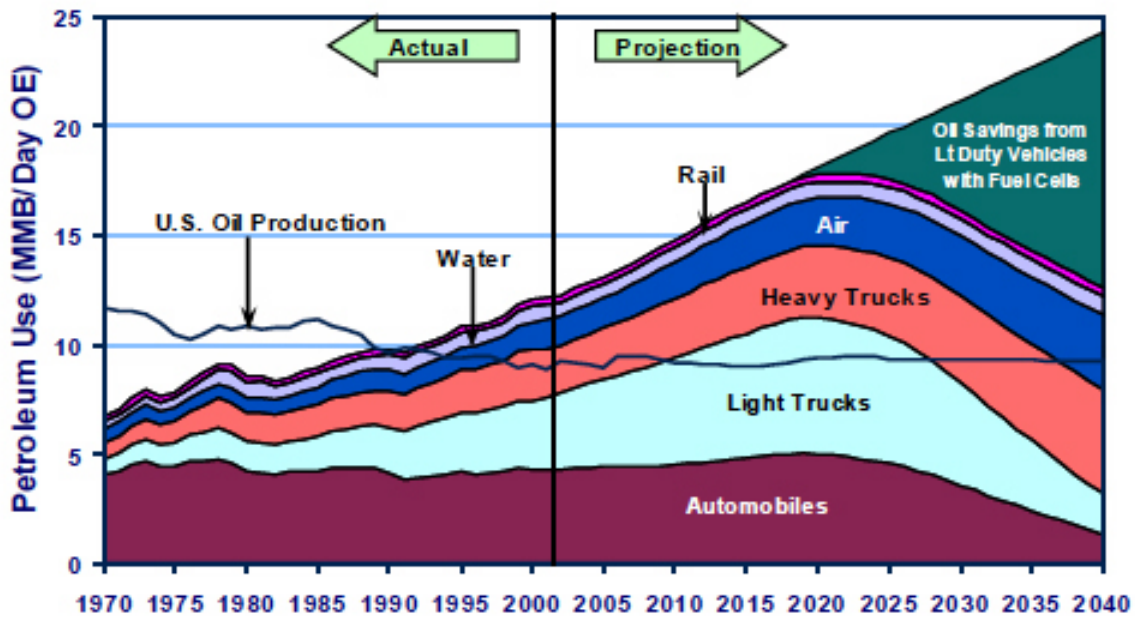


Figure 1.1 Potential Transportation Oil Savings with FCVs (December 2002)

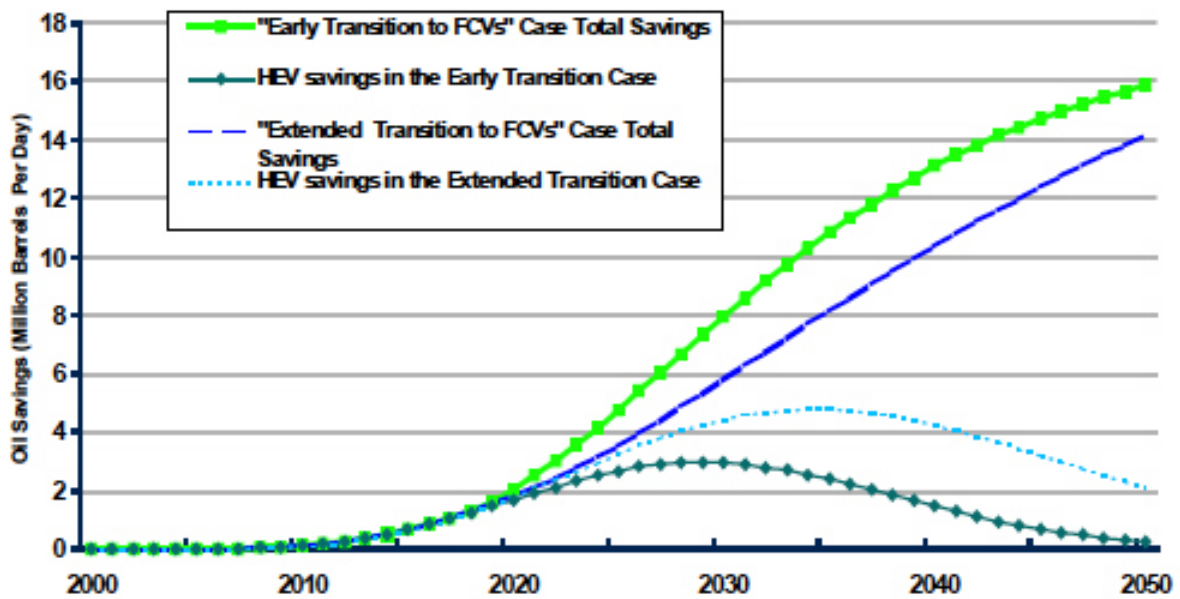


Figure 1.2 HEV Contribution to Total Light-Vehicle Oil Savings from Vehicle-Related Technologies Supported by DOE (June 2003)

出典 : Description of Model Used to Estimate the Impact of Highway Vehicle Technologies and Fuels on Energy Use and Carbon Emissions to 2050  
 (www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/299.pdf)

図2-1 運輸関係で使用する石油のフリーダムカーイニシアティブによる節減効果

### 3. 議会による水素経済の推進環境の整備

#### 3-1 2005 年エネルギー政策法

2005 年、連邦議会はいくつかの点で水素経済を全面的に支援する行動を起こした。

まず、「2005 年エネルギー政策法 (Energy Policy Act of 2005)」を可決し、ブッシュ大統領が同年 8 月 8 日に署名し法制化された。その中のタイトル 8 (Title VIII) が「2005 年スパーク・マツナガ水素法 (Spark M. Matsunaga Hydrogen Act of 2005)」というもので、水素燃料生産及び燃料電池技術の研究開発、教育、標準化 (規格策定) の推進努力のために向こう 5 年間に 32.8 億ドルの予算を確保するという内容になっている。その他の条項でも、水素研究における優遇税制をはじめ、共同研究や水素以外の代替エネルギー研究の奨励策が盛り込まれている。

#### 3-2 作業部会の発足

次に、連邦議会下院は 2005 年 6 月 28 日、「水素及び燃料電池作業部会 (Hydrogen and Fuel Cell Caucus)」を発足させた。チャールズ・デント (Charles Dent) 下議とボブ・イングリス (Bob Inglis) 下議、ジョン・ラーソン (John Larson) 下議、そしてアルバート・ウィン (Albert Wynn) 下議の 4 人が共同委員長を務める超党派の作業部会で、業界要人と協力しながら、石油燃料に代わる水素燃料の推進を目指す。

同作業部会は、ブッシュ政権の水素燃料イニシアティブとその他の関連活動を支援する。上院にも同作業部会と類似する「上院水素及び燃料電池作業部会 (Senate Hydrogen and Fuel Cell Caucus)」が組織されている。上院の方は、バイロン・ドーガン (Byron Dorgan) 上議とリンズリー・グラーム (Lindsey Graham) 上議が共同委員長を務める。

#### 3-3 予算

また、議会は近年、「内務及び関連省庁歳出予算法 (Interior and Related Agencies Appropriations Act)」に基づき、燃料電池の開発研究と化石燃料に関連した水素燃料研究に予算を組んできた。同時に、基礎科学と再生可能及び原子力関連の水素燃料研究は「エネルギー及び水資源開発歳出予算法 (Energy and Water Development Appropriations Act) : EWD」によって研究費が確保された。2006 会計年度の初頭、議会はエネルギー省 (DOE) の水素関連予算すべてを EWD に組み込んでいる。

2005 会計年度において、議会は大統領の水素燃料イニシアティブに 2 億 2,470 万ドルの予算を組んでいる。同予算は前年、1 億 5,580 万ドルだった。そして、2006 会計年度、ブッシュ大統領は同予算に総額 2 億 5,950 万ドルを要求 (プロGRESS・レポートによる) している。同要求額には、DOE の関連予算の他にも運輸省 (DOT) の関連予算も含まれる。

## 4. エネルギー省の水素燃料関連政策

米国にとって 2005 年は水素プログラムが本格的に始動し、多くの進歩や成果をあげた年とも言える。DOE は 2006 年後半、水素プログラムの進行状況をまとめた「2005 会計年度プログレス・レポート (FY 2005 Progress Report)」と報告している。以下に、同報告書をまとめる。

### 4-1 エネルギー省の水素プログラム (DOE Hydrogen Program)

関連業界と学術界、国立研究所、そしてその他の関連省庁の協力を得て、エネルギー省 (DOE) の水素プログラム (Hydrogen Program) は、ブッシュ政権による水素燃料イニシアティブ (Hydrogen Fuel Initiative) を支援すべく、水素及び燃料電池 (fuel cell) の技術革新を推進する最大の政策であり、現段階における米水素燃料関連政策の母体とも言える。

水素プログラムの目標を簡潔にまとめると、米国一般市民が手頃な価格で燃料電池車を選ぶための現実的な環境を 2020 年までに整えることであり、そのための柱として次の 4 点に焦点が合わせられている。

- 水素生産と水素燃料の輸送及び貯蔵に必要となる技術的課題を克服すると同時に、車のための燃料電池技術や電力補給所、持ち運び可能な電源装置技術も開発する。
- 水素燃料の安全性に関する課題に着目し、たたき台となる規定や標準を設定する。
- 実生活における環境で利用可能な水素燃料と燃料電池に関する技術を認定し、それらを奨励する。
- それらの技術と利害関係のある主要企業や団体、組織、業界を教育し、それらの技術を受け入れることが彼らにとって経済的成功につながることを認識してもらう。

DOE 傘下のアルゴン国立研究所では、2040 年の数値として次のような状況を予測している ([www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/299.pdf](http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/299.pdf))。

- 3 億台の燃料電池車の水素をまかなうには、6,400 万トンの水素燃料が必要になる。
- 2040 年には、米国内全体で 3 億 7,500 万台の車が走行すると予想され、そのうち 80% に相当する 3 億台を燃料電池車 (FCV) にする。
- FCV が一般乗用車市場に占める割合は、2018 年に 4%、2020 年に 27%、2030 年に 78%、2038 年に 100%。
- 2040 年における一般乗用車の走行距離は、1 台あたり年間 1 万 3,000 マイル。
- 2040 年におけるガソリン車の燃費は 1 ガロンあたり 24.3 マイル。FCV の 1gge あたりの燃費とガソリン車の 1 ガロンあたりの燃費の比率は 2.5 になると思われる。
- 3 億台の FCV が 1 台あたり年間 1 万 3,000 マイルを走るとすれば、FCV 全体の走行距離は年間 3 兆 9,000 億マイル。
- ガソリン車の燃費が 24.3 マイルだとすれば、FCV の対ガソリン車燃費比率の 2.5 をかけると水素 1gge あたり 60.75 マイルとなる。
- FCV の走行距離合計は 3 兆 9,000 億マイルであることから、60.75 マイル/gge で割ると、6,400 万トンという数字がはじき出される。それが、2040 年に走る FCV の水素燃料の量

になる。

#### 4-2 水素プログラムの新規プロジェクト

DOE の水素プログラムにおける研究、開発、広報活動は、2004 会計年度と 2005 会計年度で総額約 5 億 1,000 万ドル(これにプラス民間拠出による 7 億 5,500 万ドルが加わる)をかけた新規プロジェクトによって更に促進された。それらのプロジェクトは重要な技術的課題を克服することで、水素と燃料電池を研究室からショールームに発展させることを狙う。新規プロジェクトは、下記の技術的領域にまたがる。

■基礎科学：水素の生産、貯蔵、そして末端での使用を実現させる基礎科学に関連する研究分野で向こう 3 年間に 6,400 万ドルを投じて選別された 70 のプロジェクト。

■水素生産及び輸送（配送）：水素の生産と輸送（配送）に関わる 65 のプロジェクトに 1 億 700 万ドル（2005 年）を投じ、再生可能エネルギーや原子力や石炭を使った水素生産と輸送（配送）技術の研究。

■水素の貯蔵：ナショナル水素貯蔵プロジェクト（National Hydrogen Storage Project）のもと、20 以上の応用研究及び関連研究プロジェクトに向こう 5 年間で 1 億 5,000 万ドルを投じる。

■燃料電池：運輸向けをはじめ、家電、その他の利用法における燃料電池コストと耐久性に関する 5 つのプロジェクトに向こう 3 年間で 1,300 万ドルを投じる。

■技術の認定（確認）：自動車と関連施設に関する全米規模の「ラーニング・デモンストレーション」プロジェクトを立ち上げ、向こう 6 年間で 1 億 7,000 万ドルを投じ、進捗状況を測るとともに、研究と開発を方向づける。

■教育：3 カ所の水素技術学習センター（Hydrogen Technology Learning Center）を開設し、6 州において州政府と地方自治体のために講習会を開き、同時に、水素経済を中高校での履修科目に加えるとともに、教師育成プログラムを開始。向こう 5 年間で 500 億ドルを投じる。

#### 4-3 水素経済国際パートナーシップ（IPHE）

DOE のデイビッド・ガーマン（David Garman）次官のリーダーシップにより、水素経済国際パートナーシップ（International Partnership for the Hydrogen Economy : IPHE）の 16 人で構成される運営委員会（Steering Committee）は 2005 年 9 月 14 と 15 日、京都で会議を開き、水素燃料と燃料電池の研究開発に関し次の 10 の協同計画に合意した。

- ・天然ガスのパイプラインを活用した水素輸送
- ・太陽熱を利用した熱化学による水素生産
- ・燃料電池の電源供給システムのための変換可能固形水素の貯蔵
- ・高性能な膜
- ・燃料電池の試験と安全性、品質の確認
- ・異なるタイプの燃料電池に対する多孔式合成膜/電極接合体の適用
- ・HyWays。各国で協調された欧州水素エネルギー・ロードマップの評価
- ・HySafe。エネルギーを運ぶ媒体としての水素の安全性



- ・メタン変換による太陽熱水素生産
- ・欧州のエコロジカル・シティ・トランスポート・システム

この 10 の計画はすべて IPHE メンバーがスポンサーとなる協力関係に基づく研究内容である。計画の結果やプロジェクトから学んだ内容は、全メンバーに報告され、一般にも告知される。詳細は [www.iphe.net](http://www.iphe.net) に公開されている。

#### 4-4 連邦水素諮問委員会と連邦合同作業部会

2005 年エネルギー政策法 (Energy Policy Act of 2005) は、水素及び燃料電池技術諮問委員会 (Hydrogen and Fuel Cell Technical Advisory Committee : HTAC) の創設を規定している。同委員会は、国内の関連業界や学术界、専門組織、省庁機関、国立研究所、前身の諮問機関、金融業界、環境保護団体、その他の関連組織から選ばれた 12~25 人の専門家で構成される。同委員会は、以下の 3 点について精査し、DOE 長官に進言する役割を担う。

- ・2005 年エネルギー政策法タイトル 8 のもとに実施される計画内容と行動内容
- ・水素の生産、輸送、貯蔵及び水素燃料と燃料電池の利用による環境的かつ経済的な影響と安全性
- ・タイトル 8 のもとに DOE 長官が推進する関連計画の内容

連邦政府レベルでは、関連省庁間の協力体制がブッシュ政権の水素燃料イニシアティブの成功を左右する。ブッシュ大統領が 2003 年に同イニシアティブを発表した直後、ホワイトハウスの科学技術政策局 (Office of Science and Technology Policy) はすぐに、水素調査開発作業部会 (Hydrogen Research and Development Task Force) という複数省庁による合同作業部会を創設した。同作業部会の主な役割は、水素経済と燃料電池に関する調査と開発の予算を拠出する 8 つの連邦機関の間における協同活動を調整し推進するというものである。その活動内容の詳細を報告し、関連省庁間の連絡や情報共有、さらなる協力関係の促進を目指すためにウェブサイト [www.hydrogen.gov](http://www.hydrogen.gov) を立ち上げている。

一方、2005 年エネルギー政策法 (Energy Policy Act of 2005) も連邦政府レベルでの関連省庁間協同体制の必要性を重視し、関連省庁機関で水素と燃料電池に携わる高官らから構成され DOE 長官が議長を務める水素及び燃料電池技術作業部会 (Hydrogen and Fuel Cell Technical Task Force) の創設を規定している。

#### 4-5 全米研究評議会 (National Research Council) による精査

DOE は、学术界との協力によって、フリーダムカー (FreedomCAR) と燃料パートナーシップ (Fuel Partnership) の成果を精査している。この精査については、USCAR (フォード、クライスラー、ジェネラル・モーターズ) と 5 大エネルギー会社 (BP、シェブロン、コノコフィリップス、エクソンモービル、シェル) も協力する。

2002 年に発効したフリーダムカー・イニシアティブは、大量生産が可能で安全かつ手頃な値段の水素燃料電池自動車を生産するために必要な技術を研究する政策である。ブッシュ大統領の水素燃料イニシアティブは、既に存在していたフリーダムカー・イニシアテ

イブを支援するものでもある。関連企業との提携によって、米国市民が 2020 年までに水素燃料電池自動車を選ぶようになる環境を整備することが目標である。それによって、輸入石油への依存度を下げるとともに、大気汚染防止と温暖化ガス排出量の削減を実現させることを狙う。

一方、燃料パートナーシップは、輸入石油への依存度を下げると同時に、移動や自動車の選択において消費者の自由が損なわれずに、かつ排ガス量を最小限にとどめながら、燃料補給技術、施設及びより進んだ自動車の開発を目指すものである。2005 年 8 月、全米研究評議会（National Research Council:NRC）は同パートナーシップについて、「よく計画されている。また、水素燃料計画が直面する主要課題もすべて想定されている」という声明を発表している。

一方、NRC のクレイグ・マークス（Craig Marks）評価委員会議長は次のように語っている。「水素プログラムが成功するかどうかは不透明だが、エネルギー保障と米経済への貢献は多大なものである。現段階では、成功するかどうかを予測するのは時期尚早と言わざるを得ないが、大きな前進を遂げている」。

NRC の報告書（[www.nap.edu/books/0309097304/html](http://www.nap.edu/books/0309097304/html)）によると、水素をどのように車中貯蔵するかが長期的課題の中で一番難しい。カギとなる進言は、水素燃料を扱う上での安全性や基準、システム分析、環境への影響、そして一般大衆への認知度に及ぶ。今回の報告書は、NRC が 2004 年 2 月に出したのものから 18 ヶ月後に出されている。それら二つを合わせた内容は、米国の水素計画にとって重要な提言を含むものであり、向こう 10 年間における水素と燃料電池、燃料電池車の研究開発に大きな影響力を持っている。

フリーダムカーと燃料パートナーシップの加盟各社は次の分野でそれぞれの研究開発を進める。

- ・各種システムの統合に関する分析（Integrated systems analysis）
- ・燃料電池のパワー・システム（Fuel cell power systems）
- ・水素貯蔵システム（Hydrogen storage systems）
- ・水素燃料車のための水素生産技術と水素輸送技術
- ・水素燃料車と基幹設備を支える基本的技術の各種基準の設定
- ・燃料電池と内燃エンジンのハイブリッド車に適用できる電動システム
- ・各種素材の軽量化
- ・電気エネルギー貯蔵システム（Electrical energy storage systems）
- ・各種燃料で動く内燃エンジンの排ガス管理システム

フリーダムカーと燃料パートナーシップの加盟者は次のとおりである。

- ・ DOE
- ・ BP America
- ・ Chevron Corporation
- ・ ConocoPhillips
- ・ Exxon Mobil Corporation,
- ・ Shell Hydrogen (US)
- ・ U.S. Council for Automotive Research (USCAR) のパートナー各社

(DaimlerChrysler、Ford Motor、General Motors Corporation)

#### 4-6 21 世紀トラック・パートナーシップ (21st Century Truck Partnership)

DOE では、フリーダムカーと平行して、21 世紀トラック・パートナーシップ (21st Century Truck Partnership) と呼ばれる提携関係を構築し、米国内を走るトラックとバスといった大型車が、これまでどおりの輸送機能を維持しつつ、より安く、安全に、そしてきれいにガソリン依存度を低める新たな技術の開発を目指している。DOE をはじめ、国防省 (DOD)、運輸省 (DOT)、そして環境保護庁 (EPA) が参加している。

同パートナーシップが注力する主な活動は次のとおりである。

■商業大型車と軍事用車両、そしてバスが米国のエネルギー保障構想に見合うのに必要な研究開発を実施する。

■劇的に少ない排ガス量や高効率を実現させるために必要なエンジンや排気システム、燃料、素材に関する研究開発に注力する。

■エネルギー消費量と排ガス量を劇的に抑える大型かつ高度なハイブリッド動力システムの研究開発に注力する。

■トラックを巻き込んだ交通事故での死亡率を低下させる安全性に重点を置いた技術の研究開発に注力する。

■アイドリング時の燃料消費量と排ガス量を劇的に抑える技術の研究開発に注力する。

■既述の各種技術を駆使したトラックやバスの導入を推進するためのデモンストレーション、さらには、商業市場成長のための信頼性を高めることに注力する。

21 世紀トラック・パートナーシップの加盟企業は次のとおりである。

- ・ Allison Transmission
- ・ BAE Systems
- ・ Caterpillar
- ・ Cummins Engine
- ・ DaimlerChrysler
- ・ Detroit Diesel Corporation
- ・ Eaton
- ・ Freightliner
- ・ Honeywell International
- ・ International Truck and Engine
- ・ Mack Trucks
- ・ NovaBUS
- ・ Oshkosh Trucks
- ・ PACCAR
- ・ Volvo Trucks North America

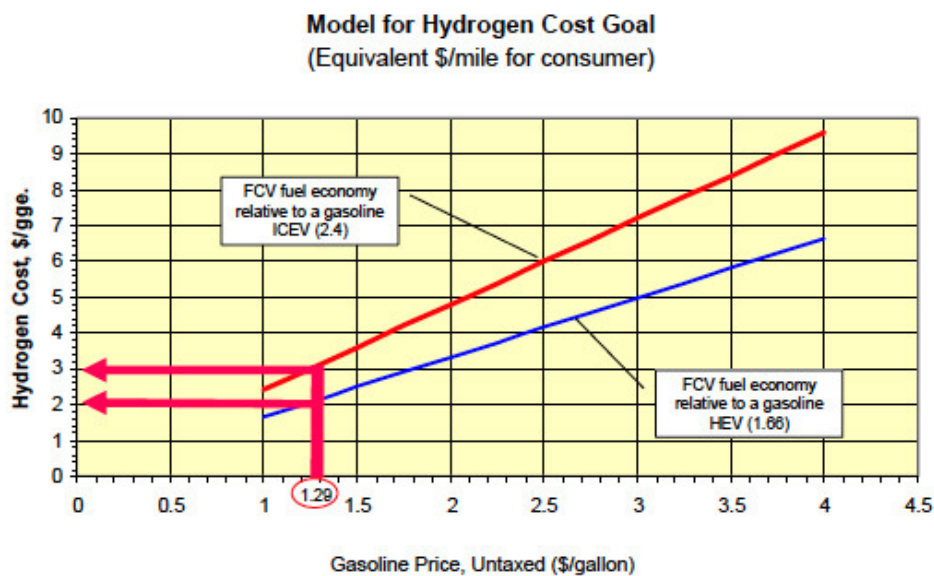
その他の国立研究機関加盟者

- Argonne National Laboratory
- Brookhaven National Laboratory
- Idaho National Laboratory
- Lawrence Berkeley National Laboratory
- Lawrence Livermore National Laboratory
- Los Alamos National Laboratory
- NASA Ames Research Center
- National Institute of Standards and Technology
- National Renewable Energy Laboratory
- Oak Ridge National Laboratory
- Pacific Northwest National Laboratory
- Sandia National Laboratories

#### 4-7 水素コストの見通し

水素生産のコスト予測値は、将来に実用化されるであろう新技術やガソリン価格によって何度も変わってきた。最新の方法によるコスト試算では、2～3ドル/gge（税金含まず、2005年のドル価値で2015年まで適用）とみられている。

水素の予測コストの上限は、1マイル当たりのコストがガソリン内燃エンジン車と同一になるように設定されている。下限は、ハイブリッド(ガソリンと電気)車と同一になるように設定されている。ガソリン価格は、エネルギー情報管理局（Energy Information Administration:EIA）の2015年予想値を使用している。従って、水素コストの目標値は、自動車システムやエネルギー効率、ガソリンの予想価格が変わるたびに変動することになる。



出典：DOE Hydrogen Program Record(参考資料3)

図 4-1 水素コストの目標値

## Summary of EIA Cases & Hydrogen Cost



EIA Case	2015 World Oil Price, \$/bbl	2015 Gasoline Price (untaxed), \$/gal.	Hydrogen Threshold Cost, \$/gge. (Gas ICEV)	Hydrogen Prioritization Cost, \$/gge. (Gas HEV)
High "B" World Oil Price	41	1.40	3.36	2.32
High "A" World Oil Price	34	1.26	3.02	2.09
Reference Case	27	1.07	2.57	1.78

The Hydrogen Threshold Cost is based on a Vehicle Fuel Efficiency Improvement Factor of 2.4 from the NAS.

The Lower Hydrogen Threshold Cost is based on a Vehicle Fuel Efficiency Improvement Factor of 1.66 from the NAS.

出典 : DOE Hydrogen Program Record(参考資料3)

図 4-2 水素コストの目標値

### 4-8 燃料電池の大量生産コスト

水素燃料車がそれ以外の車種と比べ製造コストで競争力を有するためには、燃料電池の大量生産コストが電力あたりで他の動力システムと競争できるほどに低くならなければならない。従って、DOE やフリーダムカー、さらには燃料パートナーシップにとって 30 ドル/kW（1 キロワットを生産するのに 30 ドル）という目標を 2015 年までに実現させることが、技術面で最も重要な成功条件の一つになる。

90 年代初期、DOE は燃料電池の大量生産（年間 50 万個）コストを 3,000 ドル/kW と見積もっていた。過去 15 年間にわたって、税金と民間資金を燃料電池の研究に投資してきた結果、燃料電池生産コストは継続的に下がっている。研究組織の TIAX (TIAX LLC) によると、現在（2005 年）の大量生産コストは 110 ドル/kW にまで低下している。この数字は、2005 年の目標だった 125 ドル/kW を余裕で達成している。2010 年には 45 ドル/kW まで引き下げ、2015 年には 30 ドル/kW という目標を達成したい考えである。

### 4-9 カギとなる技術的課題に関する基礎研究

DOE の科学局基礎エネルギー科学部（Basic Energy Sciences office : BES）は、水素プログラムの主要メンバーであり、技術的に最も困難な分野における根本的研究を推進し

ている。2005年5月、DOEのサミュエル・ボッドマン長官は、次の5分野について水素と燃料電池の技術開発に取り組むBES主導の研究に6,400万ドル以上の予算を割く計画を発表している。

- 水素貯蔵のための新物質及び新素材
- 分離と浄化又は精製、そしてイオン移動のための膜
- ナノ単位における触媒作用
- 太陽光からの水素生産
- バイオ技術を応用した物質及び素材と生産過程

2005年には、上記5つの分野について、25州で50以上の卓越した研究組織が向こう3年間の研究費をDOE水素プログラムのもとに取得した。

#### 4-10 石炭から水素を作るプロジェクト

2005会計年度、化石エネルギー局（Office of Fossil Energy）は、石炭を燃料にした排ガス・ゼロの発電所を建設するというブッシュ大統領の「石炭から水素（Hydrogen-from-Coal）」プロジェクトを推進するために、32の研究プロジェクトを指定した。同プロジェクトではその他、温暖化ガスを排出しない発電所計画であるフューチャーゲン（FutureGen）も含まれる。

「石炭は最も豊富な資源である。雇用を創出し、経済成長を持続させるためにも、我々はその石炭をもっと効率よく、そしてきれいに活用できる手段を見つけなければならない」「それらすべてのプロジェクトは、現在と将来における我々の経済とエネルギー保障にとって大事な投資である」とボッドマンDOE長官は同プロジェクトについて声明を発表した。

同プロジェクトの具体的な主要目的は、石炭のガス化によって純粋な水素を生産する新たな方法を発見することをはじめ、安全な水素の扱い方や貯蔵方法を発展させることである。

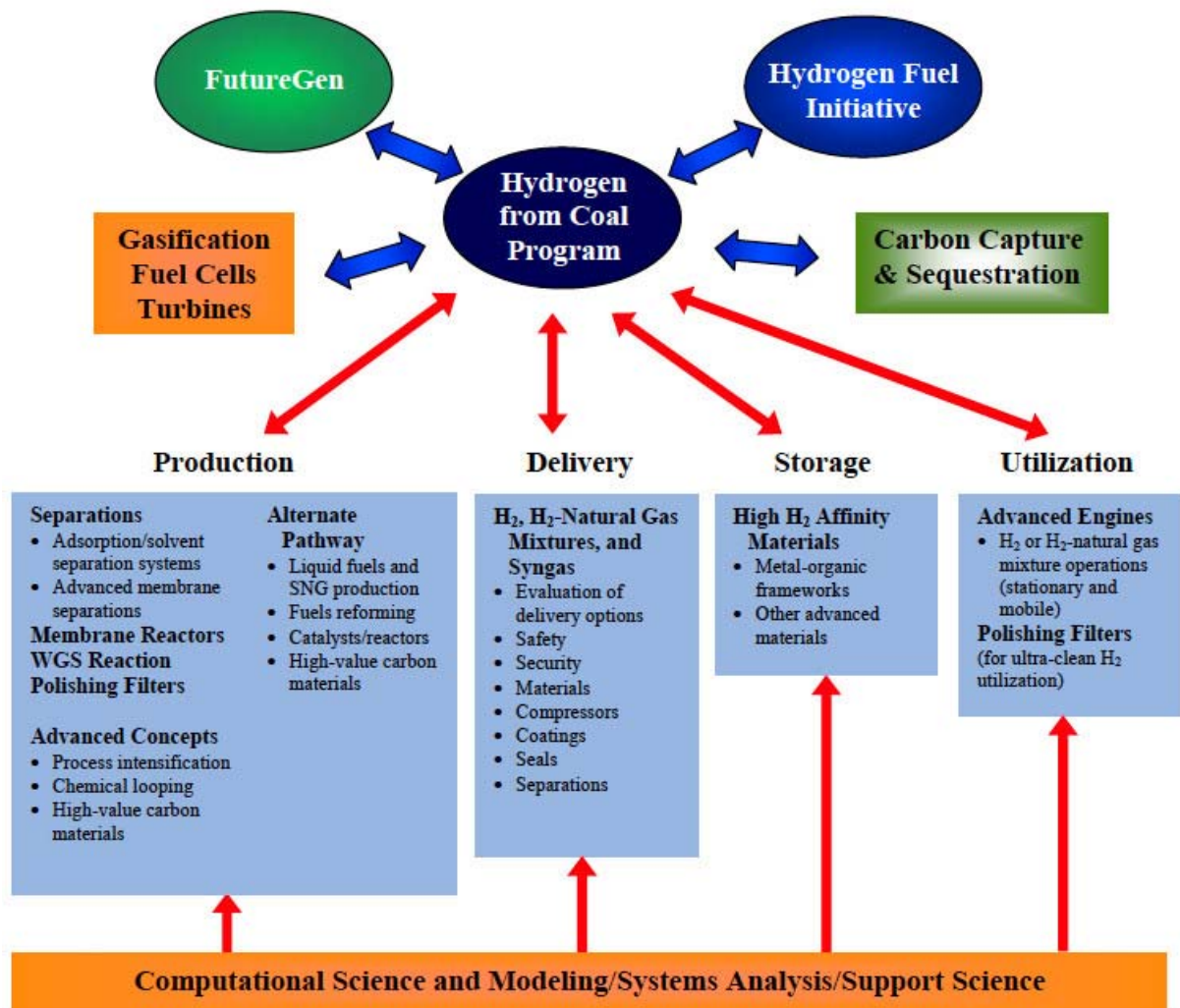
具体的には、2015年までに、石炭から水素を電気と一緒に生産する高効率かつ排ガス量ゼロの発電所を運営することである。石炭から電気と水素を生産するための部分的酸化作用（Partial oxidation）技術は、同研究の根幹技術である。その基本的技術になっているのが、IGCC（integrated gasification combined-cycle）技術である。

現段階では、それらの技術を利用した発電所及び水素生産工場が商業化できることを示す実証は行われていない。しかし、部分的酸化作用（又は石炭のガス化）で得られるガスを、石炭と酸素、そして蒸気に混合させることで、きれいな合成ガスを生産できることはすでに証明済みである。

水素を生産するには、この合成ガスはさらに加工され、「mature water-gas shift reactor」という装置を使うことで、水素を増やすと同時に一酸化炭素を二酸化炭素に変換する。水素はその際、圧力スイング吸着（pressure swing adsorption :PSA）技術によって分離される。石炭から得られる合成ガスから水素を生産する一連の技術は、石炭からきれいな電力をつくることを目指すDOE主導の研究の中では中核的存在である。

課題はコストである。石炭から水素を生産するコストを下げるためには、水素分離からガス化すべての段階でそれぞれに必要な技術を発達させなければならない。水素を生産する際の副産物として生産される二酸化炭素は分離され、それがそのまま貯蔵技術に適用される見込みで、その技術は現在、DOE の炭素隔離研究プログラムのもとに研究されている。

Figure 10. The Hydrogen from Coal Program and Support of Other Programs and Initiatives



出典：Hydrogen from Coal Multi-Year RD&D Plan  
 (www.fossil.energy.gov/.../fuels/publications/programplans/  
 2005/Hydrogen\_From\_Coal\_RDD\_Program\_Plan\_Sept.pdf)

図4-3 石油から水素プロジェクトと他のプロジェクトの関係

一方、フューチャージェンは、石炭を燃料にしながらも排ガス量ゼロの発電所を世界で初めて建設することを目指す官民協力の未来エネルギー開発計画である。予算は 10 億ド

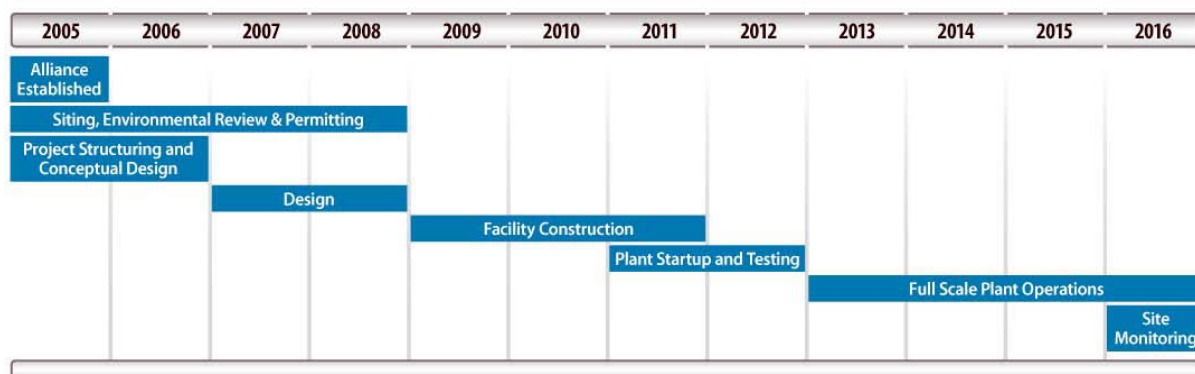
ルである。

フューチャージェンの工場は、地質学上の物質構成で二酸化炭素を取り出して貯蔵しながら、最先端技術を駆使した設備で発電する。それと同時に、水素や副産物を生産し、発電以外の産業でも利用できるようにする計画である。

フューチャージェンの工場が特異な点は、研究者や産業界が、劇的な技術革新を続けた結果として、石炭のガス化をはじめ、そこからの発電、大幅な排ガス量削減、二酸化炭素の抽出及び貯蔵、そして水素生産を可能にしつつあることである。必要な各種の基本的技術はすでに存在するものの、すべての技術をどのように応用したり融合したりすれば単一工場での操業が可能か、さらには、技術的かつ商業的に実行可能かははまだ実験段階である。

フューチャージェン同盟傘下の各社は将来的には国内外の一般家屋やビジネスに電力を供給するとともに、燃料電池のための水素も供給する。同研究に加わっている各社は、下記のように、米国外にも中国やオーストラリア、欧州大陸、南アフリカ、南米の世界各地に事業所を運営する多国籍企業である。

- American Electric Power (Columbus, Ohio)
- BHP Billiton (Melbourne, Australia)
- China Huaneng Group (Beijing, China)
- CONSOL Energy (Pittsburgh, Pennsylvania)
- Foundation Coal (Linthicum Heights, Maryland)
- Kennecott Energy (Gillette, Wyoming)
- Peabody Energy (St. Louis, Missouri)
- Southern Company (Atlanta, Georgia)



出典： <http://www.futuregenalliance.org/about/timeline.stm>

図 4-4 フューチャージェンのタイムスケジュール

#### 4-11 2005 会計年度の原子力水素研究 (Nuclear Hydrogen Research)

原子力水素研究イニシアティブは、水素を生産するために高温核反応を利用した水素生産技術の開発に特化している。原子力エネルギー・科学・技術局 (Office of Nuclear Energy, Science and Technology) が推進する DOE 水素プログラムの一環として、高温核反応を



利用した水素生産研究について 2005 会計年度では、次の 3 つの研究に予算が組まれた。

■クレムソン大学の「硫黄ヨウ素周期 (The Sulfur-Iodine Cycle)」：化学反応の平衡の測定及びモデリングを利用した反応過程の分析」

■ジョンス・ホプキンス大学の「コンパクト熱交換のためのシリコン・カーバイド・セラミックス (Silicon Carbide Ceramics)」

■ウィスコンシン大学の「塩熱移動ループ (Salt Heat Transport Loop)：素材腐食作用と熱移動現象」

それらの研究は、大規模かつ排ガスが出ない水素生産を原子力エネルギーから実現させることを目指すもので、最終的には、第 4 世代原子炉によって水素生産のデモンストレーションにつなげたい考えである。

#### 4-12 H2A モデル・サポートの透明性

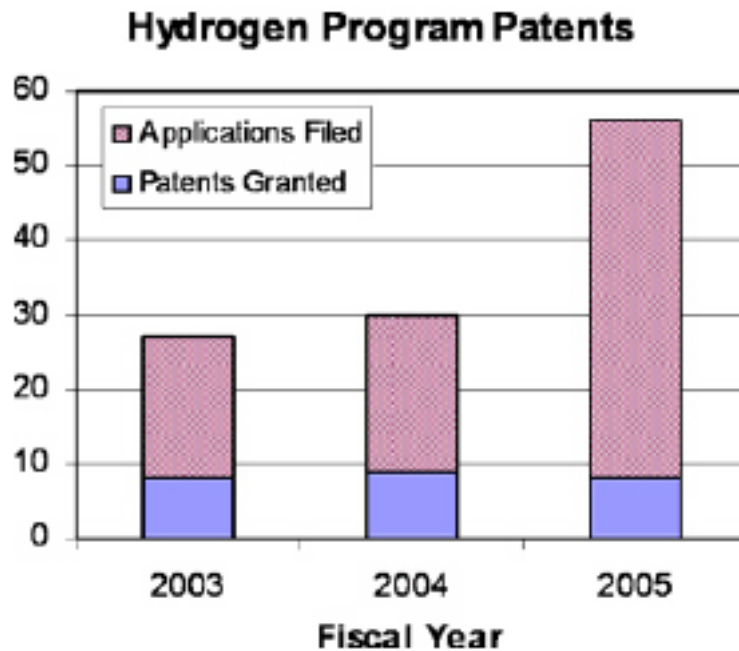
再生可能エネルギー国立研究所 (National Renewable Energy Laboratory) は、民間との協力によって、水素分析 (Hydrogen Analysis : H2A) グループを主導し、水素生産コスト・モデルを開発している。H2A モデルは、一貫した分析方法と透明性の高い報告の必要性に取り組むものである。キャッシュ・フロー分析ツールを応用して、水素生産の方法別に最小限の水素コストを予測する。H2A の初期段階と水素生産の主なモデルはすでに精査され、石炭や天然ガス、バイオマス、電気分解といった何種類かの水素生産方法について試験されている。

H2A グループのメンバーは、国立研究所や関連業界、学術界の要人で構成される。それに加え、主要業界協力者 (Key Industry Collaborator : KIC) 企業から 16 人が参加し、精査や助言を提供することで分析やモデル開発に寄与している。生産モデルの詳細は、関係者が自由に情報を共有し活用できるよう、[www.hydrogen.energy.gov/h2a\\_analysis.html](http://www.hydrogen.energy.gov/h2a_analysis.html) に掲載されている。

#### 4-13 水素プログラムの開発能力

水素プログラムでの研究における技術革新の進行状況とその強さを量る目安は、特許の申請件数と特許取得件数と言える。DOE 水素プログラムは毎年、同プログラムが拠出する各研究の成果として申請される特許の数と特許取得件数を記録している。2005 会計年度では、水素プログラム傘下のプロジェクトに 8 つの特許が下りた(うち一つは国際特許)。それに加えて、同会計年度中に特許申請件数は、前年度の 22 件から 48 件に大幅増加した。

2005 年には 100 を超える新たなプロジェクトが始まっており、水素プログラムでは向こう数年間でその数を継続的に増やしていく計画であり、特許申請の件数も特許取得数も増えていくものと期待される。



出典：FY 2005 Progress Report(参考資料 1)

図 4-5 水素プログラム特許数

#### 4-14 DOE 水素プログラムのウェブサイト

2005 年に新たに構築された DOE 水素プログラムのウェブサイト ([www.hydrogen.energy.gov](http://www.hydrogen.energy.gov)) は、ブッシュ大統領による水素燃料イニシアティブの研究開発活動に焦点を合わせた内容である。同ウェブサイトには、関連の最新ニュースをはじめ、各種資料、報告、技術の解説といった内容が掲載されている。また、エネルギーの効率化や再生可能エネルギーに関する各関連局のウェブサイトの中から、水素燃料や燃料電池に関して閲覧者が探している特定のウェブサイトに行ける便利なリンクも集合されている。

#### 4-15 2005 年の実態精査

DOE 水素プログラムは 2006 年 5 月、バージニア州アーリントンにて年次会議を開き、研究活動を精査した。300 を超えるプロジェクトについて、口頭による状況説明や技術説明があった。水素と燃料電池技術に関するあらゆる側面について 150 人の専門家からなる審査会は、300 以上のプロジェクトのうち 200 のプロジェクトに関し精査を実施し、新たな発見内容や助言を集めた。

各プロジェクトの主任研究者 (PI) は、まとめられた発見内容や助言を整理し、将来の研究に役立てる。それと同時に、DOE の技術開発管理者ら (Technology Development Managers) は、それらの内容を翌年度の研究内容の方向性や予算決定の材料に活用する。この会議では、開始から半年内の研究プロジェクトは精査対象になっていない。精査の結果は、[www.hydrogen.energy.gov/annual\\_review05.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review05.html) に掲載されている。

## 5. カリフォルニア州燃料電池パートナーシップ (The California Fuel Cell Partnership)

### 5-1 カリフォルニア州燃料電池パートナーシップの組織

カリフォルニア州燃料電池パートナーシップ (The California Fuel Cell Partnership (CaFCP)) は、31 の会員組織からなる提携関係によって、水素燃料電池車の商業化を目指す組織である。自動車メーカーをはじめ、政府省庁機関、燃料電池技術開発企業が主な会員である。正会員 20 団体と準会員 11 団体に構成される (下記参照)。民間と州政府が主導になっている水素燃料電池研究開発では全米最大規模である。

#### 正会員企業

- DaimlerChrysler
- Ford
- General Motors
- Honda
- Hyundai
- Nissan
- Toyota
- Volkswagen
- BP
- Chevron
- Shell Hydrogen
- Ballard
- UTC Power
- National Automotive Center

#### 正会員政府機関

- California Air Resources Board
- South Coast Air Quality Management District
- California Energy Commission
- U.S. Department of Energy
- U.S. Environmental Protection Agency
- U.S. Department of Transportation

#### 準会員

- Alameda-Contra Costa Transit District
- Sunline Transit Agency
- Santa Clara Valley Transportation Authority
- Institute of Transportation Studies, University of California, Davis
- Air Products and Chemicals
- Proton Energy Systems

- ・ Praxair
- ・ ISE Corporation
- ・ Hydrogenics Corporation
- ・ Pacific Gas and Electric Company
- ・ ZTEK Corporation

## 5-2 カリフォルニア州燃料電池パートナーシップの動向

CaFCP の会員は、2004～2007 年まで協力体制を維持することで合意しており、その間に、水素燃料電池車の商業化に向けて研究開発する。また、運輸に関する燃料電池技術（つまり、車に応用できる燃料電池技術）をもう一つ上の水準まで引き上げるとともに、自動車と燃料補給基幹設備を、現場と協力することで環境整備を進める。ここで言う現場とは、フリート（大量の車を所有するビジネスや何らかの組織）や、燃料補給施設を置く地域社会を意味する。2008 年以降の体制はまだ決まっていない。

## 5-3 カリフォルニア州燃料電池パートナーシップの目標

CaFCP の主な目標は次の 4 点である。

- フリート・デモンストレーションの実施：CaFCP は、会員に対し、最高で 300 台の燃料電池車（バスも含む）の導入を援助する。対象は、ロサンジェルス及びその周辺と、サクラメント＝サンフランシスコ地域で、2007 年までに実施されなければならない。
- 燃料デモンストレーションの実施：CaFCP の会員は、デモンストレーション計画を支援するために、燃料補給所を建設する。
- 商業化のための環境整備：CaFCP と会員は、地域社会が燃料電池車と燃料補給所を受け入れやすくするために、地方自治体の関係者に研修を施す。それと同時に、燃料電池車と燃料補給所のための基準を規定する。
- 一般社会における認識や教育の推進：CaFCP は、一般大衆と報道陣に対し、燃料電池車の利点を宣伝することで世間での認識や知識を高めるとともに、国内外における水素燃料及び燃料電池車の開発関係者（特に、利害関係のある組織）と必要な調整をし、商業化に向けて情報や経験値、資料を共有する。

## 6. UC デイビスの H2 パスウェイズ・プログラム (Hydrogen Pathways Program)

### 6-1 H2 パスウェイズ・プログラム

カリフォルニア大学デイビス校の運輸研究所 (Institute of Transportation Studies : ITS-Davis) が研究している H2 パスウェイズ・プログラム ( Hydrogen Pathways Program ) は、自動車向けに水素燃料を研究する大学研究としては全米最大規模かつ最先端のものと言われている。ITS-Davis が主導する H2 パスウェイズ・プログラムは、カリフォルニア州政府や連邦省庁機関、自動車メーカー、国際的エネルギー各社の協力によって進められている。

CaFCP の会員でもある自動車メーカー 8 社は、カリフォルニア州でこれまで 100 台以上の普通乗用車を走らせている。同 8 社の目標は、2007 年までにその数を、小型車から SUV まで幅広い車種で 300 台に増やすことである。

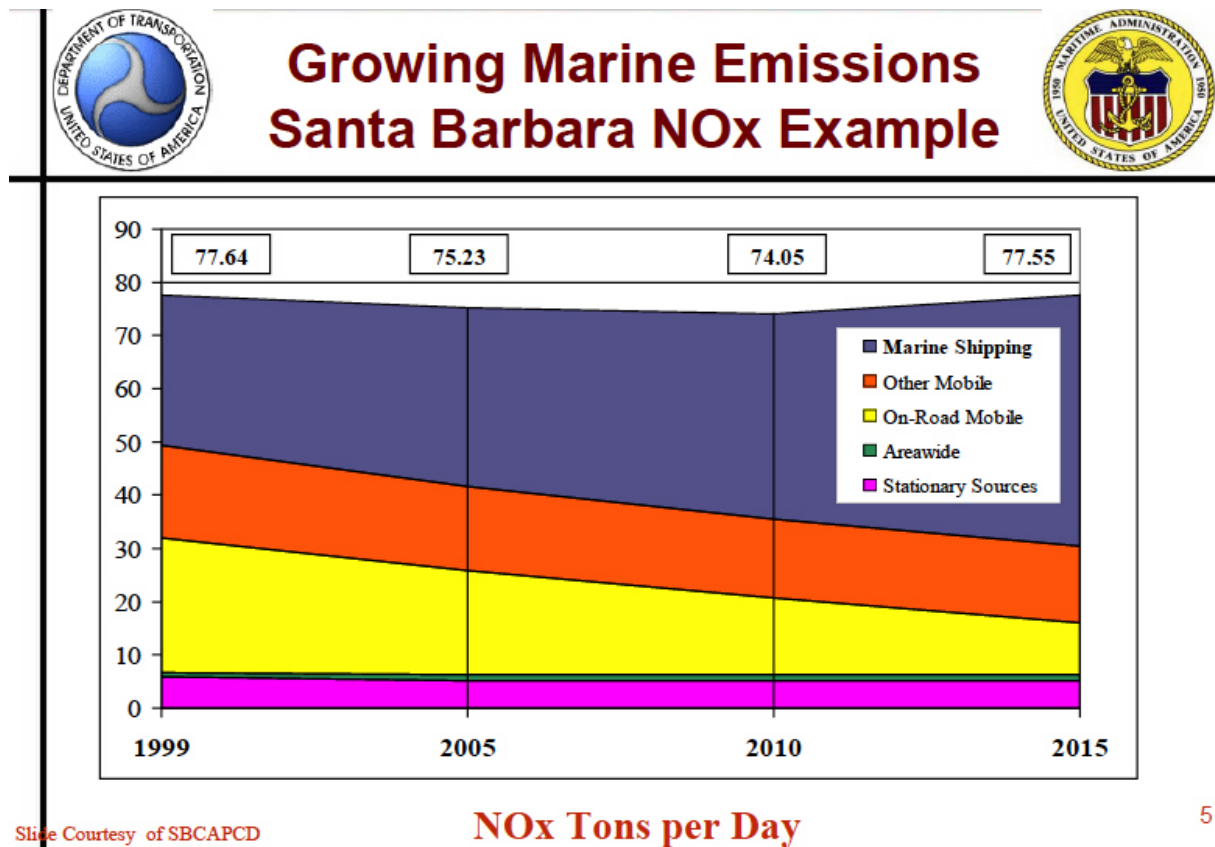
H2 パスウェイズ・プログラムの出資者は次のとおりである。

- BP America Inc.
- Nissan Motor Co., Ltd.
- ConocoPhillips
- Shell Hydrogen (US)
- ExxonMobil
- Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc.
- Department of Energy
- American Honda Motor Company
- Air Products and Chemicals, Inc.
- Chevron
- U.S. Department of Transportation
- Hyundai Motor Company
- TotalFinaElf
- General Motors Corporation
- Natural Resources Canada (NRCan) - Ressources naturelles Canada (RNCan)
- Subaru
- California Department of Transportation
- United States Environmental Protection Agency
- Petrobras
- Pacific Gas and Electric Company
- Indian Oil Corporation Limited
- Southern California Edison

## 7. MARAD のエネルギー技術プログラム

### 7-1 エネルギー技術プログラムの概要

米国の輸送機関の中では、船舶以外の排ガス量は年々減少する傾向にあるが、海上輸送に関しては現状のままでいくと酸化窒素（NO<sub>x</sub>）の排出量が 2010 年あたりから増加すると予測される。米運輸省（DOT）海事局（Maritime Administration : MARAD）はそこで、船舶の排ガス量が増加し始める前に排ガス抑制技術を開発し、実用化させようと、「エネルギー技術プログラム（Energy Technologies Program : ETP）」と銘打って 2000 年代に入ってから本格的な研究開発に着手している。



Slide Courtesy of SBCAPCD

出典：MARAD 「Energy Technologies Program」 (参考資料 5)

図 7-1 1 日当りの NO<sub>x</sub> 排出量試算

同プログラムの主要目的は、動力効率性向上と排ガス量削減を実現できる技術や燃料を調べるとともに、エネルギー関連技術や政策関連情報を海事業界に浸透させることである。それに向かう具体的な計画として次の 6 つがある。

- ・ 基盤となるパフォーマンスの試験：既存の船舶データと技術の評価
- ・ 旧式ディーゼル・エンジンの改造（diesel retrofits）：emulsified fuel、噴水（water injection）、SCR、particulate traps
- ・ 代替燃料：天然ガス、バイオディーゼル、水素、合成ディーゼル

- ・高度技術：燃料電池、高効率ガス・タービン
- ・研究：技術評価、奨励策と排ガス測定
- ・業界への働きかけ：ニューズレター、会議、ウェブサイト、プレゼンテーション

MARAD の同プログラムでは、水素燃料を用いた燃料電池の研究開発は、排ガス対策上の高度技術として位置付けられて実施されている。

MARAD では同プログラムの下、地方自治体や民間の関連企業、大学との協力によって排ガス量削減を可能にする推進システムの研究に着手している。ここではその具体例を示す。

## 7-2 エネルギー技術プログラム（排ガス対策一般）

### 7-2-1 サンディエゴでの水中翼船

MARAD は 2002 年 9 月、SCX フェリーズ社 (SCX Ferries, Inc) と共同開発の契約を締結し、カリフォルニア州サンディエゴの海上交通で使われる水中翼船の排ガス抑制システムと酸化窒素 (NO<sub>x</sub>) のパフォーマンスを調べる研究に着手した。

同プロジェクトで使用される水中翼船は、M/V ウェストフォイル (M/V Westfoil) という名前で、最新の水中翼とウォータージェット推進システムを搭載している。長さ 85 フィートで、149 人の乗客を乗せることができる。エンジンは、4 基のデトロイト・ディーゼル 12v92 TA である。

米エネルギー省 (DOE) は、ウェスト・バージニア大学の動力源試験研究所 (Mobil Source Testing Laboratory) の協力を確保することで同研究を支援している。同研究所は排ガス量を測定する。試験が成功すれば、SCX フェリーズはそれに基づき新たな船を建造する。その場合、液化天然ガス (LNG) が新型水中翼船の燃料として考慮される。同時に、MARAD は、LNG を使った水中翼船を航行させる場合に LNG の供給状況とコストを調べる調査費を拠出する。

### 7-2-2 バイオディーゼルと水噴射システム

MARAD は、水上交通局 (Water Transit Authority : WTA) と B&G フリート (B&G Fleet)、ウォルザーズ・エンジニアリング (Walthers Engineering)、カリフォルニア大学バークリー校との協力の下、サンフランシスコ湾でバイオディーゼルと噴水システム (Water Injection System : WIS) を研究している。

対象技術は、燃焼空気水噴射式 (combustion air water inject) とバイオディーゼルの B100 と B20 である。燃料が再生可能な点と二酸化硫黄及び二酸化炭素の排出量が少ないことが利点である。使用されるエンジンはデトロイト・ディーゼル 12V-71 である。

### 7-2-3 ニューヨーク市港湾民間フェリー排ガス抑制プログラム

MARAD は、環境保護庁 (EPA) との協力の下、ニューヨーク市と運輸省 (DOT) の資金拠出によって、フェリーから排出されるガスの量を抑制するプログラムを開始した。予算は 680 万ドルである。

同プログラムではまず、ニューヨーク市水域のフェリーを特定し、超低硫黄ディーゼル (Ultra Low Sulfur Diesel : ULSD) を試験し、排ガス量を削減する技術を絞り込み、それらに応用した技術を実際に適用し、その後、試験を重ね、経過を評価して、効果が確認できれば、全フェリーに適用する。

#### 7-2-4 大型船の旧式ディーゼル・エンジン改造 (Large Vessel Diesel Engine Retrofit)

MARAD は、タンカーをはじめとする大型船の旧式ディーゼル・エンジンを改造することを目指し、EPA やロサンゼルス港湾局、カリフォルニア大気資源評議会 (California Air Resources Board : CARB) と予算や研究内容を検討中である。大型船から排出される酸化窒素を 25%削減し、燃料効率を向上させたい考えである。

#### 7-3 燃料電池の安全基準適合性

船舶に燃料電池を適用しようという試みは、燃料電池で動く電力システムが、船体の大きさや構造の多様な船舶における推進力負荷に実際に反応できるか否かにかかっている。

MARAD はシュア・パワー社 (Sure Power) との協力によって、2002 年 6 月燃料電池システムがマリン・パワー負荷に反応できるかどうかの実験を行った。シュア・パワーのシステムは、2 基の 200kW (キロワット) リン酸燃料電池とフライホイール (flywheel)、エネルギー貯蔵ユニットから構成される。

同プロジェクトでは、シーワージー・システムズ社 (Seaworthy Systems, Inc.) が試験方法を開発している。海事関連の規制当局は、船舶での燃料電池に関する各種規定や規制を設けていないため、米船級協会 (American Bureau of Shipping : ABS) と米電気電子学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers : IEEE) が一般船舶のパワー・システムについてそれぞれに設定している諸規定が同プロジェクトに適用された。

##### 7-3-1 実証試験の実施

同試験では、下記のように全部で 9 種類が試された。

試験番号	試験内容	適用規則	結果
1.1	オペレーションの信頼性、60 分間、負荷 100%	ABS	合格
1.2	オペレーションの信頼性、30 分間、負荷 110%	ABS	合格
1.3	オペレーションの信頼性、4 時間、何種類かの負荷	ABS	合格
2.1	ボルテージの安定性、負荷 0~100%	ABS/IEEE	合格
2.2	ボルテージの安定性、負荷 150%	ABS/IEEE	合格
2.3	ボルテージの安定性、負荷 300%	ABS/IEEE	不合格
3.1	負荷変動によるフリークエンシーの規定、100%-0%-50%-100%	ABS	合格
3.2	負荷変動によるフリークエンシーの規定、0%-75%-100%-25%-0%	IEEE	合格
4.1	パラレル・オペレーション	ABS/IEEE	合格

##### 7-3-2 試験結果の概要

###### ■試験番号 1-1

シュア・パワーのシステムがフルパワーで 60 分稼働するかどうかのテストである。ボルテージも安定し、バス・フリークエンシー (bus frequency) も最高で 0.03% (0.02 Hz) しか変化しなかった。

###### ■試験番号 1-2

シュア・パワーのシステムが定格ボルテージと定格フリークエンシーにおいてフルパワーの



110% (352 kW) で 30 分稼働するかどうかのテストである。ボルテージも安定し、バス・フリークエンシー (bus frequency) も最高で 0.07% (0.04 Hz) しか変化しなかった。

#### ■試験番号 1-3

シュア・パワーのシステムが定格ボルテージと定格フリークエンシーにおいて、負荷が変動する状況下で 4 時間稼働するかどうかのテストである。ボルテージもバス・フリークエンシーも安定し、ユニット作動には問題が生じなかった。

#### ■試験番号 2-1

シュア・パワーのシステムが、定格負荷の範囲 (0~100%=0~320kw) 内において定格ボルテージの±2.5%以内で正常に稼働かどうかのテストである。最大偏差は、277 ボルト時の 1 ボルト (0.36%) だった。この数字は、合格基準の±7 ボルト (±2.5%) を大幅に下回る。また、燃料電池のボルテージも安定していた (一つは、-1.08%で、もう一つは-1.44%だった)。

#### ■試験番号 2-2

シュア・パワーのシステムが、大きな負荷 (定格電流の 150%) での始動に耐え、安定したボルテージで稼働を持続させることができるかどうかのテストである。2 基それぞれの燃料電池の定格ボルテージはほとんど変動せず、非常に安定した稼働だった。

#### ■試験番号 2-3

シュア・パワーのシステムが、適正ボルテージ (480 v) で 2 秒間の超過負荷 (定格キャパシティの 300%=960 kW) にある時でも正常に電力を供給できるかどうかのテストである。最初の 2 秒間におけるバス・ボルテージの偏差は 58.7 ボルトで不合格となった。

#### ■試験番号 3-1

シュア・パワーのシステムが、特定の負荷変動の状況下で規定のフリークエンシーに対応できるかどうかのテストである。何種類かの負荷の時に測定された結果、バス・フリークエンシーの最大偏差は 0.13% (0.08 Hz) で、5 秒以内には 0.03% (0.02 Hz) 以内に必ず戻った。

#### ■試験番号 3-2

3-1 と同様のテスト内容 (負荷の変動具合が異なる) である。何種類かの負荷の時に測定された結果、バス・フリークエンシーの最大偏差は 0.6% (0.36 Hz) で、2 秒以内には 0.08% (0.05 Hz) 以内に必ず戻った。

#### ■試験番号 4-1

シュア・パワーのシステムが、合計された定格負荷変動範囲 (20~100%=32~320kw) において、負荷分配を安定 (発電機の定格パワー合計の±15%) させることができるかどうかのテストである。負荷の変動は基準を満たす範囲内だった。

### 7-3-3 結論

テスト結果は、300%の負荷 (燃料電池にかかる正常負荷の 3 倍) でのテスト以外ですべて合格だった。試験番号 2-3 については今後、再テストされなければならない。

2002 年 6 月現在、燃料電池に関する各種規制内容は明文化されつつあるが、それは陸上使用の燃料電池についてであり、水上利用の燃料電池に関する規制は陸上向け燃料電池より遅れるであろう。この実験によれば、シュア・パワーのシステムやその他のシステムを総合的にみると、船舶向け燃料電池は既存の船舶電気規制 (shipboard electrical regulations) や基準を満たすものと思われる結論付けた。

#### 7-4 MARAD の燃料電池開発

MARAD は 2003 年末、船舶向け燃料電池の開発に関する課題として DOT の水素作業部会 (Hydrogen Working Group) に下記の点を指摘している。

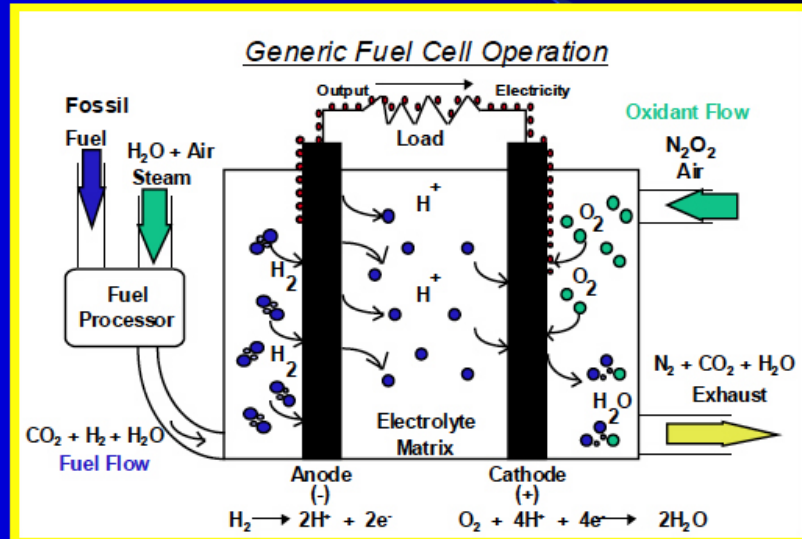
- 水素：天然ガスを利用場所までトラックで輸送することを強いられ、現場に天然ガス変換機を設置し、現場で電気分解して水素を得ることが必要で、他の燃料に比べて割高となる。
- 燃料補給：初期投資が莫大で、燃料貯蔵や消防施設、取り扱いの面でも障害が多い。
- 船内貯蔵：圧縮したり、低温貯蔵したり、水素化合物にしたりしなければならない。
- 船舶の安全性：USCG の規制や ABS の規則があり、必要以上に危険視されるおそれがある。

しかし、船舶の排ガス削減は回避できるものではなく、エンジンや燃料を改良することで、酸化窒素と二酸化炭素の排出量を減らす研究が次第に本格化している。MARAD は水素及び燃料電池プロジェクト (Hydrogen & Fuel Cell Projects) の下、燃料電池の研究開発に注力している。現在、MARAD が想定する船舶向け燃料電池の主なタイプには次の 5 種類がある。

	電解質 (Electrolyte)	電池温度 (Cell Temp)	効率性 (Efficiency)
リン酸 (Phosphoric Acid : PA)	液体	華氏 450 度	38 - 40%
溶融炭酸塩 ( Molten Carbonate : MC)	液体	華氏 1200 度	45 - 55%
管状固形酸化物 (Tubular Solid Oxide : SO)	固体	華氏 1800 度	45 - 55%
平面固形酸化物 (Planar Solid Oxide : SO)	固体	華氏 1800 度	45 - 55%
プロトン交換膜 ( Proton Exchange Membrane : PEM)	固体	華氏 180 度	38 - 40%



# Fuel Cell Review Generic Operation



出典：Maritime Hydrogen and Fuel Cell Initiatives（参考資料 7）

図 7-2 燃料電池の原理

## 7-4-1 米商船アカデミーでの研究

MARAD が支援する燃料電池研究の中で最も具体的なものが米商船アカデミー（United States Merchant Marine Academy：UUMMA）で実施されている。

同アカデミーは、再生可能エネルギーの輸送技術を開発中で、5kW の水素固体高分子形燃料電池（hydrogen PEM fuel cell）システムのほか、10 kW と 1.4 kW の太陽電池システム（photovoltaic systems）、1 kW の風力発電装置、水素発電機、圧縮水素貯蔵（2400 psi）を研究中である。

## 7-4-2 サンフランシスコの排ガス・ゼロ・フェリー

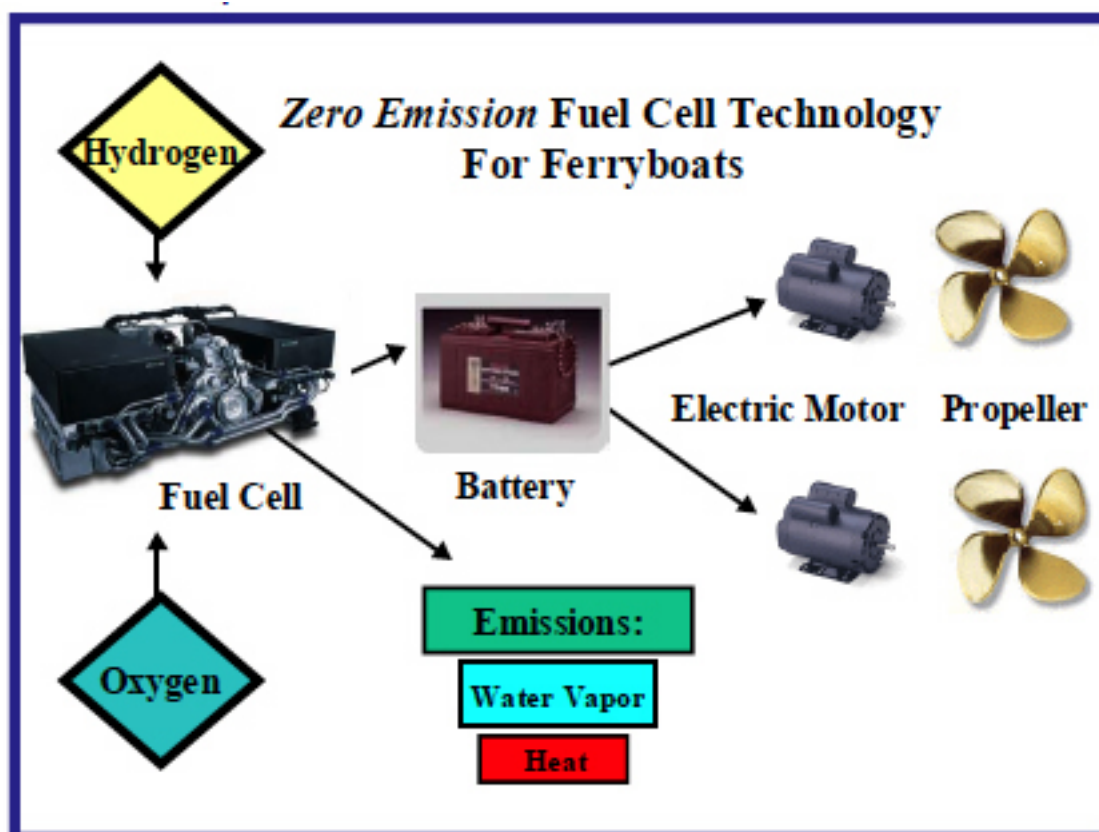
サンフランシスコ湾の水上交通局（Water Transit Authority：WTA）は、排ガス・ゼロ・フェリーの開発に積極的に取り組んでいる。燃料電池を船舶の推進に応用する例として注目されており、開発されれば、サンフランシスコ沖 3 マイルにある宝島（Treasure Island）とサンフランシスコ市を結ぶ水上交通機関として活用される。

同プロジェクトは、燃料電池「エンジン」に焦点を合わせる。燃料電池がバッテリーに電気を送り、バッテリーが電気モーターを動かし、それらがプロペラを回転させる、というのが基本的な構造である。2 基の 200kW 燃料電池エンジンなら、乗客 49 人を乗せたフェリーを時速 12 ノットで航行させることができる。

一方、燃料貯蔵は推力システムよりも深刻な課題となる可能性がある。水上バスの場合、水素シリンダーの「タンク・ファーム（tank farm）」を屋根に取り付け、そこに 8 万立方フィートのガス

を貯蔵することが想定される。タンク・ファームの大きさは 20 フィート×20 フィート×3 フィートくらいになる。

別の課題は、水上での水素燃料電池利用に関する規制である。USCG はこれまで、天然ガス燃料の使用を認めたことはある。水素燃料電池を使う場合も天然ガス燃料と同じ結果になることが望まれる。そのためには、天然ガスにしる水素ガスにしる、大気より軽いことと、圧縮液体状態で運ばれることが認可取得の条件となる。



出典：MARAD 「ENERGY TECHNOLOGIES」 (参考資料 6)

図 7-3 フェリーのゼロ排ガス燃料電池技術

#### 7-5 米海軍艦艇システム司令部 (Naval Sea Systems Command : NAVSEA)

MARAD は 2003 年、米海軍艦艇システム司令部 (Naval Sea Systems Command : NAVSEA) フィラデルフィア部隊の海軍排ガス試験プログラム (Navy Emission Test Program) に参加した。船舶向け排ガス・システムの開発を目指し、5 種類の燃料と 6 種類の排ガス抑制技術を試験している。船舶システム開発局 (Ship Systems Engineering Station) のマリーン・エンジン試験研究所 (Marine Engine Test Laboratory) が試験を実施している。

試験に使われるエンジンは 2 ストロークの 12V-71 デトロイト・ディーゼルで、試験されている燃料とシステムは下記のとおりである。

試験に使われる燃料

- ・ F-76 (ディーゼル No.2 に類似)
- ・ JP-5 (軍事航空燃料)
- ・ 合成 (Fischer Tropsch ディーゼル)
- ・ ディーゼル (硫黄が非常に少ないもの)
- ・ バイオディーゼル (大豆から作られたメチルエステル)

試験に使われるシステム又は装置

- ・ 燃料触媒混合 (Fuel Catalyst Additive)
- ・ 空気加湿システム (Air Humidification System)
- ・ シリンダー・パワー機器 (Cylinder Power Assemblies)
- ・ 小型囊(のう)噴出機 (Mini-Sac Injectors)
- ・ フィルター (Active Regenerated Particle Filter)
- ・ 遠心力利用の煤煙集合機 (Centrifugal Soot Collector)

## 8. 米海軍の燃料電池研究開発

### 8-1 概要

船舶への水素燃料利用は、特に米海軍やその他の国の海軍で注目されている。米海軍では現在、統合電力機関（integrated electric plants）を船内（又は船上）に整備する設計を検討中である。電力による推進システムは一般に、寿命が短く（4万時間と言われている）、船体振動と騒音が小さい。

燃料電池は、ガス・タービンやディーゼル・エンジンと異なり、燃焼を必要としないことから、酸化窒素を排出しない。しかも、設計上も、従来型の燃焼エンジンに比べてパワー・システムを分散して配置できる。つまり、船体のいかなる部分にでも配備できる。その結果、艦船の生存能力を高めるための柔軟性を向上させることも可能となる。

燃料電池は、海軍船舶にとって、燃料効率の向上だけでなく、低排ガスと設計の柔軟性という利点があり、それらがまた造船コストを引き下げることにもなる。

米海軍研究局（Office of Naval Research：ONR）はこれまで、船用燃料電池（Shipboard Service Fuel Cell：SSFC）プログラムの下、燃料電池を艦船に適用するために何種類もの研究開発に予算を組んできた。

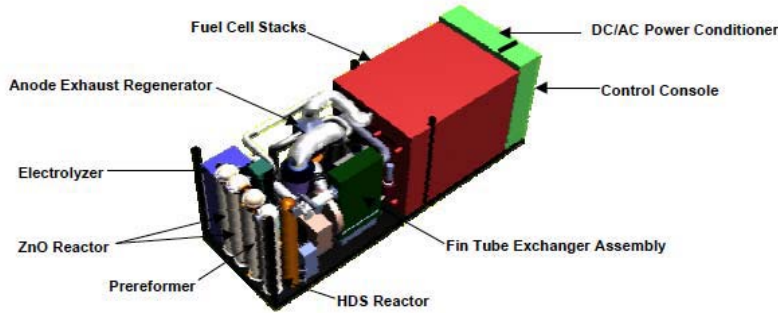
その一環として、熔融炭酸塩形（Molten Carbonate：MC）とプロトン交換膜形（Proton Exchange Membrane：PEM）という2種類のプロトタイプを開発している。2000年、海軍はフュエルセル・エナジー社（FuelCell Energy, Inc.）が開発したMC燃料電池を採用することを決めている。PEM燃料電池の方では、実用化に向けた研究には至っていない。

MC燃料電池の開発に当っては、JJMA（John J. McMullen Associates, Inc.）と米コーストガード研究開発センター（USCGC）との提携で、MC燃料電池に必要となる船舶用コンピュータ・システム及びそのためのインターフェイスの開発を進めた。実験に使われたのは、コーストガードのヴィンディケイターという船舶である。キャタピラー製のディーゼル発電機（600kW）4基を搭載し、そこから発電される電気をMC燃料電池に送り、二つのプロペラを回すというものである。

下記は、2005年及び2010年の燃料電池の目標値をガス・タービン発電装置と比較したものである。

	ガス・タービン 発電装置	2005年時点に おける燃料電池	2010年時点に おける燃料電池
ユニット体積 (ft <sup>3</sup> /kW)	1.1	2	1.7
ユニット重量(lb/kW)	27.2	40	30
燃料効率性(%) @ 50%の負荷	16	40	70
生産コスト(\$/kW)	1600	1500	1200

S&T Demonstration / Accomplishment



FuelCell Energy 625kW 450V, 3φ, 60 HZ, MC SSFC Power System

PHASE I: Complete FY00

- 2.5 MW SSFC Conceptual Design
- Sub-scale risk reduction demonstrations
  - Cell salt air tolerance
  - NATO F-76 diesel fuel reforming
  - Fuel contaminant removal and cell sensitivity (sulfur)
  - Cell shock and vibration
- Analytical model
- Marine/Naval market surveys

PHASE II:

- 625kW SSFC module detailed design
- 625kW SSFC module fabrication
- Factory testing
- Dynamic simulation model
- IPS program transition planned – ship impact/cost studies underway
- LABEVAL (FY04)

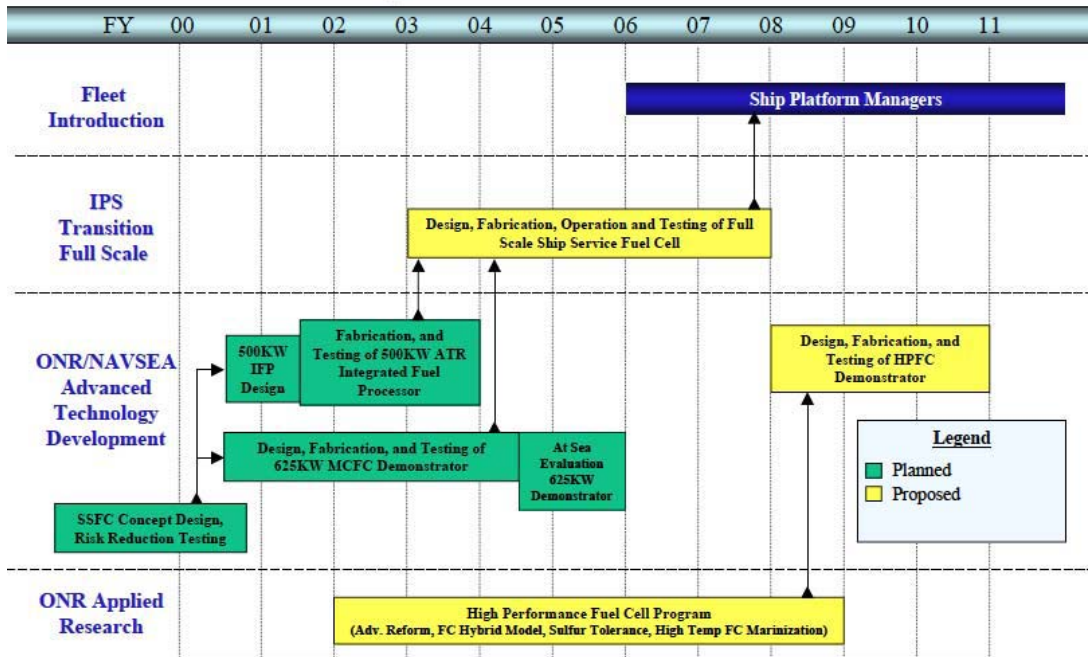
PHASE III:

- At-Sea demonstration (FY05)

出典：U.S. Navy Shipboard Fuel Cell Program (参考資料10)

図 8-1 船用燃料電池電力装置

Program Timeline/Transition



出典：U.S. Navy Shipboard Fuel Cell Program (参考資料10)

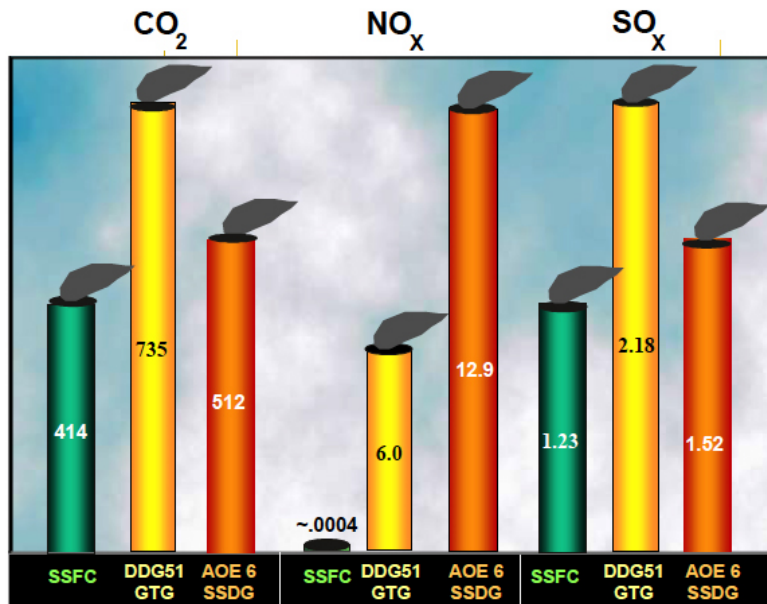
図 8-2 船用燃料電池プログラムタイムスケジュール



## Navy Shipboard Fuel Cell Program

### EMISSION COMPARISON

(gm/HP Hr @ 100% Power)



出典：U.S. Navy Shipboard Fuel Cell Program (参考資料 10)

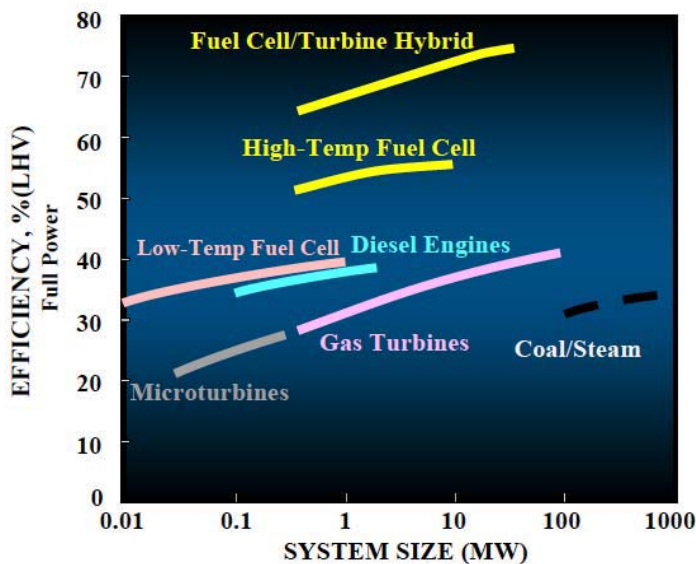
図 8-3 燃料電池とガスタービン、ディーゼルエンジンとの排ガス比較



## Navy Shipboard Fuel Cell Program



### COMPARISON OF EFFICIENCIES FOR ELECTRIC POWER PLANTS



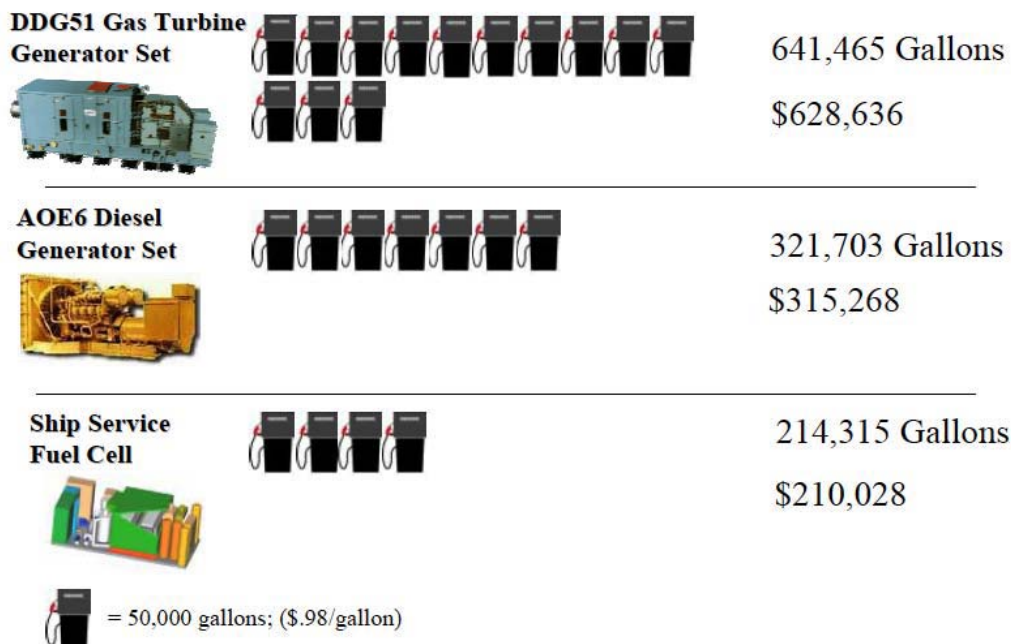
出典：Fuel Cells on the High Seas (参考資料 12)

図 8-4 燃料電池の効率



Annual Fuel Consumption

(3,000 Operating Hours)



出典：U.S. Navy Shipboard Fuel Cell Program（参考資料12）

図 8-5 燃料電池の燃料消費量

## 8-2 フュエルセル・エネルギーと海軍の契約

フュエルセル・エネルギーは 2003 年末、米海軍との第 2 期契約を締結し、米海軍船用燃料電池技術評価訓練プログラム(U.S. Navy Marine Fuel Cell Technology Verification-Trainer Program)のもと、船用燃料電池技術の開発に引き続き参加することを決めた。艦船向けの燃料電池技術開発で最大手のフュエルセル・エネルギーは、同契約で総額 95 万 4,000 ドルを受け取る。

同プログラムの目的には次の三つの骨子が含まれる。

- ディーゼル燃料を使用する直接燃料電池（Direct Fuel Cell：DFC）を開発し、海軍基地と海軍艦船に取り付ける
- 燃料電池 DFC300A 発電装置の動作を実験する
- マリン燃料電池に関わる操縦者に訓練をほどこす

同プログラムは、ONR が管理する総額 260 億ドルの研究開発計画で、フュエルセル・エネルギーとの契約はその一部である。2000 年に最初に発効した時の予算総額は 460 万ドルだった。この研究開発計画は 2003 年の末から第 2 期に入っている。同プログラムに参加するその他の組織は、メイン大学とメイン海事アカデミー（Maine Maritime Academy）である。両者は、船用燃料電池が実験室の外でも問題なく機能するかどうかを確認する役割を果たす。

## 8-3 フュエルセル・エネルギーとの新契約

ONR はさらに、2006 年 8 月、フュエルセル・エネルギーと新たな契約を締結した。船用燃料電池

(ship service fuel cell : SSFC) 発電装置 (power plant) の陸上デモンストレーションと、次世代の船上 (又は船内) 燃料電池プロトタイプ的设计が契約内容で、予算は 250 万ドルである。この契約の目的は、高効率燃料電池技術を使って、「シップ・ホテル・パワー (ship hotel power)」と呼ばれる発電システムの効率性を向上させることである。海軍の艦船に活用できるよう、フュエルセル・エナジーは、自社で開発した DFC (Direct Fuel Cell) 発電装置を海軍用液体燃料 (ディーゼルやジェット燃料) でも動くよう改造している。

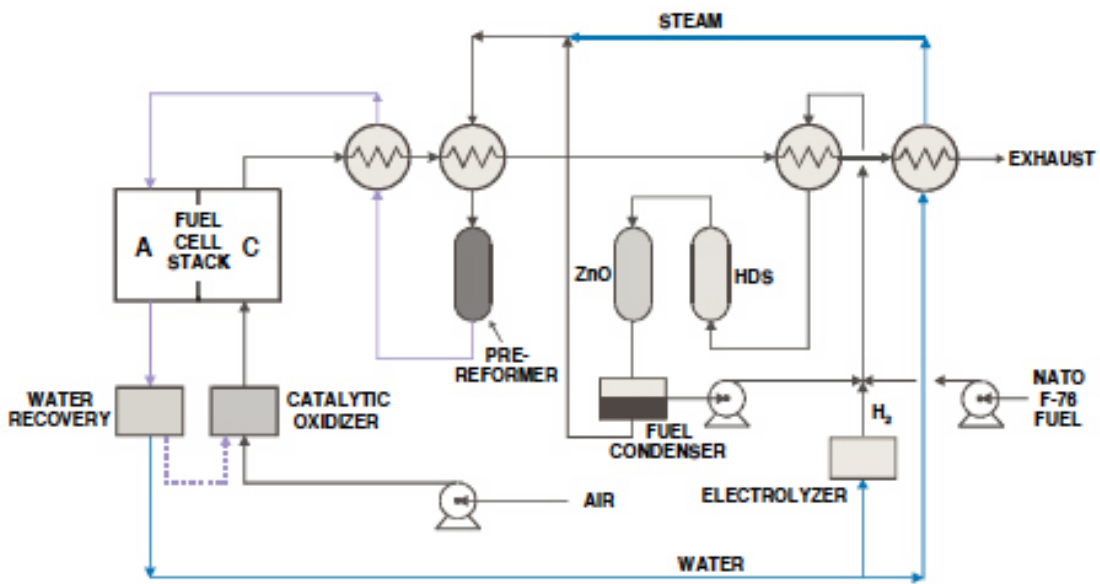
液体燃料は、船内貯蔵にとっては非常に便利だが、DFC 発電装置で使う前に脱硫 (硫黄を取り除く) しなければならないという欠点がある。フュエルセル・エナジーはそこで、液体燃料から硫黄を取り除き液体燃料をメタン・ガスに変換するという一連の流れをシームレスに行う処理装置を開発した。その装置で生産されたメタン・ガスは燃料電池発電装置の燃料として使われる。年中無休かつ安全な燃料供給システムである。

DFC 発電装置は船舶における発電装置としては理想的な解決策であり、海軍の艦船に搭載する燃料電池システムにとって大きな前進でもある。DFC 発電装置は、燃焼させずに発電させる機械としてはもっともクリーンでかつ静かな装置である。

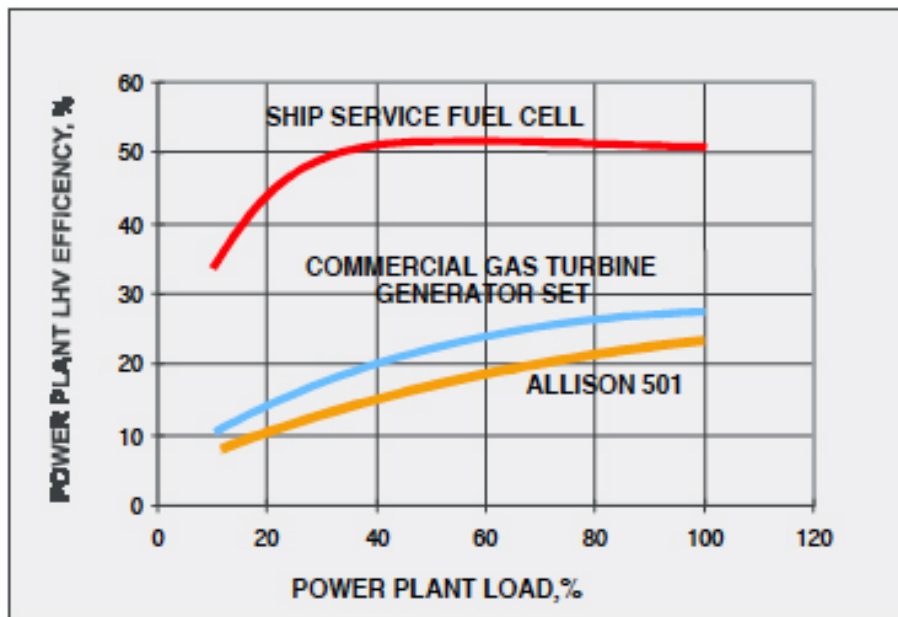
出典 : <http://www.fce.com/site/products/about.html>

フュエルセル・エナジーは同時に、改質プロセスによって炭化水素から水素を抽出する革新的な方法を開発している。この方法は燃料電池の中で最も高い電気効率性を有するものである。その改質装置と一緒に機能する船用燃料電池 (Ship Service Fuel Cell : SSFC) は、DFC が海軍の燃料で作動できるように、その能力を最適化するものであるこれまでの実験によって SSFC が機能することはほぼ証明できた。そこで、次世代の SSFC は、海軍の艦船に実用可能な貯蔵法と輸送法を実現する改質プロセスの設計である。

同プロジェクトは、メガワット級の船舶燃料電池発電装置を開発し、海軍の船に装備することを目指す ONR による研究開発の一環である。フュエルセル・エナジーはすでに、船用モジュールに必要な重要な構成部分の実験と全体的デザインを完了している。基本的な発電部分はコネチカット州ダンバリーでの実験が控えており、その後、海軍艦艇システム司令部 (Naval Sea Systems Command : NAVSEA) のフィラデルフィア部隊に送られ、そこで、船用使用実験が実施される計画である。



**Figure 1. SSFC POWER PLANT PROCESS FLOW DIAGRAM (SIMPLIFIED)**  
Each Module is Fully Autonomous



**Figure 2. SSFC EFFICIENCY COMPARED TO A GAS TURBINE**  
SSFC Peak Efficiency Exceeds 50%

出典：DIRECT CARBONATE FUEL CELL FOR SHIP SERVICE APPLICATION (参考資料9)

図 8-6 船用燃料電池のフロー図と効率

### 8-4 海軍研究局による燃料変換機の研究

ONR は、効率的発電を実現する新たな燃料電池技術に基づく推進システムを研究している。ONR が研究中のディーゼル変換システムは、比較的 low コストで、既存の基幹設備を水素燃料の貯蔵や輸送に活用できるという利点があると期待される。

ONR では 2004 年現在、500 kW (キロワット) のディーゼル燃料変換機を実験中である。その変換機は、PEM 燃料電池と互換性がある。ディーゼル燃料は、硫黄が含まれているため変量電池発電装置への活用が困難だが、変換機によって燃料を硫化水素に変換し、硫化水素を酸化亜鉛と反応させることで二酸化硫黄に変換させれば水素と分離できる。同実験は、エネルギー省 (DOE) のアイダホ・フォールズ国立エンジニアリング&環境研究所で行われている。


### 8-5 米エネルギー技術研究所における研究

海軍ではまた、エネルギー省 (DOE) の米エネルギー技術研究所 (National Energy Technology Laboratory : NETL) との協力によって、燃料電池と天然ガスを活用し排ガス量の削減を目指している。NETL は、DOE が全米で運営する 15 ヶ所の国立研究所の一つであり、DOE による燃料電池研究開発にとって最大の研究費拠出元でもある。NETL には、天然ガス戦略センター (Strategic Center for Natural Gas : SCNG) という部署があり、ONR や NAVSEA、USCG と協力して、船舶での燃料電池利用を研究している。

現在、研究されている主な燃料電池には、リン酸形燃料電池 (Phosphoric acid fuel cell : PAFC)、熔融炭酸塩形燃料電池 (Molten carbonate fuel cell : MCFC)、固体酸化物燃料電池 (Solid oxide fuel cell : SOFC)、船用燃料電池 (Ship Service Fuel Cell : SSFC)、ハイブリッドの 5 種類がある。

**DOE/NETL Products Availability**  
*Fuel Cells and Hybrids*

Year	PAFC	MCFC	SOFC	SSFC	Hybrids
2000 <i>now</i>	\$4,250 200 kW (modular to approx. 1.2 MW) 40%, Commercial	R&D Prototype 250 kW, 47% Demo/Test	R&D Prototype 100 kW, 45% Demo/Test		R&D Prototype 25 kW, 57% Demo/Test
2001					
2002					
2003		Est. \$3,000 250 kW to 1 MW 47%, Prototype	Est. \$3,000 250 kW to 1 MW 47%, Prototype	\$1,000 5 kW Module Prototype	\$3,000 250 kW to 1 MW, 60% Demo/Test
2004					
2005				\$800 Truck APU Unit Commercial	
2006					
2007					
2008		Est. \$1,500 ≤ 3 MW Commercial	Est. \$1,500 ≤ 3 MW Commercial	\$400 Lux. Vehicle APU, Commercial	\$1,300 3 MW, 74% Commercial



*Strategic Center for Natural Gas*

出典 : Next Generation Marine Vessels Fuel Cells and Gas Turbines  
([www.marad.dot.gov/NMREC/conferences\\_workshops/jan%2029-30%202002/hooie.pdf](http://www.marad.dot.gov/NMREC/conferences_workshops/jan%2029-30%202002/hooie.pdf))

図 8-7 燃料電池の種類

#### ■PAFC

PAFC は現時点で、開発段階と実用化の面で最も発達した燃料電池技術である。DOE や国防省 (DOD) をはじめ、全世界で過去 20 年以上にわたって研究され、それに投じられた予算は総額 5 億ドルを超えるものと見られる。低温燃料電池の中では、改質された炭化水素燃料から出る排ガスが無視できるほど少量であることから期待されている。

#### ■MCFC

MCFC は、石炭から直接作用される燃料電池の開発にともなって 1960 年代に初めて着眼された。近年では、燃料電池に石炭を直接利用するという研究は他の研究に比べてやや下火になったものの、石炭からガスを取り出して燃料電池に利用するという研究は続いている。

#### ■SOFC

SOFC は、腐食を防ぐ固形セラミック電解質を使う。固形セラミック電解質は、取り扱いの難しさという液体電解質が抱える課題を解決する。ただ、セラミックにおける適切なイオン伝導率を実現させるには、華氏 1830 度 (摂氏 1000 度) でシステムを作動させる必要がある。その温度では、炭素燃料の内部改質が可能であり、装置から発せられる熱を発電装置に再利用できることから効率性は良い。

#### ■SSFC

上述のとおり。

#### ■ハイブリッド

海軍が研究しているハイブリッド推進システムは、ガス・タービンと燃料電池を併用することで、燃料効率の向上を目指すものである。燃料電池だけのエネルギー効率は 60% が最高だが、ガス・タービンとの併用によって 70% まで引き上げることが可能と期待される。また、他のシステムに比べると、酸化窒素と炭化水素の排ガス量が少なく、エネルギー効率が良いという利点もある。

## 参考資料

1. Progress Report: 2005 Annual Progress Report INTRODUCTION
2. Progress Report: 2005 Annual Progress Report Basic Research
3. Hydrogen Cost: DOE Hydrogen Program Record
4. Demand: Hydrogen Demand in 2040 for FCVs
5. MARAD ET Program: Maritime Administration Energy Technologies Program
6. ETpdfFall02: ENERGY TECHNOLOGIES
7. MARAD\_toDOT: Maritime Hydrogen and Fuel Cell Initiatives
8. FUELCELLTODAY: Fuel Cells and Marine Applications
9. DCFC: DIRECT CARBONATE FUEL CELL FOR SHIP SERVICE APPLICATION
10. SFCProgram: U.S. Navy Shipboard Fuel Cell Program
11. marine\_app: Marine Application of Fuel Cells
12. future: Future for Fuel Cells on the High Seas?

## 関係ウェブサイト

### 米国における水素燃料実用化のための要素技術開発に関する背景

1. エネルギー技術国立研究所 (The National Energy Technology Laboratory : NETL)

[http://www.netl.doe.gov/KeyIssues/hydrogen\\_economy.html](http://www.netl.doe.gov/KeyIssues/hydrogen_economy.html)

2. 「E」誌 (E/The Environmental Magazine)

<http://www.emagazine.com/view/?171>

3. 米エネルギー省 (U.S. Department of Energy : DOE)

化石燃料局 (Fossil Energy Office)

<http://www.fossil.energy.gov/programs/fuels/>

基礎エネルギー科学局 (Office of Basic Energy Sciences)

<http://www.hydrogen.energy.gov/science.html>

4. 米エネルギー省アルゴン国立研究所 (Argonne National Laboratory、  
Transportation Technology R&D Center)  
<http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/299.pdf>

#### 燃料電池に関するブッシュ政権の動き

1. ホワイトハウス (White House)

<http://www.whitehouse.gov/news/releases/2003/01/20030128-14.html>

一般教書 (State of the Union)

<http://www.whitehouse.gov/news/releases/2003/01/20030128-19.html>

水素燃料 (Hydrogen Fuel: A Clean and Secure Energy Future)

<http://www.whitehouse.gov/news/releases/2003/01/20030130-20.html>

2. 米エネルギー省 (U.S. Department of Energy)

化石燃料局 (Fossil Energy Office)

<http://www.fe.doe.gov/programs/fuels/index.html>

水素プログラム (Hydrogen Program)

[http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_progress05.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress05.html)

[http://www.hydrogen.energy.gov/h2a\\_analysis.html](http://www.hydrogen.energy.gov/h2a_analysis.html)

フリーダムカーおよび自動車技術プログラム (The FreedomCAR and Vehicle Technologies Program)

<http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/>

3. 米科学・技術評議会 (The National Science and Technology Council=NSTC)

<http://www.hydrogen.gov/>

4. 米科学院 (National Academy of Sciences)

<http://www.nap.edu/books/0309097304/html>

5. 水素経済国際パートナーシップ (The International Partnership for the Hydrogen Economy)

<http://www.iphe.net/>

## 6. フューチャージェン同盟 (FutureGen Alliance)

<http://www.futuregenalliance.org/>

### カリフォルニア州の The California Fuel Cell Partnership (CaFCP)

1. カリフォルニア州の The California Fuel Cell Partnership (CaFCP)  
カリフォルニア燃料電池パートナーシップ (The California Fuel Cell Partnership)

<http://www.fuelcellpartnership.org/>

### UC デイビスの H2 Pathways Program

1. UC デイビスの H2 Pathways Program  
カリフォルニア大学デイビス校運輸研究所 (Institute of Transportation Studies University of California, Davis)

<http://hydrogen.its.ucdavis.edu/>

### MARAD のエネルギー技術プログラム

1. 米運輸省海事管理局 (Maritime Administration : MARAD)  
[https://www.marad.dot.gov/NMREC/energy\\_technologies/images/ETNo2Fall12002.htm](https://www.marad.dot.gov/NMREC/energy_technologies/images/ETNo2Fall12002.htm)  
[https://marad.dot.gov/NMREC/energy\\_technologies/images/ETpdfFall102.pdf](https://marad.dot.gov/NMREC/energy_technologies/images/ETpdfFall102.pdf)  
[https://www.marad.dot.gov/NMREC/energy\\_technologies/images/MARAD%20ET%20Program.pdf](https://www.marad.dot.gov/NMREC/energy_technologies/images/MARAD%20ET%20Program.pdf)  
[https://www.marad.dot.gov/NMREC/conferences\\_workshops/jan%2029-30%202002/house.pdf](https://www.marad.dot.gov/NMREC/conferences_workshops/jan%2029-30%202002/house.pdf)  
[https://www.marad.dot.gov/NMREC/energy\\_technologies/images/Hydrogen%20Fuel%20Cell%20for%20Marine%20Ops.pdf](https://www.marad.dot.gov/NMREC/energy_technologies/images/Hydrogen%20Fuel%20Cell%20for%20Marine%20Ops.pdf)

### フュエルセル・エナジーと海軍の契約

1. フュエルセル・エナジー社 (FuelCell Energy, Inc.)  
[https://www.fce.com/downloads/marine\\_app.pdf](https://www.fce.com/downloads/marine_app.pdf)

2. マリーン・ログ (MARINE LOG)



<http://www.marinelog.com/DOCS/NEWSMMIII/MMIII0ct02c.html>

#### フュエルセル・エナジーとの新契約

1. フュエルセル・エナジー社 (FuelCell Energy, Inc.)

[http://www.corporate-ir.net/ireye/ir\\_site.zhtml?ticker=FCEL&script=412&layout=-6&item\\_id=896271](http://www.corporate-ir.net/ireye/ir_site.zhtml?ticker=FCEL&script=412&layout=-6&item_id=896271)

2. 米国防省 (Department of Defense : DoD)

[http://dodfuelcell.cecer.army.mil/pr\\_071106.html](http://dodfuelcell.cecer.army.mil/pr_071106.html)

#### 船用サービス燃料電池

1. エネルギー省の米エネルギー技術研究所 (National Energy Technology Laboratory : NETL)

<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/99/99fuelcell/fc2-3.pdf>

#### 海軍リサーチ局による燃料変換機の研究

1. 米海軍 (Navy)

[http://www.news.navy.mil/search/display.asp?story\\_id=12221](http://www.news.navy.mil/search/display.asp?story_id=12221)

#### 米エネルギー技術研究所

1. 米国防省 (Department of Defense : DoD)

<http://dodfuelcell.cecer.army.mil/phosphoric.html>

<http://dodfuelcell.cecer.army.mil/solidoxide.html>

2. 米海軍 (Navy)

[http://www.dt.navy.mil/pao/excerpts%20pages/2001/FuelCell14\\_01.html](http://www.dt.navy.mil/pao/excerpts%20pages/2001/FuelCell14_01.html)

<http://www.onr.navy.mil/media/article.asp?ID=65>

## 參考資料

### 1. Progress Report: 2005 Annual Progress Report

#### INTRODUCTION

## I. INTRODUCTION

In cooperation with industry, academia, national laboratories, and other government agencies, the Department of Energy's Hydrogen Program is advancing the state of hydrogen and fuel cell technologies in support of the President's Hydrogen Fuel Initiative. The initiative seeks to develop hydrogen, fuel cell, and infrastructure technologies needed to make it practical and cost-effective for Americans to choose to use fuel cell vehicles by 2020. Significant progress was made in fiscal year 2005 toward that goal.

### Congress Clears Path for Hydrogen

In 2005, Congress demonstrated overwhelming support for the hydrogen economy through several activities.

Energy Policy Act of 2005. EPA 05 was signed into law by President Bush on August 8, 2005. Title VIII, the Spark M. Matsunaga Hydrogen Act of 2005, focuses on hydrogen and indicates the strong support of Congress for research, development, demonstration, education, and codes and standards for hydrogen and fuel cell technologies. Title VIII authorizes \$3.28 billion for research and development, demonstrations, and studies over five fiscal years aimed at getting hydrogen-powered automobiles on the road by 2020. In addition, numerous other titles call for hydrogen and fuel-cell related tax and market incentives, new studies, collaboration with alternate fuels and renewable energy programs, and broadened demonstrations. The timeline established by Congress matches perfectly with the milestones established by the Department in the Hydrogen Posture Plan published in February 2004 in support of the President's Initiative.

House Caucus. The House of Representatives launched a Hydrogen and Fuel Cell Caucus on June 28, 2005 with an "End Dependence Day" kick-off in Washington, D.C. The Caucus, co-chaired by U.S. Representatives Charles Dent, Bob Inglis, John Larson and Albert Wynn, is a bipartisan group of House members and industry participants dedicated to promoting hydrogen as an alternative to petroleum-based fuels. The Hydrogen and Fuel Cell Caucus plans to support the President's Hydrogen Fuel Initiative and other hydrogen-related activities. The Senate has a similar organization, the Senate Hydrogen and Fuel Cell Caucus, which is co-chaired by Senators Byron Dorgan and Lindsey Graham.



President Bush participates in refueling of GM's fuel cell vehicle at Shell's hydrogen station in Washington, DC, on May 25, 2005. During this visit, Under Secretary of Energy David K. Garman updated President Bush on progress under the Hydrogen Initiative. President Bush also received technology updates from BP, Chevron, DaimlerChrysler, Ford, GM, Hyundai, and Shell senior managers.



Accompanied by Congressional leaders and Energy Secretary Samuel Bodman in Albuquerque, New Mexico, President Bush signs the Energy Policy Act of 2005 into law.

**Hydrogen & Fuel Cell Caucus**  
END DEPENDENCE NOW



The House Hydrogen & Fuel Cell Caucus Kicked Off on June 28, 2005

**Appropriations.** In past years, Congress funded fuel cell and fossil-related hydrogen research through the Interior and Related Agencies Appropriations Act, while basic science and renewable and nuclear-related hydrogen research was funded through the Energy and Water Development (EWD) Appropriations Act. Beginning in FY 2006, Congress will fund all DOE hydrogen activities through the EWD appropriations.

For FY 2005, Congress appropriated \$224.7 million for the President's Hydrogen Fuel Initiative compared to the FY 2004 appropriation of \$155.8 million. For FY 2006, President Bush requested \$259.5 million (appropriations yet to be finalized as of publication date). These numbers include support for hydrogen and polymer fuel cell R&D across four DOE offices – Energy Efficiency and Renewable Energy; Fossil Energy; Nuclear Energy, Science and Technology; and Science – and the Department of Transportation.

### **International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE) Endorses Ten Hydrogen Projects**

Led by Under Secretary of Energy David K. Garman, the 16-member IPHE Steering Committee met in Kyoto, Japan, on September 14 and 15, 2005, and endorsed ten collaborative hydrogen and fuel cell research, development and demonstration projects. According to Under Secretary Garman, "These efforts have the potential to significantly advance the move towards a hydrogen economy."

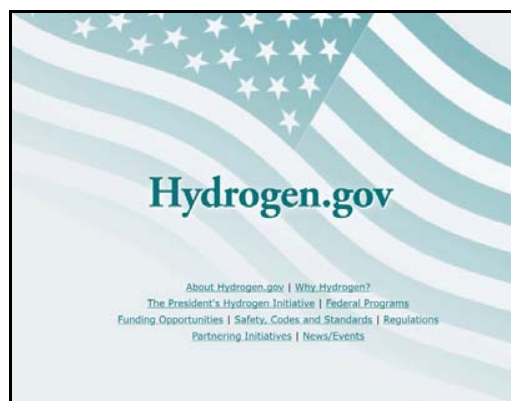
All projects are collaborative in nature with multiple IPHE members as sponsors. Results and lessons learned from the projects will be disseminated to all IPHE members and will be made available to the public. These selections are the first IPHE recognition provided to collaborative research projects on hydrogen and fuel cell development. Detailed information is available on the IPHE website ([www.iphe.net](http://www.iphe.net)).

#### **IPHE Projects to Advance Hydrogen Economy**

- Hydrogen Delivery Using Natural Gas Pipelines
- Solar Driven High Temperature Thermochemical Production of Hydrogen
- Reversible Solid State Hydrogen Storage for Fuel Cell Power Supply System
- Advanced Membranes
- Fuel Cell Testing, Safety and Quality Assurance (FCTES<sup>qa</sup>)
- Application of Gradient Porous Composite MEAs for Different Types of Fuel Cells
- HyWays - The Development and Detailed Evaluation of a Harmonised "European Hydrogen Energy Roadmap"
- HySafe – Safety of Hydrogen as an Energy Carrier
- Solar Hydrogen From Reforming Of Methane
- Clean Urban Transport For Europe - Ecological City TranspOrt System (CUTE - ECTOS)

### **Hydrogen Federal Advisory Committee and Interagency Task Force Being Established**

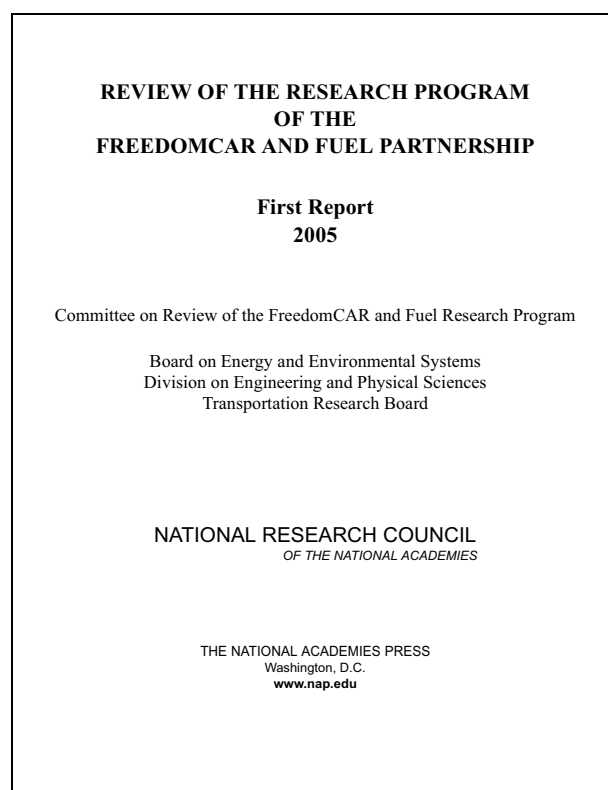
The Energy Policy Act of 2005 authorized establishment of a Hydrogen and Fuel Cell Technical Advisory Committee (HTAC), a follow-on to the Hydrogen Technical Advisory Panel authorized by the Hydrogen Future Act of 1996. This Federal Advisory Committee will be comprised of 12 to 25 expert members from domestic industry, academia, professional societies, government agencies, Federal laboratories, previous advisory panels, as well as financial, environmental, and other appropriate organizations. The Committee will review and make recommendations to the Secretary on (1) the implementation of programs and activities under Title VIII, Hydrogen, of the Act; (2) the safety, economical, and environmental consequences of technologies for the production, distribution, delivery, storage, or use of hydrogen energy and fuel cells; and (3) the Secretary's plan to conduct the programs under Title VIII. The HTAC member selection process and initial meeting will take place in FY 2006.



At the Federal government level, inter-department/agency cooperation is also critical to the success of the President's Hydrogen Fuel Initiative. Shortly after the President's announcement in early 2003, the White House Office of Science and Technology Policy established the interagency Hydrogen Research and Development Task Force. The Task Force serves as the key mechanism for collaboration among the eight Federal agencies that fund hydrogen-related research and development. It developed a web site ([www.hydrogen.gov](http://www.hydrogen.gov)) to widely communicate the goals of the President's Hydrogen Fuel Initiative and encourage greater collaboration and sharing of information on hydrogen technology development activities. The Energy Policy Act of 2005 also underscored the need for interagency collaboration at the federal level by requiring the President to establish a Hydrogen and Fuel Cell Technical Task Force chaired by the Secretary of Energy with representatives from other departments and agencies with hydrogen and fuel cell programs. The act defines numerous planning and execution activities for this task force, all tied to ensuring efficiency in use of taxpayer resources.

### **National Research Council Reviews FreedomCAR and Fuel Partnership**

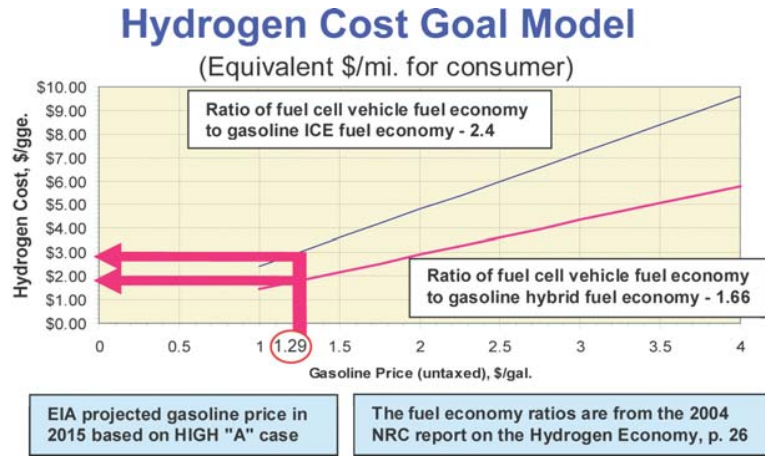
The DOE engaged the National Academies to review and report on the FreedomCAR and Fuel Partnership, a collaborative effort among the DOE, USCAR (Ford, Chrysler, and General Motors), and five major energy companies (BP, Chevron, ConocoPhillips, ExxonMobil, and Shell). The Partnership seeks to develop advanced vehicle and fueling infrastructure technologies to reduce our Nation's dependence on imported oil and minimize harmful emissions without sacrificing freedom of mobility and freedom of vehicle choice. In August 2005, the National Academies' National Research Council (NRC) press release reported that "the Partnership is well-planned and identifies all major hurdles the program will face," and acknowledged the significant progress already made by the Partnership toward overcoming the many technical barriers. The press release quoted Craig Marks, chair of the NRC review committee and retired Vice President for Technology and Productivity at Allied Signal, Inc., as follows: "The goals of this program are extremely challenging and success is uncertain, but it could have an enormous beneficial impact on energy security and the U.S. economy. Although it is still too early to speculate whether the program will achieve its long-term vision, it is making significant headway."



The report (available at <http://www.nap.edu/books/0309097304/html/>) stated that hydrogen storage in vehicles is the program's most difficult long-term challenge. Other areas with key findings and recommendations included safety, codes and standards, systems analysis, environmental effects, and public awareness. This report followed approximately 18 months behind the NRC February 2004 release entitled "The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs." Together, these two important independent assessments of the nation's hydrogen program have provided critical inputs to the strategy and planning for the next decade of hydrogen, fuel cell, and vehicle research and development.

**Hydrogen Research Cost Target Revised to Be Energy Resource Independent and Competitive with Future Technologies**

The research target for hydrogen production cost has been changed based on anticipated future technologies, including projected gasoline prices and relative fuel economies of future vehicles which will be in competition with the hydrogen fuel cell vehicle. The new methodology provided a hydrogen research cost of \$2.00-3.00/gge (delivered, untaxed, 2005\$, by 2015), which is independent of the feedstock or delivery pathway used to produce and distribute hydrogen.



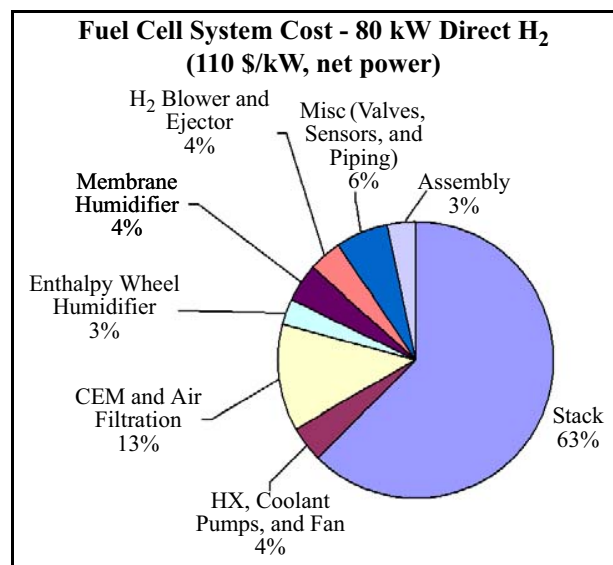
The upper boundary is based on the expected ratio between fuel cell vehicle and evolved gasoline internal combustion engine vehicle fuel economies in 2015, and represents a threshold cost to be used to screen or eliminate pathway options that cannot demonstrate an ability to meet the research goal. The lower boundary is based on the expected ratio between fuel cell vehicle and gasoline hybrid-electric vehicle fuel economies in 2015, and defines a lower hydrogen research cost goal to be used to prioritize projects for resource allocation. The hydrogen goals at both boundaries were then calculated using gasoline prices projected by the Energy Information Administration (EIA) for the year 2015, expressed in 2005 U.S. dollars. In the EIA High A case selected, the U.S. economy is more vulnerable to limited oil supplies from foreign sources due to the increasing world and U.S. oil demand, resulting in higher oil prices.

The hydrogen cost goal may be changed in the future if warranted by changes in vehicle system energy efficiency characteristics and/or gasoline price projections.

**Program Continues to Reduce High-Volume Fuel Cell Cost Projections**

For hydrogen vehicles to be cost competitive with other technology vehicles, it is critical that the high-volume production cost of fuel cells be competitive with that of other power systems on a net power basis. Therefore, achieving the DOE and FreedomCAR and Fuel Partnership \$30/kW cost goal by 2015 is one of the most critical technical targets of the DOE Hydrogen Program.

In the early 1990s, DOE estimated that the high-volume (500,000 units per year) fuel cell cost was approximately \$3,000/kW, i.e., two orders of magnitude above our goal. Over the last 15 years, through private and taxpayer investment in research, fuel cell costs have steadily decreased. Analysis by TIAX LLC shows that we are now approaching a high-volume cost of \$110/kW (bettering the 2005 target of \$125/kW) and continuing to make steady progress toward \$30/kW. In



Courtesy of TIAX LLC

FY 2006, DOE will commission and independent peer review of the assumptions and methodology used in this analysis to determine whether the result is valid. Although progress has been substantial, further cost reductions are becoming increasingly challenging as we try to achieve \$45/kW by 2010 on the way to the 2015 goal.

### **Manufacturing R&D for the Hydrogen Economy in Planning Stage**



Courtesy of Ballard Power Systems

In early 2005, under the sponsorship of the Manufacturing Interagency Working Group (IWG) of the Committee on Technology, National Science and Technology Council (NSTC), an effort began to focus our nation's manufacturing research and development (R&D) on three priority areas: Manufacturing for the Hydrogen Economy, Nanomanufacturing, and Intelligent and Integrated Manufacturing Systems. DOE has taken the lead on the first of these, and the DOE Hydrogen Program has assumed responsibility within the Department to plan this effort.

The Hydrogen Fuel Initiative focuses on researching, developing, and validating critical hydrogen and fuel cell technologies. As industry prepares for its commercialization decisions on these

technologies around 2015, it is crucial that manufacturing processes be developed concurrently to (1) reduce the costs of hydrogen systems to levels competitive with petroleum-based systems, and (2) build the necessary manufacturing infrastructure and supplier base to support the hydrogen economy. In July 2005, DOE began planning by holding a "Workshop on Manufacturing R&D for the Hydrogen Economy." Participants from industry, government, national laboratories, and academia reviewed the current state of R&D and identified manufacturing R&D needs for systems that produce, deliver, store, and use (e.g., fuel cells) hydrogen. The findings of this workshop will be used to prepare an R&D roadmap for release by January 2006.

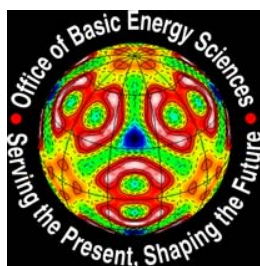
### **Hydrogen Program Gains Momentum with New Projects**

The breadth and depth of research, development, and demonstration activities within the DOE Hydrogen Program were significantly enhanced during FY 2004 and 2005 with the initiation of new competitively selected projects totaling approximately \$510 million (\$755 million with private cost share), subject to appropriations. These projects will work to overcome critical technology barriers and to bring hydrogen and fuel cell technology from the laboratory to the showroom. New projects span the following technology areas:

- **Basic Science:** Selected 70 projects (\$64 million over three years) in basic research to address the fundamental science underpinning hydrogen production, storage, and end use.
- **Hydrogen Production and Delivery:** Began funding 65 new hydrogen production and delivery projects (\$107 million over four years) in 2005, covering renewable, nuclear, and coal-based hydrogen production and delivery technologies.
- **Hydrogen Storage:** Initiated a National Hydrogen Storage Project (\$150 million over five years) that includes three Centers of Excellence, over 20 independent projects addressing applied research, and incorporating new basic research projects.
- **Fuel Cells:** Initiated five projects that address critical fuel cell cost and durability issues for transportation, consumer electronics, and other applications (\$13 million over three years).

- **Technology Validation:** Established a national vehicle and infrastructure “learning demonstration” project (\$170 million for four teams over six years) to measure progress and help guide research and development.
- **Education:** Created three Hydrogen Technology Learning Centers, held pilot “Hydrogen 101” Workshops for state and local governments in six states, and launched middle school and high school curricula and teacher professional development programs (\$5 million over five years).

### **Basic Research Addresses the Program’s Key Technical Challenges**



The Basic Energy Sciences (BES) office within the DOE Office of Science is a critical member of the DOE Hydrogen Program team, providing fundamental research in the most technically challenging areas facing the Program. This basic work complements the applied research and development projects conducted by the Offices of Energy Efficiency and Renewable Energy; Fossil Energy; and Nuclear Energy, Science and Technology. In May 2005, Secretary of Energy Samuel W. Bodman announced the selection of over \$64 million in BES research projects addressing hydrogen and fuel cell technologies in the following five areas:

- Novel Materials for Hydrogen Storage
- Membranes for Separation, Purification, and Ion Transport
- Catalyst Design at the Nanoscale
- Solar Hydrogen Production
- Bio-inspired Materials and Processes

These five technical focus areas were identified during DOE’s May 2004 workshop sponsored by BES on “Basic Research Needs for the Hydrogen Economy.” The 2005 awards include over 50 preeminent research organizations in 25 states, and typically are funded for three years. A more detailed description of the research as well as listings of the projects awarded in each of the five categories is found in Section II of this report.

### **Hydrogen-from-Coal Projects Awarded by the Office of Fossil Energy**

In FY 2005 the Office of Fossil Energy announced the award of 32 clean coal research projects to advance President Bush's goal to develop a coal-fired zero emissions power plant. This initiative will also advance other energy-related policy initiatives in hydrogen and climate, including the FutureGen zero-emissions power plant of the future. Secretary Bodman stated, “Coal is our most abundant fuel resource. It's important that we find ways to use it in a cleaner, more efficient way in order to provide the energy needed to continue our economic growth and job creation. All of these projects are an investment in our Nation's energy and economic security, present and future.” Among the objectives of the research specifically related to hydrogen and fuel cells are (1) improved and new methods of producing pure hydrogen in coal gasification, and (2) hydrogen handling and safe storage.

### **Projects Awarded for Nuclear Hydrogen Research in FY 2005**

The nuclear hydrogen initiative focuses primarily on hydrogen production technologies that utilize high-temperature nuclear reactors to produce hydrogen. In support of the DOE Hydrogen Program, this initiative within the Office of Nuclear Energy, Science and Technology awarded three projects during FY 2005 related to the production of hydrogen via high-temperature processes (thermochemical and high-temperature electrolysis). These awards were to (1) Clemson University for “The Sulfur-Iodine Cycle: Process Analysis and Design Using Comprehensive Phase Equilibrium Measurements and Modeling,” (2) Johns Hopkins University for “Silicon Carbide Ceramics for Compact Heat Exchangers,” and (3) University of Wisconsin for “Salt Heat Transport Loop: Materials Corrosion and Heat Transfer Phenomena.” This important research



paves the way for demonstration of large-scale, emission-free production of hydrogen with nuclear energy, and eventually integrating a hydrogen production demonstration with a Generation IV nuclear reactor.

**Learning Demonstration Kicks into High Gear in 2005**



Secretary of Energy Samuel Bodman and Under Secretary David Garman kick off the National Hydrogen Learning Demonstration in Washington, D.C.

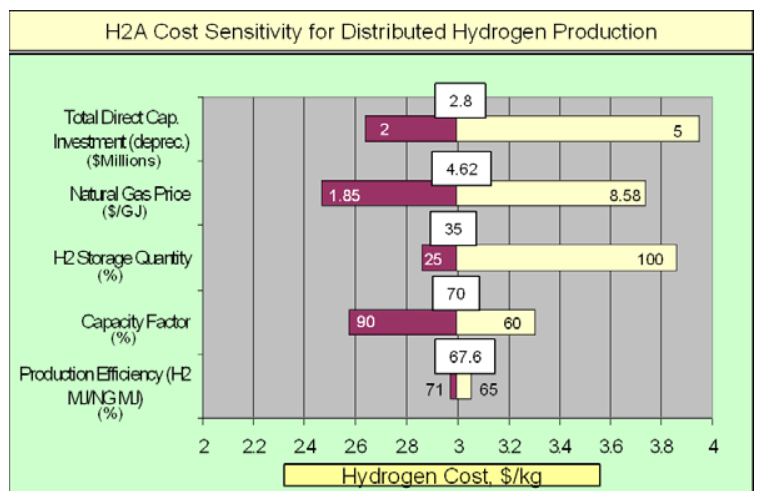
The National Hydrogen Learning Demonstration commenced this year with a kick-off event at the National Hydrogen Association Annual Hydrogen Conference 2005 in Washington, D.C. Over the course of five years the four selected teams will work to assess the status of hydrogen infrastructure and fuel cell vehicle technology against time-phased, performance-based targets. Everything from fuel cell durability and efficiency to vehicle range and fuel cost will be tested under a variety of climate and use conditions, employing several hydrogen infrastructure options.

Data acquired through the vehicle and infrastructure technology demonstration projects will be used to refocus research and development, benchmark technology status, and raise public awareness of hydrogen technology. Each project includes a comprehensive safety plan, an activity to assist in developing codes and standards, and a comprehensive, integrated education and training campaign. Teams are DaimlerChrysler and BP, Ford and BP, General Motors and

Shell, and Chevron and Hyundai-Kia, and also are supported by hydrogen suppliers, fuel cell suppliers, electric utility and/or gas companies, fleet operators, system and component suppliers, small businesses, universities and government entities. The new Energy Policy Act of 2005 strongly supports the Learning Demonstration effort as an important element of the Program’s push toward a 2015 commercialization decision.

**H2A Models Support Transparency in Program Analysis Activities**

The National Renewable Energy Laboratory, in collaboration with industry, led the Hydrogen Analysis (H2A) group in developing a hydrogen production cost model. The H2A model addresses the need for consistent analysis methodology and transparent reporting independent of hydrogen production pathway. This cash flow analysis tool, which assesses the minimum hydrogen cost (including a profit factor) for a variety of hydrogen production pathways, will be used by the Program, its contractors, and stakeholders to evaluate technologies on a common basis, to assess technology tradeoffs, and to aid systems analysis efforts. The H2A forecourt and central hydrogen production models have been peer reviewed and beta tested using several hydrogen production pathways,



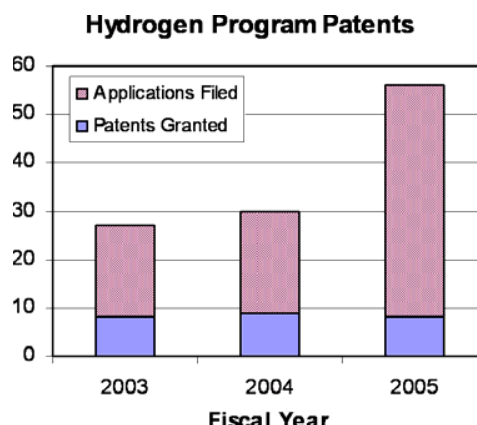
Example H2A Distributed Natural Gas Hydrogen Production Cost Sensitivity Analysis

including coal, natural gas, biomass, electrolysis, and forecourt receiving and dispensing. An H2A model assessing hydrogen delivery options has also been developed and beta tested and will be issued in FY 2006.

The H2A group is composed of members from national laboratories, industry, and academia. In addition, it has sixteen Key Industry Collaborator (KIC) companies which have supported the analysis and model development, providing key recommendations and peer review functions. The production models are currently available through [http://www.hydrogen.energy.gov/h2a\\_analysis.html](http://www.hydrogen.energy.gov/h2a_analysis.html), so that all interested parties can utilize them.

### **Hydrogen Program Participants Demonstrate Ability to Innovate**

One measure of the innovation and robustness of a research and development program is the numbers of patents applied for and granted. Each year, the DOE Hydrogen Program tracks the number of patents that are filed by or awarded to projects sponsored by the Program. During FY 2005, eight patents were issued to Hydrogen Program projects, including one international patent. In addition, a large increase in the number of patent applications occurred in 2005 (48) compared to the previous year (22). With over 100 new projects starting in 2005, the Program can expect these numbers to continue to be strong over the next several years. Congratulations to all researchers whose work is critical to the Program’s success and is being acknowledged via the patent process.



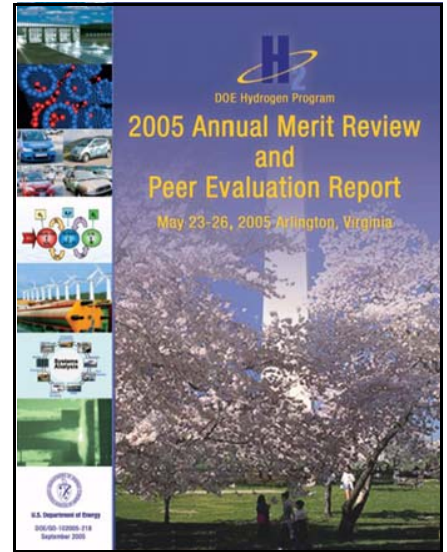
### **DOE Hydrogen Program Launches New Website**

A new DOE website launched in 2005 provides a focal point for all Department of Energy activities under the President’s Hydrogen Fuel Initiative. The website includes news, documents, announcements, and descriptions of technologies. It contains convenient links which take the user directly to the hydrogen and fuel cell areas within the office-specific websites of the Offices of Energy Efficiency and Renewable Energy; Fossil Energy; Nuclear Energy, Science and Technology; and Science. The site is developed and maintained by the Systems Integration office of the Program, and its URL is [www.hydrogen.energy.gov](http://www.hydrogen.energy.gov).



## **2005 Annual Merit Review and Peer Evaluation Held in Arlington, Virginia**

The DOE Hydrogen Program held its annual review in May in Arlington, Virginia. This was the largest review to date, with Principal Investigators (PIs) of 300 projects providing oral briefings or poster presentations. A panel of 150 technical experts covering all aspects of hydrogen and fuel cell technologies conducted peer reviews of 200 of those projects. The findings and recommendations of the peer reviewers are used by the project PIs to guide their future work, and by the Technology Development Managers at DOE to make programmatic and funding decisions for the upcoming fiscal year. Those projects that were not peer reviewed were typically ones that had just started in the six months preceding the May meeting. Hydrogen Program projects from the Offices of Fossil Energy and Nuclear Energy, Science and Technology were also part of the process for the first time. This gave the hydrogen community and its stakeholders the opportunity to see the full breadth and depth of the DOE program in one venue. The Office of Science, whose hydrogen and fuel cell-related awards were announced the same week as the review, provided an overview of its emerging program and will be more fully involved in the 2006 meeting as its projects begin to make progress. The proceedings and final report from the 2005 review can be found on the Program's website at [http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_review05.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review05.html). The 2006 meeting is scheduled to be held May 16-19 in Washington D.C.



We are pleased to present the U.S. Department of Energy's Hydrogen Program Annual Progress Report for Fiscal Year 2005. The accomplishments of 286 projects currently sponsored by the Hydrogen Program are presented herein. Preceding each technology area (e.g., storage, fuel cells, etc.), DOE Technology Development Managers provide an overview that summarizes the progress made in each area. We welcome suggestions for improving the ability of the Hydrogen Program to impact the realization of a hydrogen economy.

Steve Chalk, Program Manager  
DOE Hydrogen Program

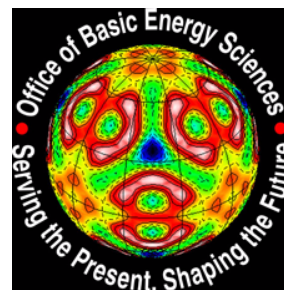


## 2. Progress Report: 2005 Annual Progress Report

### Basic Research

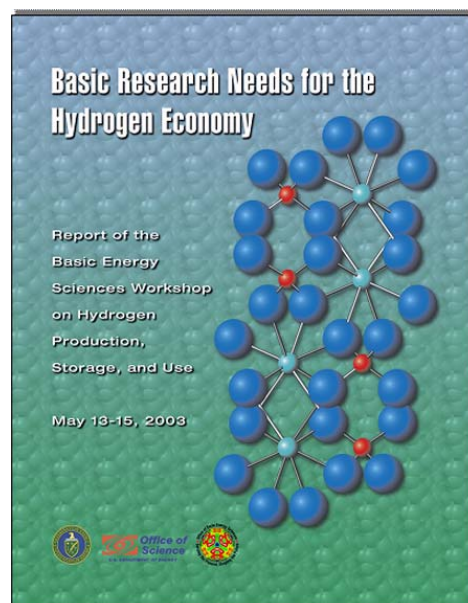
## II Basic Research

The Basic Energy Sciences (BES) office within the DOE Office of Science supports the DOE Hydrogen Program by providing basic, fundamental research in those technically challenging areas facing the Program, complementing the applied research and demonstration projects conducted by the Offices of Energy Efficiency and Renewable Energy; Fossil Energy; and Nuclear Engineering, Science and Technology. In May 2005 Secretary of Energy Samuel W. Bodman announced the selection of over \$64 million in BES research and development projects aimed at making hydrogen fuel cell vehicles and refueling stations available, practical and affordable for American consumers by 2020.



A total of 70 hydrogen research projects were selected to focus on fundamental science and enable revolutionary breakthroughs in hydrogen production and storage, in addition to new fuel cell technologies. Participants in the projects include more than 50 research organizations in 25 states. The organizations include academic institutions, industry, and national laboratories.

The projects address five technical focus areas identified during the Department of Energy's May 2003 workshop on "Basic Research Needs for the Hydrogen Economy." The key finding of that workshop was summarized as follows: *"Bridging the gaps that separate the hydrogen- and fossil-fuel based economies in cost, performance, and reliability goes far beyond incremental advances in the present state of the art. Rather, fundamental breakthroughs are needed in the understanding and control of chemical and physical processes involved in the production, storage, and use of hydrogen. Of particular importance is the need to understand the atomic and molecular processes that occur at the interface of hydrogen with materials in order to develop new materials suitable for use in a hydrogen economy. New materials are needed for membranes, catalysts, and fuel cell assemblies that perform at much higher levels, at much lower cost, and with much longer lifetimes. Such breakthroughs will require revolutionary, not evolutionary, advances. Discovery of new materials, new chemical processes, and new synthesis techniques that leapfrog technical barriers is required. This kind of progress can be achieved only with highly innovative, basic research."*

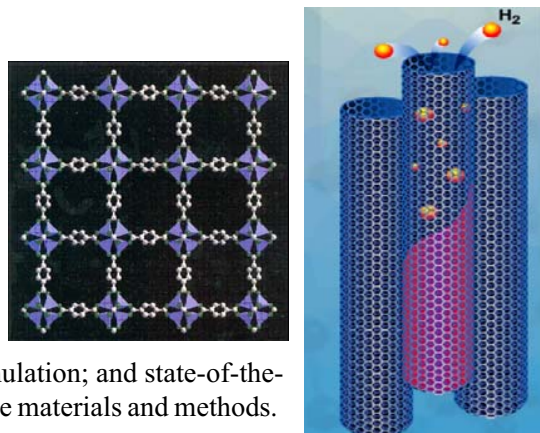


The BES initiatives are part of a comprehensive, balanced portfolio of basic and applied research, technology development, and learning demonstration projects aimed to significantly advance President Bush's Hydrogen Fuel Initiative. The projects were selected through an open, merit-reviewed, competitive solicitation process. The \$64 million will be provided to the awardees by the Department over three years, subject to Congressional appropriations.

Following are brief descriptions of the five technical areas addressed by the BES program, along with the project titles and organizations of the 70 awards.

## A. Novel Materials for Hydrogen Storage (17 projects, \$19.8 million over three years)

On-board hydrogen storage has been identified by both the National Academy of Sciences and the DOE as a key technology for the successful implementation of a hydrogen economy. However, significant scientific challenges remain, highlighting the need for further basic research. Within the hydrogen storage topic, 17 projects will be awarded to 10 universities and 6 national laboratories (Table 1). A broad range of research in hydrogen storage is covered by these selected projects, including complex hydrides; nanostructured and novel materials; theory, modeling, and simulation; and state-of-the-art analytical and characterization tools to develop novel storage materials and methods.

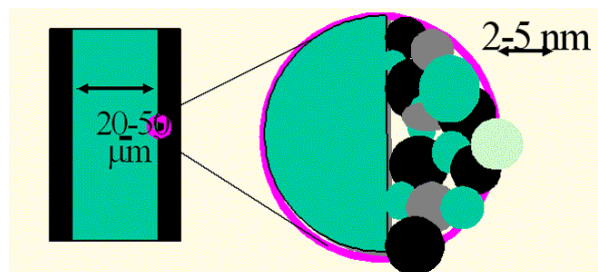


**Table 1.** Novel Hydrogen Storage Materials

Institution	Project Title
Massachusetts Institute of Technology	Theory and Modeling of Materials for Hydrogen Storage
Washington University	<i>In Situ</i> NMR Studies of Hydrogen Storage Systems
University of Pennsylvania	Chemical Hydrogen Storage in Ionic Liquid Media
Colorado School of Mines	Molecular Hydrogen Storage in Novel Binary Clathrate Hydrates at Near-Ambient Temperatures and Pressures
Georgia Institute of Technology	First-Principles Studies of Phase Stability and Reaction Dynamics in Complex Metal Hydrides
Louisiana Tech University	Understanding the Local Atomic-Level Effect of Dopants In Complex Metal Hydrides Using Synchrotron X-ray Absorption Spectroscopy and Density Functional Theory
University of Missouri, Rolla	In-Situ Neutron Diffraction Studies of Novel Hydrogen Storage Materials
University of Georgia	Integrated Nanoscale Metal Hydride-Catalyst Architectures for Hydrogen Storage
Tulane University	Molecular Design Basis for Hydrogen Storage in Clathrate Hydrates
Southern Illinois University	First Principles Based Simulation of Hydrogen Interactions in Complex Hydrides
Massachusetts Institute of Technology	High Throughput Screening of Nanostructured Hydrogen Storage Materials
Pacific Northwest National Laboratory	Control of Hydrogen Release and Uptake in Condensed Phases
Brookhaven National Laboratory	Atomistic Transport Mechanisms in Reversible Complex Metal Hydrides
Ames Laboratory	Complex Hydrides - A New Frontier for Future Energy Applications
Lawrence Berkeley National Laboratory	A Synergistic Approach to the Development of New Classes of Hydrogen Storage Materials
Oak Ridge National Laboratory	Atomistic Mechanisms of Metal-Assisted Hydrogen Storage in Nanostructured Carbons
Savannah River National Laboratory	Elucidation of Hydrogen Interaction Mechanisms with Metal-Doped Carbon Nanostructures

## B. Membranes for Separation, Purification, and Ion Transport (16 projects, \$12.3 million over three years)

Novel membranes are needed to selectively transport atomic, molecular, or ionic hydrogen and oxygen for hydrogen production and fuel cell applications. The 16 projects selected, which include 13 universities and 3 national laboratories, address integrated nanoscale architectures; fuel cell membranes; and theory, modeling, and simulation of membranes and fuel cells (Table 2).

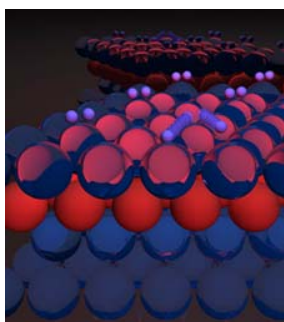


**Table 2.** Membranes for Separation, Purification, and Ion Transport

Institution	Project Title
University of Utah	Computer Simulation of Proton Transport in Fuel Cell Membranes
Clemson University	New Proton-Conducting Fluoropolymer Electrolytes for PEM Fuel Cells
Carnegie Mellon University	Rapid Ab Initio Screening of Ternary Alloys for Hydrogen Production
Rensselaer Polytechnic Institute	Sol-Gel Based Polybenzimidazole Membranes for Hydrogen Pumping Devices
Lehigh University	Porous and Glued Langmuir-Blodgett Membranes
University of Pennsylvania	The Development of Nano-Composite Electrodes for Natural Gas-Assisted Steam Electrolysis for Hydrogen Production
Case Western Reserve University	Theory, Modeling, and Simulation of Ion Transport in Ionomer Membranes
University of Tennessee	A Unified Computational, Theoretical, and Experimental Investigation of Proton Transport through the Electrode/Electrolyte Interface of Proton Exchange Membranes Fuel Cells Systems
Vanderbilt University	Template-Assisted Fabrication of Well-Defined Diffusion/Catalyst/Ionomer Networks
California Institute of Technology	Polymer Functionalized Zeolite Proton Exchange Membranes (PFZ-PEM) for Medium Temperature (<299°C) Fuel Cells
University of Rochester	Composite Fuel Cell Membranes Containing Aligned Inorganic Particles
University of North Carolina, Chapel Hill	Proton Exchange Membranes for Next Generation Fuel Cells
Cornell University	Novel Intermetallic Catalysts to Enhance PEM Membrane Durability
Lawrence Berkeley National Laboratory	Nanocomposite Proton Conductor
Los Alamos National Laboratory	Fundamentals of Hydroxide Conducting Systems for Fuel Cells and Electrolyzers
Pacific Northwest National Laboratory	Charge Transfer, Transport, and Reactivity in Complex Molecular Environments: Theoretical Studies for the Hydrogen Fuel Initiative



### C. Catalyst Design at the Nanoscale (18 projects, \$15.8 million over three years)

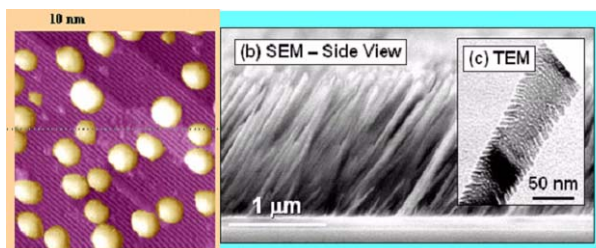


Catalysis plays a vital role in hydrogen production, storage and use.

Specifically, catalysts are needed for converting solar energy to chemical energy, producing hydrogen from water or carbon-containing

fuels such as coal and biomass, increasing efficiency in hydrogen storage kinetics, and producing electricity from hydrogen in fuel cells. Nanoscale catalyst designs

will be explored through 18 projects involving 12 universities and 5 national laboratories (Table 3). Research areas include innovative synthetic techniques; novel characterization techniques; and theory, modeling, and simulation of catalytic pathways.



**Table 3.** Catalyst Design at the Nanoscale

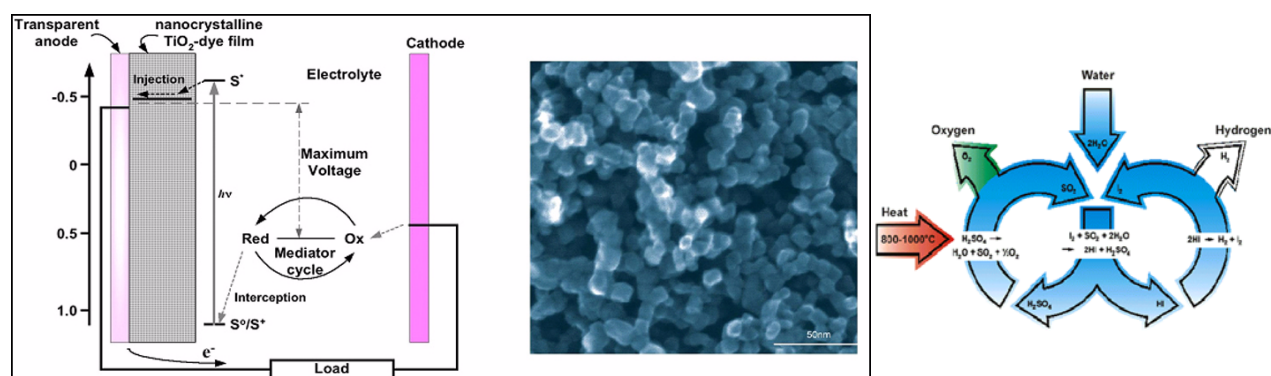
Institution	Project Title
University of Pittsburgh	Multiscale Tailoring of Highly Active and Stable Nanocomposite Catalysts
Tufts University	Nanostructured, Metal-Ion Modified Ceria and Zirconia Oxidation Catalysts
Massachusetts Institute of Technology	Instability of Noble Metal Catalysts in Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Experiments and Theory
University of Wisconsin	Atomic-Scale Design of a New Class of Alloy Catalysts for Reactors Involving Hydrogen: A Theoretical and Experimental Approach
University of California, Santa Barbara	Nanostructured Metal Carbide Catalysts for the Hydrogen Economy
University of Wyoming	eNMR for In-Situ Fuel Cell Catalyst Characterization
Yale University	Novel Reforming Catalysts
Texas A&M University	Theory-Guided Design of Nanoscale Multi-Metallic Catalysts for Fuel Cells
Johns Hopkins University	Nanoengineered Mesoporous Metals with Monolayer Thick Precious Metal Catalyst Skin
University of Illinois	Reversible Dehydrogenation of Boron Nanoclusters
Texas Tech University	Strategies for Probing Nanometer-Scale Electrocatalysts: From Single Particles to Catalyst-Membrane Architectures
Arizona State University	A Surface Stress Paradigm for Studying and Developing Catalyst and Storage Materials Relevant to the Hydrogen Economy
University of Illinois	Cathode Catalysis in Hydrogen/Oxygen Fuel Cells
Argonne National Laboratory	Fundamental Studies of Electrocatalysis for Low Temperature Fuel Cell Cathodes
Stanford Linear Accelerator Center	Development and Mechanistic Characterization of Alloy Fuel Cell Catalysts
Brookhaven National Laboratory	Metal Oxide-Supported Platinum Monolayer Electrocatalysts for Oxygen Reduction
Sandia National Labs- Albuquerque	Design of Novel Nano-Catalysts for Improved Hydrogen Production
Oak Ridge National Laboratory	Nanoscale Building Blocks for Multi-Electron Electrocatalysis: The Oxygen Reduction Reaction in Fuel Cells and Oxygen Evolution in Water Electrolysis

## D. Solar Hydrogen Production (13 projects, \$10 million over three years)

Efficient and cost-effective conversion of sunlight to hydrogen by splitting water is a major enabling technology for a viable hydrogen economy. Hydrogen production via solar energy conversion will be studied through 13 projects at 8 universities, 1 industry company, and 3 national laboratories (Table 4). The projects address nanoscale structures; inorganic and organic semiconductors and other high-performance materials; and theory, modeling, and simulation of photochemical processes.

**Table 4.** Solar Hydrogen Production

Institution	Project Title
Colorado State University	A Combinatorial Approach to Realization of Efficient Water Photoelectrolysis
California Institute of Technology	Sunlight-Driven Hydrogen Formation by Membrane-Supported Photoelectrochemical Water Splitting
University of Arizona	"Electrochemically Wired" Dye-Modified Dendrimers and Semiconductor Nanoparticles in Sol-Gel Thin Films: Toward Vectorial Electron Transport in Hybrid Materials and Solar-Assisted Hydrogen Production
University of California, Santa Cruz	Hydrogen Generation Using Integrated Photovoltaic and Photoelectrochemical Cells
Pennsylvania State University	Dye-Sensitized Tandem Photovoltaic Cells
Purdue University	Biomimetic Inspired Electrochemical Fabrication of High Performance Photoelectrodes for Solar Hydrogen Production
Pennsylvania State University	Photoelectrochemistry of Semiconductor Nanowire Arrays
University of Washington	Real-Time Atomistic Simulation of Light Harvesting and Charge Transport for Solar Hydrogen Production
Nanoptek Corporation	Bandgap Tailoring of Thin-Film Photocatalysts by Coating onto Stress-Inducing Nanostructured Templates
Virginia Polytechnic Institute and State University	Photoinitiated Electron Collection in Mixed-Metal Supramolecular Complexes: Development of Photocatalysts for Hydrogen Production
Brookhaven National Laboratory	Catalyzed Water Oxidation by Solar Irradiation of Band-Gap-Modified Semiconductors
Pacific Northwest National Laboratory	Fundamental Investigations of Water Splitting on Model TiO <sub>2</sub> Photocatalysts Doped for Visible Light Absorption
National Renewable Energy Laboratory	Ultra-High Efficiency Solar Hydrogen Production via Singlet Fission in Molecules and Exciton Multiplication in Quantum Dots

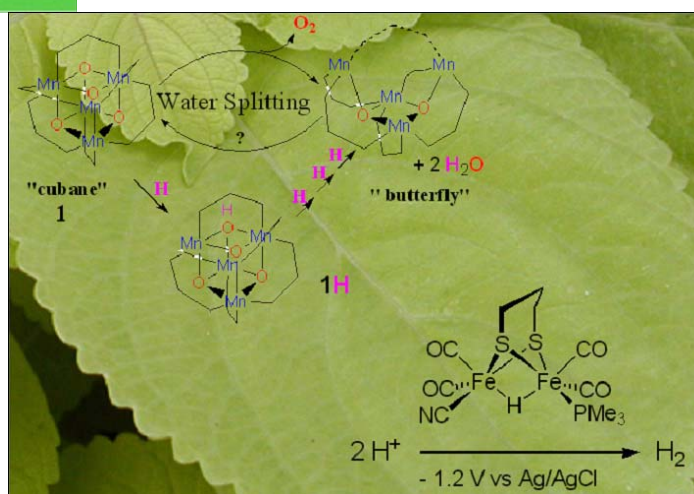
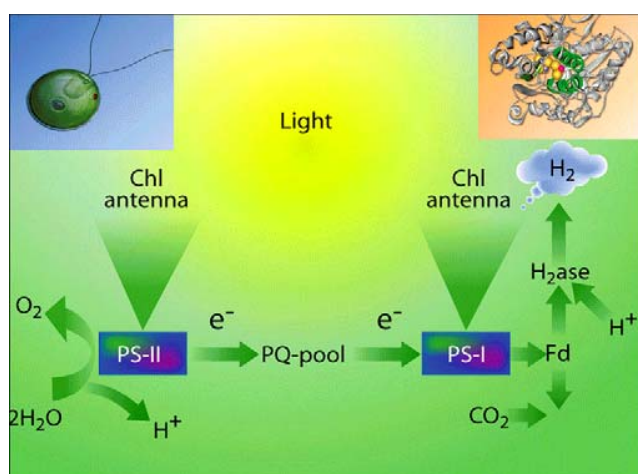


## E. Bio-inspired Materials and Processes (6 projects, \$7 million over three years)

Fundamental research into the molecular mechanisms underlying biological hydrogen production is the key to our ability to adapt, exploit, and extend what nature has accomplished for our own renewable energy needs. Bio-inspired materials and processes for hydrogen production will be investigated through 6 projects at 5 universities and 1 national laboratory (Table 5). Research includes enzyme catalysis; bio-hybrid energy coupled systems; and theory, modeling, and nanostructure design.

**Table 5.** Bio-Inspired Materials and Processes

Institution	Project Title
Pennsylvania State University	A Hybrid Biological/Organic Half-Cell for Generating Dihydrogen
University of Washington	Hydrogenases of <i>Methanococcus Maripaludis</i>
North Carolina State University	RNA Mediated Synthesis of Catalysts for Hydrogen Production and Oxidation
University of Georgia	Fundamental Studies of Recombinant Hydrogenases
University of Pennsylvania	Modular Designed Protein Constructions for Solar Generated H <sub>2</sub> from Water
National Renewable Energy Laboratory	Structural, Functional, and Integration Studies of Biocatalysts for Development of Solar Driven, Bio-Hybrid, H <sub>2</sub> -Production Systems



### 3. Hydrogen Cost: DOE Hydrogen Program Record

**DOE Hydrogen  
Program Record**

**Record #: 5013**

**Date: December 15, 2005**

**Title: Hydrogen Cost Goal  
Item: \$2.00 - \$3.00/gge**

**Originator: Roxanne Garland**

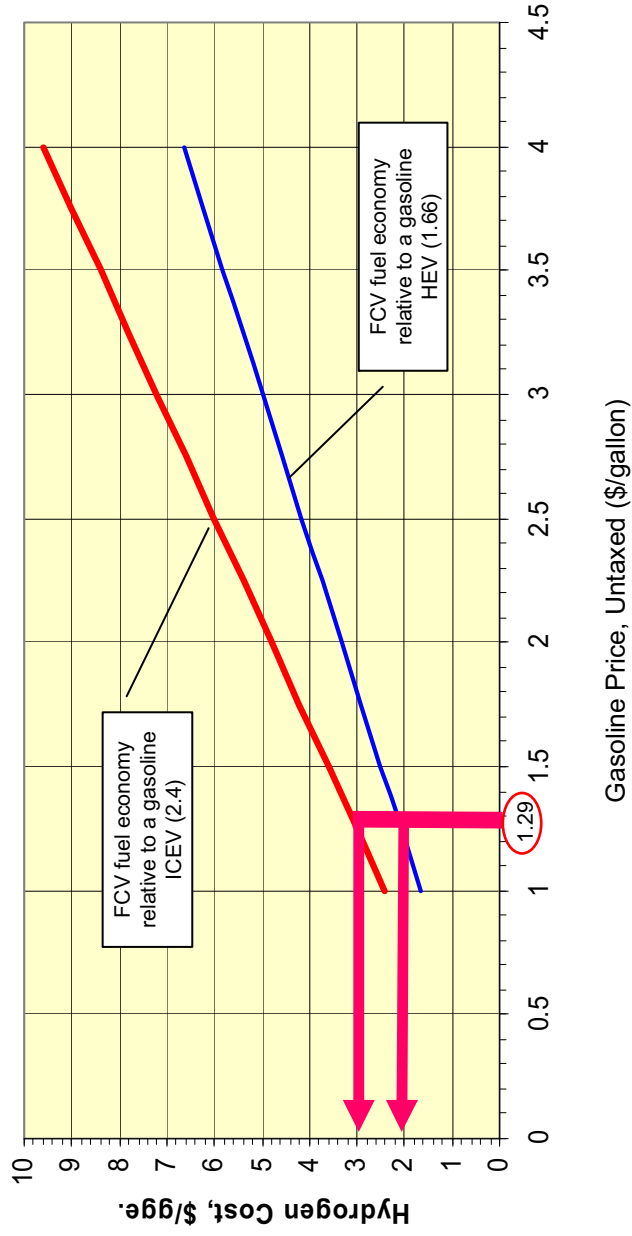
**Approved by: JoAnn Milliken**

**Date: December 21, 2005**

# Calculation



**Model for Hydrogen Cost Goal**  
(Equivalent \$/mile for consumer)



Note: FCVs are assumed to be 1.66 times more efficient than gasoline HEVs (*The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*, Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Research Council and National Academy of Engineering, 2004, p. 66) and 2.4 times more efficient than gasoline ICEVs (*ibid*, p. 26). EIA projected gasoline price of \$1.29 in 2015 is based on the high "A" case (*Annual Energy Outlook 2005*, Energy Information Administration, January 2005).

**Reference:**  
***Hydrogen Cost Goal***

Don Gardner  
Fred Joseck

Presented to the FreedomCAR and Fuel Partnership Executive  
Steering Group  
By the Fuel Pathways Integration Tech Team

April 19, 2005

# Hydrogen Cost Goal

---



## Why Re-Examine the Hydrogen Cost Target?

- The current hydrogen cost target of \$1.50 / gge (untaxed, 2001\$) for 2010 was developed in 2002.
- Represented a snapshot in time based on distributed natural gas reforming
- Was not based on comparison to a competitive benchmark
- Timeframe is not consistent with the partnership's 2015 commercialization decision point



# General Principles for Cost Goals

---



- Provide a "yardstick" for assessing technology performance
- Guide R&D programs by enabling prioritization and focusing of options
- Defined by comparison to evolved baseline or next-best technology
- Developed through a well defined, transparent process
- Reassessment based on major changes in technology or external drivers

# Hydrogen Cost Goal

---



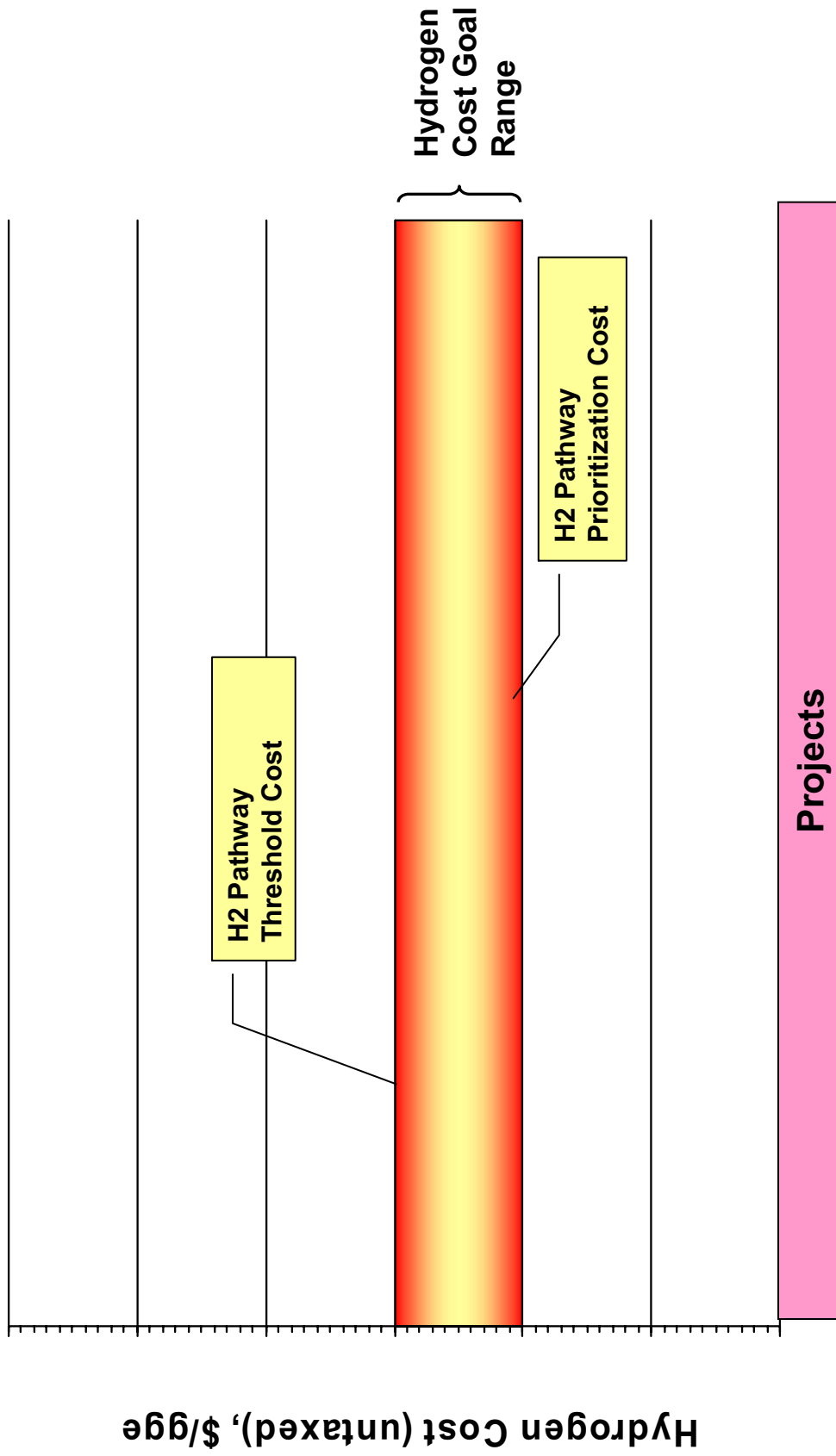
## Application of Principles

- Goal is pathway independent
- Consumer fueling costs are equivalent or less on a cents per mile basis
- Evolved gasoline ICE and gasoline-electric hybrids are benchmarks
- R&D guidance provided in two forms
  - Evolved gasoline ICE defines a threshold hydrogen cost used to screen or eliminate options which can't show ability to meet target
  - Gasoline-electric hybrid defines a lower hydrogen cost used to prioritize projects for resource allocation



# Hydrogen Cost Goal

## 2015 Hydrogen (H2) Goals



# Hydrogen Cost Goal



## Mechanics

$$\text{H2 Cost (\$/gge)} \leq (\text{EIA Gasoline Price in 2015})$$

$$\left[ \frac{\text{Fuel Economy H2FCV}}{\text{Fuel Economy Competitive Vehicle}} \right]^1$$

Input	Value	Source
Gasoline price projection for 2015	\$1.26 / gal (untaxed, 2005 \$)	EIA Annual Energy Outlook, 2005
Ratio of FCV fuel economy to evolved gasoline ICE	2.40	NRC H2 Economy Report
Ratio of FCV fuel economy to gasoline hybrid	1.66	NRC H2 Economy Report

## Results

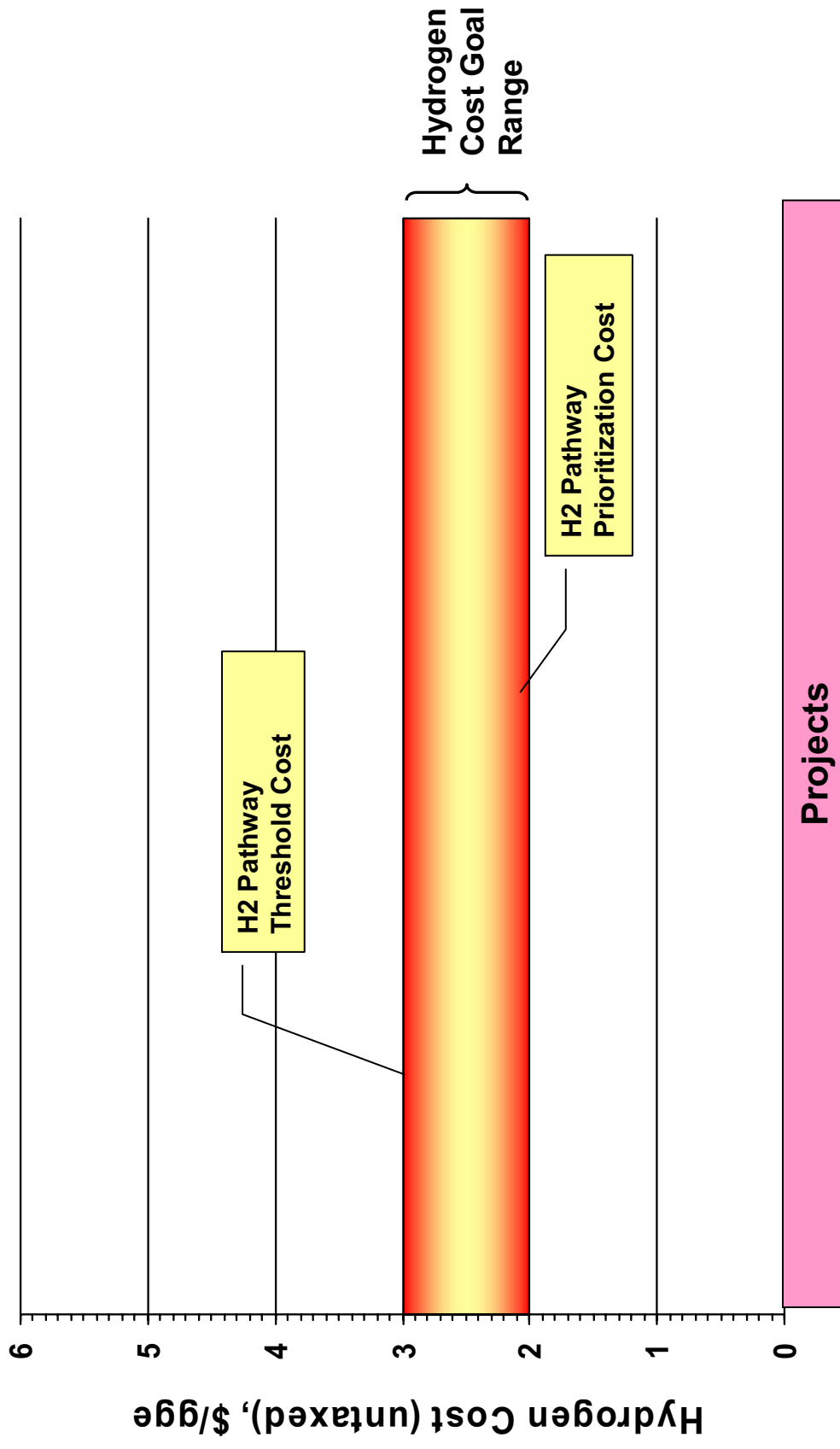
- **Hydrogen Cost Goal Range = \$2.00 – 3.00/gge.**

<sup>1</sup> Ratio of FCV fuel economy to competitive vehicle

# Hydrogen Cost Goal

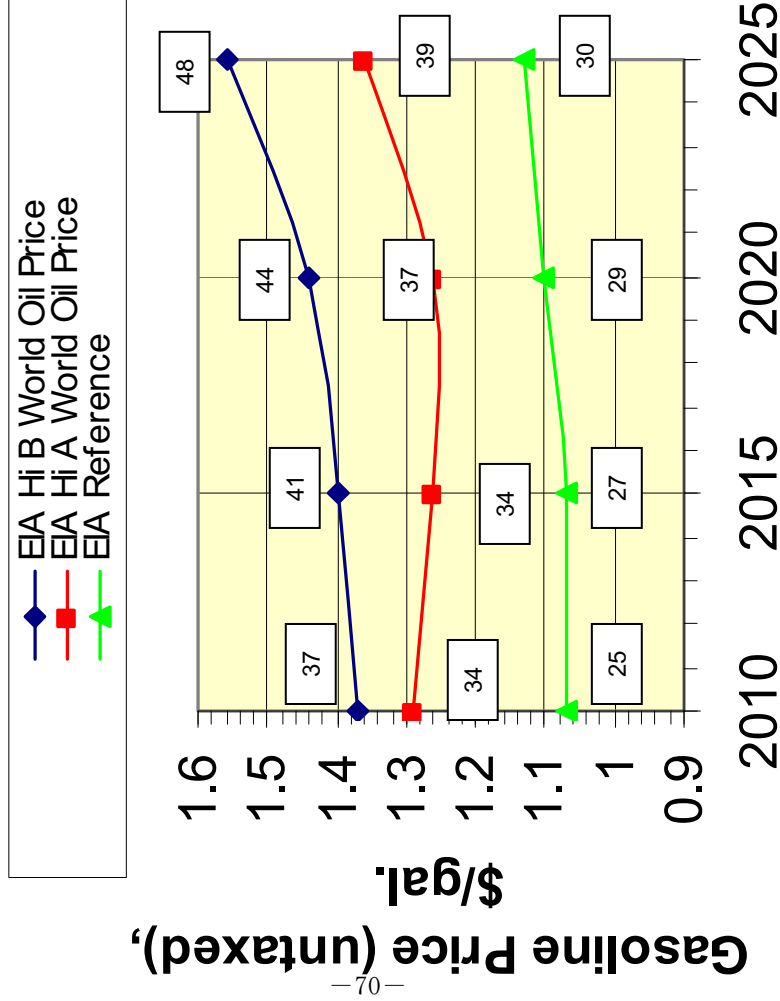


## 2015 Hydrogen (H2) Goals



# Assumptions for Cost Model: EIA Gasoline Price (Untaxed) Projections

Source: EIA Annual Energy Outlook 2005, p. 216



- Reference case - not used; relatively and stable prices, little economic case for change
- “Hi A” case – used; greater increase in future (2020-2025)
- “Hi B” case – not used; too far from best projections (Reference case)

• EIA “Hi A” case => \$1.26/gal (untaxed, \$34/bbl)

• Note: Prices are in 2005 dollars

• The value in the box is the corresponding crude price in \$/bbl

# Hydrogen Cost Goals



## Recommendation to ESG:

- The Hydrogen Cost Goal should be revised expressed as a range (untaxed in 2005\$)/gge for 2015.
  - ❖ The Hydrogen Threshold Cost of \$3.00 will be a guideline and one factor used to screen R&D projects
  - ❖ The Hydrogen Prioritization Cost of \$2.00 will be used as a guideline to prioritize the R&D projects (highest resource allocation).
- The Hydrogen Cost Goal should be reevaluated in the event there is a major change in technology, markets, and/or other external drivers.

## Next Steps if Receive Approval:

- The Hydrogen Cost Goal will be changed in the Partnership Plan
- JOG will work on communications plan



# **Backup Slides**



# Summary of EIA Cases & Hydrogen Cost



EIA Case	2015 World Oil Price, \$/bbl	2015 Gasoline Price (untaxed), \$/gal.	Hydrogen Threshold Cost, \$/gge. (Gas ICEV)	Hydrogen Prioritization Cost, \$/gge. (Gas HEV)
High "B" World Oil Price	41	1.40	3.36	2.32
High "A" World Oil Price	34	1.26	3.02	2.09
Reference Case	27	1.07	2.57	1.78

The Hydrogen Threshold Cost is based on a Vehicle Fuel Efficiency Improvement Factor of 2.4 from the NAS.

The Lower Hydrogen Threshold Cost is based on a Vehicle Fuel Efficiency Improvement Factor of 1.66 from the NAS.

# EIA Case Descriptions

---



## ***EIA Reference Case***

Baseline economic growth (3.1 percent per annum), world oil price falling to about \$25 per barrel by 2010 and rising to \$30.31 per barrel, and technology assumptions.

## ***High A World Oil Price***

Reference case assumptions except that the world oil prices are \$39.24 per barrel in 2025, compared with \$30.31 per barrel in the reference case.

## ***High B World Oil Price***

World oil prices remain high and are \$48.00 per barrel in 2025, compared with \$30.31 per barrel in the reference case.

### **Note:**

The source of this information is the EIA Annual Energy Outlook 2005 on page 216.

# Hydrogen Cost Goal Methodology



$$\begin{aligned}
 & \bullet \quad \frac{\text{\$/mi}}{\text{Any Fuel System}} = \frac{\text{Fuel Cost [ \$/gge ]}}{\text{Fuel Economy [ mi/gge ]}} \quad \text{Any Fuel System} \\
 & \bullet \quad \frac{\text{Cost}^1 \text{ H}_2}{\text{Fuel Economy H}_2\text{FCV}} \quad \text{2015} \leq \frac{\text{EIA Gasoline}^2 \text{ Price}}{\text{Fuel Economy Competitive Vehicle}} \quad \text{2015}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\text{H2 Cost}}{\text{2015}} \leq \frac{\text{(EIA Gasoline Price in 2015)}}{\text{Fuel Economy Competitive Vehicle}} \quad \text{2015}^3$$

<sup>1</sup> Untaxed

<sup>2</sup> EIA Price is untaxed; able to reference

<sup>3</sup> NRC fuel economy ratios cited; able to reference

# Assumptions for Hydrogen Cost Method: Fuel Economy Ratios for Competitive



## Options<sup>1</sup>

- 1: Gasoline internal combustion engine (ICE) vehicle – no hybridization

$$\frac{\text{H}_2\text{FCV}}{\text{Gas ICEV}} = 2.40$$

Fuel Economy

[NRC H2 Economy Report, p.26]

- 2: Gasoline hybrid-electric vehicle (HEV)


$$\frac{\text{H}_2\text{FCV}}{\text{Gas HEV}} = 1.66$$

Fuel Economy

[NRC H2 Economy Report, p.26; derived using Gas HEV to Gas ICE ratio of 1.45]

<sup>1</sup> 1%/yr improvement in fuel economy assumed in both cases

#### 4. Demand: Hydrogen Demand in 2040 for FCVs

<b>DOE Hydrogen Program Record</b>		
<b>Record #:</b> 5008	<b>Date:</b> December 28, 2005	
<b>Title:</b> Hydrogen Demand in 2040 for FCVs		

**Items:**

- 64 million metric tons of hydrogen would be needed to power 300 million hydrogen fuel cell vehicles in 2040.
- 300 million FCVs would be 80% of the vehicle fleet of 375 million vehicles projected for 2040

**Data/References:**

The following values were based on the *VISION Model: Description of Model Used to Estimate the Impact of Highway Technologies and Fuels on Energy Use and Carbon Emissions to 2050*. Singh M., A. Vyas, and E. Steiner, Argonne National Laboratory, December 2003, ANL/ESD/04-1 ([www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/299.pdf](http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/299.pdf)).

1- 375 million vehicles projected for 2040 in the U.S. Vehicles refer to light duty vehicles as defined in the model.

2- 300 million FCVs is based on the model's assumption of the following FCV market sales rates: 4% in 2018, 27% in 2020, 78% in 2030, and 100% by 2038.

3- 13,000 miles per light duty vehicle in 2040. (Also from *Transportation Energy Data Book: Edition 23-2003*, Table 7.4 (7-4).

4- 24.3 miles per gallon for conventional light duty vehicles in 2040.


5- 2.5 is the assumed ratio of FCVs miles per kg (or gge) of hydrogen to miles per gallon of gasoline for conventional vehicles.

**Calculations:**

300 million Fuel cell vehicles x 13,000 miles per vehicle per year = 3,900 billion miles driven per year

24.3 miles per gallon for conventional vehicles x 2.5 factor for fuel cell vehicle in 2040 = 60.75 miles/kg of H<sub>2</sub> for a fuel cell vehicle.

3,900 billion miles divided by 60.75 miles/kg of hydrogen = 64 million metric tons of hydrogen required.

<b>Originator:</b> Fred Joseck, Mark Paster		
<b>Approved by:</b> JoAnn Milliken	<b>Date:</b> January 3, 2006	
<b>Title:</b> Hydrogen Demand in 2040 for FCVs		

## 5. MARAD ET Program: Maritime Administration

### Energy Technologies Program





# Maritime Administration Energy Technologies Program



Presented to  
**Shipboard Energy Technologies  
Conference**  
April 08, 2004  
by  
**Daniel J. Gore**  
**Office of Shipbuilding and Marine Technology**  
**Maritime Administration**



## Presentation Contents



- **“Why an Energy Technologies program?”**
- **Brief overview of the program plan**
- **Ferry retrofit projects**
- **Cargo ship projects**
- **Fuel Cell and laboratory projects**
- **Emission measurement protocol activities**
- **Website and contact information**
- **Theme for today’s Workshop**

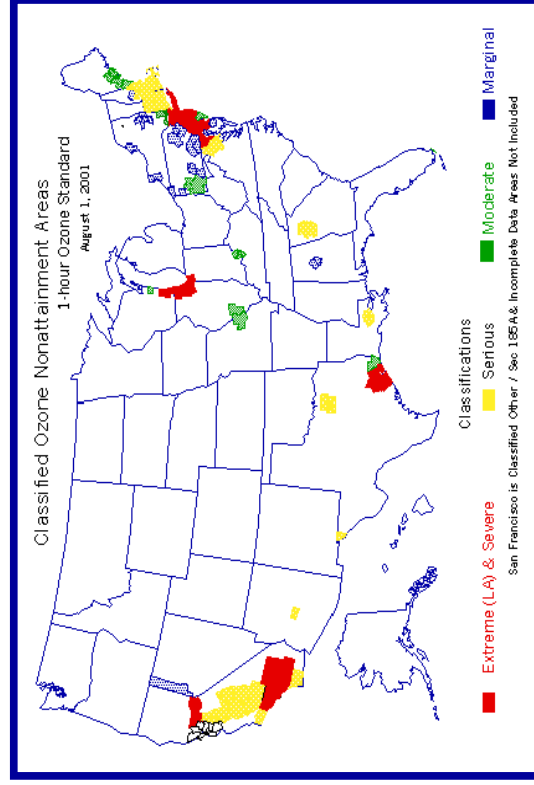
# Why A Maritime Energy Technologies Program?



# Recent Emission Pressures



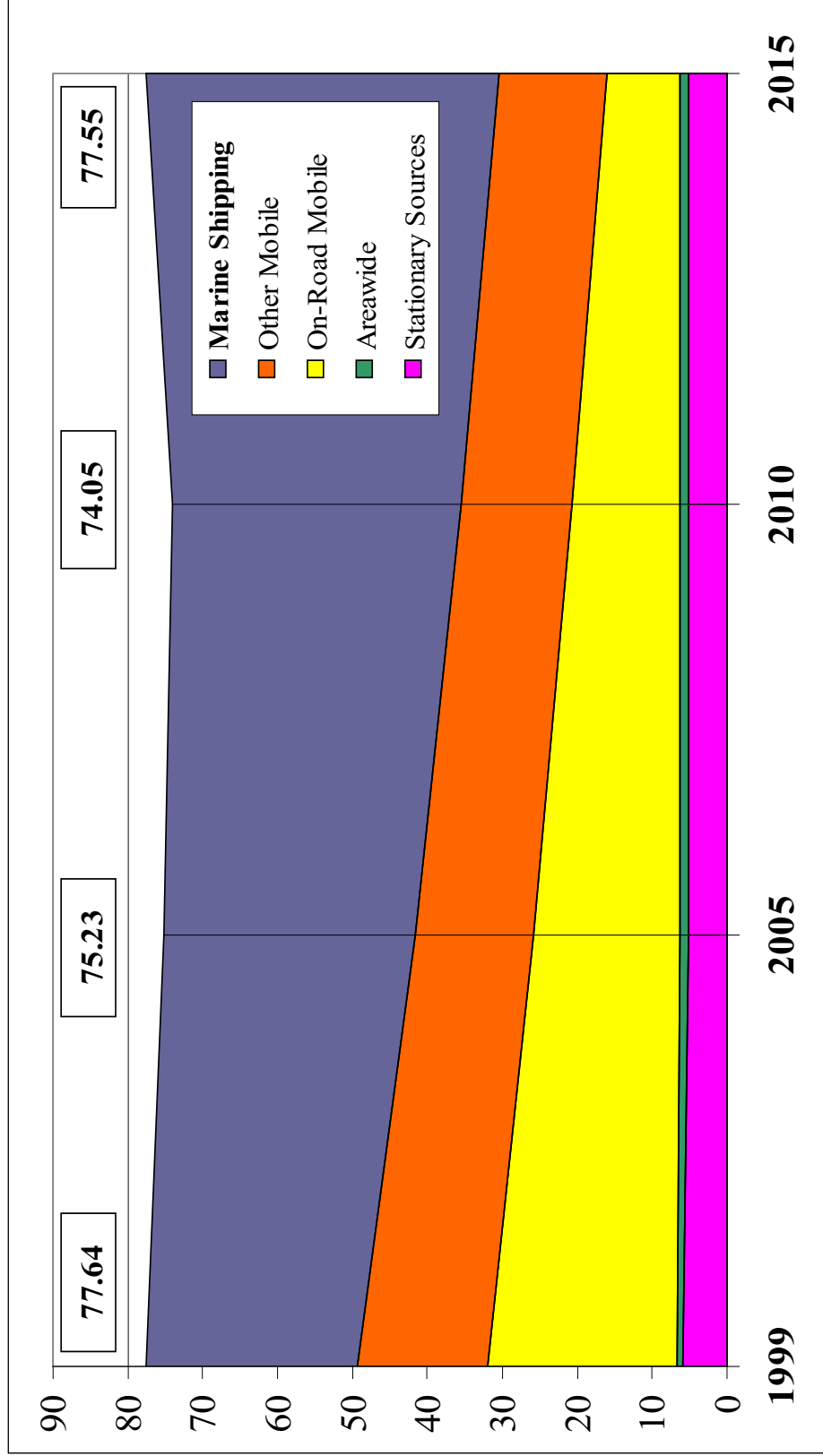
- **Maritime in spotlight**
- **MARPOL Annex 6**
  - NOx and Sulfur limits in 2004
- **EPA regulations**
  - New category 1, 2 eng's (1999)
    - NOx, HC, CO, and PM
  - New category 3 eng's (2002)
- **CARB regulation**
  - Ferries use hwy diesel
- **Ozone Nonattainment**
- **Public pressure**



## U.S. Ozone Nonattainment Areas



# Growing Marine Emissions Santa Barbara NOx Example



# Program Overview



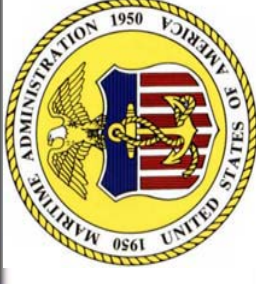
## Program Objectives



- **Investigate and demonstrate the potential for new technologies and fuels to improve marine power plant efficiency and to reduce air emissions**
- **Disseminate energy technology and related policy information to the maritime community**



# Program Plan



- **Baseline performance testing**
  - Existing vessel data and measurement techniques
- **Diesel retrofits**
  - Emulsified fuel, water injection, SCR, particulate traps
- **Alternative fuels**
  - Natural gas, biodiesel, hydrogen, synthetic diesel
- **Advanced technologies**
  - Fuel cells, high efficiency gas turbines
- **Supporting studies**
  - Technology evaluations, incentives & emission measuring
- **Industry outreach**
  - Newsletter, conferences, website, and presentations



# Partners



# Ferry Retrofit Projects



# Water Injection System (WIS) & Ultra Low Sulfur Diesel (ULSD)



**MV WAVERIDER - San Diego**

**Modified Hydrofoil Design**

**SCX Ferries**

**2003**

- **Technologies**

- **Combustion Air Water Injection System (WIS)**
- **15 PPM Sulfur Diesel**

- **Engine Type & Ops**

- **DD 12V92 TA, 2 Stroke**
- **1050 HP at 2300 RPM**
- **Long runs at cruise speed**

- **Partners**

- **SCX Ferries, DOE, West Virginia University**



# Biodiesel and Water Injection System (WIS)



- **Technologies**
  - Biodiesel - B100 & B20
    - Renewable
    - SO<sub>2</sub> & CO<sub>2</sub> friendly
  - Combustion air water inject
- **Engine Type & Ops**
  - (2) DD 12V-71
  - Tour Vessel

- **Partners**

**MV OSKI - San Francisco Bay**

**Blue and Gold Fleet**

**• B&G Fleet, Walthers  
Engineering, UC Berkeley**

**2002**

**12**



# Sister Ferries Natural Gas - Diesel Comparison



- **Two sister ferries**
  - **MV Echols - Natural Gas**
  - **MV ERF II - Diesel**
- **Engine Types**
  - **(2) CAT 3406 spk ign- gas (NA)**
  - **(2) DDC 6V 71 (NA)**
- **Operations**
  - **Cross river, heavy idling**
- **Partners**
  - **HRTA, USCG, NAVSEA, West Virginia University, Department of Energy, Mar. Chemists & Environ. Cons.**

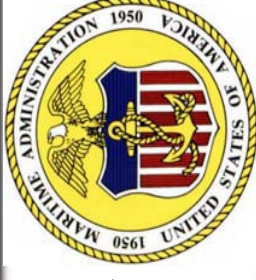
**Elizabeth River Ferry II - Norfolk**

**Hampton Roads Transit Auth.**

**2001**



# Selective Catalytic Reduction & Diesel Oxidation Catalyst

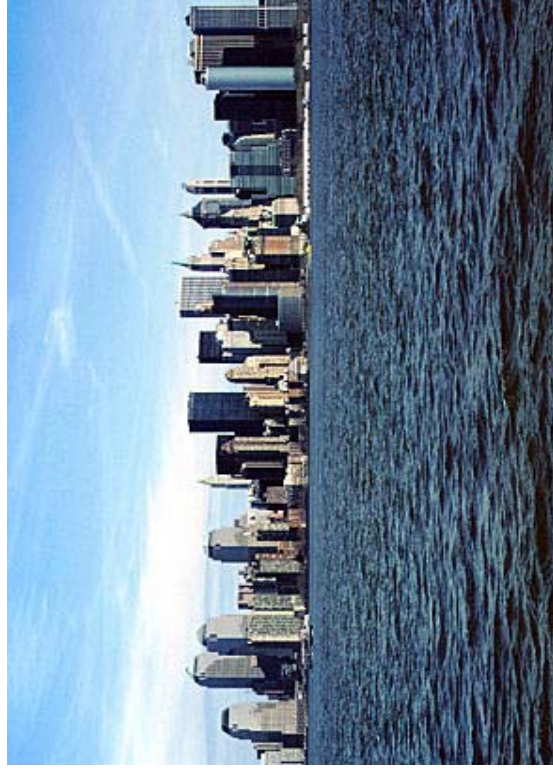


- **Pilot Project - Austen Class**
  - (2) Cat 3516 Engine (TC)
- **Eventually all 7 SI ferries**
- **SCR for NOx >70% reduction**
- **DOC for PM**
- **15 PPM Sulfur Diesel?**
- **Sponsors - PANY&NJ, NYC DOT**
- **Partners - EPA**
- **Contractors - MJ Bradley & WWU**

**Staten Island Ferry  
Scheduled 2003 - 2004  
MARAD - Advisory Board**



# NYC Harbor Private Ferry Emissions Reduction Program



- **NYSERDA - Program Manager**
- **\$6.8 M Program**
  - Identify NY ferry fleet
  - Data log vessel operations
  - Ultra Low Sulfur Diesel testing
  - Down select technologies
  - Install, demo, & test
  - Deploy technologies to fleet
- **Sponsors - NYC DOT, FHWA, & FTA**
- **Partners - EPA, Ferry Operators**
- **Contractors - Seaworthy Systems, Environment Canada, NESCAUM, ESI**

**NY Waterway**

**Seastreak**

**New York Water Taxi**

**Scheduled 2003 - 2004**

**MARAD - advisory role**

# Cargo Ship Projects





# Maersk Vessel Baseline Emission Testing



- **MV SINE MAERSK,**
  - Containership from L.A. to Tacoma
- **Sponsor - Port of LA w/MARAD assist**
- **Parties Involved -**
  - **Maersk Lines, MAN B&W, University of California Riverside, CARB**
- **NOx, PM, HC, CO and CO<sub>2</sub>**
- **Testing both underway and at pier**
- **Presentation today**



# Large Vessel Diesel Engine Retrofit



- **Potential Sponsors**
  - **MARAD, EPA, Ports LA & LB, CARB, Air Quality Districts**
- **Main Engine & Auxiliaries**
- **California Coast & Ports**
- **Promising Technologies**
  - **25% NOx Reduction**
  - **Better Fuel Economy**
- **Cooperative Research Approach w/Operators**

# Fuel Cell and Laboratory Projects



# NAVSEA Diesel Engine Pilot Retrofit Program

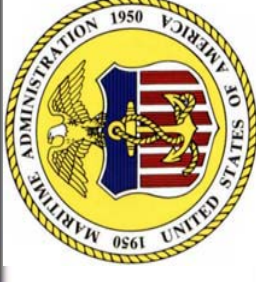


- Laboratory tests of DDC 12V-71N
- Scheduled 2004

- Technologies - Individual & comb.
  - Air humidification, ferrocene fuel additive, combustion chamber & injector modifications, electrically regenerated particulate trap and mini-sac injectors
- Fuels
  - F-76, JP-5, ULSD, B-20, and Fischer Tropsch Diesel
- Sponsors - \$1M
  - MARAD, Navy, CARB, DOE, WVU, others



# DOT Hydrogen and Fuel Cell Ferry Projects



- **Treasure Island Ferry**
  - **S.F. Bay Water Transit Authority commissioning**
    - Design & build of a 49 - 100+ passenger ferry
    - 400 kW power from fuel cell, solar, and battery
- **Arizona War Memorial Shuttle**
  - **Hawaii Electric Vehicle Demonstration Project**
    - Envisions design & build of 149 passenger water shuttle
    - Dual 200kW propulsion system w/75kW fuel cell
- **Sodium Borohydride Water Taxi (DOT - Phase 1)**
  - **Phase 2 - Duffy Electric Boats & Seaworthy Systems**
    - 22 passenger water taxi for Newport Beach, CA
    - 15 kW battery propulsion sys w/3kW PEM Fuel Cell

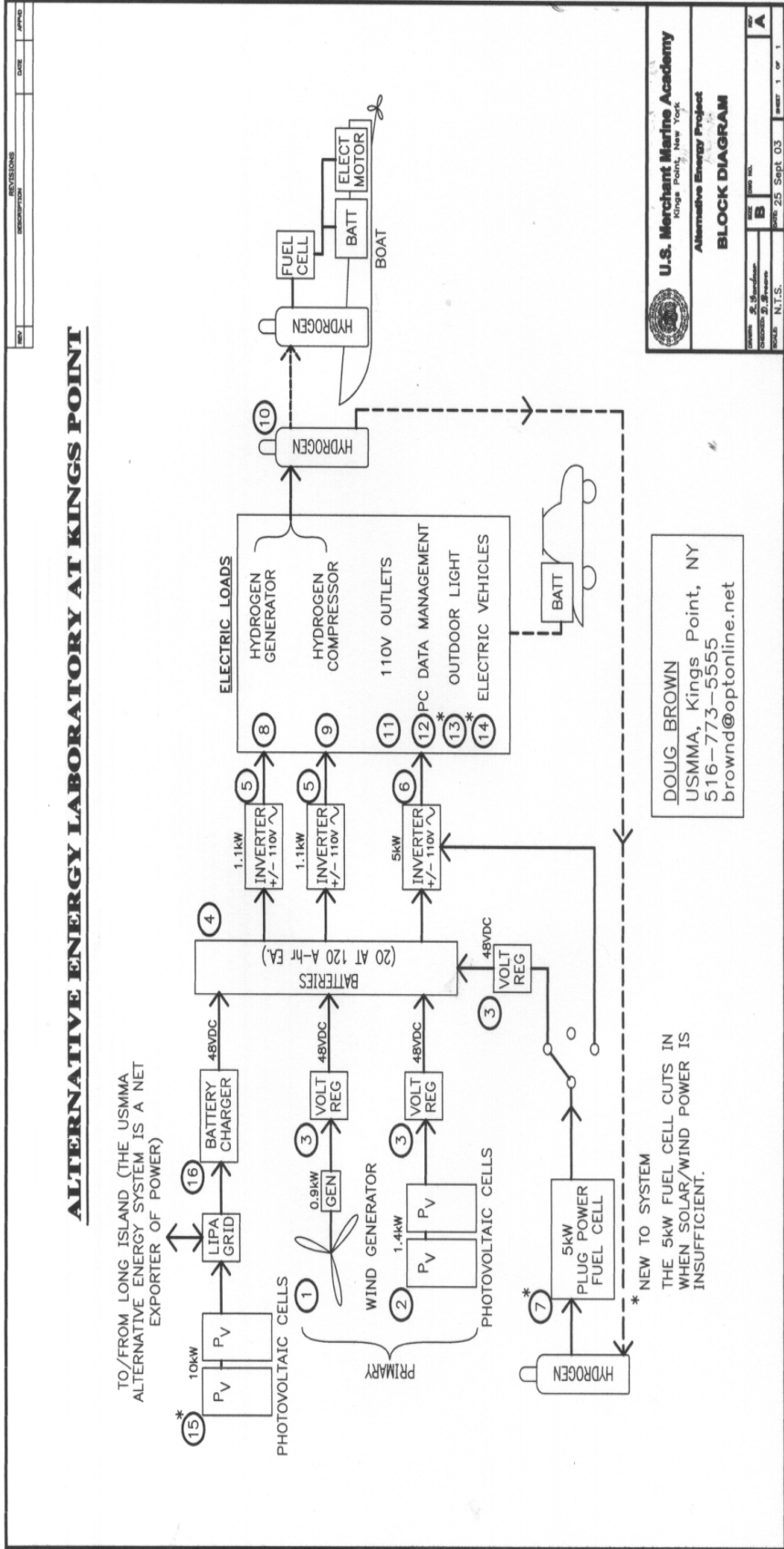


# USMMA Renewable Energy Fuel Cell Laboratory



TO/FROM LONG ISLAND (THE USMMA ALTERNATIVE ENERGY SYSTEM IS A NET EXPORTER OF POWER)

## ALTERNATIVE ENERGY LABORATORY AT KINGS POINT



DOUG BROWN  
USMMA, Kings Point, NY  
516-773-5555  
brownnd@optonline.net

U.S. Merchant Marine Academy  
Kings Point, New York  
Alternative Energy Project  
BLOCK DIAGRAM  
DATE: 25 Sept 03  
PAGE: 1 of 1

# Emission Measurement Protocol Activities



# **Emission Measurement Protocol Activities**



- **Vessel Engine Emission Measurement Guide**
  - James Corbett of UDEL
- **Views on a Universal Measurement Protocol**
  - SNAME MEETS Conference - MARAD & 7 Authors
- **Staten Island Ferry Protocol**
  - West Virginia University
- **Maersk Container Ship Testing**
  - MAN B&W with CARB Guidance
- **Large Vessel Emission Test Protocol**
  - University of California Riverside



# Contact Information



## Website and Contact Info



- **Website - [www.marad.dot.gov/nmrec/](http://www.marad.dot.gov/nmrec/)**
  - Link to “Energy Technologies”
- **For no-cost newsletter subscription:**
  - Regina.Farr@marad.dot.gov
  - (202) 366-1924
- **Re: Presentation or program**
  - Daniel.Gore@MARAD.DOT.GOV
  - (202) 366-1886

# Theme For Workshop



# Workshop Theme



- **Describe Energy Technologies Program**
  - MARAD national program assisting regional interests
- **Provide emission reduction technology info**
  - Several equipment designers presenting
- **Address emission measuring protocols**
  - Several monitoring organizations presenting
- **Facilitate future vessel owner involvement**
  - Emission reduction pressures will increase
  - Cooperative R&D possible with MARAD and others

## 6. ETpdfFall02: ENERGY TECHNOLOGIES



# ENERGY TECHNOLOGIES

NEWSLETTER NO. 02      FALL 2002

## INTRODUCTION

This issue provides updates on a number of our major program activities, including the establishment of new research partnerships with the Naval Sea Systems Command (NAVSEA) and SCX Ferries, Inc. Also provided are the results of completed technology demonstrations regarding fuel cells, a nitrogen oxides (NOx) reduction technology, and biodiesel fuel.

See page 3 of the Newsletter for a featured article by Mary Culnane of the San Francisco Water Transit Authority (WTA). Steady progress toward the development of a zero-emission fuel cell ferry is described therein.

The diagram on page 5 depicts the U.S. national energy supply and consumption as published by the En-

ergy Information Administration's Annual Energy Review 2000. It provides data on the source of energy and its production (domestic or imported). It also shows that transportation consumes almost 27 percent of the Nation's energy.

For subsequent issues, we continue to invite and encourage informative articles from our readers.

### INSIDE THIS ISSUE:

Fuel Cells	2
Zero-Emission Ferry	3
Navy Testing	4
Water Injection and Biodiesel	4
Energy Chart	5

## MARAD AND SCX FERRIES SIGN RESEARCH AGREEMENT

The Maritime Administration (MARAD) entered into a Cooperative Research Agreement with SCX Ferries, Inc. The agreement, signed on September 10, 2002, will examine the performance of nitrogen oxides (NOx) and particulate matter (PM) emission control systems aboard a hydrofoil ferry serving the San Diego, CA, commuting area.

SCX is conducting a one-year hydrofoil ferry commuter demonstra-

tion from Oceanside to San Diego under an



**WESTFOIL**

arrangement with the Port of San Diego and the California Department of Transportation (CALTRANS).

The company is also seeking to extend the

demonstration to points in the Los Angeles area as a method of relieving traffic congestion from the I-5 corridor.

The *M/V WESTFOIL*, the vessel to be used in the project, is equipped with a new hydrofoil, ride control and waterjet propulsion systems. It is 85 feet in length and capable of carrying 149 passengers. The vessel will be leased from Pacific Marine, Inc., of Honolulu, HI, and Hornblower Marine, Inc., will be responsible for its daily operations. The *WESTFOIL* has four Detroit Diesel 12v92 TA engines

*(Continued on page 2)*

## FUEL CELLS—ABOARD SHIP?

What will it take to get fuel cells aboard ships? A first step in the process is to determine whether a fuel cell-based, electrical-power generating system can actually respond to highly variable ship-board electrical or propulsion loads.

Accordingly, MARAD and SurePower Corporation entered into a Cooperative Research Agreement to test and observe a fuel cell system's response to simulated marine power loads. The SurePower system incorporates two 200 kW phosphoric acid fuel cells and a flywheel energy storage unit.

Seaworthy Systems, Inc., was enlisted to develop the testing protocol. Some creativity was involved as fuel cells are not addressed by marine regulatory agencies or classification societies.

Additionally, fuel cells figuratively combine the prime mover and generator into a single unit. A combination of American Bureau of Shipping (ABS) and Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) requirements for power systems installed aboard ships were ultimately utilized. These tests are summarized in the below table.

The tests demonstrated that the system met all regulations as they apply to rotating, alternating and direct current generators, with the exception of the 300% overload test. The latter negative outcome may have resulted from monitoring equipment limitations. It is intended that a re-test can be conducted in 2003.

POC: [carolyn.junemann@marad.dot.gov](mailto:carolyn.junemann@marad.dot.gov)

### Fuel Cell Tests Performed

Test No.	Description	Organization
1.1	Operational Reliability, 60 min, 100% load	ABS
1.2	Operational Reliability, 30 min, 110% load	ABS
1.3	Operational Reliability, 4 hours, various loads	ABS
2.1	Voltage Stability, +/-2.5% VAC of rated voltage - 0-100% load	ABS/IEEE
2.2	Voltage Stability, 150% load, starting	ABS/IEEE
2.3	Voltage Stability, 300% load, momentary	ABS/IEEE
3.1	Frequency regulation during load change - 100%-0%-50%-100%	ABS
3.2	Frequency regulation during load change - 0%-75%-100%-25%-0%	IEEE
4.1	Parallel Operation, load sharing stability	ABS/IEEE

*(Continued from page 1)*

### SCX Ferries

each rated at 1050 BHP at 2300 RPM.

The SCX agreement with the Port of San Diego requires the installation of emission control systems aboard the vessel. The company is currently considering using a combination of water injection systems for NOx reduction and a low sulfur diesel fuel for sulfur oxides (SOx) and PM reductions.

The Department of Energy has agreed to assist in the research program by committing the services of West Virginia University's Mobile Source

Testing Laboratory. This mobile lab will be utilized to perform the emission measurements early next calendar year.

Should the ferry operation prove successful, SCX may build new vessels. Liquefied natural gas (LNG) will be one of the fuels considered for the new hydrofoil design. As part of the present Cooperative Research Agreement, MARAD will sponsor a study assessing the potential supply and comparative costs of using LNG in the proposed SCX operating areas.

POC: [sujit.ghosh@marad.dot.gov](mailto:sujit.ghosh@marad.dot.gov)  
[daniel.gore@marad.dot.gov](mailto:daniel.gore@marad.dot.gov)

## FEATURED ARTICLE SAN FRANCISCO ZERO-EMISSION FERRY

This article was contributed by: Mary Culnane, San Francisco's Bay Area Water Transit Authority (WTA) and Chris McKesson, John J. McMullen Associates (JJMA).

San Francisco's Bay Area Water Transit Authority (WTA) is actively developing a fuel cell powered ferry in order to move toward a zero-emissions future. The envisioned vessel will showcase the marine application of fuel cells for propulsion and provide an opportunity to gain essential operational experience. The vessel is intended to serve Treasure Island, approximately three miles from the San Francisco city front.

WTA awarded a contract to John J. McMullen Associates (JJMA) to develop design drawings for the vessel. JJMA's stated intent is to keep the points of innovation to a minimum, insofar as that is consistent with the fuel cell concept. This means that it will not develop a specialized hull design, but will instead attempt to develop a propulsion package that is compatible with a number of suppliers' "catalog" ferry designs.

Further, JJMA intends to use an off-the-shelf fuel cell in its design. Following acceptance of the design, WTA will procure the vessel in a conventional bid process, and the major fuel cell components will be owner furnished.

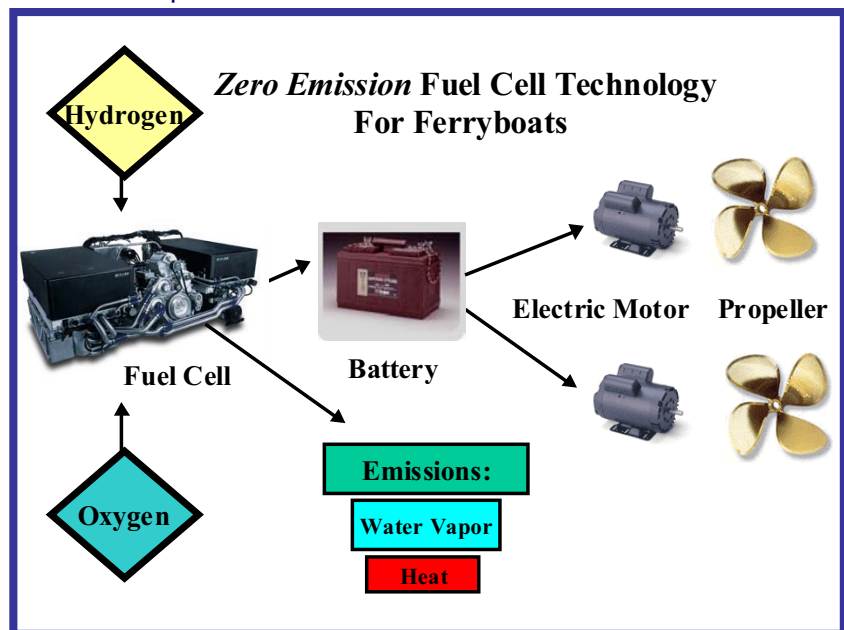
The design is focused on fuel cell "engines" being developed for use in transit buses. For example, two 200 kW bus "engines" would be sufficient to drive a 49-passenger ferry at about 12 knots, even after accounting for the weight of the system.

Another, potentially larger, issue is the matter of fuel storage. Again, following a philosophy of "minimum innovation", the current thought is to simply carry compressed hydrogen gas to fuel the cell.

As with the transit bus units, the ferry would carry a roof-mounted "tank farm" of hydrogen cylinders, amounting to some 80,000 standard cubic feet of gas. This tank farm would encompass a volume of 20 feet by 20 feet by 3 feet.

An issue not yet fully addressed is regulatory approval of a hydrogen fuel system. The U.S. Coast Guard has approved natural gas fuel for ferries in some cases, and it is hoped that the same design techniques used for natural gas would result in approval of hydrogen. In this connection, it should be noted that both gases are lighter than air and both have been carried in liquefied and compressed forms (although at present only compressed hydrogen is being considered for the ferry).

WTA's fuel cell ferry design project is scheduled for completion in early to mid 2003. At that time, WTA will hopefully be positioned to obtain funding for construction of a true zero-emission ferry and to lead the way in exploring a possible new future for ferry propulsion.





## NAVY EMISSION TEST PROGRAM

MARAD has joined forces with NAVSEA-Philadelphia in a Navy Emission Test Program. Commencing January 2003, the testing of five fuels and six emission reduction technologies (see below) will be conducted by the Ship Systems Engineering Station's Marine Engine Test Laboratory. All equipment and fuels will be tested on a reconditioned, naturally aspirated, two-stroke, 12V-71, Detroit Diesel engine.

Program objectives are to assess performance and criteria pollutants generated by the various fuels and abatement technologies under controlled laboratory conditions. Subsequently, a shipboard evaluation will be conducted to assess reliability and durability of one or two combinations of optimal technologies. Particular attention will be given to NO<sub>x</sub> and PM emissions. The engine model is very common within the workboat fleets of the Navy, Army, other federal agencies, and commercial maritime industry. Results will be disseminated to all interested fleet operators.

Fuels to be Tested				
F-76 (Similar to Diesel No. 2)	JP-5 (Military Aviation)	Synthetic (Fischer Tropsch Diesel)	Diesel (Ultra Low Sulfur)	Biodiesel (Soy Based Methyl-Ester)

Equipment to be Tested					
Fuel Catalyst Additive	Air Humidification System	Cylinder Power Assemblies	Mini-Sac Injectors	Active Regenerated Particle Filter	Centrifugal Soot Collector

The test plan incorporates a total of 25 configurations utilizing International Organization for Standardization (ISO) 8178 propulsion, generator, and auxiliary engine test cycles. Performance data will be collected in addition to emission measurements of NO<sub>x</sub>, PM, hydrocarbons (HC), carbon monoxide (CO) and opacity. Particulate matter will be broadly characterized both physically in terms of size and chemically in terms of composition.

Other partners for the testing program include the Office of Naval Research, California Air Resources Board, South Coast Air Quality Management District, Environmental Protection Agency, and Department of Energy.

POC: [robert.behr@marad.dot.gov](mailto:robert.behr@marad.dot.gov) and [daniel.gore@marad.dot.gov](mailto:daniel.gore@marad.dot.gov)

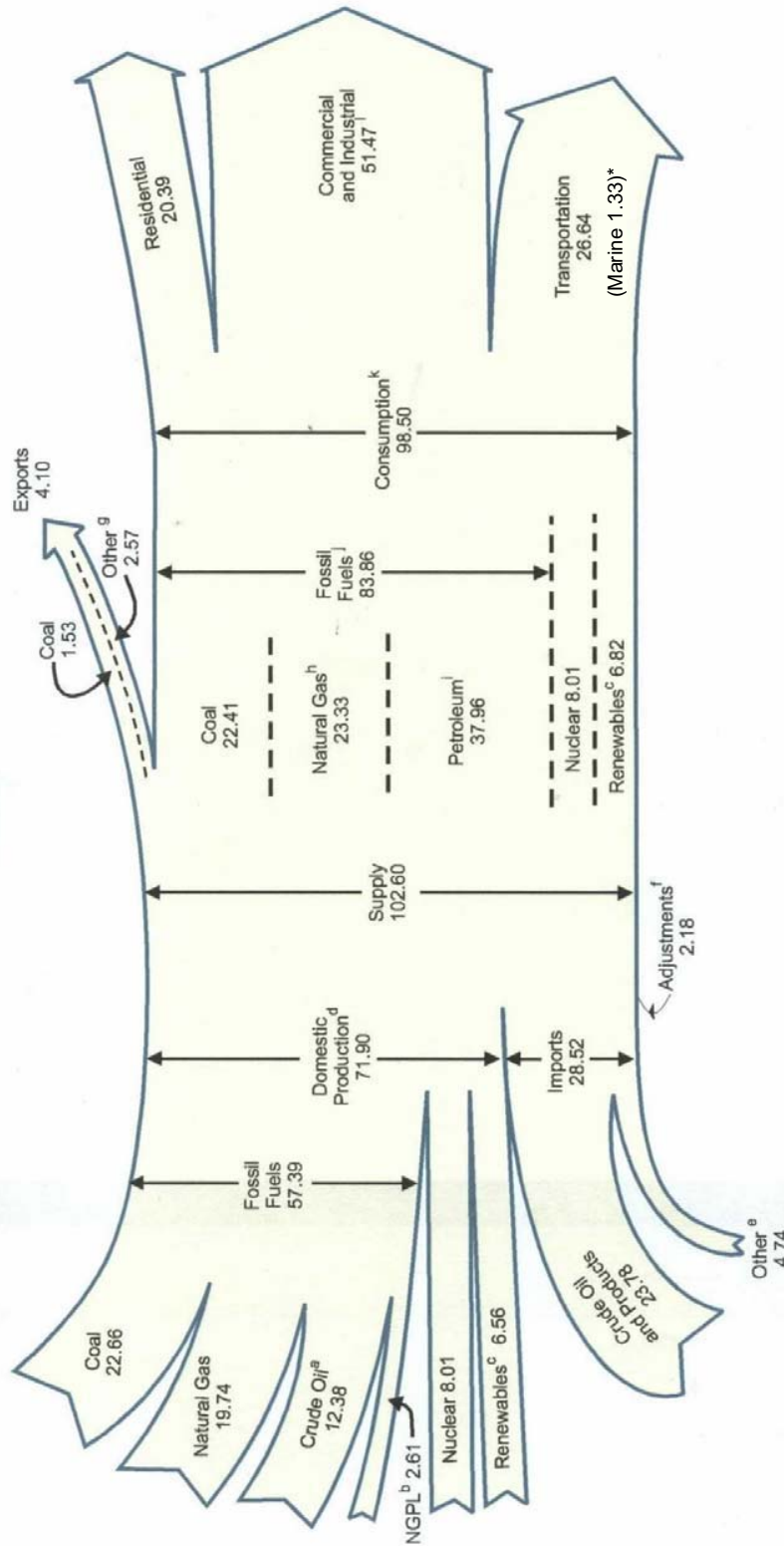
## FERRY ENGINE CONTINUOUS WATER INJECTION AND BIODIESEL TEST RESULTS

In June 2002, Blue and Gold Fleet and the San Francisco WTA released the results of emission testing conducted on the 400-passenger ferry *MV OSKI*. The *OSKI* is powered by twin two stroke, 12V-71, Detroit Diesel engines. The testing established NO<sub>x</sub> and PM emissions for baseline operation with low sulfur diesel fuel, for a 20% blend of biodiesel, for 100% biodiesel, and for a continuous water injection system with both low sulfur diesel and 100% biodiesel fuel.

The biodiesel fuel was a soy based methyl-ester type. Biodiesel is a renewable energy source that reduces greenhouse gases and particulate matter. However, biodiesel often increases NO<sub>x</sub> emissions. In order to reduce NO<sub>x</sub>, a continuous water injection system was installed to inject finely atomized water droplets in the engine's intake air system. Water injection reduces maximum combustion temperatures and consequently reduces NO<sub>x</sub> emissions.

*(Continued on page 6)*

**Energy Flow, 2000**  
(Quadrillion Btu)



<sup>a</sup> Includes lease condensate.  
<sup>b</sup> Natural gas plant liquids.  
<sup>c</sup> Conventional hydroelectric power, wood, waste, ethanol blended into motor gasoline, geothermal, solar, and wind.  
<sup>d</sup> Includes 0.06 quadrillion Btu hydroelectric pumped storage.  
<sup>e</sup> Natural gas, coal, coal coke, and electricity.  
<sup>f</sup> Stock changes, losses, gains, miscellaneous blending components, and unaccounted-for supply.  
<sup>g</sup> Crude oil, petroleum products, natural gas, electricity, and coal coke.  
<sup>h</sup> Includes supplemental gaseous fuels.  
<sup>i</sup> Petroleum products, including natural gas plant liquids.  
<sup>j</sup> Includes 0.07 quadrillion Btu coal coke net imports and 0.10 electricity net imports from fossil fuels.  
<sup>k</sup> Includes, in quadrillion Btu, 0.10 electricity net imports from fossil fuels; -0.06 hydroelectric pumped storage; and -0.14 ethanol blended into motor gasoline, which is accounted for in both fossil fuels and renewables and removed once from this total to avoid double-counting.  
 Commercial and industrial sector totals plus adjustments to avoid double-counting the amount of petroleum, natural gas, and coal that is included under both "End-Use Sectors" and "Electric Power Sector." See Tables 5.1.2d, 6.5, and 7.3.  
 Notes: • Data are preliminary. • Totals may not equal sum of components due to independent rounding.  
 Sources: Tables 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, and 2.1a-2.1f.

\*Marine transportation percentage as derived by MARAD from the Transportation Statistics Annual Report 2000.



U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION  
MARITIME ADMINISTRATION  
OFFICE OF SHIPBUILDING AND MARINE  
TECHNOLOGY

400 Seventh Street, SW  
Washington, DC 20590  
1-800-986-9678  
x61924

Phone: (202) 366-1924  
Fax: (202) 366-7197

Newsletter comments and distribution  
inquiries point of contact  
[regina.farr@marad.dot.gov](mailto:regina.farr@marad.dot.gov)

CHECK OUT OUR  
WEB SITE  
[http://www.marad.dot.gov/  
nmrec](http://www.marad.dot.gov/nmrec)

CNG — compressed natural gas  
CO — carbon monoxide  
CO<sub>2</sub> — carbon dioxide  
HC — hydrocarbons  
NO<sub>x</sub> — nitrogen oxides  
O<sub>2</sub> — oxygen  
PM — particulate matter  
SO<sub>x</sub> — sulfur oxides  
THC — total hydrocarbon

FYI

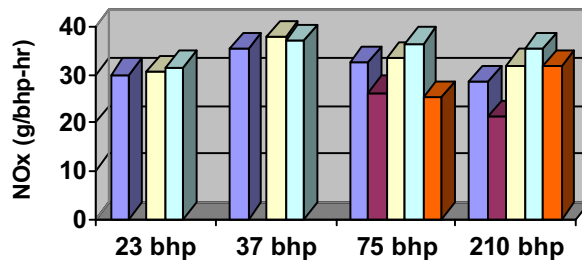
## ENERGY TECHNOLOGIES NEWSLETTER . . .

serves as a forum to convey  
timely articles of interest. You  
can find this and additional in-  
formation on our web site at  
[marad.dot.gov/nmrec](http://marad.dot.gov/nmrec)

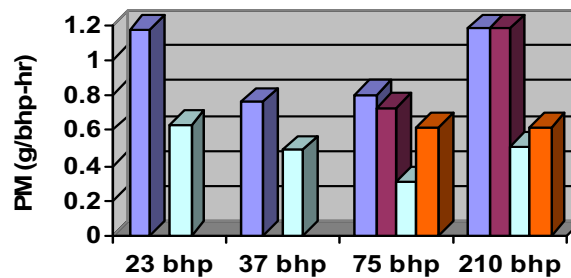
(Continued from page 4)

### Ferry Engine Test Results

The following bar charts provide brake specific NO<sub>x</sub> and PM emissions for each condition tested. At the data points tested, B20 produced a NO<sub>x</sub> increase ranging from 2-11% and the B100 increase ranged from 5-20%. The water injection system, which was only operated at higher powers, reduced NO<sub>x</sub> by averages greater than 20%. B100 generally reduced PM emissions by over 50%.



■ LS (Low Sulfur) Diesel   ■ LS Diesel w/Water Inject   □ B20 Blend  
□ B100   ■ B100 w/Water Inject



Exhaust gas composition was measured with an Enerac Model 300 portable emission analyzer. PM was measured by weighing the accumulation of particulate on a quartz filter with no dilution tunnel. Formal fuel performance tests were not conducted, but the operator stated there was no noticeable change in consumption when the continuous water injection system was applied.

Blue and Gold, a ferry operator in San Francisco Bay, managed the project with MARAD as a co-sponsor. The water injection equipment was purchased from MA Turbo/Engine Ltd. of Vancouver, British Columbia. The biodiesel fuel was purchased from World Energy, Inc. Testing and test reports were by Walther Engineering.

POC: [daniel.gore@marad.dot.gov](mailto:daniel.gore@marad.dot.gov)

### Technology Demonstrations

We welcome the opportunity to publish on our web site the status and/or results of demonstration projects in which you are engaged. If you are willing to share such information with our readers, please contact MARAD's Office of Shipbuilding and Marine Technology.

POC: [regina.farr@marad.dot.gov](mailto:regina.farr@marad.dot.gov)

## 7. MARAD\_toDOT: Maritime Hydrogen and Fuel Cell Initiatives



# Maritime Hydrogen and Fuel Cell Initiatives

Presented to DOT Hydrogen Working Group

October 7, 2003

by: Daniel J. Gore

Program Engineer

Office of Shipbuilding and Marine Technology

Maritime Administration



# Presentation Contents



- “Why a marine Energy Technologies program?”
- Brief overview of the program plan
- Fuel cell review
- Maritime hydrogen and fuel cell projects
  - DOT Projects - Merchant Marine Academy Lab, Treasure Island Fuel Cell Ferry, ARIZONA War Memorial Passenger Shuttle, Sodium Borohydride Water Taxi, and Marine Power Generation Regulatory Compliance Testing
- Conclusion and discussion
- Navy fuel cell projects (if time allows)

# WHY A MARINE ENERGY TECHNOLOGIES PROGRAM?

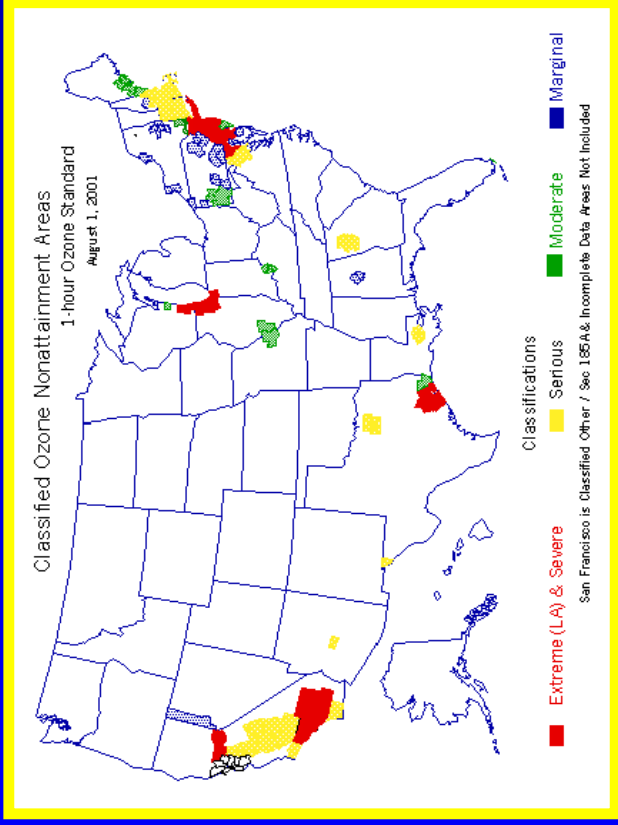


# “Why a Program?”

## Recent Emission Pressures



- Maritime in spotlight
- MARPOL Annex 6
  - NOx and Sulfur limits
  - Forecasted to be ratified in 2004
- EPA regulations
  - New category 1, 2 engines (1999)
    - NOx, HC, CO, and PM
  - New category 3 engines (2002)
- CARB regulation
  - Ferries use highway diesel
- Ozone Nonattainment Areas
- Public pressure

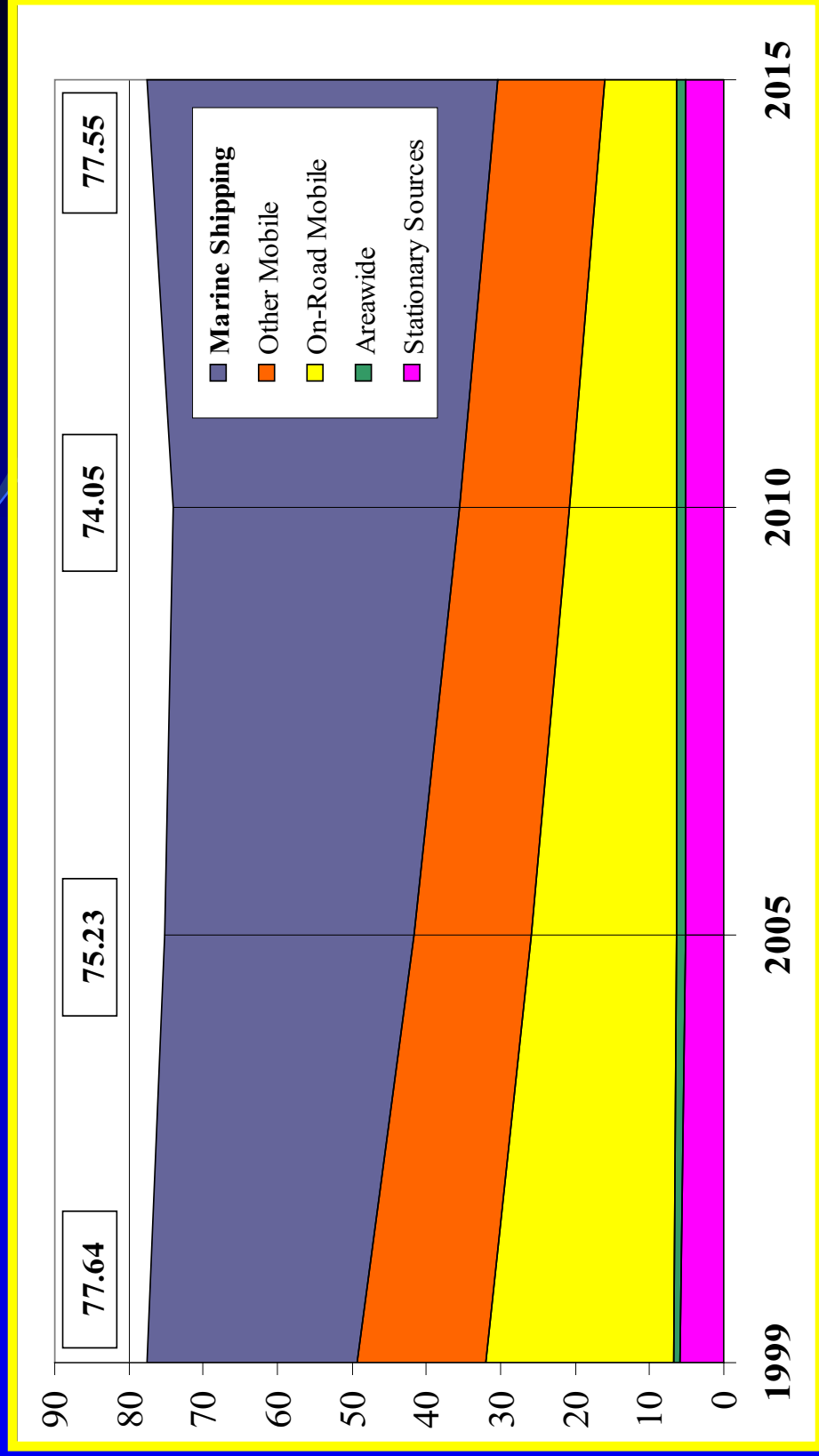


## U.S. Ozone Nonattainment Areas



# Why a Program?

## Growing Marine Emissions Santa Barbara NOx Example



NOx Tons per Day

Slide Courtesy of SBCAPCD

# PROGRAM OVERVIEW



# Overview

## Program Objectives



- Investigate and demonstrate the potential for new technologies and fuels to improve marine power plant efficiency and to reduce air emissions
- Disseminate energy technology and related policy information to the maritime community



# Overview

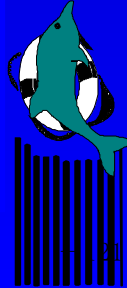
## Program Plan



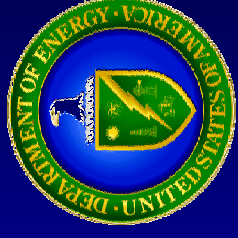
- **Baseline performance testing**
  - Existing vessel data and measurement techniques
- **Diesel retrofits**
  - Emulsified fuel, water injection, SCR, particulate traps
- **Alternative fuels**
  - Natural gas, biodiesel, hydrogen, synthetic diesel
- **Advanced technologies**
  - Fuel cells, high efficiency gas turbines
- **Supporting studies**
  - Technology evaluations, incentives and emission trading
- **Industry outreach**
  - Newsletters, conferences/workshops, website, and presentations

**U.S. COAST GUARD**

# Overview Partners



**Federal Transit Administration**



**CASRM**

Center for Advanced Ship Repair and Maintenance





## Overview

### Some Recent Activities

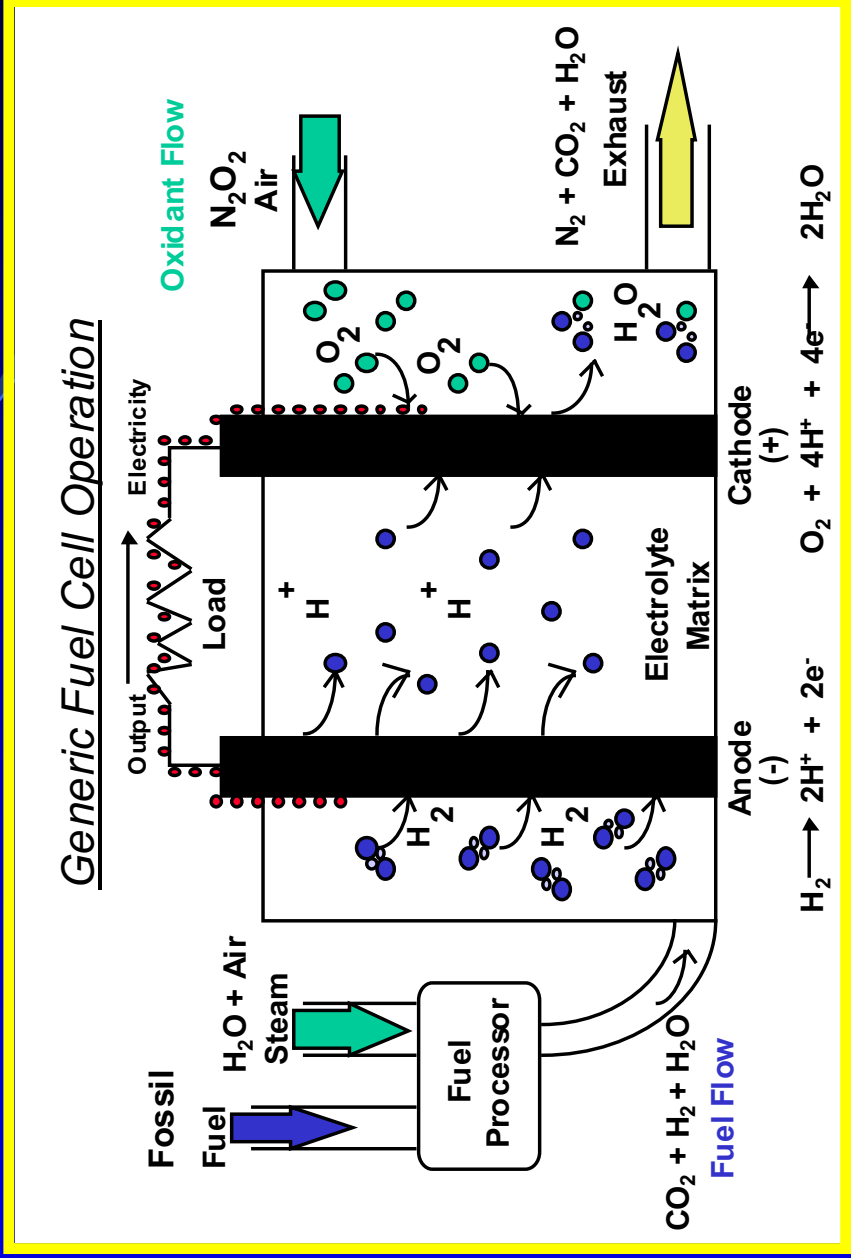


- Large West Coast Vessel Retrofit Project -
  - Sponsors are Port Authorities and California regulators
  - Agreement with Matson Navigation, dialogue with Maersk Lines
- Ferry Retrofit Projects -
  - San Diego commercial ferry
  - New York City commercial ferries
  - Staten Island ferry
- Studies -
  - Emission Measurement Protocols
  - Marine Engine and Emission Inventory Literature Search
- Developing Project - Transport Canada Short Sea Shipping<sup>10</sup>
  - Exploring agreement to measure emissions and compare to trucks

# Fuel Cell Review



# Fuel Cell Review Generic Operation







# Fuel Cell Review

## Potential Maritime Types



	Electrolyte	Cell Temp	Efficiency
Phosphoric Acid (PA)	Liquid	450oF	38 - 40%
Molten Carbonate (MC)	Liquid	1200oF	45 - 55%
Tubular Solid Oxide (SO)	Solid	1800oF	45 - 55%
Planar Solid Oxide (SO)	Solid	1800oF	45 - 55%
Proton Exchange Membrane (PEM)	Solid	180oF	38 - 40%



# Fuel Cell Review

## Hydrogen Project Issues



- Hydrogen origin
  - trucked to site, local natural gas reformer, local electrolysis, high cost compared to other fuels
- Fueling station
  - capital expense, fuel storage, fire marshal, and operation
- Vessel storage
  - compressed, cryogenic, hydride, fossil fuels
- Vessel safety
  - USCG regulations, ABS (classification society) rules
  - vessel operators may perceive danger (“kaboom” factor)

# Maritime Hydrogen and Fuel Cell Projects

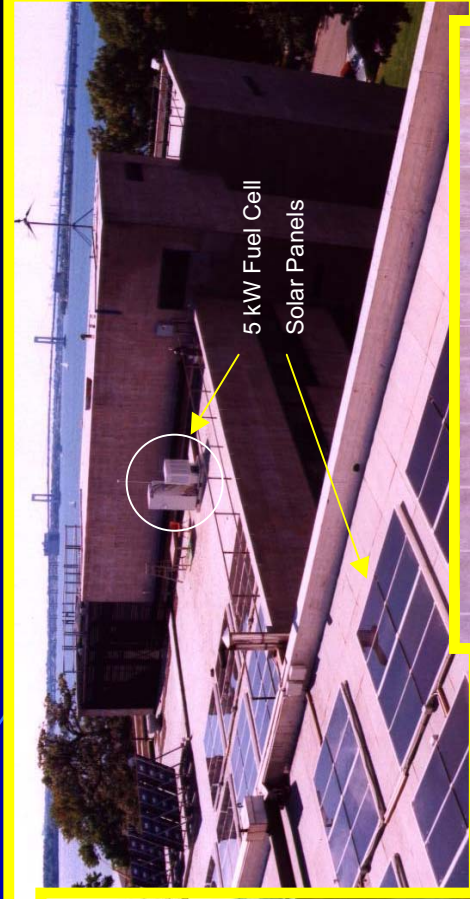
- Project
- Visuals
  - Description and objectives
  - Partner and funds
  - System details and challenges
  - Future goals and schedule



# Hydrogen & Fuel Cell Projects USMMA Laboratory



Future Fuel Cell Boat



5 kW Fuel Cell  
Solar Panels



.9 kW Wind Generator



Electric Cart



Cadets and Hydrogen Bottles



# Hydrogen & Fuel Cell Projects USMMA Laboratory



- Description
  - Academy (Kings Point, NY) has developed a renewable energy transportation laboratory including:
    - 5 kW hydrogen PEM fuel cell system
    - 10 kW and 1.4 kW photovoltaic systems
    - 1 kW wind generator
    - Batteries
    - Hydrogen generators
    - Compressed hydrogen storage (2400 psi)
    - Vehicle battery chargers
    - Control systems



# Hydrogen & Fuel Cell Projects USMMA Laboratory

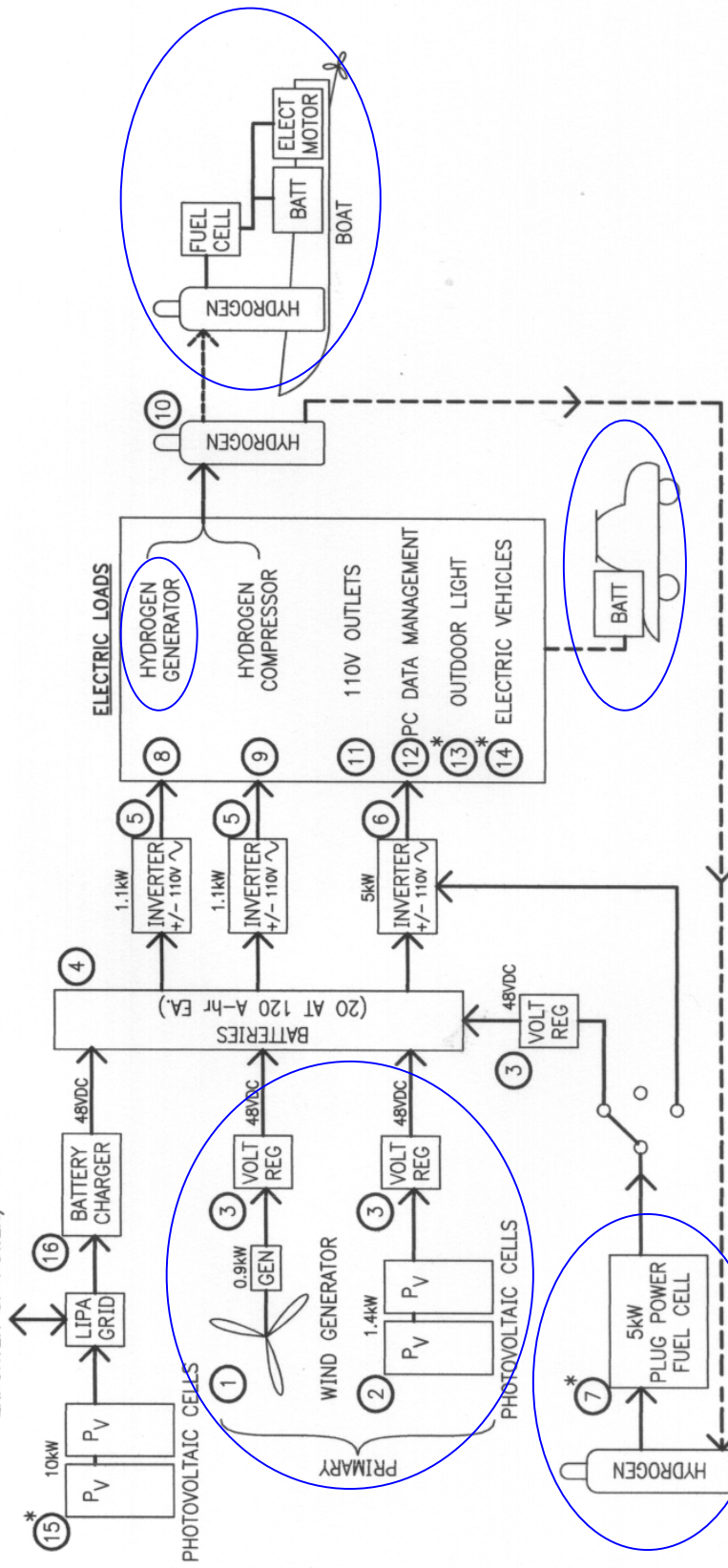


- Objectives
  - Develop zero emission, renewable energy, transportation center
  - Educate next generation transportation engineers
  - Replace all public work vehicles with electric, rechargeable type
  - Retrofit boat with hydrogen and PEM fuel cell
- Partners and cost sharing to date
  - Long Island Power Authority (LIPA) - \$80,000 funds and services
  - Plug Power, Inc - \$25,000 in equipment and services
  - USMMA - \$80,000 funds plus student labor

REV	DESCRIPTION	DATE	APP'D

## ALTERNATIVE ENERGY LABORATORY AT KINGS POINT

TO/FROM LONG ISLAND (THE USMMA ALTERNATIVE ENERGY SYSTEM IS A NET EXPORTER OF POWER)



\* NEW TO SYSTEM  
THE 5kW FUEL CELL CUTS IN WHEN SOLAR/WIND POWER IS INSUFFICIENT.

**DOUG BROWN**  
USMMA, Kings Point, NY  
516-773-5555  
brown@optonline.net

**U.S. Merchant Marine Academy**  
Kings Point, New York

Alternative Energy Project

**BLOCK DIAGRAM**

DESIGNER: J. Brown	DATE: 25 Sept 03	REV: A
CHECKED: J. Brown	SCALE: N.T.S.	SHEET: 1 of 1



# Hydrogen & Fuel Cell Projects USMMA Laboratory



- **Challenges**
  - Primarily funding, staffing and getting the word out
- **Future goals**
  - Replace 5 kW Plug Power fuel cell with new P.P. Gencore sys.
    - Commercial backup power market, need \$17,000
  - New 10 kW wind generator system
    - LIPA to fund \$22,000, need \$10,000 more
  - New 10 kW photovoltaic system for public works building
    - LIPA to fund \$50,000, need \$22,000 more
    - New electric carts to replace leased trucks (payback two years)
  - New PEM electrolyzer (for making hydrogen) - need \$87,000
  - Partner, partner, partner





# Hydrogen & Fuel Cell Projects Treasure Island Ferry



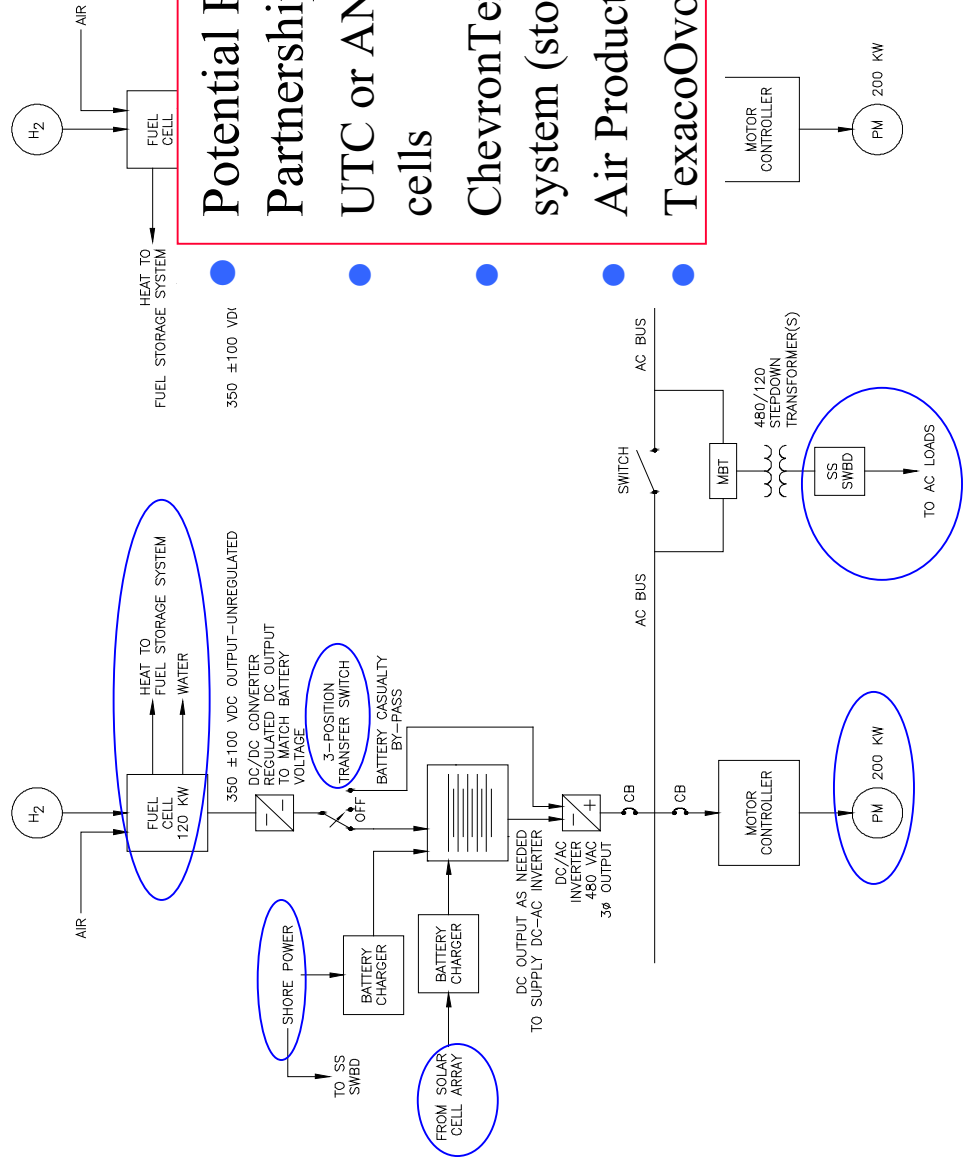


# Hydrogen & Fuel Cell Projects Treasure Island Ferry



- **Description** - S.F. Bay Water Transit Authority commissioning
  - Design and build a 49 - 100+ passenger ferry
  - 400 kW power from fuel cell, solar, and battery
  - Solid hydride for hydrogen storage
  - Compressed hydrogen delivered to site by truck
  - Minimum 12 knot speed
- **Objective**
  - Build commercial zero-emission ferry for non-attainment area
  - Expose potential market for fuel cell technology
  - Allow Treasure Island developer to operate as commuter ferry
  - Fuel vessel twice a day

# Hydrogen & Fuel Cell Projects Treasure Island Ferry



- Potential Public / Private Partnerships
- UTC or ANUVU - PEM fuel cells
- ChevronTexacoOvonic - H2 system (storage)
- Air Products - H2 fuel
- TexacoOvonic - Batteries

BAWTA  
H<sub>2</sub> FUELED  
FUEL CELL POWERED FERRY  
ELECTRICAL SYSTEM BLOCK DIAGRAM  
02/24/03



# Hydrogen & Fuel Cell Projects Treasure Island Ferry



- Partners and funding
  - Phase I feasibility design
    - FHWA \$100K, designer is JJMA
  - Phase II detail design and construction
    - FHWA \$2.5M, via FTA region office
    - WTA \$625K local share
- Challenges
  - Funding tight for design development and construction
  - Trade off for power distribution and fuel storage complicated
  - Future operating contract still to be negotiated



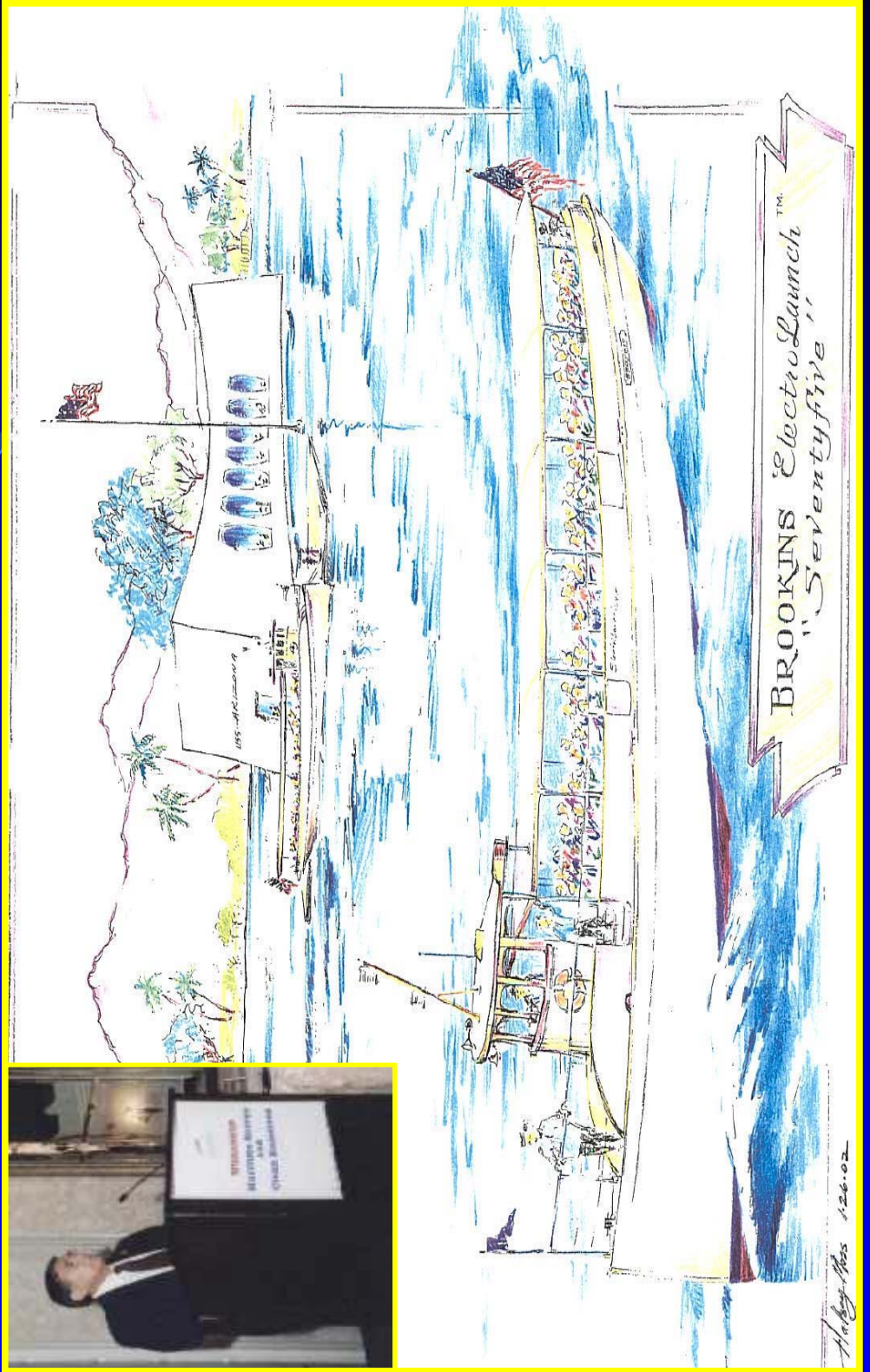
# Hydrogen & Fuel Cell Projects Treasure Island Ferry



- Future goals and schedule
  - Sept 2003 - Federal construction money available
  - Apr 2004 - Boat building RFP “hits the street”
  - Sept 2004 - Construction contract awarded
    - Power systems to be government furnished
  - Sept 2005 - Fuel cell ferryboat sea trials



# Hydrogen & Fuel Cell Projects ARIZONA War Memorial Shuttle





# Hydrogen & Fuel Cell Projects ARIZONA War Memorial Shuttle



- Description - Hawaii Electric Vehicle Demonstration Project (HEVDP) managing project with following conceptual features:
  - Design and build a 149 passenger water shuttle
  - Dual 240 kW propulsion system with 75 kW fuel cell generator
  - 5000 psi hydrogen fuel storage system
  - Advanced 128 kWhr battery system with energy management
- Objective
  - Build zero-emission ferry to serve ARIZONA War Memorial
  - Replace existing aging diesel shuttles
  - Navy to operate 362 days/year, 10 hours/day
  - Fuel once a day (hydrogen from propane or electrolysis)
  - First vessel for demo and potentially more



# Hydrogen & Fuel Cell Projects ARIZONA War Memorial Shuttle



- Partners and funding
  - Phase I feasibility design
    - RSPA AVP program, designer is Brookins Boatworks of Hawaii
  - Phase II detail design and construction
    - FTA \$4.8M (TEA 21) via Office of Naval Research regional office
  - Other partners
    - National Park Service
    - State of Hawaii
    - Pearl Harbor Naval Station
    - Hawaii-based boat and propulsion system manufacturers
- Challenges
  - Design integration
  - Fuel supply and station





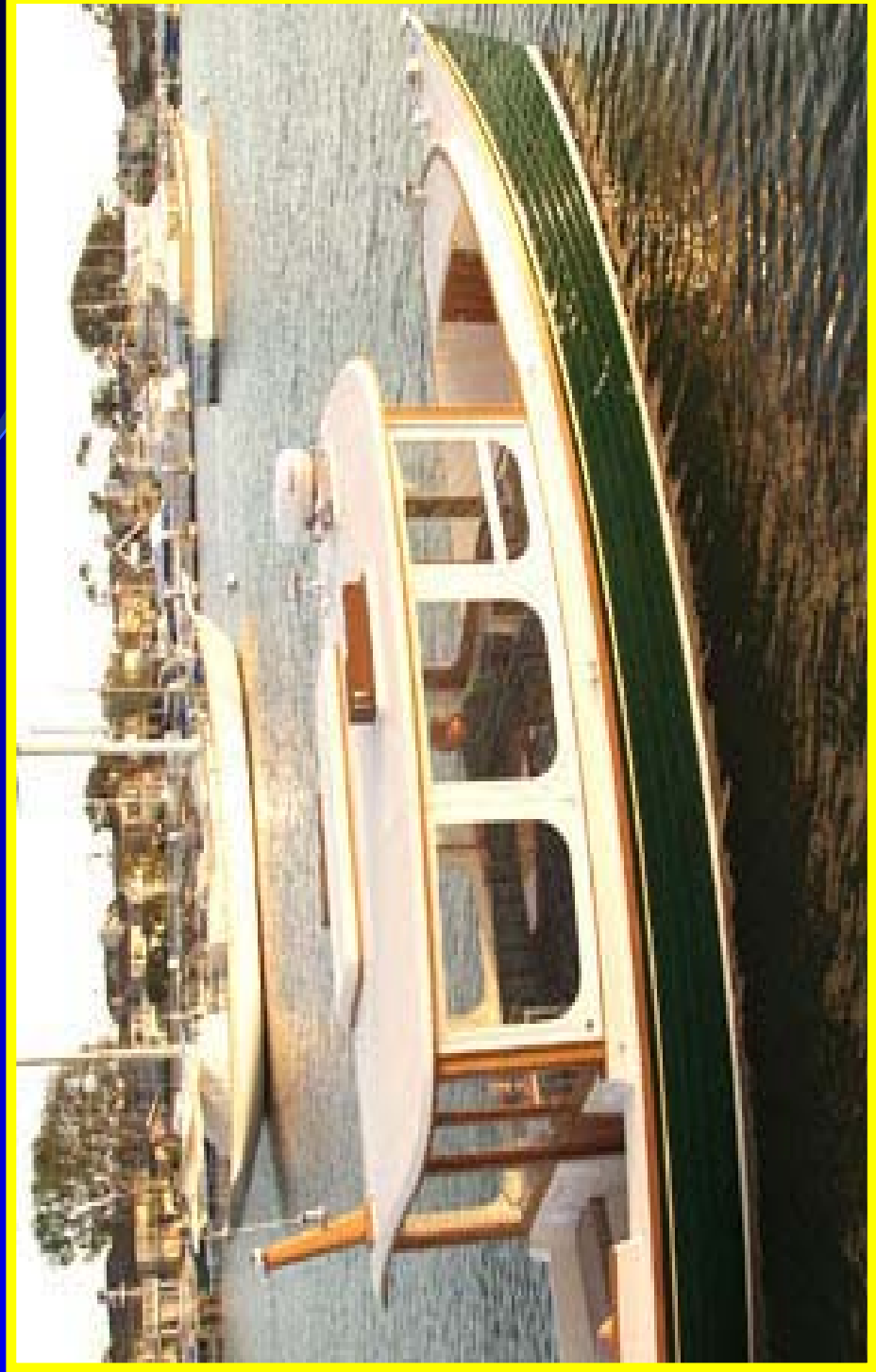
# Hydrogen & Fuel Cell Projects ARIZONA War Memorial Shuttle



- Goals and schedule
  - DOT \$4.8M obligated in September 03
  - Anticipate design completion and first boat in water one year from contract award
  - Build and operate three additional vessels
  - Four vessels cost estimated at \$10M



# Hydrogen & Fuel Cell Projects Sodium Borohydride Water Taxi





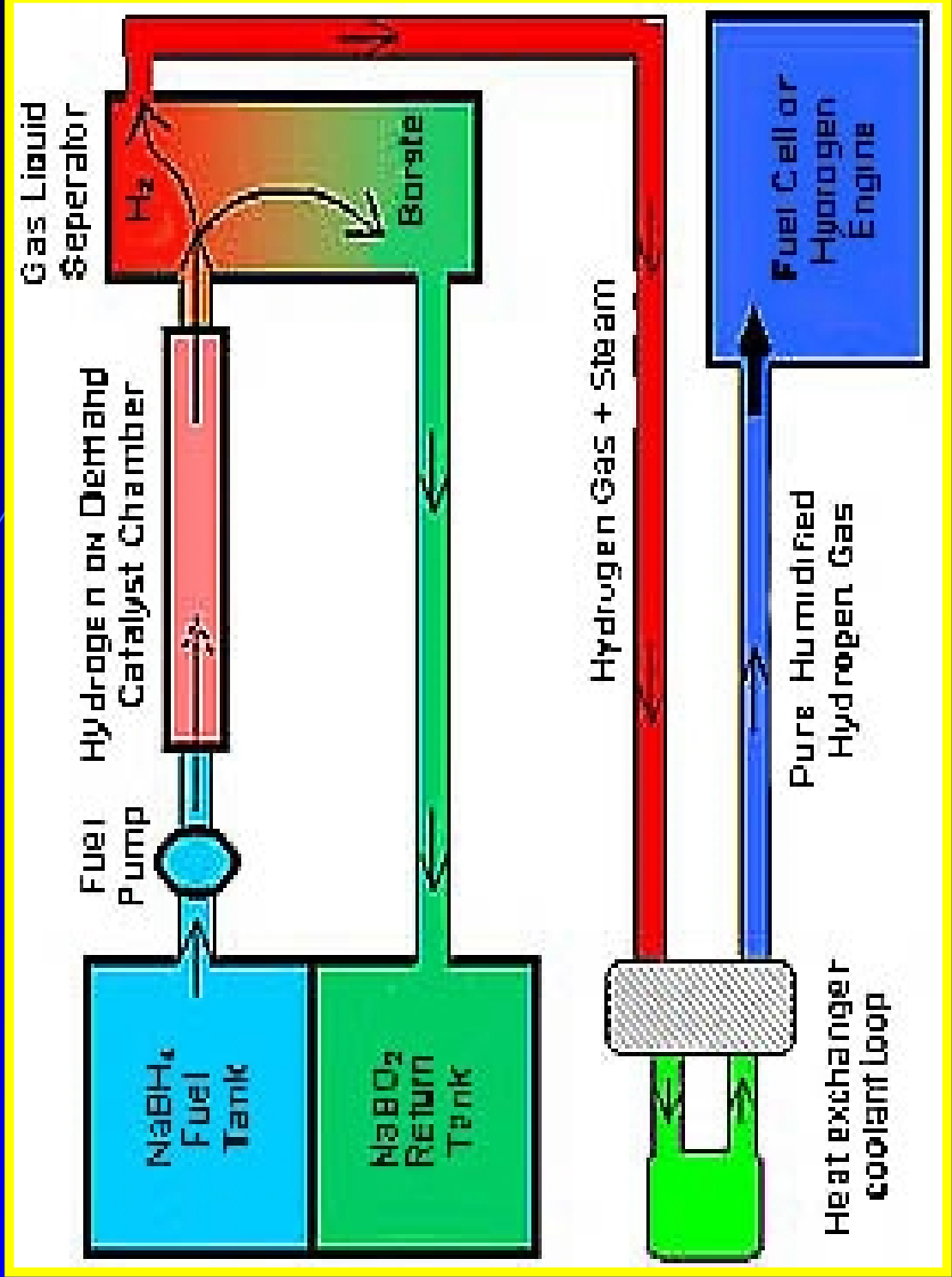
# Hydrogen & Fuel Cell Projects Sodium Borohydride Water Taxi



- **Description - Duffy Electric Boats & Seaworthy Systems building:**
  - 22 passenger water taxi
  - 15 kW battery propulsion system w/3kW PEM fuel cell
  - Uses liquid “Hydrogen on Demand” sodium borohydride system
  - 8.5 knot maximum speed
- **Objective**
  - Demonstrate viability of recyclable liquid hydride
  - Operate vessel 10 - 12 hours per day in commercial service
  - Use liquid hydride fuel cell to extend vessel endurance to 21 hours
  - Explore market opportunities- sensitive area (Newport Beach, CA)



# Hydrogen & Fuel Cell Projects Sodium Borohydride Water Taxi





# Hydrogen & Fuel Cell Projects Sodium Borohydride Water Taxi



- Partners and funding
  - Phase I feasibility study
    - \$75,000 from Center for Commercial Deployment of Transportation Technologies (CCDOTT) Program (California State University, MARAD and NAVSEA)
  - Phase II detail design and construction
    - \$200,000 ? From CCDOTT, Seaworthy Systems is designer
    - Cost share (boat construction) from Duffy Electric Boats
    - Millenium Cell Sodium Borohydride system & ANUVU PEM Fuel Cell
- Challenges
  - No infrastructure for sodium borohydride
  - Sodium borohydride price/gallon is very high



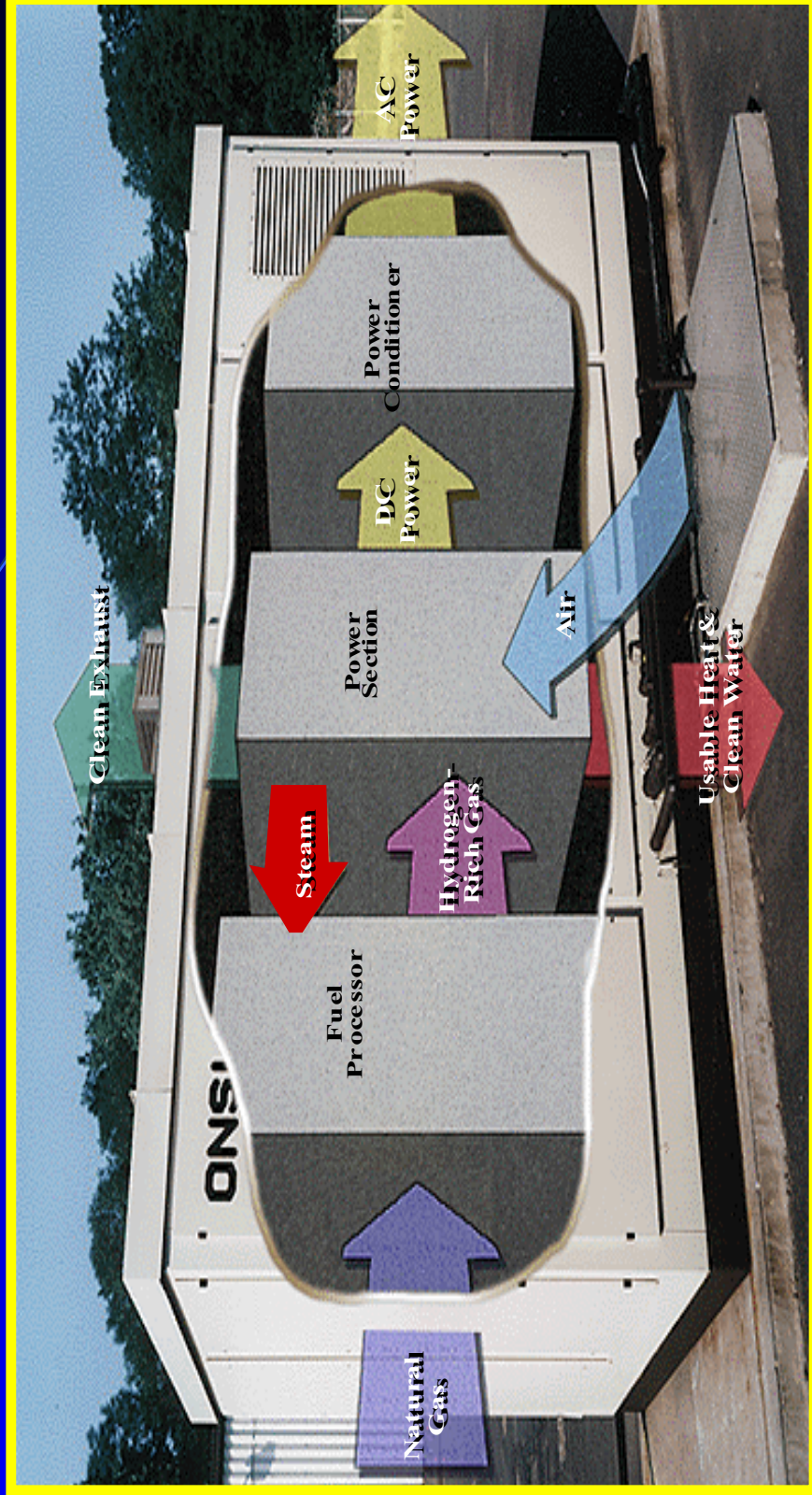
# Hydrogen & Fuel Cell Projects Sodium Borohydride Water Taxi



- Goals and schedule
  - Vessel constructed by September 03
  - Trials and endurance operation by October 03
  - Phase III “one year” operation commences soon
    - Duffy Boats to operate water taxi with fuel subsidy from South Coast Air Quality Management District



# Hydrogen & Fuel Cell Projects Power Generation Reg. Compliance

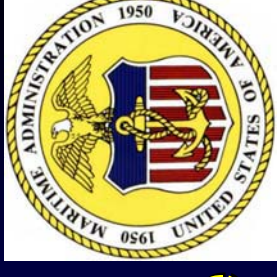


Cut-away View- 200 kW Phosphoric Acid

Fuel Cell Plant; Natural Gas Fueled



# Hydrogen & Fuel Cell Projects Power Generation Reg. Compliance



- Description - SurePower Fuel Cell Power Plant includes:
  - Two 200 kW phosphoric acid fuel cells
  - Fly wheel power storage for load increases
  - Necessary AC to DC and DC to AC power inversion controls
- Objective
  - Prove Fuel Cell System can meet marine regulations (USCG, ABS, IEEE) for power generation; specifically:
    - Voltage regulation
    - Frequency regulation
    - Parallel operation
- Partners and funding
  - MARAD \$25,000 and SurePower \$50,000 cost share





# Hydrogen & Fuel Cell Projects Power Generation Reg. Compliance



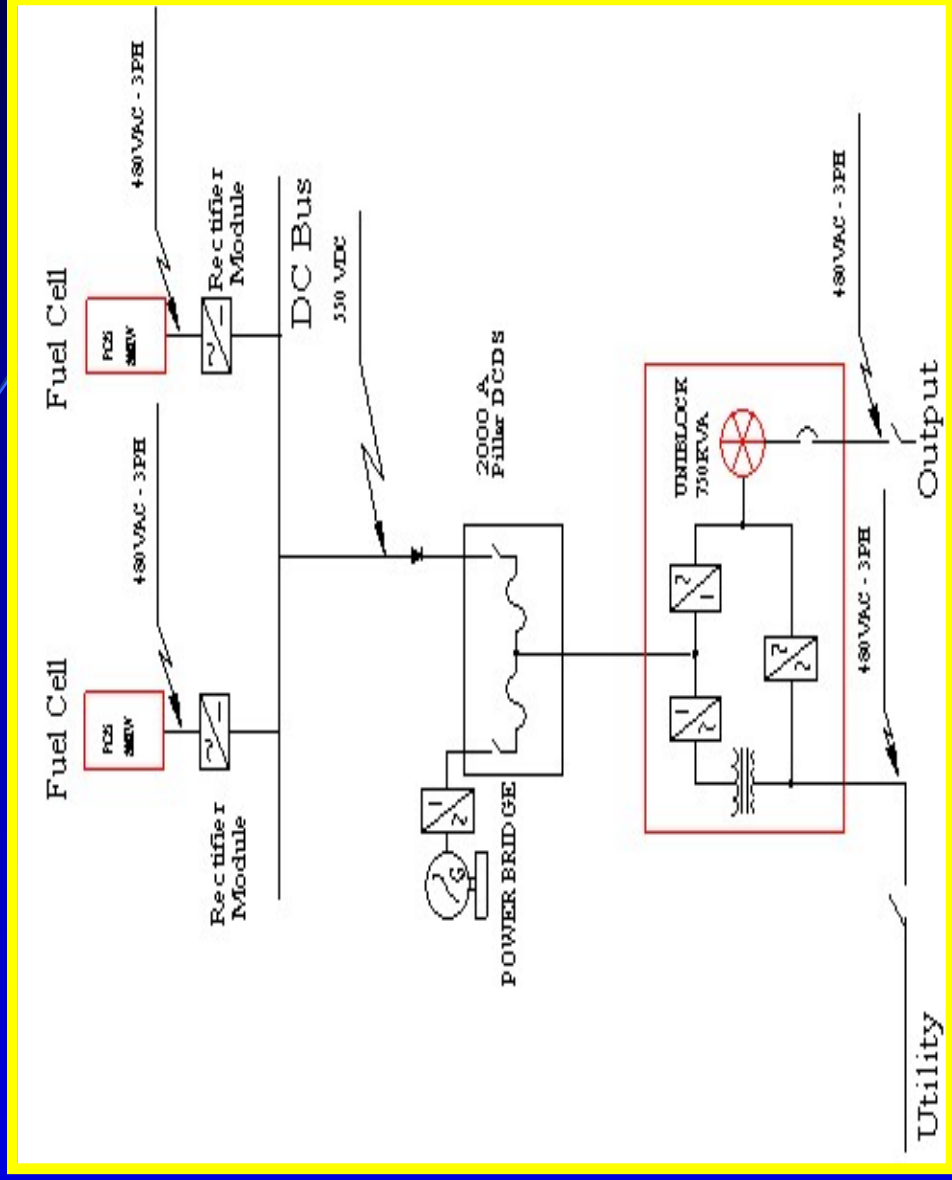
**The Challenge!  
The Fuel Cell Is Not  
a Stiff Generating  
\* Source**

- Minimal fault clearing current
- Limited step load capability
- Limited ability to handle transients
- Minimal load unbalance capability
- No over load capacity
- Can't Black Start

\* Fuel Cell with on board reformer



# Hydrogen & Fuel Cell Projects Power Generation Reg. Compliance



Power System Schematic



# Hydrogen & Fuel Cell Projects Power Generation Reg. Compliance



- Results
  - System successful complied with all regulations
  - Efficiency penalty caused by extra power control equipment

# Conclusion and Discussion



## Conclusions and Discussion



- USMMA Renewable Energy Transportation Lab is impressive and worthy of MARAD/DOT support
  - Action - Seek partnership with DOT Center for Climate Change. Ideal greenhouse gas reduction laboratory.
  - Action - Assist USMMA in marketing achievements
- Low speed ferries in sensitive environments are well suited for hydrogen and PEM fuel cell applications
- High visibility projects in Hawaii and San Francisco Bay are funded by various DOT agencies
  - MARAD requested supportive funding in 2005 budget
  - Does DOT collectively wish to more formally advertise?

# Navy Projects

- 625 kW Molten Carbonate Ship Service Fuel Cell Plant
- Fuel Processor for 500 kW PEM Fuel Cell



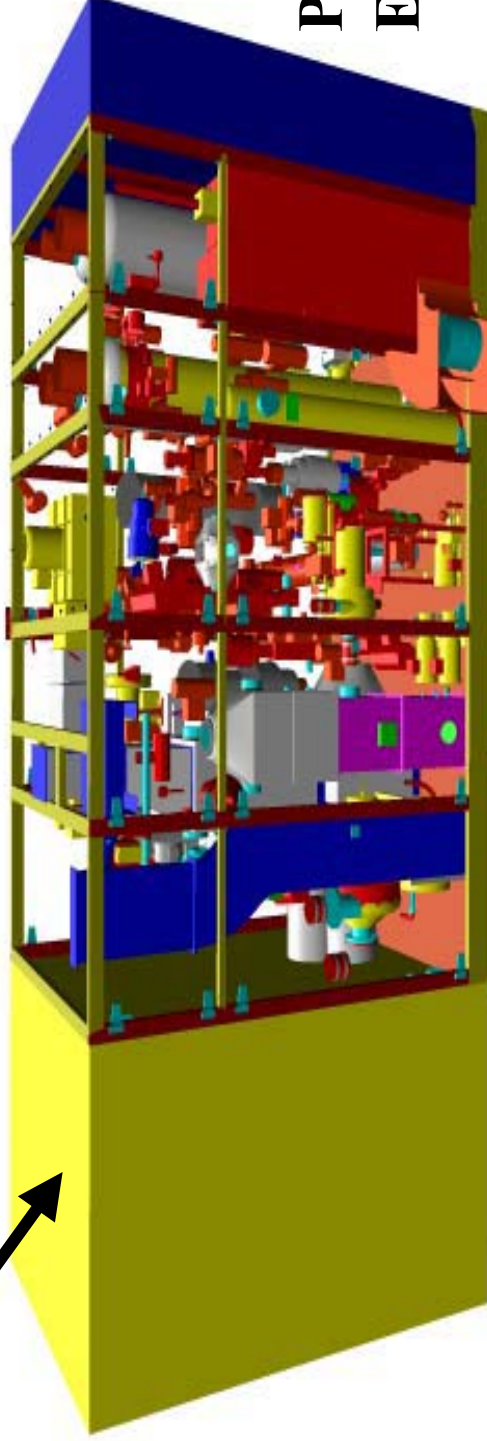
# NAVY 625kW Molten Carbonate Ship Service Fuel Cell System



Fuel Cell



Diesel Fuel Processor



Power  
Electronics

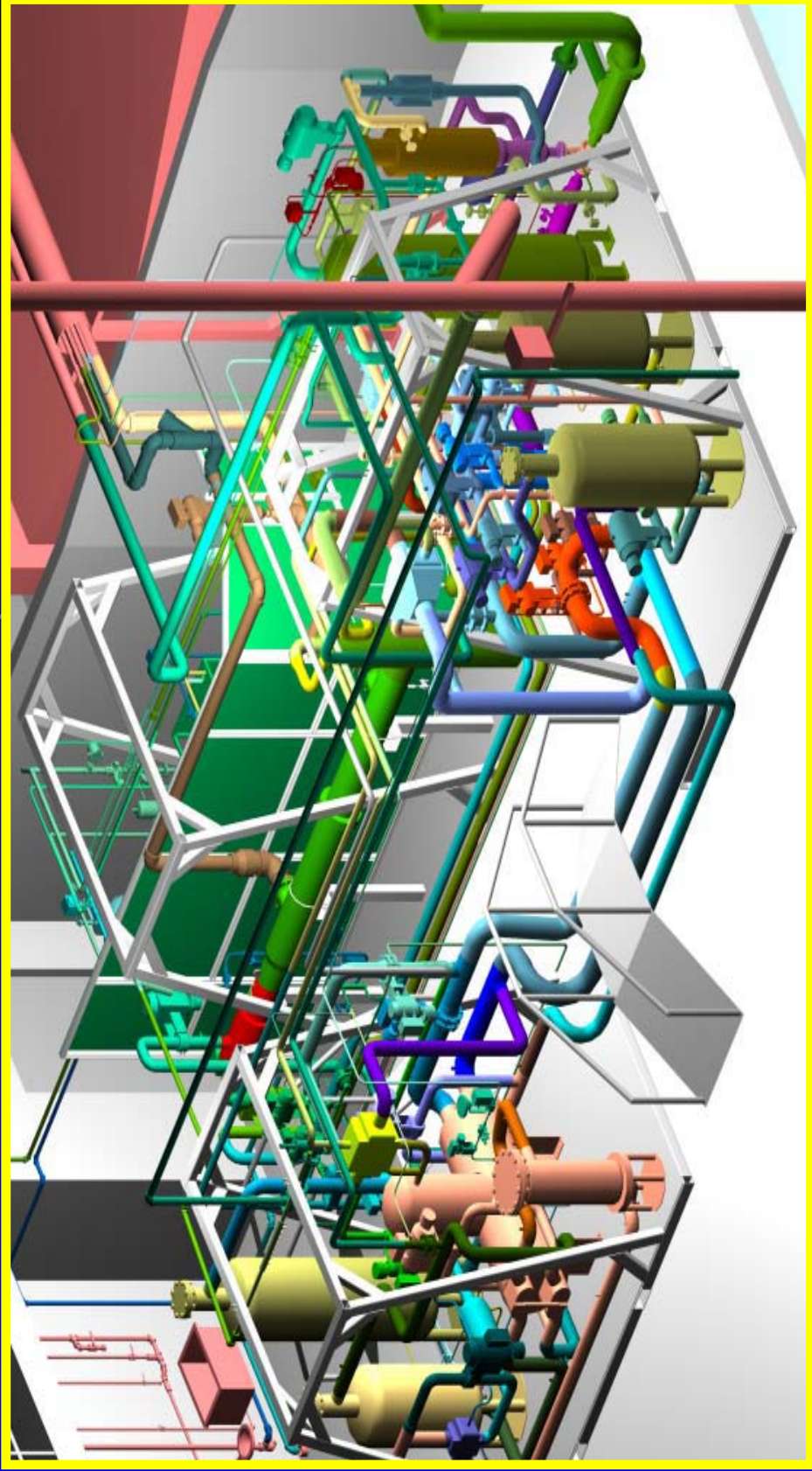
26.5' x 8.3' x 11'

*53% Fuel-to-Electrical Efficiency*

Land Based Demo in FY 04



**NAVY**  
**500kW Integrated Diesel Fuel Processor**  
**for PEM Ship Service Fuel Cell**



**Land based Demo in FY 04**

**PEM = Proton Exchange Membrane**





# Navy Shipboard Fuel Cell Program Program Timeline/Transition

