

# クリーンエネルギー利活用の現状と水素エンジン漁船開発の背景

江副 覚<sup>1†</sup>, 高橋昂大<sup>2</sup>

## Activity in Utilizing of Clean Energy and Background of Development of Fishing Boat with Hydrogen Combustion Engine

Satoru Ezoe<sup>1†</sup> and Kodai Takahashi<sup>2</sup>

**Abstract** : In Japanese fishery industry, there are some fatal problems to have to improve such environmental problems as global warming and changes in ecosystem or such the price rising of fuel oils as pressing fishery management.

If the global warming progresses, the effects of disturbing ecosystem and environmental impact on the marine living things may increase. The exhaust of carbon dioxide that might be induced by the economic human activity brings greatly global warming. One factor of global warming is bringing about by burning the fossil fuel in transportations of vehicles or vessels, etc.

The fossil oils of about 40 percent have been utilized for transportations, and then it requires immediately reducing the emission of green house gases.

Also, the development of new fuels alternating to fossil fuels is required to reduce the emission of carbon dioxide and to correspond to the rise of a rapid price of fossil fuel.

Now, hydrogen gas is the one from regenerating and recycling energy resource and also it may be a ultimate clean energy, because it emits only vapor water when it generates energy, and it is generated by electroanalysis using natural energy such as wind power or photovoltaic energy, etc.

In this paper, it was researched worldwide clean energy projects demonstrating in Japan, EU countries, USA, Canada, etc. and they were summarized.

Furthermore, it was discussed in the background of fishing boats with hydrogen combustion engine and the approaching. Conclusively, it was suggested that the size suitable for the fishing boat with hydrogen engine was the type of coast fishing boat under 5 gross tons.

**Key words** : Hydrogen, Global warming, Alternate fuel, Hydrogen project, Fossil fuels

### はじめに

現在わが国の水産業には、地球温暖化に代表される環境問題と水産経営を圧迫している燃油高騰の問題がある。

地球温暖化が進行すると、海洋生物の生態系や生育環境への影響が大きくなる。地球温暖化には二酸化炭素の排出が大きく関わっていて、これは人類の経済活動によるものが大半を占める。温暖化を促進させる主因の一つである二酸化炭素は、化石燃料の燃焼によって発生する。現在、全世界で使用されている化石燃料の約4割は、自動車や船舶等の輸送機械に使われているので、その削減が急務の課題

である。自動車等の陸上輸送分野では、二酸化炭素の排出を減少させるため化石燃料にかわる新しい燃料の開発が進んでいるが、世界的な海上物流を担う船舶への開発は遅れているとともに、研究開発を行う機関も少ない。また最近の発展途上国の経済発展と石油への供給不安から燃油価格が高騰して、これが水産業者や漁船漁業者の経営を圧迫している。

これらの解決のためには、二酸化炭素を排出しない再生可能な代替燃料の開発が求められる。検討されている代替燃料には種々あるが、水素は燃焼させても水しか発生しない究極のクリーンエネルギーとして、また再生可能な循環

2007年12月10日受付。Received December 10, 2007.

1 水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

2 水産大学校水産学研究所 (Graduate School of Fisheries Science, National Fisheries University)

† 別刷り請求先 (Corresponding author) : ezoe@fish-u.ac.jp

型のエネルギーとして注目を集めている。

そこで、世界的に進められている水素エネルギー利活用の現状、すなわち地球温暖化の問題点、燃油価格の動向、水素の生成から応用までの状況、ならびに、船舶への導入状況、また現在の漁船の現状について調査した。そして、水素エンジン漁船を実用化するための、背景と現状についてまとめたので報告する。

## 地球温暖化防止と代替燃料の検討

### 地球温暖化と化石燃料

1700年代に始まった産業革命以降、産業の発展とともに人類は石油、石炭といった化石燃料の大量消費を行ってきた。

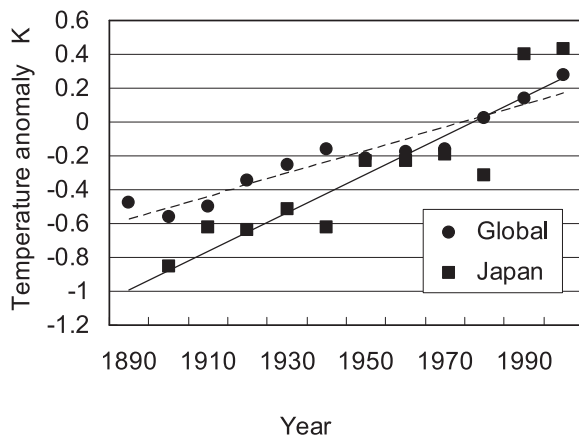


Fig. 1. Changes in annual average temperature at Japan or at world

た。これにより様々な環境問題が発生しており、地球温暖化もそのうちの一つである。日本においては年平均気温がここ100年で約1K (1℃) 上昇しており、世界全体を見ても年間の平均気温は上昇の傾向にある<sup>1)</sup>。その様子をFig. 1に示す。温暖化により起こる影響は多岐にわたり、生態系への影響、異常気象による農業生産や水資源、海洋・沿岸域、健康などへの影響が予測されている。温室効果ガスは、地球から放出される赤外線の一部を吸収する特性により大気を暖め、吸収されない赤外線は宇宙空間に放出される。この収支バランスにより地球の気温は平均で約288K (15℃) 前後に保持されてきたが、最近の温暖化は、温室効果ガスが多量に排出されたことからこのバランスが崩れた結果引き起こされている<sup>2)</sup>。

温室効果ガスには様々な種類があり、それにより温暖化に与える影響は変化する<sup>3)</sup>。温暖化に及ぼす影響は、温室効果ガスの温暖化係数と排出量、すなわち温暖化寄与度<sup>\*1</sup>から求められる<sup>4)</sup>。Table 1に、温室効果ガスの温暖化係数と温暖化寄与度<sup>5)</sup>を、またその排出量の推移をFig. 2に示す。二酸化炭素の排出量が極端に多いことがわかるとともに、ほかの温室効果ガスの排出量は全体的に減少しているにもかかわらず、二酸化炭素の排出量は最近の15年間増加していることがわかる。また、温室効果ガスの中では、二酸化炭素の温室効果係数は小さいにもかかわらず、排出量が多いので、温暖化寄与度は最も大きくなり、温暖化に与える影響は大きい。2005年(平成17年)のわが国では、温室効果ガスの中で二酸化炭素の占める温暖化寄与度は95%となる (Table 1参照)。

Table 1. Type and property of green house gases

Green house gas		Global warming potential	Amount of emission (Mton-CO <sub>2</sub> )	Contribution to global warming in Japan (%)
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	1	1293.5	95.1
Methane	CH <sub>4</sub>	21	24.1	1.8
Dinitrogen monoxide	N <sub>2</sub> O	310	25.4	1.9
Chlorofluorocarbon	HFCs	120~11200	12.8	0.9
	PFC	5700~11900		
Sulfur hexafluoride	SF <sub>6</sub>	23900	4.1	0.3

[1Mton=10<sup>9</sup>kg]

\*1 温暖化寄与度は、温暖化係数と排出量の積算で求められる。

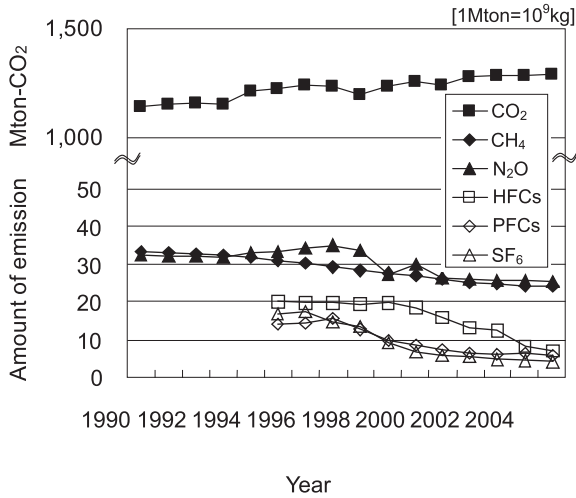


Fig. 2. Amount of emission of green house gases

温暖化に関しては、京都議定書により温室効果ガス削減の目標が設定されており、2012年までに温室効果ガスの排出量を1990年の排出量を基準に、6%削減するとされている<sup>6)</sup>。日本は京都議定書を2002年に批准し、2005年に発効したが、Fig. 2で示すように二酸化炭素の量は増加の一途をたどっている。二酸化炭素排出の主因は、現在利用されているエネルギーの中で化石燃料の燃焼によるものである。先進国では省エネルギー技術の進展に伴い、化石燃料使用量の増加割合は減少傾向にあるが、発展途上国においては経済的な発展のため今後も化石燃料の使用量は増加するものと思われる。したがって、二酸化炭素の大幅な排出量削減が課題となっている。

### 化石燃料の高騰

化石燃料は有限であるので、その大量消費による枯渇が問題視されている。これは化石燃料が長い月日をかけて蓄積され埋蔵されているものを、採掘による生産量が大きく上回っているからである。すなわち、化石燃料の再生産の速度(供給)が必要量(需要)を上回っているからである。このまま使用を続ければ現在埋蔵されている化石燃料は底をつく可能性がある。石油鉱業連盟は、原油埋蔵量とBP p.l.c.発表の生産量より可採年数を算出<sup>7)</sup>して、その結果をFig. 3に示す。これによると世界の石油の供給は40年後に底をつくことになる。

また、主たる化石燃料である石油の主要な産出国は、中東やロシアが多く、地域的に偏っているのに加えて、政情の不安定な国が多いという傾向にある。さらに、開発途上国であるブラジル (Brazil)、ロシア (Russia)、インド

(India)、中国 (China) の国々 (一般的にBRICsとまとめて略称されている) のなかで、インドや中国などの急速な経済成長で石油に対する需要が増してきている。これに、石油エネルギー資源の地域的な偏在と需給バランスの崩壊ならびに石油価格の上昇を見越した投資ファンドによる投資等が加わり、最近、石油価格が高騰してきている。Fig. 4に、最近の石油価格の変動を示す<sup>8)</sup>。最近の3年間で、原油は約1.8倍高騰しているのがわかる。この石油系燃料価格の高騰は、水産業、とくに漁船漁業者の経営を困難にしている。

化石燃料を使用することによる地球温暖化は、沿岸海洋環境や海洋生物の生育環境、ならびに生態系の変化等の問題を引き起こすのみならず、石油の枯渇や供給の不安定さによる石油価格の高騰は、水産経営の圧迫を招いている。したがって、環境対応型で、持続的・安定的に得られる再生可能な新エネルギー源への転換、すなわち代替燃料の開発が必要になる。

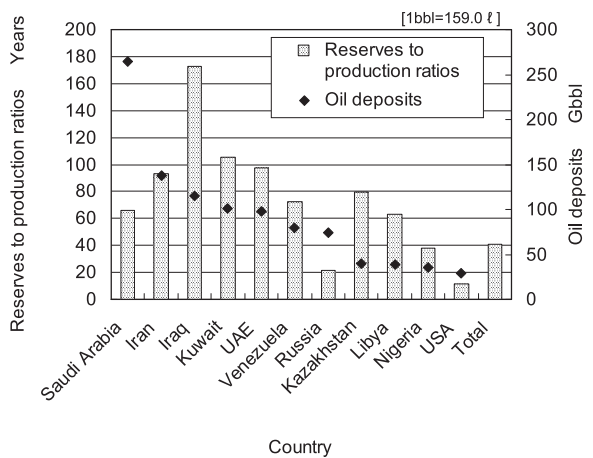


Fig. 3. Reserves to production ratios of crude oil and oil deposits of main petroliferous countries

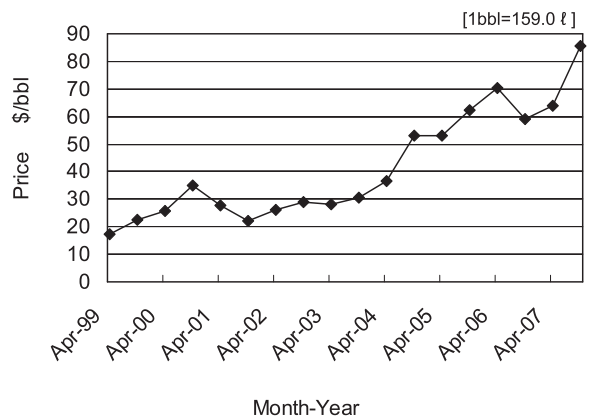


Fig. 4. Changes in price of crude oil

## 石油代替燃料の検討

二酸化炭素排出量削減と化石燃料枯渇に対する新エネルギーへの転換を考える上で、地球上に資源が豊富で再生可能なエネルギーであることが求められる。代替燃料には、バイオディーゼル燃料 (Bio-Diesel Fuel: 一般的には、BDFと略称されているので本論文でもこの略称を以後もちいる)、天然ガス、ジメチルエーテル (Di-methyl ether: 一般的には、DMEと略称されているので本論文でもこの略称を以後もちいる)、および水素などがあり、現在それぞれの燃料を代替燃料にする取組みや研究が進められている<sup>9)</sup>。石油代替燃料の代表的なものを整理してTable 2に示す。

BDFは、動植物を基油として生成された食用油をメタノールと反応させ、ディーゼルエンジン用燃料としたもので、廃油の再利用としてバスやゴミ収集車等の公共交通機関等へ、環境保全と廃物利用の観点から京都市等で利用が推進されている<sup>10)</sup>。

現在高騰しているガソリンに混合して用いられるバイオエタノールも植物を原材料にしている。これは、植物の光合成により大気中から吸収した二酸化炭素を熱エネルギーに変換したものであるから、この燃料を燃焼させても大気中の二酸化炭素の絶対量は増加しない、すなわちカーボンニュートラルと考えられる<sup>9)</sup>。このため、広大な耕作面積を有する諸国で森林が耕作地として開墾され、環境破壊を招いている。また、バイオエタノールは糖분을発酵させてアルコールにするため、従来主に食料として利用されていたトウモロコシやサトウキビ等を原材料に使用しているので、主要な燃料となったときには世界的な食糧難に陥る可能性があり、最近問題になっている。

天然ガスは、石油系燃料より炭素含有量の少ないメタン (CH<sub>4</sub>) を主成分としているので、石炭や石油と比べて燃焼時の二酸化炭素の排出量が少ない。石炭を燃焼させたときに排出される二酸化炭素量を100とした時、石油を燃焼させたときの排出量の比は76となり、天然ガスを燃焼させたときに排出する二酸化炭素の排出量の比は55となる<sup>11)</sup>。

DMEは、化石燃料である天然ガス、石炭、バイオガスなどから得られる合成ガス (水素や一酸化炭素) から製造される<sup>9)</sup>。DMEは、常温で気体であるが-25℃に冷却するか0.6MPa (6.1気圧) に加圧することで液体になるので、液体として輸送や保管が容易であるという特徴を持つ<sup>9)</sup>。またDMEは、硫黄分を含んでいないことから硫黄酸化物の発生がなく、含酸素燃料であることから粒子状物質が発生しにくいことよりディーゼルエンジンの燃料としての利用が見込まれている<sup>9)</sup>。しかし、DMEは天然ガスと同様に化石燃料であり、石油と同じく枯渇や燃料価格高騰の問題が残っている。

水素は、燃焼させても水になり地球環境や健康に有害な物質を放出しない、環境対応型のエネルギー源である<sup>12)</sup>。また、水素は酸素と結合し「水」として地球上に大量に存在している。水は電気分解をすることで水素と酸素に分解することができるので、水力・風力・太陽光・ならびに地熱発電等の自然エネルギーを利用して得た電力を活用することにより、二酸化炭素を一切排出せず水素を製造することができる<sup>13)</sup>。このように、水素を燃料として活用すると、水から作られ水に戻るという循環型エネルギー社会が構築できる。

しかし、水素は通常気体であり、液化するには多額の費用を要するとともに、液体水素として貯蔵するには20K

Table 2. Type, application and major materials of alternate fuels

Kind of fuel	Chemical formulae	Major material	Application
Bio-diesel fuel (BDF)		Animal and plants fat	Diesel engine
Bio-fuel			
Bio-ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Organic waste	Gasoline engine
Dimethyl ether (DME)	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	Methanol	Diesel engine
Natural gas (Methane)		Fossil fuel	
Bio-gas	CH <sub>4</sub>	Organic waste	Gas engine
Hydrogen	H <sub>2</sub>	Many	Fuel cell or Gas engine

(-253℃) という極低温にしなければならない<sup>14)</sup> ので、液体としての化石燃料の移送や貯蔵に比べ、より大きな費用がかかる。また、水素を利活用する場が限定されている<sup>15)</sup> ので、需要と供給のバランスが悪く、現状では水素の価格が高い。しかし中・長期的な視点に立って、温室効果ガスを一切排出せず、かつ再生可能な循環型のエネルギーとして化石燃料に代わる代替燃料について最適な燃料は「水素」と考えられる。

### 水素エネルギーの現状

現在、国内外では水素を燃料として活用するために、水素の発生からインフラの整備、および最終的な活用に向けて水素エンジン自動車や燃料電池自動車等に関する種々の研究開発やプロジェクトが行われている<sup>16)</sup>。ここでは水素燃料の導入に向けた世界の動向や普及状況、技術状況について報告する。

### 水素の発生技術とコスト

水素を、温暖化防止の切り札として、また化石燃料の代替燃料として使用する場合には、そのコストが一つのまた

大きな導入基準になると考えられる。水素は、種々の原料より、種々の方法で発生させることができる<sup>15)</sup> ので、その原料ならびに発生方法と、発生コストについて整理した。なお、日本における水素発生に関する実証試験は、経済産業省が実施する水素・燃料電池実証プロジェクト (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project: 一般的には、JHFCと略称されているので本論文でもこの略称を以後もちいる) が行っており、様々な手法での水素発生試験をしているので、本項では、ここで公開されているデータを元に整理した。また、原料が本来有するエネルギーと、水素を発生または水素に改質するときに必要とするエネルギーも含めた水素を発生・改質するに要する総エネルギーを分母に、発生した水素から得られるエネルギーを分子にした割合、すなわち水素発生に要するエネルギー効率などを試算した。水素の発生法と原材料ならびに発生コストと発生に要するエネルギー効率を整理して、Table 3 に示す。

現在、JHFCのオンサイトプラントが行っている水素発生方法は、化石燃料の水蒸気改質により水素を発生させるものが多い<sup>16)</sup> ので、石油価格の影響を受けるとともに、製造過程で二酸化炭素が排出されるので、環境負荷もある。

Table 3. Cost and energy efficiency in generating process of hydrogen

Process	Detail process	Major material	Production cost (¥/m <sup>3</sup> )	Energy efficiency (%)
Steam reforming	Desulfurized-gasoline reforming	Gasoline	83	52.2
	Naphtha reforming	Naphtha	32.4	57.4
	Methanol reforming	Methanol	40.9	63
	Kerosene reforming	Kerosene	51.2	51.2
	LPG reforming	LPG	32.6	54.9
	Natural gas reforming	Natural gas (Methane)	21.3	58.6
By-product hydrogen	Coke oven gas	Coal	16~21	-
	Caustic soda industry	Sodium chloride	20.0	-
Electrolysis	Water electrolysis		74.4	57.5
	Water electrolysis of polymer electrolyte membrane	Water	-	-
Biomass	Dry type biomass	Biomass	23.4	-
	Wet type biomass			
Partial oxidation	Partial oxidation process	The same material as steam reforming	-	-
Thermochemical decomposition	IS process	Water	-	-
	University of Tokyo-3 process			

また、水蒸気改質法を行った際のエネルギー効率は、実証試験において51%~63%となるので、化石燃料が持つ本来のエネルギーより水素を発生させて得られるエネルギーは低いことがわかる。したがって、化石燃料は水素発生の原材料として利用するより、化石燃料として使用したほうが総合効率はいいものと思われる。

JHFCの実証試験の中で、二酸化炭素を排出しない水素発生方法は、アルカリ水電解を用いた水の電気分解<sup>17)</sup>によるものである。この発生方法での排出物は酸素のみなので、二酸化炭素等の温室効果ガスを排出しない発生方法であるが、発生コストが約74円と割高となっている。原料の「水」の価格は非常に安い、電気エネルギーを使うことにより水素を発生させるので、電気料金が付加されたためである。ただ、石油系燃料を水素に変換する場合、熱量換算で石油1リットルがおおよそ水素2m<sup>3</sup>に相当すると、水素の使用量が従来は概算されている。この換算比から考えれば、電気分解で水素を発生させた場合も一見すると割高と考えられない。しかし、この発生コストの概算値は水素を発生するのに必要なコストのみから概算したもので、施設の維持・管理費や減価償却費および消費地までの輸送コスト等は含まれていない。したがって、発生地と消費地が近接していて、かつ発生施設の維持管理費や減価償却費を勘案しなくてよい場合は、現在の石油系燃料と同等の約100円で水素が入手できることを示唆していると考えられる。

このように、わが国の豊富な資源の一つである「水」は、電気分解の原材料として安価で入手できるが、電気分解に要する電気エネルギーの価格は世界的に見て高い<sup>18)</sup>ので、電気エネルギーの使用量を低減させるため、水素の発生に要するエネルギー効率を向上させる方法の確立が大きな課題になると思われる。

この他の水素発生方法として、コークス炉ガスや苛性ソーダ工場から排出される副生水素<sup>19)</sup>、バイオマスからの発生<sup>19)</sup>、また水蒸気改質法と同じく化石燃料を原料とする部分酸化法<sup>20)</sup>や熱化学分解法<sup>19)</sup>等がある。

副生水素は、コークスやナフサを精製するプロセスの中で副産物として製造されるのでコストやエネルギー効率の定義は不明確であるが、比較的安価に入手しやすいという特徴を持つ。そして、従来副産物として大気中に放出されていたエネルギーの有効利用と考えられるので、水素エネルギー社会を構築する過程での加速要因の一つになると推測できる。

バイオマスは、本来廃棄物や利用頻度が低かった廃材や森林間伐材等の有効利用で、水分を含有しているか、いな

いかで、乾燥系と含水系に分けられる<sup>21)</sup>。乾燥系バイオマスでは、木材や稲わらなどが原材料として利用され、熱化学変換や加水分解により水素、メタン、一酸化炭素、二酸化炭素にガス化され、その後改質過程を経ることにより水素が得られる<sup>21)</sup>。一方、含水系バイオマスは家畜糞尿、下水汚泥、生ゴミなどを嫌気性細菌が分解する過程でメタンと二酸化炭素が発生する。そこで発生したメタンを改質することにより水素を得る<sup>21)</sup>ことができる。また最近、森林の間伐材や廃材等から直接水素を発生させる手法も開発されている<sup>21)</sup>。

バイオマスによる水素発生は、原料費が安価であるという特徴があるが、需要を賄う量の原材料を集荷するのと、発生プラントまで持続して集積するのにコストがかかる<sup>22)</sup>こともある。また、乾燥系バイオマスでは熱エネルギーが必要であるのと、含水系バイオマスでは細菌の働きによるものなので時間がかかるのが難点でもある。

部分酸化法は、原料に化石燃料を使うため水蒸気改質法と似ている。水蒸気改質は熱エネルギーにより水を水蒸気に変えるため吸熱反応で行われるが、部分酸化法は高温状態の酸素を原料と反応させることで発熱反応が起こり、外部から加熱する必要がないという利点がある。したがって、部分酸化法と水蒸気改質法を組み合わせると、部分改質法による廃熱を水蒸気改質法の吸熱反応に利用した自己熱改質法が可能になり、発生効率の向上が期待できる<sup>23)</sup>。

熱化学分解法は、現在研究中の水素発生法の一つであり、熱エネルギーと化学反応を利用して水素を発生させる方法である。ここで必要となる熱エネルギーは主に原子力発電の排熱を利用したものを想定していて、600MWの高温ガス炉による熱分解プロセスで、年間約8億m<sup>3</sup>(273K, 1013 hPa)の水素が製造可能との報告がある<sup>24)</sup>。熱化学分解法は、電気分解法に比べて副生熱を活用するのでエネルギー効率が高くなる。

このように水素の発生法には種々の方式があり、発生効率も徐々に上がってきているが、コスト面で問題が残っている。また、水素の利活用時には従来より主として使用されている石油系燃料と水素燃料の発生エネルギーについて比較しておく必要がある。すなわち、ガソリンを使用した場合に発生される熱量と等価の熱量を発生させるのにどれだけの水素を必要とするか、について検討する必要がある。Table 4に、燃料別の標準発熱量をまとめて示す。これによると、燃料を燃焼させた場合、石油系燃料1ℓから得られるのと同等のエネルギーを水素で得るには、約2.5m<sup>3</sup>の水素ガスが必要になることがわかる。しかし、水素ガス

は圧縮性なので等価熱量を換算するときのガスの温度により水素ガス容積は変化するので、一般的な等価熱量の換算の場合、ガソリン1ℓは水素ガス2m<sup>3</sup>として概算されている。

**水素燃料の導入**

地球温暖化防止のため、温室効果ガスの排出低減を目指し、最もクリーンなエネルギーとされている水素を新しいエネルギーとして普及実用化するために、日本や世界各国で様々なプロジェクトや実証試験が行われている。本項では、陸上輸送機関の水素燃料導入の状況について調査したので報告するとともに、問題点と課題について検討する。

**Table 4 . Standard calorific value of various fuels**

Fuel	Calorific value
Gasoline	34.6 MJ/ℓ
Light oil (Kerosene)	36.7~38.2 MJ/ℓ
Bunker A	39.1 MJ/ℓ
Natural gas	41.1 MJ/m <sup>3</sup> (273K:1013.25hPa)
Hydrogen	12.8 MJ/m <sup>3</sup> (273K:1013.25hPa)

[1013.25hPa=1atm]

(a) 日本での取組み

日本では現在、経済産業省が主催するJHFC<sup>25)</sup>として、燃料電池自動車等の実証研究と水素インフラ等の実証研究が行われている。このプロジェクトは、水素ステーションでの水素の発生から供給・充填までのインフラ整備と、水素燃料利用自動車への安全な充填システムの確立、ならびに水素自動車のエネルギー効率や安全性などに関する基礎データを収集し、実用化と普及の道筋を整えようとするものである。

水素を供給する水素ステーションについては、すでに首都圏に9箇所、中部と関西地区に3箇所設置され稼働している。稼働中の水素ステーションの名称と発生・改質方法を一覧にしてTable 5に示す。首都圏の有明水素ステーションを除いたほとんどが圧縮水素を供給するステーションであり、有明水素ステーションの1箇所だけが液体水素を供給できるステーションである。

このほか、企業が研究のために保有している水素ステーションもいくつかあり、移動式水素ステーションも実証段階に来ている。しかし、すべての水素ステーションは大都市圏にあり、ほかの地方に増設する計画はないようである。

このプロジェクトには、2007年現在で、7種類の燃料電池自動車と2種類の水素エンジン自動車が参加している<sup>25)</sup>。水素燃料自動車は、現在のリース価格で、1ヶ月あたり20万円~120万円で市場にリースされている<sup>26)</sup>が、まだ開発段階にあるので、販売価格や性能の面において一般的に市

**Table 5 . Hydrogen station in service in Japan**

Name of hydrogen station	Process
JHFC Centrair hydrogen station	Natural gas reforming type
JHFC Osaka hydrogen station	Natural gas reforming type
JHFC Kansai Airport hydrogen station	Off-site type
JHFC Yokohama-Daikoku hydrogen station	Desulfurized-gasoline reforming type
JHFC Yokohama-Asahi hydrogen station	Naphtha reforming type
JHFC Senju hydrogen station	LPG/Natural gas reforming type
JHFC Ariake hydrogen station	Facility for liquefied hydrogen storage and hydrogen refueling
JHFC Kawasaki hydrogen station	Methanol reforming type
JHFC Kasumigaseki hydrogen station	High pressure hydrogen storage (Re-locatable)
JHFC Sagami-hara hydrogen station	Water electrolysis type
JHFC Funabashi hydrogen station	Natural gas reforming type (Re-locatable)
JHFC Co-Operative hydrogen station Ichihara hydrogen station	Kerosene reforming type

場に出回るまで達していない。

なお、以前に述べた水素の発生コストやエネルギー効率もこれらの水素ステーションで調査結果を参考にしたものである。

#### (b) 海外での取組み

以下に世界で行われている主な水素関連プロジェクトを示す。

##### (1) 北米での取組み

北米ではアメリカとカナダがそれぞれ独自のプロジェクトを立ち上げ、進めている。

アメリカ合衆国のカリフォルニア州では、カリフォルニア州政府機関である大気資源局とエネルギー委員会主導で米国エネルギー省（United States Department of Energy：一般的には、DOEと略称されているので本論文でもこの略称を以後もちいる）などの支援を受けて2000年11月よりCalifornia Fuel Cell Partnership(CaFCP)を実施している<sup>27)</sup>。このプロジェクトでは、実現可能な環境ソリューション社会への移行を目指し、新たな自動車技術を前進させることを目的に掲げている。主な計画としては、カリフォルニア州水素ハイウェイとして、水素補給ネットワークを構築することで、実績としてこれまでに水素供給ステーションを24箇所設置している。さらに13箇所のステーションの設置を計画している。そして、170台以上の燃料電池自動車を使用し、各企業が共同での走行試験を行っている。

カナダにおいては、BC Hydrogen Highway<sup>TM</sup>やHydrogen Villageというプロジェクトがある<sup>28)</sup>。BC Hydrogen Highway<sup>TM</sup>では、現在5つの水素ステーションが稼働しており、2010年にバンクーバーとウィスラーで開催される冬季オリンピックとパラリンピックに向けて燃料電池バスを配置することを計画している。また、Hydrogen Villageでは、限られた地域内で各種の燃料電池および水素技術を採用し試験的な運用を試みている。

##### (2) ヨーロッパでの取組み

欧州連合（EU）では、水素と燃料電池を含む広い領域の研究を支援する地域機関としての役割を担っている。現在、実証プログラムのためにインフラ整備が進められており、EU内の31都市に35箇所の水素燃料供給ステーションを設置して、水素をさまざまな方式で製造するとともに供給している<sup>29)</sup>。また、EU加盟国以外のヨーロッパでは、アイスランドが水素経済社会の構築に向かって大きく前進している。

アイスランドでは、当初EUの支援を受けた「欧州FCバス実証走行プロジェクト」（Ecological City Transport System：一般的には、ECTOSプロジェクト<sup>30)</sup>）と略称されているので本論文でもこの略称を以後もちいる）として、2001年に開始され、2004年にFCバスの商業運転を開始した。これを引き継ぐ形で、EU内ではClean Urban Transport for Europe（一般的には、CUTEプロジェクト<sup>30)</sup>）と略称されているので本論文でもこの略称を以後もちいる）として9都市で合わせて27台の燃料電池バスの実証試験を開始した。その後、ECTOSとCUTEに代わって始まったHydrogen FLEET：CUTE（一般的には、HyFLEET：CUTE<sup>31)</sup>）と略称されているので本論文でもこの略称を以後もちいる）では、EU内の8都市に中国の北京やオーストラリアのパーズも加えた10都市で、47台の燃料電池バスを公共輸送機関として運行している。EU内でHyFLEET：CUTEプロジェクトに参加している8都市を、Fig. 5に示す。

##### (c) 船舶への水素エネルギー導入の取組み

わが国の水素エネルギー政策では、3.2.1項に示すように主に自動車等の陸上輸送機関に主眼が置かれていて、海上の輸送機関である船舶では国が主導する政策はほとんど行われていない。船舶における水素燃料利用に関しては、水産大学校と下関近郊の船舶関連会社などで組織している「水素エンジン船舶研究会」が取り組んでいるに過ぎない。その活動の中で、水素エンジン船舶の開発に関しては、漁船漁業者に照準を当て、実際に海上運転を行う実証試験を行い、水素エンジン漁船の実用化に向けて開発が進



Fig. 5. Participating countries of HyFLEET : CUTE



められている。

海外での水素燃料利用の船舶の開発に関しては、水産国であるアイスランドがNEW-H-SHIP<sup>32)</sup>を策定し、水素燃料動力の漁船の開発を目標として掲げてきた。しかし、現在ではSMART-H<sub>2</sub>プロジェクト<sup>33)</sup>に軌道修正し、船用燃料電池発電機の実証に主眼を置いている。その背景には、技術的あるいは経済的な課題があったのではないかと推測される。

北米においては、燃料電池を動力源とする船舶の開発が企業の間で行われている。公的機関によるプロジェクトとしての取組みではないが、一つには燃料電池搭載型のヨットの開発<sup>34)</sup>がある。また、2003年10月に開催された「World Maritime Technology Conference and Exposition」において、燃料電池を動力源とする水上タクシーをサンフランシスコ湾で披露している<sup>35)</sup>。

このように日本だけでなく世界においても、水素燃料利用の船舶の開発は陸上輸送機関に比べ、圧倒的に遅れをとっている。船舶における水素燃料の導入は、陸上輸送機関と同様に、二酸化炭素排出削減に寄与できるとともに、高騰している石油系燃料に取って代わる代替燃料の開発に効果的であると考えられる。

### 漁船への水素燃料導入にむけて

#### 船舶および漁船の温室効果ガス排出量

##### (a) 船舶における温室効果ガスの排出

漁船への水素燃料導入のためには、船舶全体についての温室効果ガス排出量の現状を把握する必要がある。Fig. 6に、産業部門別や各種輸送分野別ならびに船舶種類別の石油消費量を示す。すなわち、Fig. 6の左には、石油を消費

する主要産業である化学産業や一般産業および輸送のそれぞれの部門における消費量を示す。同図中央には、その中の輸送部門に占める自動車や船舶等の輸送分野別の消費量を、また同図右には船舶における内航船や外航船ならびに漁船等の分野における消費量を示す。

また、1990年と2005年における輸送機関の温室効果ガス排出量の全体の割合をFig. 7に示す。船舶からの温室効果ガス排出量は、輸送機関の中において1990年には6.3%であるが、2005年には5%であることがわかる。隻数減と省エネルギー船舶導入の結果と考えられるが、船舶における温室効果ガスの全体の排出量は、1990年は二酸化炭素換算で約 $14 \times 10^9$ kgであったが、2005年は約 $13 \times 10^9$ kgと減少している。しかし、自動車に対する排気ガスの規制と違い、船舶の場合は法律による規制がほとんど無いので、環境対応と温室効果ガスについて真剣に考える必要がある。

##### (b) 漁船における燃油価格の変動

また、水産庁がまとめた最近の漁船用燃油の価格変動をまとめてFig. 8に示す。Fig. 4に示す原油の価格変動に連動するように、漁船用燃油の価格も高騰している。これに伴い、とくに漁船漁業者や水産物流部門等の水産関連業者の経営を圧迫している。したがって持続的で安定した水産業の発展のために、化石燃料依存からの脱却を早急に図る必要があるとともに、資源消化型のエネルギーである化石燃料から、再生型のエネルギーに変換することが強く求められる。

#### 水素エンジン利用漁船に関する検討

##### (a) 漁船規模についての検討

Fig. 9に、わが国漁船の大きさと隻数を示す。この図よ

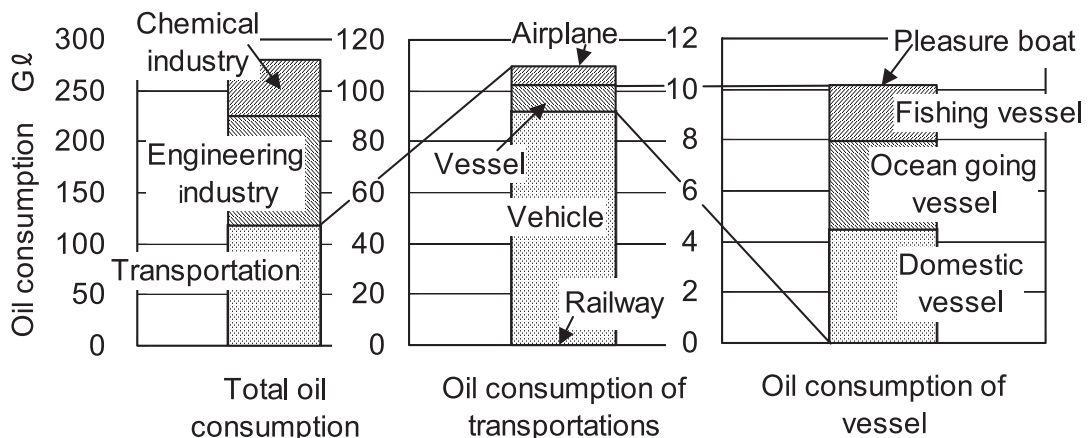


Fig. 6. Oil consumption in transportation field

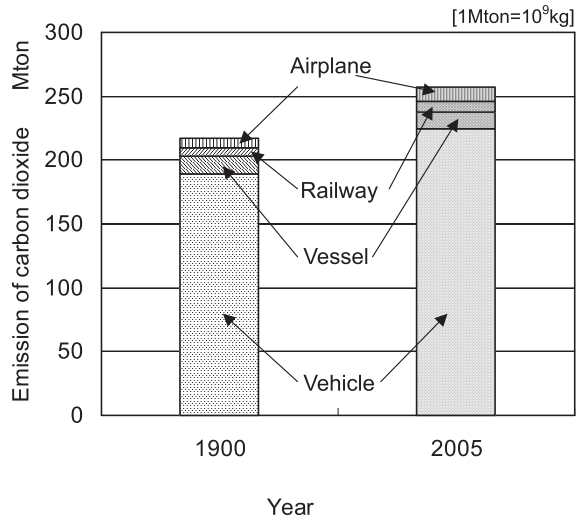


Fig. 7. Emission of carbon dioxide in transportation field

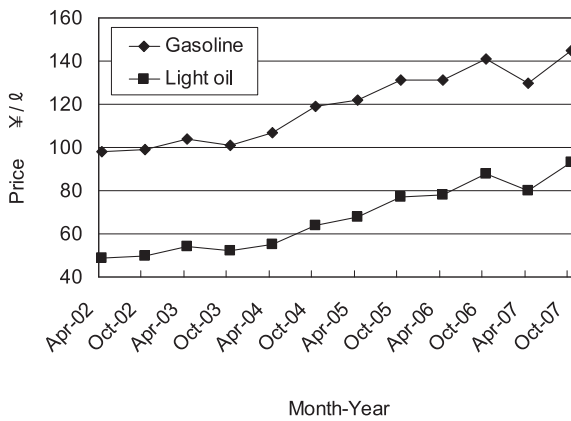


Fig. 8. Changes in price of fuel oils using in fishing vessels

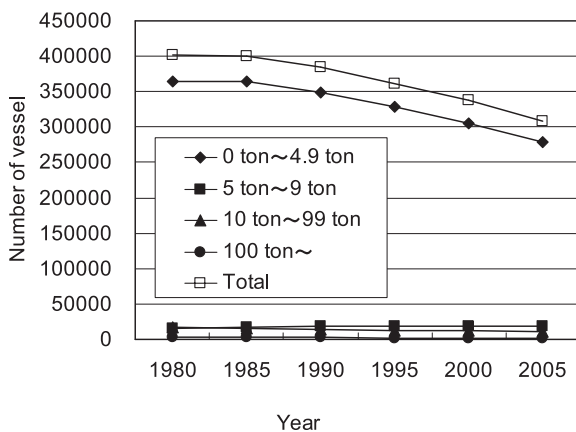


Fig. 9. Changes in amount of fishing vessels of respective gross tonnage

り、漁船の登録隻数は1980年をピークに減少傾向にあることがわかる。また、海面漁業漁船の登録隻数は約30万隻で、

この中の約96%が10トン未満の漁船であることがわかる。さらに、5トン未満の沿岸漁船が約90%を占めている。

そのほか、自動車は身近な乗り物として日常活用しているのでエンジンの変更状態が実感できるが、船舶は港を出ると乗組員以外はほとんど運行状態が実感できず、周囲の人には水素を動力として環境に優しい取組みをしていることが身近に捉えられない。このためにも、沿岸の小型漁船を水素エンジン化して実際の操業に活用する意義は大きいと考える。

したがって、水素エンジンを搭載する漁船の規模は5トン未満の沿岸小型漁船が適当と判断した。

#### (b) 漁船の水素エンジン化による温暖化ガスの削減効果

漁船の使用燃料の消費量から排出される二酸化炭素量を計算することで、現在の漁船の二酸化炭素排出量が概算できる。漁船が水素エンジンに変われば、これらの二酸化炭素の排出はゼロになり、二酸化炭素の排出削減に大きく貢献できる。

漁船には、主としてディーゼルエンジン（船内機）、またはガソリンエンジン（船外機）が搭載されている。漁船に使用されている燃料の種類とその主要な含有成分および燃料1リットルあたりの二酸化炭素の排出量をTable 6に示す。これらの船における燃料の消費量は「全国における漁船の種類別と主な操業水域別の燃料消費量推計結果」<sup>30)</sup>としてまとめられていて、ガソリンエンジンの燃料はガソリンで、ディーゼルエンジンの燃料は軽油とA重油である。これらの燃料を燃焼して排出される二酸化炭素の排出量は、燃料の消費量にそれぞれの二酸化炭素排出係数をかけることによって漁船の排出する二酸化炭素量が概算できる。ただし、ディーゼルエンジンから排出される二酸化炭素を計算するとき、軽油と重油の消費割合が明確でないため、計算には両方の数値を平均化して用いた。このようにして概算した平成17年度の漁船における燃料の消費量と各燃料の二酸化炭素排出係数、二酸化炭素排出量をTable 7に示す。漁船から年間約  $6 \times 10^9$  kgの二酸化炭素が排出されていることがわかった。これは商船やプレジャーボートも含めた全船舶の二酸化炭素排出量の約45%に相当し、京都議定書で決定されている排出削減量の2.6%に相当する。

## まとめ

地球温暖化のため、海洋環境や海洋生物の生育環境等への影響が身近に確認されてきていて、水産業の将来に不安

Table 6 . Emission factor of carbon dioxide at various fuels

Fuel	Specific gravity	Main ingredient (mass%)			Emission of carbon dioxide (kg/ℓ)
		Carbon	Hydrogen	Other	
Gasoline	0.73	85.5	14.4	0.1	2.35
Light oil	0.84	86.1	13.6	0.3	2.62
Bunker A	0.88	85.8	13.5	0.7	2.76

Table 7 . Amount of carbon dioxide emitted by different type of fishing vessel engine

Fishing vessel	Using fuel	Fuel consumption (ton/Year)	Emission of carbon dioxide (ton-CO <sub>2</sub> )
Vessel of outboard engine	Gasoline	213,000	686,000
Vessel of inboard engine	Bunker A	1,667,000	5,245,000

[1ton=10<sup>3</sup>kg]

を投げかけている。また、現在輸送機関の燃料として主として使用されている化石燃料への需要増と供給不安から、燃油価格の高騰が大きな問題になっていて、水産業とくに漁船漁業の経営を圧迫している。

それらの問題に対応するため、温室効果ガスの排出が少なく、しかも枯渇等の問題がない再生可能な新エネルギーの開発が求められている。このため、バイオディーゼル燃料 (BDF) やジメチルエーテル (DME)、水素等について、実用化に向けた試験研究や実証試験が行われている。本研究では、これら新エネルギーの特徴について調査するとともに整理した。このなかでも、「水素」は、エネルギーを取り出してもすなわち燃焼させても、温室効果ガスを全く排出しない循環型の再生可能な次世代のエネルギーとして注目されている。

水素については、日本をはじめ、北米やEU等の世界各地で、燃料電池や水素内燃エンジンを動力源として、自動車を中心とした陸上の交通機関で水素ステーション等のインフラ整備も併せて実証試験が行われている。しかし、海上交通機関である船舶、とくに早急な問題解決が求められている漁船ではほとんど行われていない。

漁船および船舶は、陸上の交通機関と違い、走行パター

ン、エンジンの出力パターン、ならびに機動力や緊急時の救助態勢等に大きな違いがある。したがって、水素エンジン漁船の実用化のためには、陸上で開発・実証されたシステムをそのまま移行できないので、独自に試験研究を行う必要がある。また、水素エンジン漁船の実用化のためには、できるだけ低コストで水素を発生するとともに、それを消費地である漁港まで輸送し、漁船に安全に充填・搭載する漁船独自の手法とシステムの開発が必要であることがわかった。

このように、本研究ではクリーンエネルギー利活用に向けた世界各国の取組みの現状について整理するとともに、水素エンジン漁船に適する漁船の規模や隻数等について調査し、水素エンジン漁船開発の背景について概要をまとめた。そして、水素エンジンを搭載する漁船の規模は、5トン未満の沿岸小型漁船が適当であることを提案した。しかし、水素エンジン漁船の実用化のためには、まだ解決しなければならない多くの課題があることもわかった。

## 謝 辞

本研究にあたり、委託研究として多大なご協力を賜りま

した岩井商事株式会社様に厚く御礼申し上げます。

また、本研究の推進にあたり、有益なご助言を賜りました独立行政法人水産大学校海洋機械工学科中村誠准教授、津田稔講師、ならびに海洋生産管理学科川崎潤二講師に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 気象庁：気象統計情報 (2007)
- 2) 環境省：STOP THE 温暖化 2005, 5 (2005)
- 3) World Meteorological Organization : WMO温室効果ガス年報 (気象庁訳), 東京, 2, 3-4 (2006)
- 4) 全国地球温暖化防止活動推進センター：地球温暖化を考える, 東京, 1 (2002)
- 5) 全国地球温暖化防止活動推進センター：地球温暖化を考える, 東京, 2 (2002)
- 6) 環境省：地球温暖化パネル, 東京, 9 (2006)
- 7) BP Statistical Review of World Energy, London (2006)
- 8) West Texas Intermediate, New York (2007)
- 9) 鈴木延昌, 田路龍吾：自動車への石油代替燃料の使用について。産学官による技術開発を推進 バイオマス利活用への技術開発, 東大総研, 東京, 54 (2004)
- 10) NPO法人バイオマス産業社会ネットワーク：拡がるバイオディーゼル燃料(BDF)利用, バイオマス白書2005, 千葉 (2005)
- 11) 森島宏：天然ガスのすべてー21世紀の主役エネルギーの最新知識ー, 石油・天然ガスレビュー, 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 東京, 135-136 (2004)
- 12) 岡野一清：水素エネルギー社会におけるインフラ及び都市・住宅に関する研究, 国土交通省国土交通政策研究所, 東京, 1-2 (2005)
- 13) NEDO：次代を担う燃料電池・水素技術2006, 東京, 1-22 (2006)
- 14) 岡野一清：水素エネルギー社会におけるインフラ及び都市・住宅に関する研究, 国土交通省国土交通政策研究所, 東京, 2-5 (2005)
- 15) NEDO：次代を担う燃料電池・水素技術2006, 東京, 1-2 (2006)
- 16) 財団法人自動車研究所：「JHFC総合効率検討結果」報告書, JHFC総合効率検討特別委員会, 東京, 72 (2006)
- 17) 戸嶋直樹：理解しやすい化学 I B・II [総合版], 文英堂, 東京, 207 (1995)
- 18) 山田竜也：電気料金の国際比較, エネルギー経済, 日本エネルギー経済研究所, 東京, 1-7 (2002)
- 19) 岡野一清：水素エネルギー社会におけるインフラ及び都市・住宅に関する研究, 国土交通省国土交通政策研究所, 東京, 8-10 (2005)
- 20) 工業所有権情報・研修館：水素製造技術, 東京, 8-9 (2006)
- 21) 産業技術総合研究所：産総研におけるバイオマス研究基礎戦略, 東京, 43-48 (2003)
- 22) 大森良太, 長谷川明宏, 根本正博：特集：バイオエネルギー利用の動向と展望, 科学技術動向, 科学技術政策研究所, 東京, 12 (2001)
- 23) 工業所有権情報・研修館：水素製造技術, 東京, 9-10 (2006)
- 24) 工業所有権情報・研修館：水素製造技術, 東京, 13-15 (2006)
- 25) 経済産業省：水素・燃料電池実証プロジェクト, 広報資料, 2 (2007)
- 26) 財団法人 日本自動車研究所：平成18年度燃料電池自動車に関する調査報告書, 東京, 146-150 (2007)
- 27) NEDO：水素燃料電池車関連研究開発とインフラ整備状況 (EU, 北米), NEDO海外レポート, 東京, 963, 26-35 (2005)
- 28) Kerry AA : 2007 Automotive Infrastructure Survey, Informing the fuel cell industry, Fuel Cell Today, London, 9 (2007)
- 29) Worldwide Hydrogen Fueling Stations : FUEL CELLS 2000, Washington, D.C. (2007)
- 30) 濱田善彦：実走段階にきた燃料電池バスの課題と将来展望, JAMAGAZINE, 社団法人 自動車工業会, 東京, 7 (2003)
- 31) 丹下昭二：平成18年度 水素・燃料電池実証プロジェクト JHFCセミナー 資料, JHFC, 東京, 132 (2007)
- 32) Skulason J B : NEW H SHIP, Icelandic New Energy ltd., Reykjavik, (2005)
- 33) 山本修：30<sup>th</sup> Anniversary Fuel Cell Seminar出張報告, 電機, 日本電機工業会, 東京, 2, 3 (2007)
- 34) WIRED VISION : Fuel Cells Weigh Anchor, WIRED News, 東京 (2004)
- 35) 経済産業省：平成17年度 PRTR届出外排出量の推計方法等の概要, 東京, II -15-26 (2007)