

水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET)

サブタスク 7.

水素利用技術に関する調査・検討

平成 11 年 3 月

新エネルギー・産業技術総合開発機構

委託先 財団法人 エンジニアリング振興協会

NEDO 図書・資料室



010014920-2

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

委託先：財団法人 エンジニアリング振興協会
平成 11 年 3 月 325 頁

サブタスク 7 では、平成 5 年度より水素燃焼ガスタービン以外の主要な水素利用技術についての調査・検討を行っている。平成 10 年度はこれまでの調査結果をもとに、水素利用技術のうち動力発生、輸送機関、燃料電池、冷熱利用の各分野毎に将来有望な技術の導入条件、今後の見通し等について検討した。動力発生については、機械技術研究所に設置した急速圧縮・膨張装置を使用し、基礎燃焼試験及び要素試験としての水素噴射装置、着火装置試験を実施した。輸送機関では、水素自動車の本格導入を前提に水素自動車の導入シナリオを作成すると共に水素自動車の環境へ与える影響を評価出来る環境 LCA を実施した。燃料電池では、純水固体高分子型燃料電池の市場調査を電気事業用、産業、民生、移動及び車両用について調査・検討した。冷熱利用では、深冷法、低温 VSA 法での酸素製造装置及び酸素製造装置と He ブレイトンサイクルの複合サイクル等を調査・検討し空気固化に関する測定方法をまとめた。水素供給システムの調査検討では、消費地の近くに分散して水素供給ステーションをスタンドアローンで設置することを前提として、水素を供給する各種方式を性能、価格等を含め調査・検討した。

目次

まえがき	①
実施体制	③
Summary	⑦
概要	⑮
1. 動力発生に関する調査・検討	1
1.1 はじめに	1
1.2 急速圧縮・膨張装置による基礎燃焼試験	2
1.3 アルコノ循環型水素コージェネレーションシステムの試験	7
1.4 水蒸気循環型水素コージェネレーションシステムの試験	44
1.5 ガス供給装置	60
1.6 水素ガス噴流のシミュレーション	63
1.7 まとめ	78
2. 輸送機関に関する調査・検討	79
2.1 はじめに	79
2.2 水素燃料電池自動車の導入シナリオ	81
2.3 水素自動車の環境LCA	139
2.4 燃費	167
2.5 まとめ	174
3. 純水素燃料電池に関する調査・検討	175
3.1 はじめに	175
3.2 純水素固体高分子型燃料電池発電システム市場調査研究	176
3.3 燃料電池自動車のLCAのための燃料電池調査	211
3.4 まとめ	219
4. 冷熱利用技術に関する調査・検討	221
4.1 はじめに	221
4.2 分散型酸素製造装置	223
4.3 固化空気(固体窒素)の熱伝導率測定法の検討	260
4.4 まとめと今後の課題	269
5. 水素供給システムに関する調査・検討	270
5.1 はじめに	270
5.2 水素自動車用水素供給システムの総括的検討	272
5.3 液体水素供給方式	299
5.4 まとめ	304
あとがき	305
付録1 研究発表リスト	307
付録2 海外出張報告	310

まえがき

「サブタスク7 水素利用技術に関する調査・検討」委員会

委員長 岡崎 健 （東京工業大学 工学部 機械科学科 教授）

平成5年度より6年間にわたって実施されてきたWE-NET計画は第I期が今年度で終了し、平成11年度より組織を大きく変えて第II期に移行する。本サブタスク7では、水素燃焼ガスタービン以外の主要な水素利用技術に関する調査・検討を行ってきたが、この6年間における明確な目的を据えた系統的な活動およびその成果には目を見はるものがあり、第I期当初の「その他の水素利用技術」という枠を越えて、サブタスク7で提案され検討された新たな各種水素利用技術が、小型分散で短中期に実現すべき主要な有望技術として認識されるようになってきた。

エネルギー源としての水素の利用方法としては、WE-NET計画の中心に据えられていた水素燃焼ガスタービン発電以外にも、水素ディーゼルや燃料電池による電力発生、自動車等の輸送機関の動力発生、一般熱需要など、多種多様な利用形態が存在する。現実的な水素利用社会への移行を考えると、短中期的にこのような分散型水素利用技術を実現可能なものから段階的に導入をはかっていくことが必要となる。この水素導入中間シナリオにおけるこれらの各個別水素利用技術の位置づけと重要性を十分認識した上で、各個別技術についての具体的かつ詳細な技術的検討を行うとともに、その結果をふまえてこれらの各需要サイトへの実現可能な技術に立脚した水素供給システムとその問題点をも明確にし、水素エネルギー社会の現実的なイメージを描いていかななくてはならない。このような立場から、WE-NETのサブタスク7として「水素利用技術に関する調査・検討」が行われてきた。その平成10年度の成果をまとめたものが本報告書である。

第I期6年間のサブタスク7の活動を振り返ってみると、初年度の平成5年度には一つのWGを組織して考え得るすべての水素利用技術をピックアップし、これらを水素利用技術の形態として体系的にまとめた。その中で、水素燃焼タービンを除く各個別技術の中で特に重要と考えられる動力発生、自動車、酸水素利用燃料電池、冷熱発電の4つの具体的課題についてWGを構成し、平成6年度に検討を行った。平成7年度からは、これらを多少変更して動力発生、輸送機関、純水素利用燃料電池、冷熱利用の4つの個別技術WGに加え、新たに利用面から見た水素供給システムWGをスタートさせ、5つのWGで調査検討を行ってきた。各個別WGの主査と委員の方々の献身的な努力により、分散型水素利用の各個別技術の定量的な具体的なイメージが明確にされるとともにその開発課題が抽出され解決策が検討されてきた。また、動力発生WGでは第I期後半には要素技術開発にもすでに一部着手してきた。さらに、これらの各水素利用形態に対応した水素供給システムにつ

いて具体的かつ詳細な検討が行われ、平成9年度には、水素導入中間シナリオへの新たな提言がサブタスク7から発信され、この現実的な水素導入中間シナリオにおける分散型水素利用技術の段階的導入の重要性が、WE-NET第II期計画にも大きく反映されることとなった。

このような状況の中、平成10年度は、動力発生、輸送機関、純水素利用燃料電池、冷熱利用、水素供給システムの5つの各WGにおいて、ハードの開発を含むWE-NET第II期計画への発展的移行を念頭に置いた上で、各個別水素利用技術の導入条件や今後の見通しを含めてさらに詳細かつ具体的な検討が加えられた。動力発生WGにおいては、アルゴン循環型および水蒸気循環型水素ディーゼルコージェネレーションの2方式の実現性を実証するための燃焼試験を実施し、第II期での実証試験への移行の目途をつけるとともに、水素噴射および水素着火等の要素技術の検証試験を行った。輸送機関WGでは、水素燃料電池自動車の本格的導入を前提にその導入シナリオを作成するとともに、水素自動車に関する環境影響LCAを実施した。燃料電池WGでは、純水素固体高分子燃料電池の将来の市場調査を電気事業用、産業用、民生業務用、移動発電装置用、自動車用等について実施した。冷熱利用WGでは、液体水素の冷熱を利用した分散型酸素製造装置として、酸素製造装置とHeブレイトンサイクルの複合サイクル、低温VSA、深冷法などについて、酸素製造電力原単位および経済性の比較検討が行われた。水素供給システムWGでは、多量の水素導入までの当面の水素自動車への水素供給を前提とした各種方式の分散型水素供給ステーションについて、その具体的な形態およびコストについて調査・検討が行われた。

詳細については報告書本文を参照されたい。

実施体制

本調査・検討は、関連する各分野の専門の研究者・技術者の協力を仰ぎ、(財)エンジニアリング振興協会内部に委員会およびワーキンググループ(WG)を設けて実施した。調査・検討の実施者は以下に示す通りである。

(1) 水素利用技術に関する調査・検討委員会

委員長	岡崎 健	東京工業大学 工学部	機械科学科 教授
委員	神本 武征	東京工業大学 工学部	工学部長
委員	清水 健一	通商産業省 工業技術院	機械技術研究所 エネルギー部

エネルギー利用技術研究室長

委員	恩田 和夫	豊橋技術科学大学 電気・電子工学系	教授
委員	勝田 正文	早稲田大学 理工学部	機械工学科 教授
委員	門出 政則	佐賀大学 理工学部	機械工学科 教授
委員	山根 公高	武蔵工業大学 水素エネルギー研究センター	助教授
委員	高橋 三餘	通商産業省 工業技術院	機械技術研究所 エネルギー部

エネルギー変換研究室長

委員	石川 博	通商産業省 工業技術院	大阪工業技術研究所
----	------	-------------	-----------

エネルギー変換材料部 部長

委員	濱 純	通商産業省 工業技術院	機械技術研究所 企画室長
委員	赤井 誠	通商産業省 工業技術院	機械技術研究所 エネルギー部

熱工学研究室 主任研究官

委員	秋葉 悦男	通商産業省 工業技術院	物質工学工業技術研究所
----	-------	-------------	-------------

無機材料部 無機機能設計研究室長

委員	藤原 昇	東京電力(株) 開発計画部	副長
委員	藤田 淳一	関西電力(株) 研究開発室	調査役
委員	服部 達雄	東京ガス(株) 技術企画部	副理事
委員	石田弥重郎	大阪ガス(株) 技術開発室	部長

(2) WG 研究員

(2)-1 動力発生に関する調査・検討 WG (動力発生 WG)

主査	神本 武征	東京工業大学 工学部	学部長
研究員	高橋 三餘	通商産業省 工業技術院	機械技術研究所 エネルギー部

エネルギー変換研究室長

研究員 古谷 博秀 通商産業省 工業技術院 機械技術研究所 エネルギー部
燃焼工学研究室

研究員 山根 公高 武蔵工業大学 水素エネルギー研究センター 助教授

研究員 庄司不二雄 東京ガス(株)エネルギー技術研究所 エンジンチームリーダー

研究員 藤本 洋 大阪ガス(株)エンジニアリング部 エネルギー技術チーム
シニア・リサーチャ部長

研究員 高石 龍夫 三菱重工業(株) 技術本部 長崎研究所 内燃機・油機研究推進室長

研究員 赤川 裕和 三菱重工業(株) 技術本部 長崎研究所 内燃機・油機研究推進室 主任

研究員 池谷 信之 石川島播磨重工業(株) 技術研究所 ターボ機械開発部 課長

研究員 山田 敬之 石川島播磨重工業(株) 技術研究所 ターボ機械開発部

研究員 丸山 洋一 石川島播磨重工業(株) 技術研究所 流体・燃焼研究部

研究員 徳永 佳郎 川崎重工業(株) 明石研究所 熱技術研究部 グループ長

研究員 酒井 規行 川崎重工業(株) 技術総括本部 開発室 主査

研究員 長岐 裕之 (財)エンジニアリング振興協会 (NEDO フェロー)

(2)-2-1 輸送機関に関する調査・検討WG（輸送機関WG①）

主 査 清水 健一 通商産業省 工業技術院 機械技術研究所 エネルギー部
エネルギー利用技術研究室長

研究員 山根 公高 武蔵工業大学 水素エネルギー研究センター 助教授

研究員 山口 郁夫 (財)日本自動車研究所 社会・環境研究室 主任研究員

研究員 赤井 誠 通商産業省 工業技術院 機械技術研究所 エネルギー部
熱工学研究室 主任研究官

研究員 橋本 辰彦 岩谷産業(株) 技術部 副部長

研究員 寺田 興司 ダイハツ工業(株) 電気自動車事業部

研究員 長谷川 弘 トヨタ自動車(株) FP 部 エネルギー技術研究開発 主査

研究員 小林 紀 日産自動車(株) 環境・総合研究所 動力・環境研究所 主任研究員

研究員 梶谷 郁夫 (株)本田技術研究所 和光基礎研究センター
エグゼクティブチーフエンジニア

研究員 渡辺 正吾 マツダ(株) 技術研究所 主幹研究員

研究員 矢澤 滋夫 三菱自動車(株) 技術本部 技術管理部 グループ長

(2)-2-2 輸送機関に関する調査・検討WG（輸送機関WG②）

主 査 清水 健一 通商産業省 工業技術院 機械技術研究所 エネルギー部
エネルギー利用技術研究室長

研究員 山根 公高 武蔵工業大学 水素エネルギー研究センター 助教授

研究員 岩井 信夫 (財)日本自動車研究所 エンジン・環境研究部 部長
 研究員 赤井 誠 通商産業省 工業技術院 機械技術研究所 エネルギー部
 研究調査官
 研究員 秋葉 悦男 通商産業省 工業技術院 物質工学工業技術研究所
 無機材料部 無機機能設計研究室長
 研究員 橋本 辰彦 岩谷産業(株) 技術部 副部長
 研究員 小林 紀 日産自動車(株) 環境・総合研究所 動力・環境研究所 主任研究員
 研究員 蓮池 宏 (財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部
 部長補佐

(2)-3 純水素利用燃料電池に関する調査・検討 WG (燃料電池 WG)

主 査 恩田 和男 豊橋技術科学大学 電気・電子工学系 教授
 研究員 安田 和明 通商産業省 工業技術院 大阪工業技術研究所 エネルギー・環境材料部
 水素エネルギー研究室研究員
 研究員 太田 洋州 東京ガス(株) 基礎技術研究所 水素技術チーム 副部長
 研究員 藤田 淳一 関西電力(株) 研究開発室 調査役
 研究員 古賀 実 石川島播磨重工業(株) プロジェクト計画部
 プロジェクト推進グループ 部長
 研究員 中山 宜長 (株)東芝 燃料電池事業推進部 システム技術担当主査
 研究員 小関 和雄 (株)富士電機総合研究所 クリーンエネルギー研究所 研究マネージャー
 研究員 橋本 辰彦 岩谷産業(株) 技術・保安本部 技術部 副部長
 研究員 橋崎 克雄 三菱重工業(株) 原動機事業本部 原動機技術センター
 新製品開発部 技術開発課 主任
 研究員 中嶋 齊 (財)野口研究所 研究部 第二研究室 室長

(2)-4 冷熱利用に関する調査・検討 WG (冷熱利用 WG)

主 査 勝田 正文 早稲田大学 理工学部 機械工学科 教授
 研究員 高村 淑彦 東京電機大学 工学部 機械工学科 教授
 研究員 川田 正国 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 極限技術部
 宇宙技術研究室 主任研究官
 研究員 落合 淳一 石川島播磨重工業(株) 技術研究所 先端技術研究部 担当課長
 研究員 花田 卓爾 日本エア・リキード(株) 顧問
 研究員 清水 次郎 日本エア・リキード(株) 機器事業本部 品質管理部 部長
 研究員 柳 秀治 (株)前川製作所 技術研究所 超伝導技術開発室 部長代理
 研究員 大平 勝秀 三菱重工業(株) 長崎研究所 ターボ機械研究室 室長

研究員 深野 隆 日本酸素(株) オンサイト・プラント事業本部 宇宙・低温機器
事業部 事業部推進部 参事

(2)-5 水素供給システムに関する調査・検討 WG (供給 WG)

主 査 門出 政則 佐賀大学 理工学部 機械システム工学科 教授
研究員 赤井 誠 通商産業省 工業技術院 機械技術研究所 エネルギー部
研究調査官

研究員 秋葉 悦男 通商産業省 工業技術院 物質工学工業技術研究所

無機材料部 無機機能設計研究室長

研究員 服部 達雄 東京ガス(株) 技術企画部 副理事

研究員 松岡 美治 岩谷産業(株) 技術部 課長

研究員 多田 文三 川崎重工(株) 鉄構事業部 装置技術総括部

貯槽配管技術部第1課 課長

研究員 花田 卓爾 フイサン(株) 顧問

研究員 濱田 秋義 電源開発(株) 新エネルギー・技術開発部 新エネルギー

課長代理

研究員 松原 豊 日本重化学工業(株) 事業本部 小国工場 工場長

研究員 高稲 正美 日本酸素(株) 技術本部 供給技術部 技術グループ チーフ

(3) 財団法人エンジニアリング振興協会研究員

鈴木 孝男 常務理事
飯倉 督夫 常務理事
岡野 一清 技術部 WE-NET推進室 室長
丸山 晋一 研究主幹
佐藤 広昭 研究主幹
喜納 政宏 研究主幹

(4) オフザパー

増田 勝彦 通商産業省 工業技術院 ニューサシヤイン計画推進本部 研究開発官
富田 康治 研究開発官付
吉澤 由香 研究開発官付
木戸 達雄 新エネルギー・産業技術総合開発機構 水素・アルコール・バイオマス技術開発室
角田 克典 //

総括主任研究員

Summery

1. R&D Target

The target of study and investigation carried out since the fiscal 1993 are as follows:

- (1) Study and investigate about the demand of level and application technologies for hydrogen energy in the future by different mode of use (gaseous and liquid hydrogen etc.), make proposal for application technologies, clarify the advantage and disadvantage of each technology and identify development issues.
- (2) Develop element technologies, if needed, for each of the studied hydrogen utilization technologies.

In fiscal 1998, for achieving these targets, continue study on promising technologies for each area of application and develop element technologies for especially promising utilization technologies.

2. R&D result in fiscal 1998

2.1 Investigation and study for power generation

(1) System proof test

In fiscal 1998, basic characteristics such as combustion efficiency, indicated efficiency were determined, performing the combustion test wherein hydrogen is injected into argon-oxygen atmosphere and steam-oxygen atmosphere utilizing the rapid compression and expansion equipment installed in the Mechanical Engineering Laboratory of Agency of Industrial Science and Technology, aiming to proof actually for realizability of the two system, namely the hydrogen diesel engine cogeneration of argon circulation type and steam circulating type.

As the result, combustion efficiency more than 90%, and indication efficiency of approximately 42.4% (HHV value) for the argon circulation type and of approximately 33.9%(HHV value) for the steam circulation type were achieved. So that realizability of the hydrogen diesel engine cogeneration system was confirmed and at the same time shifting to the actual proof test for single cylinder unit planed to perform from fiscal 1999 is prospected.

(2) Element technology proof test

The test of hydrogen injection device and hydrogen ignition device which are important element technologies were performed. The influence of injection nozzle diameter and injection nozzle number to the formation of jet flow and auto ignition phenomenon were observed through a visualizing equipment, furthermore, the forced ignition test using an arc ignition device and a laser ignition device were performed on trial and the ignition condition thereof was grasped.

① Observation of jet flow and auto ignition test

The hydrogen combustion under high pressure atmosphere was observed by the schlieren photographing that is an optical observation technique.

As the result, the injection characteristics that the jet flow angle is almost constant regardless the nozzle diameter, and the jet flow arrival distance is depend on small injection device when the nozzle diameter become small were grasped. Also, the auto ignition condition become clear, for example, the probability of auto ignition become higher when atmosphere temperature exceeds 950°C.

② Fundamental combustion test for hydrogen ignition test

The CDI (Condenser Discharging Ignition) method and the current interception method were tested as the ignition method of hydrogen by spark discharge using a spark plug. As the result, it was observed that the CDI method produce more stable ignition than the current interception method.

Furthermore, it was observed that the sure flame traveling is obtained at not more than 30 degree of nozzle angle through the twin nozzle test. The laser ignition method having high duration due to the non-contact method and high freedom for selection of the ignition position was adopted and made clear the condition in which the stable ignition is obtained.

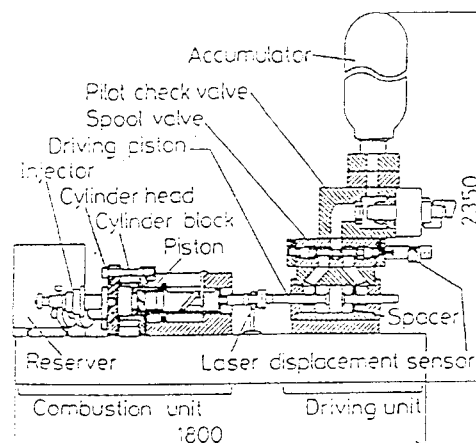


Image Drawing of the Rapid Compression and Expansion Device

2.2 Investigation and study for transportation means

In fiscal 1998, the introduction scenario of hydrogen automobiles and the environment LCA (Life Cycle Assessment) including the production process of automobiles which affect warming of globe etc. were performed, because it is estimated in the report of last year that the hydrogen automobiles will be introduced in the market within relative short period of time. Also, the issues which may occur when the hydrogen automobiles are introduced within a short time, for example, preparation of law and regulation, preparation of infrastructure and exhaust of carbon dioxide were investigated and studied.

(1) Introduction scenario

The technical and political issues were selected regarding to the introduction and popularization of hydrogen automobiles, studying the introduction from the view point of short term and mid and long term. Especially, it was pointed out that in order to popularize the hydrogen automobiles in earnest, the prototype hydrogen automobile qualified by the minister must be traveled soon and prepare the technical standard based on the actual proven data. In order to purchase and travel the hydrogen automobiles by popular users, it is necessary further process such as decontrol of qualification by the minister.

In the short term scenario, it was clarified that the establishment of technical standards is a very important factor to determine the commencement time of earnest popularization, preparing the issues to be cleared in process from actual proof test to practical use and earnest introduction during the period till 2010. In the mid and long term view point, it was considered that greater part of automobiles will be family cars and vans when it is assumed that five million automobiles will spread in 2030. It is necessary to increase the hydrogen refueling stations together with increasing of vehicles, therefore it was proposed that the development for hydrogen supply equipment with low cost is essential.

(2) Environment LCA

The study of energy efficiency and exhaust of carbon dioxide in the fuel cycle (analysis along energy flow) was performed, concerning the hydrogen fuel cell automobiles mounting hydrogen produced from regenerable energy and natural gas as primary energy.

Object of studying is family car or wagon car correspond to gasoline automobile with displacement of 1500cc.

It was clarified that there is possibility of the primary energy consumption of fuel cell automobiles become less than half of the current automobiles according to the fuel

cycle analysis and become about half even in LCA. It was concluded that the energy flow with highest efficiency is the system of hydrogen refueling station produced by solar cell, and the next is the system in which natural gas transmitted through the pipe line is transported to the consuming area and is reformed at the station.

Although the exhaust volume of carbon dioxide is only generated in the manufacturing process of automobiles when regenerable energy is used as primary energy, it was concluded that the exhaust volume of carbon dioxide even when natural gas is used as primary energy can be reduced less than about 40% in respect of the current automobiles, and less than half even in LCA.

2.3 Investigation and study for fuel cell utilizing pure hydrogen

In fiscal 1998, market research of the polymer electrolyte fuel cell(PEFC) utilizing pure hydrogen in the period of about 2010 to 2030 was performed. Also, the specification, the manufacturing method and the materials of PEFC were investigated for LCA of the fuel cell automobiles.

(1) Market research of PEFC utilizing pure hydrogen

① For electric enterprise

The hydrogen combustion turbine generators are suitable to the large capacity power generation for electric enterprise. As for market of the fuel cell, the distributed power generation with MW class and the peak cut power generation are taken into consideration, however, popularization of the distributed power generation is issue in the future, so that the estimation of market is difficult in this moment.

② For industry

The introduction of fuel cell with 100kW to 5000kW class is possible and introduction to salt electrolysis, petrochemistry and steel works where hydrogen are produced as a secondary product are considered.

③ For public welfare and business

70% of the power generation plants are not more than 500kW, and it is necessary to compete with the existing equipment economically that hydrogen price must be not more than 25 Yen/Nm³, equipment price must be not more than 0.15 million Yen/kW and unit price of the power generation must be not more than about 22 Yen/kWh.

④ For transportable power generation equipment

The price of existing equipment are degree of 40 to 80 kYen/kW and inexpensive, however, the requirement of low noise for construction power source in night is very strong, so that the introduction into market can be expected even expensive some degree.

⑤ For automobiles

In the present, world wide automobile manufacturers are endeavoring to develop the fuel cell automobile of methanol reforming type and pure hydrogen type, but the ultimate automobile is said as the pure hydrogen type.

It is supposed that the introduction of fuel cell automobiles into the market will begin about 2004, and will grow up to several million about 2030 corresponding to the preparation of hydrogen supply base.

⑥ For other market

There are market for propulsion of ship, for space and for household other than above.

(2) Investigation of fuel cell data for LCA of fuel cell automobiles

The specification of 25kW stack with the membrane humidifier was estimated, modeling the newest stack of Ballard's Mark 7 which seemed to be mounted on NECAR II and NECAR III of Daimler-Benz by Barad. In addition, the material and the dimension of each components such as cells, humidifiers, end plates, as well as used amount materials per stack was calculated, assuming the manufacturing method of membrane-electrode assemblies and separators for cells and humidifiers.

2.4 Investigation and study for cryogenic energy application

The study of distributed type oxygen supply equipment utilizing the cryogenic energy of liquid hydrogen was performed.

(1) Study for a combined cycle of He brayton cycle utilizing liquid hydrogen cryogenic energy and oxygen production equipment

In order to optimize the combination of oxygen production equipment and He brayton cycle utilizing the liquid hydrogen cryogenic energy, three cases of He conditions were studied (supply/return temperature: 140.7/199.4, 152.7/217.3, 166.6/232.7K) and the specific power consumption of oxygen for each case was calculated. Furthermore, economical comparison with the conventional process was performed.

Typical results are

Produced oxygen concentration : 96.0%

Production rate: 1651Nm³/h(as pure oxygen)

Specific power consumption of oxygen: 0.330kWh/Nm³(as pure oxygen)

(2) Study for cryogenic VSA utilizing liquid hydrogen

The specification was clarified with performing the simulation analysis in a practical equipment scale and that the specific power consumption of oxygen was

calculated against the oxygen yield and concentration. It is found that the specific power consumption of oxygen decreases with decrease of concentration.

Typical results are

Produced oxygen concentration : 93.0%

Production rate: 484Nm³/h(as pure oxygen)

Specific power consumption of oxygen: 0.66kWh/Nm³(as pure oxygen)

(3) Study for air separation equipment utilizing liquid hydrogen

The specific power consumption of oxygen and the rough production cost was calculated on trial, when production scale, oxygen concentration and oxygen pressure were varied for the air separation equipment where oxygen gas is produced utilizing the cryogenic energy of liquid hydrogen.

Typical results are

Produced oxygen concentration : 96.0%

Production rate: 1651Nm³/h(as pure oxygen)

Specific power consumption of oxygen: 0.441kWh/Nm³(as pure oxygen)

(4) Study for measuring method of thermal conductivity of solid air

The features, the comprised equipment and the equipment price were studied regarding to the transient hot-wire method, the forced Rayleigh scattering method and the radial steady heat flow method. It was clarified that the recommendable method for measuring of the thermal conductivity of solid nitrogen are in order of the transient hot-wire method, the forced Rayleigh scattering method and the radial steady heat flow method.

Through the study from (1) to (4) , improvement of the specific power consumption of oxygen become possible in spite of the small scale oxygen production equipment owing to the utilization of cryogenic energy and the proposal of original combined cycle by our WG.

However, economical merit could not be found out under the present condition compared with the conventional oxygen production process.

The important issues of further study are the basic research for thermal properties and basic thermal conductive mechanism of solid air (nitrogen) including the cost reduction means, which enables the design of direct heat exchange between hydrogen and oxygen, as well as the basic test at laboratory scale for the temperature dependence of mass transfer coefficient as is pointed out by VSA.

2.5 Investigation and study for hydrogen refueling station

In fiscal 1998, the following concrete items were investigated and studied, following the report of last year concerned with the study of hydrogen supply system and issues thereof, and supposing the various utilization method for hydrogen supply to the hydrogen automobiles through the distributed type hydrogen refueling station where produces hydrogen from regeneratable energy including natural gas, as a countermeasure during the period till large amount of hydrogen become possible to import.

① The hydrogen production technology, the transportation technology, the storage technology and the filling technology were investigated and studied, and summarized the various issues, the performance of efficiency and pressure etc. and the suppression for generation of boil off gas.

② Configuration of hydrogen refueling station

- System where hydrogen is produced at supplying site: Four systems (the reforming of natural gas, the reforming of methanol, the alkali water electrolysis, the solid polymer water electrolysis, the combination of solar generation and solid polymer water electrolysis) were investigated and studied.

- System where hydrogen is produced collectively out of refueling station: The system where liquid or high pressure hydrogen produced collectively at a hydrogen storage base and supplied to the hydrogen refueling stations through transportation by tank lorry etc. was investigated and studied. Also, it is clarified that liquid hydrogen can be transported through the current transportation system.

③ Result of cost analysis for various refueling station

The supposed supplying cost of hydrogen refueling stations was compared and studied under the ideal conditions. As the result, the details of cost structure become possible to read directly from the diagram, in other hand the economical factors at the present was clarified, for example, in the case of high pressure hydrogen the transportation cost is given much weight, and in the case of water electrolysis method the electricity price is given much weight at the production process. It is also important for the selection of hydrogen refueling station system that the both system must be studied under consideration of the preparation state of infrastructure at the installed location, so that this study offers one solution against the various selection possibilities.

3. Further plan and issues

Fiscal 1999 is the initial year when entire WE-NET are active as the second phase. Therefore, investigations and studies will be newly promoted re-constructing the project.

(1) Power generation technology

A hydrogen diesel engine of 100 kW class with single cylinder will be developed for cogeneration plant. The engine shall not exhaust environment affecting substances and shall be possible to achieve the efficiency at transmission terminal of about 45% and total efficiency of higher than 85% (based on HHV)

The development and continuous operation test will be carried out and research and development issues for actual use will be extracted.

(2) Hydrogen automobile system

The development of elementally technology of the fuel system for the hydrogen fuel cell automobile keeping in mind the fuel supply from a hydrogen refueling station will be performed. The technical verification of hydrogen automobile system combined with the hydrogen supply system, as well as the evaluation of energy efficiency etc. will be carried out.

(3) Polymer electrolyte fuel cells supplied pure hydrogen

The elementally technology of the fuel cell power generation system suitable for pure hydrogen fuel will be established, and will be verified the power generation system with 30 to 50 kW for fixed installation. The system shall be possible to achieve the efficiency at transmission terminal of about 45% (based on HHV, and about 50% based on LHV).

(4) Hydrogen refueling station

In order to establish the elementally and systematization technology of the stand alone type hydrogen refueling station aiming to supply fuel to the hydrogen automobile, a small scale testing system with 30 Nm³/h correspond to about 1/10 of hydrogen supply ability for actual scale will be developed and verified.

概 要

1. 研究開発目標

平成5年度から実施している本調査・検討の目標は以下のとおりである。

- (1) 将来における水素エネルギーの利用技術および需要量について、水素ガス、液体水素等の利用形態別に調査・検討を行い、利用技術の提案を実施し、各技術の得失を明確にするとともに開発課題を抽出する。
- (2) 検討した各水素利用技術について必要に応じ要素技術開発を行う。

平成10年度は、以上の目標を達成するため、利用技術分野毎に将来有望となる技術の調査を継続し、特に有望な利用技術については、要素技術開発を行った。

2. 平成10年度の研究開発成果

2.1 動力発生に関する調査・検討

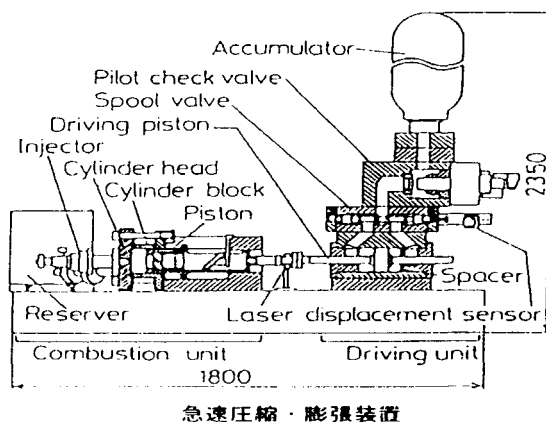
(1) システムの検証試験

平成10年度は、アルゴン循環型および水蒸気循環型水素ディーゼルコージェネレーションの2方式の実現性を実証するため、工業技術院機械技術研究所に設置した急速圧縮・膨張装置を用いて、アルゴン—酸素および水蒸気—酸素雰囲気中に水素を噴射する燃焼試験を実施し、燃焼効率、図示熱効率などの基本性能を求めた。

その結果、燃焼効率は95%以上が、図示熱効率はアルゴン循環型ではおよそ45～55%、水蒸気循環型では35%程度が得られ、水素ディーゼルコージェネレーションシステムの実現性が確認されたと同時に、平成11年度以降予定されている単筒機による実証試験、検証へ移行出来る目途を得た。

(2) 要素技術の検証試験

重要な要素技術である水素噴射弁および水素着火装置に関する試験を行った。噴流形成に及ぼす噴口径、噴口数などの影響、自着火現象を可視化装置により観測するとともに火花点火装置およびレーザー着火装置による強制着火を試み、その着火条件を把握した。



①噴流観察および自着火試験

高圧雰囲気下での水素燃焼を光学的観察手法のシュリーレン撮影により観察した結果、噴口径によらず噴流角はほぼ一定、噴口径が小さくなると噴流到達距離は小噴射弁に依存した噴流特性を把握した。また、雰囲気温度が950Kを越すと、自着火の確率が高くなるなどの自着火条件も明らかにした。

②水素着火試験基礎燃焼試験

点火栓を用いて火花放電により水素を着火させる方式として、CDI（コンデンサー放電着火）方式および電流遮断方式を試験した。その結果、CDI方式は電流遮断方式に比べ、より安定した着火をもたらすとの観察結果を得た。

また、二噴口ノズル試験から、噴口間角度が30度以下では確実に火移りすることが観察された。非接触のため耐久性が高く、点火位置選択の自由度が高いレーザー着火方式を適用し、着火が安定して得られる条件を明らかにした。

2.2 輸送機関に関する調査・検討

平成10年度は昨年度の報告内容を踏まえ、比較的短期間で水素自動車が市場へ導入されると予測されている水素自動車の導入シナリオおよび自動車の製造過程を含めた環境LCA（ライフサイクルアセスメント）を実施した。また、短期に導入を図る場合の課題、例えば法整備、インフラ整備および二酸化炭素の排出等の調査・検討を行った。

(1) 導入シナリオ

水素自動車の導入・普及について短期および中長期的観点からの導入の検討を行い、技術的、政策的な課題を抽出した。特に、水素自動車の本格的な普及には大臣認定等による水素自動車を早急に走行させ、この実証データを基に技術基準を整備することが重要との結論を得た。一般のユーザーが車両を購入し使用するためには、さらに大臣認定を解除するための規制緩和のプロセスを経ることが必要である。

短期導入シナリオでは2010年までの期間において実証から実用、本格導入に至る過程でクリアすべき事柄を整理し、技術基準の制定が本格普及の開始時期を決める大きな要因であることを明確にした。中長期の観点からは2030年に約500万台の普及を想定すると、乗用車とバンが大半を占めるものと考えられる。車両の増加と共に水素供給ステーションの設置数を増加させることが必要であり、低コストの水素供給装置の開発が重要との結論を得た。

(2) 環境LCA

再生可能エネルギーと天然ガスを一次エネルギーとした水素を搭載する水素燃料電池自動車について、フューエルサイクル（エネルギーフローに沿った分析）でのエネルギー効率や二酸化炭素の排出の検討を行った。

検討対象は、排気量1500ccのガソリン自動車相当の乗用車またはワゴン車とし

た。燃料電池自動車の一次エネルギー消費はフューエルサイクル分析のでは現行車の半分以上そして LCA でも約半分になる可能性があることを明らかにした。最も効率の高いエネルギーフローは太陽光発電で水素をオンサイト製造して燃料電池自動車に用いるフローで、ついでパイプラインで送られた天然ガスを消費地まで運んでステーションで改質して燃料電池自動車に用いるフローであるとの結論を得た。

また、二酸化炭素の排出量は再生可能エネルギーを一次エネルギーとする場合は二酸化炭素の排出量は自動車製造段階のみと仮定したが、天然ガスを一次エネルギーとする場合でも現行車に対し約 40%以下、LCA でも半分以上に低減可能であるなどの結果を得た。

2.3 純水素利用燃料電池に関する調査・検討

平成 10 年度は、2010 年～2030 年頃の純水素固体高分子型燃料電池の市場調査を行った。また、燃料電池自動車の LCA のために、固体高分子燃料電池の仕様、製造法および材料を調査した。

(1) 純水素固体高分子型燃料電池の市場調査

① 電気事業用

電力事業用の大容量発電には水素燃焼タービン発電が適している。燃料電池の市場としては MW 級の分散発電用とピークカット用などが考えられるが、分散型の普及は将来の課題となっているため、現在その市場を予測することは困難との結論を得た。

② 産業用

100kW から 5000kW 級の燃料電池が考えられ、副生水素を発生する食塩電解、石油化学および鉄鋼などの工場への導入が考えられる。

③ 民生業務用

プラントの 70%は 500kW 以下で、燃料電池が既存設備と経済的に競合するには、水素価格 25 円/Nm³ 以下、設備価格が 15 万円/kW 以下、そして発電単価が 22 円/kWh 程度になる必要があるとの結論を得た。

④ 移動用発電装置

既存の設備価格は 4～8 万円/kW 程度で安価であるが、夜間に使用する工事用電源に対する低騒音化の要求は非常に強いため、ある程度価格が高くても市場導入が期待できる。

⑤ 自動車用

自動車駆動用として、現在、世界の自動車メーカーはメタノール改質型燃料電池自動車と純水素燃料電池自動車の開発に注力しているが、究極の車は後者とされている。燃料電池自動車は 2004 年頃から市場導入が始まり、水素供給基盤（インフラストラクチャー）の整備に応じて、2030 年頃には数百万台になると想定される。

⑥ その他の市場

その他の市場として、船舶推進用、宇宙用、家庭用などがある。

(2) 燃料電池自動車のLCAのための燃料電池データの調査

巴拉ード社がダイムラーベンツ社のNECAR IIやNECAR IIIに搭載したと見られる最新のスタック Mark7 型をモデルに、膜加湿方式を前提に、25kW スタックの仕様を推定した。更に、膜・電極接合体やセル部セパレータや加湿部セパレータの製法を想定し、セル部や加湿部、端板など各部の材質、寸法やスタック当たりの使用量を試算した。

2.4 冷熱利用に関する調査・検討

液体水素の冷熱を利用した分散型酸素供給装置について検討した。

(1) 液体水素冷熱利用He(ヘリウム)ブレイトンサイクル発電と酸素製造装置の複合サイクルの検討

酸素製造装置とHeブレイトンサイクル冷熱発電の組み合わせの最適化を行うためにHeの条件を3ケース(供給/返送温度:140.7/199.4、152.7/217.3、166.6/232.7K)想定し、酸素製造装置の製造動力原単位を算出した。また、通常プロセスとの経済性の比較を行った。

製造動力原単位の試算結果の例

製品酸素濃度 : 96.0 %、 生産量 : 1,651Nm³/h(100%酸素換算)

製造動力原単位 : 0.330 kWh/Nm³ - 純酸素

(2) 液体水素利用低温VSAの検討

実装置規模のシミュレーション解析を実施して仕様を確定し、製品酸素濃度に対する製造電力原単位を試算した。この結果製品酸素濃度の低下とともに製造動力原単位は減少することを確認した。

製造電力原単位の試算結果の例

製品酸素濃度 : 93.0 %、 生産量 : 484Nm³/h(100%酸素換算)

製造動力原単位 : 0.66 kWh/Nm³ - 純酸素

(3) 液体水素利用空気分離装置の検討

液体水素の冷熱を利用し酸素ガスを製造する空気分離装置において、製造規模、酸素純度、酸素圧力を変えたときの製造電力原単位と概略製造コストを試算した。

製造電力原単位の試算結果の例

製品酸素濃度 : 96.0 %、 生産量 : 1,651Nm³/h(100%酸素換算)

製造電力原単位 : 0.411 kWh/Nm³ - 純酸素

(4) 固化空気の熱伝導率測定法の検討

細線加熱法、強制レーリー散乱法および径方向定常熱流法について、特徴、構成機器、設備価格などを検討した。細線加熱法、強制レーリー散乱法および径方向定常熱流法の順序で固化窒素の熱伝導率測定に適切なことがわかった。

以上の(1)から(4)の検討の結果、水素冷熱の利用や本WG独自の複合サイクルの提案によって、酸素製造装置が小規模であるにもかかわらず酸素製造動力単位に向上が見込めることを確認したものの、通常の酸素製造プロセスと比べると、現状では経済性の面でメリットは見出せない結果になった。また、今後の課題としては、コスト削減方法も含めて、水素・酸素の直接熱交換の設計を可能とする固化空気(窒素)の熱物性値や基本伝熱メカニズム等の基礎研究、VSAにおいて指摘するように物質移動係数の温度依存性などの研究室段階での基礎試験が重要な課題であることを明確にした。

2.5 水素供給ステーションに関する調査・検討

平成10年度は、昨年度の水素供給システムの検討とその課題の報告を受け、多量の輸入水素が見込める迄の間の対応として、天然ガス等の再生可能エネルギー以外から水素を製造する分散型水素供給ステーションによる水素自動車への水素供給を前提とした各種の利用方式を想定し、具体的な課題について調査・検討を行った。

①水素製造技術、輸送技術、貯蔵技術および充填技術を調査・検討し、各種課題、効率、圧力等の性能、BOG（ボイルオフガス）発生策の抑制をまとめた。

②水素供給ステーションの形態

- ・供給サイトで水素を製造する方式：4方式（天然ガス改質、メタノール改質、アルカリ水電解、固体高分子電解質型水電解、太陽光発電に固体高分子電解質型水電解の組み合わせ）を調査・検討した。

- ・供給する場所以外で集中的に水素製造する方式：水素貯蔵基地で集中製造された液体水素または高圧ガスをタンクローリ等で輸送し水素供給ステーションに供給する方式を調査・検討した。なお、液体水素は現状の配送方式で可能であることを示した。

③各種供給ステーションのコスト分析結果

水素供給ステーションの価格について、理想条件の下で想定される供給コストを比較・検討した。この結果、価格構成の内訳を明確にし、例えば高圧水素では輸送コストの比重が高い、水電解方式においては製造費における電気料金が大きな比重を占める等の現状の経済的な問題点を明らかにした。水素供給ステーションの方式の選択は設置する場所のインフラ整備状況等を考慮し検討することが重要であり、多くの選択肢に対する一つの判断材料となると考えられる。

3 今後の進め方および課題

平成11年度は、WE-NET全体が第II期として活動する初年度である。従ってプロジェクトを再構築し新たに調査・検討を進める。

(1) 動力発生技術

- ・環境影響物質無排出、送電端効率 45%程度及び総合効率 85%以上（高位発熱量基準）を達成しうるコージェネレーション用の、単筒機で 100kW 級水素ディーゼル

エンジンを開発する。

- ・ 100kW級ディーゼル単筒機の開発 連続運転試験を実施し、実用化のための研究開発課題を抽出する。

(2) 水素自動車システム

水素供給ステーションからの供給を考慮した水素燃料電池自動車の燃料系システムの要素技術開発を行う。水素供給ステーションと組み合わせた水素自動車システムの技術検証を行うとともに、エネルギー効率等について評価を行う。

(3) 純水素供給固体高分子型燃料電池

送電端効率 45%程度（高位発熱量基準、低位発熱量基準で 50%程度）を達成しうる純水素燃料に適合した燃料電池発電システムの要素技術確立し、定置用 30～50 kW 級発電システムの実証を行う。

(4) 水素供給ステーション

水素自動車への燃料供給を目的としたスタンドアロンタイプの水素供給ステーションの要素技術及びシステム化技術確立するため、実用規模の水素供給能力の 10 分の 1 程度に相当する 30Nm³/時の省規模試験システムの開発を行う。

1. 動力発生に関する調査・検討

1.1 はじめに

昨年度まで実施した机上検討により、アルゴンと水蒸気をそれぞれ動作流体として、燃焼室内に直接、水素を噴射して燃焼させる二つの方式を選択した。アルゴン循環型水素コジェネレーションシステムは、アルゴンの高い比熱比を利用して理論的に高効率が可能だが、アルゴンは分子量が40と重いので、この雰囲気中で軽い気体の水素噴流が短時間に十分混合するかどうかの問題である。また、圧縮温度が空気雰囲気の場合に比べて高くなるため、燃焼室壁面からの熱損失が増加し、これが熱効率の向上を阻害する恐れもある。一方、水蒸気循環型は、エンジン自体の熱効率は空気雰囲気の場合より劣るが、排気の持つ高いエンタルピーを蒸気タービンで回収し、システム全体の効率を向上させることを狙いとしている。課題は、水蒸気中での水素噴流の着火の確実性および水蒸気の燃焼室壁への凝縮と考えられる。

本年度は、まず水素噴射装置の開発とその性能試験を実施した。ここでは針弁の潤滑のための潤滑油が水素燃料に混入する問題はOリングの装着によってクリアした。弁座部での水素漏洩の問題が残ったが、これはシート材料の選択によって改善できる見通しである。

ついでアルゴン循環型について、この噴射弁を用いて急速圧縮・膨張装置内の水素噴流の着火遅れに及ぼす各種因子の影響を調べた。その結果、アルゴン循環型では全般的に圧縮温度が高いため、比較的容易に自着火が生ずることを明らかにした。ただし広範な実機運転条件下での着火を確保するため点火装置の検討も行った。従来の火花点火式では点火栓の熱的負荷が高いため耐久性に問題が生じる恐れがある。ここでは半導体レーザーによる点火方式を検討している。すなわち、ピストン表面に SUS304 から成るターゲットを4箇所設け、ここにレーザーを照射することによって水素噴流に着火する方式を検討している。

水蒸気循環型については、不活性雰囲気中の水素噴流の発達状況の観察を行った後、着火性試験を実施した。その結果、水蒸気循環型では、圧縮温度が低いため低負荷時の自己着火は確実性に欠けることが明らかとなった。電流遮断式と CDI（コンデンサー放電着火）方式を用いた強制点火を検討し、安定した着火と燃焼が可能であることを示した。また、実機が多噴口ノズルを模擬して2噴口ノズルを用い、2つの噴流間の角度を変え、一方の噴流に点火した場合に他方の噴流に火炎が伝播する様子を観察した。さらに図示熱効率と燃焼効率について調べ、燃焼効率は十分高いものの、トップクリアランス部における水蒸気の凝縮が熱効率を低下させる可能性があることを確認した。

この他、水素噴流の燃焼基礎試験、すなわち、高温・高圧雰囲気における噴流の発達状況、自着火に及ぼす雰囲気温度の影響、着火遅れに及ぼす噴口径の影響などを実施した。また、上記の急速圧縮・膨張装置を用いた燃焼試験や今後の単筒エンジン実験用に必要な水素供給装置の開発も進めた。さらにアルゴン雰囲気中の水素噴流の挙動について、KIVAコードを用いたシミュレーションを実施した。

サーボアンプを介して電子的に制御される。同時に、制御用コンピュータはデータ取得装置、カメラ、水素噴射装置および着火装置の同期信号の供給、燃焼室およびピストン用温度調節器の制御の役割も担っている。

形式	電子制御油圧駆動方式
燃焼室シリンダー径(mm)	φ100
ストローク(mm)	最大120
燃焼室許容圧力(MPa)	15
燃焼室加熱温度(°C)	200
相当回転数(rpm)	最高1000
ピストン駆動力(kN)	最大150

表 1.2.1-1 急速圧縮・膨張装置仕様

急速圧縮・膨張装置のピストン頂部には、燃焼室形状が任意に変えられるように、ピストンラウンドが取り付けられ、これと燃焼室ヘッドおよびシリンダーで形成される空間が燃焼室となる。今回の実験では、燃焼室ヘッドはすべて、その内面が平坦なものを使用した。図 1.2.1-2 に今回使用したピストンラウンドの形状を示してある。未広がり状のものをタイプ I、三日月状のものをタイプ II と呼ぶことにする。ピストンラウンドの凹部を鏡面仕上げあるいは凹部に光学ミラーを貼りつけることで、さらに、全体あるいは一部を石英ガラスとした燃焼室ヘッドを用意して、シュリーレン観測が行えるようにした。

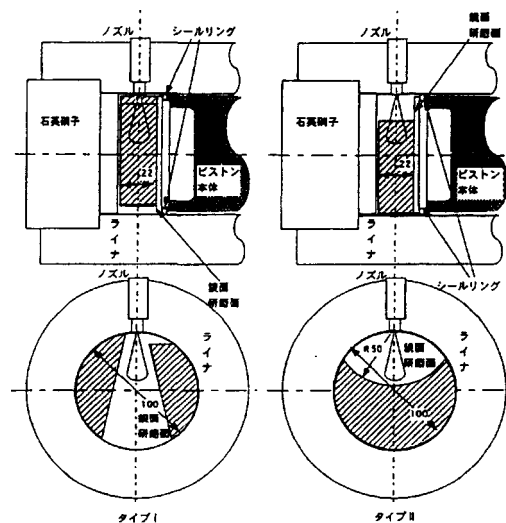


図 1.2.1-2 燃焼室形状(タイプ I、タイプ II)

(1) 噴射装置

高圧水素ガス噴射装置は、これまで武蔵工業大学をはじめとして幾つかの大学、企業でエンジン試験用や基礎試験用として試作されており、ディーゼル燃料噴射ポンプを噴射弁の駆動に利用したもの、油圧を電磁弁で制御し噴射弁を駆動するもの、ソレノイドバルブで直接水素噴射を制御するものなどが見られる。今回の実験では、単発噴射が可能であること、水素を確実にシールできること、噴射期間や噴射時期を自由に選べること、エンジン試験用噴射弁の基礎となることが要

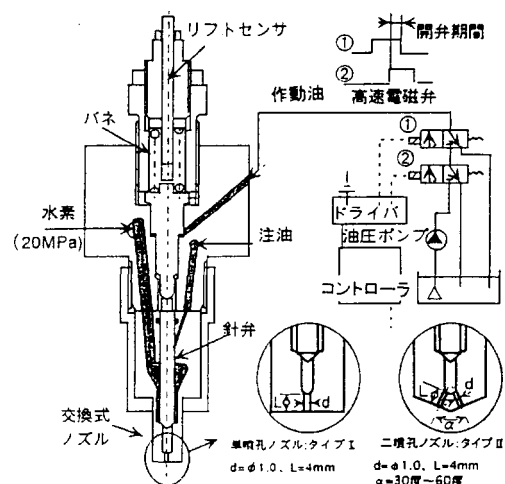


図 1.2.1-3 噴射装置と噴射ノズル形状

求されるため、電子制御油圧駆動方式の水素噴射弁を採用した。図 1.2.1-3 に示すように、油圧ポンプにより蓄圧された作動油は電磁弁の開閉により噴射弁本体に導かれ、ばね力に打ち勝って作動ピストンを押し上げる。これにより針弁が持ち上がり、針弁シート部まで導かれた高圧の水素がノズルから噴射される。針弁の潤滑とシート部のシールの役目を果たす注油は針弁を伝わってシート部にまで達する。噴射期間が 5ms 以上では流量係数はほぼ一定になり、噴射量の制御が容易になることが噴射弁の単体試験から確認されている。また、水素のシート部からの漏れは、定格噴射量に比べて十分少ないことも確認されている。ただし、今回のような単発試験では、実験間隔が長いため、注油がシート部に溜まり、水素噴射とともに多量に噴出した。そのため、初期には、注油ラインは切ってドライの状態にし、その後は噴射弁針弁に O-リングを装着して、実験を行った。

水素噴射ノズル形状が水素噴流の挙動に与える影響を調べるため、噴孔長さや噴孔形状が異なる噴射ノズルを試作したが、本実験範囲では、ノズル形状が与える影響は極めて少ないことが予備的実験から確かめられたので、以下の実験では、図 1.2.1-3 に示す標準型の一噴孔(タイプⅠ)と二噴孔(タイプⅡ)の二種類のノズルを主として用いた。

(2) 着火装置

水素の自着火温度は軽油などのディーゼル燃料に比べて高いことが知られている。このため、特に圧縮比が低い場合や冷態始動時には起動できない場合が想定される。また、

項目	内容
最大出力電圧(kV)	30
放電エネルギー(mJ)	25,50,75,100,125,150(大気中)
放電持続時間(ms)	電流遮断式:2ms ODI方式:1ms
点火プラグ構造	電極長:30mm,50mm 内臓ヒータ付き
トリガー信号	RCM制御コンピュータより0-5V
モニター機能	電流、電圧のピーク値
放電エネルギー計測	電流、電圧波形計測より積分

表 1.2.1-2 火花点火装置仕様

高圧水蒸気雰囲気では、活性種の再結合速度が上昇して自着火しにくくなることも予想されるので、このような場合でも、確実に着火させ運転を開始できるようにするには、着火装置が必要となる。現在、一般的なガソリンエンジンでは数十 mJ の放電エネルギーが必要であるとされているが、上述の点を勘案して、25mJ を最低として 150mJ まで可変とした。また、点火方式としては放電波形の異なる電流遮断方式と CDI 方式の 2 種類の回路を用意した。また、点火プラグは通常使用されているプラグを、水蒸気の凝縮による漏電を防ぐためにヒーター内臓構造に、点火位置を噴射弁近傍に置けるよう電極を延長した構造に変えた。表 1.2.1-2 に着火装置の基本仕様を示す。

レーザー着火装置およびその実験結果については、2 章に詳しく述べられているので、省略する。

(3) ガス供給装置

ガス供給装置は、高圧水素ボンベから最高 25MPa まで昇圧できるアキュムレータから水素の噴射量を噴射前後の圧力降下から計測するためのバッファータンク(132.6cc)を通り、噴射弁につながる水素ライン、酸素と水蒸気又はアルゴンと混合する混合タンクから

燃焼室につながる酸化剤ラインから成る。アルゴンはボンベより、水蒸気は電気ボイラーから供給され、水蒸気の流れるラインおよび混合タンクは、凝縮を防ぐため、電気ヒーターで約 200℃に保温した。このほかに、燃焼室、供給ガスライン、混合タンクをパージするための窒素ボンベやそれらを排気するための真空ポンプが装備されている。実験中に、アキュムレータが破損し、作動油が燃焼室内に流入する事故があり、この危険性を避けるためアキュムレーターを駆動源としたピストン型の昇圧機を導入した。また、初期の混合タンクは自然混合方式を採用しており、完全な混合には 1 時間程度を要したため、攪拌装置付きの混合タンクを新たに製作して実験に供した。

1.2.2 測定方法

主要な観測項目としては、燃焼室圧力(AVL および共和電業製ピックアップ)、燃焼室容積を決めるピストン変位(キーエンス製レーザ変位計)、燃焼室初期圧力(共和電業製ピックアップ)、水素噴射圧力、水素噴射量、噴射弁リフト、K 型熱電対による燃焼室壁温度、点火電流・電圧、噴流のシュリーレン写真などがある。図 1.2.2-1 は、これら測定系と急速圧縮・膨張装置制御系の模式図である。

点火電流および点火電圧などの高速信号はストレージオシロスコープ(テクトロニクス製 TDS420-1F)で、燃焼室圧力、噴射弁リフト、制御信号などの中速信号はデジタルオシロスコープ(横川電機製 DL708)、バッファータンク差圧、燃焼室初期圧力、混合タンク圧力・温度などの信号はハイブリッドレコーダ(横川電機製 DR130)で各々記録し、GPIB を介してパーソナルコンピュータに送られる。水素噴流および着火・燃焼過程は、シュリーレン法あるいはシャドウグラフ法で可視化し、急速圧縮・膨張装置と同期を取った高速度力

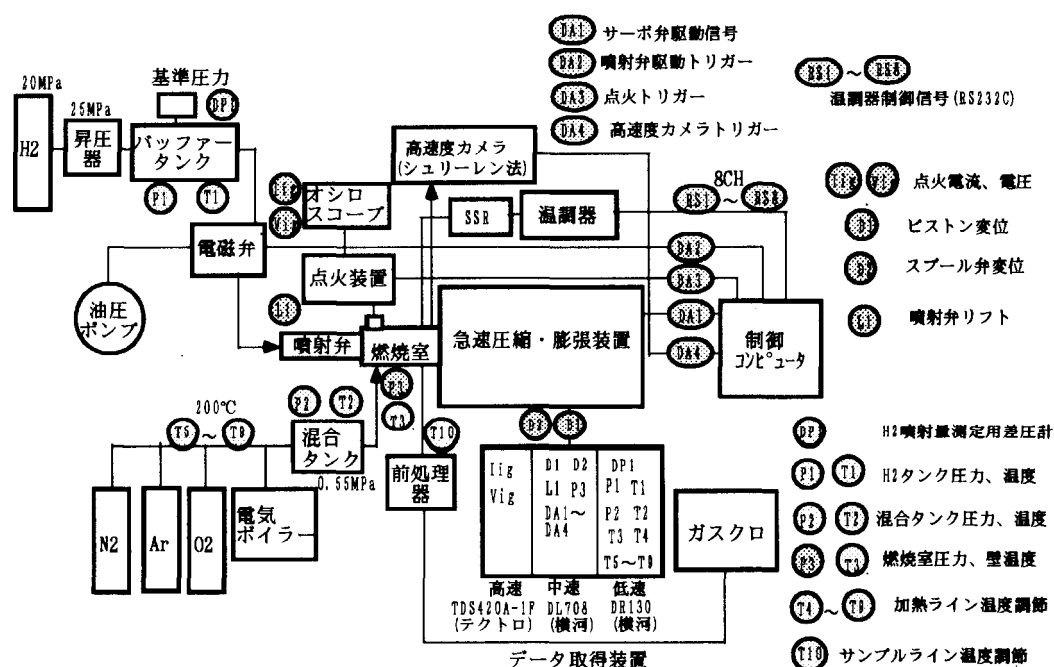


図 1.2.2-1 基礎燃焼試験装置の測定系と制御系

メウ(ULTRANAC)で撮影した後、噴流角、水素噴流到達距離、火炎の生成状況などを写真から測定・観察した。同時に、燃焼室内圧力、ピストン変位、噴射弁リフト波形より、水素噴射時の燃焼室内ガス温度、圧力、着火時期を決定して、自着火条件や着火遅れを求めた。

排気中の水素、酸素成分を

測定するため、水蒸気前処理装置とガスクロを用意した。ガスクロは、測定ガス中に多量の水蒸気が含まれると測定誤差が大きくなり、正確な測定が行なうことができなくなる。そのため、サンプルガスをアルゴンとメタンの混合気で希釈した後、水蒸気を凝縮器で除去してガスクロに導く前処理装置を製作した。このような手法により、水蒸気の

干渉を極力抑え、ガスクロで測定されるメタン濃度から排気中の水素および酸素濃度を算出することができる。図1.2.2-2は、前処理装置の模式図である。混合容器、冷却器、凝縮器を真空ポンプで排気した後、混合容器出口のバルブを閉じ、サンプルガスを一定圧まで導入する。そこに、希釈用のメタンとアルゴン混合気をさらに加え、完全に混合した後、冷却器および凝縮器を通してガスクロに送り込み、メタン、水素、酸素などの濃度を測定する。

燃焼室内ガス温度は圧力センサーから直接測定される圧力とし、サー変位計から求められる燃焼室体積より、状態方程式を用い算出し、着火遅れ時間は、噴流がノズル出口に現れてから燃焼室内圧力の急激な立ち上がりが観測されるまでの時間で定義した。噴射開始

時間は、噴射弁駆動トリガー信号から噴流が噴射ノズル

出口に現れるまでの時間遅れを予め測定しておき、実際の実験では、トリガー信号からこれらの遅れを考慮して、噴射開始時間を決めた。図1.2.2-3に本実験で得られる典型的な波形を示す。図示熱効率率は、PV線図を直接積分して得られる仕事量と水素噴射量と低位発熱量より算出した全発熱量との比から求めた。また、燃焼効率率は、ガスクロで測定した残留水素量から燃焼した水素量を求め、これと噴射された水素量との比から算出した。水素の噴射量は、差圧計で測定したバッファータンクの噴射前後の圧力降下と前もって測定したタンク容積と噴射弁までの配管容積から決定した。

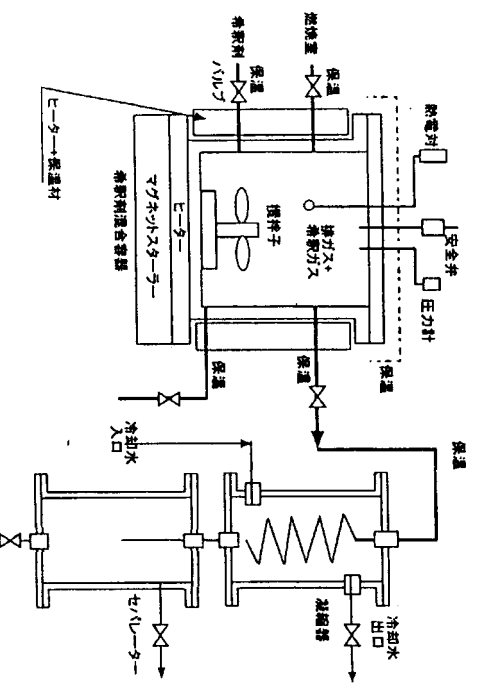


図 1.2.2-2 ガスクロ前処理装置

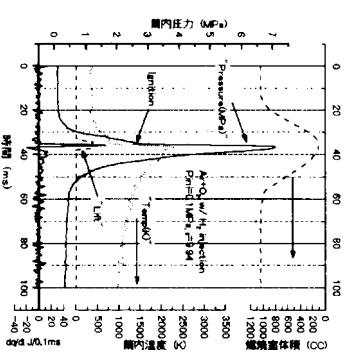


図 1.2.2-3 測定波形

1.3 アルゴン循環型水素コージェネレーションシステムの試験

1.3.1 水素噴射試験

(1) 目的

平成9年度に設計、製作した電子制御油圧駆動方式水素噴射装置を急速圧縮・膨張装置に装着して噴射し、燃焼室内での噴流の拡がり、到達距離に及ぼす噴射弁仕様、噴射圧力および燃焼室初期圧力の影響について明らかにし、エンジン用の水素噴射装置仕様作成の基礎データを得ることを目的とする。さらに、平成9年度に設計、製作した水素噴射弁はその構造から、針弁潤滑のための注油が水素噴流に混入することが考えられたため、今年度はこれを防止する構造の噴射弁を製作し噴射性能を評価することも目的とした。

(2) 方法

噴射試験時の燃焼室と水素噴射弁の配置を図1.3.1-1に示す。燃料弁上流に設けたバッファタンクを含む空間に水素を規定圧に充填してから急速圧縮・膨張装置内に1回噴射し、水素噴流の画像をシリンダヘッドに設けた観察窓からシュリーレン法により撮影した。ピストン変位、燃焼室圧力、および噴射弁の針弁リフトの信号は急速圧縮・膨張装置制御用コンピュータに収録した。

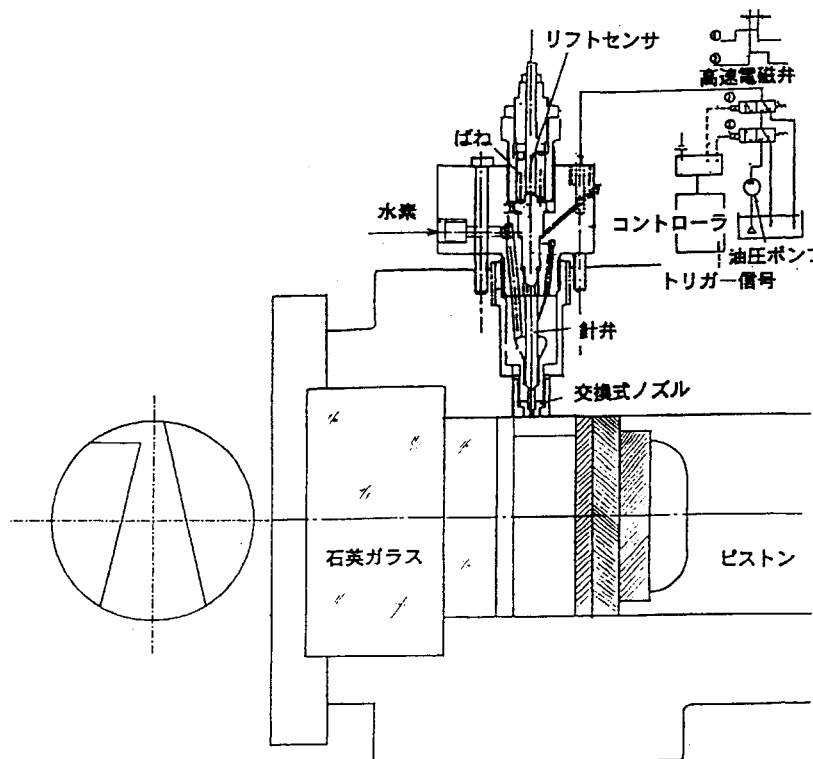


図 1.3.1-1 燃焼室と水素噴射弁の配置

$$y = \left(\frac{\rho_H}{\rho_a}\right)^{0.25} \left(\frac{2\kappa}{\kappa+1} R_H T_0\right)^{0.5} \left(\frac{\sqrt{cd}}{\tan\theta}\right)^{0.5} t^{0.5}$$

ここで

y : 到達距離、 ρ_a : 筒内ガス密度、 ρ_H : 水素密度、 κ : 水素比熱比 (=1.422)、

R_{H0} : 水素ガス定数 (=4124.6J/(kg・K))、 T_0 : 水素初期温度 (=293.15K)、

c : 噴孔量係数 (=0.8)、 d : 噴孔径 (=1mm)、噴流拡がり角 (=10°)、 t : 時間

噴流の拡がり角は厳密には筒内ガス密度と水素密度により変わってくるが、ここでは簡単のため概略実測値に合わせて 10° で一定とした。図 1.3.1-3 に示した実測値に対し絶対値および圧縮初期圧力、噴射圧力に対する変化傾向はおおむね一致していることがわかる。

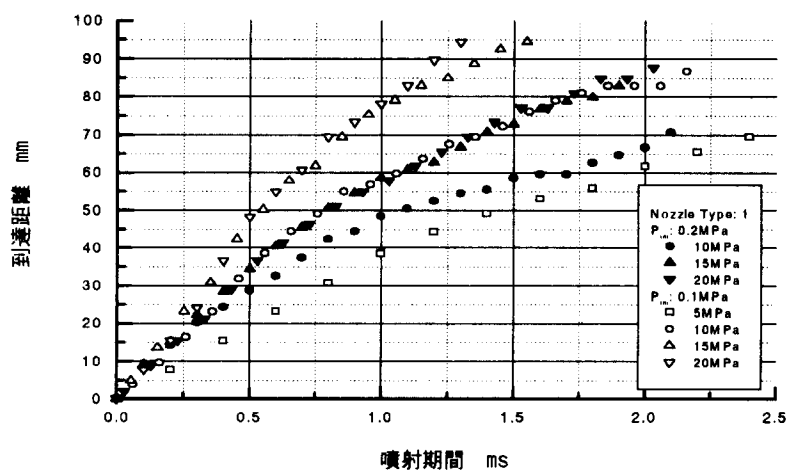


図 1.3.1-3 噴流到達距離の実測結果

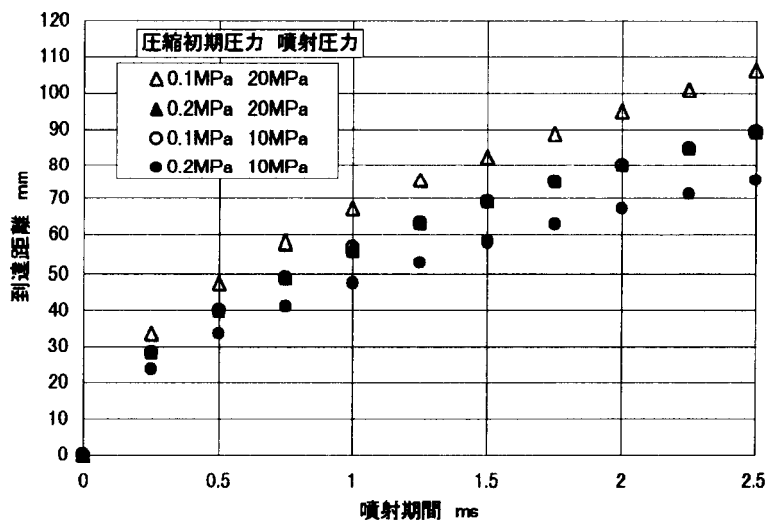


図 1.3.1-4 噴流到達距離の計算結果

b 噴射弁の改善

改善型噴射弁の構造を図 1.3.1-5 に示す。平成9年度に開発した燃料噴射弁では針弁潤滑のための注油が水素の噴流に混入した。これを防止するため、針弁摺動部の注油路との会合部より燃料溜まり側に新たに O-リングを設け、注油路との会合部より作動ピストン側の O-リングを廃止することとした。さらに、針弁シート部へ潤滑油が供給されなくなるため、針弁の材質を従来のステライトから SKH51 に強化した。

改善型燃料弁を使用して噴射試験を実施した結果、針弁潤滑のための注油が水素の噴流に混入することを防止できた。しかし、急速圧縮・膨張装置の運転停止期間中に燃料の水素がノズルチップから燃料室内へ漏洩することが判明した。針弁シート部に潤滑油が供給されなくなった結果、同部が乾いた状態になり水素をシールできなくなったものと推定される。

今後、針弁およびノズルチップシート部材質の改善あるいは噴射弁入口での漏洩防止弁の設置等を検討して行く。

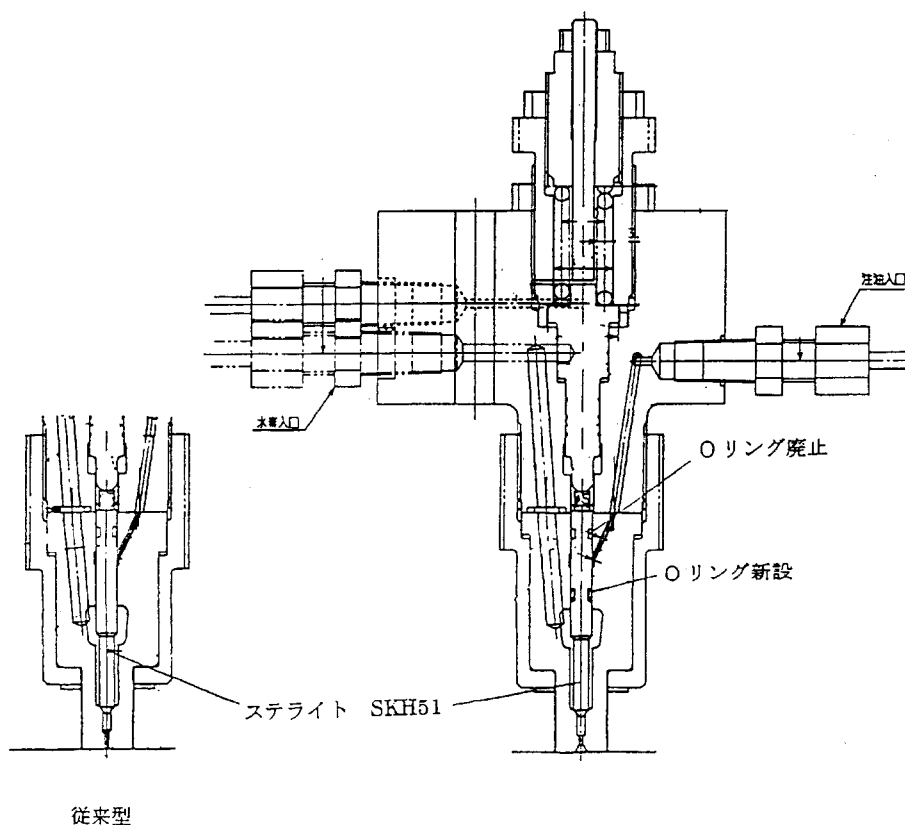


図 1.3.1-5 改善型噴射弁

1.3.2 燃焼試験

(1) 目的

急速圧縮・膨張装置に燃焼室を組み込んで水素を噴射・燃焼させて噴射弁仕様、圧縮比および給気条件が着火確率と時期、燃焼モードに与える影響について明らかにし、エンジン用の水素燃焼システム構築の基礎データを得ることを目的とする。

(2) 方法

噴射試験時と同様に水素を急速圧縮・膨張装置内に1回噴射して、噴射試験と同様に着火前後の水素噴流の画像およびピストン変位、燃焼室圧力、および噴射弁の針弁リフトの信号を記録した。

試験条件を表 1.3.2-1 に示す。

表 1.3.2-1 燃焼試験条件

噴射弁噴孔径	1mm、0.7mm
噴射弁噴孔長径比	4
圧縮比	9.9、13.8
作動ガス	アルゴン・酸素 (79 : 21、84.25 : 15.75)
給気温度	25、80、140℃
圧縮初期圧力	0.1、0.2MPa
急速圧縮・膨張装置の速度	1000min ⁻¹
噴射量	300Ncm ³
噴射圧力	5、10、15、20MPa
噴射時期	上死点

燃焼室形状を図 1.3.2-1 に示す。噴射された水素噴流は燃焼室キャビティの側面に衝突する配置とした。圧縮比はトップクリアランスとピストンキャビティ深さにより変化させ、ストロークは一定とした。

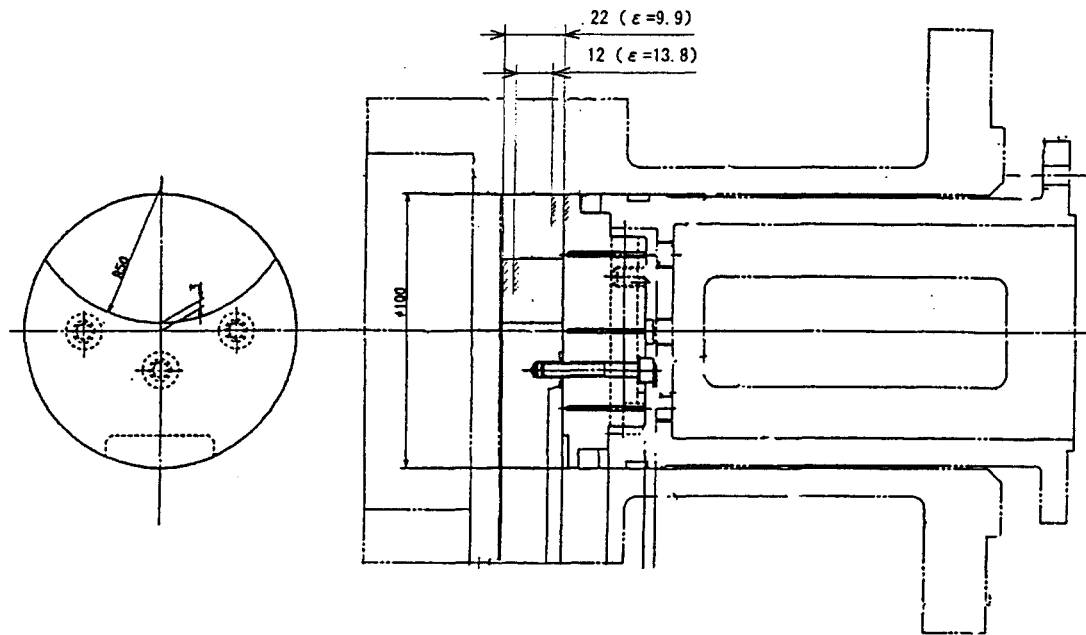


図 1.3.2-1 燃焼室形状

(3) 結果

a 噴射圧力と給気温度による着火遅れ

図 1.3.2-2 に水素噴流の代表的な着火・燃焼状況を示す。噴射圧力は 15MPa、圧縮初期圧力は 0.2MPa、燃焼室温度および給気温度は 25°C である。噴射開始後 1.33ms 前後で水素噴流は燃焼室壁面に到達し、同 1.50ms 前後で壁面近傍で着火している。着火の時期は、水素噴流が局所的に膨張し始める時期として写真上で判断している。

図 1.3.2-3 に同じ噴射圧力、圧縮初期圧力で燃焼室および給気温度を 80°C に高めた時の水素噴流の着火・燃焼状況を示す。噴射開始後 1.00ms 前後で水素噴流が燃焼室壁面に到達する前に着火している。燃焼室温度および給気温度を高めたことにより水素噴流は早く着火していると考えられる。

図 1.3.2-4 に噴射圧力と着火遅れの関係を圧縮初期圧力をパラメータとして示す。給気温度が 25°C の場合、噴射圧力が高いほど、圧縮初期圧力が低いほど着火遅れが短縮される傾向にある。噴射圧力が高いと燃料密度が高く噴流速度が減衰しにくいので、壁面への衝突により混合が促進される時期が早くなって着火遅れが短縮されるものと推定される。一方、圧縮初期圧力が低いと作動ガス密度が低く燃料と作動ガスの混合が促進されないので着火が早まるのが一般的である。しかしここでは、水素噴流の壁面への衝突が遅くなることの影響が大きいため着火遅れが短縮されるものと考えられる。

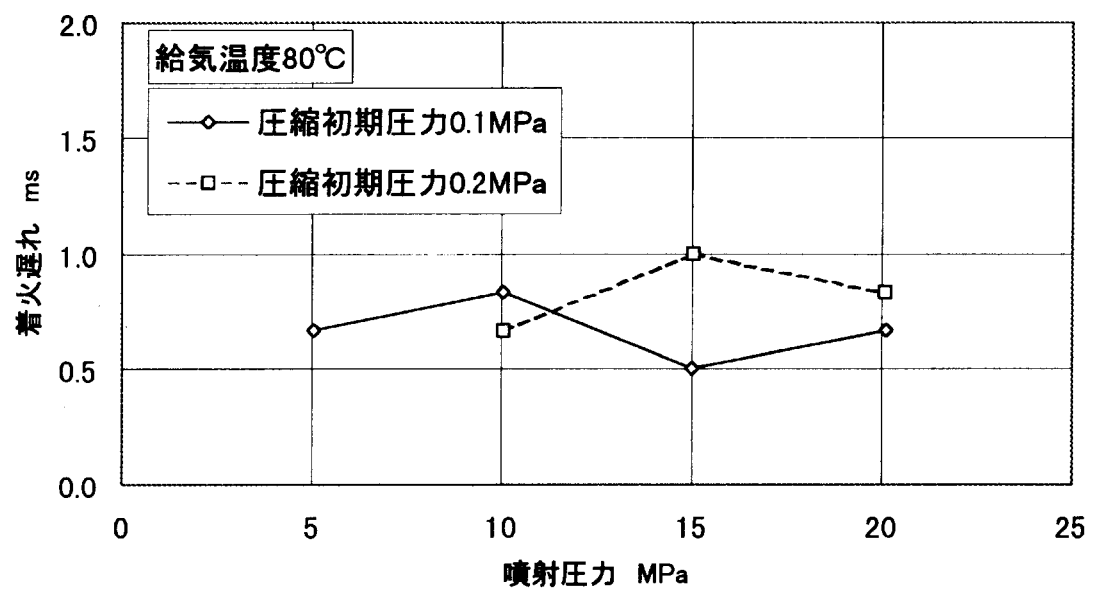
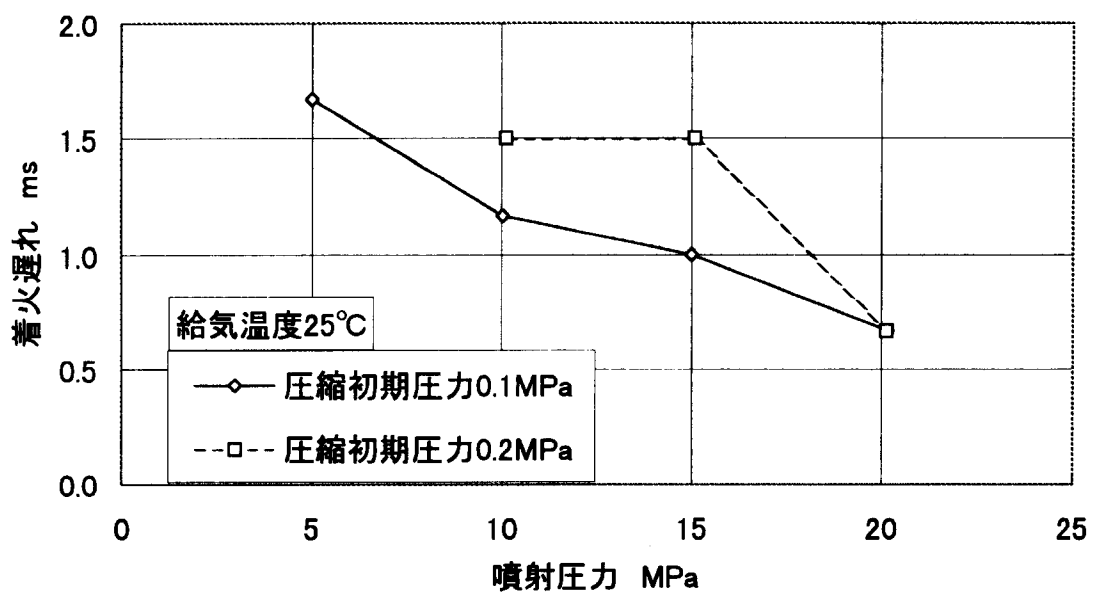


図 1.3.2-4 噴射圧力と着火遅れの関係

b 噴射弁噴孔径の影響

図 1.3.2-5 に噴射弁噴孔径が 1mm、図 1.3.2-6 に同 0.7mm の場合の水素噴流の着火・燃焼状況を示す。噴射弁噴孔径 1mm の場合、噴射開始後 0.83ms 前後で着火し同 1ms 前後で壁面に到達している。噴射弁噴孔径 0.7mm の場合には噴射開始後 1ms 前後で壁面に到達しその後同 1.17ms 前後で着火している。噴射弁噴孔径 1mm の場合のほうが着火後の噴流軸直角方向の拡がり急激なのが特徴的である。着火時点ですでに多量の燃料が燃焼室内に存在することに対応していると考えられる。

c 酸素過剰率の影響

図 1.3.2-6 は酸素濃度が 21%、酸素過剰率に換算して約 2 の場合の水素噴流の着火・燃焼状況である。これを図 1.3.2-7 に示す酸素濃度が 15.75%、酸素過剰率に換算して約 1.5 の場合の着火・燃焼状況と比較する。他の条件は図 1.3.2-6 のときと同じである。酸素過剰率が約 2 の場合は噴射開始後 1.00ms 前後で壁面に到達しその後同 1.17ms 前後で着火していたが、酸素濃度が約 1.5 の場合には噴射開始後 0.83ms 前後で着火し同 1ms 前後で壁面に到達している。さらに水素噴流の壁面到達後その近傍での火炎の輝度がきわめて高くなっているのが特徴である。作動ガス中のアルゴン濃度が大きいことため比熱比が大きくなっており、圧縮温度が高く火炎の温度も高くなっていることによるものと推定される。

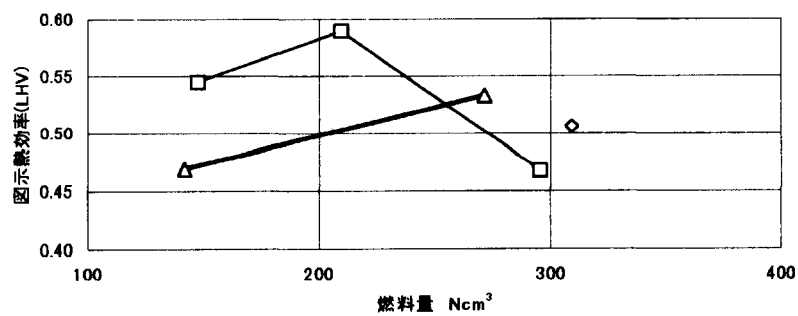
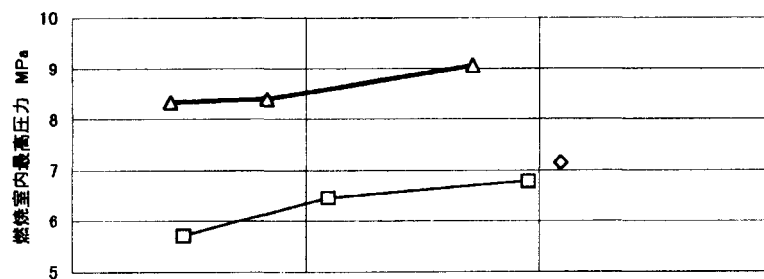
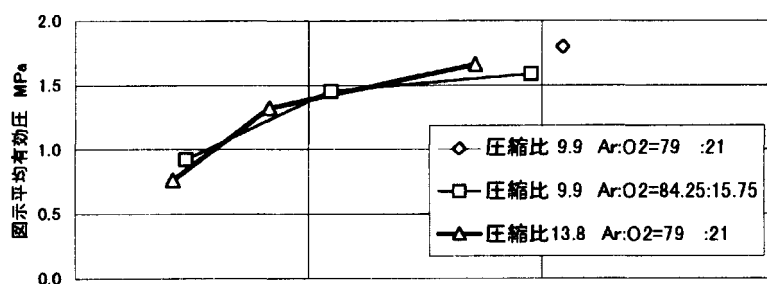
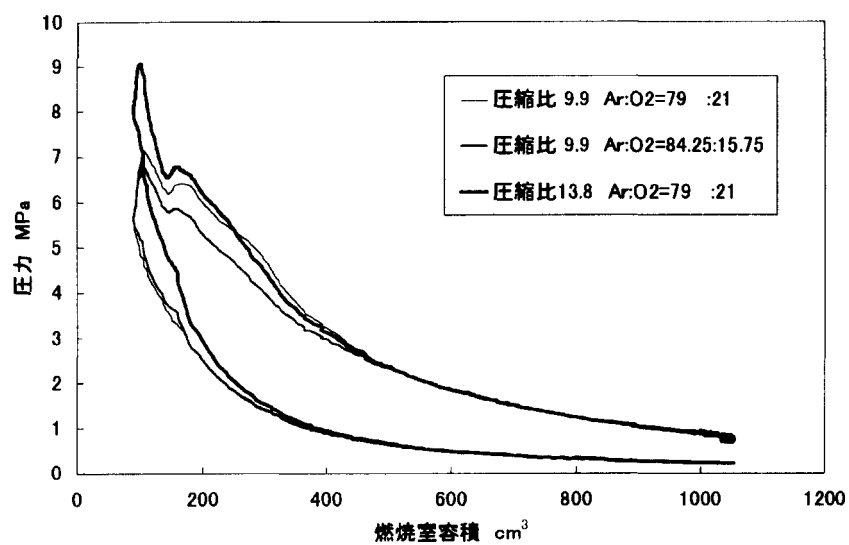
d 圧縮比の影響

図 1.3.2-6 は圧縮比が 9.9 の場合の水素噴流の着火・燃焼状況である。これを図 1.3.2-8 に示す圧縮比が 13.8 の場合の着火・燃焼状況と比較する。圧縮比以外の条件は図 1.3.2-6 のときと同じである。圧縮比が 13.8 の場合、噴射開始後きわめて早く 0.33ms 前後で既に着火して噴流全体が火炎に包まれ、その輝度も極めて高くなっている。壁面到達までの時間も 0.67ms 前後と短縮されている。圧縮比が高いため作動ガスの圧縮温度が大幅に上昇して着火が早まるとともに火炎温度が高くなっていると考えられる。壁面到達までの時間が短縮されたのは、着火後噴流内のガスが急激に膨張した結果と考えられる。

e 図示性能

図 1.3.2-9 に噴射弁噴孔径が 0.7mm のときの PV 線図、平均有効圧、燃焼室内最高圧力、および熱効率を示す。急速圧縮・膨張装置試験での出力目標は燃料量 297Ncm^3 で 1.665Mpa と設定しており、試験結果はほぼ目標値を達成している。熱効率のばらつきはあるが、燃料量 297Ncm^3 前後では LHV ベースで 47~53%程度で、目標値 49%の前後となっている。

今後の第 II 期では、噴射タイミング最適化、高給気圧と高膨張比化等により熱効率改善を図って行く。



噴射弁噴孔径 0.7mm、給気温度 80°C、圧縮初期压力 0.2MPa、噴射压力 20MPa

図 1.3.2-9 図示性能

1.3.3 レーザー着火燃焼試験

(1) レーザー着火方式のねらい

従来、難着火性燃料の着火方式としては、火花着火、グロー着火などが用いられている。ところが、これらの方式はスパークプラグあるいはグロープラグが燃焼室内に配置されるため高出力化の障害になるという欠点がある。特に、アルゴンを作動ガスとする水素ディーゼルの場合、従来の空気を作動ガスとする軽油ディーゼルに比較して筒内ガスの最高温度は 500°C 、熱伝達上の平均ガス温度は 300 度高くなることが平成7年度に実施したサイクル計算で明らかになっており、火花着火あるいはグロー着火の適用はよほどのプラグ材質耐熱性向上がない限り不可能と考えられる。したがって、これら従来着火方式に代わる信頼性の高い新しい着火方式の開発が望まれる。

アルゴンを作動ガスとする水素ディーゼルにレーザー着火方式の適用を検討したのは、レーザー装置本体を燃焼室の外に配置でき燃焼室熱負荷を受けないことと、半導体レーザーは $10,000$ 時間の連続耐久性があり信頼性が高いうえ、水素ディーゼルエンジンへの適用に当たって着火ポイントの自由度が多いことが好都合と判断したためである。

絶縁体（ターゲット材）に高エネルギーパルスレーザー光を照射した時のプラズマ発生原理を図 1.3.3-1 に示す。パルスレーザー光を絶縁体に集光照射すると、絶縁体の分子周りに瞬間的に強力な電場が発生し、分子に分極が発生する。レーザーエネルギーが大きい程分極も大きくなり、ついにはそれらの分子が絶縁破壊し多量の電子が放出され、他の絶縁体の分子に衝突しプラズマを発生する。また、放出された分子の一部は絶縁分子によって散乱された後、雰囲気ガス中の O_2 や N_2 分子に衝突し同様にプラズマを発生する。レーザー着火方式は、このプラズマの熱エネルギーを着火エネルギーとして使用するものである。

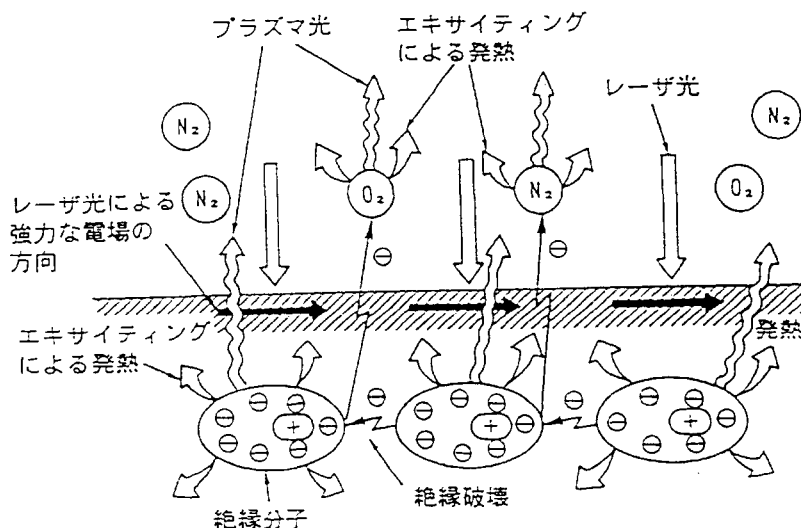


図 1.3.3-1 レーザ照射によるプラズマ発生原理

(2) 目的

レーザー着火を水素ディーゼルに適用する場合、レーザーの水素噴流に対する一般的な特性を明らかにすることがまず必要である。このため、照射位置とレーザーの出力および噴射、燃焼に関するパラメーターが着火確率に及ぼす影響を明らかにするとともに、着火後の火炎伝播状態を自着火燃焼の場合と比較して明らかにし、レーザー着火による水素ディーゼルの噴射・燃焼・着火システム構築の基礎データを得ることを目的とする。

(3) 方法

レーザー着火装置電源、本体、光学系と燃焼室の配置を図 1.3.3-2 に示す。レーザー光はシリンダヘッドに設けたガラス窓から導入し、燃焼室のピストン上に設けたターゲット上に焦点を結ばせた。照射のタイミングは急速圧縮・膨張装置制御用コンピュータから信号を出力し水素噴射開始から 0~1.2ms 程度の間で適当に設定した。

レーザー着火用の燃焼室形状を図 1.3.3-3 に示す。レーザー照射のターゲットは、材質が SUS304 で、ピストンのキャビティ底の 4 箇所に埋め込んだ。

計測データとしては、通常の燃焼試験時と同様に水素を急速圧縮・膨張装置内に 1 回噴射して、着火前後の水素噴流の画像およびピストン変位、燃焼室圧力、および噴射弁の針弁リフトの信号を記録した。

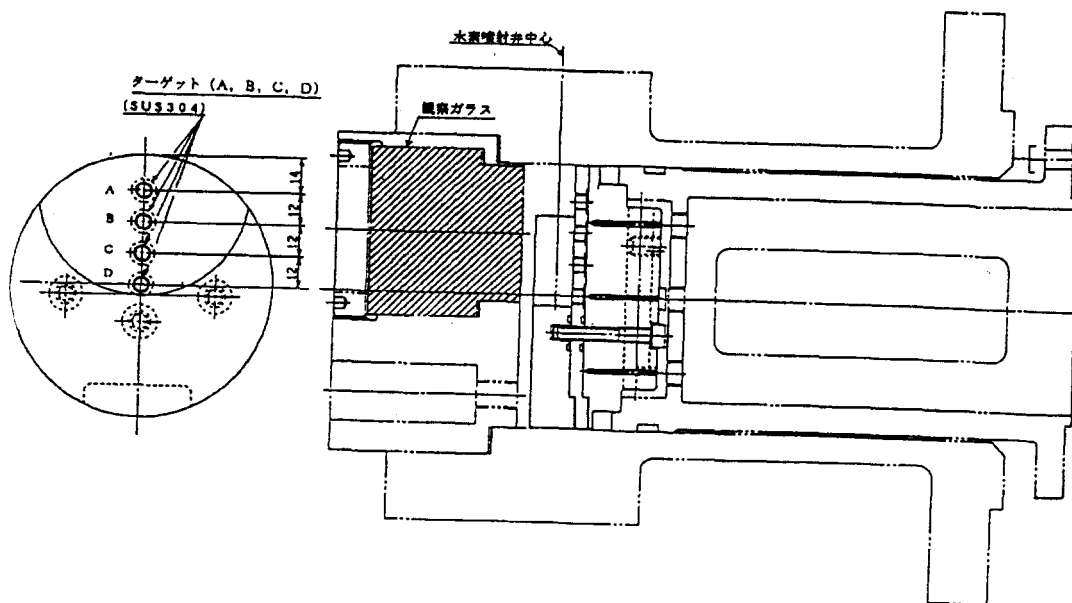


図 1.3.3-3 レーザー着火燃焼室形状

レーザー着火・燃焼の試験条件を表 1.3.3-1 に示す。

表 1.3.3-1 レーザー着火・燃焼試験条件

噴射弁噴孔径	0.7mm
噴射弁噴孔長径比	4
圧縮比	9.9
作動ガス	空気、アルゴン・酸素 (79 : 21)
給気温度	15~20℃
圧縮初期圧力	0.2MPa
急速圧縮・膨張装置の速度	1000min ⁻¹
噴射量	300Ncm ³
噴射圧力	20MPa
噴射時期	上死点
レーザー出力	15、10mJ
レーザー照射位置	14、26、38mm (噴射弁噴孔から)
レーザー照射タイミング	0~1.2ms (噴射開始後)

(4) 結果

a 空気を作動ガスとした試験

まず、空気を作動ガスとして自着火しにくい条件でレーザーによる水素噴流への着火確率を調べた。図 1.3.3-4 にレーザー照射時期をパラメータとした着火確率試験結果を示す。レーザー照射位置が噴射弁噴孔から 26mm の場合レーザー照射時期が噴射開始後 0.3~0.6ms の間は着火と失火の両方が起こりうる不安定領域である。レーザー照射時期が噴射開始後 0.6ms 以降の場合には確実に着火することが可能である。レーザー照射位置が噴射弁噴孔から 38mm の場合には噴射開始後 0.4~0.7ms の間が不安定領域で、それ以降では確実に着火できる。

空気を作動ガスとした着火しにくい条件でもレーザーを噴射開始後適当な遅れを持って照射することにより水素噴流へ確実に着火できることが確認された。アルゴン循環型コージェネレーションシステム始動時の作動ガスが空気の場合でもレーザー着火方式を適用して水素噴流に確実に着火できると考えられる。

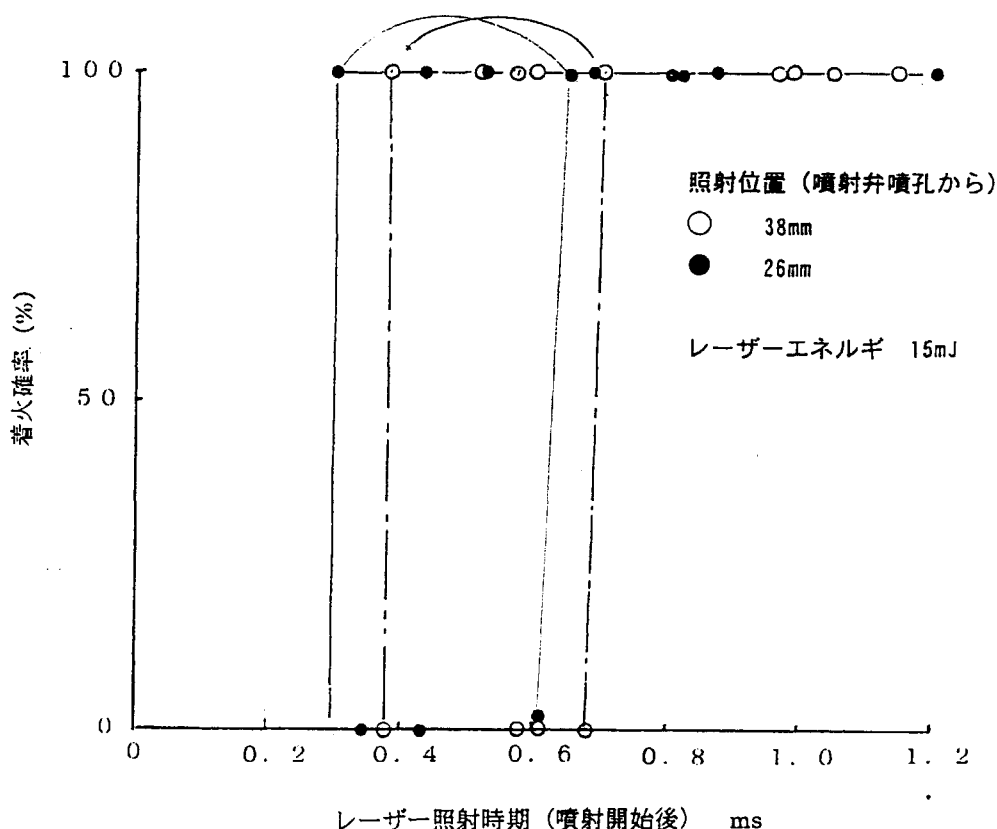


図 1.3.3-4 作動ガスが空気でのレーザー着火確率

b アルゴンを作動ガスとした試験

図 1.3.3-5 にレーザーを照射しない場合の水素噴流の着火・燃焼状況を示す。噴流軸上の 4 か所に黒く写っているのはピストンに埋め込んだレーザーのターゲット材である（図 1.3.3-6、7、8 も同様）。噴射開始後 0.42ms 前後で自着火し、同 0.83ms 前後で燃焼室壁面に到達している。着火後噴流は軸直角方向に大きく膨張している。

図 1.3.3-6 に噴射開始とほぼ同時にレーザーを噴孔からの距離 14mm のターゲットの照射した場合の着火・燃焼状況を示す。着火時期は噴射開始後 0.42ms 前後で、同 0.83ms 前後で燃焼室壁面に到達している。着火後の燃焼状況は自着火の場合とほとんど変わらない。

図 1.3.3-7 に噴射開始後 0.25ms に同じ位置にレーザーを照射した場合の着火・燃焼状況を示す。噴射開始後 0.42ms 前後で着火し、同 0.75ms 前後で燃焼室壁面に到達している。レーザーを照射しない場合に比べて着火後の噴流の軸直角方向への膨張の度合いが小さく、燃焼室壁面への到達時期が早まっている。

図 1.3.3-8 に噴射開始後 0.50ms に同じ位置にレーザーを照射した場合の着火・燃焼状況を示す。レーザー照射前の噴射開始後 0.42ms 前後で自着火している。着火後の燃焼状況は自着火の場合とあまり変わらない。

図 1.3.3-9 にレーザーを照射しない自着火による燃焼室内圧力、図 1.3.3-10 に照射時期を変えてレーザー着火したときの燃焼室内圧力を示す。図 1.3.3-9 の自着火の場合噴射開始直後の圧力上昇が鈍いがその後圧力上昇率が大きくなって最高圧力に到達している。図 1.3.3-10(a)は噴射弁噴孔から 14mm の位置にレーザーを照射した場合の燃焼室内圧力である。レーザー照射時期が噴射開始前 0.03ms と噴射開始後 0.50ms ではレーザーを照射しない場合とほぼ同様の圧力履歴となるが、噴射開始後 0.25ms にレーザーを照射した場合には噴射開始直後の圧力上昇が急激でその後一旦圧力上昇が休止した後最高圧力に到達している。図 1.3.3-10(b)は噴射弁噴孔から 26mm の位置にレーザーを照射した場合である。最高圧力のレベルはやや低くなっているが、レーザー照射時期に対する圧力履歴の変化傾向はほぼ同様である。

図 1.3.3-11 にレーザー照射時期に対する図示性能の変化を示す。噴射開始後 0.3ms 程度でレーザーを照射することにより自着火時よりも最高圧力の低い燃焼モードが実現されることがわかる。

レーザー照射の時期が早すぎるか遅すぎる場合には着火および燃焼上にその効果を及ぼすことができないが、噴射開始後適当な時期にレーザーを照射すれば、圧縮温度が高く自着火する場合でも、レーザー着火により燃焼サイクルの制御ができる可能性があることが明らかになった。

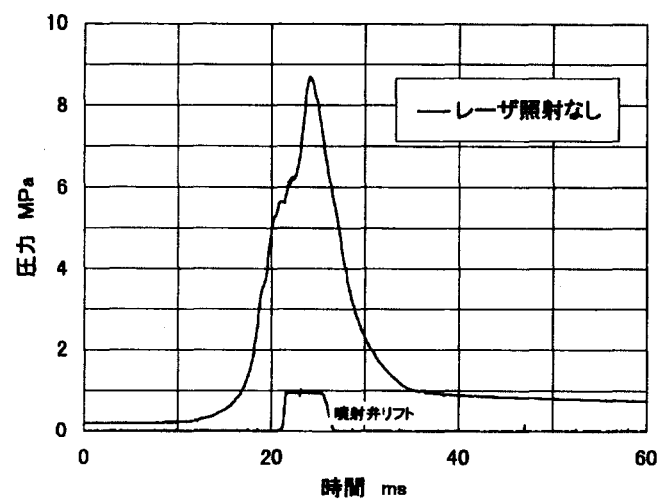
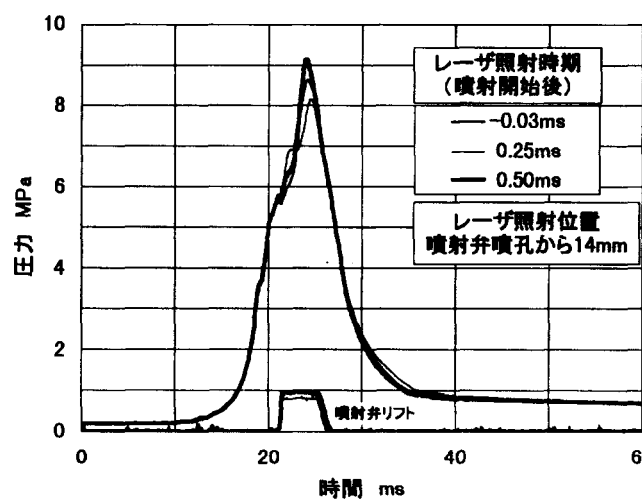
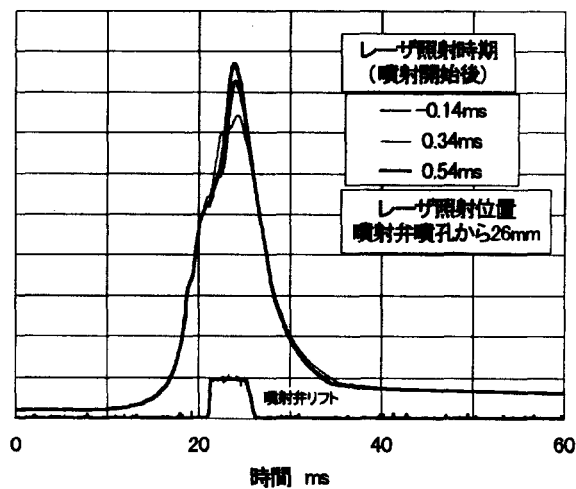


図 1.3.3-9 自着火燃焼による燃焼室内圧力



(a)



(b)

図 1.3.3-10 レーザー着火燃焼による燃焼室内圧力

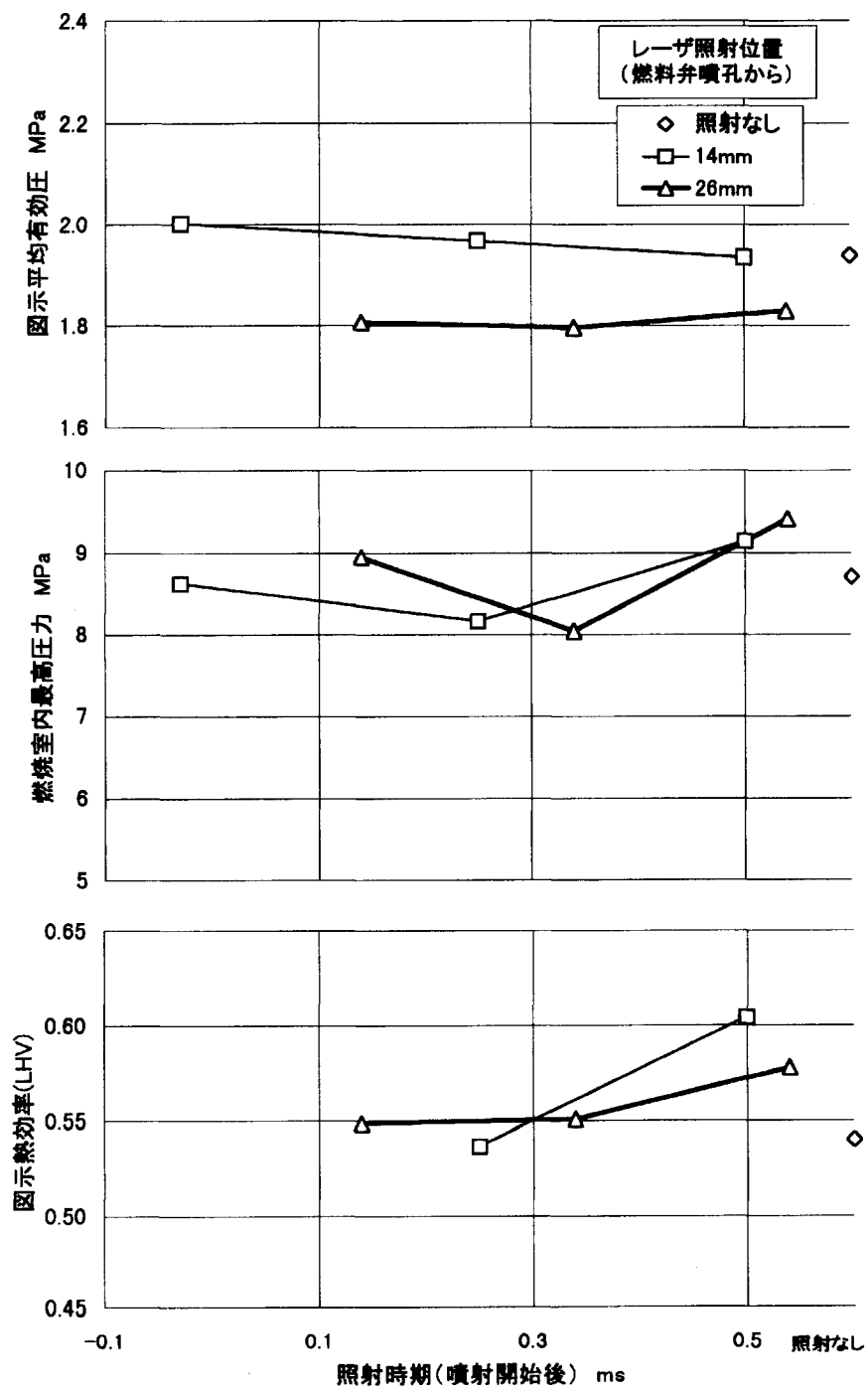


図 1.3.3-11 レーザー着火による図示性能

1.3.4 システムの特長・課題等についての調査

(1) 目的

アルゴン循環型水素ディーゼルコージェネレーションシステムの構成要素につき、作動ガスの物性が空気を作動ガスとする従来製品と異なる特徴を調査し、開発課題を明確化することを目的とした。

(2) アルゴン循環型水素ディーゼルコージェネレーションシステムの構成

図 1.3.4-1 にアルゴン循環型水素ディーゼルコージェネレーションシステムの概念図を示す。この構成要素のうち単筒実験機以外の主要な開発要素となる過給機と排ガス凝縮器および気液分離器について検討した。

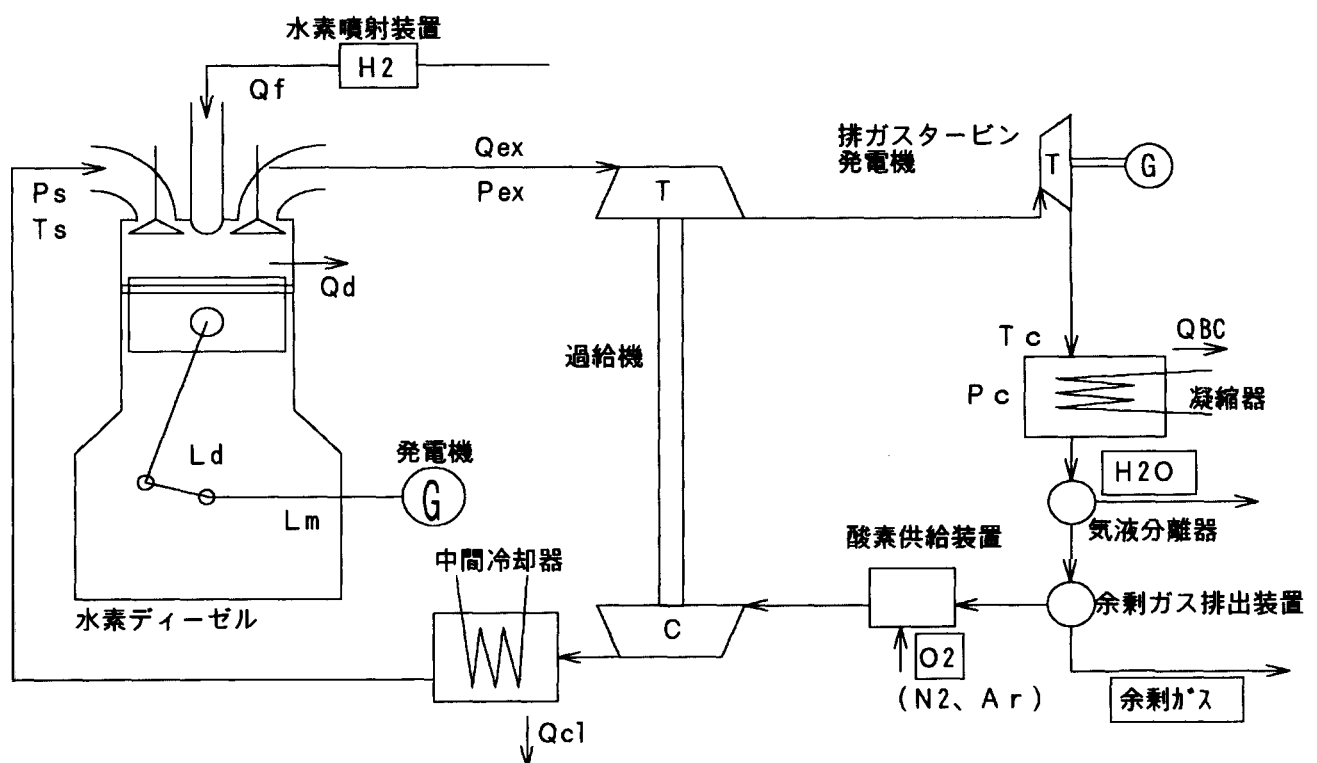


図 1.3.4-1 アルゴン循環型水素ディーゼルコージェネレーションシステム

(3) 過給機の検討

a 検討条件

過給機の検討条件を表 1.3.4-1、検討ケースを表 1.3.4-2 に示す。検討条件は平成 8 年度に実施したシステムの熱効率計算結果による圧力、温度と 6 シリンダ機関の作動ガス流量により設定した。検討ケースはアルゴン循環型水素ディーゼルの給排気組成の場合と、比較のため空気を作動ガスとするディーゼルの給排気組成の場合の 2 ケースとした。

表 1.3.4-1 過給機検討条件

コンプレッサ	
入口温度	343K
入口圧力	0.13MPa
入口ガス流量合計	1.512kmol/min
入口ガス組成	Ar:O ₂ =0.79:0.21 (モル比)
出口圧力	0.28MPa
タービン	
入口温度	763K
入口圧力	0.28MPa
入口ガス流量合計	1.671kmol/min
入口ガス組成	Ar:O ₂ :H ₂ O =0.79:0.105:0.21 (モル比)
出口圧力	0.13MPa

表 1.3.4-2 過給機検討ケース

コンプレッサ	
①	アルゴン循環型水素ディーゼルの給気 (混合組成は表 1)
②	従来ディーゼルの給気 (N ₂ :O ₂ =0.79:0.21)。入口温度、入口圧力、入口酸素流量は①と同じ。
タービン	
①	アルゴンを作動ガスとして酸素過剰率 2 の燃焼排ガス (混合組成は表 1)
②	空気を作動ガスとして酸素過剰率 2 の燃焼排ガス (N ₂ :O ₂ :H ₂ O=0.79:0.105:0.21)。入口温度、入口圧力、入口酸素・水蒸気流量は①と同じ

b 検討結果

表 1.3.4-3 にコンプレッサ仕様の計算結果を示す。アルゴン循環型水素ディーゼルの給気は空気と比較して気体定数が小さいうえ比熱比が大きいので同じ圧力比で圧縮したときの断熱ヘッドが小さくなる。したがって羽根車の周速は小さくなり、入口体積流量は変わらないので、羽根車径を同じとすると出口幅が 13% 高い大容量型となる。図 1.3.4-2 に子午面形状の比較を示す。

表 1.3.4-4 にタービン仕様の計算結果を示す。アルゴン循環型水素ディーゼルの排気は空気を作動流体とした場合と比較して気体定数が小さいうえ比熱比が大きいので、同じ圧力比で膨張したときの断熱ヘッドが小さくなる。したがって、ほぼ同じ周速/流速比を仮定すると周速は空気を作動流体とした場合より小さくなる。一方、動翼入口体積流量は空気を作動流体とした場合とほとんど変わらないで、動翼入口径を同じとすると翼高さが 14% 高い大容量型となる。図 1.3.4-3 に子午面形状の比較を示す。

表 1.3.4-3 コンプレッサ仕様の計算結果

作動ガス		Ar+O ₂	N ₂ +O ₂
分子量		38.275	28.965
ガス定数	kJ/(kg・K)	0.2172	0.2870
定圧比熱	kJ/(kg・K)	0.60495	1.0046
比熱比		1.560	1.400
入口重量流量	kg/s	0.9645	0.7299
入口体積流量	m ³ /s	0.5528	0.5528
入口ガス密度	kg/m ³	1.7448	1.3204
圧力比		2.1538	2.1538
断熱ヘッド	m	6,711.1	8,612.4
圧力係数 (仮定)		0.52	0.52
流量係数 (仮定)		0.43	0.43
ポリトロプ効率 (仮定)		0.83	0.83
周速	m/s	355.77	403.02
羽根車径	mm	136	136
回転数	min ⁻¹	49,960	56,596
出口幅	mm	8.4577	7.4660

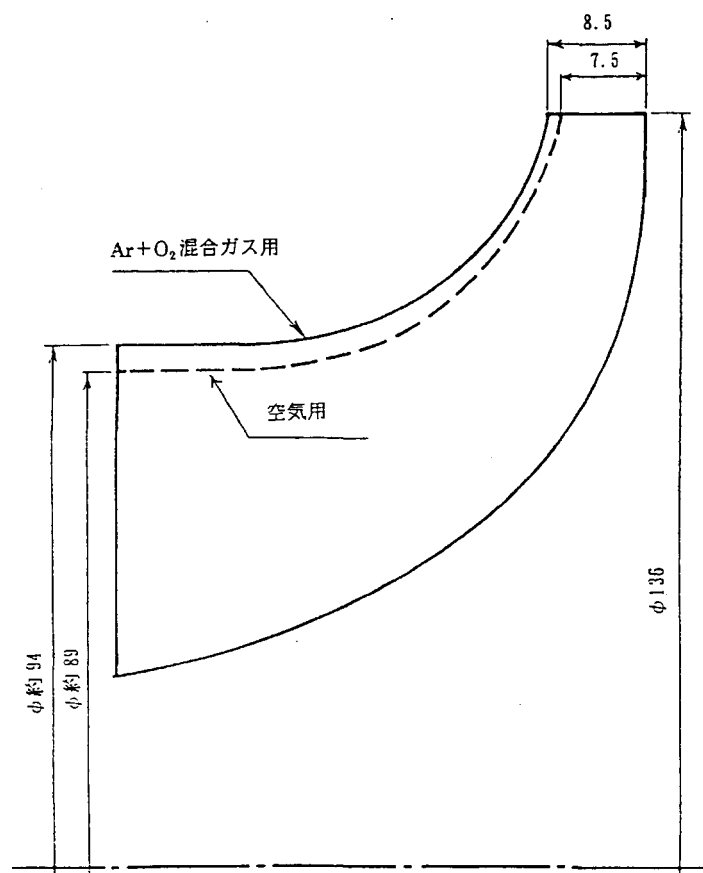


図 1.3.4-2 コンプレッサ羽根車の子午面形状

表 1.3.4-4 タービン仕様の計算結果

作動ガス		Ar+O ₂ +H ₂ O	N ₂ +O ₂ +H ₂ O
分子量		35.022	26.494
ガス定数	kJ/(kg・K)	0.23741	0.31572
定圧比熱	kJ/(kg・K)	0.81508	1.18310
比熱比		1.411	1.361
入口重量流量 G	kg/s	0.9753	0.7379
断熱ヘッド	m	12,700.5	16,494.6
周速/流速比 (仮定)		0.692	0.678
周速	m/s	349.37	403.60
羽根車径	mm	132	132
回転数 (コンプレッサ側より)	min ⁻¹	50,000	56,600
動翼入口ガス密度	kg/m ³	1.132	0.836
動翼入口体積流量	m ³ /s	0.8615	0.8826
入口幅	mm	21.5	18.8

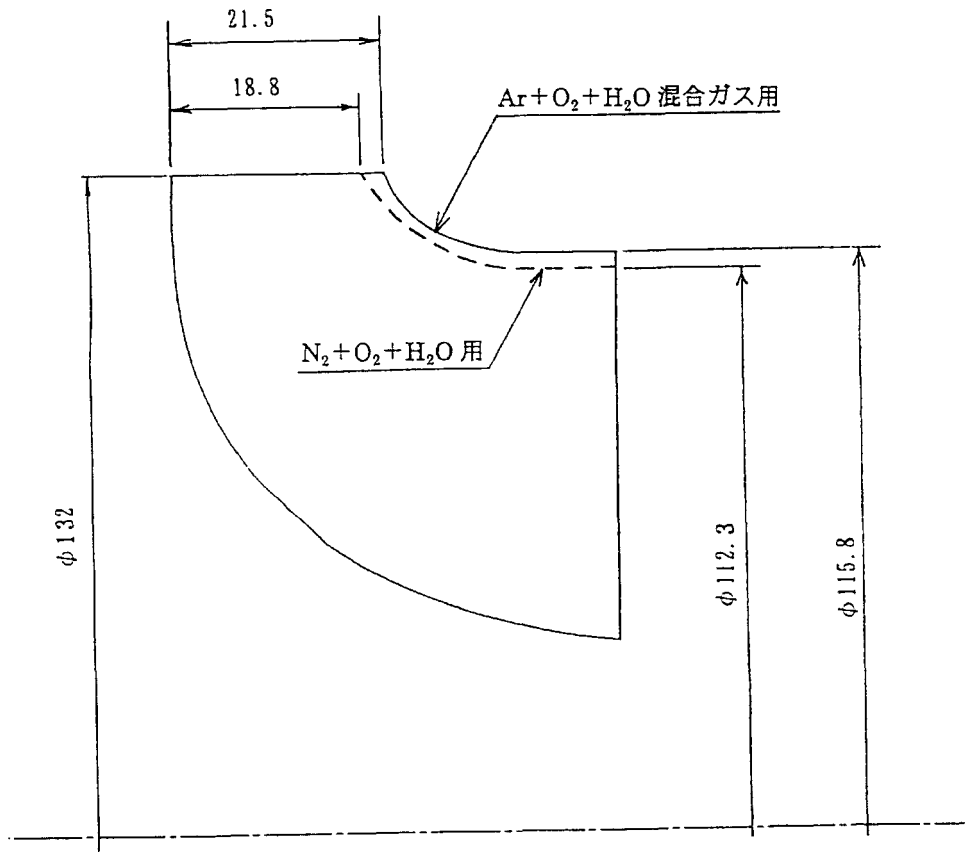


図 1.3.4-3 タービン動翼の子午面形状

表 1.3.4-5 にコンプレッサおよびタービンの入口ガス温度および圧力比を同じとしたときに必要となる総合効率を概算した結果を示す。アルゴン循環型水素ディーゼルの過給機では 52.8% で従来ディーゼルの過給機に比較して 2 ポイント高い。

表 1.3.4-5 要求総合効率

		アルゴン循環型 水素ディーゼル	従来ディーゼル
コンプレッサ			
入口ガス温度	K	343	343
圧力比		2.1538	2.1538
比熱比		1.560	1.400
定圧比熱	kJ/(kg·K)	0.60495	1.0046
有効仕事	kJ/kg	65.793	84.453
タービン			
入口ガス温度	K	763	763
圧力比		2.1538	2.1538
比熱比		1.411	1.361
定圧比熱	kJ/(kg·K)	0.81508	1.1831
有効仕事	kJ/kg	124.550	166.219
総合効率		0.528	0.508

アルゴン循環型水素ディーゼルの過給機は従来ディーゼルの過給機に比較して大容量化と総合効率の向上が必要であることが明らかになった。ただし、大容量化の割合はコンプレッサおよびタービンの羽根車高さで 13～14%、総合効率の向上は 2 ポイントで基本的な形状の大幅な変更を必要とするものではないと判断した。

(4) 凝縮器、気液分離器の検討

a 検討条件

本システムの凝縮器、気液分離器の基本設計条件を表 1.3.4-6 に示す。表 1.3.4-7 に凝縮器、気液分離器の大きさを相対的に比較するための検討ケースを示す。凝縮器は横型の多管式熱交換器、気液分離器は縦型の重力分離型の気液分離器を想定した。表 1.3.4-8 に各ケースの流量、交換熱量及び対数平均温度差を示す。

表 1.3.4-6 アルゴン循環型水素ディーゼル用排ガス凝縮器，気液分離器基本設計条件

凝縮器入口温度	K	620
凝縮器入口圧力	MPa	0.13
凝縮器入口水蒸気流量	Kmol/min	0.3175
凝縮器入口ガス組成	モル比	Ar : O ₂ : H ₂ O = 3.762 : 0.5 : 1.0
凝縮器入口出口温度	K	313.15
凝縮器入口出口圧力	MPa	0.13* ¹
凝縮器入口水蒸気圧力	MPa	0.00738 (飽和蒸気圧)

注記*1：凝縮器圧力損失を考慮せず

表 1.3.4-7 排ガス凝縮器，気液分離器検討ケース

ケース No.	作動媒体	作動媒体条件
①	アルゴン・酸素	酸素過剰率 2 の燃焼排ガス (Ar : O ₂ : H ₂ O = 3.762 : 0.5 : 1.0)
②	水蒸気	水蒸気のみ。入口温度，圧力，水蒸気流量は①と同一

表 1.3.4-8 流量、交換熱量及び対数平均温度差

ケース			①	②
作動ガス			Ar・酸素	水蒸気
流量	kmol/min	Ar	1.1944	0
		O ₂	0.1588	0
		H ₂ O	0.3175	0.3175
		N ₂	0	0
		合計	1.6707	0.3175
	kg/h	Ar	2862.9	0
		O ₂	304.8	0
		H ₂ O	343.2	343.2
		N ₂	0	0
		合計	3510.9	343.2
凝縮蒸気量	kg/h		255.2	343.2
交換熱量	MW		0.3751	0.286
対数平均温度差	°C		51.6	82.9

b 検討結果

凝縮器概念設計結果を表 1.3.4-9、表 1.3.4—10、外形図を図 1.3.4-4、図 1.3.4-5 に示す。上述の通り作動ガス種類が異なる凝縮器の大きさを相対的に比較ことを目的としているため、管内外の汚れはないものとして検討を行った。作動ガスがアルゴン・酸素、水蒸気の場合の必要伝熱面積は、各々 14.4m^2 、 2.8m^2 であり、作動ガスが水蒸気の場合に対し、アルゴン・酸素では約 5.1 倍の伝熱面積となる。これは、交換熱量の増加、対数平均温度差の低下に加え、不凝縮ガスの影響により排ガス凝縮部の凝縮熱伝達率が低下し、熱貫流率が低くなるためである。また、各ケースの排ガス側の圧力損失は、作動ガスがアルゴン・酸素、蒸気の場合に、各々 5.1 、 0.6kPa となりシステム設計において本圧力損失を考慮する必要がある。

凝縮器を横型多管式熱交換器として、排ガス出口として不凝縮ガスと凝縮液排出口を個別に配した場合、気液分離器に要求される性能は、凝縮器出口の排ガス中に含まれる飛散凝縮液を分離することである。一般に慣性集塵法として使用されるミストセパレータとしては $10\mu\text{m}$ 以上を捕集する波型のセパレータ、 $10\mu\text{m}$ 以下まで捕集する金網型のセパレータ等がある。ここでは、波型を用いたセパレータを有する気液分離器の検討を行った。また、作動ガスが蒸気の場合には不凝縮ガスを想定しておらず気液分離器は不要となるため、アルゴン・酸素を作動ガスとした場合について検討を行った。

気液分離器の外形図を図 1.3.4-6 に示す。気液分離器はミストセパレータとして波型板を設置した横置のもので、外形寸法は概略幅 $450\times$ 高さ $570\times$ 長さ 700 のものとなる。

第II期ではアルゴン循環型水素ディーゼルシステムに用いられる凝縮器及び気液分離器の詳細検討を実施する。

表 1.3.4-9 凝縮器データシート (ケース①: 作動流体-アルゴン・酸素)

寸法	350×1360		形式	多管式－横型	
伝熱面積	m ²	14.4	基数	1	
性能データ					
流体位置		胴側		管側	
流体名		排ガス		冷却水	
出入口		入口	出口	入口	出口
流量 kg/s		0.975		8.972	
水蒸気		0.095	0.026	－	－
水		－	0.070	8.972	8.972
不凝縮ガス		0.880	0.880	－	－
温度 K		620.0	313.2	293.2	303.2
比重		0.880	1.971	997.5	994.2
粘性係数 mPa・s		0.0359	0.1123	1.0031	0.8045
蒸気分子量		18		－	
不凝縮ガス分子量		39		－	
比熱 kJ/kgK		0.7141	0.8608	4.1912	4.1830
熱伝導率 W/mK		0.0346	0.0621	0.6230	0.6288
凝縮潜熱 KJ/kg		2399.3 @55.5		－	
入口圧力 MPa		0.13		0.49	
流速 m/s		12.4		0.43	
圧力損失 kPa		5.1		1.1	
熱伝達率 W/m ² K		822		2101	
汚れ係数 m ² K/W		0		0	
交換熱量 MW		0.375			
対数平均温度差 K		50.6			
熱貫流率 W/m ² K		519			
構造データ					
パス数		1		1	
ノズル寸法	入口	260		130	
	出口	205		130	
	凝縮液	30		－	
管本数	280	外 径 mm	12.7	板厚 mm	1.5
管配列	△30	ピッチ mm	16.0	管 材 質	SUS304
胴材質	SUS304	外 径 mm	360	板厚 mm	5.0

注記：管内外の汚れは未考慮

表 1.3.4-10 凝縮器データシート (ケース②: 作動流体-水蒸気)

寸法	200×770		形式	多管式－横型	
伝熱面積	m ²	2.8	基数	1	
性能データ					
流体位置	胴側			管側	
流体名	排ガス			冷却水	
出入口		入口	出口	入口	出口
流量	kg/s	0.095		6.847	
水蒸気		0.095	－	－	－
水		－	0.095	6.847	6.847
不凝縮ガス		－	－	－	－
温度	K	620.0	313.2	293.2	303.2
比重		0.454	990.5	997.5	994.2
粘性係数	mPa・s	0.0227	0.6632	1.0031	0.8045
蒸気分子量		18		－	
不凝縮ガス分子量		－		－	
比熱	kJ/kgK	2.0384	4.1772	4.1912	4.1830
熱伝導率	W/mK	0.0487	0.6342	0.6230	0.6288
凝縮潜熱	KJ/kg	2250.5 @106.6		－	
入口圧力	MPa	0.13		0.49	
流速	m/s	4.8		1.1	
圧力損失	kPa	0.6		2.7	
熱伝達率	W/m ² K	2197		5661	
汚れ係数	m ² K/W	0		0	
交換熱量	MW	0.286			
対数平均温度差	K	82.7			
熱貫流率	W/m ² K	1294			
構造データ					
パス数		1		1	
ノズル寸法	入口	110		110	
	出口	－		110	
	凝縮液	30		－	
管本数	92	外 径 mm	12.7	板厚 mm	1.5
管配列	△30	ピッチ mm	16.0	管 材 質	SUS304
胴材質	SUS304	外 径 mm	260	板厚 mm	5

注記：管内外の汚れは未考慮

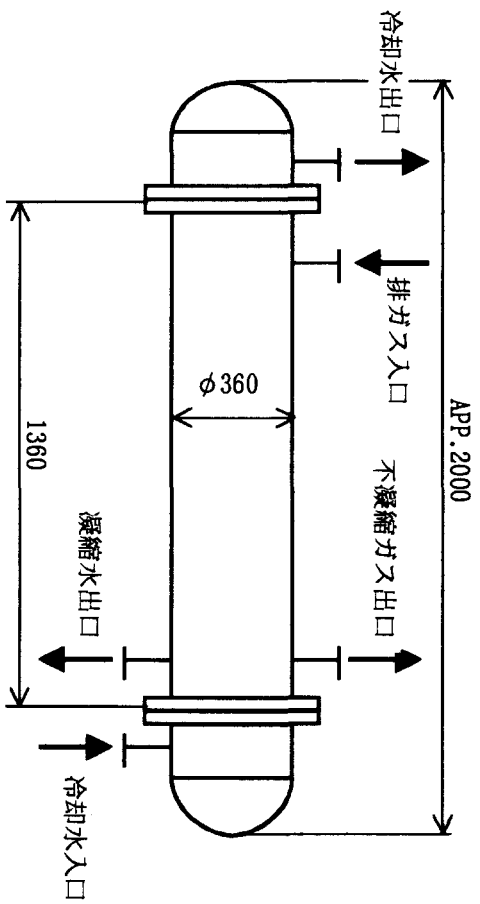


図 1.3.4-4 排ガス凝縮器外形図 (ケース①：作動流体－アルゴン・酸素)

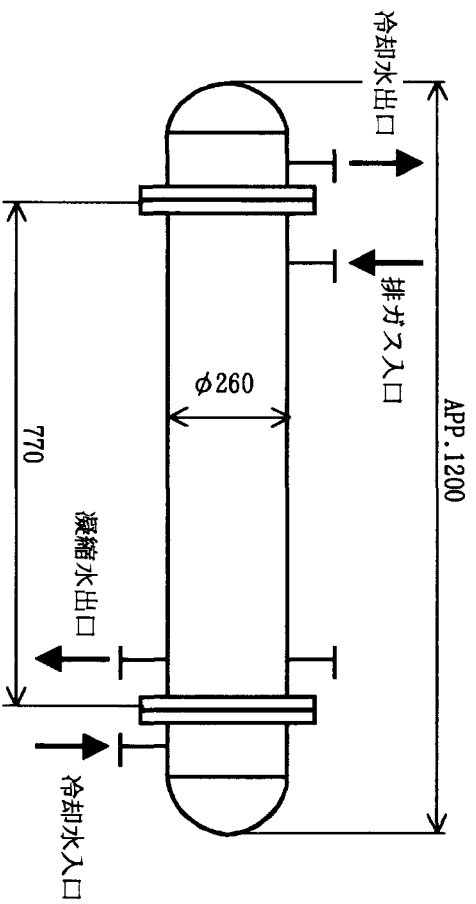


図 1.3.4-5 排ガス凝縮器外形図 (ケース②：作動流体－水蒸気)

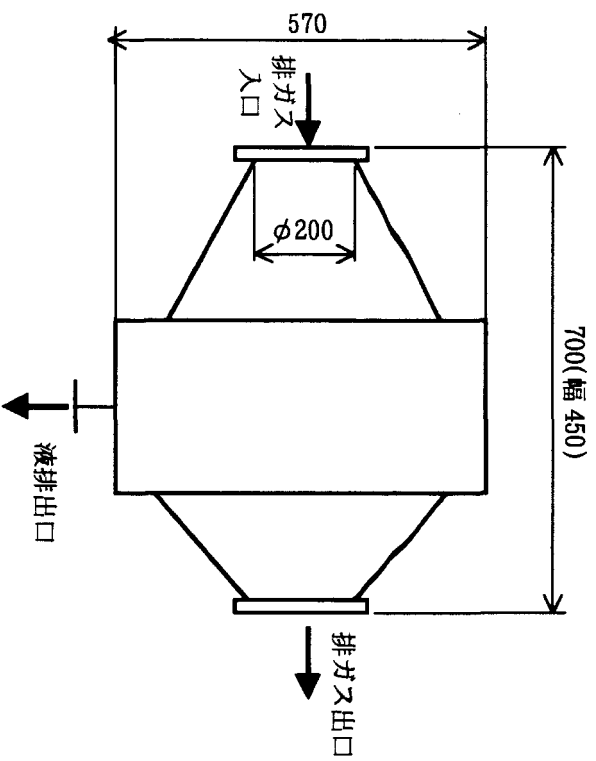


図 1.3.4-6 気液分離器外形図

1.4 水蒸気循環型水素コージェネレーションディーゼルの試験

コージェネレーション向け動力源として水素を燃料とするディーゼルエンジンにおいて、その作動流体として水蒸気と酸素の混合気を用い、ほとんど水蒸気からなる排気ガスにより蒸気タービンでさらに動力を回収するシステムを考案した。しかし水蒸気雰囲気中での水素噴流の間欠燃焼など未確立な技術的項目が多いため、急速圧縮・膨張装置を用いた予備試験を実施しその成立性を検討した。

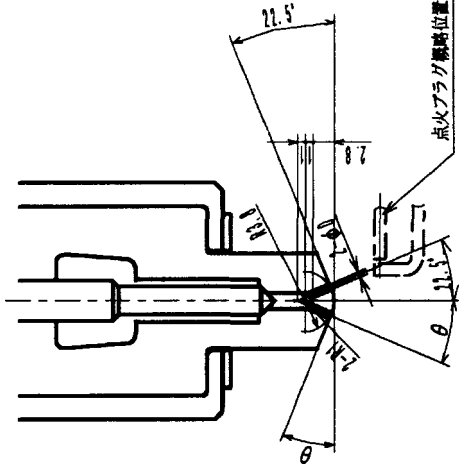
1.4.1 試験装置

平成 9 年度に機械技術研究所に設置された急速圧縮・膨張装置を用い試験を実施した。水蒸気を利用することから急速圧縮・膨張装置本体だけでなく、作動ガス用混合タンク、供給配管、排気配管などすべてヒータで加熱し温度制御装置により一定に保った。本体はシリンダ、ヘッド、ピストンそれぞれにヒータを内蔵し温度を一定となるように制御した。図 1.4.1 に使用した燃焼室形状（ピストン頂部）を示す。燃焼室(A)は噴流の観察を主な目的とし、壁面への噴流衝突が起きにくい形状となっている。それに対して燃焼室(B)は三日月型の燃焼室であり、これは直接噴射式のディーゼルエンジンで一般的に利用されているトロイダル型燃焼室を模擬した形状としてある。燃焼室(A)では噴流観察用に燃焼室底面を機械加工により鏡面仕上げした。そのため分割式となっている。燃焼室(B)では一体構造とし、噴流観察を行なう場合には底面を掘り下げ表面反射型の光学ミラーをシリコン充填剤で貼り付けたものを使用した。図 1.4.2 に急速圧縮・膨張装置に装着した観察用燃焼室(B)の写真を示す。圧縮上死点でのヘッドとピストン頂面との隙間（トップクリアランス）が 1mm の時に圧縮比は約 11 となるが、組み替えなどにより多少隙間が変化するので試験に際しては半田をつぶすことにより動的なクリアランスを計測して圧縮比を正確に計測した。なお試験はすべてエンジン回転数 1000rpm 相当の速度で行なった。試験装置の構造からストローク量を完全にするために圧縮上死点に相当する時間が多少長くなったピストンの動きをさせている。

図 1.4.3 は試作した 2 噴孔ノズルの噴孔部分の形状を示す。点火プラグ側の噴孔の角度は固定することで点火プラグとの位置関係を一定に保ちながら噴流間角度を変更した試験が可能になっている。噴孔の角度を固定するのは右側の噴孔であるが可視化写真では左右逆に写っている。単噴孔ノズルは軸方向下向きに噴射されるものを用いた。

1.4.2 水素噴射試験

燃焼室(A)と単噴孔ノズルを使用して水素噴流の発達の様子を調査した。試験は噴射した燃料が燃焼しないように水蒸気:窒素=80:20 の混合気を用いた。しかし後に述べるが初期圧力を上げていくと、圧縮上死点付近の高圧力下で壁面温度の方が飽和温度よりも低くなり、シリンダ内部で水蒸気の一部が凝縮を起し霧状となり写真撮影が困難となった。そこで水蒸気の代わりに比熱比、密度の近いメタン(CH_4)を用いメタン:窒素=80:20 の模擬ガスを使



MARK	θ	φD	備 考
a	7.5°	0.7	噴孔角11° (1/2噴孔に対向), L/D=4
b	7.5°	0.55	噴孔角11°, 小噴孔径, L/D=1.1
c	22.5°	0.7	噴孔角11° (1/2噴孔に対向), L/D=4
d	37.5°	0.7	噴孔角11° (1/2噴孔に対向), L/D=4

L: 噴孔長さ D: 噴孔径

図 1.4.3 試作 2 噴孔ノズル形状

$$X_s^2 = a \sqrt{\alpha \cdot \rho_t / \rho_g} \cdot d_n \cdot U_0 \cdot t / \tan \theta_s \quad (1)$$

- a 実験定数 (=2)
- α ノズル流量係数 (=0.39)
- ρ_t 噴射ガス密度
- ρ_g 雰囲気ガス密度
- d_n ノズル径
- U₀ ノズル部での噴射ガス流速
- t 噴射開始からの時間
- θ_s 平均ノズル噴霧角度の 1/2
- X_s 到達距離

この式より到達距離と時間の関係を対数表示すると、運動量理論における自由噴流の到達距離は傾き 1/2 の直線として表せる。雰囲気ガスの影響を式(1)から求めるとメタン窒素混合気の方が 2%到達距離が大きくなるというものであり、その影響は小さいと予想された。

図 1.4.4、図 1.4.5 に雰囲気圧力、水素噴射圧力の噴流到達距離に与える影響を示す。どちらも 1 ms 付近以降において、到達距離の増加割合 (グラフの傾き)、到達距離の絶対値とも、自由噴流の到達距離 (計算値) に近づいていく様子がわかる。0.5ms 以内の噴射初期において到達距離が計算値と大きく異なる理由としては、噴射初期の燃料噴射圧の上昇過程等、パラメータの変化過程が実験式に考慮されていないためであると考えられる。なお、実験定数と流量係数について実験結果を整理するとそれぞれ 1.5、0.74 が得られるが、今回は浜本らにより報告された値 2 と 0.39 を用いた。

一般のディーゼルエンジンの燃焼室を模擬した燃焼室(B)を用いて壁面との衝突のある噴流について観察した。噴流が壁面へ衝突後は便宜的に図 1.4.6 に示す距離を到達距離とした。図 1.4.7、図 1.4.8 に雰囲気圧力と水素噴射圧力の到達距離への影響を示す。このグラフで実験データの傾きが急激に変化する部分が壁面との衝突時期となる。噴流が壁面へ到達するのに要する時間は雰囲気圧力や噴射圧力で異なるが、到達後の噴流の発達速度は自由噴流の実験式(1)の計算結果とほぼ同じ程度となっていることがわかる。液体燃料噴

霧が壁面に衝突する場合、衝突地点を起点とした噴霧到達距離は時間の0.5~0.8乗で比例するとの報告⁽²⁾もあり妥当な結果であると考えられる。

噴射初期の噴流到達距離は、燃焼室(B)の実験の方が小さくなる傾向にある。原因としては、燃焼室内の霧囲気流れの違い(スキッシュの違い)、噴射開始時間の誤差が考えられる。

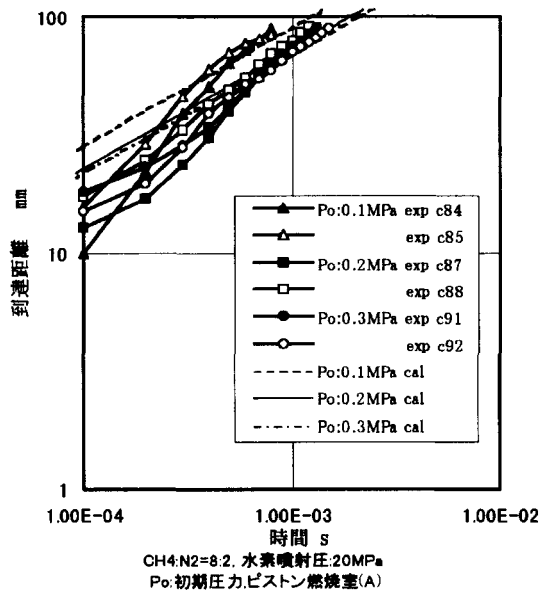


図 1.4.4 霧囲気圧力の到達距離への影響

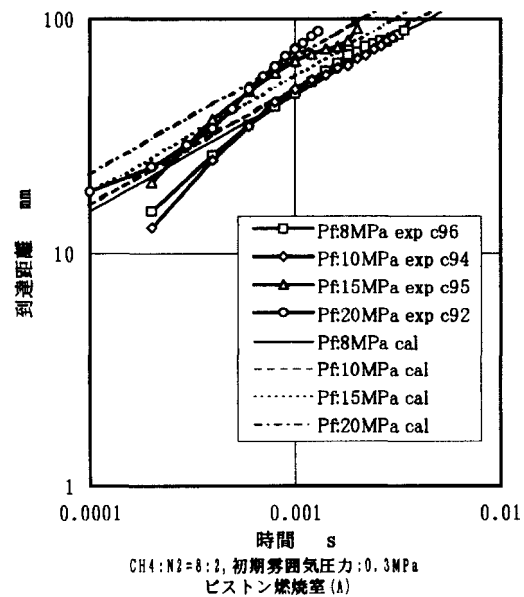


図 1.4.5 噴射圧力の到達距離への影響

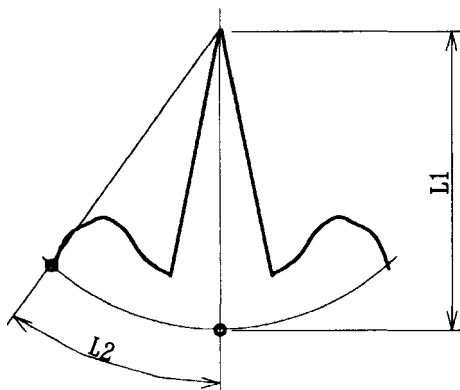


図 1.4.6 到達距離の定義

$$\text{壁面衝突後到達距離} = L1 + L2$$

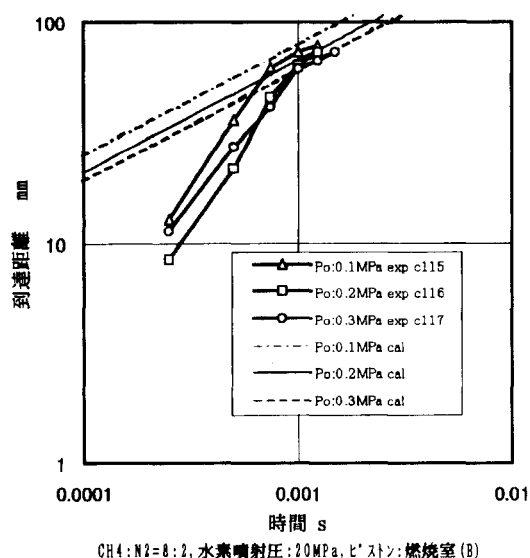


図 1.4.7 壁面衝突のある場合の雰囲気圧力の到達距離への影響

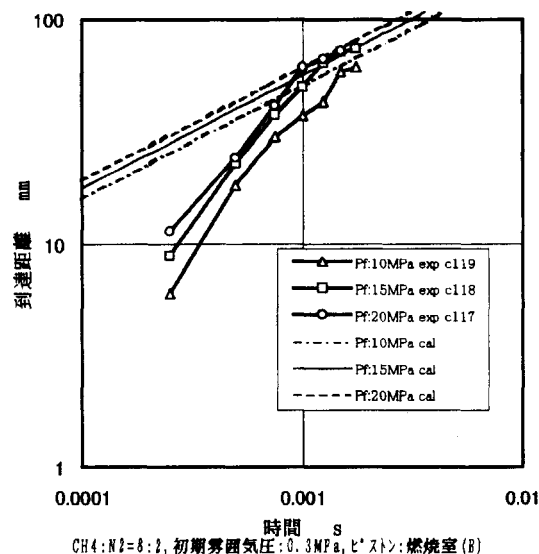


図 1.4.8 壁面衝突のある場合の噴射圧力の到達距離への影響

次に燃焼室(B)を用いて 2 噴孔ノズルを用いた噴流発達過程の観察を行なった。噴流間角度の到達距離に与える影響を図 1.4.9 に示す。噴流間角度が 30 度のものが 60 度のものより到達距離が短くなる傾向にある。グラフ中の 1hole ϕ 1mm は、2 噴孔噴流同士が角度が 0 度に相当するものとして比較のため記載した。噴流間角度が小さくなると、自由噴流に比べ雰囲気ガスの巻き込みが減少し到達距離が長くなる

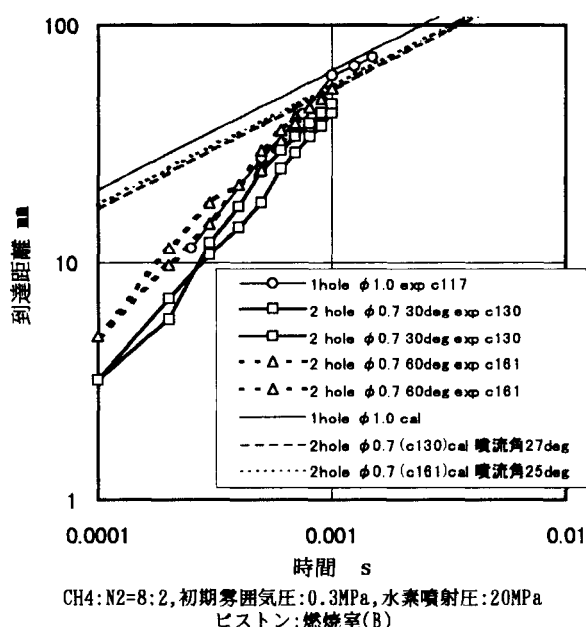


図 1.4.9 2 噴孔ノズルの噴流間角度と到達距離の関係

ことが予想されるがこの傾向は出ていない。この原因として、噴霧干渉がほとんどないこと、噴流角度(噴流広がり角度)が変化したこと、噴射開始時間の誤差、噴孔間角度の変化によるスキッシュの影響の変化が考えられる。(計算結果も 30 度のものが 60 度のものより到達距離が短くなっているは、実測した噴流角度を入力したことによる。)

噴流角が変化する理由としては、ノズルチップ中の形状が完全に相似とはならないことが考えられる。

1.4.3 着火性試験

本システムが通常のディーゼルエンジン同様に圧縮着火が可能であれば着火装置を設ける必要がなくなる。そこで水蒸気：酸素=75:25の混合気を用いて自己着火性について検討を行なった。試験は燃焼室(B)を使用し、燃料の噴射圧は15MPa、壁面温度も473K一定とした。

図1.4.10は燃料噴射開始時期を変更した時のシリンダ内圧力履歴を示す。いずれの条件においても4回ずつテストした結果を重ねて表示してある。酸素過剰率は多少ばらついてはいるが平均11である。一般的なディーゼルエンジンではシリンダ内最高圧力は噴射開始時期が早いほど高くなるが、本試験では噴射開始時期が36.0ms（上死点前4CA相当）時に最大となった。また圧力波形も36.0msの条件が比較的安定している。図1.4.11はこれら試験結果の着火遅れ時間と図示熱効率を変動幅を含めて示した。この図より噴射開始時期として36.0ms(-4ATDC)付近で着火が安定し、図示熱効率も高く最良となることがわかる。

ここで噴射開始時期は噴射弁リフトの波形より得た値であるが、噴流の観察試験結果と照合するとリフト波形から判断できる時期よりも0.1~0.2ms早く噴射が始まっていることが確認されている。

図1.4.12は2噴孔ノズルを用いて負荷の高い時と低い時の自己着火性を試験した結果を

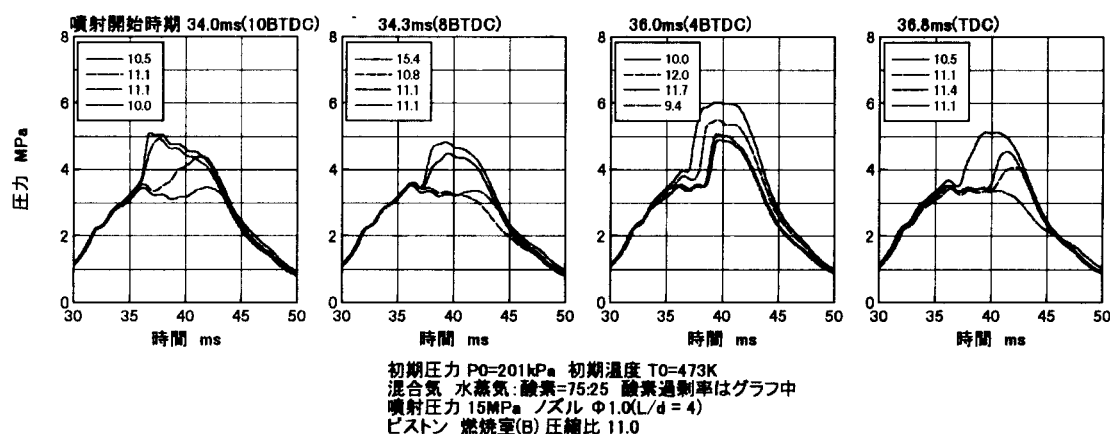


図 1.4.10 燃料噴射開始時期の着火性への影響

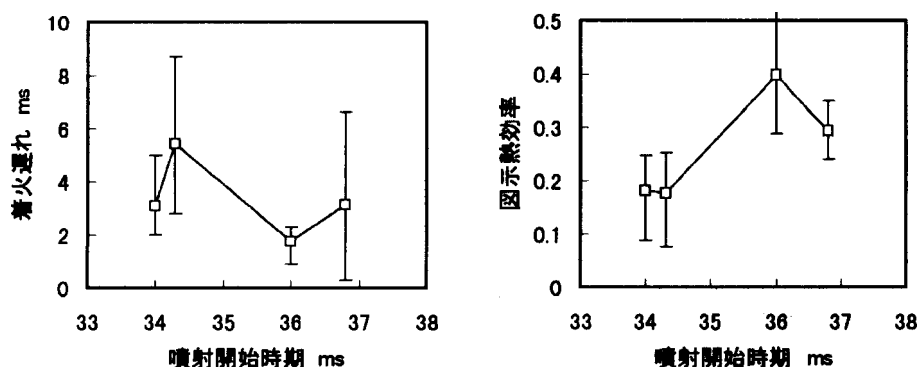


図 1.4.11 噴射開始時期の着火遅れと図示熱効率への影響

示す。水素噴射開始時期は先の図で良好であった 36ms 一定とした。結果は 2 噴孔の場合でも、酸素過剰率の大小に関わらず 4 回に 1 回の割合で着火が遅れる現象が見られた。

図 1.4.13 は噴射開始時期を 36ms とした条件下での着火性を初期圧力と当量比(=酸素過剰率の逆数)の関係でまとめた結果である。プロットの種類を以下のように変えて着火性を表現した。○：噴射とほぼ同時に着火するもの、□：約 4ms 以内に着火するもの、△：それ以上遅れて着火するもの、×：着火しないもの。その結果は当量比が大きいほど自己着火する確率が高く、当量比で 0.15 以下(酸素過剰率 6.7 以上)では着火しない確率が高くなった。

当量比 0.15 以下はかなりエンジン負荷の低い領域ではあるが、エンジンとして自立させるにはこの領域でも確実に着火燃焼する必要があることから、水蒸気を作動ガスとする水素ディーゼルエンジンでは何らかの方法による着火装置が必要であると判断できる。

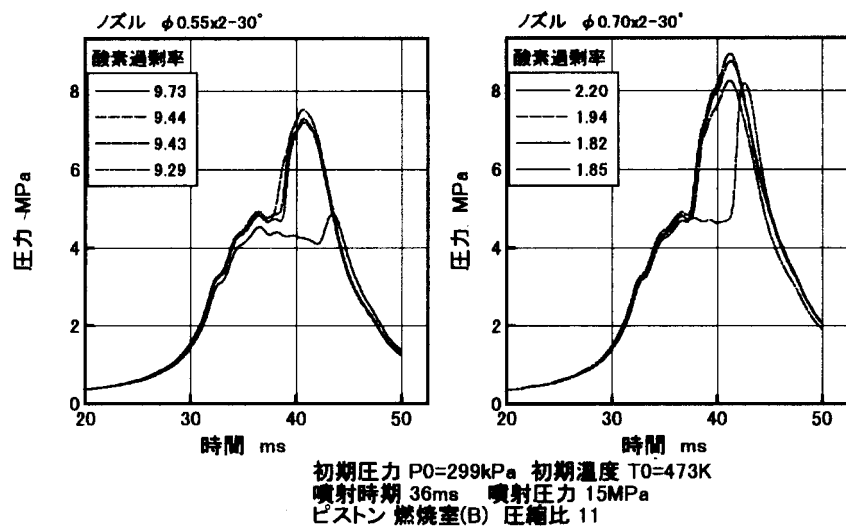


図 1.4.12 2 噴孔ノズルを用いての着火性の確認

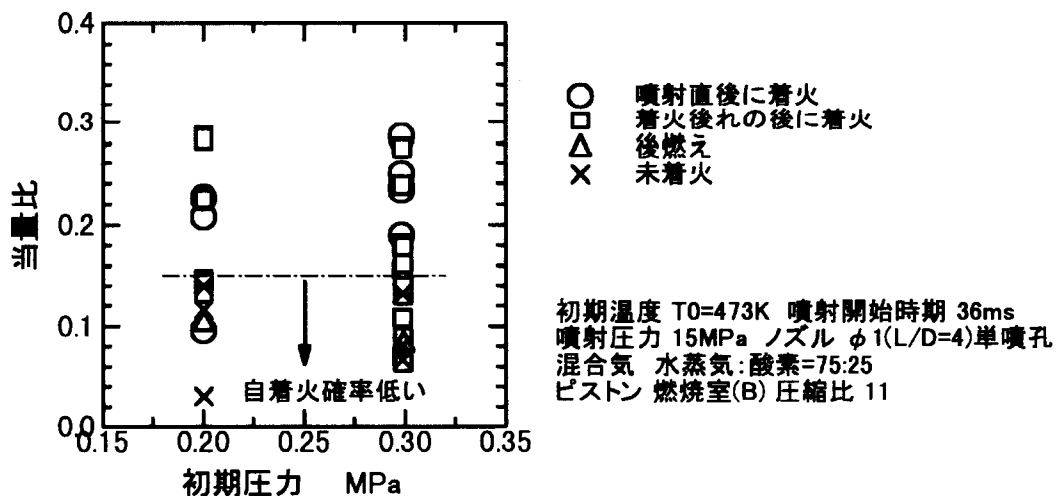


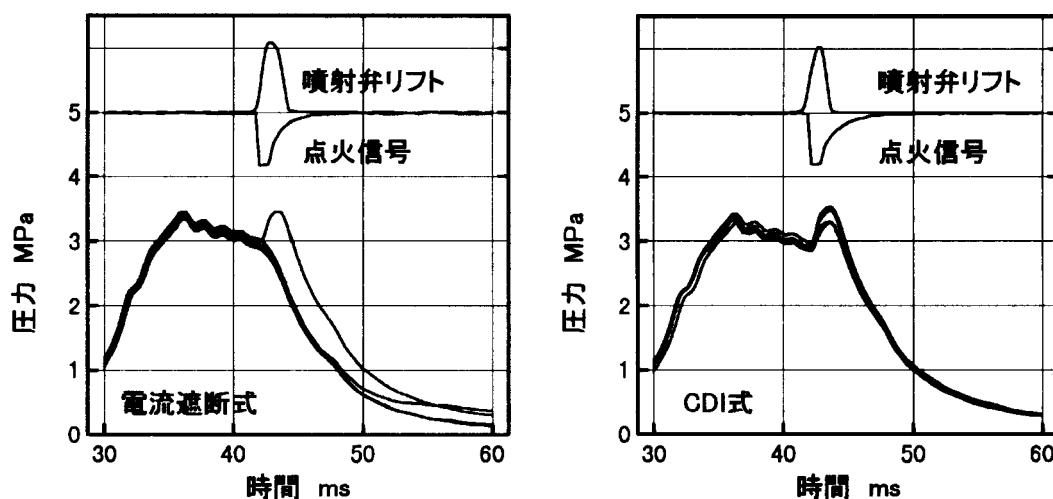
図 1.4.13 当量比による着火性への影響

1.4.4 点火着火試験

平成 9 年度に試作した点火プラグ式の着火装置を用いて水素噴流への点火着火試験を実施した。昨年度の予備試験の段階で着火エネルギーを大きく設定した場合、点火回路から発生する強力な電磁ノイズにより試験装置が異常動作する確率が高かったため本年度は着火エネルギーを最低の設定で使用した。図 1.4.14 に自己着火の確率が低い酸素過剰率 11、燃料噴射開始時期を膨張はじめとして、着火回路の違いが点火着火性に与える影響を示した。いずれの条件でも 5 回の試験結果をシリンダ内圧力の履歴として示している。その結果電流遮断式では着火と同時に圧力上昇が得られたのは 1 回のみであったが、CDI 式では 5 回とも安定して着火することが確認できた。それぞれプラグ端子間を流れる瞬時最大電流と瞬時最大電圧の 5 回の平均値を表 1.4.1 に示した。最大電流値としては回路間の違いは見られないが、最大電圧は CDI 式の方が 66% も大きくなっている。また最大電圧が発生するまでの時間が電流遮断式では $100\mu\text{s}$ 要するのに対して CDI 式では $2\mu\text{s}$ (計測の最小時間分解能) となった。CDI 式の着火性が高かったのは、ごく短時間に高い端子間電圧を印加できるため、電極間の混合気の放電破壊が可能となったためと考えられる。

表 1.4.1 点火回路の違いによる端子間電流と端子間電圧の比較

点火回路	最大瞬時電流 A	最大瞬時電圧 V
電流遮断式	1.18	8970
CDI 方式	1.21	14940



初期圧力 $P_0=200\text{kPa}$ 初期温度 $T_0=473\text{K}$
 噴射開始時期 41.5ms 噴射圧力 15MPa
 ノズル $\phi 1.0(\text{L/D}=4)$ 設定点火エネルギー 25mJ
 混合気 水蒸気:酸素=75:25 酸素過剰率 11
 ピストン 燃焼室(B)

図 1.4.14 着火回路形式の違いによる着火性への影響

1.4.5 単噴孔ノズルによる燃焼観察試験

噴流観察時に初期圧力を 200kPa とすると圧縮上死点付近で凝縮が発生した。その理由として観察用石英ガラスを壁面温度と同程度まで加熱することが困難なことが予想されたため、金属製ヘッドに小径のテーパ状観察ガラスを埋め込み、その周りをヒータで加熱して単噴孔ノズルを用いての観察を試みた。混合気はその他の燃焼試験と共通の水蒸気：酸素=75:25 とした。さらにトップクリアランス部で混合気が冷却され凝縮が促進されるのを防ぐ目的でクリアランスを 2.9mm と通常より約 2mm 広げた。その結果圧縮比は 9.5 と低下した。この試験で得られた観察結果を図 1.4.15 に示す。観察写真の上段は初期圧力を 104kPa と設定した自着火時のもので、下段は初期圧力を 153kPa とし点火プラグによる着火を試みたものである。同時に圧力波形と噴射弁リフトデータも示す。

点火着火は、噴流の発達に合わせ火炎が広がるいわゆる拡散燃焼であるのに対し、自着火は、着火点から火炎が四方へ伝播する予混合的な燃焼であることが分かる。これは、点火着火の場合、噴流発達段階において、強制的に着火され、拡散燃焼になったのに対し、自着火の場合、水素噴流が雰囲気ガスとある程度混ざることにより水素噴流が減衰し混合速度が低下した時点で自着火が生じたためと考えられる。

本観察用小径ガラスにより、条件を制限すれば凝縮の発生もなく水蒸気酸素混合気の燃焼観察が可能ことが確認された。

1.4.6 2 噴孔ノズルの燃焼観察試験

ディーゼルエンジンでは燃焼室内部の酸素利用率を高めるために燃料噴射ノズルは多噴孔ノズルを用いるのが一般的である。さらに水蒸気を作動ガスとする水素ディーゼルの場合には点火プラグを用いて着火を安定させる必要がある。そこで点火プラグで着火した噴流から他の噴流に火炎が伝播する挙動について噴流間角度の異なるノズルを試作し燃焼場の観察により検討した。2つの噴流があることから全面ガラスを用いた観察を行なった。凝縮を避けるために初期圧力を 51.2kPa と低圧力に設定した。使用したノズルはいずれも噴孔径 0.7mm のもので噴流間角度を 30、45、60 度と変更した。これはそれぞれ 12、8、6 噴孔ノズルの部分を模擬している。

図 1.4.16 に点火プラグによる着火後の時間を基準に噴射弁リフトと筒内圧力の履歴を比較した。写真上段に示した噴流間角度 30 度では点火と同時に火炎が隣の噴流に伝播するのに対して、45 度では 0.33ms、60 度では 0.50ms 遅れて伝播した。圧力の立ち上がりを表す dP/dt を比較すると、着火後 0.6 から 1.2ms の範囲で 60、45、30 度の順に高くなった。60 度の dP/dt がとりわけ大きくなったのは、噴射初期の噴射弁リフト量が他のノズルに比べて大きくより予混合化が進んでいたものと考えられる。30 度の dP/dt はこの圧力上昇率が低く抑えられることからエンジンの騒音低減にも有効と思われる。

が 27 度と 30 度にほぼ等しい角度になっていることから説明ができる。また空気－水素燃焼ではあるが、山根らの定容容器を用いた熱面着火の研究においては、45 度の噴流間角度の場合に火炎伝播が 0.9ms 要するという報告や⁽³⁾、Peter Prechtl 等の急速圧縮・膨張装置を用いた圧縮着火の研究において噴孔数が 10 以下では自着火した火炎が他の噴流に伝播せず燃焼変動が大きいという報告⁽⁴⁾とも良く対応している。

本試験時の点火プラグ端子間電流と電圧の計測結果から得られた着火エネルギーは 45～65mJ であった。

1.4.7 図示熱効率

図 1.4.17 に筒内圧力から求めた図示熱効率を酸素過剰率との関係で示す。図中には単噴孔、2 噴孔ノズルの結果を合せて表示してある。白丸のプロット以外は圧縮比は約 11、トップクリアランスは約 1mm での試験結果である。白丸のプロットはトップクリアランスを 2.9mm とした圧縮比 9.5 の結果である。この図より図示熱効率の最大値は酸素過剰率 3 以上において 0.38 程度で安定している。また酸素過剰率が 2 近辺では、酸素過剰率の低下に合わせて図示熱効率が低下する傾向を示した。圧縮比の低い方が図示熱効率で高い値を示すことがあるが、これはトップクリアランスを広げたことで凝縮が抑制されたため、燃焼による圧力上昇が大きくなり結果として図示熱効率が向上したと予想される。しかし低圧縮比の条件では図示熱効率のばらつきが大きい。この圧縮比では凝縮が完全に抑えられると仮定して求まる上死点付近での混合気温度は約 850 K となる。これはアルゴン－酸素中ではあるが水素噴流が安定して着火する雰囲気温度は 950 K 以上であるという小酒らの報告⁽⁵⁾を考えると雰囲気温度が低すぎるためと考えられる。

図 1.4.18 は実験結果と平成 8 年度に実施した水蒸気循環型水素ディーゼルエンジンの性

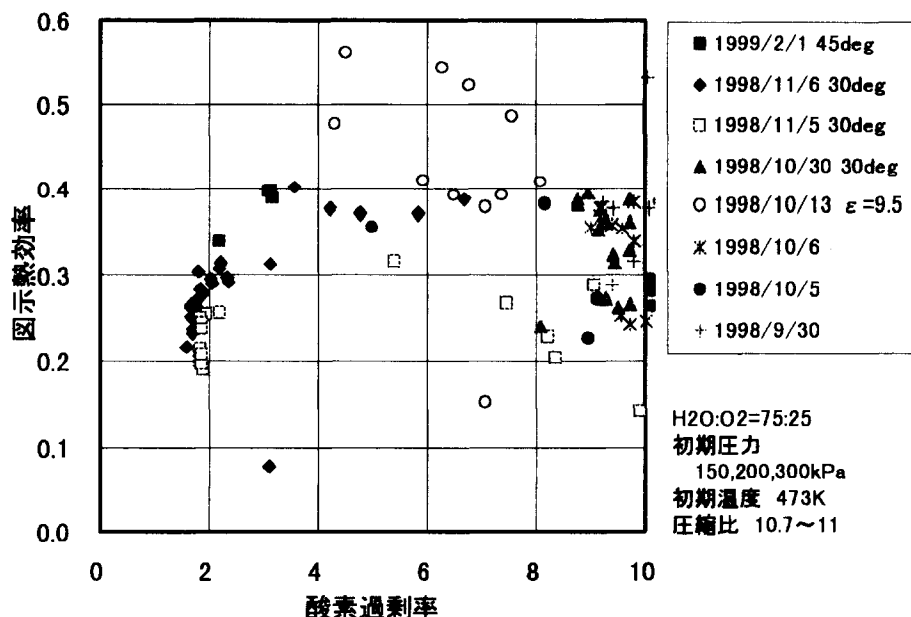


図 1.4.17 図示熱効率の傾向

能予測プログラムによる計算結果の比較をP-V線図、 $\log(P)$ - $\log(V)$ 線図で示す。計算は本試験機に合せボアとストローク、壁面温度を入力した。燃焼期間は平成8年度と同じ82CAを使用した。圧縮行程中の圧力は圧力が2MPa以下では良く一致した。2MPa以降では若干の凝縮が発生したため実験の圧力が低下している。そのため最高圧力も実験結果の方が0.4MPa低くなった。膨張行程初期の圧力の変化は計算とほぼ同じであるが、1.7MPa以下の膨張後期には実験値の方が約0.14MPa高い圧力となった。この理由として、上死点前に凝縮した水が膨張行程で圧力が低下したため気化したと推察される。これが実験結果の図示熱効率が1.2%計算結果より低くなった理由と考えられる。

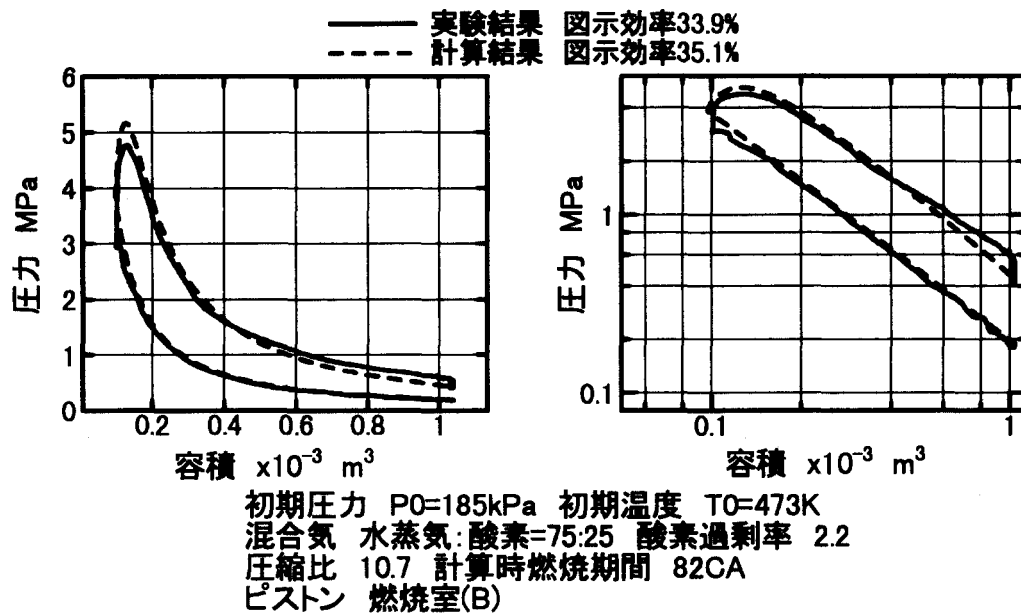


図 1.4.18 数値シミュレーションと実験結果の比較

1.4.8 燃焼効率試験

これまでの試験で水蒸気・酸素混合気中においても水素噴流の間欠燃焼が可能なことは確認したが、噴射した水素のうちどれだけが燃焼したかを示す燃焼効率を確認する必要から、排気ガスのガスクロマトグラフによる成分分析を行ない、排気中に含まれる水素の濃度から燃焼効率を求めることを試みた。酸素過剰率を1.18~2.26へ変化した3点の計測結果を図1.4.19に示す。比較のために空気を雰囲気ガスとした場合の試験結果も合わせて示した。試験はいずれも点火着火したものである。

その結果は燃焼効率98.7~99.6%を示し、参考に実施した空気を作動ガスとした試験時の結果96.7%よりも高い。このことから水蒸気中の水素間欠燃焼でも十分な燃焼効率を得られることが確認されたが、酸素過剰率が大きくなるような低負荷時の燃焼効率など実用に際してはさらに検討が必要である。

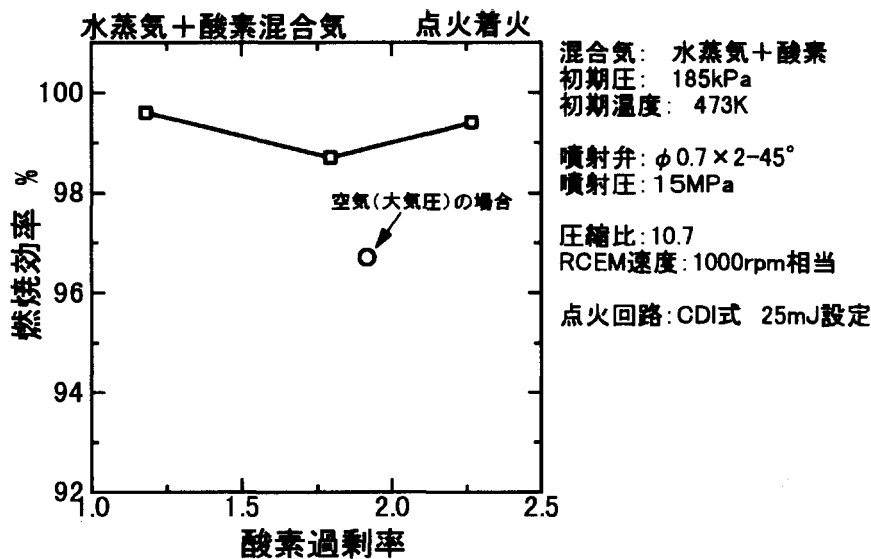


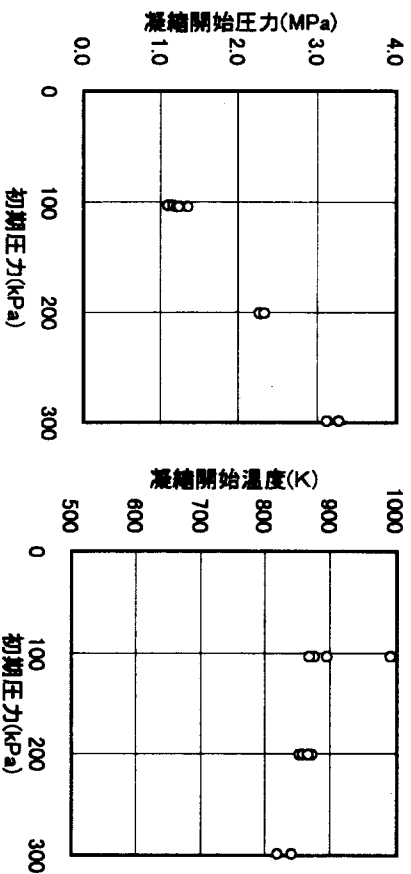
図 1.4.19 酸素過剰率と燃焼効率の関係 (2 噴孔ノズル)

1.4.9 水蒸気の凝縮

水蒸気酸素混合気を作動ガスとする場合、圧縮初めの状態は過熱蒸気となっており、壁面温度 473K は飽和温度 (400~410K) に比べて十分高いが、圧縮が進む過程で圧力が上昇し壁面温度が飽和蒸気温度以下となる。この状態で壁面近傍の混合気の一部が冷却され凝縮が発生する。図 1.4.20 に初期圧力と凝縮の関係を示す。凝縮開始点の定義は、圧縮行程 (ストローク: 1~90mm) 中の平均ポリトロプ指数を用いて初期条件から理想気体として圧縮した場合の温度を求め、その値と計測した圧力から求めた温度がずれ始める点とした。試験結果は初期圧力の上昇により、凝縮が始まる圧力が高くなる傾向を示した。また凝縮が始まる時点の温度は圧力の上昇によって低下する。その時のシリンダ容積は初期圧力の影響を受けない。

シリンダ内の蒸気分圧での飽和温度が壁面温度よりも高くなったときに凝縮が発生すると仮定すると、凝縮開始のシリンダ容積比は初期圧が高いほど大きくなるはずである。しかし実際には容積比はほぼ一定であったことから、圧縮がごく短時間で起きるために凝縮する量が平衡状態まで達していないことがわかる。逆に平衡状態まで達していないからシリンダ内温度を求めることも不可能となった。今回の試験においてはこの凝縮の問題から水蒸気を作動ガスとする本システムの熱発生率を算出することはできなかった。

この凝縮を抑制するにはできるだけ壁面との熱伝達による冷却の効果が少ない燃焼室形状を採用することが必要と思われる。今回採用した燃焼室はトロイダル型燃焼室を模倣したものであったが、トップクリアランス部の少ない半球型燃焼室などが最適と考えられる。



混合気 水蒸気:酸素
=75:25
圧縮比 $\epsilon=10.6$
初期温度 $T_0=473K$

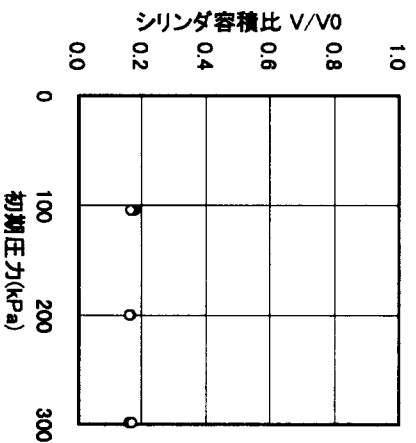


図 1.4.20 初期圧力と水蒸気の凝縮の関係

1.4.10 水蒸気循環型水素ディーゼルのまとめ

- ・ 水蒸気酸素混合気を作動ガスとしたディーゼルエンジンは、水素燃料の自着火では着火の安定化が困難であり、何らかの着火装置が必要である。
- ・ 着火装置として点火プラグを用いる場合には、着火回路としてCDI式の方が電流遮断式に比べて確実な着火が得られる。点火時の着火エネルギーとしては45~65mJで十分である。
- ・ 噴流間角度を30度とすれば、着火と同時に隣の噴流への火炎伝播が可能であるが、45度では伝播に多少時間遅れが生じる。
- ・ 噴射開始とほぼ同時期の点火着火により噴流の混合律則による拡散燃焼の形態で燃焼が進行する。
- ・ 圧縮上死点付近ではトップクリアランスのような隙間部で燃焼室壁面により冷却される水蒸気の一部が凝縮する。またその水蒸気量は圧縮がごく短時間で発生することから平衡状態には至っていない。
- ・ 圧縮比が約11の図示熱効率は最大約38%となった。酸素過利用率が2付近では本値は低下

する傾向を示した。

- ・酸素過剰率 1.18～2.26 の範囲での燃焼効率は 98%以上となり、十分高いことを確認した。

1.4.11 明らかとなった実機適用への課題

- ・点火プラグにより着火可能であるが、噴流に対する空間的な配置やタイミングに対する検討は十分ではない。
- ・噴流の発達、可燃混合気の生成、火炎伝播にはシリンダ内部の空気流動が大きく影響すると予想される。実機開発に当たってはスワールとスキッシュ流の影響を考慮した、噴射ノズル、点火プラグ位置、燃焼室形状の最適化が必要である。
- ・熱効率の向上には、圧縮上死点付近での凝縮を抑制する必要がある。そのための方策として半球形燃焼室のようなトップクリアランス部の少ない燃焼室が有望と予想されるが、最適化のための研究が必要である。
- ・プラグによる着火によって燃焼は拡散燃焼的に進行する。熱効率の向上には噴射期間を短くし燃焼期間を短縮することが必要である。
- ・実機では壁面温度は本試験機よりも高温化することから、凝縮を抑制するには有利と考えられる。しかしライナ部分は潤滑上の制限から困難が予想される。

(1)浜本等 機械学会 B53 巻 496 号 (1987)

(2)江原等 第 5 回微粒化シンポジウム A-27 213P～218P (1996)

(3)山根等 平成 10 年度サブタスク 7 動力発生 第 2 回 WG 資料 (1998)

(4)Peter Prechtel 等 Hydrogen C.I. Large Bore Four Stroke Engine: Ignition and Combustion Process Analyzed with High Speed Optical Measurement Systems、第 12 回 水素エネルギー国際会議 (1998)

(5)小酒等 平成 9 年度サブタスク 7 動力発生 第 7 回 WG 資料 (1998)

1.5 ガス供給装置

1.5.1 ガス供給装置の改造

ガス供給装置は、急速圧縮・膨張試験機に水素、酸素、アルゴン、水蒸気及び窒素ガスを供給する装置であり平成9年度に製作したものである。その後の実験において、本装置の一部を改善する必要が生じたため、本年度、装置の一部を改造すると共に新たに部品を追加及び交換した。本年度実施した改造箇所と改造内容を表 1.5.1-1 に、改造後のガス供給装置の系統図を図 1.5.1-1 に示す。

表 1.5.1-1 改造箇所及び改造内容

	改 造 個 所	改 造 内 容
1	混合用バッファタンク	新規製作、攪拌装置設置、ドレン弁追加、上面フランジ構造、ガス出口管を固定、ガス用配管長さを最短とする。安全弁 (10kg/cm ²) を追加する。タンクに装着するヒータ類は新規とする。
2	同上タンク、 排気ラインの保温	保温ヒータ及び断熱材を装着する。ガスクロとの接続配管設置 (保温工事含む)、配管回り止め用サポート設置
3	同上タンク、 排気ラインの配管改造	排気ラインに勾配を設けると共に、最下部に排気用バルブ (ボール弁 SS-S62PS4) を設ける。
4	ニードル弁からボール弁 へ変更	系統図の No. V、IX、XI の弁を SS-S62PS4 に交換する。
5	サンプルラインと排気ラインにボール弁を追加	ボール弁 No. II の後に SS-S62PS4 を取り付ける。
6	真空ポンプの油中水分除去対策	真空ポンプを GLD-050(ULVAC 製) に交換し、オイルフィルトレーションシステム UFO-003(ULVAC 製) を追加する。
7	水素ガス供給装置の弁	系統図の * 1、* 5 の弁を SS-31RS4 に交換する。
8	水蒸気ラインのニードル弁からボール弁へ変更	ニードル弁 No. IV、VIII をボール弁 SS-S63PF8RT に変更する。
9	アキュムレータ破損対策	アキュムレータと油圧ポンプの間にピストン型アキュムレータを配置する。
10	ヒータ用配電盤	ヒータ用電源 (ブレーカ) を個々のヒータ毎に設ける。
11	その他の工事	上記工事に伴う配管、保温工事。

項目	単位	燃焼室(A)	燃焼室(B)
燃焼室 (ピストン) 形状		噴流観察用	実機模擬用
回転数	r p m	1 0 0 0	→
ボア	m m	1 0 0	→
ストローク	m m	1 2 0	→
燃焼室容積 (参考値)	c c	9 4. 5	9 5. 9 6
圧縮比		1 0. 8 4	1 0. 8 2
スキツェエリア	m m	1. 3	0. 8
初期温度	K	4 7 3	3 0 0
初期圧力	M P a	0. 1 (大気圧)	→
噴射圧力 (温度)	M P a	2 0	→
噴射量 (暫定値)	g / 回	0. 0 1 6	→
噴孔形状 (D x L)	m m	1. 0 x 5. 0	→
噴孔位置 (ノット面から)	m m	1 1	→
噴射時期		上死点	→
噴射期間 (図 1.6.1-1 参照)	°C A	2 0 (3. 3 msec)	→
噴射速度 (図 1.6.1-1 の V)	m / sec	1 7 0 3	1 3 8 8
雰囲気ガス		H ₂ O-O ₂ (25%)	A r-O ₂ (21%)
壁温	K	4 7 3	3 0 0
要素数		1 5, 6 8 0	1 3, 5 9 6
節点数		1 7, 5 1 1	1 5, 1 6 3

表 1.6.1-1 解析条件

急速圧縮・膨張試験機の 2 つの形状の異なる燃焼室 (ピストン) について解析モデルを作成し、燃焼室内のガス流動・温度分布及び水素ガス噴射について解析した。

表 1.6.1-1 に解析条件、図 1.6.1-1 に水素ガス噴射条件を示す。また、図 1.6.1-2 にピストン下死点位置における燃焼室(B)、燃焼室(A)の解析モデルを示す。

そこで本年度は、シリンダ内ガス流動、噴射された水素ガスの挙動等について K I V A コードによる解析を行ない、今後、本コードによる解析を実施する際の課題について検討を行なった。

燃焼現象の解明、燃焼室の最適設計の指針を得ることが可能となる。

燃焼過程 (自着火条件、予混合燃焼、拡散燃焼等) を適切に記述する必要があり、これによりシリンダ内の水素燃焼シミュレーションには噴射された水素ガス噴流・混合気形成や燃焼過程 (自着火条件、予混合燃焼、拡散燃焼等) を適切に記述する必要があり、これによりシリンダ内の水素燃焼シミュレーションには噴射された水素ガス噴流・混合気形成や燃

1.6 水素ガス噴流のシミュレーション

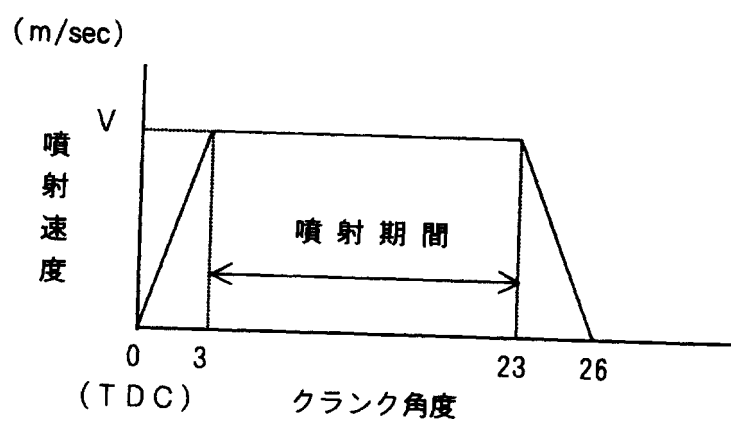
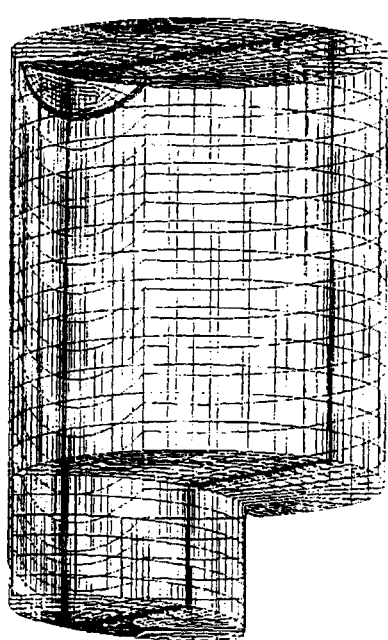
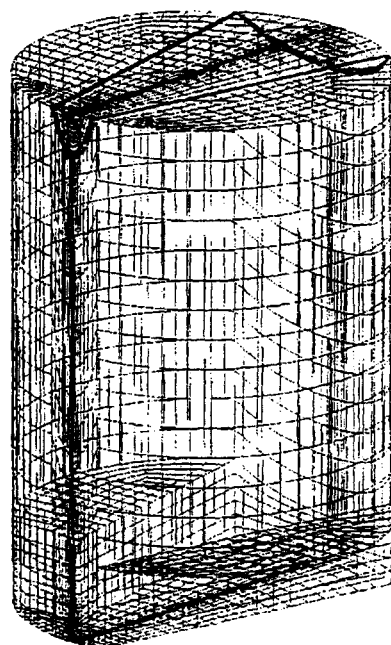


図 1.6.1-1 水素ガス噴射条件



燃焼室(B)



燃焼室(A)

図 1.6.1-2 解析モデル

(a) ガス流動解析

燃焼室(B)では圧縮に伴うスキッシュが大きいため、燃焼室にこれによる渦が生じており、上死点位置での燃焼室へ流入する速度の最大値は 20 m/s となった。

一方、燃焼室(A)では左右のピストン頂面からのスキッシュにより、燃焼室内に2つの渦が生じており、上死点位置での速度の最大値は 10 m/s となった。

(b) 温度分布

燃焼室(B)では上死点位置における燃焼室内最高温度 1046 K、平均温度 1012 K となった。

一方、燃焼室(A)では上死点位置における燃焼室内最高温度 952 K、平均温度 927 K となった。また、ピストン頂面及びシリンダヘッド面付近は燃焼室中心部より約 100 K 低い。各々の上死点における筒内の解析結果を表 1.6.2-1 に記す。

表 1.6.2-1 上死点における筒内状態

		燃焼室(B)	燃焼室(A)
最高温度	K	1 0 4 6	9 5 2
平均温度	K	1 0 1 2	9 2 7
平均圧力	M P a	3 . 4 8	2 . 1 8
圧縮行程 γ 指数	-	1 . 5 2	1 . 2 8
全噴射量 (解析後)	g/回	0 . 0 1 4 5	0 . 0 1 7 2

(c) 水素ガス濃度分布

図 1.6.2-3 は水素ガスを噴射した場合の水素のモル濃度分布であり、凡例の「0」は水素なし、「1」は全て水素であることを表わす。図は噴射位置中心における燃焼室の水平断面であり、上図はピストン上死点後 5 °C A の状態を、下図は 2 0 °C A 後の状態を示す。また図 1.6.2-4 は図 1.6.2-3 と同一の解析結果であるが、噴射位置中心における燃焼室の垂直断面の状態を示す。

これらの結果から、噴射後 5 °C A の状態を比較すると、燃焼室(B)では筒内圧力が高いため燃焼室(A)に比べ噴射方向のペネトレーションは小さいが、噴射方向と直角方向の広がり大きいこと、また噴射後 2 0 °C A の状態を比較すると、燃焼室(A)の方が燃焼室全体への水素ガスの広がりが良いことが分かった。

これらの水素ガス噴射解析結果を実験結果と比較すると、例えばペネトレーションについては実際より少し小さい値になっている。この原因としては、噴射条件（噴射速度）が実際と異なるあるいは解析モデルに問題がある等種々考えられるが、これに関しては今後の課題とし、第Ⅱ期で実験結果と比較しながら解析精度の向上を図る。

本年度は、K I V A コードによるガス噴射やガス流動等の解析の可能性について調べるため、本コードをこれらの解析に適用した。

1.7 基礎燃焼試験のまとめ

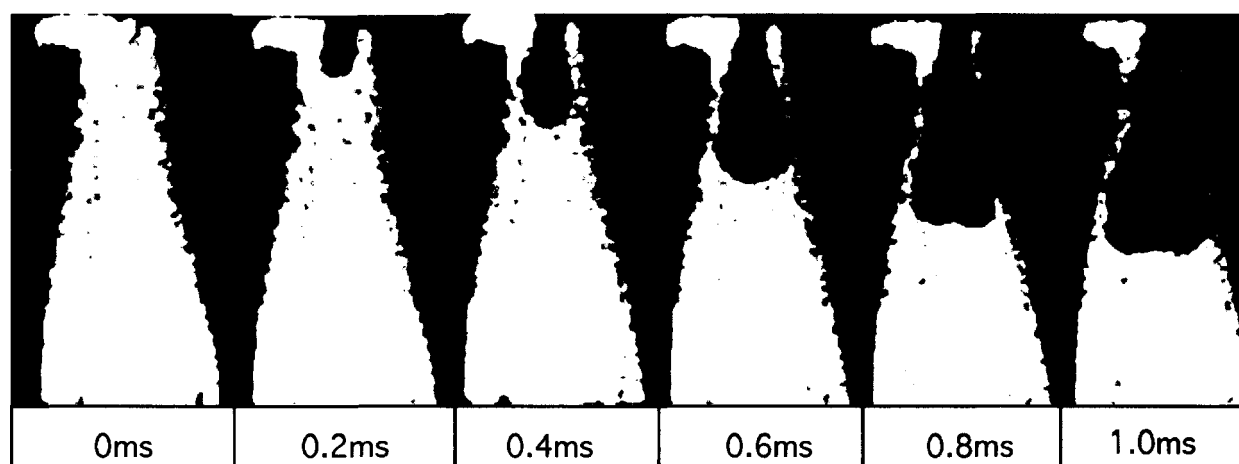
1.7.1 噴流角と噴流到達距離

急速圧縮・膨張装置を用いて高圧の水素を高圧・高温の酸化剤雰囲気中に噴射した時の水素噴流の発達状況をシュリーレン法により観測した。水素噴流の挙動を把握しておくことは、自着火現象を理解する上で、着火の最適時期・最適位置を見出す上で、さらには燃焼室を設計する上で有用である。軽油燃料噴射時の噴霧形成については、ディーゼルエンジン燃焼室の設計に関連して、理論解析と実験的アプローチの両面から多くの研究がなされており、中でも、和栗ら⁽¹⁾の運動量理論を用いた解析では、到達距離や空気過剰率分布などのディーゼル噴霧の特性が幾つかのパラメータで表され、さらに、ガス噴射の場合にも適用性があることが浜本ら⁽²⁾により確認されている。和栗らの運動量理論によれば、噴霧到達距離 X_s は、近似的に以下の式で表せる。

$$X_s^2 / (d_n \cdot U_0 \cdot t) = (\alpha \cdot \rho_f / \rho_g)^{0.5} / \tan(\theta_s)$$

ここで、 U_0 は噴霧(ガス)の噴射速度、 d_n は噴射ノズルの直径、 ρ_f はノズル出口の噴射気体の密度、 ρ_g は雰囲気ガスの密度、 θ_s は噴流の半頂角、 α は噴流の流量係数をおののを表す。

上式での噴流角は、近似的には、噴射ガスと雰囲気ガスの比だけの関数になることが次元解析から示されている。このように、到達距離は時間の平方根に比例して大きくなること、噴流半頂角の正接の平方根に反比例することなどがわかる。ここでは、アルゴン-窒素および水蒸気-酸素の擬似ガスであるメタン-窒素の二種類の雰囲気ガスについて、噴流角をシュリーレン写真から測定し、水素噴射圧力および雰囲気圧力が比較的低い浜本ら⁽²⁾の



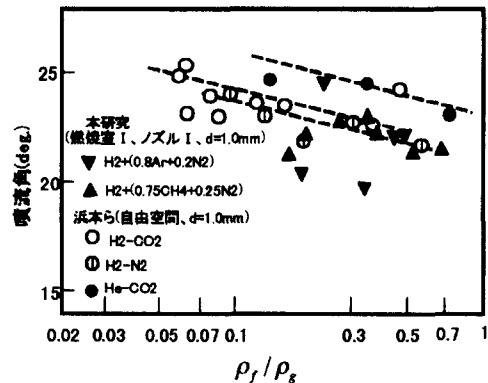
$$P_{inj} = 20\text{MPa}, P_{ini} = 0.2\text{MPa}, \text{Ar:N}_2=79:21$$

図 1.7.1-1 噴流の発達状況

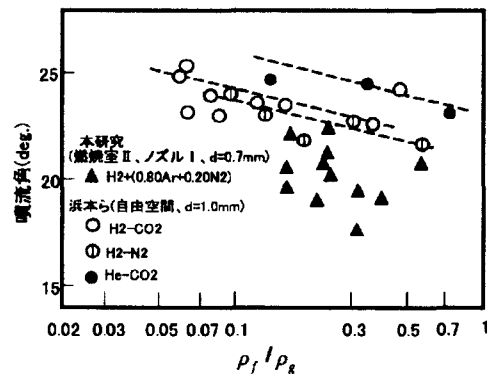
結果と比較した。初期圧 0.1MPa から 0.2MPa の混合気を圧縮比 10 程度、回転数換算で圧力付近で 5MPa~20MPa の噴射圧で水素を噴射させて実験を行った。図 1.7.1-1 は水素噴流の発達状況を示す典型的なシュリーレン写真である。噴流角は、噴射直後を除いて、ほぼ一定である。そこで、噴射から 1ms 後の噴流角をシュリーレン写真から読み取り、代表値とした。図 1.7.1-2(a)~(c)に、このようにして測定した噴流角と浜本らの結果を示した。図(a)から(c)は、燃焼室タイプと噴射ノズル径の組み合わせが、I と 1mm、II と 0.7mm、II と 0.5mm である場合の噴流角を噴射ノズル出口における水素密度と雰囲気密度との比に対しておのの示している。図(a)には、二種類の雰囲気ガス種類について測定値を示してあるが、測定値がばらついていて、雰囲気ガス種類の影響は見い出せない。密度レベルが 1 桁程度異なるにも拘わらず、浜本らの結果と良い一致が見られ、噴射角は噴射孔出口における噴射ガス密度と雰囲気密度の比によりほぼは決定されることがわかる。図(a)から(c)に見られるように、噴流角は、ノズル径が小さくなると僅かに小さく、また、噴流密度と雰囲気密度の差が小さくなると、小さくなる傾向を示しているが、今回の実験範囲ではそれらの影響は大きくなく、 $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$ の範囲にある。また、噴流角は燃焼室形状に大きな影響を受けないことが確認されている。

図 1.7.1-3(a)に、アルゴン-窒素混合気を 10 程度の圧縮比まで、タイプ I の燃焼室で急速圧縮し、直径 1.0mm の単噴孔ノズルを用い

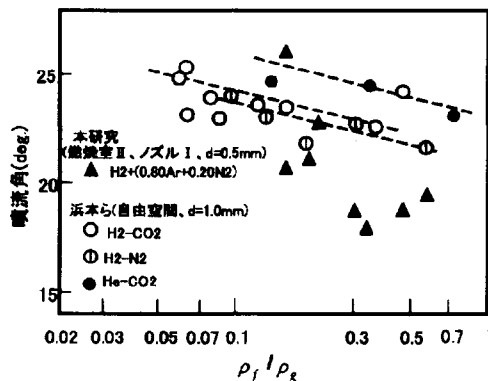
て水素を噴射した時の噴流到達距離の時間的変化を示す。和栗の式によれば、到達距離は時間の平方根に比例して大きくなるのに対して、実験結果は、噴射から 1ms までは時間に比例し、その後は、ほぼ時間の平方根に比例して発達して行く。この傾向は、広安⁽³⁾らのディーゼル噴霧やガス噴流の実験結果にも見られ、原因の一つとして、噴射弁がノズル孔面積に相当するリフトまで立ち上がる期間、水素流量が増加するためと考えられる。噴射



(a) $d=1.0\text{mm}$



(b) $d=0.7\text{mm}$



(c) $d=0.5\text{mm}$

図 1.7.1-2 噴流角

圧力と雰囲気圧力との比が大きくなるにつれて、到達距離も大きくなっている。1.7.1-2(a)には、和栗の式に、実験で求めた噴流半頂角に 10° を、流量係数に 0.8 を代入して得られる噴流到達距離の時間変化も合わせて示してある。双方の結果は、多くの仮定がなされているにも拘わらず比較的良い一致が見られ、噴射角が既知であれば、噴流到達距離さらには水素濃度分布のおおよその予測が可能であることがわかる。

雰囲気ガス組成の影響を見るため、アルゴン-窒素混合気と水蒸気-酸素の模擬ガスであるメタン-窒素混合気とを用いて到達距離の時間変化を測定した結果を 1.7.1-3(b) に示す。図 1.7.1-3(a) との比較から、噴射圧と雰囲気圧力との比が同じであっても、密度が小さいメタン-窒素混合気では貫通距離が長くなっている。噴射された水素が雰囲気ガスを巻き込み、運動量を失うために、雰囲気ガス密度が小さくなると貫通距離が長くなると考えられる。

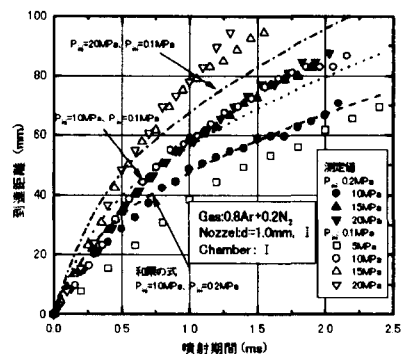
ノズル径が噴流到達距離に及ぼす影響を見るため、雰囲気ガスにアルゴン-窒素混合気を用いてノズル径を 0.7mm と 0.5mm とした時の噴流到達距離の変化を図 1.7.1-3(c) と 1.7.1-3(d) に各々示す。噴射圧力と雰囲気圧力との比による変化は同じ傾向を示すが、ノズル径が小さくなると、噴流到達距離が小さくなることがわかる。この傾向は、ノズル径 1.0mm の図(a) との比較からも確認できる。

和栗らの式は、これら噴流到達距離が、噴射圧力と雰囲気圧力との比、雰囲気ガス密度、ノズル径により受ける影響を予測しており、図(a)、(c)、(d) に示されるように、噴射初期を除いて、定量的にも 10% 程度の誤差で噴流到達距離を予測していることがわかる。

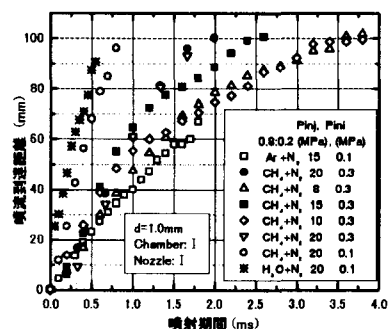
1.7.2 噴流着火実験

(1) 自着火条件と着火遅れ

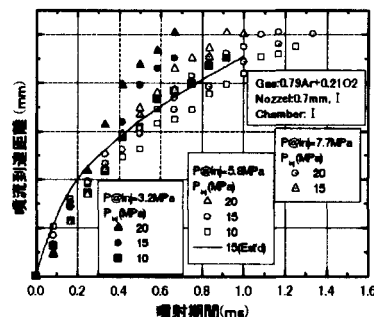
雰囲気ガスには水蒸気とアルゴンが主体の二種類のガスを、燃焼室にはタイプ I とタイプ II を、噴射ノズルにはタイプ I とタイプ II とを用いて自着火条件を測定した。この時、雰囲気ガス初



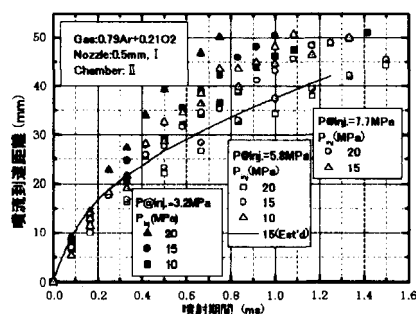
(a) $d=1.0\text{mm}$



(b) $d=1.0\text{mm}$, CH_4+N_2



(c) $d=0.7\text{mm}$



(d) $d=0.5\text{mm}$

図 1.7.1-3 噴流到達距離

期温度はアルゴン主体の雰囲気は常温から 120℃、水蒸気主体の雰囲気ガスは 100℃～200℃まで、初期圧力は 0.1MPa から 0.3MPa まで変化させ、水素の噴射圧は 10MPa と 20MPa に設定した。また、自着火の判定条件は明確な圧力上昇が認められる時点とした。図 1.7.2-1 に、水素噴射時の雰囲気圧力-温度で整理した自着火条件を示す。水素噴射から着火に至るまで時間的なズレがあるため厳密な雰囲気温度、圧力は定義できないので、ここでは便宜的にこのような圧力、温度を採用した。また、雰囲気ガスに水蒸気を用いた場合、圧縮行程で燃焼室壁付近の水蒸気はその分圧の上昇により凝縮する現象が見られ、温度の見積りには誤差が含まれるが、ここでは無視した。アルゴン主体の雰囲気ガス、燃焼室タイプ I、ノズル II の組み合わせを用いた場合、700 K から 850 K の温度範囲で、着火する場合と着火しない場合が混在しているのに対して、燃焼室タイプ II との組み合わせでは 900 K 以上の温度では確実な着火が見られ、燃焼室の形状により着火条件が幾分変化することがわかる。シュリーレン観察から、同じ実験条件であっても、噴射直後にノズル出口付近で着火する場合と噴流が壁に衝突した後に着火する場合があることがわかった。温度が上昇すると、噴射直後に自着火する割合が増える。水蒸気主体の雰囲気ガスについては、タイプ II の二噴孔ノズルと燃焼室タイプ II とを組み合わせで実験を行った。温度の低い条件では、着火するケースと着火しないケースとが混在している。また、着火条件は圧力に大きな影響を受けない。水素噴射に伴う強い乱流のため、濃度および温度は急激な変化を受けて、自着火温度限界付近では自着火が確率的に起き、温度が高くなると自着火の確率が高まると考えられる。

図 1.7.2-2 に、図 1.7.2-1 に対応した条件下での着火遅れを示した。アルゴン-酸素雰囲気での着火遅れ時間は温度の上昇とともに短くなっており、1000 K 以上になると着火遅れ時間は 0.2ms から 0.5ms の比較的狭い範囲におさまる。一方、水蒸気の場合は、ばらつきは大きいながら、600 K 以下においても自着火が観察されている。水蒸気の一部が壁で凝縮するため、温度が低く見積られている可能性がある。

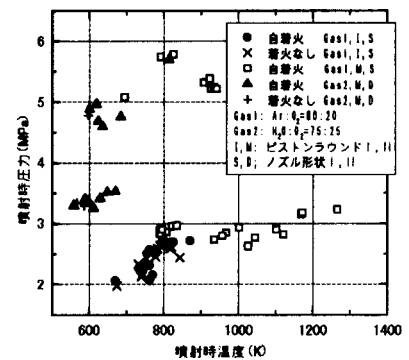


図 1.7.2-1 自着火条件(d=1.0mm)

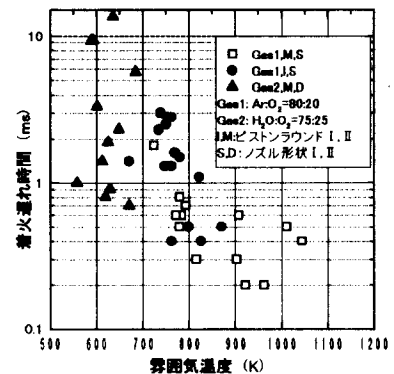


図 1.7.2-2 着火遅れ時間
(d=1.0mm)

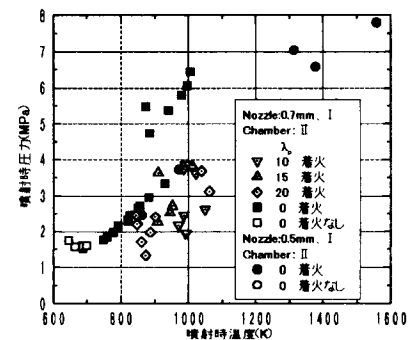


図 1.7.2-3 自着火条件
(d=0.5mm, 0.7mm)

図 1.7.2-3 は、ノズルに 0.5mm および 0.7mm を用いて、燃焼室タイプ II 中のアルゴン・酸素混合気の水素を噴射した時の着火条件を示す。図中には、水素を一部予混合した雰囲気ガスに、水素噴射した場合の結果も合わせて示した。噴射のみの実験の場合、実験データ数が十分でないため、ノズル径や圧力による明確な違いは見い出せないが、着火限界温度は 750K 程度であり、ノズル径が 1mm の場合に比べ幾分低い温度になっている。燃焼室タイプが異なり、噴流が燃焼室壁に衝突した後に急速に雰囲気ガスと混合するためと考えられる。噴流の発達状況の観察は、噴流角はノズル径によらずほぼ一定値を保ち、噴流到達距離だけが異なることを示しており、噴流内部の水素や酸素の濃度分布は相似形になっていると推察できる。したがって、ノズル径 1mm の結果がこれらノズル径についても成立すると考えられ、着火限界は、温度に強く依存し、圧力への依存性は小さいと思われる。

図 1.7.2-4 は図 1.7.2-3 に対応した条件における着火遅れ時間を示している。900K 以下では、着火遅れ時間のばらつきは大きいですが、温度が高くなるにつれ着火遅れ時間は、短くなるとともにそのばらつきも小さくなっている。この傾向はノズル径が 1mm の場合と同じである。しかしながら、ノズル径 1mm の場合と比べると、着火遅れ時間は全体的にながくなっており、1000K 以上の高温になると、ノズル径 1mm では 1ms 以下になるのに対して、一部短いデータも見られるものの、全体的には 1ms 程度の値を示している。この理由として、今回の着火遅れ時間は、噴射から燃焼室内の明確な圧力上昇が見られるまでの時間として定義しており、ノズル径が小さくなるにつれて、着火から圧力上昇が示されるまでの遅れが大きくなり、実際よりながい着火遅れ時間が測定されている可能性があること、ノズル径が小さいほど噴流のせん断流が強いため、活性種、熱の逸散速度が増大して、着火遅れが大きくなっていることなどが考えられる。今後、時間分解能を上げた可視化写真をとることによって、この原因は特定できるであろう。

水素を部分予混合した場合の着火限界温度は 820K 付近にあり、噴射のみの場合に比べて高くなっている。部分予混合(酸素過剰率 10, 15, 20)により着火限界温度が高くなる要因は考えられず、確率的な現象の範囲と考えてよい。一方、部分予混合の着火遅れ時間は、900K を超えると急激に短くなり、ここには示していないが、最高温度に達する前に着火する確率が高くなる。このように、部分予混合は、噴射のみの着火限界温度 750K から過早着火が生じるようになる 900K までの間では、着火遅れ時間を短くする効果がある。

1.7.3 燃焼過程

噴射、着火から燃焼・発熱過程に及ぼす要因を明らかにしておくことはディーゼルの燃焼を達成して最高圧力を抑え、その上で燃焼効率や熱効率などのエンジン性能を向上さ

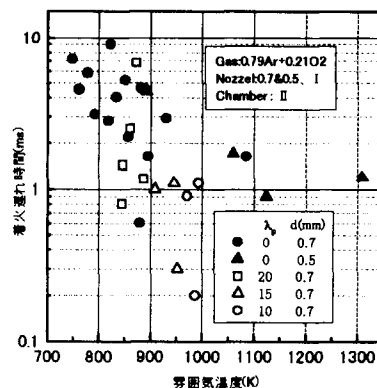


図 1.7.2-4 着火遅れ時間
($d=0.5\text{mm}, 0.7\text{mm}$)

せる意味から重要である。燃烧(発熱)過程に影響を与える因子としては、水素噴射に関するものとして、水素噴射量、噴射ノズル径、水素噴射圧力などが、また、雰囲気ガスに関するものとしては、雰囲気圧力、酸素濃度など多くものが挙げられる。これらの因子すべての影響を調べるには、膨大な時間と労力を要する。さらに、これに、実験装置および測定上の不備が加わり、信頼性のあるデータは限定されされており、現在までのところ定量的な議論はできない。ここでは、今後の課題を明らかにする意味からも、これまでに得られているデータを基に燃烧過程について考察することにする。

(1) 熱発生率

熱発生率の定量的な比較を最も困難にしている原因として、レーザ変位計の出力に振動的なノイズが乗ること、燃烧過程に再現性が乏しいことが挙げられる。図 1.7.3-1 に見られるように、熱発生率は TDC 付近で大きく振動しており、異なる条件下における僅かな違いを比較することは困難であるが、全体の波形から幾つかの知見を得ることは可能である。今回の実験では、特に、燃烧過程に及ぼすノズル径の影響が比較的顕著であった。酸素過剰率以外の条件を一定にして、ノズル径を 0.5mm および 0.7mm を使用した時の PV 線図と熱発生率を図 1.7.3-1(a)~(b)に示す。両図の比較から、ノズル径が 0.5mm の場合、着火後の圧力上昇率は鈍い上、水素噴射中もほぼ一定の熱発生率を示すことが判る。また、噴射終了から比較的短時間に熱発生が終わっている。このように、ノズル径が小さいほうがデューゼルの燃焼を実現している。ノズル径が大きくなると、着火遅れの間に形成される予混合部分が大きくなり、着火と同時にこれらが燃焼するために急激な圧力の上昇がおこる。したがって、デューゼルの燃焼を得て、最高圧力を抑えるには、ノズル径の小さ

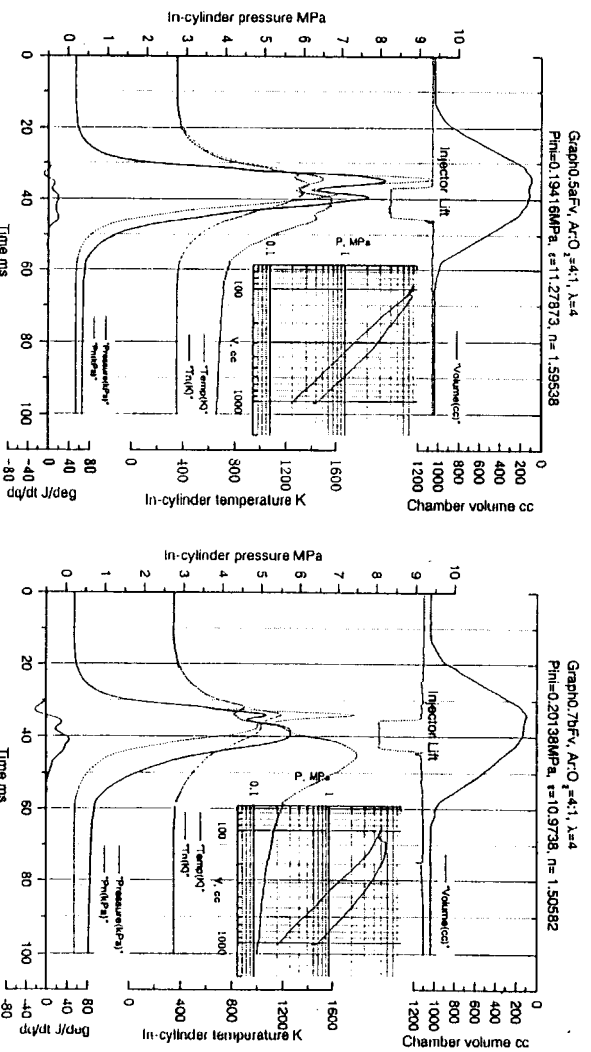


図 1.7.3-1(a) 熱発生率(d=0.5mm)

図 1.7.3-1(b) 熱発生率(d=0.7mm)

いほうが適するが、この場合、噴流到達距離が短くなり、燃焼室内の酸化剤を十分に使い切れずに、酸素過剰率が低くなると燃焼効率が低下する可能性がある。さらに、噴射量が少ないため噴射期間を長くとらなければならない、回転数が高くなると後燃えにする可能性が増大する。ノズル径の選択は、こうした点を考慮して、決定しなければならない。

(2) 燃焼効率

図 1.7.3-2 は、排ガス中の水素濃度をガスクロマトグラフィーで測定して燃焼効率を求めた結果である。この測定では、噴射ノズルから多少の水素のリークが生じている場合があった。ピストン停止時からサンプリングまでの間に燃焼室にリークした水素も測定している可能性がある。そのため、ここで示した燃焼効率は、最小値を示していると考えてよい。噴射のみの場合は 95% 以上、部分予混合の場合 92% 以上の燃焼効率を得られており、最大は 99% 以上になっている。また、酸素過剰率への依存性は顕著には現れていない。これらのことから、水素噴射時の燃焼効率はかなり高いと推察できる。今回の実験は、実機での 4 噴孔に相当する単噴孔ノズルを用い、酸素過剰率は 2 以上で行った。燃焼効率は酸素過剰率に最も強い影響を受けると考えられるので、2 以下での実験を行い、それが顕著に低下し始める酸素過剰率を見出すことは今後の課題である。また、噴孔数やスワールの影響も同様に重要課題となる。

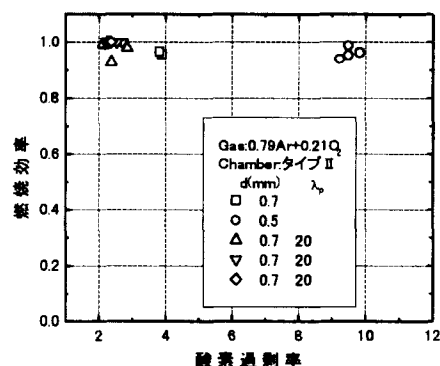


図 1.7.3-2 燃焼効率

(3) 図示熱効率

燃焼室内の圧力を燃焼室体積で時間積分して求めた図示熱効率を 1.7.3-3 に示す。ノズル径 0.5 の噴射のみの場合には、図示熱効率が 70% 程度まで上昇しているデータがある。これは水素噴射弁からのリークにより水素が燃焼室内に混入し実際より高めの値が得られたと思われ、ここでは、これらの点を除いて議論することにする。部分予混合を含めて、全体的には図示平均有効圧が上昇するにつれ、図示熱効率は増加する傾向にあり、最大 60% の図示熱効率が得られている。熱損失などにおいて大きな違いがあり、実際のエンジンと直接比較することは、あまり意味を持たないが、噴射圧力、ノズル径、燃焼室形状、酸素過剰率などのパラメータを変えた時の比較から、それらの相対的な影響を調べることはできる。しかしながら、実験点数が少ないため、これらパラメータがどの程度燃焼過程に影響を及ぼすかは、現在までのところ明らかになっていない。今後は、これらパラメータを組織的に変えた実験を行なうことが必要である。

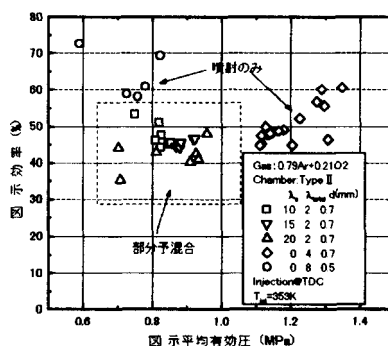


図 1.7.3-3 図示熱効率

1.8 燃焼基礎試験の成果と今後の課題

1.8.1 基礎燃焼試験による成果

急速圧縮・膨張装置、水素噴射弁、レーザおよび点火栓着火装置、ガス供給装置を組み合わせた基礎燃焼実験装置を用いて、急速圧縮した高圧・高温アルゴン+酸素及び水蒸気+酸素混合気の水素を高圧噴射した時の噴流の発達から着火を経て燃焼する過程を可視化写真、燃焼室内圧力などから観測し、水素噴流角、自着火条件、着火遅れ時間、強制着火条件、二噴孔噴射時の火炎伝播条件などを求めた結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 高温・高圧雰囲気下における水素噴流角は、従来の測定結果とほぼ同じ値の 20° 前後を示し、運動量理論にこれを適用することにより、噴流到達距離など水素噴流の基本特性が予測できることがわかった。
- (2) アルゴン-酸素混合気の場合、雰囲気温度 800 K から 950 K までは、着火遅れ時間に大きなばらつきがあり、自着火自体も確率的な現象になる。それ以上の温度では、着火遅れ時間が短くなるとともに、確実な自着火が得られるようになる。
- (3) 噴射ノズル径が小さくなると、着火遅れ時間が大きくなり、特に、高温側においては、比較的大きな着火遅れ時間を有する。
- (4) 着火遅れ時間は噴射圧力、雰囲気圧力、燃焼室形状に大きな影響を受けない。
- (5) 熱発生率はノズル径に比較的大きな影響を受け、適当なノズル径を選択することにより、最高圧力を抑えると同時に高い燃焼効率を得ることが可能である。
- (6) 着火時期および着火位置を選べば、点火栓やレーザにより確実に着火できること、拡散的な燃焼も実現できることがわかった(1.3 および 1.4 参照)。
- (7) 噴流間角度を噴流角より僅かに大きい 30° 前後にすると、噴流間で迅速な火炎伝播が得られる(1.4 参照)。

1.8.2 今後の課題

噴流の挙動、自着火条件、強制着火条件、着火遅れ時間など噴射から着火にいたる過程の基本的な特性は十分把握できた。また、点火栓およびレーザによる強制着火法、噴流間の火炎伝播条件などについて重要な知見が得られた。しかしながら、着火後の熱発生率、総括的な特性である燃焼効率や図示熱効率については、

- (1) ピストン変位を高速でしかも精度よく測定することが難しいため、また、燃焼過程が再現性に乏しい現象であるため、熱発生率、燃焼効率、図示熱効率に及ぼす各種パラメータの影響を詳細に調べることができない。
- (2) 試作した水素噴射弁は連続運転では一定の性能を有するが、水素のリークや注油の噴出といった間欠実験に特有の問題が生じる。

などの問題点があるため、十分な成果は得られていない。これまでに行なった水素ディーゼルサイクルシミュレーションでは、水素噴流の燃焼データがないため、軽油を燃料とした時の燃焼・伝熱特性を用いている。このため、シミュレーションの成立性を吟味し、さ

らに、水素ディーゼルエンジンの燃焼過程を最適化するための基礎データを得ることが不可欠である。急速圧縮・膨張装置を用いた基礎燃焼試験は、実機による試験運転に比べて、可視化が容易であること、実験条件を容易に変えることができることなどの優位点がある。上述した点を改善すれば、水素ディーゼルエンジンの燃焼過程に関する重要な知見も比較的容易に得られ、来年度以降に予定されている単筒エンジンの研究・開発に必要な基礎データを提供する役割を担うことができる。

文献(1.7 および 1.8)

- (1)和栗ほか・3名、機論、25-156(昭34)、820。
- (2)浜本ほか・2名、機論、87-0746B(昭62)、3810。
- (3)広安ほか・2名、機論、44-385B(昭53)、3208。

1. 9 まとめ

従来、内外で行われた空気雰囲気水素噴射ディーゼル機関の研究において明らかとなった水素噴射ディーゼル機関の最大の課題は着火の困難さであった。本年度は、本プロジェクトで提案したアルゴン循環型と水蒸気循環型の両方について、水素噴流の着火性を中心に急速圧縮・膨張装置を用いて着火と燃焼の基礎実験を行った。

ここで得られた最も重要な結果は、アルゴン循環型では圧縮温度が全般に高いため、筒内に噴射された水素は比較的、容易に自己着火することが示されたことである。今後着火の確実性を確保する意味で、レーザ点火方式の検討を進めるにしても、この性質は基本的に極めて有利であると言える。

一方、本プロジェクトで提案された水蒸気循環型ディーゼルは、恐らく世界で最初の試みであり、今回の基礎実験により貴重な知見が得られた。すなわちC D I方式により着実な着火が得られること、水蒸気の燃焼室壁への凝縮を抑制する設計と温度条件設定の必要があることなどが判明した。しかし今年度の研究で得られた水蒸気雰囲気中での水素燃焼に関する諸知見は世界的に極めて貴重なデータであり、将来、関連技術が進展した時、陽の目を見る可能性がある。

今後、継続の決まったアルゴン循環型ディーゼル機関については、圧縮温度が高いため、通常の運転条件では自己着火が可能との利点があるが、低負荷でも確実な着火を得るには試作した半導体レーザ点火方式を継続して検討する必要がある。また指圧線図を解析して図示熱効率を調べるとともに、熱損失の影響を明らかにする必要がある。

2. 輸送機関に関する調査・検討

2.1 はじめに

国内で輸送機関で消費されるエネルギーは、全消費エネルギーの約2割を占め、その約8割以上を自動車による消費が占めている現状から、自動車の高効率化、省エネルギー化が地球温暖化防止の面でも重要な課題となっている。排ガス対策と同時に高効率化が期待できる動力源を持った自動車として、従来から電気自動車（EV）の普及が期待されてきたが、1997年末のハイブリッド電気自動車（HEV）の市販をきっかけに、HEVの開発が盛んになっている。HEVは、従来の内燃機関自動車が低出力域で効率が大幅に低下する欠点をモーターを併用することによって改善でき、しかもEVにみられる一充電走行距離（一回の充電で走行可能な距離）が短い等の使い勝手の悪さなどのハンディキャップもないので、当面の低公害・高効率自動車と位置づけられている。

これらの車両より更に高い変換効率が期待できる燃料電池自動車(Fuel Cell Electric Vehicle: FCEV)が次世代の低公害・高効率自動車として位置づけられている。自動車メーカーはその生き残りをかけた開発競争に移りつつあり、この実用化の進捗状況に注目が集まっている。

燃料電池そのものには種々の形式があるが、FCEVとしては燃料電池に供給する水素を純水素の形で搭載する純水素燃料電池自動車と、メタノールに代表される別の燃料を搭載し、これを車両上で改質して水素を得る改質型燃料電池自動車の2種がある。改質型は、メタノールやガソリンといった供給インフラが完備した、エネルギー密度が比較的高いエネルギー源を搭載するため、エネルギー源の搭載上の問題や供給設備に関するハードルは低いが、改質時のエネルギーロスや改質器による車両の重量増や容積増の問題がある。これに対して、純水素燃料電池自動車は、改質時のエネルギーロスがないため更に高いエネルギー効率が期待できることから、効率面では有望視されている。しかし、純水素を用いる場合は供給インフラをどのように充実させていくか、水素を如何に効率よく車両に搭載するかといった解決しなければならない課題が多い。どちらの形式のFCEVが普及するかは、純水素燃料電池自動車のこれらの課題が解決できるか否かにかかる面が大きいといっても過言でない。

したがって、純水素燃料電池自動車を実用する際の問題点を整理し、その可能性と優位性を定量的に明らかにすることは、FCEVのあるべき姿を決定するために不可欠であり、その作業は最初に市販される実用目的のFCEVの形式がどちらの形式であれ、その市販前に成されるべきであるが、遅くともある程度の台数が普及する前には完結しなければならない。なぜならば、もし純水素燃料電池自動車の優位性が明らかになれば最適なインフラ整備を計画的に実施しなければならないし、逆の場合は不要なインフラを控えなければならない。したがって、純水素燃料電池自動車を推進するためには、搭載する水素貯蔵システムと供給インフラ側とのインターフェースの標準化が不可欠で、その上でシステム全体

としての効率を充分高く維持できるようなシステムを構築出来るか否かが課題となる。

このような背景を念頭に置いて、昨年度までに FCEV を普及する上で水素供給インフラに要求される要件等の検討や、FCEV システムの検討、走行時の効率の予測等を実施してきた。実際に新たなシステムが受け入れられて普及するには、総合的な効率の良さと同時に使用しやすいこと（利便性）が重要な要素であるので、平成 10 年度は効率的に普及させる手法の検討や、実際に使用した際のライフサイクルコストの検討など、実用に際しての課題を重点的に検討した。

まず、普及シナリオの検討を次のようなステップで実施した。FCEV のシステムや水素供給ステーションの現状の調査と近未来の技術レベルの推測を行い、経済的に成立しうるシステムについて検討した。ついで、純水素燃料電池自動車や関連水素供給ステーションを導入する際に車両や構成要素に要求される事柄を調査検討し、どのようなステップで導入することが最適であるかを調べた。それらの結果から、幾つかの普及シナリオを提案した。

次に、燃料電池自動車が導入された際の CO_2 の削減効果を推測するための指標として FCEV のライフサイクルアセスメント（LCA）を検討した。すなわち主なエネルギー源から水素を生成する際の効率について検討した後、車両の効率について各変換部分の効率を積み上げる形で求め、変換方法や貯蔵方法が効率に与える影響等について検討し、採用しうる方式の選択枠を明らかにした。

これらの自動車として最も現実的と考えられている燃料電池と二次電池の組み合わせによるハイブリッド電気自動車を例に、シミュレーションによる都市内走行時の具体的な燃料消費率の推定を行った。

2.2 水素燃料電池自動車の導入シナリオ

水素の利用技術の中で、最も早く実用化できるのは水素自動車と見られている。特に、究極の車と目されている燃料電池自動車の開発が急速に進展しており、その実用化が従来の予想以上に早く実現する可能性が出てきている。そこで、水素燃料電池自動車の導入に対する関係者の理解を深めるとともに、円滑な導入を図るための指針を明らかにして今後の施策に反映させることを目的として、導入シナリオの検討を行った。具体的な検討に当たっては、水素燃料電池自動車の実用化のイメージを示すこと、可能な限り定量的な見積もりを行うこと、円滑な導入を図る上で何が重要かを見いだすこと、を目標とした。

2.2.1 水素燃料電池自動車システム

(1) 水素燃料電池自動車の構成

図 2.2.1-1 に水素燃料電池自動車におけるエネルギーの流れをガソリン車と比較して示す。水素燃料電池自動車では、水素が燃料電池において電力に変換され、この電力がモータによって機械的な駆動力に変換されて駆動輪に伝えられる。大パワーが必要な場合には二次電池からも電力が供給され、二次電池は回生電力や燃料電池の余剰電力によって充電される。水素貯蔵容器としては、水素吸蔵合金タンク、圧縮水素ボンベ、液体水素タンクの3つの方式がある。

図 2.2.1-2 は、実際の燃料電池自動車におけるシステム搭載レイアウト例である。

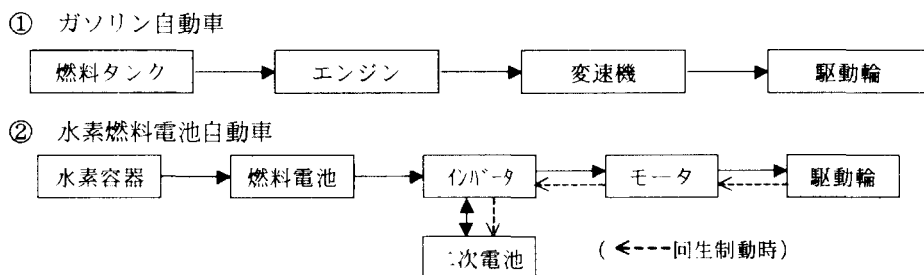


図 2.2.1-1 水素燃料電池自動車とガソリン車のエネルギーの流れ

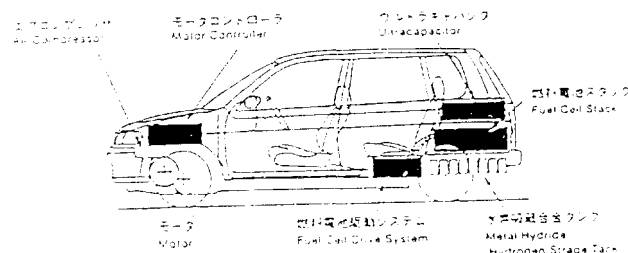


図 2.2.1-2 水素燃料電池自動車のシステム搭載レイアウト例(マツダ・デミオ FCEV)

(2) 固体高分子型燃料電池の概要

燃料電池は多くの種類があり、一般に使用される電解質によってアルカリ型、リン酸型、熔融炭酸塩型、固体酸化物型、固体高分子型に分類される。燃料電池自動車用には、固体高分子型が最も適していると考えられており、最近の自動車用燃料電池の開発例は、ほとんどがこのタイプである。

図 2.2.1-3 に固体高分子型燃料電池のスタックの構造を示す。電解質である水素イオン交換膜と触媒を担持させたシート状電極 2 枚で一つのセルを形成する。実運転における 1 セル当たりの起電力は 0.6~1.0V 程度であるので、300V 前後のモータに電力を供給するために数百のセルを直列接続することになる。電解質膜と 2 枚の電極を一体化したものを膜・電極接合体と呼び、これとバイポーラプレート（セパレータ）とを交互に配置したものがスタックである。燃料電池システムは、図 2.2.1-4 に示すように、スタックを中心として加湿装置、エアーコンプレッサ、ラジエータ、各種ポンプ等の補機から構成される。

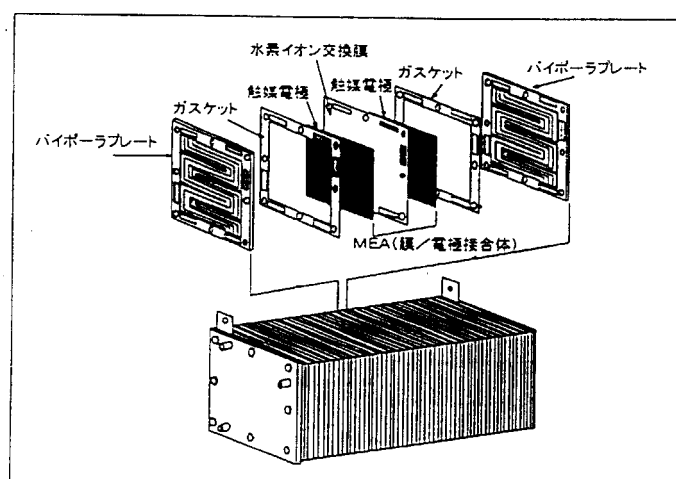


図 2.2.1-3 燃料電池スタックの構造例

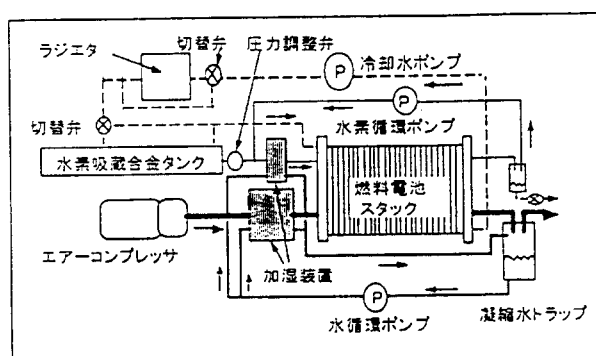


図 2.2.1-4 燃料電池システムの構成例

(3) 水素供給システム

a. 水素燃料電池自動車への水素供給のオプション

図 2.2.1-5 に水素燃料電池自動車への水素供給のオプションを示す。図中、二重線の部分は商業ベースでの運用が確立している部分である。

WE-NET プロジェクトの究極的な目標システムは、海外の再生可能エネルギーを液体水素タンカーで輸送し、水素の国内輸送を経て利用する、という形であるが、上流から下流までのインフラストラクチャーの構築には、多くの時間と費用を要する。

これに対し、天然ガスやその他の既存の一次エネルギーを利用するシステム、具体的には、
ア．供給ステーションにおいて都市ガスやメタノールの改質により水素を得るシステム

イ．供給ステーションにおいて商用電力を用いて水電解を行い水素を得るシステム

が考えられる。これらは、インフラストラクチャー構築が最小限で済むため、短中期的な自動車用水素供給方法として有望である。本研究では、これらの「天然ガス等の既存の一次エネルギーを利用するシステム」を中心に検討を進めた。

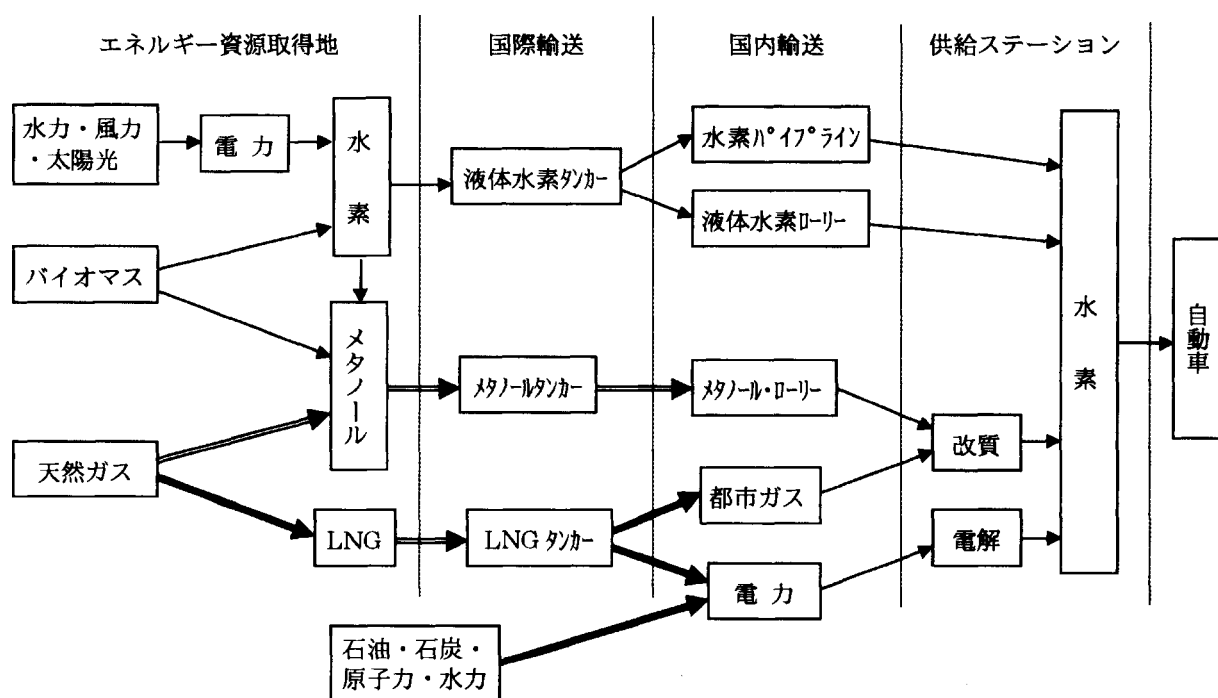


図 2.2.1-5 水素燃料電池自動車への水素供給のオプション

b. ステーションにおける水素製造・貯蔵・供給システムの構成

燃料改質式および水電解式の水素製造・貯蔵・供給システムの構成（例）を次ページの図 2.2.1-6 および図 2.2.1-7 に示す。貯蔵方法としては圧縮水素ボンベと水素吸蔵合金が想定されている。

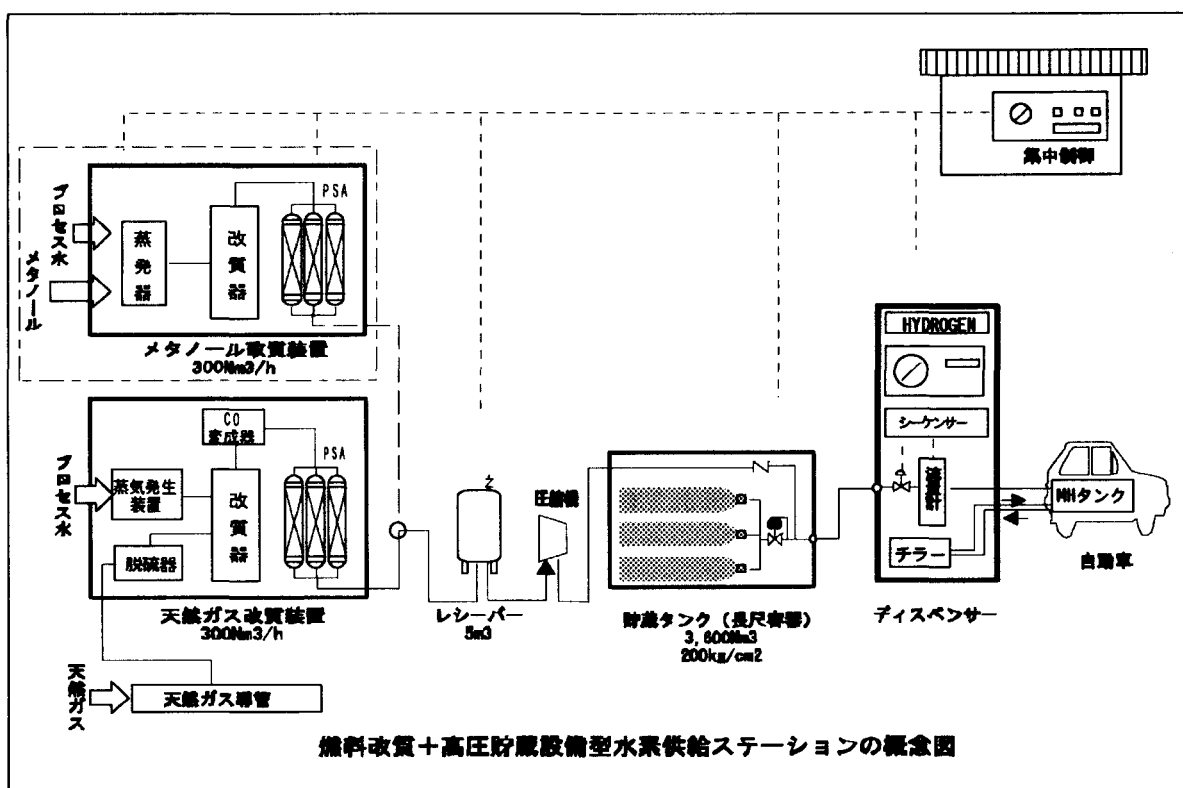


図 2.2.1-6 燃料改質式水素製造・貯蔵・供給システムの構成(例)

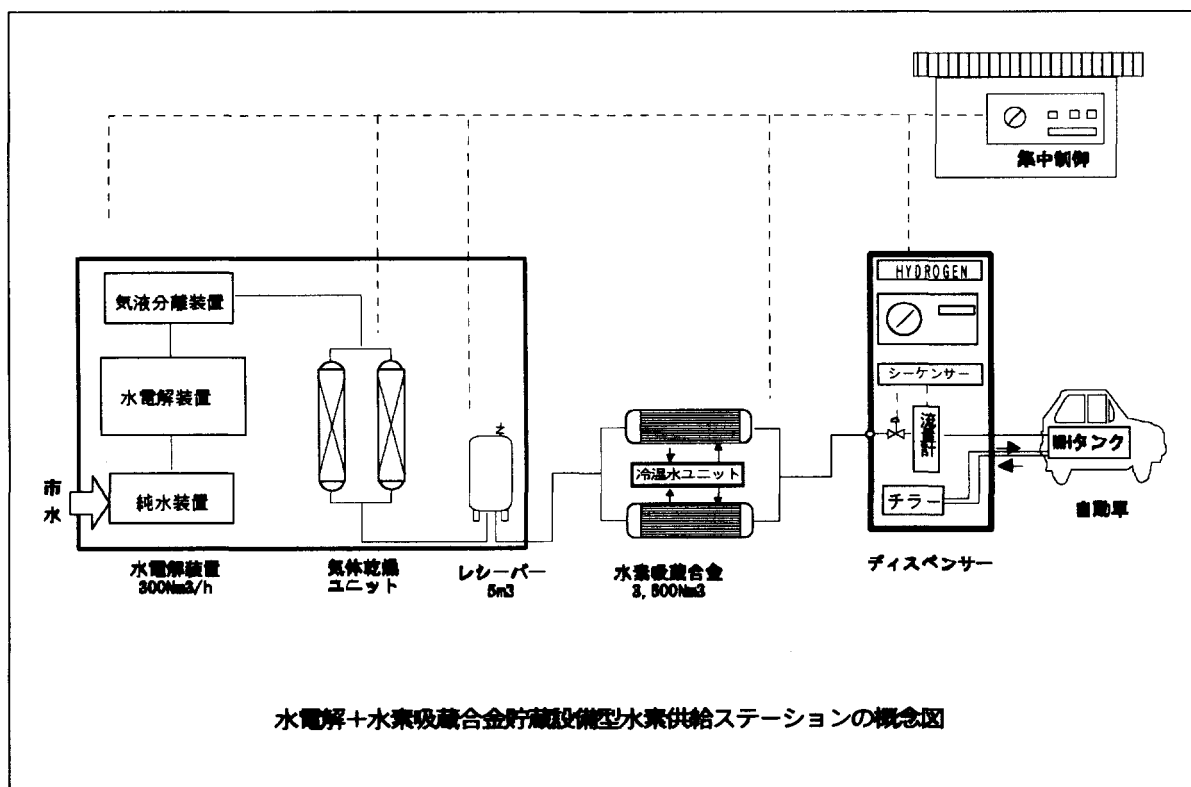


図 2.2.1-7 水電解式水素製造・貯蔵・供給システムの構成(例)

2.2.2 水素燃料電池自動車の特徴

(1) 各種自動車との比較

水素燃料電池自動車と他のクリーンエネルギー自動車および既存エンジン車の性能を比較して表 2.2.2-1 に示す。また、表 2.2.2-1 に示した各種クリーンエネルギー自動車の具体的車両の諸元例を表 2.2.2-2 に示す。

表 2.2.2-1 既存自動車および各種クリーンエネルギー自動車の比較

	普及台数 (千台)	航続距離 (km)	給油時間	環境面の特性							エネルギー面・特性		
				都市大気環境への影響				地球環境への影響			エネルギー消費効率	石油代替性	
				排気管排出ガス				燃料蒸発ガス	CO ₂	CH ₄			N ₂ O
				NOx	HC, CO	PM, 黒煙	ガス						
ガソリン自動車	56,000	～600	数分	○	○	○	○	○	○	○	○	×	
	13,000	～900	数分	▲～△	○	▲	◎	◎	◎	◎	◎	×	
	300	～900	数分	○	○	○	◎	○	○	○	○	×	
	3	～200	数分	○～◎	○	○	◎	◎	△	○	○	◎	
メタノール自動車	0.1	～300	数分	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	
ハイブリッド自動車	0.4	～300	数分	△	○	○	○	○	○	○	○	◎	
	<0.1	～1,400	数分	○～◎	○～◎	○～◎	○	◎～☆	○～◎	○～◎	◎～☆	×	
	<0.1	～1,400	数分	○～◎	○～◎	○～◎	○	◎～☆	○～◎	○～◎	◎～☆	×	
	20	～1,400	数分	○～◎	○～◎	○～◎	○	◎～☆	○～◎	○～◎	◎～☆	×	
電気自動車	3	100～200	1～8hr	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	◎	
燃料電池自動車	—	250	数分～ 10分	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	◎～☆	◎	
	—	500	数分	☆	☆	☆	◎	◎	☆	☆	◎～☆	◎	
水素自動車	—	300	数分～ 10分	○	☆	☆	☆	☆	☆	☆	○	◎	

注：1) 各車とも乗用車または小型貨物車を想定。

2) 普及台数は全車種の合計で、平成 11 年 2 月時点の概数。

3) 航続距離および給油時間は、設計や今後の技術進歩によって変わり得る。

4) 環境面の特性およびエネルギー面
の特性の評価は文献[2]による。自動車の使用段階について、ガソリン車を基準 (○) とした相対比較。
[劣る ▲ ← △ ← ○ → ◎ → ☆ 優れる]

ただし、石油代替性は◎と×の2段階で評価。

5) 水素自動車の給油時間は、圧縮水素および液体水素の場合が数分、水素吸蔵合金の場合が 10 分程度である。

表2.2.2-2 既存エンジン車および各種クリーンエネルギー自動車の諸元(例)

車種	単位	ガソリン	ディーゼル	電気	CNG	LPG	メタノール	ガソリンHV	メタFC	水素エンジン	水素FC
車名		LAV4	ファミリア	LAV4 EV	シビックGX	クルセーダー	ギャランMX	プリウス	FCEV	武蔵10号	FCEV
メーカー		トヨタ	マツダ	トヨタ	本田	日産	三菱	トヨタ	トヨタ	武蔵工業大学	トヨタ
車種		RV	乗用車	RV	乗用車	乗用車	乗用車	乗用	RV	乗用車	RV
全長	mm	4,115	4,335	3,980	4,450	4,595	4,560	4,275	3,980	4,610	3,975
全幅	mm	1,695	1,695	1,695	1,695	1,695	1,690	1,755	1,695	1,695	1,695
全高	mm	1,645	1,420	1,675	1,390	1,460	1,430	1,420	1,635	1,500	1,635
乗車定員	人	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5
空車重量	kg	1,230	1,140	1,540	1,170	1,250	1,250	1,240	*1	1,300	*1
総重量	kg	1,505	1,415	1,815	1,390	1,525	1,525	1,515	*1	1,575	*1
エンジン排気量	cc	1,998	1,686	—	1,590	1,998	1,997	1,496	—	1,998	—
エンジン出力	PS	135	88	—	115	63kW	137	58	—	70	—
トルク	kg-m	18.5	17	—	13.6	167Nm	18.5	10.4	—	12.5	—
モーター出力	kW	—	—	50	—	—	—	30	25kW	—	20kW
トルク	kg-m	—	—	190Nm	—	—	—	31.1	50	—	45
燃料搭載量	l	58	55	—	20 Nm ³	80.8	60	50	*1	100 * ⁴	2kg
電池容量	kWh	—	—	27	—	—	—	1.8	*1	—	*1
燃費	km/l	10.8	17~18	7.8km/kWh	17.0	11.4 * ²	*1	28.0	*1	3.0	34.4 * ³
航続距離	km	626	~960 * ²	210	340	921 * ²	*1	1,400	500 * ³	300	250 * ³
最高速度	km/h	170	165	125	175 * ²	180 * ²	*1	*1	125	150	>100

*1: 未公表

*2: 推定値

*3: 目標値

*4: 液体水素

(2) 水素燃料電池自動車の特長

既存自動車（ガソリン車、ディーゼル車、LPG 車）や各種クリーンエネルギー自動車と比較したときの水素燃料電池自動車の特長をまとめると、次のとおりである。

a. 走行時の NO_x, HC, CO, PM（粒子状物質）の排出がゼロである

水素燃料電池自動車では走行に伴って発生するガスは水蒸気のみであり、大気汚染の原因となる NO_x, HC, CO, PM は全く排出されない。ベンゼン、アルデヒド等の有害大気汚染物質の排出もなく、燃料タンクからの燃料の蒸発とも無縁である。

b. CO₂ 排出量が少ない

第 2.3 節において詳しく検討されるように、水素燃料電池自動車は、短期的にみて実現性の高い天然ガス改質による水素供給方式の場合でも、単位走行距離当たりの CO₂ 排出量はガソリン車の 1/3 程度と、大幅に削減されると推定される。将来、水素は国内外の再生可能エネルギーを一次エネルギー源として製造されるようになると見込まれており、その場合には、水素燃料電池自動車の走行に伴う CO₂ 排出量は正味ゼロとなる。

c. 電気自動車、水素エンジン車、メタノール燃料電池自動車との比較

上記の a.および b.について水素燃料電池自動車と同等または近い特性を兼ね備える自動車として、電気自動車（二次電池式）、水素エンジン車、メタノール燃料電池自動車がある。これら 3つの自動車と水素燃料電池自動車とを現時点での技術に基づいて比較すると表 2.2.2-3 のとおりである。水素燃料電池自動車の方が不利な点もあるが、いずれも致命的な問題点ではなく、近い将来に実現可能な排ガス・ゼロ、低 CO₂ 排出の自動車として、水素燃料電池自動車は現実的な選択肢であると考えられる。

表 2.2.2-3 水素燃料電池自動車と電気自動車、水素エンジン車、メタノール燃料電池自動車との比較

	水素燃料電池自動車が有利な点	水素燃料電池自動車が不利な点
電気自動車との比較	○航続距離 ○エネルギー補給時間 ○コスト低減の可能性	●氷点下の周囲温度環境での始動性
水素エンジン自動車との比較	○効率 （＝航続距離、燃料費、CO ₂ 排出） ○NO _x ○騒音	●原動機システムの重量、体積、コスト
メタノール燃料電池自動車との比較	○燃料電池システムの寿命、効率、コンパクト性 ○始動時間 ○燃料の価格安定性（水素を都市ガスや電力から製造した場合）	●航続距離 ●燃料補給時間 ●燃料供給インフラの構築の容易性、コスト

2.2.3 国内外の水素燃料電池自動車および水素ステーションの開発状況

(1) 水素燃料電池自動車の開発状況

自動車に使用可能な燃料電池の開発は、アルカリ型 (AFC)、リン酸型 (PAFC)、固体高分子型 (PEFC) の順に開発が進んできた。1980 年代の燃料電池自動車の開発は燃料電池メーカー主導で行われたが、最近では自動車メーカー主導で開発が進められるようになってきている。

a. ヨーロッパにおける開発状況

① ドイツ

＜純水素型＞ Daimler-Benz (現 Daimler-Chrysler) がカナダの Ballard の燃料電池技術を取り入れ、1994 年から圧縮水素ガスボンベを搭載した NECar I, NECar II 及び NEBUS を開発した。次のステップとしては液体水素を搭載した NECar IV を開発した。そして、Daimler-Chrysler は 2004 年には燃料電池自動車の量産を開始すると発表している。水素エンジン車で先行していた BMW は燃料電池自動車ではやや立ち後れの感があるが、1996 年に Rover と共同で BMW が得意とする液体水素燃料の小型燃料電池自動車を試作して発表した。Siemens は純水素燃料電池フォークリフトを開発し 1997 年から試験運転中である。バスの開発では Daimler-Chrysler に続いて MAN が 2000 年までに Siemens の PEFC を使用したバスを開発することを発表している。Daimler-Chrysler の NEBUS と MAN/Siemens のバスの仕様を表 2.2.3-1 に示す。また、Neoplan も Ansaldo/De Nora と共同で市バスを 1999 年に開発すると発表している。

＜メタノール改質型＞ 1997 年に Daimler-Benz が小型車の NECar III を開発し、その改良タイプ NECar V を開発中である。Volkswagen は英国の Johnson Matthey の改質器を使用し、スウェーデンの Volvo、オランダの ECN と共同で EU の支援を受け PEFC の乗用車を 2000 年までに試作する計画である。オペルも 2004 年までに実用車を開発するとしている。

表 2.2.3-1 ドイツの燃料電池バスの仕様例

	Daimler-Benz NEBUS	MAN/Siemens 市バス
定員	62 人乗り	100 人乗り
モーター	75kW × 2 max	75kW × 2max
走行距離	250km	250km
FC 出力	250kW	120kW
スタック	25kW × 10	30kW × 4
燃料消費	—	8kg/h
作動温度	85°C	60°C
作動圧力	2.1bar	1.5bar
水素燃料	高圧ガス容器 (300 bar)	高圧ガス容器 (250bar)
完成時期	1997 年	2000 年

② 英 国

1998年7月に Zevco (The Zero Emission Vehicle Company)はロンドンの箱型タクシーメーカーで有名な London Taxi International などのグループと共同で AFC を利用した燃料電池タクシーを開発した。今後市内を走れる 5 台のタクシーを製作する予定である。さらに Zevco は英国最大のバス製造会社 Robert Wright and Co.と 1998 年末までに 12m純水素燃料電池バス (40kW FC-70kW Battery) を開発することを目標としている。

③ 他のヨーロッパ諸国

ヨーロッパにおける燃料電池車の歴史は古く、最近では EU が資金を援助し燃料電池車の開発が EU 各国のメーカーの共同開発プロジェクトとして盛んに行われている。

1980 年代にはベルギーの ELENCO が開発した AFC を使用したバンや EURECA プロジェクトで AFC を使用したバスが開発された。その後 1996 年には EU-カナダの EQHHPP プロジェクトでイタリアの Ansaldo が PEFC を使用したバスを開発した。また、PEFC を使用した液体水素燃料のバンが Renault/Volvo/De Nora Gr.で開発されている。

さらに 1998 年には Coval H2 Partner が De Nora の PEFC を使用したミニトラックを Venice で発表している。また、フランスの Peugeot Citroen はフランスの国立科学研究所、イタリアの De Nora, Ansaldo, ベルギーの Sovay などと共同でフランス環境省 ADEME の支援を受けて 30kW PEFC システムを開発する HYDRO-GEN 計画を発表した。

ヨーロッパ全体の燃料電池開発の開發現状を表 2.2.3-2 に要約して示す。

表 2.2.3-2 ヨーロッパの燃料電池自動車の開発状況

型式	国	年	車 種	システム	航続距離	メーカー
純水素車	EU	1994	バス	AFC-LH ₂	300km	EURECA/ELENCO
		1996	バス	PEFC-LH ₂	250km	Ansaldo/De Nora Gr.
		1997	バン	PEFC-LH ₂	500km	Renault/De Nora Gr.
	ドイツ	1994	バン	PEFC-GH ₂	250km	(NECar II)
		1997	バス	PEFC-GH ₂	250km	(NEBUS) Daimler
		1999	バン	PEFC-LH ₂	—	(NECar IV) -Benz/
		1996	乗用車	PEFC-LH ₂	1000km	BMW/Rover
	EU	2000	バス	PEFC-GH ₂	250km	MAN/Siemens
		1999	バス	PEFC-GH ₂	300km	Ansaldo/Neoplan/De.
	英国	1998	ミニ	PEFC-GH ₂	64km	Coval H2 Partner/De.
		1998	タクシー	AFC-GH ₂		Zevco/London Taxi In
メタノール改質車	ドイツ	1997	バン	PEFC		Daimler-Benz/BPS
		2000	バン	PEFC		Volkswagen Gr.
		2004	バン	PEFC		OPEL

注) LH₂: 液体水素, GH₂: 高圧水素

b. 北米における開発状況

① 米 国

エネルギー省 (DOE : Department of Energy) は 1993 年から自動車の燃料効率を 3 倍に向上させる目標で PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles) 計画を発足させた。同計画では 1998 年 1 月に開発する技術の絞込みを行い、車両用燃料電池を開発対象の一つに選んでいる。この計画の中で DOE は IFC, Energy Partner, Plug Powerなどを支援し 50kW PEFC の開発を行っている。また, Allied Signal は DOE のほかに SCAQMD (South Coast Air Quality Management District, カリフォルニア州南沿岸地域大気質管理局) から援助を受けて 50kW PEFC を開発している。

燃料電池の開発では UTC が東芝と合併で新会社を設立して、50kW 級自動車用 PEFC を開発し、2003 年の量産化を目指すのと発表を 1998 年 8 月に行った。

＜純水素型＞ Energy Partner は 1991 年に PEFC を使用したスポーツカーを試作した。最近では Shutz Energy Research Center が Palm Desert 市内で走行する PEFC のカートを開発している。また、Ford は DOE の支援を受けて IFC の 50kW PEFC を搭載する乗用車を開発しているが、Daimler-Benz との提携後どのように方針が変わるかが注目されている。

DOE の水素エネルギー技術開発計画である Hydrogen Program では、2010 年には新車の 25% を水素燃料の自動車（燃料電池自動車とハイブリッド車）にすることを目標に掲げているほか、燃料の水素源を確保するためバイオマス、都市ゴミのガス化、改良型天然ガス改質などの水素製造技術開発を支援している。

＜メタノール改質型＞ 1987 年に DOE が PAFC 小型バスの開発プロジェクトを発足させた。このプロジェクトでは世界で始めてメタノール改質燃料電池小型バスを 1995 年頃から George Town で約 4000km テスト走行した。その後 DOE は、小型バスから大型バスへ開発を発展させると同時に、PAFC から PEFC への変換を図っており、1998 年に PEFC (100kW Ballard 製) 大型バスを完成させる予定である。

GM はメタノール改質 PEFC 車の生産体制を 2004 年までに作ること、さらにガソリン改質技術の開発を開始することを発表している。Chrysler もガソリン改質の PEFC 車を開発中であるが、Daimler-Benz との合併後どのような方針にするのか発表されていない。

② カナダ

Ballard が画期的な PEFC を開発するとともに、純水素 PEFC のバスを 1991 年に試作し改良を重ねた結果 1997 年には Commercial Model のバスの開発に成功した。そしてまた Daimler-Benz (当時) と合併で DBB Fuel Cell Engines を設立しメタノール改質と純水素用燃料電池の生産準備を行っている。また、Ballard は 6 年間で PEFC の体積あたりの出力密度を 6 倍に向上させて、1kW/L という高性能燃料電池を開発しているが、さらにセパレータの改良や外部加湿システムの改良などで一層小型化するための開発を継続している。

以上北米における燃料電池車の開発現状を要約して表 2.2.3-3 に示す。

表 2.2.3-3 北米の燃料電池自動車の開発状況

型式	国	年	車種	システム	メーカー
純水素車	米国	1991	乗用車	PEFC-GH ₂	Energy Partner
		1996	カート	PEFC-GH ₂	Shutz E.R.C.
		2004	バン	PEFC-GH ₂	Ford/IFC
	カナダ	1991-	バス	PEFC-GH ₂	Ballard
メタノール改質車	米国	1995	バス	PAFC	DOE Pro./FUJI
		1997	バス	PAFC	同 /IFC
		1998	バス	PEFC	同 /Ballad
		1998	バン	PEFC	GM
		2004	バン	PEFC	GM
ガソリン改質車	米国	2004	バン	PEFC	Chrysler Gr.

注) GH₂ : 圧縮水素

c. 日本における開発の現状

我が国においては、公的機関が積極的に支援している欧米と比較して、燃料電池車の開発やデモンストレーションに対する取り組みが弱い。自動車メーカーが独自に開発を進めている。水素燃料の場合、燃料貯蔵に圧縮水素ガスボンベや液体水素タンク方式を採用している欧米に対して、我が国のメーカーは水素吸蔵合金を使用する方向で開発を進めている。

＜純水素型＞ 1996年にトヨタが、1997年にマツダがいずれも水素吸蔵合金タンク搭載純水素燃料電池バンを発表した。両者の仕様を表 2.2.3-4 に示す。トヨタは燃料電池自動車の実用化について 2003 年を目標にすると発表しているが、純水素型か燃料改質型かは明言していない。

＜メタノール燃料型＞ 我が国で最初に開発された本格的燃料電池車は、1986年に富士電機／トヨタが開発した 5kW PAFC を使用した 1.5t フォークリフトである。走行試験の結果性能的には十分満足できたが、コストの問題で商用化が断念された。

その後 1997 年になってトヨタが PEFC を使用したバンを発表した。1997 年から開始された通産省・NEDO の高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発プロジェクト（ACE Project: Advanced Clean Energy Vehicle Project）の一環として、日産がメタノール改質型 PEFC 自動車の開発を行っている。なお、日産と本田は、2003 年の実用化を目標に燃料改質型燃料電池車を開発すると発表している。

日本の燃料電池車開発状況の要約を表 2.2.3-5 に示す。

表 2.2.3-4 トヨタおよびマツダの燃料電池自動車の仕様

	トヨタ		マツダ
	純水素型	メタノール改質型	純水素型
型 式	RAV4L EV	FCEV	デミオ FCEV
定 員	4 人乗り	4 人乗り	4 人乗り
モーター	45kW max	50kW max	40kW max
電 源	FC+バッテリー	FC+バッテリー	FC+キャパシタ
航続距離	250km	500km	170km
最高速度	>100km	125km	90km
FC 出力	20 kW	25kW	20kW
スタック	400 セル	400 セル	5 kW×4
燃料貯蔵	水素吸蔵合金 (H ₂ 2kg)	メタノール	水素吸蔵合金
発表時期	1996 年 10 月	1997 年 10 月	1997 年 12 月

表 2.2.3-5 日本の燃料電池自動車の開発状況

型式	年	車種	システム	航続距離	メーカー
純水素車	1992	カート	PEFC-MH		マツダ
	1996	バン	PEFC-MH	250km	トヨタ
	1997	バン	PEFC-MH	170km	マツダ
メタノール 改質車	1986	フォークリフト	PAFC		富士電機/トヨタ
	1997	バン	PEFC	500km	トヨタ
	2003	小型車	PEFC		ホンダ

注) MH : 水素吸蔵合金

d. 各国の燃料電池自動車デモンストレーションの現状と計画

以上燃料電池自動車の開発状況を述べてきたが、開発された純水素燃料電池バスがすでに米国の Chicago, カナダの Vancouver, ドイツの Stuttgart 市内で試験的に利用されている。また, Berlin の市バス当局は 2020 年までに全ての市バスを燃料電池バスに切り替えることを 1998 年 9 月に発表したほか, Hamburg の市バス当局も 2005 年から燃料電池バスの導入を行うことを検討している。

表 2.2.3-8 に世界の主要なデモンストレーションプロジェクトを示すが、メタノール改質型で運転実績があるのは DOE の PAFC バスのみで、その他は全て純水素利用のタイプである。これは、水素燃料の方が車両システムが簡単であること、メタノール改質燃料電池車の実用化技術が未完成であること、バスの場合は水素ステーションを数多く作る必要がなく管理が十分行えること、バス会社などの協力が得られ易いことなどによるものと思われる。都市バスのデ

モは各都市に広がる傾向を見せており、デモのスケールも今後益々大きくなると予想される。

表 2.2.3-6 海外の燃料電池自動車デモプロジェクト

都市・実施場所	年	車種
米) Washington DC	1995-	DOE PAFC バス
GT Univ. 市内		(メタノール改質型)
Chicago 市バス	1998	Ballard FC バス
Palm Springs 空港	1998	PEFC Utility car
Palm Desert 市内	1998	個人用小型車 ゴルフカート
カ) Vancouver 市バス	1998	Ballard FC バス
独) Stuttgart 市バス	1998	D-Benz NEBUS
Erlangen 市バス	2000	MAN/Siemens バス

(2) 水素ステーションの開発状況

水素燃料電池バスや水素エンジン車などを実用的デモに使用している米国、カナダ、ドイツでは、下記のような各種の水素ステーションが設置されている。水素ステーションの方式はその地域における水素供給源の状況により最適のものが採用されているが、オンサイトで水素を製造する方式と、工場で製造した水素を運搬する方式とに大別される。

○オンサイト製造：

- ・太陽電池／アルカリ水電解／高圧ガス貯蔵（米国／CAN, Xerox, Palm Desert）
- ・商用電力／アルカリ水電解／高圧ガス貯蔵（カナダ／Vancouver）

○工場から運搬：

- ・高圧ガス貯蔵（独／Humburg, München, 米国／Palm Springs, Augusta）
- ・液体水素貯蔵／気化／高圧ガス（米国／Chicago）
- ・液体水素貯蔵／液体水素供給（独／München）

これらの水素ステーションの仕様を表 2.2.3-7 に示す。

最近水電解式では Electrolyser 社（カナダ）、Norsk Hydro 社（ノルウェー）がアルカリ型、The Proton HOGEN electrolyser 社（米国）、Proton Energy Systems 社（米国）と神鋼パナテック社などが小型の固体高分子電解質型水電解（PEM 水電解）型を発表している。

天然ガスなどの炭化水素燃料改質方式は、工業用水素の供給では実績があるが、水素自動車のデモプロジェクトではまだ採用されていない。また、水素吸蔵合金による水素貯蔵方式も現在のところ採用されている例はない。

表 2.2.3-7 各国の水素供給ステーションの開発状況

機関名	開発状況	参加機関
SWB ドイツ ニュルンベルク	・ 太陽・水素エネルギー開発実証システムの一環として自動車用液体水素充填スタンドを保有。 ・ BMW の液水自動車(タンク容量 120 L)への充填時間は 102.5 分で 5.2 分。BOR は 7.8%。 ・ カップリングは Messer Griesheim と Linde の 2 社が開発しており、いずれも水素を大気に放出しない。Linde のシステムは、二重管構造(内:液水、外:BOG)で 1 組のカップリング。 ・ 新型システムではパージ不要。 ・ 液体水素貯槽は 3000 L。	Byernwerke BMW Linde Siemens, 他
CAN アメリカ El Segundo	・ 太陽光-水電解-貯蔵-供給の一環システムの実証 ・ 水電解, 圧縮貯蔵は Electrolyser が担当 ・ 太陽光発電 40kW ・ 水素発生量 10Nm³/h ・ 貯蔵 400Nm³, 285bar ・ 車種: Ford Ranger(ピックアップトラック)×3 台	CAN Xerox 西 Hollywood 市 Electrolyser Praxair, 他
Palm Desert アメリカ	・ 太陽水素供給ステーションの実証研究で、供給ステーションの予備デザイン段階。サイトは大学構内の予定で、州の認可が出次第建設に入る。 ・ 車種は、4kWPUV(ゴルフカート)3 台、NEV(大型カート)2 台の予定で、内 PUV1 台を試作済み。	Humboldt 州大 Palm Desert 市 Teledyne, 他
Electrolyser カナダ	・ アルカリ水電解によるパッケージ型水素発生システムを開発。水素発生量は 20~100Nm³/h。 ・ 年末に BC Transit に納入される Ballard 製 FC バス用供給ステーションも手掛けている。	Riverside Quebec Clean Air Now BC Transit
Princeton 大 アメリカ	・ 南カリフォルニア地域での ZEV 導入とそれに対する水素供給のケーススタディを実施。	

2.2.4 水素燃料電池自動車の経済性

(1) 自動車用水素供給コストの試算

水素は下記に示すような種々の方法により得ることができる。これらのうちいくつかの方法は、工業用水素の製造に実際に用いられている。

- ① 水の分解（電気分解・熱化学法・光化学法）
- ② 炭化水素系原料（天然ガス・石油・メタノール・石炭・バイオマス等）の改質・分解
- ③ 副生水素（コークス炉ガス・石油精製・食塩電解等）

最近実施された自動車燃料用水素の供給コストの試算例として、WE-NET プロジェクトにおける検討結果、および米国エネルギー省の委託研究結果を以下に示す。これらの検討では、近い将来において相対的に安いコストでの水素供給を実現できる方法として、天然ガス（都市ガス又はメタン）の改質、水電解などが取り上げられている。

a. わが国における試算

WE-NET プロジェクトでは平成 9 年度に近い将来に実現可能の低い方式による自動車用水素の供給システムの概略設計を行い、水素供給コストの試算を行っている（文献[3]）。以下にその概要を示す。なお、原料価格については最近の情勢に基づいて若干の見直しを行った。

① 製造方式

天然ガス（都市ガス）改質、メタノール改質、アルカリ水電解、PEM 水電解の 4 ケース

② 供給能力

300Nm³/h, 7,200Nm³/日（小型車 400 台/日相当）

③ 貯蔵方式

高圧ボンベ（圧力：200kg/cm², 容量：3,600Nm³）

④ 原料価格

ア. 都市ガス

大手都市ガス会社は、平成 10 年秋に CNG（圧縮天然ガス）自動車充填所向けに新しいガス料金体系を設定した。燃料供給ステーションにおいて都市ガスから自動車用水素を製造する場合、この CNG 自動車充填所向けガス料金が適用される可能性が高いと考えられる。ここでは、下記に示す東京ガスの「輸送向け圧縮天然ガス用 A 契約」から都市ガス単価を算出した。（「原料費調整分」は平成 10 年 12 月現在）

定額基本料金：90,000 円/月

流量基本料金：450 円/m³/月

従量料金：37.52 円/m³（基準料金 35.26 円/m³+原料費調整分 2.26 円/m³）

上記の水素供給能力における都市ガス消費量は 78,840Nm³/月であり、このとき平均単価は 39.3 円/Nm³となる。

イ. メタノール

わが国ではメタノールを化学工業用に年間約 200 万 t 消費している。上記の水素供給設備におけるメタノール使用量はその 0.1%程度でしかないので、水素製造用にも化学工業用メタノールの一部が使用され、価格面でも同じ扱いを受けると考えられる。ここでは、1998 年 12 月時点の化学工業用ローリー渡し価格の平均的な値として、40.0 円/kg という単価を使用した。

ウ. 電 力

東京電力の電力料金体系より高圧季節別時間帯別電力 B（下記）を適用するとして算出。

基本料金：1,650 円/kW

従量料金：

昼間（8:00～22:00）11.14 円/kWh（夏季，その他季節，休日等の加重平均）

夜間（22:00～8:00）6.15 円/kWh

⑤ 検討結果概要

表 2.2.4-1 に示すように、わが国における検討では天然ガス改質が最も安く、次いでメタノール改質，PEM 水電解，アルカリ水電解の順となっている。

表 2.2.4-1 わが国における自動車用水素のコスト見積

（単位：円/Nm³-H₂）

項 目	天然ガス改質	メタノール改質	アルカリ水電解	PEM水電解
設備費	17.6	17.6	16.9	15.7
人件費	2.9	2.9	2.9	2.9
変動費 都市ガス	14.1	—	—	—
メタノール	—	27.6	—	—
電力	4.9	4.4	54.5	48.8
その他ユーティリティ	0.4	0.3	0.5	0.5
計	39.9	52.8	74.8	67.9

注：都市ガス価格：39.3 円/Nm³，メタノール価格：40.0 円/kg，電力価格：東京電力高圧季節別電力 B

b. 米国エネルギー省／による試算

米国では、連邦エネルギー省の委託により、フォード/Directed Technologies 社が水素燃料電池自動車への純水素供給を想定して下記のような試算を行っている（文献[4]）。

- ① 製造方式
 - ・ オンサイト天然ガス改質
 - ・ オンサイト水電解（方式不明）
 - ・ オンサイト・メタノール改質
 - ・ オンサイト重質油ガス化（部分酸化）
 - ・ 液体水素のトラック輸送（液体水素製造方法は不明）
- ② 供給能力 0.5kg (11.2Nm³) /日～50,000kg (1,120,000Nm³) /日

③ 貯蔵方式 高圧ボンベ（供給圧力：345kg/cm²）

④ ステーションの人件費，利益は含まない。

⑤ 検討結果（図 2.2.4-1）

- ・ 図の左半分に示されている現在の水素供給方式による水素コストは，米国の税込みガソリン小売り価格（水平の実線）と同レベルである。
- ・ オンサイト天然ガス改質と液体水素のトラック輸送は，中規模システムに適している。前者の方がコストが安い。オンサイト天然ガス改質は，プラント生産数が増えれば一層のコスト低減が可能になる。
- ・ 天然ガス改質，メタノール改質，重質油ガス化を比較すると，天然ガス改質が最も安い。後二者も天然ガスの入手が困難な場所では有効な技術である。
- ・ オンサイト水電解は，小規模システムに適している。プラント生産量が増えれば，自動車 5～10 台用の小システムでもガソリン小売り価格より安くなる。

⑥ わが国における試算結果との比較

図 2.2.4-1 に表 2.2.4-1 の天然ガス改質と PEM 水電解の結果をドルに換算して（120 円/\$と仮定）書き込んである。

同じ供給能力の設備で比較した場合，米国での検討結果の方が水素コストは安い。第一の原因は，米国の方が天然ガス価格や電力単価が安いことである。また，天然ガス改質については，燃料費以外のコスト（主としてプラントコスト）も米国での検討の方が安く見積もられている。固定費率（資本回収率）は，両方の検討ともほぼ同じ値が用いられているので，これはプラント建設費の違いに起因すると考えて良い。

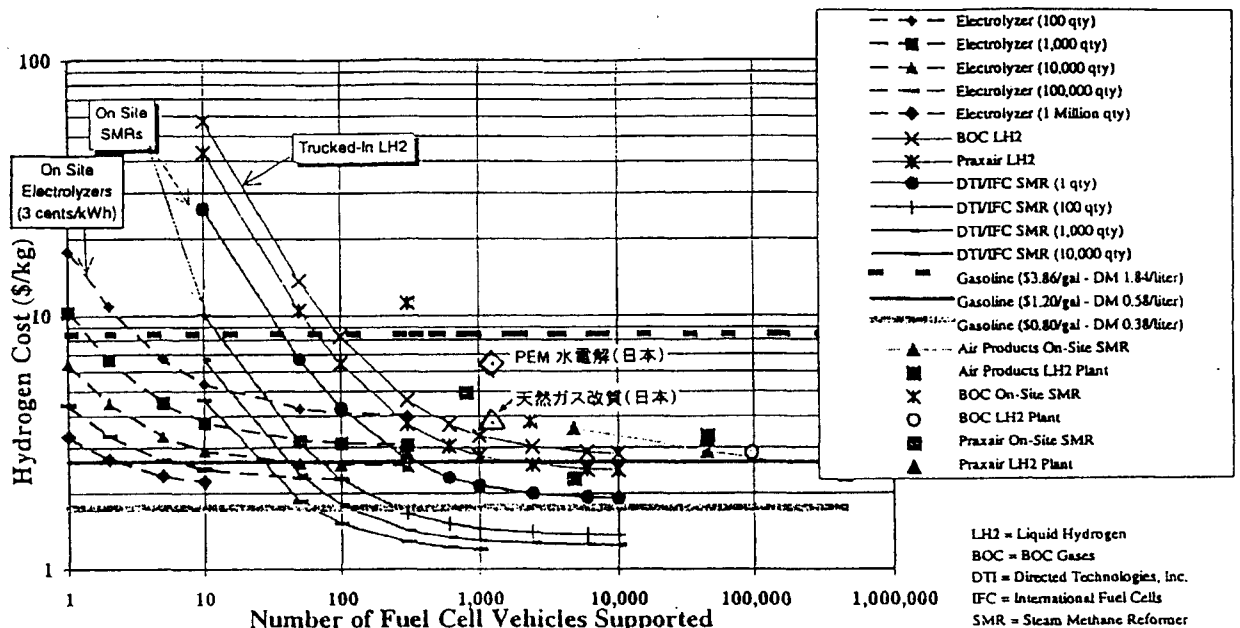


図 2.2.4-1 米国における自動車用水素供給コストの試算例 [4]

(2) 既存自動車燃料と比較しての水素の競争力

前項のわが国における水素供給コストの検討結果に基づいて、水素燃料電池自動車とその他の自動車の燃料コストを比較した。

現在の各既存燃料の価格と燃料電池自動車用水素の価格を表 2.2.4-2 に示す。また、小型バンを想定して車両使用期間（15 万 km 走行）の燃料代を試算した結果を図 2.2.4-2 に示す。自動車用水素燃料の経済性について次のことが言える。

- ・発熱量当たりの単価（表 2.2.4-2 のエネルギー単価）でみると、水素は他の燃料より高価である。
- ・燃料電池と内燃エンジンの熱効率の差が、燃料コストに大きく影響する。
- ・天然ガス改質水素を用いる燃料電池自動車は、ここで取り上げた自動車の中では走行距離当たりの燃料コストが最も安くなる。
- ・既存自動車燃料・駆動方式の中ではガソリンハイブリッド車の燃料コストが最も安い。
- ・水電解の場合、ガソリン車（ハイブリッドを除く）や LPG 車との競合は可能なレベル。
- ・水素の原料となる都市ガスの価格は CNG 自動車用の料金を想定しているが、同じ都市ガスを利用する CNG 自動車と比較しても、自動車の燃料コストとしては水素燃料電池自動車の場合の方が安くなっている。
- ・メタノール燃料電池自動車との比較でも、天然ガス改質水素を使用する水素燃料電池自動車の方が有利である。

このように水素は、単純な発熱量ベースでみた場合には既存燃料よりコスト高であるが、燃料電池自動車という水素に適した利用機器を用いることで、最終サービス（自動車では走行）のところで見れば十分なコスト競争力を有するようになる。

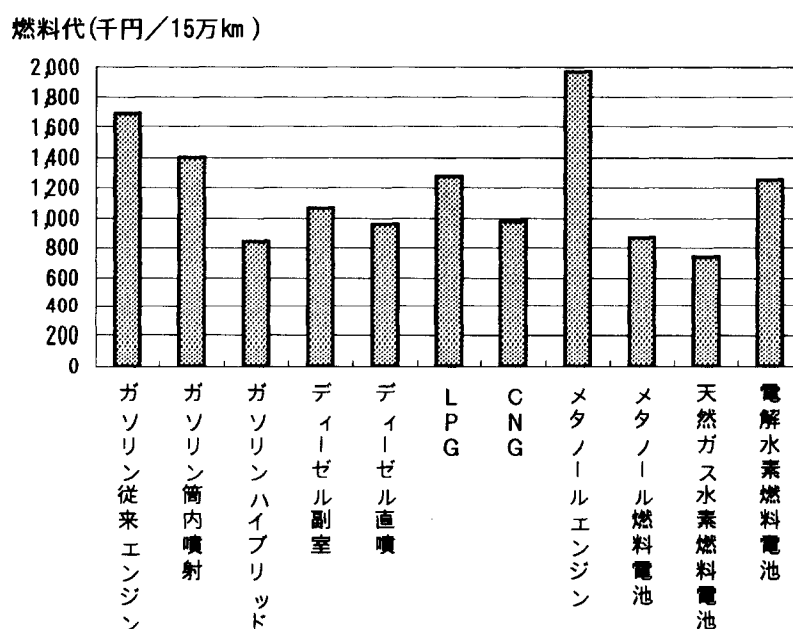


図 2.2.4-2 各種自動車の燃料コストの比較

表2.2.4-2 各種自動車の燃料コスト比較

	小売価格*1 (円)	低位発熱量 (Mcal)	エネルギー単価 (円/Mcal)	駆動方式	駆動システム効率 (ガソリン車=1)	車両燃料消費率 (ガソリン車=1)	燃料代*2 (千円/15万km)	差額*3 (千円)	差額の 対車両価格比*4
ガソリン従来エンジン				理論混合比	1.00	1	1,688	0	0%
ガソリン筒内噴射	90/1	7.95/1	11.32	筒内噴射	1.20	0.83	1,401	287	19%
ガソリンハイブリッド				ハイブリッド	2.00	0.5	844	844	56%
ディーゼル副室	75/1	8.74/1	8.58	副室	1.20	0.83	1,062	626	42%
ディーゼル直噴				直噴	1.33	0.75	959	729	49%
LPG	55/1	6.13/1	8.97	理論混合比	1.05	0.95	1,274	414	28%
CNG	72/Nm3	10.01/Nm3	7.19	希薄燃焼	1.10	0.91	976	712	47%
メタノールエンジン	53/1	3.82/1	13.87	理論混合比	1.05	0.95	1,970	-282	-19%
メタノール燃料電池				燃料電池	2.38	0.42	869	819	55%
天然ガス水素燃料電池	40/Nm3	2.58/Nm3	15.52	燃料電池	3.125	0.32	740	948	63%
電解水素燃料電池	68/Nm3		26.32	燃料電池	3.125	0.32	1,255	433	29%

*1 メタノールおよび水素は推定コスト。メタノールは現在のスタンダード納入価格にスタンダード改造コストを加算。

*2 理論混合比エンジンのガソリン車の燃費を8km/lと仮定し、これをベースに算出

*3 理論混合比エンジンのガソリン車の燃料代との差額

*4 理論混合比エンジンのガソリン車の価格を150万円と仮定し、これに対する比を算出

(3) 経済的に成立するシステム例

前項までの検討結果に基づき、近い将来において水素燃料電池自動車を経済的に成立するシステム例をまとめてみると、下記のとおりである。

まず、水素製造・供給コストについては、表 2.2.4-3 に前述の表 2.2.4-1 に示した値を再掲した。コストの内訳で比率が大きいのは、設備費と原料費（都市ガス）である。

設備費の基になるのが水素製造供給設備の建設費である。設備建設費は、表 2.2.4-4 に示したとおり総額約 2.3 億円と見積もられているが、これは実用化 1 号機クラスを想定したもので、建設実績が増えるにしたがって低減される余地は相当に大きいと考えられる。

原料費を決める要因は、都市ガスの単価とプラントのエネルギー効率であるが、これらについては、近い将来においては今回の想定値から大きな変化はないと考えられる。

次に車両コストであるが、これは表 2.2.4-6 に示すように総合経済性から逆算して設定した。すなわち、ここでの想定車種：小型バンにおけるガソリン車の生涯総費用が 319 万円と見積もられることから、水素燃料電池自動車については、表 2.2.4-3 に示した燃料単価 40 円/Nm³・H₂において生涯総費用が 319 万円となるように、車両価格を 245 万円と設定した。

表 2.2.4-3 水素燃料電池自動車を経済的に成立するシステム例(① 水素製造・供給コスト)

項 目	コスト (円/Nm ³ ・H ₂)	備 考
設備費	17.6	天然ガス改質方式, 300Nm ³ /hr
人件費	2.9	1 人, 年間 800 万円
変動費 都市ガス	14.1	都市ガス価格 39.3 円/Nm ³
電 力	4.9	
その他ユーティリティ	0.4	上水, 工業用水
合 計	39.9	

表 2.2.4-4 水素燃料電池自動車を経済的に成立するシステム例

(② 天然ガス改質式水素ステーションの建設費)

項 目	金額 (百万円)	備 考
改質装置	61	パッケージ型(脱硫, 改質, 変成, 蒸気, 純水, 制御系を含む)
精製装置	47	PSA 式
ガス圧縮貯蔵設備	43	圧力 20MPa
その他機器	40	
建 屋	15	
工 事 費	20	
合 計	226	

注) 水素製造能力：300Nm³/hr

この車両価格 245 万円の内訳を考察したのが表 2.2.4-5 である。ガソリン車の車両価格 150 万円からガソリン車特有のコンポーネント費を差し引くと、共通部分の費用は 120 万円となる。これと 245 万円との差額：125 万円以内に、燃料電池自動車特有のコンポーネント費用を収めることが必要になる。

燃料電池自動車特有のコンポーネントとしては、燃料電池、二次電池、コントローラ、モータ、水素吸蔵合金タンクがある。このうち、二次電池、コントローラ、モータについてはガソリンハイブリッド自動車における生産実績があることから、それを参考に費用を推定して設定した。燃料電池および水素吸蔵合金タンクは量産の実績は全くないので、量産時の目標単価等から費用を設定したが、水素燃料電池の単価 10 千円/kW、水素吸蔵合金（吸蔵能力 2%）の単価 3 千円/kg は、開発目標としては実現可能性のある妥当な値と考えられる。なお、水素搭載量 2.2kg の場合、小型バンでは約 200km の航続距離が確保できる。

このように、水素燃料電池自動車は、水素燃料の製造・供給の面からも、車両コストの面からも、さらにユーザーにとっての総費用の面からも、ガソリン車と同等の経済性を有するシステムが構築できる可能性があると言える。

表 2.2.4-5 水素燃料電池自動車が経済的に成立するシステム例(③ 車両コスト) 単位:千円

	ガソリン車	水素 FC 車	備 考
共通部分	1,200	1,200	
エンジン+変速装置	250	—	
その他ガソリン車専用	50	—	燃料タンク、排ガス処理装置等
燃料電池	—	300	10 千円/kW×30kW
二次電池	—	200	8 千円/kW×25kW
インバータ	—	200	
モータ	—	150	最大出力 50kW
水素吸蔵合金タンク	—	400	合金 3 千円×110kg, 水素貯蔵量 2.2kg
合 計	1,500	2,450	

注) 車種：小型バン

表 2.2.4-6 水素燃料電池自動車が経済的に成立するシステム例(④ 総合経済性)

	ガソリン車	水素 FC 車	備 考
車両価格 (a)	1,500 千円	2,450 千円	
燃費 (b)	8 km/l	8.11 km/Nm ³	水素 FC 車の効率はガソリン車の 3.125 倍とした
生涯走行距離 (c)	150,000 km	150,000 km	15,000 km/年×10 年
燃料単価 (d)	90 円/l	40 円/Nm ³	
生涯燃料費 (e)	1,690 千円	740 千円	(d)×(c)/(b)
総合費用	3,190 千円	3,190 千円	(a)+(e)

注) 車種：小型バン

2.2.5 水素自動車および水素供給ステーションに係る法規制

(1) 車両関連の法規制

a. 道路運送車両法の概要

わが国では、公道を走行する車両に対する法律として「道路運送車両法」が定められている。道路運送車両法は、道路運送車両に関する登録制度、保安基準、検査制度、整備事業等について規定しており、省令として「道路運送車両の保安基準」、「自動車型式指定規則」などがある。道路運送車両法の基本的考え方は、車両の安全性と公害防止性を確保するために車両の構造や機能に関する基準を定め、これを新規登録時およびその後の定期的な検査によって担保するというところにある。

公道を走行する自動車は1台ごとに車両検査（車検）を受けることが原則である。ただし、量産車の場合は型式指定を受けるのが一般的で、それにより新規登録時の車検が免除される。1台ごとの車検が必要な車として、改造車、試作車、組立車などがある。

b. 水素自動車の現在の位置づけ

水素自動車の場合は、「道路運送車両の保安基準」の中に水素に関する記述がない*（平成11年2月時点）ことから、基本的に例外的な車両として扱われることになる。

*：道路運送車両の保安基準の「高圧ガスを燃料とする自動車」の条項には、液化石油ガス、アセチレンガスを含有する高圧ガス、メタンガスを主成分とする高圧ガス、という記載はあるが、「水素」または「水素を主成分とするガス」という記載はない。

このような現状において、型式指定を受けたガソリン車やディーゼル車を改造して水素自動車を製作した場合には「改造車」として、新規に水素自動車を製作した場合には「試作車」または「組立車」として検査を受けることが原則となる。

c. 大臣認定制度

改造車、試作車、組立車としての検査は、同じ構造の車両であっても1台ごとに検査を受ける必要があり、水素に関する技術基準がない状況下では安全性・公害防止性を検査の度ごとに議論し判断することになり、非常に能率が悪い。水素自動車の普及のためには検査の効率化が必要で、そのためには水素自動車についての技術基準を定める必要がある。しかしながら、定めようとする技術基準の妥当性を判断するには一定の量の実走行データが必要になる。

このように、例外的な位置づけの車から現在のガソリン車のような一般的な車に移行する過程（その車に関する技術基準を定める過程）の措置として、いわゆる「大臣認定制度」がある。これは以下に示す道路運送車両の保安基準第56条の4項に基づくものである。

（道路運送車両の保安基準第56条の4）

運輸大臣が構造又は装置について本章に定める基準の改善に資するため必要があると認定した試作自動車又は試験自動車でその運行のために必要な保安上又は公害防止上の制限を付したもののについては、当該構造又は装置に関する本章の規定は適用しない。

これまでにわが国で公道走行の許可を受けた水素自動車はマツダ・カペラ（水素エンジン車、水素吸蔵合金タンク使用）2台だけであるが、これは上記の大臣認定制度によるものである。

大臣認定を受ける際の提出書類については、法規・基準等による規定はないので、申請者が運輸省の担当部署（自動車審査課）と事前調整することとなる。これまでに大臣認定を受けたメタノールエンジン車、CNGエンジン車との比較で、水素自動車が大臣認定を受ける際に提出を求められる書類を推定したのが表 2.2.5-1 である。

大臣認定制度の下で取得された種々のデータに基づいて、運輸省が「安全上および公害防止上、特段の問題がないことが確認できた」と判断し、必要な法規制（当該自動車の保安基準等）の追加・改正等が行われた段階で、当該自動車の大臣認定制度による扱いは終了し一般の自動車と同様の扱いを受けることになる。つまり、自動車メーカーが既存車と同様に技術基準等に

表 2.2.5-1 大臣認定申請の際の提出書類(推定)

申請資料(項目)	水素	メタノール	CNG	備 考
1. 申請書	○	○	○	大臣認定を申請する理由、必要性、主な走行場所等を、使用者側が申請書に記載
2. 外観写真	△	○	○	
3. 原動機の型式の打刻届出書(写)	○	○	○	
4. 構造・装置概要説明書	○	○	○	基本車より変更した部分を説明
①. 主要な構造・装置の説明書				
②. 騒音防止対策説明書	△	○	○	
③. 熱害防止対策説明書	△	○	○	
④. 排出ガス対策説明書	○	○	○	低公害車
5. 諸元表	○	○	○	
6. 外観四面図	△	○	○	
7. 走行性能曲線図	△	○	○	燃料が変更
8. 原動機性能曲線図	△	○	○	
9. 運転者席付近配置図	△	×	○	CNG のゲージでメータ変更
10. シャン全体図(透視図)	○	×	○	燃料タンクをボンベに変更 配管変更
11. 原動機全体図	△	×	○	
12. 保安基準適合検討書	○	○	○	
13. 試験成績書(データ)	○	○	○	CNG……寸法, 重量 メタノール…重量
①. 諸元測定試験(重量)				
②. 騒音試験成績書	○	○	○	原動機と燃料の適合及び これに伴う原動機出力変更等
③. 燃料消費試験成績書	△	○	×	
④. 原動機車載出力試験	○	○	○	
⑤. 排出ガス試験成績書	○	○	○	CNG……すべて公式試験 メタノール…③④社内データ その他公式試験
⑥. 熱害試験成績書	○	○	○	
⑦. 燃料蒸発ガス試験	△	○	×	

注：○提出 △不明 ×提出せず

基づいてその自動車を製造し、不特定多数の一般利用者がその自動車を購入できるようになる。

なお、CNG 自動車の場合は、平成 4 年までは都市ガス事業者のみによる利用であったため、改造車として受験・登録していたが、将来の普及拡大を目指して平成 5 年 2 月から大臣認定制度による登録に移行した。大臣認定における「運行のために必要な保安上又は公害防止上の制限」の具体的内容は、日本ガス協会が作成した自主技術基準が使用された。CNG 自動車の大臣認定扱いが解除されたのは、扱い開始から 2 年 11 ヶ月後の平成 7 年 12 月であった。この間に、大臣認定により登録された CNG 自動車は 488 台であった。

d. 車載水素容器

車載水素容器としては、高圧タンク、吸蔵合金タンク、液体水素タンクの 3 種類があり得るが、高圧タンクと液体水素タンクについては高圧ガス保安法の対象（35℃においてゲージ圧力 1MPa 以上）となり、同法およびその関連法規（主として容器保安規則と容器保安規則関係基準）による規制を受ける。容器保安規則には、容器の種類（継目なし容器、溶接容器）、試験・検査方法、刻印、表示、ガスの充填の方法、再検査などについて定められている。

こうした高圧ガス容器に対する保安基準は、主として工業用ガスの小口配送に使用する容器を想定したものであり、自動車用燃料容器としては不都合や不便が生じることもある。CNG 用車載容器の場合、そうした不都合の解消のため、①容器を取り外した上での定期的検査の免除、②軽量材料を使ったコンポジット容器の使用許可、などの規制緩和が行われて、CNG 自動車の普及促進に寄与している。ただしこれは自動車用 CNG 容器に限った規制緩和で、自動車用高圧ガス一般を対象にしているものではないので、水素容器については改めて規制緩和のための検討・働きかけを行う必要がある。

水素吸蔵合金タンクについては、35℃で 1MPa 以上の圧力が生じなければ高圧ガス保安法の対象にはならないが、水素が自動車用としては新しい燃料であることに加えて、吸蔵合金はこれまでにない燃料の貯蔵方法であるので、道路運送車両法または他の何らかの法律の下での技術基準の整備について検討する必要があると考えられる。

燃料容器や配管の車両への取り付けは、道路運送車両法の扱いとなる。ガス燃料用の容器・配管の取り付け強度、保護方法、熱からの遮蔽などについては既存の規定があり、水素の場合も同様の扱いとなると考えられる。水素特有の問題として、配管等の材質、万一漏れた時の扱いなどについては検討が必要と考えられる。

このほか、CNG 等、他のガスの誤充填を避けるためにも、コネクタの標準化を含む自動車用水素容器の規格整備が必要である。

e. 燃料電池システムに関する法規制

燃料電池は自動車にとっては全く新しい技術であり、その安全性等に関する法規制や基準は、当然存在しない。燃料電池自動車の普及がより現実に近づいた段階で、その必要性も含めて議論されることになると考えられる。なお、ISO（国際標準化機構）では 2004 年頃から、燃料電池自動車の技術の標準化の検討を開始する計画との情報もある。

(2) ステーション関連の法規制

a. 水素の法的扱い

圧縮水素および液化水素は、高圧ガス保安法第2条に定められている「高圧ガス」（常用の温度又は温度35℃においてゲージ圧力が1MPa以上が対象）の扱いを受ける。それぞれ

圧縮水素：可燃性ガス

液化水素：液化ガス(可燃性ガスの極低温貯蔵は、液化ガスとして取扱ってよい)
の基準が適用される。

b. ガス水素、液体水素の貯蔵・処理等の行為に係るガス施設関連法規

ガス水素、液体水素の貯蔵・処理等の行為は、表2.2.5-2に示すガス施設関連法規の適用を受ける。貯蔵および消費に関しては、容積300m³以上の貯蔵を行っている場合が対象となる。

表 2.2.5-2 ガス施設関連法規一覧

各種行為		関連法規
ガス水素 及び 液体水素の貯蔵	貯槽貯蔵	一般高圧ガス保安規則 第22条（貯槽により貯蔵する第1種貯蔵所*1に係る技術基準） 第26条（第2種貯蔵所*2に係る技術基準）
	容器貯蔵	一般高圧ガス保安規則 第23条（容器により貯蔵する場合の技術基準）
液体水素の移充填		一般高圧ガス保安規則 第6条（定置式製造設備に係わる技術上の基準）
圧縮水素の消費		高圧ガス保安法 第24条の2（消費）

*1 第1種貯蔵所…都道府県知事の許可を受けて設置する貯蔵所

*2 第2種貯蔵所…都道府県知事に届け出て設置する貯蔵所

c. 貯蔵・貯槽容器に関する規制

建築基準法によって都市計画法が定める用途地域ごとに、各種燃料の処理・貯蔵の数量に関する規制があり、その数量は表2.2.5-3に示すとおりである。圧縮水素は可燃性ガスとしての規制を受け、液体水素は液化ガスとしての規制を受ける（届け出る自治体によっては、圧縮水素を圧縮ガスとして取扱う可能性もある。その場合は表の10倍の貯蔵まで許される）。

表 2.2.5-3 建築基準法による水素の処理・貯蔵の規制数量

		第二種住居専用 地域、住居地域	近隣商業地域、 商業地域	準工業地域	工業地域、 工業専用地域
圧縮水素 (Nm ³)	常時貯蔵する場合	35	70	350	無制限
	製造所等で処理する場合	1,000	2,000	10,000	無制限
液体水素 (トン)	常時貯蔵する場合	3.5	7	35	無制限
	製造所等で処理する場合	100	200	1,000	無制限

d. 施設の敷地に関する法規制

施設距離として、貯蔵設備又は処理設備から保安物件に対する距離(m)の規制があり、貯蔵能力(圧縮水素は m^3 、液化水素は kg)または処理能力に対応して、表 2.2.5-4 に示す距離を確保する必要がある。ここで第一種保安物件とは、学校(校庭も含む)、患者 20 名以上の収容施設を有する病院(庭も含む)、定員 300 人以上の劇場・映画館・図書館等、1 日平均乗降者 20,000 人以上の駅の母屋及びプラットホーム、百貨店・マーケット・ホテル等で不特定多数のものを収容する 1000m^2 以上のものである。第二種保安物件とは、第一種保安物件以外の建築物で住居の用に供するものである。

高圧ガス製造設備における関連法規の立地規制の概要を図 2.2.5-1 に示す。

表 2.2.5-4 保安物件に対する水素貯蔵・処理設備の施設距離

	貯蔵または処理能力： $x(\text{m}^3 \text{ または } \text{kg}/\text{日})$		
	$0 \leq x < 10000$	$10000 \leq x < 52500$	$52500 \leq x < 990000$
第一種保安物件からの距離 (m)	$12\sqrt{2} = 16.97$	$\frac{3}{25}\sqrt{x+10000}$	30
第二種保安物件からの距離 (m)	$8\sqrt{2} = 11.31$	$\frac{2}{25}\sqrt{x+10000}$	30

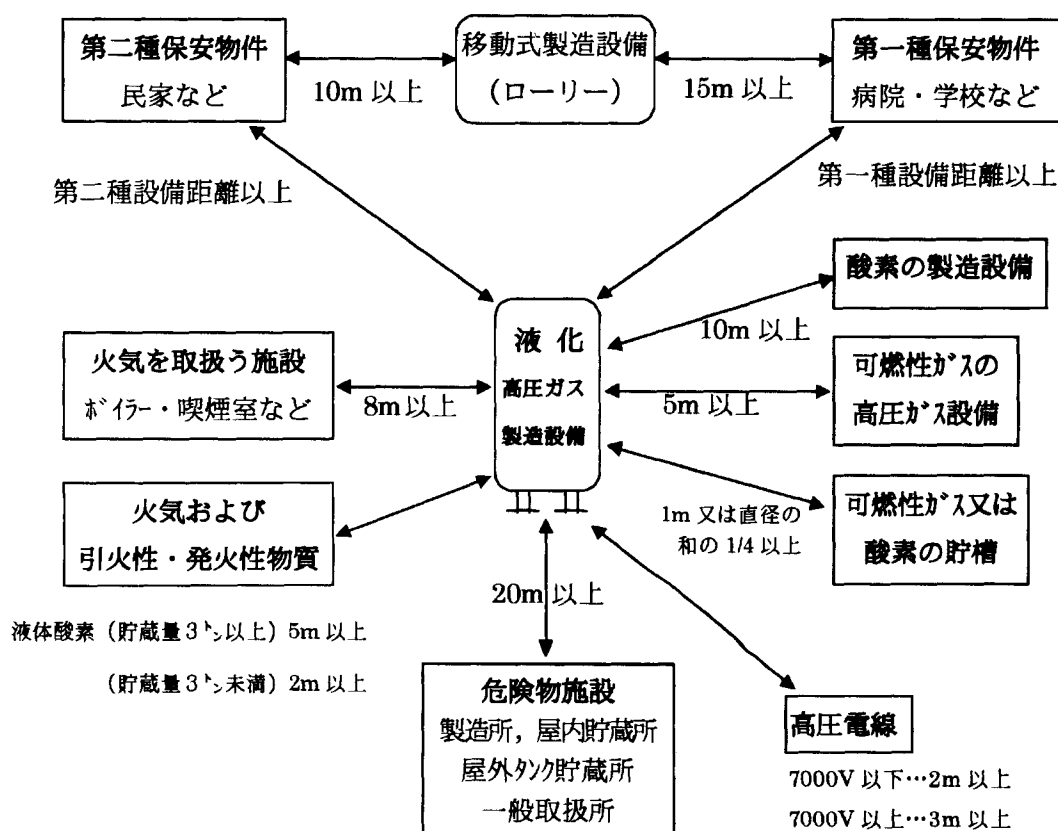


図 2.2.5-1 高圧ガス製造設備における関連法規の立地規制の概要

e. 輸送機関用各種供給インフラに関する法規制

CNG, LPG, LNG スタンドおよびガソリンスタンドは、それぞれ以下の法規により施設の立地に関する規制を受ける。

- ・ CNG スタンド：一般高圧ガス保安規則の「圧縮天然ガススタンドに係わる技術上の基準」
- ・ LPG スタンド：液化石油ガス保安規則の「液化石油ガススタンドに係る技術上の基準」
- ・ LNG スタンド：一般高圧ガス保安規則
- ・ ガソリンスタンド：消防法の「給油取扱所」
- ・ LNG, LPG を充填する場合は高圧ガスの製造に該当し、一日あたりの処理量（100m³/日以上と未満）によって、第一種製造設備と第二種製造設備に分類される。これら設備は、許可と届け出の違いはあるが、立地条件での違いはない。CNG スタンドは別基準がある。
- ・ CNG, LPG, LNG スタンドを給油所と隣接して建設する場合、消防法の規制を受ける。

建築基準法によって都市計画法が定める用途地域ごとに、各種燃料の貯蔵の数量に関する規制がある。これにより CNG の蓄ガス器や、LPG のタンク、ガソリンスタンドのタンクの大きさが表 2.2.5-5 に示すように規制されている。CNG については、一昨年までは、水素と同じ可燃性ガスの扱いを受け、表中の数値で 1/10 の貯蔵しか認められていなかったが、圧縮ガスの扱いに変更され表中の数値までが貯蔵できることになった。貯蔵数量の増加により過剰設備を持つことなく CNG 自動車への充填時間の短縮等が可能となった。

表 2.2.5-5 建築基準法による各種燃料の処理・貯蔵の規制数量

	市街化区域					用途地域の指定が無い地域
	第一種住居 専用地域	第二種住居 専用地域、 住居地域	近隣商業地域、 商業地域	準工業地域	工業地域 工業専用地域	
CNG(Nm ³)	0	350	700	3,500	無制限	無制限
LNG(トン)	0	3.5	7	35	無制限	無制限
LPG(トン)	0	3.5	7	35	無制限	無制限
ガソリン (L)	0	500 (50,000)	1,000 (50,000)	5,000 (50,000)	無制限	無制限

注：（ ）は地下貯蔵槽についての特例

f. インフラ（水素供給ステーション）に係る法規制への対応策

水素供給ステーションの設置にあたり、水素に関する法規制の中で最も支障があると考えられるのは、表 2.2.5-3 に示した建築基準法によって規制を受ける圧縮水素の貯蔵量である。即ち、水素供給ステーションを商業地域に設置することは十分に考えられることでありその場合 70Nm³（=6.3kg）が最大貯蔵量であることから水素燃料電池自動車 2～3 台しか水素供給ができないことになる。仮に圧縮水素が可燃性ガスの扱いから圧縮ガスの扱いになったとしても、10 倍に当たる 700Nm³の貯蔵量では自動車 20～30 台への水素供給が限界であり、まだ不十分である。一般的な水素供給ステーションの貯蔵量としては、その 4～5 倍に当たる 2,800～3,500Nm³

程度が必要と考えられる。さもないと、水素を圧縮水素として貯蔵することは断念して、液体水素もしくは水素吸蔵合金貯蔵に頼らざるを得ないことになる。水素は他の燃料に比べガス容積当りの発熱量が低い（メタンの1/3弱、プロパンの1/8）ことから水素供給ステーションにおける水素貯蔵量に関しては、新たな基準が必要と考えられる。

なお、水素供給ステーションに対する規制については、水素の燃焼特性や不特定多数の利用者がいることを考慮すれば、高压ガス保安法、一般高压ガス保安規則等の現行規制と共に、万一の事故における被害を最小限に止めるために、貯槽や処理設備の地下設置、または障壁の付設とガスが滞留しない構造（措置）を義務づける必要があると考えられる。

現行規制を踏まえた水素供給ステーション立地例として、液体水素（LH₂）コンテナ留置いて、LH₂自動車、高压水素（GH₂）自動車、吸蔵水素（MH）自動車に水素を供給する場合の水素供給ステーションの設置例を図2.2.5-2に示す。

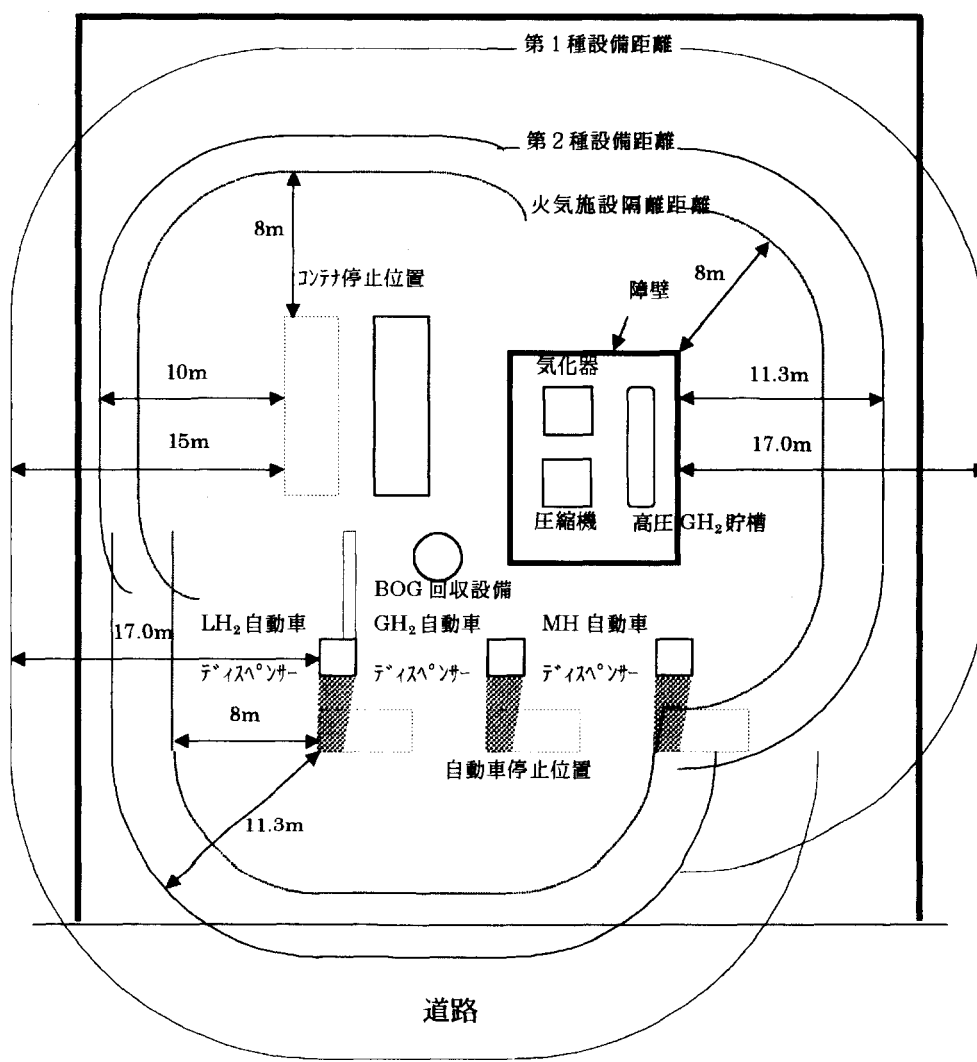


図 2.2.5-2 規制を踏まえた水素供給ステーション立地例

2.2.6 水素燃料電池自動車の導入シナリオ

本研究では、短期、中期、長期の三つの視点からのシナリオ（表 2.2.6-1）を作成した。これは、想定するタイムスパンによって期待される情報の種類が変わってくるというニーズ側の要因とシナリオと言えども長期になるほど記述できる事象の精度が低下するという作成側の要因を勘案した結果である。

3つのシナリオの設定期間と概要は下表のとおりである。

表 2.2.6-1 シナリオの概要

	期 間	概 要
短期シナリオ	2000～2010 年	実証から実用化，本格導入に至る過程でのクリアすべき事柄を，相互関係を考慮しながら年表形式に整理した。
中期シナリオ	2005～2030 年	導入車種，導入台数，水素需要量など，定量的な見積りを行った。
長期シナリオ	2005～特定しない	水素燃料電池自動車の基幹技術の移り変わりを展望した。

本検討の主要な目的は、2.2 節の最初にも述べたように「水素燃料電池自動車の導入に対する関係者の理解を深めること」、「円滑な導入を図るための指針を明らかにして今後の施策に反映させること」である。そのために、

- ・水素燃料電池自動車の実用化のイメージを示すこと
- ・可能な限り定量的な見積もりを行うこと
- ・円滑な導入を図る上で何が重要かを見いだすこと

を目標とした。このようなニーズから、各シナリオは、研究開発や実用化支援が積極的に行われ導入普及が順調に進むとの前提に立って作成している。「導入がゆっくりと進むケース」も作成は可能であるが、それによって今回の検討目的に対して新たな知見が得られるとは考えられないので、ここでは「導入普及が順調に進むケース」のみを検討した。

ここで示すシナリオは「将来を仮に想定したもの」であり「将来予測」や「導入計画」ではない。本検討の目標の一つが「定量化」であるので、導入時期や導入量に関して可能な範囲で数字を使って示しているがそれらの数字のうちのかかなりの部分は、WG における検討に基づいて（換言すれば専門家の直感により）設定したものである。その意味で、以下に示す各シナリオは「議論の出発点」と位置づけられる。

(1) 短期シナリオ

2000 年～2010 年の導入初期の期間について、図 2.2.6-1 に示すシナリオを作成した。このシナリオのポイントは次のとおりである。

- ① わが国において燃料電池自動車一般向けに実用化されるには、関連法規制の整備が不可欠である。法規制を整備するためには、一定量の実証データが必要となる。したがって、全体の導入の流れとしては、試作車や注文生産車による実証データの蓄積、法規制の整備、一般向け実用化、量産・本格的普及という順序になる。
- ② 車両の開発・生産は、「研究開発モデルの製作」から「注文生産」の段階を経て「量産」となる。一般向けの生産開始は 2005 年、量産開始は 2007 年とした。
- ③ 2002～2003 年に、WE-NET プロジェクトにおいて自動車と水素ステーションの実証試験を行う。また、2005 年の愛知国際博覧会等、その他各地の自治体においても水素燃料電池自動車の試験的導入が実施される。
- ④ 水素ステーションは、最初は試験的導入の一環として建設され、車両数が増えるに従って一般向け施設も建設されるようになる。
- ⑤ 法規制上、水素燃料電池自動車は、最初は試験自動車（大臣認定による公道走行）として扱われ、各種技術基準の整備が行われて一般の自動車と同様の扱いに移行する。技術基準の制定は 2005 年後半とした。
- ⑥ 水素供給方式がオンサイト型の天然ガス改質や電解の場合、車両への水素搭載方法は高圧水素か吸蔵合金に限られる。車載容器の標準化は、早い段階から開始することができる。
- ⑦ 導入車種は少数の燃料ステーションでの運用が可能なバス、塵芥車、業務用バンが主であり、公用車としての乗用車にも導入される。
- ⑧ 生産台数が増えるに従って車両価格が低減し、ステーション建設費の低減や車両性能の向上に伴って燃料コストも低減される。
- ⑨ 導入の初期においては既存車と比較して経済性が劣るため各種の助成策が期待される。

これらのなかで、技術基準が整備され一般の自動車と同様の扱いになる（大臣認定が不要になる）までにどれだけの実証・検討期間を要するかが普及時期を決める大きな要因となる。

年	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	実証データの蓄積 法規制・規格の整備 一般向け実用化 量産化・本格普及										
WE-NET計画	第II期										
車両開発・生産	研究開発モデル製作 特定ユザザ向け注文生産 一般向け注文生産 量産										
試験走行	WE-NET公道試験 自治体等による試験導入										
ステーション	WE-NET設計・製作 運転実証 小型低コストシステムの開発 高圧超高压プロセクトでの設置 都市ガス・LPG・工業ガス業者・自動車メーカーによる設置 フリーオートナーによる設置										
車両	試験自動車扱い（大臣認定により公道走行許可） 改造車・試作車扱い 型式指定自動車										
法規制・規格	技術基準の検討 制定 車載高圧容器・吸蔵合金容器の標準化 安全研究 技術基準の検討 制定										
補助政策 導入政策	車両購入への補助金 ステーション建設への補助金 税制優遇										
経済性	燃料費Gと同等 燃料費Gの0.7 燃料費Gの0.4 車両価格3倍 車両価格1.5倍 車両価格1.3倍										
ステーション数	0	0	0	2	5	10	20	30	60	100	200
登録台数	バス 0	0	0	0	5~10	5~10	40~80	80~160	150~300	400~800	700~1,400
	乗用車 0	0	0	0	5~10	20~40	20~40	50~100	100~200	200~400	300~600
	バン 0	0	0	0	40~80	70~140	70~140	150~300	300~600	1,100~2,200	2,500~5,000
	乗用車 0	0	0	0	0	20~40	20~40	70~140	150~300	300~600	500~1,000
計	0	0	1~3	2~5	10~20	50~100	150~300	350~700	700~1,400	2,000~4,000	4,000~8,000
											9,000~18,000

図 2.2.6-1 水素燃料電池自動車の導入シナリオ(導入初期)

(2) 中期シナリオ

a. シナリオの概要

30年程度の中期的視点からの導入シナリオとして、素燃料電池自動車の台数、水素消費量等の試算を行った。試算の手順を図 2.2.6-2 に示す。ここでは、量産が始まった後の車種別の新規登録車両に占める水素自動車のシェアをシナリオとして与え、普及台数、水素消費量等を試算している。この試算を、車種別に、2005 年～2030 年の各年ごとに行った。中期シナリオでは、前項の短期シナリオで検討したような個別のトピックスには焦点を当てていない。

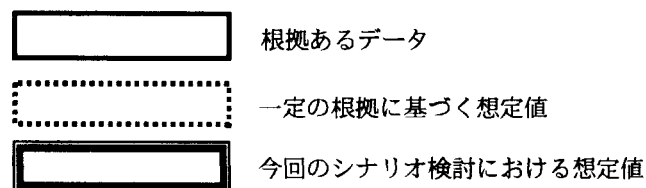
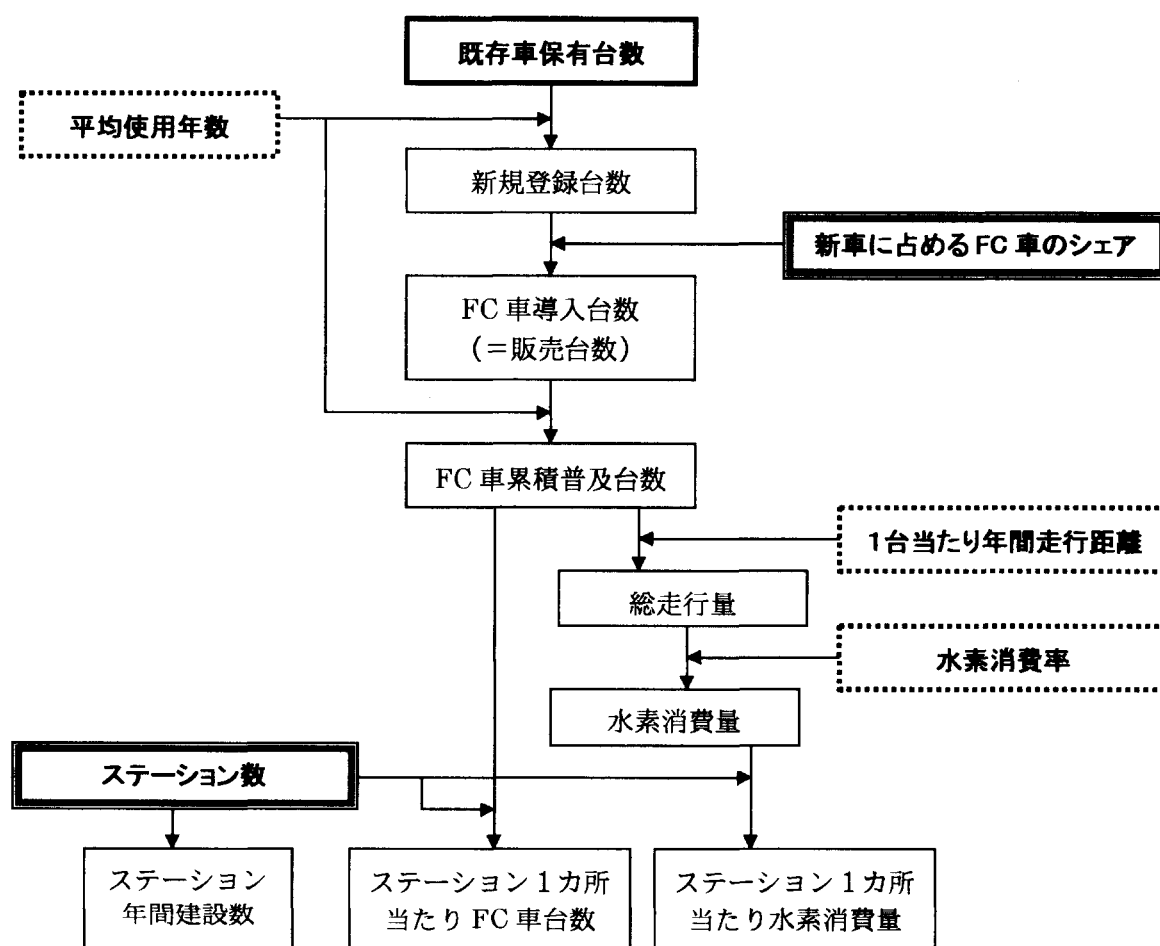


図 2.2.6-2 車両台数、ステーション数、水素消費量等の試算手順

b. 試算に用いたデータ

シナリオの核心部分である車種ごとの新規登録車両に占める水素燃料電池自動車のシェアは、図 2.2.6-3 の考え方に基づいて、図 2.2.6-4 のように設定した。まず、水素燃料電池自動車が導入される車種として次の 9 車種を選定し、公共的な車やステーションが少なくても使用可能な車から導入されていくと想定した。

- ・路線バス
- ・ゴミ収集車
- ・小型バン
- ・軽バン
- ・2tトラック
- ・4tトラック
- ・営業用乗用車（タクシー）
- ・自家用乗用車（小型・普通）
- ・自家用乗用車（軽）

具体的には、各車種の本格的導入開始時期を、バン、バス、ゴミ収集車が 2005 年、2tトラックが 2010 年、タクシーと 4tトラックが 2015 年とした。乗用車は、限られた用途（公用車等）には早い時期から使われるが、一般向け乗用車の普及が始まるのは、水素ステーション数が LPG スタンド並に達した後の 2020 年からとした。

次に、導入台数や水素消費量の試算に当たっては、1997 年時点のわが国の既存自動車の保有台数と車種構成、平均使用年数、平均年間走行距離等をベースとして用い、水素燃料電池の使用年数や年間走行距離も既存自動車のそれと同じと仮定した。また、水素燃料電池自

	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2030年 のシェア
バス	路線バス						50%
貨物車	ゴミ収集車						50%
			4tトラック				10%
		2tトラック					30%
	小型バン						30%
		軽バン					10%
乗用車			タクシー				50%
	(公用車)			小型・普通			10%
				軽			10%

図 2.2.6-3 水素燃料電池自動車の導入車種と本格的導入開始時期の想定

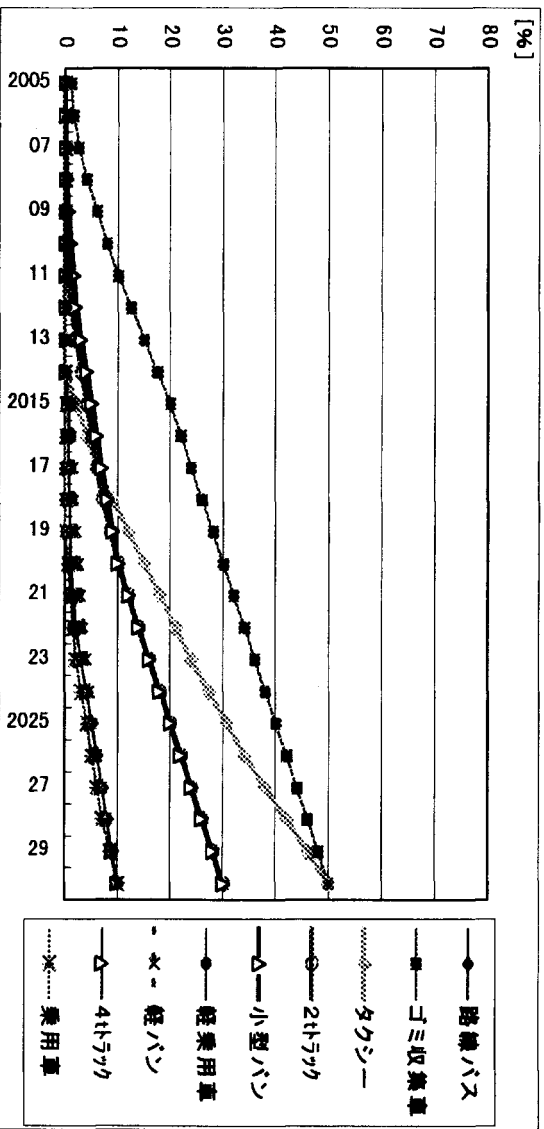


図 2.2.6-4 新規登録車両に占める水素燃料電池自動車のシェアのシナリオ

動車の燃費は、既存車に対する効率向上率に基づいて設定した。実際の試算には統計データから導いた値を有効数字2桁程度に丸めたもの（表2.2.6-2）用いており、これらの値はシナリオの対象期間（2005～2030年）にわたって一定としている。これは次の理由による。

- ・2030年までを考えると、大幅な変化は予想されない。
- ・パラメータを減らし、シナリオをなるべく単純化した方が理解しやすい。
- ・燃料電池自動車のシェアの値に大きな誤差が含まれているので、一部分だけ精緻化しても有効でない。

水素燃料電池自動車の燃費については、技術進歩とともに徐々に向上していく可能性が高いが、ここでは簡単化のため一定の値を用いた。燃費の値は、既存車と燃料電池自動車の効率の推定値（詳細は第2.3節を参照）に基づいて水素燃料電池自動車の効率向上率を算定し、燃費（投入エネルギー当たりの走行距離）も効率向上率に比例して向上するとして設定した。

表 2.2.6-2 水素燃料電池自動車の導入車種とシナリオ検討用データ

車 種	既存車保有台数 (万台)	平均使用年数 (年)	年間走行距離 (km)	水素自動車の 燃費(km/Nm ³)	既存車比 効率向上(倍)
路線バス	6	12	50,000	1.94	2.19
ゴミ収集車	5	10	10,000	3.23	2.19
小型バン	350	10	15,000	8.11	3.125
軽バン	1,100	8	10,000	11.16	3.125
2tトラック	400	10	20,000	3.88	2.19
4tトラック	80	10	40,000	2.59	2.19
タクシー	25	5	70,000	9.13	3.125
小型・普通乗用車	3,600	10	10,000	10.14	3.125
軽乗用車	700	8	7,000	12.17	3.125

c. 試算結果

以上の想定に基づく試算結果を図2.2.6-5～図2.2.6-10に示す。(数値データは、参考資料として表2.2.9-12～表2.2.9-18に示した。)

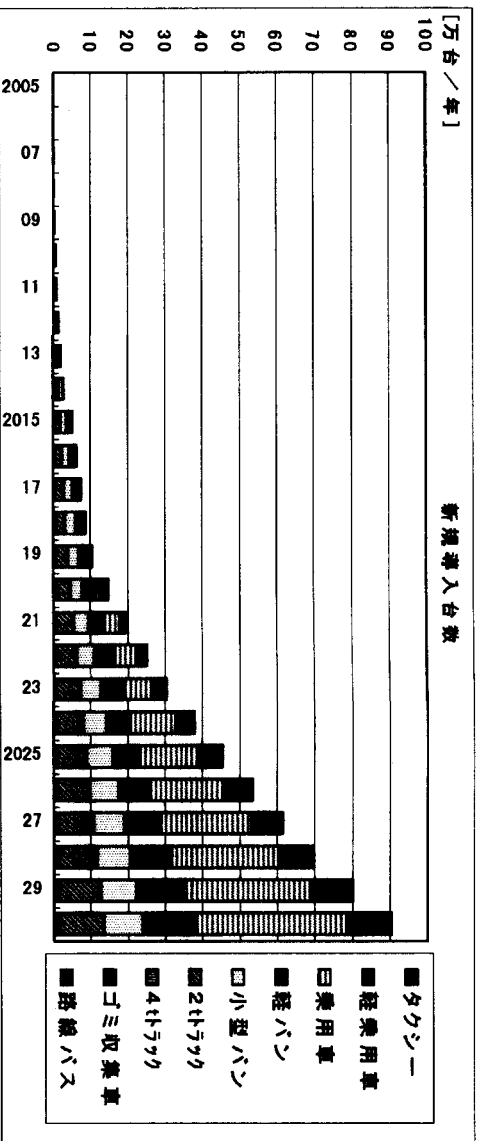


図 2.2.6-5 水素燃料電池自動車の新規導入台数

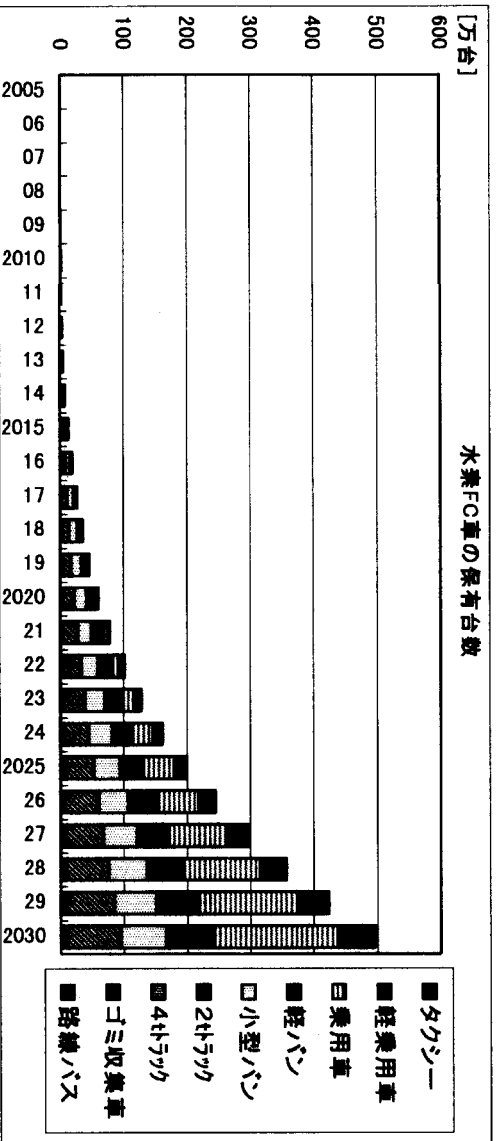


図 2.2.6-6 水素燃料電池自動車の普及台数

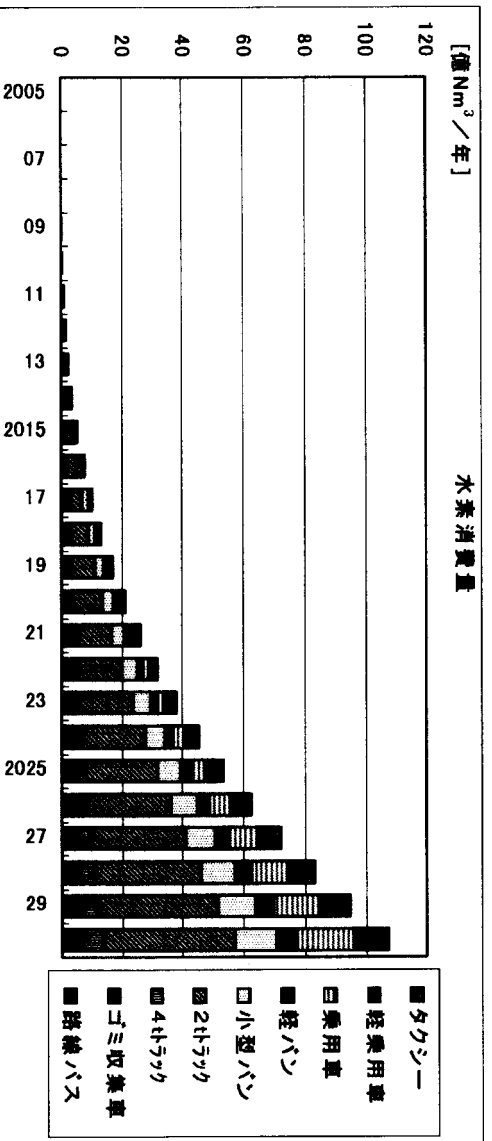


図 2.2.6-7 水素燃料電池自動車による水素消費量

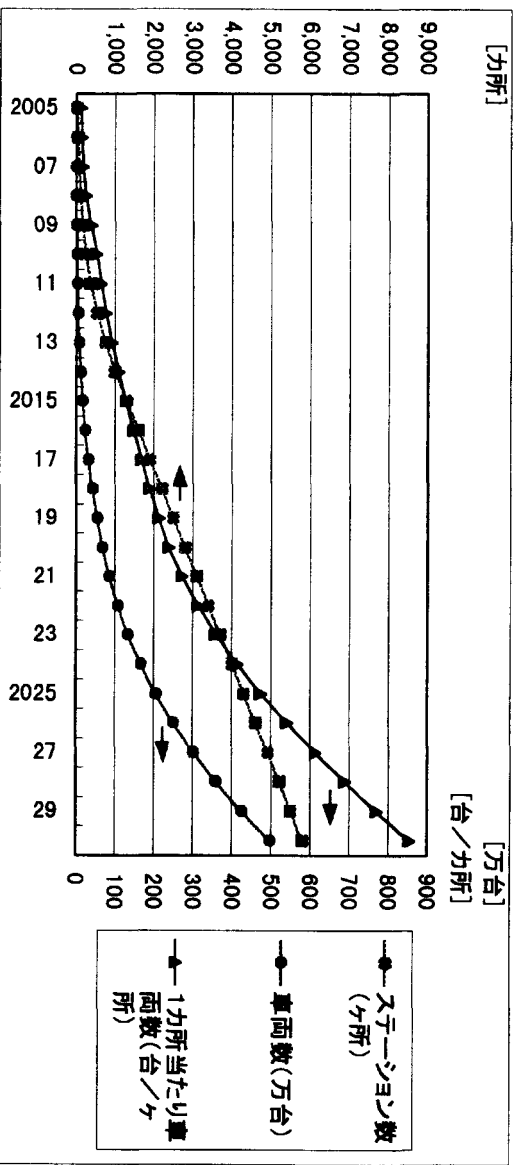


図 2.2.6-8 水素ステーション数と1ヶ所当たりの車両数

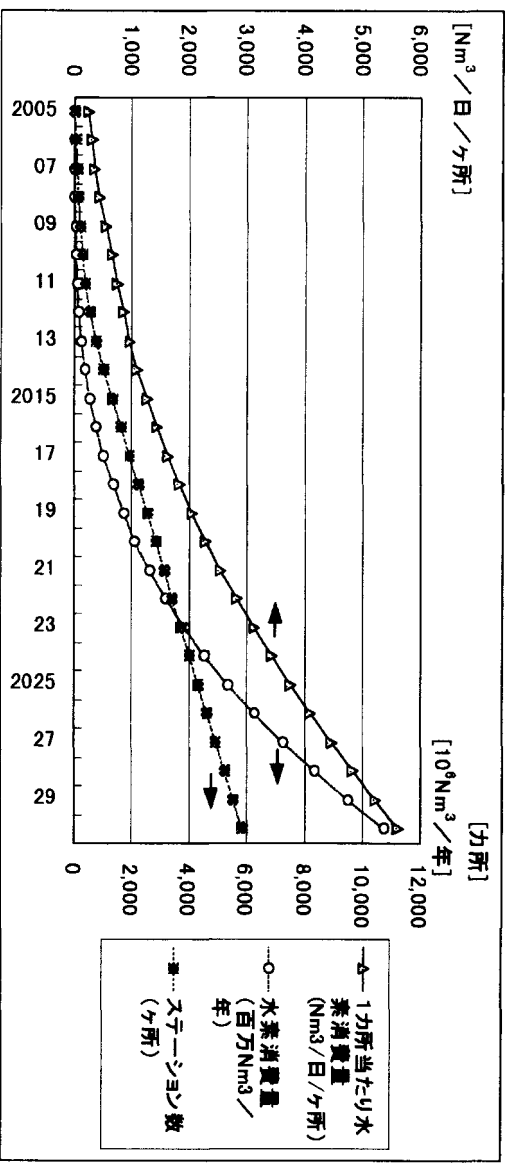


図 2.2.6-9 水素ステーション数と1ヶ所当たりの水素消費量

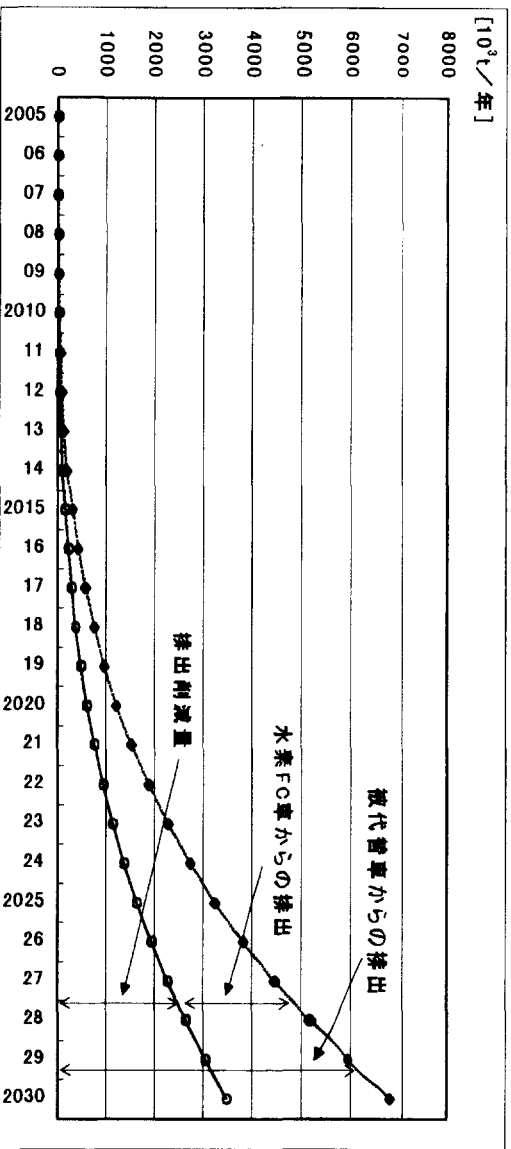


図 2.2.6-10 水素燃料電池自動車の普及によるCO₂排出削減量(天然ガス原料の場合)

フ. 普及台数
車種別の全保有台数（母集団）、水素燃料電池自動車のシェアおよび平均使用年数から各年における水素燃料電池自動車の普及台数が計算される。2030年における普及台数の合計は約500万台となった（図2.2.6-6）。台数の点では、母集団が大きい乗用車、バン（軽・小型）が大半を占めることになる。500万台という数字は非常に大きいようにも感じるが、1997年におけるわが国の全自動車保有台数と比較すると7%にしか相当しない。水素燃料電池自動車がストックベースで“主流”となるには、ここに示したベースでの普及拡大をさらに10～20年続けることが必要である。

イ. 水素消費量

2030年における水素消費量は、約108億Nm³と見積もられた（図2.2.6-7）。これは1997年におけるわが国の自動車用燃料消費量の9%を代替できる量である。車両台数に關しての代替率（7%）よりも燃料消費量に關しての代替率が大きくなるのは、軽自動車や一般乗用車よりもバス、小型バン、タクシーといった1台当たりの燃料消費量が比較的多い車種に優先的に導入されると仮定したためである。

2030年時点で上記の水素需要があったとして、水素供給源が何になっているかを予想することは難しい（後述のように、長期的な傾向としては、天然ガス主体から海外の再生可能エネルギーへと移行していくと考えられる）。参考のため、108億Nm³の水素を製造するのに必要な都市ガス、LPG、電力を計算してみると表2.2.6-3のとおりである。現実には、どれか一つの供給源に頼ることはないと予想されるが、一つに集中した場合でも、三つのエネルギー源とも、現在の供給能力を徐々に増強すれば対応できるレベルであることがわかる。一方、これだけの量の水素を海外から液体水素の形で輸入すると仮定すると、10万kl積みみのタンカーで約140隻分に相当し、ほぼ2日に1隻のペースで液体水素タンカーを受け入れることになる。

表2.2.6-3 水素製造用エネルギーの所要量

2030年水素消費量	108億 Nm ³ /年			都市ガス	LPG	電力
原単位	0.36 Nm ³ /Nm ³ -H ₂	0.33 kg/Nm ³ -H ₂	3.92 kWh/Nm ³ -H ₂			
水素向け消費量 (a)	38.7 億Nm ³ /年	355 万t/年	422 億kWh/年			
1997年国内消費量 (b)	201 億Nm ³ /年	1,730 万t/年	9,131 億kWh/年			
比率 (a)/(b)	19.3 %	20.5 %	4.6 %			

注：都市ガス消費量は11,000kcal/Nm³として換算

表 2.2.6-4 既存自動車の車両数とステーション数

	車両数(a)	ステーション数(b)	(a)/(b)
ガソリン車	約 50,000,000	約 60,000	833
LPG 車	約 290,000	約 1,900	150
CNG 車	約 3,000	約 80	38

(1999 年 1 月現在)

ナリオとして与えている。

図 2.2.6-8、図 2.2.6-9 は水素ステーション数とステーション 1 ケ所当たりの車両数および水素消費量を示したものである。ステーション数は一定の割合で増加していくとしたのに対し、車両数の増加が指数関数的であるので、導入開始後、当分の期間は燃料ステーション 1 ケ所当たりの車両数が少なく、したがって燃料処理量（販売量）も少ない状態が続くことになる。

このため、燃料供給に要するコスト（単位燃料販売量当たりの設備費負担）が高くなる恐れがある。表 2.2.4-1 において、設備コストは水素コスト全体の 23～44%を占めているが、設備の稼働率が下がるとそれに反比例して設備コストが上昇する。例えば天然ガス改質方式の場合、水素製造量が定格の 30%（設備稼働率 30%）に下がると、水素コストの 44%を占める設備コストが 3.3 倍となり、水素コスト全体としては約 2 倍に上昇する。

実際には車両への燃料供給価格を一定に抑えることになると考えられるので、燃料ステーションの採算性が悪化することになる（＝赤字を余儀なくされる）。このような状況は、新しい燃料の導入初期段階においては避け難いものであり、燃料ステーションの経営が自立できるようになるまでは、ステーションの建設あるいは運営の段階で補助金等の投入が不可欠であると考えられる。一方で、ステーションを計画する際には、過大な設備とならないよう注意する必要がある。平成 9 年度に検討した $300\text{Nm}^3/\text{h}$ ($7,200\text{Nm}^3/\text{日}$) という水素製造能力は、特に導入初期においては過大である。小容量 ($50\text{Nm}^3/\text{h}$ 以下) で低コストの水素供給装置を需要に合わせて増設していくという方法を考えるべきである。

エ. CO₂ 排出削減量

水素燃料電池自動車は、水素を天然ガス改質方式で供給した場合、走行に伴う CO₂ 排出量（資源の採取、転換、輸送等を含む。車両の製造、廃棄は含まない。）は、ガソリン車の約 41%、ディーゼル車の約 57%に減少すると見込まれる。この比率を用いて、水素燃料電池自動車の普及による CO₂ 排出削減量を試算した結果が図 2.2.6-10 である。

2010 年における CO₂ 排出削減量は 1.5 万 t-C で、1990 年のわが国のエネルギー起源 CO₂ 排出量：2 億 8,700 万 t-C の 0.01%以下とごく僅かなものであるが、2020 年の排出削減量は 63 万 t-C（1990 年排出量の 0.2%）、2030 年の排出削減量は 350 万 t-C（同 1.2%）となり、将来のわが国の CO₂ 排出削減に相当に大きな寄与が期待できる。

(3) 長期シナリオ

前項のような数量的な側面とは別に、長期的にみると水素燃料電池自動車の導入形態の中身が変化していくと考えられる。その様子を表 2.2.6-5 に示した。

主な水素源としては、当分のあいだ天然ガス（都市ガス）が使われると想定したが、一部では LPG からの製造や電解水素・副生水素の利用も行われるであろう。ステーションで水素を製造した場合、これを液化するのは非現実的であるので、車載方法は高圧ボンベか吸蔵合金タンクとなる。

将来、化石燃料の価格上昇や温室効果ガス抑制の一層の強化などが現実のものとなれば、海外の再生可能エネルギーから液体水素を製造し輸入するようになるであろう。その時には、国内輸送は液体水素が中心となり車載容器としても液体水素タンクが登場する。移行期間には、さまざまな形態のステーションと車載容器が混在することになるが、予め規格等を整備しておくことで混乱を避けることは可能であろう。

表 2.2.6-5 水素燃料電池自動車の導入形態の移り変わり

	初期（～2010）	中期（～2020）	長期（2030～）
主な導入車種	バス ゴミ収集車 業務用バン	バス，ゴミ収集車， 小型トラック， 業務用バン，タクシー	二輪車を除く全ての車種
車載容器	高圧ボンベ 吸蔵合金タンク	高圧ボンベ 吸蔵合金タンク	吸蔵合金タンク 液体水素タンク
想定水素消費量	約 0.5 億 Nm ³ (自動車用エネルギーの 0.04%)	約 21 億 Nm ³ (自動車用エネルギーの 1.7%)	約 100 億 Nm ³ 以上 (自動車用エネルギーの 9%) (液水として 14 百万 kl)
主な水素源	天然ガス（都市ガス）	天然ガス（都市ガス）	海外の再生可能エネルギー
国内輸送	パイプライン（都市ガス）	パイプライン（都市ガス）	液体水素タンカー 液体水素トレーラー
経済性	補助・助成を含めて競合自動車より有利	補助・助成なしで競合自動車より有利	水素にも課税した上で経済的に成立
推進要因	技術開発競争 大気汚染防止 CO ₂ 排出削減	大気汚染防止 CO ₂ 排出削減	CO ₂ 排出削減 エネルギーセキュリティ

2.2.7 水素燃料電池自動車導入のための支援策

新しい燃料や原動機を用いた自動車は一般的に次のような段階を経て実用化される。

①研究開発 ②実証 ③プレ商用化 ④商用化

各種のクリーンエネルギー自動車については、各段階においてその段階に適した支援策が取られてきている。

水素燃料電池自動車は、研究開発から実証に入る段階に位置していると考えられるが、ここでは、(1)研究開発および実証、(2)プレ商用化および商用化の二つの段階に分けて、他のクリーンエネルギー自動車に対する支援状況を整理した上で、水素燃料電池自動車に対して期待される支援策について述べた。

(1) 研究開発および実証段階における支援

a. 他のクリーンエネルギー自動車に対する支援状況

電気自動車、天然ガス自動車、メタノール自動車、ハイブリッド自動車等の低公害車は、プレ商用化のものが多く、商用化と呼べる段階のものもある。これらの自動車に対しては、現時点でも各種の支援が行われている（後述）が、ここに至るまでの研究開発および実証の段階においても、以下に例を示すように、国等の資金による支援が行われてきた。

① 電気自動車の研究開発

通産省工業技術院の大型プロジェクトの一つとして昭和46年度～昭和52年度に実施された。国立研究所、自動車メーカー、電池メーカー等の参加により、当時としては画期的に高性能な電気自動車や新型電池が開発された。

② 電気自動車用充電スタンドの実証

新エネルギー・産業技術総合開発機構が、平成6年度～平成8年度に通産省資源エネルギー庁の補助により実施した。夜間電力貯蔵型の充電スタンドを開発し、市販電気自動車自動車も併せて導入して実用試験を行った。

③ 天然ガス自動車実用化調査事業

(社)日本ガス協会が、平成2年度～平成10年度に通産省資源エネルギー庁の補助を受けて実施。CNG自動車の試作・フリート走行テスト、高圧ガス容器・充填設備の法規制整備に関する検討、LNG自動車・LNG充填設備の開発・試験等を行ってきた。また、並行して実施された別のプロジェクトにおいて小型CNG充填機の開発も行われた。

b. 水素燃料電池自動車に対する支援

水素燃料電池自動車の開発は、研究開発の段階から実証の段階に入りつつある。水素は自動車用としては新しい燃料であり、燃料電池も自動車に適用するのは経験のない新技術である。したがって、一般の自動車としての利用を始める前に、安全性と信頼性を確保するための法規制や技術基準等の整備が不可欠であり、その前提として、管理された状況下での実用実績を積

むことが必要になる。このような事業は民間企業のみで行うことは負担が大きく、また実績の評価には第三者的視点が欠かせないことから、国等の資金による実証プロジェクトが必要となる。

海外では、「2.2.3 (1) 水素燃料電池自動車の開発状況」に示したように、水素燃料電池自動車の実車と水素供給ステーションによる実証プロジェクトが既に行われており、連邦政府や州政府などから資金が提供されている。今後、わが国においても国や自治体などによる水素燃料電池自動車の実証プロジェクトが実施されることが強く期待される。また実証プロジェクトと並行して研究開発についても、特に燃料電池自動車の性能向上に資する基礎技術、ステーションのエネルギー効率向上や安全性の確保に関連する技術に対して、国等の支援が期待される。

(2) 商用化段階における支援

a. 他のクリーンエネルギー自動車に対する支援状況

すでに商用化ないしはプレ商用化の段階にある各種の低公害車に対しては、2.2.9 参考資料(3)に示すように、車両の導入（購入，リース）およびステーションの建設に際して各種の公的支援策が講じられている。支援策の種類は、①税の減免、②補助金の支給、③低利融資などに分類できる。また、支援を実施する主務官庁は、環境庁、通産省資源エネルギー庁、運輸省、自治省、大蔵省などにわたっており、さらに多数の地方自治体が独自に助成策を講じている。

助成の対象となる自動車は、各制度によって異なっている。電気自動車は最も多くの制度の対象となっており、天然ガス自動車、メタノール自動車も対象となっている場合が多い。以上の3車種に比べると、ハイブリッド自動車が対象となっている制度はやや少なくなっている。さらにLPG自動車が対象となっているケースは、数例あるだけである。こうした状況は、LPG自動車が平成6年からディーゼル車代替の場合に限って低公害車として扱われるようになったが、それ以前は低公害車あるいは代替燃料自動車として扱われてこなかったことと関係していると考えられる。（水素自動車あるいは水素燃料電池自動車、水素ステーションと明記している制度はない。これは、実用車両がまだない状況では当然である。）

このような低公害車の導入を促進する基本方針を確認した文書として、例えば、平成6年12月に総合エネルギー対策推進閣僚会議において決定された「新エネルギー導入大綱」がある。そこでは、重点導入を図るべき新エネルギーの一つとしてクリーンエネルギー自動車に取り上げられて、天然ガス自動車、電気自動車、メタノール自動車、ディーゼル代替LPG自動車、ハイブリッド車という5種類の自動車が明記された上で、次ページ表2.2.7-1に示すような施策方針が記されている。

b. 水素燃料電池自動車に対する支援

近い将来、水素燃料電池自動車の技術が実用レベルに達し普及が始まると期待されるが、水素燃料電池自動車についても他の低公害車と同様に、経済的に自立できるようになるまでの間、車両やステーションに対する助成策が不可欠であると考えられる。特に、水素のような新しい

燃料の場合は、ステーションの整備に対する先行投資が必要であり、それには多額の資金を要する。燃料インフラは社会基盤の一つであり、その整備のためには強力な公的支援が望まれる。

そうした公的支援を導入するためには、まず水素燃料電池自動車の低公害性、石油代替性、CO₂排出削減への寄与など公共的なメリットを確認した上で、この自動車の普及を促進すべきであるという政策的な位置づけを明確にすることが必要と考えられる。

表 2.2.7-1 新エネルギー導入大綱(抜粋)

①天然ガス自動車・電気自動車・メタノール自動車

我が国では現在、地方公共団体等を中心に導入が進められているが、コスト低減、充填所又は充電スタンドの整備という共通の問題に加え、出力や走行距離（電気自動車）、アルデヒドの排出（メタノール自動車）等の技術的な問題点がある。

今後の施策のあり方として、政府は、

1)共通的な施策

- ・充電又は燃料充填設備を整備する者に対する支援措置を講ずる。
- ・充電又は燃料充填設備の円滑な整備に資するため、既存の給油取扱所に併設する場合の消防法上の技術的な基準を整備する。

2)天然ガス自動車

- ・天然ガス自動車を購入又はリース普及する者に対する支援措置を講ずる。
- ・今後の天然ガス自動車の量的拡大を図るため、道路運送車両法上の大臣認定制度を型式認定制度等へ移行する。
- ・燃料充填設備の円滑な整備、燃料搭載容器の軽量化を図るため、高圧ガス取締法における規制緩和及び基準の整備を実施する。
- ・小型充填機が、比較的簡単に設置できるよう、ガス事業法における適切な基準を整備する。

3)電気自動車

- ・走行実証試験を実施するとともに、高性能電池及びハイブリッド電気自動車に関する技術開発を推進する。
- ・電気自動車を購入する者に対する支援措置を講ずる。

4)メタノール自動車

- ・走行実証試験を着実に実施するとともに、メタノール自動車を購入する者に対する支援措置を講ずる。

②ディーゼル代替 LPG 自動車・ハイブリッド車

現在、トラック及びバス運送事業者を中心に、導入がおこなわれている LPG 自動車は、技術的には既に実用段階にあるため、環境問題への対応、特にディーゼル代替の場合には、低公害に資する。

今後の施策のあり方として、政府は、

1)ディーゼル代替 LPG 自動車

- ・ディーゼル代替 LPG 貨物自動車を購入する者に対する支援措置を講ずる。
- ・貨物自動車用の LPG 充填所を整備する者に対する支援措置を講ずるとともに、LPG 充填所について、既存の給油取扱所に併設する場合の消防法上の技術的な基準について検討する。

2)ハイブリッド車

- ・エネルギー回生式ハイブリッド自動車を購入する者に対する支援措置を講ずる。

車両の導入に関連した支援策

(1)税の減免

自動車取得税の軽減

法人税および所得税における減価償却の特例または税額控除

(2)補助金

自動車 NOx 法特定地域および国立公園等における低公害バス導入事業
先駆的バス事業

(3)融資

ステーションの導入に関連した支援策

(1)税の減免

地価税の課税価額の減額

固定資産税の課税標準の減額

特別土地保有税の非課税化

(2)補助金

エコステーション 2000 計画（設備費に対する補助および運営費の補助）

(3)低利融資

燃料等供給設備の取得者への融資（日本開発銀行および北海道東北開発公社）

2.2.8 水素燃料電池自動車の導入の課題

(1) 技術的課題

a. 車 両

① 水素貯蔵技術

水素燃料電池自動車の最大の弱点は、車載容器の体積・重量に起因する航続距離の問題である。乗員や荷物のための空間を十分に確保した上で 200km 程度以上、車種によっては 400km 以上の航続距離が得られるような水素量を貯蔵・搭載できることが必要である。

高圧容器は重量より体積が問題であるが、コンパクト化（貯蔵圧力の高圧化）は現実問題としては難しい。軽量化に関しては、CNG 自動車用に実用化されているコンポジット容器の適用により改善が期待できる。

より高度な安全性、コンパクト性などの観点からは水素吸蔵合金タンクが優れており、吸蔵合金の性能向上に期待がかかる。充填時間を一層短縮するための研究も必要である。

液体水素は、短期的には実用車に採用される可能性は低いが、長期的観点から安全性・信頼性の向上、コンパクト化、低コスト化などに寄与する技術の蓄積を図っていくことが望まれる。

② 燃料電池システム

自動車用燃料電池システムは現在は研究開発段階であり、実用化のためには、燃料電池本体の高効率化およびコンパクト化、水の凍結対策および低温起動、システム全体の信頼性、耐久性、コスト低減など多くの課題がある。

b. ステーション

天然ガス改質方式の場合、基本的には既存技術の組み合わせで対応できる。実用化に向けては、水素の供給コストをできるだけ下げることが重要であり、そのため、建設コストの低減、効率向上、ユーティリティ使用量削減、信頼性確保、メンテナンス低減、運転自動化、コンパクト化などの開発が求められる。

安全性の確保は必須条件であるが、この点は技術基準や規格の整備が行われる中で解決されていくものと考えられる。

自動車メーカーの中には、水素ではなくメタノール燃料の燃料電池自動車に的を絞って開発している会社もある。その大きな理由は「水素供給インフラの整備の見込みがない」と考えているからである。したがって、自動車メーカーに水素燃料電池自動車の開発を促すためには、水素供給インフラの実現可能性をなるべく早い段階で実証しアピールすることが重要である。また、燃料電池自動車の実用化段階では、先行的・集中的に水素ステーションの建設を進めることが必要である。

(2) 経済的課題

車両費および燃料費のそれぞれが、既存車と比較して極端に高くないこと、そして両者を合計した生涯費用を、既存車と同等以下の費用に抑えることが必要である。そのような目標が満たすための水素価格や車両価格の一例は、「2.2.4 水素燃料電池自動車の経済性」に示したとおりである。

コスト低減の観点から最も大きな課題を有するのは、燃料電池本体である。次いで、車載水素容器、水素製造設備のコスト低減が重要である。

水素製造設備については、実用化初期には車両導入よりステーション整備が（相対的に）先行して行われ、ステーション1ヶ所当たりの水素販売量が少ない状況が続くと予想される。したがって、比較的小規模（数十Nm³/h）で低コストの供給設備の開発が望まれる。

(3) 政策的課題

a. 法規制の整備

水素は自動車用としては新しい燃料であり、現在の法体系の中では規定されていないことから、法律条項、基準、規格等を整備する必要がある。その際、CNG 自動車のような先行事例が参考になると考えられる。

b. 導入のための支援

導入初期においては、水素燃料電池自動車が経済性の点で量産車と競合するのは困難であると予想されることから、普及促進のためには助成策が必要とされる。また、車両の普及とステーションの整備を同時並行的に行う必要があり、少ないステーション数でも利便性が確保できるよう、特定用途や特定地域等へ集中的して導入することも検討すべきである。

c. 推進体制

こうした導入普及のための社会環境整備を行っていくに当たって、各種情報の集約と提供、法規制整備の検討組織の運営、助成策の実務運用などの活動を行う水素自動車のナショナルセンター的な組織が必要になると考えられる。

d. 水素燃料電池自動車の位置づけの明確化

上記の政策を行って行くに当たり、水素燃料電池自動車の政策上の位置づけを明確化することがまず基本となる。

2.2.9 参考資料

(1) クリーンエネルギー自動車の導入状況

表 2.2.9-1 国内のクリーンエネルギー自動車の導入の概要

	電気自動車	ハイブリッド車	メタノール車	天然ガス自動車	ディーゼル代替 LPG 車
概 要	地方自治体，電力会社等において，軽自動車，小型バンが主に利用されている。	蓄圧式ハイブリッドバスがバス会社に導入されている。ディーゼル・電気式は，運送会社，バス会社に導入されている。ガソリン・電気式は乗用車での実用化が始まった。	運送会社，地方自治体において小型トラック等が導入されている。	地方自治体，ガス会社等において，小型バン，塵芥車，路線バス等に利用されている。	1994 年より一部メーカーが小型トラックを販売開始。
普及台数	約 2,600 台 内，730 台は原付自転車	ディーゼルベース 226 台 ガソリンベース 約 2 万台	540 台	約 3,000 台	約 1,700 台
充填所 (充電所)	59 ケ所	約 6 万ヶ所	53 ケ所	80 ケ所	1,879 ケ所
導入形態	都市内の小荷物配送 連絡業務 短距離の送迎	都市内を走行する路線バス，中大型トラック 乗用車	中型トラック	都市内を走行する中小型トラック，塵芥車，路線バス 小型バン	都市内を走行する中小型トラック

表 2.2.9-2 電気自動車の車種別普及台数の推移

年 度	登録自動車							軽自動車						合 計
	乗用車		貨物車		乗 合 車	特 殊 自 動 車	計	軽 二・ 三 輪	軽四輪		二 輪 小 型 自 動 車	原 付 自 動 車	計	
	普 通 車	小 型 車	普 通 車	小 型 車					乗 用 車	貨 物 車				
1985	0	4	—	28	8	7	47	142	41	444	0	150	777	824
1986	0	5	—	35	8	7	55	142	42	450	0	100	734	789
1987	1	7	—	29	2	14	53	142	44	400	0	50	636	689
1988	1	7	14	6	2	14	44	223	41	444	0	105	813	857
1989	1	33	14	4	2	16	70	254	17	618	0	105	994	1,064
1990	1	32	14	6	2	17	72	225	31	603	1	75	965	1,037
1991	4	37	12	25	1	23	102	281	11	809	1	81	1,183	1,285
1992	8	54	19	70	1	29	181	278	21	949	5	107	1,360	1,541
1993	8	99		112	2	29	250	278	47	1,073	2	296	1,696	1,946
1994	7	110	15	120	2	32	286	—	70	1,300	2	600	1,972	(2,300)
1995	5	129	17	126	3	33	313	—	80	1,400	—	700	2,180	(2,500)
1996	5	174	13	115	5	36	351	—	80	1,400	—	700	2,210	(2,600)

表 2.2.9-3 メタノール自動車の車種別導入主体別普及台数の推移

年度	(財)物流技術センター			(財)石油産業活性化センター					合 計		
	M100 自動車			管理下走行試験			導入行 ^イ ル調査	計			
				M85	M85	M100	M100				
	オ ¹⁾	ディ ²⁾	計	オ ¹⁾	ディ ²⁾	ディ ²⁾	オ ¹⁾	オ ¹⁾	ディ ²⁾	計	
1990	83	68	151	12	0	0	0	12	95	68	163
1991	96	88	184	32	0	0	0	32	128	88	216
1992	107	139	246	20	2	4	0	26	127	145	272
1993	118	267	385	20	2	4	0	26	138	273	411
1994	121	314	435	14	2	4	5	25	141	320	460
1995	127	341	468	14	2	4	11	31	152	347	499
1996	129	395	524	0	1	4	11	16	140	400	540

注：1) オットータイプ，2) ディーゼルタイプ

出所：(財)物流技術センター運輸低公害車普及機構，(財)石油産業活性化センター

表 2.2.9-4 天然ガス自動車の台数および充填所数の推移

年度	天然ガス自動車 (台)	天然ガス充填所 (ヶ所)
1984	1	1
1985	1	1
1986	2	1
1987	2	2
1988	2	2
1989	4	3
1990	21	4
1991	49	6
1992	123	6
1993	243	12
1994	421	24
1995	759	34
1996	1,211	42

表 2.2.9-5 天然ガス自動車の車種別内訳

車 種	台 数
小型貨物 (バン)	842
乗用車	25
トラック	123
塵芥車	46
小型バス	5
大型バス	81
軽自動車	84
原付自転車	4
フォークリフト	7
合計	1,217

表 2.2.9-6 天然ガス自動車用ガス充填所の形態別内訳

形 態		数
昇圧供給装置		151
急速充填所	エコ・ステーション	21
	自家用充填所	16
	専用充填所	5
	合計	42

(2) クリーンエネルギー自動車の普及促進のための助成制度

表 2.2.9-7 国の助成制度(その1)

制度の名称	実施機関	制度の概要
低公害車普及推進事業費補助	環境庁	自動車NO _x 法特定地域又は公害防止計画地域を有する地方公共団体に補助。 補助率 低公害車(電気自動車、天然ガス自動車、メタノール自動車、ハイブリッド自動車)への改造費:1/2 各低公害車への燃料等供給施設の設置費:1/2
公害パトロールカー購入補助	環境庁	地方公共団体が、公害パトロールカーとして低公害車を導入する場合に購入費の一部を補助。 補助率 公害防止計画地域:基準額の1/2 その他の地域:基準額の1/3
公害健康被害補償予防協会の環境改善事業	環境庁、公害健康被害補償予防協会	「公害健康被害の補償等に関する法律」による対象地区に走行する自動車に、地方公共団体が低公害車を導入する際に要する費用の一部を補助。 補助率 1. 普及事業:地方公共団体に購入費・リース料を補助 電気自動車、ハイブリッド自動車:車種別定額 天然ガス自動車:リース料の1/2 メタノール自動車:車種別定額(リース料) メタノールスタンド:定額 2. 普及助成事業:地方公共団体が民間事業者に助成する場合、その一部(上記1.の1/2)を補助
天然ガス自動車普及促進対策事業	資源エネルギー庁、日本ガス協会	・天然ガス自動車購入者に対し天然ガス自動車への改造費を補助 補助率 改造費の1/2 ・燃料供給設備の設置に対し補助 補助率 整備費の2/3
電気自動車の普及促進対策補助	通商産業省	電気自動車の購入費補助 補助率 既存車との価格差の1/2
LPガス自動車転換補助	資源エネルギー庁、日本LPガス協会	自動車NO _x 法特定地域内で規制対象となる車両総重量6t以下のディーゼル貨物車のLPガス車への転換に対し補助 補助率 買替え及び改造費の1/2(10万円/台が限度)
地域新エネルギー等導入推進対策	資源エネルギー庁	新エネルギー(クリーンエネルギー自動車含む)の集中導入事業を実施する自治体に対し、導入費の1/2を補助

出所:各種資料より作成

表 2.2.9-8 国の助成制度(その2)

制度の名称	実施機関	制度の概要
クリーンエネルギー自動車普及基盤整備事業費補助 [エコ・ステーション2000計画]	資源エネルギー庁、 (財)エコ・ステーション推進協会	給油所に充電設備、CNG充填設備、メタノール充填設備、LPG充設備を併設する場合の設備費・運営費を補助 補助額 充電設備 : 3,300万円/カ所 CNG充填設備 : 5,300万円/カ所 メタノール充填設備 : 2,300万円/カ所 運営費 : 約200万円/カ所/年(3年間)
バス活性化システム整備費等補助金	運輸省	1. 低公害車普及促進事業(一般事業) 路線バス事業者に対し、自動車NOx法特定地域及び国立公園等において低公害車を導入する事業に要する費用を補助 補助率 国: 1/5、地方公共団体: 1/5 2. 先駆的事业 路線バス事業者に対し、我が国では未だ実施されていないバス活性化事業についての調査研究または実証に対し補助 補助率 国: 1/4、地方公共団体: 1/4
トラックに対する低公害車導入促進事業	運輸省、 全日本トラック協会、 地方トラック協会	トラック協会会員である貨物自動車運送事業者の低公害(メタノール、天然ガス、ディーゼル-電気ハイブリッド)トラックの導入に対し、リース料金を補助 補助率 全日本トラック協会より 1/4 地方トラック協会より 1/4
低公害車の導入に係わる地方交付税及び地方債による財源措置	自治省	・公害パトロール車 普通交付税に算入している公害パトロール車の車種を「電気自動車・メタノール車」に切り替え ・塵芥車 低公害車である塵芥車を購入する地方公共団体に対し廃棄物処理施設整備事業債(充当率100%)を許可し、当該経費のうち一般車よりも増高する経費見合分に対し特別交付税措置を実施 ・公営バス 低公害車バスを購入する公営企業に対し一般交通事業債(充当率100%)を許可し、経費の増加分に対して一般会計で負担し、一般会計に対して特別交付税措置を行う。
運輸事業振興助成交付金	自治省、トラック協会	各都道府県から軽油の使用実績に応じて、地方トラック協会に対して交付した助成金を財源とする地方トラック協会の補助事業。事業内容はターミナルの整備、共同休憩施設の整備等、広範に渡っており、トラック協会会員による低公害車導入に対する補助はそのメニューの一つ。

出所: 各種資料より作成

表 2.2.9-9 国の助成制度(その3)

制度の名称	実施機関	制度の概要
低公害自動車普及促進	日本開発銀行 北海道東北開発公庫	低公害車(電気、メタノール、天然ガス、ハイブリッド)及びそれらに係わる燃料等供給設備の取得者への融資。 ①日本開発銀行 特利3 (4.85%) 融資比率 40% ②北海道東北開発公庫 特利3 (4.85%) 融資比率 70%
自動車取得税の軽減措置 (地方税)	大蔵省	電気自動車、メタノール自動車、天然ガス自動車、ハイブリッド自動車を対象として自動車取得税を標準税額より2.4%軽減。 税率 営業用・軽自動車: 3%→0.6% 自家用 : 5%→2.6%
エネルギー需要構造改革投資促進税制 (低公害車の取得及び燃料供給施設の設置に対抗減価償却の特例または税額控除措置)(法人税、所得税)	大蔵省、 通産省	電気、メタノール、天然ガス及びハイブリッド自動車の取得、又はその燃料供給施設の設置に対して、以下の軽減措置を選択 (1998年3月31日まで) ・初年度30%の減価償却の特例 ・基準取得価格の7%の特別税額控除
地価税	大蔵省	課税価格の特例措置に電気、メタノール、天然ガスのスタンドの用の供する土地を追加 特定措置 地価税の課税価額を1/2とする
固定資産税	大蔵省	低公害車の燃料等供給設備について、固定資産税の課税標準の特例(2/3)を適用
特別土地保有税	大蔵省	低公害車の燃料等供給設備について、特別土地保有税を非課税とする。

出所：各種資料より作成

表 2.2.9-10 地方自治体の助成制度(その1)

制度の名称	実施機関	制度の概要
庁有車への低公害車導入補助	東京都、大阪 市、川崎市等	・公害健康被害補償予防協会の基金による助成 ・公害監視等（設備整備費補助の利用）
彩の国環境創造資金	埼玉県	・対象者：中小企業者、組合 ・電気自動車、メタノール自動車などの購入に対し補助
低公害車導入促進補助金	埼玉県	・対象者：(社)県トラック協会 ・メタノール自動車のリース料に対する助成
低公害車購入資金融資	埼玉県	・対象者：中小企業 ・低公害車の購入資金について低利融資
低公害車導入促進事業	千葉県	・対象者：市町村（千葉市を除く）、事務組合 ・電気自動車、ハイブリッド自動車、メタノール自動車、 天然ガス自動車等の低公害車の購入に対し補助
低公害車導入促進補助金	千葉市	・電気自動車、ハイブリッド自動車、電動スクーターの購入資金 の補助 ・ディーゼル車からの買い換え費用の補助 ・メタノール自動車、天然ガス自動車のリース費用の補助
電気自動車導入補助	東京都	・対象者：公益法人 ・電気自動車の購入費の1/2を補助
トラックのリース料補助	東京都	・対象者：東京都トラック協会加盟会社 ・メタノールトラック及びハイブリッドトラックのリース 料を補助
低公害バス導入補助	東京都	・対象者：交通局、民間バス事業者 ・ハイブリッドバス、CNGバスの購入に対し補助
LPG清掃車導入補助	東京都	・対象者：民間清掃事業者 ・LPG清掃車と通常の購入価格の差額を補助
府トラック協会への助成 （低公害車導入促進事業）	大阪府	・対象者：(社)大阪府トラック協会 ・天然ガス自動車、メタノール自動車のリース料に対し補助
民営路線バス事業者への助成 （低公害バス導入事業）	大阪府	・対象者：民間路線バス事業者 ・ハイブリッドバスの購入に対し補助
低公害車購入資金融資	大阪府	・対象者：中小企業 ・低公害車購入資金の低利融資
県トラック協会への助成	愛知県	・対象者：(社)愛知県トラック協会 ・メタノール自動車リース料及びメタノール簡易スタ ンド設置費に対し助成

表 2.2.9-11 地方自治体の助成制度(その2)

制度の名称	実施機関	制度の概要
環境改善事業に係る施設等整備助成事業	横浜市	・対象者：民間事業者 ・電気自動車の購入、メタノール自動車のリース料、燃料供給施設の設置に対し助成
環境改善事業に係る施設等整備助成事業	川崎市	・対象者：民間事業者 ・電気自動車の購入、メタノール自動車のリースに対し助成
低公害車の導入補助	名古屋市	・対象者：民間事業者 ・電気自動車、メタノール自動車、天然ガス自動車の購入／リースに対し補助
低公害自動車購入資金融資	大阪市	・対象者：中小企業 ・業務用貨物・バス用車両で電気自動車の購入、メタノール、ハイブリッド車への買替えに対し低利融資
低公害車普及助成制度	大阪市	・対象者：市内事業者 ・電気自動車の購入に対し補助 ・ハイブリッド車等の低公害車への買替えに対し補助 ・天然ガス自動車、メタノール自動車のリースに対し補助
環境改善事業施設等整備助成	神戸市	・対象者：市内事業者 ・電気自動車の購入、メタノール自動車のリースに対し補助
低公害車普及促進助成制度	板橋区	・対象者：一般事業者及び運送事業者 ・メタノール自動車、天然ガス自動車、電気自動車の購入・リースに対し補助

出所：各種資料より作成

(3) 水素燃料電池自動車の導入シナリオの数値データ

表2.2.9-12 新規登録車両に占める水素燃料電池自動車のシェア(単位: %)

	普及台数 (万台)	使用年数 (年)	年間市場 (万台)	2005	06	07	08	09	2010	11	12	13	14	2015	16	17	18	19	2020	21	22	23	24	2025	26	27	28	29	2030
路線バス	6	12	0.5	1	1.5	2.5	4	6	8	10	12.5	15	17.5	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
ゴミ収集車	5	10	0.5	1	1.5	2.5	4	6	8	10	12.5	15	17.5	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
4トトラック	80	10	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2トトラック	400	10	40	0	0	0	0	0	0.2	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8.5	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
小型バン	350	10	35	0.02	0.025	0.05	0.2	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
軽バン	1100	8	138	0.002	0.004	0.008	0.015	0.03	0.05	0.10	0.2	0.4	0.7	1	1.2	1.4	1.6	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	7	8	9	10
乗用車	4100	10	410	0.001	0.002	0.003	0.007	0.01	0.015	0.025	0.05	0.075	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8.5	10
軽乗用車	740	8	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
タクシー	26	5	5.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	6	9	12	15	18	21	24	27.3	30.6	34	38	42	46	50
計	6807		729.2																										

表2.2.9-13 水素燃料電池自動車の新規導入台数(単位: 万台)

	2005	06	07	08	09	2010	11	12	13	14	2015	16	17	18	19	2020	21	22	23	24	2025	26	27	28	29	2030
路線バス	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
ゴミ収集車	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
4トトラック	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.12	0.16	0.24	0.32	0.4	0.48	0.56	0.64	0.72	0.8
2トトラック	0	0	0	0	0	0.08	0.2	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.4	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8	8.8	9.6	10.4	11.2	12
小型バン	0.007	0.01	0.02	0.07	0.18	0.35	0.53	0.7	1.05	1.4	1.75	2.1	2.45	2.8	3.15	3.5	4.2	4.9	5.6	6.3	7	7.7	8.4	9.1	9.8	10.5
軽バン	0.003	0.01	0.01	0.02	0.04	0.07	0.14	0.28	0.55	0.96	1.38	1.65	1.93	2.2	2.75	3.44	4.13	4.81	5.5	6.19	6.88	8.25	9.63	11	12.4	13.8
乗用車	0.0041	0.0082	0.0123	0.0287	0.041	0.0615	0.1025	0.205	0.3075	0.41	0.615	0.82	1.025	1.23	1.435	2.05	4.1	6.15	8.2	12.3	16.4	20.5	24.6	28.7	34.9	41
軽乗用車	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46	0.93	1.85	2.78	3.7	4.63	5.55	6.48	7.4	8.33	9.25
タクシー	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.21	0.31	0.47	0.62	0.78	0.94	1.09	1.25	1.42	1.59	1.77	1.98	2.18	2.39	2.6
計	0.02	0.04	0.07	0.16	0.32	0.64	1.07	1.71	2.86	4.15	5.68	7.05	8.41	9.82	11.7	14.6	19.5	24.9	30.3	37.8	45.3	53.5	61.7	69.9	80.1	90.4

表2.2.9-14 水素燃料電池自動車の普及台数(単位: 万台)

保有台数(万台)	2005	06	07	08	09	2010	11	12	13	14	2015	16	17	18	19	2020	21	22	23	24	2025	26	27	28	29	2030	シェア
路線バス	0.005	0.0125	0.025	0.045	0.1	0.12	0.17	0.23	0.3	0.39	0.49	0.6	0.72	0.84	0.97	1.1	1.23	1.36	1.49	1.61	1.74	1.86	1.98	2.1	2.22	2.34	39
ゴミ収集車	0.005	0.0125	0.025	0.045	0.075	0.12	0.17	0.23	0.3	0.39	0.49	0.59	0.7	0.81	0.92	1.03	1.14	1.24	1.35	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85	1.95	2.05	41
4トトラック	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.09	0.14	0.21	0.28	0.36	0.48	0.64	0.88	1.2	1.56	1.99	2.5	3.07	3.72	4.44	6
2トトラック	0	0	0	0	0	0.08	0.28	0.68	1.48	2.68	4.28	6.28	8.68	11.5	14.9	18.8	23.4	28.6	34.2	40.2	46.6	53.4	60.6	68.2	76	84	21
小型バン	0.007	0.0158	0.0333	0.1033	0.28	0.63	1.15	1.85	2.9	4.3	6.05	8.14	10.6	13.3	16.3	19.4	23.1	27.3	31.9	36.8	42	47.6	53.6	59.9	66.5	73.5	21
軽バン	0.0028	0.0083	0.0193	0.0399	0.08	0.15	0.29	0.56	1.11	2.07	3.43	5.06	6.94	9.08	11.7	14.9	18.4	22.3	26.4	30.9	35.9	41.9	48.8	56.4	64.6	73.6	7
乗用車	0.004	0.0123	0.0246	0.0533	0.09	0.16	0.26	0.46	0.77	1.18	1.79	2.6	3.62	4.82	6.21	8.2	12.2	18.1	26	37.9	53.7	73.4	97	124	158	197	5
軽乗用車	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46	1.39	3.24	6.01	9.71	14.3	19.9	26.4	33.3	40.7	48.1	7
タクシー	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.31	0.62	1.09	1.72	2.39	3.12	3.9	4.68	5.48	6.29	7.12	8	8.94	9.91	10.9	42
計	0.02	0.06	0.13	0.29	0.6	1.24	2.31	4.01	6.87	11	16.7	23.7	32	41.6	52.9	66.6	84.5	107	133	165	204	249	301	358	423	496	7.3

表2.2.9-15 水素燃料電池自動車の走行量(単位: 10⁵台/km/年)

		年間走行距離																											
		(km/台)																											
		2005	06	07	08	09	2010	11	12	13	14	2015	16	17	18	19	2020	21	22	23	24	2025	26	27	28	29	2030		
路線バス	50,000	0.03	0.06	0.13	0.23	0.38	0.58	0.83	1.14	1.51	1.95	2.45	3	3.58	4.19	4.83	5.48	6.13	6.78	7.43	8.06	8.69	9.3	9.9	10.5	11.1	11.7		
ゴミ収集車	10,000	0.01	0.01	0.03	0.05	0.08	0.12	0.17	0.23	0.3	0.39	0.49	0.59	0.7	0.81	0.92	1.03	1.14	1.24	1.35	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85	1.95	2.05		
4tトラック	40,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.16	0.35	0.58	0.83	1.12	1.44	1.92	2.56	3.52	4.8	6.24	7.97	9.98	12.3	14.9	17.8			
2tトラック	20,000	0	0	0	0	0	0.16	0.56	1.36	2.96	5.36	8.56	12.6	17.4	23	29.8	37.6	46.8	57.2	68.4	80.4	93.2	107	121	136	152	168		
小型バン	15,000	0.01	0.02	0.05	0.15	0.42	0.94	1.73	2.78	4.35	6.45	9.07	12.2	15.9	20	24.4	29.1	34.7	41	47.8	55.1	63	71.4	80.3	89.8	99.8	110		
軽バン	10,000	0	0.01	0.02	0.04	0.08	0.15	0.29	0.56	1.11	2.07	3.43	5.06	6.94	9.08	11.7	14.9	18.4	22.3	26.4	30.9	35.9	41.9	48.8	56.4	64.6	73.6		
乗用車	10,000	0	0.01	0.02	0.05	0.09	0.16	0.26	0.46	0.77	1.18	1.79	2.6	3.62	4.82	6.21	8.2	12.2	18.1	26	37.9	53.7	73.4	97	124	158	197		
軽乗用車	7,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.32	0.97	2.27	4.21	6.8	10	13.9	18.5	23.3	28.5	33.7		
タクシー	70,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.73	2.18	4.37	7.64	12	16.7	21.8	27.3	32.8	38.3	44	49.8	56	62.6	69.4	76.4			

表2.2.9-16 水素燃料電池自動車による水素消費量(単位: 10⁶Nm³/年)

	ICE車		水素																										
	燃費	F C 車 燃費	消費率																										
	(km/l)	(km/l)	2005	06	07	08	09	2010	11	12	13	14	2015	16	17	18	19	2020	21	22	23	24	2025	26	27	28	29	2030	
路線バス	3	6.6	0.515	0.01	0.03	0.06	0.12	0.19	0.3	0.43	0.59	0.78	1	1.26	1.55	1.84	2.16	2.49	2.82	3.16	3.49	3.83	4.16	4.48	4.79	5.1	5.41	5.72	6.03
ゴミ収集車	5	11.0	0.309	0	0	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.25	0.28	0.32	0.35	0.38	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.6	0.63
4 tトラック	4	8.8	0.387	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.14	0.22	0.32	0.43	0.56	0.74	0.99	1.36	1.86	2.41	3.08	3.86	4.75	5.75	6.86
2 tトラック	6	13.1	0.258	0	0	0	0	0	0.04	0.14	0.35	0.76	1.38	2.21	3.24	4.47	5.92	7.67	9.69	12.1	14.7	17.6	20.7	24	27.5	31.2	35.1	39.2	43.3
小型バン	8	25.0	0.123	0	0	0.01	0.02	0.05	0.12	0.21	0.34	0.54	0.8	1.12	1.5	1.95	2.46	3.01	3.59	4.27	5.05	5.89	6.79	7.77	8.8	9.9	11.1	12.3	13.6
軽バン	11	34.4	0.090	0	0	0	0	0.01	0.01	0.03	0.05	0.1	0.19	0.31	0.45	0.62	0.81	1.05	1.33	1.65	2	2.37	2.77	3.22	3.76	4.38	5.05	5.79	6.59
乗用車	10	31.3	0.099	0	0	0	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.12	0.18	0.26	0.36	0.48	0.61	0.81	1.2	1.79	2.57	3.74	5.3	7.24	9.56	12.3	15.6	19.4
軽乗用車	12	37.5	0.082	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.08	0.19	0.35	0.56	0.82	1.14	1.52	1.92	2.34	2.77	
タクシー	9	28.1	0.110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0.24	0.48	0.84	1.32	1.83	2.39	2.99	3.59	4.2	4.82	5.46	6.14	6.86	7.6	8.37
計			0.02	0.04	0.08	0.16	0.28	0.52	0.88	1.45	2.35	3.6	5.36	7.55	10.2	13.2	16.9	21	25.9	31.6	38	45.2	53.3	62.3	72.2	83	94.8	108	

表2.2.9-17 水素ステーション数とステーション1ヶ所当たりの車両数および水素消費量

項目	ステーション数												ステーション1ヶ所当たりの車両数												水素消費量													
	2005	06	07	08	09	2010	11	12	13	14	2015	16	17	18	19	2020	21	22	23	24	2025	26	27	28	29	2030												
ステーション数 (ヶ所)	20	40	70	110	160	240	360	520	750	1,000	1,300	1,600	1,900	2,200	2,500	2,800	3,100	3,400	3,700	4,000	4,300	4,600	4,900	5,200	5,500	5,800												
ステーション建設数 (ヶ所/年)	20	20	30	40	50	80	120	160	230	250	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300												
車両数 (万台)	0.02	0.06	0.13	0.29	0.6	1.24	2.31	4.01	6.87	11	16.7	23.7	32	41.6	52.9	66.6	84.5	107	133	165	204	249	301	358	423	496												
1ヶ所当たり車両数 (台/ヶ所)	11.9	15.3	18.2	26	37.7	51.8	64.1	77.2	91.6	110	128	148	168	189	212	238	272	314	359	413	474	541	613	689	770	855												
水素消費量 (10 ⁶ Nm ³ /年)	1.64	4.09	8.25	15.8	28.4	51.8	88.5	145	235	360	536	755	1017	1323	1686	2098	2591	3162	3799	4524	5331	6230	7223	8304	9484	10755												
1ヶ所当たり水素消費量 (Nm ³ /日/ヶ所)	248	310	357	435	539	654	745	843	949	1092	1250	1431	1621	1822	2043	2270	2533	2818	3111	3427	3757	4104	4467	4839	5225	5619												

表2.2.9-18 水素燃料電池自動車の普及によるCO₂排出削減量

	2005	06	07	08	09	2010	11	12	13	14	2015	16	17	18	19	2020	21	22	23	24	2025	26	27	28	29	2030
水素消費量 (10 ⁶ Nm ³ /年)	1.64	4.09	8.25	15.8	28.4	51.8	88.5	145	235	360	536	755	1017	1323	1686	2098	2591	3162	3799	4524	5331	6230	7223	8304	9484	10755
天然ガス消費量 (10 ⁶ Nm ³ /年)	0.59	1.47	2.97	5.68	10.2	18.7	31.9	52	84.5	130	193	272	366	476	607	755	933	1138	1368	1629	1919	2243	2600	2989	3414	3872
水素FC車CO ₂ 排出量 (10 ³ t/年)	0.5	1.24	2.5	4.79	8.63	15.7	26.9	43.9	71.2	109	163	229	308	401	511	636	786	959	1153	1373	1617	1890	2191	2520	2877	3263
被代替車のガソリン消費量(10 ⁶ L/年)	0.2	0.5	1.0	2.8	6.9	14.7	26.8	44.5	72.2	###	162	225	297	380	474	584	731	915	1133	1406	1734	2124	2571	3073	3650	4295
被代替車の軽油消費量(10 ⁶ L/年)	0.9	2.3	4.7	8.4	14.0	24.1	40.1	65.1	106	162	238	330	437	559	703	866	1055	1268	1502	1758	2030	2322	2635	2968	3314	3675
被代替車のLPG消費量(10 ⁶ L/年)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	31.5	62.9	110	173	241	315	393	472	552	634	718	807	902	1000	1102
被代替車CO ₂ 排出量(10 ³ t/年)	0.91	2.26	4.57	8.92	16.5	30.4	52.3	85.6	139	214	319	450	608	794	1014	1264	1566	1917	2310	2762	3269	3837	4467	5157	5915	6736
CO ₂ 排出削減量(10 ³ t/年)	0.41	1.02	2.07	4.13	7.83	14.7	25.5	41.8	67.8	104	156	221	300	392	502	628	780	958	1158	1389	1651	1947	2276	2638	3037	3473

表2.2.9-19 各種燃料の発熱量(LHV)

水素発熱量	2,580 kcal/Nm ³
ガソリン発熱量	7,950 kcal/l
軽油発熱量	8,736 kcal/l
LPG発熱量	6,130 kcal/l

表2.2.9-20 各種燃料の利用に伴うCO₂排出量

	天然ガス (LNG)	ガソリン	軽油	LPG
国外CO ₂	12.9 g-C/McalH	1.42 g-C/McalH	1.42 g-C/McalH	6.99 g-C/McalH
国外メタン	7.19 g-C/McalH	2.36 g-C/McalH	2.36 g-C/McalH	3.87 g-C/McalH
国内燃焼	56.4 g-C/McalH	76.6 g-C/McalH	78.4 g-C/McalH	68.3 g-C/McalH
国内燃焼以外	2.06 g-C/Nm ³	55.4 g-C/L	59.9 g-C/L	14.2 g-C/L
	0.19 g-C/McalH	6.59 g-C/McalH	6.51 g-C/McalH	2.12 g-C/McalH
計	76.6 g-C/McalH	87 g-C/McalH	88.7 g-C/McalH	81.3 g-C/McalH

注：メタンは温暖化係数=21 としてCO₂に換算

(4) 引用文献

- [1] 渡辺正五, 「燃料電池 EV の開発状況と課題」, 金属学会セミナー・テキスト 未来自動車のゆくえ, (社)日本金属学会, 平成 10 年 11 月.
- [2] 環境庁, 「低公害車等排出ガス技術指針策定調査検討会 第一次報告」, 平成 10 年 6 月.
- [3] (財)エンジニアリング振興協会, 「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) サブタスク 7 水素利用技術に関する調査・検討」平成 9 年度成果報告書, 平成 10 年 3 月.
- [4] D. B. Bell, et al., "Ford's R&D Activities on Direct-Hydrogen PEM Fuel Cell Systems", The 15th International Electric Vehicle Symposium, October 1998.
- [5] 運輸省, 「自動車輸送統計年報」(平成 9 年度分), 第 35 巻, 第 13 号, 平成 10 年 10 月.
- [6] 「総合エネルギー統計(平成 10 年度版)」, 資源エネルギー庁編, 平成 11 年 3 月.
- [7] (株)三菱総合研究所, 「新エネルギー技術開発関係データ集作成調査」平成 9 年度成果報告書, 平成 10 年 3 月.

2.3 水素燃料電池自動車のLCA

2.3.1 はじめに

燃料電池の出力密度が近年飛躍的に向上し、モーター駆動自動車の電力源としてのポテンシャルが高くなってきたことがあり、石油代替エネルギー、低公害・高効率自動車として燃料電池自動車への期待が高まってきた。

現在、各国の自動車会社で各種の燃料電池自動車の研究開発が盛んに行なわれはじめている。2004年には市場に燃料電池自動車を送り出すという企業も少なくない。

本研究では、石油代替あるいはポスト石油を考え、再生可能エネルギーと天然ガスを一次エネルギーとする水素を搭載する水素燃料電池自動車についてライフサイクルでのエネルギー消費や二酸化炭素排出の検討を行なう。

2.3.2 燃料電池自動車について

ガソリン自動車は原動機として内燃機関（オットサイクル）を用いている。内燃機関の熱効率はカルノ効率を越えることはできず、部分負荷（負荷率 $\ll 1$ ）ではさらに低下するので一般に市街地走行の効率は低くなりがちである。反面、燃料のエネルギー密度は高いので航続距離が長く、燃料補給に要する時間も短いので利便性に優る。一方、電気自動車は電力源として二次電池を、原動機としてモーターを用いる。電池やモーターの効率は高く、負荷率（=負荷/最大負荷）の変動に対して性能は大きく変化しないので市街地走行の効率は高い。反面、電池のエネルギー密度は低いため航続距離が短く、充電時間も長いので利便性に劣る。

これに対して、燃料電池自動車は、図 2.3.2-1 に示すように二次電池の代わりに電力源として燃料電池、原動機としてモーターを用いる車両である。燃料電池電気自動車とも呼ばれる所以である。電気自動車同様、モーターの効率は高く、燃料電池は部分負荷効率が高いので市街地走行の効率は高い。また、エネルギーの補給は燃料補給の形態になるのでガソリン自動車と同様の利便性を得ることも可能である。すなわち、電気自動車の高効率とガソリン自動車の利便性を兼ね備えた自動車とすることが可能と考えられている。

(1) 燃料電池について

電気自動車の二次電池は、外部から充電することによって蓄えられた化学物質のエネルギーを利用するため、起電反応の進行により化学物質のエネルギーが減少すると最終的には起電反応が起こらなくなる。一方燃料電池では、図 2.3.2-2 に示すように化学物質を連続的に供給することにより、起電反応を連続して起こすことができる。したがって、航続距離の制限は電池の搭載量ではなく、燃料の搭載量に左右されることになる。

燃料電池のエネルギー密度は二次電池に比べ大きいので、航続距離が延びることやエネルギー補給の時間が大幅に短縮されることが期待できる。

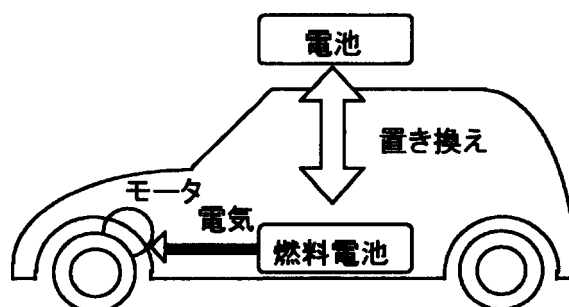


図2.3.2-1 燃料電池自動車のイメージ

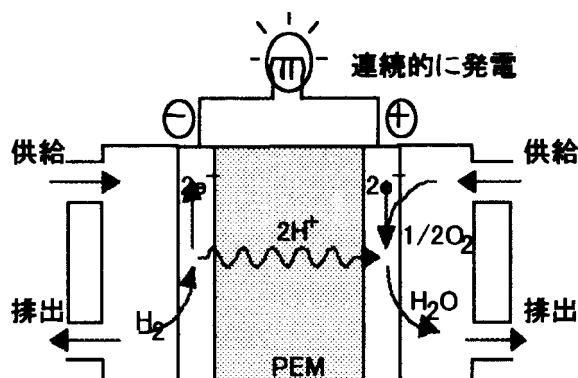


図2.3.2-2 燃料電池のしくみ (PEFC の例)

燃料電池は電解質の違いによって大きく4種類に分けられる。本稿ではPEFCを前提に検討する。

近年、PEFCの出力密度は、図2.3.2-3に示すように向上し、自動車用燃料電池の出力密度の目安である1kW/リットルを越え、実用可能な領域に達しつつある。また、PEFCのコストを支配してきた白金の使用量も大幅に減少してきており、将来さらに低減が可能という見通しがある。

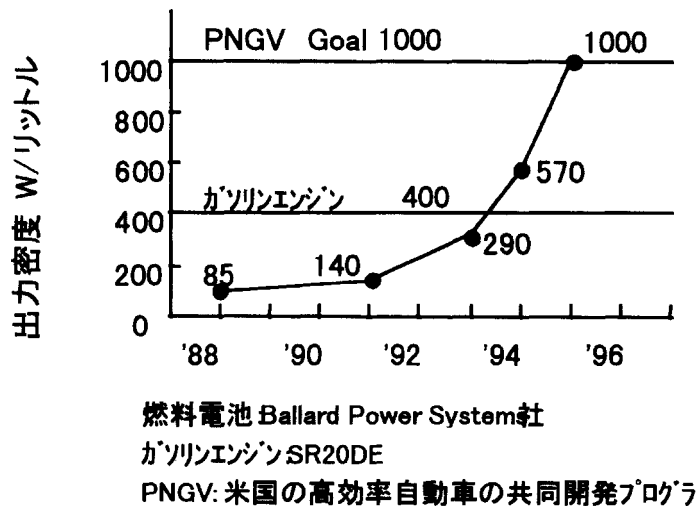


図2.3.2-3 PEFC の出力密度向上の推移

(2)燃料供給システムについて

燃料電池において直接電極で反応を起こす化学物質は水素である。水素は常温常圧で気体のため、エネルギー密度は低い。エネルギー密度が低いと車載できるエネルギーが小さくなり、電気自動車と同じように航続距離が伸びないという問題を生じる。そこで、水素のエネルギー密度をどのように高めて車載するかが燃料電池自動車の課題となる。

一つの方法は水素を高密度化して車載する方法であり、高圧水素、液体水素および水素吸蔵合金を用いる方法などが考えられている。高圧水素や液体水素では高圧や極低温に耐え、なおかつ軽量である特殊な容器が必要となる。また吸蔵合金では有効水素吸蔵量の増大（軽量化の問題を含む）が課題となる。

他の方法として、水素を車載するのではなくエネルギー密度の高い炭化水素を車載し、車上で炭化水素を改質し水素リッチな改質ガスを生成し燃料電池に供給するシステムが考えられている。利用される炭化水素としては、天然ガス、メタノールそしてガソリン（ナフサ）などが考えられている。図 2.3.2-4 にメタノール燃料電池自動車の構成を示す。水素燃料電池自動車に対して新たに改質器が必要となる。改質ガスには水素以外に二酸化炭素や水が含まれるが、僅かに含まれる一酸化炭素が燃料電池の触媒性能を劣化させるという問題がある。対策として、改質装置の後処理で一酸化炭素を低減する方法と、燃料電池の電極の一酸化炭素耐性を向上する技術などが開発されている。

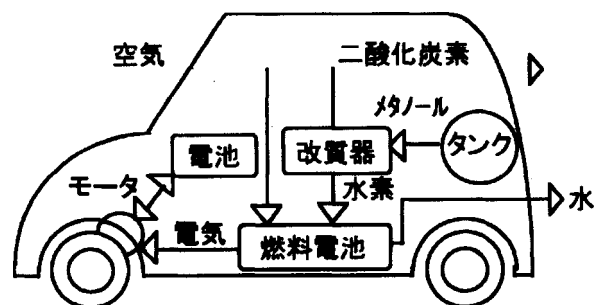


図2.3.2-4 メタノール改質燃料電池自動車

2.3.3 燃料電池自動車の開発状況

燃料電池自動車に関する研究開発の経緯をまとめると表 2.3.3-1 のようになる。燃料電池自動車のプロトタイプが開発された当初は、燃料電池の車両への適合性を実証する意味合いが強く、燃料供給システムが簡素ですむ水素を利用するタイプが多かったと思われる。近年のプロトタイプ車では、燃料電池の性能が現実味を帯びてきたことから、燃料のハンドリングのし易さや航続距離の長さなど、自動車としての利便性が考えられはじめ、メタノールなどの炭化水素を利用するタイプの開発が増加していると考えている。

表2.3.3-1 燃料電池自動車の開発状況

発表 N	'95	'96	'97	'97
メーカー	BPS	Benz	トヨタ	Benz
車種	バス	ミニバン	RV	乗用車
車載燃料	純水素	純水素	メタノール	メタノール
供給システム	高圧タンク	高圧タンク	改質	改質
燃料電池	PEFC			

水素燃料電池自動車には改質器が不要であるためシステムが簡単でコンパクトになるため、スペースが限られている自動車への搭載性が比較的よい。さらに、改質を必要としないので比較的短時間で始動することが可能である。しかし、エネルギー密度が比較的低い水素を車載することになるのでいまのところ航続距離の長さが課題となっている。一方、メタノール燃料電池自動車などの液体の炭化水素を車載する燃料電池自動車では、改質器、一酸化炭素除去装置、改質用の水などが必要となりシステムが比較的複雑になり、結果として、燃料電池システムがかさばることになり搭載スペースが問題になる。また、いまのところ改質には数分以上の時間が必要で始動までに時間がかかるという課題がある。した

がって現時点ではどちらが最初に実用化、あるいは商業化されるかは微妙であると思われる。この選択は、燃料の供給インフラも考慮に入れて考えられるべきと考えている。本研究では、燃料のインフラには触れないのでこの問題の解答を出すことはできない。最後にも述べるが今後の課題としたい。

2.3.4 検討の概要

本研究では燃料電池自動車の一次エネルギー消費と二酸化炭素排出量に関するライフサイクルアセスメント（LCA）を行なう。実際には環境負荷を定量評価するだけなのでISO14040に則っていうと一次エネルギー消費と二酸化炭素排出に関するライフサイクルインベントリー（LCI）の計算を行なうことになる。以下ではLCAとLCIを区別して用いない。

(1)自動車のLCAについて

LCAでは製品の一生涯を通した環境影響を評価する。図2.3.4-1に自動車のライフサイクルを示す。自動車という製品では自動車製造段階に始まり使用段階を経て廃棄に至る一生涯を通した環境影響を評価することになる。本研究においては、自動車製造段階では原材料製造段階と部品や自動車の加工・組立段階を評価対象とする。使用段階では走行段階と走行に必要なエネルギーの製造段階（エネルギーの採掘から自動車への充填まで）を評価する。この燃料製造から走行までをエネルギーフローに沿ったLCAと呼ぶことにする。使用段階では維持管理も評価（オイルやタイヤなどの定期的な交換部品の製造時のエネルギー消費や排出物を評価）することがあるが、本研究では省略する。また、廃棄段階ではシュレッダー処理および埋め立て段階を評価し、リサイクルは考慮しない。

理解のし易さを考え、まず、使用段階のエネルギーフローに沿ったLCAを説明し、その後自動車の製造段階も含むLCA（以降エネルギーフローに沿ったLCAに対し単にLCAまたは自動車の製造を含むLCAと呼ぶことにする）を紹介することにする。

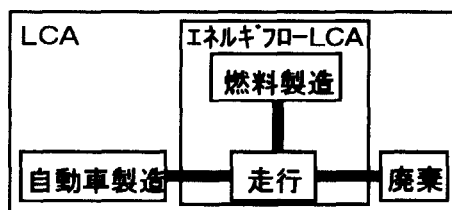


図2.3.4-1 自動車のライフサイクル

(2)検討車両の概要

図2.3.4-2に本研究で評価対象とした自動車のうち、天然ガス自動車を除く自動車についてその構成の概要を示す。ガソリン車のみ現行のガソリン車とした。他は、天然ガス自動車を含め2010年頃の実用化を想定し、今後、燃費性能や二酸化炭素排出性能が改善され

るとした。もちろんガソリン車においても今後エンジンの効率を含めさらに性能が向上していくことは論を待たない。本研究では研究の枠組みとして、最初に述べたように石油代替エネルギー、ポスト石油を考えている。したがって石油系自動車と将来時点で優劣をつけることを目的にしていない。今回対象とした自動車の性能を把握することが研究の目的であり、その目安として現行のガソリン車の性能を参考に用いる。なお、ガソリン車以外は制動回生（エネルギー回生）可能な仕様とした。

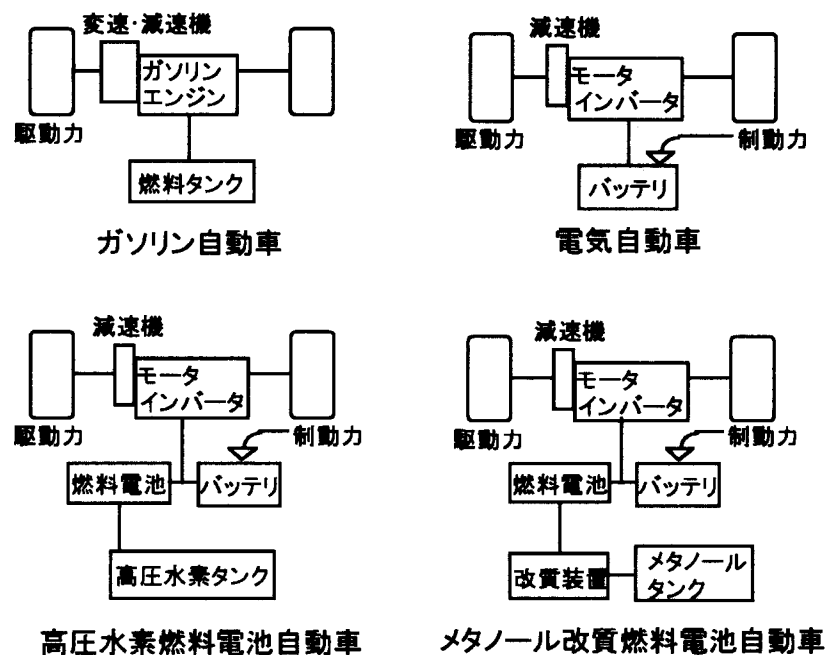


図2.3.4-2 各種自動車のシステム構成

車両の諸元は現行ガソリン車でいう次のようになる。

排気量：1,500cc

乗車定員：5人乗り

車両重量：1,040kg

燃費：10-15モード燃費で16.5 km/l

なお、天然ガス自動車のエンジンの排気量はガソリン車と同じ1,500ccとした。ただし、パラレルハイブリッド仕様とし、エネルギー回生可能とした。

また、電気自動車（EV）はモーター出力を最大定格で50kWとした。二次電池はリチウムイオン電池（出力密度400W/kg、エネルギー密度150Wh/kg）とし360kgを搭載する。航続距離は400km以上が期待できる。

本研究の直接的な対象である水素燃料電池自動車では、高圧タンク仕様、水素吸蔵合金

仕様そして液体水素タンク仕様を評価した。水素燃料電池自動車、メタノール燃料電池自動車ともに燃料電池 25kW、二次電池 25kW の計 50kW とした。二次電池はリチウムイオン電池（出力密度 700W/kg、エネルギー密度 50Wh/kg）とし 40kg を搭載する。モーター出力は電気自動車同様、最大定格で 50kW とした。航続距離は、300km 以上を想定したが、具体的には、水素燃料電池自動車の高圧タンク仕様、水素吸蔵合金仕様で 300km 以上、液体水素使用ではガソリン車と同等の航続距離を想定した。メタノール改質燃料電池自動車ではガソリン車と同等量のタンクで現行ガソリン車と同等の航続距離が可能と考えている。しかし、先に述べたように、メタノール燃料電池自動車は現行の自動車にメタノール改質燃料電池システムを搭載しようとするスペースが十分でないという課題がある。メタノール燃料電池自動車では床下にシステムを配置することなども考えられており、水素燃料電池自動車と姿が異なる可能性もある。“燃料電池システムのスペース”＋“燃料タンクのスペース”で考えると水素燃料電池自動車ももっと大量の水素を積んだ仕様にすることも可能である。このように両タイプとも車両の仕様がまだ固まっていないので、今回は航続距離を積極的に同じにして評価することはしなかった。

検討した各自動車のシステムごとの重量仮定と現行ガソリン自動車に対する重量増加の模様を表 2.3.4-1 に示す。高圧水素タンク仕様の水素燃料電池自動車を例にとると、現行のガソリン車から内燃機関、AT（自動変速機）および燃料タンクを除いた上で燃料電池、モーターそして高圧水素タンクなどのシステム（装備）を加えることで重量差を求めた。すなわち、現行ガソリン車のエンジン、変速機および燃料タンク以外は各自動車で共通とした。現行ガソリン車の重量はほぼ現実のものであるが、他の自動車の各システム重量はあくまでも想定であり、現行ガソリン車に比べるとかなり甘い見積もりとなっているといわざるを得ない。

(3)検討した燃料プロセス

図 2.3.4-3 に燃料電池自動車と一次エネルギーおよび車載エネルギー（二次エネルギー）の関係を示した。車両に搭載するエネルギーとして水素を選んでも水素は二次エネルギーであるからいろいろな一次エネルギーが考えられる。本研究では、石油代替、ポスト石油を研究のメインフレームにしている。そこで、候補となる一次エネルギーとして水力や太陽光などの再生可能エネルギーと天然ガスを選んだ。一次エネルギーが決まっても一次エネルギーから車載エネルギーまでの燃料製造段階のプロセス（途中のパス）が異なると燃料を製造するのに必要なエネルギーなどが異なることになる。例えば、再生可能エネルギーを一次エネルギーとして選んでも電解により得た水素を車載する場合と、電解後、水素を輸送し易いメタノールに一旦転換して車載する前に再び水素に改質するケースでは同じ水素といっても燃料製造段階のエネルギー消費などが異なることが予想される。このように、燃料製造プロセスが異なる燃料を車載する自動車を比較するときには、エネルギーフローに沿った LCA が必須になる。

表2.3.4-1 車両別システム重量

	現行車	CNG-HEV	EV	CH-FCV	MH-FCV	LH-FCV	メタノールFCV	ナフサFCV
ENG.,AT,タンク以外	805	805	805	805	805	805	805	805
ENG.	160	160						
改質器							50	50
燃料電池				40	40	40	40	40
ブローア				30	30	30	30	30
配管等				10	10	10	10	10
モータ		40	40	40	40	40	40	40
インバータ		15	15	15	15	15	15	15
DC-DC			5	5	5	5	5	5
発電機		17						
J/B & ハーネス		10	10	10	10	10	10	10
AT	68							
CVT		38						
ギア			30	30	30	30	30	30
タンク	10	50		50	80	80	10	10
電池		40	360	40	40	40	40	40
電池トレイ		10	50	10	10	10	10	10
総車両重量	1043	1185	1315	1085	1115	1115	1095	1095
現行車との重量差		142	272	42	72	72	52	52

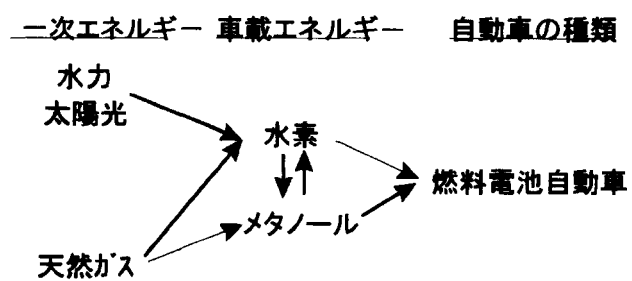


図 2.3.4-3 燃料電池自動車とエネルギー

各種燃料電池自動車について、図 2.3.4-4 にエネルギーフロー（プロセスの流れ）を示す。

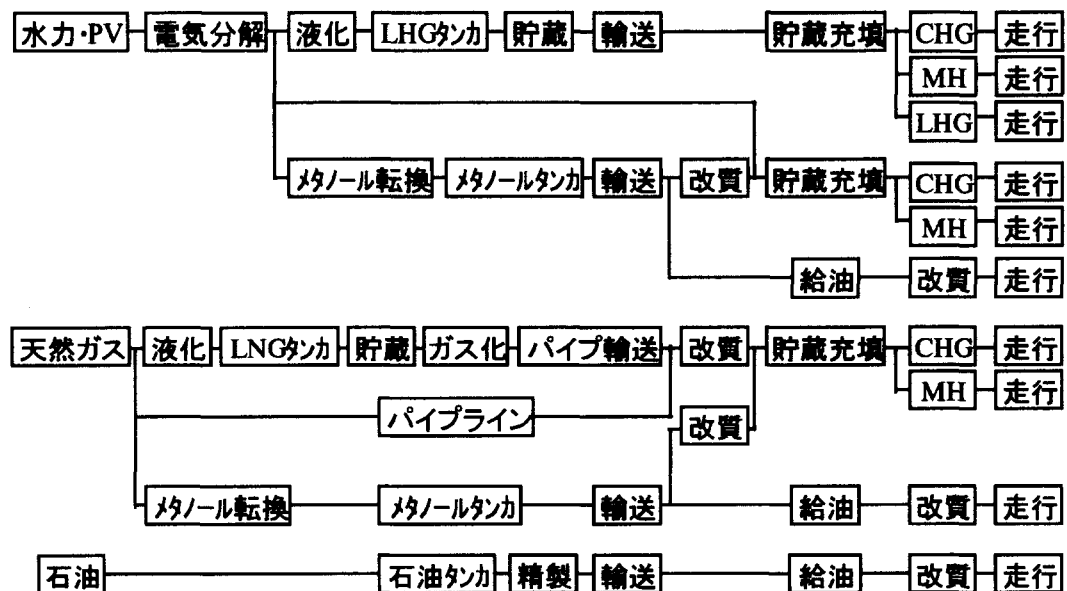


図 2.3.4-4 燃料電池自動車のエネルギーフロー

対象とした燃料電池自動車と一次エネルギーおよび車載エネルギーの組み合わせは以下のとおりである。

a. 水素燃料電池自動車

- ①カナダなどの水力発電で固体高分子型電解により水素をつくり液化してタンカーで日本へ運ぶ。日本では液体水素をタンクに移しタンクローリでスタンドまで移送し、そのタンクをスタンドでも使うケース。燃料貯蔵（車載）方式は、高压タンク、吸蔵合金、液体タンクの3方式を対象とした。液体水素タンクを搭載する仕様は、水素の液化でのエネルギーロスが比較的大きく、また、車両の液化水素タンクに充填するときも他の水素搭載方法に比べ比較的能量ロスが大きいことがあり本ケースでのみ検討することにした。
- ②スタンドに設置した太陽電池で発電し水素をつくり定置の高压タンクに蓄えて貯蔵するケース。燃料貯蔵（車載）方式は、高压タンク、吸蔵合金の2方式を対象とした。このケースは土地確保、日照度などの点で日本での実施は難しいと考えられているが、比較の意味で検討した。
- ③①のケースで水電解で得た水素をメタノールへ転換しタンカーで日本へ運びスタンドで再び水素に戻して使用するケース。このケースでは合成に用いられる二酸化炭素はこの合成のためにつくられるのではなく、工場などで発生した二酸化炭素を利用する場合を考えている。したがって、このメタノールを使用して二酸化炭素が発生してもその分は0とみなす。

- ④一次エネルギーを天然ガスとし日本のように LNG として消費国に輸送し利用するケース。都市ガス配管網を利用しスタンドで水素へ改質する。燃料貯蔵（車載）方式は、高圧タンク、吸蔵合金の2方式を対象とした。
- ⑤一次エネルギーを天然ガスとし欧米などのようにパイプラインで消費国に輸送し利用するケース。④と同様にスタンドで水素へ改質する。燃料貯蔵（車載）方式は、高圧タンク、吸蔵合金の2方式を対象とした。このケースも、将来天然ガスがパイプラインで日本に運ばれる可能性があるということで、比較の意味で検討した。
- ⑥一次エネルギーを天然ガスとし採掘地でメタノールへ転換しタンカーで日本に輸送、スタンドで水素へ改質するケース。燃料貯蔵（車載）方式は、高圧タンク、吸蔵合金の2方式を対象とした。

b. メタノール燃料電池自動車

- ⑦③の水カーメタノール転換ケースでメタノールをそのまま車載するケース。したがって自動車に改質器を搭載する。③のケースと同様にこのケースでも二酸化炭素の発生は0とみなす。
- ⑧⑥の天然ガス→メタノール転換ケースでメタノールをそのまま車載するケース。したがって自動車に改質器を搭載する。

c. ナフサ燃料電池自動車

- ⑨一次エネルギーを石油とし、石油精製でナフサをつくり車載するケース。したがって自動車に改質器を搭載する。石油代替を考えているのでここでは比較の意味で対象とした。

(4) 検討方法

a. エネルギーフローに沿った LCA

各自動車のエネルギー消費、二酸化炭素排出は現行のガソリン車を1として次のように求めた。

- 1) 現行ガソリン車の10-15走行モードのときのエネルギー効率を設定するとともに現行ガソリン車が単位距離走行するのに必要なエネルギー消費を1とする。
- 2) 他の自動車の単位距離移動するのに必要なエネルギー（走行段階のエネルギー消費）は、現行車を1として現行ガソリン車の効率と各自動車の走行段階の効率を比較して求めたエネルギー消費を現行ガソリン車に対する重量増加およびエネルギー回生の効果（加速などで消費されたエネルギーの20%が回収されたとした）で補正することにより求めることができる。また、走行段階の二酸化炭素排出は走行段階のエネルギー消費に各車載燃料固有の二酸化炭素排出原単位を掛けることにより求めることができる。
- 3) 各自動車の全一次エネルギー消費（ライフサイクルでの全エネルギー消費）はこの単位距離移動するのに必要なエネルギー（現行車では1）を燃料製造段階の総合効率（採掘から車両への充填までの効率の積）で除すことにより求められる。例として図2.3.4-5に天然ガスからメタノールをつくるケースの例を示す。ライフサイクルでの全二

酸化炭素排出はこの値に各一次エネルギーの二酸化炭素排出原単位(再生可能エネルギーは0とした)を掛けることによって求めることができる。ただし、今回の検討では一次エネルギーは二次エネルギー(車載燃料)の原料となるだけでなくエネルギーフローにおいて二次エネルギー製造に用いられるエネルギーでもあるとする。

- 4) 燃料製造段階の一次エネルギー消費、二酸化炭素排出は全一次エネルギー消費、全二酸化炭素排出から走行段階の値を引いて求めることができる。

天然ガス→メタノールの

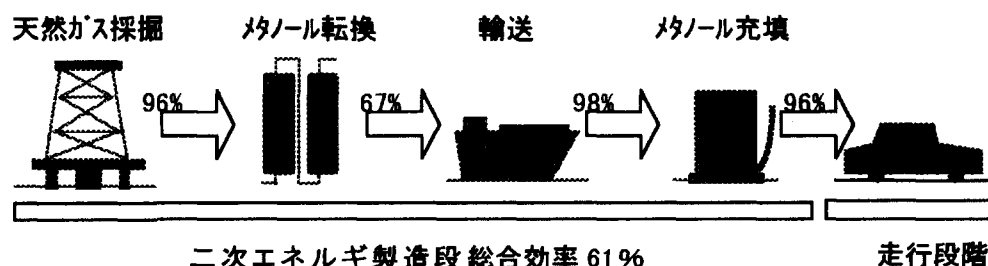


図 2.3.4-5 一次エネルギーから二次エネルギーへのプロセス

なお、車両の理論エネルギー消費は車両諸元（重量、前面面積など）、走行モードが決まれば算出可能である。本研究では原動機もしくは動力源以外は同じ諸元とした。また、本研究では車両の理論エネルギーと実際の燃費から現行ガソリン車のエネルギー効率を求めた。想定した以下の諸元のもとで現行ガソリン車の10-15モード走行時のエネルギー効率は16%であった。

転がり抵抗：0.013

空気抵抗：0.0016

前面面積：1.81 平方メートル

（以上は各車共通とした。）

現行ガソリン車の等価慣性重量：1,153kg

現行ガソリン車の10-15モード想定燃費：16.5km/l

表 2.3.4-2 に燃料製造段階の各プロセスの効率と走行段階の効率を示す。表中のおもな効率は次のように置いた。文末の文献1効率の出典を参照方。

水の電気分解効率：高分子膜電解により 90% (ref.1)

水素の液化効率：80% (ref.2)

水素からメタノールへの変換効率：77% (ref.3)

メタノールのスタンドでの改質：80% (ref.9)

天然ガス採掘効率：96% (ref.4)

天然ガス液化効率：87% (ref.4、ref.5、ref.6)

天然ガスのスタンドでの水素改質：76% (ref.7)

天然ガスからメタノールへの変換効率：67% (ref.8)

車載改質器の効率（メタノール、ナフサとも）：82% (ref.9)

水素燃料電池自動車の走行効率：50% (ref.9)

メタノールおよびナフサ燃料電池自動車の走行効率：50% (ref.9)

また、電力に関する効率については 2010 年頃を想定し平均発電効率で約 37%（採掘から発電まで）とした。また、発電エネルギー構成は石油火力 14%、天然ガス火力（複合発電）25%、石炭火力 13%、原子力 39%、水力 10%として計算した。

図 2.3.4-4 と表 2.3.4-2 は水素燃料電池自動車、メタノール燃料電池自動車ごとに上から順に対応している。

一次エネルギーの採掘から走行までの各プロセスのエネルギー効率をすべて掛けた積が各自動車の総合効率になる。総合効率は自動車のエネルギー消費の一次近似的な評価を与える。

なお、上で述べた一次エネルギーおよび車載エネルギーの二酸化炭素排出係数は次節の結果のところで示す。また、現行ガソリン車、天然ガスハイブリッド自動車そして電気自動車の効率については燃料製造段階（採掘から給油まで）および走行段階にそれぞれまとめて次節の結果のところで示す。これらの自動車の燃料製造段階のプロセスごとの効率はすでに多くの論文で発表（例えば文末参考文献 2）されているので省略する。ところで、すでに述べたように現行車以外はエネルギー回生ができる仕様とした。したがって、天然ガス車もパラレルハイブリッド仕様とし、原動機の効率は今後の研究開発により設計点で 40%近くに向上、ハイブリッド仕様とすることで 10-15 モードでの効率を 34%として検討した。電気は日本国内の発電エネルギー構成をベースに、エネルギー消費については火力発電の平均効率をもとに算出し、二酸化炭素排出については水力・原子力からは二酸化炭素の排出はないものとし、（石油、石炭、天然ガスなどの）火力発電の一次エネルギー別消費量と各二酸化炭素排出原単位から計算した。値は結果のところで示す。

表2.3.4-2 エネルギーフローでの効率評価

一次エネルギー	貯蔵	採掘	エネルギー転換	輸送	エネルギー転換	輸送	エネルギー転換	輸送	スタート改質	車載	製造段階%	車上改質	動力源	走行段階%
水力、PV	液化タンカ輸送	CH	0.9	0.9	0.8	0.96	0.95	0.95	1	0.95	59.3	1	0.5	50.0
	液化タンカ輸送	MH	0.9	0.9	0.8	0.96	0.95	0.95	1	0.95	59.3	1	0.5	50.0
	液化タンカ輸送	LH	0.9	0.9	0.8	0.96	0.95	0.95	1	0.95	59.3	1	0.5	50.0
	消費地で発電・電解	CH	0.9	1	1	1	1	1	1	0.95	85.5	1	0.5	50.0
	消費地で発電・電解	MH	0.9	1	1	1	1	1	1	0.9	81.0	1	0.5	50.0
	メタノール化スタート改質	CH	0.9	0.77	0.98	1	1	1	0.8	0.95	51.6	1	0.5	50.0
	メタノール化スタート改質	MH	0.9	0.77	0.98	1	1	1	0.8	0.9	48.9	1	0.5	50.0
	LNGスタート改質	CH	0.96	0.87	0.98	0.95	1	1	0.76	0.95	56.1	1	0.5	50.0
	LNGスタート改質	MH	0.96	0.87	0.98	0.95	1	1	0.76	0.9	53.2	1	0.5	50.0
	ハイラインスタート改質	CH	0.96	1	0.96	1	1	1	0.76	0.95	66.5	1	0.5	50.0
水素 FCV	ハイラインスタート改質	MH	0.96	1	0.96	1	1	1	0.76	0.9	63.0	1	0.5	50.0
	メタノール化スタート改質	CH	0.96	0.67	0.98	1	1	1	0.8	0.95	47.9	1	0.5	50.0
	メタノール化スタート改質	MH	0.96	0.67	0.98	1	1	1	0.8	0.9	45.4	1	0.5	50.0
	採掘地メタノール		0.9	0.77	0.98	1	1	1	1	0.96	65.2	0.8	0.5	40.0
	採掘地メタノール		0.96	0.67	0.98	1	1	1	1	0.96	60.5	0.8	0.5	40.0
	ナフサ		0.99	1	0.99	0.94	1	1	1	0.96	88.4	0.8	0.5	40.0
水力、PV	液化タンカ輸送	CH	0.9	0.9	0.8	0.96	0.95	0.95	1	0.95	59.3	1	0.5	50.0
改質 FCV	液化タンカ輸送	MH	0.9	0.9	0.8	0.96	0.95	0.95	1	0.95	59.3	1	0.5	50.0
	液化タンカ輸送	LH	0.9	0.9	0.8	0.96	0.95	0.95	1	0.95	59.3	1	0.5	50.0
	消費地で発電・電解	CH	0.9	1	1	1	1	1	1	0.95	85.5	1	0.5	50.0
	消費地で発電・電解	MH	0.9	1	1	1	1	1	1	0.9	81.0	1	0.5	50.0
	メタノール化スタート改質	CH	0.9	0.77	0.98	1	1	1	0.8	0.95	51.6	1	0.5	50.0
	メタノール化スタート改質	MH	0.9	0.77	0.98	1	1	1	0.8	0.9	48.9	1	0.5	50.0
	LNGスタート改質	CH	0.96	0.87	0.98	0.95	1	1	0.76	0.95	56.1	1	0.5	50.0
	LNGスタート改質	MH	0.96	0.87	0.98	0.95	1	1	0.76	0.9	53.2	1	0.5	50.0
	ハイラインスタート改質	CH	0.96	1	0.96	1	1	1	0.76	0.95	66.5	1	0.5	50.0
	ハイラインスタート改質	MH	0.96	1	0.96	1	1	1	0.76	0.9	63.0	1	0.5	50.0
	メタノール化スタート改質	CH	0.96	0.67	0.98	1	1	1	0.8	0.95	47.9	1	0.5	50.0
	メタノール化スタート改質	MH	0.96	0.67	0.98	1	1	1	0.8	0.9	45.4	1	0.5	50.0
	採掘地メタノール		0.9	0.77	0.98	1	1	1	1	0.96	65.2	0.8	0.5	40.0
	採掘地メタノール		0.96	0.67	0.98	1	1	1	1	0.96	60.5	0.8	0.5	40.0
	ナフサ		0.99	1	0.99	0.94	1	1	1	0.96	88.4	0.8	0.5	40.0

貯蔵：CHは高圧タンク、MHは吸蔵合金、LHは液化、タンク貯蔵を意味する。

b. 自動車製造段階を含む L C A

1) 機能単位

機能単位は、以下のように設定した。

自動車の種類：ガソリンエンジン 1,500cc 相当の乗用車またはワゴン

乗車定員：5 人

生涯走行距離：100,000km

燃費：10-15 モード燃費で 16.5km/ l

車両重量：ガソリン車で 1,043kg

2) 自動車製造段階および廃棄段階の評価

走行段階については前項で述べたのでここでは自動車の製造段階と廃棄段階の評価について述べる。自動車の製造段階では、すでに述べたように、原材料の製造段階と製品の製造段階（部品や自動車の加工・組立）を評価した。

イ. 原材料の製造段階

表 2.3.4-3 に現行ガソリン車の材料-重量構成を示す。原材料製造段階の一次エネルギー消費および二酸化炭素排出は表 2.3.4-1 を作成するにあたり各自動車別に作成した部品システム材料-重量一覧表（本報告書には載せていない）と表 2.3.4-3 をもとに各自動車の部品別材料別重量を求めて、それぞれの原材料製造のエネルギー消費原単位、二酸化炭素排出原単位を掛けて求めた。計算ソフトには自動車工業会が作成した自工会ソフト LCA96 を改善して用いた。

原材料製造のエネルギー消費原単位、二酸化炭素排出原単位ともデータは通産省・資源環境技術総合研究所の N I R E ソフトを用いた。データの制約から、海外輸送から評価した。したがって原材料の海外採掘は評価していない。ただし、アルミについては原材料の製造も海外で行われているが、将来、リサイクルの影響を考慮することもあると考え、原材料の製造を考慮した。

水素吸蔵合金を除き、結果的にカットオフされたのは重量で約 5% に満たなかった。しかし、現在のところ合金、希土類そして貴金属のデータが整備されておらず、燃料電池や改質器の主要材料の評価はされていない。

なお、リチウムイオン電池については文献 3 をもとに重量比例で算出した。

ロ. 製品の製造段階（部品・自動車の加工・組立段階）

図 2.3.4-6 に現行ガソリン車の自動車の加工・組立工程のモデルを示す。車体とエンジン、トランスミッションなどからなる部品の製造およびこれらのアッセンブリからなる。計算ソフトには原材料の製造と同じ自工会ソフト LCA96 を改善して用いた。

各燃料電池自動車、天然ガスハイブリッド自動車および電気自動車の自動車加工組立段階の一次エネルギー消費および二酸化炭素排出は現行ガソリン車の加工・組立で消費される一次エネルギーおよび二酸化炭素排出に重量比例するとして計算した。ただし、リチウ

ムイオン電池の加工、組み立て分は原材料製造段階と同様に文献 3 をもとに重量比例で算出した。

ハ.廃棄段階

廃棄段階については、シュレッター処理および埋め立てを考慮した。シュレッターに要するエネルギー等は文献 4 を参考にした。

表2.3.4-3 現行ガソリン車の材料－重量構成

自工会材料分類	NIRE材料分類	比率 (%)
銑鉄	銑鉄	6.0
棒鋼	鋼－形鋼	2.7
熱延薄板	熱延薄板	12.2
熱延中板	熱延中板	2.4
熱延厚板	熱延厚板	0.4
冷延薄板	冷延鋼板	12.4
高張力鋼板	冷延鋼板	5.0
亜鉛メッキ鋼板	電気メッキ鋼板	13.1
表面処理鋼板	電気メッキ鋼板	1.8
鋼管	冷延鋼板	0.0
その他鋼材	鋼－形鋼	1.6
炭素鋼	炭素鋼	7.5
合金鋼	炭素鋼	1.7
被削性改善鋼	炭素鋼	0.2
ステンレス・耐熱鋼	ステンレス・耐熱鋼	2.2
ハネ鋼	ステンレス・耐熱鋼	0.8
軸受鋼	ステンレス・耐熱鋼	0.2
その他特殊鋼	炭素鋼	0.7
電気銅	電気銅	1.7
鉛地金	電気銅	1.0
亜鉛地金	電気銅	0.5
アルミ地金	アルミ地金	7.6
その他非鉄金	アルミ地金	0.0
フェノール	フェノール樹脂	0.0
ポリウレタン	ポリウレタン	1.8
塩化ビニール	塩化ビニール	0.7
ポリエチレン	ポリエチレン	0.2
ポリプロピレン	ポリプロピレン	6.0
ABS	ABS	0.6
高機能樹脂	ポリアミド 66	0.2
その他樹脂	ポリプロピレン	0.7
塗料	ポリウレタン	0.01
ゴム	ゴム	3.5
ガラス	ガラス	2.9
繊維	ポリウレタン	1.3
木材	木材	0.2
その他	重油	0.2
合計値		100.01

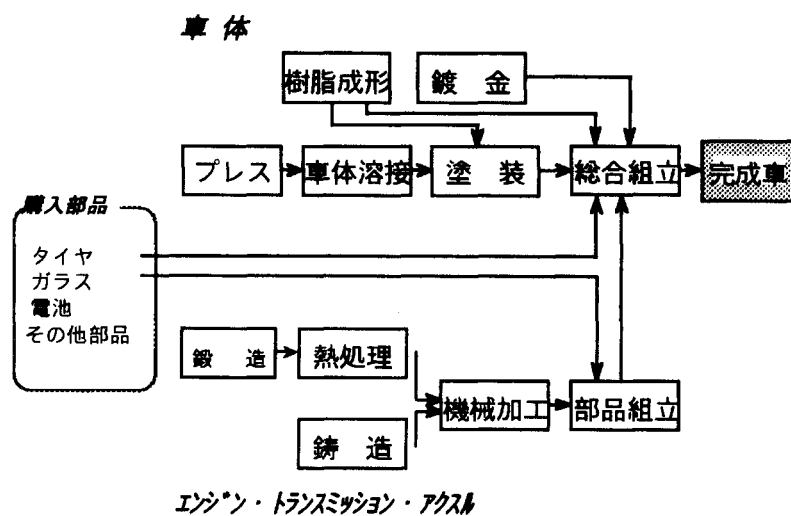


図2.3.4-6 自動車の製造工程フロー

2.3.5 結果

(1) エネルギーフローに沿った LCA の結果

表 2.3.5-1 および図 2.3.5-1、図 2.3.5-2 にエネルギーフローに沿ったときの結果を示す。表 2.3.5-1 は一次エネルギー、二次エネルギーの二酸化炭素排出原単位（ともに HHV 基準）とともにエネルギー製造段階の効率、走行段階の効率、現行車に対する重量増そして結果である現行車を 1 としたときの各自動車のエネルギー消費（単位距離走行するのに必要な熱量（熱量/km））、燃費（単位熱量で走行可能な距離（km/熱量））および二酸化炭素排出を現行のガソリン車を 1 とした相対比較で示す。また、図 2.3.5-1、-2 は一次エネルギー消費、二酸化炭素排出を走行段階、燃料製造段階に分けて示した。また、燃料電池自動車の順番は表 2.3.4-2 に対して上下、逆の順に並べられていることに注意されたい。

表2.3.5-1 一次エネルギー消費とCO2排出

自動車の種類	一次エネルギー CO2排出原単位	二次エネルギー CO2排出原単位	製造プロセス	貯蔵方法	重量増kg	燃料製造 段階効率	走行段階 効率	エネルギー比	燃費比	CO2比
現行ガソリン車	石油 19.2	ガソリン 18.3		液体タンク	0	0.838	0.16	1.00	1.00	1.00
CNGハイブリット車	天然ガス 13.4	天然ガス 13.5		高圧タンク	142	0.753	0.35	0.45	2.24	0.31
電気自動車	買電 9.5	0		リチウム電池	272	0.311	0.86	0.47	2.11	0.31
水素燃料電池車	水力 0	水素 0	液化、タンク輸送	CH	42	0.593	0.50	0.37	2.69	0.00
		0		MH	72	0.593	0.50	0.38	2.64	0.00
		0		LH	72	0.593	0.50	0.38	2.64	0.00
水力、特にPV		0	消費地で水素製造	CH	42	0.855	0.50	0.26	3.88	0.00
		0		MH	72	0.810	0.50	0.28	3.60	0.00
水力		0	メタノール化、スタント改質	CH	42	0.516	0.50	0.43	2.34	0.00
		0		MH	72	0.489	0.50	0.46	2.18	0.00
天然ガス 13.4		0	LNG、スタント改質	CH	42	0.561	0.50	0.39	2.55	0.27
		0		MH	72	0.532	0.50	0.42	2.37	0.30
		0	パイプライン、スタント改質	CH	42	0.665	0.50	0.33	3.02	0.23
		0		MH	72	0.630	0.50	0.36	2.80	0.25
		0	メタノール化、スタント改質	CH	42	0.479	0.50	0.46	2.17	0.32
		0		MH	72	0.454	0.50	0.50	2.02	0.35
メタノール燃料電池車	水力 0	メタノール 0	メタノールタンカーで日本に	液体タンク	52	0.652	0.40	0.43	2.35	0.00
	天然ガス 13.4	メタノール 16.6		液体タンク	52	0.605	0.40	0.46	2.18	0.33
ナフサ燃料電池車	石油 19.2	ナフサ 18.2		液体タンク	52	0.884	0.40	0.31	3.19	0.31

CO2排出原単位

- ・買電は火力の構成比から求めた。
- ・水力発電起源のメタノールのCO2排出原単位は0とした。
- ・エネルギー比は一次エネルギーでの消費比率(熱量/km)、燃費はその逆数(km/熱量)

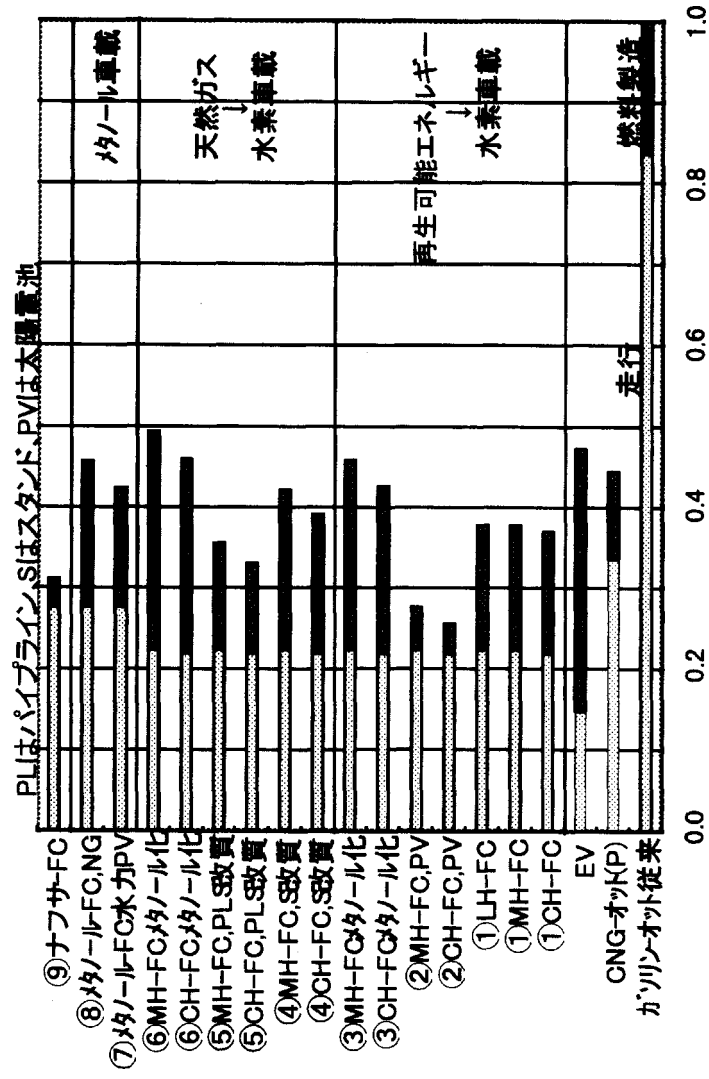


図2.3.5-1 エネルギーフローでみたエネルギー消費(ガソリン車を1とした)

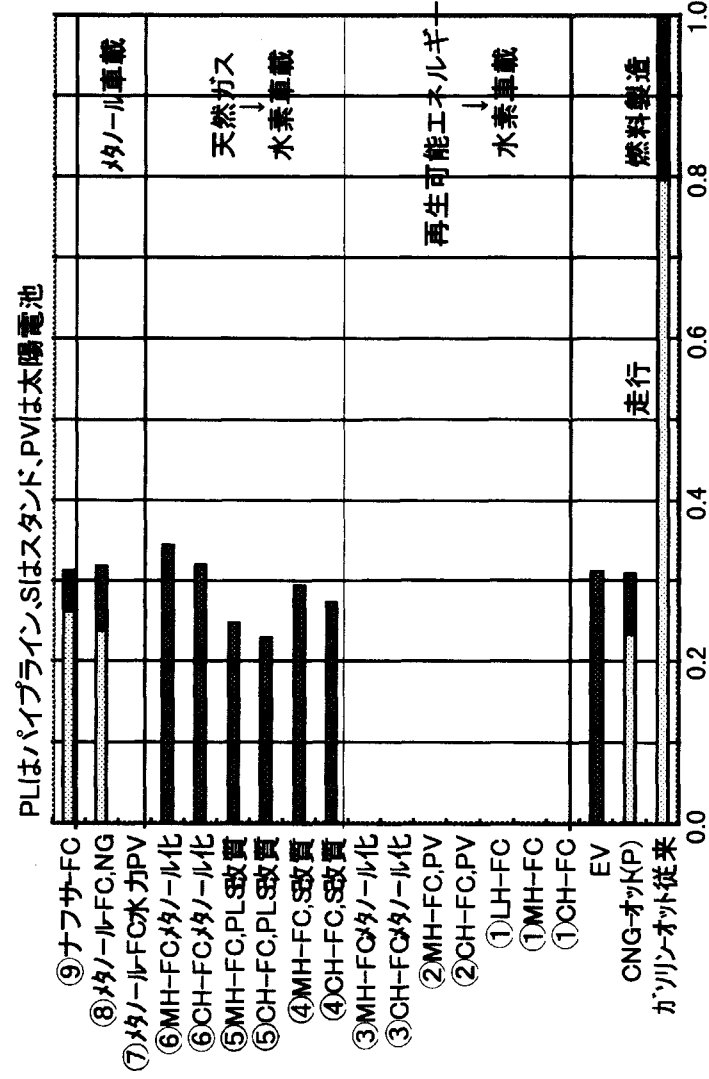


図2.3.5-2 エネルギーフローでみたCO2排出(ガソリン車を1とした)

結果を以下に要約する。

a. 一次エネルギー消費

- 1) 燃料電池自動車の一次エネルギー消費は現行車の半分以上という結果となった。
- 2) 水素燃料電池自動車の走行段階のエネルギー消費は走行段階の効率が等しいので重量差の影響分しか変わらない。エネルギー消費の差は燃料製造段階の効率差すなわち製造段階におけるエネルギー消費の差が影響する。
- 3) 日本で実現可能性の高い、ケース①、③、④、⑥（以上水素燃料電池車）、⑦、⑧（以上メタノール燃料電池車）の中では水力を一次エネルギーとする水素燃料電池自動車、天然ガスを一次エネルギーとする水素燃料電池自動車の順でエネルギー消費が少ない。再生可能エネルギー、天然ガスによらず一度メタノール化し改質により再び水素にして利用するケースではエネルギー消費が比較的大きい化学変換の回数が多くなるのでエネルギー消費が増える傾向がある。
- 4) 石油代替エネルギー（再生可能エネルギーおよび天然ガス）を一次エネルギーとするケースで考えると、ケース③のスタンドで太陽光発電でつくった水素を利用する水素燃料電池自動車、ケース⑤のパイプラインで天然ガスを消費地まで運びスタンド改質した水素を利用する水素燃料電池自動車そしてケース①の順でエネルギー消費が少ない結果となった。なお、ナフサ燃料電池自動車は燃料製造段階でのエネルギーロスが少ないことがあって全体ではケース③に続いてエネルギー消費が少ないという結果となった。

b. 二酸化炭素排出

- 1) 燃料電池自動車の二酸化炭素排出は現行車に対して 40%以下という結果となった。水力および太陽光をエネルギー源とするケースでは一次エネルギーが再生可能エネルギーということで二酸化炭素の排出はない。
- 2) 天然ガスを一次エネルギーとするものの中では天然ガスをパイプラインで消費地に運びスタンドで水素に改質して利用するケース⑤の水素燃料電池自動車の排出が少ないという結果になった。

(2) 自動車製造段階を含む L C A の結果

ライフサイクルでのエネルギー消費を図 2.3.5-3 と表 2.3.5-2 そして二酸化炭素排出を図 2.3.5-4 と表 2.3.5-3 に示す。前述したように、生涯走行距離を 100,000km として評価した結果である。なお、廃棄段階の値は他に比べて小さかったので図表では省略した。

結果を以下に要約する。

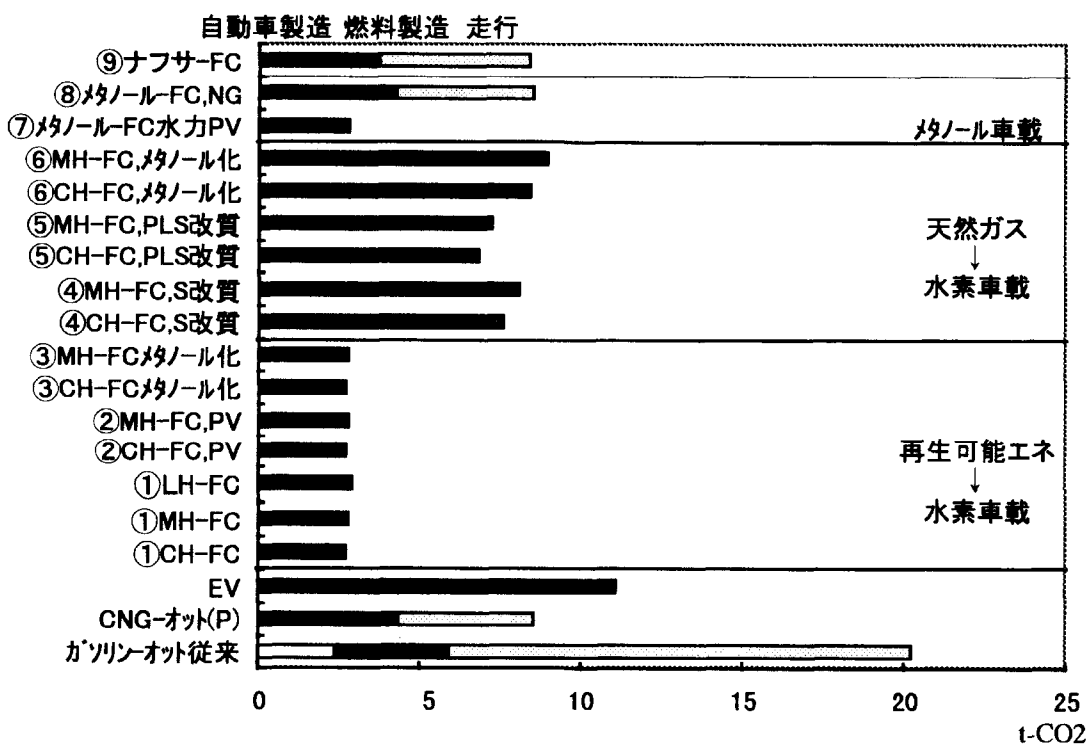
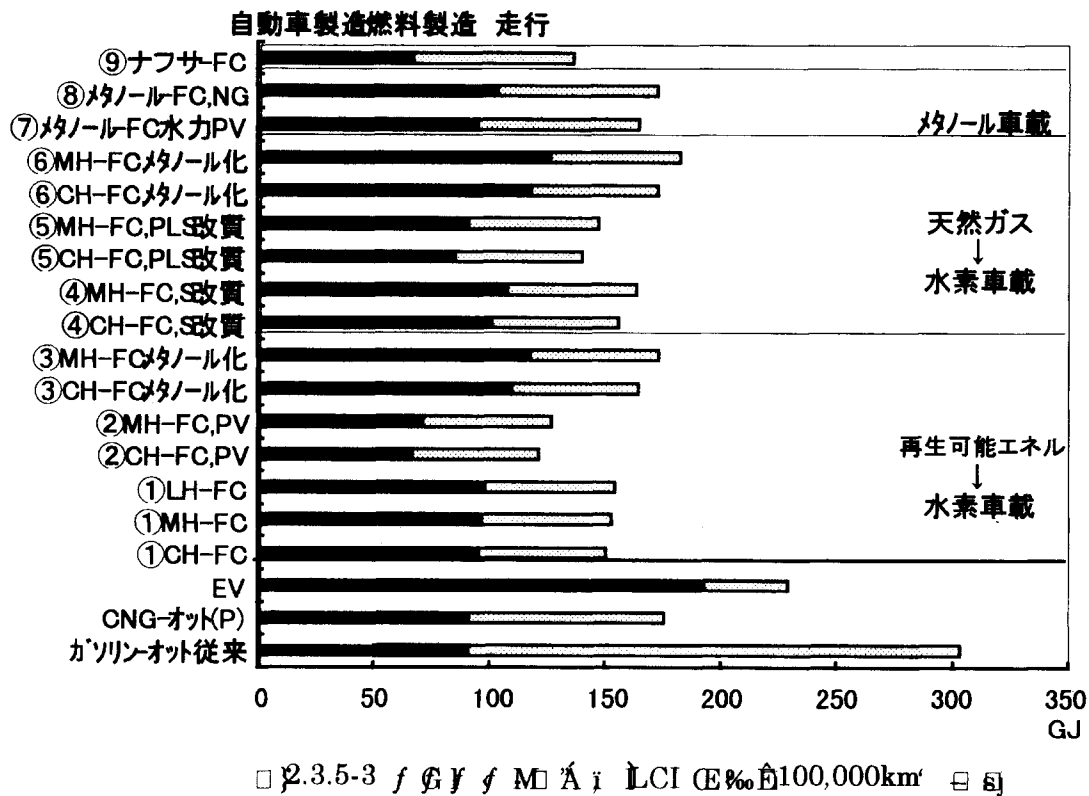


図2.3.5-4 CO2 排出のLCI結果(100,000km走行)

表2.3.5-2 ライフサイクルでのエネルギー消費(100,000km走行)

単位: MJ

	製造合計	燃料製造	走行	LC合計
GV	49537	41197	213105	303839
CNG-H/B	63066	27986	85317	176369
EV	109226	83018	37472	229716
CH-FC	56731	38553	56083	151367
MH-FC	57206	39304	57175	153684
LH-FC	58525	39304	57175	155003
CH-FC, PV	56731	9511	56083	122325
MH-FC, PV	57206	13411	57175	127792
CH-FCメタ化	56731	52574	56083	165389
MH-FCメタ化	57206	59752	57175	174133
CH-FCガスタント改質	56731	43814	56083	156629
MH-FCガスタント改質	57206	50325	57175	164706
CH-FC, Pガスタント改質	56731	28202	56083	141017
MH-FC, Pガスタント改質	57206	33525	57175	147906
CH-FCメタ化	56731	60987	56083	173801
MH-FCメタ化	57206	68805	57175	183186
メタFC水力	57075	37664	70559	165298
メタFCガス	57075	46044	70559	173678
ナフサFC	57075	9219	70559	136853

表2.3.5-3 ライフサイクルでの二酸化炭素排出(100,000km走行)

単位: Kg-CO2

	製造合計	燃料製造	走行	LC合計
GV	2387	3526	14345	20258
CNG-H/B	2993	1341	4216	8550
EV	5511	5601	0	11112
CH-FC	2717	0	0	2717
MH-FC	2813	0	0	2813
LH-FC	2917	0	0	2917
CH-FC, PV	2717	0	0	2717
MH-FC, PV	2813	0	0	2813
CH-FCメタ化	2717	0	0	2717
MH-FCメタ化	2813	0	0	2813
CH-FCガスタント改質	2717	4900	0	7617
MH-FCガスタント改質	2813	5272	0	8085
CH-FC, Pガスタント改質	2717	4134	0	6851
MH-FC, Pガスタント改質	2813	4448	0	7261
CH-FCメタ化	2717	5742	0	8459
MH-FCメタ化	2813	6179	0	8992
メタFC水力	2809	0	0	2809
メタFCガス	2809	1432	4287	8528
ナフサFC	2809	906	4700	8415

a. 一次エネルギー消費

- 1) ガソリン車に対して燃料電池自動車の自動車製造エネルギーは約 15%増加したが、燃料電池自動車だけについてみると自動車製造段階の一次エネルギー消費は大きく変わらない結果となった。このことから、エネルギー消費の少ない順番は自動車の製造段階を含む LCA の場合でもエネルギーフローの場合と変わらない結果となった。
- 2) 燃料電池自動車間でエネルギー消費が異なるのは燃料製造段階の影響が大きいことがわかった。
- 3) 現行ガソリン車では自動車製造段階と使用段階（走行とエネルギー製造、すなわちエネルギーフローに沿った LCA 分）のエネルギー消費割合は 15 : 85 ないしは 20 : 80 であるが燃料電池自動車のように燃費性能が改善されると相対的に自動車製造段階のエネルギー消費が大きくなり自動車製造段階の改善も無視できないレベルとなる。

b. 二酸化炭素排出

- 1) 水素燃料電池自動車の二酸化炭素排出は自動車製造段階および廃棄段階だけである。廃棄段階は他の段階に比べ小さいので、前述したように図では省略している。
- 2) 天然ガスを一次エネルギーとする水素燃料電池自動車の二酸化炭素排出性能の順番はエネルギー消費のときと同様、エネルギーフローに沿った LCA の順番と変わらない。
- 3) エネルギー消費と同様、自動車製造段階の影響が無視できなくなる。

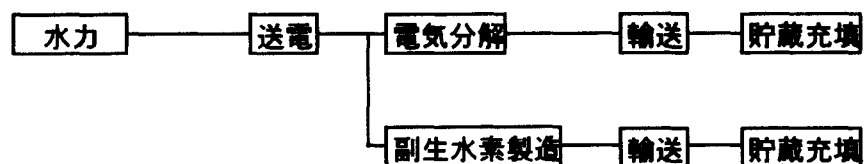
(3) 買電を利用して水素を製造するケースの追加的な検討

最後に、すでにインフラが整っている国内の買電を利用し、電気分解の場合と副生水素の場合のライフサイクルでのエネルギー消費と二酸化炭素排出を検討する。副生水素は食塩電解による苛性ソーダ製造の副産物として得られる水素を対象とした。なお、以下の検討では水素燃料電池自動車は高圧水素タンクを用いる仕様のみを対象とした。

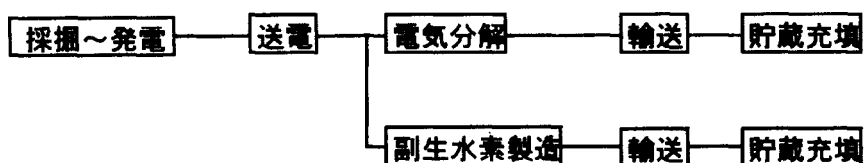
検討したエネルギーフローを図 2.3.5-5 に示す。同図の上のケースでは水力発電を想定している。ノルウェーやアイスランドのように発電のエネルギー構成において水力が 90% を越える国がこのケースに相当しよう。水素を国内で消費するため水素液化ないしは液化水素タンカー輸送のプロセスが必ずしも必要ではない。また、同図で下のケースは日本のように水力が相対的に豊富でない国の場合で、発電のエネルギーミックスを考えた。日本の発電ミックスを利用するケースでは買電がおもなエネルギーフローになるためエネルギーの採掘から発電までを考慮することになる。

表 2.3.5-4 に図 2.3.5-5 のエネルギーフローに沿ってエネルギー製造段階の各ステージの効率と製造段階の総合効率をまとめた。表 2.3.5-4 でエネルギー転換のところの値がそれぞれ電気分解による水素製造の効率、副生水素製造の効率である。日本の買電を利用するケースでは、2010 年頃を想定し石油、石炭、天然ガスなどの海外での採掘からタンカー輸送、発電までを検討範囲とし、効率およびエネルギー構成割合を考慮して平均効率を算出した。表 2.3.5-4 には示さないが走行段階の効率はこれまでの検討と同じ 50% とした。

ノルウェー、アイスランドのように水力が豊富な場合



日暮のように発電ミックスを利用する場合



申2.3.5-5 電解水素と副生水素のエネルギーフロー

表2.3.5-4 電解水素および副生水素を用いる水素FCVのエネルギーフローと効率

	採掘～発電	送電	エネルギー転換	輸送	車載	製造段階%
(1) 国内水力利用電解	1	0.95	0.9	0.95	0.95	77.2
(2) 国内水力利用副生水素	1	0.95	0.83	0.95	0.95	70.8
(3) 発電ミックス利用電解	0.37	0.95	0.9	0.95	0.95	28.4
(4) 発電ミックス利用副生水素	0.37	0.95	0.83	0.95	0.95	26.1

ライフサイクルでの結果を図 2.3.5-6 および図 2.3.5-7 に示す。前述したように水素燃料電池自動車はすべて高圧水素タンク（これまで CH-FCV と記してきた）仕様である。また、繰り返しになるが、生涯走行距離を 100,000km としたときの結果である。図で①から⑦の番号は図 2.3.5-1 から図 2.3.5-4 で用いたケース番号に等しい。両括弧付きの番号が新たに評価したケースの結果で、番号は表 2.3.5-4 に記した番号と一致する。

はじめにエネルギー消費についてみる。(1)の電解（国内水力）のケースは水素の液化と LHG タンカー輸送を必要としないため①の水力 LHG タンカーのケースに比べてエネルギー消費が少ない。評価ケースの中でもっともエネルギー消費が少ない②の PV 設置水素スタンドケース（この場合も水素の長距離輸送がない）にも迫る結果となった。(1)のケースと(2)の副生水素（国内水力）のケースの差は水素製造プロセスの効率の差に他ならない。(3)、(4)の発電ミックスを利用するケースでは買電の発電効率を考慮した結果、エネルギー消費が増大した。

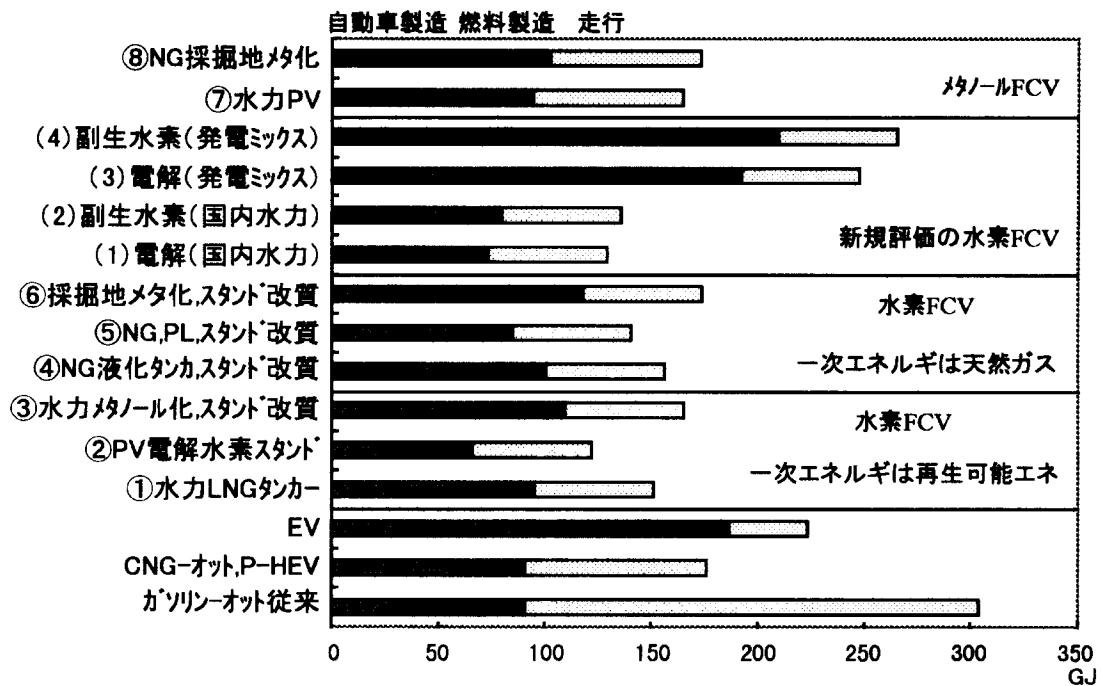


図2.3.5-6 エネルギー消費のLCI結果(100,000km走行. 水素FCVは高圧水素タンク仕様)

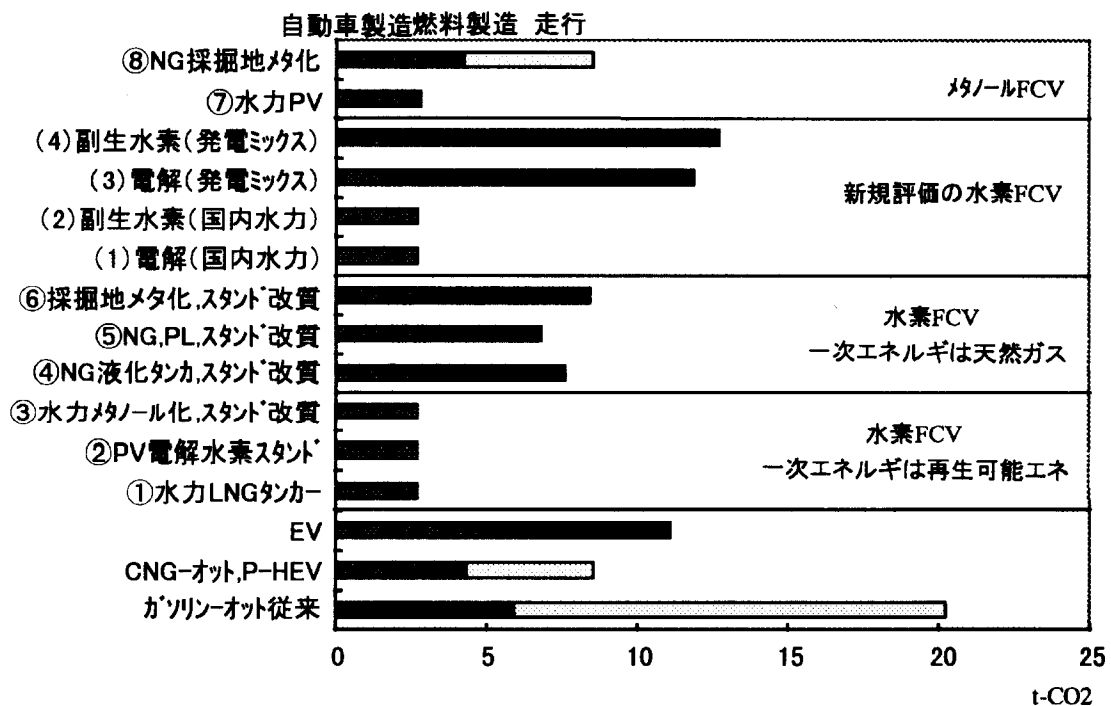


図2.3.5-7 CO2排出のLCI結果(100,000km走行. 水素FCVは高圧水素タンク仕様)

二酸化炭素排出については(1)、(2)のケースは再生可能エネルギーを一次エネルギーとしているため①、②そして③のケースなどと同様に燃料製造段階と走行段階の二酸化炭素排出はないと評価される。(3)、(4)のケースでは、(3)では水の電気分解、(4)では食塩電解の水素製造段階で化石燃料を含む発電ミックスを考慮したことにより燃料製造段階の二酸化炭素の排出が多く、ライフサイクルでの排出はEVとほぼ同等という結果になった。

ただし、副生水素はコストが安いというメリットがある。水素燃料電池自動車の普及初期からのエネルギー源として期待される。

2.3.6 まとめと今後の課題

石油代替を前提において、一次エネルギーとして水力やPVなどの再生可能エネルギーと天然ガスを取り上げ、これら一次エネルギーから二次エネルギー（車載エネルギー）までの各種の製造プロセス（エネルギーフロー）を対象として、燃料電池自動車のエネルギー消費と二酸化炭素排出に関するエネルギーフローに沿ったLCA評価および自動車の製造を含むLCI評価を行なった。その結果、WE-NET計画が対象とする水力などの再生可能エネルギーを一次エネルギーとし水素を車載する水素燃料電池自動車の一次エネルギー消費、二酸化炭素排出が少ないことを確認した。また、都市ガスをスタンドで改質するケースでも、再生可能エネルギーを利用するケースに比べてエネルギー消費はそれほど大きくないことがわかった。日本でもシベリアからのパイプラインが検討されているが、エネルギー消費、二酸化炭素排出の観点から実現が望まれる。

今回のLCAでは、自動車という製品を中心に、エネルギー消費と二酸化炭素排出に関するエネルギーフローに沿ったFuel Life Cycleでの分析および自動車の製造段階（素材製造段階および自動車本体の製造段階）を含めたLife Cycle Inventory分析を行なった。下に今後の検討として必要と思われる課題をまとめる。

- ・ システムバウンダリーの拡大：今回の検討では、例えば、メタノール改質燃料電池の改質器は車載されているのでシステムバウンダリー（検討対象）に含めた。しかし、スタンドに設置される改質器についてはシステムバウンダリーに含めなかった。自動車一台一台に改質器を積む方がよいのかスタンドで改質する方がよいのかという課題があり、今後、燃料供給インフラを含めた評価をする必要があると考えている。
- ・ 対象とする環境負荷項目の拡張：自動車で検討する必要があると考えられるおもな環境負荷には今回評価したエネルギー消費、二酸化炭素排出に加え、NO_x、SO_x、CO、VOC、PMなどの排出物が上げられる。地球温暖化、酸性化、都市大気そして枯渇性エネルギーといった環境影響カテゴリの評価を行なうことを目的にNO_x、SO_xをはじめとする環境負荷を選定しLCA評価（今回は環境負荷の評価にとどまっているので正確にはLCI（ライフ

サイクルインベントリー分析)まで行ない、望ましいエネルギーサイクル(エネルギーフローと動力源の組み合わせ)を求める必要がある。

- ・ コストを含むLCA分析: 技術の実現可能性は動力性能や環境性能だけでは決まらない。ライフサイクルでのコストを評価することによって実現性を評価し将来の自動車用エネルギーを予測することが求められる。このため燃料供給インフラ(スタンドに設置される改質器など)の整備コストなど、コスト評価を含むライフサイクル評価が求められる。
- ・ 計算精度の向上: 材料製造原単位に関する現在のデータベースには燃料電池や二次電池で用いられる金属酸化物、貴金属そしてテフロンなどの特殊な樹脂材料についてはほとんど整備されていない。評価の精度を上げるためにはこれらの材料のデータ整備を行ない再評価したい。
- ・ より現実に近いシステムでの評価: 今回の検討では一次エネルギーは二次エネルギー(車載燃料)の原料となるだけでなくエネルギーフローにおいて二次エネルギー製造時に消費されるエネルギーでもあると仮定したが、実際は電力の使用などにともないいろいろな燃料が使われており、また、二次エネルギーの輸送には他のエネルギー(例えば水素を運ぶにも軽油が使われるなど)が使われる可能性がある。これら現実のエネルギーシステムの改善も視野に入れた評価も欠かせないと考えられる。また、主エネルギーフローについてだけでなく副次的に派生するエネルギーについてもそのエネルギーフローを辿ってその影響を評価することも今後の課題と考えている。
- ・ 将来のエネルギー需給を想定した燃料電池自動車の導入シナリオの策定: 上記の検討だけでは燃料電池をはじめとする高効率クリーン自動車の導入シナリオは決まらない。上記のLCA評価に将来(少なくとも2050年くらいを見据える)のエネルギー需給を考え合わせ、どの時代にどの自動車のエネルギーサイクル(何を一次エネルギー、二次エネルギーとしどのような方法で二次エネルギーを作りどのような動力源システムとするか)が求められるか(実現性が高いか)を予測することが重要になってくると考えられる。

<参考文献>

1. 効率の出典

- ref.1: 「WE-NET 水素エネルギーシンポジウム講演予稿集」、演目 10,11、1999 年 2 月
- ref.2: 「WE-NET 水素エネルギーシンポジウム講演予稿集」、演目 13、1999 年 2 月
- ref.3: 平成 7 年度「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET)」サブタスク 3 全体システム設計、新エネルギー・産業技術総合開発機構、他
- ref.4: 「天然ガスの転換利用に関する可能性予備調査報告書」(天然ガス検討会、92/3/31)
- ref.5: 「天然ガスの新規利用に関する現状と課題」(日本経済研究所、91/12/27)
- ref.6: 「新メノール技術」(サイエンスフォーラム社)
- ref.7: 「DECARBONISATION OF FOSSIL FUELS」(IEA GHG-R&D、96/3)
- ref.8: 「Large Scale Manufacture of DME - a New Alternative Diesel Fuel from Natural Gas」(SAE950063)
- ref.9: (財) エンジニアリング振興協会内部資料

- 2. 小林他、「各種自動車の効率および CO₂ 排出の検討」、(社) 自動車技術会学術講演会前刷集、1996.10
- 3. 産業技術審議会(工技院) エネルギー・環境技術分科会 電力等輸送・貯蔵技術分科会、「リチウム電池を対象にしたライフサイクルアセスメントの実施」、平成 9 年 3 月
- 4. 小林、第 3 部製品別 LCA とインパクト分析の実際、第 3 章 自動車、実践 LCA ISO14000 対応(編集委員長石川雅紀)、サイエンスフォーラム社、
- 5. 小林、「高効率クリーン自動車の最近の動向」、技術と経済 370 号 pp.58~62, 97.12
- 6. 盛田、小林、「天然ガス資源利用の代替エネルギー車の研究」、第 13 回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, pp.329~334, 97.1
- 7. 武石、小林、「代替エネルギー車の受容性研究」、動力 vol.45 No.233, pp.1~11, 96.3

2.4.1 まえがき

2.4.2 各種自動車の比較

ベース車両は、ディーゼルエンジンを搭載した乗車定員29人のマイクロバスで、車両重量3310kg、車両総重量4905kg、半積重量4135kgである。エンジンの燃費マップは、排気量3.0Lの市販エンジンのものを用いた。

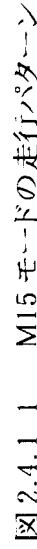
a) 対象車両

- ・FCEV A: 最高出力 20kW の PEFC + 最高出力 80kW の Li-ion 電池

・FCHV-C:最高出力50kWのPEFC・最高出力80kWのLi-ion電池

燃料搭載方法は、液体水素あるいは水素吸蔵合金で搭載する方法を想定した。それぞれの容器質量は以下のとおりである。

・水素吸蔵合金 水素吸蔵量はWE-NETの目標値の3wt.%とし、水素量は上記と同じ2種類。



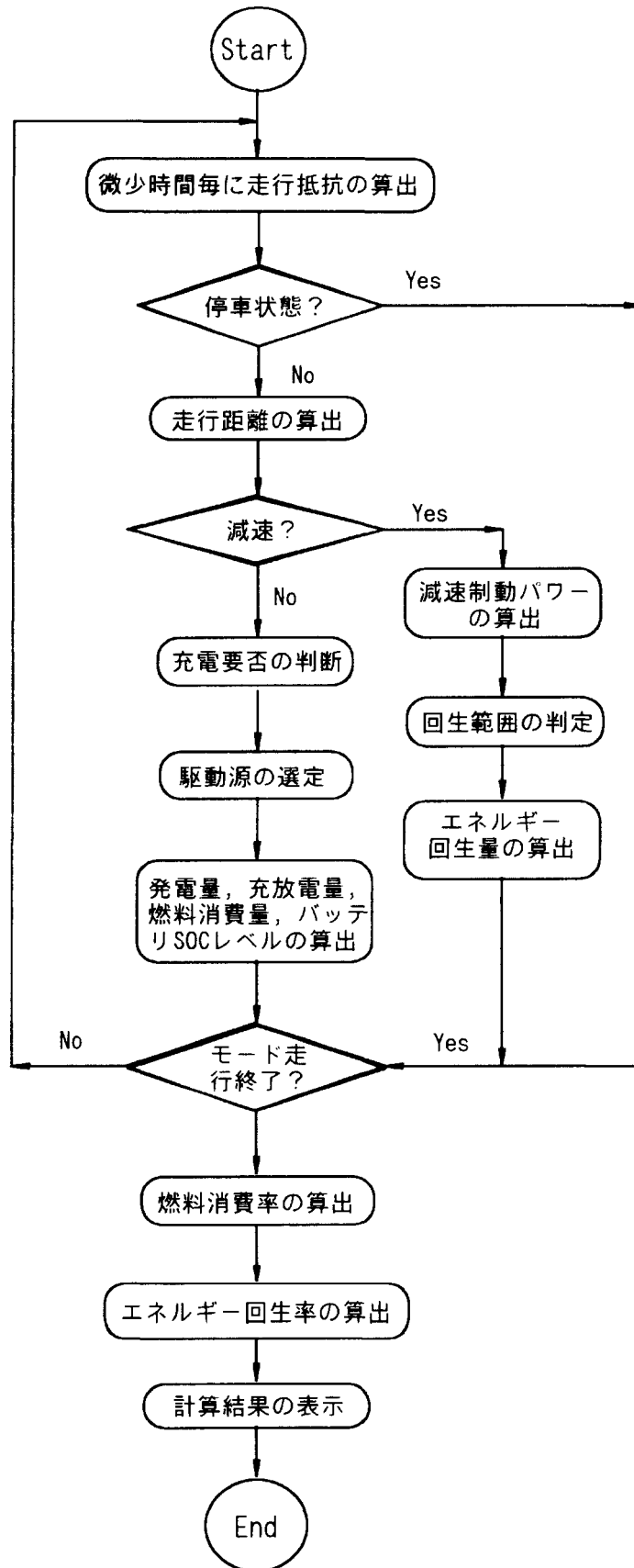


図2.4.1.2 燃費予測プログラムフローチャート

(3) シミュレーションに用いたパラメーター

燃費予測時の車両の重量は半積条件で予測した。FCHEVの半積重量は、表2.4.2-1に示すように、ベース車両の半積重量をもとに要素部品重量の増減を考慮して算出した。

なお、それぞれの車両のシミュレーションに用いたパラメーターは以下のとおりである。

a) 走行抵抗

- ・空気抵抗係数 C_d 0.518
- ・前影投影面積 S 4.37m²
- ・転がり抵抗係数 μ 0.013

b) 出力密度

- ・PEFC 1kW/kg
- ・Li-ion 電池 0.6kW/kg

c) 駆動用モーターの出力 50kW×2

d) 各要素部品の効率

・PEFC システム

負荷 12.5%の効率	45%
負荷 25.0%の効率	42.24%
負荷 37.5%の効率	40.89%
負荷 50.0%の効率	39.55%
負荷 100%の効率	34.15%

表2.4.2-1 燃費予測時の車両重量

単位: kg

車両記号 (PEFCとLi-ion電池の最高出力)	ベース車両	FCHEV-A (FC20kW+Li-ion80kW)				FCHEV-B (FC50kW+Li-ion50kW)				FCHEV-C (FC50kW+Li-ion50kW)			
項目		ケースA	ケースB	ケースC	ケースD	ケースA	ケースB	ケースC	ケースD	ケースA	ケースB	ケースC	ケースD
エンジン+ミッション デフ+プロペラシャフト 軽油(95L)+燃料タンク(15kg)	300 100 95	-				-				-			
トラクションモータ+減速ギヤ	-	60				60				60			
インバータ	-	50				50				50			
燃料電池スタック(1kW/kg)	-	20				50				50			
Li-ionバッテリー(0.6kW/kg)	-	133				83				133			
コンプレッサ, ポンプ, バルブ, 配管類	-	50				70				70			
水素+液体水素容器	-	80	206	-	-	80	206	-	-	80	206	-	-
水素+水素吸蔵合金(3wt.%)	-	-	-	341	902	-	-	341	902	-	-	341	902
半積重量	4135	4033	4159	4294	4855	4033	4159	4294	4855	4083	4209	4344	4905

ケースA: 水素(140L)+液体水素容器 水素密度:0.071kg/L

ケースA: 水素(370L)+液体水素容器(180kg)

ケースA: 水素(140L)+水素吸蔵合金(3wt.%)

ケースA: 水素(370L)+水素吸蔵合金(3wt.%)

・Li-ion 電池	充電効率	95%一定
	放電効率	95%一定
・駆動用モーター最高効率		95% (マップで与える)
・インバーター効率		95%一定
・減速機効率		98%一定
・回生エネルギー効率*		30%一定

注* 回生エネルギー効率＝バッテリーに充電されたエネルギー／減速時の利用可能なエネルギー

また、回生ブレーキにより減速エネルギーを回収できる最低速度は 10 km/h とした。

2.4.3 検討結果

(1) 各車両の運転方法

・FCHEV-A の場合、動力は PEFC を最高出力の 20kW まで使用する。20kW 以上では、PEFC に加えて Li-ion 電池からもエネルギーを供給する。Li-ion 電池の State of Charge (以下、SOC) は、停車時に PEFC を最高効率点で運転して充電し、モード走行前後で一致させる。

・FCHEV-B の場合、動力は最高出力 50kW の PEFC を負荷率 80% (40kW) まで使用する。40kW 以上では Li-ion 電池からもエネルギーを供給する。Li-ion 電池は回生ブレーキにより回収した分のエネルギーのみを利用するため、SOC をモード走行前後で一致させるための停車発電は不要となる。

・FCHEV-C の場合、動力は最高出力 50kW の PEFC を効率の高い領域である負荷率 40% (20kW) まで使用する。20kW 以上では Li-ion 電池からもエネルギーを供給する。Li-ion 電池の SOC は、停車時に PEFC を最高効率点で運転して充電し、モード走行前後で一致させる。

(2) 計算結果

全ての条件の計算結果を表 2.4.3-1 に示す。燃費は、FCHEV の場合も軽油に換算して算出した。勾配は 0% を基準にして全ての車両条件について燃費を予測した。ただし、ベース車両および FCHEV-C で車両重量が最大および最小となる水素吸蔵合金 370L (半積重量 4905kg) および液体水素 140L (半積重量 4083kg) については、±4% 勾配の燃費も予測した。

0% 勾配の M15 モード燃費を図 2.4.3-1 に示す。0% 勾配における FCHEV の M15 モード燃費は、ベース車両の概ね 1.6～2.2 倍の範囲となった。同一の車種では、燃料量が少なく重量が軽い方が燃費が良い。また、液体水素の方が水素吸蔵合金よりも軽いので燃費が良い。

車種別では、燃費の良い順は FCHEV-B、FCHEV-C、FCHEV-A であった。この原因は、以下ように考えられる。各種自動車の重量の差は、同じ燃料搭載方法で比較すると最大でも 50kg である。これは半積重量の 1% 強であるので重量の燃費への影響は僅かである。一方、FCHEV-A の最大出力 20kW 時の効率 は、最大出力 50kW の FCHEV-B および FCHEV-C の出力 20kW 時の効率よりも低い値を示すので、FCHEV-B および FCHEV-C は、低負荷すなわち効率の高い領域で運転する割合が大きくなり、FCHEV-A よりも燃費が良くなるものと考えられる。また、本シミュレーションで用いた各要素の効率では、Li-ion 電池での充電・放電のロスが大きいので、PEFC→インバーター→Li-ion

電池→インバータ→駆動用モーターの経路で使用する FCHEV-C を熱効率の高い 20kW の領域での運転よりも、FCHEV-B が PEFC の効率の低い高負荷で運転して PEFC→インバータ→駆動用モーターの経路で直接モーターを駆動した方が 全体の効率は高くなると考えられる。

ベース車両および FCHEV-C の M15 モード燃費と勾配との関係を図 2.4.3-2 に示す。FCHEV はベース車両よりも勾配による燃費の変化が大きい。+4%勾配の FCHEV の燃費はベース車両との差が小さいが、-4%勾配ではベース車両の 4. 5 倍となった。この原因としては、以下の点が考えられる。

プラス勾配では負荷が大きくなるため、FCHEV は、PEFC の効率の低い領域で運転する割合が高くなる。逆に、ベース車両は、内燃機関の効率の高い領域で運転する割合が高くなる。一方、マイナス勾配では負荷が小さくなるため、FCHEV は、PEFC の効率の高い領域で運転する割合が高くなる。逆に、ベース車両は、内燃機関の効率の低い領域で運転する割合が高くなる。また、FCHEV は回生エネルギーを利用するため、マイナス勾配ではその利用率が高くなるなどによると考えられる。

表 2.4.3-1 M15 モード燃費予測結果

		単位：km/L		
		0%勾配	+4%勾配	-4%勾配
ベース車両 半積重量4135kg		5.5	3.6	14.5
FCHEV-A (FC20kW+Li-ion80kW)	液体水素140L 半積重量4033kg	10.9	—	—
	液体水素370L 半積重量4159kg	10.6	—	—
	吸蔵合金140L 半積重量4294kg	10.3	—	—
	吸蔵合金370L 半積重量4855kg	9.0	—	—
FCHEV-B (FC50kW+Li-ion50kW)	液体水素140L 半積重量4033kg	12.1	—	—
	液体水素370L 半積重量4159kg	11.7	—	—
	吸蔵合金140L 半積重量4294kg	11.4	—	—
	吸蔵合金370L 半積重量4855kg	10.1	—	—
FCHEV-C (FC50kW+Li-ion80kW)	液体水素140L 半積重量4083kg	11.3	5.5	73.6
	液体水素370L 半積重量4209kg	11.0	—	—
	吸蔵合金140L 半積重量4344kg	10.6	—	—
	吸蔵合金370L 半積重量4905kg	9.4	4.6	64.7

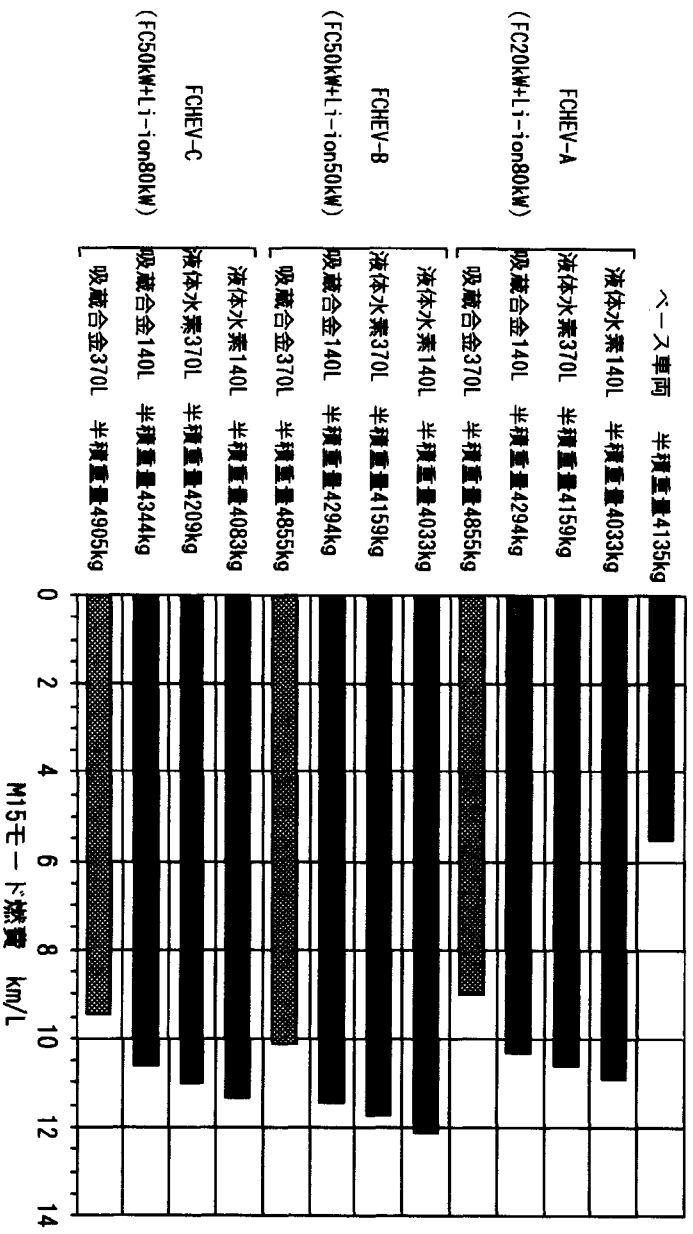


図 2.4.3-1 M15 モード燃費予測結果(0%勾配)

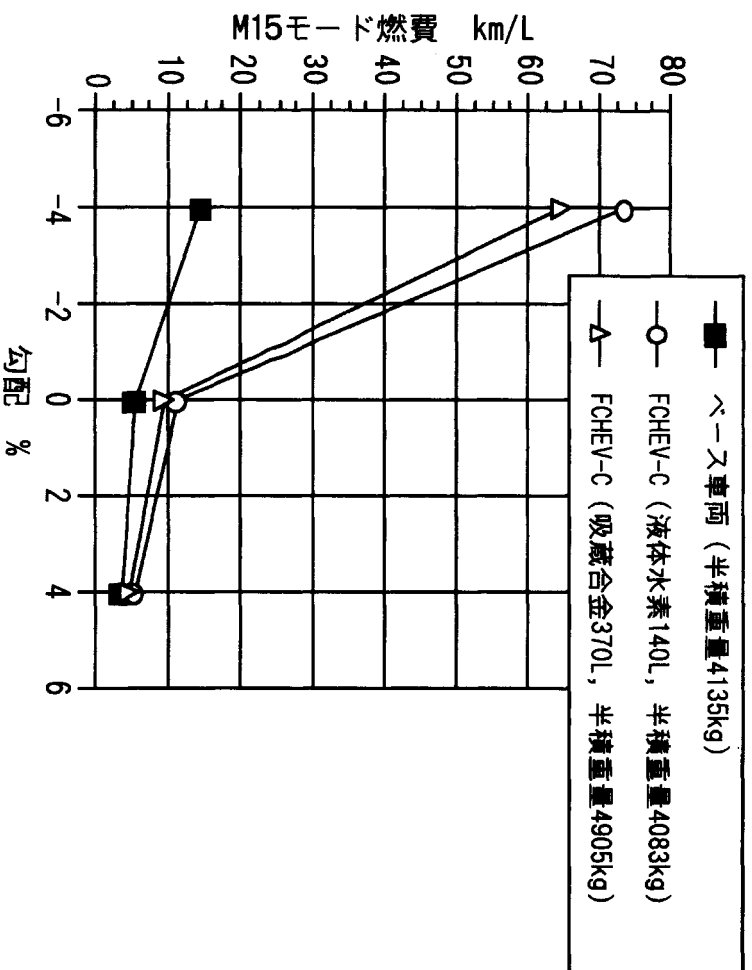


図 2.4.3-2 M15 モード燃費と勾配との関係

2.5 まとめ

国内で輸送機関に消費されるエネルギーは、全消費エネルギーの約2割を占め、その約8割以上を自動車による消費が占めている現状から、自動車の高効率化、省エネルギー化が地球温暖化防止の面でも重要な課題となっている。そのため、高い高効率化が期待できる燃料電池自動車が次世代の自動車として注目されており、実用化も従来考えられていたペースより大幅に早くなる可能性が高くなっている。

改質型より高いエネルギー効率が期待できる純水素燃料電池自動車は、エネルギー源である水素の供給インフラを整備しなければならない点と、水素の車載効率が悪い点がネックとなりうるので、実用面でのエネルギー効率の把握と普及のシナリオの検討が大切であり、平成10年度は以下のとおり、この部分に重点を置いた検討を行った。

すなわち、自動車と供給インフラ双方に関わる関連法規について調査の後、普及シナリオの検討を実施した。その結果、普及に当たっては、水素供給システムを含めた水素自動車システムを安全かつ効率的に運用するための技術基準を確立することが必要であり、このために供給システムを含めた水素自動車システムのフリートテストを実施し、実用上の問題点を明らかにすることが不可欠であることを明らかにした。

また、他の代替エネルギー自動車の普及策を例に、普及のシナリオを検討し、初期の導入シナリオとして、実証から実用化、本格導入に至る過程でのクリアすべき事柄と、それらの事柄相互の関係を明らかにした。また、中期的なシナリオとして、導入車種、導入台数、水素需要量などについても、定量的な見積もりをおこなった。さらに長期的な水素燃料電池自動車の基幹技術の移り変わりについても展望し、各スパンで検討すべき課題等を明らかにした。

また、導入時に問題となると考えられる事項について明らかにした。特に、オンボードメタノール改質が導入されるステップを排除する意味で、導入する車両の順序やインフラ整備の順序などが大きな意味を持つことを明らかにした。

LCAに関しては、車両の使用段階、すなわち Fuel Life Cycle と、車両の製造段階を含めた Life Cycle Inventory について検討した。その結果、FCEVの製造時のエネルギーはガソリン車に比べて15%増加するが、使用時のエネルギーを含めた検討ではFCEVが燃料消費率、排ガスの排出量の双方で大幅に有利であることがあきらかになった。

また、既存のディーゼルエンジンのマイクロバスをベースにした、液体水素搭載のハイブリッド車と水素吸蔵合金搭載ハイブリッド車の都市内走行時の効率シミュレーション結果からは、どちらのハイブリッド車もベース車両より大幅に燃費が改善されるが、登坂状態ではその効果が小さくなる。逆に、下り勾配を走行した場合はハイブリッド車の燃費が大幅に改善されることが明らかになった。これは道路勾配によってFCの負荷状態が異なるため、小さな負荷で効率が高くなるFCの効果が出ていると考えられる。逆に登坂時はFCを効率面で不利な高負荷領域で使用するため効率が低下するためと考える。

3. 純水素燃料電池に関する調査・検討

3.1 はじめに

平成6年度に水素エネルギー時代に有力な電力変換装置として、これまで開発されてきた化石燃料用の各種燃料電池を検討し、現在開発されている固体高分子型燃料電池(PEFC)が水素時代に適し、性能も優れることがわかった。そこで平成7年度から平成9年度は固体高分子型燃料電池の特長を明らかにするため、4つの具体的な応用を想定して燃料電池発電システムを検討し、その特徴・問題点の抽出と今後の開発課題の整理を行なった。燃料は水素とし、酸化剤は、空気の他に液体水素を冷熱源とした酸素が得られあるいは水を電解すると酸素が得られるので、純酸素も検討した。検討した項目は、(1) オンサイト用発電設備としての水素・空気 200kW 級燃料電池システム、(2) 自家発電用の水素・酸素 5,000kW 級燃料電池システム、(3) 燃料電池自動車用の水素・空気 20kW 級燃料電池発電システム、(4) 電力貯蔵機能を持ち、水電解装置と組み合わせた水素燃料電池システムの四つである。また、高純度水素を対象とする時の燃料利用率の限界、熱損失の利用、水管理などを検討し、次期計画における開発課題も抽出した。

平成10年度は検討項目を大きく変えて、これまでの検討をもとに、将来の水素燃料固体高分子型燃料電池の市場調査と燃料電池自動車のLCAのための固体高分子型燃料電池スタックの仕様や製造法、材料の使用量を求めることとした。

固体高分子燃料電池の市場調査を行なうためには、今後のエネルギー資源の需要予測や、環境負荷を軽減するための炭素税などの環境規制、燃料電池自動車の開発・普及などを的確に予測する必要がある。しかし、これらを予測するには多大な労力を要し、予測精度にも限界があるので、多方面の予測データを参考に、利用分野別に導入量の可能性を検討したにとどめた。利用分野として、電力事業用、産業用、民生業務用、ポータブル発電、自動車駆動用、船舶推進用、家庭用発電を検討した。また、それぞれの競合技術と比較し、長期的な燃料価格や電力価格を見通し、水素燃料固体高分子型燃料電池の適用分野を絞り、その可能性を検討し、市場導入の課題を整理した。

燃料電池自動車のLCA用に、固体高分子型燃料電池について以下のような調査を行なった。最近の燃料電池自動車LCA用燃料電池の実例と、現在の固体高分子型燃料電池の製作技術を参考に、スタックの性能、仕様を決め、その製造法と材料の使用量を推定し、輸送機関WGに検討資料を提出した。

3.2 純水素固体高分子型燃料電池発電システムの市場調査研究

3.2.1 用途の分類

純水素を燃料とした固体高分子型燃料電池発電システムは高い発電効率及びコンパクト性にすぐれており、各種分野での利用が期待されている。

本調査の検討対象分野は以下の通り。

- 電力事業用発電システム
- 産業用発電システム
- 民生業務用発電システム
- ポータブル発電システム
- 自動車駆動用発電システム
- 船舶推進用発電システム
- 家庭用発電システム

3.2.2 市場算定の時期

我が国の水素ガス年間販売量は図 3.2.2-1 に示すように約 1.8 億 Nm³ であり、主たる用途は弱電、化学、金属及び硝子工業の還元用原料に使用されている。

従って、発電及び駆動用に利用されている水素は極めて少ない。

水素がエネルギー源として利用される時期は地球温暖化による二酸化炭素低減運動の高まりによる炭素税の導入、石油資源の枯渇、ディーゼル等の排ガス規制強化、水素製造価格、水素供給スタンド等の社会インフラ整備等の影響を受けるものと想定される。

図 3.2.2-2 に世界の水力及び太陽エネルギーから水素エネルギーを生産することを想定した場合の水素導入量を示す。

2050 年に水力発電による水素エネルギー生産が水力資源の制約から 15EJ (10¹⁸J) で飽和し、以後は太陽エネルギーによる水素生産が主流を占めるであろうと想定している。

太陽エネルギーについては、世界の全砂漠地帯を対象に変換効率 15%の太陽光発電を想定した場合、22,363EJ のエネルギーが得られる。これは、現在の世界の全エネルギー需要 (1993 年 : 333EJ) の 70 倍程度に相当することから太陽光発電からの水素は将来の世界のエネルギー需要を充分賄えると想定している。

図 3.2.2-3 は追加コストがないつまり、炭素税の導入がない場合の我が国に於ける水力水素導入量を示す。パラメータとしては技術開発によって水素価格が年率 2.18、1.5、1%低下する場合を想定している。

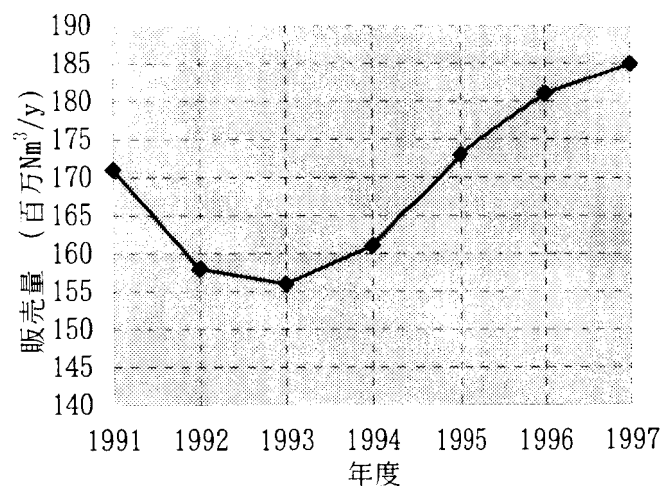
水力水素導入は水素価格が年率 2.18%で低下する場合には 2030 年頃約 0.15EJ、2050 年頃に約 2.5EJ に到達すると考えられる。

我が国の水素ガス販売量推移

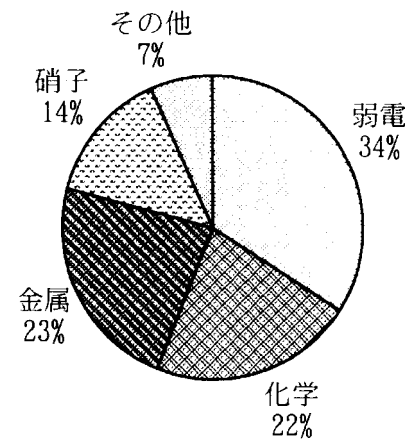
年度	販売量百万Nm ³ /y
1991	171
1992	158
1993	156
1994	161
1995	173
1996	181
1997	185

用途	シェア%
弱電	34.2
化学	21.8
金属	23.3
硝子	14
その他	6.7
合計	100

我が国の水素ガス販売量百万Nm³/y



我が国の水素ガス用途



出典：ガスジョラス' 97（ガスレビュー社）

図3.2.2-1 我が国の水素ガス販売量と用途

年	水力水素	太陽水素
2020	1.5	0
2030	2.5	0
2040	9	0
2050	15	0
2075	15	22
2100	15	50

(単位：EJ)

出典 NEDO/HAB室
We-net 第一期研究開発中間成果報告書 (H9/1)

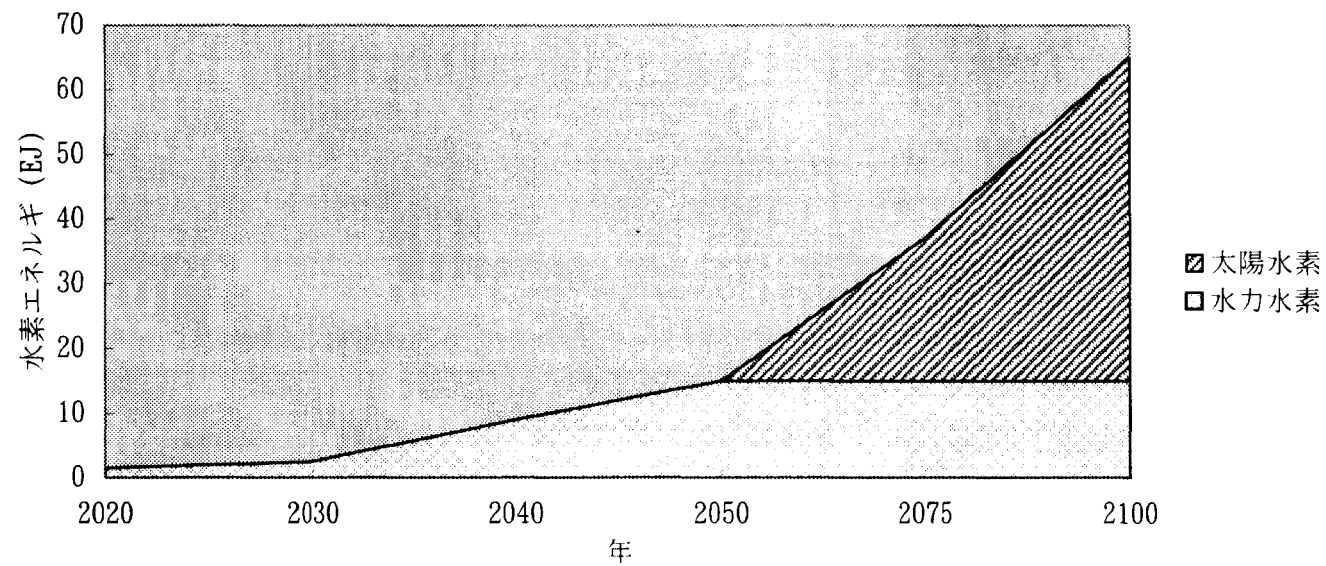


図3.2.2-2 世界の水力及び太陽水素の導入量 EJ

年	水素価格低下率%/年		
	2.18	1.50	1.00
2010	0	0	0
2020	0.01	0	0
2030	0.15	0.06	0.03
2040	0.6	0.3	0.2
2050	2.45	0.8	0.35

(単位：EJ)

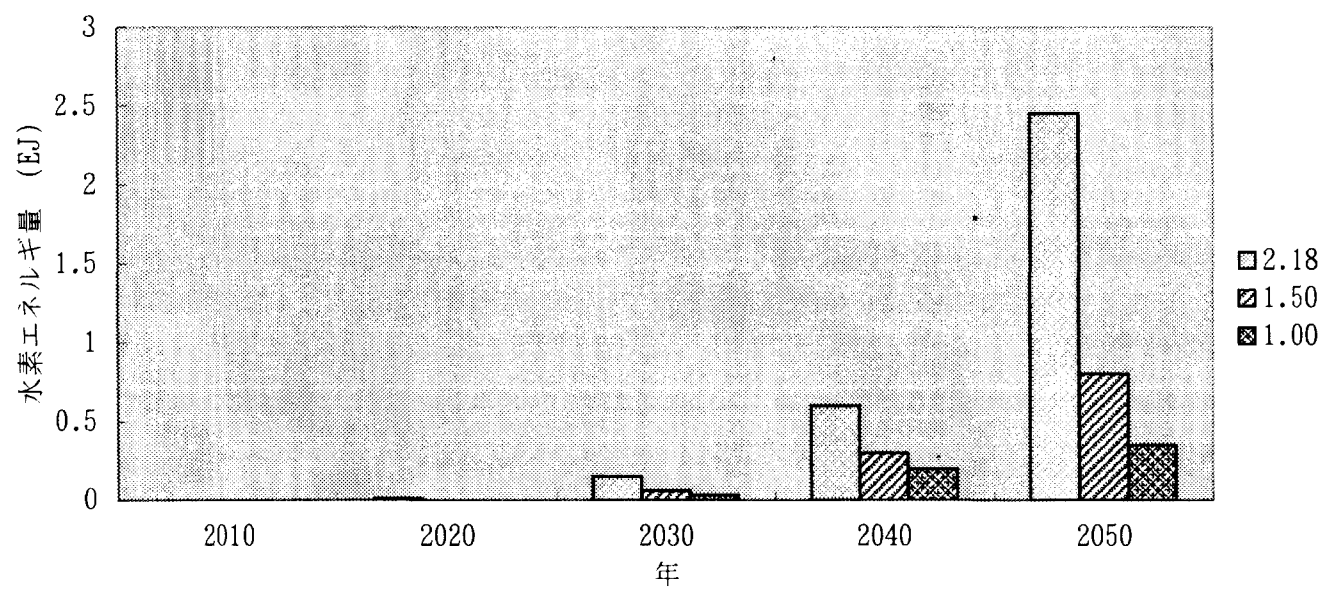


図3.2.2-3 日本の水素エネルギー導入量 (追加コスト無し)

図 3.2.2-4 に炭素税が導入される場合を示す。この場合、エネルギー価格が上昇するので、水力水素の導入開始時期は 2020 年頃と早まり、水素エネルギーの導入量は追加コストのない場合より低下し、2030 年で約 0.1EJ、2050 年で約 1.4EJ となる。

この調査では 2030 年以降の水素エネルギー時代を想定することとするが、我が国の産業構造及び規模も相当大きく変化することが予想され、市場規模の想定は極めて難しいので、ここでは産業構造及び規模は現状維持のまま推移すると仮定し、検討を行うこととする。

以上、長期的には水素エネルギー時代の到来と共に水素燃料固体高分子燃料電池の普及が予測される。また、短期的には副生水素など安価な水素価格の水素を利用することにより固体高分子燃料電池の導入が進むものと考えられる。

3.2.3 調査データ

(1) 電力事業用発電システム

図 3.2.3-1、図 3.2.3-2 に我が国の電力事業用発電システムの発電所数と最大出力を示す。我が国の火力、水力、地熱及び原子力発電所は 1996 年度で 1785 ケ所である。1996 年度の最大出力はで約 2.1 億 kW であり、発電設備能力は 660～500 万 kW/年程度で増加している。（年率設備増加率 2.8％）

純水素固体高分子型燃料電池発電システムが食い込む余地のある火力発電設備能力は 1996 年度で 1.23 億 kW、発電所の平均発電出力は 60 万 kW である。発電能力の増加は約 300 万 kW/年であり、発電所建設単価を 25 万円/kW とすると市場規模は約 7500 億円/年である。

(2) 産業用発電システム

化学、繊維、食品等の産業用発電コージェネレーションシステムの発電容量の推移と発電出力を第 3.2.3-3、3.2.3-4 図に示す。発電出力は 1997 年度で約 26 万 kW の増加である。設置数は約 70～90 ケ所であり、その約 80％は発電規模が 5000kW 以下である。発電所建設単価を 25 万円とすると、産業用発電システムの市場規模は約 650 億円/年である。

(3) 民生業務用発電システム

ホテル、病院、デパート等の民生用発電コージェネレーションシステムの発電容量の推移と発電出力を図 3.2.3-5、図 3.2.3-6 に示す。発電出力は 1997 年度で約 8 万 kW である。

設置数は約 110～170 ケ所であり、その約 70％は発電出力は 500kW 以下である。発電所建設単価を 25 万円/kW とすると民生用発電システムの市場規模は約 200 億円/年である。

年	水素価格低下率%/年		
	2.18	1.50	1.00
2010	0	0	0
2020	0.03	0.03	0.03
2030	0.1	0.08	0.07
2040	0.5	0.3	0.15
2050	1.35	0.7	0.3

(単位：EJ)

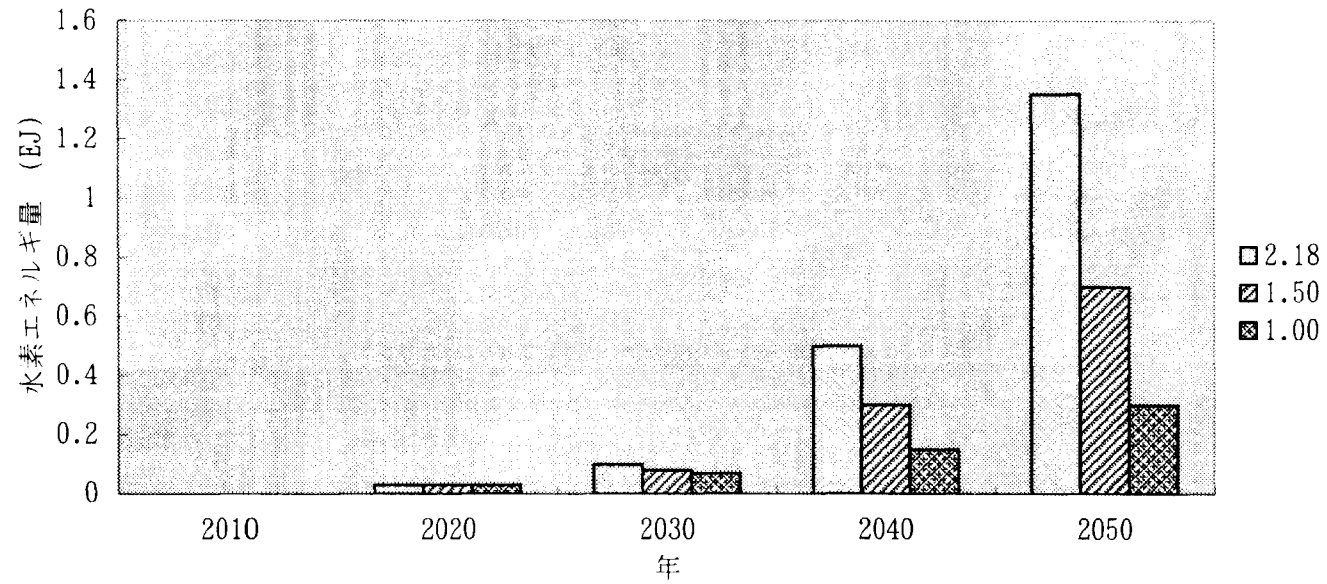


図3.2.2-4 日本の水力水素導入量（炭素税が導入される場合）

(単位：箇所)

	1992	1993	1994	1995	1996
水力	1533	1534	1541	1549	1559
地熱	5	6	8	10	11
火力	198	201	202	197	198
原子力	16	17	17	17	17
合計	1752	1758	1768	1773	1785

出典：電気事業連合会ホームページ

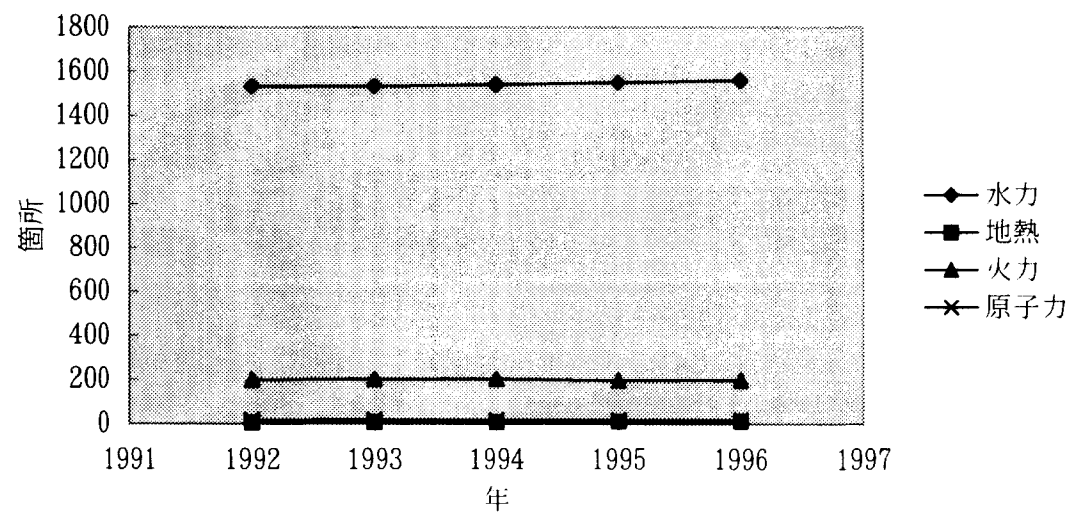


図3.2.3-1 電気事業用発電所数の推移

(単位：MW)

	1992	1993	1994	1995.05	1996
水力	38140	38593	40558	43400	43054
地熱	235	263	343	468	494
火力	111039	113196	116420	119204	123242
原子力	34419	38376	40366	41191	42547
合計	183833	190428	197687	204263	209337

出典：電気事業連合会ホームページ

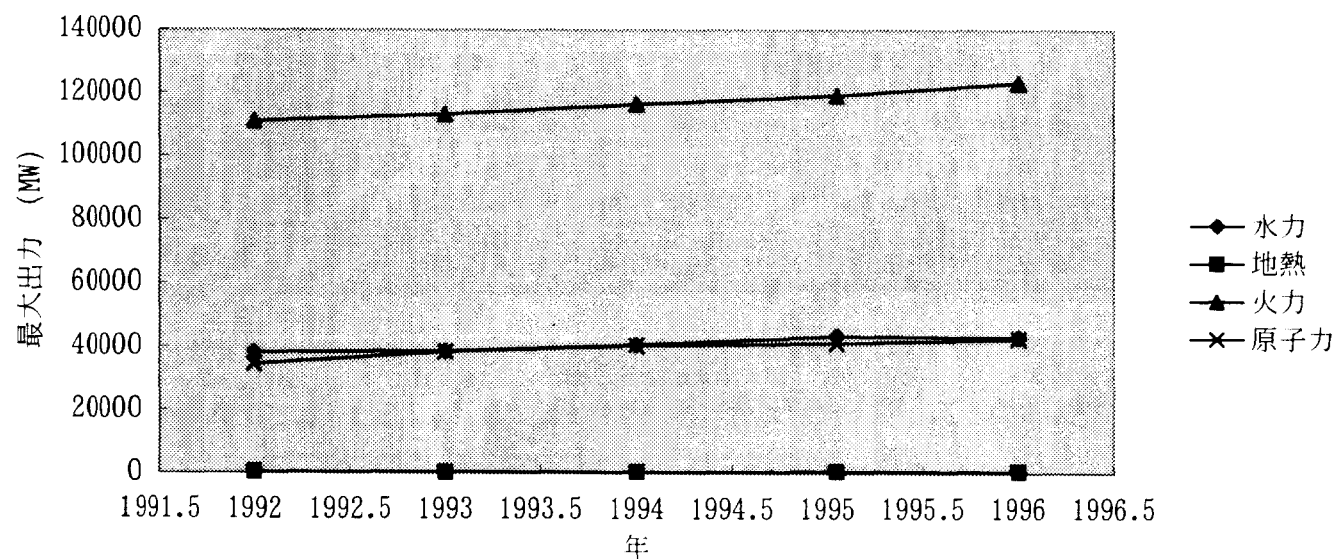


図3.2.3-2 電気事業用最大出力の推移

年	発電容量(kW)
～89	1,528,359
90	377,484
91	198,788
92	149,723
93	207,144
94	198,039
95	244,897
96	300,904
97	257,954

出典：98年度版常用発電・コージェネレーション市場の
現状と将来展望

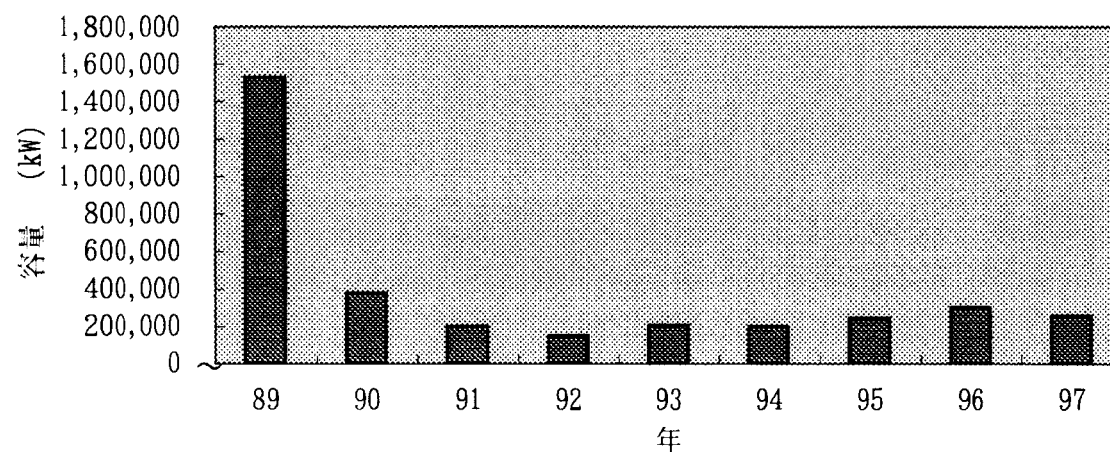


図3.2.3-3 産業用コージェネレーション発電容量の推移

容量 \ 年度	～87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	合計
～500KW	41	33	52	41	26	20	20	12	24	19	19	307
500～999KW	19	16	8	21	14	14	3	7	8	15	10	135
1000～4999KW	40	52	55	53	36	19	28	33	43	38	34	431
5000～9999KW	12	8	17	9	11	3	6	8	10	11	8	103
10000～19999KW	13	9	8	10	2	5	3	3	3	1	5	62
20000～29999KW	3	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	7
30000KW以上	5	3	0	0	0	0	1	1	1	3	1	15
合計	133	122	141	135	89	61	61	64	89	88	77	1060

出典：98年度版常用発電・コージェネレーション市場の現状と将来展望

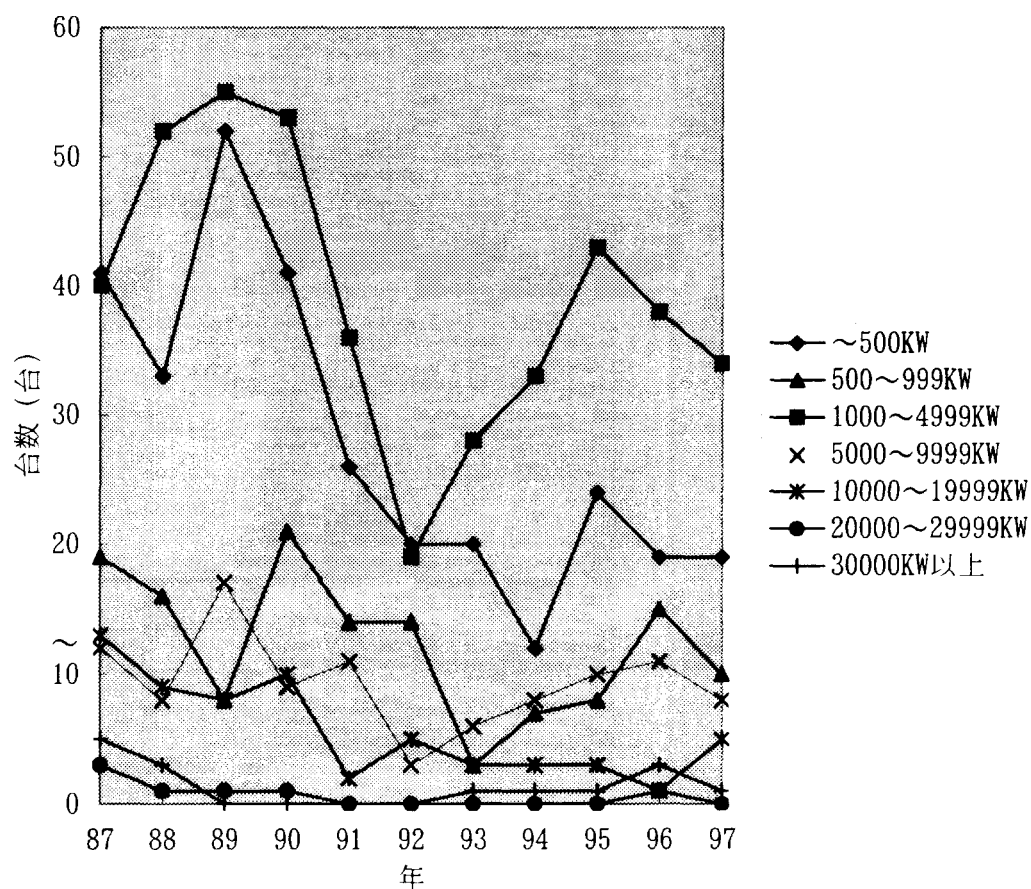


図3.2.3-4 産業用コージェネレーションの発電出力の推移

年	発電容量(kW)
～89	217,554
90	82,367
91	74,806
92	56,111
93	102,371
94	54,513
95	47,717
96	79,520
97	81,872

出典：98年度版常用発電・コージェネレーション市場の
現状と将来展望

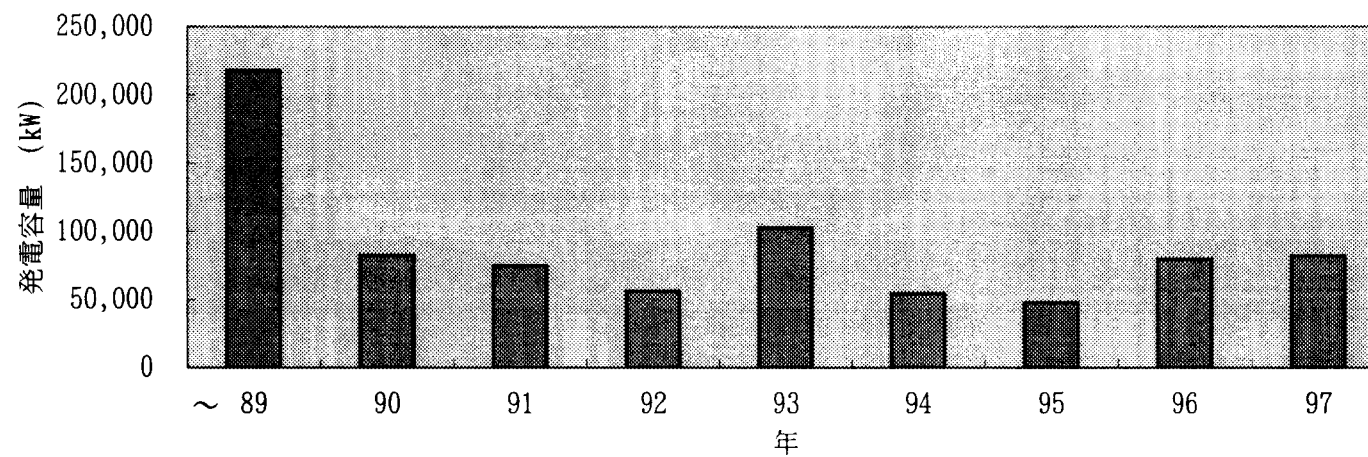


図3.2.3-5 民生用コージェネレーションの発電容量の推移

年度 容量	～87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	合計
～500KW	141	71	126	131	103	88	69	87	93	125	88	1122
500～999KW	24	23	21	15	18	13	20	15	6	15	21	191
1000～1999KW	12	12	15	17	14	6	8	7	9	19	19	138
2000～2999KW	4	2	3	4	3	5	6	0	2	3	1	33
3000～	7	1	2	5	4	3	4	5	3	4	4	42
合計	188	109	167	172	142	115	107	114	113	166	133	1526

出典：98年度版常用発電・コージェネレーション市場の
現状と将来展望

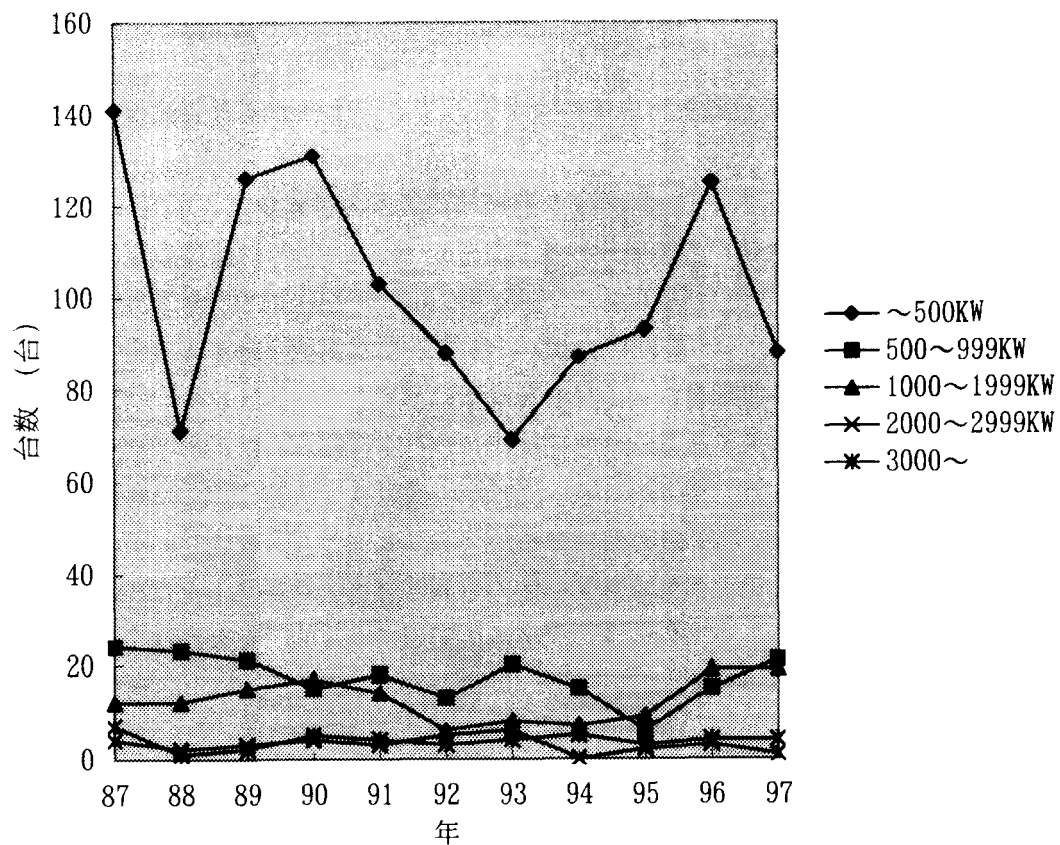


図3.2.3-6 民生用コージェネレーションの発電出力の推移

(4) ポータブル発電システム

我が国の工事用、レジャー用等のポータブル発電システムの出荷実績と発電出力規模を図 3.2.3-7 に示す。出荷台数は年間約 50～60 万台で、発電出力は約 100 万 kW である。販売価格は約 8 万円/kW とするとポータブル発電システムの市場規模は約 800 億円である。

(5) 自動車駆動用発電システム

世界の自動車の生産台数は 1995 年で約 5000 万台/年で、内訳は乗用車 3600 万台/年、トラック、バスが 1400 万台/年である。各国の自動車生産台数及び我が国の自動車市場の推移を図 3.2.3-8、図 3.2.3-9 に示す。

最近、電気自動車等の低公害自動車駆動システムの開発が脚光を浴びている。その代表例が動力源としてバッテリーだけの PEV(Pure Electric Vehicle)自動車、バッテリーと内燃機関を搭載した HEV(Hybrid Electric Vehicle)自動車及び燃料電池自動車等である。

これらがどの様に自動車市場にエントリーするかは各種調査会社の予測が報告されている。

図 3.2.3-10、図 3.2.3-11 は(株)矢野経済研究所の世界及び我が国に於ける PEV、HEV 及び燃料電池自動車の市場規模を示している。2010 年に於ける電気自動車の生産台数は約 1483 万台/年で世界の 1995 年の自動車生産台数の約 30%を占め、内訳は HEV が 1280 万台/年、PEV が 200 万台/年、燃料電池自動車 3 万台/年である。一方、当事者である自動車会社の見解を以下に示す。

図 3.2.3-12 は独ダイムラーベンツ社が 1997 年に発表した予測である。世界の電気自動車市場は 2010 年で約 150 万台/年、内訳は (PEV+HEV) 自動車が約 130 万台/年、燃料自動車が約 20 万台である。

自動車会社の燃料電池自動車普及台数の予測は調査会社予測より楽観的である。

自動車会社予測による燃料電池自動車の市場規模は 2030 年を外挿すると約 500 万台/年となり、駆動装置関連の単価を 30 万円/台とすると、約 15000 億円の市場となると想定される。

(6) 船舶推進用発電システム

純水素を燃料とする固体高分子型燃料電池発電システムが適用可能な我が国内航船の船型は 100 総トンから 499 総トン型で、4886 隻、エンジン平均出力を 500kW 程度とすると約 244 万 kW である。

固体高分子型燃料電池発電システムの単価をディーゼルエンジン並の 4 万円/kW とすると、船舶推進用発電システムの潜在需要は約 1000 億円/年である。

(単位：千台)

年度	1KW以下	1～2KW	2～3KW	3～6KW
1992	226	109	124	104
1993	229	97	126	91
1994	213	83	108	83
1995	236	72	123	79
1996	231	72	140	80
1997	237	67	145	100

出典：(社)陸用内燃機関協会

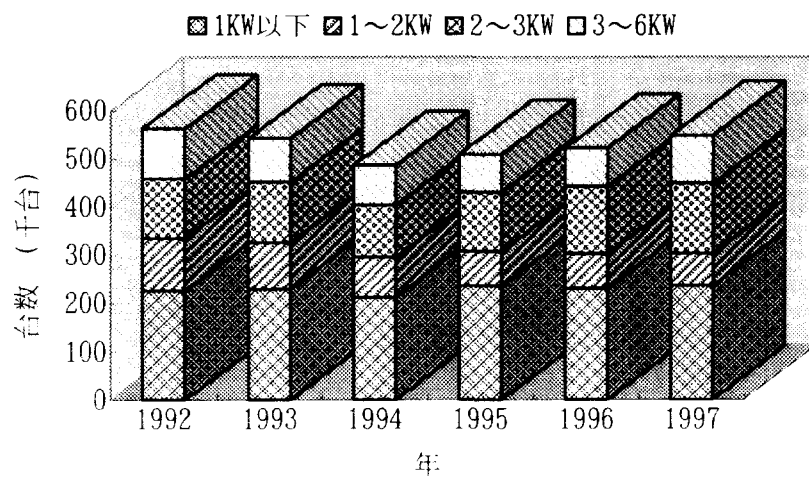


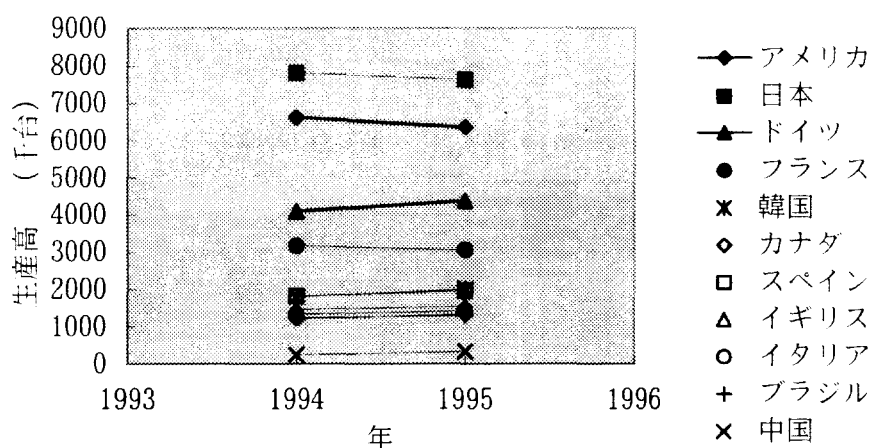
図3.2.3-7 日本のポータブル発電システムの出荷実績

(単位：千台)

	1994			1995		
	乗用車	トラック	計	乗用車	トラック	計
アメリカ	6614	5649	12263	6351	5635	11986
日本	7802	2752	10554	7611	2585	10196
ドイツ	4094	262	4356	4360	307	4667
フランス	3175	383	3558	3051	424	3475
韓国	1806	506	2312	2003	523	2526
カナダ	1216	1106	2322	1337	1070	2407
スペイン	1822	321	2143	1959	375	2334
イギリス	1467	228	1695	1532	233	1765
イタリア	1341	194	1535	1422	245	1667
ブラジル	1249	333	1582	1297	332	1629
中国	248	1103	1351	321	1114	1435

出典：日本国勢図会'97/98 国勢社出版

世界の乗用車生産高



世界のトラック生産高

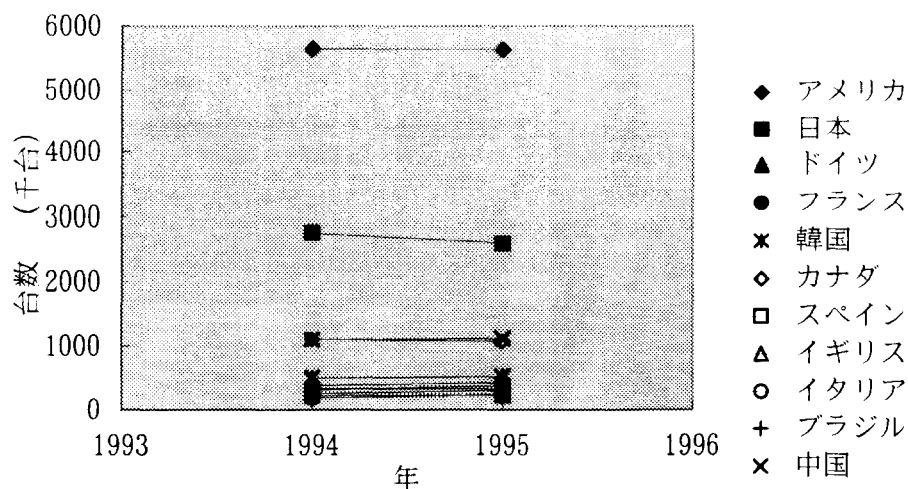


図3.2.3-8 世界の自動車生産高

(単位：千台)

	94	95	96	97
登録車	4612	5149	7078	6725
乗用車	3400	3543	3711	3575
普通車	687	889	898	873
小型車	2713	2654	2813	2702
トラック	1494	1588	1647	1522
普通車	147	177	168	151
小型車	1347	1411	1479	1371
バス	18	17	17	16
軽自動車	1615	1715	1702	1612
乗用車	810	900	957	917
トラック	805	815	745	695
総計	6527	6863	7077	6725

出典：自動車技術 1998.8

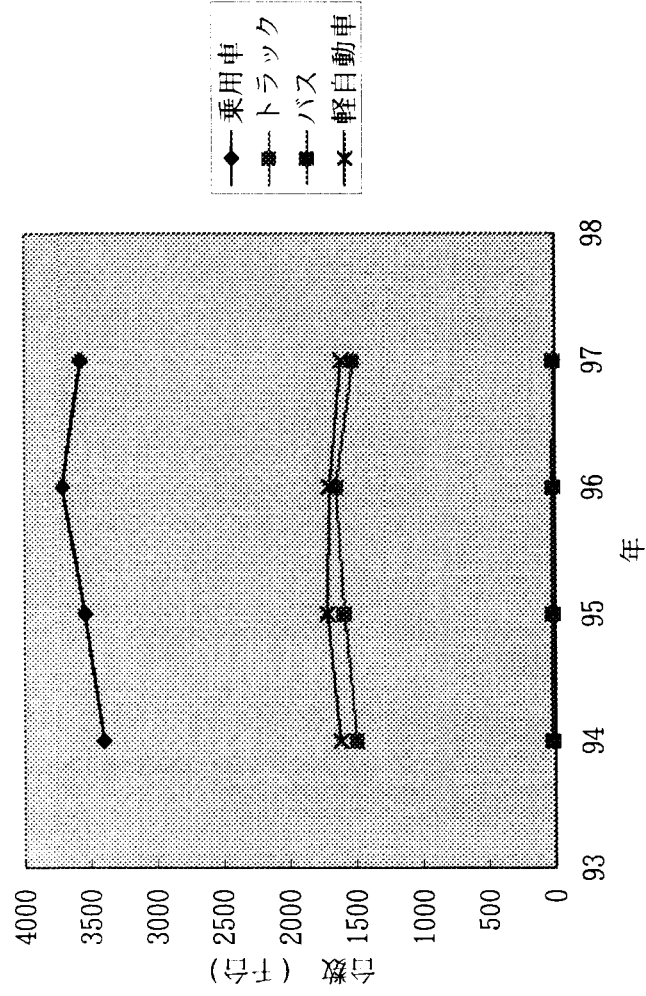


図3.2.2.3-9 国内自動車市場の推移

	PEV	HEV	FCEV
1998	1.7	23	0
1999	2.6	33.5	0
2000	5.7	96	0
2001	10.8	204	0
2002	33.5	309	0
2003	95	575	0.2
2004	200	1170	0.2
2005	420	2010	0.4
2006	680	3220	0.4
2007	1000	5500	10
2008	1340	8600	15
2009	1730	10700	20
2010	2000	12800	30

(単位：千台/年)

出典：矢野経済研究所”電気自動車市場98”

■ PEV ■ HEV □ FCEV

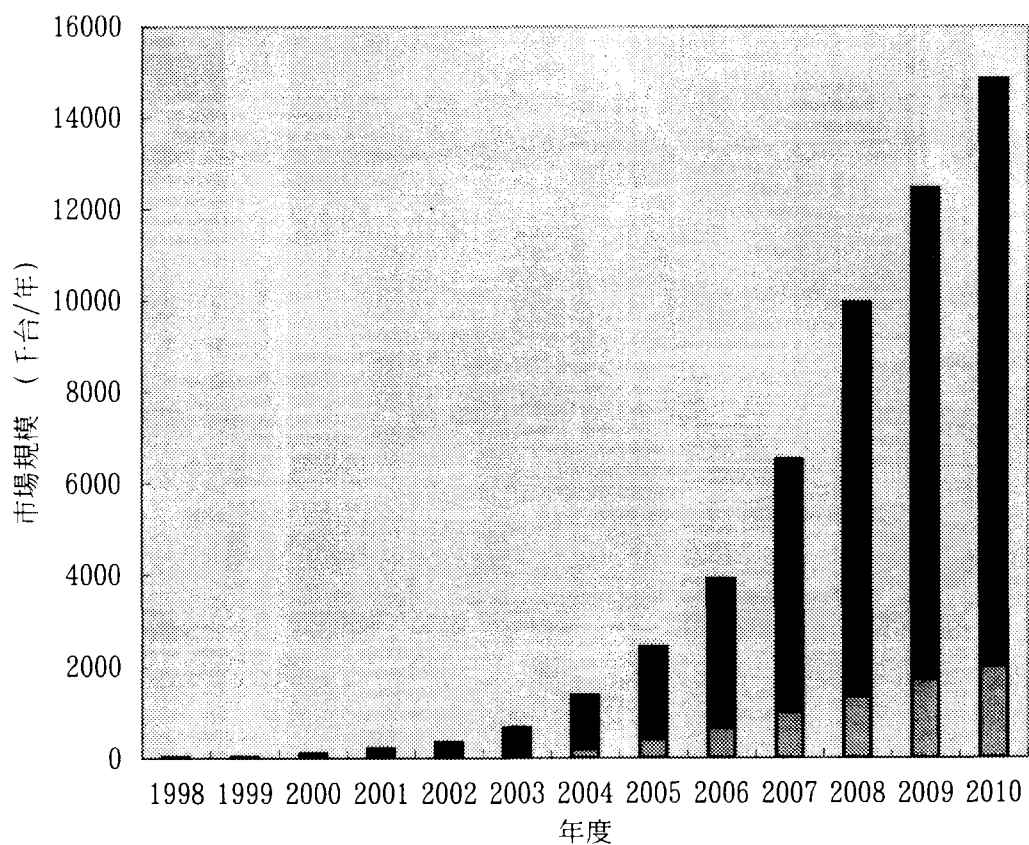


図3.2.3-10 全世界の次世代自動車市場規模予測（千台）

	PEV	HEV
1998	0.3	21
1999	0.32	35
2000	0.5	70
2001	3	120
2002	6	180
2003	15	350
2004	70	680
2005	150	950
2006	260	1200
2007	400	2200
2008	600	3100
2009	800	3500
2010	900	3900

(単位：千台/年)

出典：矢野経済研究所”電気自動車市場98”

■ PEV ■ HEV

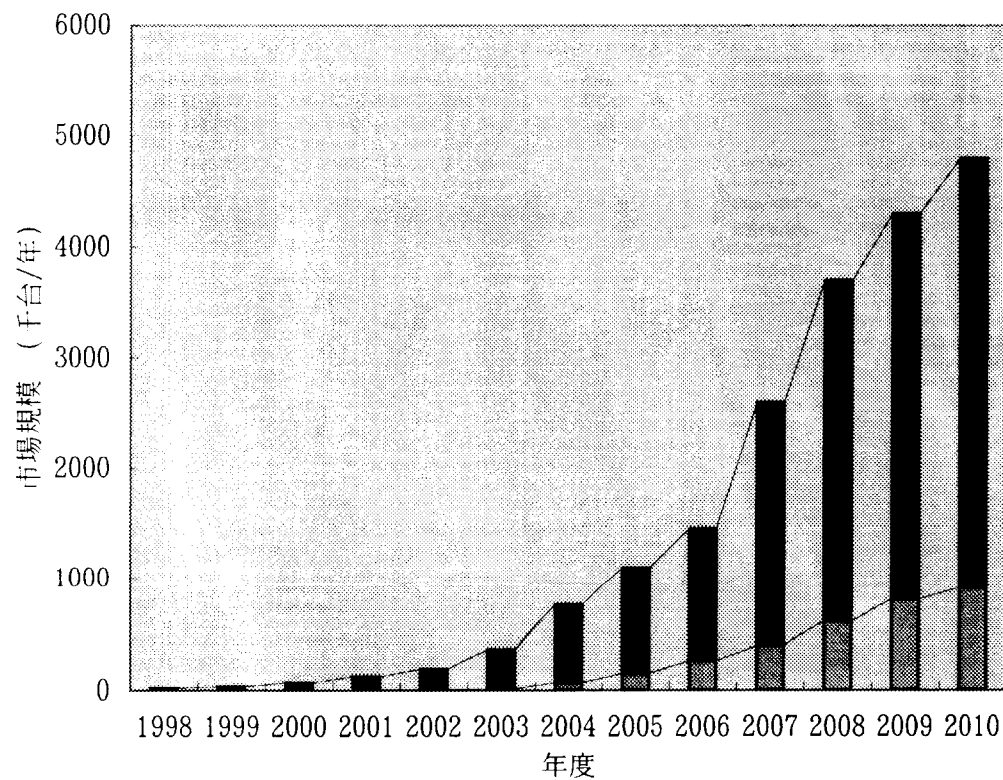
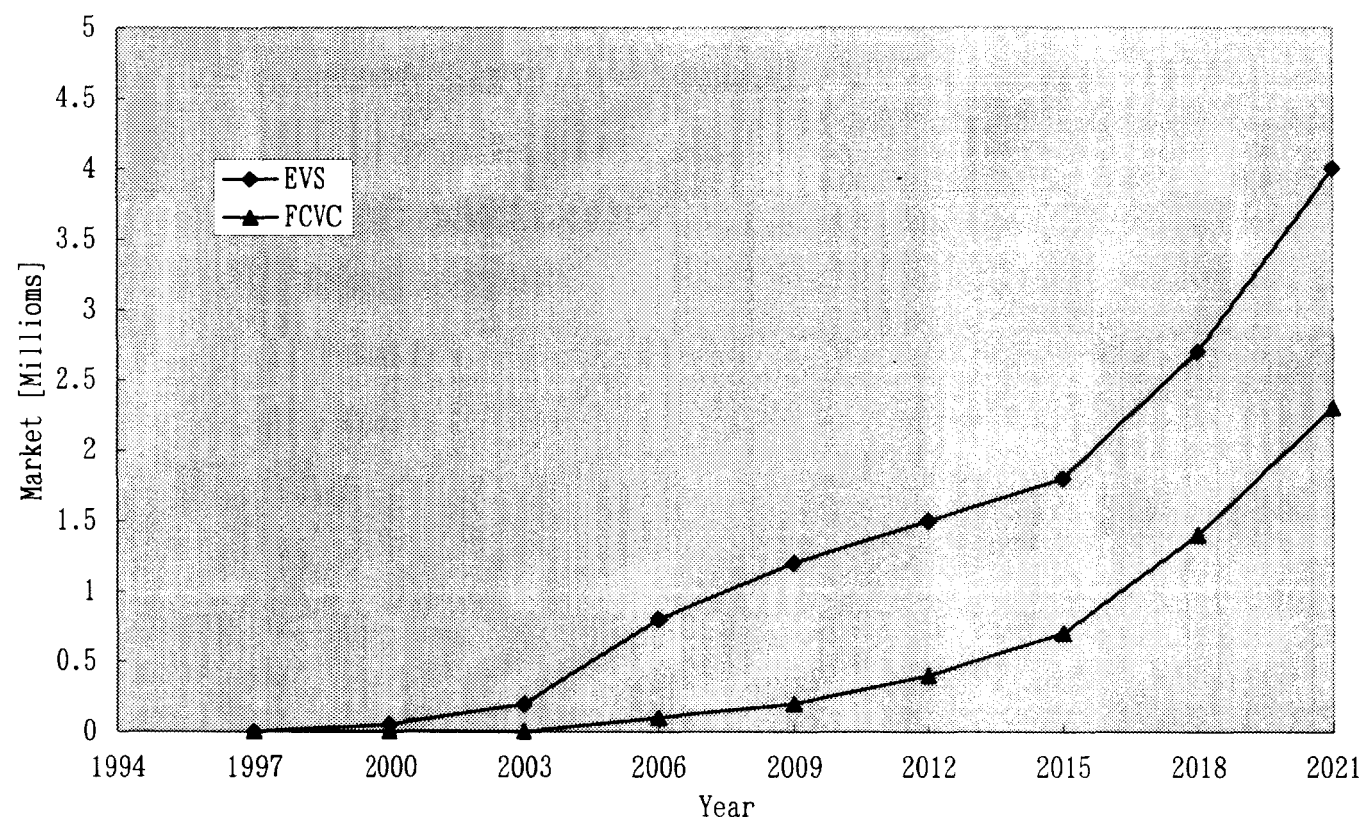


図3.2.3-11 我が国のPEV/HEVの市場規模 (千台/年)



出典: Commercializing Fuel Cell Vehicles 97

図3.2.3-12 Market for EVS and FCVS

(7) 家庭用発電システム

図 3.2.3-13 に我が国の新築住宅着工戸数を示す。平均すると 160 万戸/年であり、一戸当たりの発電出力を 3kW とすると、480 万 kW の発電出力に相当する。数% の戸数が 2030 年に純水素固体高分子型燃料電池発電システムを採用し、kW 当たりの出力単価を 15 万円/kW とすると家庭用発電システムの市場規模は約 200 億円と想定される。

3.2.4 市場導入絞り込み

(1) 純水素固体高分子型燃料電池発電システムの特徴

純水素を燃料とする固体高分子型燃料電池の特長は以下の通りである。

- 純水素を燃料とするために高燃料利用率であり、したがって、高発電効率が期待できる。
- 作動温度が 80℃が低いので、始動時間が短い。
- 燃料が水素なので排ガスがゼロエミッションである。
- 振動、騒音が少ない。

一方、以下の短所がある。

- 燃料が水素であるため、低コスト水素製造法の確立及び水素供給インフラの整備が実用化には不可欠である。
- 排熱が 80℃以下の温水であるため、熱の有効利用法に制約がある。
- 現状、設備コストが高い。

(2) 競合技術との比較

純水素を燃料とする固体高分子型燃料電池が上記市場を獲得出来るかどうかは代替技術との競合で優位性を発揮出来るかどうかにかかっている。

表 3.2.4-1 に各種発電システムとの比較を示す。純水素固体高分子型燃料電池発電システムは高効率、低公害性であることが示されている。

表 3.2.4-2 に各種燃料電池の比較表を示す。リン酸型及び溶融炭酸塩型燃料電池より低温作動であり、始動時間が短く、電流密度も高く、コンパクトな燃料電池発電システムが期待できる。

但し、低温作動であるため、一酸化炭素被毒性が高く、燃料ガス中の一酸化炭素濃度は通常 10ppm 以下が望まれる。

(3) 純水素固体高分子型燃料電池発電システム基本仕様

表 3.2.4-3 に本調査・研究で検討中の 200kW オンサイト発電システム、酸水素 5000kW 分散電源用発電システム及び自動車用燃料電池システムの基本仕様比較を

年度	新築住宅着工戸数 万戸
1990	171
1991	137
1992	140
1993	149
1994	157
1995	147
1996	164

出典：東洋経済新報社”経済統計年鑑’97”

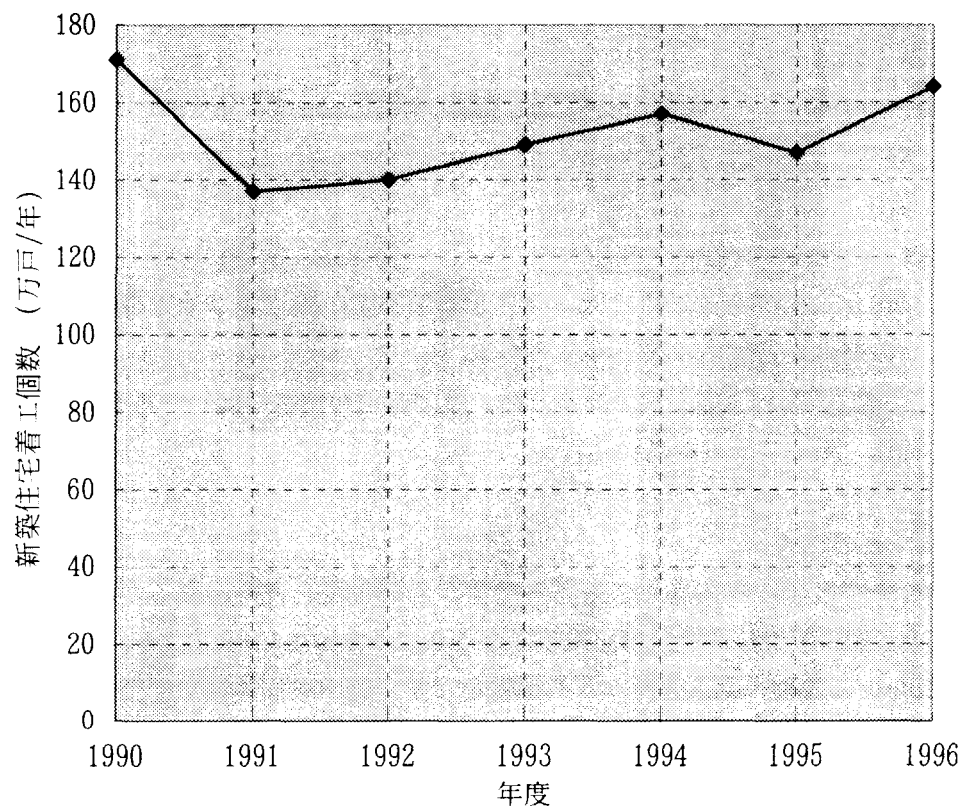


図3.2.3-13 我が国の新築住宅着工戸数

表3.2.4-1 各種発電システム比較表

	適用規模	発電効率 (LHV) (定格出力時)	燃料	始動時間	排ガス温度	熱電比	廃熱回収源	振動 (無対策時)	排ガスNOx (ppm)	備考
ガスタービン	小、中	約30～40%	ガス	15秒程度	500～600℃	1～1.5	排ガス、冷却水	大	<200 O ₂ : 0%	冷却水が必要で 温水回収が最適
ディーゼルエンジン	小、中	約35～45%	灯油、軽油、 A重油	10秒程度	400～500℃	約1	排ガス、冷却水	大	900～1300 O ₂ : 13%	冷却水が必要で 温水回収が最適
ガスタービン	中、大	約25～35%	灯油、軽油、 A重油	40秒～5分	450～550℃	2～3	排ガス	中	50～70 O ₂ =13%	冷却水は殆ど不要 蒸気回収が最適
蒸気タービン	大	約20～45%	原油、C重油、 LNG	2～3時間	100～200℃		低圧排気蒸気 抽気蒸気	中		
純水素燃料固体 高分子型燃料電池	小、中	約45～52% (H ₂ /Air)	純水素	5分程度	80℃以下	0.5～1	排ガス、冷却水	小	無し	開発段階であり、 普及はこれから

表3.2.4-2 燃料電池の種類と特徴

分類	リン酸型燃料電池 (PAFC)	溶融炭酸塩型燃料電池 (MCFC)	固体高分子型燃料電池 (PEFC)
電解質	リン酸 H_3PO_4	炭酸塩 Li_2CO_3 、 K_2CO_3	高分子交換膜 - CF_2 、- SO_3H
移動イオン	H^+	CO_3^{2-}	H^+
作動温度	約200℃	約650℃	約80℃
発電効率	35～45%	45～60%	35～45%
廃熱利用	温水、蒸気	ガスタービン、蒸気タービン	温水
総合効率	70～80%	(70～80%)	—
反応ガス	H_2 (CO : 1%以下)	H_2 、CO	H_2 (CO : 10ppm以下)
燃料	天然ガス、メタノール	天然ガス、メタノール、 ナフサ、石炭ガス化ガス	天然ガス、メタノール
特徴	・廃熱を給湯、冷暖房に利用できる	・廃熱を複合発電システムに利用できる ・燃料の内部改質が可能	・低温で作動し、電力密度が高い ・ほぼ瞬時動作が期待できる ・電気自動車としても使える
開発段階	・1MW、5MW実証プラント運転試験中 ・実用化の最終段階	・100kW級燃料電池を開発 ・1MWパイロットプラント建設	・数kW～数十kW級電池スタック、周辺機器を開発中

出典：日本機械学会 第75期通常総会講演会 資料集 (VI)

表3.2.4-3 純水素固体高分子型燃料電池発電システム基本仕様

	200k w オンサイト型	5000k w 分散型	自動車用
定格出力(kw)	200	5020	25/127
定格電圧 (セル電圧)	AC210V*3phase	AC2090V*3phase	(0.81/0.42V)
燃料	水素	水素	水素
酸化剤	空気	酸素	酸素
作動圧力(MPa)	0.1	0.8	0.3
作動温度(°C)	90		80
セル電圧(V)	0.7	0.9	0.87/0.52
電流密度(A/cm ²)	0.3	0.3	0.18/1.5
水素利用率(%)	99.5	99	99
酸素利用率(%)	60	98	50
送電端効率(% at HHV)	43.3	56.42	49/25
備考			60/120km

WE-NET/1998/3水素利用技術に関する調査、検討/NEDO-WE-NET977

示す。送電端効率は 200kW オンサイト型で 43.3%(HHV)、5000kW 分散型で 56.4%(HHV)、自動車用で 49%(60km)/25%(120km)(HHV)である。

(4) 長期的燃料、電力及び水素価格の見通し

図 3.2.4-1 に我が国に於ける燃料及び電力の長期コスト見通しを示す。

石炭、石油及び LNG 等の燃料価格は 2030 年までの期間に上昇する。特に、石油及び LNG 価格上昇は顕著である。一方、我が国の電力及びガス料金は欧米に比べ割高であり、今後、これらの公共料金を低減する政策（規制緩和等）が強力に推進される為、電力料金は据置きないし低減傾向になると考えられる。

図 3.2.4-2 に我が国に於ける太陽光発電、風力発電等のクリーン発電コストの長期見通しを示す。水力発電、風力発電、地熱発電コストは現状 20 円/kWh 以下であり、且つ、電力及び電灯総合単価以下になり、導入普及が図られている。特に、風力発電は立地的制約が水力及び地熱発電より少なく、今後、発電容量の大幅な増大が期待されている。家庭用太陽光発電は 2015～2020 年頃に電力及び電灯総合発電単価以下に到達し、普及期に入るものと想定される。

図 3.2.4-3 に水素を含む各種燃料の長期価格見通しを示す。水素価格は技術開発により価格が年率 0、1、2、3%低減する場合を想定している。

現状の水素価格は 42 円/Nm³ としている。水素価格が 30/Nm³ 以下になるのは 3%/年のコストダウンの場合でも 2030 年以降である。また、水素価格が単位エネルギーベースで LNG 価格以下になるのは 2050 年以降である。

(5) 純水素固体高分子型燃料電池発電システムの発電単価解析

首題 F S の前提条件は以下の通り。

- 年間稼働日数 300
- 稼働時間 24h
- 金利 3.5%
- 設備償却 7 年定率*10%残存
- 税金 2.1%
- メンテナンス 3%*初期設備費
- 人件費 総経費の 10%

図 3.2.4-4 に表 3.2.4-3 に示す基本仕様の 200kW/PEFC オンサイト型発電システムの発電単価を示す。このシステムは水素/空気により作動し、運転圧力は大気圧である。送電端効率は 43.3%(at HHV)である。

排熱温度が 80℃と低く、コージェネレーションシステムとしては不適である。

パラメータとして水素ガス単価と発電プラント設備コストを選定している。従って、オンサイト型としての適用ポイントは電力及び電灯総合単価である 22 円/kWh

	1995	2000	2010	2020	2030
石炭	0.64	0.78	0.91	1.08	1.21
石油価格	1.49	1.93	2.55	3.33	3.98
LNG価格	1.52	2.1	2.73	3.54	4.26
都市ガス標準価格	8.51	8.6	8.67	8.77	8.51
家庭用LPG価格	18.92	18.92	19.78	19.78	18.92
水力発電水素				13.89	11.33
電力総合単価	17	17	17	17	17
電灯総合単価	25	24	24	23	22
備考 (為替レートY/\$)	96	112	121	134	140

(YEN/kwh)

出典： 日本エネルギー経済研究所/1998/5/28
 ”わが国における再生可能エネルギーの導入見通しと制度的課題”
 NEDO/HAB室/1997/1
 ”WE-NET第一期研究開発中間成果報告書”

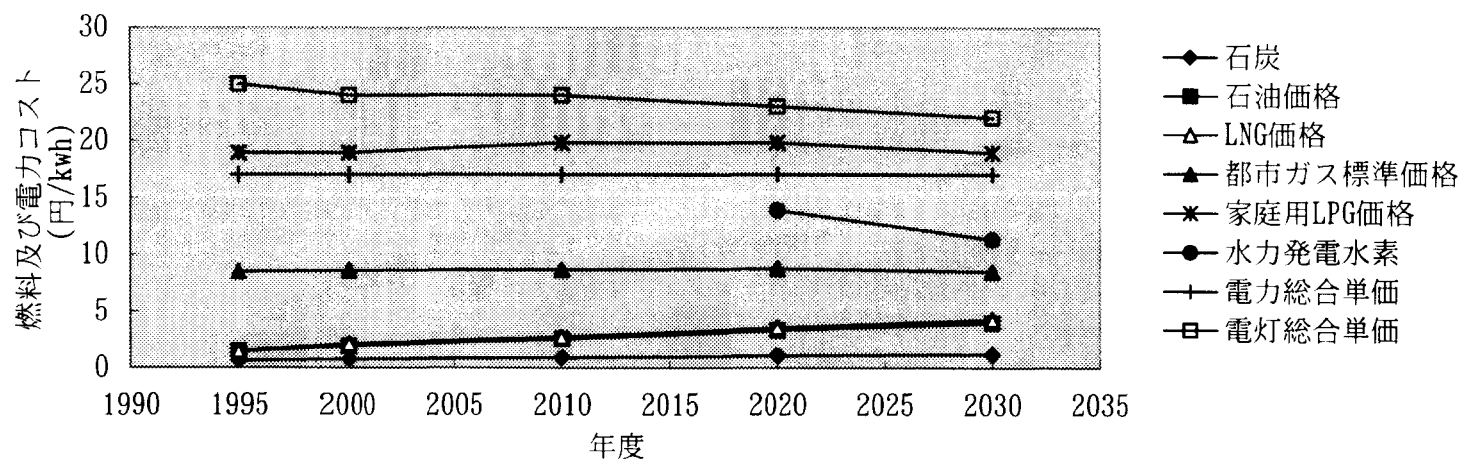


図3.2.4-1 日本の各種燃料及び電力長期コスト見直し

	1995	2000	2010	2020	2030	(YEN/kwh)
太陽光発電（家庭）	61	48	29	19	13	
太陽光発電（産業）	103	84	58	44	33	
水力発電	14	14	14	14	14	
地熱発電	15	15	15	12	10	
風力発電	16	8	8	6	5	
電力総合単価	17	17	17	17	17	
電灯総合単価	25	24	24	23	22	

出典： 日本エネルギー経済研究所/1998/5/28
 ”わが国における再生可能エネルギーの導入見通しと制度的課題”

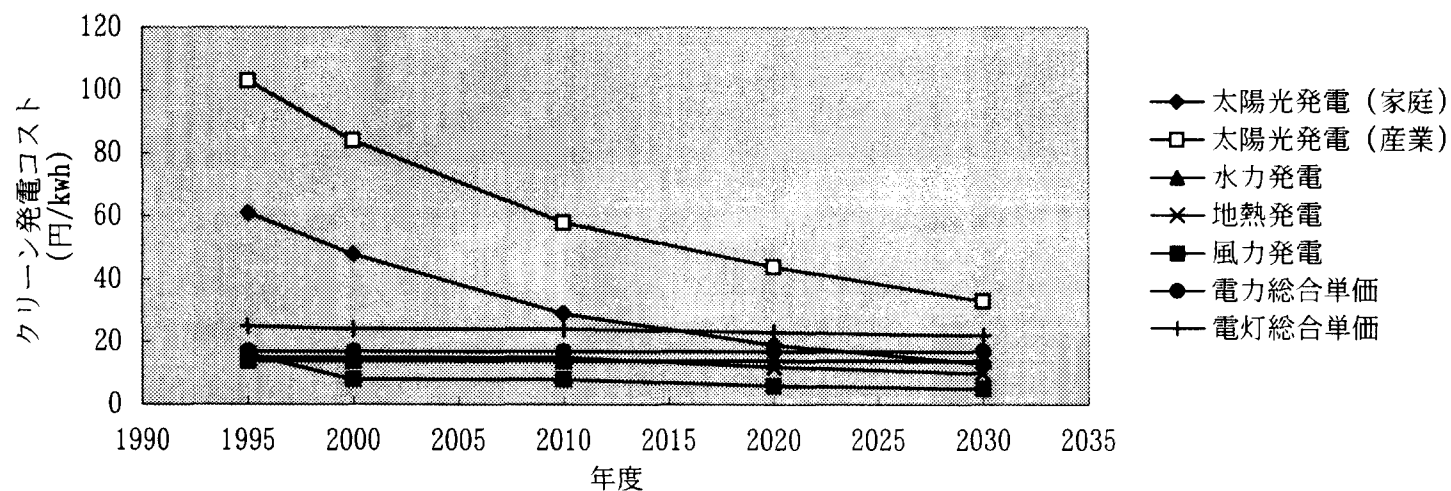


図3.2.4-2 日本のクリーン発電コスト見直し

年	一般炭	原油	LNG	水素エネルギー			
				0%	1%	2%	3%
1998	1.9	4.6	5	29.52			
2011	2.1	5.95	6.39	29.52			
2024	2.3	7.3	7.78	29.52	28.57	27.46	26.2
2037	2.56	8.65	9.29	29.52	25	21.27	17.78
2050	2.81	10	10.8	29.52	22.2	16.35	12.06
2063	3.12	11.35	12.23	29.52	19.36	12.53	8.1
2076	3.44	12.7	13.65	29.52	17.14	9.68	5.4
2089	3.75	14.13	15.08	29.52	14.92	7.46	3.65
2102	4.05	15.56	16.51	29.52	13.01	5.71	2.54

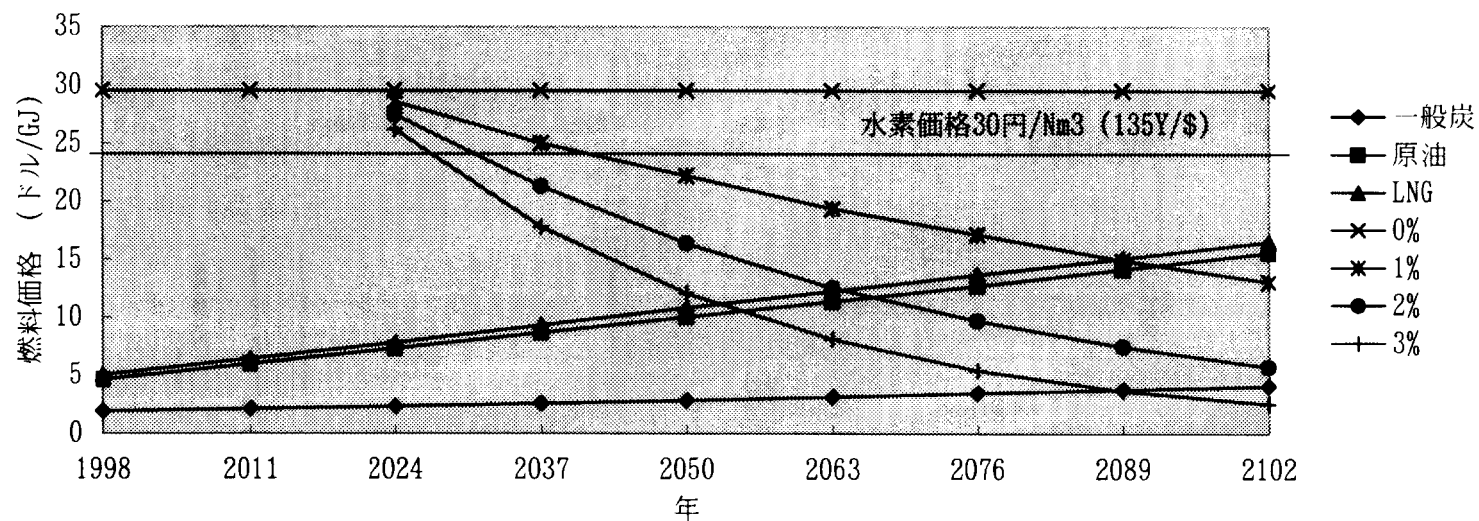
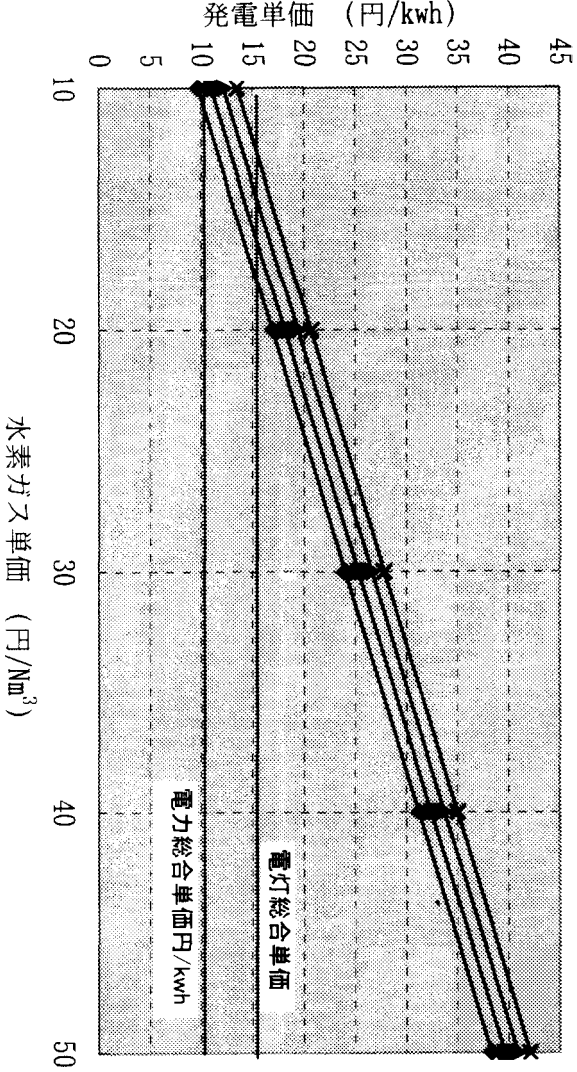


図3.2.4-3 各種燃料想定価格

水素単価円/Nm ³	発電単価 (円/kwh)			
	設備コスト			
	10万円/kw	15万円/kw	20万円/kw	25万円/kw
10	9.7	11	12.2	13.5
20	16.9	18.1	19.4	20.7
30	24	25.3	26.6	27.8
40	31.2	32.4	33.7	35
50	38.3	39.6	40.9	42.1



- ◆ 10万円/kw
- 15万円/kw
- ▲ 20万円/kw
- ✕ 25万円/kw

図3.2.4-4 200kw/PEFCオンサイト型発電システムの発電単価

以下になることが不可欠である。

従って、以上の検討で用いている数値はあくまでも一定の仮定に基づいたものであり、結果自体に一定の不確定があることを否めないものの設備コストに無関係に水素ガス単価が 25 円/Nm³ 以下になる必用があると考えることができる。

図 3.2.4-5 に 5000kW/PEFC 分散型発電システムの発電単価を示す。このシステムは純水素/純酸素で作動し、運転圧力は 8 気圧である。送電端効率は 56.4%(at HHV)である。排熱温度は 80℃と低く、コージェネレーションシステムとして適さない。従って、発電単価はベースロード用原子力及び火力発電システムの発電単価である 10 円/kWh 以下を達成することが不可欠である。パラメータは水素ガス単価と発電設備コストである。この場合、発電単価を 10 円/kWh を達成するためには水素ガスの単価が 10 円/Nm³ 程度になる必要がある。

図 3.2.4-6 は数 10m³/h の小規模水素製造装置における水素ガス製造単価を示す。この価格は設備減価償却が終了する時期の平均水素ガス単価を示す。製造方法は水蒸気改質法であり、パラメータとして都市ガス単価、水素製造装置設備単価を選定した。水素製造単価は都市ガス単価が 20～50 円/Nm³ の範囲の場合には、40～60 円/Nm³ 程度になる。

以上の検討結果から、固体高分子型燃料電池をオンサイト型及び分散型発電設備として普及させるには水素ガス単価の低減化が必用であることがわかるが、安価な副生水素を利用できる工場においては短期的に導入が進むものと考えられる。

図 3.2.4-6 に純水素固体高分子型燃料電池をポータブル発電装置に適用する場合の発電単価を示す。比較のため、現状のガソリン及びディーゼルエンジン型発電装置の発電単価を示している。パラメータとして、水素ガス単価を選定し、各年度別発電単価を示す。水素ガス価格が 30 円/Nm³ になると発電単価はディーゼル発電装置以下になる。水素ガスが 50 円/Nm³ でも発電単価はガソリンエンジン以下になる。ここで、純水素固体高分子型発電装置の設備コストは 15 万円/kW としている。また、ガソリン、ディーゼルエンジン及び純水素固体高分子型発電の発電効率はそれぞれ 20、25、47.8%(at LHV)としている。

従って、ポータブル発電用、自動車駆動用及び船舶駆動用純水素固体高分子型燃料電池は適用が有望な分野である。但し、自動車駆動用は単位出力当たりの設備コストが 1 万円/kW 以下であり、性能的な面よりコストダウンが最も重要な課題である。

一般家庭用発電システムの適用であるが、排熱温度が低く冷房には使用出来ない等の問題があるが温水の利用は可能である。水素価格が 30 円/Nm³ 以下になると発電単価が電灯総合単価 22 円/kWh 以下になる。

(6) 適用分野の絞込み及び市場規模

水素単価円/Nm ³	発電単価 (円/kwh)		
	設備コスト		
	15万円/kw	20万円/kw	25万円/kw
10	9.3	10.6	11.8
20	14.8	16.1	17.3
30	20.3	21.6	22.8
40	25.8	27.1	28.3
50	31.3	32.5	33.8

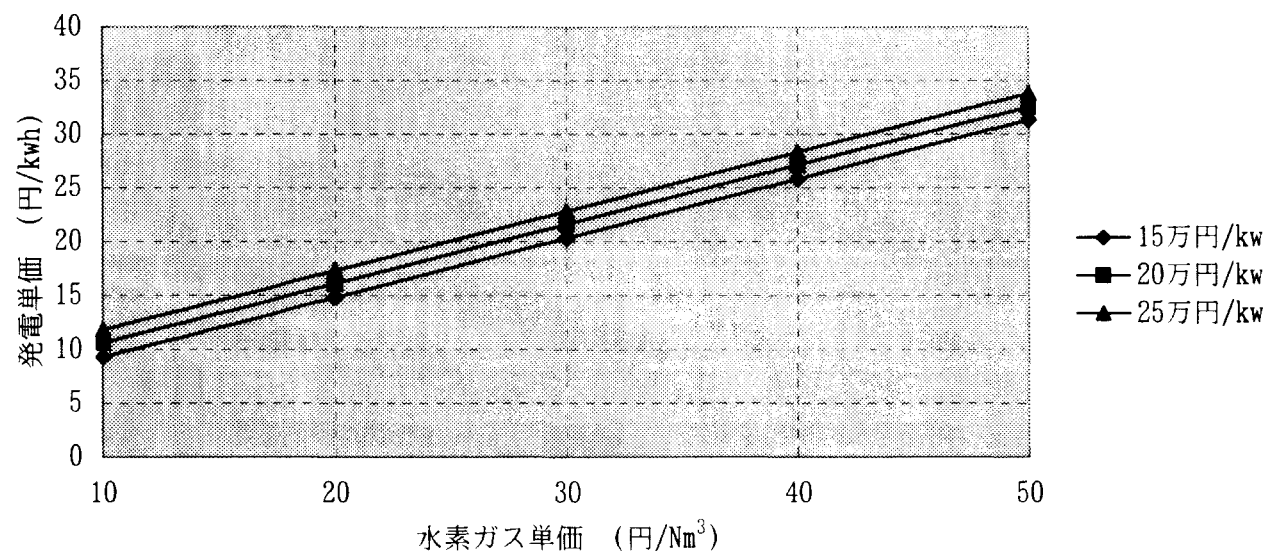


図3.2.4-5 5000kw/PEFC分散型発電システム発電単価

都市ガス 円/Nm ³	水素製造装置設備費		
	75万円/Nm ³ /hr	100万円/Nm ³ /hr	125万円/Nm ³ /hr
20	36.7	43.8	50.8
30	39.8	46.9	53.8
40	42.9	50.1	57.1
50	46.1	53.1	60.2

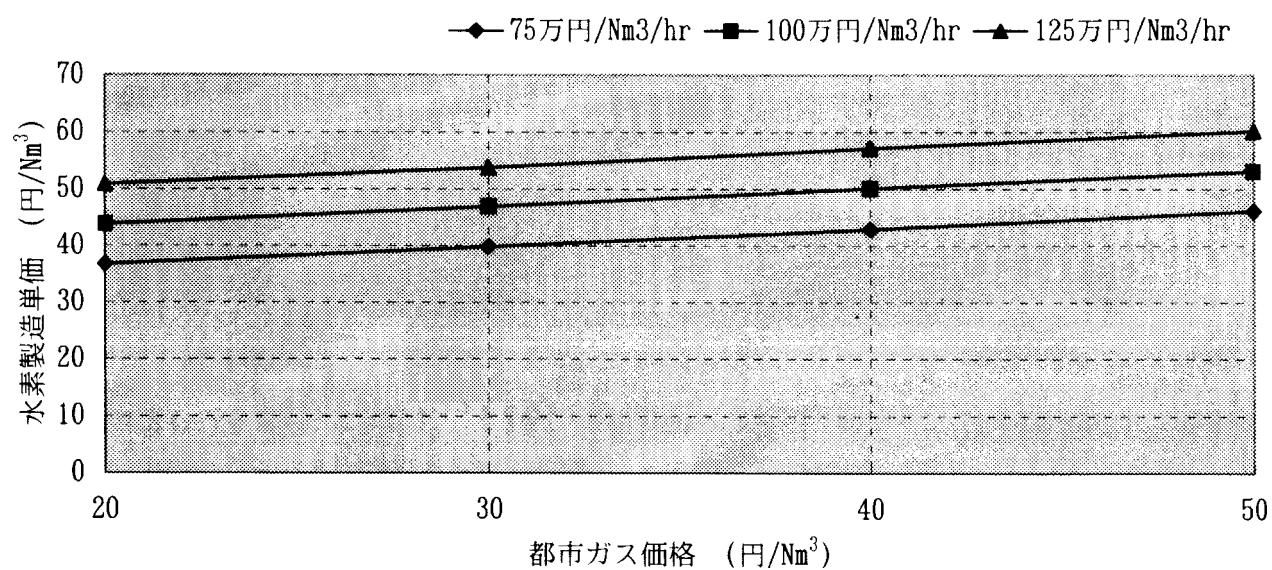


図3.2.4-6 都市ガスからの水素製造単価

年度	ガソリン	ディーゼル	PEFC		
			PEFC/30円	PEFC/40円	PEFC/50円
初年度	64	32	31	38	45
2年度	62	30	27	34	41
3年度	61	28	25	32	39
4年度	60	27	24	31	38
5年度	59	26	23	30	37
送電端効率 % LHV	20	25	47.8		
設備コスト(万円/kw)	9.2	11.5	15		
燃料	ガソリン	軽油	水素		
燃料コスト(円/Liter,Nm3)	100(Liter)	64.5(Liter)	30(Nm3)	40(Nm3)	50(Nm3)

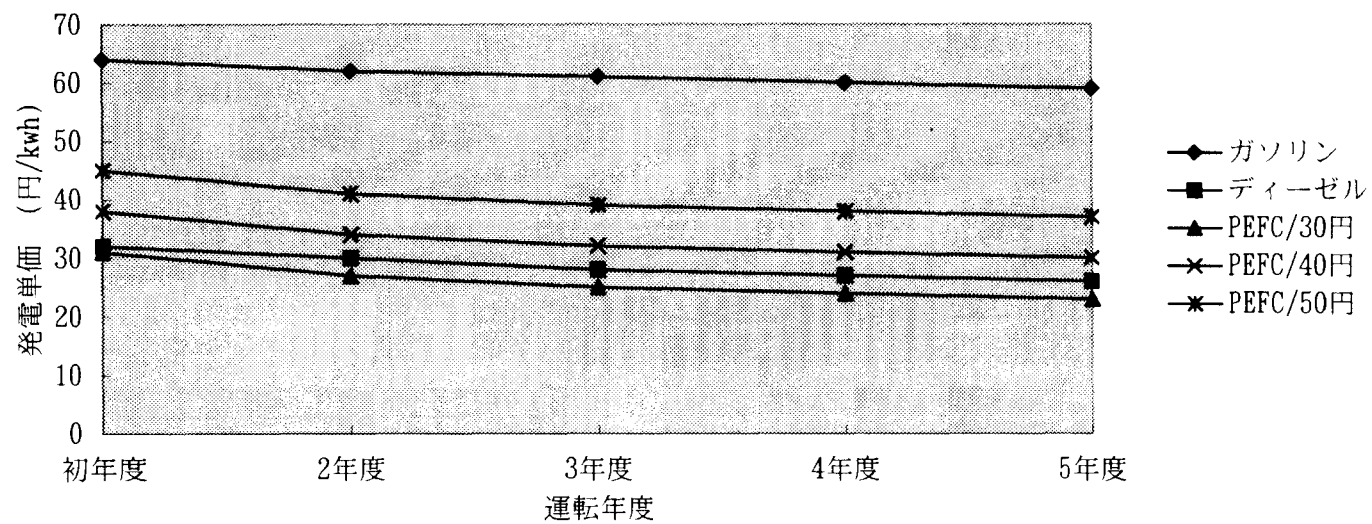


図3.2.4-7 ポータブル発電装置の発電単価比較

表 3.2.4-4 に純水素固体高分子型燃料電池の各分野への適用性評価を示す。

2030 年頃を想定すると、産業用、民生業務用、ポータブル発電分野、自動車用、船舶推進用及び家庭用において純水素固体高分子型燃料電池発電システムが実用化されてると想定される。これらの市場規模総額は 17,850 億円/年と想定される。内訳は産業用、民生業務用、ポータブル用、自動車駆動用、船舶駆動用及び家庭用発電システムのそれぞれで、650、200、800、15000、1000、200 億円/年で自動車駆動用発電システムの市場規模が圧倒的に大きい。

これらの全てに純水素固体高分子型燃料電池発電システムに導入されると 2030 年には発電規模は 1.1 億 kW 程度になるが、水素導入量との整合性から判断すると 2030 年の導入量は水素エネルギー価格が年率 2.18% の場合(図 3.3.2-3 参照)でも 200~300 万 kW 程度であると想定される。従って、純水素固体高分子型発電システムの経済性が発揮されるポータブル発電システムから導入が開始されるものと想定されるが、自動車、電機及び素材製造会社等の燃料電池自動車への開発意欲及び実力がこの市場規模を決定するものと考えられる。

3.2.5 市場導入の課題

純水素固体高分子型燃料電池発電システムの導入は炭素税導入等の環境コスト動向で大きな影響を受けるが、2030 年頃に本格的に実用化されるためには以下の課題がクリアされる必要がある。

- 水素ガスの購入価格が少なくとも 30 円/Nm³ 以下に低減されること
- 安価で、コンパクトな水素貯蔵装置の実現
- 水素ガスインフラ整備、安価な充填器の開発
- 純水素固体高分子型発電システム
 - *高性能化
 - *コンパクト化
 - *長寿命化
 - *コストダウン

表3.2.4-4 純水素固体高分子型燃料電池の適用分野

	要求機能					純水素型PEFC 適合性評価	備考
	低コスト発電	安い設備コスト	コジェネ機能	可搬機能 (起動性)	低公害性		
電力事業用	◎	△	×	×	◎	不適	◎：重要機能
産業用	△	○	◎	×	◎	不適	○：必要機能
民生業務用	△	○	◎	×	◎	不適	△：判断し難い
ポータブル用	△	○	×	◎	◎	適合	×
自動車用	△	○	×	◎	◎	適合	×
船舶推進用	○	○	×	◎	◎	適合	
家庭用	○	○	◎	×	◎	(適合)	
純水素固体高分子型 燃料電池	△	△	×	◎	◎		セールスポイント

◎：現状達成可能
○：努力必要
△：相当の努力必要
×：現状不可能

3.3.3 スタックの構造

PEFC は図 3.3.3-1 に示すように、イオン交換膜、電極(水素電極と酸素電極)および支持集電体(水素電極集電体と酸素電極集電体)とを一体化した膜/電極接合体(英語で Membrane/Electrode、略して M/E)と、水素あるいは酸素(空気)を流す溝と冷却水を流す溝がそれぞれの面に形成されたセパレータ(兼冷却板)からなる。そしてこの二つのコンポーネントを交互に配置し、ボルト等で締め付けて発電部スタックを形成する。

また、膜加湿部は図 3.3.3-2 の概念図に示すように、セパレータと膜を交互に複数個重ねて構成する。加湿部のセパレータのサイズを発電部のセパレータのそれと同じにすることで、加湿部を発電部に続けて配置し、同じボルトで締め付け一つのスタックとすることができる。

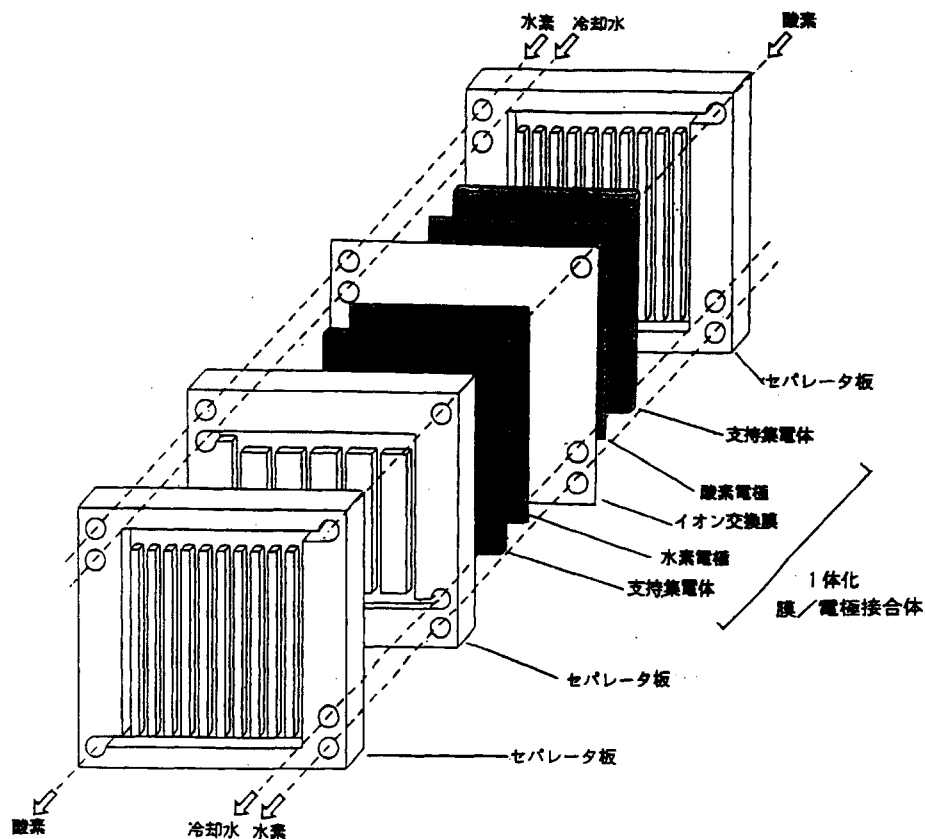


図 3.3.3-1 PEFCの構造

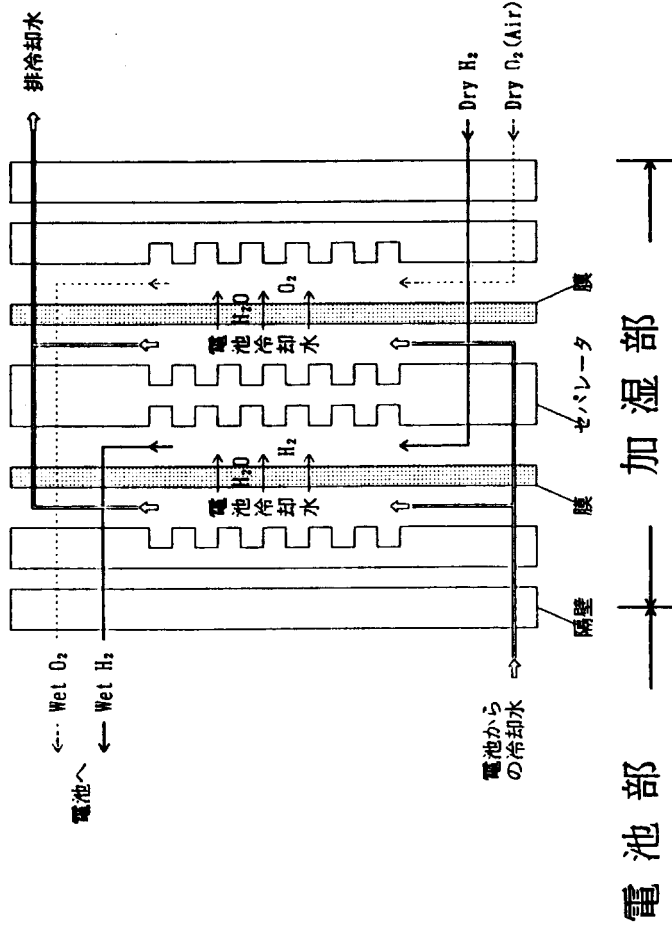


図 3.3.3-2 加湿部の構造

3.3.4 製造法の概要

a. 膜/電極接合体(M/E)の製法

膜/電極接合体(M/E)の製法を図 3.3.4-1 に示す。電極は白金担持カーボン粉(酸素電極には白金-ルテニウム担持カーボン粉を用いる場合もある)と結着剤としてのテフロン液と混合してスラリーとし、これを支持集電体であるカーボンペーパーの片面にコートして電極層とし、熱処理を施す。このものを2枚製作する(水素電極と酸素電極)。次にイオン交換膜と同じ成分の溶液(膜溶液)を2枚それぞれの電極層に塗布し、イオン交換膜をこの2枚でサンドイッチしてホットプレスで一体化する。以上が膜/電極接合体(M/E)の代表的製法である。

b. 発電部セパレータおよび加湿部セパレータの製法

セパレータの製法を図 3.3.4-2 に示す。発電部セパレータと加湿部セパレータはその表面に形成される溝形状は異なるが、製法は同じである。材料としてはカーボン系と金属系があるが、ここでは Ballard 社が使っているカーボン系の膨張黒鉛シートを材料として選定した。量産時の製法は金型プレスで溝を成形した後、周囲とマニホールド穴の切断するという簡単な工程で作られる。

c. スタックの組立

スタックの組立工程を図 3.3.4-3 に示す。発電部スタックは膜/電極接合体(M/E)とセパレータを交互に積み重ね、集電板と絶縁板を両端に配置する。加湿部スタックは膜とセパレータを交互に積み重ねる。両方のスタックをシリーズに配置し、端板を両端に置いて全体をボルトで締め付け、スタックとする。

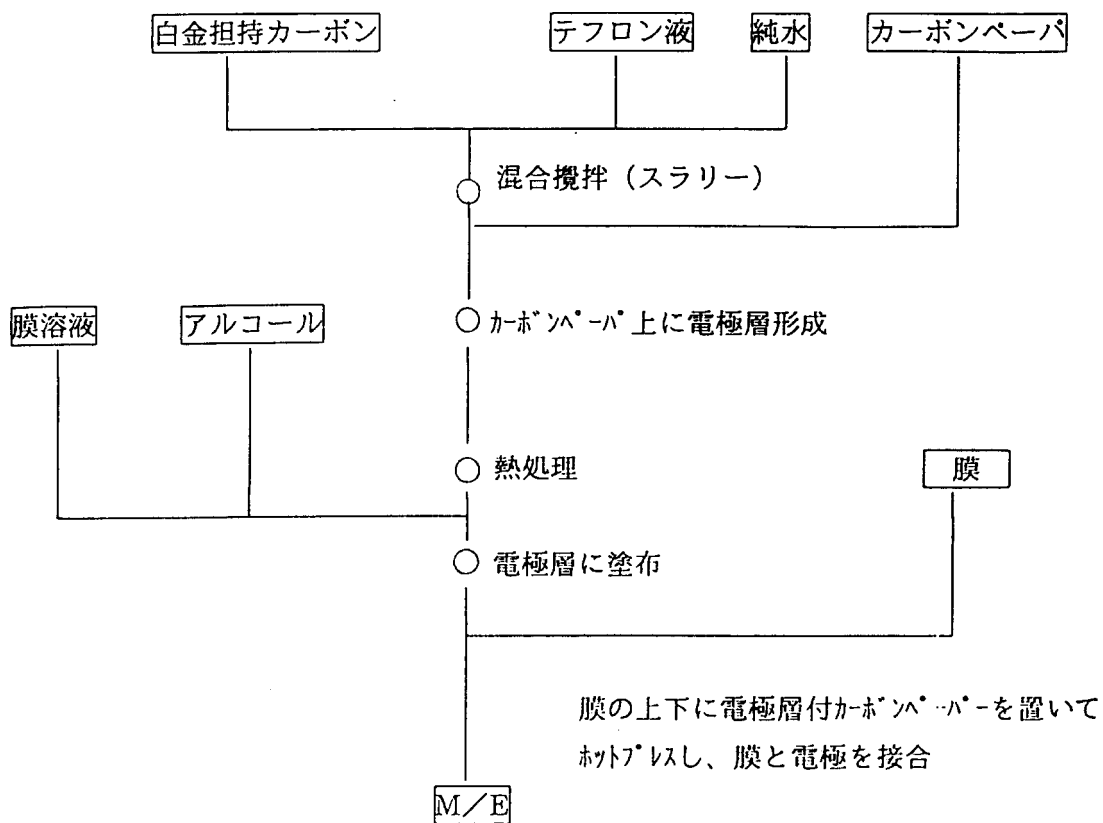


図 3.3.4-1 膜/電極接合体 (M/E) の製法

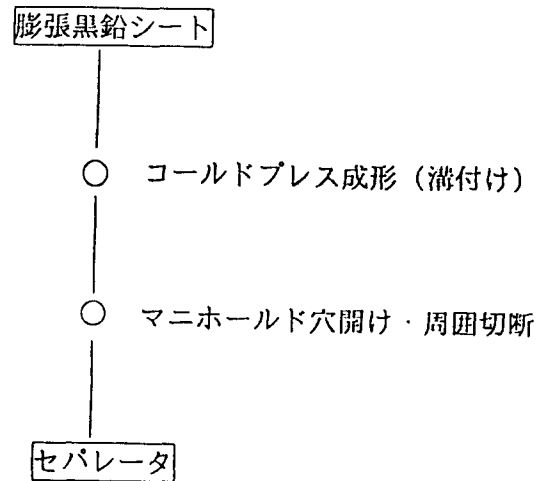


図 3.3.4-2 発電部セパレータ及び加湿部セパレータの製法

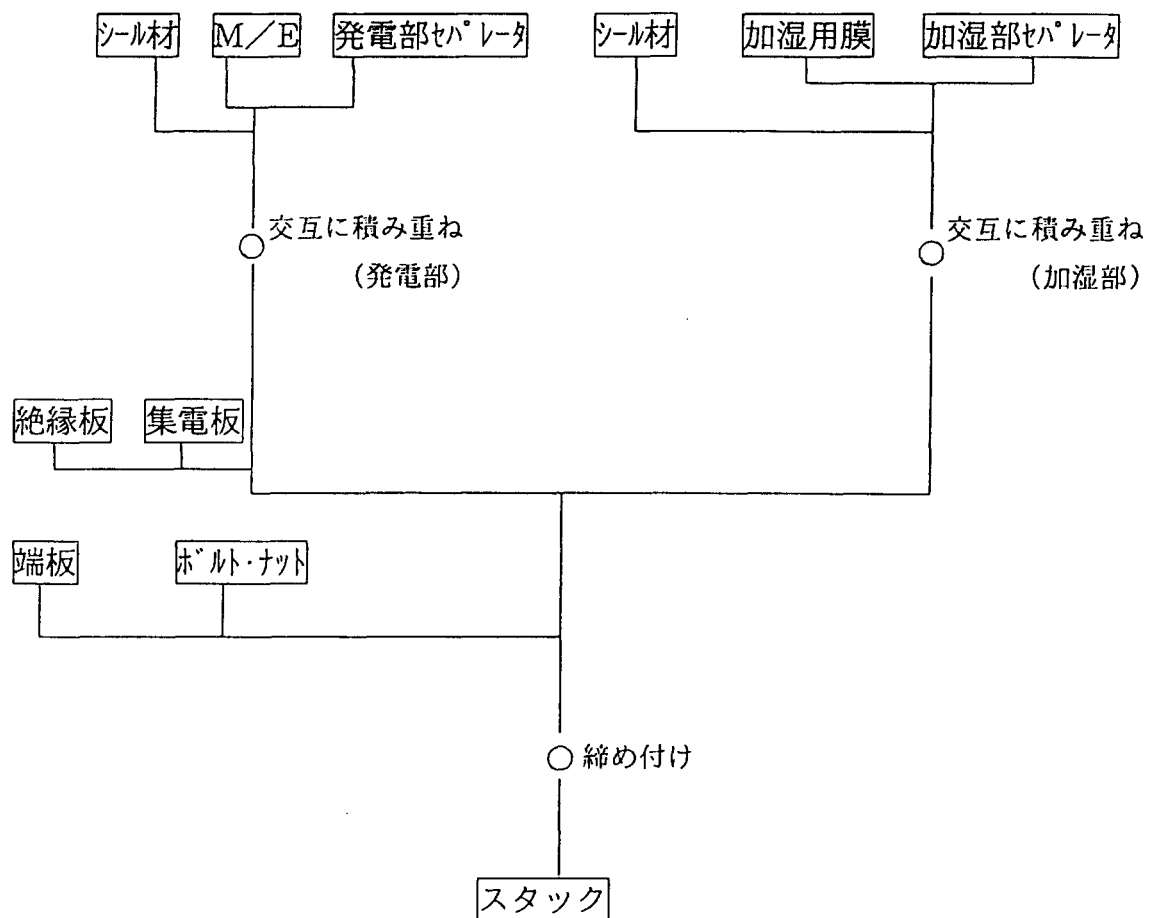


図 3.3.4-3 スタック組立

3.3.5 材料の種類別使用量

材料の種類別使用量を表 3.3.5-1 に示す。

表 3.3.5-1 材料の種類別使用量 (25 kW)

材 料			スタック当り (140セル)	備 考
発 電 部	M/E	Pt 担持カーボン粉	0.19kg	Pt 95g カーボン粉 95g
		テフロン液(60wt%)	0.2 kg	固形テフロン 100g
		カーボンペーパー	2.23kg	厚さ 0.2mm
		膜	3.65kg	厚さ 160μm
		膜溶液 9wt%	0.13kg	膜固形分 0.13kg
	セパレータ	膨張黒鉛シート	4.69kg	厚さ 0.2mm
		シール材(シリコン系接着剤)	0.75kg	
	冷却板	膨張黒鉛シート	2.33kg	厚さ 0.2mm
加 湿 部	セパレータ	膨張黒鉛シート	1.53kg	厚さ 0.2mm
		シール剤 (シリコン系接着剤)	0.25kg	
	加湿用膜	膜	1.17kg	厚さ 160μm
そ の 他	端板	アルミ板	9.16kg	厚さ 20mm
	ボルト	SUS	1.4 kg	長さ 650mm
	ホース接手	アルミ	6.8 kg	
	絶縁部品	テフロン	0.16kg	
	絶縁板	テフロン板	0.04kg	厚さ 1.0mm
	集電板	銅	5.32kg	厚さ 3.5mm

3.3.6 所要エネルギー

表 3.3.6-1 に 25kW スタックの製造に要する所要エネルギーを示す。エネルギーとしては電気エネルギーがすべてである。エネルギーの計算は次式にしたがって計算した。

$$\text{処理装置の所要電力(kW)} \times \text{処理時間(h)} \times 25 \text{ kW 必要枚数} / 1 \text{ ロットの処理枚数} \\ = \text{必要エネルギー(kWh)}$$

1 ロットの処理枚数については、混合攪拌、熱処理について 140 枚分、その他の処理は 1 枚毎とした。量産化が進めば、その他の処理操作も多数枚処理が可能となり、所要エネルギーも表 3.3.6-1 の値よりさらに低減することが期待できる。

表 3.3.6-1 所要エネルギー (25 kW)

操 作		所要エネルギー
M/E	混合攪拌	0.33kWh
	電極形成	2.33kWh
	熱処理	20.0 kWh
	ホットプレス	420.0 kWh
セル部セパレータ	コールドプレス	9.40kWh
冷却板	コールドプレス	4.67kWh
加湿部セパレータ	コールドプレス	3.07kWh

3.4 まとめ

平成 10 年度は、純水素固体高分子型燃料電池の市場を調査し、また、LCA のための自動車用燃料電池の資料を準備するため、固体高分子燃料電池の仕様、製造法や材料、その使用量を調査し、以下のような結果を得た。

3.4.1 純水素固体高分子型燃料電池の市場調査

純水素固体高分子型燃料電池は、低温で動作する、短い時間で起動する、出力密度が高い、小型軽量である、量産向きであるなどから、自動車用などの輸送機関や移動用電源に適している。また、発電効率が低い、寿命が短い、電解質が安定しているなどの特徴を生かし、熱利用より高効率発電に重点をおいた定置式発電にも利用できる。

純水素燃料電池の将来市場は、地球温暖化を防止する政策、炭素税の動向、石油資源の価格動向、自動車の排ガスや燃費規制の強化、自動車用水素ステーションなど水素供給基盤の整備、水素の価格、燃料電池の設備価格など多くの要因に左右される。燃料電池の市場調査を行うに当たり、各種燃料の価格や電力価格の長期見通し、再生可能エネルギーの長期導入見通し、コージェネレーションや自動車、電力用発電所、移動用電源などの市場の推移や、WE-NET で行った水素導入量の予測なども参照したが、年代毎の市場導入量を予測するには、前述の変動要因の条件を設定し、詳細に検討する必要がある。しかし、そのためには多大な労力を要するので、本報告では利用分野別の導入可能性を検討するにとめた。

(1) 電力事業用の大容量発電には水素燃焼タービン発電が適している。燃料電池の市場としては MW 級の分散発電用とピークカット用などが考えらるが、分散型の普及は将来の課題となっているため、現在その市場規模を予測することは難しい。その利用時期は液体水素の大量導入が可能となる時代となろう。なお、現在我が国の総発電電力量は 2.1 億 kW で、水力、原子力を除く火力発電能力は 1.23 億 kW で、その増加は約 300 万 kW/年である。

(2) 産業用として、化学、繊維、食品、鉄鋼ほかの産業用コージェネレーションの設置容量は約 350 万 kW で、電力容量の増加は約 30 万 kW/年であり、プラントの 80%は 5000kW 以下である 100kW から 5000kW 級の燃料電池が導入可能で、副生水素を発生する食塩電解、石油化学、鉄鋼などの工場への導入が考えられる。我が国の副生水素発生量のうち、燃料電池が利用できると思われる量は 51.4~171 万 kW 相当に換算できる。

(3) 民生業務用として、ホテル、病院、ビル、工場、集合住宅向けなどの民生用コージェネレーションの設置容量は約 79 万 kW で、増加容量は約 8 万 kW/年である。プラントの 70%は 500kW 以下で、燃料電池が既存設備と経済的に競合するには、水素価格 25 円/Nm³ 以下、設備価格が 15 万円/kW 以下、そして発電単価が 22 円/kWh 程度になる必要がある。これらの条件は将来の環境政策やエネルギー価格の動向により変動するが、民生業務用は特に経済性が市場導入への重要な鍵となろう。オンサイト用燃料電池の普及には、配管による水素の供給基盤が必要であろう。

(4) 移動用発電装置として、我が国では 10～100kW 級の工事用、10kW 以下の可搬型など出荷台数は 50～60 万台/年で、発電出力は 100 万 kW/年以上となる。既存の設備価格は 4～8 万円/kW 程度で安価であるが、夜間に使用する工事用電源に対する低騒音化の要求は非常に強いので、ある程度価格が高くても市場導入が期待できる。水素は高圧ボンベや小型の液体水素タンクで供給できる。

(5) 自動車駆動用として、現在、世界の自動車メーカーはメタノール改質型燃料電池車と純水素燃料電池車の開発に注力しているが、究極の車は純水素燃料電池車とされている。燃料電池車は 2004 年頃から市場導入が始まり、水素供給基盤の整備に応じて、2030 年頃には数百万台になると想定される。自動車用の水素ステーションは天然ガスやメタノール改質、水電解、副生水素利用などで比較的容易に設置ができるので、自動車用の市場も有望である。

(6) その他の市場として、船舶推進用、宇宙用、家庭用などがある。家庭用は新築住宅着工戸数が 160 万户/年で、一戸当たり 3kW とすると潜在需要は 480 万 kW/年となる。しかし、家庭用に水素の供給基盤が整備されるのは、かなり将来のことと思われるので、中期的には天然ガス改質型の家庭用燃料電池が利用される可能性がある。現在、我が国や米国で天然ガス改質型家庭用燃料電池が研究開発されている。

3.4.2 燃料電池自動車の LCA のための燃料電池調査

巴拉ード社がダイムラーベンツ社の NECARII や NECARIII に搭載したと見られる最新のスタック Mark7 型をモデルに、膜加湿方式を前提に、25kW スタックの仕様を推定した。更に、膜・電極接合体やセル部セパレータや加湿部セパレータの製法を想定し、セル部や加湿部、端板など各部の材質、寸法、スタック当たりの使用量を試算し、電気自動車検討ワーキンググループに提出した。

4. 冷熱利用に関する調査・検討

4.1 はじめに

他のWGで検討している各水素利用技術に対応した液体水素冷熱利用の検討を行う本WGでは、平成7年度から水素の冷熱を利用した空気からの高純度酸素分離技術を調査するとともに、他のWGと協調して、例えば動力発生WGの水素ディーゼルコジェネレーションシステム、燃料電池WGで検討中の固体高分子型燃料電池への各要求スペックに応じた高純度酸素供給システムについて、その実現の可能性について検討を行ってきた。

本WGでは当初から、水素冷熱を利用した分散型酸素製造方法としてP S A一段凝縮法、低温V S A法、冷熱利用深冷分離法に注目して、前述の要求スペックのもとに各方式を具体的に検討するとともに、冷熱を利用する効果を酸素製造原単位によって比較検討を行ってきた（一段凝縮法のスラッシュアルゴン熱交換器をV S A前段の空気冷却器に利用する案が検討されたが、温度レベルの点で系統的に合致しないことが判明し、昨年度をもって検討を中断した）。

さて、本年度は当WGの最終年度にあたるため、過去3年間の成果に基づき、以下に示す視点から成果の見直しを行うと同時に、更なる検討を加えた。

基本課題としては、

（1）深冷法と低温V S A法の酸素製造システムについて検討を継続する。さらに、窒素と水素を直接熱交換させることによる窒素の固化防止策として提案した、水素冷熱利用ヘリウムブレイトサイクルとの複合サイクルの最適化をはかる。

（2）WG発足時から問題となっている酸素製造装置の窒素凝縮器における空気の固化による伝熱への影響を把握するための基礎として、純窒素の熱物性を測定する測定手法について検討を加える（計測装置のコストも含む）。

（3）他のWGとの整合性（特に酸素純度に注目して）をたもちながら、各水素利用設備に酸素を供給する場合の指針を明確にし、最終的にはチャートやマップによって適用範囲を明示する。

（4）調査再開時期の確定のため、開発に必要なリードタイムの提示と、経済分岐点（昨年は $2000\text{Nm}^3/\text{h}$ 付近）の確定を行う。

である。

更に加えて、当WGの成果を将来の開発に十分反映できるように、各課題に対して①システムフロー、②構成機器（概略仕様、性能等）、③設備コスト、④動力原単位、⑤酸素製造コスト、⑥技術開発課題や、可能であれば、ハード開発のためのリードタイムなどを各課題別に明記することとした。

なお、酸素供給量の基本条件は、固体高分子燃料電池への供給酸素量（ $1651\text{Nm}^3/\text{h}$ ）、純度は

96 Vol%以上としている。

以上のような姿勢をもって最終報告書を取りまとめているので、将来にわたる各種背景の変化はもちろんあるものと想像するが、水素エネルギーの利用が国際的に確実なものとなり、開発が実行に移される際には是非とも本報告を参考にさせていただきたい旨申し添える。

4.2 分散型酸素製造装置

4.2.1 液体水素利用Heブレイトンサイクルと酸素製造装置の複合サイクルの検討

昨年度、窒素と水素を直接熱交換させることによる窒素の固化防止策として、水素冷熱利用Heブレイトンサイクルと酸素製造装置の複合サイクルについて検討を行った。このプロセスを図4.2.1-1に示す。

供給された水素はまず、Heブレイトンサイクルに導入され、窒素の3重点温度付近まで昇温された後、酸素製造装置の窒素凝縮器に導入され、さらに冷熱を回収される。また、Heブレイトンサイクルから供給される比較的溫度レベルの高い冷熱を有効に利用するために、原料空気を原料空気圧縮機で前処理で必要となる圧力まで圧縮し、前処理後、蒸留に必要な圧力までヘリウムの供給温度レベルでさらに圧縮するプロセスとしている。低温圧縮で昇温した原料空気はヘリウムとの熱交換により冷却される。これにより、常温で圧縮する場合と比較し、圧縮動力を低減することができる。

昨年度の検討では、本複合プロセスは水素と窒素を直接熱交換させるプロセスと比較し、水素の冷熱利用度は高いが、動力原単位は悪い結果となった。本年度は、水素冷熱利用Heブレイトンサイクルと酸素製造装置の複合サイクルの最適化を行うために、Heブレイトンサイクルから供給されるヘリウム温度を変化させ、酸素動力原単位を算出し、ヘリウムと水素の冷熱から得られる最大仕事及び、各機器のロスについて、エクセルギー解析を行った。

検討した設備に基づいて、市販されている酸素ガスコストを推算し、同コストと比較することにより、今回の複合サイクルの経済性評価を行った。

(1) プロセス計算の前提条件

a) 必要酸素条件

昨年度と同様に動力ワーキンググループで検討しているシステムのうち、以下に示すケース3の条件で検討を行った。

必要酸素量： 1651 Nm³/h (100%酸素換算)

酸素圧力： 10.033 kgf/cm² A(0.9839 MPa)

酸素純度： 96 vol.%以上

b) 大気条件及びユーティリティ条件

イ) 大気条件

圧力	1.033 kgf/cm ² A(0.1013 MPa)
温度	30 °C
湿度	80 % R.H.
組成	N ₂ 78.11 vol.%, O ₂ 20.96 vol.%, Ar 0.93 vol.%

ロ)冷却水 温度 30 °C

ハ)液体水素

流量 3302 Nm³/h

圧力 10.332 kgf/cm² A (1.0133 MPa)

温度 63 K(窒素の3重点付近の温度)

ニ)計装空気 50 Nm³/h

ホ)前処理吸着器の充圧によるロス及び再生動力、侵入熱、圧力損失を考慮した。

c)Heブレイトンサイクルから供給されるヘリウムの条件

図 4.2.1-1 のプロセスでは、ヘリウムの冷熱を有効に利用するために、原料空気をヘリウムの供給温度レベルで圧縮し、発生した圧縮熱をヘリウムの冷熱を用いて冷却するプロセスとしている。このため、ヘリウムの供給温度によって、低温圧縮機の動力が変化し、酸素の製造原単位に影響する。本検討では、プロセスを固定し、熱交換器で温度差が逆転しないなどプロセスが成立する範囲内で低温圧縮機の吸入温度及び吐出温度を変化させて、ヘリウムの供給温度範囲を決定した。

主熱交換器の最小温度差は全てのケースで同一の値になるよう計算を行った。

イ)ケース 1(最低温度)

低温圧縮機 2 の吸入温度を下げると圧縮熱を冷却するヘリウム供給温度も下げる必要がある。この下限界は、低温圧縮機 2 の吸入温度が高圧空気の凝縮温度(123K)付近になった場合に相当する。本ケースの主熱交換器の Q-T 線図を図 4.2.1-2 に示す。

ロ)ケース 3(最高温度)

ヘリウムの供給温度を高くすると He ブレイトンサイクルの発生動力は増加するが、酸素製造装置の低温圧縮機の消費動力も増加する。また、ヘリウムの冷熱を有効に利用するには、他の冷却手段である冷却水温度よりも低い温度でヘリウムを供給し、圧縮熱を冷却する必要がある。したがって最高温度は、主熱交換器の温端温度付近になる場合となる。本ケースの主熱交換器の Q-T 線図を図 4.2.1-3 に示す。

ハ)ケース 2(中間温度)

低温圧縮機 2 の吸入温度をケース 1 とケース 2 の中間温度とした。本ケースの主熱交換器の Q-T 線図を図 4.2.1-4 に示す。

各ケースのヘリウム供給条件を表 4.2.1-1 に示す。

(2)動力原単位の比較

He ブレイトンサイクルと酸素製造装置の複合サイクルについて、(1)項で示した 3 ケースのプロセスの比較を行った。本検討では、ヘリウムの供給条件に対する動力原単位の変化を調べるのが主目的であるので、蒸留塔における操作条件は一定とした。プロセス計算に使用した回転機の効率を表 4.2.1-2 に示す。また、各ケースの動力原単位の比較を表

4.2.1-3 に、ヘリウムの供給温度に対する動力の変化を図 4.2.1-5 に示す。

表 4.2.1-1 各ケースのヘリウムの供給条件

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
供給圧力 [MPa]	2.026	2.026	2.026
供給温度 [K]	140.7	152.7	166.6
交換熱量 ^{注 1)} [kW]	144.8	154.8	165.8
低温圧縮機 2 の吸入 温度 [K]	128.2	148.2	180.2

注 1)4.2.2 項の H e プレイトンサイクルの再生熱交換器の交換熱量

表 4.2.1-2 回転機の効率

回転機名称	効率 [%]
原料空気圧縮機	60~80
膨張タービン	
ブロー	
液酸ポンプ	50
低温空気圧縮機	50

表 4.2.1-3 各ケースの動力原単位の比較

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
原料空気流量 [Nm ³ /h]	7970	7970	7970
酸素製造動力 [kW]	619	634	656
H e プレイトンサイクル 発生動力 [kW]	74	84	95
必要動力 [kW]	545	550	561
製品酸素流量 [Nm ³ /h]	1720	1720	1720
製品酸素純度 [%]	96.0	96.0	96.0
酸素回収率 [-]	0.998	0.998	0.998
酸素動力原単位[kWh/Nm ³]	0.330	0.333	0.340
水素ガス出口温度 [K]	180.0	183.7	193.7

表 4.2.1-3 及び図 4.2.1-5 に示したように、ヘリウムの供給温度が高くなると、H e プレイトンサイクルで発生する動力は増加するが、酸素製造装置で消費される動力がそれ以上に増加するため、全動力が増大し、酸素製造原単位も増加する。

一方、ヘリウムの供給温度が高くなるに従い水素の出口温度は高くなり、水素の冷熱利用度は向上していることがわかる。

(3)水素とヘリウムの最大仕事及び各機器のエクセルギーロスの比較

水素とヘリウムから得られる最大仕事について、エクセルギー¹⁾による比較を行った。エクセルギーとは、環境と異なる系が、環境と平衡状態に至るまでに取り出し得る最大仕事で以下の式で表される。

$$E = (H - T_0 S) - (H_0 - T_0 S_0) \quad \text{eq-1}$$

ここで、Hは流体のエンタルピー、Tは流体の温度、Sは流体のエントロピーを示し、添字0は環境状態を表している。

本検討では、環境状態を以下のように定義した。

環境圧力 P_0 : 1.033 kg/cm² A(0.1013MPa)

環境温度 T_0 : 30°C

各ケースにおける冷熱供給源から供給される最大仕事を表 4.2.1-4 及び図 4.2.1-6 に示す。

表 4.2.1-4 冷熱供給源のエクセルギー変化

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
水素の供給温度 [K]	63.0	63.0	63.0
水素の返送温度 [K]	180.0	183.7	193.7
利用された水素のエクセルギー [kW]	197	200	207
利用されなかった水素のエクセルギー [kW]	40	37	30
水素を環境温度まで変化させた時のエクセルギー [kW]	237	237	237
水素の冷熱が利用された割合 [-]	0.831	0.844	0.873
ヘリウムの供給温度 [K]	140.7	152.7	166.6
ヘリウムの返送温度 [K]	199.4	217.3	232.7
利用されたヘリウムのエクセルギー [kW]	115	101	82
利用された全冷熱のエクセルギー [kW]	312	301	289

表 4.2.1-4 から、利用された水素のエクセルギーはヘリウムの供給温度が高くなるに従い、わずかに増加していることが分かる。また、水素の出口温度は 180～190K と低いが、環境温度まで変化させたときに得られる最大仕事と比較すると、そのうちの 80%以上は酸素製造装置で使用されていることが示される。ヘリウムの供給温度が高い場合、水素の冷熱利用割合が高くなっている。

一方、ヘリウムから得られる最大仕事はヘリウムの供給温度が低いほど大きく、水素とヘリウムから得られる最大仕事は、ヘリウムの供給温度の低下とともに増加する。これは、酸素製造装置で利用可能な仕事はヘリウムの供給温度が低いほど増加することを示している。

次に、供給された仕事はどのように利用されているかを把握するために、供給されたエクセルギーと各機器毎のエクセルギーロス²⁾を求めた。これを表 4.2.1-5 及び図 4.2.1-7～図 4.2.1-9 に示す。ヘリウムの供給温度が上昇すると、ヘリウムから供給されるエクセルギーは減少し、低温圧縮機のエクセルギーロス、主熱交換器のエクセルギーロスが増加してい

る。この結果、外部から与える仕事が増加し、動力原単位が大きくなることが分かった。

表 4.2.1-5 酸素製造装置のエクセルギーバランス

		ケース 1	ケース 2	ケース 3
INPUT	原料空気のエクセルギー [kW]	110.4	110.4	110.4
	ヘリウムから供給されるエクセルギー [kW]	115.4	101.5	82.5
	H ₂ から供給されるエクセルギー [kW]	199.5	202.0	214.0
	外部から与えた仕事 [kW]	168.4	183.3	205.2
	合計 [kW]	593.7	597.2	612.1
OUTPUT	膨張タービンのエクセルギーロス [kW]	5.8	5.8	5.8
	低温空気圧縮機のエクセルギーロス [kW]	147.2	149.6	151.3
	主熱交換器のエクセルギーロス [kW]	113.4	114.5	127.7
	蒸留塔部のエクセルギーロス [kW]	165.5	165.5	165.5
	窒素のエクセルギー [kW]	43.1	43.1	43.1
	酸素のエクセルギー [kW]	118.7	118.7	118.7
	合計 [kW]	593.7	597.2	612.1

(4) 複合サイクルの経済性評価

検討してきた He ブレイトンサイクル複合酸素製造装置による酸素製造コストを概略評価する。

ただし本複合サイクルは今後開発を必要とする機器により構成されているため、経済性評価は絶対的なものではなく、既存の酸素コストから、それに競合できる装置コストを逆算し、そのコストで複合サイクルを実現できるかを判断することにした。

a) 市販酸素のコスト推算

酸素は様々な形態で供給されており、酸素ガスの場合、液体酸素の場合でコストが相違する。今回は工業ガスメーカーの全体平均から市販酸素のコストを求めることにした。

昨年度の工業ガス大手 5 社の総酸素販売量と総販売金額を表 4.2.1-6 に示す²⁾。

表の酸素コストは、総販売金額を総販売量で割った値である。

今回必要な酸素量は、1651Nm³/h、すなわち 2360kg/h の酸素流量になるため、液体酸素貯槽を設置し、消費される酸素を液体酸素ローリーで供給するとなると、最大積載量が 12,500kg の大型のセミトレーラ型でも、5 時間に一回の充填を続ける必要があるため、あまり現実的ではない。

表 4.2.1-6 市販酸素のコスト推算値

	液体酸素	酸素ガス	液・ガス総計
総販売量[百万 m ³]	884	1,467	2,351
総販売金額[百万円]	38,358	18,010	56,368
酸素コスト*[円/Nm ³]	49.0	13.9	24.0

*注) 販売量の体積は 0.101MPa、35℃での値と考え、0.101MPa、0℃での体積に換算している。

b) 設備コストと酸素製造コスト

設備コストと酸素製造コストの関係は、前年度の成果報告書 5.4 節と同じ以下の条件で検討した。

表 4.2.1-7 酸素製造コスト算出条件

項目	数値	備考
年間稼動時間[h]	7,920	うち 3,300h は夜間電力利用
固定費[%/年]	18.5	保守費など含む
人件費[百万円]	42	7 百万円/人とし 5 人
電気料金	基本料金[円/kW] 1650	月額金額
	昼間[円/kWh] 11.14	
	夜間[円/kWh] 6.15	
冷却水など	—	無視

液体水素の費用は発電単価で評価されるものとして考慮しない。

人件費の 5 人は、本設備が高圧ガスの製造装置となるため、関係法規である高圧ガス保安法に則り保安統括者 1 名をたて、運転員として、1 名/直の 3 直 4 交代を考慮したためである。

このような条件では酸素製造コストは以下のように表される。

$$x = \frac{R \cdot P_c}{Q \cdot t} + C_L + C_{EP} \quad \text{eq-2}$$

ここに、 x [円/Nm³]：酸素製造コスト

P_c [円]：設備コスト

R [-]：固定費比率

Q [Nm³/h]：酸素流量(100vol%換算)

t [h]：年間運転時間

C_L [円/Nm³]：人件費

C_{EP} [円/Nm³]：電気総額荷重平均費

を示す。

上式を変形すれば、酸素製造コスト x から設備コスト P_c を、

$$P_C = \frac{Q \cdot t}{R} \times - \frac{Q \cdot t \cdot (C_L + C_{EP})}{R} \quad \text{eq-3}$$

として決定できる。

電気総額荷重平均費 C_{EP} は、表 4.2.1-6 より、酸素の電力原単位を $SPC \text{ kWh/Nm}^3$ とし、基本料金を C_F 円/kW、昼間、夜間の電気料金をそれぞれ C_D 、 C_N 円/kWh とすれば、

$$C_{EP} = \frac{12 \times C_F \cdot SPC}{t} + \frac{SPC \cdot (C_D \times 4620 + C_N \times 3300)}{t} \quad \text{eq-4}$$

と求められる。

複合サイクルの検討で酸素の電力原単位が最小となるのは、表 4.2.1-3 のケース 1 であり、 0.33 kWh/Nm^3 となっている。計測設備や補機類の電力を 10 kW として、

$$SPC = 0.33 + \frac{10}{1651} = 0.336 \quad \text{eq-5}$$

とする。

比較のため通常の深冷空気分離装置で酸素を常温で圧縮するプロセスについても同様の評価を行う。例として取り上げたプロセスを図 4.2.1-10 に示す。このプロセスの動力原単位は、 0.552 kWh/Nm^3 となっており³⁾、複合サイクルと同様補機類などの電力を 10 kW として、 $SPC=0.558$ とする。

c) 設備の経済性評価

このようにして求めた酸素製造コストと設備コストの関係を図 4.2.1-11 に示す。

eq-3 より明らかなように、同じ酸素製造コストを与える複合サイクルと通常設備のコスト差は、常に同じで約 2 億円となっている。このコスト差は、言わば複合サイクル設備費のコスト増加許容値と言える。

表 4.2.1-6 に示した酸素ガスコストに対応する設備コストは、次の表ようになる。

表 4.2.1-8 酸素コストから求めた設備のコスト比較

設備区分	酸素コスト	
	13.9 円/ Nm^3	24.0 円/ Nm^3
複合サイクル設備コスト[百万円]	518.7	1,233
通常プロセス設備コスト[百万円]	337.3	1,051

今回検討している酸素製造設備を通常プロセスで建設した場合、表 4.2.1-8 の酸素コストが 13.9 円/Nm^3 になるような設備費とするのは困難であり、一方 24 円/Nm^3 となるような設備費は少し高過ぎるように思われる。

複合サイクル設備のコスト増加許容値は約 2 億円しかなく、したがって、このコスト差で複合サイクルに必要な機器を設置し、設備として完成させられるかが経済性評価の分か

れ目になる。表 4.2.1-8 で明らかなように、通常設備と複合サイクル設備のコスト差が設備全体に占める割合は、酸素コストが 24 円/Nm³ であっても、既に 20% 程度となっており、あまり大きくはない。

以上の点を考慮すると、複合サイクルでは、

- ① He ブレイトンサイクルや低温圧縮機などの開発が必要
- ② 電気計装品はすべて水素防爆仕様になくなくてはならない
- ③ 酸素と水素が共存するための安全の確保

など、かなりコストアップ要因が明確であり、経済性評価はあまり高くないと判断され、むしろ通常設備のオンサイト酸素供給が向いているように思われる。

今回の検討で、通常プロセスと複合サイクルの動力原単位の差が約 0.22kWh/Nm³ と大きいのに、酸素製造コストの差にはあまり影響しなかったのは、酸素発生量があまり大きくなく、設備費分の固定費が最も大きく寄与したことが原因である。

(5)まとめと今後の課題

a) He ブレイトンサイクルと酸素製造装置の複合サイクルについて、ヘリウムの供給温度が異なる 3 つのケースのプロセスについて検討を行い、以下の結果を得た。

- ① ヘリウムの供給温度が高くなるに従い、冷熱供給流体から得られる最大仕事が増加し、主熱交換器、低温圧縮機のエクセルギーロスが増加する。このため、酸素製造装置の必要動力が増加し、He ブレイトンサイクルの発生動力を含めた酸素製造原単位は悪くなることわかった。

- ② 水素の冷熱利用度について、エクセルギーを用いて評価した結果、水素を環境温度まで変化させたときに得られる最大仕事の 80% 以上を本プロセスで利用していることがわかった。

b) 酸素コストから設備費を逆算し、経済性評価を実施し、以下の結果となった。

- ① 今回の酸素製造量では電力原単位の酸素製造コストに占める割合があまり大きくなく、水素冷熱利用 He ブレイトン複合サイクルの優れた酸素動力原単位は、通常プロセスからのコストアップ分を補うまでには至らない可能性がある。
- ② 今回検討した範囲内であれば、必要な酸素供給を通常プロセスに基づくオンサイト方式が最も経済性が高い。ただし大型深冷空気分離装置から直接パイプラインで酸素供給が可能であれば、それが最も効率的である。

c) 今後の課題としては、コスト削減方法も含めて、その他の水素冷熱利用方法を検討することが挙げられる。これには、酸素分離製造プロセスの単純化も含まれるので、水素と酸素の直接熱交換器の設計を可能とする固体窒素の熱伝導測定などの基礎的研究を行うことも含まれる。また安全性に関しても、他のサブタスクと協調して基本的技術の検討を行う必要がある。

(6)参考文献

- 1) Kotas, T. J., The Exergy Method of Thermal-Plant Analysis. Butterworths, London, (1985)
- 2) ガスレビュー No.419、 p.19、 1998
- 3) Murata, Y., Low Purity Oxygen Production Process by Utilizing Liquid Hydrogen Cold Energy, Proceedings of the 4th Japan-Korea Joint Symposium '97 on Hydrogen Energy, Yokohama, Aug. 29, 1997

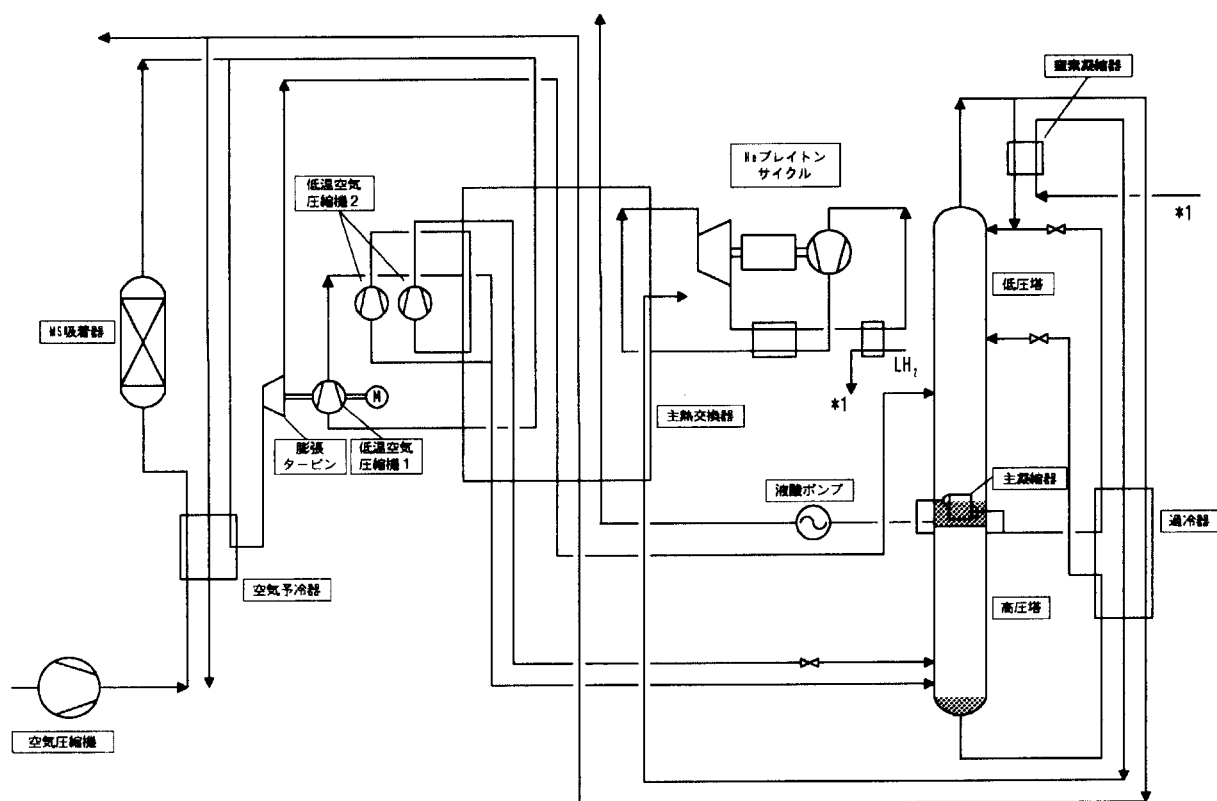


図 4.2.1-1 液体水素冷熱利用 He プレートンと酸素製造設備の複合サイクル

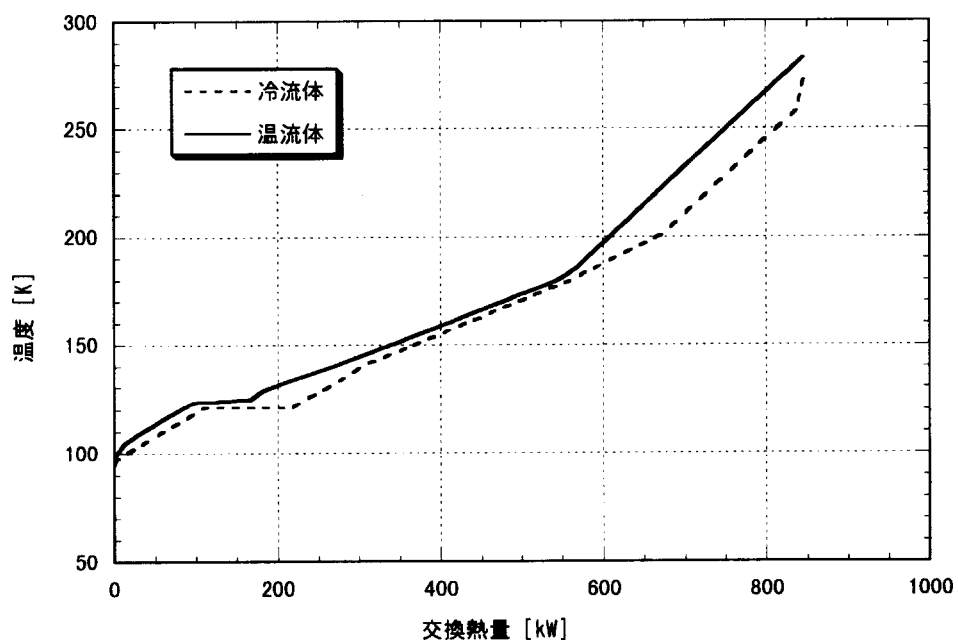


図 4.2.1-2 ケース 1 の主熱交換器の Q-T 線図

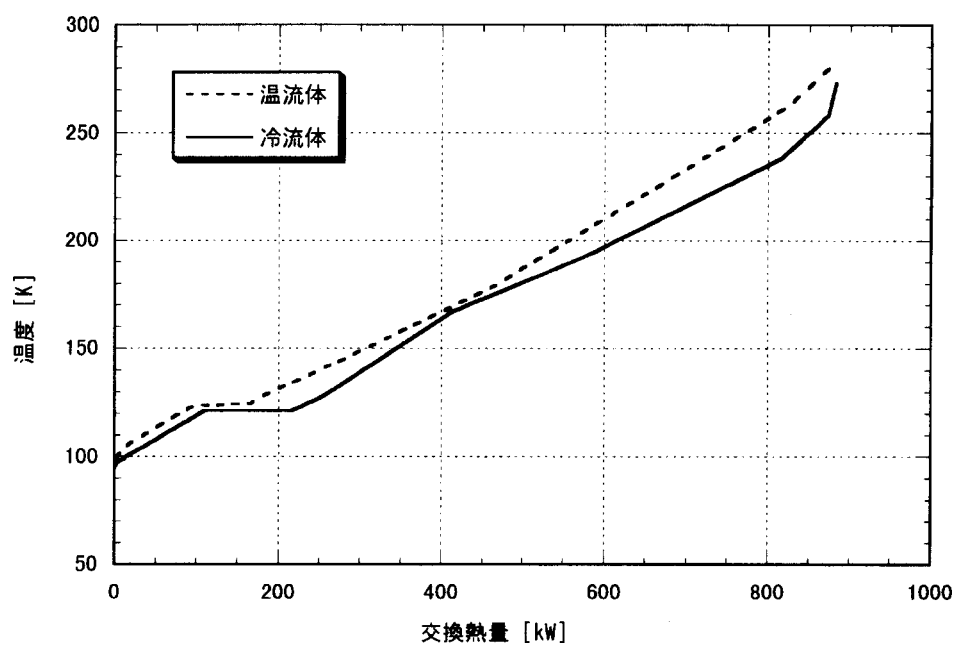


図 4.2.1-3 ケース 3 の主熱交換器の Q-T 線図

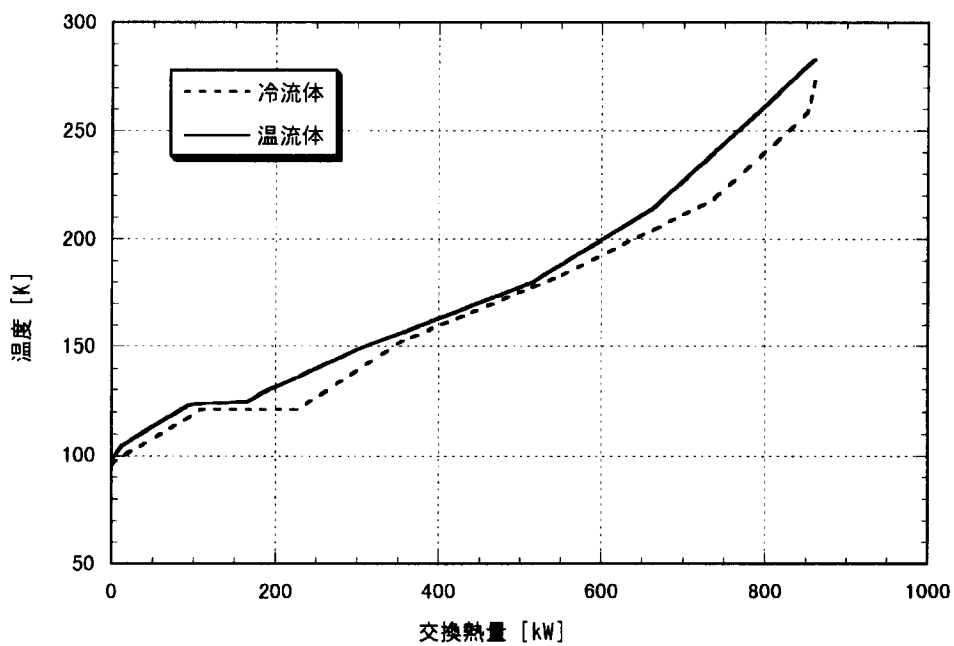


図 4.2.1-4 ケース 2 の主熱交換器の Q-T 線図

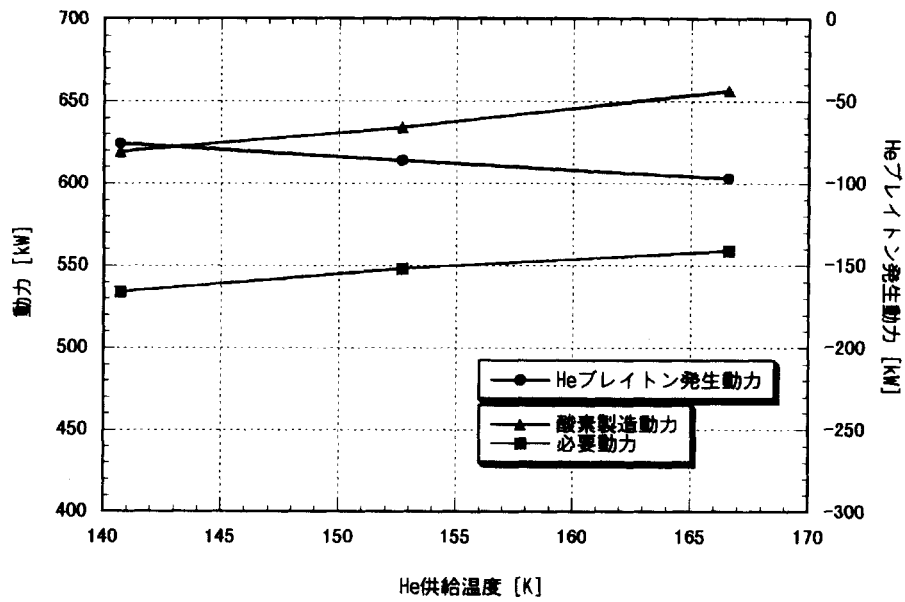


図 4.2.1-5 ヘリウムの供給温度に対する動力の変化

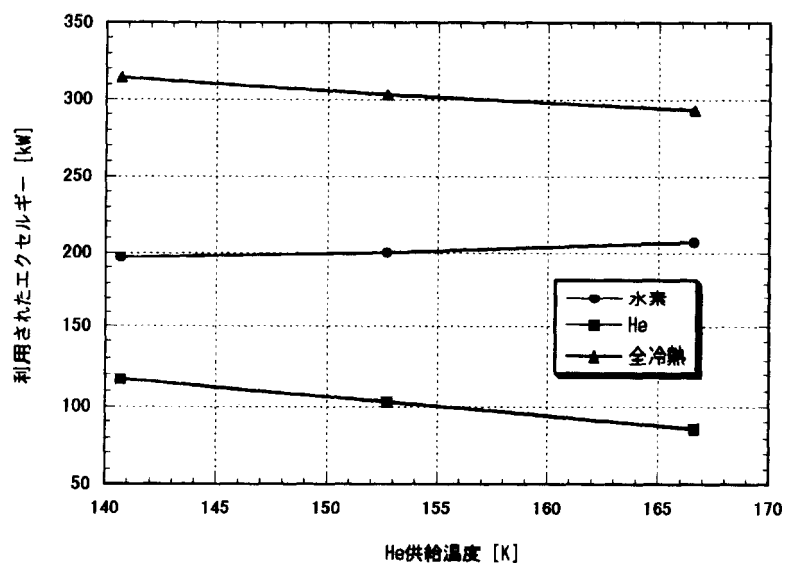


図 4.2.1-6 ヘリウムの供給温度に対する利用されたエクセルギー変化

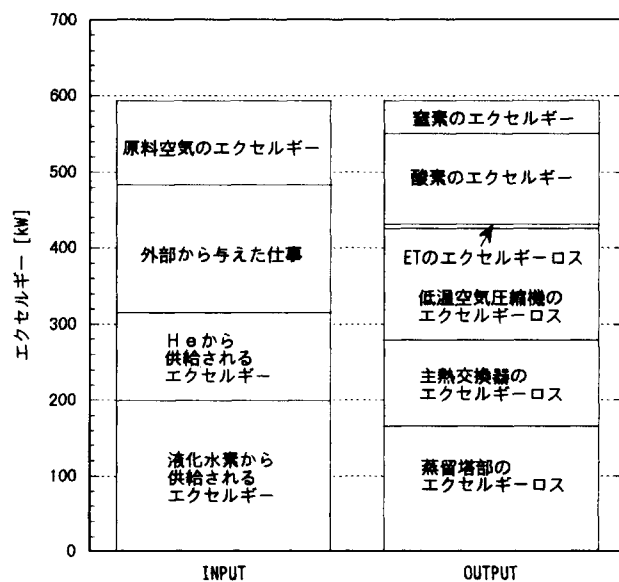


図 4.2.1-7 ケース 1 のエクセルギーバランス

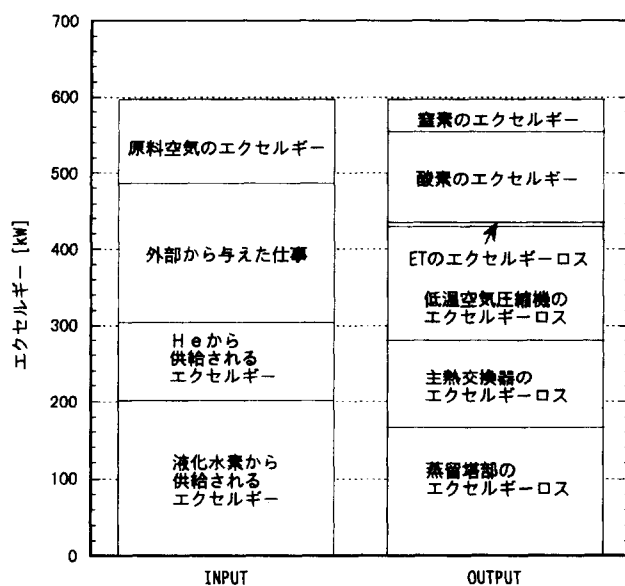


図 4.2.1-8 ケース 2 のエクセルギーバランス

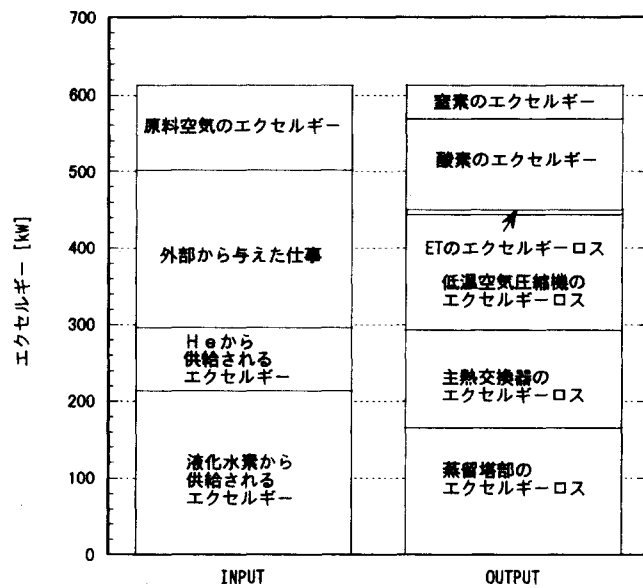


図 4.2.1-9 ケース 3 のエクセルギーバランス

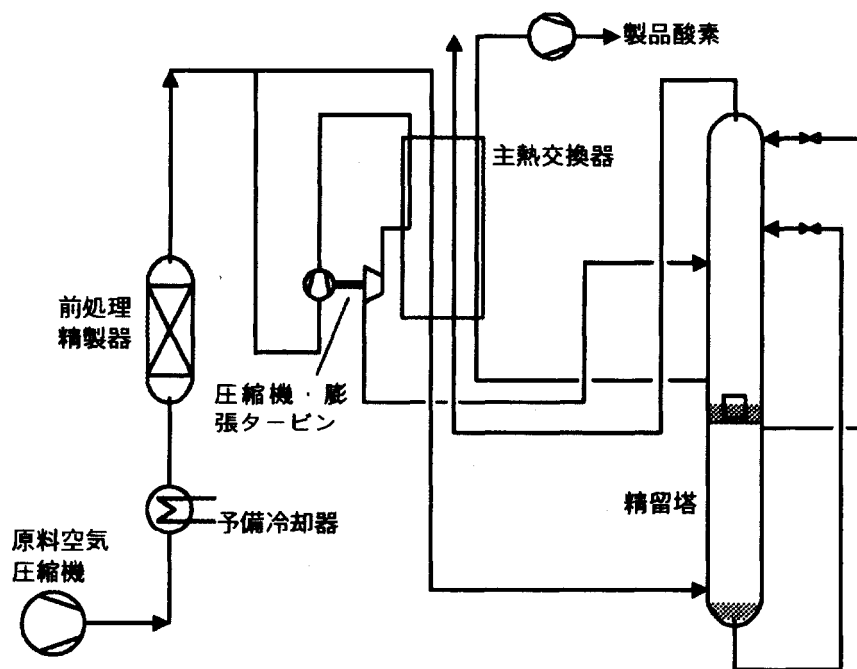


図 4.2.1-10 通常の深冷分離酸素製造プロセス

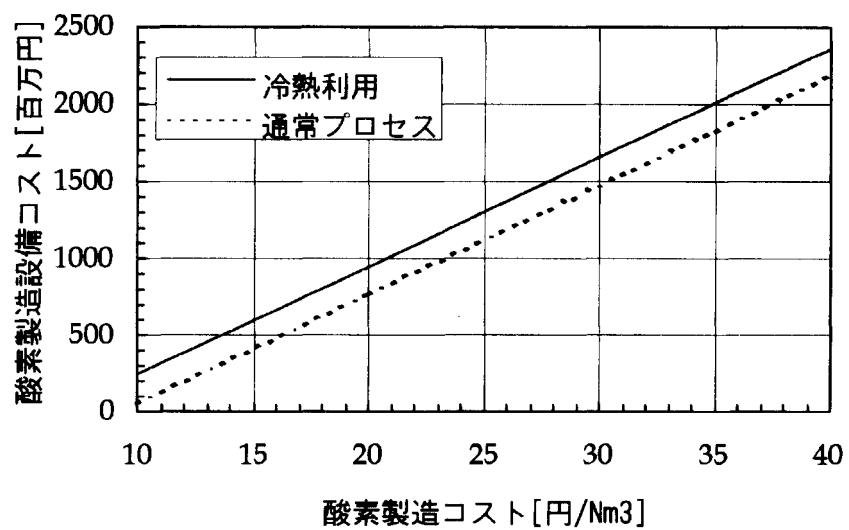


図 4.2.1-11 酸素コストと設備コスト

4.2.2 水素冷熱利用Heブレイトンサイクルの検討

液体水素が保有する冷熱を酸素製造装置の寒冷源として有効に利用するため、酸素製造の動力原単位を低減するシステムとして図 4.2.2-1 に示すようなHeブレイトンサイクルと酸素製造装置を組み合わせたプロセスを 4.2.1 で検討した。

4.2.1 では水素冷熱利用Heブレイトンサイクルと酸素製造装置の複合サイクルの最適化を行うために、Heの供給温度の異なる3ケースについて酸素製造装置の動力原単位を算出した。ここでは算出した3ケースについて酸素製造装置に供給されるHeの条件及びHeブレイトンサイクルの発生動力について詳細を述べると共にHeブレイトンサイクルの特性について検討した。

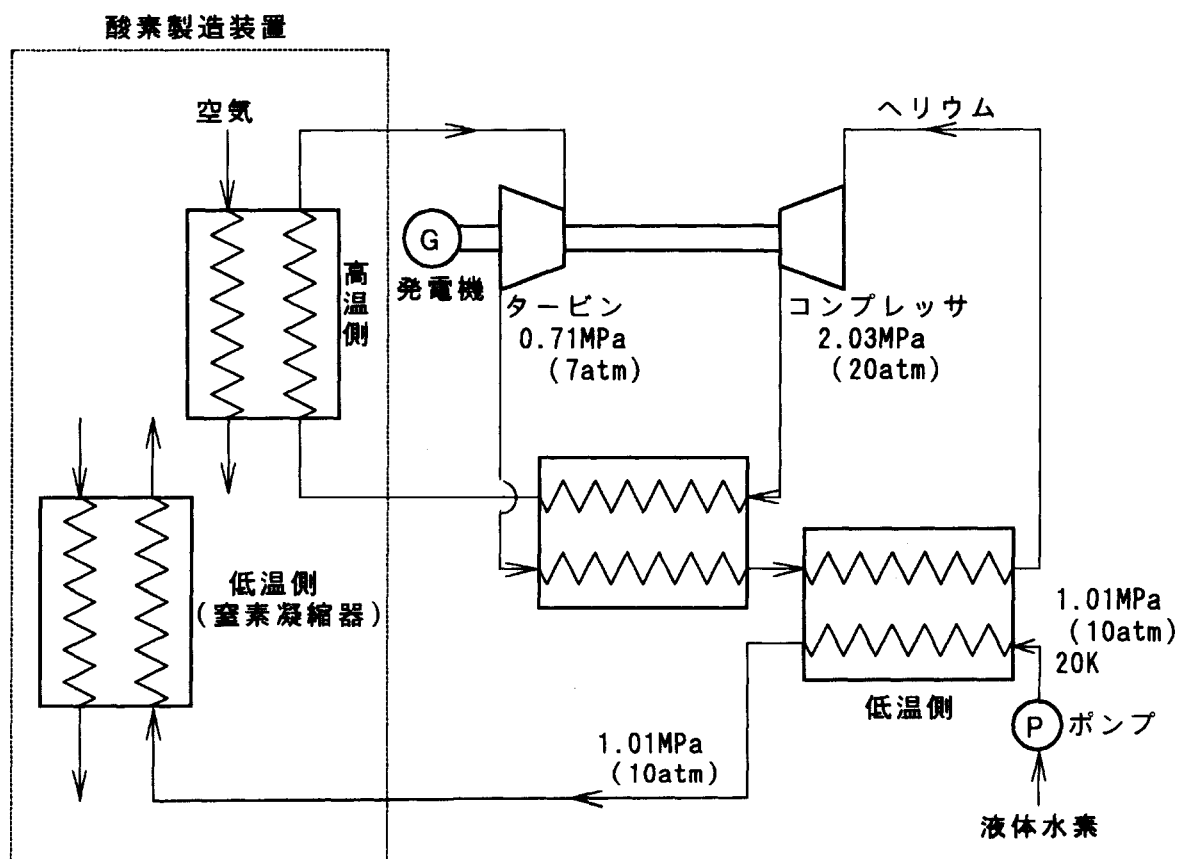


図 4.2.2-1 Heブレイトンと酸素製造設備の複合サイクル

図 4.2.2-1 に示す H e ブレイトンサイクルの低温側は液体水素の冷熱を利用し、冷熱を回収された水素はその後、酸素製造装置で窒素凝縮器によりさらに冷熱回収される。

H e ブレイトンサイクルの主な計算条件は前年度検討と同じく次の通りとした。

- ・ 高圧側 H e 圧力 2.03 [MPa] (20 atm)
- ・ 低圧側 H e 圧力 0.71 [MPa] (7 atm)
- ・ コンプレッサ効率 85 [%]
- ・ 熱交換器効率 90 [%] 前後
- ・ 液体水素の冷熱回収温度 20～63 [K]
- ・ 液体水素の圧力 1.01 [MPa] (10 atm)
- ・ 液体水素の流量 0.082 [kg/s] (5000 kw 燃料電池への供給量を想定)

4.2.1 で複合サイクルの最適化を行うため検討した H e ブレイトンサイクルの条件は、コンプレッサ入口 H e 温度 T_c を 40 K として、酸素製造装置入口 H e 温度 T_s を 140.65 K、152.73 K、166.56 K に選定した 3 ケースである。計算結果を図 4.2.2-2 から図 4.2.2-4 に、計算結果をまとめたものを表 4.2.2-1 に示す。表 4.2.2-1 にはコンプレッサ入口温度 T_c が 30 K、60 K、80 K の場合も参考迄に示している。

表 4.2.2-1 H e ブレイトンサイクル計算結果

	酸素製造装置 入口温度 (T_s)	コンプレッサ 入口温度 (T_c)	酸素製造装置での 交換熱量	ブレイトンサイクル 発生動力
ケ ー ス 1	140.65 K	30 K	181.02 kw	110.01 kw
		<u>40</u>	<u>144.80</u>	<u>73.79</u>
		60	101.87	30.86
		80	76.88	5.87
ケ ー ス 2	152.73 K	30 K	191.77 kw	120.75 kw
		<u>40</u>	<u>154.80</u>	<u>83.79</u>
		60	110.26	39.25
		80	83.82	12.81
ケ ー ス 3	166.56 K	30 K	203.95 kw	132.94 kw
		<u>40</u>	<u>165.76</u>	<u>94.76</u>
		60	118.85	47.84
		80	91.00	19.99

ケース 3 のコンプレッサ入口温度 T_c を 30 K、60 K、80 K に変えた場合の計算結果を図 4.2.2-5 から図 4.2.2-7 に示す。表 4.2.2-1 にも示すように、コンプレッサ入口温度を変更することによるブレイトンサイクルの最適化（発生動力が最大となる）については平成 8 年度に報告したように、タービン入口温度／コンプレッサ入口温度の温度比（ T_t/T_c ）が大きい方が図 4.2.2-8 に示すようにサイクル効率は高くなる。

従って、4.2.1 でも述べたように He ブレイトンサイクルから得られる発生動力はタービン入口温度 T_t が高くなるケース 3 が 3 ケースのうち一番大きくなっている。

WORKING FLUIDS = HELIUM

CYCLE EFFICIENCY = 50.960 %

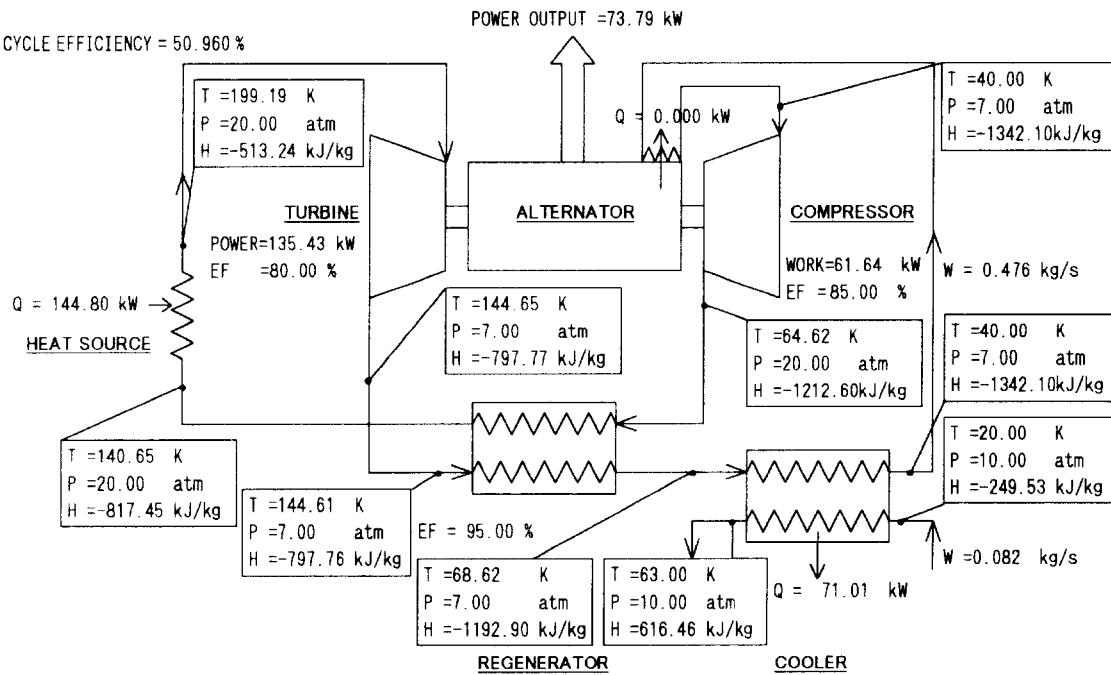


図 4.2.2-2 He ブレイトンサイクル計算結果 ($T_s = 140.65 \text{ K}$)

WORKING FLUIDS = HELIUM

CYCLE EFFICIENCY = 54.128 %

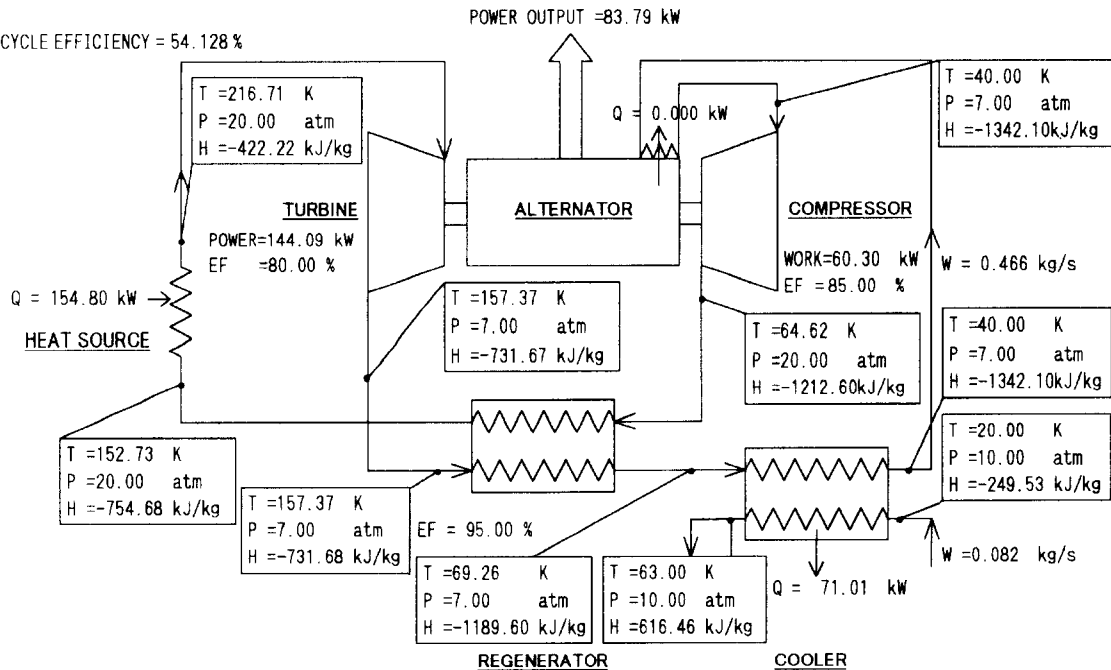


図 4.2.2-3 He ブレイトンサイクル計算結果 ($T_s = 152.73 \text{ K}$)

WORKING FLUIDS = HELIUM

CYCLE EFFICIENCY = 57.165 %

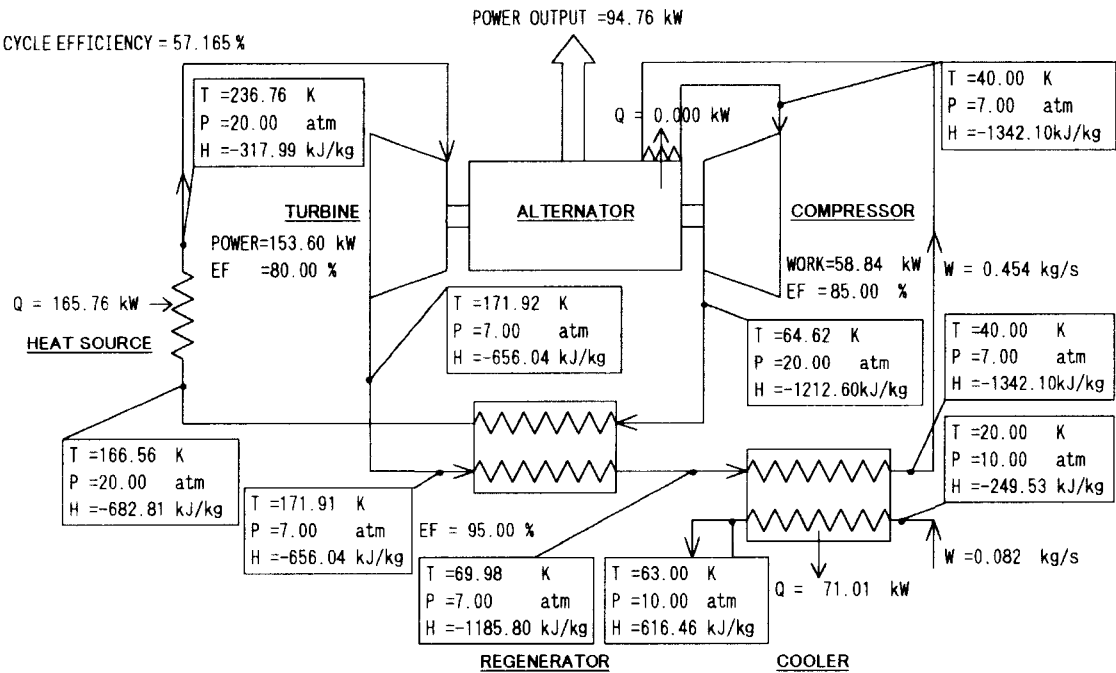


図 4.2.2-4 He ブレイトンサイクル計算結果 ($T_s = 166.56 \text{ K}$)

WORKING FLUIDS = HELIUM

CYCLE EFFICIENCY = 65.184 %

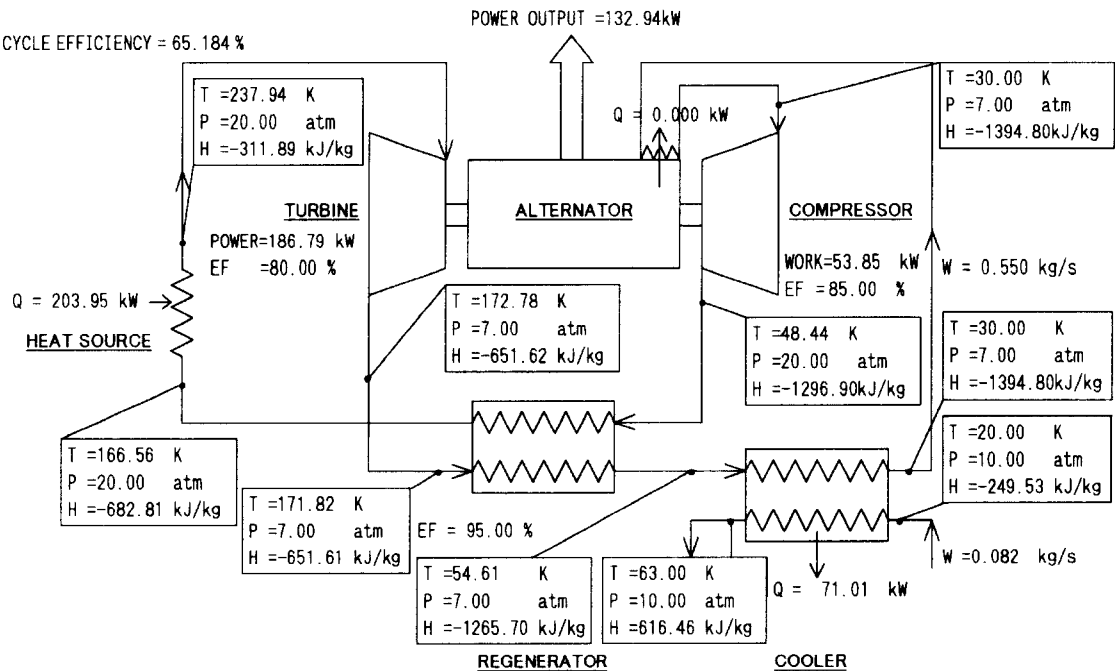


図 4.2.2-5 He ブレイトンサイクル計算結果 ($T_c = 30 \text{ K}$)

WORKING FLUIDS = HELIUM

CYCLE EFFICIENCY = 40.252 %

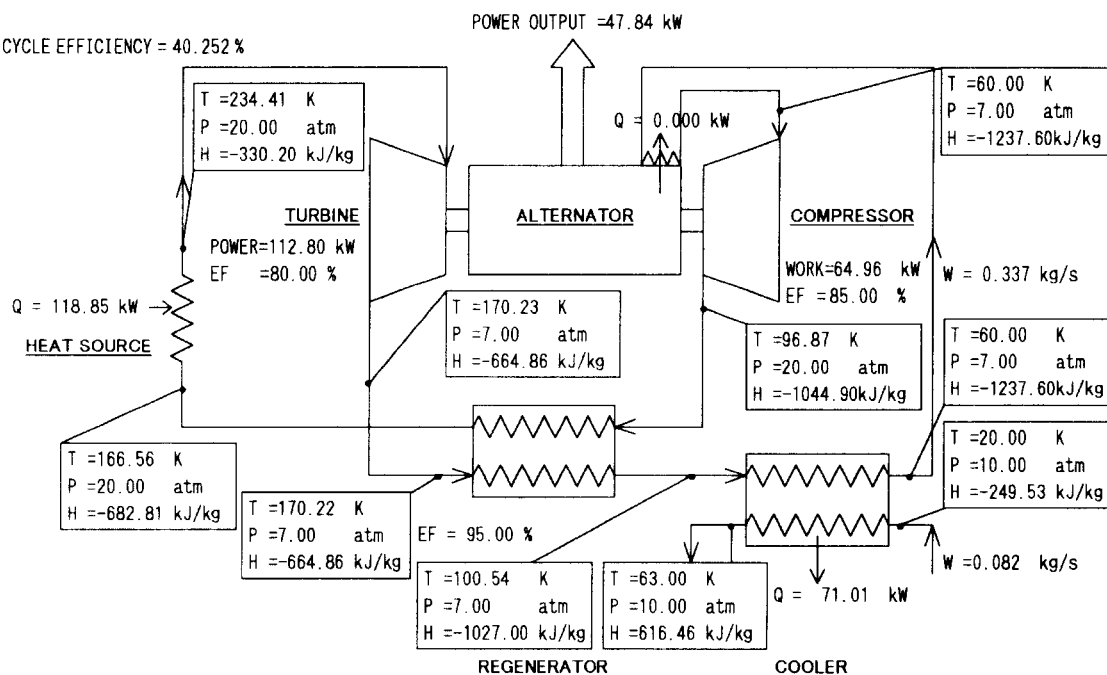


図 4.2.2-6 He ブレイトンサイクル計算結果 ($T_c = 60 \text{ K}$)

WORKING FLUIDS = HELIUM

CYCLE EFFICIENCY = 21.969 %

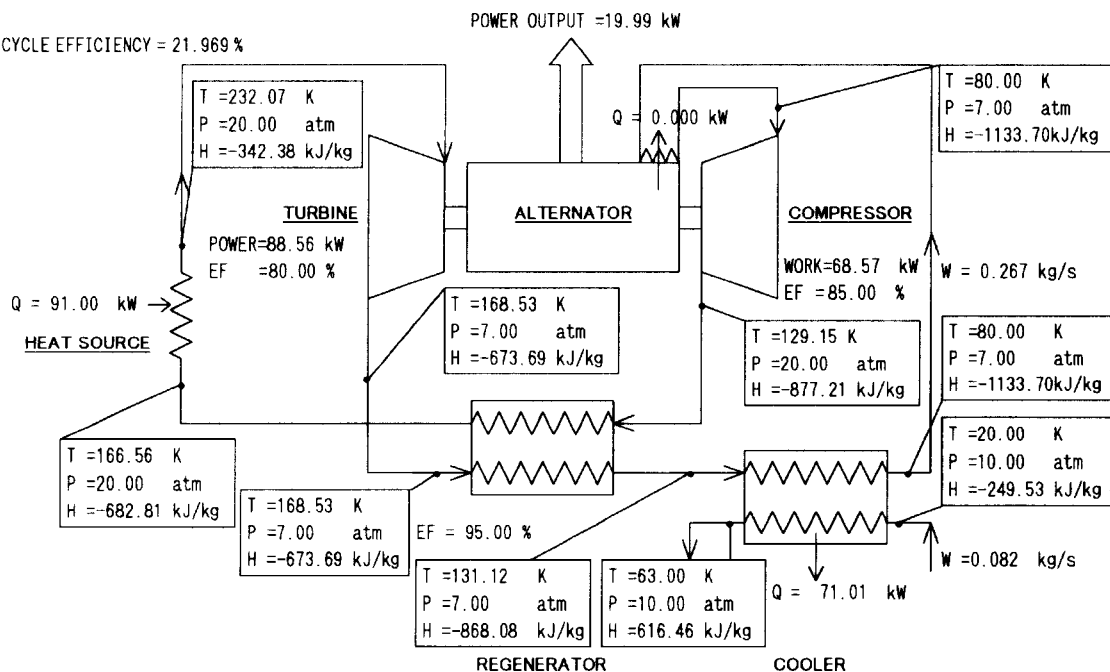


図 4.2.2-7 He ブレイトンサイクル計算結果 ($T_c = 80 \text{ K}$)

He ガス：完全ガスとして計算

$$\kappa = 1.667$$

$$C_P = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R$$

タービン効率 80%

コンプレッサ効率 85%

再生熱交効率 95%

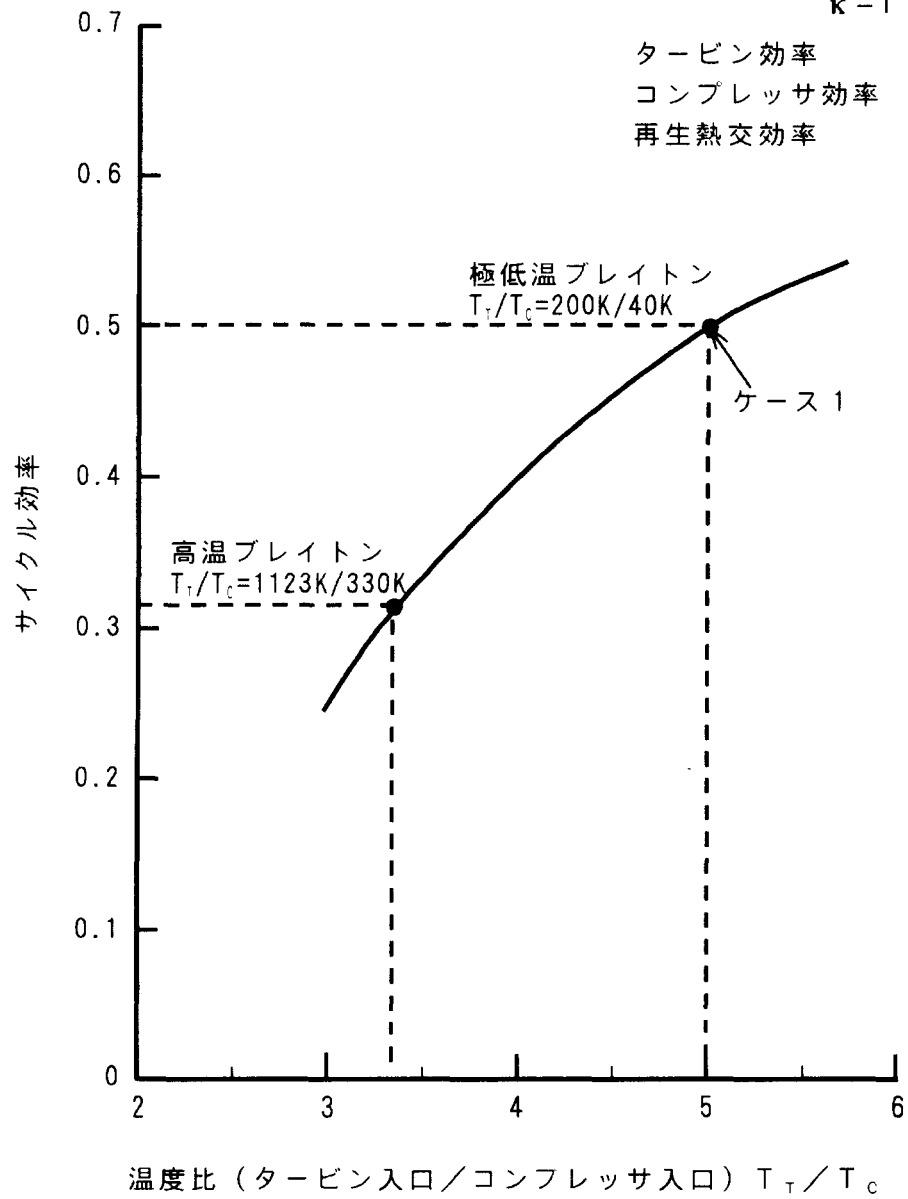


図 4.2.2-8 ブレイトンサイクル効率計算結果

4.2.3 液体水素冷熱利用低温 VSA の検討

実装置規模のシミュレーション解析を実施し仕様を確定し、製品酸素濃度に対する動力源単位との関係を求めたのでその結果について報告する。

(1) プロセス

低温 VSA による酸素供給装置のプロセスフローを図 4.2.3-1 に示す。

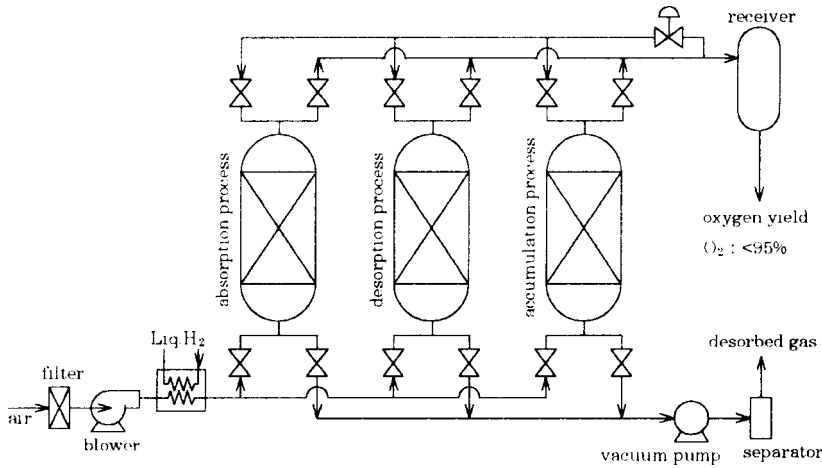


図 4.2.3-1 VSA 酸素ガス発生装置フロー

Fig.4.2.3-1 Schematic diagram of oxygen generator

(2) 構成機器の仕様

機器の仕様を表 4.2.3-1 に示す。

表 4.2.3-1 解析条件

Table 4.2.3-1 The specification of adsorption bed and parameter values used in the simulation.

Bed diameter	1.80 m
Bed height L	1.50 m
Adsorbent amount	2600 kg
Bed density ρ_b	700 kg/m ³
Bed porosity ϵ	0.36
Internal porosity ϵ_p	0.34
Temperature	200~273 K
Adsorbent	MS-5A
Adsorbent diameter	0.25 cm
LDF constant for O ₂ /N ₂	3.98/1.44 S ⁻¹ [5A,273 K] 3.6799/1.4023 S ⁻¹ [5A,269 K] 3.4709/1.2558 S ⁻¹ [5A,253 K]
Operating pressure	150/760/1000 Torr

(3) 設備コスト

設備の概算コストを表 4.2.3-2 に示す。

表 4.2.3-2 装置コスト見積もり

Table 4.2.3-2 Estimation cost of equipment

No	名 称	仕 様	個数	単 価	価格(円)
1	adsorption vessel	φ1800×3500L SUS304 2 圧	3	8,700,000	26,100,000
2	adsorbent	MS-5A 2600kg	3	5,200,000	15,600,000
3	heat exchanger	Air/Liq.H2 SUS304 2 圧	1	6,200,000	6,200,000
4	receiver	φ 1200 × 2500L 2.5m3 SUS304 2 圧	1	5,900,000	5,900,000
5	filter		1	1,200,000	1,200,000
6	blower		1	2,300,000	2,300,000
7	vacuum pump		1	1,800,000	1,800,000
8	separator	φ1000×2000L SUS304 2 圧	1	4,600,000	4,600,000
9	control valve	電動弁 非防爆 3B	1	1,600,000	1,600,000
10	automatic valve	ON/OFF solenoid valve 非防爆 3B	9	120,000	270,000
11	normal valve	ON/OFF 3B	3	90,000	450,000
12	normal valve	ON/OFF 2B	6	75,000	75,000
13	normal valve	ON/OFF 1B	6	62,000	372,000
14	normal valve	ON/OFF 3/4B	2	48,000	96,000
15	control valve	indoor on common base 非防爆	1	1,500,000	1,500,000
16	隔測温度計	-223K～323K	3	32,000	96,000
17	圧力計	-760mmHg～0.6Mpa 他	4	20,000	80,000
18	圧力スイッチ		2	8,000	160,000
19	その他配管材	配管、フランジ、ストレーナ	1	800,000	800,000
20	common base	W3000×L7500	1	900,000	900,000
	合計				70,960,000

(4) 動力源単位

製品酸素純度と動力源との関係を表 4.2.3-3 および図 4.2.3-2 にそれぞれ示す。また、製品酸素濃度と製品流量および収率の関係を図 4.2.3-3 に示す。

表 4.2.3-3 製品酸素濃度と動力源単位との関係

Table 4.2.3-3. The relation between Oxygen yield and concentration

Concentration %	Product yield mol/s	Power demand ^{*2} kW-h
98 ^{*1}	5(403 m ³ /h)	391(0.97kW-h/Nm ³)
93	6(484 m ³ /h)	317(0.66)
90	8(645 m ³ /h)	336(0.52)
89	8(645 m ³ /h)	343(0.53)
80	10(806 m ³ /h)	355(0.44)

* 1 : 吸着温度 253 K での値、他は 269 K

* 2 : 製品酸素 3 kg/cm² まで圧縮する。

* 3 : 圧縮機効率 0.8、断熱効率 0.9

収率は供給される空気中の酸素ガスに対する製品酸素ガスとの割合を示す。酸素濃度 98%における収率は 37%と、高い値が得られている。濃度が低下するにつれて製品流量、収率ともに増加している。

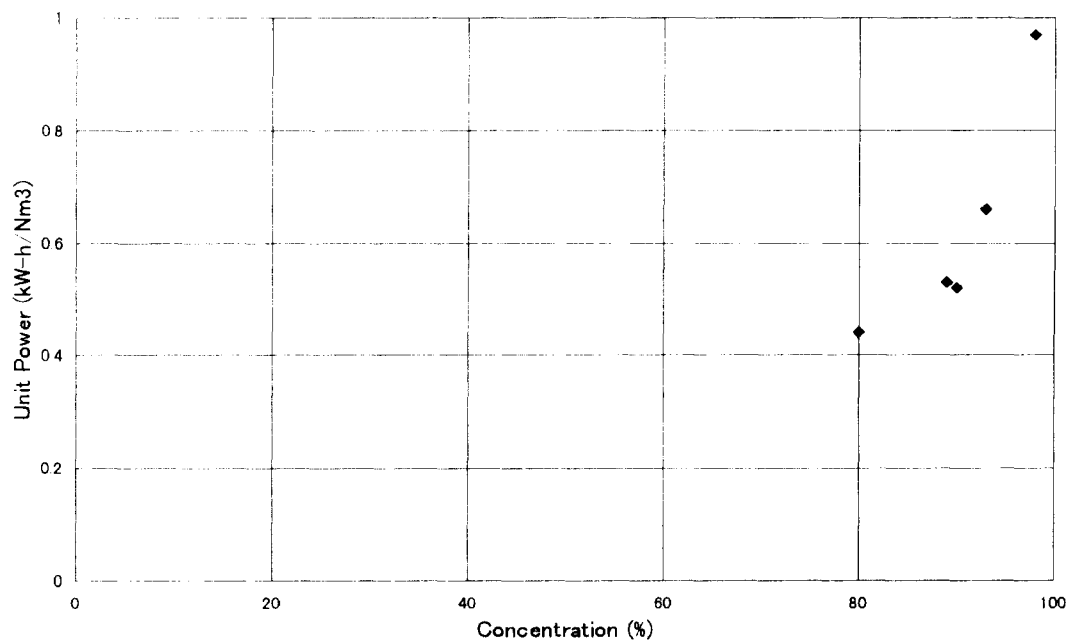
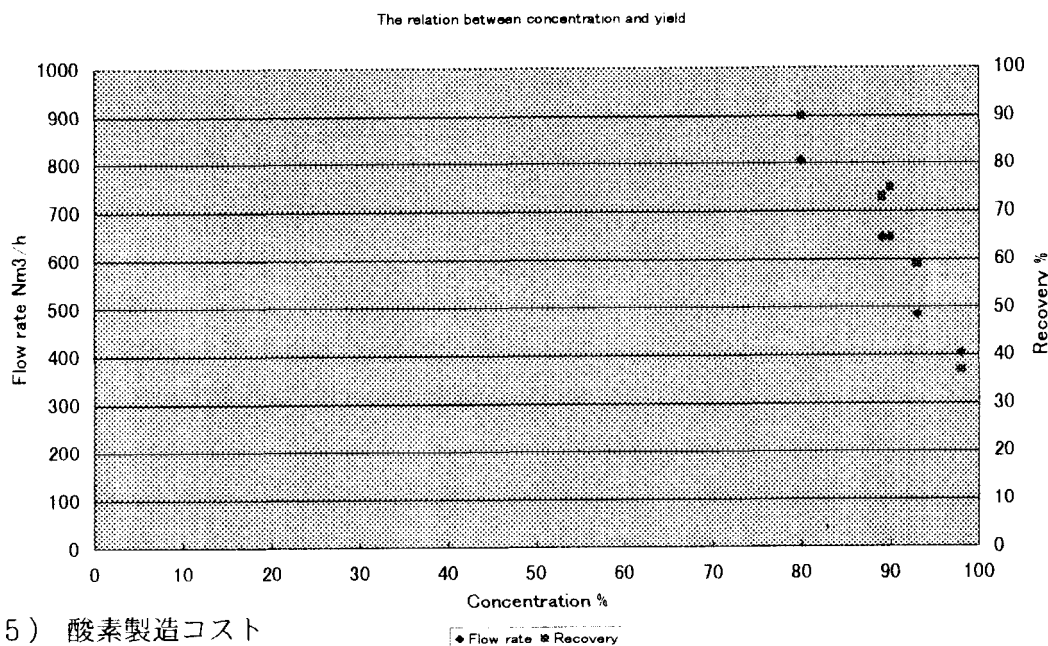


図 4.2.3-2 製品酸素濃度と動力源単位との関係

Fig.4.2.3-2 The dependency on Oxygen yield, concentration and unit power generation



(5) 酸素製造コスト

図 4.2.3-3 製品酸素濃度と製品流量&収率との関係

Fig.4.2.3-3 The relation between concentration and flow rate & yield.

(5) 技術開発課題

製品酸素出力(流量、濃度)は物質移動係数の値で変化するので、実際には物質移動係数の温度依存性を実測し、最適条件を求める必要がある。従って、以下の確認試験が重要と考えられる。

- 1)物質移動係数と温度依存性の確認
- 2)ベンチスケールモデルでの性能確認試験

学会報告

H. Yanagi. Oxygen generator using low temperature vacuum swing adsorption, Proc. of the Sixth International Conference of Fundamental of Adsorption-FOA6-, May 24-28, 1998 (Presquile de Giens, France), P799-804

4.2.4 液体水素冷熱利用空気分離装置の検討

本節では、液体水素の冷熱を利用し酸素ガスを製造する空気分離装置における、製造規模、酸素純度、酸素圧力と製造原単位(電力)と概略製造コストの関係について検討した。本節では、以降、空気分離装置を含む設備全体を酸素製造装置と呼ぶ。

(1) ケーススタディ条件

本節での検討はケーススタディ用の条件をつぎのように設定し実施した。

酸素製造量（純酸素ベース）	CASE 1	826	Nm3/h	
	CASE 2	1,651	Nm3/h	
	CASE 3	3,303	Nm3/h	
酸素純度	96	90	85	80
	75	70	65	60
	55	50	Vol. %	
圧力(酸素製造装置出口で)	0.2	0.4	0.6	0.8
	1.0	1.2	MPa(g)	

(2) 酸素製造装置モデル

以上のケーススタディを行なうにあたり全てを個々に最適なプロセスを検討する事とすると、製造量で3種、酸素純度で10種、製造圧力で6種となり合計180のプロセス検討が必要となり作業が大変なため、検討モデルを簡便化し検討する事とした。酸素製造装置の検討モデルとして次の形をとった。

製造量 CASE 1、2、3の3種

酸素純度 96 %、90 %、85 %はそのまま空気分離装置より直接製造する。80%以下は製造効率が一番良いと思われる90%の酸素を製造し、後に空気希釈して所定の純度、流量とした。

圧力 空気との希釈も考慮し、空気分離装置からの製造圧力は0.02MPa(g)とし、その後酸素圧縮機にて必要圧力まで昇圧する。

(注) 本節の以降の文中のMPaはゲージ圧を示す。

(C)

備精製 (A) (B) 空気分離 (C) 酸素圧縮 (D) 酸素ガス

(A) 原料空気 (B) 分離用空気 (C) バイパス (希釈用) 空気

(D) 酸素製造量 (E) 製品酸素ガス

表 4.2.4-1 空気分離用空気と希釈空気の関係

酸素純度 Vol. %	原料空気量 (A) 酸素／空気	分離装置行 (B) 酸素／空気	分離装置より (D) 酸素／製品量	バイパス量 (C) 酸素／空気	製品量合計 (E) 酸素／空気
96	1,688	1,688	1,651	0	1,651
	8,053	8,053	1,720	0	1,720
90	1,688	1,688	1,651	0	1,651
	8,053	8,053	1,835	0	1,835
85	1,688	1,688	1,651	0	1,651
	8,053	8,053	1,943	0	1,943
80	1,691	1,628	1,589	63	1,652
	8,050	7,751	1,765	299	2,064
75	1,689	1,589	1,551	100	1,651
	8,044	7,566	1,723	478	2,201
70	1,689	1,545	1,508	144	1,652
	8,040	7,356	1,675	684	2,359
65	1,686	1,493	1,458	193	1,651
	8,032	7,112	1,620	920	2,540
60	1,685	1,434	1,400	251	1,651
	8,026	6,829	1,555	1,197	2,752
55	319	1,364	1,331	319	1,650
	8,016	6,493	1,479	1,523	3,002
50	1,682	1,280	1,250	402	1,652
	8,010	6,096	1,388	1,914	3,302

(3) 液化水素の冷熱利用

本節では、ケーススタディの要素が多いため、液化水素の冷熱利用ヘリウムブレイトンサイクルと酸素製造装置の複合サイクルの検討と変えて、液化水素の冷熱は、循環窒素の液化に利用し、この液化された窒素で空気分離用の原料空気を冷却、空気分離に必要な原料空気の圧力を、低温圧縮機で作る事により、所要動力を常温空気で作るより軽減する形で液化水素の寒冷を利用する。全体システムの概要は節末に、空気分離装置部分の概要を次の「図 4.2.4-2」に示す。但し、液化水素量は製品酸素量（純酸素ベース）の2倍とし、余剰酸素率は考慮しない。

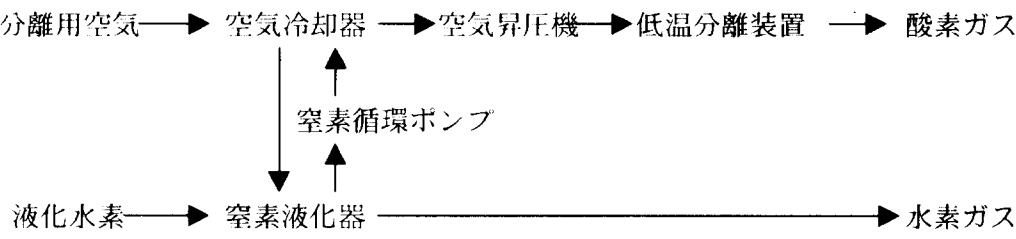


図 4.2.4-2 冷熱利用空気分離装置

以上のシステムでは、同一ケース内では供給される液化水素量は一定となるため製造される液化窒素量も一定になり、最終製品酸素純度が低いほど必要分離用空気量(低温分離装置用の)が減少するため、低温分離装置用の空気はより低い温度まで冷却され圧縮動力は更に、減少する。

(4) 電力原単位の検討

以上の条件に基づき電力原単位の検討を行なった結果を次に示します。

なお、各常温の圧縮機(空気ブロワーと酸素圧縮機)は、現在の一般的な圧縮機、電動機の効率を低温圧縮機については、現状より約5～6%高い効率を採用し試算した。以下に、検討結果を示す。

表 4.2.4-2 酸素ガス製造原単位

圧力 1.0 MPa kWh/Nm3 純酸素										
酸素量 Nm3/h	酸素純度 (Vol. %)									
	96	90	85	80	75	70	65	60	55	50
826	0.430	0.392	0.387	0.385	0.378	0.372	0.365	0.359	0.348	0.337
1,651	0.411	0.378	0.373	0.372	0.365	0.360	0.353	0.347	0.336	0.327
3,303	0.392	0.361	0.356	0.355	0.349	0.342	0.336	0.331	0.320	0.311

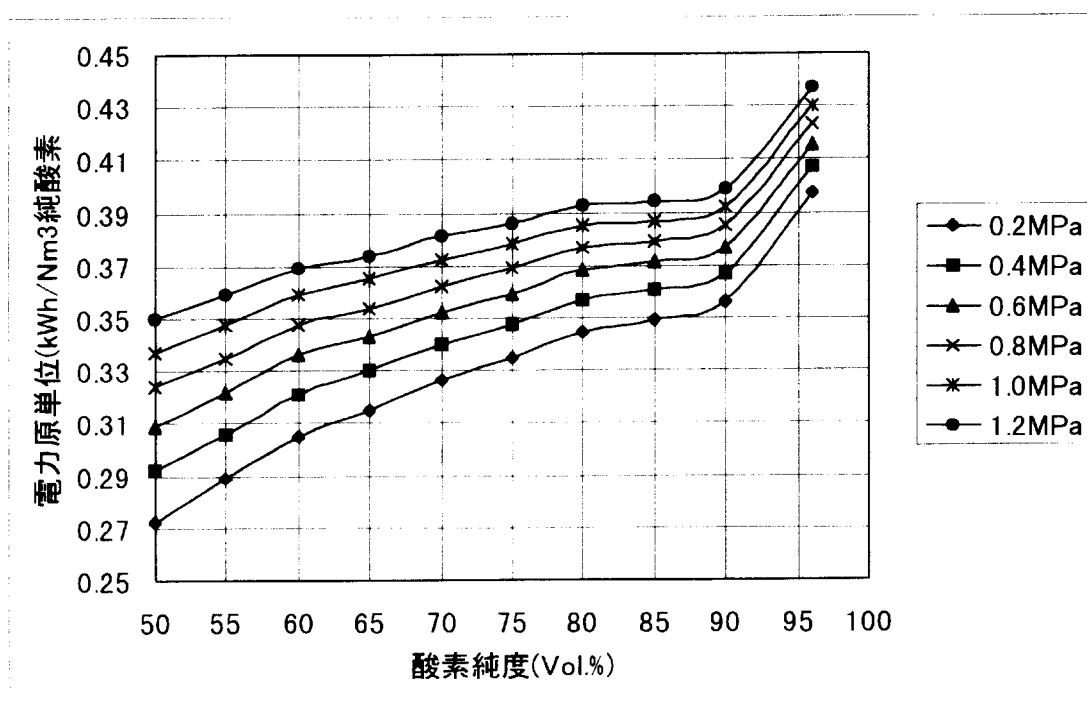


図 4.2.4-3 酸素製造原単位 (CASE 1 酸素製造量 826 Nm³/h)

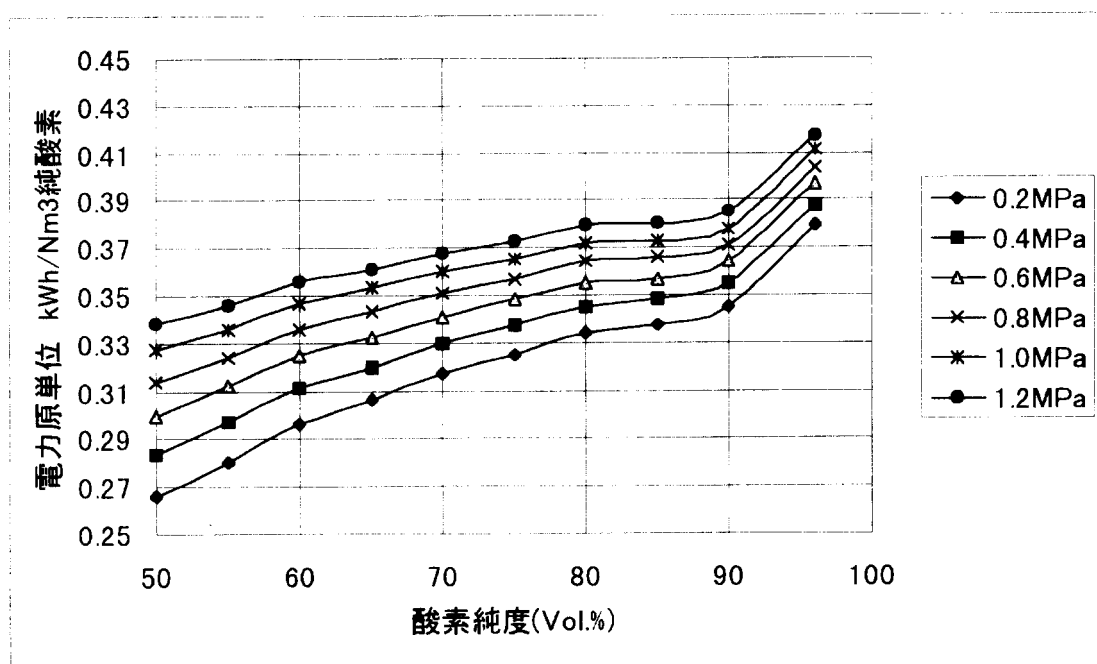


図 4.2.4-4 酸素製造原単位 (CASE 2 酸素製造量 1,651 Nm³/h)

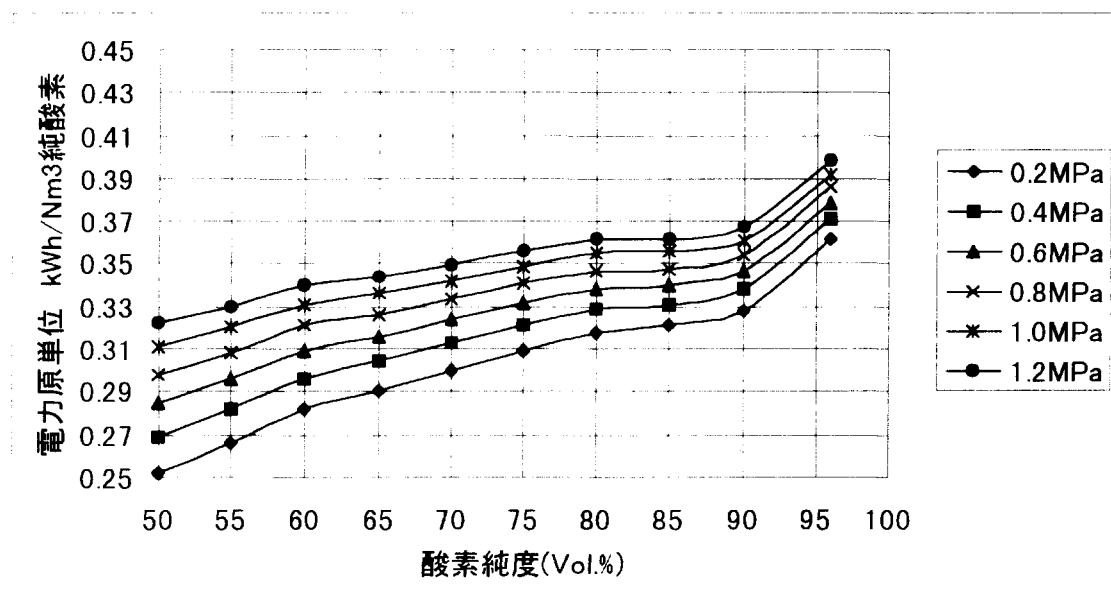


図 4.2.4-5 酸素製造原単位 (CASE 3 酸素製造量 3,303 Nm³/h)

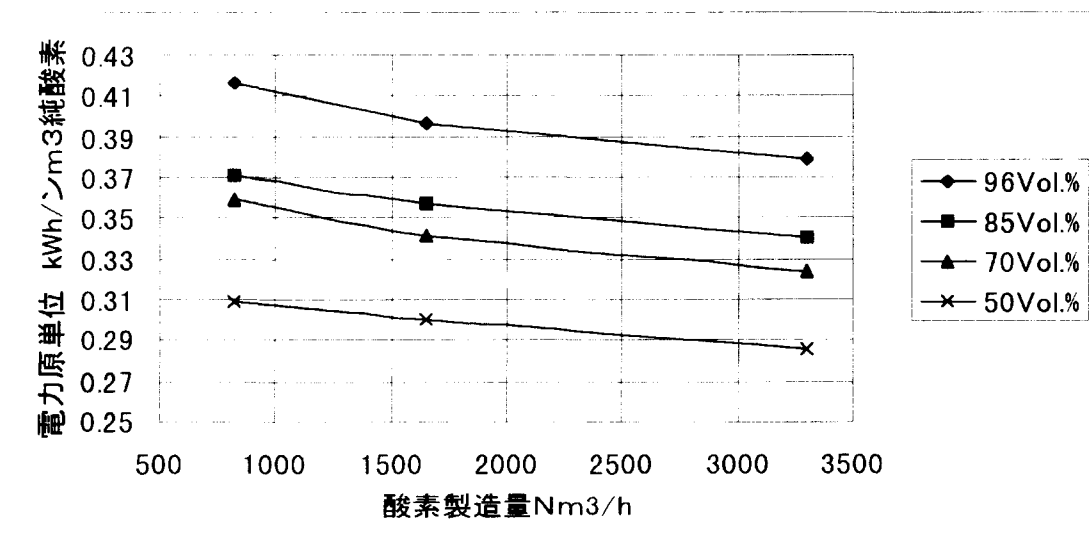


図 4.2.4-6 酸素製造原単位 (酸素製造圧力 0.6 MPa)

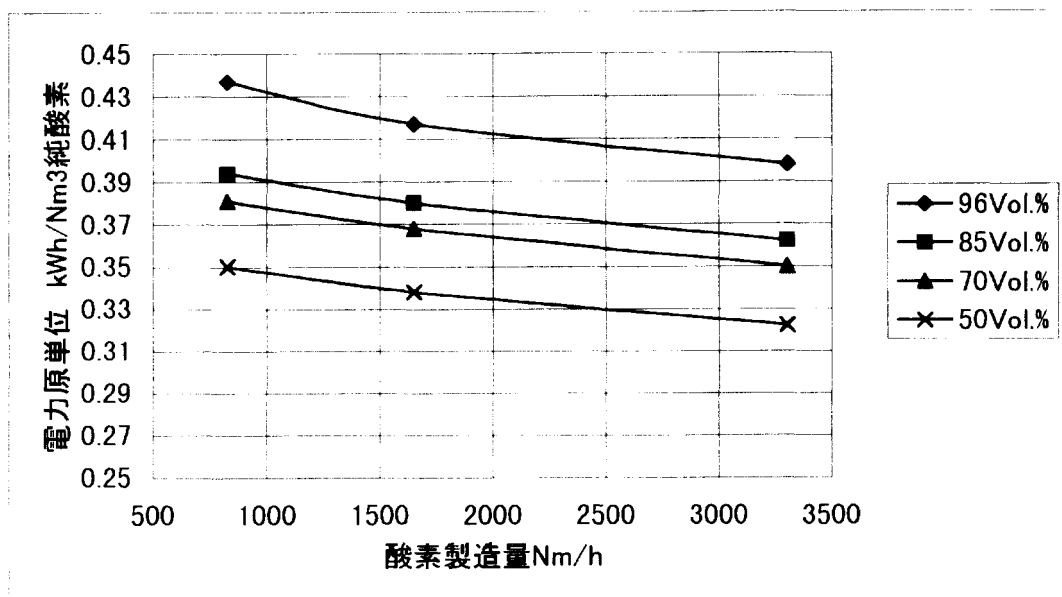


図 4.2.4-7 酸素製造原単位 (酸素製造圧力 1.2 MPa)

(5) 設備費用

製造コストの試算にあたり、設備費用の試算が必要となり、設備の範囲、付属構成機器の仕様(主として容量等)を決める必要がある。

この酸素製造設備として次の様に仮定した。

本体設備

空気予備精製設備(空気ブロワーを含む)、空気分離装置(低温空気圧縮機、膨張タービンを含む)、酸素圧縮機、窒素液化設備(循環用液化窒素ポンプを含む)、計装設備、分析計、高圧電動機盤、低圧分電盤、冷却水供給設備等

付属設備	CASE 1	CASE 2	CASE 3
液化水素タンク(内容積)	30 m ³	60 m ³	100 m ³
液化窒素タンク(内容積)	10 m ³	20 m ³	20 m ³ x 2

その他

真空断熱配管を含む、接続、連結に必要な配管、配線設備
 機械建屋(空気ブロワー、低温空気圧縮機、酸素圧縮機用)
 分析、操作、電気盤用建屋
 必要な基礎類

以下に酸素圧力 1.2MPa の設備費のグラフを示します。

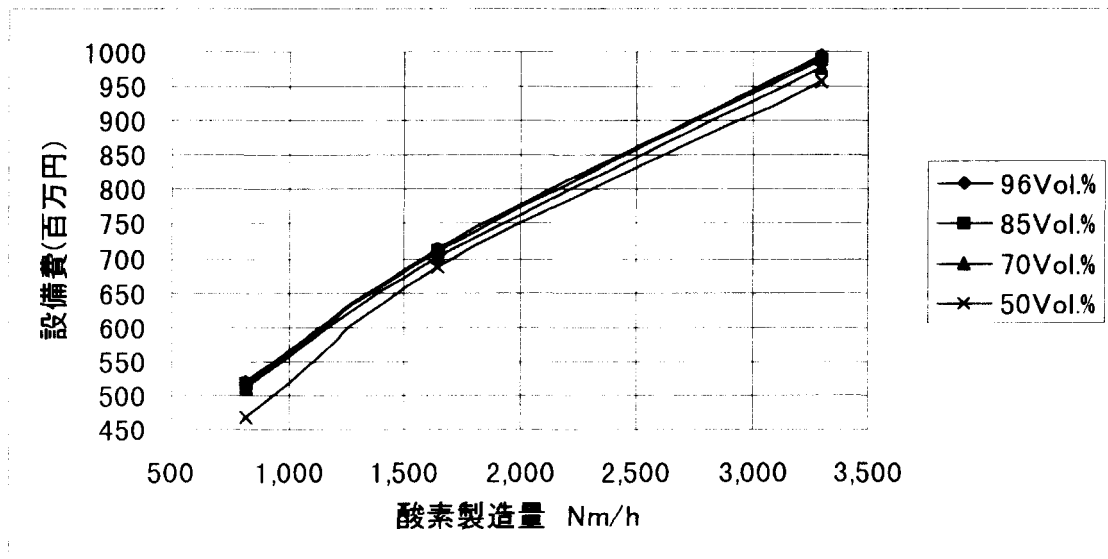


図 4.2.4-8 酸素製造装置設備費 (酸素製造圧力 1.2 MPa)

(6) 製造コスト試算

次に以下の試算条件を基に各条件の酸素の製造コストを試算した。

試算条件

年間稼働時間	24 h x 330	= 7,920 h
電力料金	基本料金 ¥1,650 / kW・月 / 720 h	= 2.29 ¥ / kW
	昼間料金 ¥11.14 / kW	平均 6.50
	夜間料金 ¥ 6.15	2.56
	料金平均単価	11.35 ¥ / kWh

(注、製造コスト試算には 12.00¥ / kWh を採用し、冷却水費を含むものとします。)

固定費 総設備費の 18.5% / 年とし、以下費用を含むものとした。
償却費、金利、税、火災保険、メンテナンス費用、消耗品費

人件費 1 名 年 7,000,000 円とし、運転員は 1 名 4 班 3 交代として 4 名、保安監督者として 1 名の合計 5 名

表 4.2.4-3 酸素製造コスト

圧力 1.0MPa ￥/Nm³ 純酸素ガス

酸素量 Nm ³ /h	酸素純度 (Vol. %)									
	96	90	85	80	75	70	65	60	55	50
826	25.17	24.59	24.55	24.43	24.30	24.17	24.03	23.88	23.67	23.42
1,651	17.69	17.21	17.17	17.08	16.97	16.87	16.75	16.62	16.44	16.26
3,303	13.06	12.63	12.58	12.52	12.43	12.31	12.22	12.00	11.95	11.80

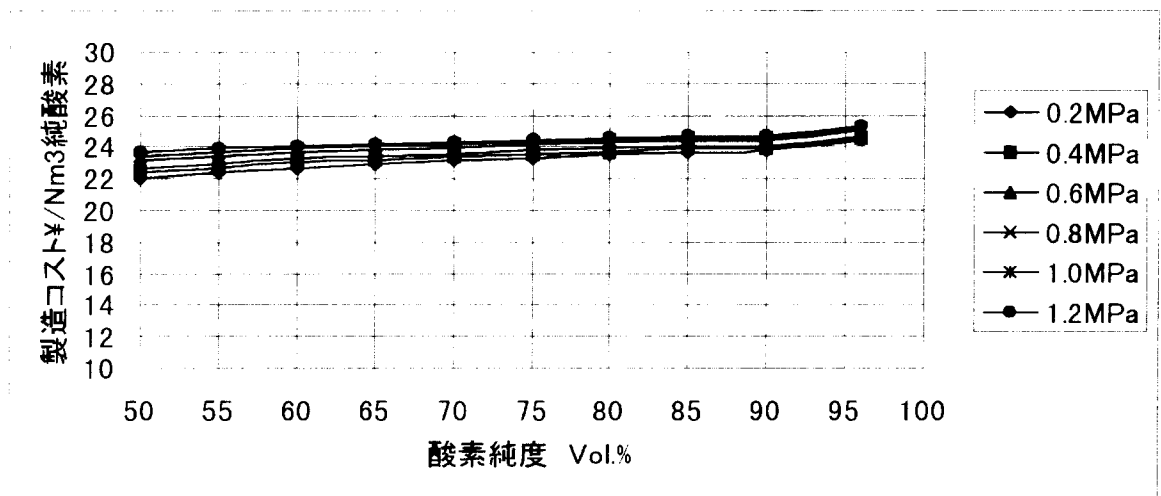


図 4.2.4-9 酸素製造コスト (CASE 1 酸素製造量 826 Nm³/h)

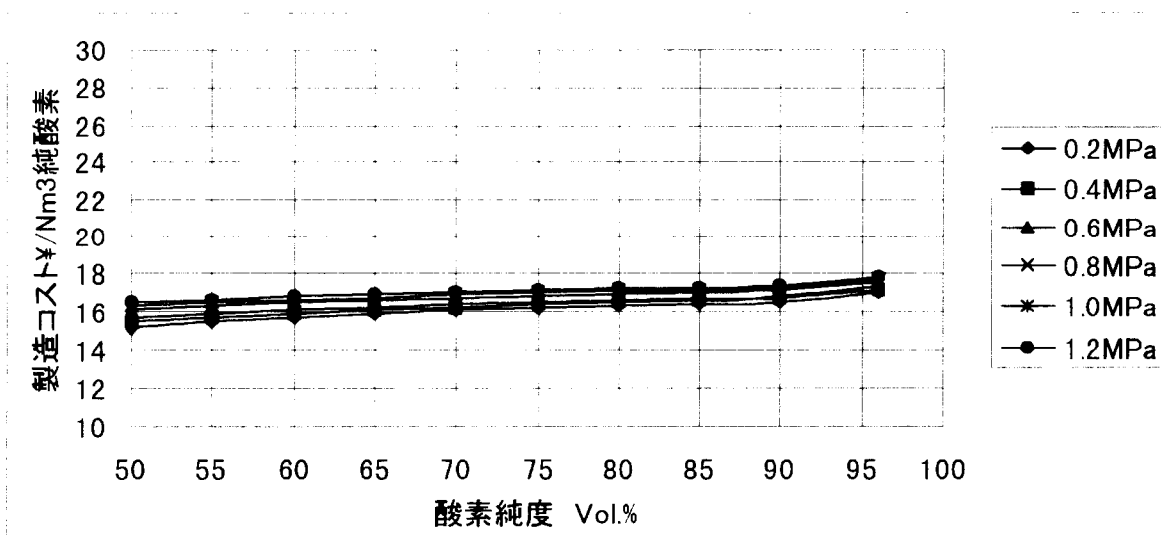


図 4.2.4-10 酸素製造コスト (CASE 2 酸素製造量 1,651 Nm³/h)

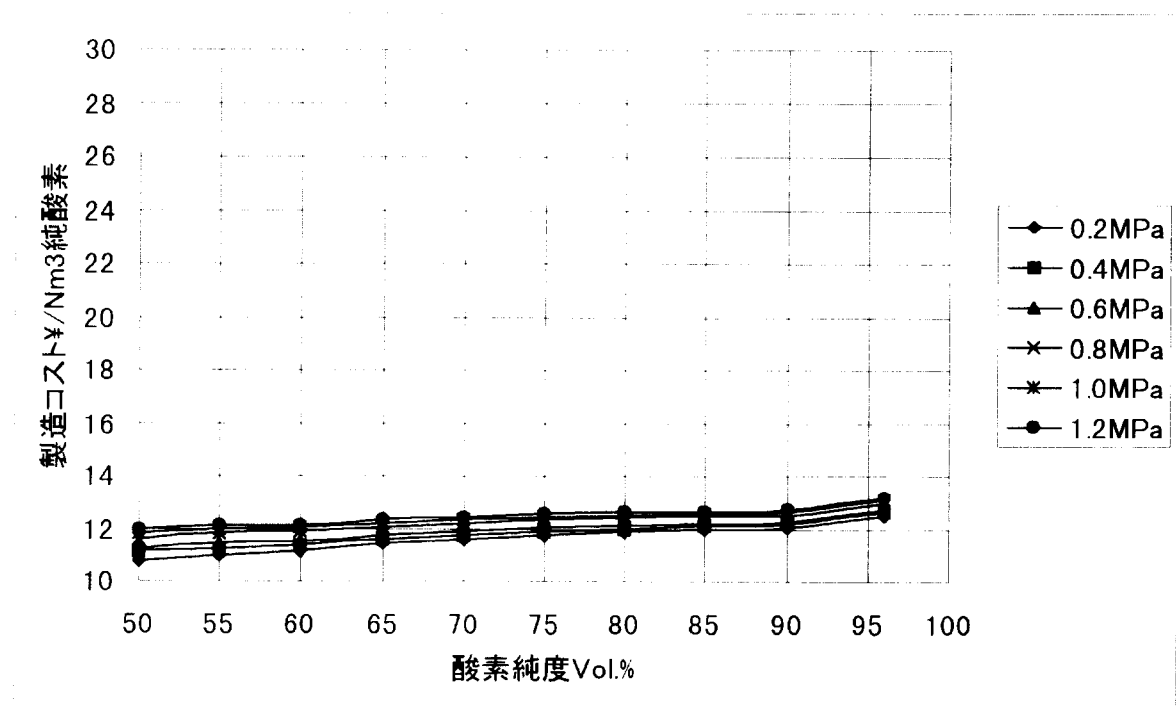


図 4.2.4-11 酸素製造コスト (CASE 3 酸素製造量 3,303 Nm³/h)

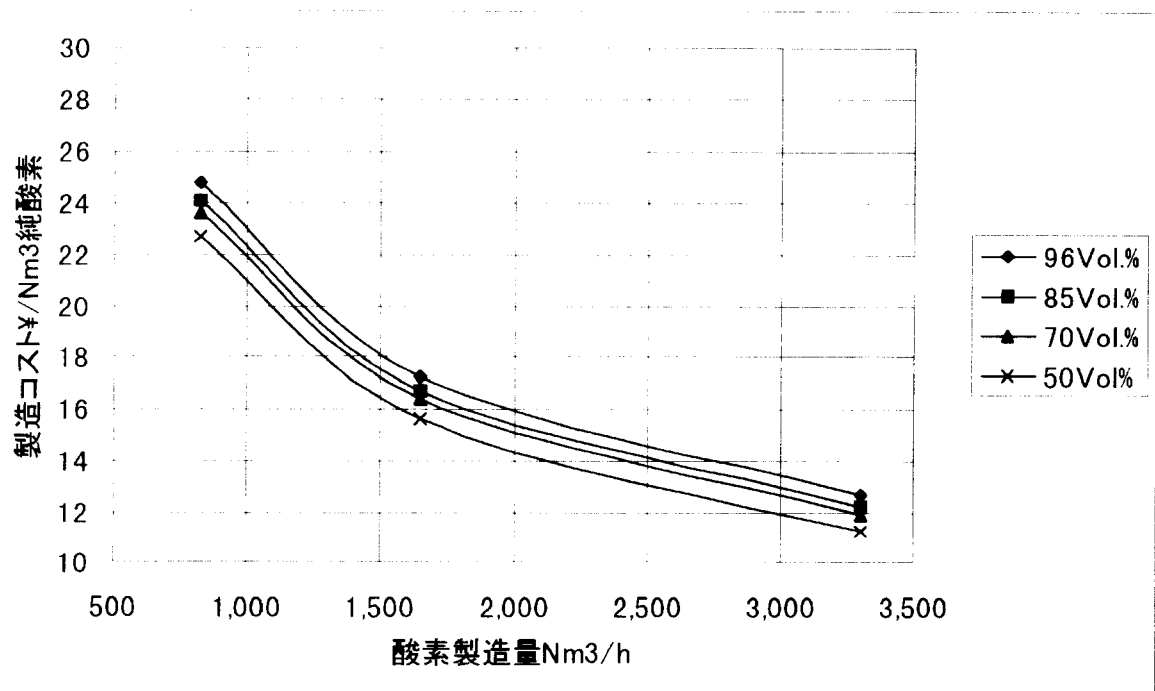


図 4.2.4-12 酸素製造コスト (酸素製造圧力 0.6 MPa)

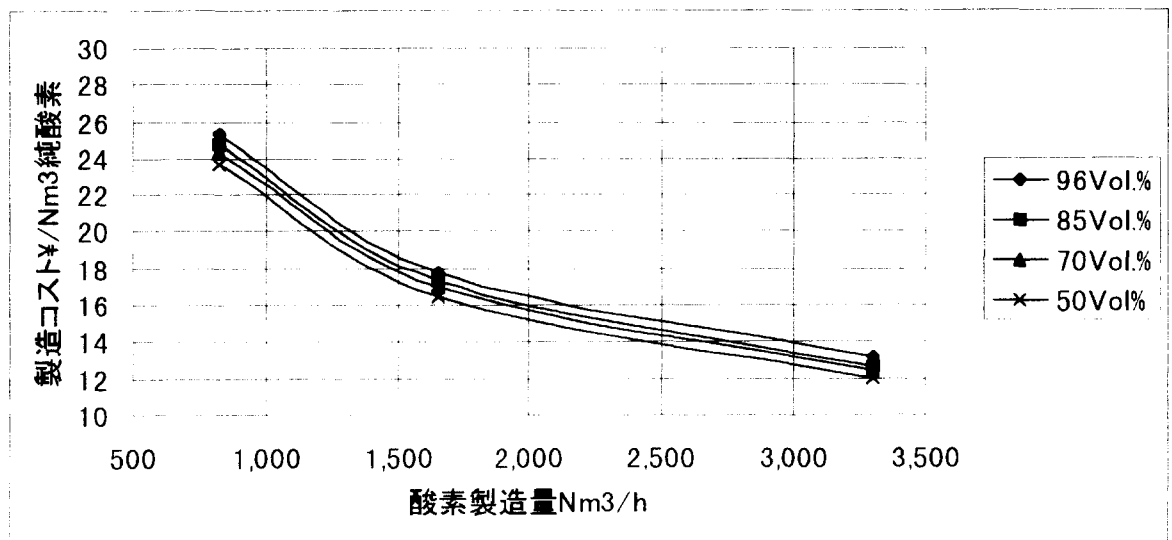


図 4.2.4-13 酸素製造コスト (酸素製造圧力 1.2 MPa)

(7) 検討結果に関する考察及び今後の課題

a) 酸素純度について

実際の使用プロセス（燃料電池、循環式ディーゼルエンジン等）で評価が分かれると思われるが、今回の結果を見て、純度を落としても電力原単位、製造コストの軽減率が小さいことから、低純度での利用は、あまり得策ではなく、低純度を使用するなら原単位も製造コストも大きく変化する 90%を採用するのが、コストダウンに寄与するのではないかとと思われる。

b) 液化水素の冷熱利用の効果

試算結果では、通常の深冷分離式空気分離装置における製造コストとほぼ同等の結果がでたと思われるが、95 から 90%の純度の範囲を考えれば、常温の吸着分離装置のコストが現状では、安い様に思われる。但し、電力原単位は若干でも冷熱利用の方が有利の様なので、将来の電力料金の上昇、又、今回のシステムの目的が発電であることから、システム内での電力消費が少しでも小さい方（冷熱利用）に将来性があると思われる。

c) 今後の課題

今回のスタディモデルの方が装置がシンプルであり制御性等で、それなりの優位性があると思われるが、低純度酸素製造の場合、低温分離装置からの酸素の温度が低い等、十分な冷熱利用ができているとは言えない。冷熱の利用を更に広げる工夫（酸素圧縮機にも低温圧縮機を利用する等）が必要なこと、また空気昇圧機に使用した低温圧縮機の効率アップ（まだ、利用分野が少ないため常温圧縮機に比べ開発度が低い）が必要と思われる。

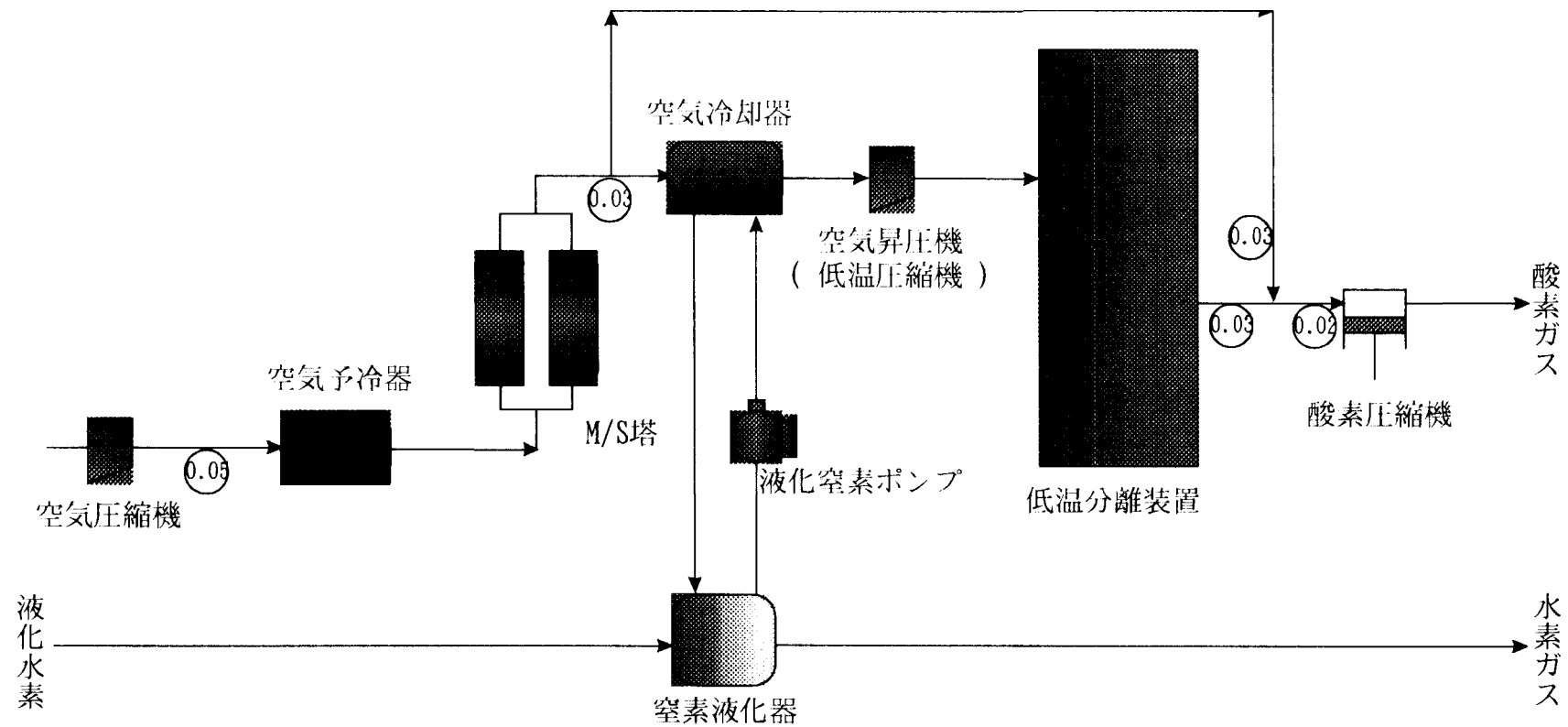


図 4.2.4-14 酸素製造装置全体システム

○ : 圧力(Mpa)を表わす

4.3 固化空気（固体窒素）の熱伝導率測定法の検討

4.3.1 測定要求

（１）概要

液体水素の冷熱利用として、空気からの酸素分離が有望であるが、液体水素温度では空気が固化する可能性があり、プロセス上および熱交換システム上からも固化空気の熱伝導率データの把握が必要である。

固化空気は固体窒素と固体酸素の混合体であるが、酸素分離で水素冷熱を利用するプロセスでは、ほとんど純窒素に近いので、純窒素固体の熱伝導率の測定で十分である。液体水素温度から窒素固化温度までの熱伝導率が要求される。

（２）測定試料

固体純窒素

（３）測定温度

液体水素温度 20 K から純窒素固化温度 63 K まで

（４）測定圧力

大気圧

4.3.2 熱伝導率測定法の分類

固体窒素の熱伝導率測定方法の選択のため、固体の熱伝導率測定法を調査した。また、低温環境を考慮して、液体の熱伝導率測定法に関しても同時に調査した。表 4.3.2-1 に熱伝導率測定方法の分類を示す。

4.3.3 固体窒素の熱伝導率測定方法の候補案調査

測定精度、測定時間、測定試料の量、試料充填方法、低温環境との適合性、装置取り扱いなどを考慮して、固体および液体の熱伝導率測定方法より下記測定方法の候補案を調査して、それぞれについての評価を表 4.3.3-1 に検討した。

精度の点からは定常熱流法の絶対法円筒型が優れているが、計測時間、試料の量、充填、低温環境適合性、取り扱いでは非定常熱流法の細線加熱法がよい。また、試料が透明な場合には新しい熱伝導率測定法としての強制レーリ－散乱法の利用も可能性がある。

表 4.3.2-1 伝導率測定方法の分類

固体	間接加熱法	定常法	軸方向定常熱流	絶対法	平板絶対法
					縦型絶対法
				比較法	平板絶対法
					縦型絶対法型
			径方向定常熱流	絶対法	同心円筒法
					同心球法
				比較法	同心円筒法
		非定常法	軸方向定常熱流	パルス状加熱法	
				ステップ状加熱法	
				周期的加熱法	
				任意加熱法（平板）	
			径方向定常熱流	定速昇温法	
				熱線法（ステップ状加熱）	
				任意加熱法（円筒）	
	直接加熱法	定常法			
		非定常法			
液体		定常法	軸方向定常熱流	平行平板法	
			径方向定常熱流	同心円筒法	
		非定常法	径方向非定常熱流	細線加熱法	
			その他	強制レーリー散乱法	

表 4.3.3-1 固体窒素の熱伝導率測定方法の候補案

熱伝導率測定方法の候補	精度	時間	試料量	充填	低温適合性	取り扱い
軸方向定常熱流（絶対法平板型）	◎	△	△	△	△	△
径方向定常熱流（絶対法円筒型）	◎	△	△	△	○	△
軸方向非定常熱流（平板型）	○	◎	○	△	△	○
径方向非定常熱流（熱線加熱法）	○	◎	◎	○	○	○
強制レーリー散乱法（透明試料）	○	◎	◎	○	○	△

4.3.4 測定試料作成および充填方法の検討

固体窒素の測定試料の作成および測定装置への充填方法としては、既設の測定装置の利用、新規専用装置の利用などにより下記の方法が考えられる。

- ・既設の測定装置を利用

冷凍装置で液体窒素を凝固して熱伝導率測定装置に充填（既設装置利用）

- ・既設の測定装置を一部改造

専用試料容器に液体窒素を充填、冷凍装置にて固体窒素に凝固して測定装置に充填

- ・新設の測定装置

熱伝導率測定装置内に冷凍装置を組み込み、装置内で液体窒素を凝固して試料を作成

4.3.5 固体窒素の熱伝導率測定方法候補案

（１）熱伝導率測定方法候補案の選定

固体および液体の熱伝導率測定方法の調査、検討より下記３候補案を選定し、特徴、構成機器、設備価格などを比較検討した。

- ・強制レーリー散乱法
- ・熱線加熱法
- ・径方向定常熱流法（絶対法円筒型）

（２）強制レーリー散乱法

a. 原理

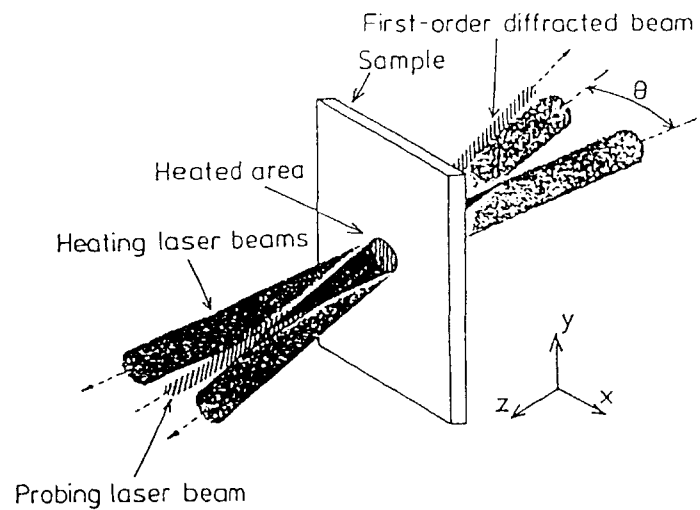
レーザーにより試料内に非定常な回折格子を励起させ、散乱光（回折光）の減衰を観測することにより物質の温度伝導率を計測する方法である。（図 4.3.5-1 参照）

b. 特徴

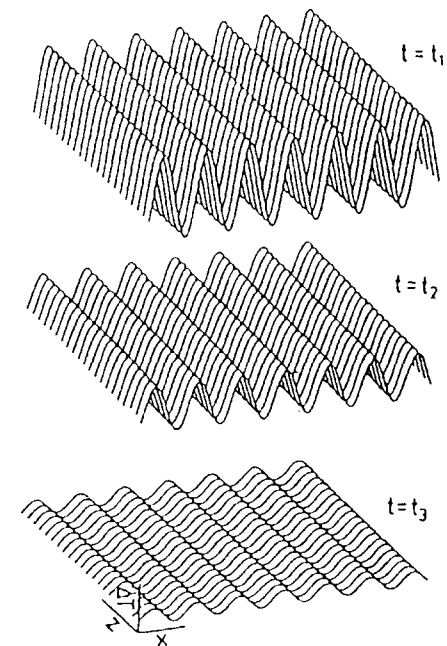
- ・加熱、温度計測とも非接触に行える。
- ・測定時間が数ms以内であるため流体の熱伝導率測定で大きな誤差要因となる対流の影響を受けにくい。
- ・試料体積が 10mm^3 程度で十分であり、試料を均一な温度場に保持するのが容易である。（特に高温下、低温下）
- ・測定時の加熱による温度上昇が 0.1K 程度と小さく、輻射による熱損失誤差が小さい。
- ・温度伝導率の異方性を測定できる。

c. 課題

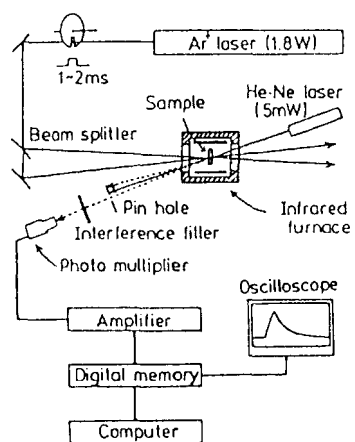
- ・透明試料が必要。
- ・試料が加熱用レーザー光を吸収するか（窒素レーザーなど）、または吸収用染料が必要。
- ・計測設備が複雑で高価。
- ・温度伝導率は測定されるが、直接的に熱伝導率は求められない。



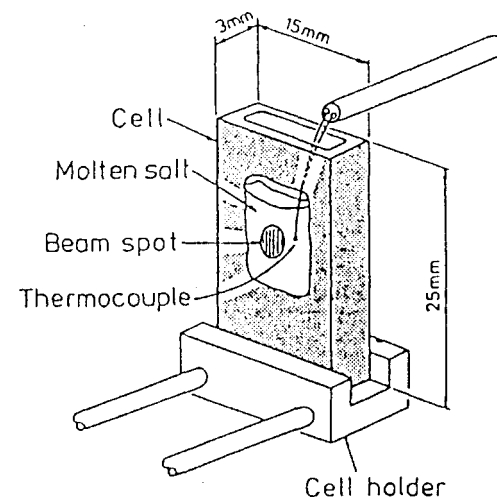
Principle of the forced Rayleigh scattering method.



Ideal temperature decay.



Experimental apparatus.



Sample cell for molten salts.

図 4. 3. 5-1 レーリー散乱法の概要

d. 測定装置

- ・ 試料セル系
 - ・ レーザ光学系：加熱用高出力レーザー（出力W級）、計測用レーザー（数mW級）、光電子倍増管、光学定盤など
 - ・ 計測系：増幅器、デジタルメモリー、解析用コンピュータ等
 - ・ 極低温冷凍系：スターリング冷凍機等（試料が微量であれば、液体ヘリウムで可能）
- e. 設備見積り
- | | |
|----------|---------------|
| ・ 試料セル系 | ： 100万円 |
| ・ レーザ光学系 | ： 1500万円 |
| ・ 計測系 | ： 100万円 |
| ・ 冷凍系 | ： 300万円（または無） |

合計 ： 2100万円（または1800万円）

(3) 細線加熱法

a. 測定原理

試料中に鉛直に張った金属細線をステップ関数状に通電加熱し、細線の発熱量とその温度応答から熱伝導率を測定する。（図4.3.5-2 参照）

b. 特徴

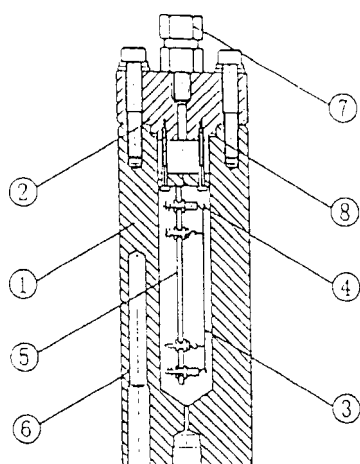
- ・ 測定時間が短時間であるため、流体の熱伝導率測定で大きな誤差要因となる対流の影響を受けにくい。
- ・ 試料が少量ですみ、試料を均一な温度場に保持するのが容易である。（特に高温下、低温下）
- ・ 試料が少量ですむ。
- ・ 測定の自動化が可能。
- ・ 比較的簡単な計測設備で、高精度な測定が容易。

c. 課題

- ・ 導電性試料の測定に工夫が必要。

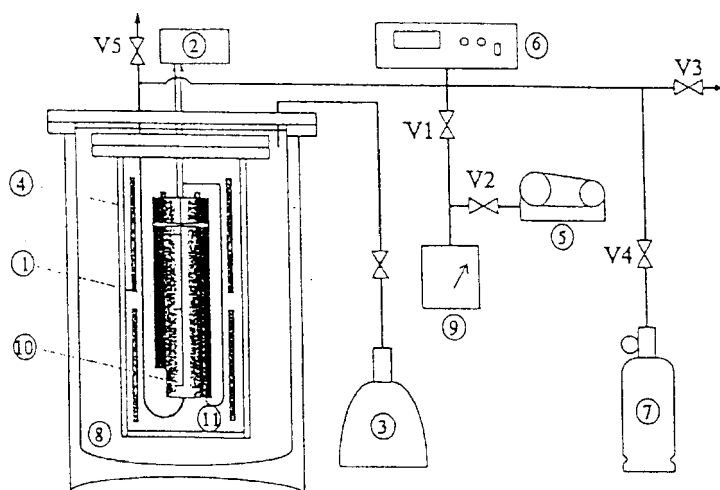
d. 測定装置

- ・ 試料セル系
- ・ 電源系：精密定電圧定電流発生器
- ・ 計測系：ブリッジ、デジタル電圧計、計測／解析用コンピュータ等
- ・ 極低温冷凍系：スターリング冷凍機等（試料が微量であれば、液体ヘリウムで可能）



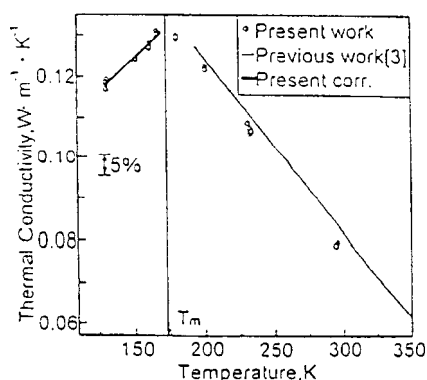
Sectional diagram of the hot-wire cell with the pressure vessel:

- (1)pressure vessel
- (2)pressure vessel cap
- (3)platinum wire
- (4)platinum hook
- (5)cell frame
- (6)Pt-Co resistance
- (7)sealing unit
- (8)metal O-ring



Sectional diagram of the experimental apparatus:

- (1)pressure vessel
- (2)digital voltmeter
- (3)liquid N₂
- (4)heater
- (5)vacuum pump
- (6)pressure gauge
- (7)sample bomb
- (8)cryostat
- (9)vacuum gauge
- (10)thermocouple
- (11)Pt-Co resistance thermometer



Thermal conductivity of HFC-134a in the solid and liquid phase as a function of temperature.

図 4.3.5-2 細線加熱法の概要

e. 計測設備見積り

- ・試料セル系：100万円
- ・電源系：100万円
- ・計測系：100万円
- ・冷凍系：300万円（または無）

合計：600万円（または300万円）

（4）径方向定常熱流法（絶対法円筒型）

a. 測定原理

同心円筒中に試料を充填し内側を加熱、外側を冷却して、定常状態での伝熱量と温度差から熱伝導率を測定する。（図4.3.5-3 参照）

b. 特徴

- ・計測精度が高い。
- ・JISに規定されている標準的測定方法

c. 課題

- ・多量の試料が必要。
- ・計測に時間がかかる。

d. 計測設備

- ・測定部
- ・真空容器系
- ・計測系：温度計、電流電圧計、
- ・極低温冷凍系：スターリング冷凍機等

e. 計測設備見積り

- ・測定部：100万円
- ・真空容器系：200万円
- ・計測系：100万円
- ・極低温冷凍系：300万円

合計：700万円

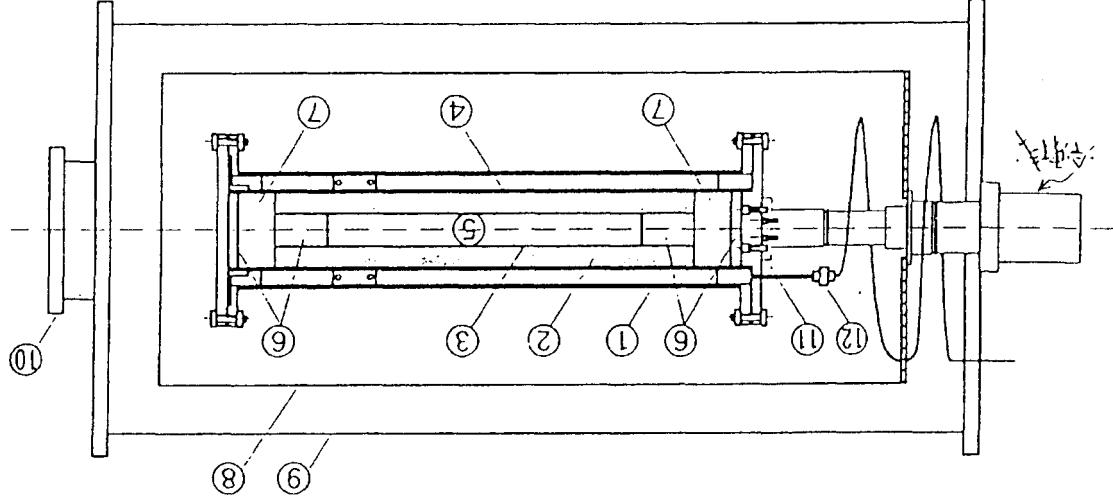


図 4. 3. 5-3 径方向定常熱流法（絶対法円筒型）の概要

4.3.6 まとめ

測定精度、測定時間、設備費用、および熱伝導率測定の専門家の意見を考慮して、表 4.3.6-1 に示す順位で固体窒素熱伝導率測定方法を推奨する。細線加熱法は簡便で測定精度も良く、熱伝導率測定方法のほぼ標準的方法として認められてきている。また、レーリー散乱法は新材料など新分野への適用性、新規性が期待される。したがって、短期的には細線加熱法、将来的にはレーリー散乱法の採用が推奨される。

表 4.3.6-1 固体窒素熱伝導率測定方法の推奨

順位	熱伝導率測定法	精度	測定時間	試料量	設備価格(円)	専門家意見
1	細線加熱法	◎	秒	c c	6,000,000 (3,000,000)	ほぼ標準的
2	強制レーリー散乱法	○	ミリ秒	c c	21,000,000 (18,000,000)	新材料等への 新規性
3	径方向定常熱流法	◎	日	l i t	7,000,000	

4.4 まとめと今後の課題

本WG報告では、各課題に対して（各節に）まとめを記している。詳細はこれに譲るとして、ここでは最終的な総括をしたい。

詳細な検討の結果、水素冷熱の利用や本WG独自の複合サイクルの提案によって、酸素製造装置が小規模であるにも係わらず、酸素製造原単位に飛躍的向上が図れたと考える。

しかしながら、全システムの製造コストを考慮した経済評価では現実的でなく、より単純な通常プロセスに基づく方式を採用して冷熱利用を図ること、大型空気分離装置によるパイプライン輸送の方が更に効率的であるとの、結論に至った。

すなわち、酸素分離プロセスの単純化および冷熱利用のための水素・酸素の直接熱交換過程が推奨されるので、ここでの伝熱を支配するであろう、未だ解明されない固化空気（窒素）の熱物性値や基本伝熱メカニズム等の基礎研究、VSAにおいて指摘するように物質移動係数の温度依存性などの研究室段階での基礎試験が将来必修となる重要な課題であると考えられる。

5. 水素供給システムに関する調査・検討

5. 1 はじめに

21 世紀に向けて、新しいエネルギー源の一つとして水素エネルギーを利用した社会基盤の構築が、水力や太陽エネルギーなどの再生可能エネルギーの有効利用や水素エネルギー固有の高効率利用、更には環境問題の観点から国際的に強く求められ、WE-NET 計画が進められている。

水素エネルギーの利用形態として、水素を大量利用した水素燃焼ガスタービン発電や小規模利用の水素ディーゼルや燃料電池、更にはそれらを利用した自動車等の輸送機関の動力や一般熱需要など多種多様な利用形態を想定することができる。それらの多種多様な利用形態からのニーズを満たしながらかつ水素をより効率的に供給するための水素エネルギー社会のあるべき姿とその水素エネルギー社会へ向けての指針を示すことによって初めて水素エネルギーを利用した社会への円滑な移行が実現可能となるであろう。

本「水素供給システムに関する調査・検討」では、平成 8 年度に多種多様な利用形態に対応した水素受け入れ、貯蔵、輸送から最終消費サイトまでの供給を考慮した具体的かつ現実的な水素供給システムについて、人口 30 万規模のモデル都市へのエネルギー供給を最大限まで水素エネルギーシステムへの転換を想定した検討を行ない、技術的な課題を抽出した。

平成 9 年度では、モデル都市での検討で明らかになった具体的な技術的検討課題、①貯蔵タンクからのフラッシュ水素やコンテナ積み込み等の出荷時に生ずるボイルオフ水素が、水素エネルギーの有効利用上、大きな問題点となること、②水素受入基地、水素燃焼タービン発電所、水素ディーゼルコージェネレーションプラント、燃料電池発電プラント、自動車用水素供給ステーションを結ぶ有機的な供給システムと最適化、③水素エネルギー社会への移行シナリオなどについて検討した。特に、水素エネルギー社会への移行シナリオの検討では、(1) 水素エネルギーが社会的にどのように受け入れられ、また(2) 水素エネルギーの供給を将来的にどのような手順で進めていくのかという基本的なコンセプトを提示することおよび現実的な水素エネルギー社会の到来を前もってイメージすることによって、水素エネルギー社会に対する社会的コンセンサスが確立されていくという点からも重要であることを指摘した。

今年度(平成 10 年)は、平成 9 年度に検討した移行シナリオ、すなわち海外から再生可能な水素エネルギーを大規模に導入し、それを大規模水素消費社会に供給するというシナリオは、実現までに膨大な社会基盤の整備が新たに必要となり、期間的にも当然相当の年数を要することになるであろう。一方、より現実的なシナリオは、小規模な水素消費サイトが順次増加して行きながら、水素エネルギーの利用へ移行していくことになる。そのような状況の中で、水素自動車用の水素供給ステーションは、最も実現可能なものであり、

かつ小規模な水素消費サイトでの供給システムとして自立できるという特徴から、水素自動車用の水素供給ステーションを最適な検討対象とした。

検討した具体的な自動車用水素供給ステーションは、大規模貯蔵タンクからの水素供給ステーションと水素消費サイトでの小規模な水素製造を含む水素供給（スタンドアローン）ステーションの二つの形態、一方水素供給を受ける自動車は、水素吸蔵合金タンク搭載型を主対象としたが、それ以外の方式では高压ガス容器搭載型と液体水素タンク搭載型についても検討とした。その具体的な組み合わせは、以下の通りである。

大規模貯蔵タンクからの水素供給ステーションは、

- ①液体水素コンテナ輸送
- ②高压ガストレーラー輸送

水素消費サイトでの小規模水素製造装置は

- ① 都市ガス改質型（LPG改質型を含む）
- ② メタノール改質型
- ③ アルカリ水電解型
- ④ 固体高分子電解質水電解型
- ⑤ 太陽電池—固体高分子電解質水電解型

となっている。

また、平成10年度は、第1期研究計画の最終年度であるので、過去3年間の調査・検討で得られた結果について総括的検討・整理を行った。すなわち、想定されたモデル都市での液体水素供給のシステム構成、需要先の消費量と要求圧力、液体水素原料基地からの輸送方法、需要先への供給方法や配置図、消費量による設備の比較、行動輸送の制約条件などについて総括整理した。

5.2 水素自動車用水素供給ステーションの総括的検討

5.2.1 はじめに

近年の固体高分子型燃料電池の性能向上は、その環境適合性ともあいまって、新たな自動車用駆動システムとしての燃料電池の位置付けを強固なものとし、自動車メーカー各社とも 2003～4 年の燃料電池自動車の実用化に向けた開発に精力的に取り組んでいる。

これらの燃料電池自動車への燃料供給形態としては、既存のインフラが利用出来るメタン、ガソリンといった液体燃料で供給し車載の改質器で水素に変換する方法、あるいは更なる効率向上と環境負荷の低減が期待される純水素を燃料として供給する方法が考えられるが、いずれの方法が適しているかについては、それぞれに技術的、経済的な得失があり、それらが今後の開発により如何に改善されるかを見守る必要がある。

一方、WE-NET のように、水素エネルギーの導入を促進する立場から見ると、輸送用エネルギーへの水素の適用は、社会の中で水素エネルギーの利用を分散的に拡大するものとも実現可能なものであり、かつ小規模な水素供給サイトへの供給システムを検討する上での最適な対象と位置付けられる。このため、平成 9 年度より、新たに水素自動車用水素供給ステーションの調査・検討に着手し、供給サイトで水素を製造するスタンドアローン型水素供給ステーションにおける水素供給コストの試算を行った。

更に、本年度の検討では、前年度に実施したスタンドアローン（オンサイト）型水素供給ステーションに加えて、外部で集中的に製造した水素をガス水素あるいは液体水素の形でステーションまで供給する形式も検討対象に含め、それぞれのシステム構成、効率、特徴、設置スペース、水素コスト、技術課題、設置上の課題と制約条件などの総括的検討を行うこととした。

5.2.2 検討にあたっての前提条件等

(1) 水素供給ステーションを構成する技術

水素供給ステーションは水素の製造、輸送、貯蔵、充填等水素に係わる様々な技術から構成される。システムとしての最適設計や安全性の確保を含んだ制御技術の開発は第 II 期での検討課題であるため、ここでは水素供給ステーションに適用される個々の構成技術を簡単に概述する。

a. 水素製造技術

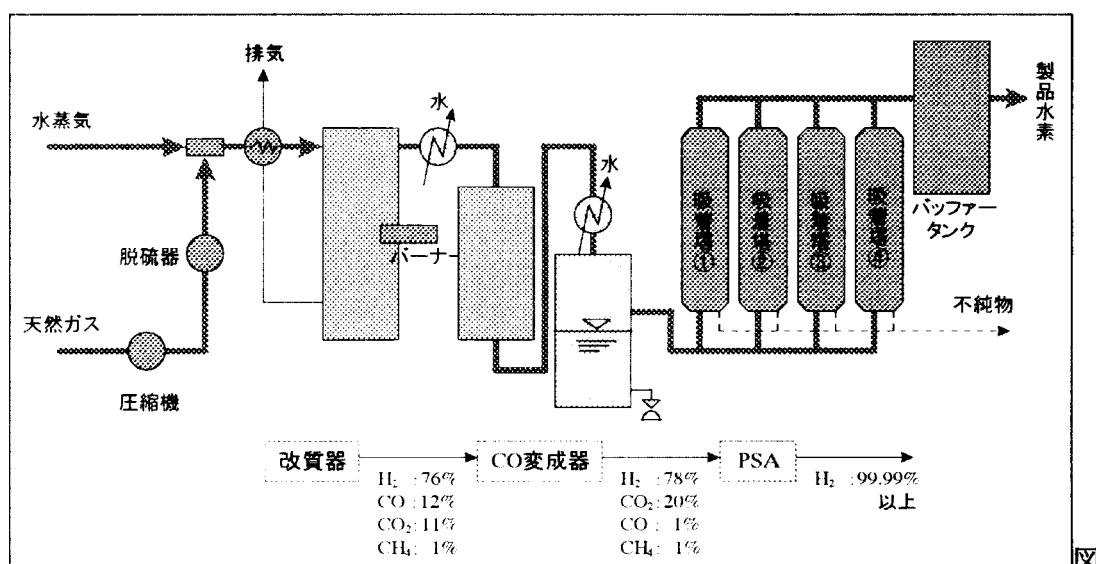
イ. 天然ガス改質：

水素の製造方法として今日広く工業的に用いられている方法である。図 5.2.2-1 に示す様に、脱硫器を経て改質器に導かれた天然ガスは、ニッケル触媒上で 700～800℃ で改質された後、シフト反応により CO の低減が図られる。シフト反応後の水素純度は 70 数％であり、後段の PSA により 99.99％以上へと精製される。

工業的に用いられている改質器の効率は一般的には 60％(HHV 基準)程度であるが、熱

回収を積極的に行うことにより 80%(HHV 基準)程度まで効率を向上させた事例も報告されている。

また、近年では、リン酸型燃料電池(PAFC)や固体高分子型燃料電池(PEFC)の燃料改質装置として数十～数百 kW 規模のコンパクトなシステムが開発されており、累積運転時間で4万時間を超えるものも出ている。将来は、燃料電池の普及に伴って、量産効果によるコストの大幅な低減とより一層の高効率化が期待される。



5.2.2-1 天然ガス改質器のプロセスフローとガス組成例^[1, 3]

ロ. メタノール改質：

天然ガス改質同様オンサイトでの水素発生装置として工業的に用いられており、数百～数千 Nm³/h 規模の装置が実用化されている。天然ガス改質より低温 (250～300℃) で改質され、シフト反応器を必要としないとの特徴を有する。改質ガス中の水素濃度は 75%以下であり、精製には PSA が用いられる。メタノール改質器のプロセスフローを図 5.2.2-2 に示す。

液体燃料のため、輸送・貯蔵が簡便であり、天然ガスが入手し難い場所での水素製造に適している。また、これらの特徴から、自動車用燃料電池及びオンサイト用燃料電池用に 5kW～200kW クラスのコンパクトなメタノール改質器が開発されており、天然ガス改質同様、将来的に燃料電池の普及に伴って、量産化によるコストの低減と性能面での向上が期待される。

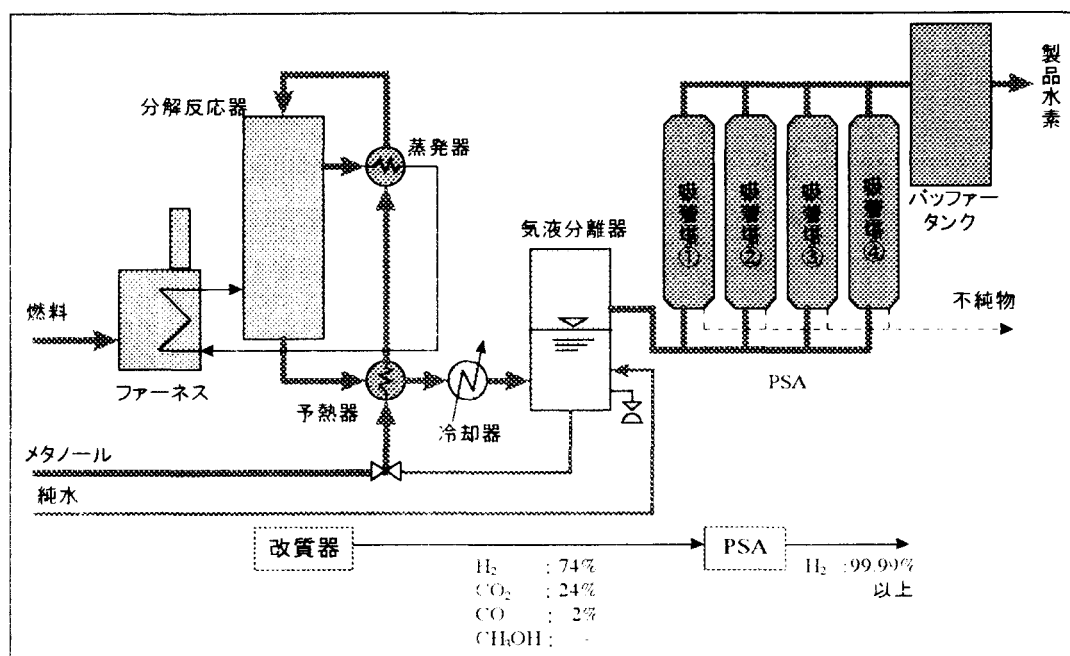


図 5.2.2-2 メタノール改質器のプロセスフローとガス組成例⁽⁴⁾

Ⅱ. アルカリ水電解：

水から水素を製造する方法として古くから工業化されている技術である。水素の製造量は電極面積に比例して決まるため、改質型水素製造法ほど規模によるメリットは出にくく、また、水素製造コストに占める電力費の割合が高いため、低廉な電力が得られる場所での水素製造に適している。電解槽から発生する水素の純度は 99.9%程度と高く、TSA 等の簡易な精製装置を組み合わせることで、燃料電池自動車に必要な純度の水素が得られる。最近ではカナダの Stuart Energy Systems 社が同技術の応用として、直流電源、電解槽、バッファータンク、昇圧機等を 40 フィートコンテナ 2 基に納めたパッケージ型ステーション設備を開発している。Vancouver での燃料電池バス実証試験用に納入されたシステムは、水素発生量 65Nm³/時で、エネルギー変換効率 72%（電流密度は不明）と報告されている。

Ⅲ. 固体高分子電解質水電解：

将来、化石資源に依存せず大規模に水素を製造する方法として WE-NET で開発が進められている技術である。電解質として固体高分子膜を用いることにより、アルカリ水電解に比べ、高電流密度で高効率な電解が可能となり、装置のコンパクト化も図られる。WE-NET の実験結果ではアルカリ水電解の 3~5 倍の電流密度である 1A/cm² で 90%を超えるエネルギー効率が報告されている。また、上述の天然ガス、メタノール等の炭化水素系改質器との比較に於いては、製造時に炭酸ガスを排出しないこと、起動時間が短く負荷変動への応答性が良いことなどがメリットとして挙げられる。固体

高分子電解質水電解で得られる水素の純度は 99.999%であり、ガス中に含まれる水分の除去は通常、発生ガスの損失が少ない温度スイング吸着方式(T S A)により行われる。図 5.2.2-3 にシステムフローを示す。

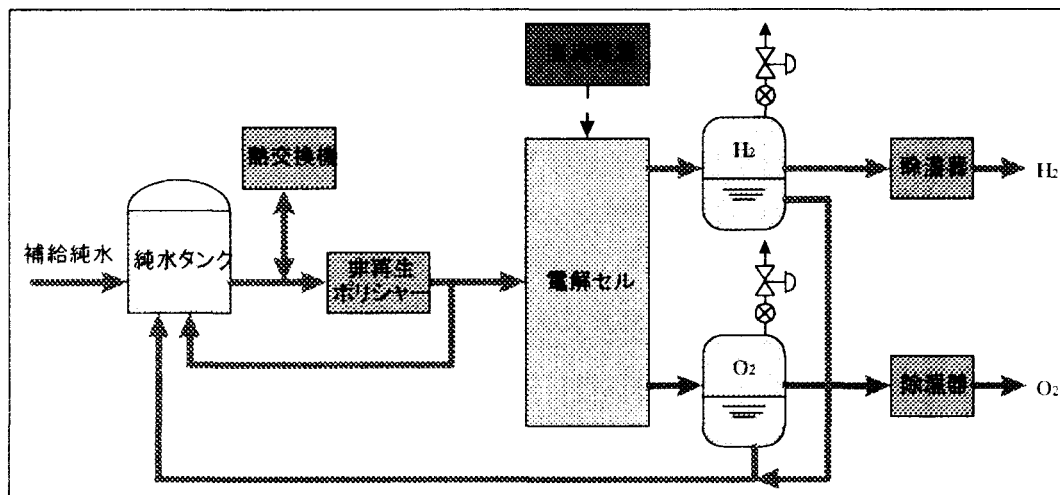


図 5.2.2-3 固体高分子電解質水電解式水素発生装置のシステムフロー^[5]

Ⅱ. 液体水素製造：

水素は体積当たりのエネルギー密度が低いため、貯蔵効率と輸送効率の向上を目的として液化して供給される。水素の液化に要するエネルギーは約 $1\text{kWh}/\text{Nm}^3\text{-H}_2$ と高いため、経済的な液体水素の製造のためには、製造規模と低廉な電力の確保が必要となる。現在世界で最大の液水製造プラントの規模は 27t/day であるが、国内では液体水素の需要がロケット用燃料にほぼ限られていることもあり、1.5t/day の規模にとどまっている。

Ⅲ. 輸送技術

水素の製造場所と利用場所が離れている場合、何らかの方法で水素を供給サイトまで輸送する必要がある。水素の輸送は一般的には高圧ガス水素あるいは液体水素の状態で行われる。欧米ではハイラインで輸送している事例もあるが、ここでは割愛する。

Ⅰ. 高圧ガスでの輸送：

一般には 15~20MPa の圧力で充填された高圧容器を集結した輸送機器が使用され、需要量に応じて様々な形態があるが、輸送効率の点からは水素ガストレーラーが選択される。国内最大のトレーラーの輸送量は $3,100\text{Nm}^3/\text{台}$ である。

Ⅱ. 液体水素での輸送：

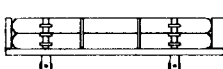
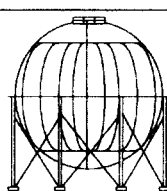
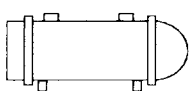
輸送中の入熱を防ぐため、積層真空断熱を施した液体水素タンクローリーあるいはコンテナが供される。高圧ガスでの輸送同様、輸送効率の点からは出来るだけ積載量

の大きいものが望ましい。現状国内で最大のものは IS040 コンテナであり、タンク容量は 42.56kL である。

c. 貯蔵技術

高圧ガス水素、液体水素による方法に加えて水素吸蔵合金を使用する方法があるが、液体水素の場合、供給ステーションでは輸送に供されたコンテナを留め置いて貯蔵タンクとして用いる方が移充填ロスを防ぐ意味で有効であり、ここではオンサイトで製造した水素を高圧ガス容器および水素吸蔵合金を用いて貯蔵する方法を概説する。また、参考として、各種定置式水素貯蔵容器の比較を表 5.2.2-1 に示す。

表 5.2.2-1 定置式水素貯蔵容器の比較^{[6][7]}

	スライド・ローダー	球形タンク	液体水素タンク	水素吸蔵合金タンク
貯蔵方式				
	100Nm ³ ×10 本 (20MPa)	圧力 1MPa 未満	1,400 L -253℃	圧力 1MPa 未満
占有空間	15m ³	113m ³	5m ³	4m ³
設置面積	15m ²	36m ²	2m ²	5m ²
所要動力	圧縮動力量： 147kWh ^(*)2)	圧縮動力量： 64kWh ^(*)3)	液化動力量： 1,000kWh ^(*)4)	水素放出熱量 ^(*)5) ： 1,340MJ(370kWh _{TH})

^(*)1) 文献[6][7]より加工

^(*)2) 0.1MPa から 20MPa への等温昇圧に必要な動力量。実操作では 1.5～3 倍の電力が必要。

^(*)3) 0.1MPa から 1MPa への等温昇圧に必要な動力量。実操作では 1.5～3 倍の電力が必要。

^(*)4) 液化に必要な動力量。液化効率：0.31

^(*)5) 水素化反応熱(30kJ/mol-H₂)で算出。水素充填時に除去、水素放出時に供給。

イ. 高圧ガス貯蔵：

長尺容器を集結した設備で、一般には 20MPa の圧力で貯蔵される。但し、水素供給ステーションでの利用を前提とし、高圧ガス容器を搭載した水素自動車への充填を考慮するとステーション側では充填圧より高い圧力（例えば 25MPa）での貯蔵が必要であり、また、急速充填のためには可変圧部と高圧部の 2 段からなるカスケード運用が望ましい。

ロ. 水素吸蔵合金貯蔵：

高密度かつ安全に水素を貯蔵する方法として開発が行われている技術で、1,000Nm³

の水素を貯蔵するための設置面積は高圧水素ポンプの1/3の5m²ですむとの報告もある^[4]。水素吸蔵合金の場合、水素の放出は吸熱反応であり、何らかの事故により容器が破損した場合でも水素の放出が妨げられ安全性が確保される。このような安全面、設置面積上の利点は、特に日本のような狭い国土に水素供給ステーションを設置して行く上で適していると考えられ、社会的な受容も得られやすいと考えられる。

高圧ガス貯蔵のようにコンプレッサーを必要としないが、標準的な水素吸蔵合金の場合、1molの水素を吸蔵放出するのに約30kJの熱を放熱または加熱する必要がある。水素供給ステーションの開発においては他の熱源とのバランスをうまく適合させるなど、最適なシステム構成を検討することが重要となる。

なお、定置式水素貯蔵容器として最大のものは2,000Nm³のものがドイツで試作されている^[4]。

d. 充填技術

車側の貯蔵形態に応じて、高圧ガス水素、低圧ガス（水素吸蔵合金タンク）、液体水素での充填技術の開発が行われている。

高圧ガス水素による充填は基本的には天然ガス自動車への充填と類似の技術であり、車載容器の温度と圧力変化を見ながら、燃料タンクの容量にかかわらず、充填圧力の上昇勾配が時間当たり一定になるように制御するシーケンスが組まれている。

水素吸蔵合金タンクへの充填に関する報告は少ないが、一定の時間内に所定量の水素を充填するための急速充填技術および残量検知に関する技術等、合金の吸蔵放出特性、伝熱特性に関わる基礎技術の開発が必要となる。また充填コネクタは、水素を供給するホースに加えて合金からの放熱を除去するための冷媒を循環させるホースが一体となったものとなる。

水素の場合、他の物質に比べて密度が低いため、特に低圧で行う水素吸蔵合金への充填に当っては、高精度な計量システムの開発も重要である。また、漏洩し易いとの観点からは、接合が確実な充填コネクタの開発、更には、人為的なエラーを極力排除するような自動充填システムの開発が望まれる。液体水素の充填では、1990年初頭よりドイツで研究が進められており、充填ロスが全くなく100Lの液体水素を3分程度で充填するシステムが開発されている。また、最近ではロボットによる自動充填システムも開発されておりミュンヘン空港での実証試験に移されようとしている。

(2) 検討対象とした水素供給ステーションの形態

将来、水素自動車用に水素を供給するためのステーションの形態としては、前項で概説した技術の組合せにより種々のものが想定されるが、今回の検討では水素の製造・供給方法により以下の7つの形態を対象とした。

I. 外部製造・供給型（集中的に製造した水素を複数のステーションに供給）

①液体水素型

②高圧水素型

II. オンサイト型（供給サイトで水素を製造）

③天然ガス改質型

④メタノール改質型

⑤アルカリ水電解型

⑥固体高分子電解質(PEM)水電解型

⑦太陽光発電(PV) + 固体高分子電解質(PEM)水電解型

水素供給ステーションでの水素の貯蔵に関しては、外部製造・供給型ステーションでは外部の水素製造場所より個々のステーションへ水素を運ぶのに供された輸送機器がそのまま留め置かれて定置用の貯蔵設備となる。一方、オンサイト型ステーションに関しては、高圧ガス貯蔵設備あるいは水素吸蔵合金貯蔵設備のいずれかを選べることになるが、ここでは便宜上高圧ガス貯蔵設備を組み合わせた各システムの仕様・コストを比較することとした。表5.2.2-2に各形式のステーションの仕様、図5.2.2-4～2.2-10にシステムフローを示す。

表 5.2.2-2 各形式のステーションの仕様

			外部製造・供給型		オンサイト型 (各形式共通)
			液体水素	高圧水素	
製造	水素生産量	Nm ³ /h	12,514 (27t/day)	6,257 (13.5t/day)	—
	設備稼働率	%	90	90	—
	供給ステーション数	ヶ所	40	20	—
輸送	輸送機器		液水コンテナ	水素トレーラー	—
	輸送量	Nm ³ /台	25,747 [*]	2,800	—
	平均輸送距離	km	200	100	—
ステーション	水素生産量	Nm ³ /h	—	—	300
	設備稼働率	%	—	—	90.4
	水素貯蔵量	Nm ³	25,747 コンテナ1基	8,400 トレーラー3基	3,600
	水素供給能力	Nm ³ /日	7,200 400台×18Nm ³	7,200 400台×18Nm ³	7,200 400台×18Nm ³

* コンテナ容積(42.56kL)×(大気圧液密度/安全弁吹出圧力液密度)×90%×0.0708/0.0899

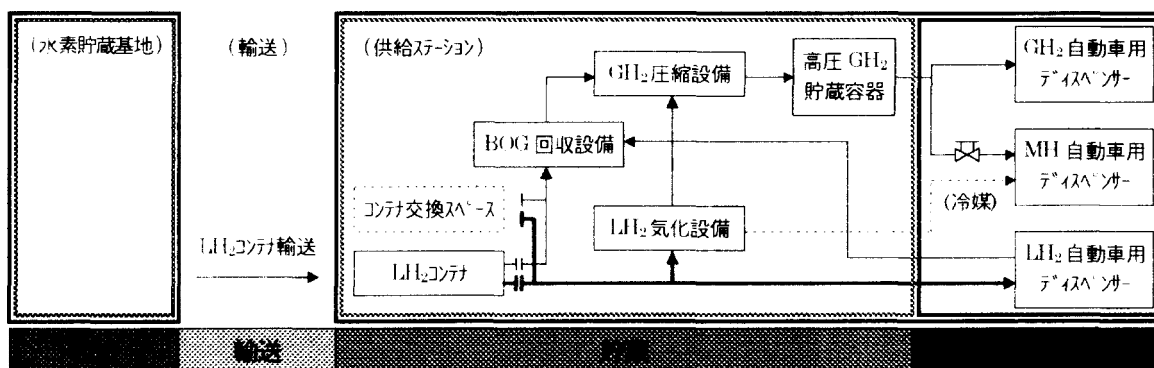


図 5.2.2-4 液体水素型供給ステーションのシステムフロー

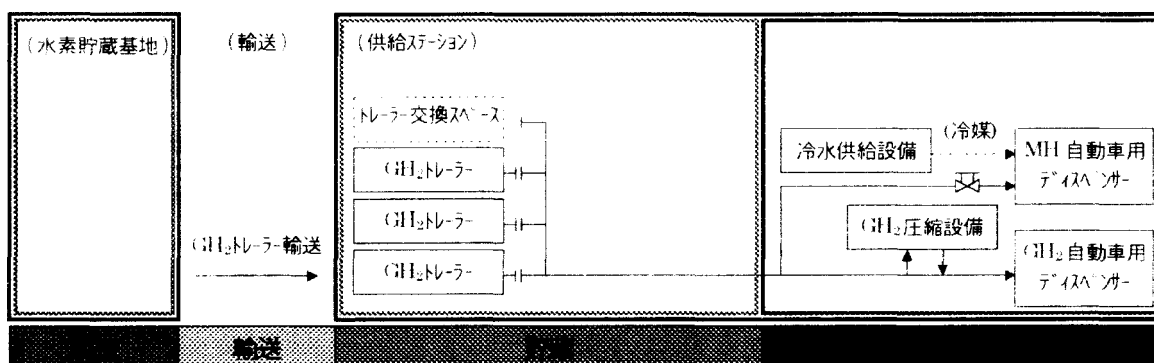


図 5.2.2-5 高圧水素型供給ステーションのシステムフロー

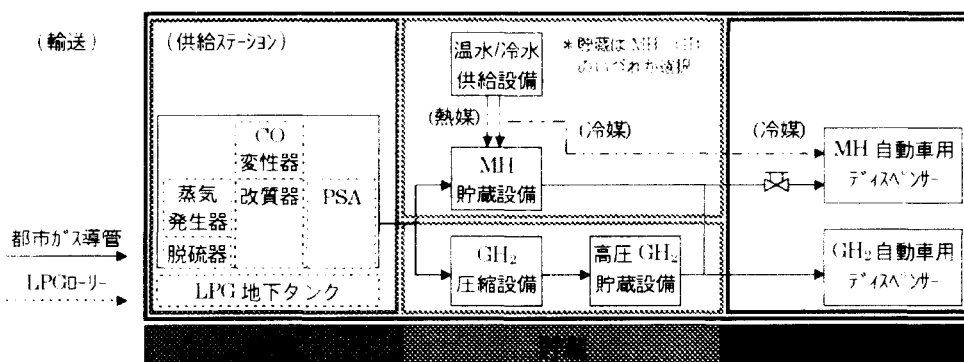


図 5.2.2-6 都市ガス改質型（含む LPG 改質）供給ステーションのシステムフロー

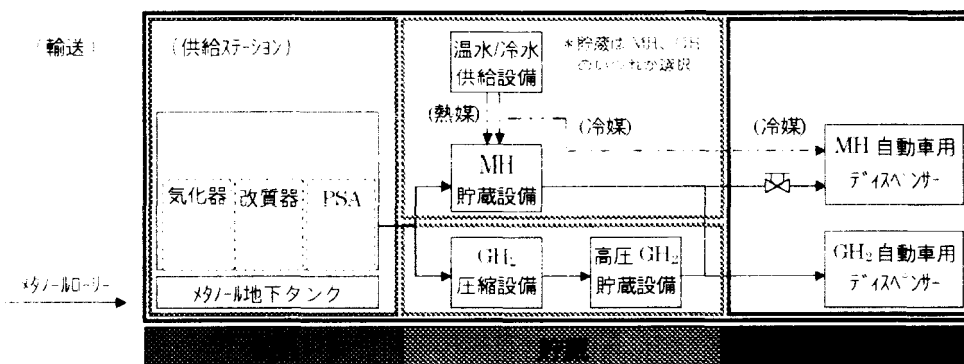


図 5.2.2-7 メタノール改質型供給ステーションのシステムフロー

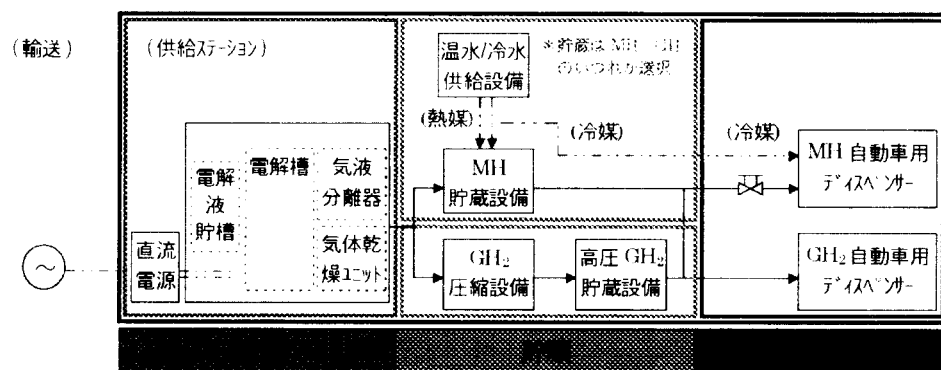


図 5.2.2-8 アルカリ水電解型供給ステーションのシステムフロー

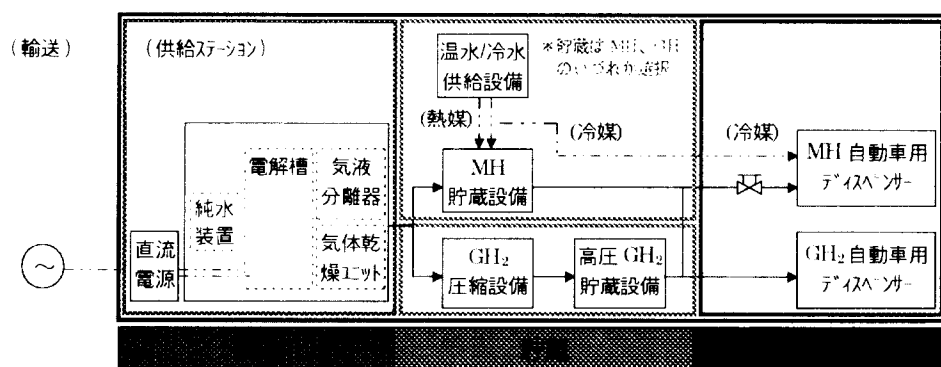


図 5.2.2-9 固体高分子電解質水電解型供給ステーションのシステムフロー

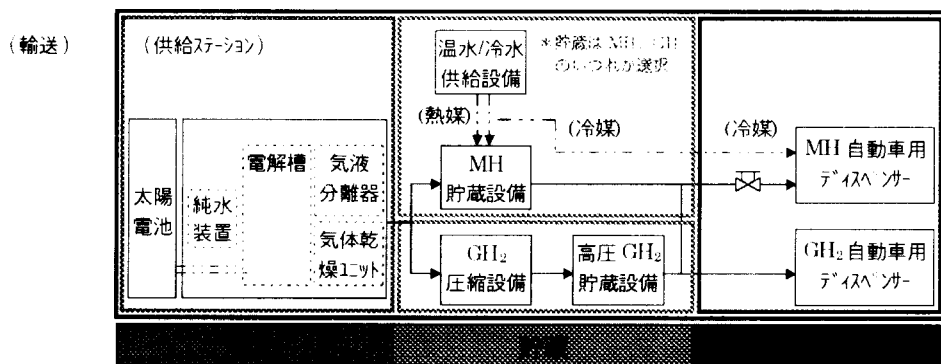


図 5.2.2-10 太陽電池－固体高分子電解質水電解型供給ステーションのシステムフロー

5.2.3 検討結果

(1) 水素供給コストの検討

a. 外部製造・供給型ステーションにおける水素供給コスト
前年度に実施したオンサイト型水素供給ステーションにおける水素供給コストの検討に対比するものとして、遠隔地で液体水素を集散的に大量生産し、それをISO40'コンテナで輸送する液体水素型供給ステーションと天然ガスのスチームリフォーミングによりガス水素を生産し、それを高圧ガストレーラーで輸送する高圧水素型供給ステーションの2種に関し検討を行った。

各々のステーションの仕様は表5.2.2-2に記されているが、液体水素製造プラントの製造規模を27t/dayに設定した。この規模は現存する液体水素製造プラントの最大級のものであり、オンサイト型水素供給ステーションと同規模の個別ステーションを約40ヶ所カバーする規模となる。また、高圧水素型ではその半分の13.5t/dayの製造規模であり、個別ステーション約20ヶ所をカバーとした。

試算結果を表5.2.3-1に示す。製造地での水素製造コストは、液体水素の場合で45.7円/Nm³、ガス水素の場合で22.9円/Nm³であり、これに水素供給ステーションへの輸送コストならびに水素供給ステーションでの充填コストを加えた水素供給価格は、液体水素型の場合で64.8円/Nm³、高圧水素型の場合で49.3円/Nm³となった。

表 5.2.3-1 外部製造・供給型ステーションでの水素供給コスト

水素製造量	t/日	液体水素型	高圧水素型	備考
設備費	Nm ³ /h	27	13.5	
設備稼働率	百万円	12,514	6,257	
年経費率	%	10,000	2,228	諸データからの類推値
製造原単位	%	90	90	ST3報告書より
天然ガス消費量	Nm ³ /Nm ³ -H ₂	0.55	0.55	ST3報告書より
電力使用量	kWh/Nm ³ -H ₂	1.07	0.01	文献[9]、ST-3報告書より
天然ガス価格	円/kWh	24	24	
電力価格	円/Nm ³ -H ₂	11.4	11.4	東電高圧季節別時間帯電力B平均
固定原価	円/Nm ³ -H ₂	20.3	9.6	
変動原価	円/Nm ³ -H ₂	25.4	13.3	
原料ガス代	円/Nm ³ -H ₂	13.2	13.2	
電力料	円/Nm ³ -H ₂	12.2	0.1	
水素製造コスト	円/Nm ³ -H ₂	45.7	22.9	WE-NET液体水素: 27.9円/Nm ³ (CIF) 副生水素: 20円/Nm ³ 前後
設備費	百万円	102	86	
固定原価	円/Nm ³ -H ₂	8.1	11.2	
変動原価	円/Nm ³ -H ₂	1.6	6.1	
水素輸送コスト	円/Nm ³ -H ₂	9.7	17.3	
設備費	百万円	84	79	
年経費率	%	18.5	18.5	
固定原価	円/Nm ³ -H ₂	6.5	6.2	
変動原価	円/Nm ³ -H ₂	2.9	2.9	
充填その他コスト		9.4	9.1	
水素供給コスト合計		64.8	49.3	

上記の液体水素型ステーションに関する検討は、あくまで移行期の一形態として、国内で天然ガスのスチームリフォーミングにより水素を製造し液化するケースの試算を行ったものである。一方、WE-NET サブタスク3（全体システム概念設計）では従来より大規模な形で、再生可能エネルギーを利用して電気分解により水から水素を製造し、これを液体水素等の輸送可能な媒体に変換してエネルギー消費地域に輸送するエネルギーシステムの検討が行われている。本年度の検討として各コストの見直しが進められているが、1,000MW 水素燃焼タービンへの供給を前提とした日本への液体水素のコストは、CIFで27.9円/Nm³と算出されている。

また、外部製造・供給型に類する利用可能な水素源の1つとして副生水素がある。副生水素は、主に製鉄、石油精製、エチレン製造、食塩電解のプロセスから副次的に生成する水素ガスであるが、量的には、コークス炉ガス(COG)で約44億Nm³、石油精製で約25億Nm³、エチレン製造および食塩電解でそれぞれ約10Nm³、その他を含む合計では国内の年間水素消費量の約半数に相当する100Nm³以上の水素が副生していると推定されている¹²⁾。これらの副生水素は脱硫を含む化学原料あるいは外販水素として有効利用されているが、相当量は燃料として自家消費されている。副生水素のコストは、それが水素の製造を主目的とするものでなく、純粋な製造コストから算出されるというよりはむしろ保有者と利用者との必要度のバランスから決定される性格のものであるため、今回の検討値との同じレベルでの比較は出来ないが、必要な純度への精製を含むコストは20円/Nm³前後になると見られる。状況に応じては、これよりも安価に入手できる場合もありうるが、反面、副生水素の利用には立地面での制約も伴うことになる。

b. オンサイト型ステーションにおける水素供給コスト

オンサイト型ステーションにおける水素供給コストを表5.2.3-2に示す。これは前年度の検討結果に対して、天然ガス改質とメタノール改質の改質効率および原料価格を見直し改定したものである。

各方式での水素製造に係るエネルギー効率に関しては次項に纏めた。

また、それぞれの原料価格は以下のとおりとした。

①天然ガス／都市ガス価格

- ・外部製造・供給型：大口供給価格として24円/Nm³(≒2.53円/Mcal)を想定。1997年度LNGのCIF価格1.81円/Mcalの1.4倍に相当。

- ・オンサイト型：東京ガス「輸送向け圧縮天然ガス用B契約」に基づく300Nm³/hr使用時の基本料金を含む平均単価として39.3円/Nm³を算出。

②メタノール価格

- ・一般向けローリー供給市況価格40～45円/kgの下値を使用。

③電力価格

- ・東京電力高圧季節別時間帯別電力Bを参照。

表5.2.3-2 オンサイト型ス水素供給デーションにおける水素供給コスト

項 目	単 位	天然ガス改質 300Nm ³ /hr	メタノール改質 300Nm ³ /hr	アルカリ水電解 300Nm ³ /hr	PEM水電解 300Nm ³ /hr	PEM+PV 1 2,260Nm ³ /hr	PEM+PV 2 300Nm ³ /hr
建設費	百万円	226	226	217	202	1,981	367
原料・ユーティリティ消費量							
都市ガス	Nm ³ /Nm ³ -H ₂	0.36	-	-	-	-	-
メタノール	kg/Nm ³ -H ₂	-	0.69	-	-	-	-
電気(製造)	kWh/Nm ³	0.12	0.08	4.41	3.92	3.92	3.92
(貯蔵)	kWh/Nm ³	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
上水	t/Nm ³	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002
工水	t/Nm ³	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
燃料(原料に含む)	-	-	-	-	-	-	-
年間稼働時間	h	7,920	7,920	7,920	7,920	1,051.2	7,920
昼間電力利用	h	4,620	4,620	4,620	4,620	-	4,620
夜間電力利用	h	3,300	3,300	3,300	3,300	-	3,300
製造コスト							
固定費(18.5%/y)	円/Nm ³	17.6	17.6	16.9	15.7	154.2	28.6
人件費(700万円/人)	円/Nm ³	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
人数	人	1	1	1	1	1	1
変動費							
都市ガス(39.3円/Nm ³)	円/Nm ³	14.1	-	-	-	-	-
メタノール(40.0円/kg)	円/Nm ³	-	27.6	-	-	-	-
電気総額(重平均)	円/Nm ³	4.9	4.4	54.5	48.8	0.0	43.0
基本料金(1650円/kW)	円/Nm ³	1.1	1.0	11.8	10.6	0.0	10.6
昼間(11.14円/kWh)	円/Nm ³	4.7	4.2	52.5	47.0	0.0	37.1
夜間(6.15円/kWh)	円/Nm ³	2.6	2.3	29.0	26.0	0.0	26.0
上水(200円/t)	円/Nm ³	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4
工水(80円/t)	円/Nm ³	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
燃料(原料に含む)	円/Nm ³	-	-	-	-	-	-
水素供給コスト	円/Nm ³	39.9	52.8	74.8	67.9	157.6	75.0

注：都市ガス：東京ガス輸送向け圧縮天然ガス用B契約、メタノール：一般向けローリー供給価格、電力：東京電力高圧季節別時間帯別電力B

c. 各種水素供給コストの比較

各方式の水素供給0ステーションにおける水素供給コストを水素の製造、輸送、貯蔵、充填その他のコストにブレイクダウンしたのが、表5.2.3-3および図5.2.3-1である。

表5.2.3-3 各種水素供給コストのブレイクダウン

	外部製造・供給型		オンサイト型			
	液体水素	高圧水素	天然ガス改質	メタノール改質	アルカリ水電解	PEM水電解
水素製造	45.7	22.9	24.4	37.3	58.9	53.1
固定費	20.3	9.6	8.4	8.4	7.3	7.3
変動費	25.4	13.3	16.0	28.9	51.6	45.8
水素輸送	9.7	17.3	0	0	0	0
水素貯蔵	0	0	6.8	6.8	6.8	6.8
充填その他	9.4	9.1	8.7	8.7	9.1	8.0
供給コスト計	64.8	49.3	39.9	52.8	74.8	67.9

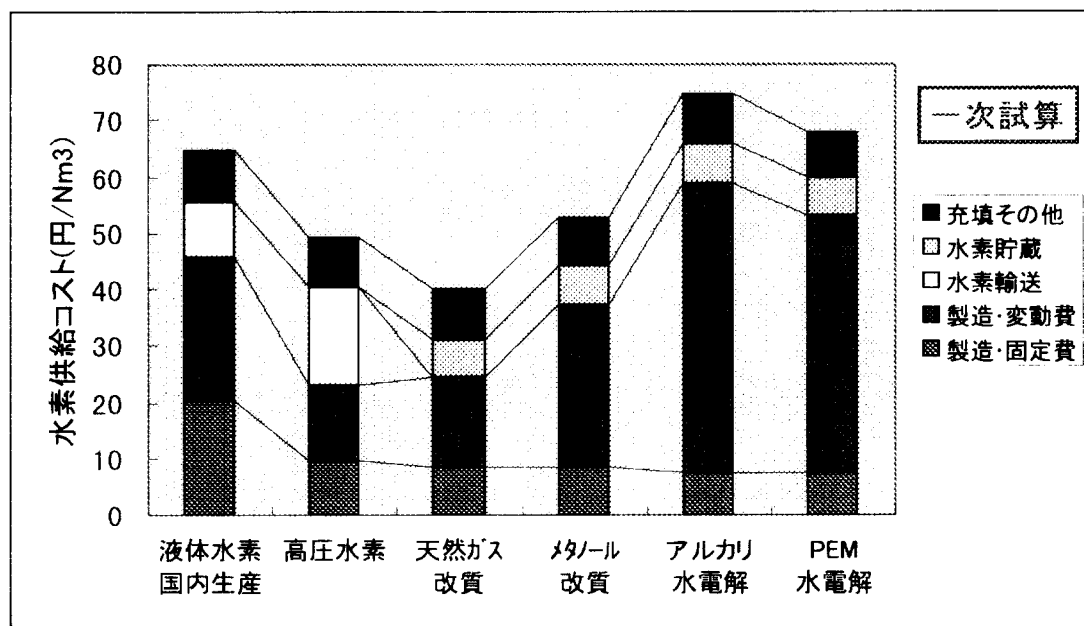


図5.2.3-1 各種水素供給コストのブレイクダウン

イ. 外部製造・供給型とオンサイト型の比較

オンサイトでの天然ガス改質に比べ、外部製造・供給型のいずれもが製造規模の大きさにも拘らず供給コストとして高くなるとの結果となっている。直接的に対比できる高圧水素型との比較においては、同じスチームリフォーミングによる天然ガスの改質でありながら、水素の製造コスト自体はオンサイトでの製造より安いものの余り差が生じていない。これは、高圧水素型での水素製造が現状技術（改質効率58%、設備費356百万円/1000Nm³/h）をベースとしているのに対して、オンサイト型天然ガス改

質装置では将来の燃料電池用改質装置の普及に伴って、コンパクト設計による配管などからの放熱損失を軽減した高効率化、量産効果による設備費の低減といった技術、経済性の向上（改質効率 76%、設備費 360 百万円/1000Nm³/h）が図られていくとの見通しを含んだものであることによる。更に、外部製造では製造した水素をそれぞれのステーションに輸送することになるが、ガス水素の輸送は最も効率が悪いいため、それが輸送コストとして影響することになる。

液体水素の場合は設備費が高い上に電力費の占める割合が大きいため、水素製造コスト自体を大幅に押し上げる結果となっている。更に、高圧水素型ほどではないが、輸送コストも全体的な供給コストを増加させる一因ともなっている。

外部製造・供給型と天然ガス改質に代表されるオンサイト型との比較における上記の結果は、水素供給ステーションのような分散型利用においては、特定規模の水素の製造を 1 ヶ所に集約してスケールメリットを期待する以上に、今後普及が期待される燃料電池技術の波及効果を活用しながら、より小規模なユニット化された設備において、量産効果による設備コストの低減と技術開発による効率の向上を図って行く方が経済的に成立し易く、利用の拡大を促進する有効な方策になりうるとの可能性を示唆していると考えられる。このことは水素供給ステーションが世の中に普及して行く過程を考察する際、水素自動車の普及と水素供給ステーションの普及が常に「鶏と卵」のジレンマの関係にあり、特に導入初期における少量かつ分散的な需要に対して如何に経済的に成立し得るインフラシステムが提供されるかがその後の市場形成を左右する鍵となることから重要である。

II. 電解型ステーションの位置付け

一方、電解型ステーションでは、90%を超える高いエネルギー変換効率が期待できる固体高分子水電解においても水素 1Nm³を製造するのに要する電力原単位は 3.92kWh であり、水素製造に要する電力費が供給コストの大半を占め、水素製造に係る変動費の差がそのまま改質型ステーションの供給コストとの差となっている。

電解型ステーションにおける水素製造コストを低減する方法として、電力料金の安価な夜間電力を利用して集中的に水素を製造することが一般的に考えられる。しかし、表 5.2.3-4 に示す様に、夜間電力の使用により水素製造コストに占める電力量料金は低下するが、運転時間の減少によって設備規模が大きくならざるを得ないことから、固定費および電気基本料金が増加し、結果として水素製造コストが上昇することになる。もっともこれは現状国内で一般的に適用されている電力料金（高圧季節別時間帯別電力 B）をベースとしたものであり、仮に基本料金が現行の 1,600 円/kW に対して 1,300 円/kW 以下、若しくは夜間電力量料金が現行の 6.15 円/kWh に対して 5.18 円/kWh 以下に設定される場合は夜間運転の方が水素製造コストが安くなる。このように、電解型ステーションの運転に対して、将来電力料金体系の変更が行われるのであれば、

水素供給ステーションにおける電解型ステーションの位置付けが高まると同時に電力消費の負荷平準化にも寄与するという相乗効果も期待されることになる。

表 5.2.3-4 PEM 水電解型ステーションにおける終日運転と夜間運転の対比

		終日運転	夜間運転	備 考
設備規模	Nm ³ /h	300	563	
年間運転時間合計	時間/年	7,920	4,224	
昼間	時間/年	4,620	924	休日等の夜間料金適用
夜間	時間/年	3,300	3,300	
設備費計	百万円	202	293	
電解設備	百万円	94	163	スケールファクター0.87
貯蔵設備	百万円	43	66	スケールファクター0.67
その他	百万円	65	65	
固定費	円/Nm ³	15.7	22.8	年経費率18.5%
人件費	円/Nm ³	2.9	2.9	
電気代合計	円/Nm ³	48.8	45.8	
基本料金	円/Nm ³	10.6	19.8	1650円/kW
電力量料金	円/Nm ³	38.2	26.0	昼間平均11.14円、夜間6.15円
水料金	円/Nm ³	0.5	0.5	
水素製造コスト	円/Nm ³	67.9	72.0	

また、電解型ステーションは、主に改質型ステーションとの対比において以下のような特徴を有しており、コスト的な要因だけでなく、これらのメリットを活かすような形で継続的な研究開発への注力が必要である。

- ・小規模な設備においても高い効率が維持され、導入期の限定された需要にも対応し易い。
- ・起動停止性に優れ、負荷変動にも対応し易いことから、運転の自由度が高い。
- ・都市ガス配管等の有無に左右されず、どこでも設置が可能であり、分散型需要に適している。
- ・夜間電力の利用により、電力負荷平準化に寄与できる。
- ・長期的には再生可能エネルギー(PV 発電等)の利用により、環境負荷低減の効果が高い。

d. アメリカにおける類似研究での検討結果

自動車用燃料として水素を利用するためのインフラ整備に関する研究は、アメリカでも 1990 年代初頭よりエネルギー省(DOE)を中心として数多く実施されている^[11]。ここでは、最近報告された文献の中から WE-NET での研究同様、いくつかの水素供給オプションに関し比較検討したコスト試算例を 2 例紹介する。これらはいずれも DOE の委託により Ford が中心となり行われた純水素燃料電池自動車導入のための研究の一部であるが、集中生産方式とオンサイト方式のいずれで水素供給コストがより安価となるかで若干

見方が異なっており興味深い。

イ. Air Products and Chemicals 社(APCI)の検討結果^[12]

表 5.2.3-5 に示される 6 つのシナリオに関し、その設備費および水素供給コストを試算している。ステーション 1 ケ所当りの水素供給量は 500 台の自動車に対して、2.7t/日(約 30,000Nm³/日)と WE-NET での検討の約 4 倍の規模となっている。

液体水素の集中生産方式(シナリオ①)では、液体水素のタンクローリーによる平均輸送距離は 800km で、27t/日のプラントで 10 ケ所、270t/日のプラントで 100 ケ所のステーションをカバーする。また、ガス水素の集中生産方式(シナリオ②)では、生産された水素はパイプラインにより供給され、27t/日のプラントでは 5 km 毎に設置されたステーション 10 ケ所に供給する 50km の直鎖状のパイプラインが、270t/日のプラントではこの 50km の直鎖状パイプラインを放射状に 10 本設置する方式が想定されている。

各々のシナリオに対する検討結果は表 5.2.3-5 のとおりであるが、ここで結論として纏められていることを列挙すると以下のとおりとなる。

- ①水素自動車の導入初期に於いては、小規模で分散された需要であるため、近接する既存の水素工場から輸送されるガス水素あるいは液体水素が供給される。
- ②これらの水素工場から離れた場所での需要に対しては、小規模なオンサイトでの改質や電解設備が適用される。
- ③完全に市場が確立された段階では、大規模な集中生産方式が可能となり、その際の水素卸売り価格は\$2.30~3.30/kg (23.8~34.1 円/Nm³、1US\$=115 円換算)程度になると見られる。大規模な集中生産を可能とするには、27t/日プラントで 25,000 台、270t/日プラントでは 250,000 台の自動車が必要となる。
- ④重質油の部分酸化、メタノール改質、水電解は、安価な天然ガスが入手出来ない遠隔地での需要を満たすことになる。

表 5.2.3-5 APCI 社での試算結果

シナリオ	水素製造規模		設備費用		水素コスト	
	(t/日)	(Nm ³ /時)	(\$1000)	(百万円)	(\$/kg)	(円/Nm ³)
①液体水素製造 + ロローリー供給	27	12,514	63,000	7,245	3.35	34.6
②ガス水素製造 + ハイライン供給	27	12,514	259,000	29,785	2.35	24.3
	270	125,139	82,000	9,430	2.91	30.1
	270	125,139	667,000	76,705	2.47	25.5
③オンサイト天然ガス改質	2.7	1,251	9,600	1,104	3.57	36.9
④オンサイト重質油部分酸化	2.7	1,251	12,500	1,438	3.96	40.9
⑤オンサイトメタノール改質	2.7	1,251	6,800	782	3.76	38.9
⑥ホームガレージでの水電解	0.003	1.39	13.5-23.1	1.55-2.66	6.97	72.1
(注)使用エネルギーコスト(US\$=115円換算):						
天然ガス: 小規模オンサイト改質用	\$3.79/GJ(20.1円/Nm ³ , WE-NET:39.3円/Nm ³)					
中規模改質設備用	\$2.85/GJ(13.0円/Nm ³ , WE-NET:24.0円/Nm ³)					
大規模改質設備用	\$1.90/GJ(8.70円/Nm ³ , WE-NET:24.0円/Nm ³)					
電気料金: ホームガレージ用	\$0.07/kWh(8.15円/kWh)					
オンサイト、集中設備用	\$0.05/kWh(5.75円/kWh, WE-NET:11.4円/kWh)					
オフピーク電力	\$0.03/kWh(3.45円/kWh, WE-NET:6.15円/kWh)					
メタノール: オンサイト改質用	\$0.18/L(26.1円/kg, WE-NET:40.0円/kg)					
重質油	\$0.09/L(10.4円/L)					

D. Directed Technologies 社(DTI)の検討結果^[13]

DTI 社でも液体水素・ガス水素の集中製造による供給、ステーションでの水蒸気改質あるいは水電解による製造等種々のオプションによる水素供給コストの試算を行っているが、水素燃料電池自動車の導入規模に拘らずに、供給インフラの整備を現実的に進めて行く方法として、工場での量産化によりコストダウンが図られた天然ガス改質器および水電解設備が有効であると結論付けているところに特徴がある。

図 5.2.3-2 は、種々の水素製造方法による水素供給コストを纏めたものであるが、同社の検討結果を要約すると以下のとおりである。

- ①大規模な液体水素製造のケースでは、水素供給コストは\$3/kg (31 円/Nm³) 前後となるが、コストの過半は液化と輸送に係る費用である。
- ②オンサイトで設置される天然ガス改質による水素製造のケースでは、上記液化と輸送に係る費用が不要となり、2.7t/日 (カバー車両数 5,400 台、1 日の充填台数 675 台) 規模のプラントでは最も安価なケースで水素供給コストは\$2.27/kg(23.5 円/Nm³)とガソリン卸売価格(\$0.80/ガロン)等価の\$2.14/kg(22.1 円/Nm³)に近づく。しかし、導入期に必要な小型改質設備 (0.18t/日、カバー車両数 360 台、1 日の充填台数 45 台) のケースでは、水素供給コストは\$11/kg(113.7 円/Nm³)となる。
- ③オンサイト設置の改質器に代わり導入期の小規模需要に対応しうる選択肢として、工場生産によるユニット化された小型天然ガス改質器および水電解設備が有望。燃料電池用改質器をベースとするユニット型改質器(0.18t/日)での水素供給コストはオンサイト型の約 4 分の 1 であり、量産化により更にコストの低減が可能となる。
- ④水電解設備では比較的小型の設備でも設置可能であり、10,000 台量産時ではカバー車両数 10 台規模でもガソリン卸売価格より安価となる。

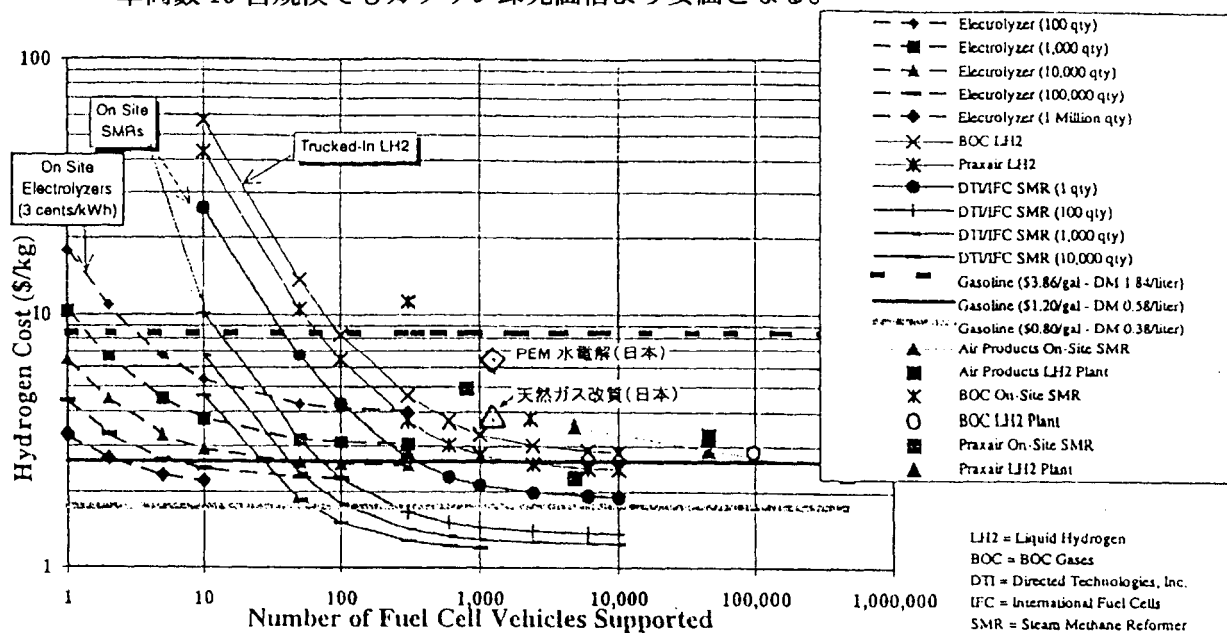


図 5.2.3-2 DTI 社による各種水素製造方法による水素供給コスト試算結果

今回の検討に用いた各種水素製造方法のエネルギー効率を纏めると表 5.2.3-6 のとおりとなる。

表 5.2.3-6 各種水素製造方法のエネルギー効率

		外部製造・供給型		オンサイト型			
		液体水素	高圧水素	天然ガス 改質	メタノール 改質	アルカリ 水電解	PEM 水電解
水素製造量	Nm3/h	12,514	6,257	300	300	300	300
水素発熱量(HHV)	kcal/Nm3	3,050	3,050	3,050	3,050	3,050	3,050
原燃料消費量	Nm3/Nm3	6,908	3,454	107	207(kg)		
原燃料発熱量(HHV)	kcal/Nm3	9,490	9,490	11,000	5,420(kg)		
電力消費量	kWh	13,390	63	36	24	1,323	1,176
熱量換算	kcal/kWh	860	860	860	860	860	860
エネルギー効率(HHV)	%	49.5	58.1	75.7	80.1	80.4	90.5

(注)上記はオンサイトでの効率評価を試みたものであり、電力消費の熱量換算は 860kcal/kWh とした。

新たなエネルギーとしての水素の運輸部門への導入を考える場合、一次エネルギーの採掘から自動車での利用に至るエネルギーフロー全体としての効率が既存のシステムに対して優位性を持つことが重要となる。一例として、オンサイトでの改質による水素供給システムとガソリンに代表される既存システムの対比を図 5.2.3-3 に示す。

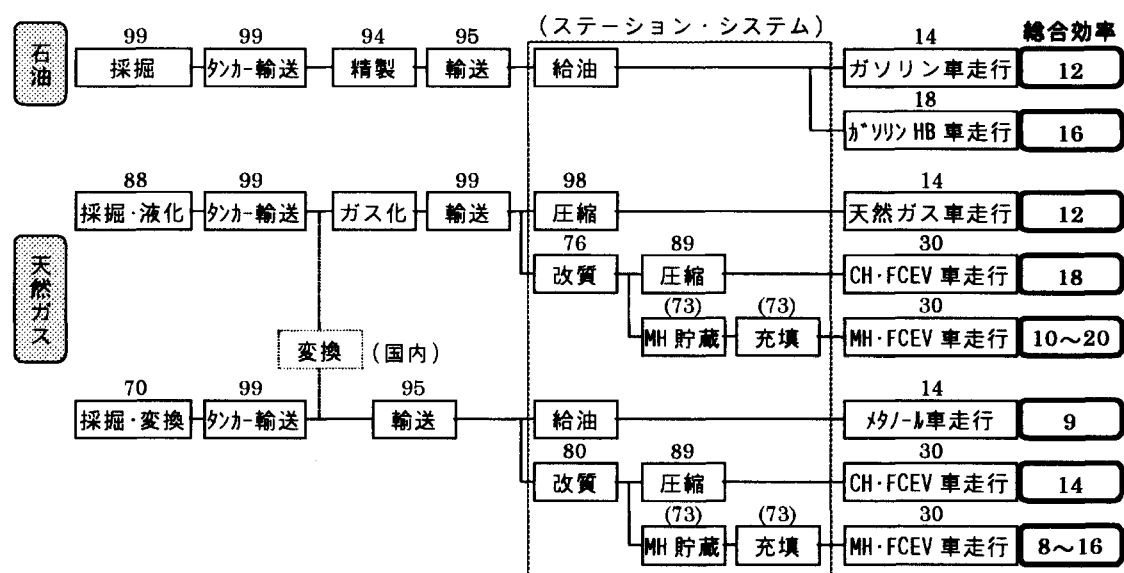


図 5.2.3-3 エネルギーフローと総合効率 ([14] をベースに加工)

ガソリンシステムでは燃料の製造・輸送段階での効率は約 88%と高いが、既存エンジン自動車の原動機・車両効率が 14%であるため、総合効率は 12%に止まる。また、ハイブリッド車では自動車側の効率が改善されることから、総合効率が 16%へと高まる。

これに対して、例えば天然ガスのオンサイト改質では、76%の効率で改質された後圧縮

ガスとして貯蔵供給されるケースでは、圧縮動力として $0.147\text{kWh}/\text{Nm}^3$ 必要であるため^[7]、圧縮に係る効率は 89% となり、これに純水素燃料電池自動車の効率 30% を加味すると、総合効率は 18% となる。一方、改質後に定置式水素吸蔵合金タンクに貯蔵し、水素吸蔵合金タンクを搭載した自動車へ供給するケースでは更に高い総合効率が得られる可能性があるが、水素の吸蔵放出時に $0.37\text{kWh}_{\text{TH}}$ の熱量を除去あるいは供給する必要があることから^[7]、これを例えばチラー等新たなエネルギーを必要とする方法で処理する場合には、総合効率が著しく低下することになる。このため、水素吸蔵合金を用いるシステムでは、エネルギー的に自立可能な合金の選定・開発や伝熱性能の改善が総合効率を高く維持する上で重要な課題といえる。

上記エネルギーフローでの評価では、個々のシステムの効率をどう見るかで結果が大きく異なるため、より精度の高い分析のためには総合的な見地からの検討が必要である。これに関しては現在輸送 WG において検討が進められているところであり、また、第 II 期に於いて自動車を含めた評価が実施される予定である。従って、ここでは考え方を例示するに止め、具体的評価は第 II 期の成果を待つこととしたい。

(3) 水素供給ステーションの設置に関する検討

水素供給ステーションの設置に関する法規制に関しては、昨年度のサブタスク 7 成果報告書の中で詳述されているが、ここでは、水素供給ステーションを実際に設置しようとする際に影響を受ける貯蔵数量および設備距離の問題に関し記載する。

a. 貯蔵・貯槽容器に関する規制

水素およびその他の自動車用燃料の貯蔵に関しては、建築基準法施行令第 116 条（危険物の数量）および第 130 条の 9（危険物の貯蔵又は処理に供する建築物）によって都市計画法が定める用途地域ごとに処理・貯蔵数量が規制されており、その数量は表 5.2.3-7 に示すとおりである。

表 5.2.3-7 建築基準法による水素および各種燃料の処理・貯蔵の規制数量

	住居地域	商業地域、	準工業地域	工業地域
圧縮水素 (可燃性ガス)	35 Nm^3 (0.4 GJ)	70 Nm^3 (0.9 GJ)	350 Nm^3 (4.5 GJ)	無制限
液体水素 (液化ガス)	3.5 t (496 GJ)	7 t (993 GJ)	35 t (4,965 GJ)	無制限
CNG (圧縮ガス)	350 Nm^3 (16 GJ)	700 Nm^3 (32 GJ)	3,500 Nm^3 (161 GJ)	無制限
LPG (液化ガス)	3.5 t (176 GJ)	7 t (351 GJ)	35 t (1,757 GJ)	無制限
ガソリン (石油類)	500 L [50,000 L] (1,757 GJ)	1,000 L [50,000 L] (1,757 GJ)	5,000 L [50,000 L] (1,757 GJ)	無制限

注：ガソリンの [] は地下貯蔵槽についての特例

圧縮水素は可燃性ガスとしての規制を受け、住居地域で 35Nm^3 、準工業地域に於いても 350Nm^3 と実用上問題となる規制値となっている。CNG の場合、以前は圧縮水素同様可燃性ガスとしての規制を受けていたが、平成 5 年 4 月に CNG の貯蔵規制数量解釈による緩和が図られ、圧縮ガスとしての取扱いにより貯蔵数量が 10 倍となっている。

一方、液体水素は LNG、LPG 同様液化ガスとしての規制を受け、その数量は重量で定められている。このため、重量あたりのエネルギー密度の高い水素の場合、他の燃料を上回る貯蔵が可能である。

b. 施設の敷地に関する法規制

施設の敷地に関する法規制として、貯蔵設備または処理設備から保安物件に対する距離の規制があり、貯蔵能力または処理能力に対応した距離を確保する必要がある。今回対象とした $3,600\text{Nm}^3$ の貯蔵設備の場合、学校、病院等の第一種保安物件に対する設備距離は 16.97m であり、その他住居等の第二種保安物件に対する設備距離は 11.31m となる。また、火気施設離隔距離は 8m となる。

CNG については、以前は水素と同じ規制を受けていたが、順次緩和され半分程度の設備距離となっている。参考として（Ⅰ）「圧縮天然ガススタンドの基準」を適用したケース、（Ⅱ）現行の高圧ガス保安規則を適用したケースおよび（Ⅲ）適用除外のケースでの水素供給ステーションの立地例を図 5.2.3-4 に示す。

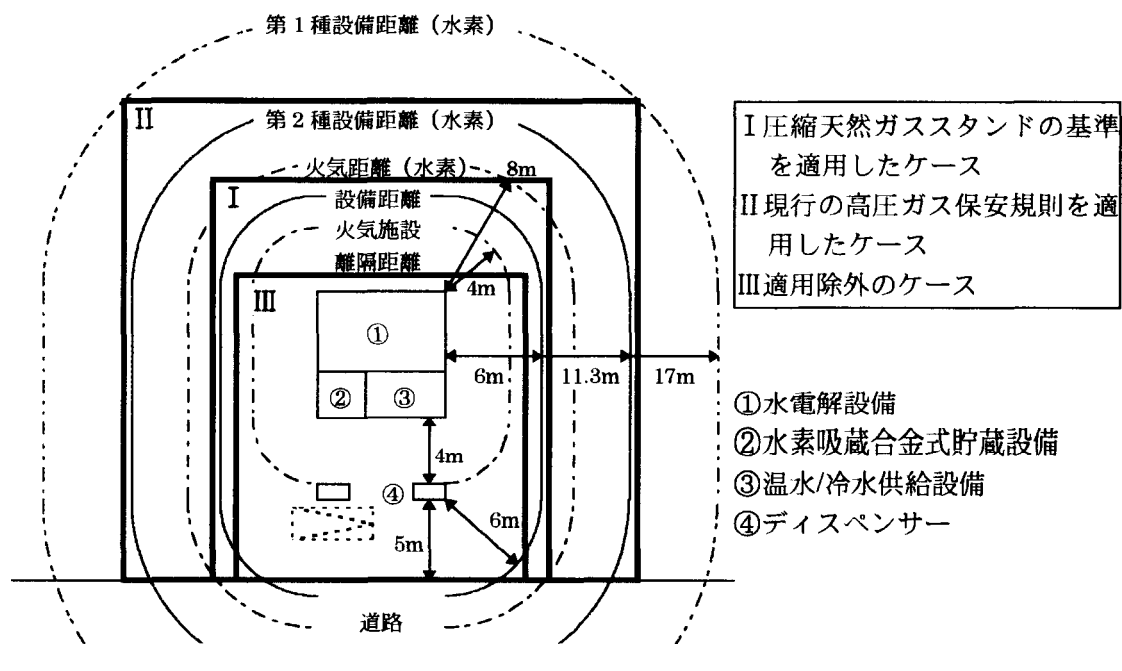


図 5.2.3-4 各種規準を適用した場合の水素供給ステーションの立地例

現行の高圧ガス保安規則を適用したケースでは、上記のような設備距離を確保するため、約 900m² (30×30m) の設置面積が必要になるのに対して、将来的に規制の緩和が図られ「圧縮天然ガススタンドの基準」並みの規制（設備距離 6m、火気距離 4m）となった場合は、約半分の 480m² (20×24m) 程度の設置面積ですむことになる（敷地境界に 2m 以上の防火壁が必要）。基準では最大 2,500m² (50×50m) 程度の設置面積が必要となる。

また、これらの規制はあくまでもゲージ圧 1MPa 以上の圧縮水素に対して適用されるものであり、例えば水素吸蔵合金タンク等を用いて全体を 1Mpa を下回る圧力で運用できる場合は適用除外となる。この場合は、上記設備距離の制約がなくなるため更に小さな面積での設置が可能となるが、一方で、安全性確保のための自主的な規準を考慮する必要もあろう。

(4) 各ステーションシステムの特長

今回の検討のまとめとして、各ステーションシステムの概要、特長等を表 5.2.3-8 に纏めた。

表 5.2.3-8 各ステーションシステム毎の概要・特長(1)

	液体水素貯蔵型	高圧水素型	天然ガス改質型	メタノール改質型
システムの概要	改質液化設備：12,514Nm ³ /h (効率：49.5%[HHV]) 40 ステーションに供給 輸送容器：ISO40 コンテナ (25,747Nm ³) 貯蔵設備：コンテナ 1 基留置き	改質液化設備：6,267Nm ³ /h (効率：58.1%[HHV]) 20 ステーションに供給 輸送容器：高圧ガストレーラー (2,800Nm ³ 、20MPa) 貯蔵設備：トレーラー 3 基留置き	改質設備：300Nm ³ /h (効率：75.7%[HHV]) (コンプレッサ：1→25MPa) 貯蔵：高圧蓄ガスユニット 25MPa、3,600Nm ³ 若しくは MH 貯蔵	改質設備：300Nm ³ /h (効率：80.1%[HHV]) (コンプレッサ：1→25MPa) 貯蔵：高圧蓄ガスユニット 25MPa、3,600Nm ³ 若しくは MH 貯蔵
設置スペース (個別機器：暫定)	コンテナ：12.19m×2.44m/基	トレーラー：9.14m×2.49m/基	改質器本体：約 7m×5m コンプレッサ：約 4m×2.5m 貯蔵設備：7.2m×4.8m	改質器本体：約 6m×6m コンプレッサ：約 4m×2.5m 貯蔵設備：7.2m×4.8m
特長	・既存技術での対応が可能 ・LH/MH/GH への供給が可能 ・将来的には再生可能エネルギーによる液体水素の導入 ・貯蔵スペース中	・既存技術での対応が可能	・既存技術での対応が可能 ・原料貯蔵設備が不要	・既存技術での対応が可能 ・天然ガス改質に比べ運転温度が低いため、負荷変動・保守が楽
問題点・課題	・液化エネルギー ・移充填ロスの減少	・輸送効率の低さ ・頻繁なトレーラー輸送 (3 基/日) ・トレーラー留置きスペース大	・運転温度が高いため、起動停止・保守に課題 ・発生設備停止時のバックアップ	・原料が危険物扱い ・発生設備停止時のバックアップ
水素コスト	64.8 円/Nm ³ (一次試算)	49.3 円/Nm ³ (一次試算)	39.9 円/Nm ³ (一次試算)	52.8 円/Nm ³ (一次試算)
類似実施例	・SWB では 3,000L のタンクを設置し、液水自動車への供給を実施。 ・シカゴでは 34m ³ のタンクを設置し、燃料電池バスへの供給を実施。	・ハンブルグでは 1998 年 3 月より商品配送会社が 2400 台のバンの内 6 台を水素エンジンに改造して使用。DOW の副生水素を利用。将来は Iceland から圧縮水素を輸入	・DOE では、天然ガス改質 50kWPEM 燃料電池の改質器容量を大きくし、余剰水素を自動車に供給するデモプラントを 2000 年までに製作の予定。	—

表 5.2.3-8 各ステーションシステム毎の概要・特長(2)

	アルカリ水電解型	固体高分子電解質水電解型	PV-固体高分子電解質水電解型①(全量をPVで製造)	PV-固体高分子電解質水電解型②(PV利用率12%で製造)
システムの概要	電解槽：300Nm ³ /h (効率：80.4%[HHV]) 貯蔵：MH 低圧貯蔵 <1MPa、3,600Nm ³ 若しくは高圧蓄ガスユニット 温熱/冷熱供給：	電解槽：300Nm ³ /h (効率：90.5%[HHV]) 貯蔵：MH 低圧貯蔵 <1MPa、3,600Nm ³ 若しくは高圧蓄ガスユニット 温熱/冷熱供給：	PV 容量：8,860kW 電解槽：2,260Nm ³ 貯蔵：18,080Nm ³ その他：同左	PV 容量：1,176kW 電解槽：300Nm ³ 貯蔵：3,600Nm ³ その他：同左
設置スペース (個別機器：暫定)	電解設備：約 4.3m×7.5m MH 貯蔵：約 2m×2m (合金量約 21.6t-1.5wt%)	電解設備：約 4.3m×7.5m MH 貯蔵：約 2m×2m	PV：約 300m×300m 電解槽： MH 貯蔵：	PV：約 100m×120m 電解設備：約 4.3m×7.5m MH 貯蔵：約 2m×2m
特長	・アルカリ水電解は既存技術で対応が可能 ・高圧ガス充填系を除けば低圧(10kg/cm ²)のシステム構成となり法規制の適用が緩やか	・アルカリ型に比べ、高効率で設置スペースがコンパクト ・低圧システムで法規性の適用が緩やか	・PVの完全利用によりクリーンなシステムとなる。 ・効率：同左 ・適用法規：同左	・PVの部分利用によりクリーンなシステムとなる(利用率12%)。 ・効率：同左 ・適用法規：同左
問題点・課題	・水素コストが電力価格に左右される。 ・GH2自動車には高圧充填系が必要。	・水素コストが電力価格に左右される。 ・GH2自動車には高圧充填系が必要。	・PVの設置面積が巨大 ・不安定電源による電解技術 ・GH2自動車には高圧充填系が必要。	・PVの設置面積が巨大 ・不安定電源による電解技術 ・GH2自動車には高圧充填系が必要。
水素コスト	74.8 円/Nm ³ (一次試算)	67.9 円/Nm ³ (一次試算)	150.8 円/Nm ³ (一次試算)	75.0 円/Nm ³ (一次試算)
類似実施例	・バンクーバーではパッケージ型アルカリ水電解式ステーションを設置(81Nm ³ /h、効率72%) ・貯蔵は高圧容器	・PEM水電解型ステーションの実証例はない	・CANでPV-アルカリ電解型を実証 PV 容量：48kW 電解容量：10Nm ³ /h 貯蔵容量：400Nm ³ 、285bar	

5.2.4 第II期研究開発における技術開発課題

第I期で実施した予備検討に基づき、第II期において水素供給ステーションの開発と実証試験を行う計画となっている。

開発対象となる水素供給ステーションは、天然ガスおよびメタノール改質により水素を製造する燃料改質型とオフピーク電力を利用した水電解法により水素を製造する電解型の2形式であり、実用規模 300Nm³/h の10分の1程度の設備規模である。貯蔵方式としては安全性に優れる水素吸蔵合金による定置型貯蔵設備を開発し、これを各々のシステムに組み合わせるものとなる。また、自動車側での水素貯蔵形態としては、重量貯蔵密度に優れる水素吸蔵合金タンクが想定されており、これに対する急速充填技術を確立することになる。

水素供給ステーションを構成する各種水素製造技術、貯蔵技術などの個々の要素技術は既存の技術であるが、それぞれでステーションでの設置に適するように、装置のコンパクト化、高効率化、操作性・信頼性の向上が図られる必要がある。

例えば、天然ガス改質装置では、改質器としてはリン酸型燃料電池の改質部としてコンパクト化が図られているが、精製器(PSA)においても高い水素回収率を維持しながら小型化を図ると共に、装置全体として最適な構造を検討して行く必要がある。また、ステーションで運転する場合には、需要に応じた運転モードの変動が予想されるが、これに対して装置への負荷を低減し、ロスを少なくするような急速起動、停止、スタンバイ方法の確立と制御システムの開発が必要となる。

固体高分子電解質(PEM)水電解装置に於いては、現在、WE-NET サブタスク4 水素製造技術の開発で開発が進められており、電流密度 1A/cm² で90%を超えるエネルギー変換効率が報告されている。固体高分子水電解では1A/cm²以上での高電流密度での電解が可能であり、また、その経済電流密度は2~3A/cm²とされていることから、カナダで開発されているパッケージ型アルカリ水電解ステーション設備より一層のコンパクト化が期待される。しかし、現状 WE-NET で開発中のスタック規模は2,500cm²×5セルであり、ステーション実証用では同一の電極面積に対して30セル程度の積層数となることから、より一層の技術開発が望まれる。更に、ステーションでの実証に対して、高電流密度運転、負荷変動に対する寿命の確認も必要となる。

水素吸蔵合金による水素の貯蔵では、前款(2)エネルギー効率に関する考察において記したように、水素の吸蔵・放出に伴う熱の除去あるいは供給が問題となる。水素放出時の熱源としては、改質装置からの燃焼排ガスの熱を回収して補うことが考えられる。一方、水素の吸蔵時の熱の除去に関しては、特に自動車用タンクへの急速充填を行う際には、チラー等により循環水を冷却する必要がでてくるが、これらのエネルギー消費を最小にするための合金の選定・開発やシステム開発が重要な開発課題となる。

水素の充填に関しては、水素吸蔵合金タンクに10分以内で充填を完了するための急速充填技術および流量計測技術の開発が必要である。また、安全性確保の観点から充填自動化のための制御システムの開発が課題となる。

また、これらを統合した全体システムとしては、個々の設備間のエネルギーバランスを考慮してステーションシステムとしての最適化を図ると共に、安全かつ効率的な運転を可能とする集中制御システムの開発が必要となる。

第II期において水素供給ステーションの開発を推進するにあたっての開発課題を整理すると表5.2.4-1のようになる。

表 5.2.4-1 水素供給ステーションの開発における課題

項目	要求される条件・課題
全体システム	・エネルギーバランスを考慮した全体システムの最適設計 ・安全かつ効率的な運転を可能とする集中制御システムの開発
天然ガス改質 (含むメタノール改質)	・ステーション設置に適すパッケージ型高効率改質・精製装置の開発 ・急速起動、停止、スタンバイ方法の確立 ・操作性に優れた制御技術の開発
PEM 水電解	・ステーション設置に適すパッケージ型電解装置の開発 ・負荷変動に対する水電解セルスタックの寿命の確認
水素吸蔵合金貯蔵	・パッケージ型 MH 貯蔵設備の最適設計 ・加熱・冷却エネルギー消費の少ない高効率 MH タンクの最適設計 ・制御技術の開発と信頼性の向上 ・水素吸蔵合金の吸蔵量増大と吸放出温度の低下
ディスペンサー	・急速充填（10 分以内）のための最適充填条件の把握 ・正確で簡素な流量計測システムの開発 ・充填完了条件の把握と自動充填のためのコントロールシステム ・充填ロスのない複合型ワンタッチコネクタの開発
共通課題	・安全運転制御システム ・構成機器の小型化、低コスト化 ・実証試験を通じたシステムの信頼性、操作性、安全性、経済性の検証
その他	・ステーション設置に関する法規制の緩和 ・普及のための導入促進策 ・一般市民の啓蒙

また、水素供給ステーションを真に社会的に根づいたものとして行くためには、上記の技術開発を推進していくと共に、ステーション設置に関する法規制の緩和、普及のための導入促進策の実施、水素に対する一般市民の啓蒙等、現実的な水素供給ステーションの設置に向けた条件整備が必要となる。

前述(3)水素供給ステーションの設置に関する検討において記した様に、今日実際に水素供給ステーションを建設しようとする場合、現行法規によって、貯蔵数量、設備距離等種々の規制を受けることになる。これらの法規は主には水素の工業的利用を対象として制定されたものであるため、これを水素供給ステーションに適用しようすると阻害要因となるケースが出てくる。従って、これらの問題点を明らかにし、実状に即した形へと改正するような働きかけが必要である。これに関しては天然ガス自動車で行先行して体系的な取り組みが行われているため、その整備状況を表5.2.4-2に示す。

表 5.2.4-2 CNG 自動車関係法令の整備状況^[15]

法律名称	実施	整備対象項目	概 要
建築基準法 (建設省)	H5.4	①CNG の貯蔵規制数量解釈による緩和	・CNG は圧縮ガスの取扱(貯蔵量 10 倍)
高圧ガス保安法 (通産省)	H6.3	①天然ガスタンド基準の新設	・ディスペンサー関連保安距離緩和
		②車両移動基準の適用除外	・駐車についての移動基準適用除外
		③LPG スタンドとの併設	・車両の警戒票の掲示不要
	H9.4	①天然ガスタンドの保安基準緩和	・保安距離、設備距離等の設置条件緩和 ・保安統括者および保安係員の選任不要
		②天然ガス自動車専用 CNG 容器の規格化	・容器寿命限定、容器設計試験の付加等
		③容器管理体制、運用方法の合理化	・自動車に搭載したまま容器再検査 OK ・再検査期間を車検に合わせる
ガス事業法 (通産省)	H7.3	①昇圧供給装置のガス工作物化	・ガス事業者と使用者の責任の明確化
	H9.2	②昇圧供給装置の用途限定解除	・天然ガス自動車以外へのガス充填 OK
	H8.2	①CNG 販売の許可不要兼業指定	・ガス事業者が CNG スタンド兼業可能
	H9	①急速充填所設置中圧需要家料金 ②昇圧供給需要家料金	・自動車に用途限定し、現行の負荷調整契約の 1 バリエーションとして新設
消防法 (消防庁)	H7.4	①天然ガス充填設備設置給油取扱所基準の新設	・天然ガス充填設備を給油取扱所へ併設
道路運送車両法	H7.12	①CNG 車の技術基準新設	・大臣認定解除→ 一般車扱い ・低公害車としての低排出ガス基準

普及のための導入促進策に関しては、特に導入期に於いて、水素自動車の導入および水素供給ステーションの設置に対する補助、あるいは税制面での優遇等政府による援助措置が不可欠となる。これに関しても、天然ガス自動車等低公害車普及での前例があり参考とすることができる。

水素に対する一般市民の認識は、総じて「危険なもの」と行ったマイナスのイメージが先行したものであるように見受けられる。このことは、例えば水素供給ステーションを設置する際にも近隣住民の反対となって現れるだけに重要な問題といえる。これに対しては、実証試験を通じて、水素の利用が如何に安全なものか、また、社会的に有意義なものかを示していく必要があると思われる。

はじめにも記したように、水素自動車用水素供給ステーションは水素利用の分散的な拡大を図る最も実現可能性の高いものであり、その開発成果の如何が今後の水素エネルギーの導入を左右する鍵になるといえる。

参考文献

- [1] 三宅健一、岡田和夫、羽木一博：水素製造装置の技術動向、日立造船技報、Vol.56、No.2(1995)
- [2] 大阪ガスエンジニアリング(株) 水素発生装置カタログ

- [3]白崎義則、太田洋州、小林一登、黒田健之助：都市ガスから直接純水素を製造する水素分離型改質器の開発、水素エネルギーシステム、Vol.22、No.1(1997)
- [4]三菱ガス化学（株）メタノール分解水素製造装置カタログ
- [5]三宅明子、小林宏子、森岡輝行：高純度水素・酸素製造のためのオンサイト大型商用水電解装置『HHOG[®]』、神鋼ハントック技報、Vol.41、No.1(1997)
- [6]中島政雄：化学工学、49、379(1985)
- [7]上原 斎：燃料電池自動車システムにおける水素貯蔵法、シンポジウム&フォーラム「未来型ビークルズを展望する」予稿集(1999)
- [8]大角泰章：水素吸蔵合金—その物性と応用—、アグネ技術センター(1993)
- [9]石原義己：水素、酸素及び窒素製造のエネルギー原単位について、資源テクノロジー、No.260(1996)
- [10]田村英雄監修：水素吸蔵合金—基礎から最先端技術まで—、NTS(1998)
- [11]例えば、G.D.Berry et al.: A Smooth Transition to Hydrogen Transportation Fuel, U.S. DOE Reports(1995)
- [12]R.B.Moore, V.Raman: Hydrogen Infrastructure for Fuel Cell Transportation, Int.J.Hydrogen Energy, Vol.23, No.7(1998)
- [13]C.E.Thomas et al.: Affordable Hydrogen Supply Pathways for Fuel Cell Vehicles, Int.J.Hydrogen Energy, Vol.23, No.6(1998)
- [14]岩井信夫：メタノール自動車、日本エネルギー学会誌、Vol.76、No.4(1997)
- [15]長谷部宏之：天然ガス自動車の開発・普及の動向、機械振興、Vol.30、No.6(1997)

5.3 液体水素供給方式

平成 8・9 年度に水素の需要先に、液体水素で水素を供給することを検討しその概略について検討した結果を報告した。本年度は、この需要先での供給方法を掘り下げて、現状法規に基づいた配置案、フローシート、消費量による設備の比較などの検討を行った結果を報告する。

5.3.1 需要先の消費量と要求圧力

需要先とその消費量、要求圧力は、平成 8 年度に『水素の小口利用』として設定 5MW 燃料電池、200KW 燃料電池、1MW 水素ディーゼル、600KW 水素ディーゼル、自動車用供給スタンド、の 5 つのケースの仕様に基ついて行った。その仕様を、表 5.3.1-1 に改めて示した。設備の利用率が示されたので、これを基に平均消費量を求めて併せて示した。

表 5.3.1-1 水素需要先と使用量・要求圧力

	サイト当たり消費量		設備利用率 %	平均消費量 L/HI	要求圧力 MPa
	T/D	L/HI			
5MW 燃料電池	3.27	1921	50.1	962	1.0
200KW 燃料電池	0.17	100	57.7	58	0.3
1MW 水素ディーゼル	1.15	676	57.2	387	0.1
600KW 水素ディーゼル	0.53	311	60.1	187	0.1
自動車用スタンド	0.37	217	57.1	124	0.6

5.3.2 需要先への供給方法

表 5.3.1-1 に示された需要先に、公道を利用して液体水素を輸送する場合、その輸送機器は、道路交通法、道路運送車両法、高圧ガス保安法、などの規定に従って製作され、運行されることとなる。これまでに日本で製作され運行されている液体水素の輸送機器については、平成 9 年度に報告したが、その後、より大型の輸送機器が米国および日本で製作され、日本で製作されたものは運行を開始したため、この輸送機器の仕様と概要を報告し、この大型輸送機器による需要先への供給を検討した。

なお、米国で製作され、カナダで運行を始めた大型輸送機器は、セミ・トレーラー型で、全長が 48 フィート(14.63m)、幅が(3.048m)、高さが(4.04m)と日本の道路交通法の車両限界を超えているため、日本で運行許可を直ちに得ることは困難と思われるため、ここでは仕様を報告するだけに止めた。

また、日本で製作され運行を開始した大型輸送機器は、最高使用圧力が 0.4MPa であるため、設定した需要先の 5MW 燃料電池と自動車用供給スタンドには、要求圧力より下回るため供給することが現状ではできない。しかし、この要求圧力を満足する輸送機器の製作は、技術的にも、法規上にも問題はなく、必要が生ずれば直ちに製作することが可能であるが、ここでは、現在運行されていて要求圧力を供給できる輸送機器で検討した。これらの輸送機器の仕様をまとめて、表 5.3.1-2 に示した。

表 5.3.1-2 新しい液体水素大型輸送機器の仕様と供給に使用する輸送機器仕様

輸送機器の形状	タンクローリー	コンテナ	セミトレーラー
製作者	日本エア・リキード	日本エア・リキード	GARDNER CRYOGENICS
型式	LSH2212	CSH43004	GCD17300LHYST160 04N
容器内容積(常温時・計算値) (L)	21.870	12.570	65.594
低温実内容積			64.996
最大充填量 (常温換算・計算値) (L)	19.680(*1)	38.310(*2)	61,010(*3)
寸法 長さ (m)	11.990	12.240	14.63
幅 (m)	2.490	2.438	3.048
高さ (m)	3.250	2.591	4.04
質量 単体質量 (kg)		16,500	29,392
充填質量 (kg)	1,380	2,710	4,277
総質量 (*1) (kg)		19,210	33,669
断熱方式	多層巻積層真空断熱	多層巻積層真空断熱	多層巻積層真空断熱
最高充填圧力 (MPa)	1.1768	0.4	1.1032
使用圧力 (MPa)	0～1.1768	0～0.4	0～1.068
設計圧力 (MPa)	1.2781	0.5013	1.2066
耐圧試験圧力 (MPa)	2.1378	0.84	
安全弁設定圧力 (主) (MPa)	1.1768	0.48	0.931
(副) (MPa)	0.1961	0.20	0.117 (補助用 0.345)
材質 (内容器)	SUS316L	SUS304L	SA240-304(*5)
(外容器)	SS41	SS400	SA516Gr.70(*6)
気化量 (*7) (%/D)	1.0～1.1	0.8～1.0	安全弁を 170Psig にセットし、2 Psig に飽和した液体水素を 61,010 L 充填した時 310 時間安全弁を作動させずに運行できる
加圧器搭載の有無	有	無	有
規格・基準	高圧ガス保安法 (容器則・一般則)	高圧ガス保安法(容器則・一般則)	ASME・Sec.VIII Div 1 CGA341 178-338、CSA B620-1987、CSA B51-95、 CGA S1.2、AL Spec.DIST-60032
概観図	図 5.3.1-1	図 5.3.1-2	
フローシート	図 5.3.1-3	図 5.3.1-4	図 5.3.1-5
写真	図 5.3.1-6	図 5.3.1-7	図 5.3.1-8

*単位を合わせるために換算値を記入した部分がある。

*1・*2：日本の法規によりガススペースを 10%とした値

*3：カナダの法規によりガススペースを 6%とした値

*4：コンテナの総質量には、シャーシの質量は含まれていない。

＊5：ASME 材料規格表示（日本材料規格表示の SUS304 に近い）。

＊6：一部ステンレス材も使用されている。

＊7：米国製のもの并表示方法が異なっている。

また、表中の概観図、フローシート、写真をそれぞれ下記のとおり添付している。

図 5.3.1-1 日本で運行されている最大の液体水素タンクローリーの概観、

図 5.3.1-2 日本で本年3月より運行をはじめた液体水素コンテナの概観、

図 5.3.1-3 および -4 に各々のフローシートを、図 5.3.1-6 および -7 に写真

図 5.3.1-5 および -8 にカナダで本年より運行を開始した大型セミ・トレーラーの
フローシートおよび写真

輸送機器で運ばれた液体水素を、受け入れ貯槽を設置して移し替え移送すると、輸送機器と受け入れ貯槽間の圧力差によって、フラッシュ・ロスが発生し、気化ガスの処理のための設備が必要となる。これをそのまま大気に放出したり焼却すれば、ロスとなり水素の価格の上昇を招くばかりでなく、供給システムとしても複雑となる。このため、輸送機器をそのまま供給システムの中に取り込む形で留め置き供給するようにし、液体水素を払い出すために加圧に使用したガスは、コンテナ・タンクローリー内に保持したまま液体水素の充填基地まで持ち帰り回収使用することとする。このことで、需要先での水素ガスのパージは原則として行わない。図 5.3.1-9 で液体水素のフラッシュロスが、他の低温ガスと比較して如何に大きいかを比較した。

それぞれの需要先に、要求されている供給圧力、使用量（設備稼働率を考慮に入れた）に基づいて供給方法、必要供給回数を検討した結果を整理すると表 5.3.1-3 に示したようになる。輸送機器で運ぶ量は、最大積載量を採用し、タンクの加圧とタンク内に残留する液体水素を5%と想定して、最大積載量の95%を需要先に供給できるものとして計算した。

表 5.3.1-3 供給方法と供給可能日数

	消費量 L/H	消費量 L/D	供給方法	要求圧 力 MPa	供給可能 圧力 MPa	1台での供 給可能日数 日/台
5MW 燃料電池	962	23.088	タンクローリ	1.0	1.176	0.8
200KW 燃料電池	58	1.392	コンテナ	0.3	0.4	92.8
1MW 水素ディーゼル	387	9.288	コンテナ	0.1	0.4	3.9
600KW 水素ディーゼル	187	4.488	コンテナ	0.1	0.4	8.1
自動車用スタンド	124	2.976	タンクローリ	0.6	1.176	6.2

この結果から、200KW 燃料電池用の供給は、コンテナ1台で92.8日間も供給する

ことができるが、コンテナの自然気化量でガスを供給することがほぼ可能で、蒸発器の大きなものの設置の必要はない。逆に言えば、このような大きなコンテナで供給せずに小さなコンテナで供給し、需要サイトのスベアを小さくすることの方が、輸送回数も適当と思われるが、5MW 燃料電池は 1 日に 1.25 台の供給が必要となり、供給基地からの距離がある場合は、安定供給の面からは常時 2 台留め置くことを考えなければならなくなることもある。

5.3.3 需要先の配置案

コンテナーは、トラクターを含めると全長が 16.25m もあり、需要先のサイトへの搬入が困難になる。特に搬入する道路の道幅が狭いことを考慮に入れて配置計画を立てる必要がある。需要先サイトの構成機器は、輸送用機器、加圧用蒸発器、供給用蒸発器、バックワー・タンクとこれらを結ぶ配管、制御・計測用機器などで、消費量によって、蒸発器、バックワー・タンクの容量が変わってくる。

需要先サイトでは、高圧ガスの定義において、『常用の温度において圧力が 0.2MPa 以上となる液化ガスであって、現にその圧力が 0.2MPa 以上であるもの、又は圧力が 0.2MPa 以上となる場合の圧力が 35℃ 以下である液化ガス』に相当することとなり、高圧ガスとしての適用を受ける。製造の許可等については、これからの判断に委ねられるが、

- 1) 処理能力が 100Nm³/日を超えるため第 1 種製造者として都道府県知事の許可をうけるか、

- 2) 輸送機器の所有者が移動式製造設備として都道府県知事の許可を受け、その許可を受けた可搬式容器で需要先に持ち込んで使用する場合は、使用先の都道府県知事に『移動式製造設備使用届書』を提出する。

貯蔵量が 3,000Kg 未満のため『高圧ガス貯蔵所』の許可は不要であるが、『貯蔵の基準』に従う。ただ、移動式容器での貯蔵で、貯槽（固定式容器）でないことを明確にしておく必要がある。

保安距離については、一般則の『液化ガスの貯蔵設備(容器)』が適用されるが、 $G = V / C$ で貯蔵質量をもとめこの質量に対して第 1 種保安物件(学校・病院等)、第 2 種保安物件(民家等住居の用に供するもの)までの距離を求める。

この式で、 G = 液化ガスの質量(kg)の数値、 V = 容器の内容積(L)の数値、 C = ガスの定数(水素は 1.05)としている。

保安距離については、一般則 1 条に定められている。これを基に求めると表 5.3.1-4 に示すようになる。

表 5.3.1-4 貯蔵量より求めた保安距離

	計算式	タンクローリ	コンテナ
容器則 22 条による質量 (kg)	$G = V / C$	$X = 20828$	$X = 40524$
第 1 種保安物件 (m)	$L1 = 3/25 * \sqrt{X+10000}$	21.1	27.0
第 2 種保安物件 (m)	$L2 = 2/25 * \sqrt{X+10000}$	14.1	18.0

図 5.3.1-10 に 600KW 水素ディーゼル用配置案を、図 5.3.1-11 に自動車用水素スタンド配置案を、図 5.3.1-12 にコンテナによる水素供給フローシートを、図 5.3.1-13 にタンクローリーによる水素供給フローシートをそれぞれ示した。

5.3.4 消費量による設備比較

輸送用機器を留め置く方法で水素を供給するため、使用量に見合った蒸発器とバッファータンクを設置すればよい。蒸発器は、大気加温型を採用することによって運転管理を楽にし、設備利用率を考慮に入れない消費量で設備設計を行う。大気平均気温、設備利用率によって安全率を加えるが、今回検討の対象とした需要先の設備利用率は 50～60%であり安全率は 10～20%増しで十分と思われる。

大気加温型蒸発器は、100Nm³/H で 1.5m * 2.0m * 2.5m(h)位の大きさになり、消費によって、増やせば良い。ただ、5MW 燃料電池では、消費量が多いため、大気加温式ではスペースを広く必要とし、需要先サイトとしては適切さを欠くことになる。この場合は、水、温水、蒸気などによる強制加温を採る方が良いだろう。

バッファータンクは、需要先までの配管の容積、使用圧力とバッファータンク内の圧力差、などによって変わってくる。また、燃料電池や水素ディーゼルでは消費量の変動は少ないが、自動車用スタンドでは、消費量の変動するため、バッファータンクの容量は、圧力が大きく低下しないだけの容量を持たせる考慮がいる。

5.3.5 公道輸送の問題点

液体水素の輸送は、法的には可燃性液化ガスとして取り扱われ、3 トンを超える輸送には、『高圧ガス移動計画書』を通商産業局長に届け出る義務がある。現在使用しようとしているタンクローリーもコンテナも 3 トン未満であり、届け出の必要はない。低温用輸送機器は、法的には自己加圧装置を持つものは移動式製造設備として扱われ、2 時間以上の同一場所での留め置きは許されていないが、最近の規制緩和で留め置きが可能になるような検討がされている。公道を輸送するためには、法規の遵守は当然のことで、運行管理者、運転手、車両整備士、需要者、など関係者の緊密な連携の元に、安全教育、安全管理、の徹底が計られなければならない。また、公道を運行するため、追突などによるいわゆる貫き事故などから容器を守るための構造上の規定も一般則にある。万一事故が発生発生した際の処置方法についても、日頃から繰り返し訓練を行って、事故の拡大を防ぐ措置が安全かつ適切にとられるようにしておかなければならない。

図 5.3.1-1 日本で運行されている最大の液体水素タンクローリーの概観図

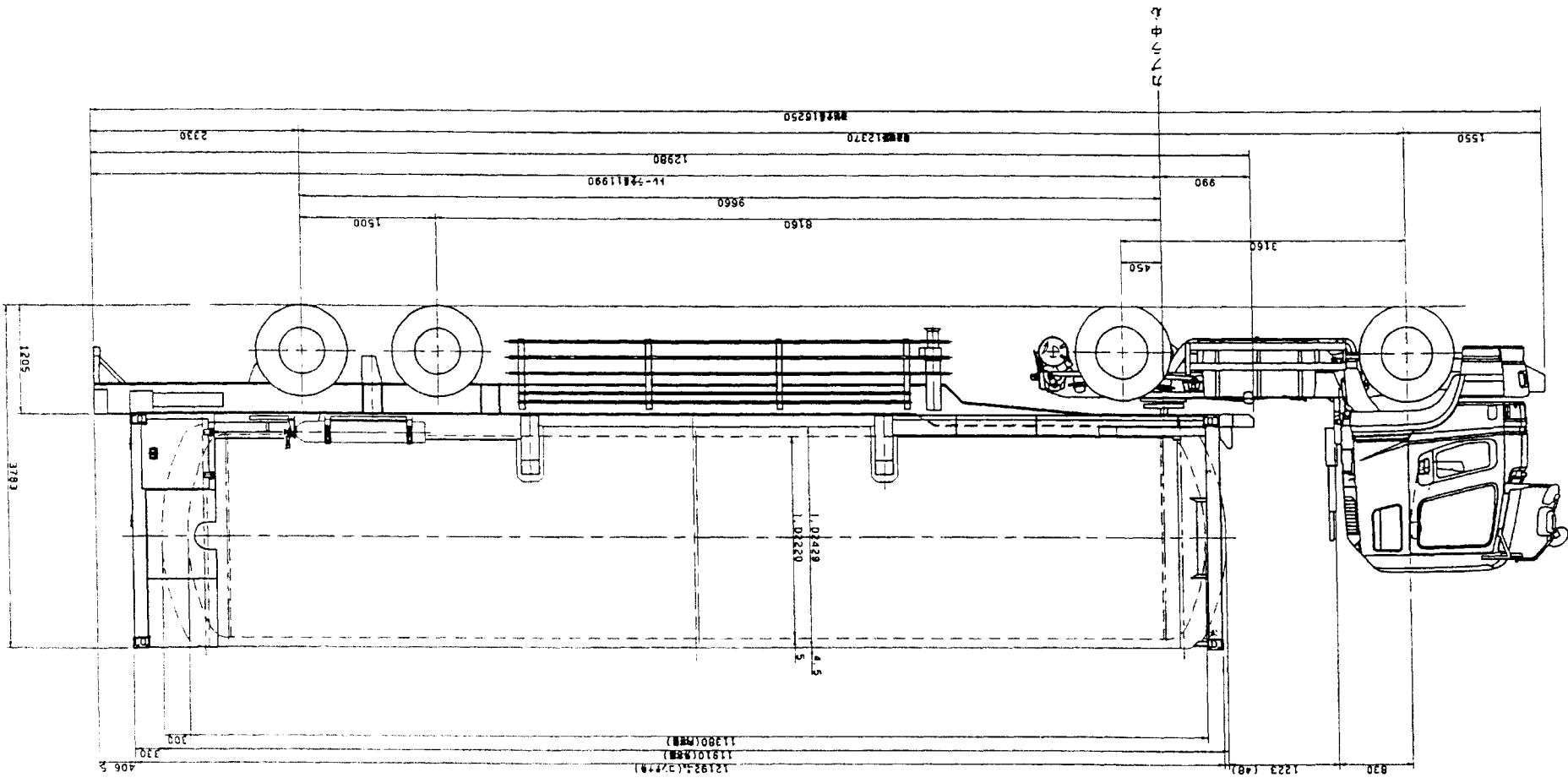
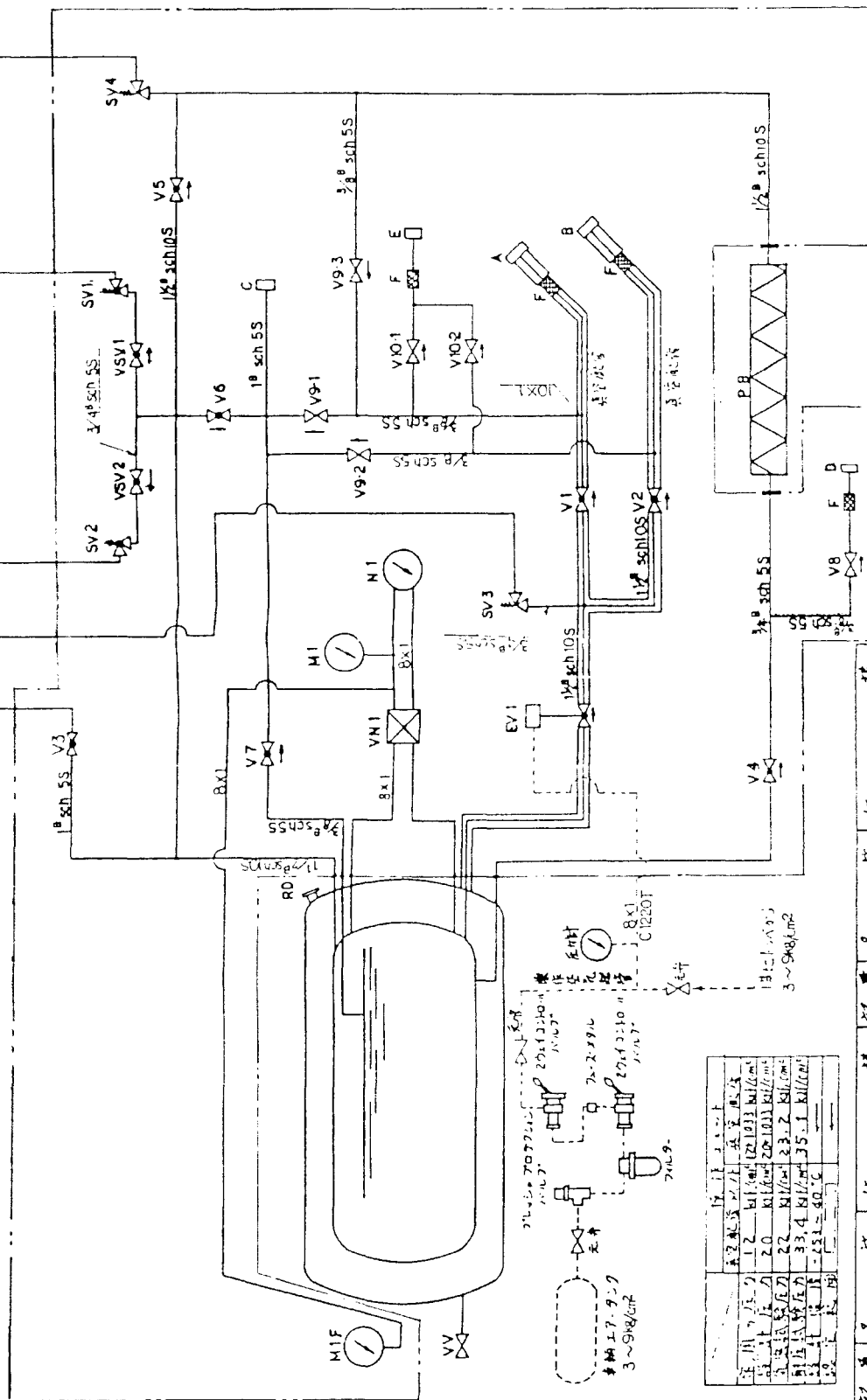


図 5.3.1-2 日本で本年3月より運行をはじめた液体水素コンテナの概観図

NE 放出



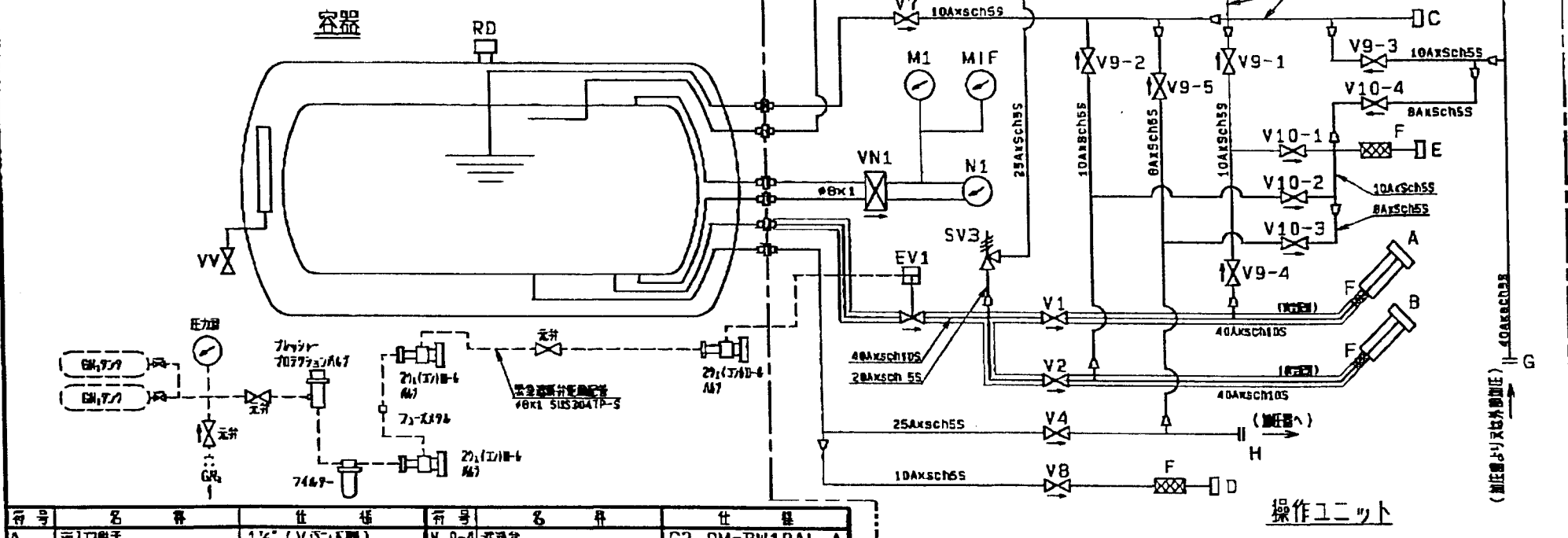
→は管配付方向を示す。
 減圧の設備はSV3, SV4, P.S.
 図上には付属品を示す。

減圧部は管配付方向を示す。
 図上には付属品を示す。
 減圧部は管配付方向を示す。
 図上には付属品を示す。

記号	名称	仕様	型式	単位	数量	備注
V 1	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	SV 3	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 2	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	SV 4	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 3	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	VN 1	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 4	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	M 1	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 5	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	M 1	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 6	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	N 1	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 7	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	A	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 8	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	B	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 9-1	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	C	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 9-2	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	D	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 9-3	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	E	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 10-1	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	F	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
V 10-2	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	NF	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
VSV 1	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	PA	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
VSV 2	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	RD	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
EV 1	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼	VV	個	1	1/2" 20° 炭素鋼
SV 1	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼		個	1	1/2" 20° 炭素鋼
SV 2	吸入口弁	1/2" 20° 炭素鋼		個	1	1/2" 20° 炭素鋼

図 5.3.1-3

仕様	容器	配管	配管
常用の圧力 (MPa)	0.4	0.4	0.5013
設計圧力 (MPa)	0.4+0.1013	1.0	1.0+0.1013
気密試験圧力 (MPa)	0.56	1.1	1.21
耐圧試験圧力 (MPa)	0.84	1.5	1.65
設計温度 (°C)	-253~+40°		
認定範囲			



行号	名	仕様	行号	名	仕様
A	真空口継手	1½" (Vバンド型)	V 9-4	充満弁	G2. DM-BW10AL Δ
B	真空口継手	1½" (Vバンド型)	V 9-5	充満弁	G2. DM-SW8AL Δ
C	ガス回収口継手		V10-1	ヘリウムガス置換弁	G2. DM-BW10AL Δ
D	分岐口継手		V10-2	ヘリウムガス置換弁	G2. DM-BW10AL Δ
E	ヘリウムガス継手		V10-3	ヘリウムガス置換弁	G2. DM-SW8AL Δ
F	フィルター		V10-4	ヘリウムガス置換弁	G2. DM-SW8AL Δ
G	加圧ガス供給口継手	JIS10K-40A FL. G	EV1	緊急停止弁	EV2. DM-BW40A O
H	加圧用減出口継手	JIS10K-25A FL. G	VSV1	主安全弁元弁	G2. DM-BW20AS O
V1	真空口弁	G2. DM-BW40AL O	VSV2	副安全弁元弁	G2. DM-BW20AS O
V2	真空口弁	G2. DM-BW40AL O	SV1	主安全弁	HL-φ7-0.48M O
V3	真空口弁	G2. DM-BW25AL O	SV2	副安全弁	HL-φ7-0.2M O
V4	加圧ガス入口弁	G2. DM-BW25AL O	SV3	配管安全弁	HL-φ7-0.5M Δ
V5	加圧ガス供給弁	G2. DM-BW40AL O	VN1	真面目元弁	N2. DM-S½ Δ
V6	ガス回収弁	G2. DM-BW25AL O	N1	真面目	真面目
V7	検漏弁	G2. DM-BW10AL O	M1	内容器圧力計	BU½-φ100-1.0M
V8	分岐弁	G2. DM-BW10AL O	M1F	外部圧力計	BU½-φ100-1.0M
V 9-1	充満弁	G2. DM-BW10AL Δ	NF	逆火防止器	
V 9-2	充満弁	G2. DM-BW10AL Δ	RD	安全装置	破断板
V 9-3	充満弁	G2. DM-BW10AL Δ	VV	真空口弁	ダイヤフラム弁 40A

一 弁の取付方向を示す

配管の材質はSUS304TP-S

Oは附属品, Δは認定品を示す

図 5.3.1-4 図 5.3.1-2 のフローシート

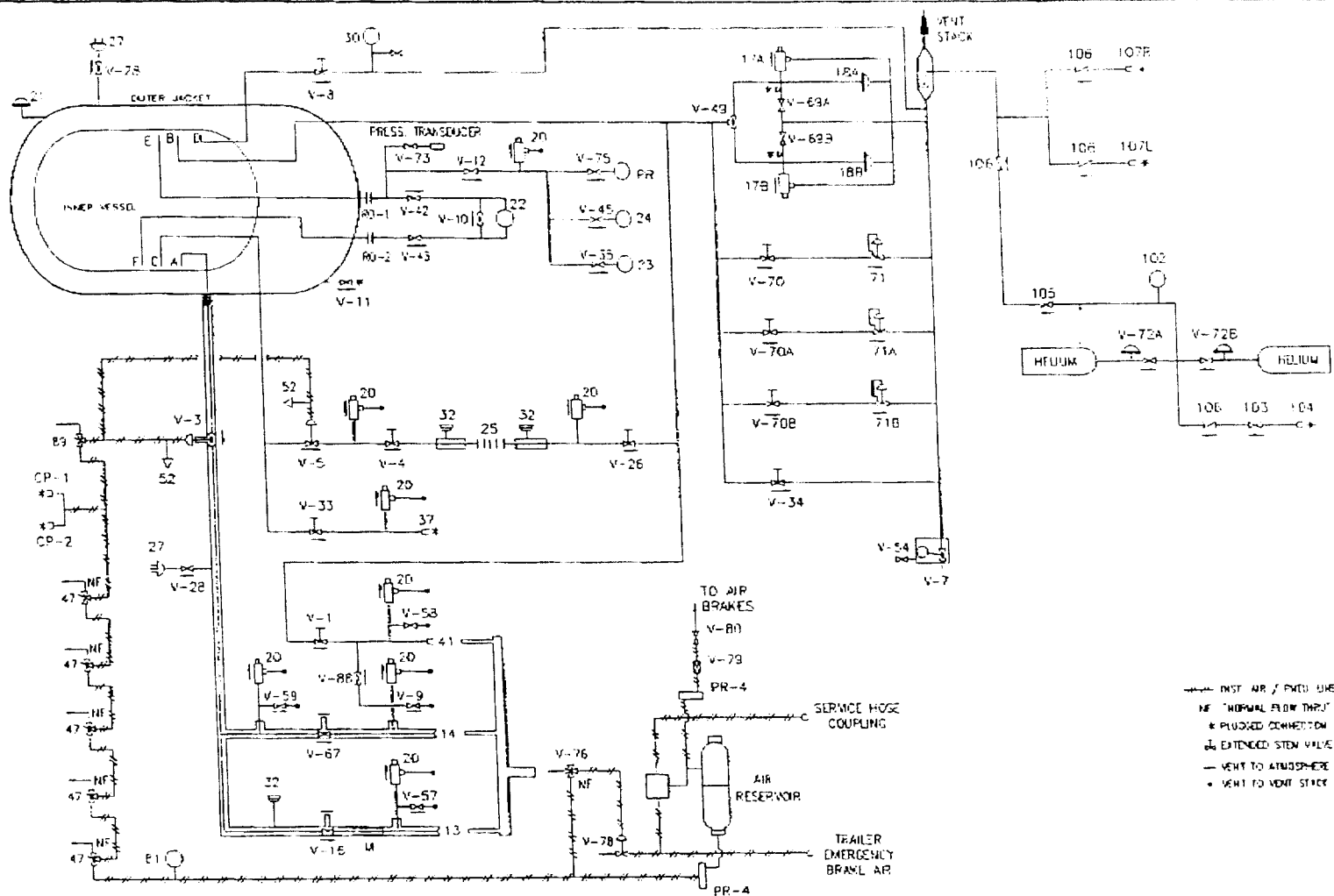


図 5.3.1-5 カナダで本年より運行を開始した大型セミ・トレーラーのフローシート

ITEM Article	DESCRIPTION Signallement	SET PRESSURE Pression	ITEM Article	DESCRIPTION Signallement	SET PRESSURE Pression	ITEM Article	DESCRIPTION Signallement	SET PRESSURE Pression
V-1	GAS PHASE RETURN VALVE Vanne de retour phase gazeuse		30	FILL TERMINATION INDICATOR Indicateur de trop plein		V-72A	HELIUM BOTTLE ISOLATION VALVE Robinet d'isolation des bouteilles d'hélium	25438 KPA (3700 PSIG)
V-3	LIQUID PHASE REMOTE SHUT-OFF VALVE Vanne de fermeture à distance phase liquide		32	PPING DIRECTION AND RELIEF CONNECTION Raccord d'évacuation et de sûreté de la système		V-72B	HELIUM BOTTLE ISOLATION VALVE Robinet d'isolation des bouteilles d'hélium	25438 KPA (3700 PSIG)
V-4	PB COIL LIQUID INLET VALVE Vanne d'entrée liquide, Serpentin BP		V-33	LIQUID SAMPLE VALVE Robinet d'échantillonnage		V-73	PRESSURE TRANSDUCER ISOLATION VALVE Robinet d'isolation du senseur de pression	
V-5	PB COIL REMOTE SHUT-OFF VALVE Vanne de fermeture à distance Serpentin BP		V-34	BLOWDOWN VALVE Vanne de mis à l'air		V-75	PRESSURE RECORDER ISOLATION VALVE Robinet d'isolation de l'enregistreur de pression	
V-7	VENT STACK AUTO-DRAIN VALVE Auto-drain, conduite de mis à l'air		V-35	FRONT PRESSURE GAUGE SHUT-OFF VALVE Robinet d'isolation du manomètre avant		V-76	HOSE INTERLOCK SWITCH Interrupteur inter-verrouillage des flexibles	
V-8	FULL TRYCOCK Robinet de top plein		37	SAMPLE CONNECTION Raccord d'échantillonnage		V-78	AIR STARTER VALVE Valve de démarrage pneumatique	
V-9	LIQUID FILL PURGE VALVE Robinet de purge, remplissage liquide		41	GAS RETURN CONNECTION Raccord retour de gaz		V-79	AIR CONTROL LEVELING Conducteur de niveau d'air comprimé	
V-10	LIQUID LEVEL GAUGE BYPASS VALVE Robinet de déboussement, indicateur de niveau		V-42	LIQUID LEVEL GAUGE, LIQUID PHASE ISOLATION VALVE Robinet d'isolation de l'indicateur de niveau liquide		V-80	AIR DUMP Valve de déchargement pneumatique	
V-11	TANK EVACUATION VALVE Vanne d'évacuation de l'espace annulaire		V-43	LIQUID LEVEL GAUGE, GAS PHASE ISOLATION VALVE Robinet d'isolation de l'indicateur de niveau gaz		B1	AIR PRESSURE GAUGE manomètre d'air	
V-12	PRESSURE GAUGE ISOLATION VALVE Robinet d'isolation des manomètres		V-45	REAR PRESSURE GAUGE SHUT-OFF VALVE Robinet d'isolation du manomètre arrière		V-88	LIQUID - GAS BYPASS VALVE Vanne de déboussement Gaz - Liquide	
13	LIQUID DISCHARGE CONNECTION Raccord de déchargement		47	TOGGLE SWITCH VALVE FOR LIQUID REMOTE SHUT-OFF Interrupteur des vannes de fermeture à distance		B9	PNEUMATIC, DIVERTER SWITCH Interrupteur de dérivation pneumatique	
14	LIQUID FILL CONNECTION Raccord de remplissage		V-49	MAIN RELIEF DIVERTER VALVE Vanne de dérivation des soupapes de sûreté		102	FIRE ABATEMENT SYSTEM PRESSURE GAUGE manomètre, système d'abattement d'incendie	
V-16	LIQUID DISCHARGE VALVE Valve de déchargement liquide		52	FUSIBLE PLUG Fusible		103	HELIUM BOTTLE FILL VALVE Robinet de remplissage des bouteilles He	
17A	INNER VESSEL PRESSURE RELIEF VALVE Soupape de sûreté du réservoir interne	1103 KPA (160 PSIG)	V-54	VENT STACK PURGE VALVE Robinet de purge de la conduite de mis à l'air		104	HELIUM BOTTLE FILL CONNECTION Raccord de remplissage des bouteilles He	
17B	INNER VESSEL PRESSURE RELIEF VALVE Soupape de sûreté du réservoir interne	1103 KPA (160 PSIG)	V-57	LIQUID DISCHARGE PURGE VALVE Robinet de purge de déchargement		105	FIRE ABATEMENT BALL VALVE Robinet d'abattement d'incendie	
18A	INNER VESSEL BURST DISK Disque éjectable du réservoir interne	1655 KPA (240 PSIG)	V-58	GAS RETURN PURGE VALVE Robinet de purge de ligne liquide		106	FIRE ABATEMENT CHECK VALVE Clapet anti-retour, système d'abattement d'incendie	
18B	INNER VESSEL BURST DISK Disque éjectable du réservoir interne	1655 KPA (240 PSIG)	V-59	LIQUID LINE PURGE VALVE Robinet de purge de ligne liquide		107L	FIRE ABATEMENT SYSTEM QUICK CONNECTION Raccord du système d'abattement d'incendie	
20	LINE RELIEF VALVES Soupapes de sûreté de ligne	1379 KPA (200 PSIG)	V-67	LIQUID FILL VALVE Vanne de remplissage liquide		107R	FIRE ABATEMENT SYSTEM QUICK CONNECTION Raccord du système d'abattement d'incendie	
21	VACUUM JACKET RELIEF DEVICE Dispositif de sûreté de l'espace annulaire		V-69A	MAIN SAFETY PURGE Purge des soupapes de sûreté		CP-1	AIR QUICK CONNECTION Raccord système pneumatique	
22	LIQUID LEVEL GAUGE Indicateur de niveau liquide		V-69B	MAIN SAFETY PURGE Purge des soupapes de sûreté		CP-2	AIR QUICK CONNECTION Raccord système pneumatique	
23	INNER VESSEL PRESSURE GAUGE (FRONT) Manomètre de pression du réservoir interne (Avant)		V-70	ROAD RELIEF SHUT-OFF VALVE Robinet de détenteur de route		PR	PRESSURE RECORDER Enregistreur de pression	
24	INNER VESSEL PRESSURE GAUGE (REAR) Manomètre de pression du réservoir interne (Arrière)		V-70A	ROAD RELIEF SHUT-OFF VALVE Robinet de détenteur de route		RO-1	FLOW RESTRICTING ORIFICE Orifice de restriction	
25	PRESSURE BUILD-UP COIL Serpentin bâtisseur de pression		V-70B	ROAD RELIEF SHUT-OFF VALVE Robinet de détenteur de route		RO-2	FLOW RESTRICTING ORIFICE Orifice de restriction	
V-26	PB COIL GAS OUTLET VALVE Vanne de sortie gaz, Serpentin BP		71	ROAD VALVE Détendeur de route	117 KPA (17 PSIG)	PR-4	PRESSURE PROTECTING Protecteur de surpression	
27	VACUUM PROBE Sonde thermique de vide		71A	ROAD VALVE Détendeur de route	344 KPA (50 PSIG)	M	FLOWMETER Compteur	
V-28	VACUUM PROBE SHUT-OFF VALVE Sûreté de la sonde thermique de vide		71B	ROAD VALVE Détendeur de route	928 KPA (135 PSIG)			

フラッシュ・ロス

液体水素・液体窒素・液体酸素・液体アルゴン

加圧された貯蔵タンクから大気圧の他のタンクへ、低温の液体を移送する際、フラッシュによってガス化する量を%で示す。(移送途中のガスの温度上昇、移されるタンクの冷却によるガス化は含んでいない)

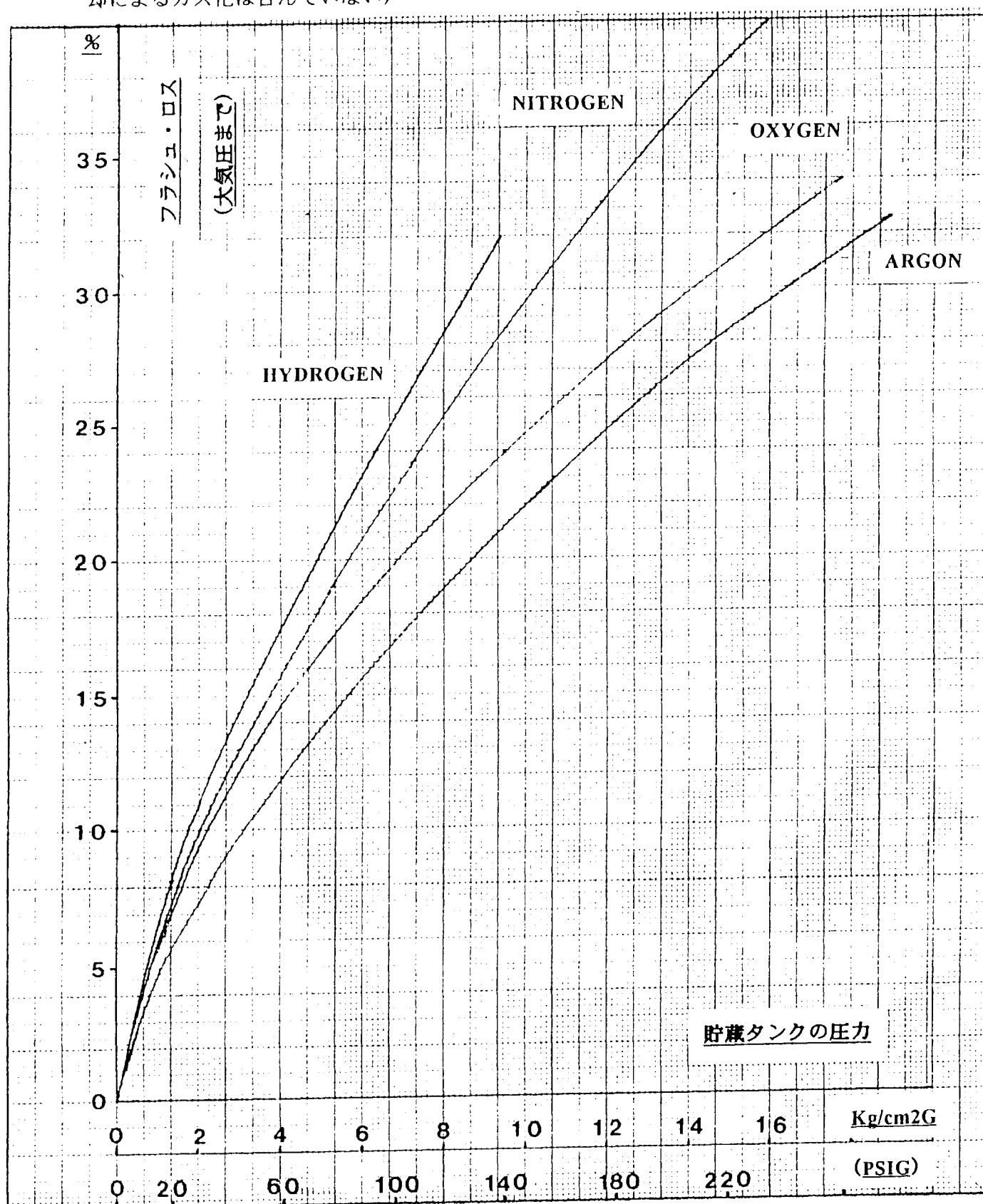


図 5.3.1-9 液体水素フラッシュによるガス発生量と他の低温ガスの比較

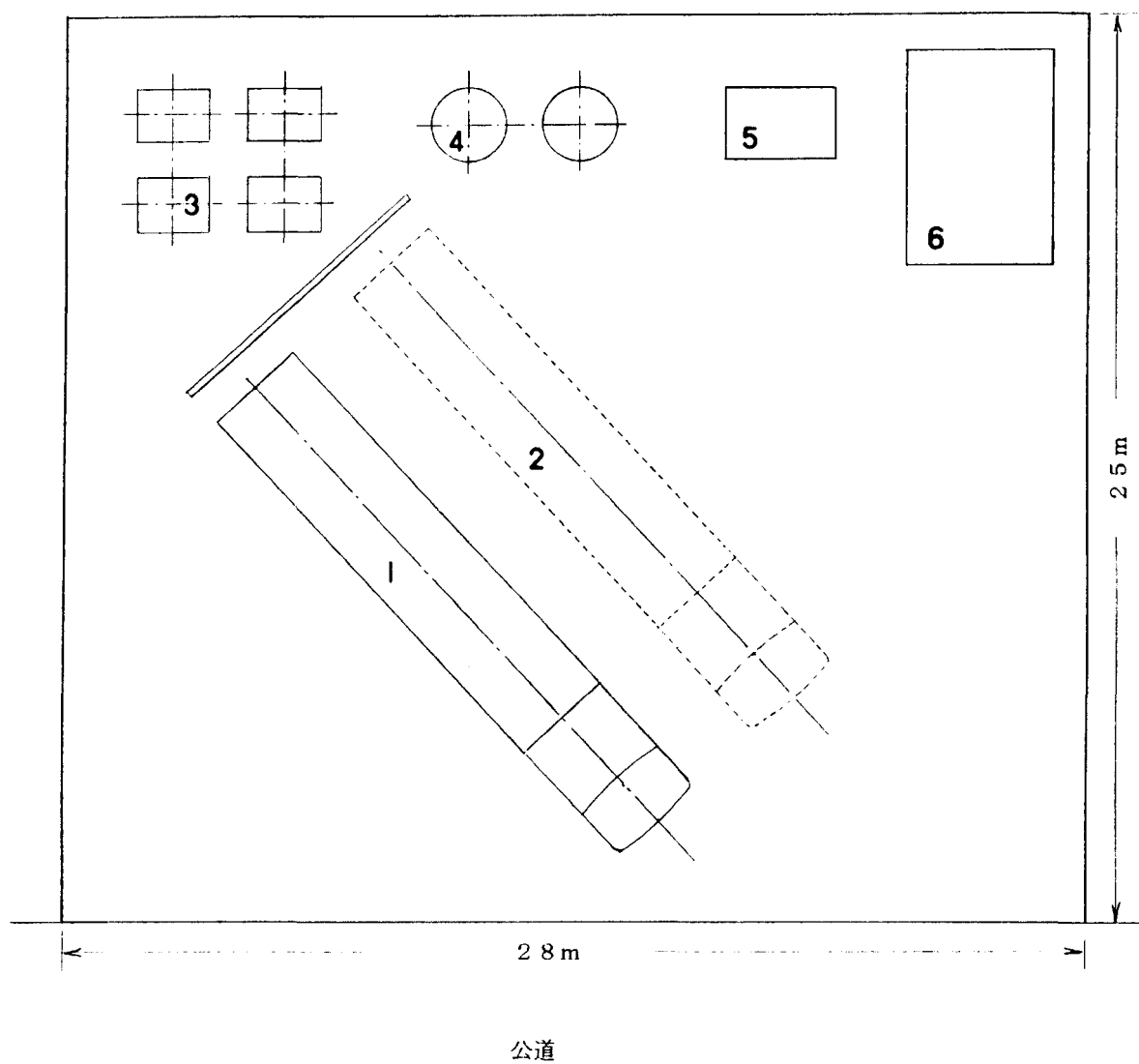


図 5.3.1-10 600KW 水素ディーゼル用 配置図

- 1 : コンテナ留め置き場所
 - 2 : コンテナ交換用スペース
 - 3 : 蒸発器
 - 4 : パッファータンク
 - 5 : 制御・計測室
 - 6 : 事務所
- 土地 $25\text{ m} * 28\text{ m} = 700\text{ m}^2$

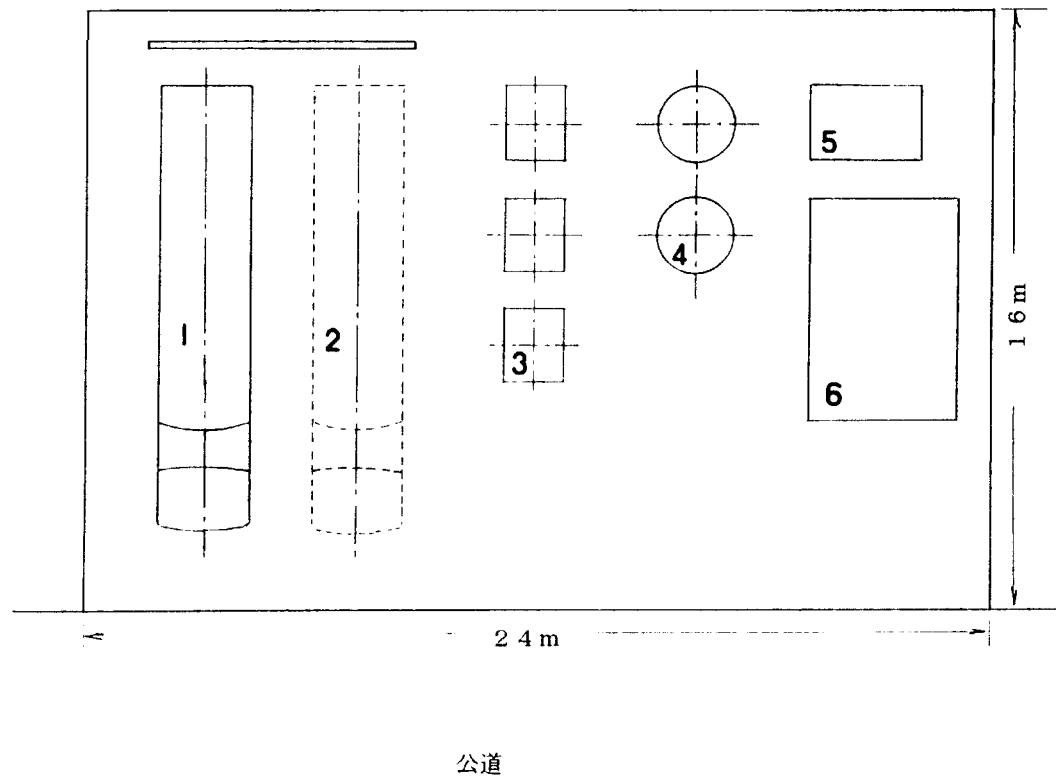


図 5.3.1-11 自動車用水素スタンド 配置図

- 1 : タンクローリー留め置き場所
 - 2 : タンクローリー交換用スペース
 - 3 : 蒸発器
 - 4 : バッファータンク
 - 5 : 制御・計測室
 - 6 : 事務所
- 土地 $16\text{ m} \times 24\text{ m} = 384\text{ m}^2$

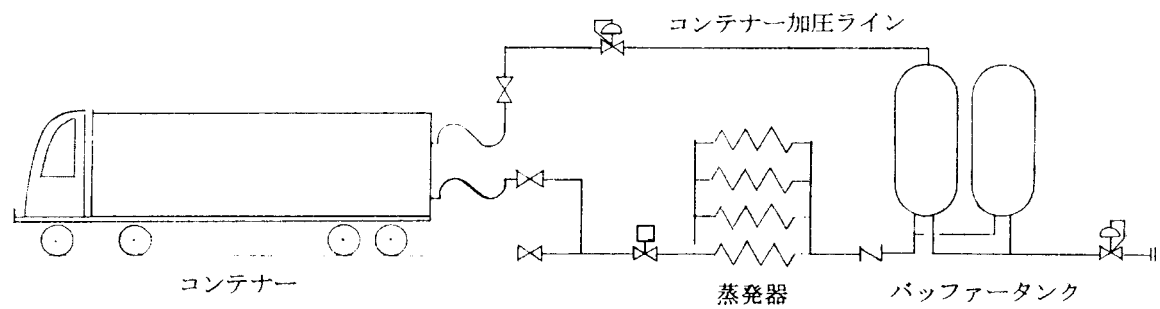


図 5.3.1-12 コンテナによる水素供給 フローシート

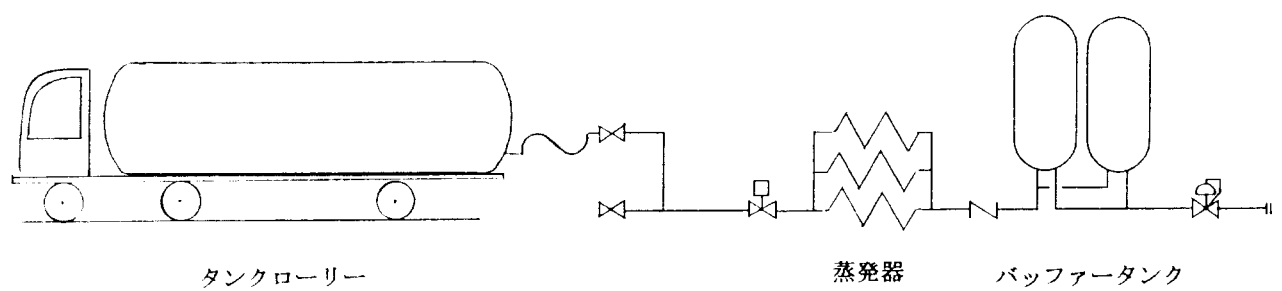


図 5.3.1-13 タンクローリーによる水素供給 フローシート

5. 4 まとめ

平成10年度は、第1期研究計画の最終年度にあたり、過去3年間の調査・検討で得られた結果について総括的検討・整理を行った。すなわち、想定されたモデル都市での水素供給のシステム構成、需要先の消費量と要求圧力、液体水素原料基地からの輸送方法、需要先への供給方法や配置図、消費量による設備の比較、行動輸送の制約条件などについて総括整理した。

また、水素エネルギーシステムが、社会に導入されていくシナリオは、小規模な水素消費サイトが順次増加してゆきながら、水素エネルギーの利用が徐々に浸透して行くであろうという観点から、自動車用水素供給ステーションに注目し、大規模貯蔵タンクからの水素供給ステーションと水素消費サイトでの小規模な水素製造を含む水素供給（スタンドアローン）ステーションについて検討を行った。水素供給を受ける自動車は、水素吸蔵合金タンク搭載型を主対象としたが、それ以外の方式では高压ガス容器搭載型と液体水素タンク搭載型についても検討とした。

具体的な水素供給方法として、大規模貯蔵タンクからの水素供給ステーションは、

- ① 液体水素コンテナ輸送と②高压ガストレーラー輸送

一方、水素消費サイトでの小規模水素製造型水素供給ステーションは、

- ①都市ガス改質型（LPG改質型を含む）、②メタノール改質型、③アルカリ水電解型
④固体高分子電解質水電解型、⑤太陽電池—固体高分子電解質水電解型

の7種類を選定した。

これらの自動車用水素供給ステーションに対して、具体的なシステムフローを提示し、更に水素供給能力 300 Nm³/h の各水素供給ステーションに対する

- ① 水素供給コスト
- ② エネルギー効率
- ③ 水素供給ステーションの設置
- ④ 各水素供給ステーション将来的見通し

を明らかにしている。

最後に、第II期研究開発では、水素社会実現の第一歩として、最も実現性の高い自動車用水素供給ステーションに注目し、その開発・推進をするための研究・開発課題を提案している。

- ① 各構成機器間のエネルギーバランスを考慮した全体システムの最適設計と安全かつ効率的な運転を可能とする集中制御技術の開発。
- ② 水素供給ステーションへの設置に適したパッケージ型機器の開発。
- ③ 車載水素吸蔵合金タンクに対して、漏洩なく確実に接合されるコネクタの開発と水素を安全かつ自動的に急速充填するための充填制御技術の開発。
- ④ 実証試験を通じたシステムの信頼性、操縦性、経済性、安全性の検証。

あとがき

平成5年にスタートしWE-NETの第Ⅰ期は6年目の今年度で終了し、平成11年度からは第Ⅱ期に入る。当初のWE-NETの全体構想では、水力、太陽光などの再生可能エネルギーを利用して水素を製造し、輸送に適した形に変換した後、大量エネルギー需要地へ長距離輸送・貯蔵し、これを主として水素燃焼タービンによる比較的大規模の発電に供することを想定して、水素利用国際クリーンエネルギーネットワークの世界的導入を可能とする技術の確立を目的としていた。この中で、サブタスク7「水素利用技術に関する調査・検討」では、水素燃焼タービンを除いたその他の水素利用技術を調査・検討の対象としてきた。各種の分散型水素利用を含めた体系的な検討により具体的な水素エネルギー利用社会の具体的なイメージを描くという重要な役割は担ってはいたものの、WE-NETの全体構想の中では、どちらかということ初めはサブ的な存在であった。しかし、30年近い長期にわたって段階的に水素エネルギー導入をはかっていく上で、短中期的に小型分散型の水素利用技術を現実的に可能なものから順次実現していくことの重要性が第Ⅰ期後半から強く認識されることとなり、サブタスク7から提案された新しい水素利用技術のいくつかがWE-NETの第Ⅱ期計画で、短中期的に実現すべき有望技術として位置づけられるに至っている。

このような状況の中、平成10年度のサブタスク7での調査・検討では、平成7年度、8年度、9年度の検討結果を踏まえて、動力発生、輸送機関、酸水素燃料電池、冷熱利用、水素供給システムの5つのWGによりさらに詳細な具体的検討が行われただけでなく、平成11年度からのWE-NET第Ⅱ期計画への発展移行を念頭に置いた検討が重点的に加えられている。動力発生WGにおいては、アルゴン循環型および水蒸気循環型水素ディーゼルコジェネレーションの2方式の実現性を実証するための燃焼試験を実施し、第Ⅱ期での要素技術開発への移行の目途をつけるとともに、水素噴射および水素着火等の要素技術の検証試験を行った。輸送機関WGでは、水素燃料電池自動車の本格的導入を前提にその導入シナリオを作成するとともに、水素自動車に関する環境LCAを実施した。燃料電池WGでは、純水素固体高分子燃料電池の将来の市場調査を電気事業用、産業用、民生業務用、移動発電装置用、自動車用等について実施した。冷熱利用WGでは、液体水素の冷熱を利用した分散型酸素製造装置として、酸素製造装置とHeブレイトンサイクルの複合サイクル、低温VSA、深冷法などについて、酸素製造電力原単位および経済性の比較検討が行われた。水素供給システムWGでは、多量の水素輸入までの当面の水素自動車への水素供給を前提とした各種方式の分散型水素供給ステーションについて、その具体的な形態およびコストについて調査・検討が行われた。

気候変動枠組み条約第3回締約国会議（京都会議、COP3）以降、地球環境保全に対する一般の人々の認識が一段と深まっている。定置型の大規模発電所などでは高効率クリーン化やCO₂の回収などが比較的容易にはかれるのに対して、小型分散型システムではこれまでこれが困難とされてきたが、水素をエネルギー源として利用することによりこの問題に対して大きなブレイクスルーが起きる期待が高まっている。水素は二次エネルギーであるから必ず他の一次エネルギー源を要するため、ローカルではなくグローバルな環境保全と一次エネルギー源の節約、および再生可能エネルギー利用可能量の現実的な限界を考えると、水素エネルギーの利用により格段の総合的な高効率化が実現できなければ地球環境保全の上での寄与は大きくなり得ない。水素エネルギー導入のメリットは、単に水素燃焼がクリーンだからというのではなく、水素だからこそ原理的に可能となる高効率・クリーンな利用形態があること、さらに多様な一次エネルギー源のベストミックスや多彩なネットワークエネルギー利用によるシステムとして

の高効率化も可能となる点にある。

サブタスク7で検討対象としてきた各種分散型水素利用技術は、いずれもこのようなメリットを生かし得るものであると考えている。ただ、これまでの検討では、各水素利用技術単独システムの検討が主体であったが、今後は、各個別技術間相互の連携と用途の住み分けを含めて、水素利用社会についてLCA的な環境インパクト極小の観点にも重点をおいたエネルギーシステムとしての最適化について、さらに深い具体的な検討を加えていかななくてはならないと考えている。WE-NET第II期においては、現在のサブタスク7の各個別技術WGのいくつかがそれぞれ別個の委員会になるのは好ましいとしても、これらの委員会間の有機的な連携が効果的に機能するしくみが強く望まれる。

サブタスク7の活動では多様な水素利用技術を具体的に取り上げているため、多くの専門家の方々や参加企業からの貴重な情報や資料を数多く提供していただいた。また、調査・検討において各WGの主査と委員の方々には献身的な御協力をいただいた。また、エンジニアリング振興協会の方々にはいろいろな面で大変お世話になった。本報告書に対するこのような多大な貢献に対し、この場を借りて深く謝意を表する次第である。

最後に、サブタスク7の活動指針の基礎を築いて下さり、平成9年5月に急逝された前委員長の故土方邦夫東工大教授に対して、WE-NET第I期としてのサブタスク7が成功裡に終了するにあたり深く哀悼と感謝の意を表したい。

「サブタスク7 水素利用技術に関する調査・検討」委員会
委員長 岡崎 健（東京工業大学 工学部 機械科学科教授）

付録1

研究発表リスト

①表 題 目： 水素ディーゼルエンジンシステムの開発

発 表 形 態： 講演 （エン振興 ‘98研究成果発表会）

主 催： エンジニアリング振興協会

発 表 者： 古谷 博秀

発 表 日： 平成10年7月7日

②表 題 目： 海外における水素自動車と水素ステーションの開発現状

発 表 形 態： 講演 （エン振興 ‘98研究成果発表会）

主 催： エンジニアリング振興協会

発 表 者： 岡野 清(エンジニアリング振興協会)

発 表 日： 平成10年7月7日

③表 題 目： 水素供給ステーションの検討と課題

発 表 形 態： 講演 （エン振興 ‘98研究成果発表会）

主 催： エンジニアリング振興協会

発 表 者： 橋本 辰彦(岩谷産業(株))

発 表 日： 平成10年7月7日

④発 表 題 目： 世界の燃料電池自動車の開発動向とその課題

発 表 形 態： 講演 （第7回 固体高分子型燃料電池分科会）

主 催： (財)大阪科学センター

発 表 者： 岡野 清・ (エンジニアリング振興協会)

発 表 日： 平成10年8月29日

⑤発 表 題 目： 水素利用クリーンエンジンの基礎研究

発 表 形 態： 社内論文 （三菱重工技報）

主 催： 三菱重工業(株)

発 表 者： 石田 裕幸 （三菱重工業(株)）

発 表 日： 平成10年11月 未予定

⑥表 題 目： 水蒸気下における水素、酸素、水蒸気混合の燃焼特性

発 表 形 態： 講演 （第12回世界水素エネルギー会議報告会）

主 催： 水素エネルギー協会

発 表 者： 古谷 博秀 (通産省 工業技術院 機械技術研究所)

発 表 日： 平成10年10月29日

⑦表 題 目： 水素自動車と水素ステーションの開発状況

発 表 形 態： 講演 （第12回世界水素エネルギー会議報告会）

主 催： 水素エネルギー協会

発 表 者： 岡野 清一（エンジニアリング振興協会）

発 表 日： 平成10年10月29日

⑧表 題 目： 急速圧縮された水素—酸素—アルゴン予混合気の

ArFエキシマレーザによる着火

発 表 形 態： 講演 （第36回 燃焼シンポジウム）

発 表 者： 古谷 博秀（通産省 工業技術院 機械技術研究所）

発 表 日： 平成10年11月18日

⑨表 題 目： 水素ディーゼルエンジンシステムの開発

発 表 形 態： 講演 （WE-NET 水素エネルギーシンポジウム）

主 催： エンジニアリング振興協会

発 表 者： 古谷 博秀（通産省 工業技術院 機械技術研究所）

発 表 日： 平成11年2月25日

⑩表 題 目： 水素自動車導入シナリオの研究

発 表 形 態： 講演 （WE-NET 水素エネルギーシンポジウム）

主 催： エンジニアリング振興協会

発 表 者： 蓮池 宏（エネルギー総合工学研究所）

発 表 日： 平成11年2月25日

⑪表 題 目： 水素燃料電池自動車の LCA に関する研究

発 表 形 態： 講演 （WE-NET 水素エネルギーシンポジウム）

主 催： エンジニアリング振興協会

発 表 者： 小林 紀（日産自動車㈱）

発 表 日： 平成11年2月25日

⑫表 題 目： 純水素燃料電池の調査研究および今後の研究

発 表 形 態： 講演 （WE-NET 水素エネルギーシンポジウム）

主 催： エンジニアリング振興協会

発 表 者： 岡野 清一（エンジニアリング振興協会）

発 表 日： 平成11年2月25日

⑬表 題 目： 冷熱利用に関する調査・検討

発 表 形 態： 講演 （WE-NET 水素エネルギーシンポジウム）

主 催： エンジニアリング振興協会

発 表 者： 花田 卓爾 （日本エア・リキード(株)）

発 表 日： 平成11年2月25日

⑭表 題 目： 水素供給ステーションの検討とその課題

発 表 形 態： 講演 （WE-NET 水素エネルギーシンポジウム）

主 催： エンジニアリング振興協会

発 表 者： 松岡 美治 （エンジニアリング振興協会）

発 表 日： 平成11年2月25日

付録2 海外出張報告

項目	訪問先	訪問日	目的	対応者	概要
水素利用技術の調査・検討 (WE-NETサタスク7) 期間 平成10年 6月21日～25日 参加者 古谷 博秀(通産省 工業技術院 機械 技術研究所)	アルゼンチン ブエノスアイレス	6月21日 ～25日	国際水素エネルギー会議への参加 水蒸気雰囲気中における水素—酸素燃焼特性に関するエネルギー変換技術発表		水素エネルギー利用技術のうち、燃焼を利用したエネルギー変換技術の研究開発に関しては308件中水素エネルギー利用技術49件、うちエネルギー変換に関しては22件の発表がありセッションの半数をせめていた。 主としてWE-NETで開発中のガスタービンエンジンとディーゼルエンジンに関しての発表が多かった。なおドイツでは自動車の動力源として直噴式の水素ディーゼルエンジンをハイブリッドで使用するとの発表が有り、MAN、B\$W,Diesel AGとミュンヘン技術大学とで共同研究費実施されている。 論文「COMBUSTION PROPEERTIES OF ST ICMETRIC HYDROGEN-OXYGEN-STEAM MIXTURE IN STEAM ENVIRONMENT」 原文はプロシーディングp1479-1488を参照下さい。

項目	訪問先	訪問日	目的	対応者	概要
水素利用技術の調査・検討 (WE-NETサタスク7) 期間 平成10年 9月12日～18日 参加者 喜納政宏(エンジニアリング振興協会)	イギリス ロンドン	9月14日 ～16日	自動車工業用 燃料電池技術の セミナーへの参加 討論参加	IQPC LIMITED (英国、コンサルティング会社) 議長 Cliev Seymour, (ヨーロッパ燃料電池グループ社重役) John Wormald (オートボリス社)	セミナー形式による発表および今後の自動車用燃料電池の戦略についての技術討論に参加した。 発表件数は全部で17件有り日本から唯一トヨタ自動車製プリウスの発表があった。 参加者は約60名弱で日本の企業では出光、日本電装およびトヨタの方と名刺を交わした。発表の代表テーマは次の通りである。 1.輸送用燃料電池システム…IFC社 Joe King 2.燃料電池システム開発への戦略的アプローチ … ジョンソンマッセ Colin Jaffray 3.燃料電池自動車の開発…トヨタ 高橋 4.燃料電池自動車の燃料の経済性… GM Jon Bereisa 5.水素燃料電池自動車、Hypa-carへの道のり… ロッキーマウンテン研究所 Brett Trapp 6.自動車への燃料電池の応用…VW ,Olaf Duebel 7.燃料電池用改質器… アーサDリトル Richard Stobart 8.DOEの燃料電池プログラム Pandit Patil 参加人員 6名。 DOEの方針に注視する。二酸化炭素問題はアジア、中国、南アメリカの自動車の伸びがキーポイント。自動車分野では軽自動車用(市街地走行)およびバス車両が燃料電池車に代替すると予測。バイオガス車に関してはブラジルを手本に調査したらどうか。等の意見。

項目	訪問先	訪問日	目的	対応者	概要
水素利用技術の調査・ 検討 (WE-NETサタスク7) 期間 平成10年 11月16日～19日 参加者 岡野一清(エン振協)	Palm Springs Convention Center (パームスプリングス 、米国)	11月16日 ～19日	1998 Fuel Cell Seminarへの参加 世界の燃料電池 開発状況調査		Fuel Cell Seminarは2年毎に米国で開催される世界最大の燃料電池シンポジウムである。今回は過去最多の30ヶ国1200人が参加した。各種燃料電池と改質器の開発について185件の発表が行われた。 今回の特長は自動車関連の固体高分子型燃料電池とガソリンやメタノール改質器に関する発表が多かったことである。 米国のベンチャー企業がDOEのプロジェクトでBallardに匹敵する燃料電池の開発成果を出し、さらに性能向上の目標を掲げて開発を進めている状況の報告があった。ガソリン改質器の発表では多くの企業が起動時間の目標を2分程度に設定していたが、現状は6分程度である。実用レベルになるにはかなりの時間を要すると思われる。
	Palm Springs市の 交通局 Sunline Transit Authority (パームスプリングス 、米国)	11月17日	水素燃料電池自動車 Project の調査	Mr. Bill Clapper Mr. Richard Cromwell Mr. Bruce Finley	DOEほか政府機関が3年間で4.5M \$ 出資して水素バス、水素自動車、カートを導入するプロジェクトがPalm Springsで99年からスタートする。水素ステーションは水電解式が2台、太陽電池水電解式が1台設置される。自動車と水素ステーションは市の交通局 Sunline Transit Authorityが管理する。

本報告書の内容を公表する際はあらかじめ新エネルギー・
産業技術総合開発機構水素・アルコール・バイオマス技術開
発室の許可を受けて下さい。

電話 03-3987-9481