

研究論文

燃料電池自動車導入に伴う運輸部門 エネルギーシステムへの影響

Analysis of the Impacts of Fuel Cell Vehicles on Energy Systems in the Transportation Sector in Japan

衣笠 良*・中田 俊彦**

Ryo Kinugasa

Toshihiko Nakata

(原稿受付日2001年11月21日, 受理日2002年10月16日)

Abstract

This research examines the changes of energy system in the transportation sector having the fuel cell vehicles (FCV) in Japan. The concern with the FCV as an advanced transportation technology has been growing. The FCV is planned to be introduced in the transportation market in 2003 by the year around through automobile manufactures in Japan. The advantage of the FCV could be summarized as follows; (1) reduction of energy consumption with the high efficiency of fuel cells, (2) drastic reduction of carbon dioxide emissions in the transportation sector, (3) possibility of energy shift from petroleum to the other energy sources, such as natural gas and renewables. In order to the transitional introduction of the FCV, both fuel economy and energy choice need to be examined in terms of changes in energy systems and environmental concerns. We have developed eight patterns of FCV models and analyzed them by using an energy-economic model. We have found that the FCV is efficient in saving energy consumption and reducing carbon dioxide emission. In particular, when the fuel is supplied directly at onsite hydrogen station and the hydrogen is reformed from natural gas, the FCV shows most efficient performance with higher efficiency and lower costs.

1. 背景

1990年代後半に入り、環境問題、エネルギー問題を解決するための運輸部門の切り札として燃料電池自動車の導入が盛んに検討されている。バラード・パワー・システムズ社などで小型で高性能な燃料電池の開発が急速に進んだこと^{1, 2)}で、米国³⁾や日本で燃料電池自動車の開発及び導入が本格的に検討されるようになった。

燃料電池自動車の導入には、エネルギー消費量の抑制や二酸化炭素の排出量削減などの利点がある反面、自動車本体が高価であることや、燃料の供給のためのインフラ整備など解決しなければならない問題が多くある。

我が国では、運輸部門の二酸化炭素排出量は日本全体の約22%を占めており、今後も増加し続けるものと考えられる。運輸部門では、特に自動車からの二酸化炭素排出量が約88%を占めており、これをいかに削減するかが重要な課題となっている。

燃料電池自動車は、天然ガスやメタノールなど原油以外の資源を燃料源として利用できることから、原油から他の資源へのエネルギーシフトの可能性を持っていると考えられている⁴⁾。燃料源のほぼ全てを原油に依存している運輸部門にとって、原油以外の資源を燃料源とする輸送技術の開発や運輸システムの整備はきわめて重要である。

燃料電池自動車は、燃料源（原油、天然ガス、バイオマスなど）と、燃料供給形態（直接水素供給方式、改質器搭載方式）の組合せによっていくつかの方式が存在する。燃料電池自動車の方式によって、長期的な導入性、運輸部門のエネルギー消費量、二酸化炭素の排出量などに及ぼす影響が異なってくることが考えられている。このため、どの方式の燃料電池自動車が優れているのかについて、長期的視点に基づいて技術性能と経済性の両観点からの検討が必要となってくる。海外では、すでに多くの研究者によって解析が行われている。Hart⁵⁾は北米とヨーロッパ、そして日本を対象として、メタノールを液体燃料として利用する燃料電池自動車の導入について解析を行った。Thomas^{6, 7)}は米国を対象に、さまざまなタイプの燃料電池自動車の導入について解析を行った。Ogden⁸⁾は米国を対象に、燃料供給形態と燃料源によって異なる燃料電池自動車の経済性について解析を行った。Borgwardt⁹⁾はバイオマスを燃料源に用いる燃料電池自動車について解析を行った。Lipman¹⁰⁾は水素とメタノールを燃料源に用いる燃料電池自動車について費用解析を行った。

日本でも、蓮池¹¹⁾によって水素供給方法を中心とした水素燃料電池自動車の導入シナリオの検討が、石谷¹²⁾らによって燃料電池自動車のエネルギー効率評価が行われている。しかし、長期的視点に基づいて自動車の導入費用や市場競争力などの経済性とエネルギー効率（燃料効率、水素変換効率）の両面を考慮した研究は見あたらない。

本研究では、燃料源や燃料供給形態によって異なる燃料電池自動車の経済性と、エネルギー効率の両面を考慮する

* 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

** 〃 〃 技術社会システム専攻助教授

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉01

E-mail: nakata@cc.mech.tohoku.ac.jp

ために、新たにエネルギー・経済モデルを作成する。これを解析することによって、燃料電池自動車の導入による運輸部門のエネルギーシステムの変化と二酸化炭素排出量への影響を評価する。

2. 解析モデル

2.1. 日本モデル

本研究では、日本全体のエネルギー需給システムを対象として解析を行った。解析には、既に中田ら¹³⁻¹⁵⁾によって開発された日本モデルをもとに、旅客運輸部門の詳細なモデルを作成した。日本モデルは、日本全体を8個の最終需要家モジュール（産業部門、業務部門、家庭部門、運輸部門など）、9個の資源モジュール（原油、石炭、天然ガス、原子力、水力など）、そして、50個の技術変換モジュール（原油市場、ガス市場、電力市場、旅客運輸市場、貨物運輸市場など）に分類したものである。中田らは、日本モデルを用いて、ハイブリッド車の導入が運輸部門に及ぼす影響などについて解析した。本研究では、運輸部門、その中でも特に旅客運輸部門に焦点をあてて解析を行った。シミュレーション期間は、1999年から2044年までの45年間とした。

2.2. 旅客運輸モデル

旅客運輸部門について、表1に示すような燃料供給方式の7種類の燃料電池自動車FCV-AからFCV-Gを定義する。また各方式の燃料電池自動車がそれぞれ存在する旅客運輸

表1 各燃料電池自動車の燃料供給方式

Type	Fuel resource	Onsite reformer	Charged fuel to the vehicle	Onboard reformer
FCV-A	Petroleum	None	Gasoline	○
FCV-B	Petroleum	○	H ₂	None
FCV-C	Gas	○	Methanol	○
FCV-D	Gas	○	H ₂	None
FCV-E	Biomass	○	Methanol	○
FCV-F	Biomass	○ (Methanol→H ₂)	H ₂	None
FCV-G	*1	○	H ₂	None

*1 H₂ is derived from H₂O by electrolysis.

部門モデルを図1に示す。以下に各方式の特徴を示す。

(a) BAU

旅客自動車市場には燃料電池自動車は導入されず、従来型自動車（ガソリン自動車）とハイブリッド自動車だけが存在する。これは現状維持（BAU, Business As Usual）モデルである。

(b) FCV-1

FCV-Aを導入する旅客運輸モデルである。燃料源に原油を用い、原油はガソリンに精製された後、ガソリンスタンドで燃料電池自動車に供給される。燃料電池自動車は、搭載している改質器でガソリンから水素を取り出し燃料電池に供給して動力を得る。

(c) FCV-2

FCV-Bを導入する旅客運輸モデルである。（b）と同様

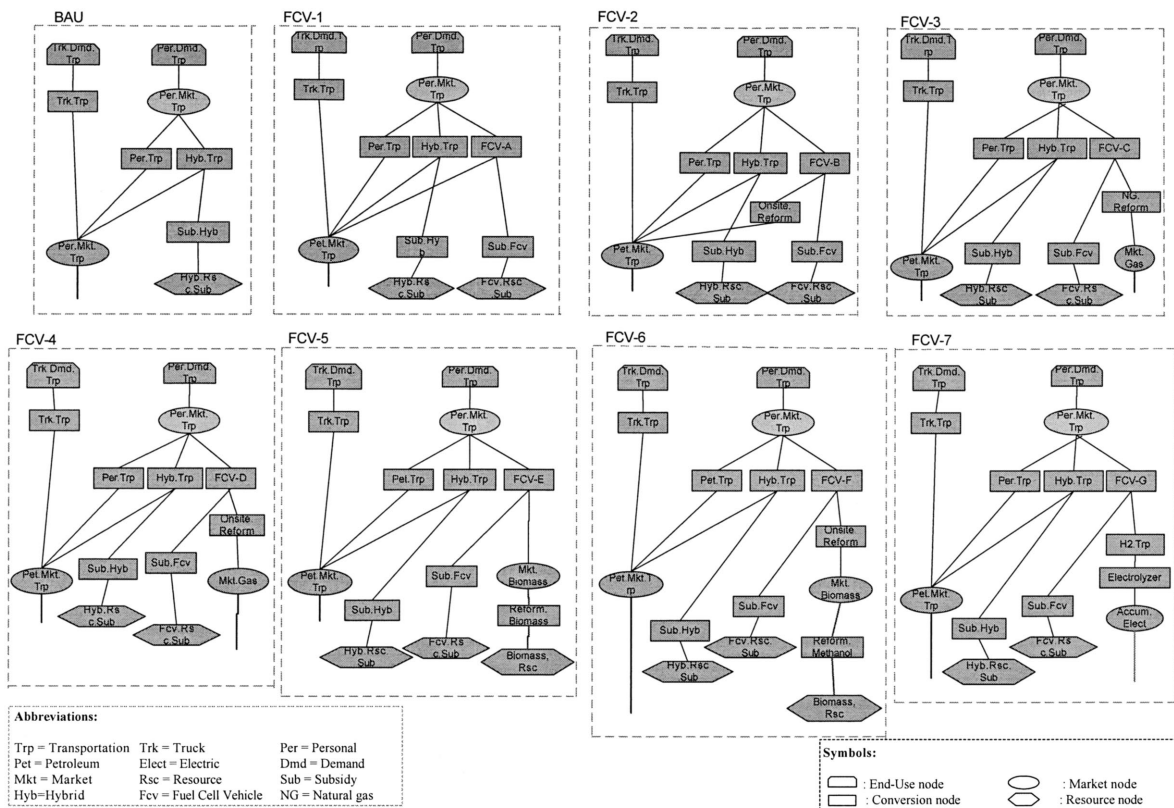


図1 各方式の運輸部門モデル

に燃料源に原油を用いるが、あらかじめ水素供給基地でガソリンから水素に改質した後 (Onsite Reform), 水素を直接燃料電池自動車 (FCV-B) に供給する。

(d) FCV-3

FCV-Cを導入する旅客運輸モデルである。燃料源に天然ガスを用い、天然ガスからメタノールを生成した後 (NG Reform), 既設のガソリンスタンドにて燃料電池自動車 (FCV-C) にメタノールを供給する。メタノールは車載の改質器で水素に改質される。

(e) FCV-4

FCV-Dを導入する旅客運輸モデルである。(d)と同様に燃料源に天然ガスを用いるが、水素供給基地にて天然ガスから水素に改質し (Onsite Reform), 燃料電池自動車 (FCV-D) に直接水素を供給する。

(f) FCV-5

FCV-Eを導入する旅客運輸モデルである。燃料源にバイオマスを用い、バイオマスからメタノールを生成する (Reform Biomass)¹⁶⁾。そして、既設のガソリンスタンドにて燃料電池自動車 (FCV-E) にメタノールを供給する。水素は車載の改質器でメタノールから生成される。

(g) FCV-6

FCV-Fを導入する旅客運輸モデルである。(f)と同様に燃料源にバイオマスを用いる。バイオマスからメタノールを生成した後 (Reform Biomass), 水素供給基地でメタノールから水素を取り出す (Onsite Reform)。燃料電池自動車 (FCV-F) には直接水素を供給する。

(h) FCV-7

FCV-Gを導入する旅客運輸モデルである。水素供給基地にて、水を電気分解して水素を製造し (Electrolyzer),

これを燃料電池自動車 (FCV-G) に供給 (H₂ Trp) する¹⁷⁾。

BAUからFCV-7までの各方式の燃料源から自動車出力までのエネルギーフローを図2に示す。() 内の数値はエネルギーの変換効率を示し、各要素の変換効率を掛け合わせたものが、全体のエネルギー効率となる。また、SCC, AOCは、水素供給基地や燃料電池自動車本体などの本体価格、運転コストをそれぞれ表している。これらの性能値は、従来型自動車の数値と文献値^{6-8, 11, 12, 16-30)}をもとに算出した。水素供給基地の建設費用は、文献値^{6, 24, 26, 29, 30)}に基づいて燃料源の発熱量、変換効率などを考慮して算出した。また、水素供給基地の運転コストは、既存の原油精製所の数値^{6, 29, 30)}をもとに算出した。

2.3. 解析ツール

本モデルの解析には、非線形最適化シミュレーションツールであるMETA・Netを用いた。META・Netは、米国のローレンス・リバモア国立研究所で開発された解析ツールで、エネルギー・経済モデルを取り扱うことができる³¹⁾。各種技術間の価格競合や供給量などの物理的制約条件、税などを考慮することができ、経済システムの発展におけるこれらの潜在的な環境への影響を評価することができる。

2.4. 設定条件

エネルギー経済モデルを用いた解析には前提条件として最終需要家ごとの価格弾性値が必要である。本解析に用いた日本の最終需要家 (産業部門、業務部門、家庭部門、運輸部門) ごとの価格弾性³²⁾を以下に示す。

産業部門	-0.340
商業部門	-0.240
家庭部門	-0.300
貨物運輸部門	-0.170

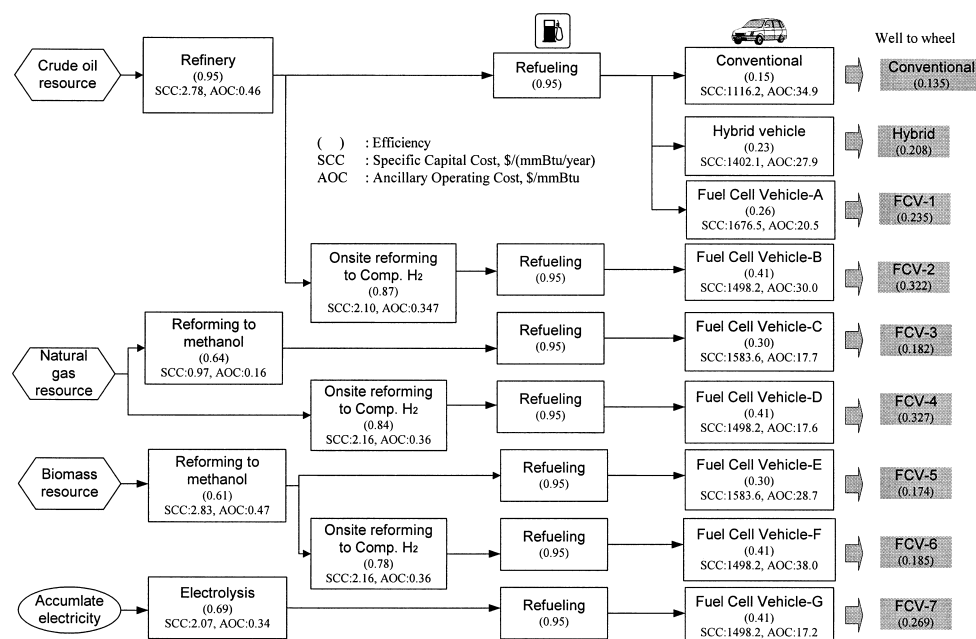


図2 エネルギーフロー

旅客運輸部門 -0.230

また本研究では、ハイブリッド自動車は1999年から、燃料電池自動車は2004年から普及が本格化し始めると仮定した。燃料電池自動車は導入開始後の10年間はハイブリッド自動車の導入実績を参考に、また導入開始10年目以降は、供給可能量が年率15%で成長するという上限を設定した。

3. 結果及び考察

3.1. 燃料電池自動車の旅客輸送コスト及び旅客輸送量

燃料電池自動車の旅客輸送コスト及び旅客輸送量について解析結果を示す。

はじめに、燃料電池自動車の旅客輸送コストを図3に示す。図中に示される従来型自動車とハイブリッド自動車の旅客輸送コストはFCV-1の場合のコストである。これらの旅客輸送コストは燃料電池自動車の導入によって、需要と供給の均衡が変化することから各モデルによって若干変化が生じている。従来型自動車の場合は2044年の時点で最大\$9/k passenger-mile、ハイブリッド自動車の場合は最大\$2/k passenger-mileの違いが生じている。燃料電池自動車の旅客輸送コストは1999年から2014年頃まで減少し、その後、ほぼ一定値をとるようになる。旅客輸送コストは、燃料供給方式が直接水素供給方式である方式(FCV-B, FCV-D)が最も低くなった。燃料源が原油の場合、直接水素供給方式であるFCV-Bは2044年時点で\$258/k passenger-mile、改質器搭載方式であるFCV-Aは\$280/k passenger-mileとなった。また、燃料源が天然ガスの場合では、直接水素供給方式であるFCV-Dは2044年で\$248/k passenger-mile、改質器搭載方式であるFCV-Cは\$268/k passenger-mileとなった。直接水素供給方式は、改質器搭載方式と比べて、改質器を搭載しないために自動車本体の重量が軽くなり、その結果として自動車のエネルギー効率が高くなる。そのため旅客輸送コストが低くなったと考えられる。

燃料供給形態が同じ場合、燃料源に天然ガスを用いた方式(FCV-C, FCV-D)が他の燃料源を用いた方式よりも旅客輸送コストが低くなった。燃料供給形態が直接水素供給方式である場合、燃料源が天然ガスであるFCV-Dと、燃

料源が原油であるFCV-Bでは2044年で\$10/k passenger-mileの差が生じた。また改質器搭載方式の場合、燃料源が天然ガスであるFCV-Cと、燃料源が原油であるFCV-Aでは2044年で\$12/k passenger-mileの差が生じた。これは、天然ガスを用いる燃料電池自動車は運転コスト(AOC)が、他の燃料源を用いる燃料電池自動車よりも低コストであるためだと考えられる。

つぎに、燃料電池自動車の旅客輸送量を図4に示す。旅客輸送量の伸びは旅客輸送コストに大きく依存する。旅客輸送コストに最も差があったFCV-DとFCV-Gとでは、旅客輸送量に11倍もの差が生じた。燃料源が同じ場合、旅客輸送コストが低い直接水素供給方式の燃料電池自動車(FCV-B, FCV-D)の旅客輸送量は、改質器搭載方式の燃料電池自動車(FCV-A, FCV-C)よりも大きくなる。燃料源が原油の場合、直接水素供給方式であるFCV-Bの旅客輸送量は、2044年で 1.15×10^8 k passenger-mile、改質器搭載方式であるFCV-Aは 2.89×10^7 k passenger-mileとなった。燃料源が天然ガスの場合、直接水素供給方式であるFCV-Dは2044年で 1.20×10^8 k passenger-mile、改質器搭載方式であるFCV-Cは 6.34×10^7 k passenger-mileとなった。

燃料供給形態が同じ場合、コストが低い天然ガスを用いた方式(FCV-C, FCV-D)の旅客輸送量は、燃料源に原油を用いた方式(FCV-A, FCV-B)よりも大きくなる。直接水素供給方式の場合、燃料源に天然ガスを用いるFCV-Dは燃料源に原油を用いるFCV-Bよりも2044年には旅客輸

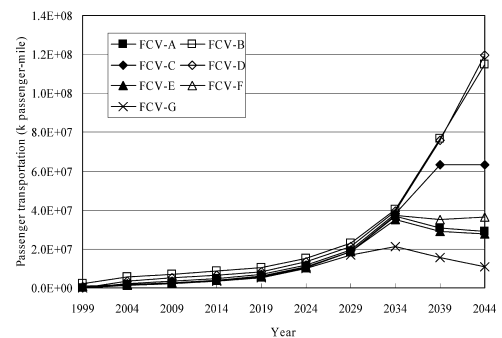


図4 各方式の燃料電池自動車の旅客輸送量

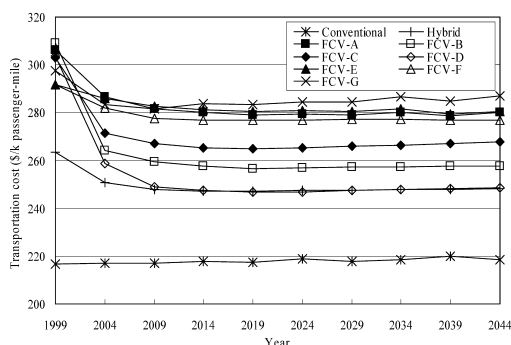


図3 各方式の燃料電池自動車の旅客輸送コスト

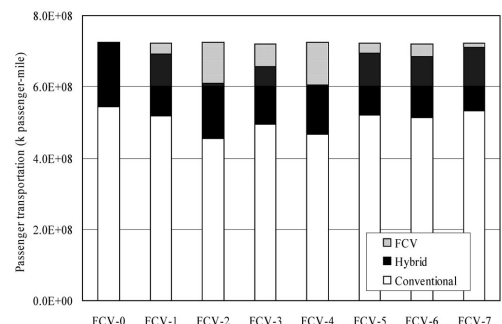
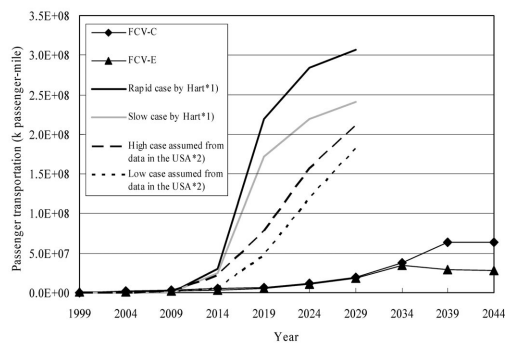


図5 2044年の旅客輸送量の内訳



*1)Hart et al. (2000)

*2)Thomas et al. (1998)

図6 メタノールを液体燃料として用いる燃料電池自動車の旅客輸送量

送量が $0.50E+07$ k passenger-mile多くなる。改質器搭載方式の場合では、燃料源に天然ガスを用いるFCV-Cは燃料源に原油を用いるFCV-Aよりも2044年には旅客輸送量が $3.45E+07$ k passenger-mile多くなる。

2044年の旅客自動車市場における従来型自動車、ハイブリッド自動車、燃料電池自動車の旅客輸送量の内訳を図5に示す。各方式ともにハイブリッド自動車の旅客輸送量に大きな変化は見られないことより、燃料電池自動車の旅客輸送量は従来型自動車の旅客輸送量を代替していると考えられる。

図4に示した燃料電池自動車の旅客輸送量のうち、メタノール燃料を使用する燃料電池自動車の旅客輸送量を、Hart⁵⁾、Thomas⁶⁾らの結果と比較したものを図6に示す。Thomasの研究結果は米国を対象にしているの、日米両国の従来型自動車の保有台数、および従来型自動車のエネルギー消費原単位^{33, 34)}を比較し日本市場での導入の場合として換算した。これらの解析結果を比較すると、燃料電池自動車の旅客輸送量は導入開始約5年後から増加し始め、以後増加し続けるという点で一致した。

3.2. 旅客運輸部門の原油消費量及びエネルギー消費量

旅客運輸部門の原油消費量とエネルギー消費量について解析結果を示す。

はじめに、旅客運輸部門の原油消費量の解析結果を図7に示す。燃料電池自動車を導入すると、原油の消費量は抑制される。しかし、燃料源と燃料供給方法の選択によって原油消費量の抑制に差が生じる。燃料源に原油以外の燃料を用いた場合、燃料電池自動車の導入が進むほど原油の消費量は抑制することができる。各方式の原油消費量を比較すると、燃料源に天然ガスを用いたモデル(FCV-3, FCV-4)が、最も原油消費量は少なくなった。とくに、燃料供給形態が直接水素供給方式であるFCV-4は2044年に原油消費量が $2.08E+09$ mmBtuとなり、改質器搭載方式であるFCV-3の原油消費量 $2.25E+09$ mmBtuよりも $1.70E+08$ mmBtu少なくなった。

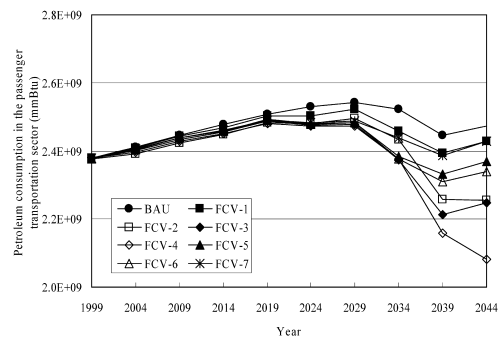


図7 旅客運輸部門における原油消費量

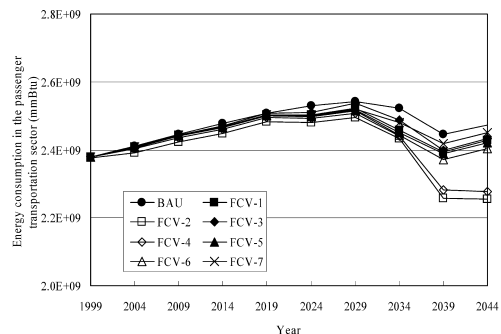


図8 旅客運輸部門におけるエネルギー消費量

つぎに、旅客運輸部門のエネルギー消費量の解析結果を図8に示す。燃料電池自動車を導入した場合、導入が進むほどエネルギー消費量を抑制することができることがわかった。燃料電池自動車を導入しないモデル(BAU)と比較すると、燃料供給形態が直接水素供給方式であるモデル(FCV-2, FCV-4)がエネルギー消費量の抑制に大きな効果があった。燃料源が原油の場合、直接水素供給方式であるFCV-2のエネルギー消費量は、2044年で $2.26E+09$ mmBtu、改質器搭載方式であるFCV-1は $2.43E+09$ mmBtuとなり、FCV-2の方がエネルギー消費量が少なくなった。燃料源が天然ガスの場合、直接水素供給方式であるFCV-4のエネルギー消費量は、2044年で $2.28E+09$ mmBtu、改質器搭載方式であるFCV-3は $2.43E+09$ mmBtuとなり、FCV-4の方がエネルギー消費量が少なくなった。これは、直接水素供給方式は改質器搭載方式よりも自動車のエネルギー利用効率が優れているためと考えられる。

3.3. 二酸化炭素排出量の削減

燃料電池自動車の導入による二酸化炭素排出量の削減について解析結果を示す。ここでは二酸化炭素の排出量を表す単位としてmmTC(炭素換算100万トン)を用いる。

旅客運輸部門の二酸化炭素排出削減量の解析結果を図9に示す。旅客運輸部門の二酸化炭素排出量は燃料電池自動車を導入しないモデル(BAU)の場合、2044年には47mmTC(炭素換算4,700万トン)に達する。しかし、燃料電池自動車を導入した場合、二酸化炭素排出量は抑制することができる。燃料電池自動車の導入による二酸化炭素の排出削減

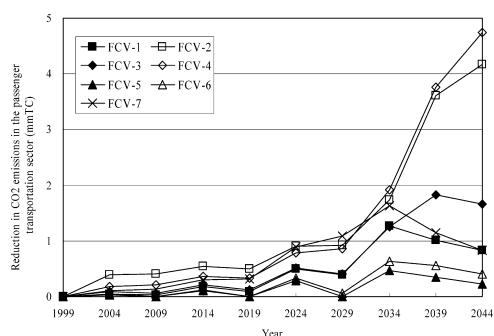


図9 旅客運輸部門の二酸化炭素排出削減量

量は燃料源の炭素含有量，発熱量，水素変換効率，燃料供給形態に大きく影響される。燃料源が天然ガスの場合が最も二酸化炭素の削減量は多くなる。燃料源が天然ガスの場合，燃料供給形態が直接水素供給方式（FCV-4）の場合は2044年に4.7mmTC，改質器搭載方式（FCV-3）の場合は1.7mmTCの二酸化炭素が削減できる。燃料源が原油の場合，直接水素供給方式（FCV-2）の場合で2044年に4.2mmTC，改質器搭載方式（FCV-1）の場合で0.8mmTCの二酸化炭素が削減できる。

4. まとめ

各方式の燃料電池自動車について，旅客輸送コスト，エネルギー消費量，二酸化炭素排出量の特徴を表2にまとめる。

4.1. 各方式の燃料電池自動車の特徴

解析から明らかになった燃料電池自動車の特徴を以下にまとめる。

(a) FCV-1

FCV-Aは旅客輸送コストが高いために，旅客輸送量はあまり伸びない。また，燃料源に原油を用いるために，原油から他のエネルギーへのエネルギーシフトは進まない。また，二酸化炭素の排出削減量も効果は小さい。

(b) FCV-2

FCV-Bは旅客輸送コストが比較的低いために，旅客輸送量は大きくなる。また，エネルギー利用効率が高いため

にエネルギー消費量は大きく削減できる。しかし，燃料源が原油のために原油から他のエネルギーへのエネルギーシフトは進まない。二酸化炭素排出量の削減については大きな効果があった。

(c) FCV-3

FCV-Cは旅客輸送コストは比較的低くなる。そのため，旅客輸送量は大きくなる。また，燃料源に天然ガスを用いるために原油消費量を大きく削減できる。また，二酸化炭素の排出量削減にも効果がある。

(d) FCV-4

FCV-Dは旅客輸送コストは最も低くなる。そのため，旅客輸送量も最も大きくなる。また，エネルギー消費量と原油消費量の削減にも大きな効果があった。この方式は，二酸化炭素の排出量削減について最も大きな効果がある。

(e) FCV-5

FCV-Eの旅客輸送コストが高いために旅客輸送量は伸びない。燃料源にバイオマスを用いているが，燃料電池自動車の導入が進まないために，原油の消費量はあまり削減されなかった。そのため，二酸化炭素の排出量削減についても大きな効果はなかった。

(f) FCV-6

FCV-Fの旅客輸送コストは高くなる。そのため，旅客輸送量は伸びない。また，エネルギー消費量と原油消費量の削減には大きな効果はなく，二酸化炭素排出量の削減にも効果は小さかった。

(g) FCV-7

FCV-Gは他の方式と比べて旅客輸送コストが最も高くなる。そのため，旅客輸送量も最も少なくなる。また，エネルギー消費量と原油消費量の削減についても大きな効果はない。二酸化炭素の排出量削減にはほとんど効果がない。

4.2. 燃料供給方式からみた最適方式

燃料供給方式は，直接水素供給方式運輸モデル（FCV-2, 4, 6, 7）と改質器搭載方式運輸モデル（FCV-1, 3, 5）の2通りがある。両者を比較すると，直接水素供給方式の燃料電池自動車は改質器搭載方式のものよりも自動車のエネルギー効率と自動車の旅客輸送コストの面で優れている。そのため，直接水素供給方式の燃料電池自動車は改質器搭載方式よりも，旅客輸送量では2044年に1.3-4.0倍上回る。また，エネルギー消費量の抑制という面でも，直接水素供給方式は改質器搭載方式よりもエネルギー消費量が1-7%少なくなる。二酸化炭素排出量の削減の面においても，直接水素供給方式は改質器搭載方式よりも0.1-3.4mmTCの二酸化炭素を多く削減できることがわかった。以上より，直接水素供給方式は改質器搭載方式よりも，旅客輸送量，エネルギー消費量の抑制，二酸化炭素排出量の削減の全ての面で優れていることが明らかになった。

表2 各方式の燃料電池自動車の結果の特徴

Model	Cost of Passenger transportation	Energy consumption	CO ₂ emission reduction
FCV-1	×	×	×
FCV-2	△	○	○
FCV-3	△	×	×
FCV-4	○	○	○
FCV-5	×	×	×
FCV-6	×	×	×
FCV-7	×	×	×

○：優れている
△：普通
×：劣っている

4.3. 燃料源からみた最適方式

燃料電池自動車に用いる燃料源として、天然ガスを用いることが最も望ましいことがわかった。原油などと比較したとき、燃料価格、発熱量、炭素含有量などの面で天然ガスは優れている。天然ガスを燃料源に用いる燃料電池自動車は他の燃料源を用いる方式よりも、旅客輸送量では最大で3.3倍の差が生じ、また、最大で8%のエネルギー消費量を抑制できることがわかった。二酸化炭素排出量の削減でも、最大で5mmTC削減できることがわかった。以上より、天然ガスを燃料源にする燃料電池自動車が最も優れていることが明らかになった。

4.4. 経済性からみた最適方式

燃料電池自動車の各方式を経済性から評価すると、燃料供給方式では直接水素供給方式を用いる方式、燃料源では天然ガスを用いる方式が最も優れていることがわかった。直接水素供給方式は、改質器搭載方式よりも旅客輸送コストが\$3/k passenger-mileから\$22/k passenger-mile低くなった。燃料源が天然ガスである方式は、他の燃料源を用いる方式よりも旅客輸送コストが\$12/k passenger-mileから\$29/k passenger-mile低くなった。しかし、燃料電池自動車の旅客輸送コストは、ハイブリッド自動車と従来型自動車の旅客輸送コストよりも高くなっている。そのため、燃料電池自動車の旅客輸送コストの低減に向けてさらなる技術革新が望まれる。

5. 結論

本研究では、長期的な経済性とエネルギー効率の両面を考慮した燃料電池自動車の導入モデルを作成し、燃料電池自動車の導入による運輸部門エネルギーシステムへの影響を評価した。燃料電池自動車の導入は、運輸部門のエネルギー消費量と原油消費量の削減、また二酸化炭素排出量の削減に効果があることがわかった。本研究で解析した燃料電池自動車の導入モデルでは、燃料源には天然ガス、燃料供給形態には直接水素供給方式を採用した燃料電池自動車モデル(FCV-4)が他の方式に比べて、旅客輸送量、エネルギー消費量の抑制、二酸化炭素排出量の削減という観点から最適であることが明らかになった。

将来的に、炭素税やエネルギー税といった環境税が適用された場合、炭素含有量の少ない燃料源への転換が促進され、エネルギー効率に優れた燃料電池自動車の導入量は非常に大きくなると考えられる。とはいえ、環境税の導入の有無に関わらず、燃料電池自動車の本体価格の高さと、燃料供給のためのインフラ整備が燃料電池自動車の導入に最も大きな障害になることには変わりがない。そのため、燃料電池自動車の導入には一層の政策的な支援が重要になると考えられる。

参考文献

- 1) Panik, F. ; Fuel cells for vehicle applications in car - bringing the future closer, Journal of Power Sources, 71 (1998), 36-38.
- 2) Weiner, S. A. ; Fuel cell stationary power business development, Journal of Power Sources, 71 (1998), 61-64.
- 3) Chalk, S. G., Milliken, J., Miller, J. F., Venkateswaran, S. R. ; The US Department of Energy - investing in clean transport, Journal of Power Sources, 71 (1998), 26-35.
- 4) Berry, G. D., Lamont, A. ; Carbonless transportation and energy storage in future energy systems, Lawrence Livermore National Laboratory, (2001), UCRL-ID-142084.
- 5) Hart, D. et al. ; Methanol infrastructure - will it affect the introduction of SPEC vehicles?, Journal of Power Sources, 86 (2000), 542-547.
- 6) Thomas, C. E., James, B. D. and Lomax Jr., F. D. ; Market penetration scenarios for fuel cell vehicles, Hydrogen Energy, 23-10 (1998), 949-966.
- 7) Thomas, C. E., James, B. D., Lomax Jr., F. D., Kuhn Jr. ; Fuel options for the fuel cell vehicle : hydrogen, methanol or gasoline? International Journal of Hydrogen Energy, 25 (2000), 551-567.
- 8) Ogden, J. M., Steinbugler, M. M., Kreutz, T. G. ; A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles : implications for vehicles design and infrastructure development, Journal of Power Sources, 79 (1999), 143-168.
- 9) Borgwardt, R. H. ; Biomass and natural gas as co-feedstocks for production of fuel for fuel-cell vehicles, Biomass and Bioenergy, 12-5 (2000), 333-345.
- 10) Lipman, T. E. ; Zero-emission vehicle scenario cost analysis using a fuzzy set-based framework, Ph. D. dissertation, University of California, Davis, UCD-ITS-RR-99-18 (1998).
- 11) 蓮池宏 ; 水素燃料電池自動車の導入シナリオの研究, エネルギー・資源, 21-1 (2000), 68-72.
- 12) 石谷久, 馬場康子, 小林紀 ; 各種燃料による燃料電池自動車(FCEV)の総合効率評価, エネルギー・資源, 21-5 (2000), 417-425.
- 13) Nakata, T. ; Analysis of the impact of hybrid vehicles on energy systems in Japan, Transportation Research Part D5, (2000), 373-383.
- 14) Nakata, T., Lamont, A. ; Analysis of the impacts of carbon taxes on energy systems in Japan, Energy Policy, 29 (2001), 159-166.
- 15) Nakata, T. ; Analysis of the impacts of nuclear phase-out on energy systems in Japan, Energy, (2002), printing.
- 16) Bull, S. R. ; Renewable energy transportation technologies, WREC (1996), 1019-1024.
- 17) Berry, G., Lamont, A., Watz, Jill. ; Synergies in Renewable Energy Systems, Lawrence Livermore National Laboratory, (2001), UCRL-JC-141615.
- 18) Argyropoulos, P., Scott, K., Taama, W. M. ; Dynamic response of the direct methanol fuel cell under variable load conditions, Journal of Power Sources, 87 (2000), 153-161.
- 19) Docter, A., Lamm, A. ; Gasoline fuel cell systems, Journal of Power Sources, 84 (1999), 194-200.
- 20) Hackney, J., Neufville, R. ; Life cycle model of alternative fuel vehicles : emissions, energy, and cost trade-offs, Transportation Research, 35 (2001), 243-266.
- 21) Han, J., Kim, I. S., Choi, K. S. ; Purifier-integrated methanol reformer for fuel cell vehicles, Journal of Power Sources, 86 (2000), 223-227.
- 22) Jarvis, L. P., Atwater, T. B., Cygan, P. J. ; Fuel cell/electrochemical capacitor hybrid for intermittent high power applications, Journal of Power Sources, 79 (1999), 60-63.
- 23) Ren, X., Zelenay, P., Thomas, S., Davey, J., Gottesfeld, S. ; Recent advances in direct methanol fuel cells at Los Alamos National Laboratory, Journal of Power Sources, 86 (2000), 111-116.
- 24) Moore, R. B., Raman, V. ; Hydrogen infrastructure for fuel cell transportation, Hydrogen Energy, 23-7 (1998), 617-620.
- 25) Specht, M., Ataiss, F., Bandi, A., Weimer, T. ; Comparison of the renewable transportation fuels, liquid hydrogen and methanol, with gasoline - energetic and economic aspects, Hydrogen Energy, 23-5 (1998), 387-396.
- 26) Badin, J. S., Tagore, S. ; Energy pathway analysis - a hydrogen fuel cycle framework for system studies, Hydrogen Energy, 22-4 (1997), 389-395.
- 27) Thomas, C. E., Kuhn Jr., I. F., James, B. D., Lomax Jr., F. D., Baum, G. N. ; Affordable hydrogen supply pathways for fuel cell vehicles, Hydrogen Energy, 23-6 (1998), 507-516.
- 28) World Energy Council. Survey of energy resources 1998, (1998), World Energy Council.
- 29) 松岡美治 ; 水素供給ステーションの検討と課題, エネルギー・資源, 21-1 (2000), 56-61.
- 30) エネルギー計量分析センター ; エネルギー・経済統計要覧, (1999), 財団法人省エネルギーセンター.
- 31) Lamont, A. ; User's Guide to the META-Net Economic Modeling System Version 1.2, Lawrence Livermore National Laboratory, (1994), UCRL-ID-122511.
- 32) 電力中央研究所, 永田豊氏 私信.
- 33) Davis, S. C. ; Transportation energy data book : Edition 17, Oak Ridge National Laboratory, (1997), ORNL-6919.
- 34) U. S. Department of Transportation ; Transportation statistics annual report 1997, (1997), BTS97-S-01.