

バイオマス種に応じた  
水素ステーション構築予測に関する研究

田島 正喜

## 目 次

第 1 章 序論 .....	1
1.1 はじめに .....	2
1.2 バイオマスー水素分野の既往の研究について .....	5
1.2.1 バイオマスから水素製造に関する諸研究 .....	5
1.2.2 水素社会構築におけるバイオマスの位置付け .....	7
1.3 研究の目的と本論文の構成 .....	9
第 2 章 バイオマスのエネルギー転換と水素製造方法 .....	11
2.1 はじめに .....	12
2.2 バイオマスのエネルギー転換技術 .....	13
2.2.1 バイオマスからのエネルギー転換経路 .....	13
2.2.2 バイオマス種に応じたエネルギー転換技術 .....	13
2.3 バイオマスの収集運搬の課題 .....	15
2.3.1 木質バイオマスのコジェネ利用における収集運搬 .....	15
2.3.2 エタノール製造における収集運搬 .....	16
2.4 バイオマスからの水素製造 .....	17
2.4.1 バイオマス種に応じた水素製造方法 .....	17
2.4.2 各種バイオマスからの水素製造量算出式 .....	18
2.4.3 将来有効なバイオマスからの水素製造技術 .....	20
2.5 本章のまとめ .....	22
第 3 章 燃料電池自動車の実用化と水素供給基盤構築 .....	34
3.1 はじめに .....	35
3.2 燃料電池実用化計画と現状の課題 .....	36
3.3 燃料電池自動車と水素ステーションの普及にむけたシナリオ .....	39
3.4 水素製造におけるエネルギー変換とCO <sub>2</sub> 発生量 .....	41

3.4.1 Well to Wheel におけるエネルギー変換効率 .....	4 1
3.4.2 Well to Wheel におけるCO <sub>2</sub> 発生量 .....	4 1
3.4.3 FCV導入によるCO <sub>2</sub> 削減効果 .....	4 2
3.5 本章のまとめ .....	4 4
 第4章 首都圏でのバイオマス種に応じた水素ステーション実現性検討	5 1
4.1 はじめに .....	5 2
4.2 水素ステーション構築モデル .....	5 3
4.3 バイオマスの賦存量と利用可能量 .....	5 5
4.3.1 木質バイオマス .....	5 5
4.3.2 畜産廃棄物 .....	5 6
4.3.3 農業残渣 .....	5 7
4.3.4 下水汚泥 .....	5 8
4.4 首都圏での事例研究 .....	5 9
4.4.1 栃木県那須塩原市の事例 .....	5 9
4.4.2 東京都奥多摩町の事例 .....	6 1
4.5 水素供給方式の検討 .....	6 3
4.6 首都圏でのバイオマス水素ステーション成立の可能性 .....	6 5
4.6.1 木質バイオマス .....	6 5
4.6.2 畜産廃棄物 .....	6 5
4.6.3 農業残渣 .....	6 6
4.6.4 下水汚泥 .....	6 6
4.7 首都圏における最適水素供給に対する考察 .....	6 7
4.8 本章のまとめ .....	6 9
 第5章 日本全国における水素ステーション実現性検討 .....	8 2
5.1 はじめに .....	8 3
5.2 日本全国への実現性検討の展開 .....	8 4
5.2.1 検討の前提 .....	8 4
5.2.2 結果および考察 .....	8 5

5.3 日本全国における水素ステーション構築のポテンシャル .....	87
5.3.1 検討の前提 .....	87
5.3.2 結果および考察 .....	89
5.4 本章のまとめ .....	90
 第6章 バイオマスから水素ステーション構築における経済性評価	108
6.1 はじめに .....	109
6.2 水素製造コストに関する検討 .....	110
6.2.1 畜産廃棄物 .....	110
6.2.2 農業残渣 .....	111
6.3 CO <sub>2</sub> 削減効果を考慮したコスト評価 .....	113
6.4 本章のまとめ .....	114
 第7章 総括 .....	118
7.1 本研究の要約 .....	119
7.2 今後の展望と課題 .....	121
 謝辞 .....	123
引用文献 .....	124

## 第 1 章 序論

## 1.1 はじめに

近年、地球温暖化対策のひとつとしてカーボンニュートラルとみなされているバイオマスの利活用推進が図られているが、その利活用の多くを占める手法のひとつが、熱電併給利用（コジェネレーション：以下コジェネ）である。これは、2003年に施行された「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（RPS法）」によって電気事業者による新エネルギーの導入が義務化されたことから、バイオマスから電気を得る方法がより具現化してきたことがその一因であると言える。しかしながら、発電効率を上げるためにはより大規模に、加えて、エネルギー効率を上げるためには熱需要が存在するサイトへバイオマスを運搬しエネルギー化する必要がある、バイオマスエネルギーのコジェネ利用はその規模、立地等の制約を受け、利活用が進まない状況が見受けられる。

一方、昨今の世界のエネルギー事情を見渡すと、化石燃料の枯渇化並びに京都議定書発効以来、地球温暖化への対応として温室効果ガス、特に二酸化炭素の排出低減が叫ばれ、2008年に開催された洞爺湖サミットの折には日本として2050年までに現状の60～80%のCO<sub>2</sub>削減を目標とした「福田ビジョン」が表明されるに至っている。日本政府のみならず、世界的にも化石燃料依存のエネルギー体制から「低炭素化社会」実現への移行を進める動きを加速している。このような背景を基に、将来有効な二次エネルギー形態として、水素エネルギーが近年とみに注目されている（最首公司, 2005）,（Jeremy Rifkin, 2003）,（Joseph J. Romm, 2005）。

水素は自然界での賦存量はほとんどないが、様々な一次エネルギーから製造しうる。また、電力と相互変換可能な唯一のエネルギーであり、燃焼しても水のみしか生成しない点、非常にクリーンなエネルギーであると言える。水素製造方法は、石油や天然ガスの水蒸気改質による製造、水の電気分解による製造、石油精製やコークス製造工程から発生する副生水素を活用する方法等様々なものがあるが、原料の生産から水素製造までの全工程で多量のCO<sub>2</sub>を排出する可能性もあり、LCA（Life Cycle Assessment）手法の導入等その製造方法を選定するには特段の考慮が必要である（（財）日本自動車研究所・（財）エンジニアリング振興協会, 2006）。

水素同様、CO<sub>2</sub>削減に対して利活用が期待されているバイオマスであるが、その利活用推進を妨げる要因のひとつとして、収集・運搬に対する経済的課題がある。特にエネルギー源としてバイオマスを利用する場合には、エネルギー生産に必要なバイオマス量をいかに安定的に確保・供給できるかが重要となってくる(小宮山宏, 2003)。バイオマスをコジェネ用の原料として活用する場合、経済的に事業が成立する規模(木質バイオマスの場合では 100t/日程度)では数十キロの範囲内のバイオマスを収集する必要がある。またバイオエタノールの自動車燃料としての利活用方法でも、経済性が成立する規模のバイオマスを収集するためには同様に数十キロの距離を輸送する必要があるといわれる(バイオ燃料技術革新協議会, 2008), (佐賀清崇, 2008)。この様にいずれの場合でも、多量なバイオマスを収集するために収集範囲を広げざるを得ず、収集・運搬費のエネルギー転換費用に占める割合が大きくなることで経済性を悪化させ、利活用できる条件を制限することとなっている。

一方、水素社会を構築するアプリケーションとして、燃料電池自動車(Fuel Cell Vehicle: 以下 FCV)の開発が進められており、FCV用の燃料としての水素供給体制の構築検討が、燃料電池実用化推進協議会(Fuel Cell Commercialization Conference of Japan: 以下 FCCJ)等にて開始されている。FCVへの水素供給を考察するに、現在のガソリンスタンドが将来水素ステーションへ転換していくと想定されるが、ガソリンスタンド同様に全国に広く賦存するバイオマスをその原料にできれば、バイオマスの収集・運搬の課題は軽減されることが予想され、再生可能エネルギーの地産地消の観点でも非常に有効な活用方法と言える。FCCJ内の検討では、水素供給方法として、水素ステーションにて都市ガスから水蒸気改質により水素を製造する方法、もしくは石油精製所内での石油由来の原料から製造される水素をデリバリーする方法が、水素の量的確保、水素製造コストの面から有利とされているが、いずれの場合も化石燃料から水素を製造するため、改質工程で発生するCO<sub>2</sub>を何らかの方法で捕集・隔離(Carbon dioxide Capture and Storage: 以下 CCS)する必要がある((独)産業技術総合研究所, 2006)。

バイオマスからの水素製造は、再生可能エネルギーであるバイオマスを用いることでこれら水素製造方法に比較して LCA でみて極めて有利な手法であり、

かつ太陽光や風力等の他の再生可能エネルギーからの水素製造方法と比較してもエネルギー変換効率が高い（横山伸也，2001），（（財）新エネルギー財団・（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構，1999）。

将来，水素ステーションにてバイオマスから水素を効率的に生産できれば，バイオマスの収集・運搬経費削減の点で有益であると同時に，多大な CO<sub>2</sub> 削減効果も期待でき，再生可能エネルギーの地産地消の観点でバイオマスの利活用がより広範囲に広がり，ひいては農林業の発展に寄与できるものと考えられる。



## 1.2 バイオマスー水素分野の既往の研究について

### 1.2.1 バイオマスからの水素製造に関する諸研究

バイオマスから水素を製造する研究は、国内外で数々報告されている。しかし、水素の利活用にはそのアプリケーションである燃料電池が現在実用化開発の途上であることから、ガス体エネルギーとしてはガスエンジンやガスタービンといった内燃機関での燃焼を目的に、高発熱量ガスの収率を上げ、熱量が安定なガスを得ることを目的にした研究が多い。

一般には、木質バイオマスのガス化では水蒸気改質が水素収率を上げるためには適している転換技術だが、反応温度が低いため改質工程でタールが発生しやすく、この分解除去が課題となる。ガス化剤として空気や酸素を用いる方法が提案されている。空気利用の場合は、生成ガス中に多量の窒素が残存するため水素精製工程が大規模になる課題がある。酸素利用の場合では、空気分離による酸素製造プロセスを付加せざるを得なく経済的な課題がある。課題解決のため、改質温度や規模に応じて適用する改質炉のタイプごとに研究開発が行われている。

含水率の高いバイオマス種に対しては、湿式メタン発酵が技術的には確立しているが、発酵残渣として発生する多量の消化液の処理費用がかかるため実用化を難しくしているケースも目立つ。超臨界水ガス化では、高圧・高温の反応条件のため、反応容器の材質選定が課題になる。高圧での原料フィードを行うためのバイオマスの可溶化や微細サイズ化等の課題もある。バイオマスを一旦バイオエタノールに転換した後水素化を試みる研究も行われているが、工程の複雑化や副生エチレンによる水素化触媒の失活等、課題が多い。

最近のバイオマスから水素を製造する研究は、将来の水素社会を想定し、より高効率な転換技術を、また幅広いバイオマス種を対象にした基礎的なものが多くみられる。例えば、米国エネルギー省（Department of Energy : DOE）の水素プログラム等でのバイオマスのエネルギー転換として、バイオディーゼルの水蒸気改質（David King・Yong Wang et al., 2008）、バイオエタノールからの水素製造（Umit S. Ozkan・Hua Song et al., 2008）、（A. Czernichowski・K. Wesolowska et al., 2006）等、バイオ燃料から水素を製造する方法や、コーンストーバの爆砕処理による水素発酵（Rohit Datar・Jie Huang et al., 2007）、メンブ

レンリアクターによるバイオマスからの水素製造 (Michael Roberts・Jerry Lin et al., 2007) 等, 技術課題が未だ多い研究等がみられる。また, 2006 年, 2008 年に開催された世界水素会議 (16<sup>th</sup>, 17<sup>th</sup> WHEC) では, グルコースの超臨界水ガス化による水素製造法 (Takafumi Sato・Yasuyoshi Ishiyama et al., 2008), 微生物電極反応による水素製造 (R. A. Rozendal・H. V. M. Hamelers et al., 2008), 廃棄物汚泥 (イタリアのなめし皮工程より) の水素発酵 (Shanmugam. P・Horan N. J., 2008), バガスの水素発酵 (S. P. Singh・R.K.Asthana et al., 2008), エステル化副生グリセリンの水素発酵 (Pim-pahn Meyer・Surasak Pankaew et al., 2008) 等といったエネルギー転換を試みる例が世界各国から発表されている。これらは, いずれも実証・実用化には至っていない, 未だ研究段階に留まっている。

しかしながら, バイオマスから製造された水素の用途を考えるに, 水素社会構築の具体的なシナリオが, 米国, 欧州, 日本で近年精力的に策定される動きがあることから, バイオマスからの水素製造のこれら研究が今後加速されることが期待される。

### 1.2.2 水素社会構築におけるバイオマスの位置付け

水素社会構築へのシナリオとして現在日本では2つの推進プロジェクトが実施されている。第1は、家庭用燃料電池を中心とした定置用燃料電池推進プロジェクトであり、他は、燃料電池自動車（FCV）推進プロジェクトである。

定置用燃料電池プロジェクトは、大規模実証試験フェーズを経て2009年度より1kWのコジェネレーション燃料電池が商品化され、経済産業省（Ministry of Economy, Trade and Industry：以下 METI）の補助金を受けながら一般に販売される予定である。これら燃料電池は純水素で駆動するタイプではなく、内部に改質装置を持った、都市ガスや灯油を原料としたシステムとなっている。

FCV プロジェクトは JHFC（Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project）の名称で経済産業省により実施されているもので、定置用燃料電池プロジェクトより進展がやや遅れている。2011 年より社会実証フェーズに入り、2015 年より普及開始の計画である。

一般に、水素社会の幕開けはこの JHFC プロジェクトの進展にかかっていると言えよう。FCV の普及拡大に伴い、全国各地に水素ステーションが形成されこのステーションが核となってステーション周辺に水素供給が開始される（東京ガス（株），2006）。定置用燃料電池はステーションからの純水素により稼動するタイプに変更され、水素社会が徐々に形成されていくといったシナリオが描かれている（小林敬幸・鈴置保雄 et al., 2004），（小林敬幸，2005），（安芸裕久・前田哲彦 et al., 2005）。

FCV の燃料には純水素（純度 99.99%以上）が用いられるが、1 充填あたりの車両走行距離を確保（約 600km／回満充填）するために超高压（35～70MPa）で充填される。FCV の普及拡大は、自動車としての技術の成熟（効率や耐久性、価格等）もさることながら、水素供給インフラである水素ステーションをいかに計画的に形成していくかにかかっている。初期のインフラ形成には、都市ガスパイプラインや製油所設備といった既存インフラを活用できることから、都市ガスもしくは石油系原料からの水素製造が量的にも経済的にも有利であるとされる（（財）石油産業活性化センター，2003），（（社）日本ガス協会，2003）。しかしながら、化石燃料からの水素製造では改質工程で CO<sub>2</sub> が発生するため、将来更なる CO<sub>2</sub> 削減が必要となれば、CCS 等の方法で CO<sub>2</sub> を捕獲除去する処

置を講じなければならない。

CO<sub>2</sub>を発生させない究極の方法は再生可能エネルギーや原子力エネルギーを用いた水素製造方法である。再生可能エネルギーからの水素製造方法では、太陽光発電，風力発電を用いた水の電気分解による水素製造やバイオマスからの水素製造の可能性がある。一般に再生可能エネルギーは一次エネルギーとしては量的に乏しく，エネルギー転換が多段，複雑になる傾向があるため実現の可能性は低いとみられている。従って JHFC の検討などでも再生可能エネルギーからの水素製造の実現は，化石燃料からの水素製造に CCS を採用する時期（2020 年頃以降）と同時期から導入が始まると目されている。

JHFC では原料の採掘から FCV の駆動動力まで（Well to Wheel：井戸元から車輪まで）の様々なルート（約 140 のエネルギーパス）におけるエネルギー効率と CO<sub>2</sub> 排出量を試算する調査研究が行われている（（財）日本自動車研究所，2006）。この中でのバイオマスから水素製造ルートとしては，畜産廃棄物および下水汚泥のメタン発酵＋メタンの水蒸気改質による水素製造の 2 ルートのみ取り上げられているに留まっている。一次エネルギーとしての供給量的課題およびエネルギー転換の複雑さ等から，バイオマスからの水素製造供給システムに関する検討はあまり進んでいないのが現状である。しかしながら，CO<sub>2</sub> 排出量の少ない水素製造の観点より，バイオ水素の FCV 燃料としての将来の可能性を評価する指摘もあり，今後のこの分野における研究・検討が期待されている（Ayhan Demirbas, 2008）。

### 1.3 研究の目的と本論文の構成

前述のごとく、バイオマスのコジェネ等の利活用には、収集・運搬に対する課題が内在しており進展が遅れている状況のなか、バイオマスから水素を製造する研究は、未だ基礎段階にある。一方、水素社会構築に対するバイオマスの位置付けも、FCVが開発段階にあり、水素供給インフラの基礎整備に対しても検討段階であることによって、バイオマスから水素を製造する手法は将来有望としながらも具体的な検討調査はあまり進んでいない状況にある。

一見するに、バイオマスー水素製造モデルは、バイオマスの利活用が推進し、かつ基礎的な水素供給インフラの整備が進行した上で達成できる、言わばダブルの条件をクリアーする必要がある困難な課題のように見える。しかしこのふたつの条件は、単独に達成することには未だ多くの課題が存在するが、同時に達成することを視野に入れば、バイオマスの収集運搬距離を短くでき、かつ、都市ガスネットワークや製油所より遠方でのバイオマス賦存サイトにおけるCO<sub>2</sub>排出の少ない水素ステーション構築に資するという、双方の課題を補完し合って達成可能なモデルとなる可能性を秘めている。

本研究は上述の観点より、バイオマスから水素を製造し、水素ステーションにてFCVに供給するモデルの、定量的かつ経済的な実現可能性を検討することを目的とした。

構成として、第1章で概要に触れた後、第2章ではバイオマスからのエネルギー転換技術および水素転換技術について整理し、収集・運搬における課題を定量的に議論した。コジェネ利用あるいは、エタノール生産では数十キロの範囲内のバイオマスを収集しなければ経済性が成立し得ない課題を有している。

第3章では水素供給基盤構築に向けた現況と、本モデルのエネルギー効率、並びに環境影響に関する意義を論じる。バイオマスから水素を製造しFCVにて燃料使用するモデルは現行のガソリン車と比較して、約90%のCO<sub>2</sub>削減を達成し得ることが窺える。

第4章では、バイオマスから水素を製造し水素ステーションでFCVに充填するモデルの提示と、首都圏のいくつかの市町村を例にあげた試算、および首都圏の全市町村に展開したときの効果についてバイオマス種ごとに整理し、考察する。モデルの定量評価を実施し、本手法の意義を確認する。バイオマス種に

よって手法への適用が異なることが判明した。

第5章では第4章の結果をもとに、この手法を全国の都道府県に展開した場合の結果と考察、日本における本手法の効果について纏める。地方によってバイオマスの賦存の偏りがあるなかで、全国に展開した場合の本手法の適応について議論する。

第6章では、バイオマスから水素ステーションを構築する経済性評価を論じた。畜産廃棄物、農業残渣を例にとり、都市ガスからの水素製造と比較することで評価した。加えて、畜産廃棄物のケースについて、CO<sub>2</sub>の削減効果を経済的に評価し将来の実現可能性について言及した。

最後に第7章にて全体の総括および今後の課題について述べた。

## 第 2 章 バイオマスのエネルギー転換と水素製造方法

## 2.1 はじめに

バイオマスは日本全国に数々賦存しており，その種類によってまたどの様なエネルギーに転換するかによって，転換技術の適性が異なる。また，一般には薄く，広く賦存するため，エネルギー利用には大量に収集しなければならないことで，その収集・運搬費用が高額になる傾向があり，エネルギー利活用の推進を遅らせる一因となっている。本章ではバイオマス種によるエネルギー転換技術を整理するとともに，収集運搬におけるコストについて言及する。

また，バイオマスから水素を製造する技術について，現在研究開発が進んでいるなか，実用化あるいは実証段階にある水素転換技術を抽出，バイオマス毎に整理し，バイオマスから水素を製造する算定式を作成する。この算定式は第4章以降の検討に用いられることになる。

合わせて，将来有効なバイオマスからの水素製造技術について言及した。



## 2.2 バイオマスのエネルギー転換技術

### 2.2.1 バイオマスからのエネルギー転換経路

図 2.1 にバイオマスからのエネルギー経路の一例を示す（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2005）。

バイオマスの分類には種々あるが、いずれのバイオマスも適切な前処理の後、様々なエネルギー転換技術で二次エネルギーに転換される。二次エネルギーとしては、電気・熱をはじめ、メタノールやエタノールあるいはバイオ燃料といった液体燃料に、またメタン・水素のような可燃性ガスにも転換される。

バイオマスは化石燃料と同じ有機物資源であることにより、化石燃料のエネルギー転換技術がそのまま適用できる場合が多く、様々な二次エネルギー形態に転換できる点、他の再生可能エネルギーの太陽光や風力等と比べ、適用範囲の広いエネルギーと言える。

しかしその賦存は薄く広く点在しているため、収集・運搬の課題や、エネルギー転換効率を上げられないケースもあり、利活用には特段の考慮が必要である（（社）日本エネルギー学会, 2002）、（（財）新エネルギー財団, 2000）、（（財）新エネルギー財団, 2001）。

本スキーム中にある水素発酵による水素製造は、未だ開発途上にある。

### 2.2.2 バイオマス種に応じたエネルギー転換技術

表 2.1 に、図 2.1 で示したバイオマス種と転換技術の適合性を、更に詳しく整理したマトリックス表を示す（（株）三菱総合研究所, 2002）。

バイオマス種によって転換技術の適性に違いがあることが分かる。

バイオマスの直接あるいは混焼技術は既に完成された技術であり、幅広いバイオマス種に適合して実績が多い（（財）エネルギー総合工学研究所, 2004）、（（財）エネルギー総合工学研究所, 2005）。

木質バイオマスに代表されるドライバイオマスでは熱化学的変換が実用化あるいは実証段階にあると言える。エネルギー転換炉のタイプが様々あり、技術の進展度合いが異なる。これら技術は主にバイオマスを可燃性ガスに転換するもので、ガスタービンやガスエンジンに導入され、電気あるいは熱にエネルギー転換される。難溶性のバイオマスに超臨界技術が適用されることがあるが、

実用化までには至っていないのが現状である。廃食油等の植物油に限ってエステル化反応が用いられており、一部実用化されている。

家畜糞尿や下水汚泥といった含水率の高いバイオマス種では、メタン発酵技術が幅広く用いられている。発酵技術の中でもエタノール発酵はドライ・ウェットバイオマスとも適合するが、糖・でんぷん以外のバイオマス種では実用化までは至っておらず、未だ実証段階にあると言える。

水素発酵もドライ・ウェットとも比較的適合範囲が広いが技術的には実験もしくは実証段階であり、実用化には至っていない。

## 2.3 バイオマスの収集運搬の課題

### 2.3.1 木質バイオマスのコジェネ利用における収集運搬

バイオマスの利活用を進める上で、最も考慮すべき因子のひとつは、収集・運搬に関してのコストを如何に低減するかである。バイオマスは広く薄く賦存するため、エネルギー密度を高めるためにもこれ等を如何に効率的に収集しエネルギー需要サイトに運搬するかを、考慮しなければならない。特にコジェネ需要に対応するためには、熱需要のあるサイトまでバイオマスを運搬し、そのサイトにてエネルギー化する必要がある。

100 t/日規模の木質バイオマス（利用間伐材）のコジェネ利用を例にとった場合、経済産業省の調査資料（（株）三菱総合研究所，2002）によると、バイオマスの収集・運搬コストは表 2.2 のように纏められる。

積込場から土場までのコストを運搬コスト A、土場から最終消費地までのコストを運搬コスト B とする。本ケースの場合、バイオマスをコジェネで利用する際に土場から最終消費地まで 63.4km のバイオマス運搬を想定しており、電力・熱の消費地までの運搬コスト B が大きく、原料費全体の約 30%を占めることが分かる。

同調査報告書によると、運搬コスト B における輸送距離と運賃の関係は表 2.3 で与えられる。この表より、10km 以内の輸送範囲であれば、運搬コスト B の 50%以上の削減が見込まれることが分かる。

未利用木質バイオマス（主伐・利用間伐による林地残材および未利用間伐材）の、収集からエネルギー需要サイトでの原料投入までの工程を、図 2.2 に纏める。林地残材と未利用間伐材ごとに利用ルートを示した。主伐・利用間伐によって生じた残材は土場や林道脇に残される。また未利用間伐材は、間伐後林内に残されている。これらはフォワーダ等により収集されるが、搬出工程に関しては、容積が異なる枝葉・末木（以降、枝葉とする）は土場、林道脇にてチップ化し容積を縮小させてトラックに積み替え搬出し、根曲がりや幹曲がりを含む端材（以降、端材とする）はそのままトラックにて搬出するものとして工程を組んだ。搬出は 4t もしくは 10t トラッククラスを想定した。

文献（福島県林業研究センター，2007）によると、林道脇からバイオマス需要地までの輸送距離と運賃の関係は図 2.3 に纏められる。枝葉、端材ごと、4t

あるいは 10t トラックでのデータを示している。原木生比重を  $0.8\text{t/m}^3$  とした場合の表 2.3 のデータも同一図中に記した。異なった出典のデータではあるが、間伐材（4t 車）の運搬データは枝葉と端材の運搬データ（4t 車）と近い値を示している。枝葉を運搬した場合は 8km まで、端材を運搬した場合は 27km まで 4t 車の方が 10t 車よりも運賃は安くなると推定された。第 4 章での輸送距離の検討ではこの図のデータを用いて議論する。

### 2.3.2 エタノール製造における収集運搬

輸送用燃料の脱化石燃料化のためのバイオマス利活用として、バイオエタノールに対する期待が高まっている。

2008 年 3 月には「バイオ燃料技術革新計画」が取り纏められた（バイオ燃料技術革新協議会，2008）。この中でバイオマス・ニッポンケース（100 円/L ケース）として掲げられている体系では、稲わら・麦わら等の運搬距離を 30km 以内と想定した輸送システムが提案されている。また、将来の技術革新ケース（40 円/L ケース）では、より安価なエタノールを製造するために、半径 6.5km の土地内に草本植物を栽培し、この 3 ブロック（山の手線面積の 6 倍）のバイオマスを効率的に収集することで、バイオマスの収集・運搬の課題を解決する提案がなされている。このケースでは 3 ブロックの中心にエタノール製造プラントを建設できたとしても 13km 以上の運搬は必要であり、また、プラントの立地条件によっては、数 10km の運搬を余儀なくされる場合もあり得る。更に、佐賀らの研究では、稲わらからのバイオエタノール製造における経済メリットを得るために、50km 以上の収集範囲内から原料を収集するシステムが検討されている（佐賀清崇，2008）。

この様にバイオマス利活用においてバイオエタノールの生産システムを検討する上でも、経済的に成立するためには、より広範囲から多量のバイオマスを収集しなければならない現状がある。

## 2.4 バイオマスからの水素製造

### 2.4.1 バイオマス種に応じた水素製造方法

現在，日本において実証あるいは実用化にあるバイオマスからの水素製造方法について，表 2.4 に纏める。

バイオマスはドライとウェットの 2 種に分けて整理した。

木質バイオマスでは，数々の熱化学的変換技術が試みられている。一般にバイオマスのガス化反応では，発生するタールをいかに除去するかが技術的課題となる。ドイツのブルータワープロセスでは，熱媒体として直径約 10mm 程度のセラミックボールが「ヒートキャリア予熱炉」「改質炉」「ガス化炉」の 3 つの炉間を循環して発生タールを分解除去する（図 2.4）（山地憲治他, 2008）。各炉の温度は，予熱炉 1,050℃，改質炉 950℃，ガス化炉 600℃である。バイオマス原料は改質炉とガス化炉の中段よりガス化炉に投入される。ガス化ガスは改質炉で添加された水蒸気で改質され，最大 50vol%の水素リッチな生成ガスとなる。改質炉からの生成ガスは，ガスクリーンアップ工程で洗浄塔および集塵機で精製され，後段の PSA での水素分離を経て高純度の水素ガスとなる。このプロセスを用いた 1.4wet-t/d の実証試験の実績がある。ヒートキャリアを用いるメリットとして，温度調整がしやすいこと，バイオマス原料の混合が進むこと，タール分がアルミナボールに付着し除去されること，チャーの粉砕を促すこと等があげられる。しかし，ヒートキャリアの移送のための所要エネルギーが大きくなることや予熱炉上部のサイクロンでアルミナボールによる磨耗が発生する等の課題もある。

その他のガス化技術としてガス化剤に酸素を用いる部分酸化ガス化法があるが，タール発生の課題には対応可能だが酸素を得るための空気分離装置の設置が必要となり，経済性上またエネルギー効率上不利である。

農業残渣を対象とした変換技術では乾式メタン発酵が実用化段階にある。乾式メタン発酵は湿式メタン発酵に比べて多量の消化液処理が不要である利点がある反面，固形残渣処理として炭化処理を採用するケースが見られ，設備投資費が高額となる。

一方，家畜糞尿，下水汚泥等のウェットバイオマスでは，湿式メタン発酵により発生したメタンの水蒸気改質による水素製造方法が現実的である(図 2.5)。

湿式メタン発酵法は様々なウェットバイオマスや廃棄物等のエネルギー化技術として実施例が多く、既に実用化されている技術である。生ごみや下水汚泥などのメタン発酵では、約 60vol%のメタンと約 40vol%の二酸化炭素を含むバイオガスが得られる。バイオガス中には硫化水素やアンモニア等の不純物が数 10ppm のオーダーで含まれるケースがある。精製メタンを得るためには水洗処理や活性炭吸着法を採用しこれら不純分を取り除く必要がある。メタンから水素を製造するプロセスには天然ガス（都市ガス）の水蒸気改質反応と同一の技術を用いる。触媒に悪影響を及ぼす硫化物をガス中より除去した後、高温下（約 800℃）で水蒸気改質を行い水素約 75vol%の水素リッチガスを得る。ガス中の一酸化炭素はシフト反応によって水素と二酸化炭素に変換され更に水素濃度が高められる。この生成ガスより PSA によって水素を分離すれば、高純度水素ガスが得られる。

メタン発酵の嫌気性発酵条件を調整することによって、メタンではなく水素を発生させる水素発酵を試みる取り組みがなされているが、水素生産効率が極めて低く未だ実証段階に留まっている。

いずれのケースでも水素ステーションにおいて FCV へ充填するためには、99.99%スペックの水素純度が必要なため、PSA（Pressure Swing Adsorption）等の水素精製が必要である。PSA を採用した場合、水素回収率は高压仕様（水素ステーションでの圧縮を考慮して）で 80%が見積もれる。

なお、バイオエタノールやバイオディーゼル燃料の改質による水素製造方法も考慮できるが、表 2.4 中の他法に比較して、バイオマスのエネルギー転換が多段になることで明らかに効率的にも経済的にも不利になるため、検討より除くものとした。

#### 2.4.2 各種バイオマスからの水素製造量算出式

表 2.4 より、木質バイオマス、畜産廃棄物、農業残渣、下水汚泥からの水素製造量を以下の式によって算出する。この 4 種のバイオマスに対して採用した水素製造方法は、表中赤枠で囲ったより実用化に近い方法を採用した。なお、各バイオマスの物性は、表 2.5 より引用した（（社）日本エネルギー学会、別添資料 1, 2001）。

### ①木質バイオマス

表 2.4 中の (2), (3) の文献による, ブルータワーシステムの実証データをもとに計算する。

水素製造量を  $H_w$  (Nm<sup>3</sup>/h), 木質バイオマス利用量を  $q_w$  (wet-t/d) とすると,

$$H_w = \frac{1}{1.4(\text{wet-t/d})} \times \frac{24h}{10h(\text{運転時間})} \times 17\text{Nm}^3/\text{t} \times q_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。

### ②畜産廃棄物

表 2.4 中の (1) の文献による, 湿式メタン発酵+メタンの水蒸気改質+PSA 精製にて水素製造することを前提に計算する。

水素製造量を  $H_l$  (Nm<sup>3</sup>/h), 畜産廃棄物利用可能量を  $q_l$  (dry-t/d) とすると,

$$H_l = \frac{15.4\text{MJ/dry-kg (糞尿発熱量)}}{12.8\text{MJ/Nm}^3(\text{水素発熱量})} \times 0.4 (\text{メタン発酵効率}) \times 0.67 (\text{水蒸気改質効率}) \\ \times 0.8 (\text{PSA 水素回収率}) \times \frac{1,000\text{kg (単位換算)}}{10h (\text{運転時間})} \times q_l \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。

### ③農業残渣

表 2.4 中の (5) の文献による, 乾式メタン発酵+メタンの水蒸気改質+PSA 精製にて水素製造することを前提に計算する。

水素製造量を  $H_a$  (Nm<sup>3</sup>/h), 農業残渣利用可能量を  $q_a$  (wet-t/d) とすると,

$$H_a = 150\text{Nm}^3/\text{t} (\text{ガス発生量}) \times \frac{21.5\text{MJ/Nm}^3(\text{発生ガス熱量})}{12.8\text{MJ/Nm}^3(\text{水素発熱量})} \times 0.67 (\text{水蒸気改質効率}) \\ \times 0.8 (\text{PSA 水素回収率}) \times \frac{1}{10h(\text{運転時間})} \times q_a \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

### ④下水汚泥

表 2.4 中の (1) の文献による，湿式メタン発酵＋メタンの水蒸気改質＋PSA 精製にて水素製造することを前提に計算する。

水素製造量を  $H_s$  (Nm<sup>3</sup>/h)，下水汚泥利用可能量を  $q_s$  (dry-t/d) とすると，

(2) 式を下水汚泥発熱量に置き換えて，

$$H_s = \frac{15.9 \text{ MJ / dry - kg (下水汚泥発熱量)}}{12.8 \text{ MJ / Nm}^3 \text{ (水素発熱量)}} \times 0.4 \text{ (メタン発酵効率)} \times 0.67 \text{ (水蒸気改質効率)} \\ \times 0.8 \text{ (PSA 水素回収率)} \times \frac{1,000 \text{ kg (単位換算)}}{10 \text{ h (運転時間)}} \times q_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。

以上の水素製造量算出式を第 4 章以降の評価にて使用する。

### 2.4.3 将来有効なバイオマスからの水素製造技術

これまでの議論においては，バイオマスからの製造される水素を FCV に供給する本手法に採用すべき技術を，現在実用化に近い技術の中から選定した。そこでここでは，現在は開発，実証中ではあるが（表 2.4 参照）将来有効な技術として，ドライ，ウェットバイオマス双方に適用可能である超臨界水ガス化技術について言及する。

バイオマスの超臨界水ガス化は，超臨界点（臨界点：374℃，22.1MPa）以上の高密度水蒸気をバイオマスに反応させることで，通常の水蒸気ガス化に比べて反応の平衡をガス発生側にシフトさせる手法で，水が積極的に水素供与源としての役割をはたし水素収率を上げることができる。特に含水率の高いバイオマスのガス化への適合性が高いといえる。例えば 28MPa 下でのグルコースのガス化における化学平衡では，主生成ガスである，水素，二酸化炭素，メタンのうち 450℃以下の低温ではメタンの収率が大きい，温度上昇とともに水素の収率が上昇し 700℃以上ではグルコースは水素と二酸化炭素に分解される。生成ガス組成における温度の影響が大きい反面，圧力の影響はほとんどないという特徴がある。この傾向は，木質バイオマスの主成分である，セルロースやリグニンにおいても同様である。また，水素収率を上げるためには原料/水比を小さくとる必要があるが，大量の水の加熱にエネルギーが投入されることでプロ



セスのエネルギー効率では不利となる。バイオマスの超臨界水ガス化の代表的な実験装置を図 2.6 に示す。ガス化における操作条件の影響としては、①昇温速度、②装置閉塞、③反応管壁の触媒作用等が上げられる。

- ① 昇温速度 グルコースの超臨界水ガス化では昇温速度が大きいほどガス化生成量が増大する。タールなどの生成は臨界温度以下にて促進されるため、ガス化にはこの温度域を速やかに通過させる迅速な昇温が重要である。
- ② 装置閉塞 超臨界水ガス化では、ガス化とともに進行しうるタール・チャーの生成により装置の閉塞が問題となることがある。バイオマス種によっては無機塩を析出する場合もある。このような場合は、反応圧力を高圧として水密度を高めることでチャー・コーク前駆体や無機塩の水への溶解度が増し、析出を抑制することができる場合がある。
- ③ 反応管壁の触媒作用 通常の超臨界反応では、ステンレス・インコネルなどの耐食合金を反応管材料として用いるが、これらが触媒作用を有するという指摘がある。石英管を使用してインコネル粉末存在下の条件でガス化率が大きくなり水素割合が大きくなるという報告がある。反応管材料を選択する際、この影響を考慮しておく必要がある。

ルテニウムやニッケル系の固体触媒を用いることで、通常のガス化温度（600～900℃）よりもかなり低温である 400℃程度でバイオマスの超臨界水ガス化が可能となる。これによりこれまで用いることが困難であったより低温の熱源を用いることができるようになるが、低温域では平衡論的にメタンが主成分となるため、バイオマスからの水素製造では、有機物をひとまず低温で超臨界水ガス化によってメタン・二酸化炭素を主成分として若干量の水素を含むガスまで分解し、その後水蒸気改質によってメタンの水素転換を試みる手法が考案されている（吉田隆, 2007）。

## 2.5 本章のまとめ

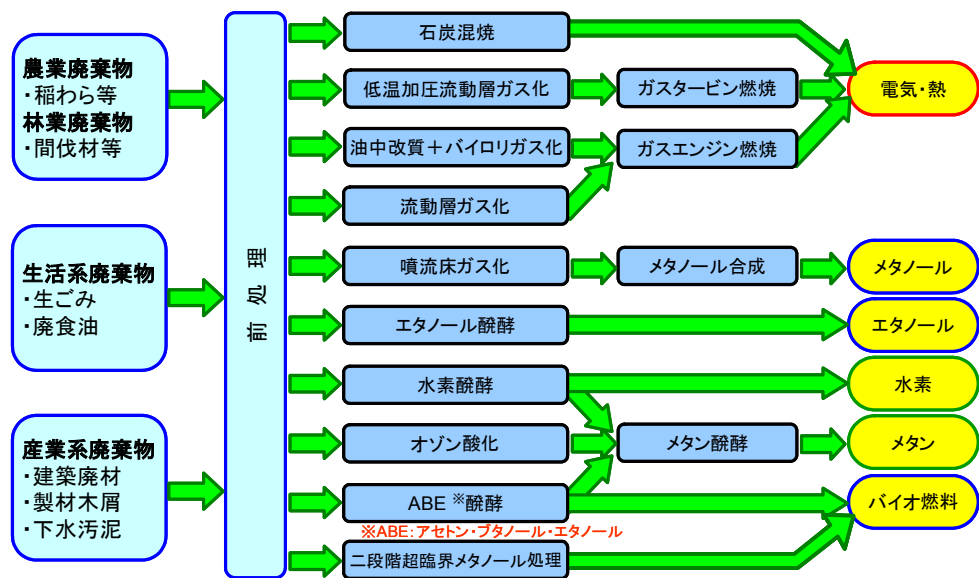
本章では、まず、バイオマスからのエネルギー転換経路およびバイオマス種ごとのエネルギー転換技術を整理し、現状の実用化に向けた開発状況を確認した。

次に、バイオマスの利活用において最も実用化に近く期待されている2つの経路（コジェネ利用、バイオエタノール燃料化）で、利活用を困難としている要因として、バイオマスの収集・運搬上の課題を上げるとともに、以降の検討において輸送コスト低減の評価を行うための輸送コストデータを整備した。

バイオマスからの水素製造技術に関しては、概ね研究開発段階あるいは実証段階にあるが、将来実用化が見込める技術をバイオマス種ごとに整理した。このうち、木質バイオマス、畜産廃棄物、農業残渣、下水汚泥のバイオマス4種について、以降の検討に用いる水素製造技術を選定し、それぞれ水素製造量算出式を作成した。

バイオマスの輸送コストデータおよび水素製造量算出式の作成によって、第4章以降の検討評価の体制を整備した。

加えて、将来有効なバイオマスからの水素製造技術として、超臨界水ガス化技術を解説した。



出典：NEDO パンフレット，バイオマスエネルギー高効率転換技術開発

図 2.1 バイオマスからのエネルギー転換経路

表 2.1 バイオマス種と転換技術のマトリックス

			バイオマス資源										
			木質系バイオマス		製紙系バイオマス	草本系バイオマス		糞尿・汚泥	食品廃棄物	その他			
						草・海草	牧草・水			農業残渣	でん糖・ぶん	植物油	
Dry/Wet			D	D	D	D	W	D	W	W	W	W	
例示			製材残材・間伐材	建築廃材	古紙	ネピアグラス	ホテイアオイ	トウモロコシ 稲藁・もみ殻・麦藁	家畜糞尿	下水汚泥 浄化槽汚泥	食品加工廃棄物 厨芥、水産加工残渣	甘藷	廃食用油、菜種油、
転換技術	燃焼	直接燃焼ボイラ	◎	◎	◎			◎		◎			
		直接燃焼発電	◎	◎	○			◎	△		◎		
		固形燃料化	◎	◎				◎		○	◎		
		混焼発電	◎	◎				◎	△	○	◎		
	熱化学的変換	熔融ガス化	○	◎									
		固定床ガス化	◎	○					○				
		低温流動層ガス化	○	○									
		噴流床ガス化	○	○		○		○					
		高カロリーガス化	○	○		○		○					
		急速熱分解	◎	○	○	○	○	○	○	○	○		
		スラリー燃料化	○	○	○	○	○	○	△	○	○		
		直接液化	○	○	○	○	○	○	△	○	○		
		超臨界水ガス化	○			○	△			○	○		
		超臨界メタノール処理	○		○								○
		炭化	◎	○	○	△	△	○		○	○		
	エステル化											◎	
	生物化学的変換	メタン発酵	△			△	◎	◎	◎	◎	◎		
エタノール発酵		○	○	○			○			○	◎		
アセト・ブタノール発酵										○	◎		
水素発酵				○	○	○	○	○	○	○	○		

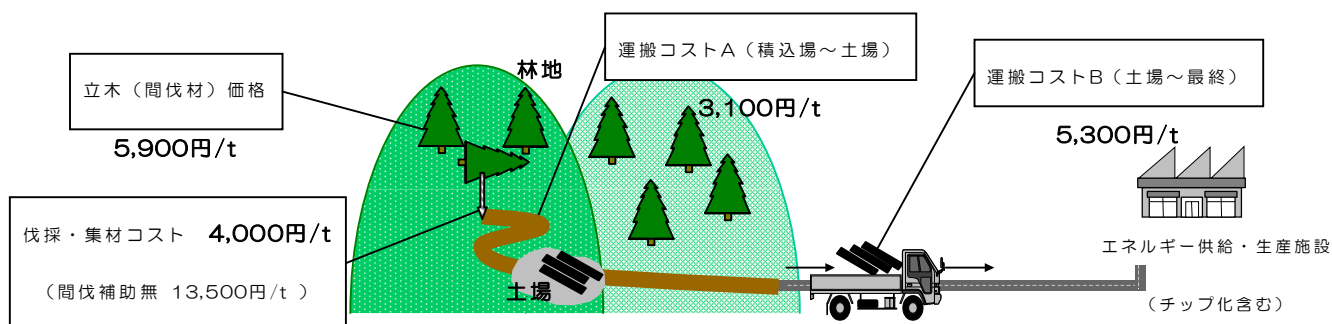
◎ : 実用化実績のある組み合わせ

○ : 実験段階もしくは実証段階の組み合わせ

△ : フィージビリティスタディが行われている組み合わせ

出典 : (株) 三菱総合研究所, 平成 14 年度新エネルギー等

導入促進基礎調査



間伐材調達費 18,300円/t (立木価格，伐採・集材コスト，運搬コストA，B)

表 2.2 バイオマスの収集・運搬コスト  
(100 t /日のコジェネケース)

状 態	価 格 (円 / wet- t )
立木 (間伐材)	5,900
伐採・収集コスト	4,000
運搬コスト A (積込場～土場)	3,100
運搬コスト B (土場～最終消費地) 63.4 k m	5,300
合計費用	18,300 (コスト B 比率 = 29.0%)

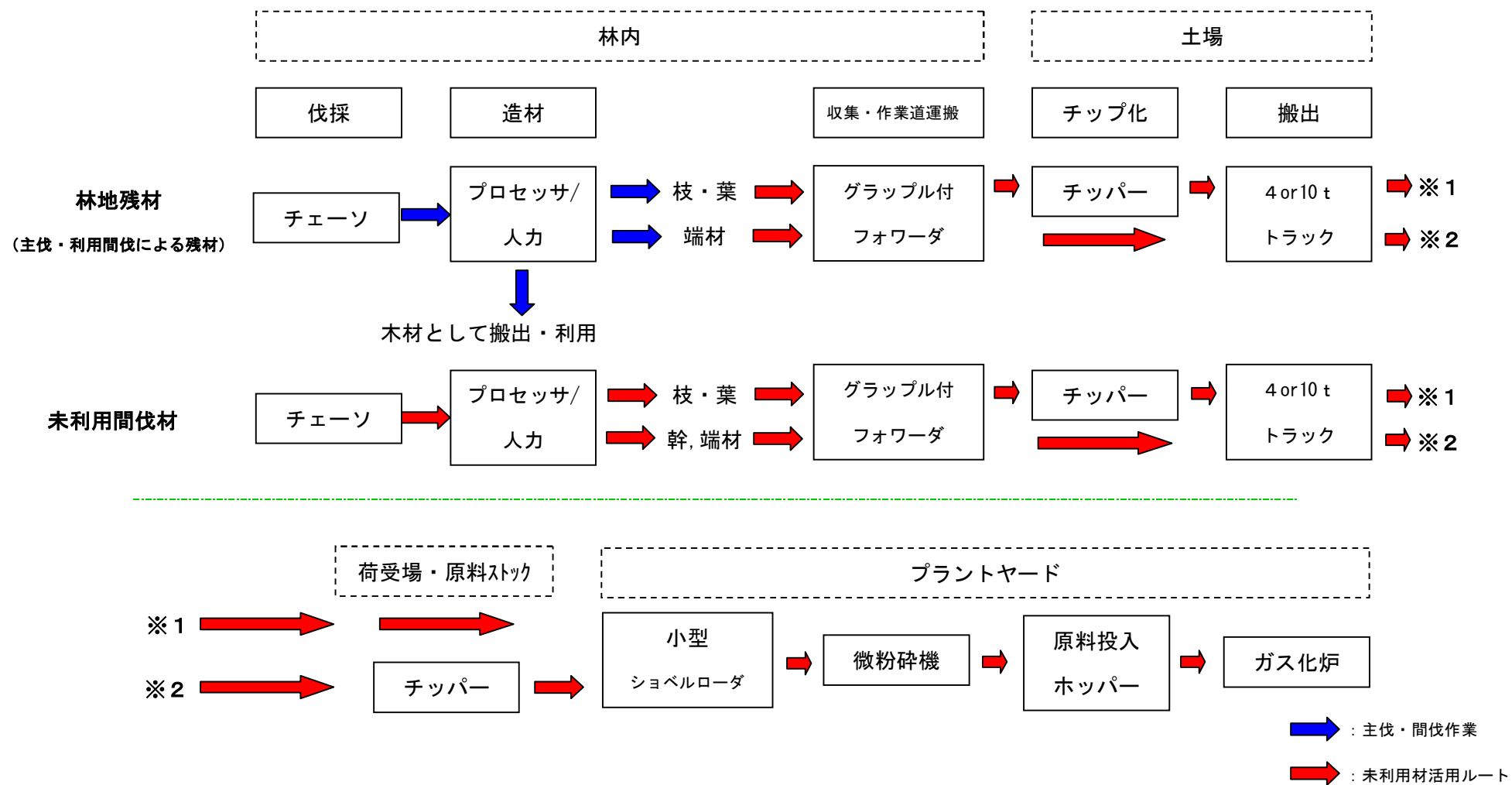
出典：(株) 三菱総合研究所，平成 14 年度新エネルギー等導入促進基礎調査  
(バイオマスエネルギー開発・利用戦略に関する調査研究) METI 新エネ課

表 2.3 運搬コスト B における輸送距離と運賃の関係  
(4 t 車)

輸送距離	運賃
$x \leq 10\text{km}$	230.3 円/km・t
$10 \text{ km} < x \leq 50 \text{ km}$	57.9 円/ km・t+1,724 円/t
$50 \text{ km} < x \leq 100 \text{ km}$	50.6 円/ km・t+2,090 円/t
$100 \text{ km} < x \leq 200 \text{ km}$	31.4 円/ km・t+4,010 円/t
$200 \text{ km} < x \leq 500 \text{ km}$	27.5 円/ km・t+4,790 円/t
$500 \text{ km} < x$	27.7 円/ km・t+4,690 円/t

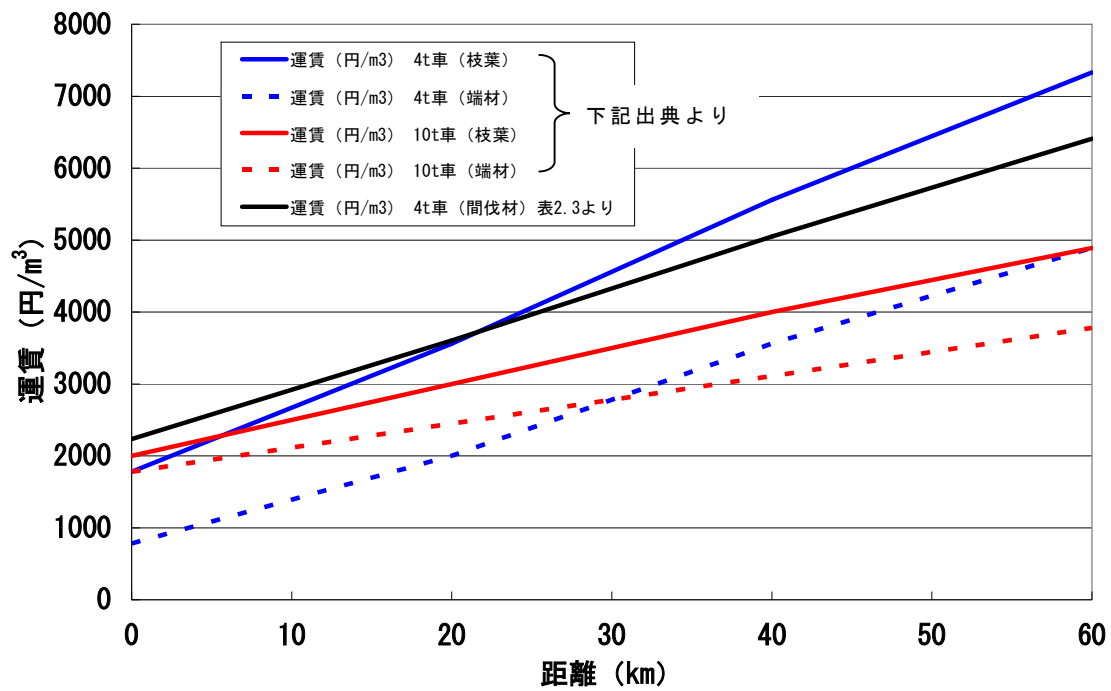
木質バイオマス:Wet Base

出典：(株)三菱総合研究所，平成 14 年エネルギー等導入促進基礎調査，  
バイオマスエネルギー開発・利用戦略に関する調査研究) METI 新エネ課



出典：福島県林業研究センター研究報告, 2007 より作成

図 2.2 林地残材の収集・積込・運搬・原料投入までの工程



出典：福島県林業研究センター研究報告, 2007

図 2.3 林道脇（土場）から重要地までの輸送距離と運賃の関係



表 2.4 バイオマスからの水素製造方法の分類

バイオマス種		変換技術	ガス組成・エネルギー効率等	規模, 特記	段階	文献
ドライ	木質系 バイオマス (林地残材, 間伐材, 製材残材等)	低温流動床ガス化	H <sub>2</sub> : 66%, CH <sub>4</sub> : 2%, 冷ガス効率: 70%程度	B: 10dry-t/d	実用	(1)
		部分酸化ガス化	H <sub>2</sub> : 62%, 冷ガス効率: 60%	B: 10dry-t/d	実証	(1)
		水蒸気ガス化	H <sub>2</sub> : 60% 約 17 Nm <sup>3</sup> /h (H <sub>2</sub> )	B: 1.4wet-t/d	実用	(2) (3)
			H <sub>2</sub> : 83%, CH <sub>4</sub> : 15%	B: 1kg/h 時, 生ガス量 0.5 Nm <sup>3</sup> /h	実証	(4)
	牧草, 海草	超臨界水ガス化	H <sub>2</sub> : 10%以下, CH <sub>4</sub> : 45%	CH <sub>4</sub> 改質要	実証	(1)
	農業残渣	乾式メタン発酵 + 水蒸気ガス化	CH <sub>4</sub> : 60%, CO <sub>2</sub> : 40% 150 Nm <sup>3</sup> /wet-t, 21.5MJ/Nm <sup>3</sup>	B: 50wet-t/d 生ゴミ, CH <sub>4</sub> 改質	実用	(5)
	古紙, 草本系	水素発酵, メタン発酵 + 水蒸気ガス化	H <sub>2</sub> : 5.23mol/dry-kg CH <sub>4</sub> : 8.39mol/dry-kg	NEDO プロ実績からの推定 (草本)	実証	(6)
ウェット	家畜糞尿, 食品廃棄物, 下水汚泥	メタン発酵 + 水蒸気ガス化	CH <sub>4</sub> 発酵: E 効率約 40% 改質: 熱効率 67%	B: 10dry-t/d CH <sub>4</sub> 改質要	実用	(1)
		水素発酵, メタン発酵 + 水蒸気ガス化	H <sub>2</sub> : 2.95mol/dry-kg CH <sub>4</sub> : 8.57mol/dry-kg	NEDO プロ実績からの推定	実証	(6)
	下水汚泥, 食品廃棄物	超臨界水ガス化	H <sub>2</sub> : 10%以下, CH <sub>4</sub> : 50%	CH <sub>4</sub> 改質要	実証	(1)

Pressure Swing Adsorption: PSA における水素回収率: 80% (高圧仕様)

(1): (社) 日本エネルギー学会, 2001

(2): (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) パンフレット, 2005

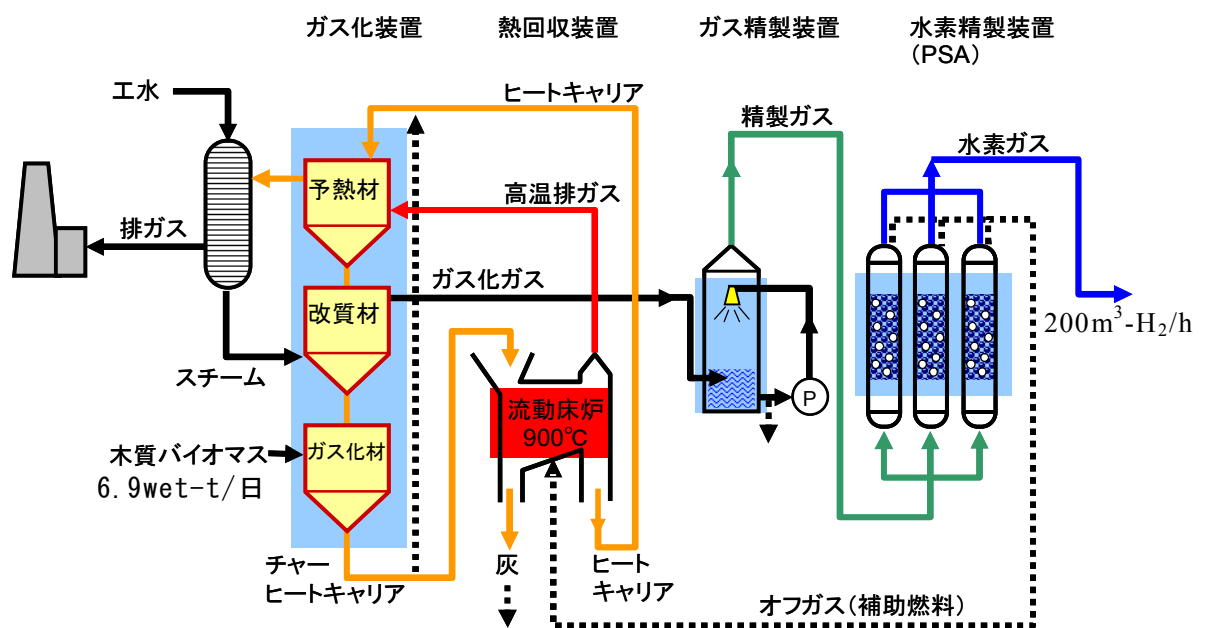
(3): 山地憲治他, 2008

(4): 美濃輪智朗, 2007

(5): (株) タクマ, 2007

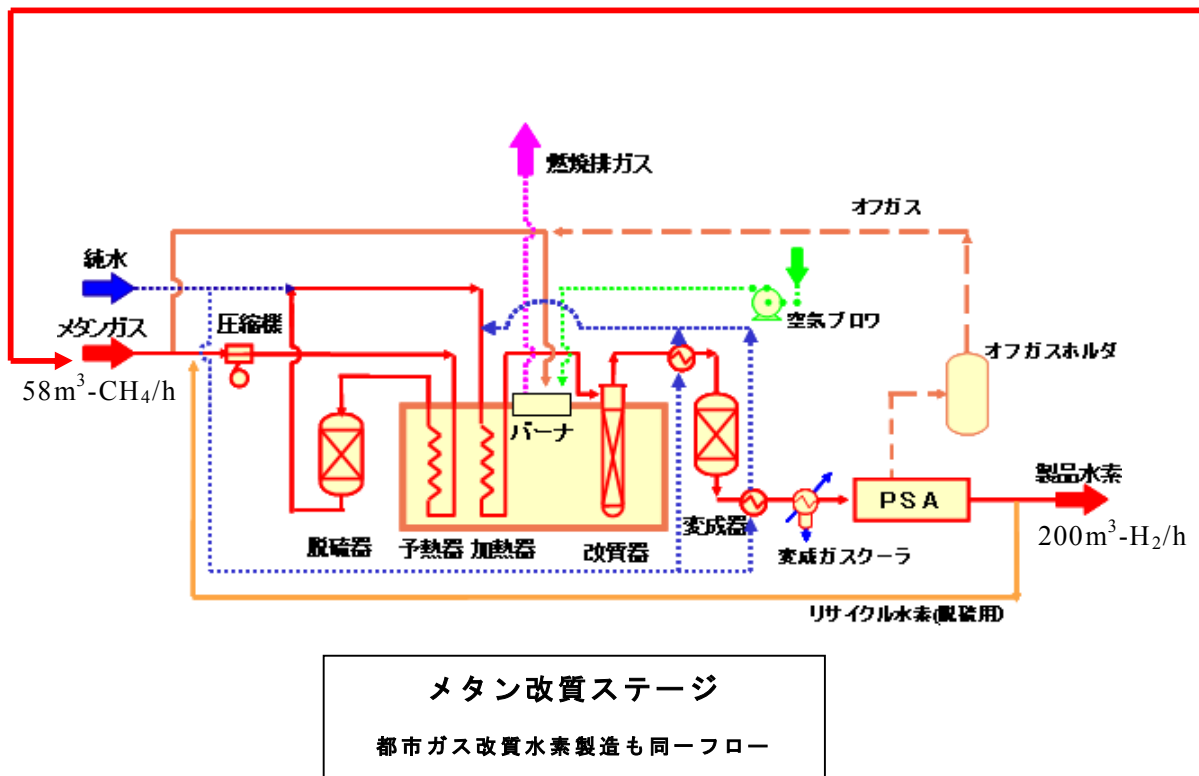
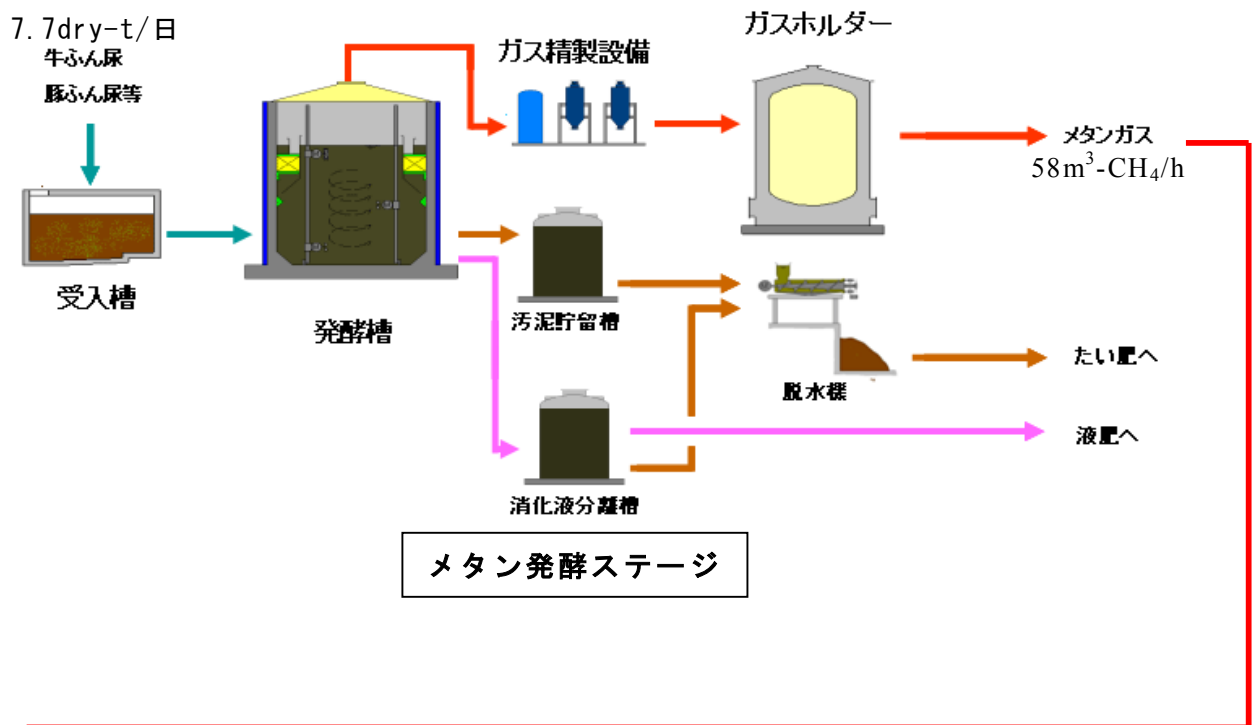
(6): (株) 荏原製作所・(株) 西原環境テクノロジー et al., 2007

注: 引用文献詳細は巻末参照



出典：山地憲治他，水素エネルギー社会，2008

図 2.4 ブルータワープロセスフロー



出典：NEDO バイオマスエネルギー導入ガイドブックおよび東京ガス資料より作成

図 2.5 メタン発酵とメタンの水蒸気改質水素製造フロー

表 2.5 計算に用いた対象バイオマスの物性

		木質系	牧草	稲わら・ 籾殻	牛豚鶏 糞尿	下水汚泥
工業分析 (乾重量基準)	セルロース	0.41	0.34	0.3	0.18	0.05
	ヘミセルロース	0.29	0.43	0.39	0.19	0.04
	リグニン	0.28	0.05	0.04	0.07	0.04
	粗タンパク	0.01	0.13	0.12	0.19	0.28
	粗脂肪					0.09
	炭水化物					0.17
	灰	0.01	0.05	0.15	0.18	0.33
発熱量 (HHV)	[MJ/dry-kg]	21	18	16.3	15.4	15.9
含水率		0.3	0.4	0.3	0.8	0.8
元素分析 (乾重量基準)	C	0.518	0.447	0.409	0.351	0.359
	H	0.063	0.059	0.052	0.053	0.052
	O	0.413	0.418	0.376	0.332	0.21
	N	0.001	0.022	0.008	0.025	0.044
	S	0	0.004	0.002	0.004	
	灰	0.005	0.05	0.15	0.235	0.33
化学式		$\text{CH}_{1.46}\text{O}_{0.60}$	$\text{CH}_{1.5}\text{O}_{0.7}\text{N}_{0.04}$	$\text{CH}_{1.58}\text{O}_{0.7}\text{N}_{0.04}$	$\text{CH}_{1.58}\text{O}_{0.7}\text{N}_{0.04}$	$\text{CH}_{1.73}\text{O}_{0.44}\text{N}_{0.11}$
式量	[kg/mol]	0.0231	0.0255	0.0255	0.0262	0.0222
燃焼エンタルピー	[kJ/mol]	-489	-483	-489	-491	-530

$$H_2 : 3,053\text{Kcal}/\text{Nm}^3 = 12.8\text{MJ}/\text{Nm}^3 (\text{HHV}) = 10.8\text{MJ}/\text{Nm}^3 (\text{LHV})$$

出典：(社) 日本エネルギー学会，平成 13 年度新エネルギー等導入促進基礎調査

(バイオマスエネルギー高効率転換技術に関する調査) 報告書 別添資料 1, 2001

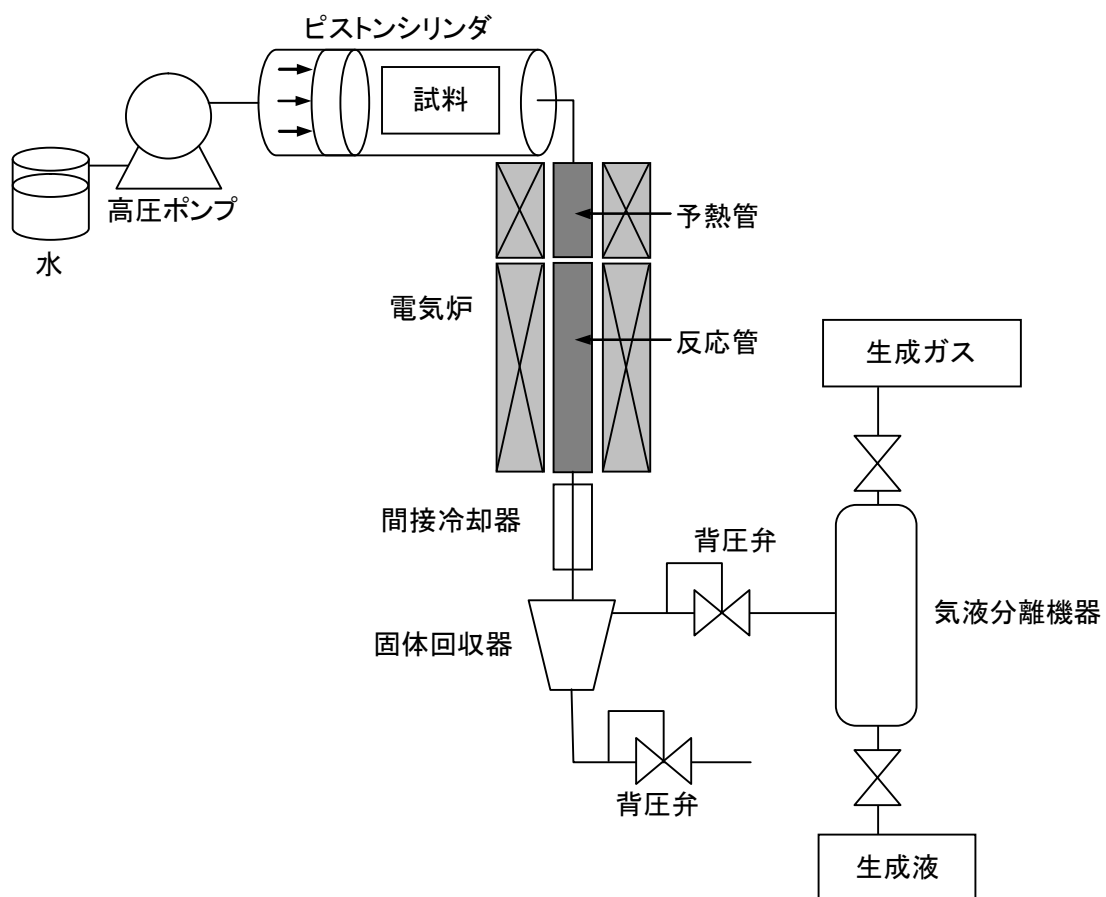


図 2.6 バイオマスの超臨界水ガス化装置

### 第 3 章 燃料電池自動車の実用化と水素供給基盤構築

### 3.1 はじめに

本章では燃料電池関連技術の普及計画について言及する。

定置用燃料電池コジェネおよび燃料電池自動車と水素ステーションの、普及計画と現状について解説する。FCV の導入普及は当初経済産業省が示した目標から遅れてはいるが、引き続き FCV に関する研究開発は精力的に続けられており、国も重要な技術課題として位置づけ支援している状況にある。産業界からは FCV 普及と水素ステーション構築に向けた独自のシナリオが提示されており、2015 年を商用化開始時期として以降の普及計画の詳細を策定している。

FCV と水素ステーションの普及拡大は、輸送部門における一次エネルギー変換効率の改善、Well to Wheel における CO<sub>2</sub> 排出量低減に多大に寄与し、2050 年を目指した国の CO<sub>2</sub> 低減目標を達成するに必要不可欠なシステムであると言える。

2050 年に向けてどの様に CO<sub>2</sub> 排出量低減が図られるか、日本経済団体連合会の関連機関にて最近取りまとめられた報告を紹介し、定量的に推定された結果について考察する。

### 3.2 燃料電池実用化計画と現状の課題

経済産業省資源エネルギー庁長官の諮問機関として設立した「燃料電池実用化戦略研究会」は、水素社会の成立に向けて燃料電池の普及計画を 2004 年に作成した（経済産業省，2004）。図 3.1 にこの計画を示す。実用化普及に向けて 2 つの目標がたてられた。定置用燃料電池の普及と燃料電池自動車の普及目標である。

燃料電池にはいくつかの種類があるが、実用化が進んでいるのはリン酸形燃料電池（Phosphoric Acid Fuel Cells：以下 PAFC）である。しかし導入機の発電規模（数 100 kW 級）はガスエンジンの商品規模と重なっており、ガスエンジンに対して未だコスト・性能面で優位性を持つことができず、普及が進んでいないのが現状である。これに対して近年注目を集めているのが、より低温で作動し輸送用にも採用でき作動レスポンスの良さを有している、固体高分子形燃料電池（Polymer Electrolyte (membrane) Fuel Cells：以下 PEFC）である。また、作動温度は高温だが、高い発電効率が得られる固体酸化物形燃料電池(Solid Oxide Fuel Cells：以下 SOFC)の導入も期待されている（George A. Olah, Alain Goeppert et al., 2006）。

定置用燃料電池では、PEFC で 1 kW 規模の家庭用燃料電池コジェネの技術開発の進展が近年目覚ましいことから、本計画はこのタイプを積極的に導入開始し普及を図ることとして策定された。5 kW 規模の SOFC 高温型コジェネは業務用・産業用に開発されている。本タイプは PEFC に続いて導入されるものとしており、最終的には数千 kW 級のコンバインド発電用電池を導入する計画である。2005 年に首相官邸に日本第 1 号の PEFC1 kW 定置用燃料電池が設置されて以来、大規模実証テストを経て、2009 年度より補助金を得ながら商品化販売される運びとなっており、本計画は概ね順調に推移していると言える。

一方 FCV に関しては、定置用に先行して 1994 年にダイムラー・ベンツ社が FCV を発表して以来、PEFC の技術進展に自動車分野が寄与した影響は非常に大きく、輸送用分野での環境影響度低減につき多くの期待が FCV に寄せられた。

日本では 2002 年に経済産業省が JHFC プロジェクトを立ち上げ、現在はその 2 期目として、国内外自動車会社 9 社が FCV を導入し、石油・ガスのエネルギー関連会社等 16 社が首都圏を中心に設置する 12 の水素ステーションとともに、



実証試験が展開されている。図 3.2 に JHFC の都市ガス改質水素ステーションと FCV を示す。

水素は可燃性ガスの中でも爆発範囲が広く、あらゆるガス体のうち最大の拡散率を持ち、細孔・薄膜などから外部へ漏洩しやすく、漏洩すると周囲へ広がりやすい性質を持つ。様々な金属に吸蔵され、透過するという性質も持ち、一般のプラントに用いる鋼材に対しては、いわゆる水素脆化の現象を引き起こすことが知られている。またエネルギー密度を上げるため超高压（35MPa 以上）で貯蔵・充填される点、上記の観点も含め、保安上取り扱いには注意を要する。水素ステーションの建設には、これら水素の持つ物理的・化学的性質を種々の実験やシミュレーションをもとに十分考慮した上で、「高压ガス保安法」、「建築基準法」、「消防法」ら諸法による規制を、水素ステーション用に見直す取り組みが行われている。隔壁の設置や、適切な保安離隔距離をとることによって、既設の圧縮天然ガススタンド並みの規制で建設できる準備が進められたが、都市部の中心にスタンドを建設するには、更なる規制の見直しが必要である。加えて、よりコンパクトで高効率かつ安価な水素ステーション構築が、今後の課題となっている。

FCV では、居住空間を確保するためによりコンパクトに、既存ガソリン車に匹敵する価格での市場導入の必要性、水素 1 回充填あたりの走行距離確保の点で超高压の水素充填が必要であること等、定置用燃料電池に比較して達成すべき技術課題が多く精力的な開発が継続されているが、当初期待されていた普及が遅れているのが現状である。2004 年に策定された導入目標では、バス等の公用大型車両から初期導入を図り、次に小型貨物車、業務用乗用車を導入、最後に一般の普通乗用車を導入するという計画であった。2008 年時点での日本全国における FCV 普及台数は約 60 台であるから、2010 年に 5 万台を導入するという本計画は達成し難い状況になってきている。水素ステーションも 50m<sup>3</sup>/h 規模（商用規模は、200～300m<sup>3</sup>/h）の実証段階のものが、首都圏に 9 ヶ所、中部地区に 1 ヶ所、関西地区に 2 ヶ所設置されるに留まっている。

FCV 普及に向けた国の計画は遅延しているとはいうものの、経済産業省は 2008 年 3 月に「Cool Earth – エネルギー革新技术計画」を発表し、プラグイン

ハイブリッド自動車や電気自動車とともに FCV を重点的に取り組むべき輸送分野の革新技術として再定義し、CO<sub>2</sub> 大幅削減を可能とする旗頭として継続的に技術支援している。

### 3.3 燃料電池自動車と水素ステーションの普及にむけたシナリオ

2008 年 4 月に、民間企業で作る燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）が FCV および水素ステーションの普及に向けたシナリオを発表している（JHFC セミナー資料，2008）。

これによると、FCV、水素ステーションとも現在はフェーズ 1 の技術実証の段階にあるが、2011 年から 2015 年にかけてフェーズ 2 として、商用規模のステーションや移動式小型ステーションを含むより多くの水素ステーションが建設され、社会受容性、自動車の利便性等の社会実証が行われる予定である。2015 年より FCV の一般ユーザーへの販売を開始する目標とされており、この際の FCV は、先の METI 目標とは異なり、バス等の公用車からではなく、一般の普通乗用車から販売を開始するものとしている。これは、公用車から業務用車、その後に普通車とした緩やかな普及計画では、近年の CO<sub>2</sub> 削減に対する要請（福田ビジョンにみるような 2050 年に現状の 60～80% の CO<sub>2</sub> 削減目標）に対応できないとの判断からであり、2015 年から年間数万台の規模で FCV を増産、急速な普及拡大が必要との見方をしている。反面、インフラとしての水素ステーションは事前に相当数を建設、準備しておく必要があるため、FCV の導入台数が少ない普及初期にはステーションの稼働が上がりずステーション経営は成立しない。この間（5 年から 10 年程度と予想されている）のステーション建設・運営への国からの補助の必要性を FCCJ は訴えており、FCV と水素ステーションの「鶏と卵」問題をいかに解決できるかが、輸送用分野での CO<sub>2</sub> 削減目標達成への鍵であるとしている。

以上述べてきたように、FCV および水素ステーションの普及拡大は当初計画との間に遅れはあるものの、輸送部門の大幅 CO<sub>2</sub> 削減に資する重要な課題として認識され、官民あげてその実現に努力がはらわれているところである。

このような FCV・水素ステーションの普及に向けた取り組みを背景に、バイオマスの利活用問題を考えると、薄く広く賦存するバイオマスを有効にエネルギー利用するためには、バイオマス同様日本全国に点在するガソリンスタンドが将来水素ステーションに転換された場合に、バイオマスの賦存サイトで水素を製造し、水素ステーションより FCV へ水素充填するシステムが有効な手法と考えられる。この手法を用いれば、バイオマスのコジェネ利用に比べて収集・

運搬費（表 2.2 中のコスト B 比率）を大幅に低減できる可能性があり，利活用のための経済性に大きく貢献することが期待される。

### 3.4 水素製造におけるエネルギー変換とCO<sub>2</sub>発生量

#### 3.4.1 Well to Wheel におけるエネルギー変換効率

図 3.4 に FCV とガソリン車他のエネルギー消費量比較を示す。図中、「将来」とは、ディーゼルハイブリッド車の開発、FCV ではスタック効率を現状の 50% から 60% への向上が図られた場合の一次エネルギーの投入量を示している。また、E100 エタノール HV も将来開発される可能性があるエコカーとして記載した。FCV の普及期に主流になるとみなされている都市ガス（天然ガス）からの水素改質による将来型の FCV では、内燃機関で走行する現在のガソリン自動車あるいは天然ガス自動車に比較して、約 50% の一次エネルギーで同一の距離を走行できる。従って、同一原料を水素に転換し FCV にて自動車燃料として使用するシステムを採用すれば、一次エネルギーを半減できる点、少資源国日本の輸送部門における将来システムとしてメリットは非常に大きいと言える。バイオマスから水素を製造し FCV にて使用するシステム（家畜糞尿をメタン発酵し、生成メタンの水蒸気改質による水素製造を想定）は、水素製造に 2 段階のエネルギー転換過程を経ているため、エネルギー効率的には若干不利な結果となった。

#### 3.4.2 Well to Wheel におけるCO<sub>2</sub>発生量

図 3.5 に FCV とガソリン車他の CO<sub>2</sub> 排出量比較を示す。CO<sub>2</sub> 排出量は、Well to Tank と Tank to Wheel に分けて表記した。

内燃機関（ガソリン車やディーゼル車、天然ガス自動車等）は Well to Tank 時の CO<sub>2</sub> 排出量割合は少ないが、Tank to Wheel 時に多量の CO<sub>2</sub> を排出していることが分かる。エタノール車については、E3 ではガソリン分の Tank to Wheel 時の発生 CO<sub>2</sub> により CO<sub>2</sub> 削減効果は少ない。E100（ブラジルでのさとうきびからのエタノール製造を前提に試算）では、バイオエタノールはカーボンニュートラルとみなされるため Tank to Wheel 時の発生 CO<sub>2</sub> は算入されず、CO<sub>2</sub> 削減効果は大きくなる。将来の E100 エタノール HV を想定すると、更に CO<sub>2</sub> 削減効果は大きい。

一方、FCV は水素製造過程によって CO<sub>2</sub> 排出割合が異なるが、FCV の特性上 Tank to Wheel 時の CO<sub>2</sub> 排出は全く無い。将来型の FCV（スタック効率を 60%

に改善)では、石炭-水素以外、いずれも既存車両に比べて著しく CO<sub>2</sub> 排出が少ないことが窺える。

図中のバイオマス・水素 FCV は、家畜糞尿からメタン発酵+メタンの水蒸気改質により製造した水素を将来型の FCV に供給する場合を示している。

CO<sub>2</sub> 排出量計算は、以下の前提に従った。

各工程のエネルギー効率

原料回収・メタン発酵：0.835， 圧縮・充填（35MPa 充填）：0.983

家畜糞尿回収には 2t トラック（燃料はガソリンで燃費 6.0km/l）で片道 10km，メタン発酵，圧縮・充填投入エネルギーは電力を使用，メタン改質に必要なエネルギーは発生メタンにより賄う。

このプロセスは現行のガソリン車に対して CO<sub>2</sub> 排出量を 90%も削減できる。この様にバイオマスからの水素製造は，FCV に充填し利活用することで CO<sub>2</sub> 排出量削減に極めて有効な手段であることが分かる。

### 3.4.3 FCV 導入による CO<sub>2</sub> 削減効果

このように、水素エネルギーを FCV の燃料に使用するシステムは、輸送部門の CO<sub>2</sub> 削減に多大の効果があることが分かった。そこで、この効果を定量的に集計し、2050 年の CO<sub>2</sub> 削減目標に対する考察を行ってみる。

最近、日本経済団体連合会の関連機関である産業競争力懇談会（Council of Competitiveness – Nippon：以下 COCN）は、「燃料電池自動車・水素供給インフラ整備プロジェクト」と題する推進テーマの中間報告を取りまとめた（産業競争力懇談会，2008）。本報告書では、2015 年以降の FCV と水素ステーションの進展シナリオに従って、日本全国にどの様に水素ステーションを配して普及を図っていくか、具体的な提案を行っている。筆者はこの提案の作成に、新日本石油（株）、トヨタ自動車（株）とともに共同提案者として深く関わった。

図 3.6 に COCN 中間報告で試算された水素インフラ普及による CO<sub>2</sub> 削減効果を示す。「普及型水素供給のみ」とは、都市ガス-水素，製油所・製鉄所副生水素で，FCV 普及を行った場合の CO<sub>2</sub> 排出量を試算したもので，2050 年には 2010 年の排出量の約 50%まで CO<sub>2</sub> を削減できる。なお，2050 年時点での FCV 普及台数は 4,920 万台（2007 年度末登録のガソリン車，軽自動車，ディーゼル車合

計 7,580 万台に対して普及率 65%), 水素ステーションは 34,200 ヶ所 (2007.3 時点の全国ガソリンスタンド数 53,900 ヶ所に対して転換率 63%), 水素販売量は, 520 億  $\text{m}^3$ /年を想定している。

「低炭素型水素供給導入」とは, 上記化石燃料からの水素製造の過程に CCS を採用し, 加えて再生可能エネルギーからの水素導入を図った場合の試算である。全体に占める再生可能エネルギーから製造される水素の割合は非常に少ないが, 2050 年では対 2010 年比で  $\text{CO}_2$  排出量を約 20%まで削減できることが示されている。この間の総  $\text{CO}_2$  削減量は約 9 億 t に相当する。

従ってこの試算は, 「福田ビジョン」における 2050 年削減目標 (現状から 60 ~80%の削減) の最も厳しい値を達成できることを示したものとして, 意義深い。

### 3.5 本章のまとめ

本章では、燃料電池開発の現況、特に燃料電池自動車・水素ステーションの実用化開発に関して解説した。

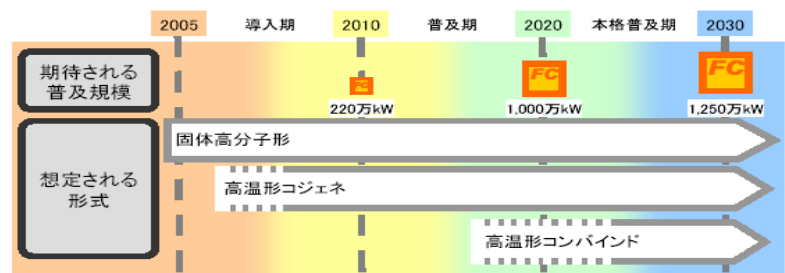
FCV と水素ステーションの普及について、経済産業省は 2004 年に普及目標を策定したが、FCV の技術開発に遅延が出てきており、普及が遅れているのが現状である。しかしながら、経済産業省は 2008 年 3 月に「Cool Earth—エネルギー革新技术計画」を策定し、FCV・水素ステーションに対する技術革新の必要性を再確認し、開発支援を継続している。産業界でも燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）は、2015 年を FCV の普及開始とする「FCV と水素ステーションの普及に向けたシナリオ」を発表し、普及に向けた具体的な検討を開始している。

FCV と、ガソリン車他内燃機関車との、エネルギー消費量および CO<sub>2</sub> 排出量比較を行った。単位走行距離あたりの一次エネルギー投入量は、ガソリン車と比較して FCV では概ね約 50%であり、FCV・水素システムの省エネ性が証明された。ガソリン車、ディーゼル車等の内燃機関車と比較して FCV は CO<sub>2</sub> の排出量を大幅に低減できる。内燃機関車では Well to Tank での発生 CO<sub>2</sub> は少ないが、Tank to Wheel 時に多量の CO<sub>2</sub> を発生していることが分かる。FCV では特性上 Tank to Wheel 時の CO<sub>2</sub> 排出は全く無く、効率を向上した将来型 FCV で家畜糞尿より製造した水素を用いると、Well to Wheel 比較でガソリン車の 90%もの CO<sub>2</sub> を削減できることがわかった。

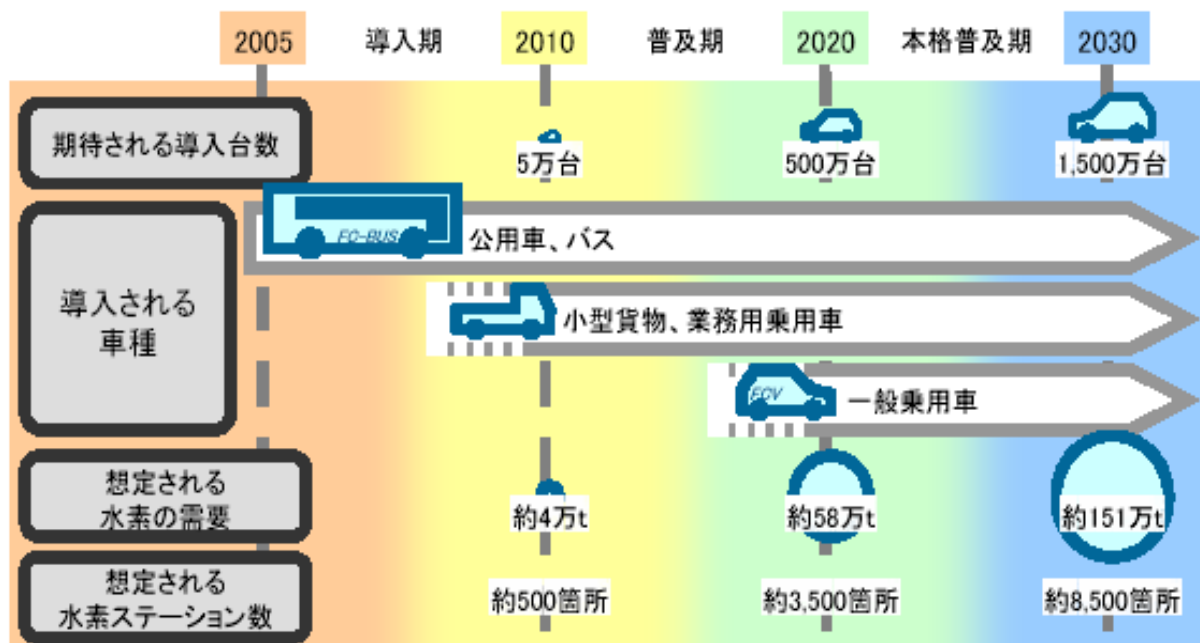
日本経済団体連合会の関連機関である産業競争力懇談会は、FCV—水素システムの導入によって石油・都市ガス等の化石燃料から水素を製造したとしても、2050 年の CO<sub>2</sub> 排出量を現在の約 50%まで削減可能であるとの試算を発表しており、更に CCS や再生可能エネルギーからの水素を導入する条件では、約 20%までの削減を達成できるとしている。

このように、FCV—水素システムの導入普及は、輸送用分野におけるエネルギー消費の削減、CO<sub>2</sub> 排出量の低減に、大きく寄与する重要な方策であることが理解できる。





(参考) 定置用燃料電池の普及目標



出典：経済産業省，燃料電池実用化戦略委員会資料，2004

図 3.1 燃料電池自動車の普及目標

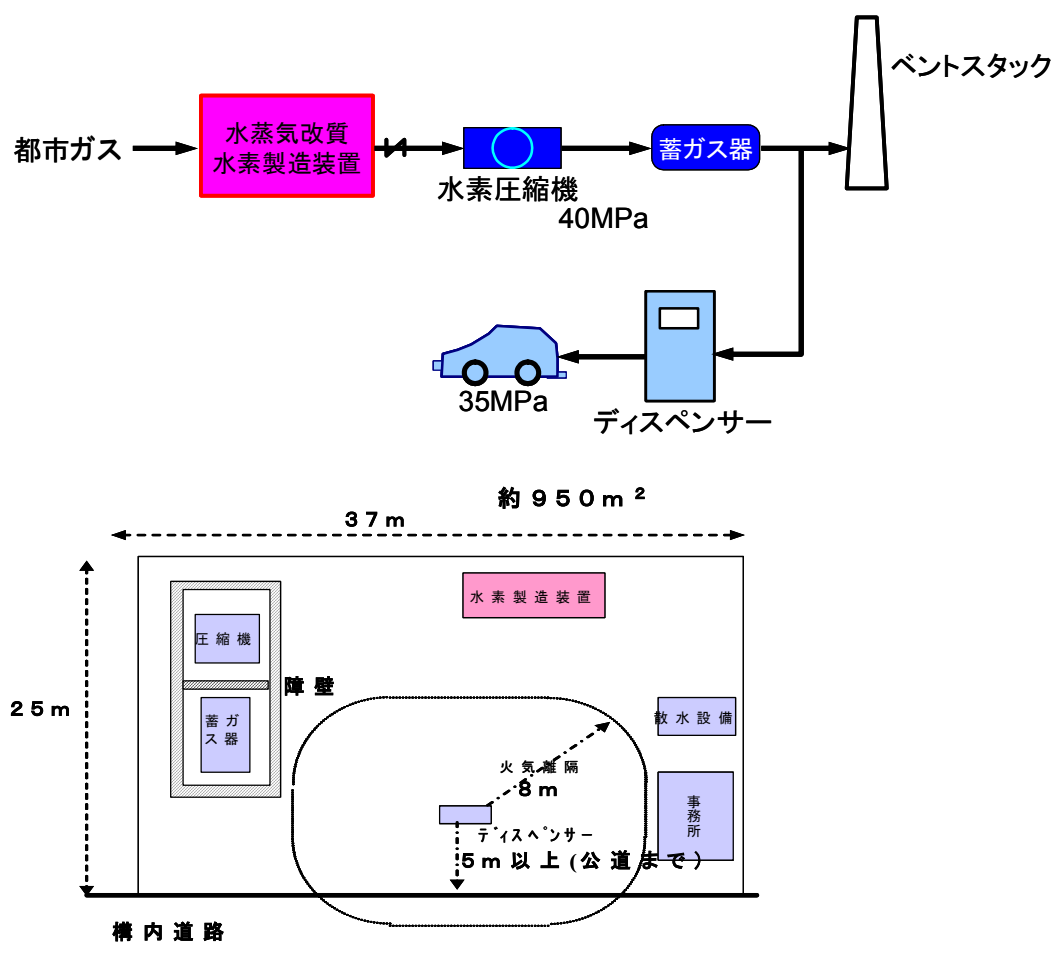
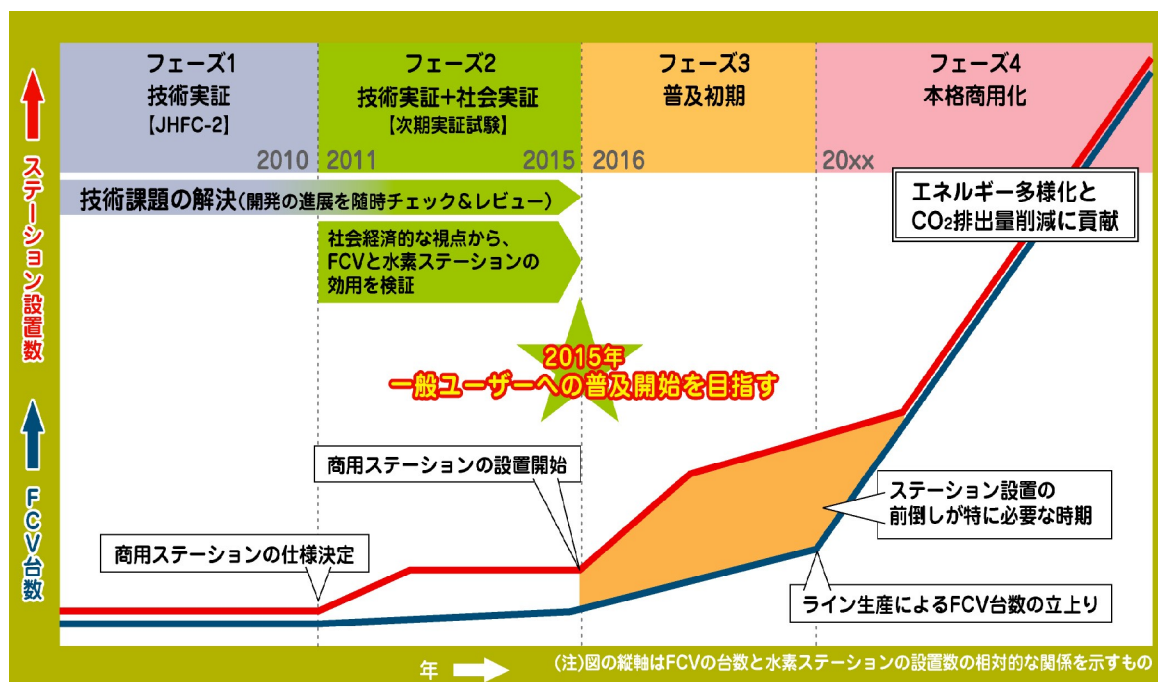


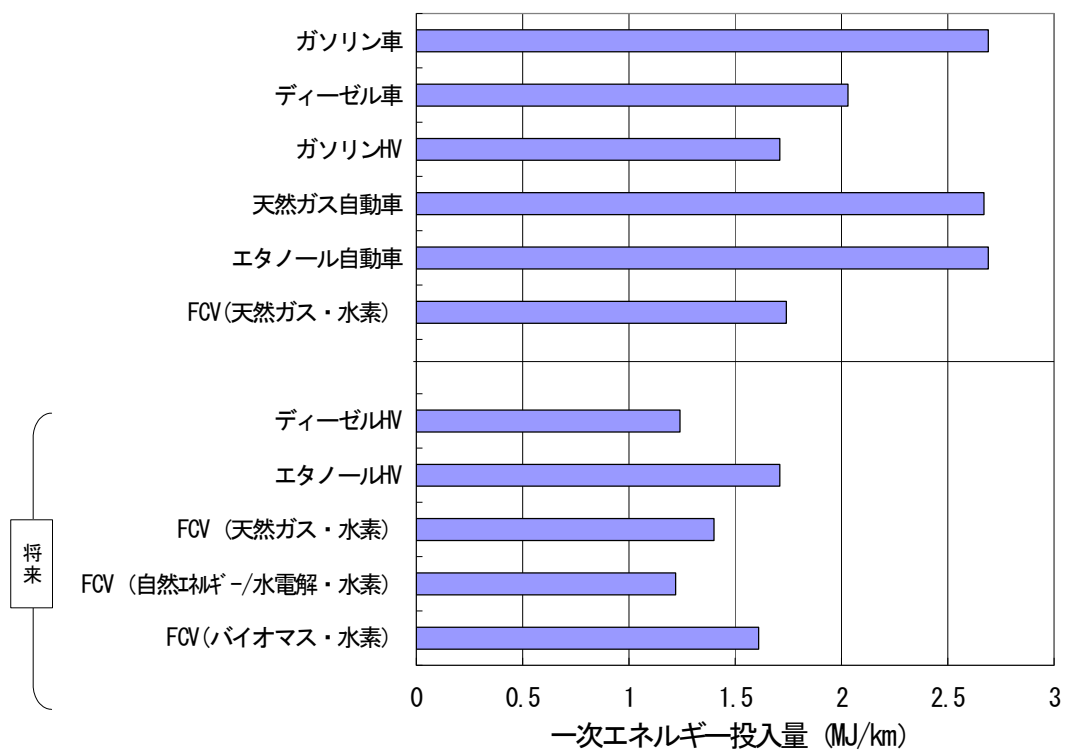
図 3.2 都市ガス改質水素ステーションの機器構成・レイアウトと FCV  
(東京ガス千住水素ステーション)



2015 年から普及開始：METI 目標  
に対して 5～10 年の遅れ

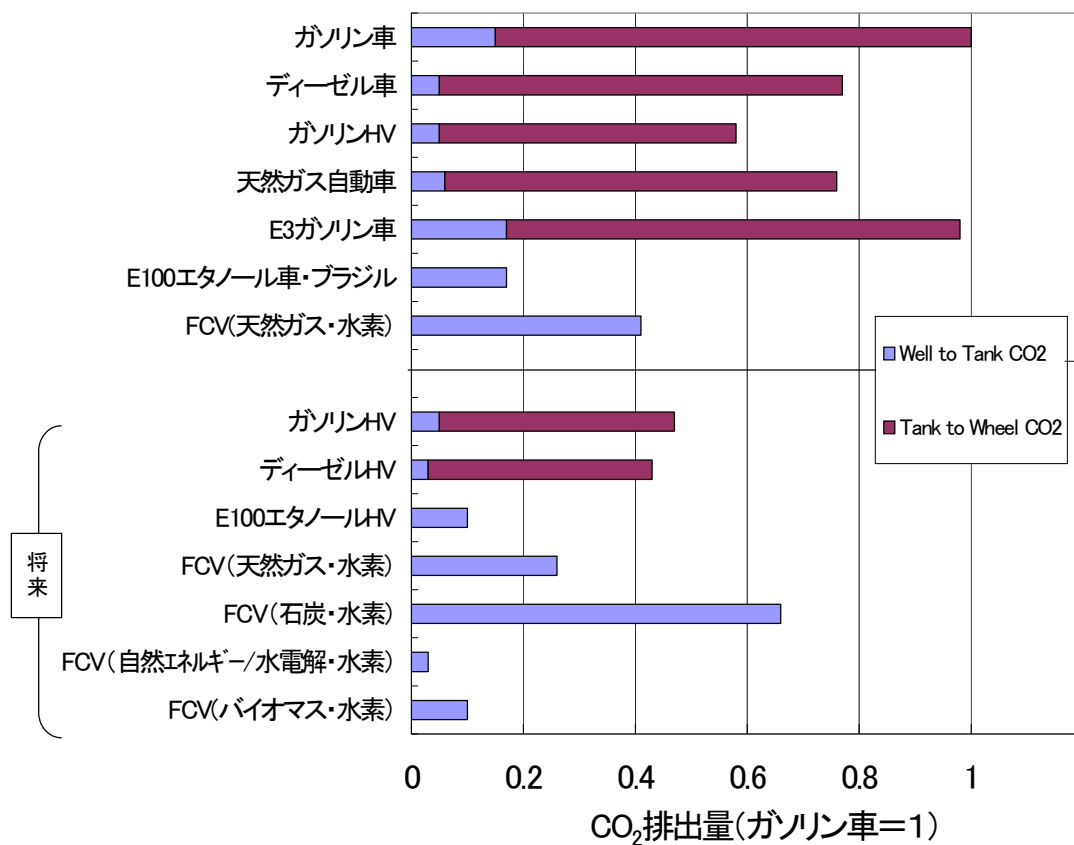
出典：JHFC セミナー資料， 2008

図 3.3 FCV と水素ステーションの普及に向けたシナリオ



出典：(財) 日本自動車研究所，JHFC 総合効率検討結果報告書，2006 より作成

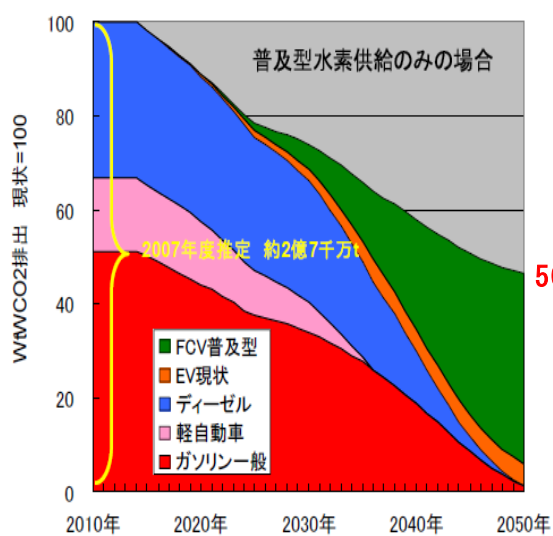
図 3.4 FCV とガソリン車他のエネルギー消費量比較  
(Well to Wheel)



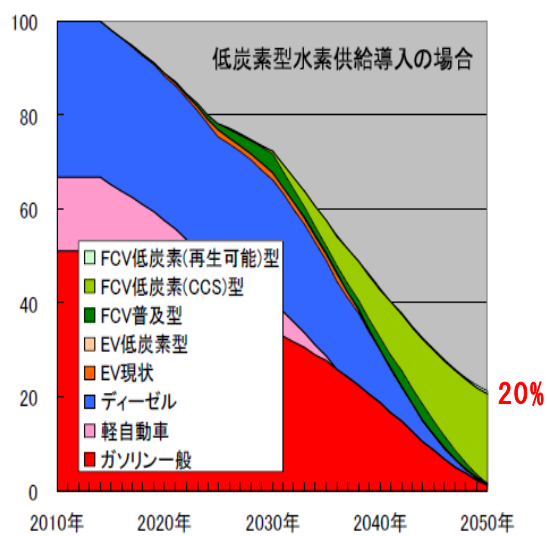
出典：(財)日本自動車研究所，JHFC 総合効率検討結果報告書，2006

トヨタ自動車・みずほ情報総研，輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価，2008 より作成

図 3.5 FCV とガソリン車他の CO<sub>2</sub> 排出量比較



普及型：化石原料からの水素のみ



低炭素型：

化石原料からの水素＋CCS および再生可能型水素（太陽光，風力発電の水電解水素）

出典：産業競争力懇談会ホームページ, 2008

図 3.6 FCV 導入によるCO<sub>2</sub>削減効果試算（普及型，低炭素型）

## 第4章 首都圏でのバイオマス種に応じた水素ステーション 実現性検討

#### 4.1 はじめに

本章ではまず、バイオマスから水素を製造し水素ステーションにてFCVに供給するにあたっての、バイオマス収集・運搬に関するモデルを提案する。対象バイオマスとして、木質バイオマス、畜産廃棄物、農業残渣、下水汚泥の4種をとりあげた。

次に、本モデルにて収集されたバイオマスにて水素製造を行った場合の製造量を第2章で検討した水素製造技術・水素製造量算出式を用いて導き出し、事業として成立する水素製造規模を有するかどうかを判定する。

本手法の判定を、同一自治体におけるバイオマス種ごと（木質バイオマス、畜産廃棄物を対象に）の実現可能性検討事例として栃木県那須塩原市を、また木質バイオマスにおいて実現可能となる自治体例として東京都奥多摩町の2例を事例研究として行う。

次に、この手法を首都圏の自治体に適応させ、その結果を考察する。

更に、バイオマス以外の水素製造方法に対して、バイオマスー水素製造手法を比較することで、首都圏における最適水素供給に対する考察を行った。

また、バイオマスの賦存量、利用可能量データの定義を明らかにした。

加えて、水素供給方式（オンサイト供給とオフサイト供給）の検討を行い、本手法に適合すべき供給方式を判定した。



## 4.2 水素ステーション構築モデル

次に、水素ステーションに適応するためのバイオマス収集の評価を行う。

ここに、 $Q$ ：バイオマス利用可能量（t/y）（以下  $Q$  は原則 wet base，含水率は dry 換算時に併記する）は、

$$Q = \sum_{i=1}^n Qi \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。但し、 $i$  はバイオマス種別を表わす。

木質バイオマスの利用可能量を  $Q_w$  とすれば(5)式は、

$$Q_w = \sum_{i=1}^4 Qi \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここに、 $i$ ：木質バイオマス種別として、林地残材，製材残材，果樹剪定枝，公園剪定枝の4種を算入する。また、畜産廃棄物の利用可能量（ $Q_e$ ）では同様に、畜産廃棄物種別として、乳牛排泄物，食肉牛排泄物，豚排泄物，鶏糞（採卵鶏＋ブロイラー）の4種を算入し、農業残渣の利用可能量（ $Q_a$ ）では、農業残渣種別として、稲わら，籾殻，麦わらの3種を，下水汚泥の利用可能量（ $Q_s$ ）では、下水汚泥1種を算入する。

以上のごとく、バイオマス種ごとの利用可能量  $Q$  は定義される。

$S$ ：市町村面積（ $\text{km}^2$ ）

$N$ ：現存ガソリンスタンド数（ヶ所）

$\rho$ ：水素ステーション転換割合（－）とすると、

水素ステーション1ヶ所あたりのバイオマス利用可能量  $q$ （t/d）は、

$$q = \frac{Q}{360 \times N \times \rho} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。但し、360 日：水素製造プラントの年間稼働日数（365 日－定期修理1日－年間休業4日）とした。

また、水素ステーション1ヶ所あたりのバイオマス収集面積  $s$ （ $\text{km}^2$ ）は、

$$s = \frac{S}{N \times \rho} \dots\dots\dots (8)$$

となり，バイオマスの収集半径  $L$  (km) は，

$$L = \sqrt{\frac{S}{N \times \rho \times \pi}} \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。ここでの  $L$  とは図 4.3 のごとく，ある市町村に水素ステーションを建設する場合，バイオマス供給エリアを市町村の面積より平均分割しその半径として算出するもので，市町村内のバイオマス密度は均一と仮定している。図 4.3 は，ある自治体に 20 ヶ所の既設ガソリンスタンドがあり，このうち 10% ( $\rho=0.1$ ) にあたる 2 ヶ所が水素ステーションに転換された場合の  $L$  を示している。また  $L$  は，表 2.2 の木質バイオマス収集・運搬における，積込場～土場～最終消費地までの平均距離と理解できる。運搬コスト  $B$  に相当する土場～最終消費地までの距離は  $L$  より短くなる。

## 4.3 バイオマスの賦存量と利用可能量

### 4.3.1 木質バイオマス

バイオマスの賦存量，利用可能量は，新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization：以下 NEDO）の「バイオマスの賦存量・利用可能量推計データ」（NEDO，2008），（井内正直，2004）を用いた。以下にバイオマス種ごとの賦存量，利用可能量の定義を示す。木質バイオマスとしては，

#### ①林地残材

- ・ 都道府県別林地残材賦存量（t/年）

$$= \text{林地残材（主伐・利用間伐による残材）賦存量（t/年）} + \text{未利用間伐材（切捨て間伐材）賦存量（t/年）}$$

ただし，

$$\text{林地残材（主伐・利用間伐による残材）賦存量（t/年）}$$

$$= (\text{素材需要量（m}^3\text{/年）} \div \text{利用率}) \times \text{林地残材率} \times \text{木材比重}$$

$$\text{残材率：針葉樹（0.15\%），広葉樹（0.35\%）}$$

$$\text{未利用間伐材（切捨て間伐材）賦存量（t/年）}$$

$$= ((\text{間伐材積（m}^3\text{）} \times 0.54 \text{（未利用間伐材積）}) \div 0.8559 \text{（針葉樹の利用率）} \times \text{木材比重}) \times (\text{都道府県別間伐材伐採面積（m}^2\text{）} \div \text{全国間伐材伐採面積（m}^2\text{）})$$

$$\text{市町村別林地残材賦存量（t/年）}$$

$$= \text{都道府県別林地残材賦存量（t/年）} \times (\text{市町村別人工林採面積（m}^2\text{）} \div \text{都道府県別人工林面積（m}^2\text{）})$$

- ・ 林地残材利用可能量（t/年）

$$= \text{林地残材賦存量（t/年）} \times ((\text{林道延長（m）} \times 50\text{m}) \div \text{人工林の面積（m}^2\text{）})$$

林道の片側 25m（両側 50m）の残材を利用可能とした。

#### ②製材所残材

- ・ 都道府県別製材所残材賦存量（t/年）

$$= \text{素材生産量（m}^3\text{/年）} \times \text{木質残材の発生率} \times \text{木材比重}$$

$$\text{市町村別製材所残材賦存量（t/年）}$$

$$= \text{都道府県別製材所残材賦存量（t/年）} \times (\text{市町村別産業中分類木材・木}$$

製品製造業製造品出荷額等÷都道府県別産業中分類木材・木製品製造業製造品出荷額等)

- ・ 製材所残材利用可能量 (t/年)

＝製材所残材賦存量 (t/年) ×木質残材の利用・処理方法別数量割合 (焼・棄却＋その他)

「チップ」「小物製材」等有効利用されているものを除く「焼・棄却」「その他」の割合を採用した。

#### ③果樹剪定枝

みかん、梅、桃等、対象 16 品目に対し、それぞれ計算しその総和とする。

- ・ 市町村別果樹剪定枝賦存量 (t/年)

＝市町村別果樹栽培面積 (ha) ×排出量原単位 (t/ha)

- ・ 果樹剪定枝利用可能量 (t/年)

＝賦存量 (t/年) ×利用可能率 利用可能率：76.4% (利用可能率の情報が得られた 5 例の平均値)

#### ④公園剪定枝

- ・ 市町村別公園剪定枝賦存量 (t/年)

＝市町村別都市公園面積 (ha) ×発生源単位 (t/ha) 発生源単位：1.71 (t/ha)  
3 事例の平均値

- ・ 公園剪定枝利用可能量 (t/年) ＝賦存量 (t/年) ×利用可能率 利用可能率：71.3% (大阪府 2006 年の実績，堆肥等の有効利用を除く未利用率として)

### 4.3.2 畜産廃棄物

#### ①乳・肉用牛汚泥

- ・ 都道府県別乳・肉用牛汚泥賦存量 (t/年)

＝都道府県別畜種別頭数×排出物原単位(t/頭/日)×365 日

市町村別乳・肉用牛汚泥賦存量 (t/年)

＝都道府県別乳・肉用牛汚泥賦存量 (t/年) ÷市町村別飼育頭数

- ・ 乳・肉用牛汚泥利用可能量 (t/年)

＝賦存量 (t/年) ×利用可能率 利用可能率：0.09 (堆肥化・液肥化等有効

利用されているものを除く浄化・炭化・焼却，野済み・素掘りの割合を  
採用した。)

## ②養豚汚泥

- ・ 都道府県別養豚汚泥賦存量 (t/年)

$$= (\text{肥育豚飼育頭数} \times \text{肥育豚排出物原単位 (t/頭/日)} + \text{繁殖豚飼育頭数} \times \\ \text{繁殖豚排出物原単位 (t/頭/日)}) \times 365 \text{ 日}$$

肥育豚排出物原単位：0.0059 (t/頭/日)，繁殖豚排出物原単位：0.0103 (t/頭/日)

- 市町村別養豚汚泥賦存量 (t/年)

$$= \text{都道府県別養豚汚泥賦存量 (t/年)} \times (\text{都道府県別飼育頭数} \div \text{市町村別飼育頭数})$$

- ・ 養豚汚泥利用可能量 (t/年)

$$= \text{養豚汚泥賦存量 (t/年)} \times \text{利用可能率} \quad \text{利用可能率：0.01 (有効利用されてい  
ない最終処分量比率を採用した。)}$$

## ③採卵鶏・ブロイラー汚泥

- ・ 市町村別採卵鶏・ブロイラー汚泥賦存量 (t/年)

$$= (\text{市町村別採卵鶏飼養羽数} \times \text{採卵鶏排出物原単位 (kg/羽/日)} + \text{市町村別  
ブロイラー飼養羽数} \times \text{ブロイラー排出物原単位 (kg/羽/日)}) \times 365 \text{ 日} \\ \times 1,000$$

採卵鶏排出物原単位：0.136 (kg/羽/日)，ブロイラー排出物原単位：0.13 (kg/羽/日)

- ・ 採卵鶏・ブロイラー汚泥利用可能量 (t/年)

$$= \text{採卵鶏・ブロイラー汚泥賦存量 (t/年)} \times \text{利用可能率} \quad \text{利用可能率：0.5} \\ \text{(農地還元，販売等の有効利用されているものを除く未利用率として)}$$

### 4.3.3 農業残渣

#### ①稲わら

- ・ 稲わら賦存量 (t/年) = 水稻・陸稻の作付面積 (ha)  $\times$  5.41 (t/ha)
- ・ 稲わら利用可能量 (t/年) = 賦存量 (t/年)  $\times$  利用可能率 (すき込み・その他) 利用可能率：74.9%

飼料用，敷料用等，有効利用されているものを除く

②もみ殻

- ・ もみ殻賦存量（t/年）＝市町村別全もみ収穫量（t/年）÷（都道府県別粗玄米粒数歩合×都道府県別玄米粒数歩合）×（1－都道府県別粗玄米粒数歩合）
- ・ もみ殻利用可能量（t/年）＝もみ殻賦存量×利用可能率　利用可能率：0.37  
畜舎敷料，堆肥等，有効利用されているものを除く焼却・その他の割合を採用した。

③麦わら

- ・ 麦わら賦存量（t/年）  
＝（小麦作付面積（ha）＋六条大麦作付面積（ha）＋二条大麦作付面積（ha）  
＋裸麦作付面積（ha））×発生原単位（t/ha）　発生原単位：3.0（t/ha）  
（三重県 2004 年実績）
- ・ 麦わら利用可能量（t/年）  
＝麦わら賦存量（t/年）×利用可能率　利用可能率：0.34（すき込み，堆肥・  
敷料等の有効利用されているものを除く焼却・その他の割合を採用した。）

#### 4.3.4 下水汚泥

①下水汚泥

- ・ 下水汚泥賦存量（t/年）＝下水処理場における濃縮汚泥量を市町村別に集計
- ・ 下水汚泥利用可能量＝下水汚泥賦存量（t/年）－下水処理場における消化設備投入量の市町村別集計量（t/年）

#### 4.4 首都圏での事例研究

##### 4.4.1 栃木県那須塩原市の事例

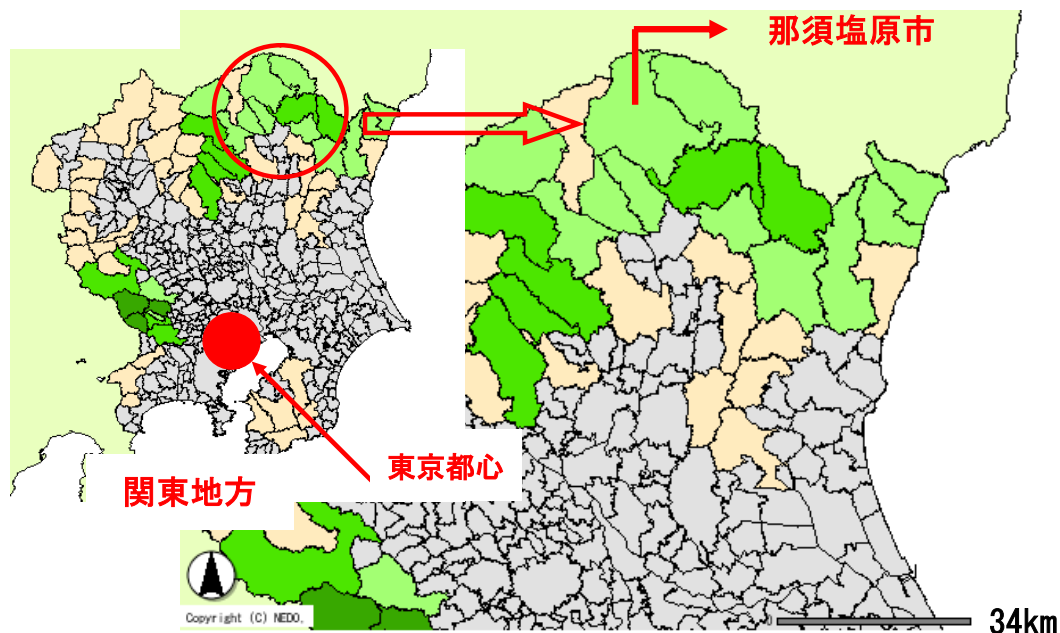


図 4.1 栃木県那須塩原市の位置図

栃木県那須塩原市は関東地方の市町村のうち有数の木質バイオマスおよび畜産廃棄物の賦存量を有している。

木質バイオマスを対象に試算してみると、(6)式より、

$$\begin{aligned} Q_w &= 196.46 \text{ (林地残材)} \\ &+ 362.17 \text{ (製材残材)} \\ &+ 73.69 \text{ (果樹剪定枝)} \\ &+ 195.04 \text{ (公園剪定枝)} \\ &= 827.36 \text{ (wet-t/y) となる。} \end{aligned}$$

バイオマスの利用可能量は前節の定義をもとに算出した。また、ガソリンスタンド設置数は価値総研, 東京ガスの調査資料((株)価値総研, 東京ガス(株), 2007) から引用した。

$$S = 592.45 \text{ (km}^2\text{)}$$

$$N = 80 \text{ (ヶ所)}$$

$$\rho = 0.1 \text{ (図 3.1 の前提を採用し, 2020 年頃 FCV500 万台, 水素 St 約 3,500 ケ)}$$

所) とすると, (7)式より, 水素ステーション 1 ヶ所あたりの木質バイオマス利用可能量は,

$$q=0.29 \text{ (wet-t/d) となる。}$$

このバイオマスに対し表 2.4 で示す水蒸気ガス化+PSA 精製の処理を行った場合, 約  $8.40 \text{ m}^3/\text{h}$  の水素が製造される。

この場合のバイオマスの収集半径は, (9)式より,

$$L=4.86 \text{ (km) となる。}$$

この場合の運搬コストは 8km 以下であるから枝葉, 端材とも 4t 車での運搬を仮定すると, 図 2.3 より  $1,100 \sim 2,250 \text{ 円/m}^3$  であり, コージェネ利用 (約 60km の運搬とする。27km 以上なので枝葉, 端材とも 10t 車を想定) の運賃  $3,800 \sim 4,900 \text{ 円/m}^3$  に比較して運搬費は  $29 \sim 46\%$  となり大幅に有利であることが分かる。

さらにまた, 畜産廃棄物で計算すると, 同様に,

$$Q_e=25,917.59 \text{ (乳牛排泄物)}$$

$$+3,998.17 \text{ (食肉牛排泄物)}$$

$$+1,205.86 \text{ (豚排泄物)}$$

$$+9,282.68 \text{ (鶏糞)}$$

$$=40,404.30 \text{ (wet-t/y)}$$

$$=8,080.86 \text{ (dry-t/y) (含水率 80\%)}$$

$$N=80 \text{ (ヶ所)}$$

$\rho=0.1$  とすると, (2)式より, 水素ステーション 1 ヶ所あたりの畜産廃棄物利用可能量は,

$$q=4.86 \text{ (dry-t/d) となる。}$$

このバイオマスに対し表 2.4 で示す  $\text{CH}_4$  発酵+水蒸気ガス化+PSA 精製の処理を行うと, 約  $72.49 \text{ m}^3/\text{h}$  の水素が製造される。

商用化水素ステーションの必要水素製造量は, 既存ガソリンスタンドにて充填するガソリン車と同量の水素充填の必要量として定義され, 通常のガソリンスタンド規模を想定すると,  $200 \sim 300 \text{ m}^3/\text{h}$  規模で採算性が取れるレベルにあるとの試算がなされている。((財) 日本自動車研究所・(財) エンジニアリング振興協会, 2006)



表 4.1 に、既存ガソリンスタンド規模と水素ステーション規模の相関を表す。

既存のガソリンスタンドでは、事業化しているスタンドのうち最小では 1 スタンドあたり約 200 台、最大の大型ガソリンスタンドでは約 4,000 台の車に対して営業を行っているのが実情である。これを水素ステーションの能力で対比すると、 $50\text{Nm}^3/\text{h}$ ～ $500\text{Nm}^3/\text{h}$  に匹敵する。本表より、平均的なガソリンスタンド規模（約 1,000 台の車に対する営業規模）に相対する水素ステーション能力は  $200\text{Nm}^3/\text{h}$  であるので、以降水素ステーション構築の基準となる必要水素製造能力を  $200\text{Nm}^3/\text{h}$  として議論を進めることとする。

本地域における畜産廃棄物からの水素製造量約  $72.49\text{m}^3/\text{h}$  は、この数字に比べ若干低いものの、この地区では畜産廃棄物からの水素製造の方が木質バイオマスからの水素製造に比較して現実的であると言える。

#### 4.4.2 東京都奥多摩町の事例

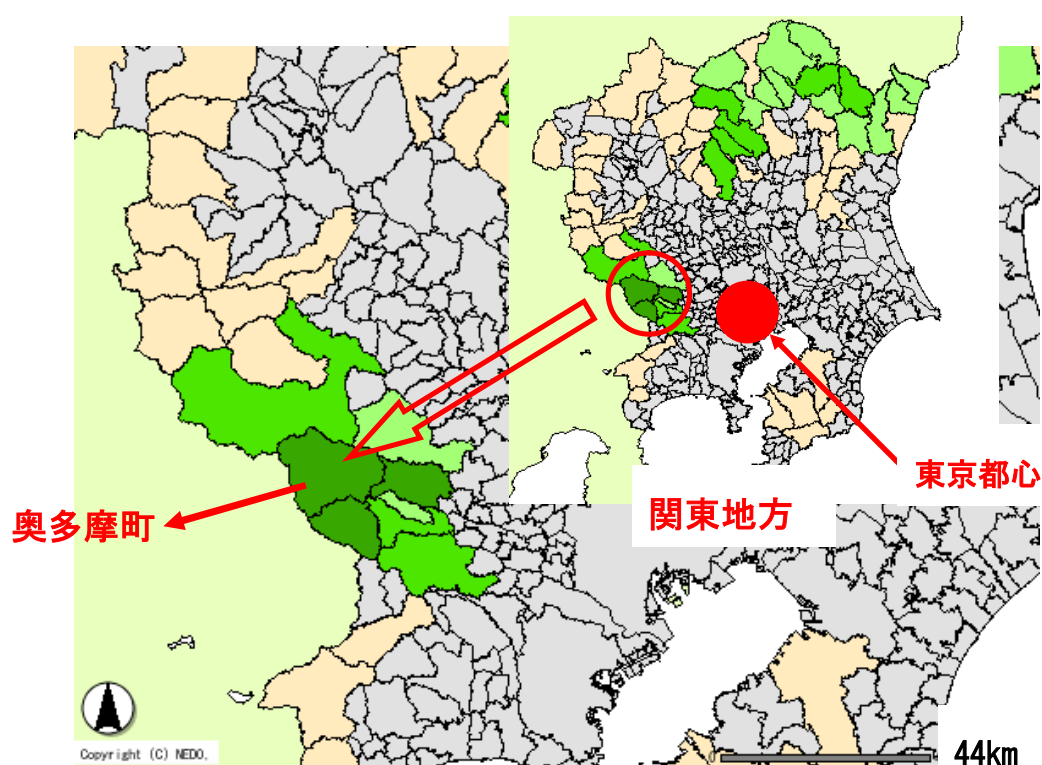


図 4.2 東京都奥多摩町の位置図

次に木質バイオマスから水素ステーションを成立できる事例として、東京近郊の有数な林業地区である東京都奥多摩町のケースを紹介する。

$$Q_w=1,384.21 \text{ (林地残材)}$$

$$+12.42 \text{ (製材残材)}$$

$$+25.36 \text{ (果樹剪定枝)}$$

$$+0 \text{ (公園剪定枝)}$$

$$=1,421.99 \text{ (wet-t/y)}$$

$$S=225.69 \text{ (km}^2\text{)}$$

$$N=5 \text{ (ヶ所)}$$

$\rho=0.1$  とすると、(7)式より、水素ステーション 1ヶ所あたりの木質バイオマス利用可能量は、

$$q=7.90 \text{ (wet-t/d)} \text{ となる。}$$

このバイオマスに対し水蒸気ガス化+PSA 精製の処理を行った場合、約 230 m<sup>3</sup>/h の水素が製造される。

従ってこの地区は、木質バイオマスからの水素を製造することで水素ステーションビジネスを展開する十分なポテンシャルを持っていると言える。

この場合のバイオマスの収集半径は、(9)式より、

$$L=11.99 \text{ (km)} \text{ となる。}$$

この場合の運搬コストは、8km 以上なので枝葉は 10t 車、27km 以下なので端材は 4t 車で運搬することを仮定すると、1,500～2,600 円/m<sup>3</sup> となり、コジェネ利用での運搬費用（60km の輸送距離で枝葉、端材とも 10t 車で 3,800～4,900 円/m<sup>3</sup>）に比べ運搬費は 39～53%となる。この地区においてもコジェネ利用に比較して運搬コストの点でコストダウンできることが分かる。

## 4.5 水素供給方式の検討

4.4 の事例研究では、バイオマスの地産地消の観点から水素製造は都市ガス改質水素ステーション同様、水素ステーション内で行う供給方式（オンサイト供給）を前提に検討した。水素供給方式ではこの他に、バイオマスを広範に収集し大規模改質装置で水素を製造し、製造された水素を各ステーションサイトに高圧水素ローリーで配給するオフサイト供給方式も考えられる。ここでは、バイオマスからの製造水素を FCV へ供給する本研究対象において、両者の比較検討を行う。

図 4.4 に水素供給における二つの方式（オンサイト供給とオフサイト供給）の比較図を示す。

オンサイト供給は、個々の水素ステーションにて改質装置を設置して水素を製造、供給する方式であるが、オフサイト供給では大規模な改質装置で製造した水素を各水素ステーションへ運搬し FCV に供給する。

両者の供給方式としての優位性を、オフサイトステーションとオンサイトステーションの建設コストに着目し、以下に考察する。

オンサイトステーション、オフサイトステーションの建設コストを考察するに、都市ガスから水素を製造するオンサイトステーションと、石油精製あるいは製鉄工業からの副生水素を供給するオフサイトステーションのコスト比較を行う。文献（（財）石油産業活性化センター, 2003）によれば、都市ガス改質のオンサイト水素ステーションの建設コストは、5.38 億円（能力 300m<sup>3</sup>/h, 土地含まずプラントコストのみ）、同一条件での副生水素によるオフサイトステーションの建設コストは 3.07 億円である。オンサイトでは水素製造装置費が必要である反面、オフサイトでは水素供給を維持するための貯蔵容器が多量に必要な点があげられ、両者のコスト差は 1 ヶ所あたりオンサイトの方が 2.31 億円コスト高になる。

仮に  $x$  ヶ所の水素ステーションを建設すると、オンサイト方式（CASE 1）では、 $5.38 \times x$  億円の総コストがかかる。

一方、オフサイト方式（CASE 2）では、オフサイトステーションとして 3.07  $\times x$  億円、大型水素改質装置および出荷設備として 300m<sup>3</sup>/h の都市ガスオンサイトステーションの建設費に 3/4 乗則を採用して、 $5.38 \times x^{0.75}$  億円となる。従っ

て両者の設備費が同一となる条件は、

$$5.38 \times x = 5.38 \times x^{0.75} + 3.07 \times x \quad \dots\dots\dots (10)$$

となり、上式を解いて、 $x \cong 29.4$ ヶ所となる。

CASE 2 は CASE 1 に比べ追加コストとして製造水素配給のための高圧水素ローリーも必要であり、水素原料を木質バイオマスとすれば、原料輸送における運搬費用も第 2 章の検討より CASE 1 が有利となる。従って両者の損益分岐点は 30 ヶ所以上の規模となり、スケールメリットを得るためには相当大規模に展開できないと CASE 2 は有利となり得ないことが分かる。

大型水素製造装置の規模を、木質バイオマスのコージェネレーション規模、100t-wet/日とすると（2.3 参照）、CASE 2 は約 10 ヶ所のオフサイト水素ステーションに配給するモデルとなる。従って、バイオマスを水素原料として水素ステーションにて FCV に供給する本研究対象では、CASE 2 の集中製造によるオフサイト供給方式は損益分岐点以下の規模となることから採用できず、CASE 1 のオンサイト供給方式を前提に試算することとした。

## 4.6 首都圏でのバイオマス水素ステーション成立の可能性

### 4.6.1 木質バイオマス

以上述べてきたように、バイオマスから水素を製造し水素ステーションにてFCVに充填する利活用手法は、バイオマスのコジェネ利用に比較して将来有望な手法になる可能性があることが分かった。また、バイオマス種や展開する市町村によって、その成立形態が異なることも判明した。

そこで次に、首都圏（関東地方＋山梨県）全域の市町村に、本手法を展開して考察してみる。首都圏への展開においてはEXCEL表にて計算、集計した（図4.5）。

図4.6は関東地方における木質バイオマスの賦存を、林地残材を例にとって示した分布図である。房総半島の中央部や西北部の山間地に多く賦存していることが分かる。

図4.10に首都圏398の市町村において、前節と同一条件で試算した水素製造量とバイオマス輸送距離の関係を示す。

木質バイオマスでは、実用化の目安となる必要水素製造能力 $200\text{m}^3/\text{h}$ 以上の条件を満たすステーションを有する自治体は、6ヶ所程度に過ぎない。

しかし、図4.11は輸送距離と自治体サイト数の関係を示したもののだが、運搬費用が大幅に削減できる、輸送距離が10km以下であるサイトが大半（398ヶ所中373ヶ所=93.7%）であることから、木質バイオマスに関しては集積エリアを更に広げることで経済性を成立させる等最適化を行えば、実用化可能なステーションサイト数を増加させることができると考えられる。このステーションサイト増加の検討は、5.3の日本全国への展開の中で詳しく検討する。

### 4.6.2 畜産廃棄物

図4.7は関東地方における畜産廃棄物の賦存状況を乳牛の糞尿を例にとって示した分布図である。林地残材の賦存と一部共通するところも窺えるが、賦存エリアは山間地より幾分内陸側にある。

図4.12に首都圏の市町村における畜産廃棄物での水素製造量とバイオマス輸送距離の関係を示す。 $200\text{m}^3/\text{h}$ 以上のステーションを有する自治体は全体の

約 10%にのぼっている。首都圏においては、木質バイオマスに比べて畜産廃棄物から水素を製造する方法がより実現可能性が高いことが窺える。なお、対象自治体数（358 市町村）が木質バイオマスの場合（398 市町村）と異なっているのは、バイオマスが賦存しない自治体を対象から外していることによる。

#### 4.6.3 農業残渣

図 4.8 は関東地方における農業残渣の賦存状況を稲わらを例にとって示した分布図である。関東の西側にあたる平野部にその賦存が多いことが窺える。

図 4.13 は農業残渣での 4.6.1, 4.6.2 節と同一条件による結果を示している。

図 4.13 より、農業残渣においても畜産廃棄物と同様、首都圏での約 10%の自治体においてバイオマスからの水素製造が実現可能である結果が得られた。首都圏においては、農業残渣も畜産廃棄物とほぼ同等に水素ステーションを構築できるポテンシャルをもっているバイオマス種と言える。

#### 4.6.4 下水汚泥

図 4.9 は関東地方における下水汚泥の賦存状況である。専ら東京、横浜を中心とした都市部、地方でも県庁所在地に賦存が偏っている。

下水汚泥での同一条件での結果を図 4.14 に示す。

下水汚泥のケースでは、水素ステーション実現可能な水素製造量を製造する自治体割合は、約 38%と多い。また、1 サイトあたりの水素製造量が、木質バイオマス、畜産廃棄物、農業残渣に比べ多いのも特徴である。しかし、全体の自治体サンプル数が 117 ヶ所と他のバイオマス種に比べ著しく少ないことが窺える。これは、図 4.9 の下水汚泥賦存図からも分かるように、エネルギー利活用可能な下水汚泥が、下水処理場を有する市町村のみに偏在していることを示している。下水汚泥は収集・運搬システムが既に整っている都会型バイオマスであることを考慮すれば、本研究手法には適合できず、むしろ積極的にコジェネ利用を進めるに相応しいバイオマス種と言えよう。

#### 4.7 首都圏における最適水素供給に対する考察

水素ステーション構築の黎明期・普及期においては、①既存インフラである都市ガスパイプラインを使用し、水素ステーション内で都市ガスから水素を製造するオンサイト製造方法、②製油所での石油精製用集中水素製造装置の製造余力、あるいは製鉄所でのコークス製造工程から発生する COG (Coke Oven Gas) 中の水素を、高压容器に充填して水素ステーションまでローリー輸送するオフサイト製造・供給方法の 2 方法が、既存インフラの余力を活用できることで、経済的にも、量的にも有利であるとの見解が一般的である ((財)エネルギー総合工学研究所, 2004)。

前節まで述べてきたバイオマスから水素を製造する手法は、これらの方法とどのような関係で成立し得るか、以下検討する。

図 4.15 は、東京ガス(株)、(株)価値総研が行った、首都圏での最適水素供給についての検討結果図である ((株)価値総研・東京ガス(株), 2007, pp31)。首都圏近傍には、千葉、袖ヶ浦、君津、川崎、横浜、根岸、鹿島の 7 ヶ所の石油化学コンビナートがある。これらコンビナートから発生する余剰水素を供給するエリアとして図中の青色のエリアが成立する。また、赤色のエリアは東京ガスの供給エリアであり、緑色のエリアは首都圏の他都市ガス供給エリアを示している。青エリアと赤+緑エリアは多くの部分で重なり合ったエリアであり、これらで上記①および②の供給方法が将来競合的に選択されると考えられる。

茶色のエリアは、関西では既の実績のある液体水素供給(ローリーでの供給)エリアを示している。これは、根岸地点に 10t/d 規模(実績規模)の液体水素供給基地を建設した場合(根岸地点には LNG(液化天然ガス)受け入れ基地があり、液体水素製造に有利な極低温冷熱が入手しやすい)、上記②に比べて採算性が良いエリアである。液体水素供給は高压ガス供給に比べエネルギー密度が高いため、遠方への供給には有利となる。

更にその外側の黄色のエリアは、液体水素供給が沿岸部から遠方になるため採算性上厳しくなることで、既存のガソリンスタンドでガソリンあるいは灯油等石油系原料から水素を製造する方法の方が有利と判断されたエリアである。

さて、図 4.6～4.9 と図 4.15 を比較すると、首都圏でバイオマスから水素ステーションを構築し易いとされた、畜産廃棄物の賦存では、図 4.15 の黄色エリア

と一部茶色エリアが、農業残渣では黄色エリアと青エリアが、また、水素ステーションを構築し難いが拡張の可能性がある木質バイオマスでは、ほとんどの黄色エリアが重なっていることが分かる。

従って、3種のバイオマスに共通なカバーエリアとして黄色エリアが上げられることから、バイオマスー水素製造手法が構築できるエリアは、首都圏の場合、水素ステーション構築の黎明期・普及期に有利とされた上記①、②の供給方法と棲み分けして存在しうることが理解できる。

この様にして、製造・供給方法の特性によって、一部事業競合する可能性はあるが、バイオマスー水素での製造手法が有利となる地区が存在することが示唆される。



#### 4.8 本章のまとめ

バイオマスから水素を製造し水素ステーションにて FCV に供給する事業を検討するにあたり、バイオマスの収集・運搬に関するモデルを、自治体を基本単位として構築した。バイオマス種としては、木質バイオマス、畜産廃棄物、農業残渣、下水汚泥の 4 種を対象とした。

バイオマスの賦存量、利用可能量は NEDO の「バイオマスの賦存量・利用可能量推計データ」から引用した。このデータにおけるバイオマス各種の賦存量、利用可能量の定義を明示した。

栃木県那須塩原市、東京都奥多摩町の 2 ケースで事例研究を行った結果、奥多摩町のケースでは木質バイオマスの運搬距離が短くなることによって、コージェネ利用に比べて 39～53%の運搬費となり費用の削減が可能であることが分かった。

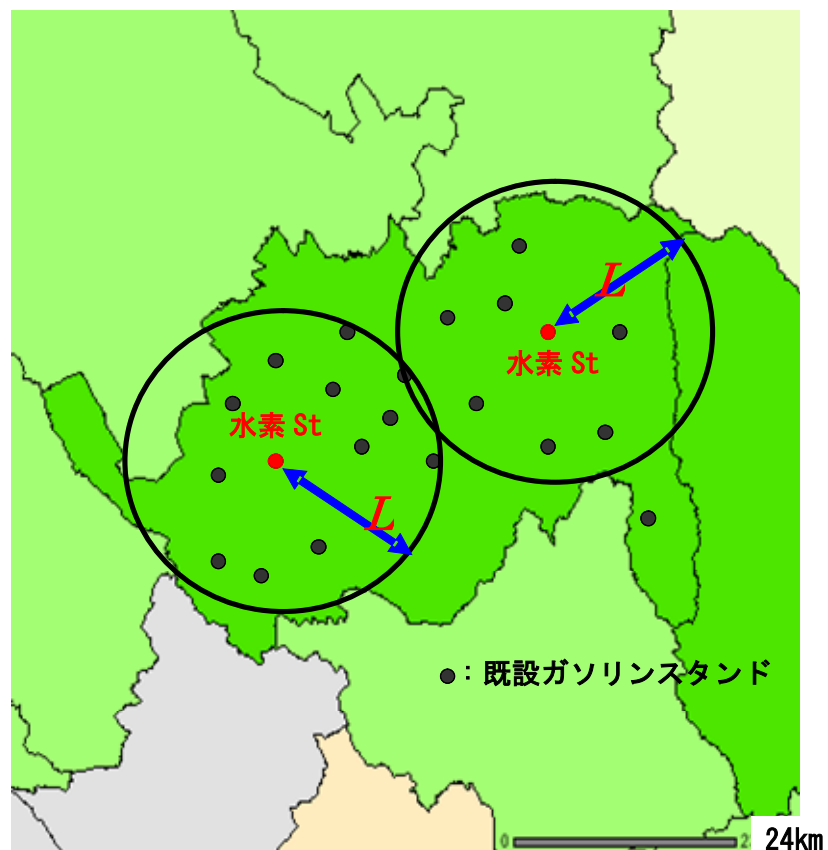
水素供給方式において、オンサイト供給、オフサイト供給の比較を実施した。その結果、バイオマスから水素製造し FCV へ供給する本方式ではオンサイト供給が現実的な供給方式であると判断された。

次にこの手法を首都圏の約 400 の自治体に適応してみた結果、木質バイオマスでは水素ステーションとして事業が成立する製造量 ( $200\text{Nm}^3/\text{h}$  以上)を満足する自治体は 6 ヶ所と少ないが、94%の自治体でバイオマス収集範囲が 10km 以内であることが判明し、更に収集エリアを拡大すれば水素ステーション構築可能な自治体を増加できることが示唆された。

畜産廃棄物、農業残渣では、双方とも約 10%の自治体が水素ステーションを構築できることが分かり、木質バイオマスより適用し易いことが分かった。

一方下水汚泥では、多量な水素製造は可能であるが、実施できる自治体は限られており、下水汚泥は収集システムが整備された都会型のバイオマスであることを勘案すると、むしろコージェネ利用に向くことが示唆された。

最後に、都市ガスからの水素製造方法、製油所・製鉄所からの副生水素供給方法、更には液体水素供給方法と本バイオマスー水素製造手法を比較検討したところ、首都圏においてそれぞれの方法は棲み分けて成立可能であることが分かり、それぞれの供給方法の特性に応じた実現可能性があると判断された。



既設 20 ヶ所のガソリンスタンドのうち、2 ヶ所が水素ステーション  
に転換されたケースを想定：転換割合 10%（2020 年頃を想定）

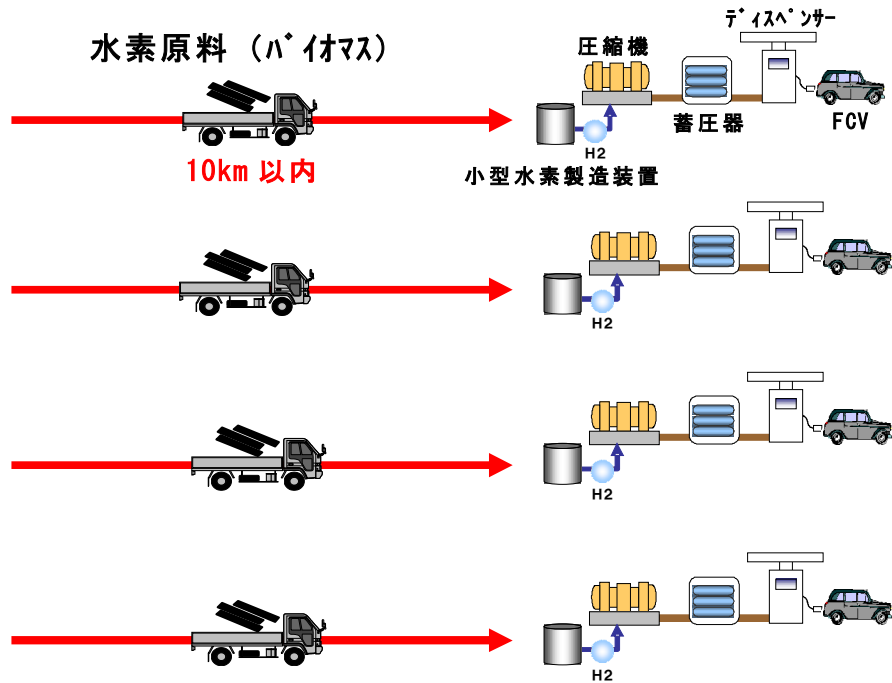
図 4.3 バイオマス運搬距離  $L$  の考え方

表 4.1 ガソリンスタンドと水素ステーションの規模における相関

	カバー台数 (台/ステーション)	稼働率				
		50Nm <sup>3</sup> /h	100Nm <sup>3</sup> /h	200Nm <sup>3</sup> /h	300Nm <sup>3</sup> /h	500Nm <sup>3</sup> /h
CNGステーション並→	10	4%	2%	1%	1%	0%
	20	8%	4%	2%	1%	1%
	30	13%	6%	3%	2%	1%
	40	17%	8%	4%	3%	2%
	50	21%	11%	6%	4%	2%
	60	25%	13%	7%	4%	3%
	70	30%	15%	8%	5%	3%
	80	34%	17%	9%	6%	3%
LPGステーション並→	90	38%	19%	10%	6%	4%
	100	42%	21%	11%	7%	4%
	110	46%	23%	12%	8%	5%
	120	51%	25%	13%	8%	5%
	130	55%	27%	14%	9%	5%
	140	59%	30%	15%	10%	6%
	150	63%	32%	16%	11%	6%
	160	67%	34%	17%	11%	7%
ガソリンスタンド 極小型→ (全体の2割弱)	170	72%	36%	18%	12%	7%
	180	76%	38%	19%	13%	8%
	190	80%	40%	20%	13%	8%
	200	84%	42%	21%	14%	8%
	300	*	63%	32%	21%	13%
	400	*	84%	42%	28%	17%
	500	*	*	52%	35%	21%
	600	*	*	63%	42%	25%
ガソリンスタンド 小型→ (全体の1/3強)	700	*	*	74%	49%	30%
	800	*	*	85%	56%	34%
	900	*	*	95%	63%	38%
ガソリンスタンド 平均→	1000	*	*	*	70%	42%
	2000	*	*	*	*	84%
	3000	*	*	*	*	*
ガソリン大型スタンド→	4000	*	*	*	*	*

**CASE 1 : オンサイト供給**

**オンサイト水素ステーション**



**CASE 2 : オフサイト供給**

**オフサイト水素ステーション**

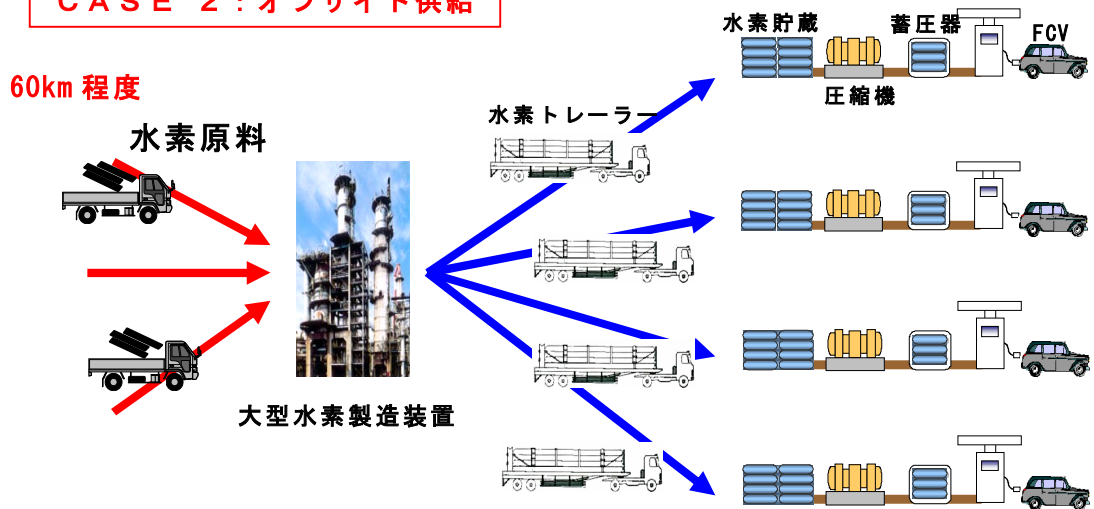


図 4.4 水素供給方式の比較 (オンサイト供給とオフサイト供給)

Microsoft Excel - 木質系並び替え.xls

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ツール(T) データ(D) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)

質問を入力してください

MS Pゴシック 11 B I U

水蒸気ガス化実績より:  $(1.4 \times 1000(\text{kg/D}) / 24) \times 10\text{h}(\text{営業時間})$  が  $17\text{m}^3/\text{h}(\text{H}_2)$  相当とする

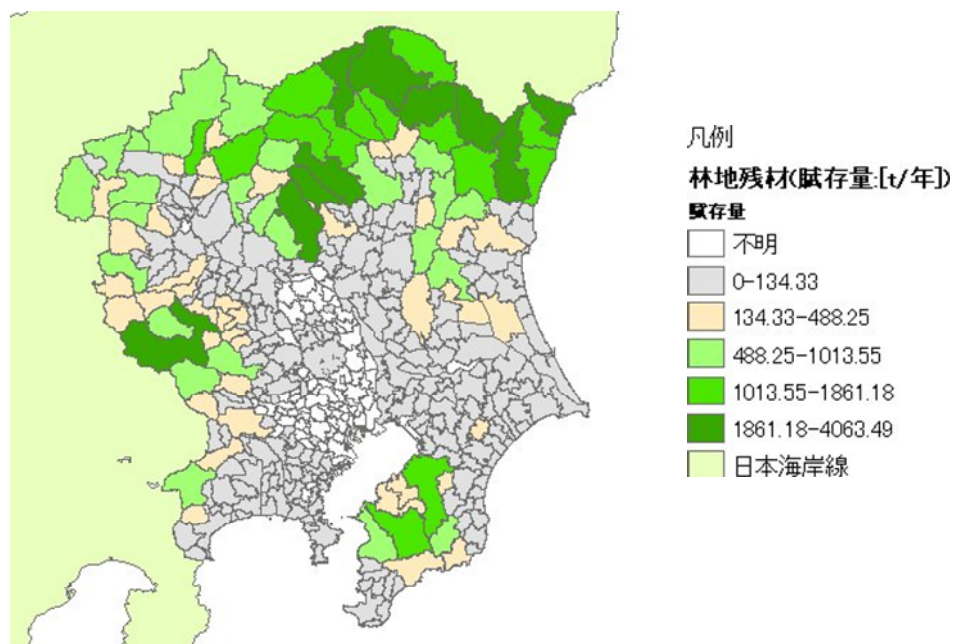
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	県名	市町村名	面積S	St数:N	$\rho(-)$	Qw(wet)	Qw(dry)	$q(\text{wetXt/d})$	$q(\text{dryXt/d})$	L(km)	H <sub>2</sub> 製造量(m <sup>3</sup> /H)	林地残材	製材所残材	果樹剪定	公園剪定
1	茨城県	水戸市	217062542.2	116	0.1	1474	442.2	0.352969	0.1058908	2.441173	10.29241668	16.03	122.3	998.04	337.63
2	茨城県	日立市	225066844.1	65	0.1	720	216	0.307692	0.0923077	3.320735	8.972159916	95.44	372.97	73.62	177.97
3	茨城県	土浦市	91760368.78	70	0.1	937.73	281.319	0.372115	0.1116345	2.043213	10.850697	3.77	82.63	756.79	84.54
4	茨城県	古河市	72549515.81	72	0.1	730.69	219.207	0.281902	0.0845706	1.791374	8.22012711	4.77	390.03	126.39	209.5
5	茨城県	石岡市	215695677.8	51	0.1	4192.84	1257.852	2.283682	0.6851046	3.67004	66.59106791	62.33	108.76	3984.64	37.11
6	茨城県	結城市	72549515.81	32	0.1	188.81	56.643	0.163898	0.0491693	2.687061	4.779174409	1.51	52.07	104.51	30.72
7	茨城県	竜ヶ崎	78203517.45	29	0.1	527.69	158.307	0.50545	0.1516351	2.930551	14.73868483	4.44	375.53	52.5	95.22
8	茨城県	下妻市	60953291.5	31	0.1	1041.28	312.384	0.933047	0.279914	2.502378	27.20719059	0.54	41.32	929.39	70.03
9	茨城県	水海道市	79674303.49	52	0.1	459.78	137.934	0.245609	0.0736827	2.208984	7.161839733	0.88	376.27	55.67	26.96
10	茨城県	常陸太田市	371632133.4	29	0.1	1308.01	392.403	1.252883	0.3758649	6.38841	36.53347069	179.5	589.7	524.73	14.08
11	茨城県	高萩市	193454296.6	9	0.1	279.52	83.856	0.862716	0.2588148	8.273764	25.15638566	137.2	102.58	33.42	6.32
12	茨城県	北茨城市	186528733.2	23	0.1	552.72	165.816	0.667536	0.2002609	5.082111	19.46503592	148.94	339.04	45.79	18.95
13	茨城県	笠間市	131574958.5	39	0.1	739.88	221.964	0.52698	0.158094	3.277853	15.36648537	39.84	93.34	534.83	71.87
14	茨城県	取手市	69951446.57	28	0.1	141.35	42.405	0.140228	0.0420685	2.820684	4.088986223	1.5	0	48.04	91.81
15	茨城県	牛久市	58858838.25	27	0.1	313.6	94.08	0.322634	0.0967901	2.63487	9.407845047	6.06	82.63	187.35	37.56
16	茨城県	つくば市	283942897.3	118	0.1	1747.63	524.289	0.411401	0.1234202	2.768278	11.99624564	26.94	750.74	737.24	232.71
17	茨城県	ひたちなか	98893930.6	69	0.1	514.83	154.449	0.207258	0.0621775	2.136463	6.043556981	3.75	207.84	32.02	271.22
18	茨城県	鹿嶋市	103211532.7	41	0.1	178.51	53.553	0.120942	0.0362825	2.83144	3.52660289	3.87	82.63	31.19	60.82
19	茨城県	潮来市	72046560.93	29	0.1	45.98	13.794	0.044042	0.0132126	2.812826	1.284247813	1.57	0	17.03	27.38
20	茨城県	守谷市	35644122.72	18	0.1	205.85	61.755	0.31767	0.0953009	2.511267	9.263097431	1.07	82.63	53.37	68.78
21	茨城県	常陸大宮市	348219298	44	0.1	957.34	287.202	0.604381	0.1813144	5.020365	17.62346882	145.67	254.97	536.7	20
22	茨城県	那珂市	97651463.31	34	0.1	184.68	55.404	0.150882	0.0452647	3.024371	4.399656947	9.57	11.24	100.04	63.83
23	茨城県	筑西市	205180779.1	67	0.1	1902.47	570.741	0.788752	0.2366256	3.122958	22.99963163	3.44	76.46	1717.55	105.02
24	茨城県	坂東市	122876834.5	34	0.1	1941.32	582.396	1.586046	0.4758137	3.392585	46.24833238	5.77	1773.14	149.45	12.96
25	茨城県	稲敷市	194024940.8	45	0.1	212.68	63.804	0.131284	0.0393852	3.705593	3.828176948	7.13	123.95	56.8	24.8
26	茨城県	かすみがうら	158631914.1	25	0.1	4330.48	1299.144	4.811644	1.4434933	4.495318	140.3052411	17.24	123.95	4187.55	1.74
27	茨城県	桜川市	179650595.8	40	0.1	482.15	144.645	0.334826	0.1004479	3.781982	9.763376691	42.7	155.17	250.06	34.22
28	茨城県	神栖市	147055396.3	60	0.1	654.66	196.398	0.303083	0.090925	2.79383	8.837764437	3.21	397.93	21.65	231.87
29	茨城県	行方市	217476376	44	0.1	188.28	56.484	0.118864	0.0356591	3.967481	3.466006549	18.79	0	163.65	5.84
30	茨城県	茨城町	121646398	29	0.1	1639.4	491.82	1.570307	0.471092	3.654987	45.78938375	13.14	39.72	1573.29	13.25

図形の調整(R) オートシェイプ(U) コマンド

スタート 田島博士論文.doc - Mic... Microsoft Excel - 木質...

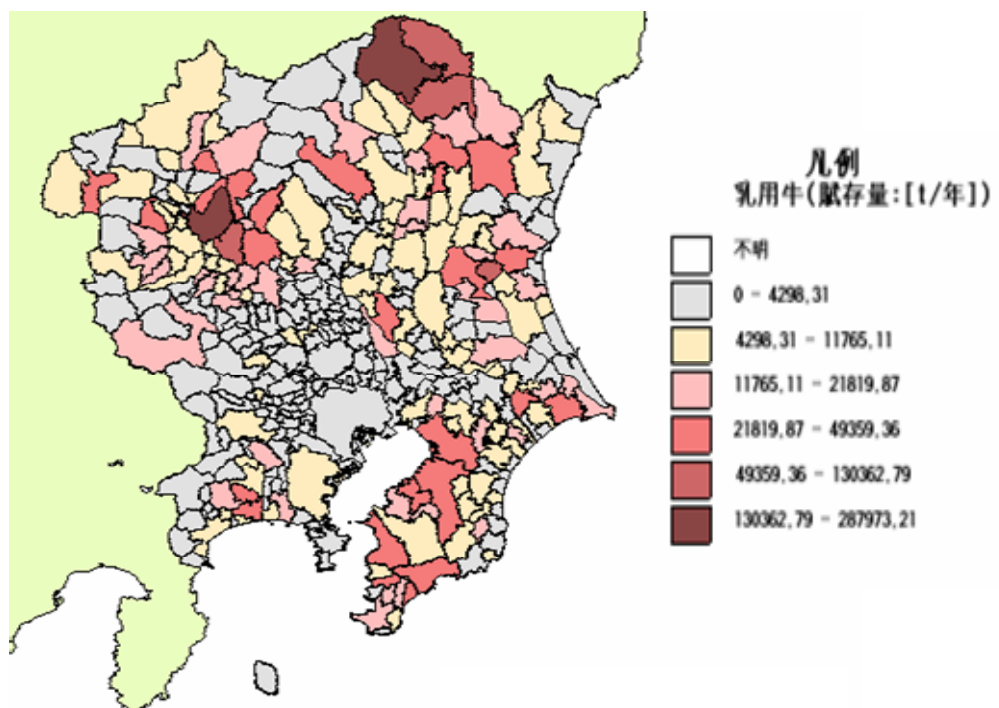
11:21

図 4.5 首都圏でのバイオマス水素ステーション成立の可能性検討 EXCEL 集計 (例)



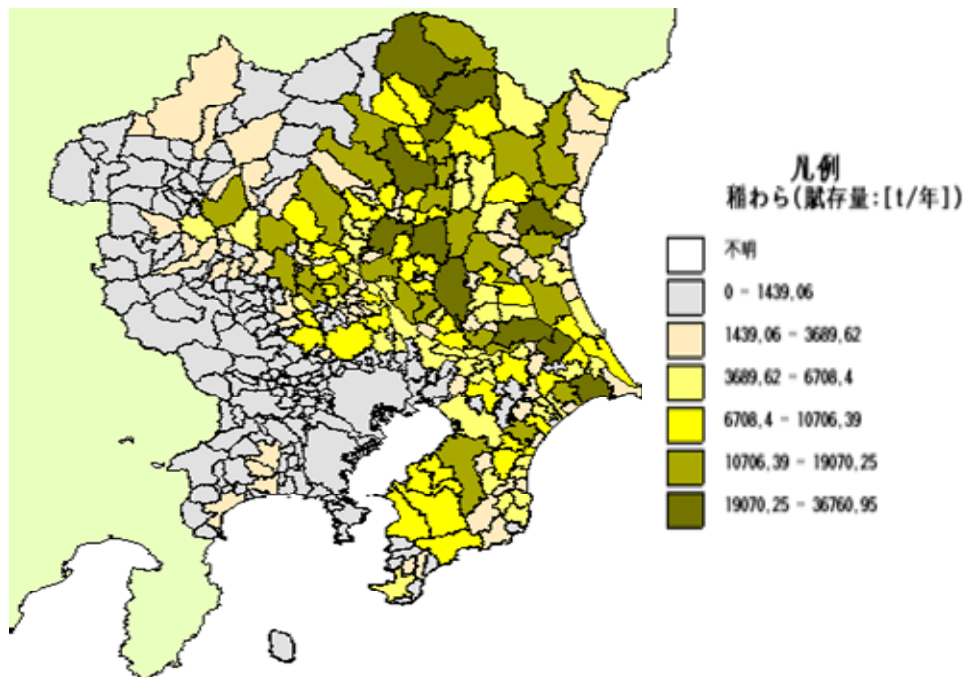
出典：(独) N E D O , バイオマス賦存量・利用可能量の推計

図 4.6 首都圏における林地残材の賦存量分布図



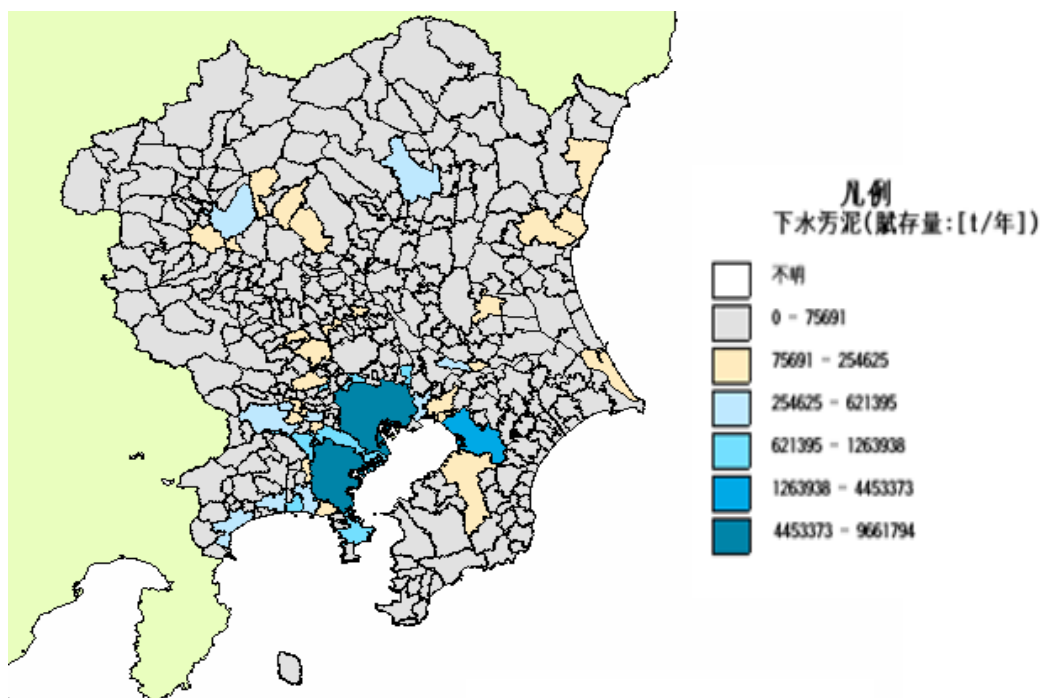
出典：(独) N E D O , バイオマス賦存量・利用可能量の推計

図 4.7 首都圏における畜産廃棄物（乳牛糞尿）の賦存量分布図



出典：(独) N E D O , バイオマス賦存量・利用可能量の推計

図 4.8 首都圏における農業残渣（稲わら）の賦存量分布図



出典：(独) N E D O , バイオマス賦存量・利用可能量の推計

図 4.9 首都圏における下水汚泥の賦存量分布図

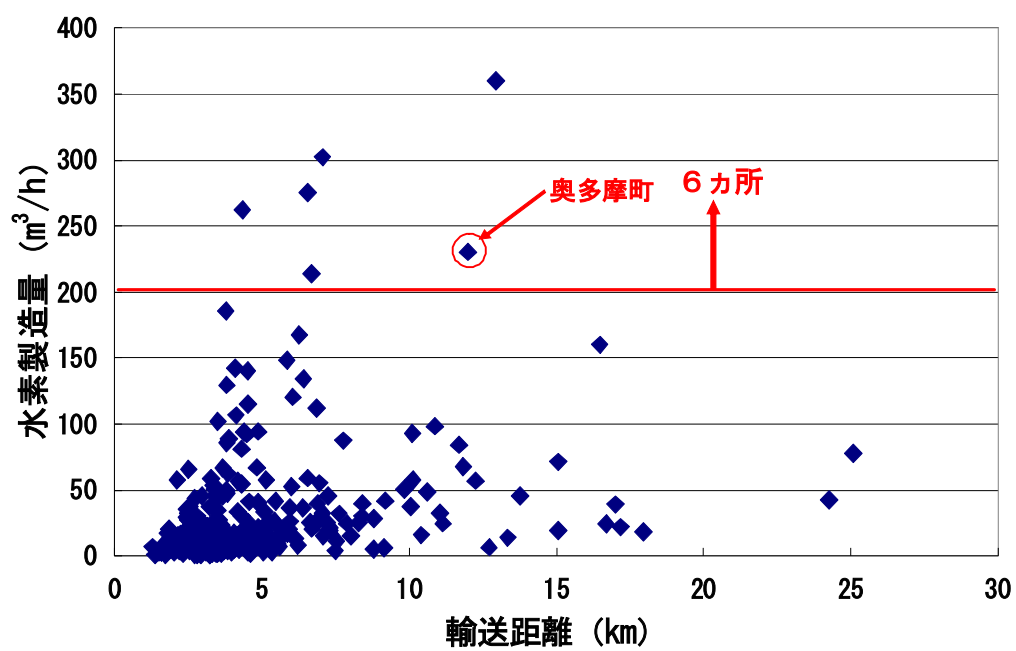


図 4.10 バイオマスの輸送距離と水素製造量（木質バイオマス）



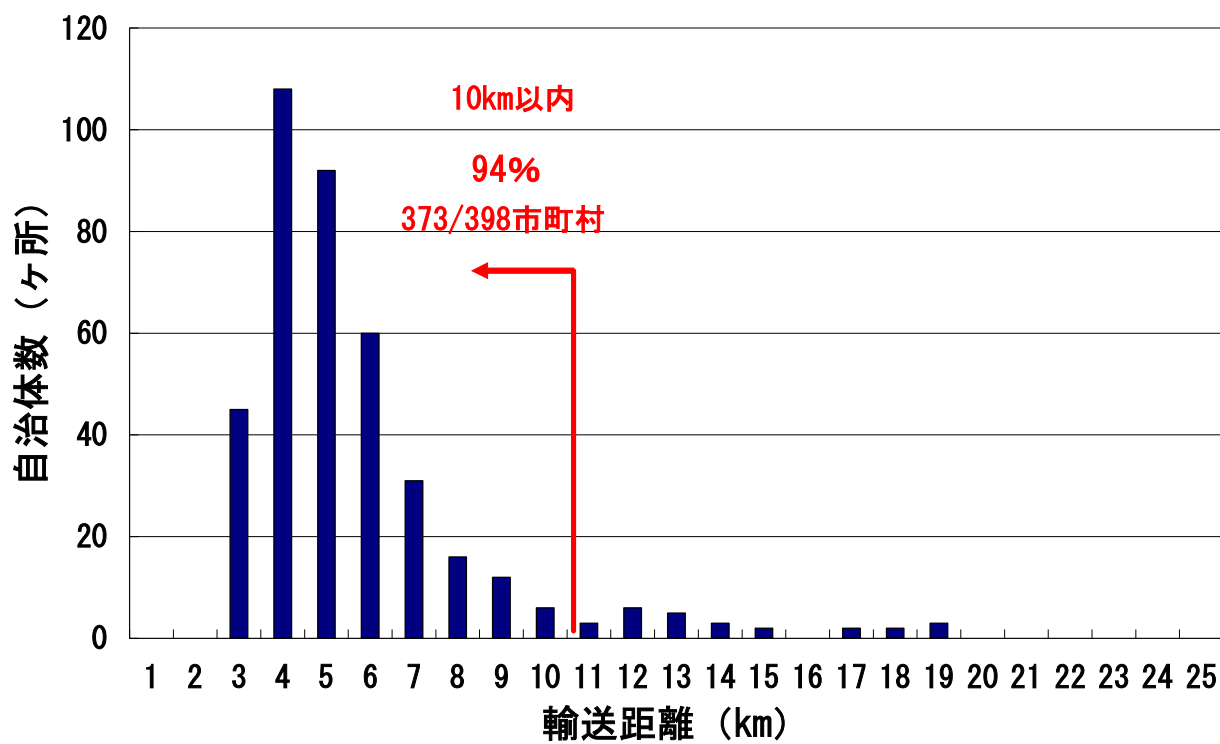


図 4.11 輸送距離と自治体数の関係

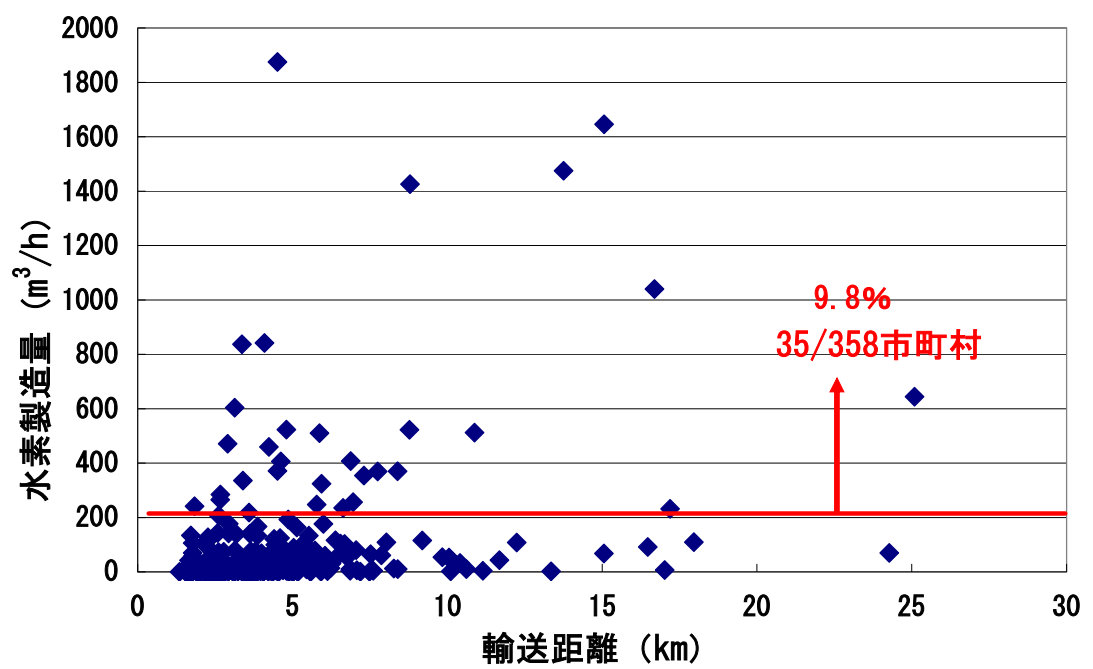


図 4.12 バイオマスの輸送距離と水素製造量（畜産廃棄物）

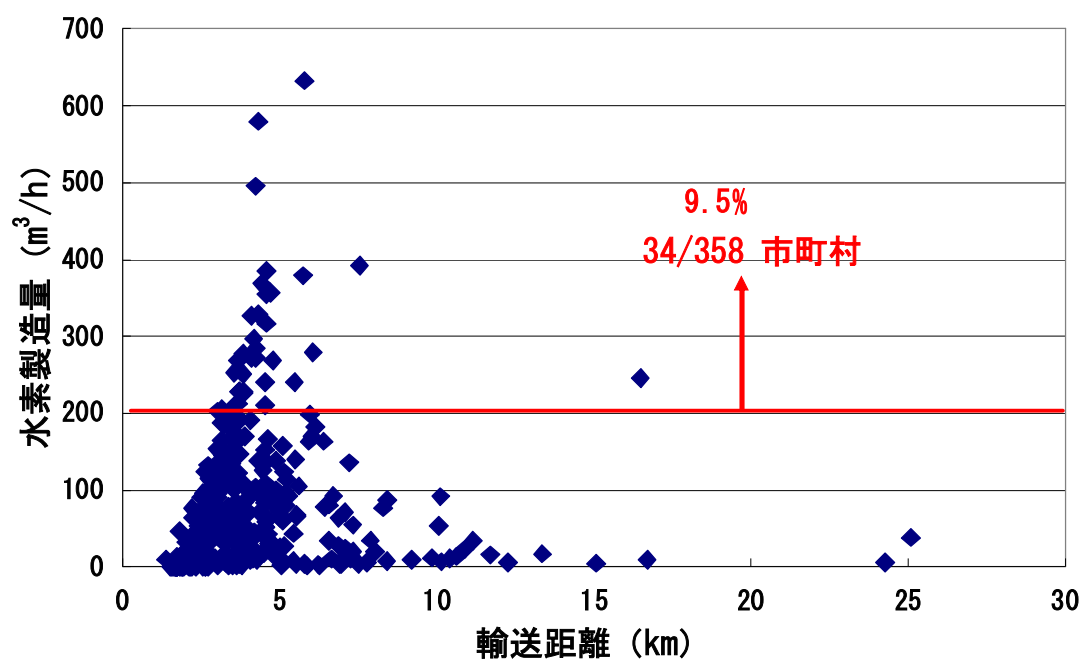


図 4.13 バイオマスの輸送距離と水素製造量（農業残渣）

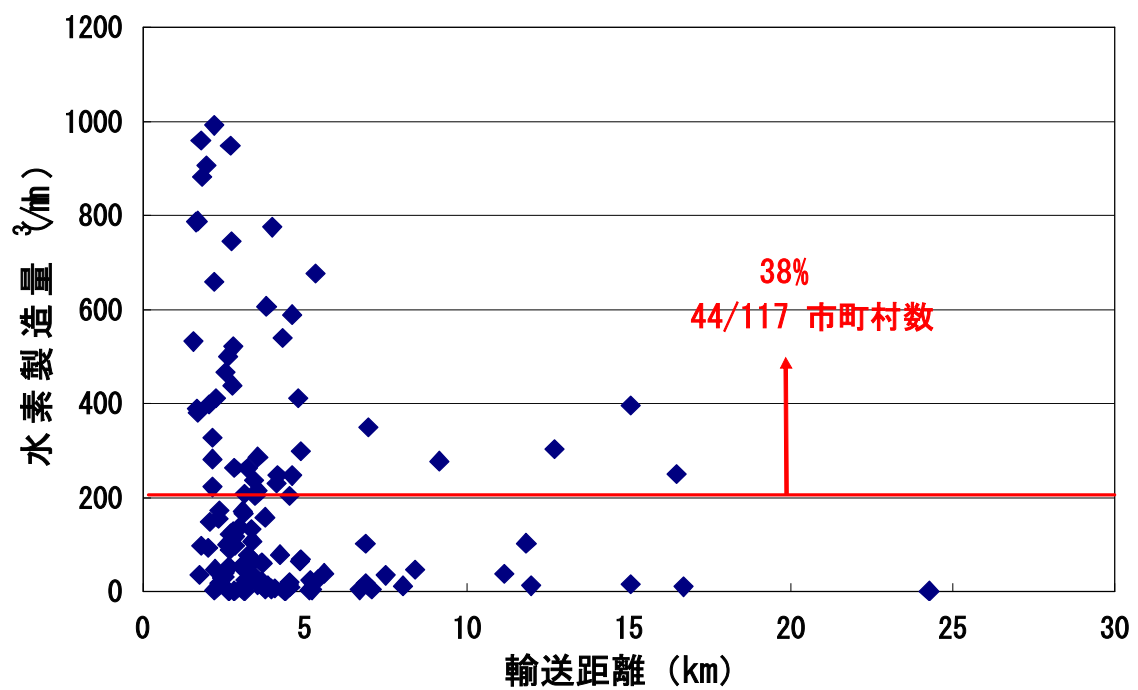
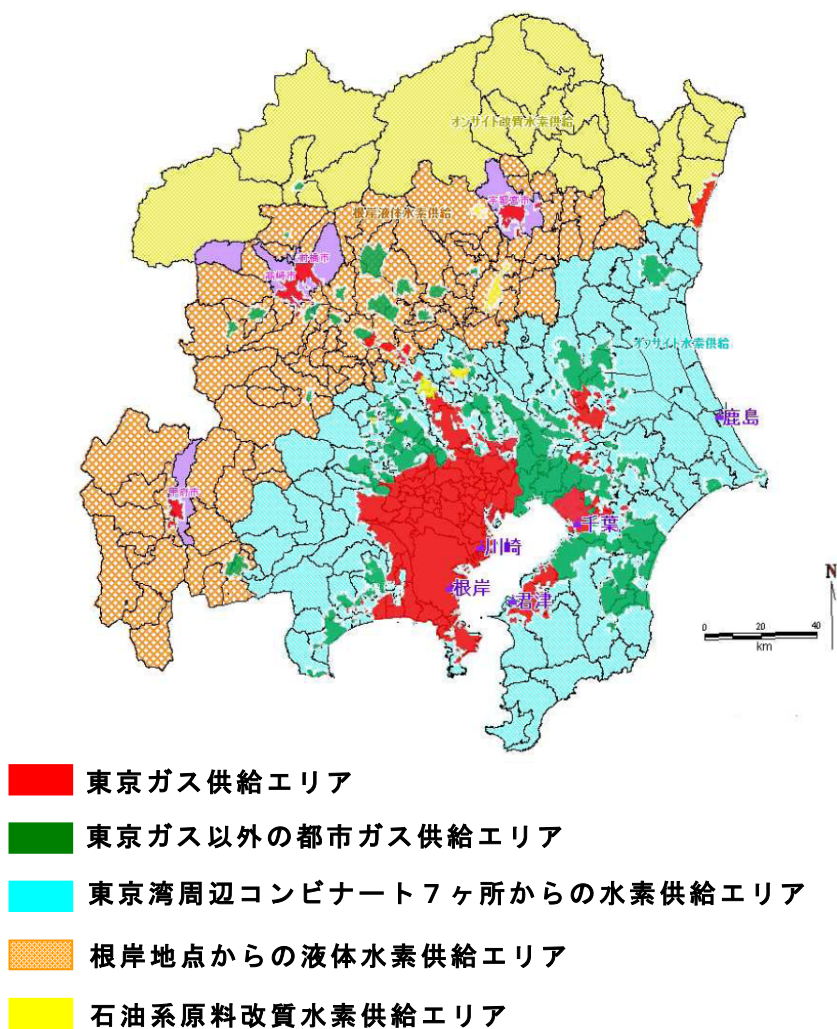


図 4.14 バイオマスの輸送距離と水素製造量（下水汚泥）  
（水素製造量 1,000m³/h 以下）



出典：(株) 価値総研・東京ガス(株)，

関東圏における水素インフラ展開シナリオ検討基礎調査，2007

図 4.15 首都圏における最適水素供給の考え方

## 第 5 章 日本全国における水素ステーション実現性検討

## 5.1 はじめに

前章までの検討において、バイオスより水素を製造し、水素ステーションにてFCVに供給するモデルの有効性を証明，評価してきた。

そこで本章では，このモデルを首都圏から更に拡大させ，日本全国に展開した場合の有効性に関して検討，論じる。地方ごと，バイオマス種別（木質，畜産廃棄物，農業残渣）にデータを整理し，水素ステーション構築の可能性を考察する。更に加えて，4.6.1の木質バイオマスの項で指摘した，バイオマスの収集エリアを拡大した検討を行い，水素ステーションの構築を最大にする試みを行う。最後に，本手法のバイオマス利活用に対する有効性を日本全国ベースで評価する。

## 5.2 日本全国への実現性検討の展開

### 5.2.1 検討の前提

第4章の検討手法を日本全国へ展開する。但し、下水汚泥に関しては水素ステーションへの活用には不適切であることから、本検討からは除き、木質バイオマス、畜産廃棄物、農業残渣の3種のバイオマスのみを対象とした。

評価条件は第4章と同一とした。すなわち、 $\rho = 0.1$  であり、経済産業省の普及計画では2020年頃の既存車の10%がFCVに転換される前提である。

全国展開にあたり、地方区分として、北海道、東北、関東、中部、北陸、近畿、中国、四国、九州、沖縄の10地方域に分けて表示する。各地方に区分された都道府県は以下である。

北海道：北海道

東北：青森，秋田，岩手，宮城，山形，福島

関東：東京，神奈川，群馬，栃木，茨城，埼玉，千葉

北陸：新潟，富山，石川，福井

中部：山梨，長野，岐阜，静岡，愛知，三重

近畿：滋賀，京都，大阪，兵庫，奈良，和歌山

中国：鳥取，島根，岡山，広島，山口

四国：徳島，香川，愛媛，高知

九州：福岡，佐賀，長崎，熊本，大分，宮崎，鹿児島

沖縄：沖縄

平成に入り、地方自治体間で市町村合併が推進された。(平成の大合併)1999年では全国に3,232あった市町村は、2009年3月には1,779と約半減される予定である。

NEDO，電力中央研究所が提供する全国バイオマスデータは、原則、旧市町村でのデータ(自治体数：2,218)であるが、東京ガス，価値総合研究所の調査による全国ガソリンスタンド数のデータは、合併途上時期での調査のため、一部合併後のデータが含まれる。本検討ではデータメッシュを細分化する観点で、NEDO，電中研のバイオマスデータを基準として評価を行うこととし、合併後のガソリンスタンドデータは、旧市町村の人口比率でスタンド数を割り振って



用いた。

### 5.2.2 結果および考察

本結果を、図 5.2～図 5.31 に記す。木質（青）、畜産廃棄物（茶）、農業残渣（緑）ごとに、プロット点の色を変えて表示した。図中、赤字の分数表示は、水素製造量  $200\text{m}^3/\text{h}$  以上を基準として、（水素ステーション構築可能自治体数）／（対象自治体数）を示している。各地方において、バイオマス種ごとに対象自治体数が異なるのは、バイオマス種によっては賦存しない自治体があることによる。

地方ごとバイオマス種別ごとに纏めた全国集計を表 5.1 および図 5.32 に示す。

全国で水素製造量  $200\text{m}^3/\text{h}$  以上を基準とし、バイオマス種によって異なる水素ステーションが同時構築可能とした場合の構築可能自治体数は、529 ヶ所にのぼり、評価対象自治体を 2,042 ヶ所（のべ自治体数 6,127 ヶ所／バイオマス 3 種 $\div$ 2,042）と見積もれば、全国の約 26%の自治体が、本手法によって水素ステーションを構築できることが判明した。

地方によっては構築可能な自治体数に偏りが見られる。バイオマスの賦存に応じて、東北地方で最も構築可能な自治体が多い（128 ヶ所）。次に、北海道（115 ヶ所）、九州（114 ヶ所）が同程度であり、関東では北海道、九州の約半数（67 ヶ所）程度の自治体で水素ステーションが構築できる。他の地方（中部、北陸、近畿、中国、四国、沖縄地方）は、これら 4 地方に比べると著しく構築可能自治体数は少なくなる。なお、関東地方に関しては、第 4 章での検討は首都圏（関東地方＋山梨県）を対象エリアとして評価したため、本章における関東地方のデータとは若干異なっている。構築可能自治体比率でもほぼ同じ傾向がみられるが、比率で比較すると 3 種のバイオマスとも東北地方より北海道の方が高くなる。首都圏では木質バイオマスでの実現可能性が低かったが、北海道、九州地方では 10%程度の自治体で木質バイオマスから水素ステーションを構築できる。近畿地方での木質バイオマスから水素ステーションを構築可能な自治体数が比較的多いのが特異的である。（和歌山県での構築可能性が特に高い）

畜産廃棄物では、北海道、東北、関東、九州地方での構築可能性が高いと言える。全国集計でも、木質バイオマスに比べて利活用の可能性は高い。

農業残渣は、首都圏での構築可能性は畜産廃棄物と同程度であったが、全国では畜産廃棄物より利活用の可能性は高い。特異的なのは北陸地方であり、同地方では木質バイオマスおよび畜産廃棄物を活用しての水素ステーションは構築し難いが、農業残渣から水素製造ステーションを運営できる可能性が高い。

沖縄地方はいずれのバイオマス種からの水素ステーションも構築し難い結果となった。農業残渣に計上したバイオマス種別が、稲わら、籾殻、麦わらの3種であったため、沖縄地方特有に賦存するバガスのデータが算入されていない。沖縄地方ではバガスからの水素ステーション構築の可能性を、個別に検討する必要があると思われる。

## 5.3 日本全国における水素ステーション構築のポテンシャル

### 5.3.1 検討の前提

これまでの検討では、FCVの普及率 $\rho$ を設定して評価を行ってきた。これは言わば、ガソリンスタンドの水素ステーションへの転換率を決定することによって、各自治体における将来のある時期での水素ステーション数を決定して議論を進めてきたものである。

そこで次に、各自治体の水素ステーション構築への最大の可能性を評価する。第4章の首都圏での木質バイオマスのケースにおいて指摘したように（図4.10参照）、輸送距離を伸ばすことでステーション構築の可能性拡大を図る。以下にその考え方を記す。

当該自治体において、水素製造量を $H$ （ $\text{m}^3/\text{h}$ ）、バイオマスの利用可能量を $Q$ （ $\text{t}/\text{y}$ ）、現存ガソリンスタンド数を $N$ （ヶ所）、水素ステーション転換割合を $\rho$ （－）とすると、(7)式および(1)～(3)式より、

$$H \propto q = \frac{Q}{360N\rho} \quad \dots\dots\dots (11)$$

（但し360日：水素製造プラントの年間稼働日数）となり、この(11)式を変換して、

$$Q = aN\rho H \quad (a: \text{定数}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

市町村面積を $S$ （ $\text{km}^2$ ）、バイオマスの収集半径を $L$ （ $\text{km}$ ）とした関係式(9)式

$$L = \sqrt{\frac{S}{N \times \rho \times \pi}} \quad \text{を変換して、}$$

$$S = N\rho\pi L^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

となることから、

$$\frac{Q}{S} L^2 = \frac{aN\rho H}{N\rho\pi} \quad \dots\dots\dots (14)$$

より、

$$\therefore H \propto \frac{Q}{S} L^2 \quad \text{となる。} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$Q/S$ は自治体ごとの単位面積あたりのバイオマス利用可能量（バイオマス密度）を表している。

(15) 式をもとに，輸送距離  $L$  と水素製造量  $H$  の関係を図 5.1 に示す。

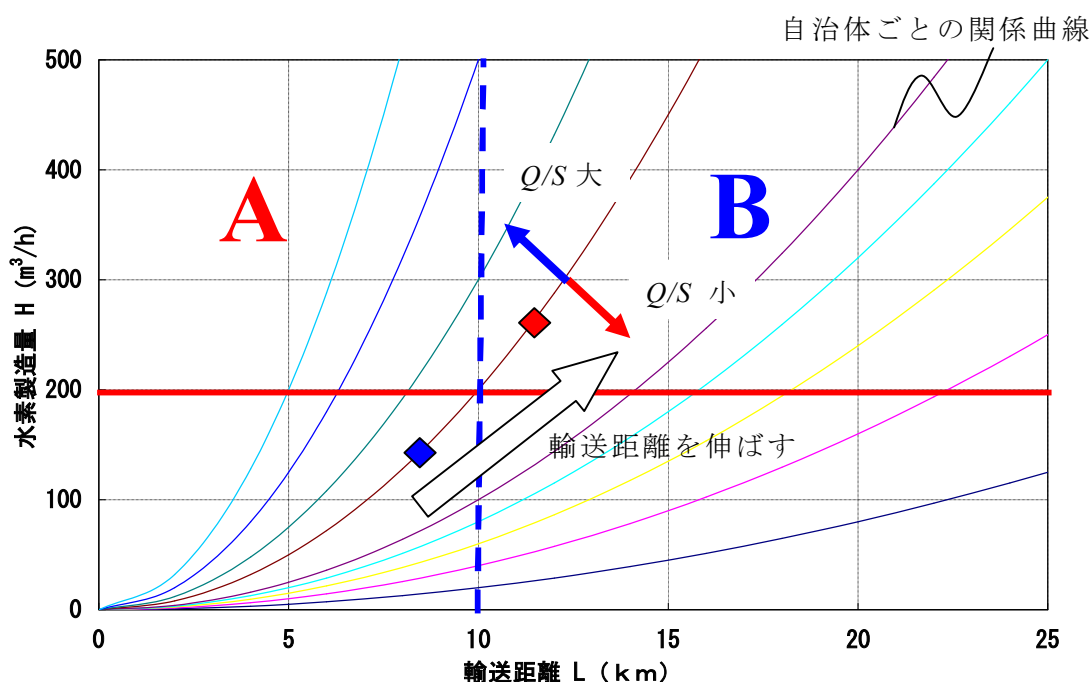


図 5.1 輸送距離と水素製造量との関係

輸送距離が短く（例えば 10km 以内）水素製造量が大きい（必要製造能力  $200\text{m}^3/\text{h}$  を超える）エリア A に入る自治体を算入することはもとより， $Q/S$  が小さい自治体では，輸送距離を伸ばすことで水素製造量を確保し，エリア B に入るところまで収集範囲を広げる。但し，その自治体の外（隣接の自治体）までには輸送距離を伸ばさない前提とした。

$$\text{すなわち， } l = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \geq L \quad \dots\dots\dots (16)$$

を条件とする。但しここにおける  $l$  は，自治体形状を円形と仮定した場合の半径を表す。

上記条件に加えて，水素ステーション数を評価する際には，一種のバイオマスが多く，多量な水素を製造しうる自治体，もしくはバイオマス種同士の重複によっても水素を多く製造しうる自治体では，自治体内の既存ガソリンスタンド数以上に水素ステーションを形成できる可能性もあるが，水素ステーションへの転換率は 100%を超えないものとして条件付けた。（転換率 100%を超え

る自治体：全国で 11 ケ所，バイオマス重複で転換率 100%を超える自治体：北海道厚真町の 1 ケ所)

### 5.3.2 結果および考察

本検討は EXCEL 表にて図 5.33 の形式で計算した。

また，検討した全国データの集計を表 5.2 に示す。表 5.1 と表 5.2 を比較すると，水素ステーションを構築し得る自治体数は，述べ数で，529 ケ所から 792 ケ所へと大幅に増加している。全国構築可能自治体割合では，25.0%から 34.7%へ 9.7%の増加となった。

図 5.34 から図 5.36 は水素ステーションあたりのバイオマス輸送距離に対する水素ステーション構築可能自治体数の分布を，バイオマス種ごとに示したものである。いずれのバイオマス種でも輸送距離は最大でも 25km 以内である。特に農業残渣の輸送距離は他の 2 種に比べても短い。水素ステーション構築を拡大するために，バイオマスをより遠方まで収集する試みを行ったわけだが，分布の形状は異なるものの，平均輸送距離はいずれのバイオマスでも 10km 以内（7.6～9.0km）であり，本手法は地産地消の観点でバイオマス利活用を図る有効な手段であることが裏付けられたと言える。

日本全国における構築可能なステーション数は 3 種のバイオマス合計で，1,341 ケ所である。これは本調査時（2007.3 の集計：(株) 価値総研・東京ガス (株)，2007 のデータを全国集計）での全国ガソリンスタンド数 53,902 ケ所の 2.51%にあたる。バイオマスの，水素ステーション構築への原料としての寄与率を考えるに，その影響は少ないように見受けられる。しかし，バイオマスの利活用から見た水素ステーションへの適用は，全国のバイオマス利用可能量のうち水素ステーション構築に使用されたバイオマス量割合(水素への転換割合)をみれば，木質バイオマス，畜産廃棄物，農業残渣でそれぞれ，49.1%，48.0%，66.9%と高い数字を示している。バイオマス 3 種の合計では全国のバイオマス利用可能量のうち，約 56%が水素に転換され水素ステーション構築に寄与したことが分かる。したがって本手法は，バイオマスの将来有望な利活用法であると判断できる。

## 5.4 本章のまとめ

本章では、地方自治体での事例研究，あるいは首都圏の自治体に対して適用させた手法を，日本全国に拡大してその有効性を評価した。

2020 年頃の FCV 普及割合を想定した場合で水素ステーションを構築できる自治体数を推定したところ，全国の各地方によって，またバイオマス種によって，その有効性は異なることが判明した。日本全体では，北海道，東北，九州地方での構築可能性が高い。また，木質バイオマス，畜産廃棄物，農業残渣の 3 種のバイオマスのうち，農業残渣でのステーション構築可能性が尤も高いことが分かった。

更に，普及割合を限定せず自治体内のバイオマスから構築できる最大の水素ステーション数を推定した結果，全国のガソリンスタンドの約 2.5%がバイオマスから製造する水素でステーションを構築できることが判明した。水素ステーション構築におけるバイオマスの役割は比較的小さいが，バイオマスの利活用の観点では，全国でのバイオマス 3 種の利用可能量のうち，約 56%が水素ステーション構築に活用されたこととなり，バイオマスから水素を製造しステーションにて FCV に充填する本手法は，将来有望なバイオマス利活用手法であると言える。

加えて，本手法におけるバイオマス平均輸送距離は，いずれのバイオマス種でも 10km 以内であり，再生可能エネルギーの地産地消での利活用の観点からも，推奨できる手法であると判断された。

## 北海道

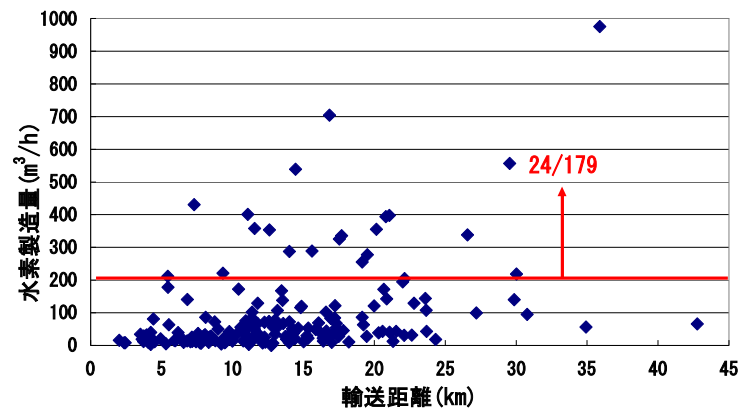


図 5.2 木質

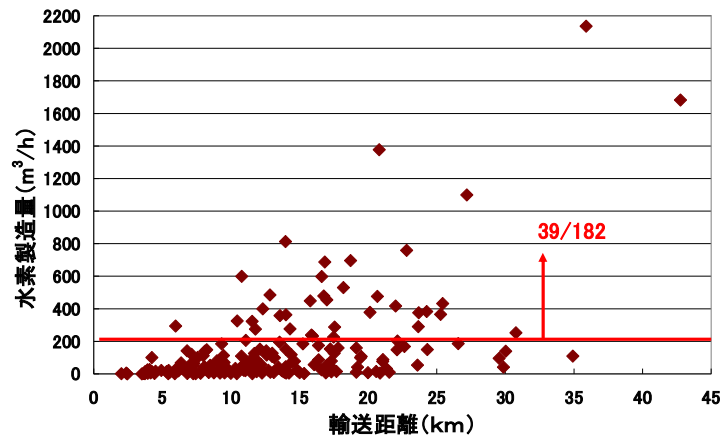


図 5.3 畜産廃棄物

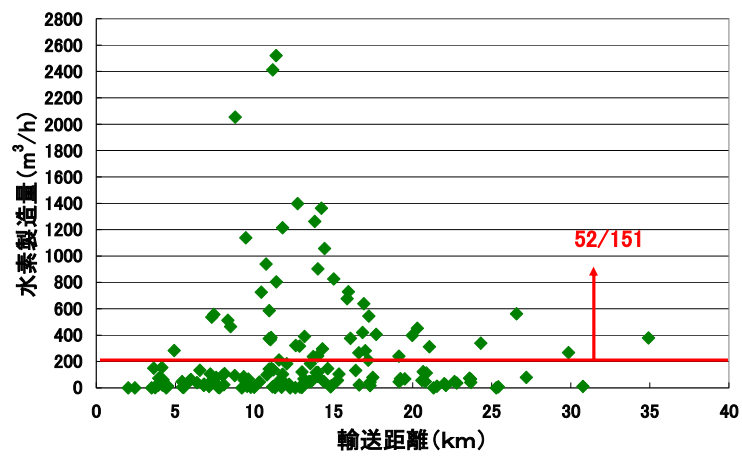


図 5.4 農業残渣

## 東北地方

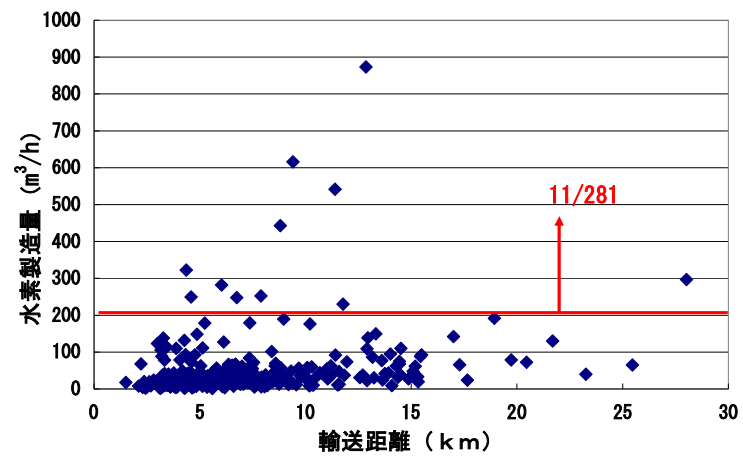


図 5.5 木質

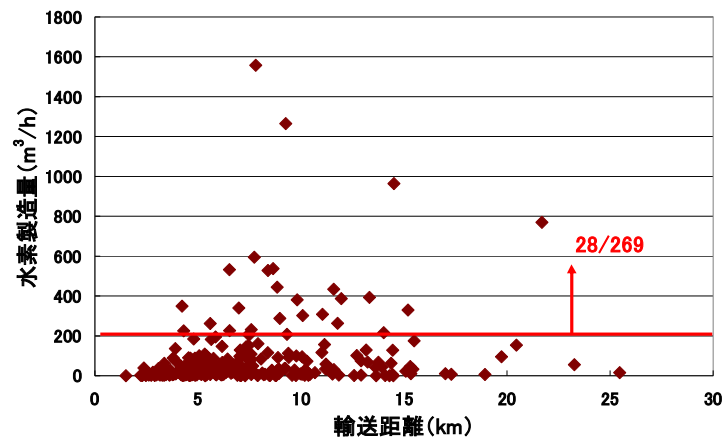


図 5.6 畜産廃棄物

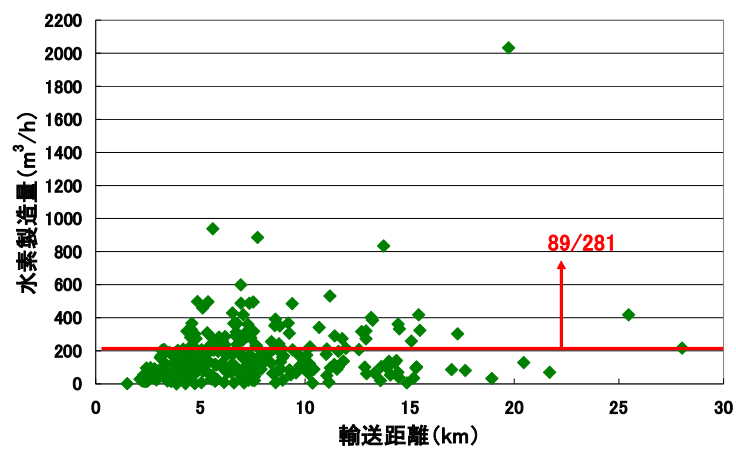


図 5.7 農業残渣



## 関東地方

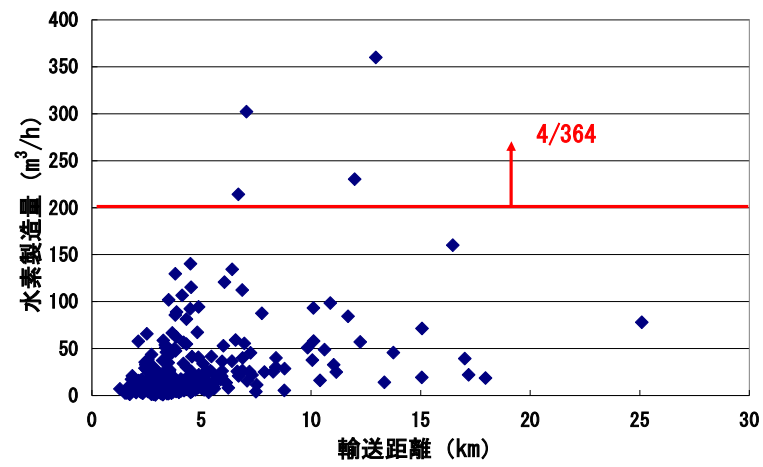


図 5.8 木質

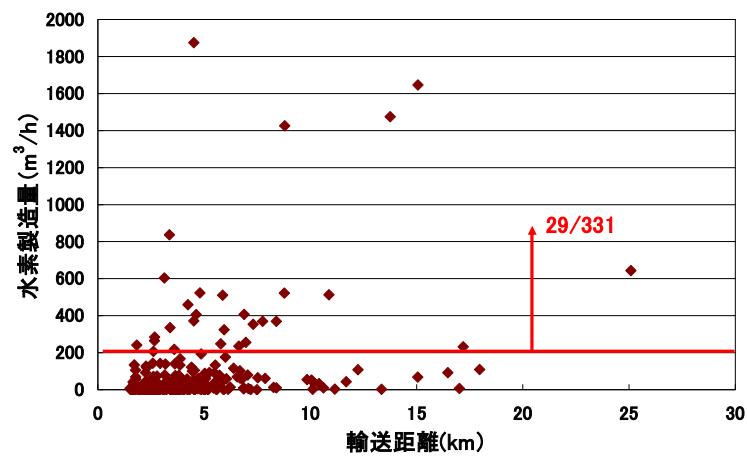


図 5.9 畜産廃棄物

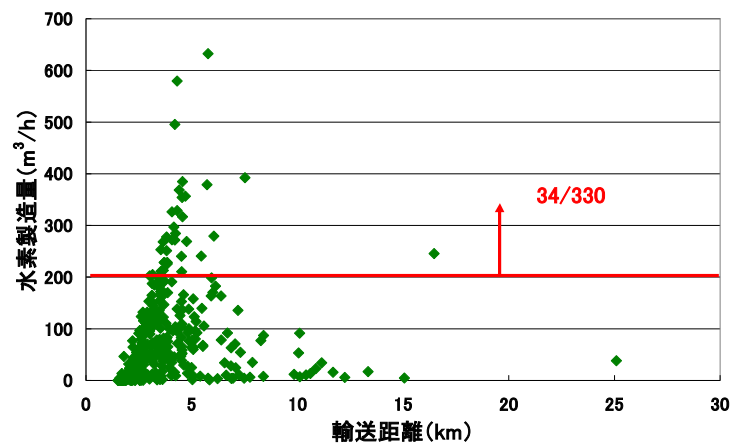


図 5.10 農業残渣

## 中部地方

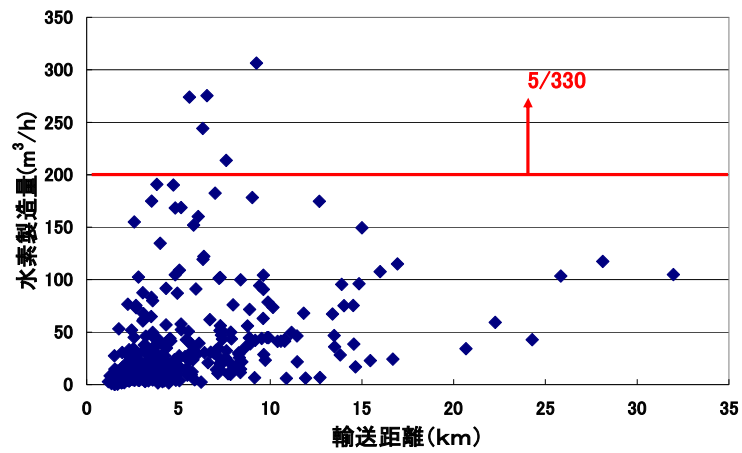


図 5.11 木質

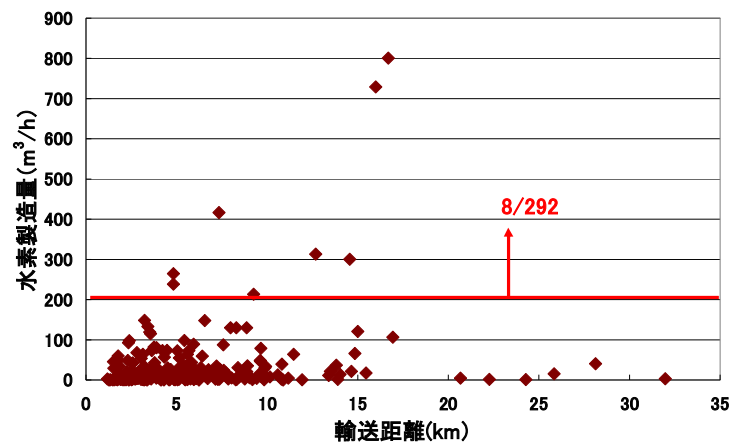


図 5.12 畜産廃棄物

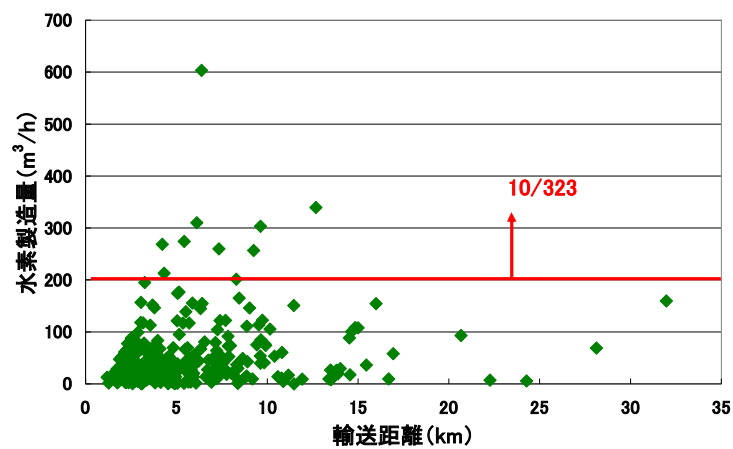


図 5.13 農業残渣

## 北陸地方

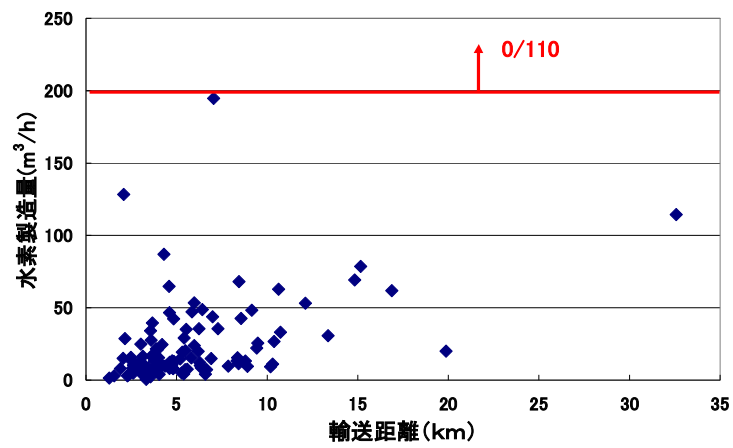


図 5.14 木質

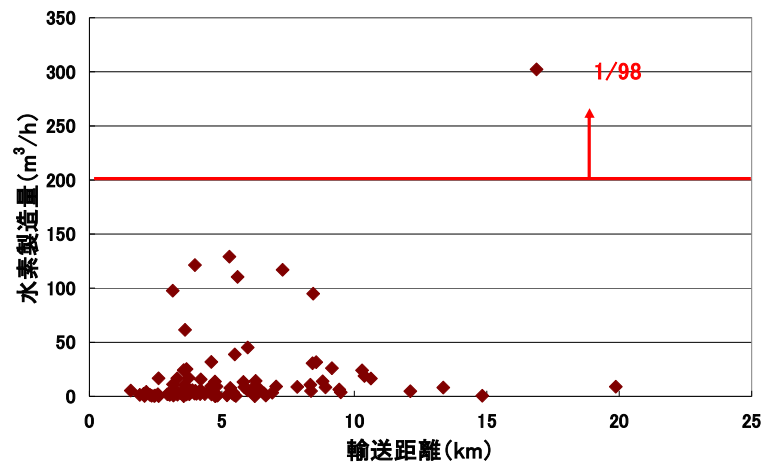


図 5.15 畜産廃棄物

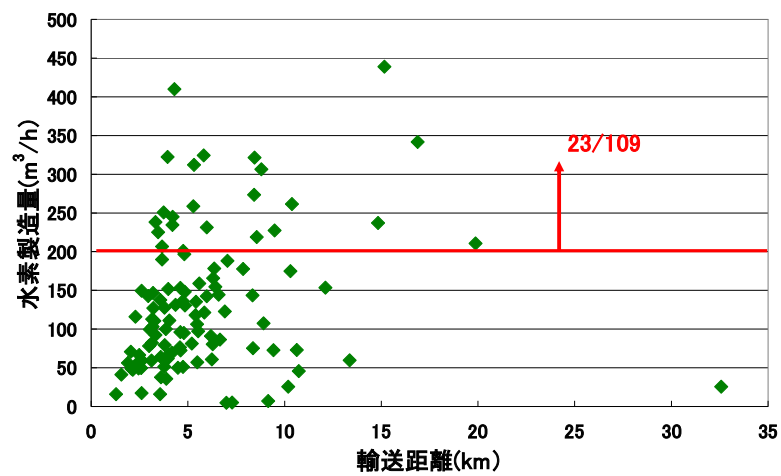


図 5.16 農業残渣

## 近畿地方

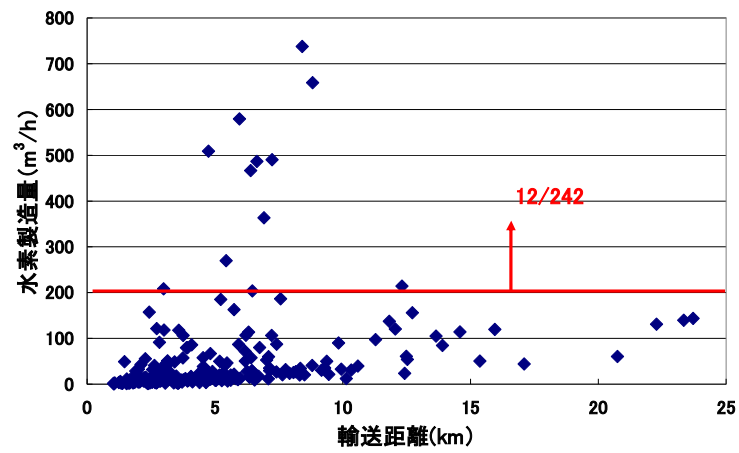


図 5.17 木質

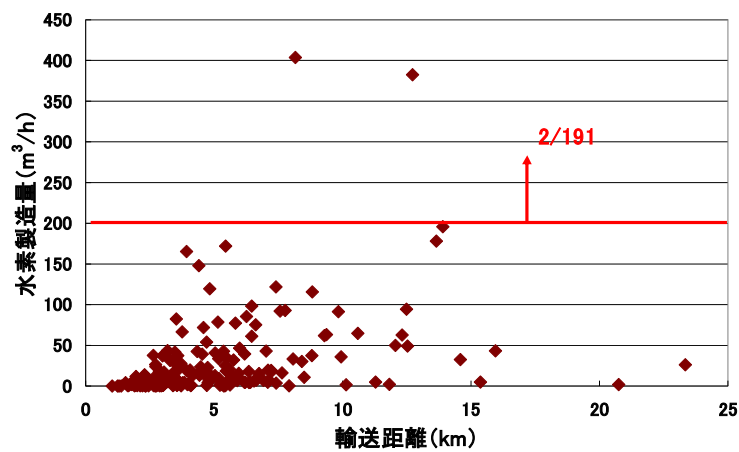


図 5.18 畜産廃棄物

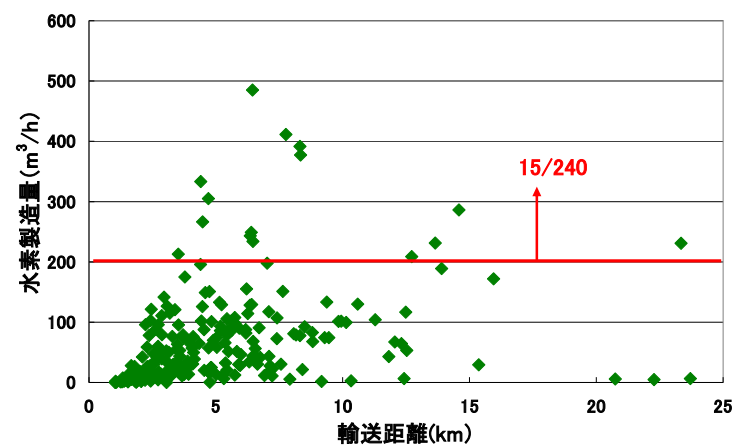


図 5.19 農業残渣

## 中国地方

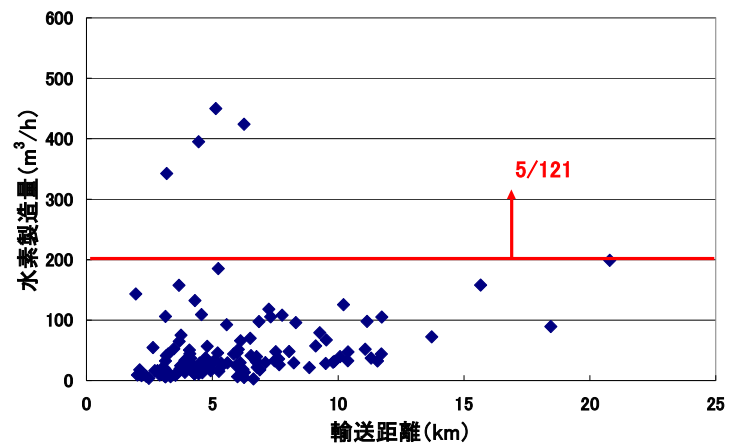


図 5.20 木質

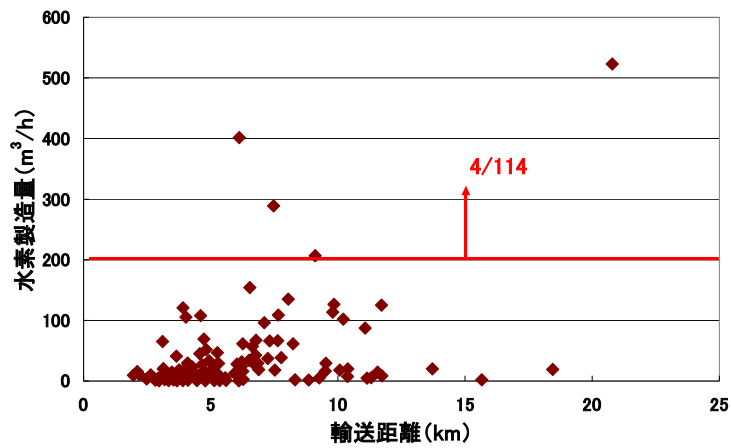


図 5.21 畜産廃棄物

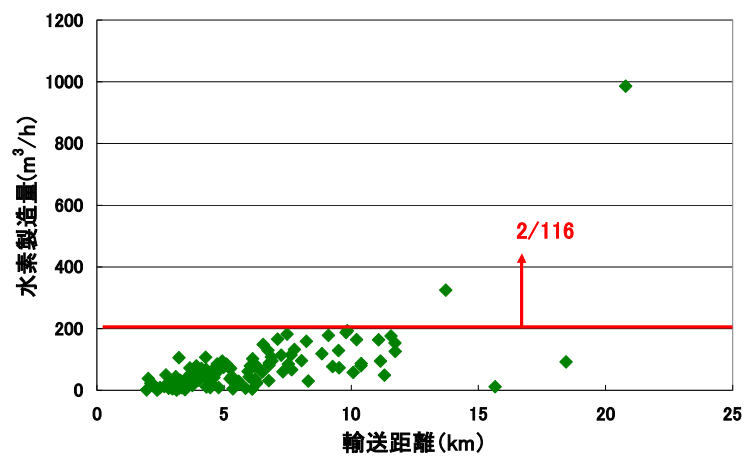


図 5.22 農業残渣

## 四国地方

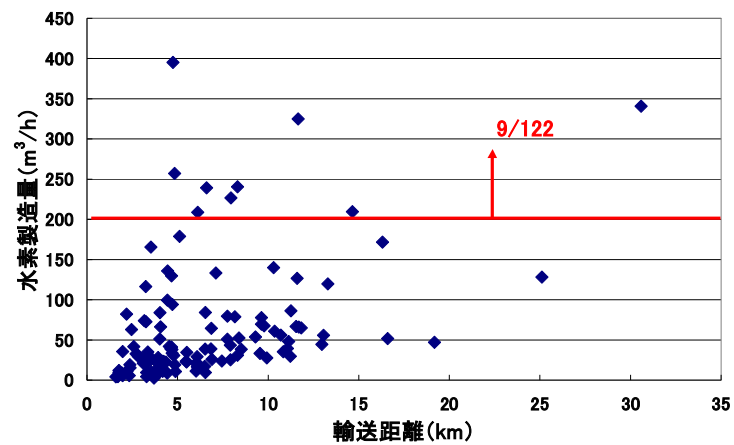


図 5.23 木質

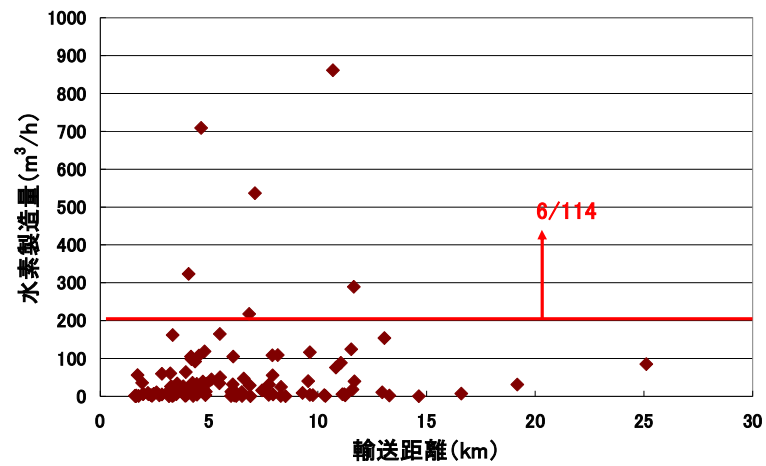


図 5.24 畜産廃棄物

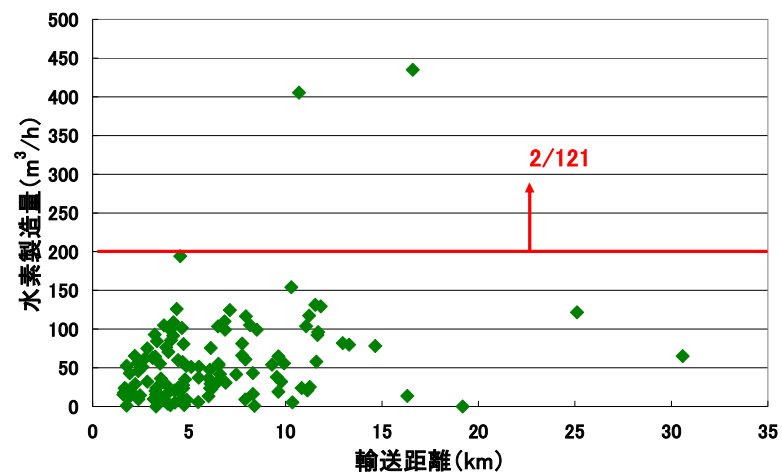


図 5.25 農業残渣

## 九州地方

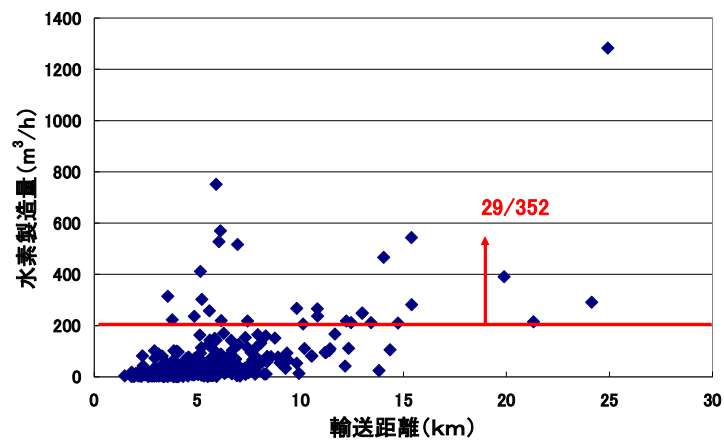


図 5.26 木質

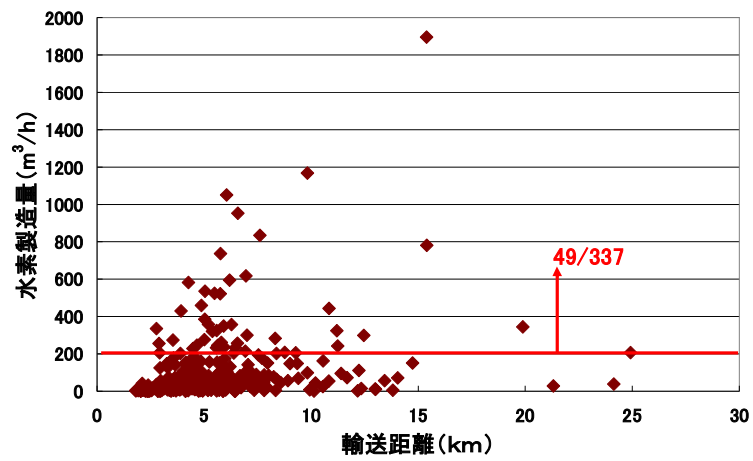


図 5.27 畜産廃棄物

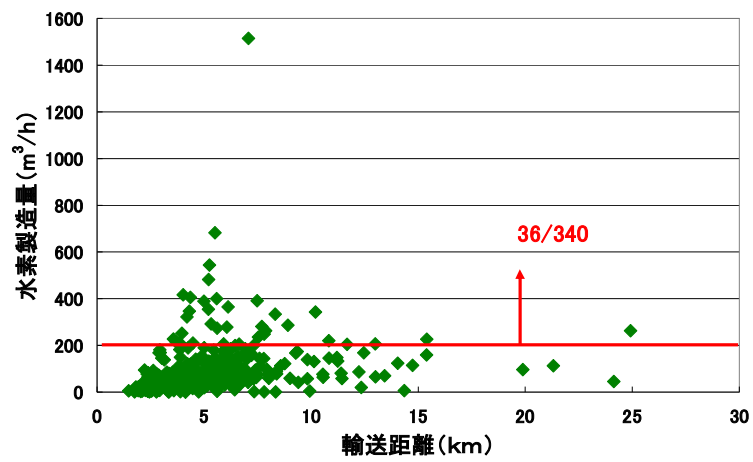


図 5.28 農業残渣

## 沖縄地方

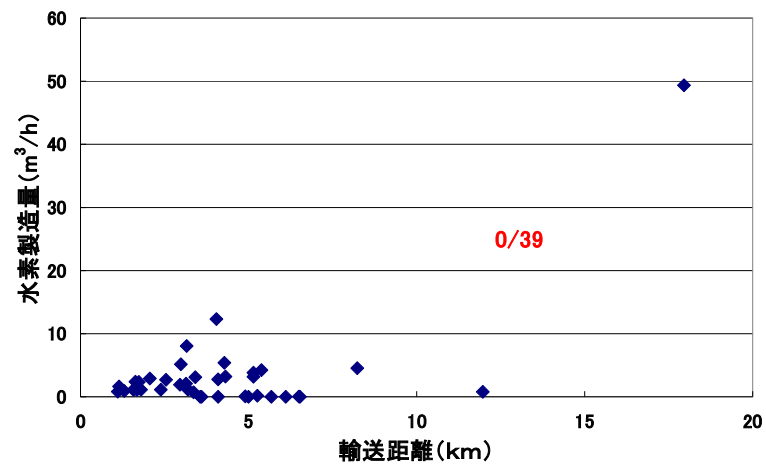


図 5.29 木質

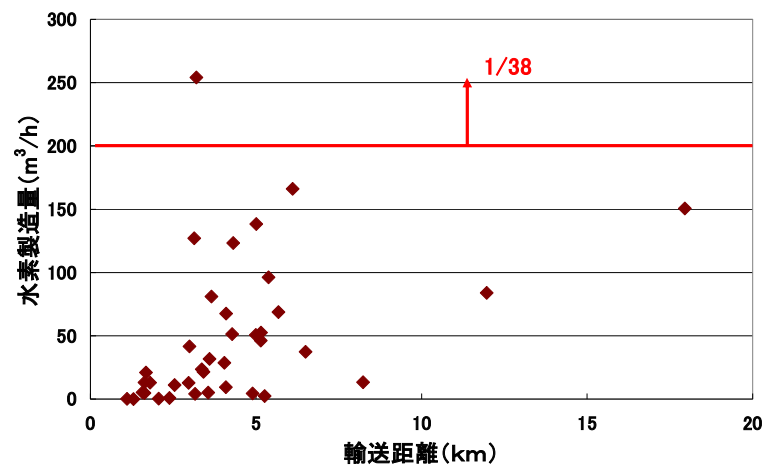


図 5.30 畜産廃棄物

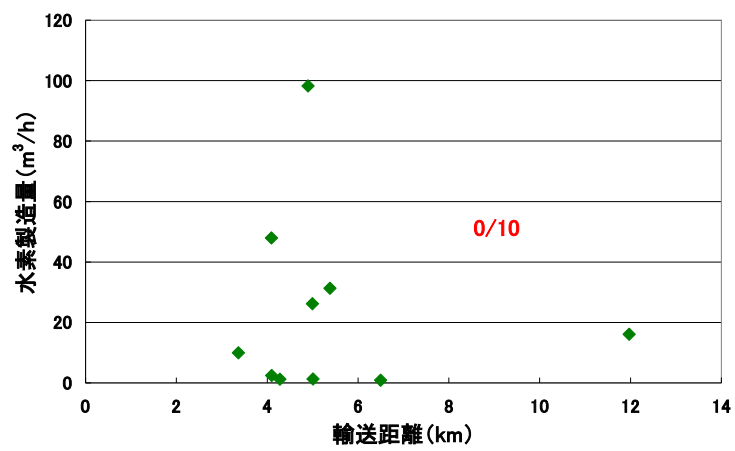


図 5.31 農業残渣



表 5.1 水素ステーション実現性検討全国集計

地方	バイオマス			木質			畜産廃棄物			農業残渣			バイオマス計		
	構築可能 自治体数	対象自 治体数	比率 (%)	構築可能 自治体数	対象自 治体数	比率 (%)	構築可能 自治体数	対象自 治体数	比率 (%)	構築可能 自治体数	対象自 治体数	比率 (%)	構築可能 自治体数	対象自 治体数	比率 (%)
北海道	24	179	13	39	182	21	52	151	34	115	512	22			
東北	11	281	4	28	269	10	89	281	32	128	831	15			
関東	4	364	1	29	331	9	34	330	10	67	1,025	7			
中部	5	330	2	8	292	3	10	323	3	23	945	2			
北陸	0	110	0	1	98	1	23	109	21	24	317	8			
近畿	12	242	5	2	191	1	15	240	6	29	673	4			
中国	5	121	4	4	114	4	2	116	2	11	351	3			
四国	9	122	7	6	114	5	2	121	2	17	357	5			
九州	29	352	8	49	337	15	36	340	11	114	1,029	11			
沖縄	0	39	0	1	38	3	0	10	0	1	87	1			
全国計	99	2,140	5	167	1,966	8	263	2,021	13	529	6,127	9			

全国平均対象自治体数：6,127/3＝2,042

全国構築可能自治体割合：529/2,042＝25.0%

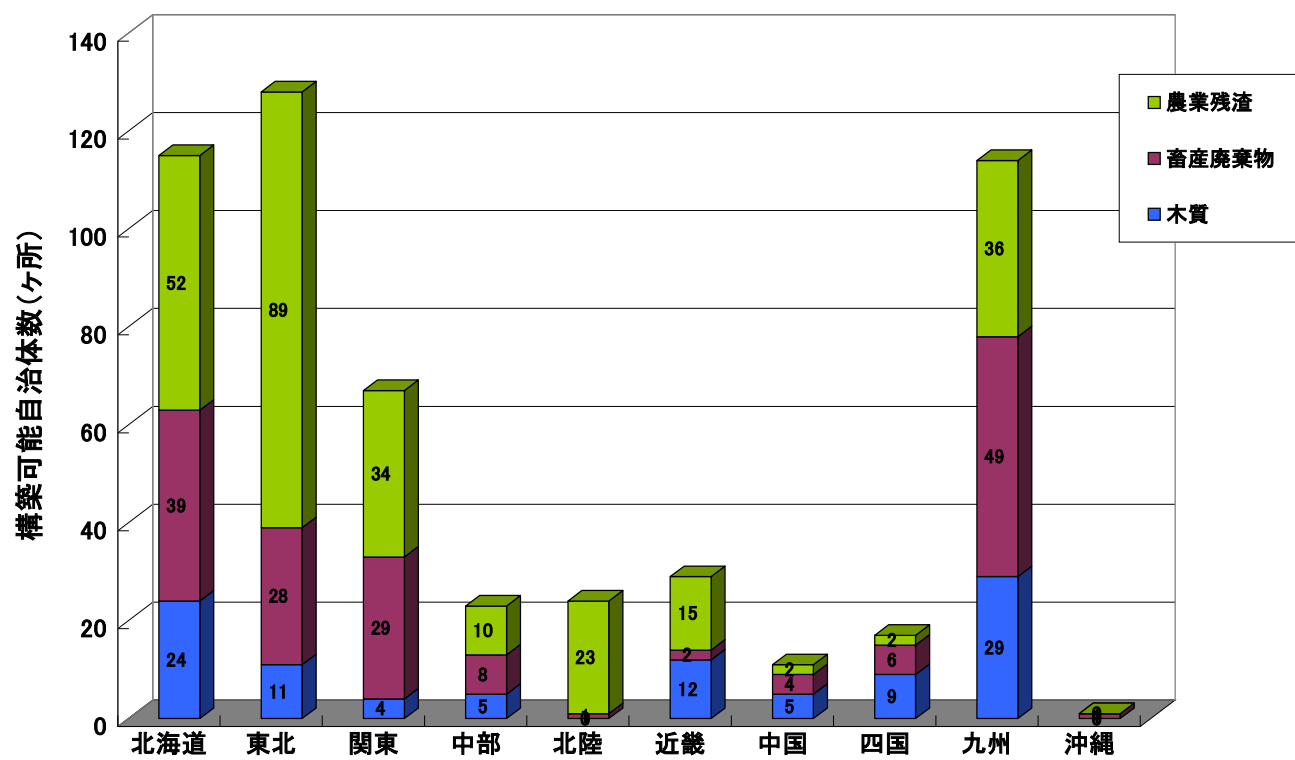


図 5.32 水素ステーション実現性検討全国集計

Microsoft Excel - Z全国集計.xls

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ツール(T) データ(D) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)

質問を入力してください

MS Pゴシック 11 B I U

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	県名	市町村名	面積S	St数N	Qw (wet-t/y)	林地残材	製材所残材	果樹剪定	公園剪定	究極qw (wet-t/d)	究極H2製造量 (m3/h)	設置可能 水素st数	可能St ヘースL(km)	限界I (km)	水素St 普及率(%)	
3	北海道	石狩市	721112183	30	2679.92	224.33	2297.58	45.85	112.16	7.44422222	217.0699447	1	15.154325	15.15432	3.333333	
4	北海道	帯広市	618869607	128	3255.93	119.46	2305.32	0	831.15	9.04425	263.7259863	1	14.038954	14.03895	0.78125	
5	北海道	札幌市	1120175914	598	5922.38	220.11	3094.05	157.97	2450.25	16.4510556	479.704879	2	13.355597	18.88767	0.334448	
6	北海道	北見市	421499805	78	2592.06	399.05	1850.07	50.79	292.15	7.20016667	209.9534019	1	11.586009	11.58601	1.282051	
7	北海道	旭川市	747503535	153	6051.16	377.62	4608.59	271.27	793.68	16.8087778	490.1358872	2	10.910052	15.42914	1.30719	
8	北海道	白糠町	608979825	3	6481.76	256.27	6122.55	0	102.94	18.0048889	525.0139127	2	9.8474012	13.92633	66.66667	
9	北海道	上磯町	262165619	18	3124.34	114.57	2958.46	0	51.31	8.67872222	253.0673718	1	9.1374086	9.137409	5.555556	
10	北海道	小樽市	242732524	63	2657.77	115.13	2247.44	137.6	157.6	7.38269444	215.2758243	1	8.7922325	8.792232	1.587302	
11	北海道	苫小牧市	559906854	91	9102.26	403.33	7438.47	0	1260.46	25.2840556	737.2709167	3	7.7096106	13.35344	3.296703	
12	北海道	余市町	140356002	15	3290.58	81.81	188.79	2992.51	27.47	9.1405	266.5325901	1	6.6857583	6.685758	6.666667	
13	北海道	栗山町	133771645	8	4253.71	155.17	4054.76	252	41.26	11.8158611	344.5448351	1	6.5270541	6.527054	12.5	
14	北海道	赤平市	129716682	14	3653.73	144.49	3458.04	0	51.2	10.14925	295.9472556	1	6.4273669	6.427367	7.142857	
15	北海道	津別町	159617977	2	6931.13	439.73	6491.4	0	0	19.2531389	561.4122832	2	5.0415152	7.129779	1.00	
16	和歌山県	田辺市	1032166193	63	8260.51	566.61	1816.89	5814.88	62.13	22.9458611	669.0902897	3	10.467654	18.13051	4.761905	
17	和歌山県	みなべ町	120866316	13	4331.7	37.58	88.69	4205.27	0.16	12.0325	350.8619211	1	6.204229	6.204229	7.692308	
18	和歌山県	金屋町	120172408	8	3588.86	42.02	77.65	3469.19	0	9.96905556	290.6928721	1	6.1863937	6.186394	12.5	
19	和歌山県	橋本市	110855575	25	3290.96	45.7	101.43	3055.12	88.71	9.14155556	266.5633695	1	5.9417441	5.941744	4	
20	和歌山県	和歌山市	209639067	166	6732.71	5.44	4368.78	2085.32	273.17	18.7019722	545.3405279	2	5.7777173	8.170926	1.204819	
21	和歌山県	かつらぎ町	152518452	11	6606.03	76.13	173.59	6337.51	18.8	18.3500833	535.0796169	2	4.9281211	6.969416	18.18182	
22	和歌山県	海南市	102271852	36	5252.34	9.44	489.26	4736.52	17.12	14.5898333	425.4325329	2	4.0355082	5.70707	5.555556	
23	和歌山県	粉河町	78155202.9	7	5009.03	27.25	29.56	4937.76	14.46	13.9139722	405.7247475	2	3.5277608	4.989007	28.57143	
24	和歌山県	有田市	37012111.6	20	3883.15	0.05	23.03	3826.85	33.22	10.7865278	314.5299695	1	3.4332633	3.433263	5	
25	和歌山県	吉備町	36582359.8	13	3346.43	1.76	144.88	3193.38	6.41	9.29563889	271.0563655	1	3.4132731	3.413273	7.692308	
26	和歌山県	那賀町	28281343.9	4	2513.63	6.94	211.64	2294.72	0.33	6.98230556	203.6006766	1	3.0011327	3.001133	25	
27	兵庫県	宍粟市	663803913	42	3110.79	421.47	2416.89	253.7	18.73	8.64108333	251.9698399	1	14.539688	14.53969	2.380952	
28	兵庫県	神戸市	553582676	291	4136.15	32.74	508.62	545.5	3049.29	11.4893056	335.022632	1	13.277809	13.27781	0.343643	
29	福島県	郡山市	761628402	217	3400.5	529.1	1820.56	660.95	389.89	9.44583333	275.4359634	1	15.574236	15.57424	0.460829	
30	福島県	会津若松市	331569964	80	2534.78	146.59	890.56	1227.83	269.8	7.04105556	205.3137984	1	10.275969	10.27597	1.25	
31	福島県	福島市	745885681	163	9142.91	542.94	684.04	7577.73	338.2	25.3969722	740.5635125	3	8.8983746	15.41244	1.840491	
32	福島県	いわき市	1229962576	190	15304.84	1389.2	12594.93	780.71	540	42.5134444	1239.671622	6	8.079891	19.79161	3.157895	

図形の調整(R) オートシェイプ(U) コマンド

スタート 田島博士論文.doc - Mic... Microsoft Excel - Z...

図 5.33 日本全国における水素ステーション構築のポテンシャル EXCEL 集計 (例)

表 5.2 全国の水素ステーション構築拡大に対する検討

	構築可能 自治体数（－）	水素ステーション数 （ヶ所）	対象自治体 がリソース数（ヶ所）	ステーション転換率 （％）	転換バッチ量 （千 wet-t／年）	全国バッチ量 （千 wet-t／年）	水素転換割合 （％）
木 質	1 7 4	3 0 3	1 5, 9 8 3	1. 9 0	9 1 7	1, 8 6 9	4 9. 1
畜産廃棄物	1 6 9	2 6 6	6, 6 7 3	4. 0 0	4, 6 4 3	9, 6 7 5	4 8. 0
農業残渣	4 5 0	7 7 2	2 3, 9 7 7	3. 2 2	5, 1 0 6	7, 6 3 3	6 6. 9
全国計	7 9 3	1, 3 4 1	5 3, 9 0 2 (全国)	2. 4 9	1 0, 6 6 6	1 9, 1 7 7	5 5. 6

7 0 8 : 重複自治体等除く

構築可能自治体割合 : 708/2, 042=34. 7%

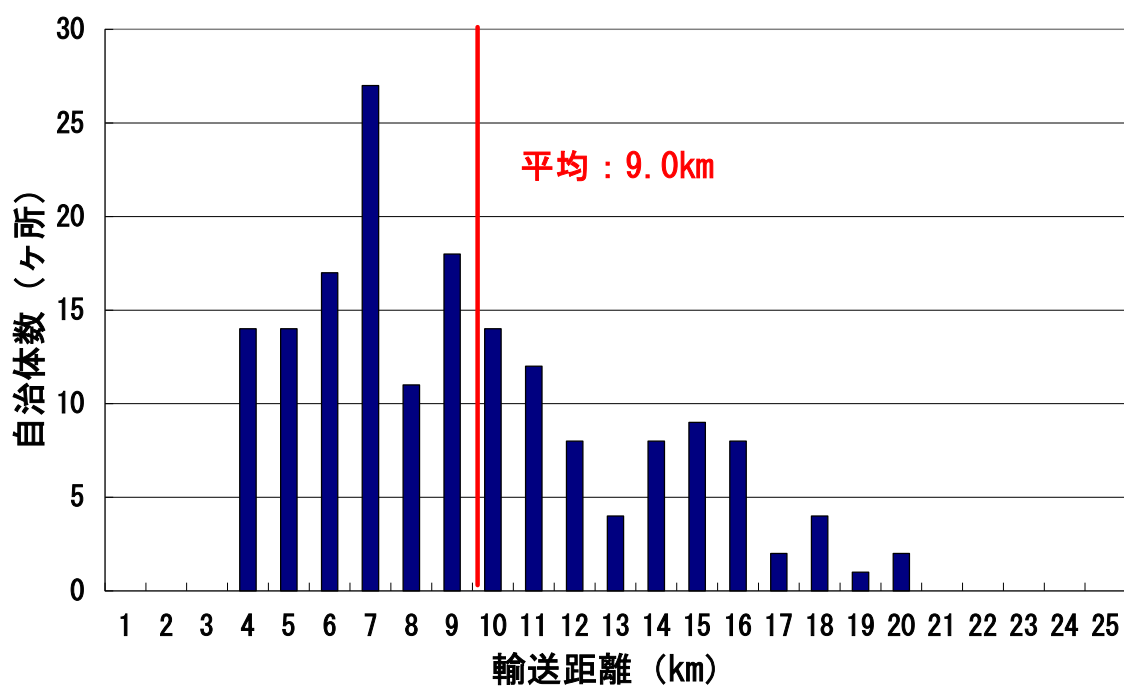


図 5.34 全国の水素ステーション構築可能自治体数の  
バイオマス輸送距離に対する分布（木質バイオマス）

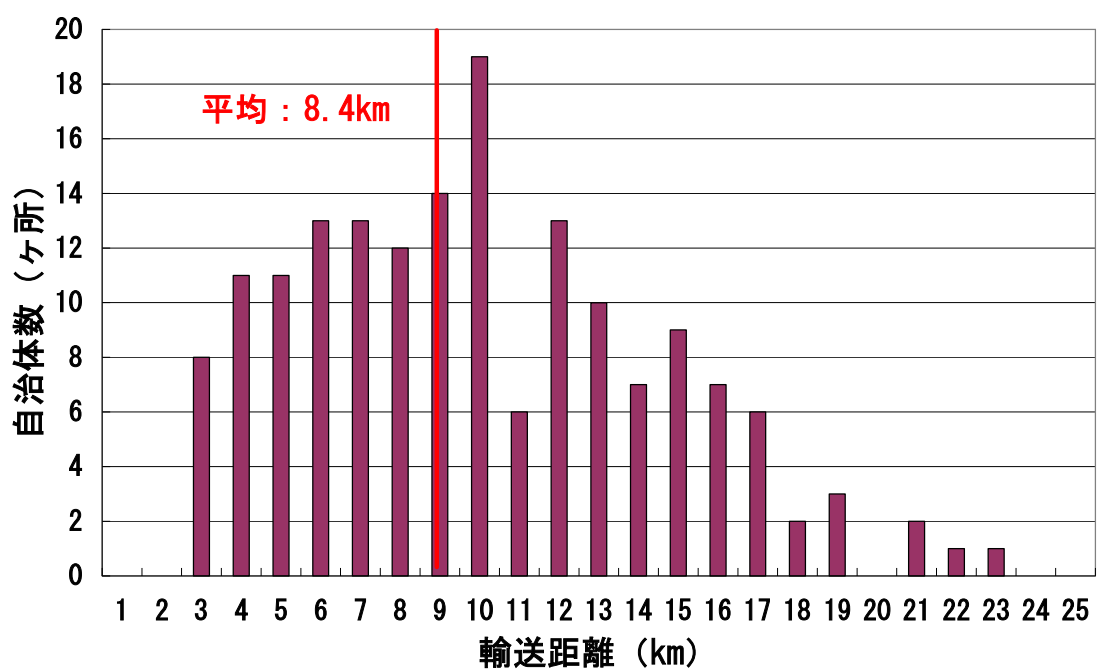


図 5.35 全国の水素ステーション構築可能自治体数の  
バイオマス輸送距離に対する分布（畜産廃棄物）

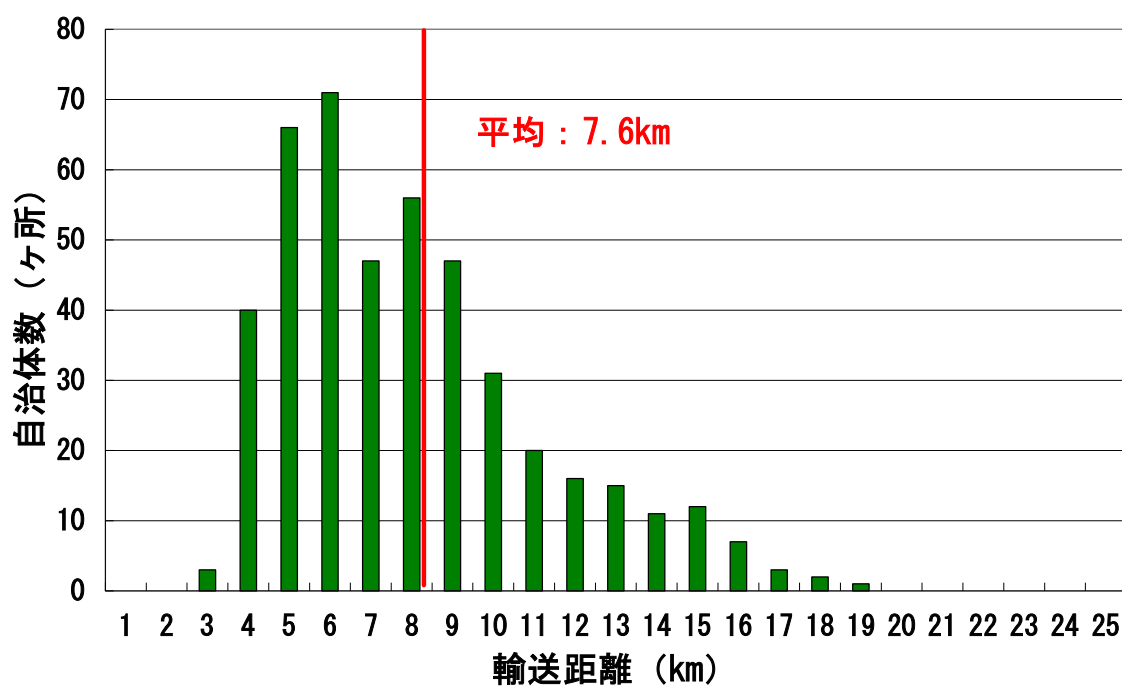


図 5.36 全国の水素ステーション構築可能自治体数の  
バイオマス輸送距離に対する分布（農業残渣）

## 第 6 章 バイオマスから水素ステーション構築における 経済性評価



## 6.1 はじめに

上章までの議論では、コジェネ利用と比較して、バイオマスを水素原料とし水素ステーションにて利活用する手法は、バイオマスの収集運搬距離を短く出来ることで収集運搬コストを大幅に低減できる可能性を指摘した。

そこで本章では、水素ステーションでのバイオマス利活用手法の経済的実現可能性を検証するために、製造される水素コストについて評価する。

水素社会黎明期（ここで検討している時期：2020年頃）には、都市ガス改質水素が先んじて普及すると判断されていることから、都市ガス改質水素ステーションとバイオマス改質水素ステーションを比較する。

木質バイオマスからの水素製造の検討に用いたプロセス（ブルータワープロセス）は、実証試験結果をもとに試算したもので、商用化プラントに適用した場合のコストに関する十分な知見が得られていない。また、農業残渣からの水素製造に用いた乾式メタン発酵プロセスでは、近年実用化事例がいくつか報告されているが、環境性データが整備されていない状況にある。

そこで本章では、主たる対象プロセスとして実施例が多い湿式メタン発酵を用いた、畜産廃棄物からの水素製造プロセスについて経済性評価を実施する。

加えて、同プロセスのCO<sub>2</sub>削減効果を経済的に評価した場合の、都市ガス改質プロセスとの比較についても考察した。

また経済性評価については、農業残渣からの乾式メタン発酵による水素製造プロセスに関しても言及した。

## 6.2 水素製造コストに関する検討

### 6.2.1 畜産廃棄物

畜産廃棄物をメタン発酵させた後、生成メタンの水蒸気改質による水素製造方法を Process A とし、都市ガスの水蒸気改質による水素製造方法を Process B として、経済性およびマテリアルバランスを図 6.1 のように纏める（NEDO, 2005）、（JHFC セミナー資料, 2008）。

本比較の評価条件は以下である。

1. コストは 2005 年時点とした。
2. バイオマス原料費はバイオマス利活用前後での産業廃棄物処理費の削減として、1,000 円/t の逆有償とする。
3. メタン発酵設備費には、メタン発酵により生成する消化ガスから  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{S}$  等の不純物を除去する精製費用が含まれる。
4. 消化液の肥料としての活用は実施サイトの条件によって可否が決まるため、消化液は無償引渡しするものとして、その利益・損失は本評価では見込まないものとした。
5. 設備の償却はメタン発酵、メタン水蒸気改質設備とも 10 年の定額償却とした。メンテナンス費用、ユーティリティ費用等の変動費は引用文献に従った。
6. 人件費は水素ステーションの運転員が兼用で業務を行うことを想定して 3 名を計上している。
7. メタン水蒸気改質、水素ステーション装置コストには、水素の精製装置（PSA）、水素ステーションにおける昇圧のためのコンプレッサー、蓄ガス器、ディスペンサー（自動車充填装置）等、FCV への水素充填のための諸設備費用全てを含んでいる。なお、充填圧力は 35MPa を想定した。

図 6.1 に示すように、バイオマスー水素方法（Process A）は、メタン発酵装置の設備コストが大きく影響し、製造水素価格で 13 円/ $\text{m}^3\text{-H}_2$  ほど都市ガスー水素方法（Process B）に比べコスト高になることが分かる。ちなみに、都市ガスからの水素製造における水素コスト 110 円/ $\text{m}^3\text{-H}_2$  とは、ガソリン税抜き単価

142 円／l に相当する。現行のガソリン小売にかかる石油税，揮発油税等約 60 円／l を加算すると販売価格で約 210 円／l を意味するが，昨今のガソリン価格高騰や乱高下の現状を考慮しても，また将来価格としても，幾分高額な感がある。現在 NEDO では，メタン水蒸気改質，水素ステーション装置価格約 6 億円をコストダウンするべく，水素ステーション諸設備のコストダウンに資する技術開発プログラムを 2008 年度より開始している。

### 6.2.2 農業残渣

前節の畜産廃棄物でのコスト比較に準じて，農業残渣を原料として水素製造するプロセスと，都市ガスを原料とするプロセスの比較を試みる。農業残渣の場合，乾式メタン発酵を行った後，生成メタンの水蒸気改質を行うプロセスを採用する。乾式メタン発酵の場合，湿式メタン発酵に比べ消化液の発生量が少ない利点がある反面，固形残渣の処理の問題が生じる。固形残渣を炭化处理することで生成する炭化物を土壌改良剤として有効利用するプロセスが多く提案されており，特にこの方法はバイオマス中に内在するリンを土壌に還元できる利点がある（（株）循環社会研究所，2005），（柚山義人，2005），（西尾尚道，2008），（帆秋利洋，天石文，et al.,2005）。本コスト試算においても，固形残渣を炭化处理するものとした。

本比較の評価条件は以下である。

- 1．コストは 2005 年時点とした。乾式メタン発酵設備のプラントコストは，文献（（株）循環社会研究所，2005）より参照されるプラント規模と本評価でのプラント規模に，3/4 乗則を適用させ算出した。
- 2．乾式メタン発酵残渣を炭化处理することとして，炭化处理設備コスト 1 億円を見込む。
- 3．炭化处理によって原料バイオマス（農業残渣：含水率 30%）中の固形分の 15%が炭化物残渣として発生することを仮定して（農業残渣の場合，炭化处理後の残渣物は wet ベースでの原料重量の 10%となる），バイオマス原料費はバイオマス利活用前後での産業廃棄物処理費の削減として，9,000 円/t の逆有償を見込む。

4. 炭化物を土壌改良剤として外部へ販売することも考えられるが、ここではバイオマス採取土壌へ還元することとして外部販売は見込まないものとする。
5. 設備の償却、メンテナンス費用、ユーティリティー費用、人件費、水素ステーション設備費等の条件は、前節 6.2.1 の 5～7 と同条件とする。

農業残渣を乾式メタン発酵させた後、生成メタンの水蒸気改質による水素製造方法を Process C とし、都市ガスの水蒸気改質による水素製造方法を図 6.1 同様 Process B として、経済性およびマテリアルバランスを図 6.2 に纏める。

乾式メタン発酵設備は湿式に比較して高額であり、かつ炭化設備費コストも加わることで、発生メタンガスコストは 40 円/m<sup>3</sup>-CH<sub>4</sub> ほど湿式に比べ高くなる。製造される水素コストでは、135 円/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub> となり、都市ガスからの水素製造プロセス (Process B) に比べて 25 円/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub> 高く、畜産廃棄物からの水素製造 (Process A) に比べても 12 円/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub> ほど高くなる結果となった。

### 6.3 CO<sub>2</sub>削減効果を考慮したコスト評価

CO<sub>2</sub> の削減効果を経済的に評価する試みは、京都議定書達成に向けた「京都メカニズム」の中でも謳われている。京都メカニズムでは、①クリーン開発メカニズム：CDM (Clean Development Mechanism)、②共同実施：JI (Joint Implementation)、③排出権取引：ET (Emission Trade) の3種の温室効果ガス削減に向けた手法が提示されている(山地憲治, 2006)。この中でもETは既に欧州や英国においても排出権取引市場が立ち上げられているとともに、わが国でも2008年秋より国内取引の試験的試みが実施の途にある。京都議定書の約束年(2008～2012年)以降、このメカニズムが継続して有効であるかは不明のところだが、「ポスト京都」の議論の中では、何らかの同等な代替手段は講じられる可能性は非常に高いとみられている(みずほ総研, 2002)、(三菱総合研究所, 2006)、(大串卓矢, 2006)、(北村慶, 2007)。

表 6.1 に CO<sub>2</sub>削減効果を考慮した Process A, B の水素価格比較を纏める。Process A は Process B に比べて 130kg-CO<sub>2</sub>/h の CO<sub>2</sub>削減効果が見積もれる(JARI, 2006)。この CO<sub>2</sub>削減効果は、将来における CO<sub>2</sub>クレジット価格として 1.5～3.0 万円/t-CO<sub>2</sub>程度を見込んだ場合、上記バランスで水素コストに換算すると、9.8～20 円/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>と評価される。従って CO<sub>2</sub>削減効果を考慮した水素価格での差異は 3～-6 円/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>となり、両者は競合可能なものとなる。将来における CO<sub>2</sub>クレジット価格をいかに見積もるかについては様々な見解があるところだが、環境省のプロジェクトで試算された条件では、2050年にて最大で 39,900 円/C-tとするケースもある(国立環境研究所・京都大学 et al., 2008)。

従って、現在(2005年時点)のコスト比較では、畜産廃棄物を例示した場合のバイオマスからの水素製造手法は都市ガスからの方法に比べコスト高となって不利ではあるが、2020年以降を想定して CO<sub>2</sub>削減効果が経済的に評価されるようになれば、十分競合する可能性がある手法と判断される。

## 6.4 本章のまとめ

上章までの検討では、バイオマスから水素を製造し、水素ステーションにて FCV へ充填する利活用手法は、バイオマスの収集運搬距離を短縮でき、また日本全国に展開してもバイオマス種によって、あるいは地方によって適性は異なるものの、水素ステーションを構築できる量的なポテンシャルが認められ、バイオマスの有効な利活用手法として将来有望であることが分かった。

本章では、この手法の経済的な評価として水素製造コストについて検討を行った。

都市ガス改質による水素製造プロセスと、畜産廃棄物を湿式メタン発酵し生成メタンの水蒸気改質により水素を製造するプロセスとを、ステーションにて FCV へ供給される水素コストで比較したところ、発酵プロセスが追加されている分バイオマスプロセスの方が 13 円/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub> ほど水素コストが高くなると評価された。(200m<sup>3</sup>/h 規模での比較)

農業残渣を乾式メタン発酵し水素を製造するプロセスとの比較をも行ったところ、発酵残渣の炭化設備費等の影響で、更に 12 円/m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub> ほど水素コストは高くなる。

しかし、バイオマスからの水素製造プロセスは、都市ガスからのプロセスに比較して CO<sub>2</sub> 発生量を大幅に削減できる効果があり、将来この効果を経済的に評価できるようになれば、両者は競合できるプロセスであることが判明した。

本手法は、量的にも経済的にも将来の実現可能性が高いことが示唆された。

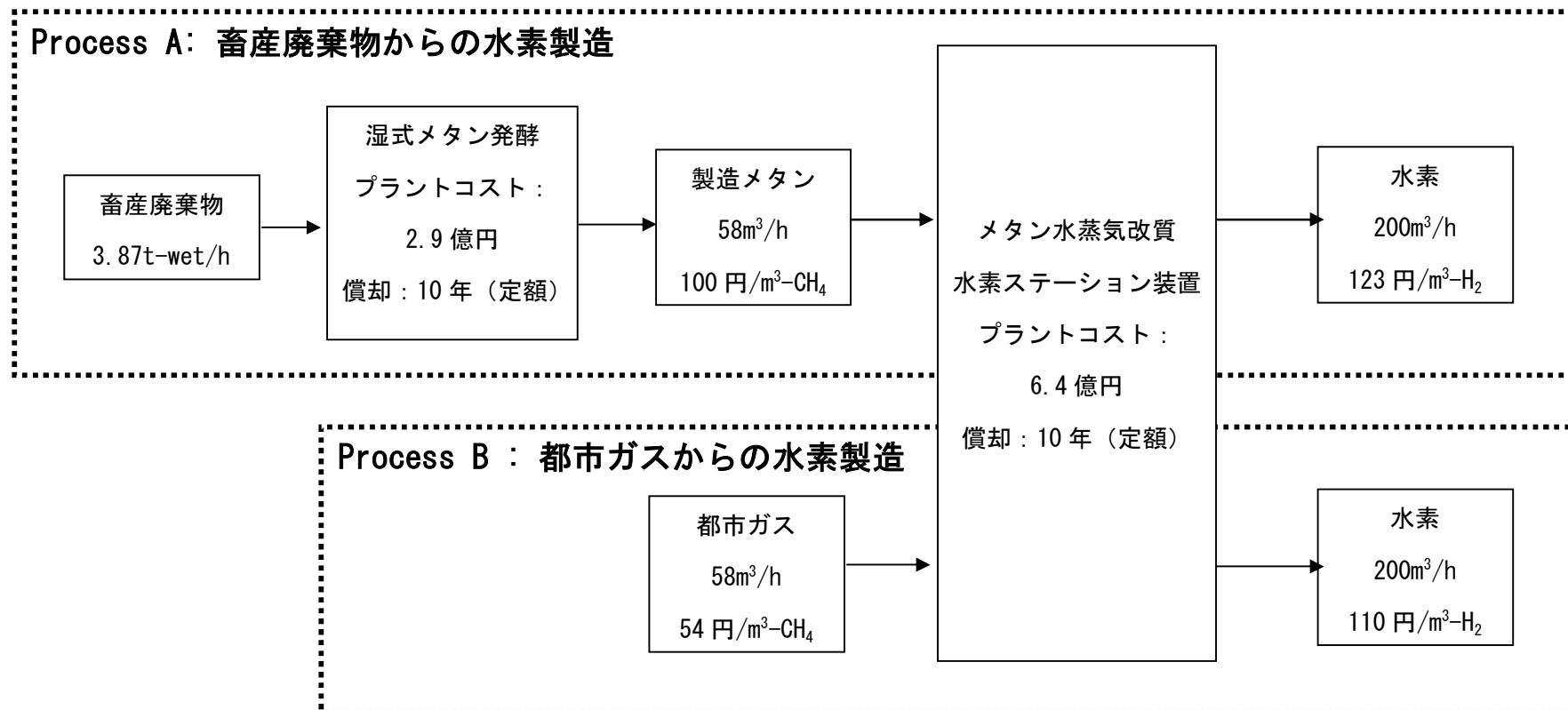


図 6.1 都市ガスおよび畜産廃棄物からの水素製造における経済性比較

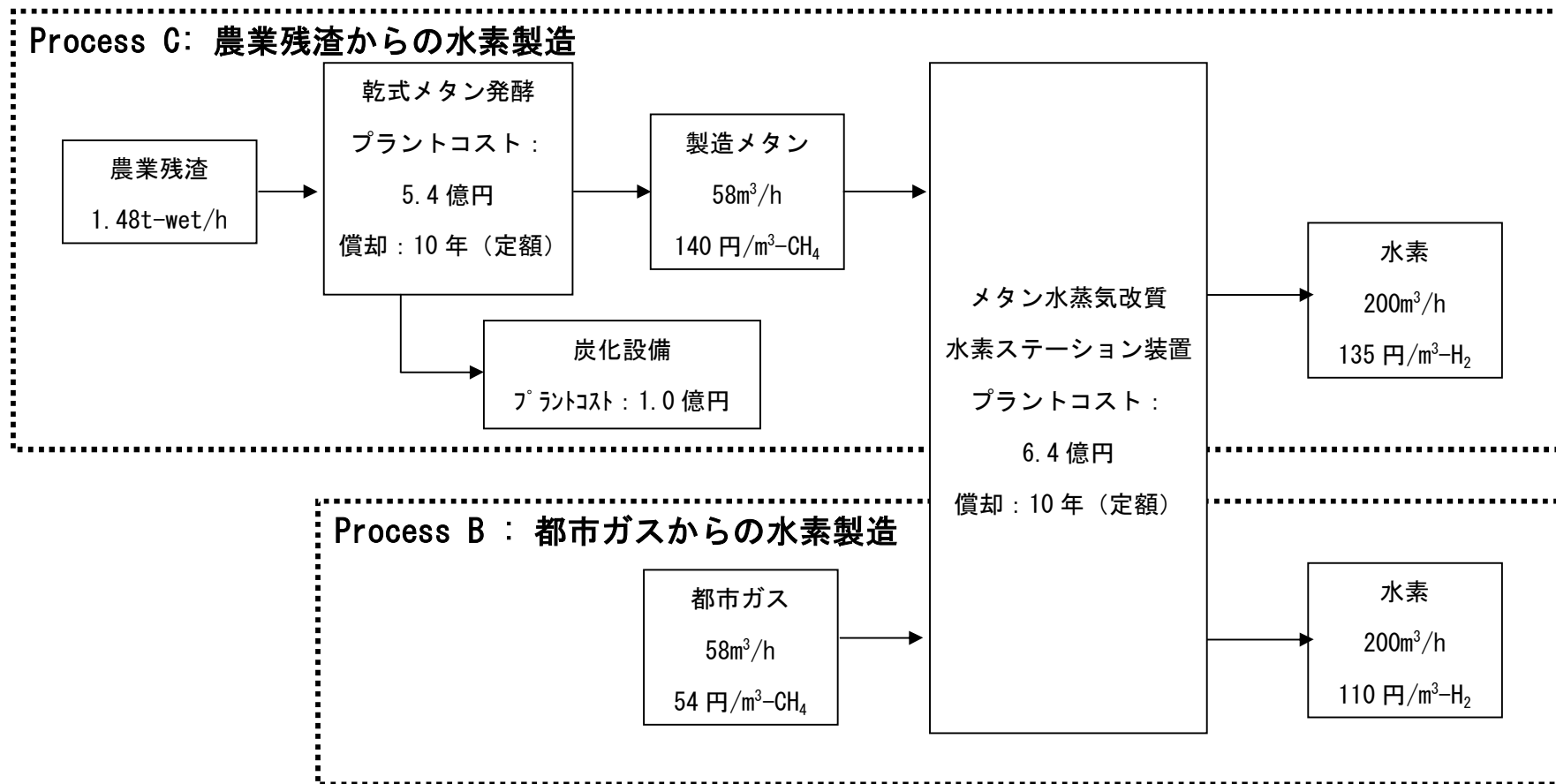


図 6.2 都市ガスおよび農業残渣からの水素製造における経済性比較



表 6.1 CO<sub>2</sub>削減効果を考慮した水素価格比較

プロセス	原料価格 (円/wet-t)	製造メタン 価格 (円/m <sup>3</sup> -CH <sub>4</sub> )	水素価格 (円/m <sup>3</sup> -H <sub>2</sub> )	CO <sub>2</sub> 発生量 (kg-CO <sub>2</sub> /h)	CO <sub>2</sub> 補正 水素価格* (円/m <sup>3</sup> -H <sub>2</sub> )
A メタン発酵+メタン改質水素	-1,000	100	123	118	132~141
B 都市ガスー水素	—	54	110	248	129~147
差異 (A-B)	—	46	13	-130	3~-6

\* : 15,000~30,000 円/t-CO<sub>2</sub> とした

## 第 7 章 総括

## 7.1 本研究の要約

バイオマスから水素を製造し水素ステーションにて FCV に充填するバイオマス利活用手法について考察を行った。

その結果、バイオマスからのコジェネ利用に比較して、利活用サイトがバイオマス賦存サイトの近傍になることによって、バイオマスの運搬費用が削減できる可能性があることが判明した。例えば奥多摩町のケースでは、コジェネ利用に比べて 39～53%の運搬費となり費用の大幅削減が可能である。

首都圏で水素利活用を図った場合、木質バイオマスでは実用化水素ステーションに必要な規模である 200 m<sup>3</sup>/h 以上の水素を製造できるサイトを有する自治体数は、数ヶ所程度と少ない。しかし本手法では、首都圏の自治体のうち約 94%がバイオマス収集半径 10km 以内であり、水素化するステーションを限定し収集範囲を広げる最適化を行えば、実現可能サイトを増加できることが示唆された。

これに比較して畜産廃棄物からの水素製造では、首都圏の自治体の約 10%で実用化レベルのバイオマス量が確保でき、更に農業残渣においても同様に、約 10%の自治体が実用化水素ステーションを構築できることが分かった。

都市型のバイオマスである下水汚泥では、下水処理場にて多量な水素製造は可能ではあるが、実施サイトは限定されており、分散して形成すべき水素ステーションへの適用には不向きであると言える。下水汚泥の場合、その利活用はコジェネ利用に向くことが示唆される。

次に首都圏から日本全国へ本手法を展開してその有効性を検討した。木質バイオマス、畜産廃棄物、農業残渣の 3 種のバイオマスで、バイオマス種ごと、また地方ごとに水素ステーション構築の可能性は異なることが判明した。バイオマスの収集範囲を広げることで水素ステーションを最大に構築できる条件で評価したところ、全国のガソリンスタンドのうち、約 2.5%がバイオマスから転換した水素でステーションを構築できる。この時、全国のバイオマスの利用可能量のうち水素に転換された割合は約 56%に上ることから、本手法がバイオマスの有効な利活用手法であることが理解できた。更に、収集範囲を最大にした場合でも、収集されるバイオマスの平均輸送距離は 10km 以内であることから、再生可能エネルギーの地産地消の観点からも有意義な手法であることが導き出

された。

更に加えて、バイオマスより水素を製造する手法の経済的実現可能性につき、畜産廃棄物と農業残渣を例に取り、都市ガスからの水素製造方法と比較検討を行った。水素製造コストは 2005 年時点では都市ガスからの製造に比べ高くなるものの、将来、CO<sub>2</sub> 削減効果を経済的に評価できる条件が整備されれば、バイオマスからの水素製造手法は十分競合できる手法であることが示唆された。

以上、分散、点在することによって収集・運搬コストがかかるバイオマスの利活用法を考えるに、将来の水素ステーション原料に活用する可能性を評価したところ、バイオマス種や実施地方によって適性が異なるものの、量的にも経済的にも利活用の可能性があり、輸送部門における CO<sub>2</sub> 削減の将来有望な手段であることが判明した。

## 7.2 今後の展望と課題

本研究では、バイオマスの収集運搬の課題を解決するひとつの手法として、バイオマス同様に日本全国に点在するガソリンスタンドが、将来水素ステーションに転換することを想定して、その水素製造の原料としてバイオマスを用いるシステムを提案した。そして、本システムを、水素製造量、経済性、および環境影響度の観点から考察し、将来の実現可能性を検証したものである。

本研究の一連の検討の中で、未だ解明できていないいくつかのポイントがある。以下に今後の課題を纏める。

- ① 検討には自治体ごとの、バイオマス賦存データおよびガソリンスタンド設置データを使用した。検討の前提として、自治体内ではバイオマス賦存は均一であり、ガソリンスタンドも均一に設置されていると仮定した。収集範囲を円形で模しているが、円の中心に水素ステーションが設置でき、均等にバイオマスを収集できるかの確証は取れていない。これは、日本全国への展開にもみるように、まずは本モデルの実現可能性を検証することを研究の第一の目的としたためであり、自治体内でのバイオマスの賦存の偏りや実施可能ガソリンスタンドの設定等、実際の事業化には更なる詳細検討が必要である。
- ② バイオマスの収集運搬距離を短くすることを目的に検討を行ったため、自治体を跨いで収集する前提は加えなかった。収集運搬距離が長くなることで運搬費が経済性を圧迫することが無ければ、例えば、隣接した自治体において共同で1ヶ所の水素ステーションを構築することも考えられる。本モデルではこの可能性までは推定できないため、今後は更なる水素ステーション構築の拡大化検討が必要になってくると考える。
- ③ 詳細な実施計画策定には、プラントの建設、運転コストだけでなく、ステーションの立地条件の検討が必要になってくる。バイオマス転換には、バイオマスのガス化設備の他に、バイオマスのストックヤード、荷捌き場等ステーション近傍に、ある程度の土地を確保しておかなければならない。特に、農業残渣の稲・麦わらからの水素製造では、わらの収集時期は年間でも限定されており、常時安定に水素供給しなければならない水素ステーション

ションとして、これらバイオマスを腐敗・変質させないようにストックしておく必要がある。今後はステーション設置における基本設計の検討が必要となってくる。

- ④ 下水汚泥からの水素製造の可能性は、第4章以降にて本検討の趣旨にそぐわないものと評価して取り扱った。都市型のバイオマスは、都市ガスからの水素製造や、製油所や製鉄所からの副生水素供給に競合する供給エリアを持っている。下水処理場での水素ステーション設置の可能性については、水素製造量は十分に確保されているので、設置ポイントの有効性や他のシステムとの競合条件を良く吟味しながら、個別に対応していく必要がある。
- ⑤ 本研究では、エネルギー効率、コストや環境性の観点から実現可能性を検討する必要があったため、検討に使用したバイオマスからの水素転換技術は、現状実用化もしくは実証段階にあるものから選定して検討した。将来、より効率の良く、経済的にも環境影響性からも優れた技術が開発されれば、本手法の検討結果も異なってくることが予想される。技術の進展に伴って本手法のブラッシュアップも同時に図っていかねばならないと考える。

以上、将来のバイオマスや水素に対する社会ニーズの変化によって、この研究結果の評価も変貌してくることが予想されるが、本研究が何らかの形で将来の低炭素社会形成並びにバイオマスの利活用推進に役立つことを期待したい。

## 謝辞

まず、本研究を進めるにあたって、横山伸也先生（生物機械工学研究室教授）には格段のご指導を頂いた。深く感謝の意を表す。先生には、研究の進め方、論文の作成、投稿論文の執筆から海外発表に至るまで、私の到らない部分に常にきめ細かなご指導を賜り、改めて深謝したい。また、芋生憲司先生（同准教授）には特に論文執筆に関して、数々の貴重なご指導・ご助言を頂いたことに感謝の意を表す。さらに本論文の審査を頂いた、東京大学農学生命科学研究科の大政謙次先生、仁多見俊夫先生、井上雅文先生に厚く御礼申し上げる。

私は社会人博士課程として3ヵ年間、生物機械工学研究室にお世話になった。村木茂常務執行役員（東京ガス R&D 本部長）、杉山昌樹常務執行役員（同技術開発本部長）には、東京ガス株式会社の会社人として、この貴重な勉学の機会を与えて頂いたことに、感謝したい。

まま業務に不都合をかけてしまったこともある職場の皆さん、ややもすると挫けてしまいそうな精神を、常に叱咤励まして支えてくれた家族にも感謝したい。

3ヵ年お世話になった研究室の方々、研究を支えていただいた全ての方々のお名前を挙げられないのは残念であるが、この場をお借りして深謝の意を表す。

最後に、私の博士課程への入学、論文の完成に至るまで常に感じていたこととして、今は亡き父の教育に対する理解があったことをここに明記したい。父は高等学校の化学の教師として人生を終えたが、私の半生における様々な勉学機会に対し常に寛容に接し、支持してきてくれた。この論文を作成できる機会を得られたのも、父の開かれた勉学に対する理解の影響が私自身の中にあり、その力が推進力となっていたことを感じずにはいられない。本論文を父の墓前に捧げたい。

## 引用文献

### 第 1 章

A.Czernichowski・K. Wesolowska and P. Czernichowski, Synthesis gas generation from bio-Ethanol, 16<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, 2006, 254

安芸裕久・前田哲彦・混同潤次・石井格・山本重夫, 都市域の住宅における燃料電池と水素エネルギーネットワークに関する研究, 水素エネルギーシステム vol.30, No.1, 2005, 26-28

Ayhan Demirbas, Biodiesel A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines, 2008, Springer-Verlag London Limited, pp59

バイオ燃料技術革新協議会, バイオ燃料技術革新計画, 2008, 5-16

David King・Yong Wang・Jon Strohm・Gordon Xia・Yong Yang・David Heldebrant・Daryl Brown and Aaron Oberg, Bio-derived liquids reforming, 2008 DOE Hydrogen Program Review, 2008, PD2

(独) 産業技術総合研究所, 平成 18 年度産総研エネルギーシンポジウム 第 4 回水素エネルギーシンポジウムー水素製造について考えるー, 2006

Jeremy Rifkin, 水素エコノミー エネルギー・ウェブの時代, 2003, NHK 出版, 236-286

Joseph J. Romm, 水素は石油に代われるか, 2005, オーム社, 15-25

小林敬幸・鈴置保雄・森川高行・朴海洋・葛山弘一, 水素供給インフラ形成モデルに関する研究 ～導入初期における自動車と住宅への水素供給に関



- わるエネルギー的検討～, エネルギー資源学会, 2004, pp1
- 小林敬幸, 導入初期における都市部への水素供給インフラ形成に関する研究,  
都市計画学会, 2005, 1-3
- 小宮山宏, バイオマス・ニッポン日本再生に向けて, 2003, 日刊工業新聞社,  
156-168
- Michael Roberts・Jerry Lin・Richard Killmeyer・Mark Davis and Nancy Beaudry, One  
step biomass gas reforming-shift separation membrane reactor, 2007 DOE  
Hydrogen Program Review, 2007, PD5
- Pim-pahn Meyer・Surasak Pankaew・Amawasee Rukruang and Chakrit Tongurai,  
Biohydrogen production from crude glycerol produced from biodiesel  
manufacturing, 17<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, 2008, 214
- R. A. Rozendal・H. V. M. Hamelers・C. J. N. Buisman・K. Rabaey and J. Keller,  
Potential and technical challenges for scale-up of hydrogen production through  
microbial electrolysis, 17<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, 2008, 239
- Rohit Datar・Jie Huang and Pin-Ching Maness et al., Hydrogen production from the  
fermentation of corn stover biomass pretreated with a steam-explosion process,  
International Journal of Hydrogen Energy 32, 2007, 932-939
- S. P. Singh・R. K. Asthana and A. P. Singh, Semi-solid state fermentation of bagasse  
for hydrogen production; the cost-effective approach in Indian context, 16<sup>th</sup>  
World Hydrogen Energy Conference, 2006, 431
- 佐賀清崇, 地域バイオマスを原料とするエタノール生産システムの構築に関す  
る研究, 2008, 47-52

最首公司, 水素社会宣言, 2005, (株) エネルギーフォーラム, 14-24

Shanmugam. P. and Horan N. J., Effect of C/N ratio, and OLR on fermentative H<sub>2</sub> production from leather and municipal solid wastes using batch and CSTR reactors, 17<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, 2008, 257

(社) 日本ガス協会, 平成 17 年度地方都市ガス事業 天然ガス化促進対策調査報告書 (水素供給システム安全性技術調査), 2003, 7-128

Takafumi Sato・Yasuyoshi Ishiyama・Takeshi Furusawa・Noboru Suzuki and Naotsugu Itoh, Hydrogen production by supercritical water gasification of glucose and ethanol with a flow reactor and ruthenium catalyst, 17<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, 2008, 211

東京ガス (株), 水素エネルギー社会構築に向けた HCNG 技術の利活用の可能性に関する調査, (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構調査, 2006, 24-39

Umit S. Ozkan・Hua Song・Lingzhi Zhang・Kurt Blohm and Bing Tan, Investigation of reaction networks and active sites in bio-ethanol steam reforming over Co-based catalysts, 2008 DOE Hydrogen Program Review, 2008, PD5

横山伸也, バイオマスエネルギー最前線, 2001, 森北出版, 119-121

(財) 日本自動車研究所, JHFC 総合効率検討結果報告書, 2006, 33-37

(財) 日本自動車研究所・(財) エンジニアリング振興協会, 固体高分子形燃料電池システム実証等研究(第 1 期 JHFC プロジェクト)報告書, 2006, 136-180

(財) 石油産業活性化センター, 水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置付けに関する調査報告書, 2003, 46-63

(財) 新エネルギー財団・(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構, 平成 10 年度調査報告書「バイオマス資源を原料とするエネルギー変換技術に関する調査」, 1999, 1-5

## 第 2 章

(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構パンフレット, バイオマス等未活用エネルギー実証試験概要, 2006, pp24

(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構パンフレット, バイオマスエネルギー高効率転換技術開発, 2005, pp3

福島県林業研究センター, 木質バイオマス利用技術 ~2 木質バイオマス循環利用モデルの開発~, 福島県林業研究センター研究報告 第 40 号, 2007, 28-31

(株) 荏原製作所・(株)西原環境テクノロジー・鹿島建設(株)・(独) 産業技術総合研究所・(財) バイオインダストリー協会, 有機性廃棄物の高効率水素・メタン発酵を中心とした二段発酵技術研究開発, 平成 17 年度バイオマスエネルギー高効率転換技術開発成果報告会予稿集 (NEDO), 2007, 1-9

(株) 三菱総合研究所, 平成 14 年度新エネルギー等導入促進基礎調査 (バイオマスエネルギー開発・利用戦略に関する調査研究), 2002, pp5, pp93

(株) タクマホームページ, 高温乾式メタン発酵 (コンボシステム) の特徴,  
<http://www.takuma.co.jp/product/waste/general/08biogas01.html>  
(アクセス 2007.3)

美濃輪智朗，産業技術総合研究所ホームページ，木材から水素を生産する新技術

[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2004/pr20041014/pr20041014.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2004/pr20041014/pr20041014.html)  
(アクセス 2007.4)

(社) 日本エネルギー学会，平成 13 年度新エネルギー等導入促進基礎調査（バイオマスエネルギーの利用・普及政策に関する調査）報告書，2002，74-94

(社) 日本エネルギー学会，平成 13 年度新エネルギー等導入促進基礎調査（バイオマスエネルギー高効率転換技術に関する調査）報告書，2001，132-173

(社) 日本エネルギー学会，平成 13 年度新エネルギー等導入促進基礎調査（バイオマスエネルギー高効率転換技術に関する調査）報告書 別添資料 1，2001，pp4

山地憲治他，水素エネルギー社会，資源エネルギー学会，2008，63-65

吉田隆，水素利用技術集成 Vol.3 加速する実用化技術開発，2007，(株) エヌ・ティー・エス，303-311

(財) エネルギー総合工学研究所，バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ策定に関する調査，2004，52-124

(財) エネルギー総合工学研究所，バイオマスエネルギー導入システムおよびロードマップ等に関する調査，2005，16-17

(財) 新エネルギー財団，平成 11 年度通商産業省資源エネルギー庁委託業務成果報告書 新エネルギー等導入促進基礎調査 バイオマスエネルギーの実態等基礎調査，2000，63-79

(財)新エネルギー財団, 平成 12 年度通商産業省資源エネルギー庁委託業務成果報告書 新エネルギー等導入促進基礎調査 バイオマスエネルギーの実態等基礎調査, 2001, 88-147

### 第 3 章

George A. Olah, Alain Goeppert and G. K. Surya Prakash, Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006,

JHFC セミナー資料, 平成 19 年度 水素・燃料電池実証プロジェクト, 2008, pp15

経済産業省, 燃料電池実用化戦略委員会資料, 2004

産業競争力懇談会ホームページ, 産業競争力懇談会 2008 年度推進テーマ 中間報告 燃料電池自動車・水素供給インフラ整備普及プロジェクト～低炭素社会を目指して～,

<http://cocn.jp/common/pdf/fcv.pdf>, pp29, (アクセス 2008.12)

トヨタ自動車株式会社・みずほ情報総研株式会社, 輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価 バイオ燃料を中心とした輸送用燃料製造 (Well-to-Tank) における温室効果ガス排出量に関する研究報告書, 2008, 74-76

### 第 4 章

(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ, バイオマス賦存量・利用可能量の推計 GIS データベース,

<http://www.nedo.go.jp/> (アクセス 2008.4)

井内正直, (財)電力中央研究所, バイオマスエネルギー利用計画支援システムの開発 --賦存量データベース及び収集コスト評価モデル--, 2004, 1-7

(株)価値総研・東京ガス(株), 関東圏における水素インフラ展開シナリオ検討基礎調査, 2007, pp31

(財)エネルギー総合工学研究所, 水素安全利用等基盤技術開発 水素に関する基盤技術開発「水素シナリオの研究」, 2005, 46-90

(財)日本自動車研究所・(財)エンジニアリング振興協会, 固体高分子形燃料電池システム実証等研究(第1期 JHFC プロジェクト)報告書, 2006, 70-71

## 第5章

(株)価値総研・東京ガス(株), 関東圏における水素インフラ展開シナリオ検討基礎調査, 2007, 13-20

## 第6章

(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構, バイオマスエネルギー導入ガイドブック, 2005, 149, 173-175

帆秋利洋・天石文・小嶋令一・羽川富夫・大原孝彦, メタン発酵の研究開発の現状と課題, 大成建設技術センター報 第38号, 2005, 24-2~24-4

JHFC セミナー資料, 平成19年度 水素・燃料電池実証プロジェクト, 2008, pp14

(株)循環社会研究所, 平成16年度宮城県業務委託事業 地域リサイクルエネルギー資源利用促進事業業務報告書, 2005, 4-15

北村慶, 温暖化がカネになる, 2007, PHP 研究所, 70-178

国立環境研究所, 京都大学・立命館大学・みずほ情報総研, 2050 日本低炭素社会シナリオ: 温室効果ガス 70%削減可能性検討 環境省戦略研究開発プロジェクト, 2008, 8-9

三菱総合研究所編, 排出権取引ビジネス最前線, 2006, 工業調査会, 12-21

みずほ情報総研, 排出権取引ビジネス, 2002, 日刊工業社, 80-132

西尾尚道, 嫌気微生物による有用物質生産と環境浄化・エネルギー回収への応用, 生物工学会誌 第 86 巻 第 1 号, 2008, 2-11

大串卓矢, 排出権のしくみ, 2006, 中央経済社, 20-44

柚山義人, バイオマス多段階利用の地域実証研究から見えてくるバイオマス利活用推進上の課題, 2005, 18-25

山地憲治, エネルギー・環境・経済システム論, 2006, 岩波書店, 80-85