バイオマス起源生成物の地域有効利用技術の開発

－　バイオガスの水素・燃料電池利用に向けた研究　－

（平成１８～１９年度）

研究成果報告書

平成２０年３月

独立行政法人
土木研究所　寒地土木研究所

はじめに

近年、石油など化石資源量の限界予測や価格高騰による様々な工業原料や燃料の供給不安の問題が懸念されているとともに、化石資源のエネルギー変換に伴い排出される温室効果ガスによる地球温暖化の問題がある中で、クリーンエネルギーである水素と発電効率が高く熱供給も可能な燃料電池は次世代のエネルギー供給システムとして期待されている。また、国内においてはバイオマス・ニッポン総合戦略が推進されており、北海道を代表とする酪農地域で発生する家畜ふん尿はカーボンニュートラルなエネルギー源として注目されている。特に嫌気性発酵により産出するバイオガスはメタン資源として有望であり、多くの地域でバイオガス或いは精製したメタンガスを活用した様々なエネルギー利用に関する取り組みが行われている。

独立行政法人土木研究所　寒地土木研究所では、平成 15 年度に別海資源循環試験施設（バイオガスプラント）に隣接して設置したエネルギー地域自立型実証研究施設において平成 15 年度～平成 17 年度に特別研究「地球温暖化対策に資するエネルギー地域自立型実証研究」を実施し、バイオガスから水素とベンゼン等の芳香族化合物を生成し、この水素を有機ハイドライドとして貯蔵し、さらに有機ハイドライドから水素を再生して燃料電池発電を行う一連のプロセス技術の実証試験を行ってきた。また、平成 18 年度～平成 19 年度には重点プロジェクト研究の個別課題として「バイオマス起源生成物の地域有効利用技術開発」を実施し、主にバイオガス由来のベンゼンの応用性改善を目的としたベンゼン水素化実験や水素エネルギーの地域利用のための技術的課題の検討を行ってきた。

本研究成果報告書は平成 18 年度～平成 19 年度に実施した研究成果を報じるとともに、過年度の研究成果も参照に要約した。バイオマス・バイオガス関連の社会インフラ整備や水素・燃料電池関連分野のみならず、エネルギー・化学産業など様々な分野において、本報告書が参考となれば幸いである。

バイオマス起源生成物の地域有効利用技術の開発

－　バイオガスの水素・燃料電池利用に向けた研究　－

研究成果報告書　目次

はじめに

１．バイオガスを原料とする水素・燃料電池利用のモデル

1.1. バイオガス利用の基本技術　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1.1　主なバイオマスの発生量　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1.2　メタン発酵技術　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1.3　バイオガスプラントの概要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
1.1.4　バイオガスエネルギーの利用方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3
1.1.5　バイオガスからの水素製造及び水素貯蔵技術の実証実験の概要　・・・・・・・・・5

1.2. 実証プラントにおけるバイオガスからの水素製造・貯蔵技術実証実験　・・・・・・・・7
1.2.1. 実証プラントの概要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7
1.2.2. 水素製造技術　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・8
1.2.3. 水素貯蔵技術　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24
1.2.4. まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・37

1.3. 地域におけるバイオガスからの水素供給とその利用　・・・・・・・・・・・・・・・・41
1.3.1. 実用規模のプラントから供給可能な水素量の試算　・・・・・・・・・・・・・・・41
1.3.2. バイオガスからの水素供給・利用モデル　・・・・・・・・・・；；・・・・・・・・48
1.3.3. 地域のおけるバイオガスからの水素供給・利用モデルの評価　・・・・・・・・・・52
1.3.4. 水素製造・利用におけるインフラ整備と法規制　・・・・・・・・・・・・・・・・74
1.3.5. まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・79

２．副生成芳香族の有効活用技術

2.1. ベンゼン水素化技術開発の背景 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・81

2.2. ベンゼン水素化技術 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・82
2.2.1. ベンゼン水素化の原理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・82
2.2.2. ベンゼン水素化設備 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・82
2.2.3. 試験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・84
2.2.4. ベンゼン水素化反応の物質収支と転化率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・84
2.2.5. ベンゼン水素化反応のエネルギー収支 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・85

2.3. 生成物の特徴と利用途 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・87
2.3.1. 原料ベンゼン、および回収シクロヘキサンの成分 ・・・・・・・・・・・・・・87
2.3.2. 生成物の利用途 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・89

2.4. インフラ整備における留意点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91

2.5. まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91

３．バイオガス - 水素エネルギーの多様な有効利用

3.1. 個別型バイオガスプラントにおけるエネルギー利用 ・・・・・・・・・・・・・・・・94
3.1.1. 個別型プラントにおけるメタン供給量の試算 ・・・・・・・・・・・・・・・・94
3.1.2. 個別型プラントからのメタン利用方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・95
3.1.3. まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・98

3.2. 都市における生ごみ等を原料とするBTHプラントシステム ・・・・・・・・・・・・99
3.2.1. 都市型BTHプラントのシステムフローと水素供給量試算 ・・・・・・・・・・・99
3.2.2. 都市型BTHシステムの検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・100
3.2.3. まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・105

3.3. 地域における分散型エネルギーの有効利用の検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・106
3.3.1. バイオガスを用いたガスエンジン発電と燃料電池発電の比較 ・・・・・・・・・106
3.3.2. 分散型電源利用の増加に伴う課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・107
3.3.3. マイクログリッドシステム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・109

3.3.4. 水素・燃料電池の特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・110
3.3.5. 酪農村地域におけるマイクログリッドシステムの適用 ・・・・・・・・・・・・・112
3.3.6. マイクログリッドの普及とその形態 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・116
3.3.7. 北海道の農村地域におけるマイクログリッド導入の課題 ・・・・・・・・・・・117
3.3.8. まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・118

基礎資料 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・121

1. バイオガスを原料とする水素・燃料電池利用のモデル

1. バイオガスを原料とする水素・燃料電池利用の基本モデル

1.1　バイオガス利用の基本技術

1.1.1. 主なバイオマスの発生量

地球温暖化や大気汚染など現在の環境問題の多くは、化石燃料の大量消費によるものと考えられる。将来の持続可能な社会の構築を目指してしていく中で、再生可能な資源であるバイオマスが注目されている。ただし、バイオマスは身近に存在する国産の物質・エネルギー資源といえるが、その分布密度は小さく地域によって種類や賦存量も異なる。そのため各地域特有の豊富なバイオマスを選択し、適切な技術をもって効率的に活用することが重要である。

図 1.1.1 に全国のバイオマスの発生量とその内訳を示す[1)]。年間のバイオマス発生量 21,230 万 t の内、家畜排せつ物が最も多く、下水汚泥、食品廃棄物と続き、全体の 87.6%を占める。バイオマスの利用方法は種類や目的により様々となるが、これら上位 3 項目のバイオマスを原料として、メタン発酵技術によるバイオガス化が可能である。このようにバイオマス発生量の大部分を占めるバイオマス原料から生成可能なバイオガスは、バイオマスのエネルギー利用方法の中でもとくに重要な技術であると考えられる。

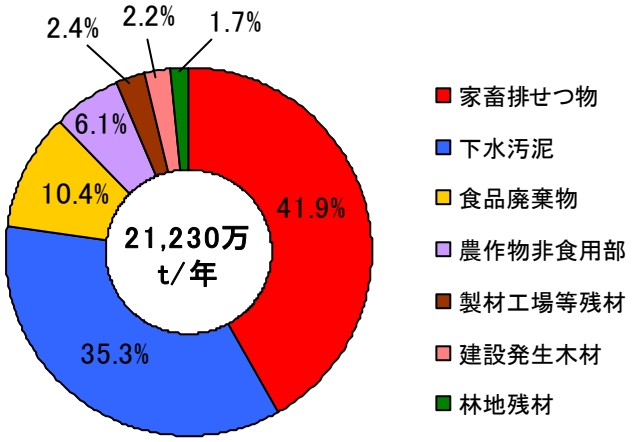


図 1.1.1　全国のバイオマスの発生量とその内訳

バイオマスニッポン総合戦略　資料（2005 年現在）より作成

1.1.2. メタン発酵技術

メタン発酵技術は、密閉された条件のもとで嫌気性菌及びメタン菌のはたらきにより原料となる有機物をメタンと二酸化炭素に分解する方法である。**図 1.1.2** に示すように、有機物中の炭水化物、脂質、タンパク質を、有機酸を生成する酸発酵と生成された酸からメタンと二酸化炭素を生成するガス発酵の 2 段階により分解する[2)]。通常 30～35℃で 1 ヶ月程度の期間で発酵を進める

中温発酵と 50～60℃程度で 2 週間程度発酵する高温発酵とがある。

また、メタン発酵後の発酵残渣として残る消化液は肥料として有用である。しかし、その需要がなければ浄化処理が必要となる。この点について、北海道の酪農地域では消化液を肥料として散布できる十分な圃場面積があるため、次項に述べるようなバイオガスプラントの運用に有利な条件を有している。

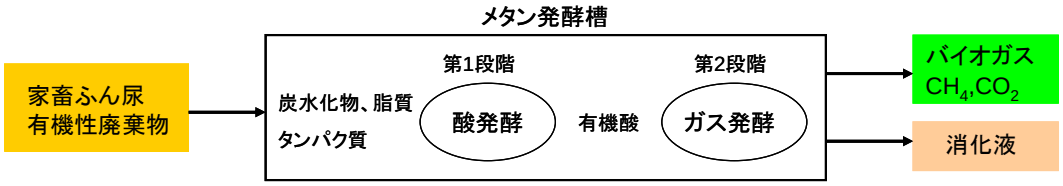


図 1.1.2　メタン発酵の模式

1.1.3. バイオガスプラントの概要

近年、上記のメタン発酵技術を利用して有機性廃棄物を処理するバイオガスプラントの普及が促進されている。現在、北海道では試験研究プラントも含めて、乳牛ふん尿用プラントで約 40 基が稼動している。

（独）土木研究所寒地土木研究所では、2000 年に北海道東部の別海町に建設した別海資源循環試験施設（**図 1.1.3**）（乳牛 1,000 頭のふん尿処理規模の共同利用型バイオガスプラント）において寒冷地における共同利用型バイオガスプラントの運用とその課題等について実証研究を行ってきた [3]。**図 1.1.4** に別海資源循環試験施設のフロー図を示す。

バイオガスプラント利用農家から運搬されてきた乳牛ふん尿は、固形分とスラリー（液分）に分離され、スラリーは発酵設備へ送られメタン発酵を行う。発生したバイオガスはガスホルダーをバッファとして、ガスエンジン発電機によりコージェネレーションを行う。本バイオガスプラントでは約 1,200m^3/day 程度のバイオガスが発生しており、バイオガスはガスエンジンによりプラント施設内の消費電力及び熱エネルギーを賄い、さらに余剰として発生した電力は電力系統に売電している。また、消化液は貯留タンクに蓄えておき、必要な時期に各プラント利用酪農家の圃場に還元される。

図 1.1.3　別海資源循環試験施設の全景

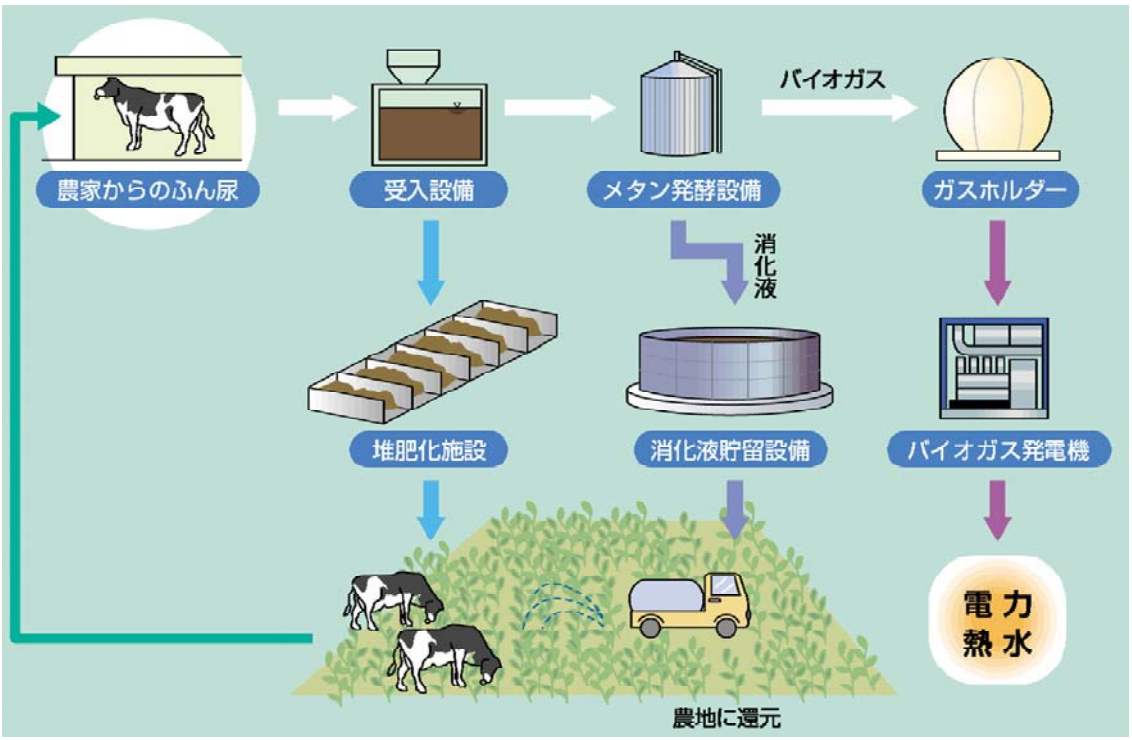


図 1.1.4　別海資源循環試験施設のフロー

1.1.4. バイオガスエネルギーの利用方法

バイオガスプラント技術により、家畜ふん尿や他の有機性廃棄物を原料として、バイオガスを効率的に生産できる。バイオガスの主成分は 60%のメタンと 40%の二酸化炭素である。そのメタンを精製することで、バイオガスのエネルギー利用途は現状より拡大する。

図 1.1.5 にバイオガスのエネルギー利用方法について示す。バイオガスプラントの立地、規模などにより、主として家畜ふん尿を中心とする農村型のバイオガスプラント（個別型、共同利用型）と生ごみ等食品廃棄物が原料の中心となる都市型のバイオガスプラントが考えられる。

現状におけるバイオガスの利用方法は、バイオガスプラントオンサイトにおけるバイオガスを直接燃焼するガスエンジンコージェネレーション利用またはガスボイラーによる熱利用である。主なエネルギーの供給先はプラント自家消費エネルギーや隣接した農業施設等であり、電力の余剰は既存系統へ逆潮流する。ただし、使用場所はプラント近傍となり、使用機器も限られる。また、プラント単独での既存電力系統との系統連系にも課題があり、必ずしも最善の方法とはいえない。

しかしバイオガスをメタンに精製すれば、従来のガスインフラを用いた熱利用が可能である。例えば、現在家庭用に流通している給湯または暖房用の燃料に利用できる。そして、さらにメタンを改質し水素を製造すれば、一般の需要家を対象に燃料電池システムを用いた電力・熱エネルギー利用、あるいは燃料電池自動車の燃料に利用することができる [4]。また、次項で述べるがメタン改質に直接改質を用いれば、水素の製造と同時に化学原料として有用なベンゼン等の芳香族化合物が併産する。

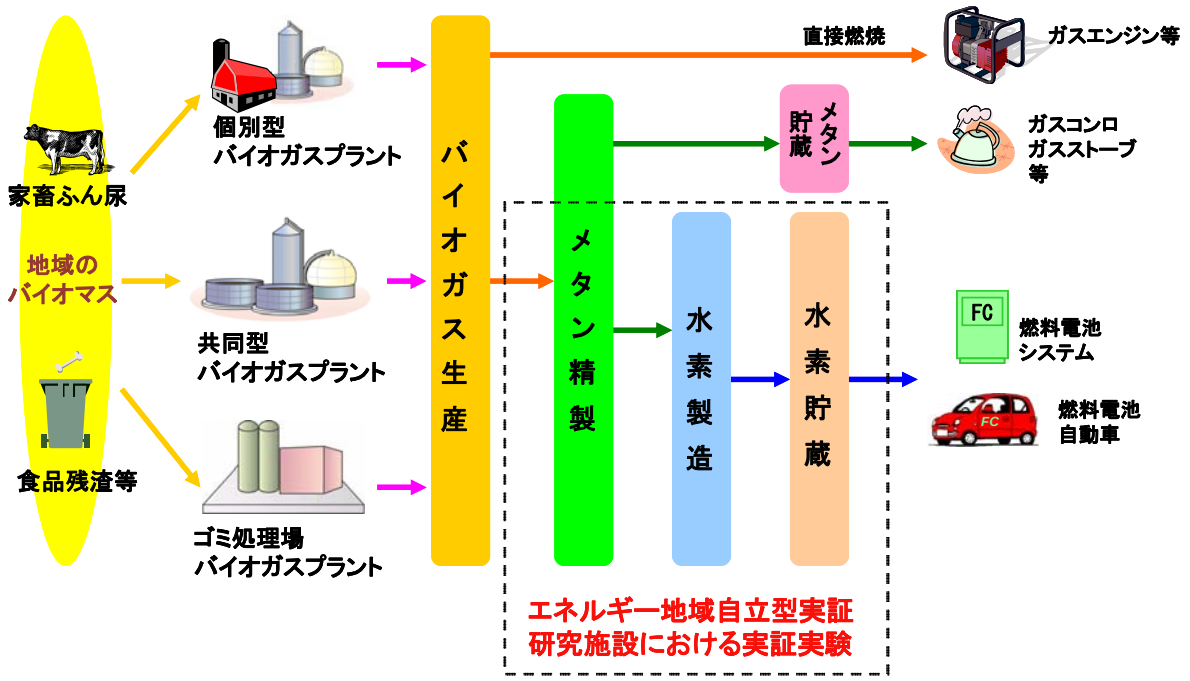


図 1.1.5　バイオガスのエネルギー利用方法

以上のようにバイオガスは多様なエネルギー形態に変換可能であり、それにより利用方法も多様化する。将来はバイオガス利用の普及に伴い各需要家の要求やインフラ整備状況、あるいは他のエネルギー普及状況などを踏まえて、対象地域の諸条件に応じた適切なバイオガスの利用方法が選択されるものと考えられる。

（独）土木研究所寒地土木研究所では、このようなバイオガスの多様な利用方法を積極的に行うものとして、2003 年より北海道東部の別海町にバイオガスからの水素製造と水素貯蔵および供給を行う一連技術の実証実験プラント（エネルギー地域自立型実証研究施設）を設置（図 1.1.6）し、隣接する共同利用型バイオガスプラント（別海資源循環試験施設）から発生するバイオガスを用いた水素製造技術、および有機ハイドライドを用いた水素貯蔵・供給技術に関する実証研究を行ってきた[5]。次項にその実証実験プラントの実証実験の概要について述べる。

図 1.1.6　エネルギー地域自立型実証研究施設の外観

1.1.5. バイオガスからの水素製造及び貯蔵技術の実証実験の概要

エネルギー地域自立型実証研究施設（以下実証プラントと記す）では、これまでの実証プラント運転実験において水素製造並びに水素貯蔵・供給に係る各プロセス技術の長時間運転の実証や適正な反応条件及びオペレーション手法等について実験的に明らかにしてきた。図 1.1.7 に本実証プラントにおける実証実験の概要について示す。

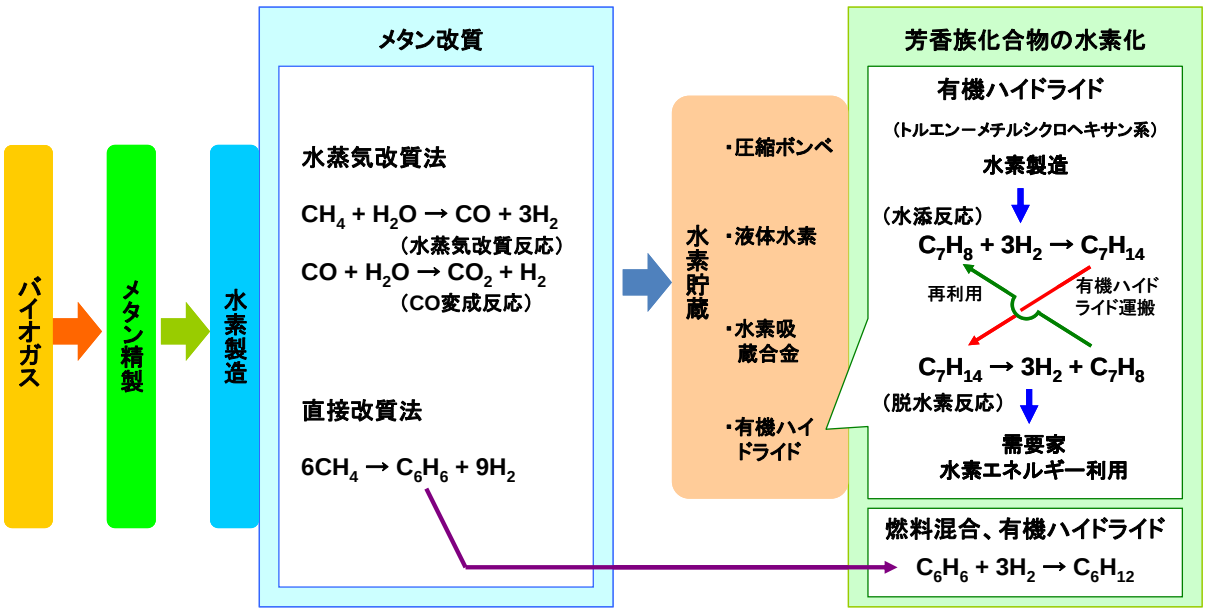


図 1.1.7　エネルギー地域自立型実証実験プラントにおける実証実験の概要

(1) バイオガスからの水素製造

バイオガスからメタンを精製し、そのメタンを改質して水素を製造する。本実証プラントではメタン改質を水蒸気改質法と直接改質法により行う。前者はメタン等炭化水素から水素を製造する実用的な方法である。後者は研究段階の手法であるが、改質プロセスにおいて CO_2 を排出せず、水素製造と同時に副生成物としてベンゼン(C_6H_6)等芳香族化合物を産出する。ベンゼンは化学製品の基礎原料となる有用な物質である。本実証プラントでは水蒸気改質の前段に直接改質を行い、直接改質反応後の未反応メタンを水蒸気改質で水素に変換するシステムとした。

以上の実証実験結果については、次項 1.2 において述べる。

(2) 有機ハイドライドによる水素貯蔵

水素の貯蔵方法には圧縮ボンベ、液体水素、水素貯蔵合金、有機ハイドライド等があるが、本研究では有機ハイドライドによる水素貯蔵及び再生利用の実証実験を行った。有機ハイドライドによる水素貯蔵は芳香族化合物の水素化（水添反応）を利用して行う。その貯蔵原料となる芳香族化合物はトルエン、ベンゼン、ナフタレンが考えられているが、特別研究「地球温暖化対策に資するエネルギー地域自立型実証研究」の期間（平成 15 年度～平成 17 年度）では、北海道の寒

冷な冬季においても凝固しないトルエンを原料とした実証実験を行った。この場合の水添反応及び水素再生時の脱水素反応は次に示すとおりである。

$C_7H_8 + 3H_2 \rightarrow C_7H_{14}$　（水添反応）　(1.1.1)

$C_7H_{14} \rightarrow 3H_2 + C_7H_{14}$　（脱水素反応）　(1.1.2)

(1.1.1)式よりトルエンを水素化した物質 C_7H_{14} すなわちメチルシクロヘキサンを有機ハイドライドとして、水素を必要な場所まで運搬することや必要な時期まで貯蔵することができる。そのとき有機ハイドライドは常温・常圧で液体であるため取り扱いやすく、既存の石油系インフラを活用できる利点をもつ。そして(1.1.2)式より水素を再生すれば、燃料電池等による水素エネルギー利用が可能である。脱水素反応後のトルエンは水素化原料として再利用することができる。

以上の実証実験結果については、次項 1.2 において述べる。

(3) ベンゼンの水素化

水素製造プロセスに直接改質法を用いれば、水素と同時にベンゼンが併産される。ベンゼンは各種化学製品の原料となる有用な物質であるが、非工業地域における利用方法として、ガソリン混合燃料として利用する方法や上記のトルエンと同様に水素貯蔵媒体としての利用が考えられる。しかし、ベンゼン自体は人体に有害な物質であるため、ガソリンなど燃料中のベンゼン成分割合は制限されている。そのためベンゼンを次式(1.1.3)により水素化する実証実験を平成 18 年度～平成 19 年度の重点プロジェクト研究において行い、ベンゼンをシクロヘキサンに変換してガソリン等の混合燃料とすることを検討した。

$C_6H_6 + 3H_2 \rightarrow C_6H_{12}$　（ベンゼン水素化反応）　(1.1.3)

以上の実証実験結果については、2 章において述べる。

参考文献

1) 農林水産省バイオマスニッポン、＜http://www.maff.go.jp/j/biomass/＞

2) 羽賀清典他：家畜排せつ物の処理・リサイクルとエネルギー利用、最新浄化・処理技術からバイオマス利用、法対策、有効利用事例まで、（株）エヌ・ティー・エス、2004.

3) 独立行政法人北海道開発土木研究所：積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト（平成 12～16 年度）最終成果報告書、2006.

4) NEDO 技術開発機構：燃料電池導入ガイドブック、2005.

5) 独立行政法人北海道開発土木研究所：地球温暖化対策に資するエネルギー地域自立型実証研究（平成 15～17 年度）、最終年次報告書、2006.

1.2.　実証プラントにおけるバイオガスからの水素製造・貯蔵技術実証実験

1.2.1.　実証プラントの概要

別海エネルギー地域自立型実証研究施設（以下、実証プラントと記す）は、北海道野付郡別海町内の(独)土木研究所寒地土木研究所　別海資源循環試験施設内に平成 15 年度に設置した [1)−4)]。**図 1.2.1** に別海資源循環試験施設の鳥瞰図を示す。

実証プラントは別海資源循環試験施設において産出されるバイオガスを原料として、クリーンエネルギーである水素や芳香族炭化水素の一種で化学基礎原料であるベンゼンを製造する実証試験を行うプラントⅠと、生成した水素を芳香族炭化水素の一種であるトルエンに付加してメチルシクロヘキサンの状態で貯蔵し、水素の需要時にはメチルシクロヘキサンから脱水素して水素を発生させる実証試験を行うプラントⅡとからなる [5)−9)]。

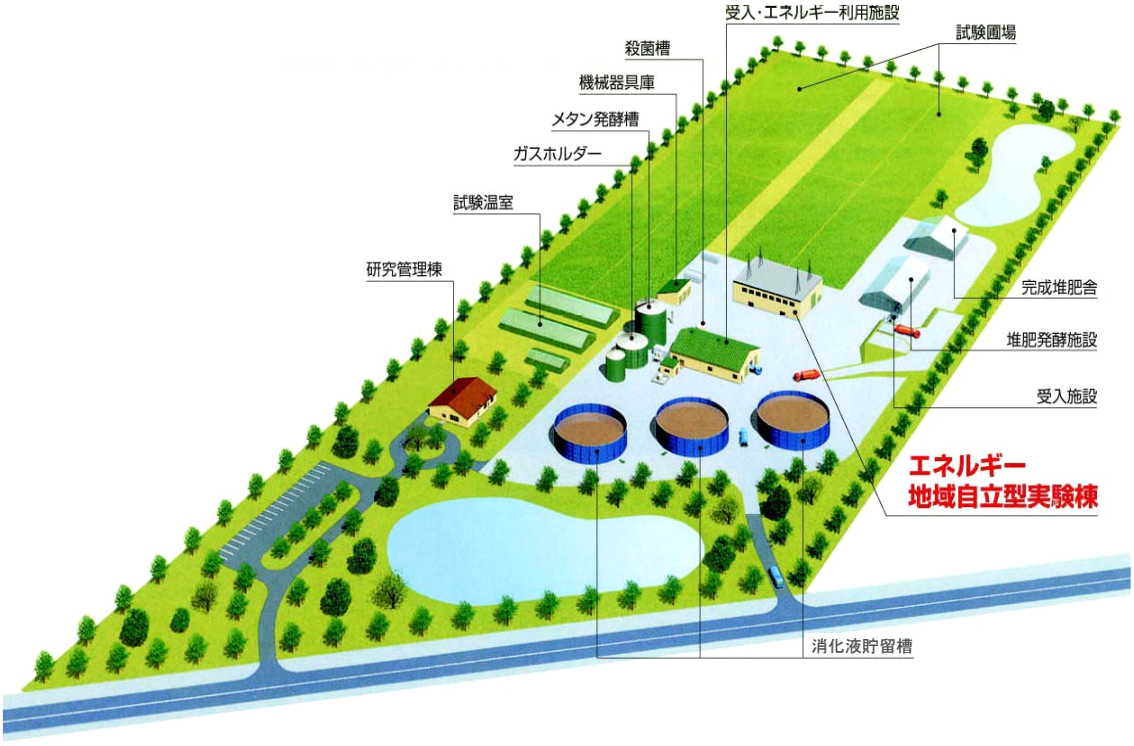


図 1.2.1　別海資源循環試験施設の鳥瞰図

1.2.2. 水素製造技術

1.2.2.1. 水素製造技術の概要

乳牛ふん尿を起源とするバイオガス中には、一般に約 60%のメタンと約 40%の二酸化炭素が含まれており、天然ガスなどと同様にメタン資源としての活用が期待されている。メタンから水素を製造する方法としては触媒反応を用いた水蒸気改質がよく知られている。

また、北海道で研究蓄積されてきた技術で、触媒反応を用いてメタンから水素とベンゼンを同時製造するメタン直接改質が、近年の石油など化石資源の価格高騰による様々な工業原料の供給不安があるなかで注目されている。本研究では、バイオガスから精製したメタンを原料としてこれら 2 つの方法により水素を製造、あるいは水素とベンゼンを同時製造する実証実験を行ってきた。水蒸気改質とメタン直接改質の特徴を以下に記す。

(1)水蒸気改質

水蒸気改質とは、触媒反応によりメタンと水蒸気から水素と一酸化炭素を生成する反応のことである。一酸化炭素は毒性があるので、後工程の CO 変成反応により一酸化炭素と水蒸気を反応させて水素と二酸化炭素を生成する。各反応を式(1.2.1)、式(1.2.2)に示すが、水蒸気改質は吸熱反応であり、750℃程度の加熱が必要である。また、CO 変成反応は発熱反応であるため 170℃程度まで冷却したうえで反応を行っている。

水蒸気改質反応：$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2 - 205.9kJ/mol\ (298K)$ (1.2.1)

CO 変成反応　：$CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 41.1kJ/mol\ (298K)$ (1.2.2)

(2)メタン直接改質

メタン直接改質とは、触媒反応によりメタンから水素を取り出すと同時に芳香族炭化水素の一種で化学基礎原料として有用であるベンゼンを合成するメタンの脱水素芳香族化反応（dehydro-aromatization reaction）のことを言う[10)−11)]。本研究ではメタン資源としてバイオガスを活用してきたが、当然のことながら天然ガスやメタンハイドレートなどの活用も可能であり、この技術は燃料電池などを利用する水素エネルギー社会の形成や石油化学工業における原料供給ルートの多様化に向けて注目されている。**図 1.2.2** にメタン脱水素芳香族化反応の模式図を示すが、主反応は式(1.2.3)に記すようなメタンから水素とベンゼンが生成する吸熱反応であり、750℃程度の加熱が必要である。

$CH_4 = 1/6C_6H_6 + 3/2H_2 - 88.4kJ/mol\ (298K)$ (1.2.3)

触媒には数 mass%の Mo が担持された ZSM-5 型のゼオライト触媒が用いられ[12)−13)]、本研究では 6%Mo 担持の ZSM-5 触媒を使用してきた[14)−16)]。その反応のメカニズムは、まずゼオライトの細孔中の Mo 触媒種においてメタンが脱水素されて水素が生成し、同時に生じた活性メチレ

ン種(CH_2等)が縮合して芳香族化し、ベンゼンが生成するというものである。また、ZSM-5 型ゼオライトの細孔径は約 5.5Å であり、ベンゼンの分子サイズとほぼ同じであることがベンゼン生成の選択率が高い理由である。

しかしながら、ZSM-5 型ゼオライトの細孔は必ずしも均一ではないので、分子サイズがベンゼンに近いナフタレンやトルエンが副次的に生成する。また、メタンや生成した炭化水素が分解して生成した炭素が触媒内へ蓄積するコーキング（coking）が起きると、Mo 触媒種の活性を低下させるとともに、ゼオライトの細孔を閉塞するため芳香族化が抑制される。そこでコーキングを抑制するために原料メタンに対して微量の CO_2 や水素を添加すると、触媒の活性を長時間安定して維持することが明らかにされている [17)−20)]。特に水素の添加は、生成した水素を循環させて供給できること、炭素と水素が反応してメタンが生成して未反応メタンと同様に扱えることから分離プロセスを単純化することができるので、原料メタンに 6～10%の水素を添加するプロセスが一般的となっている。さらに、触媒内に蓄積した炭素を除去して触媒の性能を維持するため、定期的に純水素を流通させて炭素と反応させ、メタンにして除去する触媒再生プロセスも検討されている [21)]。

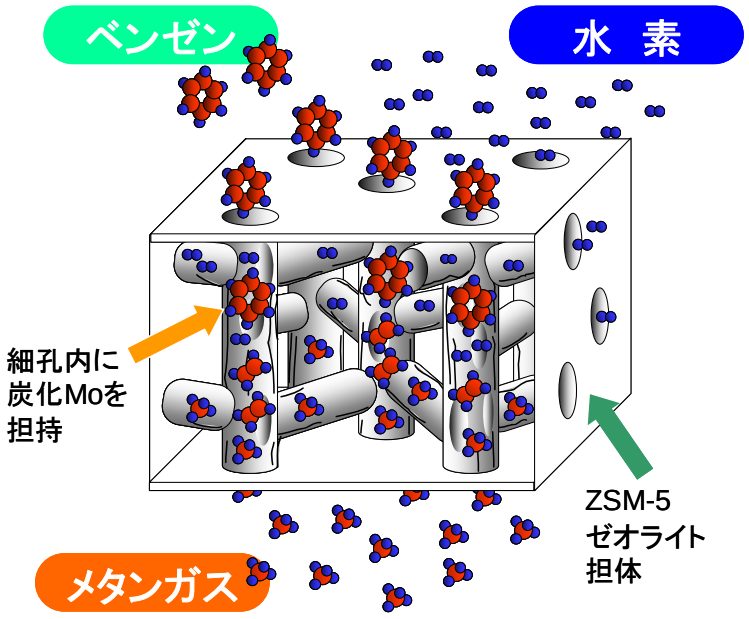


図 1.2.2　メタン脱水素芳香族化反応の模式図

1.2.2.2. 水素製造実証実験のプロセスフロー

図 1.2.3 にプラントⅠ（バイオガス改質・水素等製造設備）のプロセスフロー図を示す。バイオガスからの水素製造では、バイオガスに約 60%のメタンのほか約 40%の CO_2 と、酸素、窒素、H_2S、NH_3、水といった微量成分が含まれることから、これらの不純物を取り除いた高純度メタンを原料とした。水素のみを製造する場合、図 1.2.3 の赤線で示したプロセスによりバイオガスから精製したメタンの水蒸気改質反応と CO 変成反応により水素を生成し、PSA（Pressure Swing Adsorption）装置を用いて不純物を取り除くことにより高純度の水素を得た。

また、メタン直接改質反応により水素とベンゼンを同時に製造する場合、図 1.2.3 の黒線で示したプロセスにより生成したベンゼンや副生成した芳香族炭化水素を芳香族吸収塔で回収し、蒸留塔にてベンゼンを抽出した。一方、未反応メタンと水素の分離ガス（CH_4 約 55%、H_2 約 45%）はメタン分離膜でリサイクル用のメタンを取り除いたのち水蒸気改質器に導入し、一層多くの水素製造を図った。製造した水素の一部は、直接改質触媒のコーキングを抑制するために原料メタンに対して 9%の水素を添加し、触媒活性の長時間安定維持を図った [22)−24)]。

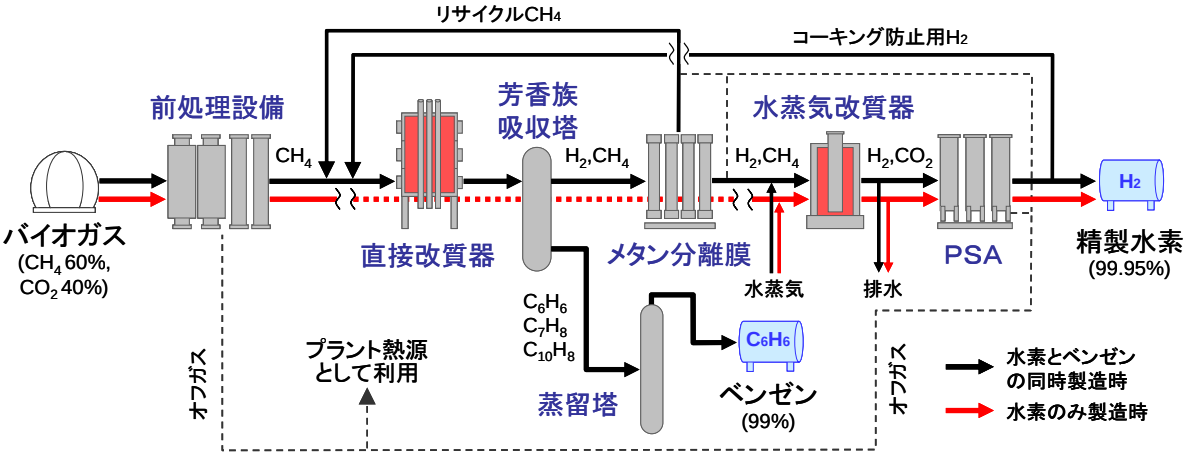


図 1.2.3　プラントⅠ（バイオガス改質・水素等製造設備）のプロセスフロー図

図 1.2.4 にプラントⅠ（バイオガス改質・水素等製造設備）の設備フロー図を示す。プラントⅠは主に①バイオガスからメタンを精製する前処理設備、②メタンの脱水素芳香族化反応によって水素とベンゼンを製造する直接改質設備、及び③精製メタンまたは未反応メタンの水蒸気改質反応によって水素を製造する水蒸気改質設備に分けられる。前処理設備、直接改質設備および水蒸気改質設備の特徴を以下に記す。

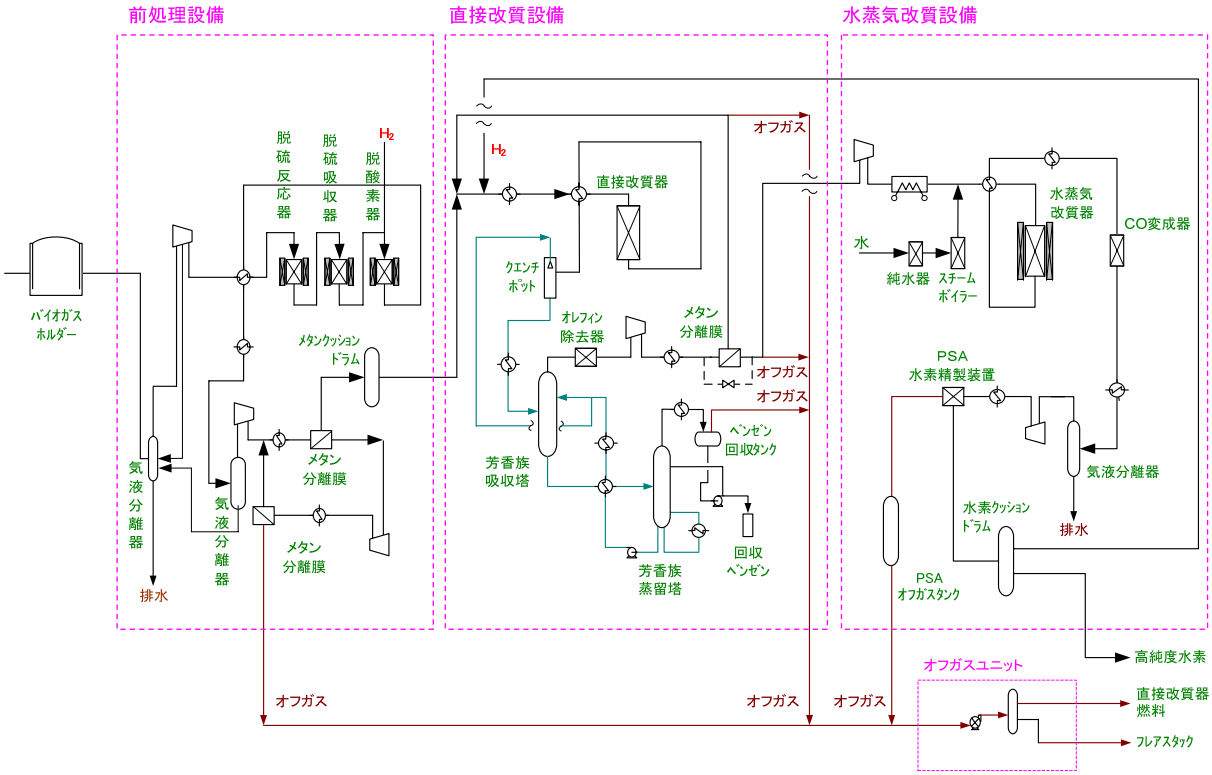


図 1.2.4　プラントⅠ（バイオガス改質・水素等製造設備）の設備フロー図

(1) 前処理設備

前処理設備は、圧縮機、脱硫反応器、脱硫吸収器、脱酸素器、メタン分離膜、気液分離器、熱交換器などで構成される。バイオガス中に約 60%含まれるメタンを純度 99%以上に精製するため、バイオガスのもう一つの主成分で約 40%含まれる二酸化炭素と、微量成分である酸素、窒素、硫化水素、メチルメルカプタン、アンモニア、水蒸気を除去する機能を有する。また、当該設備のバイオガス処理能力は 200～500m^3/day となっている。

(2) 直接改質設備

メタン直接改質設備は、直接改質器、クエンチポット、芳香族吸収塔、蒸留塔、オレフィン除去器、圧縮機、メタン分離膜、気液分離器、熱交換器などで構成される。

直接改質器では、反応管に 7.5～15.0kg の 6%Mo/ZSM-5 ゼオライト触媒を充填し、蓄熱式バーナーにより 750℃に均一加熱している。**表 1.2.1** に本研究で使用した 6%Mo/ZSM-5 ゼオライト触媒の仕様を示す。

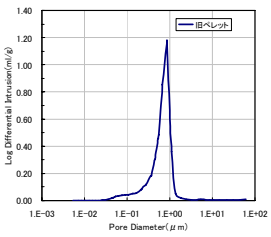
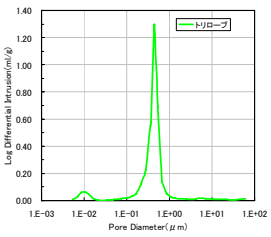
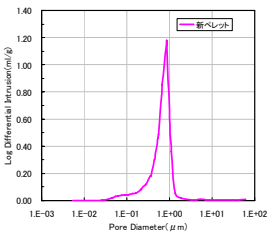
蓄熱式バーナーはオフガスを燃料とすることも可能である。メタンの脱水素芳香族化反応により水素とベンゼンが生成するが、副反応によりナフタレン（$C_{10}H_8$）、トルエン（C_7H_8）といった芳香族炭化水素や、エタン（C_2H_6）、エチレン（C_2H_4）といった炭化水素が生成する。

クエンチポットと芳香族吸収塔では、直接改質出口ガスをαメチルナフタレン（$C_{11}H_{10}$）の噴霧により冷却し、液化した芳香族を回収するとともに、塔頂から水素と未反応メタン、C_2H_6、C_2H_4を分離する。また、生成したベンゼンを回収するため、芳香族を吸収した $C_{11}H_{10}$ を塔底部から蒸

留塔に移送する。

蒸留塔では、芳香族を吸収した $C_{11}H_{10}$ を加熱してベンゼンを蒸留し、塔頂部からベンゼンを分離する。分離したベンゼンの一部は蒸留塔にリフラックスし、運転の安定化を図っている。また、ベンゼン除去後の $C_{11}H_{10}$ は塔底部からクエンチポットと芳香族吸収塔に移送し、循環させている。活性炭の吸着剤を充填したオレフィン除去器において C_2H_4 などのオレフィンを除去した後、ポリイミド中空糸膜からなるメタン分離膜では、水素と未反応メタンからなる混合ガスからメタンを分離し、分離したメタンをリサイクルして直接改質器に再度供給している。これにより見掛けの転化率を向上させている。また、メタンを分離した後の混合ガスには 50%以上のメタンが含まれているので、さらに多くの水素を製造するため水蒸気改質設備に導入している。

表 1.2.1　本研究で使用した 6%Mo/ZSM-5 ゼオライト触媒の仕様

触媒(サイズ) / 特性	旧 M 社製ペレット（φ5mm×10mm）	S 社製トリローブ（φ1.6mm×3mm）	新 M 社製ペレット（φ5mm×10mm）
外観			
嵩比重(g/cm³)	0.58	0.54	0.63
バインダー量(%)	17.5	10.0	17.5
比表面積(m²/g)	254	263	247
細孔容積(ml/g)	0.408	0.450	0.398
細孔分布			

(3) 水蒸気改質設備

水蒸気改質設備は、圧縮機、純水器、スチームボイラー、水蒸気改質器、CO 変成器、気液分離器、PSA（Pressure Swing Adsorption）水素精製装置、熱交換器などで構成される。

水蒸気改質器には Ru/Al_2O_3 系触媒が充填され、750℃の加熱下で原料ガスと水蒸気を流通させて改質反応を行う。また、CO 変成器に Cu/Zn 系触媒が充填されており、熱交換などにより 170℃まで降温した改質ガスを流通させて CO 変成反応を行う。CO 変成後の改質ガスには水素と CO_2 の他、未反応メタンと微量の CO が含まれるため、PSA 水素精製装置において純度 99.95%以上の水素を精製できるような仕様となっている。

1.2.2.3. バイオガス改質・水素等製造の実証実験結果

本研究では主に 200m³/day のバイオガスから水素、あるいは水素とベンゼンを同時製造する実証実験を行い、物質収支やエネルギー収支を把握した。以降はバイオガスから水素のみを製造する水蒸気改質プロセスと、バイオガスから水素とベンゼンを同時製造する直接改質プロセス、それぞれについての実証実験の結果を述べる。

(1) バイオガスから水素のみを製造する場合（水蒸気改質プロセス）

別海資源循環試験施設の場合、バイオガス中の硫化水素やメチルメルカプタンといった被毒成分はいずれも 0.01ppm 未満となっている。また、生物脱硫を行わなければ酸素濃度は 0.01%未満となっている。したがって、水蒸気改質プロセスの場合、これらの微量成分が改質性能に悪影響を及ぼすことはないので、前処理設備において脱硫反応器、脱硫吸収器および脱酸素器を使用せずに水素製造を行うことができる。

前処理設備にバイオガスを 200m³/day 導入して水蒸気改質によって水素のみを製造した場合の稼働データを**表 1.2.2** に示す。各サブシステムに No.を付けており①メタン精製、②スチームボイラー、③水蒸気改質器、④PSA 水素精製装置とした。バイオガスの前処理によって純度 99%以上のメタンが 108m³/day 生成し、これらのサブシステムを経て 280m³/day の水素が生成する。測定した物質収支とエネルギー収支より、各物質のエンタルピー及びエクセルギーを算出した。

各物質のエンタルピーH は式(1.2.5)より算出される。

$$H = H_C + H_T \qquad (1.2.5)$$

ここで H_C は化学エンタルピー、H_T は熱エンタルピーであり、(1.2.6)、(1.2.7)式で求められる。

$$H_C = \sum n_i h^0{}_i \qquad (1.2.6)$$

$$H_T = \sum n_i \int_{T0}^{T} C_{Pi}{}^0 dT \qquad (1.2.7)$$

また、各物質のエクセルギーE は式(1.2.8)より算出される[25)−26)]。

$$E = H - H_0 - T_0(S - S_0) = \varepsilon_c + \varepsilon_T + \varepsilon_P + \varepsilon_M \qquad (1.2.8)$$

ここで ε_c, ε_T, ε_P, ε_M はそれぞれ化学、熱、圧力、混合のエクセルギーであり、(1.2.9)-(1.2.12)式より算出される。

$$\varepsilon_c = \Sigma\ n_i \varepsilon_i{}^0 \qquad (1.2.9)$$

$$\varepsilon_T = (\Sigma\ n_i C_{P,i})\{T - T_0 - T_0 \ln(T/T_0)\} \qquad (1.2.10)$$

$$\varepsilon_P = (\Sigma\ n_i) RT_0 \ln\{\Sigma(p_i/p_0)\} \qquad (1.2.11)$$

$$\varepsilon_M = RT_0\ \Sigma[n_i \ln\{n_i/\Sigma n_i\}] \qquad (1.2.12)$$

※　n；モル、i；成分、0；標準状態、h^0; 標準化学エンタルピー、S; エントロピー、
Cp; 平均熱容量、ε^0; 標準化学エクセルギー、R; 気体定数、p；圧力、T；温度

バイオガスから水素のみを製造する水蒸気改質プロセスにおいて、圧縮機やポンプの稼働に必要な電気は 673MJ/day となり、スチームボイラー、プリヒーター、水蒸気改質器の電気ヒーターによる加熱に必要な電気を 3582MJ/day 供給している。また、その他にチラー（475MJ/day）、ブラインポンプ（142MJ/day）、熱媒ポンプ（69MJ/day）といった用役設備に電気を供給する必要がある。

表 1.2.2　バイオガスから水素のみを製造した場合の稼働データ

No.	機器	No.	I/O	物質	流量	流量	温度	圧力	成分												全	全
									CH4	CO2	CO	H2	C2H4	C2H6	C6H6	C7H8	C10H8	C	H2O	C11H10	エンタルピー	エクセルギー
					m^3/d	m^3/h	℃	MPa	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	MJ/d	MJ/d
①	バイオガス	B102	Input	バイオガス	200	8.3	25	0.00	60.0	40.0											4297	4500
	ホルダー		Input	電気																	11	11
	ブロワー		Output	バイオガス	200	8.3	25	0.00	60.0	40.0											4297	4500
	圧縮機	K101	Input	バイオガス	200	8.3	25	0.00	60.0	40.0											4297	4500
			Input	電気																	182	182
			Output	バイオガス	200	8.3	208	0.94	60.0	40.0											4364	4567
	熱交換器	K101	Input	バイオガス	200	8.3	208	0.94	60.0	40.0											4364	4567
			Output	バイオガス	200	8.3	127	0.94	60.0	40.0											4332	4556
	熱交換器	E103	Input	バイオガス	209	8.7	127	0.94	60.0	40.0											4332	4556
			Input	メタン	9	0.4	25	0.76	56.5	43.5											180	191
			Output	バイオガス	209	8.7	25	0.76	59.8	40.2											4476	4737
	メタン分離膜	M101	Input	バイオガス	209	8.7	25	0.76	59.8	40.2											4476	4737
			Output	メタン	108	4.5	25	0.76	100												3869	4026
			Output	CO2	101	4.2	25	0.05	16.8	83.2											608	703
	圧縮機	K103	Input	CO2	101	4.2	25	0.05	16.8	83.2											608	703
			Input	電気																	215	215
			Output	CO2	101	4.2	156	0.76	16.8	83.2											631	727
	熱交換器	E104	Input	CO2	101	4.2	156	0.76	16.8	83.2											631	727
			Output	CO2	101	4.2	25	0.76	16.8	83.2											608	722
	メタン分離膜	M102	Input	CO2	101	4.2	25	0.76	16.8	83.2											608	722
			Output	メタン	9	0.4	25	0.76	56.5	43.5											180	191
			Output	オフガス	92	3.8	25	0.00	13.0	87.0											428	511
②	スチーム	M303	Input	水	324	13.5	25	0.00											100		0	0
	ボイラー		Input	電気																	10	10
			Input	熱																	1186	1186
			Output	水蒸気	324	13.5	163	0.37											100		704	191
③	プリヒーター	H302	Input	メタン	108	4.5	25	0.76	100												3869	4026
			Input	熱																	183	183
			Output	メタン	108	4.5	300	0.76	100												3926	4045
	熱交換器	E301	Input	メタン	108	4.5	300	0.76	100												3926	4045
			Input	水蒸気	324	13.5	163	0.37											100		704	191
			Output	メタン	432	18.0	300	0.37	25.0										75.0		4701	4232
	水蒸気	R301	Input	メタン	432	18.0	300	0.37	25.0										75.0		4701	4232
	改質器		Input	熱																	2213	2213
			Output	生成ガス	626	26.1	750	0.37	1.7		15.5	46.6							36.2		5877	5128
	熱交換器	E301	Input	生成ガス	626	26.1	750	0.37	1.7		15.5	46.6							36.2		5877	5128
			Output	生成ガス	626	26.1	300	0.37	1.7		15.5	46.6							36.2		5451	4845
	熱交換器	E303	Input	生成ガス	626	26.1	300	0.37	1.7		15.5	46.6							36.2		5451	4845
			Output	生成ガス	626	26.1	170	0.37	1.7		15.5	46.6							36.2		5335	4796
	CO変成器	R302	Input	生成ガス	626	26.1	170	0.37	1.7		15.5	46.6							36.2		5335	4796
			Output	生成ガス	626	26.1	170	0.37	1.7	14.7	0.8	61.3							21.5		4987	4684
	分離器	V301	Input	生成ガス	626	26.1	170	0.37	1.7	14.7	0.8	61.3							21.5		4987	4684
			Output	生成ガス	492	20.5	25	0.37	2.2	18.8	1.0	78.0									4594	4621
			Output	水	134	6	25	0.00											100		0	0
④	圧縮機	K302	Input	生成ガス	492	20.5	25	0.37	2.2	18.8	1.0	78.0									4594	4621
			Input	電気																	255	255
			Output	生成ガス	492	20.5	235	0.85	2.2	18.8	1.0	78.0									4740	4696
	熱交換器	E304	Input	生成ガス	492	20.5	235	0.85	2.2	18.8	1.0	78.0									4740	4696
			Output	生成ガス	492	20.5	25	0.85	2.2	18.8	1.0	78.0									4594	4659
	PSA	V304	Input	生成ガス	492	20.5	25	0.85	2.2	18.8	1.0	78.0									4594	4659
			Output	水素	280	12	25	0.85				100									3026	3011
			Output	オフガス	212	9	25	0.00	5.1	43.6	2.3	49.0									1568	1608

(2) バイオガスから水素とベンゼンを製造する場合（直接改質プロセス）

別海資源循環試験施設の場合、バイオガス中の硫化水素やメチルメルカプタンといった被毒成分はいずれも 0.01ppm 未満となっている。また、生物脱硫を行わなければ酸素濃度は 0.01%未満となっている。しかしながら、直接改質プロセスの場合、これらの微量成分が改質性能に悪影響を及ぼす可能性がある。特に酸素は直接改質設備で用いられる触媒のうち Mo と反応して MoO_2 を生成し、揮発してしまうため除去する必要があることから、前処理設備においては脱硫反応器、脱硫吸収器および脱酸素器を使用して製造実験を行っている。

前処理設備にバイオガスを 200m^3/day 導入して直接改質と未反応メタンの水蒸気改質により水素とベンゼンを製造した場合の稼働データを**表 1.2.3** に示す。各サブシステムの No.は①脱硫・脱酸素器、②メタン精製、③直接改質器、④芳香族吸収塔、⑤蒸留塔、⑥気液分離器、⑦メタン分離膜、⑧スチームボイラー、⑨圧縮機、⑩水蒸気改質器、⑪PSA 水素精製装置とした。なお、本プロセスは工程が多いため、**表 1.2.3** ではサブシステム No.①～④を(a)に、No.⑧～⑪を(b)にと分割して添付した。

バイオガスの前処理によって純度 99%以上のメタンが 108m^3/day 生成し、これらのサブシステムを経て 134m^3/day の水素と 8.4L/day のベンゼンが生成する。測定した物質収支とエネルギー収支より、各物質のエンタルピー及びエクセルギーを、**1.2.2.3.** (1)に記述した方法で算出した。

バイオガスから水素とベンゼンを製造する直接改質プロセスにおいて、圧縮機やポンプの稼働に必要な電気は 1119MJ/day となり、脱硫反応器、脱硫吸収器、脱酸素器、スチームボイラー、プリヒーター、水蒸気改質器の電気ヒーターによる加熱に必要な電気を 2032MJ/day、直接改質器や蒸留塔の加熱に必要な熱を 3214 MJ/day 供給している。また、その他にチラー（244MJ/day）、ブラインポンプ（73MJ/day）、熱媒ポンプ（335MJ/day）といった用役設備に電気を供給する必要がある。

表 1.2.3 (a)　バイオガスから水素とベンゼンを製造した場合の稼働データ

(a) サブシステム No.①～④

	機器	No.	I/O	物質	流量	流量	温度	圧力	成分											全エンタルピー	全エクセルギー
									CH4	CO2	CO	H2	C2H4	C2H6	C6H6	C7H8	C10H8	C	H2O	C11H10	
					m^3/d	m^3/h	℃	MPa	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	MJ/d	MJ/d
①	バイオガスホルダー	B102	Input	バイオガス	200	8.3	25	0.00	60.0	40.0											4297	4500
	ブロワー		Input	電気																	11	11
			Output	バイオガス	200	8.3	25	0.00	60.0	40.0											4297	4500
	圧縮機	K101	Input	バイオガス	200	8.3	25	0.00	60.0	40.0											4297	4500
			Input	電気																	182	182
			Output	バイオガス	200	8.3	208	0.94	60.0	40.0											4364	4567
	熱交換器	K101	Input	バイオガス	200	8.3	208	0.94	60.0	40.0											4364	4567
			Output	バイオガス	200	8.3	127	0.94	60.0	40.0											4332	4556
	熱交換器	E101	Input	バイオガス	200	8.3	127	0.94	60.0	40.0											4332	4556
			Output	バイオガス	200	8.3	139	0.94	60.0	40.0											4337	4558
	脱硫反応器	R101	Input	バイオガス	200	8.3	139	0.94	60.0	40.0											4337	4558
			Input	電気																	118	118
			Output	バイオガス	200	8.3	224	0.94	60.0	40.0											4370	4570
	脱硫吸収器	R102	Input	バイオガス	200	8.3	224	0.94	60.0	40.0											4370	4570
			Input	電気																	326	326
			Output	バイオガス	200	8.3	232	0.94	60.0	40.0											4373	4572
	脱酸素器	R103	Input	バイオガス	200	8.3	232	0.94	60.0	40.0											4373	4572
			Input	電気																	87	87
			Output	バイオガス	200	8.3	227	0.94	60.0	40.0											4371	4571
	熱交換器	E101	Input	バイオガス	200	8.3	227	0.94	60.0	40.0											4371	4571
			Output	バイオガス	200	8.3	216	0.94	60.0	40.0											4367	4569
②	熱交換器	E102	Input	バイオガス	200	8.3	216	0.94	60.0	40.0											4367	4569
			Output	バイオガス	200	8.3	10	0.50	60.0	40.0											4292	4539
	圧縮機	K102	Input	バイオガス	200	8.3	10	0.50	60.0	40.0											4292	4539
			Input	電気																	51	51
			Output	バイオガス	200	8.3	45	0.76	60.0	40.0											4303	4547
	熱交換器	E103	Input	バイオガス	200	8.3	45	0.76	60.0	40.0											4303	4547
			Input	メタン	9	0.4	25	0.76	56.5	43.5											182	193
			Output	バイオガス	209	8.7	25	0.76	59.8	40.2											4479	4740
	メタン分離膜	M101	Input	バイオガス	209	8.7	25	0.76	59.8	40.2											4479	4740
			Output	メタン	108	4.5	25	0.76	100												3869	4026
			Output	CO2	101	4.2	25	0.05	16.8	83.2											610	706
	圧縮機	K103	Input	CO2	101	4.2	25	0.05	16.8	83.2											610	706
			Input	電気																	215	215
			Output	CO2	101	4.2	156	0.76	16.8	83.2											634	729
	熱交換器	E104	Input	CO2	101	4.2	156	0.76	16.8	83.2											634	729
			Output	CO2	101	4.2	25	0.76	16.8	83.2											610	725
	メタン分離膜	M102	Input	CO2	101	4.2	25	0.76	16.8	83.2											610	725
			Output	メタン	9	0.4	25	0.76	56.5	43.5											182	193
			Output	オフガス	92	3.8	25	0.05	13.0	87.0											428	515
③	熱交換器	E201	Input	メタン	108	4.5	25	0.40	100												3869	4019
			Input	メタン	348	14.5	25	0.40	99.2			0.5	0.1	0.2							12441	12922
			Input	水素	43	1.8	25	0.40				100									466	461
			Input	熱																	457	461
			Output	混合ガス	499	20.8	141	0.40	90.8			9.0	0.0	0.1							16874	17403
	熱交換器	E202	Input	混合ガス	499	20.8	141	0.40	90.8			9.0	0.0	0.1							16874	17403
			Output	混合ガス	499	20.8	260	0.40	90.8			9.0	0.0	0.1							16991	17451
	直接改質器	R201	Input	混合ガス	499	20.8	260	0.40	90.8			9.0	0.0	0.1							16991	17451
			Input	熱																	2313	2456
			Input	電気																	151	151
			Output	生成ガス	510	21.2	750	0.40	85.7			13.5	0.1	0.1	0.5	0.01	0.01	0.04			17702	17985
	熱交換器	E202	Input	生成ガス	510	21.2	750	0.40	85.7			13.5	0.1	0.1	0.5	0.01	0.01	0.04			17702	17985
			Output	生成ガス	510	21.2	260	0.38	85.8			13.5	0.1	0.1	0.5	0.01	0.01				17053	17491
④	熱交換器	E208	Input	吸収液	59	2.4	156	0.00												100	14710	14627
			Output	吸収液	59	2.4	8	0.00												100	14613	14610
	芳香族吸収塔	C201	Input	生成ガス	510	21.2	260	0.38	85.8			13.5	0.1	0.1	0.5	0.01	0.01				17053	17491
			Input	吸収液	59	2.4	8	0.00												100	14613	14610
			Output	分離ガス	507	21.1	12	0.38	86.2			13.6	0.1	0.1							16467	17055
			Output	吸収液	61	2.5	10	0.00							4.0	0.1	0.1			95.9	14968	14981

表 1.2.3 (b)　バイオガスから水素とベンゼンを製造した場合の稼働データ

(b) サブシステム No.⑤～⑪

	機器	No.	I/O	物質	流量	流量	温度	圧力	成分												全	全
									CH4	CO2	CO	H2	C2H4	C2H6	C6H6	C7H8	C10H8	C	H2O	C11H10	エンタルピー	エクセルギー
					m^3/d	m^3/h	℃	MPa	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	MJ/d	MJ/d
⑤	熱交換器	E205	Input	吸収液	61	2.5	10	0.00							4.0	0.1	0.1			95.9	14968	14981
			Output	吸収液	61	2.5	114	0.00							4.0	0.1	0.1			95.9	15035	14988
	蒸留塔	C202	Input	吸収液	61	2.5	114	0.00							4.0	0.1	0.1			95.9	15035	14988
			Input	ベンゼン	42	1.8	25	0.00							100						5899	6191
			Input	熱																	443	448
			Output	吸収液	59	2.4	243	0.00												100	14777	14655
			Output	ベンゼン	45	1.9	80	0.00							100						6252	6547
	ポンプ	P202	Input	吸収液	59	2.4	243	0.00												100	14777	14655
			Input	電気																	8	8
			Output	吸収液	59	2.4	243	0.00												100	14777	14655
	熱交換器	E205	Input	吸収液	59	2.4	243	0.00												100	14777	14655
			Output	吸収液	59	2.4	156	0.00												100	14710	14627
	熱交換器	E207	Input	ベンゼン	45	1.9	80	0.00							100						6252	6547
			Output	ベンゼン	45	1.9	27	0.00							100						6237	6546
⑥	気液分離器	V202	Input	ベンゼン	45	1.9	27	0.00							100						6237	6546
			Output	ベンゼン	2.4	0.1	25	0.00							100						338	355
			Output	ベンゼン	42	1.8	25	0.00							100						5899	6191
	ポンプ	P201	Input	ベンゼン	42	1.8	25	0.00							100						5899	6191
			Input	電気																	16	16
			Output	ベンゼン	42	1.8	25	0.00							100						5899	6191
⑦	圧縮機	K201	Input	分離ガス	507	21.1	12	0.38	86.2			13.6	0.1	0.1							16467	17055
			Input	電気																	241	241
			Output	分離ガス	507	21.1	54	0.76	86.2			13.6	0.1	0.1							16501	17089
	熱交換器	E204	Input	分離ガス	507	21.1	54	0.76	86.2			13.6	0.1	0.1							16501	17089
			Output	分離ガス	507	21.1	25	0.76	86.2			13.6	0.1	0.1							16477	17088
	メタン分離膜	M202	Input	分離ガス	507	21.1	25	0.76	86.2			13.6	0.1	0.1							16477	17088
			Output	メタン	348	14.5	25	0.40	99.2			0.5	0.1	0.2							12441	12922
			Output	オフガス	26	1.1	25	0.40	99.2			0.5	0.1	0.2							944	980
			Output	分離ガス	108	4.5	25	0.01	51.2			48.6	0.1	0.1							2560	2605
			Output	オフガス	25	1.0	25	0.01	51.2			48.6	0.1	0.1							589	599
⑧	スチームボイラー	M303	Input	水	160	6.7	25	0.00											100		0	0
			Input	電気																	10	10
			Input	熱																	571	576
			Output	水蒸気	160	6.7	163	0.37											100		348	95
⑨	圧縮機	K301	Input	分離ガス	108	4.5	25	0.01	51.2			48.6	0.1	0.1							2560	2605
			Input	電気																	83	83
			Output	分離ガス	108	4.5	151	0.37	51.2			48.6	0.1	0.1							2581	2626
	プリヒーター	H302	Input	分離ガス	108	4.5	151	0.37	51.2			48.6	0.1	0.1							2581	2626
			Input	電気																	67	68
			Output	分離ガス	108	4.5	300	0.37	51.2			48.6	0.1	0.1							2609	2638
⑩	熱交換器	E301	Input	分離ガス	108	4.5	300	0.37	51.2			48.6	0.1	0.1							2609	2638
			Input	水蒸気	160	6.7	163	0.37											100		348	95
			Output	分離ガス	268	11.2	300	0.37	20.6			19.6	0.1	0.0					59.7		2991	2727
	水蒸気改質器	R301	Input	分離ガス	268	11.2	300	0.37	20.6			19.6	0.1	0.0					59.7		2991	2727
			Input	電気																	863	924
			Output	改質ガス	365	15.2	750	0.37	2.0		13.3	54.2							30.5		3609	3204
	熱交換器	E301	Input	改質ガス	365	15.2	750	0.37	2.0		13.3	54.2							30.5		3609	3204
			Output	改質ガス	365	15.2	300	0.37	2.0		13.3	54.2							30.5		3364	3042
	熱交換器	E303	Input	改質ガス	365	15.2	300	0.37	2.0		13.3	54.2							30.5		3364	3042
			Output	改質ガス	365	15.2	170	0.37	2.0		13.3	54.2							30.5		3297	3014
	CO変成器	R302	Input	改質ガス	365	15.2	170	0.37	2.0		13.3	54.2							30.5		3297	3014
			Output	改質ガス	365	15.2	170	0.37	2.0	12.2	1.1	66.4							18.3		3129	2960
	分離器	V301	Input	改質ガス	365	15.2	170	0.37	2.0	12.2	1.1	66.4							18.3		3129	2960
			Output	改質ガス	298	12.4	25	0.00	2.4	15.0	1.3	81.3									2924	2878
			Output	水	67	3	25	0.00											100		0	0
⑪	圧縮機	K302	Input	改質ガス	298	12.4	7	0.00	2.4	15.0	1.3	81.3									2916	2878
			Input	電気																	152	152
			Output	改質ガス	298	12.4	235	0.85	2.4	15.0	1.3	81.3									3011	2974
	熱交換器	E304	Input	改質ガス	298	12.4	235	0.85	2.4	15.0	1.3	81.3									3011	2974
			Output	改質ガス	298	12.4	25	0.85	2.4	15.0	1.3	81.3									2924	2952
	PSA	V304	Input	改質ガス	298	12.4	25	0.85	2.4	15.0	1.3	81.3									2924	2952
			Output	水素	134	6	25	0.85				100									1444	1437
			Output	水素	43	1.8	25	0.85				100									466	464
			Output	オフガス	121	5	25	0.00	5.9	36.9	3.2	54.0									1013	1028

1.2.2.4. 水素製造プロセスの評価

(1) バイオガスから水素のみを製造する場合（水蒸気改質プロセス）

設備の稼働に必要な熱をバイオガスおよびオフガスの燃焼により供給し、必要な電力をバイオガス発電により供給するとした場合、バイオガスからの水素製造におけるエンタルピーフローを**図 1.2.5** に示す。ここで入力される物質がバイオガス、空気および水で、入力されるエンタルピーの合計は 11.6GJ/day である。また、出力される物質が水素で、出力されるエンタルピーの合計は 3.0GJ/day としたときのエンタルピー効率は約 26%となった。

水蒸気改質プロセスにおいては水蒸気改質器における排熱が著しく大きいことがわかる。この排熱の大部分は水蒸気改質器の表面からの放射熱であり、その温度は設備周囲の温度まで低下したものであることから、この排熱を用いたエネルギー利用は困難である。

なお、エンタルピー効率にはバイオガス発電機の回収熱の利用を考慮していないが、スチームボイラーにおける原料用水の加温や改質器などの前工程における原料ガスの予熱に使うことができれば、さらに効率を向上させることが可能である。

図 1.2.6 にはバイオガスから水素製造におけるエクセルギーフローを示す。ここで入力される物質がバイオガス、空気および水で、入力されるエクセルギーの合計は 12.1GJ/day である。また、出力される物質が水素で、出力されるエクセルギーの合計は 3.0GJ/day としたときのエクセルギー効率は約 25%となった。エクセルギー損失は、水蒸気改質器、スチームボイラー及びバイオガス発電機において比較的大きいことがわかる。特に水蒸気改質器の表面からの放射熱による損失が著しく大きいことから、断熱の強化や効率的な熱交換により入力エンタルピーを少なくする必要がある。一方、スチームボイラーについてはバイオガス発電機の回収熱を利用するなどして、余計なエネルギー投入を行わないような方策が必要である。

図 1.2.7 にバイオガスを起源とする水素製造の模式図を示すが、水素を 280m^3/day 製造するのに原料バイオガスが 200m^3/day、燃料バイオガスが燃焼加熱用に 112m^3/day、発電用に 228m^3/day の計 340m^3/day が必要であり、原料と燃料を合わせた総必要バイオガスは 540m^3/day となった。これは水素を 1 m^3 製造するためには約 1.9m^3 のバイオガスが必要となることを示している。

この場合、バイオガスの燃焼によって得られる熱 2.1GJ/day は稼働熱源として利用され、バイオガス発電による電気 16kW は稼働電力として利用されているが、バイオガス発電器からの回収熱 2.7GJ/day については、前述したようにスチームボイラーにおける原料用水の加熱などに利用可能であり、そのような設備設計を検討する必要がある。

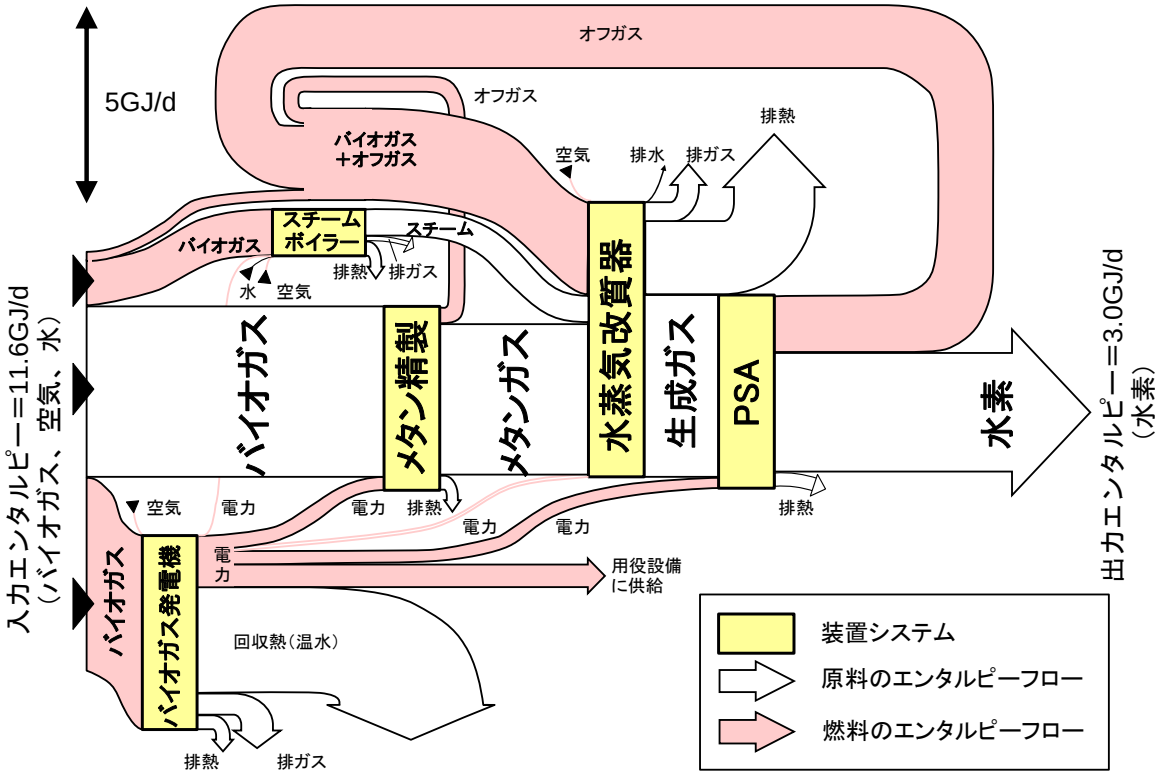


図 1.2.5　バイオガスからの水素製造におけるエンタルピーフロー

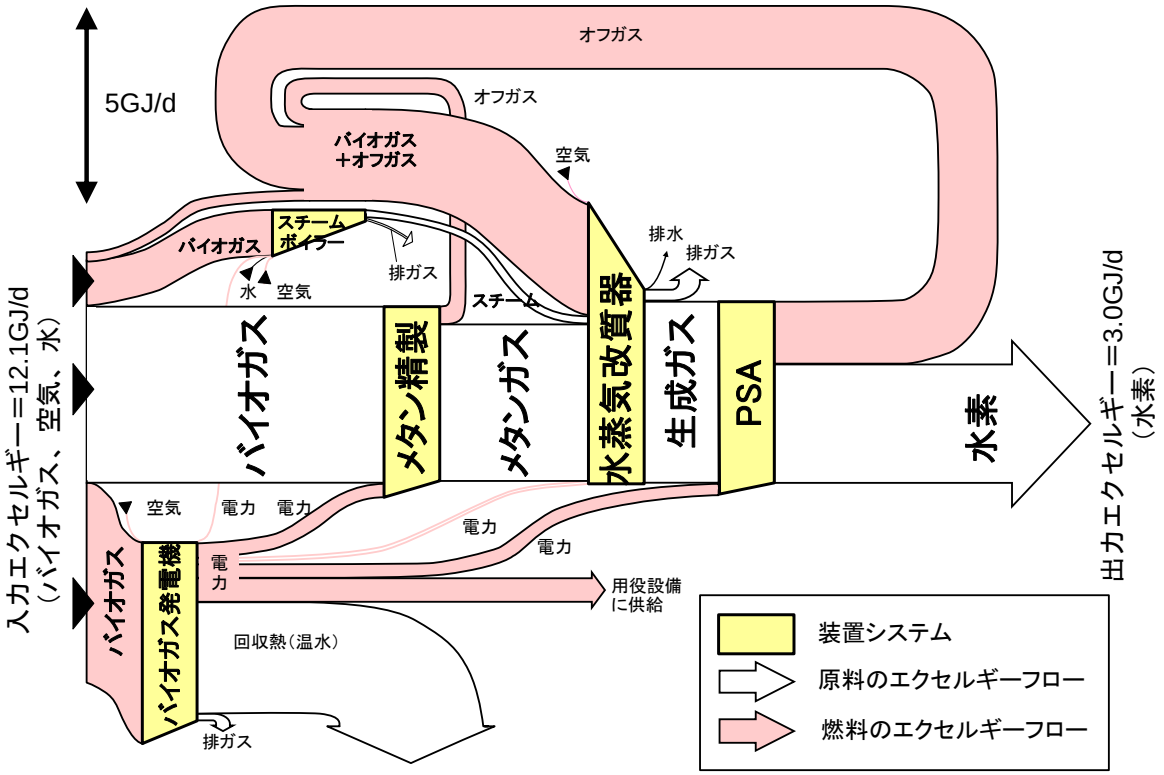


図 1.2.6　バイオガスからの水素製造におけるエクセルギーフロー

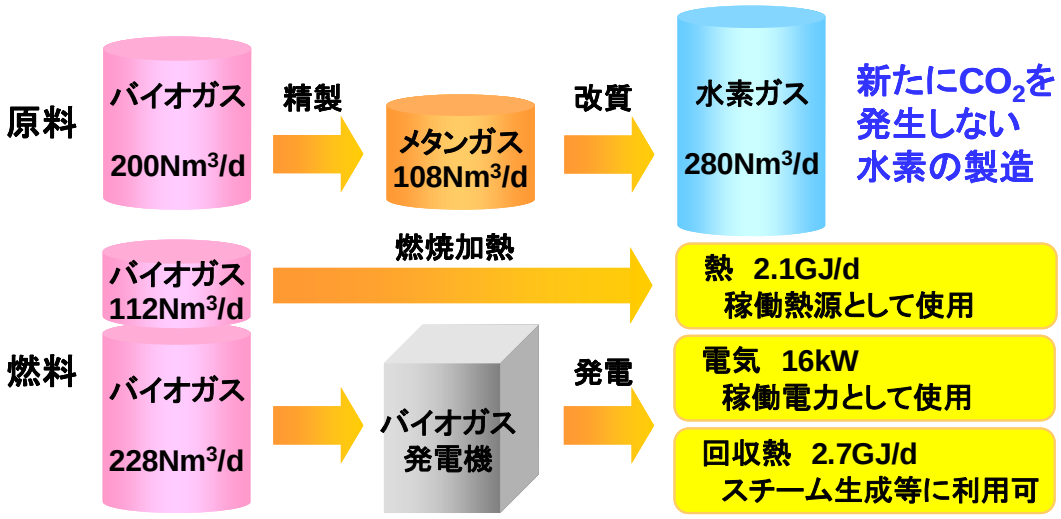


図 1.2.7　バイオガスを起源とする水素製造の模式図

(2)バイオガスから水素とベンゼンを同時製造する場合（直接改質プロセス）

ここでも、設備の稼働に必要な熱をバイオガスおよびオフガスの燃焼により供給し、必要な電力をバイオガス発電により供給するとした場合、バイオガスからの水素およびベンゼン製造におけるエンタルピーフローを図 1.2.8 に示す。ここで入力される物質がバイオガス、空気および水で、入力されるエンタルピーの合計は 15.3GJ/day である。また、出力される物質が水素とベンゼンで、出力されるエンタルピーの合計は 1.8GJ/day としたときのエンタルピー効率は約 12%となった。

直接改質プロセスにおいては直接改質器における排熱が著しく大きいことがわかる。この排熱の大部分は直接改質器の表面からの放射熱であり、その温度は設備周囲の温度まで低下したものであることから、この排熱を用いたエネルギー利用は困難である。なお、エンタルピー効率にはバイオガス発電機の回収熱の利用を考慮していないが、水蒸気改質プロセスと同様にスチームボイラーにおける原料用水の加温や各改質器などの前工程における原料ガスの予熱に使うことができれば、さらに効率を向上させることが可能である。

図 1.2.9 にはバイオガスから水素およびベンゼン製造におけるエクセルギーフローを示す。ここで入力される物質がバイオガス、空気および水で、入力されるエクセルギーの合計は 16.0GJ/day である。また、出力される物質が水素とベンゼンで、出力されるエクセルギーの合計は 3.0GJ/day としたときのエクセルギー効率は約 11%となった。エクセルギー損失は、直接改質器において著しく大きく、脱硫・脱酸素器や水蒸気改質器、スチームボイラー及びバイオガス発電機においても比較的大きいことがわかる。特に直接改質器の表面からの放射熱による損失が著しく大きいことから、断熱の強化や効率的な熱交換により入力エンタルピーを少なくする必要がある。一方、ここではバイオガス発電機の回収熱を効率に含めていないため、回収熱の利用によって余計なエネルギー投入を行わないような方策が必要である。

図 1.2.10 にバイオガスを起源とする水素およびベンゼン製造の模式図を示すが、水素を 134 m^3/day、ベンゼンを 8.4kg/day 製造するのに原料バイオガスが 200m^3/day、燃料バイオガスが燃焼加熱用に 95m^3/day、発電用に 416m^3/day の計 511m^3/day が必要であり、原料と燃料を合わせた総必要バイオガスは 711m^3/day となった。これは水素を 1m^3 製造するためには約 5.3m^3 のバイオガス、ベンゼン 1kg 当りでは 84.6 m^3 のバイオガスが必要となることを示している。

この場合、バイオガスの燃焼によって得られる熱 2.0GJ/day は稼働熱源として利用され、バイオガス発電による電気 26.6kW は稼働電力として利用されているが、バイオガス発電器からの回収熱 4.9GJ/day については、前述したようにスチームボイラーにおける原料用水の加熱などに利用可能であり、そのような設備設計を検討する必要がある。

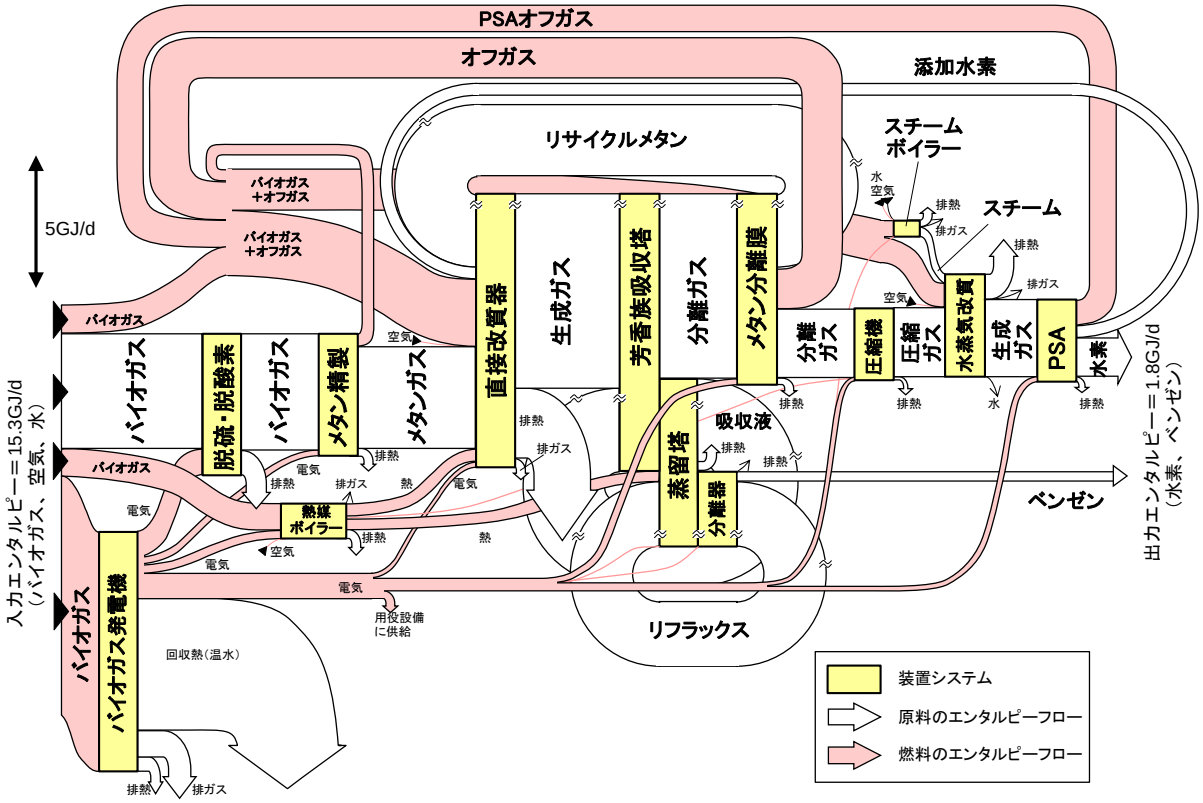


図 1.2.8　バイオガスからの水素製造におけるエンタルピーフロー

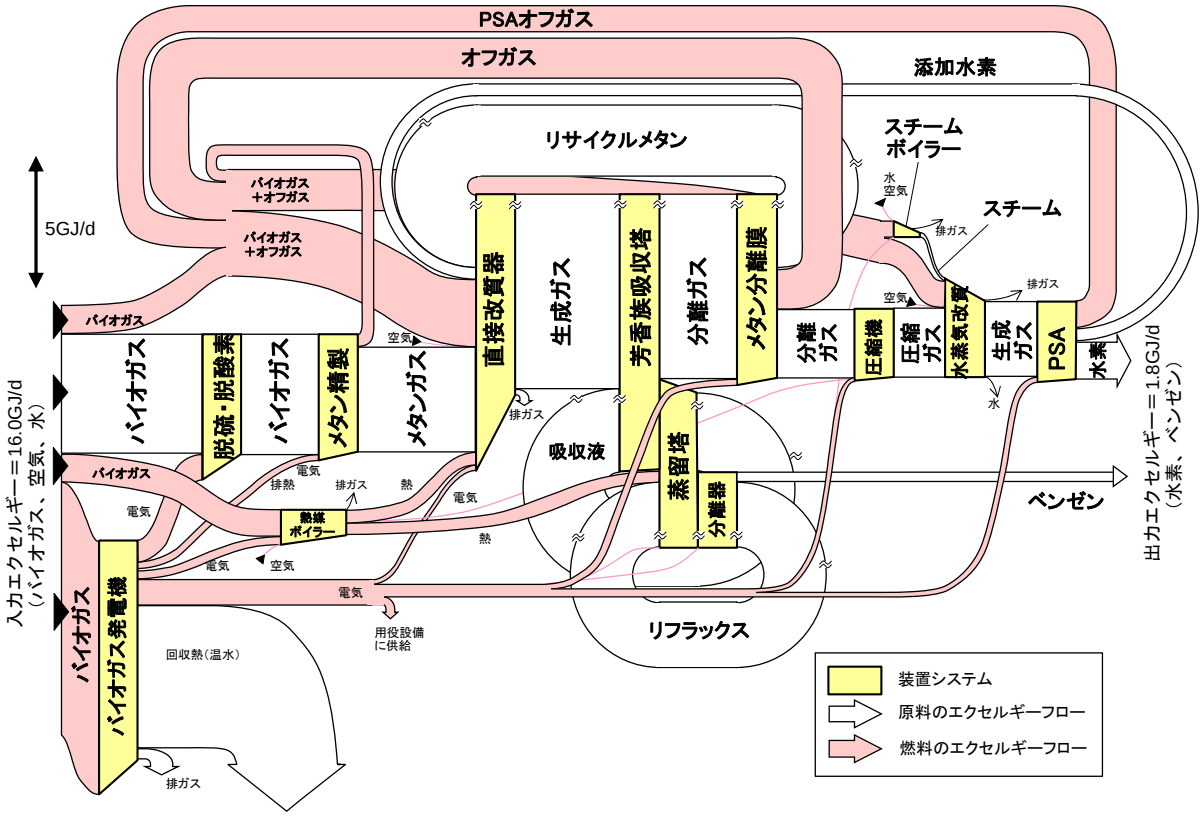


図 1.2.9　バイオガスからの水素製造におけるエクセルギーフロー

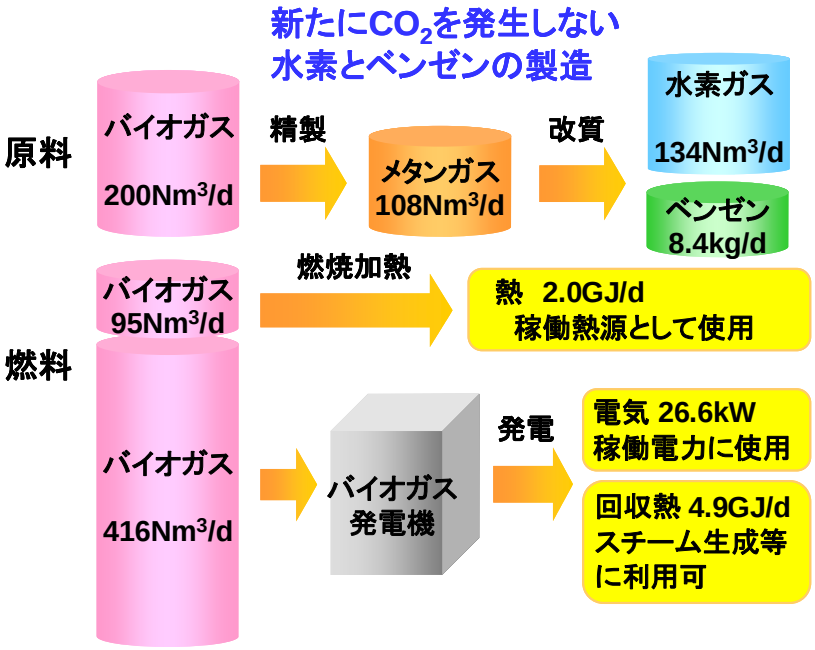


図 1.2.10　バイオガスを起源とする水素およびベンゼン製造の模式図

1.2.3. 水素貯蔵技術

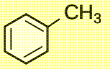
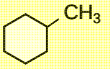
1.2.3.1. 有機ハイドライドによる水素貯蔵技術の概要

本実証研究では水素を貯蔵する方法として有機ハイドライドプロセスを用いている。この方法は触媒反応を用いた水添反応により不飽和炭化水素であるベンゼン、トルエン、ナフタレンなどの芳香族化合物に水素を付加し、飽和炭化水素である有機ハイドライド（シクロヘキサン、メチルシクロヘキサン、デカリンなど）を生成して水素を貯蔵するものである。また、その逆反応である脱水素反応により得られた水素を利用するものである[27)−30)]。

図 1.2.11 に主な有機ハイドライドの性質[31)]を示すが、本実験施設では冬季の気温が−20℃以下になること、そしてそのような寒冷地域での利用を考慮し、芳香族化合物としてトルエン（C_7H_8；以下 TOL）を、有機ハイドライドとしてメチルシクロヘキサン（C_7H_{14}；以下 MCH）を使用するトルエン（TOL）－メチルシクロヘキサン（MCH）系について試験を行った[32)−33)]。この TOL−MCH 系は常温・常圧で無色透明の液体で、−90℃以下でも固化しない。また、液体 1m³ 当りの理論容積貯蔵密度が 527m³-H_2/m³、47.7kg-H_2/m³、理論重量貯蔵密度が 6.16wt%であり、高い水素貯蔵密度を持つ。さらに、常温・常圧での貯蔵が可能で、ガソリン並みの管理水準で問題ないことから貯蔵容器の強度や密閉性を強化するために容積や重量を大きく増加する必要が無く、長期間貯蔵や輸送面でガソリンスタンドやタンクローリーといった従来タイプのインフラを使用できる利点がある。以降では、トルエン水添反応とメチルシクロヘキサン脱水素反応の特徴を記す。

図 1.2.11　主な有機ハイドライドの性質

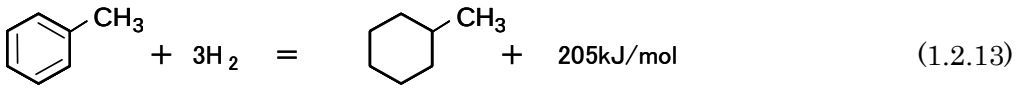
主な有機ハイドライドの性質

	トルエン−ﾒﾁﾙｼｸﾛﾍｷｻﾝ系		ベンゼン−ｼｸﾛﾍｷｻﾝ系		ナフタレン−デカリン系	
物質名	トルエン 	ﾒﾁﾙｼｸﾛﾍｷｻﾝ 	ベンゼン	ｼｸﾛﾍｷｻﾝ	ナフタレン	デカリン
化学式	C_7H_8	C_7H_{14}	C_6H_6	C_6H_{12}	$C_{10}H_8$	$C_{10}H_{18}$
分子量	92.134	98.182	78.108	84.156	128.164	138.244
室温における状態	無色の液体	無色の液体	無色の液体	無色の液体	白色の結晶	無色の液体
比重	0.867	0.770	0.874	0.778	0.975	0.896
沸点	110.6℃	100.9℃	80.1℃	80.7℃	217.9℃	195.5℃
融点	-95.0℃	-126.6℃	5.5℃	6.5℃	80.3℃	-43.2℃
重量貯蔵密度	6.16 wt%		7.19 wt%		7.29 wt%	
容積貯蔵密度	47.4 kg-H_2/m³		55.9 kg-H_2/m³		65.4 kg-H_2/m³	
	527 m³-H_2/m³		622 m³-H_2/m³		727 m³-H_2/m³	

(1)トルエン水添反応

トルエン水添反応ではトルエン 1 分子当り水素 3 分子と結合し、メチルシクロヘキサン 1 分子を生成する発熱反応である。トルエン水添反応の反応式を式(1.2.13)に、水添反応の模式図を**図 1.2.12** に示す。担体に担持した Pt（白金）などの貴金属触媒粒子の作用により水素原子の H-H 結合が切断されて水素原子(H)となり、水素原子はトルエン分子の二重結合部に付加されてメチルシクロヘキサン分子となり、生成したメチルシクロヘキサンが触媒から解離するというのが芳香族化合物の水添反応による水素貯蔵の原理である。

トルエン水添反応は発熱反応であるものの、触媒の活性を上げるために 200～250℃程度の加熱が必要である。一方、発熱反応であることから温度が上がり過ぎると反応が進まなくなり、むしろ逆反応である脱水素反応が優勢になることから、適切な抜熱による温度制御が要求される反応である。



(1.2.13)

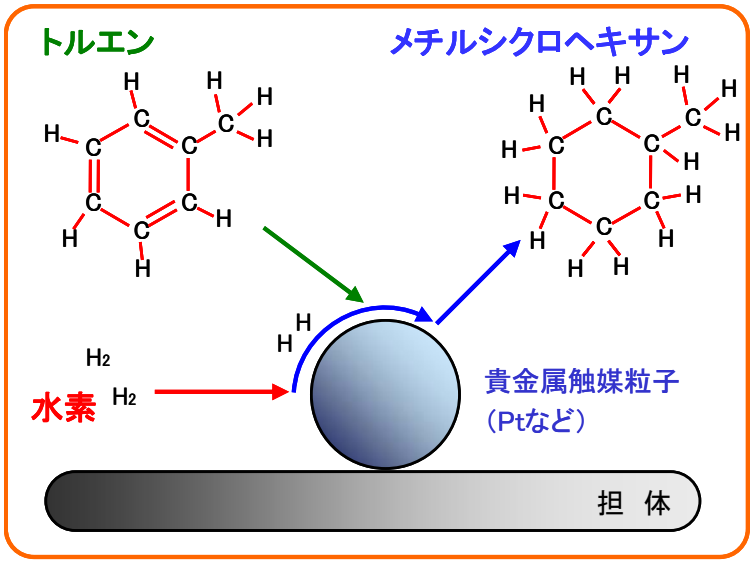


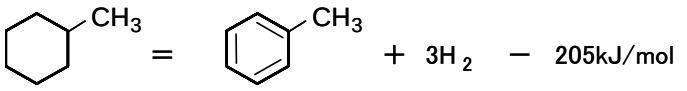
図 1.2.12　トルエン水添反応の模式図

(2)メチルシクロヘキサン脱水素反応

メチルシクロヘキサン脱水素反応ではメチルシクロヘキサン 1 分子当り、水素 3 分子とトルエン 1 分子を生成する吸熱反応である。メチルシクロヘキサン脱水素反応の反応式を式(1.2.14)に、脱水素反応の模式図を**図 1.2.13** に示す。担体に担持した Pt（白金）などの貴金属触媒粒子の作用によりメチルシクロヘキサンの C-H 結合が切断されて水素原子(H)が解離し、生成したトルエンが触媒から解離する。さらに水素原子どうしは結合して水素分子(H_2)が生成し、触媒から解離するというのが有機ハイドライドの脱水素反応による水素供給の原理である [6]。

メチルシクロヘキサン脱水素反応は吸熱反応であり、触媒温度が高いほど脱水素反応が進むので 275～325℃程度の触媒加熱によって反応が行われる。一方、触媒加熱温度が上がり過ぎると、

トルエンと水素への分解のみならず、メタンやベンゼンなどの副生成物が生じるため、ここでも適切な温度制御が要求される。



(1.2.14)

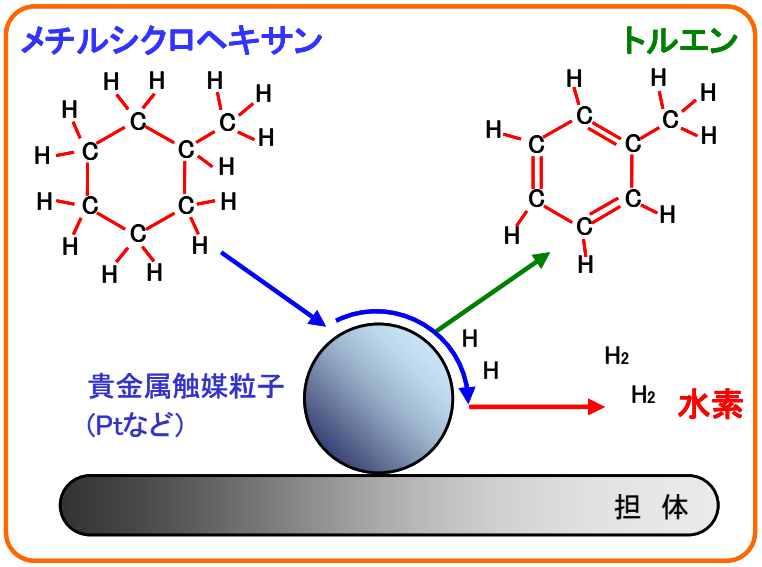


図 1.2.13　メチルシクロヘキサン脱水素反応の模式図

1.2.3.2. 水素貯蔵実証実験のプロセスフロー

図 1.2.14 にプラントⅡ（有機ハイドライド水素貯蔵・供給設備）のシステムフロー図を、図 1.2.15 にプラントⅡ（有機ハイドライド水素貯蔵・供給設備）の設備フロー図を示す。

水添反応には純度 99.95%以上の水素を用い、水添反応器においてトルエン水添反応を行い、得られたメチルシクロヘキサンは有機ハイドライドタンクに一時的に貯蔵した。また、水素供給時は有機ハイドライドタンクより脱水素反応器にメチルシクロヘキサンを供給し、脱水素反応により水素とトルエンを生成した。発生した水素中のトルエンやメチルシクロヘキサンなど不純物は気液分離器により除去されるものの、若干の不純物が含まれることから、活性炭を充填した TSA(Thermal Swing Adsorption)水素精製装置を用いて純度 99.99%の高純度水素を得た[22)−24)]。

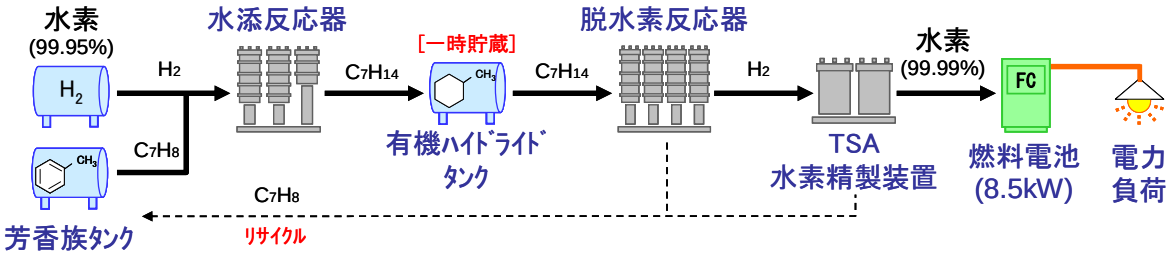


図 1.2.14　プラントⅡ（有機ハイドライド水素貯蔵・供給設備）のシステムフロー図

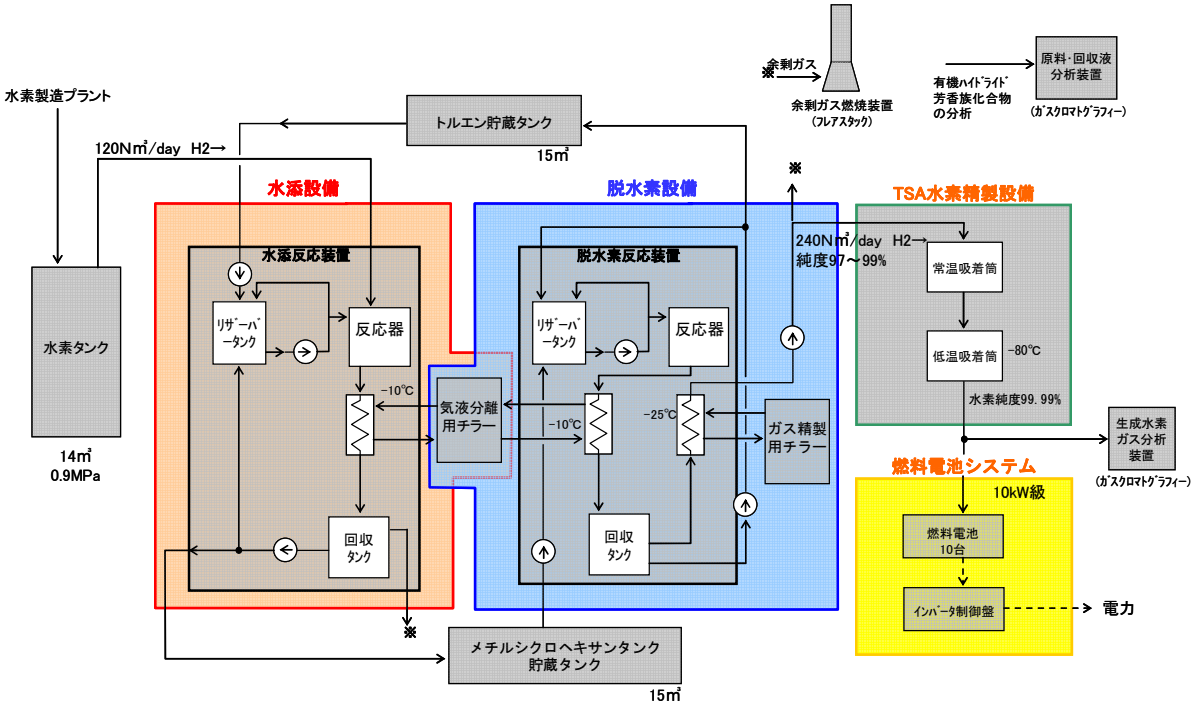


図 1.2.15　プラントⅡ（有機ハイドライド水素貯蔵・供給設備）の設備フロー図

プラントⅡは主に④トルエンの水添反応によりメチルシクロヘキサンを生成する水添設備、⑤メチルシクロヘキサンの脱水素反応により水素を発生させる脱水素設備、及び⑥水素を精製した後、燃料電池発電を行う TSA 水素精製設備・燃料電池システムに分けられる。水添設備、脱水素設備、TSA 水素精製設備・燃料電池システムの特徴を以下に記す。

(1)水添設備

水添設備は、リザーバータンク、水添反応器（Wet-dry 多相式＋固定床反応器)、冷却器、有機ハイドライド回収タンク、屋外貯留タンク等で構成される。水添設備では、屋外タンクから移送した TOL をリザーバータンクに一時貯留した後、1MPa に昇圧して水添反応器への供給ラインに導入する。

本研究で用いられている Wet-dry 多相式水添および脱水素反応では、10wt%の Pt（白金）を担持した活性炭繊布触媒を用いている [34)−35)]。**図 1.2.16** に水添反応器の模式図を、**写真 1.2.1** に本試験で用いた 10wt%Pt／活性炭繊布触媒を示す。この触媒の見た目は黒い活性炭の布であるが、活性炭上には Pt の微粒子が細かく分散している。

反応器内には 10wt%Pt／活性炭繊布触媒を表面に貼り付けたプレート式触媒加熱ヒーターが設置されており、水素圧力 0.3MPa の条件下で噴射側及び開放側の作動弁を ON/OFF することによって噴射口より水添反応器内に周期的に噴霧する。このとき反応器内は液相と気相が混在した状態である。**図 1.2.17** に原料の噴射パターンを示す。

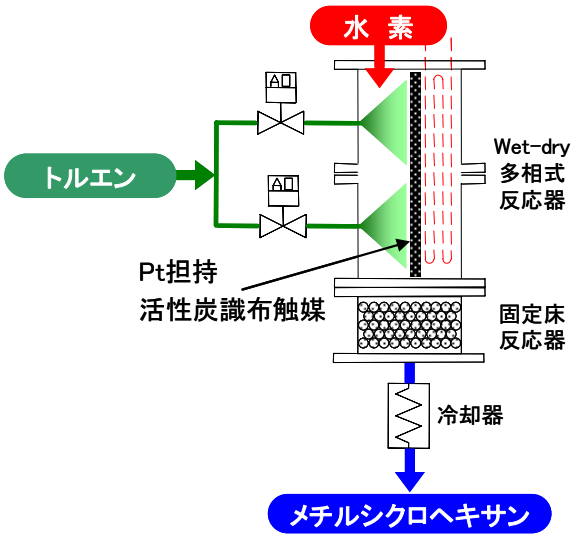


図 1.2.16　水添反応器の模式図

写真 1.2.1　10wt%Pt／活性炭繊布触媒

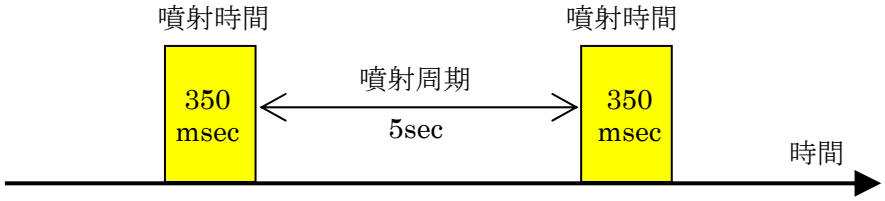


図 1.2.17　原料の噴射パターン

水素との反応により生成したMCH及び未反応TOLと水素の混合気体は冷却器を通過した際にTOLとMCHが液化されて回収タンクに貯留され、さらに屋外タンクに移送される。また、未反応水素は回収タンクよりオフガスとして排出され、フレアスタックで燃焼処理される。

(2)脱水素設備

脱水素設備は、リザーバータンク、脱水素反応器（Wet-dry多相式）、冷却器、トルエン回収タンク、屋外貯留タンクなどで構成される。脱水素設備では、屋外タンクから移送したMCHをリザーバータンクに一時貯留した後、0.7MPaに昇圧して脱水素反応器の供給ラインに導入する。

図 1.2.18 に脱水素反応器の模式図を示す。反応器内には水添反応器と同様の10wt%Pt／活性炭繊布触媒を表面に貼り付けたプレート式触媒加熱ヒーターが設置されており、噴射側及び開放側の作動弁をON/OFFすることによって噴射口より脱水素反応器内に周期的に噴霧する。このとき反応器内は液相と気相が混在した状態である。**図 1.2.19** に原料の噴射パターンを示す。

反応圧力0.1MPaで生成した水素とTOL及び未反応MCHの混合気体は冷却器を通過した際にTOLとMCHが液化されて回収タンクに貯留され、さらに屋外タンクに移送される。また、水素は回収タンクより水素ポンプで移送され、TSA水素精製装置を経由して燃料電池に送られる。

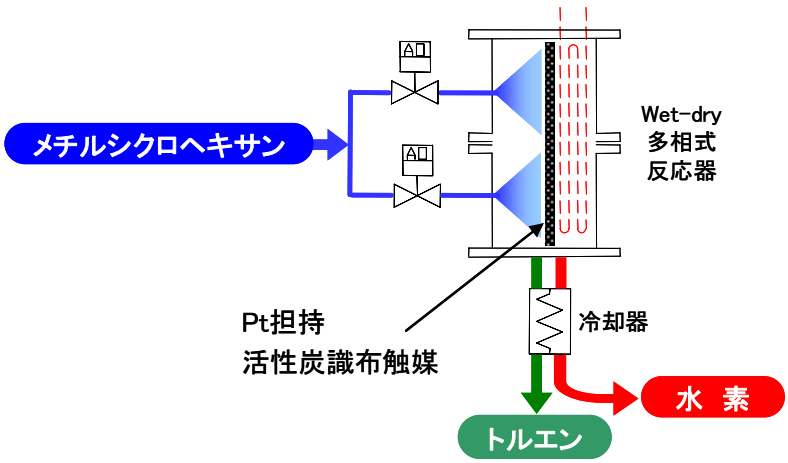


図 1.2.18　脱水素反応器の模式図

図 1.2.19　原料の噴射パターン

(3)TSA 水素精製設備・燃料電池システム

TSA 水素精製装置（TSA; Thermal Swing Adsorption）を使用するのは発生した水素に含まれる微量の TOL や MCH を除去するためであるが、これは燃料電池の要求仕様として供給水素の純度 99.99%以上とされていたことによる。TSA 水素精製装置・燃料電池システムのフロー図を**図 1. 2. 20** に示す。

脱水素装置より生成した水素には微量の TOL や MCH が含まれることからこれらを冷却器で除去し、水素ガスポンプで 0.9MPa まで昇圧した後、TSA 装置に導入する。TSA 装置では常温吸着塔と低温吸着塔で不純物を吸着除去し、燃料電池の供給ガス仕様である純度 99.99%の水素を精製する。

精製水素は 0.2～0.4MPa に減圧したうえで燃料電池に送り、発電を行う。燃料電池の発電電圧は直流 DC48V であることから、一般の電気機器が使用できるようにインバータで DC/AC 変換し、さらに変圧器で AC100V、200V に変圧した後所定の電力負荷に接続している。

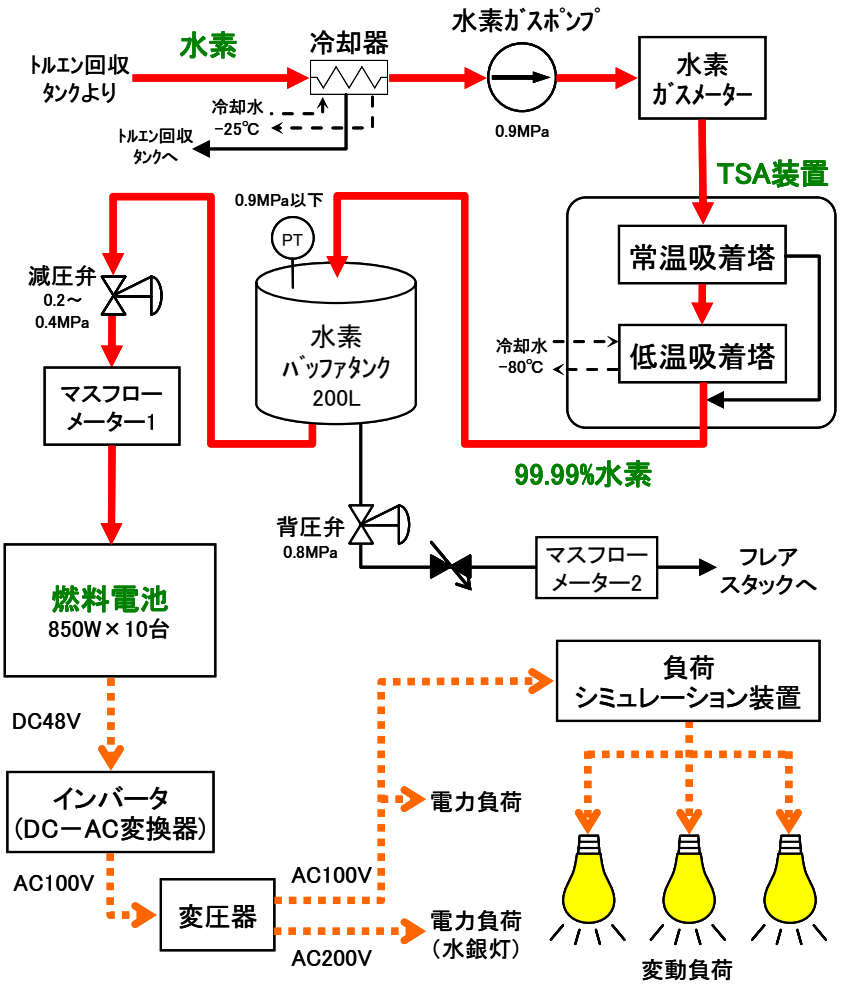


図 1. 2. 20　TSA 水素精製装置・燃料電池システムのフロー図

1.2.3.3. 有機ハイドライドを用いた水素貯蔵・供給の実証実験結果

本研究では主に 120m³/day の水素をトルエンに付加して貯蔵し、水素が貯蔵されたメチルシクロヘキサンから水素を再生成させる実証実験を行い、物質収支やエネルギー収支を把握した。以降はトルエンに水素を付加するトルエン水添プロセスと、メチルシクロヘキサンから水素を再生成させるメチルシクロヘキサン脱水素プロセス、それぞれについての実証実験の結果を述べる。

(1)トルエンに水素を付加する場合（トルエン水添プロセス）

Wet-dry 多相式反応単独によるトルエンの水添反応では、1 サイクル転化率が 50～60%であったことから同じ原料を反応器に 2 度流通させる 2 サイクル運転を実施したが、転化率は 80%に到達しなかった。そこで、水素貯蔵密度やエネルギー効率を向上させるため、Wet-dry 多相式反応と固定床反応を連続して行う方式を実施した。固定床反応器には 0.5wt%白金／アルミナ触媒を 20k g（触媒充填密度 1.61g-pt/L）充填し、ヒーター制御温度を 200℃、反応圧力を Wet-dry 多相式反応器と同じ 0.3MPa の条件で水素化試験を行った。**表 1.2.4** にトルエン水添試験の条件を示す。その結果、転化率は約 92%まで向上し、水素貯蔵密度やエネルギー効率が改善された。

表 1.2.4　トルエン水添試験条件

Wet-dry 多相反応触媒重量	315.5g（反応器 A）＋157.8g（反応器 B）
Wet-dry 多相反応触媒加熱温度	250℃
固定床反応触媒重量	10kg（反応器 A）＋10kg（反応器 B）
固定床反応触媒加熱温度	200℃
原料濃度	約 72%TOL-28%MCH
原料噴射速度（安定域）	0.31～0.35ml/g-cat./min
TOL 噴射速度（安定域）	0.22～0.26ml/g-cat./min

120m³/day の水素をトルエンに付加して貯蔵した場合の水添設備の稼働データを**表 1.2.5** に示す。各サブシステムの No.は①移送ポンプ、②水添反応器、③冷却器・リザーバータンクとした。

120m³/day の水素をトルエンに付加した場合、これらのサブシステムを経て 324L/day のメチルシクロヘキサンが生成する。測定した物質収支とエネルギー収支より、各物質のエンタルピー及びエクセルギーを、**1.2.2.3.** (1)に記述した方法で算出した。

水素をトルエンに付加する水添プロセスにおいて、移送ポンプや冷却器の稼働に必要な電気は 492MJ/day となり、水添反応器の触媒加熱ヒーターによる加熱に必要な電気を 218MJ/day 供給している。したがって、水素を 1 m³/day 貯蔵する時に必要な TOL は 2.4L で、必要な電力量は 5.9MJ となった。

表 1.2.5　水添設備の稼働データ

	機器	I/O	物質	ガス流量	ガス流量	液流量	液流量	温度	圧力	成分			モル数			total	全エンタルピー	全エクセルギー
										H2	C7H8	C7H14	H2	C7H8	C7H14			
				Nm^3/d	Nm^3/h	[L/d]	[L/h]	℃	MPa	%	%	%	mol/d	mol/d	mol/d	mol/d	MJ/d	MJ/d
①	移送ポンプ	Input	トルエン(l)			286	12	25	0.00	0	72	28	0	1938	628	2566	10444	10460
		Input	電気														49	49
		Output	トルエン(l)			286	12	25	1.00	0	72	28	0	1938	628	2566	10444	10476
②	水添反応器	Input	トルエン(l)			286	12	25	1.00	0	72	28	0	1938	628	2566	10444	10476
		Input	水素(g)	156	6.5			25	0.85	100	0	0	6960	0	0	6960	1989	1676
		Input	電気														218	218
		Output	メチルシクロヘキサン(g)	36	1.5	324	13	141	0.30	38	4	58	1606	152	2413	4172	12113	11947
③	冷却器リザーバータンク	Input	メチルシクロヘキサン(g)	36	1.5	324	13	141	0.30	38	4	58	1606	152	2413	4172	12113	11947
		Input	電気														443	443
		Output	メチルシクロヘキサン(l)			324	13	25	0.00	0	5	95	0	152	2413	2566	11614	11556
		Output	水素(g)	36	1.5			25	0.00	100	0	0	1606	0	0	1606	459	378

(2)メチルシクロヘキサンから水素を再生成させる場合（メチルシクロヘキサン脱水素プロセス）

Wet-dry 多相式反応によるメチルシクロヘキサンの脱水素反応では、1 サイクル転化率が約 74%であった。**表 1.2.6** にメチルシクロヘキサン脱水素試験の条件を示す。

表 1.2.6　メチルシクロヘキサン脱水素試験条件

Wet-dry 多相反応触媒重量	416g×反応器 4 塔
Wet-dry 多相反応触媒加熱温度	300℃
原料濃度	約 90% MCH -10% TOL
原料噴射速度（安定域）	0.030～0.113ml/g-cat./min
MCH 噴射速度（安定域）	0.028～0.102ml/g-cat./min

メチルシクロヘキサンから 120m^3/day の水素を再生成した場合の脱水素設備の稼働データを表 1.2.7 に示す。各サブシステムの No.は①移送ポンプ、②脱水素反応器、③冷却器・リザーバータンク、④冷却器、⑤圧縮機、⑥TSA 水素精製装置とした。

水素をメチルシクロヘキサンから再生成する場合、324L/day のメチルシクロヘキサンからこれらのサブシステムを経て 120m^3/day の水素と 286L/day のトルエンが生成する。なお、TSA 水素精製装置において水素を純度 99.99%まで精製すると、約 5%のロスが生じ、得られる水素量は 114m^3/day となることから、水素精製効率を考慮した上でのメチルシクロヘキサン供給バランスを考慮する必要がある。測定した物質収支とエネルギー収支より、各物質のエンタルピー及びエクセルギーを、**1.2.2.3.** (1)に記述した方法で算出した。

水素をメチルシクロヘキサンから再生成する脱水素プロセスにおいて、移送ポンプや冷却器の稼働に必要な電気は 745MJ/day となり、脱水素反応器の触媒加熱ヒーターによる加熱に必要な電気を 1411MJ/day 供給している。したがって、水素を 1 m^3/day 生成する時に必要な MCH は 2.8L で、必要な電力量は 18.8MJ となった。

表 1.2.7　脱水素設備の稼働データ

	機器	I/O	物質	ガス流量	ガス流量	液流量	液流量	温度	圧力	成分			モル数			total	全エンタルピー	全エクセルギー
										H2	C7H8	C7H14	H2	C7H8	C7H14			
				Nm^3/d	Nm^3/h	[L/d]	[L/h]	℃	MPa	%	%	%	mol/d	mol/d	mol/d	mol/d	MJ/d	MJ/d
①	移送ポンプ	Input	メチルシクロヘキサン(l)			324	13	25	0.00	0	5	95	0	152	2413	2566	11614	11556
		Input	電気														89	89
		Output	メチルシクロヘキサン(l)			324	13	25	0.70	0	5	95	0	152	2413	2566	11614	11569
②	脱水素反応器	Input	メチルシクロヘキサン(l)			324	13	25	0.70	0	5	95	0	152	2413	2566	11614	11569
		Input	電気														1411	1411
		Output	トルエン・水素(g)	120	5.0	286	12	141	0.10	68	24	8	5358	1938	627	7923	12029	11730
③	冷却器 リザーバータンク	Input	トルエン・水素(g)	120	5.0	286	12	141	0.10	68	24	8	5358	1938	627	7923	12029	11730
		Input	電気														347	347
		Output	トルエン(l)			286	12	25	0.00	0	76	24	0	1938	627	2566	10443	10460
		Output	水素(g)	120	5.0			25	0.10	100	0	0	5358	0	0	5358	1532	1269
④	冷却器	Input	水素(g)	120	5.0			25	0.10	100	0	0	5358	0	0	5358	1532	1269
		Input	電気														112	112
		Output	水素(g)	120	5.0			−25	0.10	100	0	0	5358	0	0	5358	1524	1270
⑤	圧縮機	Input	水素(g)	120	5.0			−25	0.10	100	0	0	5358	0	0	5358	1524	1270
		Input	電気														89	89
		Output	水素(g)	120	5.0			−25	0.90	100	0	0	5358	0	0	5358	1524	1291
⑥	TSA	Input	水素(g)	120	5.0			−25	0.90	100	0	0	5358	0	0	5358	1524	1291
		Input	電気														108	108
		Output	水素(g)	114	4.8			25	0.90	100	0	0	5090	0	0	5090	1455	1226
		Output	オフガス	6	0.3			25	0.10	100	0	0	268	0	0	268	77	63

1.2.3.4. 水素貯蔵プロセスの評価

(1)トルエンに水素を付加する場合（トルエン水添プロセス）

図 1.2.21 にトルエン水添設備のエンタルピーフローを示す。ここで入力される物質およびエネルギーが水素、トルエン、電気で、入力されるエンタルピーの合計は 13.1GJ/day である。また、出力される物質がメチルシクロヘキサン、オフガスで、オフガスの主成分は水素なのでリサイクルできるとしたときの出力されるエンタルピーの合計は 12.1GJ/day となり、エンタルピー効率は約 92%となった。

トルエン水添プロセスにおいては、水添反応器と冷却器・リザーバータンクにおける排熱が大きいことがわかる。しかしながら、いずれも反応器内の抜熱や生成物の冷却のために放出されるべき排熱であることから、他の高温排熱を用いた原料トルエンの余熱など入力するエネルギーを小さくするための方策が必要である。

図 1.2.22 にはトルエン水添設備のエクセルギーフローを示す。ここで入力される物質およびエネルギーが水素、トルエン、電気で、入力されるエクセルギーの合計は 12.8GJ/day である。また、出力される物質がメチルシクロヘキサン、オフガスで、出力されるエンタルピーの合計は 11.9GJ/day となり、エンタルピー効率は約 93%となった。

トルエン水添プロセスにおいては、水添反応器と冷却器・リザーバータンクにおけるエクセルギー損失が著しく大きい。冷却器・リザーバータンクにおける損失は冷却水により回収された熱がほとんどであるが、脱水素反応器における損失は反応器表面からの放射熱によることから、損失を低減する対策としては断熱を強化することが上げられる。しかしながら、水添反応温度が 250℃、沸点が 110.6℃と比較的低温であることから、バイオガス発電機の回収熱などを用いて原料 TOL を沸点直下まで余熱するといった対策が必要であることが示唆された。

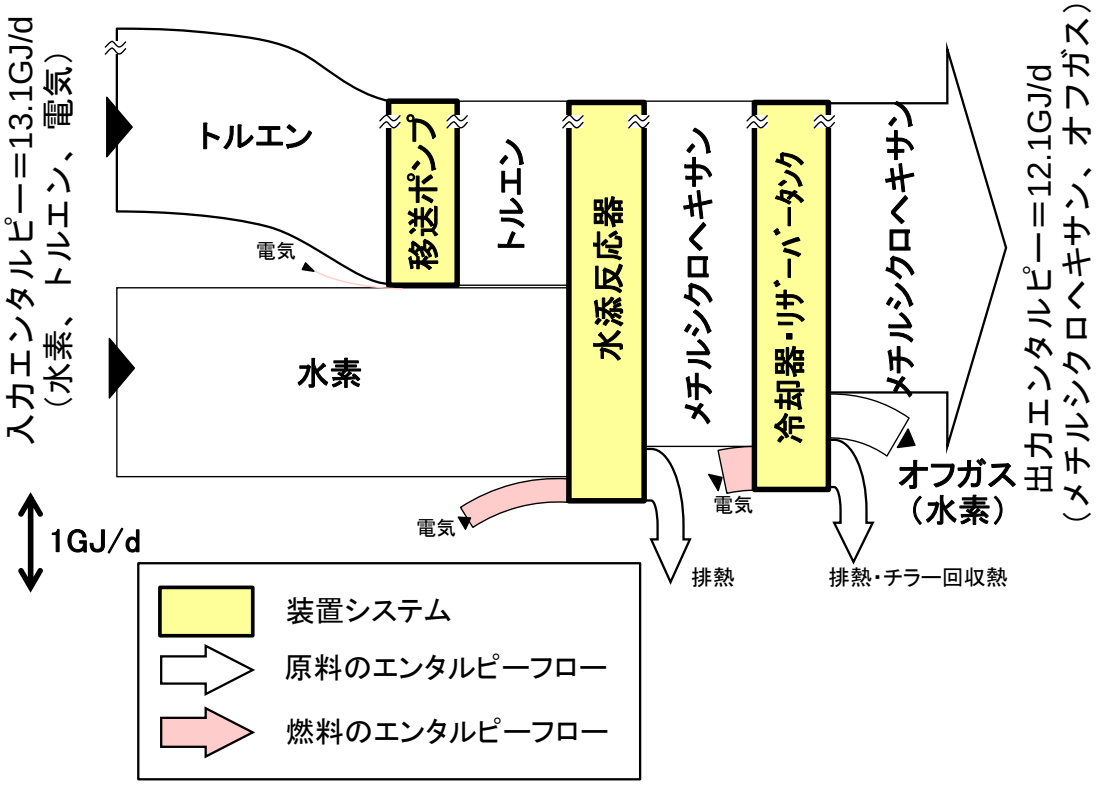


図 1.2.21　トルエン水添設備のエンタルピーフロー

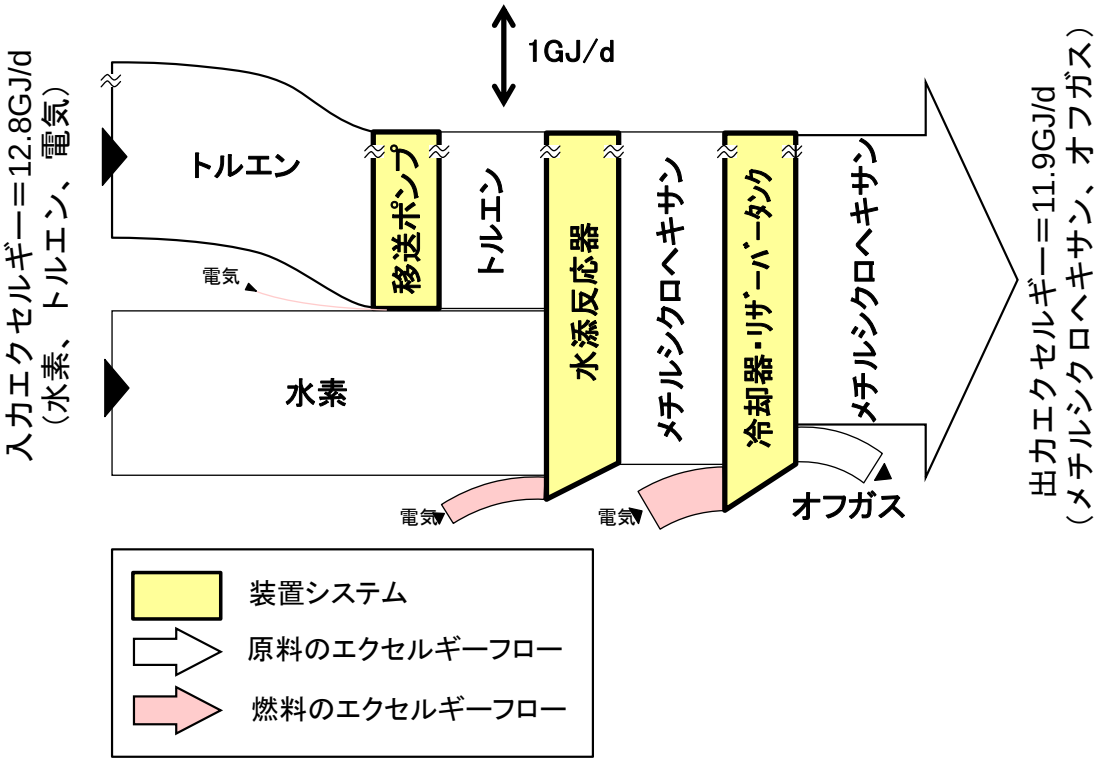


図 1.2.22　トルエン水添設備のエクセルギーフロー

(2)メチルシクロヘキサンから水素を再生成させる場合（メチルシクロヘキサン脱水素プロセス）

図 1.2.23 にメチルシクロヘキサン脱水素設備のエンタルピーフローを示す。ここで入力される物質およびエネルギーがメチルシクロヘキサン、電気で、入力されるエンタルピーの合計は 13.8GJ/day である。また、出力される物質が水素、トルエン、オフガスで、出力されるエンタルピーの合計は 12.0GJ/day となり、エンタルピー効率は約 87%となった。

メチルシクロヘキサン脱水素においては、脱水素反応器における排熱が著しく大きく、冷却器・リザーバータンクにおける排熱も大きいことがわかる。しかしながら、冷却器・リザーバータンクでは生成物の冷却のために放出されるべき排熱であり、脱水素反応器における排熱を小さくするための方策が必要である。

図 1.2.24 にはメチルシクロヘキサン脱水素設備のエクセルギーフローを示す。ここで入力される物質およびエネルギーがメチルシクロヘキサン、電気で、入力されるエクセルギーの合計は 13.7GJ/day である。また、出力される物質が水素、トルエン、オフガスで、出力されるエクセルギーの合計は 11.7GJ/day となり、エンタルピー効率は約 85%となった。

メチルシクロヘキサン脱水素プロセスにおいては、脱水素反応器におけるエクセルギー損失が著しく大きく、冷却器・リザーバータンクにおける損失も大きい。冷却器・リザーバータンクにおける損失は冷却水により回収された熱がほとんどであるが、脱水素反応器における損失は反応器表面からの放射熱によることから、損失を低減する対策としては断熱を強化することが上げられる。しかしながら、脱水素反応温度が 300℃、沸点が 100.9℃と比較的低温であることから、バイオガス発電機の回収熱などを用いて原料メチルシクロヘキサンを沸点直下まで余熱するといった対策が必要であることが示唆された。

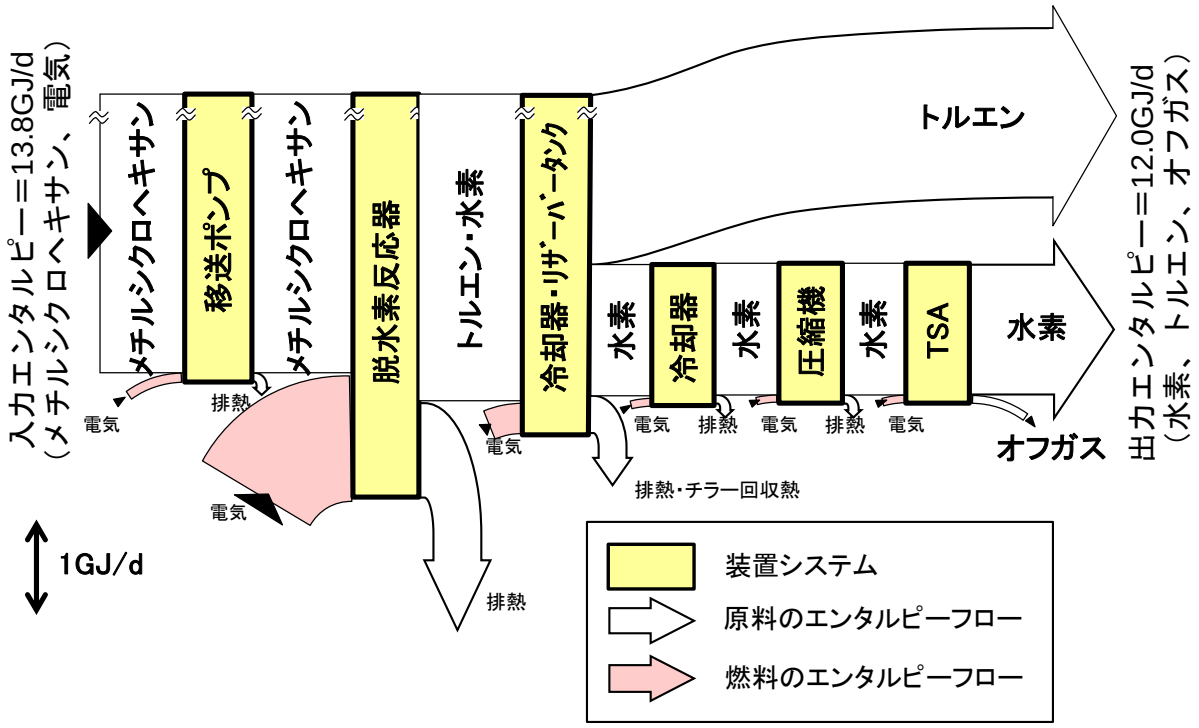


図 1.2.23　メチルシクロヘキサン脱水素設備のエンタルピーフロー

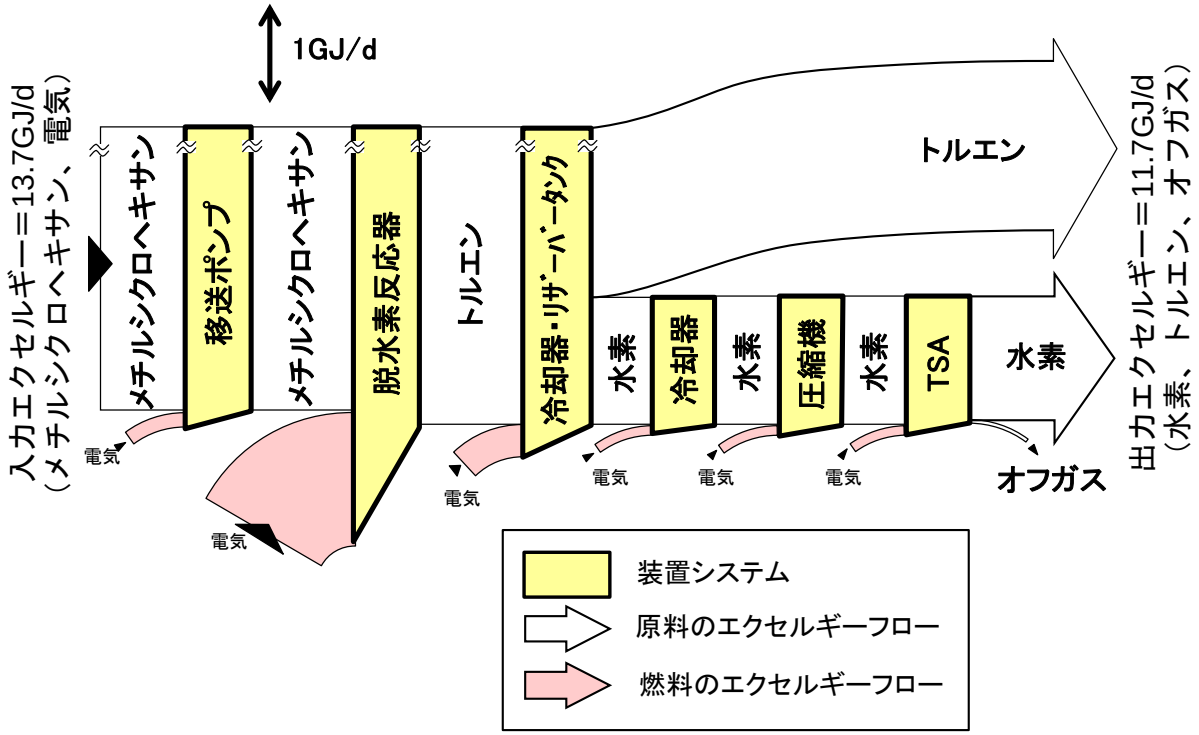


図 1.2.24　メチルシクロヘキサン脱水素設備のエクセルギーフロー

1.2.4. まとめ

本研究ではバイオガスから水蒸気改質反応や直接改質反応を用いて水素、あるいは水素とベンゼンを製造する実証実験設備を用いて稼働データを取得し、物質収支などの水素製造特性並びにエネルギー効率を把握した。また、有機ハイドライド法の一つであるトルエンの水添反応、およびメチルシクロヘキサンの脱水素反応を利用して水素を貯蔵する実証実験設備を用いて稼働データを取得し、物質収支などの水素貯蔵特性並びにエネルギー効率を把握した。

積雪寒冷地の酪農村における水素・燃料電池による効率的なエネルギー供給と社会基盤整備を行ううえで、地域で水素を生産し、貯蔵・運搬利用するための水素製造・貯蔵プロセスは重要な課題となっている。本研究は実証実験設備において水素製造・貯蔵プロセスの効率化を図るうえでの可能性を見出したので本報告をもって水素製造・貯蔵プロセスの発展の一助としたい。本研究の成果を以下に纏めて記す。

1)バイオガスから水素のみを製造する水蒸気改質プロセスでは、バイオガス 200m^3/day から 280m^3/day の水素を製造し、このときのエンタルピー効率は約 26%、エクセルギー効率は約 25%となった。特に水蒸気改質器の表面からの放射熱によるエクセルギー損失が大きく、断熱強化による放射熱低減の必要がある。また、エクセルギー損失が大きかったスチームボイラーについてはバイオガス発電の回収熱を利用するなどして、余計なエネルギー投入を行わない方策が必要である。

2)バイオガスから水素とベンゼンを製造する直接改質プロセスでは、バイオガス 200m^3/day から 134m^3/day の水素と 8.4L/day のベンゼンを製造し、このときのエンタルピー効率は約 12%、エクセルギー効率は約 11%となった。特に直接改質器の表面からの放射熱によるエクセルギー損失が大きく、断熱強化の必要がある。また、回収された熱を利用するなどして、余計なエネルギー投入を行わない事により効率を上げるといった方策が必要である。

3)トルエンに水素を付加するトルエン水添プロセスでは、エンタルピー効率は約 92%、エクセルギー効率は約 93%となった。水添反応器や冷却器では抜熱による温度制御が必要であることから、バイオガス発電機の回収熱などを用いて原料トルエンを沸点直下まで余熱するといった対策が必要であることが示唆された。

4)メチルシクロヘキサンから水素を再生成させるメチルシクロヘキサンの脱水素プロセスでは、エンタルピー効率は約 87%、エクセルギー効率は約 85%となった。脱水素反応器表面からの放射熱に起因するエクセルギー損失が著しく大きく、断熱強化が必要である。また、バイオガス発電機の回収熱などを用いて原料メチルシクロヘキサンを沸点直下まで余熱するといった対策が必要であることが示唆された。

参考文献

1）酪農村における新しいエネルギー開発(1)－乳牛ふん尿起源のバイオガスから水素エネルギーを製造・貯蔵する施設の建設計画－,大久保天, 主藤祐功, 秀島好昭, 泉亙, 第 52 回農業土木学会北海道支部研究発表会, 釧路(2003)

2）積雪寒冷地の酪農村における水素エネルギー実験施設の建設計画, 大久保天, 主藤祐功, 秀島好昭, 泉亙, 佐々木憲弘, 山本章博, 第 19 回寒地技術シンポジウム, 寒地技術論文・報告集 vol.19, P.661-664(2003)

3）積雪寒冷地における水素エネルギー生成・貯蔵施設の建設計画－酪農村における新しいエネルギー開発－,大久保天, 主藤祐功, 秀島好昭, 第 47 回北海道開発局技術研究発表会, 札幌(2004)

4）バイオガスを利用した地域エネルギー自立型実証試験概要, 主藤祐功, 秀島好昭, 大久保天, 中村諭, 伊藤秀明, 垣原肇, 市川勝, 小島綾一, 第 13 回日本エネルギー学会大会, 東京(2004)

5）乳牛糞尿起源バイオガスからの水素エネルギー生成と利用, , 大久保天, 秀島好昭, 主藤祐功, 平成 16 年度農業土木学会大会講演会, 札幌(2004)

6）酪農村における新しいエネルギー開発(2)－乳牛糞尿起源のバイオガスから水素エネルギーを製造・貯蔵する実証実験の概要－, 大久保天, 秀島好昭, 主藤祐功, 第 53 回農業土木学会北海道支部研究発表会, 帯広(2004)

7）積雪寒冷地の酪農村に設けた水素エネルギー実験施設の稼働概要, 主藤祐功, 大久保天, 秀島好昭, 第 20 回寒地技術シンポジウム, 寒地技術論文・報告集 vol.20, P.714-718 (2004)

8）積雪寒冷地における水素エネルギー生成・貯蔵に関する実証実験の概要－酪農村における新しいエネルギー開発をめざして－,大久保天, 主藤祐功, 秀島好昭, 第 48 回北海道開発局技術研究発表会, 札幌(2005)

9）エネルギー地域自立型実証実験施設の稼動概要, 大久保天, 主藤祐功, 秀島好昭, 北海道開発土木研究所月報 No.623, P.42-49 (2005)

10)Dehydrogenation and aromatization of methane under non-oxidizing conditions. Wang L, Tao L, Xie M, Xu G, Huang J, Xu Y. Catal Lett;21:35-41(1993)

11) Methane activation without using oxidants over Mo/ZSM-5 zeolite catalysts. Xu Y, Liu S, Wang L, Xie M, Guo X. Catal Lett;30:135-49(1995)

12) Bifunctional catalysis of Mo/HZSM-5 in the dehydroaromatization of methane to benzene and naphthalene XAFS/TG/DTA/ MASS/FTIR characterization and supporting effects. Liu S, Wang L, Ohnishi R, Ichikawa M. J Catal;181(1):175-88(1999)

13) Catalytic dehydrocondensation of methane toward benzene and naphthalene on transition metal supported zeolite catalysts templating role of zeolite micropores and characterization of active metallic sites. Shu Y, Ichikawa M. Catal Today;71:55-67(2001)

14)メタン直接改質法による水素等の製造技術開発／地域エネルギー自立型実証試験のための触媒性能評価, 中村諭, 伊藤秀明, 垣原肇, 秀島好昭, 大久保天, 主藤祐功, 市川勝, 小島綾一, 菊池聡, 第 13 回日本エネルギー学会大会, 東京(2004)

15)バイオガスからグリーン石油と水素を作る触媒技術の展開, 市川勝, 資源環境対策 Vol.41、

No.6, P.86-90 (2005)
16)バイオガスを利用したエネルギー地域自立型実証研究(3) メタン直接改質法による水素等の製造実証試験、主藤祐功、大久保天、秀島好昭、中村諭、垣原肇、佐藤幸雄、市川勝、小島綾一、第 14 回日本エネルギー学会大会講演要旨集、P.118-119 (2005)
17) Unique promotion effect of CO and CO2 on the catalytic stability for benzene and naphthalene production from methane on Mo/HZSM-5 catalysts. Liu S, Dong Q, Ohnishi R, Ichikawa M. Chem Commun;1217-8(1998)
18) Catalytic dehydrocondensation of methane with CO and CO2 toward benzene and naphthalene on Mo/HZSM-5 and Fe/Co -Modified Mo/HZSM-5. Ohnishi R, Liu S, Dong Q, Wang L, Ichikawa M. J Catal;182(1):92-103(1999)
19) The effects of CO2, CO and H2 co-reactants on methane reactions catalyzed by Mo/H-ZSM-5. Liu Z, Nutt M A, Iglesia E. Catal Lett;81:271-9(2002)
20) Highly stable performance of methane dehydro- aromatization on Mo/HZSM-5 catalyst with a small amount of H2 addition into methane feed. Ma H, Ohnishi R, Ichikawa M. Catal Lett;89(1-2):143-6(2003)
21)メタン直接改質法による水素等の製造技術開発(50)／実証装置による連続運転試験結果と触媒性能評価, 中村諭, 伊藤秀明, 市川勝, 大西隆一郎, 池田恵一, 八木健司, 種田大介, 第 12 回日本エネルギー学会大会, 東京(2003)
22)積雪寒冷地の酪農村におけるバイオガスからの水素等製造実証研究, 大久保天, 主藤祐功, 秀島好昭,第 21 回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集 vol.21, 835-840, (2005)
23)バイオガスからの水素製造及び水素貯蔵技術の実証試験と地域におけるエネルギー利用, 大久保天, 主藤祐功, 秀島好昭, 第 22 回寒地技術シンポジウム 寒地技術論文・報告集 vol.22, 267-272, (2006)
24)地球温暖化対策に資するエネルギー地域自立型実証研究最終年次報告書, (独)北海道開発土木研究所, 平成 18 年 3 月
25)“エクセルギー工学－理論と実際－”, 吉田邦夫編, 共立出版, p.95-102 (1999)
26)物質・エネルギー再生の科学と工学, 葛西 栄輝, 秋山 友宏, 共立出版, p.43-51 (2006)
27)地域特性を活かしたエネルギー活用社会形成調査報告書, 北海道開発局開発監理部開発調査課, 平成 16 年 3 月
28)有機ハイドライドを利用した水素供給装置の実証実験, 歌川忠, 田邉克守, 名取祐二, 須貝保徳, 仮屋伸子, 市川勝, 第 13 回日本エネルギー学会大会講演要旨集, 242-243, (2004)
29)有機ケミカルハイドライド法脱水素触媒の開発－常温・常圧条件での水素貯蔵・輸送技術の確立を目指して－, 岡田佳巳, 斉藤政志, 真壁利治, 西島裕明, 触媒学会第 94 回触媒討論会, (2004)
30)メチルシクロヘキサン・デカリン系有機ハイドライドによる水素貯蔵と過熱液膜型脱水素触媒反応方式による水素供給, 程島真哉, 八ッ橋広光, 庄野厚, 斉藤泰和, 触媒学会第 96 回触媒討論会, (2005)
31)水素エネルギーの利用概要と地域での取り組み, 主藤祐功, 大久保天, 秀島好昭, 北海道開発

土木研究所月報 No.608, 41-45, (2004)
32)有機ハイドライドを用いた水素貯蔵・供給実証試験／バイオガスを利用したエネルギー地域自立型実証研究(4) , 主藤祐功, 大久保天, 秀島好昭, 櫻元正, 黒澤誠, 田邉克守, 市川勝, 第 14 回日本エネルギー学会大会, 大阪(2005)
33)有機ハイドライドを用いた水素貯蔵効率の向上に関する研究、主藤祐功、大久保天、秀島好昭、須貝保徳、櫻元正、黒澤誠、田邉克守、北海道開発土木研究所月報 No.634 (2006)
34) Efficient evolution of hydrogen from liquid cyclo -alkanes over Pt-containing catalysts supported on active carbons under “wet-dry multiphase conditions”, Kariya N, Fukuoka A, Ichikawa M, Applied Catalysis A: General, 233, 91-102, (2002)
35) Efficient hydrogen production using cyclohexane and decalin by pulse-spray mode reactor with Pt catalysts, Kariya N, Fukuoka A, Utagawa T, Sakuramoto M, Goto Y, Ichikawa M, Applied Catalysis A: General, 247, 247-59, (2003)

1.3. 地域におけるバイオガスからの水素供給とその利用

現在、都市ガス改質型の燃料電池システムの商用化が進められているところである。また、燃料電池の普及とエネルギー供給源の多様化が進む将来においては、農村地域においても燃料電池システムの利用が検討されていくものと考えられる。その際には農村地域における水素エネルギー源として考えられるものは商業的に供給されている水素ガスのほかに、その地域の地場で生産可能なバイオマスや太陽光、風力、小水力発電等の再生可能エネルギーを利用した水素供給システムと考えられる。中でも酪農村地域では家畜ふん尿から発生する豊富なバイオガスを中心としたエネルギーシステムが期待される。

本節では実証プラントにおける実験結果を基礎に、地域における水素エネルギー利用について検討し、定量的な評価を行った。最初に実験データをもとに試算した実用規模プラントシステムからの供給可能な水素量について述べ、次にその結果に基づいて地域における水素エネルギー利用の環境性及び経済性についての検討を行った。

1.3.1. 実用規模のプラントから供給可能な水素量の試算

実際を想定したバイオガスから水素を製造するプラントは、バイオガスの生産から水素製造・貯蔵工程まで一貫したシステムになるものと考えられる。本報ではこのようなプラントを以降 BTH（Biogas To Hydrogen）プラントと呼ぶ。これまでエネルギー地域自立型実証研究施設（水素プラント）の運転実験 [1)−4)]においても隣接の別海資源循環試験施設（共同利用型バイオガスプラント）から原料となるバイオガスとガスエンジン発電による電力を供給して一部連系した運転（図 1.3.1）を行ってきたが、両プラント規模が異なること、試験設備として様々な条件に対応できるように内部の装置は特徴のある設計となっていることから、両者の連系が機能的に合致するものではなかった。そのため、本節では別海資源循環試験施設とエネルギー地域自立型実証研究施設から実用稼動に必要な設備のみを抽出した BTH プラントシステムを再構成し、これまで両実証プラントにおいて取得してきた物質収支・エネルギー収支データを基礎として、BTH プラントから供給可能な水素量をシミュレーションにより試算した。

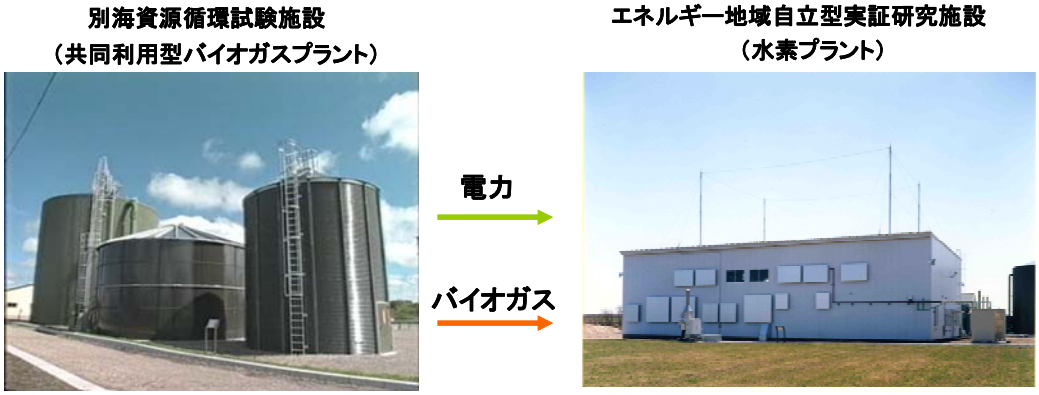


図 1.3.1　実証プラントにおけるバイオガスから水素製造実験

1.3.1.1. BTH プラントの物質量およびエネルギー消費量の推定

本報において想定する BTH プラントは乳牛ふん尿とその他有機性廃棄物（副資材）を受け入れた共発酵を行うものとし、メタンから水素への改質は実績のある水蒸気改質を用いて行うこととした。また、水素貯蔵は燃料電池自動車用の水素スタンド利用の場合をも想定して 40MPa 水素シリンダーへの充填とした。

(1) 物質量の推定

別海資源循環試験施設とエネルギー地域自立型実証研究施設の実績および実験データより、物質量のシミュレーション条件として、次の設定を行う。

① バイオガスについて

・乳牛 1 頭あたりのふん尿量を 65kg とし、乳牛ふん尿はスラリーのみを投入する。

・バイオガス発生量は乳牛ふん尿 1t あたり 30m³、副資材 1t あたり 150m³ とする [5]。

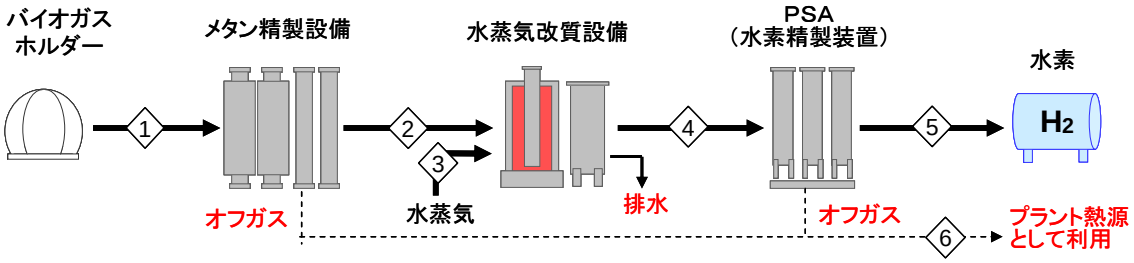
② 水素製造について

図 1.3.2 に示す実証プラントの運転実験により取得した物質収支データを基礎として、水素製造プロセスにおける各物質量は改質バイオガス量（No.1）に比例するとした。すなわち、

・メタン精製量は改質バイオガス量の 0.54 倍とする。

・水素製造量は改質バイオガス量の 1.4 倍とする。

・オフガス量は改質バイオガス量の 1.06 倍とし、各成分割合は一定とする。



No.		1	2	3	4	5	6
ガス流量(m^3/day)		200	108	324	492	280	212
成分 (Vol%)	CH_4	60	100		2.2		7.5
	CO_2	40			18.8		56.7
	CO				1.0		1.6
	H_2				78.0	100	34.2
	H_2O			100			

図 1.3.2　実証プラントにおける運転実験の物質収支

(2) エネルギー消費量の推定

現状の実証プラントは様々な条件における実験やそのデータ計測に対応できるように設計されている。そのため、必ずしもプラント規模の実状に見合ったエネルギー消費量となっていない。ここでは実証プラントにおける各設備から実用プラントに必要な装置のみを抽出し、その各装置

の電力計測値や物質収支データ等をもとに、プラント設備の任意の規模におけるエネルギー消費量を推定した。

i）バイオガスプラント

バイオガスプラントのエネルギー消費量は、別海資源循環試験施設（乳牛ふん尿処理頭数 1,000 頭規模バイオガスプラント）およびその運転データをもとに、次の設定において試算した。

① 投入する乳牛ふん尿は敷わら等の固形分を含まないとし、固液分離・堆肥化設備は除外する。

② 研究管理施設など実用稼動に不要な試験設備は除外する。

以上の設定条件からバイオガスプラントの主なエネルギー消費設備は発酵槽、殺菌槽及びその他共通設備となる。これまでのプラント運転データより、この場合の電力消費量及び熱消費量は乳牛ふん尿投入量 41t/day 時において、

電力消費量：1,132 kWh/day 、熱消費量：8,654 MJ/day （基礎資料参照）

である。各スケールアップした電力消費量及び熱消費量は以上の値を基準として、任意の乳牛ふん尿投入量に比例するものとして試算した（**図 1.3.3**、**図 1.3.4**）。

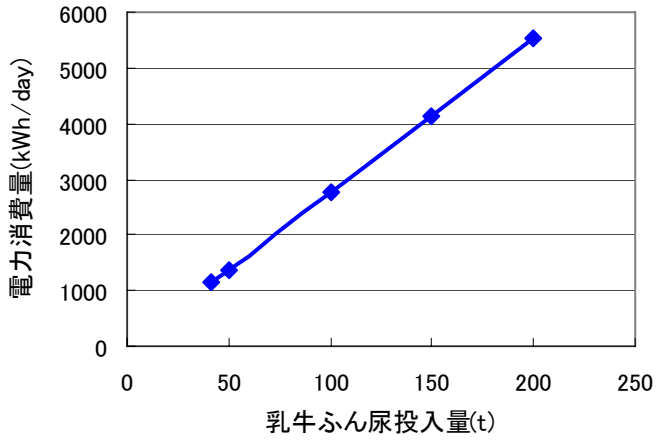


図 1.3.3 乳牛ふん尿投入量に対するバイオガスプラントの電力消費量

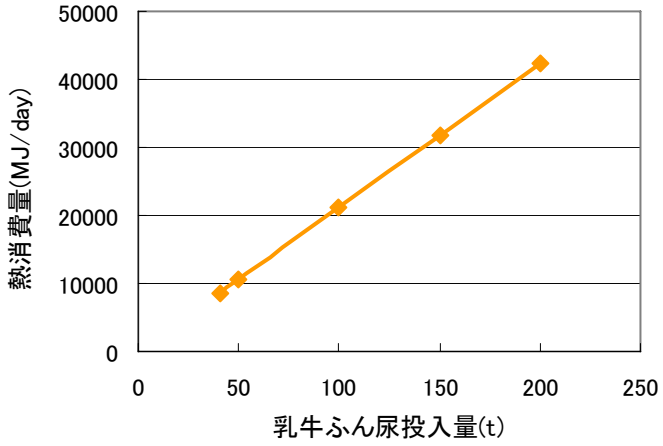


図 1.3.4 乳牛ふん尿投入量に対するバイオガスプラントの熱消費量

ii）水素製造設備

バイオガスプラント設備との一体化を想定して、水素製造にかかる各設備をエネルギー地域自立型実証研究施設より次に示すように抽出し、構成した。

① バイオガスホルダー、脱硫装置はバイオガスプラント設備と共有するとして除外した。

② メタン発酵槽での生物脱硫を行わないとして、脱酸素装置を除外した。

③ メタンからの水素製造は水蒸気改質で行うとした。

④ 水蒸気発生装置、水蒸気改質反応器はオフガスとバイオガスを燃料とするガス燃焼式とした。

以上に基づき再構成した水素製造設備において、プラント運転実験で得られた物質収支・エネルギー収支データをもとに、任意の設備規模に応じたエネルギー消費量を試算した（基礎資料参照）。**図 1.3.5** と**図 1.3.6** に水素製造設備への改質バイオガス導入量に対する水素製造設備の電力消費量と熱消費量をそれぞれ示す。

コンプレッサ等の電気機器による電力消費量は、改質バイオガス導入量に比例するものとした。また、水蒸気改質炉においては反応炉のスケールアップによる放熱・損失熱量の低減効果を考慮しているので、熱効率は改質バイオガス導入量の増大に伴い向上する。

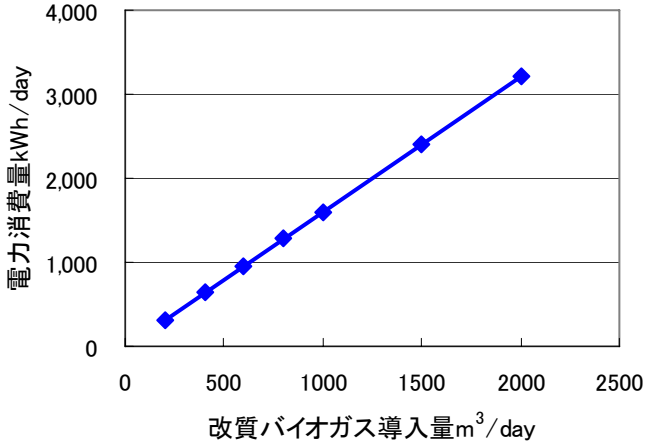


図 1.3.5　改質バイオガス導入量に対する水素製造設備の電力消費量

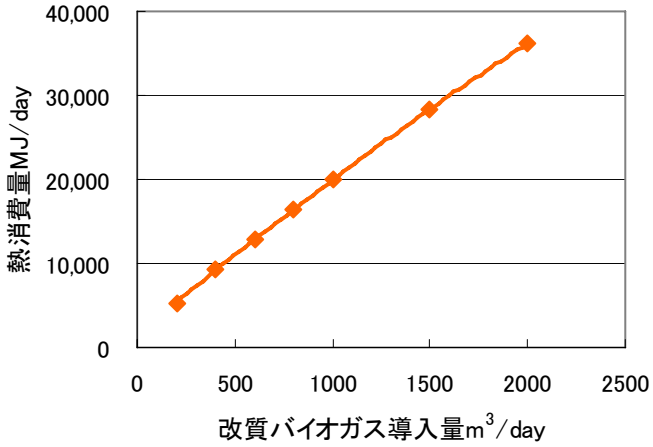


図 1.3.6　改質バイオガス導入量に対する水素製造設備の熱消費量

iii）水素貯蔵設備

水素貯蔵設備は 40MPa シリンダーとした。燃料電池自動車用の 35MPa 圧縮ボンベに充填可能であり、シリンダーごと運搬し需要家近傍における定置型燃料電池利用も考えられる。JHFC 水素・燃料電池実証プロジェクトにおける水素ステーション実証試験結果 [6]を参考にして、水素貯蔵のために必要なコンプレッサ等の電力消費量は貯蔵する水素量に対して 0.4 kWh/m³ とした。

1.3.1.2. BTH プラントのシステムフロー

上記の検討結果を用いて、同規模のバイオガスプラントと水素プラント間の物質およびエネルギー需給バランスをシミュレーションすることにより、各プラント規模や運転条件における BTH プラントの物質収支・エネルギー収支を試算することが可能となった。

本報で想定した BTH プラントのシステムフローを**図 1.3.7** に示す。乳牛ふん尿等の処理工程は従来のバイオガスプラントと同様であり、メタン発酵後の消化液は良質な液肥として圃場へ散布する。本 BTH プラントの大前提として、プラント稼動に必要なエネルギーはすべて自ら生産するバイオガスによる自家供給とする。発生するバイオガスはガスエンジン燃料、熱エネルギー燃料および水素製造の原料となる改質バイオガスにそれぞれ分配する。このとき、BTH プラントの全消費電力と 80℃以下の熱利用はバイオガスを燃料とするガスエンジンコージェネレーションにより供給し、水素製造プロセスで必要な数百度の高温熱源にはバイオガスおよびオフガスの燃焼により確保するとした。

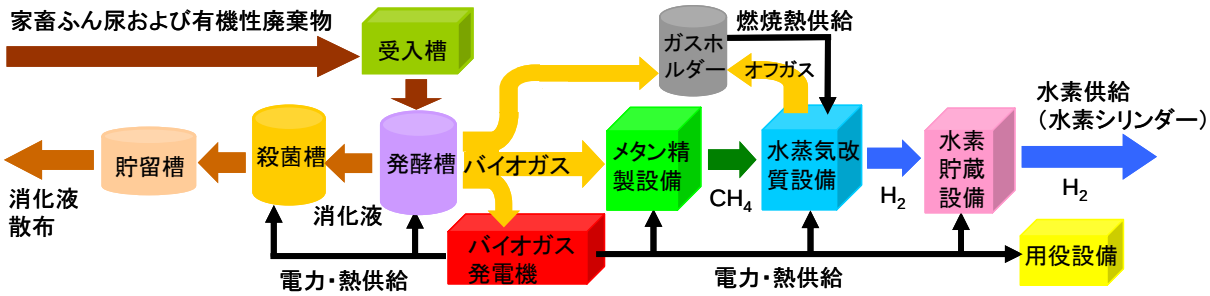


図 1.3.7　BTH プラントのシステムフロー

1.3.1.3. シミュレーションの流れ

以上の BTH プラントのシミュレーションの流れを**図 1.3.8** に示す。

バイオガスプラント設備の消費エネルギーは投入する乳牛ふん尿等バイオマス量により決定し、水素製造および水素貯蔵設備の消費エネルギーは改質バイオガス量で決まる。しかし、その改質バイオガス量は BTH プラント消費エネルギーとそれを賄うガスエンジン発電および高温熱供給量により決定されるので、全体としてバイオガスの分配量とプラントのエネルギーの需給バランスが一致したところで解が決定する。

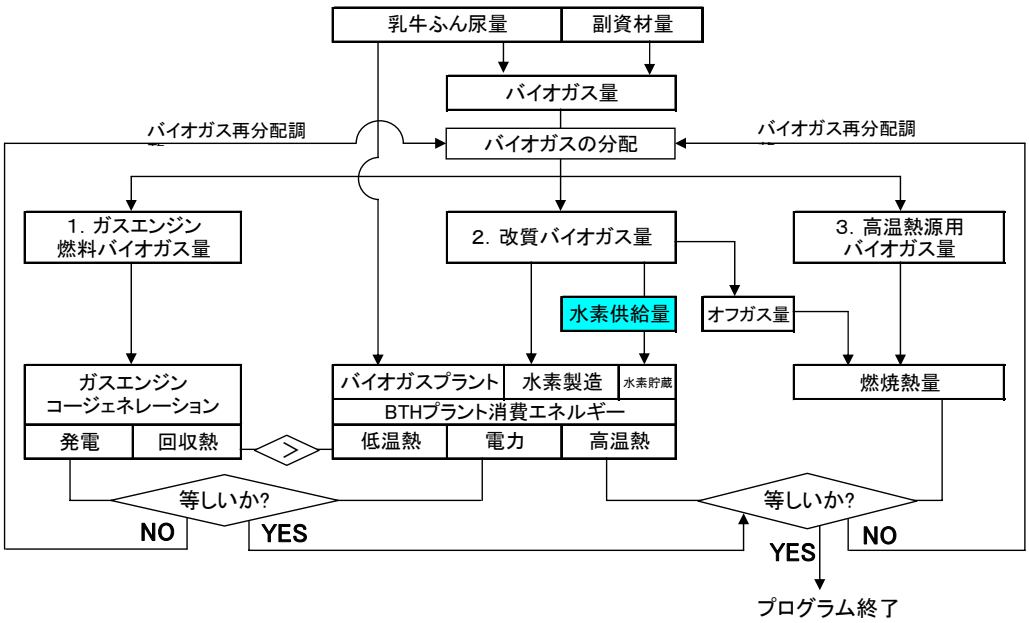


図 1.3.8　BTH プラントのシミュレーションフロー

1.3.1.4. BTH プラントからの水素供給量の試算結果

上記シミュレーションフローに従い試算した乳牛ふん尿処理頭数 2,000 頭規模の BTH プラント（以降プラント規模は簡略化して、～頭規模と記載する）における結果について**図 1.3.9** に示す。乳牛 2,000 頭からのふん尿量 130t とその 6.67%にあたる 8.67t の副資材を投入し、バイオガスは 5,200m³/day 発生する。そのバイオガスのうち約 20%が改質バイオガスとして水素製造設備に導入され、メタン約 600m³/day に精製、最終的に BTH プラントから外部に供給可能な水素量は約 1,560m³/day となった。水素のほかガスエンジンからの余剰回収熱が生じるが、プラントオンサイト付近での利用に限られるため、通常の場合は放熱することになる。

同様にして得られた各プラント規模および副資材投入量の条件における試算結果を**表 1.3.1** に整理する。プラント規模及び副資材投入量の増加に伴い BTH プラントからの水素供給量はそれにほぼ比例して増大する。

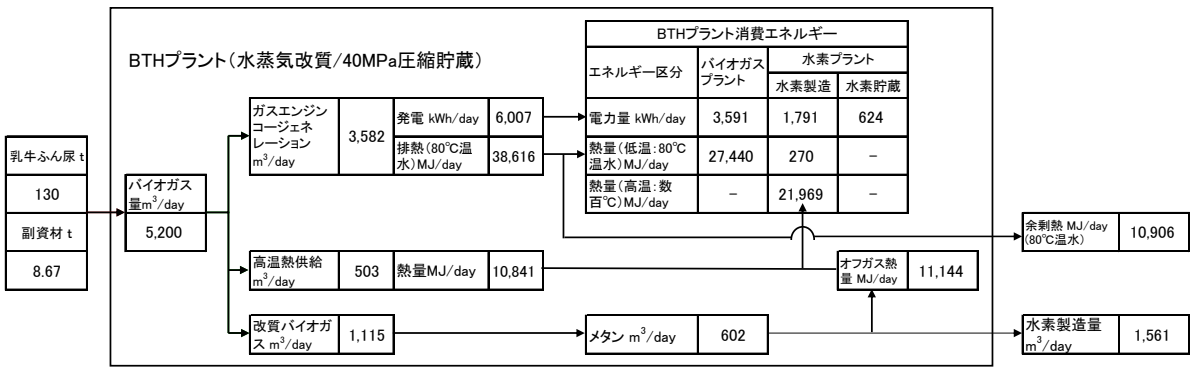


図 1.3.9　乳牛 2,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

表 1.3.1 BTH プラントからの水素製造量の試算結果

乳牛ふん尿投入頭数(プラント規模)	1,000				2,000				3,000			
乳牛ふん尿量 t/day	65				130				195			
副資材投入量 t/day (乳牛ふん尿投入量に対する割合%)	0.00 (0.00)	2.17 (3.33)	4.33 (6.67)	6.50 (10.00)	0.00 (0.00)	4.33 (3.33)	8.67 (6.67)	13.00 (10.00)	0.00 (0.00)	6.50 (3.33)	13.00 (6.67)	19.50 (10.00)
バイオガス生産量 m^3/day	1,950	2,275	2,600	2,925	3,900	4,550	5,200	5,850	5,850	6,825	7,800	8,775
改質バイオガス量 m^3/day	297	418	539	660	624	869	1,115	1,365	956	1,328	1,705	2,089
水素供給量 m^3/day	416	585	754	924	874	1,216	1,561	1,910	1,338	1,859	2,387	2,924
単位乳牛ふん尿量あたりの水素供給量 m^3/t	6.40	9.00	11.60	14.22	6.72	9.35	12.01	14.69	6.86	9.53	12.24	14.99

1.3.1.5. 小括

本項ではこれまでの実証プラントにおける取得データをもとに実規模を想定した BTH プラントの水素供給量についての試算を行った。主な成果を次にまとめる。

1) 実証プラントにおける設備とエネルギー消費等を精査し、プラント規模に応じたエネルギー消費量を推定した。
2) BTH プラントの規模や副資材投入量などの条件における水素供給量を試算した。

1.3.2. バイオガスからの水素供給・利用モデル

前項の BTH プラントからの水素供給量試算の結果を受けて、BTH プラントを核とした地域における水素エネルギーの利用システム（以降 BTH システムと記す）について検討した。本項では BTH システムの基本モデルⅠとして住宅等における定置型燃料電池利用と、基本モデルⅡとして燃料電池自動車への水素燃料供給利用について考察した。

1.3.2.1. 基本モデルⅠ（住宅等における定置型燃料電池を用いた水素エネルギー利用）の検討

基本モデルⅠの模式図を**図 1.3.10** に示す。BTH プラントから供給される水素を用いて住宅等における定置型燃料電池システムによるエネルギー利用を行う。

BTH プラントでは酪農家から排出される乳牛ふん尿のほか、その他地域で排出される有機性廃棄物（副資材）との共発酵を行う。BTH プラントから外部へはメタン発酵残渣の消化液と水素が供給される。消化液は良質な肥料となり、プラント利用酪農家の圃場に還元される。水素は地域の住宅地へ輸送され、燃料電池システムによりエネルギー利用を行う。

本モデルでは水素エネルギー利用の需要家として一般の住宅を想定した。複数の需要家間を電力、給湯、水素のネットワークを形成し、各世帯間でそれらを融通することで戸別住宅のエネルギー需要を平準化し、効率的な水素エネルギー利用を図るものとした[7]。**図 1.3.11** に約 130 戸の住宅をネットワークした場合の住宅 1 戸相当の電力・給湯消費量推移（年平均）の一例を示す。一般に住宅等では朝・夕に電力、給湯ともにピークをもつ。このように平準化された戸々の住宅の電力ピークは 1kW 以下であり、燃料電池規模は住宅 1 戸に対して 1kW 相当の燃料電池システムを考えればよいことになる。また平準化された給湯需要は電力と同様に朝・夕にピークを持つ需要となるため、コージェネレーションによる回収熱利用も効率的に利用することができると考えられる。ここでは燃料電池発電により電力需要のすべてを賄うとし、その回収熱供給に不足が生じた場合は従来の化石燃料により補完するとした。水素に対する燃料電池の発電効率を 40%、回収熱効率を 40%とし、この場合の水素エネルギー導入時の住宅 1 戸のエネルギー収支を**表 1.3.2** に示す。ただし、回収熱利用に際して 20%の損失があるものとした。このとき住宅 1 戸相当に必

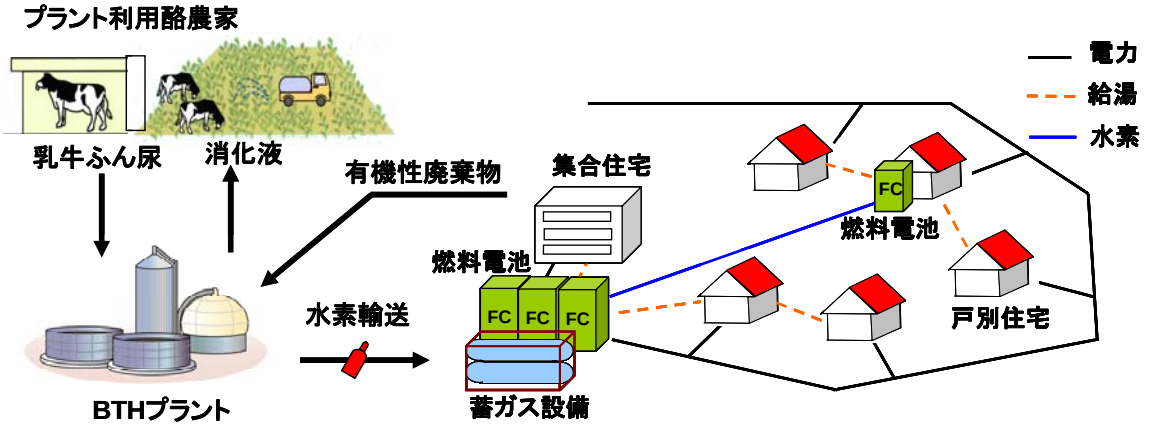


図 1.3.10　基本モデルⅠ：住宅等における定置型燃料電池を用いた水素エネルギー利用

要な水素量は 10.8 m³/day となった。また、電力を 1 次エネルギーに換算(9.83MJ/kWh：省エネ法施行規則)し給湯熱量を加えて、住宅における燃料電池利用により代替する 1 次エネルギー量を算出すると、単位水素量あたり 16.1 MJ/m³ となる（基礎資料参照)。

前節で試算した BTH プラントからの水素供給量から、この場合の水素エネルギーの利用可能な住宅戸数を算出すると、**表 1.3.3** に示す結果となる。乳牛 1,000 頭規模プラントにおいても 69 戸相当の水素エネルギー供給となる。農村地域の 1 集落やコミュニティ全体で、本項の基本モデル I に示した水素エネルギー利用のネットワークを形成できるものと考えられる。

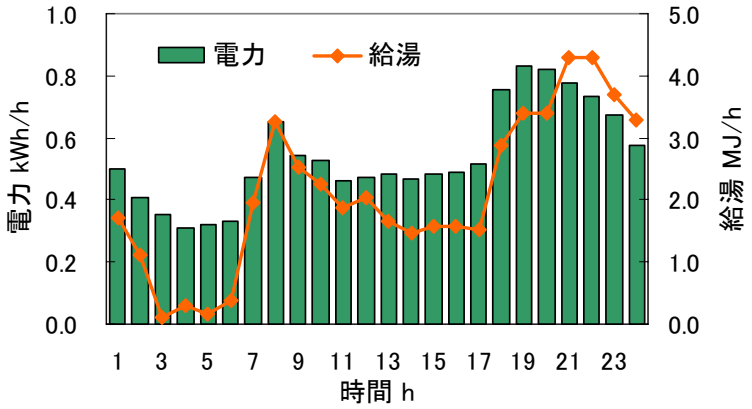


図 1.3.11 住宅 1 戸における電力・給湯消費量推移

[地域特性を活かしたエネルギー活用社会形成調査報告書 北海道開発局 H16.3]より作成

表 1.3.2 水素エネルギー利用時住宅 1 戸のエネルギー収支

項目	電力	熱(給湯)
	kWh/day	MJ/day
エネルギー需要	13.0	50.7
燃料電池による供給	13.0	37.3
化石燃料による供給	−	13.4
必要水素量	10.8 m^3/day	

表 1.3.3 BTH プラントからの水素供給によるエネルギー利用可能な住宅戸数
(副資材投入量を乳牛ふん尿投入量の 6.67%とした場合)

プラント規模(乳牛頭数)	1,000	2,000	3,000
水素供給量 (m^3/day)	754	1,561	2,387
利用可能住宅戸数(戸)	69	144	221

1.3.2.2. 基本モデルⅡ（燃料電池自動車への水素燃料供給：水素スタンド）の検討

基本モデルⅡの模式図を図 1.3.12 に示す。BTH プラントで製造した水素を燃料電池車へ供給する水素スタンドモデルである。BTH プラントでは前述の基本モデルⅠと同様な運用となるが、水素スタンドを BTH プラントに隣接して設置し、水素輸送は行わないとする。水素スタンドでは 40MPa 圧縮水素シリンダーから水素ディスペンサーによって燃料電池自動車に 35MPa 圧縮水素を供給する。燃料電池自動車への 1 回の水素充填量は約 30m³ とし[8]、BTH プラントで生産した水素量と燃料電池自動車への水素需要がバランスしていると仮定した。

BTH プラントから水素供給可能な燃料電池自動車数を算出すると、表 1.3.4 に示す結果となる。燃料電池自動車へ 1 日に数十台分の水素供給が可能であり、地域の水素スタンドとして十分な水素量を供給できるものと考えられる。

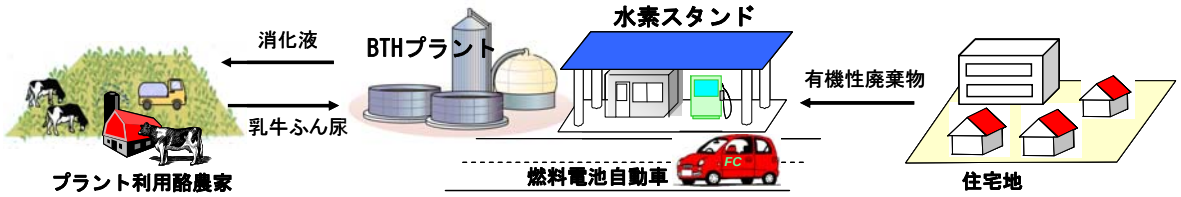


図 1.3.12　基本モデルⅡ：燃料電池自動車への水素燃料供給モデル

表 1.3.4　BTH プラントから水素供給可能な燃料電池自動車数
（副資材投入量を乳牛ふん尿投入量の 6.67%とした場合）

プラント規模（乳牛頭数）	1,000	2,000	3,000
水素供給量（m^3/day）	754	1,561	2,387
燃料電池自動車数（台/day）	25	52	79

ガソリン車の効率を 16%、燃料電池自動車の効率を 38%とし[9]、この値より燃料電池自動車により代替する単位水素量あたりのガソリン熱量は 25.6MJ/m³ となる（基礎資料参照）。前述の基本モデルⅠの場合は 16.1MJ/m³ であるので、水素は燃料電池自動車に利用したほうが定置型燃料電池利用を行うより約 1.6 倍の省エネルギーとなる。しかし、この比較により水素エネルギー利用として基本モデルⅡのみを採用するべきということにはならない。燃料電池自動車は各自動車メーカーを中心に開発が進められ、技術面における性能向上は目覚しいが、主としてコスト面で本格的な普及に至っていない。また、その普及に際しては水素スタンドの配置など社会全体の広域的な水素関連のインフラ整備が不可欠である。それゆえ、水素源がある一定地域の中で地産地消のエネルギー利用システムとする基本モデルⅠのほうが、先行して実現できる可能性は大きいものと考えられる。

いずれにしても本格的な水素社会が実現した場合は、民生、運輸に限らず様々な場面で水素エネルギー利用が図られることになるであろう。本報で想定した基本モデルⅠと基本モデルⅡはそうした将来の水素エネルギー利用全体の一部分のモデルということになる。

1.3.2.3. 小括

酪農村におけるバイオガスからの水素供給・利用モデル（BTH システム）として、基本モデルⅠ：住宅等における定置型燃料電池を用いた水素エネルギー利用と、基本モデルⅡ：燃料電池自動車への水素燃料供給（水素スタンド）を想定して、その水素エネルギー利用状況を検討した。

1) 基本モデルⅠにおいて、住宅間の電力及び熱のネットワークを想定し、戸々の住宅のエネルギー利用を平準化した中での水素利用を想定した。その場合についての一般住宅 1 戸の必要水素量を 10.8m³/day と試算した。
2) BTH プラントからの水素供給量から供給可能な住宅戸数を試算した。1,000 頭規模 BTH プラントから 69 戸相当の水素エネルギーが供給可能である。農村地域の集落やコミュニティ全体で、基本モデルⅠで示した水素エネルギー利用ができるものと考えられる。
3) 基本モデルⅡにおける BTH プラントから 1 日に燃料電池自動車数十台相当分の水素供給が可能であり、将来の水素スタンドとしての利用か期待できることを示唆した。

1.3.3. 地域におけるバイオガスからの水素供給・利用モデルの評価

環境面の向上は BTH システム導入の目的であり、それを実現可能な技術とするためには経済的に成立しなければならない。本項では、前項に示した BTH システムの基本モデルⅠと基本モデルⅡについて、その環境性と経済性の評価をそれぞれ定量的な試算に基づいて行った。また、基本モデルⅠと基本モデルⅡそれぞれにおいて、さらに乳牛ふん尿や消化液等の運搬を従来の軽油車両とした場合と、その運搬をプラントで自ら製造した水素を燃料とする燃料電池自動車とした場合について検討を行った。

上記の各場合の基本モデルの名称を**表 1.3.5** に示すとおりとし、以後の検討を行った。

表 1.3.5 各場合における検討モデルの名称の整理

モデル名	運搬等作業に従来の軽油燃料車両を利用した場合	運搬等作業に燃料電池自動車を利用した場合
基本モデルⅠ	基本モデルⅠ-1	基本モデルⅠ-2
基本モデルⅡ	基本モデルⅡ-1	基本モデルⅡ-2

1.3.3.1. 評価方法の概要

検討対象とする基本モデルの環境性および経済性評価の流れを**図 1.3.13** に示す。はじめに基本モデルの具体的な数値を設定し、以降の試算に必要な基礎データを作成した。環境性の評価については大気環境への影響評価を行うものとし、LCA(Life Cycle Assessment)手法を用いて温室効果ガス排出量を試算した。BTH プラントは通常のバイオガスプラントと同様にメタン発酵による適切な乳牛ふん尿処理を行う施設であるので、その時点から環境性への効果は現れる。それゆえにプラント導入前の乳牛ふん尿処理方法としてスラリー処理を比較対象として、その温室効果ガス排出量の削減効果を検証した。

経済性の評価については、基本モデルⅠでは燃料電池端の発電単価を求め、一般住宅における従来の買電単価との比較を、基本モデルⅡでは水素価格を算出し、燃料電池自動車用の目標水素価格との比較を行い、それぞれの経済性にかかる課題等を把握した。

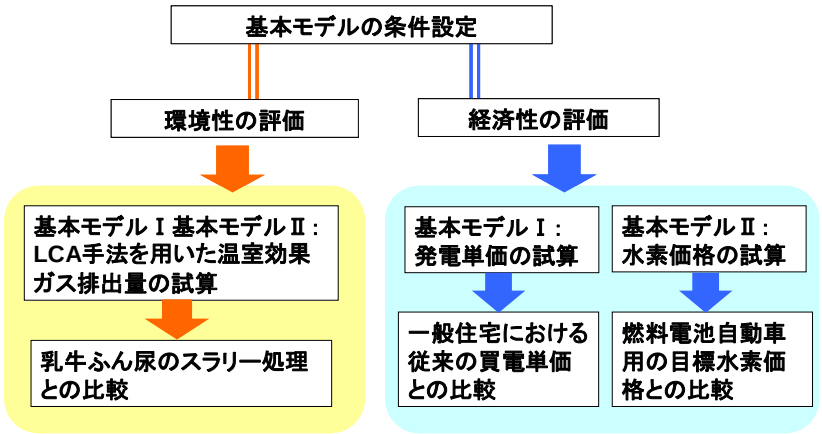


図 1.3.13　環境性および経済性評価の流れ

1.3.3.2. 基本モデルの条件設定

はじめに BTH システムの基本モデルⅠ及び基本モデルⅡに具体的なスケールと条件等を与える。また、以後の検討ではプラント規模による比較を行うため、乳牛 1,000 頭規模、2,000 頭規模、3,000 頭規模の BTH プラントとした場合について、それぞれ試算を行った。

(1) 基本モデルⅠの設定

i) 基本モデルⅠ-1：軽油を燃料とする従来の運搬車両を用いた場合

表 1.3.6 に基本モデルⅠ-1 における設定値を示す。主な設定条件の内容は次のとおりである。

① プラント利用酪農家 1 戸の乳牛飼養頭数は 100 頭とした。

② 乳牛ふん尿運搬量は乳牛 1 頭当りふん尿 65kg が発生するとし、消化液も同量であるとした。

③ 乳牛ふん尿および消化液運搬距離は、乳牛 1,000 頭規模の別海資源循環試験施設の実績値 2.5km[2)]からプラント規模に比例するとして設定した。

④ プラントへの副資材投入量は乳牛ふん尿投入量の 6.67%とした。このときの副資材運搬量、バイオガス発生量および水素供給量は、**表 1.3.1** に示したとおりである。

⑤ 副資材は地域で発生する有機性廃棄物を対象として、プラントから 20km 離れた場所（住宅地）から運搬されるものとした。また、同様に住宅地の需要家までの水素シリンダー運搬距離もまた 20km とした。

⑥ 水素エネルギー利用は燃料電池によりコージェネレーションを行う。その発電効率と熱回収効率はともに 40%(LHV)とした。ただし、回収熱は利用に際し 20%の損失があるとした。

表 1.3.6　基本モデルⅠ-1 の設定値

項　目		単位	設定値		
BTHプラント規模		頭	1,000	2,000	3,000
乳牛ふん尿運搬	運搬量	t/day	65	130	195
	平均距離	km	2.5	5	7.5
副資材運搬	運搬量	t/day	4.33	8.67	13.00
	平均距離	km	20	20	20
消化液運搬	運搬量	t/day	65	130	195
	平均距離	km	2.5	5	7.5
バイオガス発生量		m^3/day	2,600	5,200	7,800
住宅等への水素供給量		m^3/day	754	1,561	2,387
水素シリンダー運搬	運搬量	t/day	2.4	5.1	7.8
	平均距離	km	20	20	20
水素エネルギー利用	電力量	kWh/day	904	1,871	2,862
	熱量	MJ/day	2,603	5,390	8,242

ii) 基本モデルⅠ-2：燃料電池自動車を運搬車輌に用いた場合

表 1.3.7 に基本モデルⅠ-2 における設定値を示す。上記①～⑥の設定条件と同様であるが、相違点は乳牛ふん尿や消化液運搬等の運搬車両が軽油自動車から燃料電池自動車となるため、住宅

等への水素供給量はプラントにおける水素製造量から燃料電池車両の燃料となる水素量を差し引いた値となることである。

ここでは運搬用の大型燃料電池自動車の水素消費量を 2.0m³/km とし、ふん尿等の吸引・吐出及び消化液の散布にかかる水素量は、従来のエンジン効率を 16%、燃料電池自動車効率を 38%[6] として 13.4m³/h（基礎資料参照）と算定した。これらの値を用いて燃料電池自動車による運搬に必要な水素供給量と住宅等へ供給可能な水素量を算出した。

表 1.3.7　基本モデルⅠ-2 の設定値

項　目		単位	設定値		
BTHプラント規模		頭	1,000	2,000	3,000
乳牛ふん尿運搬	運搬量	t/day	65	130	195
	平均距離	km	2.5	5	7.5
副資材運搬	運搬量	t/day	4.33	8.67	13.00
	平均距離	km	20	20	20
消化液運搬	運搬量	t/day	65	130	195
	平均距離	km	2.5	5	7.5
バイオガス発生量		m^3/day	2,600	5,200	7,800
水素製造量		m^3/day	754	1,561	2,387
燃料電池車両による運搬に必要な水素量		m^3/day	141	394	759
住宅等への水素供給量		m^3/day	613	1,167	1,628
水素シリンダー運搬	運搬量	t/day	2.1	3.9	5.4
	平均距離	km	20	20	20
水素エネルギー利用	電力量	kWh/day	735	1,399	1,952
	熱量	MJ/day	2,117	4,029	5,621

(2) 基本モデルⅡの設定

表 1.3.8 に基本モデルⅡ-1、表 1.3.9 に基本モデルⅡ-2 における設定値を示す。

乳牛ふん尿運搬から水素供給までの BTH システムの工程は基本モデルⅠの設定値と同様である。水素供給可能な燃料電池自動車台数は、燃料電池自動車の 1 回の充填水素量を 30m³ として算定した。

表 1.3.8　基本モデルⅡ-1 の設定値

項　目		単位	設定値		
BTHプラント規模		頭	1,000	2,000	3,000
乳牛ふん尿運搬	運搬量	t/day	65	130	195
	平均距離	km	2.5	5	7.5
副資材運搬	運搬量	t/day	4.33	8.67	13.00
	平均距離	km	20	20	20
消化液運搬	運搬量	t/day	65	130	195
	平均距離	km	2.5	5	7.5
バイオガス発生量		m^3/day	2,600	5,200	7,800
水素供給量		m^3/day	754	1,561	2,387

表 1.3.9　基本モデルⅡ-2 の設定値

項　目		単位	設定値		
BTHプラント規模		頭	1,000	2,000	3,000
乳牛ふん尿運搬	運搬量	t/day	65	130	195
	平均距離	km	2.5	5	7.5
副資材運搬	運搬量	t/day	4.33	8.67	13.00
	平均距離	km	20	20	20
消化液運搬	運搬量	t/day	65	130	195
	平均距離	km	2.5	5	7.5
バイオガス発生量		m^3/day	2,600	5,200	7,800
水素供給量		m^3/day	754	1,561	2,387
燃料電池車による運搬に必要な水素量		m^3/day	134	381	742
水素供給量		m^3/day	620	1,180	1,645

1.3.3.3. 環境性の評価

(1) LCA による分析方法

LCA(Life Cycle Assessment)手法を用いて、前節で設定した BTH システムの基本モデルⅠと基本モデルⅡにおける温室効果ガス排出量を試算した。

共同利用型バイオガスプラントである別海資源循環試験施設の LCA 分析についてはこれまでに報告されており [5]、従来の個別型スラリー処理に比較してバイオガスプラントにおけるメタン発酵処理は温室効果ガスを大幅に削減できることが示されている。BTH システムはそのバイオガスプラント工程に水素製造・貯蔵工程を加え、さらに需要家において水素エネルギー利用を行うシステムである。BTH システム導入による温室効果ガス排出量の削減効果もまた大きいものと期待される。

図 1.3.14 に個別型スラリー処理のライフサイクルフローを示し、**図 1.3.15** 及び**図 1.3.16** にそれぞれ基本モデルⅠ-1 と基本モデルⅠ-2 のライフサイクルフローを、**図 1.3.17** 及び**図 1.3.18** にそれぞれ基本モデルⅡ-1 と基本モデルⅡ-2 のライフサイクルフローを示す。試算対象とする温室効果ガスは農業生産活動の中で主に排出される CO_2、CH_4、N_2O の 3 種とした。これら温室効果ガスは輸送車両による燃料消費、スラリーおよび消化液の貯留・散布時のガス揮散により発生するが、輸送車両による燃料消費以外の CO_2 はカーボンニュートラルの原理により温室効果ガスとしては計上しない。

個別型スラリー処理と BTH プラントにおけるメタン発酵処理の主要な相違点は、スラリー処理は開放状態での発酵であるため、発生する温室効果ガスは大気中に放散してしまうが、メタン発酵処理は密閉した嫌気状態で効率よく発酵を促進し、同時に回収されるバイオガスによりエネルギー生産を行うことにある。そのため BTH プラントからは温室効果ガスがほとんど排出されない上、需要家における水素エネルギー利用により従来の化石燃料を代替する。ただし、BTH システムではふん尿や消化液など運搬車両にかかる燃料消費が必要となる。

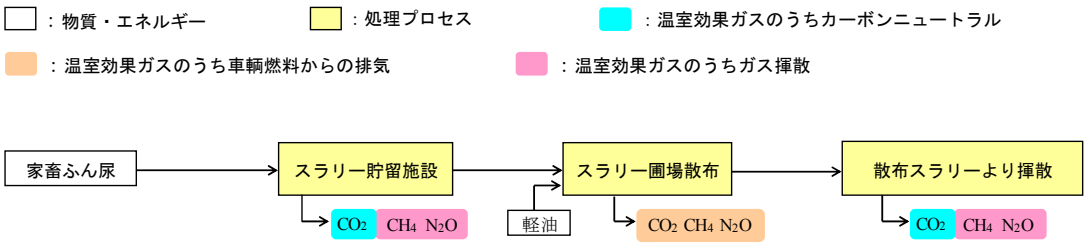


図 1.3.14　個別型スラリー処理のライフサイクルフロー

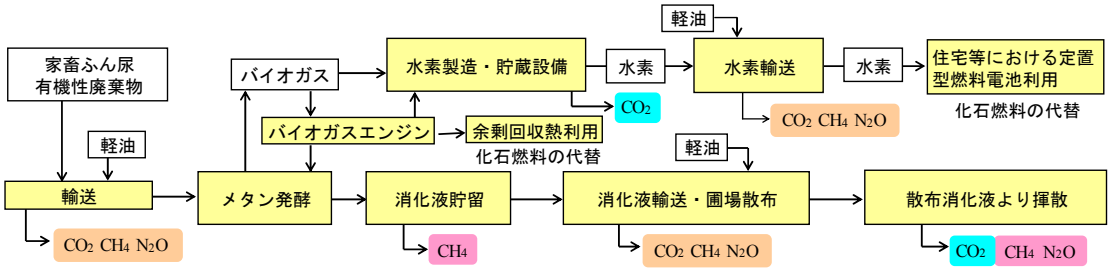


図 1.3.15　BTH システムの基本モデルⅠ-1 のライフサイクルフロー

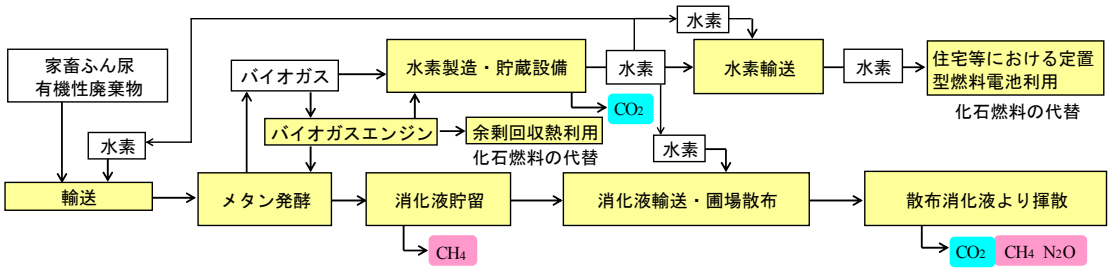


図 1.3.16　BTH システムの基本モデルⅠ-2 のライフサイクルフロー

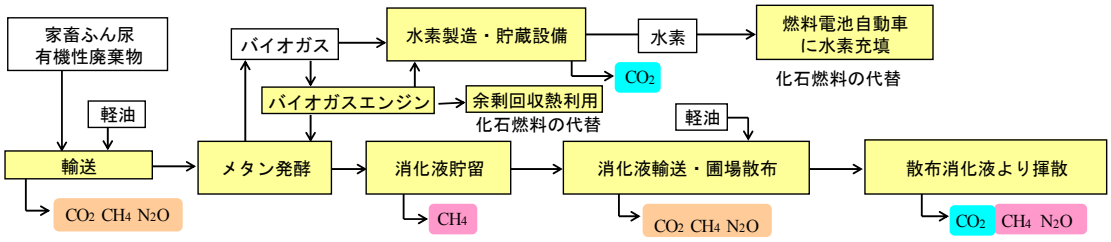


図 1.3.17　BTH システムの基本モデルⅡ-1 のライフサイクルフロー

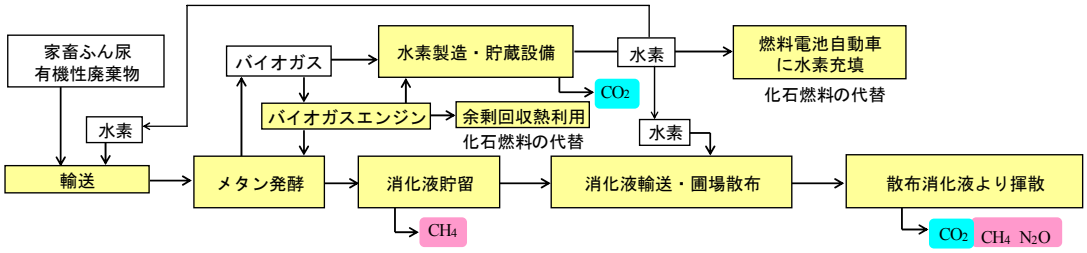


図 1.3.18　BTH システムの基本モデルⅡ-2 のライフサイクルフロー

ライフサイクルフローに示す各作業過程における燃料消費量やガス揮散等を定量的に分析し、温室効果ガス排出量を試算した。また、算出した CO_2、CH_4、N_2O の各ガス量に温暖化影響度の強さを表す特性化係数（CO_2:1 に対して CH_4:23、N_2O:296）を乗じて、CO_2 排出量相当に換算し一元的に温室効果ガス排出量を評価した。さらに、プラント建設時の施工データから BTH プラント建設・解体にかかる温室効果ガス排出量を推定し、BTH プラントの建設から運用、解体に至る全ライフサイクルにおける温室効果ガス排出量を試算した（基礎資料参照）。

(2) 温室効果ガス排出量の試算結果と考察

i) 基本モデルⅠ（住宅等における定置型燃料電池利用）

BTH システムの基本モデルⅠ-1 における温室効果ガス排出量の試算結果を**図 1.3.19** に示す。

図の縦軸は各プラント規模における温室効果ガス排出量を一律に比較するため、乳牛ふん尿処理 1 頭あたりの年間の温室効果ガス排出量で示した。年間の建設・解体時における温室効果ガス排出量は、スラリー処理施設の耐用年数を 20 年、BTH プラントの耐用年数を 13 年[10]として、それぞれの建設・解体時における温室効果ガス排出量を除した値を計上した。

先ず、正の領域に示すのは BTH システムの運用において排出される温室効果ガス排出量である。最も温室効果ガス排出量が大きい 3,000 頭規模 BTH システムにおいても、従来の個別型スラリー処理に比較して約 50%程度の温室効果ガス排出量が低減する。すなわち、BTH プラントから外部に供給するエネルギーの利用を考慮しなくても相当量の温室効果ガス排出量の削減効果が得られることになる。また、負の領域に示したものは BTH プラントから供給されるエネルギー利用による化石燃料の代替相当分の温室効果ガス排出量、すなわち削減量である。BTH システムにおけるトータルの温室効果ガス排出量は、これら正値と負値の温室効果ガス排出量の和であり、この場合の温室効果ガス排出量はほぼ 0 となることがわかる。

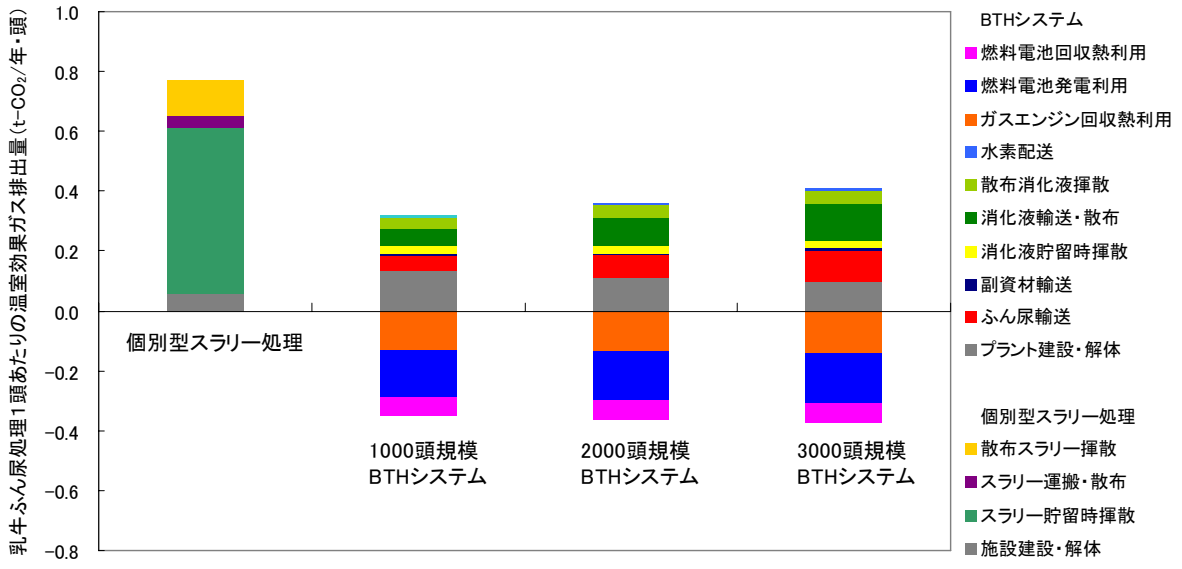


図 1.3.19　個別型スラリー処理と基本モデルⅠ-1 における温室効果ガス排出量

また、プラント規模による温室効果ガス排出量の相違はプラントの建設・解体によるものと乳牛ふん尿及び消化液運搬等にかかる燃料消費によるものである。前者においてはプラント規模のスケールアップの効果により規模が大きいほど温室効果ガス排出量は小さくなっている。後者については逆にプラント規模増大に伴いその運搬移動距離が大きくなるため、温室効果ガス排出量は大きくなる。

BTH システムの基本モデルⅠ-2 における温室効果ガス排出量の試算結果を**図 1.3.20** に示す。この場合は運搬車両を燃料電池自動車とするので、運搬にかかる温室効果ガス排出量は 0 となり、BTH システム運用における温室効果ガス排出量は大きく低減する。ただし、その燃料となる水素は自らのプラントで生産するという条件であるので、プラント外部の需要家において利用される水素エネルギー相当の温室効果ガス削減量は、ふん尿運搬等に使用した分だけ減少している。

温室効果ガスの総削減量は、**図 1.3.19**、**図 1.3.20** の正の領域における個別型スラリー処理と BTH システムの排出量の差と、負の領域のエネルギー利用による化石燃料代替相当分の値との和である。**図 1.3.21** に BTH システムの基本モデルⅠ-1 と基本モデルⅠ-2 における温室効果ガス削減量の比較を示す。図の縦軸は年間の乳牛ふん尿処理 1 頭あたりの温室効果ガス削減量で示した。ただし、ガスエンジンによる余剰回収熱はプラントオンサイト付近での利用に限られ、通常のプラント施設のみでは有効な利用手段がないため、ここでは水素エネルギー利用による温室効果ガス排出量のみを計上した。

運搬車両として燃料電池自動車を利用した場合、従来の軽油車両の場合と比較して温室効果ガス削減量が増加する。特にプラント規模が大きいほどその削減量は大きくなり、プラント規模による差異はほとんど解消される結果となった。また、例えば基本モデルⅠ-1 における 2,000 頭規模の場合を挙げると、温室効果ガス削減量は約 1,285t-CO_2/年であり、同量の温室効果ガスを排出する灯油量に換算すると約 500kL/年となる。BTH システム導入より、有効な温室効果ガス排出量の削減効果が得られることが示された。

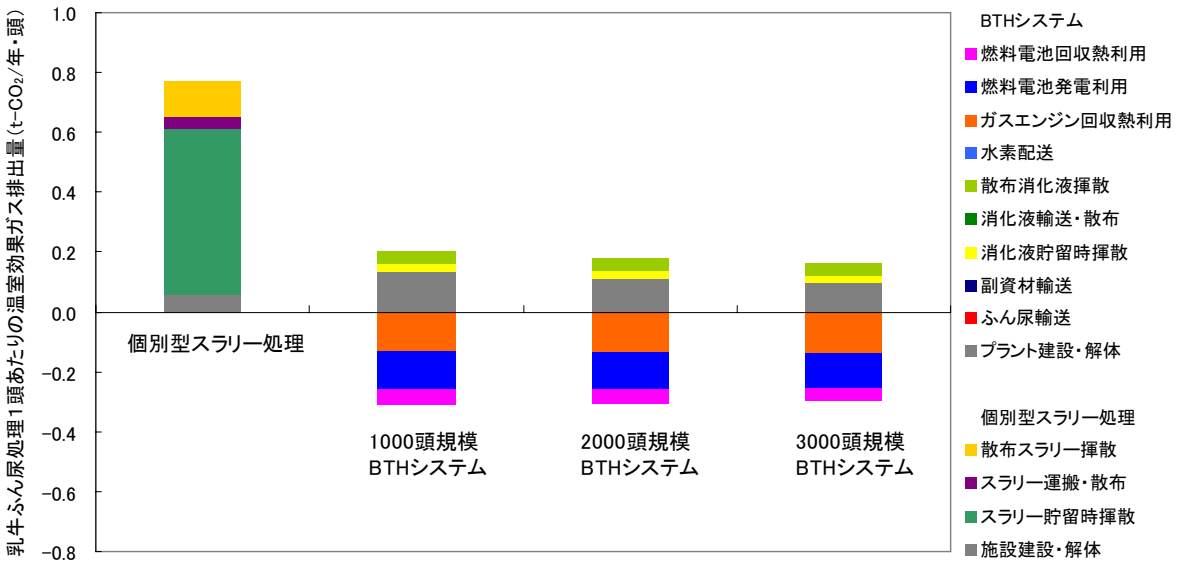


図 1.3.20　個別型スラリー処理と基本モデルⅠ-2 における温室効果ガス排出量

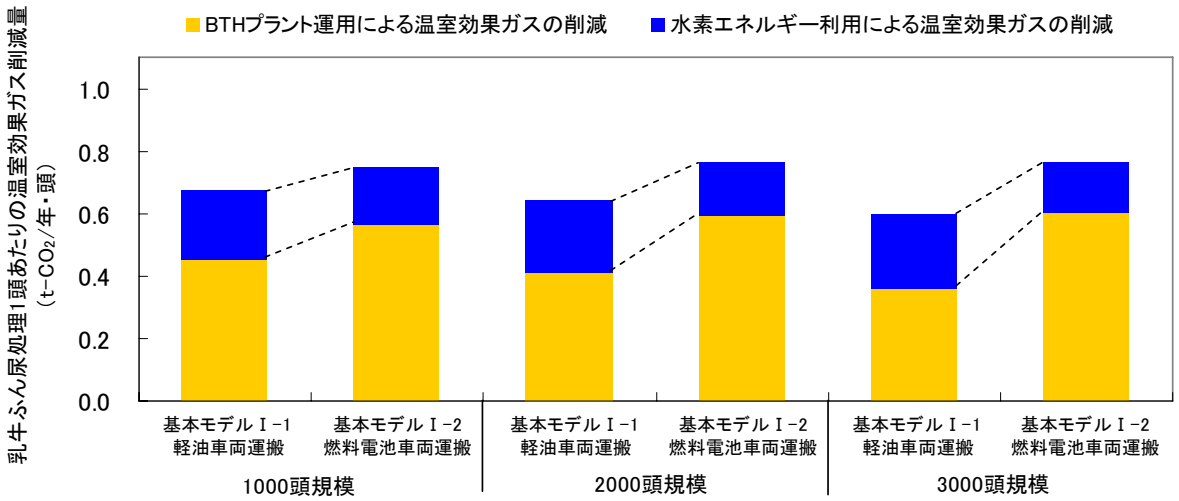


図 1.3.21　基本モデルⅠ-1 と基本モデルⅠ-2 の導入による温室効果ガス削減量の比較

ii) BTH システム基本モデルⅡ

i)の場合と同様、**図 1.3.22**、**図 1.3.23** にそれぞれ基本モデルⅡ-1 と基本モデルⅡ-2 における温室効果ガス排出量の試算結果を示す。基本モデルⅠの場合の BTH プラントの運用工程とほぼ同様となるが、基本モデルⅡではプラントに隣接した水素スタンドを想定しているので、水素の需要地への輸送工程はない。また、プラントから供給する水素はすべて燃料電池自動車に提供される（プラントからの水素供給と燃料電池自動車の水素需要がバランスする）ものとして、ガソリン車代替相当量の温室効果ガス削減量を試算した。図の正の領域に示される BTH システムの運用における温室効果ガス排出量は、基本モデルⅠの場合とほぼ同量であるが、水素エネルギー利用の面では温室効果ガス排出量の削減効果は大きい。

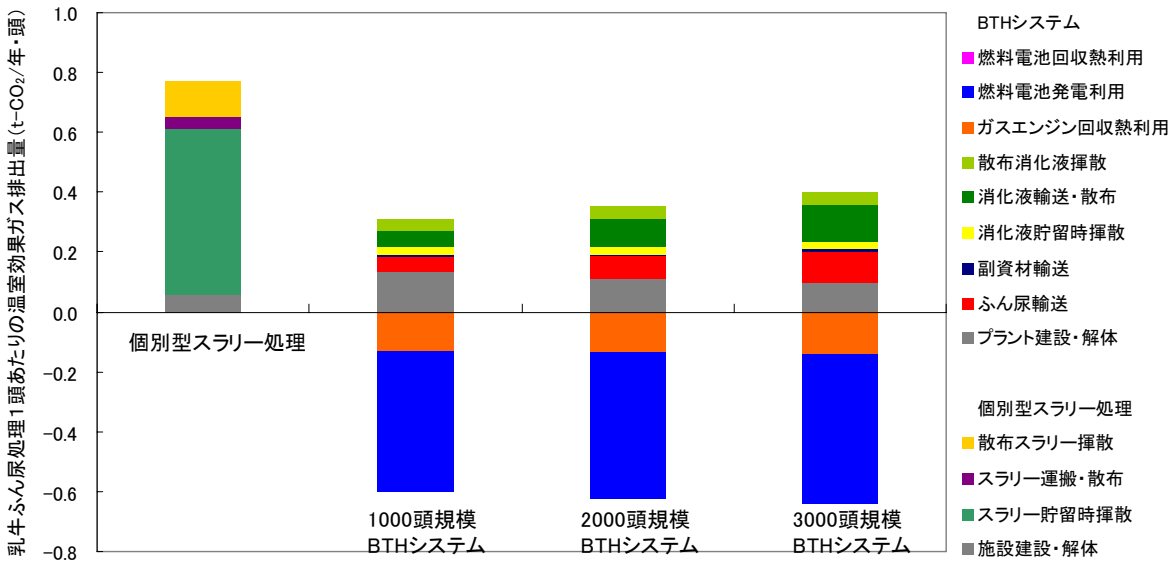


図 1.3.22　個別型スラリー処理と BTH システム基本モデルⅡ-1 における温室効果ガス排出量

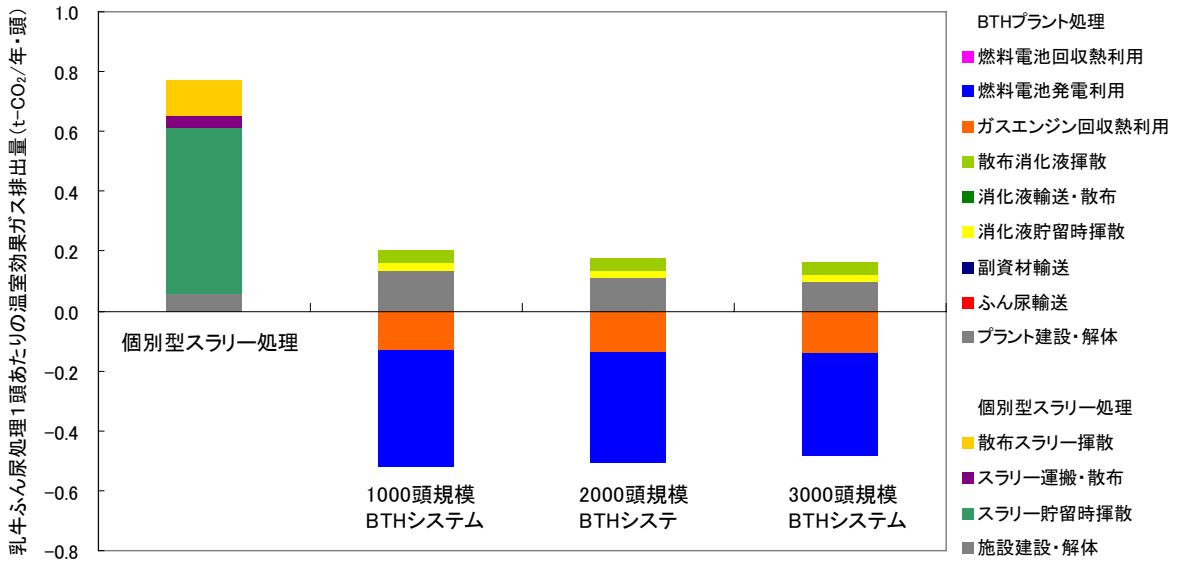


図 1.3.23　個別型スラリー処理と BTH システム基本モデルⅡ-2 における温室効果ガス排出量

図 1.3.24 に BTH システム基本モデルⅡ-1 と基本モデルⅡ-2 における温室効果ガス削減量の比較を示す。プラント規模における差異は小さく、基本モデルⅡ-1 とⅡ-2 の比較においても大きな変化はない。基本モデルⅡの場合は基本モデルⅠに比べて温室効果ガス削減効果が大きくなり、有効な水素エネルギー利用といえる。しかし、そのためには社会全体の燃料電池自動車の普及と水素インフラの建設が大前提であり、3.2.2 項で述べたとおり、地域における水素エネルギー利用は基本モデルⅠすなわち定置型燃料電池利用のほうが先行して実現する可能性は大きいものと考えられる。

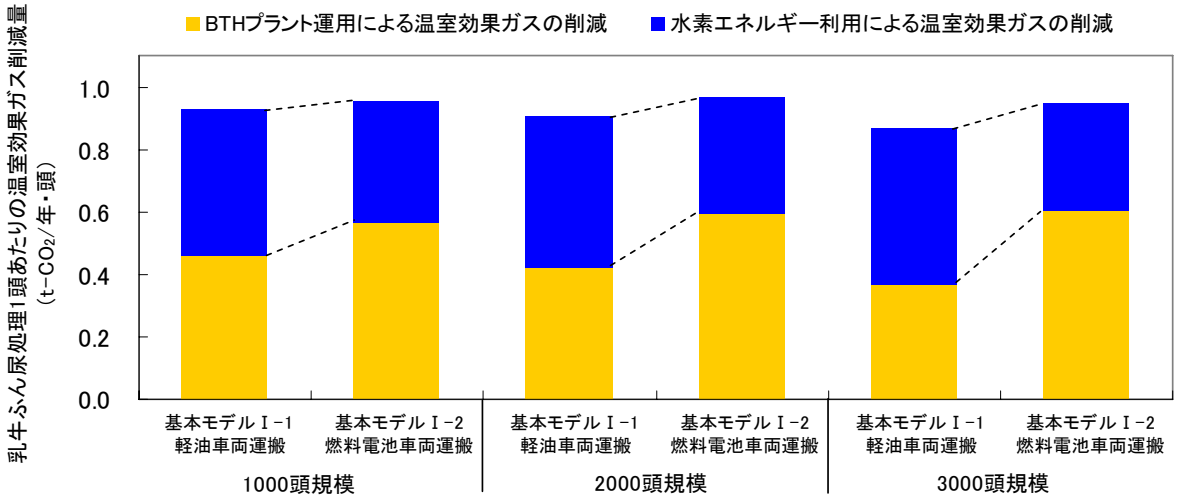


図 1.3.24　基本モデルⅡ-1 と基本モデルⅡ-2 の導入による温室効果ガス削減量の比較

(3) 地域における温室効果ガス排出量削減への貢献

これまでの温室効果ガス排出量の試算をもとに、地域全体の中でどの程度の温室効果ガスの削減効果が見込めるのか、その中でバイオガス－水素エネルギー利用による効果はどの程度に位置づけられるのか、について試算した。

図 1.3.25 は酪農業が盛んな B 町（人口：17,000 人、乳用牛飼養頭数：108,000 頭）の例である。地域に賦存する新エネルギー等を有効に利用すれば、現在の町全体で排出される温室効果ガス排出量に対して、約 6%の削減が期待できる。その中でも乳牛ふん尿のバイオガス化・水素エネルギー利用（BTH システム）導入による温室効果ガス削減量は大半の部分を占めると試算され、酪農村地域における重要なエネルギー資源であることが示された。

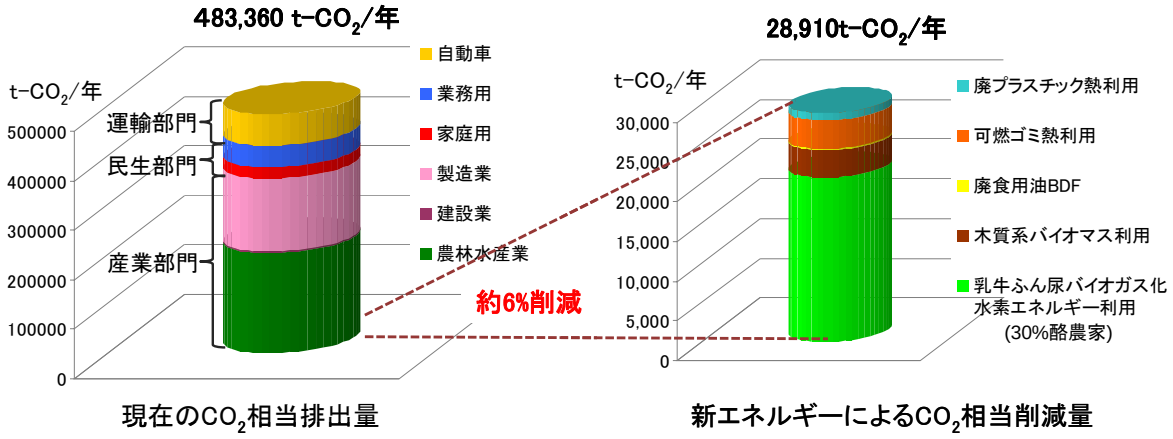


図 1.3.25　酪農村地域における新エネルギー利用による温室効果ガスの削減

1.3.3.4. 経済性の評価

本項では BTH システムの実用化を評価するため、基本モデルⅠ及び基本モデルⅡについて経済的成立条件について検討を行った。基本モデルⅠについて水素エネルギーの発電単価（円/kWh）を、基本モデルⅡについて水素価格（円/m³）を試算し、現状との比較により評価を行った。

(1) 経済性検討のための比較対象

i) 基本モデルⅠ

図 1.3.26 に示すように、従来の電力システムでは電気は遠方の大規模集中型の発電所から送電線により運ばれ、最終的な需要家での買電単価は北海道の一般家庭の場合、約 24 円/kWh（基礎資料参照）である。

これと対照して基本モデルⅠの検討では、**図 1.3.27** に示すように BTH プラントから供給される水素エネルギーを燃料電池により利用した場合の発電単価すなわち BTH システムの買電単価を試算し、従来の電力システムにおける買電単価と比較を行う。

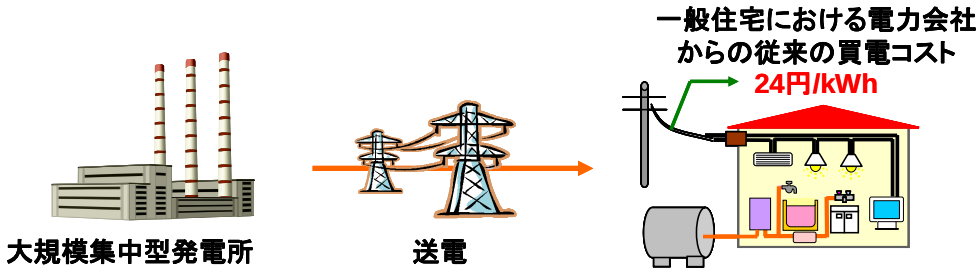


図 1.3.26 大規模集中型電力システム

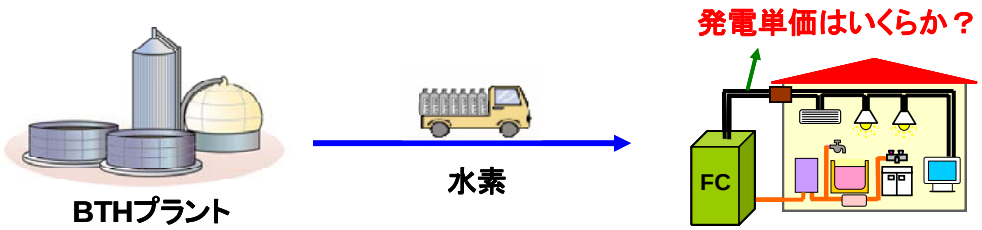


図 1.3.27 地域分散型 BTH システム

ii) 基本モデルⅡ

図 1.3.28 に示すように、現状のガソリン自動車を代替する燃料電池自動車への燃料用水素価格の目標値（2020 年本格普及期 NEDO 目標値）は 40 円/m³ としている。これに対し基本モデルⅡの検討では、**図 1.3.29** に示すように BTH システムにおける水素価格を試算し、燃料電池自動車用の水素価格目標値 40 円/m³ との比較を行う。

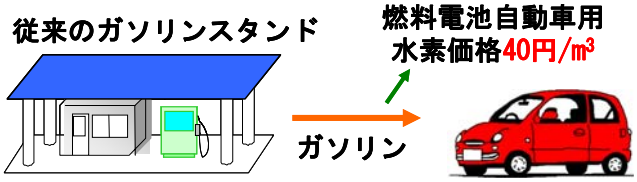


図 1.3.28　従来の燃料供給システム

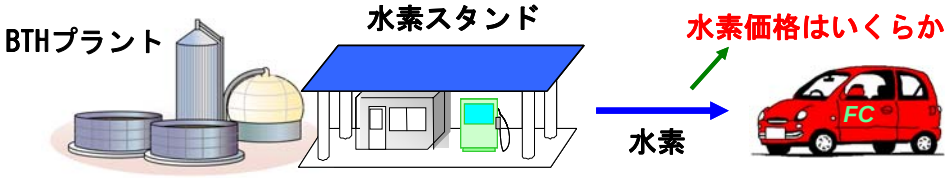


図 1.3.29　BTH システムによる水素供給

(2) 発電単価及び水素価格の試算方法

i) 発電単価、水素価格の算出式

a. 基本モデルⅠ：定置型燃料電池における発電単価

通常、発電単価は発電にかかる費用、すなわちランニングコストを発電量で除することで求められる。しかし燃料電池はコージェネレーションが可能であり、発電単価はその回収熱利用を考慮した(1.3.1)式[11]により算出する。

$$P_{CG} = \frac{R}{G}\left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_0}\gamma\right) \tag{1.3.1}$$

P_{CG}：コージェネレーションの発電単価、　G：発電電力量

R：ランニングコスト（水素エネルギー供給にかかる費用）

α：熱回収効率、　α_0：ボイラー効率、　γ：補正係数（回収熱の利用可能割合）

右辺の第 1 項は電力の発電単価を表し、第 2 項は回収熱利用によるコスト減を表す。ランニングコストは一般に発電設備の資本費（減価償却等）、運営費（人件費、修繕費等）および燃料費の合計となるが、BTH プラントではプラント利用料金と副資材処理料金が収入となるため、ここではプラント運営における支出と収入の差額をランニングコスト（水素エネルギー供給にかかる費用）として求める。また、燃料電池効率を電気 40%、熱 40%(α= 0.4)、ボイラー効率を α_0= 0.8(80%)、回収熱利用における放熱・損失量を 20%として γ= 0.8(80%)を用いることとした。

b. 基本モデルⅡ：燃料電池自動車への燃料用水素価格

基本モデルⅡにおいては水素を燃料電池自動車に供給する水素価格であり、水素価格は上記ランニングコストより次の(1.3.2)式より算出する。

$$P_C = \frac{R}{V} \qquad (1.3.2)$$

P_C：水素価格　　R：ランニングコスト（水素エネルギー供給にかかる費用）

V：水素供給量

ii）試算方法の流れ

基本モデルⅠにおける発電単価および基本モデルⅡにおける水素価格の試算方法の流れを、**図 1.3.30** に示す。最初に地域における BTH システムの実際の運用を想定して、BTH プラントの運営条件を設定する。次に実験プラント施工データやその他資料に基づき BTH プラント建設コストを試算する。プラント建設コストから減価償却費、修繕費等を導き、他のプラント運営条件をもとに BTH プラント運営における支出と収入を算出する。そしてそれら経済収支バランス（支出と収入の差額)からランニングコスト R すなわち水素エネルギー供給にかかる費用を求め、(1.3.1)式、(1.3.2)式によりそれぞれ発電コストおよび水素価格を算出する。

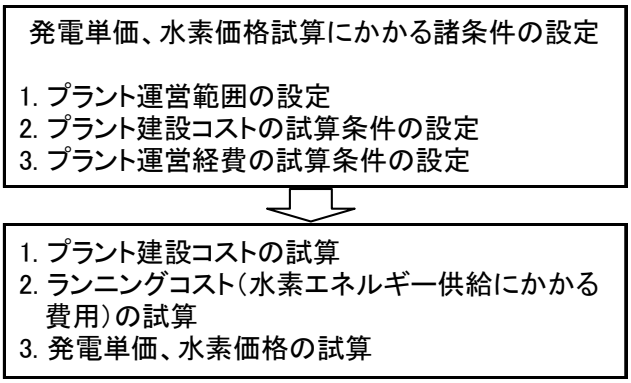


図 1.3.30　発電単価、水素価格の試算の流れ

(3) 発電単価、水素価格試算にかかる諸条件の設定

i）プラント運営範囲の設定

a. 基本モデルⅠ

図 1.3.31 に基本モデルⅠにおいて想定する BTH プラント運営範囲を示す。運営範囲は乳牛ふん尿の運搬から水素の配送及び燃料電池発電までとし、消化液の搬出・散布は各プラント利用酪農家により、有機性廃棄物（副資材）の運搬は各回収業者によるものとした。BTH プラントと燃料電池システムの運営は別な経営主体となることも考えられるが、ここでは燃料電池の発電端における発電単価の算出を行うため、燃料電池発電を含むまでの範囲を設定した。

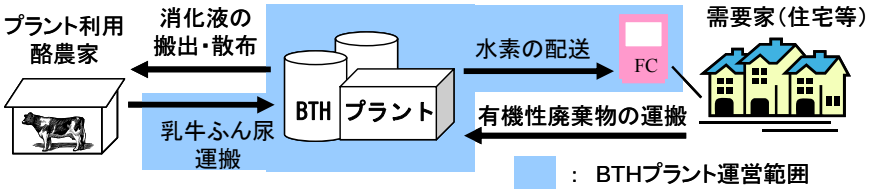


図 1.3.31　基本モデルⅠの BTH プラント運営範囲

b. 基本モデルⅡ

図 1.3.32 に基本モデルⅡにおいて想定する BTH プラント運営範囲を示す。運営範囲は乳牛ふん尿の運搬から水素スタンドにおける燃料電池自動車への水素供給までである。基本モデルⅠの場合と同様に、消化液の搬出・散布は各プラント利用酪農家により、有機性廃棄物の運搬・搬入は各回収業者によるものとした。

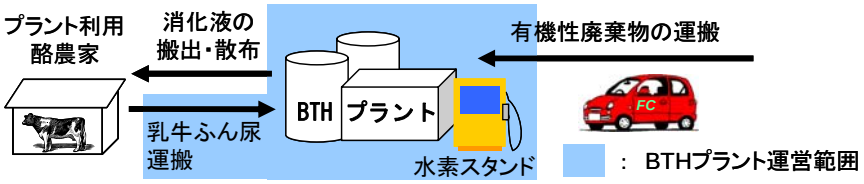


図 1.3.32 基本モデルⅡの BTH プラント運営範囲

ii）プラント建設コストの試算条件

BTH プラントの建設コストは、別海資源循環試験施設の建設費 [5]（1,000 頭規模）とエネルギー地域自立型実証研究施設（バイオガス 500m³ 導入規模）の施工データを基礎に算出した。ただし、水蒸気改質設備については試験用に改良された特注品であるため、文献 [8]より水素製造量 30m³/h 規模の設備 4,000 万円を参考とした。また、40MPa の水素充填設備および水素シリンダーについても文献 [8]よりそれぞれ、20Nm³/h 充填設備 2,000 万円、95m³ 充填シリンダー90 万円/本を基礎とした。

プラントのスケールアップに応じた建設費の増加は、主として(1.3.3)式による 0.7 乗則 [12]に基づいて算出した。(1.3.3)式は経験則であり、プラント規模のスケールアップによる経済性向上の効果を表している。

$$P_2 = P_1 \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{0.7} \qquad (1.3.3)$$

P_1：規模 C_1 のときの建設費 、　P_2：規模 C_2 のときの建設費

現在、都市ガス改質型固体高分子形燃料電池システムが本格的な市場普及を目指して、数十万円/kW を目標に開発が進められている。基本モデルⅠで想定している燃料電池は改質器なしの純水素用固体高分子形燃料電池であるが、インバータ等周辺設備も含め 100 万円/kW として計上した。また基本モデルⅠ-2、基本モデルⅡ-2 について、運搬等を行う燃料電池自動車価格は現状の軽油車両と同値とした。

iii）プラント運営経費の試算条件の設定

BTH プラント運営経費の試算条件について、**表 1.3.10** にまとめる。

① 減価償却費は定額法で計上し、耐用年数 13 年、経過後の残存価格は 0%とした。

② 修繕費はプラント建設コストの 2%とした。

③ 人件費は管理者 1 人に加え、乳牛ふん尿運搬作業及びプラント内作業で 1,000 頭規模、2,000 頭規模、3,000 頭規模でそれぞれ 1 人、2 人、3 人とし、年間 1 人あたり 600 万円として計上した。

④ 水素運搬は 1 日 1 回～2 回であるため運搬業者へ委託とし、委託費は 1,000 円/t とした。

⑤ 燃料費（軽油）は 100 円/L とした。

⑥ 乳牛ふん尿処理費は酪農家のプラント利用による経済性効果額 36,600 円/頭/年 [7] より、本試算においては 30,000 円/頭/年とした。

⑦ 副資材処理料金は 15,000 円/t [13] とした。

表 1.3.10 プラント運営経費の試算条件の設定

支出	減価償却費	プラント建設コストの7.69%（耐用年数13年）
	施設修繕費	プラント建設コストの2%
	人件費（雇用人数）	1,000頭規模： 2人の雇用
		2,000頭規模： 3人の雇用
		3,000頭規模： 4人の雇用
	水素輸送委託費	1000円/t
	燃料費	軽油単価 100円/L
収入	乳牛ふん尿処理料金	乳牛1頭あたり年間30,000円
	副資材処理料金	15,000円/t

(4) プラント建設コスト及びランニングコストの試算例

上記の算出条件と設定値等に基づいたプラント建設コスト及びランニングコストについて、基本モデル I -1 の乳牛 2,000 頭規模 BTH システムの試算例を次に記す。

i）プラント建設コストの試算例

基本モデル I -1 の乳牛 2,000 頭規模 BTH プラントの建設コストは 1,787 百万円と試算された。その各設備別の内訳を**図 1.3.33** に示す。バイオガスプラント関連施設が全体の約 3/4 を占め、水素製造・利用関連施設は全体の約 1/4 となる。

各設備の主な内容は次のとおりである。

・共通設備：ふん尿受入棟、計器類、土木工事等

・タンク設備：メタン発酵槽、ガスホルダー、殺菌槽、消化液貯留タンク等

・バイオガスエネルギー設備：ガスエンジン、熱交換器、ポンプ、脱硫装置等

・副資材処理設備：残渣破砕機、残渣タンク等

・水素製造・貯蔵設備：熱交換器、メタン精製装置、水蒸気改質設備、水素精製装置、水素圧縮機、水素貯蔵シリンダー等

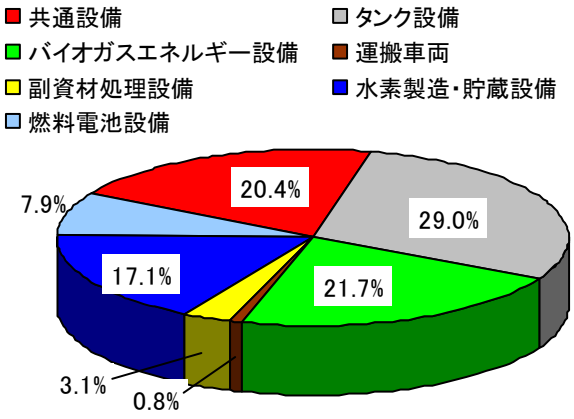


図 1.3.33 乳牛 2,000 頭規模プラント建設コストの内訳

ii) ランニングコストの試算例

上記プラント建設コスト試算結果を受けて、BTH プラント運営の経済収支からランニングコストを算出する。**図 1.3.34** にこの場合の BTH プラントの経済収支を示す。支出の大半を減価償却費が占め、それによるプラント建設にかかる費用の負担が大きいことがわかる。支出の合計は約 200 百万円であり、収入となる乳牛ふん尿処理費と副資材処理費で 100 百万円強となるが、その支出と収入の差額が水素エネルギー供給にかかる費用であり、言い換えればプラントの経済収支のバランスをとるため水素エネルギーの販売により補填しなければならない費用である。本報ではこの金額がランニングコスト R となる。

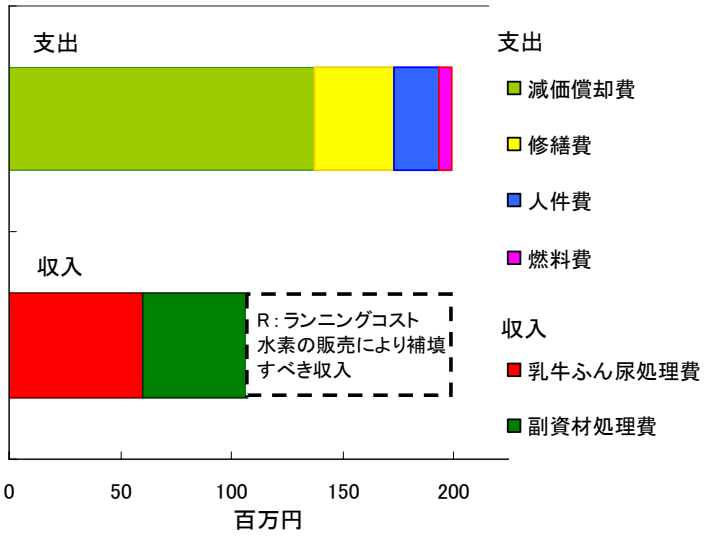


図 1.3.34 乳牛 2,000 頭規模 BTH プラント運営の経済収支例

(5) 発電単価及び水素価格の試算結果

以上の算出過程を経て、(1.3.1)式及び(1.3.2)式によりそれぞれ発電単価と水素価格を算出した。

i) 基本モデルⅠにおける発電単価の試算結果

基本モデルⅠ-1 と基本モデルⅠ-2 における発電単価の試算値を**図 1.3.35** に示す。

3.3.3 項より基本モデルⅠ-1 に比べ基本モデルⅠ-2 は環境性には優れているが、発電単価は逆に割高となった。プラント規模のスケールアップによる経済性向上効果を反映して、プラント規模増大に伴い発電単価は減少する。ただし、その減少率ついてはプラント規模増大に伴い減少する結果となった。基本モデルⅠ-1 ではプラント規模（乳牛頭数）x に対する発電単価 y は $y = 6102x^{-0.5457}$ で近似する。**表 1.3.11** はその微分値から求めた発電単価の減少率(円/kWh)/(100 頭)を示す。1,000 頭規模プラントにおける発電単価の減少率 7.68(円/kWh)/(100 頭)、すなわち乳牛 100 頭相当のプラント規模増大に伴い 7.68 円 /kWh の発電単価が減少することに対し、3,000 頭規模付近では 1.41(円/kWh)/(100 頭)となり、プラント規模増大による経済性効果はしだいに小さいものとなる。

一般住宅における従来の買電単価 24 円/kWh との比較において、BTH システムの発電単価は大きく割高となった。上記の結果から 3,000 頭規模より大きなプラントを想定しても、大きな発電単価の低減は期待できない。BTH システムが現状の買電単価と競合するためには、別の抜本的な発電単価の低減方策が必要となる。

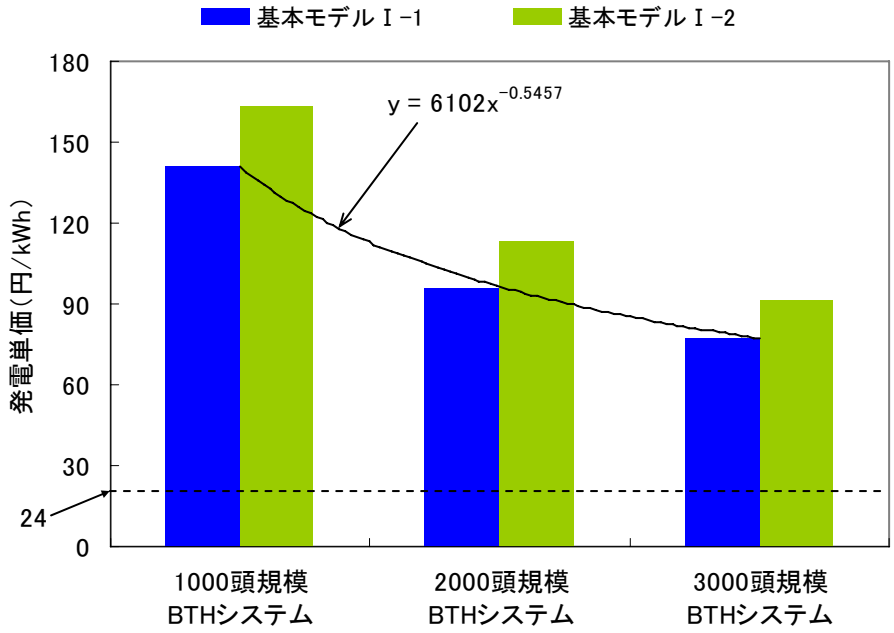


図 1.3.35　基本モデルⅠの発電単価の試算結果

表 1.3.11　基本モデルⅠ-1 における発電単価の減少率

プラント規模	1000頭	2000頭	3000頭
発電コストの減少率 (円/kWh)/(100頭)	7.68	2.63	1.41

ii)　基本モデルⅡにおける水素価格の試算結果

基本モデルⅡ-1 と基本モデルⅡ-2 における水素価格の試算値を**図 1.3.36** に示す。

基本モデルⅠの場合と同様に、基本モデルⅡ-1 に比べ基本モデルⅡ-2 は環境性には優れているが、水素価格は割高となった。また、プラント規模の経済性効果を反映して、プラント規模増大に伴い水素価格は減少するが、その減少率は規模増大に伴い減少する結果となった。**表 1.3.12** は基本モデルⅡ-1 のプラント規模（乳牛頭数）x に対する水素価格 y の近似式：$y = 17756x^{-0.6448}$ の微分値から求めた水素価格の減少率を示す。1,000 頭規模付近のプラントにおける水素価格の減少率は 13.32(円/m³)/(100 頭)、であることに対し、3,000 頭規模付近では 2.19(円/m³)/(100 頭)となり、プラント規模増大による効果はしだいに小さいものとなった。

また上記の試算結果は、燃料電池自動車への燃料用水素価格の目標値 40 円/m³ と比較して割高な値となった。従来の自動車燃料と競合するためには基本モデルⅠの場合と同様、水素価格の抜本的な低減方策が必要となる。

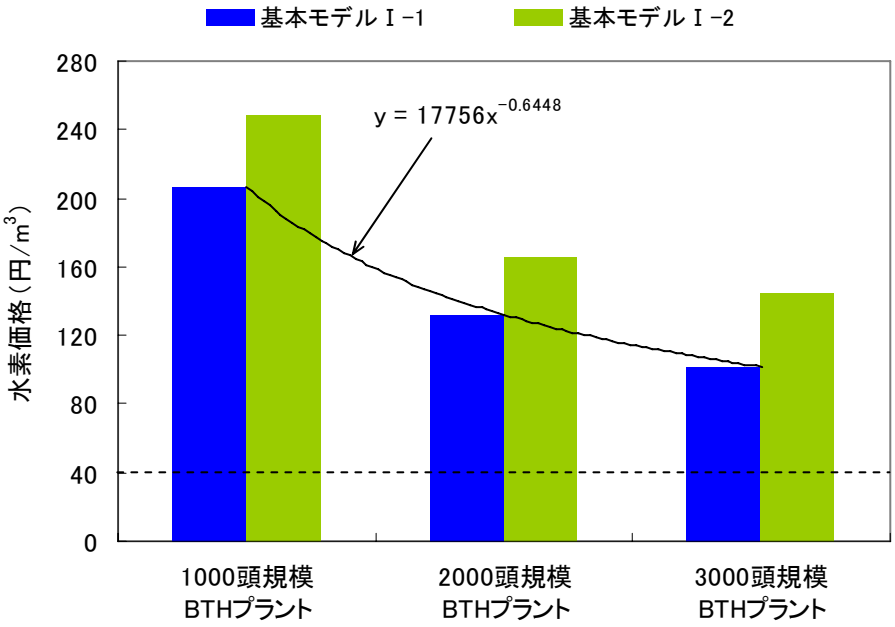


図 1.3.36　基本モデルⅡの発電単価の試算結果

表 1.3.12　基本モデルⅡ-1 における発電単価の減少率

プラント規模	1000頭	2000頭	3000頭
発電コストの減少率 (円/m³)/(100頭)	13.32	4.26	2.19

(6) プラント建設コストの削減による発電単価及び水素価格の低減

(5)項において基本モデルⅠ及び基本モデルⅡともに、経済的に自立した運営を図るためそれぞれ発電単価、水素価格の削減が必要であることが明らかとなった。**図 1.3.34** の説明に記したように、プラント建設コストが影響する減価償却費及び修繕費がプラント運営支出の大部分を占めている。プラント建設コストの削減は発電単価および水素価格に大きく影響するものと考えられる。ここでは基本モデルⅠ-1 と基本モデルⅡ-1 についてプラント建設コストの削減に対する発電単価及び水素価格それぞれの変化をシミュレーションし、プラント建設コスト削減の目標値を推定した。

i) 基本モデルⅠ-1

基本モデルⅠ-1 におけるプラント建設コストの削減割合に対する発電単価の変化についてのシミュレーション結果を**図 1.3.37** に示す。プラント建設コストの削減（削減割合の増加）に伴い発電単価は大きく減少する。従来の電力会社からの買電単価 24 円/kWh と同値とするため、プラント建設コストの削減のみを考えた場合は、3,000 頭規模で約 30%、2,000 頭規模で約 40%、1,000 頭規模で約 50%のプラント建設コストの削減が必要であることが示唆された。

次に助成金を受けてプラント建設コストが削減される場合についての同様なシミュレーション結果を**図 1.3.38** に示す。この場合は減価償却費のみにおいて助成金額相当分の削減となり、修繕費は元のプラント建設コストに対する 2%のままとなる。従来の買電コスト 24 円/kWh と同値となるためには、プラント建設コストの内、3,000 頭規模で約 40%、2,000 頭規模で約 50%、1,000 頭規模で約 64%の助成金が必要となることが示唆された。

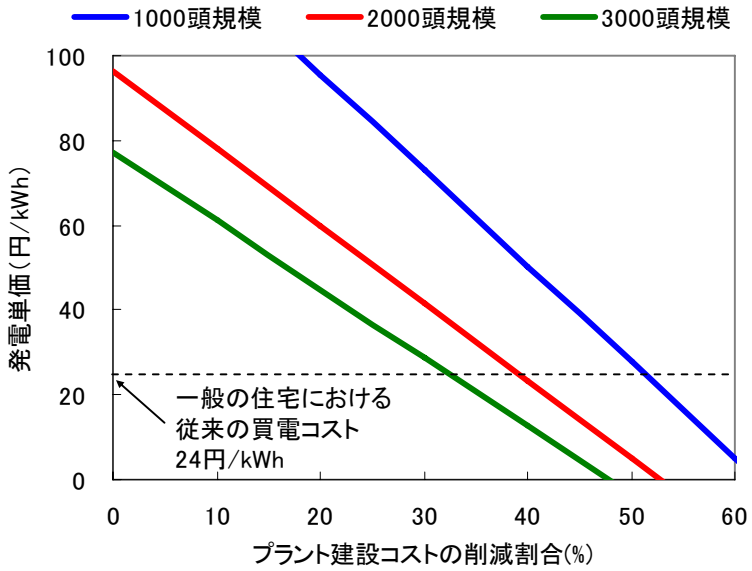


図 1.3.37 プラント建設コストの削減割合に対する発電単価の変化

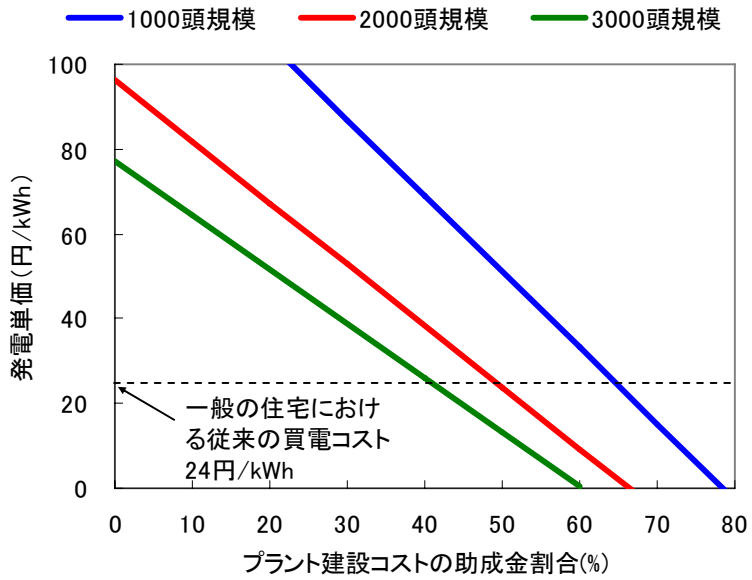


図 1.3.38 プラント建設コストの助成金割合に対する発電単価の変化

ii) 基本モデルⅡ-1

基本モデルⅡ-1 におけるプラント建設コストの削減割合に対する発電単価の変化についてのシミュレーション結果を**図 1.3.39** に示す。燃料電池自動車用水素価格として目標とする水素価格 40 円/m³と同値とするため、プラント建設コストの削減のみを考えた場合、3,000 頭規模で約 25%、2,000 頭規模で約 30%、1,000 頭規模では約 50%の削減が必要であることが示唆された。

また、プラント建設費に助成金を受けた場合についての同様なシミュレーション結果を**図 1.3.40** に示す。この場合、燃料電池自動車用水素価格として目標とする水素価格 40 円/m³と同値とするためには、3,000 頭規模で約 30%、2,000 頭規模で約 40%、1,000 頭規模で約 60%のプラント建設コストの削減が必要と試算された。

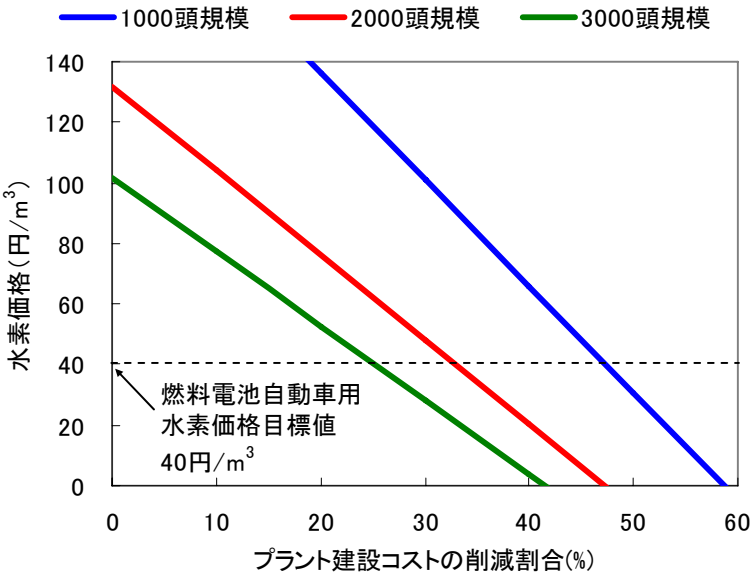


図 1.3.39 プラント建設コストの削減割合に対する水素価格の変化

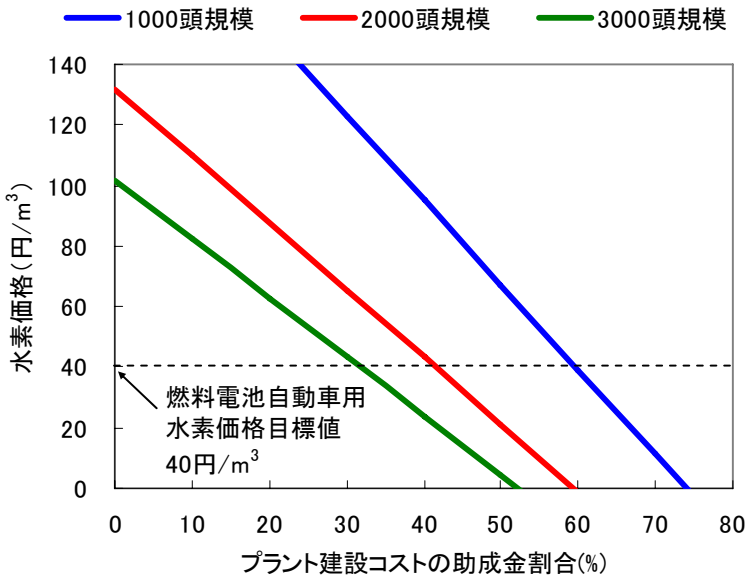


図 1.3.40 プラント建設コストの助成金割合に対する水素価格の変化

以上、プラント建設コストのみに注目して、それをどの程度削減すれば BTH システムが現状システムと競合することができるのか、その目標とする目安を明らかにした。この他、投入する有機性廃棄物量を増加すれば、その処理料金の収入と水素製造量の増加からプラントの経済性は向上する。しかし、地域から産出する有機性廃棄物量には限度があり、プラントの普及に伴いそれらが分配されれば、プラント 1 基当りの有機性廃棄物投入量は逆に少なくなっていくものと考えられる。それゆえ、有機性廃棄物投入量の増加に伴う経済性の向上は本質的な解決方策ではないものと考えられる。それは普及の初期段階において経済性を高める有効な手段となるが、長期的な普及段階では、本項で示したようなプラントの建設コストの削減をはじめとするプラント運用コスト全体の低減が必要となるであろう。

(7) BTH システムの経済性向上の方策

i) プラントの普及及び技術開発等によるコスト削減

上記に述べたプラント建設コストの削減について考えられることは、BTH プラントの普及に伴う建設コストの低減である。本報における試算ではプラント建設コストの大部分を実証プラント建設時の施工データを基礎に算出しているので、プラントの普及に伴い建設費は本報の試算より安くなる可能性は十分にあるものと考えられる。また、本研究の実証プラントにおいてバイオガス及び水素製造にかかるプロセス技術について実証を行ってきたが、今後はコストダウンを行う技術開発が必要と考えられる。そして現在すでに実施されているところであるが、プラントの普及および技術開発を推進するためには国や自治体からの助成金が当面の間必要であると思われる。

ii) 環境コストを取り入れた新たな経済システムの導入

環境コストを取り入れた新たな経済システムとして、CO_2 排出権取引制度活用や環境税などの

導入が期待される。

農業分野における CO_2 排出権取引制度の本格的な活用はこれからであるが、将来的にはあらゆる分野に対して CO_2 排出権取引市場が拡大するものと予想される。ここで EU-ETS での売却単価（2006 年 11 月現在）を 1t-CO_2 当り 20 ユーロ（約 3,000 円）を参考として、基本モデルⅠ-1 の乳牛 2,000 頭規模 BTH システムの導入で削減された温室効果ガス量 1,285t-CO_2/年について売却額を算出すると、約 385 万円/年の収益ということになる。これは、**図 1.3.34** に示した BTH プラント運営における年間支出の約 2%に相当する。わずかな収益と思われるが、発電単価は本試算方法によれば、全体の収益増に対して約 2 倍の感度で減少する。すなわち、年間 2%の収益があれば発電単価は約 4%減少する。今後 CO_2 排出量取引金額はさらに上昇することが予想され、売却単価の上昇に伴いけっして無視できない重要な収益となるものと考えられる。

環境税についても将来の社会的状況を踏まえて、今後その導入に向けて本格的な議論がなされていくものと考えられる。環境省（平成 17 年 10 月）提出の環境税具体案では税率を 2,400 円/t-C（8,800 円/t-CO_2）とし、その税収は地球温暖化対策の促進に用いるとしており、BTH システムのような温室効果ガス削減に貢献する施設に対して具体的な優遇措置が期待される。

以上のように、BTH プラントが有する環境性の向上効果をいかにプラントの経済性に振り替えていけるのか、それは具体的にだれからどのように手当てされるのか、今後重要な焦点になるものと考えられる。

1.3.3.5. 小括

BTH システムの基本モデルⅠと基本モデルⅡ及び運搬車両を燃料電池自動車とした場合それぞれについて、環境性及び経済性について定量的な評価を行った。次にその結果をまとめる。

1) LCA 手法を用いて BTH システム基本モデルⅠⅡの導入前後における温室効果ガス排出量を比較し、その削減効果を定量的に検証した。一例として基本モデルⅠ-1 における 2,000 頭規模 BTH プラント導入により、温室効果ガスは年間約 1,285t-CO_2（約 0.65t-CO_2/年・頭）が削減できる。
2) 乳牛ふん尿や消化液の運搬車両燃料からの温室効果ガス排出量が大きいことから将来の運搬車両として燃料電池自動車を想定した場合について試算した。その結果、温室効果ガス削減量はさらに向上できることが示唆された。
3) BTH システムの基本モデルⅠについて水素エネルギーの発電単価を試算した結果、従来の電力会社から購入する買電単価 24 円/kWh と比較して割高な値となった。基本モデルⅡについては水素価格を試算し、燃料電池自動車用水素価格の目標値 40 円/Nm^3 より高い価格となることを確認した。
4) プラント建設コストに対する発電単価及び水素価格の変化をシミュレーションし、BTH プラントが現状システムと競合する点のプラント建設コスト削減の目標を示唆した。例として 2,000 頭規模 BTH システムでは、基本モデルⅠの場合で約 40%、基本モデルⅡで約 30%のプラント建設コストの削減が目安である。

1.3.4. 水素製造・利用におけるインフラ整備と法規制

前節までは BTH システムの基本モデルⅠ及び基本モデルⅡについて、実証試験に基づき技術的に可能なものとして検討を行ってきた。本節では現状においてそのインフラ整備を行う場合の法的規制及び規制緩和の課題点等について検討を行った。ただし、水素スタンドについてはすでに規制緩和が進められており、圧縮天然ガススタンドとほぼ同程度の取り扱いとなりつつある。ここでは水素スタンドの規制緩和と参照し、主として基本モデルⅠについて述べる。(1)BTH プラントの運用、(2)水素輸送、(3)住宅付近における圧縮水素の貯蔵と利用の各工程に分けて主な法規制事項について次に記す。

1.3.4.1. BTH プラントの運用（バイオガスからの水素製造・貯蔵施設）

BTH プラント運用に関連して、高圧ガス保安法、消防法、労働安全衛生法に係る法規制が挙げられる。その主な内容を**表 1.3.13** に示し、具体的な条項等を以降に記す。BTH プラントの運用に関して各種許可申請が必要となるが、プラントの稼動に当たり問題となる法規制はない。ただし、各資格を持った人員の常駐が義務付けられており、それが運用上の経済的な負担となることが考えられる。燃料電池自動車用の水素を供給する水素スタンドにおいては規制緩和がなされ、その常駐義務が課せられない。水素スタンドとほぼ同等な機能をもつ BTH プラントにおいても同様な規制緩和の適用が望まれるところである。

表 1.3.13　BTH プラントの運用に係る関係法令と主な内容

関係法令	関連する主な内容
高圧ガス保安法	【製造許可】第一種製造者 第一種製造業者の許可申請 ・第一種高圧ガス製造許可申請書、製造計画書 【第一種製造所の保安の届出】 ・危害予防規定の届出 ・販売事業の届出 ・人員（資格者）の届出と常駐義務 高圧ガス保安統括者1名 高圧ガス製造保安技術管理者1名 高圧ガス保安係員1名 高圧ガス販売主任者1名 ＊燃料電池自動車用水素スタンドの場合は常駐義務なし
消防法	水素ガス施設と危険物施設との保安距離20m以上等
労働安全衛生法	ボイラー作業主任者の選任等

① 高圧ガス保安法関連

【ガスの種類】高圧ガス(法第二条第一項、政令第三条関係)

【製造の許可】第一種製造者

●第一種製造者の許可申請(高圧ガス保安法第五条第一項)：知事

・様式第一種高圧ガス製造許可申請書、製造計画書(規則第三条関係)

・製造業者に係る技術上の基準を満足(法第五条、第六条、第七条、第八条関係)

・製造に係る貯蔵、導管による輸送のための技術上の基準(法第八条、法第十五条、規則第五条関係)

【第一種製造所の保安の届出】第一種製造者

●危害予防規定を定め知事に届出(法第二十六条、大規模地震対策特別措置法第六十三条第三項関係)

・様式第三十二危害予防規定届出書、危害予防規定(規則第六十三条第一、二項関係

●人員(資格者)

・高圧ガス保安統括者一名(法第二十七条の二第一項、規則第六十四条関係)

・高圧ガス製造保安技術管理者一名(法第二十七条の二第三項、規則第六十五条関係)但し、保安統括者による兼任が可能。

・高圧ガス製造保安係員一名(法第二十七条の二第四項、規則第六十六条関係)

・高圧ガス製造保安主任者一名(法第二十七条の三第一項、規則第六十九条関係)

・高圧ガス製造保安企画推進員一名(法第二十七条の三第二項、規則第七十条関係)

●販売事業の届出(法第二十条の四第一項第二号、規則第三十七条、規則第四十条関係)

・高圧ガスの種類を記載した書面、その他省令で定める書類添付

② 消防法関連

【防火管理】

●防火管理者を定める(法第八条、政令第三条関連)

●水素ガス施設と危険物施設の保安距離(法第十条の四関連)・保安距離 20m 以上(危険物の規制に関する政令第九条第一項第一号、規則第九条第一項二、規則第十二条第一項関連)

③ 労働安全衛生法

● 医師その他厚生労働省令で定める者に、労働者の健康管理等の全部又は一部を行わせるよう務める(法第十三条の二、規則第十四条第二項関連)

● ボイラー作業主任者の選任(法第十四条、令第六条第一項第四号、規則第十六条、第十八条関連)

1.3.4.2. 水素輸送（圧縮水素ガスの一般道路における輸送）

水素の輸送に関連して、次の高圧ガス保安法、消防法、道路運送車両法、道路法に係る法規制が挙げられる。その主な内容を**表 1.3.14** に示し、具体的な条項等を以降に記す。水素輸送に関して問題となる法規制はない。ただし、輸送に当たっては有資格者による監視等が必要となる。

表 1.3.14　水素輸送に係る関係法令と主な内容

関係法令	関連する主な内容
高圧ガス保安法	高圧ガスを移動する際のその容器についての保安上の必要な措置等 ＊保安上の措置、技術上の基準が定められているが、届出または許可等は義務付けられていない。
消防法	危険物と高圧ガスの混載禁止等
道路運送車両法	ガス容器を運送するための構造及び装置を有する自動車の基準等
道路法	水底トンネルに類するもの（延長5,000m以上のトンネル）の通行制限

① 高圧ガス保安法関連

【車両による高圧ガスの移動】

●高圧ガスを移動するにはその容器、積載方法及び移動方法について省令で定める技術上の基準に従う(高圧ガス保安法第二十三条、規則第四十八条、規則第五十条関連)

●運転者は以下の場合は二名以上(規則第五十条関連)

ｲ.連続運転時間が四時間を超える場合

ﾛ.運転時間が一日あたり九時間を超える場合

② 消防法関連

【車両による高圧ガスの移動での禁止事項】

●危険物と高圧ガスの混載の禁止(法第十六条、政令第二十九条第一項第六号、省令第四十六条第一項第二号関連)

③ 道路運送車両法関連

【ガス運送装置を備える自動車等】

●その他のガス容器を運送するための構造及び装置を有する自動車の構造及び装置(法第二条第一項、第四十六条、保安基準第二十八条関連)

④ 道路法関連

【車両の通行制限】

●高圧ガスが規制対象(法第四十六条第三項、政令第十九条の十二第一項関連)

●水底トンネルに類するもの(延長 5000m 以上のトンネル)の通行制限(省令第四条の九、第四条の十関連)

1.3.4.3. 住宅付近における水素貯蔵と利用

住宅付近における水素貯蔵と利用に係る関係法令と主な内容について**表 1.3.15** に示す。建築基準法により規制がある。本水素利用モデルでは純水素による供給・利用であり、その場合の一般住宅地域での水素の貯蔵・利用は不可である。燃料電池車等の燃料とする水素製造・貯蔵に関してはこの規制は適用されない。水素スタンド同様の規制緩和が望まれる。

表 1.3.15　住宅付近における水素貯蔵と利用に係る関係法令と主な内容

関係法令	主な規制内容
高圧ガス保安法	・第一種貯蔵所（水素300m^{3}以上）の申請・許可 ・特定高圧ガス消費届 ・取扱主任者の選任と届出
建築基準法	・第一種住居専用地域での原則建設不可。（建築基準法第四十八条関連） ・建築基準法施行令の一部改正する政令（平成17年3月） 特定圧縮水素スタンドに関する規制の改正により、用途規制は適用しない。
消防法	燃料電池設備の構造及び性能基準の関係部分の適用等。
労働安全衛生法	ガス集合装置と消費設備との離隔距離5m以上等。

① 高圧ガス保安法関連

【高圧ガスの貯蔵】

●第一種貯蔵所の申請・許可(高圧ガス保安法第十六条第一項、第十八条規則第二十条第一項関連):知事

・様式第七第一種貯蔵所許可申請書　貯蔵の目的、技術上の基準、位置図等書類添付

●特定高圧ガス消費届け(法第二十四条の二、三、政令第七条):知事

・特定ガス消費に係る技術上の基準を満足(省令第五十五条第一項、第二項関連)

② 建築基準法関連

【用途地域】

●第一種住居専用地域での原則建設不可(建築基準法第四十八条関連)

●建築基準法施行令の一部改正する政令(平成 17 年 3 月)

特定圧縮水素スタンドに関する規制の改正により、用途規制は適用しない。⇒ボンベ貯蔵施設に適用出来れば建設可能。

③ 消防法関連

【貯蔵所(ボンベ減圧から消費器具までのガス移動】

●燃料電池設備の構造及び性能基準の関係部分を適用(法第十二条第四号ｲ(ﾛ)関連)

【ガス、蒸気又は粉塵の暴発防止】

●有効な換気、集塵若しくは防爆措置(火災予防条例に基づく協議)

④ 労働安全衛生法関連

【ガス集合装置の設置基準】

●ガス集合装置と消費設備との離隔距離 5m 以上　他(法第五十七条第一項、令第一条第一項第二号、規則第三百八条関連)

●ガス集合装置室の構造(第三百九条関連)

1.3.4.4.　小括

本項では BTH システムにおける法規制について述べた。基本モデル I の住宅地における定置型燃料電池利用についての法規制について次にまとめる。

1) BTH プラント稼動において、障害となる規制はない。ただし、各資格を持った人員の常駐が義務付けられており、運用上の経済的な負担となることが考えられる。水素スタンドでは常駐義務が除外されており、ほぼ同等な機能をもつ BTH プラントにおいても同様な規制緩和の適用が望まれる。
2) 水素運搬に関してはとくに問題となる規制等はない。
3) 住宅付近における水素貯蔵について、建築基準法より水素貯蔵施設の建設はできない。しかし、このことについても水素スタンドの場合については圧縮天然ガススタンド並の水素貯蔵が可能となっている。基本モデル I の場合にも同法が適用されれば建設可能となる。

1.3.5 まとめ

1.3 では実証プラントにおける実験結果を基礎に地域におけるバイオガスからの水素供給・利用について検討した。次に本項の結果をまとめる。

1) BTH プラントの規模や副資材投入量の条件における水素供給量を試算し、地域のコミュニティ単位で水素エネルギー利用可能であることを示唆した。
2) 温室効果ガス排出量の試算し、BTH プラント導入により環境改善効果があることを定量的に検証した。
3) 水素エネルギー利用の発電単価は従来の買電単価と比較して割高となることが試算された。現状のエネルギーシステムと競合するためには、プラント建設コストや水素製造コストの低減のための技術開発等を行うと同時に今後は CO_2 排出権制度の活用や環境税などの導入が重要になってくるものと考えられる。
4) 現行の建築基準法では住宅地域において蓄ガス設備の設置には制限があるが、燃料電池自動車用の水素スタンドではその規制適用外と改正されているため、同様な法規制の緩和は進行していくものと考えられる。

本節ではバイオガスから水蒸気改質による水素製造と 40MPa シリンダーによる水素輸送を行う BTH システムを想定し、検討を行った。しかし水素関連の技術は開発途上であり、必ずしも本研究で設定した BTH システムのモデルが適切とは限らない。とくに水素貯蔵・輸送に関しては、さらに高圧ボンベや液体水素、水素吸蔵合金、あるいは有機ハイドライド等があり、それぞれが一長一短の特徴を有している。そのため、水素エネルギーの利用方法により適切な水素貯蔵方法は異なるものと考えられる。今後、これらの技術開発の動向を見据えていく中で比較検討を行うことが重要と考えられる。

また、本研究では環境性として温室効果ガス排出量のみを取り上げ検討した。しかし、水素・燃料電池システムの環境面の効果はそれだけではない。大気環境として他重要なものに NOx や SOx といった大気汚染物質が挙げられるが、水素・燃料電池システムは内燃機関でないため、ほとんどそれらの公害物質を排出しない。そしてこのことに関わり、水素エネルギー利用における健康への便益についての報告もなされている[14]。これら総合的な水素エネルギー利用の効用が一般に理解され、普及が促進されることに期待したい。

参考文献

1) 独立行政法人北海道開発土木研究所：地球温暖化対策に資するエネルギー地域自立型実証研究（平成 15～17 年度)、最終年次報告書、2006.
2) 大久保天、秀島好昭、主藤祐功：エネルギー地域自立型実証実験施設の稼動概要、北海道開発土木研究所月報 No.623、pp.42-49、2005.
3) 主藤祐功，大久保天，秀島好昭，中村諭，垣原肇，中村哲成，佐藤幸雄：バイオガスからの水素および芳香族化合物の製造試験　(独)土木研究所寒地土木研究所月報，No.640，21-28、2006.
4) 主藤祐功、大久保天、秀島好昭：有機ハイドライドを用いた水素供給および燃料電池運転特性、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所月報 No.648、20-30、2007.
5) 独立行政法人北海道開発土木研究所：積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト（平成 12～16 年度）最終成果報告書、2006.
6) 福岡水素エネルギー社会近未来展 2006 - FUEL CELL & HYDROGEN TECHNOLOGY - 専門技術セミナー資料、pp.80-162、2006.
7) NEDO 技術開発機構：燃料電池導入ガイドブック、106-111、2005.
8) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 15 年度～平成 16 年度成果報告書　水素安全利用等基盤技術開発　水素に関する共通基盤技術開発　水素シナリオの研究-1、2005.
9) トヨタ自動車 HP <http://toyota.jp/>
10) 小野学、鵜川洋樹：共同利用型バイオガスシステムの経済性と成立条件－バイオガスプラントの利用実態と経済性シミュレーション－：独立行政法人北海道開発土木研究所月報 No.635、19-29、2006.
11) 山岸一夫著：空気調和・衛生工学会新書コージェネレーションとその応用、116-117、理工図書、1994.
12) 化学工学編修委員会編　基礎シリーズ　化学工学入門、284-292、実教出版、1999.
13) 市川　治、中原准一、干場信司監修：酪農ジャーナル　酪農バイオガスシステムの社会的・経済的評価　酪農学園大学エクステンションセンター、73-79、2006.
14) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 15 年度～平成 16 年度成果報告書　水素安全利用等基盤技術開発　水素に関する共通基盤技術開発　水素シナリオの研究-2

2. 副生成芳香族の有効活用技術

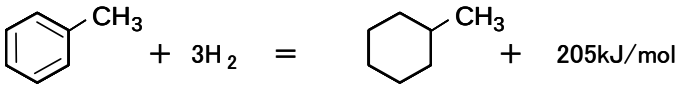
2. 副生成芳香族の有効活用技術

2.1. ベンゼン水素化技術開発の背景

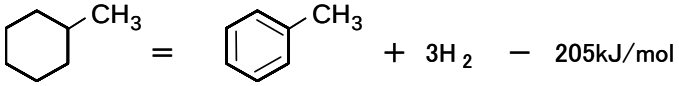
酪農業が盛んな地域においては多量の家畜糞尿が排出されるが、これらの有機性資源を嫌気性発酵処理することによりバイオガスが産出する。バイオガス成分の約 60%は可燃性ガスとして知られるメタンであり、地域のエネルギー源として期待されている。また、バイオガスの触媒改質によりクリーンエネルギーである水素や、従来は石油や石炭などから生産されてきた化学基礎原料の製造が可能である。その中でもメタンの脱水素芳香族化反応は(2.1.1)式に示すように水素と有用化学原料であるベンゼンを同時に生成する反応である。

$$CH_4 = 1/6C_6H_6 + 3/2H_2 - 88.4kJ/mol\ (298K) \qquad (2.1.1)$$

(独)土木研究所 寒地土木研究所では平成 15 年度にバイオガスプラント（別海資源循環試験施設）に隣接して設置したエネルギー地域自立型実証研究施設においてバイオガスから水素とベンゼンを同時製造する実証試験を実施した [1)−5)]。また、(2.1.2)式に示すように生成した水素をトルエンに付加してメチルシクロヘキサンの形で一時貯蔵し、さらに、(2.1.3)式に示す脱水素反応により水素を発生させ、その水素を用いて燃料電池発電を行う実験を行ってきた [6)−9)]。

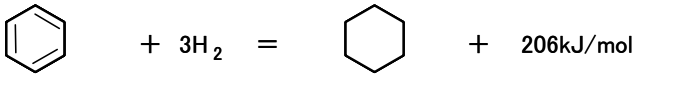


(2.1.2)

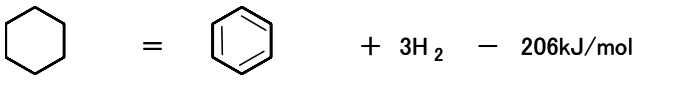


(2.1.3)

一方、メタンの脱水素芳香族化反応によって生成したベンゼンについては酪農地域における活用手段が無く、現状では大規模需要地である各地の石油化学コンビナートに輸出するよりほか無い。そこで、ベンゼンの酪農村等における利用を考慮した応用性の改善を目的として、ベンゼンの水素化によるシクロヘキサンの製造を検討した。シクロヘキサンはナイロンの中間原料として年間約 65 万トンの国内需要があり、溶剤としても利用されている化学基礎原料の一つで、ガソリンの含有成分の一つでもある。また、(2.1.4)式の反応により水素をベンゼンに付加するとシクロヘキサンの形で水素を貯蔵することができ、(2.1.5)式の脱水素反応により水素を生成できることから、シクロヘキサンの用途として燃料への添加と水素キャリアとしての利用について検討した。



(2.1.4)



(2.1.5)

なお、この研究の一部は平成 18 年度ノーステック財団「研究開発助成事業」基盤的研究開発育成事業の研究開発シーズ育成補助金（研究開発テーマ名「バイオガス由来ベンゼンの応用性改善のための改質技術開発」）により実施したものである。

2.2. ベンゼン水素化技術

2.2.1. ベンゼン水素化の原理

工業的なベンゼン水素化プロセスは、液相プロセスとしては IFP 法など、気相プロセスとしては宇部法などがある。これらの操作条件は IFP 法が均一系 Ni 触媒を用いて圧力 1.0～2.5MPa、温度 150～200℃で、宇部法が Ni 系触媒を用いて圧力 0.7～3.0MPa、温度 150～200℃で行われているが、本研究では Pt を担持した活性炭繊布触媒を用いて圧力 0.3MPa、温度 200～250℃の操作条件で行う Wet-dry 多相反応方式を用いた。**図 2.2.1** に水素化反応の模式図を、**写真 2.2.1** に Pt 担持活性炭繊布触媒の外観を示す。Wet-dry 多相反応では水素雰囲気中で触媒上にベンゼンを噴霧すると、Pt 粒子の作用により水素分子(H_2)の H-H 結合が切断されて水素原子(H)となり、水素原子(H)はベンゼンの二重結合部において C-H 結合し、最終的に生成したシクロヘキサンが触媒から解離する。

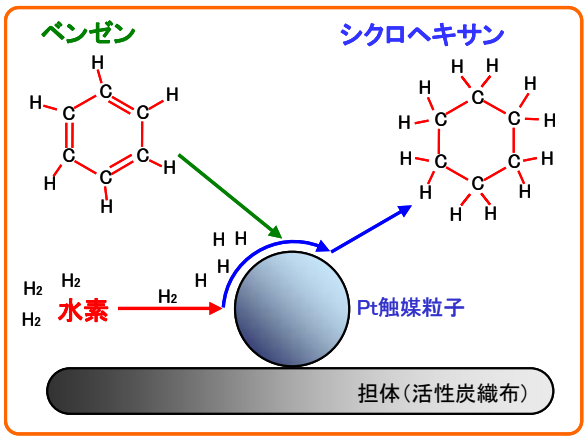


図 2.2.1　水素化反応の模式図

写真 2.2.1　Pt 担持活性炭繊布触媒の外観

2.2.2. ベンゼン水素化設備

水素化設備の外観を**写真 2.2.2** に、水素化設備のフロー図を**図 2.2.2** に示す。内径 305.5mm×高さ 1148mm の Wet-dry 多相式反応器内には 10wt%Pt／活性炭繊布触媒、計 315g を表面に貼り付けたプレート式触媒加熱ヒーターが設置されている。また、Wet-dry 多相式反応器の下流には固定床反応器を設置しており、固定床触媒を充填できるようになっている。

本装置では原料ベンゼンをリザーバータンクに貯留した後、ポンプで供給ラインに注入し、噴射側及び開放側の作動弁を ON/OFF することによって反応器に 6 本×4 段設置された噴射口より

ベンゼンを周期的に噴射する。また、反応器内には水素を供給し、水素が反応によって消費され圧力が低下したら所定圧力になるように制御する。このとき反応器内は液相と気相が混在した状態である。生成したシクロヘキサンと未反応ベンゼン及び水素の混合気体（一部液体）は熱交換器を通過した際にシクロヘキサンとベンゼンが液化され、回収タンクに貯留される。

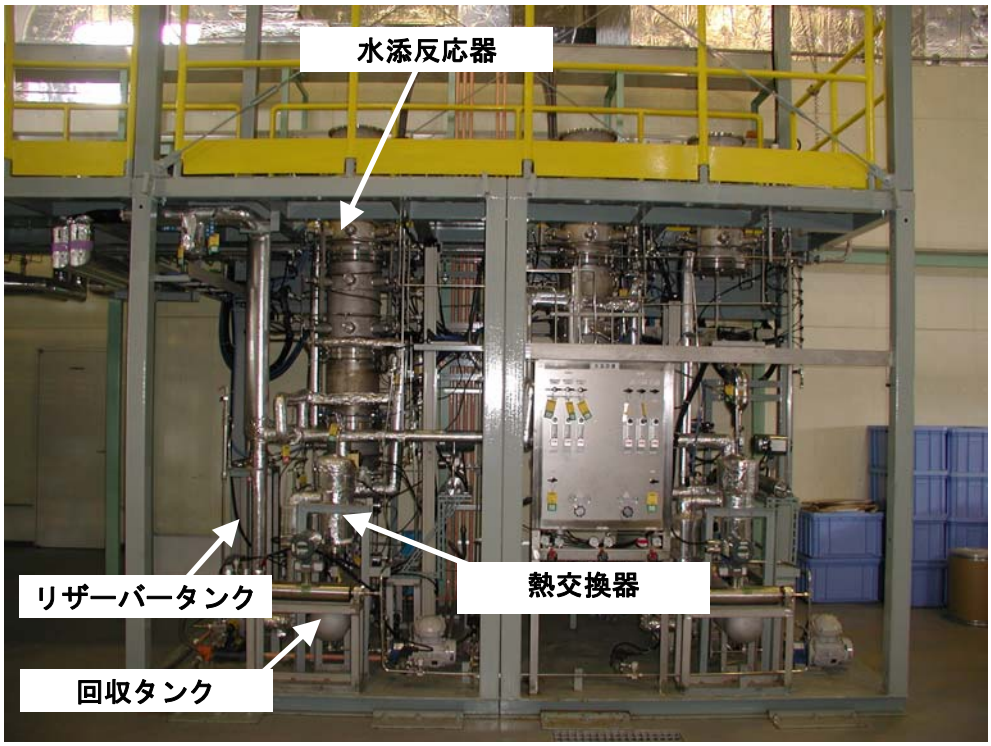


写真 2.2.2　水素化設備の外観

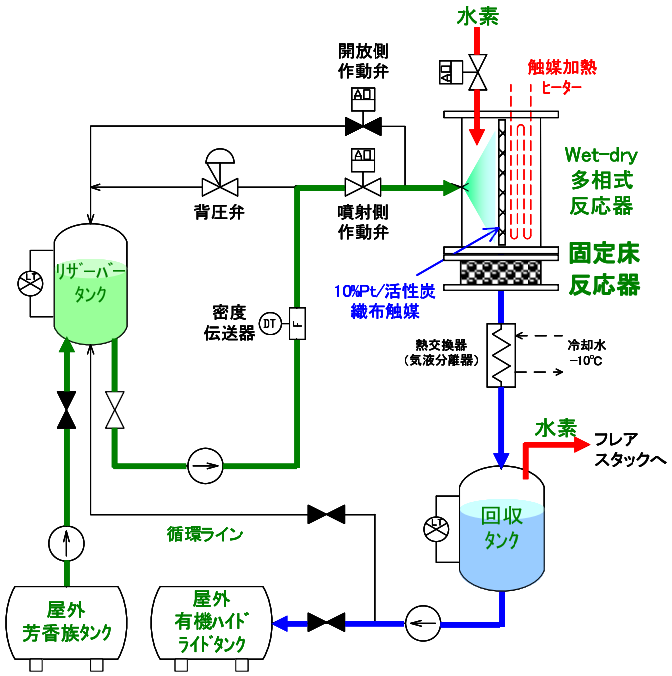


図 2.2.2　水素化設備のフロー図

2.2.3. 試験条件

試験で用いた原料は試薬ベンゼン（>99.5%）と工業用水素（>99.9%）である。また、最も高い転化率を示した条件を選定してバイオガス由来のベンゼンを用いて水素化実験を行った。原料ベンゼンの噴射時間、減圧時間、噴射圧力、反応圧力および触媒加熱温度はトルエン水素化試験の条件を踏襲し、それぞれ 350msec、40msec、1MPa、0.4MPa、250℃とした。**表 2.2.1** に原料ベンゼン投入速度と反応水素速度など試験条件を示す。

表 2.2.1　原料ベンゼン投入速度と反応水素速度など試験条件

目標転化率	原料投入速度 [ml/min]	[L/h]	[g/h]	触媒Pt重量[g]	転化率 X	WHSV [g/Pt-g]	反応速度定数 k	反応水素量[Nm^3/h]	噴射周期 [sec]
TOL水素化	139.5	8.4	7280.2	31.5	0.59	231.1	332.4	3.1	―
60%	133.7	8.0	6980.9	31.5	0.60	221.6	332.4	3.6	6.04
70%	86.0	5.2	4487.7	31.5	0.70	142.5	332.4	2.7	9.39
80%	50.1	3.0	2617.8	31.5	0.80	83.1	332.4	1.8	16.10
90%	22.3	1.3	1163.5	31.5	0.90	36.9	332.4	0.9	36.23

2.2.4. ベンゼン水素化反応の物質収支と転化率

表 2.2.2 にベンゼン水素化試験の物質収支を示す。Wet-dry 多相式反応単独では、噴射周期が長くなるに伴い転化率は増大し、目標転化率 90%の条件、すなわち最もベンゼン投入速度の遅い条件で最大値 87.5%を示した。一方、原料ベンゼンの投入速度が減少することにより水素化物であるシクロヘキサンの生成速度も低下した。また、バイオガス由来ベンゼンを用いた実験は目標転化率 90%の条件で行い、反応水素速度、転化率、触媒温度の推移は試薬ベンゼンを用いた場合と同等となり、転化率は 87.2%を示した。

表 2.2.2　ベンゼン水素化試験の物質収支

	Wet-dry多相式反応					Wet-dry多相式反応＋固定床反応				
原料ベンゼン	試薬ベンゼン				ﾊﾞｲｵﾍﾞﾝｾﾞﾝ	試薬ベンゼン				ﾊﾞｲｵﾍﾞﾝｾﾞﾝ
噴霧速度(ml/min)	133.3	88.9	45.8	22.7	23.4	138.3	82.7	44.2	21.9	21.6
目標転化率	60%	70%	80%	90%	90%	87%	89%	92%	94%	94%
投入ベンゼン(L)	39.3	32.0	16.5	8.2	8.4	47.9	34.5	20.2	10.9	9.3
反応水素(Nm3)	20.7	18.2	10.0	5.3	5.5	32.3	26.0	15.3	8.3	7.1
未反応ベンゼン(L)	11.9	8.0	3.3	1.1	1.2	5.2	0.1	0.0	0.0	0.0
生成ｼｸﾛﾍｷｻﾝ(L)	32.6	28.6	16.4	8.7	8.8	49.8	40.6	22.7	11.5	10.0
転化率(%)	71.5	76.5	81.9	87.5	87.2	89.1	99.7	100.0	100.0	100.0

これに対して、Wet-dry 多相式反応と固定床反応を連結した試験の場合、最もベンゼン投入速度の速い条件においても転化率は 89.1%となり当初の予測値よりも高い値を示した。また、ベンゼン投入速度 90ml/min 以下の試験では、転化率がほぼ 100%となり、固定床反応を連結した効果が認められた。

図 2.2.3 に原料投入量と転化率および反応水素量との関係を示すが、反応水素速度、すなわち水素貯蔵速度についても固定床反応の連結による向上が認められた。これにより高い転化率と比較的速い反応水素速度を満たす条件としてベンゼン投入速度約 90ml/min が適当であると判断された。

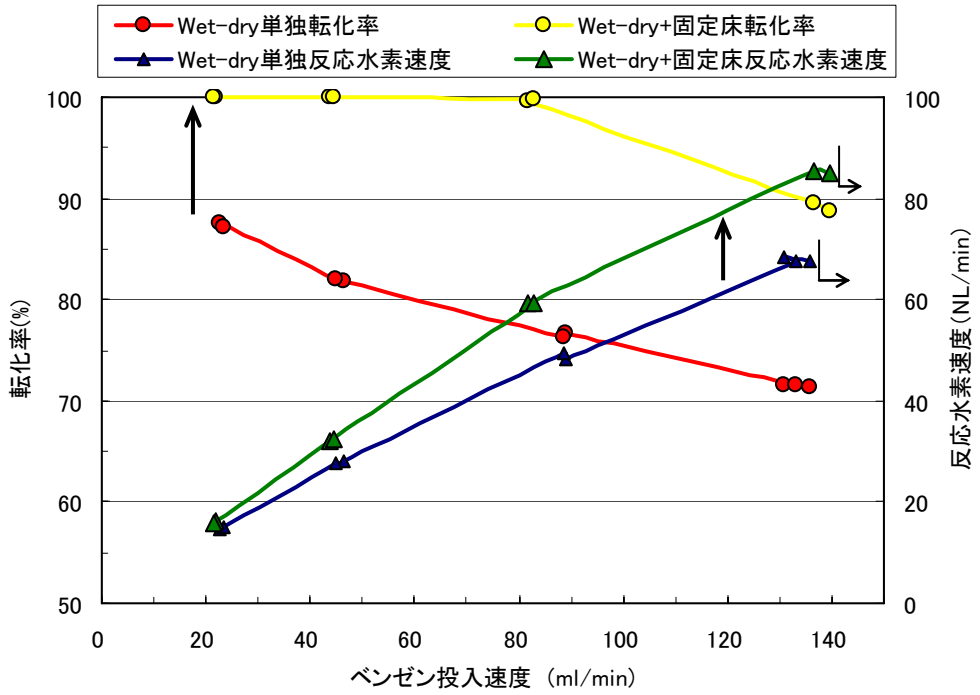


図 2.2.3 原料投入量と転化率および反応水素量

2.2.5. ベンゼン水素化反応のエネルギー収支

表 2.2.3 にベンゼン水素化試験のエネルギー効率を示すが、原料投入速度を低下させると転化率は増加するものの、付加される水素量が減少するのでエネルギー効率は低下した。また、水素 1 m^3 当たりの投入熱量は原料投入速度の低下に伴い増加したが、これは噴射周期を長くすることで待機時間が増加するためである。加えて本反応が発熱反応であることから、シクロヘキサンの生成量の減少に伴い供給される反応熱が減少するため、さらに投入熱量が増加したためと考えられる。

これに対して固定床反応を連続した場合、**表 2.2.3** のエネルギー効率 1（冷却水による熱回収を含めないエネルギー効率）はベンゼン投入速度 130ml/min 試験の時 0.76 となり最大値を示し、ベンゼン投入速度が高い試験条件ほど効率も高くなる傾向であることが読み取れる。補機電力はどの試験条件でも同等の値を示しており、ヒーター消費電力量と水素熱量が効率に直接影響を与

えていることがわかる。ベンゼン投入速度がほぼ同等な 130ml/min 試験と Wet-dry 多相式反応のみの試験の転化率 60%試験との比較では、転化率に関しては 89.1%と 71.5%で 17.6%向上した。さらに、エネルギー効率は 0.76 と 0.70 で本年度試験が 6%向上した。他の条件に関しても、転化率は 12.5～23.3%向上し、エネルギー効率 1 は 2～4%向上した。そして、水素 1m^3 を水素化するのに投入した熱量に関しても H18 年度に実施した Wet-dry 多相反応単独よりも 0.4～1.0kWh/d（1.44～3.6MJ/d）削減できた。このように Wet-dry 多相反応と固定床反応との連続はエネルギー効率や転化率向上に効果的であることが確かめられた。

表 2.2.3　ベンゼン水素化試験のエネルギー収支

試験条件	試験年度	H19年度　Wet-Dry多相反応+固定床反応					H18年度　Wet-Dry多相反応				
	ベンゼン投入速度[ml/min]	130	90	45	20	20	130	90	45	20	20
	原料芳香族種類	試薬ベンゼン（1級）				バイオベンゼン	試薬ベンゼン（1級）				バイオベンゼン
	固定床ヒーター温度[℃]	200					なし				
	Wet-dryヒーター温度[℃]	250					250				
	チラー水設定温度[℃]	−10			±0		−10				
試験結果	ベンゼン投入速度[ml/min]	138.3	82.7	44.2	21.9	21.6	133.3	88.9	45.8	22.7	23.4
	転化率[%]	89.1	99.8	100.0	100.0	100.0	71.5	76.5	81.9	87.5	87.2
水素熱量	燃焼熱量[kWh/day]	471.0	319.0	170.8	88.2	83.5	393.6	288.2	167.6	87.4	88.4
投入熱量	Wet-dryヒーター[kWh/day]	14.9	29.8	43.5	60.2	58.3	36.6	48.0	63.0	78.0	78.0
	固定床ヒーター[kWh/day]	0.2	0.2	4.5	5.8	4.7	なし				
補機電力量	動力盤[kWh/day]	3.8	3.6	3.0	3.6	3.6	2.9	3.0	3.6	3.0	3.0
	制御盤[kWh/day]	5.6	5.8	5.6	5.8	5.7	6.1	5.7	5.7	5.6	5.7
	気液分離チラー[kWh/day]	124.1	123.8	114.9	107.3	101.6	125.5	116.8	108.6	117.5	117.7
回収熱量	冷却水[kWh/day]	59.7	49.4	42.7	33.4	31.4	45.9	43.5	42.7	45.5	45.8
効率	効率1	0.76	0.66	0.50	0.33	0.32	0.70	0.62	0.48	0.30	0.30
	効率2(熱回収あり)	0.86	0.76	0.62	0.45	0.45	0.78	0.72	0.60	0.46	0.46
水素1Nm3当たりの投入熱量[kWh]		1.1	1.8	3.6	7.3	7.4	1.5	2.1	3.8	8.3	8.2

2.3. 生成物の特徴と利用途

2.3.1. 原料ベンゼン、および回収シクロヘキサンの成分

直接改質により生成したバイオガス由来のベンゼンとその水素化により生成したシクロヘキサン（ベンゼン投入速度 21.6ml/min、転化率 100%）の 2 サンプルの微量成分、計 31 種について定量分析を実施した。**表 2.2.4** にバイオガス由来ベンゼンと生成シクロヘキサンの微量不純物分析結果を示す。

(1) バイオガス由来ベンゼン

バイオガス由来ベンゼンでは、アセトニトリルやプロピオニトリルといった窒素化合物、プロピレン、1,3-シクロペンタジエン、シクロペンテン、シクロペンタン、トルエン、ビシクロヘプタン、メチルシクロヘキサン、ナフタレン、1-メチルナフタレンといった炭化水素が検出された。

窒素化合物の生成はバイオガス中の残留 N_2 によるものと考えられ、特に空気の混入防止策を講じることで低減できると考えられる。また、プロピレン、1,3-シクロペンタジエン、シクロペンテン、シクロペンタン、トルエン、ビシクロヘプタン、メチルシクロヘキサン、ナフタレンはメタンの脱水素芳香族化反応により生成したものと考えられる。

一方、1-メチルナフタレンはバイオガス由来ベンゼンの回収のために使用した芳香族吸収液が蒸留の際に混入したものと考えられ、適当な吸収液を使用すれば検出されないと考えられる。

(2) 生成シクロヘキサン

生成シクロヘキサンでは、新たにエタン、プロパン、i-ブタン、n-ブタン、i-ペンタン、n-ペンタン、メチルシクロペンタン、デカリン、1-メチルデカリンが検出された。

エタン、プロパン、i-ブタン、n-ブタン、i-ペンタン、n-ペンタンは水素化による芳香族の開環により生成したものと考えられる。また、メチルシクロペンタンはシクロヘキサンの異性体であり、ベンゼンの水素化により生成したと考えられる。デカリンと 1-メチルデカリンはそれぞれナフタレンと 1-メチルナフタレンの水素化物である。

一方、ビシクロヘプタンは水素化によって減少し、アセトニトリルやプロピオニトリル、プロピレン、1,3-シクロペンタジエン、シクロペンテン、シクロペンタンは水素化によって未検出となった。

表 2.2.4　バイオガス由来ベンゼンと生成シクロヘキサンの微量不純物分析結果（単位 ppm）

成分名	構造式	分子量	沸点	分析下限値	サンプル	
		g/mol	℃		ﾊﾞｲｵﾍﾞﾝｾﾞﾝ	ｼｸﾛﾍｷｻﾝ
アセチレンC2H2	CHCH	26.0	−85.0	1ppm	＜1	＜1
エチレンC2H4	CH_2CH_2	28.1	−104.0	1ppm	＜1	＜1
エタンC2H6	CH_3CH_3	30.1	−89.0	1ppm	＜1	130
アセトニトリルC2H3N	CH_3CN	41.1	82.0	1ppm	830	＜1
プロピレンC3H6	CH_3CHCH_2	42.1	−47.7	1ppm	3	＜1
プロパンC3H8	$CH_3CH_2CH_3$	44.1	−42.1	1ppm	＜1	190
エチルアミンC2H7N	$C_2H_5NH_2$	45.1	16.6	1ppm	＜1	＜1
プロピオニトリルC3H5N	$C_2H_5-C\equiv N$	55.1	96.0	1ppm	270	＜1
i−ブタンC4H10	$(CH_3)_2CHCH_3$	58.1	−12.0	1ppm	＜1	7
n−ブタンC4H10	$CH_3CH_2CH_2CH_3$	58.1	−0.5	1ppm	＜1	67
プロピルアミンC3H9N	$C_3H_7NH_2$	59.1	48.0	1ppm	＜1	＜1
1,3−シクロペンタジエンC5H6		66.1	41.0	1ppm	30	＜1
シクロペンテンC5H8		68.1	44.0	1ppm	17	＜1
シクロペンタンC5H10		70.1	49.3	1ppm	1	＜1
i−ペンタンC5H12	$(CH_3)_2CHC_2H_5$	72.1	28.0	1ppm	＜1	13
n−ペンタンC5H12	$CH_3(CH_2)_3CH_3$	72.1	36.0	1ppm	＜1	74
ベンゼンC6H6		78.1	80.1	1ppm	96.6%	240
シクロヘキサンC6H12		84.2	80.7	1ppm	＜1	96.8%
メチルシクロペンタンC6H12		84.2	72.0	1ppm	＜1	15
トルエンC7H8		92.1	110.6	1ppm	3.3%	9
ビシクロヘプタンC7H12 Norbornane		96.2	106.0	1ppm	10	7
メチルシクロヘキサンC7H14		98.2	100.9	1ppm	3	3.2%
エチルシクロペンタンC7H14		98.2	103.0	1ppm	＜1	＜1
ナフタレンC10H8		128.2	217.9	1ppm	150	＜1
テトラリンC10H12		132.2	206.0	1ppm	＜1	＜1
デカリンC10H18		138.2	195.5	1ppm	＜1	63
1−メチルナフタレンC11H10		142.2	244.6	1ppm	0.1%	＜1
1−メチルデカリンC11H20		152.3	244.6	1ppm	＜1	340
フタル酸ジエチルDiethyl PhthalateC12H14O4		222.2	296.0	1ppm	＜1	＜1
1,2−シクロヘキサンジカルボン酸ジエチルC12H20O4		228.3	135.0	1ppm	＜1	＜1
水分	H_2O	18.0	100.0	1ppm	390	22

2.3.2. 生成物の利用途

2.3.2.1. 燃料としての利用

既存燃料への混合利用の検討として、生成したシクロヘキサンのガソリンへの添加を想定した場合、大気汚染防止法に基づきガソリン中のベンゼン含有量が 1vol%以下に規制されていることを考慮する必要がある。**図 2.2.4** はレギュラーガソリンへの生成シクロヘキサン添加可能量を示したものであるが、Wet-dry 多相式反応単独の場合は最も転化率が高いときでも約 13%のベンゼンを含んでおり、レギュラーガソリンには 2%弱しか添加できない。一方、Wet-dry 多相式反応と固定床反応との連結により転化率を向上させた結果、反応水素速度が 59.2NL/min と比較的速いベンゼン投入速度 82.7ml/min の条件においても、シクロヘキサン純度は 99.7%に達しており、レギュラーガソリンに無制限に添加できる純度となった。

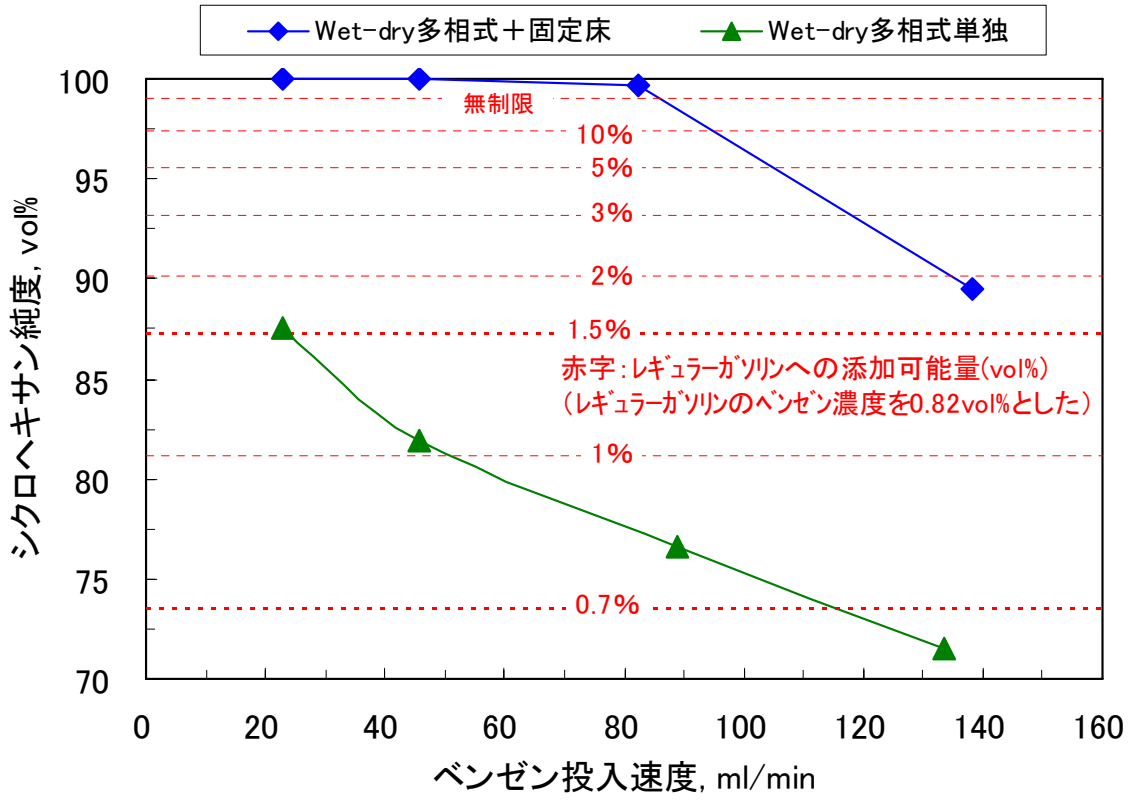


図 2.2.4　レギュラーガソリンへの生成シクロヘキサン添加可能量

2.3.2.2. 水素貯蔵媒体（有機ハイドライド）としての利用

図 2.2.5 に各水素キャリアにおける容積当り水素貯蔵密度を示す。そこで、水素キャリアとしてメチルシクロヘキサンとシクロヘキサンについて比較した。実績値よりメチルシクロヘキサン（17 年度）の転化率は 91%、シクロヘキサン（18 年度）の転化率は 87%として容積当り貯蔵密度を比較すると、シクロヘキサンでは水素を約 1/550 の容積に貯蔵することができ、メチルシクロヘキサンより約 14%向上した。今回、固定床反応器の連結を採用したことによってシクロヘキサン（19 度）の転化率は 100%となり、水素を約 1/620 の容積に貯蔵することができ、さらに容積当り貯蔵密度を 12%向上させることができ、水素キャリアとして有望であることが確認できた。

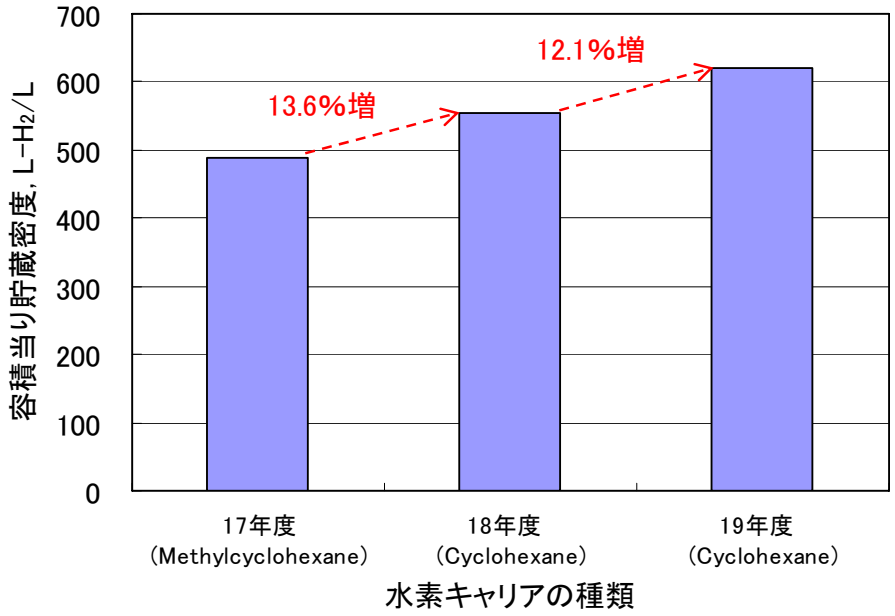


図 2.2.5　各水素キャリアにおける容積当り水素貯蔵密度

2.4. インフラ整備における留意点

シクロヘキサンはガソリンの成分にも含まれている物質であり、ガソリンと同等に取扱を行えば安全面でも問題はなく、貯蔵や輸送に関しても、既存の石油貯蔵タンク、タンクローリー、ガソリンスタンド等のインフラが活用できる利点がある。また、水素を取り出した後に生成するベンゼンは再び水素化することでシクロヘキサンとなるため、水素のキャリアとして何度でも循環して利用することができる。一方、シクロヘキサンは融点が 6.5℃であるため、積雪寒冷地において使用する場合は凍結に注意する必要がある。また、水素を取り出した後に生成するベンゼンは、外部に曝露しないような取扱が求められる。

シクロヘキサンとベンゼンの固化温度の問題については、ベンゼンにトルエンを 10%添加することで固化温度が－20℃まで低下することが知られており、この系について同様に容積当り貯蔵密度を比較すると 1.8%減となり、大きく低下することはなく寒冷地における水素貯蔵システムとして有望であると言える。

2.5. まとめ

本研究ではバイオガスを由来とするベンゼンの水素化において、転化率の向上によるベンゼンの応用性改善を図るため、従来の Wet-dry 多相式反応と連結して固定床反応器を設置した水素化試験を実施した。結果を以下に記す。

1）Wet-dry 多相式反応単独の試験データを元に予測していた転化率よりも高い転化率が得られ、固定床プロセスの反応性が高いことが確認できた。固定床プロセス導入により原料投入速度 130ml/min の条件では 90%の転化率となり、他の条件においては、ほぼ 100%の転化率となった。また、エネルギー効率は 2～6%向上し、水素 1m^3 貯蔵するのに消費したエネルギー量も 0.4～1.0kWh/d 削減できた。

2）バイオガス由来ベンゼンと生成シクロヘキサンの 2 サンプルの微量成分、計 31 種について定量分析を実施し、バイオガス由来ベンゼンでは、アセトニトリルやプロピオニトリルといった窒素化合物、プロピレン、1,3-シクロペンタジエン、シクロペンテン、シクロペンタン、トルエン、ビシクロヘプタン、メチルシクロヘキサンといった炭化水素が新たに検出されたが、いずれも ppm オーダーの値で微量であった。また、生成シクロヘキサンでは、水素化により新たにエタン、プロパン、i-ブタン、n-ブタン、i-ペンタン、n-ペンタン、メチルシクロペンタン、デカリン、1-メチルデカリンが検出されたが、これらも ppm オーダーの値で微量であった。

3）本試験の生成シクロヘキサンはベンゼン含有量が低いことから、自動車用ガソリンの混合用として利用できる可能性がある。また、シクロヘキサンを水素キャリア（有機ハイドライド）として利用した場合、水素を安全に高密度に貯蔵でき、さらに既存インフラが利用できるなどの多くの利点がある。一方、凍結の問題やベンゼンの毒性など課題が残る部分もあり、実用化においてはこれらの問題を留意した施設設計が必要であると言える。

参考文献

1) バイオガスを利用した地域エネルギー自立型実証試験概要, 主藤祐功, 秀島好昭, 大久保天, 中村諭, 伊藤秀明, 垣原肇, 市川勝, 小島綾一, 第 13 回日本エネルギー学会大会, 東京(2004)
2) メタン直接改質法による水素等の製造技術開発／地域エネルギー自立型実証試験のための触媒性能評価, 中村諭, 伊藤秀明, 垣原肇, 秀島好昭, 大久保天, 主藤祐功, 市川勝, 小島綾一, 菊池聡, 第 13 回日本エネルギー学会大会 (2004)
3) メタン直接改質法による水素等の製造実証試験／バイオガスを利用したエネルギー地域自立型実証研究(3) , 主藤祐功, 大久保天, 秀島好昭, 中村諭, 垣原肇, 佐藤幸雄, 市川勝, 小島綾一, 第 14 回日本エネルギー学会大会(2005)
4) 積雪寒冷地の酪農村におけるバイオガスからの水素等製造実証研究, 大久保天, 主藤祐功, 秀島好昭, 第 21 回寒地技術シンポジウム, 寒地技術論文集 vol.21, (2005)
5) Demonstrative Study on the Production Technology of Hydrogen Energy Originated from Biogas, Shudo Y, Ohkubo T, Hideshima Y, The World Hydrogen Technologies Convention (WHTC2005)
6) 積雪寒冷地の酪農村に設けた水素エネルギー実験施設の稼働概要, 主藤祐功, 大久保天, 秀島好昭, 第 20 回寒地技術シンポジウム, 寒地技術論文集 vol.20, (2004)
7) 有機ハイドライドを用いた水素貯蔵･供給実証試験／バイオガスを利用したエネルギー地域自立型実証研究(4) ,大久保天,主藤祐功,秀島好昭, 櫻元正, 黒澤誠, 田邉克守, 市川勝, 第 14 回日本エネルギー学会大会(2005)
8) 積雪寒冷地の酪農村における有機ハイドライドを用いた水素貯蔵･供給実証研究, 主藤祐功, 大久保天, 秀島好昭, 第 21 回寒地技術シンポジウム, 寒地技術論文集 vol.21, (2005)
9) Demonstrative Study on Storage Technology of Hydrogen Energy in Form of Organc Hydride, Ohkubo T, Shudo Y, Hideshima Y, The World Hydrogen Technologies Convention (WHTC2005)

3. バイオガス - 水素エネルギーの多様な有効利用

3. バイオガス - 水素エネルギーの多様な有効利用

1 章 1.3 において検討した BTH システムの基本モデルは、その基礎となった別海資源循環試験施設（共同利用型バイオガスプラント）とエネルギー地域自立型実証研究施設（水素プラント）の立地と運転規模に則して、酪農村における共同利用型 BTH プラントを想定した検討を行った。本章ではその他のバイオガスー水素エネルギー利用の適用例として、個別酪農家における水素利用と都市域における BTH システムについて検討を行った。また、分散型電源の有効利用方法として、近年注目されているマイクログリッドシステム [1)]の酪農村地域における適用について考察した。そこではバイオガス発電と燃料電池を分散型電源とし、その電源特性を踏まえた適切な利用方法と電源配置について検討した。

3.1.　個別型バイオガスプラントにおけるエネルギー利用

現在、北海道では家畜ふん尿処理プラントとして 40 以上のバイオガスプラントが稼動している。その内、比較的規模の大きな酪農家では個別にバイオガスプラントを所有し運営している。しかし、個別酪農家においてバイオガス発生から水素製造（BTH プラント）まで行うことは、その運営・管理面において困難であると考えられる。また、現状のようにバイオガスを燃料にガスエンジン発電する方法も大量の電力が不安定に既存系統へ逆潮流するような場合は、電力の品質や電力系統の安定運用への影響が課題となる [2)]。

それゆえ、本節では乳牛 300 頭規模の個別型バイオガスプラントにおいて、バイオガスからメタン精製までを行うものとし、そのメタンを酪農家住宅において都市ガス用改質器付燃料電池システムにより利用することを検討した。ただし、酪農家住宅での水素エネルギー利用のみとすると、供給されるメタンの大部分が余剰となるので、その他メタンの利用方法について検討した。

3.1.1.　個別型プラントにおけるメタン供給量の試算

3.1.1.1.　乳牛ふん尿からメタン供給フロー

通常のバイオガスプラント設備にメタン精製装置を付加すれば、バイオガスからメタンを精製するシステムとなる。メタン精製設備の主要な装置はバイオガスから二酸化炭素を除去してメタンの精製を行う膜分離装置である。そしてこの膜分離装置にバイオガスを導入するための圧縮機やガス冷却のための冷却機、熱交換器がそれに付随した構成となる。以下このようなプラントを個別型メタンプラントと呼ぶこととする。

図 3.1.1 に個別型メタンプラントのシステムフローを示す。受入槽に投入された乳牛ふん尿は発酵槽においてメタン発酵を行い、消化液とバイオガスを生産する。消化液は圃場に散布するが、その前段で個別型プラントでは共同利用型プラントのように消化液の殺菌を行わない。バイオガスはガスエンジンの燃料とメタン精製の原料に分配され、プラントの消費エネルギーを自家供給すると同時にメタンを精製・供給する。

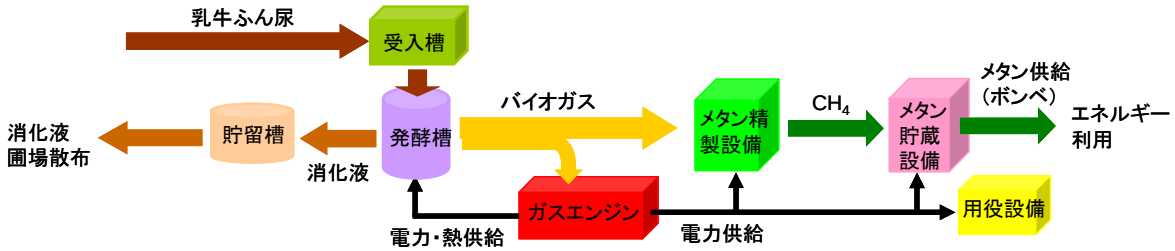


図 3.1.1　個別型メタンプラントのシステムフロー

3.1.1.2.　メタン供給量の試算結果

乳牛 300 頭規模の個別型メタンプラントのメタン供給量をシミュレーションより試算した。個別型メタンプラントのエネルギー消費量については、1 章 1.3.1 で検討した BTH プラントの各消費エネルギーの試算から個別型メタンプラントに関する設備の部分を抽出して推定した。投入原料はスラリー状の乳牛ふん尿（乳牛 1 頭あたりのふん尿量を 65kg）のみとし、バイオガス発生量はふん尿 1t あたり 30m³ とした。また、実証プラントにおける物質収支データ（**図 1.3.2**）よりメタン精製量は、バイオガス導入量の 0.54 倍とした。

図 3.1.2 に上記の個別型メタンプラントにおけるメタン供給量の試算結果を示す。乳牛 300 頭相当のふん尿量 19.5t/day からバイオガス 585m³ が発生し、最終的にボンベ貯蔵の形で得られるメタン量は 110m³/day となった。

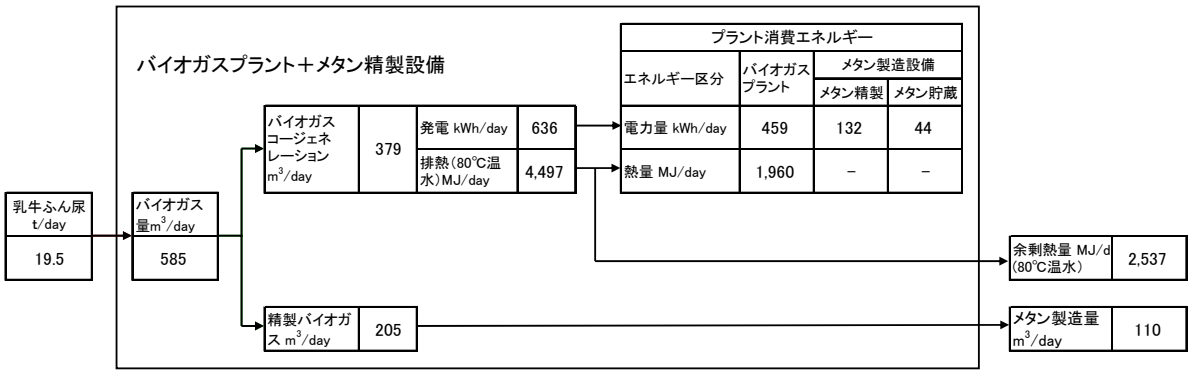


図 3.1.2　個別型メタンプラントにおけるメタン供給量の試算結果

3.1.2. 個別型プラントからのメタン利用方法

バイオガスをメタンに精製することで、エネルギー利用途は拡大する。第 1 に現在実用化されている都市ガスを原料とする家庭用燃料電池システムの原料としてメタンを使用することができる。第 2 に既存のガスインフラの燃料として使用可能である。例えば家庭用のガスコンロや暖房用のガスストーブなどである。第 3 に天然ガス自動車の燃料として使用できる。また最近ではメタンを燃料とするトラクター等の開発も進められており、多種の車両燃料として利用が期待される。第 4 に上記のようなメタン需要において、地域の需要家に売却する。そして第 5 にメタンを共同利用型 BTH プラントに輸送し、水素製造原料として利用することが考えられる。

次にこれらメタン利用途の個別酪農家における利用について検討した。

①　メタン改質器付燃料電池システムへの利用

1 章 1.3 において検討した基本モデル I では、各需要家をネットワークし負荷変動を平準化した中での電力・熱利用を想定したが、酪農家間距離は数百 m 以上となるため、個別での燃料電池利用を考える。酪農家住宅側近にメタン改質器付家庭用燃料電池システムを設置し、住宅内の電

力及び熱需要（給湯）を賄うとした。

導入するメタンに対する燃料電池システムの発電効率を 30%、回収熱効率を 35%として、酪農家住宅の電力をすべて燃料電池発電で供給した場合のエネルギー収支を**表 3.3.1** に示す。給湯などの熱利用には従来の化石燃料から補填を必要とするが、そのほとんどのエネルギーを燃料電池システムにより供給することができる。このときの必要なメタン量は 4.8m³/day となった。

表 3.3.1 メタン改質器付燃料電池利用時の住宅 1 戸のエネルギー収支

項目	電力	熱（給湯）
	kWh/day	MJ/day
エネルギー需要	14.3	57.4
燃料電池による供給	14.3	48.0
化石燃料による供給	−	9.4
必要メタン量	4.8 m^3/day	

② 既存のガスインフラへの利用

燃料電池システムによる熱供給は 60℃程度の給湯となるので、住宅における暖房燃料は別途必要となる。ここでは、冬季の酪農家住宅における暖房燃料としてメタンの利用を想定し、その必要量を試算した。

図 3.1.3 は冬季（1 月）の暖房熱量の 1 日の推移を示す。電力や給湯の場合と同様に朝と夕から夜半にかけて暖房の使用量は増大する。この場合における 1 日の必要熱量は、157MJ/day であり、そのために必要なメタン量は 5.47m³/day（暖房の熱効率を 80%）と試算された。

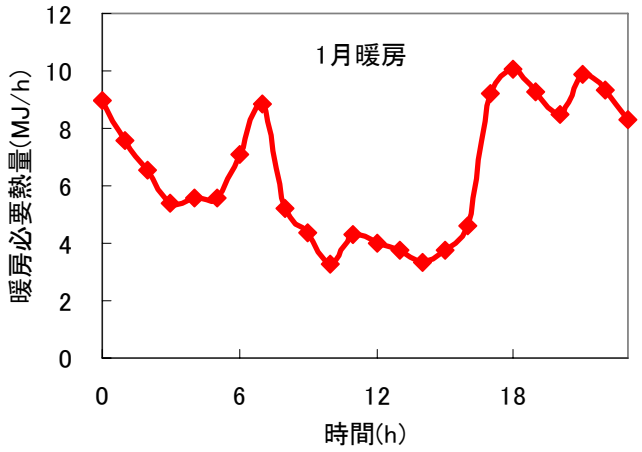


図 3.1.3 冬季 1 日の暖房熱量の推移例

［地域特性を活かしたエネルギー活用社会形成調査報告書 H16.3 北海道開発局］より作成

③　自動車やトラクター等への燃料利用

天然ガス自動車の燃料として使用可能であり、バイオガスから精製したメタンによる実証試験も行われている [3)]。また、精製メタンあるいはメタンと軽油の混焼エンジンによるトラクターの開発も進められており、農業用機械へのメタンの活用が今後期待されるところである。

④　メタンの売却

メタン供給量 110m³/day の内、①、②（冬季のみ利用）の利用は合わせても 10m³/day 程度である。残りは③に示したように車両燃料等に使用できるが、その需要が少ない地域や時期には、精製したメタンを売却することが考えられる。一般需要家においてもメタン利用途は上記に記した内容と同様であるが、地域においてそのためのインフラ整備が強化されれば、メタンの需要は増加するものと考えられる。

⑤　BTH プラントへ輸送して水素変換利用

メタンの売却先として BTH プラントが考えられる。BTH プラントの運用においても、すでに精製されたメタンの導入量が増加すれば、その導入相当分はメタン改質のみを行えばよいことになるので、プラントの水素製造効率は増加し同時に経済性も向上すると考えられる。

以上、個別酪農家におけるメタンの利用途についての模式図を**図 3.1.4** に示す。酪農家住宅における消費エネルギーのほとんどはプラントからの精製メタンにより供給する。精製メタンの約 100m³/day は③、④、⑤の場合のいずれかによる利用が可能である。

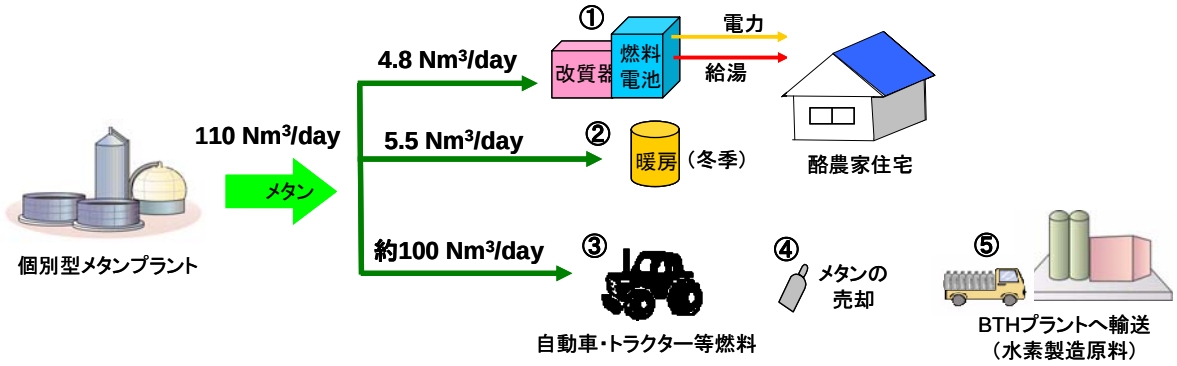


図 3.1.4　個別酪農家におけるメタンの利用途の模式図

3.1.3. まとめ

本節では個別型バイオガスプラントから生産されるバイオガスからメタンを精製し、水素・燃料電池利用他、メタンの利用方法を検討した。

1) 乳牛 300 頭規模の個別型プラントから、メタン約 110m³/day が生産可能であることが試算された。
2) 酪農家住宅の電力・給湯をメタン改質器付燃料電池システムにより供給し、そのメタン使用量は 1 日約 4.8m³ となることが試算された。また、冬季は暖房等の燃料として既存のガスストーブに使用でき、それも含め住宅のほぼ全エネルギーをメタンにより供給することが考えられる。
3) 約 100m³/day のメタンが酪農家住宅の生活系以外で利用可能であり、自動車やトラクター等の燃料利用や他の需要家への売却などが考えられる。
4) メタンを BTH プラントへ輸送して水素製造原料として活用することも考えられる。

3.2. 都市における生ごみ等を原料とする BTH プラントシステム

酪農村地域における BTH プラントの基本システムは、都市における生ごみ等を原料とする BTH システムに適用できる。都市型 BTH プラントにおいてメタン発酵原料となるのは、各家庭から排出される生ごみや食品店や食品工場から残滓、下水処理汚泥等になる。家庭生ごみは人口約 10 万人から 1 日あたり 60t が排出され、1t あたり 150m³ のバイオガスが生産できる。これまでに生ごみ処理のバイオガスプラントの事例はあるが、本節ではさらにそのバイオガスから水素に変換し、周辺の需要家に水素エネルギーを提供する都市型 BTH システムについて検討した。

3.2.1. 都市型 BTH プラントのシステムフローと水素供給量試算

1 章 1.3 において検討した酪農村地域における BTH プラントを基礎として、都市型の BTH プラントシステムについて推定した。**図 3.2.1** に都市型 BTH プラントのシステムフローについて示す。メタン発酵から水素製造・貯蔵プロセスについては酪農村型 BTH プラントと同様であるが、その主要な相違点は酪農村型のようにメタン発酵後の消化液を圃場散布できないため、消化液の処理工程が加わることである。具体的には消化液を脱水機により液分と固形分に分離して、固形分は乾燥させて堆肥化し、液分はさらに浄化して自然放流または工業用水として再利用を行う。それゆえ BTH プラントの消費エネルギーには消化液処理にかかる脱水機等の電力消費量が加算される。

プラントの全消費エネルギーを自ら生産するバイオガスにより賄うことを前提に水素供給量を試算した。生ごみ等有機性廃棄物 60t/day を原料とした場合の水素供給量の試算結果を**図 3.2.2** に示す。原料 60t/day からバイオガスは 9,000m³/day が発生し、そのバイオガスのうち約 1/3 が水素に変換する改質バイオガスとなって水素製造設備に導入される。そしてメタン約 1,800m³/day を精製し、最終的に BTH プラントからの水素供給量は約 4,150m³/day となった。また、ガスエンジンからの余剰回収熱約 4,100MJ/day が生じるが、酪農村型の BTH システムでは通常プラント周辺に熱需要がないためその熱利用は課題としたのに対して、都市型の BTH システムでは熱利用の需要家がプラント近傍に存在するため、有効な熱利用が考えられる。

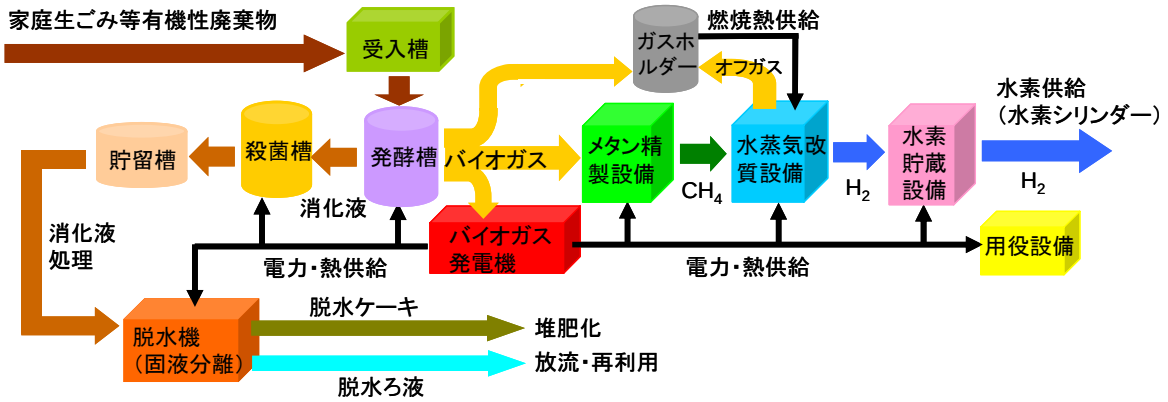


図 3.2.1 都市型 BTH プラントのシステムフロー

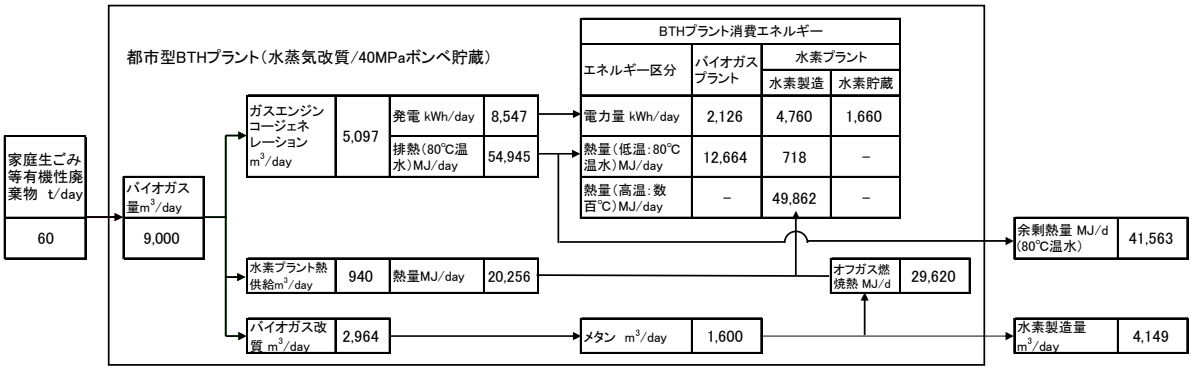


図 3.2.2　都市型 BTH プラントからの水素供給量の試算結果

3.2.2. 都市型 BTH システムの検討

上記の都市型 BTH プラントからの水素供給量試算の結果をもとに、都市域における BTH システムについて考察した。本項では BTH システムの都市型モデルⅠとして住宅等における定置型燃料電池利用と、都市型モデルⅡとして燃料電池自動車への水素供給利用（水素スタンド）の場合について想定し、検討を行った。

3.2.2.1. BTH システムの都市型モデルの設定

(1) 都市型モデルⅠ： 住宅等における定置型燃料電池を用いた水素エネルギー利用

都市型モデルⅠの模式図を図 3.2.3 に示す。BTH プラントでは住宅各戸から収集された生ごみや食品残渣など有機性廃棄物が投入される。BTH プラントから外部へは消化液と水素を供給する。消化液は固液分離および浄化処理が行われ、液分は自然放流または再利用する。水素はプラント近傍の住宅地等において燃料電池システムを用いてエネルギー利用を行う。基本モデルⅠと同様に需要家間に電力、給湯、水素のネットワークを想定するが、酪農村地域に比べ都市域の場合は集合住宅が多いので、コンパクトかつ熱利用損失が小さい有効な水素エネルギー利用ができるものと考えられる。この場合、前項の水素供給量試算結果 4,150m³/day により、約 340 戸相当（1 戸あたり水素消費量 10.8m³/day）の水素エネルギーによる電力供給が可能である。

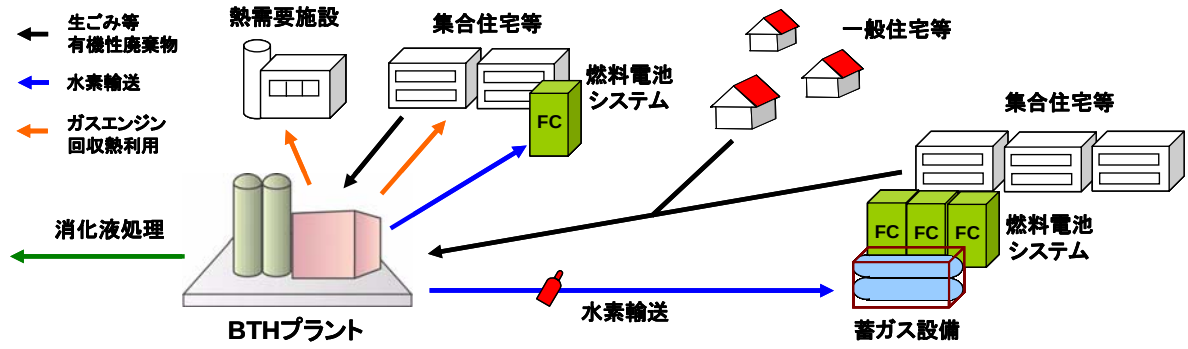


図 3.2.3　都市型モデルⅠ：住宅等における定置型燃料電池を用いた水素エネルギー利用

(2) 都市型モデルⅡ: 燃料電池自動車への水素燃料供給（水素スタンド）

都市型モデルⅡの模式図を図 3.2.4 に示す。BTH プラントで製造した水素を燃料電池車へ供給を行う水素スタンドモデルである。BTH プラントの運用は都市型モデルⅠと同様となるが、水素スタンドを BTH プラントに隣接して設置するとして水素輸送は行わないとする。

水素スタンドでは 40MPa 圧縮水素シリンダーから水素ディスペンサーによって燃料電池自動車に 35MPa 圧縮水素を供給する。有機性廃棄物投入量 60t/day の BTH プラントからの水素供給量試算結果約 4,150m³/day により、燃料電池自動車 1 台分の充填水素量を 30m³ として、1 日約 138 台相当の燃料電池自動車への水素供給可能である。

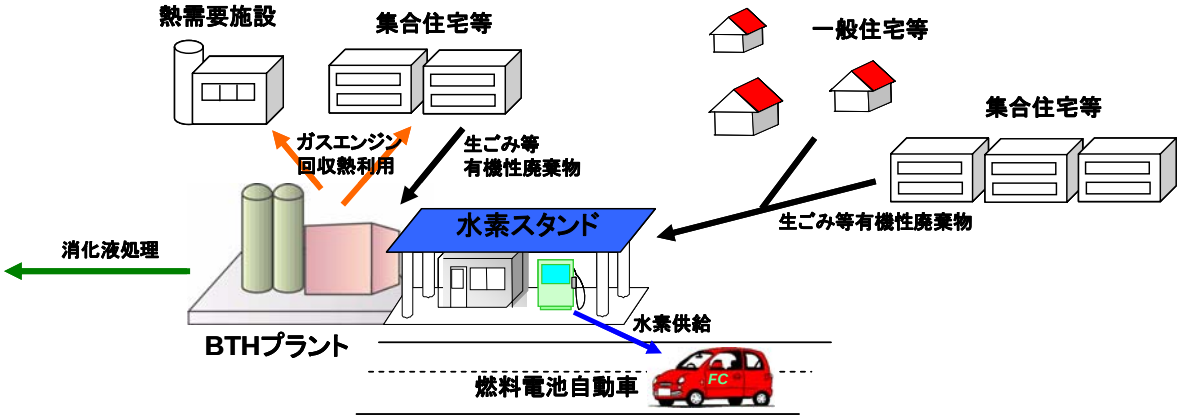


図 3.2.4　都市型モデルⅡ：燃料電池自動車への水素燃料供給の模式図

3.2.2.2. 都市型 BTH プラントからのエネルギー供給による温室効果ガス削減量

上記都市型モデルⅠ、Ⅱそれぞれにおけるエネルギーの利用による温室効果ガス削減量について図 3.2.5 に示す。BTH プラント導入前の温室効果ガス排出量や生ごみ等の収集にかかる温室効果ガス排出量など未定であるため、ここでは BTH プラントから供給するエネルギー利用による温室効果ガス削減量を示すのみとした。都市型の BTH システムの場合、プラント近隣に需要家が配置しているので、プラントオンサイトにおけるガスエンジンの回収熱を比較的有効に利用することができると考えられ、その熱利用よる化石燃料代替相当分の温室効果ガス削減量も大きい。

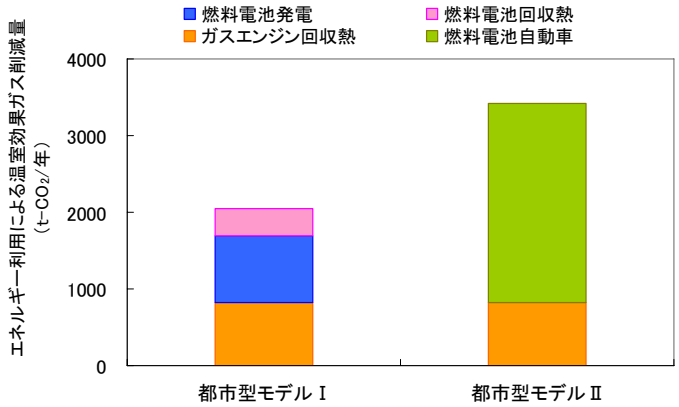


図 3.2.5　都市型 BTH プラントからの供給エネルギー利用による温室効果ガス削減量

3.2.2.3. 都市型 BTH システムの経済性

BTH システムの都市型モデルⅠ及び都市型モデルⅡの経済性について検討を行った。Ⅰ章のおける基本モデルと同様に都市型モデルⅠについて水素エネルギーの発電単価（円/kWh）を、都市型モデルⅡについて水素価格（円/m³）をそれぞれ試算し、現状システムとの比較を行った。

(1) 都市型モデルⅠ

家庭の生ごみなど有機性廃棄物原料60t/dayを処理する都市型のBTHプラントの建設コストは2,428 百万円と試算され、その内訳を**図 3.2.6** に示す。酪農村型 BTH プラント（**図 1.3.33**）の場合は、バイオガスプラント設備にかかる建設コストが全体の 3/4 を占め、水素製造・貯蔵設備、燃料電池設備等は全体の約 1/4 程度であったのに対して、都市型 BTH プラントではバイオガスプラント設備に関するコストが全体の約 1/3 となり、水素製造・貯蔵設備及び燃料電池設備のコストが占める割合が大きくなった。これは原料の単位量あたりのバイオガス発生量が、乳牛ふん尿の場合では 30m³/t であるのに対し、生ごみ等有機性廃棄物では 150m³/t と大きいことが各設備規模に反映されているからである。

図 3.2.7 はこの場合の都市型 BTH プラントの運営に係る経済収支を示す。酪農村型の場合と同様に支出においては、プラント建設コストに係る減価償却費と修繕費でほとんどを占める。収入では有機性廃棄物の処理費があり、図はその処理単価 5,000 円/t の場合を示す。しかし有機性廃棄物処理単価はその種類により幅があり、1t あたり数千円～数万円である。例えば、廃乳製品等は 3 万円/t となる。

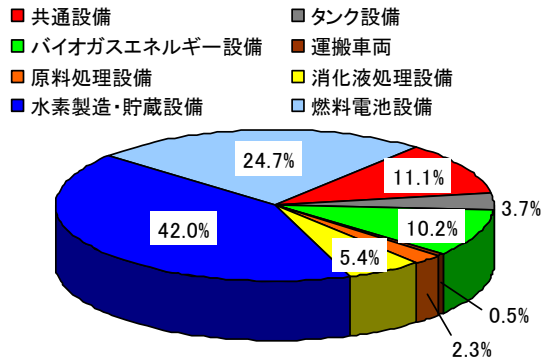


図 3.2.6　都市型 BTH プラント（都市型モデルⅠ）の建設コストの内訳

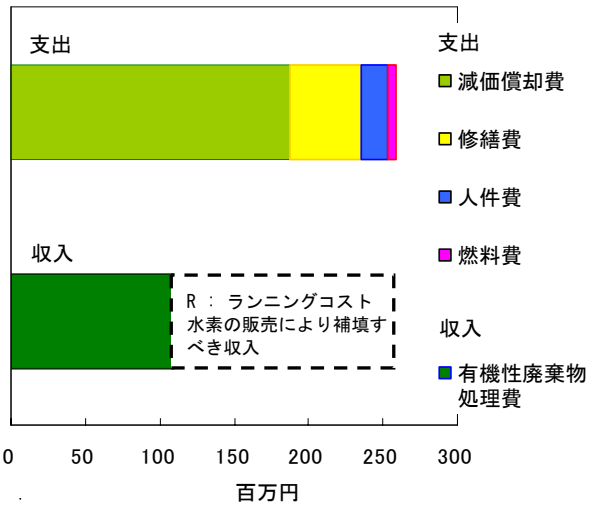


図 3.2.7　都市型 BTH プラント運営における経済収支

プラント運営収支から求めたランニングコスト（水素の販売により補填すべき収入）により、試算した都市型モデルⅠの発電単価を**図 3.2.8** に示す。ここでは各有機性廃棄物処理単価における発電単価を示した。有機性廃棄物単価の上昇に伴い発電単価は減少する。一般家庭における従来の買電単価 24 円/kWh と比較すると、有機性廃棄物処理単価が 9,000 円/t となれば従来の電力

システム相当の値となる。しかし、現状における家庭生ごみの処理費は約 4,000 円程度であり、他の単価が高い有機性廃棄物も加えて 5,000 円/t 程度が通常の処理単価と考えられる。

図 3.2.9 にプラント建設コストに対する発電単価の変化についてシミュレーションした結果について示す。有機性廃棄物処理単価が 5,000 円/t の場合は、従来の買電単価 24 円/kWh とするため、約 40%のプラント建設コストの削減が目標となることが示唆された。

以上のようにプラント建設コストの削減のための技術開発やプラント普及の施策等が必要であるが、先にも述べたとおり有機性廃棄物の処理単価には大きく幅があり、処理単価の高い廃棄物を優先的に BTH プラントで処理する等、プラント運営方法により大きく経済性を向上できるものと考えられる。

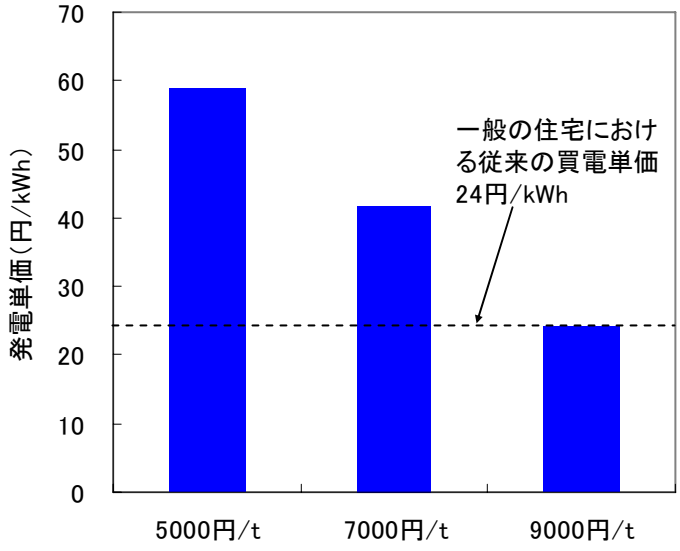


図 3.2.8　都市型モデルⅠの発電単価の試算結果

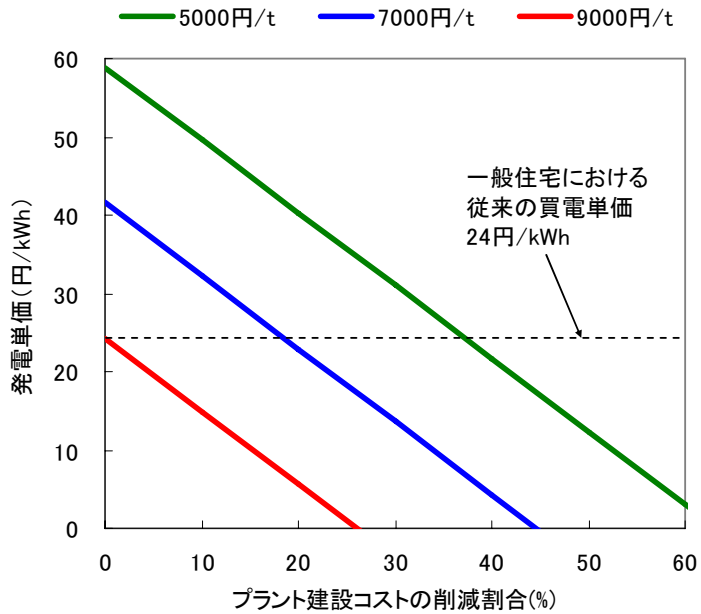


図 3.2.9 プラント建設コストの削減割合に対する発電単価の変化（都市型モデルⅠ）

(2) 都市型モデルⅡ

図 3.2.10 に各有機性廃棄物処理単価における水素価格の試算結果を示す。燃料電池自動車用水素価格の目標値 40 円/m³ と比較すると、有機性廃棄物処理単価をほぼ 7,000 円/t とすればよいことになる。**図 3.2.11** はこの場合についてのプラント建設コストに対する発電単価の変化について示す。有機性廃棄物処理単価が 5,000 円/t の場合においても、プラント建設コストは約 25%程度の削減量で目標水素価格 40 円/m³ に達することが示された。燃料電池自動車が普及すれば、このような都市型 BTH プラントによる水素スタンドは有力な利用方法になるものと考えられる。

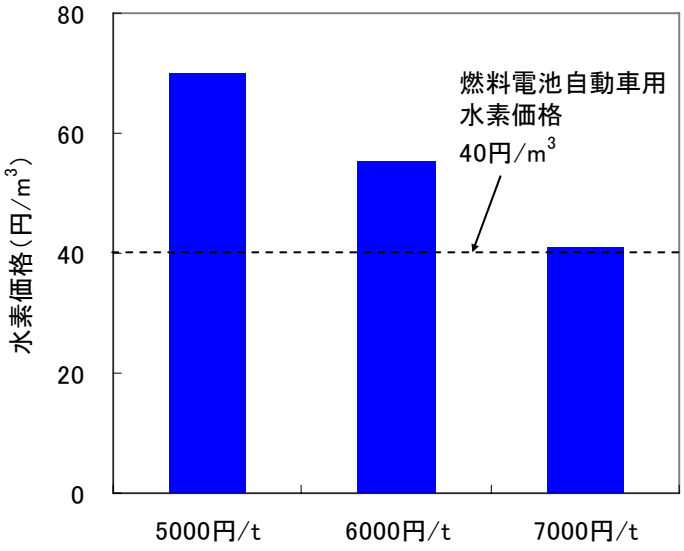


図 3.2.10 都市型モデルⅡの発電単価の試算結果

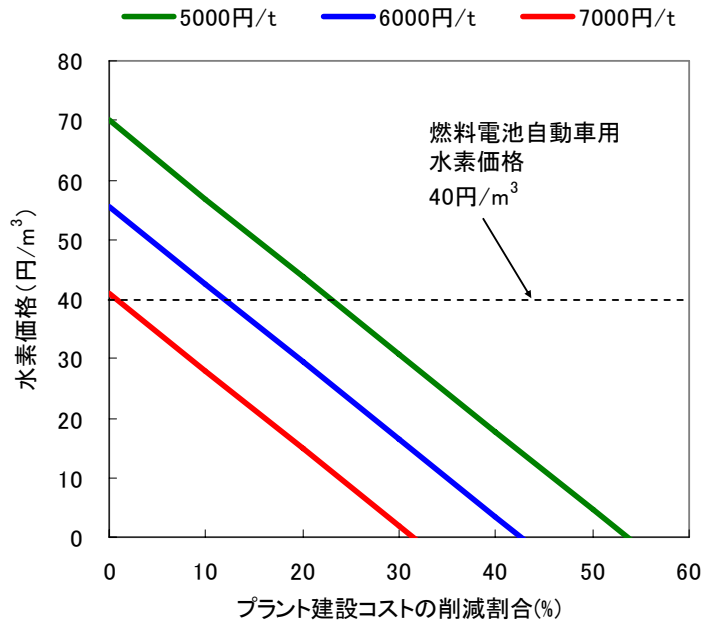


図 3.2.11 プラント建設コストの削減割合に対する発電単価の変化（都市型モデルⅡ）

3.2.3. まとめ

BTH システムの都市型モデルⅠと都市型モデルⅡそれぞれについて環境性及び経済性について定量的な評価を行った。次にその結果をまとめる。

1）都市域における人口約 10 万人から排出する生ごみ等 60t/day の有機性廃棄物を処理する BTH プラントからの水素供給量は 4,150m³/day と試算された。
2）都市型 BTH プラントシステム導入による温室効果ガス削減量を試算した。
3）都市型モデルⅠについて水素エネルギーの発電単価を試算した結果、従来の電力会社から購入する買電単価 24 円/kWh と比較して、有機性廃棄物の処理単価が 5,000 円/t であれば割高な値となるが、処理単価が 9,000 円/t となればほぼ競合できることが試算された。また処理単価が 5,000 円/t のとき、従来の買電単価と同値となるため必要なプラント建設コストを削減割合は 40%程度であること示唆された。
4）都市型モデルⅡについて水素価格を試算した結果、燃料電池自動車への燃料用水素価格 40 円/m³と比較して、有機性廃棄物の処理単価が 5,000 円/t であれば割高な値となるが、処理単価が 7,000 円/t となればほぼ競合できることが試算された。また処理単価が 5,000 円/t のとき、従来の買電単価と同値となるため必要なプラント建設コストを削減割合は 25%程度であること示唆された。

3.3. 地域における分散型エネルギーの有効利用の検討

本節ではこれまでの研究成果を基礎として、近年分散型電源の利用方法として注目されているマイクログリッドシステムの酪農村地域における適用を検討した。

3.3.1. バイオガスを用いたガスエンジン発電と燃料電池発電の比較

バイオガスから製造する水素は二次エネルギーである。水素製造にかかるエネルギー消費のため、バイオガスを直接燃焼するガスエンジン発電のほうが、そのバイオガスを改質して得られた水素による燃料電池発電より大きな出力が得られる。**図 3.3.1** は乳牛 2,000 頭規模のバイオガスプラントから外部へ供給される電力量と同規模の BTH プラントから供給される水素エネルギー量の比較を示す。ガスエンジンからの余剰回収熱はプラント側近での需要に限られるため、ここでは除外している。バイオガスプラントにおけるガスエンジン発電の逆潮流電力は、同規模の BTH プラントから供給される水素を用いた燃料電池発電と比較して約 2.5 倍程度大きい。ただし燃料電池は住宅付近での利用を想定しているので、その回収熱を有効に利用できる。しかしその熱量を加算してもガスエンジン発電のほうが大きなエネルギー供給量となる。水素・燃料電池システムは、低騒音・低公害であり、家庭用コージェネレーションから燃料電池自動車までその利用途は広く、優れた分散型電源として注目されているが、以上のようにエネルギー生産を比較した場合、決して水素エネルギーに特化した利用方法のみが優れているとはいえない。実際はガスエンジンと燃料電池のそれぞれの発電特性を考慮した適切な電源配置と利用方法を検討することが重要と考えられる。

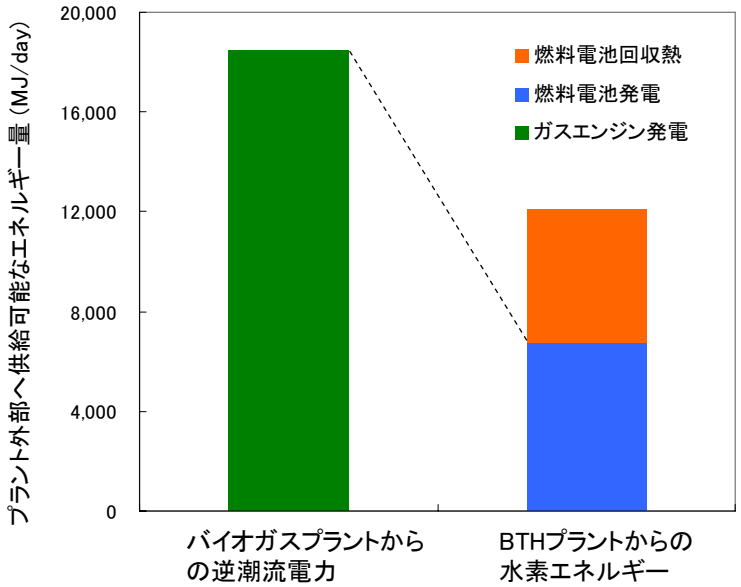


図 3.3.1　バイオガスプラントと BTH プラントから供給可能なエネルギー量の比較

また、地域には他のバイオマス、風力や太陽光、小水力発電などの再生可能エネルギーが賦存している。将来はそれら多種の分散型電源を含めた地域のエネルギー利用システムの構築が望まれる。しかし、他方でこうした再生可能エネルギーを中心とする分散型電源が既存電力系統へ多数導入（系統連系）された場合、電力系統全体に与える影響が懸念されている。

3.3.2. 分散型電源利用の増加に伴う課題

2003 年 4 月に「電気事業者による新エネルギー等利用に関する特別措置法」：通称 RPS(Renewables Portfolio Standard)法が施行された。RPS 法はある一定量以上の新エネルギー等（太陽光、風力、バイオマス、中小水力、地熱）電気の利用を電気事業者に義務づけるもので、環境保全に優れた電力利用の促進を図ることを目的としている。ただし、同法に関する経済産業省告示の条文では、**表 3.3.1** に示すような新エネルギー等による電力供給量の目標値を掲げる一方で、周波数変動抑制等の系統安定化や既存系統の増強等を講ずることが必要としている。

一般に太陽光、風力、バイオマスをはじめとする再生可能エネルギーやガスエンジン、燃料電池等のような分散型電源が商用電力系統に多数連系されれば、以下に述べるような電力系統全体の電力品質と運用の安定性に悪影響が生じるものと懸念されている。

表 3.3.1　新エネルギー等による電力供給　目標（全国）

年度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
利用目標(億kWh)	92.7	103.3	122.0	131.5	141.0	150.5	160.0

3.3.2.1.　再生可能エネルギーの特徴

風力発電や太陽光発電は気象条件により時々刻々と大きく変動する。これら再生可能エネルギーを商用電力系統に直接連系すれば、その不安定な発電変動が通常の負荷変動に加わり、全体として電力系統内の電力変動は増幅されることになる。また通常バイオガス発電等に利用されるガスエンジンは部分負荷運転では効率が低下するため、一般に定格での一定出力運転を行う。そのため現状では負荷の変動部分やガスエンジンの起動/停止時による急激な変動、余剰電力の逆潮流への対応は商用電力系統が担っている。

図 3.3.2 に別海資源循環試験施設（乳牛 1,000 頭規模バイオガスプラント）における電力需給状況について一例を示す。そこではバイオガスを燃料にガスエンジンにより発電を行い、商用電力系統と系統連系を行っている。**図 3.3.2** の上段はガスエンジンの稼動状況とプラントの消費電力量推移を示す。この場合のガスエンジンの稼動パターンは、バイオガスが不足する夜半過ぎには停止し、乳牛ふん尿を受け入れた後バイオガス発生量の増大に伴い 65kW 級ガスエンジンを 2 台稼動、そしてバイオガスが不足するとガスエンジン 1 台の運転としている。このように、現状ではバイオガス発生量に応じたガスエンジンの運転方法を行っている。このときの各時間帯に対応した系統連系点における電力需給推移は、**図 3.3.2** の下段のようになる。逆潮流を正、電力購入を負として示しているが、ガスエンジンの起動/停止時には電力購入から逆潮流へまたはその逆へとたいへん急激な変化となっている。

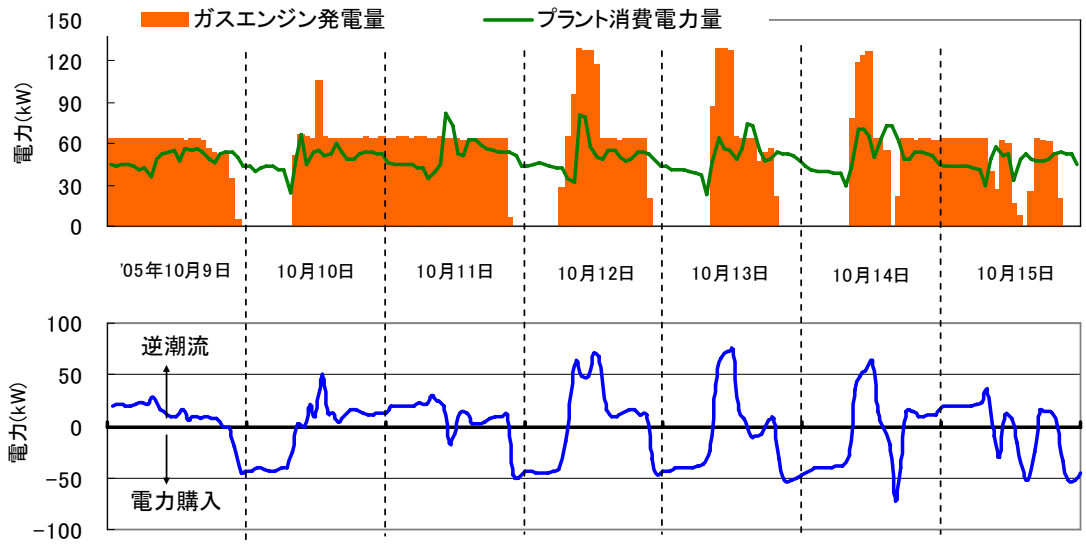


図 3.3.2 別海資源循環試験施設の電力需給推移

上段：ガスエンジン及びプラント消費電力量の推移、下段：系統連系点における電力需給推移

3.3.2.2. 分散型電源の系統連系による商用電力系統への影響

以上のような再生可能エネルギーやガスエンジン等の分散型電源利用は、現状ではその変動時の電力需給アンバランスを商用電力系統により即座に補償されることによって安定的に運用している。しかしこうした分散型電源利用の導入が増加すれば、図 3.3.3 に示すように商用電力系統における電力需給バランスの調整制御機能、いわゆるアンシラリーサービス（負荷変動等における電力需給アンバランスより生じる電圧および周波数変動を一定範囲内に調整し電力品質を維持する機能）の負担が増大し、そのための調整予備力確保及び制御機能の増強等にかかる商用電力系統側の運用コストの増加が予想される [4]。またその他、燃料電池やマイクロガスタービン等のインバータからの高周波ノイズの増大、複数の単独運転検出の干渉による検出感度の低下、逆潮流による系統運用全体の複雑化やそれに伴う配電線設備の利用率の低下など、いくつかの課題が挙げられている [5]。

図 3.3.3 電力変動と発電機調整機能との関係

3.3.2.3. 戸別需要家における分散型電源利用の問題点

以上の課題を戸別に設置された分散型電源において解決していくことは難しいと考えられる。一般に戸別の電力負荷推移は各種電気機器類のスイッチ起動/停止による矩形上の電力利用を重ねあわせた様相を示す。一例として図 3.3.4 に酪農業施設 1 戸の 1 日の電力負荷推移の実測値を

示す。早朝と夕刻には搾乳機器等の作動により電力ピークとなり、数時間ごとにバルククーラーの起動/停止による短時間の電力負荷がある。前述の指摘から商用電力系統に頼らない分散型電源利用ができればよいが、余裕の発電容量がほとんどない分散型電源でこのような矩形上の電力需要に追従させるのは困難であり、たとえそれを可能にする発電容量の発電機を設置としたとしても利用する発電量に対して、発電設備は大きなものとなるため設備の利用効率・経済性の面から現実的な方法とはいえない。

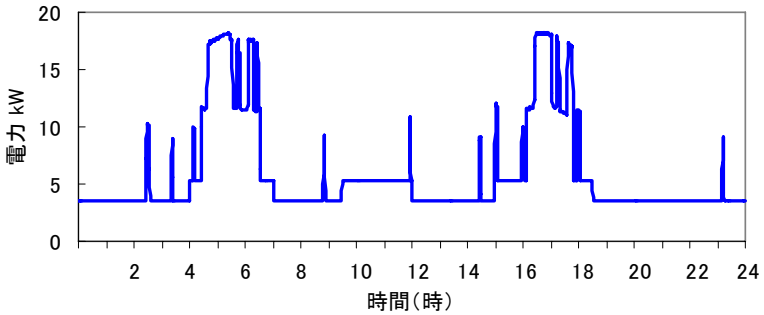


図 3.3.4　酪農施設 1 戸の電力負荷推移

3.3.3.　マイクログリッドシステム

こうした分散型電源の導入による課題を解決するためには、これまで系統連系において商用電力系統に依存してきた機能の一部またはすべてを分散型電源側で行うことが必要と考えられる。そのための有力な技術のひとつとしてマイクログリッドシステムが注目されている。マイクログリッドシステムとは、**図 3.3.5** に概念図を示すように複数の分散型電源と電力負荷をネットワークしたローカルな小規模電力系統である [4]。それは多数の電力負荷をネットワークすることで、**図 3.3.4** に示したような戸別需要家の特徴的な矩形上に立ち上がる負荷変動を平準化し、これまで商用電力系統に依存してきた負荷変動への対応を現代の IT 関連技術と電力貯蔵技術を用いて自らの分散型電源により対応する（**図 3.3.6**）。このとき、マイクログリッド内への商用電力は安定的な一定供給となるように制御され、商用電力系統に与える電力品質低下等の影響は回避されることになる [6]。

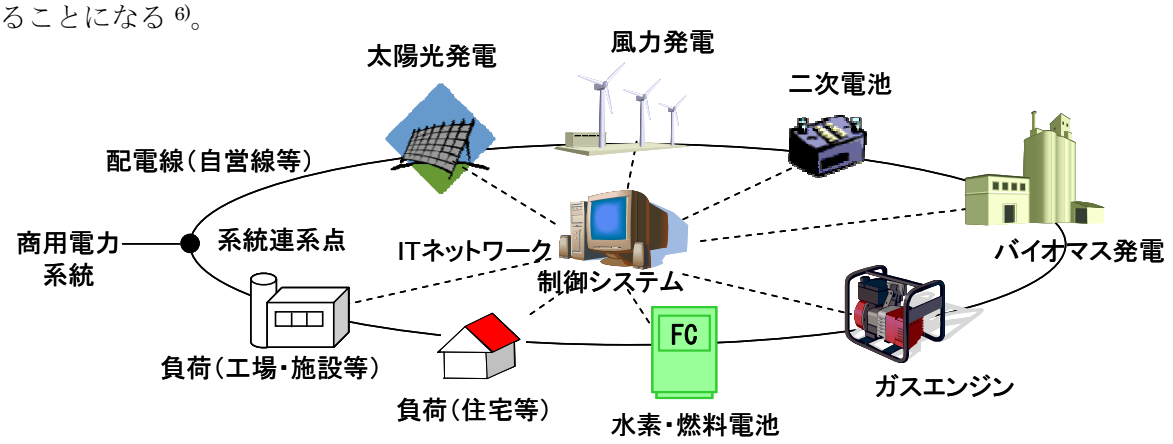


図 3.3.5　マイクログリッドシステム概念図

図 3.3.6　マイクログリッド内の電源運用

このようなマイクログリッドシステムは、ネットワークによるエネルギー利用の平準化効果や補完効果が期待されるばかりでなく、アンシラリーサービスなど商用電力系統本来の機能の一部を担う電力系統の末端設備としての概念に発展しつつある [7]。すなわち、それは環境性に優れた再生可能エネルギー等の導入を促進すると同時に商用電力系統の課題であるピーク電力への対応にも貢献し、電力系統全体として効率化と安定化が図られるものと考えられる。さらに商用電力系統の事故時にマイクログリッドの自立運転が可能であれば、エネルギーセキュリティの面からも期待される。

マイクログリッドは米国において主として電力の安定供給と経済性の観点から発展した技術であるが、日本においては再生可能エネルギー利用などを目的とした環境性を重視したマイクログリッドシステムが主流である。これまでの国内におけるマイクログリッド実証事例の主なものとして、八戸市の水の流れを電気で返すプロジェクトや京都エコエネルギープロジェクト、愛・地球博会場での燃料電池を用いた実証試験 [8]等が挙げられる。

3.3.4.　水素・燃料電池の特性

現在、家庭用燃料電池システムとして都市ガス等を原料とした改質器付固体高分子形燃料電池が開発されているが、ガス改質能力に限界があるため通常はベース電源としての利用となる。しかし、固体高分子形燃料電池自体は必要な水素供給があれば非常に優れた負荷追従性を示し、部分負荷運転においても発電効率は低下しないという特性を持つ [9]。本研究では BTH プラントから純水素が供給され、需要家においてそれを直接燃料電池に導入して利用する場合を考えるので、ガス改質器なしの固体高分子形燃料電池を想定する。以降この場合の固体高分子形燃料電池を簡単に「燃料電池」と記す。ここではその燃料電池の発電特性の実測結果を示すとともに、次節以降のマイクログリッドモデルの分散型電源のひとつとして検討を行った。

3.3.4.1.　燃料電池発電の実測結果

図 3.3.7 は最大出力 7kW（0.85kW×10 台、インバータ効率 80%）の燃料電池を電源に家庭用掃除機のスイッチ投入時の発電推移を示す。燃料電池の待機状態からスイッチ投入後、約 7 秒で安定的な出力となり、このときの最大負荷追従速度は 0.4kW/s であった。ガスエンジンの負荷追従性は約 100 秒であり [6]、その値をもとに同様な負荷変動つまり最大出力の 16%の負荷変動をガスエンジンで対応した場合の追従速度を点線で示す。この場合、ガスエンジン単独では秒オーダーの急激な負荷変動に追従できないため、その間他の電源から電力が補完されなければ起動停止

または電圧や周波数等に異常が生じることになる。また、燃料電池は起動時間が約 1 分程度であり、出力は 0（待機状態）～最大出力まで使用可能である。**図 3.3.8** に燃料電池の部分負荷運転時における水素消費量と発電量の関係を示す。両者はほぼ比例関係となり、部分負荷運転に関わらず燃料電池の発電効率はほぼ一定となることを確認した。

3.3.4.2. マイクログリッド内分散型電源としての検討

マイクログリッドでは急激な負荷変動には二次電池（例えば鉛蓄電池 負荷追従性 1～数秒）を用いて対応することが考えられている。**図 3.3.7** に示したようにガスエンジンで追従できない変化を二次電池で補償し負荷変動に対応することも可能であるが、この場合ガスエンジンは負荷変動に対応する制御余裕（予測できない負荷変動に対応する電力供給能力）を確保するため、通常は発電効率を落とした部分負荷での運転を余儀なくされることになる。負荷変動対応に二次電池と燃料電池を用いれば、ここで示した燃料電池特性から燃料電池により発電効率を低下させることなく負荷変動対応が可能となり、さらに二次電池設備が大幅に軽減されるものと考えられる。

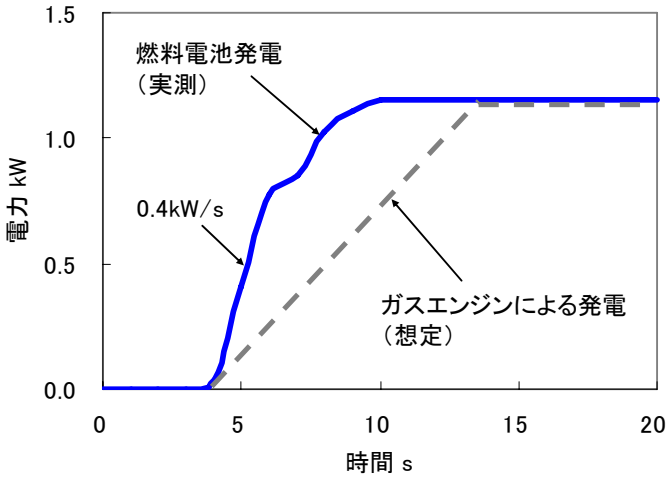


図 3.3.7 負荷変動に対する燃料電池発電の推移

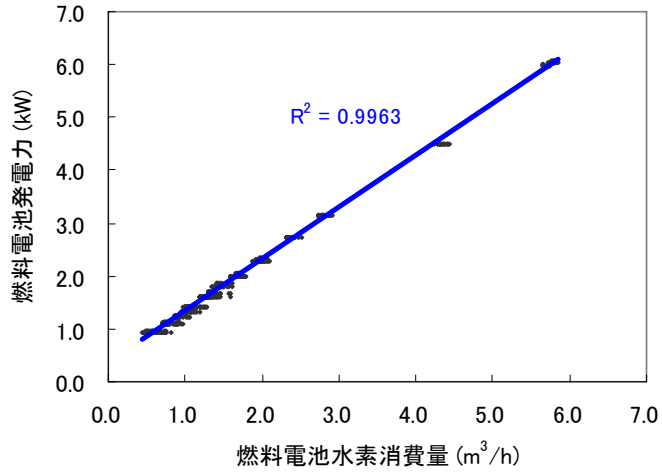


図 3.3.8 部分負荷運転時における燃料電池の水素消費量と発電量との関係

3.3.5. 酪農村地域におけるマイクログリッドシステムの適用

3.3.5.1. マイクログリッドモデルの策定

酪農村地域における将来的なバイオガスエネルギーの利用方法のひとつとして、以上に述べたマイクログリッドシステムの適用を検討した。構成する主要な分散型電源はバイオガスプラントオンサイトにおけるガスエンジン発電および BTH プラントから供給されるバイオガス改質の水素を用いた燃料電池発電とした。

(1) ガスエンジンと燃料電池の特性と利用方法

この場合のガスエンジンと燃料電池の特性とマイクログリッドシステムにおける利用方法について、**表 3.3.2** にまとめる。バイオガス単位量あたり生産できるエネルギー量が大きいのはバイオガスプラントオンサイトにおけるガスエンジン発電であるが、プラント立地が住宅地など主要な需要家から離れた郊外となるため、隣接した熱需要施設がなければその回収熱を効率的に利用することは難しい。燃料電池は騒音がなく排気は水だけであるので、住宅またはその近傍に設置し回収熱も効率的に利用できる。また、各発電機特性からガスエンジンはほぼ定格の一定出力運転が望ましく、燃料電池発電は負荷変動に応答した追従運転が可能である。

表 3.3.2　ガスエンジンと燃料電池の特性とマイクログリッドにおける利用方法

分散型電源		エネルギー量	騒音・公害	回収熱利用	負荷追従	部分負荷運転
バイオガスエンジン	特性	プラントオンサイトにおいて発電量は大	発電機から機械音あり	プラントに近接した熱需要施設のみ利用	分オーダーの追従	発電効率は低下
	利用方法	主要なベース電源として利用	郊外おける利用	プラント側近の施設で利用	長周期変動に対応	ほぼ定格運転
燃料電池	特性	水素製造・貯蔵にかかるエネルギー消費のため、ガスエンジン発電より減。	騒音はなし。NOx,SOx等を排出はなし。	需要家近傍における利用	秒オーダーの追従	発電効率は一定
	利用方法	適正に応じた利用	住宅地近傍での利用	一般需要家の給湯などに利用	短周期変動に対応	負荷変動に対応

(2) 酪農村地域のマイクログリッドモデル例

各発電機の利用方法と酪農村の地域性を踏まえて策定したマイクログリッドモデルを**図 3.3.9** に示す。大規模経営の酪農地域では酪農家間が数百 m～数 km オーダーで点在し、エネルギー源となるバイオガスプラントもその中に散在することになる。そのため需要家が密集する住宅地と遠方のバイオガスプラントをネットワークすることは困難と考えられる。それゆえ本マイクログリッドモデルでは、住宅地における各需要家とその近隣郊外の酪農家およびバイオガスプラントにまたがる配電線または自営線のネットワークを考え、遠方のプラントではバイオガスを水素に変換しそれを輸送して、マイクログリッド内の燃料電池システムにおいてエネルギー利用を行うものとした。

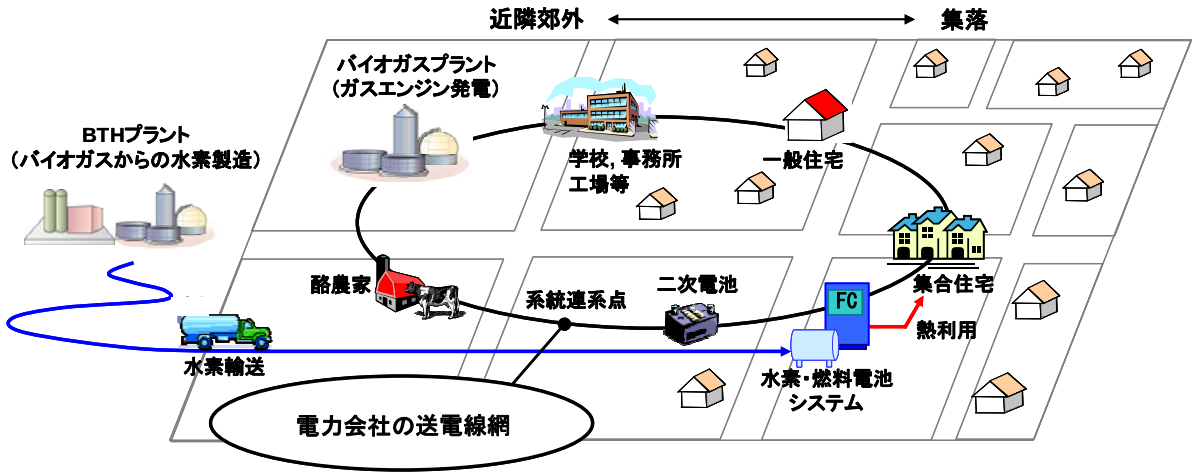


図 3.3.9　酪農村地域におけるマイクログリッドモデル

3.3.5.2. マイクログリッドにおける電源運用試算

一般に発電所の電源運用は、あらかじめ予想される電力需要に対する各発電機の運転計画により実行される。マイクログリッドにおいても同様に運転計画に基づいた各発電機の運転制御を行う。前項で設定したマイクログリッドモデルにおける電源運用について検討を行った。

マイクログリッド内の負荷パターンは戸々の需要家消費電力の重ね合わせであり、その平準化効果によりネットワークする需要家戸数が多数となるほど日々の電力負荷パターンに大きな相違はなくなる。そのため電力需要は概ね予想することができ、その需要パターンに基づいて発電機の各運転計画を立案することになる。

(1) マイクログリッドモデルの負荷等の数値設定

表 3.3.3 に本マイクログリッドモデルの冬季 1 日の電力収支を示す。負荷として住宅 300 戸、小学校、酪農家（乳牛 100 頭飼養）10 戸およびそのふん尿等を原料とする 1,000 頭規模のバイオガスプラントを想定し、分散型電源となるバイオガスプラントにおけるガスエンジンは 65kW 級 4 台を設置、燃料電池システムは住宅地近傍に数 kW～数十 kW 級のものを計 200kW 相当設置するものとした。またバイオガスプラントにおけるバイオガス発生量は、副資材の投入を想定し原料投入量 1t あたり 40m^3 とし、燃料電池に供給する水素は、乳牛 2,000 頭規模（100 頭飼養の酪農家 20 戸から構成）の BTH プラントから 40MPa 水素シリンダーにより 1 日約 1,560m^3 (1.3.2 試算結果より）をマイクログリッド内の燃料電池へ輸送し、電力・熱エネルギー利用を行うものとした。

(2) マイクログリッドの電源運用計画例

図 3.3.10 にこの場合の電源運用計画の試算例を示す。ここでは簡単のため 1 時間平均の電力需要推移で表している。マイクログリッド内の 1 日の総電力需要量から供給可能なガスエンジン発電量と燃料電池発電量を差し引き、商用電力系統から供給する電力量を求める。商用電力を一定

供給とし、ガスエンジンの運転計画を決めれば、残りの電力需要は燃料電池発電からの供給となる。このときガスエンジンはほぼ定格運転とし、予測される大きな需要変化に応じた発電量の調整は 4 台のガスエンジンの起動・停止により行うとした。そして予測不可能な短周期の負荷変動への対応は燃料電池発電と二次電池により行うとともに、夕刻から夜半にかけては住宅において熱需要が増大するので、その時間帯に対応して燃料電池の発電量（コージェネレーション）を増大させることとした。

以上の電源運用計画例のように、マイクログリッド内の電源制御を適切に行うことで、バイオガスエネルギーを有効利用すると同時に商用電力系統の負荷平準化となり、分散型電源と商用電力系統双方に有効なエネルギー利用と環境性向上が期待できる。また、風力発電や太陽光発電、小水力発電など地域で産する他の再生可能エネルギーもこのようなマイクログリッドシステムに組み入れることで、それらに特徴的な急激な発電変動を吸収でき、さらに環境性を高められるものと考えられる。

表 3.3.3　マイクログリッドの電力収支

	種類	電力 (kWh/day)	備考
負荷	一般住宅300戸	4,276	1戸あたり給湯熱量:57.4MJ/day
	小学校 1校	692	床面積:4000m^2
	酪農家10戸	1,355	1戸あたり100頭飼養規模
	バイオガスプラント	1,795	乳牛1000頭ふん尿処理規模
	合計	8,118	
供給電源	バイオガスエンジン	4,355	効率:電気28%、熱55% (LHV)　65kW×4台使用
	水素・燃料電池	1,867	効率:電気40%、熱40% (LHV)　改質器なしPEFC
	商用電力系統	1,824	系統連系
	(二次電池)	72	鉛蓄電池等
	合計	8,118	

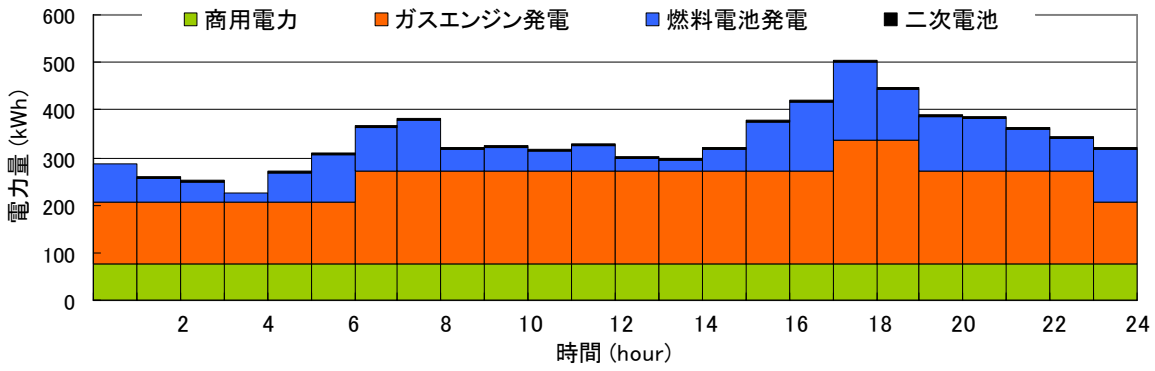


図 3.3.10　マイクログリッドにおける電源運用計画例

3.3.5.3. 熱利用ネットワーク

前項までのマイクログリッドモデルの検討は、電力供給面について述べてきた。分散型電源利用の重要な利点のもうひとつは、コージェネレーションによる回収熱利用によるエネルギー効率の向上である。しかし、通常一般の住宅等需要家の電力と熱需要の割合（熱電比）は日々の状況で異なるため、戸別利用のコージェネレーションシステムの場合は回収熱の一部が未利用のまま放熱される場合が生じ、その効果を十分に発揮できない。このことを解決するため、**図 3.3.11** に示すように電力ネットワークと同様に各需要家を結ぶ給湯配管ネットワークの構築を考える。これによりコージェネレーションの回収熱を需要家間で融通でき、無駄な放熱を少なくすることができる。また、電力の場合と同様、熱利用の平準化がなされ日々の利用熱量に大きな差は生じない。一日の燃料電池発電量は**表 3.3.3** より 1,867kWh/day であり、熱利用時において 20%が損失するとして利用可能な回収熱量は 5,400MJ/day 弱であり、約住宅 100 戸相当の給湯などの熱利用を行うことができる。

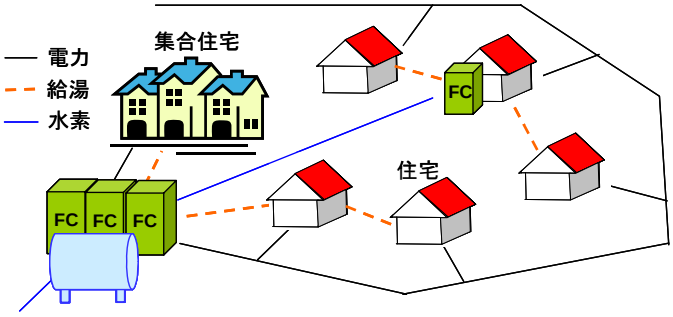


図 3.3.11　マイクログリッド内の燃料電池システムネットワーク

3.3.5.4. 温室効果ガス排出量の削減効果

温室効果ガスが実効的に削減されるということは、電力会社の化石資源を燃料とする発電機が削減されるかあるいはその効率が向上するということである。しかし、これまで述べてきたようにアンシラリーサービスを商用電力系統に依存した分散型電源利用では、その発電量に見合った温室効果ガス削減量が得られないものと考えられる。なぜならばその場合、商用系統側では電力変動対応の発電機の制御余裕を確保するため、発電機は効率を落とした部分負荷運転を行い、場合によっては発電機の増設ということも考えられるからである。この点、マイクログリッドシステムでは分散型電源の制御により変動を吸収し商用電力をほぼ一定のベース供給とするため、分散型電源代替相当の実効的な温室効果ガス排出量の削減が期待できる。

(1) プラント導入による温室効果ガス排出量の削減

バイオガス及びそれから製造される水素エネルギーは再生可能なエネルギーであるが、プラントを運用する過程で温室効果ガスが排出される。それは家畜ふん尿及び消化液運搬車両の燃料消費や圃場に散布した消化液からのガス揮散等である。しかし、プラント導入前の従来のふん尿処

理である個別型スラリー処理は、スラリー貯留・散布時にメタンや亜酸化窒素など温室効果ガスを排出し、その量はプラント運用の場合を大幅に上回る（1 章 1.3 参照）。それはプラントによるふん尿処理は、密閉されたホルダー内での嫌気性発酵であり同時に貯留されるバイオガスをエネルギー利用（放出すれば温室効果ガスとなる）するシステムだからである。そのため従来のスラリー処理との比較によれば、温室効果ガスは削減することになる。

(2) 温室効果ガス排出量の試算結果

LCA 手法を用いて、本報で策定したマイクログリッドモデル導入前後の温室効果ガス排出量を試算した。その結果を**図 3.3.12** に示す。ただし、ここでは施設の建設・解体に伴う温室効果ガス排出量は含めていない。乳牛ふん尿を個別型スラリー処理からプラントによる処理とすることで温室効果ガスを約 1/3 程度に低減することができる。さらにプラントから供給するバイオガス及び水素エネルギー利用により化石燃料の代替相当分の温室効果ガスを削減することができ、全体として温室効果ガスの削減量は年間 2,710t-CO_2 となった。

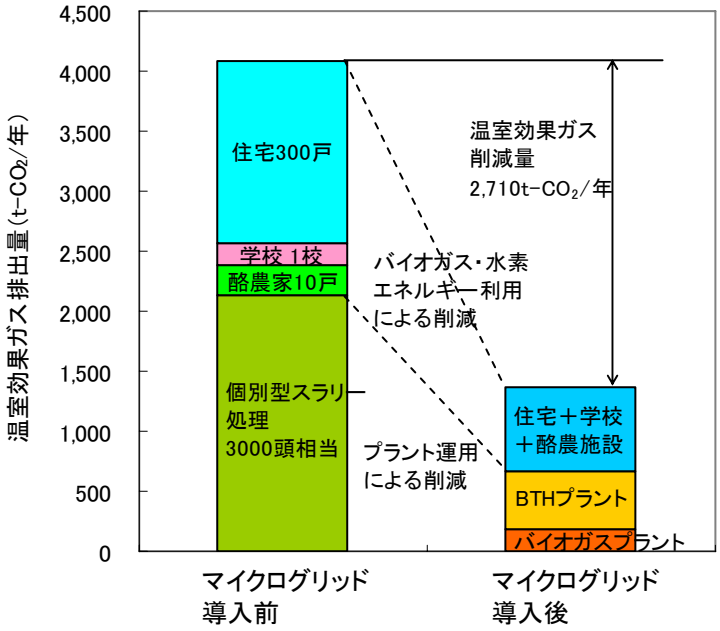


図 3.3.12　マイクログリッド導入前後の温室効果ガス排出量の比較

3.3.6. マイクログリッドの普及とその形態

前項で述べた温室効果ガス排出量の削減効果をさらに完全なものとするため、すなわち商用電力系統のピーク負荷対応の発電設備の効率化またはその削減に貢献するためには、再生可能エネルギーを含むマイクログリッドの普及が必要である。また単独のマイクログリッドシステムで完全な無事故運用を行うことは現実的ではなく、その場合万一の事故時に備えて商用電力系統側のアンシラリーサービスが必要となってしまう。こうしたセキュリティの面からも複数のマイクログリッドの普及が必須であり、その普及時には**図 3.3.13** に示すように複数のマイクログリッドを

さらに連系して、相互に協調することにより万一の事故時に備えたセキュリティを強化することが考えられる。しかし、この場合においてもバイオガスをはじめ再生可能エネルギーは限りある希少な資源である。それゆえ、マイクログリッドの普及に伴い構成する電源の商用電力割合は増加し、図 3.3.10 に示したよりも商用電力を主要なベースとするマイクログリッドが一般的な形態となるであろう。いずれの場合にしても重要なのは分散型電源を商用電源系統に影響を与えずに導入することであり、かつ商用電力のピークカットに貢献することである。極端な場合、マイクログリッド内のピーク電力負荷の時間帯にのみ合わせて集中的に分散型電源を利用する運用方法等も考えられる。

ただし、現実にマイクログリッドの形態とその普及を最終的に決定するのは経済性によるところが大きいと考えられる。マイクログリッドの経済性については、再生可能エネルギーの単価や対象とする負荷、または上記に述べたマイクログリッドの形態とその規模等、不確定な要素が多く課題としたい。

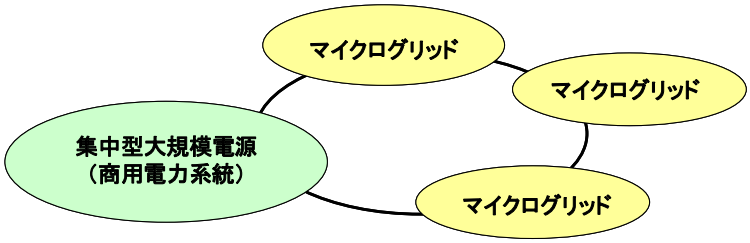


図 3.3.13　マイクログリッド間の連系模式図

3.3.7. 北海道の農村地域におけるマイクログリッド導入の課題

北海道の農村地域は寒冷地であることはもとより、農家が大規模農地を所有する離散型の農村形態である。このような地域特性におけるマイクログリッド導入にかかる課題について次に記す。

3.3.7.1.　離散農家間ネットワーク

北海道の農村地域では農家は離散的である。とくに本報で検討したような大規模酪農村地域における酪農家間距離は大きい。マイクログリッドを運営する事業主体によるが、通常従来の電気会社とは独立した電気事業者であれば、独自の自営線によりマイクログリッドを形成する。そうしたほうが、電気会社の既存の配電線を借用してその借賃を支払っていくより、将来的には割安となると考えられるからである。しかし、配電義務を負わないマイクログリッド事業者において、自営線の設営にかかる経済的理由から需要家密度が小さい離散的な農家間のネットワークは行われにくいであろう。そうすれば農村地域でも経済的に有利な人口密集地でのマイクログリッドのみが限定的に形成されることになり、マイクログリッドを構成する需要家とそれ以外の需要家において電気事業サービスに格差が生じることになる。従来の電力会社が地域のマイクログリッド事業者として運営を行えば、このような問題は解消されると思われるが、その場合は電力自由化により規制緩和される電気業界の競争市場は拡大しない。

3.3.7.2. コージェネレーション回収熱利用の損失

燃料電池等の回収熱利用を有効に行うため電力と同様に給湯配管による需要家どうしのネットワークが必要であることはすでに述べた。しかし、熱利用に有利な集合住宅が少ない農村地域の住宅地では、戸別住宅間での配管設置ということになる。その配管網整備のための経費が嵩む上、冬期間の熱損失は大きいものとなる。

以上、北海道の農村地域における地域特有の課題について記したが、マイクログリッド自体もまだ完全に確立された技術ではない。再生可能エネルギーの開発状況によるところが大きいと思われるが、主として経済性の面からまだ一般電気事業者における普及にまで至っていない。しかし、北海道はバイオマスをはじめ再生可能エネルギーに恵まれた土地である。本報で検討したようなマイクログリッドシステムの導入を先進的に進めていける土壌にあると思われる。

3.3.8. まとめ

本節では酪農村地域における再生可能エネルギーを中心とする分散型電源利用について、既存系統と協調性をもった電力系統技術として注目されるマイクログリッドシステムの適用と検討した。次にその主な結果について記す。

1) バイオガスエンジンとバイオガス改質の水素を用いた燃料電池を分散型電源とする酪農村地域のマイクログリッドモデルを策定した。
2) マイクログリッド内の負荷変動を主に燃料電池発電で対応することで、バイオガス発電はほぼ定格のベース運転となり、有効なバイオガスエネルギー利用ができることを示した。また、供給する商用電力はほぼ一定として、既存系統への影響を回避できることを示唆した。
3) この場合のマイクログリッド導入による温室効果ガス排出量はその導入前の約1/3となることが試算された。

本報ではバイオガスエネルギー利用として、水素・燃料電池システムなど多様な利用方法を検討するものとし、個別酪農家における水素利用、都市の生ごみ等を原料とした BTH システム、そして地域における有効なエネルギー利用方法としてバイオガス及び水素エネルギーを分散型電源としたマイクログリッドシステムについて検討した。いずれも現状から進んだ将来の技術といえるが、今後バイオガスに限らず他の新エネルギー導入を同時に進めていく上でも、本報で述べたエネルギー利用の新たな側面は徐々に重要になっていくものと考えられる。

参考文献

1) NEDO 技術開発機構「よくわかる技術解説」新エネルギー・省エネルギー分野，分散型エネルギーシステム　＜http://www1.infoc.nedo.go.jp/＞

2) 横山隆一、浅野浩志、荒井純一、岡田健司、久保川淳司、栗原郁夫、小柳薫、陳洛南、中西要祐、新村隆英、福山良和、藤田吾郎、舟橋俊久、的場誠一：電力自由化と技術開発、電機大出版局、pp.273-296、2001.

3) 牧孝憲、尾崎正明：消化ガスで走る自動車、土木技術資料、Vol.42、No.2、pp34-39、2005.

4) 合田忠弘、田熊良行、泉井良夫、小島康弘、竹内英次郎、高坂幹: エネルギー新書 マイクログリッド（社）日本電気協会新聞部、pp.27-40、2004.

5) 柏木孝夫、伊東弘一、加藤丈佳、鈴置保雄、中塚勉、本間琢也、安田勇、尾本敏孝、三角好輝、伊東高根、渡邊裕、小川健一郎、清水幸丸、石川忠夫、岡土千尋：分散型電源システムの最新動向と将来展望 第3編第1講分散型電源の導入形態と系統連系における技術課題およびその対策、エヌ・ティー・エス、pp.413-445、2001.

6) 森野仁夫、沼田茂生、傳田篤：分散型電源によるマイクログリッドシステムの開発（その1）－小規模実験システムによる負荷追従制御技術の開発－　清水建設技術研究所 研究所報第 84 号、pp.45-56、2006.

7) 刑部真弘、堀木幸代、伊藤俊之、久角善徳、森直樹、渡辺健一郎、篠原裕文、田村豊一、大林一、中川二彦、小西杉弘、大谷誠、飯高弘、藤縄幸雄、川辺豊明、毛利邦彦、西洋一、菱沼孝夫：地域分散エネルギー技術 SMART 研究会編、海文堂、pp.103-105、2004.

8) 中島、佐薙、矢吹：家庭用燃料電池システムの大規模実証試験と愛知万博のマイクログリッド実証試験、東芝レビューVol.61、No.2、 pp.44-47 、2006.

9) 安芸裕久、近藤潤次、山本重夫、石川芳郎、前田哲彦、山口浩、村田晃伸、石井格、杉本一郎：燃料電池も用いた住宅向けエネルギーネットワークに関する研究、第 20 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、2-2、pp.25-28、2004.

10) 独立行政法人北海道開発土木研究所：積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト（平成 12～16 年度）最終成果報告書、2006.

基　礎　資　料

1.3 の基礎資料

1. BTH プラントのバイオガスプラント設備における電力・熱消費量の推定

BTH プラントのバイオガスプラント設備部分の消費エネルギーについて、別海資源循環試験施設（乳牛 1,000 頭規模共同利用型バイオガスプラント）で消費される電力・熱エネルギーより、以下の設定条件において推定した。

① 受け入れるふん尿はスラリーのみとするので、堆肥化設備の電力消費量は計上しない。

② 温室ハウス等、試験研究にかかる部分のエネルギーは計上しない。

③ 発酵設備、殺菌設備及びその他施設における電力・熱消費量は投入する乳牛ふん尿処理量に比例するものとする。

表 1.1 と**表 1.2** にそれぞれバイオガスプラント設備の乳牛ふん尿処理量に対する電力消費量の推定値及び熱消費量の推定値について示す。

表 1.1　バイオガスプラント設備の乳牛ふん尿処理量に対する電力消費量の推定値

設 備 名	処理量別電力利用量（kWh/d）					備　　考
	41m^3	50m^3	100m^3	150m^3	200m^3	
発酵設備	456	556	1,112	1,668	2,224	
殺菌設備	167	204	407	611	815	
その他	509	621	1,241	1,962	2,473	
合　　計	1,132	1,381	2,760	4,241	5,512	

表 1.2　バイオガスプラント設備の乳牛ふん尿処理量に対する熱消費量の推定値

設 備 名	処理量別熱利用量（MJ/d）					備　　考
	41m^3	50m^3	100m^3	150m^3	200m^3	
発酵設備	4,121	5,026	10,051	15,077	20,102	
殺菌設備	4,533	5,528	11,056	16,584	22,112	
その他						
合　　計	8,654	10,554	21,107	31,661	42,214	

2. BTH プラントの水素プラント（水素製造設備）における電力・熱消費量の推定

2.1. エネルギー地域自立型実証研究施設における水素製造設備の電力計測値（推定値を含む）

表 2.1 に水素製造設備運転実験時の電力消費量の計測値を示す。直接改質と水蒸気改質の連結運転時の計測データで前電力量は約 100kW であった。個々の機器類については、計測できないもの（*印）もあったが、他の定格電力量や他の計測値等から推定した。表のバイオガス 200m³/d 導入時の色付部分は、各設備全体の計測値（200m³/d 導入の真中の欄）において個々の機器類の電力消費量（200m³/d 導入の左の欄）を再比例配分したものである。

表 2.1　水素製造設備の電力計測値

設備名	機器番号	機器名称	定格電力	電力 (kW)				
				200m³/d導入			300m³/d導入	400m³/d導入
前処理設備・直接改質ユニット	B-102	バイオガスホルダーブロワー	1.1	0.13	17.39	0.13		
	K-101	バイオガス圧縮機	7.5	4.34		4.22	4.20	4.15
	H-101	脱硫反応器ヒーター	10	2.81		2.74	2.95	3.28
	H-102	脱硫吸収器ヒーター	12	3.87		3.77	4.08	3.99
	H-103	脱酸素器ヒーター	6	1.03		1.00	0.82	0.90
	K-102	精製バイオガス圧縮機	7.5	0.61*		0.59	0.98	1.35
	K-103	精製バイオガス循環圧縮機	11	2.55*		2.48	3.93	5.31
	K-201	直接改質ガス圧縮機	11	1.61*		1.57	1.69	1.77
	P-201	芳香族化合物抜出ポンプ	0.4	0.2*		0.19		
	P-202	溶剤ポンプ	0.2	0.1*		0.10		
	B-001	オフガスブロワー	1.5	0.61		0.59		
		合計		17.86		17.39		
直接改質炉	B-201	送風機	0.75	0.45	1.75	0.45		
	B-202	排風機	2.2	1.3		1.30		
		合計		1.75		1.75		
水蒸気改質設備	K-301	原料ガス圧縮機	2.2	1.00*	20.08	0.96		
	P-301	純水供給ポンプ	0.04	0.02*		0.02		
	P-302	純水循環ポンプ	0.2	0.10*		0.10		
	M-303	水蒸気発生器	10.1	6.24		6.01		
	H-302	原料ガス予熱ヒーター	1.0	0.80		0.77		
	V-306	分離ドラム(ヒータ)	1.5	0.62*		0.60		
	H-301	水蒸気改質器	27	10.24		9.87		
	K-302	改質ガス圧縮機	5.5	1.82		1.75		
		合計		20.84		20.08		
用役設備	K-481	エアコンプレッサー	20	16.08	47.64	16.13	16.13	
	K-461	ブラインチラー	47	14.89		14.94	15.84	
	P-461	ポンプ他	22	11.83		11.87	14.89	
	M-441	熱媒ポンプ	12.8	3.93		3.94	3.89	
	H-401	ベーパライザー	4.2	0.75		0.75	0.53	
		合計		47.48		47.64	51.28	
機械室換気扇				10.25	10.25	10.25		
計装制御盤				2.1	2.1	2.10		
計				100.28	99.21	99.21		

* 推定値

2.2. 水素製造プロセスのフローと物質収支

2.2.1. メタン精製設備

図 2.1 にバイオガスからのメタン精製プロセスのフローと物質収支を示す。バイオガスを 2 つの膜分離装置によりメタンに精製する。そのための圧縮器や冷却器等を備えている。物質収支はバイオガス 200m³/day を改質原料として導入した場合の実験値である。

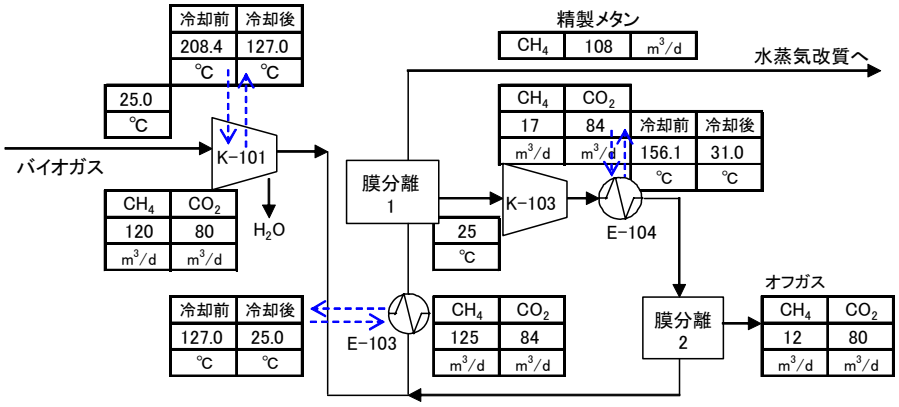


図 2.1　前処理設備フロー

2.2.2. 水蒸気改質設備

図 2.2 にメタンからの水素製造プロセスのフローと物質収支を示す。メタンから水蒸気改質反応器及び CO 変成反応器を経て水素を製造し、PSA 装置により水素を精製する。その他水蒸気発生器や圧縮器や冷却器等により構成されている。

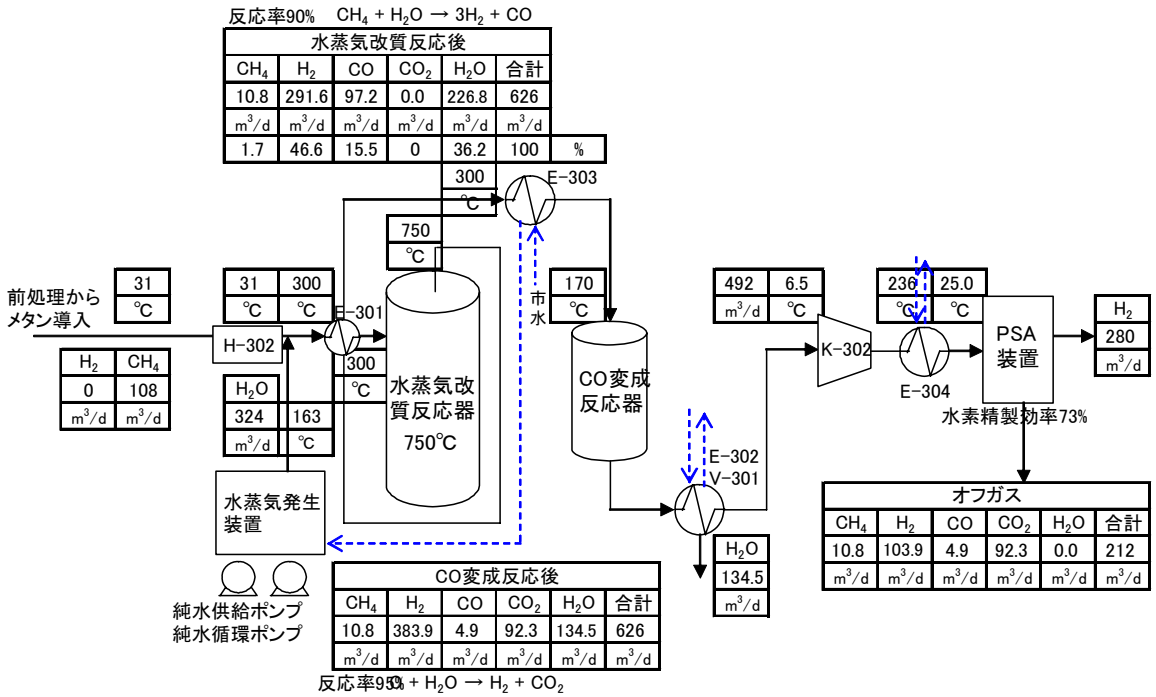


図 2.2　水蒸気改質設備フロー

2.3. 水素製造プロセスのスケールアップにおけるエネルギー消費量の推定

上記のプラント運転実験において取得した電力計測値及び物質収支、その他各設備機器の諸元等を基礎に、任意の改質バイオガス導入量に対する水素製造プロセスのエネルギー量について推定した。

表 2.2 にその結果を示す。電力量のスケールアップはバイオガス導入量に比例するとした。熱量に関しては水蒸気改質反応器においてスケールアップ効果による放熱量の低減を考慮した。

表 2.2　水素製造プロセスにおける改質バイオガス導入量に対するエネルギー消費量

設備名称	区分	機器番号	機器名称	改質バイオガス導入量(m^3/day)						
				200	400	600	800	1000	1500	2000
メタン精製設備	電力 (kWh/h)	K-101	圧縮機	2.075	4.150	6.225	8.300	10.375	15.563	20.750
		K-103	圧縮機	2.655	5.310	7.965	10.620	13.275	19.913	26.550
			電力小計(kWh/h)	4.730	9.460	14.190	18.920	23.650	35.475	47.300
水蒸気改質設備	電力 (kWh/h)	H-302	原料ガス予熱器	1.539	3.078	4.617	6.156	7.695	11.543	15.390
		P-301	純水供給ポンプ	0.019	0.038	0.057	0.076	0.095	0.143	0.190
		P-302	純水循環ポンプ	0.096	0.192	0.288	0.384	0.480	0.720	0.960
		K-302	圧縮機	2.480	4.960	7.440	9.920	12.400	18.600	24.800
			電力小計(kWh/h)	4.134	8.268	12.402	16.536	20.670	31.005	41.340
	熱 (MJ/day)	M-303	水蒸気発生器	829	1,659	2,488	3,317	4,147	6,280	8,398
		H-301	水蒸気改質反応器	4,427	7,591	10,465	13,177	15,780	21,973	27,868
			熱小計(MJ/day)	5,256	9,250	12,953	16,494	19,927	28,253	36,266
用役設備	電力 (kWh/h)	K-461	ブラインチラー	3.253	6.507	9.760	13.014	16.267	24.401	32.535
		P-461	ブラインポンプ	1.268	2.536	3.804	5.072	6.340	9.510	12.680
			電力小計(kWh/h)	4.521	9.043	13.564	18.086	22.607	33.911	45.215
電力合計 kWh/h				13.385	26.771	40.156	53.542	66.927	100.391	133.855
電力合計 kWh/day				321	643	964	1,285	1,606	2,409	3,213
熱合計 MJ/day				5,256	9,250	12,953	16,494	19,927	28,253	36,266

次に上記の各設備機器のスケールアップ方法について記す。

(1) メタン精製設備

表 2.1 に示す次の電力測定値を基準として、電力消費量は任意の改質バイオガス導入量に比例するとした。

・K-101 圧縮機

バイオガス導入量 400m³/day 実験時の測定値 4.150kW を基準とした。

・K-103 圧縮機

バイオガス導入量 400m³/day 実験時の測定値 5.310kW を基準とした。

(2) 水蒸気改質設備

水蒸気改質設備の H-302 原料ガス予熱器と M-303 水蒸気発生器の前段においてバイオガスエンジンコージェネレーションによる回収熱を利用して予熱を行う。**図 2.3** にそのプロセスの模式図を示す。バイオガスエンジンの回収熱は最高温度でも 80℃であるから、原料ガス及び水はともに 60℃まで予熱するものとした。

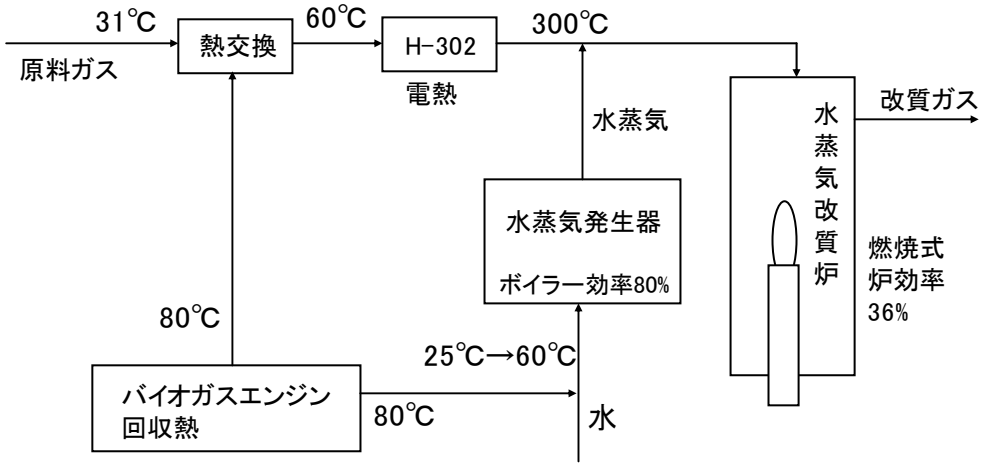


図 2.3　水蒸気改質設備におけるバイオガスエンジン回収熱の予熱利用

① H-302 原料ガス予熱器

H-302 原料ガス予熱器前段でバイオガスエンジン回収熱により、原料ガスを 60℃まで予熱するとしたので､H-302 では 60℃から 300℃までメタン温度上昇のための顕熱が必要ということなる。

バイオガス導入量 200m^3/day 実験時（原料ガス：メタン 108m^3/day）の必要な顕熱量を算出すると、1.184 kW となり、熱交換ロスを 30%として、H-302 の電力消費量は 1.539kW と推定した。この値を基準として、電力消費量は任意の改質バイオガス導入量に比例するとした。

② P-301 純水供給ポンプ、P-302 純水循環ポンプ、K-302 圧縮機

表 2.1 に示す電力測定値または推定値を基準として、電力消費量は任意の改質バイオガス導入量に比例するとした。各機器の基準値は次のとおりである。

・P-301 純水供給ポンプ

改質バイオガス導入量 200m^3/day 実験時の推定値 0.02kW を基準とした。

・P-302 純水循環ポンプ

改質バイオガス導入量 200m^3/day 実験時の推定値 0.10kW を基準とした。

・K-302 圧縮機

表 2.1 に測定値 1.75kW は定格流量 14.5m^3/h 時の電力量として、**図 2.2** に示す K-302 へのガス導入流量 20.5m^3/h(492m^3/d)より、K-302 のバイオガス 200m^3/day 導入時の電力消費量は、

1.750×20.5 / 14.5 = 2.480 kW

となり、この値を基準とした。

③ M-303 水蒸気発生器

水蒸気の発生をボイラーにより行うものとした。

バイオガスエンジン回収熱で水を 60℃まで予熱するので、M-303 水蒸気発生ボイラーでは 60℃の水から 163℃の水蒸気の発生のための熱量が必要となる。バイオガス導入量 200m^3/day 実験時(水蒸気必要供給量 324m^3/day) の必要な熱量を算出すると、663 MJ/day となり、ボイラー効率を 0.8 として、M-303 の所要熱量は 829MJ/day と推定した。この値を基準として、電力消費量は任意の改質バイオガス導入量に比例するとした。

④ H-301 水蒸気改質器

燃焼炉による水蒸気改質器とした。水蒸気改質設備への改質バイオガス導入量に対する水蒸気改質器の熱消費量の試算結果について**表 2.3** に示す。

表 2.3　水蒸気改質炉のバイオガス導入量に対する熱消費量

バイオガス導入量 m^3/day	200	400	600	800	1000	1500	2000
改質に必要熱量 kW	15.814	31.627	47.441	63.254	79.068	118.602	158.136
放熱・損失熱量 kW	35.420	56.226	73.677	89.253	103.569	135.714	164.406
必要総熱量　kW	51.234	87.853	121.118	152.508	182.638	254.316	322.542
必要総熱量　MJ/day	4,427	7,591	10,465	13,177	15,780	21,973	27,868

改質に必要な熱量と放熱・損失熱量を分けられているが、それぞれのスケールアップ時の算出方法は次のとおりである。

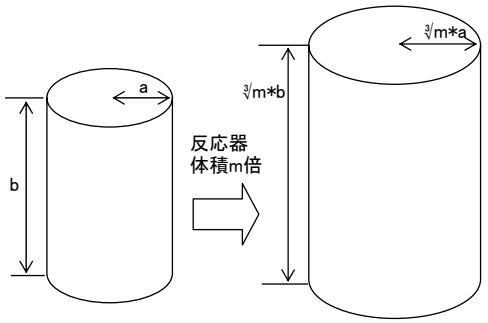
i) 改質に必要な熱量

最初にバイオガス 200m^3/day（水蒸気改質反応器にメタン 108m^3/day を導入）導入時の改質に必要な熱量（原料ガスの顕熱＋反応熱）15.814kW を算出し、その値を基準として改質に必要な熱量はバイオガス導入量に比例するとした。

ii) 放熱・損失熱量

水素製造量 30m^3/h の燃焼式の水蒸気改質反応器を参考に試算した。この場合、改質バイオガス導入量 400m^3/day に相当し、反応炉の効率は 36%である。**表 2.3** におけるバイオガス導入量 400m^3/day 時の改質に必要な熱量 31.627kW に対して炉の効率 36%から、その放熱・損失熱量は 56.226kW となる。

放熱・損失熱量のスケールアップはバイオガス導入量に比例（反応炉体積）ではなく、反応炉の表面積に比例するとした。**図 2.4** に示すように反応器の体積を m 倍するとその表面積は立方根 m の 2 乗倍となる。それに基づきバイオガス導入量 400m^3/day 時の放熱・損失熱量 56.226kW を基準としてスケールアップ（ダウン）時の放熱・損失熱量を算出した。



反応器を円柱として考える。
反応器の体積を相似にm倍となったとき、
半径及び高さ ： ∛m（mの立方根）倍
表面積 ： (∛m)^2（mの立方根の2乗）倍

図 2.4 スケールアップによる反応器の表面積の増加割合

(3) 用役設備

① K-461 ブラインチラー

図 2.1、図 2.2 に示す物質フローから、バイオガス導入量 200m³/day 時の前処理設備および水蒸気改質設備における除熱量を算出した。その結果を表 2.4 に示す。熱交換器周辺の付帯する熱損失は一律 30%とし、ブラインチラーによる総除熱量は 9.760kW と算出した。ブラインチラーの成績係数を 3（プラント施工データより）として、バイオガス 200m³/day 導入時のブラインチラー電力消費量は

表 2.4 ブラインによる除熱量

単位:kW

前処理設備	K-101中間冷却	0.362
	E-103	0.427
	E-104	0.259
水蒸気改質設備	E-302, V-301	4.776
	E-304	1.684
合計(除熱量)		7.508

9.760 / 3 = 3.253kW

と算出した。この値を基準として、電力消費量は任意の改質バイオガス導入量に比例するとした。

② P-461 ブラインポンプ

プラント施工データより、施設設計上必要最大限の除熱量 77kW とそのときの予想されるブラインポンプ電力量 10kW から、バイオガス 200m³/day 導入時のブラインポンプ電力消費量は、上記のブラインチラー総除熱量 9.760kW を用いて、

9.760 × 10 / 77 = 1.268 kW

と算出した。この値を基準として、電力消費量は任意の改質バイオガス導入量に比例するとした。

(4) オフガス

図 2.1 と図 2.2 に示されるオフガスを図 2.5 にまとめ、その熱量を図 2.6 に示す。改質バイオガス導入量 200m³/day 時のオフガス熱量 1,999MJ/day を基準として、オフガス熱量は任意の改質バイオガス導入量に比例するとした。

図 2.5 水素製造設備からのオフガス量

m³/day

成分	前処理メタン精製	PSA水素精製	合計
CH_4	12.0	10.8	22.8
H_2	0.0	103.9	103.9
CO	0.0	4.9	4.9
CO_2	80.0	92.3	172.3
H_2O	0.0	0.0	0.0
合計	92.0	211.9	303.9

図 2.6 水素製造設備からのオフガス熱量

成分	単位熱量(MJ/m³)	流量(m³/day)	熱量(MJ/day)
CH_4	35.79	22.8	816.0
H_2	10.79	103.9	1121.1
CO	12.63	4.9	61.9
CO_2	0.00	172.3	0.0
H_2O	0.00	0.0	0.0
合計		303.9	1998.98

3. BTH プラントからの水素供給量試算結果

本文**表 1.3.1** に示した BTH プラントからの水素製造量の試算結果のシミュレーションシートを以下に示す。

図 3.1～図 3.3 は乳牛ふん尿のみで、副資材との共発酵しない場合である。

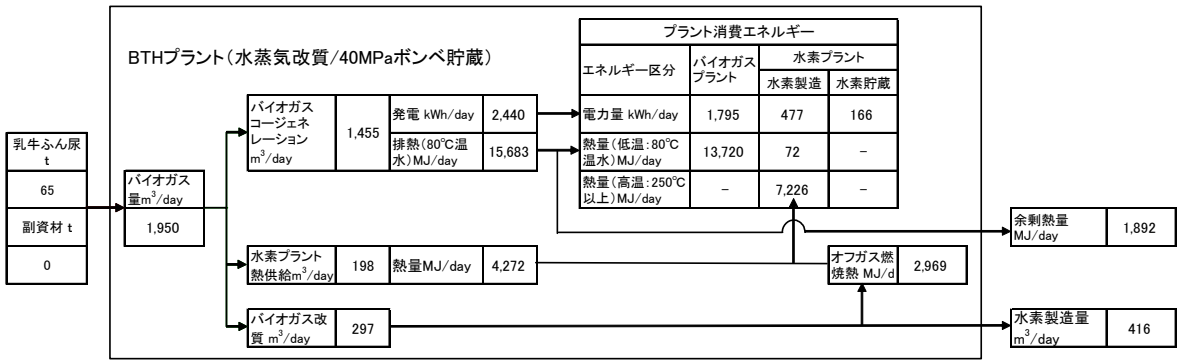


図 3.1　乳牛 1,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

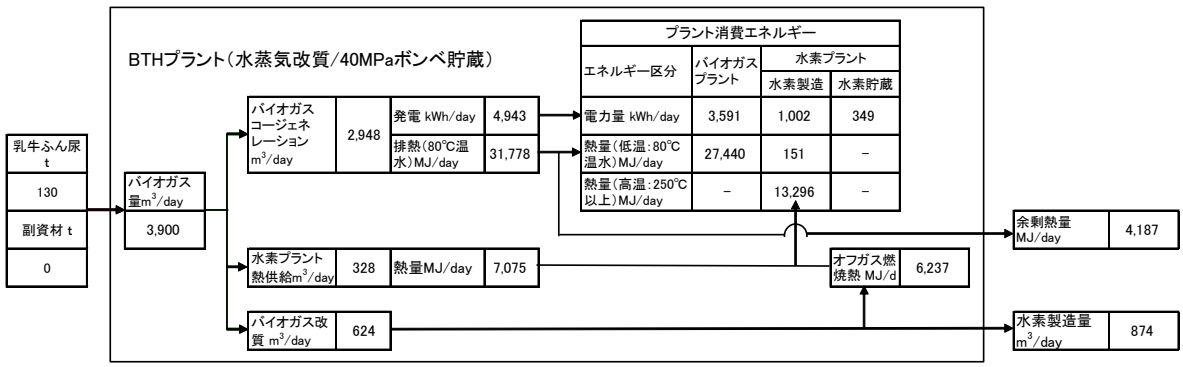


図 3.2　乳牛 2,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

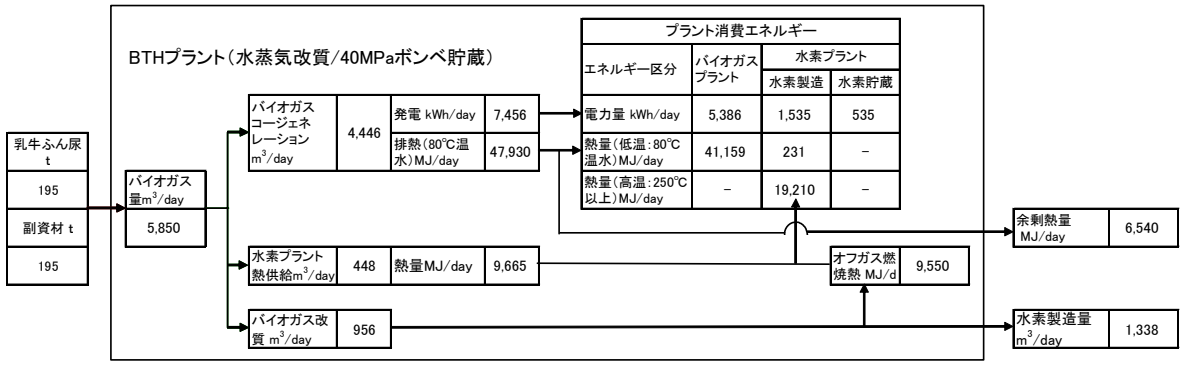


図 3.3　乳牛 3,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

図 3.4～図 3.6 は乳牛ふん尿投入量の 3.33%の副資材を投入し、共発酵した場合である。

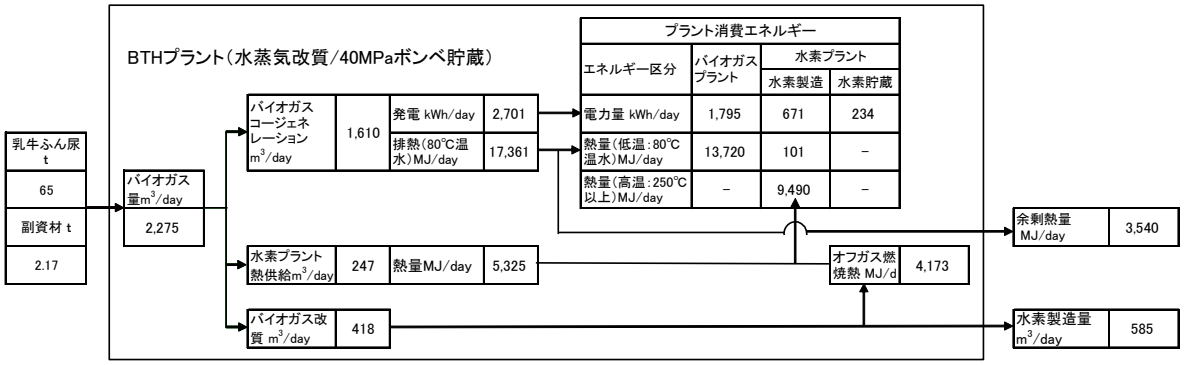


図 3.4　乳牛 1,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

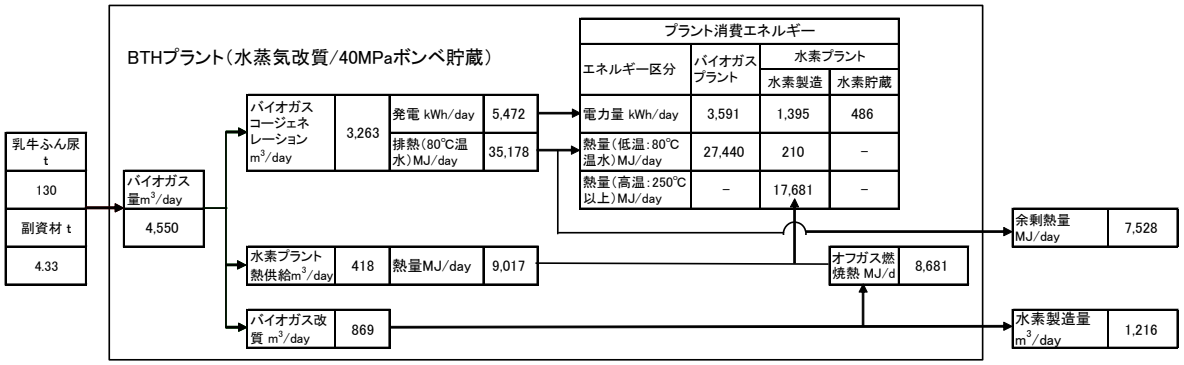


図 3.5　乳牛 2,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

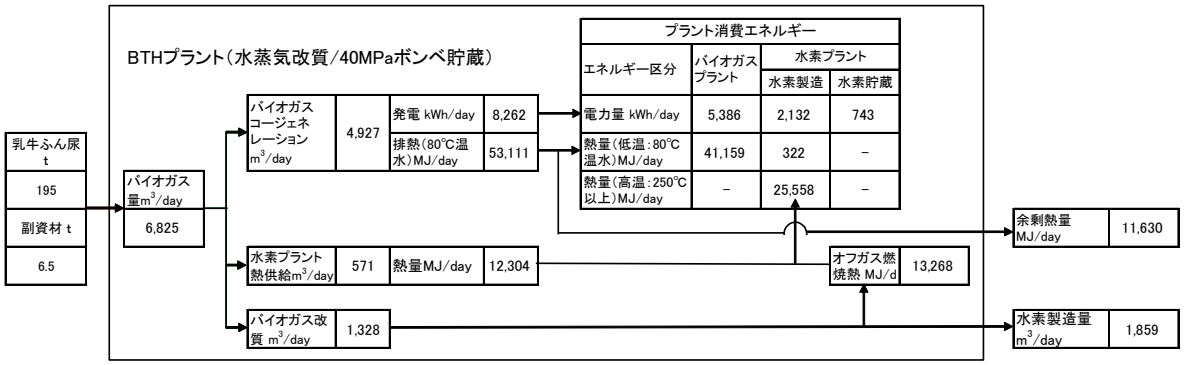


図 3.6　乳牛 3,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

図 3.7～図 3.9 は乳牛ふん尿投入量の 6.67%の副資材を投入し、共発酵した場合である。

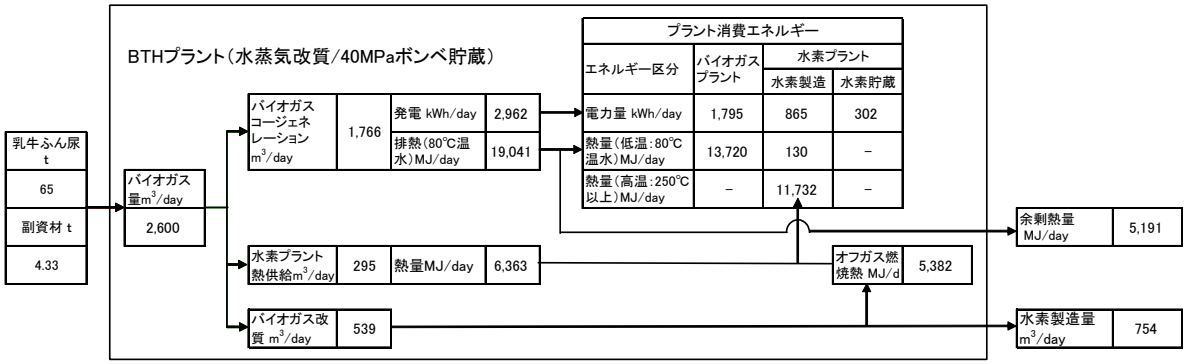


図 3.7　乳牛 1,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

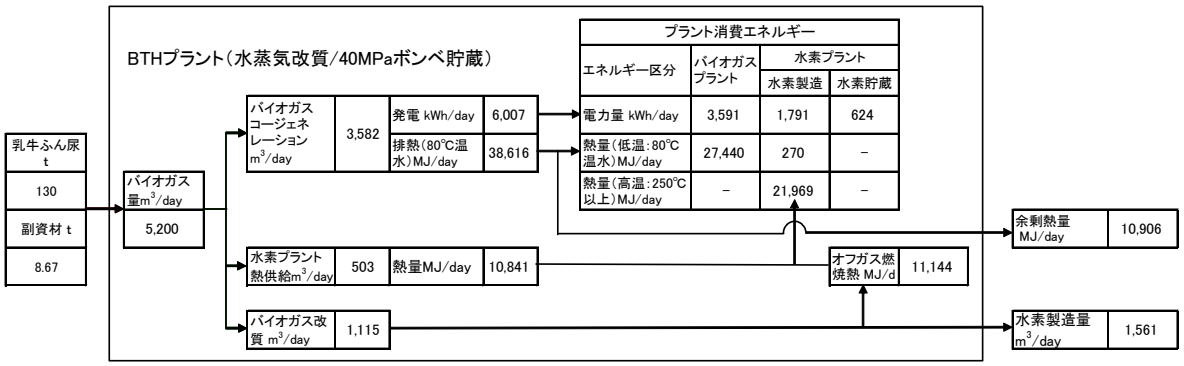


図 3.8　乳牛 2,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

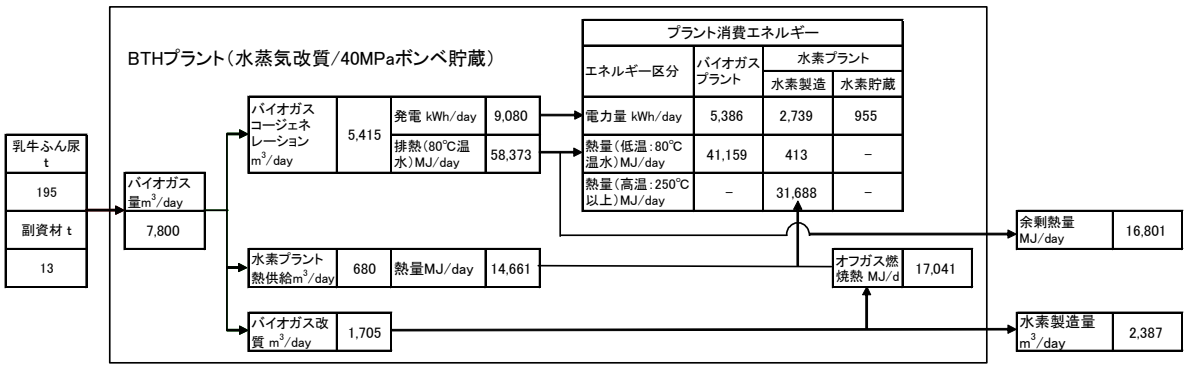


図 3.9　乳牛 3,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

図 3.10～図 3.12 は乳牛ふん尿投入量の 10%の副資材を投入し、共発酵した場合である。

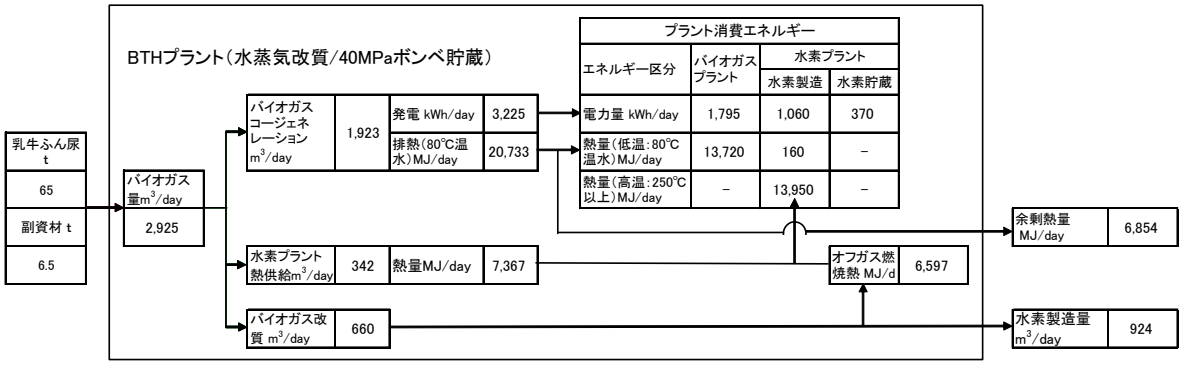


図 3.10　乳牛 1,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

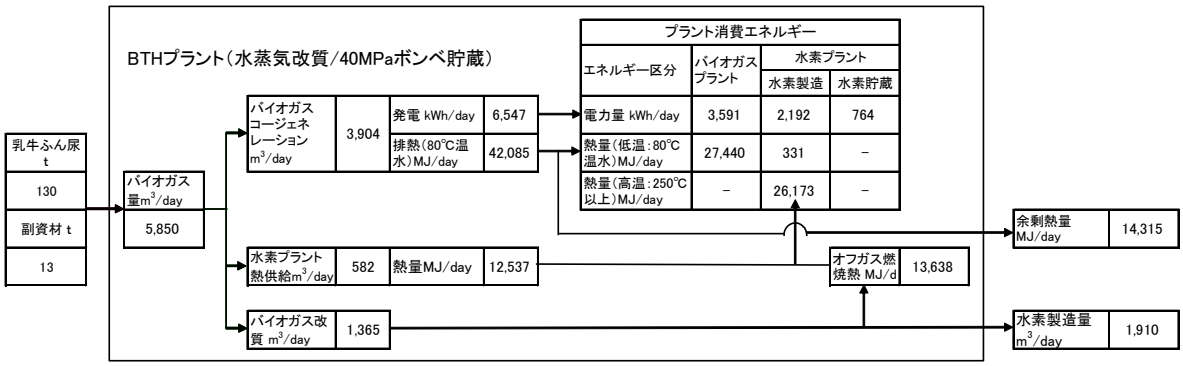


図 3.11　乳牛 2,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

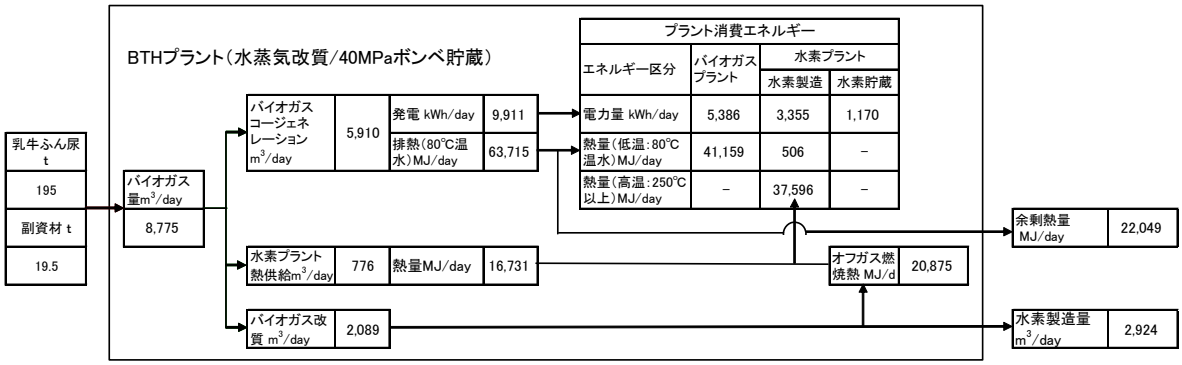


図 3.12　乳牛 3,000 頭規模 BTH プラントのシミュレーション結果

4. 水素エネルギーが代替する１次エネルギーの単位水素量あたりの熱量の算出

(1) 基本モデルⅠ

本文の**表 1.3.2** より、一般住宅の１日の電力・熱需要量
水素エネルギーで代替する電力量：13.0 kWh/day
水素エネルギーで代替する熱量　：37.3 MJ/day
必要水素量：10.8 m^3/day

電力の１次エネルギー換算係数：9.83 MJ/kWh

一般住宅における１次エネルギー消費量：
13.0kWh/day × 9.83MJ/kWh + 37.3MJ/day / 0.8 = 174.4 MJ/day
単位水素量あたりの１次エネルギー熱量： 174.4MJ/day / 10.8m^3/day = 16.1MJ/m^3

(2) 基本モデルⅡ

エンジン効率：16%
燃料電池車両効率：38%
水素熱量：10.79 MJ/m^3

単位水素量あたりの１次エネルギー熱量： 10.79MJ/m^3 × 0.38 / 0.16 = 25.6 MJ/m^3

5. BTH システムの温室効果ガス排出量試算におけるインベントリ計算

以下に、本文**図 1.3.19** における個別型スラリー処理と 2,000 頭規模 BTH システムの温室効果ガス排出量の試算例を示す。スラリー処理及びバイオガスプラントの運用時の温室効果ガス排出量については「積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト（平成 12～16 年度）最終成果報告書 平成 17 年 3 月独立行政法人北海道開発土木研究所」おいて試算されおり、ここではそこで用いられている諸元及び原単位等を参照して、BTH プラントの温室効果ガス排出量について試算を行った。

インベントリ計算例：

・個別型スラリー処理（乳牛 2,000 頭相当：乳牛 100 頭飼養酪農家 20 戸）
・基本モデルⅠ-1、2,000 頭規模 BTH システム
・ふん尿発生量 65kg/頭
・副資材投入による共発酵により、バイオガス発生量 40Nm^3/t
・１戸あたり年間スラリー量 0.065t/頭×100 頭/戸×365 日/年 = 2,372 t/(戸・年)
・2,000 頭規模年間スラリー量：2,372 t/年×20 = 47,440 t/年

5.1 個別型スラリー処理

(1) スラリー貯留時揮散（100 頭飼養）

排出量推定式

CO_2 ： 0 kg/t × 2,372t = 0 kg-CO_2

CH_4 ： 0.432 kg/t × 2,372t = 1,025 kg-CH_4

N_2O ： 0.0448 kg/t × 2,372t = 106 kg-N_2O

(2) スラリー運搬・散布（100 頭飼養）

・スラリー施設から圃場までの平均距離 1km
・散布機械：トラクター牽引式バキュームタンカー
・バキュームタンカー積載容量：5m^3
・トラクター牽引式バキュームタンカー移動速度：10km/h
・バキュームタンカー吸引・排出時間：1 分/m^3
・トラクター牽引式バキュームタンカーの時間あたり燃料消費：9L/h（尿散布機より参照）

① 年間散布回数：2,372t ÷ 5m^3 = 475 回/年
② 年間移動時間：475 回/年 × 2 回（往復）÷10km/h = 95 h/年
③ 年間吸引時間：2,372t × 1 分/m^3 ÷ 60 = 39.5 h/年
④ 年間吐出時間：2,372t × 1 分/m^3 ÷ 60 = 39.5 h/年
⑤ 年間トラクター運転時間：95 + 39.5 + 39.5 = 174 h/年
⑥ 年間軽油消費量：174h/年 × 9L/h = 1,566 L/年

排出量推定式

CO_2 ： 2.643 kg/L × 1,566L = 4,139 kg-CO_2

CH_4 ： 2.621×10^{-5} kg/L × 1,566L = 0.0441 kg-CH_4

N_2O ： 4.442×10^{-5} kg/L × 1,566L = 0.070 kg-N_2O

(3) 散布スラリー撹散（100 頭飼養）

排出量推定式

CO_2 ： 0 kg/t × 2,372t = 0 kg-CO_2

CH_4 ： 0.122 kg/t × 2,372t = 289 kg-CH_4

N_2O ： 0.00716 kg/t × 2,372t = 17 kg-N_2O

乳牛 2,000 頭規模 BTH システム

(1) ふん尿輸送

・20 戸の酪農家からプラントまでの平均距離：5km
・ふん尿輸送方法はアームロール車
・アームロール車積載容量：7.41 m^3
・アームロール車の平均移動速度：30km/h
・アームロール車吸引・吐出時間：1 分/m^3
・アームロール車の燃費：1.5km/L
・吸引・排出時の燃料：9L/h（尿散布機より参照）

① 年間移動回数：47,440 t/年 ÷ 7.41m^3 = 6,402 回/年
② 年間走行距離：6,402 回 × 5km × 2（往復）= 64,020 km/年
③ 年間軽油消費量（移動）：64,020km ÷ 1.5km/L = 42,680 L/年
④ 年間吸引時間：47,400t × 1 分/m^3 ÷ 60 = 791 h/年
⑤ 年間吐出時間：47,400t × 1 分/m^3 ÷ 60 = 791 h/年
⑥ 年間軽油消費量（吸吐）（791 + 791）× 9L/h = 14,238 L/年
⑦ 年間軽油消費量（全体）42,680 + 14,238 = 56,918 L/年

排出量推定式

CO_2 ： 2.643 kg/L × 56,918L = 150,434 kg-CO_2

CH_4 ： 2.621×10^{-5} kg/L × 56,918L = 1.492 kg-CH_4

N_2O ： 4.442×10^{-5} kg/L × 56,918L = 2.528 kg-N_2O

(2) 副資材輸送

・ふん尿からのバイオガス発生量：30m^3/t

・副資材からのバイオガス発生量：150m^3/t

・ふん尿投入量 130t、単位バイオガス発生量 40m^3/t より、
バイオガス発生量：5,200m^3/日

・ふん尿より発生バイオガス：0.065t/頭 × 30m^3/t × 2000 頭 = 3,900m^3/日

・副資材よる発生バイオガス：5,200 − 3,900 = 1,300m^3/日

・副資材量：1,300 ÷ 150 = 8.67 t/日

・プラントまでの副資材輸送距離：20km

・副資材輸送方法：ダンプトラック

・ダンプトラック積載容量：9 t

・ダンプトラック移動速度：30 km/h

・ダンプトラックの燃費：2.5 km/L

① 年間副資材量：8.67t × 365 日 = 3,165 t/年

② 年間移動回数：3,165 ÷ 9 = 352 回/年

③ 年間走行距離：352 回 × 20km × 2（往復）= 14,080 km/年

④ 年間軽油消費量：14,080km ÷ 2.5km/L = 5,632 L/年

排出量推定式

CO_2 ： 2.643 kg/L × 5,632L = 14,885kg-CO_2

CH_4 ： 2.621×10^{-5} kg/L × 5,632L = 0.148 kg-CH_4

N_2O ： 4.442×10^{-5} kg/L × 5,632L = 0.250 kg-N_2O

(3) 消化液貯留時揮散

・消化液量：0.065t/頭日 × 2,000 頭 + 8.67t/日 = 138.67t/日（消化液量は、投入原料量と同じであるとした。）

・年間消化液量：138.67 × 365 = 50,615 t/年

消化液の乾物率を 3.3%、有機物含量を 2.2%と設定する。スラリー貯留時の CH_4 揮散率は対有機物含量で 0.92%、貯留時のスラリー揮散対消化液揮散比 0.756、乾物率 3.3%における補正値 0.27 より、

排出量推定式

CH_4 ： 50,615 t ×2.2% × 0.92% × 0.756 ×0.27 × 1000 = 2,091kg-CH_4

(4) 消化液輸送・散布

a. 消化液輸送

・20 戸の酪農家からプラントまでの平均距離：5km
・消化液輸送・散布機械：尿散布機
・尿散布機の積載容量：5t
・尿散布機の燃費：1.9km/L
・吸引時の燃料：9.0L/h

① 年間消化液量：50,615 t/年
② 年間移動回数：50,615t ÷ 5t = 10,123 回/年
③ 年間移動距離：10,123 × 5km × 2（往復）= 101,230 km/年
④ 年間軽油消費量（移動）：101,230km ÷ 1.9km/L = 53,279 L/年
⑤ 年間吸引時間：50,615t × 1 分/m3 ÷ 60 = 844 h/年
⑥ 年間軽油消費量（吸引）844h × 9.0L/h = 7,596 L/年
⑦ 年間軽油消費量（全体）53,279 + 7,596 = 60,875 L/年

排出量推定式

CO_2 ： 2.643 kg/L × 60,875L = 160,893 kg-CO_2

CH_4 ： 2.621×10^{-5} kg/L × 60,875L = 1.596 kg-CH_4

N_2O ： 4.442×10^{-5} kg/L × 60,875L = 2.704 kg-N_2O

b. 圃場散布

・消化液散布時間：5 分/回
・散布時の燃料：9.0L/h

① 年間散布時間：10,123 回 × 5 分/回 ÷ 60 = 844 h/年
② 年間軽油消費量：844h × 9.0L/h = 7,596 L/年

排出量推定式

CO_2 ： 2.643 kg/L × 7,596L = 20,076 kg-CO_2

CH_4 ： 2.621×10^{-5} kg/L × 7,596L = 0.199 kg-CH_4

N_2O ： 4.442×10^{-5} kg/L × 7,596L = 0.337 kg-N_2O

(5) 散布消化液揮散

・消化液量は投入原料量に等しいとする。

年間消化液量：50,615 t/年

消化液は N_2O 揮散データが整っていないため、スラリーで代替する。消化液の T-N 率をそれぞれ 0.3%と設定し、対全窒素 N_2O 揮散原単位（N ベース）として 0.12%を用いると、

N_2O 排出量

50,615 t × 1000 × 0.3% × 0.12% × 44/28 = 286 kg-N_2O

(6) 水素配送

・プラントから需要家（一括積み下ろし）までの距離：20km

・水素貯蔵は 15MPa 圧縮ボンベ

・水素輸送はダンプトラック

・ダンプトラックの積載重量：6 t

・ダンプトラック移動速度：30km/h

・ダンプトラック燃費：2.5km/L

・水素ボンベ重量：300kg/本

・水素ボンベ容量：95m^3/本

・水素供給量：1,561 m^3/day

① 年間ボンベ量：1,561m^3 ÷ 95Nm^3 × 300kg ÷ 1000 × 365 日 = 1,799t/年

② 年間移動回数：1,799t ÷ 6 = 300 回/年

③ 年間走行距離：20km × 2（往復） × 300 回 = 12,000 km/年

④ 年間軽油消費量：12,000km ÷ 2.5km/L = 4,800 L/年

排出量推定式

CO_2 ： 2.643 kg/L × 4,800L = 12,686 kg-CO_2

CH_4 ： 2.621×10^{-5} kg/L × 4,800L = 0.126 kg-CH_4

N_2O ： 4.442×10^{-5} kg/L × 4,800L = 0.213 kg-N_2O

(7) ガスエンジン回収熱利用

・ガスエンジン余剰回収熱量：10,906MJ/day

・灯油の標準発熱量：36.7MJ/L

・CO_2 排出量原単位：2.49kg-CO_2/L

余剰回収熱量と同熱量の燃焼熱を発する灯油量に換算し、その CO_2 排出量を算出する。

排出量推定式

ガスエンジン余剰回収熱を有効に利用できれば、次のマイナスの CO_2 の排出量になる。

CO_2 ： △10,906MJ/day × 365 日 ÷ 36.7MJ/L ×2.49kg-CO_2/L = △270,000kg-CO_2/年

(8) 燃料電池発電利用

・水素供給量：1,561m^3/day

・水素発熱量(LHV)：10.79 MJ/m^3

・燃料電池発電効率：40%(LHV)

・CO_2 排出原単位：0.479 kg-CO_2/kWh（2006 年度　北海道電力実績値）

① 年間水素供給量：1,561m^3/day × 365 日 = 569,765 m^3/年

② 年間発電量：569,765m^3/年 × 10.79MJ/Nm^3 × 40% × 1000 ÷ (60×60)

= 683,085 kWh/年

排出量推定式

CO_2：△683,085 kWh/年 × 0.479kg-CO_2/kWh = △327,198 kg-CO_2/年

(9) 燃料電池回収熱利用

・水素供給量：1,561m^3/day

・水素発熱量(LHV)：10.79 MJ/Nm^3

・燃料電池発電効率：40%(LHV)

・灯油の標準発熱量：36.7MJ/L

・CO_2 排出量原単位：2.49kg-CO_2/L

① 年間水素供給量：1,561m^3/day × 365 日 = 569,765 m^3/年

② 年間熱量：569,765m^3/年 × 10.79MJ/Nm^3 × 40% ×80% = 1,967,285 MJ/年

排出量推定式

CO_2 ： △1,967,285MJ/day ÷ 36.7MJ/L ×2.49kg-CO_2/L = △133,475t-CO_2/年

以上、**表 5.1** に各温室効果ガスインベントリを示す。気体別の排出量では二酸化炭素の排出量が最も多いが、**表 5.2** に示すように、特性化係数を乗じて総温暖化負荷量（CO_2排出量換算した温室効果ガス排出量）すると、温暖化負荷はメタンや亜酸化窒素のほうが大きいものとなる。

表 5.1　個別型スラリー処理(乳牛 2,000 頭相当:乳牛 100 頭飼養酪農家 20 戸)の温室効果ガスインベントリ

kg/年	CO_2	CH_4	N_2O
スラリー貯留時揮散	−	20,500	2,120
スラリー運搬･散布	82,780	0.88	1.40
散布スラリー揮散	−	5,780	340
気体別合計	82,780	26,281	2,461

表 5.2　個別型スラリー処理(乳牛 2,000 頭相当:乳牛 100 頭飼養酪農家 20 戸)の総温暖化負荷量

kg/年	CO_2	CH_4	N_2O
気体別合計	82,780	26,281	2,461
特性化係数	1	23	296
CO2換算温暖負荷	82,780	604,460	728,574
温暖化負荷合計		1,415,815	

表 5.3 に各温室効果ガスインベントリを示す。プラントから生産するエネルギーの有効利用により従来の化石燃料が代替されるものとして、その相当分の温室効果ガスは控除されるとして△（マイナス）で示した。

表 5.4 に特性化係数を乗じた総温暖化負荷（CO_2排出量換算した温室効果ガス排出量）を示す。

表 5.3　乳牛 2,000 頭規模 BTH システムの温室効果ガスインベントリ

kg/年	CO_2	CH_4	N_2O
ふん尿輸送	150,434	1.49	2.53
副資材輸送	14,885	0.15	0.25
消化液貯留時揮散	−	2,091	−
消化液輸送･散布	180,969	1.80	3.04
散布消化液揮散	−	−	286
水素配送	12,686	0.13	0.21
気体別合計	358,974	2,095	292
ガスエンジン回収熱利用	△ 270,000	−	−
燃料電池発電利用	△ 327,198	−	−
燃料電池回収熱利用	△ 133,475	−	−
気体別合計(エネルギー利用)	△ 730,673	−	−

表 5.4　乳牛 2,000 頭規模 BTH システムの総温室化負荷

kg/年	CO_2	CH_4	N_2O
気体別合計	358,974	2,095	292
特性化係数	1	23	296
CO2換算温暖負荷	358,974	48,175	86,441
温暖化負荷合計		493,590	

kg/年	CO_2	CH_4	N_2O
気体別合計(エネルギー利用)	△ 730,673	−	−
特性化係数	1	23	296
CO2換算温暖負荷	△ 730,673	−	−
温暖化負荷合計		△ 730,673	

6. BTH プラント建設・解体時の温室効果ガス排出量試算

スラリー施設及び BTH プラント建設・解体時の温室効果ガス排出量の試算について簡単に示す。

スラリー施設及びバイオガスプラントの建設・解体時の温室効果ガス排出量については「積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト（平成 12～16 年度）最終成果報告書 平成 17 年 3 月 独立行政法人北海道開発土木研究所」おいて試算されおり、ここではその結果を基礎にスケールアップと BTH プラントの建設・解体時の温室効果ガス排出量について試算を行った。なお、その試算は施設の建設資材生産における温室効果ガスのうち大部分を占める鉄鋼、コンクリート、アスファルトを対象としている。

表 6.1 にスラリー施設の建設・解体時の温室効果ガス排出量を示す。1 基（100 頭）のスラリー施設の値をもとに、任意の施設数に比例して温室効果ガス排出量を算出した。

表 6.1　スラリー施設の建設・解体時の温室効果ガス排出量

項目	スラリー施設			
	1基(100頭)	10基	20基	30基
鉄筋使用量 t	15.76	157.6	315.2	472.8
鉄骨使用量 t	0	0	0	0
コンクリート使用容量 m^3	211.05	2110.5	4221	6331.5
コンクリート使用重量 t	495.57	4955.7	9911.4	14867.1
アスファルト重量 t	0	0	0	0
資材重量 t	511.33	5113.3	10226.6	15339.9
施工面積 m^2	676	6760	13520	20280
建設資材生産過程	73	730	1460	2190
建設資材運搬過程	33	330	660	990
建設現場施工過程	7	70	140	210
解体除去過程	11	110	220	330
合計 t-CO_2	124	1240	2480	3720

表 6.2 は水素プラント（エネルギー地域自立型実証研究施設）における鋼材の使用量を示す。水素シリンダー以外は水素プラント建設時の施工データより算出した。各プラント規模のスケールアップは、本文 3.3.4 における(3)式の 0.7 乗則に基づき計算した。

表 6.2　水素プラント鋼材使用量

単位：t

項目	水素プラント バイオガス500m^3/day 導入規模	1000頭規模	2000頭規模	3000頭規模
鉄筋	37.2	39.21	65.22	87.80
前処理設備	11.46	12.08	20.09	27.05
水蒸気改質設備	4	4.22	7.01	9.44
オフガスユニット	2.43	2.56	4.26	5.74
ブラインチラー	1.7	1.79	2.98	4.01
ブラインタンク	1.8	1.90	3.16	4.25
水素シリンダー		2.4	5.10	7.80
合計		64.15	107.82	146.08

表 6.3 は水素プラント（エネルギー地域自立型実証研究施設）におけるコンクリートの使用量を示す。水素プラント建設時の施工データより算出した。各プラント規模のスケールアップは、**表 6.2** と同様に 0.7 乗則に基づき計算した。

表 6.3　水素プラントのコンクリート使用量

単位：m^3

項目	水素プラント バイオガス500m^3/day 導入規模	1000頭規模	2000頭規模	3000頭規模
設備の基礎等	16.9	17.81	29.63	39.89
	30.7	32.36	53.82	72.45
	48.7	51.33	85.38	114.94
	7.1	7.48	12.45	16.76
	170	179.18	298.03	401.21
	116	122.26	203.36	273.77
	7.1	7.48	12.45	16.76
合計	396.5	417.90	695.11	935.77

表 6.4 にはバイオガスプラントの試算値と上記の施設の鉄鋼及びコンクリート量から求めた水素プラントの建設・解体時の温室効果ガス削減量の試算値を示す。

BTH プラントの建設・解体時の温室効果ガス排出量は、バイオガスプラントと水素プラントの和であるとして、**表 6.5** に最終的な BTH プラント建設・解体時の温室効果ガス排出量を示す。

表 6.4　バイオガスプラント及び水素プラントの建設・解体時の温室効果ガス排出量

項目	バイオガスプラント			水素プラント		
	1000頭規模	2000頭規模	3000頭規模	1000頭規模	2000頭規模	3000頭規模
鉄筋使用量 t	40.76	66.21	87.95	64.15	107.82	146.08
鉄骨使用量 t	187.54	304.66	404.65			
コンクリート使用容量 m^3	1,017.53	1,652.98	2,195.49	417.90	695.11	935.77
コンクリート使用重量 t	2,391.26	3,884.61	5,159.55	982.07	1,633.52	2,199.07
アスファルト重量 t	4800	7798	10357	0	0	0
資材重量 t	7,420	12,053	16,009	1,046	1,741	2,345
施工面積 m^2	10,978	17,834	23,687	632	1,052	1,416
建設資材生産過程	817	1,327	1,763	115	192	258
建設資材運搬過程	482	783	1,040	68	113	152
建設現場施工過程	112	182	242	6	11	14
解体除去過程	158	257	341	22	37	49
合計 t-CO_2	1,569	2,549	3,385	212	352	474

表 6.5　BTH プラントの建設・解体時の温室効果ガス排出量

	BTHプラント		
プラント規模	1000頭規模	2000頭規模	3000頭規模
合計 t-CO_2	1,781	2,901	3,859

7. ふん尿等の吸引・吐出及び消化液の散布にかかる燃料電池車両の必要水素量

エンジン効率：16%
燃料電池車両効率：38%

スラリー散布機：9L/h
軽油熱量：38.2 MJ/L
水素熱量：10.79 MJ/m^3

従来の軽油燃料の散布機の時間あたりの熱量： 9.0 × 38.2 = 343.8 MJ/h
エンジン動力： 343.8MJ/h × 16% = 55.008MJ/h
必要水素量： 55.008MJ/h / (10.79MJ/m^3 × 38%) = 13.42m^3/h

8. 従来の電力会社からの買電単価の算出

電気使用料金（北海道電力単価）は、

① 120kWh まで、170 円/kWh

② 120kWh をこえ 280kWh まで、22.4 円/kWh

③ 280kWh をこえる、24.1 円/kWh

基本料金

967.5 円/月

一般住宅の月平均電気使用量は、表 1.3.2 より、の住宅 1 戸電力使用量

13.0 kWh/day × 30 日 = 390 kWh/月

	電気使用量		電気使用料単価		電気使用料金
① 120kWh まで：	120 kWh/月	×	17 円/kWh	=	2040 円/月
② 120kWh をこえ 280kWh まで：	160 kWh/月	×	22.4 円/kWh	=	3584 円/月
③ 280kWh をこえる：	110 kWh/月	×	24.1 円/kWh	=	2651 円/月
	計 390 kWh/月				計 8275 円/月

電気使用料金 8,275 円/月 + 基本料金 967.5 円/月 = 9,251.5 円/月

(9,251.5 円/月) / (390 kWh/月) = 23.72 円/kWh (24 円/kWh)

9. BTH プラント建設コストの算出例

表 9.1 に基本モデルⅠ-1 における乳牛 2,000 頭規模の BTH プラントの建設コストと試算方法についてまとめる。プラント設備のスケールアップの方法における実証プラントの施工データとはバイオガスプラントでは別海資源循環試験施設(1,000 頭規模共同利用型バイオガスプラント)、水素プラントではエネルギー地域自立型実証研究施設（バイオガス最大 500m^3/day 導入規模）のものである。表 9.2 に各モデルにおけるプラント建設コストを記す。また、表 9.3 にはランニングコストの試算値を示す。

表 9.1　基本モデルⅠ-1 における乳牛 2,000 頭規模 BTH プラントの建設コストと試算方法

施設	設備区分		費用(千円)	プラント設備のスケールアップの方法
バイオガスプラント	共通設備		364,989	実証プラント施工データより0.7乗則
	タンク設備		518,547	
	バイオガスエネルギー設備		387,561	
	運搬車輌		13,940	
	副資材処理設備		56,175	
	合計		1,341,212	
水素プラント	水素製造設備 水素貯蔵設備	メタン精製設備	58,043	実証プラント施工データより0.7乗則
		水蒸気改質設備	68,756	水素製造量30m^3/h設備4,000万円より0.7乗則
		オフガスホルダー	5,028	実証プラント施工データより0.7乗則
		水素タンク	18,189	実証プラント施工データより0.7乗則
		水素貯蔵圧縮シリンダー	30,600	95m^{3}充填シリンダー90万円/本
		水素貯蔵圧縮器、冷却装置	44,374	水素20m^3/h充填設備2,000万円より0.7乗則
		制御盤・監視卓	12,248	実証プラント施工データより0.7乗則
		計装管理設備	4,220	実証プラント施工データより0.7乗則
		用役設備	11,654	実証プラント施工データより0.7乗則
	燃料電池設備	燃料電池設備	141,000	100万円/kW
	機器単体費　計		394,112	
	工事価格		52,033	実証プラント施工データより0.7乗則
	合計		446,145	
乳牛2,000頭規模BTHプラント建設費			1,787,357	

表 9.2 プラント建設コストの試算結果（百万円）

プラント規模	1,000頭	2,000頭	3,000頭
基本モデルⅠ-1	1,069	1,787	2,423
基本モデルⅠ-2	1,052	1,739	2,327
基本モデルⅡ-1	999	1,639	2,210
基本モデルⅡ-2	999	1,639	2,210

表 9.3　ランニングコストの試算結果（万円）

プラント規模	1,000頭	2,000頭	3,000頭
基本モデルⅠ-1	6,456	9,139	11,225
基本モデルⅠ-2	6,102	8,052	9,033
基本モデルⅡ-1	5,689	7,509	8,875
基本モデルⅡ-2	5,618	7,376	8,662

10.　BTH システムの運用に係る法規制の詳細一覧

①Biogas貯蔵

行為	関係省庁	根拠法		規制内容		適用
Biogas貯蔵	総務省	消防法	消防法	規制対象外 【用語の例】第二条第七項 危険物とは別表の品名欄に掲げる物品で、同表に定める区分に応じ同表の性質欄に掲げる性状を有するもの。	平成五年法律十一月二日 法律第八十九号	消防法で言う危険物は可燃性個体、引火性液体などの固体及び液体であり、気体であるバイオガスは含まれないため、法的規制は受けない。。 性質：酸化性個体、可燃性個体、自然発火性物質及び禁水性物質、引火性液体、自己反応性物質、酸化性液体 品名：省略(別表参照)
	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	規制対象外 【定義】第二条第一項 高圧ガス保安法における高圧ガスは「常用の温度において圧力が１MPa以上となる圧縮ガス」	最終改正：平成18年6月2日 法律第50号	ガスホルダーの圧力は５KPa以下程度であり高圧ガスには含まれないため、法的規制は受けない。

②H2改質ー高圧ガス製造・貯蔵Plant　その１

行為	関係省庁	根拠法		平成19年時点での規制項目及び主な内容		適用
水素製造 水蒸気改質法	総務省 市町村	消防法	火災予防条例	【炉】第三条：炉の位置及び構造 【ボイラー】第四条：ボイラーの構造	昭和37年3月31日 条例第65号	水蒸気改質(バイオガス⇒水素)器の設置・運転には、炉、ボイラー等の位置及び構造について、市町村が定める火災予防条例が準用。
高圧ガス製造	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【事業：製造の許可等】第五条 圧縮、液化その他の方法で処理することが出来るガスの容積(温度零度、圧力零パスカルの状態に換算)が１日100m3(当該ガスが政令(施行令第三条)で定めるガスの種類に該当するものである場合にあっては、当該政令で定めるガスの種類毎に100m3を超える政令で定める値)以上である設備を使用して高圧ガスを製造しようとするものは「事業所毎に都道府県知事の許可」を受けなければならない。	最終改正：平成18年6月2日 法律第50号	法第五条第一項の許可を受けたものを「第一種製造者」と言う。 製造能力300m3以上、40Mpの圧力の高圧ガス製造所であり、事業に当たっては経済産業省令(一般高圧ガス保安規則第三条)の規定に従い、管轄する知事への許可申請が必要
				【事業：許可の基準】第八条第一項 製造のための施設の位置、構造及び設備が「経済産業省令(規則第五条)」で定める技術上の基準に適合するものであること。 製造の方法が「経済産業省令」で定める技術上の基準に適合するものであること 公共の安全の維持又は災害の発生の防止に支障を及ぼす恐れがないものであること。		
			高圧ガス保安施行令	【政令で定めるガスの種類等】高圧ガス保安法施行令第三条 法第五条第一項第一号の政令で定めるガスの種類は、一つの事業所において次の表の上覧に掲げるガスに係る高圧ガスの製造を使用とする場合における同欄に掲げるガスとし、同号の政令に定める値は、同欄のガスの種類に応じ、それぞれ同表の下欄に掲げる通りとする。 (詳細は同条表参照)	最終改正：平成16年10月27日 政令第328号	水素ガスは第一種ガス以外のガスに種別され、政令で定める値は300m3以下の省令で定める値である。即ち300m3を超える施設は許可が必要。
			一般高圧ガス保安規則	【第１種製造業者に係る技術上の基準】第五条 法第八条第一号の「経済産業省令」で定める技術上の基準及び同条第二項の「経済産業省令」で定める技術上の基準は、第六条から第八条までに定めるところによる。	最終改正：平成19年3月28日 経済産業省令第22号	第五条では、許可申請に当たって第一種製造業者に係る技術上の基準に適合すべき事が、その具体的内容は第六条から第八条。 本製造設備は【定置式製造設備に係る技術上の基準】第六条が適用
				【第１種製造業者に係る製造の許可の申請】第三条 法第五条第一項の規定により許可を得ようとするものは、様式第一種高圧ガス製造許可申請書製造計画書を添えて事業所の所在地を管轄する都道府県知事に提出しなければならない。		
				【定置式製造設備に係る技術上の基準】第六条 製造設備が低地式製造設備である製造施設における法第八条第一号の経済産業省令で定める技術上の基準		【技術上の基準】 1.警戒標　2.設備距離　3.火気施設との離隔距離(8m以上)　4.他の可燃ガス製造設備との離隔距離　5.耐圧性・機密性・強度　6.使用材料　7.設備の基礎　他
高圧ガス製造に係る貯蔵・移動	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【許可の基準】第八条第一項 製造(製造に係る貯蔵及び導管による輸送を含む)のための施設の位置、構造及び設備、製造の方法が「経済産業省令(規則第五条)」で定める技術上の基準に適合するものであること。 製造の方法が「経済産業省令」で定める技術上の基準に適合するものであること 公共の安全の維持又は災害の発生の防止に支障を及ぼす恐れがないものであること。		第一種事業者が法第五条第一項の許可を受けた事業所で、高圧ガス製造に係る貯蔵・導管による移動を行う場合の施設は本条の規定を受ける。 第一種事業者が法第五条第一項の許可を受けていれば、改めての許可申請は不要。
			一般高圧ガス保安規則	【第一種製造業者に係る技術上の基準】第五条 法第八条第一号の「経済産業省令」で定める技術上の基準及び同条第二項の経済産業省令で定める技術上の基準は、第六条から第八条までに定めるところによる。		第五条では、許可申請に当たって第一種製造業者に係る技術上の基準に適合すべき事が、その具体的内容は第六条から第八条。 【第六条の定置式製造設備に係る技術上の基準】前出
高圧ガスの一次貯蔵(ボンベ)	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【貯蔵】第十五条 高圧ガスの貯蔵は経済産業省令(規則第五条)で定める技術上の基準に従ってしなければならない。但し第１種製造者が、法第五条第一項の許可を受けたところに従って貯蔵する高圧ガスに付いてはこの限りではない。		法第五条の規制を受けることから、技術上の基準は法第八条(許可の基準)より、省令(規則第五条)の技術状の基準に適合する必要がある。
第一種製造所の保安	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【危害予防規定】第二十六条 第一種製造者は経済産業省令(規則第六十三条)で定める事項について記載した危害予防規定を定め都道府県知事に届けなければならない。		危害予防規定の届け出 様式第三十二の危害予防規定届書に危害予防規定を添えて都道府県知事に提出 1.保安統括者の選任 2.保安技術管理者の選任(保安統括者の兼任可能) 3.保安係員の選任 ●原則常駐
			一般高圧ガス保安規則	【危害予防規定の届出等】六十三条 第一項：届け出をしようとする第一種製造者は様式第三十二の危害予防規定届書に危害予防規定を添えて都道府県知事に提出しなければならない 第二項：法第二十六条第一項の経済産業省令で定める事項の細目		【細目】 1.法第八条第一号・第二号の経済産業奨励で定める技術上の基準に関すること 2.保安管理体制・保安管理者の職務とうに関すること 3.製造設備の安全な運転・操作に関すること 4.施設の巡視・点検 5.災害の発生に防止に関すること　　他
			一般高圧ガス保安規則	【大規模地震対策特別措置法(昭和53年法律第73号】第六十三条第三項 大規模地震対策特別措置法第二条第四号に規定する地震防災対策強化地域内にある事業所に係る法第二十六条第一項の経済産業省令で定める事項は、本条前項各号に掲げるもののほか、次の各号に掲げる細目とする		【細目】 ●地震予知情報及び警戒宣言の伝達に関する事 ●軽火器宣言が発せられた場合における避難の勧告又は支持に関する事　他

②H2改質－高圧ガス製造・貯蔵Plant　その２

行為	関係省庁	根拠法		平成19年時点での規制項目及び主な内容		適用
保安教育	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【保安教育】第二十七条第一項：第一種業者の保安教育計画 【保安教育】第二十七条第三項：第一種業者の保安教育計画の忠実な実行 【保安統括者、保安技術管理者及び保安係員】 第二十七条の二第一項：　第一種製造業者は「経済産業省令(規則第六十四条)」で定めるところにより高圧ガス保安統括者(保安統括者)を選任し第三十二条第一項の職務を行わせる。		第一種製造者であって第五条第一項第一号に規定するもの（経済産業省令で定めるものをのぞく）は事業所ごとに保安統括者一人を選任しなければならない。
			一般高圧ガス保安規則	【保安統括者の選任等】第六十四条 第一種製造者であって第五条第一項第一号に規定するもの（経済産業省令で定めるものをのぞく）は事業所ごとに保安統括者一人を選任しなければならない。		経済産業省令で定めるものに水素ガスは含まない。(規則第六十四条第二項)
保安統括者	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【保安統括者、保安技術管理者及び保安係員】第二十七条の二第二項第２号 保安統括者は、当該事業所においてその事業の実施を統轄管理する者を持って当てなければならない。 【保安統括者の届け出】第二十七条の二第五項 第一種製造者は保安統括者を選任したときは遅滞なく経済産業省令(第六十七条第一項)で定めるところによりその旨を都道府県知事に届け出なければならない。		
				【保安統括者等の職務等】法第三十二条第一項 保安統括者は、高圧ガスの製造に係る保安に関する職務を統轄管理する。		
			一般高圧ガス保安規則	【保安統括者等の選任等の届出】第六十七条第一項 第一種製造者は様式第三十三の高圧ガス保安統括者届書に、保安統括者が当該事業所においてその事業の実施を統括管理する者であることを証する書面を添えて、都道府県知事に提出しなければならない。		
保安技術管理者	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【保安統括者、保安技術管理者及び保安係員】第二十七条の二第三項 第一種製造業者は事業所毎に「経済産業省令(一般高圧ガス保安規則第六十五条)」で定めるところにより高圧ガス製造保安技術管理者(保安技術管理者)を選任し第三十二条第二項の職務を行わせる。 【保安技術管理者又は保安係員の選任の届け出】第二十七条の二第六項 第一種製造者は保安技術管理者又は保安係員に選任について経済産業省令(第六十七条第二項)で定めるところにより都道府県知事に届け出なければならない。		
				【保安技術管理者の職務】法第三十二条第二項 保安技術管理者は、保安統括者を補佐して、高圧ガスの製造に係る保安に関する技術的に事項を管理する。		
			一般高圧ガス保安規則	【保安技術管理者の選任等】一般高圧ガス保安規則第六十五条 同条表に掲げる製造保安責任者免状の交付を受けているものであって、同表に掲げる高圧ガスの製造に関する経験を有するもの。 ●保安統括者による保安技術管理者の兼任（第六十五条第二項） 【保安技術管理者等の届出等】第六十七条第二項 第一種製造者はその年の前年の八月一日からその年の七月三十一日までの期間内にした保安技術管理者又は保安係員の選任について、当該機関終了後遅滞なく、様式第三十三の二の高圧ガス保安技術管理者等届書に、当該保安技術管理者又は保安係員		●保安責任者免状 甲種化学責任者免状又は甲種機械責任者免状 ●製造に関する経験 1. 一種類以上の高圧ガス及び二種類以上の液化ガス～ 2. 圧縮機又は液化ガスを加圧するための～ 3. 高圧ガス設備の設計、施工、管理、検査等業務に～
保安係員	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【保安統括者、保安技術管理者及び保安係員】第二十七条の二第四項 第一種製造業者は「経済産業省令」で定める製造のための施設の区分毎に「経済産業省令」で定めるところにより高圧ガス製造保安係員を選任し第三十二条第三項の職務を行わせる。 【保安技術管理者又は保安係員の選任の届け出】 第一種製造者は保安技術管理者又は保安係員に選任について経済産業省令で定めるところにより都道府県知事に届け出なければならない。		
				【保安係員の職務】法第三十二条第三項 保安係員は、製造のための施設の維持、製造の方法の監視その他高圧ガスの製造に係る保安に関する技術的な事項で経済産業省令（一般高圧ガス保安規則第七十六条）で定めるものを管理する		
			一般高圧ガス保安規則	【保安係員の選任等】第六十六条 製造の区分：同条第一項第十六号　その他の高圧ガスの製造施設 同条第二項に掲げる責任者免状の交付を受けているもので同条第三項から第四項に掲げる経験を有するもの。 【保安技術管理者等の届出等】第六十七条第二項 第一種製造者はその年の前年の八月一日からその年の七月三十一日までの期間内にした保安技術管理者又は保安係員の選任について、当該機関終了後遅滞なく、様式第三十三の二の高圧ガス保安技術管理者等届書に、当該保安技術管理者又は保安係員が交付を受けた製造保安責任者免状の写しを添え		●保安責任者免状 甲種・乙種・丙種化学責任者免状又は甲種・乙種機械責任者免状 ●製造に関する経験 条文参照 ●責任者免状、製造に関する経験は保安技術管理者と重複しているものがあり、保安技術管理者による兼任についての緩和措置が可能か。安全面の課題。
保安主任者	経産産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【保安主任者、保安企画推進員】第二十七条の三第一項 第一種製造業者の内一日に製造をする高圧ガスの容積が経済産業省令で定めるガスの種類ごとに経済産業省令で定める容積以上（規則第六十九条第一項：製造する高圧ガスの種類にかかわらず100万m3以上とする）である者は・・・・・・・・・。		容積は100万m3以上を満たさないことから、保安主任者の選任は不要。
保安企画推進員	経産産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【保安主任者、保安企画推進員】第二十七条の三第二項 前項に規定する第一種製造業者は、事業所毎に経済産業省令で定める高圧ガスの製造に係る保安に関する知識経験を有する者のうちから、高圧ガス製造保安企画推進員選任し第三十二条第五項の職務を行わせなければならない。		前項に規定する第一種製造者とは「製造する高圧ガスの種類にかかわらず100万m3以上」の第一種製造者と理解されることから、保安器各推進員の選任は不要と判断。

②H2改質ー高圧ガス製造・貯蔵Plant　その３

行為	関係省庁	根拠法		規制内容		適用
高圧ガスの販売	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【販売事業の届け出】第二十条の四第一項第二号 高圧ガスの販売の事業を営もうとする者は、販売所毎に、事業開始の日の20日前までに、販売をする高圧ガスの種類を記載した書面その他経済産業省令(規則第三十七条)で定める書面を添えて、その旨を都道府県知事に届ける。 ただし 一、第一種製造者であって、第五条第一項第一号に規定する者がその製造したガスをその事業所において販売するときは、この限りではない。		※法第五条第一項の許可に含まれると解釈されるが、取り継ぎ書類は本条の規則に準拠することと思われる。
				【販売の方法】第二十条の六第一項 販売業者等は、経済産業省令(規則第四十条)で定める技術上の基準に従って高圧ガスの販売をしなければならない。		
				【販売主任者及び取扱主任者】第二十八条第一項 販売業者は販売所毎に経済産業省令(規則七十二条)で定めるところにより製造保安責任者免状又は高圧ガス販売主任者免状の交付を受けているものであって、経済産業省令で定める高圧ガスの販売に関する経験を有する者のうちから、高圧ガス販売主任者を選任し、第三十二条八項に規定する職務を行わせる		●条文にはないが、交付免状の種類及び必要な経験から判断すると、高圧ガス保安係員の兼務の可能性もある。
				【保安統括者等の職務等】第三十二条第七項 販売主任者は、高圧ガスの販売に係る保安に関する業務を管理する		
			一般高圧ガス保安規則	【販売業者に係る販売の事業の届け出等】第三十七条 法第二十四条の四の規定により届け出しようとする者は、様式第二十一の高圧ガス販売事業届け書に事項に掲げる書類を添えて、所在地を管轄する都道府県知事に届け出しなければならない。		経済産業省で定める書類は以下に掲げるものとする。 一　販売の目的を記載したもの 二　法第二十条の六第一項の経済産業省令(第四十条)で定める技術上の基準に関する事項を記載したもの
				【販売業者等に係る技術上の基準】第四十条 法第二十条の六第一項の経済産業省令で定める技術上の基準は次の各号に掲げるものとする。		【技術上の基準】 一、高圧ガスの引渡し先の保安状況を明記した台帳を添える 二、充填容器の引渡しは、外面に容器の使用上支障のある腐食、割れ、すじ、しわ等が無く、かつ、当該ガスが漏洩していないものを持ってすること。　他
				【販売主任者の選任等】第七十二条第二項 法第二十八条第一項の規定により、販売業者は、販売所の区分毎に責任(主任)者免状の交付を受けている者であって、その種類毎の製造又は販売に関する六ヶ月以上の経験を有する者から販売主任者を選任する 【販売主任者の届け出】第七十四条 ‥‥販売業者は、様式第三十五の高圧ガス販売主任者届出書に、当該販売主任者が交付を受けた高圧ガス製造保安責任者免状又は高圧ガス販売主任者免状の写しを添えて、販売所の所在地を管轄する都道府県知事に提出しなければならない。		販売所の区分：アセチレン、水素及びメタンの販売所 ガスの種類：水素 交付免状：甲種・乙種化学責任者免状、甲種・乙種機械責任者免状、第一種販売主任者免状
防火の設備	総務省	消防法	消防法	【定義】第二条第七項 消防法で言う危険物とは別表第一の品名欄に掲げる物品で同表に定める区分に応じ同表の性質欄に掲げる性状を有するものを言う。	最終改正:平成19年6月22日 法律第93号	消防法で言う危険物の性質は固体及び液体であり品名にも水素ガス及び高圧ガスは含まれない。 【別表に示される危険物の性質】品名省略 1.酸化性個体(第1類)　2.可燃性個体(第2類) 3.自然発火性物質及び禁水性物質(第3類) 4.引火性液体(第4類)　5.自己反応性物質(第5類) 6.酸化性液体(第6類)
				【防火管理】第八条 学校、病院、工場、事業場、興行場、百貨店、複合用と防火対象物市に他多数のものが出入りし、勤務し、又は居住する防火対象物で政令で定めるものの管理について権限を有するものは、政令で定める資格を有する者の内から防火管理者を定め‥‥‥その他防火管理上必要な業務を行わせなければならない。		BTH施設は工場としての扱いを受け、防火対象物。 政令で定める資格者の内から防火管理者を定める 【防火管理者の業務】 1.防火計画書作成　2.消火、通報及び避難訓練　3.消防用設備・施設の点検整備　4.火気使用・取り扱いの監督　5.避難・防火用設備の維持管理　等
				【水素ガス施設と危険物施設の保安距離】第十条の四 製造所、貯蔵所及び取扱所の位置、構造及び設備の技術上の基準は政令(危険物の規制に関する政令第九条第一項第一号に)でこれを定める。		
				【消防の設備等】第十七条第一項 学校、病院、工場、事業場、興行場、百貨店、旅館、飲食店、地下街、複合用と防火対象物その他の防火対象物で政令(施行令第六条)で定めるものの関係者は、政令(施行令第七条)で定める消防の用に供する設備、消防用水及び消火活動上必要な施設について消火避難その他の消防活動のために必要とされる性能を有するように、政令(施行令第十条第一項)で定める技術上の基準に従って、設置し、及び維持しなければならない。		工場としての扱いを受けるBTH施設では、消防設備等を技術上の基準に従って設置し、維持しなければならない。
			消防法施行令	【防火管理者の資格】第三条 法第八条第一項の政令で定める資格を有する者は、次の各号に掲げる防火対象物の区分に応じ、当該各号に定める者で、当該防火対象物において防火管理上必要な業務を適切に遂行することができる管理的又は監督的な地位にあるものとする 1.第一条の二第三項に規定する防火対象物で次号に規定する防火対象物以外のもの(工場)	最終改正:平成19年6月13日 政令179号	【管理者の資格】 イ甲種防火管理講習修了者 ロ大学、短期大学、高等専門学校で防災に関する学科又は課程を修了し一年以上の実務経験を有するもの ハ市町村の消防職員で管理的又は監督的な職務に一年以上あった者 ニ総務省が定めるところにより必要な学識経験を有すると認められる者
				【防火対象物の指定】第六条 法第十七条第一項の政令で定める防火対象物は別表第一に掲げる防火対象物とする		【別表第1】 (12)-イ：工場又は作業場に該当
				【防火用設備等の種類】第七条 法第十七条第一項の政令で定める消防の用に供する設備は、消火設備、警報設備、及び避難設備とする。		【消火設備】 1.消化器及び簡易消火用具　2.屋内消火栓設備 3.スプリンクラー設備　4.水噴霧消火設備　5.泡消火設備 6.不活性ガス消火設備　7.ハロゲン化物消火設備 8.粉末消火設備　9.屋外消火栓設備　10.動力消防ポンプ設備
				【消化器に関する基準】第十条第一項 消化器又は簡易消火器具は、次に掲げる防火対象物又はその部分に設置するものとする 第二号:別表第1(12)項から(14)項までに掲げる防火対象物で、延べ面積が150m2以上のもの		【別表第2】消化器の区分:建築物その他の工作物 1.棒状放水消化器　2.霧状放水消化器 3.棒状強化液放射消化器　4.霧状強化液放射消化器 5.泡放射消化器 6.リン酸塩類等消火粉末放射消化器
			危険物の規制に関する政令	【製造所の基準】第九条第一項第一号ニ 高圧ガスその他災害を発生させる恐れのあるものを貯蔵し、又は取り扱う施設で総務省令で定める者は総務省令で定める距離(危険物の規制に関する規則第十二条)	最終改正：平成18年1月25日 政令第6号	
			危険物の規制に関する規則	【高圧ガスの施設に係る距離】第十二条第一項 ‥‥‥の総務省令で定める施設及び距離は、それぞれ次の各号に定める施設及び距離とする。 1.処理能力30m3/d以上の設備で高圧ガス製造をするもの20m以上 2.高圧ガス保安法第16条第1項、同17条の2の貯蔵所20m以上	最終改正：平成19年9月21日 総務省令第106号	BTHプラントは消防法で定める危険物製造所、貯蔵所及び取扱所との離隔距離は20m以上が必要。
作業主任及び事業所の労働環境	厚生労働省	労働安全衛生法	労働安全衛生法	【危険物及び有害物に関する規制】 法第一条で水素は可燃性ガスに区分され、法第五十五条(製造の禁止)法第五十六条(製造の許可)第五十七条(表示等)の規制対象には含まない。	最終改正:平成18年6月2日 法律第50号	水素は危険物、有害物質の規制対象外
				【産業医等】第十三条の二 事業者は、常時50人以上の労働者を使用する事業場以外の事業場では、労働者の健康管理を行うのに必要な医学に関する知識を有する医師その他厚生労働省令(第14条第2項)で定める者に労働者の健康管理等の全部又は一部を行わせるように務めなければならない。		健康管理の産業医への委嘱
				【作業主任】第十四条 高圧室内作業その他の労働災害を防止するため、の管理を必要とする作業で、政令で定めるものについては‥‥当該作業の区分に応じて、作業主任者を選任し、その者に当該作業に従事する労働者の指揮、その他の厚生労働省令で定める事項を行わせなければならない		●資格条件 ・都道府県労働局長の免状を受けたもの又は都道府県労働局長の登録を受けたものが行う技能講習を修了したもの
			労働安全衛生法施行令	【作業主任者を選任すべき作業】第六条第一項第四号 四ボイラー(小型ボイラー除く)の土地扱い作業		
			労働安全衛生規則	【産業医等】第十四条第二項 法第十三条第二項　の厚生労働省令で定める要件を備えた者	最終改正：平成19年12月28日 厚生労働省令第155号	【省令で定める要件】 一　労働者の健康管理等を行うのに必要な医学に関する知識についての研修を修了した者 二　医学の正規の課程であつて産業医の養成等を行う当該課程を修めて卒業した者で実習を履修したもの 三　労働衛生コンサルタント試験に合格者で、その試験の区分が保健衛生であるもの 四　学校教育法 による大学において労働衛生に関する科目を担当する教授、准教授又は講師の職にあり、又はあつた者 五　前各号に掲げる者のほか、厚生労働大臣が定める者
				【作業主任者の選任】第十六条第一項 作業主任者の選任は、別表第一に掲げる作業区分に応じ、同表に掲げる資格を有する者の内から行う。 【作業主任者の氏名等の周知】第十八条 当該作業主任者の氏名、及びその者に行わせる事項を作業場の見易い箇所に掲示し関係労働者に周知させなければならない。		作業の区分：令第六条第四号の作業のうち取り扱うボイラーの伝熱面積の合計が二十五平方メートル未満の場合における当該ボイラーの取扱い作業 資格：特級ボイラー技士免許、一級ボイラー技士免許又は二級ボイラー技士免許を受けた者(ボイラーの規模によって資格要件が変更)
設置場所	国土交通省	建築基準法	建築基準法	都市計画区域外		制限・規制無し

③圧縮水素ボンベの搬送

行為	関係省庁	根拠法		規制内容		適用
高圧ガスのボンベ搬送	総務省	消防法	消防法	【危険物】第十六条 危険物の運搬は、その容器、積載方法及び運搬方法について政令で定める技術上の基準に従ってこれをしなければならない。	最終改正:平成19年6月22日 法律第93号	水素ガス(高圧ガス)は危険物の規制対象外
			危険物の規制に関する政令	【運搬及び移送の基準・積載方法】第二十九条第一項第六号 危険物は総務省令(危険物の規制に関する規則)で定めるところにより、類を異にするその他の危険物又は災害を発生させる恐れのある物品と混載しないこと。	最終改正：平成18年1月25日 政令第6号	混載の禁止：水素ボンベ搬送の専用化
			危険物の規制に関する規則	【危険物と混載を禁止される物品】第四十六条第一項第二号 高圧ガス保安法第二条各号に掲げる高圧ガス(告知で定める者を除く)	最終改正：平成19年9月21日 総務省令第106号	
	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【移動】第二十三条 高圧ガスを移動するには、その容器について、経済産業省令で定める保安上必要な措置を講じなければならない。 2.車両(道路運送車両法第二条第一項に規定する道路運送車両を言う)により高圧ガスを移動するには、その積載方法及び移動方法について経済産業省令で定める技術上の基準に従ってしなければならない。		保安状の措置、技術上の基準が定められているが、届け出又は許可等は義務付けられていない
			一般高圧ガス保安規則	【移動に係る保安上の措置及び技術上の基準】第四十八条 法第二十三条第一項の経済産業省令で定める保安上必要な措置及び同上第二項の経済産業省令で定める技術上の基準は次条及び第五十条に定めるところによる。		【車両に固定した容器による移動に係る技術上の基準等】 第四十九条 【その他の場合における移動に係る技術上の基準】 第五十条
				【その他の場合における移動に係る技術上の基準】第五十条 前条の規定する場合以外の場合における法第二十三条第一項り経済産業省令で定める保安上必要な措置及び同条第二項の経済産業省令で定める技術上の基準		【主な内容】 1.警戒標　2.充填容器等の温度管理　3.一般複合容器等の耐用年　4.充填容器の取り扱い　5.他のガスの同一積載の禁止及び注意　6.災害発生防止　7.駐車時の注意　8.容器移動に当たっての監視と資格　9.運転者の連続運転時間と運転者数 車両一台につき運転者二人を充てる場合 イ.連続運転時間が四時間を超える場合 ロ.運転時間が一日あたり九時間を超える場合 10.移動中の災害防止に必要な注意事項の携帯　他
	国土交通省	道路運送車両法	道路運送車両法	【定義】第二条第一項 この法律で「道路運送車両」とは、自動車、原動機付自転車及び軽車両をいう。	最終改正：平成19年3月30日 法律第九号	●軽車両：人力若しくは畜力により陸上を移動させることを目的として製作した用具(馬車、リヤカーなど)
				【保安基準の原則】第四十六条 ……保安状況は公害防止その他の環境保全状の技術基準は、道路運送車両の構造及び装置が運行に十分耐え、操縦その他の使用のための作業に安全であると共に、通行人その他に危害を与えないことを確保するものでなければならず……。		
			道路運送車両の保安基準	【高圧ガス運送装置】第二十八条 高圧ガスを運送する自動車のガス運送装置は、爆発等の恐れのないものとして、強度、取り付け方法に関し告示で定める基準に適合するものでなければならない。		告示：内容不明 告示内容が不明なため、本条のガス運送装置がボンベにも適用されるのか不明。
				【消化器】第四十七条第一項第四号及び第二項 150kg以上の高圧ガス(可燃性ガス及び酸素に限る)を運送する自動車(牽引車除く)には消火器を備えなければならない 消火器は運送物品等の消火に適応することが出来、且つ、安全な運行を妨げない者として、消化剤の種類及び充てん量、構造、取り付け位置等に関し、告示に定める基準に適合するものであること。		
				【ガス運送容器を備える自動車等】第五十条のニ ガス運送容器を備える自動車その他のガス容器を運送するための構造及び装置を有する自動車は、本基準第二条から、第四十八条の三までの規定による外、衝突によるガス容器及びその他の付属装置の損傷を防止できるものとして、強度、取り付け位置等に関して告示で定める‥‥。		告示：内容不明 告示内容が不明なため、本条のその他のガス容器を運送するための構造及び装置がボンベにも適用されるのか不明。
		道路法	道路法	【通行の禁止又は制限】第四十六条第三項 道路管理者は、水底トンネル(水底トンネルに類するトンネルで国土交通省令で定めるものを含む。以下同じ)の構造を保全し、又は水底トンネルにおける交通の危険を防止するため、政令で定めるところにより、爆発性又は易燃性を有する物件その他の危険物を積載する車両の通行を禁止し、又は制限することが出来る。		
			道路法施行令	【車両の通行の禁止】第十九条の十二第一項 道路管理者は次に掲げる危険物を積載する車両の水底トンネルの通行を禁止することが出来る。	改正：平成12年 政令312	水素ガス(高圧ガス)は危険物の規制対象外 消防法第二条第七項に規定する危険物以外の物品で、塩化アセチレン、ジシランその他水又は空気と作用してこれらと同程度以上の発火性を有するもの
				【車両の通行の制限】第十九条の十三第一項 道路管理者は、次に掲げる危険物を積載する車両のうち水底トンネルを通行できる車両を、道路管理者の定める種類に属し、かつ、積載する危険物の容器、容器への収納方法及び包装、積載数量並びに積載方法が道路管理者の定める要件を満たしているものに限ることができる。 1.火薬類　2.高圧ガス保安法第二条に規定する高圧ガス。 3.毒物又は劇物　4.クロルアセトフェノン、モノクロルアセトン他同程度の毒性を有するもの 5.消防法第二条第七項の危険物　6.マッチ　他		消防法第二条第七項に規定する危険物は対象となるが、水素は含まれない。 高圧ガスが規制対象
			道路法施行規則	【水底トンネルに類するトンネル】第四条の九 法第四十六条第三項に規定する国土交通省令で定める水底トンネルに類するトンネルは、水際にあるトンネルで当該トンネルの路面の高さが水面の高さ以下のもの又は長さ5000m以上のトンネルとする。	最終改正：平成19年9月28日 国土交通省令第84号	延長5000m以上のトンネルが規制対象 道路管理者と協議(但し協議せよとはされていない)
				【車両の通行の禁止又は制限に関する公示】第四条の十 令第十九条の十五の規定による車両の通行の禁止又は制限に関する公示は、官報に掲載して行う。		【公示内容】 1.水底トンネルの名称及び箇所 2.通行禁止する当該危険物の表示 3.通行制限に関する事項

④圧縮水素ボンベの貯蔵・消費（個人住宅、集合住宅、地域コミュニティー）

行為	関係省庁	根拠法		規制内容		適用
ボンベの貯蔵	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【貯蔵所】第十六条第一項本文 容積300m3以上の高圧ガスを貯蔵するときは、あらかじめ都道府県知事の許可を受けて設置する貯蔵所(第一種貯蔵所)においてしなければならない。		水素が300m3以上(250/40Mp圧縮ボンベ３本)以上となる場合は第一種貯蔵所の申請・許可が必要。
				第十八条 第一種貯蔵所の所有者又は占有者は、第一種貯蔵所を、その位置、構造及び設備が第十六条第二項の技術上の基準(経済産業省令に定める技術上の基準)に適合するように維持しなければならない。		
			一般高圧ガス保安規則	【第一種貯蔵所の設置許可の申請】第二十条第一項 法第十六条第一項の規定により許可を受けようとするものは、様式第七の第一種貯蔵所許可申請書に第一号から第三号までに掲げる事項を記載した書面並びに第四号に掲げる図面を添えて都道府県知事に提出しなければならない。		【申請書記載事項】 1.貯蔵の目的 2.法第十六条第二項の経済産業省令で定める技術上の基準 （警戒標、設備距離、火気設備対策、耐圧性、気密性、強度、使用材料、設備の基礎　他） 3.移設等にあっては当該貯蔵設備の使用経歴及び保管状況 4.貯蔵所の位置及び付近の状況を示す図面
				【容器により貯蔵する場合の技術上の基準】第二十三条 容器により貯蔵する第一種貯蔵所における法第十六条第二項の経済産業省令で定める技術上の基準は、次の各号に掲げるものとする。 【用語の定義】第二条第一項第五項、第六項 ●第五項　第一種保安物件 幼稚園・学校、病院、劇場・映画館等収容定員300人以上のもの、福祉施設、文化財・美術品等、駅、百貨店・ホテル等 ●第六項　第二種保安物件 第一種保安物件以外の建築物であって住居の用に供するもの		【技術上の基準の内容】 1.容器が配管によって接続されたものにあっては、その外面から第一種保安物件に対し第一種設備距離(X=1700m3、L1=17m)以上、第二種保安物件に対して第二種設備距離(X=1700m3、L2=12m)以上の距離を有し、かつ、第六条第一号第四十二号イ、ロ及びホからヌ迄の基準(容器置場の明示、警戒標、1階建、直射日光遮蔽、消火設備)に適合すること。 住居の用に供するものは第二種保安物件 2.容器が配管に接続されてものにあっては、その配管(高圧ガスが通る部分に限る)については、第六条
	国土交通省	建築基準法	建築基準法	【用途地域】第四十八条 用途区分により建築できない高圧ガスの製造工場が規制されている。 1.原則として建設不可のもの 第一種低層住居専用地域　第二種低層住居専用地域 第一種中高層住居専用地域 2.圧縮ガス350m3 第二種中高層住居専用地域　第一種住居地域　第二種住居地域 準住居地域 3.圧縮ガス700m3 近隣商業地域　商業地域 4.圧縮ガス3500m3　準工業地域 5.制限無し　工業地域　工業専用地域	改正：平成9年6月13日 法律第79条	一般住宅地域での水素利用が不可
				【建築基準法施行令の一部を改正する政令案】 燃料電池又は内燃機関の燃料として自動車に充填するための圧縮水素の製造であって、安全上及び防火上支障がないものとして国土交通大臣が定める基準に適合する製造施設を用いて行われる場合には、第一種住居地域、第二種住居地域、準住居地域、近隣商業地域、及び準工業地域における圧縮ガスの製造に係る用途規制を適用しないこととする。	平成17年3月	圧縮ボンベの貯蔵所への適用が可能であれば、一般住宅地域での水素利用が可能
	厚生労働省	労働安全衛生法	労働安全衛生法	【危険物及び有害物に関する規制：表示等】第五十七条第一項 爆発性の物、発火性の物、引火性の物その他の労働者に危険性を生ずる恐れのある物若しくは‥‥容器に入れ、又は包装して、譲渡し、又は提供する者は、厚生労働省の定めるところにより、その容器又は包装に次に掲げる(摘要欄)ものを表示しなければならない。	最終改正：平成18年6月2日 法律第50号	●次に掲げるもの(水素は可燃性ガスであり、その他のものに該当しなければ本条項の適用は受けない) イ.名称　ロ.成分　ハ.人体に及ぼす作用　ニ.貯蔵又は取り扱い状の注意 ホ.その他厚生労働省が定める事項
			労働安全衛生法施行令	【定義：ガス集合溶接装置】第一条第一項第二号 ガス集合装置(摘要欄)、安全器、圧力調整器、導管、吹管等により構成され、可燃性ガス及び酸素を使用して、金属を溶接し、溶断し、又は加熱する設備をいう。	最終改正：成19年12月14日 政令第375号	●水素の燃料電池利用が該当しなければ本条項の適用は受けない
			労働安全衛生規則	【名称等の表示】第三十二条 法第五十七条第一項の規定による表示は、全てを印刷した票せんを貼り付けが困難な時は、これらを印刷した票せんを容器又は包装に結びつけることによって表示することが出来る 第三十三条 法第五十七条第一項第一号ホで定める「その他厚生労働省が定める事項」 1.氏名(法人名)　2.住所　電話番号　3.注意喚起語　4.安定性及び反応性	最終改正：成19年12月28日 厚生労働省令第155号	
				【ガス集合装置の設置】第三百八条 第一項：ガス集合装置と火気を使用する設備の離隔距離5m以上。 第二項：ガス集合装置は専用のガス装置室に設ける。 第三項：ガス装置室壁と集合装置との間隔は十分な距離に保つ。 【ガス装置室の構造】第三百九条 第一項：漏洩したガスが滞留しないこと 第二項：屋根及び天井は軽い不燃材で在ること。 第三項：壁材が不燃性のものであること		
消費	経済産業省	高圧ガス保安法	高圧ガス保安法	【消費】第二十四条の二 ‥‥‥又は液化酸素その他の高圧ガスであって当該ガスを相当程度貯蔵して消費する際に公共の安全を維持し、又は災害の発生を防止するために特別の注意を要するものとして政令(施行令第七条)で定める種類の高圧ガス(特定高圧ガス)を消費する者は、事業所毎に消費開始の日の20日前までに‥‥‥‥‥‥‥‥書面を添えて、その旨を都道府県知事に届けなければならない。		●都道府県知事への届け出 ボンベ貯蔵所から末端消費施設までの範囲を「特定高圧ガス消費届」の範囲として届け出 【届け出書面内容】 施設位置、構造及び設備、消費の方法
				第二十四条の三 1.特定高圧ガス消費者は、消費のための施設をその位置、構造及び設備が経済産業省令(規則第五十五条第一項)で定める技術上の基準に適合するよう維持する 2.特定高圧ガス消費者は、経済産業省令(規則第五十五条第二項)で定める技術上の基準に従って特定ガスの消費をする		
				【販売主任者及び取扱主任者】第二十八条第二項 特定高圧ガス消費者は事業所毎に経済産業省令(規則七十三条)で定めるところにより特定高圧ガス取扱主任者を選任し、第三十二条八項に規定する職務を行わせる		
			高圧ガス保安法施行令	【政令で定める種類の高圧ガス】第七条 法第二十四条の二第一項の高圧ガスであって、当該ガスを相当程度貯蔵して消費する際に公共の安全を維持し、又は災害の発生を防止するために得意別の注意を要するものとして政令で定める種類のもの		圧縮水素⇒300m3　　圧縮天然ガス⇒300m3 液化酸素⇒3000kg　　液化アンモニア⇒3000kg 液化石油ガス⇒3000kg(10000kg) 液化塩素⇒1000kg
			一般高圧ガス保安規則	【特定高圧ガスの消費に係る技術上の基準】第五十五条第一項 法二十四条の三第一項の経済産業省令で定める技術上の基準は次の各号に掲げるものとする。第一号から第三十号		【基準内容　例】 1.警戒標　2.設備距離　3.火気使用場所に対する距離　4.漏洩ガス対流防止 5.消費設備材料　6.消費設備の基礎‥‥等
				第五十五条第二項 法二十四条の三第二項の経済産業省令で定める技術上の基準は次の各号に掲げるものとする。第一号から第六号		【基準内容　例】 1.周囲5m以内火気の禁止等　2.消費設備の点検　3.充填機等の接続・取り外し　4.消費設備の修理又は清掃　5.消費設備のバルブ操作‥‥等
				【取扱主任者の選任】第七十三条第一項 法第二十八条第二項の規定により特定ガスの消費者は、次(摘要欄)の各号に一つに該当する者を取扱主任者に選任しなければならない。 【取扱主任者の届け出】第七十五条 ‥‥特定ガスの消費者は様式第三十六の特定ガス取扱主任者届書に当該取扱主任者が第七十三条に規定する資格を有することを証する書面を添えて都道府県知事に提出しなければならない。		1.特定高圧ガスの製造又は消費(特定高圧ガスの消費者の消費に限る)に関し一年以上の経験を有する者。 2.大学若しくは高等専門学校又は専門学校において理学若しくは工学に関する課程を納めて卒業した者、協会が行う講習の修了者、高等学校若しくは工業学校において工業に関する課程を修めて卒業した者であって、特定高圧ガスの製造又は消費に関し六ヶ月以上の経験を有する者。 3.甲種・乙種・丙種化学責任者免状、甲種・乙種機械責任者免状、又は第一種販売主任赦免状 ●条文にはないが、交付免状の種類及び必要な経験から判断すると、
ボンベから消費器具までのガス移動(常圧)	総務省	消防法	告示	(イ)地表面水平加速度400ガルの地震動が加えられた後であっても、燃料が安定して供給されるものであること (ロ)導管が建築物の外壁を貫通する場合にあっては、次に定める緊急ガス遮断装置が設置されていること。 a 当該導管の最高圧力を加えたときに漏れが生じない遮断性能 b ガスの供給を停止せずに点検が出来る措置が講じられていること	平成18年3月29日 消防庁告示第8号	消防法(昭和36年自治省令第6号)第十二条第一項第四号イ（ロ）に規定する燃料電池設備の構造及び性能基準を定めたもので、これを準用する。
	総務省 市町村	消防法	火災予防条例	【化学実験等】第二十七条の二 蒸発、粉砕又は水素添加等の操作に際しては、内容物から発散するガス、蒸気又は粉塵の暴発を防止するために、裸火の使用を避け、かつ、有効な換気、集塵、若しくは防爆措置を講ずること。		換気設備の完備 防爆措置の有無については消防協議

バイオマス起源生成物の地域有効利用技術の開発

－　バイオガスの水素・燃料電池利用に向けた研究　－

試験担当機関　：独立行政法人土木研究所　寒地土木研究所
連絡先
〒062-8602　札幌市豊平区平岸１条３丁目１番34号
独立行政法人土木研究所　寒地土木研究所　特別研究監
TEL　011-841-1636（代表）
ホームページアドレス：http://www.ceri.go.jp