

# あおもり CO<sub>2</sub>フリー水素活用モデルプラン

平成30年3月

青森県



はじめに

国は、平成 26 年 4 月に閣議決定されたエネルギー基本計画において「水素社会の実現」を謳い、同年 6 月に策定された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」において、2040 年頃に再生可能エネルギー等を用いた CO<sub>2</sub>フリーの水素供給システムの確立を目指すこととし、加えて、平成 29 年 12 月に水素社会実現に向けた行動計画として「水素基本戦略」を取りまとめており、水素エネルギーの活用を積極的に推進していくこととしています。

青森県は、再生可能エネルギーポテンシャルに恵まれ、特に、むつ小川原地域は、県内で最も多くの風力発電が稼働し、大規模のメガソーラーが立地する再生可能エネルギーの集積地です。

今後、さらなる再生可能エネルギーの導入の拡大により、出力抑制等による余剰電力の発生が予想されることから、その余剰電力を有効活用し、来るべき水素社会にも対応した先進モデルを構築・展開するため、平成 28 年度から「あおり CO<sub>2</sub>フリー水素検討会」において、CO<sub>2</sub>フリー水素の製造から活用まで、さまざまな場面での水素エネルギーの活用方策について検討を進めてきたところであり、このたび、検討結果を「あおり CO<sub>2</sub>フリー水素活用モデルプラン」として取りまとめました。

今後は、このモデルプランが示す方向性に沿って、モデルの具体化と実現に向けた課題の解決に向け、地元自治体、関係企業等とともに検討を進めていきます。

本モデルプランの策定に当たっては、検討会の委員の皆様にご格別の御指導、御助言を賜り、深く感謝申し上げます。

平成 30 年 3 月

青森県知事 三 村 申 吾

# 目次

1. 基本的な考え方 .....	1
1.1 背景 .....	1
1.2 目的 .....	1
1.3 水素エネルギーに取り組む意義.....	1
1.4 想定時期 .....	2
2. 現状の整理 .....	3
2.1 青森県の現状.....	3
2.1.1 再生可能エネルギーの集積地.....	3
2.1.2 大きな熱需要.....	3
2.2 電力を巡る動向.....	5
2.2.1 再エネ大量導入による出力抑制.....	5
2.2.2 電力制度改革の過渡期.....	6
2.3 水素を巡る動向.....	7
2.3.1 国の水素導入ロードマップ.....	7
2.3.2 水素の可能性と課題.....	8
3. 活用モデルの検討.....	12
3.1 基本方針 .....	12
3.2 モデル地域の概要.....	12
3.3 【テーマ1】再エネ電力の効率的集約（あつめる・つくる） .....	13
3.3.1 再エネ導入量の想定.....	13
3.3.2 未利用電力量の試算.....	13
3.3.3 水電解効率の設定.....	13
3.3.4 水素製造可能量の試算.....	15
3.3.5 設備容量と設備利用率等とのバランス.....	15
3.4 【テーマ2】低コスト水素供給・活用モデル構築（ためる・はこぶ・つかう） .....	18
3.4.1 水素活用法.....	18
3.4.2 水素製造・貯蔵モデルの検討.....	32
3.4.3 水素輸送方法の検討.....	34
3.4.4 コスト試算例.....	39
3.4.5 副生酸素の活用による関連産業創出.....	43
4. まとめ：モデルプランの実現に向けて.....	50
4.1 六ヶ所村における CO <sub>2</sub> フリー水素活用モデル .....	50
4.1.1 内容 .....	50
4.1.2 イメージ.....	50

4.2	モデル導入効果.....	50
4.2.1	地産電力供給による域内経済循環効果.....	51
4.2.2	地産熱供給での灯油代替による域内経済循環効果.....	51
4.2.3	水素ステーションでのガソリン代替による域内経済循環効果.....	52
4.2.4	その他効果.....	52
4.2.5	段階的展開シナリオ.....	53
4.3	実現に向けた課題と提言.....	54
4.3.1	安価な電力の調達.....	54
4.3.2	水素関連設備コストの削減.....	55
4.3.3	事業実施体制の構築.....	57
4.4	おわりに.....	58

## 1. 基本的な考え方

### 1.1 背景

青森県は、導入量が日本一の風力発電をはじめ、再生可能エネルギーの集積地となっている一方、寒冷地であることから光熱費負担が大きく、燃料代として多くの地域資本が域外に流出している地域である。

また現状、県内の大型再生可能エネルギー発電施設の多くは県外資本によるものであるために、これら再生可能エネルギーによる地域経済への波及効果は限定的となっている。

さらには天候等により変動する再生可能エネルギーの急激な増加により、電力の安定的な供給を担う送電系統への負荷が増大し、現状ではさらなる再生可能エネルギーの導入が困難となっており、地域の強みである再生可能エネルギーのポテンシャルを地域活性化に最大限活用する上での課題となっている。

一方、国では2014年に「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を策定し、2040年頃には再生可能エネルギーを利用したCO<sub>2</sub>フリー水素の製造・輸送・貯蔵の本格化を目指す機運が高まってきている。

### 1.2 目的

地域の強みである再生可能エネルギーを活用し、来るべき水素社会に対応した地域展開を図ることによって、地域で作られたエネルギーの地産地消による地域内経済循環、産業振興を図る必要がある。

県では産学官による「あおり CO<sub>2</sub>フリー水素検討会」を設立し、地域に即した可能性のある水素の活用方法を先進モデルとして最大限想定するとともに、その実現に向けた課題を検討するものである。

### 1.3 水素エネルギーに取り組む意義

水素は、その製造段階で再生可能エネルギーを電源とすることで、CO<sub>2</sub>フリーとなるクリーンなエネルギーとなり、電力を利用して水素を製造し、ガスとして保存すれば、蓄電池のように放電して電力がなくなることがないため長期間・大容量のエネルギーを貯蔵することができるという性質を持つ。

また、燃料電池による発電時に発生する排熱を利用することで、内燃機関よりもエネルギー利用効率が高くなるため、熱需要の大きい寒冷地において高効率なエネルギー利用が期待できる。

さらに、風力発電や太陽光発電のように、天候等の影響により変動する再生可能エネルギーが大量導入されると、送配電事業者から電力の質を確保するために出力抑制指示が出される可能性が生じるが、水素製造における電力需要によって再生可能エネルギーの変動分を吸収すれば、送配電事業者にとっては「系統負荷軽減」となるほか、吸収分の出力抑制が不要となることから、再生可能エネルギー事業者にとっても「再生可能エネルギーの

最大活用」をすることができ、加えて地元にとっては CO<sub>2</sub>フリー水素にすることで地域エネルギーの地産地消を通じ、低炭素社会の実現と新たな産業の創出による「地域活性化」が期待できるという、三者それぞれに Win-Win となるモデルが考えられる。

#### 1.4 想定時期

本モデルプランにおいては、再生可能エネルギーの導入・電力市場改革が進み、FIT 切れ電源の大量発生、水素関連設備の効率化が予想され、国の燃料電池・水素戦略ロードマップにおいて 2040 年頃の実現を目指しているフェーズ 3（トータルな CO<sub>2</sub>フリー水素供給システムの確立）に先んじる 2030 年頃の社会を想定し、地域の特性に合わせた最適な水素活用モデルを目指し、段階的な展開（図 1）を検討し、その実現に向けた課題を抽出することとした。

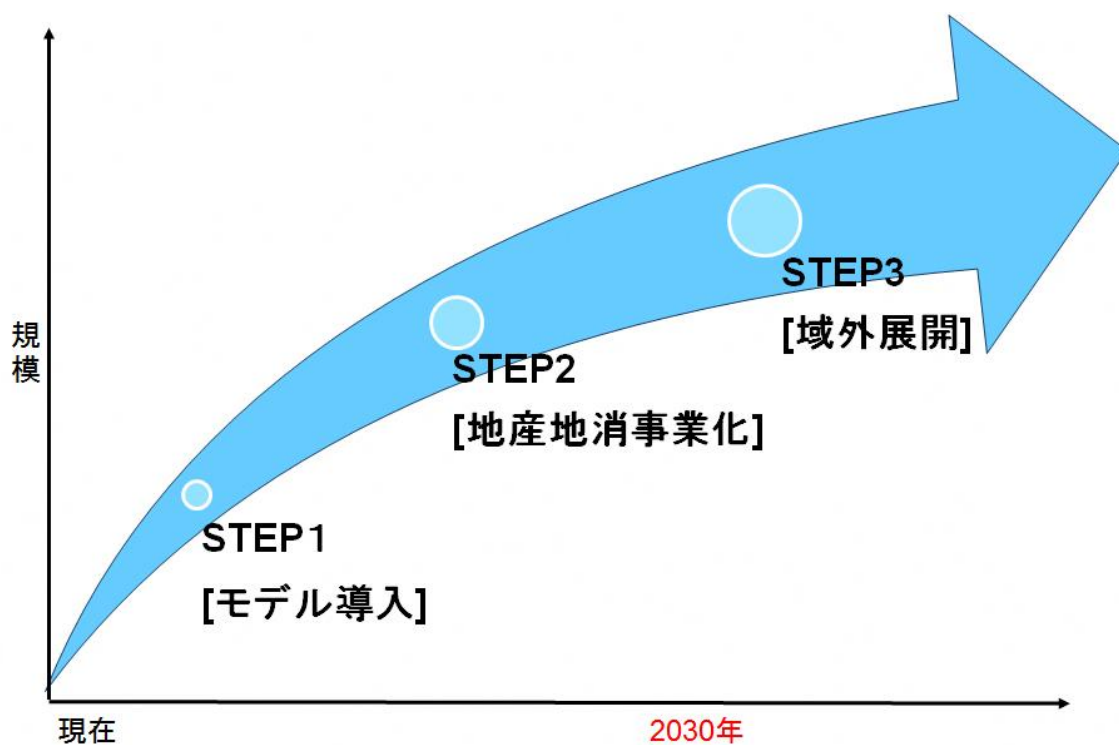


図 1 段階的展開イメージ

## 2. 現状の整理

### 2.1 青森県の現状

#### 2.1.1 再生可能エネルギーの集積地

青森県は FIT 認定された風力発電設備容量が 9 年連続全国 1 位であり、太陽光発電についても、近年大規模な施設が設置されたことにより、全国でも中位になっている。

また、再エネ導入認定量は 870 万 kW あり、認定されている再エネ電源がすべて導入されたとすると規模は現在の約 5 倍（出典：<sup>1</sup>）となる。

青森県内での再エネ発電施設の分布について、風力発電を取り上げると、40 %が六ヶ所村に、約 80 %が下北～上北地区に存在し、県内でも偏在が激しい。

一方、平成 28 年 3 月時点での既存風力発電施設の 97 %、設備容量 20MW 以上のメガソーラー発電施設の 87.4 %（出典：<sup>2</sup>）が、県外の事業者の施設であり、県内に立地する再エネ資源の県内への還元という観点からは課題を残す。

#### 2.1.2 大きな熱需要

図 2 に 47 都道府県県庁所在地の電気、ガス、灯油等の光熱費に対する家計支出を示す。この図から分かるように、青森市は県庁所在地で家計支出額が全国一で、北海道・東北地域の中でも、都市ガスが少なく、プロパンガス・灯油の家計負担が経済的な負担となっていることがわかる。

---

<sup>1</sup> 固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト「A 表都道府県別認定・導入量（2012 年 4 月～2016 年 3 月）」, <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfo>（2018 年 3 月アクセス）

<sup>2</sup> 事業計画認定情報 公表用ウェブサイト 2018 年 1 月 31 日時点, <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfo>（2018 年 3 月アクセス）



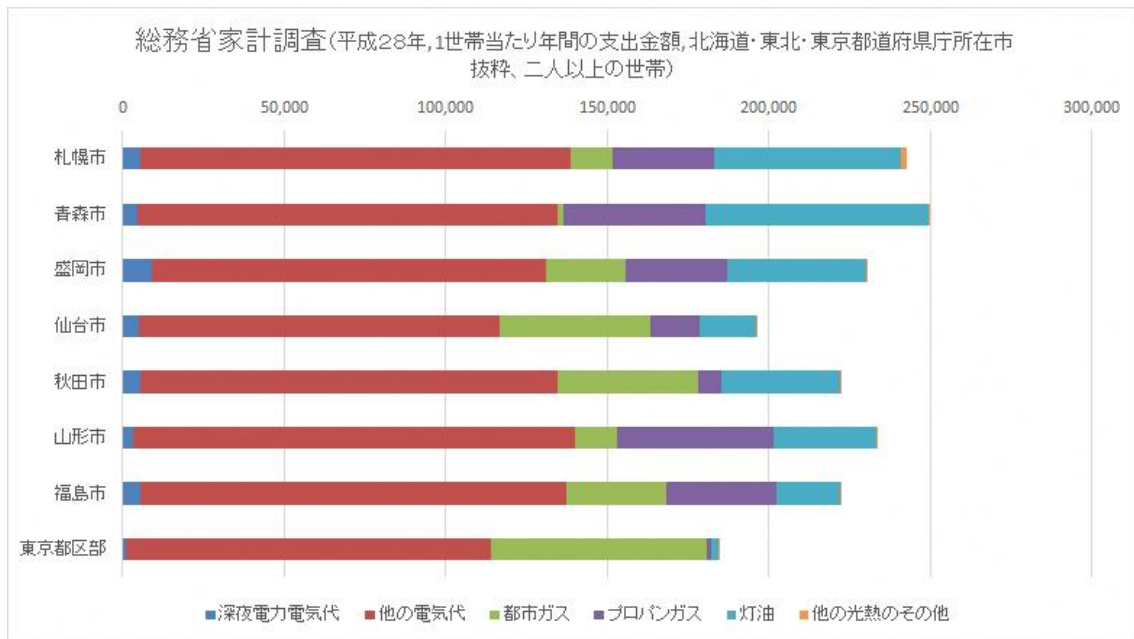


図2 エネルギーに対する支出内訳(都道府県庁所在地(抜粋)) (出典: <sup>3</sup>)

<sup>3</sup> 総務省統計局, 家計調査家計収支編総世帯詳細結果表 2016年1世帯当たり品目別支出金額  
都市階級・地方・都道府県庁所在地別総世帯,  
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031534761&fileKind=0> (2018年  
3月アクセス)

## 2.2 電力を巡る動向

### 2.2.1 再エネ大量導入による出力抑制

再エネの大量導入により、全国的に系統運用面での課題が顕在化してきており、国のWG等においても「将来的な課題」ではなく、「喫緊に対策が必要な課題」であるとの認識が広まりつつある。

系統運用面の課題には、図3にあるとおり、「容量面での系統制約」と「変動面での系統制約」があり、前者はさらに、「エリア全体での需給バランス」と「送電容量の制約」に分けられる。

#### 系統制約に関する地域毎の課題

2

- 系統制約は、**容量面での系統制約**と**変動面での系統制約**に大別される。
- さらに、容量面での系統制約は、**エリア全体の需給バランスの制約**と**送電容量の制約**に分けられる。
  - ①**エリア全体の需給バランス**：需給一致のために余剰電力の出力制御が必要【九州】
  - ②**送電容量の制約**：連系のために送電線の増強が必要【東北・北海道】
  - ③**変動面での系統制約**：太陽光・風力の出力変動に追随するため、調整力の拡大が必要【北海道】

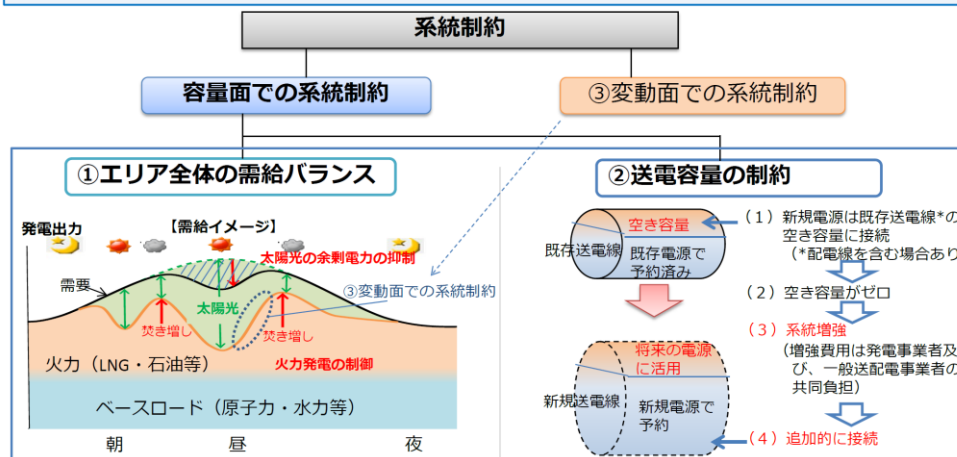


図3「系統制約の概要」（出典：4）

再エネ導入に係るこれらの課題に関して、九州電力エリアにおいては、2017年4月30日に、太陽光出力が系統需要の73%を記録しており、再エネ出力抑制や需要の創出等の「エリア全体での需給バランス」の維持管理面で苦慮している現状がある。

風力発電の立地の多い北海道電力エリアにおいては、風力発電出力の急変による短周期変動および長周期変動それぞれへの対策（火力発電所との協調運転、蓄電池による吸収等）を「変動面での系統制約」として技術開発に着手している。

また、北海道電力エリアおよび東北電力エリアにおいては、再エネの連系申込みが集中するエリアにおいて連系送電線の熱容量不足が深刻な状況にあり、その改善に長期を要す

4 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ（第11回）エネ庁資料（2017年9月27日）

る増強の在り方が「送電容量の制約」の大きな課題として中央でも議論が行われているところである。

図3のとおり、需給バランスと送電容量の制約を超える再エネ供給量が発生した場合には、再エネの出力抑制発動による系統安定化対策が既に実施されている状況であり、抑制対象となる再エネ電力の有効活用への期待は大きい。

### 2.2.2 電力制度改革の過渡期

出力抑制の可能性が高まるなか、抑制対象となる再エネ電力の有効活用のためには、安価な電力の流通が必要となるが、現状では自由かつ柔軟な電力流通システム構築のため、図4のような改革が進められているところであり、制度的には過渡期にある。

#### ●電力広域的運営推進機関（OCCTO）設立

従来電力は地域を超えた電力融通が難しかったが、2015年4月には、全電力事業者が加入義務を負う認可法人として、電力広域的運営推進機関（OCCTO）が設立され、地域間融通の司令塔として機能を開始している。

#### ●電力小売り自由化

2016年4月から、電気の小売りの全面自由化が開始され、400社近くの小売電気事業者が登録を行っており、電力市場における競争が拡大した。

#### ●送配電分離

2020年4月には、送配電部門の法的分離が行われ、誰でも自由かつ公平・平等に送配電ネットワークを利用できる予定であり、ネガワット市場、リアルタイム市場の創設や容量メカニズムの導入等、電力市場における活発な競争の実現へ向けて改革が進められる予定である。

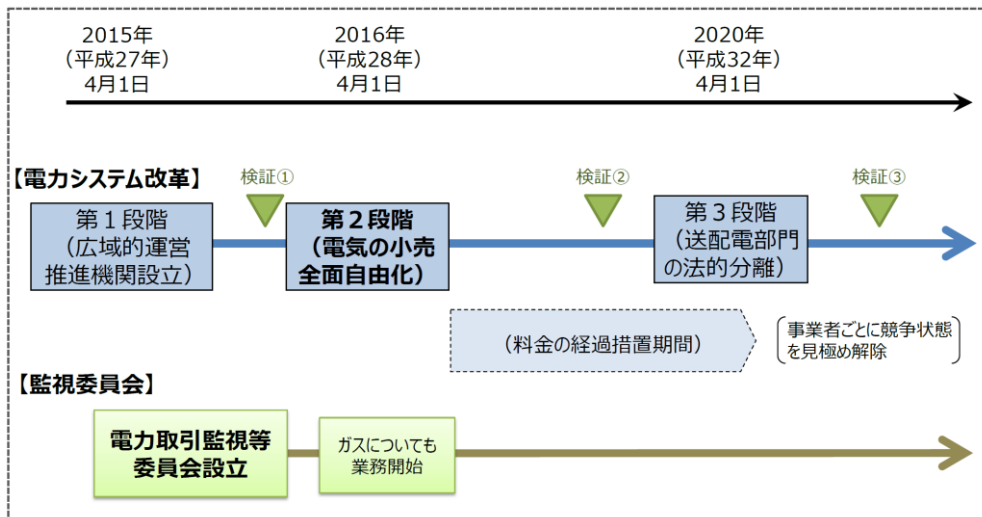


図4 電力システム改革の概要（出典：<sup>5</sup>）

<sup>5</sup> 電力システム改革の現状と課題：資源エネルギー庁（2016年9月27日）

## 2.3 水素を巡る動向

### 2.3.1 国の水素導入ロードマップ

水素・燃料電池戦略ロードマップは2014年6月23日に経済産業省資源エネルギー庁から発表され、2016年に改訂されたもの<sup>6</sup>である。その概要を図5に示す。このロードマップは2040年以降を含めた3つのフェーズから構成されており、今後このロードマップに従って、各種施策が展開されていくものと考えられる。

フェーズ1：2020年以前から始まり、「定置用燃料電池や燃料電池自動車の活用を大きく広げ、わが国が世界に先行する水素・燃料電池分野の世界市場を獲得する」フェーズであるとされており、経済産業省を中心として産官学が実施している現在進行中の水素事業計画と重なる部分が多くある。

フェーズ2：2020年代後半からが想定されており、「水素需要を更に拡大しつつ、水素源を未利用エネルギーに広げ、従来の「電気・熱」に「水素」を加え新たな二次エネルギー構造を確立する」としている。2030年頃には、事業用水素発電の本格導入が開始するとしている。

フェーズ3：2030年以降を見通したもので、2040年頃に「水素製造にCCSを組み合わせ、または再生可能エネルギー由来の水素を活用し、トータルでのCO<sub>2</sub>フリー水素供給システムを確立する」フェーズと位置づけている。

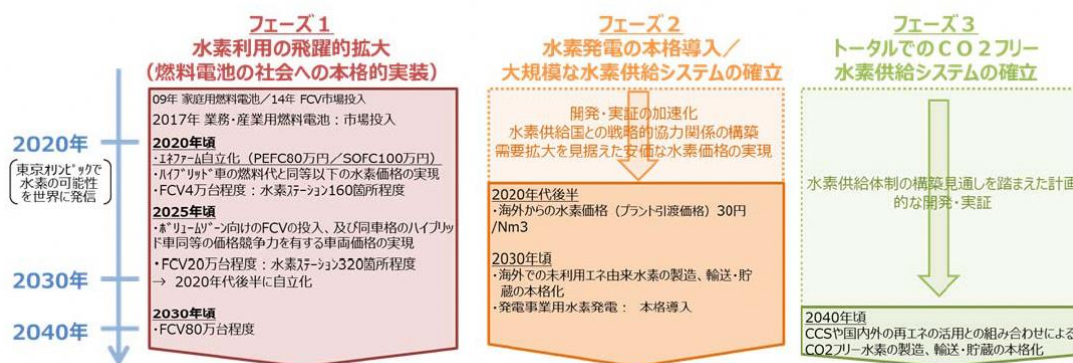


図5 燃料電池水素戦略ロードマップ (出典：<sup>6</sup>)

<sup>6</sup> 水素・燃料電池戦略協議会, 燃料電池・水素戦略ロードマップ [改訂版], 2016年3月22日公開.

## **2.3.2 水素の可能性と課題**

### **2.3.2.1 水素エネルギーの可能性**

#### **(1) 利用時の CO<sub>2</sub> 排出がない**

水素は、エネルギー源として利用した際に CO<sub>2</sub> の排出がない。そのため、排出された二酸化炭素を回収することが難しい運輸部門や家庭等において水素を用いることにより、それらの部門からの二酸化炭素排出削減に貢献する。

#### **(2) エネルギー自給率向上**

水素は電気や熱と同様の二次エネルギー源である。化石燃料から再生可能エネルギーまで、様々な一次エネルギー源から製造することができる。再生可能エネルギーを一次エネルギー源とする水素を利用することによって、温室効果ガスを排出することなくエネルギーを使うことができる。また、日本国内の再生可能エネルギーから水素を製造することにより、エネルギー資源の乏しい我が国のエネルギー自給率向上にも貢献する。

#### **(3) 燃料電池を用いることで、高いエネルギー利用効率可以实现できる**

水素を燃料として用いる燃料電池は、発電効率が最大で 50 % 程度、熱も含めたエネルギー利用効率は 90 % を超える。これは熱力学的に効率が制約されるエンジンなどの内燃機関では実現できないものである。

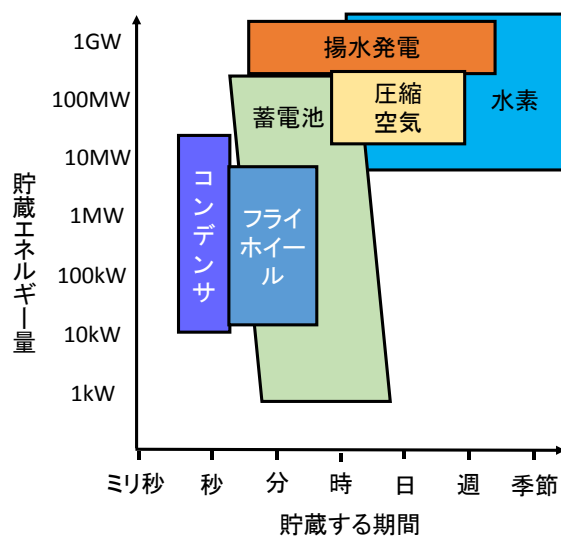
#### **(4) 交通、輸送、発電等、幅広い分野で適用可能性がある**

水素エネルギーの利活用技術の適用可能性は幅広く、既に実用化段階にある燃料電池自動車や家庭用燃料電池システムだけでなく、船舶や鉄道等を含む他の輸送分野、水素発電等多くに対応し得る潜在的なポテンシャルがある。

#### **(5) エネルギー貯蔵媒体として用いる場合、長期間、大容量の貯蔵に適する**

水素はそのままの状態置いておく限り、漏洩したりしなければ、蓄電池のようにエネルギーが自然に失われてしまうことがない。このため、水素を水の電気分解により電気から作り、電力を貯蔵する媒体として用いる場合、蓄電池に比べて長期間、大量の電力を貯蔵する用途に適していると言われている（図 6）。

また、水素や水素を可逆的に取り出すことができる水素エネルギーキャリアの貯蔵は基本的にタンクで行うため、セルが使用に伴って徐々に劣化していく蓄電池に比べて貯蔵設備の耐用年数が長いことも特徴である。また、例えば中低圧用の水素タンクは、通常の鋼材で製作できるため、蓄電池に比べてリサイクル性も良好である。



フライホイール: 巨大な車輪などの回転運動エネルギーとして電力を貯蔵

図6 電力貯蔵媒体毎の特性の違い (出典: <sup>7</sup>を元に作成)

### 2.3.2.2 水素エネルギーの課題

#### (1) CO<sub>2</sub>フリーとするための対策

水素製造に化石燃料等を使用した場合、全体で見ると CO<sub>2</sub>排出量削減に貢献しないため、再生可能エネルギーを利用するか、あるいは化石燃料等を原料とする場合には、水素製造時に排出される CO<sub>2</sub>の回収隔離といった対策が必要になる。

#### (2) コスト

水素は現在、エネルギー源としては化石燃料や電力のように一般化していないため、水素を製造し、利用するための設備や機器は生産数が少なく、コストダウンが進んでいない。また、水素自体の生産量が少ないため、化石燃料や電気に比べて割高となっている。水電解により、再生可能エネルギー由来の電気を調達して水素を製造する場合には、現状 FIT 制度により価格が高値で固定されているため、必然的に水素も高価になる。

#### (3) 貯蔵・輸送効率 (体積エネルギー密度を高める必要性)

水素は最も軽い物質であり、常温常圧では体積当たりのエネルギー密度が小さく効率よく輸送することができない。そこで、圧縮したり、液化したり、その他の化学物質などの形に変換することで、体積当たりのエネルギーを高める工夫をする必要があり、変換の過程で余分なエネルギーが必要となる (表 1)。

<sup>7</sup> International Energy Agency, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, 2015.

表 1 水素の代表的な貯蔵・輸送方法

形態	貯蔵について	輸送について
液化水素	常温常圧時の約 800 倍の体積効率があるが、液化に多大なエネルギーが必要となる。極低温の物質であるため、設備費が高くなりがちである。 定置用燃料電池に直接供給できる高純度の水素が得られ、水素の取り出しにエネルギーを要しない点がメリットである。	陸送の場合、液化水素タンクを搭載した車両や列車、船舶による輸送が適切であろうと考えられるが、まだ数が少ないため設備費が高くなりがちである。短距離、少量の輸送だとコストが割高になる。
有機ハイドライド	トルエン-メチルシクロヘキサンは、灯油等と同様のインフラが利用できるため、比較的安価に貯蔵設備の建造が可能となる。需要家側に水素の取り出し、精製設備が必要で、取り出しには高温熱源が必要となる。また、水素添加時の反応熱の有効活用も要検討である。	現状の液体化石燃料、液体炭化水素の輸送インフラが使える。
圧縮水素 (高圧)	高圧ガス保安法が適用され、監視に人員を常時貼り付ける必要がある。また、大きな物理エネルギーを秘めるため、漏洩、機器の破損等に注意が必要である。比較的小さな面積に貯蔵設備を納めることが可能である。取り出された水素は製造された水素の品質を引き継ぐため、製造段階で燃料電池に供給できるグレードのものを製造すれば精製は不要である。	高圧水素カードルによる輸送の他、パイプラインによる輸送も可能である。パイプラインは新規敷設コストが高い代わりに、限界輸送コストは 0 に近い。
圧縮水素 (低圧)	高圧水素に比べて貯蔵設備に面積を要する。貯蔵設備の材質、設計等が高圧水素に比べてシビアではない。法制度上管理者を常駐させる必要がないため、低コストで運用が可能である。	水素カードルでの輸送は昇圧が必要となるため、輸送効率が悪い。パイプラインが輸送方法としては適切と考えられる。
アンモニア	合成に高温高圧が必要。利用時に水素取り出しが必要。肥料、化学品原料として広く普及している。劇物であるため、特に居住地近傍では安全管理に注意を払う必要がある。	現状のアンモニア輸送インフラが利用可能である。

#### (4) 蓄電池と水素の組合せ

蓄電池と水素は、その性質が異なることから単純比較はできないが、蓄電という観点から以下のような違いがある。

図 7 にあるように、蓄電池の場合、自然放電が発生しないような短時間でのエネルギーの出し入れに用いる場合には入力した電力の最大 90 %程度を取り出すことができる。

しかし、PtoG システムにおいて水の電気分解で製造した水素を燃料電池で用いる場合、2.3.2.1(3) で言及しているように水素に含まれるエネルギーの 92 %という高い利用効率で、熱と電気を使用でき、2.3.2.1(5) で述べたように長期間エネルギーを保存できるが、水素製造の際にロスが発生するため、全体で見ると、水素製造装置に入力された電力の 55 %に目



減りしてしまう。電力だけで見ると、水電解装置に入力された電力の約 30 %しか取り出すことができない。

また、燃料電池からの排熱は、発電時に副生されるため、電力需要に合わせて発電した場合、熱需要とは必ずしも合致しないため、季節の影響も大きい熱需要に熱供給を合わせるためには、熱の需給バランスの調整に工夫が必要となるという課題もある。

よって水素と蓄電池は、その特徴を考慮しつつ、ランニングコストを含めた総合的な検討の上で使い分け、必要に応じては組み合わせて使うことも検討する必要がある。

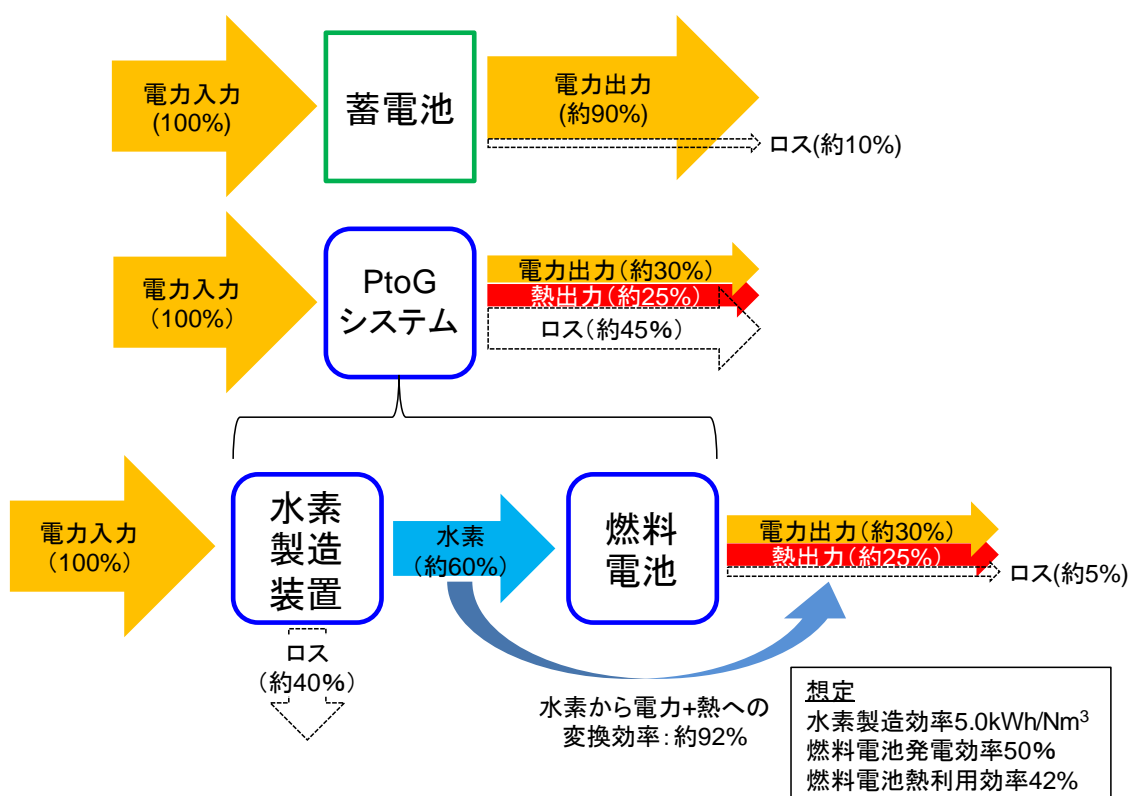


図7 蓄電池と Power to Gas の効率比較  
(特記なき場合、電力入力を 100 %としたときの割合)

#### (5) 適切に取り扱わなかった場合に生じる危険性

水素は空気との混合比率が 4.1 % -74.2 %の範囲で燃焼するため、漏洩した場合に危険を伴う。ただし、水素は非常に軽く、すぐ空气中で拡散してしまうため、屋根がない場所などでは危険性は高くなく、適切な安全対策を施すことによって抑制することができる。



### 3. 活用モデルの検討

#### 3.1 基本方針

本モデルプランでは以下のテーマに基づき、青森県上北郡六ヶ所村尾駈地区（図 8）をモデル地域として、地域での CO<sub>2</sub>フリー水素活用モデルを検討する。

##### 【テーマ 1】再エネ電力の効率的集約（あつめる・つくる）

再生可能エネルギー集積地では、既存システムを活用することで、初期投資を抑えるとともに、域内の再生可能エネルギー由来の電力等を効率的に集約して CO<sub>2</sub>フリー水素製造をすることで稼働率をあげ、電力システムの負荷軽減にも貢献する。

##### 【テーマ 2】低コスト水素供給・活用モデル構築（ためる・はこぶ・つかう）

製造した水素を熱需要の高い寒冷地において、需要の集約した地域への熱電供給することで、低コストで効率的な水素供給・活用モデルを構築する。

また、水素製造時に副生される酸素を有効活用することで、関連産業創出を図る。

#### 3.2 モデル地域の概要

再生可能エネルギーが集積する本県においても六ヶ所村は最大の集積地であり、2017 年 12 月時点で村内だけで 92 基の大型風力発電・日本有数規模のメガソーラー等が立地され、320 MW を超える再生可能エネルギーが既に稼働しており、今後の立地計画はさらにその数倍の規模となっていること。さらに、これらの再生可能エネルギー事業者は、ほとんどが県外資本であり、地域内での経済循環を検討する意義があると考えられている地域である。

また、水素活用の際に課題となる熱電供給先となる公共施設等がコンパクトに集積しているほか、エネルギーパークの認定を受ける等、エネルギーの村として先端的技術への取り組みに積極的であり、将来的に県内他地区への広がりまで期待でき、モデル地域として最適と考える。



図 8 モデル地域の概要

### 3.3 【テーマ1】再エネ電力の効率的集約（あつめる・つくる）

#### 3.3.1 再エネ導入量の想定

再生可能エネルギー集積地の強みを活かすとともに、既存系統活用による系統増強コストを抑えた系統負荷軽減と、CO<sub>2</sub>フリー水素製造による未利用電力の有効活用を図るため、以下のとおり、六ヶ所系統への今後の再エネ推定導入量を想定し、2030年頃を想定した出力抑制により発生が予想される未利用電力の発生量を試算する。

再エネ推定導入量については、現時点における固定価格買取制度の認定済みの合計容量を用いた。改正FIT法による失効等により、認定済み施設であっても接続できないものがあり、導入量が減少する要因もあるものの、東北電力管内では想定を大幅に上回る募集プロセスへの応募が2017年12月時点（出典：<sup>8</sup>）でされており、同地区においては将来的にも再エネ導入量が大幅に増加することが予想されることから、比較的保守的な想定として現時点での認定容量を活用した。

表2に風力発電及び太陽光発電設備の想定容量、想定利用率、想定年間発電電力量をまとめる。最大で1GW程度の発電容量となることから、大量に発生する未利用電力を全量利用しようとした場合、大規模な水電解装置が必要となる。また、想定年間発電電力量は1.47～1.75TWhと想定される。

表2 利用率を仮定した場合における想定発電電力量

発電種類	想定容量	想定利用率	想定年間発電電力量
風力	346.7 MW	20～25 %	607～759 GWh/y
太陽光	704.7 MW	14～16 %	864～988 GWh/y
合計	1.051 GW	---	1.47～1.75 TWh/y

（出典：<sup>9</sup>データを基に作成）

#### 3.3.2 未利用電力量の試算

仮に現在でも無補償での出力抑制が認められている30日ルール の範囲内での出力抑制が行われたと想定すると、想定年間発電電力量の8%程度が出力抑制対象となり、これら未利用の再エネ由来電力を水素製造に利用したとすると118～140GWh程度が利用可能と算定される。

#### 3.3.3 水電解効率の設定

水電解設備の電解効率、特に将来の性能向上の見込みについては、複数の文献に記述が

<sup>8</sup> 資源エネルギー庁 総合エネルギー調査会 新エネルギー小委員会 系統WG（第13回）東北電力資料（2017年12月12日）

<sup>9</sup> 資源エネルギー庁「固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト「B表 市町村別認定・導入量（2016年8月末時点）」

ある。一般財団法人日本エネルギー経済研究所<sup>10</sup>によると、2030年頃の水電解装置の製造効率については、4～5 kWh/N m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>と整理されている（図9）。

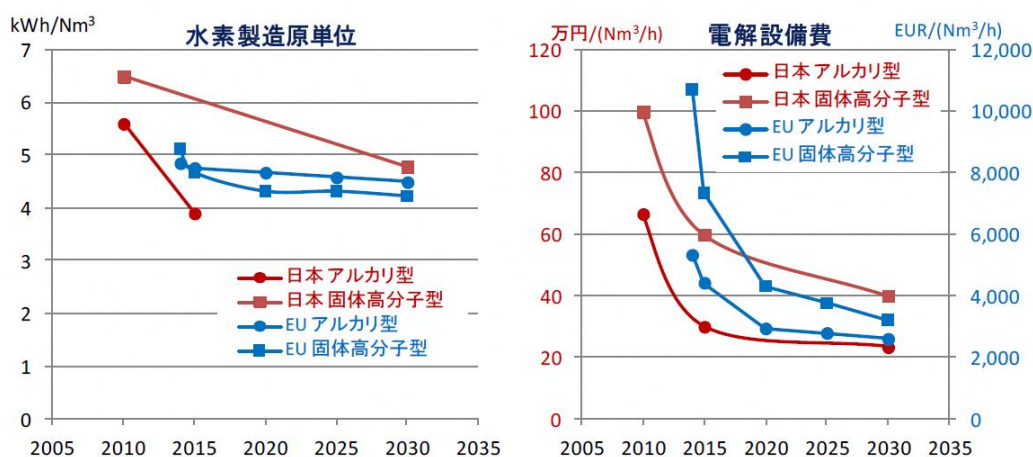


図9 水電解装置の性能予測（出典：<sup>10</sup>）

また、米国エネルギー省（DOE）では、750t/日以上の水素製造量を持つ集中型水電解（Centralized Electrolysis）と、それ以下の（Distributed Electrolysis）の2種類の水素製造方式（出典：<sup>11</sup>）について、効率目標の設定が行われている（出典：<sup>12</sup>）。DOEの分類に従うと、本モデルプランで検討している水素製造規模は Distributed Electrolysis にあたる。このケースでの水素製造効率は表3のようになる。補機類を含むシステム全体の2020年の効率目標として、44 kWh/kg=約4 kWh/N m<sup>3</sup>という値が設定されている。

本モデルプランでは、これらの性能予測を参考に、検討において想定する水電解装置の効率を、システム効率4.5 kWh/N m<sup>3</sup>と設定する。

<sup>10</sup> 柴田, 再生可能エネルギーからの水素製造の経済性に関する分析, IEEJ 2015年1月.

<sup>11</sup> <https://energy.gov/eere/fuelcells/central-versus-distributed-hydrogen-production> (2018年3月アクセス)

<sup>12</sup> <https://energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-hydrogen-production-electrolysis> (2018年3月アクセス)

表3 DOEによる水電解の性能・コスト目標（出典：<sup>12</sup>）

### Distributed Electrolysis

#### Technical Targets: Distributed Forecourt Water Electrolysis Hydrogen Production<sup>a,b,c</sup>

Characteristics	Units	2011 Status	2015 Target	2020 Target
Hydrogen levelized cost <sup>d</sup> (production only)	\$/kg	4.20 <sup>d</sup>	3.90 <sup>d</sup>	2.30 <sup>d</sup>
Electrolyzer system capital cost	\$/kg	0.70	0.50	0.50
	\$/kW	430 <sup>e,f</sup>	300 <sup>f</sup>	300 <sup>f</sup>
System energy efficiency <sup>g</sup>	% (LHV)	67	72	75
	kWh/kg	50	46	44
Stack energy efficiency <sup>h</sup>	% (LHV)	74	76	77
	kWh/kg	45	44	43
Electricity price	\$/kWh	From AEO 2009 <sup>i</sup>	From AEO 2009 <sup>i</sup>	0.037 <sup>j</sup>

### 3.3.4 水素製造可能量の試算

上記未利用電力量を水電解効率で割り、将来的に発生が予想される出力抑制による未利用電力を活用した、理論上の水素製造可能量を試算すると表4のとおりとなる。

表4 水素製造可能量試算

想定発電総量	未利用電力量 (8%)	水素製造可能量
1.47~1.75 TWh/年	118~140 GWh/年	2,600万~3,100万 Nm <sup>3</sup> /年

### 3.3.5 設備容量と設備利用率等とのバランス

#### 3.3.5.1 年間を通じた想定発電出力モデル

大規模な水電解装置を導入しても、設備利用率が低ければ事業性は成り立たない。そこで、電力の利用範囲と設備容量・設備利用率の関係を把握するため、まず風力発電と太陽光発電の発電パターンを調査し、それぞれに今後の想定導入量をかけて合成した出力をグラフ化し、当該地域での想定再生可能エネルギー電源出力モデルを試算した（図10）。

六ヶ所地域に立地している再エネの発電パターンデータを調査した結果、風力発電は7月から9月にかけて出力が小さく、太陽光発電は12月から1月にかけて出力が小さいが、年間を通じて一定の発電出力が得られるという傾向が把握できた。

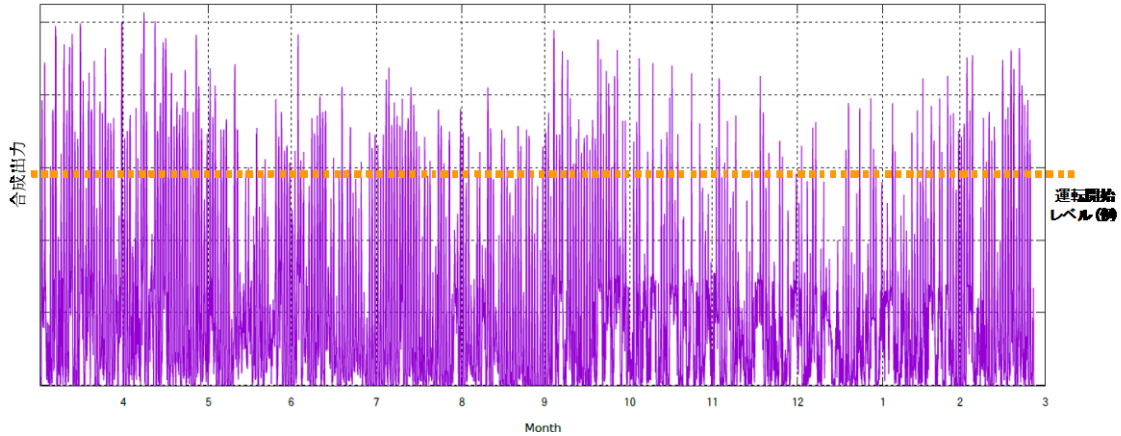


図 10 推定総再生可能エネルギー電源出力時系列グラフ

### 3.3.5.2 設備利用率と設備容量の関係

次に、想定出力が一定のレベルを超過した場合に水素製造装置を運転すると仮定し、その運転開始レベルを変化させた場合における設備利用率と設備容量の変化の例を図 11 に示す。なおモデル化するため、特定の基準値からの倍数を示す表記法の p. u. 値で示す。図 11 から、電力の出力時系列グラフの末端部分を利用しようとして、運転開始レベルをあげれば、設備容量が急激に増加し、過剰設備となり、利用率も下がる。逆に運転開始レベルを下げれば、設備容量も小さくて済み、利用率も高くなるが、当然水素製造量も少なくなるので、水素需要の変動に合わせるためには、バッファタンクの容量を大きくする等の調整が必要となること分かる。

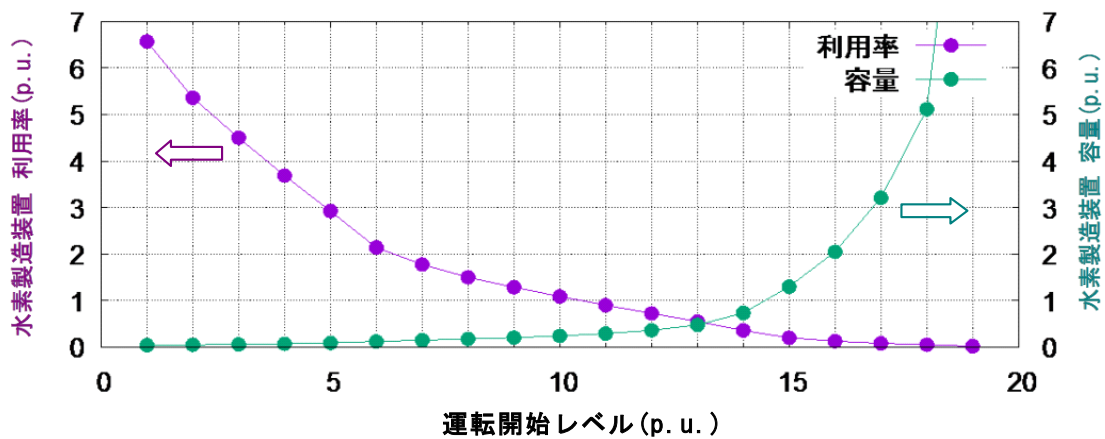


図 11 運転開始レベルの変化による設備容量と設備利用率

### 3.3.5.3 FIT 切れ電力等の活用による利用率向上

各都道府県で 2032 年から 2035 年に FIT 切れが見込まれる再エネの容量を図 12 に示す。



### 3.4 【テーマ2】低コスト水素供給・活用モデル構築（ためる・はこぶ・つかう）

#### 3.4.1 水素活用法

水素の活用法は大きく三つに分類される。以下にそれぞれ、モデル地区に最適な活用法と規模を検討する。

- コジェネレーション（定置式燃料電池による熱電併給）
- モビリティ（水素ステーション、燃料電池自動車等）
- その他（水素ガスボイラー、水素発電、化成品製造等）

##### 3.4.1.1 コジェネレーション（定置式燃料電池による熱電併給）

###### (1) 燃料電池とは何か

燃料電池は、水素と空気中の酸素を利用して、水の電気分解と逆の化学反応により発電と同時に熱を生み出すコジェネレーションシステムである。既に化石燃料由来のガスを改質して水素ガス化して使用する家庭用燃料電池コジェネレーションシステムは、“エネファーム”という名称で商品化され、2017年時点で、既に20万台以上が普及している。

本モデルプランでは、化石燃料由来のガスを改質をせずに、直接水素ガスを使う純水素型燃料電池を想定する。

###### (2) 地産地消規模での想定条件

熱需要の高い寒冷地において、需要の集約した地域への熱電供給することで、低コストで効率的な水素供給・活用モデルを検討するため、同地区の中心部に水素製造拠点を設置して、以下の周辺にある公共施設及び住宅等の需要先へ水素を供給する地産地消規模での活用を検討した。

- 総合体育館
- 六ヶ所村温水プール
- 六ヶ所村医療センター
- 村役場・第2分庁舎
- 給食センター
- 小学校
- 中学校
- スワニー（多目的コミュニティセンター）
- ガソリンスタンド
- 分譲住宅（青実線枠内 200世帯）
- 集合住宅（青破線枠内 1496世帯）

各需要先での活用方法としては、各需要家に設置した純水素型燃料電池を補助電源、熱源として運用し、不足する電力、熱については系統電力と、需要家に既設の熱供給機器（ボイラー、エアコン等）から供給するものとし、燃料電池の運転パターンについては、電力需要に合わせて決定し、燃料電池の発電出力が需要家の電力需要を超えないよ

うに運転することとした。

また、各需要先の需要パターンは、文献を参照して施設の延床面積や外気温等の諸条件に基づいてパターンの基本形状を決め、それに各施設より提供された月間電力、化石燃料消費量から推測した実データを用いて補正をかけ、1年を夏期、冬期、中間期の3期に分類し、それぞれ1日を代表日として、24時間を1時間刻みの24ステップとして、電力、暖房、冷房、給湯の4種類のエネルギー需要パターンを作成した。

導入する燃料電池は業務用と家庭用の2種類とし、スペックは既存のものを参考に表5、表6の通りとした。発電効率、熱利用効率は出力を変化させても変化しないものと仮定した。燃料電池の排熱を暖房、給湯に用いるための追加の設備投資についてはこの検討では考えない。

表5 業務用燃料電池のスペック

方式	PEFC
最大出力 (電力 kW)	100
発電効率 (%)	50
熱利用効率 (%)	46
合計効率 (%)	96
水素消費量 (Nm <sup>3</sup> /h)	67

表6 家庭用燃料電池のスペック

方式	PEFC
最大出力 (電力 kW)	0.7
発電効率 (%)	49
熱利用効率 (%)	46
合計効率 (%)	95
水素消費 (Nm <sup>3</sup> /h)	0.48

燃料電池の稼働パターンは、需要先に導入されている空調、給湯機器を考慮して、冷房、暖房、給湯需要を電力需要とカウントするか、熱需要とカウントするかを判断し、作成し、施設毎に PtoG 設備の稼働日数を設定し、年間の水素需要規模を算出した。例えば、冷暖房給湯機器については、表7のように効率を仮定し、冷房機器としてエアコンを需要家が備える場合、冷房需要を冷房効率3で割った値を負荷として、電力需要にカウントするとした。数値の有効数字は基本的に2桁とし3桁目を四捨五入する。文献値については引用元に準ずる。

表7 冷暖房給湯機器効率

冷暖房給湯機器	効率 (熱供給量/消費電力 or 消費燃料熱量)
エアコン (冷房・暖房) ヒートポンプ給湯器 (給湯)	3
ボイラー (暖房・給湯)	0.95



今回の検討では、起動停止がある稼働パターンを想定したため、固体高分子型の燃料電池（PEFC）導入を想定した。これは発電効率が大きく、熱の発生が少なく、排熱の温度も 60℃程度となる。リン酸型燃料電池（PAFC）は熱の発生が大きく 90℃の排熱を回収することもできる（出典：<sup>14</sup>）ため、熱需要が大きい需要家においては導入に適すと考えられるが、出力の変更に不向きでベースロード運転に向くため需要家を選ぶ。

なお、家庭用燃料電池は集合住宅と戸建住宅のみに導入するものと考えたが、起動停止速度が速いため、日によって需要に大きな変動がある施設においては、複数台並列に設置して運転させるといったパターンも考え得る。ここでは業務用燃料電池の出力は 100 kW としているが、将来的には MW クラスの燃料電池も利用可能となる可能性がある。

### （試算例： 集合住宅）

#### ① 検討条件

集合住宅については、集合住宅の世帯数に、文献<sup>15</sup>に記載の 24 時間の電力、冷房、暖房、給湯負荷パターンを元に、冷房、暖房需要については文献<sup>16</sup>に示されている、東京都と青森県の冷暖房エネルギー消費原単位の比を使って文献<sup>15</sup>由来のパターンの補正を行った。検討の諸元を表 8 に示す。

表 8 集合住宅の水素需要規模検討の諸元

諸元	値	備考
延床面積	149,600 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup> ×1496 戸
冷房	エアコン	
暖房	灯油ボイラー	
給湯	プロパンガス	
燃料電池	家庭用 1 台/戸 計 1496 台	
需要パターン出典	<sup>15</sup> 、 <sup>16</sup>	

#### ② 想定需要パターン

季節別のエネルギー需要パターンは、**図 13** のとおりとなり、大きな季節間ギャップが存在することが分かる。

<sup>14</sup> <http://www.fujielectric.co.jp/products/fuelcell/pafc/spec.html>（2018 年 3 月アクセス）

<sup>15</sup> 財団法人 エンジニアリング振興協会、地下開発利用研究センター：平成 18 年度地域産業活性化をめざした水素エネルギー供給利用システムの実現化の調査研究 報告書, 2007.

<sup>16</sup> 高島他, 地域特性を考慮した住宅の冷暖房エネルギー消費原単位の作成, 土木学会中部支部研究発表会(2010.03), VII-001.

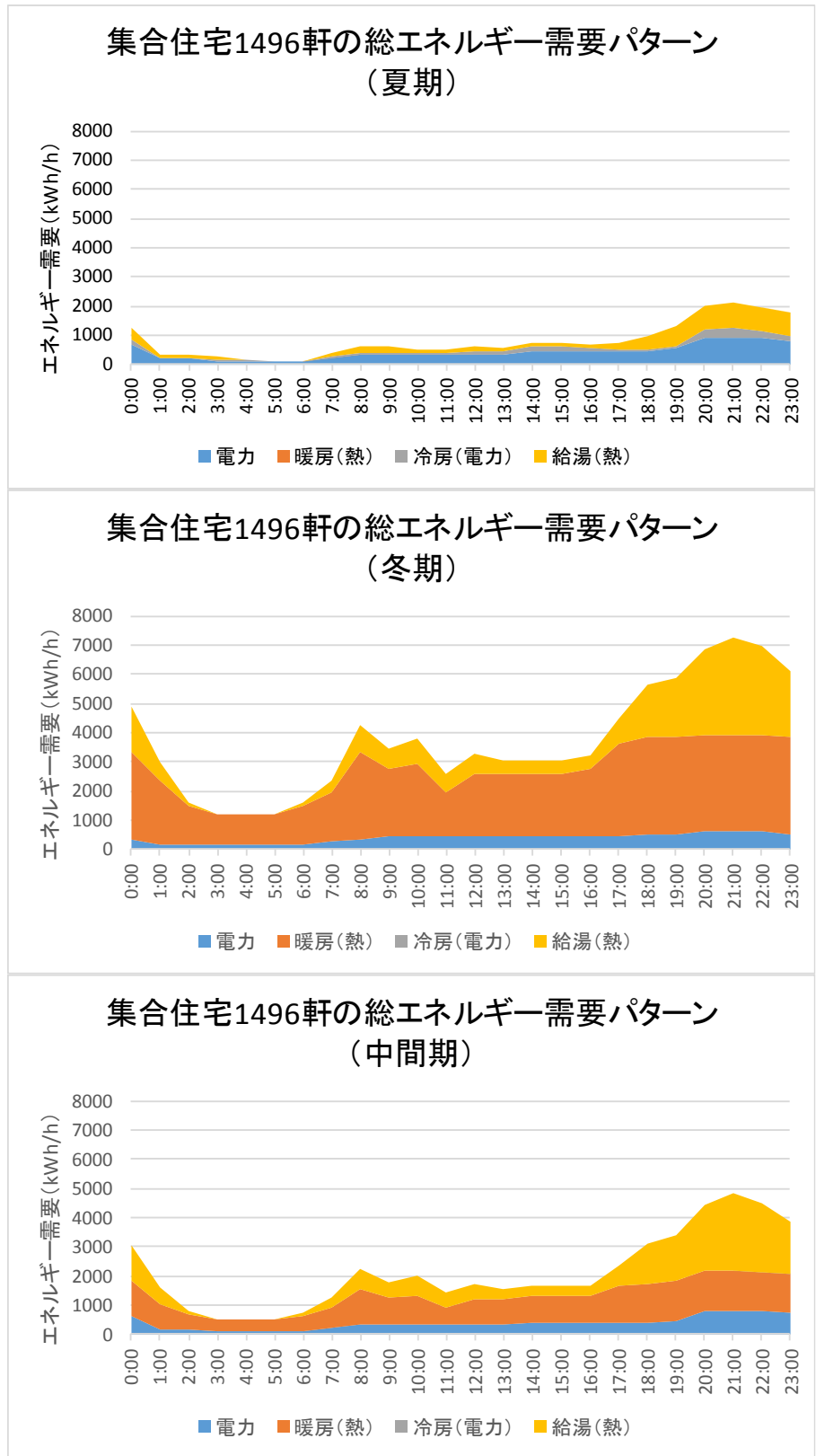


図 13 集合住宅の季節別エネルギー需要パターン

### ③ 稼働パターン

需要に合わせて設定した燃料電池稼働パターンと、電力、熱需要を重ね合わせた電力・熱需給パターンを図 14 に示す。稼働日の設定を表 9 に示す。

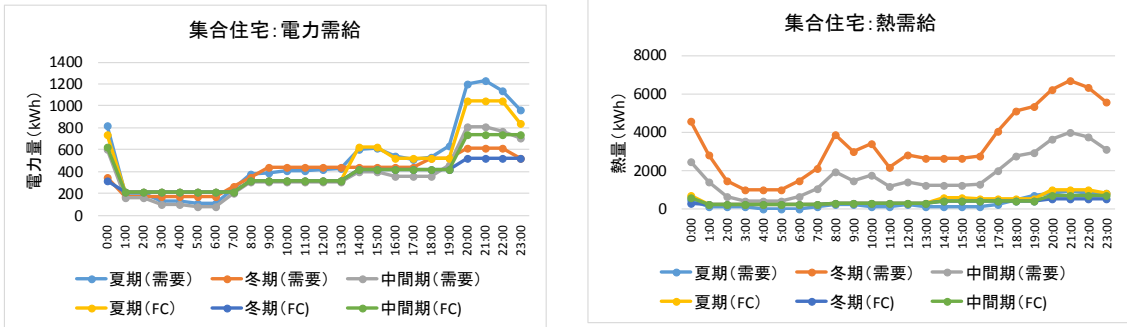


図 14 集合住宅の電力・熱需給

表 9 集合住宅の稼働日数設定

	年間季節日数	P2G 設備年間稼働日	年間 P2G 設備非稼働日数
夏期	62	58	4
冬期	182	172	10
中間期	122	115	7
合計	366	347	19

### ④ 年間水素需要量

これらより計算した年間水素需要量は以下の通りである。

$$\text{年間水素需要量} = 1,900,000 \text{ Nm}^3/\text{年}$$

#### (3) コミュニティ全体の水素需要

##### ① 水素需要パターン

図 15、図 16、図 17 に六ヶ所村コミュニティ全体のコジェネレーションによる水素需要パターンを示す。ただし、これは各季節のある 1 日にすべての需要家が同時に稼働して水素需要が最大となる場合の需要パターンである。

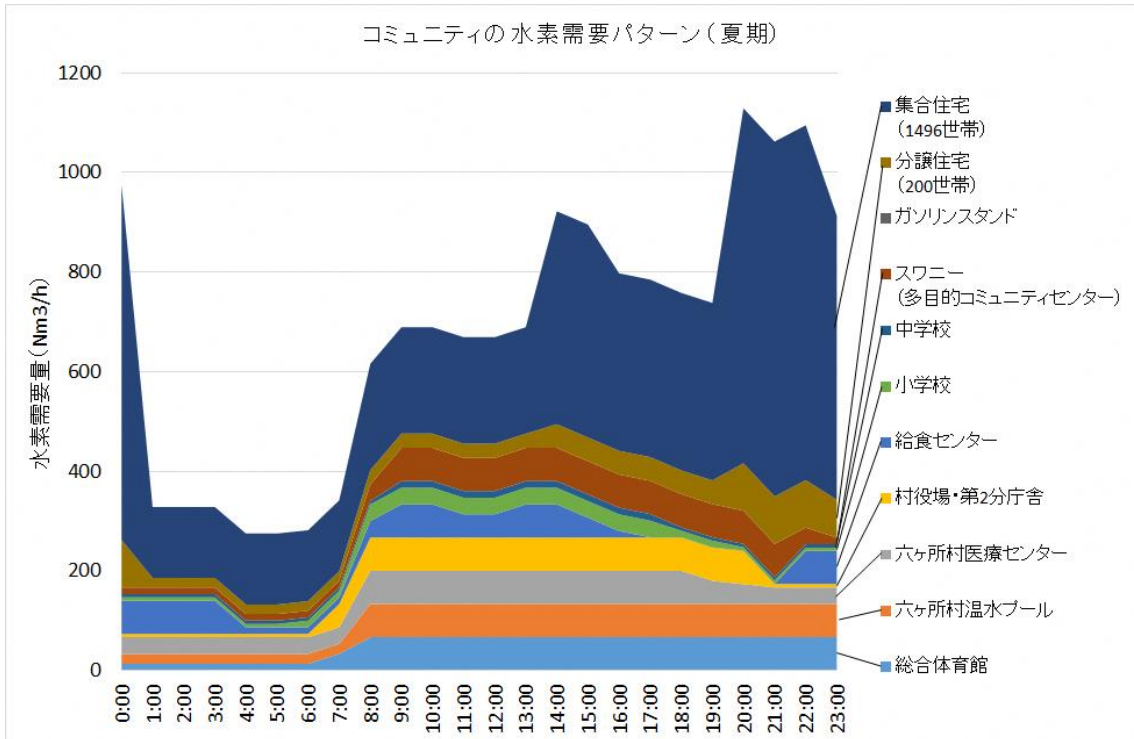


図 15 コミュニティの水素需要パターン (夏期)

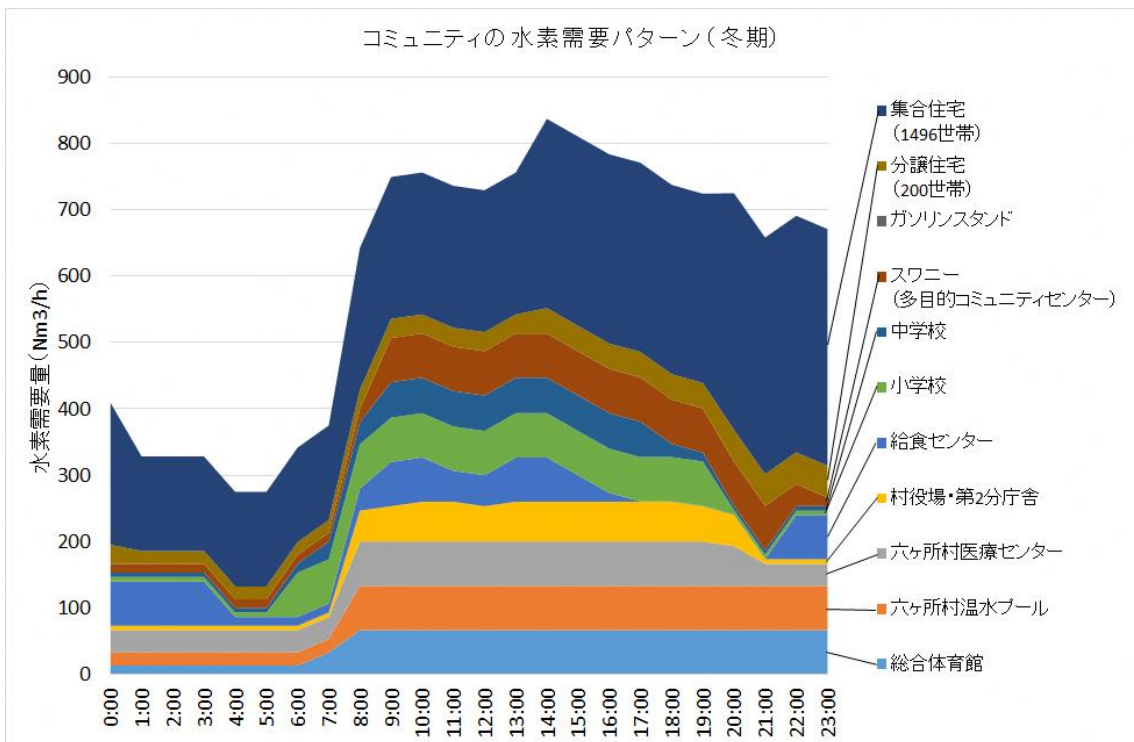


図 16 コミュニティの水素需要パターン (冬期)

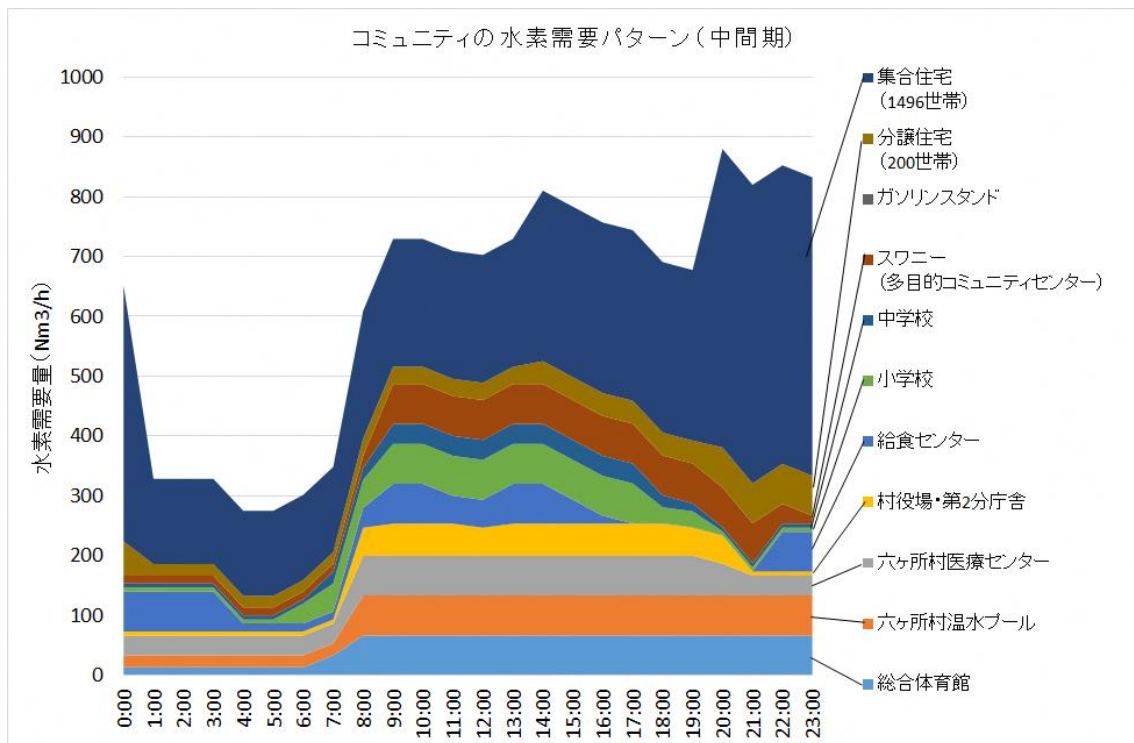


図 17 コミュニティの水素需要パターン (中間期)

## ② 年間水素需要量

想定した地産地消規模での公共施設及び住宅等のコジェネレーションによる年間水素需要量は、以下のとおりとなる (表 10)。

表 10 各需要家の年間水素需要量一覧

施設	年間水素需要
総合体育館	86,000 Nm <sup>3</sup> /y
六ヶ所村温水プール	360,000 Nm <sup>3</sup> /y
六ヶ所村医療センター	420,000 Nm <sup>3</sup> /y
村役場・第2分庁舎	220,000 Nm <sup>3</sup> /y
給食センター	230,000 Nm <sup>3</sup> /y
小学校	220,000 Nm <sup>3</sup> /y
中学校	130,000 Nm <sup>3</sup> /y
スワニー (多目的コミュニティセンター)	230,000 Nm <sup>3</sup> /y
分譲住宅 (青実線枠内 200 世帯)	290,000 Nm <sup>3</sup> /y
集合住宅 (青破線枠内 1496 世帯)	1,900,000 Nm <sup>3</sup> /y
合計	4,086,000 Nm <sup>3</sup> /y

### 3.4.1.2 モビリティ（燃料電池自動車、水素ステーション）

#### (1) モビリティの動向

現在、国では四大都市圏を中心に水素ステーションの整備、燃料電池自動車の普及拡大を図っているが、本県においてもその低炭素社会推進、非常時の外部給電機能等の付加価値が認められることから、日本全国におけるFCVおよび水素ステーションの普及目標を踏まえつつ、六ヶ所村での現状の公用車、自家用車、バス等の普及状況、利用状況を鑑みて、ステップをおった地産地消規模でのモビリティ活用モデルを検討した。

水素・燃料電池戦略ロードマップによれば、FCVは日本全国総計で2025年までに20万台程度、2030年までに80万台程度普及するとしている。また、FCトラック・バスについても2030年までには1,000台超の普及を目標としている。

また、水素ステーションは、2025年度までに320箇所程度、2030年時点では標準的な能力（300Nm<sup>3</sup>/h）を持つステーション換算で900箇所程度が必要としている。そして2025年頃までに欧米（水素ステーションの整備費：1.7億円～2.2億円程度、運営費：1,500万円程度）と遜色のない水準まで低減させ、2020年代後半までに水素ステーション事業の自立化を目指している。

#### (2) 六ヶ所村の状況

六ヶ所村では現在、表11に示すように公用車193台、自家用車11,047台、バス16台が利用されており、人口減少等に伴うコミュニティ規模の変動を考慮しなければ、この台数が六ヶ所村における地産地消規模でのモビリティ活用の最大規模となる。

表11 六ヶ所村自動車台数

種別	値
公用車	193台
自家用車	11,047台
バス	16台

#### (3) 想定されるFCV、FCバス

##### ① FCV

FCVは、現在、トヨタ自動車のMIRAI、本田技研工業のCLARITYが流通しているが、水素需要を試算する上での前提を以下のとおり想定する。

表12 FCV使用状況の前提

項目	値	備考
満タン容量	約5kg	但し35MPaの場合その半分程度
燃費	8.9 Km/Nm <sup>3</sup> (100 Km/Kg-H <sub>2</sub> )	JHFCプロジェクトより
走行距離	9,500 km/年 (26km/日)	JHFCプロジェクトより
年間水素消費量	1,067 Nm <sup>3</sup> /年	

2030年における本県でのFCVの普及台数及び消費水素量については、公用車等への先導的導入が優先されるものと想定し、以下のとおり試算した。

公用車 193 台 ×年間水素消費量 1,067 Nm<sup>3</sup>/年 ≒206,000 Nm<sup>3</sup>/年

## ② コミュニティ燃料電池バスの導入

バスのような公共交通機関は走行ルートが決まっているため、燃料の消費量や補給のパターン等が自家用車に比べて読みやすく、環境性や非常時の外部電源供給などの付加価値も期待される。ここでは、六ヶ所村村内にコミュニティバスとして表13のような性能の燃料電池バス（FCバス）を導入した場合を考えた。

なおFCバスは、東京都交通局がH29年3月21日、路線バスに2台を本格導入し、運行開始されており、2020年までに100台以上の導入を目指している。

FCバスは、満タンに充填し約200km走行可能であり、

表14に示すような平均的なバスの1日当りの走行距離142km/日の場合、毎日一回、水素補給をすればよいことになる。2030年には村内のバスが燃料電池バスに転換すると想定すると、年間水素需要量は以下のとおりとなる。

バス 16 台 ×年間水素消費量 52,206 Nm<sup>3</sup>/年 ≒835,000 Nm<sup>3</sup>/年

表13 コミュニティバス（トヨタFCバスの場合）の緒元（出典：<sup>17</sup>）

緒元	値	
車両	全長／全幅／全高 10,525/2,490/3,340(mm)	
	定員：77人	
	航続距離：約200km	
高圧タンク	最高充填圧力：70MPa	
	タンク内容積（合計）：600ℓ	

表14 FCバス使用状況の前提

項目	値	備考
満タン容量	約25kg	
燃費	0.99 km/Nm <sup>3</sup> (11 km/Kg-H <sub>2</sub> )	JHFCプロジェクトより
走行距離	52,000 km/年 (142km/日)	日本バス協会「日本のバス事業」をもとに推計
年間水素消費量	52,206 Nm <sup>3</sup> 年	

## (4) モビリティでの年間水素消費量

上記FCV及びFCバスの合計水素需要量は1,041,000 Nm<sup>3</sup>/年≒100万 Nm<sup>3</sup>/年となる。商用

<sup>17</sup>国土交通省、「燃料電池自動車・バスの普及に向けた導入支援策について」（2017年9月21日）

水素ステーションの採算ラインを考慮し、稼働率を 80%と想定すると水素製造能力は 1,008,000 Nm<sup>3</sup>/年（表 15）であり、FCV では約 900 台分に相当すると言われているが、六ヶ所村においては公用車とバス需要で概ね達成することになる。

表 15 水素ステーションの前提条件

緒元	値	備考
能力	300 Nm <sup>3</sup> /h	
営業	12 時間/日、11.5 ヶ月/年	
水素製造能力	1,008,000 Nm <sup>3</sup> /年	80 %稼働
	90,450 kg/年	80 %稼働
	248 kg/日	80 %稼働

ただし、300 Nm<sup>3</sup>/h 規模の商用水素ステーションをバスへの水素供給に用いる場合、能力としては、燃料電池バス 1 台の水素タンクを空の状態から満タンにするために 1 時間を要することから、複数の水素ステーション（300 Nm<sup>3</sup>/h）を設置するか、あるいは水素ステーション（900 Nm<sup>3</sup>/h）程度の能力が必要となる。

#### <参考： 水素ステーションの採算性について>

水素ステーションの採算性は、初期投資費用、水素原料価格、稼働率により、相当変動する。ここでは、株式会社野村総研が検討した結果を例として示す。

図 18 左のグラフでは、水素ステーション 1 基あたりに補給しに来る FCV 台数（保有台数と呼ぶ。ステーションの設備利用率を決定する）を横軸に取り、初期投資費用が低減（2.55 億円/基）、顧客への販売価格は 1,100 円/kg とし、水素原料費が 500 円、700 円、900 円/kg の時の運用総コスト（固定費+原料費）と、設備利用率から決まる総売上を比較している。保有台数が 720 台/基の時、原料費 500 円/kg の運用総コストを示す直線と、総売上の直線が交差し、これはすなわち水素ステーションの運用が損益分岐点を超えることを示す。原料費 700 円/kg、900 円/kg の場合、必要な保有台数は稼働率に直すと 100%を超える数字となるため、この場合には損益分岐点を超えることはなく、運用は常に赤字となる。

図 18 右の図は、水素原料費とステーション稼働率の関係を示す。原価率が下がる=粗利率が上がると低稼働率でも損益分岐点を超えることは自明である。このグラフ内で損益分岐点を超える領域（単年度黒字となる領域）は薄青で示されており、その境界点は、原料費 638 円/kg、稼働率 100 %の点である。**稼働率 80 %**で単年度黒字となる**水素原料価格は 523 円/kg**であり、これは現在の水素原料費の 1/3 から 1/4 となる。



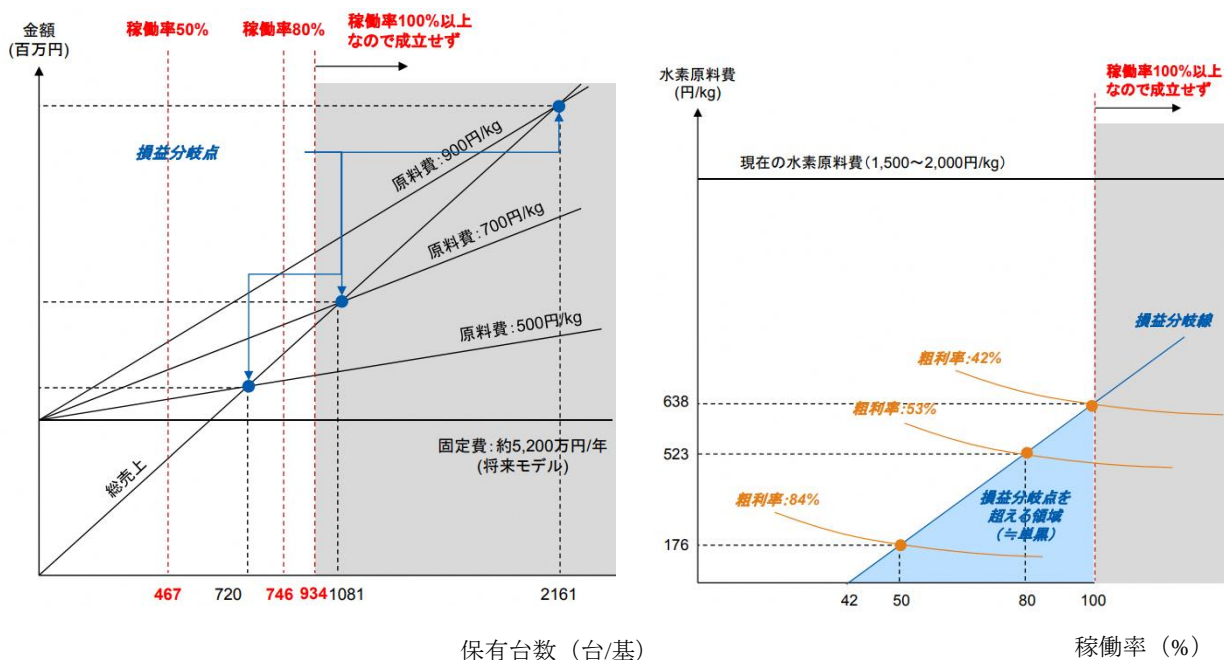


図 18 水素ステーションの損益分岐点 (出典：<sup>18)</sup>)

### 3.4.1.3 その他の活用法

#### (1) 水素のその他活用法

##### ① ボイラー燃料としての活用

水素は燃焼するため、水素は燃料電池だけでなく、ボイラーでも燃料として活用することができる。水素をボイラー燃料として用いる利点として、排気の水蒸気量が大きくなるため、潜熱回収型とすることで効率を高めることができるという点がある。ボイラーは燃料電池に比べて不純物に対する許容量が大きいいため、水素の精製プロセスを省略できる可能性がある。エネルギー工学の見地からすると、電力の塊である再エネ水素から特に人間が日常生活で必要とするような 40℃~100℃程度の温水を得るために活用することは非合理的であるが、熱需要が電力需要に対して極めて大きいような需要家に対しては、燃料電池コジェネよりもボイラーを導入する方が理に適う可能性が考えられる。また、水素を燃料とするボイラーは、現在化石燃料を使っており、電力への代替が困難な工業分野における熱供給を低炭素化できる可能性を持つ。

#### ・ 専焼ボイラー用燃料としての活用事例

ボイラー燃料としての活用例として、三浦工業が岡山県のソーダ工場に納入した水素専焼ボイラー<sup>19)</sup>が挙げられる。このボイラーは、100%水素を燃料として稼働し、水素消費量

<sup>18)</sup> 野村総合研究所, 平成27年度新エネルギー等導入促進基礎調査水素社会の実現に向けた取組に関する調査報告書, (2016年3月31日)

<sup>19)</sup> <http://www.miuraz.co.jp/info/newsrelease/2017/01/23/1500.html> (2018年3月アクセス)

が 400 Nm<sup>3</sup>/h、年間 6,000 時間稼働を想定しており、合計で 240 万 Nm<sup>3</sup>/年規模の水素需要となる。

#### ・他の燃料との混焼事例ボイラー燃料としての活用

水素を含むガスの燃焼は、石炭や石油から製造された一酸化炭素と水素の混合ガス（合成ガスと呼ばれる）の燃焼が昔から広く行われてきている。近年研究開発や実証等が行われている水素混焼の例としては、以下の様なものがある。

水素は着火しやすく、燃焼速度が速いことから、希薄燃焼（燃料に対して空気を非常に多量に供給した状態での燃焼）でも燃料の完全燃焼、窒素酸化物等の排出抑制に寄与している。補助燃料としての水素の利用は、専焼型に比べて小規模となるが、既存設備を活用しうる分専焼型に比べて容易であると考えられる。

中国の JOCITE 社<sup>20</sup>は、中国、インドを中心に、化学プラント等から出てくる水素含有ガスから水蒸気を製造するボイラーの製造と販売を行っている。例えば、インド・グジャラート州に納入されたシステムでは、Gujarat Fluorochemicals 社の工場内に出てくる水素含有ガスから 10 t/h 規模のスチームを製造するボイラーが稼働している（図 19）。



図 19 JOCITE 社の水素ボイラー（出典：<sup>20</sup>）

日立製作所は、Power to Gas の実証において、未利用電力から製造した水素を、軽油を主要な燃料とするエンジンにて混焼することを計画している（出典：<sup>21</sup>）。

<sup>20</sup> Waste Hydrogen Utilization System - JOC International Technical Engineering Co.,Ltd. , <http://www.jocite.com/en/ctt/1/79.htm>（2018 年 3 月アクセス）

<sup>21</sup> <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2016/11/1102.html>（2018 年 3 月アクセス）

## ② 水素タービン発電での活用

水素を火力発電や、ガスタービンコージェネレーションシステムの燃料として用いる計画が検討されている。例えば我が国においても、海外輸入水素を用いた水素タービン火力発電の技術検討、実証が行われている（出典：<sup>22</sup>、<sup>23</sup>）。このプロジェクトの中では、数 MW 級の水素専焼ガスタービン燃焼器の検討が行われており、例えば、出力 1 MW、発電効率 40%、年間設備利用率 90%の水素専焼ガスタービンは、約 660 万 Nm<sup>3</sup>/年の水素需要家となる。

## ③ 化成品製造での活用

水素の活用方法として検討されている物の 1 つに、Power to Chemical というものがある。これは、従来化石燃料等から製造されている化学物質を再生可能エネルギー由来の水素とその他の原料から製造するアイデアである（表 16）。

表 16 Power to Chemical の例

物質名	用途	技術レベル
アンモニア	肥料、爆薬、燃料（研究中）	基礎研究段階
メタン	都市ガス原料、化学品原料	システム実証段階
液体燃料	燃料、化学品原料	・非再エネ原料～実用化段階（海外に多数商用プラントあり） ・再エネ原料～実用化段階
メチルシクロヘキサン	水素キャリア	・水素添加～システム実証段階 ・直接還元～基礎研究段階
ギ酸	水素キャリア、飼料添加物等	基礎研究段階

## ④ 産業部門での活用

燃料としての供給以外の方法として、産業部門に水素ガスとして販売する可能性について、一般社団法人日本産業・医療ガス協会（以下「JIMGA」）にヒアリングを行った。

現状では、水素の用途は製造業が中心となっており（表 17）、市場は成熟している。産業用・医療用ガスには法規制もあり、要求される品質を確保するためには、水電解により製造した水素は除湿が必要となる等、品質面でも課題がある。東北管内には山形県、福島県に水素製造プラントはあるが、青森県にはないため、地産地消による輸送コスト削減、CO<sub>2</sub>フリー等の新たな付加価値による市場開拓ができるかが課題となる。

<sup>22</sup> <http://www.nedo.go.jp/content/100863659.pdf>（2018年3月アクセス）

<sup>23</sup> [http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100883.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100883.html)（2018年3月アクセス）

表 17 現状での水素の産業部門での用途 (出典:<sup>24</sup>)

● **通信分野**

大容量の情報の伝達に使用される光ファイバーは石英硝子を材料としていますが、素材となる石英硝子の製造時に大量の水素が使用されます。また、ファイバーに加工する際は水素、酸素を熱源として、石英硝子を付着させるファイバーの母材を作るために使用されます。

携帯電話の表示部分の発光はガリウムリン等の化合物半導体が使用されていますが、このウエハの熱処理にも水素は使用されています。

● **半導体分野**

シリコンウエハ製造時は単結晶製造用として、金属珪素に他のガスを反応させたり、多結晶反応器のキャリアガスとして使用されています。

さらに水素は、シリコンウエハ上に希望する抵抗率、厚みのシリコンを基板と同じ結晶方向に成長させるためにシラン等のキャリアガスとして使用されます。

LSI の製造工程中では、酸化用としての酸水素炎による高純度水蒸気雰囲気形成として、熱処理用に雰囲気ガス、還元性または熱分解反応ガスとして使用されます。また、拡散工程ではシリコンウエハにボロン、リンを付着させウエハ表面に入り込ませるキャリアガスとして、窒素ガスとともに使用されます。

半導体製造に欠くことのできない治具類、拡散工程中などで使用される反応炉は石英硝子でできていますが、水素は石英の製造、治具類の加工の酸水素炎として使用されます。

● **化学工業分野**

石油化学工業においては、エチレンプラントより分離される各種化学品の水素添加として使用されています。合成繊維原料の他、幅広い分野で使用されるアンモニアの合成用として、可塑剤、界面活性剤の原料となる高級アルコール合成用として、無機工業薬品の原料として水素は使用されます。これらの化学製品は化粧品、洗剤、香料、ビタミン剤等の特殊化学品原料として使用されます。

産業ガス分野ではアルゴン精製用に水素が広く使用されています。

● **宇宙開発分野**

人工衛星打ち上げ用ロケットエンジンの燃料として、液化水素が使用されています。

<sup>24</sup>一般社団法人 日本産業・医療ガス協会ホームページ 産業ガスの使われ方  
<http://www.jimga.or.jp> (2018年3月アクセス)

### 3.4.2 水素製造・貯蔵モデルの検討

#### 3.4.2.1 水素製造規模の想定

上述した同地区における地産地消規模でのコージェネレーションによる水素需要と同地区における商用水素ステーションの年間水素需要合計を「地産地消型」の水素需要規模とし、水素製造モデルを検討する。

表 18 地産地消型水素活用モデルの水素需要合計

施設	年間水素需要
総合体育館	86,000 Nm <sup>3</sup> /y
六ヶ所村温水プール	360,000 Nm <sup>3</sup> /y
六ヶ所村医療センター	420,000 Nm <sup>3</sup> /y
村役場・第2分庁舎	220,000 Nm <sup>3</sup> /y
給食センター	230,000 Nm <sup>3</sup> /y
小学校	220,000 Nm <sup>3</sup> /y
中学校	130,000 Nm <sup>3</sup> /y
スワニー（多目的コミュニティセンター）	230,000 Nm <sup>3</sup> /y
モビリティ（公用車+バス）	1,000,000 Nm <sup>3</sup> /y
分譲住宅（青実線枠内 200 世帯）	290,000 Nm <sup>3</sup> /y
集合住宅（青破線枠内 1496 世帯）	1,900,000 Nm <sup>3</sup> /y
合計	5,086,000 Nm <sup>3</sup> /y

- トータルの水素需要規模 5,086,000 Nm<sup>3</sup>/年 ≒ 510 万 Nm<sup>3</sup>/年
- 水素製造に必要な電力 510 万 Nm<sup>3</sup>/年 × 4.5 = 22,950,000 kWh/年  
≒ 23 GWh/年

#### 3.4.2.2 運転モデル

地産地消型での水素需要に対応した水素製造に必要なとされる電力量は、約 23 GWh と試算された。これは、想定年間発電電力量（1.47～1.75 TWh/y）のうち 1.3 %から 1.6 %程度に相当し、現状のルールに基づく大規模再生可能エネルギー電源設備の無条件出力制御可能日数である 30 日相当分（想定発電電力量の 8 %）を大幅に下回ることから、未利用電力を地域で活用することができれば、十分実現可能な規模であることが分かった。

将来的に風力発電が稼働しても電力需要の少ない 0:00-6:00 間の夜間と、太陽光発電が集中する 10:00-15:00 間は、未利用電力発生可能性が高く、また卸売市場から調達したとしても価格が安くなると想定するが、これらの時間帯だけでは設備容量が大きく、設備利用率が低くなることから、最小限の設備規模となるよう考慮し、他の時間帯の電力も運転することを想定して（図 20）、水素需要を満たす水電解装置の容量を検討したところ、3.6 MW となった。

地産地消型の水素需要に対応した、水素製造を行う消費を 1 日単位でバランスさせる場合を想定して、エネルギー・物質バランスを検討した。製造-消費のバランスは図 20 のように、その場合のバッファタンク内の水素残量の変動は図 21 のようになった。

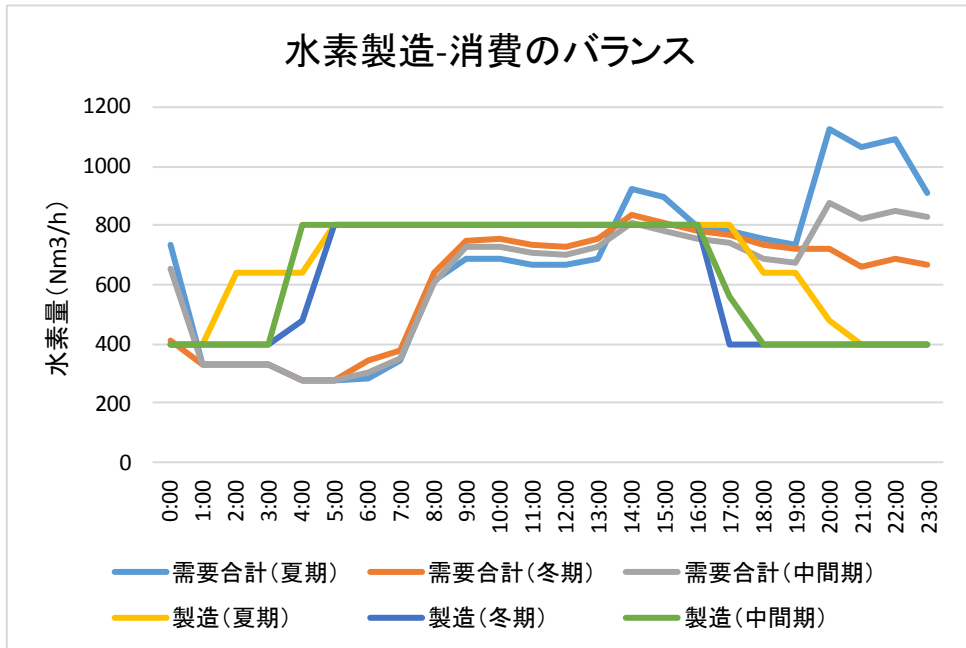


図 20 水素製造-消費のバランス (3.6 MW)

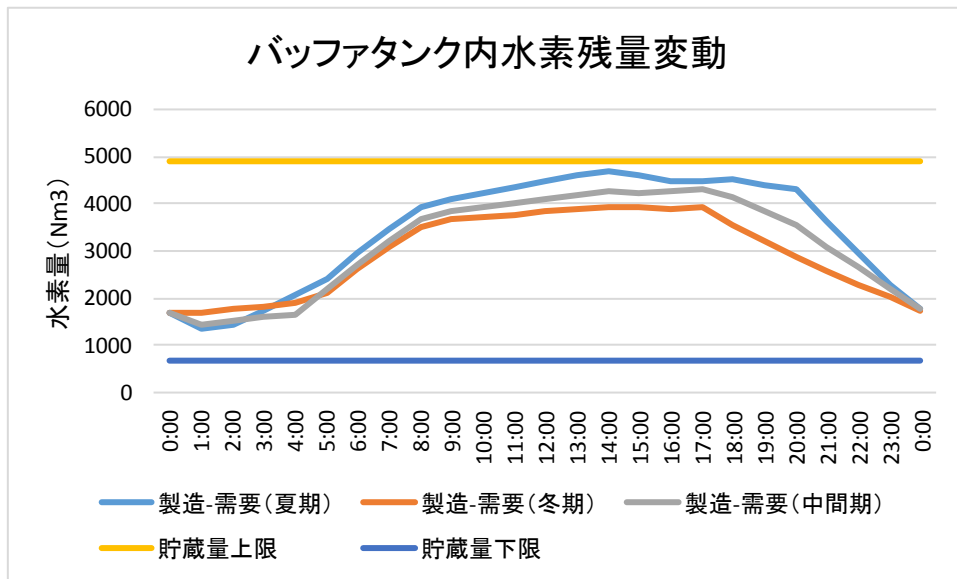


図 21 バッファタンク内水素残量変動 (3.6 MW)

### 3.4.2.3 必要とされる水素製造・貯蔵設備容量

0.1 MPaG-0.8 MPaG 間で圧力を変化させて水素を貯蔵する中圧バッファタンクの仕様を検討したところ、700 m<sup>3</sup>の容積が必要となることが分かった。100 m<sup>3</sup>のタンクを複数台運用する場合、7基必要になり、弁やタンク間の配管等構成が複雑になるため、もっと大型のタンクを用意して基数を減らす構成が適切であると考えられる。

表 19 水電解装置諸元 (3.6MW)

水電解装置設備容量	3.6 MW
水電解装置水素製造効率	4.5 kWh/Nm <sup>3</sup>
水電解装置時間水素製造量	800 Nm <sup>3</sup> /h

表 20 バッファタンク諸元 (3.6MW)

常用時貯蔵量上限	4900 Nm <sup>3</sup>
常用時貯蔵量下限	700.0 Nm <sup>3</sup>
圧力上限	0.8 MPaG
圧力下限	0.1 MPaG
タンク容積	700.0 m <sup>3</sup>
タンク 1 基	100 m <sup>3</sup>
タンク基数	7 基

### 3.4.3 水素輸送方法の検討

コミュニティ全体として水素を基幹のエネルギー源として取り扱う社会インフラとしての運用を想定すると、30年程度の運用期間が妥当と考えられる。そこで、ここでは簡便な評価のために、コミュニティ全体を500万Nm<sup>3</sup>/年の水素需要を持つ1つの需要家と仮定して、30年の運用期間において水素製造地と需要家（コミュニティ全体）の間で適切な水素輸送方法がどのようなものであるかを検討する。

#### 3.4.3.1 地産地消型での検討方法の想定

##### (1) パイプライン

パイプラインの設備単価については、熱導管について鋼管を埋設した場合のコストが約5万円/mと見積もられている（文献<sup>25</sup>）。水素導管の場合は、安全設備等を具備することを想定し、専門家ヒアリングの結果も踏まえて20万円/mとした。安全のための付臭、脱臭については実施しないと仮定した。（表21）

表 21 パイプラインコスト計算の諸元

設備名	単価	基数・数	出典
パイプライン一式 (部材・工事費含む)	200,000 円/m		専門家ヒアリング、 文献 <sup>25</sup>
	200 千円/年		
運用コスト (対設備費割合)	5 % /年	仮定	専門家ヒアリング

<sup>25</sup>総務省, 自治体主導の地域エネルギーシステム整備研究会第4回資料 資料1-1 分散型エネルギーインフラによる地域経済活性化とサービス・イノベーション, (2015年5月11日)

## (2) 高圧ガス輸送

### ① 自動車輸送コストの想定

自動車を使った輸送については、諸元を表 22 のように設定した。水素を輸送する高圧容器については、安定供給を期して正副予備の 3 個 1 セットとして、1 日の輸送車の往復回数が適切になるように設定した。施設によって年間稼働日数が異なるため、年需要を 365 日で割った 1 日平均の水素需要から 1 日の輸送車往復回数を求めた。自動車、容器以外に、供給側に水素を圧縮装荷する設備、需要家側に受入設備を設けるものとした。

表 22 自動車輸送コストの計算諸元

	項目	単価・単位	数	出典	備考
	圧縮装荷設備一式	30,000,000 円/基	1 基	<sup>26</sup>	
トレーラー輸送	牽引車	10,000,000 円/台	1 台	<sup>26</sup>	
	圧縮水素トレーラー車 (1 式 2580Nm <sup>3</sup> )	30,000,000 円/台	3 台	<sup>26</sup>	正副予備
	水素輸送量	2,580 Nm <sup>3</sup> /台・回		<sup>26</sup>	
シリンダー輸送 カー	4tトラック	10,000,000 円/台	1 台		
	圧縮水素カードル (20 本用)	500,000 円/式	3 式	<sup>26</sup>	正副予備
	高圧水素シリンダー (15Nm <sup>3</sup> /本)	100,000 円/本	60 本	<sup>26</sup>	
	水素輸送量	300 Nm <sup>3</sup> /台・回			
人件費	輸送作業 者 (トレーラー)	5,000,000 円/人・年	3 人	3 名 /1 台	高圧ガス 設備監視 員を兼務
	輸送作業 者 (シリンダー)	5,000,000 円/人・年	3 人	同上	
	圧縮装荷設備常駐員	5,000,000 円/人・年	0 人		24 時間常 駐 3 交代
需用費	圧縮装荷設備運用コスト (対設備費割合)	5% /年			
	4tトラック燃費	2 km/ℓ			
	軽油代	110 円/ℓ			
	水素トレーラー車燃費	0.5 km/ℓ			
	需要家追加投資	1,000,000 円/需要家		仮定	

水素容器の個数は、1 日のトラック往復頻度=1 日に何容器分水素を消費するか×3 (正副予備の 1 セット分) とした。表の容器数は最低個数の場合を示す。水素の装荷と、需要家

<sup>26</sup> 株式会社ガスレビュー。工業ガス供給機器図鑑, 2009.



側での受入設備以外の自動車、高圧水素容器等の耐用年数は15年として、30年間で1度自動車、高圧水素容器類を全交換とした。

## ② 輸送頻度試算

自動車による輸送設備は一式で表23のようになるが、1台で2,580 N m<sup>3</sup>の水素を輸送できる圧縮水素トレーラーであっても1日に5往復以上する必要があり、シリンダーカードルを2tトラックで輸送する場合には4台で1日46回近く往復する必要がある。この規模になってくると自動車による水素輸送は現実的でなくなってくるものと考えられる。

表23 5,000,000 N m<sup>3</sup>需要家への水素自動車輸送の諸元

水素トレーラー輸送			
項目	単価・単位	数	単位
牽引車	10,000,000 円/台	2	台
圧縮水素トレーラー車 (1式 2580 Nm <sup>3</sup> )	30,000,000 円/台	18	台
トラック往復頻度	5.31 回/日		
年間往復回数	1938 往復/年		
シリンダートラック輸送			
項目	単価・単位	数	単位
4tトラック	10,000,000 円/台	4	台
圧縮水素カードル (20本用)	500,000 円/式	114	式
高圧水素シリンダー (15 Nm <sup>3</sup> /本)	100,000 円/本	2,280	本
トラック往復頻度	45.66 回/日		
年間往復回数	16,667 往復/年		

### 3.4.3.2 パイプラインと高圧ガス輸送の比較

30年運用時のトータルコストの比較を図22に示す。運用コスト面で見ても、コミュニティ全体に30年間水素を輸送する場合には、図23にあるようにパイプラインを敷設した場合の総延長は3km程度となるため、パイプラインがリーズナブルであり、適切な輸送方法であることが分かる。

パイプラインの3km範囲内を超える体育館については、適切な輸送方法の選定を行う必要がある(図24)。なお、実際にパイプラインを敷設した場合には個別の建物への配管を敷設することにより距離は伸びる可能性があり、また、隣接する施設の近傍までは共通の配管を敷設することにより費用を抑えられる可能性もある。

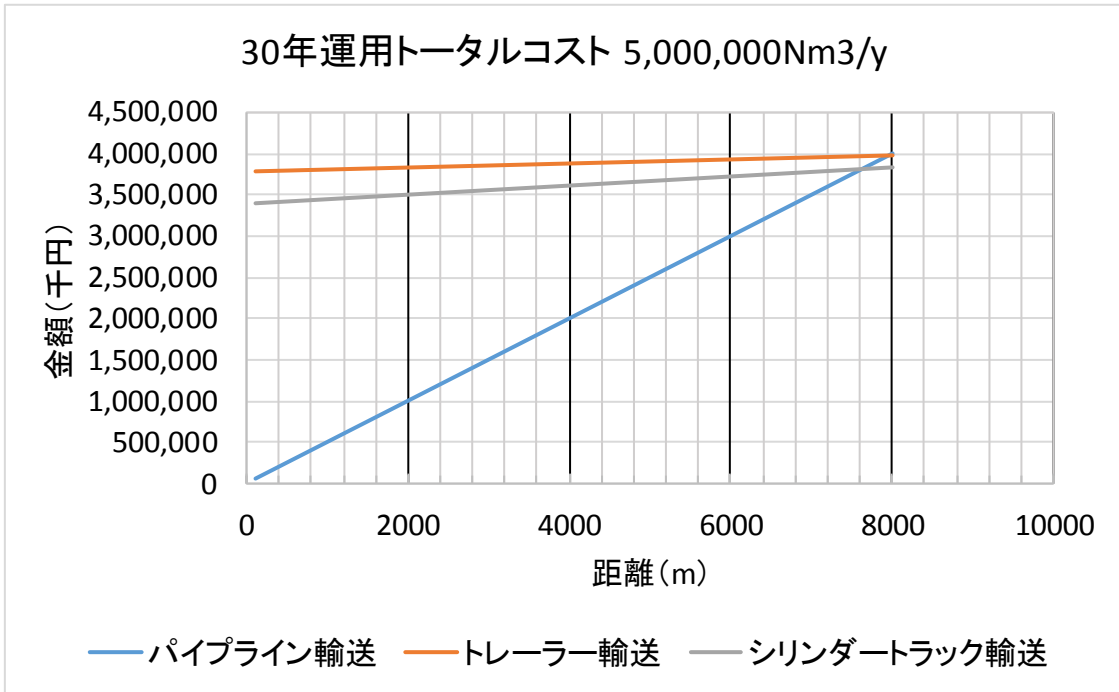
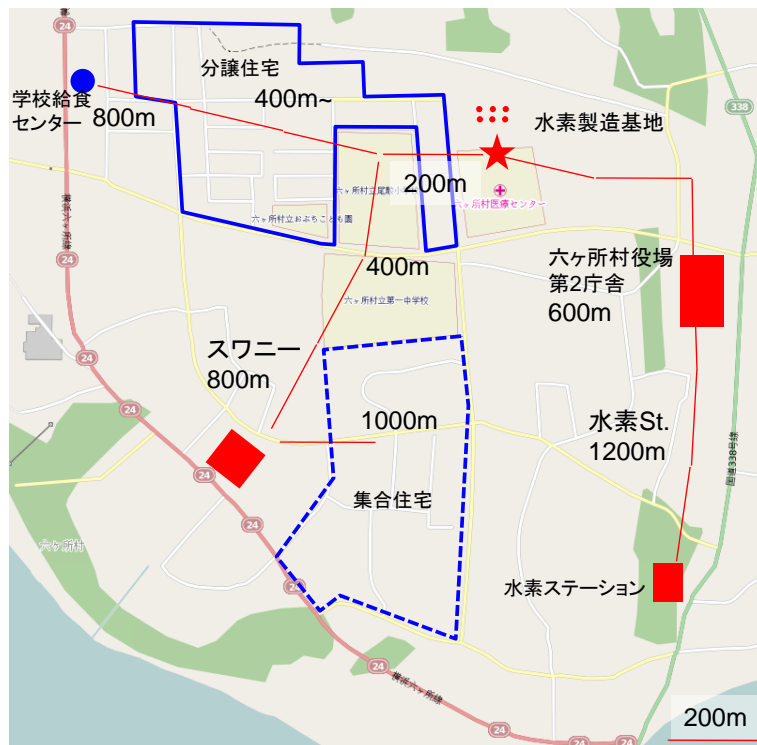


図 22 30年運用トータルコスト比較



図の様なパイプライン敷設での総延長約3.0km  
戸建住宅への戸別配管を除く

図 23 モデル地区 中心地区内の施設配置 (地図出典: Open Street Map)



図 24 検討モデルの六ヶ所村尾駈地区の施設配置（全景）（地図出典：Open Street Map）

### 3.4.3.3 地産地消型の規模を超える場合

#### (1) 設備規模

3.3.4で試算したとおり、未利用電力を利用した水素製造可能量は理論的には、2,600万～3,100万 Nm<sup>3</sup>/年となり、地産地消型の約5～6倍の規模となるが、この規模を製造する水素製造装置の設備規模は、需要に応じて増設することになる。

#### (2) 輸送方法の検討

地産地消型の規模を超えることになるため、域外に輸送する必要があるが、大量に水素製造した場合の輸送方法の検討として、一般社団法人日本産業・医療ガス協会に現状をヒアリング調査したところによると、「NEDOのロードマップ2010」において、途中に中継基地等を設けないシングルフローで片道50km輸送した場合のコストとして、2010年での技術実証値が追加され、圧縮水素で20円/Nm<sup>3</sup>、液体水素で6円/Nm<sup>3</sup>（液化コストを除く）とされている（表24）。しかし、2017年時点でこの2015年目標にも到達しておらず、大型輸送において圧縮水素の約20円/Nm<sup>3</sup>に達しているものがあるという状態である。また、液体水素については、マイナス253度という低温で輸送する必要があり、また安全性への配慮も必要なため、他の液化ガスよりもコストは高くなる。」とのことである。

よって、輸送コストのさらなる低減と事業性の検証が必要となる。

表 24 水素輸送コスト目標値 (出典<sup>27</sup>)

	現状 (技術実証)	2015 年 (普及開始)	2020 年 (普及初期)
圧縮水素	約 20 円/Nm <sup>3</sup>	約 15 円/Nm <sup>3</sup>	約 10 円/Nm <sup>3</sup>
液体水素 (液化コスト除く)	約 6 円/Nm <sup>3</sup>	約 3~6 円/Nm <sup>3</sup>	約 3 円/Nm <sup>3</sup>

### 3.4.4 コスト試算例

あくまで仮の想定条件を設定しての試算ではあるが、全体のイメージをつかむため、地産地消型を例として、コスト試算を行う。

#### 3.4.4.1 計算条件の設定

##### ① 設備単価

投資額および水素コストの試算にあたり、システムを構成する各設備の単価設定を表 25 に示す。

表 25 システム構成設備単価設定 (2030 年想定)

設備名	単価	出典
事業用燃料電池 (100 kW)	1 億円/台	メーカーへのヒアリングに基づき推定
家庭用燃料電池 (0.7 kW)	50 万円/台	<sup>28</sup>
水素ステーション	2.55 億円/基	<sup>18</sup>
中圧バッファタンク (100 m <sup>3</sup> )	10 万円/m <sup>3</sup>	<sup>29</sup>
水電解装置	40 万円/(Nm <sup>3</sup> /h)	<sup>27</sup>

この設備費は工事費を含むとする。各需要家への水素の配送方法は、表 22 の設定に基づき、総合体育館以外にはパイプラインで行う。水素ステーションは 3.4.1.2(4) に記載した商用水素ステーションが稼働しているとする。総合体育館へは、表 22 のような輸送コストの比較計算を行った結果、輸送の頻度も 2 日に 1 回程度と非現実的ではなく、機器が安価であることが分かったため、高圧水素シリンダーをトラック輸送するとし、その諸元は表 22 の値を採用する。

システムの運用期間は 30 年とする。パイプライン以外の設備は 15 年で 1 回交換する。

##### ② 運用コスト単価

固定設備の年間運用コストは設備費の 5 % と仮定する。シリンダーカードル輸送の運用

<sup>27</sup> NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010

<sup>28</sup> 水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ (第 2 回) 配布資料 (2014 年 2 月 3 日)

<sup>29</sup> 株式会社ガスレビュー。工業ガス供給機器図鑑, 2009.

コストは上記 86,000 Nm<sup>3</sup>/年規模需要家への輸送コスト計算で算出した値を使用する。このようにして計算した製造・貯蔵・輸送設備の年間運用コストを年間水素製造量で割った値を 1 Nm<sup>3</sup>あたりの運転維持費とする。

電力価格についてはパラメータとして設定するとし、電力システムを利用する場合の託送料金も含めて年間の平均電力単価を 5 円/kWh とし、これと水電解効率の積を 1 Nm<sup>3</sup>あたりの電力費とする。水素の原料、冷却水となる上水の価格を 150 円/トンとし、これとメーカーに対するヒアリングに基づいて推定した 1 Nm<sup>3</sup>あたりの水消費量 0.2 t/Nm<sup>3</sup>-H<sub>2</sub> から 1 Nm<sup>3</sup>あたりのプラント運用に必要なユーティリティ費を計算する。

### 3.4.4.2 地産地消型水素活用モデルコスト試算

#### ① 地産地消型設備投資額

3.4.2.2 で検討した地産地消型に必要な製造・輸送・貯蔵設備を全て導入したと仮定すると、必要な投資額は表 26 のように合計約 14 億円になる。

表 26 水素製造・貯蔵・輸送に必要な投資額（地産地消型 3.6 MW）

項目	単価	単位	導入回数 (回)	
パイプライン	200,000 円/m	3,000 m	1	600,000,000 円
水素シリンダーカードルトラック一式	16,500,000 円/式	1 式	2	33,000,000 円
高圧装荷設備	30,000,000 円/式	1 式	2	60,000,000 円
総合体育館受入設備	1,000,000 円/式	1 式	2	2,000,000 円
中圧バッファタンク	100,000 円/m <sup>3</sup>	700 m <sup>3</sup>	1	70,000,000 円
水素製造装置 (PEM 型)	400,000 円/(Nm <sup>3</sup> /h)	800 Nm <sup>3</sup> /h	2	640,000,000 円
合計				1,405,000,000 円

#### ② 水素製造コスト

製造設備投資額を 30 年間の水素製造総量で単純に除した減価償却費は 9 円/Nm<sup>3</sup>となる。金利 3%/年、固定資産税 1.4%と事業税 1.3%で税率を設定し、元利均等返済の想定で 30 年間の平均で金利・税金を算出すると表 27 のようになる。水素製造コストのうち固定費は合計で約 22 円/Nm<sup>3</sup> となり、30 年間で投資回収することができ、大きな初期投資負担を軽減すれば、投資回収期間を短縮することができ、金利負担も軽減できる。

水素製造コストは、託送料も含めて電力を平均 5 円で調達できると想定して、運転維持費、電力費、ユーティリティ費（水道代）等の試算をすると約 40 円/Nm<sup>3</sup>となり、水素製造コスト単独での年間ランニングコストは、約 500 万 Nm<sup>3</sup>製造すると、約 2 億円となる。

固定費のうちの金利・税金を除いた 49 円/Nm<sup>3</sup>では、日本政府の水素基本戦略による、水素ステーションが単年度黒字になる水素の卸売価格の約 50 円の水準を下回る。

表 27 高圧ガス併用パターンの水素製造コスト（30年間の平均）

	費目	コスト（円/Nm <sup>3</sup> ）
固定費	設備原価償却費	9
	金利・税金	13
	小計	22
水素製造コスト	運転維持費	14
	電力費	23
	ユーティリティ費	3
	小計	40
	合計	62

### ③ 収支試算

上記水素製造コストと 2030 年頃の電力及び灯油の販売価格を比較する。

#### <想定電力及び灯油価格>

2018 年現在の電力価格は 26 円/kWh とする。これは東北電力従量電灯 B<sup>30</sup>契約の家庭が月間 120 kWh 使用したときの 1 kWh あたりの電力価格（（基本料金+従量料金）÷ 120 kWh）に相当する。また、2018 年の青森県の灯油価格を 1,522 円/18ℓ<sup>31</sup>とする。

2030 年頃の化石燃料価格は、気候変動対策の推進のための諸施策の導入、化石燃料価格の上昇等の複合的な効果として 2010 年代後半（文献中では 2016 年）の 1.86 倍となるという IEA による予想がある（出典:<sup>32</sup>）ことから、2030 年頃の電力価格、灯油価格を以下のとおり想定する。化石燃料価格の上昇による電力価格への感度は、電源構成等により大きく異なってくると考えられるが、ここでは上限値として 2018 年現在の 1.86 倍になったと仮定する。

- ・ 2030 年の灯油価格： 1,522～2,800 円/18ℓ
- ・ 2030 年の電力価格： 26～48 円/kWh

灯油の熱利用効率を 95 % とし、灯油価格を 1 MJ あたりに直すと、灯油の LHV が 35 MJ/ℓ であるため、 $1,522 \text{ 円}/18\ell \div 35 \text{ MJ}/\ell \div 0.95 = 2.5 \text{ 円}/\text{MJ}$  ～  $2,800 \text{ 円}/18\ell \div 35 \text{ MJ}/\ell \div 0.95 = 4.7 \text{ 円}/\text{MJ}$  となる。

#### <燃料電池による相当額>

燃料電池で水素を熱電供給に供する場合、発電効率 50 %、熱利用効率 46 % であるため、1 Nm<sup>3</sup>の水素は、 $3.0 \text{ (kWh)} \times 0.5 = 1.5 \text{ kWh}$  の電力と  $10.8 \text{ (MJ)} \times 0.46 = 5 \text{ MJ}$  の熱と同等である。

よって、電力+灯油と同等の水素価格は次のとおりとなる。

#### 【現状の電力・灯油価格に基づいた場合】

<sup>30</sup> [https://www.tohoku-epco.co.jp/dprivate/menu/menu\\_lightb.html](https://www.tohoku-epco.co.jp/dprivate/menu/menu_lightb.html)（2018 年 3 月アクセス）

<sup>31</sup> [https://oil-stat.com/kerosene\\_shop/青森県.html?sx=2017-02-27&ex=2018-02-26](https://oil-stat.com/kerosene_shop/青森県.html?sx=2017-02-27&ex=2018-02-26)（2018 年 3 月アクセス）

<sup>32</sup> IEA World Energy Outlook 2016

$$26 \text{ 円/kWh} \times 1.5 \text{ kWh/Nm}^3 + 2.5 \text{ 円/MJ} \times 5 \text{ MJ/Nm}^3 = 52 \text{ 円/Nm}^3$$

**【IEA 予測による価格上昇が起きた場合】**

$$48 \text{ 円/kWh} \times 1.5 \text{ kWh/Nm}^3 + 4.7 \text{ 円/MJ} \times 5 \text{ MJ/Nm}^3 = 96 \text{ 円/Nm}^3$$

したがって、試算した地域の再生可能エネルギーを利用しての水素製造コスト 62 円/Nm<sup>3</sup> は、現状の電力・灯油価格に基づいた場合と IEA 予測による価格上昇が起きた場合の 52～96 円/Nm<sup>3</sup> の範囲内に収まるものとなり、かつ化石燃料のように外部環境の変化の影響を受けにくいエネルギーが得られることとなる。

需要家側の設備コスト（表 28）も必要となるが、固定費のうちの金利・税金を除いた 49 円/Nm<sup>3</sup> では、日本政府の水素基本戦略による、水素ステーションが単年度黒字になる水素の卸売価格の約 50 円の水準を下回ることから、さらなるコストダウンとともに大きな設備投資への負担軽減策を講じることで、実現する可能性は十分あると考えられる。

表 28 需要側に必要な設備投資額

需要家	単価（円/基）	基数	導入回数（回）	合計
総合体育館	100,000,000	1	2	200,000,000 円
六ヶ所村温水プール	100,000,000	1	2	200,000,000 円
六ヶ所村医療センター	100,000,000	1	2	200,000,000 円
村役場・第2分庁舎	100,000,000	1	2	200,000,000 円
給食センター	100,000,000	1	2	200,000,000 円
小学校	100,000,000	1	2	200,000,000 円
中学校	100,000,000	1	2	200,000,000 円
スワニー（多目的コミュニティセンター）	100,000,000	1	2	200,000,000 円
水素ステーション	255,000,000	1	2	510,000,000 円
分譲住宅 （200 世帯）	500,000	200	2	200,000,000 円
集合住宅 （1496 世帯）	500,000	1,496	2	1,496,000,000 円
合計				3,806,000,000 円

**【テーマ2 水素活用法まとめ】**

- **社会インフラとしてパイプライン等を整備することで、低コストサプライチェーン構築が可能**
- **安価な電力調達等が実現すれば、将来的には地産の CO<sub>2</sub>フリー水素で、電力・灯油に匹敵するエネルギー供給が可能**

### 3.4.5 副生酸素の活用による関連産業創出

#### 3.4.5.1 水素製造に伴う新たな副生酸素の発生量

副生酸素とは、水電解により水素を製造する際に、水素と同時に副生物として発生する酸素である。

3.4.2.2 (1)で試算された「地産地消型」での水素需要量は約 510 万 Nm<sup>3</sup>/年であり、この数値を基に導き出される副生酸素発生量は、約 255 万 Nm<sup>3</sup>/年となる。

県内の大手充填所へのヒアリング結果によれば、現状における県内の酸素需要規模は、約 3,350 万 Nm<sup>3</sup>/年であり、「地産地消型」で発生する酸素量は県内の酸素需要規模の約 7% にあたる。

再生可能エネルギーを地産地消する場合、再生エネルギーを市場性のある化学物質（水素、酸素、オゾン、アンモニア、CO<sub>2</sub>、エタノールなど）に変換して利用するというコンセプトが重要となる。特に酸素は水の電気分解により水素を製造される過程で副生されるが、水の電気分解によって発生する副生酸素は、これまでほとんど利用されていないのが現状である。

酸素の販売価格は、全国平均では 7 円～8 円/Nm<sup>3</sup>であるが、地域需要や利用特性により 20 円/Nm<sup>3</sup> 前後やボンベ販売だと 200 円/Nm<sup>3</sup> 前後の場合もあり、用途によって高い付加価値を有する場合があることから、地産地消型水素活性モデルを考えるうえで、この副生酸素を有効に活用し、地域において市場性のある化学物質とすることが重要となる。

#### 3.4.5.2 副生酸素の特性

酸素はその特性からいろいろな用途に活用されているが、酸素（O<sub>2</sub>）としてだけでなく、酸素を原料にしてオゾン(O<sub>3</sub>)を生成して活用することも可能である。

##### (1) 酸素の特性

酸素は、無色・無味・無臭のガスで、空気中に約 21 %含まれ、1 気圧下で-183 °Cで液体になる。

酸素は、他のものを酸化する力(酸化性・支燃性)が強い。酸化反応は燃焼ともいわれ、燃焼関連の用途に広く利用されているほか、不純物除去、各種切断、医療用、環境浄化などの分野でも使用されている。また、多くの生物の生命維持に不可欠なエネルギーを供給する役割を果たしており、灌水や飼育水の溶存酸素量を高めることによる農作物等の成長促進等の研究報告事例も多々あり、農林水産分野での用途も期待されている。

なお、水電解により副生される酸素ガスは、そのままの状態では水分を多く含んでいることから、通常、市場に流通している酸素ガスと同等のものにしようとする場合、水分を除去し乾燥させることが必要となる。この問題を解決する方法として提案されているのが、副生された酸素ガスを水中にバブリングさせ溶かし込んだ酸素水である。酸素水の形で利用することができれば、乾燥工程が不要となるメリットがある。



## (2) オゾンの特性

オゾンは酸素原子 3 個からなる微青色のガスであり、時間の経過に伴い自然と無害な酸素に分解される。

オゾンの生成方法はいくつかあるが、酸素を含むガス体中に放電を行い生成する放電法の生産コストが最も安価であり、オゾンガス発生器のほとんどがこの方式でオゾンを生成している。

オゾンは優れた殺菌・消毒力、分解浄化能力、脱臭力、脱色力を持っており、幅広い分野での利用が期待されている。

オゾンの利用は、今後広がっていくと考えられるが、オゾンガスは微量でも人体に悪影響を及ぼすなど、非常に毒性が高い物質であると言われており、安全な利用が求められる。

この問題を解決する方法として提案されているのが、オゾンガスを水中にバブリングさせ微細な泡状態で水に溶かし込んだオゾン水である。オゾン水は、その性質上、数十分で水と酸素に戻るため、残留性のない殺菌水として使用でき、塩素系殺菌剤やエタノール系殺菌剤を使えないところにも使用できるという優れた特性があることから、近年注目されている。

### 3.4.5.3 青森県内における副生酸素の活用可能性

県内の大手充填所へのヒアリング結果によれば、現状における県内の酸素ガス需要は飽和状態にあることから、水素製造に伴い新たに副生される酸素ガスについてはこれまで県内であまり使用されていなかった分野での需要を創出することが重要である。また、その特性や生成の状況から酸素水やオゾン水の形で副生酸素を利用する方法が最も利用しやすいものと考えられる。

これらの条件を前提に、水素製造に伴い新たにかつ大量に副生される酸素を県内で地産地消するに当たって青森県の産業特性とのマッチングを考えると、酸素の成長促進等の効果やオゾンの残留性のない殺菌等の効果に注目し、農林水産業での酸素水やオゾン水の形で利用が最も有望と考えられる。

本県は農林水産業の分野で高い生産量を誇るが、これまで酸素及びオゾンはほとんど利用されていない。このため、副生酸素の利用を農林水産業分野での生産性向上や安全性確保による高付加価値化に結びつけることができれば、新規かつ大量の副生酸素の受け皿となり得る分野と考えられる。

### 3.4.5.4 ファインバブル技術の導入

酸素やオゾンガスを高濃度で水中に保持する方法にファインバブル化がある。ファインバブルとは、球相当直径が 100 マイクロメートル以下のバブルのことで、洗浄効果、触媒効果、殺菌・消毒効果、脱臭効果、微粒子吸着効果、生体活性化効果、摩擦力低減効果な

どがある」とされている。

普段目にする数ミリメートル以上のバブルは水中で急速に浮上し水面で破裂するが、ファインバブルは水中での上昇速度が非常に遅く、バブル内の気体が完全に溶解すると水中で消滅する。さらに、球相当直径が1マイクロメートル以下になると浮力の影響を受けずに水中に長期残存するため、ファインバブル酸素水・ファインバブルオゾン水とすれば、高濃度の酸素やオゾンバブルの長期残存が可能になる。

ファインバブルならではの物理特性を有することで、酸素の成長促進等の効果やオゾンの残留性のない殺菌等の効果がさらに向上し、副生酸素の利用用途が広がることで、青森県の農林水産業に利用できる技術として事業化が期待できる。

ファインバブル Fine-Bubble			
	ウルトラファインバブル Ultrafine-Bubble (UFB)	マイクロバブル Micro-Bubble (MB)	ミリバブル/サブミリバブル Milli-/Submilli-Bubble
泡の直径 同サイズの 比較対象物	数10nm～1μm ■ウイルス（数10～100nm） ■タバコの煙（数10～500nm）	1μm～100μm ■スギ花粉（約30μm） ■黄砂（500nm～5μm）	100μm～ ■通常の泡（数mm～） ■髪の毛の直径（約80～100μm）
目視	不可能（無色透明）	可能（白濁）	可能
動態	水に長期間残存（液中安定性） 数週間～数か月の寿命がある 浮力よりも粘性力が大きい ブラウン運動（微細振動）	非常にゆっくりと上昇 直径10μmの気泡で約3mm/分 （ミリバブルの1/2000程度） 水中で消滅	上昇速度が速い 直径1mmの気泡で約5～6m/分 水面で破裂

図 25 ウルトラファインバブルとミリバブルの主な性状

（出典：ファインバブル産業会の図を基に作成）

## (1) ファインバブル酸素水の活用

酸素のファインバブル水は、生理活性や溶存酸素の改善等により、農作物等の生物の成長を促進する。副生酸素からファインバブル酸素水を製造し、県内農林水産業で活用することで生産性の向上が期待され、具体的には以下のような活用方法が考えられる。

### ① 種子の発芽促進

発芽の3要素として、「水」、「酸素」、「温度」が必要であることは一般に知られている。特に酸素は、発芽時の代謝に必要でかなり大量に消費するといわれる。

発芽前の種子を「溶存酸素濃度」を高めた水に浸して発芽状況を観察した結果、溶存酸素濃度が高い水（30 mg/l）に浸したホウレンソウの種子の発芽は、無処理の対象（溶存酸素濃度7 mg/l）が50%発芽に14日かかったのと比較して、1.6日で発芽し、無処理の最終発芽率が50%であったのに対し、高濃度の酸素水に浸した種子は99%であったとの研究報告事例<sup>33</sup>がある。

<sup>33</sup><http://www.pref.nara.jp/secure/73720/74-2347.pdf>（2018年3月アクセス）

## ② 切り花の延命

根を切り離された切り花は根からの呼吸ができないので、生け水に含まれる溶存酸素が重要と考えら、生け水の溶存酸素濃度の違いによる延命効果の比較を行うため、呼吸量の多い品種であるトルコギキョウを使用し、溶存酸素濃度が 8.1 mg/l の通常水と 9.7 mg/l の高濃度酸素水の 2 つの場合で状態観察と質量の測定により劣化度合を比較した結果、試験開始時と 7 日後の状態を比較したところ、通常水を使ったものは変色やしおれが顕著に進行したが、高濃度酸素水を使ったものは変色やしおれは目立たず、さらに質量を比べると、通常水を使った場合は 5 日後から減り始めているが、高濃度酸素水を使った場合は 9 日後から減少し始め、高濃度酸素水を生け水に使用した場合の延命効果が確認できたとの研究報告事例<sup>34</sup>がある。

## ③ 水耕栽培における成長促進・維持

水耕栽培による植物工場は、国内では 1980 年代から注目され始め、近年は特に新しい野菜生産システムとして注目されている。

水耕栽培にマイクロバブルを導入することで溶存酸素量が増加し、葉菜類および果菜類において、根の健全な成長と葉部成長に効果があることを確認できたとの研究報告事例がある<sup>35</sup>。

また、人工光型植物工場実験室での土を使用しない養液栽培で、リーフ系レタス 4 種を用いて、通常の養液を用いた区分（コントロール区）と、養液中にウルトラファインバブルを発生させた区分（UFB 区）を設定し、養液以外の環境条件（光強度、光質、温度、湿度）は同一として比較したところ、UFB 区の養液タンクの溶存酸素値は飽和値より高い過飽和状態であったことが観察され、UFB 区とコントロール区の 4 種のレタスについて収穫時の地上生体重、収穫時の乾燥重を比較すると、どちらの場合も、UFB 区で育てた場合の重量が重く、乾燥時の体重も増加し、収穫時の葉の枚数の比較でも、UFB 区のリーフ系レタスの葉の枚数が多くウルトラファインバブルによる成長促進効果が見られたとの研究報告事例<sup>36</sup>がある。

なお、その他にも水耕栽培で高濃度酸素水を与えることにより植物の地上部の成長が大きくなり、枯死枝率が低くなる等の維持効果がることがわかったとの研究報告事例<sup>37</sup>がある。

---

<sup>34</sup> [https://www.panasonic.com/jp/corporate/technology-design/ptj/pdf/592\\_03.pdf](https://www.panasonic.com/jp/corporate/technology-design/ptj/pdf/592_03.pdf) (2018 年 3 月アクセス)

<sup>35</sup> [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsem/13/4/13\\_366/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsem/13/4/13_366/_pdf) (2018 年 3 月アクセス)

<sup>36</sup> 清水浩（京都大学大学院農学研究科）植物工場におけるウルトラファインバブル技術活用、JATAFF ジャーナル、4（6）、2016.6

<sup>37</sup> [https://www.panasonic.com/jp/corporate/technology-design/ptj/pdf/592\\_03.pdf](https://www.panasonic.com/jp/corporate/technology-design/ptj/pdf/592_03.pdf) (2018 年 3 月アクセス)

#### ④ 植物の成長促進

農水省「農業界と経済界の連携による先端モデル農業確立実証事業」（テーマ名：高溶存酸素ファインバブル水を用いたトマトの活性コントロールによる養液土耕栽培手法の確立）<sup>38</sup>にて、トマト栽培農業法人がファインバブル水を灌水する養液土耕栽培で実験中である。

トマト栽培の灌水に高溶存酸素ファインバブル水を常時一定供給して、根部分の活性による樹勢向上効果が得られているが、気候変動に伴い樹勢が低下する事が課題となっている。

#### ⑤ 養殖場での養殖魚の成長促進

飼育用の海水を酸素ウルトラファインバブルを含む高濃度酸素水とすることで、トラフグ、オコゼ、ウマヅラハギで成長促進効果が観察でき、ウマヅラハギでは通常の海水で育てた場合の1.5倍に成長し、トラフグでは、出荷できる大きさになるのに通常の約半分の14か月で達するとともに、ウルトラファインバブルの効果により飼育水が滅菌され、飼育槽等に汚れが付きにくくなるとの報告事例<sup>39</sup>がある。

### (2) ファインバブルオゾン水の活用

副生酸素から殺菌効果が高く残留する心配のないファインバブルオゾン水を製造し、県内農林水産業等で殺菌・洗浄等に活用することで、殺菌剤の残留等の課題が解決されることが期待される。具体的に以下のような活用方法が考えられる。

#### ① 野菜出荷時の殺菌処理

オゾンは高い殺菌力を有するとともに、作用後は速やかに酸素へと分解し、野菜に残留しないことから、カット野菜の殺菌処理に適した殺菌剤といえる。さらにオゾンは殺菌にとどまらず、脱臭や汚れの除去といった効果も持っている。

野菜洗浄機に気液混合装置を組み込んでさらに洗浄液に特定の界面活性剤を添加することで洗浄液中に曝気したオゾンをファインバブル化し、低濃度のオゾンで有効な殺菌効果がえられるシステムを用いて、千切りキャベツの一般生菌数をカウントすることで除菌効果を評価した結果、水処理と比較して次亜塩素酸処理とオゾン処理ではいずれも2桁を上回る生菌数の減少が認められ、殺菌のレベルは2者ともほぼ同等であったが、3日目を比較するとオゾン処理のみ生菌数が減少するという状況となり、臭気や辛味など7種類の指標に基づいて専門パネラーによる官能試験によって評価した結果では、次亜塩素酸は塩素系

<sup>38</sup> <http://www.maff.go.jp/tokai/noson/kankyo/eino/newfarming/pdf/vol26.pdf> (2018年3月アクセス)

<sup>39</sup> <http://www.nano-x.co.jp/high-oxygen> (2018年3月アクセス)

の殺菌剤の独特の臭気や酸化力に起因すると推定される薬品臭や辛味が非常に高い値を示した一方で、オゾン処理と水洗いはいずれの項目も近い値となり、オゾン処理を経た千切りキャベツが水洗いに極めて近い食味を示すことが分かったとの研究報告事例<sup>40</sup>がある。

## ② 魚介類出荷時の殺菌処理

ノロウイルスと同じカリシウイルス科に属するネコカリシウイルス（培養法が確立されていないノロウイルスの代替として使用される。）を使用した牡蠣体内におけるノロウイルスの不活性化の検討では、処理前の牡蠣は、中腸線にウイルスがたまりやすいが、オゾンのファインバブルによる処理を行うと、牡蠣体内の有機物が分解され牡蠣は白くきれいになり、不活性化率は99%以上となったとの研究報告事例<sup>41</sup>がある。

## ③ 家畜環境の衛生管理

畜舎内でオゾン水をシャワー散水等することにより、舎内の除菌洗浄及び脱臭と飼育動物の洗浄・除菌による皮膚病や伝染病の予防が期待される。

なお、養豚施設においてオゾンガスを用いた畜舎内の脱臭が行われている事例<sup>42</sup>もある。

## ④ 植物工場での衛生管理・殺菌処理

オゾンマイクロバブルを用いた水耕培養液の殺菌に関して、植物病原菌のフザリウム菌と軟腐病菌を、植物にはレタスを用いた研究で、オゾンマイクロバブルを1回も発生させない対象と週1回、週2回、週3回とそれぞれ発生させたものを比較したところ、オゾンマイクロバブルを発生させない対象区では発病率62.5%であったが、週1回のもので12.5%、2回、3回のは0%となった。しかし、オゾンマイクロバブルの発生件数が植物の生育には影響を与えなかったことから、週に2~3回オゾンマイクロバブル処理することで、植物の生育に影響を及ぼさずに培養液の殺菌が可能であると推察されるとの研究報告事例<sup>43</sup>がある。

### 3.4.5.5 青森県内の農林水産業分野への副生酸素の活用

前述のとおり、副生酸素の青森県内の農林水産業分野への活用可能性が認められる。

今後、生産性向上や安全性確保等といった効果について青森県内の農林水産業の現場で

<sup>40</sup>久保園隆康（ライオンハイジーン）、オゾンのファインバブル（マイクロバブル）を用いたカット野菜洗浄システムの開発、FOOMA 技術ジャーナル、12（1）、35~39、2017.5

<sup>41</sup> [https://www.jstage.jst.go.jp/article/swsj1965/59/1/59\\_17/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/swsj1965/59/1/59_17/_pdf)（2018年3月アクセス）

<sup>42</sup> FLAG（ガスが彩る食と農）、ガスレビュー社、Vol.1、Apr.2017、p12~13

<sup>43</sup> <https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-24580484/24580484seika.pdf>（2018年3月アクセス）

実証を重ね、ビジネス展開に耐え得る成果につなげることが必要である。

**【テーマ2 副生酸素活用法まとめ】**

- 副生酸素やオゾンは、一次産業等への活用可能性あり
- ファインバブル技術導入で高濃度の酸素やオゾンバブルの長期残存可能性あり

## 4. まとめ：モデルプランの実現に向けて

### 4.1 六ヶ所村における CO<sub>2</sub>フリー水素活用モデル

#### 4.1.1 内容

再生可能エネルギー集積地である本地域では、今後さらなる再エネ大量導入により発生する大量の未利用電力の発生が予想される。

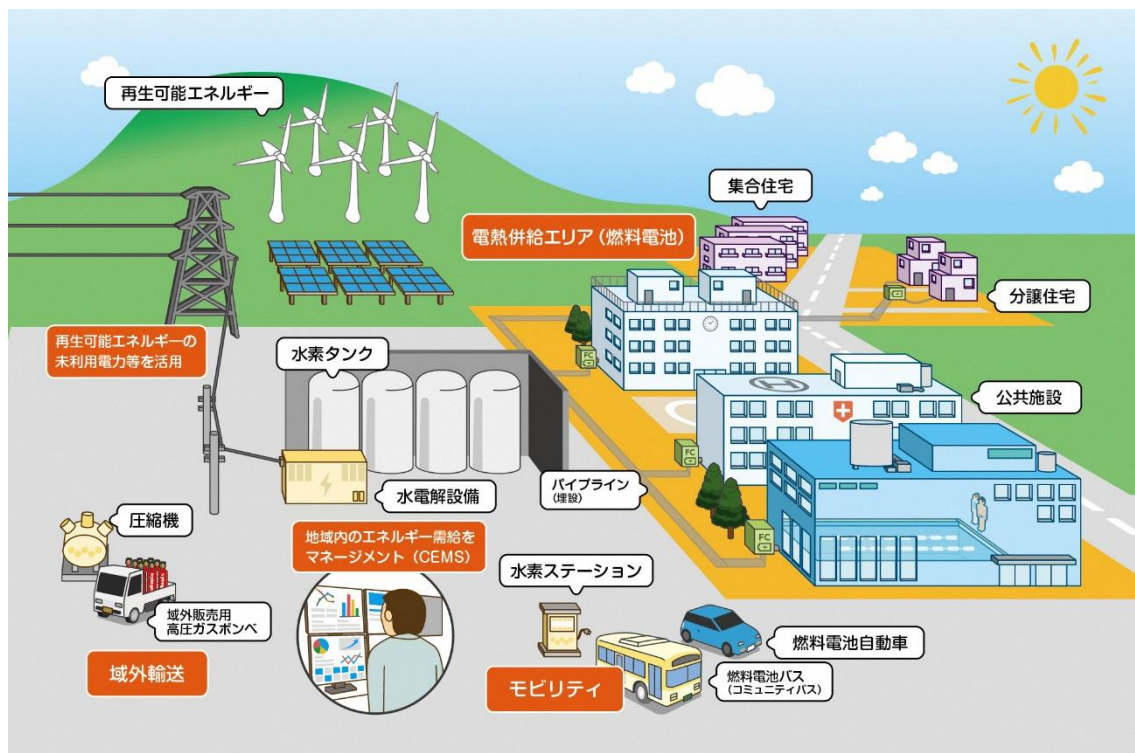
この地域資源を既存システムを利用して効率的に集約し、FIT 切れ電力等も活用して稼働率を高めた高効率な CO<sub>2</sub>フリー水素製造を行う。

社会インフラとしてのパイプライン等を整備し、寒冷地における大きな熱需要にも対応した、地産地消による低コストサプライチェーンを構築する。

地域の再生可能エネルギーで発電された電力の一部を地域で活用して地産地消を行い、余剰分は域外へ移出し、外貨を獲得する。

CO<sub>2</sub>フリー水素製造に先行的に取り組むことで、これまで地域外へ流出していた地域資本の域内経済循環が実現するだけでなく、先進モデルとしての関連産業振興、BCP 対策を推進する。

#### 4.1.2 イメージ



### 4.2 モデル導入効果

ここでは、本モデル導入効果について、イメージをつかむため、以下の導入効果指標について想定をおいて試算してみる。

#### 4.2.1 地産電力供給による域内経済循環効果

地域の需要家が、従来域外に支払ってきた電力料金を、地域内で製造した CO<sub>2</sub>フリー水素による燃料電池由来電力に変えることで地域内経済循環が図られた指標とする。

各需要家における地産電力量は六ヶ所村全体では約 **610 万 kWh/年** となり（表 29）、これは、**一般家庭約 1300 世帯分**の年間消費電力に相当する。

表 29 地産電力供給量

需要家名	年間水素消費量 (Nm <sup>3</sup> /年)	地産電力量 (kWh/年)
総合体育館	86,000	129,000
六ヶ所村温水プール	360,000	540,000
六ヶ所村医療センター	420,000	630,000
村役場・第2分庁舎	220,000	330,000
給食センター	230,000	345,000
小学校	220,000	330,000
中学校	130,000	195,000
スロニー（多目的コミュニティセンター）	230,000	345,000
ガソリンスタンド	1,000,000	0
分譲住宅（200 世帯）	290,000	426,300
集合住宅（1496 世帯）	1,900,000	2,793,000
合計	5,086,000	6,063,300

#### 4.2.2 地産熱供給での灯油代替による域内経済循環効果

地域の需要家が、従来域外に支払ってきた灯油代金を、地域内で製造した CO<sub>2</sub>フリー水素による燃料電池由来の熱利用に変えることで地域内経済循環が図られた指標とする。

燃料電池による熱供給による灯油代替量は、六ヶ所村全体で年間灯油 **58 万ℓ** となる（表 30）。これは、青森県の 1 家庭の年間灯油消費量が約 1,600ℓ（出典：<sup>44</sup>）であるので、青森県の一般家庭約 **360 世帯分**の年間灯油消費量に相当する。

<sup>44</sup> 財団法人日本エネルギー経済研究所 石油情報センター, 平成 18 年度灯油消費実態調査報告書, (2008 年年 3 月)



表 30 灯油代替量

需要家名	年間水素消費量 (Nm <sup>3</sup> /年)	供給熱量 (MJ/年)	灯油相当量 (ℓ/年)
総合体育館	86,000	427,248	12,207
六ヶ所村温水プール	360,000	1,788,480	51,099
六ヶ所村医療センター	420,000	2,086,560	59,616
村役場・第2分庁舎	220,000	1,092,960	31,227
給食センター	230,000	1,142,640	32,647
小学校	220,000	1,092,960	31,227
中学校	130,000	645,840	18,453
スワニー（多目的コミュニティセンター）	230,000	1,142,640	32,647
分譲住宅（200世帯）	290,000	1,440,720	41,163
集合住宅（1,496世帯）	1,900,000	9,439,200	269,691
合計	4,086,000	20,299,248	579,977

#### 4.2.3 水素ステーションでのガソリン代替による域内経済循環効果

地域の需要家が、従来域外に支払ってきたガソリン代金を、地域内で製造した CO<sub>2</sub>フリー水素による FCV 等利用に変えることで域内経済循環が図られた指標とする。

ガソリンスタンドにて供給される水素 1,000,000 Nm<sup>3</sup>/年は、表 12 の FCV の燃費と、ガソリンスタンドにおける水素供給量より 8,900,000 km の走行に相当し、ハイブリッド車プリウスの燃費 40.8 km/ℓ（出典：<sup>45</sup>）より計算すると、**22 万ℓ分のガソリン**を代替したことに相当する。

#### 4.2.4 その他効果

このほか以下の、水素サプライチェーン関連の産業創出、副生酸素の活用による地域活性化のほか、BCP対策等の効果も期待される。

例えば、表 26 の 700 m<sup>3</sup> のバッファタンクに貯蔵されている最大 4,900 Nm<sup>3</sup> の水素は、3.4.1.1(2) に示す 8 つの公共施設に設置された 100kW 型燃料電池 8 台を 9 時間フル稼働させるだけの容量を持つ。出力を絞り、最低限の電力を供給する場合であればより長時間非常用の電源供給が可能となる。

<sup>45</sup> <http://toyota.jp/prius/performance/top/>（2018 年 3 月アクセス）

#### 4.2.5 段階的展開シナリオ

##### 「モデル導入期」

未利用電力が未発生な段階で、再エネ発電量の予測・系統ネットワークとの連携・各種設備の制御等について技術的検証を行うため、検証に必要な電力を確保し、体制を整えた上で、国事業等を活用して一部公共施設への試験的導入によるモデル実証を行う必要がある。

##### 「地産地消事業化期」

モデル実証の結果をもとに未利用電力活用の制度化を進めるとともに、未利用電力の発生状況、各種設備の開発によるコスト低減状況等を踏まえ、最適な電熱供給等による事業性検討を行い、適宜パイプラインの規模拡大等、事業化を進める。

##### 「域外展開期」

未利用電力の大量発生により水素製造規模の拡大が可能となった段階で、域外への需要を開拓し、圧縮装置等の域外輸送に対応した設備投資や化成品製造等により、域外展開を図っていく。

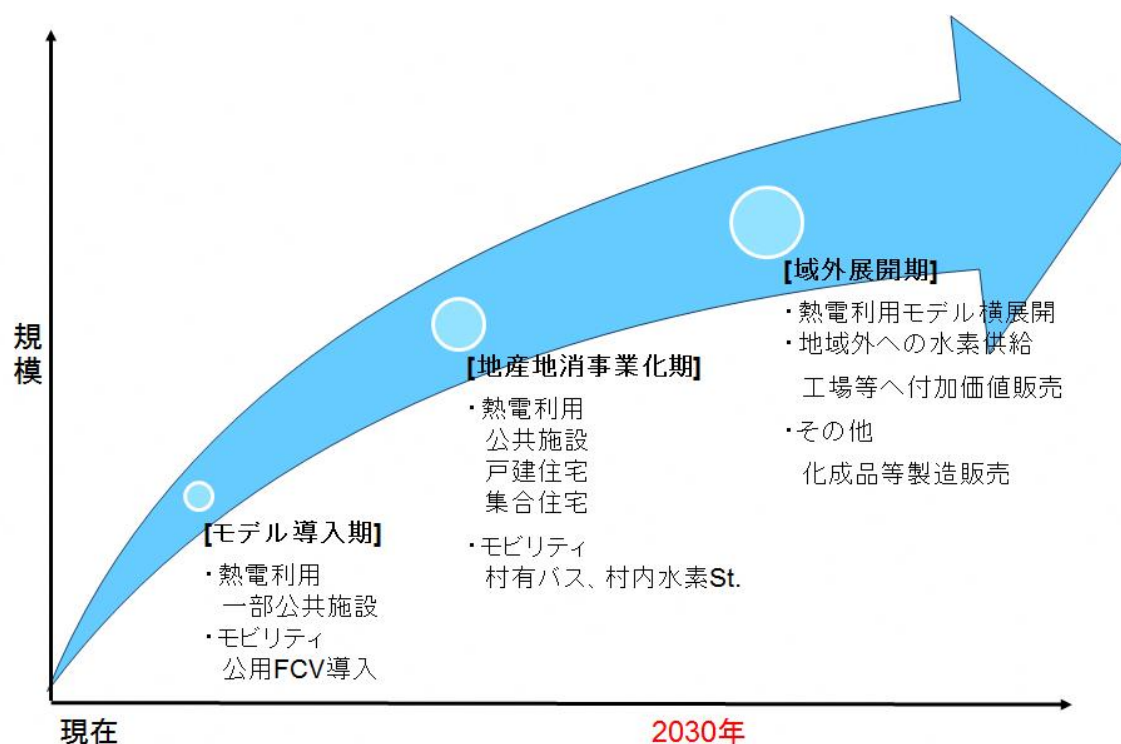


図 26 段階的展開イメージ

## 4.3 実現に向けた課題と提言

### 4.3.1 安価な電力の調達

水電解による水素製造では、電力コストが多くを占めるため、如何にして、電力を安価に調達することができるかが、最重要課題となる。

#### 4.3.1.1 電力調達スキームに関する課題

将来的には出力抑制による大量の未利用電力が発生することが予想されるが、現状では未利用電力が発生していない状況であることから、FIT 期間満了前にモデルプラン実現に向けたモデル導入を行う場合、その実証に要する電力を如何に調達して、必要な技術的検証等を行うかが課題となる。

##### (1) 電力調達窓口の確立

再生可能エネルギー発電事業者から系統を経由して電力を調達するにあたっては、地域新電力事業者（リソースアグリゲーター含む）等の窓口が必要となる。

##### (2) 調達電力の検討

出力抑制による未利用電力のどの部分を活用するのか、また FIT 切れ再エネ、自家発電施設、電力卸売市場等のうち利用可能な電力はどの程度なのか十分に検討し、事業実施時点において、妥当な電力コストと設備利用率を確保できる最適な組み合わせを検討する必要がある。

##### (3) 調達方法の検討

未利用電力については、系統を利用してみなし電力として相当分を調達するのか、モデル導入段階においては、自営線や蓄電池等を活用して系統に負荷をかけずに調達するかの検討が必要である。

また、FIT 対象施設については、期間満了前では既存の売電先との契約変更、売買ルート等の検討、村有発電施設等については費用対効果等を検討する必要がある、個別に発電事業者等と協議する必要がある。

#### 4.3.1.2 制度的な課題

##### (1) みなし電力

通常、出力抑制された未利用電力は、系統に流されられないため、利用できない。仮に系統に流して水素製造に用いた場合、普通に需要家に販売されたものと判断され、その電力には正規の値付けが行われる可能性も制度設計によっては考えられる。したがって、系統を利用して送電をしたものであってもいわゆる「未利用電力」としてみなし、安価に利用できるものとする制度設計が必要となる。

##### (2) FIT 切れ電源

2030 年頃には大量に発生する FIT 切れ電源だが、買取期間終了後に系統接続解除となれば事業継続が困難となることも予想される。しかし、国として何らかの施策を講じるのかは未定であり、原価償却後の安価な電源として活用できるかどうか、不確定である。

### (3) 再エネ変動吸収への調整力取引

電力システム改革が進められている途上ではあるが、デマンドレスポンスによる変動吸収等のいわゆるアンシラリーサービスの導入は海外でも進められており、付加価値が認められることで事業性向上にもつながる可能性がある。

### (4) 非常用電源供給

今回導入を考えている燃料電池は、災害時の非常用電源、熱源としての運用も考えられ、既存自営線を活用した非常用電源供給体制のある六ヶ所村では、コミュニティ内で電力供給が可能であり、被災者のQOLの向上に寄与できるものと考えられる。

ただし、電力システムを活用して、他の地域へ電源供給する場合には、法制度が未整備の部分であるため、検討が必要である。

## 4.3.1.3 技術的な課題

### (1) 系統ネットワークとの連携

システムを利用して電力を調達して利用する場合には、同時同量の確保が求められることから、どこまでの精度で再エネ電力の変動に応じた水素製造が可能かという負荷追従性の検証が必要である。また、送配電事業者とネットワークでつなぎ、連動する制御システムを開発する必要がある。

### (2) 関連設備の最適制御 (CEMS)

系統ネットワークとの連携だけではなく、再エネ発電状況に応じた水電解装置の運転、バッファタンクの残量管理、需要に応じた燃料電池の運転による熱電併給等、関連設備を一体的に管理する CEMS (Community Energy Management System) が必要である。特に、寒冷地においては、熱の利用が重要となることから、現地の状況に即した最適な運転モデル開発が必要となる。

## 4.3.2 水素関連設備コストの削減

水素関連設備コストの削減には、機器の開発によるコスト削減、設計による導入コスト削減、規制緩和によるコスト削減がある。

### 4.3.2.1 機器の開発によるコスト削減

#### (1) 各種設備のコストダウン

純水素型業務用燃料電池 (100kW型) は1基1億円、水電解装置の設備単価は50~60万円/(Nm<sup>3</sup>/h)以上となっており、事業性の向上のためにはコストダウンが求められる。

#### (2) 周辺機器の抑制

水素関連設備は周辺機器が多く、設備コスト増加の原因のひとつとなっている。よって、出力変動を吸収する際に、蓄電池等を導入せずとも出力変動に対応できるようにする等、技術開発を進める必要がある。

### (3) 各設備の寒冷地対応

本モデルプランでは、水素が有用となる地域として熱需要の大きい寒冷地を考えているが、水電解装置等の凍結防止のために建屋の建設や凍結防止装置の導入が必要となり、コストアップにつながっていることから、安価な寒冷地対応システムの開発が必要である。

#### 4.3.2.2 設計による導入コスト削減

##### (1) 導入ノウハウ蓄積による効率化

現在では、水電解装置、燃料電池、水素パイプラインといった水素関連設備については導入事例が少なく、効率的な設備導入についてのノウハウが不足していると考えられる。今後は導入事例から吸い上げられる知見等を集約し、設備導入コストを低減できるような施工方法の開発、および製品設計を行っていく必要があると考えられる。

##### (2) 水電解装置の最適配置

電力潮流抑制のために最適な水電解装置の設置個所と、水素需要の観点から想定されるそれとは、必ずしも一致しないことが容易に想定される。電力潮流抑制に資するのは、各電圧階級の変電所近傍であるが、需要地域を無視して建設すれば、水素供給・輸送インフラ整備コストを増大させる恐れがある。それぞれ、どちらの適地を選択すればコストを最小化できるかについて、今後、費用対効果の検討が必要である。

#### 4.3.2.3 規制緩和によるコスト削減

##### (1) 高圧ガス保安法の規制緩和

水素を高圧ガスとして扱う場合、その設備は高圧ガス保安法の適用対象となり、高圧ガス保安責任者、販売責任者の免許が求められるが、実務経験が必要であるため取得困難であり、運営コスト増加の原因となっている。

##### (2) 水素パイプライン関連

現在、水素パイプラインの敷設にあたっては漏洩検知のために化学物質による付臭が求められる場合があるが、燃料電池で水素を用いる場合には脱臭が必要となるため、追加の設備投資が必要となり、設置面積の増大や設備コストの増大につながっていることから、無付臭水素パイプラインに関する制度設計を行い、安全規格を設定して、安全かつ効率的に水素を用いることができるようになることが必要である。

##### (3) 部材の拡大・離隔距離水素ステーション関連

日本の規格、法制度に従った水素ステーションは欧米の 2 倍程度の建設費が必要であると言われており、これを抑制するためには、ステーションに用いられる部材の拡大や安全確保のための離隔距離に関する規制緩和が求められる。ただし、欧米の水素ステーションは充填圧力が 35 MPa のものが多いのに対して、日本の標準規格は 70 MPa であるため、欧米の規格の単純導入では成立し得ないことについては留意する必要がある。

### **4.3.3 事業実施体制の構築**

#### **4.3.3.1 理解促進**

一般には水素は危険だという意識もあり、安全性、導入の意義等に関する周辺住民への理解促進に向けた取組が必要である。

#### **4.3.3.2 事業主体の検討**

##### **(1) モデル事業実施主体**

地産地消の観点からは、地元企業も参加した事業主体の確立が必要であり、当面は先進的なモデル事業として、実現可能性のある計画、実施体制を検討する必要がある。

##### **(2) 費用負担**

参加事業者、受益者、関連自治体等の関係者による出資、費用負担、負担軽減措置等も検討し、地域エネルギー事業の一環として推進していくべきである。

##### **(3) 事業モデルの確立**

水素活用によるエネルギー供給事業以外にも、非常用エネルギーの供給、再エネ由来電力の変動吸収のための調整力、エネルギーパークとしての普及啓発活動、共同研究フィールドの提供等、付加価値を持った事業モデルを確立する必要がある。

#### **4.3.3.3 支援措置**

水素の利点は利用時に二酸化炭素を排出しないことであり、気候変動対策が強く求められる社会においてはニーズが高まるものと考えられるが、化石燃料由来水素に比べて再生可能エネルギー由来の CO<sub>2</sub>フリー水素は価格が高くなりがちである。したがって、気候変動対策における CO<sub>2</sub>フリー水素の価値を認証し、価値換算し、化石燃料由来水素や既存の化石燃料との間での価格ギャップを埋める制度を整備することにより、CO<sub>2</sub>フリー水素がより広範に活用され、長期的に水素価格の低減につなげていくことができるものと考えられる。

#### 4.4 おわりに

地球温暖化の抑制のため、第 21 回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)で採択されたパリ協定に付随して、日本は 2013 年比で温室効果ガス排出量を 26 %削減することを表明しており、化石燃料の使用量削減は必須となっている。一方、原油価格は 2004 年頃からの新興国の経済成長に伴う需要増大と投機目的から 2008 年前半にかけて急激に上昇した後、シェールオイルの生産コスト削減などにより、1 バレル当たり 30～70 ドルを推移している。

青森県は、来るべき再生可能エネルギーを基盤としたエネルギーシステムを構築するための条件の整った最適地の一つである。既存のエネルギーシステムが“再生可能エネルギーをエネルギー源とする再生可能電力と水素”に置き換わったら、“薪炭(再生可能燃料)”の第一次エネルギー革命、“石炭”の第二次エネルギー革命、“原油と電力”の第三次エネルギー革命に次ぐ第四次エネルギー革命であり、青森県は投機の対象にもなっている化石燃料ベースのエネルギーシステムの末端から、地産地消の独立したセキュアなエネルギーシステム、さらには周囲へエネルギーを販売する地域に転換できる可能性を持っている。

以上の認識のもと、検討会で「あおり CO<sub>2</sub> フリー水素活用モデルプラン」を取りまとめた。

再生可能エネルギーを基盤とするシステムは、火力発電や原子力発電のような百万 kW 単位の集中型システムではなく、0.1~1 万 kW 単位で設置可能な分散型システムである。したがって、本モデルプランに記した起点が出来上がれば、順次拡大可能なシステムである。青森県は第 4 次エネルギー革命の中で、エネルギーシステムの末端の消費地域から、自立した地域へ、さらにエネルギー供給地域となる可能性を秘めており、本モデルプランを第一歩として継続的に取り組んでいきたい。

平成 30 年 3 月

あおり CO<sub>2</sub> フリー水素検討会

会長 光島 重徳

あおもりCO<sub>2</sub>フリー水素検討会委員名簿（順不同、敬称略）

所属	部署名	役職	氏名	備考
横浜国立大学大学院	工学研究院	教授	光島 重徳	会長
東京農工大学		名誉教授	亀山 秀雄	
東京大学大学院	先端エネルギー工学	准教授	馬場 旬平	
東北大学 金属材料研究所	先端エネルギー材料理工 共創研究センター	特任教授	河野 龍興	
六ヶ所村		村長	戸田 衛	
東北電力株式会社	青森支店	副支店長	今野 清司	
日本風力開発株式会社	東京本社 開発本部 立 地開発部	副部長	内山 審	
株式会社ユーラスエナジー ホールディングス	国内事業第一部	副部長	加藤 潤	
双日株式会社	石炭・金属本部	鉄鋼事業 担当顧問	四戸 良治	
株式会社N T Tファシリテ ィーズ	スマートビジネス本部	事業企画部長	渡邊 茂道	
エヌ・ティ・ティ・コミュニ ケーションズ株式会社	東北支店	法人営業部長	今村 聡	
岩谷産業株式会社	水素エネルギー部	部長	藤本 守之	
東芝エネルギーシステムズ 株式会社	次世代エネルギー事業開 発プロジェクトチーム	参事	山根 史之	
本田技研工業株式会社	ビジネス開発統括部 スマ ートコミュニティ企画室	主任技師	岡本 英夫	
富士電機株式会社	営業本部 エネルギー統 括部 営業第三部	担当部長	明瀬 郁郎	

検討の経緯

- 平成28年 8月18日 あおもりCO<sub>2</sub>フリー水素検討会（第1回）  
 平成29年 3月30日 あおもりCO<sub>2</sub>フリー水素検討会（第2回）  
 平成29年12月27日 あおもりCO<sub>2</sub>フリー水素検討会（第3回）  
 平成30年 3月20日 あおもりCO<sub>2</sub>フリー水素検討会（第4回）