

セイリング型風力発電による水素製造に関する研究

独立行政法人国立環境研究所 江崎 宏至

1. はじめに

国立環境研究所では、平成 15 年度から 5 年間の計画で「洋上風力発電を利用した水素製造技術開発」を産学の協力を得て進めている。本研究でセイリング型洋上風力発電として提案している非係留浮体システムは、風車によるエネルギー取得率を高めるため、風況の良い海域を選んで移動できるという特長を有し、また荒海象域を避けることで構造体重量の軽減が期待されるシステムである。こうした特長は、エネルギー取得システムの評価指標であるライフサイクル EPR (Energy Profit Ratio : 全取得エネルギーを全製造・運用必要エネルギーで除した値)の向上に寄与する。

本講演では、本研究のこれまでの研究成果について報告する。



2. システム全体の基本コンセプト

(1) 研究の背景

「地球温暖化問題」はますます深刻さを増している。産業革命以降の石油・石炭といった化石燃料の消費により発生する二酸化炭素がその原因とされているが、それらの資源も近未来には枯渇するとされている。日本のエネルギーは多くを化石燃料に依存しているが、これの見直しは喫緊の課題である。

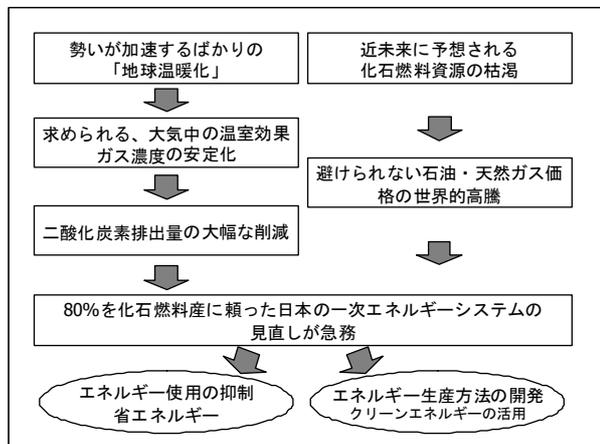


図 研究の背景

(2) 研究の目的・目標

本研究は、我が国の広大な排他的経済水域上に設置した、セイルを擁する非係留大型浮体上に風車を搭載して発電を実施し、得られた電力を化学エネルギーに変換して、消費地まで輸送するエネルギーシステムの構築により、「低い面密度」と「大きな変動性」といった特性故、膨大に存在しながら十分な活用が図られていない風力エネルギーを基幹エネルギー源の一つと位置づけることの可能性を検証することを目的としている。

従って、本研究の目標は、システムを構成する個別技術の技術的可能性、環境影響評価に加えて、システム構築と稼働に要するエネルギーとシステムが産生するエネルギーの収支を評価し、これが妥当なレベルでプラスになる系を見出すことである。具体的な数値目標として、本研究では、セイリング型洋上風力発電によるエネルギー産生までの EPR が、石炭、石油火力発電の EPR と同等程度となる 19 以上と設定した。

(3) 基本コンセプト

- ・世界第 7 位の面積(447 万 km²)を誇る排他的経済水域(EEZ)の活用
- ・日本初のユニーク要素技術の活用(浮体建造技術、海水直接電解技術)
- ・環境負荷の低減を目指した、長寿命化の追求によるエネルギー生産性の高いエネルギー生産システムの実現

(4) システム構成

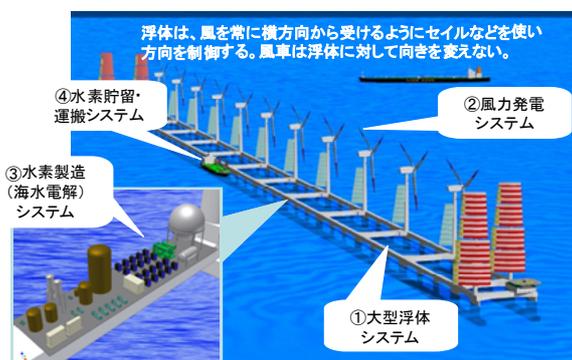


図 システム構成

表 主要目

| | |
|-------------|--------------------|
| 【浮体】 | |
| ・全長： | 1,880m |
| ・幅： | 70m |
| ・重量： | 約 150,000ton |
| ・帆走速度： | 約 4 ノット (約 8km/h) |
| ・機帆走速度： | 約 7 ノット (約 13km/h) |
| 【風車】 | |
| ・出力： | 5MW/基 |
| ・基数： | 11 基 |

3. 浮体システムの基本コンセプト

(1) 係留していないなら、風に流されて発電できないのでは？

風車には風下向きに風の抗力が発生するが、セイルにより風向に対して横向きの方に浮体を進行させ、さらに浮体の水中構造であるストラットで揚力を得て風の抗力を克服し、風車を発電可能な状態に維持する。

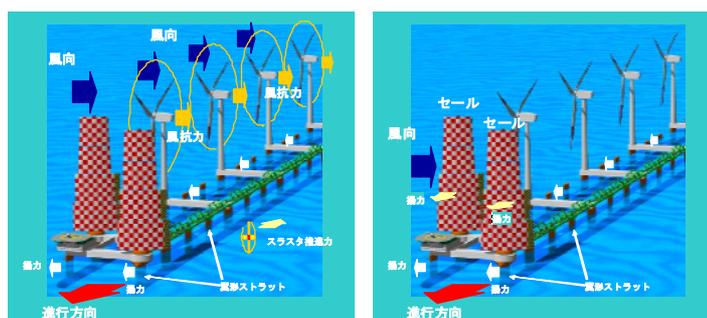


図 位置保持メカニズム

(2) 外洋を航行するのに適した浮体構造とは？

浮体構造にはポンツーン型（箱型）とセミサブ型（半潜水型）とがある。ポンツーン型はシンプルな構造のためコストは安価であるが、波浪の影響を受けやすいため、静穏域での利用に適している。一方、セミサブ型は構造が複雑なためコストが割高となるが、ポンツーン型に比べ波浪に対する受圧面積が小さいため、過酷な波浪中でも動揺が少なく、波浪の高い外洋に適している。

(3) 筏型か、紐型か？

① 1つの浮体に何基の風車を搭載するのか？

浮体1隻に風車1基しか搭載しないよりも、例えば浮体が大きくなっても複数の風車を隣接して搭載した方が移動する浮体を運用する上では有効である。

② 複数の風車を浮体上にどのように配置するのか？

研究の初期には筏型の浮体上に風車を3列に並べることを想定したが、前列の風車による後流が後列の風車に影響を与えるため、最終的には紐型の横長浮体に風車を1列に並べることにした。

(4) どうやって方向転換するのか？

風向が一定だとしても、浮体を常に同じ方向ばかりに進行させるわけにはいかない。時に、進行方向を反転させる必要が生じる。しかし、この紐のような浮体を旋回させるのは容易ではない。この浮体では、スイッチバックという方法の採用を想定している。

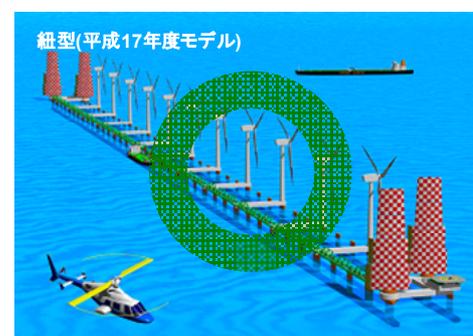
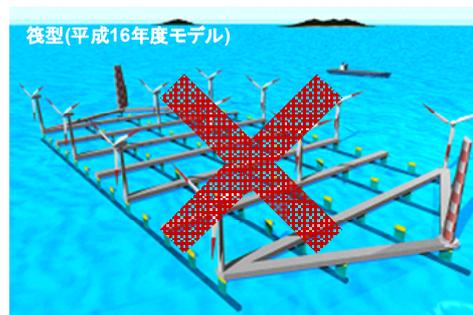


図 筏型か、紐型か

4. 海象・気象に耐える浮体

(1) セイリング型（セミサブ型）浮体の特徴

セイリング型浮体では、水面下にローハルがあること、ストラットの断面積を小さくすることで波から受ける力を小さくすることができる。

一方、ストラットは風車抗力に抗する揚力を得るため、翼型断面である必要がある。

また、ここではストラットを2列並列させる構造としたが、水中にローハルあるいはストラットを結ぶ補強材を付けることはできない。航走する際の抵抗が増えてしまうためである。

(2) 浮体構造の最適化

紐型浮体の検討を始めた平成17年度は、アッパーハルの無い浮体を想定していた。しかし、水槽実験や数値解析の結果、浮体の強度不足が判明し、横桁を補強

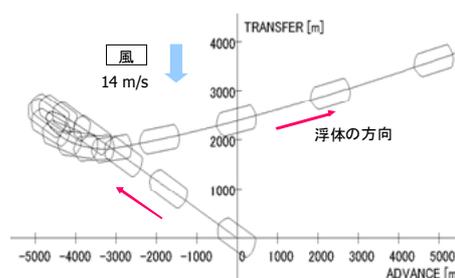


図 スイッチバック

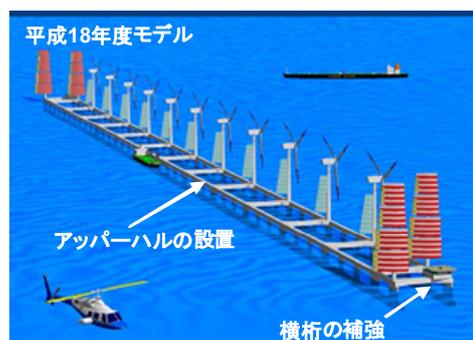


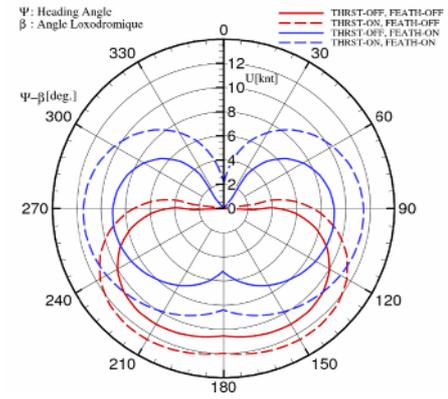
図 平成18年度モデル

し、新たにアップパーハルを設けた平成 18 年度モデルを導き出した。

このモデルにより、強度的に厳しい横桁部に高張力鋼を用いれば、降伏強度・疲労強度を満足する、長期耐用可能な浮体を実現できる見通しを得た。

(3) 浮体の運航性能

シミュレーションの結果、風に対して真横方向に航走する場合の性能は、セイルのみの場合 4 ノット、スラスト併用の場合 7 ノット、風車をフェザリングする前提ならば、それぞれが 9 ノット、11 ノット期待できることがわかった。



風速 14m/s、有義波高 2m のケース
 ※風向は上から下
 赤の実線：通常
 青の実線：フェザリング実施の場合
 点線は、スラストを併用する機帆走の場合

5. 荒天を回避しながら発電する

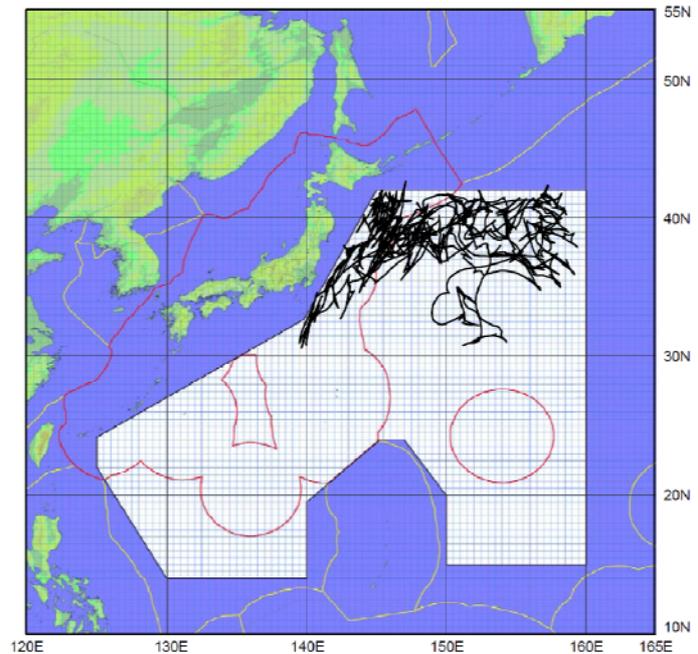
(1) 「荒天を避けながら発電する」とは？

地球温暖化に伴い、台風が巨大化していると言われる。台風が持つエネルギーの巨大さは、もたらされる被害の程度から容易に想像ができる。このエネルギーを活用できれば良いが、風力発電と言えど、荒天時には発電することができない。10 数 m/sec の風速時にエネルギー取得が最大となるような設計をしているためである。

また、一般に風が強いと波も高くなるため、荒海象とはできるだけ回避したい。

荒海象を避け、一定以上の風のある海域を移動しながら発電することができれば、より多くのエネルギーが取得できる。

図 浮体のポラー曲線



赤の実線：日本の EEZ 黄の実線：他国の EEZ 黒の実線：運用海域
 図 運用シミュレーション結果（年間設備利用率最大時）

(2) 運用シミュレーションの実施

セイリング型洋上風力発電により、荒天を回避しつつ、どれだけの発電が可能か、1 年間の運用シミュレーションを実施した。

(3) シミュレーション結果

運用シミュレーションの結果、台風などによる荒天海域を避けながら発電を行い、最大 42.6% の年間設備利用率を得られる運用方法があることがわかった。

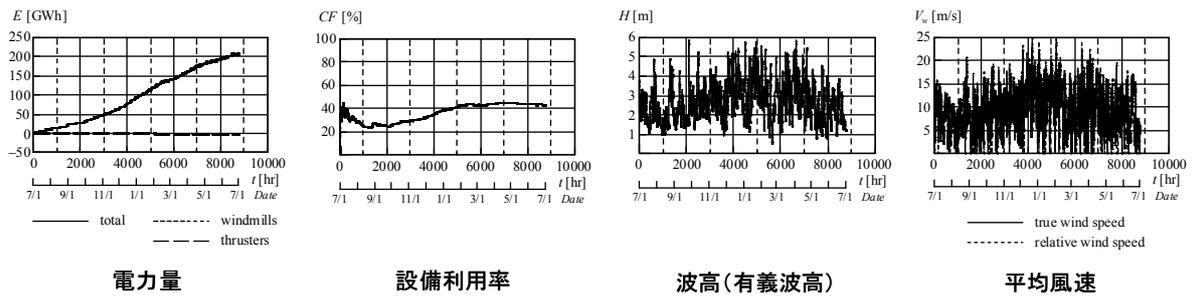


図 運用シミュレーション結果（年間設備利用率最大時の諸値）

6. 浮体上での風車の基本コンセプト

(1) 浮体に搭載する風車

現在、国内にある最大の風車は、三菱重工業(株)横浜製作所構内にある 2.4MW の風車(ロータ径 92m)である。浮体上に搭載する風車は、これよりも一回り大きい 5MW の風車を想定している。

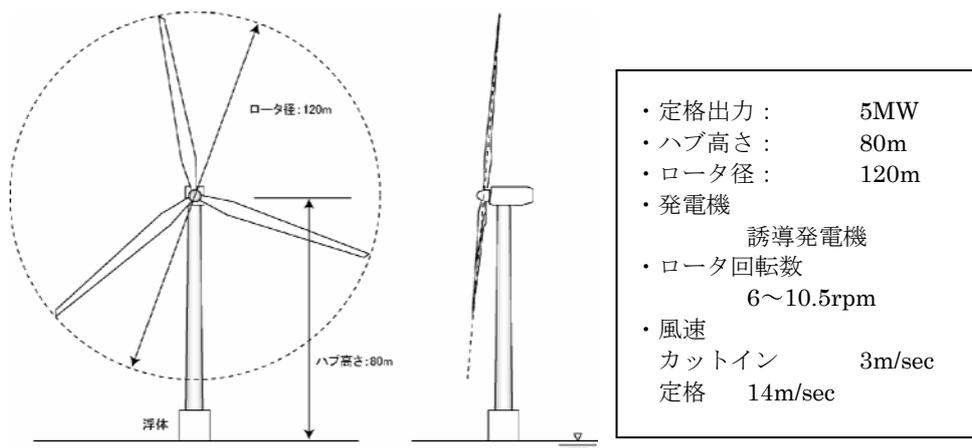


図 搭載する風車

(2) 浮体上の風車に求められること

浮体上の風車は、陸上に設置される風車にはない次の要件が求められる。

- 1) 浮体上に密に設置
- 2) 浮体の動揺の影響

風洞実験、数値解析により、1)設置方法に関しては、風車を風に対して横方向にロータ径の 1.2 倍の間隔で一列に配列すれば風車間の干渉の影響が避けられ、出力が維持できることがわかった。2)浮体の動揺の影響に関しては、浮体の動揺により風車タワーの疲労強度に影響があることがわかったが、その一方で、風の乱れによる影響の方が大きいこともわかった。

(3) 非係留型浮体上の風車固有の特徴

一方、非係留型の浮体上の風車ゆえの特徴もある。

浮体側で浮体の向きを制御することにより、風車が受ける風方向を常に同じに保つことができる。つまり、

- 風車のヨー(Yaw)制御(ロータの向きを変えること)を±20~30° に抑えることができる。
- タワー形状は軸対象である必要がなくなる。
- ⇒タワー背後に翼を取り付け、セイルの補助装置の役割を果たさせることができる。

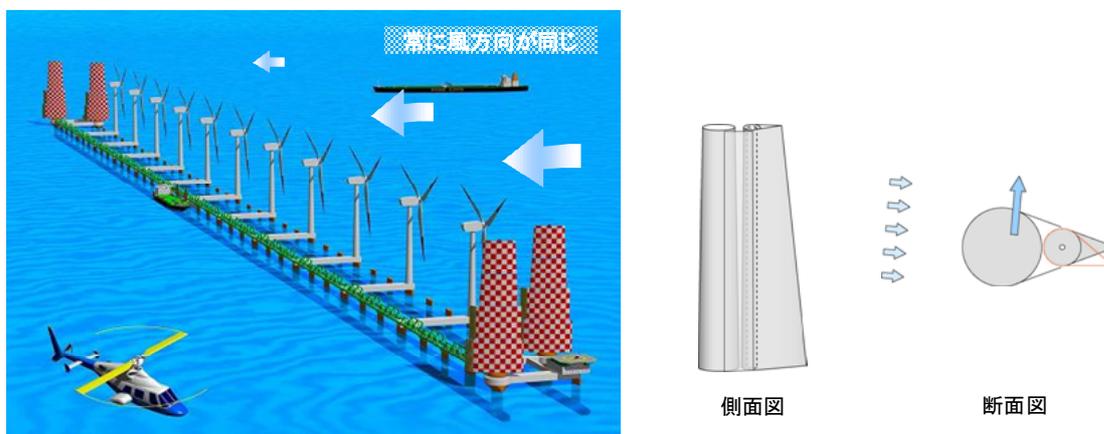


図 非係留型浮体上の風車固有の特徴

7. 海水の直接電解

電力をどうやって運ぶのか？

風車により発電した電力は、電力のまま消費地である陸上まで運搬できれば良いが、現状では困難である。このため、水素(H₂)などの化学エネルギーに一旦変換する。この変換プロセスで海水の電気分解を行うが、一般に海水を電気分解すると、H₂と塩素(Cl₂)が1:1の割合で発生する。このCl₂がやっかいである。

東北工業大学橋本功二名誉教授らは、マンガン(Mn)にモリブデン(Mo)、タングステン(W)などの成分を微量含ませて複酸化物にするとCl₂を発生させず100%O₂を発生させる電極を開発した。

エネルギー効率や耐久性にまだまだ課題はあるが、白金(Pt)などのレアメタルを使わない点でも魅力的である。

水素を運ぶ方法としては、液体水素、圧縮水素、有機ハイドライドなどが考えられる。しかし、いずれの方法も石油や天然ガスなどの化石燃料を運ぶほど容易ではない。

本研究では、火力発電所などから回収した二酸化炭素を浮体まで輸送し、浮体上で、水素と二酸化炭素を反応させて、メタンを始めとする炭化水素を合成することにも注目している。これらの輸送は水素に比べれば格段に容易となる。

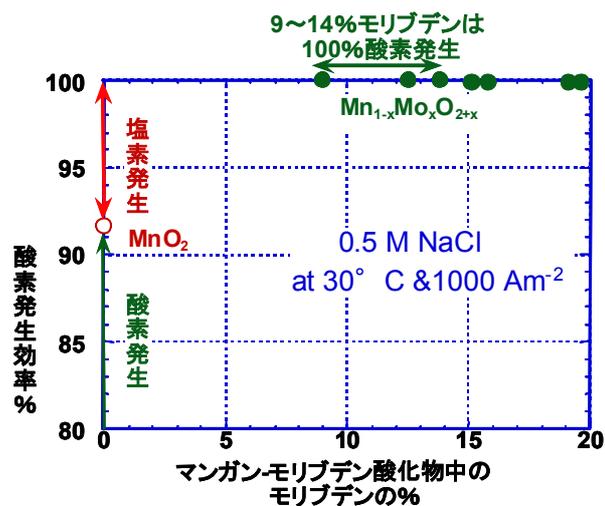


図 Cl₂を発生しない電極による海水の直接電解

8. 経済性、エネルギーシステムとしての成立性

(1) エネルギーシステムとしての成立性

(独) 国立環境研究所 江寄 宏至

セイリング型洋上風力発電のエネルギーシステムとしての評価は、エネルギー収支比 EPR を用いた。研究の目標で示したとおり、本研究の EPR の数値目標は、セイリング型洋上風力発電によるエネルギー産生までの EPR を 19 以上とすることである。

エネルギー収支比: EPR

$$EPR = \frac{\text{システムが産生するエネルギー}}{\text{システムの構築・稼働に消費するエネルギー}}$$

風力発電システムで得た電力を消費地である陸上まで輸送する方法としては、ここでは(1)液体水素、(2)液化メタン、(3)有機ハイドライドの 3 ケースについて算定した結果を示す。

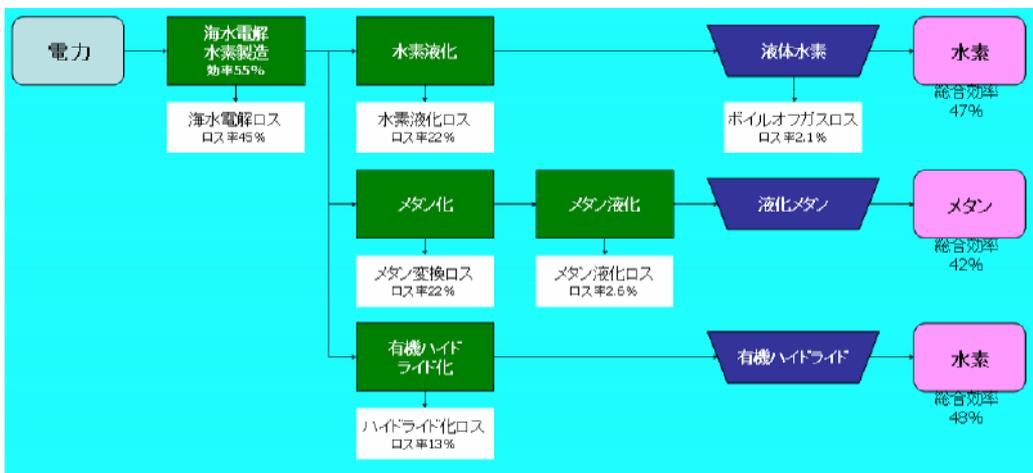


図 電力の輸送方法

各ケースの EPR は 5.0~5.9 の値となった。一方、浮体上での電力産生までの EPR は 16.0 で、開発目標とした 19 を 16%下回っていた。

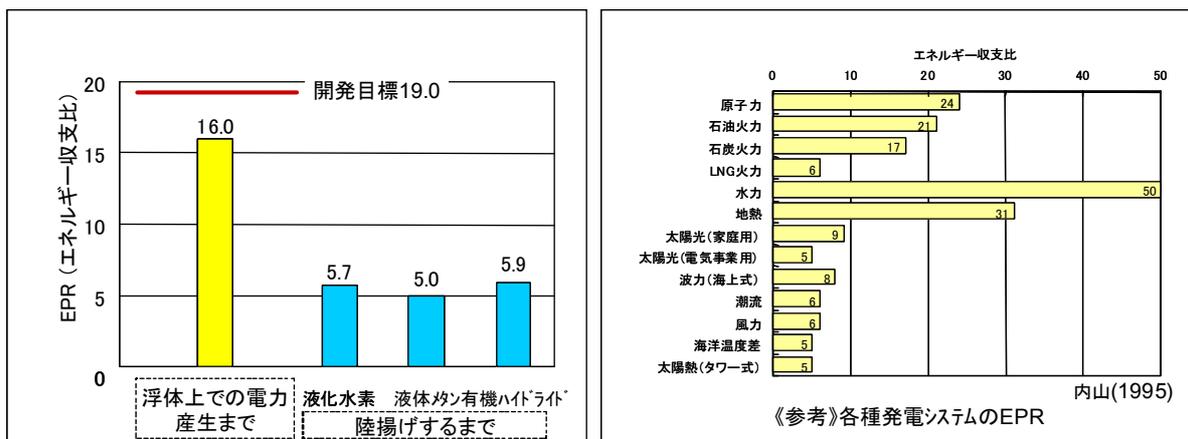


図 エネルギーシステムとして成立性の評価結果

(2) 経済性

経済性の評価は、発電原価を用いた。

(独) 国立環境研究所 江崎 宏至

$$\text{発電原価} = \frac{\text{資本費} + \text{燃料費} + \text{運転維持費}}{\text{発電電力量}}$$

算定の結果、発電原価は 16.6 円/kWh。量産効果を考慮した場合で、12.7 円/kWh となった。

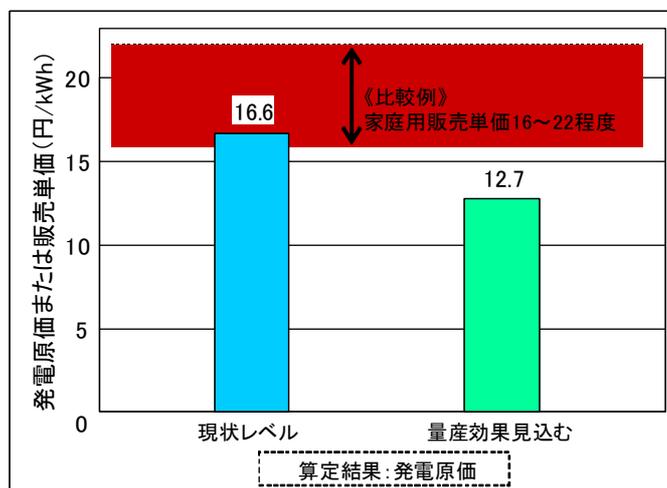


図 経済性の評価結果

9. プロジェクト終結に向けて

5 年に渡った本研究もいよいよ佳境に達した。本研究を通して得た資産、残された課題を明確にし、バトンを次のランナーに手渡したい。