

平成 22 年度総会特別講演会（第 131 回定例研究会）資料Ⅲ



**再生可能エネルギーの大陸間  
輸送の予備的評価研究**

2010年4月26日(月)

(財)エネルギー総合工学研究所  
プロジェクト試験研究部  
石本祐樹

Copyright: 2010 IAE. All rights reserved.

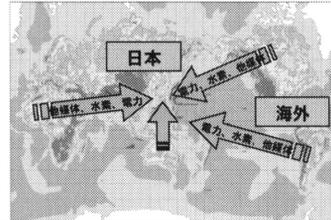
LAE 財団法人 エネルギー総合工学研究所 平成22年4月26日 水素エネルギー協会総会特別講演会

内容

1. コンセプト
2. 評価範囲および前提条件
3. 概念設計（電力、液体水素、有機ハイドライド）
4. 経済的評価
5. 技術課題
6. まとめ

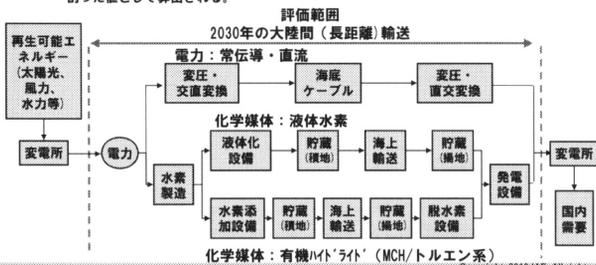
コンセプト

- ・ 再生可能エネルギー輸送技術のフィージビリティ・スタディ
  - 海外の豊富な再生可能エネルギーを輸送可能な媒体に変換
  - 我が国に輸送
- ・ 複数の再生可能エネルギー輸送技術の評価
  - 経済的・技術的成立性とCO<sub>2</sub>排出削減
- ・ 革新的な地球温暖化対策技術で世界を先導するための提言作成



評価範囲および前提条件

- ・ 本調査では、再生可能エネルギーの「輸送」に着目するため、供給される再生可能エネルギー由来電力は、ある出力、ある稼働率で稼働している発電所で置き換えて評価。
  - 単位システムあたり100万kWの発電所が稼働率90%で稼働した場合の電力を供給（80億kWh/年）
- ・ 評価する再生可能エネルギーの設備の規模として、国内の送電網に入る直前で、年間の発電電力量約80億kWhを供給できる設備構成
  - 入力側に必要な電力量は、出力側の電力量をそれぞれのキャリアの総合的エネルギー効率で割った値として算出される。



前提条件

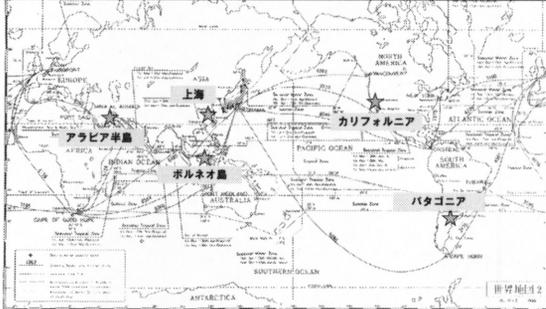
- 時間断面
- ・ 2030年ごろ。

輸送電力量

- ・ 出力変動無しの変電所（評価範囲外）が起点
- ・ 必要な電力量はエネルギーキャリアによって損失等を考慮して決定する。
- ・ 100万kW、稼働率90%
  - 年間発電電力量80億kWh/yr（化学媒体の場合、発電所送電端効率を50%とすると、必要水素量は約53億Nm<sup>3</sup>/年（約47万t/年））

前提条件

|         |                |                              |                       |                       |                      |
|---------|----------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 距離 (目安) | 1,000km        | 5,000km                      | 10,000km              | 15,000km              | 20,000km             |
| 候補地域    | 上海~九州<br>800km | インドネシア (ボルネオ島)~日本<br>4,500km | カリフォルニア~日本<br>8,000km | アラビア半島~日本<br>12,000km | パタゴニア~日本<br>17,000km |



主要航路図 平成22年度報告書FC-NEETカブタスク5より (原典は造船便覧) 平成22年4月26日 水素エネルギー協会特別講演会

エネルギーキャリアの選択

- 電力
  - 再生可能エネルギーは、電力の形で捕集されるのが一般的 (光触媒を除く)
  - 電力は、送電し、利用するのがもっとも合理的。
  - 陸上もしくは海底に敷設された常伝導ケーブルによる高圧直流送電により、再生可能エネルギー由来電力を輸送することを想定。
- 液体水素
  - 送電が難しい場合には、電力を化学エネルギーに変換して輸送する方法を採用
  - 需要サイトでは化学エネルギーから電力を再生・利用
  - 化学エネルギーは熱力学的に安定な条件下では長時間の貯蔵が可能であることから、貯蔵性に難のある電力を長距離輸送する場合のエネルギーキャリアとして最適
  - エネルギー輸送媒体として見た場合、もっとも質量エネルギー密度が大きい
  - 水素エネルギー技術開発の当初からエネルギーキャリアとして、多くの研究開発が行われてきた結果、液体水素容器等要素技術については多くの知見が蓄積
  - 工業プロセス用原料水素等の国内輸送で、すでに液体水素輸送が商用化。

Copyright: 2010 IAE. All rights reserved. 平成22年4月26日 水素エネルギー協会特別講演会

キャリアの選択

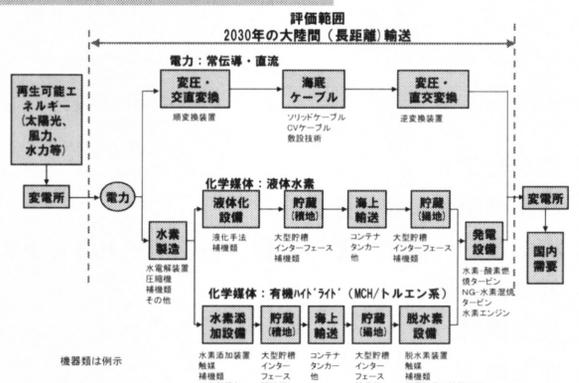
- 有機ヒドライド (トルエン/メチルシクロヘキサン系)
  - エネルギー密度の観点からは、無機ヒドライドの一種であるアンモニアが魅力的。アンモニアの場合、水素生産サイトでのアンモニア合成は成熟技術であるが、需要サイトにおける水素再生反応については研究例・知見も少なく、まだ基礎研究のレベル。
  - 芳香族化合物の水素化・脱水素反応は、表に挙げた他の媒体に比べて可逆性に優れており、また研究開発も活発に行われているところから、ケミカルヒドライドのモデルとして、トルエン/メチルシクロヘキサン系を評価の対象とする。

| 化学系媒体        | 有機アラルキルヒドライド (MCH/トルエン系)                                    | ポリヒドライド系                                      | 無機ケミカルヒドライド (アンモニア系)                     | アンモニア                            |
|--------------|---|---|--|----------------------------------|
| 水素貯蔵容量 (wt%) | 6.2   | 10.8  | 3.6                                      | 17.6                             |
| 反応式          | <chem>MCH + 3H2 -&gt; NaBH4 + 2H2O -&gt; NaBO2 + 4H2</chem> | <chem>2NaBH4 + 4H2O -&gt; 2NaBO2 + 4H2</chem> | <chem>2NH3 + 2H2 -&gt; N2 + 3H2</chem>   | <chem>2NH3 -&gt; N2 + 3H2</chem> |
| 製品           | MCH   | 水素化ケミカルナトリウム                                  | 水素化アルミニウムナトリウム                           | アンモニア                            |
| 大量工業プロセス     | 無   | 無   | 無  | 130万トン/年                         |
| 国内生産量        | 2,300トン/年   | 無   | 無  | 自動車プロセスは、Kilgig IP による海外供給       |
| 現状           | 低沸点液体としてMCHを製造、工業プロセスはシクロヘキサンと類似の反応                         | 国内生産実績はなく、輸入利用されている                           | 無  | 自動車プロセスは、Kilgig IP による海外供給       |
| 反応条件         | 無、Pt 系触媒 1~5MPa、120~200℃                                    | 無   | 無  | Pt 系触媒 8~10MPa、400~500℃          |
| 水素貯蔵密度       | 120kg/立方メートル  | 約200kg/立方メートル                                 | 約100kg/立方メートル                            | 約100kg/立方メートル                    |
| 大量工業プロセス     | 180万トン/年  | 無   | 無  | 無                                |
| 国内生産量        | 180万トン/年  | 無   | 無  | 無                                |
| 現状           | 原油から分離製造  | 加水分解で爆発的反応                                    | 基礎研究段階                                   | 合成反応は発熱                          |
| 備考           | キャリアの選り取り使用が可能。貯水プロセスの開始により大規模稼働が可能。                        | 数千万 NaBH4・NaOH・H2 水素化物の大量生産が可能。小規模生産も可能。      | 数千万 NaBH4・NaOH・H2 水素化物の大量生産が可能。小規模生産も可能。 | -32℃の液化冷凍、常温で液体の貯蔵。精製プロセスの開発が必要。 |

参考 NEDO 平成20年度報告書 水素キャリアに応じたフィジビリティスタディ Copyright: 2010 IAE. All rights reserved.

Copyright: 2010 IAE. All rights reserved. 平成22年4月26日 水素エネルギー協会特別講演会

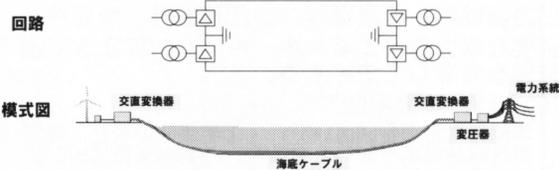
概念設計



Copyright: 2010 IAE. All rights reserved. 平成22年4月26日 水素エネルギー協会特別講演会

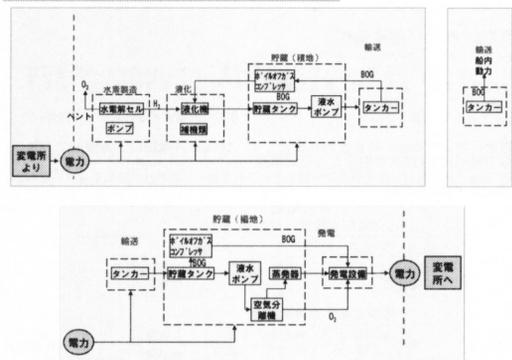
電力

- 双極中性点両端接地方式
  - 本線は+極、-極の2本のケーブルで構成され、+極-極の差の電流を大地で流す
- 送電容量2000MW (±500kV, 2000A) 鉄線鍍装付 直流CVケーブル
- 交直変換-海底ケーブル-交直変換-変電所を経て需要側へ



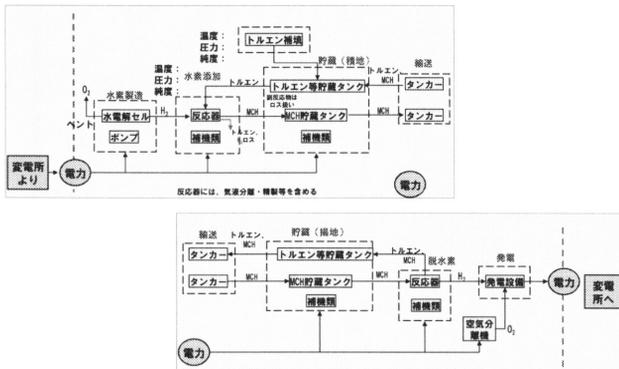
Copyright: 2010 IAE. All rights reserved. 平成22年4月26日 水素エネルギー協会特別講演会

システムフロー (液体水素)



Copyright: 2010 IAE. All rights reserved. 平成22年4月26日 水素エネルギー協会特別講演会

システムフロー（有機ハイドライド）



Copyright © 2010 IAE. All rights reserved.

経済性評価

$$\text{耐用年平均発電コスト (円/kWh)} = \frac{\sum_n [(I_{n,t} + M_{n,t})(1+r)^{-t}]}{\sum_n E_t(1+r)^{-t}}$$

- ・  $I_{n,t}$ : 設備nのt期における設備関連費用（元利金等払いの1期分の金額）
- ・  $M_{n,t}$ : 設備nのt期における運転関連費用（固定資産税、事業報酬、保険費用、修繕費、変動費）
- ・  $E_t$ : t期における発電量
- ・ r: 割引率
- ・ t: 期（1年単位）

年経費（電力）

| 項目    | 1   | 2   | 3   |
|-------|-----|-----|-----|
| 建設費   | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 運転費   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 維持費   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 廃棄費   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 平均年経費 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 割引率   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 平均年経費 | 0.9 | 0.8 | 0.7 |
| 建設費   | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 平均年経費 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |

年経費（液水）

| 項目    | 1   | 2   | 3   |
|-------|-----|-----|-----|
| 建設費   | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 運転費   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 維持費   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 廃棄費   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 平均年経費 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 割引率   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 平均年経費 | 0.9 | 0.8 | 0.7 |
| 建設費   | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 平均年経費 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |

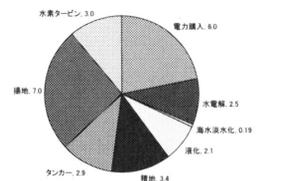
年経費（OCH）

| 項目    | 1   | 2   | 3   |
|-------|-----|-----|-----|
| 建設費   | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 運転費   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 維持費   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 廃棄費   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 平均年経費 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 割引率   | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 平均年経費 | 0.9 | 0.8 | 0.7 |
| 建設費   | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 平均年経費 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |

年経費やコストは「平成6年度報告書E-NE[サステナブル]全体システム概念設計」および「国内外電力供給における電力供給コスト比較」（渡部、他、エネルギー・貿易学会2009年3月）を参照した。

コスト内訳の例（17,000kmの比較）

液体水素

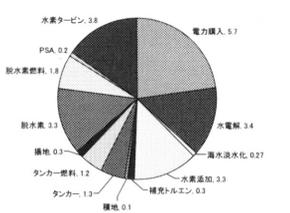


約27円/kWh

- ・ 固定費がほとんど

- ・ 電力購入費用が約2割を占めるため、再生可能エネルギー由来の電力が安価に供給されることもポイントとなる。

有機ハイドライド



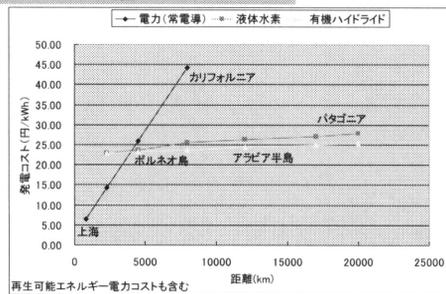
約25円/kWh

- ・ 変動費の割合が高い

※再生可能エネルギー電力の購入費用2.0円/kWhは仮定

Copyright © 2010 IAE. All rights reserved.

実施内各キャリアの発電コストの距離依存性



- ・ 日本から数千キロメートルが電力と化学媒体による輸送のブレイクポイント
- ・ 4000kmから8000kmで液体水素の発電コストの傾きがやや急になっているのは、距離の増加に伴う揚子貯蔵設備の増加による。

技術課題

- (1) 電力
  - 常電導送電技術
    - 5000m級の大深度に敷設可能なケーブルの開発
    - 5000m級の大深度へのケーブルの敷設技術
    - 1回航あたりのケーブル敷設長の増加（敷設工期の短縮化）
    - 交直変換機、ケーブルの低コスト化、大深度対応ケーブル
- (2) 化学媒体の共通技術
  - 水電解装置のシステム原単位の向上
  - 再生可能エネルギー由来電力と水電解装置のインターフェース技術
  - 水素大量需要技術：例、水素タービンの開発（高効率酸素分離技術、クロースド化技術、耐熱異材料・タービン・コンプレッサ、高温熱交換器、純水素酸素燃焼器）
  - 導入期における天然ガス-水素混焼技術の開発
- (3) 液体水素
  - 300 t/日規模の高効率大型液化機の開発（大型機の作成、液化原単位の向上）
  - 大型液体水素タンク（80,000m<sup>3</sup>規模）の開発、断熱技術の低コスト化
  - 現状のLNGタンカー級の液体水素タンカーの開発
  - 液体水素の冷熱を利用する港湾システム
- (4) 有機ハイドライド
  - 長寿命高性能の脱水素触媒の開発
  - 大型の脱水素プラントの開発
  - 高回収率の水素脱水素システム
  - 省エネ大型ケミカルタンカーの開発
  - 排熱利用技術（水素反応の排熱、水素タービン排熱の有効利用）

Copyright © 2010 IAE. All rights reserved.

まとめ

- 再生可能エネルギー大陸間輸送システムの概念設計
- ・ 基幹エネルギーシステムとして必要な電力供給を前提とし概念設計
    - 化学媒体への変換を経由する電力輸送
    - 海底ケーブルによる電力輸送システム
      - 単位システムあたり100万kWの発電所が稼働率90%で稼働した場合の電力を供給
- 再生可能エネルギー大陸間輸送技術の評価・比較
- ・ 選択した各エネルギーキャリアについて発電コストの距離依存性を評価。
  - ・ 日本から数千キロメートルが電力と化学媒体による輸送のブレイクポイント
  - ・ これより短い距離では電力が、長い距離では化学媒体が有利
  - ・ 化学媒体では、長距離で、有機ハイドライドがやや有利か。

謝辞

本研究は、NEDO技術開発機構委託事業「エコイノベーション推進事業」『海外再生可能エネルギーの大陸間輸送技術の調査』にて実施したものです。

Copyright © 2010 IAE. All rights reserved.