

# 再生可能エネルギーの大規模導入に対応する ためのエネルギー貯蔵・輸送技術

## Energy Storage and Transportation Technology for Huge Scale Renewable Energies

光島重徳\*

Shigenori Mitsushima

Green Hydrogen Research Center, Yokohama National University

### Abstract

Carbon dioxide emission must be reduced to control global warming and a drain on fossil energy resources. After the great east Japan earthquake, the importance of renewable energies is increasing, because nuclear power plants must decrease. In this decade, the installation of renewable energy systems increases, however, their electric power generation is around 1% of total electric power generation in Japan. The utilization of photovoltaic and wind turbine generation system is ten several percent of their capacity because of weather conditions. Renewable energies are not uniform, and good place is limited, therefore, huge scale renewable energy system with energy storage and transportation should be planned with global viewpoint. Nature of electrochemical system is suitable to renewable energies because of high energy conversion efficiency without dependence of the system size around ambient temperature. Development of secondary batteries is increasing in order to improve performance with cost reduction. These efforts are important, but other huge electrochemical systems for storage and transportation should be also required for huge renewable energies because of their capacity. Combination of water electrolysis and fuel cells with an energy carrier or advanced redox flow battery-like systems would be candidates for them.

*Key words*: Energy carrier; Renewable energy; Energy storage; Energy transportation

### 1 はじめに

地球温暖化や化石エネルギー資源の枯渇を抑制するために二酸化炭素排出量を削減する必要があることは共通認識であろう。東日本大震災前には、二酸化炭素

排出量抑制の対策に再生可能エネルギーの導入をすすめることも織り込んでいたが、原子力発電所の増設が最も大きな割合を占めていた。2013年4月現在、我が国では稼働可能な50基の原子力発電所のうち、運転しているのは2基のみで、震災前はほとんど稼働していなかった老朽化した火力発電所等により電力を賄っており、二酸化炭素排出量の大幅増加と貿易収支の赤字を招いている。

\* 横浜国立大学大学院 工学研究院 機能の創生部門  
グリーン水素研究センター 教授

福島第一原子力発電所での事故の後、明確な意思決定で原子力発電を停止して、再生可能エネルギーを基盤とするエネルギーシステム構築に大きく舵をとったのはドイツである。事故後、稼働していた17基の原子力発電所のうち8基を停止し、その他の発電所も順次稼働停止する予定になっている。旧東ドイツのロシア型加圧水型原子炉(VVER)を廃止したことも有り、ドイツ国内では原子炉16基が解体中である。福島第一原子力発電所を含めても8基が廃止あるいは解体中の日本よりもドイツのほうが解体技術の経験も多いと考えられる。ドイツは隣国との電力の融通が可能であること、バルト海沿岸を中心に風力発電の適地であることも有り、日本よりも良い環境で計画的に脱原発が進んでいるように見えるが、課題も多い。ドイツでも放射性廃棄物の最終処分場が決定していないこと、再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度により電力価格が上昇していることのほか、変動する電力を隣国と融通する容量的な制限や価格、洋上風力と陸上のグリッドとの接続、風力資源の豊かなバルト海沿岸から電力消費の多い南部への電力輸送等、エネルギーの貯蔵や輸送に関わる経済的、技術的な問題である。

日本の電力消費量は年間1,000 TWh程度で、東日本大震災前はその30%の300 TWh程度を原子力発電、600 TWh程度が火力発電であった。現在は火力発電が原子力発電の分も担っており、2012年は900 TWh程度に達している。日本でも再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度を充実し、二酸化炭素排出量を抑制するための新エネルギーとしての太陽光、風力、水力、地熱発電の普及に務めている。設備容量としては太陽光、風力、および地熱でそれぞれ362万kW、224万kW、および54万kWである。これらの所謂新エネルギーによる発電電力量は全体の1%程度である。ここで、現状の太陽光発電および風力発電の設備容量と時間の積で求まる電力量に対する実際の発電電力量は10%台半ばである<sup>1</sup>。

国内の再生可能エネルギー導入のポテンシャルについての報告は必ずしも十分とは言えないが、太陽光発電では5~10 TWh、小水力発電では8~70 TWh、風力発電では6~数100 TWh程度と考えられる。風力発電については洋上風力の設備容量と稼働率をどのように考えるかによって非常に大きな幅になる。国内での風力発電のポテンシャルは北海道および北東北に偏っており、これらの開発はドイツ同様、電力の貯蔵や輸送も問題となる<sup>2-4</sup>。

再生可能エネルギーの分布を国際的に見ると、日本

は水資源には恵まれているものの、太陽光や風力に関しては適地とは言い難い。太陽光については日本の180 W/m<sup>2</sup>と比較してアフリカの砂漠地帯でも200 W/m<sup>2</sup>程度で数10%程度の差であるが、風力は首都圏の5 m/sに対して南アメリカのパタゴニア地方、オセアニアの南部、西ヨーロッパの北部、西サハラ、ソマリアなどでは9 m/s程度の風力が得られる。ここで、風力エネルギーは風速の3乗に比例するので、5 m/sと9 m/sの風速は、エネルギーとしては約6倍であり非常に大きな差である。風力発電の稼働率も立地条件に大きく影響される<sup>5,6</sup>。

以上のように、国内の再生可能エネルギーは絶対量の不足の他、世界的な適地と比較して稼働率でも劣ると考えられるので、再生可能エネルギーの大規模導入を考える上ではエネルギー貯蔵や輸送と併せて適地を選定する必要がある。

## 2 再生可能エネルギーを基盤とするエネルギーシステム

再生可能エネルギーを基盤とするエネルギーシステムについて考える。例えば需要側で100万kW程度のベースロード、即ち、原子炉1基の発電量に相当する電力を考える。国内の平均的な立地条件では、100万kWとはメガソーラー(1,000 kW級)で設備稼働率が15%であるとする約6,700箇所分、世界最大級の風車(5,000 kW級)で設備稼働率が15%であるとする風車約1,300台に相当する。なお、風力発電量が上位の国々の平均設備稼働率は約25%であり、必ずしも地産地消が好ましい訳ではなく、立地条件によっては利用率の差がエネルギーの輸送による損失を補える可能性がある。

Fig. 1に水電解により水素を製造し、エネルギーキャリアに変換して船舶輸送して100万kWの電力を得ることを想定した試算例を示す。図中の化学物質の下のMW単位の数字は燃焼熱、機器の下のかっこ内の数値は機器のエネルギー変換効率の概算値である。図中、上段は再生可能エネルギーが得られる地域でのプロセス、下段がエネルギー消費地でのプロセスである。100万kWの電力を得るためには発電量ベースで300万kW強の再生可能エネルギーが必要である。エネルギー変換に関わる水電解と発電効率の積が40%、貯蔵および輸送に関わる水素化、輸送、および脱水素化の効率をそれぞれ90%、95%、および90%とするとこれらの積は77%である。この中では、

エネルギー変換に関わる損失，具体的には酸素が反応に関わるプロセスの損失が大きいと考えられる．次にこの規模の電気化学システムの実現性について考える．Table 1 に大規模水電解プラントの例を示す．世界最大級のアルカリ水電解プラントでも水素生産速度は  $30,000 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$  程度，燃焼熱として 10 万 kW 程度で Fig. 1 の 1/10 以下の値である．しかし，現在の水電解は水素製造プロセスの主流では無く，最近は技術的にも進歩が少ない．ここで，水電解とは技術的には比較的近く，大規模な工業電解が行われている食塩電解に注目する．食塩電解は食塩水を電解して塩素および水酸化ナトリウムを得るプロセスであり，水素は副生成物である．Table 2 に示すように水酸化ナトリウムは年間 9 千万 t 程度製造され，252 億  $\text{Nm}^3$  の水素が副生している．国内でも年間 4 百万 t の水酸化ナトリウムが製造され，11 億  $\text{Nm}^3$  の水素が副生している．注目すべきは，世界で 1 年間に 8 百万 t 分の水酸化ナトリウム製造設備が増設され，このうち約 80

%が日本の技術であることである．年間に増設された設備の電力消費量は 270 万 kW 程度で Fig. 1 で想定した規模である．したがって，食塩電解工業並の規模でエネルギーの貯蔵・輸送を考えると，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ことが実現可能と考えられる．

### 3 再生可能エネルギーを支えるエネルギーの貯蔵・輸送システム

実用化されている大規模なエネルギー貯蔵システムとして揚水発電が挙げられるが，この方法は輸送には適さない．エネルギーの輸送と貯蔵を効率よく行うためには化学エネルギーに変換することが有効と考えられる．電力を直接化学エネルギーに変換するプロセスが電気化学システムである．例えば，二次電池，いわゆる蓄電池は電力を化学エネルギーに変換して貯蔵するデバイスであり，携帯機器から電気自動車まで広く

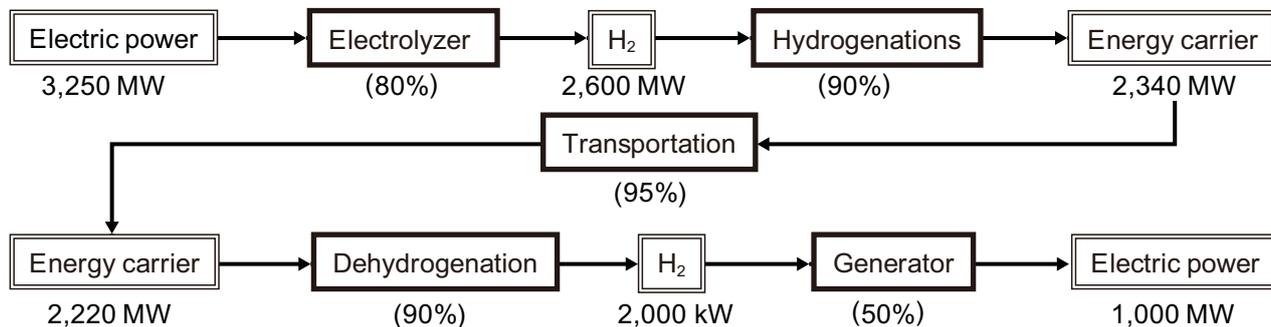


Fig. 1 Energy supply chain using hydrogen as an energy carrier.

Table 1 Large scale water electrolysis plants.

Site	Supplier	Capacity / $\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$	$\Delta H^{\circ}$ (combustion) / MW
Aswan (Egypt)	Brown Boveri	33,000	117
Nangal (India)	DeNora	30,000	106
Rjukan (Norway)	Norsk Hydro	27,900	99
Glomfjord (Norway)	Norsk Hydro	27,100	96
Kwe Kwe (Zimbabwe)	—	21,000	74
Trail (Canada)	Trail	15,200	54

Table 2 Hydrogen production and energy consumption of chloro-alkaline industry in 2010.

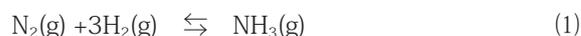
Item	World	Growth in the world	Japan
NaOH production	90 Mt	8 Mt/year	4 Mt
$\text{H}_2$	$2.52 \times 10^{10} \text{ Nm}^3$	$2.24 \times 10^9 \text{ Nm}^3 / \text{year}$	$1.12 \times 10^9 \text{ Nm}^3$
Electric energy	240 TWh	22 TWh/year	10 TWh
Electric power	30,000 MW	2,700 MW / year	1,200 MW

用いられている。リチウムイオン電池は質量エネルギー密度が約 100 Wh/kg, 体積エネルギー密度が約 250 Wh/L の高エネルギー密度の二次電池であり, 様々な用途に用いられているとともに, 研究開発も活発に行われている。とくに電気自動車用電源としては航続距離を確保し, 低コスト化を図るため, 2030 年頃には質量および体積基準でそれぞれ 500 Wh/kg および 1,000 Wh/L, 2030 年以降には 700 Wh/kg および 1,500 Wh/L を目指すとされている。また, コストについても現状の 100,000 ~ 200,000 円 / kWh を 2030 年以降の目標として 5,000 円 / kWh としている<sup>7</sup>。この流れは, 現状のリチウムイオン電池を基準と考え, リチウムイオン電池の応用から新型二次電池の開発を目指すものであり, 風力発電および大規模太陽光発電の短周期の出力変動緩和への応用も考慮されている。

電力平準化のための定置型の大型二次電池システムとしては Table 3 に示すレドックスフロー電池, ナトリウム-硫黄電池, ニッケル-水素化物電池, 鉛蓄電池なども検討されている。これらの電池はエネルギー密度ではリチウムイオン電池より劣るものの, 容量あたりの価格等では優れている。レドックスフロー電池の運転試験では, 30 MW 級のウィンドファームの出力の短周期変動を 6 MWh の電池システムで平滑化した例や, 100 kW 級の太陽光発電と 5 MWh の電池システムで昼夜の電力調整により計画運転試験した例が報告されている。短周期変動を抑制するシステムの例では電池システムの容量 / 再生可能エネルギーの定格出力 = 6 MWh / 30 MW = 0.2 h, 計画運転試験の例では 5 MWh / 0.1 MW = 50 h である。再生可能エネルギーを中心としたエネルギーシステムを構築するためには計画運転可能なシステムが必要であり, 短周期の電力の平滑化と比較して非常に大きな容量の電池システムが必要である。エネルギーの貯蔵・輸送を季節間まで考えると, さらに大きな容量が必要となる。一般的な二次電池システムでは容量とセル数が比例するので, システムの容量と出力ならびに価格は基本的には

比例するのに対して, レドックスフロー電池の場合には活物質の水溶液のタンクで保持するため, 出力とは独立で容量を設計することが可能である。したがって, 大容量システムでは容量あたりのコスト低減が可能である。以上の特性より, これらの中ではレドックスフロー電池が計画運転可能なシステムには適していると考えられる<sup>8,9</sup>。

次に, 水素の貯蔵・輸送のためのキャリアについて考える。Table 4 に水素キャリアとしての圧縮水素, 液化水素, 液体アンモニア, メチルシクロヘキサンの物性をまとめる。燃料電池自動車用の水素ボンベとして, 35 MPa と 70 MPa の規格が提案され, 70 MPa が主流となりつつあるが, 35 MPa から 70 MPa に圧力を 2 倍にしても理想気体から外れて水素の質量は約 1.7 倍の容量となる。また, 極低温で液化しても液体のエネルギー密度は 70 MPa ボンベの 2 倍にもならず, 密度も約 0.07 g/cm<sup>3</sup> の小さな値である。石油系の燃料の燃焼では質量エネルギー密度が約 12,800 Wh/kg, 体積エネルギー密度が約 9,600 Wh/L であるので, 水素は高圧での圧縮や極低温の液化でも体積エネルギー密度が低く, 非常に軽いエネルギーキャリアである。船舶での輸送では密度が水に比べて非常に小さくて軽いことは必ずしも利点では無いので, 専用船の開発や, 質量エネルギー密度は低いものの体積エネルギー密度が高い水素吸蔵合金による貯蔵とのハイブリッドなども検討されている。水素を化合物として固定して輸送する方法の例として液体アンモニアやメチルシクロヘキサンなどの有機ハイドライド法などがある。アンモニアは空気中の窒素をキャリアとするもので, 肥料の製造などで工業化されている約 500 °C, 20 MPa での触媒反応でのハーバー・ボッシュ法により製造可能である。



体積エネルギー密度, 質量エネルギー密度とも高いが, 製造過程のエネルギー効率向上やアンモニアの毒性に

Table 3 Secondary batteries for power storage application.

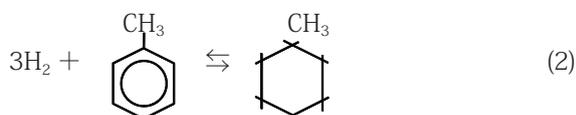
	Redox flow	Na-S	Lead-acid	Lithium-ion	Ni-MH	Zn-Br
Active materials (+) / (-)	VO <sup>2+</sup> / V <sup>2+</sup>	S / Na	PbO <sub>2</sub> / Pb	LiMO <sub>2</sub> / LiC <sub>6</sub>	NiOOH / MH	Br <sub>2</sub> / Zn
Theoretical specific energy / Whkg <sup>-1</sup>	100	786	167	392 - 585	225	428
Open circuit voltage / V	1.4	2.1	2.1	3.6 - 3.8	1.2	1.8
Temperature / °C	R. T.	300	R. T.	R. T.	R. T.	R. T.
Auxiliaries	Flow system	Heater	-	-	-	Flow system

Table 4 Properties of hydrogen carriers.

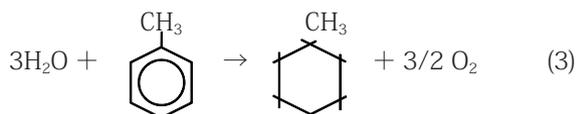
	Compressed hydrogen	Liquid hydrogen	Liquid ammonia	Methylcyclohexane
Chemical formula	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
Molecular mass	2.0 g/mol	2.0 g/mol	17.0 g/mol	98.2 g/mol
Boiling point	-253 °C	-253 °C	-33.4 °C	101 °C
Density	0.0233 g/cm <sup>3</sup> (35 MPa) 0.0392 g/cm <sup>3</sup> (70 MPa)	0.0706 g/cm <sup>3</sup>	0.682 g/cm <sup>3</sup> (liq.)	0.769 g/cm <sup>3</sup>
Hydrogen content	100 mass% 2.33 kg/100 L (35 MPa) 3.92 kg/100 L (70 MPa)	100 mass% 7.06 kg/100 L	17.8 mass% 12.1 kg/100 L	6.16 mass% 4.73 kg/100 L
Enthalpy change of hydrogen evolution	-	0.899 kJ/mol-H <sub>2</sub>	30.8 kJ/mol-H <sub>2</sub>	59.4 kJ/mol-H <sub>2</sub>
Gibbs energy density as hydrogen (HHV)	32,900 Wh/kg 767 Wh/L (35 MPa) 1,290 Wh/L (70 MPa)	32,900 Wh/kg 2,330 Wh/L	5,810 Wh/kg 3,960 Wh/L	2,010 Wh/kg 1,550 Wh/L
Storage pressure	35 / 70 MPa	< 20 MPa	~ 1 MPa	0.1 MPa
Storage temperature	R.T.	Very low temp.	R.T.	R.T.
Flammability limit	4.1 ~ 74.2 vol.%	4.1 ~ 74.2 vol.%	15 ~ 28 vol.%	1.4 ~ 6.7 vol.% (toluene)
Electromotive force	1.23 V	1.23 V	1.17 V	1.07 V

対する対策などが課題である。

有機ハイドライド法，例えばトルエン / メチルシクロヘキサン系はトルエンがキャリアとなり，約 300 °C，0.1 MPa 程度の条件で以下の反応で水素を貯蔵・輸送する。



質量エネルギー密度，体積エネルギー密度ともにそれほど高くはないが，トルエン，メチルシクロヘキサンともに常温で液体であり，現状の石油系燃料とほぼ同じ取り扱いが可能である利点がある。また，これらの反応は効率の高い既存のプロセスで得られるとともに，電気化学法では水電解との複合で直接電解水素化する高効率プロセスの検討もすすめられている。



水電解により得られた水素をエネルギーキャリア等により貯蔵するプロセスでは，二次電池システムとは異なり，受け入れ可能な電力と電力量をそれぞれ最適化することが可能であるので，使用条件により数十円 / kWh 程度のコストが可能と考えられる。

以上，再生可能エネルギーの変動を緩和して需要に

応じたシステムを構築するためには，再生可能エネルギーの特性に応じた起動停止や負荷追従が可能で，主に船舶輸送の観点から体積エネルギー密度および質量エネルギー密度がそれぞれ 1,000 ~ 1,500 Wh/L および 1,000 ~ 1,500 Wh/kg 以上，長時間大量に貯蔵する観点からは数十円 / kWh 以下のコストが見通せるエネルギーキャリアのシステム技術開発が必要であると考える。

#### 4 まとめ

再生可能エネルギーの大幅導入のためには，エネルギーの貯蔵・輸送の観点での技術開発が必須である。電気化学システムは常温付近でシステムサイズに関わりなく高いエネルギー変換効率が得られるので再生可能エネルギーと親和性が高い。大規模再生可能エネルギーに対応するためには，エネルギーの昼夜や季節間の調整や長距離輸送，長時間貯蔵が必要であることから，従来の二次電池とは異なるコンセプトで容量 / 入出力比を大きくする必要がある。具体的には，エネルギーキャリアと電気化学システムの複合技術の開発が必要である。具体的にはアルカリ水電解，エネルギーキャリアの水素化・脱水素化の化学プラント，燃料電池の組み合わせのシステムの高効率化と実用化，ならびにこれらの複合システムの研究開発などが必要と考える。本稿が再生可能エネルギーの導入の一助となれば幸いである。

## 文 献

1. 資源エネルギー庁, エネルギー白書 2012, 第2部,  
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2012/index.htm>.
2. 環境省委託事業, 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書, 平成 23 年 3 月.
3. 三菱重工, 風力講座 1.3 世界の風資源,  
[http://www.mhi.co.jp/products/expand/wind\\_kouza\\_0103.html](http://www.mhi.co.jp/products/expand/wind_kouza_0103.html).
4. NEDO エネルギー対策推進部, 風力発電導入ガイドブック改訂第9版, p.88 (2008).
5. <http://www.3tier.com/en/support/resource-maps/>.
6. 太田健一郎, 大城善郎, 水素エネルギーシステム, **36**, 64 (2011).
7. NEDO 燃料電池・水素技術開発部蓄電技術開発室, NEDO 二次電池技術開発ロードマップ (Battery RM2010)(2010), <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100519a05j.pdf>.
8. 重松敏夫, SEI テクニカルレビュー, 179, 7 (2011).
9. 柴田俊和, 隈元貴浩, 長岡良行, 川瀬和典, 矢野敬二, SEI テクニカルレビュー, 182, 10 (2013).