

再生可能エネルギーを活用する 水素電力貯蔵システム

Hydrogen Electric Power Storage System Using Renewable Electricity

渡邊 久夫 亀田 常治 山田 正彦
 ■ WATANABE Hisao ■ KAMEDA Tsuneji ■ YAMADA Masahiko

東日本大震災以降、太陽光や風力など、再生可能エネルギーの導入が国内で進められ、これに伴い出力平準化や需要調整を図るための電力貯蔵システムの必要性が増してきている。東芝は、固体酸化物を用いた水の電気分解（以下、電解と略記）を余剰電力で行って水素を製造し、この水素を用いて需要過多のときに燃料電池で発電する、水素電力貯蔵システムを開発している。

今回、高い充放電効率が得られた固体酸化物型電解セル（SOEC）を用いて、システムの概念設計を行った結果、システム充放電効率が80%であること、コスト面では大容量、長時間蓄電の適用に有利であることを確認した。

With the widespread introduction of renewable energy sources including photovoltaic and wind power facilities in Japan since the Great East Japan Earthquake of March 11, 2011, electricity storage systems have become necessary for load leveling and demand regulation.

Toshiba has been developing a hydrogen electric power storage system, which produces hydrogen using surplus electricity and generates electricity by fuel cells using the produced hydrogen. Through conceptual design of such a system using solid oxide electrolysis cells (SOECs) with high charge and discharge efficiency, we have confirmed that a system using SOECs achieves a system charge and discharge efficiency of 80% and has a cost advantage in the case of large-capacity and long-term electricity storage.

1 まえがき

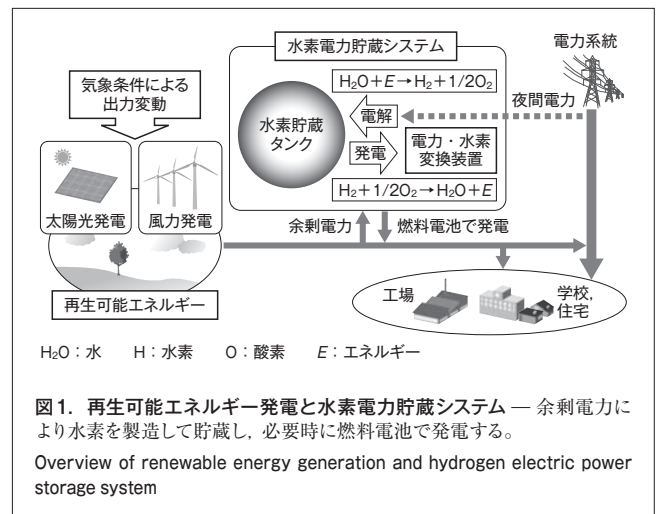
2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入が国内で進められており、2012年度のエネルギー・環境会議で、水力を除く再生可能エネルギーの2030年の発電電力量を、2010年に比べて8倍にする目標が決定された。太陽光や風力の電力は天候の影響を受けやすく変動が大きいので、これらの総発電容量に占める割合が20%に達すると、系統安定のための電力貯蔵システムが必要になるとされている。

海外でも再生可能エネルギーの導入は活発で、特にEU（欧州連合）では2050年の脱炭素社会を目指し、再生可能エネルギーの導入割合は日本に比べて高い。また、この導入拡大に伴い、種々の水素電力貯蔵の開発が進められている。英国では、欧州東芝研究所がワイト島での実証試験に参画しており、ドイツ、フランスでも試験が行われている。

東芝は、固体酸化物型電解セル（SOEC）を用いた電解部と高温蓄熱装置の開発を行い、これらに基づきシステム概念設計を行っている。

2 水素電力貯蔵システム

水素電力貯蔵システムは、再生可能エネルギーの出力が変動して余剰電力が生じた場合に、この余剰電力により水電解を行って水素を製造し、この水素を貯蔵して、必要ときに燃料



電池で発電を行うものである（図1）。水素として貯蔵するために、大容量及び長時間の蓄電に適している。その他の電力貯蔵の方式としては、NaS（ナトリウム硫黄）電池などがあり、図2に示すように、それぞれに適した出力容量と蓄電時間がある。

水電解の方式として、アルカリ水電解や、固体高分子膜（PEM）、SOECがある。アルカリ水電解は古くから実用化されてきた技術であり、電解液による腐食や隔膜の耐久性などの課題がある。PEMは腐食の問題はないものの貴金属触媒を用いる点からコストが高くなる。SOECは高効率で低コストの潜在力はあるが、現在開発中の技術であり、当社ではこのSOECを用いた水素電力貯蔵システムの開発を行っている。

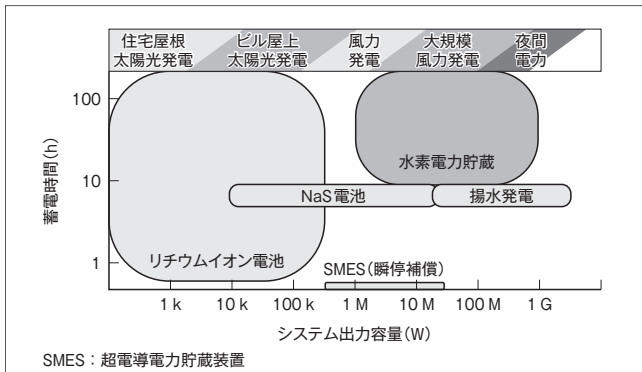


図2. 各種電力貯蔵システムの出力容量と蓄電時間 — 電力貯蔵方式それぞれに適した出力容量と蓄電時間がある。

Relationship between power capacity and storage time of various electric power storage systems

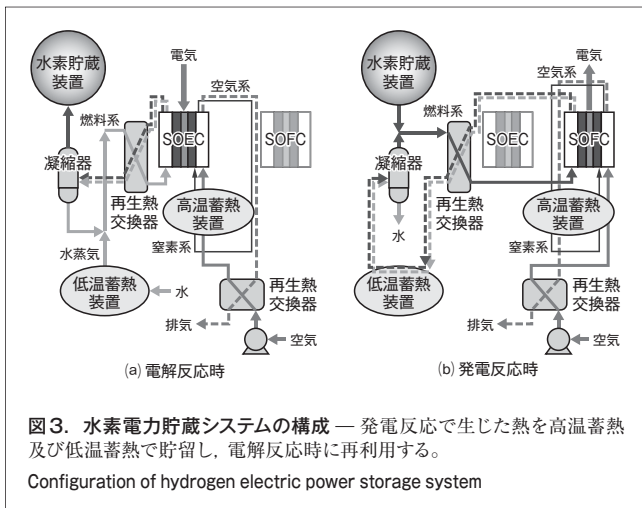


図3. 水素電力貯蔵システムの構成 — 発電反応で生じた熱を高温蓄熱及び低温蓄熱で貯留し、電解反応時に再利用する。

Configuration of hydrogen electric power storage system

水素電力貯蔵システム構成を図3に示す。SOEC, 固体酸化物型燃料電池 (SOFC) から成るセルスタック部は、電解膜の性能を上げるため、約800℃の高温としている。また、高い充放電効率を得るために発電反応で生じた熱を高温蓄熱装置で貯留し、電解反応時に再利用している。一方、燃料(電解時の水など、発電時の水素など)を室温から約800℃に昇温するために、再生熱交換器と低温蓄熱装置を設けている。低温蓄熱装置は、高温蓄熱装置と同様に、発電反応時に蓄熱し、電解反応時に放熱して水を蒸発させる。

3 SOEC 電解部

電解部と電池部での化学反応を図4に示す。反応エネルギー ΔH (添え字ECは電解時, FCは電池時)は式(1), (2)で表される。

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (1)$$

$$\Delta H_{EC} = -\Delta H_{FC} \quad (2)$$

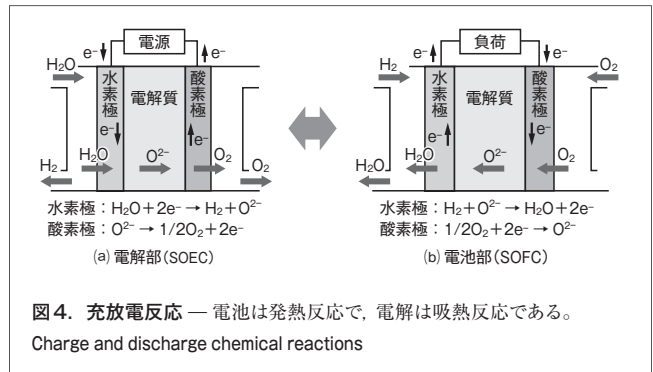


図4. 充放電反応 — 電池は発熱反応で、電解は吸熱反応である。

Charge and discharge chemical reactions

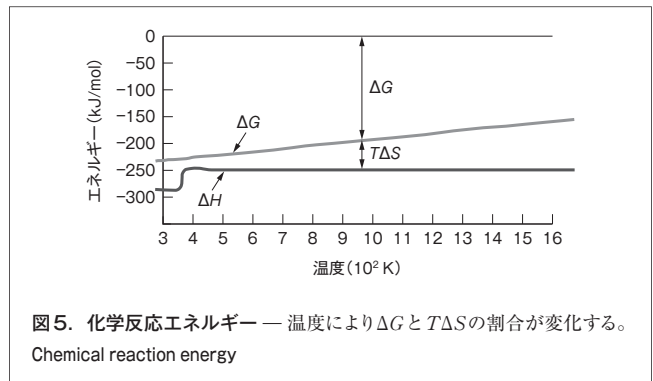


図5. 化学反応エネルギー — 温度により ΔG と $T\Delta S$ の割合が変化する。

Chemical reaction energy

ここで、 ΔG はギブス自由エネルギー、 ΔS はエントロピー、 T は温度である。電解反応に必要なエネルギー(ΔH)には、電気エネルギーとして ΔG を、熱エネルギーとして $T\Delta S$ を与える。逆に電池反応では、電気エネルギーとして ΔG を、熱エネルギーとして $T\Delta S$ を発生する。この熱を蓄熱装置で貯蔵する。

ΔG は、図5に示すように温度の増加に伴い減少するため、温度を上げて電解に必要な電気エネルギーを低減し、更に電池反応で発生する熱エネルギーを再利用することにより、高い充放電効率を得ることができる。

当社で開発した電解と電池における電流電圧特性の一例を図6に示す。電解と電池で同様のセルを用いており、ボタンセルと同等のサイズである。同じ電流密度での電解電圧(V_{EC})と電池電圧(V_{FC})の比が電解電圧効率 (EVE) と呼ばれる。EVE

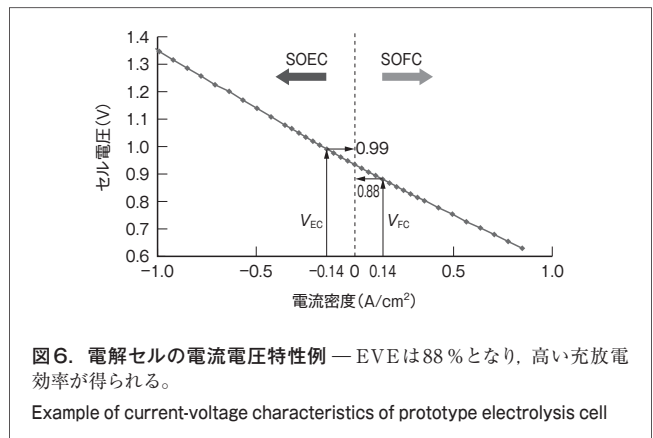


図6. 電解セルの電流電圧特性例 — EVEは88%となり、高い充放電効率が得られる。

Example of current-voltage characteristics of prototype electrolysis cell

は、電解電力と電池電力の比でもあり、充放電効率となる。

図6から、SOEC電解で88%の高充放電効率を得られることを確認した。今後、セルの耐久性向上や、大型化、セルを組み立てたセルスタックでのリーク抑制などを図っていく。

4 高温蓄熱装置

高温蓄熱装置は、電池時には反応熱を蓄熱し、電解時には必要な熱を放熱する装置である。蓄熱材には、800℃付近に融点を持ち、コスト当たりの蓄熱量が大きい材料を調査し、NaCl(塩化ナトリウム)を選定した(図7)。NaClの高温での耐食性を考え、SiC(炭化ケイ素)のカプセルにNaClを封入している。溶融凝固時のカプセル構造の健全性は、溶融凝固の繰返し試験により確認した⁽¹⁾。

高温蓄熱装置の伝熱特性の確認は、装置を縮小した試験とシミュレーションで行った。図8に示すように、NaClを内封したカプセル14体を断熱材の中に収納し、840℃の窒素ガスを通風し蓄熱させた後、760℃の窒素ガスを通風し放熱させた。このときの温度変化を図9に示す。図9灰色部の窒素ガス出

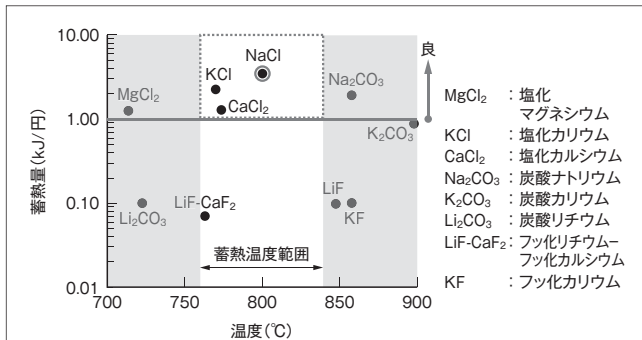


図7. 高温蓄熱材の特性 — NaClは、800℃付近に融点を持ち、コスト当たりの蓄熱量が大きい。

Comparison of characteristics of high-temperature thermal storage materials

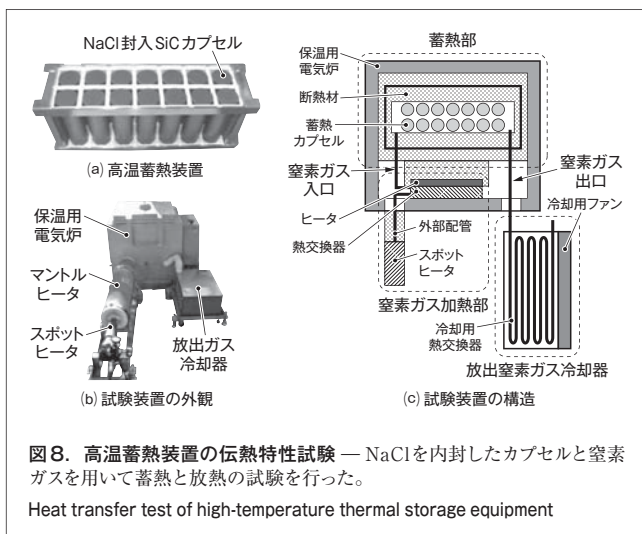


図8. 高温蓄熱装置の伝熱特性試験 — NaClを内封したカプセルと窒素ガスを用いて蓄熱と放熱の試験を行った。

Heat transfer test of high-temperature thermal storage equipment

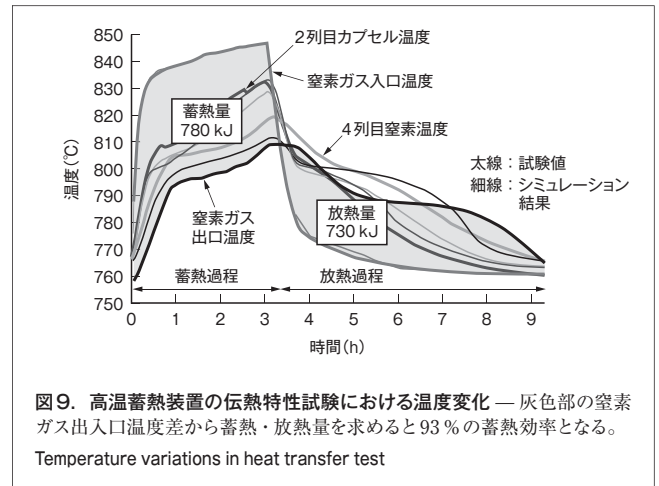


図9. 高温蓄熱装置の伝熱特性試験における温度変化 — 灰色部の窒素ガス出入口温度差から蓄熱・放熱量を求めると93%の蓄熱効率となる。

Temperature variations in heat transfer test

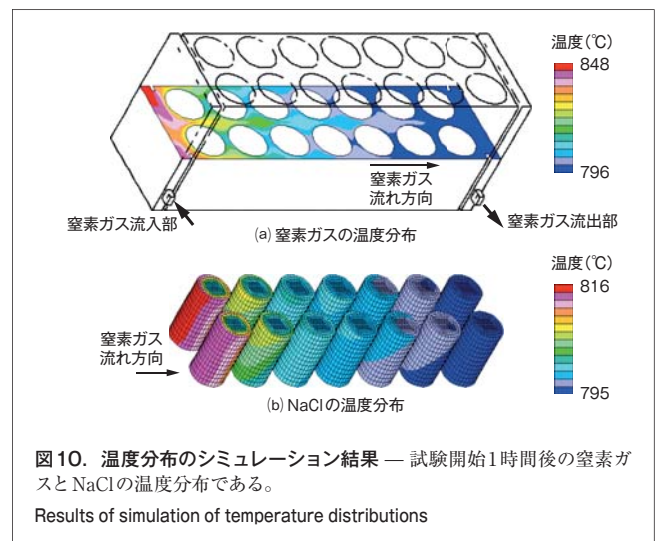


図10. 温度分布のシミュレーション結果 — 試験開始1時間後の窒素ガスとNaClの温度分布である。

Results of simulation of temperature distributions

入口温度差から蓄熱量と放熱量を求めると、蓄熱効率(=放熱量÷蓄熱量)は93%となった。窒素ガスとNaClの温度分布をシミュレーションした結果を、図10に示す。このシミュレーション手法を用いて、大型化した場合の性能評価を実施していく。

電解及び電池セルスタックと高温蓄熱装置は、約800℃で保持されるため、外部放熱を抑制する観点からは集中配置にすることが望ましい。今後はこれらを組み合わせたモックアップ試験により、問題ないかを確認していく。

低温蓄熱装置や水素貯蔵装置など、水素電力貯蔵システムを構成する他の装置には既存の技術があるため、それらを用いる計画である。

5 システム概念設計

SOEC電解部の試験で得られたセル性能や、高温蓄熱装置の試験で得られた蓄熱性能などを用いて水素電力貯蔵システムの概念設計を行った⁽²⁾。

主な仕様を表1に、システム概念図を図11に示す。運転温度800℃、電流密度0.14 A/cm²の運転条件で、システム充放電効率は80%としている。低温蓄熱装置や再生熱交換器などは既存の製品から選定している。

この仕様を基にコスト評価を行った結果(図12)、このシステムは、大容量、長時間蓄電に適しており、これらの使用条件下で有望な電力貯蔵システムである。

表1. 水素電力貯蔵システムの主な仕様

Main specifications of hydrogen electric power storage system

| 項目 | | 機器仕様 | |
|-----------------|--------------|---|------------|
| システム | 電解電力/発電電力 | 5.0 / 4.0 MW | |
| | 水素製造量/消費量 | 2,060 / 2,060 Nm ³ /h | |
| | 運転温度 | 800℃ | |
| | セル面積 | 3,520 m ² (電流密度0.14 A/cm ²) | |
| | セル充放電効率(EVE) | 88% | |
| | システム充放電効率 | 80% | |
| | 高温蓄熱装置 | 冷媒/蓄熱材 | 窒素ガス/NaCl |
| | 運転温度 | 800℃ | |
| 低温蓄熱装置 | 蓄熱材 | エリスリトール、パラフィンなど | |
| | 運転温度 | 100℃近傍 | |
| 熱交換器* 交換熱量 | 電解反応モード | 酸素極側熱交換器 | 220 kW |
| | | 水素極側熱交換器 | 550 kW |
| | 発電反応モード | 酸素極側熱交換器 | 1,450 kW |
| | | 水素極側熱交換器 | 580 kW |
| 高温蓄熱装置 窒素系統熱交換器 | | 420 kW | |
| 凝縮器 | | 水素・水蒸気分離用 | |
| 送風機 | 電解反応モード | 空気用 | 1,100 kg/h |
| | | 水素・水蒸気用 | 192 kg/h |
| | 発電反応モード | 空気用 | 7,300 kg/h |
| | | 水素用 | 220 kg/h |
| | 窒素ガス用 | 3,100 kg/h | |
| ポンプ | 電解反応モード 水用 | 290, 1,600 kg/h | |
| | 発電反応モード 水用 | 1,600 kg/h | |
| 配管系統 | | 水素極ループ(水素・水蒸気), 酸素極ループ(酸素・空気系), 窒素ループ | |
| 水素貯蔵装置(球形タンク) | | 1,600 m ³ (0.95 MPa, 8.0h蓄電相当) | |

*温度領域により熱交換器を分割。500℃以上ではインコイを使用
 出典：NEDO委託研究平成24年度成果報告書「再生可能エネルギーの水素電力貯蔵・充放電システムに関する検討」^[2]

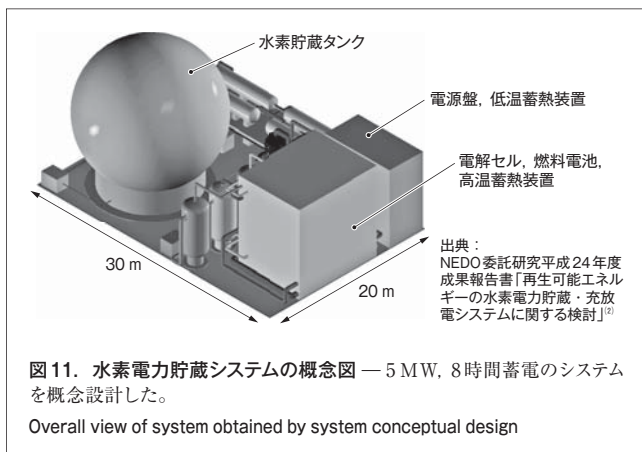


図11. 水素電力貯蔵システムの概念図 — 5 MW, 8時間蓄電のシステムを概念設計した。

Overall view of system obtained by system conceptual design

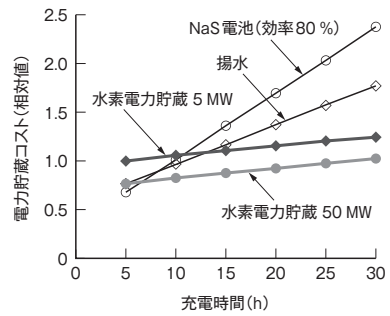


図12. コスト評価の結果 — 水素電力貯蔵システムは大容量、長時間蓄電に適している。

Results of cost evaluation

6 あとがき

水素電力貯蔵システムは、再生可能エネルギーの増大に伴い必要となる電力貯蔵システムとして、大きな潜在力を持つ。

実用化に向けた要素技術の開発とシステムの概念設計を行い、ボタンセルを用いたSOEC電解部の試験では、80%を超える高いシステム充放電効率を確認した。またコスト評価の結果、大容量、長時間蓄電では、他の電力貯蔵システムよりも有利であることがわかった。

2012年度に当社は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の調査研究「再生可能エネルギーの水素電力貯蔵・充放電システムに関する検討」^[2]を受託し、水素電力貯蔵システムの現状技術を整理した。2013年度以降、SOECによる水素製造実現に向けて開発を進めていく。

文献

- 須山 章子 他. “水素電力貯蔵システム用高温蓄熱セルの開発”. 日本セラミックス協会第25回秋季シンポジウム講演予稿集. 名古屋, 2012-09. 1A06.
- NEDO委託研究平成24年度成果報告書 再生可能エネルギーの水素電力貯蔵・充放電システムに関する検討. 2013-02報告. 207p.



渡邊 久夫 WATANABE Hisao

電力システム社 原子力事業部 原子力開発設計部主幹。
 高速増殖炉などの伝熱流動・動特性評価に従事。日本原子力学会、日本機械学会会員。
 Nuclear Energy Systems & Services Div.



亀田 常治 KAMEDA Tsuneji, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 高機能・絶縁材料開発部主幹、博士(工学)。機能性セラミックスの材料・プロセス開発に従事。日本セラミックス協会会員。
 Power and Industrial Systems Research and Development Center



山田 正彦 YAMADA Masahiko

電力システム社 技術管理部 技術企画担当主幹。
 ガスタービン燃焼器の開発及び燃料電池事業の開発に従事。
 日本機械学会、日本ガスタービン学会会員。
 Technology Management Div.