

水素吸蔵合金タンクを中心とした トータル・システム・エンジニアリング

岡本 英之¹・川上 理亮¹・小澤 由行¹・赤井 誠²

¹高砂熱学工業株式会社 総合研究所
243-0213 神奈川県厚木市飯山 3 1 5 0

²独立行政法人 産業技術総合研究所 小型分散システム研究グループ
305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1

Total Energy System Engineering by Coring Metal Hydride Tanks

Hideyuki OKAMOTO¹, Yoshiaki KAWAKAMI¹, Yoshiyuki KOZAWA¹ and Makoto AKAI²

¹Research and Development Center, Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.
3150 Iiyama, Atsugi, Kanagawa 243-0213

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
1-2-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305-8564

Hydrogen is a possible energy carrier in the near future, because it has fruitful characteristics as for reversible conversion and high volumetric storage density of energy. By using the total energy system integrated by electrolysis, metal hydride and fuel cell functions, it is possible to realize simultaneously the effective use of energy, the load leveling of electricity, and the energy cost reduction. In this report, we have picked up the critical R&D issues as for the system engineering and the component design to achieve the high energy-performance, based on the energy flow analysis of such a total system. Next, we have performed both of the numerical analysis and the scope experiment to obtain the optimum thermal-hydraulic design technologies among electrolysis pressure, hydrogen flow rate and metal hydride utilization rate.

Keywords: Electrolysis, Metal hydride, Fuel cell, Load-leveling of electricity, Optimum thermal-hydraulic design

1. 緒言

水素はエネルギーの可逆変換と高体積密度貯蔵に特長を有する。その中でも、エネルギー貯蔵に関しては、図1に示すように、人工的な方法の中では水素吸蔵合金を用いることで、圧倒的に高い体積貯蔵密度を簡単な仕組みを用いて享受することができる[1]。

一方、現状の我が国におけるエネルギー需給構造を認めた上で、その中に新たな二次エネルギーである水素エネルギーを導入する場合に、エネルギーの供給から利用に至るトータルなマネジメントを実践できる最適な例題としては、図2に示すような電力の負荷平準化がある[2]。このシステムは、電力供給と熱供給が可能なエネルギー貯蔵機能を有するコージェネレーション・システム

と言える。また、本システムの構成機器として、水電解と燃料電池の機能を同一場所で発揮できる可逆セル・スタックを開発導入できることが、エネルギー・パフォーマンス

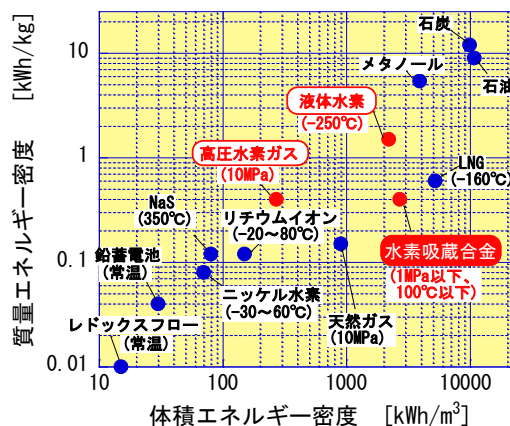


図1. 各種のエネルギー貯蔵密度の比較

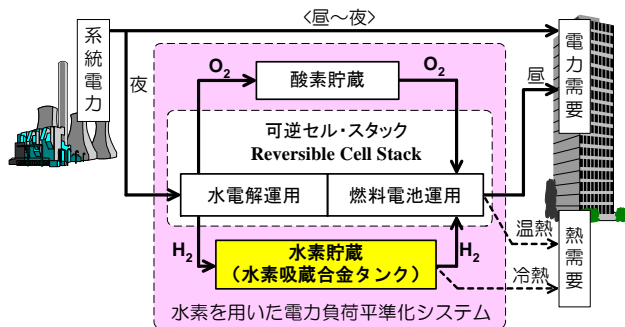


図2. 水素を用いた電力負荷平準化システムの概要

スをも高める意味から望ましい。この可逆セル・スタックは、今後自然変動型電源の安定的な有効利用を図る上での汎用機器にもなる。

本研究では、図3に示すような、発電能力5kW級の水電解-水素吸蔵合金-燃料電池からなるトータル・エネルギー・システムにおける水素吸蔵合金タンクの最適化および「水素」と「電気」、ならびに「熱」の同時有効利用技術の確立を主な研究の目的とした。

本報では、まずは図3のトータル・エネルギー・システムについて、システム全体のエネルギー・フローの分析・評価を行うことで、既存のコージェネレーション・システムや他の新型二次電池に対する本システムの競合力を、総合エネルギー利用効率を用いて評価した。次に本システムの熱管理の課題について、システム全体の運転性能に大きく影響する水素吸蔵合金タンクの最適化に着目し、本システムに最適な水素吸蔵合金と水素吸蔵合金タンク的设计仕様、ならびにシステムの運転条件をそれぞれ特定した。なお、水素吸蔵合金タンク的设计仕様を特定する方法として、システム全体をモデル化した数値解析を行い、さらにその妥当性を検証する実験を行った。

2. 総合エネルギー利用効率によるシステム評価

図3のエネルギー・システムにおいて、システム全体の性能を把握するために、システムの電気出力と排熱利用(排熱利用効率を70%と設定)とを組み合わせた総合エネルギー利用効率を試算した。

試算した結果、図4(1)に示すように、総合エネルギー利用効率という観点から本システムを評価(ここでは補機動力を除く)した場合、その値は、原理的には80%以上にすることができ、既存のコージェネレーション・システムの60~80%[3]や他の新型二次電池の70~90%[4-5]

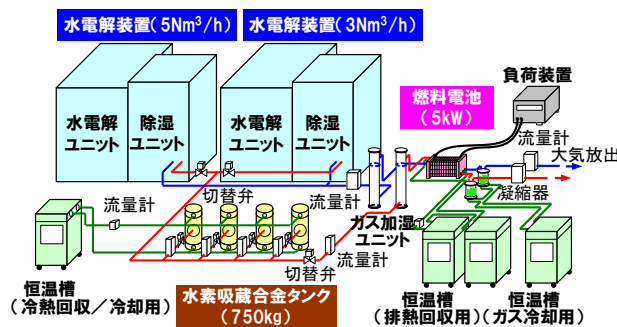


図3. 5kW水電解-水素吸蔵合金-燃料電池からなるトータル・エネルギー・システムの実証試験装置

の場合と遜色ない性能になることを確認した。

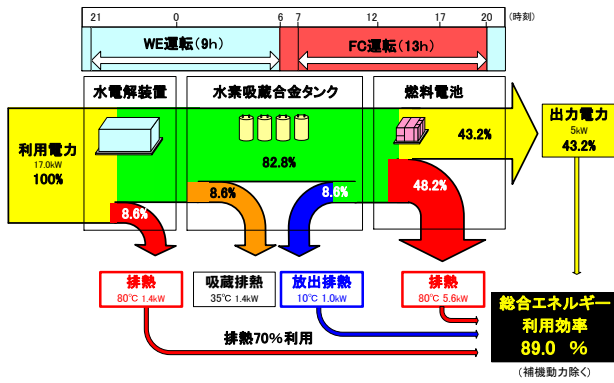
次に、本システムを既存の機器で構築した場合のエネルギー・フローを図4(2)に示す。ここでは、システムの実運用に必要な補機類も含めて評価した。この場合、総合エネルギー利用効率は13%近傍まで低下してしまう結果になった。その主な原因としては、以下の三つがある。

第1には、本システムを構成する主要な機器自体には、エネルギー・システムという目的に則した設計がなされていないことにある。例えば、既存の水電解装置の多くは、水素を安定に生成することを最優先に機器設計や運転条件の特定がなされているために、エネルギー収支の上での無駄が多い。

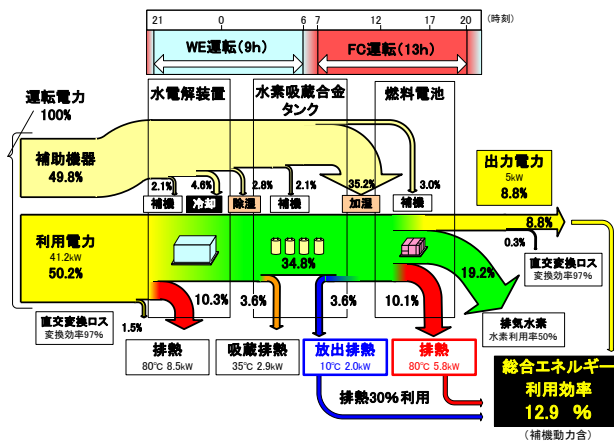
第2には、燃料電池に供給する燃料ガス(水素・酸素)の温・湿度条件を整えるために投入されるエネルギーが過大である。例えば、本システムにおける供給ガスの加湿方式としては、簡便なバブリング方式を採用している。この方式であれば、将来的に本システムの水電解と燃料電池とを一体化した可逆セル・スタックに代替して、さらに必要なシステム補器を簡素化する場合にも有利である。しかしながら、バブリング方式の場合には、その補器自体が大きくなり、またガス/水/配管経路などの温湿度管理のために、過大なエネルギー投入が起きがちである。

第3には、本システムで使用する補機類用の動力にある。これも既存の機器でシステムを構成した場合には、それぞれの機器の運転条件/運転方法なども含めて、エネルギー・システムに適した補機的设计/選定が、必ずしも行われていない。

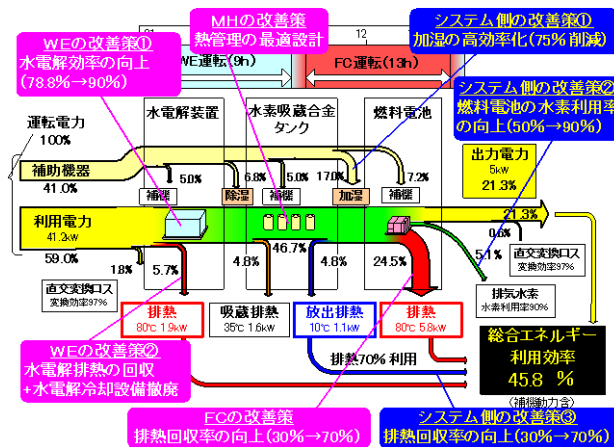
そこでトータル・システム・エンジニアリング技法を駆使することによって、上述のような課題を克服し、本システムにおける総合エネルギー利用効率の向上を図るために、システム側での対策と機器単体での対策の両面からアプローチすることにした。



(1) 総合エネルギー利用効率の目標値



(2) 総合エネルギー利用効率の現状値



(3) 総合エネルギー利用効率の改善値

図4. 本システムにおけるエネルギー・フローの分析

システム側からのアプローチとしては、①加湿の高効率化、②燃料電池の水素利用率の向上、③各装置の排熱利用効率の向上といった三点が挙げられる。

まず加湿に関しては、バブリングにおける気泡サイズや気/液の温度制御の最適化に加えて、システムの起動時を考慮して過大に設計されているヒータ能力を、主に二次側の負荷変動量に適合させる最適制御へと変更させ

ることによって、現状で必要な投入エネルギーの75%削減を改善の目標にすることができる。次に燃料電池における水素利用率に関しては、燃料電池の廻りに高効率な水素循環の仕組みを導入することで、現状の50%から90%まで向上させても、その電力変換効率は変わらない。ただし、水素利用率を向上させるほど、水素消費量が減少、つまりその分だけの水素吸蔵合金からの水素放出量が減少するために、水素吸蔵合金タンクからの排熱回収の総量は低下する。なお、排熱利用効率に関しては、可能な限り余分な仕組みを排除することで熱損失を低減させること、さらには負荷側(利用系)との最適統合を行うことによって、現状の30%から70%まで向上できよう。

一方、主要機器単体からのアプローチとしては、水素吸蔵合金タンクにおける熱管理の最適設計と、水電解装置と燃料電池のエネルギー・システムとしての設計仕様の見直しが挙げられる。水素吸蔵合金タンクに関しては、単に水素貯蔵性能というだけでなく、システム全体の運転性能に大きく影響することを考慮しなくてはならない。その詳細は次項で述べる。水電解装置に関しては、前述した通り、エネルギー・システムとしての仕様を再検討し、水電解効率を90%以上でかつ排熱利用を可能にする必要がある。さらに燃料電池に関しては、水素吸蔵合金タンクの改善策と同様なことが言えることから、排熱利用効率を70%にまで向上できよう。

以上のようなエネルギー・システムとして成立させる上での第一ステップの改善策を施すことにより、本システムの総合エネルギー利用効率は、図4(3)に示すように、40%を越す値まで向上可能であると推測される。

3. システムの熱管理

本システムの熱管理として、ここではとくに、システム全体の運転性能に大きく影響する水素吸蔵合金タンクの最適化について検討した。その結果、本システムに最適な水素吸蔵合金と水素吸蔵合金タンク的设计仕様、ならびにシステムの運転条件を特定することができた。

本システム中の水素吸蔵合金タンクを最適化するための指標としては、合金利用率がある。高い合金利用率を達成することによって、水素吸蔵合金の使用量に係わるコストとタンクの設置スペースを低減できる。しかし、水素吸蔵合金タンクの水素吸放出性能および排熱回収量は、システム全体の運転性能に大きく影響するために、水

素吸蔵合金タンクは、単に水素貯蔵量のみで設計することはできない。

そこで本研究では、システム全体を合理的に設計するために、まず必要な設計パラメータの抽出を行い、次に設計パラメータが合金利用率に及ぼす影響を特定することによって、高い合金利用率を達成することのできる運転条件とシステムの設計仕様の特定を行った。

3.1 水素吸蔵合金タンクとシステムの運転条件

図5には、水素吸蔵合金タンクの設計パラメータとシステムの運転条件との関係を示す。本システムでは、水素吸蔵時の発熱を通常の冷却塔で得られる冷水程度で除去し、一方、水素放出時の吸熱反応を空調機の冷熱源として利用することにする。したがって、システムの固定条件としては、水電解モードでの冷却水の入口温度(35°C)と燃料電池モードでの冷却水の入口温度(10°C)がある。また、燃料電池の運転圧力は、既存の機器の仕様や安全確保の観点から、0.1MPaとすることが適当であり、これも固定条件になる。そこで、設計上の変数パラメータとしては、①水素吸蔵合金タンクの熱交換性能、②水電解の運転圧力、③水素吸蔵合金特性の三つになる。

これらのうち、①と②に対しては、水素吸蔵合金タンクにおける熱交換機構の簡素化と水電解における運転圧力の低減化とが求められる。しかし、図5に示すように、これらはトレード・オフの関係にある。すなわち、水素吸蔵合金タンクの熱交換性能を高くすれば、水電解の運転圧力を低下させることができる。しかし、その水素吸蔵合金タンクには高度な構造・機構が必要となり、結果的に高価な装置となってしまう。それに対して、水電解の運転圧力を高くすれば、その分、水素吸蔵合金タンクの熱交換性能に余裕はできるが、排熱回収が難しくなるため

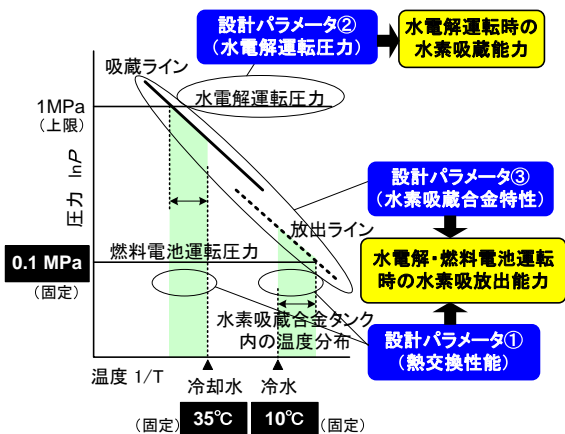


図5. 合金タンクの設計パラメータとシステムの運転条件との関係

に、システム全体の効率が低下してしまう。

一方、③の水素吸蔵合金特性によっても必要な水素吸蔵合金タンクの熱交換性能や水電解圧力は影響される。しかも、本システムに適した水素吸蔵合金の特性は、上述の固定条件からほぼ決定されるものの、設計通りの特性を有する水素吸蔵合金を製作できるか否かについては、即断はできない。本研究ではまず上述の固定条件を基に水素吸蔵合金を製作してみることにし、その特性値を用いて、①と②の設計パラメータによる数値解析を行った。

3.2 数値解析によるシステム設計概要

3.1 項の設計パラメータを基に、水素吸蔵合金タンクの設計仕様のみならず、システム全体の設計/運転仕様を決定するために、図6に示すようなシステム全体を対象にした熱と物質の連成移動現象の非定常数値解析を行った。図に示すように、本システムが成立する条件とは、四つの水素流量の瞬時値と積算値とをそれぞれ満足することである。

具体的には、水電解/燃料電池モードで生成/消費する水素流量と水素吸蔵合金タンクで吸蔵/放出可能な水素流量について、それらの積算値と瞬時値の双方を整合させる必要がある。

すなわち本システムを設計する上では、水電解モードでの水素流量は、水電解からの生成流量と水素吸蔵合金タンクでの吸蔵流量のいずれに律速されるのか、また燃料電池モードでの水素流量は、水素吸蔵合金タンクからの放出流量と燃料電池での消費流量のいずれに律速されるのか、さらに可逆セルを想定した場合には、それらの水素流量は、水電解と燃料電池のいずれのモードに律速されるかを特定する必要がある。なお、ここでの水素吸

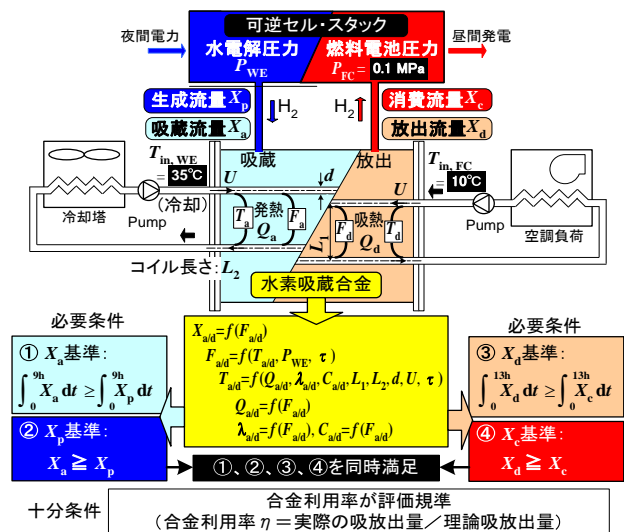


図6. 数値解析モデルの概念図

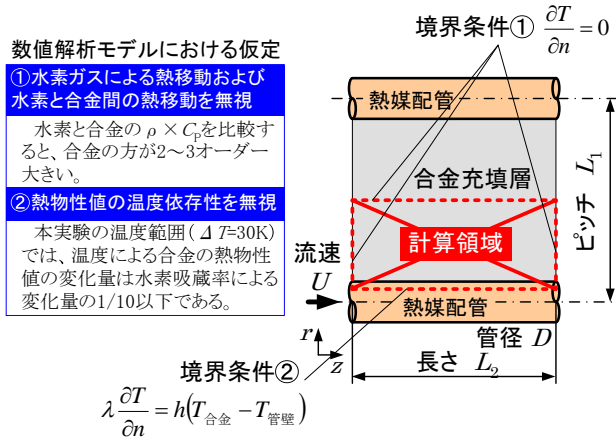


図7. 水素吸蔵合金充填層内の数値解析モデル

蔵合金タンク内の数値解析においては、図7に示すようなモデルを採用した。

ここで、数値解析で用いた式について説明する。

水素吸蔵合金タンクの水素吸蔵量基準/水素放出量基準の場合の水素流量計算式を式1に、水電解の生成量基準/燃料電池の消費量基準とした場合の水素流量の計算式を式2にそれぞれ示す。

$$X_{a/d} = \frac{4}{\pi L_1^2 L_2} \int_0^{L_2} \int_{\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \left(\frac{\partial F_{a/d}}{\partial t} N_{\text{theory}} \right) 2\pi r \, dr \, dz \quad \text{..... (式1)}$$

$$X_{p/c} = \frac{N_{\text{theory}}}{3600 \cdot \tau_{\text{WE/FC}}} \eta \quad \text{..... (式2)}$$

ここで、 η [-]は式3に示した合金利用率である。また $F_{a/d}$ [-]は水素吸蔵合金の水素吸蔵率（組成）であり、吉田らの実験式[6]に従い、式4および式5で、それぞれ表されるものとした。

$$\eta = \frac{1}{N_{\text{theory}}} \int_0^{9\text{h}/13\text{h}} X_{a/d} \, dt \quad \text{..... (式3)}$$

吸蔵反応：

$$\frac{\partial F_a}{\partial t} = k_a \frac{P_{\text{WE}} - P_{\text{eq,a}}(T_a)}{P_0} \frac{3}{2} (1 - F_a) \{ -\ln(1 - F_a) \}^{1/3} \quad \text{..... (式4)}$$

$$\text{放出反応：} \frac{\partial F_d}{\partial t} = -k_d \frac{P_{\text{eq,d}}(T_d) - P_{\text{FC}}}{P_0} F_d \quad \text{..... (式5)}$$

なお、 $P_{\text{eq}}[\text{MPa}]$ は水素吸蔵合金の平衡圧力であり、大角の近似式[7]に従い、式6で表されるものとした。また、 $T_{a/d} [\text{K}]$ は水素吸蔵合金の運転温度であり、図7の左に示す仮定により、水素吸蔵合金のエネルギー保存式のみで、

式7のように表される。

$$P_{\text{eq}} = \exp \left[A - \frac{B}{T_{a/d}} + (\phi \pm \phi_0) \tan \left\{ \pi (X_{a/d} - X_0/2) \pm \frac{\beta}{2} \right\} \right] \quad \text{..... (式6)}$$

ここでの ϕ 、 ϕ_0 はプラトー域の平坦性、 β はプラトー域のヒステリシス、 X_0 は最大水素吸蔵量をそれぞれ示し、A、Bは水素吸蔵合金の特性によって決まる定数である。

なお、±の記号は、吸蔵のときを+、一方放出のときを-としている。

$$(1 - \varepsilon) \rho C_{a/d} \frac{\partial (T_{a/d})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{eff,a/d}} \frac{\partial T_{a/d}}{\partial r} \right) + \lambda_{\text{eff,a/d}} \frac{1}{r} \frac{\partial T_{a/d}}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{eff,a/d}} \frac{\partial T_{a/d}}{\partial z} \right) + (1 - \varepsilon) \cdot Q_{a/d} \quad \text{..... (式7)}$$

ここで、 $C_{a/d}[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ は式8に示す水素吸蔵合金の比熱であり、また $Q_{a/d}[\text{W}/\text{m}^3]$ は式9に示す水素吸蔵合金の発熱/吸熱能力である。さらに $\lambda_{\text{eff,a/d}}[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ は式10に示す水素吸蔵合金の有効熱伝導率であり、吉田らの実験結果[6]を基に作成した。

$$C_{a/d} = a_1 \cdot F_{a/d} + a_2 \quad \text{..... (式8)}$$

$$Q_{a/d} = \Delta H \frac{\partial F_{a/d}}{\partial t} \quad \text{..... (式9)}$$

$$\lambda_{\text{eff,a/d}} = a_3 + a_4 \cdot F_{a/d} \quad \text{..... (式10)}$$

ここでの $\alpha_{1,2}[-]$ は、水素吸蔵合金の構成材料によって決まる定数（Neuman-Kopp 則による）である。

以上の式を用いて、本システムにおける水素吸蔵合金の仕様およびシステムの運転条件の特定を行った。

3.3 水素吸蔵合金の設計・製作

図5の固定条件に基づいて製作した水素吸蔵合金の特性を図8に示す。この図から、水素吸蔵合金の設計仕様通り、水電解最大運転圧力である1.0MPa以下において、合金利用率80%を満足する水素吸蔵合金を製作できたことを確認するとともに、数値解析に必要な水素吸蔵合金の固有定数を特定することができた。その値を表1にまとめて示す。

3.4 数値解析結果に基づくシステム設計

3.2項の数値解析と並行して、別途に行った実験結果との比較によって、両運転モードにおいて、本数値解析の妥当性は確認できている[8]。そこで、本解析方法を用

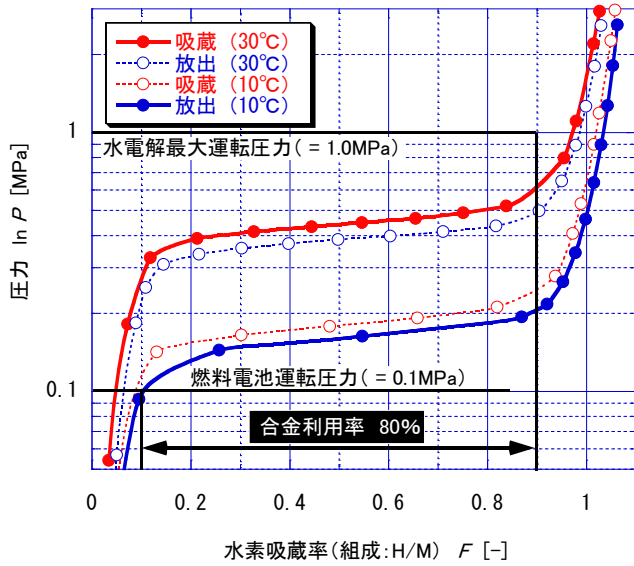


図 8. 水素吸蔵合金の PCT 特性曲線

表 1. 製作した水素吸蔵合金の固有定数

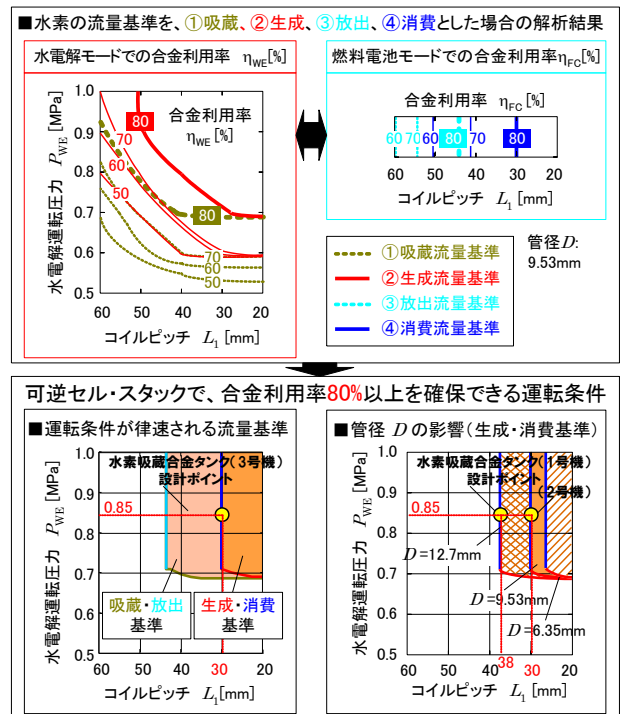
A	B	ϕ	ϕ_0	β	X_0
10.85	3534	0.093	0.002	0.13	1.05

いて、合金タンクの熱交換機構と水電解の運転圧力とが合金利用率に及ぼす影響を計算することによって、本システムに適した設計条件の特定を行うことができる。その数値解析結果を図 9 に示す。

図 9 上方の左側には、水電解モードにおける計算結果を、また右側には、燃料電池モードにおける計算結果を、さらに下方の左側には、両モードの計算結果を組み合わせた可逆セル・スタックを想定した場合の計算結果を、加えて下方の右側には、熱媒配管系におけるコイルの管径についての計算結果をそれぞれ示している。

これらによると、水電解の運転圧力と熱媒配管系のコイル・ピッチ（隣接する熱媒配管の距離）は、常に水素流量を「生成／消費」基準とした場合の水素吸放出特性に律速されていることが分かり、合金利用率 80% を満足するためには、0.7MPa 以上の水電解の運転圧力が必要なこと、コイル・ピッチは水電解モードでの水素吸蔵特性に影響されることがなく、燃料電池モードでの水素放出特性から決定されることが分かった。すなわち、水電解の運転圧力は、水電解モードでの水素吸蔵特性で設計可能であり、コイル・ピッチと管径によって決定される水素吸蔵合金タンクの熱交換性能は、燃料電池モードでの水素放出特性で設計可能であることが分かった。

以上の計算結果は、これまでの小型（水素吸蔵合金量：



※水電解運転圧力の設計は、今後の合金種類の変化に対応可能なように、余裕を設定した。

図 9. 数値解析によるシステム設計

2kg) の装置を用いて検証実験を行った結果から、十分に整合性のある設計法であることを確認している[8]。

さらに本システムについて、実用規模における本設計法の妥当性を実証するために、表 2 に示すような熱交換の能力と性能の異なる大容量の水素吸蔵合金タンクを製作した。その水素吸蔵合金タンクの外形写真を仕様とともに図 10 に示す。これにより、これまでの小型の実験装置では検証できていない総合エネルギー利用効率や排熱の有用性の確認、さらには本システムにおける負荷追従性／操作性／安全性等も含めて、本システムの実用化に向けた実証に供することができる。

4. 結論

「水素吸蔵合金を中心としたトータル・エネルギー・システム」を対象にした検討を行った結果、以下のことが得られた。

本システムの総合エネルギー利用効率は原理的には 80% 以上にでき、その値は既存のコージェネレーション・システムや他の新型二次電池の場合と遜色のない性能であることが確認できた。

また、既存の水電解や燃料電池等の機器を用いて構成させたシステムの総合エネルギー利用効率の評価を行う

表2. 製作した水素吸蔵合金タンクの仕様

	熱媒配管 外径	熱媒配管 ピッチ	タンク 外径	タンク 長さ
1号器	12.7	38	400A	500
2号器	12.7	30	400A	500
3号器	9.53	30	400A	500



■水素吸蔵合金仕様

- ①合金種類: MmNi 系
- ②充填量: 210kg (充填率: 50%)
- ③合金利用率: 80%

■水素吸蔵合金タンク仕様

- ①型式: シェル&チューブ型 (フィンなし) 熱交換器
- ②水素吸放出制御方式: 水素吸蔵合金温度制御

図10. 製作した水素吸蔵合金タンクの外形写真と機器仕様

ことで、システム全体の最適な運用方法や今後に重点的に行うべき機器の改善課題の特定ができ、さらに本システムにおける「水素」と「電気」、ならびに「熱」の同時有効利用に関するエンジニアリング技法を開発した。とくに、システム全体を対象にした数値解析を行うことで、本システムに最適な水素吸蔵合金および水素吸蔵合金タンク的设计仕様を特定することができた。

今後は、本解析結果を基に設計・製作した水素吸蔵合金タンクを含む図3に示す発電能力5kWを擁するトータル・エネルギー・システム試験装置にて、負荷追従運転制御方法を検証・確認するとともに、システム全体および運転制御系の簡素化を図り、図4(1)に示した総合エネルギー利用率の実現を目指す。

なお本研究は、独立行政法人産業技術総合研究所の分野別重点課題: 「分散型エネルギー大規模導入実証研究」の内の1テーマである「水素エネルギー・トータル・マネジメント手法の研究」に連携して実施したものである。

主な記号

- C : 比熱 [kJ/(kg·K)]
- D : 合金タンク内の熱媒配管の管径 [m]
- F : 水素吸蔵合金の水素吸蔵率 (組成; HM) [-]
- ΔH : 体積当たりの水素吸蔵合金の反応熱 [kJ/m³]
- K : 水素吸蔵時の反応速度定数 [s⁻¹]
- L_1 : 水素吸蔵合金タンク内の熱媒配管間の距離 [m]
- L_2 : 水素吸蔵合金タンク内の熱媒配管の長さ [m]

M_{theory} : 水素吸蔵合金単位質量当たりの

理論水素吸放出量 [mol/(s·kg)]

P : 運転圧力 [MPa]

P_{eq} : 水素吸蔵合金の平衡圧力 (合金温度と
雰囲気圧力と水素吸蔵量で定まる圧力) [MPa]

P_{FC} : 燃料電池運転圧力 (= P_0) [MPa]

P_0 : 標準気圧 (= 0.101325) [MPa]

Q : 水素吸蔵合金の発熱/吸熱能力 [W/m³]

T : 温度 [K]

U : 水の流速 [m/s]

X : 水素流量 [mol/(s·kg)]

X_a : 水素吸蔵基準の水素流量 [mol/(s·kg)]

X_c : 水素消費基準の水素流量 [mol/(s·kg)]

X_d : 水素放出基準の水素流量 [mol/(s·kg)]

X_p : 水素生成基準の水素流量 [mol/(s·kg)]

τ : 運転時間 [h]

ε : 水素吸蔵合金充填層の空隙率
(=1-合金充填率) [-]

η : 合金利用率 [-]

λ : 熱伝導率 [W/(m·K)]

λ_{eff} : 有効熱伝導率 [W/(m·K)]

ρ : 密度 [kg/m³]

添字

- a: 水素吸蔵
- d: 水素放出
- FC: 燃料電池
- in: 入口
- MH: 水素吸蔵合金
- WE: 水電解

参考文献

1. 小澤由行; "水素利用技術集成 製造・貯蔵・エネルギー利用 第5編将来展望 第2章「水素の多角的機能を活用したエネルギーマネージメント」", 株式会社エヌ・ティー・エス, 2003, p516-542
2. 増田正夫, 小澤由行; Thermal Science & Engineering, 8[1], 47(2000)
3. 通産資料出版会; "コージェネレーション総合マニュアル", 日本コージェネレーションセンター編, 2003, p30
4. 中部電力(株); "ナトリウム硫黄電池による電力貯蔵の研究", 技術開発ニュース No.69, 1996, p29
5. 西嶋健一; 電気評論, 82(7), 36(1997)
6. 吉田篤正, 仲恭宏, 大北勉; 日本機械学会論文集B編, 56 (522), 278-282(1990)
7. 大角泰章; "水素吸蔵合金—その物性と応用—", 株式会社アグネ技術センター, 1997, p419
8. 岡本英之, 増田正夫, 小澤由行, 飯塚雅由; 第36回空調和・冷凍連合講演会予稿集, 9-12(2002)