

水電解・燃料電池一体型セルの開発状況

加藤敦史・高橋惇*、五百蔵勉・伊藤博**、吉田哲也***

*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3150

**独立行政法人産業技術総合研究所

〒563-8577 大阪府池田市緑丘1-8-31

***アタカ大機株式会社 産機開発部

〒277-8515 千葉県柏市新十余二11

Development State of a Unitized Reversible Cell

Atsushi KATO, Atsushi TAKAHASHI*, Tsutomu IOROI, Hiroshi ITO**, Tetsuya TOSHIDA***

Research & Development Center, Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.

3150, Iiyama Atsugi City, Kanagawa 243-0213

** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1-8-31, Midoriga-oka, Ikeda, Osaka 563-8577

*** Research & Development Department, Daiki-Ataka Engineering Co., Ltd.

11 Shintoyohuta, Kashiwa, Chiba, 277-8515

A PEM-type unitized reversible cell (URC) is a device combined the functionality of water electrolyzer (WE) and a fuel cell (FC) in one electrochemical cell. URC can work as either of WE or FC by switching operation depending on the demand, so that URC has the potential to reduce device cost, installation space, and to raise operating rate compared to the dedicated use of WE and FC. Therefore, URC should become a key energy conversion device for a distributed energy system or emergency power supply if it is used with a hydrogen storage system such as high pressure tank or metal hydride Alloy. For practical use, it is necessary to improve the performance and durability of the URC up to the level of the dedicated cells. In this paper, development state of URC system is described.

Keywords: Unitized reversible cell, Water electrolyzer, Fuel cell, Hydrogen energy system

1. 緒言

水電解・燃料電池一体型セル (URC) は、水を電気分解して水素を製造する水電解セルと、水素と酸素で発電する燃料電池の双方の機能を、1台の機器で併せ持つエネルギー変換機器である。どちらの機能を利用するかはユーザーが自由に選択でき、運転モードの切り替えも自在に行うことができる[1]。

高砂熱学工業と産総研では、かねてから水素が持つ電気⇄水素の可逆変換機能に着目し、その特徴を最大限に活用

できるエネルギーシステムの検討を進めてきた。一例として、図1に業務用建物向けに現在開発を進めている、水素をエネルギーキャリアに用いたシステムを示した[2-7]。本システムは、熱と水素の供給機能を備えた蓄電装置であり、建物の需要に応じて電気・熱・水素を供給できる。URCを開発すれば、本システムの水電解セルと燃料電池の部分を、1台のURCに置き換えることができる。

本稿では、これまでに我々が産総研、アタカ大機と共同で進めてきたURC開発の経緯について紹介し、今後の展望について述べる。

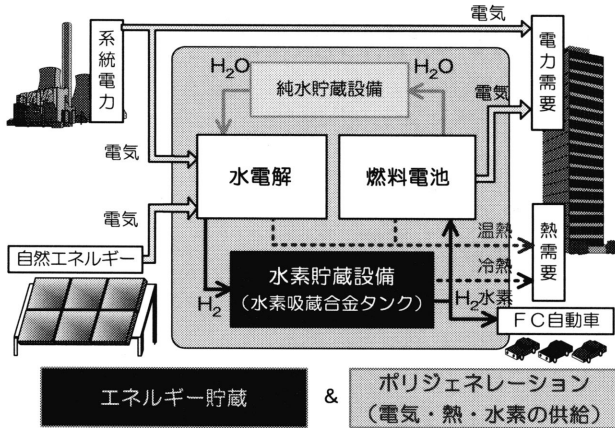


図1. 業務用建物向けの水素利用システム

2 URCのメリット

図1に示すような水電解と燃料電池の各専用機を設置するシステムにおいて、水電解と燃料電池を一体化するメリットは以下のとおりである。

1) 機器稼働率の向上

各専用機を設ける場合、どちらかのモード（水電解または燃料電池）で稼働する際には片方の機器は停止するが、一体化によりどちらのモードでも運転しているため稼働率が倍増する。

2) 設置スペース・重量の低減

各専用機を設ける場合、水電解セルと燃料電池のそれぞれが必要となるが、一体化によりセルが1つになるため、スペース・重量ともに低減できる。

3) コスト低減

各専用機を製作する場合よりも部品点数を半程度程度まで低減できる。

また、水電解で製造した水素を燃料電池に供給するメリットを、燃料電池の要求仕様や環境負荷の側面から評価すると以下のとおりである。

1) 製造される水素が高純度

製造される水素の純度は99.999%以上である。COが含まれていないため、燃料電池のアノード電極におけるCO被毒問題を考慮する必要がない。

2) 水素製造過程でのCO₂発生がゼロ

水素製造の原料は純水と電力であるため、水素製造の反応過程でCO₂は発生しない。さらに、自然エネルギー由来の電力を使用すれば水素製造過程において一切CO₂が発生しない。

3) 常温起動が可能で負荷変動にも対応

起動のための待機エネルギーが不要であり、自然エネルギー由来の電力のように変動のある電力からでも容易に水素を製造できる。

ここで一体化による上述のメリットは、URCのエネルギー変換効率や性能耐久性が、各専用機と同等であることを前提としている。そのため、我々の目標は各専用機と性能面で比較しても遜色のないURCを開発することである。

3. URCの概要

3.1. URCの構造と原理

燃料電池の電解質には複数の種類がある。電解質に何を採用するかは、使用用途やシステム設計にも大きな影響を与える重要な設計因子である。以下に、本URCの電解質を選定するにあたり考慮した点を示す。

1) 出力変動のある自然エネルギー由来の電力でも容易に水素製造が行える。

2) 水電解と燃料電池の可逆運転に対応できる。

3) 将来的に普及が予想され、それに伴う量産効果で低コスト化が期待できる。

以上の点を勘案し、本URCの電解質には固体高分子形を採用した。図2にURCの構造を模式的に示す。図に示すように、基本的な構造に関しては各専用機と比べても特段の相違は無い。

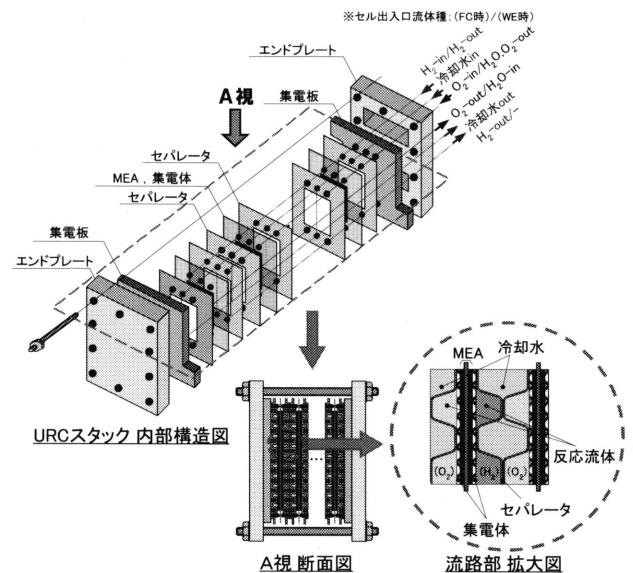


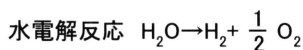
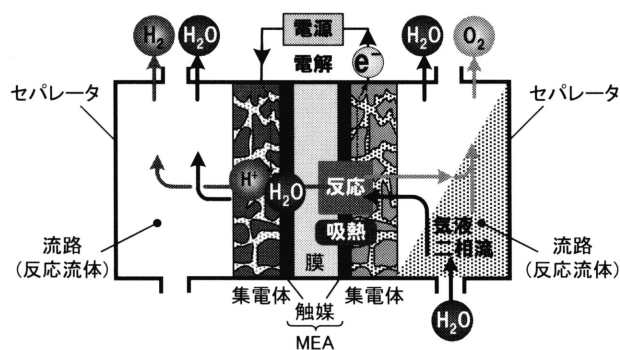
図2. URCの断面展開模式図

図3に各反応の原理を模式的に示す。水電解反応は、反応流体流路の陽極側（燃料電池で言うところのカソード

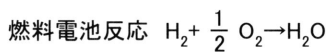
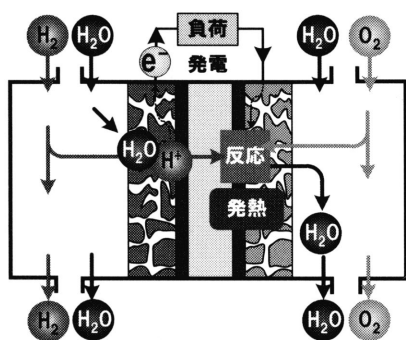
側)に純水を供給し、セルに電力を供給すると、陽極の電極上で純水が電気分解され、陰極側(燃料電池で言うところのアンード側)に水素が、陽極側に酸素が発生する。

燃料電池反応はこの正反対であり、反応流体流路のアンード側に燃料(水素)を、カソード側に酸化剤(空気や酸素)を供給し、外部に負荷を接続すると、電極上で水素と酸素が化学反応を起こして電気と水が発生する。

図中の反応式からわかるように、水電解反応と燃料電池反応は逆反応であるため、原理的には一体化が可能である。



a) 水電解反応



b) 燃料電池反応

図3. 各反応の模式図

3.2. URCの構成部材

反応中にセル構成部材が曝される環境は、水電解反応と燃料電池反応で著しく異なる。そのため、双方の反応を、同一の電極を用いて、繰り返し、安定して行うためには、セル構成部材を双方の反応環境に耐えられる仕様にする必要がある。

本URCの各構成部材には、竹中らがURC用に考案した表1に示す仕様を採用している[8]。この中でも電極触媒と集電体には、水電解運転では親水性が必要であるが、燃料

電池運転では撥水性が必要であることから、この対極に位置する物理現象の両立が求められる。本URCでは、親水性の各基材に撥水剤を適量溶着することで親水と撥水を両立させている。この撥水処理については、五百蔵らが最適化した仕様を採用している[9-10]。

表1. セル内部構成部材の仕様

構成部材	仕様	備考	
電極触媒	水素側	Pt	
	酸素側	Pt+Ir	
集電体	水素側	カーボンペーパー	
	酸素側	Ti製クロス	Pt鍍金
セパレータ	Ti板	Pt鍍金	
チャンネル	パラレル型		

3.3. URCの運転方法

URCでは、水素を製造する際に純酸素も発生する。そのため、この純酸素を貯蔵し燃料電池運転時の酸化剤に用いることで、燃料電池モードの高効率化・高出力化が可能である。しかし、以下に示す理由から酸化剤には空気を使用し、水電解時に発生する純酸素は、利用用途が無い限り大気中に排気する。

- 1) 高圧の純酸素を貯蔵しておくことは危険である。
- 2) 純酸素貯蔵設備を設置すると、総合エネルギー効率を勘案しても全体としてコストアップになる。
- 3) 機器としての汎用性を持たせる。

4. URCの開発状況

図4に開発当初から現在までの開発の経緯を示す。図中には、試作した各URCとその最高出力、及び各開発段階での重点課題をまとめた。以下では、主な重点課題に対する現在までの開発状況を説明する。

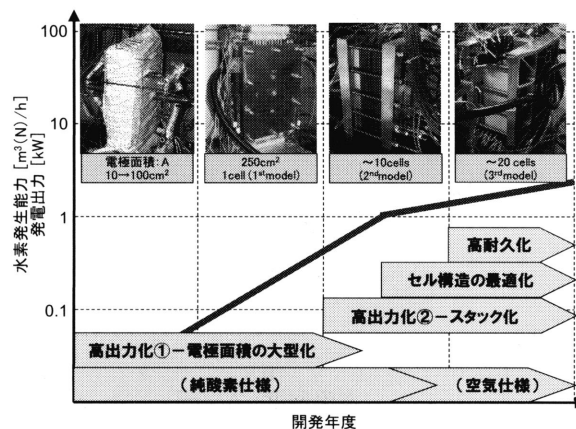


図4. URC開発の経緯

4. 1. 高出力化

当社がURCの開発に着手した当時、URCの電極面積:Aは、大阪工業技術研究所(現在の産総研関西センター)が基礎研究用として使用していた10cm²であった。これを実用に供せる出力レベルにするために、まずは電極面積の大型化を図った。そして、電極面積の大型化にある程度の目途が立った段階で、次に大型化したセルを積層し、更なる高出力化を図った。

その結果、現在までに電極面積を250cm²まで大型化し、セルの積層枚数を20枚とすることで、2m³(N)/h以上の水素製造能力と1.7kW以上の発電出力を有するURC(A=250cm²-3rd model)の開発に成功し、その数倍の出力規模までの開発見通しを得た。

図5にそれぞれの電極面積、セルmodellにおけるI-V特性を示す。図に見られるように、水電解性能に関しては、開発当初から特段の変化は見られない。しかし燃料電池性能については、開発当初のモデルでは電流密度が0.4A/cm²を超える辺りから拡散過電圧の上昇に起因する電圧低下が見られた。この原因は、セルの構造を空気運転用に設計していなかったことにある。そのため最新の3rd modelでは、セルの構造に関して、水電解性能の維持と空気運転性能の向上の双方を両立させることに重点を置いた設計を行った。その結果、水電解性能を一切低下させることなく、燃料電池運転時の電流密度の上昇に伴う拡散過電圧の上昇を大幅に改善できた。

なお、エネルギー変換効率については、通常各専用機と比較した場合、燃料電池性能が現状で数%劣っている。この点に関しては、セル構成部材の仕様最適化により、専用機同等レベルにできることの見通しを得ている。

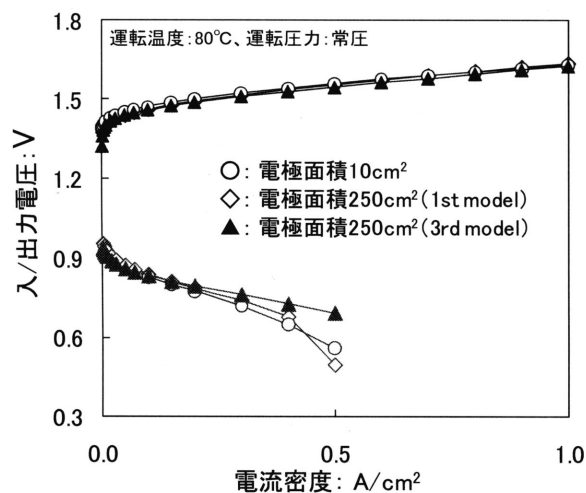


図5. 各セルタイプのI-V特性

4. 2. 高耐久化

URCの耐久性を評価する場合、3つの項目を評価する必要がある。水電解単一モード、燃料電池単一モード、そして水電解と燃料電池を切替えて運用するモード(以降切替モードと称する)での耐久性である。本稿での切替モードの耐久性とは、運転モードを切替える過程での各種操作やセル内部基材が曝される環境変化に対する耐久性を評価するものとした。切替回数のカウント方法は、水電解から燃料電池への運転切替(充電→放電)と、燃料電池から水電解への運転切替(放電→充電)をそれぞれ1回行った状態を、切替回数1回とカウントした。なお、各耐久性試験には単セルを用い、初期性能から10%性能低下するまでの累計運転時間や累計切替回数を調査した。

その結果、現在までに各単一モードについては、おおよそ4,000時間相当の耐久見通しを得た。この値は、実運用における運転時間を10時間/日とすると、1年以上の耐久性に相当する。次に切替モードについては、電極製造過程の改良やセル構造の改良、単一モード耐久性の改善等を進めた結果、現在までに水電解では7,500回相当、燃料電池では2,000回相当の耐久見通しを得た(図6参照)。この値は、実運用における切替回数を1回/日とすると、5年(水電解に限っては20年)以上の耐久性に相当する。ここで、水電解と燃料電池の耐久性にこれほどの差異が生じた原因は、現在の部材仕様が、使用環境のより厳しい水電解セルベースになっていることが挙げられる。実運用時の劣化は、単一モード連続運転中の劣化と、切替による劣化を合わせたものであることから、今後は単一モードでの耐久性を改善していく中で、水電解と燃料電池の双方にとって最適となる部材仕様を検討する。

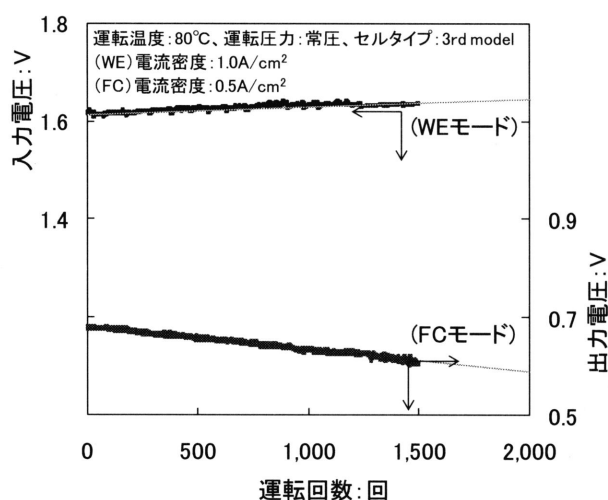


図6. 切替モードの耐久性

5. URCシステムの開発状況

ここでは、URCを実際にシステムに組み込んだURCシステムについて、現在までの開発状況を説明する。

URCシステムでは、URCの水電解モードで製造した水素を水素貯蔵容器に貯蔵し、それをURCの燃料電池モードの燃料として利用する。そして、燃料電池モードで発生した水を水貯蔵容器に貯蔵し、それを水電解モードの電解水として利用する。つまり、URC—水素貯蔵容器—水貯蔵容器から成る「水循環型の充放電システム」である。まずはこのような循環型システムが実際に成立するかを検証するために、100W級URCシステムで予備検討を行った。このシステムでは、水電解モードで加圧運転をすることにより昇圧機無しで高圧の純水素と純酸素を製造・貯蔵した。燃料電池モードでは、貯蔵した高圧の純水素と純酸素をシステム内で循環させることで、貯蔵ガスを排気することなく利用した。なお、実用に際しては前述の通り純酸素は貯蔵せず排気するが、ここでは完全循環型システムの実現性を検証するという試験的な目的から純酸素も貯蔵した。

図7に、予備検討で得られた電力エネルギーの収支を示した。なお、実用に際しては燃料電池排熱等を回収し利用するが、100W級システムでは得られる熱エネルギーは少なく回収困難であるため、ここでは電力エネルギーのみに着目した。図に見られるように、投入した電力に対して、最終的に取り出せた電力は24%（交一直、直一交変換効率：各90%と仮定）であった。なお、循環型システムの実現性については、当初想定した通りの繰返しの充放電機能を確認した。エネルギー損失の内訳を見ると、補機の占める割合が28%であり、この割合の最小化がエネルギー効率の改善に向けた最大の課題である。

現在では、この結果を踏まえて図8に示す数kWの発電出力に対応した、排熱回収率の評価も可能なURCシステムの検討を進めている。

6. 今後の展開

まずURC開発における今後の課題は、更なる高耐久化と高出力化、及び低コスト化である。中でも重点課題は単一モード運転での高耐久化であり、まずは10,000時間レベルの耐久性を、最終的には各専用機同等の耐久性を目指す。出力に関しては段階的に向上させ、最終的には業務用システムに供せる水素製造能力：数 $10\text{m}^3(\text{N})/\text{h}$ 、発電出

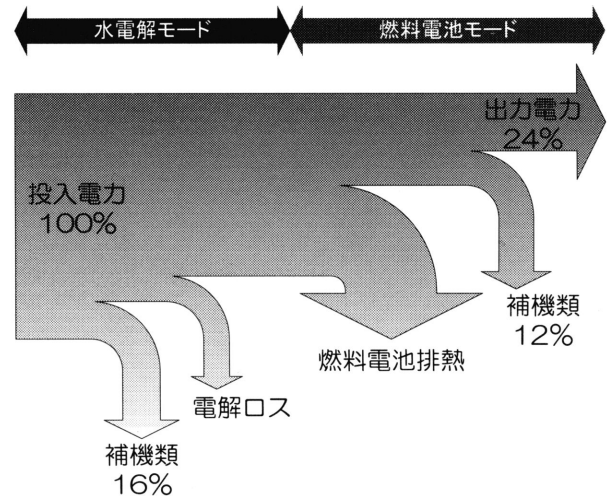


図7. URCシステムの電力エネルギーの収支

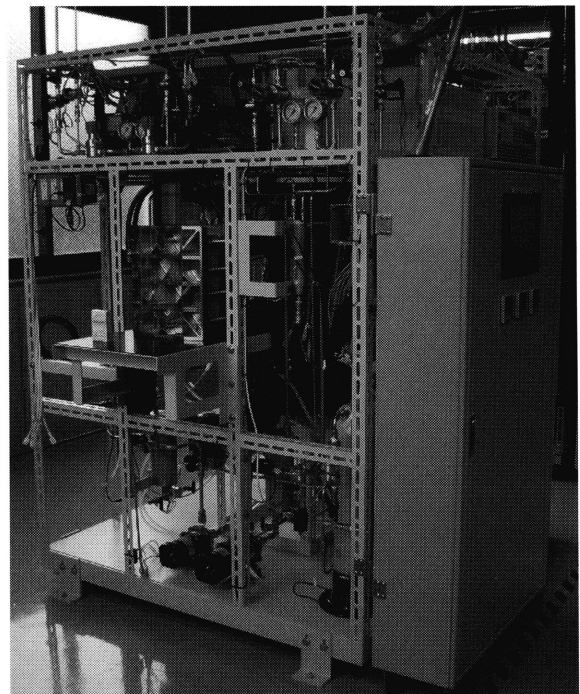


図8. 数kW対応のURCシステム

力：数10kWレベルを目指す。コストに関してはPt使用量の劇的な低減はもちろんのこと、URC構造の簡素化による部品点数の更なる低減により低コスト化を目指す。次にURCシステム開発における今後の課題は、システム構成の最適化によるエネルギー効率の向上と低コスト化、及び高耐久化である。中でも重点課題はエネルギー効率の向上であり、電力エネルギー効率をまずは30%、最終的には35%以上を目指す。加えて、特に燃料電池運転時の排熱回収等による熱エネルギーの有効利用に向けた検討も進め、総合エネルギー効率で75%以上を目指す。

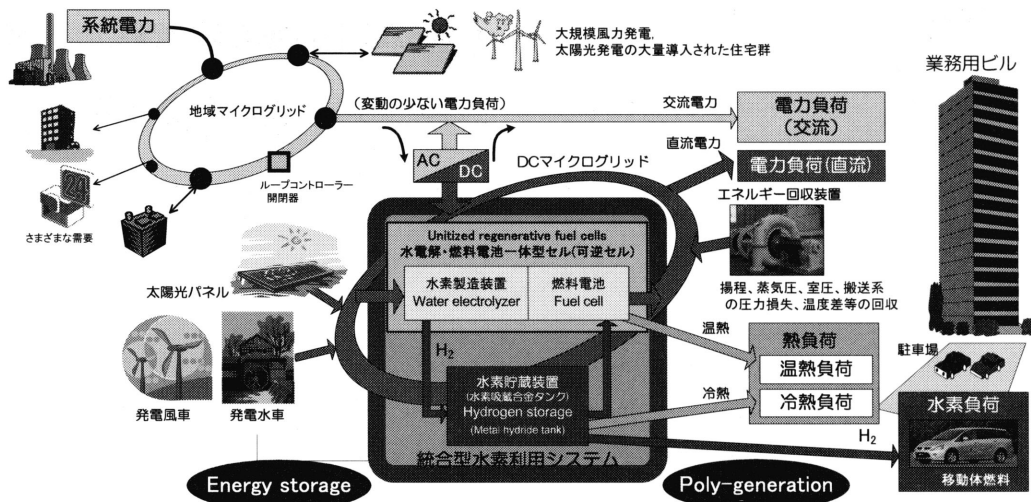


図9. 水素利用システムを用いた将来の構想

これらの課題を克服して、本システムが本来持つシステム全体としてのコストメリット・スペースメリットを高め、最終的には図9に示すようなシステムに導入し、エネルギーの面的有効利用の一翼を担える機器に仕立て上げる計画である。

参考文献

1. 加藤,高橋,五百蔵,吉田,伊藤: 燃料電池, vol9, No2, pp.102-107(2009).
2. 増田,小澤: エネルギー資源学会第18回研究発表講演論文集, 15(1999).
3. 増田,小澤: "Thermal Science & Engineering", 8, 47-56 (2000).
4. 岡本,増田,小澤,飯塚: 第8回動力・エネルギー技術シンポジウム, 393-398(2002).
5. 岡本,増田,小澤,飯塚: 第36回空気調和・冷凍連合講演会論文集, 9(2002).
6. 小澤,岡本: 空律誌, 77(9), 35(2003).
7. 伊藤,岡本,川上: 燃料電池, vol3, No3, pp.106-113(2007).
8. 竹中,安田,五百蔵,小澤,増田: 電池技術, 12, pp.132-138(2000).
9. T. Ioroi, K. Yasuda, Z. Siroma, N. Fujiwara, Y. Miyazaki, J. Power Sources, 112, 583 (2002).
10. T. Ioroi, T. Oku, K. Yasuda, N. Kumagai, Y. Miyazaki, J. Power Sources, 124, 385 (2003).