

航空宇宙用電源における水素利用

曾根理嗣

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究本部 宇宙探査工学研究系

研究開発本部 未踏技術研究センター(兼務)

月・惑星探査プログラムグループ (兼務)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

Hydrogen Application for the Electric Energy Storage and Generation for Aerospace Applications

Yoshitsugu SONE

Japan Aerospace Exploration Agency

Institute of Space and Astronautical Science, Department of Space Craft Engineering,
Aerospace Research and Development Directorate, Innovative Technology Research Center

Lunar and Planetary Exploration Program Group

7-44-1 Jindaiji Higashimachi, Chofu, Tokyo 182-8522

The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is developing energy storage system using hydrogen as an active material. One example is the polymer electrolyte fuel cell system which can be applied to the closed environment like high altitude balloons, transfer vehicles and spacecrafts. In the case of the moon exploration, specially, regenerative fuel cell system is required for the survival during the night time on the moon. The fuel cell demonstration model was designed for the balloon mission. The system was designed for the low pressure environments where the working gases are supplied by the counter flow method and the temperature of the system is passively controlled by the heat generated from the fuel cell stack. The system was launched in August, 2007 using high altitude balloon of JAXA. Furthermore, a 100 W-class regenerative fuel cell system was designed, and demonstration model was prepared. Based on the concept design, we are going to clarify the applicability of the regenerative system for the aerospace missions.

Key words: aerospace, hydrogen, polymer electrolyte, fuel cell, closed environment

1. 緒 言

宇宙開発において水素は様々な形態で使用されている。宇宙への輸送手段であるロケットにおいては、液体水素と液体酸素を貯蔵し、これを高速で燃焼させる推進機構が使用されており、日本では主力ロケットであるH-IIAロケットのLE-7Aエンジンにおいて実用化がはかられている。また、航空機においても水素を燃料としたエンジンの研究

が進められており、水素燃焼による航空機飛行技術の研究が進められている。成層圏近くを飛行する航空機にとって、燃焼による排気ガスが地球環境に与える影響を軽減するためにも、このような水素燃焼による飛行技術は今後必要性を増すものと考えられる[1, 2]。

水素を発電に活用する動きは、宇宙開発においては、ごく初期のころから進められてきた。一例として、燃料電池が挙げられる。米国では1960年代に月探査を目指した技

術開発が進められた。その中で長時間の有人宇宙活動を可能とするために、燃料電池の技術革新が図られ、その後のスペース・シャトルまで含めた有人宇宙活動を支える技術として活用されてきている。

このような技術背景の中で、現在、宇宙探査に向けて燃料電池の研究を加速させる必要性が生まれている。

日本は、2007年の「かぐや」打ち上げを機に、月の起源に迫る本格的な月探査を開始している。「かぐや」は月周回衛星であり軌道上から月探査を行うが、将来においては更に月への着陸を果たし、ローバ等による月面での月の直接探査を試みる計画がある。月の自転周期は1ヶ月近くあり、月面上では最大で14日以上（354時間）の夜が発生する。このような長期の夜間の保温を行い、探査機の機能を保全するためには燃料電池を水電解技術と組み合わせた再生形燃料電池技術の習得を必要としている。

ここでは、宇宙開発初期を支えた米国の燃料電池技術の推移を紹介しつつ、今日の宇宙航空研究開発機構（JAXA）において進められている燃料電池の研究開発状況を紹介する。

2. 宇宙用燃料電池の技術背景

1960年代初頭、米国では故ケネディ大統領が10年以内に人類を月に送り届けると宣言する。地球周回能力すらなかった当時の米国の有人宇宙技術において、月に人を降ろして地球に生還させるには各種の技術習熟を必要とし、課題の抽出と解決を図るためにジェミニ計画が立ち上げられた。ここでは長期間にわたり人を宇宙空間で生かすための技術習得が進められたが、エネルギーの確保は極めて重要な案件であった。

このために、エネルギーの供給と同時に水を供給できる発電システムとして燃料電池が開発された。図1には、現存するJEMINI用固体高分子形燃料電池と、APOLLO用アルカリ形燃料電池を示す。

JEMINIにおいて使用された固体高分子形燃料電池は、陸軍の要請でGE社が試作していた野戦用の燃料電池をモデルとしており、これを宇宙の真空環境のもとでも使用できるようにカプセルに格納した形態をとっていた[3]。1960年の無人カプセルによるテスト飛行の後、ジェミニ5号から有人宇宙活動における実用化が進められた。このときに使用された燃料電池は1 kW級の発電装置であり、ポリスチレン系のイオン交換膜を固体電解質として使用



図1 JEMINI(左)およびAPOLLO(右)宇宙船に搭載された燃料電池
US Space & Rocket Center (Huntsville, Alabama)にて撮影

していた。当初は生成水を飲用に供することも想定されていたようであるが、当時のポリスチレン膜は安定性に乏しく、分解して生成水に混入したようであり、水は飲用には適さなかったようである。

その後、アポロ計画においてはアルカリ形燃料電池が使用された。アポロ計画においては、当初、ロケットが月面上に着陸することが想定されており、この際の環境温度が100°Cを超える可能性があった。このような高温環境においても使用可能な燃料電池として、熔融塩を使用するアルカリ形燃料電池が考案され、実用化が進められた。熔融塩を使用したアルカリ形燃料電池として、当時はベーコン式の燃料電池があり、これを元にアポロ用燃料電池が開発されている[4]。

その後、スペース・シャトル計画においては固体高分子形とアルカリ形との間で競合開発が進められた。固体高分子形燃料電池では高分子膜としてNAFION®が使用されて性能向上が進められた。アルカリ形燃料電池はアポロ計画時の高温動作形から運用性の向上を図り、アスベストセパレータのマトリックス内に水酸化カリウム水溶液を閉じ込めたタイプが開発された。この両者の間で3年間にわたり比較評価が進められた結果、アルカリ形燃料電池が採用されている[5, 6]。

以上はNASAによる燃料電池開発の概要であるが、旧ソ連でもブランと呼ばれるソ連のスペース・シャトル用にアルカリ形燃料電池が開発された。宇宙機用の性能確認試験および環境試験は全て完了していたが、ソ連邦の崩壊等による政情不安から、燃料電池を使用した有人フライトは実現されなかった。結果として宇宙用にフライト実績を有する燃料電池はNASAの燃料電池のみとなっている。

これらの燃料電池の開発においては常に技術課題とし

て水管理手法が挙げられてきた。宇宙機は軌道上で微小重力環境におかれる。地上では湿潤ガスは冷却して密度を増すことにより気相から水分を落下除去できるが、宇宙ではこれができない。生成水の飲用が期待される宇宙用燃料電池であるが、発電を継続しつつ系外に水を搬出するには特有の技術を必要とする。

例えばジェミニ用の燃料電池ではウィック（吸湿材）に水分を吸着させ燃料電池内外での気圧の差を利用して系外に押し出す機構が採用された。これは単純で優れた方式だがウィックの吸湿性能に燃料電池の発電性能が制約を受ける[3, 7]。

一方でアポロから今日のスペースシャトルに至るまでのアルカリ形燃料電池では遠心分離方式が用いられた。システム内に未反応ガスを循環させる回転式のサーキュレーション・ポンプを設置し、インペラ回転時に遠心力を発生させて水を分離除去していた。この手法は非常に効率的に水を除去できるが、万一フラックス等の不純物が燃料電池内部に発生するとこれが詰まり、燃料電池そのものの動作に不具合を招くことになる。一例として、スペースシャトルの第2回目のフライトにおいて、系内に混入したフラックスのために動作異常を起こし、燃料電池内部に生成水が滞留して発電を継続できなくなったとの報告がある。

3. 航空宇宙における固体高分子形燃料電池技術の必要性

3-1. 米国における航空技術への適用の試み

アルカリ形燃料電池は、スペース・シャトル用に成熟した技術となっているが、アルカリによる腐食のために2500時間毎にオーバーホールを行いセパレータやハウジング等の交換を行う必要がある。このような運用性に対する制限等から、今日では多様化する航空宇宙ミッションにあわせて、民生用に開発が進んでいる固体高分子形燃料電池を適用する試みが進められてきた。

米国では、Wallops Flight Facility (WFF) により大気圏や太陽活動調査のための高高度気球に対して燃料電池を適用し、比較的長時間にわたる気球の観測可能時間を確保する試みが進められた。ここで行われた検討では、従来はバッテリーを使用して100 Wの電力を12から24時間程度確保していたのに対して、200 W級の電力を48時間以上確保する試みであり、将来的には800 W級電力を100時間供給し続けるシステムの開発を目指すものであった[8]。NASA Glenn Research Centerにより固体高分子形燃料電池を使

用した発電デバイスの研究が進められ、熱真空試験を含む地上試験が実施されているが、実機でのフライトには至らなかった。

また、有翼の飛行体により成層圏滞空を図る試みも進められた。NASA Dryden Flight Research Center主導の太陽動力飛行機HELIOSプロジェクトにおいては、翼長75 m (275 ft) のプロペラ機を高度約30 km (100,000 ft) にて96時間滞空させることを目指し、夜間電力確保のために燃料電池を水電解セルと組み合わせた再生形燃料電池の研究が進められた[9]。NASAによる試算では、HELIOSを高度約18 km (60,000 ft) に12時間滞空させるのに必要な電力は120 kWhであり、この電力を蓄えて飛行するには600 Wh/kg以上の蓄電システムが必要であり、上述の燃料電池と水電解セルを組み合わせた再生形燃料電池が必要であるとされていた。当該プロジェクトにおいては、まず水電解セルを搭載せず、燃料電池のみを搭載した状態でのテスト飛行が試みられたが、機体側のトラブルによりHELIOSが墜落し、燃料電池動力による飛行は実現されていない。

3-2. JAXAにおける燃料電池の技術検討

このように海外において航空宇宙分野での燃料電池研究が進む中、JAXAでは、独自技術としての燃料電池技術の基礎研究を進めてきた。我々は特に、固体高分子形燃料電池を基調とし、システムを簡素化するための運転手法を中心に研究をすすめてきている[10-12]。

図2には、JAXAにより試作された燃料電池システムを示した。このシステムでは最大4 kW相当の電力を発生することができる。発電時には、冷却水を循環させており、燃料電池温度が常に65°C程度に保たれるようにした。

特に閉鎖空間での燃料電池運転を想定し、供給されるガスは循環されつつ、燃料電池反応による生成水は分離除

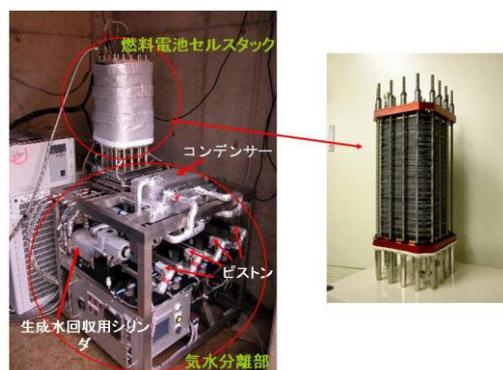


図2 外部無加湿状態での閉鎖運転試験用燃料電池システム
気水分離部は生成水凝縮用のコンデンサーと生成水回収用シリンダ部を有しており、シリンダ内のウィックに吸着された水はピストンにより系外に排出された。ピストン動作は、シーケンサにより自動管理された。図中のスタックは、40セルスタック。

去される気水分離機構を備えた設計とした。

このような検討の中で、我々は、純水素と純酸素を対向供給することにより燃料電池が外部からは無加湿で運転が可能であることを見出し、システムへの反映を進めた。また、気水分離手法としては、当初ウィックを使用した吸着除去を考え、シリンダー内にガスを透過しつつ水を吸着させる経路を有するウィックを配して、これを自動運転により動作するピストンにて圧搾することにより水を除去する機能を持たせ、連続運転に使用した。このシリンダーは酸素側/水素側に二連ずつ設置し、一方から水分を除去している際には他方のシリンダーにより燃料電池のガス循環が可能設計としている。また、ピストンの動作するタイミングは通電量と燃料電池のスタック積層数から算出される水の生成量に基づきシーケンサーが判定を行うことにより、自動運転が可能状態とした。

図3には、このシステムにより連続運転試験を実施した際の結果を示している。

1100時間にわたり連続運転を行っている。この間、外部からは無加湿にて純水素/純酸素供給を行っているが、性能の目だった変化は現れていない。途中、電圧の変動が起こっているが、これはスペースシャトルの運用を模擬した負荷変動試験を実施したためである。負荷を通常運転時の60 Aに対して、30 Aから150 Aの範囲で変動させているが、連続運転に支障をきたすような電圧の変動や水不足に起因するような運転上の問題は発生していない。

このようにしてガスの閉鎖/循環運転を、外部から無加湿にて実施可能であることを確認することができたことから、システムの小型軽量化を可能にするための技術検討をすすめてきた。

特に重要なコンポーネントとして気水分離器に着目し、ガス循環と水分離を同時に行うことのできるポンプの試

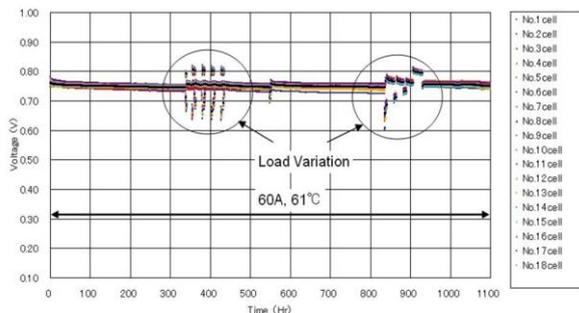


図3 外部無加湿状態での閉鎖連続運転
18セルスタックにより評価を実施した。負荷は60 A通電をノミナルとし、途中で30 Aから150 Aまでの負荷変動 (Load Variation) 試験を実施した。

作検討を進めてきた。

図4には、試作されたポンプを示している。このポンプでは、ファンの回転により湿潤したガスが吸い込まれた際、水分については、途中で遠心力により分離される。この水は、水圧により弁を介して系外に除去されるようになっており、液体を分離しつつ気体のみを反応系に戻すことが可能な設計となっている。現在、この改良試作が続けられており、100 W級小型システムへの搭載が可能システム設計と併せて、検討が進められている。

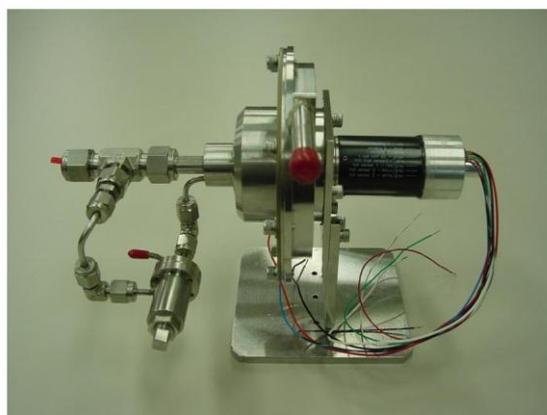


図4 気水分離機能付きガス循環ポンプ

3-3. 国内での航空宇宙技術への適用の試み

このような研究の流れの中で、飛行体を使用した実証フライトの計画を進めた。

JAXAでは、成層圏フライトを行うことのできる大気球を、科学観測や工学実験等に使用している。大気球を使用した実験には、極域での飛行やブラジル-オーストラリア間フライトなども構想されており、このような運用では100日間程度連続して飛行し続けるような運用も想定されている。

我々は、将来的に大気球のメイン電源としての搭載を実現するため、フライト開始から刻々変化する気球の周囲環境の推移の中で、燃料電池が健全な機能を維持し続けることができることを確認するために、燃料電池をミッション機器として搭載した大気球のフライトを提案してきた。

2007年には、三陸大気球センターからフライト試験を実施し、無事に成層圏領域までのフライトを経験することができている。

図5には、この際にフライトに使用した燃料電池の概観を示した。燃料電池は純水素と純酸素を対向供給されることにより、外部からは無加湿で発電する。ここでは燃料



図5 大気球フライト試験に使用した固体高分子形燃料電池12 V級スタックを使用した。酸素と水素は対向供給され外部無加湿により運転した。入力圧力と排圧を制御し、パッシブ熱制御によりフライト実証を行った。

電池反応の持続性に焦点を絞った実験を行うため、燃料電池への入力圧力と排圧のみを制御した。また、熱的には冷却水を循環させることなく発電により生じる熱と周囲環境との間で適切な温度のバランスが保たれる運転条件を割り出し、極力パッシブな状態で運転できるように設計を行った。結果として、本試験により、燃料電池は成層圏の断熱真空環境の下であっても支障なく発電に供することができることを実証している。

前述のとおり、NASAにおいても成層圏領域での活動のために燃料電池の実証フライトは計画されてきたが成功には至らなかった中、本フライト試験が事実上世界初の燃料電池による成層圏フライトとなっている。

更にJAXAでは、再生形燃料電池システムによる成層圏プラットフォーム実現に向けた研究を加速させつつある。図6には成層圏プラットフォーム構想の中で想定されている飛行船を示した。フィージビリティ・スタディーの中では、成層圏高度である20 kmに耐風速度30 m/sec.で定点滞空させつつ1 tのペイロードを搭載できる飛行船は、規模として全長245 m、全備質量32.4tとなり、動力として200 kW出力の電源システムが必要であるとされている。



図6 成層圏プラットフォーム概念図
http://jda.jaxa.jp/jda/より引用

このための夜間電力を確保するため、蓄電デバイスには450 Wh/kgを越えるエネルギー密度を実現することが求められており、燃料電池を水電解技術と複合化した再生形燃料電池システムが必要となっている[13]。

このための技術実証を目指し、1 kW級再生形燃料電池システムが作られている。図7には、現在試験中のシステム全景を示した。既に、数日間分に相当する充放電試験を実施しており、今後は断熱真空試験や熱環境試験等を経て、システムの成立性を実証していく予定である。

このような検討が進む中、航空宇宙分野から月・惑星探査までをつなぐ、宇宙開発/宇宙探査における燃料電池開発のロードマップが設定されている。図8には、そのロードマップを示した。

宇宙輸送技術では、従来から液体水素と液体酸素を燃料として使用している。このような液体燃料を使用している系では、燃料の余剰搭載分を有効活用することも可能な燃料電池は、長期間の発電デバイスとして有効になると期待している。

また、先に紹介した成層圏フライトの実績から、気球

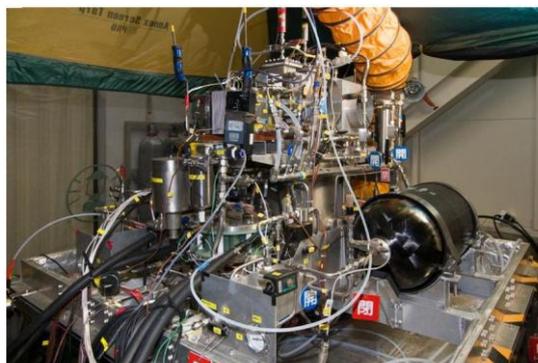


図7 1 kW級再生型燃料電池システム
将来の成層圏プラットフォームに必要なシステム成立性を検証するために試作された供試体。マテリアルバランスや運転手法の明確化のための試験に供されている。1 kW級の発電性能を有する燃料電池と水電解セルを有する。

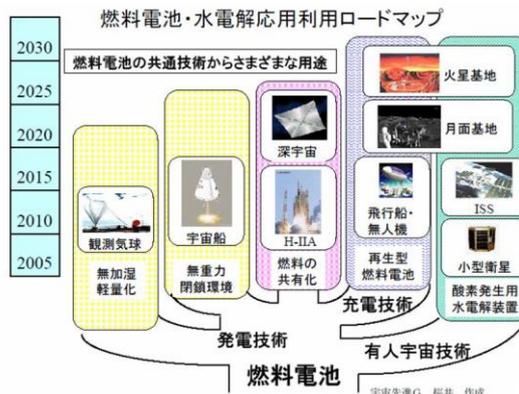


図8 燃料電池および再生型燃料電池をベースとする航空宇宙技術

や飛行船技術への貢献は可能な領域になっていると考える。

今後の展開として、重要な位置づけとなってきたのが月探査である。

日本では2007年に「かぐや」を打ち上げ、本格的な月探査を開始した。次に想定される月ミッションとしては、月に着陸し、可能な限り夜を越える(越夜)技術を習得し、月での長期間にわたる科学探査を実現することになる。月は地球に対して常に同じ面を向けて自転しているため、約28日間をかけて一回転する。この間、中低緯度地域では354時間程度の夜が発生する。このような長時間にわたり電力供給を続け、日照期間中に再充電可能な電源として再生形燃料電池が着目されている。

JAXAでは燃料電池にかかわる技術者が集まり、国際宇宙ステーションに建設の進む日本実験棟「きぼう」(開発時名称は「JEM」)を、このような宇宙環境での燃料電池の実証の機会として位置づけ、2007年に実施された「JEM曝露部ポート共有利用候補ミッション」に対して応募し、一次選考の結果、候補8件の中に選ばれた。

この際に試作した再生形燃料電池が図9である。ここでは、酸素極側での気水分離技術として気水分離ポンプを適用し、100 W級燃料電池スタックと100 W級水電解スタックを使用している。

JEMからは通常40 Wの電力供給を受けることができ、また排熱としては40 Wまでが許容されることとなっていた。我々は、通常運転としては40 Wまでの制限をつけつつ、システム全体を循環する冷却水に一時的に熱を蓄えた後に休止中に徐々に放熱する運用手法を考え、最大100 Wまでの運転が可能システムとして、この再生形燃料電池システムを提案した。図9に示したシステムは、この成立性検証のために試作された検証モデルである。実際に動作



図9 100 W級再生型燃料電池システム

「JEM曝露部ポート共有利用候補ミッション」におけるシステム検証用に試作された。コントローラ部分はJEM(国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」)との電気的なインターフェース条件を模擬した。冷媒循環により最大100 W級の発電と水電解が模擬できるシステム構成となっている。

することも可能であり、サイズ/質量ともに要求事項である体積: 50 cm×50 cm×30 cm以内、質量: 50 kg以下を満たした設計となった。残念なことに、この実験提案は最終選考において選定されなかったが、この検証モデルを雛形として、今後の再生形燃料電池システムの成立性にかかる検討を進める予定である。

4. おわりに

高いエネルギー密度を有する蓄電デバイスの必要性は、宇宙開発や探査において欠くことのできない開発要素となっている。月探査においては各国の協力関係を構築しつつ、技術的なニーズの整理や協調開発が進められることと期待している。

NASAが行っている月探査検討の中では、特に有人探査や月ローバシステムなどにおいては、200 Wh/kgから300 Wh/kgといった高いエネルギー密度を有する蓄電デバイスの必要性がシステムからの要請として挙がっており、これに対して新規材料を使用したリチウムイオン二次電池を想定するべきか、再生形燃料電池技術の開発を進めるべきかが、議論されている。

日本においては、既存技術として高エネルギー密度を有する宇宙用リチウムイオン二次電池が開発されているが、更なる探査の利便性を実現し、複数回の越夜を可能とするためには、再生形燃料電池技術と、その基礎となる燃料電池技術の習熟を図る必要が高いと考えている。

参考文献

1. 桑島三郎; "燃料電池技術とその応用", 竹原善一郎編, (株)テクノシステム, 2000, 第3節, "宇宙開発における燃料電池発電技術"
2. 曾根理嗣, 上野三氏, 桑島三郎; *Electrochemistry*, **70**, 705-710(2002).
3. H. A. Liebhafsky and E. J. Crains; "Fuel Cell and Fuel Cell Batteries", John Wiley & Sons, Inc., 587(1968)
4. D. Bell III, and F. M. Plauché; "APOLLO EXPERIENCE REPORT -POWER GENERATION SYSTEM", NASA TND-7142(1973)
5. W. E. Simon; "SPACE SHUTTLE ELECTRICAL POWER GENERATION AND REACTANT SUPPLY SYSTEM", NASA CP-2342(1985)
6. M. K. Blaski, and S. L. Owens, 9th Intersociety Energy Conversion

Engineering Conf., Paper No. 749001(1974)

7. 笛木和雄 ‘燃料電池設計技術’、笛木和雄、高橋正男編、(株)サイエンスフォーラム、1987、pp.29-33、pp.92-93、pp.104-108
8. P. L. Loyselle, T. M. Maloney, and H. M. Cathey, Jr.; 34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Paper No. 1999-01-2588(1999)
9. R. F. Curtin and J. Sharkey; Proc. of the Second Stratospheric Platform Systems Workshop, 42(2000)
10. Y. Sone, M. Ueno, S. Kuwajima; J. Power Sources, **137**, 269-276(2004)
11. Y. Sone, M. Ueno, H. Naito, S. Kuwajima; Electrochemistry, **74**, 768-773(2006)
12. Y. Sone, H. Naito, M. Ueno, S. Kuwajima; J. Power Sources, **157**, 886-892(2006)
13. H. Naito, K. Eguchi, T. Hoshino, S. Okaya, T. Fujiwara, S. Miwa, and Y. Nomura, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Paper No. 99-3913(1999)