

第7章 「はやぶさ」カプセル回収に電池の果たした役割

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

曾根理嗣

Battery Technologies for the ‘HAYABUSA’ Capsule Recovery

Japan Aerospace Exploration Agency

Yoshitsugu Sone

ABSTRACT The interplanetary spacecraft ‘HAYABUSA’ was launched in May, 2003. It touched down on the surface of the asteroid ‘ITOKAWA’ in November, 2005. After the touch-down, the spacecraft suffered a malfunction, and could not maintain proper attitude control. During this malfunction, the secondary battery was over discharged, while it was essential to close the lid of the asteroid sample container for the Earth reentry capsule. Furthermore, when the capsule re-entered to the Earth atmosphere, the primary battery should work properly after the 12 years storage including 7 years space flight. The batteries showed proper performance for the capsule recovery of HAYABUSA.

1. はじめに

小惑星探査機「はやぶさ」は、2003年5月に鹿児島県肝付町にある宇宙空間観測所から打ち上げられた。図1には「はやぶさ」を、図2には目的地であった小惑星「イトカワ」を示した。「はやぶさ」は約2年半をかけて小惑星イトカワに到達し、種々の科学観測を行った後に、小惑星へのタッチダウンを試みた。2度のタッチダウンを行った後、サンプルを捕集している可能性のあるカプセルを地球に持ちかえるべく帰路につき、2010年6月に地球に帰還した。分離された大気圏再突入用カプセルは無事にオーストラリアのウーメラ砂漠に着地し、回収に成功している。

「はやぶさ」はイトカワへの往路と復路のいずれにおいても多くのトラブルに見舞われた探査機であった。

すでにイトカワに到達する前から姿勢を安定に保つためのリアクションホイールの一部に不調を来し、小惑星へのタッチダウンにおいては、リアクションホイールと化学推進スラスターの併用運用が行われた。

一度目のタッチダウンにおいては、小惑星表面でバウンドしたような軌

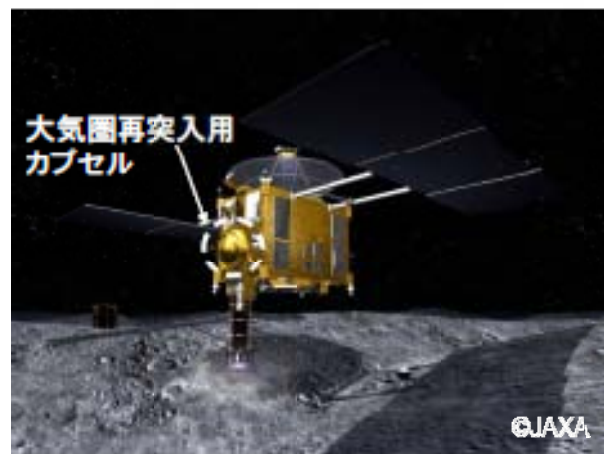


図1 小惑星探査機「はやぶさ」フライト想像図

跡をたどったと考えられている。その後に行われた二度目のタッチダウンにおいては想定されていた着地を果たしたと考えられたが、その後、化学推進スラスタの部品の故障と思われる事象により化学推進薬が探査機からリークし、姿勢を安定に保てなくなった。結果として地球との通信が一時途絶し、再度の通信回復には7週間を要した。



図2 小惑星イトカワ

その後、探査機の立て直しに成功するも、姿勢制御用の小型スラスタは燃料を失い、リアクションホイールも複数台が不調を来した。姿勢の制御にはイオンエンジンで使用するはずのガスをイオン化せずに放出する手法や太陽光圧をも活用する手法など、本来の設計にない運用を編み出しながらの復活となった。

また、地球帰還の半年前には惑星間航行を成し遂げるために必要なイオンエンジンにも故障が起り、一時は地球帰還も危ぶまれた。この際には、健全な部品同士をつなぎ合わせて使用するなどの処置を施し、推力の確保に成功している。

「はやぶさ」の帰還は、機器の潜在的な能力を引き出しつつトラブルを乗り越えての帰還であった。

この「はやぶさ」は宇宙で必要となる工学技術の実証を目的として開発された探査機であり、様々な新規技術が導入されていた。著者は、2003年10月の宇宙三機関統合において宇宙科学研究本部の所属となった。すでに打ち上げられていた探査機の設計を学ぶ中で開発の経緯やチャレンジングな探査機設計には、著者自身も感嘆させられたことを記憶している。

著者の深く関わることとなった電源系では、トリプルジャンクションの太陽電池が使用され、この電力がスイッチングレギュレータにより制御されつつ、負荷やバッテリーに供給されていた。過去の科学探査衛星は28 V級の電源を使用し、実用衛星も当時の主流としては50 V級の電源を使用していた中で、「はやぶさ」では、主要バス電圧を50 V級としつつ、太陽電池の発生電力を一部の機器に対しては100 V級のラインで供給する設計になっていた。また、バッテリーには宇宙用に開発された大容量リチウムイオン二次電池が世界に先駆けて適用されていた^{1,2)}。リチウムイオン二次電池は1990年代半ばから民生市場に投入された電池であり、2003年に打ち上げられた「はやぶさ」への適用が進められたことは大変な挑戦であったと思われる。

この電池の特徴として、過放電や過充電が許容されない電池であるにも関わらず、途中、姿勢制御が困難になった時には過放電も経験した。本来使用不可能な状態となったバッテリーであったが、再度使用する必要が生まれ、周辺回路からの微弱なリーク電流を活用した再充電を試みた。

また、「はやぶさ」の最終ミッションは、カプセルの地上での回収であった。このカプセルでは民生品のリチウム一次電池が使用されていた。「はやぶさ」は地球帰還時に小惑星サンプル回収用のカ

プセルを分離したが、このカプセルは大気圏に突入してパラシュートを展開した後にビーコンを送信し、これを受信することにより着陸位置の同定が進められた。この動作用電源としてLi-CF_x電池が使用された。電池は製造から12年、宇宙フライトを7年経験した後に機能する必要があり、探査機の運用と並行して種々の検証試験を進めた。

著者は、特に「はやぶさ」の電源運用を担当した。ここでは、カプセル回収までの現場体験を、電源の観点からまとめ、特に、小惑星サンプルを回収するために電池が果たした役割について述べる。

2. 主要電源仕様

2-1. 「はやぶさ」搭載バッテリー

図3には「はやぶさ」に搭載されたリチウムイオンバッテリーを示した。使用された電池は古河電池製の13.2 Ahリチウムイオン二次電池であり、これを用いてNEC東芝スペースシステムズが11セル直列のバッテリーを構築した。各セルにはモニター回路、過充電防止用の充電バイパス回路、およびセルのオープン故障時にセルを迂回して放電電流を流すための放電バイパスダイオードが取り付けられていた。モニター回路と放電バイパスダイオードは常に各セルに接続されており、充電バイパス回路はコマンドによりon/offが選択できるように設計されていた。充電時には、充電制御器を介して500 mAでの充電を行うことができた。

2-2. 「はやぶさ」カプセル搭載電子機器部

図4には、「はやぶさ」カプセルを示した。カプセルの中心部分にはサンプルが格納されるコンテナがあり、これを取り巻くように搭載電子機器部が設置されていた。



図3 「はやぶさ」搭載リチウムイオンバッテリー



図4 「はやぶさ」カプセル

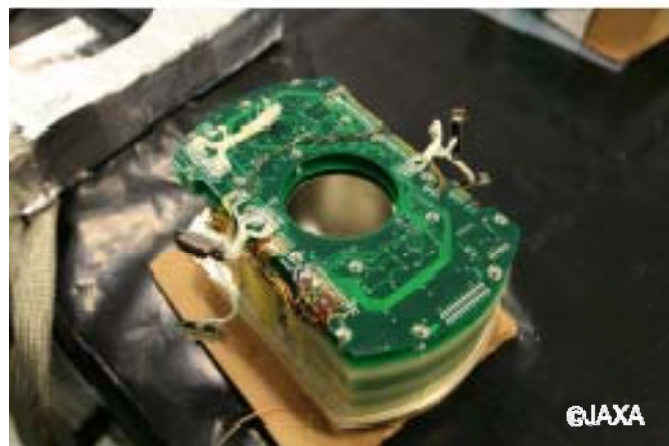


図5 「はやぶさ」カプセル搭載電子機器部

図5には、カプセルの搭載電子機器部を示した。この部位には母船から切り離された後にカプセルの電力を賄うために一次電池が格納されていた。使用された電池はパナソニック製BR(Li-CFx)電池であり、5 Ahセル(BR-C)を3直列2並列、1.8 Ahセル(BR-A)を3直列4並列とし、更にこれらを並列に接続していた。

3. 「はやぶさ」電源系の軌道上運用

3-1. 「はやぶさ」用リチウムイオンバッテリーの運用

小惑星イトカワへの往路においては、電池劣化を抑制するためにバッテリーは容量を65%程度に維持した。定期的に各セルの容量バランスをとりつつ、途中、バッテリーの容量確認を行った。ここで得られた宇宙空間での容量情報から電池性能が地上での検証試験により予測可能であることを確認している。「はやぶさ」がイトカワに到達した際、地上と「はやぶさ」との通信に必要とされた往復の伝搬遅延時間は40分程度であり、地上試験から得られた予測性能をもとに、小惑星への着陸の直前には、搭載バッテリーには40分間の運用に必要な電力が充電された。

「はやぶさ」は2度にわたり小惑星へのタッチダウンを行った。特に二度目のタッチダウンの後に化学推進系のトラブルから姿勢制御が困難な状態に陥り、電力発生用の太陽電池を太陽に指向することができずに電力維持が困難になった。表1には、通信から7週間後に再度探査機との通信が回復し、探査機の状態が安定した時点で得られたバッテリーを構成する素電池(セル)の電圧を示したものである。バッテリーは11セルが直接に接続された構成をしており、便宜上、プラス(ホット)側から順に番号を付けて識別されていた。表1の情報から、既にバッテリーを構成する11セルのうち4セルは過放電状態にあり、7セルが健全な状態にあることが示唆されていた。

リチウムイオン二次電池は、放電時にもセルあたりで2.75 V以上の電圧を維持することが必要とされる電池である。電池内部には正極にコバルト酸リチウム、負極にグラファイトが使用された。これらの材料が決着剤で練られ、集電体と呼ばれる金属箔表面に塗られて電極を形成する。「はやぶさ」用の電池では、正極の集電体にはアルミニウムが、負極の集電体には銅が使用されていた。正常な電池反応は2.75V以上で維持されるが、1V以下の領域には負極集電体の銅が溶け出す反応があり、この反応をさけるために下限電圧に達したら放電を打ち切る必要がある電池である。表1に示した電池の電圧は、この下限電圧を、1番、2番、4番のセルが逸脱したことを示しており、3番の電池についても性能は保障できない状況であると認識した。この時点で不思議であったことは、5番から11番の電池の電圧が奇妙に高いことであった。このリチウムイオン二次電池は4.2 Vまで充電できる電池であったが、表1のデータは5番から11番の電池は、ほぼ100%に近い充電状態を維持していることを示すものであった。

表1 通信回復時の電池電圧

参考文献[2]より

電池番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
電圧 / V	0.58	1.74	3.69	1.28	4.11	4.05	4.09	4.09	4.09	4.09	4.06

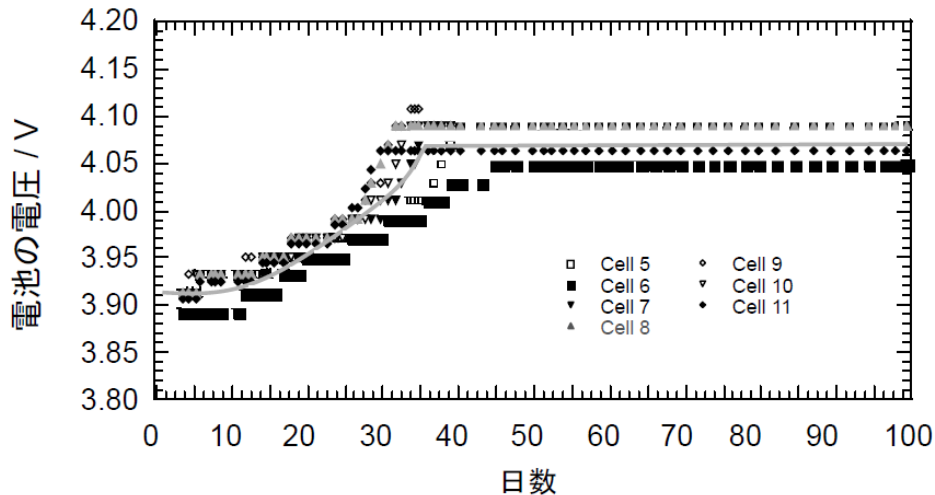


図6 過充電防止回路を動作状態にすることによる充電時のセル電圧推移
参考文献[2]より

その他にも不思議な事柄がみられた。リチウムイオン二次電池は過充電も回避しなければならない電池であり、過充電に至りそうになった際に充電電流をバイパスさせる回路が備えられていた。過充電防止回路と呼ばれる回路であるが、これはコマンドを送らなければ動作状態にならない回路である。この回路が誤作動により動作状態になっていた。これは正常な状態ではないので、非動作に戻した。その直後から、電池電圧の急激な低下が始まった。

この理由を調べる中で、過充電防止回路が動作状態にある時には微弱な漏れ電流が電池に流れることがわかった。これは、バッテリーを構成する個々の11個の電池それぞれに対して流れるが、1番のセルに対しては2mA程度であり、2番の電池以降はセル番号が大きくなるにつれて電流が徐々に大きくなり、11番の電池については22 mAが流れ込むことがわかった。一方、各電池には電圧モニター用の回路が接続されており、この回路からは放電方向に電流が流れ続けることはわかっていて、この電流も微弱であり、それぞれに電池を常時数mA放電させるものであった。この結果、過充電防止回路が動作状態にある間、1番から4番の電池については放電方向のリークが上回り、5番から11番の電池については充電方向へのリークが上回ることで、結果として1番から4番の電池は放電し、5番以降の電池は充電状態を維持し続けることができたことがわかった。

ただし、状況は整理されたものの、バッテリーを構成する電池のうち複数個が過放電を起こしている中でこのバッテリーを使用する運用は想定しえないと考え、その後にバッテリーの再充電を行うことはなかった。

更にその後、小惑星サンプル用のコンテナが大気圏再突入用カプセルに未だ格納されていないことが伝えられた。この動作を実行するためには電力が供給されなければならなかった。ただし、この電力供給ラインはバッテリーからの直結であり、カプセルへのサンプルコンテナの格納動作には故障しているリチウムイオンバッテリーを再充電する必要が生じた。種々の手法を試す中で、バッテリー電圧を上げることができ、かつ探査機の安全を確実に担保できる充電方法として、過充電防止回路を動作状態にしたときの微弱なリーク電流を活用する充電手法を採ることになった。

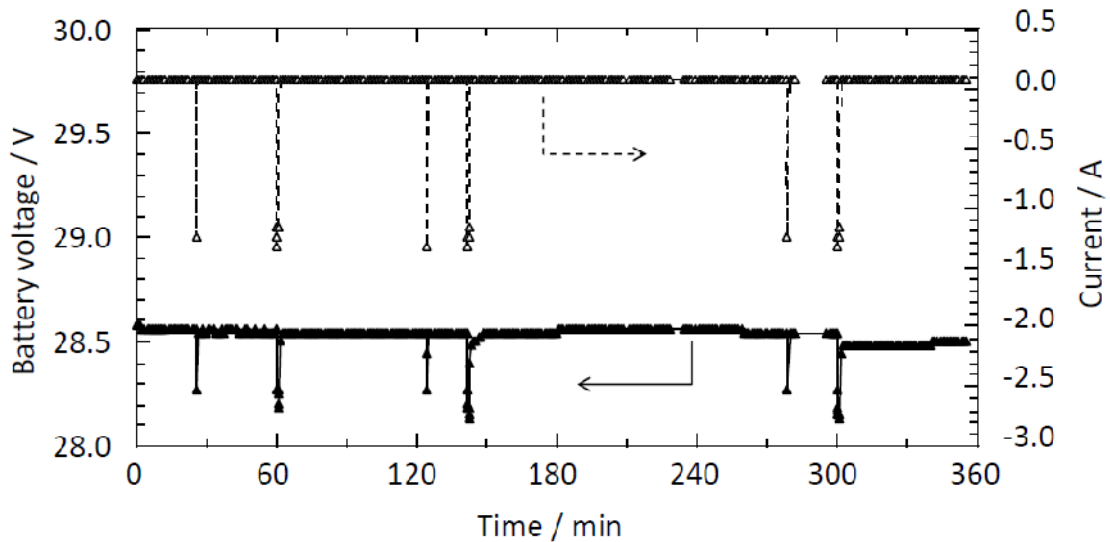


図7 「はやぶさ」カプセルへのコンテナ格納時のバッテリー電圧推移
参考文献[2]より

図6には、再充電による健全な7セルの電池電圧が上昇する様子を示した。約40日間をかけて、本来バッテリーを過充電から保護するための充電バイパス回路からのリーク電流を用いて再充電を行い、健全性が期待された7セルを個別に充電することに成功した。その後は充電状態を維持するために同じ運用を継続実施し、カプセルへのコンテナ格納運用に備えた。

図7には、このバッテリーを放電し、無事にカプセルへコンテナを格納した際のバッテリーの放電の様子を示した。コンテナのカプセルへの格納を完了するまでには、2 A/30秒のパルス放電を28 V以上の電圧を維持しつつ4回以上行うことが求められたが、バッテリーは所望の性能を維持し、コンテナは無事にカプセルに格納された。

3-2. カプセル搭載電子機器部の一次電池評価

地球近傍に到達した「はやぶさ」は、2010年6月13日に、無事に大気圏再突入用カプセルを分離した。

カプセルは「はやぶさ」本体から分離された後に大気圏に突入し、更にパラシュートを展開しつつ、ビーコンの送信を開始する設計となっていた。

カプセルは大気圏突入後の光学観測とビーコンの電波追尾によって位置同定を進めつつ、着地予想地点にヘリコプターが回収に向かうことになっていた。カプセル回収に先立つ事前の評価として、特にこのビーコンの送信可能時間を見積もることを目的とした試験を実施した。

図8には、熱衝撃を加えることにより加速的に劣化を促進した電池を用意し、この放電試験を行った際の電池電圧と電池表面温度の推移を示した。ここでは外部環境温度を -20°C から 15°C の範囲で設定して試験を行っている。

カプセルはフライト中に -20°C 程度の温度を示しており、切り離し前には 5°C 程度までは昇温可能であるとされていた。別途実施したフライト中のカプセルの昇温試験から、カプセルは放出前に 5°C 程度まで昇温された場合には、大気圏再突入までの宇宙空間での3時間の単独飛行中に、 -15°C から -20°C 程度まで温度を下げるのが予想されていた。図8で得られた結果からは、このような温度

環境におかれても放電中の電圧は搭載電気機器部を動作させるのに充分であることを示すものであった。また、電池は放電を開始すると自己発熱により温度上昇を起し、特にビーコン送信時には安定な出力を維持することが予想された。

この熱劣化加速試験に加えて、実際の大気圏再突入の約2ヶ月前にはカプセルに積まれているフライト品と同一ロットの電池についても同様の放電試験を実施した。この電池は12年間の冷蔵保管を行った電池であり、フライト中のカプセル内電池にもっとも近い性能を持っていることが期待できた。図9には、フライトロット品の放電性能データを示したが、熱劣化加速品と、ほぼ同程度の性能を示していた。

実際のフライト中のバッテリーでは搭載状態において常に周辺回路に対して微弱な放電を続ける。この回路への放電量を補正した上で、環境温度が0℃では12時間程度、15℃以上では14時間程度にわたりビーコンの送信が継続可能であることが予想された。本結果等を考慮した検討の中で、ヘリコプターのフライトが出来ない時間帯にはビーコンの送信を停止させるタイマーの設定等が進

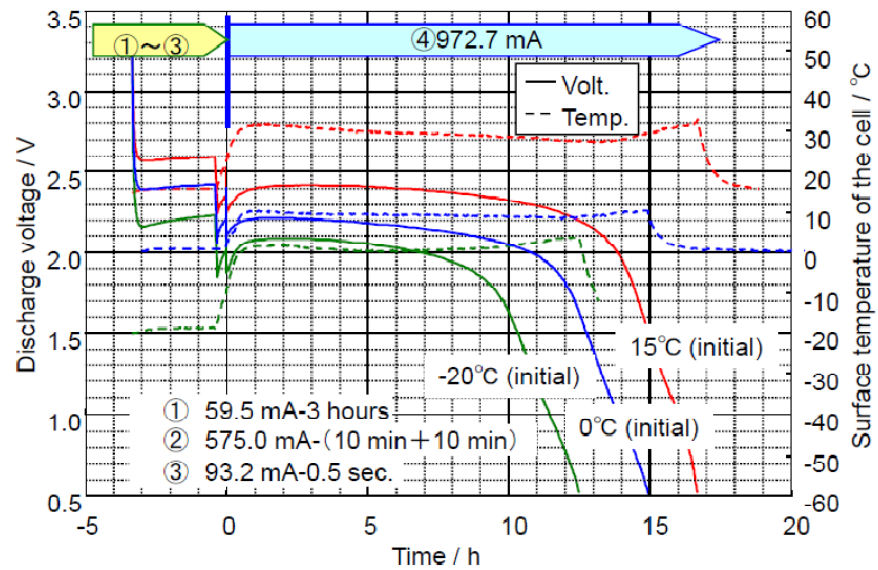


図8 加速評価試験用に用意されたリチウム一次電池による「はやぶさ」からのカプセル放出後を模擬した放電試験結果
①～③: 計測待機、アナログ系ウォームアップ、パラシュート/アンカー点火を模擬、④: ビーコン発信を模擬

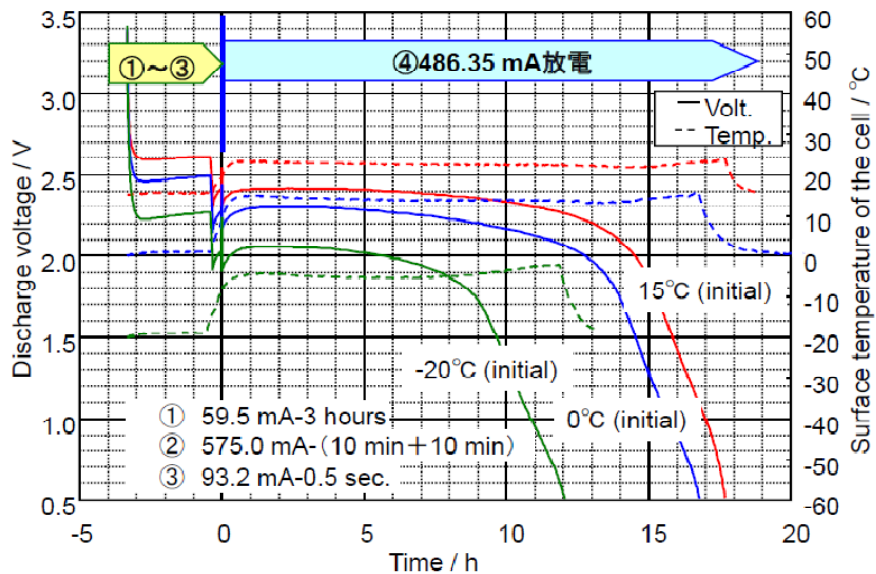


図9 フライト搭載電池と同一ロットのリチウム一次電池による「はやぶさ」からのカプセル放出後を模擬した放電試験結果
①～③: 計測待機、アナログ系ウォームアップ、パラシュート/アンカー点火を模擬、④: ビーコン発信を模擬

められた。

「はやぶさ」は2010年6月13日地球に帰還した。カプセルは無事に分離され大気圏に再突入した。パラシュートの展開とあわせて正常にビーコンを送信し、所望の機能を果たした。

図10には、「はやぶさ」と小惑星サンプル回収用のカプセルが大気圏に再突入した際の流星発光の様子を示した。



図10 大気圏再突入時のはやぶさの様子

カプセルからは小惑星由来と考えられる微粒子が見つかっており、分析が進められている。

謝辞

「はやぶさ」本体に使用されたリチウムイオン二次電池につきましては、開発／運用全般におきまして、古河電池(株)の関係者とNEC東芝スペースシステムズ(株)の電源関係者および日本電気(株)関係者にご支援とご協力をいただきました。

また、カプセル回収に係るリチウム一次電池の検証試験では、パナソニック(株)エナジー社の関係者と日本電気(株)関係者にご助力をいただきました。

この場をお借りして、深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Sone, et al., *Electrochemistry*, **75**, pp. 518-522 (2007).
- [2] Y. Sone, et al., *Electrochemistry*, **75**, pp. 950-957 (2007).