

## 金星探査機 PLANET-C 用リチウムイオン電池の開発（その2）

## Development of Satellite for Scientific Purposes PLANET-C Lithium-Ion Battery –2nd Report–

大平 賢治<sup>\*1</sup>  
Kenji Ohira大登 裕樹<sup>\*1</sup>  
Hiroki Ooto山本 真裕<sup>\*2</sup>  
Masahiro Yamamoto井奈福 浩之<sup>\*1</sup>  
Hiroyuki Inahuku**Abstract**

Based on fundamental technologies used in the battery cells for “HAYABUSA” and for preparation for mounting on the “PLANET-C” Venus probe scheduled for launch in spring 2010, we developed a revised 23.5 Ah class lithium-ion cell. We produced a prototype model cell with space specifications and performed assessment of adaptability of performance of the cell to the “PLANET-C” mission, assessment of durability in mechanical environments, and of safety. Assessment of its adaptability to its mission is continuing: all cells subjected to testing have exhibited good progression. Result of assessment of durability in the mechanical environment revealed that abnormality was not found in the cell. Safety assessments have confirmed that fracture, ignition, actuation of the pressure relief valve and a sudden temperature rise did not occur.

**1. はじめに**

当社は宇宙研究用及び人工衛星用 Ni-Cd 電池、Ni-MH 電池の研究開発と製造実績を基に、宇宙用リチウムイオン電池を開発し<sup>1)~3)</sup>、宇宙航空研究開発機構（以下 JAXA）宇宙科学研究本部殿の小惑星探査用工学実験探査機「はやぶさ」に搭載され、2003年5月の打上げ以降、3.5年に亘って軌道上での実証評価を進め、宇宙用電池として高い性能と品質を満足することを確認した。

この「はやぶさ」用電池の基本技術をベースに、新たに金星探査機 PLANET-C 搭載用リチウムイオン電池の開発を開始した。ミッションの要求条件から質量メリット、寿命特性の更なる改善が求められたため、大型化、高エネルギー密度化、長寿命化検討を行い、23.5Ah 級角形リチウムイオン電池を開発した。

これまでに我々は、定格容量及び質量エネルギー密度を改善し、エンジニアリングモデルセル（EMセル）を試作し、その EMセルの評価において、PLANET-C ミッションへの適合性の目処が得られ

たことについて報告してきた<sup>4)~6)</sup>。

本報では、PLANET-C 搭載用電源として開発した 23.5Ah 級リチウムイオン電池の、PLANET-C 搭載仕様プロトタイプモデルセル（以下 PMセル）の評価試験を開始したので試験経過を報告する<sup>7)</sup>。

**2. PLANET-C 用バッテリーの運用計画**

PLANET-C 搭載バッテリーの運用計画を表 1 に示す。バッテリーは納入から打上げまでの 1.5 年間、地上での総合試験などで使用する以外は、特性劣化と過放電を防ぐため、常温環境下にて僅かな容量を充電した状態で、開回路で保管される。

表 1 PLANET-C 搭載バッテリーの運用計画  
Table 1 Operation plan of battery for PLANET-C

	Time (year)	Temperature (°C)	State
Delivery - launch	1.5	25	Storage at off load
launch - arriving at Venus (nominal)	0.5	10	Standby use
〃 (backup)	2.5		
Venus orbit	2.0	10	Cycle use

続いて、探査機を打上げから金星に到着するまでのクルージング運用モードに移行する。この期間には探査機がセーフホールドモードに移行するなどして、太陽電池パドルの発生電力が不足した際、非常

\*1 アルカリ電池部

\*2 アルカリ電池部兼技術開発本部

用電源としてバッテリーの電力を使用するため、スタンバイユースでの運用が前提条件となる。ノミナルな軌道では金星到着まで0.5年の期間だが、バックアップウィンドウでは2.5年かかる軌道となる。ノミナルとバックアップウィンドウとの間隔は約1ヵ月と短いため、あらかじめ2.5年のクルージング運用に耐えられる長寿命電池を開発した。

金星に到着した後、バッテリーは探査機の日陰に応じて電源として使用される。2年間の金星周回運用計画で、探査機の日照期間を除き、常時充放電を繰り返すサイクルユースで運用されるほか、金星周回軌道の全期間において探査機がセーフホールドモードに移行する際に備えたスタンバイユース運用が前提条件となる。

### 3. PLANET-C 搭載仕様PMセルの充放電特性

#### 3.1 PLANET-C 搭載仕様 PM セルの概要

PLANET-C 搭載用電池セルは、第一報<sup>4)</sup>で報告した容量設計の結果から、定格容量 23.5Ah、質量当りのエネルギー密度が 107Wh/kg 以上の角形リチウムイオン電池である。現在、PM セルの基本充放電特性とミッション適合性の模擬試験を実施している。PM セルの外観写真と外寸を図 1 に示す。

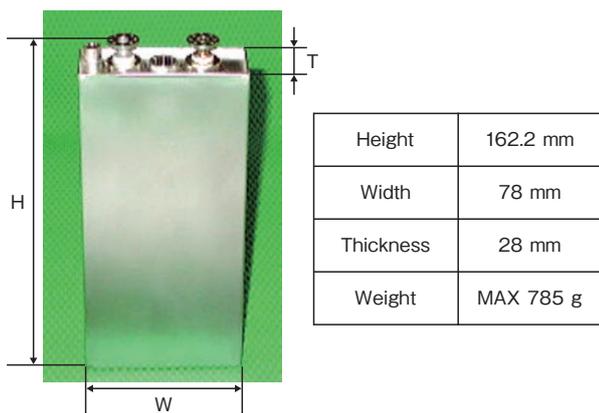


図 1 PM セルの外観写真  
Fig.1 Appearance of PM cells

#### 3.2 基本放電特性試験

負荷変動による影響を確認するため、基本放電特性試験を実施した。PM セルを 100%SOC (State of Charge: 充電状態) から 0.2 C\*A、0.5 C\*A、1 C\*A (C\*:

定格容量 = 23.5Ah) の各定電流で 2.75V まで放電した結果を図 2 に示す。電流値の違いによる電圧降下はあるが、容量は同一となり良好な特性が得られた。

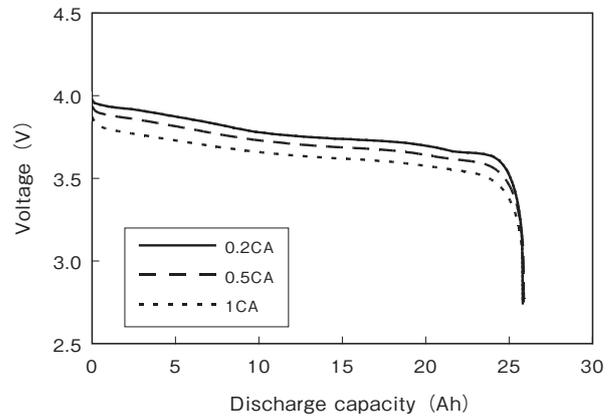


図 2 PM セルの基本放電特性  
Fig.2 Discharge characteristics for PM cells

#### 3.3 基本サイクル寿命試験

PM セルの基本的なサイクル寿命を確認するため、100%SOC から 22.27W の定電力放電を 90 分行なう充放電サイクル試験を開始した。これは金星周回運用の最大日陰負荷を想定した条件である。図 3 は 460 サイクル経過した特性であり、良好な経過が得られている。

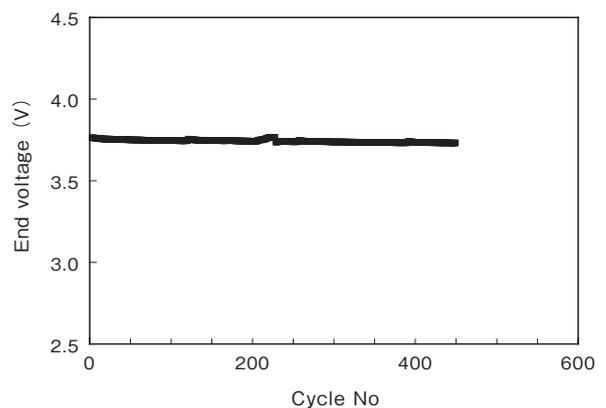


図 3 基本サイクル寿命特性  
Fig.3 Cycle life characteristics for PM cells

#### 3.4 PSOC (Partial State of Charge: 部分充電状態) サイクル寿命試験

金星周回運用に近い条件である充放電サイクルの模擬試験を開始した。試験は約 85%SOC から 22.27

W の定電力放電を 90 分行なう充放電サイクル試験である。461 サイクル経過した特性を図 4 に示す。金星周回運用の予定サイクル数である 550 サイクル目で 3V 以上という要求値を上回る見通しが得られた。

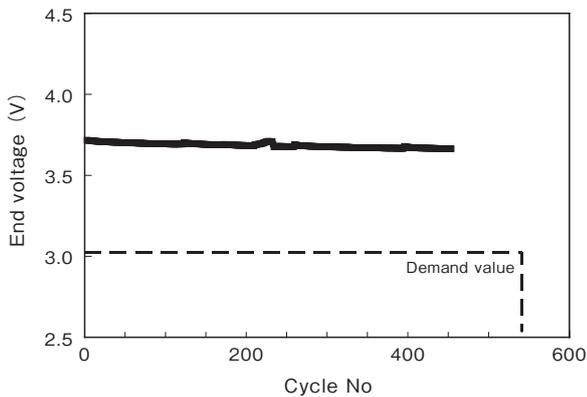


図 4 PM セルの PSOC サイクル寿命特性  
Fig.4 PSOC cycle life characteristics for PM cells

### 3.5 運用シミュレーション試験

表 1 に示した一連のバッテリー運用の模擬試験を開始した。図 5 にその試験経過を示す。評価は納入～打ち上げまでの保管試験中である。保管試験では 10%SOC の PM セルを 25℃ の環境下に保管し、定期的に容量確認試験を実施している。現在、約 1 年が経過しており、1.5 年後の放電容量維持率 93.6% という要求値を達成できる見込みである。

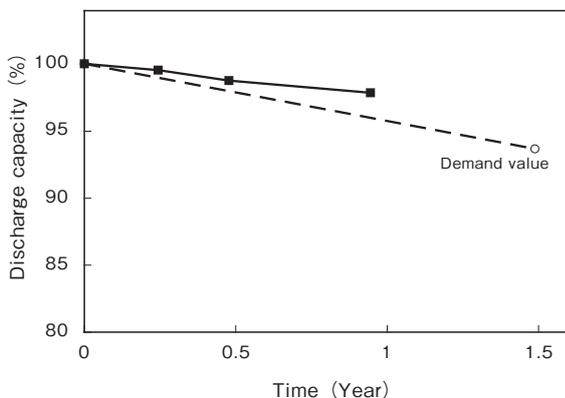


図 5 運用シミュレーション試験 保管特性  
Fig.5 Storage characteristics of simulated operation test

### 3.6 11 直列組電池シミュレーション試験

PLANET-C 搭載バッテリーは、11 個のセルを直

列に接続した組電池で構成されるため、運用シミュレーション試験と同内容の試験を組電池状態で開始した。図 6 に示すように、評価は保管試験が約 1 年経過した状態にあり、要求値を上回る良好な経過が得られている。

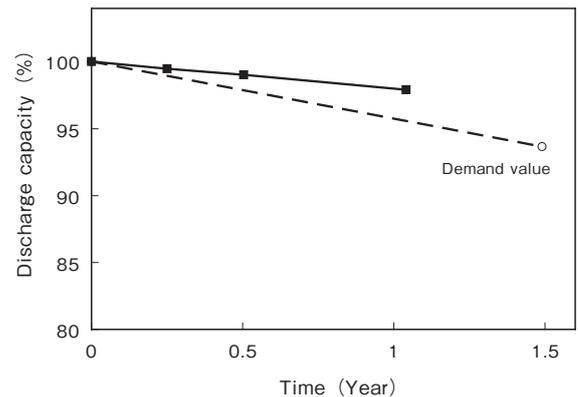


図 6 組電池シミュレーション試験 保管特性  
Fig.6 Storage characteristics of simulation test by assembled battery

### 3.7 加速シミュレーション試験

加速シミュレーション試験は温度を 20℃ 上昇させ劣化を 4 倍に加速した単セル模擬試験である。図 7 に試験経過を示す。打上げ前の保管終了となる 1.5 年相当での容量維持率は 95.4% であり、要求値 93.6% を上回る良好な結果が得られた。

図 8 に保管終了時の放電特性を示す。1.5 年相当の保管後も、打上げ負荷要求を満たす良好な放電特性が得られた。

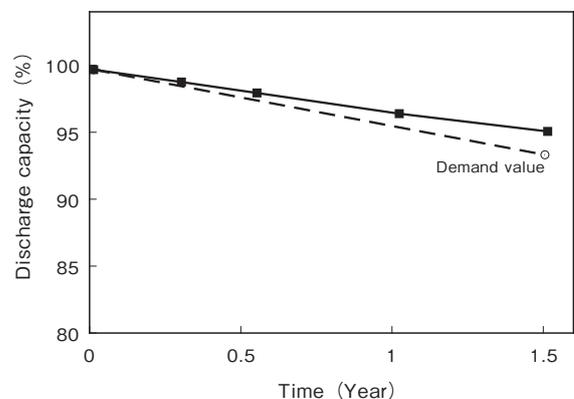


図 7 加速シミュレーション試験 保管特性  
Fig.7 Storage characteristics of simulation test by temperature acceleration

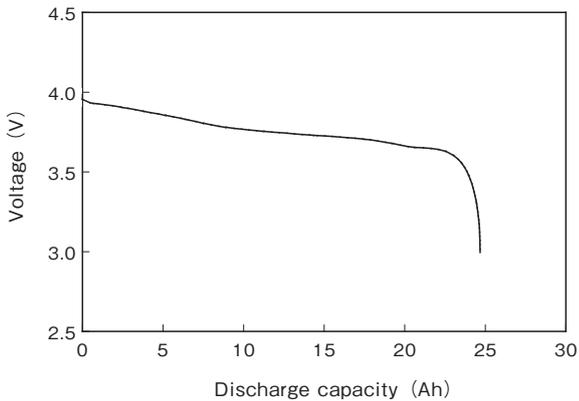


図8 加速シミュレーション試験 保管後放電特性  
Fig.8 Discharge characteristics after storage of temperature acceleration simulation test

#### 4. PLANET-C 搭載仕様 PM セルの機械環境耐性

##### 4.1 PM セルの機械環境耐性試験

機械環境試験では、PM セル構造が衛星打上げ時の振動や衝撃に耐える構造であることを確認した。JAXA 殿の『PLANET-C 搭載機器の耐環境性設計基準書』により定められた要求条件に従い、ランダム振動試験、正弦波振動試験、パイロ衝撃試験を実施した。機械環境試験の条件を表2に示す。また、振動及び衝撃は、図9に示すX軸、Y軸、Z軸の各軸に印加している。

表2 PM セルの機械環境試験  
Table2 Mechanical environmental test of PM cells

Item	Requirement	Test method
Random vibration test	X, Y axis :maximum 10.4 G Z axis :maximum 17 G	We impressed vibration while discharging the PM cells of 50% SOC at 0.5 CA, and observed the voltage and cell temperature.
Sinusoidal vibration test	X, Y, Z axis :maximum 25 G	〃
Pyrotechnic shock test	X, Y, Z axis :maximum 500 G	We measured cell voltage before and after shock impression and observed damage to power generation elements, such as the electrode group and connection of electrode terminals and collecting tabs.

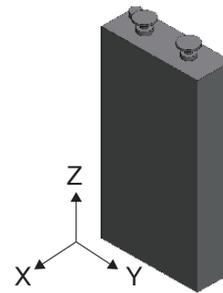


図9 PM セルの設定軸  
Fig.9 Axis of PM cells

##### 4.2 ランダム振動試験

50%SOCのPMセルを0.5 CAの電流で放電させながらX軸及びY軸で最大10.4G、Z軸で最大17Gのランダム振動を印加した。X軸及びY軸でのランダム振動印加中の電池特性を図10、図11に示す。PMセルの放電中の電圧、電流、温度に急激な変化はなく、要求条件を満足していることを確認した。

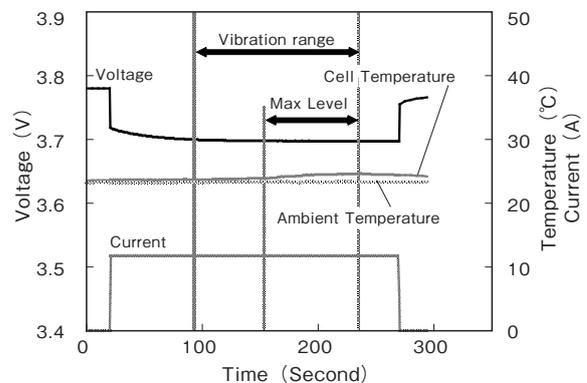


図10 ランダム振動試験 X軸  
Fig.10 Random vibration test of X axis

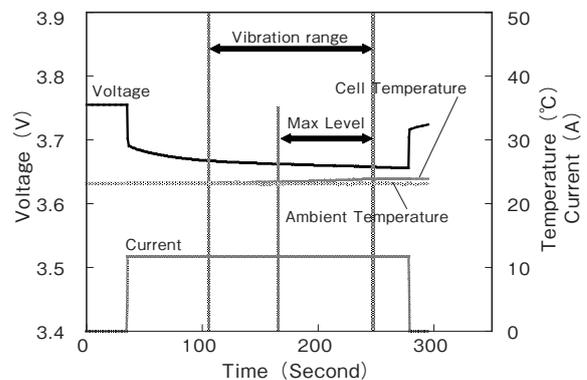


図11 ランダム振動試験 Z軸  
Fig.11 Random vibration test of Z axis

4.3 正弦波振動試験

PMセルを0.5 CAの電流で放電させながらX軸, Y軸, Z軸で最大25 Gの正弦波振動を印加した。その時の電池特性を図12に示す。PMセルの放電中の電圧、電流、温度の急激な変化はなく、要求条件を満足していることを確認した。

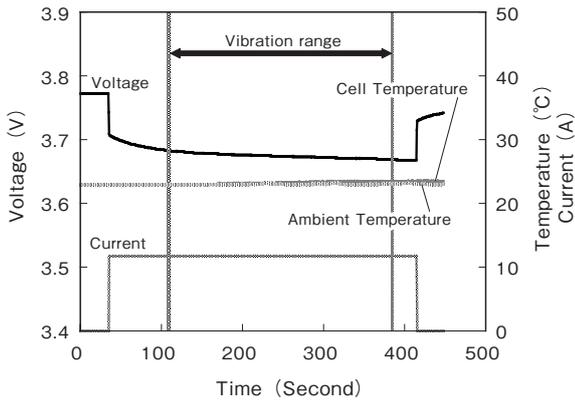


図12 正弦波振動試験  
Fig.12 Sinusoidal vibration test

4.4 パイロ衝撃試験

PMセルにパイロ衝撃を印加し、印加前後のセル電圧を測定し、セル構造の損傷の有無を評価した。図13に衝撃特性、表3に衝撃印加前後の電圧変動を示す。最大で700 Gを超える衝撃をPMセルに印加したが、衝撃印加前後の電池電圧に変化はなく、要求条件を満足していることを確認した。

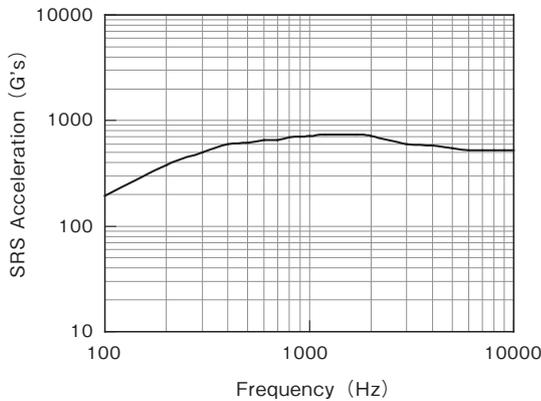


図13 パイロ衝撃試験 印加衝撃波形  
Fig.13 The wave of a shock impressed in a pyrotechnic shock test

表3 パイロ衝撃試験前後のセル電圧の変動  
Table 3 Change of cell voltage before and after pyrotechnic shock test

+ Y axis	None
- Y axis	None
+ X axis	None
- X axis	None
+ Z axis	None
- Z axis	None

5. PLANET-C 搭載仕様 PM セルの安全性評価

5.1 PMセルの安全性評価試験

過充電試験及び外部短絡試験からPMセルの安全性を評価した。安全性試験の条件を表4に示す。

表4 PMセルの安全性試験  
Table 4 Safety evaluation of PM cells

Item	Test method	Result
overcharge test	We charged the PM cells to 200% of capacity under a 10°C environment.	Abnormality none
external short circuit test	We short-circuited the electrodes of the PM cells of a completely charged state with a resistance of 30.3mΩ between lines under a stationary environment for 8h.	Abnormality none

5.2 過充電試験

100% SOCのPMセルに1 CAの定電流充電を1時間行い、200% SOCまで過充電した。過充電中のPMセルの電圧、温度特性を図14に示す。試験の結果、破裂、発火、放圧弁作動、熱暴走に至るような急激な温度上昇はなく、PMセルが安全性要求を満足していることを確認した。

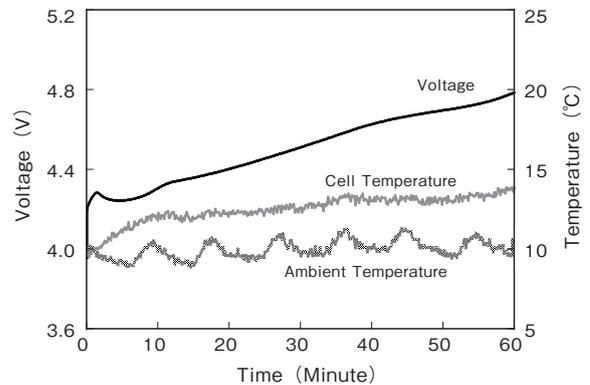


図14 過充電試験  
Fig.14 Overcharge test

### 5.3 外部短絡試験

100% SOC の PM セルを外部回路により 8 時間の短絡を実施した。短絡回路の抵抗値は、当該セルの組電池等の実運用における作業上の不具合を想定し 30mΩ とした。外部短絡中の PM セルの電圧、温度特性のうち、特徴的な最初の 1 時間のトレンドを図 15 に示す。短絡開始直後には最大で 109.5A の短絡電流が流れ、比較的大きな温度上昇が発現したが、約 14 分後に短絡電流は垂下し、これに伴い温度も低下した。その後、短絡を 8 時間継続しても、発火、破裂、放圧弁作動、熱暴走に至る急激な温度上昇はなく、PM セルが安全性要求を満足していることを確認した。

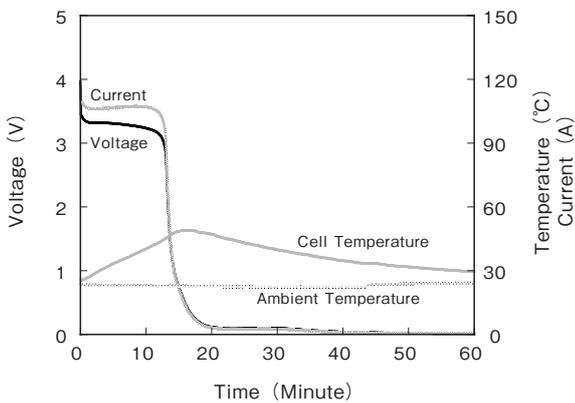


図 15 外部短絡試験  
Fig.15 External short circuit test

## 6. おわりに

金星探査機 PLANET-C 搭載仕様の PM セルの評価試験を開始した。基本充放電試験及び PLANET-C ミッションの適合性試験は良好な経過が得られている。機械環境耐性試験の結果、セル故障、異常発熱、電池電圧の異常は発現せず、JAXA 殿の『PLANET-C 搭載機器の耐環境性設計基準書』に定められた要求条件を満足することを確認した。過充電及び外部短絡試験の結果から、破裂、発火、放圧弁作動、急激な温度上昇等の電池異常は見られず、PM セルが安全性要求を満足していることを確認した。

## 7. 謝辞

本研究開発は独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部殿、NEC 東芝スペースシステム株式会社殿の御指導の下で実施している。ここに、御指導、御協力を賜った関係各位に感謝を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 山本、大登、高椋、酒井、高橋、廣瀬、田島, 第 18 回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集, pp.47-50 (Feb 1999)
- 2) 大登、高椋、山本、酒井、高橋、廣瀬、田島, 第 19 回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集, pp.1-5 (Feb 2000)
- 3) 山本、高椋、大登、酒井, FB テクニカルニュース, No.56, p64 (2000)
- 4) 大登、大平、山本、江黒、豊田、鶴野、廣瀬、田島, 第 27 回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集, pp.11-15 (Mar 2008)
- 5) H.Ooto, K.Ohira, H.Toyota et al, Proc. of the '8th European Space Power Conference', (Sep 2008)
- 6) 大登、大平、山本、井奈福, FB テクニカルニュース, No.64, p19-25 (2008)
- 7) 大平、大登、山本、井奈福、豊田、鶴野、廣瀬、田島, 第 28 回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集, pp.1-5 (Mar 2009)