

# On-Orbit Demonstrator of Next Generation Instruments for Electric Power System by NESSIE

Akio Kukita<sup>(1)</sup>, Masato Takahashi<sup>(2)</sup>, Kazunori Shimazaki<sup>(2)</sup>, Yuki Kobayashi<sup>(2)</sup>, Tomohiko Sakai<sup>(1)</sup>,  
Hiroyuki Toyota<sup>(1)</sup>, Yu Takahashi<sup>(1)</sup>, Mio Murashima<sup>(1)</sup>, Masatoshi Uno<sup>(2)</sup>,  
Takanobu Shimada<sup>(1)</sup>, and Mitsuru Imaizumi<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa, 252-8510 Japan

<sup>(2)</sup>JAXA, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

## *Abstract:*

The on-orbit demonstrator of next generation instruments for electric power system called NESSIE (NExt Generation Small Satellite Instrument for Electric power system), is installed on SPRINT-A/Hisaki satellite, launched in the September of 2013 by Epsilon launcher.

The mission is the on-orbit demonstration of the aluminum-laminated lithium-ion capacitor (LIC) and of the lightweight solar panel called KKM-PNL which consist of space solar sheets using thin-film MJ solar cells called.

LIC has sufficient safety compared to lithium-ion secondary battery (LIB) and wide operating temperature range. In addition, LIC can operate for a long term. Although the energy density of LIC is lower than that of LIB, the practical energy density is equivalent to LIB due to LIC's superior DOD allowance. Therefore, it is suitable for long-term missions such as planetary explorations.

Thin-film MJ solar cells such as IMM InGaP/GaAs/InGaAs 3J cells have flexibility as well as high conversion efficiencies relative to conventional rigid 3J solar cells. Using a combination of the thin-film MJ solar cells and light flexible paddles, satellite mass can be greatly reduced.

In this paper, the details and the result of this 3 months operation of NESSIE are described.

# NESSIE による次世代電源系要素技術の軌道上実証

JAXA 久木田明夫、高橋真人、島崎一紀、小林裕希、坂井智彦、  
豊田裕之、高橋 優、村島未生、鵜野将年、嶋田貴信、今泉充

## 1 はじめに

次世代小型衛星電源系要素技術実証機 NESSIE (NExT-generation Small Satellite Instrument for Electric Power System(EPS): NESSIE)は、将来科学衛星や探査機において今後利用が予想されるリチウムイオンキャパシタ (LIC) や、高効率多接合薄膜太陽電池アレイシート (SSS: Space Solar Sheet) を機能構造膜化した薄膜セル応用機能構造パネル (KKM-PNL) の宇宙実証を目的とする。KKM-PNL は、内部電力源として2接合のSSS、評価用としての IMM3J 薄膜太陽電池セル、そしてリファレンス用の Si 太陽電池セルを搭載している。

リチウムイオンキャパシタは、酸化物を持たない為、安全性が高い。またサイクル劣化が少なく長寿命である。エネルギー密度はリチウムイオン二次電池に劣るものの、深い放電深度での利用が可能である為、宇宙機において実利用可能なエネルギー密度はリチウムイオン二次電池に匹敵する。更に、動作温度範囲が広く、ハイレート充放電が可能という特徴を持ち、長期のミッションへの適用が期待される。

薄膜太陽電池は、軽量且つフレキシブルであり、NESSIE に部分搭載される IMM3J 薄膜太陽電池セルは30%を超える変換効率が期待出来るため、現在使用されているリジッドな三接合太陽電池セルを用いた太陽電池パネルに比べ、大幅な軽量化が期待出来る。

宇宙機の小型軽量化や安全性が求められる一方、電源機器は問題が発生した場合、衛星の生死に直結するため、新技術が開発されてもすぐにバス機器として搭載する事は出来ない。そのため、NESSIE のように新技術を軌道上実証する事は非常に重要である。

NESSIE は、LIC の充放電電圧、電流、及びセル温度を計測し、KKM-PNL 上の2接合薄膜アレイシート及び IMM3J 薄膜セル、及びリファレンス用の Si 太陽電池セルの短絡電流、開放電圧、及びパネル温度の計測を行い、軌道上経年変化データを取得する事により、宇宙複合環境下での動作実証による実力確認 (耐放射線性、性能が設計通りか) を行い、地上試験性能予測モデルと軌道上トレンドデータ取得による相対評価を実施する。

NESSIE は、2013 年 9 月にイプシロンロケットで打ち上げられた惑星分光観測衛星/SPRINT-A に搭載され、現在軌道運用中である。本稿では、この NESSIE について、及びこれまで取得したデータについて報告をする。

## 2 NESSIE 概要

まず、NESSIE が搭載されている SPRINT-A の概略を示す。Fig.1 に、SPRINT-A の外観を、そして Table 1 に、主要仕様を示す。SPRINT-A は、金星、火星、木星を極端紫外光観測することで、木星のイオトーラスのエネルギー収支機構の解明や、地球型惑星の太陽風との相互作用による大気流出機構の解明を目指す衛星である。次に NESSIE 概要を以下に示す。

### 2.1 構成

NESSIE の外観図を Fig. 2 に、主要構成品目を表 Table 2 に示す。また、Fig.3 に内部配置図を、Table 3 に主要構成品目



Fig.1 An Image of SPRINT-A

Table 1. Specifications of SPRINT-A.

重量	約 330 kg
寸法	約 1 m×1 m×4 m
軌道高度	946.8 km×1,156.8 km
軌道傾斜角	29.7 deg.
軌道種類	楕円軌道
軌道周期	約 106.2 分

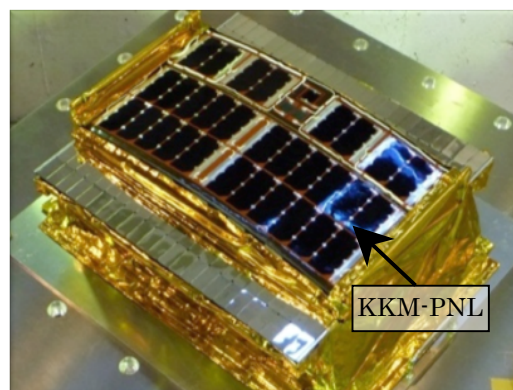


Fig.2 Appearance of NESSIE

を示す。本実証機のパス電圧は 5 V 安定バスであり、DC-DC コンバータは、KKM-PNL の出力を 5 V に降圧安定させ、内部機器に必要な電力を供給する。KKM-PNL は、動作に必要な電力を発生させる為のセルだけでなく、実証の為の計測用セルも具備する。

PCU は、内部の充放電制御回路により LIC の充放電制御を行う。日照中は充電を行い、太陽電池の短絡電流、開放電圧の測定時、放電し、内部回路の電力を賄う。また、太陽電池の開放電圧や短絡電流、温度、LIC の充放電電流、電圧等のアナログデータを取得し、HK データとして RS-422 を用い SPRINT-A 本体に送信する。

## 2.2 構造

Fig. 2 に示す通り NESSIE 表面が、KKM-PNL である。NESSIE 内部には中段にある機器搭載用のハニカムパネル上に Fig.3 に示すように内部機器が配置される。周囲 4 面はハニカムパネルで囲まれ、ボックス構造である。NESSIE は、SPRINT-A のオプション実験として、SPRINT-A のミッション部に搭載される予定であるため、質量、質量中心、熱インターフェースに様々な制約が存在する。そのため SPRINT-A と断熱構造にする必要があり、結果として放熱面が必要となり、Fig.2 にあるように放熱面を設けている。

## 3. 主要機器

### 3.1 LIC

NESSIE は、実証対象である LIC をバッテリーとして搭載する。LIC セルの主要性能を Table 4 に示す。リチウムイオン二次電池(LIB)は正極に酸化物を使用するため、内部短絡等の不具合が発生してセル温度が上昇すると正極材料の酸化物が分解して電解液と反応し、連鎖的な発熱が起きる危険性があるが、LIC の場合、正極が活性炭であり、LIC 内部に酸化物を持たない為、不具合が発生しても酸素が発生しない。それ故、連鎖的な発熱反応には至らないため、安全性は極めて高い。

Fig.4 に LIC の真空中及び大気中での充放電サイクル試験中の容量維持率を示すとおり、LIC は、エネルギー密度では LIB に比べ劣るが、高い容量維持率を持つ。また、ア

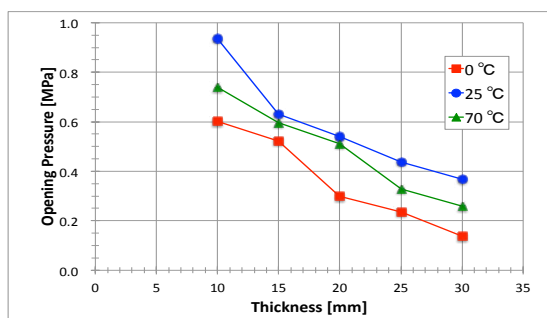


Fig. 5. Opening Pressure of LIC Cell

Table 2. Specifications of NESSIE.

質量	10.03 kg
サイズ	550 mm(W)×463 mm(L)×205mm(H)
電源方式	5 V 完全安定バス
発生電力	10 W 以上(EOL,太陽光垂直入射時)
LIC 容量	1,171 mAh

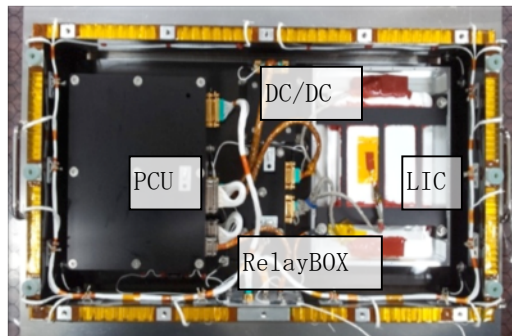


Fig.3 Internal Layout of NESSIE

Table 3. Main Components of NESSIE.

コンポーネント名称	略称	数量
薄膜セル応用機能構造パネル	KKM-PNL	1
PCU	PCU	1
DC/DC コンバータ	DC/DC	1
リチウムイオンキャパシタ	LIC	1

Table 4. LIC Specifications

質量	303 g(単体) / 832 g(含構造部)
サイズ W×L×H	125×165×15 mm (LIC セル単体) 164×220×23 mm (含構造部)
セルタイプ	アルミラミネート
容量	1,171 mAh
エネルギー密度	11.7 Wh/kg

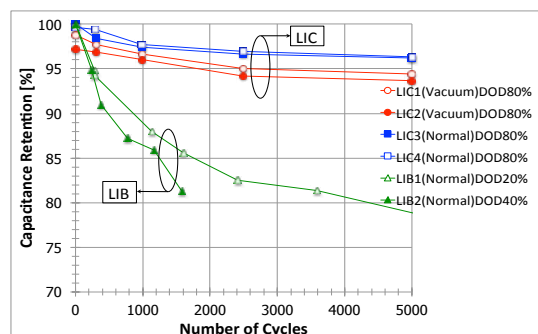


Fig. 4. Capacitance Retention of LICs and LIBs in Atmosphere and vacuum

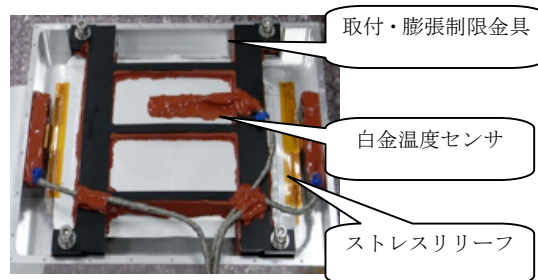


Fig. 6. Mounting Method of LIC

ルミラミネートセルは、真空中で膨張するが、Fig.4の結果が示す通り、膨張は電氣的性能に影響はしない。それ故、Fig.6に示すような膨らみを許容した簡素な搭載方法が可能である。

また Fig.5に示される通り、破裂強さは、膨らみ厚のみならず、この結果から、温度とも関係があることがわかる。適切な強さを維持し、且つ仮に問題が発生し、内圧上昇に至ったとしても、カタストロフィックな状態にならないよう、0.5～0.7MPaで開口するように、ラミネート近傍の厚さが約15mmになるように膨張制限をかける構造とした。

### 3.2 KKM-PNL

まず、KKM-PNLに搭載される薄膜太陽電池セルの仕様をTable 5に示す。従来セルに比べ、出力密度は従来セルに比べ大幅に向上している。次にKKM-PNLの主要諸元をTable 6に示す。またFig.7にKKM-PNL上の太陽電池構成を示す。上部2列がメインアレイであり、下部のセル群が評価用のIMM3Jセルとリファレンスセルである。NESSIE用太陽電池パネルは、KKM-PNLに搭載されるSSSは、薄膜多接合太陽電池セルを所定の電力が得られる枚数で直並列に組み合わせ、発生電力をミッション期間中、内部機器に供給する機能を有する。SSSは10W以上(EOL、太陽光垂直入射時)の電力を発生する。また、実証を目的として、IMM3J薄膜太陽電池セル、及びリファレンス用のSi太陽電池セルを有する。

Fig.8(a)に、打上げ1年後における高温時発生電力解析結果を、Fig.8(b)に、打上げ1年後における低温時発生電力解析結果を示す。高温時、12.8W(出力電が16.8Vの時)、低温時でも11.9W(出力電が17.1Vの時)であり、これは打ち上げ1年後において10W以上、16V以上というシステム要求を満足している。

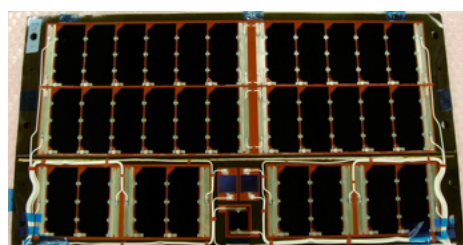


Fig. 7. Configuration of Solar Cells on KKM-PNL

	従来セル	薄膜多接合太陽電池セル	
	3J	2J	IMM3J
セル初期変換効率	Typ. 28.5%	25%	30～32%
セル初期出力密度	0.4 W/g	Typ. 4.5 W/g	6.0～7.0 W/g

Table 6. KKM-PNL specifications.

項目	インターフェース条件
発生電力	10 W 以上(EOL, 太陽光垂直入射 SAP 出力端電圧: 16 V~36 V)
アレイシートセル	ガラスコンフィギュレーションアレイシート SHARP 製 2 接合薄膜太陽電池セル (2J) SHARP 製 IMM3 接合薄膜太陽電池セル (3J) SHARP 製 Si セル
アレイシート構成	2J メインアレイ: 11 直列×2 並列 IMM3J 評価セル: 2 直×1 並列および 1 セル リファレンスセル (Si): 2 セル
寸法	W: 273.6 mm × L: 504 mm × H: 55 mm
保持方法	固定パネル。リブを用いた曲面支持構造

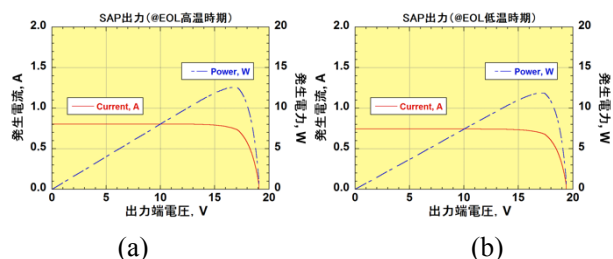


Fig. 8. Output Power Analysis in High (a) and Low (b) Temperature Conditions

### 4. フライトデータ

NESSIE は、ひさきに搭載され、2013 年 9 月 14 日にイプシロンロケットにより打ち上げられた。打ち上げ後、ひさきのバス機器や主ミッションである惑星分光観測装置の動作チェックを実施し、10 月 12 日に NESSIE を ON にして初期データを取得した。その後も 11 月 4 日、12 月 4 日と NESSIE を ON にし、データを取得した。以下で、これまで取得したフライトデータを示す。

#### 4.1 リチウムイオンキャパシタ (LIC)

10 月 12 日に初期チェックアウトを実施し、その運用の中で、1.5 サイクルの放充電を行い、LIC を満充電状態にした。Fig.9 にこのときのデータを示す。

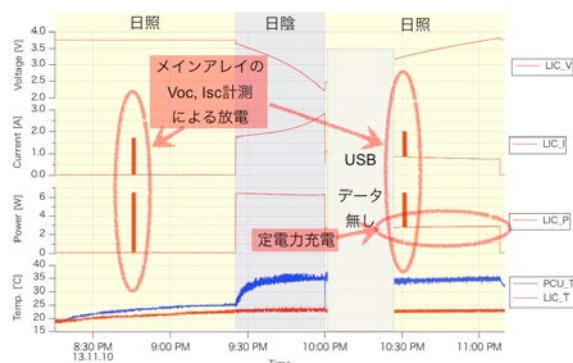


Fig. 9. First Flight Data of LIC



データが抜けている期間は、地上との通信レートを下げて運用を行った期間である。この時、衛星にとって必須な HK（ハウスキーピング）データのみを取得となるため NESSIE データが抜けているが、正常な動作である。日照期間中において、短期的に内部電力用太陽電池の開放電圧と短絡電流を計測する為、その期間放電している事がわかる。また、充電に関しても正しく定電力充電動作していることが判る。また Table 7 に示す通り、地上試験データとも一致している。

その後、11月4日と12月4日に、それぞれ1～2分程度の放電を実施した。Fig.10 に、放電トレンドと地上で実施した容量確認時のデータを元にした放電トレンドとの比較を示す。Fig.10 に示す通り、有意な容量低下は見られず、現在までアルミラミネート型 LIC は健全である。

## 4.2 KKM-PNL（薄膜太陽電池）

打ち上げから28日後に、初期チェックアウトを実施した。Fig.11 に示す通り、評価セルのデータが正しく取得出来ている事が確認された。この中でアルベドの影響が無い部分のデータを初期データとし、その後約2ヶ月の保存率を Fig.12, Fig.13 に示す。赤破線の薄膜2接合セル放射線劣化予測と IMM3J セルの劣化とほぼ一致している事から健全性が保たれている事がわかる。

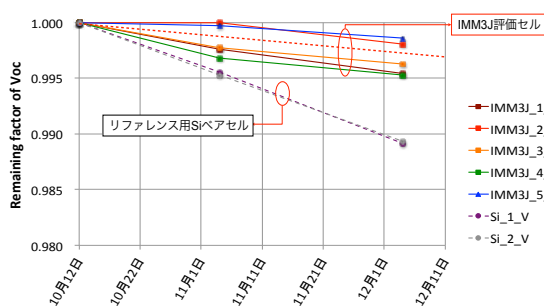


Fig.12 Remaining Factor of Voc

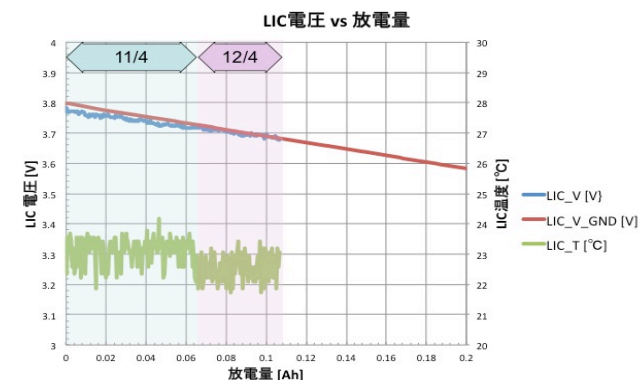


Fig. 10. LIC Cell Capacitance Retention

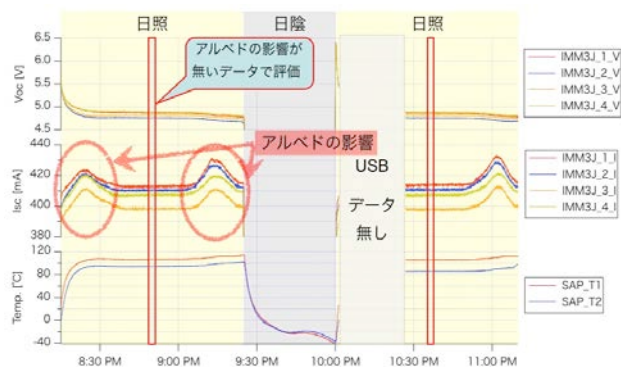


Fig.11 First Flight Data of IMM3J Solar Cells

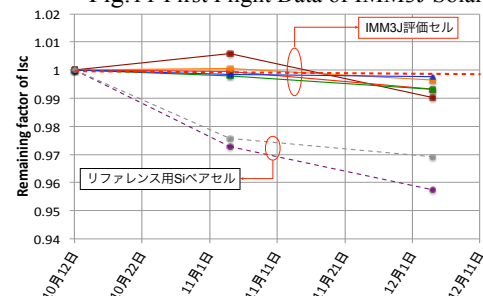


Fig.13 Remaining Factor of Isc

## 5. まとめ

NESSIE のフライトデータについて報告した。今後もデータを取得し、実証を進めて行く予定である。

NESSIE による軌道上実証は、将来衛星に適用するためにも、非常に重要なミッションと考えている。

## 参考文献

- [1] A. Kukita, M. Takahashi, K. Shimazaki, H. Toyota, M. Imaizumi, Y. Kobayashi, T. Takamoto, M. Uno, and T. Shimada, “on-orbit demonstration of thin-film multi-junction solar cells and lithium-ion capacitors as bus components,” 9th European Space Power Conf. (ESPC), 2011.

Table 7. A Comparison of Charge/Discharge Data

	軌道上データ	地上試験
充電時間/ 放電時間	66 min / 35 min	66 min / 35 min
充電 / 放電終止電圧	3.78 V / 2.37 V	3.77 V / 2.42 V
充電電力（定電力）	2.84 W	2.82 W
LIC 温度変化量	4.4 °C	4.4 °C

Table 8. Remaining Factor of Voc, Isc

評価セル種類		保存率	
		Voc	Isc
IMM3J_1	カバーガラス、UVC 有	0.995	0.990
IMM3J_2	カバーガラス、UVC 有	0.998	0.993
IMM3J_3	カバーガラス、UVC 無	0.996	0.996
IMM3J_4	カバーガラス、UVC 無	0.995	0.993
IMM3J_5	フィルムラミネート	0.999	0.998