

Development of On-Orbit Demonstrator of Next Generation Instruments for Electric Power System

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

⁽¹⁾ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa, 252-8510 Japan

⁽²⁾ARD/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), will be installed on the Small Scientific Satellite Platform for Rapid Investigation and Test-A (SPRINT-A) satellite, scheduled for launch in the summer 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 development status of NESSIE are described.

次世代電源系要素技術実証機の開発状況

JAXA 久木田明夫、高橋真人、島崎一紀、小林裕希、豊田裕之、奥村哲平
坂井智彦、高橋 優、村島未生、鶴野将年、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、2接合の SSS 及び 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。

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 年度夏期に打ち上げ予定の惑星分光観測衛星/SPRINT-A に搭載される予定であり、現在 SPRINT-A に搭載され、総合試験中である。本稿では、この NESSIE の現在の開発状況について報告をする。



Fig.1 An image of SPRINT-A

2 NESSIE 概要

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。

Table 1. Specifications of SPRINT-A.

重量	330 kg
寸法	1 m×1 m×4 m
軌道高度	950 km×1,150 km
軌道傾斜角	31 deg.
軌道種類	楕円軌道
軌道周期	約 106 分

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 に主要構成品を示す。本実証機のバス電圧は 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

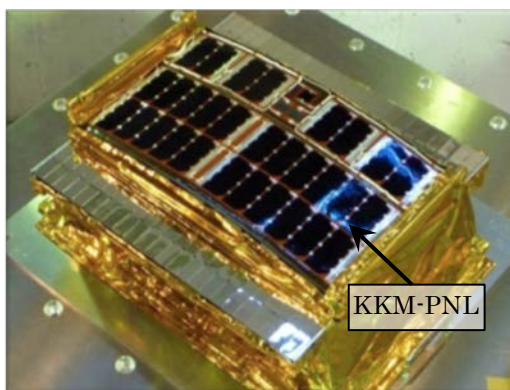


Fig.2 Appearance of NESSIE

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.3 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ため、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、膨張は電気的性能に影響はしない。それ故、膨らみを許容した Fig.6 に示すような簡素で軽量の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。適切な強さを維持するため、ラミネー

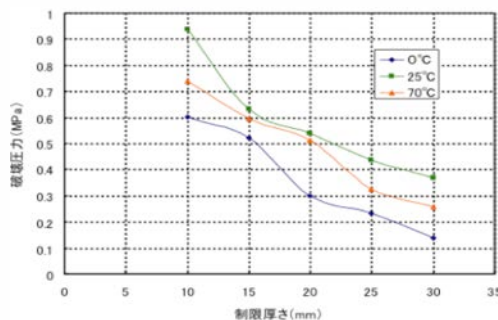


Fig. 5. LIC Cell Capacitance Retention

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

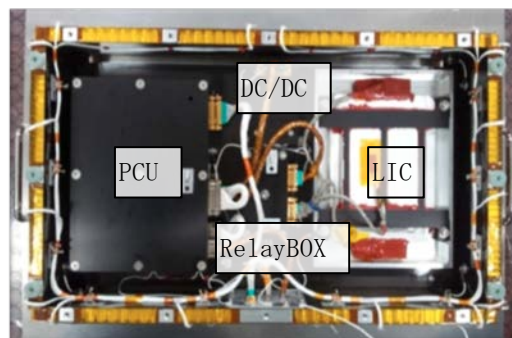


Fig.3 Internal Layout of NESSIE

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

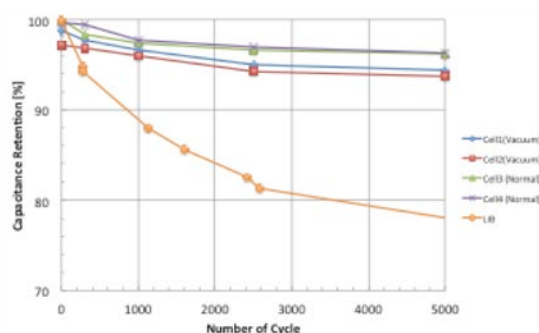


Fig. 4. LIC Cell Capacitance Retention

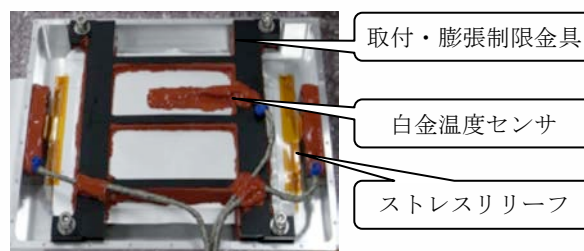


Fig. 6. Appearance of LIC

ト近傍の厚さが約 15 mm になるように膨張制限をかける構造としている。

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 10 W 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、12.8 W (出力電が 16.8 V の時)、低温時でも 11.9 W (出力電が 17.1 V の時)であり、これは打ち上げ 1 年後において 10 W 以上、16 V 以上というシステム要求を満足している。

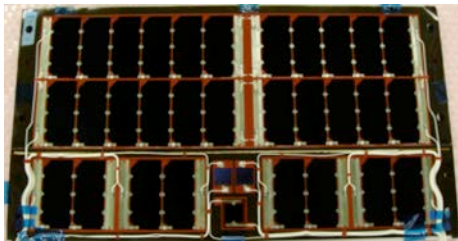


Fig. 7. Configuration of solar cells on KKM-PNL

Table 5. Thin-film solar cell specifications

	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.	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

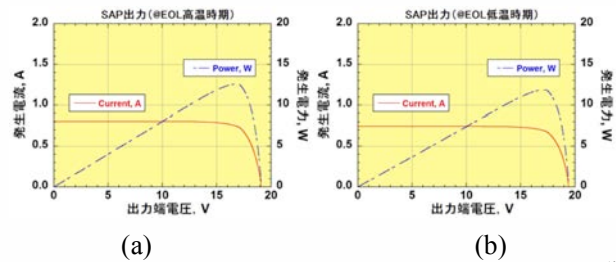


Fig.8. Main array output power analysis for (a) high and (b) low temperature operation.

3.3 充放電制御回路

PCU は、LIC の充放電制御、NESSIE のコマンド、テレメトリの処理等を行う。ここでは、PCU に搭載されている充放電制御回路動作について記述する。Fig.9 に 1 サイクルの充放電プロファイルを示す。最大日陰時間を想定し、充電時間は約 70 分、放電時間は約 35 分で実施した。このとき、放電終止電圧は約 2.42 V であり、放電深度は約 86 % である。

充電制御は、極性反転型コンバータを電流不連続モード、且つ固定時比率で動作させることで定電力充電制御を行う。定電力充電により、KKM-PNL が供給する電力は日照期間中一定となるため、太陽電池の最適化が可能となる。更に固定時比率で動作するため、フィードバック不要のシンプルな回路構成が可能である。放電制御も同様に極性反転型コンバータを用いるが、こちらは出力電圧 (バス電圧 : 5V) のフィードバック制御を行う。Fig.9 の 80 分以降にある LIC 電圧や電流の変動は、メインアレイの開放電圧、及び短絡電流の計測による変動である。このとき LIC の放電により内部機器の電力を賄うためである。メインアレイの開放電圧、及び短絡電流計測は、過去に例が無く、本実証の大きな目的の 1 つである。

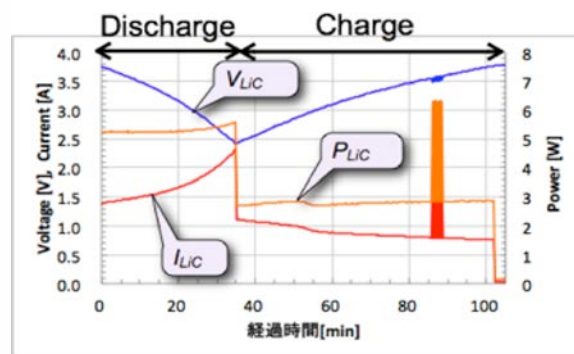


Fig. 9. Discharging and charging profiles of a cycle.

4. NESSIE の開発状況

内部機器単体、及び NESSIE 単体での、機械環境試験、熱真空試験は完了しており、既に第 31 回宇宙エネルギーシンポジウムで報告済みである。

4.1 EMC 試験

SPRINT-A で規定されている MIL-STD-461C の条件に従い EMC 試験を実施した。実施した試験項目は RE01、RE02、及び RS03 である。NESSIE は SPRINT-A から電源供給されない為、CE01、CE03 は対象外とした。RE02 狭帯域において 20MHz 付近で最大 10dB 程度の逸脱が出たが、SPRINT-A 噛合せ試験において機器動作に問題なき事を確認し、この逸脱は許容された。また NESSIE は外部機器であるため S バンド帯の干渉確認をも実施し、SPRINT-A の環境条件書で規定される、16dB 以下を満足することを確認した。

4.2 電気試験

真空、室温(24 °C)条件でサイクル動作確認を実施した。充放電サイクル条件は、SPRINT-A の最短日照時間(70 分)、及び最大日陰時間(35 分)とした。Table 8 に試験データを示す。また Fig.10 に PCU 内部のスイッチング素子近傍と LIC の温度変化を示す。共に動作温度範囲での安定動作が確認出来た。また Fig.11 に充放電プロファイルを示す。LIC を深い放電深度で動作させることが本実証の目的でもある為、Table 7 の試験結果に示す通り放電終止電圧 2.42 V, 最大放電深度 86%での運用が出来ることが確認された。

Table 7. Results of Charge / Discharge Cycles

充電時間/ 放電時間	66 分 / 35 分
充電 / 放電終止電圧	3.77 V / 2.42 V
平均充電 / 放電電力	2.82 W / 5.33 W
PCU 平均最大温度/Cycle	38.3 °C(室温とのΔ15.3 °C)
LIC 平均最大温度/Cycle	28.4 °C(室温とのΔ4.4 °C)

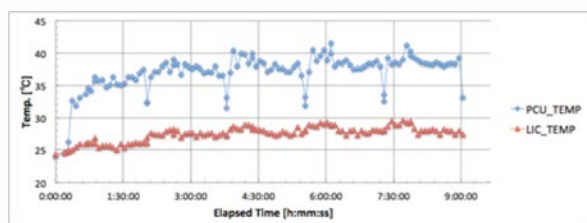


Fig.10 PCU and LIC Temp. Profiles

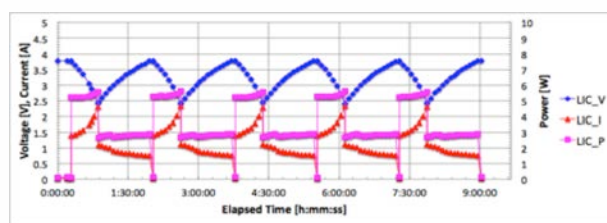
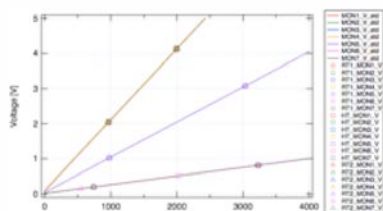
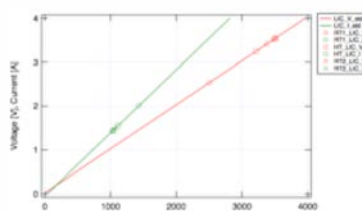


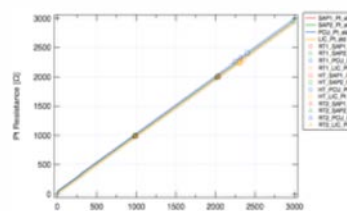
Fig.11 Discharging and charging profiles of 5 cycles



(a) Open Circuit Voltages of Evaluation Solar Cells



(b) LIC Voltage and Current



(c) Resistances of Temp. Sensors

Fig.12 Pre-Post Telemetry Data of Vacuum / High Temp. Test

また、Fig.12 に示す通り高温真空試験中、及びその前後でテレメトリデータを確認し、全てのデータにおいて差異がなく計測系内部回路の健全性も確認された。

5. まとめ

31 回の本シンポジウムで報告した環境試験に加え EMC 試験、電気試験を実施し、問題が無いことを確認した。2013 年度夏のフライトに向け SPRINT-A システム総合試験に参加中である。

NESSIE による電源系要素技術の実証計画は、近い将来、標準バス部品として、これらの要素技術が使われるためにも、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.