Development Status 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⁾, Masatoshi Uno⁽¹⁾, Tomohiko Sakai⁽¹⁾ Takanobu Shimada⁽¹⁾, and Mitsuru Imaizumi⁽²⁾

⁽¹⁾ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, 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, an acronym for "NExt Generation Small Satellite Instrument for Electric power system (EPS)", will be installed on the Small Scientific Satellite Platform for Rapid Investigation and Test–A (SPRINT-A) satellite, which will be launched on the Epsilon launch vehicle in 2013.

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

Thin-film MJ solar cells such as IMM InGaP/GaAs/InGaAs 3J cells have flexibility as well as high conversion efficiencies greater than conventional rigid 3J solar cells. A great reduction of satellite mass will be achieved by the combination of the thin-film MJ solar cells and light flexible paddles.

LIC has sufficient safety than lithium-ion secondary battery (LIB), 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.

This paper describes the details and the development status of NESSIE on which KKM-PNL and LIC are installed.

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、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、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)、リチウムイオンキャパシタ(LIC)及びその充電回路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。

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。

リチウムイオンキャパシタはエネルギー密度はリチウムイオン二次電池に劣るが、深い放電深度での利 用が可能である為、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。また、安全性が 高く、長寿命且つ動作温度範囲が広くハイレート充放電が可能な蓄電デバイスであり、長期のミッション への適用が期待される。

NESSIE は、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、LIC の充放電電圧、電流、及びセル温度 を計測し、軌道上経年変化データを取得する事により、下記の実証を行う。

(a) 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)

(b) 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

NESSIE は、2013 年度に打ち上げ予定の小型科学衛星 1 号機(SPRINT-A)に搭載される予定である。本 稿では、この NESSIE の現在の開発状況について報告をする。

2 NESSIE 概要

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に、この SPRINT-A の主要仕様を 示す。

2.1 構成·性能

NESSIE の主要構成品目を表 Table.2 に示す。 また、Fig.1 に主要構成品によるブロック図 を示す。また Table 2 に主要性能を示す。

本実証機のバス電圧は5V安定バスであり、 DC-DC コンバータは、KKM-PNL の出力を5V に降圧安定させ、内部機器に供給する。 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 も備える。Charge/Discharge Regulator は、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。そして Control Board で太陽電池の開放電圧や短絡電流、温度、

Table 1. Specifications of SPRINT-A

I I I I I I I I I I I I I I I I I I I			
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		
ミッション期間	1 年以上		

Table 2. Main components of NESSIE.

コンポーネント名称	略称	数量
	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

NESSIE KKM-PNL (SAP) Converter Converter PCU Power Board Board Board Handling Board TIM (CMD) Converter Charge Discharge Regulator Heaer I/F Power/Signal

Fig. 1. Block diagram of main components of NESSIE.

LIC の充放電電流、電圧等のアナログデータを取得し、Data Handling Board から SPRINT-A 本体に送信する。

2.2 構造

Fig.2(a)に、NESSIE の外観図を、(b)に、その内部配置図を示す。表面が、KKM-PNL である。中段に機器搭載用のハニカムパネルを置き周囲 4 面をハニカムパネルで囲んだ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(a)にあるように放熱面を設けている。

3. 主要機器の仕様

3.1 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 4 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 5 に示 す。また Fig.3 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.4(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.4(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。



Fig. 3. Configuration of solar cells on KKM-PNL

Table 3. Specifications of NESSIE.

名称	性能
電源方式	完全安定バス
バス電圧範囲	5 V ~ 5.5 V(DC-DC コンバータ)
電力供給	10 W 最大(充電電力を含む)
KKM-PNL	発生電力:10W以上(太陽光垂直入射時)
(SAP)	出力電圧:0V~36V
	出力電流:2A以下
DC-DC	入力電圧:0V~36V(日照時16V~36V)
コンバータ	出力電力:最大 12 W(リミッタ機能付)
BAT (LIC)	リチウムイオンキャパシタ 2,200 F
	セル直列数:1
	温度センサ:1
PCU	 ・充電
	充電方式:定電力方式、充電電力:2.5W
	 ・放電
	放電方式:Buck-boost コンバータ方式
	放電電力:最大 7.5 W
	(BAT 電圧範囲 : 2.2 V~3.8 V の時)
	・インターロック機能
	過電圧(OV)、過温度(OT)、低電圧(LV)



(a) (b) Fig. 2.(a) Appearance and (b) Internal layout of NESSIE.

Table 4. 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 5. 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	ガラスコンフィギュレーションアレイシー
セル	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	2J メインアレイ:11 直列×2 並列
構成	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	$W:273.6\ mm \times L:504\ mm \times H:55\ mm$
保持方法	固定パネル。リブを用いた曲面支持構造



Fig.4. Main array output power analysis for (a) high and (b) low temperature operation.

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。

3.2 LIC

NESSIE は、実証対象である LIC をバッテリとして搭載する。LIC セルの主要性能を Table 6 に示す。

LIC は、正極が活性炭で酸化物を含まないため、原理 的に熱暴走せず安全性が高い。



Fig. 5. Capacity retention of LICs in atmosphere and vacuum

Table 6. LIC specifications.

名称	性能
セルタイプ	アルミラミネートセル
電力容量、静電容量	2.88 Wh, 2,200 F
エネルギー密度	約 14 Wh/kg
動作温度範囲	-20 °C∼70 °C



Fig.6. LIC and brackets

Fig.5 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。アルミラミネートセルは、真空中で膨張するが、Fig.5 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な搭載方法が可能である。

3.2 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 れている充放電制御回路動作について記述する。

Fig.7 に1 サイクルの充放電プロファイルを示す。 充電時間は約70分、放電時間は最大35.4分である為、 本試験では36分の放電時間としている。このとき放 電終始電圧は約2.6 V であった。

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。固定時比率故、フィードバック不



Fig. 7. Discharging and charging profiles of a cycle.

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。

4. NESSIE の試験実施状況

4.1 振動試験

Table 7 にランダム応答解析による QT 相当加振時、各機器取付点での最大加速度実効値の一覧を示す。 NESSIE は、SPRINT-A の観測機器筐体に取り付けられるため、X 軸方向の振動入力レベルが非常に厳しい。 故に PCU の 63.3 Grms をはじめ、NESSIE の搭載機器全ての X 軸方向の応答が非常に大きい。

rable 7. Maximum response to random excitation of each components									
	X 加振時			Y加振時		Z 加振時			
	X 応答	Y応答	Z応答	X 応答	Y 応答	Z応答	X 応答	Y 応答	Z応答
PCU	63.3	0.89	5.29	4.96	13.2	0.76	4.17	0.19	6.74
LIC	60.0	0.82	5.94	6.52	12.6	0.93	3.45	0.18	6.69
DC-DC	63.0	1.30	5.37	6.64	12.5	0.66	2.95	0.17	6.62
Relay BOX	75.0	0.90	5.58	2.78	12.5	0.28	3.38	0.10	6.72

Table 7. Maximum response to random excitation of each components

振動試験は、正弦波振動試験、準静加速度試験、そしてランダム振動試験を実施した。ランダム振動試 験の前後に、ローレベルランダム試験を実施し、機械的健全性を確認した。また、試験後の検査により電 気的にも問題が無いことを確認した。

4.2 熱真空試験

熱真空試験を Fig.8 に示す温度 プロファイルに従って実施した. ここでは、熱モデルのコリレーシ ョンのため、初めに熱平衡試験を 実施し、その後 8 回の熱サイクル 試験を実施した。試験中は、基本 的に内部機器を非動作状態とした。



Fig. 8. Thermal vacuum test profiles.

ただし、最高・最低温度において機器を動作状態にし、電気性能試験を実施した。

Table 8. Estimated	temperature on	orbit and	target temperature

	高温ケー	-ス	低温ケース		
	最高温度	熱電対位置	最高温度	熱電対位置	
	(軌道上予測+10 ℃)	目標温度	(軌道上予測-10 ℃)	目標温度	
KKM-PNL	123 °C	120.5 °C	-110 °C	-106 ℃以下	
LIC	32 °C	32 ℃以上	-2 ℃ (非動作)	-2 ℃以下	

熱サイクル試験は、温度規定点を KKM-PNL 中央と LIC とした。Table 8 に軌道上予測温度、及び規定点の目標温度 を示す。但し KKM-PNL の最高・最低温度になる部分と温 度規定点が異なるため、予測温度と規定点の目標温度は若 干異なっている。

Fig.9 に熱サイクル試験の規定点温度プロファイルを示 す。熱真空試験の後、健全性を確認するため、外観検査、 電気試験、太陽電池の EL 検査等実施し、LIC に一部異常を 確認した以外は問題が無いことを確認した。



5. 今後の予定

Fig. 9 Reference point temperature profiles.

- (1)EMC 試験の実施。EM にて既に EMC 試験(RE02)を実施して仕様に入る目処はついているが、その後、 改良を加えた為、FM にて再度 EMC 試験を実施する。
- (2)熱真空試験で LIC に異常が発生し、この保持方法改善の必要性が明確になった為、改善を行い、単体で振動試験、及び熱真空試験を実施する。
- (3)上記作業に対する品質確認のため、NESSIE として AT レベルの振動試験を実施する。

6. まとめ

高効率多接合薄膜太陽電池、その軽量化パドル、及びリチウムイオンキャパシタの宇宙実証計画の開発 状況について説明した。振動試験、熱真空試験、電気試験を実施し、概ね問題が無いことを確認した。

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

 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.