

3D14 宇宙用大型リチウムイオン電池の開発

○内藤 均, 川瀬 誠, 舩分 宏昌 (宇宙航空研究開発機構)
今村 文隆, 山本 忠嗣, 瀬川 全澄, 吉田 浩明 ((株)ジーエス・ユアサ テクノロジー)

Development of Large Scale Lithium-ion Cells for Spacecraft
Hitoshi Naito, Makoto Kawase and Hiroaki Kusawake (JAXA)
Nobutaka Imamura, Tadatsugu Yamamoto, Masazumi Segawa and Hiroaki Yoshida (GYT)

Key Words: Lithium-ion Cell, Cycle-life, High energy density, Qualification test

Abstract

Rechargeable cells store electric power and supply it to all the components, especially during eclipses. Lithium-ion cells have many advantages such as high energy density, low self-discharge rate and no memory effect compared to conventional alkaline cells. The cycle life performance of large-scale lithium-ion cells manufactured by GS Yuasa Technology Ltd. has been evaluated since the 1990s and the requirements for their use with satellites have been satisfied. Accordingly, large scale lithium-ion cells were successfully approved for use in spacecraft. Recently, we have been studying the applicability of improved lithium-ion cells, which are designed to have longer cycle life and higher energy density compared to qualified ones. We have accumulated a range of data and are now ready for qualification.

1. はじめに

人工衛星等の宇宙機は食（地球の影）等により太陽電池の発電が行えない場合にバッテリーにより電力供給を行っている。これまで、Ni-Cd 等のアルカリ形二次電池が宇宙用電力貯蔵用として主流であり、例えば温室効果ガス観測技術衛星(いぶき GOSAT ; 2009 年 1 月打上げ)は 35AhNi-Cd 電池を搭載し、打上後 3.5 年以上順調に運用を続けている。また、第一期水循環変動観測衛星（しずく GCOM-W1; 2012 年 5 月打上げ）も 50AhNi-Cd 電池を搭載している。

バッテリーは宇宙機において質量・容積の面でのインパクトが大きく宇宙機自体の寿命を左右するものである。そのため、小型・軽量化及び高信頼化、長期サイクル寿命を実現することが強く求められている重要コンポーネントの一つである。我々はバッテリーの寿命評価を中心とした電池の研究開発を行っている。

リチウムイオン電池は民生用としては既になんかの実績が得られ、電気自動車用途も開発されている。エネルギー密度が高く、自己放電が少ない等の多くの特長を有しているため、宇宙機の要求を満足するものである。またエネルギー密度（質量）に着目すると、図 1 に示すように、アルカリ形からリチウムイ

オン電池に代替することで 2 倍以上の軽量化が図れる。

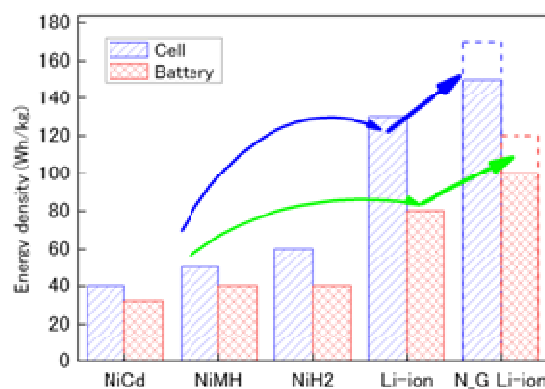


図 1 宇宙用二次電池の比較

(株)ジーエス・ユアサテクノロジー(GYT)では宇宙環境での利用を考慮した設計を行った 100Ah 級の大型リチウムイオン電池を開発しており、JAXA ではこの電池を用いて宇宙機への適用性を評価するため、1999 年より実時間での充放電サイクル試験を進めている。サイクル寿命特性についても衛星等での長期運用要求を満足する十分な知見が得られたことを踏まえ、戦略コンポーネントとして開発確認作業を行い、宇宙機へ提供できる体制を整えた。また民生でのリチウムイオン電池の改良・高性能化状況を踏まえ、既開発のリチ

ウムイオン電池よりも軽量化，長寿命化設計を行った高性能（次世代）リチウムイオン電池の研究も 2008 年より行っており，こちらについても宇宙機への適用の目途が得られたため，2011 年度より戦略コンポーネントとして開発作業に着手している．

本稿では宇宙用リチウムイオン電池の基本特性と開発確認作業の結果等について簡単にまとめた内容を報告する．

2. 宇宙用大型リチウムイオン電池の仕様

リチウムイオン電池の構成部材を図 2 に示す．リチウムイオン電池は基本的には民生用で使用されている構成材料と同じものを使用しているが，宇宙という高真空環境で使用するため，ケース接合部は全て溶接またはろう付けを行っており，また電極端子部はハメチックシールを採用し，完全密閉型としているのが特徴である．またコンポーネント開発を完了している宇宙用大型リチウムイオン電池の外観例を図 3 に示す．図 3 は 50Ah, 100Ah のセルで主に衛星・探査機等の長期ミッションに用いられるものである．各セルの仕様は表 1 にまとめた．

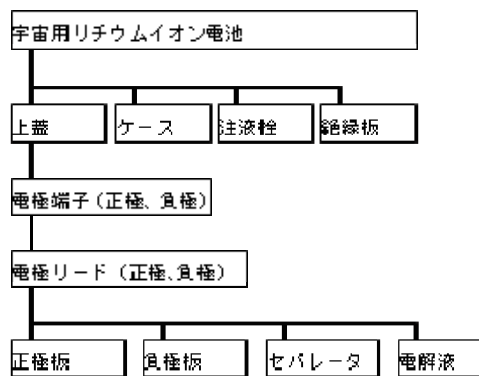


図 2 リチウムイオン電池構成部材



図 3 宇宙用リチウムイオン電池の外観例
(左：50Ah, 右：100Ah)

表 1 宇宙用リチウムイオン電池の仕様

項 目	50Ah(JMG050)	100Ah(JMG100)
電池形状	長円筒形	
正極	LiCoO ₂	
負極	Graphite	
実力容量	54Ah	109Ah
定格容量	50 Ah	100 Ah
平均放電電圧	3.7 V	
質量	1,510g	2,800g
寸法* (W x D x H)	130 x (52) x 131 (mm)	130 x (52) x 216 (mm)
エネルギー密度**	132Wh/kg, 235Wh/l	145Wh/kg, 298Wh/l

*スタッドボルトは含まず

**実力容量を基準

開発確認作業を最初に行ったのが，図 3 及び表 1 で例として示している，50,100Ah であり，現在 35Ah 級から 100Ah までの種類について開発を完了しており，小型衛星から中大型衛星まで対応できる電池のラインナップを完了している．また更なる高性能化を図った次世代セルについては，現在開発作業を行っており，その仕様については後述(5.)する．

3. 宇宙用リチウムイオン電池の寿命特性

衛星用電池においてその適用性判断において最も重要な特性の一つは長期運用性である．電池は化学反応を伴うため，単純に加速評価を行うのが難しいため，従来のアルカリ形電池の時代から実時間で寿命評価を行うことが必要であった．本リチウムイオン電池についても 1999 年より寿命評価試験に着手している．表 2 に試験条件を簡単にまとめた．

表 2 充放電試験条件

LEO 模擬試験	DOD25%, 充電 60min. 0.3C CC/CV 放電 30min. 0.5C
GEO 模擬試験	DOD80% 充電 22h48min. 0.1C CC/CV 放電 72min. 0.67C

*温度は 15℃で実施．

例として 100Ah セルを用いた実時間の充放電サイクル試験の充放電トレンドグラフを図 4, 5 に示す．図 4 は LEO 模擬であり，現在 60,000 サイクル(運用 10 年相当)以上を経過し試験を継続中である．また図 5 は GEO 模擬であり，1,800 サイクル(40 蝕期間：20 年相当)経過の後試験を終了している．現在の衛星の運用期間としての要求は LEO5 年，GEO10～15 年であるので，それらの要求を十分に満足することを確認している．

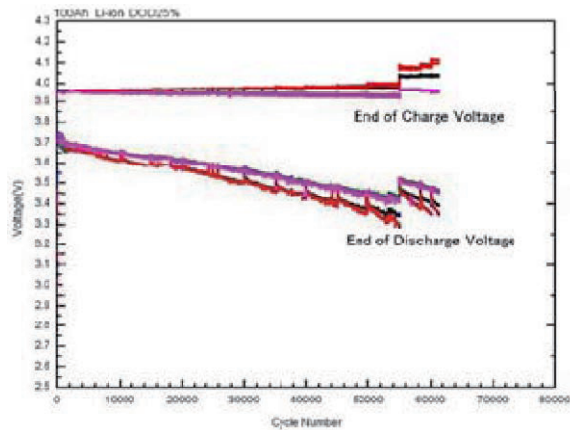


図 4 LEO 模擬試験トレンドグラフ

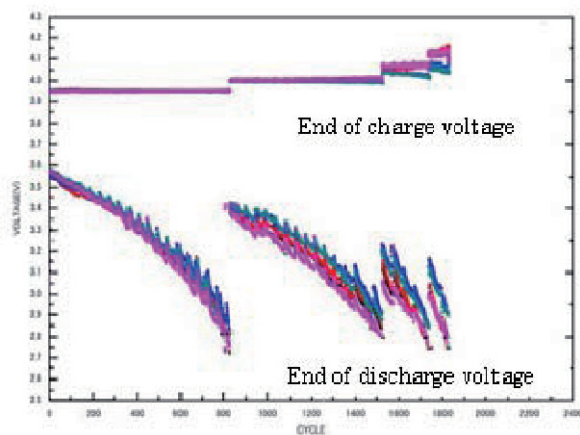


図 5 GEO 模擬試験トレンドグラフ

4. 宇宙用リチウムイオン電池の開発確認

4.1. 開発確認試験要求項目

開発時の検証項目は図 6 に示すように 5 項目からなり、各項目において実施する試験等検証項目は表 3 にまとめた。QT 温度範囲は $-10\sim+40^{\circ}\text{C}$ である。IV の寿命特性については 3. でも述べたように実時間での評価は長期にわたるため、過去の試験の実績が基になる。

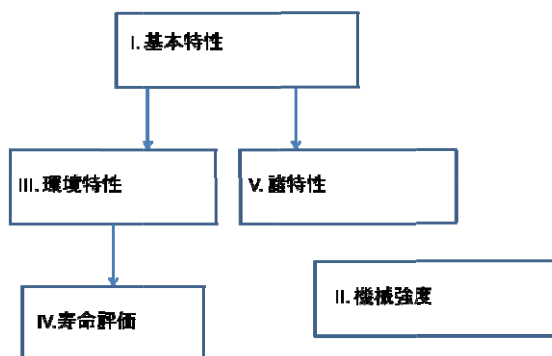


図 6 開発確認試験フロー

表 3 開発確認試験要求項目

要求項目	検証項目
I. 基本特性	外観・寸法・質量 内部構造 容量 高率放電 内部抵抗 ケース絶縁性 電解液リーク確認 気密性
II. 機械強度	耐圧強度 ケース疲労強度 安全弁疲労強度 安全弁作動圧
III. 環境特性	振動(正弦波, ランダム) 衝撃 加速度
IV. 寿命評価	作動寿命(LEO, GEO) 保管
V. 諸特性	自己放電 安全性試験 (過充電, 過放電, 外部短絡) 放電効率

またリチウムイオン電池については、解析による寿命予測技術も向上してきている¹⁾ことから、解析結果も併用して妥当性確認を行う。なお、開発確認試験が完了した後に、データ蓄積の目的も踏まえて、実時間での寿命試験も継続して行うこととしている。

4.2. 開発確認試験結果例

開発確認試験の例を図 7, 8 に示す。

基本特性の例として、各温度での放電容量を測定した結果を図 7 に示す。 5°C 以上では温度による内部抵抗差が放電時の電圧差として表れているが、ほぼ同等の容量を示している。 -10°C では抵抗増大による電圧及び容量低下が生じているが、各温度での内部抵抗を考慮した容量要求仕様は満足する結果を得ている。

また、諸特性の一つである安全評価の過充電試験(図 8)は満充電状態からさらに 0.5C で充電を続け 200% 充電(過充電 120min. 経過時)において破裂・発火等無きことが要求であり、その要求を満足していることが分かる。その後 1 時間通電せずオープン放置したが、わずかに温度上昇はするものの、熱暴走することなく落ち着いていることを確認した。

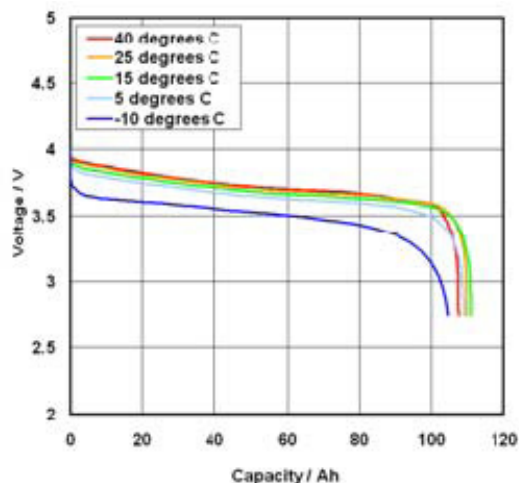


図 7 各温度放電特性

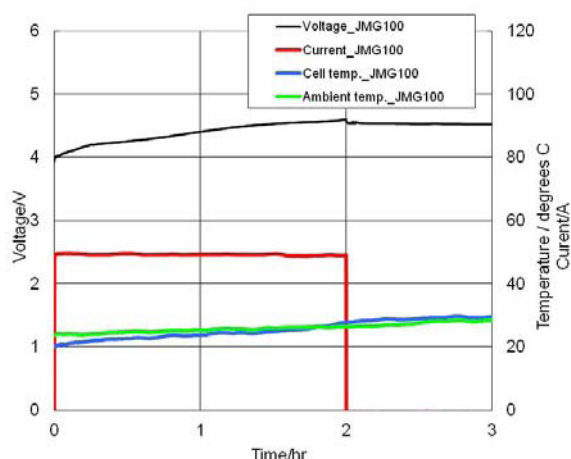


図 8 過充電試験

これら各種試験において全て要求を満足することを確認し、人工衛星等に供給可能な性能であることを確認した。

4.3. セルの供給

開発完了を受けて、各衛星等への電池の供給を開始し、現時点では以下の JAXA の衛星への採用が決まっており、また JAXA 外の衛星にも採用されつつある。

ALOS-2

GCOM-C1

ASTRO-H

小型科学衛星シリーズ

SLATS

5. 高性能リチウムイオン電池の開発

開発完了したリチウムイオン電池(既開発セル)の材料技術は 1998 年頃の技術であるた

め、日進月歩で研究開発が進む民生分野の電池技術を効率的に取り入れて、宇宙用リチウムイオン電池の高性能化に着手している。既開発セルでも試験により LEO で 10 年以上の性能が確認できているが、目標性能としては、長寿命と軽量化に着目し、LEO7 年以上、GEO20 年以上であり、かつエネルギー密度 150Wh/kg 以上を目指すこととした。また設計の際には既開発セルから高性能セルへの移行を容易にするため、セルケースは同じものを採用することとした。ただし、将来の衛星の大容量化を考慮し既開発セルの容量空白帯である 150Ah 級の電池は新規に開発する w。

以上を踏まえ、既開発セルからの性能向上に際しての設計ベースラインを表 4 に、主要な仕様を表 5 に示す。

表 4 高性能セル設計時のベースライン

項 目	要求
電池形状	現行と同じ
寸法	同じケースを使用. 新規容量帯については フットプリントは既存セルと同じ。(高さで容量を調整)
正極	現行とベース材料は同じ
負極	同上
充電電圧	3.98V⇒4.1V
容量	10%以上向上
エネルギー密度	150Wh/kg以上
寿命	LEO 5年⇒7年 GEO 15年⇒20年

表 5 高性能セル主要仕様

項 目	150Ah	110Ah	100Ah***
電池形状	長円筒形		
正極	LiCoO ₂		
負極	Graphite		
実力容量	161Ah	122Ah	109Ah
定格容量	150 Ah	110 Ah	100Ah
平均放電電圧	3.7 V		
質量	3,550g	2,770g	2,800g
寸法* (W×D×H)	130 x (52) x 263 (mm)	130 x (52) x 216 (mm)	
エネルギー密度**	168Wh/kg 348Wh/l	163Wh/kg 333Wh/l	145Wh/kg 298Wh/l

*スタッドボルトは含まず

**実力容量を基準

***既開発セル(比較用)

これらをベースとして試作したセルを図 9 に示す。110Ah セルは既開発の 100Ah セルと同じ寸法、形状である。またこれらのセルを用いてサイクル寿命試験を行っており、その現在の進捗状況を図 10,11 に示す²⁾。



図 9 高性能セル外観

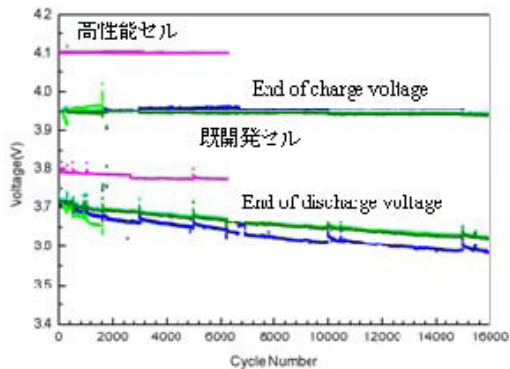


図 10 LEO 模擬試験

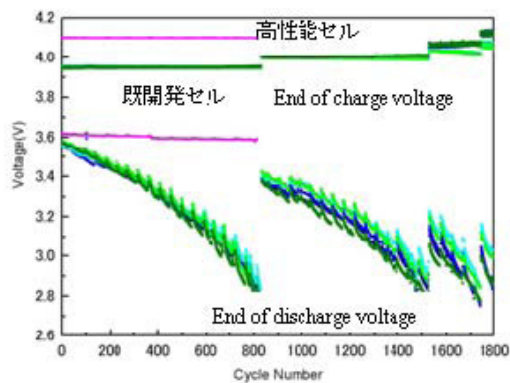


図 11 GEO 模擬試験

いずれの寿命試験においても既開発セルに対して高い放電末期電圧を維持しており、現時点において長寿命性能を示していることが分かる。また主構成材料が既開発セルと同じであるため劣化メカニズム等が同じであるので、寿命予測技術についても既開発セルの予測モデルを基にした予測ができる。予測モデルの各パラメータの劣化率等を高性能セルの特性にチューニングすることで現在の試験結果と良く合うことを確認している。この高性能用にパラメータ調整を行った寿命予測モデ

ルを用いて寿命推定を行い LEO7 年、GEO20 年を十分に達成できる性能を有することが示された。(図 12 参照²⁾)

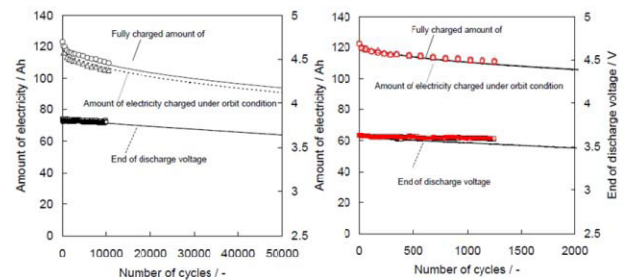


図 1 2 高性能セル寿命予測
(左図 LEO 運用, 右図 GEO 運用)

この結果に基づき、高性能セルを戦略コンポーネントとして提案し、既開発セルの容量空白帯でもあり、商用大型衛星等のニーズに対応可能な大容量 150Ah セルが 2011 年度に戦略コンポーネントとして選定された。2011 年度に開発確認試験用セルの製作が完了し、現在開発確認試験を実施中である。開発確認試験項目は 4.1 項と同じである。

6. まとめ

本稿では、戦略コンポーネントの一つであるリチウムイオン電池について、既開発セル及び現在開発中の高性能セルについて、それらの性能及び開発作業内容について簡単にまとめた。

電池は寿命評価に時間を要するため、ニーズの出現や材料枯渇問題が現れてからでは開発完了が間に合わない場合が多く、如何に潜在的なニーズ、市場動向を捉え先行して研究開発を進めていくかが課題の一つであると認識している。また多岐にわたる電力要求にこたえるため、容量ラインナップ化の効率的な実施についても引き続き検討を進める予定である。

参考文献

- 1) H. Yoshida, N. Imamura, T. Inoue, K. Takeda and H. Naito, "Verification of Life Estimation Model for Space Lithium-Ion Cells", *Electrochemistry*, 78 (2010) 482-488 .
- 2) 川瀬誠, 内藤均, "宇宙用大型リチウムイオン二次電池の研究開発", 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 1105, 2011 年 11 月 .