

# 宇宙用大容量 リチウムイオンバッテリー

Large Capacity Lithium Ion Battery for Space Use

岡 寿久\*  
Toshihisa Oka

大迫庸介\*  
Yosuke Osako

丸谷健太郎\*  
Kentaro Marutani

濱田慎太郎\*  
Shintaro Hamada

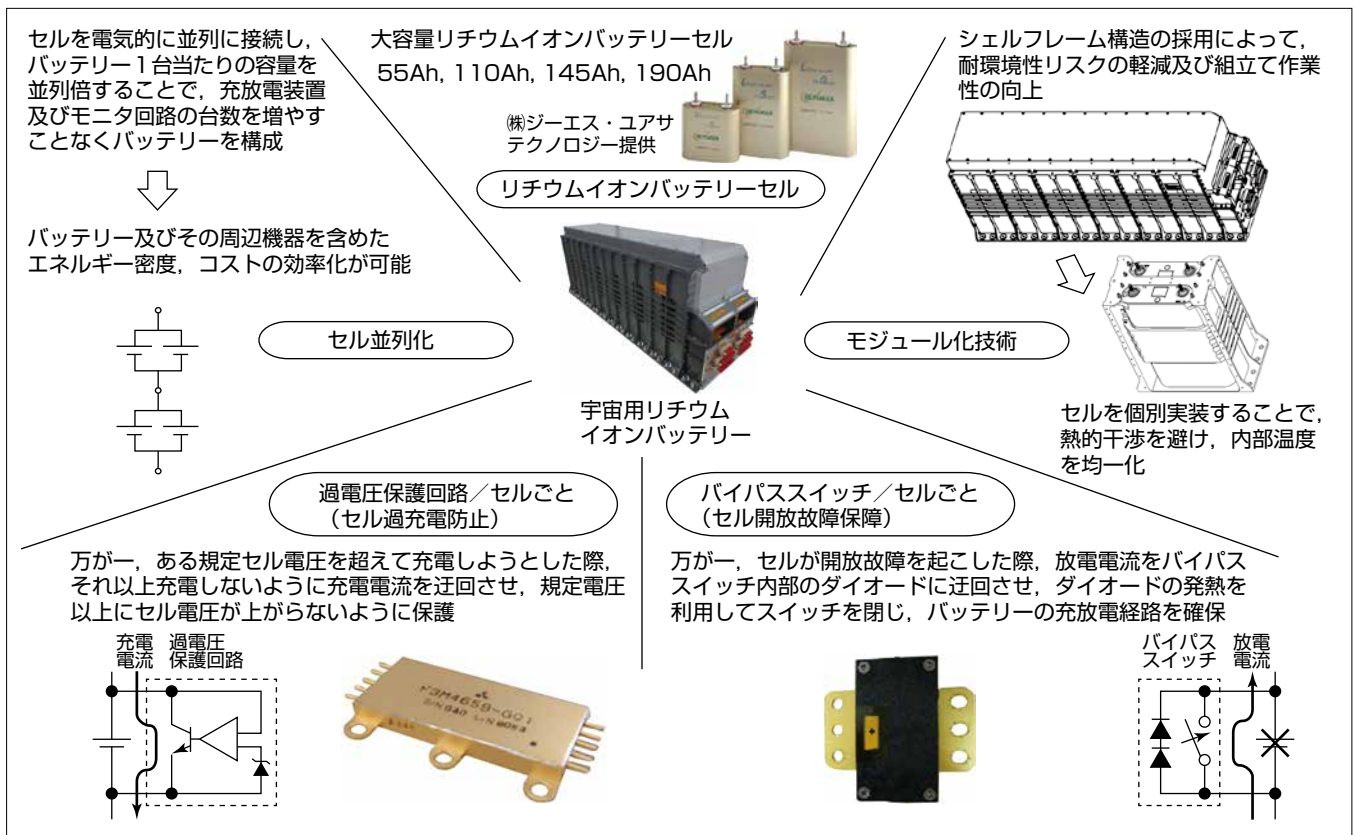
## 要 旨

宇宙用電源機器のキーデバイスであるバッテリーの小型・軽量化及び高機能化は人工衛星(以下“衛星”という)全体の小型・軽量化を可能にする。携帯電話用や車載用バッテリーとして広く普及しているリチウムイオンバッテリー(Lithium Ion Battery: LIB)は、エネルギー密度が高く、放電電圧が高い充放電効率の良いバッテリーであり、衛星用バッテリーシステムにも多くのリチウムイオンバッテリーが使用されている。

三菱電機は継続的に宇宙用リチウムイオンバッテリーの開発・生産を行い、国内だけでなく世界中の衛星システムメーカーにリチウムイオンバッテリーを供給し、既に300台以上の軌道上運用実績を持っている。商用衛星市場で当社リチウムイオンバッテリーの世界シェアは約30%に達し

ており、新たに開発した次世代リチウムイオンバッテリーを中心に更なるシェア拡大を進めている。

近年は、衛星電力要求が増加傾向にあり、バッテリー大容量化のニーズに応える必要がある。バッテリーを宇宙用途に適用するため、ロケットによる厳しい打上げ環境への機械耐性を持ったバッテリーの開発及び様々な電力・容量帯に対応できるようにセル並列化による拡張性の検討・開発を行った。リチウムイオンバッテリーセルのラインアップ及びその並列化、保護回路による拡張性と耐機械環境を持ち、宇宙用途での長期間の運用(静止軌道衛星:15年以上、低軌道衛星:5年以上)を満足する宇宙用リチウムイオンバッテリー構成を実現した。



## 宇宙用リチウムイオンバッテリーの基本構成

宇宙用リチウムイオンバッテリーを構成する基本的な技術を示す。宇宙環境で使用される宇宙用リチウムイオンバッテリーは、単セルの大容量化だけでなくセル並列化による大容量化、ロケット及び宇宙環境に適合するバッテリーモジュールの耐環境性及び万が一の搭載部品の故障にも対応するための保護/保障機能を持っている。

## 1. ま え が き

1990年代に市場に流通して以来リチウムイオンバッテリーセルは、携帯電話用や車載用バッテリーとして急速に普及している。衛星搭載用バッテリーでも、従来のNi-H<sub>2</sub>(ニッケル水素)バッテリーセルから性能、信頼性、品質面で優位なりチウムイオンバッテリーセルを搭載したバッテリーが使用されている。

当社は、2001年以降継続的にMaxar Technologies社(旧SPACE SYSTEMS/LORAL)に納入し、2005年の同社向けiPStar衛星搭載用リチウムイオンバッテリー納入を機にフライト実績が認められた。またTHALES ALENIA SPACE社、INDIAN SPACE RESEARCH ORGANISATION等の衛星システムメーカーにも多くのリチウムイオンバッテリーを供給し、現在までに300台以上の軌道上実績を持っている。海外商用衛星市場で当社リチウムイオンバッテリーのシェアは約30%であり、新たに開発した次世代リチウムイオンバッテリーを中心に更なる拡販を行っている。

本稿では、これらの製品に適用した技術と最近の開発成果について述べる。

## 2. 宇宙用リチウムイオンバッテリー

### 2.1 特 長

衛星に必要な電力は、太陽光が衛星を照らす日照期間では太陽電池から供給しているが、衛星が地球や惑星等の陰に入った日陰期間ではバッテリーから供給している。宇宙用リチウムイオンバッテリーは、ロケットでの打上げ時に想定される過酷な振動及びロケットから衛星を切り離す際に起こる衝撃、真空・放射線環境、排熱等を十分考慮する必要がある。

リチウムイオンバッテリーは、2009年の電気自動車(Electric Vehicle: EV)発売や、スマートグリッドなど、国策を背景として急成長を見せている。これら地上用とは異なる宇宙用に特に必要な機能としては、

- (1) 充放電サイクルに強い(低軌道では数万サイクル)
- (2) 長寿命(静止軌道衛星: 15年以上, 低軌道衛星: 5年以上)
- (3) 軽量でエネルギー密度が高い
- (4) 衛星搭載性(熱的・機械的な特性)に優れること等がある。

当社の宇宙用リチウムイオンバッテリーは、1998年から(株)ジーエス・ユアサテクノロジー(旧日本電池)と共同

開発を進め、海外衛星向けとして初めて2005年8月にMaxar Technologies社向けiPStar衛星に搭載され、現在も正常に運用されている。この実績を皮切りにリチウムイオンバッテリーの搭載が拡大してきている。これまで一つの故障もなく正常に作動を続けており、高い信頼性を裏付けている。

リチウムイオンバッテリーセルには正極にLiCoO<sub>2</sub>(コバルト酸リチウム)を用いて高い充放電電圧を得るとともに、負極にはカーボン材料を用いて容量の確保を図っている。バッテリーとしてはセルごとに、セル故障対策のための過電圧保護回路、直列に接続されたバッテリーセルの開放故障時でもバッテリー機能を維持できるバイパススイッチを独自に開発し、長寿命化を支える高信頼性技術を搭載した。

宇宙用リチウムイオンバッテリーセルは、エネルギー密度の高い大容量セルを使用し、従来の宇宙用であったNi-H<sub>2</sub>バッテリーセルに比べてエネルギー密度は2倍以上である。バッテリーレベルでも筐体(きょうたい)や保護回路などの軽量化を図り、120Wh/kg以上の高いエネルギー質量効率を実現し、競争力強化を図っている。セルの形状としては長楕円(だえん)円筒形であり、容積効率が高い一方で、バッテリー筐体フレームとの接触面積を大きく取れるため、セル内部の温度均一性に優れている。

バッテリーはセルを並列及び直列に複数接続して構成し、充放電はバッテリー一括で行う。このため、セル電圧がばらつくと各セル間に電圧差が生じ、特定のセルが過充電になる可能性がある。これを防ぐのが過電圧保護回路である。充電中に、セルの電圧が上限電圧以上に上昇する場合には、このセルを迂回(うかい)させ、電圧が規定値以上にならないように制御する(特許第3872057号)。

バイパススイッチは直列に接続されたセルの一つが開放故障を起こした場合でも、充放電電流の経路を確保してバッテリーの機能を喪失しないようにするためのスイッチである。これによって、1セル故障に対し、バッテリー冗長を構成する必要がなくなるため、軽量化で重要な技術の一つである。セル直列段ごとにスイッチを並列に接続し、セルが故障を起こした場合に自動で作動し、バッテリー機能を維持できるようにしている(特許第4358134号)。

バッテリー構成として、セルケースと筐体の間に2種類の絶縁機能を施しており、その他バッテリー内の電位部でも電氣的に二重の絶縁機能を持つ構成としている。

図1に代表的な宇宙用リチウムイオンバッテリーの外観を示す。

### 2.2 構 造

当社リチウムイオンバッテリーは、振動及び衝撃環境に適した独自のシェルフレーム構造を採用している。図2に

従来のNi-Cd(ニッケルカドミウム)バッテリー等で採用されていたスタック構造とシェルフレーム構造の比較を示す。シェルフレーム構造を採用することによって、セル

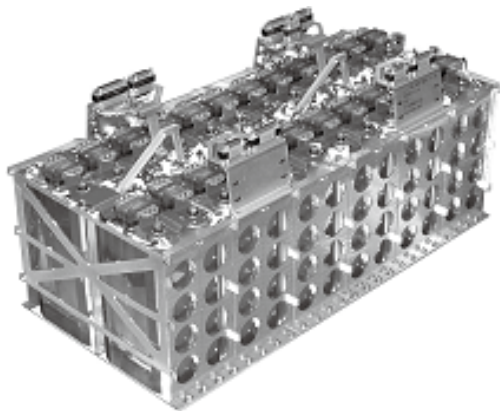
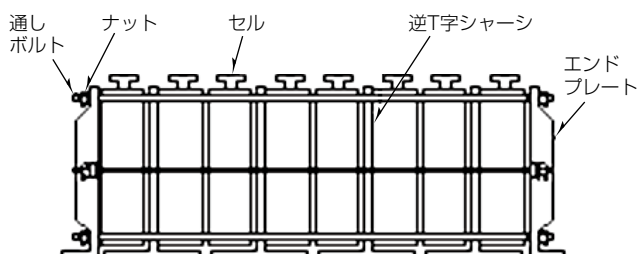
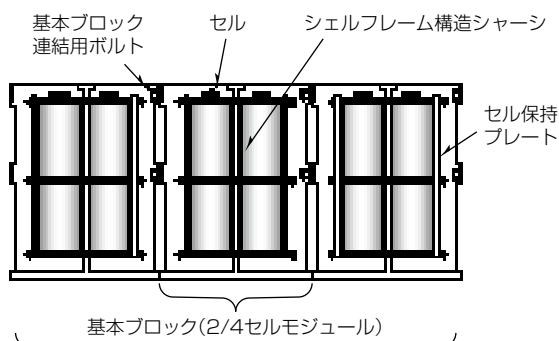


図1. 代表的な宇宙用リチウムイオンバッテリー



(a) スタック構造



(b) シェルフレーム構造

図2. バッテリー構造の比較

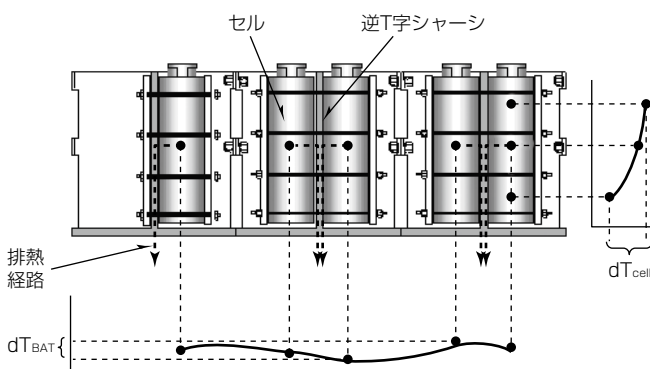


図3. バッテリーの熱設計概念図

実装時にセル外形寸法公差の影響を受けにくくなって組立て作業性の向上が図れ、さらにセルを荷重パスから除外し、局所的な応力集中を緩和することによって耐環境性のリスクを軽減できる(特許第3888283号)。

バッテリーの熱設計概念図を図3に示す。セルを個別実装することによって他のシャーシに実装されたセルとの急峻(きゅうしゅん)な熱的干渉を避けると同時に、バッテリー内部温度の均一化を実現している。

### 3. 宇宙用大容量リチウムイオンバッテリーの開発

#### 3.1 リチウムイオンバッテリーセルのラインアップ

当社が採用するリチウムイオンバッテリーセルのラインアップは、容量、寸法及び質量の異なるほぼ同形状の55Ah/110Ah/145Ah/190Ahセルである。各衛星及び宇宙機に必要な電力・容量に適したバッテリー構成を、これらセルのラインアップ及び使用するセル数(直列数/並列数)によって最適化してバッテリーの軽量化を実現している。シェルフレーム構造を採用しているため、バッテリーへのセル数の増加に対してシャーシ筐体連結数を容易に拡張可能なバッテリー構成になっている。2セル実装可能な2セルシャーシ筐体と1セル実装可能な1セルシャーシ筐体による5セルから12セルまでのバッテリー構成拡張性を図4に示す。

#### 3.2 機械耐性を向上させた構成及びその検証

衛星及び宇宙機に搭載するバッテリーで、ロケットでの打上げ時に想定される過酷な振動及びロケットから衛星を切り離す際などに起こる衝撃への機械耐性を持つ必要がある。また、衛星及び宇宙機へのバッテリー搭載場所によって振動・衝撃の印加レベルが大きい場合があるため、これらの厳しい機械環境でもセルの故障及びその他バッテリー構成品の破損等によって機能を喪失させない必要がある。このため、バッテリーに採用している長楕円筒形セルへの機械的影響をセルの機能・性能に影響が出ないように効率的に実装しつつ、電氣的・熱的特性を持つ必要がある。

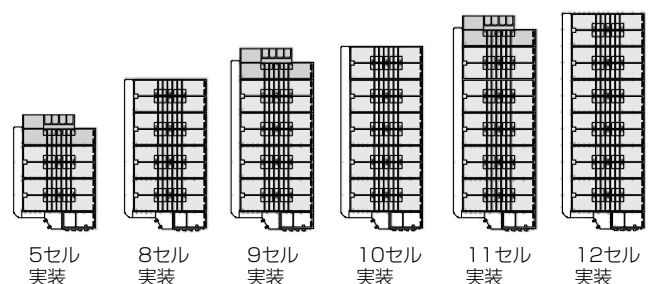


図4. バッテリー構成拡張性の概念図



これらの課題を解決するため、厳しい耐機械環境耐性を持つセル実装方法の開発・評価を行った。開発したセルの実装構成を図5に示す(特許第6537730号)。

セル内部の極板等のエレメントを機械環境で効率的に保持することを目的に、セル中央部を局部的に機械構成品で押さえて保持することによって、既存バッテリー構造の外部とのインターフェースは変更せず、かつ質量増加を抑えた構成になっている。

過酷な振動・衝撃、真空環境等の一般のバッテリーにはない環境を試験評価するため、図6に示す衛星の環境条件下でのリチウムイオンバッテリーの電気特性、機械性能等を実機で試験(認定試験)・検証し、耐環境設計仕様を満足することを確認した。その後、軌道上での寿命特性を把握するために寿命試験を実施して良好な寿命耐性を持っていることを確認した。

認定試験に供した大容量リチウムイオンバッテリー検証モデルのラインアップのうち、190Ahセルを用いたバッテリーモデルを図7に示す。

当該大容量リチウムイオンバッテリー検証試験結果から、バッテリーの機械及び熱的機能が従来の宇宙用バッテリーと同等の衛星環境(ロケット打上げ、宇宙環境)に十分適合

していることを確認し、特に機械環境試験(振動試験・衝撃試験)結果から振動耐性(正弦波振動(20G等))及び衝撃耐性(20,000G以上)を十分に持っていることが検証された。また、電気的にはエネルギー密度の高い大容量セルを採用したことによってバッテリーとして120Wh/kg以上の高いエネルギー質量効率を実現し、充放電サイクル寿命試験結果から静止衛星軌道の運用パターンで15年以上の寿命を満足できる特性であることが検証された。190Ahセルを用いた大容量リチウムイオンバッテリーによる充放電サイクル寿命特性(放電深度100%サイクル@25℃)を図8に示す。実衛星運用のバッテリー環境温度より温度を高く、更に放電深度も深い加速寿命試験を実施し、充放電1,000サイクル以上でも容量保持率が90%以上と、寿命特性で非常に良い結果が得られた。耐機械環境耐性を重視して開発したセル実装方法でもセル性能に影響を与えないことを確認し、長寿命要求の衛星運用に適したバッテリーであることが実証された。

### 3.3 セル並列化による大容量化及びその検証

大電力・大容量が必要な衛星にバッテリーを適用するに

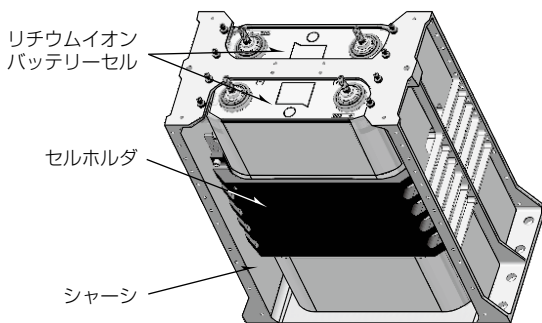


図5. セル実装構成

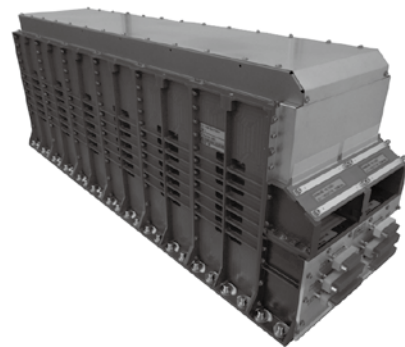


図7. 190Ahセルを用いたリチウムイオンバッテリーの検証モデル

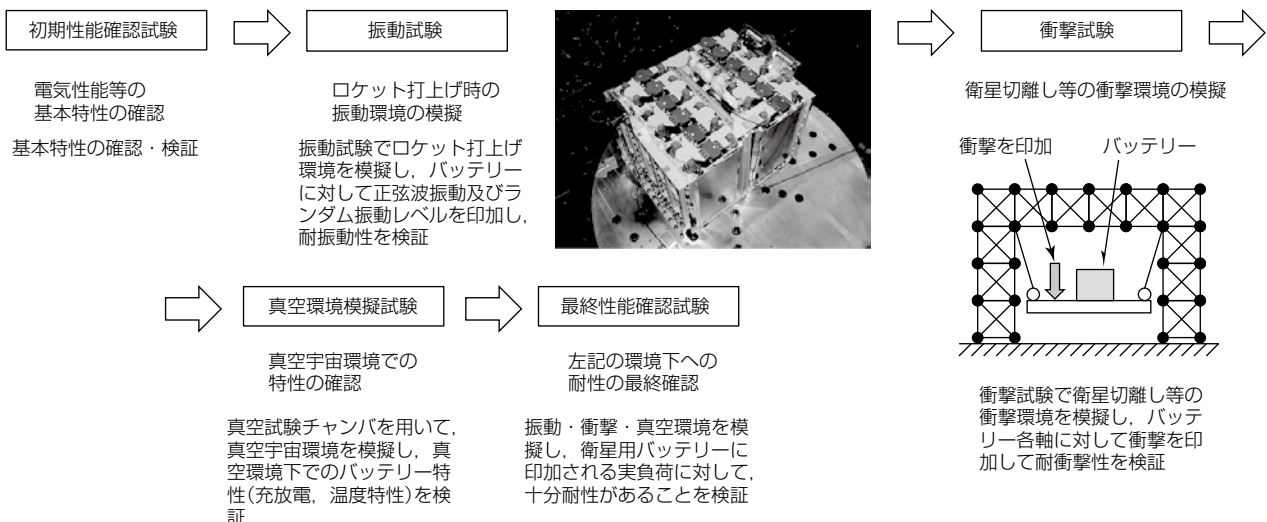


図6. 宇宙環境を模擬した検証試験

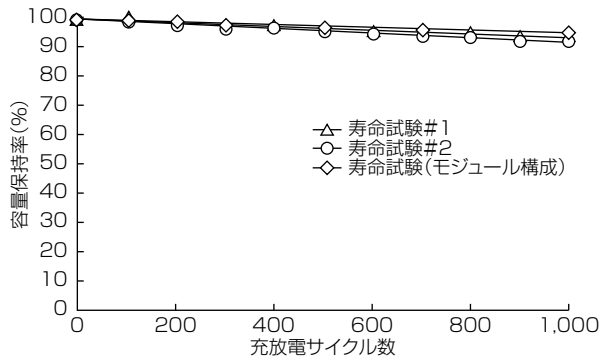


図8. セル単体及び開発実装方式セルの寿命特性

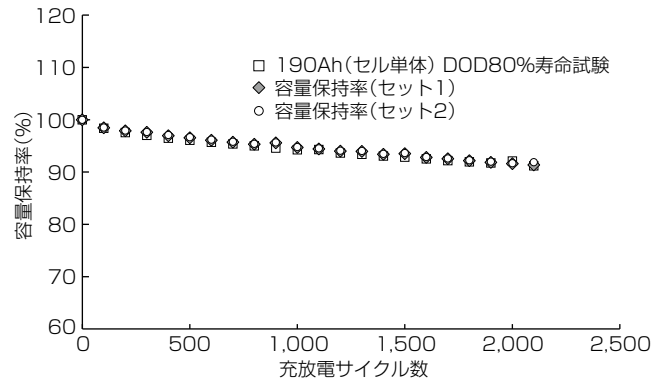


図9. セル単体及びセル並列の寿命特性

は、バッテリー台数を増やすか、又はセルを電氣的に並列に接続する必要がある。バッテリー台数を増やすとそれぞれのバッテリーへの充放電装置及びモニタ回路等が必要になりエネルギー密度が下がってコストも上がる。セルを電氣的に並列に接続してバッテリー1台当たりの容量を並列倍することによって、充放電装置及びモニタ回路の台数を増やすことなく大容量化が実現できる。ただし、セル並列化には特に並列接続されているセル特性(容量、内部抵抗等)の個体差による充放電電流のアンバランスが起こって寿命特性への影響が懸念されるため、次のような検証試験を実施した。

衛星搭載用バッテリーとして採用しているセルのセル並列化による寿命特性への影響を充放電サイクル試験(放電深度80%サイクル@15℃)によって検証した結果を図9に示す。結果は図8と同等であり、衛星搭載用バッテリーとして採用しているセルで、セル並列での充放電サイクルによる容量劣化は単セルと同等であること、当該セルでのセル間の特性個体差が寿命性能に影響を与えないことを確認した。また、長寿命要求の衛星運用に適したバッテリーに適用可能であることも確認した。

また、並列セルの充放電サイクル後の容量確認試験(C/2(145A)放電)での電圧特性及び各セル電流特性を図10に示す。充電率(State Of Charge : SOC)10%以下で若干の放電電流のアンバランスが見られた。各セルの容量差によって発生していると考えられるが、許容レベルであると判断している。ただし、長期間の衛星運用時で、並列セルの電流アンバランスを抑制して安定した劣化寿命特性を維持するため、電流アンバランスが発生する低SOC使用を極力避ける必要がある。実際は静止軌道衛星で放電深度(Depth of Discharge : DOD)最大80%以下、低軌道衛星でDOD最大20%程度での運用を通常行っているため、ア

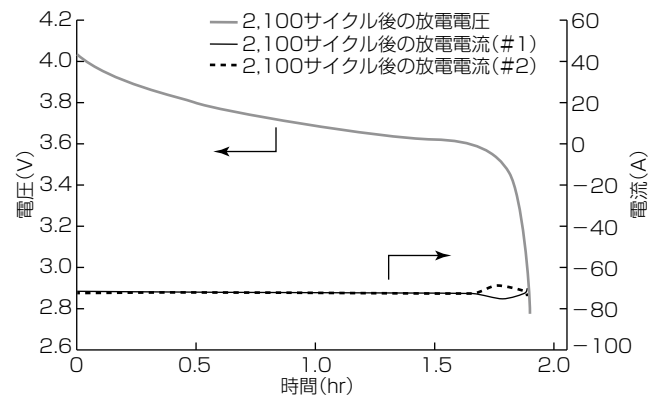


図10. 充放電サイクル後の並列セルの各電流

ンバランスの影響は受けにくく、セル並列化による大容量化は有効である。

## 4. む す び

近年衛星搭載用バッテリーに要求されている大容量化・高エネルギー密度化の需要に対応するため、当社での宇宙用リチウムイオンバッテリーで確立した技術と最近の開発成果について述べた。

これらの成果によって、当社で採用しているリチウムイオンバッテリーセルのラインアップである55Ah/110Ah/145Ah/190Ahセル及びその並列化による幅広い容量ラインアップをそろえ、過電圧保護回路及びバイパススイッチによる高い信頼性を実現し、高いレベルの耐機械環境性を持った宇宙用リチウムイオンバッテリーを完成させた。当社商用衛星“DS2000/DS1000”及び海外衛星メーカーに拡販していくことによって国内外シェアNo.1を目指していく。