

スターダストプログラム 「次世代の電源システム基盤技術獲得に向けた検討」 成果報告

宇宙航空研究開発機構 研究開発部門
第一研究ユニット 研究領域主幹 岩佐 稔

1. 研究の背景・目的

電気推進搭載化、高速大容量通信ペイロードの搭載等により、中大型衛星の電力規模は増加傾向(20kW～)にある。また、複数同時打上に対応した通信衛星等の小型化に伴い、電力規模の小さい電源(約3kW)の需要も大幅に拡大しており、多様な電力ニーズへの対応が必要となってきた。

電源システムの主構成要素であり、性能を左右する電力制御器(PCU)、バッテリー(BAT)、太陽電池パドル(SAP)について、国内外の需要調査及び下記の検討、要素技術開発を実施し、その後の実用化開発の実現案を提示する。

① デジタル電源の検討、要素技術開発

モジュール化、高周波スイッチング化に係る設計検討(仕様・構成検討)および要素技術開発(双方向コンバータ*)を行う。

*双方向コンバータ:バッテリー充放電を1モジュールで行う小型低コスト化のキー技術

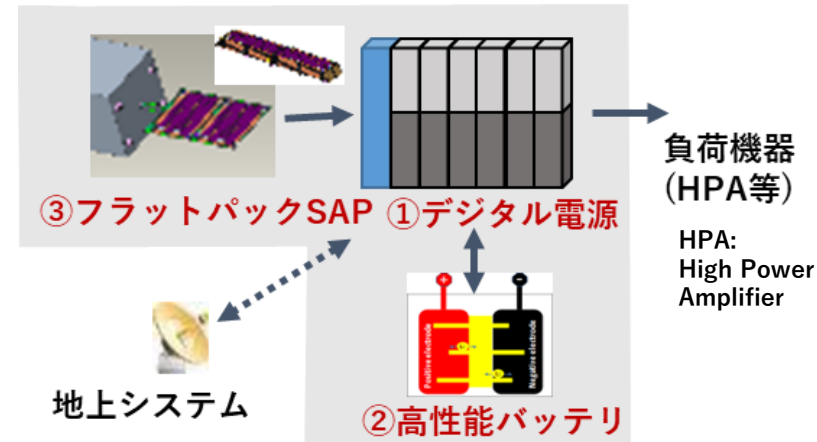
② 高性能バッテリーの検討、要素技術開発

液系バッテリーセルを前提に低コスト化を実現するバッテリーアセンブリの設計検討(構造簡素化・保護機能検討)及び試作評価を行う。並行して全固体電池セルの高容量化に向けた要素試作を行う。

③ フラットパック太陽電池パドルの検討、要素技術開発

機構系部品試作・薄型パネルのBBM基礎評価*を行う。

*BBMは機構品とパネル要素からなる試験体。機構品/パネルの組み合わせ要素として部分的なインテグレーション及び熱環境等の評価を実施。



2. 研究目標

① デジタル電源

電気推進GEO通信衛星をターゲットに海外競合の性能をベンチマークし、目標を設定。質量電力比を従来GEO用国産電源から向上させ、優位性を確保する。

	海外競合 T社	海外競合 A社	従来 GEO用 国産電源	本事業による デジタル電源
供給電力 kW	5.4 ~ 22	8 ~ 23	30	3.6 ~ 29
バッテリー電圧 V	54~98.5	55~96	43~98.4	(50) ~ 98.4
質量 kg	32~62	32~54	97.2	<57.6
質量電力比 kg/ kW	2.36	2.34	3.24	2.00
コスト(推定) %	100		—	72

② 高性能バッテリー

アセンブリの低コスト化、軽量化を実現し、欧州の主力バッテリーより低コスト、軽量のバッテリーを実現し、優位性を確保する。現行国産バッテリーを100とした場合のコスト・質量の比較を示す。

	欧州バッテリーS社	開発目標
コスト比較	80	70以下
質量比較	95	90

宇宙用バッテリーコスト比較(海外衛星メーカーT社、M社より, 2025年予測)

③ フラットパック太陽電池パドル

従来リジッド方式や海外で主流のロールアウト方式に対してコスト・収納時容積効率に優れるフラットパック方式により、小型衛星市場向けの量産効果によるコスト低減及び電力要求にフレキシブルに対応することで優位性を確保する。

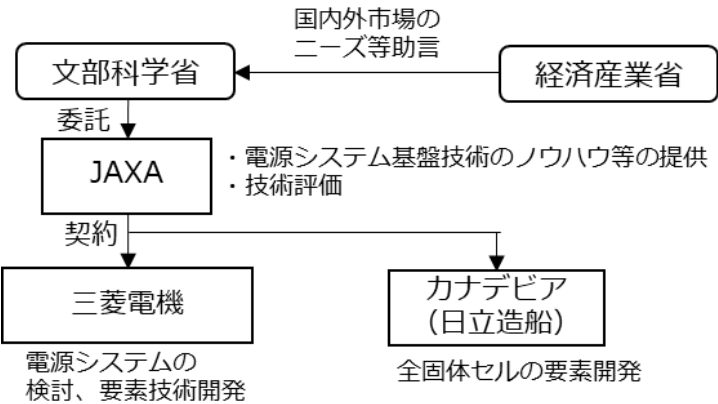
従来リジッド方式を100とした場合の電力当たりのコストと収納容積の比較を示す。

	ロールアウト方式	フラットパック方式
電力当たりコスト	66	40
電力当たり収納容積	60	30

※コストは太陽電池セルを除く。
※算出した対象は同電力規模（20kW～30kW）の太陽電池パドル。
小型コンステ向けを想定した量産によるコスト低減効果は含まない。

3. 実施項目とスケジュール、実施体制

本研究の実施項目とスケジュール、実施体制を示す。文部科学省よりJAXAが受託し、三菱電機及びカナデビア(全固体電池セル開発のみ)との契約により実施した。



実施項目	R5	R6
①デジタル電源 ・ 概念検討、基礎検討 ・ 要素技術開発 (双方向コンバータ)		
②高性能バッテリー ・ 概念設計、基礎検討 ・ 低価格液系バッテリー組立開発 ・ 全固体電池セル開発		
③フラットパック太陽電池パドル ・ 基本設計、要素試作品の仕様検討 ・ 要素試作、基礎評価		
①～③共通 ・ 実用化開発の実現案の提示		

4. 実施結果(全体サマリ)

①デジタル電源、②高性能バッテリー、③フラットパック太陽電池パドルについて、国内外の需要調査及び概念検討、要素技術開発等を実施し、下記のとおり、当初設定した研究目標を達成した。

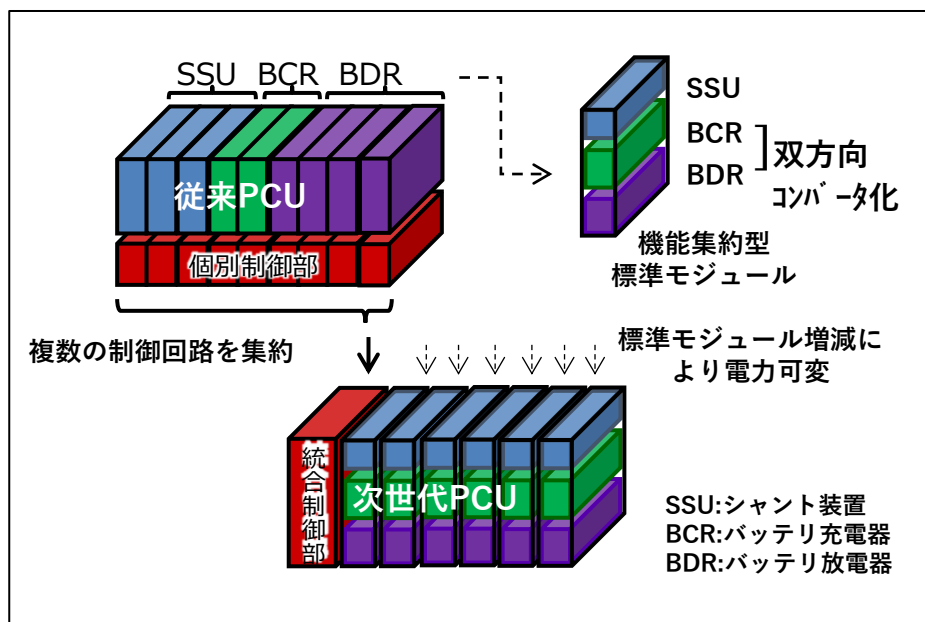
評価項目	目標値	実施結果	達成／未達
①デジタル電源			
供給電力	3.6kW～29kW	3.6kW～29kW	達成
バッテリー電圧	50V～98.4V	43V～92V	達成※
質量	< 57.6kg	< 57.6kg	達成
質量電力比	2.00kg/kW	2.00kg/kW	達成
コスト	72%	72%	達成
②高性能バッテリー			
コスト	70%以下	69.6%	達成
質量	90%	90%	達成
③フラットパック太陽電池パドル			
コスト	40%	38%	達成
収納容積	30%	30%	達成

※:高性能バッテリーの仕様を考慮して最適化。技術的に難易度が高い低電圧I/Fで性能実現

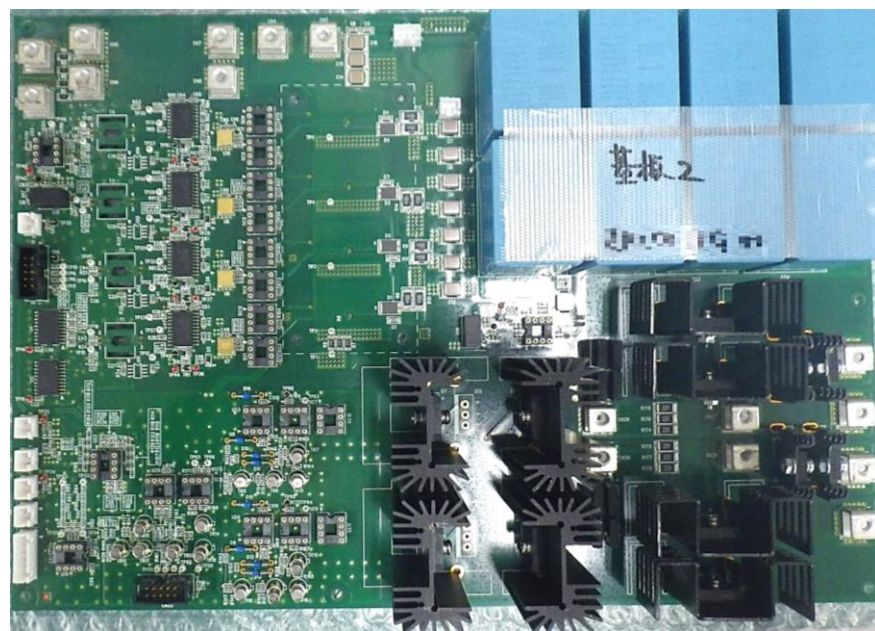
5. 実施結果詳細(デジタル電源)

5.1 デジタル電源の要素技術開発(1/2)

- 従来PCUの個別モジュール構成から一体化標準モジュールの実現を目指すため、SSUと双方向コンバータを含めた試作モデルを設計した。2次試作モデルでは標準モジュールサイズを模擬した1.8kW構成とし、排熱構造についても検討した。
- 設計にあたっては、GaNパワーデバイスを適用するとともに、インタリーブ動作を採用して、95%以上の高効率化と質量電力比2.0kW/kg以下の軽量化の両立を実現することを目標とした。



PCU全体構成

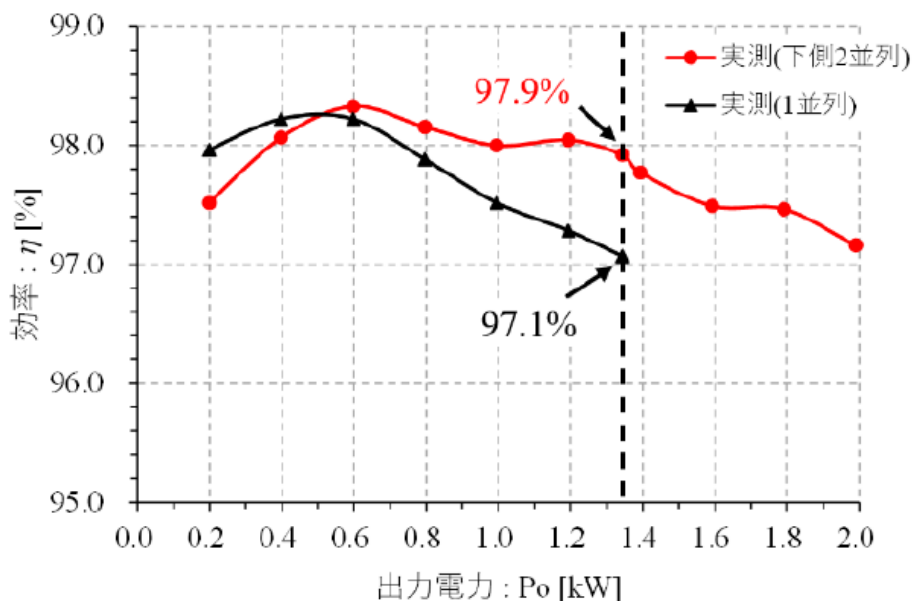


標準モジュール試作モデル

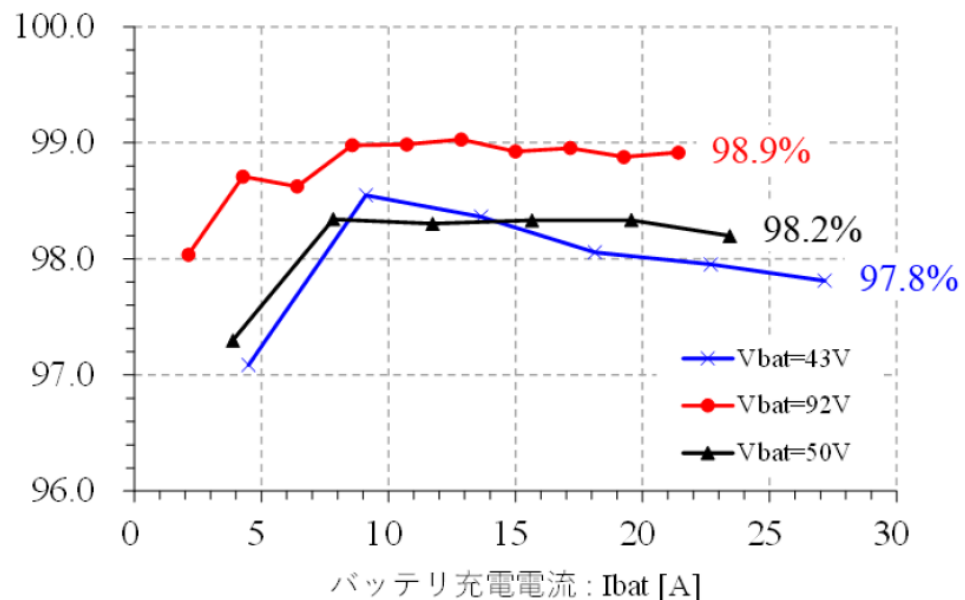
5. 実施結果詳細(デジタル電源)

5.1 デジタル電源の要素技術開発(2/2)

- 試作モデルを用いて動作モードを模擬した動作検証をおこない、目標効率に対する評価を実施した。
- 下側FETの2並列化、スイッチング周波数及びデッドタイムの最適化を行い、目標の95%を上回る97%以上の効率を実現した。
- また、シミュレーション結果と動作検証結果を比較しデジタル電源モデルベース開発環境を整備した。モデル製作にあたっては、部品特性、寄生成分を反映し、モデルの精度向上を図った。



放電時の電力変換効率

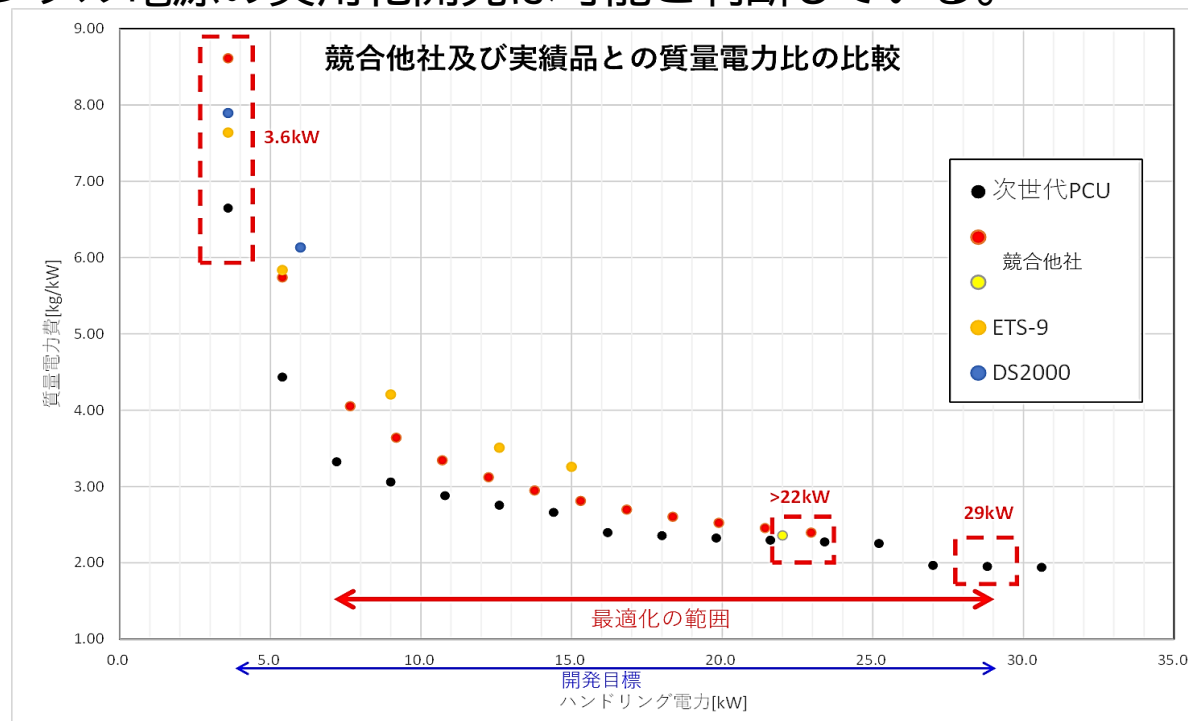


充電時の電力変換効率

5. 実施結果詳細(デジタル電源)

5.2 デジタル電源の全体概念検討

- 海外競合他社の電源系性能向上トレンドを調査し、スコープとする供給電力や商品化に向けた価格も含め、性能目標が妥当なことを確認した。
- コンデンサバンク搭載数、搭載するFPGAの最適化を図ることにより、幅広い電力範囲で競争力を有することを確認した。
- 要素技術開発で発生したスイッチング時のサージ電圧対策については、高耐圧の部品に変更することにより対応可能なことを確認しているが、サージ低減も含め、次フェーズでの検討が必要である。
- デジタル制御部を含めた全体試作等の研究開発を継続することにより、競争力を有したデジタル電源の実用化開発は可能と判断している。



6. 実施結果詳細(高性能バッテリー)

6.1 低コスト液式バッテリーの開発(1/2)

・低コスト化のための技術1

機械環境耐性を持たせ、かつ、セルを効果的に温度制御するために、各セルに対して適切な拘束力を付与

⇒従来の個々に拘束する方式からまとめて拘束し、かつ少ない工数で拘束できる手法を構築(図6-1)

・低コスト化のための技術2

基本構成単位のバッテリーモジュールを設定し、そのモジュールを複数直並列構成させることで並行して製造可能にすることで製造工程を短縮化。モジュール間接続は接点抵抗を削減するRPLモジュールを新たに構築

・軽量化のための技術

部品点数の削減. 機械強度の詳細見積もりによるシャシなど構成材料厚さの最適化

以上を踏まえ、190Ahセルを用いて表6-1に示す仕様のバッテリーを試作(図6-2)。

試作バッテリーを用いた確認試験により機能・性能を確認。

この構成は全固体電池へも適用可能であることを確認。

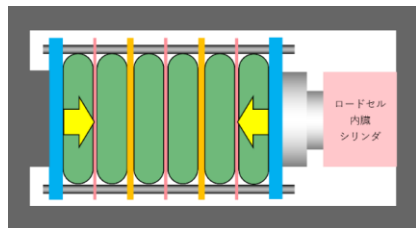


図6-1 セルスタック方式

表6-1 試作バッテリー組立仕様

項目		本バッテリー
公称容量		380 Ah (2 ストリング並列)
放電特性	最大放電電流	380 A
	下限電圧	49.50 V
充電制御	最大充電電流	190 A
	充電電圧	~73.80 V (3 蓄電モジュール直列)
外形寸法		X: 768(max) Y: 1042(max) Z: 341.5(max)
質量		222±11.1 kg
質量エネルギー密度		126.3 Wh/kg

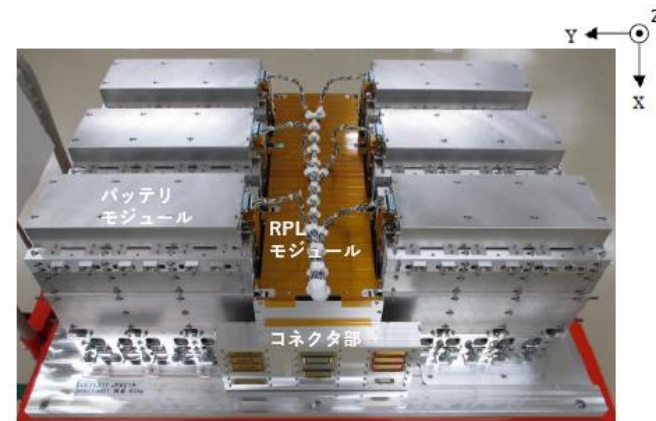


図6-2 試作バッテリー外観

6. 実施結果詳細(高性能バッテリー)

6.1 低コスト液式バッテリーの開発(2/2)

・需要動向

- 2024年度調査結果では、以前と同じく軽量化と低コストのニーズが高く、海外ベンチマークとしても、欧州バッテリーS社は従来比質量95%、コスト80%であったことから、本研究での目標値(従来比質量90%,コスト70%)を設定した。
- 特に容量の大きなセルを対象としたバッテリー組立に対する引き合いは、現時点でも堅調であるため、軽量・低コスト化をアピールできる本成果は有効である。(なお、新しいバッテリー組立についてはユニークな方式として外部発表*¹においても関心を集めた。)

*¹ 2024 NASA Aerospace Battery Workshopにて発表

・今後の展開

- 今回の成果を基に、容量の異なるバッテリー製造に向けたデータ整理を進める。
- オプションとしていたBMS*²機能の付加*³について検討する。

*² BMS:Battery Management System(バッテリー監視システム)

*³ 現状の中大型衛星ではバッテリー側には管理機能は有していない。民生品ではバッテリーの充放電制御含めBMS内で行っているものもある。小型衛星事業者等では付加することで上位機器での制御負担を少なくすることも期待されている。

6. 実施結果詳細(高性能バッテリー)

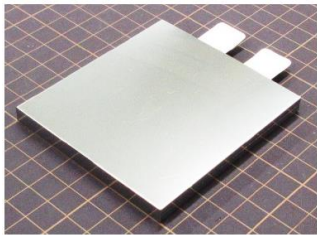
6.2 全固体電池の高容量化に向けた要素試作

・高容量化課題

- 固体電解質層の薄層化 ⇒ 均一・均質な電解質層の成膜技術
- 電極面積の拡大 ⇒ 広い面積で均一・均質な電極活物質・電解質層の成膜加圧技術

・試作・評価

目標とする電池容量2Ah級の電池製造に向けて、従来比1.67倍の面積で成膜加圧可能な治具を試作、その治具を使用して全固体電池を試作し、目標を達成することを確認。この試作結果を基に、将来の目標の10Ah級セルの現時点仕様案を策定。



項目	仕様（試験結果）
寸法(タブ含まず)	75mm x 82.5mm x 7.0 mm
エネルギー密度	213Wh/L
容量	2.513Ah

図6-3 試作全固体電池外観と仕様

・需要調査

- 全固体電池の特長である耐環境性を活かした場所での需要が高い
- 数Ah級以上のニーズが高く、本研究の目標設定は妥当

・今後の展開

- 【次フェーズへの課題と対策】高容量化高エネ密化に向け電池構成部材の更なる薄層化、多積層技術の獲得。
- 我が国の優位性を保つため、ISO文書*4に全固体電池の選定・取扱いについての項目を追加する方向で検討中。

*4 IS 17546: Space systems - Lithium ion battery for space vehicles - Design and verification requirements を我が国主導で制定

表6-2 試作結果を基にした10Ah級セル仕様検討結果

No.	項目	検討結果
1	形状	金属ケース
2	寸法	約78mm x 85mm x 22 mm
3	質量	約320g
4	設計容量	10.173Ah
5	エネルギー密度	253Wh/L
6	電圧範囲	2.70-4.30V
7	公称電圧	3.65V
8	タブ/端子	金属箔

7. 実施結果詳細(フラットパックSAP)

7.1 基本設計結果

フラットパックSAPは、機構ユニットと太陽電池ユニットで構成することにより、発生電力0.1 kW～20 kWの範囲に対し拡張性を有する設計とした。

- 特徴:
- 枠体+太陽電池セルを実装したフィルムによる高収納性
 - 同一断面を持つビーム部材+機械締結により低コスト+量産性
 - 構成要素をモジュール化し電力規模に対してスケラブルな設計
 - 進展マスト/ステム不要のシンプルな屏風展開型構造

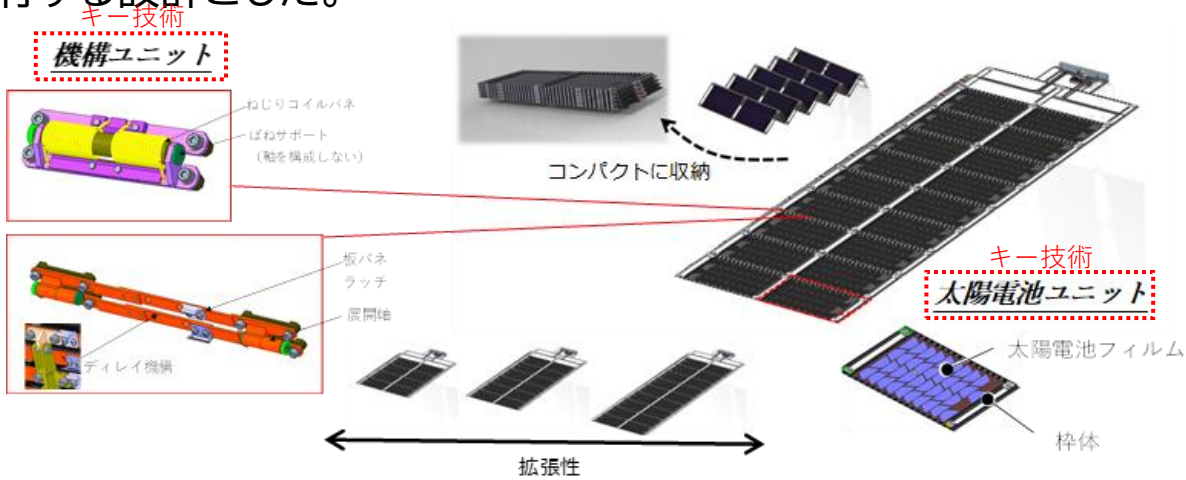


図7-1:フラットパックSAPの概要

衛星サイズとして、500W級の小型衛星、4kW級の中小型衛星、及び20kW級の大型衛星を想定した基本設計の概要を表7-1に示す。

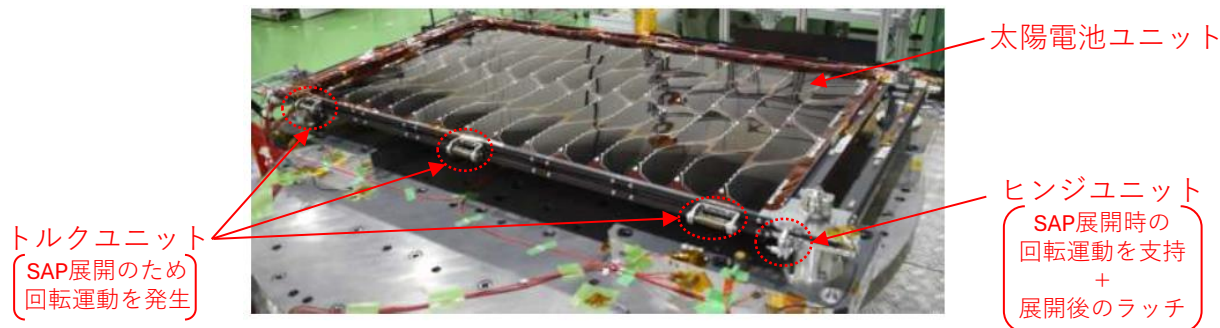
表7-1:フラットパックSAPの基本設計の概要

衛星サイズ	小型衛星(500W) 250W/wingの2翼構成	中小型LEO衛星(4kW) 2kW/wingの2翼構成	大型GEO衛星(20kW) 10kW/wingの2翼構成
寿命	軌道上運用寿命： LEO 3年	軌道上運用寿命： LEO 7年	軌道上運用寿命： GEO 15年
発生電力	EOL 0.56 kW以上 (2翼合計,分点) BOL 0.57 kW以上 ※SAP発生電力解析時のシステム I/F電圧は55Vとする	EOL 4.4 kW以上 (2翼合計,分点) BOL 4.5 kW以上 ※SAP発生電力解析時のシステム I/F電圧は55Vとする	EOL 20.7 kW以上 (2翼合計,分点) BOL 22.5 kW以上 ※SAP発生電力解析時のシステム I/F電圧は103Vとする

7. 実施結果詳細(フラットパックSAP)

7.2 機構系部品試作・薄型パネルのBBM基礎評価結果

- **機構ユニット**(ヒンジユニット、トルクユニット等)の要素試作、基礎評価
 - 機構ユニットは信頼性を確保しつつ、薄型・低コスト・量産性・拡張性を確保するため、**構成部品を少なくし、シンプルな構造**とした。機構ユニットの製造・組立検証を行い、**量産に適用可能**であることを確認した。
 - 収納状態で太陽電池ユニット同士が接触する摩擦保持面のブレーキ材について、トレードオフ、評価試験を実施。ブレーキ材として必要な摩擦係数、寿命を有し、低コスト、量産性の観点から酸化物系硬質皮膜を採用し、BBMに適用した。
- **太陽電池ユニット**の要素試作、基礎評価
 - 実装する太陽電池セルを限定することなく、**多様なタイプに対応可能な設計**とした。4種の異なる太陽電池を実装した太陽電池ユニットを製造し、製造の実現性があることを確認した。また、熱真空試験に供して、熱真空環境に対する**耐環境性を有する**ことを確認した。
- **BBM基礎評価**
 - 機構ユニットと太陽電池ユニットを組み合わせて**BBM**を製造し、組立検証及び環境試験を実施。組立検証により、**量産適用性がある**ことを確認した。また、振動試験、音響試験により**耐環境性を有する**ことを確認した。



異なるセル搭載時でも耐振動環境性を示し、SAPの共通プラットフォームとしての設計成立性・実現性を確認

図7-2:フラットパックSAP/BBM振動試験の様子

7. 実施結果詳細(フラットパックSAP)

7.3 国内外の需要調査

● 太陽電池パドル構造

- ・ 各メーカーともに旧来のリジッドタイプパドルは引き続き使用。
- ・ フレキシブルタイプパドルについても商用業界においてここ数年開発と適用が拡大。
- ・ ロケットへの複数衛星搭載を念頭に、太陽電池パドルの「低コスト化」「量産性」「高収納性」といった需要が見られる。

● 太陽電池セル

- ・ 現在も既存型の化合物半導体3接合太陽電池が主流。接合数増による高効率化や、薄膜化及び用途に合わせた耐放射線をはじめとした発展型品種の開発の傾向が見られる。
- ・ コンステレーション衛星の台頭により、太陽電池は既存の宇宙用メーカーだけでは供給不足が見えていることから、既存民生メーカーを含めた新規メーカーが市場参入を模索している状況。
- ・ 今後も太陽電池セルのトレンドは継続して変化が著しい状況にあると考えられ、太陽電池パドルのような共通プラットフォームにおいては、太陽電池セルに対して柔軟な選択が求められている。

国内SAPメーカーに対する輸出向け太陽電池パネル引合いとしては、静止軌道衛星需要継続(国際需要としては減)及び低軌道衛星の需要増の動向は変わらず、それに加え低軌道・中軌道衛星コンステレーションの計画が具体化されてきており、それぞれの需要において海外衛星各社から引合いがある状況。

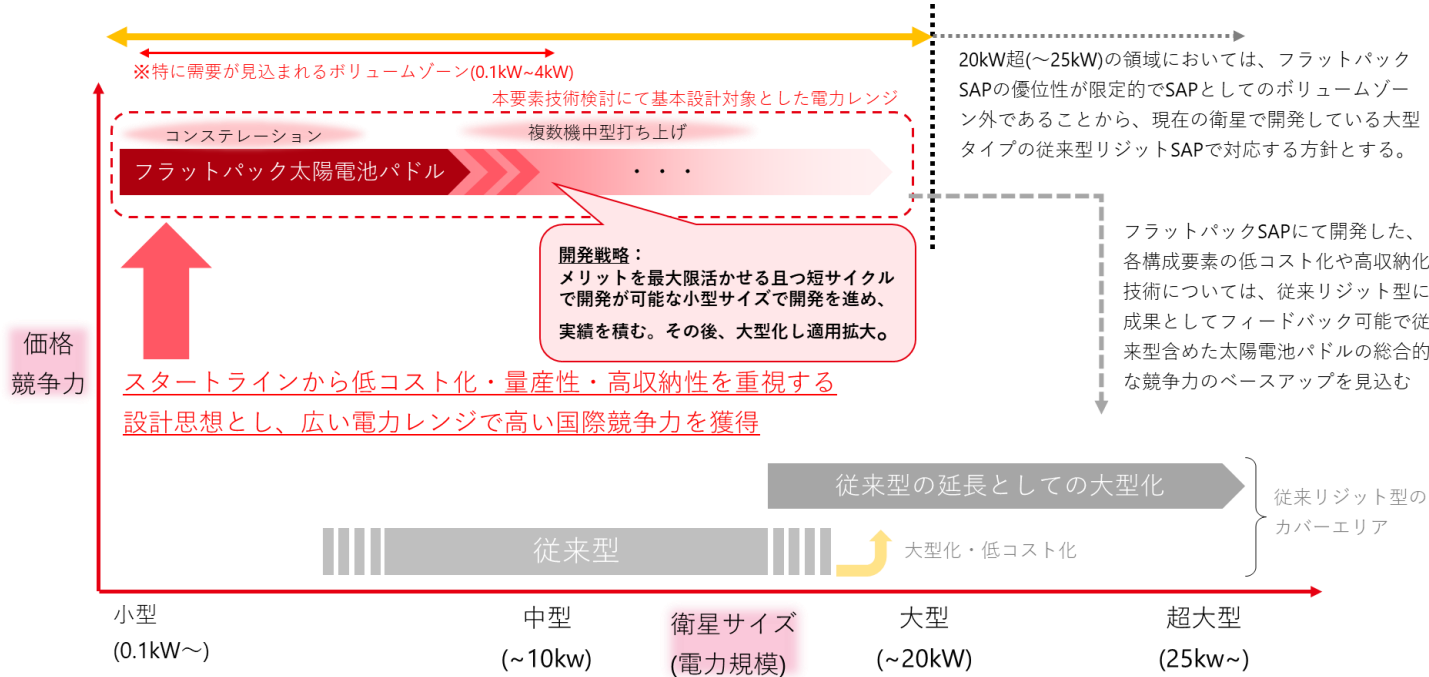


- ・ フラットパックSAPの目指す主要指標である「低コスト化」、「量産性」、「高収納性」といった特徴が、**市場の需要と合致**
- ・ 幅広い電力規模の需要とともに、各軌道環境に対応した太陽電池セルのトレンドは変化が著しい状況にあると考えられ、太陽電池パドルとしては電力規模や太陽電池セルに対して柔軟な選択が可能な**共通プラットフォームが必須**

7. 実施結果詳細(フラットパックSAP)

7.4 開発レンジ及び戦略

フラットパックSAPのメリットは**低コスト**と**量産性**であることから、多くの機数が期待できる小型コンステレーション衛星に対応することでこれらのメリットを最大限に活かすことができる。さらに、小型は短サイクルで開発が可能であることから、まず小型サイズで開発を進めて実績を積み、その後大型化し適用を拡大していく戦略である。



7.5 次フェーズに向けて検証が必要となる項目

基礎評価結果に基づき、次検証フェーズ(展開検証モデル／小型衛星向けフルサイズ検証モデル)で実施が必要となる項目を具体化した。

- ① 機構潤滑部分検証
- ② 保持解放機構試作検証
- ③ 小型スケールモデルを用いた展開機能検証
- ④ 寿命評価検証
- ⑤ 解析モデルコリレーションと単純化

8. まとめ

計画していた作業を全て完了し、①デジタル電源、②高性能バッテリー、③フラットパック太陽電池パドルについて、当初設定した研究目標を達成できる技術的実現性を得るとともに、需要調査を行い、次フェーズに向けた検証項目を明確化し、下記のとおり、実用化開発における基本的な構成と技術方式を整理した。

現在、これらに基づき、メーカーが中心となって実用化開発を計画中である。

	①デジタル電源	②高性能バッテリー	③太陽電池パドル
システム構成／技術方式	・SSU＋双方向コンバーター一体モジュール ・モジュール並列化によるスケラブル構成 ・統合デジタル制御	・バッテリーモジュール＋RPLモジュール ・全固体電池の極板面積拡大	・機構ユニット＋太陽電池ユニットで構成するフラットパック方式 ・シンプルで電力拡張性、量産適用性を有する機構・構造
電力レンジ	・1.8kW／モジュール ・3.6kW～29kW	・0.5kW～29kW級（16Ah～230Ah）	・0.1kW～20kW
次フェーズに向けた検証項目	・デジタル制御部を含めた全体検証 ・サージ電圧対策検証 ・機械環境を含めたコポーネント開発	（バッテリー） ・BMS機能付加 ・セルスタック自動化 ・販路開拓（全固体電池） ・高容量化に向けた多積層極板薄層化	・機構潤滑部分検証 ・保持解放機構試作検証 ・小型スケールモデルを用いた展開機能検証 ・寿命評価検証 ・解析モデルコリレーションと単純化