

宇宙用耐放射線性 POL DC/DCコンバータの開発

矢野 善之・池田 直美・鈴木 隆博
中村 正夫・谷代 智寿・中谷 直人

要 旨

宇宙機に使用されるMPUやFPGAの低電圧化が進んでいます。一方、低電圧化が進むと配線抵抗により電圧降下が発生し、これら部品の安定動作に支障をきたします。この問題を解決するために、MPUやFPGAなどの直近に配置する電源であるPOL (Point of Load) DC/DCコンバータの必要性が高まっています。本稿では、POL DC/DCコンバータの開発経緯と、信頼性・耐環境性などの試験結果を報告します。

キーワード

- POL ●DC/DCコンバータ ●マルチチップ構造 ●高信頼性
- 耐放射線性 ●シートリアクトル

1. はじめに

近年、人工衛星など宇宙機の高性能化のため、高速MPU (Micro Processing Unit) や大規模FPGA (Field Programmable Gate Array) などが使用されるようになってきています。日本においても宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 殿にて宇宙用MPUが開発され、更にSOI (Silicon On Insulator) を用いた宇宙用FPGAやASIC (Application Specific Integrated Circuit) の開発が進んでいます。これらの部品ではコア電圧の低電圧化が進んでおり、1.8Vや1.5Vといった低電圧が必要となります。これらの部品に対する給電について、従来のように基板から離れた場所に配置された電源から給電する集中給電方式を採用した場合、電源から部品までの配線が長くなるため、その抵抗成分により電圧降下が発生して部品の安定動作に支障をきたします。この問題を解決するためには、MPUやFPGAなどの負荷の直近に電源を配置する分散給電方式を採用し、配線距離を短くして配線抵抗を減らす必要があります。このとき、負荷の直近に配置する電源が「POL (Point of Load) DC/DCコンバータ」 (POL) であり、部品の低電圧化に伴ってその必要性が高まっています。

今回、JAXA殿の指導の下、宇宙用としては世界最高クラスの性能・サイズの耐放射線性POLを開発しました。本稿では、その開発経緯と信頼性・耐環境性試験結果について報告します。

2. 開発目標及び目標性能

POLの開発を進めるに当たり、次に示す開発目標及び目標性能を設定しました。これらを達成できるように構造設計・回路設計・部品選定を行い、製造したPOLに対して信頼性・耐環境性試験などを実施して所望の性能を有しているかを確認しました。

2.1 開発目標

POLはMPUやFPGAなどの直近に配置されるため、小型・軽量であることが要求されます。また、少なくとも周辺部品の高さと同等もしくは、より低い (低背) ことも必要です。用途が宇宙機のため、限られた電力を有効活用するとともに、熱設計上の理由から自己発熱を極力抑える必要があるため、電力変換効率が高いこと (高効率) も求められます。宇宙用なので当然のことながら高信頼性、耐環境性、耐放射線性も同時に求められます。これらを踏まえ、表1に示す開発目標を設定しました。

2.2 目標性能

表2に、POLの電気的特性と耐環境性の両方の目標性能を示します。入力電圧は5Vを標準入力とし、最大で16Vまで入

表1 POLの開発目標

| 項目 | 目標 |
|-------|----------------------|
| 小型化 | 20×20mm以下 |
| 低背化 | 6mm以下 |
| 軽量化 | 10g以下 |
| 高効率 | 効率90%以上(3.3V出力時) |
| 信頼性 | 宇宙機に必要な信頼性(JAXA認定取得) |
| 耐放射線性 | 宇宙機に必要な耐放射線性(表2参照) |

表2 目標性能

| 項目 | 目標性能 |
|-------------------------|---|
| 入力電圧範囲 | 4.5V~16V(標準は5V) |
| 出力電圧/電流(定格) | 1.2V/3A、1.5V/3A、1.8V/3A、2.5V/2.6A、3.3V/2A |
| 出力電圧変動 | ±2%(25°C)、±4%(125°C、-55°C) |
| 効率 | 90%以上(5V入力、3.3V出力、25°C時) |
| スイッチング周波数 | 250kHz |
| 適用規格 | 宇宙開発用信頼性保証混成集積回路共通仕様書(JAXA-QTS-2020B) |
| 動作温度範囲 | -55°C~125°C |
| 耐振性 | 20G、正弦波 |
| 耐衝撃性 | 1,500G、半正弦波 |
| 温度サイクル性 | -65°C⇄150°C、100サイクル |
| 定常動作寿命 | 125°C、1,000時間 |
| 耐放射線性 TID ¹⁾ | 1kGy(Si) |
| 耐放射線性 SEE ²⁾ | >64MeV/(mg/cm ²) |

1) Total Ionizing Dose 2) Single Event Effect

力可能としました。出力電圧のラインアップは表2に示す5種類とし、POLの目標効率を民生品と同等かつ宇宙用として世界最高水準の90%以上(5V入力、3.3V出力、25°C時)としました。信頼性・耐環境性・耐放射線性については、従来の宇宙用ハイブリッドICで要求されるクラスI水準としました。

3. 開発経緯及び試験結果

3.1 構造

POLの配置は、MPUやFPGAの真横か裏面となります。このため、小型化と基板への両面実装が可能な高さの実現が必要になります。また、基板上に実装されることから、軽量であることも必要です。したがって、小型・軽量・低背を実現させる構造を検討しました。

小型化へのアプローチとしては、写真1左に示すように制御ICやパワー-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)などの部品をベアチップ実装し、気密封止するマ

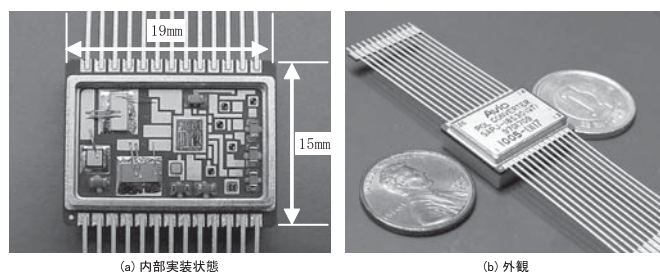


写真1 POL内部の実装状態(上面側)及び外観

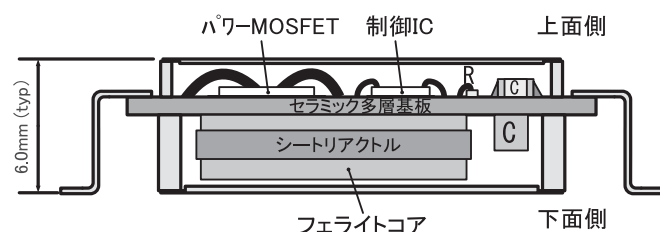
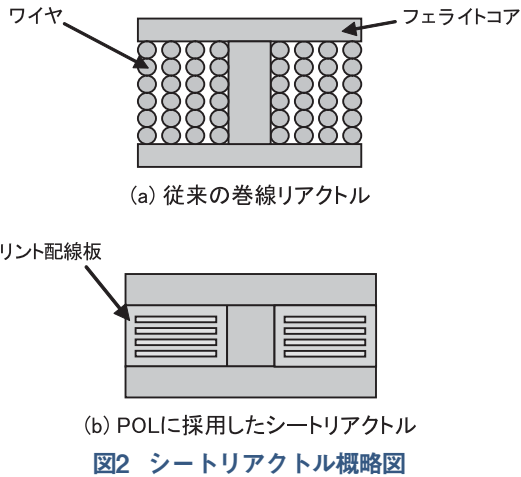


図1 POL両面実装イメージ図

ルチチップ構造を採用しました。ベアチップはパッケージされたディスクリート部品よりも小さいため、ベアチップを適用することは、小型化に大いに寄与することになります。更なる小型化のため、図1に示すように両面実装構造とし、両面とも気密封止する構造を採用しました。この構造を採用することで、宇宙用POLとしては世界最小クラスの15×19mmというサイズを実現することができました。外観写真を写真1右に示します。

両面実装構造を採用すると小型化には寄与しますが、厚くなるというデメリットがあります。そこで、可能な限り低背化するために、上面側にはベアチップの半導体や小型コンデンサなど、低背の部品を集めて極力低くしました。

下面側には高背部品であるリアクトルが実装されるので、低背化のためにはこのリアクトルの高さを低くする工夫が必要となります。そこで、図2上に示すようなワイヤとフェライトコアで構成される巻線リアクトルは採用せず、図2下に示すような、ワイヤの代わりに内製による多層プリント配線板を用いたシートリアクトルを採用しました。シートリアクトルとは、従来はフェライトコアにワイヤを巻いてリアクトルを構成していたものを、ワイヤ巻線の代わりに多層プリント配線板を用いることで巻線を構成するものです。この構造は



民生分野においてはよく採用されており、現在のオンボード電源の主流の構造となっています。シートリアクトルを採用することで、巻線タイプより薄くリアクトルを構成することができるので、低背化に寄与します。加えて、このシートリアクトルを採用することで、巻線リアクトル採用時の信頼性にかかわる懸念（例えば、ワイヤはんだ付け部の断線やワイヤ被覆ハガレなど）を無くすることができるため、高信頼性が要求される宇宙用部品には最適な構造といえます。

軽量化のアプローチについては、パッケージのベースに積層セラミックスを採用し、それを部品実装基板として利用するマルチチップ構造を採用しました。この構造を採用することで、宇宙用POLとしては世界最軽量クラスの7.2g (max) を実現しました。

3.2 電気的性能

効率90%以上を実現させるため、回路方式は降圧型スイッチングレギュレータとしました。現在、宇宙用として使用できるスイッチングレギュレータ用の制御ICが日本国内に存在しないため、JAXA殿がPOL専用に制御ICを開発することになりました。制御ICは、POLの高効率化に寄与する同期整流方式に対応したものです。同時に、その制御ICとセットで使用することを想定して開発された、低オン抵抗タイプのパワーMOSFETの開発もJAXA殿にて実施されました。これらの部品を採用し、積層セラミック基板上の部品配置や配線パターンの最適化を行うことで、世界最高水準の90%以上の効率（入

力5V、3.3V出力時）を実現することができました。

図3に、製造したPOLの負荷電流に対する効率のグラフを示します。このグラフからは、25℃時においては負荷電流が2Aの場合の効率が93%程度であり、目標であった90%以上を達成していることが分かります。また、効率が低下する高温時でも90%近い効率が達成できていることも分かります。なお、低温時の効率は室温時とほぼ同じです。

出力電圧によって効率は変動しますが、その特性を図4に示します。この図は、出力電圧が1.2V、1.5V、1.8V、2.5V、3.3Vそれぞれについての負荷電流に対する効率を示しています。この図からは、出力電圧が低くなると効率が低下する傾向にあることが分かります。

また、負荷電流の変化に対する出力電圧の変動は1%程度で

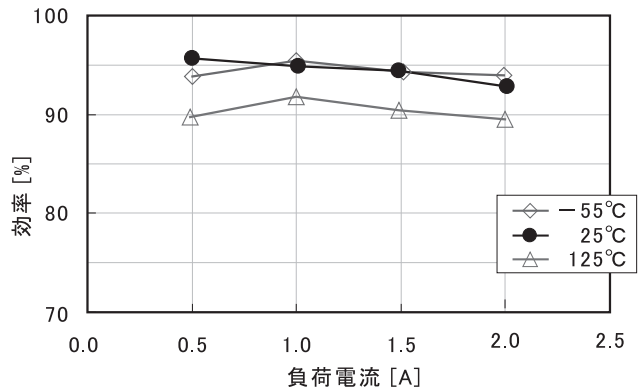


図3 効率—負荷特性 (Vin=5V、Vout=3.3V)

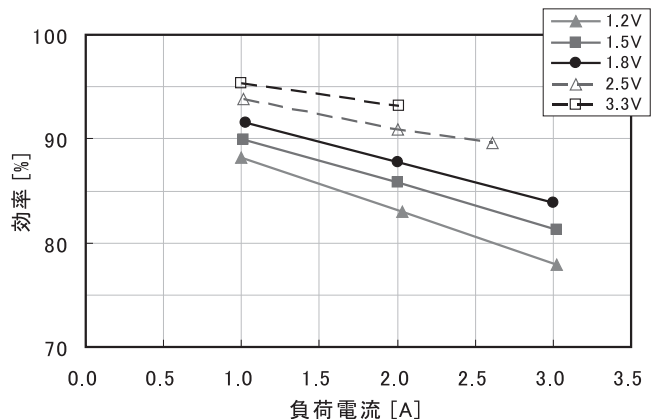


図4 各出力電圧における効率—負荷特性 (Vin=5V、25°C)

あり、温度による変動も最大で2%程度なので、目標である±2% (25℃時)、±4% (温度特性) を十分に満たす結果となりました。

3.3 信頼性・耐環境性

宇宙用としての信頼性・耐環境性を有しているかを確認するために、製作したPOLに対して宇宙用ハイブリッドICの適用仕様書であるJAXA-QTS-2020Bで規定される信頼性試験(認定試験)を実施しました。主な試験内容及び結果は表3に示すとおりで、すべて良好な結果となりました。この結果をもってJAXA認定部品に登録する手続きを行い、JAXA QML認定を取得しました。

また、この信頼性試験に加えて、より厳しい試験として表4に示す試験も実施し、こちらも良好な結果を得ています。これらの結果より、開発したPOLは宇宙用としての信頼性、耐環境性を十分に有していると考えています。

3.4 耐放射線性

POLにおいて、放射線による特性変動を受けやすい部品は

表3 主な信頼性試験内容及び結果

| 項目 | 内容・条件・供試数量 | 結果 |
|--------|---|----|
| Gr. A | 電気的特性評価: 45個 -55℃、25℃、125℃ | 良好 |
| Gr. B | 出来栄評価: 3個 ボンド強度、ダイ剥離、はんだ付け性、リード強度、耐溶剤性など | 良好 |
| Gr. C1 | 信頼性評価: 22個 定常動作寿命(125℃、1,000時間) | 良好 |
| Gr. C2 | 耐環境性試験: 5個 温度サイクル(-55℃⇔150℃、100サイクル) 衝撃(1,500G、6方向) 振動(20G、3軸)など | 良好 |
| Gr. D | 耐環境性試験: 5個 熱衝撃(-55℃⇔125℃、15サイクル) 衝撃(1,500G、6方向) 振動(20G、3軸) 耐湿性、塩気など | 良好 |

表4 追加信頼性試験内容及び結果

| 項目 | 条件・供試数量 | 結果 |
|--------|------------------|----|
| 定常動作寿命 | 125℃、3,000時間: 3個 | 良好 |
| ランダム振動 | 43.92Grms、3軸: 3個 | 良好 |

制御ICとパワーMOSFETです。両者ともにJAXA殿にて開発されたもので、目標の放射線耐性を満たすように設計されています。できあがったチップは、JAXA殿にて単体でTID、SEE試験が実施され、問題が無いことが確認されています。

チップ単体で耐放射線性を確認しているのに特に問題はありませんが、確認のため、製造したPOLにてTID試験を実施しました。静止軌道衛星を想定して、照射線量は1kGyとしました。線源はコバルト60(γ線)です。試験の結果、照射前後で出力電圧が1%程度低下することが分かりました。これは制御ICの特性であり、制御IC単体でのTID試験においても同等の変動が見られるため、妥当な結果といえます。その他の電気的特性は特に問題はなく、良好な結果を得ています。これにより、開発したPOLは宇宙用として十分な耐放射線性を有していると考えています。

4. おわりに

本稿では、JAXA殿ご指導の下、MPUやFPGA用電源として宇宙用耐放射線性POLの開発を行い、宇宙用として世界最高クラスの効率・サイズのPOLを開発することができました。また、開発したPOLに対して各種試験を実施し、宇宙用としての信頼性・耐環境性を有することを確認しました。今後はJAXA認定部品として広く宇宙機に使用されるものと考えています。

このPOL開発については、JAXA委託研究「宇宙用POL電源の開発」の下で実施されました。このような開発の機会を与えていただき、ご指導・ご鞭撻を賜りましたJAXA関係各位に深く感謝いたします。

執筆者プロフィール

矢野 善之
独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

池田 直美
独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

鈴木 隆博
日本アビオニクス
情報システム事業部
第二技術部

中村 正夫
日本アビオニクス
情報システム事業部
第二技術部

谷代 智寿
福島アビオニクス
技術部

中谷 直人
日本アビオニクス
情報システム事業部
第二技術部

NEC 技報のご案内

NEC 技報の論文をご覧くださいありがとうございます。
ご興味がありましたら、関連する他の論文もご覧ください。

NEC技報WEBサイトはこちら

NEC技報(日本語)

NEC Technical Journal(英語)

Vol.64 No.1 宇宙特集

特別寄稿：宇宙ソリューションで社会に貢献する時代へ
宇宙特集によせて
宇宙事業ビジョンとロードマップ
NECのグローバルな宇宙ソリューション事業への取り組み

◆ 特集論文

ロードマップ実現に向けた取り組み

宇宙技術とIT・ネットワーク技術の融合
宇宙分野におけるグローバル市場への参入戦略
「宇宙利用」のためのサービス事業の推進
先進的宇宙システム「ASNARO」の開発

ロードマップの実現を支える技術と製品（人工衛星/宇宙ステーション）

国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう（JEM）」の開発
金星探査機「あかつき」の開発
小型ソーラー電力セイル「IKAROS」の開発
月周回衛星「かぐや」の開発
地球観測衛星（陸域観測技術衛星）「だいち」の開発
超高速インターネット衛星「きずな」の開発
総合宇宙利用システムの普及を促進する小型SAR衛星技術

ロードマップの実現を支える技術と製品（衛星地上システム）

衛星運用を支える地上システム
衛星データの利用を促進する画像処理システム

ロードマップの実現を支える技術と製品（衛星バス）

リモートセンシング事業を迅速に立ち上げる標準プラットフォーム「NEXTAR」
衛星機器を構成する標準コンポーネント

ロードマップの実現を支える技術と製品（通信）

衛星通信を支える通信技術
世界で活躍する衛星搭載用中継機器

ロードマップの実現を支える技術と製品（観測センサと応用技術）

観測衛星「いぶき」を支えた光学センサ技術と展望
全地球上の雨と雲を観測する電波センサ技術
リモートセンシングデータの向上を実現するSAR画像処理技術
衛星画像を活用した産業廃棄物監視システム

ロードマップの実現を支える技術と製品（基盤技術）

宇宙技術を支える基盤技術や開発プロセス
月惑星探査を支える軌道計画と要素技術
宇宙用耐放射線性POL DC/DCコンバータの開発
宇宙開発向けプリント配線板の認定状況と今後の展開

ロードマップの実現を支える技術と製品（誘導制御計算機）

ロケット用誘導制御計算機の変遷と展望

小惑星探査機「はやぶさ」

小惑星探査機「はやぶさ」の開発と成果

◆ NEC Information

NEWS

NEC C&C財団25周年記念賞表彰式開催



Vol.64 No.1
(2011年3月)

特集TOP