

## 化合物多接合太陽電池の高効率化と応用

High Efficiency Technology and Application of Multi-Junction Compound Semiconductor Solar Cells

鷲尾 英俊\* 十楚 博行\*

Hidetoshi Washio Hiroyuki Juso

化合物太陽電池とは、現在の主流であるシリコンを材料として用いた太陽電池と異なり、インジウムやガリウムなど、2種類以上の元素からなる化合物半導体を材料とした光吸収層を持つ変換効率の高い太陽電池で、主に人工衛星に使用されています。当社は2000年から、光吸収層を3層に積み重ねて高効率化を実現する「化合物3接合型太陽電池」の研究開発を進めています。近年の高効率化技術とその応用について報告します。

Compound semiconductor solar cells have the light absorption layers composed of two or more elements such as Gallium and Indium. This type of solar cells show a higher conversion efficiency comparing to the conventional crystal silicon solar cells, and are mainly used for the power source of a satellite.

Sharp has been developed “triple-junction compound semiconductor solar cell” having three light absorption layers since 2000. Progress of high efficiency technologies and applications of multi-junction compound semiconductor solar cells in recent years are described in this report.

### 1. 多接合型太陽電池

結晶シリコン型太陽電池等の単体の材料で構成される太陽電池は、幅広い波長分布を有する太陽光エネルギーを高効率で電気エネルギーに変換するには限界がある。この課題を解決するために複数の材料を積層した多接合型太陽電池の開発が実施されている。このような多接合型太陽電池のなかでも、構成材料の組成比を制御することによりさまざまなバンドギャップエネルギーの半導体を任意に構成でき、かつ、高品質の単結晶膜の形成が可能なⅢ-V族の化合物半導体は太陽電池の高効率化に有利である。計算で求めた化合物多接合型太陽電池の変換効率の理論値は、2種類の材料を重ねた2接合で42%、3接合で47%、6接合で61%である。さらに、レンズなどを使って太陽光を1000倍に集光すると、それぞれ50%、56%、72%まで高まる。接合数増で変換効率は向上するが、

技術開発の困難さ、多層化による製造コスト増等の課題から現在は当社を含む各社の開発は3~4接合が中心である。高効率化が期待できる化合物多接合型太陽電池だが、高価な単結晶基板上に30~40層の単結晶薄膜をMOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition/有機金属気相成長) 法を用いて形成し製造することから、一般的な結晶シリコン型太陽電池等と比較して高価であることが課題である。このため現時点では、実用化されているのは人工衛星などの宇宙用途が中心である。一方で高効率のメリットを生かしながら、高コストのデメリットを解消するためにセル面積を小さくすることが可能な集光型太陽電池(レンズやミラーで太陽光を集め焦点を結ぶ場所に太陽電池を配置し発電を行うシステム)への適用も徐々に増加しはじめている。

### 2. 高効率化への取組

#### 2.1 非集光型太陽電池

現在、既に人工衛星の電源として実用化されているⅢ-V族多接合型太陽電池は、Ge基板上にエピタキシャル成長した単結晶薄膜からなる $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}/\text{Ge}$ 構造の3接合型太陽電池である。図1-①に示すように、InGaP (1.88eV) トップセルおよびInGaAs (1.40eV) ミドルセルの格子間隔がGe (0.67eV) ボトムセル(基板)の格子間隔とほぼ一致した格子整合型(Lattice-Match (LM) 構造)の太陽電池である。3つの太陽電池セルが直列に接続されているため、電圧はトップとミドル、ボトムの3つのセルの電圧の和になるが、電流は最も小さいセルに制限される。したがって高効率化のために、トップとミドルで発生する電流を整合させる工夫がなされているが、Geボトムセルについては発生する電流の一部しか利用でき

ていない。それでも変換効率は量産レベルで宇宙光 (AM0スペクトル) で約29%, 地上光 (AM1.5Gスペクトル) で約31%であり, 結晶シリコン型太陽電池の研究開発レベルの最高値である25.6% (地上光 AM1.5Gスペクトル) をも上回っている。

上述の格子整合系3接合構造では, ボトムセルのバンドギャップが小さ過ぎることから, ボトムセルで発生する光電流がトップセルおよびミドルセルで発生する光電流より1.8倍程度も大きく, 3接合セルの短絡電流値はトップセルおよびミドルセルの発生電流で制限されており, ボトムセルで発生した余分な電流は電力として取り出すことができない。

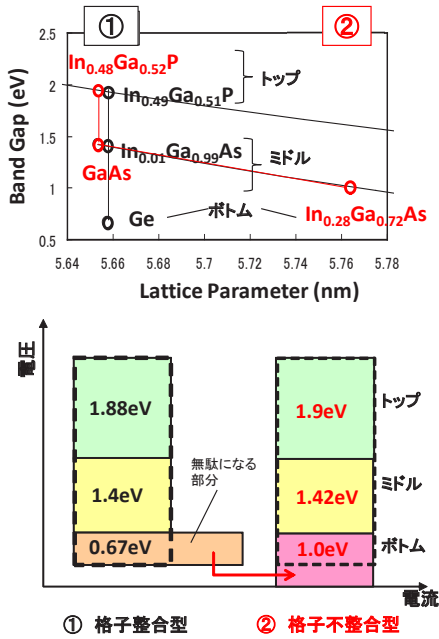


図1 格子定数と電気特性イメージ  
Fig. 1 Lattice constant and electrical specification image.

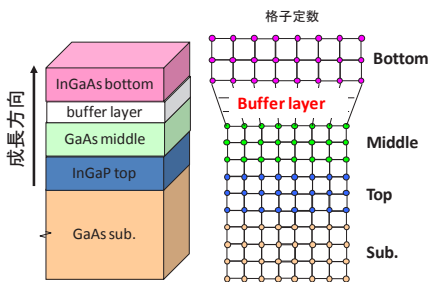


図2 逆積み太陽電池の構造  
Fig. 2 Structure of IMM cell.

い。つまり, 格子整合系3接合構造では, 電流バランスの観点からバンドギャップの組合せは最適ではない。そこで, ボトムセルの材料として電流値をトップセル及びミドルセルとバランスするバンドギャップの大きい材料を用いることで電流を下げることなく, 電圧を上げることでより変換効率を向上させるアプローチが考えられる。このアプローチとして当社では図1-②に示すようにボトムセルを従来のGe (0.67eV) からInGaAs (1.0eV) に変更した構造での開発を行っている。この場合はボトムセル (InGaAs 1.0eV) の格子定数がGaAs基板もしくはGe基板と約2%異なるため基板上に直

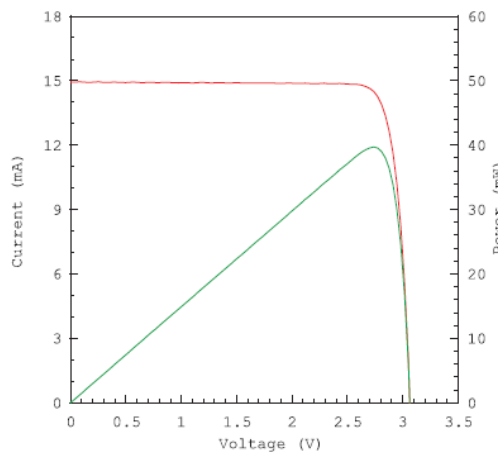
接高品質なボトムセルを成長することができないために, ボトムセル⇒ミドルセル⇒トップセルの順で成長するとミドルセルおよびトップセルの結晶品質が低下する。そこで通常とは逆の順序で, トップセルから順に成長し最後にボトムセルを成長することで, 格子整合系のトップおよびミドルセルの高品質結晶を維持するようにした。また, ミドルセルとボトムセルの間には格子定数を段階的に変化させるためのバッファ層を形成している。図2に示すこのような構造は逆積み変成系との意味で, Invert-Metamorphic (IMM) 構造と呼ばれる。通常の構造では太陽電池としての受光面は成長後の最上

表1 当社開発の化合物太陽電池の変換効率の推移

Table 1 History of conversion efficiency of compound semiconductor solar cell developed by Sharp.

測定日	セル面積 (cm <sup>2</sup> )	Isc (mA)	Jsc (mA)	Voc (V)	FF (%)	Eff (%)	改善点
2009.9.2	0.880	12.27	13.94	3.012	85.3	35.8	-
2011.9.2	0.891	12.52	14.05	3.006	87.5	36.9	FF向上 トンネル抵抗低減
2012.2.3	1.046	15.23	14.56	3.015	85.5	37.5	Jsc向上 反射防止膜最適化
2012.9.18	1.047	15.25	14.57	3.014	86.0	37.7	Jsc向上 InGaPトップセル窓層組成最適化
2013.2.20	1.047	14.94	14.27	3.065	86.7	37.9	Voc向上 InGaAsボトムセル高Eg化

I-V CURVE  
IEC60904-3Ed.2 1.047 cm<sup>2</sup>(aperture area) WHSS



Date : 20 Feb 2013  
Data No : SC2156-01  
Sample No : SC2156  
Repeat Times : 9

Isc 14.94 mA  
Voc 3.065 V  
Pmax 39.70 mW  
Ipmx 14.49 mA  
Vpmax 2.740 V  
F.F. 86.7 %  
Eff (ap) 37.9 %  
DTemp. 25.0 °C  
MTemp. 24.9 °C  
DIrr. 100.0 mW/cm<sup>2</sup>  
MIrr. 99.9 mW/cm<sup>2</sup> (top)  
99.9 mW/cm<sup>2</sup> (middle)  
99.8 mW/cm<sup>2</sup> (bottom)

Scan Mode  
Isc to Voc

図3 公的機関 (産業技術総合研究所) での測定結果

Fig. 3 Measurement result at public institution (AIST:National Institute of Advanced Industrial Science and Technology).

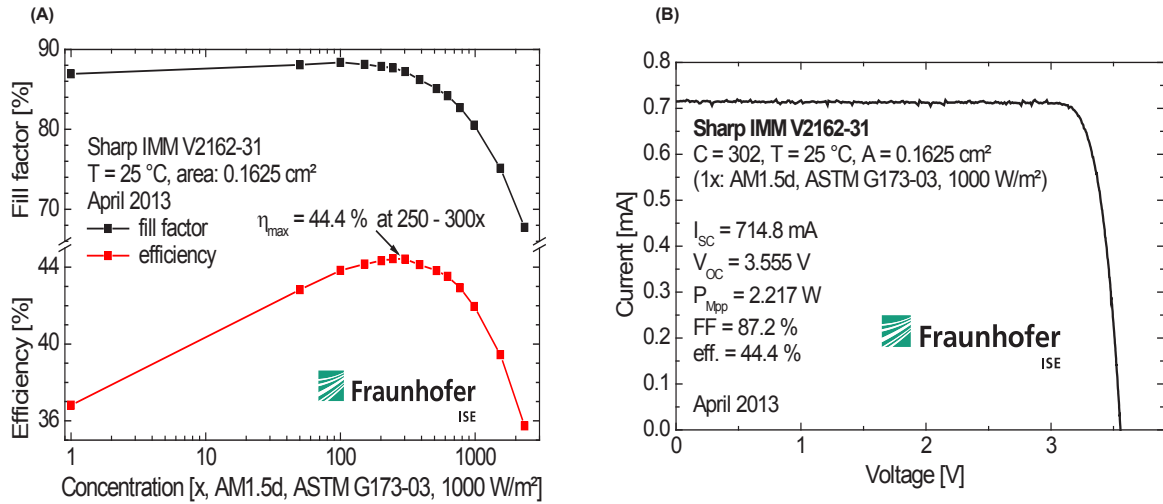


図4 集光型の公的機関(独Fraunhofer研)での測定結果  
 Fig. 4 Measurement result of concentration type (Fraunhofer -ISE).

面となるが、本構造では基板と接する面が受光面となるので、セル化を行うときに何らかの支持基板上に太陽電池部を転写する必要がある。当社は本構造で2009年9月に35.8%の変換効率を達成し、その後、表1および図3に示すように改良を加えて2013年3月に37.9%の変換効率を達成した(いずれも発表時は非集光型の太陽電池の中で変換効率が世界最高。2014年5月時点では米国spectrolab社が5接合型で38.8%を発表。3接合型では当社の記録が依然世界最高値)。変換効率向上の主な改善点はセル内部の直列抵抗の低減、セル表面の反射率低減、ボトム(InGaAs)セルの高品質化によるVocの向上などである。

## 2.2 集光型太陽電池

前項で説明したセル構造を使用し、集光下で発電すると2012年5月に43.5%, 2013年6月には図4に示すように44.4%を達成した(いずれも発表時は世界最高効率。2014年5月時点では4接合型で44.7%を独国Fraunhofer ISEを中心としたグループが発表)。集光型と非集光型で大きく異なる点は発電時に発生する電流密度が数百倍になる点である。電流密度が増加するとセル内の

直列抵抗の影響(電圧降下)による曲線因子の低下が大きくなることからセル内部の直列抵抗をいかに低減するかが課題となる。具体的には各セルを接続しているトンネル層、セル表面の窓層、表面電極とのコンタクト抵抗、表面電極の配線抵抗などである。

## 3. 応用

### 3.1 既存型宇宙用太陽電池

前述のように、現在人工衛星の電源として実用化されている太陽電池は図1-①に示すような格子整合型3接合構造を持ち、図5に示すような外観の太陽電池である。このセルは名刺大の大きさで、4インチウエハから2枚が製造でき、厚さは約150 μmである。衛星パドルに陰が生じた際には個々の太陽電池セルに逆バイアス電圧が印加されるが、太

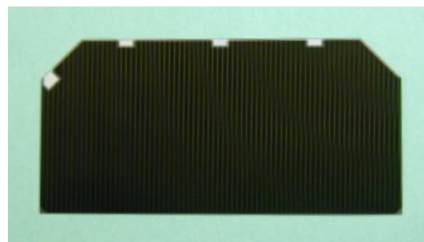


図5 宇宙用太陽電池セルの外観  
 Fig. 5 Appearance of space solar cell.

陽電池が破壊しないようにバイパスダイオードを接続している。また、セルの表面側には宇宙放射線や紫外線、電離気体などから太陽電池を保護する目的でカバーガラスを接着し、セルの裏面側は衛星パドルの筐体に使用されているアルミハニカムパネルに接着している。セル同士はインターコネクターを介して直列もしくは並列に接続している。図6には太陽電池パドルの外観とその断面構造図を示す。

世界の商用人工衛星は大型化&大電力化へ推移しているが、打上コストを下げるため、発電効率が良く、軽量で、収納性の良い太陽電池セルとパドルが求められている。

### 3.2 次世代宇宙用太陽電池

前述のIMM構造を持つ薄型太陽電池は、既存型太陽電池と比較して、Ge基板が存在しないため軽量、かつ、発電効率が高いため、将来の宇宙用太陽電池として有望である事から、現在宇宙航空研究開発機構(JAXA)とともに共同開発作業を進めている。図2にIMM構造を持つ薄型太陽電池の構造、図7に外観、表2には既存型と薄膜型太陽電池の特性値を示す。薄膜型セルも既存型セルと同様の形状であるが、セル厚



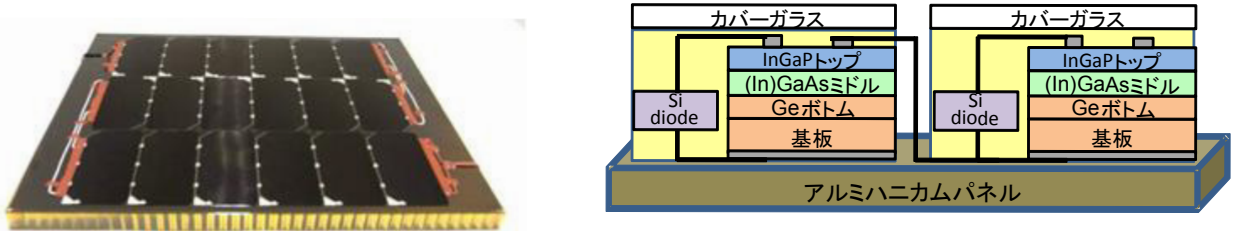


図6 宇宙用太陽電池パドルの外観と断面構造図  
Fig. 6 Appearance of space solar puddle and cross-sectional view.

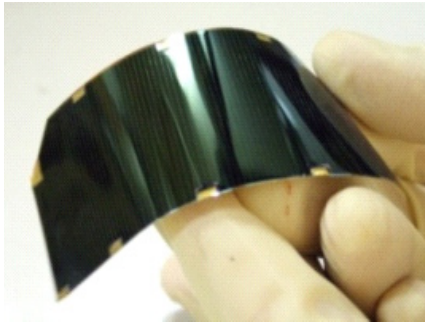


図7 宇宙用薄膜型太陽電池セルの外観  
Fig. 7 Appearance of thin film space solar cell.

さは既存型セルの1/7以下である。前述の通り、薄膜型太陽電池はボトムセルを改良しているため、既存型太陽電池よりもVoc値が向上しており、変換効率として30%を超える太陽電池が作製できている。また、宇宙環境では太陽電池セルに宇宙放射線が照射されるが、静止軌道上で放射線が10年程度照射されても、照射後の特性値は薄型化合物セルの方が既存型セルを上回る事が確認できた。

図8には薄膜型太陽電池を用い作製した太陽電池パドルの外観とその断面構造図を示す。図6に示す既存型パドルと異なる箇所は、セルの裏面をアルミハニカムパネルよりも

軽量のCFRPシートに接着している事である。既存型セルはフレキシブル性が無いため、フレキシブル性の有るCFRPシートに接着するとセルが割れてしまうが、薄膜型太陽電池にはフレキシブル性が有ることから、軽量のCFRPシートの採用が実現した。

表3には既存型太陽電池と薄膜型太陽電池を利用したパドルの出力重量比を示す。衛星軌道上での薄膜型太陽電池パドルの出力重量比7.14g/Wは既存型太陽電池パドル1.72g/Wの約4倍である。

薄膜型太陽電池セルは既存型セルと構造が大きく異なるため、セルレベルでは表4に示すような耐宇宙環境試験を実施している。各試験後のセル特性値の変動は許容範囲内であった事から、これらの試験結果により、静止軌道10年相当の信頼性が実証できた。

また、JAXAや国内主要衛星メーカーでは、打上時や衛星放出時、パドル展開時などを模擬した、引張り、曲げ、振動、衝撃、音響、耐放電、熱真空などの各種試験がパドルレベルで実施され、耐宇宙環境下でも使

用可能との判断がなされた。

図9には薄膜型太陽電池パドルを搭載した人工衛星SPRINT-A(ひさき)を示す。この衛星は惑星観測専用の宇宙望遠鏡を搭載して、2013年9月14日に鹿児島県内之浦宇宙空間観測所よりイプシロンロケットにより打上げられた。衛星本体一部である実験用モジュール(NESSIE)には、当社製の薄膜型太陽電池パドルが搭載され、現在宇宙空間で発電等の実証試験を実施中である。

図10には薄膜型太陽電池パドルの他の形態として、表面側のカバーガラスと裏面側のCFRPシートを、どちらもフィルム材料に置き換えたフィルムタイプ型パドルがある。前述の通り宇宙には宇宙放射線や紫外線が存在するため、それらに耐えるフィルム材料の探索が課題となるが、表裏面をフィルムにすることで更なる軽量化と収納性の向上が見込めるとともに、パドル内に割れる部材が存在しないため、将来的には宇宙ステーションや有人宇宙船などとのドッキング用衛星などに採用される可能性が高いと考えられる。

表2 宇宙用太陽電池セルと宇宙用薄膜型太陽電池セルの特性  
Table 2 Characteristics of space solar cell and thin film space solar cell.

(AM0光下, 2cmx2cmセルの測定値)

	初期出力値					放射線照射後出力値					出力保存率			
	Voc mV	Isc mA	Pmax mW	FF	$\eta$ %	Voc mV	Isc mA	Pmax mW	FF	$\eta$ %	Voc %	Isc %	Pmax %	F.F. %
既存化合物セル	2673.0	70.4	156.9	0.834	28.7	2392.3	68.1	137.3	0.842	25.1	89.5	96.8	87.5	101.0
薄膜型化合物セル	2999.0	67.1	172.0	0.854	30.5	2681.1	66.7	149.8	0.836	26.6	89.4	99.4	87.1	97.9

### 3.3 集光システム

化合物多接合型は高価なため前述したように現在では実用化が宇宙用途に限定されている。当面は高価な状態が続くと予想される。このため、太陽電池セルの使用量を削減できる集光システムとの組み合わせが重要になると考える。

現状の化合物多接合型太陽電池の生産コストを想定した場合、実用化のためには集光倍率500~1000倍が必要になる。集光方式はレンズやミラーなどがあり、システムサイズも3k~60kWとさまざまに各社が開発を進めている。集光システムは日射時間が年間2000時間以上で、水蒸気などで光が散乱されることなく地上に届く直達光が豊富な地域で有効なので、今後太陽電池の市場として大きく期待できる南米やアフリカ、中近東などにフィットする商品と期待される。

### 4. 今後

#### 4.1 低コスト化

前述したIMM構造の化合物太陽電池は基板上に成長したエピタキシャル層のみが太陽電池として機能するので、成長に使用した基板は不要となる。そこで太陽電池層をGaAs基板より分離し、支持基板に転写した後、GaAs基板を成長用に再利用することで、基板のコストが削減できる。太陽電池層は10 μm以下の極薄層であるため、太陽電池の材料使用量を大幅に削減することが可能となる。

#### 4.2 4接合化による高効率化

バンドギャップが0.65eV以下の材料（格子不整合材料もしくは多結晶材料等）から成る太陽電池を、を逆積み方法+転写プロセスによって、3接合に追加することで4接合が可能となり。非集光で40%、集光時50%の高効率化が期待される。

### 5. まとめ

化合物多接合太陽電池は結晶シリコン型太陽電池よりも変換効率が高いため、宇宙用や集光用などで実用化が進み、更なる特性向上のため、世界の各研究機関や製造メーカーにて研究開発が進められている。低コスト化の研究開発を進めば、利用される範囲も拡大するものと予測している。

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）および宇宙航空研究開発機構（JAXA）から委託され実施したものである。

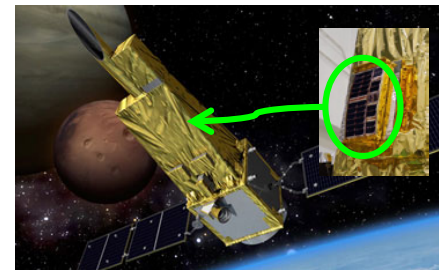


図9 人工衛星SPRINT-A(ひさき)  
Fig. 9 Satellite SPRINT-A.

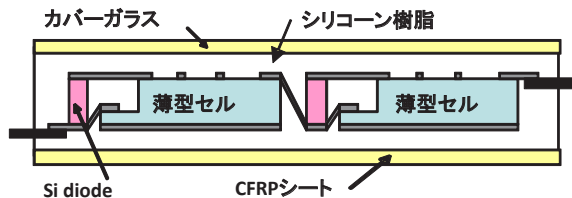
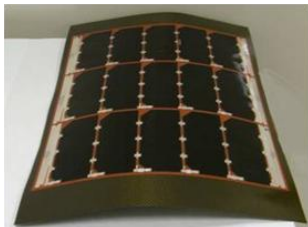


図8 宇宙用薄膜ガラス型太陽電池パドルの外観と断面構造図  
Fig. 8 Appearance of thin film space solar piddle [grass type] and cross-sectional view.

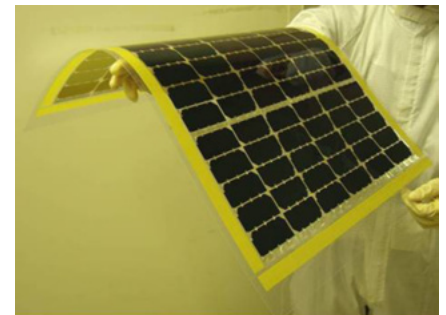


図10 宇宙用薄膜フィルム型太陽電池パドルの外観  
Fig. 10 Appearance of thin film space solar piddle [film type].

表3 宇宙用太陽電池パドルと宇宙用薄膜型太陽電池パドルの重量

Table 3 Power ratio by weight of space solar piddle and thin film space solar piddle.

セルタイプ	(AM0光下での測定値)	
	既存型3接合セル	薄型3接合セル
変換効率(AM0)	28.5%	30.0%
パドルタイプ	アルミハニカム	CFRPシート
出力/重量比	7.14g/W	1.72g/W

表4 耐宇宙環境試験

Table 4 Reliability tests on new type solar piddle.

試験名称	試験条件
熱衝撃試験	温度範囲-180~+100°C, 1000サイクル
耐湿試験	65°C, 90%, 720時間
高温真空試験	1.3x10 <sup>-3</sup> Pa以下, 140°C, 168時間
放射線照射試験	1MeV電子線 照射量1×10 <sup>15</sup> e/cm <sup>2</sup>
非動作寿命試験	150°C, 1000時間
耐逆方向試験	150°C, 1000時間, -0.5A印加