

# 宇宙用単結晶シリコン太陽電池

## Single Crystal Silicon Solar Cells for Space Use

上村 邦夫\*      佐賀 達男\*      松谷 壽信\*  
Kunio Kamimura      Tatsuo Saga      Toshinobu Matsutani

### 要 旨

人工衛星の電源として用いられる単結晶シリコン太陽電池の生産を行ってきた。開発当初は、寸法が2 cm角でPN接合のみのシンプルな構造をしたConv.型太陽電池で宇宙環境における太陽光(AM0)の条件下で太陽光を電力に変換する効率(変換効率)が10%程度であった。現在量産されている太陽電池は、寸法が4 cm × 7 cmと大きく、複雑な構造のNRS/BSF型太陽電池で変換効率も17%に向上している。

We have manufactured single crystal silicon solar cells as a power source for satellites. Once in the first stage, we made conventional type cells, 2 cm square each, with a conversion efficiency of 10% under AM0 irradiation. Now, NRS/BSF solar cells, each measures 4 cm by 7 cm, replace them with their improved efficiency of 17%.

### まえがき

高度数百 km から数万 km の高度を周回し、科学観測、気象観測、放送・通信の中継等を行う人工衛星は、太陽光を電力に変換する太陽電池を電源としている。

宇宙用太陽電池は、高出力の性能とあわせ一度軌道に打ち上げられると修理や部品交換が非常に困難なため、厳しい宇宙環境においても故障なく機能する高い信頼性が要求される。太陽電池の開発当初、変換効率は、10%程度であり、厚さが300 μmで、寸法も2 cm角と小さかったが、現在量産している太陽電池は、厚さが100 μmで、寸法が約4 cm × 7 cmで変換効率が17%と大きく改善された。また、人工衛星の寿命も最近では、15年と長くなり寿命末期の放射線量に換算される1 MeVのエネルギーの電子線1E15e/cm<sup>2</sup>照射での変換効率も当初の8%から12.5%に改善された。

宇宙用太陽電池に要求される性能及び現在までの太陽電池開発の経緯について、搭載された国内衛星の主な目的や写真等と合わせ紹介する。

### 1. 宇宙用太陽電池に要求される性能

宇宙用として用いられる太陽電池は、10<sup>6</sup>Pa(パスカル)以下の高真空下、太陽フレアや地磁気に補足される放射線にさらされ、地球周回での陰と日なたの繰り返しによる-100 ~ +100にも及ぶ温度サイクルを受けながらも動作する事が求められる。その材料、構造などの基本設計は地上用や民生用太陽電池のそれと大差がないが、前述のような特殊環境下で使用されるために独特の特性が要求される。以下に宇宙用太陽電池に要求される主な特性を挙げる。

#### (1) 高変換効率と軽量性

太陽電池の開発の当初より高効率化、軽量化の強化がはかられてきた。近年各国のロケットの打上げ能力は大きくなってきているが、人工衛星のミッション自体も複雑化し、電力消費量および衛星重量も増大の傾向にある。従って太陽電池に、よりいっそう大きい発生電力と軽量化が求められている。

#### (2) 優れた熱光学特性

太陽電池は、素子温度が高くなると発生電力が低下する特性を有している。地上環境では空気を媒体とした熱の伝達が太陽電池を冷却する役割を果たすのに対し、宇宙の高真空環境下ではそのような熱放散が行われない。従って太陽電池の温度上昇を防ぐには、発電に寄与しない不要な太陽光を吸収せず太陽電池自体の発熱を抑えることと、発生した熱を表面からの熱放射により外部に逃がす特性に優れていることが要求される。太陽から放射される光エネルギーの内、太陽電池に吸収される割合を太陽光吸収率(Solar Absorptance:  $\alpha_s$ )と定義され、太陽電池の構造、厚さ、カバーガラスのコーティング等によって決まる。実用されている太陽電池の場合、約0.7 ~ 0.9である。熱放散については、カバーガラスの輻射率(Emissance:  $\epsilon_s$ )、約0.8)により決まり、 $\alpha_s$ との比  $\alpha_s/\epsilon_s$  が小さくなるほど、太陽電池の電気出力が大きくなる。

\* 電子部品事業本部 ソーラーシステム事業部 第1技術部

(3) 耐放射線性

人工衛星の軌道の宇宙空間は、地上にない材料を劣化させる厳しい環境である。特に太陽から飛んできて直接および地磁気に補足された荷電粒子等の放射線の被爆による電気特性の低下の影響が大きい。地磁気により補足されている荷電粒子の特に密度の高いバンアレン帯と呼ばれる空間があり、科学観測を目的とする人工衛星は、敢えてこの軌道を選んで飛翔することもある。放射線被爆により生じるイオン化損傷・バルク損傷による特性劣化を防ぐため、放射線損傷を受けにくく、また損傷が生じてもその影響を受けにくい構造とする事が望まれる。基板の薄型化や表面に逆ピラミッドを形成することにより、放射線による損傷の影響を受けにくく耐放射線性を向上することができる。

(4) 耐環境性

太陽電池は、表1に示す耐環境性を評価試験が要求される。耐放射線性をはじめ、高温高真空、熱サイクル、紫外線等の厳しい宇宙環境を模擬した試験だけでなく、打ち上げまでの地上環境を模擬した耐湿試験やこれらを組合わせたシリーズ試験が含まれている。

(5) 高信頼性

人工衛星は、スペースシャトルによる回収修理等を除き、通常打ち上げ後の保守は不可能なため搭載部品に対して厳しい信頼性が要求される。特に太陽電池の故障は、人工衛星そのものが機能なくなる致命的な重要故障となるため、通常故障率は1 Fit以下の高いレベルが要求される。このため、開発から生産、出荷まで一連の業務について信頼性保証プログラム計画書を基に品質、信頼性の管理を効果的に行っている。

表1 主要な評価試験

Table 1 Summary of evaluation tests.

試験項目	試験内容	要求
熱衝撃試験	-190 ~ +180 , 10サイクル -190 ~ +100 , 2000サイクル	外觀, 電気特性 プルタブ強度 5N以上
耐湿試験	65 , 90%RH, 1,000時間	外觀, 電気特性
高温真空試験	180 , 6 × 10 <sup>-3</sup> Pa: 2時間 140 , 6 × 10 <sup>-3</sup> Pa: 166時間	外觀, 電気特性
耐温・熱衝撃試験	[ 65 , 90%RH, 96時間 ] + [ -190 ~ +100 , 100サイクル ]	外觀, 電気特性
耐温・熱衝撃・高温真空試験	[ 65 , 90%RH, 96時間 ] + [ -190 ~ +180 , 10サイクル ] + [ -190 ~ +100 , 1800サイクル ] + [ 180 , 6 × 10 <sup>-3</sup> Pa: 2時間 ] 140 , 6 × 10 <sup>-3</sup> Pa: 166時間 ]	外觀, 電気特性
放射線照射試験	1MeV電子線 3 × 10 <sup>13</sup> , 3 × 10 <sup>14</sup> , 1 × 10 <sup>15</sup> , 3 × 10 <sup>15</sup> e/cm <sup>2</sup>	外觀, 電気特性
非動作寿命試験	150 , 1,000時間	外觀, 電気特性
温度特性	-100 ~ +100	外觀, 電気特性
紫外線照射試験	2,500UV sun-hour	外觀, 電気特性

(6) 経済性

以上述べた(1)~(5)は、いずれも製造コスト増の要因となるものだが、通信・放送分野における商業衛星の普及に伴って、経済性も重要な要素となってきた。ガリウム砒素等の化合物半導体による太陽電池は優れた特性を有するものの、高価であることと取り扱いの難しさより民生分野の人工衛星には、シリコン太陽電池が多く使用されている。

2. 宇宙用太陽電池の開発の歴史

これまでに当社で開発してきた太陽電池について変換効率と使用した国内の衛星名とを併記し図1に示す。また、太陽電池の構造図を図2に示す。

当初開発された太陽電池は、Conv.型と呼ばれている構造でP型の単結晶シリコン基板にPN接合が設けられたシンプルな構造をしており、寸法も2cm × 2cmと小さく、厚さは300~400μmと厚く変換効率は、10%程度であった。Conv.型太陽電池は、宇宙開発事業団(NASDA: National Space Development Agency of Japan)の電離層観測衛星ISS(愛称「うめ」、写真1)、宇宙科学研究所(ISAS: The Institute of Space and Astronautical Science)の科学観測衛星EXOS-A(愛称「きょっこう」)等に搭載された。

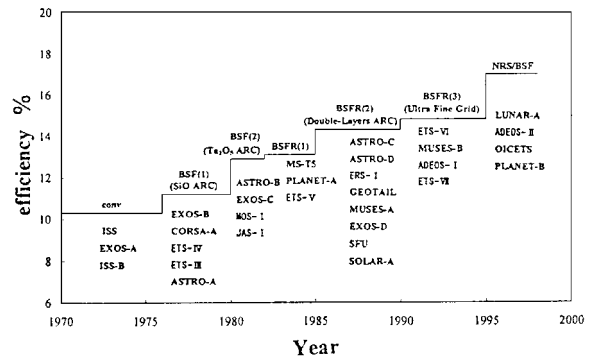


図1 太陽電池の交換効率の変遷

Fig. 1 The change of Si cell η for japanese satellite.

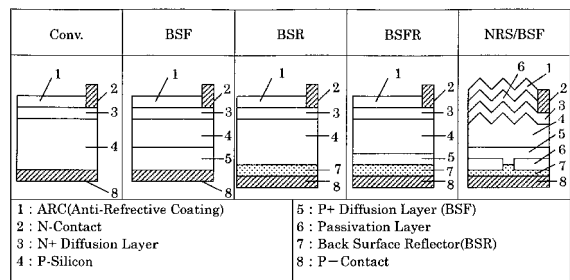
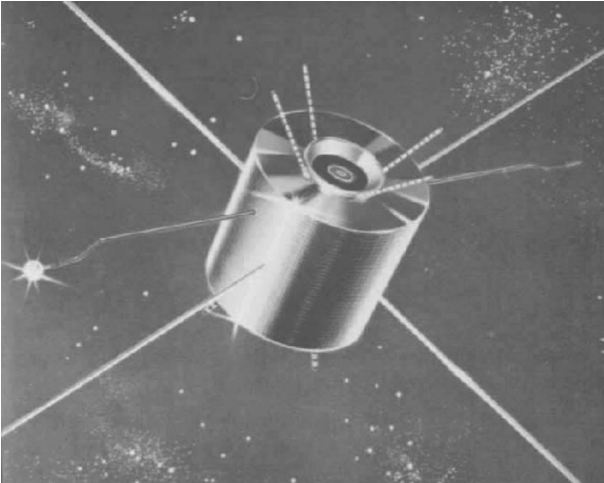


図2 宇宙用太陽電池の構造図

Fig. 2 Structure of single crystal solar cell.



宇宙開発事業団写真提供

写真1 電離層観測衛星 ISS(愛称「うめ」)

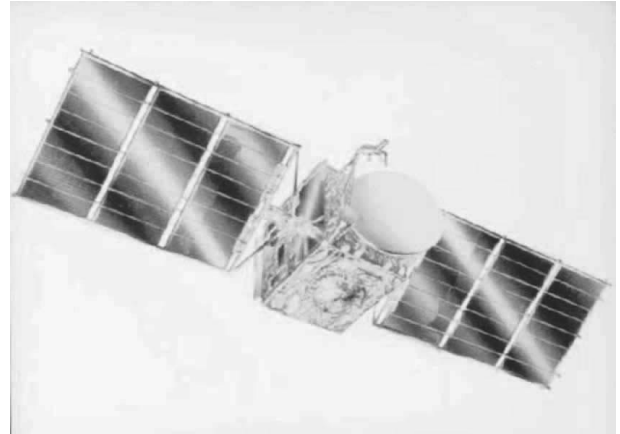
Photo 1 Ionosphere sounding satellite (ISS).

太陽電池の裏面側にP<sup>+</sup>拡散層を設け、PP<sup>+</sup>の電界によりキャリアの再結合による損失を小さくしたBSF(Back Surface Field)型太陽電池を開発した。Conv.型と比べ、長波長の光に対する感度が改善され、短絡電流が増え、ダイオードの飽和電流が減少し開放電圧が増大する。BSFにより変換効率は、11%を超えるようになった。BSF型太陽電池は、NASDAの技術試験衛星ETS- (愛称「きく4号」)及び技術試験衛星ETS- (愛称「きく3号」)に、またISASの磁気圏観測衛星EXOS-B(愛称「じきけん」)、X線天文観測衛星CORSA-A(愛称「はくちょう」)及び太陽X線観測衛星ASTRO-A(愛称「ひのと」)に搭載された。

次に反射防止膜を、それまでのSiO<sub>2</sub>から、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>に変更し変換効率を13%程度まで改善した。この改良BSF型太陽電池は、NASDAの海洋観測衛星MOS-1(愛称「もも1号」)、ISASのX線観測衛星ASTRO-B(愛称「てんま」)、地球科学観測衛星EXOS-C(愛称「おおぞら」)等に搭載された。

次に太陽電池のシリコン基板裏面にAlの高反射層を設け、裏面に到達した光を反射させ発電効率を向上させるとともに発電に寄与しない長い波長光を太陽電池の表面から放出させ、温度上昇を抑えるBSR(Back Surface Reflector)構造が開発された。先のBSF構造と合わせもつBSFR(Back Surface Field and Reflector)構造の太陽電池は、ISASの試験衛星MS-T5(愛称「さきがけ」)、惑星及びハレー彗星の観測衛星PLANET-A(愛称「すいせい」)、及び写真2のNASDAの大型静止3軸実験衛星ETS-V(愛称「きく5号」)に搭載された。MS-T5では、セル寸法が従来の2cm×2cmと合わせ2cm×6cmの大きなセルも併用された。

反射防止膜の改善では、それまでの単層からTiO<sub>2</sub>/



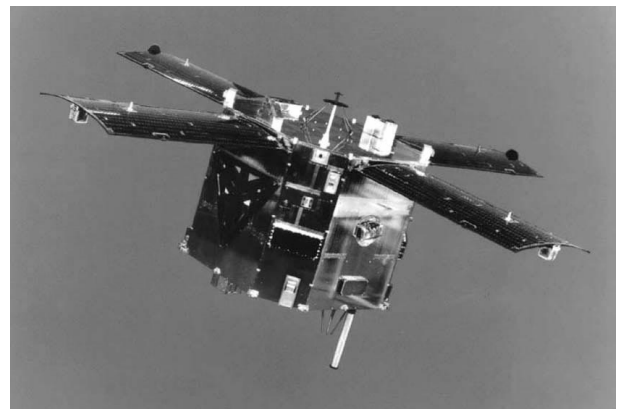
宇宙開発事業団写真提供

写真2 実験衛星 ETS-V(愛称「きく5号」)

Photo 2 Engineering test satellite-V (ETS-V).

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>による2層にすることで表面の反射を低減することができ、変換効率で14%を達成した。また、BSFR型は、シリコン基板厚さを薄くしても変換効率の低下が少なく、耐放射線性が改善できることから国内の衛星には薄いBSFR型太陽電池が多く用いられるようになった。これまでの太陽電池の基板厚さが280μm厚さであったのに対し、ISASの銀河観測衛星ASTRO-C(愛称「ぎんが」)は200μm厚さ、オーロラ観測衛星EXOS-D(愛称「あけぼの」:写真3)は100μm厚さ、X線観測衛星ASTRO-D(愛称「あすか」:写真4)、磁気圏尾部観測衛星GEOTAIL、月スイングバイ実験衛星MUSES-A(愛称「ひてん」:写真5)、太陽観測衛星SOLAR-A(愛称「ようこう」)及びNASDAの地球資源探査衛星JERS-1等(愛称「ふよう1号」:写真6)は50μm厚さの太陽電池が搭載された。

表の櫛型電極は、薄い金属板にスリットを設けたメタルマスクを介し電極を蒸着する方法で形成され、数十μm幅が限界であったが、ホトリソグラフィ技術の導



文部省宇宙科学研究所写真提供

写真3 第12号科学衛星 EXOS-D(愛称「あけぼの」)

Photo 3 12th scientific satellite D (EXOS-D).

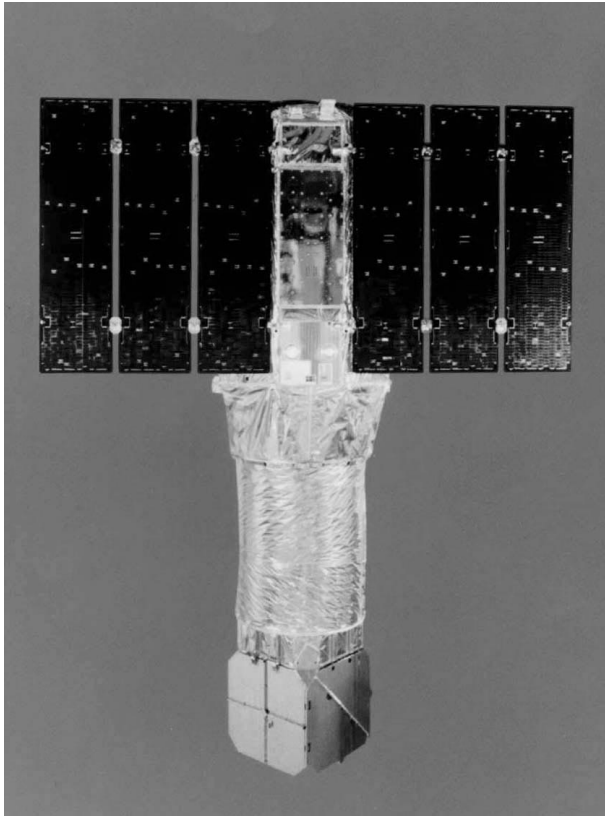


写真4 第15号科学衛星ASTRO-D(愛称「あすか」)  
Photo 4 15th scientific satellite (ASTRO-D).

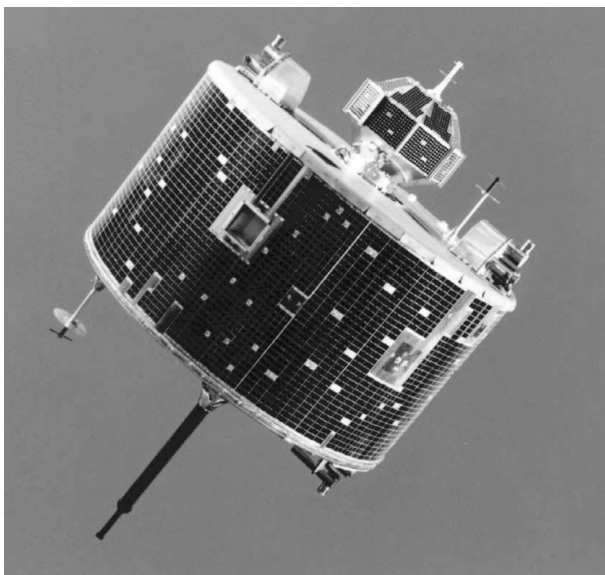


写真5 第13号科学衛星MUSES-A(愛称「ひてん」)  
Photo 5 13th scientific satellite (MUSES-A).

入により、数 $\mu\text{m}$ の幅まで細くすることができ、メタルマスク方式に比べ6%程度の改善ができた。この電極を改善した太陽電池は、NASDAの2トン級大型静



写真6 地球資源探査衛星JERS-1(愛称「ふよう1号」)  
Photo 6 Japanese earth resources satellite-1 (JERS-1).

止3軸衛星バスの実証技術試験衛星ETS- (愛称「きく6号」), ISASの大型精密展開機構実験衛星MUSES-B(愛称「はるか」: 写真7), NASDAの地球観測プラットフォーム技術衛星ADEOS等から採用された。

更に高効率化と耐放射線性の向上のため、表面に $1\text{mm}^2$ あたり2500個の逆ピラミッドを形成し、表裏両面に酸化膜によるパッシベーション膜を形成したNRS/BSF (Non Reflective Surface and Back Surface Field and Reflector) 型太陽電池を開発した。変換効率は約17%で、静止軌道上15年に相当する $1\text{MeV}$ のエネルギーの電子線を $1\text{E}15\text{e}/\text{cm}^2$ 照射された後でも12.5%の変換効率を維持しており、従来の同じ厚さの $100\mu\text{m}$ BSFR型太陽電池と比べ21%の向上となった。NASDAの環境観測技術衛星ADEOS- (写真8), 光衛星間通信実験衛星OICETS及びISASの月探査衛星LUNAR-A, 火星探査衛星PLANET-B(写真9)に搭載される。この太陽電池のシリコン基板厚さは、 $100\mu\text{m}$ が標準であるが、LUNAR-Aでは、軽量化のため $75\mu\text{m}$ 厚さが採用された。このNRS/BSF型太陽電池は、高効率のGaAsセルと比較してコストパフォーマンスに優れており、海外の商業衛星等にも多数採用されている。

一方、海外の商用衛星の中には、コストを重視する場合があります、シンプルな構造のBSR型太陽電池も採用されている。

### 3. シリコン太陽電池の技術

現在、量産しているNRS/BSF型太陽電池に用いられている要素技術について紹介する。



写真7 第16号科学衛星 MUSES-B(愛称「はるか」)  
Photo 7 16th scientific satellite (MUSES-B).

### (1) 薄型化技術

宇宙用太陽電池には、軽量、高耐放射線性が求められる。現在のシリコン太陽電池では、最小50 $\mu\text{m}$ までの薄型化が達成されている。一般に単結晶シリコンウェハは、スライシング、ラッピング、ポリッシング等の工程で割れ不良が多発するため200 $\mu\text{m}$ 程度以下の厚さにすることはコスト上不利である。従って、太陽電池の製造工程では、200 $\mu\text{m}$ 程度の厚さのシリコンウェハから所定の厚さまで薄型化する工程を設けて



宇宙開発事業団写真提供

写真8 環境観測技術衛星 ADEOS-II  
Photo 8 Advanced earth observing satellite-II (ADEOS-II).



文部省宇宙科学研究所写真提供

写真9 第18号科学衛星 PLANET-B  
Photo 9 18th scientific satellite A (PLANET-B).

いる。この薄型化の工程では、水酸化ナトリウム等のアルカリ系薬品を用い、ウェハ全体が均一な厚さになるよう管理している。

### (2) NRS(無反射表面形状)形成技術

シリコン表面での反射を小さく、耐放射線性をより向上させるために1 $\text{mm}^2$ 当たり2500個の規則正しい逆ピラミッドを形成しつつ、櫛型電極形成部を平坦にするために、ホトリソグラフィ技術とアルカリ系薬品によるシリコンの結晶異方性エッチング技術を利用する。

### (3) 接合技術

大気圏外の太陽光(AM0)は、大気により短波長が吸収される地上光に比べ400~500nm近辺の短波長光が強く、この波長の光はシリコン基板のごく表面

近傍で吸収される。このため、PN接合を非常に浅く形成することで、これらの光により励起されたキャリアを有効に電気出力として取出すことができる。一般に地上用太陽電池のPN接合深さは、1  $\mu\text{m}$ 前後であるのに対し、宇宙用太陽電池は0.1  $\mu\text{m}$ で形成される。高温のN型の不純物雰囲気中にウェハを入れ、表面より熱拡散させてPN接合を形成する。

また、BSF構造のため太陽電池の裏側には、ボロンを拡散しP<sup>+</sup>層を形成する。

#### (4) 表面安定化技術

太陽電池のシリコン表面は、不安定で発生したキャリアが再結合し易い(表面再結合速度の大きい)状態となっている。BSF/NRS型太陽電池は、表面を安定化し、キャリアの表面再結合損失を抑えることにより変換効率を改善している。安定化の方法として、表面に酸化膜を形成するSiO<sub>2</sub>パッシベーションを行っている。

#### (5) 電極技術

表面電極(N電極)は受光面から基板への光の入射を妨げないようできるだけ面積を小さく、受光面全体から有効に電流を収集するため櫛型電極が用いられる。櫛の幅を細く本数を多くし、また厚くすることにより、表面層の直列抵抗成分を減少させ、より高出力を取出すことができる。これは、十数 $\mu\text{m}$ 厚さの感光性樹脂を塗布したウェハに電極パターンを描いたガラスマスクのパターンを転写し(ホトリソグラフィ技術)、現像したものに、電極材料を真空蒸着する。蒸着した後に感光性樹脂を取り除くと不要な電極材料も取り除かれ、数 $\mu\text{m}$ の幅の櫛型電極が形成(リフトオフ技術)できる。このホトリソグラフィ技術とリフトオフ技術により、電極の微細化と高密度化は、大きく改善された。

電極材料は、真空蒸着装置によりTi、Pd、Agの順に蒸着する。最表面のAgが最も厚く4~10  $\mu\text{m}$ の厚さを有し、太陽電池の出力端子となるインターコネクタ(接続金具)の溶接法等による接続を可能にしている。Tiは、シリコン基板との導電性および密着性に優れており、TiとAgの間には、耐湿性向上のためのPdを設けている。また、裏面電極には、BSRの裏面反射膜となるAlも蒸着し、Al、Ti、Pd、Agの4層構造とする。

#### (6) 反射防止膜形成技術

太陽電池の表面には、光の反射を小さくするため反射防止膜が形成される。反射防止膜は、TiO<sub>x</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の2層構造で、電極と同様真空蒸着によって形成する。太陽電池の表面には、太陽電池の劣化を招く低エネルギー光子および350nm以下の極短波長を阻止す

るためシリコン樹脂によりカバーガラスを接着する。カバーガラスおよびシリコン樹脂の光学特性と放射線により劣化した寿命末期の太陽電池の分光感度特性を考慮し、最大出力が得られるよう反射防止膜の屈折率および膜厚の設計を行う。

電極および反射防止膜が真空蒸着された後、熱処理を行い、膜の緻密化、密着性を向上させている。

#### (7) CIC化技術

インターコネクタと呼ばれる30  $\mu\text{m}$ 厚さの銀箔の出力端子をN電極に溶接し、カバーガラスを接着した太陽電池をCIC(Connector and Coverglass Integrated Cell)という。インターコネクタは太陽電池のN電極にハンダまたは溶接により接続する。カバーガラスを接着する接着剤は、宇宙環境の高温真空下でもアウトガスが殆ど出ないシリコン樹脂が用いられる。カバーガラスは、放射線による変色のない石英または変色を防ぐためにセリウム(Ce)が添加されたガラスを用いる。

NRS/BSFセルには、太陽電池の光電変換に寄与しない短波長光をガラスの表面で、長波長光をガラス裏面で反射するBRR(Blue and Red Reflective)コーティング付のカバーガラスが、温度上昇を抑えるため使われる。

#### むすび

本稿に紹介したNRS/BSF型太陽電池は、現在、海外向衛星向等に4 cm x 7 cmの寸法のを毎月衛星2機分にあたる量産を行い、さらなる増産体制を確立しつつある。

一方、地球全体を数十~数百機の衛星を用いたネットワークで結ぶ低軌道衛星通信システムの運用が開始されようとしており人工衛星および太陽電池の需要は、急激に拡大している。今後の市場拡大とユーザの性能向上要求に応じるため変換効率、耐放射線性に代表される性能の向上および量産化技術の開発等を行い、引き続き宇宙開発に貢献していきたい。

#### 謝辞

本稿で紹介した各種宇宙用シリコン単結晶太陽電池の開発は、文部省宇宙科学研究所および宇宙開発事業団の方々のご指導及び業務委託として共同開発を行ってきた成果であります。また、放射線試験については、日本原子力研究所高崎研究所のご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

(1998年2月17日受理)