

バイパスダイオード内蔵太陽電池パネルの開発

Development of solar panels with built-in bypass diode

技術開発部 プロジェクト研究科 小野裕道 三瓶義之 小林翼 本田和夫
 国立研究開発法人産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所
 高遠秀尚 白澤勝彦 水野英範 望月敏光
 福島双羽電機株式会社 本田剛
 アンフィニ株式会社 川崎俊弘 根本克広 木村太亮

太陽電池パネルの設置場所の拡大のため、バイパスダイオードをパネルに内蔵し裏面のジャンクションボックスを無くした太陽電池パネルを開発する。厚さ 0.7[mm]の薄型バイパスダイオードを開発し、これを内蔵した太陽電池パネルを試作した。電流バイパス時のバイパスダイオードの熱を効率的に放熱する設計を行い、定格電流 12[A]を流してもバイパスダイオードの温度上昇を 55[°C]以下に抑えることができた。

Key words: 太陽電池パネル、バイパスダイオード、内蔵

1. 緒言

再生可能エネルギーにより発電した電力の固定価格買い取り制度により、再生可能エネルギー発電設備が大量に導入された。特に太陽光発電の導入量の増加は大きく、さらなる拡大をめざし自動車車載用や建材一体型など設置箇所も多様化している。

現在の太陽電池パネル（以下：モジュール）は裏面に突起となるジャンクションボックスがある。これが、車両や建材に張り付ける際に障害となるため、ジャンクションボックスを省くことが求められている。しかし、ジャンクションボックス内には、太陽電池モジュールに影がかかるなどの不具合が発生した際に、電流をバイパスさせて太陽電池セルを保護する役割のバイパスダイオードが設置されている。このため、ジャンクションボックスを単純に取り除くあるいは移動させることはできず、裏面の突起を無くし、意匠性に優れた薄型太陽電池モジュールを生産することは難しい。

そこで、ハイテクプラザは福島県内の企業2社と産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所（FREA）と共同で、バイパスダイオードを内蔵した太陽電池モジュール及び実装技術の研究開発を行った。本報告では、薄型バイパスダイオードを開発し、これを内蔵した太陽電池モジュールを製作した結果を報告する。

2. 実験及び結果

2. 1. 薄型バイパスダイオードの開発

2. 1. 1. 熱膨張の応力緩和構造の開発

バイパスダイオードは屋外直射日光による加熱に加えて、バイパス動作時にはダイオードを流れる電流の抵抗加熱によりダイオードチップ自体が発熱する。日中-夜間の温度変化に加え、バイパス動作の ON/OFF に

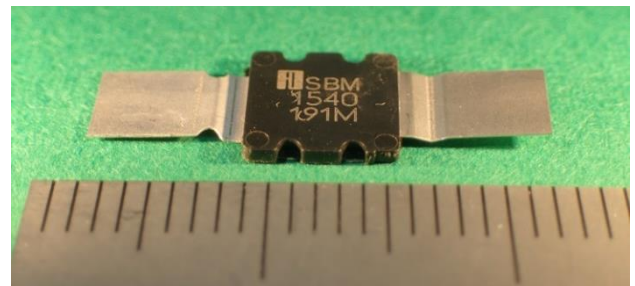


図1 バイパスダイオードの外観

表1 構造シミュレーション条件

解析ソフトウェア	Solid Works Professional
端子形状	・ M008-H2-01
解析条件	・ 静変形解析 ・ 表裏面の変形拘束 ・ 端子間に強制変位 0.2[mm]
表示	・ 相当応力 ・ 変位量

よる熱膨張-収縮は、ダイオードに引張・圧縮応力を加え破損させる恐れがある。

そこで、図1のようにばね性により応力の集中を緩和するための曲げを入れたダイオードの端子の形状について検討した。3次元CAD SolidWorks を用いて接続されたタブ線の熱収縮に相当する強制変位 0.2[mm]を与えた端子の応力分布をシミュレーションし、その有効性を評価した。解析条件を表1に示す。

シミュレーションにより得られた薄型バイパスダイオードの相当応力とその集中部位を図2に示す。この結果、単純な平板からなる端子では破損する条件であっても、曲げにより応力を分散することで、破損を避けることができることが確認できた。

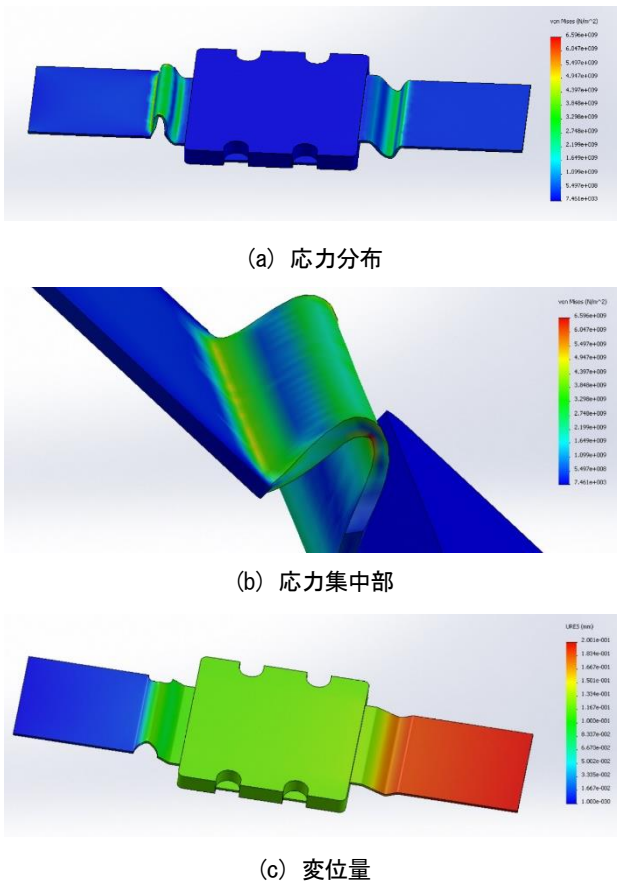


図2 シミュレーション結果

2. 1. 2. 薄型バイパスダイオードの試作

太陽光発電モジュールは、太陽電池セル(厚さ $300[\mu\text{m}]$ 以下)とインターコネクタ(厚さ $0.3[\text{mm}]$)、タブ線(厚さ $0.3[\text{mm}]$)がラミネートされている。バイパスダイオードを太陽光発電モジュールに内蔵させるためには、これらを重ねた最大の厚さ、 $0.9[\text{mm}]$ 以下の厚さであることが求められる。

また、屋外の直射日光下に長時間、設置されることが前提であるため、ダイオードチップは内部保護のため樹脂モールドで封止されていることが望ましい。

これらの条件を満たす薄型バイパスダイオードの試作は、福島双羽電機株式会社が取り組んだ。

2. 2. 太陽光発電モジュールの放熱設計

2. 2. 1. 薄型バイパスダイオードのラミネート試験

試作した薄型バイパスダイオードを太陽光発電セルと共にラミネートすることを試みた。薄型バイパスダイオードをタブ線にはんだ付けし、太陽光発電モジュールと同様にエチレン・酢酸ビニル共重合体(Ethylene-vinyl acetate copolymer 以下 EVA)フィルムではさみ真空加熱ラミネーターでガラス板にラミネート加工した。ダイオードの温度測定のため、ダ

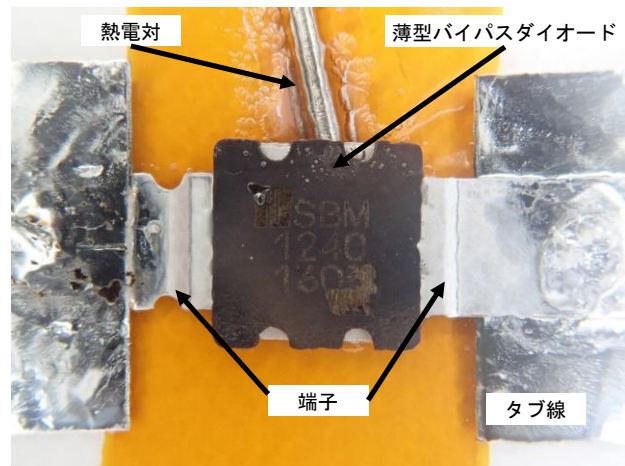


図3 ラミネート試験

イオードの裏面にシース熱電対を同時にラミネートした。図3に示すように、熱電対の周辺にEVAの剥離があるものの、薄型バイパスダイオード周辺には気泡もなくラミネートできることを確認した。

2. 2. 2. 薄型バイパスダイオードの熱抵抗の測定

薄型バイパスダイオードを太陽電池モジュールに使用するには、太陽電池モジュールが太陽光により昇温し、さらにラミネートされた薄型バイパスダイオードから発熱があったとしても、ダイオードの動作温度範囲である $150[^\circ\text{C}]$ 以下に保つことが求められる。

一般に、電子回路の熱設計では、素子の消費電力ごとの上昇した温度を測定し、消費電力と温度の傾きである熱抵抗 $R_{\text{th}}[\text{K/W}]$ を算出して評価する。これと同様に薄型型バイパスダイオードについても、熱抵抗を求め、周辺への放熱の状況の評価した。

内蔵された薄型バイパスダイオードの発生した熱の大部分はタブ線によりモジュール内を伝導すると考えられる。そこで、タブ線の幅を変えてダイオードを接続し、通電した際のダイオードの温度上昇を測定することで、タブ線の幅の違いによる熱抵抗の違いを測定した。タブ線の幅を $1.5[\text{mm}]$ と $6[\text{mm}]$ 、 $12[\text{mm}]$ の3種類とし、これと比較のため市販の外付けのジャンクションボックスに内蔵されたダイオードも測定した。

作製した試料に太陽電池モジュールの定格電流を想定して定電流電源より表2に示す条件で通電し、熱電対でダイオードのカソード端子側の温度上昇を測定した。消費電力と薄型バイパスダイオードの温度上昇を図4に示す。タブ線の幅が広くなると放熱量が大きくなり、温度上昇は抑制された。最もタブ線幅が広い幅 $12[\text{mm}]$ の熱抵抗は $24.2[\text{K/W}]$ で、 $12[\text{A}]$ を通電した際 $120[^\circ\text{C}]$ の温度上昇があった。これは日中の日向設置でパネル温度が $30[^\circ\text{C}]$ 以上であれば、 $150[^\circ\text{C}]$ を超えてしまい不具合の原因となる。そこで温度上昇を抑制する配置方法の開発に取り組んだ。

表2 通電実験の実験条件

電源	定電流電源
電流値 [A]	3, 5, 7, 10, 12.5
温度測定	ダイオードの温度 ラミネート熱電対 ガラス板の表面温度 サーモカメラ

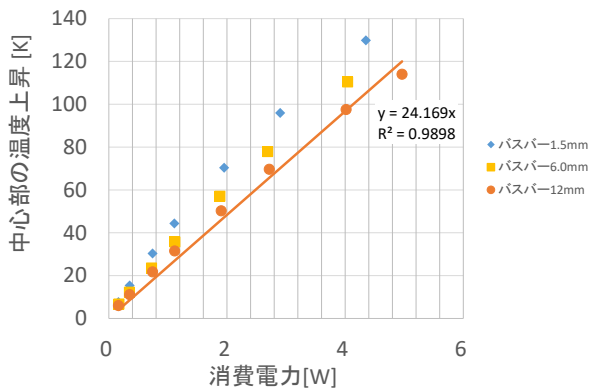


図4 消費電力と薄型バイパスダイオードの温度上昇

比較対象である従来の外付けのジャンクションボックスに内蔵されたバイパスダイオードの熱抵抗は14[K/W]であり、これと同程度を、太陽光モジュールにラミネートした薄型バイパスダイオードの熱抵抗の目標とした。

2. 2. 3. 薄型バイパスダイオードの並列配置

通電している薄型バイパスダイオードの発熱を抑制するには、電流を減らすことが有効である。このダイオードに使用したショットキーバリアダイオードの電流-電圧特性は比例関係になく、電流値を1/2にすれば電圧降下は1/2以下となる。そのためダイオードを2個並列に配置すれば、1個あたりの消費電力は1/2以下になり、発熱の総量は減少する。

そこで図5に示すように薄型バイパスダイオードを並列配置し、通電した際の温度上昇を測定した。ラミネートしたダイオードを表2の条件で通電し、その温度上昇を測定した結果を図6に示す。並列に2個配置したことで温度上昇は抑制され、熱抵抗は16.9[K/W]まで減少した。

2. 2. 4. 放熱経路の設計

バイパスダイオードの温度上昇を抑えるためには、タブ線への放熱量を増やすことが効果的である。しかし、ガラス板の表面の温度分布をサーモカメラにより観察すると、図7のとおりダイオード周辺部に急な温度勾配が観察される。これはダイオード周辺で放熱が

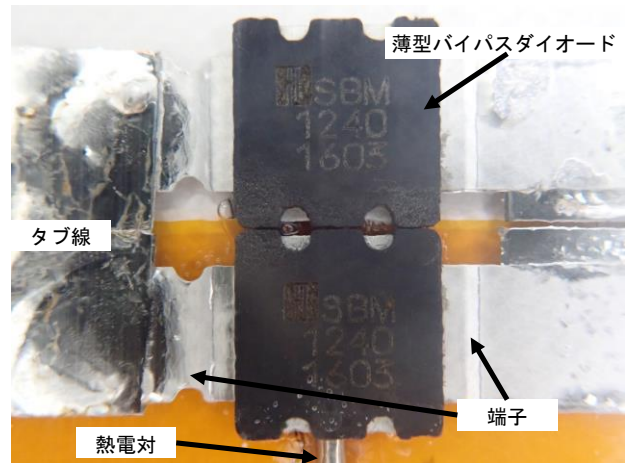


図5 薄型バイパスダイオードの並列配置

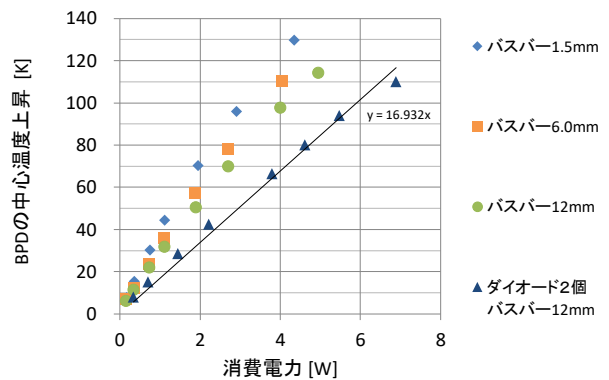


図6 並列配置した薄型バイパスダイオードの温度上昇

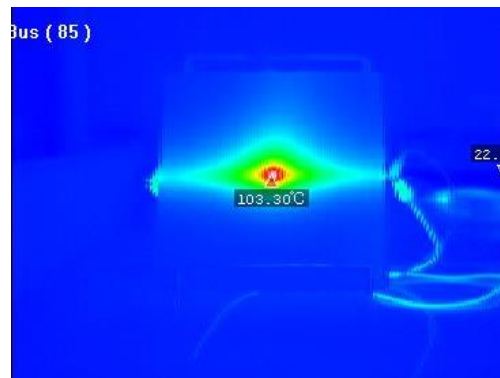


図7 ガラス表面の温度分布

妨げられていることを示している。そこで、この原因についてシミュレーションにより探索した。ダイオードからタブ線までを図8のとおりモデル化し、CAEにより温度分布を求めた。バイパスダイオードの熱は、厚さ0.1[mm]の端子を介してタブ線-EVA-ガラス板あるいはバックシートへ伝導し、ガラス板とバックシートから空気へ伝達する。解析したところ、図9に示す大きな勾配の温度分布が算出された。これは発熱体であるダイオードとタブ線を熱接続する端子が薄いため、

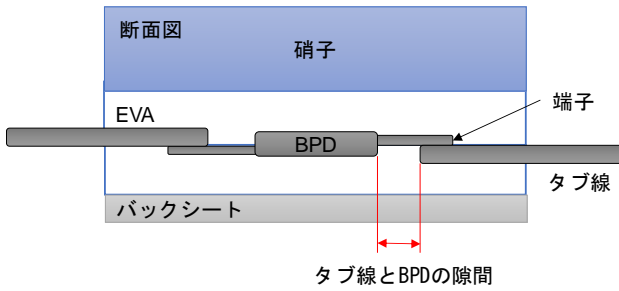


図8 バイパスダイオードの熱解析モデル

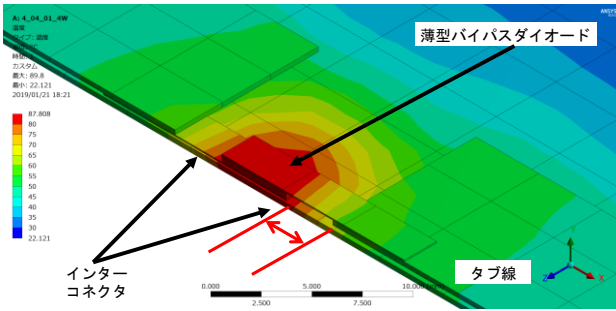


図9 ダイオード周辺の温度分布

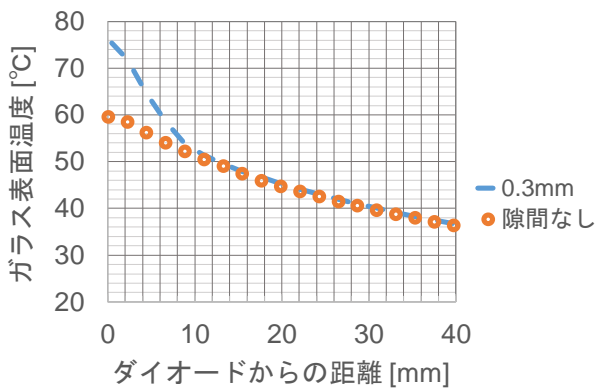
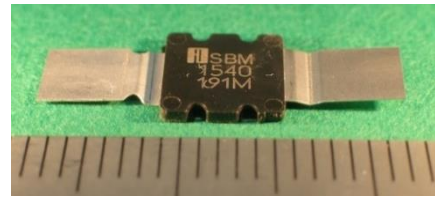


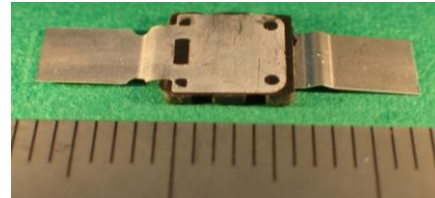
図10 薄型バイパスダイオードとタブ線の温度勾配

この部分で伝熱量が制限されたと考えられる。端子の薄い部分を少なくするため、ダイオードとタブ線の距離を縮めて解析すると、伝熱量は増加しガラス表面の温度分布は図10のとおりとなり、急な温度勾配は解消した。

このように、薄型バイパスダイオードの端子が熱伝導の律速である可能性があることから、それを解消するため薄型バイパスダイオードとタブ線を熱的に接続することを試みた。薄型バイパスダイオードは図11に示すとおり、中央部は樹脂封止されているものの、カソード側の電極は露出している。図12に示すようにカソード電極とタブ線を熱的に接続できれば伝熱量の増加が期待できる。はんだ付けあるいはろう付けは熱伝導性に優れているが、接合時の加熱により薄型バイパスダイオード内のダイオードチップと端子のはんだが再熔融することが懸念される。そこで、薄型バイ



(a) モールド側



(b) カソード端子側

図11 薄型バイパスダイオードの外観

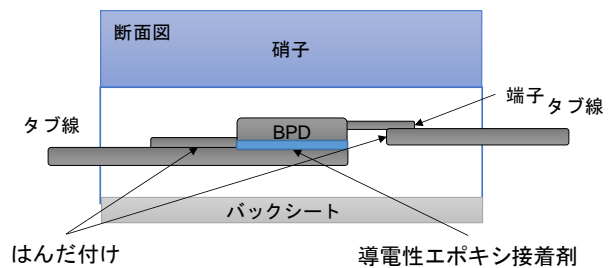


図12 カソード側電極熱接続の模式図

パスダイオードのカソード電極とタブ線の熱接続は、固化する際にはんだ熔融温度まで加熱されない導電性エポキシ接着剤で行い、端子とタブ線の電気接続は、端子先端部のはんだ付けとした。

2. 3. 発熱量を抑制したバイパスダイオードの開発

薄型バイパスダイオードの通電による発熱量を低減させるためには、内蔵されるダイオードチップの電気抵抗を小さくすることが有効と考えられる。

そこで、1つのパッケージにダイオードチップを2個並列に内蔵したダイオード及び、より電流容量の大きいダイオードチップを内蔵したダイオードを試作し、電気特性と発熱特性を評価した。

使用したダイオードチップの特性を表3に、試作した薄型バイパスダイオードの外観を図13及び図14に示す。

発熱特性を評価した結果、ダイオードチップを2個入れたものは、温度上昇が抑えられていることが確認された。これは、ダイオードチップを並列に入れたことによりも電気抵抗が低下したことと発熱源が分散されるために熱抵抗の面で有利に働いたことが原因と考えられる。

一方、より電流容量の大きいダイオードチップを内蔵したダイオードでは、むしろ発熱量が上昇する傾向が見られた。これは、電流容量を大きくしたことで順

表3 使用ダイオードチップ特性

薄型バイパス ダイオード型式 (モールドタイプ)	ダイオードチップ仕様
SBM2440	平均整流電流：12[A] 繰り返しピーク逆電圧：40[V] の ダイオードチップ 2 個使用
SBM1545	平均整流電流：15[A] 繰り返しピーク逆電圧：45[V] の ダイオードチップ 1 個使用



図13 SBM2440の外観

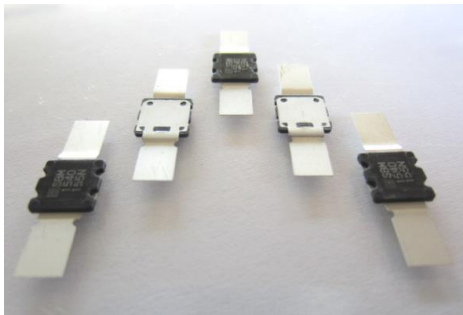


図14 SBM1545の外観

方向の電気抵抗自体が上昇したためと考えられる。

2. 4. ミニモジュールの製作

太陽光発電セルと共にラミネートした状態で温度上昇を評価するため、太陽光発電セルを4枚使ったミニモジュールを作製した。一般的なモジュールは太陽光発電セルが60枚程度直列に配置されるが、薄型バイパスダイオード周辺の配置を模擬して、温度分布を評価した。作製したミニモジュールを図15に示す。

2. 5. 温度上昇の測定

発熱素子は発熱量と放熱量が同量となれば、温度は一定になる。ダイオードの発熱量は電流値で決まり、放熱量は温度勾配と熱伝導路の材種と断面積で決まる。ダイオードの温度だけで放熱経路を評価することはで



図15 温度測定用のミニモジュール

表4 実験条件

印加方向	順方向
印加電流	6A, 12A, 12.5A
装置	直流電源 PAD55-20L (菊水電子工業(株)) デジタルマルチメータ PC500 (三和電気計器(株)) K熱電対
静定時間	6分
セル設置	80°に傾け

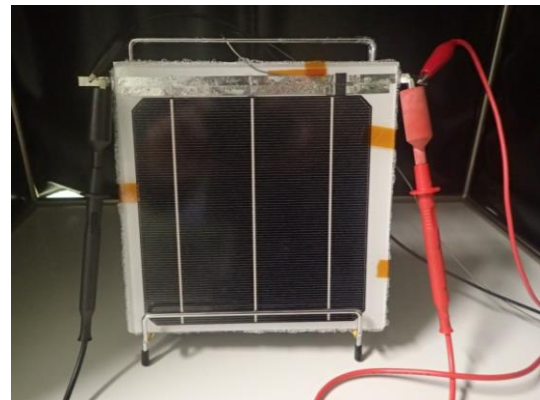


図16 実験中の太陽光発電モジュール

きないため、電子機器の放熱設計の指標となる熱抵抗を算出した。これは、ダイオードの消費電力当たりの温度上昇から算出される。

バイパスダイオードに電流が通過することを想定し、バイパスダイオードに順方向電流を通電し、消費電力当たりの温度上昇を測定した。市販品として多く使われている156[mm]×156[mm]の単結晶シリコン太陽光発電セルは、定格出力電流は10[A]程度が得られる。バイパスダイオードにも最大で同量の電流が通過することから、12.5[A]の直流電流を負荷し試験した。実験条件を表4に、実験の外観を図16に示す。評価したミニモジュールの諸元と熱抵抗を表5に示す。

表5 ミニモジュールの諸元と熱抵抗

型式	個数	配線幅	硝子サイズ	BPD配置	熱抵抗	順方向印加電流		
						6A	12A	12.5A
SMB1240	2個並列	12mm	180mm×180mm	アノード-ガラス	14.8 K/W		67.6K	73.4K
	1個並列	6mm	400mm×400mm	カソード-ガラス	21.6 K/W	53.2K	85.9K	-
	2個並列	12mm	400mm×400mm	カソード-ガラス	14.1 K/W	30.7K	61.7K	65.1K

表6 裏面に屋根材を張り付けたミニモジュールの熱抵抗

型式	個数	配線幅	硝子サイズ	BPD配置	裏面の鋼板	熱抵抗	順方向印加電流		
							6A	12A	12.5A
SMB1240	2個並列	12mm	180mm×180mm	アノード-ガラス	-	14.8 K/W		67.6K	73.4K
	1個並列	6mm	400mm×400mm	カソード-ガラス	-	21.6 K/W	53.2K	85.9K	-
					鋼板	16.8 K/W	42.4K	70.7K	-
	2個並列	12mm	400mm×400mm	カソード-ガラス	-	14.1 K/W	30.7K	61.7K	65.1K
鋼板					11.5 K/W	26.0K	51.8K	54.8K	

この熱抵抗から算出される電流通過時の温度上昇は65[°C]程度となり定格温度とほぼ同じになる。夏の日向に設置されモジュール温度が上昇した場合に安全性を確保するには、より温度上昇を抑制する必要がある。

そこで屋根材と一体に施工することを想定し、厚さ0.5mmの鋼板製の屋根板に接着した。バイパスダイオードに近いバックシート部分に接着剤を塗布し、屋根材と接着して温度上昇を測定した。同様に表4の実験条件で熱抵抗を測定すると表6のとおり、温度上昇を55[°C]以内に抑制することができた。これはジャンクションボックス内に設置される従来のバイパスダイオードの温度上昇と同程度であった。



図17 ミニモジュールの外観

2. 6. 難燃性ラミネート材による太陽電池の試作

2. 6. 1. ラミネート材の選定

太陽光発電セルに影がかかるなどして発電量が下がると、セルが発熱しホットスポットになる。バイパスダイオードはセルに流れていた電流を迂回させ、セルの発熱は減らすが、バイパスダイオード自体が発熱する。ダイオードの温度上昇によりモジュールのラミネート材が変性しないよう材種を選定する必要がある。そこでEVAフィルムより高温に耐えられる難燃性ラミネート材を選定した。

2. 6. 2. ラミネート試験

薄型バイパスダイオードは太陽光発電セルよりも厚く、ラミネート工程で気泡残りやラミネート材との剥離が発生する懸念がある。そこで従来のEVAと難燃性ラミネート材でラミネート試験を実施した。

太陽電池セル4枚を直列配置し、セルとタブ線をはんだ付けしたストリングを作製した。これをEVAフィルムと難燃性ラミネート材のそれぞれで挟み、真空加熱ラミネーターでガラス板にラミネート加工した。

2. 6. 3. 外観検査

難燃性ラミネート材によるミニモジュールのラミネート後の外観を図17に示す。薄型バイパスダイオードを内蔵した太陽光発電セルよりも厚い部分に気泡が残った。これは難燃性ラミネート材に対応したバックシートの柔軟性が低かったためと考えられた。太陽光発電セル部分に気泡残りはなく、良好であった。薄型バイパスダイオード内蔵太陽光発電モジュールを難燃性ラミネート材で製作できると考えられる。

2. 7. 量産機によるミニモジュールの試作

2. 7. 1. レイアップ加工

開発した製造工程が量産工程として耐えられるか確認するため、量産機を用いてミニモジュールの試作を行った。太陽光発電セル4枚を直列に配置し、セルとタブ線をはんだ付けしたストリングを製作した。これを図18の順でレイアップさせた。

4. 2. 2. ラミネート加工

レイアップしたミニモジュールをアンフィニ株式会社の量産機でラミネートした。表7に示す条件でラミネートした試料を図19に示す。ラミネート後のバイ

パスダイオード内蔵ミニモジュールの外観を図20に示す。薄型バイパスダイオードの内蔵部分にシート破損や発泡、断線は見られず、良好にラミネートできた。開発した製造工程が量産機に適していることを確認した。

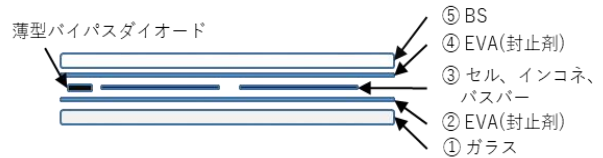


図18 ミニモジュールの断面図

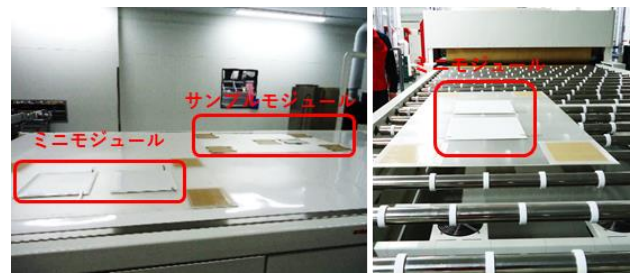
3. 結言

薄型バイパスダイオードを開発し、これを内蔵した太陽光発電モジュールを開発し、次の結果を得た。

- ・ダイオードチップが樹脂モールドで封止された、厚さ0.7mmの薄型バイパスダイオードを開発した。
- ・タブ線の温度変化による伸縮を吸収するため薄型バイパスダイオードの端子部にばね性を持たせた。
- ・ダイオードチップを2個使用し、電流通過時の発熱を抑制した。
- ・薄型バイパスダイオードに順方向電流12.5[A]を流しても、温度上昇55[°C]以下に抑えることができた。
- ・高温で変性しない難燃性ラミネート材により太陽光モジュールを試作した。バックシートの柔軟性が低かったため、薄型バイパスダイオード周囲に気泡残りがあったが、良好にラミネートできた。
- ・量産機により薄型バイパスダイオードを内蔵したミニモジュールを良好に製造でき、製造工程が量産工程に適することを確認した。

表7 ラミネーターの条件

封止材	EVA（中国製） バックシート（中国製）		
処理条件		1層目	2層目
	温度 [°C]	142	151
	保持時間 [s]	150	450
	到達 ゲージ圧力 [kPa(G)]	1段階	-20
	2段階	-15	-10
	3段階	-10	-5



(a) 投入前

(b) 投入後

図19 ラミネーター投入前後のモジュール

参考文献

- 1) 小野裕道, 他. 福島県ハイテクプラザ研究報告書 バイパス回路内蔵太陽電池パネルの実装技術の開発. 福島県ハイテクプラザ, 2020



図20 バイパスダイオード内蔵ミニモジュール