研究成果報告書

研　究　題　目		太陽光発電設備の焼損故障防止技術及び設備内アーク検知技術の開発	実　施　年　度 令和２年度
代表研究者	所属	宇部工業高等専門学校　電気工学科	
	氏名	濱　田　　俊　之　　印	

１．研究の目的・背景

図１　申請課題の概要および目的

世界的な脱炭素・Society5.0 社会の実現へ向けた取り組みが進む中、太陽光発電（PVS）は前述目的達成のための重要なエネルギー源の 1 つに位置付けられている。しかし、PVS は故障や災害時において、光照射で発電する利点が火災や感電事故を引き起こすリスクとなる。実際に我が国でも PVS による火災や感電事故が多数発生している[1]。さらに全国に点在する PVS の多くは 50kW 未満の一般用電気工作物であり，小規模 PVS ほど高い安全性が求められる。

代表者は NEDO 委託事業（産総研からの再委託）で PVS の雷故障機構解明に関する PVS 安全研究に取り組んだ。その成果により，太陽電池（PV）モジュール内のバイパスダイオード（BPD）が雷など各種要因により故障すると，PV モジュール焼損に発展することが分かった[2]。BPD は高温環境での動作や逆耐圧の低いシリコンショットキーバリアダイオード（Si-SBD）が普及している点など **BPD の耐久性への課題が顕在化**した。加えて，PVS のコネクタや配線部などの接触不良に伴う**アーク焼損も問題**となっている[3]。特に近年の大規模 PVS では，1000V 規模の直流高圧システムも現れており，アーク焼損や高電圧荷電に伴う急激な設備劣化の問題が今後さらに深刻化することが予想される。

PVS はメンテナンスフリーで安全な発電方式と一般に認知されており，PVS の開発は効率向上や寿命向上，コスト低減にばかり注目が集まり、ニューサンシャイン計画など多くの研究プロジェクトが実施されてきた。しかし，固定買取価格制度(FIT)により普及が進むにつれて，PVS の火災が我が国でも発生し報告され始めている[4]。IR カメラなどを用いた PVS 焼損の前駆発熱現象の発見手法は既にある[3]が，点検労務費や機器のコスト，検査員の練度差問題に加え，低頻度（改正 FIT ガイドラインでは 4 年に 1 度）点検では異常検知が手遅れになる恐れがある。さらに点検時の発電停止による発電電力量の損失問題もある。

本研究では，**『焼損しにくい構造の PVS』**及び**『焼損リスクのある故障の前駆現象を検知』**という 2 つの視点の研究開発として①バイパスダイオードの耐久性向上を目指したダイオード材料の最適化，②PVS におけるアーク現象の早期検知技術の開発に取り組んだ。

２．研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

(1) バイパスダイオードの耐久性向上を目指したダイオード材料の最適化

PV モジュール内の保護素子である BPD が故障すると，その後日射で太陽電池が発電を開始すると発電電流によって故障 BPD が発熱・焼損する事例が多数確認されている。BPD の故障要因は雷や BPD の長期間継続動作による経年劣化による故障が実際に確認されており、故障しにくい BPD 材料の最適化にはサージによる耐久性向上と長期間継続動作による耐久性の両面を考慮する必要がある。そこで研究期間では BPD の耐久性向上を目指し、①BPD の故障状態と焼損リスクの関係の検証、②PV モジュールの配線による誘導雷が BPD の故障を引き起こすリスクの検証、③BPD の長期動作耐久性の検証について取り組んだ。

① BPD 故障特性と焼損リスクの関係の検証

太陽電池モジュール内の BPD の故障形態は短絡故障（若干の抵抗を有する状態を含む）及び開放故障に大別される。短絡故障時における焼損リスクは太陽電池モジュールの構造にある。太陽電池モジュール内は十数枚程度のセルが直列接続された組（クラスタ）ごとに BPD が並列に接続されている。そのため、BPD が故障して比較的低い抵抗状態になるとセルの発電電力はクラスタと BPD による閉回路内で循環するようになる。このとき、故障した BPD の抵抗状態が循環電流による発熱及び焼損リスクに影響を与える。そこで、1 枚の PV モジュール内の BPD を抵抗素子（0.001-100Ω）に置き換え PV モジュールの出力端に電子負荷を接続した状況下において、PV モジュールに光照射して MTTP（最大電力点追従動作）運転を行った際に BPD 故障を模擬した抵抗素子における消費電力（発熱）を求めた。図 2 に抵抗素子の抵抗値と発熱量の関係を示す。自然光を用いたため、日射量のばらつきはあるが抵抗素子の抵抗値が 2～3Ω 程度で消費電力が高くなることが分かる。また、本試験時の日射量は 500W/m^2 程度であり夏場の日中であれば 1000W/m^2 を超える。したがって、消費電力は測定値の 2 倍程度になることも十分考えられ、BPD の短絡故障における焼損リスクの高い故障状態を把握することができた。ちなみに、BPD が高抵抗状態で故障した際はアークの発生による焼損リスクという別の要因での焼損リスクがあるため、高抵抗においても注意が必要である。

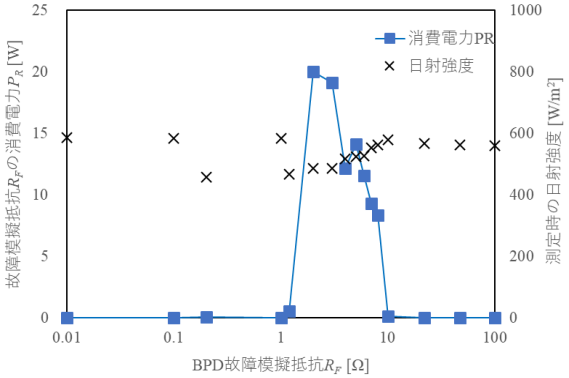


図 2　BPD の故障抵抗と消費電力の関係

② 誘導雷が PV モジュール内の BPD を故障に至らしめる機構及び故障様相の検討

BPD の故障要因の 1 つとして誘導雷が挙げられる。BPD を故障に至らしめる誘導雷は PV モジュール内のクラスタと BPD で構成される閉回路や PV モジュール同士を接続したストリングにおいて生じる。前者は、代表者らは既に誘導雷で故障に至ることを明らかにしている。一方、後者は検証を行えていないため、研究期間ではこれを明らかにした。

図3にPVモジュールの配線により閉回路が形成された場合にBPDに流れる誘導電流を示す。同試験では、PVモジュールの出力配線を閉路させることで簡易的に電気配線による閉回路を形成させた状態で閉回路の近傍（PV モジュールの金属フレーム）にIEC61000-4-5 で規定されるコンビネーション波形（最大波頭値 3.0kA のサージ電流）を通過させている。ちなみに、本試験で用いたPVモジュールは3クラスタで構成されており BPD も 3 つ存在する。これらの BPD はサージ電流が通過する経路（金属フレーム）と離隔が近い BPD よりそれぞれ BPD-A、BPD-B、BPD-C と定義している。同図より、PV モジュールの出力配線により閉路を形成した場合、サージ電流が通過する金属フレームに最も離隔が近い BPD-A には 400 A 程度の誘導電流が流れることが分かった。また、配線により形成される閉回路の面積は 400 × 900 mm^2 に比べ 1350 × 900 mm^2 と大きくなると誘導電流も大きくなる。なお、開路の場合に流れる電流はクラスタと BPD で形成された閉回路において生じる誘導電流である。なお、配線により形成された閉回路の面積が 1350 × 900 mm^2 においては BPD-A が短絡故障に至った。したがって、PV モジュールの BPD の誘導雷は、クラスタと BPD からなる閉回路及び PV モジュールの出力配線において誘導雷は重畳して生じることを明らかにすることができた。したがって、複数の PV モジュールを接続して運用する実際の PVS において配線による誘導雷の影響がある。本対策には配線の面積の最小化やねん架することが有効と考える。

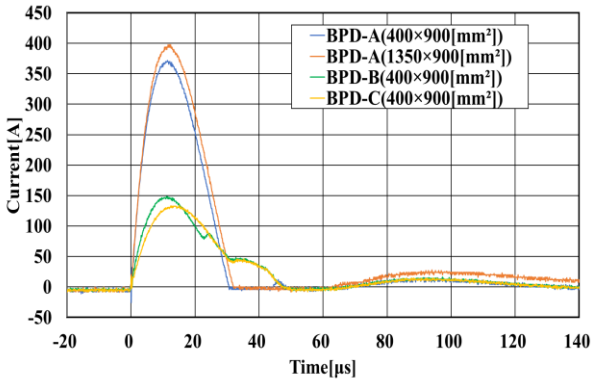


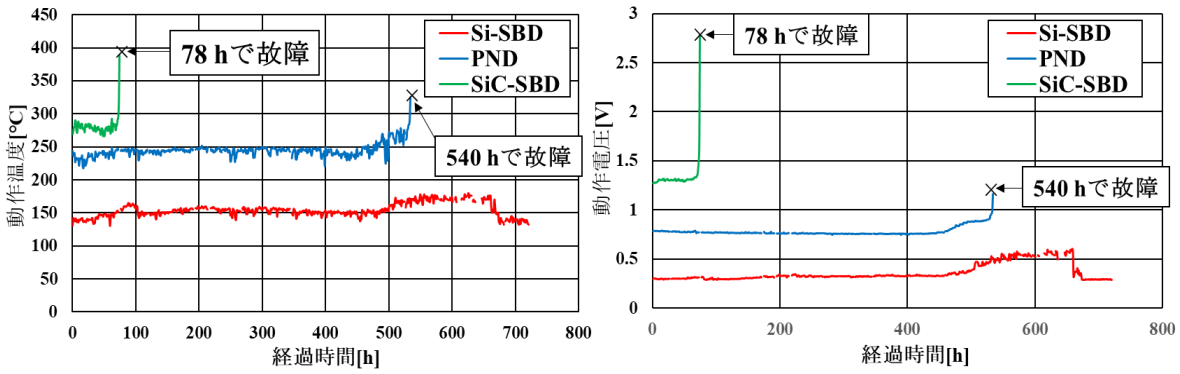
図 3　出力配線で閉回路を形成した際に BPD に生じる誘導起電力

③ BPD の長期動作耐久性の検証

長期動作耐久性試験時のダイオードの動作温度及び動作電圧の推移を図 4 に示す。同図より、Si-SBD、PND、SiC-SBD で動作温度はほぼ一定で動作し、動作電圧もほぼ一定である。しかし、PND、SiC-SBD においては故障の直前に動作温度及び動作電圧が大きく変化し、PND は 90 cycle(540 h)、SiC-SBD は 13 cycle(78 h)で故障した。一方、Si-SBD は 121 cycle(726 h)経過しても故障には至っておらず、Si-SBD が BPD として最も優れた長期動作耐久性を示した。SiC-SBD はその後も複数のサンプルにて試験を行ったが、いずれも 10 cycle 前後で故障した。また、それぞれのダイオードの定格動作温度は、Si-SBD で-40～150 °C、PND で-65～150 °C、SiC-SBD で-55～175 °C であり、使用したすべてのダイオードが定格温度範囲を超えており、放熱機構の検討が必要であることが分かった。

太陽電池モジュールの BPD として適用可能な Si-SBD、PND 及び SiC-SBD を用いて長期動作耐久性及びサージ耐久性試験を行った結果、長期動作耐久性試験において SiC-SBD は放熱対策の必要性が確認された。この結果を踏まえ、50 × 50 mm^2 の放熱板(ケニス(株) 材質:膨張黒鉛 厚さ:1 mm 耐熱温度:300 °C)にて放熱対策を行い、長期動作耐久性試験を行ったところ 59 cycle(354 h)経過した現在も故障に至っておらず、放熱対策が長期動作耐久性の向上に有効であることを確認した。したがって、BPD の長期動作耐久性は PV モジュールの BPD 周囲

の放熱設計の最適化が今後の課題となる。



(a) ダイオードの動作温度の推移　　(b) ダイオードの動作電圧の推移

図 4　長期動作耐久性試験時のダイオードの動作温度及び動作電圧の推移

(2) PVS におけるアーク現象の早期検知技術の開発

PVS では，PV モジュール同士の接続コネクタやストリング間の接続端子，PV モジュール内部のセル配線など様々な条件や部材においてアークが生じる恐れがある。また，アークは断線等により電流が遮断されるときに生じる直列アークと電路の絶縁劣化や損傷により本来電流が流れない領域に発生する並列アークがあり，後者はコロナや沿面放電状に進展する場合もあり，放電発生の初期段階では数 μA～mA 程度の微弱かつ比較的低温の放電形態となることも多い。したがって，一度にすべての条件のアーク検出を対象とするのは難しいため，まずは PV モジュールで生じるアークによる信号の特性解析を行った。

図 5 に PV モジュールで生じるアークを模擬した DC アークの放電電流波形及びアーク信号である。なお、アークの検出には AE センサ（Acoustic Emission Sensor）を用い、アーク発生による弾性波を検知している。アークの生成には PVS 模擬電源（日本カーネルシステム㈱）を針対針電極間に印加し、ギャップ間をアークが生じるまで短くさせることで針電極間に直列アークを発生させている。AE センサ（NF 回路設計ブロック㈱）は、直列アークの発生する電極より約 0.3m 離れた位置に配置している。図 5 に示すアークに起因する AE 信号を FFT(

高速フーリエ変換）した AE 信号の周波数特性を図 6 に示す。同図より、PVS 模擬アークでは 40-55MHz 付近の AE 信号が発生することを明らかにすることができた。本成果は今後の帯域通過フィルタ処理、アーク検知を行う AE 信号強度の閾値設定へと発展させるための基礎となる重要なデータとして今後 AE 法による PVS の直流アーク検知技術の実用化へ向けた重要な成果となる。

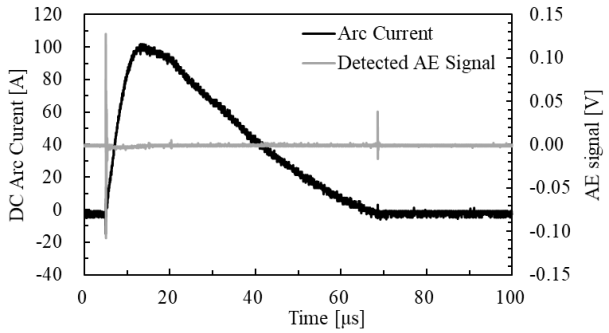


図 5　DC アークの放電電流及び AE 信号

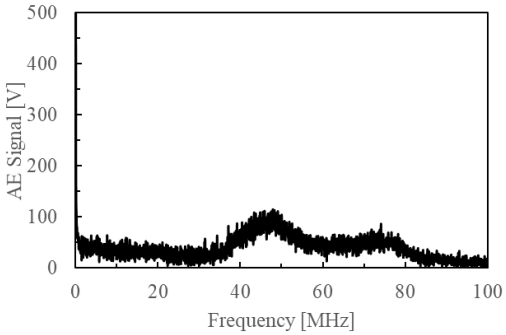


図 6　AE 信号の周波数特性

３．経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

COVID-19 の影響はあったが、概ね当初の研究計画のとおり研究を伸展させることができた。経費の使用状況も PVS 内アーク検知に関する研究ならびに PV モジュールの BPD 耐久性検証に関する研究に必要な経費として助成金を全額使用させて頂いた。なお、当初計上していたアーク検知用のオシロスコープ（キーサイト DSOX2024A）及び LAB VIEW スタンダードパッケージ、BPD 耐久性評価における電子負荷装置（日本カーネルシステム ECL02401@51 万円）は別途学内の研究プロジェクト経費の支援を頂くことができたことから前述物品は別予算により購入させて頂いた。また、COVID-19 の影響により計上させて頂いていた打ち合わせ及び成果報告のための旅費・講演会参加費は不要となった。そこで、本研究経費では PVS 内で発生するアークに近い放電を再現させてアークによる放電特性を把握するため、PV 出力を模擬できるパワーコンディショナ評価システムを購入させて頂いた。また、耐久性試験における BPD の温度・電圧測定のためのデータロガーを購入させて頂いた。

研究期間では COVID-19 の影響などにより一部の予算の使用内訳の変更が生じたが、研究課題の適正な遂行に使用させて頂いた。

４．将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

申請者は①太陽光発電システム（PVS）の故障防止に関する安全設計、ならびに②深刻な故障被害になる前の故障の前駆現象の検知技術開発、③故障後も安全を確保できる安全システム開発の 3 段階のフェーズからなる総合的な PVS の安全研究に取り組んでいる。申請課題では、①及び②に該当する研究を展開することができた。①に該当する研究として太陽電池モジュールの火災に発展するリスクのあるバイパスダイオード故障に注目し、BPD の火災リスクの検証や各種 BPD 材料の耐久性の検討を行った。これにより BPD 材料の耐久性の視点からの最適化を図ることができた。今後は BPD を収納する PV モジュールの接続箱周辺の熱設計の最適化を図り、BPD 故障および故障及び焼損リスクを低減可能な PV モジュールの構造設計の提案及び実装に発展させる予定である。

また、②に該当する研究として AE センサによる PVS 内のアーク検知技術開発を行った。研究期間においては PVS を模擬した電源により発生させた DC アークの放電特性を把握することができた。次年度以降はアーク検知システムの構築及びフィールド試験を経て、新しい PVS 内のアーク検知技術としての実装を目指したい。

本研究課題は次年度以降、本研究代表者を代表として太陽光発電システムの安全研究に取り組む中国地区の 4 高専 4 教員（PVS 安全研究会：PVK-net）とともに JSPS 科研費の支援を受けながら申請課題を含む PVS の安全研究に取り組み実装を目指して研究をさらに発展させる。本研究課題をこのように発展させることができたのも貴財団のご支援によるものであり感謝申し上げます。

５．成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

査読付学術論文

(1) T. Hamada, K. Nakamoto, I. Nanno, N. Ishikura, S. Oke, M. Fujii, Fault Characteristics of Schottky Barrier Diode used as Bypass Diode in Photovoltaic Module against Repetitive Surges, IEEE 47th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-47), ISSN0160-8371, (2020), Date Added to IEEE Xplore at January 2021.

(2) T. Hamada, T. Kashiwaya, S. Yoneda, K. Nakamoto, Durability Performance Testing of SiC Diodes for use as Bypass Diodes in Photovoltaic Modules, IEEE 47th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-47), ISSN0160-8371, (2020), Date Added to IEEE Xplore at January 2021.

(3) T. Hamada, S. Yoneda, I. Nanno, N. Ishikura, S. Oke, M. Fujii, Effect on Bypass Diodes of Passing an Impulse Current through the Metal Frame of a Photovoltaic Module, IEEE 47th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-47), ISSN0160-8371, (2020), Date Added to IEEE Xplore at January 2021.

(4) 濱田俊之ほか，バイパスダイオードの故障状態と太陽電池モジュールの焼損リスクの関係の検証（仮題），電気設備学会誌，2021 年 8 月頃投稿予定

国内学会発表

(1) 金子真大，藤本雄大，濱田俊之，池田風花，岡本昌幸，茂野交市，南野郁夫，中本健太，藤井雅之，石倉規雄，桶真一郎，金属フレームへのインパルス電流通過がバイパス ダイオードに与える影響，2020 年度（第 71 回）電気・情報関係学会中国支部連合大会，R20-07-03-01，（2020 年 10 月）

(2) 渡邊麗生，藤本雄大，濱田俊之，池田風花，岡本昌幸，茂野交市，南野郁夫，藤井雅之，石倉規雄，桶真一郎，太陽電池モジュールの出力配線で生じる誘導起電力がバイパスダイオードへ与える影響 ，2020 年度（第 71 回）電気・情報関係学会中国支部連合大会，R20-07-03-03，（2020 年 10 月）