

太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト/ 太陽光発電システムの安全確保のための実証/ 太陽光発電設備の安全化に関する実証試験および研究

大関 崇

(国研)産業技術総合研究所

再委託先:

(国)筑波大学、北海道科学大学、(国)弘前大学、(国研)防災科学技術研究所、
(国)長岡技術科学大学、国立高専機構 宇部高専、国立高専機構 津山高専、
国立高専機構 米子高専、国立高専機構 大島商船高専

発表日:2019年10月17日

問い合わせ先
国研)産業技術総合研究所
太陽光発電研究センター
E-mail:takashi.oozeki@aist.go.jp
TEL:029-861-5449

事業概要

1. 期間

開始 : 2016年6月

終了 : 2019年2月

2. 最終目標

太陽光発電設備の安全に関する実態調査とリスク分析、太陽光発電設備の積雪荷重に関する実証試験、太陽電池モジュール内バイパス回路の長期耐久性に関する実証試験、太陽光発電設備の電気安全性(火災危険・感電危険)や誘導雷被害に関する試験と研究などで得られるデータおよびその分析成果、ならびに、わが国にも有益と判断できる海外諸国の法令や規格、および本委託業務に関連する幅広い技術分野の専門家の助言を総合して、NEDOが基本計画で最終目標と定める「太陽光発電システムの安全確保のための設計ガイドライン」(以下、「設計ガイドライン」)の一部を作成する。

3. 成果・進捗概要

- 雪害および雷害の発生したメガソーラーや高等専門学校等、17箇所の現地調査の実施、およびヒヤリハット・インシデント情報収集により事例収集を行い、現地点検手順の素案の作成を行った。また、火災リスクを主対象としたイベントツリーおよびフォルトツリーからなる確率論的安全評価ツリーを構築し、発生影響を過去事例のケーススタディとして定量評価した。
北海道、山形県、青森県において太陽電池アレイの積雪荷重の測定を開始し、アレイの勾配と軒先の沈降荷重との関係について分析、設計方法を作成した。
- バイパス回路の屋外故障事例と屋内試験結果との比較分析を行い、試験方法の仕様を示した。また、パルス照射を利用したバイパス回路の現地検査技術を開発した。
- 地絡検出保護装置について、プロトタイプを作成および屋内外試験による確認を行った。
- 人工誘導雷による太陽光発電設備部材の破壊試験を行い、破壊モードを確認した。また、故障したバイパスダイオードの短絡故障が開放故障に至るメカニズムや逆電流による焼損事例の再現を行った。ダイオード素子の劣化・破壊により引き起こされる発熱を計算機シミュレーションにより定量的に明らかにした。
- これらの成果を反映して、「太陽光発電の直流電気安全のための手引きと技術情報(第2版)」を作成、公開した。

研究項目および実施体制

- 太陽光発電設備の安全に関する実態調査とリスク分析
 - － 太陽光発電設備の現地調査（担当：産業技術総合研究所、大島商船高専）
 - － 太陽光発電設備のヒヤリハット・インシデントに関する情報収集（担当：産業技術総合研究所）
 - － 太陽光発電設備のリスク分析（担当：筑波大学）
- 太陽光発電設備の積雪荷重に関する実証試験
 - － 積雪地域における太陽電池アレイの積雪荷重の屋外測定（担当：北海道科学大学および長岡技術科学大学）
 - － 積雪地域における太陽電池アレイの積雪荷重変化と気象データとの比較（担当：防災科学技術研究所）（H29.7より）
 - － 積雪地域における太陽電池アレイの積雪荷重とモジュール温度との比較（担当：弘前大学）（H29.7より）
- 太陽電池モジュール内バイパス回路の長期耐久性の検証
 - － 太陽電池モジュール内バイパス回路の耐久性に関する試験・研究（担当：産業技術総合研究所）
 - － 太陽電池モジュール内バイパス回路の現地検査技術の研究（担当：長岡技術科学大学）
- 太陽光発電設備の電気安全性(火災危険・感電危険)に関する研究
(担当：産業技術総合研究所)
- 誘導雷が太陽光発電設備の健全性に及ぼす影響に関する研究
 - － 太陽光発電設備の雷故障機構解明のための人工誘導雷試験（担当：宇部高専）
 - － 誘導雷故障太陽電池モジュールの過熱・発火過程の実験的検討（担当：津山高専）
 - － 誘導雷による素子破壊の計算機シミュレーション（担当：米子高専）

太陽光発電設備の安全に関する実 態調査とリスク分析

太陽光発電設備の安全に関する実態調査とリスク分析

- 太陽光発電設備の安全に関する実態調査については、これまでも実施し、ナレッジの蓄積はされている。
- しかしながら、事故モードは多数あるため、引き続き調査事例を増加させることが必要。本事業では現地調査およびヒヤリハット・インシデントに関する手法収集を行うことで、ナレッジの蓄積を行う。
- これら情報をリスク分析を行うことで広く知識の共有を行う。
- また、現地調査は、トラブルシューティングの手順そのものであるため、現地調査手法の知見を保安点検方法へのフィードバックも行う。

太陽光発電設備の現地調査および ヒヤリハット・インシデントに関する情報収集

- 故障等が見られた案件および全国の高専に設置された設備について、現地調査17件を実施し、保安点検手順を作成。
- ヒヤリハット・インシデント・事故情報収集システムを構築し、情報収集・公開（約60件）。
- 事例とともに、「太陽光発電の直流電気安全のための手引きと技術情報（第2版）」の一部として公開。

保守点検手順

- 安全具の装備・整備
- 検電、目視、接地抵抗の確認
- 運転状態：
システム、各ストリングの動作、循環電流の確認 等
- 解列状態
等電位接地の確認、BLDの確認、絶縁抵抗測定等
モジュールの確認：パイバス回路検査等
架台等の目視確認
発電特性の測定
- 運転状態
各モジュールの調査 等



等電位ボンディングの確認の例

ヒヤリハット・インシデントに関する情報収集

全国の太陽光発電システムにおけるヒヤリハット事例（インシデント）を収集して現状を把握し、今後の太陽光発電システムの安全対策に役立てる。

産総研

ホーム | アンケート | プライバシーポリシー

太陽光発電の安全に関する
ヒヤリハット・インシデント・事故情報収集システム



被害	原因、対応
コネクタ溶断。感電危険。	出荷時のコネクタ不良。コネクタ全数交換。

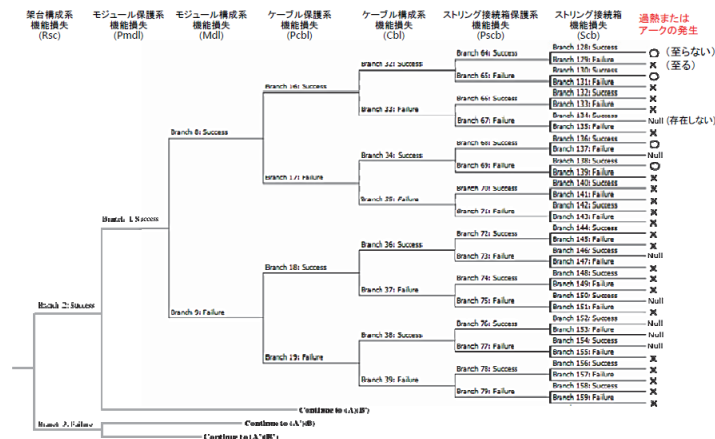


- 過熱/アークの発生に至る定性的・定量的評価

- ETA分析における128個のパスのうち、○のパスは16、過熱またはアークの発生に至る×のパスは100個という結果が得られた。
- 故障率に対する感度について分析した結果、セル、インターコネクター、バスバー電極は、PVシステム全体への感度はそれほど高くない。架台構成系サブコンポーネントにおける故障率改善はPVシステム信頼性の向上に大きな寄与が見込まれる。

- 信頼性対策効果、単位改善費用を定義・導入し、定量的評価を実施した。対策費用DBの構築により、各軽減措置へ展開可能。
- 接続箱、モジュールコネクタは安価な対策費用と高い故障軽減率の両方を実現できれば、リスク軽減措置として有用となる。

Event Tree 解析の例



太陽光発電設備の積雪荷重に関する実証試験

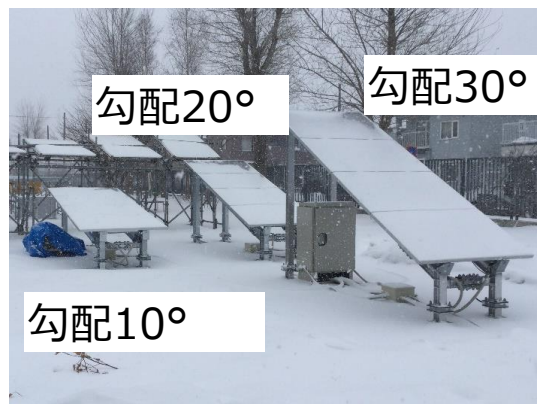
太陽光発電設備の積雪荷重に関する実証試験

- 積雪地域に太陽光発電設備を設置した場合の、太陽電池モジュールおよび太陽電池アレイ用支持物各部の荷重を測定するため、国内の複数の積雪地域に屋外積雪荷重測定装置を設置し、冬期間における上記荷重データを収集し、分析を実施する。分析の主な視点は次のとおりである。
 - － アレイに堆積する積雪の性状や深度などと、太陽電池モジュールや太陽電池アレイ用支持物に及ぼす荷重との間にどのような関係性があるのか。
 - － 現在の太陽電池モジュールの機械的荷重試験は、わが国の積雪地域に設置する太陽電池モジュールの機械強度の適合性の判断基準として適切であるのか。
 - － 建築基準法における「屋根形状係数」（すなわち、JISC8955における「勾配係数」）は、太陽電池用アレイ支持物にも適用可能であるのか。

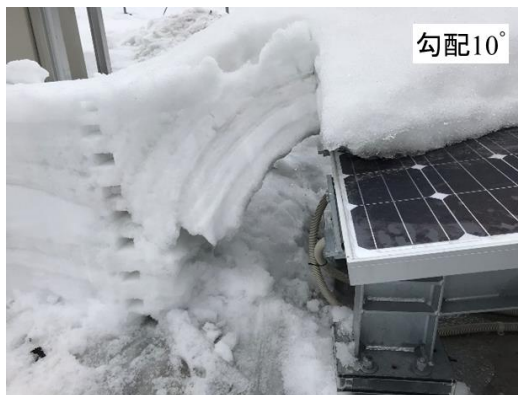
積雪地域における太陽電池アレイの積雪荷重の屋外測定

- 北海道、青森、山形に導入した測定装置により、積雪加重の測定が可能であることを確認。
- 軒側に大きな荷重が作用することを実測し、設計用荷重モデルの素案を作成した。

北海道 軒高：0.7m



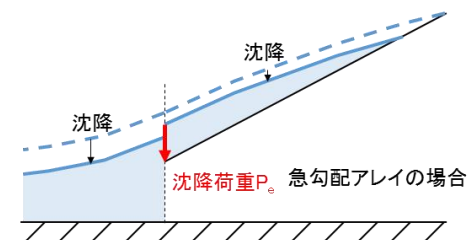
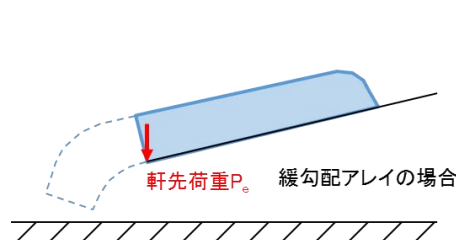
軒先積雪状況と軒先荷重との関係



青森
軒高：0.8m

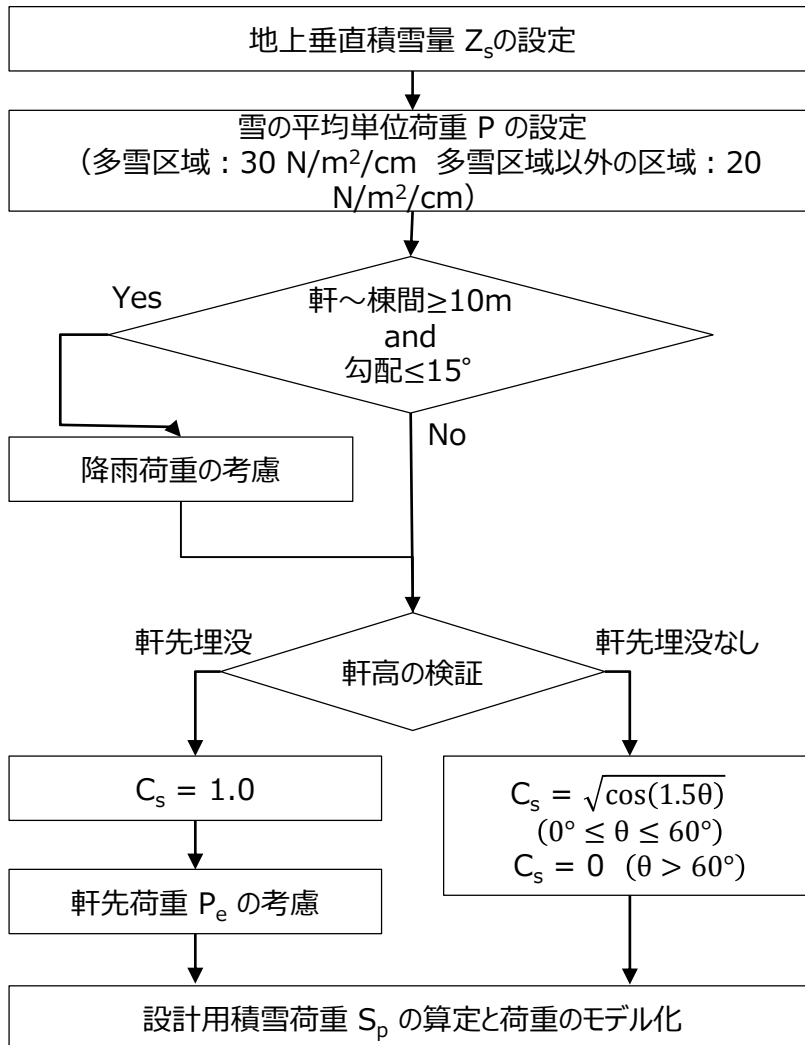


山形
軒高：0.9m

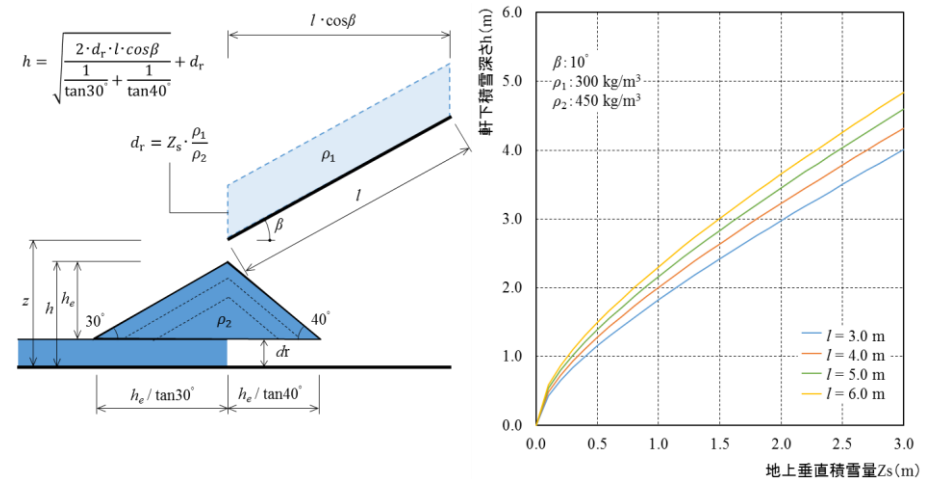


積雪地域における太陽電池アレイの積雪荷重の屋外測定

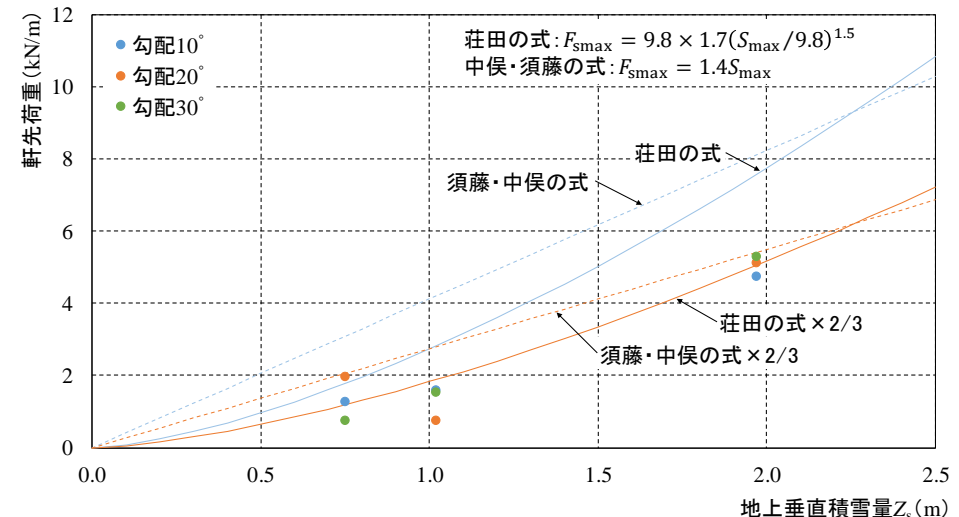
積雪荷重の評価フロー



軒高算定モデルと地上垂直積雪量と軒高との関係



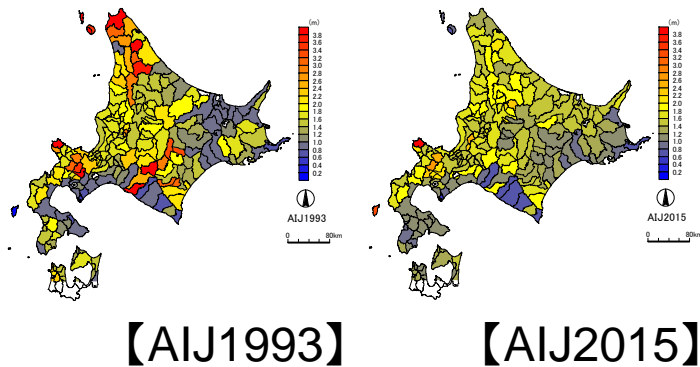
軒先荷重の設定方法



積雪地域における太陽電池アレイの積雪荷重の屋外測定

- 太陽光発電の積雪荷重をGISにおいて表示できる設計支援ツールを作成し、公開。
- 特定行政庁における設計用のデータベースも整備。
- 地図上をクリックすることで、緯度経度・標高（250mメッシュデータ）・海率を取得し、地上鉛直積雪量を計算・表示する。
- WEBにてツールを公開：
https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV_Electrical_Safety/index.html

建築物荷重指針・同解説の違いによる 計算結果例



太陽光発電の積雪荷重設計支援ツールのイメージ



太陽電池モジュール内バイパス回路 の長期耐久性の検証

太陽電池モジュール内バイパス回路の長期耐久性の検証

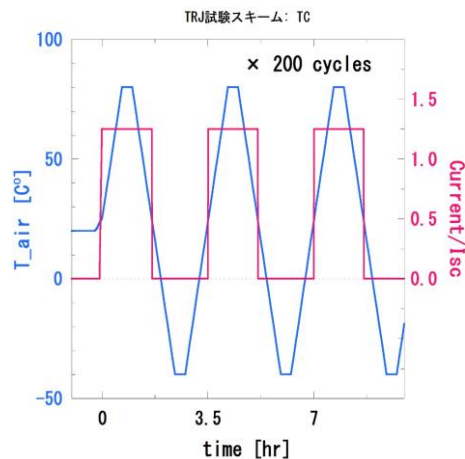
- 火災発生のひとつの要因として、バイパス回路の開放がある。しかしながら、バイパス回路に関する試験方法は、バイパスダイオードを対象としたものしかなく、回路全体の信頼試験などが存在しない。
- そのため、本プロジェクトでは太陽電池モジュールの安全保護機能としてのバイパス回路の長期耐久性の適合性を判断するためのバイパス回路の長期耐久性試験方法を提案することを目的として、バイパス回路機能の実態把握と加速試験方法の検討を行う。
- また、バイパス回路の開放を現地にて発見することは現状では容易ではない。そのため、現地において発見できる方法の検討を行う。

太陽電池モジュール内バイパス回路の 耐久性に関する試験・研究

- 実フィールドにおいてバイパス回路の故障が見られたモジュールに対して、屋内試験を実施し、屋外の故障事例と類似性を確認。
- 試験サンプルのBPC-IV特性を等価回路モデルにより解釈することで開放故障のいくつかのプロセスを明らかにした。
- 温度サイクル試験が構造的な初期不良の早期検出に有効なことが確認された。

屋内試験方法

- 温度サイクル試験
 - 雰囲気温度: $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$
 - $1.0 I_{sc}$ を 25°C 以上で通電
 - 定電圧により印加



フィールドにおける故障モジュール



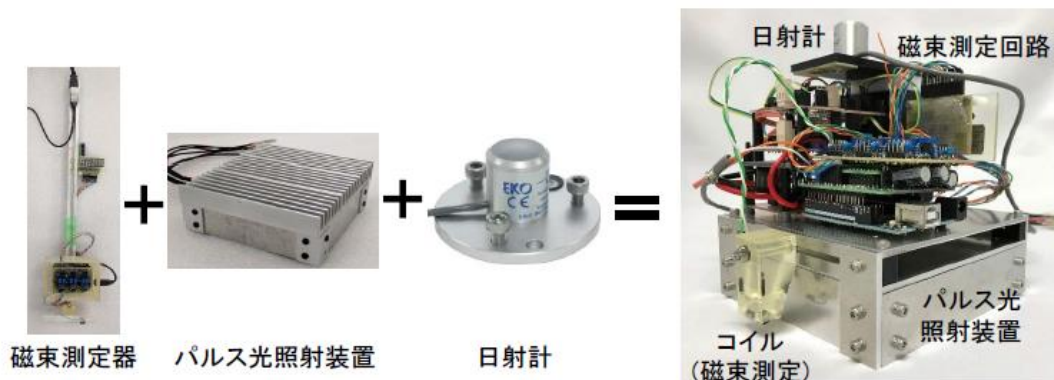
屋内試験 (温度サイクル試験)



太陽電池モジュール内バイパス回路の現地検査技術の研究

- 稼働中のPVSにおける検証試験により、ストリング内のBPC開放故障モジュールを検出できることを実証。
- 日射量の変化に対応できる一体型検査デバイスを設計・製作し、400～800W/m²で日射変動した場合でも、稼働中PVSのストリング内のBPC開放故障モジュールを検出できることを実証。
- 昇温を検出可能なパルス光照射装置を開発し、検査時の安全性を向上。
- 約6秒/moduleで検査可能、サポート機構を利用し0～30度の範囲で走行可能な遮光ロボットを開発し、より速く安全な検査を実現。

パルス光照射装置：一体型検査デバイスの開発



ロボットによる試験



太陽光発電設備の電気安全性(火災危険・感電危険)に関する研究

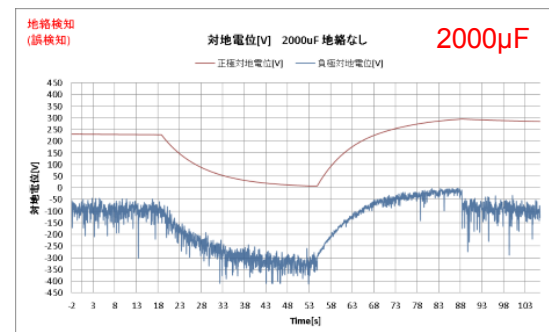
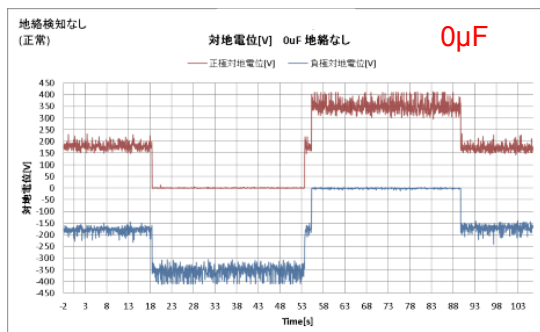
太陽光発電設備の電気安全性 (火災危険・感電危険)に関する研究

- 太陽光発電設備の火災・感電危険の主因である地絡故障を採り上げ、その対策を検討する。
- 具体的には、太陽光発電設備の直流地絡対策として地絡電流が発生する前の地絡故障の段階で当該個所を発見しかつ事故原因を除去することが可能な地絡検出保護装置 (GFDI : Ground Fault Detector and Interrupter) を試作し、それを実際に運用している太陽光発電設備に装備して関連データを収集し、その機能を検証する。
- また、市販されている地絡検出装置の性能確認試験を検討を行った。

屋内装置概要



屋内試験における装置動作結果例



誘導雷が太陽光発電設備の健全性に及ぼす影響に関する研究

誘導雷が太陽光発電設備の 健全性に及ぼす影響に関する研究

- 太陽光発電設備は太陽電池モジュールなどの発電設備を屋外に設置する特性上、雷に起因する外部過電圧による被害を受ける確率的可能性がある。
- 近年、事業用、家庭用ともに太陽光発電設備の急速な普及につれて雷に起因する種々の設備故障及び損壊事例が明らかとなりつつある。
- 雷に起因する太陽光発電設備の故障は、設備の損壊や火災による財産の喪失だけでなく、感電などの人身への危険や電力系統への波及事故など重大なリスクを抱えているにも関わらず、その故障機構は十分検討されていない。
- 本プロジェクトでは、雷によりBPD等の素子特性がどのようになるか、その素子特性がシステムでの電気事故への波及するメカニズムなどを、現地調査等から得られるデータなどを利用して、メカニズムの解明、対策技術の検討を行う。

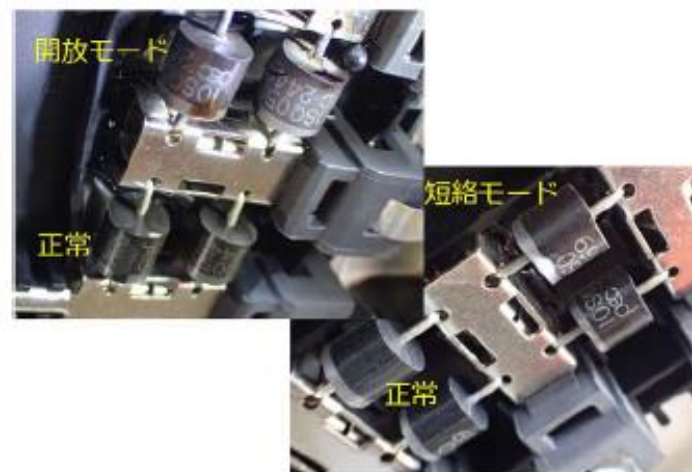
PVの雷故障機構解明のための人工誘導雷試験

- 雷害被害を受けた事例として、3 件の雷害による被害を調査を実施。
- モジュールの焼損，接続箱の焼損，発電能力の著しい低下などとなって雷害による被害が明らかになったケースである。
- モジュールの表面に破壊痕やガラス割れとなって雷害が顕在化したケース、PV モジュールの裏面のジャンクションボックスが焼損して雷害が顕在化したケースなどがある。

ジャンクションボックスが焼損した例



バイパスダイオードの故障例



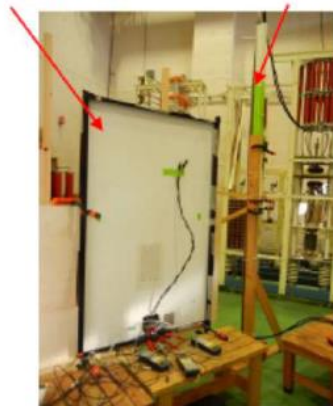
PVの雷故障機構解明のための人工誘導雷試験

- 人工誘導雷サージ試験によりPN接合タイプやSiCのダイオード、ブロッキングダイオード、バリスタ等の雷サージ試験も行い、耐電圧と特性からSiのSBDが一番危険な種類の部材であることを確認。
- 破壊サンプルのSEM内部分析をした結果、ハンダがシリコンの中に溶融したことを観察し、電流通路形成の可能性を確認。
- また、モジュール近傍および直撃雷電流の通過がバイパスダイオードに与える影響の検証のための実験を行ない、バイパスダイオードが破壊するケースを確認。

モジュール近傍の雷サージによるバイパスダイオードの破壊試験の結果例

モジュール 角度: 90° 遮光

放電電路



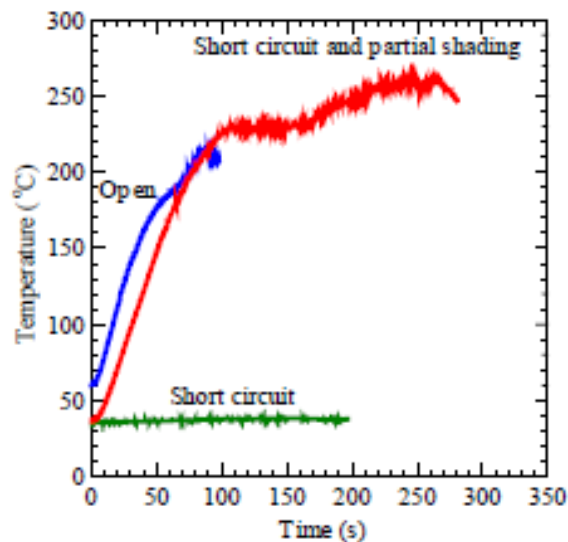
試験波形：
10/350 μ s
電流波頭値：
100 \pm 5kA

Fl	設置角	離隔[m]	試験電流 [kA]	BPD種別	BPD 極性	出力端	発電	接地	試験結果		
									BPD-N	BPD-C	BPD-F
有	90°	0.2	100	SBD	①	開放	遮光	有	正常	正常	正常
		0.15							短絡	正常	正常
有	90°	0.15	100	SBD	②	開放	遮光	有	正常	正常	正常
		0.13							正常	正常	短絡
無	90°	0.65	100	SBD	①	開放	遮光	無	正常	正常	正常
		0.4							短絡	正常	正常
		0.2							短絡	正常	正常
		0.15							短絡	短絡	正常
		0.2							正常	正常	正常
無	90°	0.2	100	SBD	②	開放	遮光	無	正常	正常	正常
		0.15							短絡	正常	正常

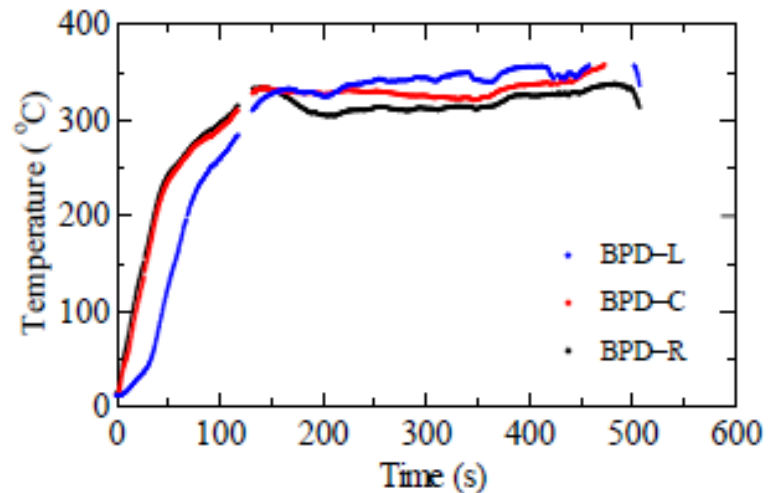
誘導雷故障PVモジュールの過熱・発火過程の実験的検討

- セルストリングの断線等により劣化していると考えられるバイパスダイオードに電流を注入し、故障の過程を観察し、短絡から開放に至ることを確認。故障の過程において、一度抵抗の状態を経て開放故障に至ることを明らかにした。
- また、バイパスダイオードが短絡故障した PV モジュールに逆方向電流が流入し、バイパスダイオードが過熱して火災に発展する可能性が高いことを実験的に確認。

劣化したバイパスダイオードへの電流注入による
故障過程の模擬試験結果例



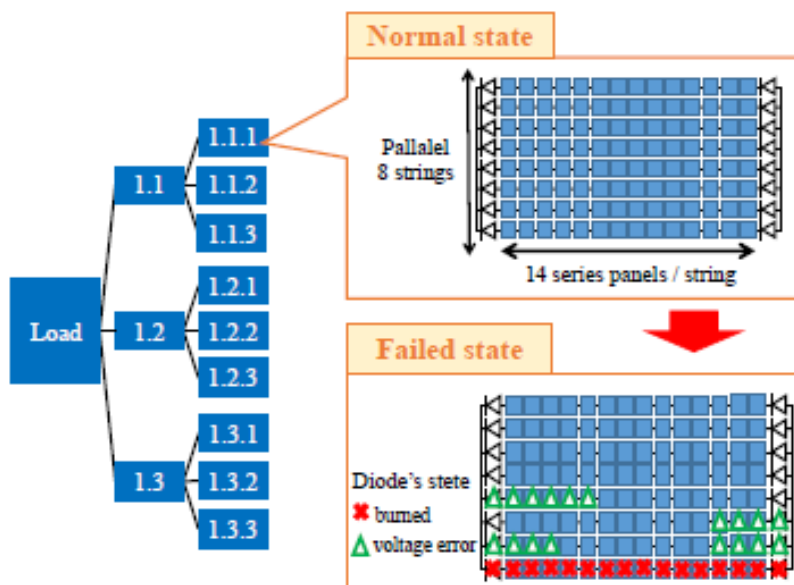
逆方向電流の流入による短絡故障バイパスダイ
オードの過熱試験結果例



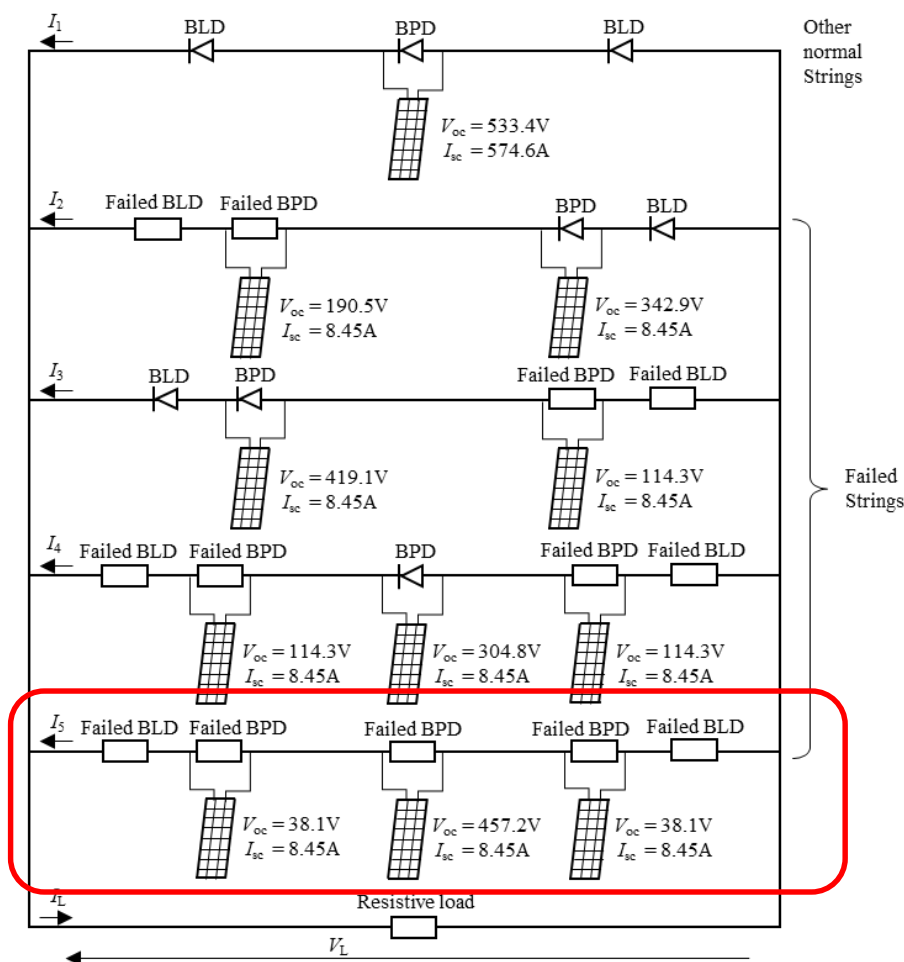
誘導雷による素子破壊の計算機シミュレーション

- シミュレーションにより故障時の逆電流の値を確認。
- 逆電流を防ぐヒューズにより保護することが有効であることを確認。

実際の事故条件を適用した回路



逆電流のシミュレーション結果例



太陽光発電設備の安全設計に関するガイドラインの作成

- 本事業の成果を産業技術総合研究所が過去に作成し公開している「太陽光発電の直流電気安全のための手引と技術情報（第1版）」に追加し、この技術資料の第2版として作成・公開。
- 第2版では、可能な範囲で第1版以降の法令や規基準の改定を反映させるとともに、本事業の成果の中でも、特に太陽光発電設備の保安点検手順や点検の実例、太陽光発電設備の地絡保護や絶縁監視、雷被害に関する内容を充実させた。
- 太陽光発電の直流電気安全のための手引きと技術情報（第2版）：2019年7月掲載
https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV_Electrical_Safety/index.html

目次

まえがき	3 章 機器選定方法	第4章 運用保安に関する一般事項
第1章 はじめに	3.1 機器選定編 総論（一般事項）	4.1 一般原則
第2章 設計 組み合わせ編	3.2 太陽電池モジュール選定	4.2 保安規程
2.1 組み合わせ編 総論（一般事項）	3.3 パワーコンディショナ選定	4.3 保安点検の方法
2.2 図書の整備（設備文書要件）	3.4 接続箱（筐体および遮断器を含む）選定	4.4 事故報告
2.3 絶縁・地絡保護・過電流保護の基本原則	3.5 ケーブル設備および配線設備の選定	4.5 その他
2.4 雷害保護設計		【4章参考1】太陽光発電設備に利用する計測機器の注意事項
2.5 個別要素設計		【4章参考2】太陽光発電設備保守点検（直流部分）の手順例
2.6 消防隊員保護対策		【4章参考3】保守点検調査の実例
【2章参考1】太陽光発電設備の接地方式		
【2章参考2】電路絶縁に関する法令等		

付録