



太陽光発電システムの直流電気安全性に関する 基盤整備プロジェクト概要

独立行政法人 産業技術総合研究所

大関 崇



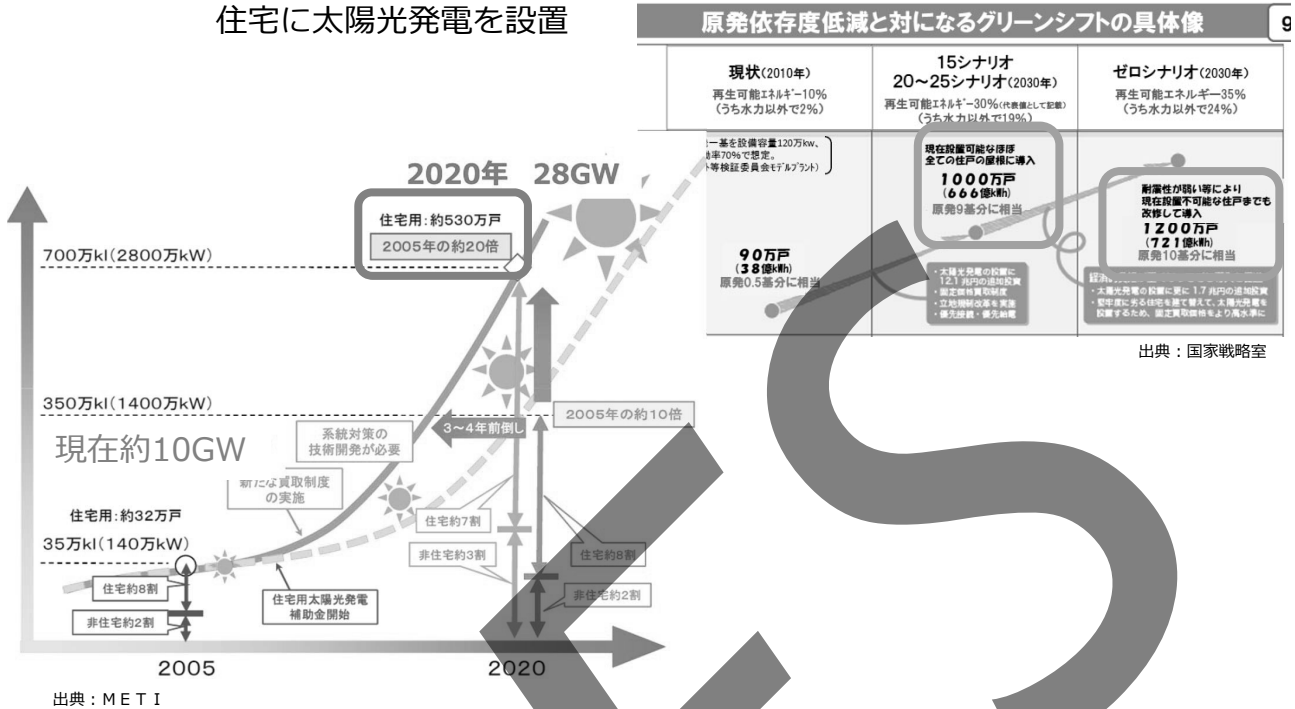
背景・目的



背景



- 将来的には1000万戸の住宅に太陽光発電を設置



背景



優先順位

発電特性

安全性

社会的信頼性

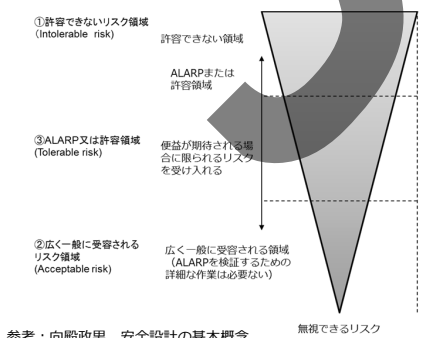
発電コスト [計算式]

の考え方 (震災後)

$$\frac{\text{資本費} + \text{運転維持費} + \text{燃料費} + \text{社会的費用}}{\text{発電電力量(kWh)}}$$

(CO₂対策費用+事故リスク対応費用+政策経費)

(参考：コスト等検証委員会)



参考：向殿政男、安全設計の基本概念、

5. 安全という概念

5.1 安全は、あらゆる技術領域にまたがり、かつ、ほとんどすべての製品、プロセス及びサービスのための規格で扱われている。市場に投入される製品、プロセス及びサービスは、ますます複雑化しており、安全の視点に立った配慮の優先度を高くすることが求められている。

絶対的な安全というものはありえない。この規格で残留リスクを定義しているように、ある程度のリスクは残る。そのため、製品、プロセス又はサービスは、相対的に安全であるとしかたない。

5.2 安全は、リスクを許容可能なレベルまで低減させることで達成される(3.7 許容可能なリスク参照)。許容可能なリスクは、絶対的安全という理念、製品、プロセス又はサービス及び使用者の利便性、目的適合性、費用対効果、並びに関連社会の慣習のように諸要因によって満たされるべき要件とのバランスで決定される。したがって、許容可能なレベルは常に見直す必要がある。技術及び知識の両面の開発が進み、製品、プロセス又はサービスの使用と両立して、最小リスクを達成できるように改善が経済的に実現可能になったときには、特に見直しが必要である。

5.3 許容可能なリスクは、リスクアセスメント(リスク分析及びリスクの評価)によるリスク低減のプロセスを反復することによって達成させる(図1参照)。

参考：JISZ8051、安全側面-規格への導入指針

PVシステムの特徴とリスク



太陽光発電 (PV) システムの特徴

- 発電設備の規模範囲が、数kW～数MWと幅広い。
- 住宅屋根から地上置きまで設置場所、利用用途が多様。
- 直流および交流という、二つの電気方式を具有。
- 屋根等に取り付けられるため構造物としての性質を持つ。
- 居住空間近くに設置されることが多い。
- 設備数が多数存在、広く国土に分散。
- 電気・屋根設計・施工をとまなう。
- 多様な構成要素ならびにステークホルダーを含んだ発電システム。

用語の定義

- 3.1 安全(safety) 受容できないリスクがないこと。
備考 ISO/IEC Guide 2: 1996 の定義 2.5 を参照のこと。
- 3.2 リスク (risk) 危害の発生確率及びその危害の程度の組合せ。
- 3.3 危害 (harm) 人の受ける身体的傷害若しくは健康傷害、又は財産若しくは環境の受ける害。
- 3.4 危険事象 (harmful event) 危険状態から結果として危害に至る出来事。
- 3.5 ハザード (hazard) 危害の潜在的な源。
備考 ハザードという用語は、起こる可能性のある危害の発生源又は性質を定義するために用いることが一般的に認められている (例えば、感電、押しつぶし、切断、毒性によるもの、火災、おぼれなどのハザード)。
- 3.6 危険状態 (hazardous situation) 人、財産又は環境が、一つ又は複数のハザードにさらされる状況。
- 3.7 許容可能なリスク (tolerable risk) 社会における現時点での評価に基づいた状況下で受け入れられるリスク。

参考：JISZ8051, 安全側面-規格への導入指針

危害 (Harm)

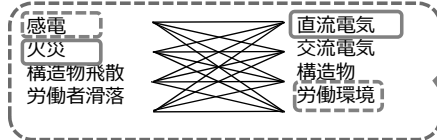
人の受ける身体的障害

- ユーザに対する危害 (感電、やけど、滑落死等)
- 施工者に対する危害 (感電、やけど、滑落死等)
- 消防隊員に対する危害 (感電、やけど、滑落死等)

財産・環境が受ける害

- 建物：建物火災、構造物の破壊等
- 環境：廃棄による土壌物汚染、廃棄物火災
- 組織：倒産
- 社会：太陽光発電業界の社会的信頼度の低下

ハザード



参考：各種資料



PVシステムの直流電気安全に関するハザード



ホットスポットと可燃物

モジュール/システム

(a) 屋外配線

地絡、短絡

冠水等による浸水

消防隊員の消防活動に対して (鎮火、残火処理)

PV付建物火災

放火

- 設置時 : 感電、滑落 (施工業者)
- 運用時 (~20,30年、放置システム) : 建物焼損、感電 (オーナー等、メンテ業者、消防隊員)、公共被害 (延焼)
- 撤去時 : 感電、滑落 (撤去業者)
- 廃棄時 : 廃棄物火災、(放置システムの感電、火災)

参考：吉富電気, 太陽エネルギー学会セミナー資料





「太陽光発電システムの直流電気安全性に関する基盤整備」プロジェクトの内容



事業概要

平成24～平成26年度予定

新エネルギー等共通基盤整備促進事業
8.8億円(新規)

資源エネルギー庁 新エネルギー対策課
03-3501-4031
産業技術環境局 認証課
03-3501-9473

事業の内容

事業の概要・目的

- 新エネルギー技術の大規模導入の実現には、高い発電コストに加えて、基準や規格がないために開発時間やコストが増加し、メーカーによる早期の市場投入が困難であることが課題です。
- また、海外メーカーの急速な台頭により、市場での競争力の確保が益々難しくなっており、「技術で勝って、事業で負ける」状況が危惧されています。
- 新技術の性能や安全性、評価方法等の標準化により、高い品質や安全性を確保することがメーカーによる市場投入や競争力の確保・維持を後押しし、導入を加速・促進すると考えられます。
- このため、共通基盤となる試験方法の確立や安全性評価基準の開発を行うとともに、それら試験方法や基準への適合性確認の手法について開発・実証を行います。

条件(対象者、対象行為、補助率等)



事業イメージ

以下のような新エネルギー等に関する基盤整備事業を推進します。

(例)

【太陽光発電】

- ・太陽電池アレイ用逆流防止装置、パワコン等の性能試験手法の開発
- ・『太陽光発電システムのリユース・リサイクルWG』の検討結果の具体化 等

【燃料電池】

- ・FCV用水素燃料の品質評価手法の開発
- ・水素ステーション等に使用される部品の性能評価基準の策定及び認証制度の確立 等

【蓄電池】

- ・家庭用蓄電池の安全性評価手法の開発
- ・車載用蓄電池の国際標準化に係る技術開発

【太陽熱】

- ・太陽熱利用システムの性能評価手法の開発



平成24年度資料



事業目的



平成24年度

- 太陽光発電の直流電気安全に関して、現状の事故例等の国内外の調査を行い、把握できるリスクについてFMEA分析（Failure Mode and Effect Analysis：故障モード影響分析）等を利用してリスクアセスメントの大枠をまとめる。それに基づき、直流電気安全、火災リスクに関してデータが不足しているリスク評価項目および対策技術検討に必要な実証実験の具体的な内容を整理する。
- 逆流防止素子に関しては、これまでにIECへ提案など議論が先行しているため、逆流防止素子の効果の実証について、先行して試験方法の開発および素子の予備検証を行う。

平成25年度

- 平成24年度のリスク評価を受けて、実証が必要なリスク項目について、実証試験によりデータ収集を行う。逆流防止素子に関しては、平成24年に引き続き効果の検証と信頼性評価を行う。

平成26年度

- 平成25年度までに整理した結果をもとに、現状の太陽光発電システムに関して直流電気安全のリスクアセスメントを行い、リスク低減方法を考慮した直流電気安全設計ガイドライン（義務・推奨）を策定する。特に、逆流防止素子に関しては国際標準として提案を行う。



9

実施体制



太陽光発電システムの直流電気安全のガイドライン原案の作成

- 国内外の事例、消防ガイドラインの調査（みずほ、AIST）
- 国内標準化に関する調査（JEMA）
- リスク評価（AIST）
- 有識者委員会（みずほ、AIST）



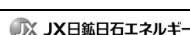
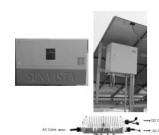
直流電気安全のリスク確認実験

- 直流電気安全に関するリスク確認実験（関電工）
- ブロッキングダイオードの有効性検証（JEMA）
- ジャンクションボックスの信頼性の検討（産総研）



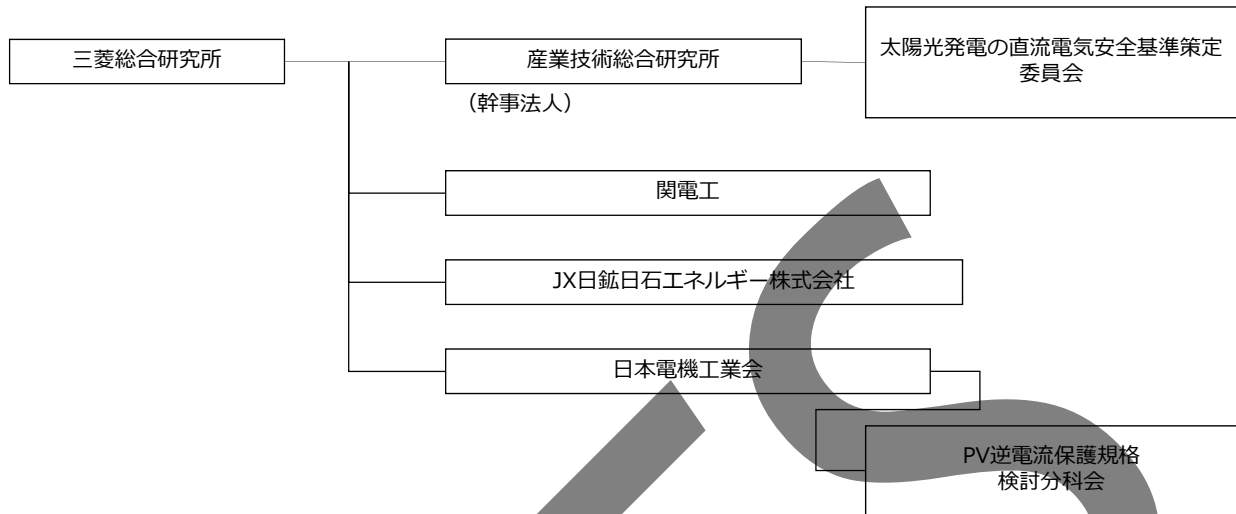
直流電気安全の対策技術の評価

- 直流電気安全のパワーコンディショナ地絡検知機能の評価（JX）



10

実施体制



実施内容



直流電気安全のガイドライン策定

- (1)直流電気安全に関する国内外調査(AIST)
- (6)直流電気安全に関するリスク評価 (AIST)
- (7)太陽光発電システムの直流電気安全設計ガイドライン (案) の検討(AIST)

直流電気安全のリスク確認実験

- (2)逆流防止素子 (ブロッキングダイオード) の安全性に関する検討 (JEMA)
- (3)直流電気安全に関する実システムによるリスク確認試験の検討(関電工)
- (4)直流電気安全に関するシミュレーションによるリスク評価(AIST、JEMA)

直流電気安全の対策技術の評価

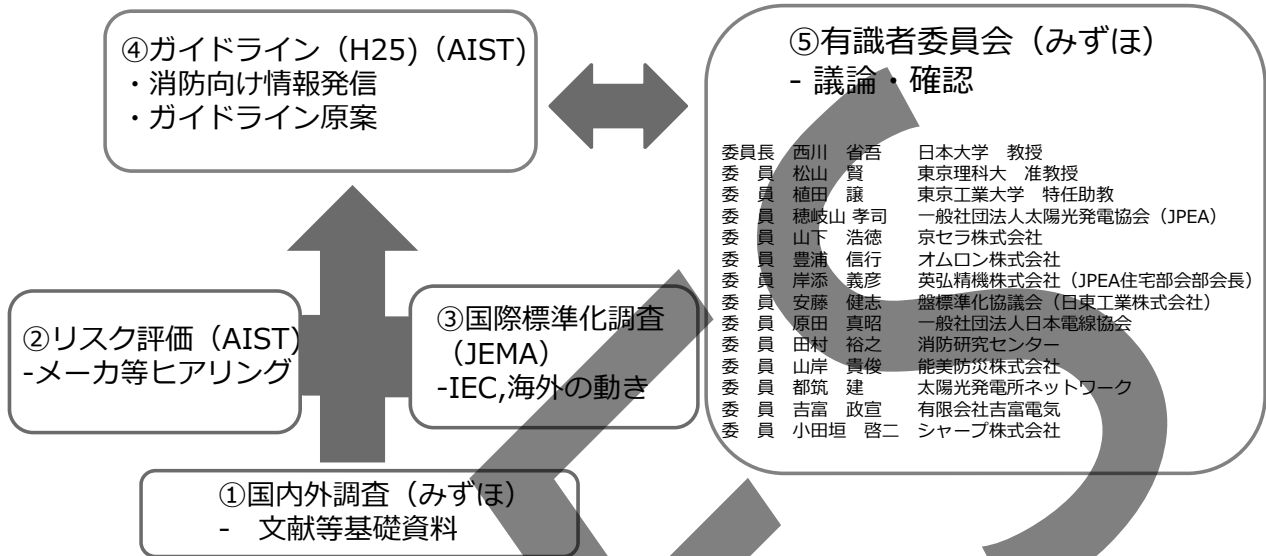
- (5)既存対策技術の予備評価 (JX)

(1) 直流電気安全のガイドライン原案の作成



実施計画

- ① 太陽光発電システムの火災事例調査(みずほ)
- ② FMEA分析・評価について改善、ガイドライン作成のための基礎資料整理 (AIST)
- ③ 国際標準化に関する調査 (JEMA)
- ④ 直流電気安全のガイドライン原案の作成 (主AIST、副みずほ)
- ⑤ 「太陽光発電の直流電気安全基準策定委員会」の運営 (みずほ)



⑤ 有識者委員会 (みずほ) - 議論・確認

委員長	西川 省吾	日本大学 教授
委員	松山 賢	東京理科大 准教授
委員	植田 謙	東京工業大学 特任助教
委員	穂岐山 孝司	一般社団法人太陽光発電協会 (JPEA)
委員	山下 浩徳	京セラ株式会社
委員	豊浦 信行	オムロン株式会社
委員	岸添 義彦	英弘精機株式会社 (JPEA住宅部会会長)
委員	安藤 健志	盤標準化協議会 (日東工業株式会社)
委員	原田 真昭	一般社団法人日本電線協会
委員	田村 裕之	消防研究センター
委員	山岸 貴俊	能美防災株式会社
委員	都筑 建	太陽光発電所ネットワーク
委員	吉富 政宣	有限会社吉富電気
委員	小田垣 啓二	シャープ株式会社

(1) 直流電気安全のガイドライン原案の作成



進捗状況

- PV火災安全性に関する海外における取り組みに関して、関係機関、事業者へヒアリング調査を実施

- ・ 米国 (UL, CAL Fire)
- ・ 欧州 (Fraunhofer ISE, BSW, EPIA, TUV Rheinland, BRE, Basler&Hofmann)

消防向けガイドラインについて

- ・ 米国、ドイツでは消防向けのガイドラインが2010年に公表されている。
- ・ ただし、具体的にオペレーションにどのように活かされているかについては、消防の規模や、実際の火災の状況により異なるため、一概にはわからない。米国カリフォルニアの消防オペレーションのカリキュラムにも現時点で反映されていない。

技術的対策

- ・ 米国では、PV火災防止の技術対策として、AFCIの導入が義務化されている。
- ・ 一方ドイツ (Fraunhofer ISE) は、AFCIの導入に懐疑的である。
- ・ ドイツでは、消防保護のための対策として、消防スイッチ (遠隔DCスイッチ) が推奨されている。一方、米国 (UL) は消防スイッチの導入に懐疑的である。

- 「太陽光発電火災発生時の消防活動に関する技術情報」として、消防向けの基礎的な情報提供を目的としたドキュメントを作成

- ・ 太陽光発電システムが設置されている家屋における消防活動時に留意すべき点を整理

1. 太陽光発電システムの基礎
 - 1.1 太陽光発電システムとは
 - 1.2 太陽光発電の性質
 - 1.3 太陽光発電システムの構成
 - 1.4 太陽光発電システムに関する火災/感電事例
2. 太陽光発電設置家屋の火災における危険性
 - 2.1 太陽光発電システムの危険性
 - 2.2 太陽光発電システムの認識方法
 - 2.3 感電、火傷
 - 2.4 滑落
 - 2.5 燃焼ガスの発生
 - 2.6 崩壊
 - 2.7 出火
 - 2.8 その他 (蓄電池)
3. 太陽光発電システムの設置家屋における留意事項

(2) 直流電気安全のリスク確認実験



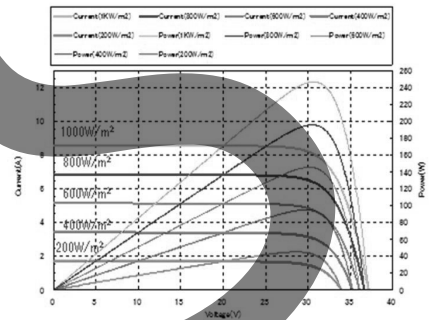
① 直流電気安全に関するリスク確認実験（関電工）

- 非定常電流に関する効果の検証
- 地絡時、短絡時の電流挙動と素子の効果の検証
- PCS側接地箇所と電流挙動、および素子の効果の検証
- 日陰による影響の評価



② ブロッキングダイオードの有効性検証 (JEMA、「PV逆流防止素子規格検討分科会」)

- リスク確認実験の結果をもとに、ブロッキングダイオードの有効性について議論を行う。
- 遠雷によるサージ等の影響についての調査を行う。
- システムの電流挙動を解析するシミュレーション技術を構築し、以下の検討を進める。
 - シミュレーションと実測データの比較検討
 - サージ等の過渡電流の解析方法の確立



(2)① 直流電気安全のリスク確認実験

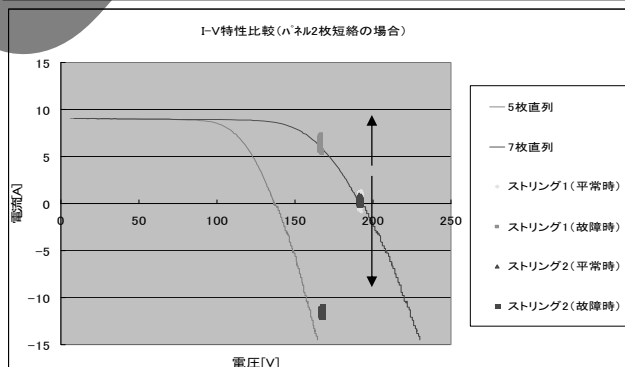
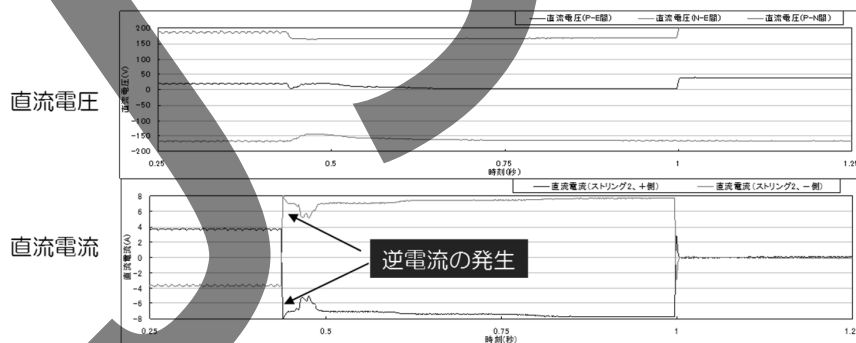


進捗状況：短絡試験時の挙動

ブロッキングダイオードなし

インバータ連系

2枚短絡時 当該ストリングの電流が反転し、電流値増加（電圧変化なし）



順電流・逆電流
の比が 1 : N-1

N : ストリング数
本試験では N=3
のため 1:2 の逆電流発生

(2)①直流電気安全のリスク確認実験



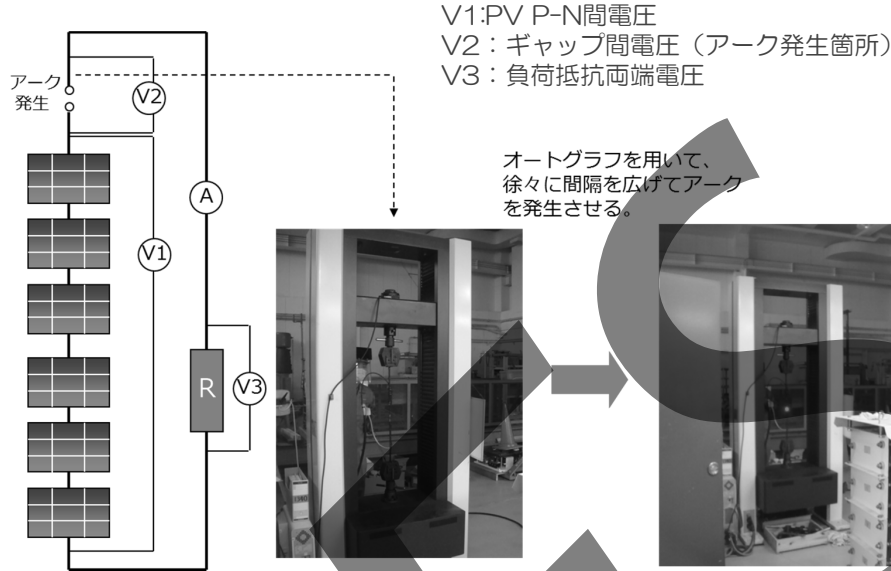
進捗状況：アーク試験結果

ブロッキングダイオードによるアーク消弧効果の有無を検証

1ストリングでの試験

実験1：負荷抵抗あり

実験2：負荷抵抗なし



(2)①直流電気安全のリスク確認実験



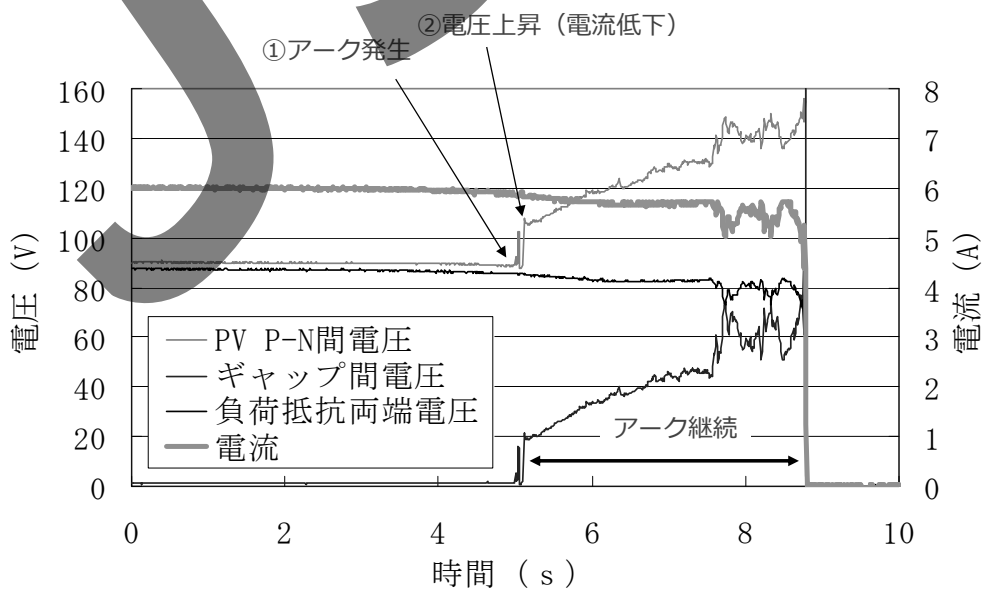
進捗状況：アーク試験結果

ブロッキングダイオードなし

抵抗負荷で消費

1ストリングでの試験

実験1：負荷抵抗あり



(2)②ブロッキングダイオードの有効性検証



進捗状況：逆流防止素子の国際標準化

太陽光発電システムの逆電流保護に関する規格開発（IEC62548→IEC60364-9-1改正）

【目的】

「太陽光発電システムの電気的安全性の向上」に主眼をおき、その向上に効果がある逆流防止素子（ブロッキング・ダイオード）の技術基準の策定と国際提案を行うことを目的とする。

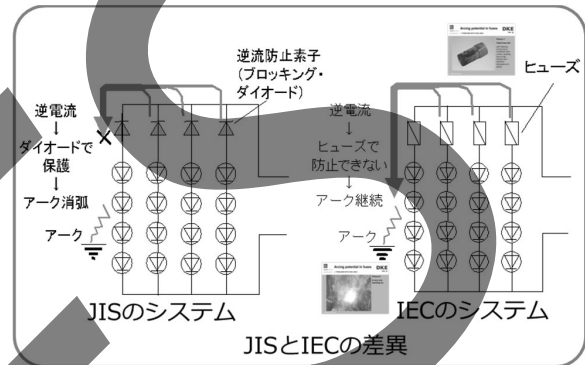
【背景】

- (1) IECでは太陽光発電システムの過電流保護としてヒューズの使用を義務付けているが、海外ではアーク等の電気的事故によると思われるシステムの火災事故が報告されている。
- (2) JISでは逆流防止素子の使用を義務付けており、国内で短絡や地絡等による火災等は報告されていない。ただし、概念的な説明ではなく、実証実験によるデータをもった提案が必要

【事業の目標】

太陽光発電システムの電気的安全性向上のための逆流防止素子の国際標準化

- ・電設規格 IEC60364-9-1の要求項目への記載を提案または単独規格も視野



(2)②ブロッキングダイオードの有効性検証



進捗状況：逆流防止素子の国際標準化

6.3.12 Blocking diodes

Blocking diodes may be used to prevent reverse currents in sections of a PV array.

NOTE In some countries blocking diodes are permitted as replacement for overcurrent protection. In other countries diodes are not considered reliable enough to replace overcurrent protection because their failure mode is generally to a short circuited state when subjected to voltage transients. Local country requirements should be taken into account in system designs.

In systems containing batteries it is recommended that some device should be implemented to avoid reverse current leakage from the batteries into the array at night. A number of solutions exist to achieve this including blocking diodes.

If used, blocking diodes shall comply with the following requirements:

- have a voltage rating at least $2 \cdot$ PV array maximum voltage determined in clause 6.2;
- have a current rating IMAX of at least 1.4 times the short circuit current at STC of the circuit that they are intended to protect; that is:
 - 1.4 · ISC MOD for PV strings;
 - 1.4 · ISC S-ARRAY for PV sub-arrays;
 - 1.4 · ISC ARRAY for PV arrays;
- be installed so no live parts are exposed;
- be protected from degradation due to environmental factors.

注釈ではダイオードを使用している国（日本）を紹介

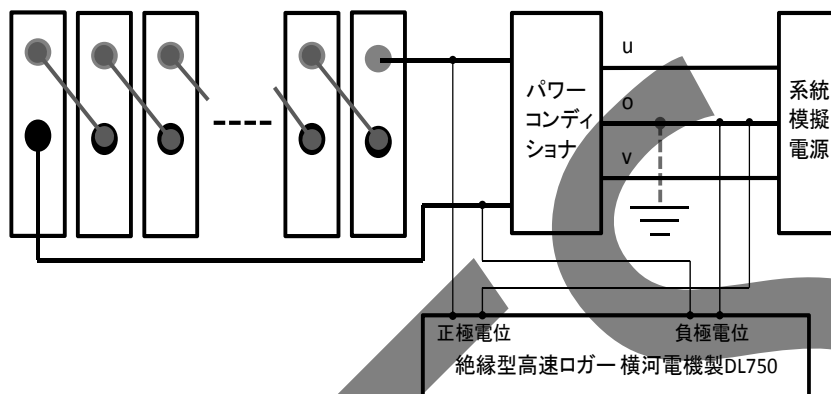
本文では、ダイオードは他ストリングからの流れ込み防止ではなく、バッテリー側からの逆流防止に用いていると記載がされている。

以下略

(3) 直流電気安全のPCS地絡検知機能の評価



3ストリング程度のシステムにおいて地絡事故、線間短絡などを模擬的に発生させ、各種パワコンが規定の時限内に地絡検出可能かについて機能性評価を行う。



(3) 直流電気安全のPCS地絡検知機能の評価

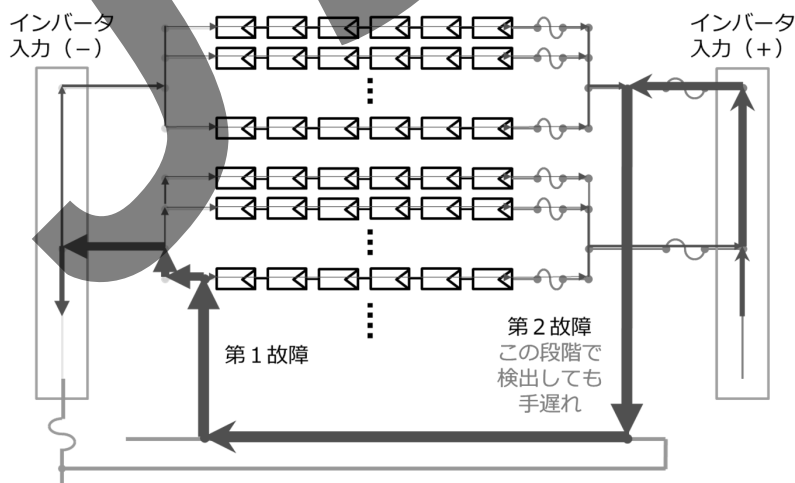


進捗状況：パワーコンディショナ地絡検知機能の評価

米国Bakersfield火災の様相と防止策

The Ground-Fault Protection Blind Spot:

Safety Concern for Larger PV Systems in the U.S. (January 2012)



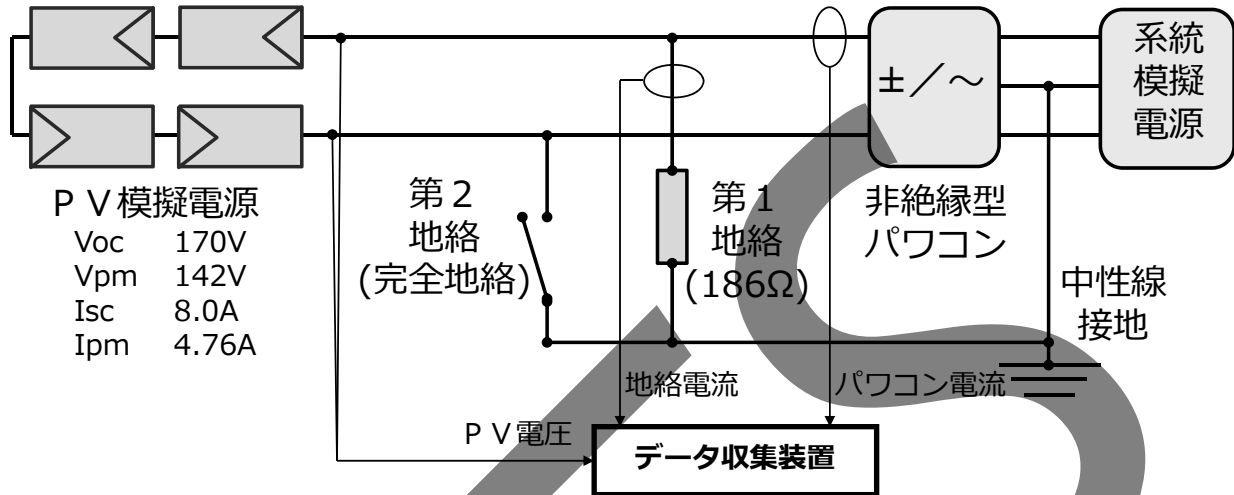
★ 第1故障の確実な検出・除去が必要(検出不感帯の排除)

(3) 直流電気安全のPCS地絡検知機能の評価



進捗状況：パワーコンディショナ地絡検知機能の評価

国内PVシステムを模した多点直流地絡実験

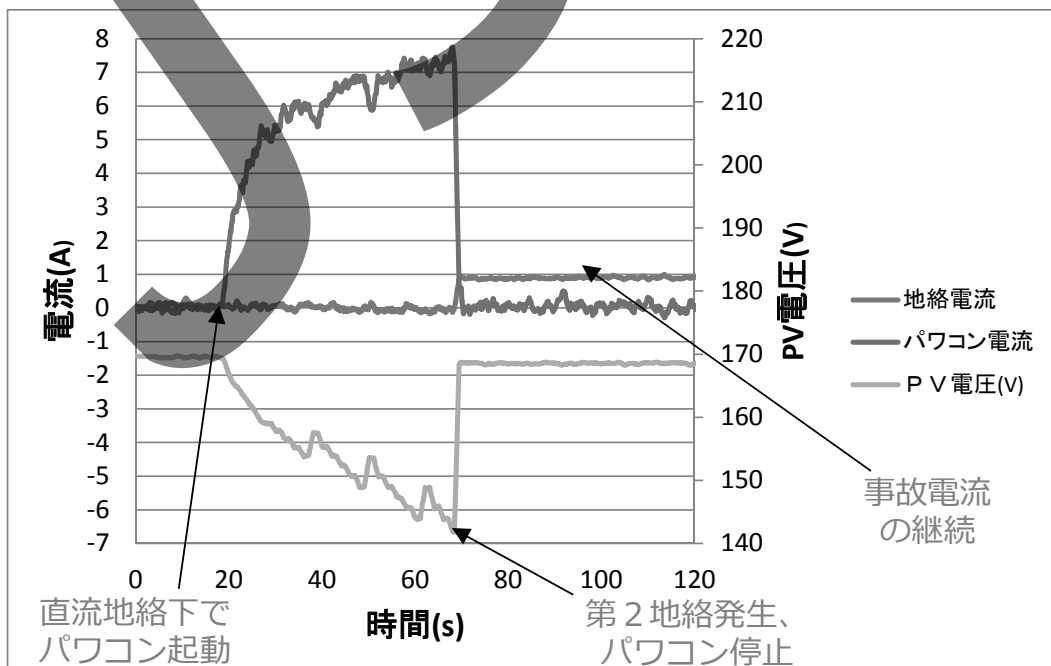


(3) 直流電気安全のPCS地絡検知機能の評価



進捗状況：パワーコンディショナ地絡検知機能の評価

多点直流地絡実験結果 (事故電流の継続)



(3) 直流電気安全のPCS地絡検知機能の評価



進捗状況：パワーコンディショナ地絡検知機能の評価

- ① パワーコンディショナ運転中に直流地絡が発生しても検出できない点(不感帯)がある。
- ② 直流地絡が発生していても、パワーコンディショナは起動できる場合があることが分かった。すなわち、直流地絡が発生していても、一見正常に稼働を継続し得ることが分かった。
- ③ 従って、第2地絡によって米国事例と類似の火災が発生する恐れがあることが分かった。
- ④ 直流地絡火災を回避するためには、以下が必要と考える。
 - ★検出不感帯の無い手段で、第1故障を確実に検出する。
 - ★第2故障が発生する前に、第1故障を取り除く。

太陽光発電の直流電気安全基準策定委員会



委員長	西川 省吾	日本大学 教授
委員	松山 賢	東京理科大 准教授
委員	植田 譲	東京工業大学 特任助教
委員	遠藤 浩二	一般社団法人太陽光発電協会 (JPEA)
委員	山下 浩徳	京セラ株式会社
委員	豊浦 信行	オムロン株式会社
委員	岸添 義彦	英弘精機株式会社
委員	安藤 健志	盤標準化協議会 (日東工業株式会社)
委員	原田 真昭	一般社団法人日本電線協会
委員	田村 裕之	消防研究センター
委員	山岸 貴俊	能美防災株式会社
委員	都筑 建	太陽光発電所ネットワーク
委員	吉富 政宣	有限会社吉富電気
委員	小田垣 啓二	シャープ株式会社

オブザーバ：消防庁，全国消防庁会，NECA，METI等

PV逆電流保護規格検討分科会



主査	小田垣 啓二	シャープ株式会社
委員	長岡 直人	同志社大学
委員	福田 哲也	富士電機株式会社
委員	神戸 智	三菱電機株式会社
委員	大林 只志	株式会社カネカ
委員	柳田 好一	京セラ株式会社
委員	安藤 健志	日東工業株式会社
委員	中島 仁	河村電器産業株式会社
委員	田窪 義玄	木谷電器株式会社
委員	工藤 均	パナソニック株式会社
委員	左右田 裕	株式会社三社電機製作所
委員	楊 民拳	シャープ株式会社

直流電気安全設計ガイドラインのイメージ



- リスク評価をベースにガイドラインの作成。
 - 調査+実証+シミュレーション
 - ドキュメント案を作成、委員会にて審議。
- ドキュメント化を目標
 - 本事業では、太陽光発電システムの直流電気安全設計ガイドライン（義務・推奨）を本事業内で取りまとめ、事業終了後、JEMAおよびJPEA（太陽光発電協会）等を通じて、ガイドラインの利用を薦めることで普及をはかる。
 - JIS, IECは必要に応じて本事業後に検討（逆流防止素子についてはIEC提案が目標）

火災事例（太陽電池以外）



Figure 3 shows the second fault in a fire similar to the Bakersfield event. In this scenario, the short circuit current is forced through the small 10 American wire gauge (AWG) grounded string conductor, causing a conductor insulation fire. Figure 4 shows the second fault in a fire similar to the Mount Holly event, in which the array short circuit current is forced through the poor inadvertent grounding connection, causing an arcing fire.

A 500-kilowatt (kW) PV array can have more than 1,500 amps of available short circuit current, which can cause enormous damage during this short circuit condition. If the two connection points were intentionally made with terminations able to handle the current, there would be little if any hazard. Unfortunately, these connections are made with only incidental contact that can evolve dramatically into intense arcs with operating temperatures of more than 2,000°C. These arcs can jump gaps between metal parts up to six inches apart.

図3はベーカーフィールド事件と同様の火災における第2の故障を示したものである。本シナリオでは、短絡電流が米国ワイヤゲージ (AWG)10という細い被接地ストリング導体を通ることになり、導体の絶縁材が発火する。図4はマウントホーリー事件と同様の火災における第2の故障を示したもので、意図せず形成された不良な接地接続をアレイ短絡電流が通ることになり、アークにより火災が発生する。

500キロワット(kW)のPVシステムは短絡電流として1,300アンペアをもたらすものであり、こうした短絡条件下で多大な損傷を起こす。接続点2点が当該電流に対応する成端を意図的に備えている場合は、ハザードがあったとしてもごくわずかに過ぎないだろう。しかし残念ながら、これらの接続は偶発的接触によるもののみで起こり、2,000°Cを超える動作温度を伴った強いアークに劇的に進化しうる。これらのアークは最大6インチ離れた金属間を飛ぶことができる。

まとめ



- PVシステムのメリットだけを全面に押し出して推進するのではなく、真正面から各種リスクに立ち向かい解決していくことが必要不可欠である。
- 平成24年度から開始した、「新エネルギー等共通基盤整備促進事業/太陽光発電システムの直流電気安全性に関する基盤整備」プロジェクトについて概要を紹介した。本プロジェクトでは直流電気安全の火災リスク低減を主目的としており、そのために尽力したい。
- PVシステムは多数の技術分野に支えられているため、分野の異なる専門家同士の積極的な情報交換が事故対策進展の鍵となる。火災学会の研究者の多くの方々がPVシステムの安全性に関してご参画頂けるなら大変心強い。
- 最後にPVシステムのリスクはこれ以外にも存在する。今後のPVシステムの大量導入および、そのエネルギーの本格利用に向けて、本プロジェクトに限らず、リスク、危険から目をそむけずに議論できればと考えている。

謝辞



本研究の一部は、経済産業省/三菱総合研究所受託研究「新エネルギー等共通基盤整備促進事業」の中の「太陽光発電システムの直流電気安全性に関する基盤整備」の一環で行った。ここに記して関係者各位に感謝の意を表する。

連絡先 : takashi.oozeki@aist.go.jp

共同実施機関 :

- ・ 関電工
- ・ JX日鉱日石エネルギー
- ・ みずほ情報総研
- ・ 日本電機工業会