

配布物からは、派手な事故画像を除去しています。
その理由は、以下。

- ・画像による恐怖商法事例多数（感心しない）
- ・画像は感情をかき乱し熟慮を妨害する。

太陽光発電火災に関する、 現象内容・発生機構のレビュー



2014/3/26 太陽エネルギー学会

PVResQ!名古屋支部

吉富政宣(有限会社吉富電気)

1

実例と概要

PVS火災事例とその傾向

- ドイツの統計
- 屋根建材型(一体型)と屋根置き型(後づけ型)

2

要因別分類

発生機構

- システム内の全ての場所で発生する事象(直列, 並列, 地絡アーク)
- モジュール内の発生事象(逆電圧, 逆電流, 直並列アーク)

3

主なものを挙げる

火災経過紹介, 対策案立案

- すぐにできること(設計上の工夫)

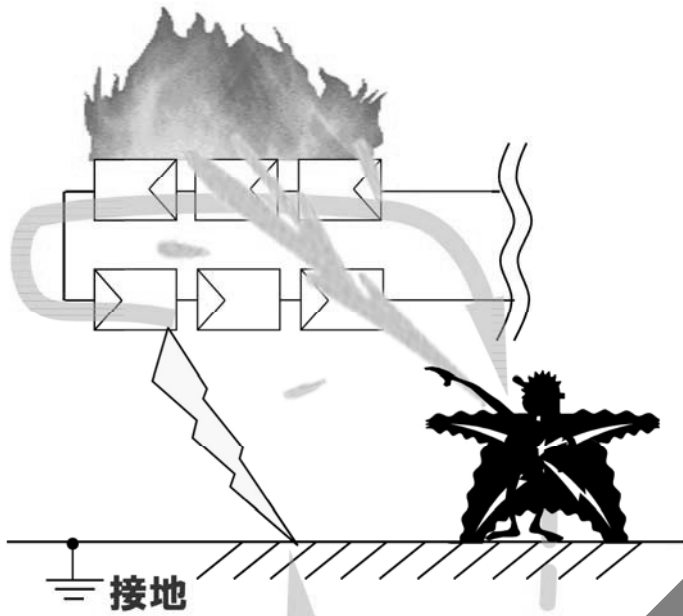
4

今後の課題

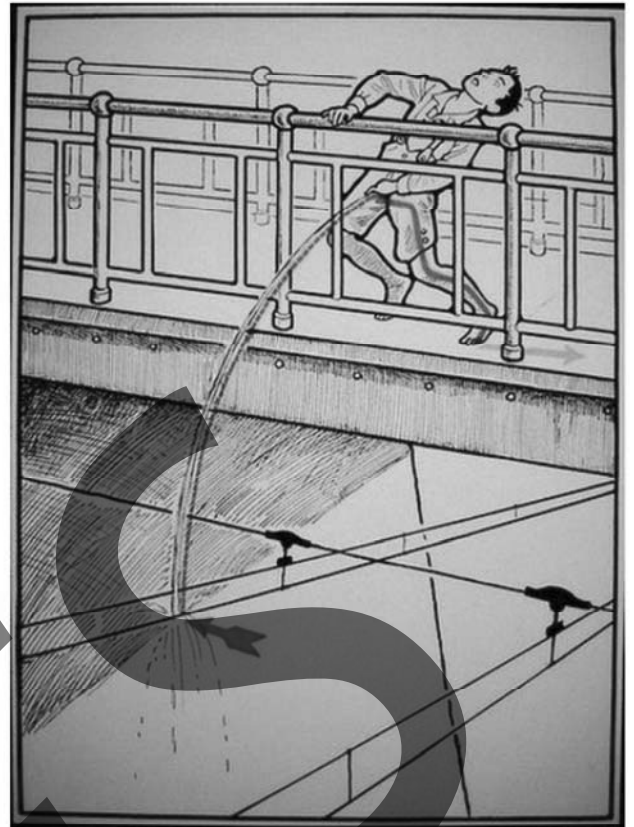
抑止法研究を目的とした情報収集, の困難

- 非通報の問題

放水と感電危険



架台, 屋根鉄板等, 同電位部分



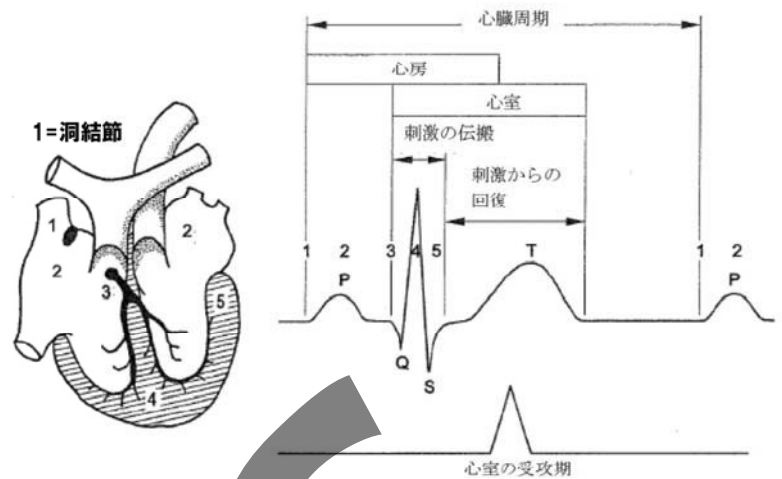
✓ 消防の放水が感電の電路となる.

10

感電の考え方

感電危険・・・低圧電気での心室細動と受攻期 (IEC479-1)

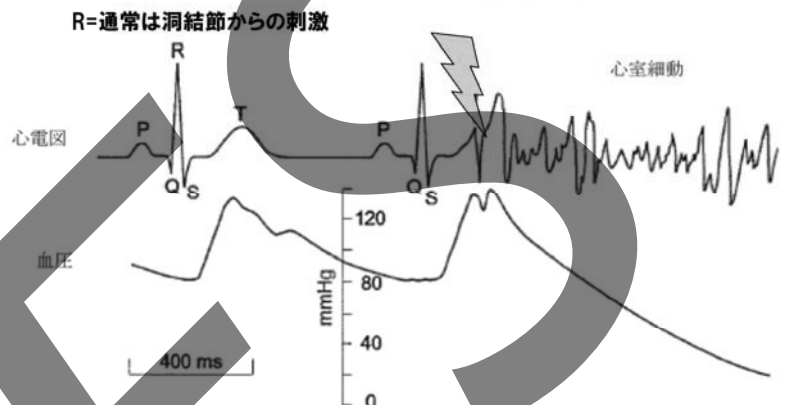
1. 感電死亡事故の原因は、やけど等ジュール熱によるものと、心室細動(心室のけいれん)の2種類。
2. 低圧感電死亡事故は心室細動によるものが殆どである。
3. 心臓拍動周期には受攻期(vulnerable period)と呼ばれる、外的刺激に弱い期間がある。
4. 心室細動を発生させるのは、R-on-Tの期外収縮。



心室細動の発生確率は、次の関数になるとされる。

- 電源周波数
- 継続時間
- 人体通過電流
- 心臓電流係数(電流経路)
- 電気極性

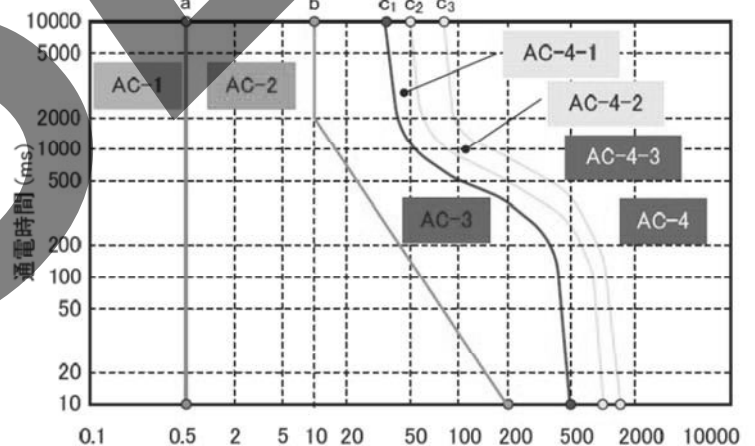
⇒大雑把には電流時間積で評価



感電危険・・・心室細動閾値 (IEC479-1)

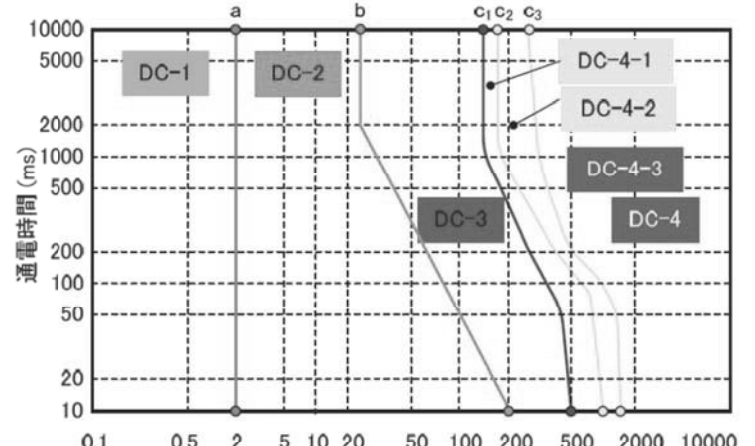
交流の場合

領域	生理学的影響
AC-1	通常無反応
AC-2	通常有害な生理学的影響なし。
AC-3	電流が二秒以上継続して流れると痙攣性の筋収縮や呼吸困難の可能性はある。
AC-4	心停止、呼吸停止または重度のやけどといった病理生理学上の危険な症状が引き起こされることがある。 AC-4-1: 心室細動確率約5%以下 AC-4-2: 約50%以下 AC-4-3: 約50%以上



直流の場合

領域	生理学的影響
DC-1	通常無反応、わずかに刺すような痛み
DC-2	通常有害な生理学的影響なし。
DC-3	心臓に回復可能な障害と伝達障害が起きる可能性がある。
DC-4	危険な病理生理学上の症状が引き起こされることがある。 DC-4-1: 心室細動確率約5%以下 DC-4-2: 約50%以下 DC-4-3: 約50%以上



ただし太陽光発電は、上表(IEC479-1)が定義する直流ではない。人体を流れる直流電流の大きさ I_0 (mA)
※日中、日射急変するとき、また、夜間の灯火による発電は、交流性を帯びる。

漫然と**恐怖画像**を見てもよくわからないので、**定性情報**を抽出。

✓ **事例の多さ**

✓ 米国、イタリア、フランス等でも**事例は、大量**にある。

✓ **原因不明、情報錯そう**

✓ **原因・経過不明**が非常に多い。

✓ 情報錯そう マスコミ、消防での意見の食い違い、世の中の思い込み。

✓ **傾向**

✓ **種類:** リジッド系、フィルム系、両方がある。

✓ **規模:** 住宅等小規模～倉庫等大規模、両方がある。

✓ **原因:** 太陽電池原因、建物側原因、両方がある。

✓ **消防の意識**

✓ **再出火危険**への警戒

✓ (夜間といえども**灯光器で発電**するので)**放水を通じた感電**への警戒

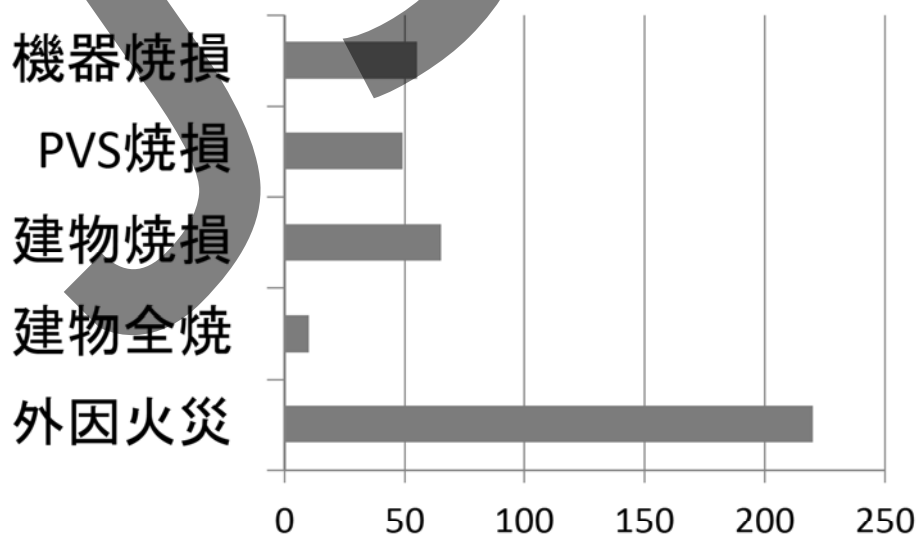
23

ドイツにおけるPVS火災統計(Laukamp氏)

✓ **火災総数(対象期間 1995～2012)** 400件

✓ **PVS火災(内因火災)の割合** 180件

✓ **外因火災によりPVSが焼損した割合** 220件

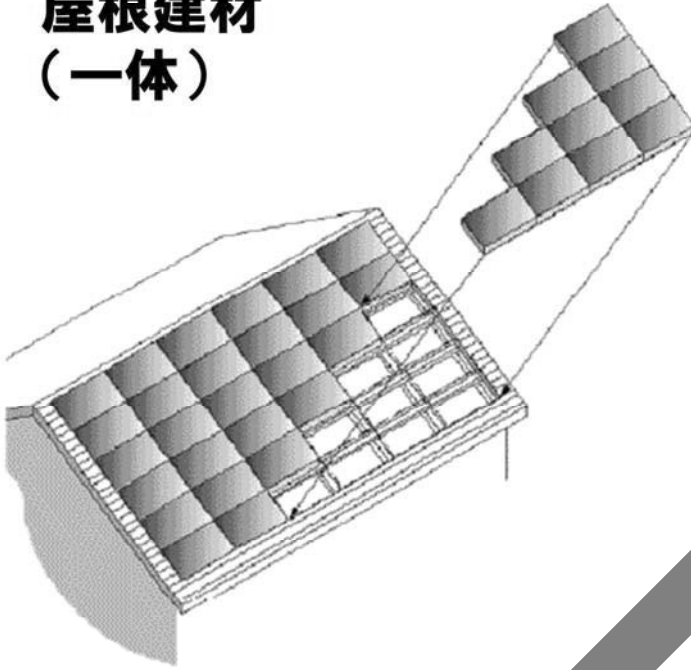


✓ PVS火災の**半数は、PVS自体に原因**がある。

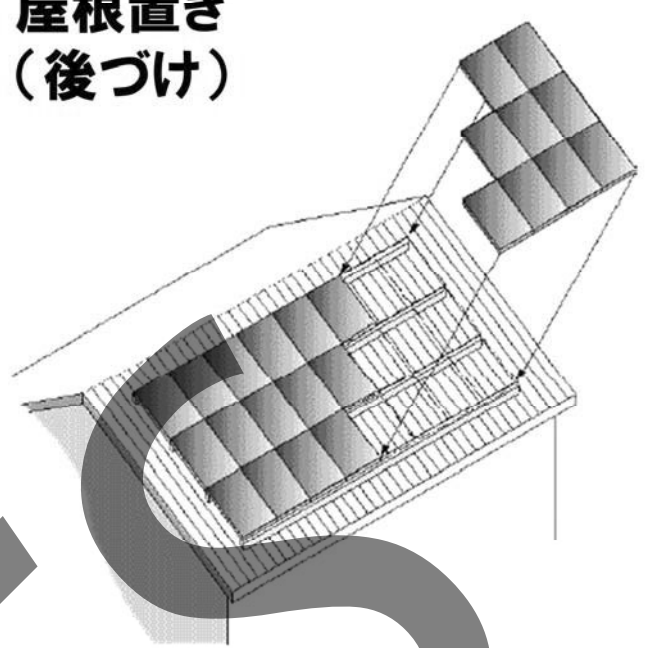
✓ 以上は**有用な知見**。∴ドイツ電気方式≒日本。

屋根建材＝一体，屋根置き＝後付

屋根建材
(一体)



屋根置き
(後づけ)



まず，屋根建材型(以後，“一体型”)について.

25

延焼危険に関する，世界への公知化 @欧州2006

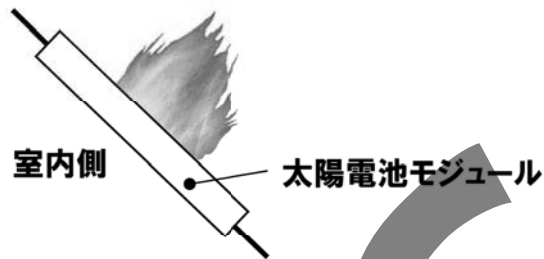


製造時のJB内のはんだ付け不良個所が直列アークを発生。
アークが，JB内部から高温滴下物を噴出させた。
それが野地と桟木の一部を炭化させた(延焼危険の認知)

26

屋根建材＝一体

屋根建材 (一体)



一体型では、太陽電池の下に、野地板など可燃物。
よって、内部延焼しやすいと想像せられる。

では、可燃物が近接していない、後づけ型はどうかなのか？

29

太陽電池モジュールの下の可燃物 @日本

「屋根には可燃物が無い」
「だから大丈夫」
との言説もあつたが、
事実は、そうではない。

ムクドリ営巣
糞害とダニ害、
そして可燃物である稲藁。



巣立ちの後



野鳥が、稲わらなどの可燃物を運び込むことがある。

30

太陽電池モジュールの下の可燃物 @日本



広葉樹の落ち葉の堆積
45リットルゴミ袋×5



エコロシステム 吉川順様撮影

後づけ型に可燃物が無いというのは、大嘘。

住宅PV火災，燃え抜け“なし” @米国2010メリーランド州



落ち葉堆積@乾燥状態，動物による咬害？，燃え抜け無し。
では，後づけ型は，燃え抜け(延焼拡大)しないのか？



ULのレポートより

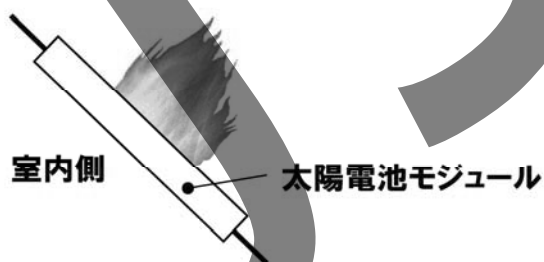


不燃材料に遮られた後づけ型でも，燃え抜けする！
輻射熱？解らないことが多い。一層の研究が必要。

33

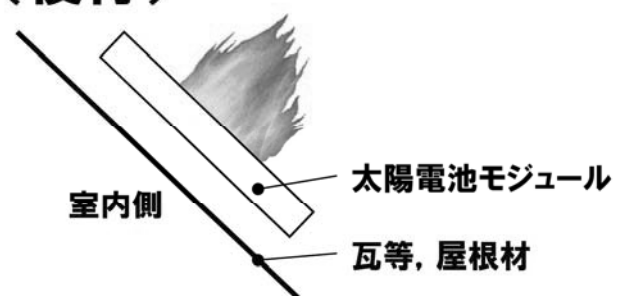
屋根建材＝一体，屋根置き＝後付

屋根建材 (一体)



一体型太陽電池の下部は，
野地板など可燃材料。
よって，内部延焼しやすい。

屋根置き (後付)

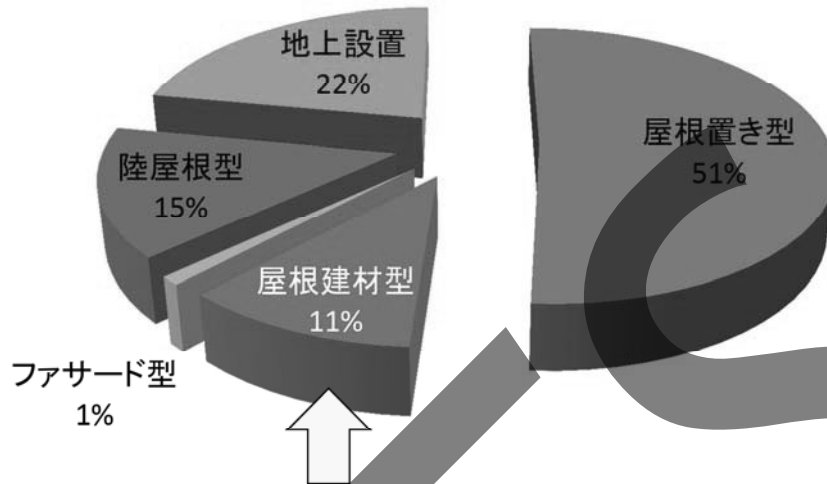


後付型太陽電池の下部は，
瓦など不燃材料。
しかし，堆積物次第では，
燃え抜ける。

では，定量的にはどうなのか？

設置形態ごとの火災数構成比(Laukamp氏)

- ✓ 一体型(屋根建材型)の火災事例数の突出
 - ✓ 導入数は, 全体の1%.
 - ✓ しかし, 出火報告数は, 全体の11%



一体型の火災リスクは, 後づけ型の20倍.

35

1

実例と概要

PVS火災事例とその傾向

- ドイツの統計
- 屋根建材型(一体型)と屋根置き型(後づけ型)

2

要因別分類

発生機構

- システム内の全ての場所で発生する事象(直列, 並列, 地絡アーク)
- モジュール内の発生事象(逆電圧, 逆電流, 直並列アーク)

3

主なものを挙げる

火災経過紹介, 対策案立案

- すぐにできること(設計上の工夫)

4

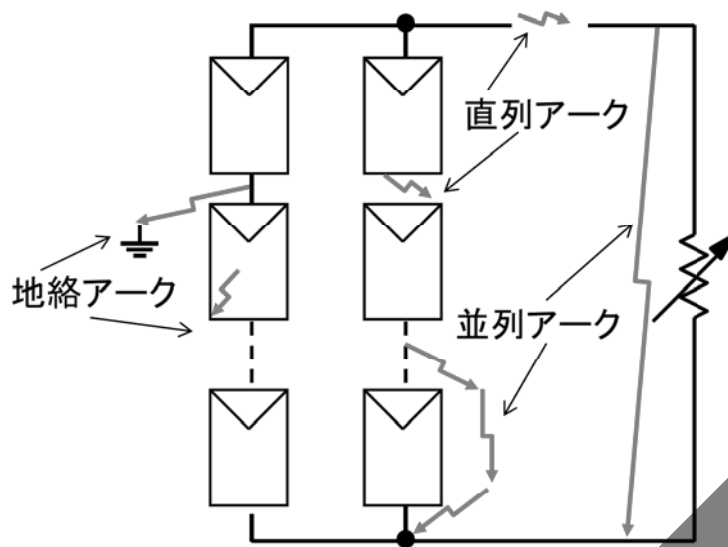
今後の課題

抑止法研究を目的とした情報収集, の困難

- 非通報の問題

PVS火災の引き金事象に関する基礎知識①

✓ システム内のどの部位でも発生する事象



※欧米：直列・地絡アーキの報告多数。

直列アーキ：同極性の配線間に生じる。コネクタ嵌合部や端子台のネジが緩んだ場合などが、これに相当する。

並列アーキ：異極性の配線間に生じる。プラスとマイナスの電線を直接接触させたような場合が、これに相当する。

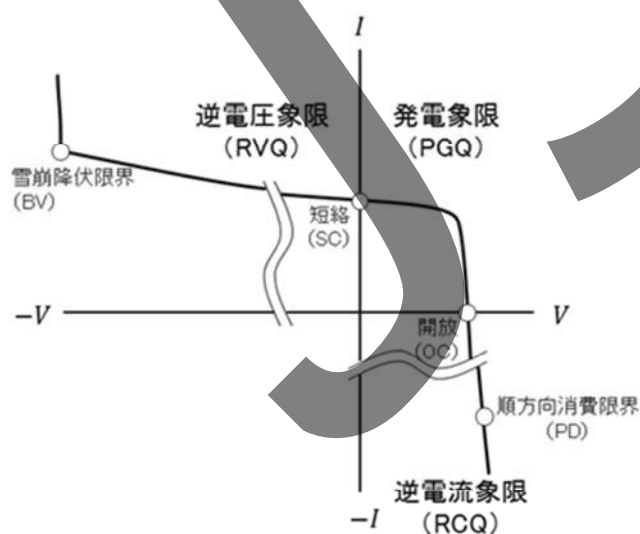
地絡アーキ：（多くの場合）異極性の配線間に生じる。まずプラスの配線が地絡し、次にマイナスの配線が地絡したような場合が、これに相当する。地面や架台、建物鉄骨など、本来電気を通じるべきではない場所を電流が通じるところに、本タイプの特徴がある。

✓ システムのどこでも発生する事象としては、
直列アーキ、並列アーキ、地絡アーキがある。

37

PVS火災の引き金事象に関する基礎知識②

✓ モジュール内でのみ発生する火災引き金事象



※日米欧：逆電圧焼損の報告多数。

セルの逆電圧焼損：発電電圧符号が逆転したセルに生じる。保護装置であるバイパスダイオードが開放（断線）したような場合が、これに相当する。

セルの逆電流焼損：発電電流符号が逆転したセルに生じる。電圧が異なるストリングを、何らの保護装置もなく並列にしたような場合が、これに相当する。

セル同士の直並列アーキ：モジュール内の同極配線間、または、異極配線間で生じる。モジュール内の半田接合部が緩んだような場合が前者に相当し、製造時からセル同士が重なっていたような場合が後者に相当する。

✓ モジュール内発生事象としては、
逆電圧、逆電流、直並列アーキがある。

火災・感電の事実とその発生機構に関する情報源

✓ 行政のアクション

- ・ 経済産業省:平成24年度～新エネルギー等共通基盤促進事業
「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」, 産総研, 関電工, JX日鉱日石エネルギー, 日本電機工業会, みずほ情報総研(平成25年度より)の5機関
- ・ 総務省消防庁:「太陽光発電システムを設置した一般住宅の火災における消防活動上の留意点等について」
(平成25年3月26日総務省事務連絡)

✓ 事実に関する論文, 報告記事(記事内に参考文献リストあり)

- i. 小室修, “住宅用太陽光発電システムが設置された建物火災の消防活動について”, 第59回全国消防技術者会議資料(平成23年10月), pp127-131 (2011)
- ii. 吉富政宣, 太陽光発電システム特有の火災発生特性ならびに消火活動時の感電危険, 火災324, pp.14-19
- iii. 大関崇, 吉富政宣, 太陽光発電システムのリスクに関して, 安全工学52, pp162-172
- iv. 吉富政宣, 太陽光発電システム特有の火災発生特性ならびに消火活動時の感電危険, 太陽光発電システムの安全保護 その1, 太陽エネルギー216, pp.91-100(2013)

✓ メカニズムに関する論文, 報告記事

- i. 加藤和彦, 太陽光発電システムの不具合事例の分析・評価(1)ー故障診断手法の確立に向けてー, 太陽エネルギー, Vol.33, No.4, pp.69-74, (2007)
- ii. 池田一昭, PVモジュールのインターコネクタ不備に起因する症状および出力低下, 太陽エネルギー講演論文集pp201-204, (2012), 北九州.
- iii. 吉富政宣, 太陽電池セルの焼損メカニズムー逆電圧象限動作ー 太陽光発電システムの安全保護 その2, 太陽エネルギー, pp73-86, (2013)

✓ 学会に入ったほうが, 話が速い.
太陽エネルギー学会がおすすめ.

39

対策のための技術開発方向性?(問題構造と私見)

➤ 着目すべき現象群

- ✓ 直列・並列・地絡による三種のアーキ(システム)
- ✓ 逆電圧・逆電流(半導体)
- ✓ 過電流(@電技要求), 短絡(愛工大&日東の開発デバイスの視点), 雷害

➤ 全般的方向性

- ✓ 逆電圧は, クラスタサイズ制御とBPDロバストネスによる保護が有力.
- ✓ 地絡アーキ・逆電流・過電流の多くは, 「地絡という同一現象」から生じる.
これらは, 第一故障保護によって対応可能と考えられる(確信型私見)
- ✓ 残る, 直並列アーキ・短絡・雷による火災は, 可能性が低い気がする(経験型私見)

➤ 第一防護壁突破対策としての多重防護

- ✓ 個別保護? 「コスト増と危険緩和のトレードオフ」となる.
社会的要求とのすり合わせが重要(利潤関係者や技術専門家の独断はダメ).

★ご案内 逆電流・過電流保護は, 宮本氏発表
第一故障保護は, 石井氏発表

ただし今日は上記のうち, 「直並列アーキ」「雷」「短絡保護」に手が回っていない.
そこで次に, 「アーキ保護」について軽く情報提供しておく.

40

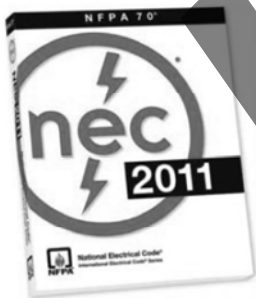
アーク保護に関する情報提供 (ill-defined problem)

1. 検知と遮断という, 2つの技術課題
→ 以下4枚に幾つかの論点を収録しておく.
2. 相互作用(「地絡や逆電流」と「アーク」)を如何に考えるか.
→ まだ分からないことが多い.
組み合わせ型故障の研究が必要.
(方法は論理, 確率論, システム工学になるか?)



AFCIの規格化, 実機例

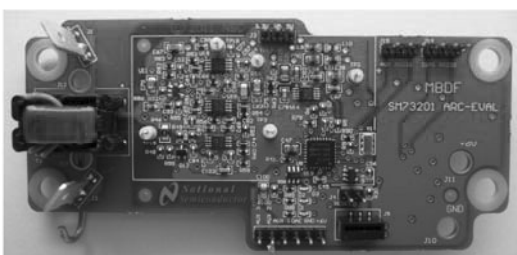
NEC690.11(日本規格協会訳)



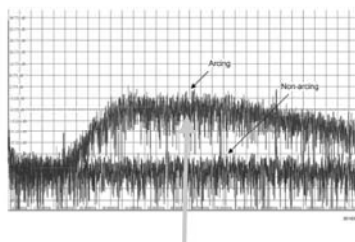
アーク漏れ回路保護(直流)

建築物上の又は建築物を貫通する、直流電源回路、直流出力回路又はその両方を備えた80V以上のPVシステム最大システム電圧で動作する光起電力システムは、認定品登録済み(dc)アーク漏れ回路遮断器(吉富注:UL1699BのAFCIのこと)、PV型、又は同等の保護を提供するように認定品登録されたその他のシステム構成品によって保護されなければならない。PVアーク漏れ保護手段は、次の要求事項に適合しなければならない。

- (1)システムは、直流PV電源及び出力回路内の導体、接続、モジュール又は他のシステム構成品の意図された導通での故障に起因するアーク漏れを検出し、断路しなければならない。
- (2)システムは、次の一つを使用不能にし、断路しなければならない:
 - a.故障が発見された場合、故障回路に接続されたインバータ又は充電制御装置
 - b.アーク回路内のシステム構成品
- (3)システムは、使用不能にされた又は断路された機器は手動で再起動するように要求する。
- (4)システムは、遮断器が動作したことを視覚的に指示するアナウンシエータを備えなければならない。この指示は自動的にリセットしてはならない。

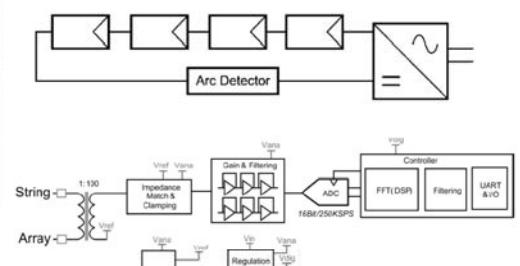


アークディテクタ(AFD)・・・NS社(現TI社)



アーク時の高周波

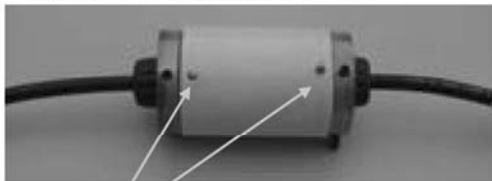
横軸周波数 (kHz), 縦軸電流 (dB)





開放処理機器の2例

溶融を利用したディスコネクト
(現在、やや尻切れトンボ)



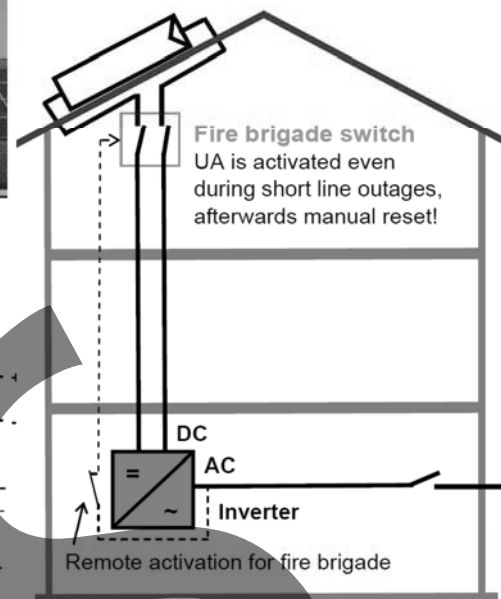
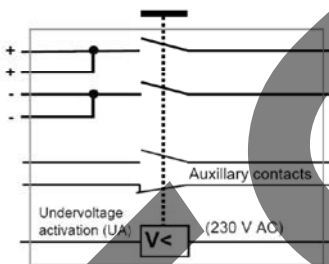
原文から要所抜粋

穴にはピンが入っていて高温時に溶融する。
ばね張力でコネクタが外れ120V以下になる。
セラミック管を叩き割って動作させることも可能。
安い、長く複雑な配線が必要。信頼性は？

消防隊スイッチ(欧米で一定の評価を得ている手段)



Fire brigade switch
(e.g. SOL30-Safety from EATON)
(1000 V, 30 A)



内容は、OR型DC遮断システム

- ・系統UA(UVR)による、DC主回路自動遮断。
- ・マニュアル押しボタンによる、リモート遮断も可能。

課題:大量に設置しなければELV(DC120V以下)にならない。

(FhGなどで様々な方式のトレードオフを精力的に研究中)

- ・上図小屋裏設置は現在ドイツでは禁止。屋根上に設置せよとのこと



並列アークでは、短絡処理が良い。

※ 並列アーク(相間アーク)の場合。

➤ 短絡による消弧が可能

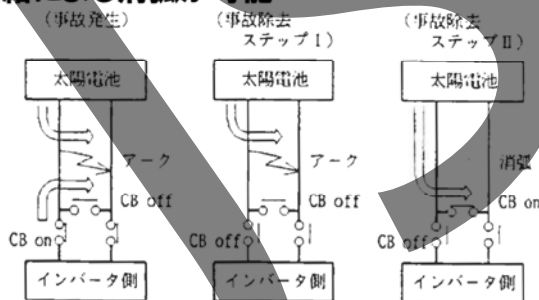


図 7 アレイ短絡事故に対する消弧システム
(アーク短絡)

※ しかし、BPD開放がモジュール内にある場合に短絡処理すると危険が増大する。

➤ 左はPmax運転。右は短絡処理後(丸囲み部に新規ブレイクダウン)



(ストリングの)Pmax動作時



Isc動作時

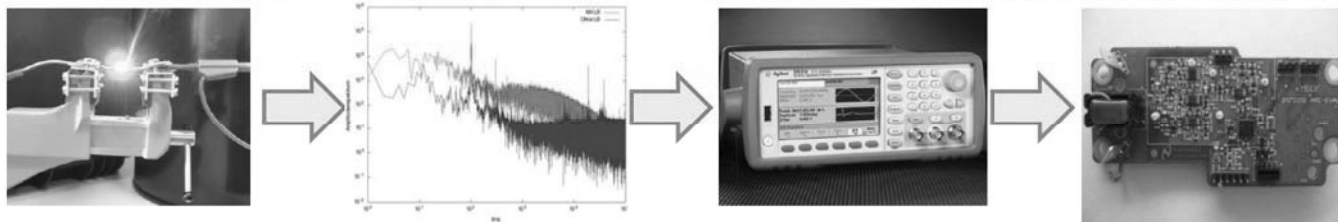
吉富政直:
PV火災ワークショップ
@東工大



検知方法, 故障除去方法に関するPV用AFCIの動向

※ スイスやドイツにおける検知法開発プロセス

- 模擬装置によるアーク発生, スペクトルパターンの収集, FGによる再現, 試作回路の動作テスト



- 並列アークと直列アークではスペクトルパターンが異なる.
- 研究開発の中心に居るのは, スイスBern大学のHaeberlin氏.

※ 事故処理法

- (先の議論より)並列アークと直列アークそれぞれ別々の事故処理シーケンス, 方法が必要.
- モジュール内FETを開放しELV化する方法, ACモジュール活用など多様な対処法提案あり.

※ 動向

- NEC2011よりPVAFCIが義務化された.
- AFCIの試験法は, UL1699Bが担っている.
- SMAの米国仕向け品には, すでにAFCIが搭載されている.
- 欧州は, UL1699B試験の再現性の無さ, ローカル規格ゆえの実効性不足に疑問を呈している.
- 検出における**並直分離**は, 故障除去にとって大きな課題.

このページ, 書きかけです. まだ分からないことが多いため, 調査&整理を進めています.

45

1

実例と概要

PVS火災事例とその傾向

- ドイツの統計
- 屋根建材型(一体型)と屋根置き型(後づけ型)

2

要因別分類

発生機構

- システム内の全ての場所で発生する事象(直列, 並列, 地絡アーク)
- モジュール内の発生事象(逆電圧, 逆電流, 直並列アーク)

3

主なものを挙げる

火災経過紹介, 対策案立案

- すぐにできること(設計上の工夫)

4

まとめ

抑止法研究を目的とした情報収集, の困難

- 非通報の問題

火災対策のうち、すぐにできること① 資材関連

✓ モジュール

- ✓ クラスタ電力の小さい製品を用いる。

✓ 筐体全般

- ✓ 金属製筐体を用いる(樹脂製筐体を使わない)
- ✓ ガターを大きくとる。
- ✓ 電気工事用の亀の甲ネジを用いる(電子回路用ネジを使わない)

✓ 接続箱

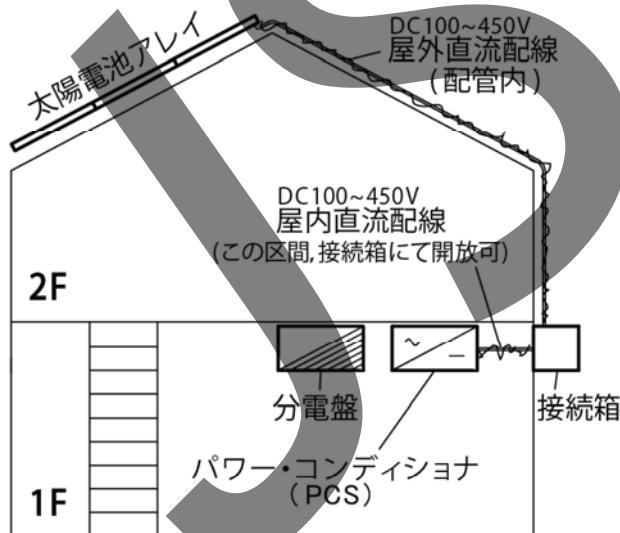
- ✓ ワイヤ配線をする(プリント基板配線をしない)
- ✓ 双極にBLDを設ける(片極としない)
- ✓ 双極に過電流保護素子を設ける(片極としない)

✓ ケーブル

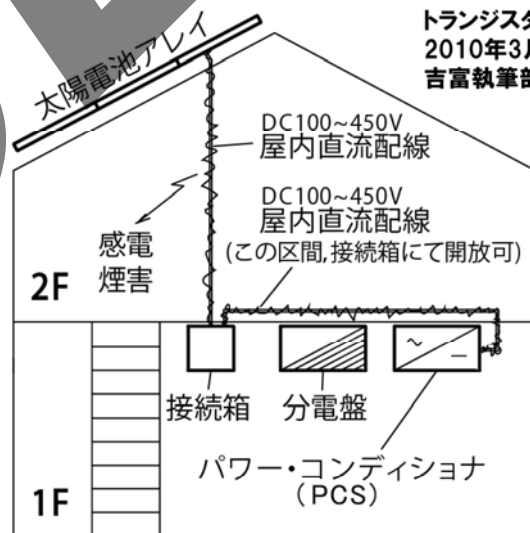
- ✓ シングルコアケーブルを用いる(多心を避ける)
 - ✓ 例:CV-3C ではなく, CVTにする。

58

火災対策のうち、すぐにできること② 施工計画関連



屋外配線の場合



屋内配線の場合

トランジスタ技術
2010年3月号
吉富執筆部分を改変

- 1.室内は、屋外配線を基本とする(DC長距離配線を避ける)
- 2.屋内配線区間には二方向避難原則を適用する。
- 3.DC遮断位置を明確化し、アレイに近いところで遮断できるようにする。
- 4.小屋裏配線後退(消防士の排煙・残火チェックがしやすい配線経路)
- 5.ケーブルはシングルコアを採用する(短絡防止・導火線効果抑止)
- 6.教育を！(リスク認知無くば、危険であっても人々は安心してしまう)

NEC, IEC0364, AS/NZS
建築基準法, 消防法
NFPA
NFPA,
NEC, IEC0364-7-712
NEC, NFPA, SolarABCs

完全防御法はまだ見当たらないが、抑制方略はある。

59

1 実例と概要 PVS火災事例とその傾向

- ドイツの統計
- 屋根建材型(一体型)と屋根置き型(後づけ型)

2 要因別分類 発生機構

- システム内の全ての場所で発生する事象(直列, 並列, 地絡アーク)
- モジュール内の発生事象(逆電圧, 逆電流, 直並列アーク)

3 主なものを挙げる 火災経過紹介, 対策案立案

- すぐにできること(設計上の工夫)

4 今後の課題 抑止法研究を目的とした情報収集, の困難

- 非通報の問題

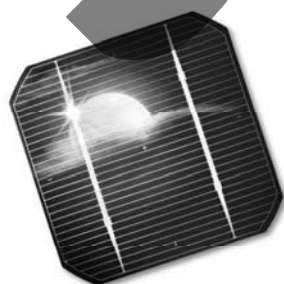
まとめ

PVS火災は少なくない。

- ・ 対策のためには、**一層の研究が必要。**
- ・ 研究加速のためには、**情報集約が必要。**
- ・ 情報集約のためには、**関係者保護の体制が必要。**

↑
最大の課題

Thank you !!



(有)吉富電気
技術・代表取締役 吉富政宣

<http://homepage2.nifty.com/domi/index.html>
<http://pv.way-nifty.com/>

愛知県名古屋市中東区社台1-114

mail : ZVU06411@nifty.com
tel/fax : 052-760-2573
mobile : 0904-161-7171