

# 消防研究センターにおける太陽光発電システムの火災リスクに関する取り組み

消防研究センター 田村裕之

## 背景

- ・ 原子力発電所事故を受けて、再生可能エネルギーの利用が活発に
- ・ 住宅用太陽光発電システム設置に対する補助金の制度、余剰電力の固定価格買取制度の発足
- ・ 住宅に設置された太陽光発電システムが 100万件を突破(2011年)
- ・ 2020年には500万件になる予想(経産省予想)



発電設備なので、火災の危険性、消防活動上の危険性はどうか。

## 火災事例(1)~(3)

### (1) 屋根上のモジュールからの火災

- ・ 発火3日前に使用者より販売店に「太陽光ブレーカーが落ちる」との連絡。
- ・ 販売店が配線の漏電をチェックし、4系統の内、2系統目に絶縁不良を発見。2系統目の接続をOFF。
- ・ 地上からの外観確認では異常なし。
- ・ 発災時、消防が駆け付けた時、居住者がホースで消火し終えていた。
- ・ 販売店が急遽訪問。パネルの取り外し(焼損した2系統目を含む13枚)と、モジュールの下にあった杉の木の落ち葉等を回収した。

### (2) 屋根上のモジュールからの火災

- ・ 後付けの太陽光発電システム。
- ・ 外を通行していた人が、屋根の上から煙が出ているのを見つけ家主に伝えた。家主が消防と設置業者に電話連絡をした。
- ・ モジュール配線をまとめてモジュール裏に押し込んであった。鳥の巣や枯れ枝があった。
- ・ モジュール1枚の焼損。
- ・ 切れた配線に、溶融痕が認められた。

### (3) 屋根上のモジュールが焼け落ちた火災

- ・ 後付けの太陽光発電システム。
- ・ 2階の部屋から出火した火災が屋根を抜けて、モジュールを焼損させた火災。
- ・ 出火場所は部屋の中で、太陽光システムとは無関係。
- ・ 焼損した配線が金属部材に触れるなどしてぱちぱちと放電していた。放電を止められなかった。

# 火災事例(4)～(5)

## (4) 屋根上のモジュール配線から出火した火災

- 工場建屋の屋根上にモジュールを設置する工事期間中に出火
- 発電の運用前
- 屋根上へのモジュールの設置が終わり、接続箱やパワーコンディショナへの配線つなぎ込みを残して休日を迎えた
- 配線の端部をビニルテープで巻き、屋根の上にまとめて放置して作業を終えた
- 雨が降った後に晴天になり、まとめてあった配線端部から出火
- 配線端部の処理としてビニルテープを巻いていたが、ストリング毎に+端子と-端子を一緒にビニルテープで巻いていた
- 雨の水がテープ内に浸み込み絶縁が悪くなったところで日射により発電が開始され、端部の両極間が絶縁不良になり発火

## (5) パワーコンディショナから出火した火災

- 事務所ビル地下1階の電気室に設置されていた感知器が発報した。
- 電気室の自動消火装置は作動しない状況。電気室内に火煙は無く、きなくさい臭いがただよっていた。
- 発報した感知器付近にパワーコンディショナ内部には焼損が認められた。
- パワーコンディショナは、前年の落雷被害で、出火の前に部品交換等の修繕を行っている。
- 筐体内を調べると、ダイオードの焼損が激しい。

# 東日本大震災での火災事例(1)～(3)

## 火災事例(1)

- 3階建て住宅の1階車庫内に設置された太陽光発電システムのパワーコンディショナが津波により浸水し、パワーコンディショナ内部の配線から出火した。
- 津波被害を受けた翌日の午前中に焼損を発見した。発見時は日射のある天気で、発電による電力で発火したものである。
- 住民は避難所にいたため無人であった。
- 発見時、パワーコンディショナ内はまだ湿っていた。駆け付けた消防隊員が粉末消火器で消火した。被害はパワーコンディショナ内部だけである。

## 火災事例(2)

- 2階建て住宅に設置された太陽光発電システムのパワーコンディショナが津波により浸水し、配線に付着した塩分などの影響で絶縁が劣化し、微小電流が流れ続けることで発熱が起こり、約2ヶ月後に出火したと思われる。
- 住民は避難所にいて無人であった。
- 火災を発見したのは近くにいた作業員である。消火活動はなかった。被害は金属筐体でできたパワーコンディショナ内部だけで、配線被覆部分が焼損した。

## 火災事例(3)

- 建物1階外壁に設置された太陽光発電システムのパワーコンディショナ(接続箱機能も内蔵)と思われる機器が津波で浸水した。
- 屋根上の太陽電池からの電力入力配線に力がかかり機器筐体から配線が脱落したことにより短絡し、配線被覆が焼損したと考えられる。
- 被害は筐体付近の配線のみである。焼損が発見されたのは津波被害から約2週間後であった。

# 出火原因

- 接続箱やパワーコンディショナ内の絶縁不良、端子部のゆるみ
- 機器内の部品不良、半田不良（一般的な電気用品火災）
- 落雷等の影響による機器内や部品内の絶縁破壊
- 配線、施工の不良（つぶす、かじられる、束ねる、養生不適、バックシートを傷つける、ガラスを割る）
- 後付けモジュール 屋根との隙間にある金具を通しての漏電
- 後付けモジュール 屋根との間に可燃物の堆積  
ホットスポットの熱、配線の絶縁劣化による放電で着火
- 屋内仕様の機器を屋外に取り付ける場合があり
- バイパスダイオードの不良  
端子ボックス内が高温、ホットスポットの形成
- ブロッキングダイオードの不良  
モジュールへの逆電流の発生
- モジュール内の半田不良による接触部過熱や半断線過熱

## 消防活動事案 小屋裏での活動中に感電した事例

- 昼間に屋根一体型太陽電池モジュールで覆われた屋根をもつ住宅が火災
- 出火原因は太陽光発電装置とは無関係
- 屋根裏に火が入ったため、残火確認で屋根を壊す作業を実施
- 屋根上でとびろやベンケイでモジュールを持ち上げ、手をかけて引きはがそうとしたときに、手にびりびりと感じた
- 小屋裏で片手を建物の金属製柱につき、もう一方の手でモジュールの裏面を押してはずそうとしたときに、バーンという電撃を感じた

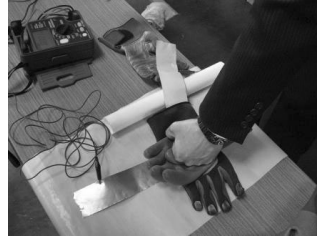
# 隊員装備品の抵抗測定

A消防本部  
絶縁抵抗計で測定

電圧 250 V  
測定レンジ 4000 M $\Omega$   
電極 アルミシート(幅約 5cm)



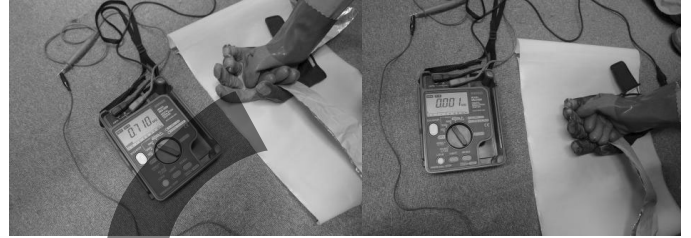
乾いた状態 3520 M $\Omega$



濡れた状態 0.001 M $\Omega$

B消防本部  
絶縁抵抗計で測定

電圧 500 V  
測定レンジ 4000 M $\Omega$   
電極 アルミシート(幅約 5cm)



乾いた状態 0.710 M $\Omega$

濡れた状態 0.001 M $\Omega$



消防隊の長靴 抵抗測定 O. L.



消防隊の長靴 抵抗測定 O. L.

## 隊員装備品の抵抗測定

- 濡れた現場では、断熱材や壁なども導電性が高くなる。
- 太陽光発電システムの配線が脱落などで建物部材に触れていると、建物部材を通して電流が流れてくる可能性が高まる。
- その部分に濡れた手袋で触れると感電する。
- 消防隊員が使用していた手袋（ケブラー製）を水道水で濡らして、手袋の内側から外側への抵抗を絶縁抵抗計（250 V）で測定すると1 k $\Omega$ 以下であった。太陽光発電システムが100 Vを発電していたとすると1 k $\Omega$ の手袋を介して人体（人体の内部抵抗 約 500  $\Omega$ （IEC60479-1 より）を流れる電流は 67mAとなり、痙攣が起こる電流値となる。屋根や梯子からの落下につながる危険がある。

## 感電電流と人体への影響

- 直流電流による感電（IEC60479-1）（労働安全総合研究所技術資料No.25(2009)）
  - 2 mA 通電によるしびれを感じる
  - 20 mA 可随電流, 離脱電流  
痙攣が起こるが自分の意志で体を動かせる
  - 150 mA以上 心室細動, 痙攣
- 筋肉収縮や意識障害のレベルの電流が流れた場合、屋根からの落下等が起こる。

# 太陽光発電システムに関連する問題点

## (1) 装置自体の危険性

モジュール上のホットスポットからの出火

モジュールや配線の損傷による短絡による出火

一般の電気製品としての事項

接続端子部分や基板の絶縁劣化による出火

部品の劣化や不具合による出火

## (2) 消防活動上の危険性

放水による感電（商用電源でもあり）

モジュール破壊時の感電

損傷したモジュール・配線からの漏電

モジュール、ガラスの落下（焼損により柱、壁が脆弱に）

燃焼・加熱時に発生するガス、煙

# 消防研究センターにおける火災実験

## 課題

- ・ 太陽光発電システムからの出火の危険性の把握と対策
- ・ システムの設置された住宅火災に対する消防活動危険性の把握と対策

## 実験計画

1. 火炎光による発電特性
2. 燃料を変えた場合の火炎光分光スペクトルと発電特性
3. 火炎曝露時のモジュールの発電特性と破壊状況
4. 防火フィルム、ブルーシート等の光遮光効果実験
5. 手袋等を通しての感電についての検討
6. モジュール破壊時の危険性把握
7. 太陽電池モジュールの主な材質確認

# 1. 火炎光による発電特性

## 2. 燃料を変えた場合の 火炎光分光スペクトルと発電特性

### 目的

- n-ヘプタンの火炎での多結晶シリコン太陽電池が発電することを確認した。
- 火炎の色は燃料によって違いがある。発電特性も違うのではないか。
- 種々の燃料の火炎を用いて、モジュールの発電特性を確認する。

- n-ヘプタン1ℓ 及び水5ℓ
- 鉄製の円形火皿(内法直径454mm、高さ100mm、厚さ3mm)
- 離隔距離 1m (火皿中央とモジュール面の水平距離)
- 人工太陽照明を太陽光代わりに準備

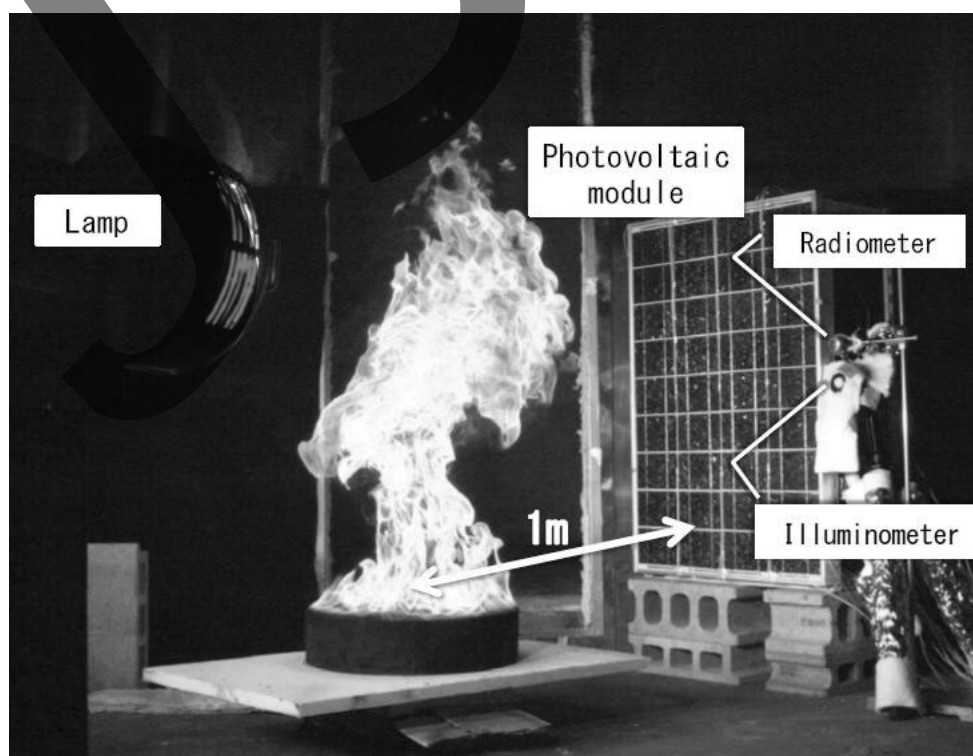


図 モジュール及び機器類の設置状況

- ヘプタン火炎のみ 照度に従って線形的に出力電圧が増加
- 照明灯のみ点灯 照度約 13700 lxで約 2.6 Vの出力電圧
- 約2.6 Vの出力には約 670 lxのヘプタン火炎の照度が必要である。
- ヘプタン火炎の照度が照明灯の 5 %程度で同じ出力電圧となる。
- 照度計受光部の相対分光応答度特性は、人間の目の感度である標準分光視感効率に合わせている（紫外域, 赤外域には鈍感）。
- 太陽電池が発電する波長帯が可視光のみではなく、近赤外も含まれる。

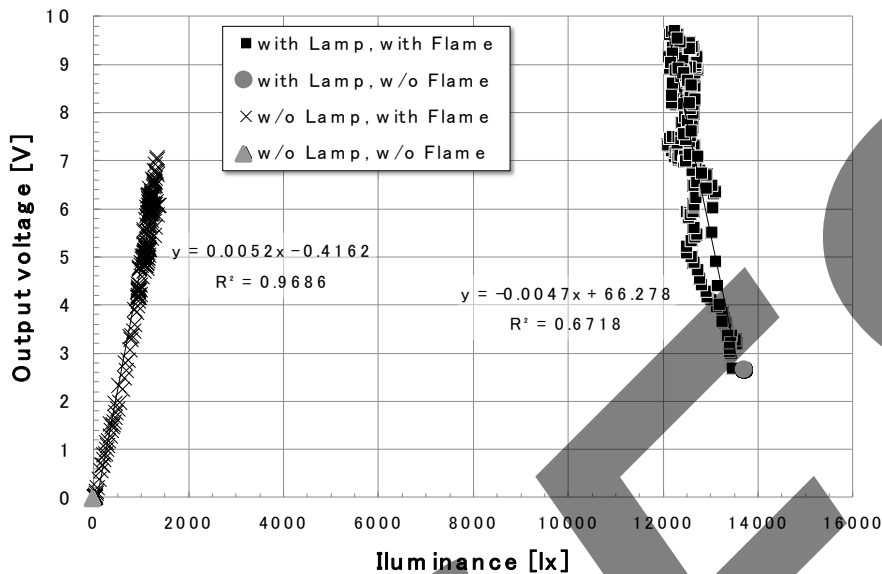


図 モジュール大の出力電圧と照度の関係

## まとめ

- 同じ照度での照明灯とヘプタン火炎では、ヘプタン火炎の方が高いモジュール出力電圧を示した。
- 太陽光発電システムが設置された建物が火災に見舞われた際、夜間の消防活動であっても火炎の光により発電する。

# 種々の火炎光における太陽電池モジュールの発電特性と分光スペクトル

## 目的

- n-ヘプタンの火炎での多結晶シリコン太陽電池の発電特性を確認した。
- 火炎の色は燃料によって違いがある。発電特性も違うのではないか。



- 種々の燃料の火炎を用いて、モジュールの発電特性を確認する。

# 燃料の種類、計測装置

燃料・・・ メタノール、エタノール、n-ヘプタン、灯油、木材ク립

燃料		仕様	測定開始
メタノール	3ℓ	直径494mmの円形火皿	着火3分後
エタノール	3ℓ	直径494mmの円形火皿	着火3分後
n-ヘプタン	3ℓ	直径454mmの円形火皿	着火3分後
灯油	5ℓ	直径454mmの円形火皿	着火3分後
木材ク립	40×4×4cmの杉材28本8段井桁組み		着火3分後

- 多目的分光放射計  
MSR-7000N(オプトリサーチ製)
- 照度計  
T-10(コニカミノルタ)
- モジュール  
ND-114(シャープ)

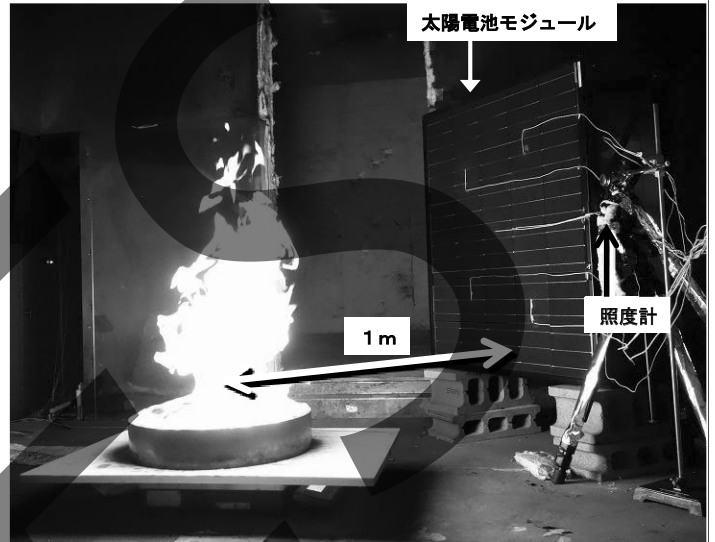
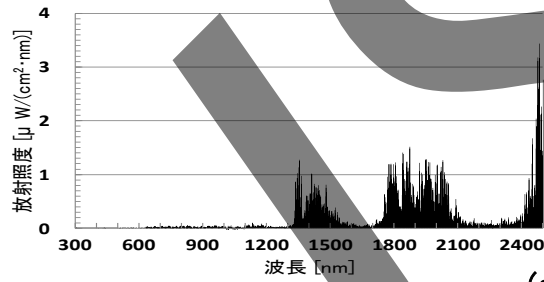
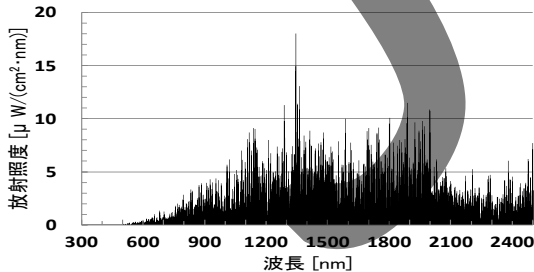
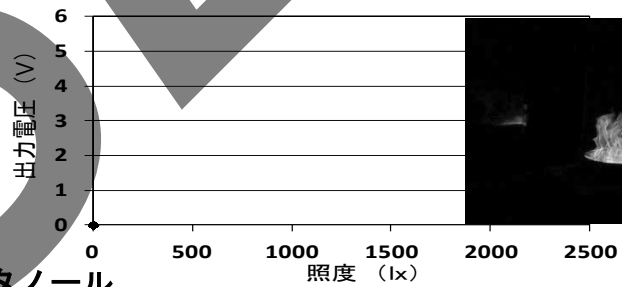


図 モジュール及び機器類の設置状況

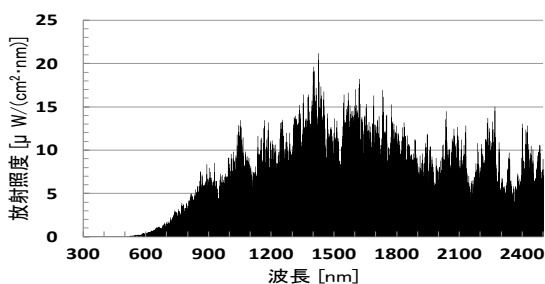
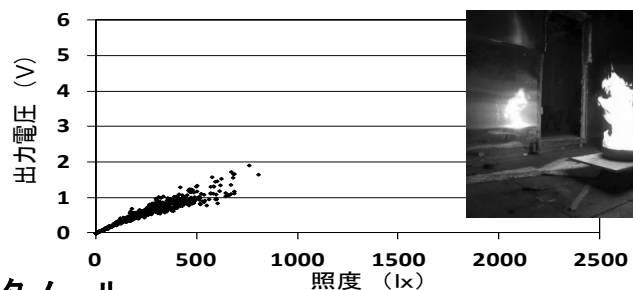
## 火炎光分光スペクトルと発電特性



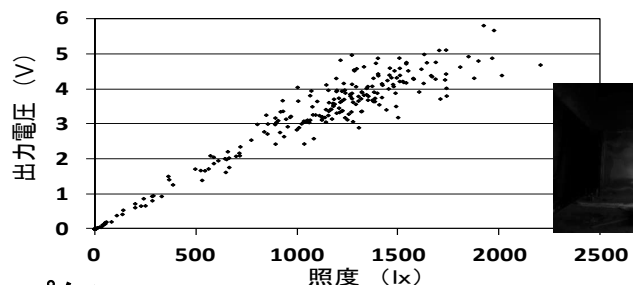
(a) メタノール



(b) エタノール

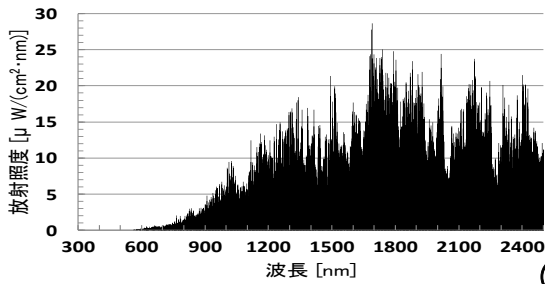


(c) n-ヘプタン

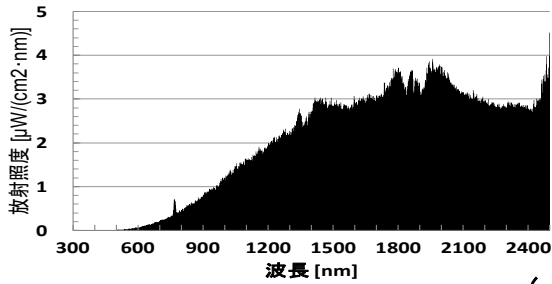
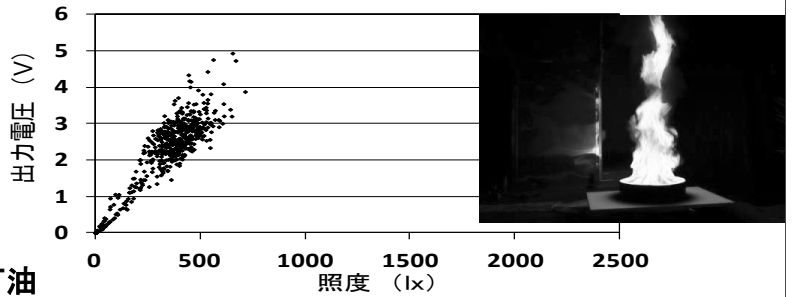




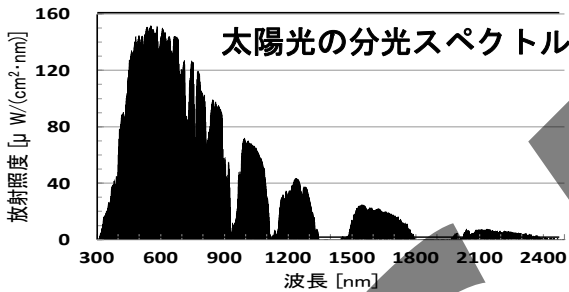
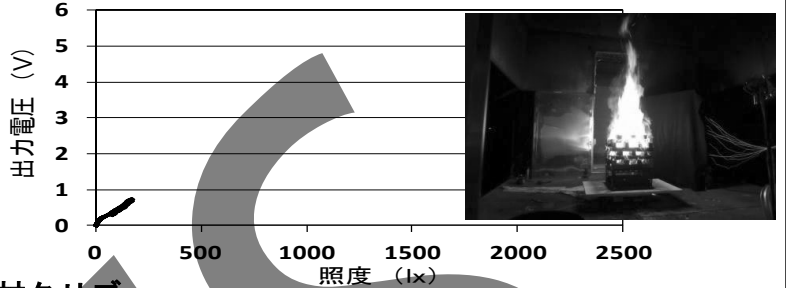
# 火炎光分光スペクトルと発電特性



(d) 灯油



(e) 木材クリブ



- 火炎には赤外域の成分が多いため照度のわりに大きな出力電圧が得られることから、火炎からの放射が届くモジュールでは、夜間でも発電していることが想定できるので、消防活動においては感電への注意が必要である。

## 3. 火炎曝露時のモジュールの発電特性と破壊状況

助燃剤を入れた容器

- 鉄製角形火皿1(内法一辺355 mm、高さ68 mm)n-ヘプタン3ℓ、水1ℓ

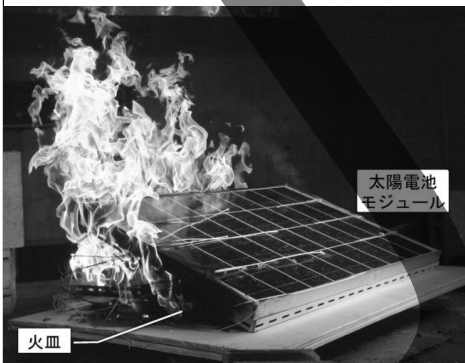


図 ヘプタン火炎によるモジュールの加熱

図 損傷を受けたモジュールの状態

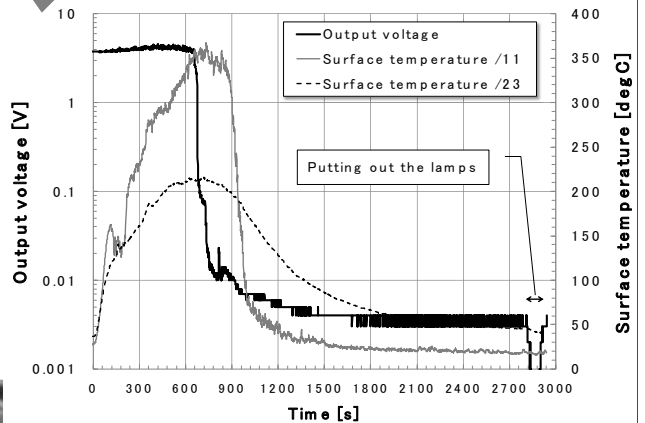
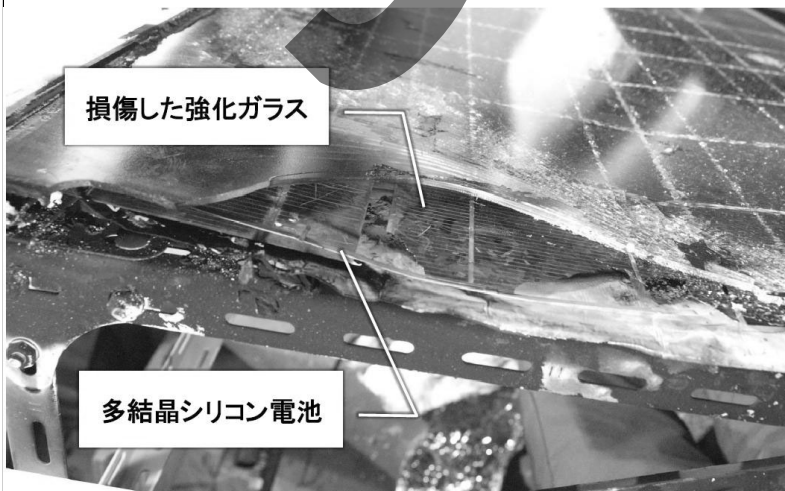


図 モジュール大の出力電圧及び表面温度

最高温度に到達した付近で急激に出力電圧が降下した。

助燃剤の燃焼終了(978秒)後、モジュール自体の自発的燃焼はなし。

モジュール出力電圧は降下し、実験後に0.003~0.004Vで一定。

実験後、モジュールの出力電圧は3.2Vまで回復。実験前の電圧3.8Vの84%まで回復。

## 実験 太陽電池モジュールの火炎曝露による挙動



図 ヘプタンでのモジュール加熱状況



図 多結晶シリコンモジュール裏面の自己燃焼

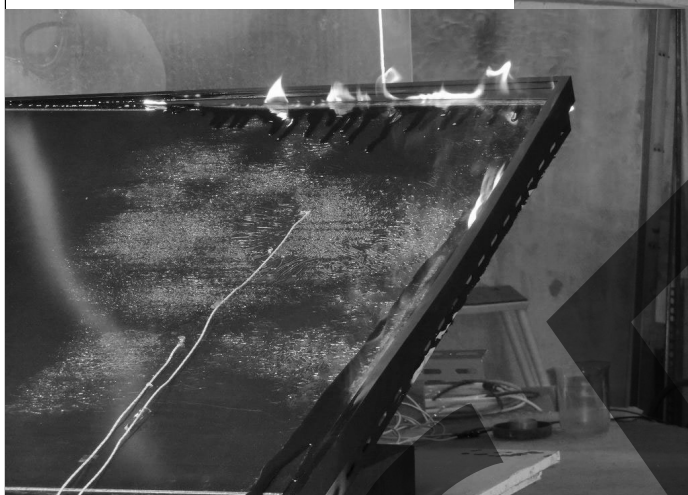


図 CISモジュールをヘプタン火炎で加熱した後の発炎状況

## 実験 太陽電池モジュールの火炎曝露による挙動

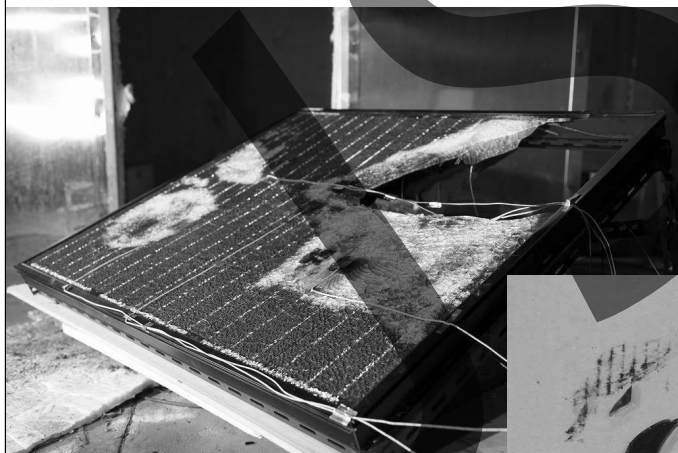


図 結晶シリコンモジュールの部分脱落の状況

図 モジュールから脱落したガラス片

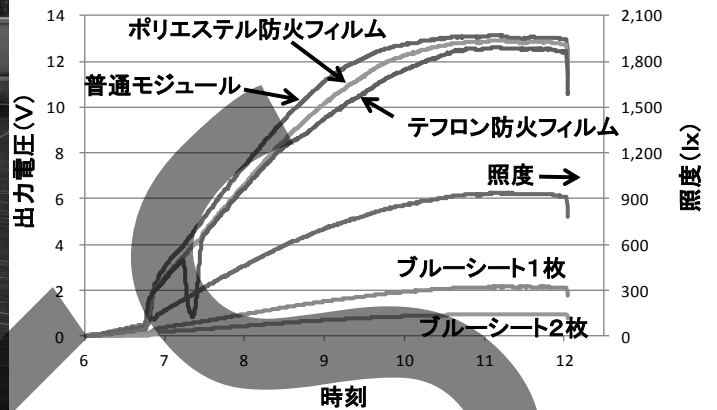
### まとめ

- モジュールは損傷を受けて出力電圧が低下しても、時間の経過を追って電圧が回復することがある。
- 加熱されたガラスはフロートガラスのような割れ方をする場合があるため危険である。



## 4. 防火フィルム、ブルーシートの遮光効果実験

- 日射があれば、太陽電池モジュールは発電を続けている。
- 感電の危険と再出火の危険がある。
- 発電を弱める手段として、モジュール表面の遮光を試した。
- 2Ωの負荷抵抗を接続し、その両端の電圧を測定した。



遮光効果の確認 消防研究センター本館屋上(左から、テフロン防火フィルム、ポリエステル防火フィルム、普通モジュール、ブルーシート1枚、ブルーシート2枚)

遮光効果の観測 モジュール出力電圧、照度の変化

(防火フィルムは、より普通モジュールに近いほうが望ましい。ブルーシートは、よりゼロに近いほうが望ましい。)

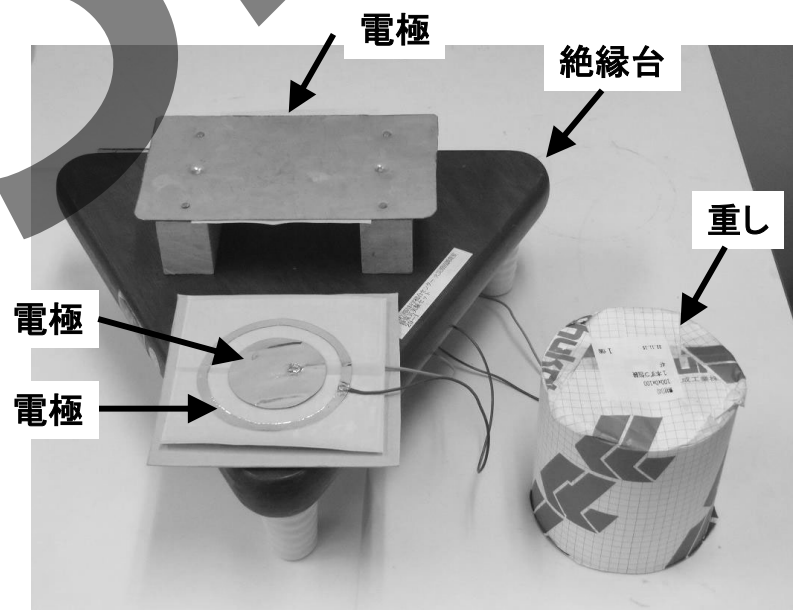
## 5. 手袋等を通しての感電についての検討



手袋 繊維製

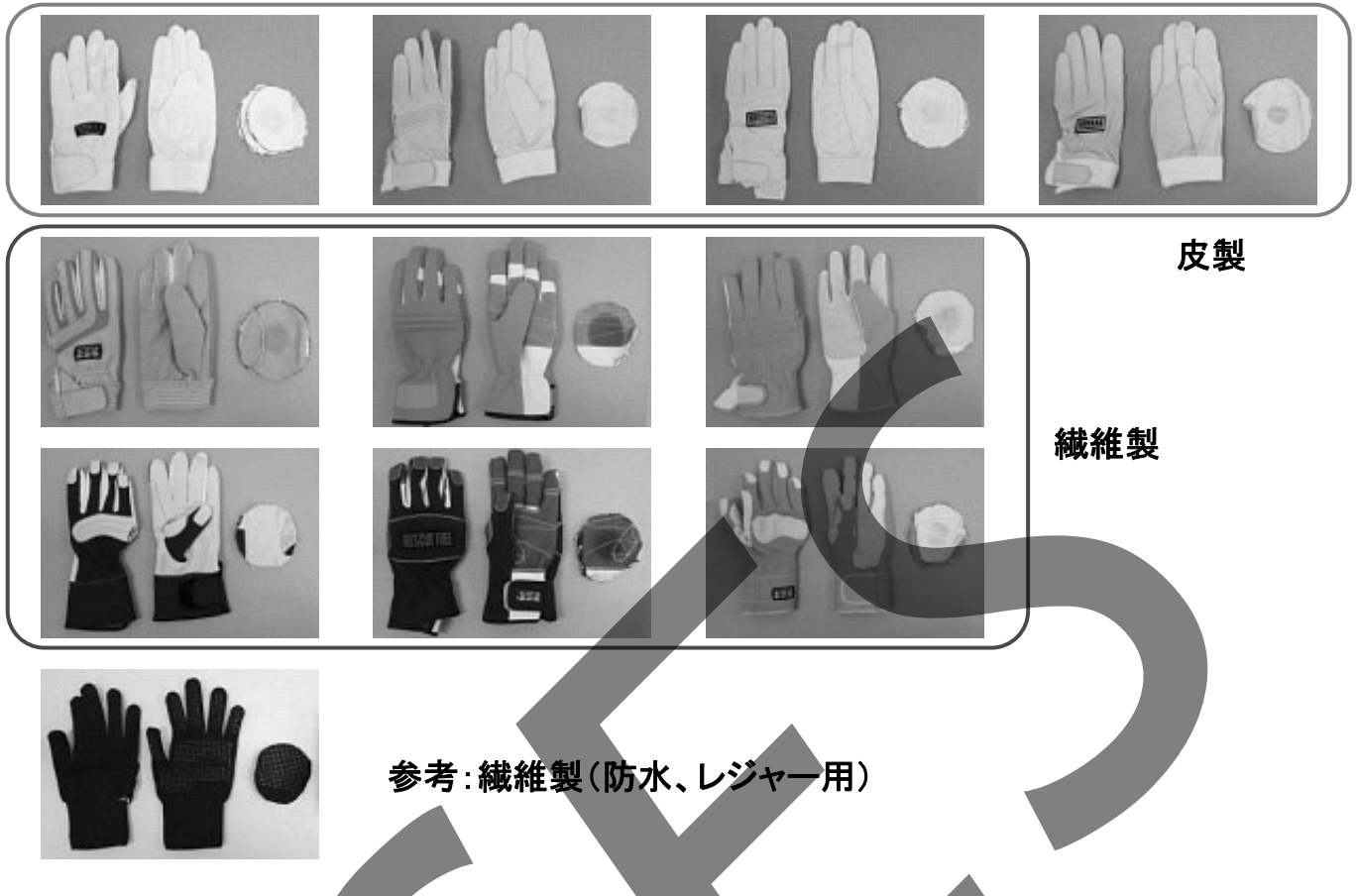


濡らした手袋 繊維製



手袋素材の抵抗率測定用の電極と重し

# 手袋の種類



皮製

繊維製

参考：繊維製（防水、レジャー用）

## 手袋の抵抗測定

手袋 近隣消防本部が使用している型式を準備（全10種）  
 試料 直径9cm程度に切り出した手袋の手のひら部分の素材  
 印加電圧 300 V

### 乾いた状態

- ・ 革製手袋（4種） 体積抵抗 340 MΩ～2600 MΩ
- ・ 繊維製手袋（6種、防水仕様含む） 体積抵抗 21 TΩ～80 TΩ

### 湿らせた状態（水道水で湿らせた。）

手袋表面から水を浸み込ませ、手袋内面が湿ってきた状態で測定した。

- ・ 革製手袋 体積抵抗 21 kΩ
- ・ 繊維製手袋（5種、防水仕様含まず） 体積抵抗 21 kΩ  
 （ティッシュを水で湿らせたときの体積抵抗 21 kΩ）
- ・ 繊維製防水仕様手袋（1種）
  - 表面側のみ湿っている場合 体積抵抗 26 MΩ以上
  - 両面が湿っている場合 体積抵抗 25 kΩ以上

- ・ 乾いた状態の皮手袋、繊維を編んだ手袋は抵抗が大きく、感電をある程度防ぐ性能があるが、濡れてしまうとどちらの手袋も水の電気抵抗と同じになり、感電を防げない。

# 長靴の抵抗測定

## 被測定靴の種類



長靴



半長靴

# 長靴の抵抗測定

- 長靴 6種
- 編み上げ靴 4種



靴の中の底と靴底の間の抵抗を測定

- 印加電圧 300 V
- 荷重 20 kg
- 幅5cmのアルミテープを靴中電極として利用



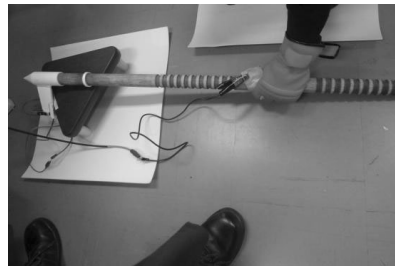
## 結果

- 安全靴規格 靴の中底－靴底 66MΩ～4.4TΩ
- 帯電防止安全靴規格 靴の中底－靴底 3.8～270MΩ
- 水が浸み込む穴がなければ、300Vの電圧がかかっても安全である。

# 破壊器具の抵抗測定



とび口 (180cm)



とび口の抵抗測定

万能斧と  
小型万能斧



万能斧の抵抗測定

- 万能斧 金属-金属  $1\Omega$  以下  
金属-握り部(ゴム)  $1000\text{ M}\Omega$  以上、 $92\text{ G}\Omega$  以上
- 小型万能斧 金属-金属  $1\Omega$  以下  
金属-握り部(ゴム)  $10\text{ k}\Omega$  以上
- とび口(長さ1100mm) 柄が木製  
金属-握り部  $1075\text{ M}\Omega$  以上  
(湿潤状態  $190\text{ k}\Omega$ )
- とび口(長さ1900mm) 柄がグラスファイバ  
金属-握り部  $608\text{ G}\Omega$  以上
- 破壊器具は、金属部分ではほぼ抵抗ゼロである。
- 一部で導電性のゴムが使われている。

## 6. モジュール破壊時の危険性把握



モジュール15枚の直列接続



CISモジュールの破壊実験

- 単結晶シリコンモジュールを15枚直列接続し、約250Vの出力を得た。
- 破壊器具を通して人体に電流が流れたことを想定して、人体模擬抵抗器 ( $500\Omega$ ) に流れた電流を測定した。

# モジュール破壊時の放電実験



単結晶シリコンモジュールをとび口で破壊

- ・ 破壊器具にマイナス出力端子を接続してモジュール内電極と接触させた。最悪の条件である。電圧は約250Vである。
- ・ モジュール内電極と破壊器具の間で放電が発生する。放電の熱により、樹脂が分解され発煙したり、発火したりする場合もあった。

## 7. 太陽電池モジュールの主な材質確認



バックシート部分拡大写真(上がA、下がB)

	太陽電池モジュール	
	A	B
第1層	EVA	EVA
第2層	PVF	PET
第3層	Al	PET
第4層	PVF	—

「EVA」とは、Ethylene-Vinyl Acetate (エチレン-酢酸ビニル共重合樹脂)

「PVF」とは、Polyvinyl Fluoride (ポリフッ化ビニル)

「PET」とは、Polyethylene Terephthalate (ポリエチレンテレフタレート)

- ・ バックシートの構成部材は製品によって異なる。
- ・ 燃焼時の性状も変化する。

# 消防活動上の対策

## 1. 装置自体の危険性

### (1) 出火の危険性

- ・ 一般的な電気製品と同様な出火危険性がある。決してメンテナンスフリーではない。
- ・ ホットスポットからの出火
- ・ モジュールの破壊、配線の異常によるアーク放電発生の可能性はある。
- ・ はずしたモジュールは裏返しに置か光を通さない物で覆う。

### (2) 落下の危険性

- ・ 梁や柱、屋根等が火災の影響で炭化してもろくなっていると、太陽電池モジュールの自重で落下する危険性がある。
- ・ 高い熱を受けた太陽電池モジュールのガラスは、圧縮応力が開放され割れると大きな破片となる。残火確認、原因調査などの作業中にガラスの破片が落下する可能性がある。

## 2. 消防活動中の危険性

### (1) 感電の危険性

- ・ 残火確認等の際に、モジュールに触れた破壊器具やモジュールを握った手から感電する場合がある。消火活動により水が内部にまで浸み込んでいる手袋では感電の危険性が高まる。建物に近づき活動する時は、絶縁性の高い手袋（低圧用ゴム手袋、高圧用ゴム手袋など）を活用するほうが安全である。
- ・ 棒状注水で水が粒にならずに建物に掛かる場合は、水を伝わっての感電の可能性もあるため、粒状で建物に水がかかるように距離や筒先の調節を行う。建物から6m以上離れる、噴霧放水に切り替えるなど。
- ・ 感電のショックで屋根から落下する危険性がある。高所での作業では、落下防止の措置をとる。
- ・ 夜間であっても炎の光を受けて発電するので、感電の危険はなくなる。
- ・ 見た目の破壊が進んでいる太陽電池モジュールであっても、日射があれば発電をすることもあるので、感電の危険性はなくなる。

### (2) 消火の困難性

- ・ モジュールの主な可燃物はモジュール裏面の樹脂製のバックシートや封止材である。燃焼しているこれらを消火するとき、モジュール表面のガラスが水を遮ることや裏面に直接水をかけづらい構造であることから、消火に時間がかかる。

### (3) 活動での注意点

- ・ 太陽光発電システムが設置されている建物であるかを活動開始までに把握する。また、可能であれば、接続箱やパワーコンディショナ部分の開閉器を切る。

## まとめ

- (1) 太陽光発電システムの設置が拡大しているが、火災に関しての対策・対応はまだ不十分である。
- (2) 感電や再出火の観点から、機械的な破壊や、燃焼したときにモジュールの発電を停める技術の開発が望まれる。
- (3) 施工時に漏電が起こりそうな要因を除去したり、配線を適正に処理することの徹底が望まれる。
- (4) バイパスダイオードの機能が正常かどうかをチェックする技術・装置が望まれる。
- (5) モジュールの活線配線を切断する方法の提案が望まれる。
- (6) 今後、太陽光発電システムの機能向上、消防活動や原因調査を行う上で少しでも参考になれば幸いである。