

第5章 PVモジュール燃焼実験

PVモジュールの燃焼性状を検証するための実験を、平成25年11月、東京理科大学火災科学研究センター実験棟において実施した（実験委託先：アイエヌジー株式会社）。

第1節 実験の目的

PVモジュールに含まれる可燃物の量は微量であり、PVモジュール自体が出火源となる危険性は小さいと想定されるが、それを理論的に説明することは難しい。技術改良等により、PVモジュール自体からの出火は抑えられ、事例として少ないのが実態である。一方で、他所からの火災により強い加熱を受けた場合に、PVモジュールが延焼媒体となる可能性は否定できない。

よって、今回の実験では、現在市場に流通しているPVモジュールについて以下の項目を検証し、燃焼性状に関する知見を得ることを目的とする。

- ・ PVモジュール自身の燃焼が、周囲の設備へ与える熱的な影響
- ・ 他所で火災が生じた場合に、PVモジュールが延焼媒体となる危険性

第2節 実験方法等

1 実験装置

PVモジュールの自己燃焼性状及び延焼拡大性状を検証するため、図5-1の装置を設定した（写真5-1、写真5-2参照）。火源は都市ガスを燃料としたガスバーナーとし、PVモジュールの裏面中心部に炎が当たる構造となっている。PVモジュールの設置角度の基本条件は、東京都内で最も発電効率が高いとされる 33° とした。

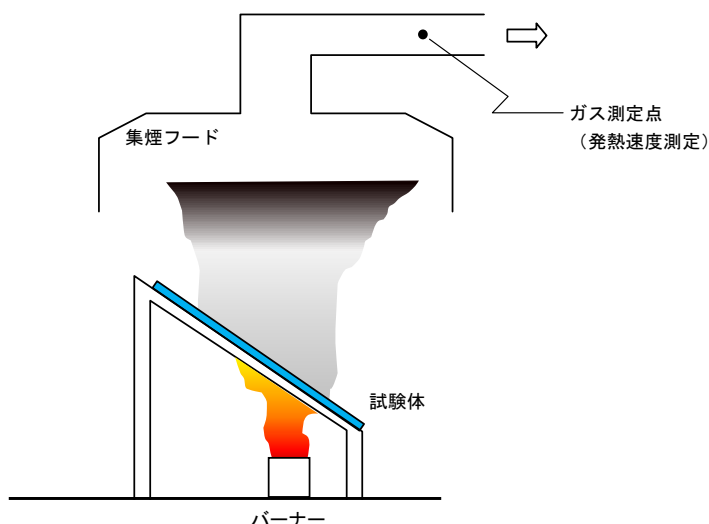


図5-1 実験装置（断面図）



写真 5-1 実験装置（側面）



写真 5-2 実験装置（正面）

2 実験条件等

(1) 火源

今回の実験では、以下3種類の火災を想定する。(図5-2から図5-4参照)

- ア 小火災：点検整備中に持ち込まれる可燃物、くずかご程度の可燃物の燃焼を想定。平均火炎高さ（伸縮する火炎の平均的な高さ）がちょうどPVモジュール裏面程度となる火災（加熱出力75kW）。
- イ 中火災：屋上に設置される小規模な設備の燃焼を想定（空調室外機など）。PVモジュール1枚に火炎が行き渡るような火災（加熱出力150kW）。
- ウ 大火災：屋上塔屋など、建物内で火災が生じ、開口部からの噴出火炎などを浴びる状況を想定。PVモジュール2枚に火炎が行き渡るような状況（加熱出力220kW）。

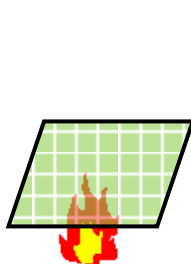


図5-2 小火災

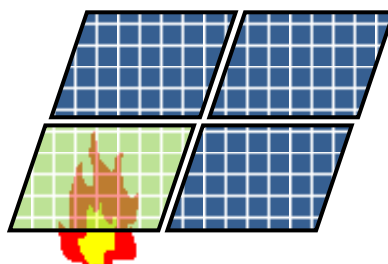


図5-3 中火災

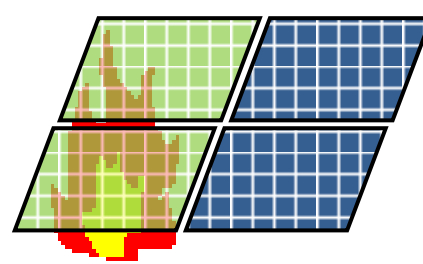


図5-4 大火災

(2) PVモジュールの選定

今回のPVモジュールの選定の条件は以下のとおりである。

- ア 屋上（陸屋根）設置タイプのPVモジュールとし、屋根建材型は、検証の対象外とする。
- イ JIS C 8992-2 に基づく火災試験（又は同等の性能試験）に適合しているPVモジュール。
- ウ 市場に流通している一般的なPVモジュール構造（結晶系、薄膜系、CIS系）の製品。

今回の試験体は、「結晶系」から5種類、「薄膜系」から2種類、「CIS系」から2種類の計9種類のPVモジュールを選定した（表5-1参照）。

表 5-1 試験体モジュールの諸元

	結晶系					薄膜系		CIS系	
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	C1	C2
幅(mm)	1165	1630	1657	1318	1662	1100	1210	1257	1417
長さ(mm)	990	862	994	983	990	1500	1008	977	791
厚み(mm)	46	35	46	40	46	50	40	35	37
重量(kg)	14.5	24	19	15.7	20	29	18.3	20	14.3
可燃物量(kg)	1.3	2.3	1.8	2.2	3	0.8	0.6	2	1.5
単位面積当たり可燃物量(kg)	1.12	1.64	1.09	1.70	1.82	0.49	0.49	1.63	1.34

※幅、長さ、厚み、重量、可燃物量はP Vモジュール1枚当たりの量を示す。単位面積は1 m²とする。

(3) 実験条件

以下の条件を設定し、検証を行った（表5-2参照）。

ア Test-1（P Vモジュール単体の燃焼実験）

P Vモジュール単体が持ち込み可燃物の燃焼を模した小火災からの加熱を受けた場合、当該P Vモジュールの燃焼状況を確認する。

イ Test-5（P Vモジュール単体の燃焼実験）

P Vモジュール単体が小規模な設備の燃焼を模した中火災からの加熱を受けた場合、当該モジュールの燃焼状況を確認する。

ウ Test-6（P Vモジュール4枚から構成されるアレイの燃焼実験）

P Vアレイが建築設備の燃焼を模した中火災からの加熱を受けた場合に、加熱されたP Vモジュールから他のP Vモジュールへの延焼拡大の有無を確認する。

エ Test-9（P Vモジュール4枚から構成されるアレイの燃焼実験）

建物内の火災からの加熱状況を模した大火災からの加熱を受けた場合に、加熱されたP Vモジュールから他のP Vモジュールへの延焼拡大の有無を確認する。

オ Test-2 及び Test-7

P Vモジュールの設置角度が燃焼性状に与える影響を確認する。

カ Test-3 及び Test-8

外気風が燃焼性状に与える影響を確認する。

キ Test-4

P Vモジュールの劣化が燃焼性状に与える影響を確認する。

表 5-2 試験条件と実施した実験(○印)

試験名称	火災条件	実験条件	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	C1	C2
Test-1	小火炎 (75kW)	単板、33°、無風	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Test-3		単板、33°、横風	○					○		○	
Test-4		劣化単板、33°、無風	○								
Test-2	中火炎 (150kW)	単板、90°、無風	○					○		○	
Test-5		単板、33°、無風	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Test-6		4枚、33°、無風	○					○		○	
Test-7		4枚、90°、無風	○								
Test-8		4枚、33°、横風	○								
Test-9	大火炎 (220kW)	4枚、33°、無風	○					○		○	

PVモジュールの発電状態が、燃焼性状に与える影響については、結果に差異がないと推測されることから、実験条件には加えていない。

今回の試験体PVモジュールの通電部分は、シリコン及び金属で構成されており、それ自体は燃焼の危険性はない。また、通常の使用範囲では、発電又は日光の照射によりPVモジュール本体の温度が上昇したとしても100℃程度であるため、燃焼性状に影響を与える充填材及びバックシートの熔融や熱分解に至ることはなく、加熱火炎が高温であることに比べて、発電等による温度上昇の影響は無視できるものと判断した。

なお、過去に消防庁消防大学校消防研究センターにおいて、人工太陽照明灯による発電状態のPVモジュールの燃焼実験を行っている。

実験結果は、PVモジュールの燃焼温度が最高に到達した時点で、電圧は急激に低下し、助燃剤による加熱終了後も光を照射し続けたが、PVモジュール自体が自発的に燃焼をすることは無かった(資料5参照)。

(4) 実施要領

実験は以下の手順で行った。

-2'00(min) 測定開始

-1'00(min) VTR 記録開始

0'00(min) バーナーに着火

X'00(min) バーナーによる加熱中止(測定、録画は継続)

Y'00(min) 測定・録画終了

Xは火災条件により異なる。小火炎で5分、中火炎では5分または10分、大火炎では15分とした。

Yも火災条件及び燃焼の状況によって異なるが、概ね小火炎を火源とした場合で20分、中火炎を火源とした場合で20～30分、大火炎を火源とした場合で40分を目安とした。

(5) 測定

ア 温度測定

Kタイプ熱電対（測定範囲～1000℃）を用いて、試験体の加熱面（裏面）及び非加熱面（表面）の温度測定を行った。試験体を加熱する気流（火炎を含む）の状況及び試験体が燃焼した際に生じる火炎の状況を把握するために、試験体の加熱面（裏面）及び非加熱面（表面）からそれぞれ約1cm程度離れた点の温度測定を行った（図5-5参照）。また、IRカメラ（NEC G120EX）により、非加熱面の温度を測定した（図5-6参照）。

イ 熱流束測定

熱流束計（Vatell社製EPISENSOR：測定範囲～約10kW/m²）を用いて、試験体から1m、及び2mの離隔を取った位置における熱流束の測定を行った（図5-6、写真5-3参照）。

ウ 燃焼によって生じる発熱性状の測定

集煙フード（島津製作所製GT7600）で集められた煙中の酸素、二酸化炭素及び一酸化炭素濃度を測定し、酸素消費法を使って発熱速度を算出した。排煙機の容量から、おおよそ2MWまでの測定が可能である（図5-1参照）。

エ 燃焼ガスの測定

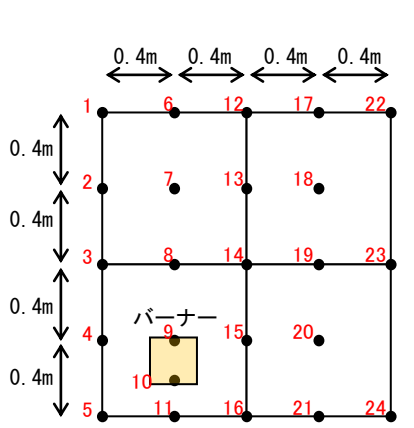
燃焼ガスをサンプリングし、ガスの有毒性の有無を確認した。加熱終了後2分の時点で、試験体の上空に設置したサンプリングプローブから発生ガスを捕集し、ガス検知管（ガステック社製）を用いて代表的な有毒ガス（一酸化炭素（測定範囲25～1000ppm）及びホルムアルデヒド（測定範囲20～2000ppm））の発生の有無を確認した（写真5-4参照）。

オ 飛散物の観測

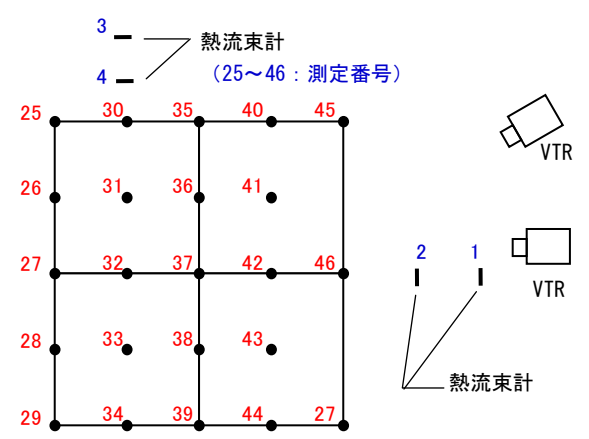
燃焼中に滴下、落下する飛散物の状況を観測した。

カ 実験終了後のPVモジュールの状況の観測

実験前後のモジュールの状況の静止画をデジタルカメラで記録し、また実験中の加熱面・非加熱面の燃焼状況の動画をVTRで記録した。



● 熱電対
(1~24 : 測定番号)



熱流束計
(25~46 : 測定番号)

VTR, IR

熱流束計 2, 4 は試験体端部から 1m,
1, 3 は 2m の位置に設置した。

図 5 - 5 加熱面測定箇所
(非加熱面側から見た状況)

図 5 - 6 非加熱面及び周囲の測定箇所

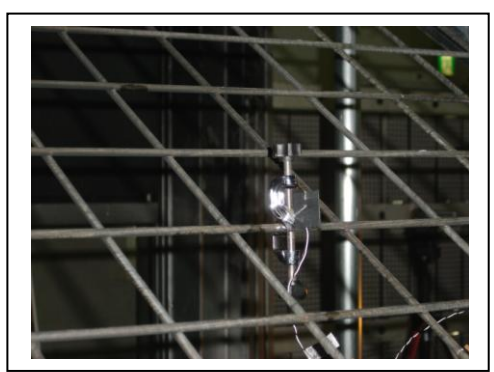


写真 5 - 3 熱流束計



写真 5 - 4 ガス検知管

第3節 実験結果の概要

試験体A1のPVモジュールの小火災、中火災、大火災の3種類の実験結果は以下のとおりである。全種類の実験詳細は、資料編1「太陽電池モジュールの燃焼性状に関する実験委託報告書」に示す。

1 燃焼性状

(1) 小火災

Test-1: 加熱開始後1分程度でケーブルの一部に熔融燃焼が確認された(写真5-5(写真は2分時)参照)。加熱中にPVモジュールの燃焼は観測されなかった。加熱後の裏面の状況(写真5-6参照)を見ると火炎が当たる範囲(おおよそ30cm四方)に変色が見られ、フィルムの浮きが見られた。表面(非加熱面)にはほとんど変化は見られなかった。



写真5-5 Test-1_A1 加熱2分時の状況



写真5-6 Test-1_A1 実験後裏面の状況

(2) 中火災

Test-5: 加熱開始後1分程度で裏面のケーブルが着火・燃焼する(写真5-7(写真は2分時)参照)。3分30秒後には、表面(非加熱面)からも炎が確認できた(ガラス面が割れて炎を噴出するのではなく、ガラス面を通して裏面の炎の色が確認できた(写真5-8(写真は4分時)参照)。燃焼は、ケーブル・端子箱のある側の方(加熱面から見て左側)が大きい。加熱中止後、PVモジュールの左側の部分は、内部樹脂部分の周囲に延焼しない程度の弱い炎が残り、これが完全に消えるまでに4分程度要した(写真5-9参照)。実験終了後の裏面の状況を確認すると、加熱面から見て左側の部分の損傷が激しく、左側部分の5割以上のフィルムが焼失し、内部樹脂が熔融した痕跡も確認できた(写真5-10参照)。表面側から見ても損傷が激しかった部分は褐色となった(写真5-11参照)。なお、表面ガラス部材に大きな破損は見られなかった。一方、裏面の加熱面からみて右側は、小火災の場合と同様に裏面フィルムの変色とフィルムの浮きが確認されたが、左側のような燃焼や損傷は観測されなかった。燃焼物の飛散状況については、火源に近く、かつ、燃焼が激しかった側で樹脂の燃焼しながらの滴下を確認された。床面に設置された模造紙上では約0.2㎡の範囲での滴下を確認された(写真5-12参照)。



写真5-7 Test-5_A1 加熱2分時の状況



写真5-8 Test-5_A1 加熱4分時の状況



写真5-9 Test-5_A1 加熱終了後の状況



写真5-10 Test-5_A1 実験後裏面の状況

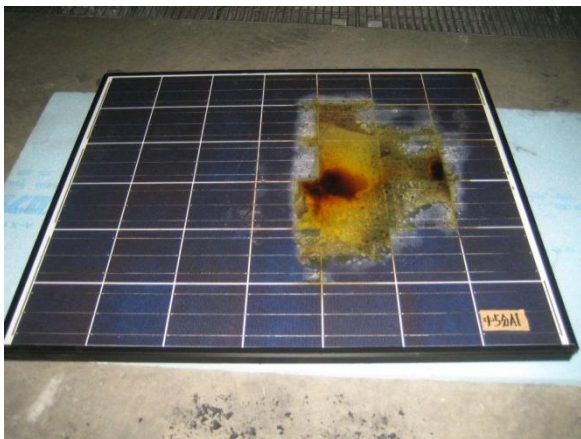


写真5-11 Test-5_A1 実験後表面の状況



写真5-12 Test-5_A1 飛散物の状況

(3) 大火災

Test-9:火源直上の火炎に接する下方のP Vモジュール(以下「1枚目モジュール」という。)及び上方のP Vモジュール(以下「2枚目モジュール」という。)は、加熱後2～3分で裏面のフィルムと内部樹脂が燃焼した(写真5-13参照)。この燃焼で生じる火炎を伴って、1枚目モジュールと2枚目モジュールは、ほぼ全面が火炎に包まれた(写真5-14参照)。表面のガラス部材の崩落も激しく、5分ごろには表面への火炎の噴出も確認された(写真5-15参照)。しかしながら、1枚目モジュール及び2枚目モジュールの可燃物の燃焼が終結すると、火炎は火源のみとなり(写真5-16参照)、結果として水平方向への延焼はないことが確認された。

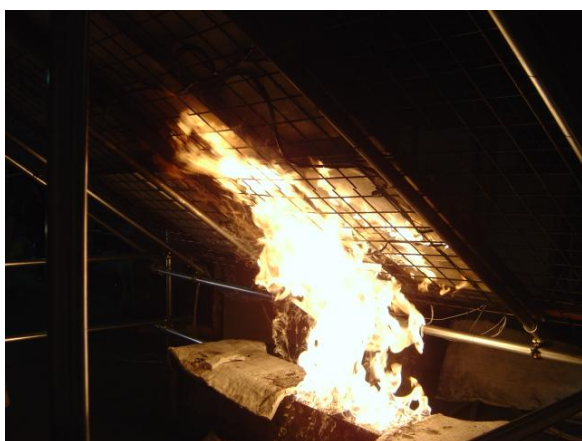


写真5-13 Test-9_A1 3分時の状況

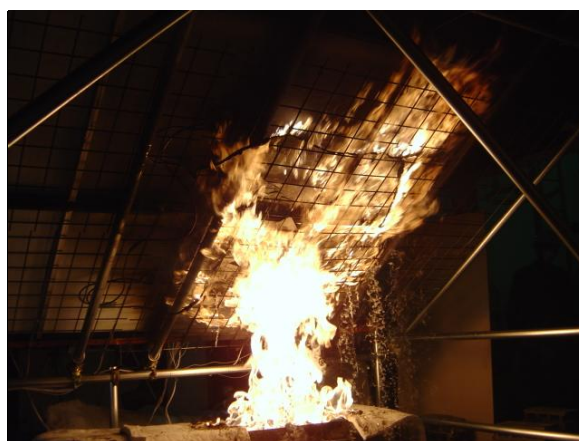


写真5-14 Test-9_A1 4分時の状況



写真5-15 Test-9_A1 5分時の状況



写真5-16 Test-9_A1 10分時の状況

2 熱流束

A1の試験体については、最も熱流束が大きいと考えられるTest-9の値(後方1mの位置で計測)が 1.0kW/m^2 程度であり、木材の受熱限界 10kW/m^2 に比べると非常に小さい。また、熱流束が最大となったのは、A4の試験体のTest5であり、 1.5kW/m^2 (後方1mの位置で計測)であった。

3 ガス濃度

今回の実験においてサンプリングしたガスから、検知管の感知範囲の濃度の一酸化炭素（25～1000 ppm）及びホルムアルデヒド（20～2000 ppm）は確認されなかった。

第4節 まとめ

今回の実験結果より、他所の火災からの加熱を受けたPVモジュールの燃焼性状は以下のようにまとめられる。

想定される火災条件に対する燃焼性状

小火災：整備点検などで持ち込まれるゴミ箱や工具類の燃焼による加熱に対しては、ほとんど燃えることはない。

中火災：屋上に設置されている小型の設備の燃焼による加熱に対しては、火炎を浴びる部分については燃焼するが、それ以上に延焼することはない。

大火災：火炎を浴びる部分は燃焼するが、この範囲以上に延焼することはない。



屋上設備等から延焼したPVモジュールの火炎及び熱等が、隣接する他のPVモジュールを延焼させる可能性は極めて低い。

PVモジュールが周囲に与える影響

- ・ 燃焼しているPVモジュールから前、後、側方いずれも1m離隔をとった位置での熱流束は、最大で1.5kW/m²程度で、この値は木材の着火条件（10kW/m²）に満たず、延焼媒体となることはない。また、プラスチックや合成樹脂の変形や溶融等の影響を与えない。
- ・ 燃焼しているPVモジュールから、構成部材であるガラス部材が破損・落下したり、内容物の樹脂が燃焼しながら滴下する場合がある。
- ・ 燃焼しているPVモジュールから、人体に影響を及ぼす製品特有の有毒ガスが発生することはない。



PVモジュール自体が燃焼する際に発生する火炎及び熱等が、1m先の可燃物（屋上設備を構成する部材、樹脂、ゴム等）に重大な熱的影響（発火、溶融）を与えることはない。

いずれの燃焼性状もPVモジュールの可燃物量の少なさにより特徴づけられていることから、今回実験を行ったPVモジュールの可燃物の条件の範囲（単位面積1m²当たりの可燃物量が2000g以下）であれば、上記の燃焼性状を有することを確認した。

なお、落下・滴下する燃焼物への対応は別途考慮する必要があると考えられる。

第6章 消防活動時の感電危険

この章では、火災時に消防隊員が装着する基本装備及び資器材の性能等の面から、消防隊員の感電危険について検討する。過去には、太陽光発電設備が設置された建物の消防活動において、消防隊員が感電する事故が発生した(資料3参照)。今後、太陽光発電設備が普及し、消防隊員が太陽光発電設備の設置された建物の消防活動に従事する機会が多くなると考えられる。消防隊員には、適切な装備の使用と太陽光発電に関する知識の習得が求められる。

なお、この章における消防活動時の感電危険については、現在の東京消防庁の装備、資器材及び消防活動の流れを前提に検討を行ったものである。

第1節 建物火災時の基本装備及び資器材等

1 消防隊員の基本装備

消防隊員が火災現場に出場する際の基本装備は以下のとおりである。(写真6-1から写真6-3参照)



写真6-1 消防隊員の基本装備



① 防火帽

前面にはシールド、側面から背面にかけては首筋を守る覆いがついている。

② 防火衣

外衣と中衣三層の四重構造になっている。

③ 手袋

熱防護性能はあるが、絶縁性は低い。

写真 6 - 2 消防隊員の基本装備（前面）



④ 空気呼吸器

使用時間はおよそ 20 分

⑤ 面体

建物内部に進入する際に顔面に装着する。

⑥ 長靴

ゴム製であり、一部布が使用されている。
濡れた場合には、著しく絶縁性が落ちる。

写真 6 - 3 消防隊員の基本装備（側面）

2 主な破壊器具

消防隊員が建物内部へ進入する際、扉、窓等を破壊するなど使用する破壊器具については以下のとおりである。



写真 6-4 エンジンカッター

エンジンカッター
消防活動時、施錠される等で開放できないドア、シャッター等を破壊するために使用する（写真 6-4 参照）。



写真 6-5 とび口

とび口
建物内進入時、窓等の破壊や、消火及び残火処理時、壁、天井及び屋根等を破壊するために使用する。
先端は金属製、取手は木製である（写真 6-5 参照）。



写真 6-6 万能斧

万能斧（弁慶）
建物内進入時、窓等の破壊や、消火及び残火処理時、壁、天井及び屋根等を小破壊するために使用する。
金属製で、握り部がゴム製である（写真 6-6 参照）。

**破壊器具は、建物内部へ進入する際に携行、使用し、
出入口、非常用進入口、代替開口部（▼表示窓）、階段等で使用**

3 絶縁用防護具

消防隊員の感電危険が想定される災害現場で使用する絶縁用防護具は、以下のとおりである（写真6-7から写真6-9参照）。



写真6-7 絶縁用防護具

絶縁用防護具一式（7000V以下で使用）

- ① 絶縁用防護衣（上衣、ズボン）
- ② 絶縁用長靴
- ③ 絶縁用手袋
- ④ 保安帽

火災現場に、通常
2組は携行している。



写真6-8 高圧絶縁用手袋

高圧絶縁用手袋

（7000V以下で使用）

活線等の切断、排除の際に装着する。
絶縁用防護具一式としてはしご車等に配置される他に、必要により増強される。



写真6-9 低圧絶縁用手袋

低圧絶縁用手袋

（600V以下で使用）

検電器を使用する際の感電防止のために装着する。手袋単体でポンプ車等に配置され、火災現場に通常3～4組携行する。

**絶縁用防護具は、主に電路遮断に使用し、
耐熱性、強度が低いため、消火活動、残火処理には不向き**

4 感電

人体の感電と、消防隊員が使用する装備等の電気抵抗は以下のとおりである（表6-1参照）。

表6-1 通過電流値と人体への影響

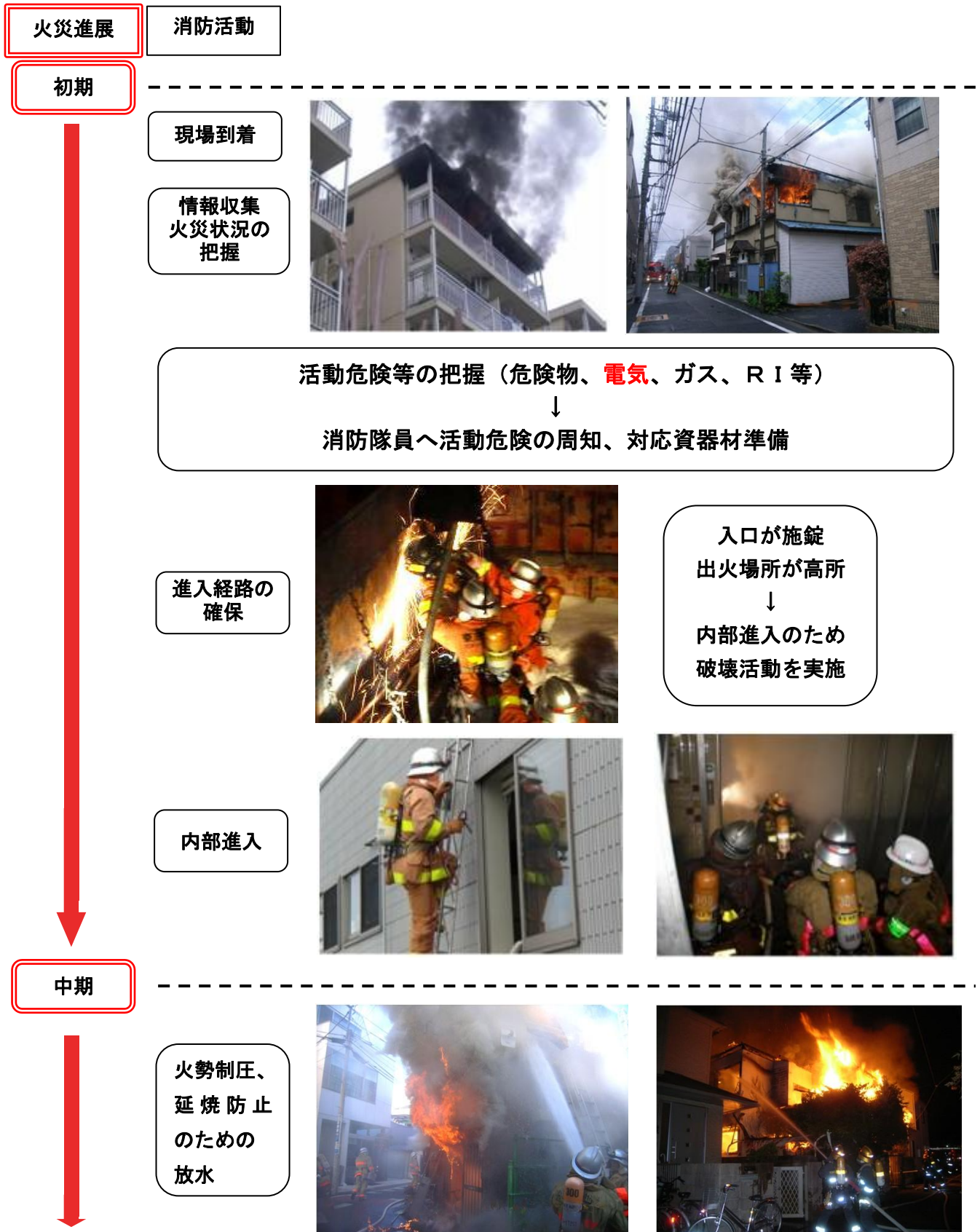
通過電流値	人体への影響
1 mA	最小感知電流といって、ピリピリ感じる。人に影響はない。
5 mA	生理的に悪影響を及ぼさない最大の許容電流値である。 危険性の始まりである。
10～20 mA	不随電流といって、離脱の限界である。 持続して筋肉の収縮が起こり、握った電線を離せなくなる。
50 mA	痛み、気絶、疲労、人体構造損傷の可能性、心臓の律動異常の発生、呼吸系統への影響が出る。 心室細動電流の発生ともいわれ、心肺停止が現れ、極めて危険である。
100 mA～ 3 A	心室細動の発生、心肺停止が現れ、極めて危険である。
6 A以上	心筋は持続的に収縮し続ける。呼吸麻痺による窒息、火傷。

出典) 公益社団法人 日本電気技術者協会HP

資料4に、1及び2で示した消防隊員の基本装備、破壊器具等の電気抵抗測定結果（参考値）を示す。

5 建物火災における消防活動の流れ

建物火災の進展と、消防活動の流れは以下のとおりである。





感電危険排除のため**交流電路遮断**
↓
電気事業者又は関係者等が実施

終期

残火処理：表面上焼損している箇所の裏面や内部の火種を確認するため、小屋裏、壁体等を破壊

残火処理
のための
放水



焼損箇所の
破壊



鎮火

再出火防止：関係者へ再出火防止に関する注意事項を説明

◎太陽光発電設備設置建物の場合、発電停止が必要
↓
関係者による焼損PVモジュール撤去、回路切断、遮光シート展張等

再出火
防止活動



再出火危険を排除




引揚げ

火災原因
調査に移行

第2節 消防活動における感電危険

太陽光発電設備が設置されている場合、交流電路遮断後も感電危険が存在することから、感電防止対策が必要となる。

表6-2 消防活動における感電危険

火災の進展		消 防 活 動	感 電 危 険	
			太陽光発電設備設置なし	太陽光発電設備設置あり
初期		<ul style="list-style-type: none"> ・ 出入口の確保（窓、扉等の破壊） ・ 内部進入 	なし	<ul style="list-style-type: none"> ・ 出入口等の活動施設周囲に直流ケーブルが敷設されている場合、破壊等による感電
中期	交流電路遮断前	火勢制圧、延焼防止のため放水	<ul style="list-style-type: none"> ・ 放水による感電※1 	放水による感電
	交流電路遮断後			
終期		<ul style="list-style-type: none"> ・ 残火処理のため放水、焼損箇所周辺の破壊 	交流電路遮断による感電危険除去 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光発電設備（直流ケーブル、PVモジュール、パソコン等）に接触することによる感電※2
鎮火後		<ul style="list-style-type: none"> ・ 再出火防止（火災原因調査） 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 焼損PVモジュール撤去、回路切断、遮光シート展張等の作業中の感電

※1 火災中期の「放水」では、燃焼体からの距離を確保していること、及び交流電路遮断前には電気設備等にむやみに放水しないことから、感電事例はほとんど発生していない。

※2 東京消防庁で起きた太陽光発電設備の感電事例は、残火処理の破壊活動中に手から感電したもの。東京消防庁の消防隊が現在行っている感電防止の対応は、以下のとおりである。

消防活動時の太陽光発電設備に対する感電防止の対応

- ① 太陽光発電回路切断又は遮光シート展張による発電停止等により、早期に感電危険を排除する
- ② 感電危険が排除されていない間は、危険箇所を隊員へ周知し、むやみに接近しない、放水しない
- ③ 回路遮断及び残火処理等の太陽光発電設備に触れる作業は、絶縁用防護具等を装着した消防隊員が行う