

太陽光発電設備の火災－水害時や水上太陽光発電所－

Fires of Photovoltaic Power Generation Facilities -During Flood Damage and Floating Solar Power Plant-

田村裕之*

1. はじめに

近年、台風や集中豪雨により、高潮や河川の氾濫による水害が多く発生している。また、台風や突風、竜巻による風の被害も発生している。屋外に設置される太陽光発電設備においては、水没や風による破壊の危険が高まることとなる。このような環境変化を踏まえて今回、水害等を起因とした太陽光発電設備の火災について報告してほしいとの依頼があった。また、太陽光発電所が池などの水上に作られる例も増え、風の被害を受けやすく、しかも、導電性の水が周囲にあることから、水分浸入による腐食や絶縁劣化が起りやすい環境での稼働を余儀なくされる。普及が進むと、太陽光発電設備がこのような厳しい環境にさらされる機会が増え、それに伴って火災が発生する可能性も増す。消防隊員の感電などの視点から我々は太陽光発電設備の火災事例を分析してきた。今回はこれら事例の中から、水害が原因となった火災と、水上太陽光発電所の火災事例について報告する。

2. 2018年9月の台風21号の影響による火災¹⁾

淡路島付近を南から北に通過した台風21号は関西圏に暴風と高潮をもたらした。台風中心気圧の低さから記録的な高潮が発生し、海岸沿いに設置されていた太陽光発電所へ海水が流入し、太陽光発電設備の一部が海水に没した。この発電所の複数の接続箱が、浸水時と水がある程度引いた翌日に出火した。

2.1 火災概要

台風が通過した後、9月4日16:00頃に出火し、16:06に119番通報があった。付近の住民がバンッバンッという音を聞き、太陽光発電所の方を見ると2ヶ所から白煙が立ち上るのを確認したため、119番通報した。消防隊は、9月4日に接続箱1個に対する消火活動を行い、接続箱2個の自然鎮火を確認した。翌日から太陽光発電設備の被害確認が行われ、接続箱651個のうち65個で発火やアーク痕を確認した。

2.2 太陽光発電所の設備

この発電所は運用を開始してから約3年を経過していた。総発電出力は29,700kWで、太陽電池モジュール（以下、モジュールという。）枚数は約15万枚、システム直流電圧は約600V（モジュール16枚直列の電圧）、接続箱は651個（15Aヒューズ、避雷器内蔵）、パワーコンディショナ（以下、パワコンという。）は61基である。

2.3 接続箱の状況

接続箱の配線前の状況はFig.1の通りで、上部には開閉器とバスバー、上部左に避雷器、中段より下部には入力端子がある。開閉器の部分には透明アクリルの保護板が設置されている。入力端子は上下2

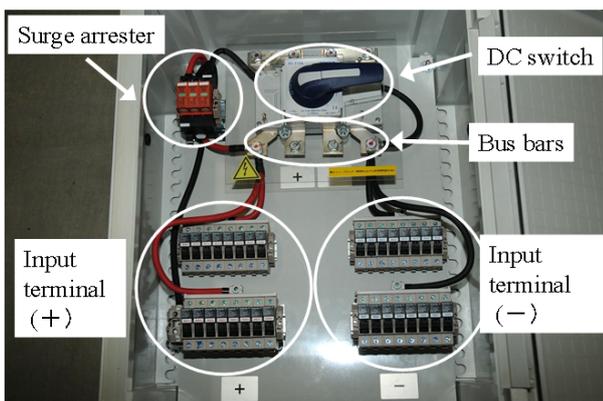


Fig.1 Inside a new junction box

*消防庁消防研究センター 大規模火災研究室長

段となっており、左に+極が16回線、右に-極が16回線ある。モジュールからの配線は接続箱の底面から挿入される。開閉器の下にある+と-のバスターの端子は出力用で、出力配線はこの端子からまっすぐ下に延ばし底面から送り出される。接続箱の火災状況をすべて紹介できないが、特徴のある事例を3つ記載する。

2.3.1 接続箱上部部品付近の焼損

接続箱内上部にあるバスター付近や避雷器付近が焼損している。Fig2は開閉器のハンドルが既に脱落し、バスターが溶断するほどに焼損している。避雷器につなぎ込まれている両極の端子部分で焼損している。

2.3.2 接続箱下部接続端子付近の焼損

接続箱内中段より下部にある入力端子の両極付近が焼損している。Fig3では、下部の入力端子台部分が両極とも焼損している。配線が端子台部分で溶断しているものが多い。海水の浸入高さによって端子台の焼損する位置（高さ）が変わってくる。

2.3.3 接続箱が破裂した事例

火災の通報者は、バンッバンッという音を聞いて発電所の方に目を向けた、と言うことであった。Fig4に示した接続箱は、正面の蓋は外れ上下に破断し、側面の板は左右とも外れていた。接続箱内部

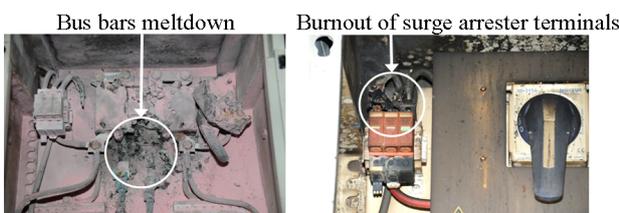


Fig2 Burnout of the upper inside of the junction box

Burnout of input terminal (-)

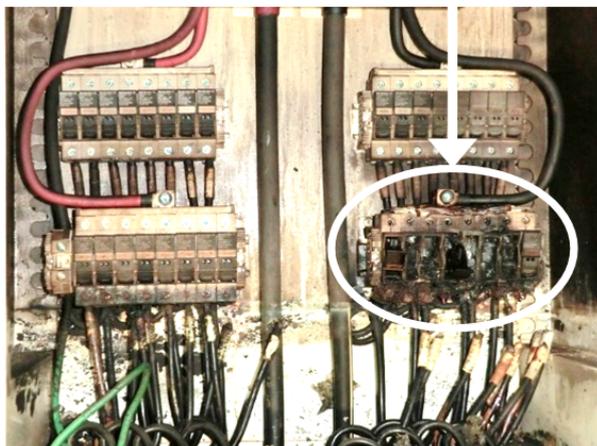


Fig3 Burnout of the lower inside of the junction box

で爆発が起きたと考えられ、そのときの音が聞こえたと推定される。接続箱内部で爆発が起こる可能性としては、海水の電気分解により発生した水素が箱の中に溜まり、何らかの火花や高温物により着火したものと考えられる。なお、壊れた接続箱は複数確認されている。

2.4 通電実験

接続箱内の端子部分が海水に水没した時、どのような現象が起こるかを確認するため、火災の発生した発電所内で、樹脂ケースに海水を貯め、配線端部を水没させて実験を行った。電源として実際のモジュールの出力を用い、実験開始前に測定した開放電圧は566Vであったが、薄曇りであったため、定格出力には届かなく、さらに雲の濃淡により出力は変動していた。

Fig5が実験を行った様子である。実際の接続箱

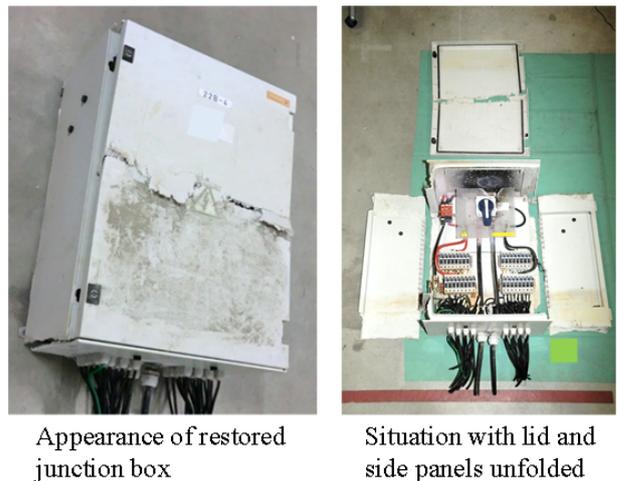


Fig.4 Burst junction box

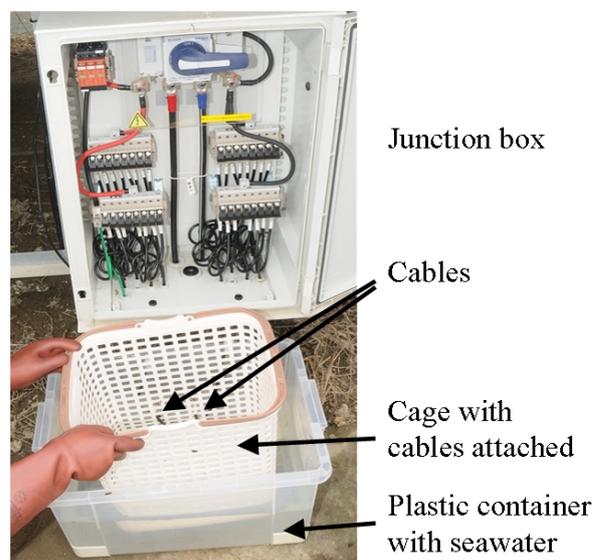


Fig5 Reproduction experiment of inundation situation

内の入力端子は下から配線をつなぎ込んでいるため、この実験でも水中から心線である銅線部分が出ている状態から実験を開始した。徐々に配線を水中に沈めていくと電気分解が開始され、-極から水素が、+極から酸素が発生した。銅線部分を水面で上下させると、-極及び+極でバチバチと放電が始まった。+極の放電の様子を Fig.6 に示す。銅線が完全に水没すると、両極からガスが発生した。再び水面付近で銅線部分を上下させると、放電とガスの発生が継続し、およそ 60～70 秒後に-極で発炎が確認できた。-極での発炎の様子を Fig.7 に示す。電気分解で発生した水素が空気中の酸素と混ざり、放電のエネルギーで着火したと思われる。発炎状態で配線を水没させると、水中で発炎が継続した (Fig.7 参照)。水中での酸素供給がどのように行われたかの確証はないが、水素と放電エネルギーは存在するので、酸素があれば水中での発炎が継続すると思われる。モジュールの公称最大出力動作電流は 8.15A で、水中で放電や発炎が続いている間は公称

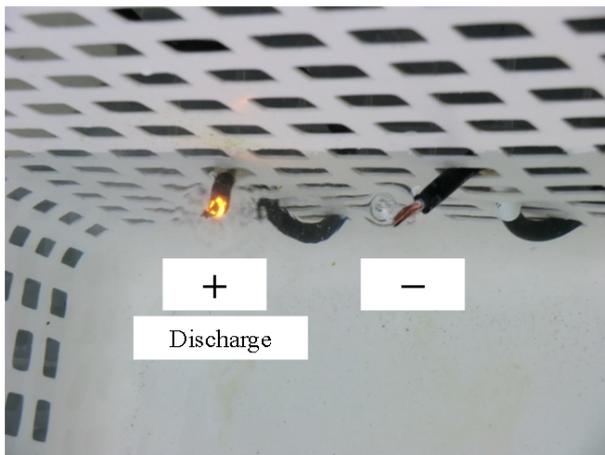


Fig.6 Discharge at the liquid surface

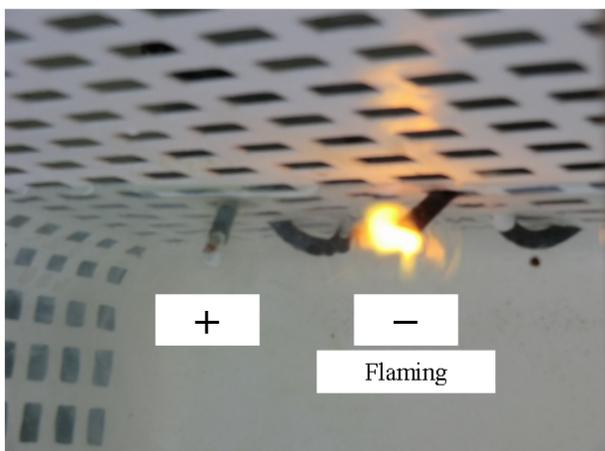


Fig.7 Flaming at the liquid surface

最大出力動作電流の 7 割以上の約 6A の電流が流れていた。消防隊が現場に駆け付けた時、雨はやんでいたという証言があるため、曇り空での発電があったと思われる。

今回の実験により、接続箱内に海水が浸入し、直流の高電圧がかかっている端子や配線部分が水没すると、水素や酸素が発生することがわかる。また、高電圧の端子や配線部分に海水面が来ると、放電が発生する。この放電により、発生した水素ガスが着火し、接続箱を破壊するような爆発が発生したと考えられる。また、-極では端子台に接続した配線部分で放電や火炎が発生するため、端子台の溶融や銅線の溶断、Fig.8 のような配線被覆の焼損が起こったと考えられる。+極では、海水の電気分解で銅が溶け出し、銅線がやせ細ることが見られた。太陽光発電所では、システム直流電圧は住宅用の 2～3 倍の高さになっているため、放電や絶縁破壊が起こりやすい。高潮の場合、海水には導電性もあるため、放電や短絡に近い状態を作りやすい。そのため、水没した接続箱で多くの被害が出たものとする。今回の実験のように高潮による浸水で激しい放電や発炎が起こるが、それらが継続する時間は、接続箱の水はけが良ければ短時間に、水はけが悪ければ長時間になると思われ、接続箱内の被害の程度に差が生じることとなる。

3. 2018 年 7 月豪雨 (西日本豪雨)¹⁾

2018 年 7 月豪雨では、山口県、広島県、岡山県、島根県、愛媛県をはじめとして、西日本や北海道、長野県など広い範囲で洪水、土石流、土砂崩れが発生し、甚大な被害が出た。これら水害のあった地域で、水害発生後に火災が発生したかをいくつかの消防本部に問い合わせた。その中の太陽光発電設備の

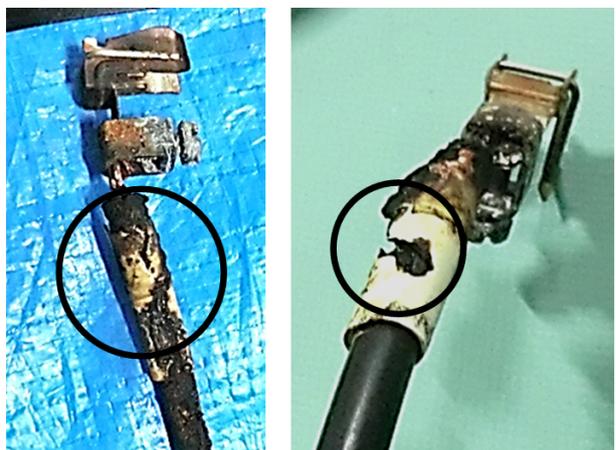


Fig.8 Melting of wiring sheath

火災について紹介する。

3.1 発生火災の概要

西日本豪雨で被害のあった広島県内で5本部、岡山県内で3本部、愛媛県内で1本部の計9本部に電話で問い合わせを行った。岡山県の1本部を除き、他の8本部は、水害の中で何らかの火災が発生していた。8本部の合計で17件の出火を確認しているが、うち4件は土砂被害がひどく調査が行えてなかった。残る13件は、土砂崩れや土石流が原因と思われる事例が4件、浸水が原因と思われる事例が8件、豪雨との関連が不明の事例が1件であった。この13件のうち、太陽光発電設備からの出火事例が8件であった。

3.2 出火事例

【事例1】

2階床まで浸水した2階建て住宅で発生した。住宅1階外壁に設置されていた太陽光発電設備のパワコン2台のうちの1台から煙が出ているとの通報を受け、消防隊が確認したところ、配線被覆の一部が溶融していた。モジュールからの電力が供給されているパワコンの入力端子部分に溶融が確認できた。直流開閉器を切断後、住民に感電危険の注意喚起をした。

【事例2】

2階の屋根まで浸水した2階建て住宅で発生した。住宅1階外壁に設置されていた太陽光発電設備のパワコン3台のうちの1台から煙が出ているとの通報を受け、消防隊が確認したところ、煙はおさまっており、直流開閉器及び分電盤のブレーカーが切断されていることを確認した。

【事例3】

2階床まで浸水した2階建て住宅で発生した。住宅1階外壁に昇圧器と蓄電池装置が設置されていた。1階浴室脱衣所に設置されていた住宅用太陽光発電設備のパワコンから火花及び白煙があがっているとの通報を受け、駆け付けた消防隊は断続的な放電火花とパチパチ音を確認した。脱衣所内の分電盤の開閉器や太陽光発電用ブレーカーを開いても放電は収まらず、屋外の昇圧器の開閉器を開くと放電は止った。モジュールからの電力が供給されているパワコンの入力端子部分に溶融が確認できた。

【事例4】

1階天井まで浸水した住宅で発生した。住宅1階に設置されたパワコンから白煙があがっているとの通報を受け、消防隊が確認したが、火煙は認められなかった。また、パワコンのフロントカバーを開け

たが、溶融は認められなかった。太陽光発電設備の直流開閉器が開になっていることを確認した。

【事例5】

1階床上まで浸水した住宅で発生した。住宅1階に設置されたパワコンから白煙があがっているとの通報を受け、消防隊が確認したが、火煙は認められなかった。直流開閉器、パワコンブレーカーが開になっていることを確認した。

【事例6】

約3mの深さで浸水した2階建て住宅で発生した。水害後の片付け作業中に「ボン」という音で振り返ると、住宅1階に設置されたパワコンから黒煙があがっていた。その後発炎し、住民が消火器で消火し収まった。2階のベランダに接続箱があったが、直流開閉器を開にしていなかった。接続箱の鍵は、住民ではなく電力会社が保管していた。パワコンでは、「バチ」という音と発火、発煙が継続していたが、接続箱内の直流開閉器を開にするとこれらは収まった。パワコン内には泥が付着しており、この影響で絶縁劣化が起こり、短絡等により配線被覆や樹脂等に着火したものと推定された。

【事例7】

水深2.3mまで浸水し、モジュール表面まで水没した太陽光発電所で発生した。発電所は総出力約200kWで、直流電圧は600Vで、送電は交流6600Vである。モジュールは約740枚、接続箱は7個である。浸水2日後に接続箱2個から白煙を確認し、消防隊が駆け付け、電気保安協会の作業員が直流開閉器を開にしたあと焼損を確認すると、接続箱7個中4個が焼損していた。電気保安協会の作業員は、焼損の激しい2個の接続箱の開閉器操作はできなかつたため、これら2個の接続箱は浸水3日後に再び出火した。モジュールからの電力が供給されていた端子部分の絶縁が浸水の影響で低下し、発火に至ったと推定された。

【事例8】

水深70～80cmまで浸水し、接続箱が水没した太陽光発電所で発生した。浸水2日後に、接続箱から炎が上がりモジュールまで燃え広がりそうであるとの通報があり、現場で確認すると、接続箱9個中8個とモジュール2枚が焼損していた。消防隊が到着する前に、設置業者が配線を切断し消火していた。接続箱内には泥が付着しており、この影響で絶縁劣化が起こり、短絡等により配線被覆や樹脂等に着火したものと推定された。

【事例1～8の傾向】

浸水被害を受けた後、2日または3日後に出火していた。浸水翌日もまだ雨模様の天気であったため太陽光発電設備の発電が弱かったが、2日後には天気が回復したため、2日または3日後に出火したものである。住宅の太陽光発電設備が浸水被害に遭った総数は分らないが、出火件数は9消防本部で6件であった。太陽光発電所では、接続箱の出火が多い。接続箱はモジュールの陰（下）に設置されていることが多いため、水没の可能性が高い。また、今回の事例でみると、発電所の直流電圧は住宅用の2倍程度になっていたため、短絡や漏電が起こった際のエネルギーが大きくなる。そのため、発火しやすいと言える。水没してしまった太陽光発電所の接続箱は、日射が回復すると発火する危険性が高い。

4. 水上太陽光発電所の火災

4.1 2019年台風15号台風の影響による火災

内陸の池の上に設置された13MW超の太陽光発電所が台風の影響を受け、モジュール群が強風により岸まで追いやられ、破壊されたために出火したものである。強風は夜中だったため日射による発電が開始された朝に、パワコンに絶縁不良の警報が発生した。その際パワコンをすべてシャットダウンしていたが昼頃に火災の通報があり、3時間ほどで鎮圧に至った。

Fig.9のようにモジュールを乗せたフロートごと風により移動し、フロートがほかのフロートに乗り上げたり、破損したりしている。フロート上の接続箱は、フロート位置の移動により、配線が引き出されているものもある。フロートは池の底にワイヤーによって固定されていたが、設計風速以上の強風が吹いたため、ワイヤーが切れ移動した。5万枚以上



Fig.9 Condition of destroyed modules

のモジュールが使われていたが、全体の2/3ほどのモジュールが移動した。消防隊が駆け付けた時にはモジュールやフロートが発炎している状態で、焼損したフロートは浮力を失うことが多いため、焼損物は沈んだ状態となった。

パワコンがモジュールからの電気を受け取らない状態になっていたとしても、モジュール自体の発電は日射により継続している。その状態で、1系統中の2か所で配線が切れ、水につかっていると、回路が形成され電気が流れる。そのため、ジュール熱による発熱、アーク放電が発生しうる。また、水上にある接続箱は遮断操作ができていないため、接続箱経由でほかの系統を合わせた大きな電流が地絡している系統に流れ込み、過電流による加熱も考えられる。焼損部分は水没しているため、モジュールや接続箱は調べ切れていないため、はっきりとした原因はわからないが、このような原因が推定できる。

4.2 フロート及びモジュールが燃えた火災

河口付近の池に設置された太陽光発電所（Fig.10参照）で、一部のフロートとモジュールを焼損した。太陽光発電所は約33000枚のモジュールで構成され、出力は約9MWであった。出火当日はときどき小雨が降る曇り空で、昼頃に地絡警報が発生してパワコンが停止し、16時過ぎに通行人が炎を発見している。

焼損したのは、モジュールが35枚、接続箱が1個、これらが載っていたメインフロートと足場用のサブフロートである。火災現場は道路から100m以上離れた場所であり、昼間だと低い炎は見つけにくい。そのため、出火時刻は、地絡警報の出たときなのか、火災が発見されたときなのかは判断が難しい。

地絡警報によりパワコンの稼働は停止したが、接

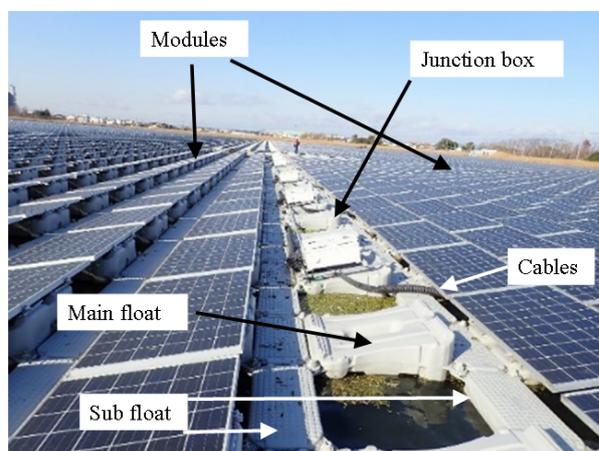


Fig.10 Status of modules, junction boxes, and cables on floats

続箱の遮断までは行っていない。また、日射があればモジュールの発電も継続している。接続箱の内部には、遮断器とヒューズが設置されているが、ダイオードはないためモジュール側への逆流を防止する機能はない。この太陽光発電所では野生動物が配線をかじることによる地絡警報が月に数回起こっている。配線の被覆がなくなり心線が露出し水につかることで起こることが多い。現場での観察でも、モジュール間の配線や接続箱につながる配線に修復跡が多数見つけられる。また、かじられた配線は、銅心線がえぐられているものもあり、場合によっては心線が切れかかったり、切れたりすることが考えられる。以下に延焼状況を確認した実験を示す。

4.2.1 モジュール配線のアーク放電実験

発電中に配線が切れることで発生するアーク放電により配線被覆やフロートが燃焼することが考えられるため、現場とは違う型式のモジュールを用いてアーク放電を発生させ、周囲可燃物への着火や延焼について確認した。

実験は、公称最大出力電流 8.16A、公称最大出力電圧 14.96V のモジュール 20 枚と 13 Ω の負荷と開閉器を Fig.11 のように直列にループ状に接続し、ループ内の配線の 1 か所を切断した状態にし、この部分でアーク放電を起こさせた。開放電圧は約 360V である。モジュール面への日射の角度により出力電流の値が変わるので、角度を 3 パターン実施し、出力電流が 7.7A、4.3A、3.0A の状態で放電させた。切断した配線の心線を接触させた状態で電流を流し、その後、配線をゆっくりと引き離してアーク放電を発生させた。各電流で 2 回実施した。放電個所の近傍にフロートの樹脂を置き、着火や延焼について観察した。放電の様子はビデオで記録し、放

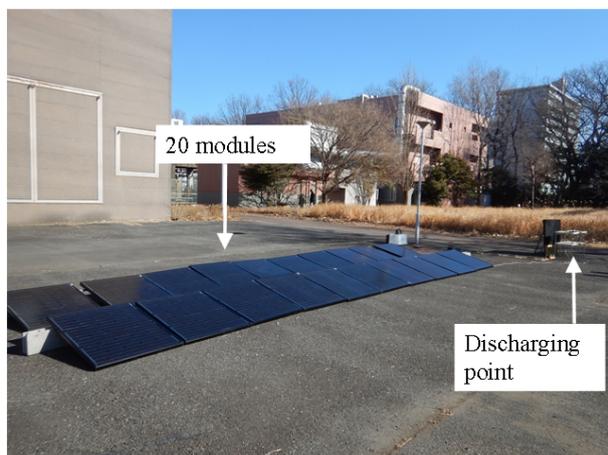


Fig.11 Experimental equipment for checking arc discharge

電時間を計測した。クランプメータで電流を測定し、データロガーに記録した。

アーク放電が始まり配線の動きを止めると、しばらく放電が継続する。配線心線の溶損が進み心線同士の距離が離れると放電が停止する。放電電流の変化を見ると通電中とアーク放電中の電流値に違いはなかった。そのため、放電時間はビデオ映像から計測した。

電流が 7.7A のときの放電時間の平均は 4.3 秒、4.3A のときの放電時間の平均は 6.7 秒、3.0A のときの放電時間の平均は 37 秒となった。放電電荷量 (= 電流×時間) の比較では 3.0A のときは 7.7A のときの 3.4 倍ほどが流れている。日射が強い場合は弱い場合に比べ、大きな電流が流れることで電極溶損が早く進み、放電時間が短くなる。3.0A のときは近傍に置いたフロート樹脂が延焼したが、他の条件では樹脂の表面が溶けたり焦げたりする程度であった。この時のアーク放電の様子とフロートの延焼状態を Fig.12 に示す。アーク放電の継続時間が近傍の可燃物に着火や延焼の影響を与えやすいと考えられ、日射が弱い時のほうがアーク放電から延焼火災に移行しやすいと思われる。例えば、配線が動物にかじられ心線が切れかかった状態で、波や風の影響でフロートが揺れて切れてしまうことによりアーク放電が始まり、フロートの樹脂に着火した、ということが考えられる。

4.2.2 フロートの燃焼実験

モジュールや接続箱を乗せるモジュール用のメインフロートと人が歩くための足場用のサブフロートがある。材質は同じである。火災当日の地絡警報発生時刻と火災発見の通報時刻に 3～4 時間の開きがあるので、フロートの燃焼状況を確認した。

メインフロートは上面を、サブフロートは側面をバーナーであぶり着火し、その後の延焼を観察した。Fig.13 に着火 22 分後の延焼状況を示す。大きな炎を上げることなく、樹脂が溶けて燃えながら落ちる様子が見られた。延焼はじわじわと拡大し、30 分



Arc discharge Float resin burnout situation

Fig.12 Float resin spreading fire by arc discharge

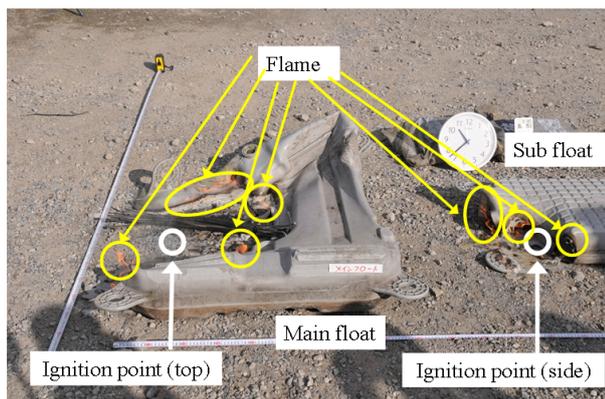


Fig.13 Situation 22 minutes after ignition

以上をかけてフロートほぼ全面に拡大した。実験は土の上で行ったため、フロート底面も延焼したが、水上にある場合には底面は水に触れているため延焼しにくいと考えられ、実際の焼損物でも底面は燃えずに残っているものが多い。

この実験より、フロートの1か所から延焼が始まったとした場合、消えることなく長時間にわたってゆっくりと延焼していくことが推定できる。大きな炎を上げずに静かに延焼していた場合には、地絡警報時に出火したとしても、火災発見の通報まで時間の開きがあっても不思議ではない。

5. まとめ

太陽光発電設備の火災のうち、高潮や洪水の影響による火災と、水上発電所の火災について報告した。電気設備と水は火災や事故を起こしやすい組み合わせであり、屋外に設置される太陽光発電設備は設置施工に注意が必要である。太陽光発電所では、接続箱がモジュール下などの低い位置に設置されること

が多いため、水没の被害を受けやすい。水没した接続箱は絶縁劣化や水素の発生、放電の発生が起こりうるので火災になりやすい。被害を受けた設備を再利用することは危険である。水上発電所はモジュールや接続箱の設備がフロート上にあり固定が堅固ではないため、風や波の影響を受けやすい。水面とモジュール等の位置も近いので、野生の動物が近づきやすいので、動物がcaじるなどの被害も生じやすい。caじられた配線のすぐ下には水があることから地絡などの故障に進みやすい。これはメンテナンスだけでは対応しきれない問題でもある。自然災害が激甚化する中で、様々な場所に今後も設置されることが考えられる太陽光発電設備は、重要な電力を賄う設備でもあるので、設備・施設ごとに安全対策を施した形で設置されることを期待する。

参考文献

- 1) 田村裕之, 松崎崇史, 洪水・高潮等の水害時に発生した太陽光発電設備の火災, 太陽エネルギー, 45 (3), 53-58 (2019).

著者略歴



田村裕之 (たむらひろゆき)

火災感知技術, 電磁波ノイズ対策, 静電気火災の防止, 太陽光発電システム火災への対応に関する研究に従事。静電気学会功績賞, 日本火災学会賞, 日本火災学会内田奨励賞受賞。現在, 消防研究センター大規模火災研究室長, 上席研究官。