

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託業務

2017年度

太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト／

太陽光発電システムの安全確保のための実証／

耐風安全性および水害時感電防止を考慮した合理的設計手法の開発

（ii）水害時の太陽光発電システムの電気安全に係る研究開発

【太陽光発電システムの水没実験報告書（抜粋版）】

2019年4月26日

一般社団法人 太陽光発電協会

この資料は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト／太陽光発電システムの安全確保のための実証」事業の一環として実施した水没実験の概要をまとめた成果物です。

目次

1. 序	1
2. 本研究の趣旨・位置付け	2
2.1 本研究の趣旨・目的	2
2.2 本研究の位置付け及び実施事項	2
3. 体制及びスケジュール	3
3.1 本研究の体制	3
3.2 本研究のスケジュール.....	5
4. 実験計画の策定	6
4.1 実験計画の策定方針	6
4.2 実験による感電リスクの検証範囲	6
4.3 単体実験とシステム実験	6
4.4 専門家への実験方法に対するヒアリング	7
4.4.1 電流検出器側のセットアップ・測定箇所	7
4.4.2 太陽光発電システムと設備側のセットアップ	8
4.4.3 計測・記録に関するその他の留意点	9
4.5 測定系の検討	10
4.5.1 人体の感電状況を模擬した電流測定方法の検討	10
4.5.2 測定方法の検討	11
4.6 水没させる太陽光発電システム（設備）の状況検討	13
4.7 実験方法の検討（水没後）	14
5. 実験場所の選択、整備と実験設備の調達	15
5.1 実験場所の選択、整備.....	15
5.1.1 実験場所の選択	15
5.1.2 実験場所の整備	17
5.2 実験設備の調達	19
5.2.1 主要機器の調達	19
5.2.2 架台の調達.....	20
5.2.3 その他材料の調達.....	20
6. 単体実験の実施及び結果	21
6.1 単体実験の準備	21
6.1.1 プール（模擬池）の準備.....	21
6.1.2 測定時のシステム構築	22
6.1.3 測定棒の準備と測定箇所.....	23
6.2 単体実験の実施手順	26

6.3 単体実験の結果	28
6.3.1 実験①モジュール単体実験	28
6.3.2 実験② 接続箱・PCS に接続しての水没実験	33
6.3.3 実験③ 接続箱・PCS を用いて印加電圧を大きくした場合	38
6.3.4 実験④ 接続箱「鋼板・ダイオード」を用いて並列回路を形成した場合	43
6.3.5 実験⑤ 接続箱「鋼板・ダイオード」を用いて印加電圧を大きくした場合（破 損有り）	44
6.4 単体実験の考察・まとめ	48
6.4.1 各パラメータと感電リスクの関係	48
6.4.2 漏電回路の考察	58
6.4.3 その他	61
7. システム実験の実施及び結果	62
7.1 システム実験の準備	62
7.1.1 池の準備	62
7.1.2 測定時のシステム構築	62
7.1.3 測定棒・接地の準備	64
7.2 システム実験の実施手順	66
7.3 システム実験の結果	71
7.3.1 実験① 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いた場合（水の濁りが大きい場合）	71
7.3.2 実験② 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いた場合	72
7.3.3 実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）を用いた場合	75
7.3.4 実験④ 接続箱（樹脂・ヒューズ）を用いた場合	77
7.3.5 実験⑤ PCS を用いた場合	79
7.3.6 実験⑥ 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いて2ストリングとした場合	81
7.3.7 実験⑦ 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いて直流ケーブルを破損させた場合	83
7.3.8 接続箱への接触による感電リスク	90
7.4 システム実験の考察・まとめ	90
7.4.1 各パラメータと感電リスクの関係	90
7.4.2 漏電回路の考察	101
7.4.3 その他	102
8. 実験後設備の調査	103
8.1 実験後設備の調査手順	103
8.1.1 機器	103
8.1.2 システム	103
8.2 実験後設備の調査結果	104
8.2.1 機器	104
8.2.2 システム単位	108

8.3 実験後設備の調査まとめ.....	109
8.3.1 停止状態での安全性について.....	109
8.3.2 再稼働時の安全性について.....	110
9. 実験データを踏まえたシミュレーションへの展開.....	111
10. 実験結果・考察を踏まえた安全に対する提案.....	112
10.1 安全に対する提案に向けた専門家へのフォローヒアリングの実施.....	112
10.2 実験結果を踏まえた安全に対する提案.....	113
10.2.1 一般の方及び保守保安業務従事者の水没した太陽光発電システム・設備への対応.....	113
10.2.2 消防隊員等が救助活動を行う場合の水没した太陽光発電システムへの対応.....	113
10.2.3 事業者・保安業務従事者が点検・撤去を行う場合の水没被災後の太陽光発電システム・設備への対応.....	114
11. その他業務の実施.....	115
11.1 地元関係者への説明会の実施.....	115
11.1.1 北杜市役所への説明.....	115
11.1.2 地権者への説明.....	115
11.1.3 中日本高速道路株式会社（NEXCO中日本）への説明.....	115
11.1.4 鉄塔立替え工事との調整.....	115
11.2 見学会の実施.....	115
11.3 実験設備の廃棄.....	115
12. まとめ及び今後の課題.....	116

巻末資料 データ集

図目次

図 3-1	実施体制	3
図 4-1	水没実験実施イメージ	6
図 4-2	感電時の形成回路	10
図 4-3	感電時の電流測定方法	10
図 4-4	水没させる太陽光発電システム	13
図 4-5	完全水没と半分水没の実験概要	13
図 5-1	浸透池の周辺配置図	16
図 5-2	浸透池の周辺写真（北側からの状況）	16
図 5-3	単体実験環境	17
図 5-4	単体実験用プール内部の状況	17
図 5-5	整備後の浸透池周辺写真	18
図 6-1	単体実験時の模擬池	21
図 6-2	単体実験時のシステム構成	23
図 6-3	測定棒の外観	23
図 6-4	プローブ端、アース端箇所	24
図 6-5	実験①の基本状態	28
図 6-6	実験①-2 剥き線	29
図 6-7	実験①-2 コネクタ間距離 5 cm	30
図 6-8	実験①-2 コネクタ間距離 180 cm	31
図 6-9	実験①-3 のケーブル破損状況	32
図 6-10	実験①-3 の破損箇所	32
図 6-11	実験②の基本状態	33
図 6-12	実験⑤の基本状態	44
図 6-13	断線箇所間距離 80 cm 時の配置	44
図 6-14	断線箇所間距離 270 cm 時の配置	45
図 6-15	断線箇所間距離 180 cm 時の配置	46
図 6-16	破損箇所（正極）と電流の相関	47
図 6-17	接続箱単体実験時のシステム構成	51
図 6-18	ダイオード方式の接続箱内部	51
図 6-19	ダイオード方式の接続箱内部（ストリング入力部）	52
図 6-20	ヒューズ方式の接続箱内部	52
図 6-21	実験②でのヒューズ方式とダイオード方式の動作点	53
図 6-22	PCS 内部	55
図 6-23	断線箇所と漏電電流	57
図 6-24	断線箇所と漏電電流グラフ	57
図 6-25	負極接地の漏電経路	59
図 6-26	単体実験システム	60
図 6-27	接地線に流れる電流（負極接地有の場合）	60
図 7-1	浸透池概略図	62

図 7-2	水没させる太陽光発電システム	63
図 7-3	システム実験時のシステム構成	63
図 7-4	測定棒外観	65
図 7-5	接地棒写真	65
図 7-6	接地極位置関係	66
図 7-7	水中の測定箇所（水中での測定箇所（●）と測定器のアース端の位置（▼））	68
図 7-8	測定の外観	70
図 7-9	測定結果記載方法	71
図 7-10	攪拌前後の池の状態	71
図 7-11	2ストリングの測定システム	81
図 7-12	直流ケーブル破損 測定システム	83
図 7-13	直流ケーブル破損 断線箇所	84
図 7-14	実験⑦ 断線箇所間 8 cm 完全水没時の配置	84
図 7-15	実験⑦ 断線箇所間 100 cm 完全水没時の配置	86
図 7-16	実験⑦ 断線箇所間 8 cm 半分水没時の配置	87
図 7-17	実験⑦ 断線箇所間 100 cm 半分水没時の配置	88
図 7-18	実験⑦ 断線箇所間距離変更 半分水没時の配置	89
図 7-19	単体実験時の接地極	95
図 7-20	ストリング数と動作電流・電圧の関係	97
図 7-21	断線箇所（+）からの距離と漏電電流の関係	97
図 7-22	水中の測定箇所	98
図 7-23	接地極位置関係	98
図 7-24	実験② 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いた場合での動作点と I-Vカーブ	100
図 7-25	実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）を用いた場合での動作点と I-Vカーブ	100
図 7-26	実験④ 接続箱（樹脂・ヒューズ）を用いた場合での動作点と I-Vカーブ	101
図 8-1	水没前後の太陽電池モジュールの I-Vカーブ	104
図 8-2	水没後の腐食	106
図 8-3	電圧印加中の気泡（例）	106
図 8-4	ヒューズの腐食	107
図 8-5	ピンの溶出	108
図 8-6	ダイオード破損	108
図 8-7	水没前後の太陽電池ストリングの I-Vカーブ	109

表目次

表 2-1	本研究の実施事項.....	2
表 3-1	実施担当者一覧.....	3
表 3-2	助言を頂いた有識者一覧.....	4
表 3-3	本研究のスケジュール.....	5
表 4-1	接近方法ごとの測定方法一覧.....	12
表 5-1	主要機器一覧.....	19
表 6-1	単体実験時の水質.....	21
表 6-2	模擬池材料.....	21
表 6-3	測定器仕様.....	22
表 6-4	測定棒等仕様.....	25
表 6-5	単体実験概要.....	26
表 6-6	単体実験時の測定方法.....	27
表 6-7	感電リスクの判定基準.....	28
表 6-8	実験①-1 コネクタ短絡の結果.....	29
表 6-9	実験①-2 コネクタ間距離 5 cm の結果.....	30
表 6-10	実験①-2 コネクタ間距離 180 cm の結果.....	31
表 6-11	実験①-3 コネクタ短絡 (破損有) の結果.....	32
表 6-12	実験②-1 接続箱 (鋼板・ダイオード) の結果.....	34
表 6-13	実験②-2 接続箱 (鋼板・ヒューズ) の結果.....	35
表 6-14	実験②-3 接続箱 (樹脂・ヒューズ) の結果.....	36
表 6-15	実験②-4 PCS の結果.....	37
表 6-16	実験③-1 接続箱 (鋼板・ダイオード) の結果.....	39
表 6-17	実験③-2 接続箱 (鋼板・ヒューズ) の結果.....	40
表 6-18	実験③-3 接続箱 (樹脂・ヒューズ) の結果.....	41
表 6-19	実験③-4 PCS の結果.....	42
表 6-20	実験④ 2ストリングの結果.....	43
表 6-21	実験⑤ 断線箇所間距離 80 cm.....	45
表 6-22	実験⑤ 断線箇所間距離 270 cm.....	46
表 6-23	実験⑤ 断線箇所間距離 180 cm.....	46
表 6-24	接地状態による違い.....	48
表 6-25	接続箱比較.....	49
表 6-26	実験③-4 PCS 接続時の抜粋.....	55
表 6-27	接続時と実験③-1 1ストリング接続時の比較.....	56
表 6-28	測定方法比較.....	58
表 7-1	架台材料.....	64
表 7-2	測定棒仕様.....	65
表 7-3	接地抵抗.....	66
表 7-4	システム実験概要.....	68
表 7-5	システム実験時の測定方法.....	69

表 7-6	一般的な水の電気伝導度.....	71
表 7-7	実験① 接続箱（鋼板・ダイオード）水の濁り大 測定結果.....	72
表 7-8	実験② 接続箱（鋼板・ダイオード）完全水没 測定結果.....	73
表 7-9	実験② 接続箱（鋼板・ダイオード）半分水没 測定結果.....	74
表 7-10	実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）完全水没 測定結果.....	76
表 7-11	実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）半分水没 測定結果.....	77
表 7-12	実験④ 接続箱（樹脂・ヒューズ）完全水没 測定結果.....	78
表 7-13	実験④ 接続箱（樹脂・ヒューズ）半分水没 測定結果.....	79
表 7-14	実験⑤ PCS 完全水没 測定結果.....	80
表 7-15	実験⑤ PCS 半分水没 測定結果.....	81
表 7-16	実験⑥ 接続箱（鋼板・ダイオード）2ストリング 測定結果.....	82
表 7-17	ストリング数と1ストリング当たりの動作電流・電圧の関係.....	83
表 7-18	実験⑦ 断線箇所間 8 cm 完全水没時 追加測定結果.....	85
表 7-19	実験⑦ 断線箇所間 8 cm 完全水没時 測定結果.....	85
表 7-20	実験⑦ 断線箇所間 100 cm 完全水没時 測定結果.....	86
表 7-21	実験⑦ 断線箇所間 8 cm 半分水没時 測定結果.....	87
表 7-22	実験⑦ 断線箇所間 8 cm 半分水没時 測定結果.....	88
表 7-23	実験⑦ 断線箇所間 100 cm 半分水没時 測定結果.....	89
表 7-24	実験⑦ 断線箇所間距離変更 半分水没時 測定結果.....	90
表 7-25	筐体における各測定箇所とアース間の導通の有無.....	90
表 7-26	システム実験時の水質.....	91
表 7-27	濁り大と小の比較 接続箱（鋼板・ダイオード）.....	91
表 7-28	実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）.....	92
表 7-29	実験④ 半分水没 接続箱（樹脂・ヒューズ）.....	93
表 7-30	実験⑤ 半分水没 PCS.....	94
表 7-31	PCS 単体実験（再掲）.....	94
表 7-32	PCS 単体実験（再掲）.....	96
表 7-33	実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）半分水没 測定結果.....	98
表 7-34	実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）半分水没 測定結果（負極接地無し）	102
表 8-1	水没前後の太陽電池モジュールの絶縁抵抗推移.....	104
表 8-2	測定器仕様.....	105
表 8-3	水没前後の接続箱の絶縁抵抗推移.....	105
表 8-4	測定器仕様.....	106
表 8-5	水没前後のPCSの絶縁抵抗推移.....	107
表 8-6	水没前後のストリングの絶縁抵抗推移.....	109
表 8-7	測定器仕様.....	109

概要

近年、太陽光発電システムの導入が急速に増加している。これに伴い、台風や大雨被害といった自然災害により太陽光発電システムが水没する事象が発生し、太陽光発電システムが水没することによる安全面での懸念が顕在化してきた。

太陽光発電システムは、水没等した場合でも発電を続ける。そのため、水没によるシステムの絶縁性能の低下等により、水没中のシステムへの近接や接触では感電の危険性があると想定される。そこで、一般社団法人太陽光発電協会（JPEA）では、太陽光発電システムの水没が懸念される場合、太陽光発電システムへむやみに接近または接触しないように注意喚起を行っている。

しかし、実際に水害被害を受け、水没した太陽光発電システムにどの程度の感電リスクが生じているのかについて、漏電電流の測定といった具体的な検討は行われていなかった。今回、太陽光発電システムを水没させた状態での水中の漏電状況の測定、水没後の乾燥過程での接続箱等の絶縁抵抗値の変化の測定等を行った。

今回の太陽光発電システムの水没実験では、水没時の太陽光発電システムに起因する感電リスクの概要を把握し、測定方法等を事前に検証して円滑なシステム実験につなげることを目的とした太陽光発電システム・設備の単体を水槽に沈める「単体実験」及び実際の太陽光発電システム（直流部）を池にシステム全体を沈める「システム実験」の2つの実験を計画した。実験は「単体実験」から行い、その知見を基にシステム実験を行った。漏電電流の測定手法として、実際の水難救助等の状況を想定した実験方法を考案した。これらの実験セットアップには、専門家への事前ヒアリングにて頂いた助言を反映させた。

水没実験の結果から示唆された事項は、システムが負極接地されている場合に感電リスクが増加することや接続箱に直接接触すると危険であり、特に接続箱のアースがない場合により危険性が高まること等が明らかになった。また、システム実験の結果から、接続箱が漏電発生箇所となる場合、今回の水没実験に用いた池の大きさの範囲においての検証ではあるものの、水中では安全な退避距離がないこと等が明らかになった。一方で、漏電発生箇所が水中に暴露した正極の断線部分のみである場合には、水中において数m程度の距離をとることで、人命に関わる感電リスクを低減できることが示唆された。

これらの結果について、専門家への事後ヒアリングを行った。これにより、JPEAが行っている「水没太陽光発電システム・設備へ接近すべきではない。」旨の注意喚起が適切であるとの見解を頂いた。また、水没後の太陽光発電システム・設備については出来る限り早急に太陽電池モジュールと集電装置との切り離しを行う必要がある旨の注意喚起が必要であるとの意見を頂いた。

今後の課題として、水害時に太陽光発電システムが水没している際の安全を担保した救助手法の検討の必要性が挙げられる。今回の実験結果を踏まえ、今後の更なる検討がなされることを期待したい。

1. 序

2012年7月の固定価格買取制度（FIT）¹の導入により、太陽光発電システムの導入が増加している。一方で、台風や大雨被害といった自然災害により、太陽光発電システムが水没する事象が発生している。

太陽光発電システムの水没被災は絶縁性能の低下等を招き、太陽光発電システムへの近接や接触による感電の危険性がある。一般社団法人太陽光発電協会（JPEA）では太陽光発電システムが水害の被害を受けた場合の対処等の注意喚起²を行っている。

一方、これまで水害被害を受けた太陽光発電システムの感電リスクについて、太陽光発電システム・設備から水中への漏電状況の測定や水没後の絶縁抵抗値の測定といった実験的かつ定量的な調査は行われていない。これらの定量的な調査を行うことにより、水害時における水中での救助、太陽光発電システム・設備の復旧や撤去時の安全性の確保に向けた合理的な作業方法等を示すことができると考えられる。また、水害時を想定した点検用器具の準備等も可能となると考えられる。

本研究では、水害等により太陽電池モジュール及び関連設備が水没した場合、特に人体への危険性が高いと想定される事象について、その事象を再現した実証実験を行うとともに、安全確保に必要な対策の検討を行った。

¹ 電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法（平成23年8月30日法律第108号）最終改正平成28年6月3日法律第59号

² 太陽光発電設備が水害によって被害を受けた場合の対処について

<http://www.jpea.gr.jp/pdf/t150911.pdf>

太陽光発電システム被災時の点検・撤去に関する手順・留意点【水害編】

<http://www.jpea.gr.jp/pdf/t151009.pdf>

2. 本研究の趣旨・位置付け

本研究の趣旨、位置付け及び実施事項について以下に説明する。

2.1 本研究の趣旨・目的

水害により機能不全に陥った太陽光発電システムにおいても、太陽電池モジュールは光が当たることにより発電が継続する。このため、電力系統からの遮断やパワーコンディショナ（PCS）の停止が正常に行われていたとしても、直流側のケーブル・設備等は充電状態となっている場合がある。また、通常の太陽光発電システムでは絶縁や接地により感電に対する安全確保が行われているが、水害時には太陽光発電システム・設備等の破損等により絶縁性能の著しい低下や接地の断線等により、感電リスクが上昇する可能性がある。

本研究では、水害被害を受け水没した太陽光発電システムによる感電リスクについて水中での太陽光発電システム・設備からの漏電状況の測定を行うことにより定量的に把握し、水害時における水中での救助、太陽光発電システム・設備の復旧や撤去時の安全確保に向けた対策の検討を行うことを目的とした。

2.2 本研究の位置付け及び実施事項

本研究は、2016年度に行った「水害時における太陽光発電設備の感電リスクに関する検討」を踏まえて実施したものであり、今後の安全マニュアル策定等に資する位置付けで実施したものである。

本研究の実施事項は表2-1のとおりである。

表 2-1 本研究の実施事項

実施事項
1. 実験計画の策定
2. 単体実験の実施
3. システム実験の実施
4. 実験後設備の調査
5. 実験データを踏まえたシミュレーションへの展開の検討
6. 実験の結果及び考察を踏まえた安全に対する提案

3. 体制及びスケジュール

本研究の体制及びスケジュールについて以下に説明する。

3.1 本研究の体制

一般社団法人太陽光発電協会（JPEA）が研究の実施、取りまとめ、管理を行い、実験の計画及び実施に関してはEPC及び測定・試験会社に、研究支援及び有識者ヒアリングの実施等に関してはシンクタンクに、それぞれ外注する体制で実施した。実験場所の提供等に関しては、山梨県北杜市の協力を頂いた。

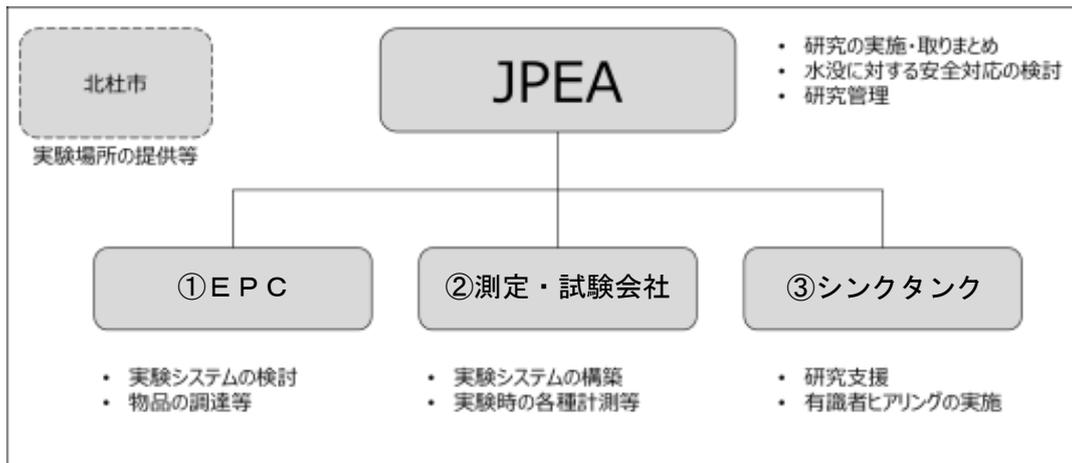


図 3-1 実施体制

①EPC、②測定・試験会社及び③シンクタンクの担当は、表 3-1 のとおりである。

表 3-1 実施担当者一覧

会社名	所属	氏名(敬称略)
①EPC	スマートエネルギービジネス本部	
	南関東支店 山梨支店	

会社名	所属	氏名(敬称略)
②測定・試験会社	PV試験評価事業部	
③シンクタンク	科学・安全事業本部	

実験に際しては、関係省庁や表 3-2 に示す有識者に対してヒアリングを行い、実験内容及びその結果等の解釈、感電事故防止のための対応策に関する助言を頂いた。

表 3-2 助言を頂いた有識者一覧

有識者所属
東京理科大学 工学部 電気工学科
国立研究開発法人 産業技術総合研究所(AIST) エネルギー・環境領域 太陽光発電研究センター
一般社団法人 日本電機工業会(JEMA)新エネルギー部
一般財団法人 電気安全環境研究所(JET)研究事業センター
総務省消防庁 消防大学校 消防研究センター
一般財団法人 関東電気保安協会 保安本部

3.2 本研究のスケジュール

本研究のスケジュールを表 3-3 に示す。

表 3-3 本研究のスケジュール

	2017年									2018年			
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
実験計画の 策定	●————→●										————→		
				有識者等へのヒアリングを実施									
単体実験				●	————→●								
				機器単位の実験									
				実験結果を反映									
システム 実験				●	————→●								
				実験準備						●————→			
										実験			
実験結果 取りまとめ				●	————→●							————→	
											結果の取りまとめ、対策検討		

4. 実験計画の策定

本章では、本研究内で行った実証実験の方法を以下に説明する。

4.1 実験計画の策定方針

水害時の太陽光発電システムの感電リスクは条件によって差異がある。しかし、実際の水害時には、日照条件や水質、施工方法や破損状態（設備状況）等の外部環境の違いがある。また、人命救助者か要救助者か、といった人の近接状況の違い等もあり、条件は千差万別である。そこで、これらの条件の違いを可能な限り模擬できるように、実験計画を策定した。また、将来的に実際の水害時の状況をシミュレーションするための基礎となるデータを取得することも目的として実験計画を策定した。

4.2 実験による感電リスクの検証範囲

実験を行うにあたり、実際の水害時の状況に近づけるため、基本的にシステムとして電氣的に接続された太陽電池モジュールのレイが水没した状況を作り出すこととした。ただし、パワーコンディショナ（PCS）の出力側から系統側の交流系統は、水害時には基本的に停電状態であると考えられるため、交流配線及び設備は取り外し、感電リスクの検証範囲を直流側に絞って実験を行った。（図 4-1）

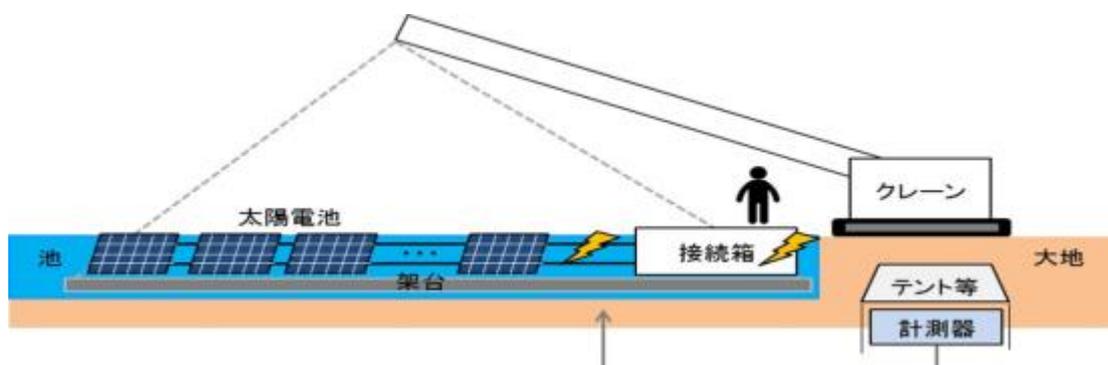


図 4-1 水没実験実施イメージ

4.3 単体実験とシステム実験

太陽光発電システム全体を水没させる実験のためには、重機等を要し、規模が大きくなり、実施期間が限られ、また、やり直しも困難となる。そこで、機器個別の大まかな特性と測定方法の健全性を確認するため、スモールスケールでの予備実験を行うこととした。この実験は機器単体を水没させることから「単体実験」と呼称する。これに対して太陽光発電システム全体を水没させる本実験のことを「システム実験」と呼称する。

単体実験はプールに模擬環境を作り出した。実験装置の外観を 5.1.2 に、実験結果を 6 章に、システム実験の結果は 7 章に記述する。

4.4 専門家への実験方法に対するヒアリング

実験計画の策定に際して表 3-2 に記載した各専門家へのヒアリングを行った。ヒアリングでは、実験で検証すべき感電事象や計測すべきパラメータ等の助言を頂いた。このヒアリング結果を基に

- ①電流検出器側のセットアップ・測定箇所
- ②太陽光発電システム・設備側のセットアップ
- ③計測・記録に関するその他の留意点

の3点に着目し、実験方法へのフィードバックを行った。

以下に専門家へのヒアリングで頂いたアドバイスと実験方法へのフィードバック内容を記載する。

4.4.1 電流検出器側のセットアップ・測定箇所

ヒアリングにおいて、以下のようなコメント、アドバイスを頂いた。これらを基に電流検出器側のセットアップと測定箇所の検討を行った。（下線は J P E A が付記）

- 太陽光発電システム・設備付近での救助活動に資するために、実際の救助作業を想定した測定を今回の実験に採り入れてもらえると有り難い。消防が行くときは、救助で近づく。ウェットスーツを着て水中に入る場合とボートに乗る場合がある。それを模擬するような測定、実験も採り入れてもらえると有り難い。
- 水害発生時には、太陽光発電システム・設備の開閉器を遮断するために、作業員が水の中に入っていき場合が有り得ると思う。それにより感電する可能性を確認できるようにして欲しい。
- うっすら水没している状況では、保守点検の作業者が緊急停止、電圧降下、廃棄作業等のために侵入するだろう。
- 作業として有り得る行動から実験条件を出したほうが良いだろう。ポイントとしては人が水につかっているケース、太陽光発電システム・設備に触るケースを考えたほうが良い。触り得る場所も測定パターンに含めたほうが良い。
- 太陽光発電システム・設備がまるまる水没しているところに人が入っていく、という想定に対応する測定であれば、池に立っている状態を模擬するために池の下にアースを取ったほうが良い。
- 今回の実験で、例えば P C S 等の危険になりそうな場所が特定できれば良いのではないか。接続箱、P C S 等、集電している部分が水没時に電氣的に一番危険と考えられる。

ヒアリングにおいて、水没実験では水没時の実際の救助作業、保守作業等を模擬するような電流検出を行うべきである旨のコメントを頂いた。そこで、水中で立っている場合や水中で足を付けずに浮いている場合といった救助者の実際の状態を模擬（想定）した電流検出回路を幾つか構成し、実験を行うこととした。例えば、水中に立っている状態を模擬した電流検出回路では、コメントにもあるように、水中に検出回路のアースを取ることとした。その他、具体的な電流検出回路構成については 4.5.2 に記載する。

また、水中で水を介して感電する可能性だけでなく、水没している太陽光発電システムや設備に触れる状況も検証するべきであることや特に集電装置が危険と考えられる旨のこ

ントを頂いた。そこで、水中だけでなく接続箱やPCSの表面も測定箇所として、電流検出器をこれらに直接接触させて測定を行うこととした。具体的な測定箇所については6.1.3や7.2に記載する。

4.4.2 太陽光発電システムと設備側のセットアップ

ヒアリングにおいて、以下のようなコメント、アドバイスを頂いた。これらを基に太陽光発電システムと設備側のセットアップについて検討を行った。（下線はJPEAが付記）

- 中途半端に沈んでいるときの方が、危険度が高いということはないか。
- 太陽電池モジュールはI-V特性を持っているため、単純な直流電源で模擬できるという訳にはいかないだろう。
- 事故発生の要因を整理して、やみくもに実験しているのではないことが説明できると良い。
- 接続箱の筐体は、水没時には非金属で非接地のほうが金属製よりも危険かもしれない。
- 接続箱のアースの有無を比較すれば良いと思われる。
- 実際の水没状況だと流れがあるため、ケーブルの断線リスクもあると思う。例えば、負極側が水没して接地になっている時に、正極側が接続箱より手前で断線して水に浸かった場合にどうなるかを見たほうが良いだろう。太陽電池モジュールのI-V特性から考えると、その時の発電状態に対して最も出力が出るような抵抗を介して回路が形成されたときが最も危険で有り、ワーストケースとなるかもしれない。
- PCSとつながるケーブルの片方だけを取り外して水につける「1点地絡」のような状況を作ると良いのではないか。
- 2ストリングを並列化して水没させることはできないか。接続箱のところはどうなるか、例えば、そこで直列化するのか等を調べたらいいだろう。

ヒアリングによるコメント、アドバイスを受けて、以下のように実験を行った。

太陽電池モジュールが完全に水没している場合より、太陽電池モジュールは水面に出ている状態の方が太陽光発電システムによって発電する電流量が多く、感電リスクが高まる可能性がある旨のコメントを頂いた。また、本実験では太陽光発電システムの発電電流量が多い状態を単純な直流電源で模擬するべきではない旨のコメントを頂いた。これらを踏まえ、太陽光発電システムの太陽電池モジュールを完全に水没させた場合と太陽電池モジュールは水没させず集電箱、PCS、ケーブル類のみを水没させた場合（半水没の場合）の2つの状況の実験を行うこととした。詳細については4.7に記載する。

事故発生の要因から実験条件を抽出するべきである旨やこの事故発生要因のひとつとして、水害時の水の流れによるケーブルの断線が考えられる旨のコメントを頂いた。加えて、この断線したケーブルが水中に暴露されることにより感電の危険性が増加する可能性も指摘された。そこで太陽光発電システムの太陽電池モジュールから延びる正極側のケーブルを切断し、水中に暴露させた状態での測定を行うこととした。詳細については6.3.5に記載する。

水害時の水の流れによって、アース線の破損という事象が起こる可能性がある。特にヒアリングにおいて、接続箱のアースの有無によって感電の危険性が変化する可能性がある旨

のコメントを頂いた。そこで太陽光発電システムの接続箱、PCSのアースの有無における測定結果の違いについても検証することとした。

2ストリングを並列化して、接続箱につなげた場合も太陽光発電システム側のセットアップのパターンのひとつとして加えた。

4.4.3 計測・記録に関するその他の留意点

ヒアリングにおいて、以下のようなコメント、アドバイスを頂いた。(下線はJPEAが付記) これらを基に計測・記録に関するその他の留意点について、以下のような検討を行った。

- 正極と負極が水中でどの程度、離れていると電流パスができるのか、水槽実験で調べると良いだろう。
- 基本的に、アースに至る全ての経路については、電流を計測しておくことが望ましい。
- 消防の活動やメンテナンス事業者の活動は水が引いた状況で行われることが多いので、水没後の実験も重要だろう。
- システム実験で沈めた時の太陽電池モジュールと太陽電池パネル、PCSの配置が明示されれば、実験結果を見た人が、感電を避けるのに必要な距離を判断することができるだろう。

正極、負極となり得る太陽光発電システムの設備箇所の距離と感電リスクとの関連性については、太陽光発電システムの設備配置や検出装置の配置の自由度が大きい水槽実験において検証することとした。詳細については6.3.5に記載する。

水が引いた後に作業が多く行われることのコメントを踏まえて、水没後のPCSについて、絶縁抵抗値の長期的な診断を行うこととした。詳細について8章「実験後設備の調査」に記載する。

これらに加え、測定点と太陽光発電システムと設備との位置関係の記録やアースに流れる電流値の測定等は、コメントのとおり、実験を通して留意するようにした。

4.5 測定系の検討

前項の専門家ヒアリングの結果を受け、検討した測定方法等を説明する。

4.5.1 人体の感電状況を模擬した電流測定方法の検討

太陽光発電システムが水没している状態で、感電時に形成される回路は、図 4-2 の等価回路図で表すことができる。

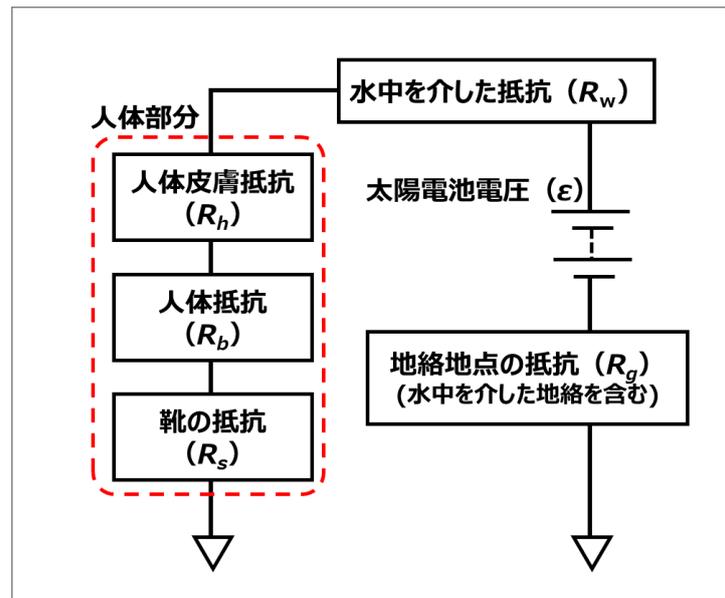


図 4-2 感電時の形成回路

水害時でない乾燥状態であれば人体皮膚抵抗が高く、また、通常は靴を履いているため、それらにより合成された抵抗は数 k Ω 以上であると考えられる。しかし、今回、想定している水害時では人間が濡れていることを考慮し、人体皮膚抵抗は 0 Ω、靴を履いていない可能性も考慮して靴の抵抗も 0 Ω とすることとし、本実験では人体抵抗のみを考慮することとした。なお、人体抵抗値は一般的言われている 500 Ω を採用した。

以上を踏まえた感電時の電流測定方法は図 4-3 のとおりである。プローブ端の銅版を人の手とし、測定系のアース端を足先として想定した。図中の R の部分には人体抵抗値として 500 Ω の抵抗を接続した。

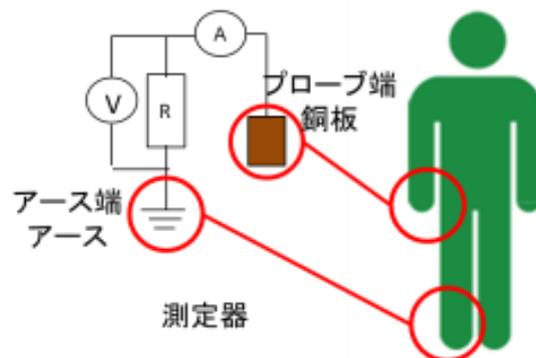
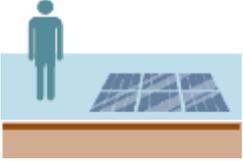
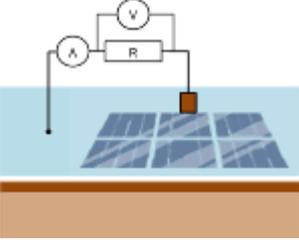
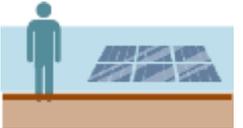
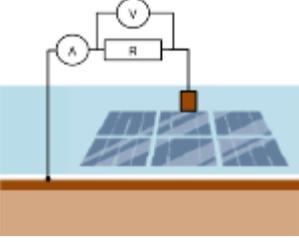
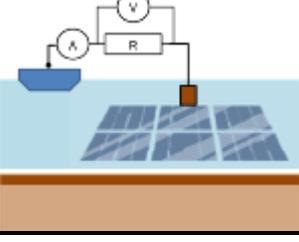
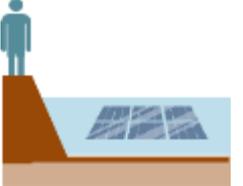
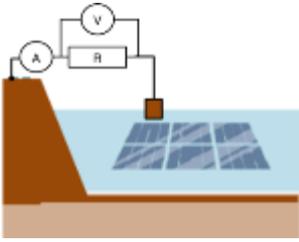


図 4-3 感電時の電流測定方法

4.5.2 測定方法の検討

専門家ヒアリングの結果を踏まえ、水没した太陽光発電システムと設備に接近する可能性のある想定パターンを表 4-1 の左側のように整理した。本実験では、これらのパターンを測定器のアース端の状態を変えることで模擬して実験を行うこととした。アース端の状態は表 4-1 の右側に併記しており、それぞれ「活動」が「測定器アース端の状態」を「活動の詳細」が「測定器プローブ端の状態」に対応している。これらの接近条件ごとの感電電圧・電流を、単体実験、システム実験において設備状況を変え、測定した。

表 4-1 接近方法ごとの測定方法一覧

対象	活動	活動の詳細	測定器 アース端の状態	測定器 プローブ端の 状態
救助者	水中で救助している (浮いた状態) 	何も触っていない(水に手を入れる)	水中に浮かせる 	水中に浮かせる
		接続箱・PCSの筐体を触る		接続箱・PCSに接触
		パネル(太陽電池モジュール・アレイ)のフレームを触る		パネルのフレームに接触
		パネルの表面を触る		パネルの表面に接触
	水中で救助している (足をつけた状態) 	何も触っていない(水に手を入れる)	水底と接触 	水中に浮かせる
		接続箱・PCSの筐体を触る		接続箱・PCSに接触
		パネルの表面を触る		パネルの表面に接触
	水上でゴムボートに乗っている 	何も触っていない(手は水の外)	ボートに乗せる 	空中で保持させる
		水に手を入れる		水中に浮かせる
一般	陸に立っている (地面は湿り有) 	何も触っていない(水に手を入れる)	池外の地面と接触 	水中に浮かせる
		接続箱・PCSの筐体を触る		接続箱・PCSに接触
		パネルのフレームを触る		パネルのフレームに接触
		パネルの表面を触る		パネルの表面に接触

4.6 水没させる太陽光発電システム（設備）の状況検討

水没させる太陽光発電システムとしては、大きく分けると①低圧の個人所有、②地上設置型の事業者所有の2パターンを想定した。両システムの違いは図4-4に示すとおりである。構成品の違いによる影響を把握するために、実際には機器を入れ替えながら更に細分化して実験を行った。なお、使用した設備や計測器等の詳細は5章の物品調達の項に記述する。

また、細分化した設備の違いとして負極接地の有無を、破損状況の違いとして主回路及び筐体設置の断線という状況を作り出すこととした。これらは6章及び7章で説明する。

これに加えて、太陽電池モジュールが完全に水没した場合と水が引く等により、半分だけ水没した場合を想定し、太陽光発電システム全体を水没させる場合と太陽電池モジュールは地上に設置し、それにつながった接続箱またはPCSのみを水没させる場合で実験を行った。この概要を図4-5に示す。

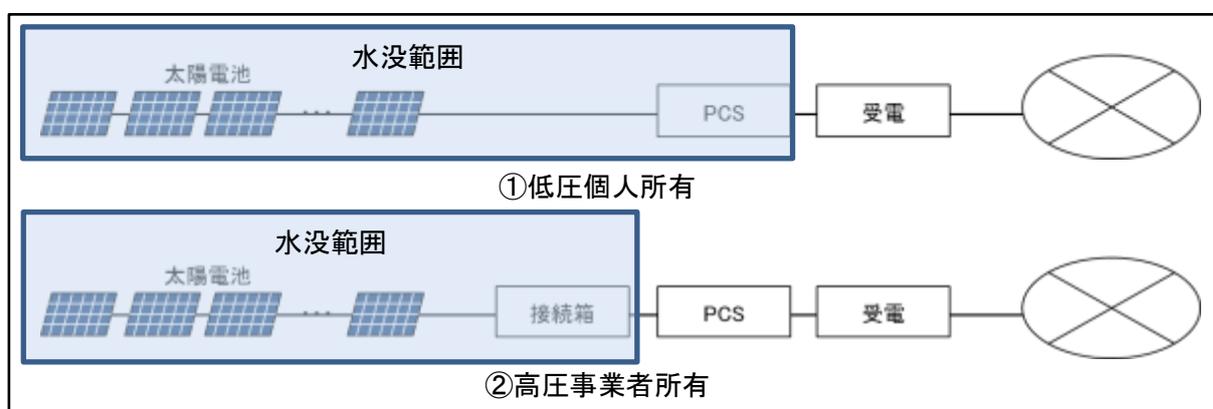


図4-4 水没させる太陽光発電システム

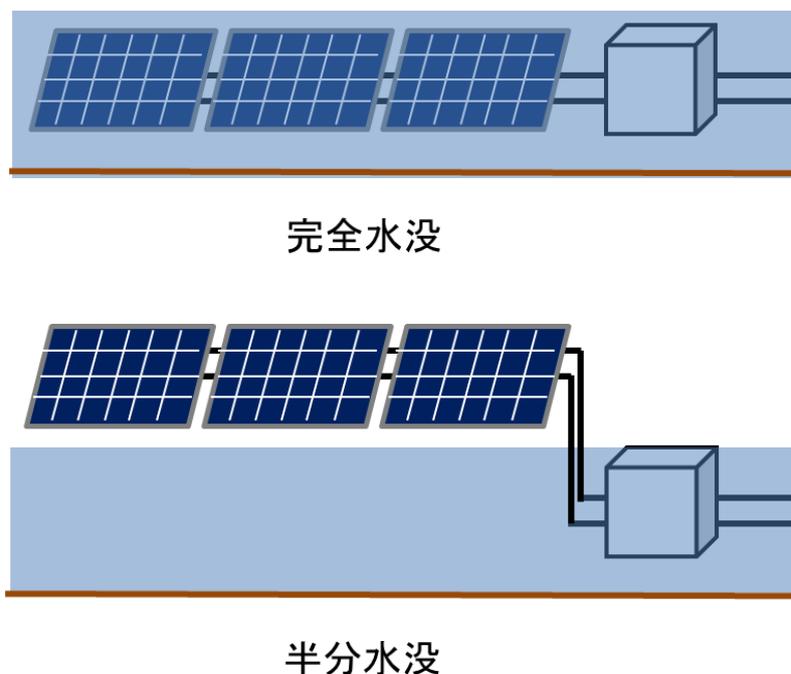


図4-5 完全水没と半分水没の実験概要

4.7 実験方法の検討（水没後）

水没後の太陽光発電システムについて、水没状態から脱した直後の機器の変化、暫くの期間、自然環境において乾燥させて外観の変化及び絶縁抵抗並びに漏電電流の変化等を観測した。これにより、水害が収束した後の感電リスク把握に役立てることとした。これらの詳細は8章にて説明する。

5. 実験場所の選択、整備と実験設備の調達

本章では、4章で検討した実験を実施する場所の選定、環境整備について説明する。また、実際に実験に使用する太陽光発電システムを構成する設備の仕様等についても記述する。

5.1 実験場所の選択、整備

4章で検討した方法を実現できる場所を選定と整備の状況を説明する。

5.1.1 実験場所の選択

(1) 単体実験場所の選択

単体実験は4章で述べたとおりである。機器個別の大きな特性と測定方法の健全性を確認することを目的としている。システム実験と同じ環境で実施することで水害時を模擬した環境を得ることはできるが、池の場合では水位の調整や機器の水没・引き上げに時間を要するため、測定方法の健全性確認には適さない。そこで、単体実験はプールで十分目的を達すると判断し、太陽光発電システム・設備が水没させられる程度の大きさのプールで実験を行うこととした。

可搬のプールを実験の利便性の良い試験センター（山梨県北杜市）の敷地内で日照条件の良い場所に設置し、単体実験を行った。

(2) システム実験場所の選択

システム実験を行う場所は、単体実験より実環境に近い場所であることが求められる。基本的には、水没させる太陽光発電システムが入る大きさの池での実施を検討したが、充足すべき条件はこれ以外にもいくつか存在する。

大前提の条件として挙げられるのは、実験中の安全確保である。水没中の感電リスクを明確化する目的の実験であるため、実験の前段階ではどの程度の危険があるか把握できていない。このような状況下では人間の接近を防ぐだけでなく、生物の池への進入や接近を防ぎ、在来生物の感電死による生態系への影響も防ぐ必要がある。この課題をクリアできる場所として、山梨県北杜市長坂町夏秋地区にある人工の浸透池を候補とした。この浸透池は、池の北側にある北杜サイト太陽光発電所内の雨水を一時的に貯め、大地に自然浸透させることを目的に作られた池で、池底は大地と接している人工池である。そのため、生態系への影響がなく、本実験の実施場所に適している。

池周辺の敷地図を図5-1に示す。浸透池は青い四角で示された2箇所に設置されているが、東（図では左）側の大きな池は進入路に急激な傾斜を伴う高低差が存在し、実験において太陽光発電システムを吊り上げるためのクレーン車の進入が困難であるとの判断から、西（図では右）側の池を使用した。この池の周辺の写真を図5-2に示す。

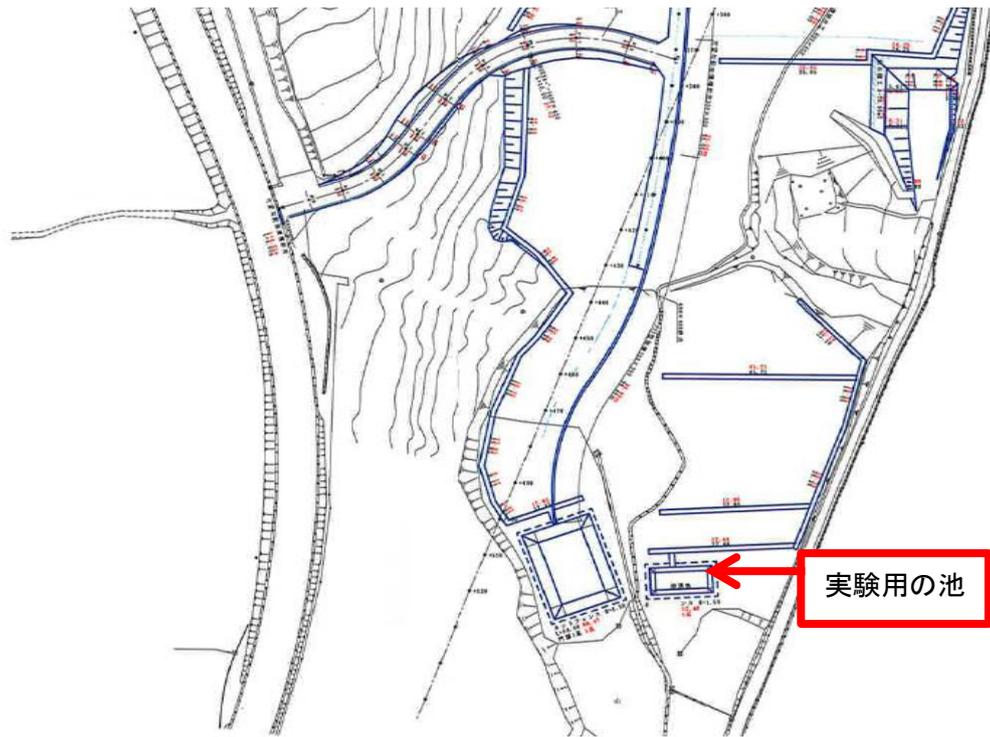


図 5-1 浸透池の周辺配置図



図 5-2 浸透池の周辺写真（北側からの状況）

5.1.2 実験場所の整備

(1) 単体実験場所の整備

単体実験を行う試験センター敷地内に実験用のプールを設置し、池の底面を模擬するための接地したアルミ板を設置した。プール内に水道水を引込み、実験環境を整備した。その状況を図 5-3 及び図 5-4 に示す。より詳細な準備の状況は 6 章で説明する。



図 5-3 単体実験環境

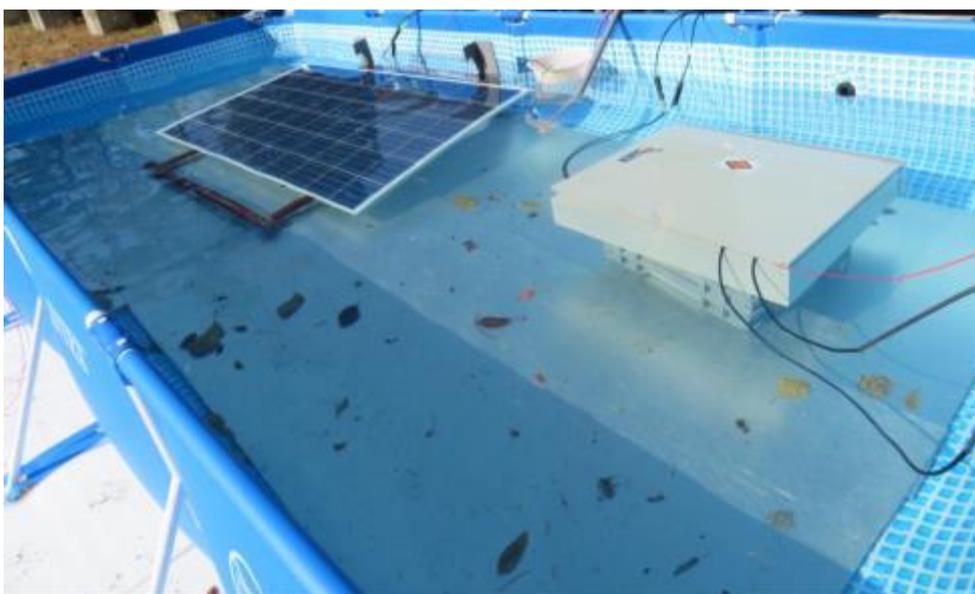


図 5-4 単体実験用プール内部の状況

(2) システム実験場所の整備

図 5-2 にあるように、浸透池の周辺にはフェンス及び立木があり、その一部を撤去、伐採・枝打ちをする必要があった。また、実験に用いる重機の進入路確保のために枝打ちが必要な箇所があった。さらに、図 5-2 の写真は真冬であったため雑草は目立たないが、実験準備のためには除草も必要であった。加えて、池内部の枯草の除去も行った。これらの整備を行った後の池の状況を図 5-5 に示す。

また、実験に用いる太陽光発電システム・設備と機器の保管及び作業スペースを兼ねた資材置き場を浸透池の北（図では上）側に設け、仮設フェンスで囲った。この資材置き場はクレーンが自走することなく旋回により太陽光発電システムを浸透池へ水没・引き上げができるようにし、実験の効率化に配慮した。



図 5-5 整備後の浸透池周辺写真

5.2 実験設備の調達

ここでは、実験に用いる太陽光発電システム・設備の調達について説明する。

5.2.1 主要機器の調達

水没させる太陽光発電システムを構成する主要な設備と機器の名称、仕様等を表 5-1 に示す。太陽電池モジュールは国内の大手EPCにて採用数の多いもの、PCSは水没後の詳細分析が可能なメーカーのもの、接続箱は筐体の種類と遮断方式の違いで3種類（鋼板・ダイオード、鋼板・ヒューズ、樹脂・ヒューズ）を用意した。

表 5-1 主要設備・機器の一覧

種類	太陽電池モジュール	PCS	接続箱		
型式	STP270-20/Wem	CEPT-P2AAB9P9B	PV-8XA	要求仕様	要求仕様
メーカー	Suntech	YASKAWA	日東工業	藤崎電機	藤崎電機
概要	Pmax:270 W Vmp:31.1 V Imp:8.69 A Voc:37.9 V Isc:9.15 A	定格出力:9.9 kW 運転可能電圧範囲:100V~600 V (起動電圧:150 V) 出力電圧:単相 3 線 202 V 自立運転機能付	筐体:鋼板 IP 規格:IP44 最大入力電圧:1000 V 入力回路数:8 回路 最大入力電流:9 A/回路 逆流防止:ダイオード	筐体:鋼板 IP 規格:IP66 最大入力電圧:1000 V 入力回路数:8 回路 最大入力電流:15 A/回路 逆流防止:ヒューズ	筐体:樹脂 IP 規格:IP44
サイズ等	1640 × 992 × 35 mm 18.2 kg	600 × 540 × 310 mm 61 kg	700 × 600 × 200mm 35.5kg	700 × 500 × 250 mm 40 kg	700 × 500 × 303 mm 35 kg
外観					

5.2.2 架台の調達

システム実験で用いた架台は、単管パイプを調達し、現地で組み立てることとした。使用した単管パイプ及びその他治具については7章に記載する。

5.2.3 その他材料の調達

その他、実験に用いる材料品の情報は6章、7章の実験準備の説明に併せて記載する。

6. 単体実験の実施及び結果

ここでは、システム実験に先行して実施した単体実験の実施状況を説明する。

6.1 単体実験の準備

6.1.1 プール（模擬池）の準備

準備したプールに水道水を貯め、電気伝導度の調整のため塩化ナトリウムを溶かした。水深は50cmである。水質は一般的な河川の下流域と同程度の電気伝導度となるように調整し、実験期間を通して表6-1のとおり一定に保った。また、プールの底には接地線をつないだアルミ板を敷き、大地を模擬した。このときの状態を図6-1に示す。また、使用したプール及びアルミ板、接地線の情報は、表6-2に示す。この時の接地は既設の接地端子台から得たが、この端子台における接地極の接地抵抗は1.52Ωであった。

表 6-1 単体実験時の水質

項目	測定値	使用した測定器
水温[°C]	5.1 ~ 6.2	東亜ディーケーケー株式会社 多項目水質計 型番:WQC-24
濁度[NTU]	0.0 ~ 2.8	
電気伝導度[mS/m]	28.4 ~ 30.6	
電気抵抗率[Ω・m]	32.7 ~ 35.2	(電気伝導度から換算)

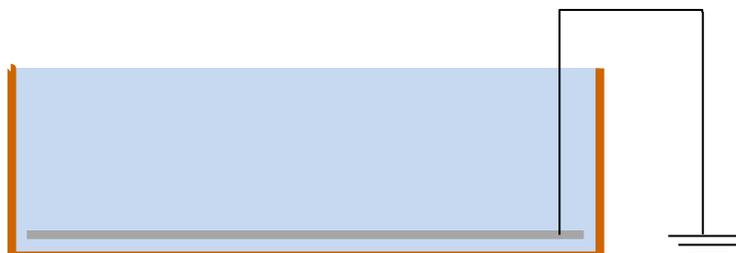


図 6-1 単体実験時の模擬池

表 6-2 模擬池材料

項目	プール	アルミ板	接地線
材質	ポリ塩化ビニル	アルミ	VSFケーブル
サイズ等	450×220×85cm	200×100cm 厚さ 2mm	1.25mm ²

6.1.2 測定時のシステム構築

図 6-2 のようなシステムの状態を構築した。太陽光発電システムの動作電圧・電流及び水中の漏電電圧・電流と経路を把握するため、図 6-2 のとおり、システムの電圧・電流も測定した。また、同時に水平日射量を測定した。測定機器の名称等は表 6-3 に示す。なお、太陽電池モジュール単体を水没させるときは太陽電池モジュールから P C S 若しくは接続箱への配線及び P C S 若しくは P C S が無い状態で測定した。

また、設備状況の違いを作り出すため、太陽電池モジュールのフレーム（以降、P V）接地、P C S ・接続箱（以降、筐体）接地、負極接地のオン／オフが可能となるスイッチを設置した。これらの接地はアルミ板と同じ箇所から取った。

表 6-3 測定器仕様

項目	電圧計 動作点測定用	電流計 動作点測定用	電圧計 筐体の対地電圧 測定用	電流計 アース流入電流 測定用	日射計
型式	DT4281	DT4282	12 Multimeter	DM-01	MS-802
メーカー	日置電機	日置電機	Fluke	カスタム	英弘精機
仕様等	基本確度: ±0.025% rdg.±2 dgt.	基本確度: ±0.05 % rdg. ±5dgt.	確度: ±(0.9 %+1)	確度: ±(1.5 % rdg + 2 dgt)	感度定数: 7 $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
外観					

出所) 日置電機ウェブサイト, https://www.hioki.co.jp/jp/products/detail/?product_key=61、2018年1月31日取得 (DT4281 仕様)

出所) 日置電機ウェブサイト, https://www.hioki.co.jp/jp/products/detail/?product_key=636、2018年1月31日取得 (DT4282 仕様)

出所) Fluke ウェブサイト, <http://www.fluke.com/fluke/phen/digital-multimeters/fluke-12.htm?pid=55998>、2018年1月31日取得 (12 multimeter 仕様)

出所) カスタムウェブサイト, <http://www.kk-custom.co.jp/industrial/DM-01.html>、2018年1月31日取得 (DM-01 仕様)

出所) 英弘精機ウェブサイト, http://eko.co.jp/solar/sol_products/0203.html、2018年1月31日取得 (MS-802 仕様)

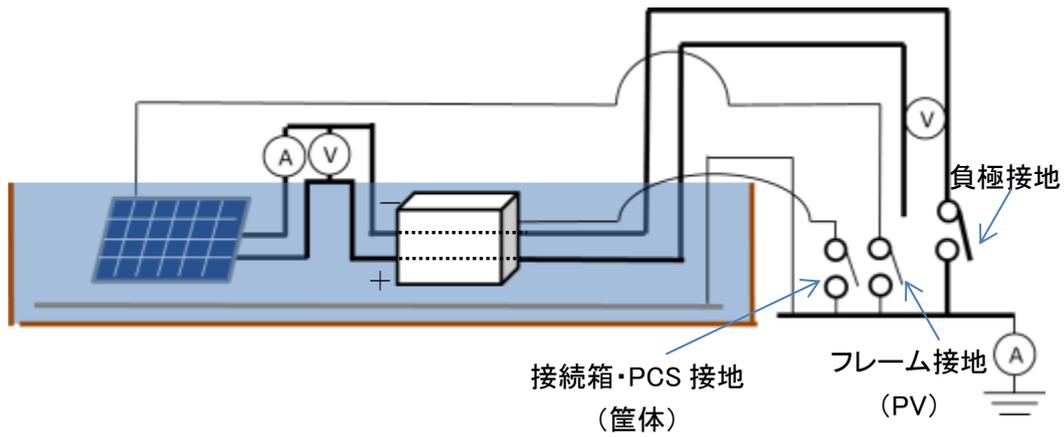


図 6-2 単体実験時のシステム構成

6.1.3 測定棒の準備と測定箇所

図 6-3 のような測定棒を作成した。測定棒のアース端は表 4-1 にあるように、水中に浮かせる、水底と接触させる、ボートに乗せる、池外の地面と接触させる、の 4 パターンで実施した。プローブ端は筐体に触れた場合に加え、水中の 3 箇所を設定し測定した。アース端及びプローブ端の配置場所として設定した箇所が分かる平面図を図 6-4 に示す。また、測定棒本体、抵抗器、電圧計及び電流計の情報を表 6-4 に示す。



図 6-3 測定棒の外観

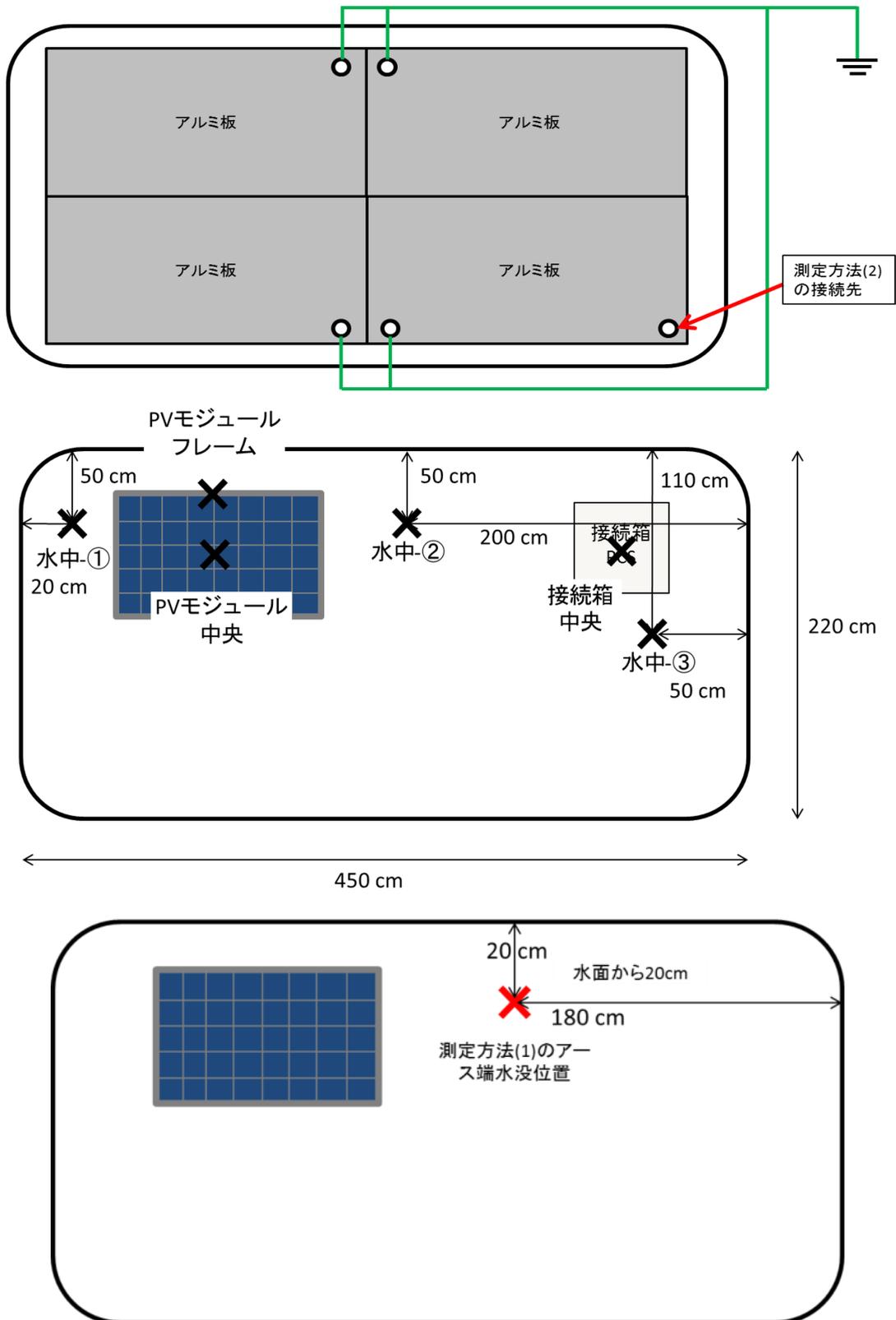


図 6-4 プローブ端、アース端箇所

表 6-4 測定棒等仕様

項目	測定棒本体	測定プローブ端	抵抗器	電圧計・電流計 (各 1 台)
型式	—	—	HS50 500R J	TY530
メーカー	—	—	Arcol	横河計測
素材等	硬質ポリ塩化 ビニル	銅(C1220P)	—	—
仕様等	長さ 100cm 外径 26mm 内径 20mm	80 × 40 × 0.5mm	抵抗値 500 Ω	基本確度 0.09 %
外観	図 6-3 参照			

出所) 横河計測ウェブサイト, <https://www.yokogawa.com/jp-yimi/gmi/dmm/gmi-TYseries-002-jp.htm>、
2018 年 1 月 31 日取得 (TY530 仕様)

6.2 単体実験の実施手順

単体実験の実施手順は以下のとおりとした。

- (1) システムを組み、水没させる。
- (2) 接地条件等を決める。
- (3) 測定棒のアース端の状態を決める。
- (4) 各ポイントで測定する。
- (5) 水から引き揚げ、次のシステムに組み替える。

この1サイクルを実験の1単位とし、その全体像を表6-5に示す。それぞれのシステム構成は測定結果に併記するが、実験①は太陽電池モジュール単体の試験を水没時に想定される状況により3パターン作成した。実験②は太陽電池モジュールを接続箱・PCSに接続した場合を想定し接続箱・PCSの種類4つに対し全て測定することとした。実験③は実験②の状態から接続する太陽電池モジュールの直列数を増やし、動作電圧が高い状態での測定である。実験④は太陽電池モジュールの並列数を増やし、動作電流が大きい状態での測定である。実験⑤は直列数が多い状況で一番電位が高い箇所が破損、導体部が露出している状況での測定となる。なお、単体実験ではプールの大きさに限りがあるため、実験③、④、⑤では太陽電池モジュールは水没していない状態で行った。また、実験②、③は接続箱・PCSの違いによる影響を見るために全種類の接続箱・PCSで測定を実施したが、実験④、⑤では「鋼板・ダイオード」の接続箱で確認した。

表6-5の項目に対する接地条件（太陽電池モジュール、筐体、負極それぞれの接地有無）は8パターンを作り出し、表6-6の測定方法4パターンで各箇所の漏電状況を測定した。

なお、感電リスクの判定はIEC60479-1にある電流値（表6-7）で行った。水中では感電からの離脱が困難であることから、通電時間2秒の場合で判断した。

以降に測定結果の表を示すが、2mA以上20mA未満の場合は黄色、20mA以上150mA未満を橙色、150mA以上を赤で各欄を表記している。

表6-5 単体実験概要

実験No	システム構成						その他
	太陽電池モジュール			接続箱・PCS			
	直列数	端末の状態	水没	筐体	逆流防止保護	水没	
①-1	1	短絡	○	—	—	—	
①-2	1	開放	○	—	—	—	コネクタ破損
①-3	1	短絡	○	—	—	—	直流ケーブル破損
②-1	1	接続箱へ	○	鋼板	ダイオード	○	
②-2	1	接続箱へ	○	鋼板	ヒューズ	○	
②-3	1	接続箱へ	○	樹脂	ヒューズ	○	
②-4	1	PCSへ	○	鋼板	—	○	
③-1	5、10	接続箱へ	—	鋼板	ダイオード	○	
③-2	5、10	接続箱へ	—	鋼板	ヒューズ	○	
③-3	5、10	接続箱へ	—	樹脂	ヒューズ	○	
③-4	5、10	PCSへ	—	鋼板	—	○	
④	5 (2並列)	接続箱へ	—	鋼板	ダイオード	○	
⑤	10	接続箱へ	—	鋼板	ダイオード	○	直流ケーブル破損

表 6-6 単体実験時の測定方法

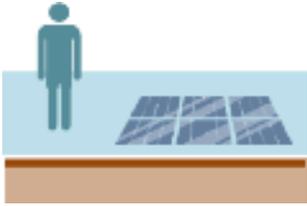
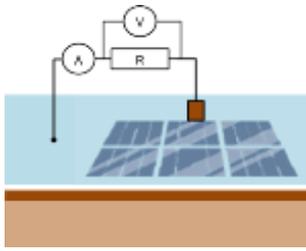
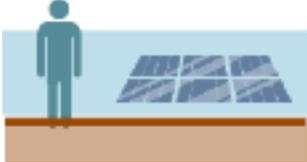
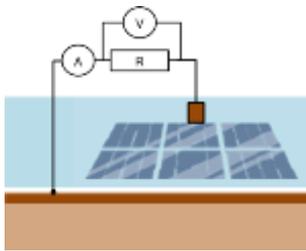
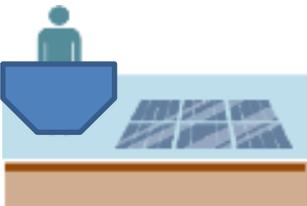
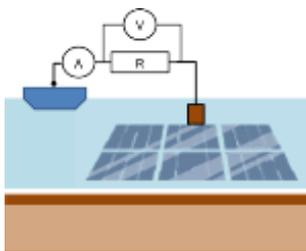
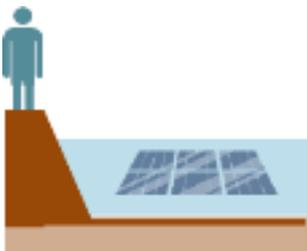
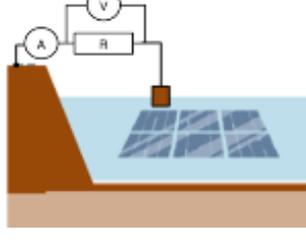
測定方法 No	活動	測定器アース端の状態
(1)	水中で救助している（浮いた状態） 	水中に浮かせる（水中浮遊） 
(2)	水中で救助している（足を付けた状態） 	水底と接触（水底のアルミ板） 
(3)	水上でゴムボートに乗っている 	ボートに乗せる（ボート上） 
(4)	陸に立っている（地面は湿り有） 	池外の地面と接触（池外の地面） 

表 6-7 感電リスクの判定基準

人体反応による 電流名	流れた際の人体反応	直流電流[mA]	
		通電時間:0.01秒	通電時間:2秒
感知電流	通電によるしびれを感じる	2	2
可随電流	筋肉の痙攣を生じる(自力での離脱が困難となる)	200	20
心室細動電流	心室細動が引き起こされ、死亡する可能性がある	500	150

6.3 単体実験の結果

単体実験の結果を記載する。計測値が非常に小さいことが予想される等、実験の都度の判断により、測定を省略することがあり、その場合の結果欄は『一』を記載している。また、マイナス値は『▲』で表記した。

6.3.1 実験①モジュール単体実験

実験①測定時のシステムの基本的な状態を図 6-5 に示す。この図はプールを上から見た図となっている。

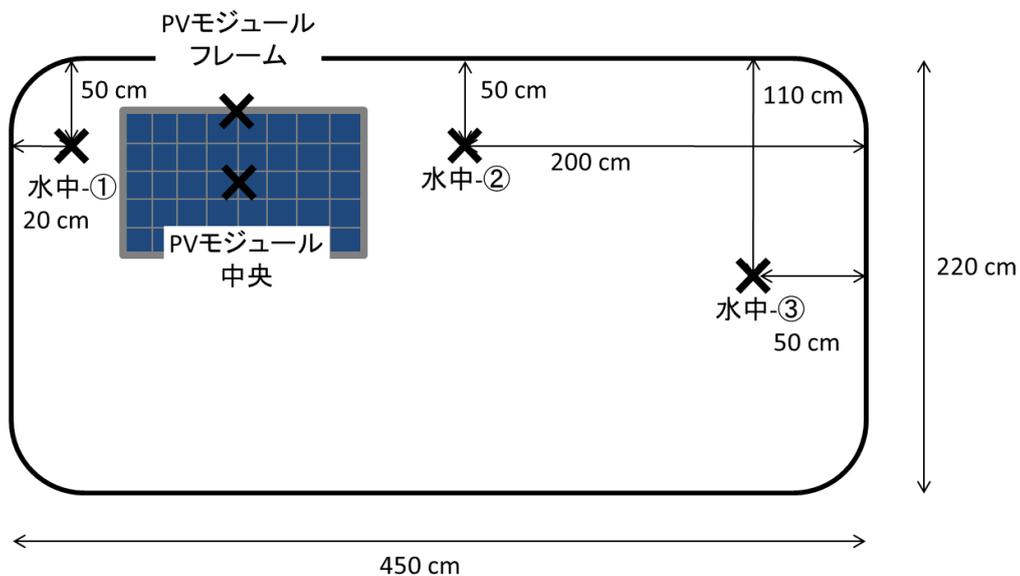


図 6-5 実験①の基本状態

(1) 実験①-1 短絡の場合

短絡(コネクタの正極(+)と負極(-)を接続した)状態で図 6-5 のように配置、測定した結果を表 6-8 に示す。この条件においては、通電電流は非常に小さく、感電リスクはないと考えられる。また、測定箇所の違いによる明確な傾向も読み取れなかった。

表 6-8 実験①-1 コネクタ短絡の結果 (▲ : マイナス値)

測定方法	接地状況			測定箇所						動作点		日射
				水中①	水中②	水中③	コネクタ	モジュールフレーム	モジュール表面			
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[W/m ²]
(1) 水中 浮遊	有			0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.36	3.79	600
	無			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.36	3.83	597
(2) 水底の アルミ板	有			0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.38	3.96	620
	無			0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.38	3.94	607
(3) ボート上	有			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.37	3.84	598
	無			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.37	3.85	594
(4) 池外の 地面	有			▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	0.36	3.82	594
	無			▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	0.37	3.87	603

(2) 実験①-2 開放の場合

図 6-5 の機器配置は変えずに、コネクタを開放した状態で同様の測定を実施した。コネクタ間の距離を変えて 2 パターン測定した。なお、開放時について、コネクタが正常な状態においては短絡時と同様の非常に小さい通電電流しか検知されなかった。短絡時との違いをみるため、剥き線の状態 (図 6-6) で測定することとした。

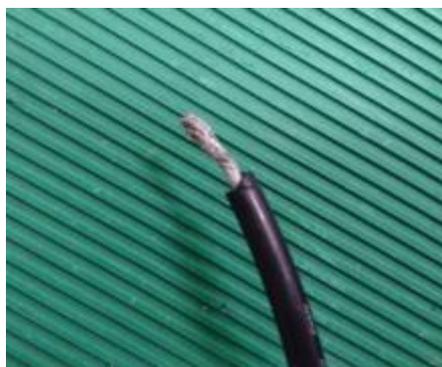


図 6-6 実験①-2 剥き線

1) コネクタ間距離が近い (5 cm) 場合

まず、図 6-7 のようにコネクタ間の距離が近い (5 cm) 状態で測定した。その結果を表 6-9 に示す。コネクタを剥いているため、コネクタ (+)、コネクタ (-) は導体を直接、触れている状態である。

この時、しびれを感じるレベルの電流が流れているが、これは主回路に直接、触れた場合と同じ状況であるため、水害時特有の事象ではない。

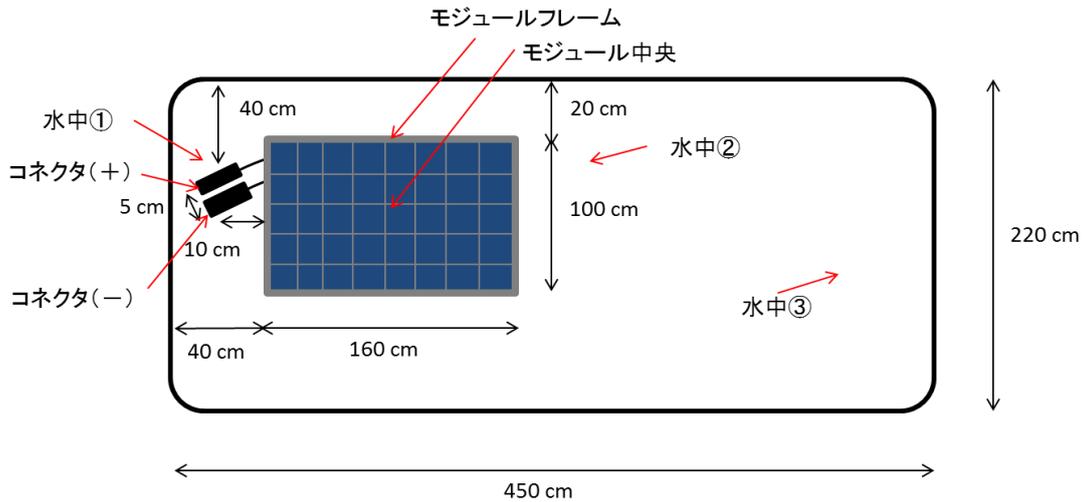


図 6-7 実験①-2 コネクタ間距離 5 cm

表 6-9 実験①-2 コネクタ間距離 5 cmの結果 (▲ : マイナス値)

測定方法	接地状況			測定箇所							動作点		日射
				水中①	水中②	水中③	コネクタ(+)	コネクタ(-)	モジュールフレーム	モジュール表面			
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]
(1) 水中浮遊		有		0.3	0.3	0.3	3.0	▲3.9	0.3	0.3	37.9	0.03	395
		無		0.3	0.3	0.3	2.9	▲4.0	0.3	0.2	37.8	0.02	389
(2) 水底のアルミ板		有		0.3	0.3	0.2	5.7	▲4.1	0.2	0.2	38.0	0.02	397
		無		0.5	0.5	0.5	4.1	▲5.6	0.4	0.3	38.0	0.02	412
(3) ボート上		有		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.9	0.03	377
		無		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.8	0.03	374
(4) 池外の地面		有		▲0.1	▲0.1	▲0.1	3.4	▲6.3	▲0.1	▲0.1	37.7	0.03	367
		無		0.0	0.0	0.0	4.7	▲7.1	▲0.1	▲0.1	37.7	0.03	363

2) コネクタ間距離が遠い (180 cm) 場合

次に図 6-8 のようにコネクタ間距離が遠い (180 cm) の状態で測定した。その結果を表 6-10 に示す。コネクタ間距離 5 cm の場合と同様の傾向が読み取れる。

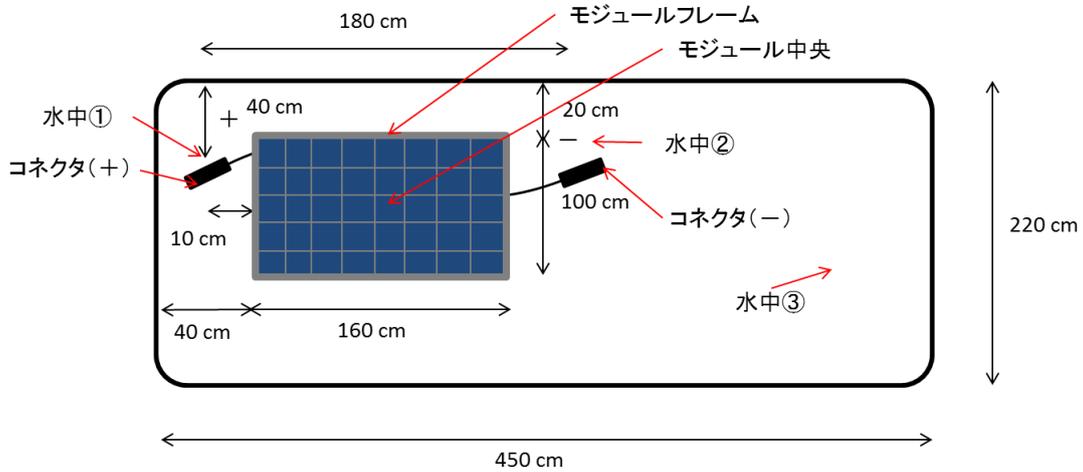


図 6-8 実験①-2 コネクタ間距離 180 cm

表 6-10 実験①-2 コネクタ間距離 180 cm の結果 (▲: マイナス値)

測定方法	接地状況			測定箇所							動作点		日射
				水中①	水中②	水中③	コネクタ(+)	コネクタ(-)	モジュールフレーム	モジュール表面			
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]
(1) 水中浮遊	有			0.4	0.2	0.3	5.8	▲5.7	0.4	0.3	35.1	0.02	146
	無			0.4	0.3	0.3	6.2	▲6.0	0.4	0.3	34.7	0.02	132
(2) 水底のアルミ板	有			0.7	0.4	0.5	9.4	▲9.1	0.6	0.5	36.0	0.02	287
	無			0.6	0.5	0.5	9.0	▲8.8	0.7	0.6	35.5	0.02	214
(3) ボート上	有			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.3	0.02	116
	無			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.1	0.02	113
(4) 池外の地面	有			0.2	▲0.2	▲0.1	8.2	▲8.8	0.1	0.1	37.5	0.02	324
	無			0.1	▲0.2	▲0.1	8.0	▲8.8	0.1	0.1	37.0	0.02	307

(3) 実験①-3 短絡（破損）の場合

実験①-1の実施時と同様に、コネクタを短絡させ、ケーブルを図6-9の写真のように、被覆を剥き、破損させた状態で測定した。破損箇所は図6-10のとおりである。測定結果は表6-11に示す。破損箇所を含め、感電リスクは低く、実験①-1と同様、測定場所による傾向も見られなかった。



図 6-9 実験①-3 のケーブル破損状況

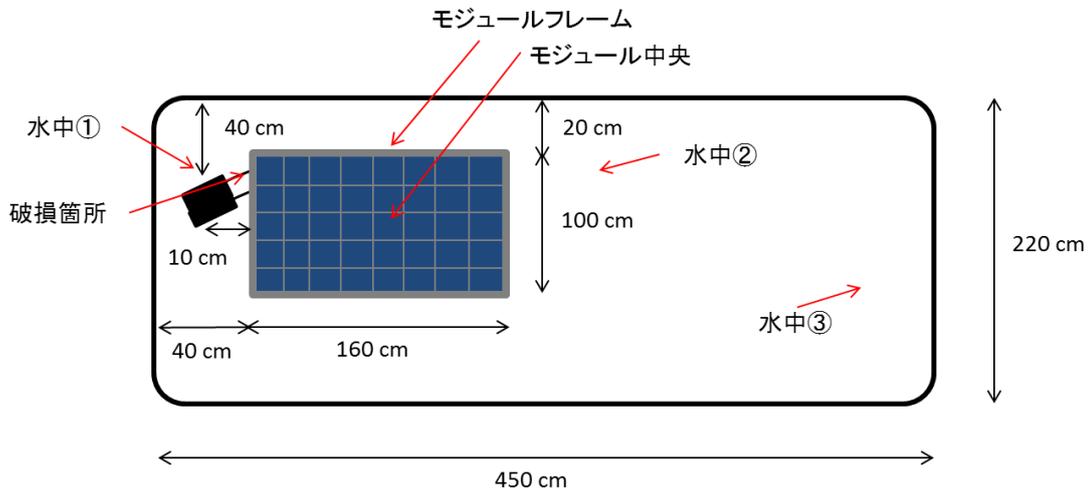


図 6-10 実験①-3 の破損箇所

表 6-11 実験①-3 コネクタ短絡（破損有）の結果（▲：マイナス値）

測定方法	接地状況			測定箇所						動作点		日射
				水中①	水中②	水中③	破損箇所	モジュールフレーム	モジュール表面			
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[W/m ²]
(1) 水中浮遊	/	/	有	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.33	3.72	509
			無	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.33	3.18	504
(2) 水底のアルミ板	/	/	有	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.25	2.44	484
			無	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.31	2.96	482
(3) ポート上	/	/	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.33	3.12	494
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.32	3.08	491
(4) 池外の地面	/	/	有	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.2	▲0.2	▲0.2	0.34	3.25	512
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	0.32	3.15	508

6.3.2 実験② 接続箱・PCSに接続しての水没実験

実験①の状態の太陽電池モジュールに加え、その太陽電池モジュール1枚に接続箱若しくはPCSを接続した状態で計測を行った。基本的な状態を図6-11に示す。

実験②は接続箱・PCSの種類を変えながらの測定であり、この状態からの配線方法等の変更はないが、接続箱・PCSの筐体接地及び負極接地の有無により測定パターンが増える。図6-2のように筐体の対地電圧及び接地線に流れる合計電流値の計測も行った。ただし、電流値は以降の全ての単体実験において0.00mAであったため、記載は省略する。

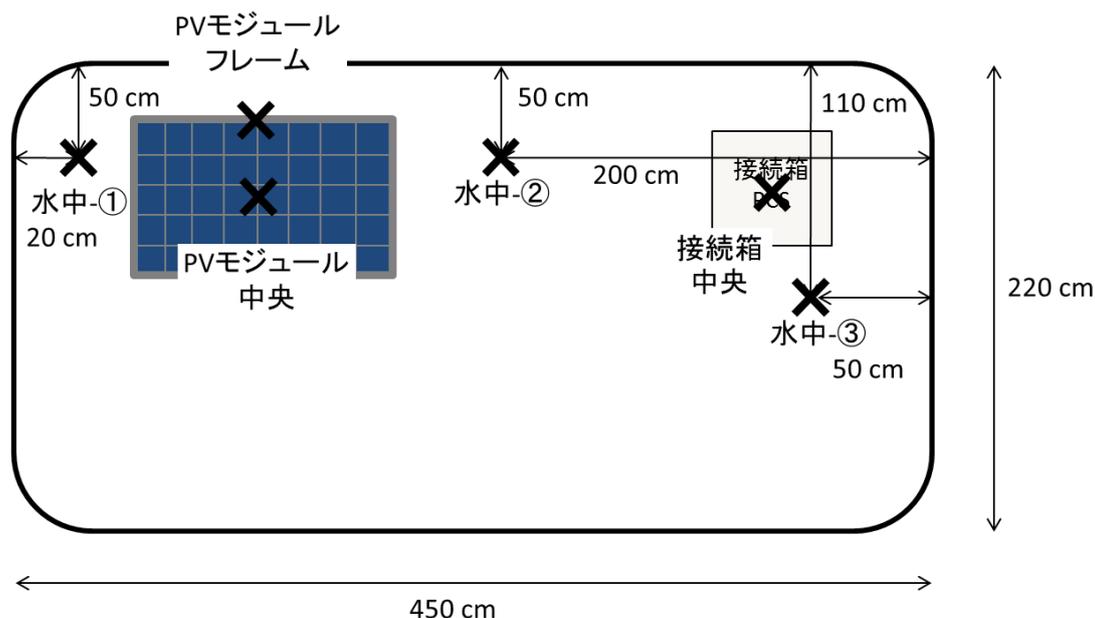


図 6-11 実験②の基本状態

(1) 実験②-1 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いた場合

測定結果は表6-12のとおりである。測定方法としては、接地端がボート上となる測定方法（3）では感電リスクが小さく、他の測定方法では少し感電リスクがある。このうち、測定方法（2）で感電リスクが大きい傾向があった。接地条件は、負極接地有・筐体接地無の場合に感電リスクが大きい傾向にあり、PV接地の有無の影響は見られなかった。測定箇所は筐体に近づくほど感電リスクが大きい傾向にあった。感電リスクは最大でもしびれを感じる程度である。

なお、筐体の電圧は動作点の電圧と同程度であった。

表 6-12 実験②-1 接続箱（鋼板・ダイオード）の結果（▲：マイナス値）

測定方法	接地状況			測定箇所							動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手	モジュールフレーム	モジュール表面				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(1) 水中浮遊	無	有	有	0.0	0.1	0.0	0.2	—	0.1	0.0	37.3	0.89	36.40	560
			無	0.1	0.1	0.0	0.1	—	0.1	0.1	37.3	0.90	36.40	555
		無	有	0.0	0.2	0.0	0.2	—	0.1	0.0	37.3	0.90	36.40	552
			無	0.1	0.1	0.0	0.1	—	0.1	0.1	37.3	0.90	36.40	554
	有	有	有	▲0.3	0.3	0.4	0.6	—	0.1	▲0.1	36.7	1.37	35.80	542
			無	▲0.7	0.6	1.1	2.4	—	▲0.1	▲0.4	37.1	0.99	36.20	541
		無	有	▲0.3	0.4	0.4	0.8	—	0.1	▲0.1	36.7	1.37	35.70	544
			無	▲0.7	0.6	1.3	2.4	—	▲0.1	▲0.5	36.6	0.99	36.20	534
(2) 水底のアルミ板	無	有	有	0.4	0.7	0.5	0.6	—	0.5	0.4	36.9	0.92	36.05	518
			無	0.3	0.3	0.1	0.2	—	0.2	0.2	37.0	0.92	35.40	327
		無	有	0.3	0.6	0.4	0.5	—	0.4	0.3	35.0	0.87	35.64	406
			無	0.2	0.2	0.0	0.1	—	0.1	0.1	32.7	0.80	31.88	198
	有	有	有	0.6	1.6	1.7	2.1	—	1.0	0.6	36.3	1.34	34.60	425
			無	0.8	3.0	3.6	4.1	—	1.6	1.0	37.0	1.00	36.12	557
		無	有	0.7	1.6	1.7	1.9	—	1.1	0.6	30.5	1.25	31.05	235
			無	0.9	3.0	3.3	4.7	—	1.7	0.9	36.8	0.99	35.88	505
(3) ボート上	無	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.14	524
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.14	522
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.13	515
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.13	518
	有	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.14	524
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.14	522
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.13	515
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.13	518
(4) 池外の地面	無	有	有	0.0	0.2	0.0	0.2	—	0.1	0.0	36.6	0.91	35.71	459
			無	▲0.1	▲0.1	▲0.3	▲0.1	—	▲0.2	▲0.2	36.6	0.91	35.70	455
		無	有	▲0.1	0.2	0.0	0.2	—	0.0	▲0.1	36.5	0.91	35.65	451
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.4	▲0.2	—	▲0.2	▲0.2	36.5	0.91	35.59	443
	有	有	有	0.1	0.9	0.9	1.4	—	0.6	0.3	21.0	0.73	22.00	162
			無	0.2	2.0	2.2	3.6	—	1.1	0.4	36.4	0.98	35.50	438
		無	有	0.1	0.9	1.0	1.5	—	0.5	0.2	35.8	1.34	34.85	442
			無	0.2	2.0	2.7	3.6	—	0.7	0.4	36.3	0.98	35.38	430

(2) 実験②-2 接続箱（鋼板・ヒューズ）を用いた場合

測定結果は表 6-13 のとおりである。基本的に実験②-1 と同等の結果であった。

実験②-1 では測定していなかった筐体の取手測定に関しては、リスク判定上は他と同じしびれを感じる程度の区分だが、扉よりも 1 桁大きい電流が流れた。

表 6-13 実験②-2 接続箱（鋼板・ヒューズ）の結果（▲：マイナス値）

測定方法	接地状況			測定箇所							動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手	モジュールフレーム	モジュール表面				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(1) 水中浮遊	無	有	有	0.2	0.2	0.2	0.2	▲0.1	0.2	0.2	38.3	0.25	38.20	519
			無	0.2	0.2	0.2	0.1	▲0.1	0.2	0.2	38.3	0.25	38.20	522
		無	有	0.2	0.2	0.2	0.2	▲0.1	0.2	0.2	38.3	0.25	38.20	522
			無	0.2	0.2	0.2	0.2	▲0.1	0.2	0.2	38.3	0.25	38.20	519
	有	有	有	0.1	0.2	0.3	0.8	2.0	0.0	0.1	38.0	0.50	37.80	519
			無	▲0.1	0.1	0.8	3.0	7.8	▲0.4	▲0.3	38.2	0.32	38.10	524
		無	有	0.1	0.1	0.4	0.8	2.1	0.0	0.0	38.0	0.51	37.80	529
			無	▲0.2	0.0	1.0	3.2	7.8	▲0.4	▲0.3	38.2	0.33	38.20	525
(2) 水底のアルミ板	無	有	有	0.4	0.3	0.3	0.2	▲0.3	0.2	0.2	38.3	0.26	38.20	528
			無	0.3	0.3	0.3	0.2	▲0.3	0.2	0.2	38.3	0.26	38.20	532
		無	有	0.3	0.2	0.3	0.1	▲0.3	0.2	0.2	38.3	0.26	38.20	529
			無	0.2	0.2	0.2	0.1	▲0.2	0.2	0.2	38.3	0.26	38.20	531
	有	有	有	0.3	0.3	0.6	1.0	3.1	0.2	0.2	38.1	0.50	37.90	531
			無	0.2	0.5	2.3	4.3	12.2	0.2	0.2	38.2	0.33	38.10	529
		無	有	0.4	0.4	0.7	1.2	3.5	0.3	0.3	38.1	0.51	37.90	532
			無	0.4	0.6	2.6	4.3	12.1	0.3	0.3	38.2	0.33	38.10	529
(3) ボート上	無	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.3	0.26	38.20	529
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.3	0.26	38.10	528
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.3	0.26	38.20	528
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.3	0.26	38.10	529
	有	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.0	0.50	37.90	532
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.2	0.33	38.10	529
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.0	0.51	37.90	531
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.2	0.33	38.10	527
(4) 池外の地面	無	有	有	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.2	▲0.7	▲0.1	▲0.1	38.2	0.26	38.10	531
			無	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.2	▲0.7	▲0.2	▲0.1	38.3	0.26	38.10	532
		無	有	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.2	▲0.6	▲0.2	▲0.1	38.3	0.26	38.10	529
			無	▲0.1	▲0.2	▲0.1	▲0.2	▲0.7	▲0.2	▲0.1	38.2	0.26	38.10	529
	有	有	有	▲0.1	▲0.1	0.2	0.6	2.5	▲0.2	▲0.2	38.0	0.50	37.80	528
			無	▲0.1	0.1	1.9	3.9	10.1	▲0.2	▲0.2	38.2	0.33	38.00	524
		無	有	▲0.1	▲0.1	0.2	0.8	2.4	▲0.2	▲0.2	38.0	0.51	37.80	528
			無	▲0.1	0.1	1.8	4.1	10.3	▲0.3	0.4	36.3	0.98	38.00	529

(3) 実験②-3 接続箱（樹脂・ヒューズ）を用いた場合

測定結果は表 6-14 のとおりである。基本的に実験②-1、②-2 と同等の結果であった。筐体の取手に触れたときの感電リスクは②-2 より小さい。

表 6-14 実験②-3 接続箱（樹脂・ヒューズ）の結果（▲：マイナス値）

測定方法	接地状況			測定箇所								動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手	モジュールフレーム	モジュール表面					
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(1) 水中 浮遊	無	有	有	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	33.45	0.25	33.10	65	
			無	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	37.80	0.29	37.70	410	
		無	有	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	37.73	0.29	37.60	410		
			無	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	37.70	0.29	37.60	410		
	有	有	有	0.1	0.2	2.1	1.5	2.1	▲0.1	0.0	37.67	0.36	37.50	425	
			無	0.1	0.2	1.9	1.4	2.2	▲0.1	0.0	34.98	0.32	38.80	280	
		無	有	0.1	0.2	1.6	1.4	2.0	▲0.2	▲0.1	34.50	0.32	34.40	108	
			無	0.0	0.2	2.0	1.7	2.2	▲0.2	▲0.1	37.70	0.35	37.60	423	
(2) 水底の アルミ板	無	有	有	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.3	0.3	38.02	0.24	37.90	459	
			無	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	37.94	0.28	37.80	453	
		無	有	0.4	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	37.94	0.28	37.80	468	
			無	0.3	0.3	0.4	0.2	0.1	0.2	0.2	37.98	0.29	37.90	466	
	有	有	有	0.4	0.4	2.5	2.6	3.4	0.3	0.3	37.88	0.35	37.70	458	
			無	0.4	0.6	3.0	2.6	3.5	0.2	0.3	37.83	0.34	37.70	445	
		無	有	0.4	0.6	2.9	2.6	3.4	0.2	0.3	37.78	0.35	37.60	438	
			無	0.4	0.7	2.9	2.5	3.5	0.3	0.2	37.84	0.34	37.70	433	
(3) ポート上	無	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.55	0.29	37.40	383	
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.32	0.29	37.00	294	
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.44	0.29	37.30	367	
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.43	0.29	37.30	364	
	有	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.38	0.35	37.70	369	
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.35	0.35	37.70	367	
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.32	0.36	37.20	366	
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.23	0.35	37.10	339	
(4) 池外の 地面	無	有	有	▲0.1	▲0.2	▲0.1	▲0.2	▲0.3	▲0.2	▲0.2	37.27	0.29	37.10	316	
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.3	▲0.3	▲0.2	▲0.2	37.26	0.29	37.10	352	
		無	有	▲0.1	▲0.2	▲0.1	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	37.23	0.29	37.10	347	
			無	▲0.1	▲0.2	▲0.1	▲0.2	▲0.3	▲0.3	▲0.2	36.78	0.29	36.60	288	
	有	有	有	▲0.1	0.0	1.6	1.9	2.4	▲0.3	▲0.2	36.25	0.34	36.10	331	
			無	▲0.2	0.0	1.6	1.9	2.5	▲0.3	▲0.2	35.78	0.33	35.60	300	
		無	有	▲0.2	0.0	1.2	1.8	2.4	▲0.3	▲0.3	35.56	0.34	35.40	296	
			無	▲0.2	0.0	1.6	1.7	2.5	▲0.3	▲0.2	35.36	0.33	35.20	215	

(4) 実験②-4 PCSを用いた場合

測定結果は表 6-15 のとおりである。接続箱と比較し、感電リスクは小さく、ほぼ安全と言える。接続箱では動作点と同等の電圧が筐体にかかっていたが、PCSでは0.00Vであった。

表 6-15 実験②-4 PCSの結果 (▲：マイナス値)

測定方法	接地状況			測定箇所								動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手	モジュールフレーム	モジュール表面					
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(1) 水中浮遊	無	有	有	0.1	0.1	0.0	▲0.1	—	0.1	0.1	36.6	1.70	0.00	587	
			無	0.2	0.2	0.1	▲0.1	—	0.2	0.1	36.5	1.76	0.00	587	
		無	有	0.2	0.2	0.1	▲0.1	—	0.1	0.1	36.6	1.73	0.00	587	
			無	0.1	0.1	0.1	▲0.1	—	0.1	0.1	36.6	1.74	0.00	595	
	有	有	有	0.2	0.2	0.1	▲0.2	—	0.1	0.1	36.7	1.69	0.00	597	
			無	0.1	0.1	0.1	▲0.3	—	0.1	0.1	36.6	1.69	0.00	595	
		無	有	0.1	0.1	0.1	▲0.3	—	0.1	0.1	36.6	1.70	0.00	594	
			無	0.2	0.1	0.1	0.0	—	0.1	0.1	36.7	1.68	0.00	595	
(2) 水底のアルミ板	無	有	有	0.3	0.3	0.2	▲0.2	—	0.2	0.2	36.7	1.58	0.00	590	
			無	0.2	0.2	0.2	▲0.2	—	0.2	0.2	36.7	1.59	0.00	590	
		無	有	0.3	0.3	0.2	▲0.2	—	0.2	0.2	36.7	1.57	0.00	588	
			無	0.2	0.2	0.1	▲0.1	—	0.2	0.1	36.7	1.59	0.00	590	
	有	有	有	0.2	0.2	0.1	▲0.1	—	0.1	0.1	36.7	1.59	0.00	588	
			無	0.2	0.2	0.1	▲0.2	—	0.1	0.1	36.7	1.57	0.00	585	
		無	有	0.2	0.2	0.1	▲0.2	—	0.1	0.1	36.7	1.57	0.00	587	
			無	0.2	0.2	0.1	▲0.3	—	0.1	0.1	36.7	1.59	0.00	585	
(3) ポート上	無	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	36.7	1.54	0.00	585	
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	36.7	1.55	0.00	588	
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	36.7	1.55	0.00	588	
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	36.7	1.56	0.00	587	
	有	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	36.7	1.56	0.00	585	
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	36.7	1.56	0.00	585	
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	36.7	1.56	0.00	584	
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	36.7	1.56	0.00	584	
(4) 池外の地面	無	有	有	▲0.1	▲0.1	▲0.2	▲0.5	—	▲0.1	▲0.1	36.8	1.46	0.00	588	
			無	▲0.1	▲0.2	▲0.2	▲0.4	—	▲0.2	▲0.2	36.7	1.52	0.00	580	
		無	有	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.4	—	▲0.2	▲0.2	36.7	1.51	0.00	574	
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.5	—	▲0.2	▲0.2	36.7	1.52	0.00	577	
	有	有	有	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.4	—	▲0.2	▲0.1	36.7	1.51	0.00	575	
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.7	—	▲0.2	▲0.2	36.6	1.53	0.00	574	
		無	有	▲0.2	▲0.2	▲0.3	▲0.4	—	▲0.2	▲0.2	36.6	1.54	0.00	572	
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.3	▲0.7	—	▲0.2	▲0.2	36.6	1.54	0.00	571	

6.3.3 実験③ 接続箱・PCS を用いて印加電圧を大きくした場合

実験②では接続する太陽電池モジュールは1枚であったが、ここでは複数枚を直列に接続し測定した。プールの大きさの制限があるため、太陽電池は水中ではなく、通常の大気中に設置した太陽電池を接続した。太陽電池モジュールのフレームと表面もこの接続された電池を測定したが、電流が流れることはなかったため、記載は省略する。接続する太陽電池は5枚と10枚の2パターンとした。ただし、水中に構造物として太陽電池1枚はそのまま残した。

また、太陽電池モジュールが大気中に通常設置され、接続箱・PCSのみが水中にある状態を、水位が引き始めた半分水没状態と定義することとした。その場合、接近時に足が水中に浮くことは想定しづらいため、測定方法(1)水中浮遊は省略することとした。接地方法についても、PV接地の有無がほとんど結果に影響しなかったことから省略した。

(1) 実験③-1 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いた場合

測定結果は表 6-16 のとおり。モジュール 5 枚と 10 枚で目立った差は見られなかった。
また、動作点自体にも目立った差がなかった。

表 6-16 実験③-1 接続箱（鋼板・ダイオード）の結果（▲：マイナス値）

モジュール5枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	無	無	有	0.5	0.9	0.2	0.9	—	145.0	4.05	138.0	89
			無	0.4	0.5	▲0.2	0.3	—	154.5	4.43	153.0	347
	有	無	有	0.8	2.4	2.5	3.9	—	113.0	5.05	111.5	359
			無	1.2	7.4	11.8	19.9	—	150.7	4.71	149.2	353
(3) ポート上	無	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	156.8	4.48	155.0	366
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	156.3	4.53	154.9	369
	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	118.0	5.20	116.3	366
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	151.0	4.70	150.0	360
(4) 池外の地面	無	無	有	▲0.1	0.5	▲0.3	0.5	—	140.8	4.10	149.0	409
			無	▲0.2	0.0	▲0.7	0.0	—	157.0	4.57	156.3	397
	有	無	有	0.3	2.0	2.5	4.3	—	126.0	5.55	124.2	390
			無	0.5	7.8	11.1	18.5	—	148.0	4.28	146.8	403
モジュール10枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	無	無	有	0.5	0.9	0.2	0.8	—	151.0	4.25	149.8	288
			無	0.4	0.7	0.1	0.5	—	148.1	4.24	146.8	288
	有	無	有	0.8	1.7	1.5	1.8	—	96.8	4.29	95.5	288
			無	1.1	7.7	10.2	16.8	—	133.0	4.18	132.5	280
(3) ポート上	無	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	120.5	3.49	118.5	235
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	114.0	3.03	96.0	207
	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	68.5	3.05	68.8	211
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	105.8	3.32	105.8	215
(4) 池外の地面	無	無	有	▲0.1	0.2	▲0.1	0.2	—	111.0	3.09	9.2	220
			無	▲0.1	▲0.1	▲0.2	▲0.1	—	53.0	1.54	56.3	133
	有	無	有	0.3	1.5	0.5	2.3	—	86.8	3.78	85.0	253
			無	0.6	5.5	7.0	13.1	—	115.0	3.49	113.0	241

(2) 実験③-2 接続箱（鋼板・ヒューズ）を用いた場合

測定結果は表 6-17 のとおりである。実験③-1 とは異なり、モジュール5枚と10枚では明らかにモジュール10枚の方が感電リスクは高まっている。また、動作電圧も高い。

絶対値として全体的に実験③-1 で用いた接続箱より電流が大きく、筐体に触れた場合、自力での脱出が困難となるレベルの感電となる可能性がある。

水中であっても「水中③」のように接続箱に近い場所では、触れなくても同レベルの感電リスクが生じる。

表 6-17 実験③-2 接続箱（鋼板・ヒューズ）の結果（▲：マイナス値）

モジュール5枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	無	無	有	0.5	0.4	0.5	▲0.6	▲1.9	181.2	1.77	180.0	372
			無	0.5	0.4	0.6	0.3	▲0.9	181.3	1.79	180.0	362
	有	無	有	0.5	0.4	1.3	3.7	11.8	176.4	3.13	175.0	356
			無	0.5	1.3	12.5	25.1	65.5	180.3	2.17	179.0	360
(3) ボート上	無	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	180.6	1.92	180.0	376
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	180.7	1.88	180.0	376
	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	175.8	3.17	174.0	374
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	179.8	2.22	179.0	376
(4) 池外の地面	無	無	有	▲0.1	▲0.2	0.1	▲0.8	▲2.1	181.5	1.74	181.0	346
			無	▲0.1	▲0.1	0.0	▲0.7	▲1.1	181.6	1.72	181.0	337
	有	無	有	▲0.1	0.0	0.1	1.9	9.8	175.5	3.07	174.0	330
			無	▲0.1	0.6	8.8	23.0	57.8	179.2	2.12	178.0	324
モジュール10枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	無	無	有	0.5	0.4	0.5	▲1.6	▲4.1	349.7	3.69	347.0	410
			無	0.5	0.5	1.2	▲0.5	▲1.5	347.2	3.71	347.0	407
	有	無	有	0.5	0.6	1.5	4.4	24.9	310.4	5.97	308.0	403
			無	0.6	2.2	22.9	48.9	125.9	342.0	4.35	340.0	400
(3) ボート上	無	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	348.1	3.83	347.0	392
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	348.5	3.63	347.0	392
	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	298.9	5.98	296.0	389
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	340.0	4.50	340.0	387
(4) 池外の地面	無	無	有	▲0.1	▲0.1	0.0	▲1.2	▲3.3	348.3	3.49	348.0	438
			無	▲0.1	▲0.1	0.3	▲0.4	▲1.1	349.2	3.50	348.0	435
	有	無	有	▲0.1	0.0	1.3	5.0	23.8	317.8	6.00	316.0	432
			無	0.0	1.2	12.4	43.1	108.7	345.7	4.24	344.0	426

(3) 実験③-3 接続箱（樹脂・ヒューズ）を用いた場合

測定結果は表 6-18 のとおりである。実験③-2 と同様、モジュール 5 枚より 10 枚の方が動作電圧は上がり、感電リスクが高い。

表 6-18 実験③-3 接続箱（樹脂・ヒューズ）の結果（▲：マイナス値）

モジュール5枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	無	無	有	0.4	0.3	1.0	0.4	0.1	177.8	1.47	177.0	357
			無	0.4	0.3	0.5	0.6	▲0.1	177.1	1.58	176.0	380
	有	無	有	0.4	0.7	4.7	12.2	19.0	175.9	1.89	175.0	372
			無	0.4	1.2	4.7	10.6	20.7	176.2	1.85	175.0	456
(3) ポート上	無	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	176.0	1.49	175.0	545
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	176.0	1.52	175.0	541
	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	175.1	1.82	174.0	542
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	175.1	1.79	174.0	541
(4) 池外の地面	無	無	有	▲0.1	▲0.1	0.3	0.3	0.3	177.1	1.46	176.0	508
			無	▲0.1	▲0.1	0.3	0.1	0.1	176.9	1.52	176.0	535
	有	無	有	0.0	0.3	9.6	8.9	13.4	175.8	1.86	175.0	538
			無	▲0.2	0.4	5.4	8.8	17.8	175.7	1.82	175.0	496
モジュール10枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	無	無	有	0.5	0.4	1.4	1.1	1.4	341.2	3.24	340.0	524
			無	0.4	0.4	0.9	1.3	0.8	342.1	3.29	341.0	525
	有	無	有	0.4	1.3	15.7	31.0	26.0	338.7	3.95	337.0	542
			無	0.5	1.1	15.4	21.6	27.3	340.0	3.89	339.0	522
(3) ポート上	無	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	341.8	3.25	341.0	557
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	341.4	3.21	340.0	518
	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	337.3	3.87	336.0	539
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	337.7	3.76	337.0	515
(4) 池外の地面	無	無	有	▲0.1	▲0.1	0.8	0.7	1.1	342.5	3.45	342.0	562
			無	▲0.1	▲0.1	0.6	0.3	▲0.5	343.8	3.49	343.0	524
	有	無	有	0.0	0.9	18.0	17.6	23.8	337.7	4.28	337.0	538
			無	▲0.1	0.7	12.6	19.7	20.9	339.6	4.12	339.0	527

(4) 実験③-4 PCSを用いた場合

測定結果は表 6-19 のとおりである。接続箱と比較し、感電リスクは非常に小さい。5直列での測定の順番を測定方法（3）ポート上、測定方法（4）池外の地面、測定方法（2）水底のアルミ板の順で行ったところ、測定方法（2）の負極接地の無から有に切り替えたタイミングで動作点の電流値が極端に低下した。そのため、5直列の後に実施した10直列の場合の方が感電リスクは小さい結果となった。これについては、6.4.1.2 で検討を行った。太陽電池モジュール1枚時と同様に、接続箱とは異なり、筐体の電圧は0Vであった。

表 6-19 実験③-4 PCSの結果（▲：マイナス値）

モジュール5枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	無	無	有	0.2	0.1	▲0.2	▲1.9	—	155.7	6.72	0.0	527
			無	0.3	0.2	▲0.2	0.1	—	154.8	6.66	0.0	537
	有	無	有	0.2	0.2	0.1	0.2	—	179.5	0.32	0.0	532
			無	0.1	0.1	0.1	0.1	—	178.8	0.32	0.0	542
(3) ポート上	無	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	155.2	6.80	0.0	537
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	156.0	6.76	0.0	527
	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	147.6	6.32	0.0	538
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	155.6	6.82	0.0	541
(4) 池外の地面	無	無	有	▲0.1	▲0.2	▲0.6	▲3.0	—	149.8	7.43	0.0	554
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.6	▲1.9	—	150.2	7.35	0.0	552
	有	無	有	▲0.2	▲0.2	▲0.5	▲2.5	—	145.0	6.86	0.0	549
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.4	▲2.1	—	153.5	7.10	0.0	547
モジュール10枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	無	無	有	0.3	0.2	0.2	0.2	—	362.1	0.58	0.0	412
			無	0.2	0.1	0.1	0.0	—	362.3	0.53	0.0	422
	有	無	有	0.2	0.1	0.1	0.1	—	361.1	0.54	0.0	420
			無	0.1	0.1	0.1	0.0	—	360.5	0.55	0.0	418
(3) ポート上	無	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	360.9	0.62	0.0	462
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	360.2	0.59	0.0	458
	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	340.0	0.51	0.0	118
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	363.0	0.59	0.0	449
(4) 池外の地面	無	無	有	▲0.3	▲0.3	▲0.3	▲0.3	—	364.2	0.55	0.0	382
			無	▲0.2	▲0.3	▲0.3	▲0.3	—	337.6	0.64	0.0	380
	有	無	有	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	—	350.5	0.60	0.0	373
			無	▲0.3	▲0.3	▲0.3	▲0.3	—	349.6	0.57	0.0	370

6.3.4 実験④ 接続箱「鋼板・ダイオード」を用いて並列回路を形成した場合

実験③では太陽電池の直列数のみ変化させたが、本実験では5直列2並列で回路を構成した。実験③と同様、太陽電池モジュールは大気中に通常設置したものを使用し、水中に構造物として太陽電池モジュール1枚をそのまま残した。接続箱は実験②-1及び③-1で用いた鋼板・ダイオードタイプを使用した。その他の実験条件は実験③と同様である。

測定結果は表6-20のとおりである。実験③-1の5直列1並列の結果と比較しても目立った感電リスクの増加はみられなかった。

表 6-20 実験④ 2ストリングの結果 (▲：マイナス値)

測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底の アルミ 板	無	無	有	0.6	0.6	0.8	0.9	—	172.4	2.54	171.3	461
			無	0.6	0.6	0.5	0.4	—	172.3	2.53	171.2	451
	有	無	有	0.6	0.7	1.3	3.3	—	167.6	3.94	166.2	446
			無	0.6	1.2	5.4	22.1	—	172.5	2.76	171.3	445
(3) ボート 上	無	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	172.4	2.50	171.2	429
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	172.3	2.54	171.2	429
	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	167.0	3.96	165.5	426
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	171.6	2.79	170.4	425
(4) 池外の 地面	無	無	有	0.0	▲0.1	0.0	0.0	—	172.4	2.76	171.3	379
			無	0.0	▲0.1	▲0.2	▲0.3	—	172.5	2.73	171.3	376
	有	無	有	0.0	0.0	0.8	1.3	—	165.4	4.21	163.9	373
			無	0.0	0.5	11.3	17.6	—	172.2	3.01	171.1	372

6.3.5 実験⑤ 接続箱「鋼板・ダイオード」を用いて印加電圧を大きくした場合（破損有り）

図 6-12 のように断線した状態を最もリスクの高い設備状態（ワーストケース）と想定し、測定を行った。断線させた箇所は、ストリング内の最も電圧の高い場所として、負極は接地し、接続箱の入力部に最も近い正極を断線させた。断線箇所はこれまでと同様、コネクタを外して剥き線状態とした。接地状態の変化は接続箱の筐体接地のみで行った。

新たなパラメータとして、断線箇所間の距離・位置を変えて測定した。接続箱は実験②-1 及び③-1 に用いた鋼板・ダイオード型を使用した。モジュールは 10 枚を直列につないでいる。

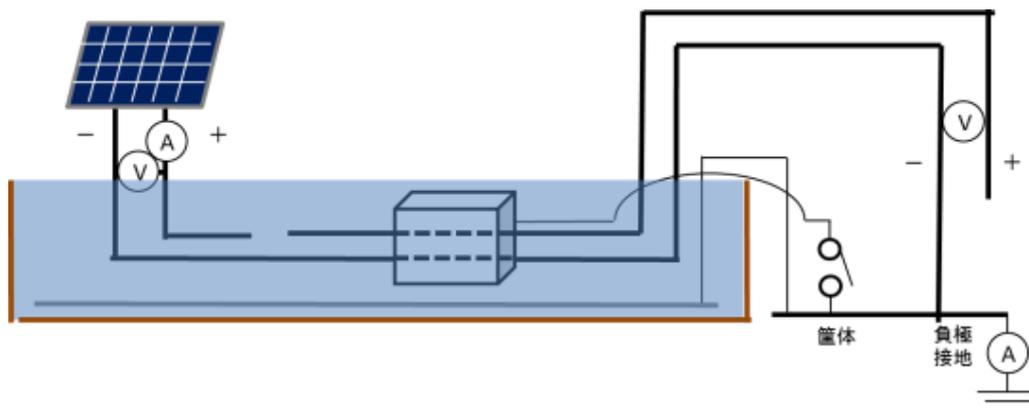


図 6-12 実験⑤の基本状態

(1) 断線箇所間の距離を 80 cm とした場合

断線箇所間距離 80 cm 時を上から見たものを図 6-13 に示す。水深は 48 cm（床から 29 cm）の位置に断線箇所を配置した。その測定結果を表 6-21 に示す。この結果、感電リスクは見られなかった。

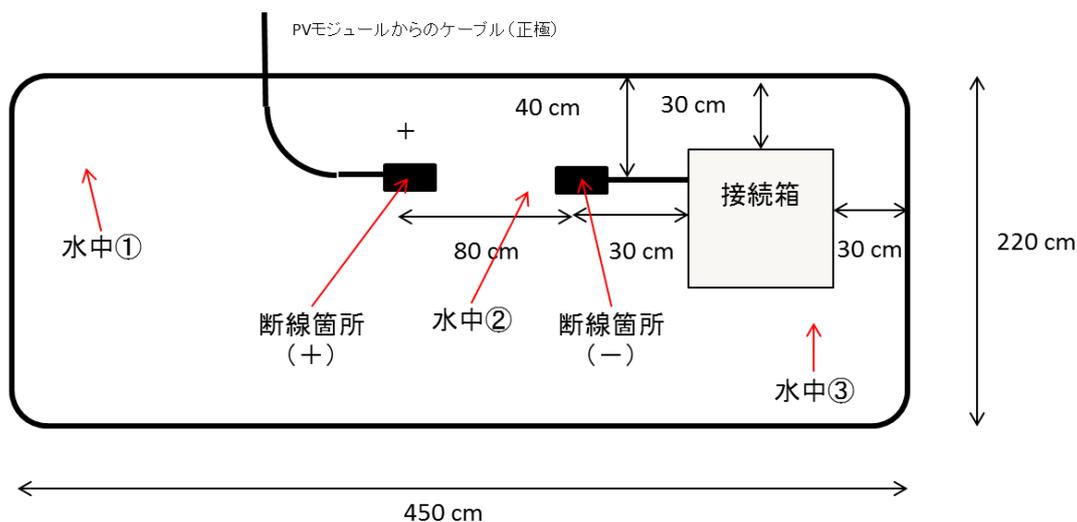


図 6-13 断線箇所間距離 80 cm 時の配置

表 6-21 実験⑤ 断線箇所間距離 80 cm

測定方法	接地状況			測定箇所							動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手	断線箇所(+)	断線箇所(-)				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	有	無	有	0.7	1.0	0.8	0.7	—	—	—	354.0	0.12	0.9	549
			無	0.7	1.0	0.8	0.7	—	—	—	353.5	0.14	0.8	551
(3) ポート上	有	無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	353.0	0.13	0.9	548
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	353.4	0.13	0.8	548
(4) 池外の地面	有	無	有	0.1	0.4	0.2	0.3	—	—	—	353.0	0.14	0.9	551
			無	0.1	0.5	0.2	0.2	—	—	—	353.3	0.14	0.9	551

(2) 断線箇所間の距離を 270 cm とした場合

断線箇所間距離 270 cm 時の上から見たものを図 6-14 に示す。水深は 48 cm (床から 2 cm) の位置で変更していない。なお、断線箇所間距離 80 cm、270 cm の場合ともに、これまでに設定した測定箇所における計測値がリスクの低い値であったため、断線箇所付近も測定箇所に加えた。断線箇所付近とは断線箇所から 5 cm 以内の場所とした。

また、筐体接地の有無が筐体扉の計測値にほとんど影響を与えなかったため、ここからは筐体接地有のみで測定した。さらに測定方法については、これまでの実験の経過からリスクが最も高いと想定される (2) のみで測定を行った。

その測定結果は表 6-22 のとおりであるが、感電リスクは見られなかった。

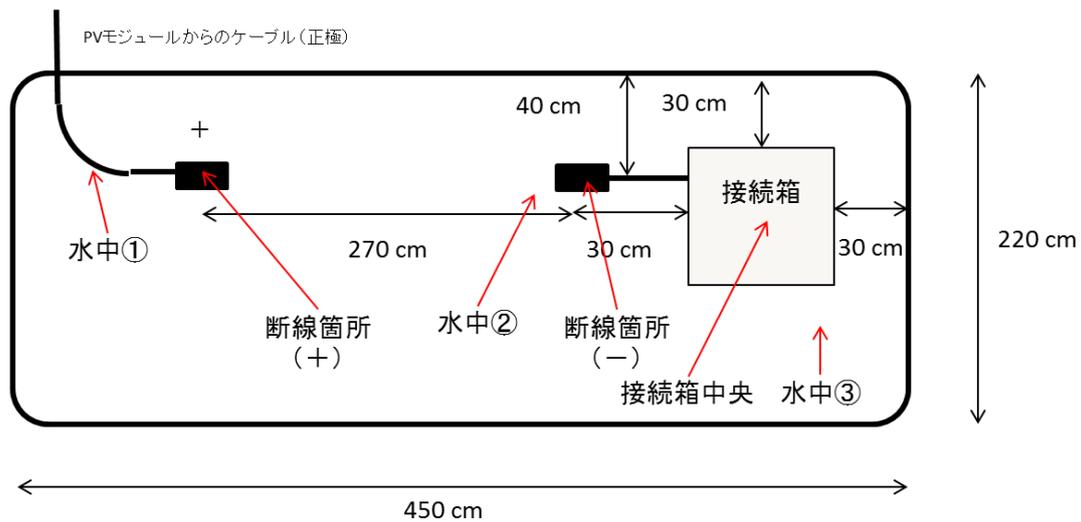


図 6-14 断線箇所間距離 270 cm 時の配置

表 6-22 実験⑤ 断線箇所間距離 270 cm

測定方法	接地状況			測定箇所							動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手	断線箇所(+)	断線箇所(-)				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	有	無	有	1.1	0.6	0.7	0.6	—	1.1	0.7	353.9	0.10	0.89	547

(3) 断線箇所間の距離を 180 cm とした場合

断線箇所間距離 180 cm 時の上から見たものを図 6-15 に示す。水深は 45 cm (床から 5 cm) の位置に変更した。

その測定結果は表 6-23 のとおりであるが、感電リスクは見られなかった。

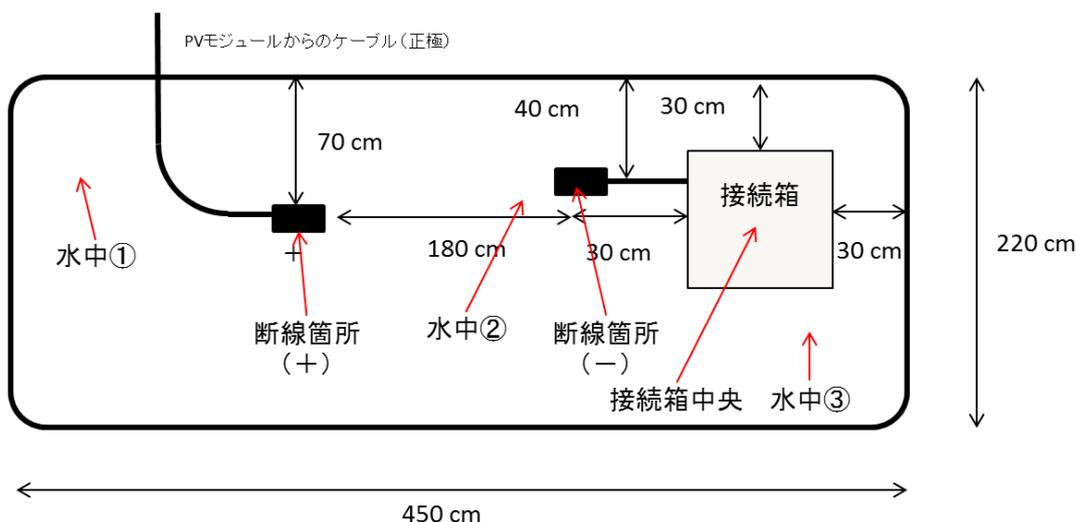


図 6-15 断線箇所間距離 180 cm 時の配置

表 6-23 実験⑤ 断線箇所間距離 180 cm

測定方法	接地状況			測定箇所							動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手	断線箇所(+)	断線箇所(-)				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	有	無	有	4.5	0.9	0.8	0.7	—	1.1	0.7	353.7	0.35	0.90	547

(4) 破損箇所 (正極) からの距離と検出電流の関係調査

これまで破損箇所間の距離を変えても目立った感電リスクが見られなかったため、破損

した正極のみ水没させその距離と電流の相関を図 6-16 に示す。図 6-16 はプールを横から見た図で、正極と測定箇所の水平方向の座標は揃えている。

正極付近では感電リスクが有り、正極から離れるとリスクが低下していることが分かる。

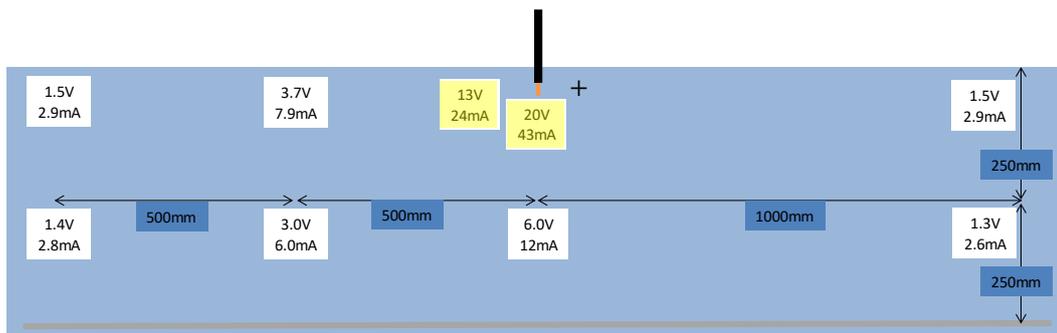


図 6-16 破損箇所（正極）と電流の相関

6.4 単体実験の考察・まとめ

本節では、単体実験データに基づき、考察を行う。

6.4.1 各パラメータと感電リスクの関係

水質、設備の状態、人間の状態の違いが感電リスクに与える影響を考察する。

6.4.1.1 水質

単体実験は、水質一定で実施した点及び半分水没と完全水没を全く同じシステム構成で、実施しなかったことから、水質の影響は考察できない。システム実験時のデータから考察することとする。

6.4.1.2 設備の状態

(1) 接地状態

単体実験の期間中で日射が十分に安定していた際の接続箱（樹脂・ヒューズ）に太陽電池モジュール10枚を1ストリングとして接続した時の結果である表6-18の下部分の抜粋を表6-24に示す。（再掲）

この結果によると、負極接地有の場合は負極接地無の場合と比較して、明らかに感電リスクが高まっている。これは全ての実験に共通して見られた傾向である。

筐体接地の有無の影響については、実験の種類、測定箇所により傾向が一律ではなかった。これについては6.4.2において考察する。

表 6-24 接地状態による違い

測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底の アルミ 板	無	無	有	0.5	0.4	1.4	1.1	1.4	341.2	3.24	340.0	524
			無	0.4	0.4	0.9	1.3	0.8	342.1	3.29	341.0	525
	有	無	有	0.4	1.3	15.7	31.0	26.0	338.7	3.95	337.0	542
			無	0.5	1.1	15.4	21.6	27.3	340.0	3.89	339.0	522

(2) 接続箱の種類

日照条件に近い実験③-1、2、3 の太陽電池モジュール5枚1ストリング接続時で3種類の接続箱を比較した。その結果は表 6-25 のとおりである。なお、測定方法（3）は、ほとんど電流が流れなかったため省略した。この結果に基づき考察する。

表 6-25 接続箱比較（▲：マイナス値）

鋼板・ダイオード												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底の アルミ 板	無	無	有	0.5	0.9	0.2	0.9	—	145.0	4.05	138.0	89
			無	0.4	0.5	▲0.2	0.3	—	154.5	4.43	153.0	347
	有	無	有	0.8	2.4	2.5	3.9	—	113.0	5.05	111.5	359
			無	1.2	7.4	11.8	19.9	—	150.7	4.71	149.2	353
(4) 池外の 地面	無	無	有	▲0.1	0.5	▲0.3	0.5	—	140.8	4.10	149.0	409
			無	▲0.2	0.0	▲0.7	0.0	—	157.0	4.57	156.3	397
	有	無	有	0.3	2.0	2.5	4.3	—	126.0	5.55	124.2	390
			無	0.5	7.8	11.1	18.5	—	148.0	4.28	146.8	403
鋼板・ヒューズ												
(2) 水底の アルミ 板	無	無	有	0.5	0.4	0.5	▲0.6	▲1.9	181.2	1.77	180.0	372
			無	0.5	0.4	0.6	0.3	▲0.9	181.3	1.79	180.0	362
	有	無	有	0.5	0.4	1.3	3.7	11.8	176.4	3.13	175.0	356
			無	0.5	1.3	12.5	25.1	65.5	180.3	2.17	179.0	360
(4) 池外の 地面	無	無	有	▲0.1	▲0.2	0.1	▲0.8	▲2.1	181.5	1.74	181.0	346
			無	▲0.1	▲0.1	0.0	▲0.7	▲1.1	181.6	1.72	181.0	337
	有	無	有	▲0.1	0.0	0.1	1.9	9.8	175.5	3.07	174.0	330
			無	▲0.1	0.6	8.8	23.0	57.8	179.2	2.12	178.0	324
樹脂・ヒューズ												
(2) 水底の アルミ 板	無	無	有	0.4	0.3	1.0	0.4	0.1	177.8	1.47	177.0	357
			無	0.4	0.3	0.5	0.6	▲0.1	177.1	1.58	176.0	380
	有	無	有	0.4	0.7	4.7	12.2	19.0	175.9	1.89	175.0	372
			無	0.4	1.2	4.7	10.6	20.7	176.2	1.85	175.0	456
(4) 池外の 地面	無	無	有	▲0.1	▲0.1	0.3	0.3	0.3	177.1	1.46	176.0	508
			無	▲0.1	▲0.1	0.3	0.1	0.1	176.9	1.52	176.0	535
	有	無	有	0.0	0.3	9.6	8.9	13.4	175.8	1.86	175.0	538
			無	▲0.2	0.4	5.4	8.8	17.8	175.7	1.82	175.0	496

1) ダイオード式とヒューズ式の接続箱の比較（水中での感電リスク）

ダイオード式は測定箇所「水中②」でも感電リスクが残る。そのため、ダイオード式はヒューズ式よりも広い範囲に感電リスクが及ぶと考えられる。この理由を考察する。

この実験時のシステム構成は図 6-17 のとおり（図 6-2 の再掲）である。この図のように各接地線に流れる電流の合成値は計測しているが、全ての実験において 0.0 mA であったことは前節で既に述べている。そのため、ケーブルの断線もないこのシステム系で漏電する可能性があるのは接続箱内部の端子台や導体部等、絶縁物で被覆されていない箇所で、水等を介して主回路に戻ってくると想定することができる。これは動作点が電流 0 A の解放状態でないことから説明がつく。

今回、使用した接続箱は、逆流防止機構の違いとしてダイオード式、ヒューズ式と端的に表しているが、内部構造には他にも差が見られる。

図 6-18 がダイオード方式の接続箱の内部写真である。左側に太陽電池モジュールからのケーブルが入力され、これらの並列回路が導体に接続・合成され右側の MCCB を介して出力される構造になっている。左側には前面カバーが付いているが、それを外して接写撮影した写真が図 6-19 である。一方、ヒューズ方式は図 6-20 のような構造になっており、右側に太陽電池モジュールからのケーブルが入力され、これらの並列回路が導体に接続・合成され左側の MCCB を介して出力される構造になっている。

機器配置に左右の違いはあるが、主回路に戻ってくる漏電電流に与える影響が大きいと考えられるのは、導体の正極と負極間の距離である。ダイオード方式よりヒューズ方式の方がこの導体間の距離が長い。つまり、ヒューズ方式の方がダイオード方式より水を介した正極と負極の抵抗が大きくなり、動作点が開放状態に近いと考えられる。これは動作点の電流、電圧の測定結果からも裏付けられている。

図 6-21 に実験②でのヒューズ方式とダイオード方式の動作点をプロットしたものを示す。図中には幾つかの日射での太陽電池モジュールの I-V カーブを併記している。太陽電池モジュールの水没により、日射が遮られるため実際の I-V カーブに形は段差が付くが、図中には理想的な I-V カーブを記載している。この図より、ヒューズ方式がダイオード方式より動作電圧が高く、動作電流が低いことが分かる。一方で、ダイオード方式は水を介した正極と負極間の抵抗が小さく動作電流が高い。

動作電流の一部が漏電電流となり、水中を介して流れると考えられるため、動作電流が高いダイオード方式が水中での感電リスクが大きくなったと考えられる。

2) ダイオード式とヒューズ式の接続箱の比較（直接、触れた際の感電リスク）

筐体に触れたときの電流値について考察する。筐体接地がある状態で触れるとヒューズ方式のリスクは低い、筐体接地がない状態だとそれが逆転し高リスクになる。これは以下のように考えられる。

- 筐体接地がある場合、動作電流が低く漏電電流が少ないヒューズ方式の方がリスクは低くなると考えられる。
- 筐体接地がない場合、水を介した正極と負極間の抵抗が小さいダイオード方式では、接続箱内部からの漏電電流は筐体アースがなくとも負極接地端に流れ易く、筐体から人体を介してアースへ流れる経路には余り電流が流れなかったと考えられ

る。水を介した正極と負極間の抵抗が大きいヒューズ方式では負極設置端に流れ難いため、筐体アースがなくなると筐体から人体を通してアースへ流れる経路に電流が流れ易くなったと考えられる。

- 筐体接地端子が両接続箱とも右下に位置しており、導体部が右寄りのヒューズ方式の方が漏電箇所からアース端の距離が近いということも一因であると想定できる。

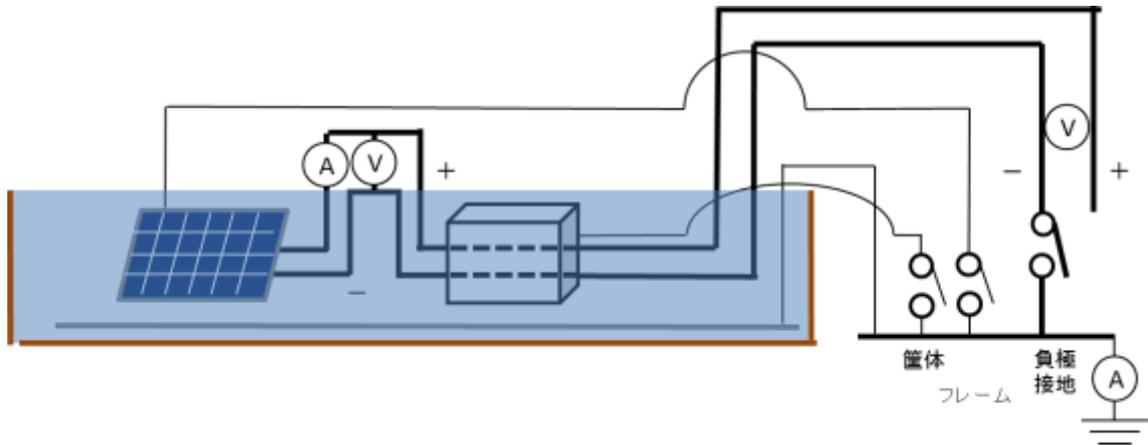


図 6-17 接続箱単体実験時のシステム構成



図 6-18 ダイオード方式の接続箱内部

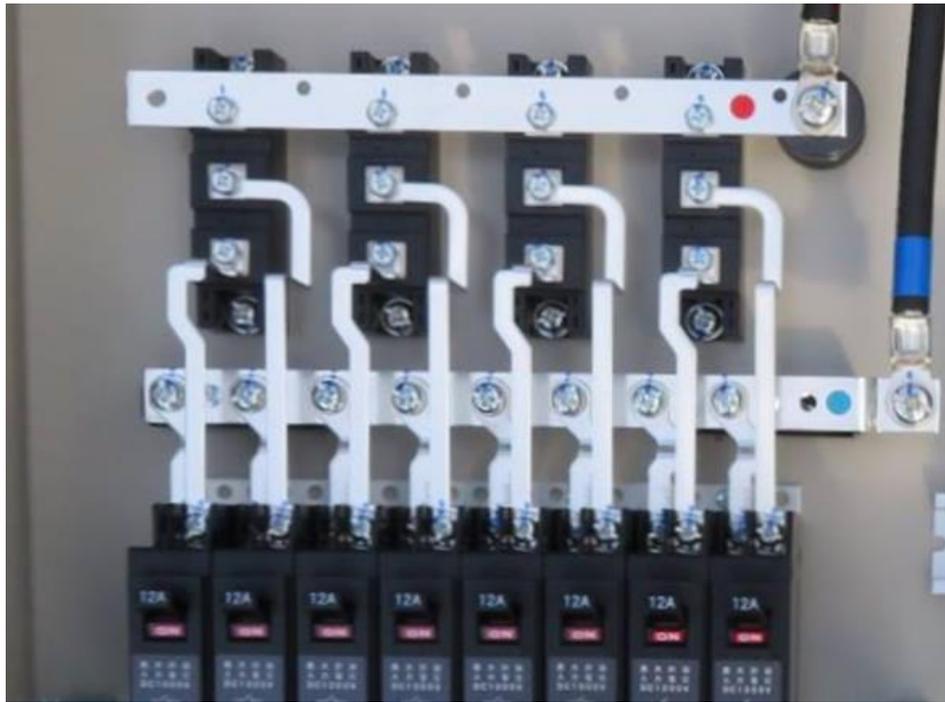


図 6-19 ダイオード方式の接続箱内部（ストリング入力部）



図 6-20 ヒューズ方式の接続箱内部

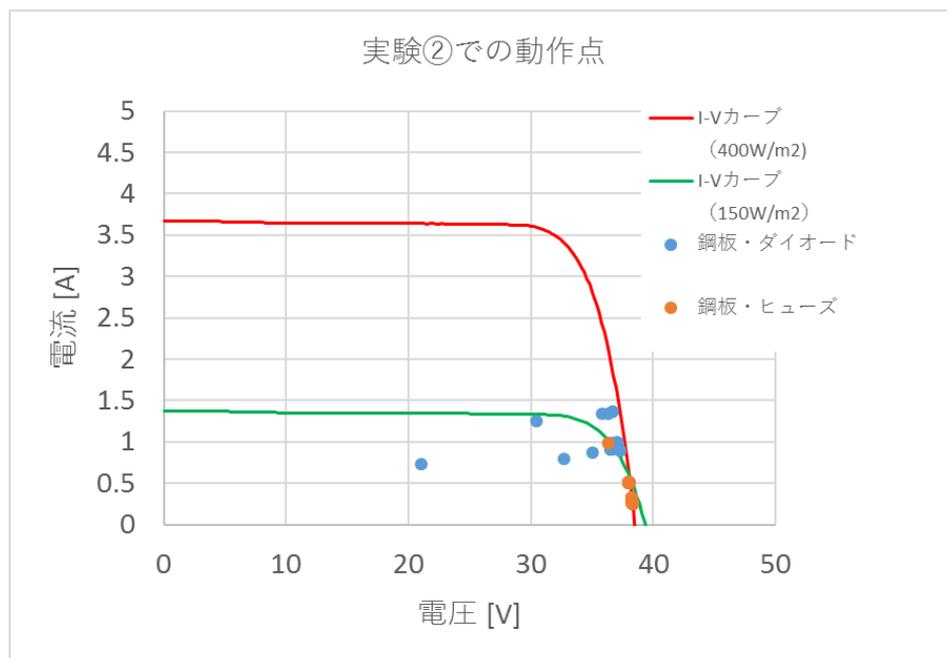


図 6-21 実験②でのヒューズ方式とダイオード方式の動作点

3) 鋼板と樹脂の比較

表 6-25 の中で、鋼板・ヒューズと樹脂・ヒューズの特性を比較すると、筐体が鋼板製である場合と樹脂製である場合の比較が可能である。

筐体に触れた場合、鋼板製に比べて樹脂製は感電リスクが低い。これは鋼板製と比べ、樹脂製は電気抵抗率が高く、電流が流れ難いためと考えられる。接続箱の外部も筐体接地が無い場合は樹脂製が流れ難く、漏電電流を接続箱外部に漏らさない効果があると考えられる。

しかし、筐体接地がある場合を比較すると、水中での特性が逆転する。樹脂製は筐体接地があっても感電リスク低減効果はほとんどない。この点について考察する。樹脂製筐体は二重絶縁の仕様となっており、実際、筐体接地無し状態で鋼板と樹脂を比較すると、樹脂製のほうが安全は保たれている。一方、水没時に限れば、筐体接地をしている鋼板製筐体に感電リスクが残るのと同様、樹脂製でも感電リスクは残り、それは接地しても改善しないことが分かった。

4) 接続箱とPCSの比較

PCSは接続箱と異なり、ダイオード等のデバイスが組み込まれており、実験の途中において、それらに破損が生じたと考えられる動作点を含めた計測値の不連続性が見られた。実験は5直列の測定方法(4)の次に測定方法(2)を行ったが、表 6-19 の抜粋である表 6-26 では、測定方法(4)までは動作電流が大きく流れていたが、測定方法(2)の負極接地を「無」から「有」に切り替えてからは大きく電流値が低下しており、負極接地の有無の切替えのタイミングで何らかの破損が生じたものと考えられる。破損後は感電リスクも大きく低下しており、安全面言えば破損は望ましい。

破損前の動作点を見ると、ダイオード式の接続箱よりも更に電流軸寄りに位置しており、近い距離で電流パスができていていると考えられる。PCSは接続箱と異なり、むき出しの導体部は少ないため、距離の近い端子台が漏電箇所（図 6-22）と考えられる。近い場所で電流パスができているため、接続箱では動作点の電位がそのまま検出された筐体部の電位が0.0Vとなり、筐体に触れたときのリスクは故障前でも接続箱より低い。

また、PCSでは電流が負極側の方向に出ている。これは、ここで言う負極接地が直流入力
の負極ではなく交流出力のW相接地であったためと考えられる。本実証で用いたような
接続箱機能付のPCSについて、直流の負極接地を行うのが一般的でないため、実証目的で
交流側のW相を接地したが効果がなく、0電位に基準がそろっていなかったためと考えら
れる。

表 6-26 実験③-4 PCS接続時の抜粋 (▲ : マイナス値)

モジュール5枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底の アルミ 板	無	無	有	0.2	0.1	▲0.2	▲1.9	—	155.7	6.72	0.0	527
			無	0.3	0.2	▲0.2	0.1	—	154.8	6.66	0.0	537
	有	無	有	0.2	0.2	0.1	0.2	—	179.5	0.32	0.0	532
			無	0.1	0.1	0.1	0.1	—	178.8	0.32	0.0	542
(4) 池外の 地面	無	無	有	▲0.1	▲0.2	▲0.6	▲3.0	—	149.8	7.43	0.0	554
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.6	▲1.9	—	150.2	7.35	0.0	552
	有	無	有	▲0.2	▲0.2	▲0.5	▲2.5	—	145.0	6.86	0.0	549
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.4	▲2.1	—	153.5	7.10	0.0	547

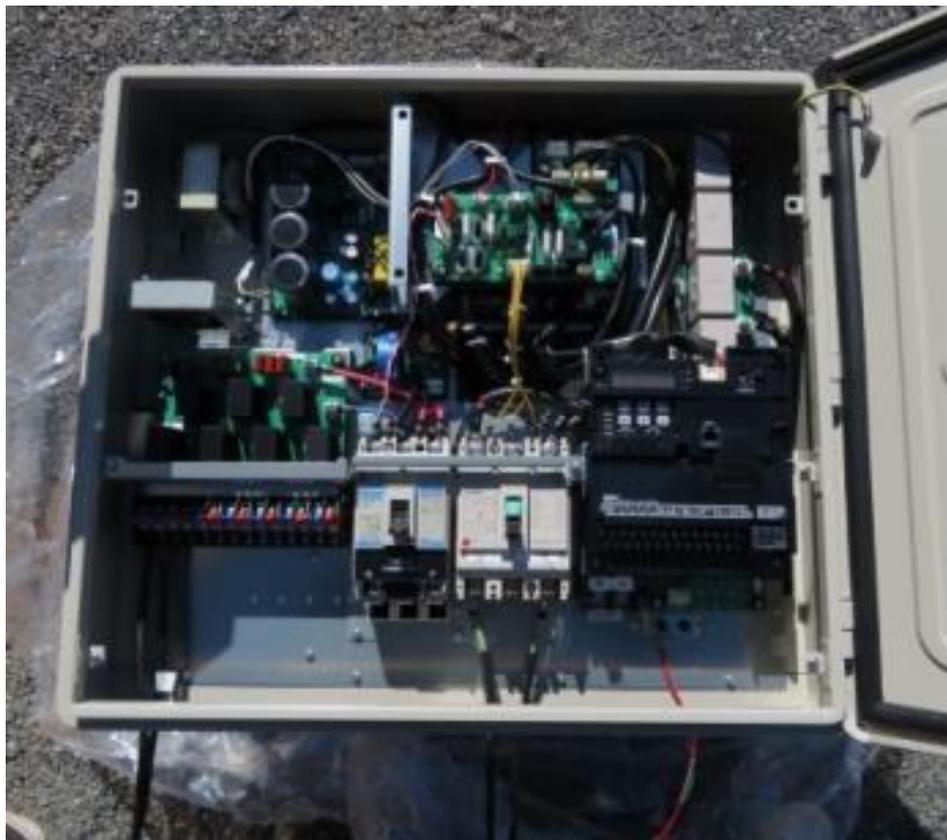


図 6-22 PCS 内部

(3) 太陽電池モジュールの構成

表 6-27 は実験④、表 6-20 のモジュール5枚を直列につないだものを2ストリングとして測定したときの結果とこれと同じ機器を使って構成した実験③-1、表 6-16 のモジュール5枚を1ストリングとした特定の測定結果の比較である。

動作点は電圧が上昇し、電流が低下している。ただし、この動作点は一方のストリングのみの測定結果であり、理論上では1ストリング時と同じ値となる筈であるが、実際には漏電が生じているため、水没していない時のように、きれいな2並列回路として動作していないものと考えられる。

結果として、接続箱に触れた場合の感電リスクは同等だが、離れてもリスクが残りやすいのは動作点が電流寄りの1ストリング時であることが分かる。

表 6-27 接続時と実験③-1 1ストリング接続時の比較 (▲：マイナス値)

1ストリング(モジュール5枚)												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底の アルミ 板	無	無	有	0.5	0.9	0.2	0.9	—	145.0	4.05	138.0	89
			無	0.4	0.5	▲0.2	0.3	—	154.5	4.43	153.0	347
	有	無	有	0.8	2.4	2.5	3.9	—	113.0	5.05	111.5	359
			無	1.2	7.4	11.8	19.9	—	150.7	4.71	149.2	353
(4) 池外の 地面	無	無	有	▲0.1	0.5	▲0.3	0.5	—	140.8	4.10	149.0	409
			無	▲0.2	0.0	▲0.7	0.0	—	157.0	4.57	156.3	397
	有	無	有	0.3	2.0	2.5	4.3	—	126.0	5.55	124.2	390
			無	0.5	7.8	11.1	18.5	—	148.0	4.28	146.8	403
2ストリング(モジュール5枚×2並列)												
(2) 水底の アルミ 板	無	無	有	0.6	0.6	0.8	0.9	—	172.4	2.54	171.3	461
			無	0.6	0.6	0.5	0.4	—	172.3	2.53	171.2	451
	有	無	有	0.6	0.7	1.3	3.3	—	167.6	3.94	166.2	446
			無	0.6	1.2	5.4	22.1	—	172.5	2.76	171.3	445
(4) 池外の 地面	無	無	有	0.0	▲0.1	0.0	0.0	—	172.4	2.76	171.3	379
			無	0.0	▲0.1	▲0.2	▲0.3	—	172.5	2.73	171.3	376
	有	無	有	0.0	0.0	0.8	1.3	—	165.4	4.21	163.9	373
			無	0.0	0.5	11.3	17.6	—	172.2	3.01	171.1	372

(4) 断線有無

断線箇所がある場合、他の実験と同様の箇所を水中で測定しても、目立った感電リスクは見られなかった。これは電流パスが接続箱の導体部でなくなり、断線箇所になったことを意味する。このような状態の場合、漏電箇所から1m以上離れていても安全とは言い切れない。断線箇所との距離別の測定結果は図6-23（図6-16の再掲）のとおりである。これを距離別にグラフにプロットしたものが図6-24である。

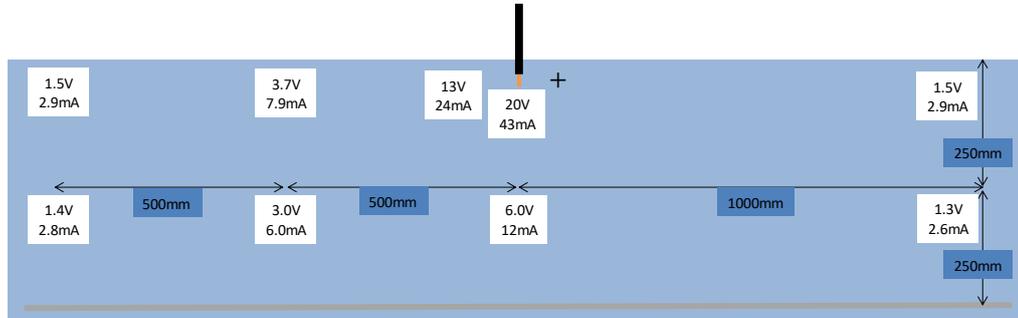


図 6-23 断線箇所と漏電電流

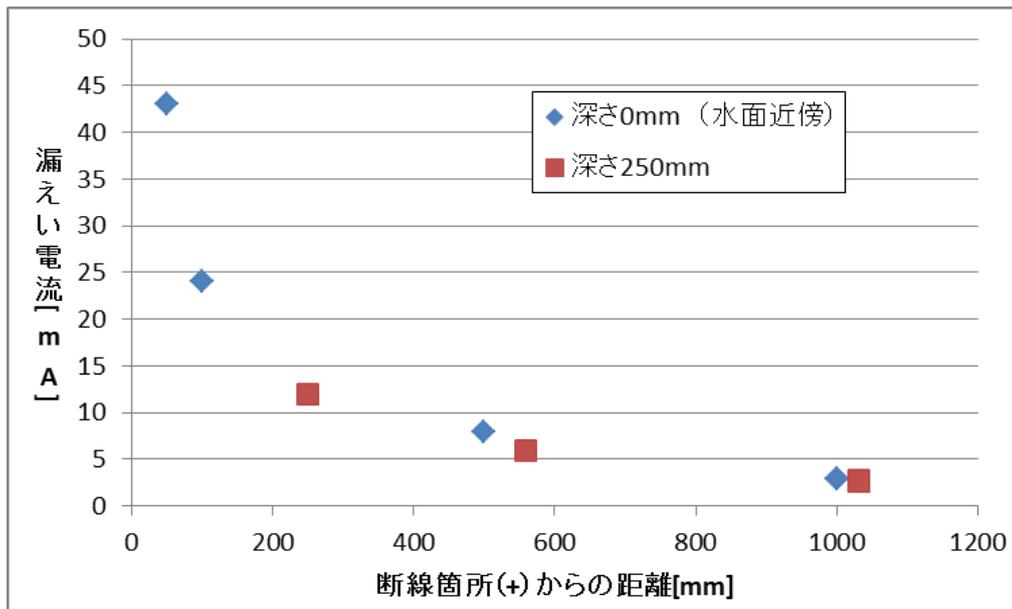


図 6-24 断線箇所と漏電電流グラフ

6.4.1.3 人間の状態（測定方法）

測定方法による違いを表6-28（表6-12の再掲）に示す。感電リスクの大きさは、大きい順に（2）水底＞（4）池外＞（1）水中浮遊＞（3）ボート上である。

基本的に、足が地面についている状態である（2）と（4）が人体を電流が流れ易い状態である。今回は（2）の方が（4）より感電リスクが高い結果となったが、これは接地極間の電位差が生じており、状況により容易に変わるものと考えられる。

また、（3）ボート上については、今回の実験では感電リスクは見られなかったが、これ

は足がボート上に有り、手から足に流れる電流に限った話で、両手を水中につけた場合等のように、水中から水中に電流が流れる状況になった場合は（１）水中浮遊と同様に感電リスクは生じるものと考えられる。

表 6-28 測定方法比較（▲：マイナス値）

測定方法	接地状況			測定箇所							動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手	モジュールフレーム	モジュール表面				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(1) 水中浮遊	無	有	有	0.0	0.1	0.0	0.2	—	0.1	0.0	37.3	0.89	36.40	560
			無	0.1	0.1	0.0	0.1	—	0.1	0.1	37.3	0.90	36.40	555
		無	有	0.0	0.2	0.0	0.2	—	0.1	0.0	37.3	0.90	36.40	552
			無	0.1	0.1	0.0	0.1	—	0.1	0.1	37.3	0.90	36.40	554
	有	有	有	▲0.3	0.3	0.4	0.6	—	0.1	▲0.1	36.7	1.37	35.80	542
			無	▲0.7	0.6	1.1	2.4	—	▲0.1	▲0.4	37.1	0.99	36.20	541
		無	有	▲0.3	0.4	0.4	0.8	—	0.1	▲0.1	36.7	1.37	35.70	544
			無	▲0.7	0.6	1.3	2.4	—	▲0.1	▲0.5	36.6	0.99	36.20	534
(2) 水底のアルミ板	無	有	有	0.4	0.7	0.5	0.6	—	0.5	0.4	36.9	0.92	36.05	518
			無	0.3	0.3	0.1	0.2	—	0.2	0.2	37.0	0.92	35.40	327
		無	有	0.3	0.6	0.4	0.5	—	0.4	0.3	35.0	0.87	35.64	406
			無	0.2	0.2	0.0	0.1	—	0.1	0.1	32.7	0.80	31.88	198
	有	有	有	0.6	1.6	1.7	2.1	—	1.0	0.6	36.3	1.34	34.60	425
			無	0.8	3.0	3.6	4.1	—	1.6	1.0	37.0	1.00	36.12	557
		無	有	0.7	1.6	1.7	1.9	—	1.1	0.6	30.5	1.25	31.05	235
			無	0.9	3.0	3.3	4.7	—	1.7	0.9	36.8	0.99	35.88	505
(3) ボート上	無	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.14	524
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.14	522
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.13	515
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.13	518
	有	有	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.14	524
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.14	522
		無	有	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.13	515
			無	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—	37.0	0.92	36.13	518
(4) 池外の地面	無	有	有	0.0	0.2	0.0	0.2	—	0.1	0.0	36.6	0.91	35.71	459
			無	▲0.1	▲0.1	▲0.3	▲0.1	—	▲0.2	▲0.2	36.6	0.91	35.70	455
		無	有	▲0.1	0.2	0.0	0.2	—	0.0	▲0.1	36.5	0.91	35.65	451
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.4	▲0.2	—	▲0.2	▲0.2	36.5	0.91	35.59	443
	有	有	有	0.1	0.9	0.9	1.4	—	0.6	0.3	21.0	0.73	22.00	162
			無	0.2	2.0	2.2	3.6	—	1.1	0.4	36.4	0.98	35.50	438
		無	有	0.1	0.9	1.0	1.5	—	0.5	0.2	35.8	1.34	34.85	442
			無	0.2	2.0	2.7	3.6	—	0.7	0.4	36.3	0.98	35.38	430

6.4.2 漏電回路の考察

これまでの結果から、漏電ルートを把握し、場所による感電リスクを考察する。

(1) 漏電箇所との距離と感電リスク

図 6-24 を見れば、漏電箇所が断線した 1 点であれば、そこから 1 m 程度離れられれば、しびれ程度に抑えられると言える。しかし、それは今回の実験環境下に限るため、引き続き、システム実験等でデータを取得していく必要がある。

(2) 漏電ルートについて

1) 断線無しの場合

負極接地有、筐体接地無の状態がリスクは高いことを踏まえると、負極接地及び筐体接地の有無で図 6-25 のように漏電ルートが変わってくると考えられる。

図の右側のように、負極接地有、筐体接地無の場合、人体と負極接地の 2 点地絡で、きれいに人体を通る電流パスができてしまう。これが最もリスクの高い状態である。一方、図の左側のように、筐体接地がある場合は、ない場合と比べ、人体に流れていた電流の一部が筐体接地に流れ込むため、感電リスクが低減できる。

一方、負極接地がない場合、人体から大地に流れた電流が負極に戻る有線のルートがないため、感電リスクは格段に低下する。

なお、図 6-26 のようなシステム構成で、設備の接地線の合計電流を測定して、その計測値は 0.00 mA であった旨は既に述べたが、測定棒を入水・接触したタイミングだけ電流値を検知したケースがあった。それは、測定方法 (4) の池外の地面の場合である。その電流値は測定棒に流れる電流と向きが逆で大きさが同じであった。

これは図 6-26 のとおり、設備の接地線は池底の大地を再現するための接地と共用で、測定棒用の接地に関しても、池の中に足がある前提の測定方法 (2) では池底の大地から設置を取っていることになる。この場合、図 6-27 の上の図のように、共用している接地端子へ電流が流れない。逆に測定方法 (4) は測定棒用の接地は設備用と別の接地端子を使用しているため、図 6-27 の下の図のように測定棒の接地端子と測定棒以外で共用している接地端子間で大地を介して電流が流れたと考えられる。

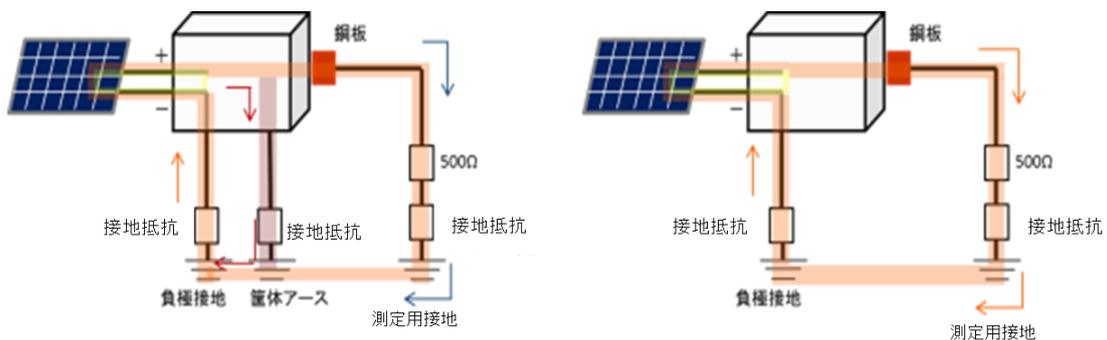


図 6-25 負極接地の漏電経路

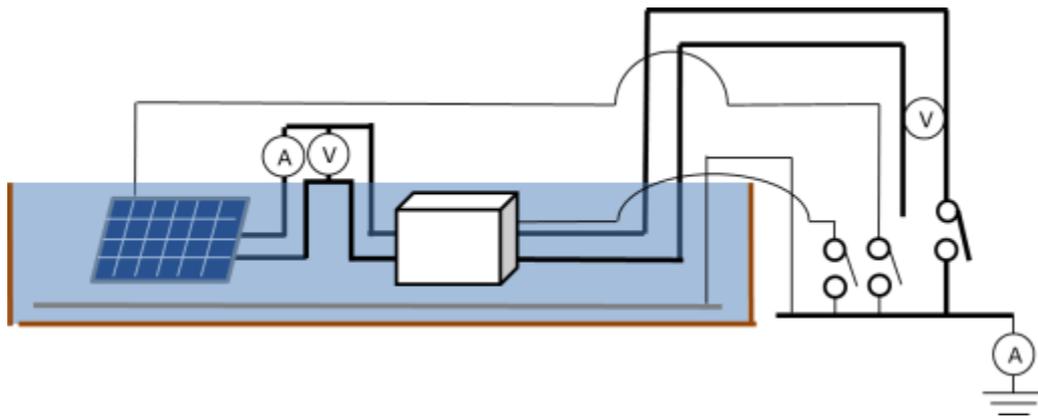
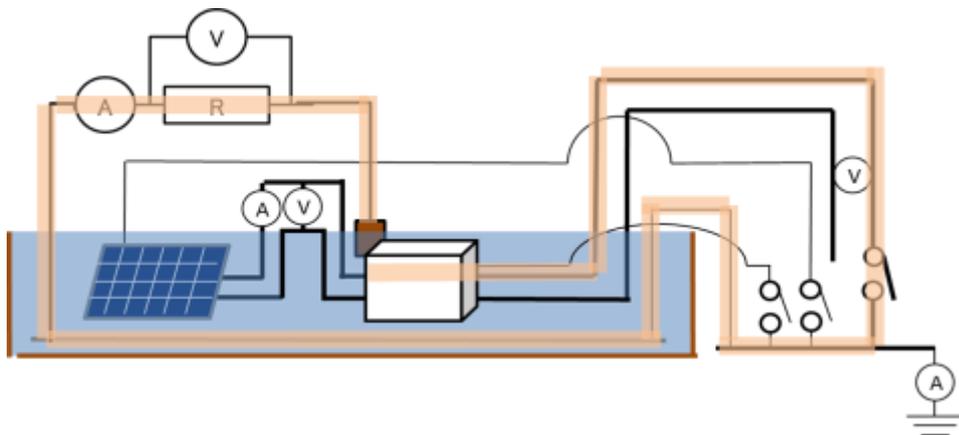
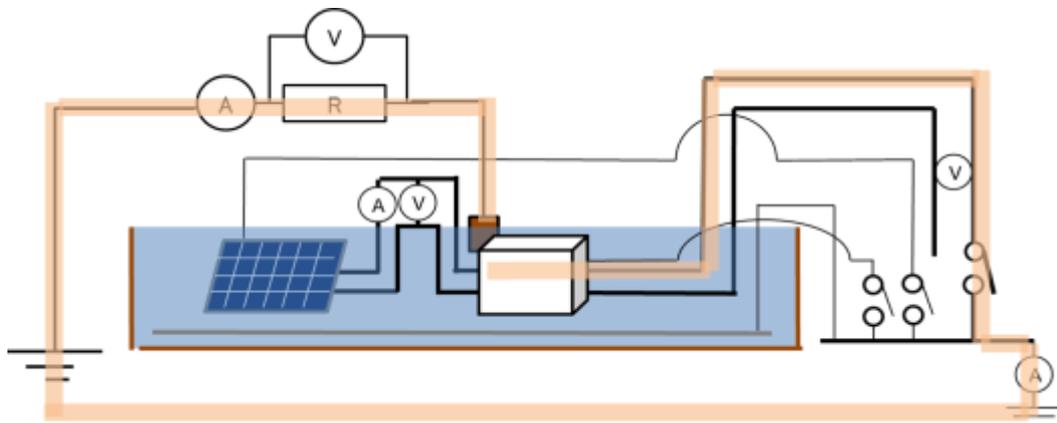


図 6-26 単体実験システム



測定方法(2)



測定方法(4)

図 6-27 接地線に流れる電流（負極接地有の場合）

2) 断線している場合

接続箱より太陽電池モジュール側でむき出しになっているため、断線部・正極側で大部分の漏電が起こっている。そのため、断線部付近に測定棒を近づけた場合に感電リスクが高くなるが、感電箇所からの電流ルートは図 6-27 と同様と考えられる。

6.4.3 その他

通電中、漏電箇所（接続箱、断線箇所等）から、気泡の発生が見られた。この点について、水没後の考察を含めて8章に記述する。

7. システム実験の実施及び結果

ここでは、システム実験の実施状況を説明する。

7.1 システム実験の準備

7.1.1 池の準備

自然に近い水質で実験を行うため、単体実験とは異なり水質調整は行わなかった。ただし、池の水位を維持するため、隣の浸透池及び消火栓から給水したことによって、水質には変化が生じている。水質は実験時の条件として実験結果に併記する。

なお、池の概略図は図 7-1 に示すとおりである。

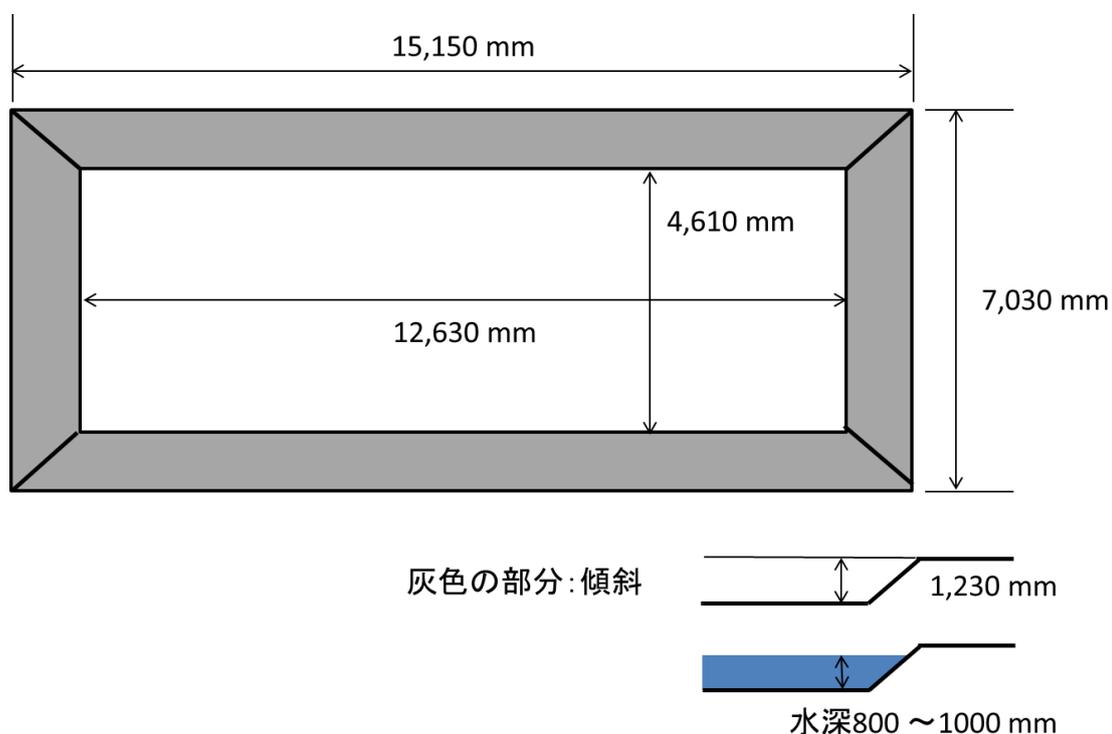


図 7-1 浸透池概略図

7.1.2 測定時のシステム構築

まず、水没させる太陽光発電システムを構築（図 7-2）した。陸地で太陽電池アレイを組み、実験に応じて接続箱、PCSを取付け／取外しを行った。システムの構成は

図 7-3 のとおりである。単体実験時と基本構成は同じだが、感電リスクとの関連が小さいと思われるフレーム接地は省略した。また、計測箇所も筐体の電圧、接地に流れる電流は省略した。

架台に用いた単管パイプ、取付治具は表 7-1 のとおりである。太陽電池、接続箱、PCS は単体実験と同じ種類で、水没させていない新品を使用した。

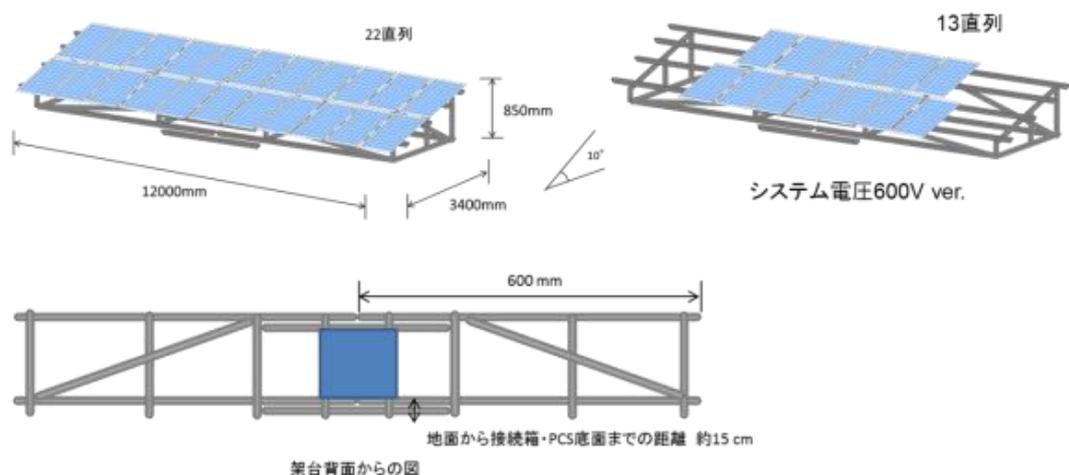
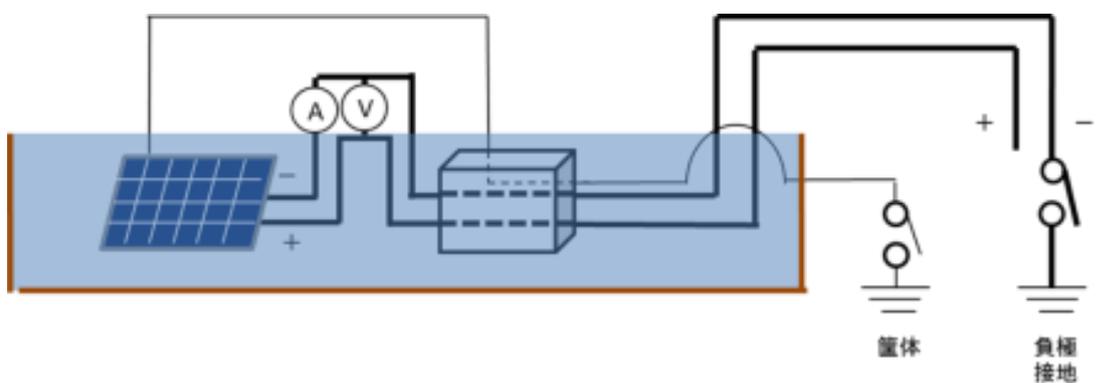
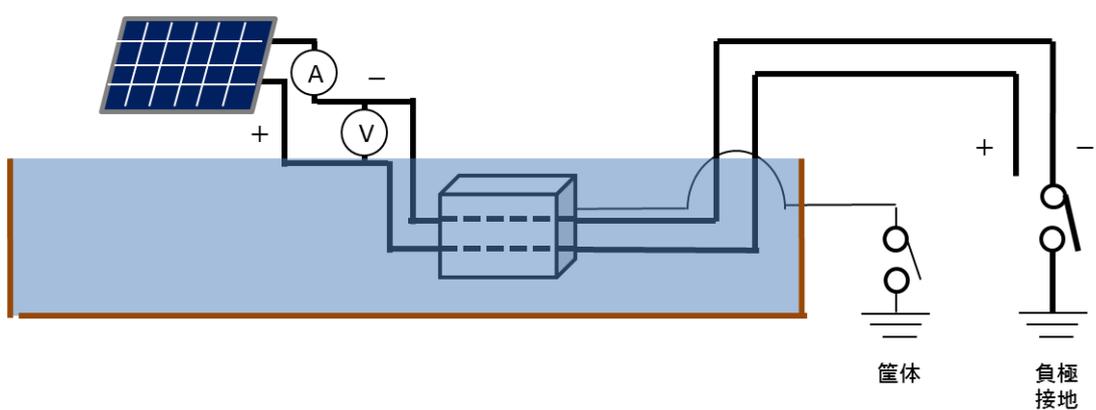


図 7-2 水没させる太陽光発電システム



完全水没



半分水没

図 7-3 システム実験時のシステム構成

表 7-1 架台材料

項目	単管パイプ	架台組立治具	太陽電池・PCS・ 接続箱 取付治具
品名・品番	スーパーライト 700	—	C-486-A C-486-D C-486-H
メーカー	大和鋼管工業	—	タキゲン製造株式会社
素材	鋼(溶融亜鉛めっき)	鋼	高耐食溶融めっき鋼板
サイズ	φ 48.6mm 厚さ 1.8mm	φ 48.6mmの単管パイ プに固定可能	φ 48.6mmの単管パイ プに固定可能
外観			 C-486-A C-486-D C-486-H

出所) モノタロウウェブサイト, <https://www.monotaro.com/g/02476950/>、2018年1月31日取得(パイプ写真)

出所) モノタロウウェブサイト, <https://www.monotaro.com/g/02602561/>、2018年1月31日取得(架台治具写真)

出所) あしばバンクウェブサイト, <https://www.ashiba-bank.com/goods-new/panel-clamp.html>、2018年1月31日取得(取付治具写真)

7.1.3 測定棒・接地の準備

測定棒は基本的に単体実験時と同じであるが、柄には長い棒を使用した。棒の素材は表 7-2 に、外観は図 7-4 のとおりである。計測機類は単体実験と同じものを使用した。測定棒の情報を表 7-2 に記載した。

測定に際して、池周辺には接地端子が無いいため、接地棒として、測定棒用の接地及び筐体、負極接地を

図 7-5 のように打ち込んだ。それぞれの位置関係は図 7-6 のとおりである。

それぞれの接地棒の接地抵抗も計測しており、その結果は表 7-3 のとおりである。なお、測定方法(2)は足が水底にある場合、測定方法(4)は足が池底にある場合を模擬した状態のことである。

表 7-2 測定棒仕様

項目	測定棒本体	測定プローブ端
素材等	グリップ・先端部:ポリエチレン、ポリプロピレン 柄:アルミ合金、スチール(ポリプロピレン被覆)	銅 (C1220P)
仕様等	長さ 200~500cm(可変)	120×100×0.5mm
外観	図 7-4 参照	



図 7-4 測定棒外観

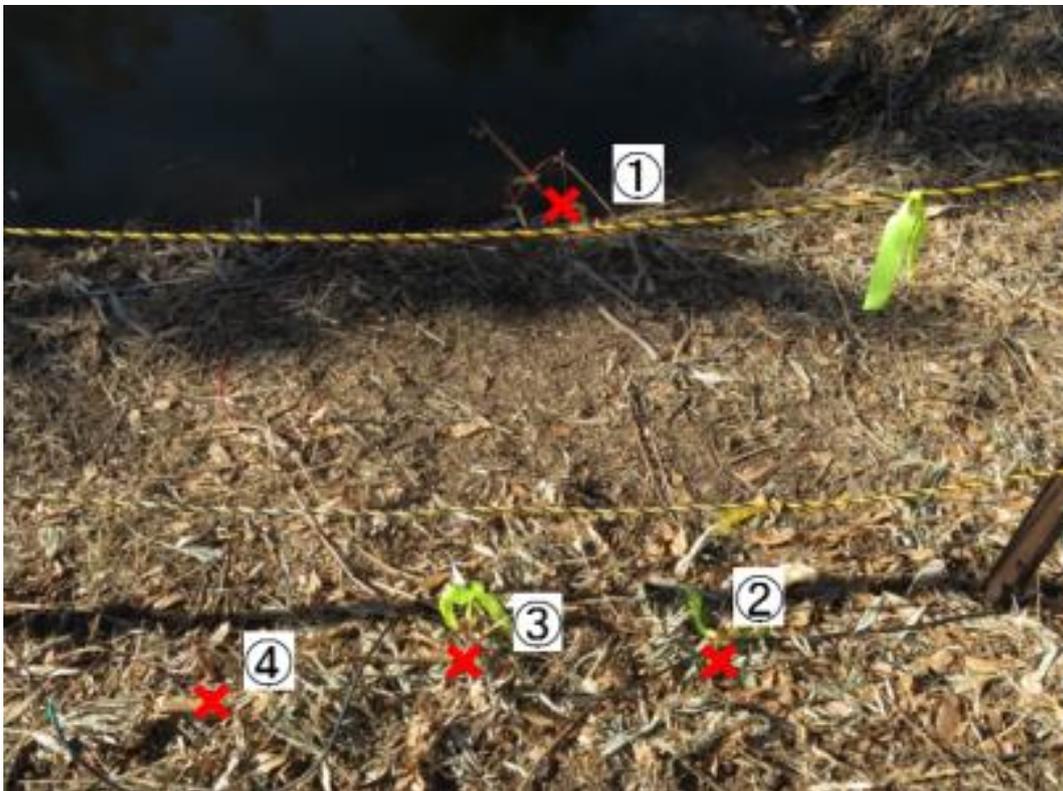
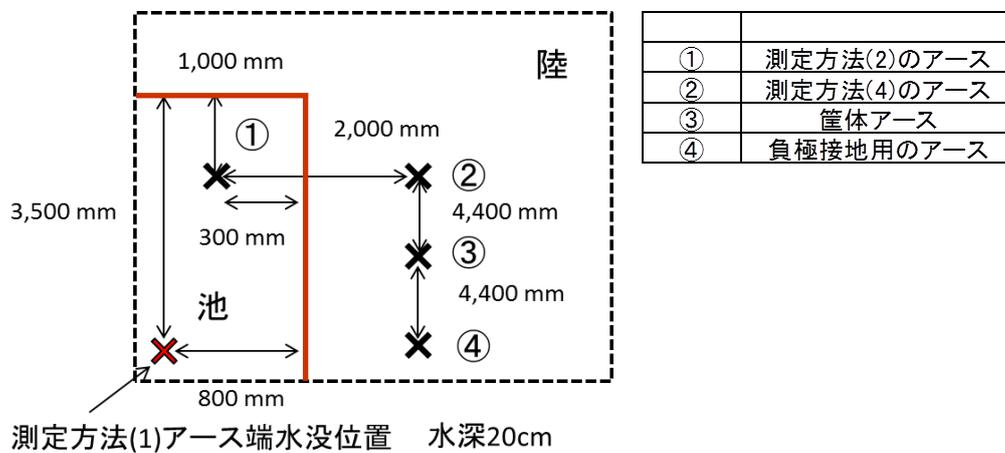
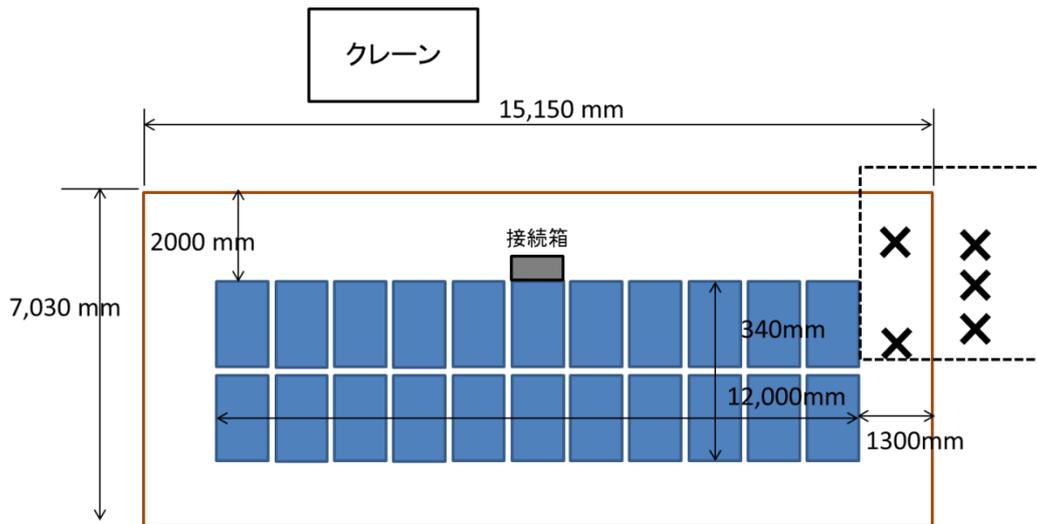


図 7-5 接地棒写真



点線枠内拡大図

図 7-6 接地極位置関係

表 7-3 接地抵抗

No	役割	接地抵抗[Ω]
①	測定方法(2)のアース	60.4
②	測定方法(4)のアース	73.1
③	筐体アース	70.2
④	負極接地	90.6

7.2 システム実験の実施手順

システム実験の実施手順は以下のとおりとした。

- (1) システムを組み、水没させる。(全水没状態)
- (2) 接地条件等を決める。
- (3) 測定棒のアース端の状態を決める。

- (4) 各ポイントで測定する。
- (5) 水揚げし、接続箱若しくはPCSをシステムから取り外す。
- (6) 接続箱若しくはPCSのみ水没させる。(半分水没状態)
- (7) 半水没状態で(2)～(4)を実施する。
- (8) 水揚げし、次のシステムに組み替える。

この1サイクルを実験の1単位とし、その全体像を表7-4に示し、それぞれのシステム構成は測定結果に併記する。

- 実験②、③、④、⑤は単体実験で実施した各接続箱をシステムに組み込み、同条件で実験を行う。
- 実験⑥、⑦についても単体実験で実施した夫々2ストリングの場合、1番電位の高い箇所が破損している状態での実験である。
- 実験①は実験②の水質を変えた場合で、システム構成としては実験②と同様である。
- 実験⑤は低圧個人所有の所謂600Vシステムを想定したもので太陽電池モジュールは13直列で構成した。他は高圧事業者が所有している所謂1,000Vシステムを想定したもので太陽電池モジュールは22直列で構成した。

それぞれの実験に対して、一部を除き太陽光発電システム全体を水没させる全水没状態と接続箱若しくはPCSのみを水没させる半分水没状態の両方で測定を行った。

水中の測定箇所は図7-7の赤丸(●)に示すとおりで、他に筐体扉・筐体取手・取付治具を測定した。また、太陽電池モジュールのフレームと表面も単体実験と同様に測定した。

測定方法は単体実験と同様、(1)アース端水中、(2)アース端水底、(3)アース端ポート上及び(4)アース端池外の地面の4パターンとした。測定方法は表7-5に示す。

この測定箇所と測定方法は①～⑦のそれぞれの実験に対して全て実施したのではなく、単体実験の結果やシステム実験上で必要性が低いと判断できた箇所・方法は省略した。

半分水没においては、水位が低いときの想定であるため、アース端が水中に浮遊している測定方法(1)は実施しない。

測定結果のリスク判定についても表6-7に示される単体実験と同様の基準(しきい値は2mA、20mA、150mA)で判定した。測定風景の様子を図7-8に示す。

表 7-4 システム実験概要

実験 No	システム構成				その他
	太陽電池モジュール		接続箱・PCS		
	直列数	水没状態	筐体	逆流防止保護	
①	22	有	鋼板	ダイオード	水の濁り大
②	22	有 無	鋼板	ダイオード	
③	22	有 無	鋼板	ヒューズ	
④	22	有 無	樹脂	ヒューズ	
⑤	13	有 無	鋼板	—	
⑥	22(2 並列)	有/無	鋼板	ダイオード	1ストリングのみ水没
⑦	22	有 無	鋼板	ダイオード	直流ケーブル破損

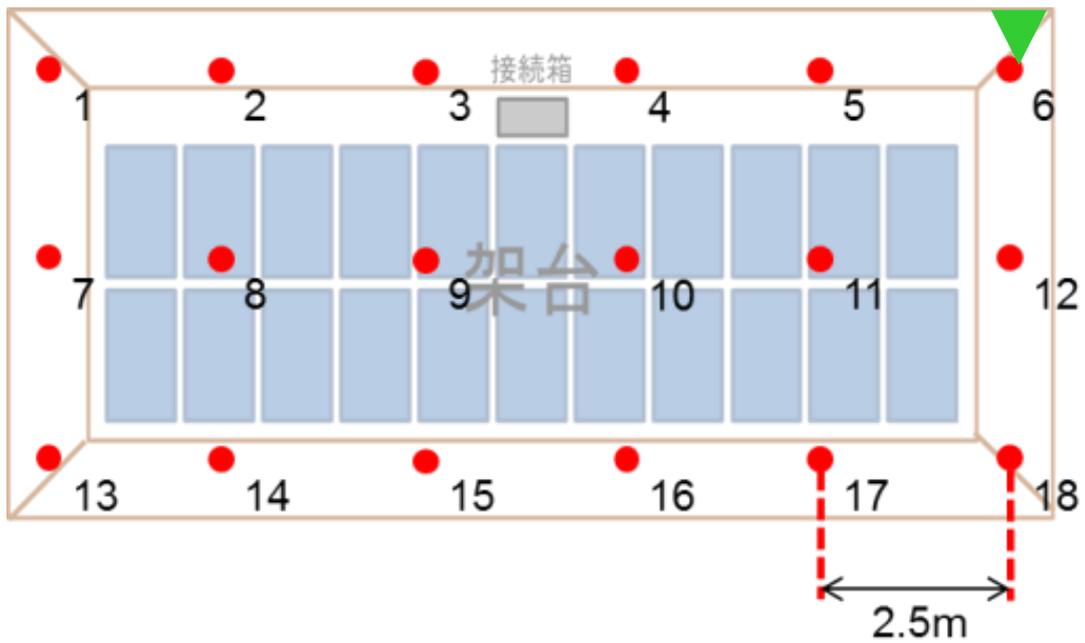
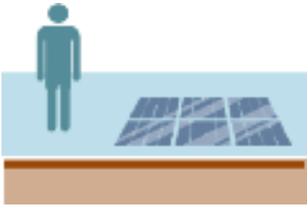
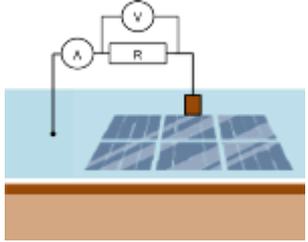
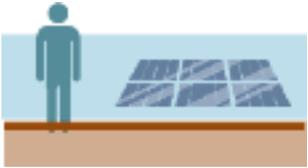
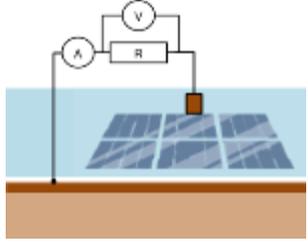
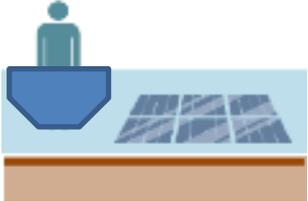
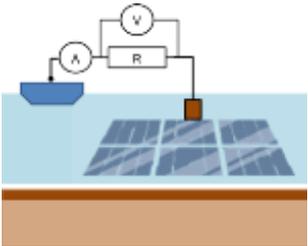
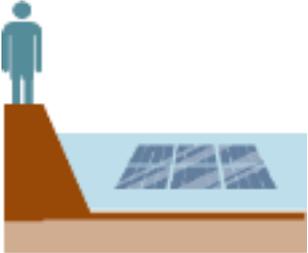
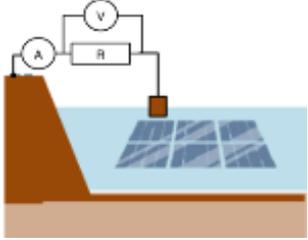


図 7-7 水中の測定箇所（水中での測定箇所（●）と測定器のアース端の位置（▼）

表 7-5 システム実験時の測定方法

測定方法 No	活動	測定器アース端の状態
(1)	水中で救助している(浮いた状態) 	水中に浮かせる(水中) 
(2)	水中で救助している(足をつけた状態) 	水底と接触(池底) 
(3)	水上で、ゴムボートに乗っている 	ボートに乗せる(ボート上) 
(4)	陸に立っている(地面は湿りあり) 	池外の地面と接触(池外の地面) 



完全水没時の測定状況



半分水没時の測定状況

図 7-8 測定の外観

7.3 システム実験の結果

以下にシステム実験の結果を記載する。測定値結果は図 7-7 のナンバリングに則り、図 7-9 の配置のとおり記載する。各測定結果の表付近に凡例として併記する。

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュール フレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール 表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

図 7-9 測定結果記載方法

7.3.1 実験① 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いた場合（水の濁りが大きい場合）

水の濁りの影響を受光の観点及び電気伝導度の観点から検証するために、水を攪拌し濁りが大きい条件で水没させた。攪拌前後の様子は図 7-10 のとおりで、電気伝導度の参考値を表 7-6 に示す。

測定については表 7-7 のとおり、完全水没のみ測定方法（2）と（4）で実施した。目立った感電リスクはなかった。



図 7-10 攪拌前後の池の状態

表 7-6 一般的な水の電気伝導度

	電気伝導度 [Ω]
雨水	1 ~ 3
河川上流のきれいな水	5 ~ 10
河川下流の汚い水	20 ~ 40

出所) 和歌山県, <http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/032000/gakusyu/modelschool/houkoku-pdf/misu/mi-shiryoku2.pdf>、2018年2月15日取得

表 7-7 実験① 接続箱（鋼板・ダイオード）水の濁り大 測定結果（▲：マイナス値）

水質等：水温 9.0[°C] 濁度 74.7[NTU] 電気伝導度 11.9[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]						
(2) 池底	有	無	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	14.6	0.15	115
			0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2			
			0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	▲1.0				
(4) 池外の 地面	有	無	—	—	—	0.9	—	0.8	1.1	0.7	20.8	0.23	100 未満
			—	—	—	—	—	—	1.1	0.6			
			—	—	—	0.8	—	0.7	0.2				

測定箇所

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18

筐体扉	モジュール フレーム
筐体取手	モジュール 表面
筐体取付具	

7.3.2 実験② 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いた場合

これ以降の実験では、水の濁りは自然状態で実施した。
 実験②は、実験①と同じシステム構成で実施している。

(1) 完全水没の場合

完全水没の結果は表 7-8 のとおりで、負極接地有、筐体接地無がリスクの高い傾向であった。測定方法は(4) 池外にアース端がある場合のリスクが高い傾向にあった。また、濁りが大きい場合よりリスクが高い。

表 7-8 実験② 接続箱（鋼板・ダイオード）完全水没 測定結果（▲：マイナス値）

水質等：水温 7.5[°C] 濁度 1.8[NTU] 電気伝導度 12.1[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]
(1) 水中	有	有	-	-	-	0.3	-	0.1	0.3	1.0	76.7	0.91	227
			-	-	-	-	-	-	1.3	1.0			
			-	-	-	0.2	-	0.0	▲0.4				
	有	無	-	-	-	0.3	-	▲0.3	0.4	0.6	115.2	1.43	135
			-	-	-	-	-	-	2.0	0.6			
			-	-	-	0.6	-	▲0.1	▲0.1				
	無	有	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	106.4	1.21	139
			-	-	-	-	-	-	0.3	0.0			
			-	-	-	0.0	-	0.0	▲1.0				
	無	無	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	73.4	0.82	145
			-	-	-	-	-	-	0.2	0.0			
			-	-	-	0.0	-	0.0	▲1.0				
(2) 池底	有	有	-	-	-	0.7	0.6	0.2	0.8	0.3	73	0.88	112
			-	-	-	0.8	0.7	0.4	1.8	0.5			
			-	-	-	0.7	0.6	0.4	▲0.1				
	有	無	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.5	0.9	0.9	60.4	0.73	104
			1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	0.7	2.1	0.8			
			1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.6	0.4				
	無	有	-	-	-	0.1	-	0.1	0.1	0.1	64.4	0.69	103
			-	-	-	-	-	-	0.2	0.1			
			-	-	-	0.1	-	0.1	0.1				
	無	無	-	-	-	0.1	-	0.1	0.0	▲1.0	62.5	0.68	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.1	0.1			
			-	-	-	0.1	-	0.0	▲1.4				
(4) 池外の地面	有	有	1.6	-	1.6	1.7	-	1.4	1.6	1.7	51.4	0.62	118
			-	-	-	-	-	-	2.6	1.6			
			-	-	-	1.7	-	1.5	1.3				
	有	無	-	-	-	2.0	-	1.7	2.0	2.1	59.1	0.66	151
			-	-	-	-	-	-	3.2	1.9			
			-	-	-	2.4	-	1.9	2.1				
	無	有	-	-	-	0.3	-	0.2	0.2	0.3	71.6	0.76	144
			-	-	-	-	-	-	0.5	0.2			
			-	-	-	0.3	-	0.2	▲1.2				
	無	無	-	-	-	0.1	-	0.1	0.1	0.1	85.2	0.93	252
			-	-	-	-	-	-	0.2	0.0			
			-	-	-	0.1	-	0.1	▲1.4				

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュール フレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール 表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

(2) 半分水没の場合

半分水没の結果は表 7-9 のとおりで、完全水没時より相対的に感電リスクが高い。負極接地有、筐体接地無がリスクの高い傾向で、測定方法（4）の池外にアース端がある場合のリスクが高い傾向は完全水没と同様である。

表 7-9 実験② 接続箱（鋼板・ダイオード）半分水没 測定結果（▲：マイナス値）

水質等： 水温 7.5[°C] 濁度 1.8[NTU] 電気伝導度 12.1[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]						
(2) 池底	有	有	—	—	—	0.9	0.4	0.1	1.5	—	75.2	0.84	100 未満
			—	—	—	1.0	0.4	0.1	3.3	—			
			—	—	—	0.5	0.3	0.2	8.8	—			
	有	無	0.8	1.0	1.9	1.7	0.8	0.5	3.0	—	61.3	0.68	100 未満
			0.8	0.8	1.3	1.1	0.6	0.2	8.2	—			
			0.6	0.8	0.7	0.7	0.5	0.3	6.0	—			
	無	有	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—			
			—	—	—	—	—	—	—	—			
	無	無	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—			
			—	—	—	—	—	—	—	—			
(4) 池外の地面	有	有	—	—	—	0.6	—	0.2	0.9	—	47.6	0.47	100 未満
			—	—	—	—	—	—	2.9	—			
			—	—	—	0.3	—	0.1	1.3	—			
	有	無	—	—	—	2.1	—	0.9	2.5	—	52.3	0.57	100 未満
			—	—	—	—	—	—	5.9	—			
			—	—	—	1.7	—	1.2	12.0	—			
	無	有	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—			
			—	—	—	—	—	—	—	—			
	無	無	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—			
			—	—	—	—	—	—	—	—			

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュール フレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール 表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

7.3.3 実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）を用いた場合

実験②と同様の測定を接続箱の種類を変えて行った。実験の実施日が異なるため、水質等も異なる。

(1) 完全水没の場合

完全水没の結果は表 7-10 のとおりである。負極接地有、筐体接地無がリスクの高い傾向であり、測定方法（4）の池外にアース端がある場合のリスクが高い傾向は、完全水没と同様である。

実験②より相対的に大きい電流が流れているが、この実験日の方が日照条件は良い。

表 7-10 実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）完全水没 測定結果（▲：マイナス値）

水質等： 水温 7.7[°C] 濁度 4.1[NTU] 電気伝導度 21.7[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]
(1) 水中	有	有	-	-	-	1.1	-	0.1	1.8	1.0	214.2	1.66	245
			-	-	-	-	-	-	2.9	1.0			
			-	-	-	1.3	-	0.4	1.3	/			
	有	無	-	-	-	1.3	-	-0.2	2.2	1.0	220	1.71	316
			-	-	-	-	-	-	8.1	1.0			
			-	-	-	1.5	-	0.4	1.6	/			
	無	有	-	-	-	0.1	-	0.1	▲0.1	0.1	235.5	1.44	176
			-	-	-	-	-	-	0.0	0.0			
			-	-	-	0.1	-	0.1	▲0.9	/			
	無	無	-	-	-	0.1	-	0.0	0.0	0.1	241.4	1.48	334
			-	-	-	-	-	-	0.2	0.0			
			-	-	-	0.1	-	0.1	▲0.9	/			
(2) 池底	有	有	-	-	-	1.8	1.5	1.0	2.3	1.8	152.8	1.24	311
			-	-	-	2.4	2.3	1.6	3.3	2.0			
			-	-	-	2.1	2.0	1.6	2.0	/			
	有	無	2.5	2.5	2.4	2.5	2.0	1.2	2.8	2.4	154.6	1.21	203
			2.9	2.8	2.8	2.8	2.9	2.5	7.8	2.1			
			2.7	2.8	2.6	2.5	2.5	2.1	3.1	/			
	無	有	-	-	-	▲0.1	-	▲0.1	▲0.2	▲0.1	176.9	1.08	284
			-	-	-	-	-	-	▲0.2	▲0.1			
			-	-	-	▲0.1	-	▲0.1	▲0.2	/			
	無	無	-	-	-	▲0.1	-	▲0.1	▲0.2	▲0.1	180.3	1.11	150
			-	-	-	-	-	-	▲0.2	▲0.1			
			-	-	-	▲0.1	-	▲0.1	▲0.2	/			
(4) 池外の地面	有	有	-	-	-	6.4	-	5.5	6.3	5.6	160.1	1.27	336
			-	-	-	-	-	-	11.9	5.4			
			-	-	-	5.8	-	5.6	7.6	/			
	有	無	-	-	-	9.0	-	8.0	9.3	9.3	166.5	1.3	282
			-	-	-	-	-	-	14.5	8.4			
			-	-	-	9.3	-	8.6	11.5	/			
	無	有	-	-	-	0.1	-	0.1	0.0	0.2	187.7	1.14	264
			-	-	-	-	-	-	0.2	0.1			
			-	-	-	0.3	-	0.2	▲1.2	/			
	無	無	-	-	-	▲0.1	-	0.0	▲0.1	▲0.1	191.2	1.16	121
			-	-	-	-	-	-	▲0.1	▲0.1			
			-	-	-	0.0	-	▲0.1	▲1.2	/			

測定箇所

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18

筐体扉	モジュール フレーム
筐体取手	モジュール 表面
筐体取付具	

(2) 半分水没の場合

半分水没の結果は表 7-11 のとおりである。完全水没時より相対的に感電リスクが高く、自力で脱出困難なレベルに達した。負極接地有、筐体接地無がリスクの高い傾向であり、測定方法（4）の池外にアース端がある場合のリスクが高い傾向は、完全水没と同様である。

表 7-11 実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）半分水没 測定結果（▲：マイナス値）

水質等： 水温 7.7[°C] 濁度 4.1[NTU] 電気伝導度 21.7[mS/m]

測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]						
(2) 池底	有	有	—	—	—	11.2	5.5	1.5	27.0	—	628	5.34	600
			—	—	—	13.7	5.7	1.4	60.0	—			
			—	—	—	8.6	5.1	2.6	96.0	—			
	有	無	12.0	14.2	26.5	19.1	8.6	2.3	45.0	—	632.3	4.76	606
			11.4	13.6	22.0	23.2	10.3	3.9	86.0	—			
			10.7	11.8	13.7	14.1	9.2	5.4	100.0	—			
	無	有	—	—	—	0.0	—	0.0	0.1	—	703	4.86	498
			—	—	—	—	—	—	4.9	—			
			—	—	—	0.1	—	0.0	0.0	—			
	無	無	—	—	—	0.0	—	0.0	-0.3	—	705	4.77	477
			—	—	—	—	—	—	▲5.5	—			
			—	—	—	0.1	—	0.0	0.5	—			
(4) 池外の地面	有	有	—	—	—	23.7	—	4.9	33.0	—	620	5.4	544
			—	—	—	—	—	—	66.0	—			
			—	—	—	10.4	—	5.2	98.0	—			
	有	無	—	—	—	41.3	—	21.8	71.0	—	629.9	5.23	543
			—	—	—	—	—	—	116.0	—			
			—	—	—	30.7	—	25.2	123.0	—			
	無	有	—	—	—	0.1	—	0.0	0.0	—	668.3	4.39	519
			—	—	—	—	—	—	▲4.7	—			
			—	—	—	0.0	—	0.0	0.0	—			
	無	無	—	—	—	0.0	—	0.0	▲0.3	—	651.6	4.24	484
			—	—	—	—	—	—	▲4.0	—			
			—	—	—	0.1	—	0.0	▲0.2	—			

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュールフレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

7.3.4 実験④ 接続箱（樹脂・ヒューズ）を用いた場合

実験②、③と同様の測定を接続箱の種類を変えて行った。実験の実施日が異なるため、水質等は異なる。

(1) 完全水没の場合

完全水没の結果は表 7-12 のとおりである。日照条件が悪かったため、感電リスクを示す測定値は現れなかった。

表 7-12 実験④ 接続箱（樹脂・ヒューズ）完全水没 測定結果（▲：マイナス値）

水質等： 水温 7.7[°C] 濁度 4.1[NTU] 電気伝導度 21.7[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	[V]	[A]							
(1) 水中	有	有	-	-	-	0.2	-	0.1	0.4	0.2	37.1	0.19	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.5	0.1			
			-	-	-	0.2	-	0.1	▲0.7	/			
	有	無	-	-	-	0.2	-	0.1	0.3	0.1	31.5	0.16	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.4	0.1			
			-	-	-	0.2	-	0.1	▲0.6	/			
	無	有	-	-	-	0.1	-	0.1	0.1	0.1	34.9	0.16	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.1	0.1			
			-	-	-	0.1	-	0.0	▲0.8	/			
	無	無	-	-	-	0.1	-	0.0	0.1	0.0	34.2	0.16	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.1	0.0			
			-	-	-	0.1	-	0.1	▲0.9	/			
(2) 池底	有	有	-	-	-	0.3	0.2	0.2	0.8	0.3	44.2	0.25	100 未満
			-	-	-	0.4	0.3	0.3	1.0	0.2			
			-	-	-	0.3	0.3	0.3	▲0.9	/			
	有	無	0.4	0.3	0.5	0.3	0.3	0.1	0.6	0.3	46.8	0.23	135
			0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.8	0.2			
			0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	▲0.9	/			
	無	有	-	-	-	0.1	-	0.1	0.1	0.1	50.2	0.24	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.1	0.0			
			-	-	-	0.1	-	0.1	▲1.3	/			
	無	無	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	46.6	0.22	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.0	0.0			
			-	-	-	0.0	-	0.0	▲1.5	/			
(4) 池外の地面	有	有	-	-	-	0.8	-	0.6	1.0	0.7	37.6	0.19	100 未満
			-	-	-	-	-	-	1.2	0.7			
			-	-	-	0.8	-	0.7	▲0.3	/			
	有	無	-	-	-	0.6	-	0.5	0.7	0.5	33.4	0.17	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.9	0.5			
			-	-	-	0.6	-	0.5	▲0.6	/			
	無	有	-	-	-	0.3	-	0.2	0.2	0.3	34.9	0.21	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.3	0.2			
			-	-	-	0.3	-	0.3	0.2	/			
	無	無	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	▲0.1	43.2	0.2	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.0	▲0.1			
			-	-	-	0.0	-	0.0	▲1.4	/			

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュール フレーム	
7	8	9	10	11	12		筐体取手	モジュール 表面
13	14	15	16	17	18		筐体取付具	

(2) 半分水没の場合

半分水没の結果は表 7-13 のとおりで、完全水没時より相対的に感電リスクが高いが、日照条件も少し改善しているため、その影響も受けている。絶対的には日照条件が良くないの

で感電リスクは低い。

表 7-13 実験④ 接続箱（樹脂・ヒューズ）半分水没 測定結果（▲：マイナス値）

水質等： 水温 7.7[°C] 濁度 4.1[NTU] 電気伝導度 21.7[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]						
(2) 池底	有	有	—	—	—	0.6	0.3	0.1	1.2	—	584.3	2.18	269
			—	—	—	0.4	0.2	0.1	1.7	—			
			—	—	—	0.3	0.2	0.2	2.7	—			
	有	無	0.4	0.4	0.7	0.4	0.2	0.1	0.7	—	571.4	2.01	321
			0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	1.6	—			
			0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	1.7	—			
	無	有	—	—	—	0.3	—	0.1	0.4	—	586.2	2.16	313
			—	—	—	—	—	—	0.6	—			
			—	—	—	0.2	—	0.1	0.8	—			
	無	無	—	—	—	0.0	—	0.1	0.0	—	605.6	2.21	214
			—	—	—	—	—	—	0.1	—			
			—	—	—	0.1	—	0.1	▲0.3	—			
(4) 池外の地面	有	有	—	—	—	0.9	—	0.6	1.3	—	538.7	2.01	191
			—	—	—	—	—	—	1.7	—			
			—	—	—	0.8	—	0.6	2.0	—			
	有	無	—	—	—	0.6	—	0.4	0.9	—	491.4	1.75	195
			—	—	—	—	—	—	1.6	—			
			—	—	—	0.5	—	0.4	1.7	—			
	無	有	—	—	—	0.5	—	0.3	0.4	—	476	1.71	151
			—	—	—	—	—	—	0.8	—			
			—	—	—	0.3	—	0.3	0.9	—			
	無	無	—	—	—	0.1	—	0.1	0.0	—	534.8	1.9	132
			—	—	—	—	—	—	0.1	—			
			—	—	—	0.1	—	0.1	▲0.3	—			

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュールフレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

7.3.5 実験⑤ PCS を用いた場合

実験②、③、④と同様の測定を接続箱からPCSに変えて行った。実験の実施日が異なるため、水質等は異なる。さらに、個人用の太陽光発電システム（低圧）を想定しているため、太陽電池モジュールの直列数は13直列で実施した。

なお、個人用の低圧の太陽光発電システムの場合、基本的に負極接地をしていないと考えられるため、負極接地有の場合の計測は省略した。

(1) 完全水没の場合

完全水没の結果は表 7-14 のとおりである。接続箱類の場合よりはリスクは低かった。筐

体接地の有無及び測定方法の違いによる影響も見受けられなかった。

表 7-14 実験⑤ PCS完全水没 測定結果 (▲ : マイナス値)

水質等: 水温 10.8[°C] 濁度 9.8[NTU] 電気伝導度 12.2[mS/m]														
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射	
	負極	筐体	mA	[V]	[A]	[W/m ²]								
(1) 水中	無	有	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.1	399.5	0.89	319
			▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.1	▲0.1	—	▲0.2				
			▲0.2	▲0.1	▲0.2	▲0.2	▲0.1	▲0.1	—	▲0.2				
	無	無	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.2	▲0.1	▲0.3	394	0.93	455	
			▲0.1	▲0.1	▲0.2	▲0.2	▲0.2	▲0.2	—	▲0.2				
			▲0.1	▲0.1	▲0.1	▲0.2	▲0.1	▲0.1	—	▲0.2				
(2) 池底	無	有	0.0	0.0	▲0.1	0.0	0.0	0.0	▲0.1	▲0.1	403	0.82	403	
			▲0.1	0.0	▲0.1	0.0	0.0	0.0	—	▲0.1				
			0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	—	▲0.1				
	無	無	▲0.1	▲0.1	0.0	▲0.1	0.0	0.0	0.1	▲0.1	412	0.86	276	
			0.0	0.0	▲0.1	▲0.1	0.1	0.0	—	0.0				
			0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	—	▲0.1				
(4) 池外の地面	無	有	▲0.1	▲0.1	0.0	0.0	▲0.2	▲0.1	0.0	▲0.1	320	0.6	246	
			▲0.2	▲0.1	▲0.1	▲0.1	0.0	0.0	—	▲0.1				
			▲0.1	0.0	0.0	▲0.1	0.0	0.0	—	▲0.1				
	無	無	▲0.1	0.0	0.0	▲0.1	0.0	0.0	▲0.1	▲0.2	366	0.71	220	
			▲0.1	0.0	▲0.1	▲0.1	0.0	▲0.1	—	▲0.1				
			0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	—	▲0.1				

測定箇所

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18

筐体扉	モジュール フレーム
筐体取手	モジュール 表面
筐体取付具	

(2) 半分水没の場合

半分水没の結果は表 7-15 のとおりである。完全水没時の実験結果より相対的に感電リスクが高く、接続箱類の際よりリスクは低かった。筐体接地の有無及び測定方法の違いによる影響も見られなかった。

表 7-15 実験⑤ PCS 半分水没 測定結果 (▲ : マイナス値)

水質等: 水温 10.8[°C] 濁度 9.8[NTU] 電気伝導度 12.2[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]
(2) 池底	無	有	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.6	—	454.5	1.12	454
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
	無	無	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7	—	454.5	1.2	431
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
(4) 池外の地面	無	有	0.1	0.1	0.1	0.1	▲0.1	0.0	0.6	—	456.5	0.93	504
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
	無	無	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.7	—	455	0.96	462
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュールフレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

7.3.6 実験⑥ 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いて2ストリングとした場合

実験①、②で用いた接続箱（鋼板・ダイオード）を用いて図 7-11 のように2ストリングのシステムを構成した。

測定結果は表 7-16 のとおりである。日照条件が悪い条件下での実験のため、同じ機器を1ストリングで測定した実験②と比較してもリスクがより低くなっている。

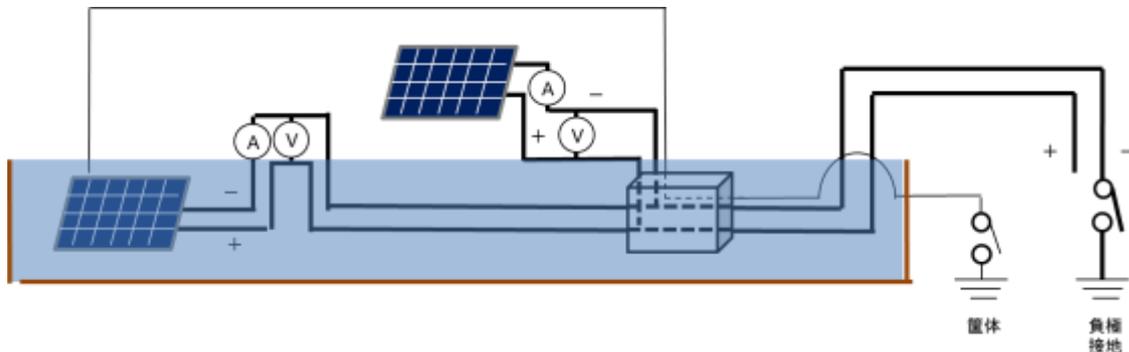


図 7-11 2ストリングの測定システム

表 7-16 実験⑥ 接続箱（鋼板・ダイオード）2ストリング測定結果（▲：マイナス値）

水質等： 水温 5.9[°C] 濁度 2.7[NTU] 電気伝導度 25.4[mS/m]

測定方法	接地状況		測定値								動作点 (上段水中 下段陸上)		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	
(1) 水中	有	有	-	-	-	0.3	-	0.0	0.7	0.4	111.1	0.33	100 未満
			-	-	-	-	-	-	4.8	0.3			
			-	-	-	0.3	-	0.1	1.6	0.3			
	有	無	-	-	-	0.3	-	0.1	0.7	0.3	96.7	0.31	100 未満
			-	-	-	-	-	-	3.5	0.4			
			-	-	-	0.3	-	0.0	1.5	0.4			
	無	有	-	-	-	0.3	-	0.1	0.7	0.3	90	0.31	100 未満
			-	-	-	-	-	-	3.5	0.4			
			-	-	-	0.3	-	0.0	1.5	0.4			
	無	無	-	-	-	0.1	-	0.1	0.2	0.0	83.8	0.3	100 未満
			-	-	-	-	-	-	0.9	0.1			
			-	-	-	0.0	-	0.0	0.8	0.1			
(2) 池底	有	有	-	-	-	0.2	▲0.1	▲0.1	0.6	0.3	81.9	0.29	271
			-	-	-	0.3	0.3	0.1	3.3	0.3			
			-	-	-	0.3	0.0	0.1	1.5	0.3			
	有	無	0.5	0.5	0.6	0.5	0.3	0.1	0.8	0.1	82.7	0.29	100 未満
			0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.3	3.6	0.1			
			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	1.7	0.1			
	無	有	-	-	-	0.1	-	0.0	0.7	0.1	150	0.35	260
			-	-	-	-	-	-	3.2	0.1			
			-	-	-	0.0	-	▲0.1	0.8	0.1			
	無	無	-	-	-	0.1	-	▲0.1	0.3	0.0	85.2	0.57	195
			-	-	-	-	-	-	5.3	0.0			
			-	-	-	0.1	-	0.0	0.8	0.0			
(4) 池外の 地面	有	有	-	-	-	1.0	-	0.3	0.9	0.6	72.4	0.27	100 未満
			-	-	-	-	-	-	3.1	0.6			
			-	-	-	0.5	-	0.4	1.9	0.6			
	有	無	-	-	-	1.2	-	1.1	1.6	1.4	83.1	0.3	100 未満
			-	-	-	-	-	-	4.5	1.4			
			-	-	-	1.1	-	1.2	3.0	1.4			
	無	有	-	-	-	▲0.2	-	▲0.3	▲0.2	▲0.3	72.4	0.27	100 未満
			-	-	-	-	-	-	2.0	▲0.2			
			-	-	-	▲0.5	-	▲0.4	0.5	▲0.2			
	無	無	-	-	-	▲0.1	-	▲0.2	0.0	▲0.2	72.4	0.27	100 未満
			-	-	-	-	-	-	2.1	▲0.1			
			-	-	-	▲0.3	-	▲0.2	0.7	▲0.1			

測定箇所

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18

筐体扉	モジュール フレーム
筐体取手	モジュール 表面
筐体取付具	

また、実験の際の日照条件が悪かったことから、別途、システム実験の架台を用いて、太

陽電池モジュール11直列を4ストリング用意し、水で満たした接続箱(鋼板・ダイオード)に接続し、ストリング数増加による1ストリングにおける動作点電流・電圧の変動の確認の検証を行った。ストリング数による動作電流・電圧の関係は表7-17のとおりである。ストリング数が増加するに従い、動作電圧が増加し、動作電流が低下する傾向が確認できた。つまり、ストリング数の増加に比例した電流の増加とはならない、といえる。

表7-17 ストリング数と1ストリング当たりの動作電流・電圧の関係

ストリング数	動作点		日射 [W/m ²]
	[V]	[A]	
1	243.5	5.24	324
2	353.5	4.36	308
3	372.3	3.62	334
4	373.0	3.23	443

7.3.7 実験⑦ 接続箱(鋼板・ダイオード)を用いて直流ケーブルを破損させた場合

単体実験時と同様に、最もリスクの高い高電圧の箇所を断線させた場合についても測定した。測定時のシステムは図7-12のとおりである。使用した接続箱は実験①②⑥と同じ鋼板・ダイオードタイプである。

測定はこれまでと同様の箇所に加え、単体実験時と同様に断線箇所との距離を変えながら複数箇所を測定した。なお、断線箇所は塩ビパイプに結束バンドとビニールテープで固定し、断線箇所間の距離が測定中一定になるようにした上で水没(図7-13)させた。断線箇所深さは水深20cmに固定した。

なお、測定方法はアース端が池底になる(2)に固定して測定を行った。また、接地状態は原則、負極接地有り、筐体接地無しの高リスクの状況での測定を行った。

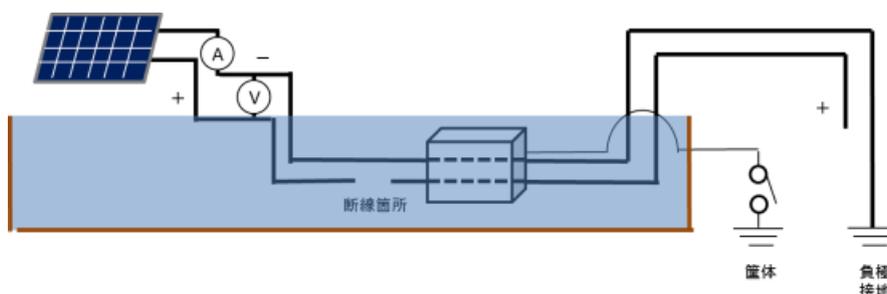


図7-12 直流ケーブル破損 測定システム



図 7-13 直流ケーブル破損 断線箇所

(1) 完全水没の場合

1) 断線箇所間の距離が 8 cm の場合

断線箇所間距離 8 cm の測定時の配置を図 7-14 に示す。これには本実験から追加の測定箇所のナンバリングもしている。この追加測定箇所の測定値を表 7-18 に、これまで同様の測定箇所の測定値を表 7-19 に示す。

これまでと同様の測定箇所では、正常状態のシステムと比較しても目立った感電リスクの増加は見受けられないが、表 7-18 の測定値を見ると、断線箇所に近づくほど、大きな感電リスクが測定された。

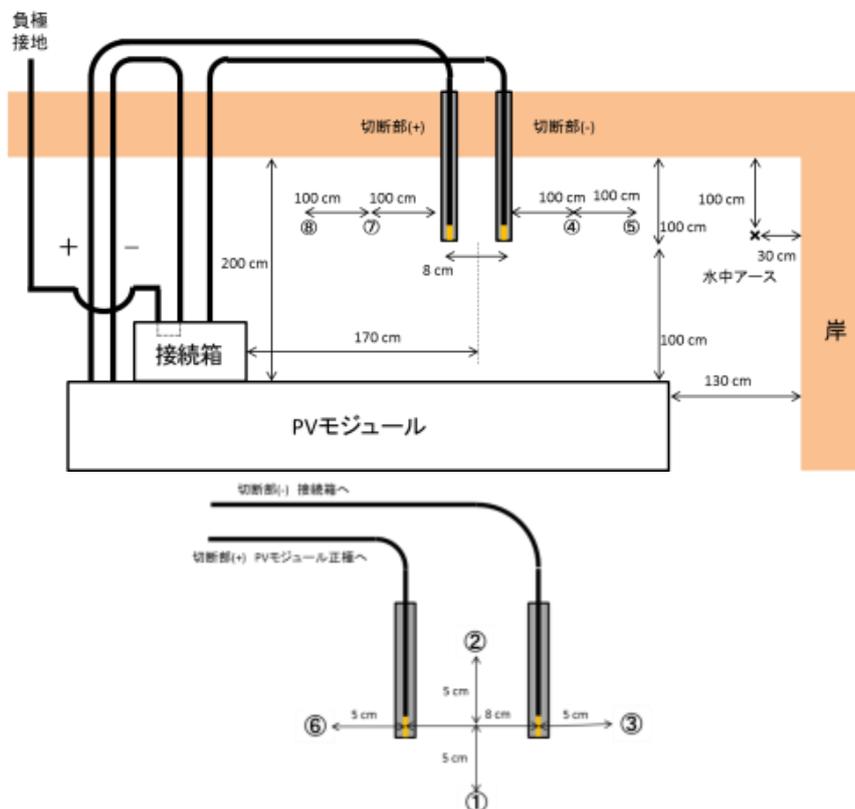


図 7-14 実験⑦ 断線箇所間 8 cm 完全水没時の配置

表 7-18 実験⑦ 断線箇所間 8cm 完全水没時 追加測定結果

測定箇所	測定電流[mA]
① (+)(-)奥 5cm	21.0
② (+)(-)手前 5cm	26.0
③ (-)左 5cm	15.0
④ (-)左 100cm	4.0
⑤ (-)左 200cm	0.9
⑥ (+)右 5cm	22.0
⑦ (+)右 100cm	6.0
⑧ (+)右 200cm	1.2
- (-)接触	119.0
- (+)接触	5.0

接地:負極有り、筐体無し 測定方法(2)

水質等: 水温 6.0[°C] 濁度 0.5[NTU]

電気伝導度 26.4[mS/m]

表 7-19 実験⑦ 断線箇所間 8cm 完全水没時 測定結果 (▲: マイナス値)

水質等: 水温 6.0[°C] 濁度 0.5[NTU] 電気伝導度 26.4[mS/m]

測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射		
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]		
(2) 池底	有	有	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			-	-	-	-	-	-	-	-	-				-
			-	-	-	-	-	-	-	-	-				-
	有	無	▲0.1	▲0.1	0.5	6.8	0.6	0.0	0.5	0.0	418.9	0.44	100 未満		
			0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	▲0.1	▲0.1	▲0.2					
			▲0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	1.0						

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュール フレーム
7	8	9	10	11	12		モジュール 表面
13	14	15	16	17	18		筐体取付具

2) 断線箇所間の距離が 100 cm の場合

断線箇所間距離 100 cm の測定時の配置を図 7-15 に示す。これにナンバリングした箇所での測定結果は表 7-20 のとおりである。断線箇所間の距離を離れたことで、正極 (+) 側に近いほど感電リスクが高いことが読み取れる。

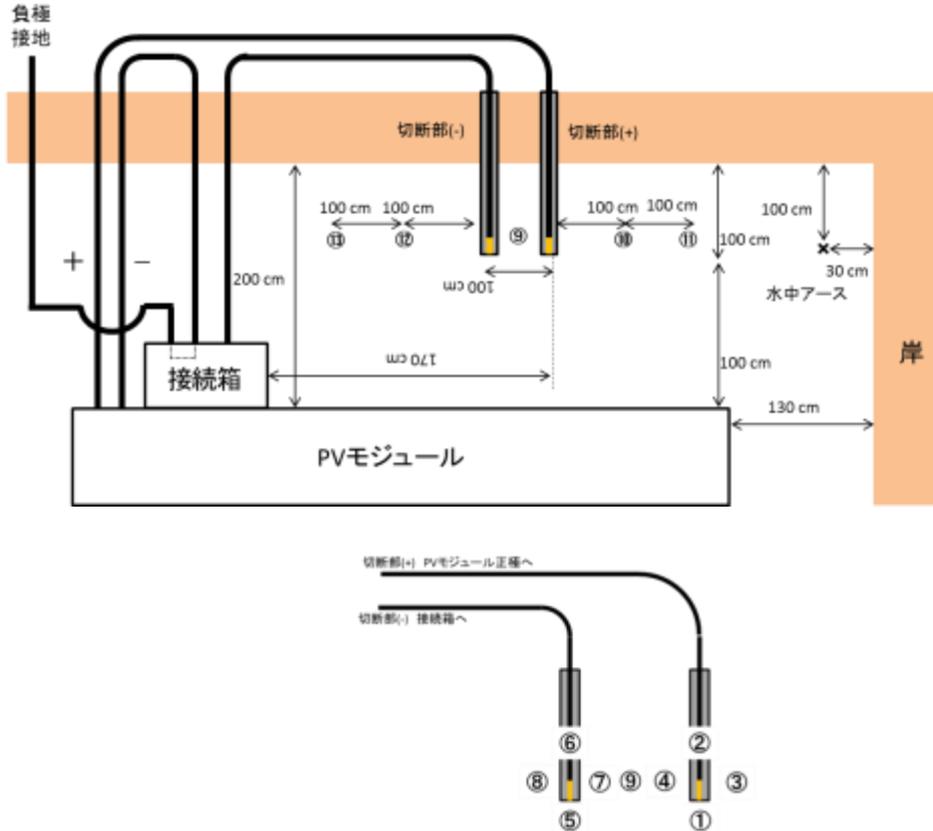


図 7-15 実験⑦ 断線箇所間 100 cm 完全水没時の配置

表 7-20 実験⑦ 断線箇所間 100 cm 完全水没時 測定結果 (▲ : マイナス値)

測定箇所	測定電流[mA]
① (+)奥 5cm	19.0
② (+)手前 5cm	23.0
③ (+)左 5cm	32.7
④ (+)右 5cm	21.0
⑤ (-)奥 5cm	3.0
⑥ (-)手前 5cm	3.0
⑦ (-)左 5cm	4.0
⑧ (-)右 5cm	2.0
⑨ (+)(-)中間	7.0
⑩ (+)左 100cm	4.1
⑪ (+)左 200cm	1.4
⑫ (-)右 100cm	0.7
⑬ (-)右 200cm	0.4
- (+)接触	125.0
- (-)接触	▲3.0
- (+)直下	18.0

接地: 負極有り、筐体無し 測定方法(2)

水質等: 水温 6.0[°C] 濁度 0.5[NTU]

電気伝導度 26.4[mS/m]

(2) 半分水没の場合

1) 断線箇所間の距離が8cmの場合

断線箇所間距離8cmの測定時の配置を図7-16に示す。これにナンバリングした追加測定箇所の測定値を表7-21、これまで同様の測定箇所の測定値を表7-22に示す。

この条件では、完全水没時と同様に、断線箇所に近づくほど大きな感電リスクが測定された。また、従来の測定箇所でも高い感電リスクが見受けられ(表7-22)、全体的に完全水没よりリスクが高い。

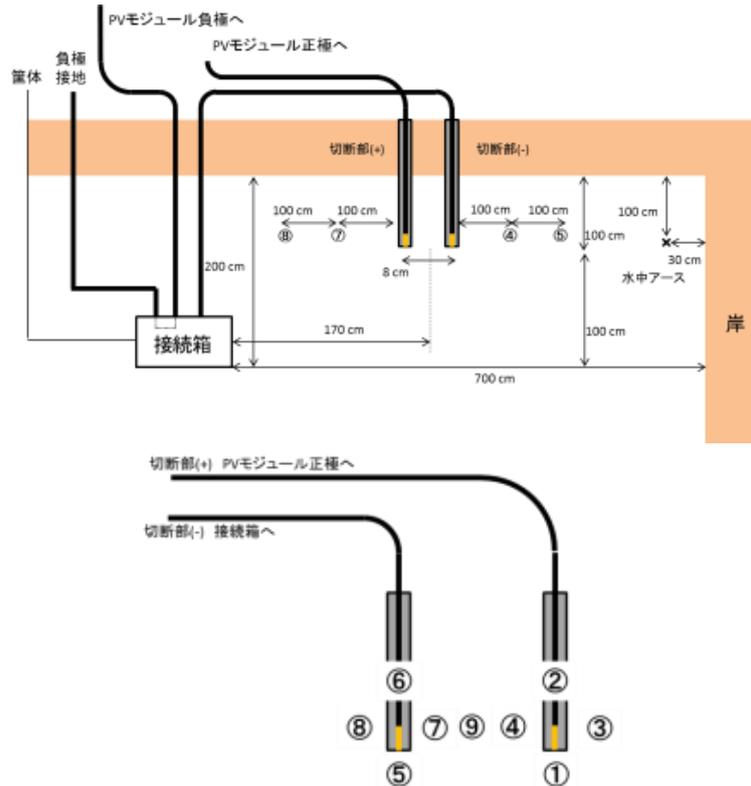


図7-16 実験⑦ 断線箇所間8cm 半分水没時の配置

表7-21 実験⑦ 断線箇所間8cm 半分水没時 測定結果 (▲: マイナス値)

測定箇所	測定電流[mA]
① (+)(-)奥5cm	34.0
② (+)(-)手前5cm	34.0
③ (-)左5cm	41.0
④ (-)左100cm	8.0
⑤ (-)左200cm	2.8
⑥ (+)右5cm	50.0
⑦ (+)右100cm	6.0
⑧ (+)右200cm	1.4
- (-)接触	3.0

接地: 負極有り、筐体無し 測定方法(2)
 水質等: 水温 6.0[°C] 濁度 0.5[NTU]
 電気伝導度 26.4[mS/m]

表 7-22 実験⑦ 断線箇所間 8 cm 半分水没時 測定結果 (▲ : マイナス値)

水質等：水温 6.0[°C] 濁度 0.5[NTU] 電気伝導度 26.4[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]
(2) 池底	有	有	1.2	1.3	1.3	11.2	5.1	1.9	▲0.6	—	747	0.8	100 未満
			1.2	1.2	0.6	3.1	2.5	1.4	▲8.7	—			
			1.1	1.1	1.2	1.7	1.7	1.2	▲28.8	—			
	有	無	1.1	0.9	0.1	3.7	5.1	1.2	▲2.9	—	759	0.72	100 未満
			1.1	0.8	▲0.2	1.5	2.2	0.5	▲9.7	—			
			1.0	0.9	0.8	1.0	1.2	0.4	▲27.2	—			

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュールフレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

2) 断線箇所間の距離が 100 cm の場合

断線箇所間距離 100 cm の測定時の配置を図 7-17 に示す。これにナンバリングした箇所の測定結果は表 7-23 のとおりである。

この条件では、完全水没時よりもリスクが高い。

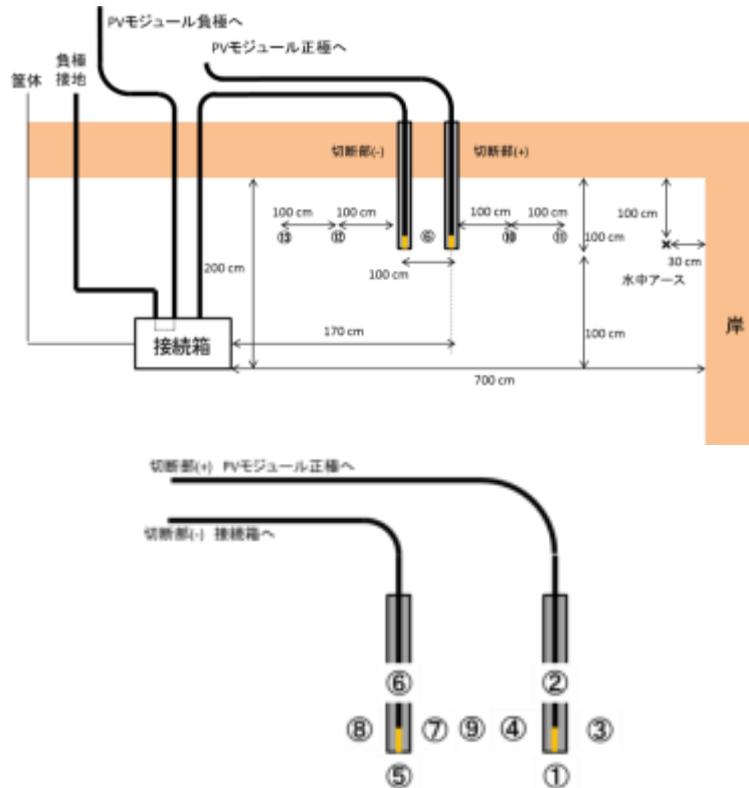


図 7-17 実験⑦ 断線箇所間 100 cm 半分水没時の配置

表 7-23 実験⑦ 断線箇所間 100 cm 半分水没時 測定結果

測定箇所	測定電流[mA]
① (+)奥 5cm	65.0
② (+)手前 5cm	105.0
③ (+)左 5cm	75.0
④ (+)右 5cm	83.0
⑤ (-)奥 5cm	5.0
⑥ (-)手前 5cm	5.0
⑦ (-)左 5cm	5.0
⑧ (-)右 5cm	5.0
⑨ (+)(-)中間	18.0
⑩ (+)左 100cm	12.0
⑪ (+)左 200cm	4.8
⑫ (-)右 100cm	2.0
⑬ (-)右 200cm	1.0
- (+)直下	74.0

接地:負極有り、筐体無し 測定方法(2)

水質等: 水温 6.0[°C] 濁度 0.5[NTU]

電気伝導度 26.4[mS/m]

3) 断線箇所間の距離を変化させた場合

正極(+)極の断線箇所からの距離が感電リスクに与える影響が大きい傾向が見られたことから、正極の断線箇所から測定棒までの距離を変えながら感電リスクを測定した。測定時の配置は図 7-18 のとおりである。引き続き、半分水没状態・接地は負極有、筐体無として、測定方法(2)で実施した。その結果は表 7-24 のとおりで、正極の断線箇所と電流値は相関関係が見られる。

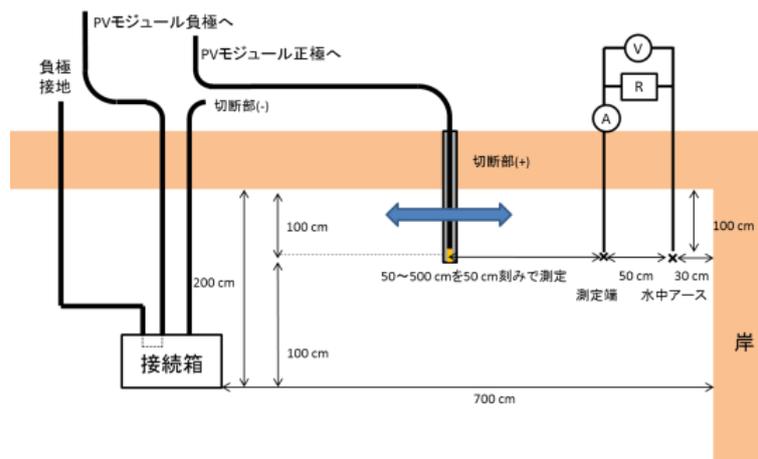


図 7-18 実験⑦ 断線箇所間距離変更 半分水没時の配置

表 7-24 実験⑦ 断線箇所間距離変更 半分水没時 測定結果

距離[cm]	測定電流[mA]
50	38.2
100	12.9
150	5.8
200	3.2
250	2.4
300	1.8
350	1.5
400	1.4
450	1.2
500	1.2

接地: 負極有り、筐体無し 測定方法(2)

水質等: 水温 6.0[°C] 濁度 0.5[NTU]

電気伝導度 26.4[mS/m]

7.3.8 接続箱への接触による感電リスク

システム実験では、接続箱の取付治具、筐体扉の取手、筐体扉の3箇所に測定棒を接触させて測定を実施したが、全般的にリスクが大きいのは、取付治具、筐体取手、筐体扉の順であった。

この順序の原因を解明するため、筐体のアース部分と各測定箇所での電気的な導通の有無の確認を行った。

結果は表 7-25 のとおりである。筐体扉は塗装の層により導通が取れないことが想定されたため、一部塗装を剥がした部分でも確認を行った。(樹脂製の接続箱については実施していない。)

表 7-25 筐体における各測定箇所とアース間の導通の有無

	接続箱 (鋼板、ダイオード)	接続箱 (鋼板、ヒューズ)	接続箱 (樹脂、ヒューズ)
取付治具	導通有り	導通有り	導通無し
筐体扉取手	導通無し	導通無し	導通無し
筐体扉	導通無し	導通無し	導通無し
筐体扉(塗装剥がし)	導通有り	導通無し	

7.4 システム実験の考察・まとめ

7.4.1 各パラメータと感電リスクの関係

7.4.1.1 水質

システム実験では、毎日の水質状態を測定した。測定結果及び測定結果から算出された電気抵抗率は表 7-26 のとおりである。浸透池内の水は自然浸透により水位が低下するため、必要に応じて水の補給を行った。補給する水は実験している池の隣にある別の浸透池内の

水を優先的に使用したが、枯渇したため水道水も補給に使用した。補給源の違いが電気伝導度に与える影響は見られなかった。他の外部環境の変化の影響の方が大きかったと想定できる。

水質の違いが本実験に与える影響としては、電気伝導度と太陽電池モジュールに到達する日射量の2点と想定していた。この2点の確認のため、2017年12月4日の実験の際に、池の底の泥を巻き上げるように攪拌し、水質の違いを観測した。電気伝導度について、池の濁度が上昇しても大きな違いは生まれなかった。

また、太陽電池モジュールに到達する日射量について、ある程度の近い日射条件下においては、濁水の場合の発電量の方が小さいことが分かる。

表 7-26 システム実験時の水質

	11月28日	11月29日	11月30日	12月1日	12月4日	
	①	②	③	④	⑤攪拌前	⑥攪拌後
水温 [°C]	10.8	5.9	6.0	7.7	7.5	9.0
濁度 [NTU]	9.8	2.7	0.5	4.1	1.8	74.7
電気伝導度 [mS/m]	12.2	25.4	26.4	21.7	12.1	11.9
電気抵抗率 [$\Omega \cdot m$]	82.0	39.4	37.9	46.1	83.0	84.0

表 7-27 濁り大と小の比較 接続箱（鋼板・ダイオード）（▲：マイナス値）

水質等： 水温 9.0[°C] 濁度 74.7[NTU] 電気伝導度 11.9[mS/m] (濁り大・完全水没)													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	[V]	[A]							
(2) 池底	有	無	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	14.6	0.15	115
			0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2			
			0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	▲1.0				
(4) 池外の地面	有	無	-	-	-	0.9	-	0.8	1.1	0.7	20.8	0.23	100 未満
			-	-	-	-	-	-	1.1	0.6			
			-	-	-	0.8	-	0.7	0.2				
水質等： 水温 7.5[°C] 濁度 1.8[NTU] 電気伝導度 12.1[mS/m] (濁り小・完全水没)													
(2) 池底	有	無	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.5	0.9	0.9	60.4	0.73	104
			1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	0.7	2.1	0.8			
			1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.6	0.4				
(4) 池外の地面	有	無	-	-	-	2.0	-	1.7	2.0	2.1	59.1	0.66	151
			-	-	-	-	-	-	3.2	1.9			
			-	-	-	2.4	-	1.9	2.1				
水質等： 水温 7.5[°C] 濁度 1.8[NTU] 電気伝導度 12.1[mS/m] (濁り小・半分水没)													
(2) 池底	有	無	0.8	1.0	1.9	1.7	0.8	0.5	3.0	-	61.3	0.68	100 未満
			0.8	0.8	1.3	1.1	0.6	0.2	8.2	-			
			0.6	0.8	0.7	0.7	0.5	0.3	6.0				
(4) 池外の地面	有	無	-	-	-	2.1	-	0.9	2.5	-	52.3	0.57	100 未満
			-	-	-	-	-	-	5.9	-			
			-	-	-	1.7	-	1.2	12.0				

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉 モジュール フレーム	
7	8	9	10	11	12		筐体取手 モジュール 表面
13	14	15	16	17	18		

7.4.1.2 設備の状態

(1) 接地状態

日射が安定して得られた実験③接続箱（鋼板・ヒューズ）の測定結果抜粋を表 7-28 に示す。単体実験と同様で、負極接地有の場合は負極接地無の場合と比較し、明らかに感電リスクが高まっている。これは全ての実験に共通して見られた傾向である。

筐体接地の有無の影響については、実験の種類、測定箇所により傾向が一律ではなかった。これについては 7.4.2 にて考察するが、単体実験の時と同様、筐体の素材による影響のところが大きい。

表 7-28 実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）（▲：マイナス値）

水質等： 水温 7.7[°C] 濁度 4.1[NTU] 電気伝導度 21.7[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]
(2) 池底	有	有	—	—	—	11.2	5.5	1.5	27.0	—	628	5.34	600
			—	—	—	13.7	5.7	1.4	60.0	—			
			—	—	—	8.6	5.1	2.6	96.0	—			
	有	無	12.0	14.2	26.5	19.1	8.6	2.3	45.0	—	632.3	4.76	606
			11.4	13.6	22.0	23.2	10.3	3.9	86.0	—			
			10.7	11.8	13.7	14.1	9.2	5.4	100.0	—			
	無	有	—	—	—	0.0	—	0.0	0.1	—	703	4.86	498
			—	—	—	—	—	—	4.9	—			
			—	—	—	0.1	—	0.0	0.0	—			
	無	無	—	—	—	0.0	—	0.0	▲0.3	—	406	4.77	477
			—	—	—	—	—	—	▲5.5	—			
			—	—	—	0.1	—	0.0	0.5	—			

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュールフレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

(2) 接続箱の種類

1) ダイオード式とヒューズ式の比較

システム実験においては日照条件の差が大きく、比較できなかった。

2) 鋼板と樹脂の比較

1) ダイオード式とヒューズ式の比較と同様に、日射の差が大きく比較できなかったが、単体実験の時と同様、樹脂の場合は筐体接地有にしても感電リスクが下がらないことは読み取れる。（表 7-29）

表 7-29 実験④ 半分水没 接続箱（樹脂・ヒューズ）

水質等：水温 7.7[°C] 濁度 4.1[NTU] 電気伝導度 21.7[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]						
(2) 池底	有	有	—	—	—	0.6	0.3	0.1	1.2	—	584.3	2.18	269
			—	—	—	0.4	0.2	0.1	1.7	—			
			—	—	—	0.3	0.2	0.2	2.7	—			
	有	無	0.4	0.4	0.7	0.4	0.2	0.1	0.7	—	571.4	2.01	321
			0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	1.6	—			
			0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	1.7	—			
(4) 池外の地面	有	有	—	—	—	0.9	—	0.6	1.3	—	538.7	2.01	191
			—	—	—	—	—	—	1.7	—			
			—	—	—	0.8	—	0.6	2.0	—			
	有	無	—	—	—	0.6	—	0.4	0.9	—	491.4	1.75	195
			—	—	—	—	—	—	1.6	—			
			—	—	—	0.5	—	0.4	1.7	—			

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュール フレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール 表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

3) 接続箱とPCSの比較

単体実験時には、実験途中で測定値が急激に低下する事象が見られたが、システム実験では同様の不連続性は見られなかった。動作点の電流を単体実験時と比較すると、単体実験破損前は500W/m²余りの日射量で、7A前後の電流値であったことから、恐らく当初からPCSが破損状態であったものと推測できる。単体実験時の破損は5直列回路での実験途中で発生しており、直列数が多いほど破損し易いと考えられる。表7-30は分析に使用した半分水没時の測定データを示している。

また、単体実験では筐体付近において電流が負極（-）の方向に出ていたが、システム実験ではその傾向は見られなかった。単体実験の結果考察において、負極接地がないことにより電位が0Vになっていなかったと述べたが、他にも接地極間で接地抵抗の違い等が原因の電位差が生じたとも考えられる。単体実験時の結果（表6-19）の一部を

表7-31に再掲するが、測定方法（4）の場合が最も負極（-）方向の電流が大きく流れている。これは図7-19に再掲（元図は図6-27）するように、測定方法（2）の場合は筐体と同じ接地極から、測定方法（4）の場合は筐体と別の接地極から測定用接地を接続しており、異電位になり易い状況にあったと言える。

負極接地時無の場合、漏電の向きは予測困難であると言える。

表 7-30 実験⑤ 半分水没 PCS (▲: マイナス値)

水質等: 水温 10.8[°C] 濁度 9.8[NTU] 電気伝導度 12.2[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	[V]	[A]							
(2) 池底	無	有	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.6	—	454.5	1.12	454
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
	無	無	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7	—	454.5	1.2	431
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			
			0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	—	—			

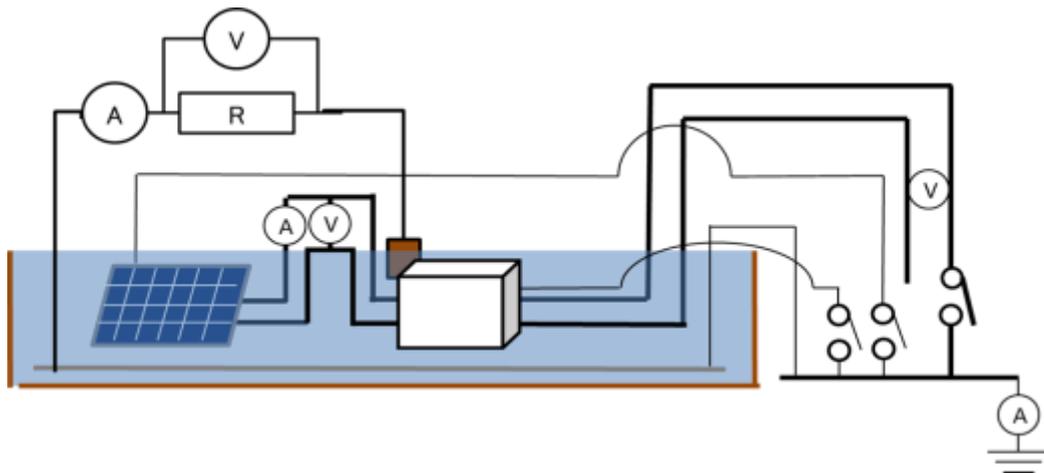
測定箇所

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18

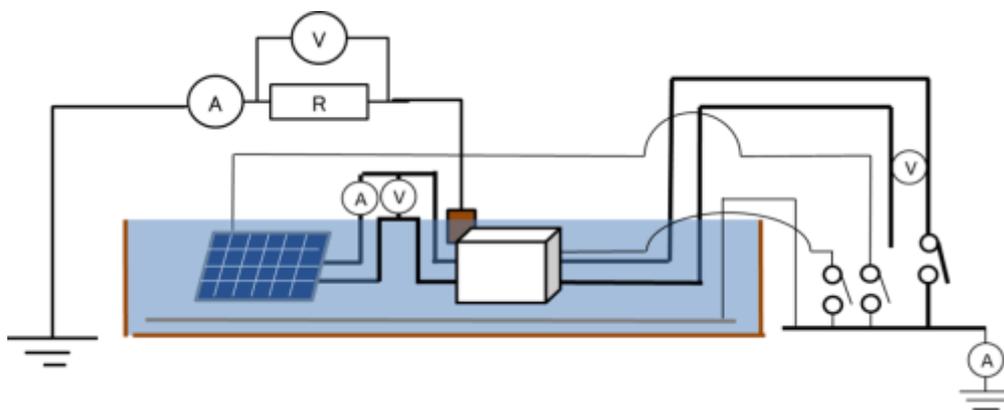
筐体扉	モジュール フレーム
筐体取手	モジュール 表面
筐体取付具	上: 電圧/V 下: 電流/mA

表 7-31 PCS 単体実験 (再掲) (▲: マイナス値)

モジュール 5 枚												
測定方法	接地状況			測定箇所					動作点		筐体	日射
				水中①	水中②	水中③	筐体扉	筐体取手				
	負極	PV	筐体	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[W/m ²]
(2) 水底のアルミ板	無	無	有	0.2	0.1	▲0.2	▲1.9	—	155.7	6.72	0.0	527
			無	0.3	0.2	▲0.2	0.1	—	154.8	6.66	0.0	537
	有	無	有	0.2	0.2	0.1	0.2	—	179.5	0.32	0.0	532
			無	0.1	0.1	0.1	0.1	—	178.8	0.32	0.0	542
(4) 池外の地面	無	無	有	▲0.1	▲0.2	▲0.6	▲3.0	—	149.8	7.43	0.0	554
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.6	▲1.9	—	150.2	7.35	0.0	552
	有	無	有	▲0.2	▲0.2	▲0.5	▲2.5	—	145.0	6.86	0.0	549
			無	▲0.2	▲0.2	▲0.4	▲2.1	—	153.5	7.10	0.0	547



測定方法(2)の接地



測定方法(4)の接地

図 7-19 単体実験時の接地極

(3) 太陽電池モジュールの構成

表 7-32 は 2 ストリング測定時と同じ機器を使って構成した 1 ストリングとの測定結果の比較である。感電リスクの高い測定方法 (2)、(4) の結果の抜粋である。単体実験時には 2 ストリング構成の方が動作電圧は高く、動作電流が低い結果が得られ、システム実験でも概ね同様の結果が得られた。感電リスクについては、日射が不安定かつ不十分であるため厳密な比較は困難だが、1 ストリングのほうが相対的に水中の感電リスクが高い。

単体実験の時と同様、接続箱に触れた場合の感電リスクは同等だが、離れてもリスクが残る易いのは、動作点が電流寄りの 1 ストリング時であるといえる。

また、別途で行ったストリング数と動作電流・電圧の関係の検証で、各ストリングの I-V カーブに表 7-17 に掲載した各ストリング数における 1 ストリング当たりの動作電流・電圧をプロットしたものを図 7-20 に示す。I-V カーブは測定された日射から予想されるストリングの I-V カーブである。各ストリング数における動作電流・電圧は凡そ各ストリング数の I-V カーブ上に位置し、動作電圧がストリング数とともに増加したのは、ストリング数の増加による全体の電流値の増加によるものであると言え、接続箱の水没によ

って隣接したストリング間が短絡し、見かけ上の直列数が増加することで電圧が大幅に増加するといった危険は確認されなかった。

表 7-32 PCS 単体実験（再掲）（▲：マイナス値）

水質等： 水温 7.5[°C] 濁度 1.8[NTU] 電気伝導度 12.1[mS/m](1ストリング、完全水没)													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	
(2) 池底	有	有	-	-	-	0.7	0.6	0.2	0.8	0.3	73	0.88	112
			-	-	-	0.8	0.7	0.4	1.8	0.5			
			-	-	-	0.7	0.6	0.4	▲0.1				
	有	無	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.5	0.9	0.9	60.4	0.73	104
			1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	0.7	2.1	0.8			
			1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.6	0.4				
(4) 池外の地面	有	有	1.6	-	1.6	1.7	-	1.4	1.6	1.7	51.4	0.62	118
			-	-	-	-	-	-	2.6	1.6			
			-	-	-	1.7	-	1.5	1.3				
	有	無	-	-	-	2.0	-	1.7	2.0	2.1	59.1	0.66	151
			-	-	-	-	-	-	3.2	1.9			
			-	-	-	2.4	-	1.9	2.1				
水質等： 水温 5.9[°C] 濁度 2.7[NTU] 電気伝導度 25.4[mS/m] (2ストリング)													
測定方法	接地状況		測定値								動作点 (上段水中 下段陸上)		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	
(2) 池底	有	有	-	-	-	0.2	▲0.1	▲0.1	0.6	0.3	81.9	0.29	271
			-	-	-	0.3	0.3	0.1	3.3	0.3			
			-	-	-	0.3	0.0	0.1	1.5				
	有	無	0.5	0.5	0.6	0.5	0.3	0.1	0.8	0.1	82.7	0.29	100 未満
			0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.3	3.6	0.1			
			0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	1.7				
(4) 池外の地面	有	有	-	-	-	1.0	-	0.3	0.9	0.6	72.4	0.27	100 未満
			-	-	-	-	-	-	3.1	0.6			
			-	-	-	0.5	-	0.4	1.9				
	有	無	-	-	-	1.2	-	1.1	1.6	1.4	83.1	0.3	100 未満
			-	-	-	-	-	-	4.5	1.4			
			-	-	-	1.1	-	1.2	3.0				

測定箇所

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18

筐体扉	モジュール フレーム
筐体取手	モジュール 表面
筐体取付具	上:電圧/V 下:電流/mA

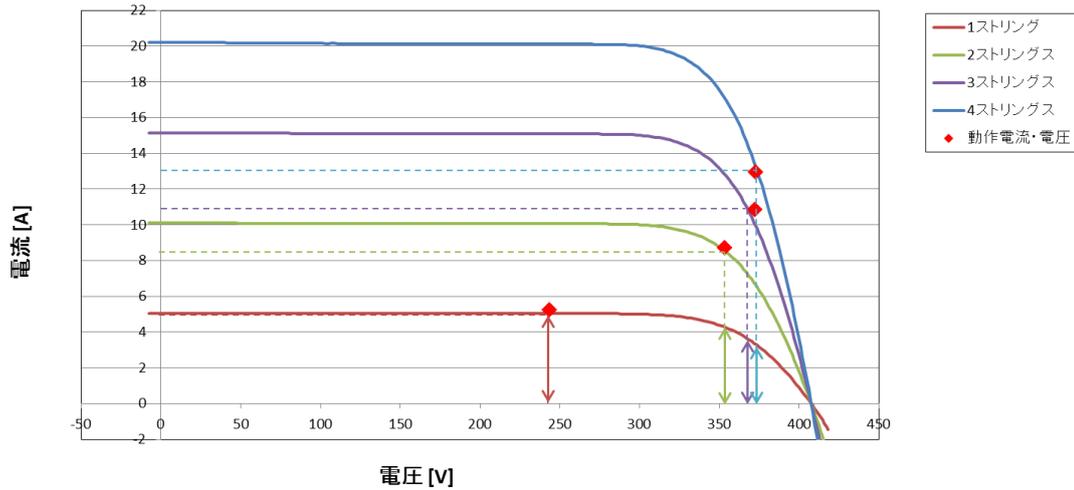


図 7-20 スtring数と動作電流・電圧の関係

(4) 断線有無

断線箇所がある場合、断線箇所 (+) からの距離が感電リスクと相関関係が大きいことが単体実験の結果から見られる。また、システム実験でも距離を変更しながら測定した結果を得ており、それをグラフにして可視化したものが図 7-21 である。感電リスク 2 mA のしきい値を下回る安全領域は、今回の実験の条件では、3 m 以上離れる必要があるといえる。

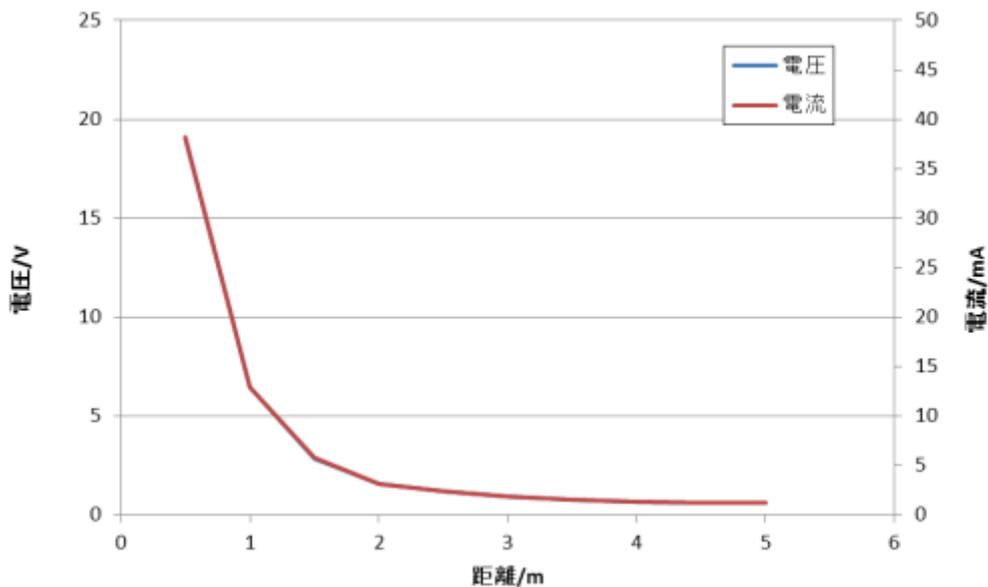


図 7-21 断線箇所 (+) からの距離と漏電電流の関係
(※電流と電圧のカーブは合致しているため、1本のカーブに見える。)

(5) その他 (接地棒の影響)

水中での全ての測定結果を見ると、測定点 6 の測定結果が最も感電リスクが低い。(表

7-28 はその一例) これは、これまで述べてきた漏電箇所との相関性だけでは説明がつかない。(距離は測定点18の方が漏電箇所から遠い。(図7-22に図7-7を再掲)

この原因としては、測定方法(2)のために水中に設置したアース棒によって、この付近に低抵抗の電流パスが形成されており、この付近に検出用銅板を置いて、人体を模擬した500Ωの回路に電流が流れ込まなかったためと考えられる。(接地極の位置は図7-23に図7-6を再掲)

表 7-33 実験③ 接続箱(鋼板・ヒューズ) 半分水没 測定結果

水質等: 水温 7.7[°C] 濁度 4.1[NTU] 電気伝導度 21.7[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]
(2) 池底	有	無	12.0	14.2	26.5	19.1	8.6	2.3	45.0	—	632.3	4.76	606
			11.4	13.6	22.0	23.2	10.3	3.9	86.0	—			
			10.7	11.8	13.7	14.1	9.2	5.4	100.0	—			

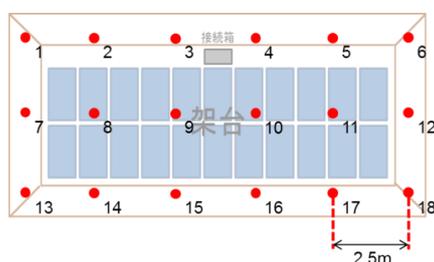


図 7-22 水中の測定箇所

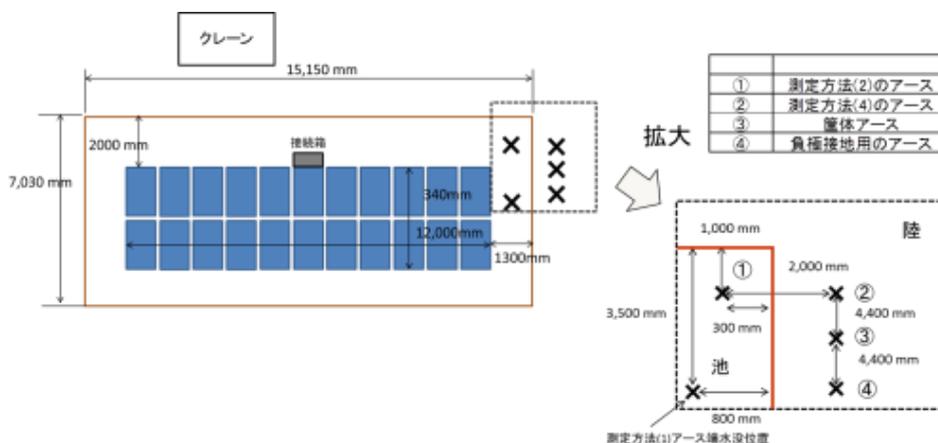


図 7-23 接地極位置関係

7.4.1.3 人間の状態(測定方法)

測定方法による感電リスクの大きさとして、大きい順に並べると(4)池外、(2)水底、(1)水中浮遊、(3)ボート上である。

単体実験と(4)と(2)の順番が入れ替わっており、単体実験時の予測どおり、接地極間の電位差が生じており、一概にどちらが危険かの断言はできないことが分かった。

また、(3)ボート上については、今回の実験では感電リスクは見られなかったが、これ

は足がボート上に有り、手から足に流れる電流に限った条件で、両手を水中に浸けた場合等、水中から水中に電流が流れる状況になった場合は、(1) 水中浮遊と同様に感電リスクは生じるものと考えられる。

7.4.1.4 実験での日射条件と感電リスク増加の可能性について

システム実験では、実験ごとに日射強度のばらつきが大きかった。特に日射強度が 100 W/m^2 に満たない条件で実験を行ったものがあつた。そのため、実験で測定された感電リスク（電流値）が、日射強度が増加した場合にどのように変化するかについて考察を行う。

図 7-24 に実験②、接続箱（鋼板・ダイオード）を用いた場合での動作点と I-V カーブを示す。完全水没での測定時の動作点と半分水没での測定時の動作点の両方をプロットしている。また、負極接地の有無の条件でプロットの色を変えている。4 種類のプロット全てを用いた近似直線も併記している。

実験②における各測定では、日射強度の最大が 252 W/m^2 で有り、 100 W/m^2 に満たない条件での実験を行った場合も多くあつた。このため、動作点は電圧、電流ともに小さくなっている。しかし、併記した近似直線と I-V カーブの交点から、例えば 600 W/m^2 の日射強度がモジュールに当たった場合、今回の実験での動作点より、電圧は 4 倍程度、電流は 5 倍程度大きくなることが想定される。水中や接続箱表面で測定された電流の起源は動作電圧と電流であることから、晴天時には今回得られた表 7-8、表 7-9 の電流値よりも数倍程度大きな電流が水中や接続箱表面で流れる可能性があり、感電リスクが数倍大きくなる可能性がある。

図 7-25 に実験③、接続箱（鋼板・ヒューズ）を用いた場合での動作点と I-V カーブを示す。ここでは、負極接地の有無の条件で、それぞれ近似直線を併記した。この図での近似直線と図 7-24 の近似直線の比較から「鋼板・ダイオード」の接続箱より「鋼板・ヒューズ」の接続箱の方が水没中のシステムの抵抗値が高いことが分かる。また、負極接地がない方がより抵抗値が高い。

実験③でも完全水没状態での測定では平均の日射強度が 252 W/m^2 と低かつた。近似直線と I-V カーブの交点から「鋼板・ダイオード」の接続箱を用いた実験の場合ほどではないものの、晴天時には動作電圧、電流が増加すると予想され、表 7-10 での測定値よりも数倍程度大きな電流が流れる可能性があり、感電リスクが数倍大きくなる可能性がある。例えば、水中に浮いた状態を模擬した測定方法（1）では、表 7-10 に示されるように、水中での測定値は 1.5 mA 以下であつたが、この値の数倍程度大きな感電リスクを考える必要がある。

一方、実験③での半分水没状態での実験では、平均 534 W/m^2 の日射強度があつたため、 600 W/m^2 の I-V カーブの近傍に動作点がある。このため、表 7-11 での測定値は大きく増加しないと考えられる。

図 7-26 に実験④、接続箱（樹脂・ヒューズ）を用いた場合での動作点と I-V カーブを示す。図 7-25 の近似直線との比較から「鋼板・ヒューズ」の接続箱と比べ、水没中のシステムの抵抗値が高いことが分かる。半分水没状態での実験では平均 223 W/m^2 の日射強度であつたものの、近似直線と I-V カーブの交点から、晴天となつた場合でもあまり動作電圧、電流は増加しないと考えられる。そのため、表 7-13 の測定結果は日射強度によって大きく増加しないと考えられる。

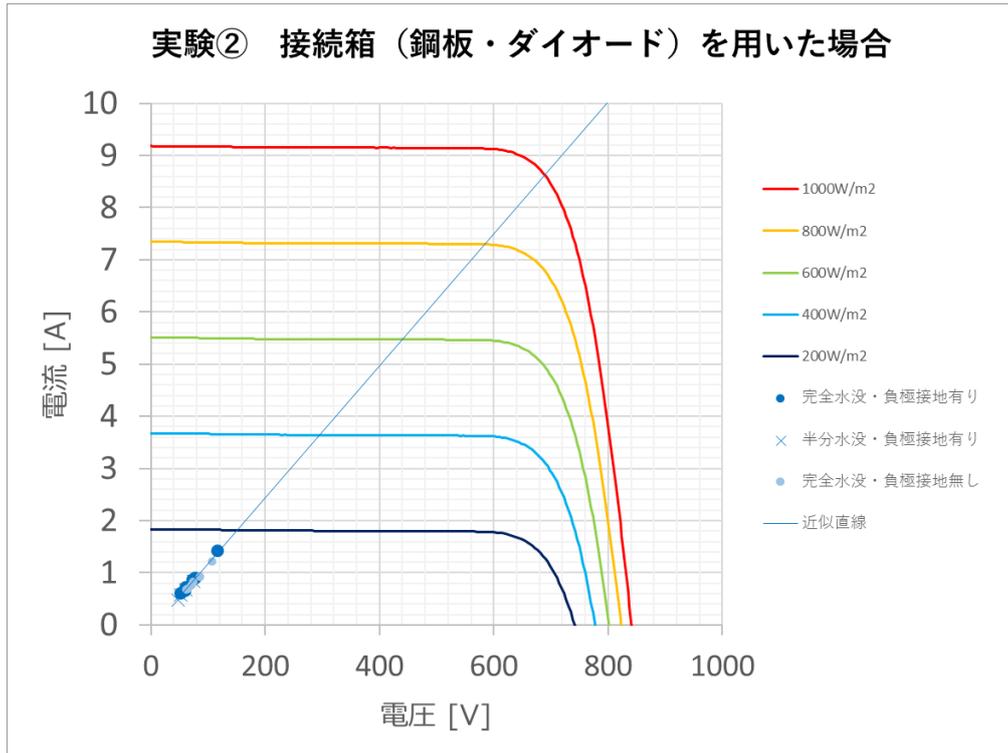


図 7-24 実験② 接続箱（鋼板・ダイオード）を用いた場合での動作点と I-Vカーブ

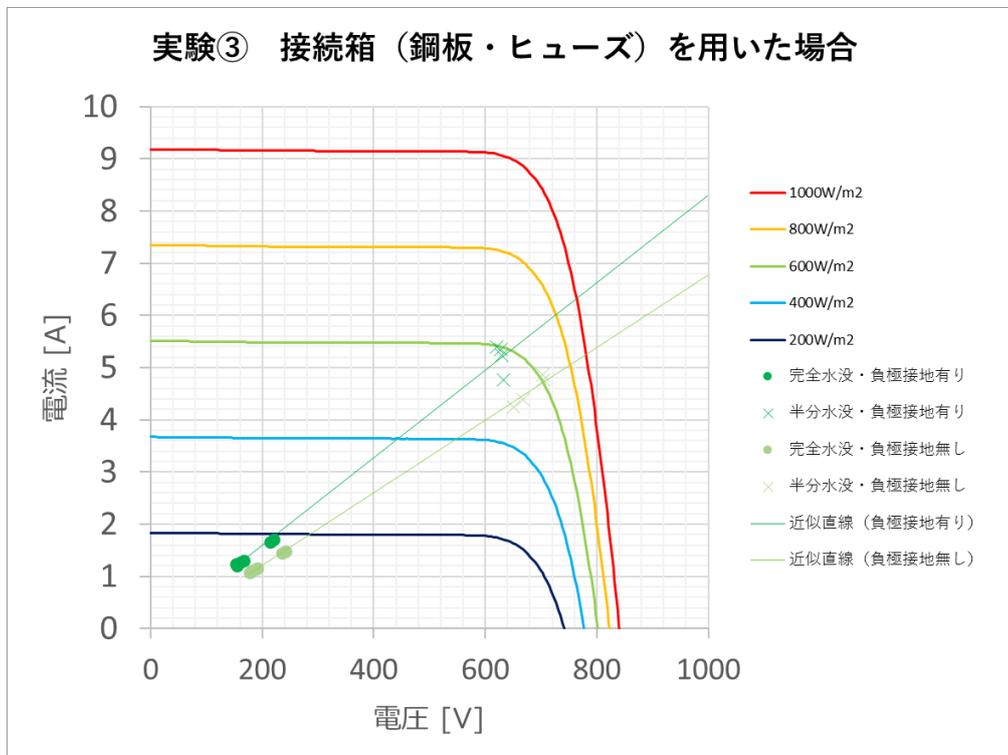


図 7-25 実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）を用いた場合での動作点と I-Vカーブ

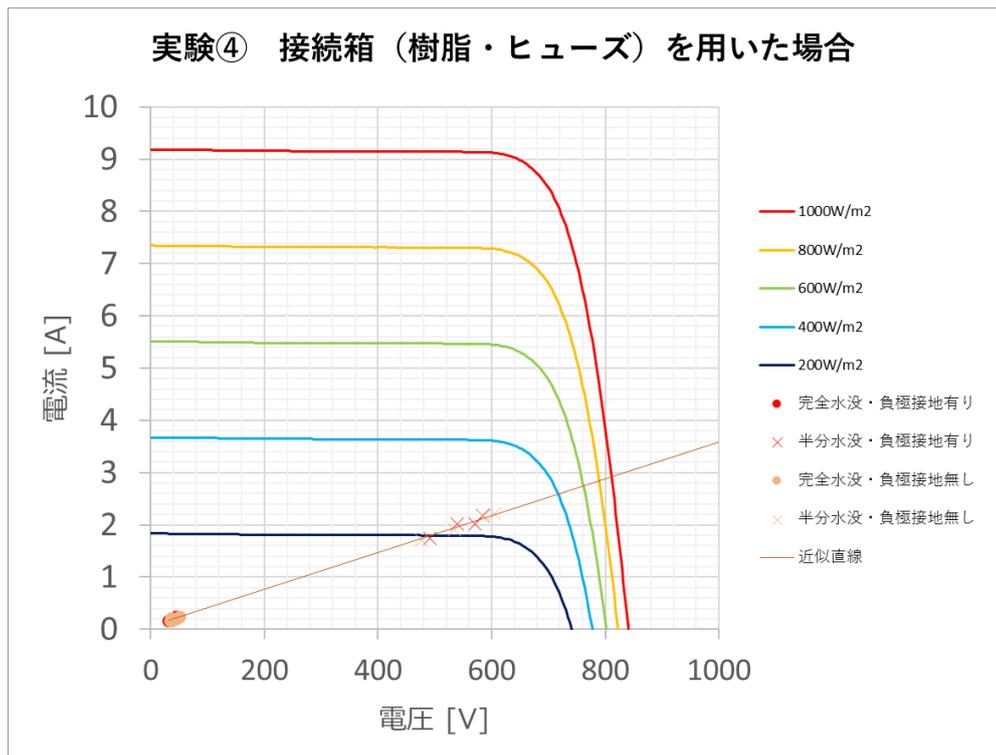


図 7-26 実験④ 接続箱（樹脂・ヒューズ）を用いた場合での動作点と I-V カーブ

7.4.2 漏電回路の考察

これまでの結果から、漏電ルートを把握し、場所による感電リスクを考察する。

(1) 漏電箇所との距離と感電リスク

図 7-21 を見れば、漏電箇所から 3 m 離れば、ほぼ安全と言えるが、それは今回の実験環境（条件）下に限られる。

(2) 漏電ルートについて

1) 断線無の場合

負極接地有、筐体接地無の状態がリスクは高いことを踏まえると、基本的に単体実験時の考察のとおり電流経路であると考えられる。

全般的にリスクが大きいのは、表 7-11 に示してあるように取付治具、筐体取手、筐体扉の順であるが、これらの漏電経路は下記理由によるものと考えられる。

- 取付治具：活電部から筐体内の水を通り、筐体のアース部分に漏電し、筐体のアースと同電位の取付治具へ漏電する。
- 筐体取手：活電部から筐体内の水を通り、扉内側の取手部分と同電位の扉外側の取手部分に漏電する。
- 筐体扉：活電部から筐体内の水を通り、筐体外の水、筐体扉の順に漏電する。

取付治具、筐体取手の順でリスクが大きいのは、通過する水の距離によるものと考えられ、本実験条件に限る結果と想定している。また、接続箱（樹脂）に関しては、上述の経路とは異なると考えられる。

表 7-34 実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）半分水没 測定結果（負極接地無し）に負極接地無しの場合の結果のひとつを記載している。電流の符号が複雑に入れ替わっていることが分かるが、これは前述した接地極間の電位差が原因であると考えられる。

表 7-34 実験③ 接続箱（鋼板・ヒューズ）半分水没 測定結果（負極接地無し）

（▲：マイナス値）

水質等：水温 7.7[°C] 濁度 4.1[NTU] 電気伝導度 21.7[mS/m]													
測定方法	接地状況		測定値								動作点		日射
	負極	筐体	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	mA	[V]	[A]	[W/m ²]
(2) 池底	無	有	-	-	-	0.0	-	0.0	0.1	-	703	4.86	498
			-	-	-	-	-	-	4.9	-			
			-	-	-	0.1	-	0.0	0.0	-			
	無	無	-	-	-	0.0	-	0.0	▲0.3	-	406	4.77	477
			-	-	-	-	-	-	▲5.5	-			
			-	-	-	0.1	-	0.0	0.5	-			
(4) 池外の地面	無	有	-	-	-	0.1	-	0.0	0.0	-	668.3	4.39	519
			-	-	-	-	-	-	▲4.7	-			
			-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	-			
	無	無	-	-	-	0.0	-	0.0	▲0.3	-	651.6	4.24	484
			-	-	-	-	-	-	▲4.0	-			
			-	-	-	0.1	-	0.0	▲0.2	-			

測定箇所

1	2	3	4	5	6	筐体扉	モジュール フレーム
7	8	9	10	11	12	筐体取手	モジュール 表面
13	14	15	16	17	18	筐体取付具	

2) 断線している場合

単体実験で考察したとおり、漏電の起点が接続箱内から断線箇所が変わるが、漏電ルート自体は断線なしの場合と同様であると考えられる。

7.4.3 その他

単体実験同様、通電中、漏電箇所（接続箱、断線箇所等）から気泡の発生が見られた。これに関しては、水没後の考察を含めて8章に記述する。

8. 実験後設備の調査

水没後の太陽光発電システム・設備について、停止状態での安全性及び再稼働の観点から状態を観測した。

8.1 実験後設備の調査手順

各機器及びシステムで水没前後の状態を観測し、影響を把握する。

水没前の各種計測は正常状態の把握のため、水没後はその後の安全性及び再稼働可否判断を目的としている。水没後の経過観察については、接続箱等の扉は閉じた状態で保管した。

8.1.1 機器

(1) 太陽電池モジュール

- ・ 水没前の I - V カーブ及び絶縁抵抗測定、外観点検
- ・ 水没直後の絶縁抵抗測定、外観点検
- ・ 水没数日後の I - V カーブ測定

(2) 接続箱

- ・ 水没前の絶縁抵抗測定、外観点検
- ・ 水没直後の絶縁抵抗測定
- ・ 水没後、数日間の絶縁抵抗測定、外観点検

(3) PCS

- ・ 水没前の絶縁抵抗測定、外観点検
- ・ 水没直後の絶縁抵抗測定
- ・ 水没後、数日間の絶縁抵抗測定
- ・ 水没数、日後の解体分析

8.1.2 システム

- ・ 水没前のストリング単位 I - V カーブ及び絶縁抵抗測定、外観点検
- ・ 水没直後のストリング単位 I - V カーブ及び絶縁抵抗測定、外観点検

8.2 実験後設備の調査結果

8.2.1 機器

(1) 太陽電池モジュール

システム実験で使用した太陽電池モジュールの水没前後で最も出力の低下した I-V カーブの測定データは図 8-1 のとおりである。なお、水没後のデータは水没から 2 ヶ月後の架台解体後のデータである。

太陽電池モジュールの出力は 0～2% 程度の低下を確認した。(システム実験で使用した太陽電池モジュールの全測定結果は巻末のデータ集を参照)

また、水没前と水没直後の絶縁抵抗値の推移を表 8-1 に示す。絶縁抵抗は短絡させた出力端子とフレーム間で測定した。水没直後は水没前よりも低い結果となったが、それでも高い絶縁抵抗を維持していた。外観上の変化もほとんどない。I-V 測定と絶縁抵抗測定で使用した機器を表 8-2 に示す。

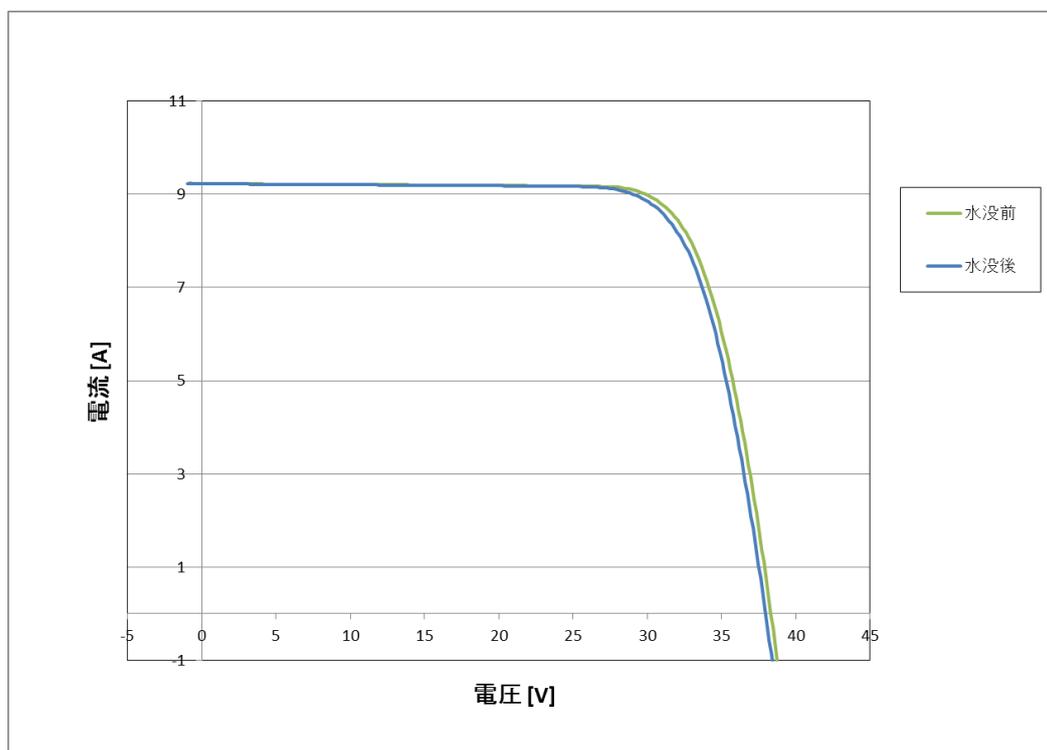


図 8-1 水没前後の太陽電池モジュールの I-V カーブ

表 8-1 水没前後の太陽電池モジュールの絶縁抵抗推移

	絶縁抵抗値[GΩ]	
	水没前	水没後
太陽電池モジュール	62.5	12.3

表 8-2 測定器仕様

項目	I-V測定		絶縁抵抗測定
型式	WFS-2000 × 1000	PIV-1000	TOS9213S
メーカー	ワコム電創	ワコム電創	菊水電子工業
仕様等	有効照射面: 2000 × 1000mm 放射照度: 100 ± 2 mW/cm ² クラス AAA	測定電圧: ~500 V 測定電流: ~20 A 誤差: ±0.2 %以内	測定抵抗: ~10.0 GΩ 誤差: ±5 % of settings +3digits
外観	/		

(2) 接続箱

水没前と水没後数日間の絶縁抵抗値の推移を表 8-3 に示す。絶縁抵抗測定に使用した機器を表 8-4 に示す。

水没直後は絶縁抵抗が大きく低下していたが、7日経過後では接続箱(鋼板、ダイオード)は水没前と同程度まで回復したが、接続箱(鋼板、ヒューズ)、接続箱(樹脂、ヒューズ)では絶縁抵抗は水没前と同程度に回復することはなかった。その後、接続箱内部をブラシと流水により清掃を行った結果、洗浄前と比較しても回復することは確認できなかった。

外観については、導体部の腐食、溶解が確認できた。電圧印加中に水中に気泡が発生しており、電気分解による反応が起こったと考えられる。水没後の導体部の腐食状況を図 8-2 に、気泡の発生している様子(気泡の発生の様子は断線時の一例)を図 8-3 に示す。

表 8-3 水没前後の接続箱の絶縁抵抗推移

		絶縁抵抗値[MΩ]					
		水没前	水没後			洗浄直前	洗浄後
			水揚げ直後	4日後	7日後		
接続箱 (鋼板、ダイオード)	P-N間	103	0.024	29.4	421	1210	153
	P-G間	817	0.012	0.686	419	79.8	32.8
	N-G間	102	0.01	1.43	2.59	91.8	37.7
接続箱 (鋼板、ヒューズ)	P-N間	>4000	0.005	0.02	0.401	0.560	0.594
	P-G間	>4000	0.004	0.01	0.18	10.1	24.2
	N-G間	>4000	0.015	0.019	0.263	0.737	0.721
接続箱 (樹脂、ヒューズ)	P-N間	>4000	0.058	0.222	0.198	116	49.7
	P-G間	>4000	0.1	0.029	2.16	110	46.2
	N-G間	>4000	0.115	0.079	1.78	126	43.2

表 8-4 測定器仕様

項目	絶縁抵抗測定
型式	IR4053
メーカー	日置電機
仕様等	確度 $\pm 4\% \text{rdg.}$ (0.200~1000 M Ω) $\pm 8\% \text{rdg.}$ (1010~4.000 M Ω) $\pm 2\% \text{rdg.} \pm 6 \text{dgt.}$ (0~0.190 M Ω)
外観	



図 8-2 水没後の腐食

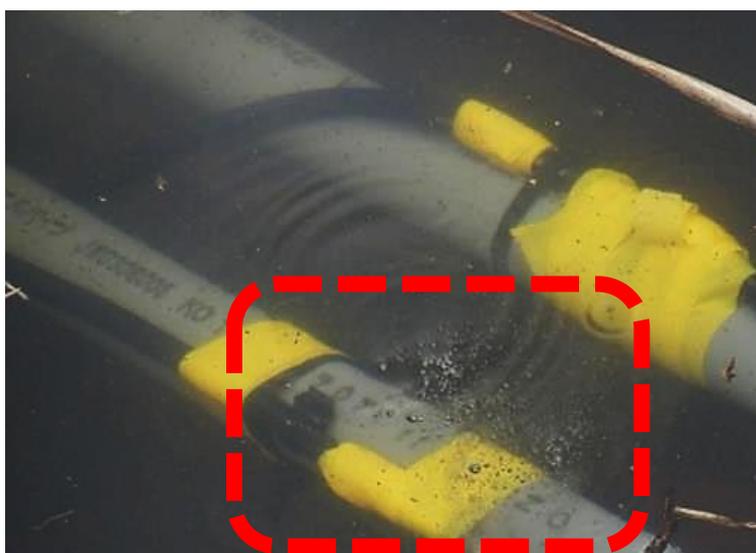


図 8-3 電圧印加中の気泡 (例)

(3) PCS

水没前と水没後数日間の絶縁抵抗値の推移を

表 8-5 に示す。水没直後は絶縁抵抗が低下していたが、7日経過後には問題ないオーダーまで回復している。

主回路については上述のとおり、接続箱と同様の傾向であったが、基板等制御機器の金属部分もいたるところに腐食が見られた。一例として、図 8-4 はヒューズが腐食し、図 8-5 は基板上のピンが溶けている箇所である。これらは、電気分解の反応のひとつと見られる。

直流入力部にある逆流防止ダイオード及び昇圧チョップに用いられているダイオードがオープン故障していた。水没後のPCSは起動できなかったが、このダイオード故障により、水没したPCSは入力電力が供給されず、制御電源が立ち上がらない状態であったと考えられる。

単体実験の途中で、電流が不連続に低下したタイミングがあった。これはダイオードが故障したタイミングと推定できる。破損箇所詳細については

図 8-6 に示す。

水没後のPCSに太陽電池ストリングを接続状態にしていたところ、ストリングの入力端子P-N間で煙、火花の発生、焦げを確認した。その後は安全措置のために切り離れた。

表 8-5 水没前後のPCSの絶縁抵抗推移

		絶縁抵抗値[MΩ]			
		水没前	水没後		
			水没直後	4日後	7日後
PCS	P-N間	>2000	0.007	0.692	670
	P-G間	>2000	0.01	0.319	659
	N-G間	>2000	0.012	0.82	503

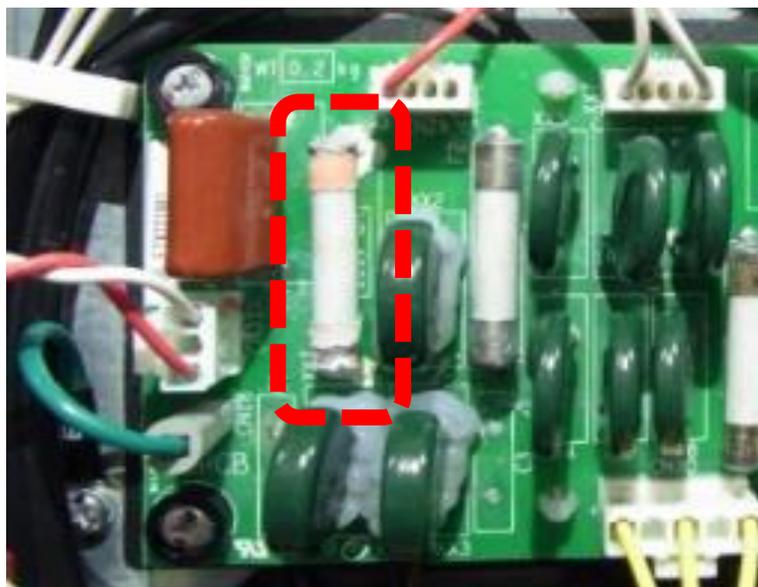


図 8-4 ヒューズの腐食

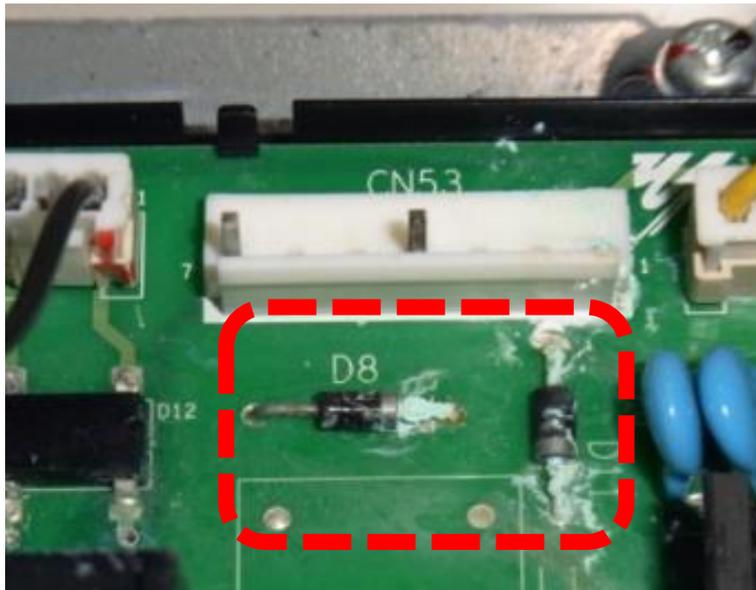


図 8-5 ピンの溶出

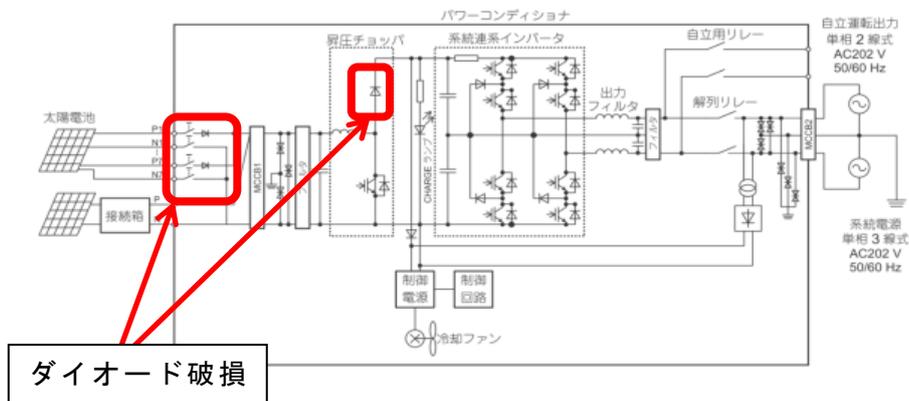


図 8-6 ダイオード破損

8.2.2 システム単位

水没前後の I-V カーブの測定データは図 8-7 のとおりである。（使用した測定器は表 8-7 のとおり）

水没後のデータは水没から 1 日後のデータで有り、僅かな出力の低下が確認された。これは水没によるガラス表面の汚れによるものと考えられる。

また、水没前と池から引き揚げた直後の絶縁抵抗値を

表 8-6 に示す。引き揚げ直後は接続箱内の P-N 間の絶縁抵抗が大きく低下しているため、太陽電池モジュールのストリングから切り離し、ストリングの出力端子と太陽電池モジュールのフレーム間で絶縁抵抗を測定した。（測定器は接続箱の絶縁抵抗で使用した機器（表 8-4 測定器仕様）と同一のもの）

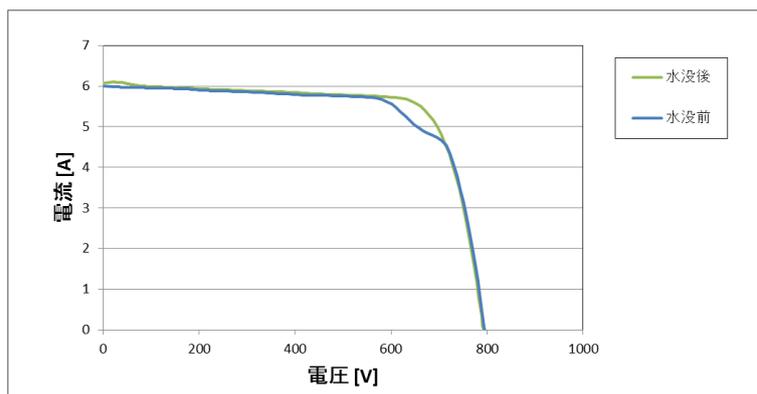


図 8-7 水没前後の太陽電池ストリングの I-Vカーブ

表 8-6 水没前後のストリングの絶縁抵抗推移

		絶縁抵抗値[MΩ]	
		水没前	水没後
ストリング	P-G	408	161
	N-G	562	361

表 8-7 測定器仕様

項目	I-V測定
型式	I-V400w
メーカー	HT ITALIA
仕様等	測定範囲: 5~999.9 V 0.10~15.00 A 精度: ±1 %rdg2 dgt
外観	

出所) エクセルウェブサイト, <http://www.excelinc.co.jp/energy-iv400w.shtml>、
2018年2月15日取得

8.3 実験後設備の調査まとめ

8.3.1 停止状態での安全性について

PCSからの発煙、火花を確認したことに関し、実際には接続箱・PCSの扉が閉じた状態の場合が多いため、酸素不足で延焼しない可能性はあるが、太陽電池を接続した状態における火災のリスクは否定できない。

一度でも接続箱・PCSが水没した場合は、水位が接続箱・PCSの位置を下回る前に太陽電池を切り離すことを推奨する。

8.3.2 再稼働時の安全性について

時間の経過及び清掃等により、絶縁抵抗値が使用に問題のないレベルにまで回復する接続箱と回復しない接続箱が存在する。接続箱については、通電可能な状態になると考えられるが、保護機能が正常に働く保証は得られない。

また、PCSは今回の場合では起動しなかったため、使用できない状態になる可能性が高い。

これらの状況を踏まえると、絶縁抵抗値が規格値内であれば、太陽電池モジュールはそのまま使用可能だが、接続箱・PCSは更新するのが望ましい。

9. 実験データを踏まえたシミュレーションへの展開

今回の実験の結果、例えば表 7-10 や表 7-11 の結果にあるように、太陽電池アレイを池へ入水した場合には、それが池の端に近い部分であっても感電リスクがあることが分かった。一方、図 7-21 に示されるように、漏電箇所が断線端である場合にはある程度の距離をとることで感電リスクを低減できることも分かった。しかし、これらの結果は今回の単体実験及びシステム実験のセットアップの場合での一例である。そのため、例えば大きさの違う他の池等で水没が発生した場合等のように、広く一般化できるものではない。

他の水没条件での感電リスクを検証するためのひとつの方法として、3Dのシミュレーションモデルを作成することが挙げられる。例えば、3Dモデル内の池の大きさ、構造物の形を変更することで、様々な条件での感電リスクを検証することができる。また、モデル内に漏電電流回収のための水中アース棒の追加等を行うことで、入水する際の安全対策や救助手法についても検討することができる。

今回の実験においては、あるひとつのセットアップにおける実験データの取得ができたため、3Dのシミュレーションモデルの構築への参考になると思料する。今回の実験結果を再現するように、3Dシミュレーションモデルに入れるべき構造物や水と池の底面との境界の電気抵抗といったシミュレーションモデル内のパラメータを設定検討することが可能となるからである。そのため、今回の実験結果を活用して3Dシミュレーションモデルを構築し、感電リスクのより詳細な検証や救助手法の開発等に役立てることが、今後の展開として考えられる。

10. 実験結果・考察を踏まえた安全に対する提案

水害等により太陽電池モジュール及び関連機器が水没した場合に周辺住民等の一般の方、消防隊員等の水難救助者、電気保安業務従事者等の安全を担保するための対応について、前章までに記載した実験結果とその考察を踏まえ、以下を提案する。

なお、安全への提案については、実験計画の策定の際にご意見を伺った専門家へ再度ヒアリングを行い、そこで頂いたご意見も参考にした。

10.1 安全に対する提案に向けた専門家へのフォローヒアリングの実施

安全への提案について、専門家へのヒアリングを行った。頂いたコメント等は以下のとおりである。（下線はJPEAが付記）

【専門家A】

- 今回の実験結果で、感電リスクがあることが分かったため、近づかないということは大前提だろう。逆に言えば、近づかなければ感電することはない、と言えるだろう。
- 水没後の接続箱の絶縁抵抗が低下するというのは、水没後に太陽電池モジュールがつながっているとショートが起き、二次災害の可能性があるとということだろう。水没後に乾いた後には放置せず、早急に改修するという対策を安全への提言に入れるのが良いだろう。
- 消防が救助する際、電気に関して専門家でない救助者等が電流、電圧を測定し、水中の感電リスクを把握することは困難であり、危険を伴うだろう。
- 電気に関する専門家が水中の電流等を測定し、感電リスクを把握、判断することは考えられる。しかし、そのときの状況によって、どの様に測定器のアースを取るのが適切かは一概に言えない。実際の水没現場で水中の電流を計測することは、かなり困難であろう。
- 電気主任技術者等が水中の電流を測定したとしても、水の流れ等もあり、状況も変化するため、安全であるという判断はできないだろう。「水中には入ってはいけない。」という判断にしかならないと考える。
- 発電している太陽電池モジュールが水没している水中に入るという行為は、火災現場で燃え盛る炎の中に突入するのと同じイメージである。感電しない、ということを示せないと判断できない。しかし、今回の実験結果を踏まえた提言では、それを示すための具体的な手法までは提示できないと思われる。

【専門家B】

- どれくらい離れば良いかといったことは、状況にも依るだろう。
- 水に浸かっていると、どこの線が切れているか分からないため「水辺には近づかないように。」という注意喚起にならざるを得ないだろう。
- 樹脂製の筐体は比較的電流が流れないというものの、救助活動中は金属製または樹脂製か、筐体の素材を判別するような想定は難しい。
- 実際の救助では、水中に両手を入れれば、そこで回路が形成されるため、絶縁性ボート上で活動していても安全とは言えないだろう。空中からヘリ等で救助しても、隊員は濡れるため、水中からの救助と状況は変わらないだろう。

10.2 実験結果を踏まえた安全に対する提案

10.2.1 一般の方及び保守保安業務従事者の水没した太陽光発電システム・設備への対応

実験結果より、以下のことが言える。

- ① 測定方法（2）の結果より、水中の地面と人体（足）とが電氣的に接続されている場合には、太陽光発電システム・設備が水没しているところに入水すると感電のリスクがある。（例：表 7-10、表 7-11 より）
- ② 測定方法（1）の結果より、水中に浮いている場合や絶縁長靴を履いて地面と絶縁されていたとしても、水を介して電氣的につながっている場合には、感電のリスクがある。（表 7-10 の結果や 7.4.1.4 の考察より）
- ③ 水没している集電設備に触れると、より大きな感電のリスクがある。（例：表 7-11 より）
- ④ ケーブルが断線して水没している場合、そのケーブルに近づくと、より大きな感電のリスクがある。（7.3.7 の実験結果より）

これらの結果から、太陽光発電協会（JPEA）による注意喚起資料の添付資料³にあるとおり、水没した太陽光発電システム・設備には近づかないようにすることが適切であると考えられる。そのため、以下のような対応を提案する。

- ⑤ 特に、水没中の集電設備への接触は避けるべきである。
- ⑥ ケーブルの断線がないことが担保できない場合は、地面に薄く水が張っている場所でも近づかない。止むを得ず近づく場合には、絶縁性が担保できる長靴と手袋を装備する必要がある。

10.2.2 消防隊員等が救助活動を行う場合の水没した太陽光発電システムへの対応

要救助者がいる場合、消防隊員等が水没した太陽光発電システム付近に入水して救助する必要がある場合が想定される。その場合の対応について、前項の提案を前提とした上で、以下のように提案する。

- ⑦ 可能な限り防水性・絶縁性が担保できる装備を用いて救助を行う。
- ⑧ 救助活動を行う者の安全性を担保するために、今後以下のような追加検証を行うことを提案する。
 - 防水性・絶縁性が担保できる装備や救助手法の検討・検証
 - 実際の水没現場において感電リスクを評価する手法や手段の検討・検証
 - 感電のリスクを低減するための救助手法（例：水中へのアース棒の敷設）に関する有効性の検討・検証

³ 太陽光発電設備が水害によって被害を受けた場合の対処について（太陽光発電協会）

<http://www.jpea.gr.jp/pdf/t150911.pdf>

10.2.3 事業者・保安業務従事者が点検・撤去を行う場合の水没被災後の太陽光発電システム・設備への対応

水没し、その後に乾いた場合の太陽光発電システム・設備の接続箱・PCSの絶縁抵抗値については8章「実験後設備の調査」に記載のとおり結果となっている。

この結果を踏まえて、以下のような提案を行う。

- ⑨ 接続箱・PCSが水没した場合、水が引き次第、早急に太陽電池モジュールを切り離し回収することで、火災等の二次災害を防止する。
- ⑩ 水没した接続箱・PCSは絶縁性が低下していることを念頭に置き、太陽光発電システム・設備に直接触れないように太陽電池モジュールとの解列を行う。具体的な手法としては、太陽光発電協会による資料「太陽光発電システム被災時の点検・撤去に関する手順・留意点【水害編】」⁴を参考とする。

⁴ 太陽光発電システム被災時の点検・撤去に関する手順・留意点【水害編】

<http://www.jpea.gr.jp/pdf/t151009.pdf>

11. その他業務の実施

本実証業務に関わるその他業務について記載する。

11.1 地元関係者への説明会の実施

11.1.1 北杜市役所への説明

システム実験を行う浸透池を使用するにあたり、事前に北杜市長、北杜市役所の関係者へ実験に関する説明を行い、ご理解を頂くとともに、その後の必要な手続きについてご助言とご支援を頂いた。

11.1.2 地権者への説明

システム実験を行う浸透池を含む場所は、北杜サイト太陽光発電所の敷地内ではあるが、北杜市が個人から賃借している土地である。北杜市役所担当者に地権者へのアポイントメントの取得を頂き、地権者への事前の説明会を実施し、ご理解を頂いた。

11.1.3 中日本高速道路株式会社（NEXCO中日本）への説明

システム実験を行う浸透池を含む場所は、中央自動車道に隣接しており、大型クレーン使用の際の手続き等を確認した。

11.1.4 鉄塔立替え工事との調整

システム実験の場所付近で、電力会社の鉄塔立替え工事を実施していたため、日程及び作業場所・動線の確保等調整を行った。

11.2 見学会の実施

システム実験の実施に際し、関係者（ヒアリングでアドバイスを頂いた方及び経済産業省やNEDOの担当者）限りで、2017年11月29日（水）と11月30日（木）の2日間、現地での見学会を開催し、実験を公開した。

11.3 実験設備の廃棄

実験に使用した太陽光発電システム・設備は、産業廃棄物として適切に処分した。

12. まとめ及び今後の課題

本研究では、水害等により太陽電池モジュール及び関連機器が水没した場合、特に人体への感電の危険性が高いと想定される事象について、その事象を再現した実証実験を行った。また、その結果を元に安全確保に必要な対策の検討を行った。

<実験計画の策定>

- 先ず、実験計画の策定を行い、検討の結果、今回の実験は太陽電池モジュールからPCSに入力される直流側のみに着目して行うこととした。
- 実験としては、実際の池にシステム全体を沈める「システム実験」と水没時の感電リスクについて概要・概略を把握し、測定方法等を事前に検証し、円滑なシステム実験につなげることを目的とした「単体実験」の2つを行うこととした。
- 実験での水没状況や電流測定方法の検討では有識者ヒアリングを実施し、消防研究センター等からの意見を踏まえて、実際の水難救助を模擬したセットを組むこととした。

<単体実験>

- 実験は「単体実験」から行った。この結果から、負極接地している場合に感電リスクの危険性が高まること等が明らかになった。
- 正極が断線し水中に暴露した場合の感電リスクについても確認した。

<システム実験>

- 単体実験の結果を踏まえて「システム実験」を行った。
- システム実験の結果、「単体実験」から得られた負極接地等の装置側の状態と感電リスクとの相関と同様の結果が得られた。
- 水没中のシステム周辺の水中では、今回の実験に用いた池の大きさの範囲においての検証ではあるものの、安全な退避距離がないことが明らかになった。
- 正極が断線し、水中に暴露した場合の感電リスクについても検証し、ある特定のセットアップにおいて、距離による感電リスクの減少効果を確認した。

<その他>

- 水没実験後に、水没した接続箱、PCSの経過観察を行った。
- その結果、絶縁抵抗値の低下が観察され、水没後にこれらを放置することで漏電火災等のリスクが増加することが明らかになった。

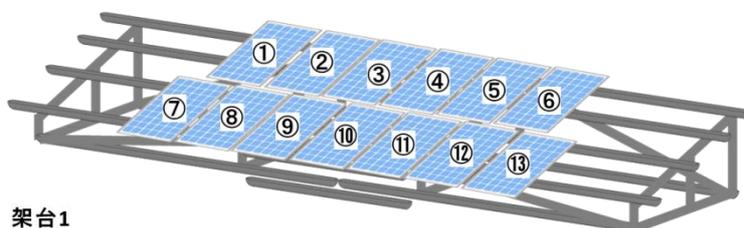
以上の実験結果を踏まえて、太陽光発電システムが水没した場合に安全を担保するための対応について検討した。

- 有識者からのご意見も参考にした結果、これまでの太陽光発電協会（JPEA）による、基本的に近づかないという注意喚起が適切であると判断し、これを維持していくことを提案した。
- 接続箱、PCSの早期回収が必要であることを新たに注意喚起として盛り込むことを提案した。

今後の課題として、水没中の太陽光発電システム・設備周辺に要救助者がいる場合の対応方針を策定する必要性が挙げられる。実験結果から、水中の構造によりアースが取れている箇所の周辺、そもそも天候等の関係で動作電圧が低い場合等の条件次第で、感電リスクが小さい場合が存在することも明らかになった。このため、実際の水没現場において感電リスクを評価できる手法や手段を確立することができれば、救助者の感電といった二次災害のない水難救助が可能となると思われる。今後、このような手法の研究開発を進める必要があると考えられる。

巻末資料 データ集

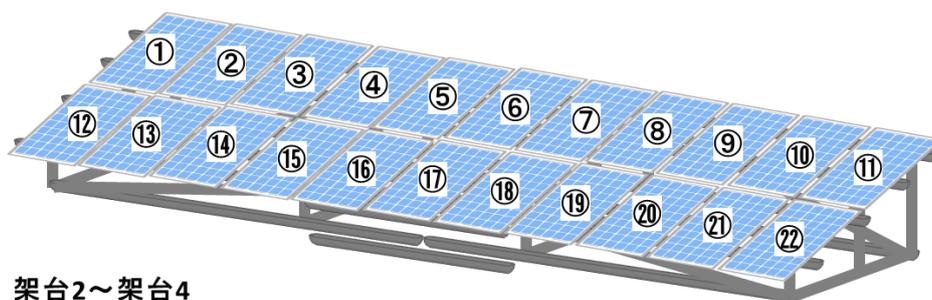
システム実験に使用した太陽電池モジュールの設置位置と実験前後の I-V データ



架台1

架台 No.	位置 No.	Serial No.	測定 状態	Isc [A]	Voc [V]	FF [%]	Pm [W]	劣化率 [%]
1	①	0G1915592750254217	実験前	9.178	38.02	77.75	271.4	▲0.3
			実験後	9.113	38.38	77.79	272.1	
	②	0G1915592750134217	実験前	9.184	38.02	77.67	271.2	0.7
			実験後	9.062	38.35	77.50	269.4	
	③	0G1915592750214217	実験前	9.156	38.11	77.72	271.2	0.8
			実験後	9.039	38.30	77.74	269.1	
	④	0G1915592750204217	実験前	9.152	38.02	77.73	270.5	1.0
			実験後	9.034	38.31	77.41	267.9	
	⑤	0G1915592730644217	実験前	9.257	38.17	77.62	274.3	0.7
			実験後	9.081	38.49	77.91	272.3	
	⑥	0G1915592750144217	実験前	9.197	38.26	77.83	273.9	1.1
			実験後	9.053	38.46	77.83	271.0	
	⑦	0G1915592722584217	実験前	9.258	38.05	77.49	273.0	0.0
			実験後	9.119	38.44	77.91	273.1	
	⑧	0G1915592740044217	実験前	9.227	38.13	77.72	273.5	0.0
			実験後	9.129	38.56	77.67	273.4	
	⑨	0G1915592730704217	実験前	9.167	38.08	78.16	272.8	0.1
			実験後	9.085	38.42	78.09	272.6	
	⑩	0G1915592730764217	実験前	9.247	38.10	78.02	274.9	0.1
			実験後	9.117	38.48	78.26	274.6	
	⑪	0G1915592740114217	実験前	9.270	38.11	77.61	274.2	0.3
			実験後	9.149	38.47	77.72	273.5	
	⑫	0G1915592730454217	実験前	9.246	38.19	77.96	275.3	0.5
			実験後	9.131	38.51	77.87	273.8	
	⑬	0G1915592730724217	実験前	9.223	38.15	78.02	274.6	0.0
			実験後	9.097	38.53	78.31	274.5	

劣化率 = $(1 - (\text{実験後のPm}) \div (\text{実験前のPm})) \times 100$ で、▲がついた値はマイナス(Pmの増加)を示す値



架台2～架台4

架台 No.	位置 No.	Serial No.	測定 状態	Isc [A]	Voc [V]	FF [%]	Pm [W]	劣化率 [%]
2	①	OG1915592730754217	実験前	9.182	38.09	78.17	273.4	1.0
			実験後	9.083	38.38	77.64	270.7	
	②	OG1915592740054217	実験前	9.207	38.09	78.02	273.6	0.4
			実験後	9.083	38.40	78.09	272.4	
	③	OG1915592730774217	実験前	9.176	38.09	78.09	272.9	0.0
			実験後	9.073	38.48	78.18	272.9	
	④	OG1915592740244217	実験前	9.164	38.11	78.35	273.7	0.6
			実験後	9.078	38.44	77.97	272.1	
	⑤	OG1915592750274217	実験前	9.152	38.04	78.20	272.3	0.5
			実験後	9.082	38.39	77.69	270.9	
	⑥	OG1915592723754217	実験前	9.156	38.10	77.73	271.2	▲0.1
			実験後	9.021	38.44	78.26	271.4	
	⑦	OG1915592722444217	実験前	9.190	38.00	78.21	273.1	0.4
			実験後	9.089	38.46	77.84	272.1	
	⑧	OG1915592723624217	実験前	9.186	38.08	78.17	273.5	0.5
			実験後	9.059	38.46	78.12	272.2	
	⑨	OG1915592750404217	実験前	9.152	38.02	77.80	270.7	0.4
			実験後	9.051	38.30	77.79	269.7	
	⑩	OG1915592750154217	実験前	9.123	38.18	78.26	272.6	1.2
			実験後	9.068	38.31	77.48	269.2	
	⑪	OG1915592750034217	実験前	9.202	37.99	77.72	271.7	0.8
			実験後	9.106	38.25	77.34	269.4	
⑫	OG1915592740234217	実験前	9.247	38.02	77.74	273.3	▲0.1	
		実験後	9.111	38.54	77.93	273.6		
⑬	OG1915592740224217	実験前	9.241	38.09	77.71	273.5	▲0.3	
		実験後	9.093	38.56	78.21	274.2		
⑭	OG1915592740194217	実験前	9.239	38.07	77.81	273.7	0.0	
		実験後	9.125	38.54	77.80	273.6		
⑮	OG1915592730574217	実験前	9.208	38.11	78.18	274.4	▲0.1	
		実験後	9.093	38.61	78.29	274.8		
⑯	OG1915592730624217	実験前	9.220	38.19	77.88	274.2	0.2	
		実験後	9.063	38.62	78.19	273.7		
⑰	OG1915592722114217	実験前	9.246	38.11	77.69	273.7	0.2	
		実験後	9.098	38.48	77.98	273.1		
⑱	OG1915592730614217	実験前	9.247	38.22	77.97	275.6	1.2	
		実験後	9.100	38.50	77.73	272.3		
⑲	OG1915592721394217	実験前	9.245	38.05	77.48	272.5	▲0.3	
		実験後	9.085	38.52	78.10	273.4		
⑳	OG1915592723464217	実験前	9.219	38.11	78.01	274.1	0.9	
		実験後	9.095	38.42	77.73	271.6		
㉑	OG1915592730734217	実験前	9.231	38.14	78.02	274.7	1.1	
		実験後	9.091	38.46	77.70	271.7		
㉒	OG1915592730634217	実験前	9.237	38.16	77.79	274.2	0.5	
		実験後	9.103	38.51	77.83	272.8		

劣化率=(1▲(実験後のPm)÷(実験前のPm))×100で、▲がついた値はマイナス(Pmの増加)を示す値

架台 No.	位置 No.	Serial No.	測定状態	Isc [A]	Voc [V]	FF [%]	Pm [W]	劣化率 [%]
3	①	OG1915591333934217	実験前	9.234	38.14	76.88	270.8	0.8
			実験後	9.206	38.07	76.61	268.5	
	②	OG1915592750314217	実験前	9.197	37.99	77.81	271.9	0.4
			実験後	9.066	38.41	77.76	270.7	
	③	OG1915591350014217	実験前	9.270	37.95	77.35	272.1	0.6
			実験後	9.090	38.38	77.56	270.6	
	④	OG1915591354004217	実験前	9.274	37.98	77.31	272.3	0.4
			実験後	9.084	38.41	77.70	271.1	
	⑤	OG1915592750654217	実験前	9.191	38.00	78.01	272.4	0.4
			実験後	9.085	38.49	77.59	271.3	
	⑥	OG1915592750304217	実験前	9.179	37.93	77.83	271.0	0.0
			実験後	9.060	38.41	77.91	271.1	
	⑦	OG1915589022344217	実験前	9.218	38.13	76.97	270.6	0.4
			実験後	9.206	38.19	76.63	269.4	
	⑧	OG1915592720574217	実験前	9.261	38.33	76.89	272.9	▲0.2
			実験後	9.243	38.53	76.80	273.5	
	⑨	OG1915592730744217	実験前	9.241	38.36	77.19	273.6	0.8
			実験後	9.214	38.34	76.79	271.3	
	⑩	OG1915592750164217	実験前	9.204	38.32	77.16	272.1	1.1
			実験後	9.201	38.15	76.70	269.2	
	⑪	OG1915592730714217	実験前	9.237	38.46	77.50	275.3	0.5
			実験後	9.212	38.51	77.24	274.0	
⑫	OG1915592750174217	実験前	9.185	38.11	77.76	272.2	0.6	
		実験後	9.080	38.38	77.68	270.7		
⑬	OG1915592730434217	実験前	9.207	38.23	77.91	274.2	0.2	
		実験後	9.121	38.45	78.02	273.6		
⑭	OG1915592723244217	実験前	9.173	37.93	78.04	271.6	0.2	
		実験後	9.121	38.31	77.59	271.1		
⑮	OG1915591352144217	実験前	9.122	38.00	78.69	272.7	0.1	
		実験後	9.109	38.36	77.97	272.4		
⑯	OG1915592723794217	実験前	9.150	38.01	78.42	272.7	0.0	
		実験後	9.091	38.34	78.25	272.8		
⑰	OG1915592723094217	実験前	9.157	37.96	78.10	271.5	0.0	
		実験後	9.119	38.33	77.69	271.6		
⑱	OG1915592750354217	実験前	9.191	38.08	77.78	272.2	0.3	
		実験後	9.119	38.31	77.67	271.3		
⑲	OG1915592730604217	実験前	9.233	38.20	77.68	274.0	0.3	
		実験後	9.163	38.42	77.57	273.1		
⑳	OG1915591360014217	実験前	9.196	38.05	77.69	271.8	0.5	
		実験後	9.126	38.24	77.50	270.5		
㉑	OG1915592740204217	実験前	9.206	38.19	78.04	274.3	0.5	
		実験後	9.136	38.42	77.78	273.0		
㉒	OG1915592750184217	実験前	9.170	38.07	77.75	271.4	1.1	
		実験後	9.022	38.30	77.68	268.4		

劣化率 = (1 - ▲(実験後のPm) ÷ (実験前のPm)) × 100で、▲がついた値はマイナス(Pmの増加)を示す値

架台 No.	位置 No.	Serial No.	測定 状態	Isc [A]	Voc [V]	FF [%]	Pm [W]	劣化率 [%]
4	①	0G1915591330544217	実験前	9.233	38.33	76.67	271.3	1.1
			実験後	9.210	38.18	76.34	268.4	
	②	0G1915591330854217	実験前	9.213	38.23	77.04	271.4	1.4
			実験後	9.177	38.17	76.42	267.7	
	③	0G1915591330764217	実験前	9.198	38.18	76.91	270.1	1.0
			実験後	9.181	38.07	76.53	267.4	
	④	0G1915591330064217	実験前	9.202	38.16	77.06	270.6	1.2
			実験後	9.174	38.03	76.63	267.3	
	⑤	0G1915590280264217	実験前	9.234	38.19	76.86	271.1	1.5
			実験後	9.171	38.03	76.52	266.9	
	⑥	0G1915591330784217	実験前	9.214	38.21	76.79	270.4	1.1
			実験後	9.168	38.16	76.41	267.4	
	⑦	0G1915591331934217	実験前	9.216	38.20	76.94	270.8	1.6
			実験後	9.188	37.93	76.42	266.4	
	⑧	0G1915591330584217	実験前	9.212	38.23	76.77	270.4	1.2
			実験後	9.197	38.07	76.29	267.1	
	⑨	0G1915591330614217	実験前	9.182	38.26	77.31	271.6	1.7
			実験後	9.153	38.08	76.60	267.0	
	⑩	0G1915591331124217	実験前	9.210	38.27	77.12	271.8	1.8
			実験後	9.158	38.04	76.61	266.9	
	⑪	0G1915591331364217	実験前	9.196	38.26	77.17	271.5	1.7
			実験後	9.166	37.97	76.69	266.9	
⑫	0G1915590280074217	実験前	9.231	38.43	77.14	273.7	0.9	
		実験後	9.211	38.36	76.75	271.2		
⑬	0G1915590260554217	実験前	9.211	38.39	77.25	273.2	0.8	
		実験後	9.203	38.31	76.89	271.1		
⑭	0G1915591330824217	実験前	9.229	38.33	77.03	272.4	2.1	
		実験後	9.226	37.96	76.15	266.7		
⑮	0G1915591330294217	実験前	9.212	38.17	76.88	270.4	0.1	
		実験後	9.208	38.27	76.60	270.0		
⑯	0G1915591341284217	実験前	9.234	38.22	76.69	270.6	0.1	
		実験後	9.197	38.35	76.64	270.4		
⑰	0G1915592750384217	実験前	9.195	37.94	77.77	271.3	▲0.3	
		実験後	9.098	38.48	77.74	272.2		
⑱	0G1915592750394217	実験前	9.183	38.15	78.04	273.4	0.6	
		実験後	9.091	38.47	77.70	271.8		
⑲	0G1915592750344217	実験前	9.153	38.13	78.11	272.6	0.4	
		実験後	9.071	38.47	77.82	271.6		
⑳	0G1915592740134217	実験前	9.251	38.34	77.39	274.5	0.8	
		実験後	9.267	38.33	76.67	272.3		
㉑	0G1915592722844217	実験前	9.227	38.34	77.43	274.0	0.6	
		実験後	9.221	38.32	77.06	272.3		
㉒	0G1915591333234217	実験前	9.185	38.14	77.03	269.9	0.5	
		実験後	9.175	38.15	76.71	268.5		

劣化率 = (1 ▲ (実験後のPm) ÷ (実験前のPm)) × 100で、▲がついた値はマイナス(Pmの増加)を示す値

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託業務

2017年度

太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト／
太陽光発電システムの安全確保のための実証／
耐風安全性及び水害時感電防止を考慮した合理的設計手法の開発

（ii）水害時の太陽光発電システムの電気安全に係る研究開発 報告書

【太陽光発電システムの水没実験報告書（抜粋版）】

発行者 一般社団法人 太陽光発電協会

<http://www.jppea.gr.jp/index.html>



● 2019年 4月26日 第1版第1刷 発行