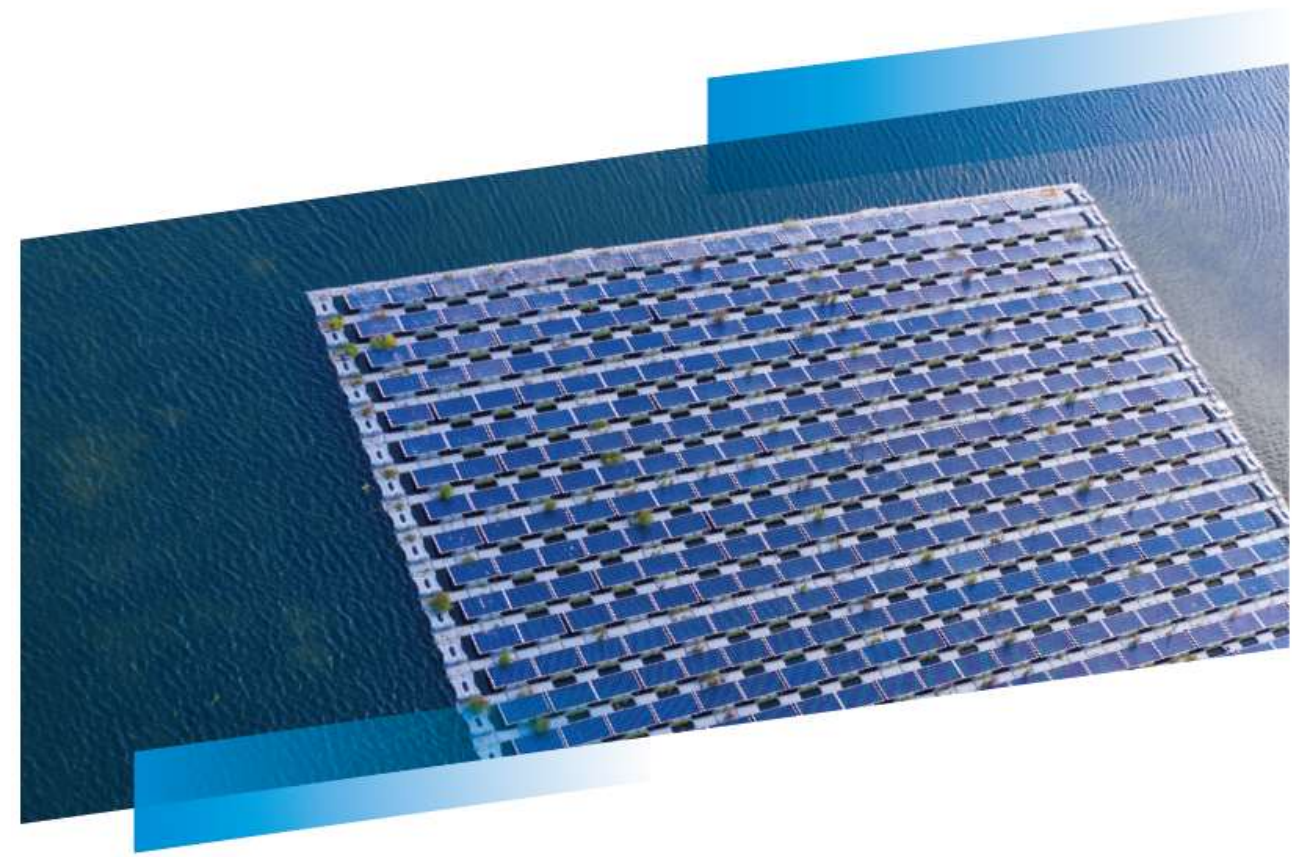


Trina solar

Trina solar
天合光能



トリナ・ソーラー 洋上PVモジュール白書

洋上PVモジュール白書

序文

太陽光発電の新市場・用途として拡大が予想される洋上太陽光発電は、高温、高温、塩水噴霧腐食、強風、波浪、降水などの厳しい海洋環境の課題に直面し、モジュールはより高い信頼性が要求されます。本白書は、沿岸地域や洋上環境でのPVモジュールの使用時に注意すべき事項を提供し、ユーザーによるPVシステム設計の参考指針とすることを目的とする。

目次

1. 洋上PVの背景と主な応用形態	01
1.1 中国での洋上PV	01
1.2 その他地域での洋上PV	01
2. 洋上PVの分類と現状の課題	01
2.1 洋上PVの分類	01
2.2 洋上PVの主な環境課題と破壊モード	02
3. 洋上PVモジュールソリューション	03
3.1 モジュールソリューション	03
3.2 洋上 PV モジュール 認証	05
3.3 トリナ 700W + 洋上ソリューション	05
3.4 沿岸および洋上でのPVモジュール検討事項	06
3.4.1 鳥害	06
3.4.2 波浪	07
4. トリナ・ソーラーの洋上PVモジュール信頼性向上試験	07
4.1 機械的荷重試験	07
4.2 高温高湿試験	09
4.3 塩水噴霧試験	10
5. トリナ・ソーラーの洋上PVモジュール事例	13
6. 洋上PVの動向と展望	14

01

洋上PVの背景と主な応用形態

近年、太陽光発電の陸上設置が増加し続け、土地資源が太陽光発電の大規模開発を制限する重要な要因となっている。それに対し、海域は広くて遮るものがなく、洋上には太陽光も豊富で、開発領域も豊富にあり、急速に人々の視野に入りつつある。世界の洋上太陽光発電の潜在容量は約4000GWで、全体の潜在容量は非常に大きい。

1.1 中国での洋上PV

中国政府の新エネルギー政策に後押しされ、中国の沿岸地方は「カーボンピーク・カーボンニュートラル目標」の実現に積極的に対応し、相次いで洋上太陽光発電の開発に力を入れている。沿岸部の電力消費量は大きく、太陽光発電所の開発は土地資源によって制限される。（大規模地上設置型発電所は土地を必要とし、分散型太陽光発電の貢献は不十分である）沿岸部には豊富な海洋資源があり、洋上太陽光発電と風力発電の共同開発によって、投資コストを効果的に最適化することができる。（海底ケーブル、変電設備など）洋上太陽光発電は養殖と組み合わせることもでき、全体的な投資収益率を向上させることができる。洋上太陽光発電の発電効率は、同じ採光条件下で地上設置太陽光発電と比較すると一定の効果がある。中国の海岸線は1.8万キロメートル以上、海岸の砂浜面積は1.5万平方キロメートル以上有し、杭式設置洋上太陽光発電は1800平方キロメートル以上の面積に設置でき、砂浜杭式太陽光発電は2000平方キロメートル以上の面積に設置できる。理論上、中国は100GW以上の洋上太陽光発電を設置することが可能である。

1.2 その他地域での洋上PV

アジア太平洋地域は、洋上太陽光発電の開発にとって、もう一つのブルーオーシャン地域である。特に東南アジア地域は人口が密集しており、島嶼が土地資源の不足を補うため、洋上太陽光発電はエネルギー転換の主要な発展方向の一つとなっている。理論的な観点から、アジア太平洋地域、特に東南アジアでは、50GW以上の洋上太陽光発電を設置すること可能であり、市場の見通しは明るい。中南米も洋上太陽光発電に注目している。ラテンアメリカには長い海岸線があり、沿岸部での電力消費は膨大で、新エネルギー開発は土地資源の制約によって制限されているため、洋上PV開発はエネルギーと消費の問題を効果的に解決できる。

02

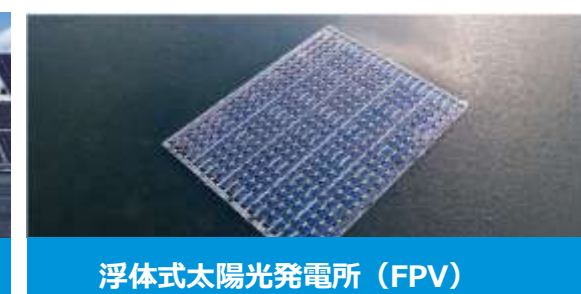
洋上PVの分類と現状の課題

2.1 洋上PVの分類

新しいエネルギー利用と資源開発モードとして、洋上太陽光発電は、太陽光発電技術を利用して洋上に発電所を設置するもので、発電能力が高く、土地占有率が低く、他の産業との統合が容易であるという特徴がある。陸上太陽光発電に比べ、洋上太陽光発電は自然環境の利点がある。水面は開放的で障害物がなく、太陽光が長時間十分に利用可能である（水面での反射光）ため、発電能力を大幅に向上させることができる。水深や岸からの距離によって、洋上太陽光発電は主に杭固定型と浮体型に分類される。

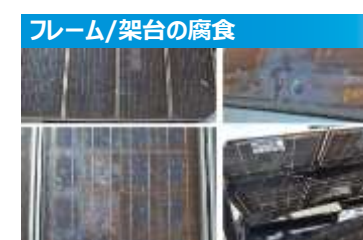
杭固定式太陽光発電所は高架式水面太陽光発電所とも呼ばれ、水位が浅く、地盤沈下などの地質災害がなく、水位変化が小さい水面サイト、例えば養殖池、塩田などによく適用される。水深が8メートル以下で、地質が安定し、水位変化が小さい海浜に適用し、現在洋上太陽光発電建設の主流である。このタイプの発電所は「漁業と太陽光発電の融合」という建設モードを採用することができ、養殖が集中している地域の池の海洋資源を利用して、太陽光発電プロジェクトを開発・建設する。海洋発電と養殖を融合し、多産業の相補的發展を実現する。

浮体式太陽光発電所（FPV）は浮体材料とアンカーシステムの使用により、太陽光モジュール、インバータなどの発電設備を海面に浮かべて発電するもので、水深が8メートル以上の水域に適しており、台風の影響がない海域に設置する。長期的な経済的観点から、浮体式は将来的に洋上太陽光発電の主な応用形態になると予想される。浮体式太陽光発電所は応用範囲が広く、環境問題も少ない。世界的に見ると、現在60カ国以上が積極的に洋上での浮体式太陽光発電所の建設を推進しており、そのうち35カ国以上が350基の浮体式太陽光発電所を建設している。調査機関Global Industry Analystsが発表した調査によると、2021年の世界の浮体式太陽光発電設備容量は1.6GWで、2026年には4.8GWに成長すると予想されている。



2.2 洋上PVの主な環境課題と破壊モード

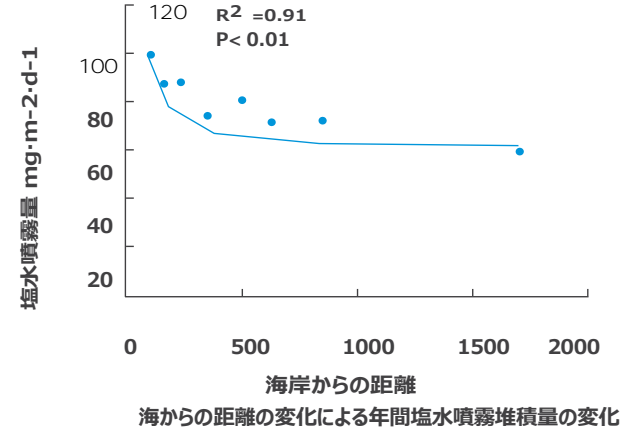
地上設置と比べ、洋上PVモジュールが直面する環境問題は、その特殊な環境のため、陸上PVが直面する環境問題よりも複雑である。風、波、潮流による浮体構造への負荷は劇的に増加し、システムの安全性は深刻な課題に直面する。「三高三強」（高温、高湿度、高塩水噴霧、強風、高波、強降水）が太陽電池モジュールに及ぼす複合的な影響は、発電効率の低下と寿命の短縮につながる。



洋上太陽光発電モジュールソリューション

3.1 モジュールソリューション

異なる季節における塩水噴霧暴露量と海からの距離の相関研究[1]によると、海からの距離が500mまでの範囲では、海からの距離が長くなるにつれて塩水噴霧暴露量は減少し、500mを超えると緩やかに減少し、海からの距離が2,000mの範囲では、塩水噴霧暴露量は60mg-m-2-d-1の範囲にある。



[1]侯夢華,李翠平,袁甜甜,南方沿海地区盐雾沉降的时空分布——以福建古雷半岛为例[J].生态学报,2019,38(8):2524-2530

上記に基づいて、トリナ・ソーラーは浮体式太陽光発電所（FPV）タイプと杭固定式太陽光発電所タイプの2種類の製品ソリューションを提供している。

	遠洋	沖合	500m	2000m	
距離:	遠洋	沖合	500m	2000m	
地域:	海洋地域と一部の沖合地域	沖合地域	500m 以下	海岸より500m - 2km	≥ 2km
設置方式:	フロート設置	杭固定設置	杭固定設置	標準設置方式	標準設置方式
モジュール:	ダブルガラス仕様 (推奨モデル NEG21C.20, DEG21C.20, NEG19RC.20, DEG19RC.20) ダブルガラス+表面ダブルコート ガラス AA15グレードフレーム IP68 Junction Box & コネクタ+防塵防水キャップ	ダブルガラス仕様 (推奨モデル NEG21C.20, DEG21C.20, NEG19RC.20, DEG19RC.20) ダブルガラス+表面ダブルコートガラス AA15グレードフレーム IP68 Junction Box & コネクタ +防塵防水キャップ	標準ダブルガラス仕様	標準仕様	標準仕様
その他 要求品質	ボルトと架台防腐仕様	ボルトと架台防腐仕様	標準仕様	標準仕様	

定義	沖合距離	適合モジュール	ボルト 要求仕様	架台 要求仕様
フロート固定設置 (FPV)	海洋地域と 一部の沖合地域	ダブルガラス+表面ダブルコートガラス AA15グレードフレーム IP68 Junction Box & コネクタ+防塵防水キャップ +防水ケーブル	防錆仕様	防錆仕様
杭固定設置	海岸より500m 以下	ダブルガラス+表面ダブルコートガラス AA15グレードフレーム IP68 Junction Box & コネクタ+防塵防水キャップ	防錆仕様	防錆仕様
その他地域	海岸より500m - 2km	標準ダブルガラス構造	標準仕様	標準仕様
	≥ 2km	標準ガラス・バックシート構造、ダブルガラス構造	標準仕様	標準仕様

防水防塵キャップ:

朝夕の施工時に発生する結露や水蒸気のコネクタ部への侵入を避けるために設計されたキャップ。



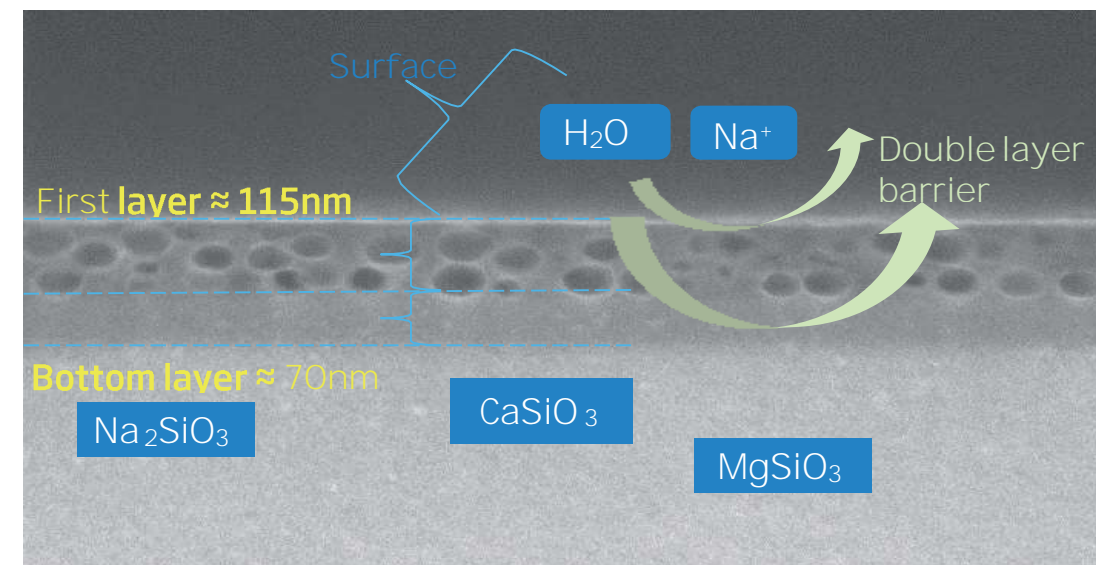
IP68 コネクタ:

コネクタはIP68等級/塩水噴霧S8で、コネクタ保護カバーを追加することにより耐水性、耐塩水噴霧性が向上します。コネクタ保護カバーを追加することで、耐防水性・耐塩水噴霧性が向上します。



ダブルガラスコート:

前面ガラスは水蒸気と塩水噴霧からガラス基板を保護するために緻密なSiO2層を施す仕様とする。



3.2 洋上 PV モジュール 認証

トリナのバーテックス・シリーズは、テュフラインランド・洋上PV2 PfG 2930/02.23モジュール認証を取得し、これは初の洋上モジュール認証で洋上太陽光用途市場の拡大に向けて重要なマイルストーンである。



3.3 トリナ 700W + 洋上ソリューション

信頼性という技術的な難題に対処するだけでなく、洋上太陽光発電のコスト管理も、漁業と太陽光発電の融合プロジェクトにとって極めて重要であることを計算の例として挙げる。182-78枚モジュール仕様と比較すると、700W+210N型 i-TOPCon-66セルモデルのBOSコストは、¥0.03-0.06/w以上節約できる。

製品	Trina N型 i-TOPCon	比較対象N型 type A	比較対象N型 type B
Size (mm)	2384*1303	2465*1134	2465*1134
Power (W)	680	610	610
Voc (V)	47.4	51.47	55.25
Isc (A)	18.18	15.01	14.11
Number of blocks of a single string component	29	26	24
Low-voltage electrical costs (¥/W)			
Inverter	0.0241	0.0242	0.0242
Convergence box (including construction)	0.0013	0.0017	0.0018
MC4 connector (including construction)	0.0015	0.0019	0.0020
Cables (including construction)	0.0247	0.0258	0.0264
Low Voltage DC Cable (including construction)	0.0687	0.1020	0.1162
Grounding wire (including construction)	0.0026	0.0029	0.0029
Bridge (including construction)	0.0062	0.0078	0.0085
Cable gutter (including construction)	0.0096	0.0094	0.0120
Inverter installation	0.0005	0.0005	0.0005
Total amount	0.1391	0.1761	0.1945
Difference	BL	0.0370	0.0554
Structural costs (Pile exposed 5.5m) (¥/W)			
Racking (including construction)	0.2605	0.2648	0.2541
Pile foundation (including construction)	0.2793	0.2701	0.2926
Total amount	0.5398	0.5350	0.5468
Difference	BL	-0.0048	0.0070
land rent (¥/W)			
Total amount	0.1375	0.1385	0.1382
Difference	BL	0.0010	0.0007
Cost of BOS (¥/W)			
Total amount	0.8164	0.8495	0.8795
Cost differential of BOS (¥/W)			
Total amount	BL	0.0331	0.0631

第一に、洋上は地上プロジェクトに比べ広大で日陰がなく、日射量が多いため、長いアレイ配置に適している。

第二に、外洋の水深や波の影響により、風の状況は複雑である。

また、地域によっては凍結の影響を考慮する必要があるため、洋上PVプロジェクトの杭基礎の設計は長くなり、杭も太くなると予想されます。よって地上太陽光発電所と比べると、基礎材料と建設コストは高くなります。

また、洋上環境では、防風、腐食、温度、湿度に対し高い耐性が要求されると共に、材料自体の経年劣化に対する高い耐性が要求されるため資材の使用量を効果的に削減することは、地上太陽光発電プロジェクトよりも経済的なメリットをもたらします。

トリナのN型Vertex 700W+モジュールは、低Vocで高出力であるため、洋上用途ではBOSコストの優位性がより明らかと言う結果となった

3.4.沿岸および洋上でのPVモジュール検討事項

3.4.1 鳥害

海には多くの鳥が生息し長期滞在による糞尿はモジュールにホットスポットを発生させる可能性がある。

そのため、次の3つの観点から解決策を検討することを推奨する

1. 赤外線干渉システムによる鳥害対策
2. 音波干渉システムによる鳥害対策
3. 定期的な清掃とメンテナンス

3.4.2 波浪

洋上太陽光発電は、風や波が直接モジュールの表面に当たるのを避ける必要があるため、以下を推奨する

1. 杭の高さ、モジュールの下端は過去50年間の最高波より高くする
2. 防波堤を施して波の影響を減らす

04

トリナ・ソーラーの洋上PVに関する信頼性評価

洋上PVモジュールは、機械的強度、塩水噴霧、PID、耐高温高湿などの面で強化する必要がある。

トリナ・ソーラーは第三者試験機関と提携し、一連の強化試験を実施している。

4.1 機械的強度試験：



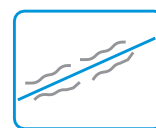
偏積雪荷重

2.8m 非対称
積雪荷重



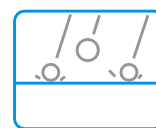
超低温

耐-40℃



動的負荷疲労

+1500Pa
@20000回
振動テスト



雷テスト

35mm
耐雷テスト

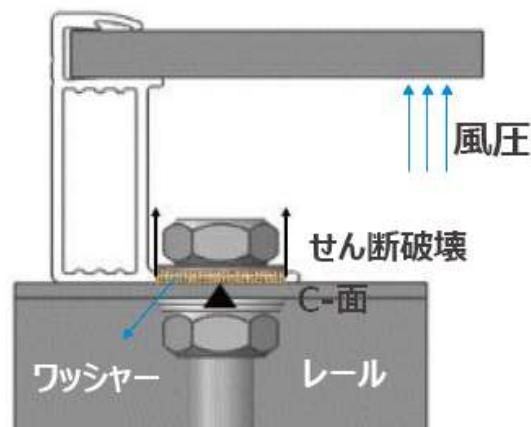


風洞テスト

カテゴリー 17
ハリケーンテスト

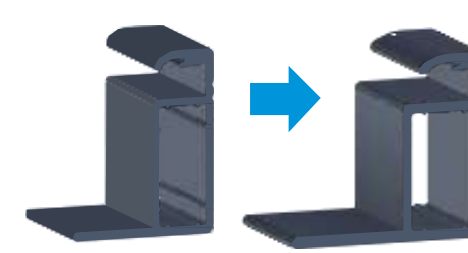
トリナ・バーテックス・モジュールは、5種類の過酷な負荷テストに合格し、過酷な気象条件下でも高い品質を維持することが出来た。

強風下におけるモジュール破壊モードの分析：



洋上環境での風によるフレームの破損・ボルトの緩みに対策は、以下の2点を強化した。

1) フレームの肉厚を増やしアームを小さくする。適切なワッシャー選定と取扱説明書に従ったトルク管理



製品モデル	B面高さ (mm)	C面幅 (mm)	C面厚さ (mm)	C-d長さ (mm)
210-66	33	28.5	1.8	18.1

2) 強風時の振動によるトルクの減衰や固定強度の低下を避けるため、緩み止めボルトの使用を推奨

仕様	機能	イメージ	振動 (s)	残留軸力/初期軸力
メタルロック	摩擦力に依る 緩み防止機能		240	98.00%

強風テスト：

1) ボルト固定による風洞実験では、大型モジュールが60m/s以上の風速に耐えることを実証

風レベル	12	13	14	15	16	17
名称	サイクロン	サイクロン	サイクロン	サイクロン	サイクロン	サイクロン
風速 m/s	32.7-36.9	37.0-41.4	41.5-46.1	46.2-50.9	51-56	56.1-61.2

2) 「フレキシブルステントの適用時におけるPVモジュールの信頼性試験要求事項」に従い、我々はシミュレーション振動実験を行い、大型モジュールを設計した。

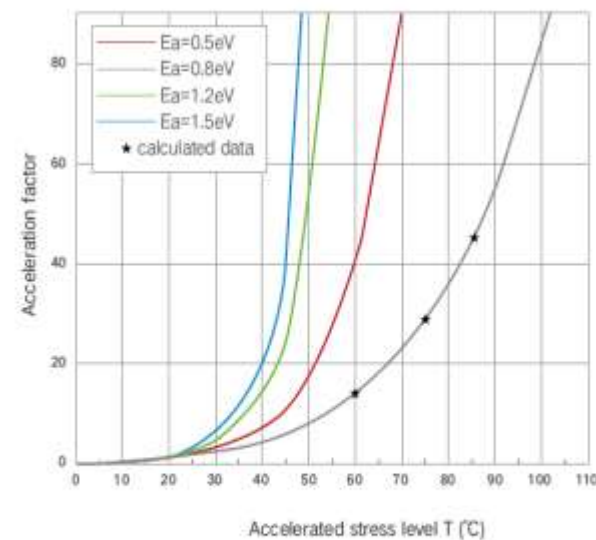
振幅数6Hz、振幅10mmと20mm、模擬風圧力1.0kN/m²で振幅数は230万回に達した。

振幅数230万回は世界の80%の地域をカバーする事が可能である。

230万回の振幅テスト後、モジュールには明らかなクラック損傷は見られなかった。

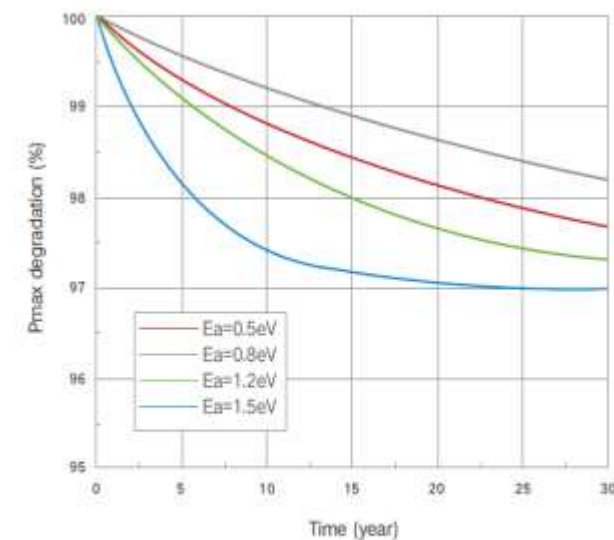
アルミ合金フレームには亀裂、破損、裂け目などはなく、ケーブル、コネクタ、ボルトは無傷であった。

3) 浙江省嘉興市屋外経験基地：2022年、台風「梅花」が上陸した後、210個の大型部品は無傷であった



Acceleration factor simulation

$$AF(T, RH) = \left(\frac{RH_{\text{試験}}}{RH_{\text{実証}}} \right)^n \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{実証}}} - \frac{1}{T_{\text{試験}}} \right) \right]$$



$$P(t; temp; H) = P_{\infty} * [1 - \exp(-RU * AF(T; RH) * t)]$$

4.2 高温高湿試験：

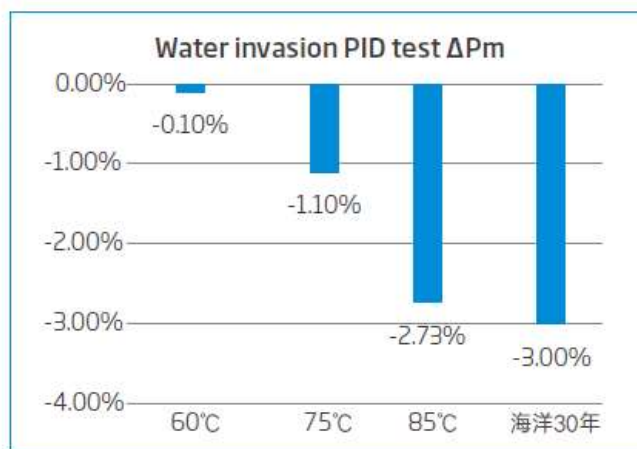
- 1) DH試験：ダブルガラスモジュールはDH3000テストに合格し、ELに異常はなく、出力減衰はわずか1.31%であった
- 2) PID試験：ダブルガラスモジュールはPID試験に合格し、アレニウス式で補正された洋上環境での30年相当の劣化は3%以下であった

塩水噴霧試験：

PVモジュールが沿岸の塩害環境に耐える能力をシミュレートするため、国際的な認証試験 IEC 61701-2011およびIEC 60068-2-52規格を用いて試験を実施した。



PID test device
(60°C、75°C、85°C、3.5% saline soak PID)



65°C、75°C、85°C、3.5% saline soak
PID power degradation

Table A.1 - ISO 9223 に準じた腐食性能評価の簡易ガイドス、および鋼製試料の質量減少に基づく1年間の腐食度に相関する試験方法

腐食等級分類	環境		年間質量減少量 (g/m ²)	60068-2-52 加速試験相当日数
	海水域からの距離 (km)	暴露時間比率 (ToW)		
C1(本試験対象外)	--	--	<10	none
C2(本試験対象外)	≥10	<25%	10-200	2,3
C3	≥10 2 to 10	≥25% <25%	200-400	4(14日)
C4	2 to 10 <2	≥25% <25%	400-650	1(28日) 5(28日)
C5	<2	≥25%	600-1500	6(56日)
CX	海洋地域	--	1500-5500	7(90日) 8(70日)

PV モジュールの塩水噴霧腐食試験 IEC61701-2020 によると、海洋環境の腐食条件 CX は、試験方法 7 および 8 を参照し実施した。塩水噴霧試験方法は下表を参照：

Table 1 - 試験方法 1~8 試験サイクル

試験方法	試験サイクル詳細	推奨サイクル
Test method 1	<p>1サイクル=7日間 手作業の場合移行時間（最大2時間）は6日と22時間の湿度条件期間に含める</p>	4サイクル(28 days)
Test method 2	<p>1サイクル=1日 手作業の場合、移行時間（最大2時間）は、22時間の湿度条件期間に含める必要がある。</p>	3サイクル(3 days)
Test method 3	<p>4回繰り返す</p> <p>1サイクル=7日間 手作業の場合、移行時間（最大2時間）は、湿度条件期間22時間および標準雰囲気期間3日に含める。</p>	1サイクル(7 days)
Test method 4		2サイクル(14 days)
Test method 5		4サイクル(28 days)
Test method 6		8サイクル(56 days)
Test method 7	<p>1サイクル=8h</p>	3,6,12,30,45,60,90,150,180 サイクル
Test method 8	<p>移行時間（ある条件に移行した後、その条件に規定された温度および相対湿度に達するまでの時間）は、塩ミストから乾燥状態まで30分以内または30分以上60分以内、乾燥状態から加湿コンディションまで15分以内または15分以上30分以内、加湿コンディションから塩ミストまで30分以内とする。これらの移行時間は次のコンディション期間に含まれるものとする。</p>	(1,2,4,10,15,20,30,50,60 days)
<p>注 温度および相対湿度の±許容誤差は、平衡状態における操作制御設定点でのセンサーの設定値からの正負の偏差として定義される許容変動です。これは、設定値が指定された値からプラスマイナスで変動することを意味するものではない。</p>		

実際の設置状況での腐食をよりよくシミュレートするため、塩水噴霧S8試験にはボルト固定方式を採用した。アルミ合金フレーム、固定ボルト、架台固定レールの活性度が異なるため、接続部が電蝕反応（陽極、保護陰極）を起こしやすく、その結果、固定穴の劣化、固定強度の低下、架台の腐食程度が異なる。同様に屋外では、8年間稼働した漁業用太陽光発電所で同じ電蝕に依る腐食の問題が発生した。



洋上PVではフレームとボルトの接続位置の電蝕に注意し、以下の二つの方法で問題を解決すべきである：

- 1)モジュールフレームの酸化膜の厚さを15マイクロメートル以上、架台の垂鉛メッキ層を厚くし、固定ボルトに特殊な絶縁コーティング処理を施し海水からの塩害腐食耐性を向上させる
- 2)設置後、固定箇所をスプレー塗料などで保護する



05

トリーナ・ソーラーの洋上PV事例

📍 煙台CIMCオフショア浮体式プラットフォーム実証実験



06

洋上PVの動向と展望

▶ 洋上PVの種類と機能はさらに強化される

世界の洋上PVは急成長しており、市場の伸びが電力コストのさらなる低減に貢献し、コスト低減がより大規模な普及につながり、成長サイクルを形成しつつある。将来の洋上太陽光発電は、養殖業、水素製造業、その他の産業と融合され、その価値を最大化する予想される。浮体式太陽光発電は複雑で時間のかかるインフラを必要としないため、プロジェクトの迅速な建設に有利であり、洋上太陽光発電の主流になるであろう。

▶ 洋上での "風と光の融合" は、今後の洋上エネルギーの重要な発展方向である

洋上太陽光発電は、洋上風力発電の遊休海域を利用することが可能であり、ケーブルや送電設備を共有することが可能である。杭基礎や係留と設置方法を共有し、便利でコストパフォーマンスの良い設置方法が可能となる。



▶ 洋上エネルギーアイランド

洋上エネルギーアイランドは、洋上における再生可能エネルギーの大規模利用の将来的な方法と考えられており、人工的に建設された大規模な洋上固定構造物または浮体構造物に複数の形態の再生可能エネルギー利用を継承し、補完的で大規模な発電の利点を形成することを指す。洋上風力発電と太陽光発電を基盤とする多様な海洋エネルギー融合の発展は、海洋天然資源と海洋空間資源を複合的に利用し、補完的な優位性を形成し、空間構成を最適化し、資源利用効率を向上させ、海洋の集約的かつ経済的な利用を促進し、海洋クリーンエネルギー分野における技術革新の統合を促進する。

▶ 洋上PVと水素、アンモニア製造

洋上太陽光発電と水素・アンモニア製造装置を融合し、送電システムコストの削減も将来可能となるであろう。