

特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する 安全性確保のためのガイドライン策定

国立研究開発法人産業技術総合研究所

福島再生可能エネルギー研究所(FREA)

再生可能エネルギー研究センター 太陽光システムチーム

大関 崇



ともに挑む。つぎを創る。

未来をデザインし、社会と共に未来を創る。
互いを認め、共に挑戦する研究所を築く。

本事業の目的・期間

- 本事業は、近年増加傾向にある傾斜地、農地、水上に設置される太陽光発電設備の安全確保に向けた電気・構造に関する設計・施工ガイドラインの策定を目的とする。
 - 傾斜地設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン:傾斜地GL
 - 営農型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン:営農型GL
 - 水上設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン:水上GL
- これらのガイドラインは、2021年3月までに暫定版※を策定する。実証実験等で得られる知見を盛り込み、2023年3月までに完成版を策定する。

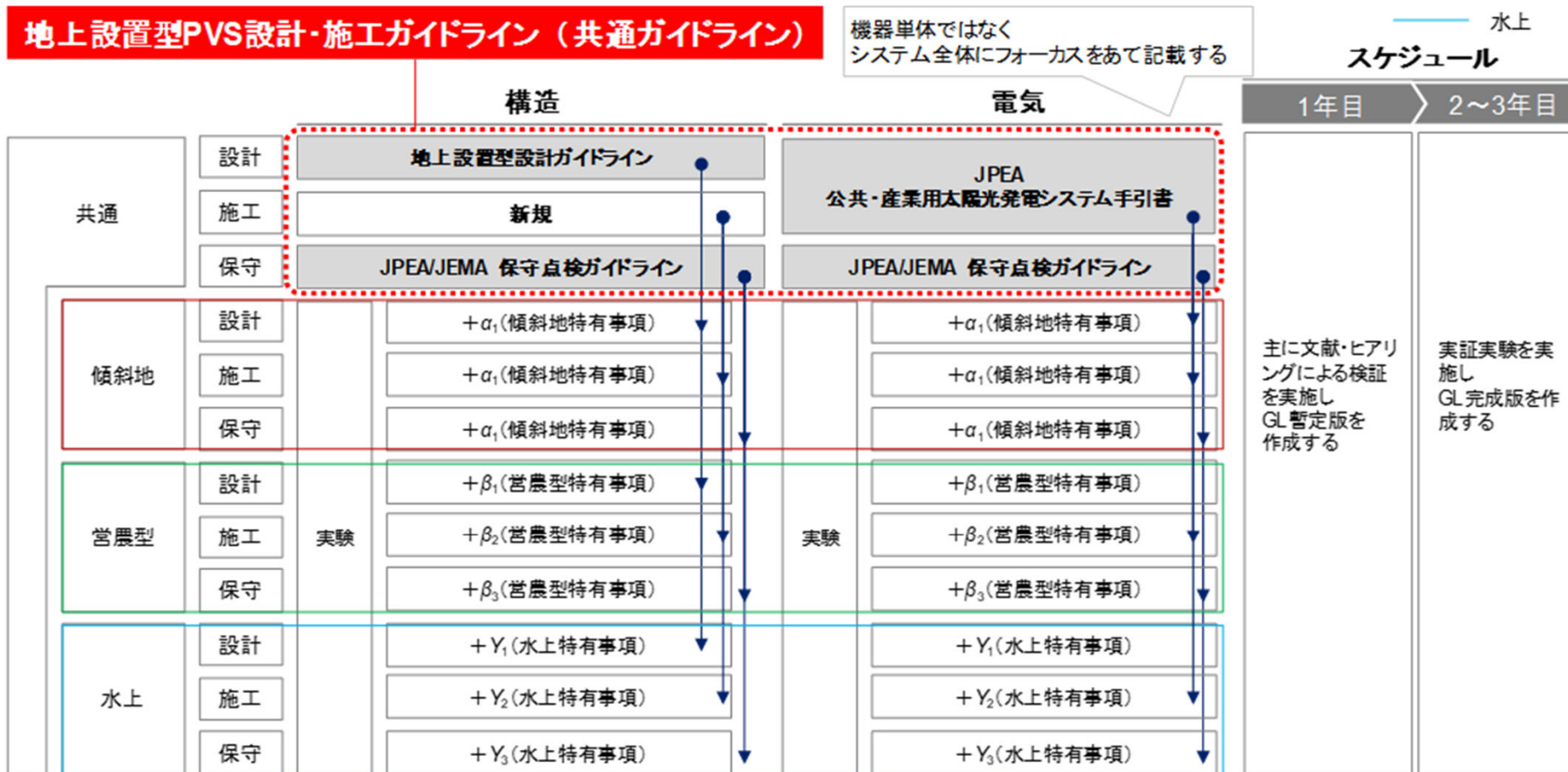
※「暫定版」とは実証実験を踏まえない内容であることを示すもの。具体的なガイドライン名称は別途検討。

ガイドライン作成方法

- 傾斜地
- 営農型
- 水上

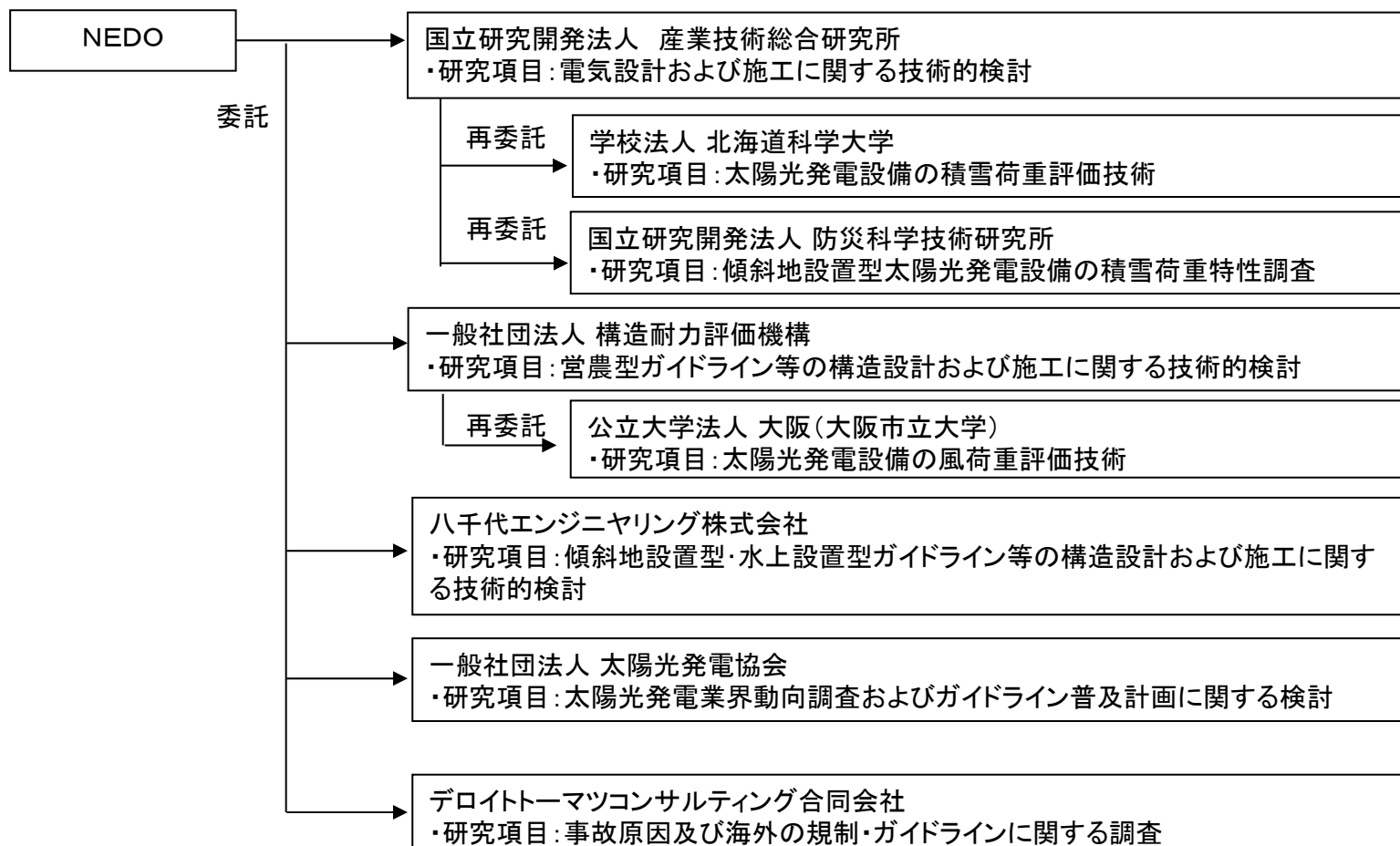
スケジュール

1年目 2~3年目

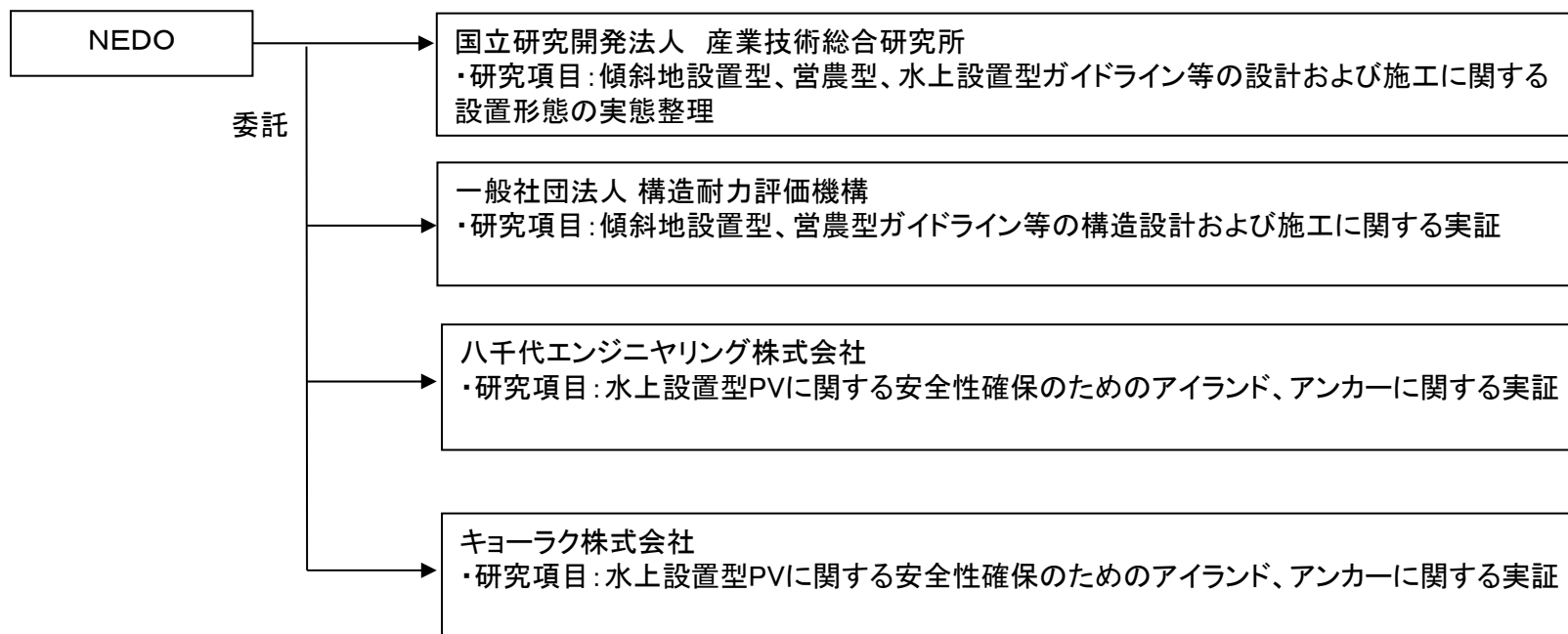


※環境アセスメント(土壌・水質汚濁)に関しては他GLより引用する

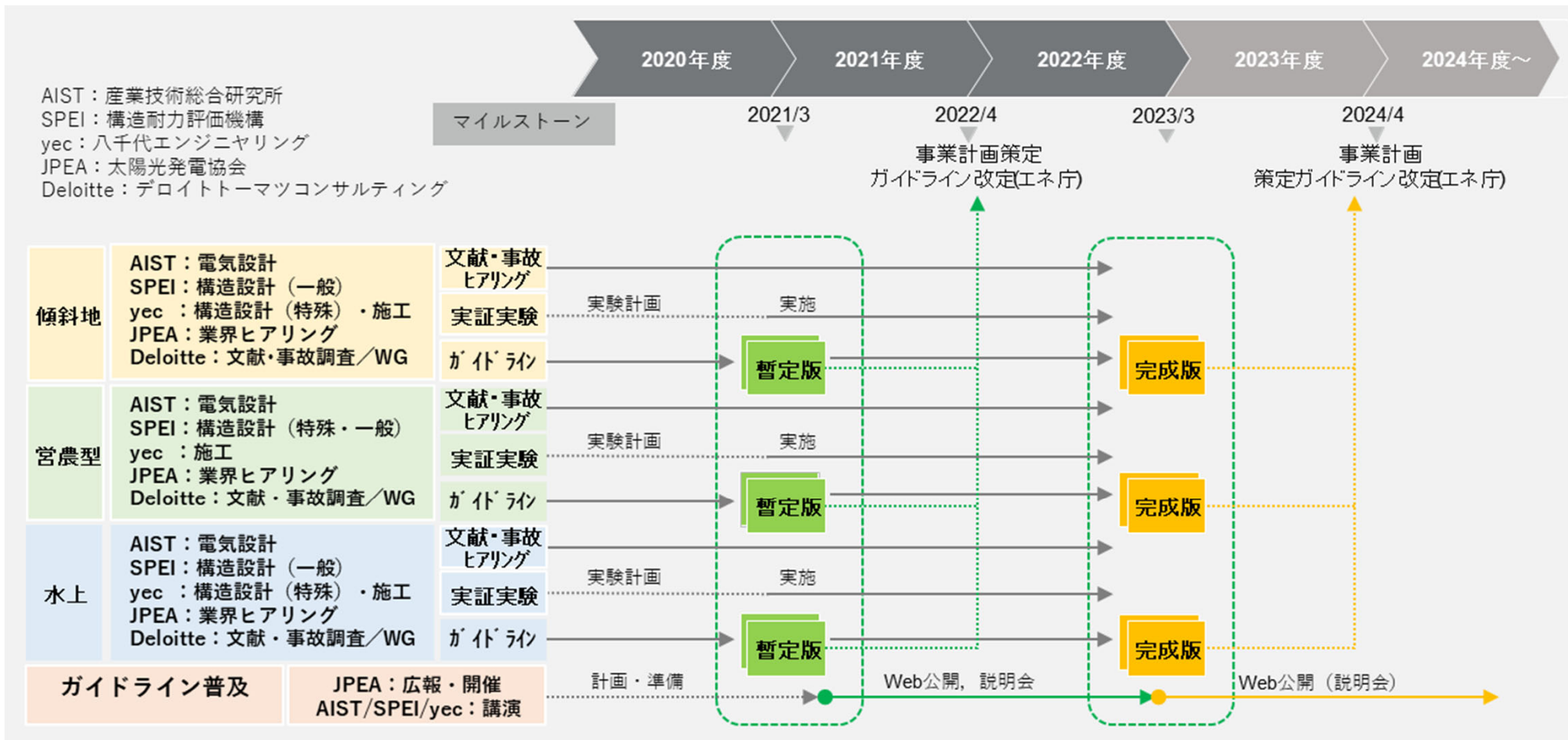
特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する 安全性確保のためのガイドライン策定



特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する 安全性確保のための実証実験



実施体制、概要



各設置形態で特有の内容

傾斜地



営農型



水上



構造

- 土木造成が相対的に多く、土砂災害対策が必要。
- 造成地盤だけでなく自然地盤もあり、急こう配にも設置。

- 農耕地盤であり水田や畑など地質は様々。
- 農地法から簡易に撤去できる基礎の要求有り。
- 柱スパンが大きく、梁の下端までが高い。

- ため池など水面設置のため、アースアンカーを水面下の地盤へ打設し、アイランドの外周部のフロートを係留。
- 樹脂製フロートが多い。
- 1フロートに1枚のPVモジュールが設置されることが多く、アイランドの大きさは様々。

電気

- ケーブル配線には排水計画を考慮する必要。
- 保安点検することが相対的に困難。

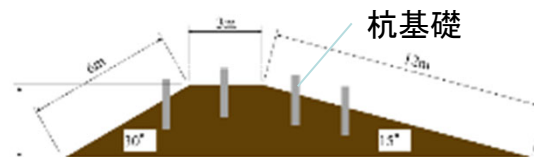
- 営農者が設備敷地内で農作業を実施し、頭上にケーブルを敷設。
- モジュールが疎に配置されているため、ケーブルやコネクタが直接雨水や直射日光に曝される可能性。

- フロート上およびフロートと岸の間に配線が存在。
- 機器への水分浸入、水没する可能性が相対的に高い。
- 波、風により機器、配線が常に揺れる。

実証実験

傾斜地設置型

- 風荷重(設計風速)：CFD・実験(単純地形)
- 風荷重(設計風速)：CFD・実験(実在地形)
- 風荷重(風力係数)：風洞実験
- 積雪荷重：屋外荷重実測
- 杭基礎設計：凍上効果実測、(北見工大)
- 杭基礎の抵抗力：載荷試験(傾斜地、杭1種類)
- 杭基礎の抵抗力：載荷試験(傾斜地勾配、杭種類等)
- 地盤・造成施工：地盤侵食保護に関する実証実験



杭基礎載荷試験、
地盤侵食保護の実証実験



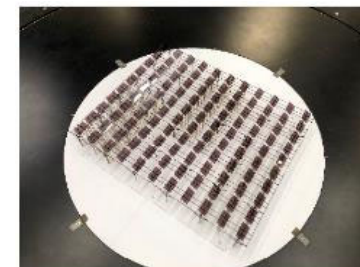
農地での地盤調査



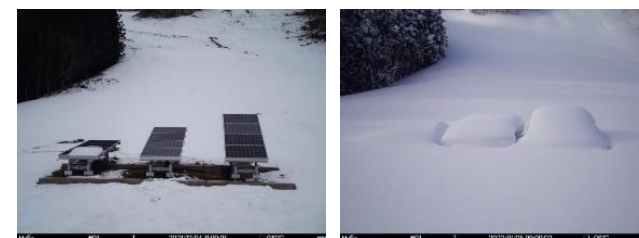
係留張力：水理実験イメージ

営農型

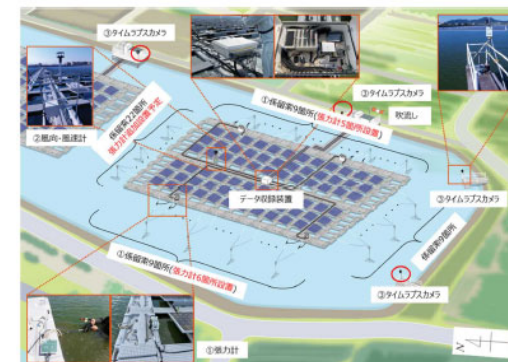
- 風荷重(風力係数)：風洞実験(藤棚式；遮光率、アレイ勾配)
- 風荷重(風力係数)：風洞実験(足高式等)
- 農地の地盤調査：SWS試験、簡易貫入試験等
- 杭基礎の抵抗力：載荷試験(水田、畑等)
- 杭基礎設計：凍着凍上対策に関する実証実験、(北見工大)



営農型風洞実験



積雪荷重の実証実験



水上係留索への荷重実測

海外規制調査・ガイドライン調査

- 海外規制やガイドラインなどを調査し、ガイドラインの参考とする。
- 調査対象国において 傾斜地への太陽光導入を促進している国は見当たらず。欧米では営農・水上は入札枠等で条件付きでの導入を促進している。

各国の営農型設置形態の太陽光発電における概況

太陽光発電を対象とした法規制特殊な設置形態の太陽光発電向けのガイドライン

 規制緩和・導入促進

×
 規制強化・導入抑制

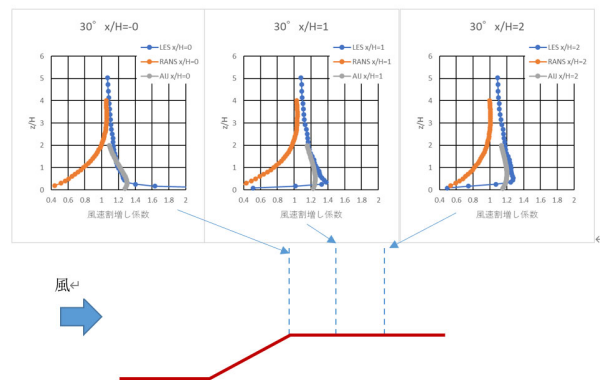
		アジア			欧州			米国
		日本	韓国	台湾	英国	ドイツ	フランス	MA州
営農	導入関連指標	560ha(2018年度累計) (営農型ための一時転用許可)	10GW(2030年)	2025年までに2万haの荒廃農地に太陽光発電の導入を計画	不明	導入実績は数十MW (2020年10月時点)	2017-20年に約135MW導入	不明
	導入政策	農業経営の高度化に利活用できる場合は補助金を支給	—	地上設置型より高いFIT価格を適用*1	—	専用入札枠	専用入札枠	インセンティブ付与(FIP, US\$0.06/kWh)
	ガイドライン	—	営農ガイドラインあり	—	営農ガイドラインあり	営農ガイドラインあり	(営農ガイドライン作成中)	営農ガイドラインあり

傾斜地設置型

傾斜地

実証実験 (傾斜地)

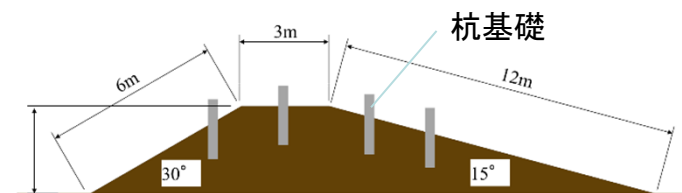
- 風荷重(設計風速) : CFD・実験(単純地形)
- 風荷重(設計風速) : CFD・実験(実在地形)
- 風荷重(風力係数) : 風洞実験。
- 積雪荷重 : 屋外荷重実測
- 杭基礎設計 : 凍上効果実測、GL2(北見工大)
- 杭基礎の抵抗力 : 載荷試験(傾斜地、杭 1 種類)
- 杭基礎の抵抗力 : 載荷試験(傾斜地勾配、杭種類等)
- 地盤・造成施工 : 地盤侵食保護に関する実証実験



CFD: 数値計算実験



積雪荷重実測

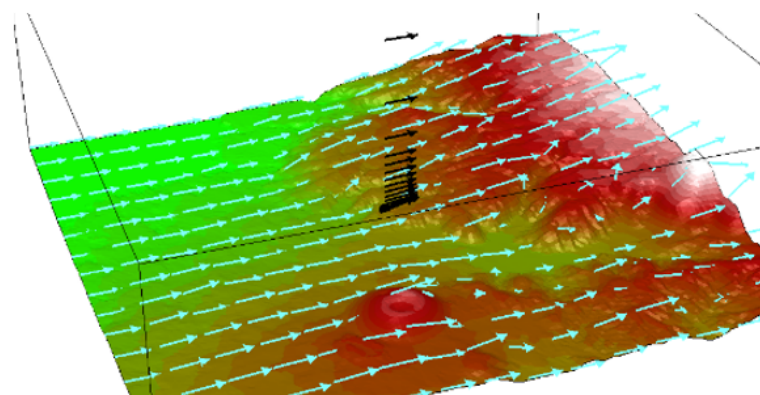
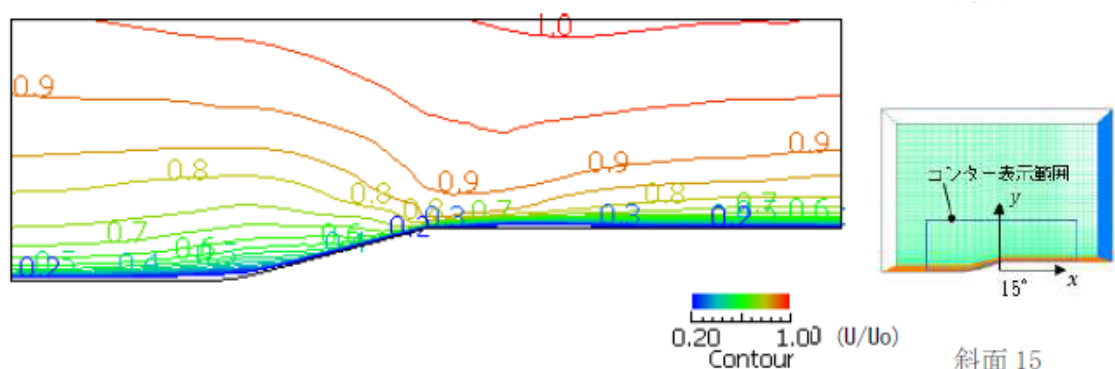


杭基礎載荷試験、地盤侵食保護の実証実験

傾斜地

CFD・実験(単純地形)

- 傾斜地での風速分布（風速増加）や傾斜地に設置されるPVアレイ面の風力係数について調査するため**単純な傾斜地形**でのCFD解析を実施する。
- 単純な傾斜地形をモデル化し、**LES**および**RANS**による解析を実施する。また、解析結果と既往文献に示された小地形の**風速割り増し係数**（風洞実験結果に基づいて設定されている）を比較する。また、**地表面粗度（樹木）の影響**についても検討する。アレイ面の風力係数については、ピーク風力を求める必要があるため、LESで計算する。

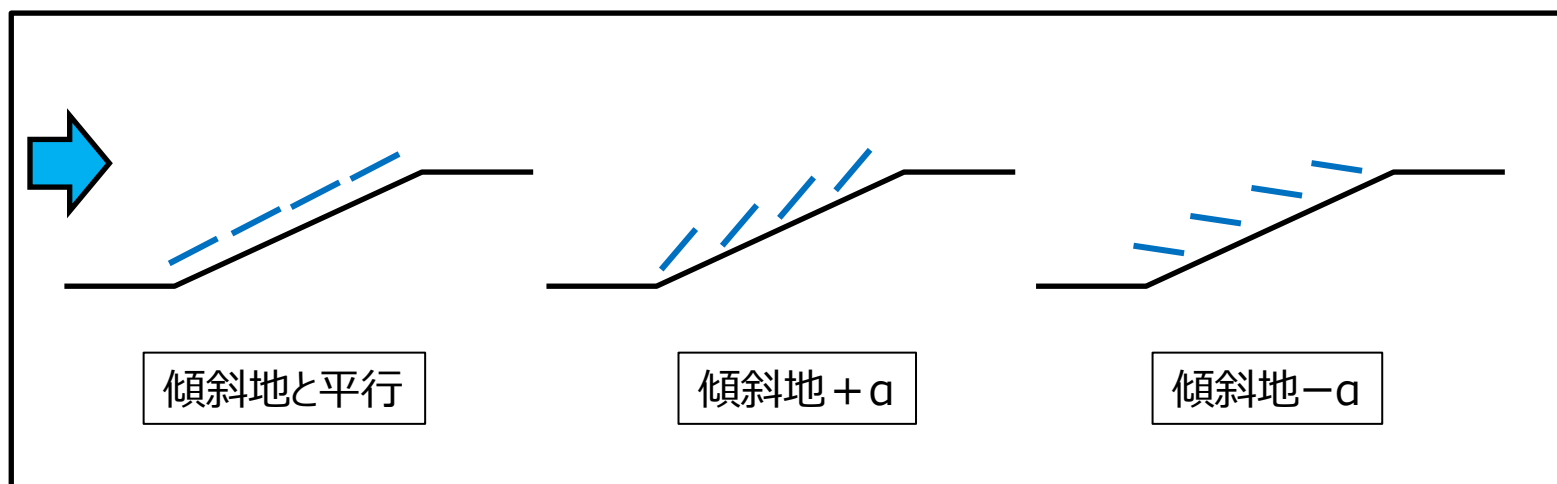


LESによる解析結果（斜面勾配15度）

実地形の分析例

風洞実験

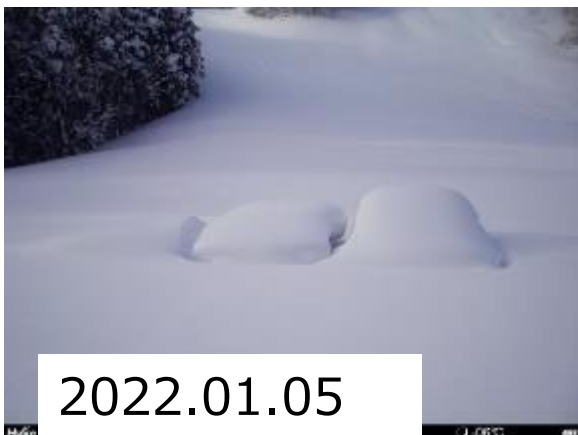
- 傾斜地に設置されるPVアレイに作用する風力係数について調査するため風洞実験を実施し、2021年版ガイドラインでの風力係数の与え方の妥当性を検証する。また、法肩、法尻に設置されたアレイ面の風力係数についても検討する。
- 単純な傾斜地形に設置されたPVアレイの模型を用い、境界層乱流中での風洞実験を行う。傾斜地の勾配とアレイ面の角度を変化させて、地盤とアレイ面の相対角との関係で風力係数が与えられることを検証する。



傾斜地

積雪荷重の屋外荷重実測

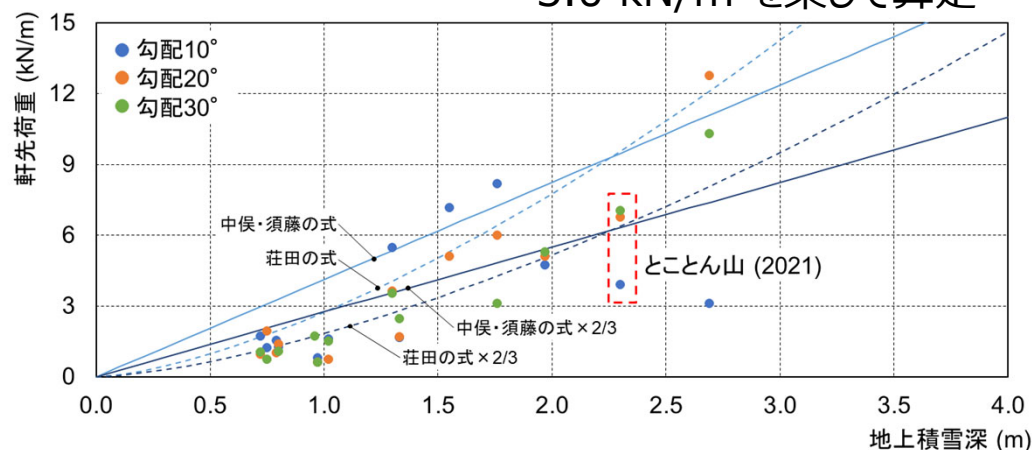
- 秋田県湯沢市のスキー場跡地で地盤勾配約10度に10～30度の架台を設置。
- 調査データをもとに設計用積雪荷重や耐雪設計法の検討および、傾斜地PVのアレイ面およびPCSに作用する積雪荷重特性を整理し、ガイドラインへの反映する。



◆年最大積雪深を用いた軒先荷重の評価

- 荘田の式 : $F_{Smax} = 9.8 \times 1.7(S_{max}/9.8)^{1.5}$
- 中俣・須藤の式 : $F_{Smax} = 1.4S_{max}$

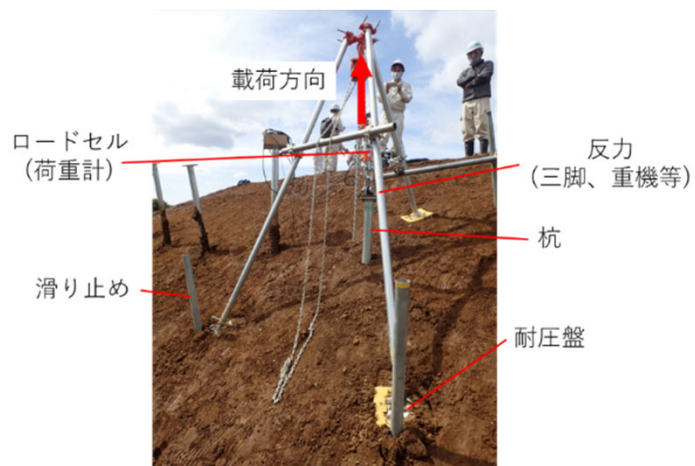
※ F_{Smax} : 最大沈降力 (kN/m) S_{max} : 最大積雪重量 (kN/m²)
 地上積雪深に単位積雪重量 3.0 kN/m³を乗じて算定



傾斜地

杭の載荷試験(杭種の追加、載荷試験方法の検討)

- 傾斜地に設置されるPVアレイの杭基礎における水平抵抗力および引抜抵抗力の確認のため、**スクリュー杭以外の代表的な種類の杭**を用いて載荷試験を行う。また、傾斜地における杭基礎の**載荷試験を安全かつ効率的に実施する方法**についても検討する。
- 傾斜地および平地で**単管杭および形鋼杭**の載荷試験(水平方向および引抜方向)を実施し、試験結果の比較検証をする。また、載荷方法については事前に検討した方法で実施する。



引抜載荷試験の状況



水平載荷試験の状況

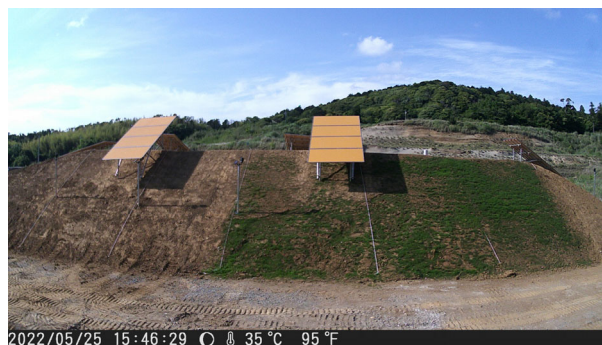
図 傾斜地盤での杭の載荷試験風景

地盤侵食保護に関する実証実験

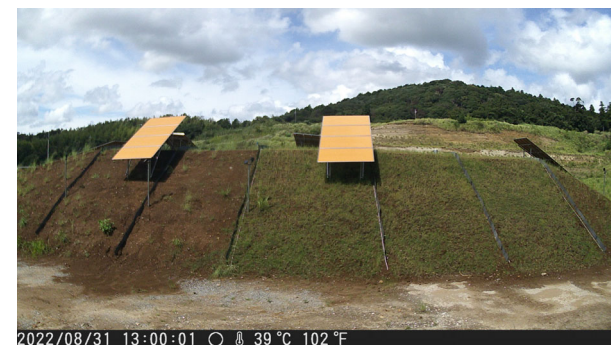
- 傾斜地における地盤浸食・崩壊の事例は発生しているが、これまでPVアレイが設置された状態においてアレイ面の軒先（水下側先端）からの落水による地盤浸食などへの影響は明確に把握されていない。種子散布など植生工の侵食対策の有効性や注意事項について確認する。
- 15°および30°の傾斜地盤に法面保護工として種子吹付による植生工を行う。また、PVアレイを設置した状態を再現するために模擬的なPVアレイを設置し、当該設置場所の雨量と地盤の観察を行う。雨量の測定と地盤の観察についてはそれぞれ、降雨量計の測定データ、タイムラプスカメラを用いて行う。



模擬的なPVアレイ



2022.05.25
(模擬PV設置直後)



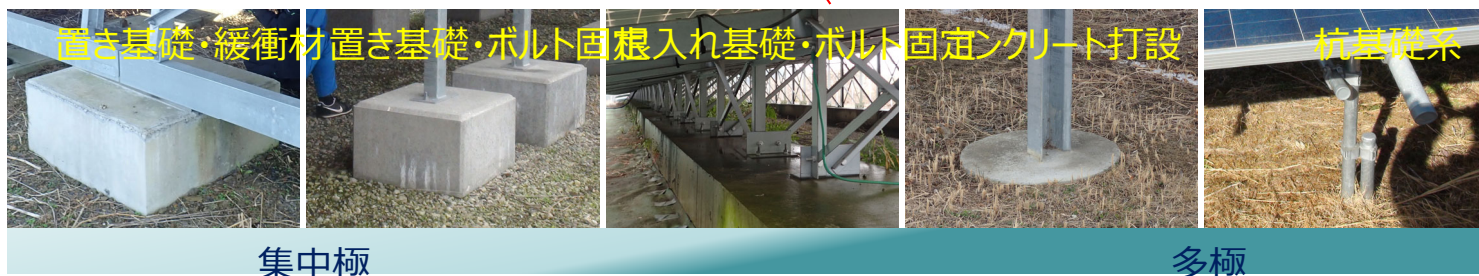
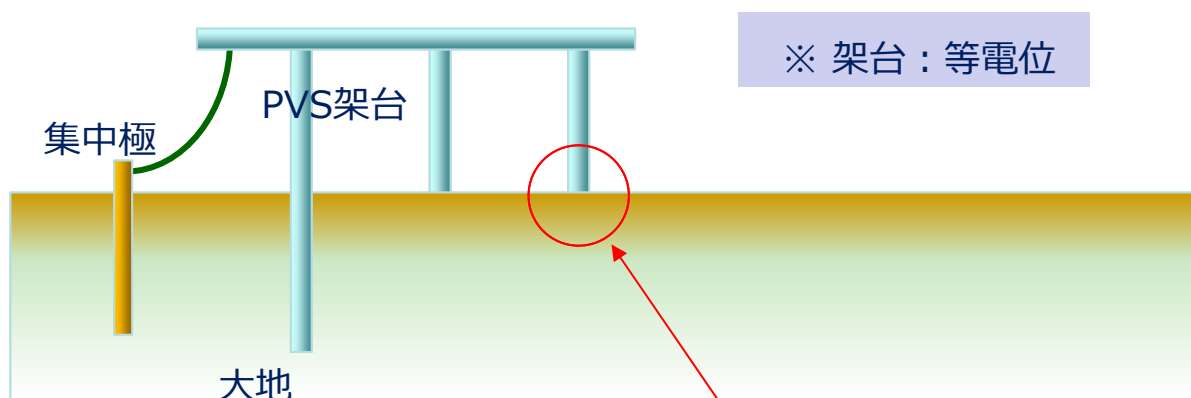
2022.08.31
(経過観察時)

地盤侵食保護の状況（タイムラプス画像）

傾斜地

電気関係：多極接地について

- 架台、基礎が接地極として働き、「集中極」or「多極」は架台脚の電氣的な効き具合で接地抵抗への影響が決定される。
- 接地抵抗を測定する場合に、敷地内で測定すると正しい接地抵抗が測定できないため、測定時の注意点についてまとめる。

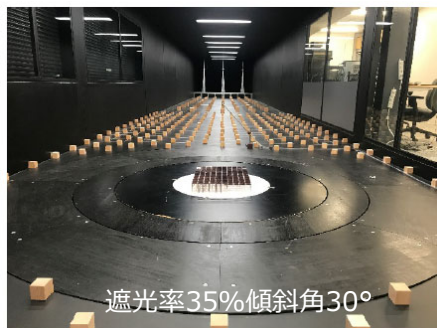


宮農型

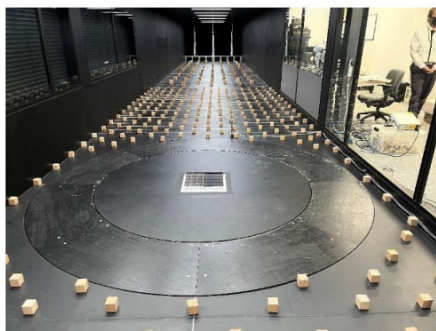
営農

実証実験（営農）

- 風荷重(風力係数)：風洞実験(藤棚式；遮光率、アレイ勾配)
- 風荷重(風力係数)：風洞実験(足高式等)
- 農地の地盤調査：SWS試験、簡易貫入試験等
- 杭基礎の抵抗力：載荷試験(水田、畑等)
- 杭基礎設計：凍着凍上対策に関する実証実験



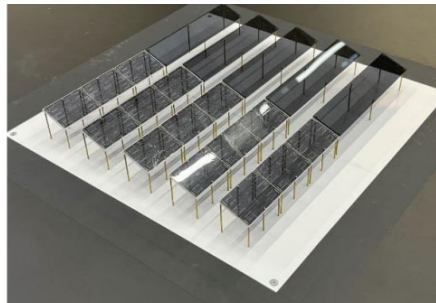
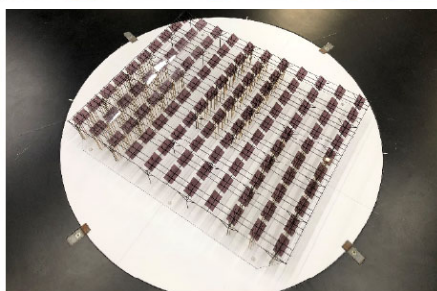
藤棚式架台の風洞実験



足高式架台の風洞実験



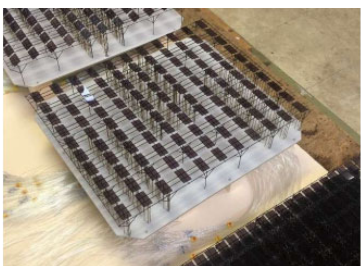
農地での地盤調査



農地での杭基礎載荷試験

風洞実験(藤棚式、遮光率、アレイ勾配)

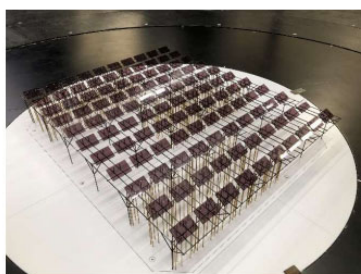
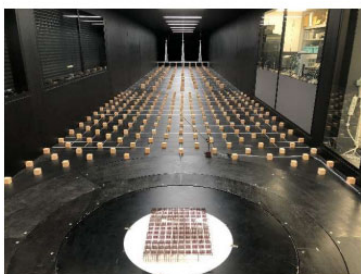
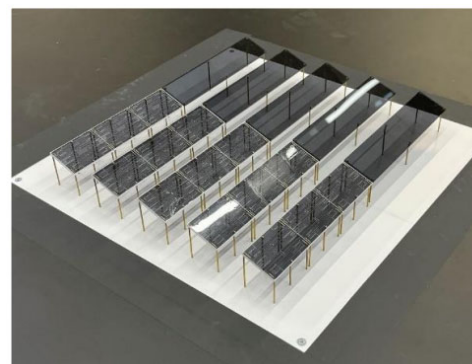
- 営農型PVアレイの設計用風力係数がないため、営農型PVアレイ（藤棚式）特有のモジュール配置や遮光率を考慮した模型を用いて風洞実験を実施し、**営農型PVアレイの設計用風力係数を例示**する。
- 架台の形式、アレイ面の高さ、PVモジュールの仕様、遮光率、傾斜角度等については一般的な仕様を決定した上で風洞実験を行う。



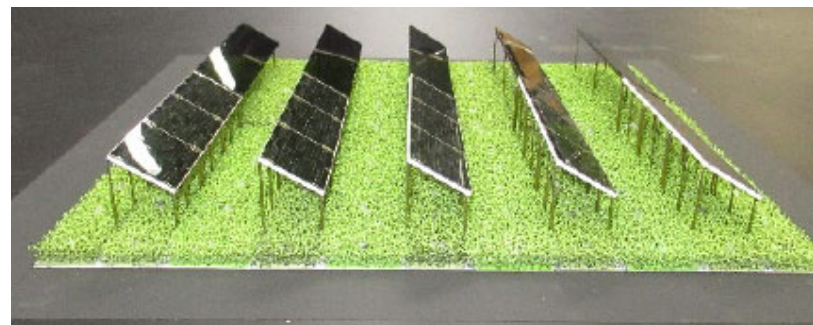
実験模型（遮光率：約 35%）



実験模型（遮光率：約 70%）



風洞実験の様子



載荷試験(水田、畑等)

- 営農型PVで使用される杭基礎は表土層が軟弱な地盤に打設することが想定されるが、**農地での杭の抵抗力特性は把握**されていないため、代表的な農地(**水田、畑**)で杭基礎の載荷試験を実施し、杭の引抜および水平抵抗力の特性を確認する。
- 実際の農地(**水田、畑**)で**杭基礎の載荷試験**を実施し、営農型PVで使用される杭基礎の抵抗力(引抜力、水平力)および変位の特性を把握する。



杭の引抜き載荷試験



杭の水平載荷試験
(載荷点：高さ300mm)



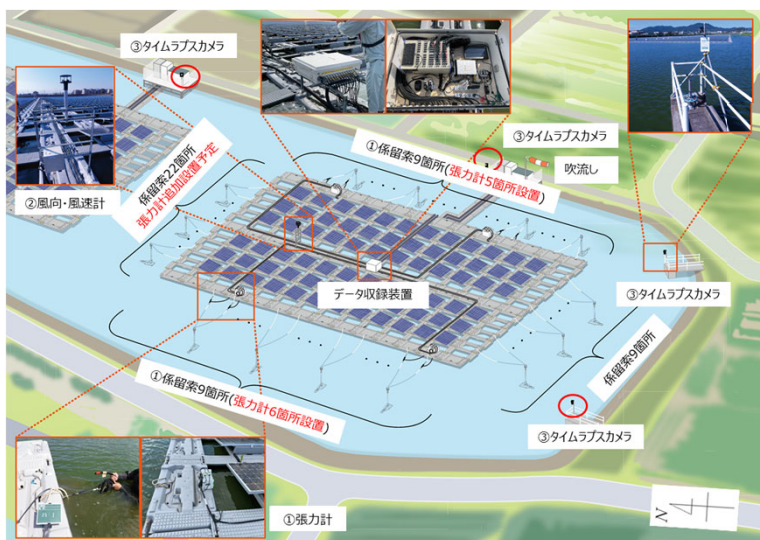
杭の水平載荷試験
(載荷点：高さ2000mm)

水上型

水上

実証実験（水上）

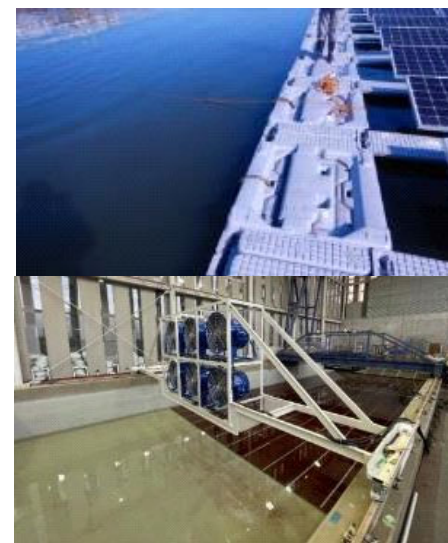
- 係留索への荷重：屋外荷重実測
- 水中アンカーの耐力：実システムの載荷試験
- 係留索への荷重：数値計算、水理実験
- フロートへの荷重：風水洞実験
- 風荷重(風力係数)：風洞実験
- フロートの耐力：ラボ実験、CAEの評価
- 接合部の耐力：載荷試験
- 電気設計・感電防止：水上絶縁測定、接地、機器IP試験



水上係留ワイヤーへの荷重実測



フロートへの荷重：風水洞イメージ



係留張力：水理実験イメージ

水上

係留索への荷重：屋外荷重実測

- 実証実験サイト
 - 施設名称：女井間(めいま)池水上太陽光発電所
 - 所在地：香川県木田郡三木町池戸1205-1 女井間池（農業用ため池）
 - 事業者：三井住友建設株式会社
 - 施工会社：三菱電機システムサービス株式会社
 - 発電出力：2,822kw(パネル出力)
 - 事業期間：2020年1月～2040年1月(20年間)



- 計測項目

計測対象	計測項目	計測手法
外的環境	風向・風速計測	気象計
	フロート群の移動観測	タイムラプス撮影
フロート等への作用	アンカーロープ張力計測(平均, 変動荷重, 衝撃荷重), 位置(端部, 中央部)による違い	鉄筋計(ひずみゲージ)

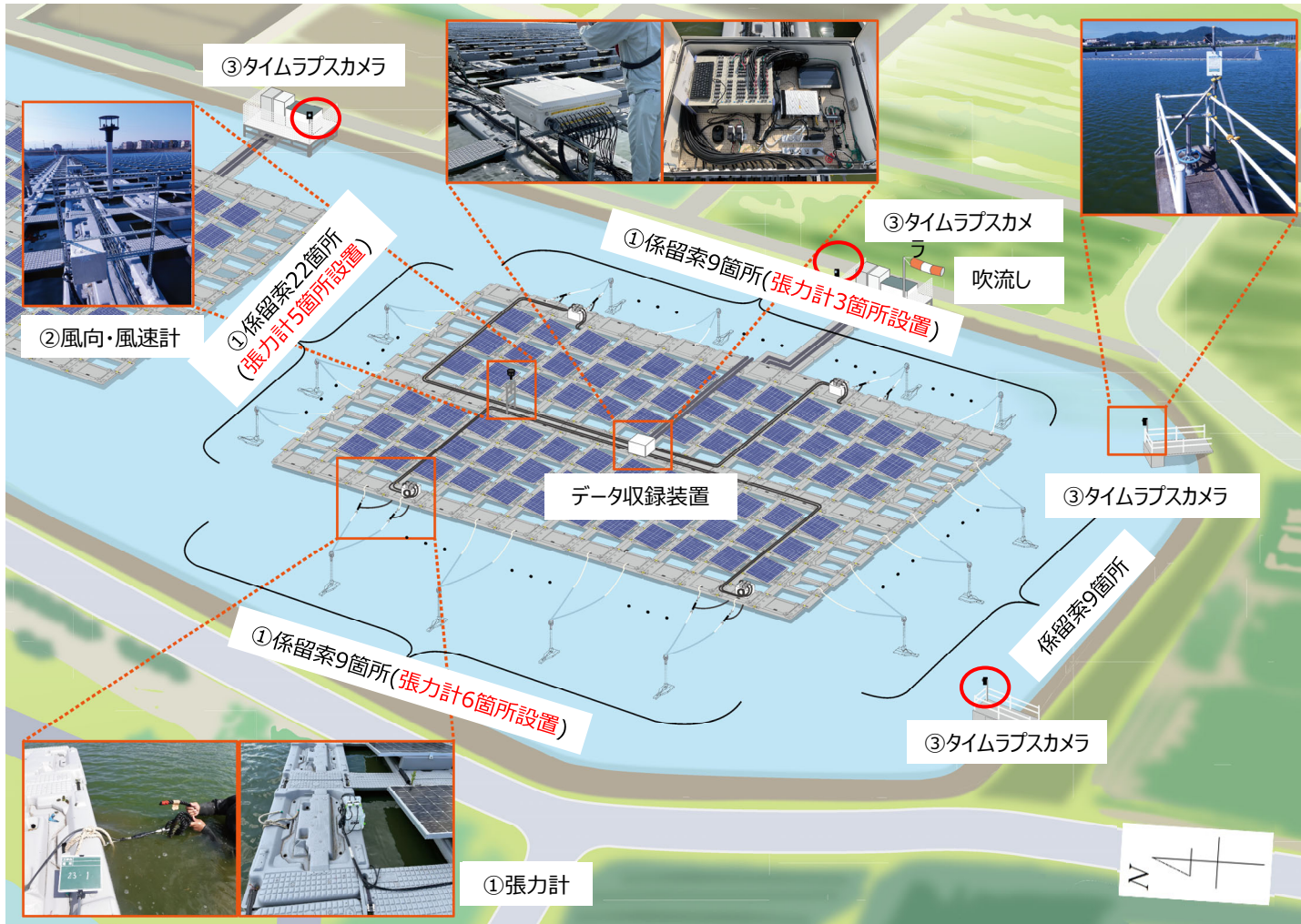
- 計測期間：16ヶ月(2021年10月～2023年1月)

2022/9/19未明に台風14号が来襲し、10分間平均風速で10m/sを計測した

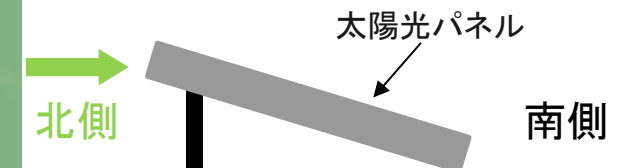
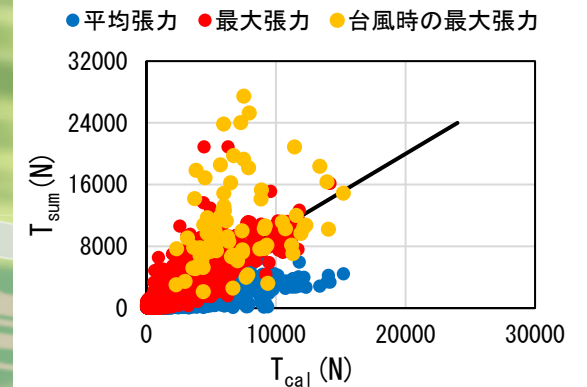
水上

係留索への荷重：屋外荷重実測

計測機器設置状況

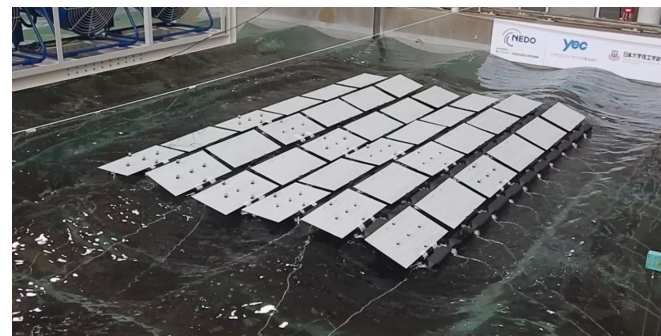
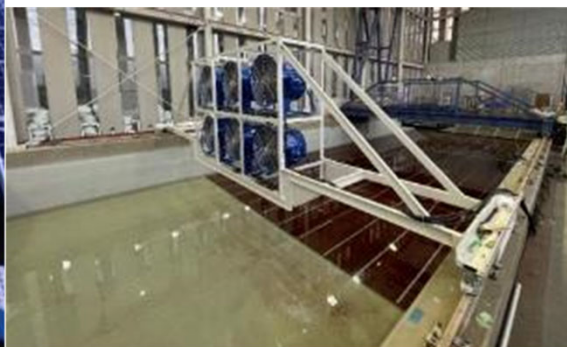


計算値と実測値は概ね
整合している



係留索への荷重：水理実験

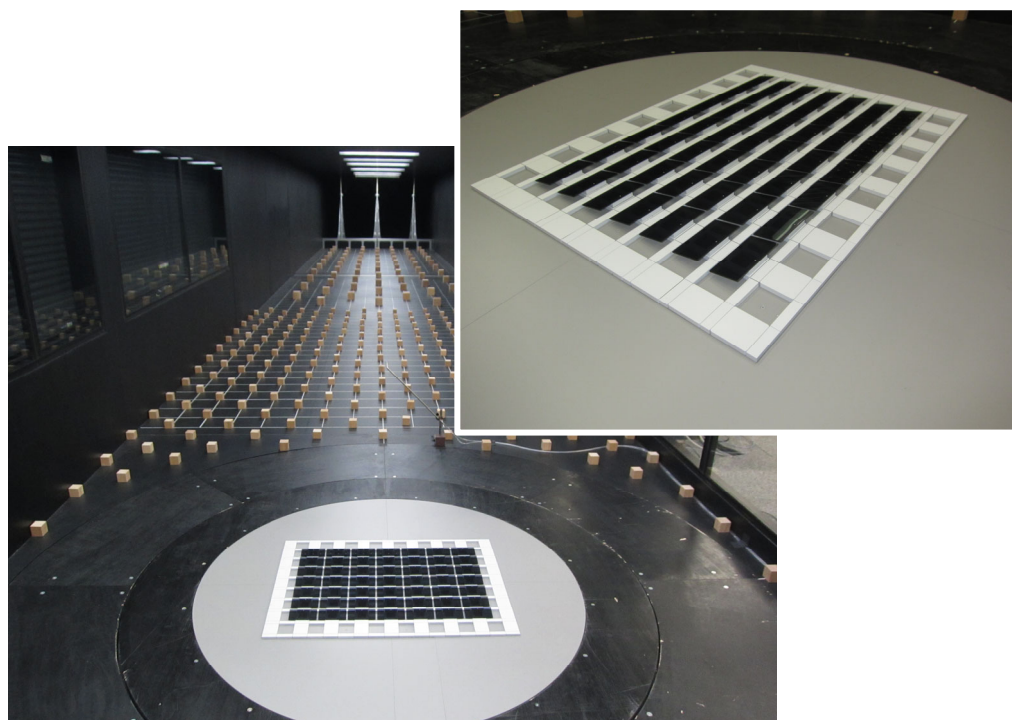
- 係留索には余裕長があり、強風等荒天時においてアイランド全体が変形・移動すると、係留索が弛んだ状態から緊張状態になる時点に衝撃的な張力が発生するとともに、特定の係留索に張力が集中することが予想される。これらの現象はまだ明らかになっていない。
- 上記現象を、**水理実験と数値解析により再現**する。風・波浪作用時のフロート群(アイランド)の形状変化に伴う係留張力の偏り特性を数値解析、フロート群の形状変化と係留張力の偏りを計測水理実験により実施する。
- 係留張力の外力設計へ反映。



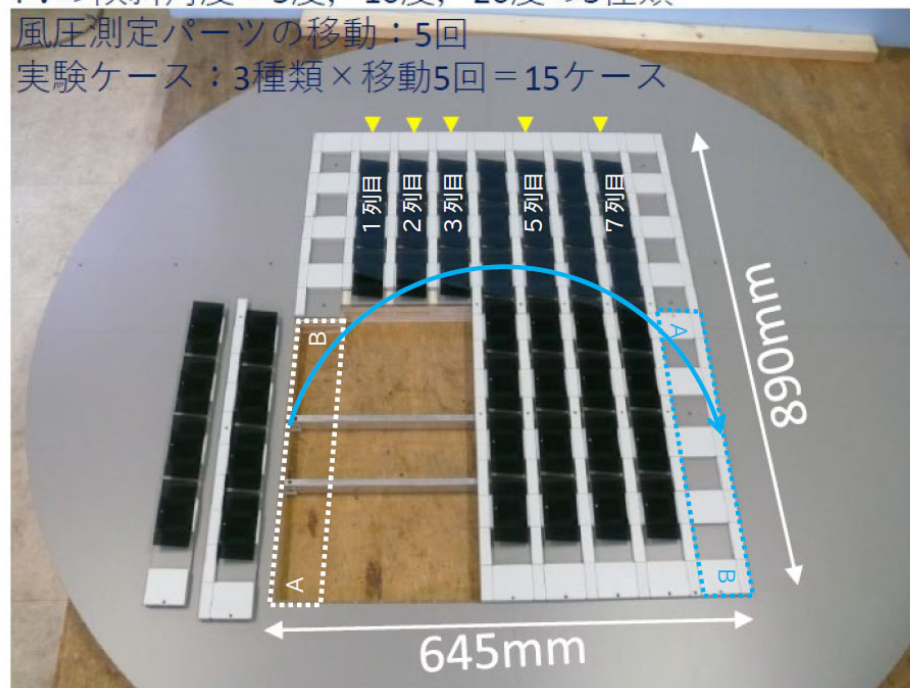
(a)アンカーロープ (b)実験水槽イメージ
図 実験方法の概要

風洞実験

- 水上PVのレイ面に作用する適切な風圧荷重を設定するために風洞実験を実施し、設計用風力係数の整備を行う。
- 代表的なフロート形状を想定し、フロート群（アイランド）を構成した縮小模型を用いた風洞実験（風圧実験）を行う。風力係数はアイランドの列ごとについて測定する。

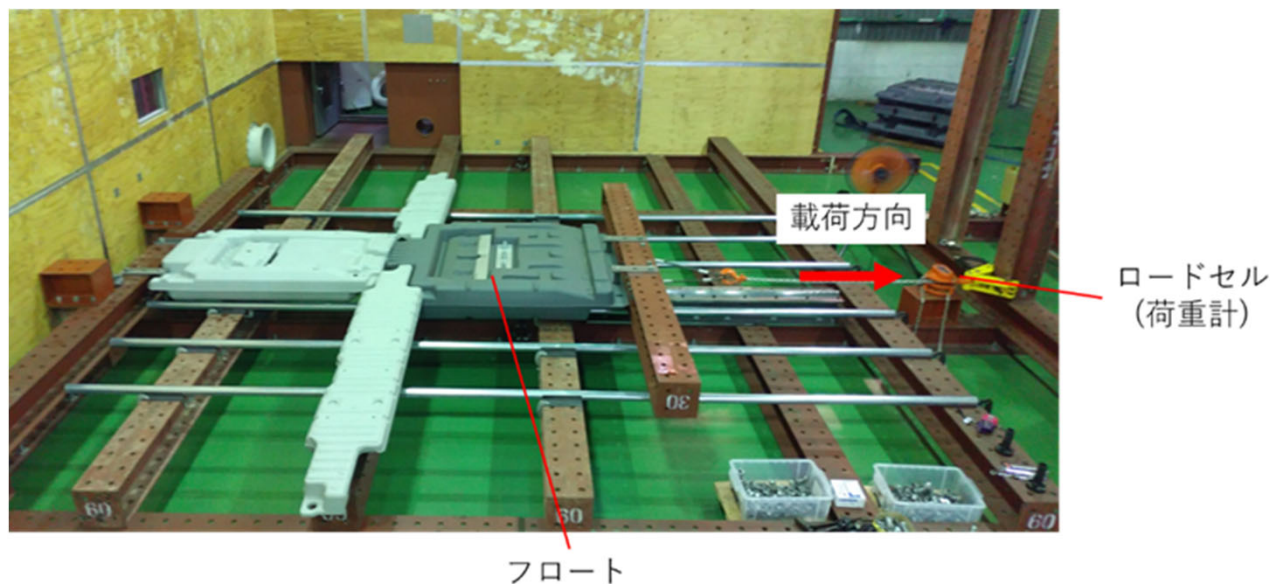


PVの傾斜角度：5度，10度，20度の3種類
 風圧測定パーツの移動：5回
 実験ケース：3種類×移動5回＝15ケース



接合部の耐力：載荷試験

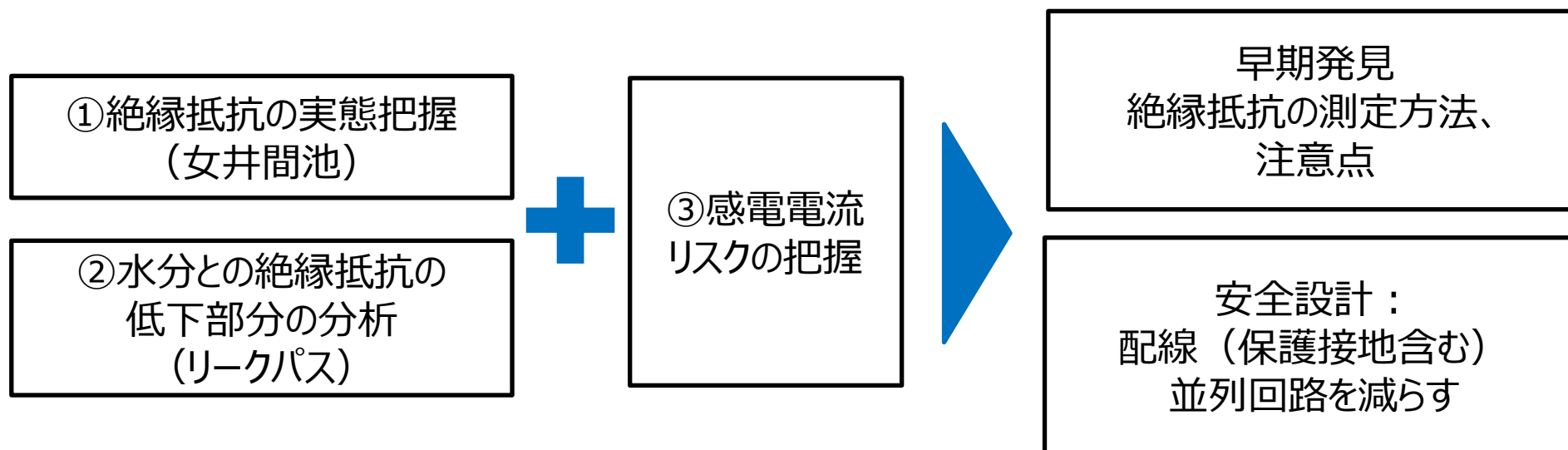
- 日本国内で流通している代表的なフロートを対象としてフロート間やフロートと係留策の接合部についての載荷試験を実施し、接合部の耐力を評価するとともに、載荷試験方法における注意点などについてとりまとめる。
- 国内で流通している代表的なフロートについて、実際の状況を模擬するためにフロートを連結させた状態で縦（南北）方向および横（東西）方向に載荷する試験を実施する。



フロート群の連結部部分試験の一例

電気設計・感電防止：水上絶縁測定

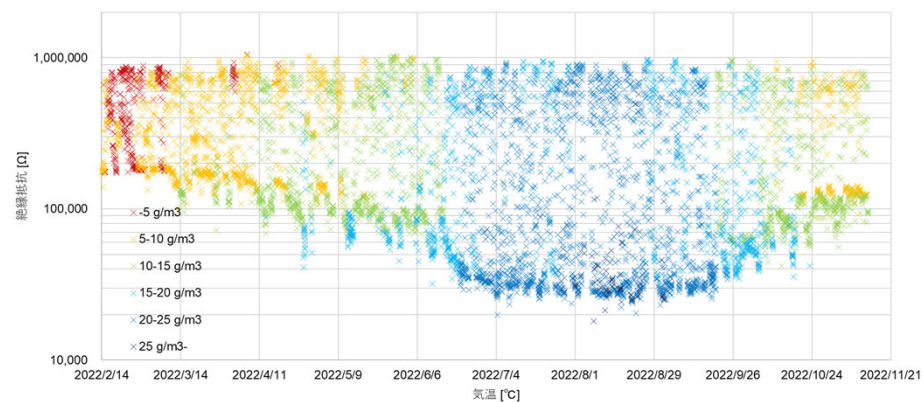
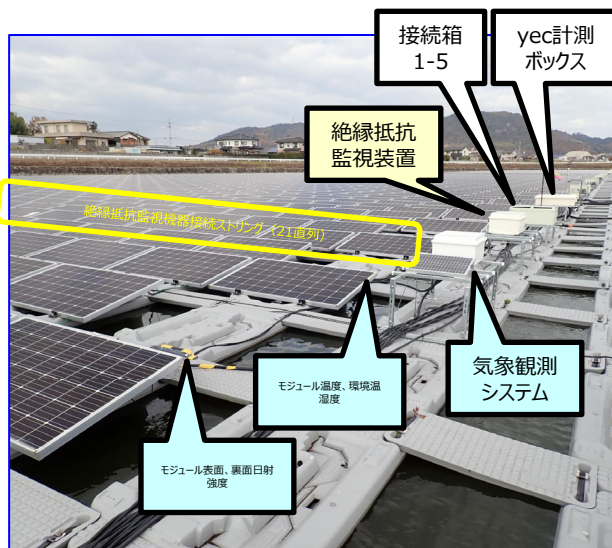
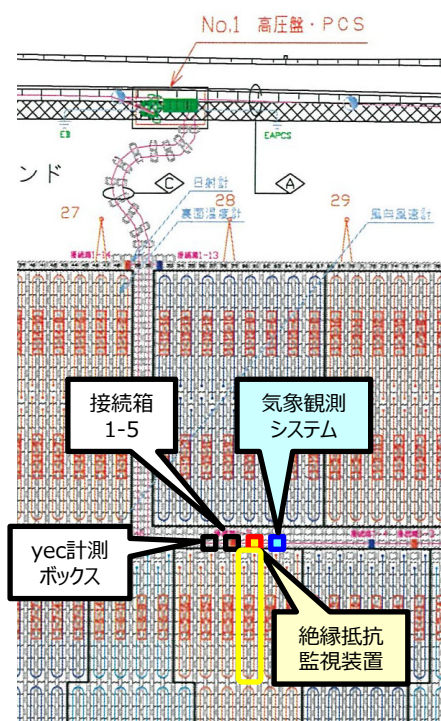
- 水分環境にさらされることによる絶縁抵抗の状況と感電防止方法の検討。
- 絶縁抵抗の実測、絶縁低下部分の分析、絶縁抵抗とアレイ全体の感電リスクの把握、測定方法やその注意点



水上

電気設計・感電防止：水上絶縁測定

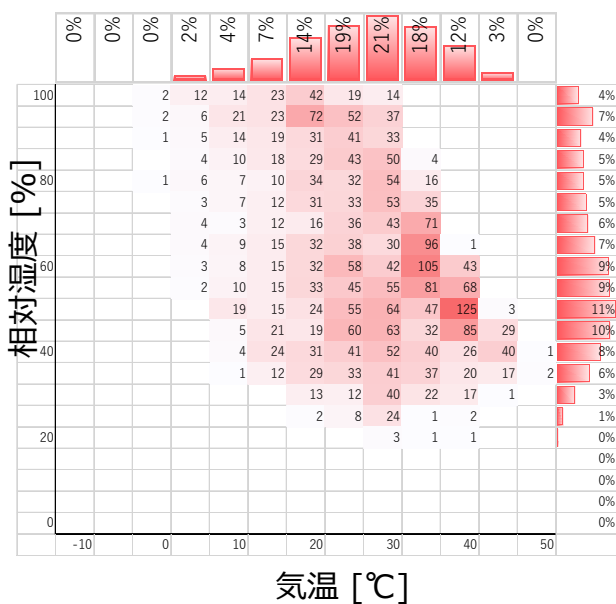
- 絶縁抵抗など常時測定を実施（係留索への荷重の実測と同じ発電所）。
- 絶縁抵抗は、時間や湿度により大きく異なることを確認。
- 地上部の湿度（近隣の気象官署など）の状況などの比較。



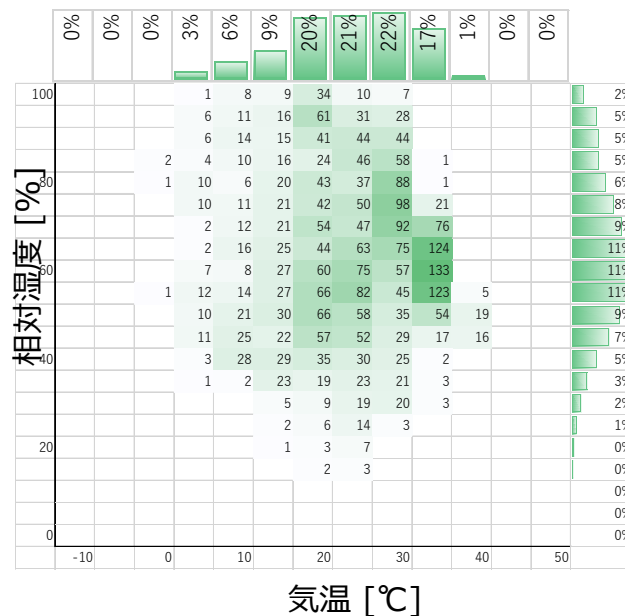
水上

電気設計・感電防止：水上絶縁測定

- 絶縁抵抗は、時間や湿度により大きく異なることを確認。
- 地上部の湿度（近隣の気象官署など）の状況などの比較。



(1) 水上PV



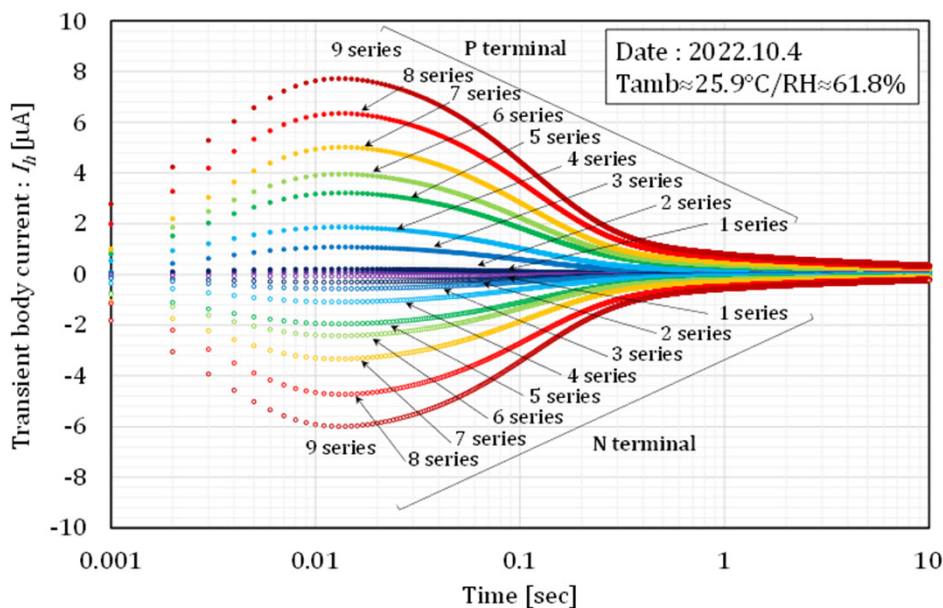
(2) アメダス高松

図 水上PVおよびアメダス高松における気温と相対湿度の出現頻度分布（7:00-18:00）
計測期間：2022.2.14-2022.11.12, 3264点(1時間値)

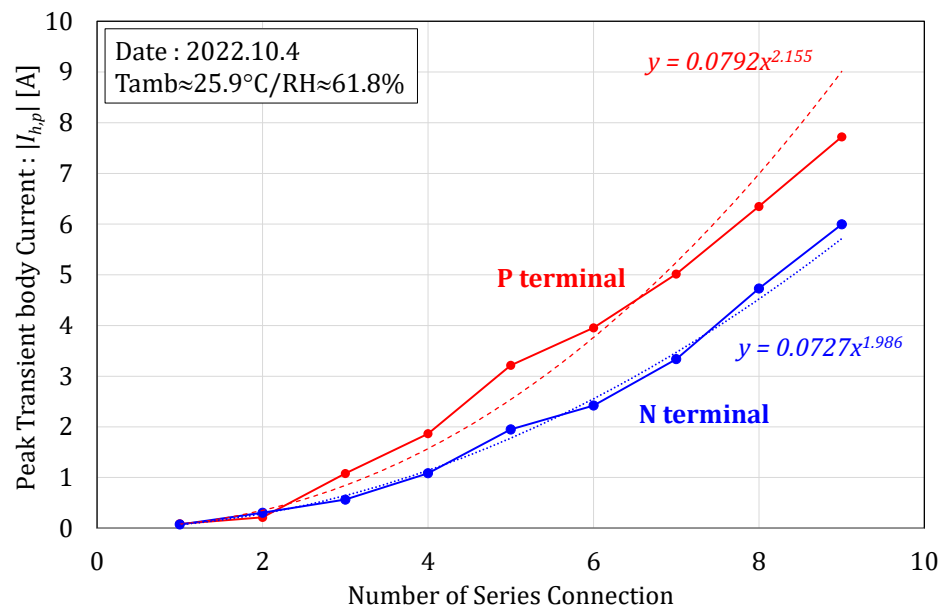
電気設計・感電防止：水上絶縁測定

- 絶縁抵抗と実際の感電電流の関係を調査。
- ストリングレベルとアレイレベルにおける電流の変化について実験中。

単一ストリングによる実験

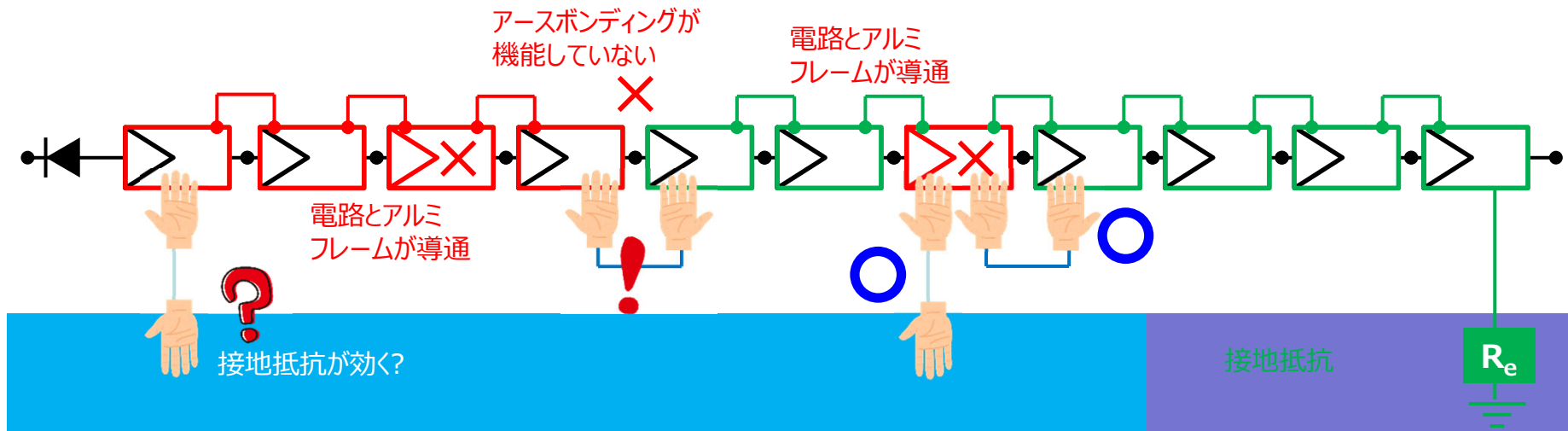


感電電流は概ねモジュール直列枚数の二乗に比例していることがわかる。これはVOCがモジュール枚数に比例することと、ストリングの対地絶縁抵抗の逆数がモジュール枚数に比例すること、の二つから説明できる。



電気設計・感電防止：水上絶縁測定

- 感電のユースケースを整理中。
- 水上は集中接地。ケーブルによる等電位が外れる可能性（冗長性のある線）。



電気設計・感電防止：コネクタ水没試験

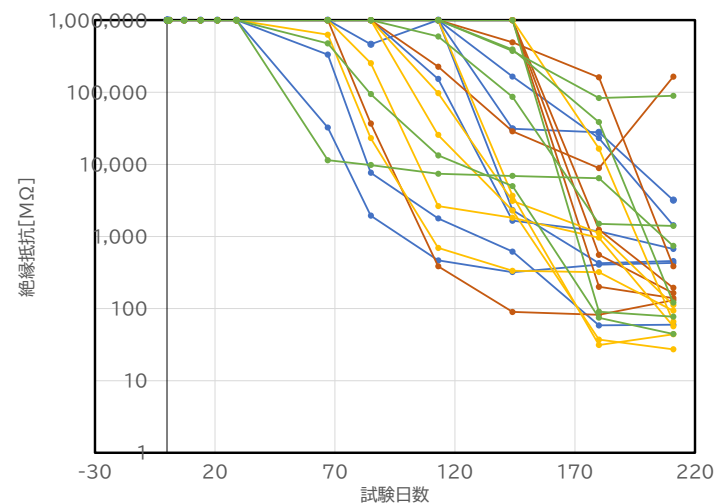
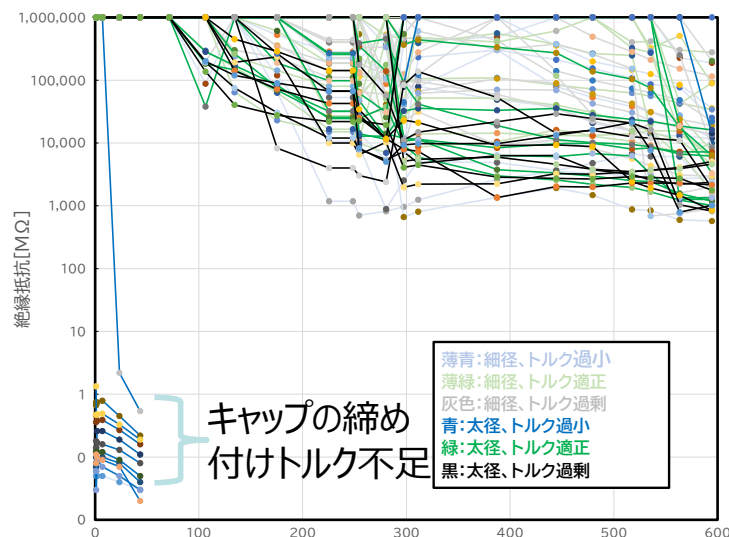
- コネクタの水没試験を継続的に実施。MC4と形状が同じものを実施中。
- コネクタによる防水方法の確認（嵌合、オーリングとかも製品により異なる）、水侵入箇所の確認などを実施。
- 異種勘合についても実験を実施。同種勘合より絶縁抵抗が低下傾向。

MC4

組み立て：プロ
トルク：工具+トルク管理

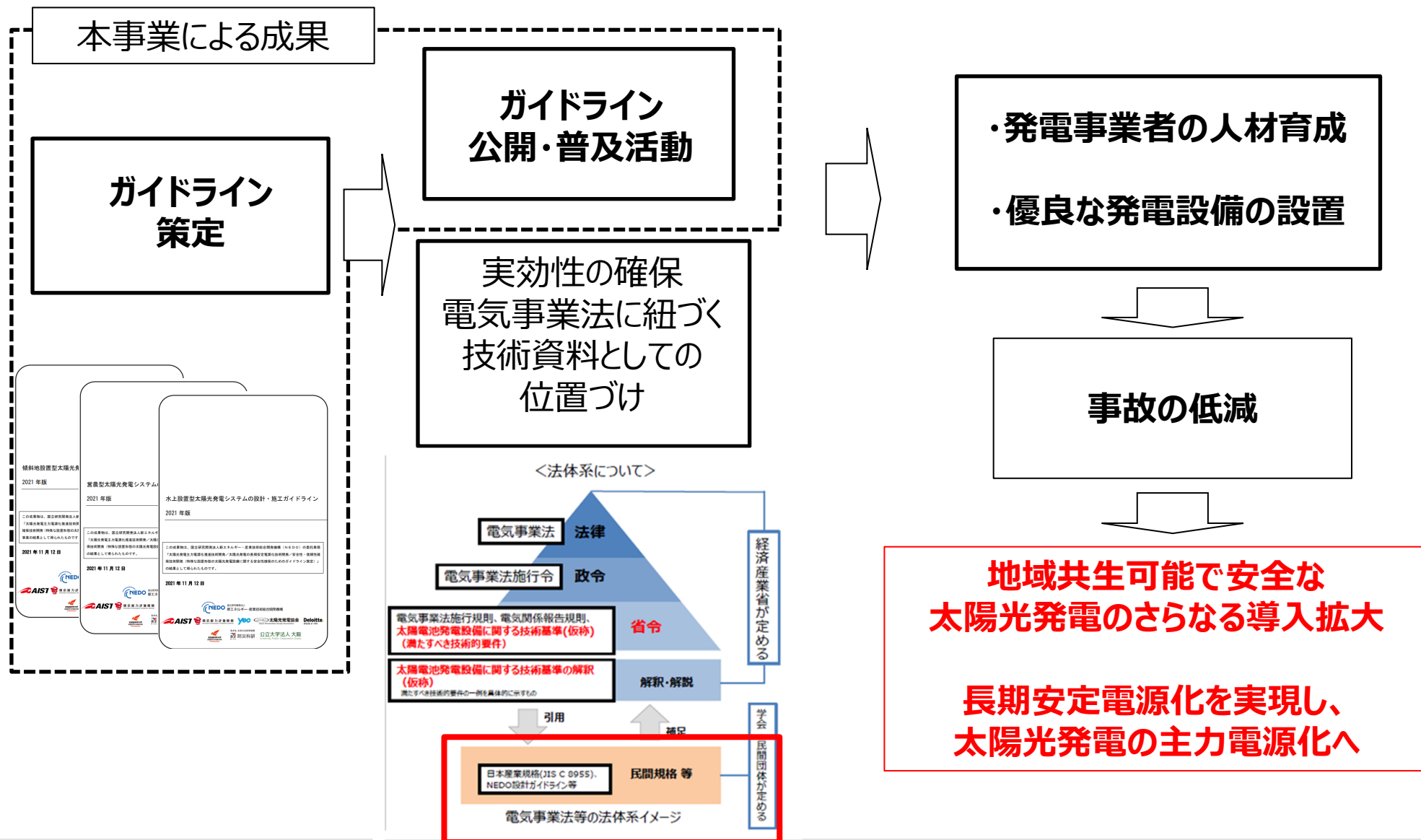


異種勘合：MC4+同一形状4種



まとめ

ガイドラインの公開



ガイドラインの公開

- 現在までに、暫定版のガイドライン（傾斜地／営農／水上設置型ガイドライン2021年版）を、**2021年11月12日に公開済（NEDOおよび太陽光発電協会のHP）**。
 - <https://www.nedo.go.jp/content/100939010.pdf>
 - <https://www.nedo.go.jp/content/100939011.pdf>
 - <https://www.nedo.go.jp/content/100939012.pdf>
- 関係省庁との連携の強化
 - 例1：傾斜地／営農／水上設置型ガイドライン2021年版は**電気事業法における、『発電用太陽電池設備に関する技術基準を定める省令（令和3年経済産業省令第29号）』の逐条解説**に、設計・施工の技術的内容をできるだけ具体的に示した技術資料として規定されており、本ガイドラインが利用されるように、実効性を高めている。
 - https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2021/12/20211220-1.html
 - 例2：**農水省の「営農型太陽光発電取組支援ガイドブック」**における「営農型太陽光発電取組チェックリスト」に本ガイドラインが紹介されている。
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/attach/pdf/einou-6.pdf>

謝辞

- 本成果は、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（JPNP20015）の結果得られたものです。
- 本事業は、下記の機関による共同実施であり、各資料を提供いただいた。関係者の皆様に感謝する。
- 一般社団法人 構造耐力評価機構、八千代エンジニアリング株式会社
一般社団法人 太陽光発電協会、デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
キョーラク株式会社、学校法人 北海道科学大学
国立研究開発法人 防災科学技術研究所、公立大学法人 大阪

ともに挑む。つぎを創る。

未来をデザインし、社会と共に未来を創る。
互いを認め、共に挑戦する研究所を築く。

私たちの使命

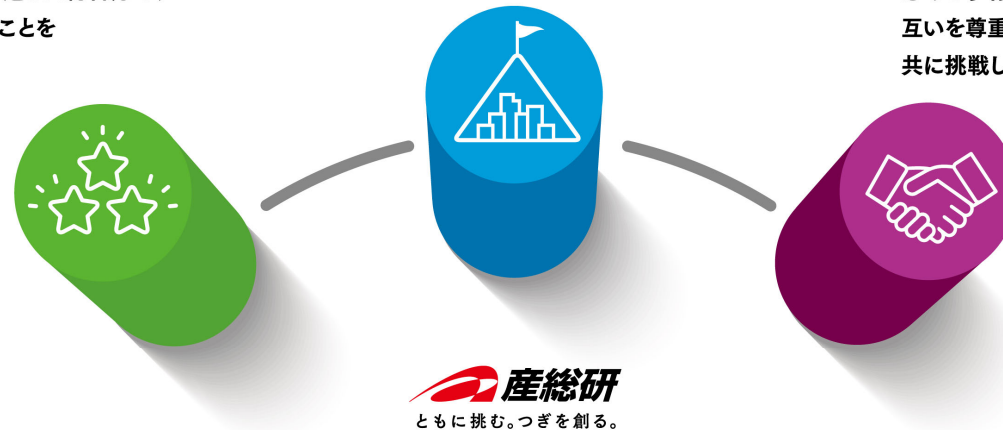
世界水準の研究のみならず、
社会課題の掘り起こし・施策提言・社会実装・
知的基盤整備などあらゆる活動を
これまでの産総研の枠を超えて推し進めます。

私たちの価値観

強い個の発揮と協働を通じた総合力で、
多様な価値を創り出すことを
大切にします。

私たちの文化

志ある多様な人材が集い、
互いを尊重しながら、
共に挑戦し成長する文化を育みます。



国立研究開発法人 産業技術総合研究所
福島再生可能エネルギー研究所
Fukushima Renewable Energy institute, AIST
(FREA)

Thank you for your attention.
takashi.oozeki@aist.go.jp