

**千葉・山倉水上メガソーラー発電所  
太陽電池破損事故  
審議会報告（第4回）**

**2020年4月1日**

**京セラTCLソーラー合同会社**

1. 事故原因調査結果
2. 破損原因の要因分析
3. 原因を踏まえた山倉水上メガソーラーの再発防止対策

構造 要因 1 : 矩形化・小型化による偏荷重発生リスクの低減  
    要因 1 - 1 : 入り隅部の不均等アンカー配置の解消策  
    要因 2 : アンカー抜け防止対策  
再発防止案 : 山倉水上メガソーラーの再建設計

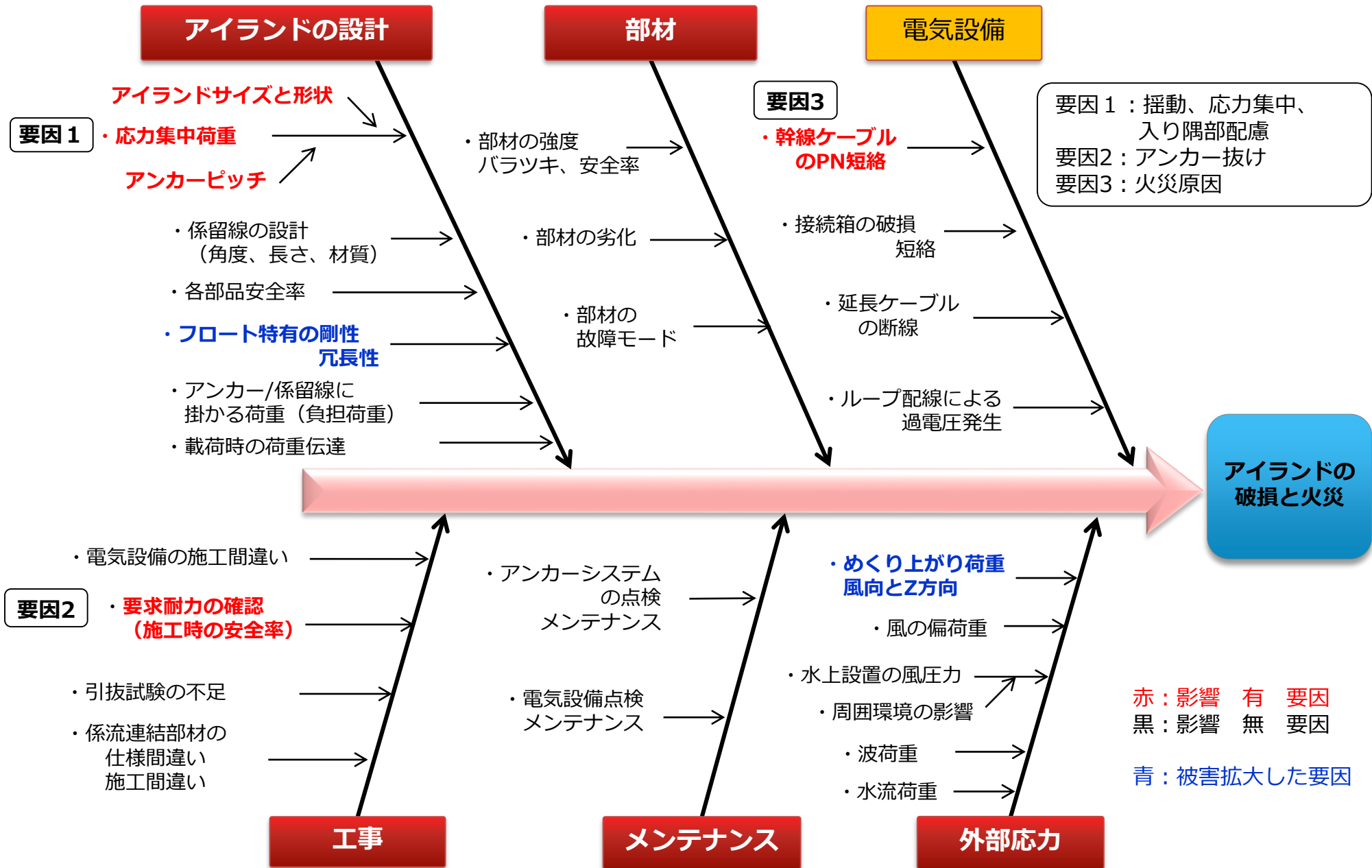
4. 被害拡大要因 : Z方向荷重の説明（反転の可能性について）
5. 山倉ダム事故発生においてアイランドが反転した原因の推測
6. 被害拡大防止フェールセーフ（連鎖的な破損対策）
  - ① 応力集中リスク場所に補助係留線追加（検討中）
  - ② 外周部のスプレッターバー固定部を強化接続ピンに変更
  - ③ 外周フロート水入れ/水入りフロート追加
7. 火災 要因 3 : 火災防止対策
8. 事業者として初期提案時の新たな留意点と水平展開

# 1. 事故原因調査結果

- ・調査の結果、強風時に偏荷重が発生することが判明。現場の破損現象とシミュレーションにおける応力集中場所が一致した。
- ・入り隅部のアンカー配置の配慮が欠けていたため、受け持ち荷重が過大となりアンカー抜けに繋がった。
- ・アイランドが隆起したことでケーブルが破損。太陽電池の発電によりアークが発生しフロートが延焼した。

調査項目		原因	影響評価
要因1	応力集中の発生	1- 揺動シミュレーションにより、強風時にアイランドに偏荷重が発生することが判明。現場の破損現象とシミュレーションによる応力集中箇所が一致。 2- 想定した外力、耐力は妥当であったが、 <b>入り隅部のアンカー配置の配慮が欠けていた。その結果受け持ち荷重が過大となりアンカーが抜けた。</b>	◎
要因2	アンカー抜けが発生	アンカー設計上は一般的な安全率（1.2）としていた。	○
要因3	火災発生	破損し隆起したアイランド内で幹線のP N間アークの発生により近傍のフロートが発火し延焼。	○
要因4	設計風速41.53m/s を超える強風の発生	近隣の観測データや机上検討では、設計風速を超えた可能性は確認できず。	×
要因5	風洞実験に基づく荷重計算	風洞実験を実施し、当時の設計規格（JIS C 8955（2011））に準拠している。	×
要因6	地理的条件による課題有無	地形による影響は軽微であったと判断。	×
要因7	各接続部材の劣化の可能性	使用品と現地から回収した接続ピンを引張試験とせん断試験で比較した結果、経年劣化による強度低下はない。	×

## 2. 破損原因の要因分析



### 3. 原因を踏まえた山倉水上メガソーラーの再発防止対策

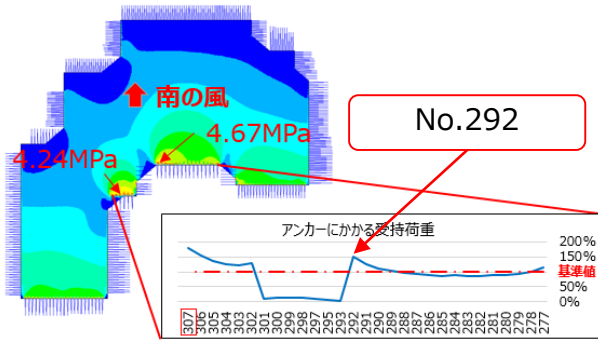
- ・アイランドの形状やサイズを考慮の上、応力集中の発生しない設計を実施。
- ・建築・土木の基準を参考にした安全率を確保し、アンカー／係留線の受持荷重が均等に配置される設計を実施。
- ・強靱な設計により火災発生に繋がる破壊を防ぎ、かつアークの発生しない配線設計を実施。
- ・アイランドの冗長性を持たせた設計を実施し、被害拡大を防止します。

調査項目		原因	防止対策
要因 1	応力集中の発生	揺動シミュレーションにより、強風時にアイランドに偏荷重が発生することが判明。	①アイランド形状の制限 複合形状 → 矩形形状 ②アイランドサイズの制限（小型化） 6アイランドに分散 <span style="float: right; border: 1px solid red; padding: 2px;">偏荷重対策</span> <span style="float: right; border: 1px solid red; padding: 2px;">アイランド風荷重低減</span>
		入り隅部のアンカーの受け持ち荷重が過大となりアンカーが抜けた。	③矩形形状の外周部にアンカー／係留線を均等配置 <span style="float: right; border: 1px solid red; padding: 2px;">応力集中防止対策</span>
要因 2	アンカー抜けが発生	一般的な安全率(1.2)	①建築・土木の基準を参考にした安全率を確保 最大荷重×1.2×1.5=1.8以上の初期耐力※とする ※従来通りアンカー施工時、鉛直方向での耐力値 ②アンカー係留線の設計基準変更 <span style="float: right; border: 1px solid red; padding: 2px;">冗長性確保</span>
被害拡大要因	アイランド接合強度・冗長性	連鎖的な破損	①補助係留線追加（検討中） <span style="float: right; border: 1px solid red; padding: 2px;">フェールセーフ</span>
	Z方向の荷重（浮き上がり）	外周部めくれ上がり（反転）	①既存フロートに水入れ or 水入りフロート追加 ②強化接続ピン導入（検討中） <span style="float: right; border: 1px solid red; padding: 2px;">フェールセーフ</span>
要因 3	火災発生	破損したアイランド内で幹線のP N間アークによって発火	①P極とN極配線の距離を保つ。 ②保護管の使用 <span style="float: right; border: 1px solid red; padding: 2px;">フェールセーフ</span>

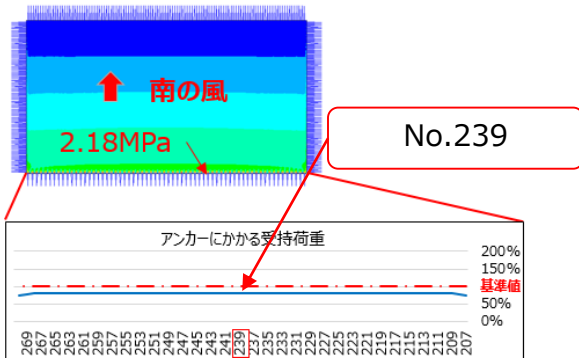
# 要因 1 : 矩形化・小型化による偏荷重発生リスクの低減

- 複合形モデルから矩形大モデルにすることで、同じ面積、アンカー本数でもアイランド面には偏荷重による応力集中の発生リスクが減ることによりアンカー受持荷重が分散できる。①→②
- アイランドサイズを小型化することでアイランド全体の風力荷重が下がり負担荷重も低減され、接続部品、係留部材の安全率を確保する。②→③

① <複合形モデル(138,196m<sup>2</sup>)>  
山倉サイズ

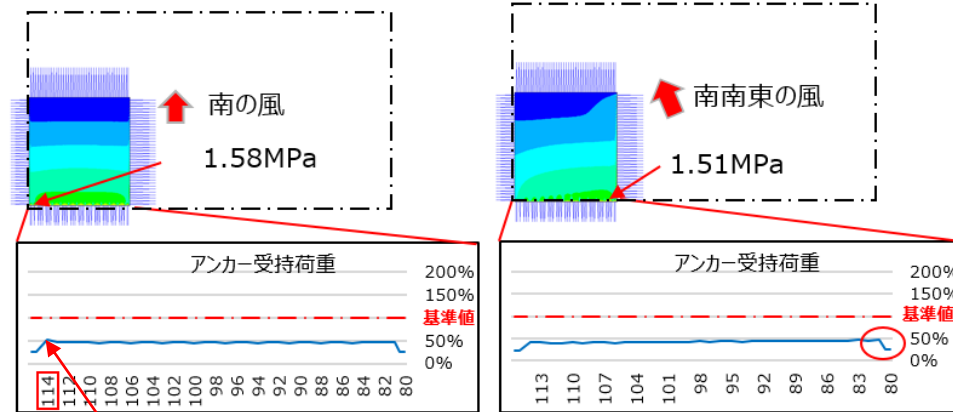


② <矩形(大)モデル(137,205m<sup>2</sup>)>  
山倉同等面積



風速41.53m/s、粗度区分Ⅲ相当

③ <矩形(小)モデル(28,534m<sup>2</sup>)> 例  
山倉再建案(アイランドⅡ)サイズ: 南北最長アイランド 面積約1/4.8



安全率 = 基準値 / 受持ち荷重

	最大アンカー負担荷重	備考
① 複合形モデル	No.292	偏荷重により耐力不足
② 矩形(大)モデル	No.239	矩形形状で偏荷重改善
③ 矩形(小)モデル	No.114	小型化で負担荷重低減

短期荷重×(2/3)  
安全率=1.5以上

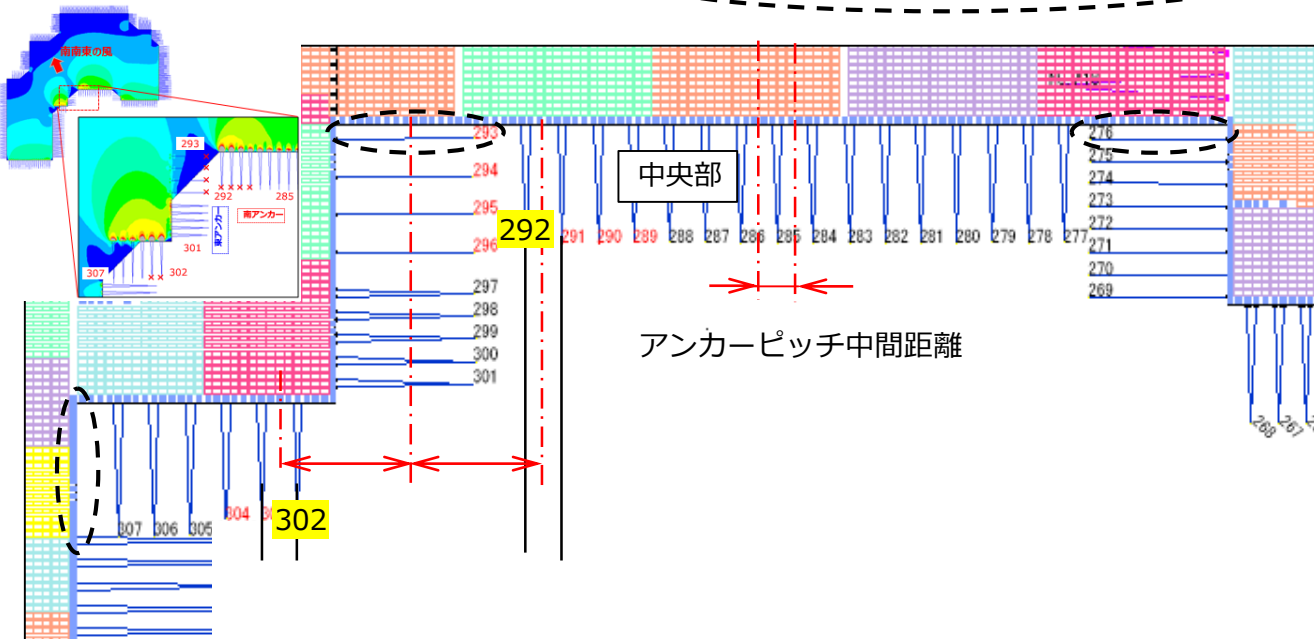
1.7倍  
1.6倍  
2.8倍

# 要因1：入り隅部の不均等アンカー配置の解消策

## 【補足】

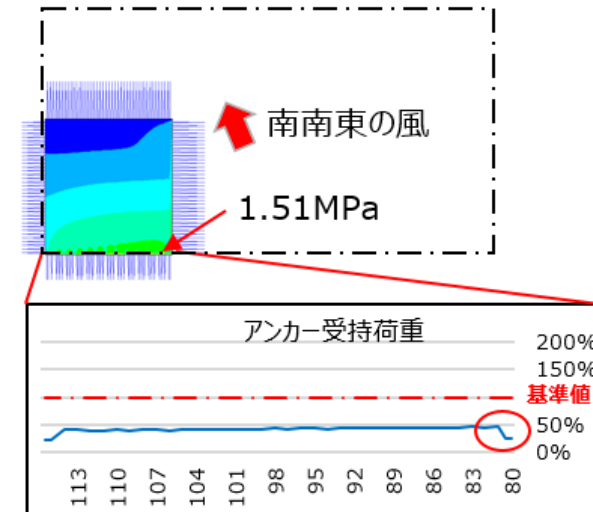
入り隅部の角部からアンカー292~302番の間には南側アンカーが設置されていなかったため、強風により、292と302の負担荷重が大きくなりアンカー抜けに繋がった。

## 入り隅部の不均等アンカー配置

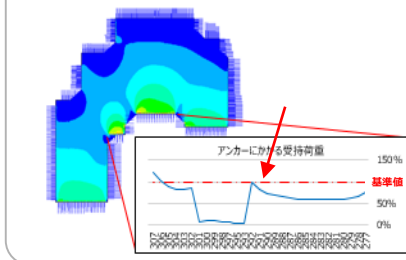


## 【解消策】

矩形形状の外周部にアンカー／係留線を均等配置する



アンカー耐力基準値 (No.292)  
が抜ける最大瞬間風速：39.1m/s



市原市基準風速 38 m/s  
設計風速 41.53m/s

台風15号平均風速 (観測計高さ)  
(最大瞬間風速と同時刻帯)

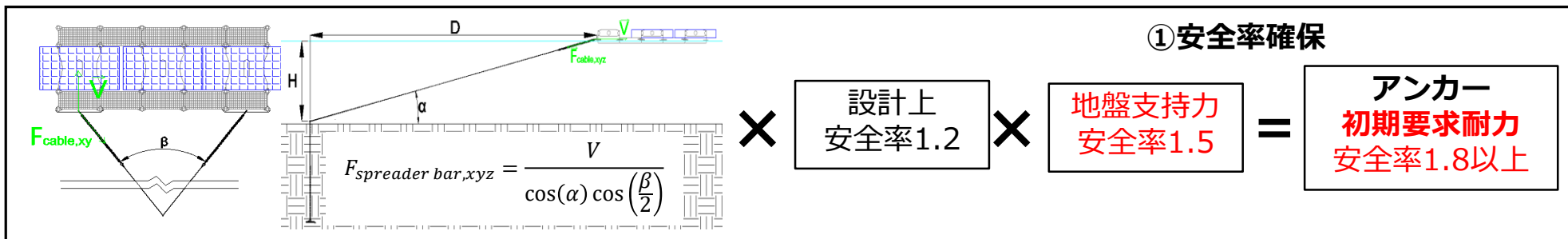
- ・五井 : 20.2m/s (18.0m)
- ・郡本 : 24.0m/s (15.0m)
- ・潤井戸 : 14.1m/s (10.0m)

## 要因2：アンカー抜け防止対策

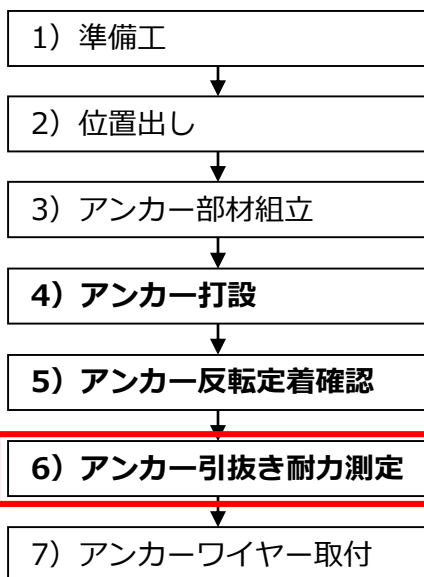
### ①アンカー設計時には建築・土木の基準を参考にした安全率を確保

最大風力荷重に対して、従来の設計上安全率1.2倍に、更に地盤支持力1.5倍を乗じて1.8倍以上を初期要求耐力とする。※

### ②係留線が1本切れても隣り合う係留線、連結部品、アンカーは補完する耐力を有する設計

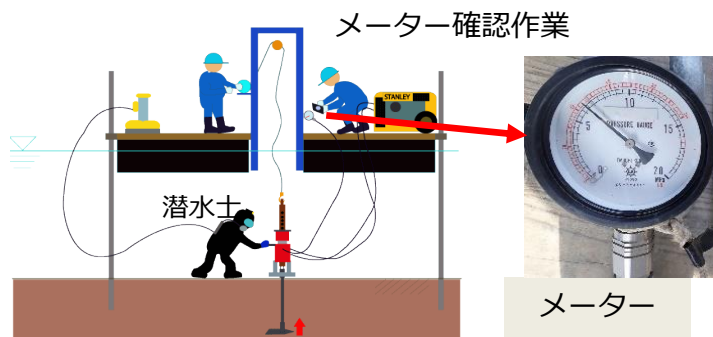


### ■施工フロー



### 6) アンカー引抜き耐力測定 > (初期要求耐力)

所定のアンカー耐力を船上作業者が油圧メータで確認し記録する。

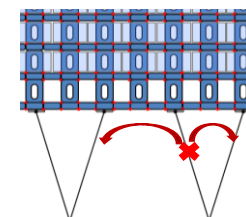


※従来通りアンカー施工時、鉛直方向での耐力値

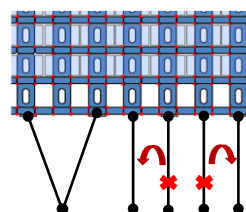
### ②アンカー係留線の設計基準変更

・係留線が1本切れても隣り合う係留線、連結部品は補完する耐力を有する設計

⇒矩形中間部  
(一般部) 条件



⇒矩形角部  
(最大応力発生部) 条件



・V字→I字係留線とし  
アンカーを増設  
× (1.5~2.0)



# 再発防止案：山倉水上メガソーラーの再建設計案

- 複合形状から矩形にすることで偏荷重による応力集中の発生リスクが減る。
- アイランドを小型化、分散化することでアンカー／係留線1本当当たりの負担荷重を低減し安全率を確保。

<複合形モデル(138,196m<sup>2</sup>)> 初期形状

アイランド面積：90.8%

<矩形(小)モデル(125,519m<sup>2</sup>)> 再建形状案

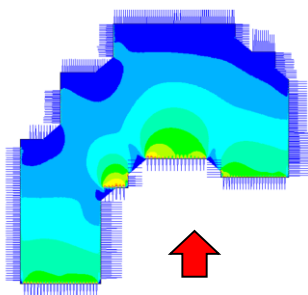
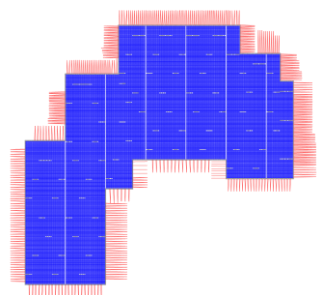
太陽電池パネル出力・枚数：270W×50,904枚

発電所容量：13.7MW

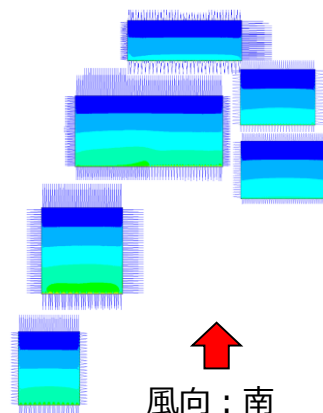
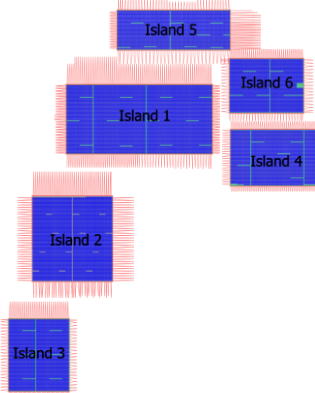
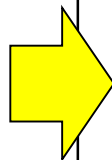
太陽電池パネル出力・枚数：270W×8,848枚

315W×36,050枚

発電所容量：13.7MW



風向：南



風向：南

アンカー総本数：420本

アンカー本数：203%

アンカー総本数：852本

	面積(m <sup>2</sup> )	北	東	南	西
初期山倉	138,196	112本	133本	<b>68本</b>	107本
アンカー1本当たり負担面積(m <sup>2</sup> /本)		1,234m <sup>2</sup>	1,039m <sup>2</sup>	<b>2,032m<sup>2</sup></b>	1,292m <sup>2</sup>

	面積(m <sup>2</sup> )	北	東	南	西
合計	125,519	280本	169本	<b>233本</b>	170本
アンカー1本当たり負担面積(m <sup>2</sup> /本)		488m <sup>2</sup>	743m <sup>2</sup>	<b>539m<sup>2</sup></b>	738m <sup>2</sup>

※負担面積差補足

安全率向上、アイランド分割による周長増によりアンカー本数を増やしたため負担面積が小さくなっています。

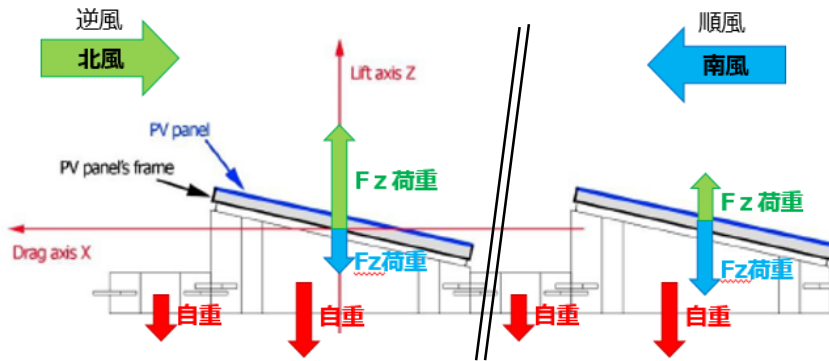
※現地の地耐力を再計測中のためアンカー本数が増減する可能性があります。

## 4. 被害拡大要因：Z方向荷重の説明（反転の可能性について）

- ・風力によりアレイ（フロート+パネル）に揚力が発生するが、アレイ重量と係留線の引張荷重でバランスは保たれる。
- ・順風では浮き上がり荷重は発生しない。

### 1. アイランド全体にかかるz方向荷重

風力による浮き上がりは、PVアレイの自重により発生しないが、北側のアイランド外周部のフロート単体については、浮き上がりの力が発生する。

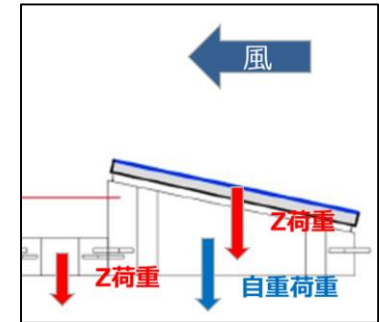


風向	部位	PV+フロート質量(kN)
真北 (180°)	アイランド	Fz ↑ 自重 ↓ 2.25倍
	単体	Fz ↑ 自重 ↓ 0.64倍
真南 (0°)	アイランド	Fz ↓ 自重 ↓
	単体	Fz ↓ 自重 ↓

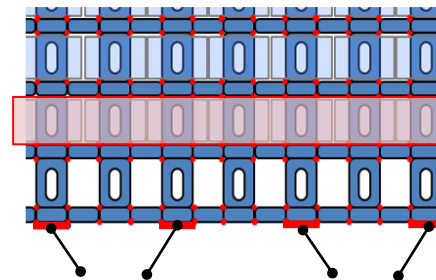
### 2. 南側のz方向荷重

従前の山倉ダムのような複合形状でも、南側外周部のフロートには、浮き上がりの力は発生しない。

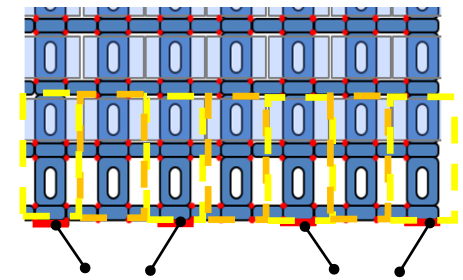
パネルに掛かるz荷重は↓方向となる。



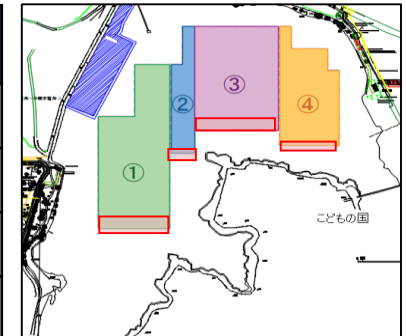
Z方向を考慮する荷重部位



自重を考慮する部位



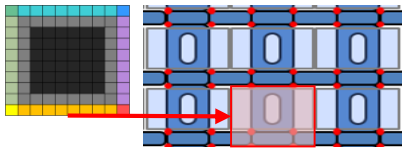
エリア	Fz (kN)	自重(kN)	結果(kN)
①の南側	↓ -31.76	↓ -43.53	↓ -75.29
②の南側	↓ -10.59	↓ -14.51	↓ -25.10
③の南側	↓ -36.14	↓ -49.53	↓ -85.67
④の南側	↓ -26.65	↓ -36.52	↓ -63.17



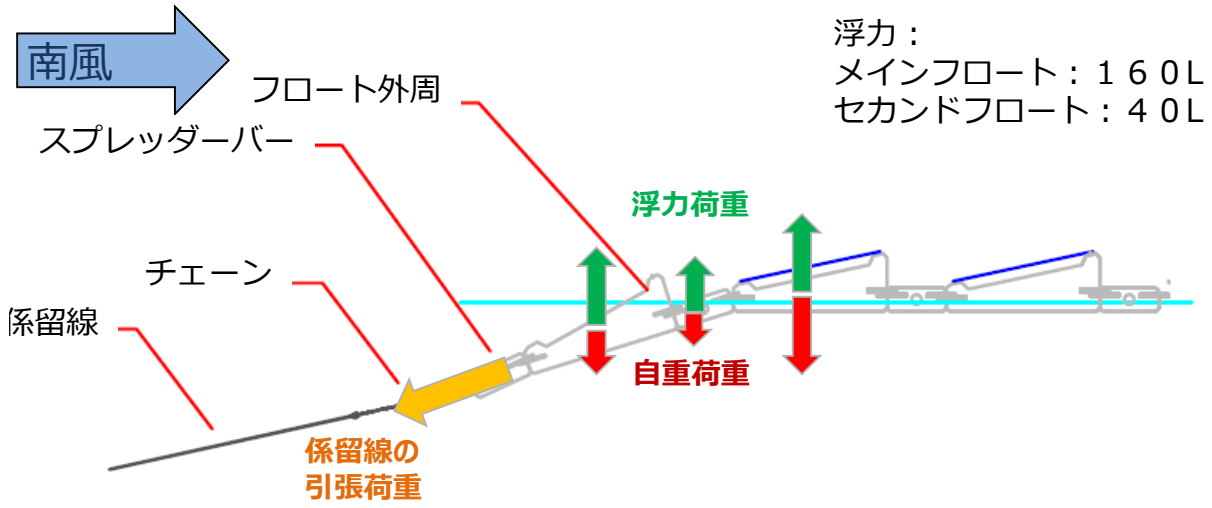
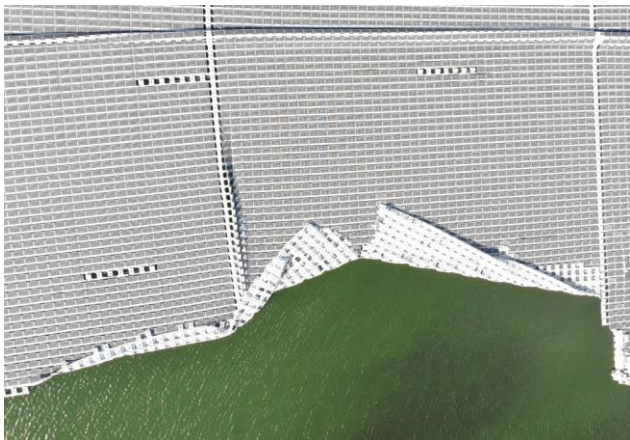
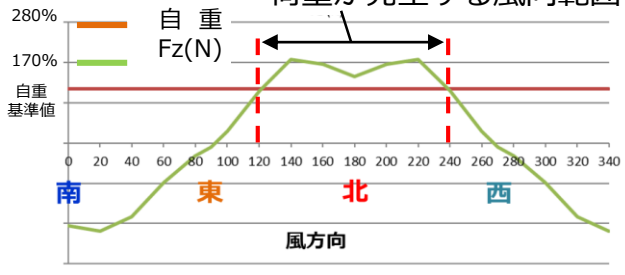
# 5. 山倉ダム事故発生においてアイランドが反転した原因の推測

- ・ 接続部が破断したことにより、側面から風が当たり、反転した可能性がある。
- ・ 南風によって水中に引き込まれたフロートが破断した場合、浮力の反発力により、フロートが浮き上がり、反転した可能性がある。

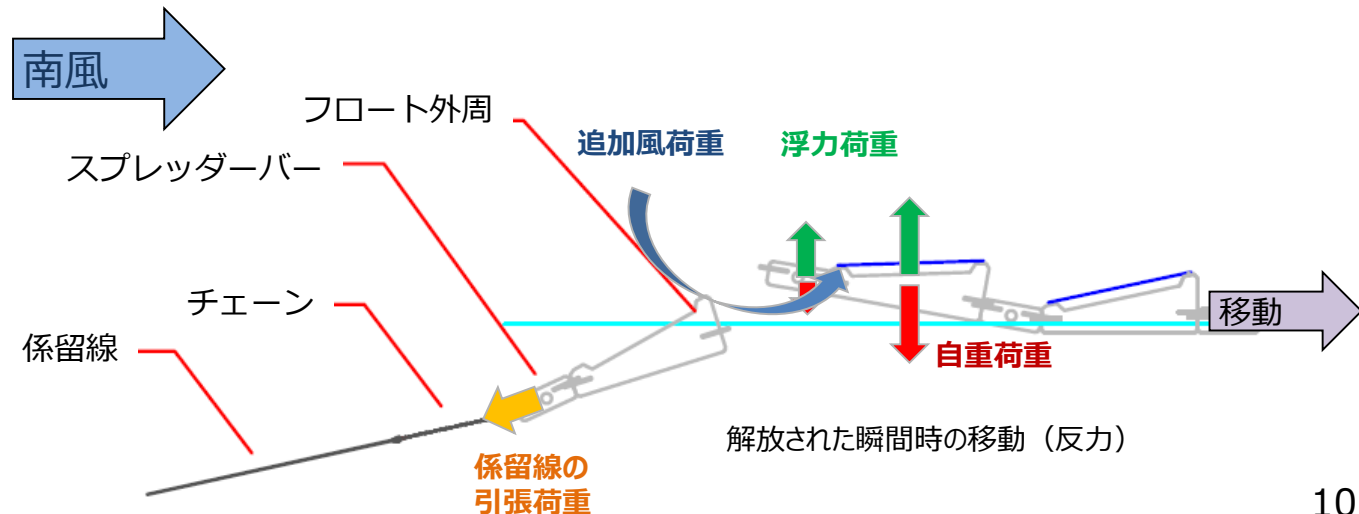
○南側アレイのZ荷重



PVアレイの自重を超える浮き上がり荷重が発生する風向範囲



浮力：  
メインフロート：160L  
セカンドフロート：40L



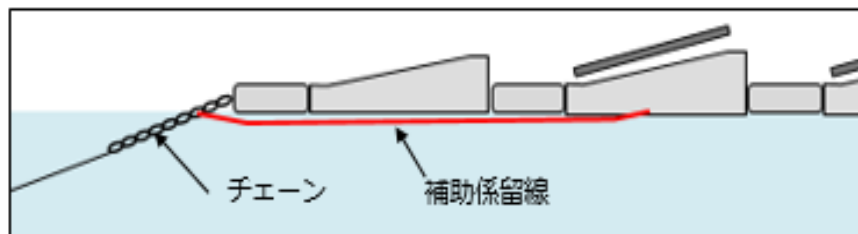
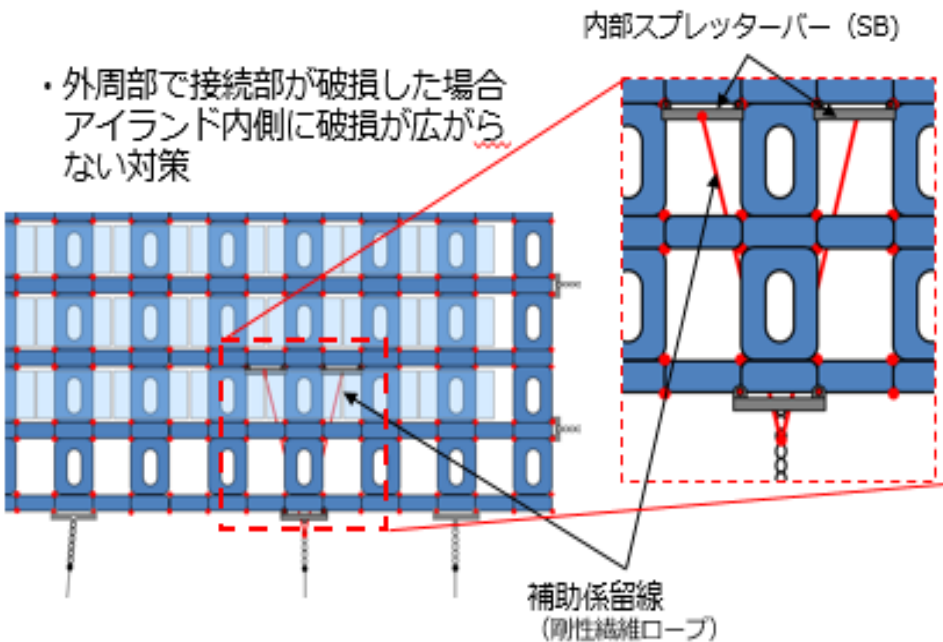
解放された瞬間時の移動（反力）

# 6-1. 被害拡大防止フェールセーフ（連鎖的な破損対策）

- ① 応力集中リスク場所に補助係留線追加（検討中）
- ② 外周部のスプレッターバー固定部を強化接続ピンに変更
- ③ 外周フロート水入れ/水入りフロート追加

## ① 補助係留線追加

・外周部で接続部が破損した場合  
アイランド内側に破損が広がらない対策



## ② 強化接続ピンの追加設定

最外周部でスプレッターバー固定接続ピンを強化ピンに変更

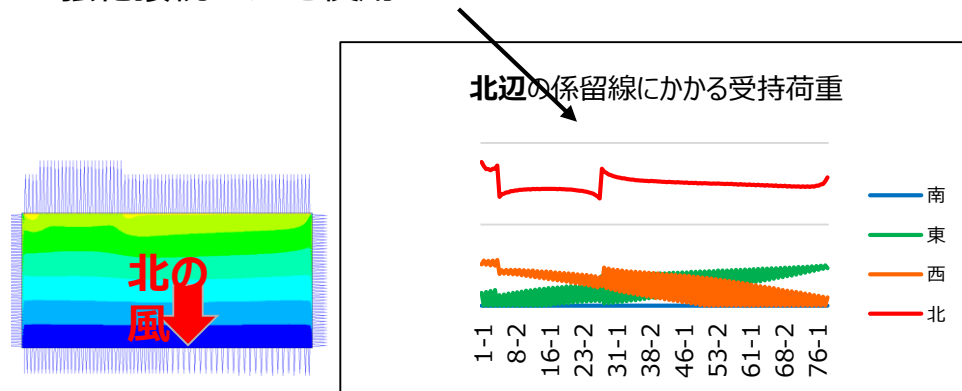


セカンドフロート

強化接続ピン

### <応力分布図>

耐力基準値内で部分的なピークが出る場合は、  
強化接続ピンを使用



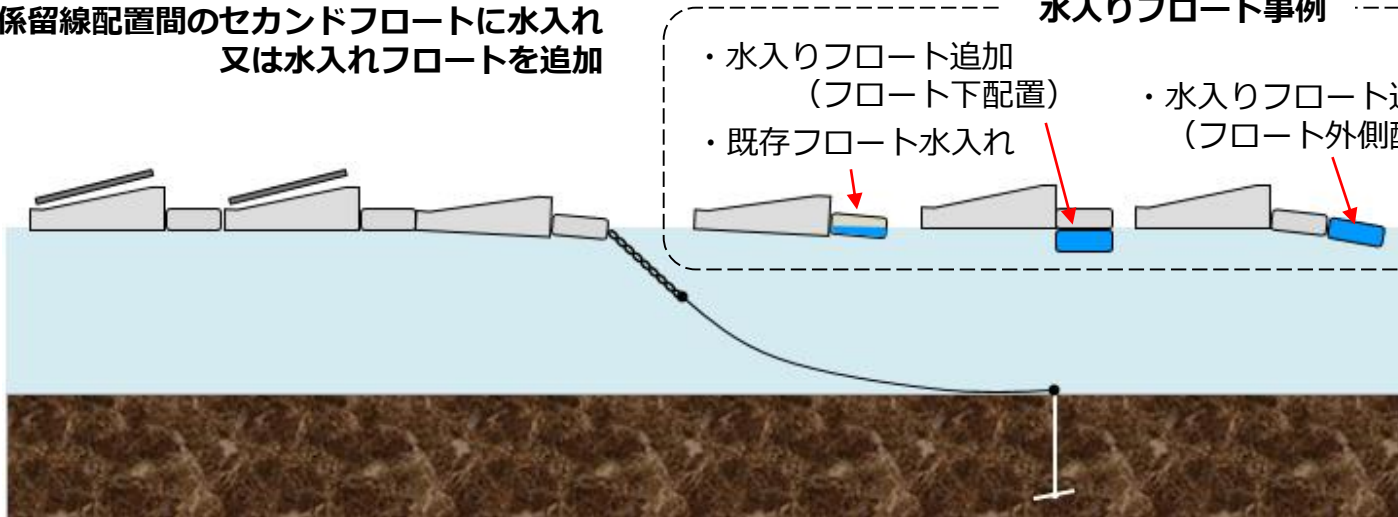
## 6-2. 被害拡大防止フェールセーフ（連鎖的な破損対策）

- ① 応力集中リスク場所に補助係留線追加（検討中）
- ② 外周部のスプレッターバー固定部を強化接続ピンに変更
- ③ 外周フロート水入れ/水入りフロート追加

### ③ 係留線配置間のセカンドフロートに水入れ 又は水入れフロートを追加

### 水入りフロート事例

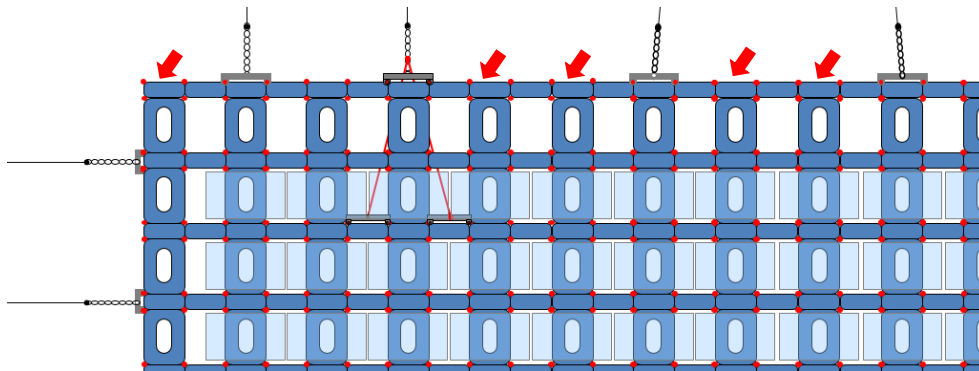
- ・ 水入りフロート追加（フロート下配置）
- ・ 既存フロート水入れ
- ・ 水入りフロート追加（フロート外側配置）



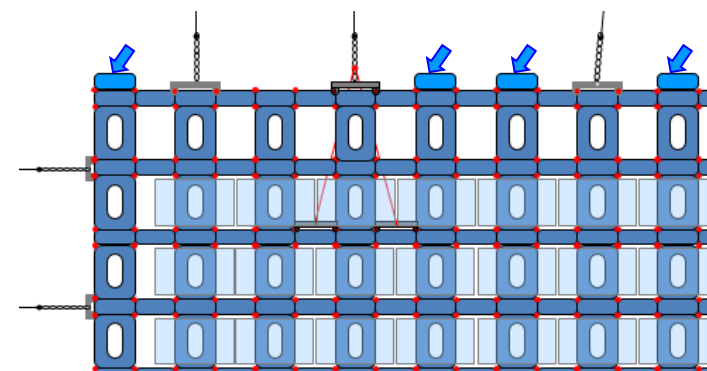
既存フロート水入れ作業



### ▼ フロートに水入り /水入りフロート追加（フロート下配置）



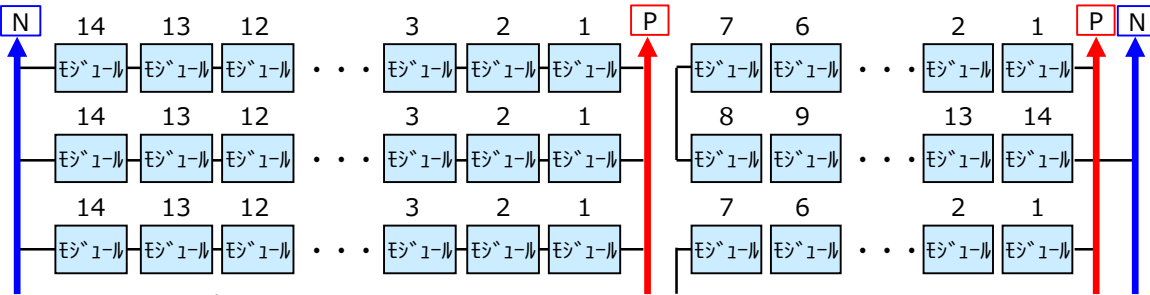
### ▼ 水入りフロート追加（フロート外側配置）



# 7. 要因3：火災防止対策

- ・配線ループが大きくなならない配線経路でP極とN極配線の距離を保つ。
- ・P局/N極の延長ケーブルが近い場合は保護管に入れる対策を実施。

## ●14直列系統の場合



## ●大きなループ配線の危険性

[5] 太陽電池アレイ付近において雷(直撃/誘導)が発生した場合に、太陽電池アレイ配線内のケーブルに電磁誘導は発生することになる。その場合に、正負極のケーブルを図2.5.2-2の右のように並列配線している場合には、誘導電流が打ち消しあい、線間の過電圧の発生がない。他方、正負極を離して配線した場合には、大きな閉ループが形成されてしまい、両者に過電圧が発生する可能性がある。(2.4 雷害保護設計を参照)。

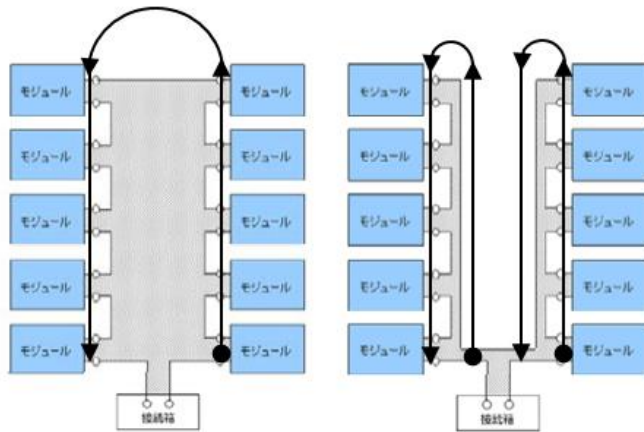


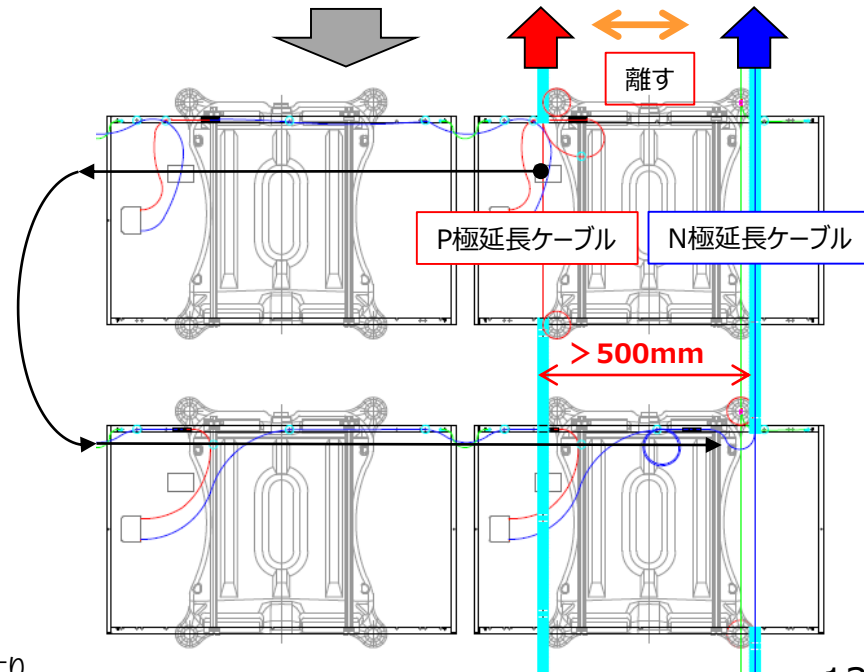
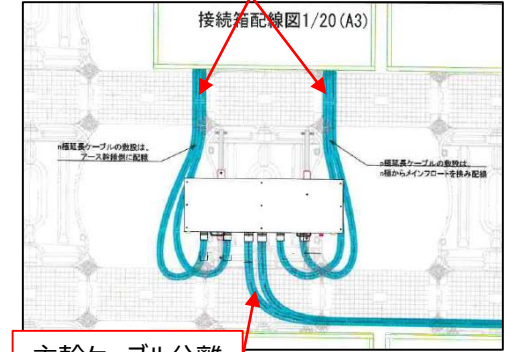
図 2.5.2-2 太陽電池モジュールの配線による誘導ループの違い

※ 産業技術総合研究所「太陽光発電の直流電気安全のための手引きと技術情報」より

## PN延長ケーブル同位置結束



## PN延長ケーブル分離



## 8. 初期提案時の新たな留意点と水平展開

項目	部位	再発防止設計の留意点
設計基準・根拠	風洞実験～	水上アイランドの設計荷重算出方法について 外部応力（風/波）
アイランド設計	設計条件	環境調査（水深、水質、流速、水位変動などの変動要素含む）
	<b>形状</b>	<b>矩形／複合形状</b> ：風向別荷重分布影響 機器レイアウト
	<b>サイズ</b>	<b>方位別の最大連結台数</b> と支持辺長／係留線1本当たりのフロート数
	<b>構造</b>	<b>フェールセーフ設計（連鎖的破壊防止策）</b> 、安定性、配線経路
アンカー設計	アンカー	初期の調査と設計耐力 アンカー方式、荷重負担・施工管理
	係留線	施工時バラツキと調整方法、余長と移動距離
		係留線配置ピッチと角度、係留線材質：劣化率、伸び率
フロート、接続部品設計	設計耐力	揺動時の接続部の応力、荷重伝達
	部品強度	負担荷重、破壊モード、
電気配線設計	ケーブル配線	<b>火災</b> 、経路（水面上/水面下）、クランプ方法・ケーブル保護・メンテナンス性

### 水平展開

- 進行中の案件及び既設案件に関しましては、上記の留意点、とりわけアイランド形状についてサイト毎に検討し、緊急性を鑑みて補強などの対応をして参ります。