



第22回 海上技術安全研究所研究発表会



浮体式洋上風力発電の 促進のための技術開発

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

中條 俊樹 洋上風力発電プロジェクトチーム
黒岩 隆夫 洋上風力発電プロジェクトチーム

■ 背景

- 洋上風力産業ビジョン
- 日本近海の洋上風力発電ポテンシャル
- 海技研の考えるビジョン

■ 浮体式洋上風力発電の技術開発

■ 海技研の取り組みについて

- 合成繊維索係留の安全性評価
- 合成繊維索係留の生物付着影響評価
- デジタルツイン技術の開発
- O&M（オペレーション&メンテナンス）コスト低減のための研究

洋上風力発電の意義と課題

- 洋上風力発電は、①**大量導入**、②**コスト低減**、③**経済波及効果**が期待され、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札。
- **欧州を中心に全世界で導入が拡大**。近年では、中国・台湾・韓国を中心に**アジア市場の急成長**が見込まれる。
(全世界の導入量は、**2018年23GW→2040年562GW (24倍)**となる見込み)
- 現状、**洋上風力産業の多くは国外に立地**しているが、**日本にも潜在力のあるサプライヤーは存在**。

洋上風力の産業競争力強化に向けた基本戦略

1. 魅力的な国内市場の創出

2. 投資促進・サプライチェーン形成

3. アジア展開も見据えた次世代技術開発、国際連携

官民の目標設定

(1) 政府による導入目標の明示

- ・2030年までに1,000万kW、
2040年までに3,000万kW～4,500万kW
の案件を形成する。

(2) 案件形成の加速化

- ・政府主導のプッシュ型案件形成スキーム
(日本版セントラル方式)の導入

(3) インフラの計画的整備

- ・**系統マスタープラン**一次案の具体化
- ・直流送電の具体的検討
- ・港湾の計画的整備

(1) 産業界による目標設定

- ・国内調達比率を2040年までに60%にする。
- ・着床式発電コストを2030～2035年までに、
8～9円/kWhにする。

(2) サプライヤーの競争力強化

- ・公募で安定供給等に資する取組を評価
- ・補助金、税制等による設備投資支援 (調整中)
- ・国内外企業のマッチング促進 (JETRO等) 等

(3) 事業環境整備 (規制・規格の総点検)

(4) 洋上風力人材育成プログラム

(1) **浮体式**等の次世代技術開発

- ・「技術開発ロードマップ」の策定
- ・基金も活用した技術開発支援

(2) 国際標準化・政府間対話等

- ・国際標準化
- ・将来市場を念頭に置いた二国間対話等
- ・公的金融支援

■ 日本近海の浮体式洋上風力発電ポテンシャルはアジアNo.1

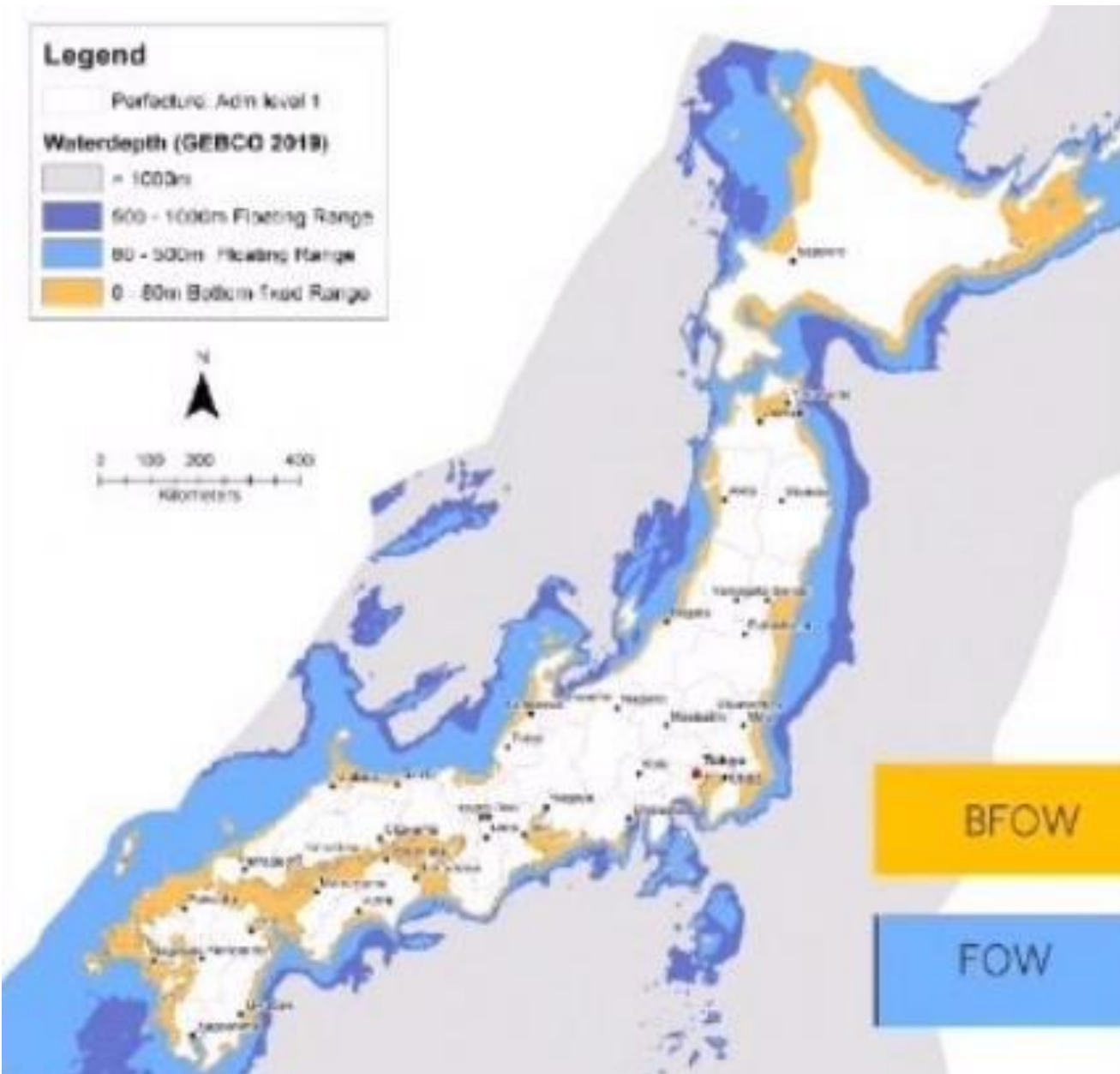
➤ 導入目標達成には、浮体式洋上風力発電が不可欠！

設備利用率40%換算で約**600GW**

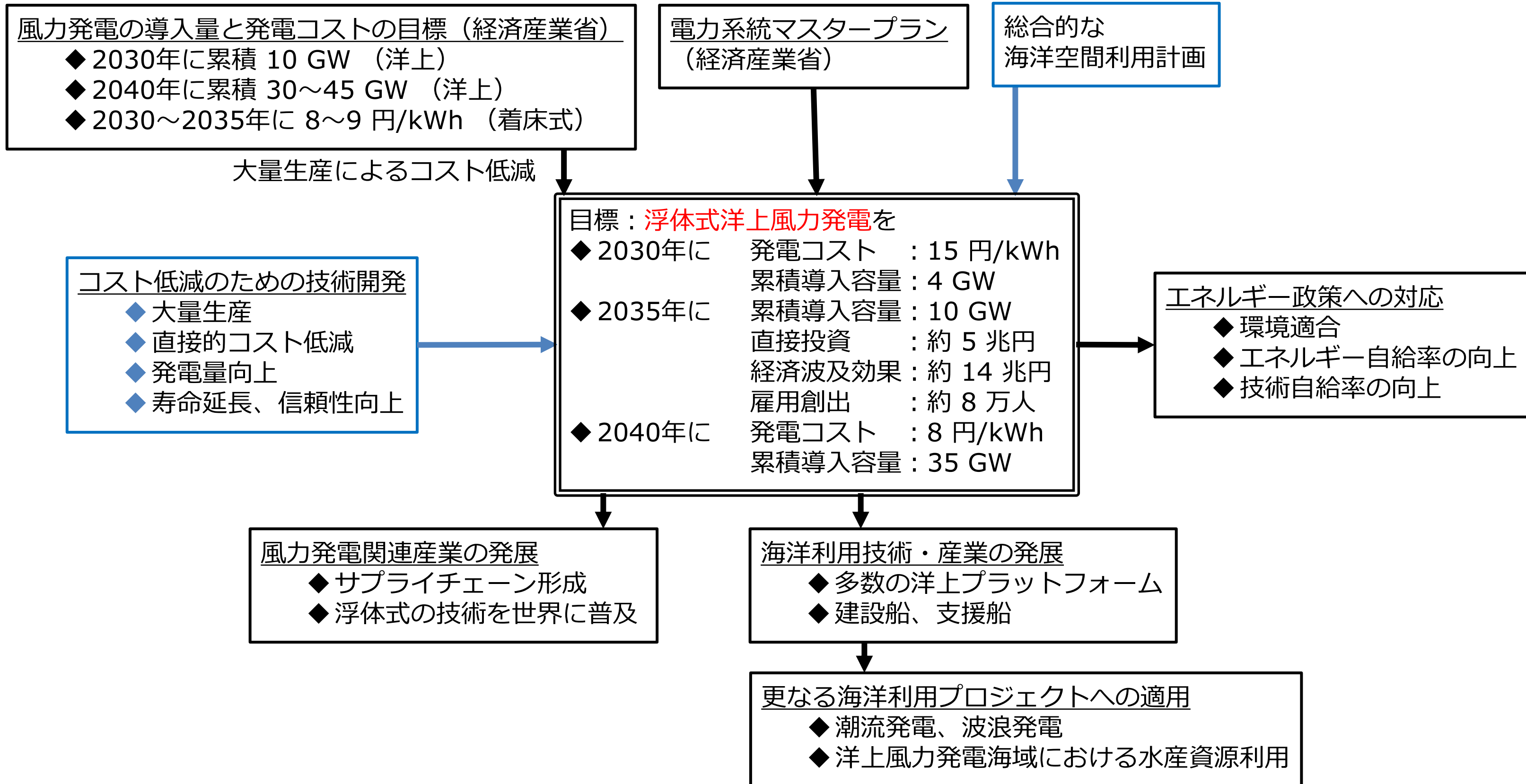
設備利用率40%換算で約10GW

離岸距離60km以内の発電可能量 (TWh/year)

国・地域	着床式	浮体式
日本	30	2,223
中国	1,822	142
韓国	27	366
東南アジア	1,318	1,631
インド	683	903
ヨーロッパ	2,266	7,541
アメリカ	6,333	5,846

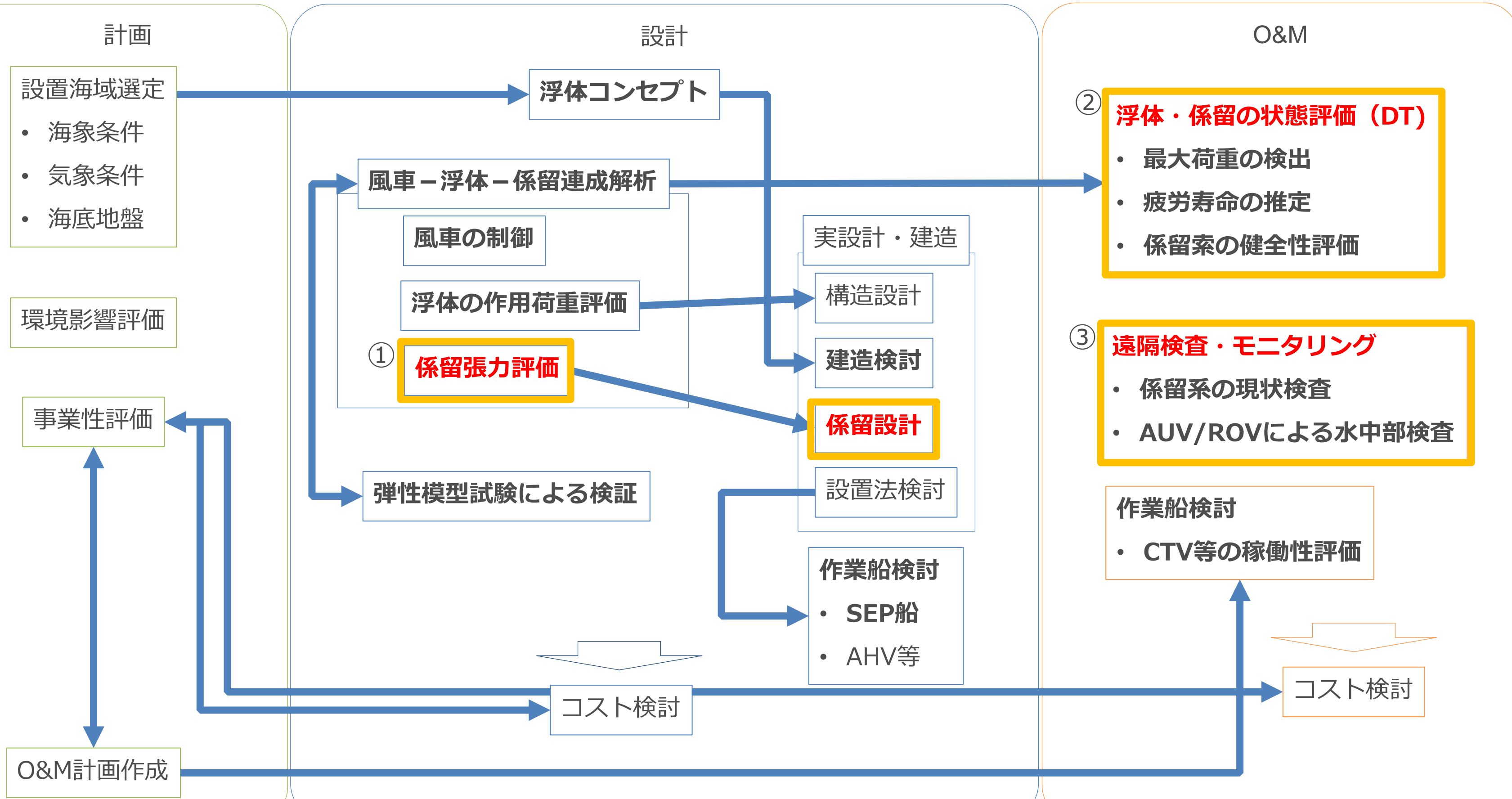


浮体式・着床式に適した海域



(参考) 日本風力発電協会、風力発電の主力電源化に向けた提案、2019年5月。
海津信廣、洋上風力発電費の課題と見通し、風力エネルギー、Vol.42、通巻126、2018年。
松信隆、風力発電関連機器産業の技術的発展に向けて、日本風力エネルギー学会誌、Vol.40、No.3、2016年。

浮体式洋上風力発電の技術開発



撤去

浮体式洋上風力発電の技術開発

欧州の動向



■ Carbon Trust Floating Wind JIPによる技術分析・研究開発項目

- 3年間のJIPを実施し、浮体式洋上風力発電の今後の普及に必要な技術開発項目を抽出
- その中で、重要な知見や必要な技術開発をまとめている
- 先進地域の動向を調査することで、海技研における研究開発の参考に



JIPパートナー

Floating Wind JIPの主な研究開発項目

Phase	R&D
Phase I (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Mooring System : 係留系 • Infrastructure & logistics : インフラ & 物流
Phase II (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Heavy lift offshore operations : 重量物の洋上つり上げ作業 • Monitoring and inspection : モニタリング & 検査
Phase III (2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Heavy lift offshore maintenance : 重量物のつり上げを伴うメンテナンス • Tow to port maintenance : 港に曳航してのメンテナンス

■ 背景と課題

➤合成繊維索を用いた係留系は、コストの観点から有望

➤技術的課題

- 浅い海域での実績が少ない
- 浅い海域では一般的に設計の難易度が上がる
- 繊維索の荷重 – 変位特性や疲労特性が索の素材により大きく異なる
- 生物付着による影響が不明

石油・ガス業界では、大水深域での使用実績が豊富。

■ 海技研の取り組み

- 合成繊維索を用いた係留系の評価手法の提案
- 実海域での生物付着量、生物付着影響の評価

合成繊維索係留を用いた海底石油・ガス掘削生産施設の例

浮体	設置海域	水深
Cascade & Chinook FPSO	メキシコ湾	2600 m
Goliat FPSO	ノルウェー	380 m
Aasta Hansteen spar	ノルウェー	1300 m
Appomattox semi-submersible	メキシコ湾	2195 m
FPU	メキシコ湾	1200 m

<https://www.energyfacts.eu/mdl-and-jumbo-conclude-gom-mooring-installation/>

■ 合成繊維索を用いた係留系設計のポイント

■ 制約条件

- 最大変位（オフセット）：送電ケーブルの破損防止のため、一定程度に制限される。
- 係留張力：最小破断荷重の1/3～1/2.5以下に抑える。（3, 2.5は安全率）
- 合成繊維索が海底と接触しない、海面付近で使用しない。（紫外線劣化）
- ロープをたるませない。（たるんだ状態で繰り返し荷重が働くと、寿命が大幅に低下）

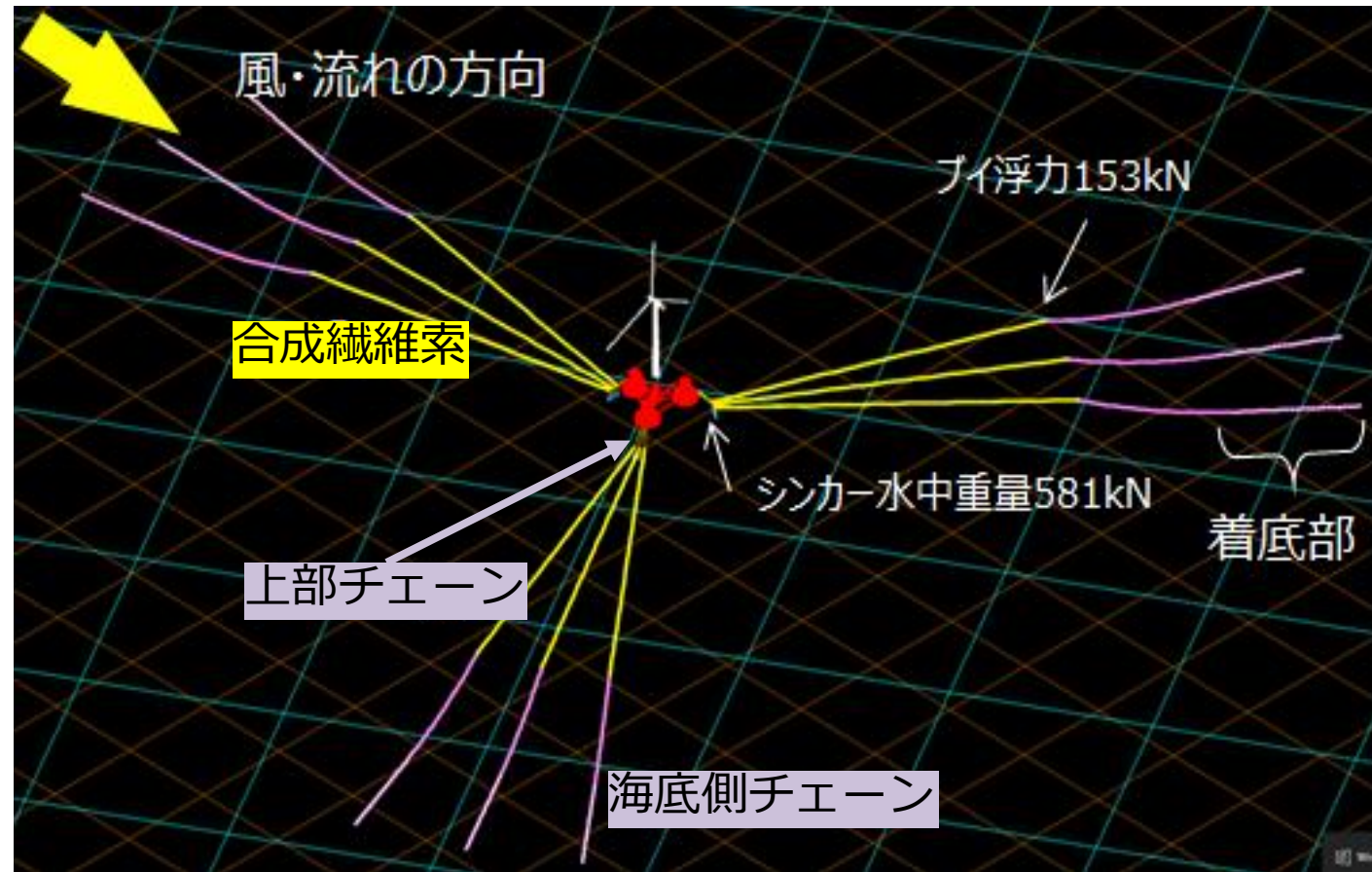
■ 設計パラメータの影響

索本数	<ul style="list-style-type: none">○ 索を増やすと1本当たりの張力は低下する。✗ アンカーコスト、設置コストは増加する
ロープ径・チェーン径	<ul style="list-style-type: none">○ 径を増やすと最小破断荷重が増加し、余裕が生まれる。✗ 特にチェーンの場合は重くなり、浮体サイズの増加につながる。
ロープ長さ	<ul style="list-style-type: none">○ ロープを長くすると、ロープの伸びで吸収できる変位が増加する。✗ ロープが長すぎるとたるみ、寿命低下、海底と接触する。
アンカー半径	<ul style="list-style-type: none">○ ロープを長くすると、ロープの伸びで吸収できる変位が増加する。✗ 海域占有面積が増加する。
ブイ・シンカー	<ul style="list-style-type: none">○ 浅海域等、通常の係留では困難な海域へも適用可能となる可能性。✗ 設計は複雑化。

- 前スライドの制約条件の下で、IEA(International Energy Agency)の数値解析コード検証(OC4: Offshore Code Comparison Collaborative Continuation)における参加機関共通の解析対象浮体に対し、適切な係留系を設計、風車-浮体-係留の連成解析を実施。

再現期間	有義波高	有義波周期	平均風速	平均流速
50年	9.30m	12.95s	35.15m/s	0.75m/s
10年	6.79m	10.97s	28.79m/s	0.61m/s

水深	64 m	
索本数	9	
上部チェーン	長さ	25 m
	直径(呼び径)	81 mm
	最小破断荷重	5490 kN
合成繊維索	長さ	300 m
	直径	167 mm
	最小破断荷重	5472 kN
海底側チェーン	長さ	270 m
	直径(呼び径)	81 mm
	最小破断荷重	5490 kN
シンカー	水中重量	581 kN
ブイ	浮力	153 kN

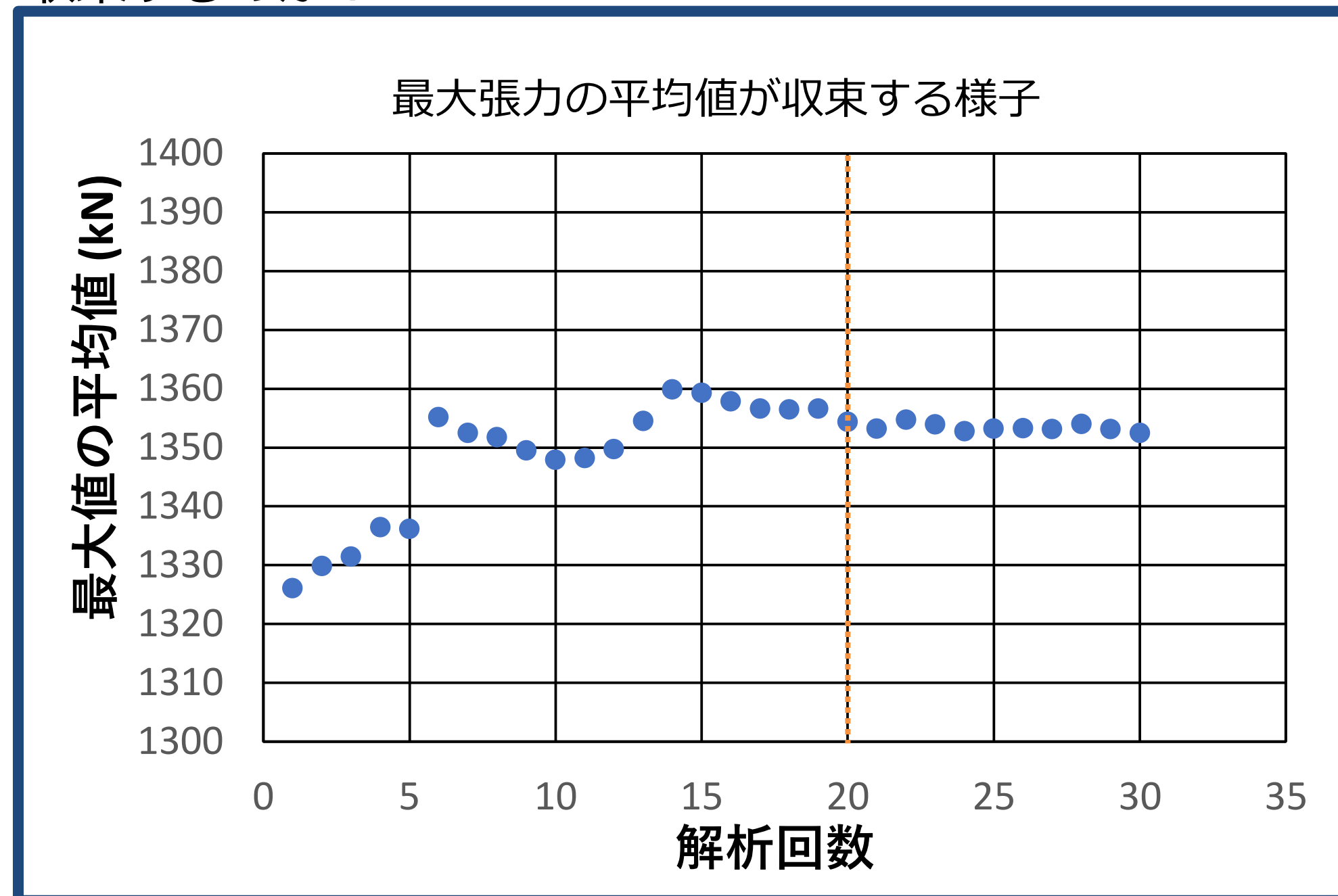


OC4浮体を対象とした合成繊維索係留の設計例

- 風車-浮体-係留の連成解析により、制約条件を満たしていることを確認した。留意点を次スライドに示す。

- 合成繊維索を用いた係留系設計上の留意点について、以下が明らかになった
 - 非線形性の強い繊維索の張力特性は、4直線程度以上の近似が望ましい
 - 係留張力は風・波・流れの入射方向が同一方向の条件で最大となるとは限らない
 - 波の方向分布は一方向波による解析が安全側とは限らない
 - 最大張力となる海象条件は、定格風速で波高が高く波周期が短い条件である
 - 最大張力の発生箇所は、海底着底点近の場合もあり得る
 - 最大張力の推定にはランダムシードを変えた複数回の時系列計算が必要であるが、一定の解析結果に到達するまでの解析回数については、今回の解析では20回程度で収束
 - 最大疲労被害度の発生箇所は最大張力発生箇所と一致しない場合がある

- 不規則波、乱流風のランダムシードを変えて解析
 - ランダム現象のため、1回目の解析で得られた最大値が過小評価の可能性がある
 - そこで、複数回の計算結果から平均値を求めるが、長時間の計算が必要
 - 何回程度で一定値に収束するのか？

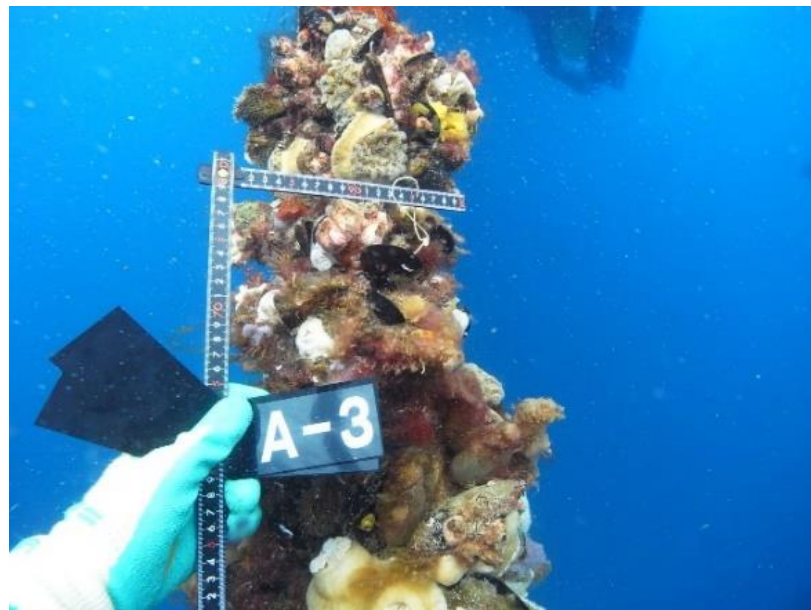


海上技術安全研究所のとりくみ

①合成繊維索係留の生物付着影響評価



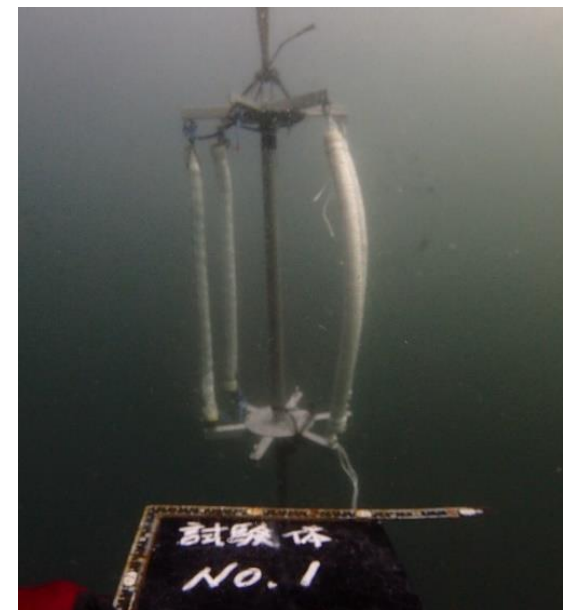
- 生物付着の影響は明確になっていない
 - 重量増加による索張力の増加
 - 付着生物による索強度の低下
- 現地計測と実海域浸漬試験による付着量評価と強度評価を実施中
- 現地計測では、単位長さ当たりの水中重量は最大で300 kgf/m程度を観測
 - 安全ガイドライン化を目指す



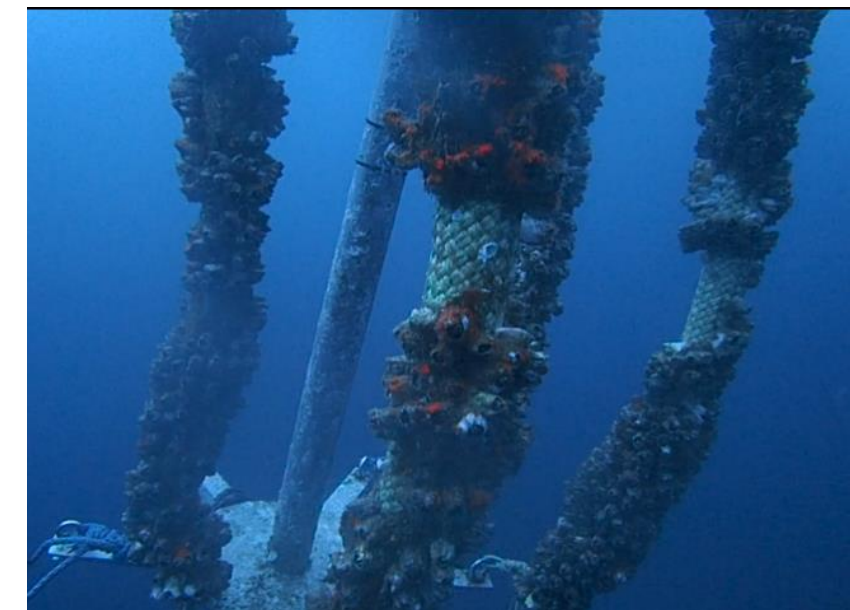
石狩湾の養殖施設の付着状況



石狩湾の浸漬試験の状況



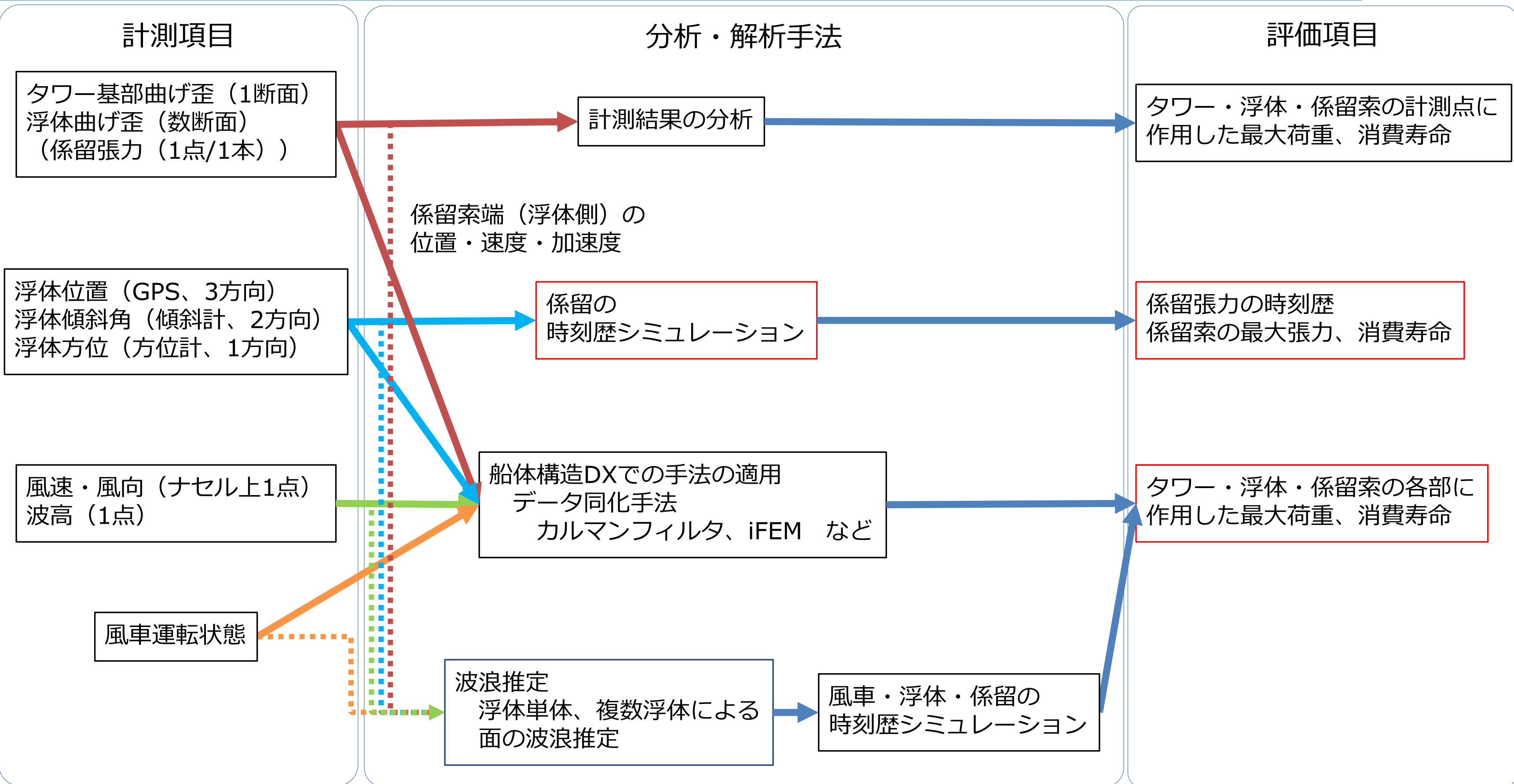
高知県沖の浸漬試験の状況と付着状況



- デジタルツイン：デジタル上に実機と同等の仮想モデルを構築する。
- デジタルツインモデルに実機と同様の海気象を作用させると、実機に発生する荷重や疲労を精度よく評価可能
- 開発の流れ
 - 風車－浮体－係留の連成解析技術に、浮体構造強度評価を加える開発を実施
 - モデル化の手法
 - 浮体：梁モデル
 - 梁の断面剛性を想定実機的设计結果に基づき設定
 - モリソン式に基づく流体力を入力
- より精度を高めた解析手法を開発し、実海域における計測結果を用いた検証を行い、デジタルツイン技術の確立を目指す

海上技術安全研究所のとりくみ

② デジタルツイン技術の開発



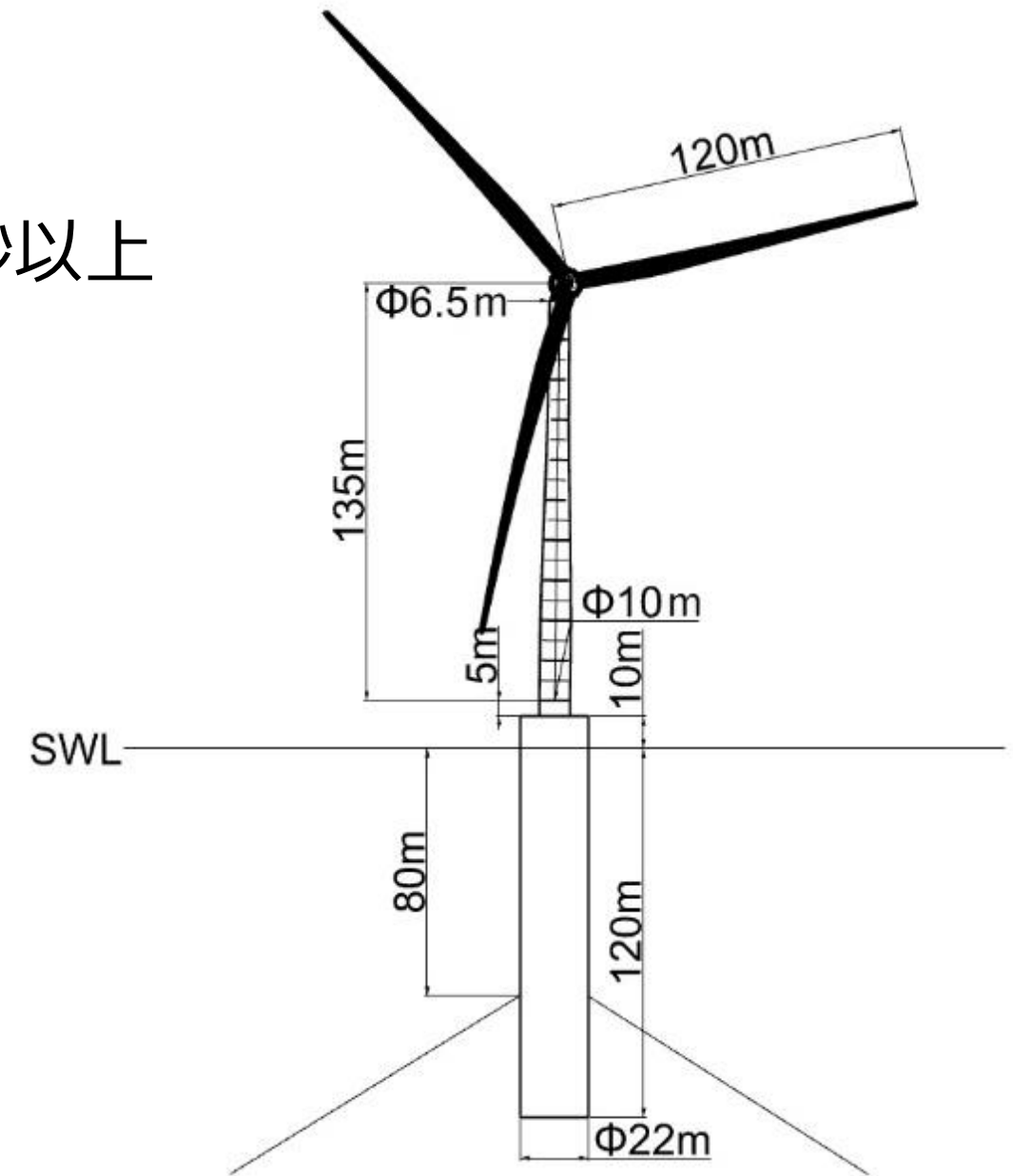
- スパー型浮体を対象に試設計、解析を実施
- 浮体の主要材料を鋼製、コンクリート製の2種類で検討
- 目標値
 - 静的傾斜角：3度以下、動的傾斜角：片振幅5度、浮体の固有周期：20秒以上

搭載風車の主な仕様

項目	値
ナセル・ハブ重心高さ	150 m
ナセル重量	631 ton
タワー重量	1250 tom

設計結果

項目	鋼製	コンクリート製
最大スラスト力での静的傾斜角	2.3 deg.	2.7 deg.
ピッチ固有周期	24.0 s	26.5 s
板厚	20~50 mm	200~1000 mm
風車・タワー・浮体構造重量	3000 ton	16000 ton
バラスト重量	43000 ton	30000 ton



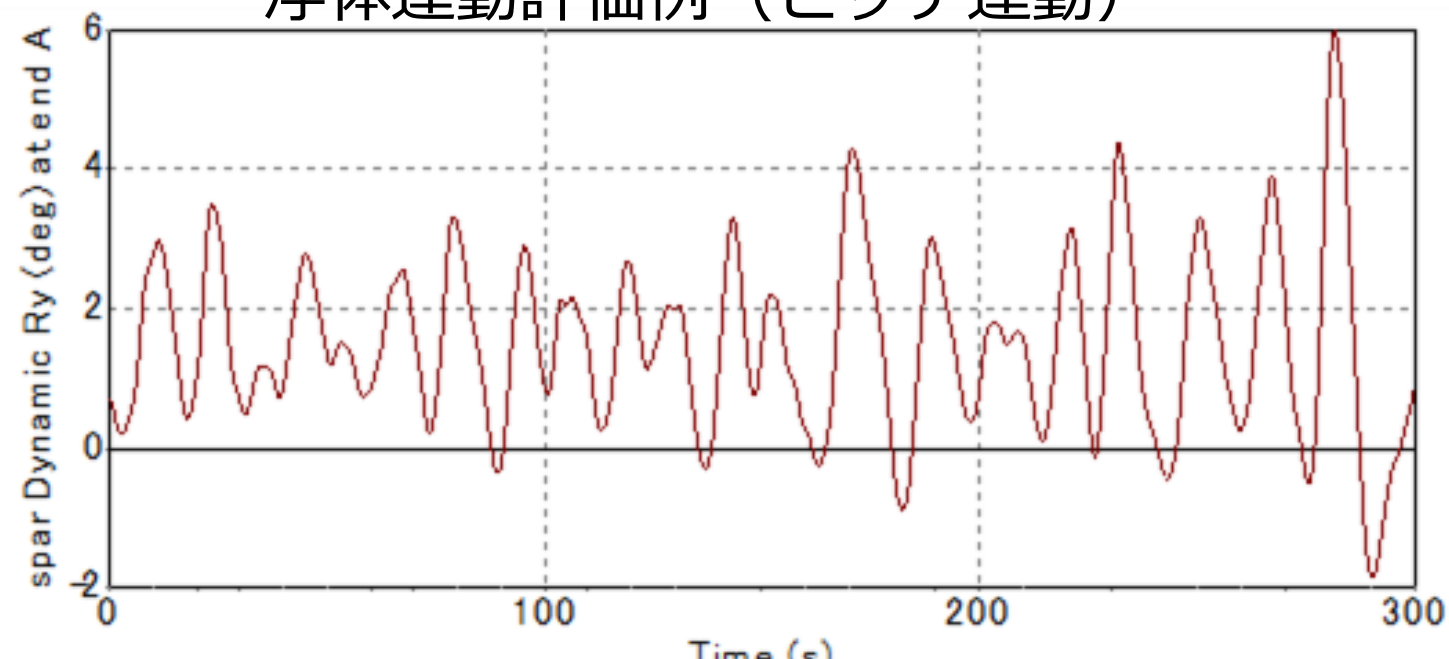
15MW風車搭載のスパー型浮体

■ コンクリート製スパー型浮体を対象とした解析事例

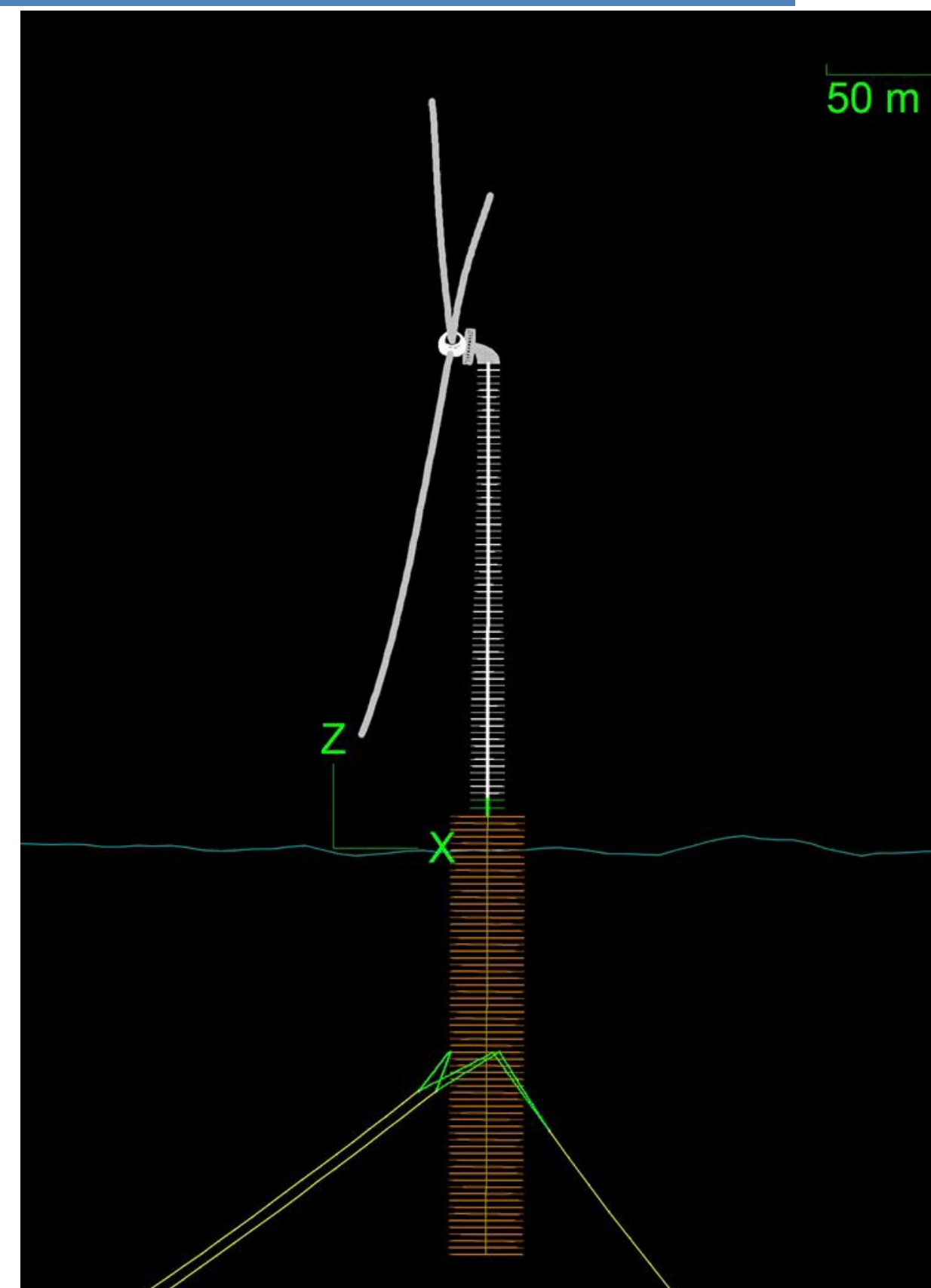
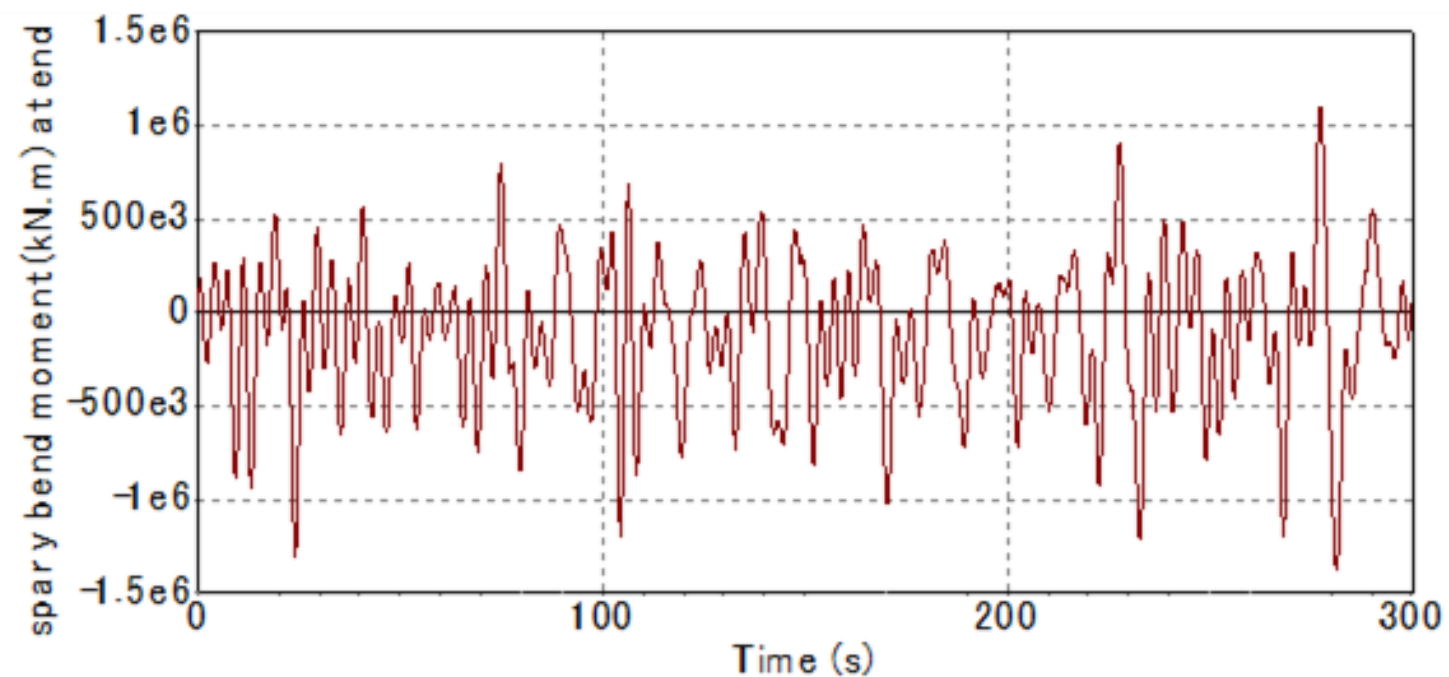
➤ 風 : IEC Kaimal、Ref, mean speed = 20 m/s

➤ 波 : JONSWAP、 $\gamma = 1$ 、 $H_s = 10$ m、 $T_z = 10$ s

浮体運動評価例 (ピッチ運動)





強度評価例 (浮体ピッチ方向曲げモーメント)

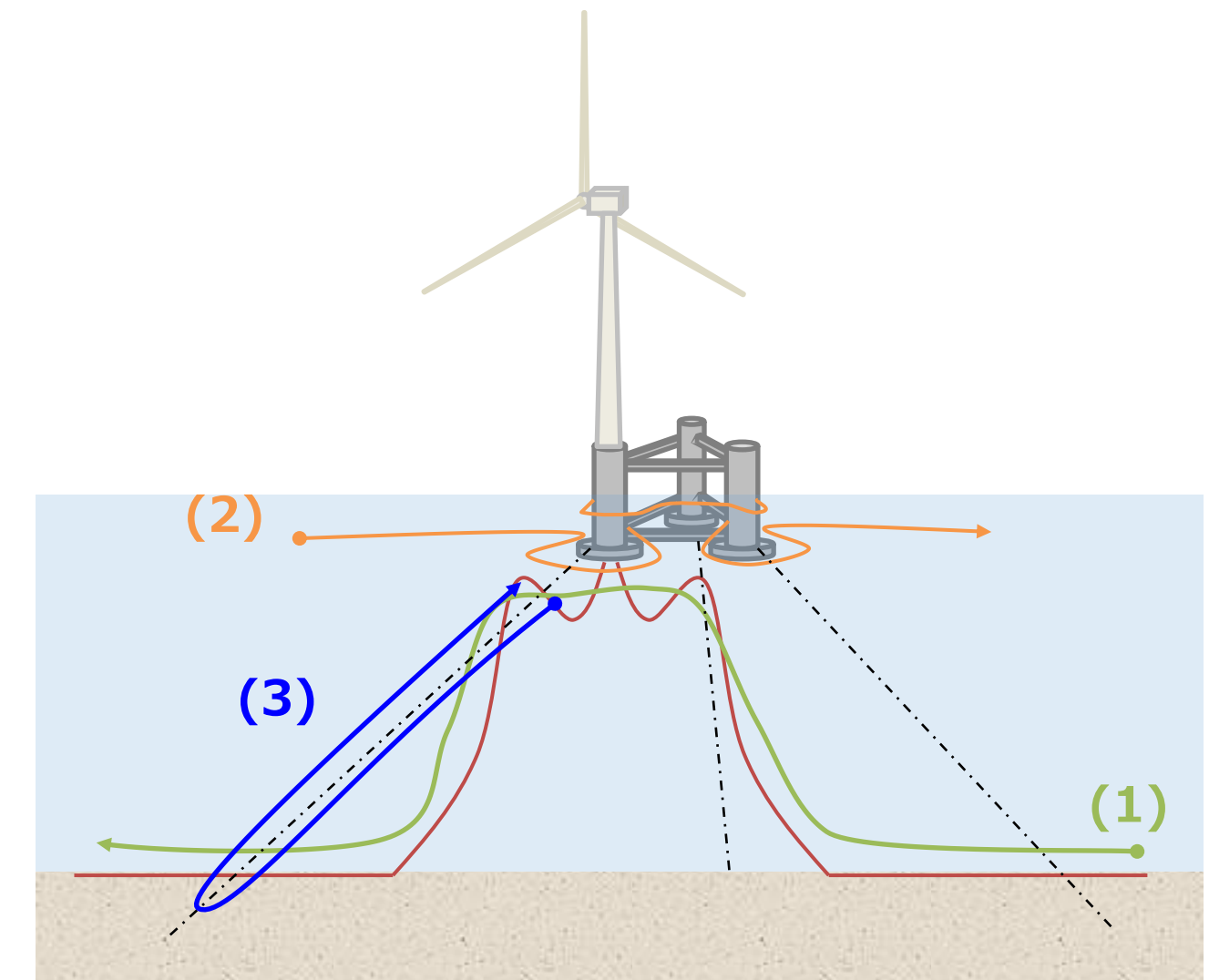
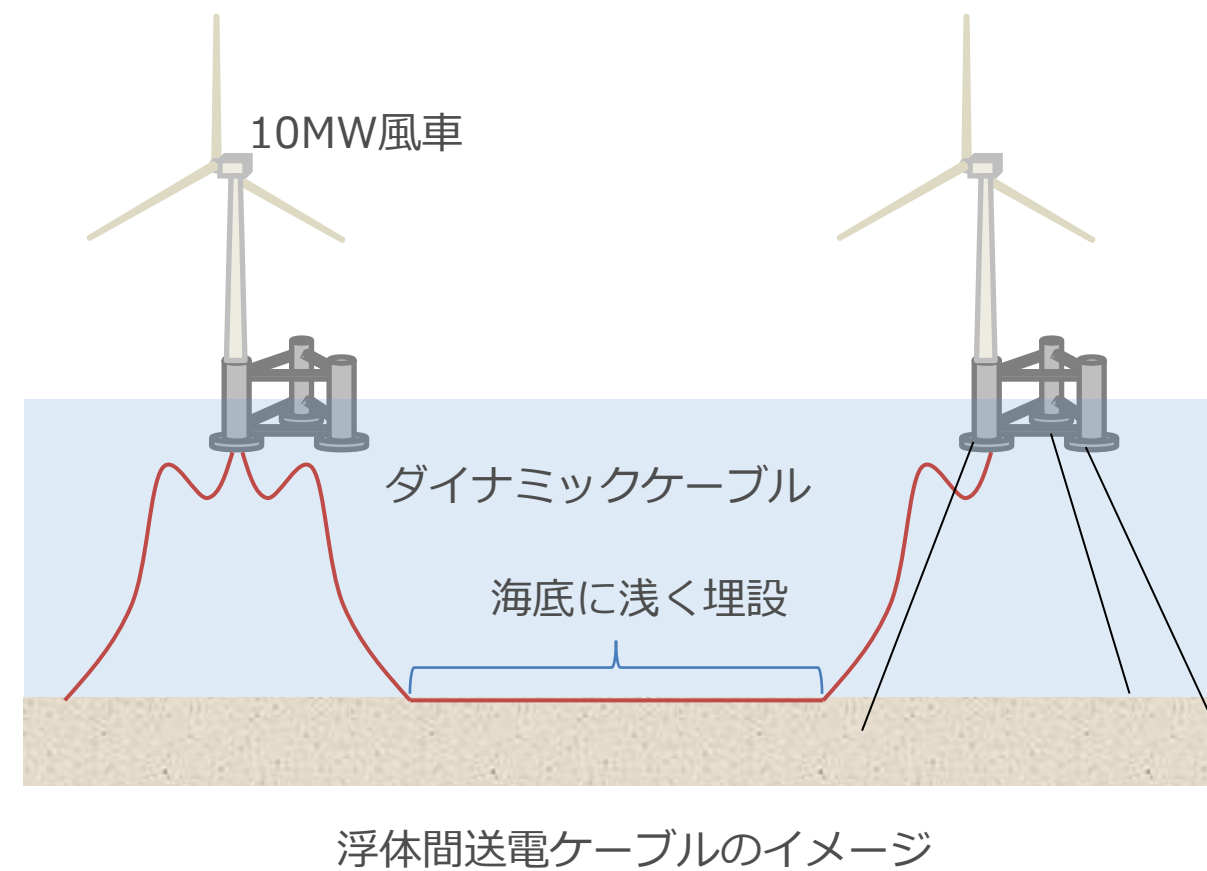
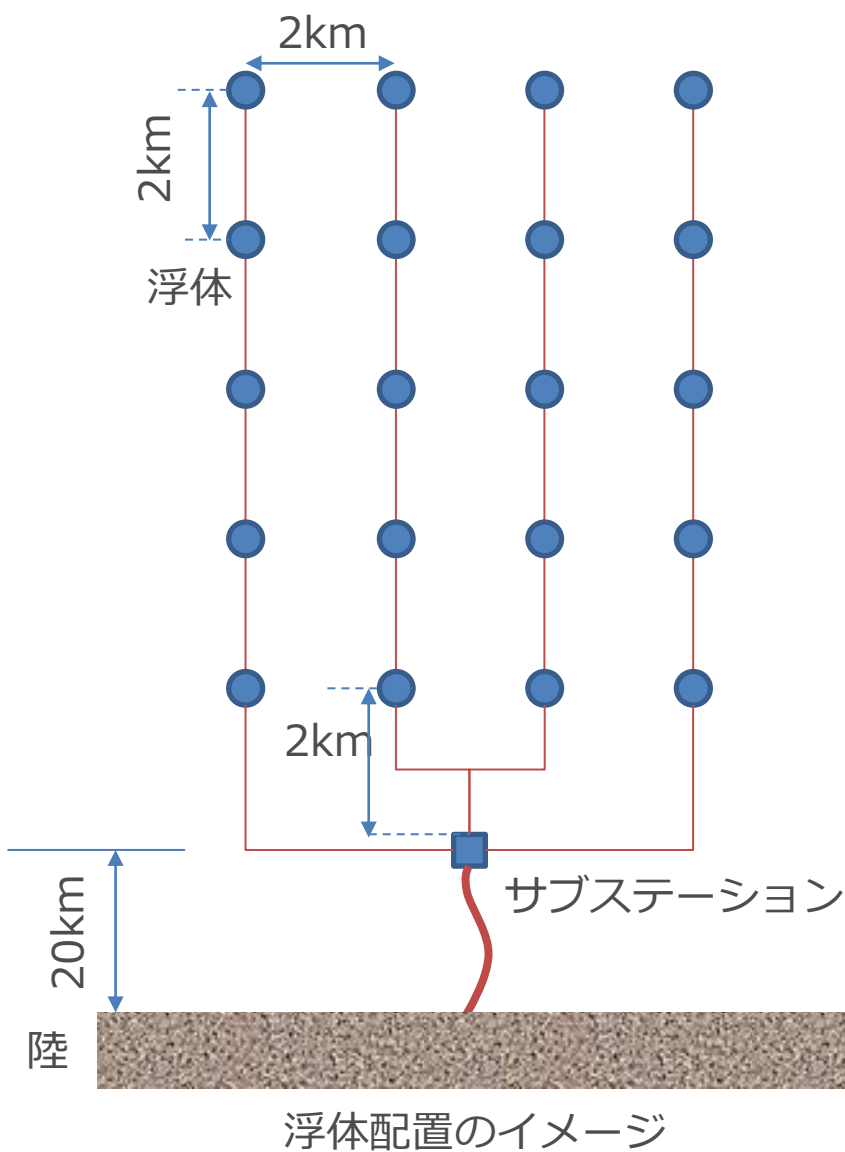


- 海技研では、国土交通省海事局による請負研究を通じて安全ガイドラインの改訂を実施
- モニタリングや検査についても、浮体式洋上風力発電の普及促進につながるよう検討中
- 検討の方向性
 - 目視によるモニタリングを無人化、センサーによるモニタリングも効率化を図る
 - 有人かつOn siteの検査を遠隔から可能にする
- 検討中の課題
 - 現状のモニタリングシステムを代替可能な、効率的かつ安全なモニタリングシステムの検討
 - 有人かつ浮体上での検査手法を代替可能な遠隔からの検査手法の検討
 - ウィンドファームを想定し、一部浮体を検査対象とする、いわゆる代表基検査の適用可能性の検討
- 検討の成果は今後公表予定

■ 海技研保有のAUVの例

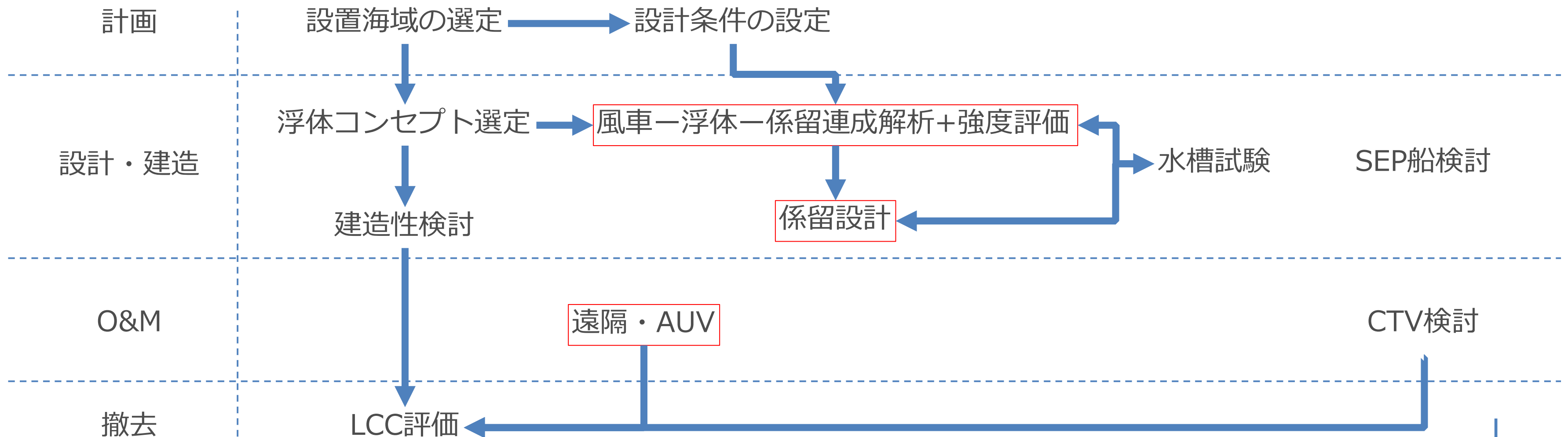
航行型AUV (NMRI-AUV3)	ホバリング型AUV (NMRI-Hobalin)
	
<p>サイズ：長さ3.9m、直径0.65 m 総重量：545 kg 航行速度：3.5 knot 航行可能水深：2,000 m バッテリー持続時間：22時間 駆動装置：水中スラスタ、バラストリリナー、リアエレベーター センサー：MBES、Spontaneous electrometer、CT、TCM</p>	<p>サイズ：長さ1.2 m、幅0.7 m、高さ0.8 m 総重量：270 kg 航行速度：0.4 knot 航行可能水深：2,000 m バッテリー持続時間：8時間 駆動装置：水中スラスタ、バラストリリナー センサー：観測用カメラ、LEDフラッシャー、前方監視カメラ、照明2台、Profiling Sonar、CT、Turbidity meter、pH sensor</p>

■ AUVを用いた浮体式windファームの検査手順の例



- (1)ダイナミックケーブルの状況確認（海底面～各浮体）
- (2)ケーブル取り付け部・浮体状況確認（各浮体）
- (3)係留索状況確認（各浮体）

- 政府による導入目標の達成には、浮体式洋上風力発電が不可欠
- 浮体式洋上風力発電の普及拡大に資する研究開発を実施中
- 海技研では、合成繊維索を用いた係留系や、デジタルツイン技術の開発、O&Mの効率化を中心に取り組み
- その他の分野についても、大学、民間企業とともに研究開発に取り組んでいる



ご清聴ありがとうございました

