



第22回 海上技術安全研究所講演会



浮体式洋上風力発電のロードマップと 海技研の研究開発

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

洋上風力発電プロジェクトチーム

中條 俊樹

□ 浮体式洋上風力発電の現状

■ ヨーロッパ

➤ 風車の大型化とウィンドファーム化が早いペースで進行している。

- Hywind Tampen (ノルウェー, スパー型, コンクリート製, 8MW×11基) : 1号機が試運転開始。全基完成は2023年。
- Hywind Scotland (イギリス, スパー型, 6MW×5基)
- Kincardine (イギリス, セミサブ型, 9.5MW×5基+2MW×1基)

■ 浮体形式はセミサブ型, スパー型, バージ型に加え, 新たな形式も実証試験が実施されている。

➤ 1基の浮体に2基の風車を搭載するコンセプトも実証試験を実施。

- SCD NEZZY2, W2Power

➤ タレットを用いた1点係留のコンセプトも実証試験を実施。

- SATH, X1 Wind



W2Power



DemoSATH



X1 Wind

□ 浮体式洋上風力発電の現状

■ 日本

- ▶ 長崎県沖でウィンドファーム設置工事が開始（2.1MW×8基）
- ▶ 福島の浮体が撤去された

■ 中国

- ▶ 浮体式での技術開発が急速に進展
 - 1号機：Mingyang製5.5MW機搭載のセミサブ型
 - 2号機：Fuyao（CSSC6.2MW）、セミサブ型
 - さらに、SCD Nezy2の搭載風車もMingyang製8.3MW機



国内の動き

再エネ海域利用法における案件形成

▶ ラウンド1

- 着床式の3海域で事業者選定

▶ ラウンド2

- 新たに3海域が促進海域に

- 1海域が一定の準備段階の海域に

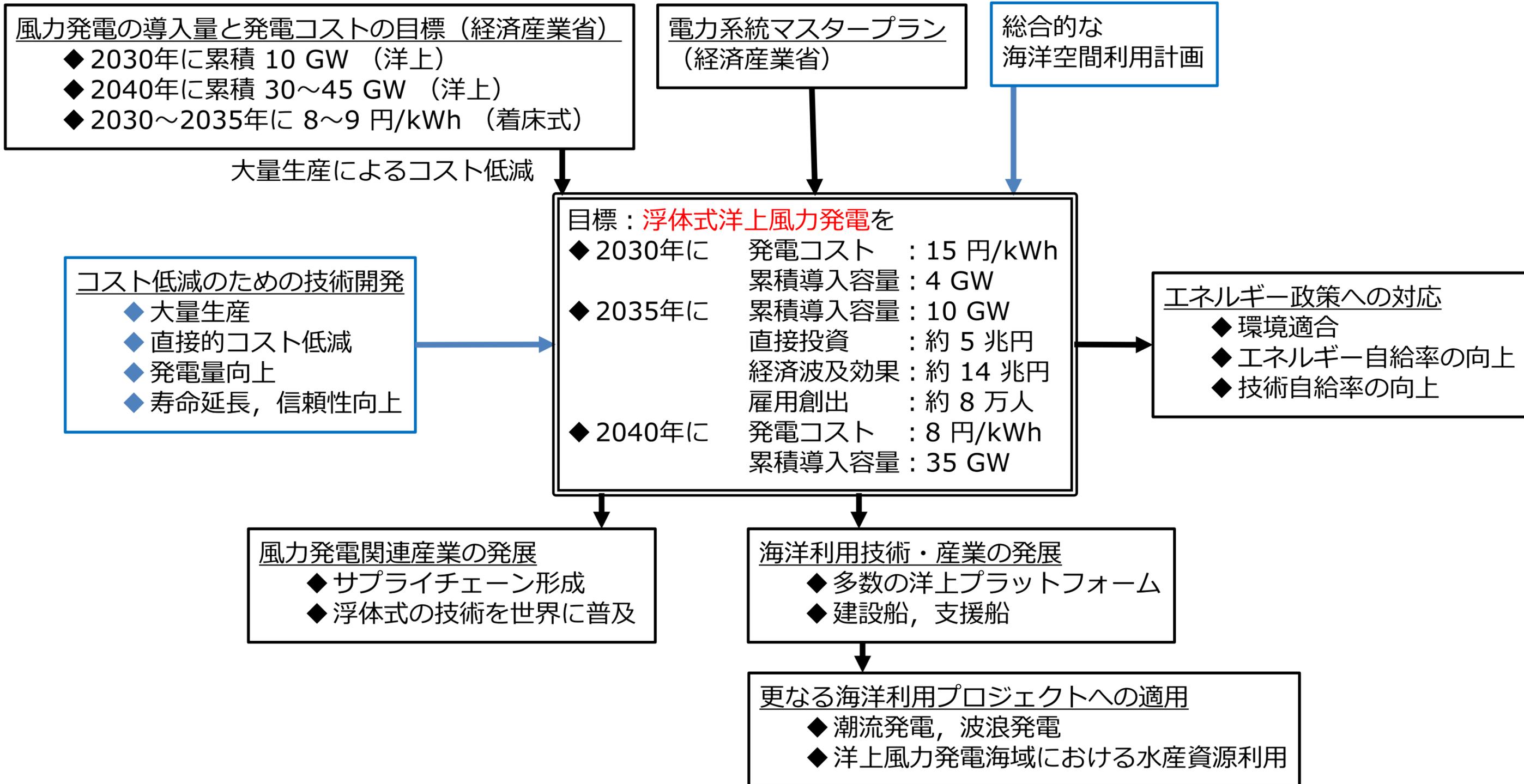
グリーンイノベーション事業

▶ 多数のプロジェクトで研究開発を実施



区域名	
事業者選定済	①長崎県五島市沖（浮体）
	②秋田県能代市・三種町・男鹿市沖
	③秋田県由利本荘市沖
	④千葉県銚子市沖
	⑤秋田県八峰町・能代市沖
促進区域	<u>⑥長崎県西海市江島沖</u>
	<u>⑦秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖</u>
	<u>⑧新潟県村上市・胎内市沖</u>
有望区域	⑨青森県沖日本海（北側）
	⑩青森県沖日本海（南側）
	⑪山形県遊佐町沖
	⑫千葉県いすみ市沖
	<u>⑬千葉県九十九里沖</u>
一定の準備段階に進んでいる区域	⑭北海道檜山沖
	⑮北海道岩宇・南後志地区沖
	⑯北海道石狩市沖
	⑰北海道松前沖
	⑱青森県陸奥湾
	⑲青森県陸奥湾
	<u>⑳富山県東部沖（着床・浮体）</u>

背景 – 海技研の考えるビジョン –



(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導入量ロードマップ

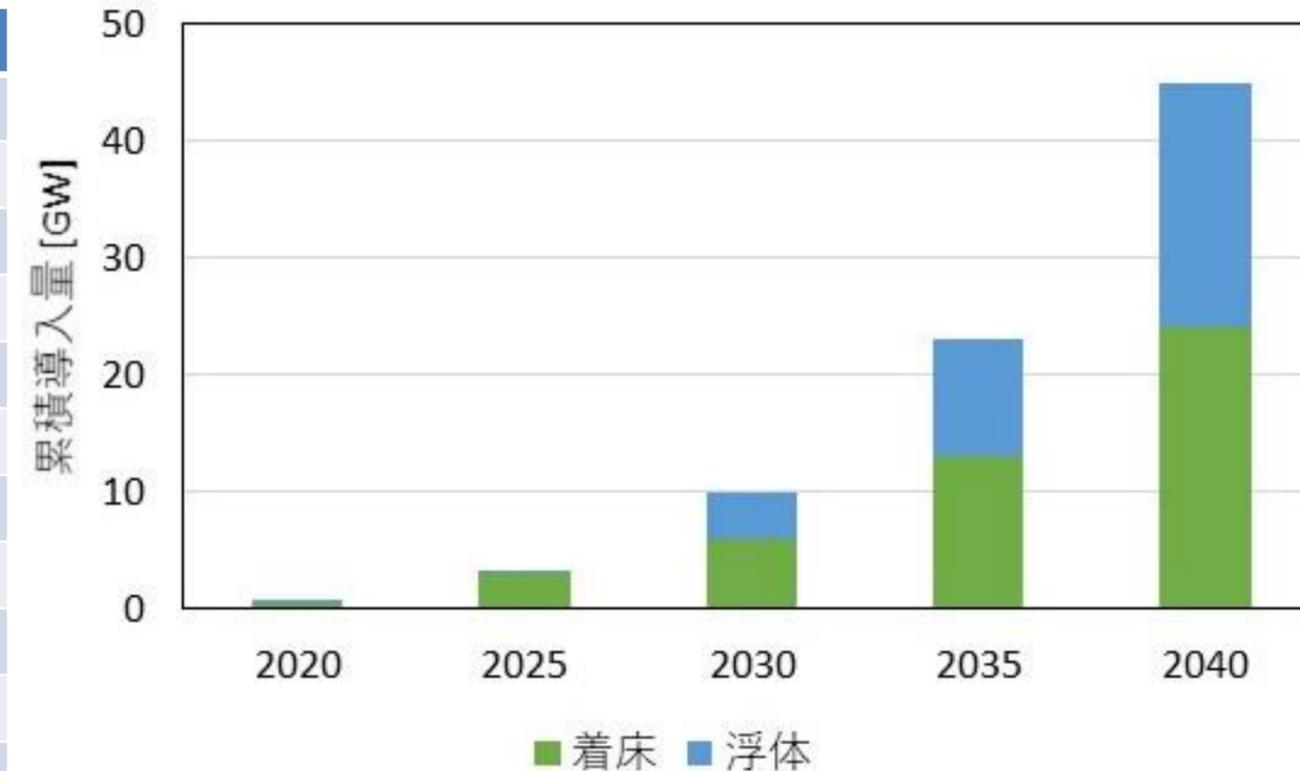


- 複数の浮体式風力発電の導入量ロードマップが提言されている
 - 導入目標は2040年に20GW程度

海洋技術フォーラムの提言（2022年）

年度		2030年	2040年	2050年
高位目標	風車出力	13MW	20MW	20MW
	発電コスト		¥9.5/kWh	¥8.4/kWh
	導入目標量（累計出力）	0.2GW	40GW	150GW
高位目標	年間浮体製造数		380	682
	組立拠点数（月4基ペース）		8	14
中位目標	導入目標量（累計出力）	0.2GW	25GW	100GW
	年間浮体製造数		191	499
	組立拠点数（月4基ペース）		4	10
低位目標	導入目標量（累計出力）	0.2GW	15GW	50GW
	年間浮体製造数		139	196
	組立拠点数（月4基ペース）		3	4

海技研の提言（2021年）



浮体式洋上風力発電の導入量ロードマップ



- 発電コストでは、2050年目標値には現状から1/5程度のコストダウンが必要

海技研試算によるコストの内訳 (100万円/MW)

		発電コスト LCOE	設備利用率 CF	CAPEX 資本費	OPEX/年 運用費				
					運転保守	保険	間接経費	利息	年計
現状	単基 実証	40 円/kWh	43 % (7.5 m/s相当)	1500	50	10	7.5	—	67.5
2030年の目標	100基	15 円/kWh	43 % (7.5 m/s相当)	537	10	5	1.5	9.8	26.3
2050年の目標 欧州並み	100基	8 円/kWh	50 % (8.5 m/s相当)	341	5	4	0.8	6.2	15.0

海技研試算によるCAPEXの内訳 (100万円/MW)

	浮体建造費	係留材料費	浮体・係留設置費	サブステーション	電力ケーブル	開発, 間接経費	風車以外の合計
現状	400	100	500	—	300	—	1,300
2030年	159	18	78	44	50	38	387
2050年	80	14	50	28	40	24	236

- 風車の大型化に伴う課題
 - 浮体寸法の大型化
 - 建造場所の制約
 - 風車搭載工事の難易度が上昇
- 海上工事
 - 風車の大型化に対しクレーンの大型化が遅れている
 - 大型のクレーン船の傭船料は高価
- 係留
 - 風車・浮体の大型化に伴い必要な係留力は増加するが、影響は大きくない？
 - 合成繊維索の長期間使用は実績がない

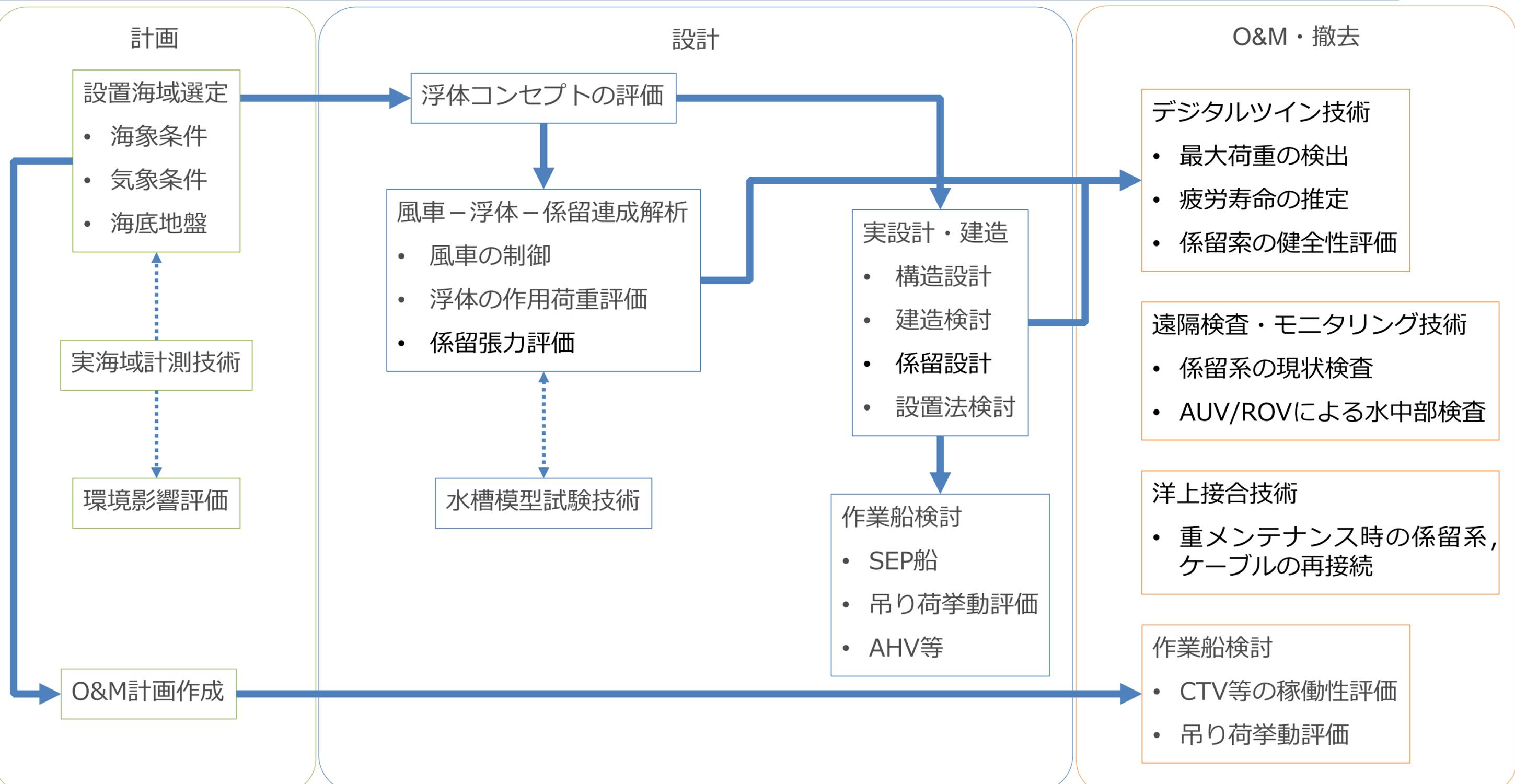
□ 海外における調査，実証プロジェクトの知見等を参考に整理

	計画	設計	建造・設置	運用・撤去
風車	風況観測 発電量評価	風車－浮体－係留の 連成解析	吊荷挙動評価	ブレードピッチ制御 遠隔監視・メンテナンス 吊荷挙動評価（大規模メンテ ナス時，撤去時）
浮体	海象観測 設計条件設定	設計条件設定 連成解析 構造強度評価	曳航 SEP船稼働性評価 大量建造技術	遠隔監視・メンテナンス 基地港への曳航（大規模メン テナンス時，撤去時）
係留	海象観測 設計条件設定	連成解析 合成繊維索の最適設計	AHV評価 大量生産 合理的な海上作業技術	生物付着対策（合成繊維索） 切り離し・再接続（大規模メン テナンス時） 遠隔監視 合成繊維索伸び対策
ケーブル	送電量評価	連成解析	敷設船評価	生物付着対策 切り離し・再接続（大規模メン テナンス時） 遠隔監視
作業船	CTV稼働性評価			CTV運用

AHV : Anchor Handling Vessel

CTV : Crew Transfer Vessel

それぞれの技術のリンク



世界におけるプロジェクトの推移



~2020年度

2021年度

2022年度

2023年度

2024~

グリーンイノベーション事業開始

2023年度からPhase2

福島プロジェクト完了
・ 世界初の浮体式
 ウィンドファーム

福島浮体撤去完了
・ 世界で初めて撤去・解体まで実施

- ・ 大型風車を搭載した浮体
- ・ 合成繊維索係留
- ・ 設置の低コスト化 etc.

長崎県沖設置工事開始

- ・ 日本初の商用浮体式ウィンドファーム

Hywind Tampen建造開始

Kincardine全機運開

- ・ 浮体式で最大の風車搭載
- ・ 鋼製浮体

Hywind Tampen全機運開

- ・ コンクリート製浮体を岸壁で複数基連続建造
- ・ 合成繊維索係留 (HMPE)
- ・ アンカー共有化

FLOATGEN運転開始 (2016)

- ・ コンクリート製浮体
- ・ 極めて浅い海域で合成繊維索係留 (ナイロン)

テトラスパー運転開始

- ・ キール (重り) を用いた係留

中国1号機設置

中国2号機設置

海技研における研究開発プロジェクトの推移



NEDOプロジェクト参画 (2016~)

【実施内容】

- 水槽試験
- 実海域計測

【成果】

- 特殊な浮体・係留系に対する解析能力の強化**
- 実海域対応

海事局請負研究 (2018~)

【実施内容】

- 損傷時復原性検討
- 合成繊維索係留
- コンクリート製浮体
- O&M

【成果】

- ガイドライン改訂
- 合成繊維索の生物付着影響評価

グリーンイノベーション事業参画

【実施内容】

- ブレードピッチ制御を用いた浮体最適化
- 大量生産に適した浮体最適化
- 合成繊維索係留

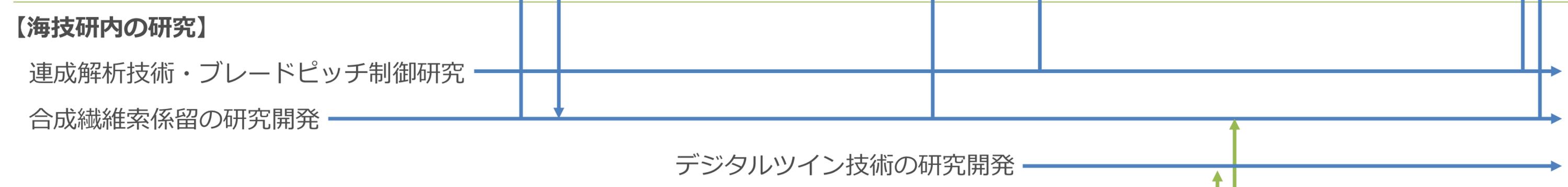
【成果】

- 普遍的な浮体に対する最適化**
- 合成繊維索係留の実海域試験

2023年度からPhase2

【成果の社会実装】

- 大型風車搭載の実機建造
- 合成繊維索係留の実用化



水槽試験による検証 (2023)

□ ブレードピッチ制御を用いた浮体最適化

■ NREL開発の制御アルゴリズム「ROSCO」を用いて発電量最適化と浮体運動の低減、およびブレードピッチ制御による浮体の最適化（コンパクト化）の研究を実施中。

- ROSCO (Reference OpenSource Controller) : NREL (アメリカ再生エネルギー研究所) の開発した制御アルゴリズム
- IEA15MW風車を搭載したセミサブ型浮体を用いて検証。
- ROSCOにおいては, Pitch Saturationにより定格風速付近での浮体運動の低減を確認
- ブレードピッチ制御を効果的に用いることで浮体のコンパクト化につながるか検証中

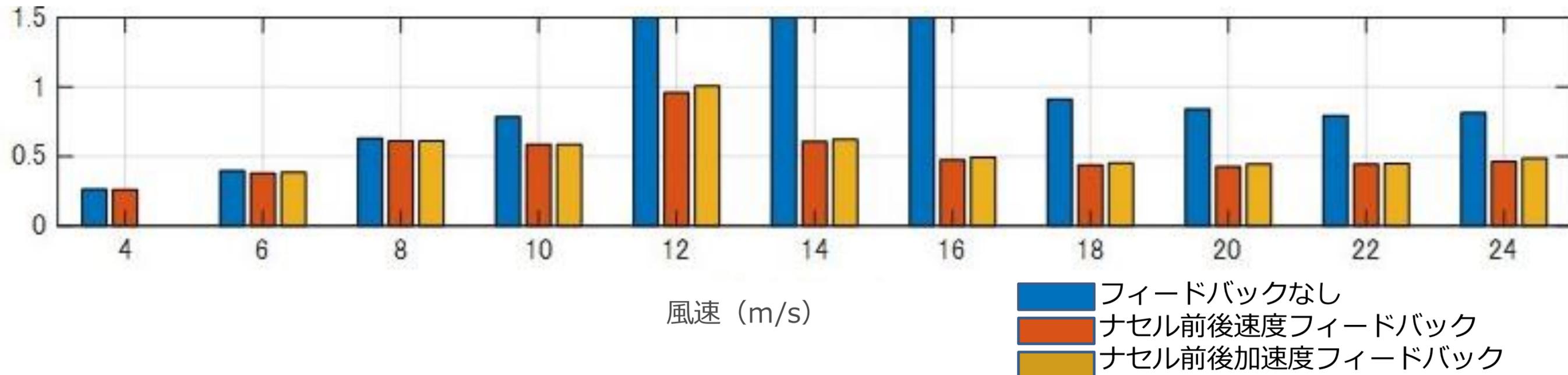
□ ブレードピッチ制御を用いた浮体最適化

■ 浮体運動のフィードバックの効果

- ナセルの前後運動の速度または加速度を用いたフィードバック
- 風速ビンごとに浮体ピッチ変位の検証

■ 浮体運動の減少を確認

浮体ピッチ変位の標準偏差(deg.)



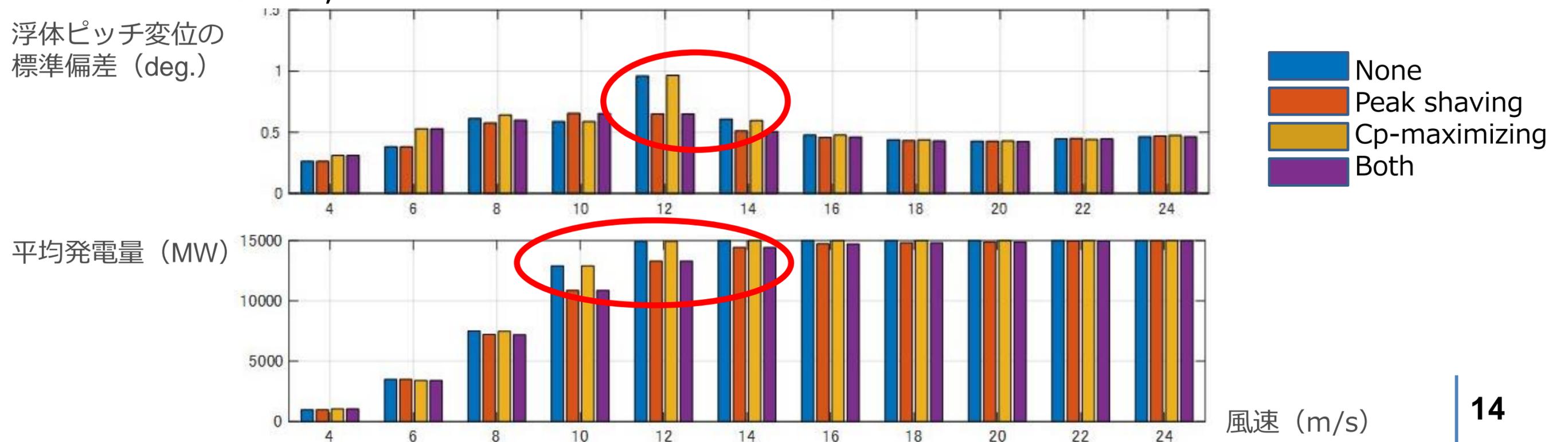
□ ブレードピッチ制御を用いた浮体最適化

■ ブレードピッチ角の制御範囲設定の効果（Pitch Saturation）

- Peak shaving：定格風速近傍において、スラスト荷重を抑制するために、ブレードピッチ角の下限値に制限を与える。定格スラスト荷重に対する割合で設定が可能。
- Cp maximizing：低風速領域において、発電効率を高めるために高周速比での回転を許容し、ブレードピッチ角の最小値を従来の下限值よりも高く設定する。

■ 定格風速付近での浮体運動の低減を確認。

■ 平均発電量の減少量と合わせ、最適な制御入力を設定する必要がある。



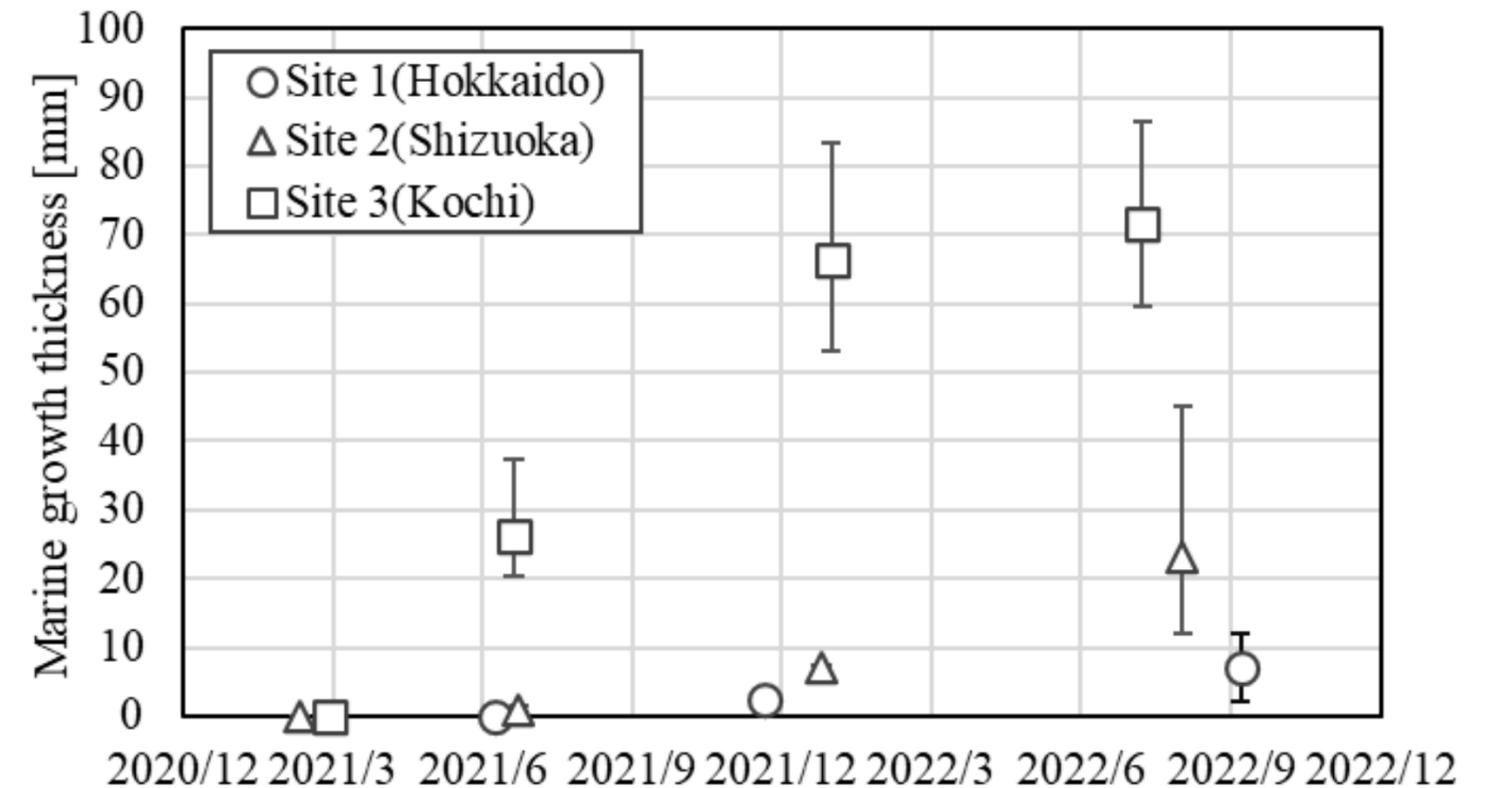
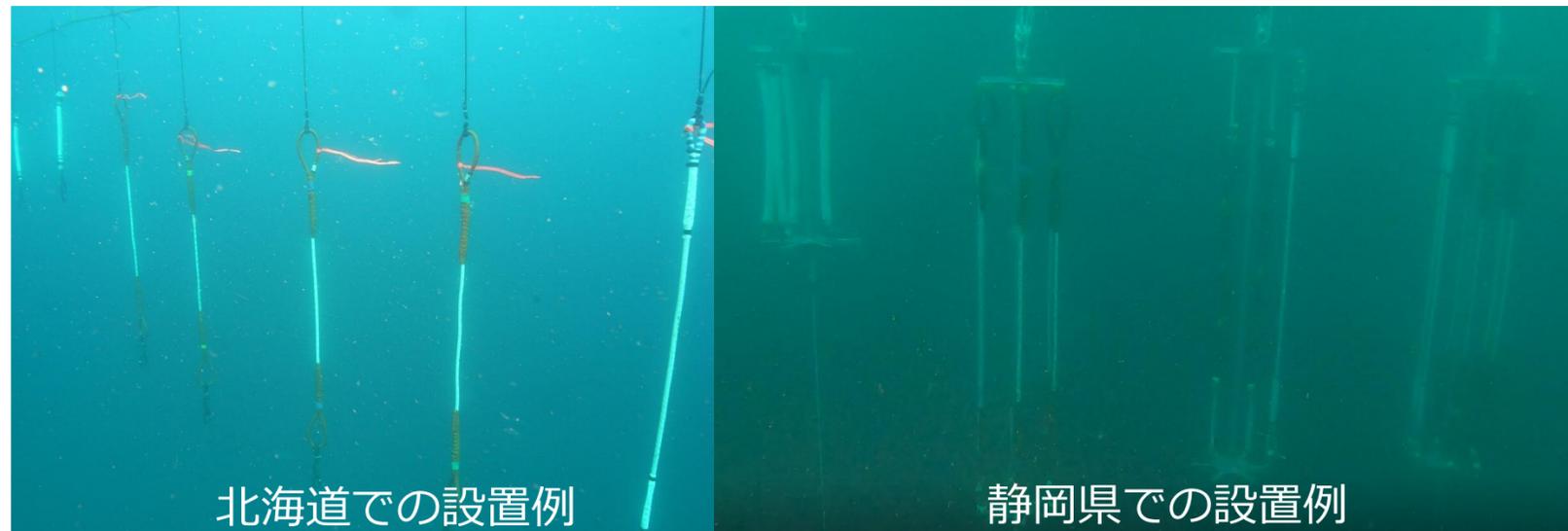
- デジタルツイン技術の開発（2021年度，NEDO/NKCS）
 - 試設計，構造図面の作成，数値解析を実施。（本日の発表で係留系についてご紹介）
 - 水槽試験による検証を2023年度に予定。

- 合成繊維索を用いた係留の最適設計技術の開発
 - 試設計，最適仕様算出ツールの整備を実施中。（本日の発表でご紹介）
 - 水槽試験による検証を2023年度に予定。

- 合成繊維索に対する生物付着の影響評価
 - 国内3海域で繊維索試験体の浸漬試験を実施中。
 - 付着量，浸漬後の強度を評価。

□ 合成繊維索に対する生物付着の影響評価

- 2021年から国内3海域（北海道，静岡県，高知県）にて合成繊維索の試験体（ナイロン，ポリエステル）を浸漬。



ナイロンロープに対する付着量の計測結果（抜粋）

- 成果は「浮体式洋上風力発電施設技術基準 安全ガイドライン」に反映される見込み。

- 浮体式洋上風力発電はヨーロッパを中心に拡大中。
- 従来の先進地域に加え，中国で急速に発展中。
- わが国では，グリーンイノベーション事業での実海域試験が予定されているが，低コスト化のための技術開発が急務。
- 海技研では，浮体式洋上風力発電の技術開発を精力的に進めている。
 - 連成解析技術
 - ブレードピッチ制御
 - ブレードピッチ制御を含む水槽模型試験
 - デジタルツイン技術
 - 合成繊維索を用いた係留系の設計評価技術
 - 実海域計測
- ガイドライン等の環境整備に加え，官民一体の技術開発が必要。