

福島沖 2 MW 浮体式洋上風力発電実証事業の成果

今北明彦* 長拓治* 神永肇*

Lessons from 2MW Floating Offshore Wind Turbine, “ Fukushima Mirai ”, in Fukushima Demonstration Project

Akihiko IMAKITA, Takuji CHYO, Hajime KAMINAGA

In Japan, available area for land based wind turbine (WT) is limited. Besides, for construction of offshore wind farm, shallow water area suitable for fixed foundation type WT is also limited in Japan. In Europe, many fixed foundation offshore wind farms installed in the shallow water area are in commercial operation. In order to promote wind power generation in Japan, it is necessary to develop floating offshore wind turbine (FOWT). Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) of Japan started Fukushima floating offshore wind farm demonstration project (Fukushima FORWARD) in FY2012. Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) as a member of Fukushima offshore wind consortium built a 2MW FOWT, “ Fukushima Mirai ”. It has produced electricity for three years since December 2013 without major trouble. MES conducted its planning, design, construction, and maintenance. All of them are R&D elements of demonstration project. Fukushima Mirai was the first semi-submersible FOWT in Japan and the second in the world after “ Wind Float ” installed in Portugal. Fukushima FORWARD has built another two FOWTs, one floating substation with transformer and supporting facility on land. This Fukushima FORWARD is the first offshore wind farm in the world. In this report, the overview of Fukushima Mirai, from design to field test, is described and the lessons obtained in the project are also introduced.

日本では様々な理由から陸上風車を設置できる場所は限られている。また、洋上風力発電では着床式に適する浅海域が少なく、浮体式の開発が必要とされる。平成 23 年度から開始された経済産業省委託研究事業「浮体式洋上ウィンドファーム実証研究」では、三井造船は 11 の企業、大学、研究機関からなるコンソーシアムのメンバーの 1 社として参画し、セミサブ(セミサブマージブル)形式を採用した 2 MW 発電施設“ふくしま未来”を建設し、平成 27 年度まで 5 カ年度に渡り、計画、設計、建設から稼働、メンテナンスまでを行った。2013 年 11 月に発電可能状態になり、同 12 月 1 日から発電を開始し、2016 年 12 月まで 3 年間大きな故障もなく発電を継続してきている。セミサブ形式では日本初、世界でも 2 番目の実証試験である。なお、平成 28 年度からは「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究」として“ふくしま未来”を運転中であり、種々の運転データを集積している。



写真 1 ふくしま未来
“ Fukushima Mirai ”



写真 2 2016 年 8 月の台風 10 号接近時の状況
“ Fukushima Mirai ” in the Typhoon “ Lionrock ”, Aug. 2016

* 船舶・艦艇事業本部 事業開発部

1. 緒言

1.1 日本における洋上風力発電

日本は山岳地帯が多く、風光明媚な地域には国立公園が存在し、また、平野には居住区域が存在するため、陸上での風車設置可能面積は限られており、洋上風力発電が期待されている。しかし、海底に固定した基礎の上に風車を設置する着床式は水深 50 m が限界とされ、日本周辺海域は欧州のような浅海は限られているので浮体式が必要となる。日本風力発電協会のロードマップ¹⁾では 2050 年までに陸上 3 800 万 kW、着床式 1 900 万 kW、浮体式 1 800 万 kW が提言されている。一方、資源エネルギー庁の調査²⁾では、様々な制約条件を仮定し、導入ポテンシャルは陸上 2 500 万 kW、洋上 1 100 万 kW としている。このような背景から、日本では洋上風力発電のポテンシャルは十分にあると見込まれるため、発電能力の大型化に向いている着床式、浮体式の実証試験が行われている^{3)~5)}。

1.2 浮体形式

風車の支持構造である浮体について様々な形式が提案されている⁶⁾。表 1 に代表的浮体形式 3 種について定性的な比較結果を示す。TLP は緊張係留型浮体 (Tension Leg Platform)、SPAR は円筒型浮体、セミサブは半潜水式浮体 (Semi-Submersible Platform) の略称である。これらの設置概念を図 1 に示す。浮体の係留方式は 2 種類に分類される。カテナリ係留とは、複数の係留索を水平展開したときに、自重により懸垂線形状にたわんだラインの張力により係留する方式である。緊張係留とは、海底から鉛直方向に配置する緊張係留ラインにより浮体施設を下方に引き込むことによって係留する方式である。

SPAR とセミサブに用いられるカテナリ係留方式では、係留索を水平に展開するため、占有面積が広くなり、係留索の先端部に設置するアンカーに加わる荷重は水平方向となる。三井造船は過去に TLP 形式の洋上風力発電について机上検討を行った。⁷⁾ TLP の動揺は小さいが、アンカーに対する荷重が垂直方向となるので、浮体の浮力に対抗する重量のアンカー又は杭が必要になり、コストが高くなる。SPAR の構造は単純であるが、直立した円筒形状のために喫水が大きくなり、風車搭載時の水深が深くなければならず、工事場所、工事方法に注意が必要である。セミサブは前出 2 形式に比べて浮体重量が重くなる傾向がある。これらの中で長期間にわた

る実証試験まで進んでいるのはスパーとセミサブの 2 種類である。なお、TLP についても欧州で実証試験が開始される予定である⁶⁾。

これら 3 種類の中から、今回の実証研究において当社は、建造期間、設置場所等の条件を考慮してセミサブ型を選定した。

1.3 実証研究事業

平成 24 年 (2012 年) 3 月に開始された経済産業省からの委託事業「福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業」⁵⁾では、世界初の浮体式洋上ウインドファームを福島県沖に建設した。この洋上ウインドファームには、「ふくしま絆」(サブステーション)、「ふくしま未来」(2 MW)、「ふくしま新風」(7 MW)及び「ふくしま浜風」(5 MW)の 4 基の浮体がある。本報ではそのうち、2 MW 風車を搭載した「ふくしま未来」の実証試験結果概要を述べる。

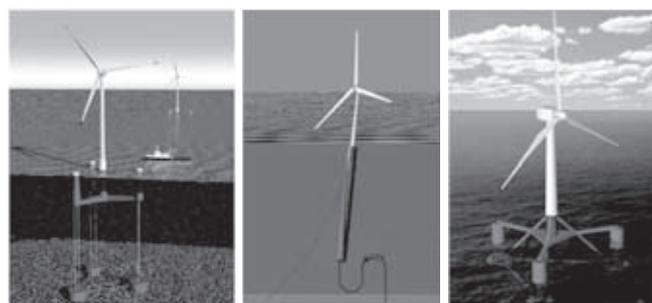
当社は「ふくしま未来」の計画、設計、浮体建造、風車搭載、係留工事、風車の稼働、メンテナンスまで、1 基の浮体式洋上風力発電施設建設のほぼ全てを担当した。発電施設全体としては、変電所、陸上開閉所、海底送電線、陸上送電線などに係る工事があるが、コンソーシアム参加社がそれぞれ担当した。またサブステーションにおける気象海象観測などは東京大学が担当した。全体は丸紅株式会社がインテグレータとしてとりまとめを行った。日本で最初のセミサブ形式を採用した浮体式洋上ウインドファーム建設であるので、設計はもとより、工事方法なども実証研究に含まれた。

「ふくしま未来」は 2013 年 11 月に発電を開始し、その後順調に稼働して現在に至っている。搭載している風車は日立製作所製ダウンウインド型風車 (HTW2.0-80) で、出力は 2 MW、ロータ直径は 80 m である。

2. 設計

浮体の設計は風車メーカーと情報を共有化して実施した。参照した規則は日本海事協会の「浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン」⁸⁾である。浮体設計で特に配慮した項目を以下に示す。

- a) 安全性
- b) 風車からの制限 (傾斜角度, 加速度)
- c) 送電線からの制限 (移動距離)



(a) TLP (b) SPAR (c) セミサブ

図 1 各種洋上風力発電方式の設置概念
Conceptual Drawing of Three Floater Types

表 1 浮体形式比較
Characteristics of Three Floater Types

	TLP	SPAR	セミサブ
適用水深	50 ~ 200 m	80 ~ 300 m	60 ~ 300 m
係留方式	カテナリ	カテナリ	緊張
占有面積	小	大	大
動揺	小	大	中
設置コスト	大	中	中
アンカー荷重方向	垂直	水平	水平
浮体構造複雑性	中	低	中

- d) 無人施設, 無人運転
- e) 設置工事, 曳航工事
- f) 周辺航行船舶への配慮
- g) アクセス性などの運転保守(O&M)

気象海象条件は Grand Renewable Energy 2014⁹⁾で記述されている波, 風, 潮海流とした。暴風時は50年再現期間の波, 風, 潮海流を風車浮体において最も厳しい条件となる方向から受けると仮定した。疲労強度検討でも同様の方向として20年間の疲労被害度(疲労損傷度)を算定し安全性を確保した。風車稼働時の数値解析はBLADED¹⁰⁾を用いた風車と浮体の連成解析とした。設計時のBLADEDは長波頂波での解析であり, 波方向の分散性は考慮していない。

設計に際し, 水槽試験を実施し, 基本的な浮体挙動と曳航時の安定性などを確認した。水槽試験の実施状況例を写真3に示す。

係留索は6組のチェーンとドラッグ式アンカーで構成される。チェーンの呼び径は132mm, フェアリーダを通してデッキ上のストッパで固定される。50年再現期間の気象海象条件で安全性を確認した。疲労強度は波風潮海流が同一方向から来ると仮定し, 20年間の気象海象発現時間と張力から累積被害度を算出し, 安全率を満足することを確認した。

浮体の要目は表2に示したとおりである。

風車のハブ・ナセルは陸上仕様のものを採用したが, 浮体の傾斜を考慮した結果, 増速機からのオイル漏れを防止する改造が必要となった。タワーの構造強度評価は, 日本海事協会のガイドライン⁹⁾及び土木学会「風力発電支持構造物設計

指針・同解説」に従って実施した。開口部を含む筒身(風車タワー), フランジ, ボルト等について降伏強度, 座屈強度及び疲労強度について評価を行い, 当該規則を満足していることを確認した。

図2に風車浮体の平面図と側面図を示す。浮体はサイドカラム3本とセンターカラム1本の4本で構成され, センターカラム上に風車を搭載している。風車タワー周辺のデッキには変圧器などを配置した。

3. 発電施設建設¹¹⁾

図3に建設フローを示す。浮体部分の建造と風車組立ては当社千葉事業所で行った。風車搭載後, 風車と浮体を一体で小名浜港まで曳航した。曳航作業の安全性などは, 有識者, 所轄官庁, 関係者と航行安全性検討委員会を開き検討した。小名浜港では, 岸壁近傍に浮体を着底させて, 風車調整作業を行った。並行して係留索, アンカーを設置位置の所定場所に展開し, 把駐力試験を行った。把駐力とはドラッグアンカーの水平方向保持力である。次に係留索を浮体に接続し, 海底ケーブルを浮体に引き込み, 受電を開始した後に風車を最終調整し, 稼働を開始した。

写真4は千葉事業所での風車組立て状況で, ブレードをハブに取り付けている状況である。浮体上への風車組み立て完了後, 東京湾から銚子沖を経て小名浜港まで曳航した。曳航



写真3 水槽試験実施状況
Tank Test at Akishima Laboratory

表2 浮体要目

Principal Particulars of " Fukushima Mirai "	
浮体形式	半潜水型の洋上風力発電船
長さ	57.50 m
幅	64.23 m
型深さ	32.00 m
計画喫水	16.00 m
船級	日本海事協会
設計水深	120 m

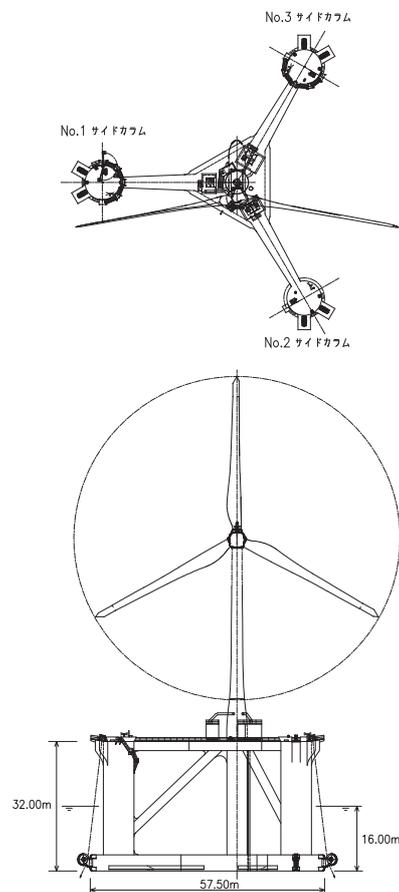


図2 「ふくしま未来」の外形
Schematic View of " Fukushima Mirai "

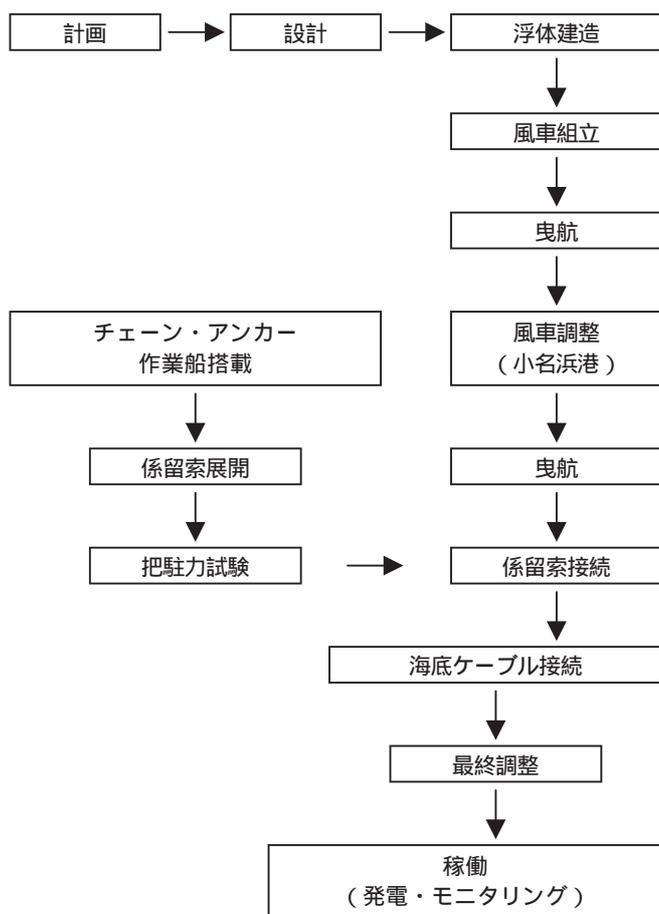


図3 建設フロー
Work Flow



写真4 風車組立て状況
Assembling of Wind Turbine on the Floater



写真5 曳航状況
Towing toward Onahama Bay

時の状況を写真5に示す。曳航中は過度な傾斜を風車に与えないように傾斜計を浮体に搭載し、モニタリングを行った。

小名浜岸壁では作業期間中に暴風状態になることを想定し、浮体を着底させ、風車の調整を行った。なお、あらかじめ着底場所をマウンド状に造成している。

海象条件が厳しい設置海域では、風車浮体の安全性を確保するため、アンカーは十分な把駐力を持つことが必要である。ガイドライン⁹⁾の把駐力試験では設計最大力のアンカー引張試験が要求されており、実証試験サイトにて試験を行った。

この把駐力試験は台船上に配置した油圧式牽引装置(プラーユニット)に対となる係留索の1本を結合し、他の1本を台船に固定し実施した。本試験は、日本海事協会の立会のもと実施したが、日本の洋上では過去例がない大規模なものであった。把駐力試験の状況を写真6に示す。

把駐力試験終了後のチェーンと浮体の接続はクレーン船を用いて行った。メッセンジャーロープを小名浜にて浮体係留装置に通し、洋上にて、メッセンジャーとチェーンを接続した。その後、クレーンにて、チェーンを引き込み、所定位置でチェーンを浮体上の係留装置に固定した。

次に海底ケーブルを引き込み風車に接続した。受電後に風車の最終調整を行い、発電を開始した。

4. 稼働状況

2014年3月から2016年3月までに経験した最大波高、最高風速などは以下である。

最高風速：44 m/s

最高有義波高：7.2 m

最大傾斜角度：6.5度(ナセル上、風車停止時)

最高風速はナセル風速計によるものであり、有義波高は福島沖ナウファスデータ¹²⁾を用いている。2016年8月にはこれらの数値を上回る風速46 m/s(台風9号)、最高有義波高9.6 m/s(台風10号)を経験しているが、その後の点検で異常がないことを確認している。稼働開始から大きなトラブルはなく、現在に至っている。

2015年8月2日16時28分に落雷を検知した。その後、浮体上での点検を実施するまでの間、風車を停止した。詳細なブレードの点検を行った結果、異常はなく、9月30日に発電を再開した。このときの雷検知器の測定値は-3.9 kAであった。写真7は浮体に搭載したカメラで落雷の瞬間を捉えた様子を示す。高速撮影ではないので残像があるが、ブレード先端近傍に落雷していることが分かる。

2016年3月までの点検日数を表3に示す。2013年度の対象期間は4カ月間である。



写真6 把駐力試験
Mooring Tensioning Test on the Barge



写真8 浮体へのアクセス
Boat Access to "Fukushima Mirai"



写真7 落雷時の状況
Lightning on a Blade

表3 点検等日数 ()内風車関連
Number of Days for Maintenance of Floater and Window Turbine(WT)

	乗船日数		
	定期点検	修理等	その他
2013年度	7(7)	4(4)	0(0)
2014年度	19(15)	7(6)	3(1)
2015年度	9(8)	2(1)	2(0)

点検等のための浮体へのアクセスは乗船補助装置を備えた双胴型作業船を導入した。写真8にアクセスの様子を示す。

風車の定期点検は半年1回を基本としたが、1年目の半年点検以降は半年ごとの点検の間の3か月に1回の目視点検(3ヶ月、9ヶ月点検)も実施している。

図4に風速と出力の関係を示す。風速は2km離れたサブステーションの計測結果である。データにバラツキがあるが、動揺する浮体に搭載された洋上風力発電でも陸上と同等な発電が得られていることを示唆している。

表4に発電実績を示す¹³⁾。2016年6月までの月間の最大設備利用率は44%(2014年12月 設備稼働率93.3%)であった。

5. 浮体挙動

浮体風車のモニタリングでは遠隔制御監視システム(SCADA)のほかに、タワー歪、加速度(3高度)、浮体位置(GPS)、浮体傾斜(ジャイロ)浮体構造歪などを計測している。

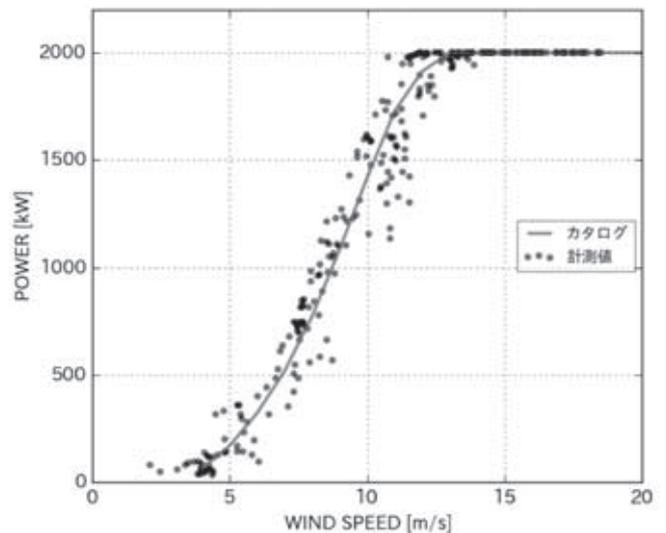


図4 パワーカーブ
Power Curve of 2 MW WT

設計で用いた数値解析手法の精度を確認するため、検証解析を行った。気象海象条件はサブステーションで観測された数値を用い、これをBLADEDに入力し、結果を計測された浮体の挙動と比較した。

図5に波風潮流の観測データを示す。2015年10月8日台風23号を受けた際のデータである。風車は稼働状態、有義波高6.8m、平均風速21.4m/s、水流0.49m/sである。表5に傾斜角度の比較を示す。数値解析結果と計測結果は同等の値となっており、数値解析手法は妥当であることが分かる。

6. 実証試験成果

本実証試験において得られた成果を以下に示す。

- ・セミサブ型浮体を支持構造とした浮体式洋上風力発電が福島沖洋上で可能であることが示された。
- ・本実証試験において使用した風車と浮体では、風速に対する発電性能は陸上とほぼ同等であることが示唆された。
- ・設計手法、建設方法、O&M手法などについて貴重な知見が得られた。

表 4 発電実績
Capacity Factor and Availability Factor

期間	設備利用率	設備稼働率
2013年12月 ～2015年11月	28.70%	89.40%
2015年12月 ～2016年6月	32.20%	95.80%

表 5 計測と数値解析の比較(合成傾斜角)
Comparison of Inclination Angle(degree)

	計測(度)	数値解析(度)
最大	5.23	5.82
最小	0.33	0.57
平均	1.77	2.01
標準偏差	0.76	0.66

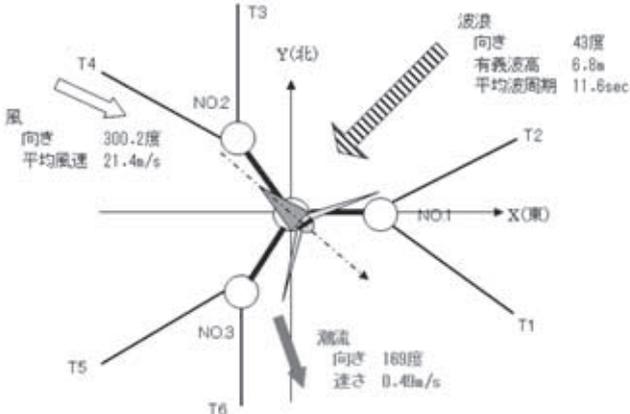


図 5 検証用気象海象条件
Wave, Wind and Current Conditions for Simulation

- ・ 実海域における風車と浮体の挙動データを取得できた。
- ・ 設計で用いた数値解析手法が妥当な解を与えることが確認できた。

7. 結言

経済産業省委託研究事業「浮体式洋上ウィンドファーム実証研究」による日本で最初のセミサブ浮体を用いた浮体式洋上風力発電施設“ふくしま未来”は約5カ年度にわたる研究を終え、平成28年度からは、同「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究」により、福島県沖での事業化を見据えた実証研究に取り組んでいるところである。

実証事業を実施するにあたり、福島洋上風力コンソーシアムのメンバーを始め、関係省庁、自治体、地元の方々には多大なご協力をいただきました。ここに深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 一般社団法人 日本風力発電協会：風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標 v4.3, <http://jwpa.jp/pdf/2014-06dounyuumokuhyou.pdf>, (2017-6-7)
- 2) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社：平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業(風力エネルギーの導入可能性に関する調査), http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2011fy/E001771.pdf, (2017-6-7)
- 3) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構，洋上風力発電の取組, <http://www.nedo.go.jp/>

library/pamphlets/FF_201306_yojofuryoku.html, (2017-6-7)

- 4) 環境省：浮体式洋上風力発電実証事業(GO-TO FOWT) <http://goto-fowt.go.jp/home/>, (2017-5-12)
- 5) 福島洋上風力コンソーシアム：福島浮体式洋上ウィンドファーム実証事業(Fukushima Offshore Wind Consortium), <http://www.fukushima-forward.jp/>, (2017-5-12)
- 6) 公益社団法人 日本船舶海洋工学会：浮体式洋上風力特別検討委員会最終報告書, https://www.jasnaoe.or.jp/research/dl/report_sp1.pdf, (2017-6-7)
- 7) 鈴木．外：洋上風力発電用 TLP 型浮体の開発，三井造船技報，198(2009-10)，p.19
- 8) 一般社団法人 日本海事協会：浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン, https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/authentication/windmill_attestation/ja/gl_windmill_j201608.pdf, (2017-6-7)
- 9) T. Ishihara, et al.,“ METOCEAN DESIGN CONDITION FOR“ FUKUSHIMA FORWARD ” PROJECT ”, Grand Renewable Energy 2014, July27-August 1
- 10) Bladed User Manual, Ver. 4.2, 2011, GL Garrad Hassan
- 11) ジャパンマリンユナイテッド株式会社．外：福島浮体式洋上風力発電施設建設工事，作業船，315(2014-4)，p.9
- 12) 国土交通省港湾局：全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS), <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, (2017-5-12)
- 13) 福島洋上風力コンソーシアム：福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業(Fukushima Offshore Wind Consortium) 研究通信, <http://www.fukushima-forward.jp/magazine/index.html>, (2017-5-12)

[問い合わせ先]

船舶・艦艇事業本部 事業開発部
TEL 03 - 3544 - 3345 長 拓治



今北 明彦



長 拓治



神永 肇

お詫びと訂正

三井造船技報 第 219 号 (2017-7) P.7 の表 1 の係留方式の行に誤りがありましたので、お詫びして訂正いたします。

(誤)

(正)

表 1 浮体形式比較
Characteristics of Three Floater Types

	TLP	SPAR	セミサブ
適用水深	50 ~ 200 m	80 ~ 300 m	60 ~ 300 m
係留方式	カテナリ	カテナリ	緊張
占有面積	小	大	大
動揺	小	大	中
設置コスト	大	中	中
アンカー荷重方向	垂直	水平	水平
浮体構造複雑性	中	低	中

表 1 浮体形式比較
Characteristics of Three Floater Types

	TLP	SPAR	セミサブ
適用水深	50 ~ 200 m	80 ~ 300 m	60 ~ 300 m
係留方式	緊張	カテナリ	カテナリ
占有面積	小	大	大
動揺	小	大	中
設置コスト	大	中	中
アンカー荷重方向	垂直	水平	水平
浮体構造複雑性	中	低	中

三井造船技報編集委員会

委員長 木戸口 晃
委員 高岡 正宏
田中 茂
難波 浩一
中嶋 幸子
穴倉 進
村田 和俊
兼本 浩

三 井 造 船 技 報

第 220 号

2018 年(平成 30 年)2 月 28 日発行

発行人 西 畑 彰
発行所 三井造船株式会社 技術開発本部
〒104 - 8439 東京都中央区築地 5 丁目 6 番 4 号
TEL 03 - 3544 - 3266
<http://www.mes.co.jp>
印刷 株式会社 MES ファシリティーズ
〒261 - 7128 千葉県千葉市美浜区中瀬 2 - 6 - 1

三井造船技報に関するお問い合わせは、e-mail : gihojim@mes.co.jp まで。

万一、落丁・乱丁がありました節は、お取り替えます。

(非売品、無断転載を禁ず)