

# 再生可能エネルギーを利用した被災地の取り組み事例—洋上風力発電（いわき市）

## An Introduction of Renewable Energy in Disaster Areas Casestudy - Offshore Wind Power Generation (Iwaki City)

永尾 徹\*

### 1. はじめに

福島県いわき市沖を舞台として、東日本大震災からの復興を旗印に、革新的な研究事業が行われた。これは世界初の集合型浮体式洋上風力発電の実証研究事業で、経済産業省の下で2012年2月に開始され、2022年3月に終了予定の10年間に渡る大プロジェクトである。本稿ではその概要を紹介する。

### 2. 洋上風力発電

風力発電の導入量は年10%以上の成長率で増加しており、2020年には世界の総設備容量は743GWに達した。風力発電の歴史は陸上風力発電から始まったが、近年になって陸上より風況が良く、広い面積を確保できる洋上風力発電が発達している。2020年の洋上風力発電は35GWで全体の5%であるが、毎年陸上の2倍の20%を超えて成長している。（図1）

IRENAによると、2050年には陸上5044GW、洋上1000GWの計6044GWの風力発電が導入されると見込まれている。

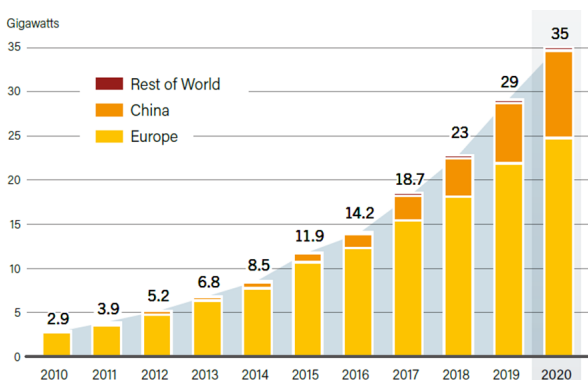


図1 世界の洋上風力発電の累積導入量推移  
（出典：REN21 Renewables 2021 Global Status Report）

洋上風力発電を最初に建設した欧州では、着床式洋上風力発電から始まった。着床式とは風車の基礎を海底に設置し、その上に風車を据え付ける形式で、浅い海に適した建設形式である。着床式洋上風力発電はデンマーク、ドイツ、オランダ、イギリスなどに囲まれた、北海南部に広がる水深10m～20mの浅い大陸棚で発展普及してきた。

それに対して我が国は、平均水深が90mの北海に比べて世界一深いマリアナ海溝や、平均水深1,700mを超える日本海などの深い海に囲まれており、水深の浅い海域は限られている。日本の国土は「極東の、四方を海に囲まれた小さな島国」と表現されることがあるが、国土面積は世界194カ国中61位で、加えて国土の70%以上は山岳、森林、耕作地で占められており、陸上には風力発電を建設できる場所は限られる。

一方、海に目を向けてみると、日本の領海と排他的経済水域を合わせた面積は、国土面積の約12倍にのぼり、世界の第6位の広大な水域を有している。海岸線長さも、広大な国土面積を有するアメリカの1.5倍、中国の2倍で、同様に世界6位を占めており、海洋国日本の名前に相応しいものである。我が国の広大な海洋と洋上の豊富な風力エネルギー資源を背景に、洋上風力発電は将来性のある再生可能エネルギーとして位置付けられている。

深い海で囲まれている我が国では、風車の基礎を海底に設置する着床式洋上風力発電に適した浅海域は限られている。それと比べて洋上に浮体と呼ばれる船の役目をする基礎構造を浮かべ、その上に風車を設置する浮体式洋上風力発電の設置可能な海域は広く、ポテンシャルは大きい。図2に洋上風力発電

\* 足利大学特任教授

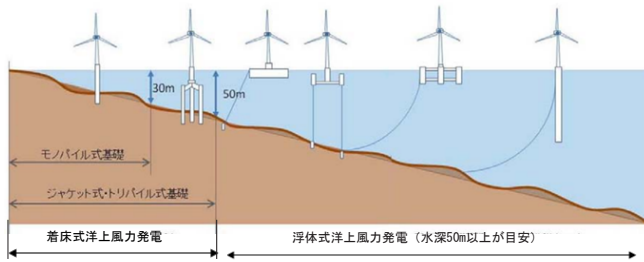


図2 洋上風力発電と水深  
NEDO 浮体式洋上風力発電技術ガイドブック  
<https://www.nedo.go.jp/content/100891410.pdf>

の設置場所の分類を示す。

浮体式洋上風力発電については、2009年にノルウェー、2011年にはポルトガルで実証試験が行われた。我が国でも2010年から長崎県五島沖の海域で、環境省の浮体式洋上風力発電の実証試験が行われた。このいずれも実証風車は1基で、多数の風車を使う商用の洋上ウインドファームに比べて、規模と実証内容は限られたものであった。

### 3. 福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業

#### 3.1 事業の目的

経済産業省は、2012年2月に浮体式ウインドファームの実証研究事業を福島沖で開始した。この事業は、世界初の複数基による浮体式洋上風力発電システムの実証事業で、この実証を通じて、安全性・信頼性・経済性の検証を行うことを目的としている。さらにその成果によって、福島県を再生可能エネルギー先駆けの地として復興に貢献することも狙いの一つとしている。

#### 3.2 実証事業の概要

事業の内容は、事前調査から始まり実施海域の気象・海象の観測、3基の風車と1基の変電設備から構成される浮体式洋上風力発電システムの開発、送電システムの開発、各設備の維持管理手法の確立のほか、環境影響・船舶の航行安全性の評価、漁業との共存に関する作業、マニュアル作成、国民との科学・技術対話という広範囲で包括的な内容で構成されている。

#### 3.3 実証事業の構成メンバー

この実証事業は経済産業省から公募され、福島洋上風力コンソーシアムが受託した。このコンソーシアムは、浮体式洋上風力発電の開発に関する知見、技術力を持つ国内の主要企業と大学から構成されたもので、次の10企業と1大学が参加している。（ ）内は主な担当範囲を示す。

- \* 丸紅（全体取り纏め）
  - \* 東京大学（技術アドバイザー）
  - \* 三菱商事（環境影響調査）
  - \* 三菱重工業（7MW風車、7MW風車用浮体）
  - \* JMU（5MW風車用浮体、洋上変電所用浮体）
  - \* 三井造船（2MW風車用浮体）
  - \* 新日鐵住金（高性能鋼材、係留チェーン）
  - \* 日立製作所（2MW風車、5MW風車、洋上変電所）
  - \* 古河電気工業（大容量海底ケーブル）
  - \* 清水建設（設備施工技術開発）
  - \* みずほ情報総研（基礎情報収集、報告書取り纏め）
- 事業開始後に三菱造船は、三菱重工業から分社化し、7MW風車用浮体を担当した。三井造船は2018年に三井E&Sと改称し、2MW風車用浮体を担当した。（JMUはジャパンマリンユナイテッドの略）

## 4. 実証事業の内容

### 4.1 実証事業海域

浮体式洋上風力発電の実証システムは、福島県広野町、楡葉町から約20km沖、水深120mの海域に設置された。この海域は、実証拠点港のいわき市小名浜港から約60km離れており、高速の双胴連絡船を使っても片道1時間半を要する遠い位置にある。

3基の風車と浮体は、北から南へ5MW、2MW、7MWの順にそれぞれ1.6km、1.75kmの間隔を空けて設置され、この列から西方向の陸側に2km離れて洋上浮体変圧器が設置された。

### 4.2 システムの構成

風車3基、変電所1基、及びそれぞれの浮体4基のほか付帯設備で構成されている。

#### 1) 2MW ダウンウインド風車 / 浮体

風車は富士重工業と日立製作所が共同開発し、2008年から国内で多数が運転されている量産商用機である。この風車は大型商用風車としては世界でも稀なダウンウインド形式を採用している。ほとんどの大型風車は、風車を支えるタワーの風上にロータ（羽根を含む回転体）が位置するアップウインド形式を採用しているが、ダウンウインド形式は逆の配置でタワーの風下にロータが置かれている。（図3）

ダウンウインド形式は、強風時に細長い羽根が風下に撓って、タワーに接触して破壊する危険性がないこと、ロータの風見鶏効果でナセルは自動的に風上を向くため、風向制御が容易などの優れた特性を持っている。また浮体式洋上風車は、風を受けると帆船の様に全体が風下に傾くが、この傾斜によってロータ面に垂直な風速成分が増加して、発電量が増

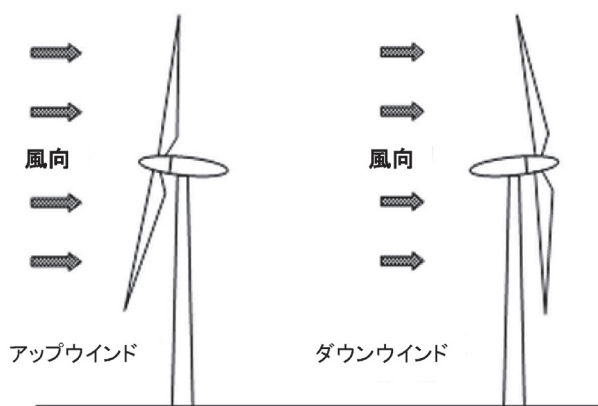


図3 アップウインド風車とダウンウインド風車  
(アップウインド風車はタワーとロータの衝突を避けるため、ロータを上向きに取り付ける)



図5 2MW 風車と浮体 (ふくしま未来)

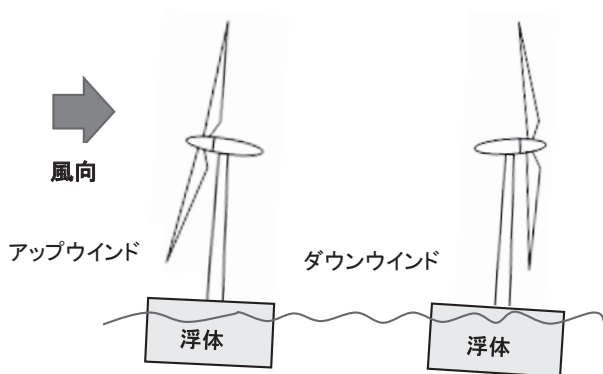


図4 浮体式洋上風車のダウンウインド形式の利点  
(傾斜でダウンウインド形式は受風面積が増加する)

えるという利点も注目されている。(図4)

浮体は三井造船(三井E&S)が開発した4カラムセミサブ形式で、水線面積が小さいため波浪や潮流の影響を受けにくく、揺動や上下動を抑制する効果がある。浮体式洋上風力発電設備は、法律上船舶として扱われるため船名を持っており、2MW風車と浮体は「ふくしま未来」と命名された。図5に全体写真を示す。

### 2) 5MW ダウンウインド風車 / 浮体

風車は日立製作所が開発し、2MW風車と同じダウンウインド形式を採用している。この風車の初号機は2015年に陸上で運転試験が開始され、福島洋上に建設された風車は2号機である。前述の2MW風車が巻線型誘導発電機と、増速比が約100の高速増速機を使用していることに対して、5MW風車は、永久磁石同期発電機と中速増速機を組み合わせることで軽量・小形化を図っている。

浮体はJMUが開発したアドバンストスパー形式で、上下のハルで浮体の揺れを低減するほか、浮体の幅が狭く、喫水も浅いため直立状態で建造し曳航



図6 5MW 風車と浮体 (ふくしま浜風)

が可能という利点を持っている。5MW風車と浮体は「ふくしま浜風」と命名された。(図6)

### 3) 7MW 可変油圧動力伝達風車 / 浮体

世界最大級の浮体式洋上風車として、三菱重工業が開発した。この風車は世界初の油圧式ドライブレインを採用しており、従来のギア式動力伝達システムで想定される大型化に伴う様々な課題を解決し、大型化が進む次世代風車への適用が期待できる画期的な技術として開発された。(図7)

開発に当たっては、スケールダウンした実証機を用いて事前に技術実証を行ったほか、同型の7MW風車を英国の陸上に設置して試験を実施するなど、革新的な新規技術に伴う課題を解決して、福島洋上風車に適用したものである。

浮体は、三菱重工業(後に三菱造船として分社化)が開発したV型セミサブ形式を採用している。形状は箱型構造で製造が容易であるほか、浮上時の喫



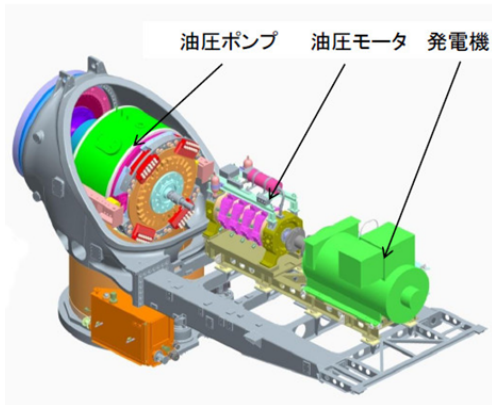


図7 革新的な可変式油圧動力伝達システム  
三菱重工技報 Vol.50 No.3

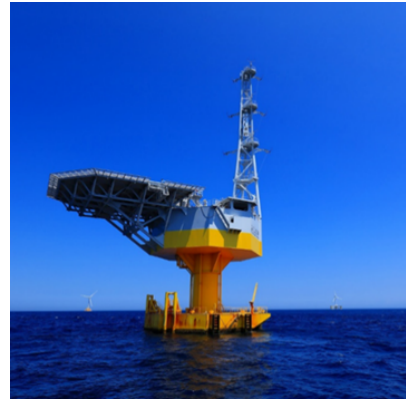


図9 洋上変電所と浮体（ふくしま絆）



図8 7MW 風車と浮体（ふくしま新風）

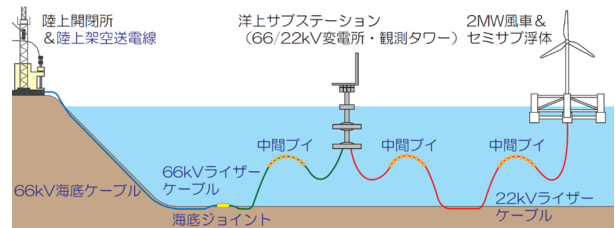


図10 送変電システムと洋上変電設備  
（コンソーシアムパンフレット）

表1 風車と浮体の主要諸元

名 称	ふくしま未来	ふくしま浜風	ふくしま新風	ふくしま絆
風車／変電所				
開発・製造業者	日立製作所	日立製作所	三菱重工業	日立製作所
定格容量	2 MW	5 MW	7 MW	25 MW
ローター位置	ダウンウインド	ダウンウインド	アップウインド	-
ローター直径	80m	126m	167m	-
ハブ高さ	66.2m	86.4m	105m	-
運転開始年月	2013.11	2017.2	2015.12	2013.11
増速方式	固定ギア式	固定ギア式	可変油圧式	-
運転期間	7年2ヵ月	3年11ヵ月	5年1ヵ月	7年2ヵ月
設備利用率	31.0%	18.3%	1.9%	-
稼働率	89.0%	54.1%	9.2%	98.0%
浮 体				
開発・製造業者	三井 E&S 造船	JMU	三菱造船	JMU
浮体形式	4カラムセミサブ	アドバンストスパー	V字型セミサブ	アドバンストスパー
浮体高さ	32m	36m	32m	71m
計画喫水	16m	33m	17m	50m
係留索	6本	6本	8本	4本

運転期間は2021年1時点である。  
JMU：ジャパンマリンユナイテッド

水が浅いため、多くの港湾地域で浮体の建造が可能という製造上の利点を持っている。7MW 風車と浮体は「ふくしま新風」と命名された。（図8）

#### 4) 洋上変電所／浮体

世界初の浮体式洋上変電所として日立製作所が開発を担当した。25MW の容量を持ち、陸上用の変電所に浮体の動揺と塩害への対策を適用したものである。

浮体は5MW 風車の浮体と同じアドバンストスパー形式で、JMUが開発した。上部、コブ、中間、下部ハルの4つから構成しており直立状態で建造と曳航が可能である。洋上変電所と浮体は「ふくしま絆」と命名された。（図9）

#### 5) 付帯設備

3基の浮体式洋上風車と浮体式洋上変電所を連携させて、全体システムを構成する要素として、送変電システム（海底ケーブル、陸上開閉設備（66KV）、監視装置）、付帯の係留システム（アンカー、チェーン）が開発された。また要素技術としては、洋上風力発電用高強度鋼と溶接技術も開発された。図10に送変電システムと洋上変電設備を示す。

表1に各風車と浮体の主要諸元を示す。

## 5. 実証事業の進捗

### 5.1 運転実績

2013年11月に2MW 風車が運転を開始した。この風車は量産商用機として陸上における多くの運用実績を背景に、洋上運転についても順調に推移し、7年後の2021年1月までの稼働率は89%、設備利

用率は31%に達した。

7MW 風車は2015年12月に運転が開始された。この風車は当時世界最大級の規模の風車であり、世界初の油圧式動力伝達装置を採用した、研究実証に相応しい意欲的な設計であったが、新開発の動力伝達装置の不具合で運転停止が長引いた。その後、浮体の改修による運転停止も発生し、2018年8月をもって運転試験を終了し、次の実証項目である撤去技術の実証に移行した。この間の稼働率は9%を超える程度で設備利用率は低く、運転成績は振るわなかった。

最後に設置された5MW 風車は、2017年2月に運転が開始された。この風車は同型機として2基目であり、初期故障も発生して安定した運転には至らず、稼働率は54%、設備利用率は18%の成績であった。

## 5.2 撤去の実証

7MW 風車と浮体は2020年5月から撤去の実証に着手し、9月には海上撤去作業を終了した。2MWと5MWの風車と浮体は、運転を継続して稼働率の向上やコスト低減に関するデータの取得を行い、2021年3月でデータ取得を終了した。その後2022年3月完了を目的に2MWと5MWの風車と浮体の撤去に係る作業と実証研究が進んでいる。全体事業の最終フェーズである撤去の実証では、大型の洋上浮体型風車の解体に関する工法、曳航方法、期間短縮、コストダウン手法の開発などの今後活用できる課題は多く、成果が期待される。

## 6. 成果と今後の課題

本実証研究事業では、我が国の豊富な海洋資源を活用できる浮体式洋上風力発電について、容量と形式の異なった3基の風車、変電設備、4基の浮体、付帯設備とそれに関連した運転維持手法、気象・海象の観測手法の開発、データ取得を実施した。これを通じて、浮体式洋上風力発電の安全性・信頼性・経済性を明らかにするという実証研究事業の目的は達成した。その一方で、福島洋上浮体式実証システムを利用した事業化には至らなかった。その理由の一つとして、使用した2基の風車が開発途上のレベルで、技術的に成熟していなかったことが指摘される。

## 7. おわりに

本実証研究事業に対して「経済的に成り立たなかったから失敗」という記事が一部マスコミで流布した。本事業の検討過程で、実証風車が安定して稼働した場合、本システム内で経済的に自立し運用を

続けることの可能性が検討されたことがあったが、この検討を見て実証研究事業で採算を取るべきという意見が出てきたものと推察される。

実証研究事業で採算を取ることは本事業の目標に含まれておらず、成果は、技術・運用・管理・経済に関するデータと経験であり、次の開発事業に生かされることが成果の本質である。

本実証研究事業に参画した各企業は、ここで得た技術と経験を生かして、その後の洋上風力開発の主要プレーヤーとして活動している。一例を挙げると5MW ダウンウインド風車は、海外の大型案件を受注し輸出に至ったこと、浮体を担当した各社では新しい浮体形式の研究を継続して、新しい概念を発表していること等、洋上浮体式風力発電に関する経験と技術は、新しい洋上風力発電事業の発展に生かされていることを紹介して、本稿を終わりにしたい。

## 参考資料

- ・ IRENA Global Renewables Outlook 2050
- ・ REN21 Renewables 2021 Global Status Report
- ・ 福島洋上風力コンソーシアムホームページ  
<http://www.fukushima-forward.jp/>
- ・ H30年度福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業 総括委員会 報告書、2018年8月
- ・ 永尾徹、福島浮体式洋上風力発電の総括と将来展望、足利大学第20回風力エネルギー利用総合セミナー、2019年6月27日
- ・ 永尾徹、福島浮体式洋上風力発電の総括と将来展望、足利大学第21回風力エネルギー利用総合セミナー、2021年6月24日
- ・ 写真は特記なきは筆者撮影

## 著者略歴



永尾 徹 (ながお とおる)  
富士重工業(株) (現 SUBARU) (1972年～2007年) 航空機及び風力発電の研究・開発  
新エネルギー財団 (2007年～2018年)  
再生可能エネルギー研究に関する国際協力事業  
足利大学 特任教授 (2016年～ )

日本風力エネルギー学会副会長 (前)  
福島浮体式洋上風力発電実証研究事業に関する第三者委員会 委員長