

# 研究成果報告書

日本財団 会長 笹川 陽平 殿

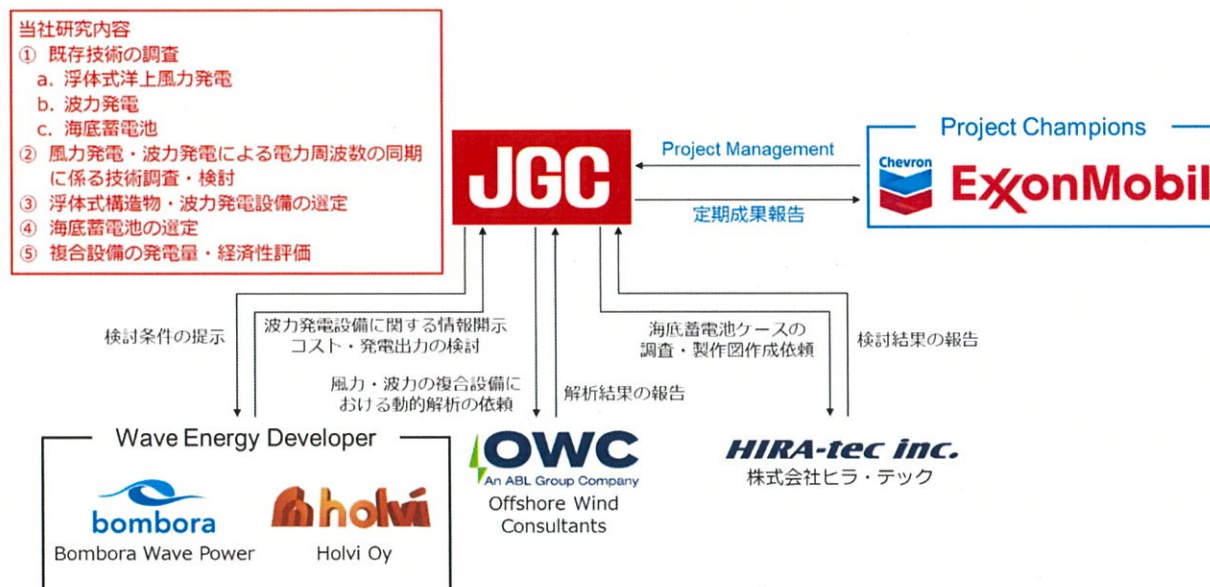
報告日付: 2023年 6月15日  
事業ID: 2022014775  
事業名: 浮体式洋上風力発電、波力発電及  
び海底バッテリーの統合システム  
の開発  
団体名: 日揮株式会社  
代表者名: 山田 昇司  
TEL: 045-682-1111  
事業完了日: 2023年 5月 31日



以下の通り、研究成果について報告いたします。

## 1. 研究開発体制について

本研究の研究開発体制を図-1に示す。当社は、Project Champions (Chevron及びExxonMobil)と定期ミーティングを行い、検討条件・及び研究方針に関する助言を反映しながら本研究を遂行した。本研究における主な検討内容は、①浮体式洋上風力発電、波力発電、海底蓄電池に関する既存技術の調査、②風力発電・波力発電による電力周波数の同期に係る技術調査・検討、③浮体式構造物・波力発電設備の選定、④海底蓄電池の選定、⑤複合システムの経済性・事業性評価の5項目である。



## 2. 研究概要及び成果

### 2.1 事業の背景と目標

洋上風力発電事業の開発は欧州で先行しており、日本国内においても海域や事業者の選定が始まっている。欧州では比較的開発が容易で風況の良い遠浅海域は少なくなってきており、英国では浮体式洋上風力発電への移行が本格的に検討されている。風力発電機の開発が進み、その発電容量は増加の一途をたどってはいるが、着床式風力発電所に比べ浮体式風力発電所の開発費は現時点で3~4倍と言われてお

り、風力発電機の基数を大きくすることによるウィンドファームの規模拡大は難しいと考える。そこで波力発電設備を浮体式洋上風力発電に加えることで1基あたりの設備容量を増強することを考える。

蓄電池の併設については風力業界で既に議論がなされており、不安定電源である再生可能エネルギーに対して蓄電池から瞬発的に放電し補助を行うことで、電源の安定化につなげる。また再エネの電力余剰分がある場合は蓄電し、電力需要が大きい時間帯に放電するピークシフトも考えられている。

なお、蓄電池は充放電時の発熱量が大きく、海底への設置によりそれを緩和できることが期待される。また、その大きい自重を利用して浮体式基礎構造物のアンカーとしての役割を考慮できる可能性がある。以上の背景のもと、本事業では浮体式洋上風力発電、波力発電、及び海底バッテリーに関する技術の机上調査を行うとともに、これらの統合システムの実現可能性を技術的側面、及び経済的側面から検討することを試みた。

## 2.2 研究の概要と結果

### (1) 浮体式洋上風力発電、波力発電に関する既存技術の調査

浮体式洋上風力発電、及び波力発電に関する既存技術を調査した結果、2023時点で、すでに100種類を超える浮体式構造物(以下Floater)、30種類を超える波力発電装置(以下WEC: Wave Energy Converter)が開発されていることが明らかになった。特に、WECについてはその大きさ、形状、発電方法に至るまで多種多様である。このように、浮体式洋上風力・波力の発電システムには多様な組み合わせがあり、全てを検討するのは現実的ではない。

したがって、本研究では、あらかじめ実現可能性の高いFloater、WECの組み合わせを検討した。選択した一つのシステムに対して、MATLAB/Simulinkを用いてシミュレーションを行い、動的解析、及びシステムからの発電出力の評価を行った。本検討は、OWC (Offshore Wind Consultant) の協力の下行った。次項にその結果を示す。

### (2) 浮体式洋上風力/波力/蓄電池の統合システムにおける負荷解析、及び発電量の評価

本研究で対象とした浮体式洋上風力・波力の統合システムの概略を図-2に示す。風車、及び浮体の情報は、NREL (National Renewable Energy Laboratory)によって公開されているIEA 15MW Offshore Reference Wind<sup>[1]</sup>、及びセミサブ型浮体として知られるUMaine VoltturnUS-S Reference Platform<sup>[2]</sup>の情報をそれぞれ参照した。WECについては、Point Absorber Type<sup>[3]</sup>を使用した。図-2 右図にあるように、WECは浮体の各カラムに装着されており、カラム下部から支持棒を通じてワイヤーで接続される構造となっている。1基あたりの出力は500kWであり、3基全体の出力として1.5MWを見込んだ。

なお、蓄電池を海底に配置するためには、新たに海底ケーブルを敷設する必要があるため、本研究では図-3に示す通り、浮体のポンツーン上(浮体上ではあるが、風車運転時は水面下になる領域)に配置し、浮体の揺動に変化が生じるかを確認した。

ナウファス、及びWindPROを用いて、公的に入手可能な秋田県沖(40.210556E 139.661111N)、青森県沖(40.633333E 141.75N)の環境条件を下に、実環境条件における本統合システムの負荷解析、また発電量の評価を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) FloaterにWECを装着することにより、波風による系全体の揺動(Roll運動、Pitch運動)が低減され、浮体の安定性が増すことが確認された。
- 2) Point Absorber TypeのWEC搭載により、Floaterの揺動が安定し、風車発電量の増加に寄与することを期待したが、WECの有無によらず風車からの発電量は同程度を維持する結果となった。

本研究において想定した海域ではWECからの発電量は風車からの発電量に比べて小さく、発電量

の増強という観点では、十分な結果が得られなかった。

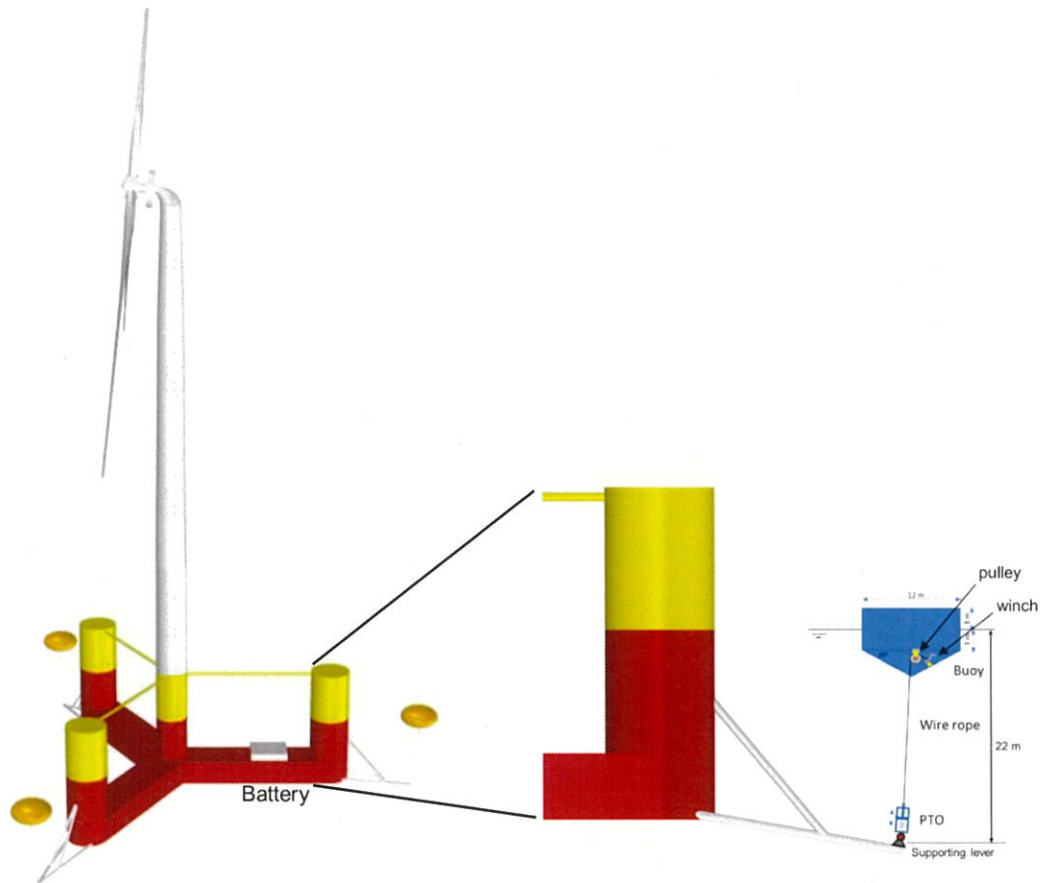


図-2 浮体式洋上風力・波力の統合システムの概略図

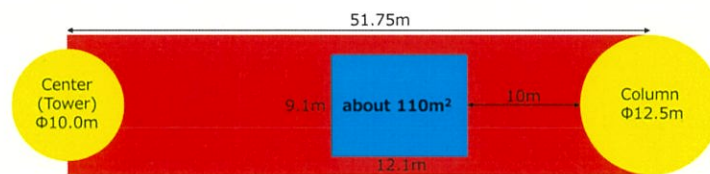


図-3 蓄電池の設置位置

### (3) 風力発電・波力発電による電力周波数の同期に係る技術調査・検討

波力発電メーカーでR&Dも行っているBombora<sup>[4]</sup>、Holvi Oy<sup>[5]</sup>の2社にコンタクトし、技術調査を行った。洋上風車から送電網へ接続する際の回路図の例を図-4に示す。風車から交流(AC)で発電された電気は一度直流(DC)に変換された後、再びACに変換され、送電網の電圧・周波数と同期するように制御されている。このようなシステム全体をPCS (Power Conditioning System) と呼び、洋上風車においては、PCSは風車メーカーによって供給され、ナセルもしくはタワー内にすでに備わっている。

一方、Bombora、Holvi Oyの2社を調査した結果、WECについても、すでに内部にPCSが備わっていることが明らかになった。風力と波力を接続する際の回路図を図-5に示す。このように、風力と波力の周波数や電圧を同期し、これを制御することは容易であることが明らかになった。ただし、このシステムにさらに蓄電池を

追加する場合には、蓄電のために電流を一度DCに直す必要があるため、新たにDC/ACの変換を行うコンバータが必要となる。蓄電池を追加する際の回路図を検討した結果を図-6に示す。このように、蓄電池の追加に伴い、ケーブルやコンバータ等の機器も併せて必要になる可能性があることは留意する必要がある。

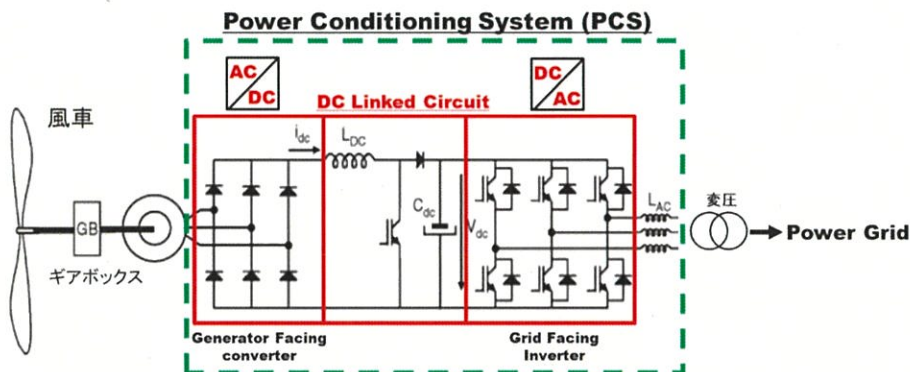


図-4 風車から送電網への回路図の例

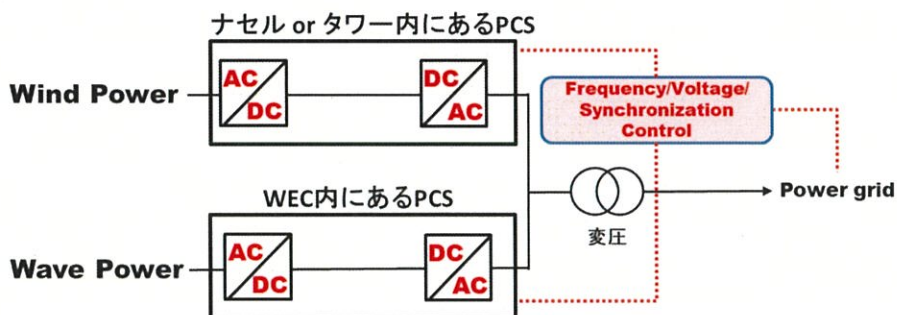


図-5 風力/波力を接続する場合の回路図の例

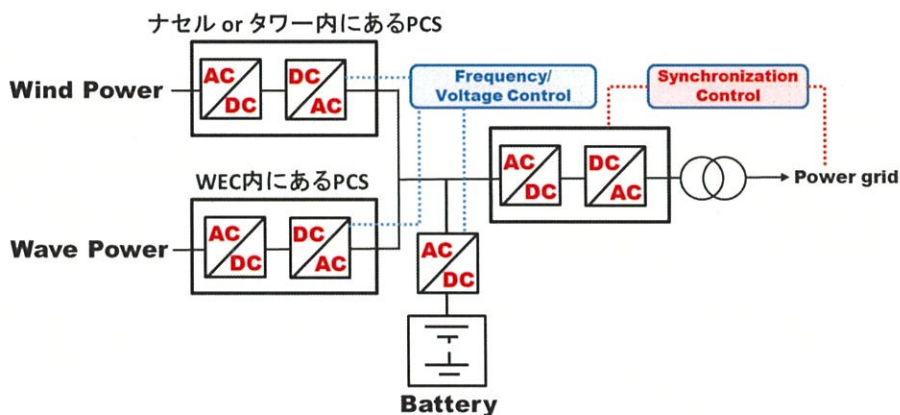


図-6 風力/波力・蓄電池を接続する場合の回路図の例

#### (4) 統合システムの経済性・事業性評価

以下の3つの統合システムについて、CAPEX・OPEX、年間発電量を比較した。

1) JGC & OWCの風力/波力の統合システム (図-2):

セミサブ型浮体 UMaine VoltornUS-S Reference Platform (15MW) の各コラムにPoint Absorber TypeのWECを結合させるシステム(500kW×3=1.5MW)

2) Bomboraの風力/波力の統合システム (図-7):

Bombora及びTechnipFMCによって考案されているInSPIRE 18 (Wind 12MW + Wave 6MW)のシステム

3) 係留を共有させることによる浮体式洋上風力とWECの統合システム(図-8、図-9)

セミサブ型浮体 UMaine VoltornUS-S Reference Platform (15MW) の周囲に、海底に係留索を必要とするHolvi OyのWECを配置し(300kW×6=1.8MW)、アンカーを共有させるシステム



図-7 Bombora Wave Powerの風力/波力統合システムのコンセプト(InSPIRE18)



図-8 Holvi OyのWECのコンセプト

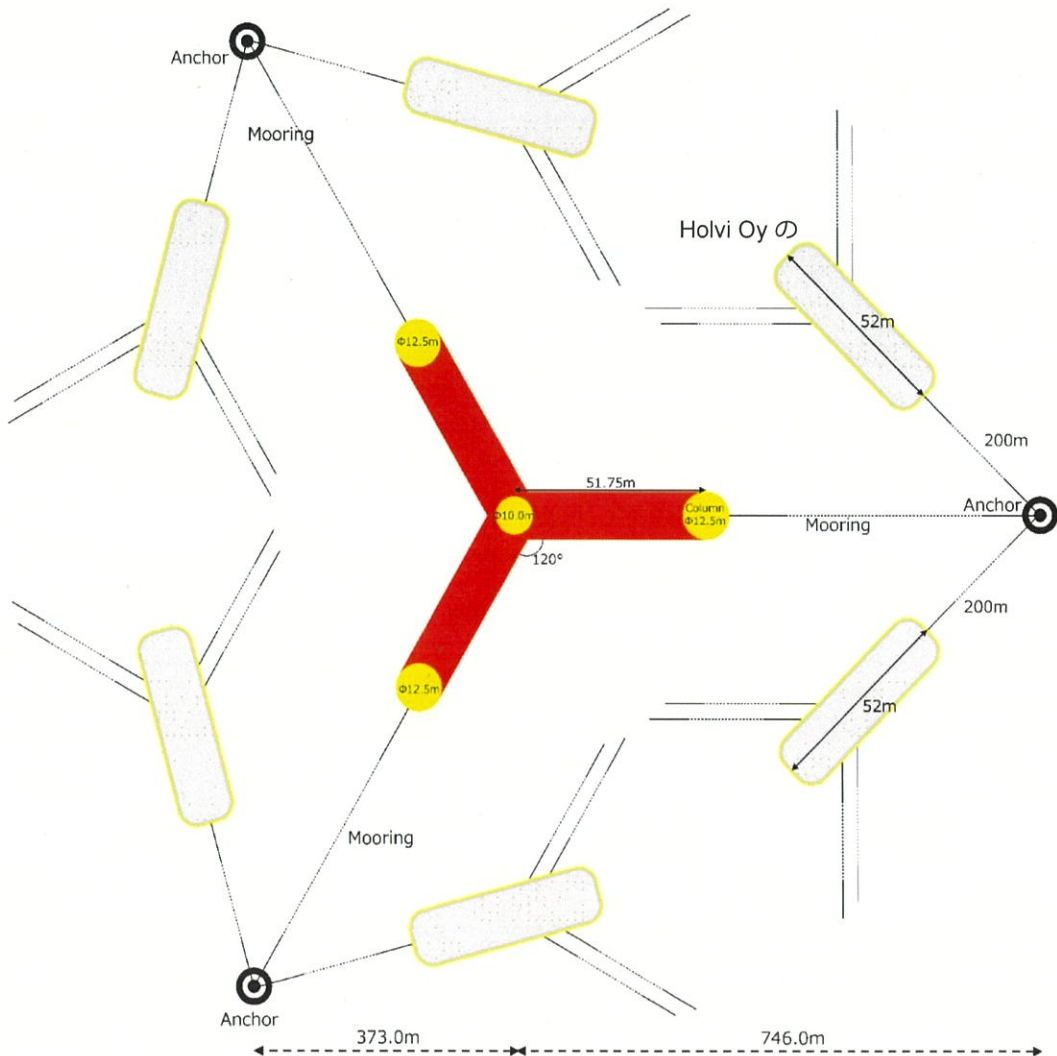


図-9 セミサブ型浮体のアンカーをHolvi OyのWECと共有させるシステムのレイアウト

これら3種類の統合システムを1基導入する際のCAPEX, OPEXを表-1にまとめた。なお、本研究のコスト算定結果は、JGCの社内蓄積データ、及びBombora, Holvi Oyへの聞き取り調査を元に算出した金額であり、将来的にはコスト削減できる可能性があることには留意が必要である。また、本検討では、統合システム1基のみの検討であるため、海底ケーブルのコストは含まれていない。これは、海底ケーブルのコストが、水深、離岸距離、Wind farm化する際の風車の数など様々な条件に依存するためである。

表-1中のCAPEXに注目し、各システムにおける1MWあたりのCAPEXを整理すると、以下のようになる。

1. JGC & OWC (15MW 風車+ Point Absorber WEC)
  - ✓ Windのみ :  $\$ 62.4 \text{ M} / 15 = \$ 4.16 \text{ M/MW}$
  - ✓ Wind + Wave :  $(\$ 62.4 \text{ M} + \$ 2.05 \text{ M}) / 16.5 = \$ 3.91 \text{ M/MW}$
2. Bombora
  - ✓ Wind + Wave :  $\$ 56.7 \text{ M} / 18 = \$ 3.15 \text{ M/MW}$
3. General WTG + Holvi Oy
  - ✓ Windのみ :  $\$ 62.4 \text{ M} / 15 = \$ 4.16 \text{ M/MW}$
  - ✓ Wind + Wave :  $(\$ 62.4 \text{ M} + \$ 8.54 \text{ M}) / 16.8 = \$ 4.22 \text{ M/MW}$

表-1 各統合システムにおけるCAPEX, OPEXの比較

	Capacity	CAPEX* <sup>1</sup>		OPEX* <sup>1</sup>	
		Wind	Wave	Wind	Wave
1) JGC & OWC * <sup>2</sup> 15MW 風車 + Point Absorber WEC	Wind 15 MW Wave 1.5 MW	\$ 62.4M	\$ 2.05M	\$ 0.841M	\$ 0.0198M
2) Bombora * <sup>3</sup>	Wind 12 MW Wave 6 MW (InSPIRE 18)	\$ 56.7M (Whole system)		\$ 0.496 M (Whole system)	
3) 15MW 風車+ Holvi Oy の WEC * <sup>4</sup>	Wind 15 MW Wave 1.8 MW (Assumed 300kW x 6 WECs)	\$ 62.4M	\$ 8.54M	\$ 0.841M	\$ 0.0237M

注\*<sup>1</sup>: 計算には、2023/05/31時点での以下の為替レートを用いた。

139.8 (JPY/USD), 1.07 (USD/EUR)

注\*<sup>2</sup>: CAPEXには、係留索、風車、Floater, WEC, プロジェクトマネジメント & 保険、炭素排出コストが含まれている。1基のみのため、海底ケーブルは含まれていない。

注\*<sup>3</sup>: コスト情報は、Bombora への聞き取り情報に基づく。CAPEXには、1基の統合システムのコストとして、係留索、風車、Floater, WEC, プロジェクトマネジメント & 保険、炭素排出コストが含まれている。1基のみのため、海底ケーブルは含まれていない。

注\*<sup>4</sup>: コスト情報は、Holvi Oy への聞き取り情報に基づく。CAPEXには WEC, WECの係留索, プロジェクトマネジメント & 保険, 炭素排出コストが含まれている。

また、本研究で対象とした秋田県沖、青森県沖の環境条件を下に、各システムの風力/波力の年平均出力をまとめた。結果を表-2に示す。いずれのシステムにおいても、波力からの出力は風力と比較して小さく、今回対象とした海域においては、全体の発電量増強には十分寄与していないことが示された。

表-2 本研究で対象とした秋田、青森沖の海域における年平均出力の比較

	Capacity	秋田			青森		
		Wind (MWh/year)	Wave (MWh/year)	Total (MWh/year)	Wind (MWh/year)	Wave (MWh/year)	Total (MWh/year)
1) JGC & OWC 15MW 風車+ Point Absorber WEC	Wind 15 MW Wave 1.5 MW	61,392	892	62,284	52,155	666	52,821
2) Bombora	Wind 12 MW Wave 6 MW (InSPIRE 18)	49,114	6,995	56,109	41,724	5,721	47,445
3) 15MW 風車 + Holvi Oy の WEC	Wind 15 MW Wave 1.8 MW (300kW x 6 WECs)	61,392	1422	62,814	52,155	720	52,875

注: 設備容量は一律 100%と仮定し、メンテナンスや故障等で風車, WEC が止まる期間は考慮しない。

### (5) 海底蓄電池の選定

海底蓄電池の既存技術を調査したところ、SubCtech、Kraken Robotics、Ocean Power Technologiesなどが開発・商用化していることが分かった。ただしこれらの技術は全て海中または海底となっており、それぞれ使用できる水深の条件(500m~5,000m)が決まっており、それに応じて設計条件や金額規模も変わってくると予想している。

本研究では、異なる水深ごとに設計条件を変更する必要性を無くし、オフショアで汎用的に活用することが出来る「海中蓄電池」の開発を目指した。具体的には、開発のポイントは電池を封入する筐体に絞り、蓄電池は既に市場で取引されているリチウムイオン電池を用いることとした。筐体は強度や腐食を考慮しステンレス製とし、図-10の通り海上に浮かべながらも蓄電池の充放電分を海中で冷却するために電池の封入部分は水面下とした。

一方で、水面近くで海中蓄電池の有用性を検討するための筐体の強度計算や電池に対する衝撃等に関する調査は出来ておらず、今後の課題となる。



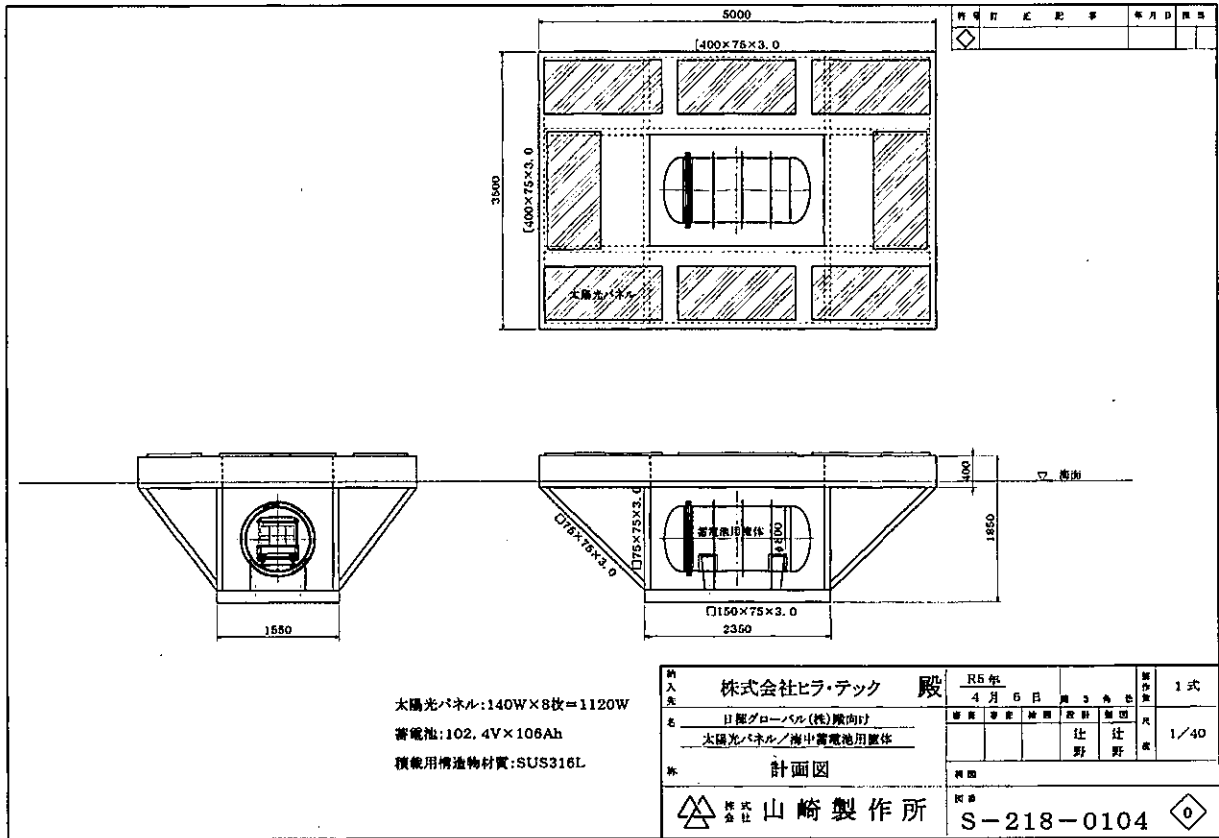


図-10 海上蓄電池の概要図

### 2.3 結論と今後の展望

本研究では、Floater, WEC, また蓄電池を統合したシステムを検討することにより、以下の知見が得られた。

- 1) 動的解析の結果、洋上風力発電のFloaterにWECを搭載することにより、波風による浮体の揺動(Roll及びPitch運動)を抑えることができた。これにより、風車を支える支柱(Tower)やFloaterの経済的設計に寄与する可能性がある。
- 2) WECを搭載することによりFloaterが安定化し、風車からの発電量も安定化することを期待したが、本研究では、WECの有無によらず、風車からの発電量は同程度を維持した。
- 3) システム全体系の発電量と比較し、WECによる発電量は小さく、システム全体の発電量増強には十分寄与していない。
- 4) 3種類の統合システムについて、CAPEX/OPEX、及び実環境での年間平均発電量を算出した。いずれのシステムにおいても、本研究で想定した海域では波力からの発電量は風車からの発電量に比べて小さく、発電量の増強という観点では十分寄与していないことが明らかになった。

今後の展望として、以下の点をより検討する必要がある。

- 1) 50年再現期間の気象・海象データを用いたモデリング及び解析  
本研究で対象とした気象・海象条件は、公的に入手できるデータに限られていたため、より条件の厳し

い 50 年再現期間のデータを用いて解析を実施し、実現性及び経済性を評価する必要がある。また、風力・波力双方の発電量が大きくなるような海域を再度調査・選定する必要がある。

2) WECのタイプ、また設置場所の再検討

本研究でWECをFloaterのカラム外側に設置することにより、全体系の固有周期が大きくなり発電時のFloaterの動揺が抑えられた。一方、増加した固有周期は荒天時の強制運動を引き起こしてしまう可能性があるため、WECの設置場所の再検討を実施し発電容量の増強を伴ったコンセプトの検討が必要である。

またFloaterとの親和性がより大きいWECが他に存在しないか、更なる調査を行う。

3) Wind Farmを念頭に置いた設計

将来的に商用化を目指す場合、Wind Farm化は必然である。その場合、風車ウェイクを回避するために設けられている間隔にWECを効率的に配置する等の有効活用、Wind Farm全体の発電量に準じた蓄電池選定の実施が考えられる。

3. 学会発表及び論文発表

本研究期間中における発表実績はない。

今後、風力・波力・蓄電池の統合システムに関する更なる詳細な設計を行い、普遍的なモデルを確立できれば、学会・論文を通じて積極的に研究成果の周知を図る必要がある。

4. 特許取得状況の実績及び予定

本研究期間中における特許出願実績はない。

5. 参考文献

- [1] Evan Gaertner, Jennifer Rinker, Latha Sethuraman, Frederik Zahle, Benjamin Anderson, Garrett Barter, Nikhar Abbas, Fanzhong Meng, Pietro Bortolotti, Witold Skrzypinski, George Scott, Roland Feil, Henrik Bredmose, Katherine Dykes, Matt Shields, Christopher Allen, and Anthony Viselli. March 2020. Definition of the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine Technical Report. URL. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf>
- [2] Christopher Allen, Anthony Viselli, Habib Dagher, Andrew Goupee, Evan Gaertner, Nikhar Abbas, Matthew Hall, and Garrett Barter. July 2020. Definition of the UMaine VoltturnUS-S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15- Megawatt Offshore Reference Wind Turbine Technical Report. URL. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/76773.pdf>
- [3] Hongzhong Zhu. 2023. Optimal Semi-Active Control for a Hybrid Wind-Wave Energy System on Motion Reduction, IEEE Transaction on Sustainable Energy, 14 (1), pp. 75-82.
- [4] Bombora Wave Power. URL. <https://bomborawave.com/>
- [5] Holvi Oy. Ocean waves endless source of energy. URL. <https://holvienergy.com/index.html>