

カーボンニュートラルを目指した波力 発電関連分野での新産業創出促進事業 概要報告

補助金対象

- 株式会社e-ウェーブR&D
 - [第2期平塚波力発電所に向けた技術開発、実施計画の策定](#)

成果報告書から一部抜粋して概要を紹介する。

* 本事業報告は2022年度の繰り越し分

本事業は、ヤフー株式会社より企業版ふるさと納税で支援を受けています。

<概要> 「第2期平塚波力発電所に向けた技術開発、実施計画の策定」

補助金申請者：株式会社e-ウェーブR&D

共同実施者：東京大学生産技術研究所、海洋エネルギー共同研究参加企業（16社）

実施内容

- I 基本設計条件の見直し
 - 1. 波浪条件の検討（設計波高・周期）
 - 2. 定格波高・発電出力の推定
 - 3. 構造物設計条件の検討

- II 分離型ジャケット構造物の最適構造の検討
 - 1. ジャケット構造物強度設計
 - 2. 反射板強度設計
 - 3. ラダー及びラダーアーム強度計算

- III ベンチ試験装置の改造と定格出力点の確認
 - 1. EVG*ベンチ試験装置の追加改造
 - 2. EVG発電確認

* EVG :電気自動車用発電機(Electric Vehicle Generator)の略

本事業は、ヤフー株式会社より企業版ふるさと納税で支援を受けています。

I 設計条件の見直し

1. 波浪条件の検討（設計波高・周期）

浅海域に設置される波力発電所の設計波は、当該地点の換算沖波波高・周期、海底勾配から砕波限界波高を求めた。

【前提条件】

- 設置水深：DL-3.2m
- 設計潮位：既往最高潮位HHWL(DL+1.9)+0.5* = DL+2.4r

※0.5mは将来(2040年)の平塚海域での海面上昇0.14m(IPCC第6次評価報告書の予測値)と台風の大規模化による高潮の水位上昇を含む

- 設計波の計算水深： $h=3.2+2.4=5.6\text{m}$
- 海底勾配1/50の砕波限界波高の関係より

$$H_0' = 7.1\text{m} \text{ (20年確率波)}, T_0 = 10\text{s}$$

$$L_0 = 1.56T^2 = 156\text{m}, H_0'/L_0 = 0.046$$

$$h/H_0' = 0.79$$

$$H_{\max}/H_0' = 0.70$$

$$\therefore H_{\max} = 0.70/0.79h = 0.89h$$

【設計波の波高と周期】

- 設計波高： $H_{\max} = 0.89h = 0.89 \times 5.6 = 5.0\text{m}$
- 周期：10s（沖波：20年確率波）

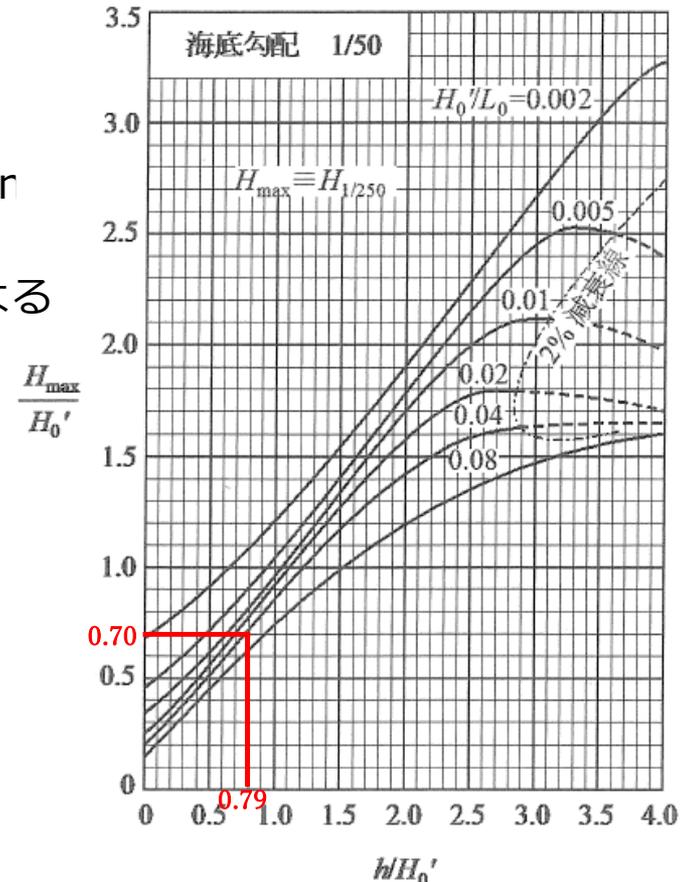


図2.1.1-1 砕波限界波高

2. 定格波高・発電出力の推定

(1) 波エネルギーからの推定

波力発電所設置地点の波浪条件から定格波高(Hrms)と発電出力を推定することができる。

単位幅辺りの波エネルギーE(kW/m)は、波高H(m)と群速度Cg(m/s)より次式で表される。

$$E=1/8 \rho g H^2 C_g/1000$$

ここに、 ρ は海水密度(1,030kg/m³)、 g は重力加速度(9.8m/s²)である。
ラダーへの波の入射角 θ 、ラダー幅B(m)、発電効率 ξ とするとラダー入射エネルギーW(kW/m)、発電出力EW(kW)は次式で表される。

$$W(\text{kW})=E(\text{kW}/\text{m})\times\cos\theta\times B(\text{m}) \quad , \quad EW(\text{kW})=W(\text{kW})\times\xi$$

2. 定格波高・発電出力の推定

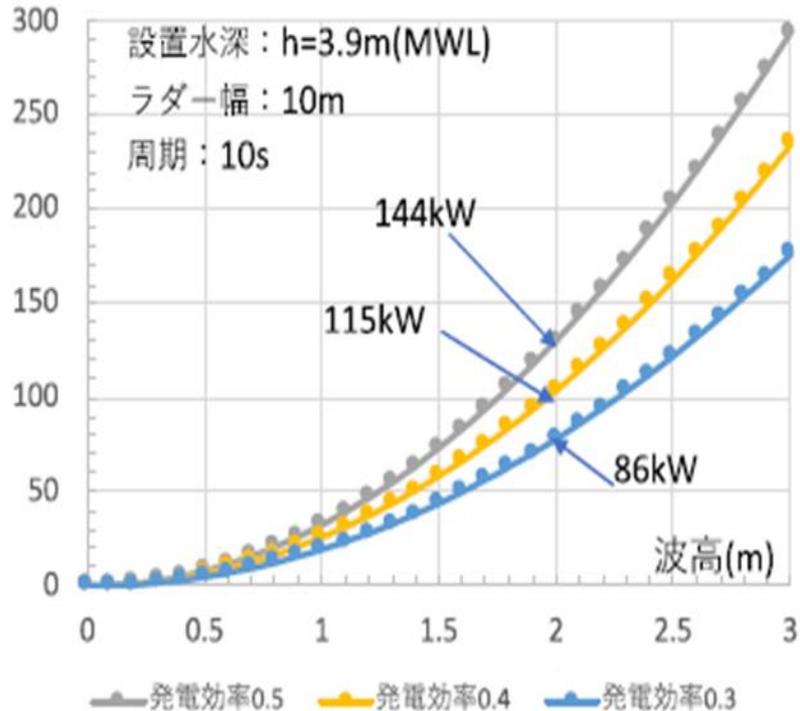
ラダー幅10m、発電効率0.3~0.5とした場合の発電出力を以下に示す。

波高(m)	E(kW/m)	発電効率0.5	発電効率0.4	発電効率0.3
0.5	1.80	9.00	7.20	5.40
1.0	7.20	36.02	28.81	21.61
1.5	16.21	81.04	64.83	48.62
2.0	28.81	144.07	115.26	86.44
2.5	45.02	225.11	180.09	135.06
3.0	64.83	324.15	259.32	194.49

再計算結果

- ・設置位置DL-2.5mからDL-3.0mへ沖側に変更。
MWL=DL+0.9m時の水深はそれぞれ3.4m、3.9mに変更
- ・周期T=8sから10sに変更し、波数・波長・波速を再計算した。
- ・波高（エネルギー平均波高 H_{rms} ）別、発電効率（0.3,0.4,0.5）別の発電出力図を再計算した。
- ・定格波高2mでの発電効率別の発電出力は、水深3.9m、T=10sでは（86kW,115kW,144kW）、見直し前の水深3.4m、T=8sでは（77kW,103kW,128kW）より若干大きくなった。
- ・変換効率0.4以上であれば、ラダー1枚（幅10m）で100kW出力が可能である。

発電出力(kW)



波エネルギーから推定した発電出力

2. 定格波高・発電出力の推定

(2) 平塚波力発電所の実績値からの推定

今回検討している平塚波力発電所GEN3の設置位置はGEN2とほぼ同じ地点であり、水深帯や波浪条件がほぼ同じであること、前述(1)より波エネルギーは波高Hの2乗に比例することから平塚波力発電所GEN2の実績値からも推定可能である。

GEN2の場合、定格波高(Hrms)1.5mで定格出力45kWであった。ラダー幅Bが同じであれば、波高Hに対して出力は $45 \cdot (H/1.5)^2$ となる。平塚GEN3では定格波高(Hrms)1.2mを想定していることから定格出力は $45 \cdot (H/1.5)^2 = 45 \cdot (1.2/1.5)^2 \approx 30$ kWと推定された。この結果は、前項の波エネルギーから推定した発電効率0.3の計算結果とほぼ同じであった。

<用語解説>

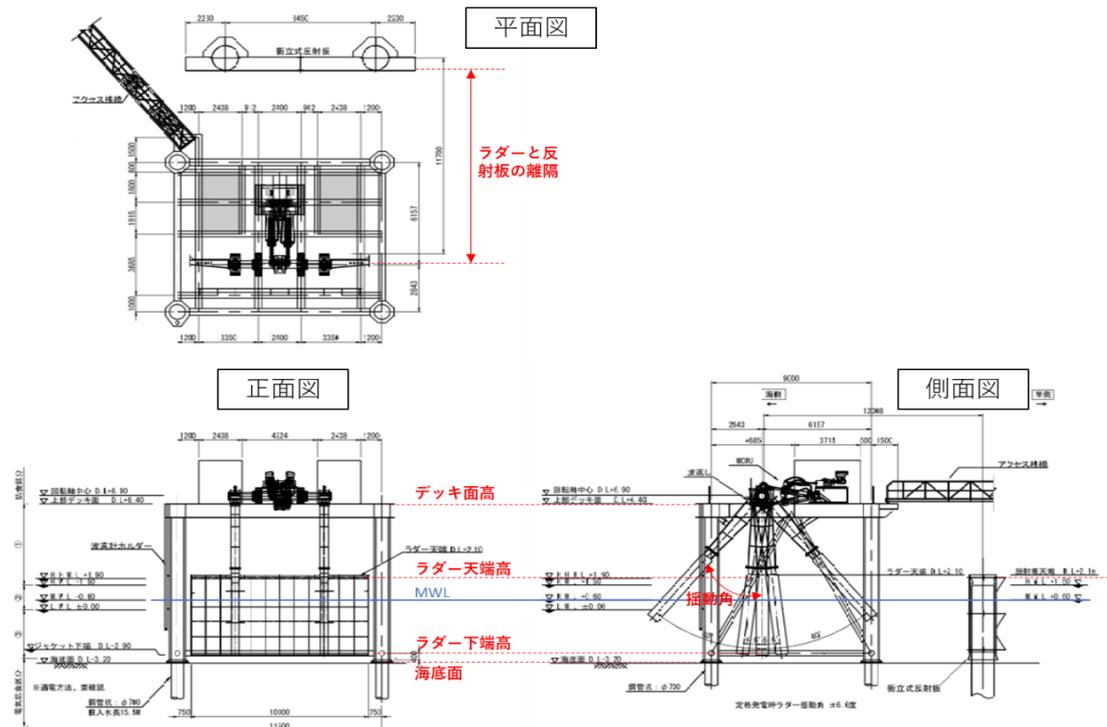
平塚波力発電所GEN2・・・2022年2月に撤去された環境省事業の平塚波力発電所ウェーブラダー型としては第2世代 (Generation 2)

平塚波力発電所GEN3・・・第3世代として検討している新型の波力発電システム

3. 構造物設計条件の検討

以下の6点の検討の結果、図面を作成した。

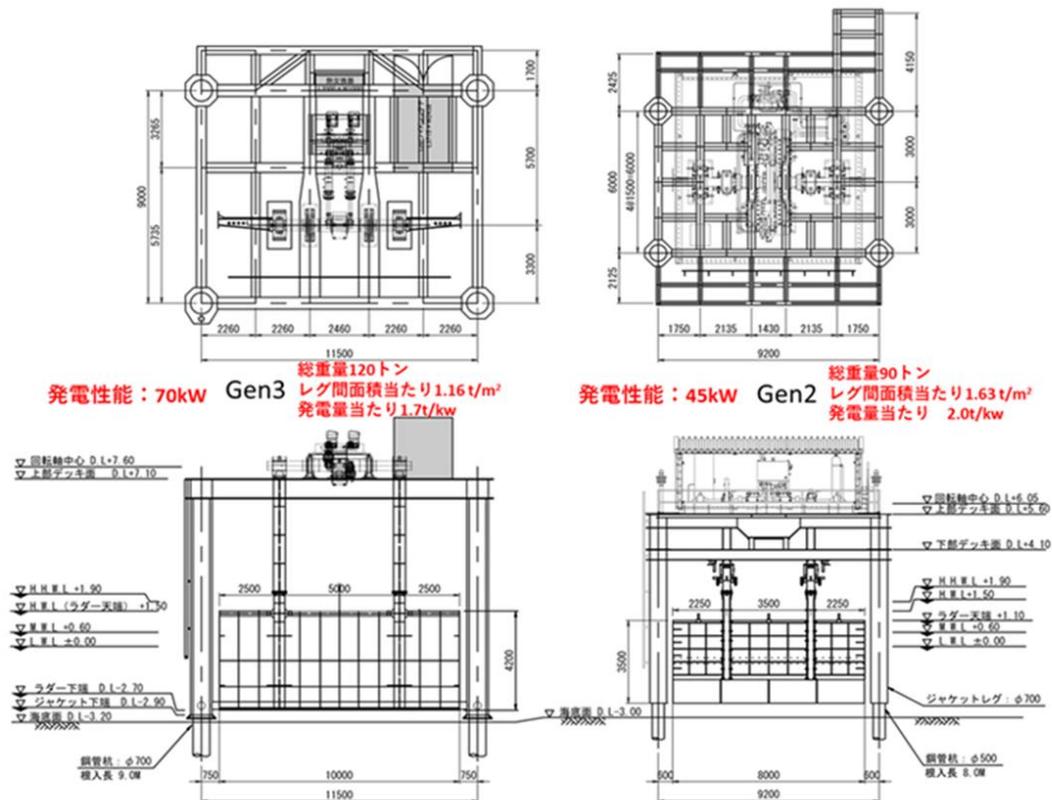
1. デッキ面高（設計波が来ても波はデッキの下を通過する）
2. ラダー天端高（MWL時に定格波高の有義波相当波まではラダーを越波させない）
3. ラダー下端高とラダーの高さ（漂砂や海底地形の変動を考慮して海底から0.5m離す）
4. 反射板天端高（過剰な波エネルギーを越波させて揺動角を抑える）
5. ラダーと反射板の離隔（ラダー位置が重複波の節となるように反射板との離隔を1/4波長とする）
6. 揺動角の検討



Ⅱ 分離型ジャケット構造物の最適構造の検討

1. ジャケット構造物強度設計

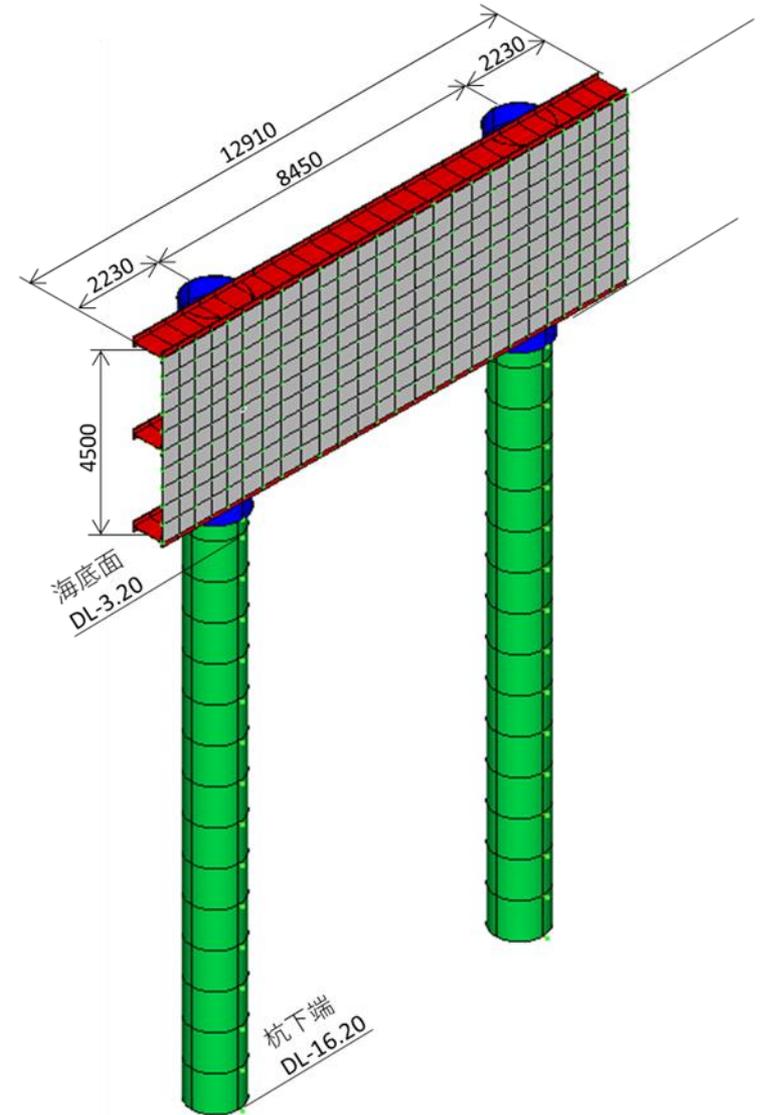
令和4年度に実施したGEN3連結型から沿岸方向幅1/2となる第3世代（GEN3）分離型（11.5m×9m、LEG4本、ラダー1枚）としてユニバーサル設計を目標とした波力発電装置の構造解析を行い、最適構造を求めた。



GEN2とGEN3の比較

2. 反射板強度設計

令和4年度に採用した鋼板の上下左右にH型鋼で補剛した壁の左右端に鋼管柱を設け2本の杭にかぶせる衝立式反射板について、最大設計波高以上の波を透過させる天場高さをDL+2.0m、海底地形変化が最小となるよう海底面DL-3.2mから反射板底面を1m離れたDL-2.2mとした寸法で強度解析を行い、反射板の最適化を検討した。その結果、総重量が26.1tとなり令和4年度の総重量49.1tと比べ47%の軽量化を達成した。

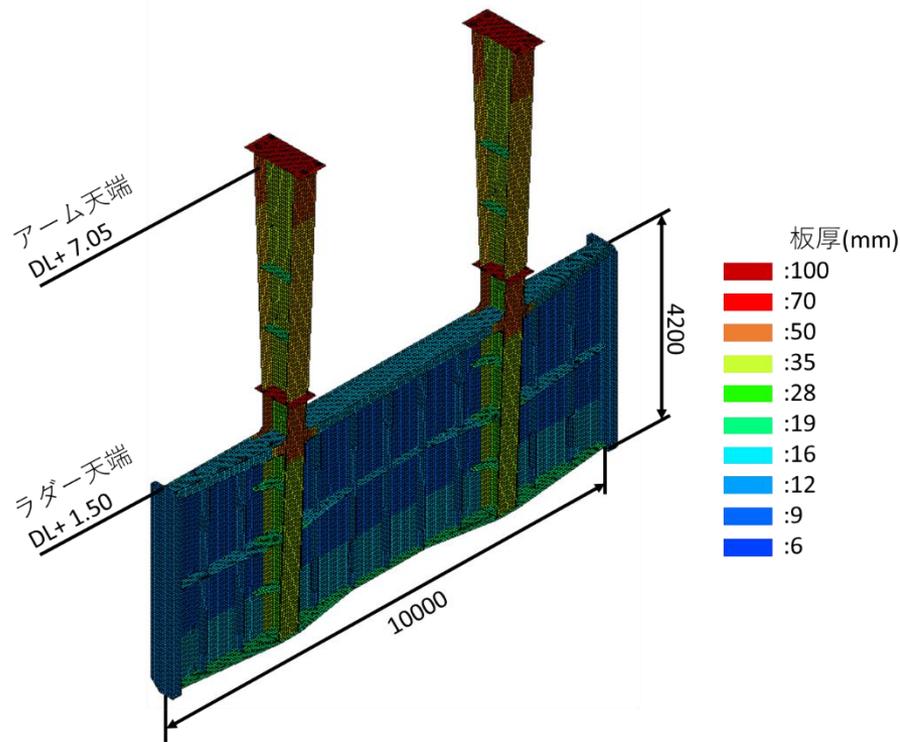


反射板 3Dモデル

3. ラダー及びラダーアーム強度計算

令和4年度では、ラダー下端にゴムを装着した複合ラダーと鋼製ラダーとの比較を行い**重量軽減化**を行った。令和5年度では、**低コスト化**を考えて、ラダー下端のゴムは不採用とし鋼製ラダーでのさらなる重量軽減化の検討を行った。ラダー寸法は、地球温暖化に伴う海面上昇を考慮した定格出力を実現するため、ラダー幅10m、ラダー天端高DL+1.5m、ラダー下端は海底面から0.5m離れたDL-2.7mとした鋼製のラダー、ラダーアームの強度計算を行い、発生応力度が許容応力度に比べ小さい部材は、板厚を薄くした。またその際、全体の剛性バランスが崩れないように配慮して構造解析を実施しすべての部材が許容値内に収まるよう軽量化を行った。軽量化の指標（C）としてラダー下端からラダーシャフト中心までの距離で重量を除いたものを用いた。

令和4年度より重量低減化ができた。



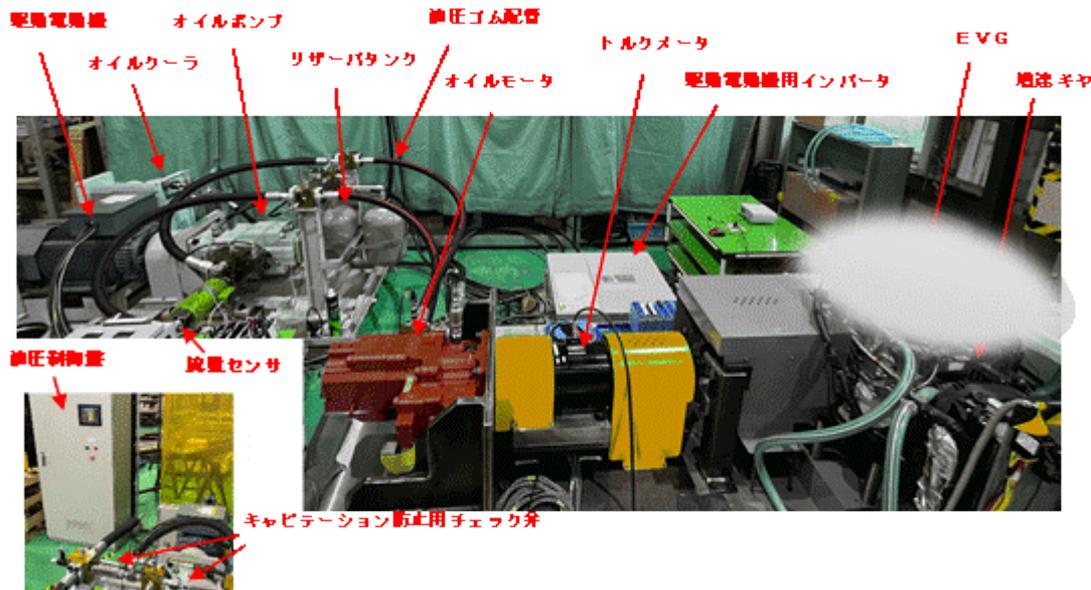
ラダー及びラダーアーム 3Dモデル

Ⅲ EVGベンチ試験装置の改造と定格出力点の確認

1. EVGベンチ試験装置の追加改造

(1) クローズ回路への変更とリザーバタンクの追加

商用化に向けてPTO(Power Take Off)のシリンダポンプから吐出した油でオイルモータを回転させた後、オイルモータから排出される油をオイルタンクを介さず、直接シリンダポンプの吸入側に接続するクローズ回路への変更と油圧回路内を加圧するためのリザーバタンクの追加改造を実施した。



(2) EVGギアボックスの改造（ギア比変更）

EVGの定格発電回転数の変更（令和4年度ベンチ試験結果：2763 min⁻¹→4,500min⁻¹）に対応したギヤ比の変更を行った。

(3) 正逆回転に対応したソフトウェア（μGPCsH）の修正

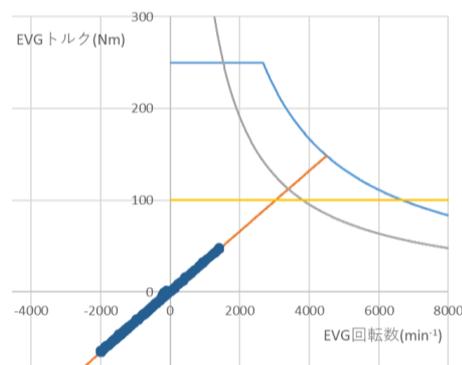
商用機では、部品点数削減や信頼性向上を狙い、アキュムレータやチェック弁による整流用回路を省略することで、波の往復運動にあわせてEVGが正逆回転となるため、回転方向にあわせたトルク指令（逆回転時は－トルク）が生成できる変更を行った。

2. EVG発電確認

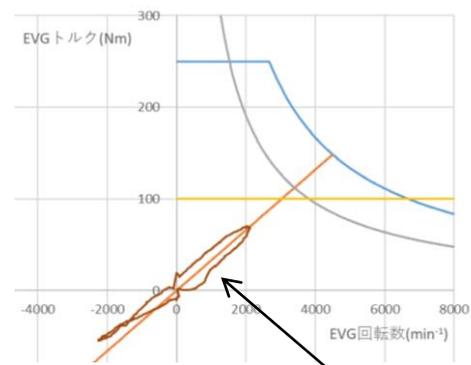
(1) 正逆回転運転に対するEVGの妥当性の確認

EVGの逆回転側の回転数を上げることができないため回転数が低い範囲(約 $\pm 2000 \text{min}^{-1}$)に限り運転トルク制御を行った結果、MPPTトルクで運転できることを確認した。

なお、ベンチ試験に使用しているEVGと同様に逆回転側にトルクの制約がある発電機を採用するためには、油圧システム側にて正回転のみとなるような回路変更が必要となる。



回転数をゆっくり変化させた場合



制御系内の通信の遅れによるヒステリシス

正弦波($\pm 2000 \text{min}^{-1}$ 、周期4sec)

図 正逆回転運転に対する運転トルク制御結果

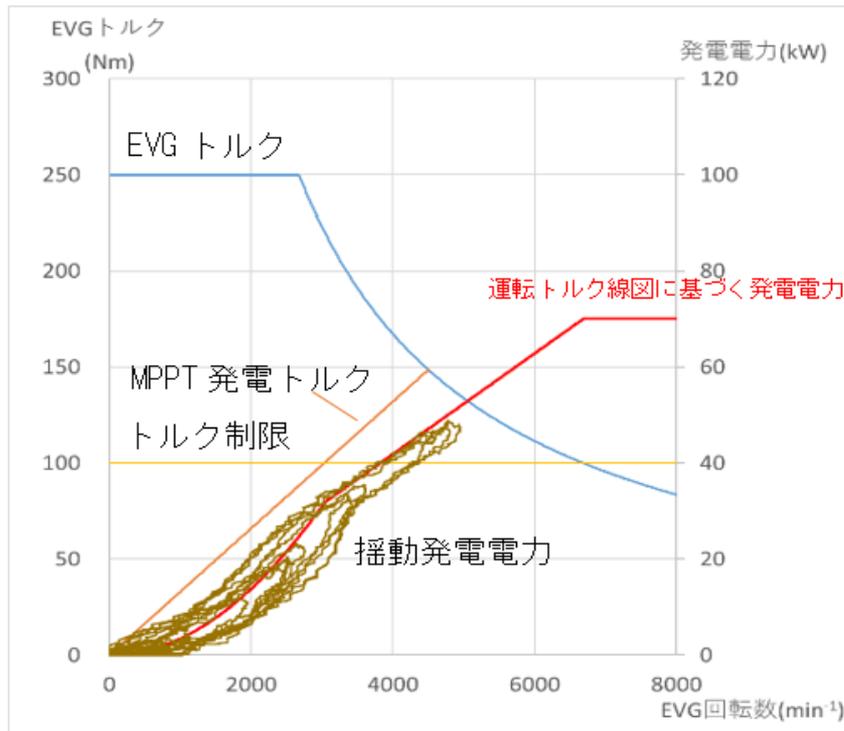
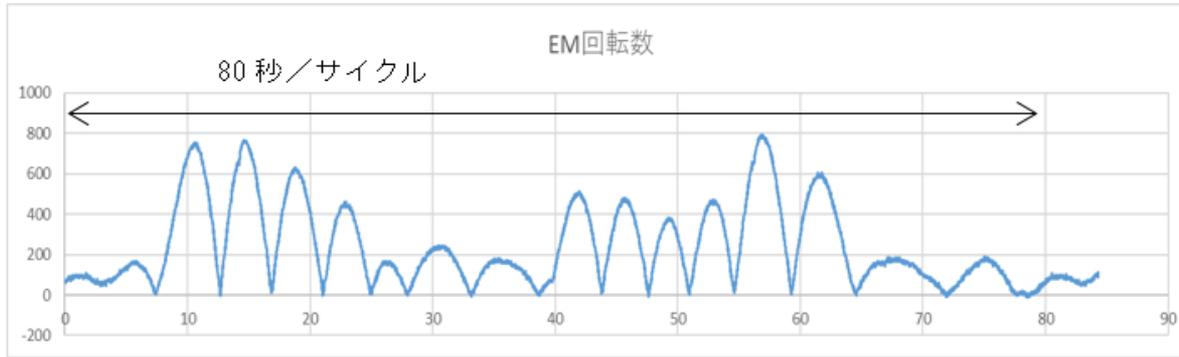
(2) 正逆回転運転に対する油圧回路妥当性（クローズ回路の機能確認と機能）の確認

- ・ 油圧システム内の温度上昇リザーバタンクのキャビテーション防止
- ・ エアの残留
- ・ リザーバタンクのキャビテーション防止

(3) EVG4,500min⁻¹以上の回転域を最高出力領域とし、発電機回転数：回転数0min⁻¹～7,000min⁻¹の範囲で発電出力の確認

前年度の試験と同様、1500min⁻¹以上の広範囲において、効率80%以上の概ねフラットな特性であった。なお、試験ではEVGトルクを超えたポイントもあり、最大発電電力は76kW（8000min⁻¹、86Nm）であった。

カーボンニュートラルを目指した波力発電関連分野での新産業創出促進事業 概要報告



- 平均発電電力：8.25kW
- 平均 EVGG 入力パワー：9.48kW
- 発電効率：87.0%

ラダー揺動によって発生する油量を模擬し、EVGの回転数を変化させた状態での発電効率についても評価したが、正弦波、不規則波ともに定常効率と同程度の発電効率が得られている。

EVG回転数-発電電力-効率（不規則波）