

海洋科学技術センター納入 波力空気タービン発電機

Air Turbine Generator by Wave Power for Japan Marine Science and Technology Center

平本 嵩* Akira Hiramoto · 中西幸一** Koh'ichi Nakanishi · 田島崇好*** Takayoshi Tajima

大西 茂*** Shigeru Ohnishi · 土信田徹也**** Tetsuya Toshida ·

I. まえがき

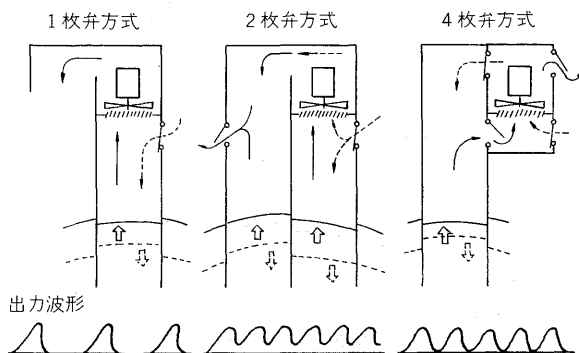
波のエネルギーを採取する方法は、種々のものが考案されている。波の上下運動を利用するもの、波が打ち寄せるときの横方向の力を利用するもの、浮体の動揺運動を歯車により回転運動として利用するものなどがある。波の力は強いけれども、その運動は低速度かつ往復運動であるので、波のエネルギーを利用するためには、増速と一方向運動へ変換する必要がある。その方法として、一方向クラッチと増速歯車の組合せや、弁機構と空気タービンの組合せなどが用いられる。現在実用化されている波力発電装置は、海上保安庁で航路標識ブイとして約300台使用されている空気タービン式のもの(60W)だけである。

海洋科学技術センターは、この空気タービン方式の大形化と消波効果の研究を昭和49年度から、発電ブイの発明者益田善雄氏を中心に取り組み、本年秋には日本海において、375kWの海上実験を行う計画で、54年度中には最高2,000kWの発電実験を行う予定である。

以下、この波力発電の概要と本年3月完成した空気タービン発電機について述べる。

II. 発電原理と波のエネルギー

空気タービン発電方式の発電原理は、第1図に示すように、波の上下動に伴い空気室から流出または空気室へ流入する空気により、タービンを回転させ発電しようとするものである。



第1図 発電原理図

Fig. 1. Operation principle by one, two and four valve system

するものである。波の上下動により空気の流れが変化するので、タービンを常に同一方向に回転させるために弁機構が用いられ、その個数により1枚弁・2枚弁・4枚弁方式などがある。

1枚弁方式は、その出力が間欠的であるが、構造が簡単であるため、航路標識ブイなど小形のものに使用されている。

4枚弁方式は、出力が連続的となるが、構造が複雑となるので、今回はほぼ同様の出力が得られる2枚弁方式が採用された。

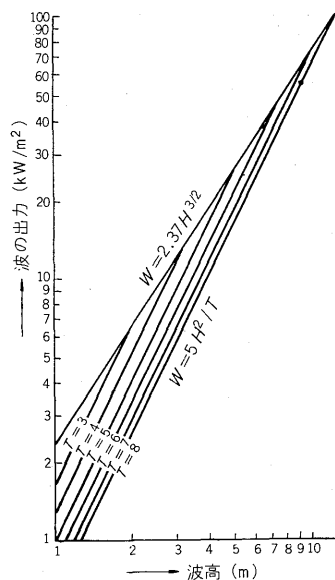
海面の単位面積当たりの出力 W は、水柱 H (m) の位置エネルギーが周期 T (s) で放出されるものとするならば、

$$W = \frac{\rho H^2}{2} \cdot \frac{1}{T} \cdot 9.8 \quad (\text{W/m}^2)$$

$$= 5 \frac{H^2}{T} \quad (\text{kW/m}^2)$$

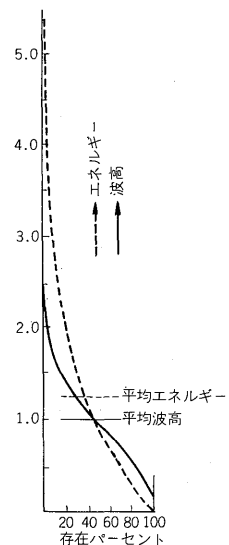
となり、波高の2乗に比例し、周期に逆比例するのであるが、波高は波長の1/7以上になると波頭を生じてくずれることになり、また波高 L と周期 T の間には、

$$L = \frac{g}{2\pi} \cdot T^2$$



第2図 波の出力

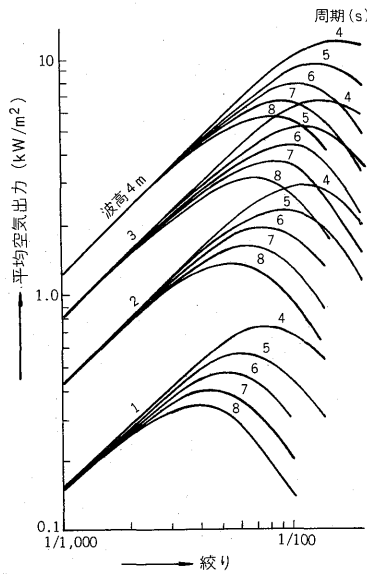
Fig. 2. Wave power



第3図 波高・エネルギー分布

Fig. 3. Spectrum of wave height and energy

* 輸送特機技術部 ** 中央研究所 *** 鈴鹿工場 設計部 **** 川崎工場 設計部



第 4 図 絞りの効果
Fig. 4. Effect of nozzle

の関係が成り立つので、結局波の出力は、

$$W \leq 2.37 H^{3/2} \quad (\text{kW/m}^2)$$

の条件も満足されねばならず、第 2 図のようになる。

以上は単一の波の場合であり、実際の波は数多くの波の集合であるため、波のエネルギー平均は波高の分布を考慮しなければならない。第 3 図に波高分布とエネルギー分布を示してあるが、そのエネルギー分布は平均波高以上の波高の範囲に 80% のエネルギーが分布しており、エネルギー平均は単一平均波高エネルギーの 1.27 倍以上となる。

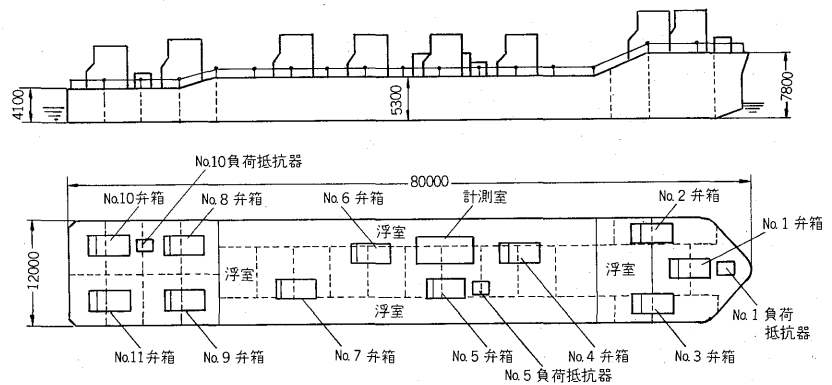
III. 絞りの効果

波のエネルギーを空気室の空気流として採取するには、ノズルを使用する必要がある。その絞り（ノズル面積 / 空気室面積）は、大きすぎても、また小さすぎてもエネルギーを取り出すことはできない。第 4 図に示すように最適な絞りは、波高・周期により異なるため、発電船を設置する海域の年間平均波高・周期に合わせて設定しなければならない。

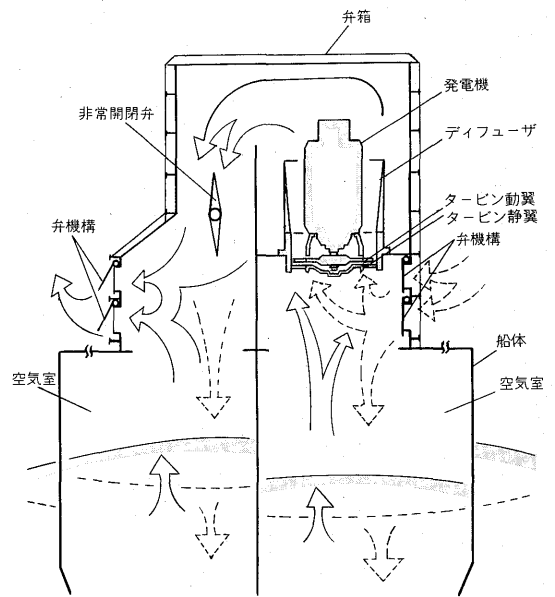
IV. 発電船

波力発電装置を搭載する発電船“海明”は、第 5 図のように、全長 80m、幅 12m、重量 500t の大きさで、面積 26m² 程度の空気室 22 個をそなえている。空気室は底板がなく浮力を期待できないため、別に 4 個の浮室がある。

発電船は、波の進行方向に向けて係留され発電を行うと同時に、その結果として、後方に波高が 1/2 程度に減じられた海域を扇状に出現させる。空気タービン発電機、非常開閉弁などが取り付けられる弁箱は第 6 図のようなもので、2 個の空気室ごとに設けられる。なお、係



第 5 図 発電船“海明”
Fig. 5. Generator buoy “Kaimei”



第 6 図 弁箱の構造
Fig. 6. Construction of valve case with air turbine-generator

留装置が万一破断した場合には、浮室に海水を注入させる沈降装置が働き、発電船の漂流を防止する対策が講ぜられている。

V. 主要機器の仕様

本年秋から日本海で開始される海上実験は、発電出力実験で、季節変動、日変動、それに数分を周期とする波の息つきによる変動、そして波の反復性による数秒を周期とする短周期変動などを解明することが目的である。このため発電機の過負荷保護のほかは、波のエネルギー入力を制限することなく発電させなければならない。一般に変動する入力による発電機方式は、誘導発電機方式が最適な方法である。けれども、別に大容量の同期発電機または系統電源が必要となるため、今回の実験においては、同期発電機方式を採用することとした。負荷としては、固定抵抗を使用し、発電機の出力は、回転速度の 3 乗に比例させるように計画されている。これは、反復

性入力に対しタービン発電機を常に最適運転させようとするものである。

空気タービンは、耐食性アルミ合金鋳物 AC 7 AF (ヒドロナリウム) を使用し、一体鋳造を行っている。翼形状は、モデル実験の結果から、衝動形に近いものを採用した。

主要機器の回路構成を第 7 図に示す。

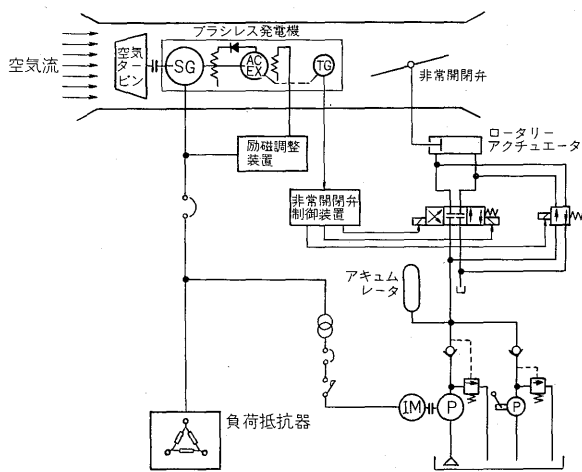
定格は日本海冬期の最多波高 3 m, 周期 6 ~ 7 s を対象波浪として設定したが、設計に当たっては種々の波高周期に対し、シミュレーションを行い仕様を決定した。

第 8 図はその一例である。

主要機器の仕様は、次のとおりである。

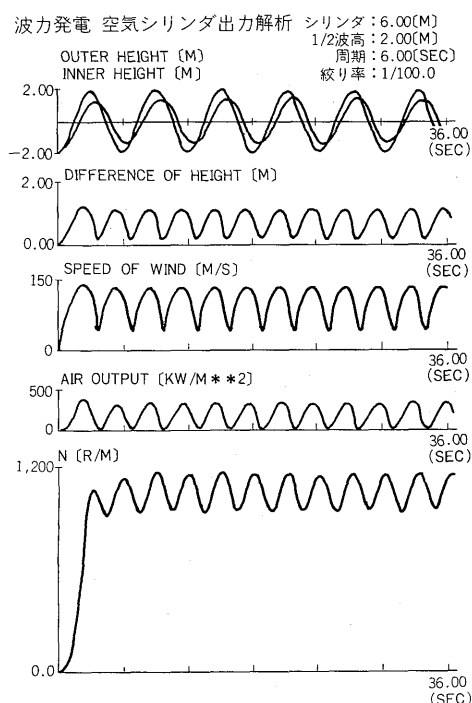
1. 空気タービン

形 式：立軸形軸流式衝動タービン



第 7 図 回路構成

Fig. 7. System configuration of wave power generation test



第 8 図 波力発電の位相関係

Fig. 8. An example of time chart

絞 り 率：1/118 (一空気室当たり)

ランナ外径：1,400 mm

ランナ枚数：60 枚

ランナ面積：3,896 cm²

ノズル外径：1,350 mm

ノズル枚数：50 枚

ノズル面積：2,238 cm²

ランナ材質：アルミ合金鋳物 AC 7 AF (ヒドロナリウム)

ノズル材質：同上

支支柱材質：SS 41

2. 同期発電機

形 式：立軸円筒回転界磁形

外被構造：屋外全閉形

冷却方式：空気タービンによる他力通風

定格出力：125 kW

相 数：3

定格電圧：200 V

極 数：6

定格回転速度：950 rpm

定格周波数：47.5 Hz

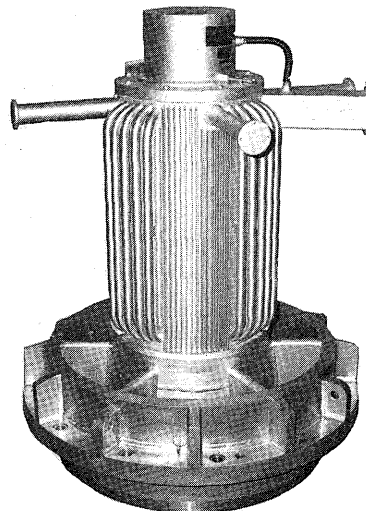
力 率：1.0

絶縁種別：F種

励磁方式：ブラシレス, SR 制御方式

運転範囲：600 rpm (30 Hz) ~ 1,400 rpm (70 Hz)

無拘速回転速度：2,000 rpm



第 9 図 125 kW 波力空気タービン発電機の外観

Fig. 9. 125 kW air turbine generator

3. 負荷抵抗器

形 式：屋外自然冷却式シーズ抵抗器

定格容量：125 kW

相 数：3

定格電圧：200 V

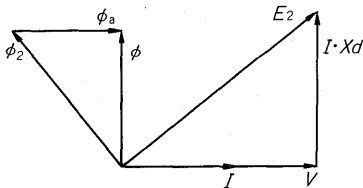
結 線：デルタ

抵 抗 値：0.96 Ω (一相当たり)

VI. 出力特性

今回の海上実験の目的の一つは、種々の波高・周期で取り出せる波のエネルギーを確認することである。したがって、発電機は空気タービン効率が最大になるように設計された。つまり、定格は、波高 3m 同期 6~7s で、回転速度 950rpm 出力 125kW とし、運転範囲 600~1,400rpm において、出力特性は回転速度のほぼ 3 乗に比例する発電機としている。この特性は、回転電機子形同期発電機を励磁機として同軸上に配置したブラシレス方式において、励磁機の増幅特性を利用し、励磁機の励磁電流一定のもとに可能となる。

第 10 図に円筒形三相同期機のベクトル図を示す。



- V: 端子電圧
- Xd: 同期リアクタンス
- phi2: 界磁極磁束
- phi4: 電機子反作用磁束
- I: 電機子電流
- E2: 内部同期リアクタンス電圧
- phi: 電機子反作用を受けた後の有効磁束

第 10 図 円筒形同期機のベクトル図
Fig. 10. Vector diagram of cylindrical rotor type synchronous generator

発電機の負荷抵抗を R, 励磁機の負荷抵抗を Rf (発電機の界磁抵抗) とし、定格回転速度 N0 における発電機と励磁機の出力 P, 電圧 V の基本式は、次のようになる。添字 c, ex は、それぞれ発電機, 励磁機を表す。

$$P_{G0} = |\dot{V}_{G0} \cdot \dot{I}_{G0}| = |\dot{V}_{G0}^2 / R| \dots\dots\dots(1)$$

$$\dot{I}_{G0} = \dot{V}_{G0} / R \dots\dots\dots(2)$$

$$\dot{V}_{G0} = \dot{E}_{2G0} - jX_{dG} \dot{I}_{G0} \dots\dots\dots(3)$$

$$\dot{I}_{ex0} = \dot{V}_{ex} / R_f \dots\dots\dots(4)$$

$$\dot{V}_{ex0} = \dot{E}_{2ex0} - jX_{dex} \cdot \dot{I}_{ex0} \dots\dots\dots(5)$$

ここで $|\dot{E}_{2G0}| = K \cdot |\dot{I}_{ex0}|$ として整理すると、

$$V_{G0} = |K \cdot \dot{E}_{2ex0} / R_f (1 + jX_{dG} / R) (1 + jX_{dex} / R_f)| \dots\dots(6)$$

$$P_{G0} = |\{K \cdot \dot{E}_{2ex0} / R_f (1 + jX_{dG} / R) (1 + jX_{dex} / R_f)\}^2 / R| \dots\dots(7)$$

これを、励磁機の励磁電流を一定として、任意の回転速度 Nn の場合について考える。

いま、定格回転速度との速度比 Nn / N0 = n とすれば、

$$P_{Gn} = |\dot{V}_{Gn}^2 / R| \dots\dots\dots(8)$$

$$\dot{I}_{Gn} = \dot{V}_{Gn} / R \dots\dots\dots(9)$$

$$\dot{V}_{Gn} = n \cdot \dot{E}_{2Gn} - jn \cdot X_{dG} \dot{I}_{dn} \dots\dots\dots(10)$$

$$\dot{I}_{exn} = \dot{V}_{exn} / R_f \dots\dots\dots(11)$$

$$\dot{V}_{exn} = n \cdot \dot{E}_{2ex0} - jn \cdot X_{dex} \cdot \dot{I}_{exn} \dots\dots\dots(12)$$

$$|\dot{E}_{2Gn}| = K |\dot{I}_{exn}| \dots\dots\dots(13)$$

$$V_{Gn} = |K \cdot n^2 \cdot \dot{E}_{2ex0} / R_f (1 + jn \cdot X_{dG} / R) (1 + jn \cdot X_{dex} / R)| \dots\dots(14)$$

$$P_{Gn} = |\{K \cdot n^2 \cdot \dot{E}_{2ex0} / R_f (1 + jn \cdot X_{dG} / R) (1 + jn \cdot X_{dex} / R)\}^2 / R| \dots\dots(15)$$

したがって、式(6), (7), (14), (15)から次式が得られる。

$$V_{Gn} = n^2 V_{G0} \left| \frac{(1 + jX_{dG} / R) (1 + jX_{dex} / R_f)}{(1 + jn \cdot X_{dG} / R) (1 + jn \cdot X_{dex} / R_f)} \right| \dots\dots(16)$$

$$P_{Gn} = n^4 \cdot P_{G0} \left| \left\{ \frac{(1 + jX_{dG} / R) (1 + jX_{dex} / R_f)}{(1 + jn \cdot X_{dG} / R) (1 + jn \cdot X_{dex} / R_f)} \right\}^2 \right| \dots\dots(17)$$

よって、鉄心の磁気飽和がなく、発電機及び励磁機の Xd = 0 とした場合、励磁機の励磁電流一定においては発電機の端子電圧は速度比の 2 乗に、出力は 4 乗に比例することがわかる。

実機では、励磁機の励磁電流一定において発電機端子電圧は速度比のほぼ 3/2 乗に、出力は約 3 乗になるように設計されている。

VII. 励磁調整装置

前述のような発電機特性 $V \propto N^{3/2}$ を得るために必要とする励磁調整装置の出力特性、すなわち励磁機の励磁入力特性は、発電機電圧あるいは回転速度に無関係に一定電流であることを要する。しかし、本装置においては、発電装置の実験的性格も考慮し、波のエネルギーを最大限に引き出すための出力電圧-回転速度特性の変化裕度をもたせるため、次式で示されるような出力特性で計画されている。

$$i_f = i_{f0} + \alpha N, \quad \alpha N / i_{f0} = 0 \sim 0.25$$

ここで、if: 励磁機の励磁入力電流

if0: 同上定数分

alpha N: 同上回転速度関係分

(定格回転速度において、if0 の最大 25% まで可変設定可能)

すなわち、基本的には、全動作域で定電流特性を持ちながら、影響度可変の回転速度補正項を持たせている。

海上無人運転を原則とする波力発電用励磁調整装置として留意すべき事項は、大略次のとおりである。

- (1) 船上のため、他に補助電源を得ることができないので、制御対称の発電機出力を有効活用するいわゆる自励方式を採用せざるを得ないこと。
- (2) 上記の発電機出力、すなわち励磁調整装置の入力電圧と周波数 (回転速度) が、 $V \propto f^{3/2} (\propto N^{3/2})$ の関係を持って、大幅に変動することに対する装置構成機器への十分な配慮が必要であること。
- (3) 発電機回転速度は、波の反復性に相応して、停止またはそれに近い低速域を有するが、この状態でも発電機電圧の自己立上りが可能なること。
- (4) 上記(3)項に関連して、制御装置構成部に電圧または回転速度に連動して作動する可動接点部を有しないこと。これは可動部寿命に制約があるためであり、例えば、発電機初期励磁を波の反復性に相応して可動接点

を通して行うことは、信頼性の点で実施できない。この意味で、一般に波力発電制御装置は、完全無接点化が理想的である。

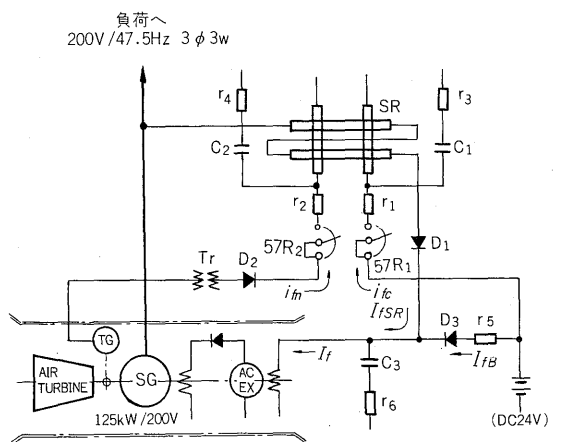
(5) 単純堅固なこと。

以上の点を考慮の上、励磁調整装置の形式を、自励分巻SR(可飽和リアクトル)方式とした。励磁系の概略を第11図に示す。第12図及び第13図にSRの特性を示す。

SRの特性は、ほぼ3種の動作域を有しているが、波力発電機の励磁装置としては、第13図の(A)領域を電圧自己立上り部、(B)領域を通常動作の界磁電流一定域に対応させている。なお、(C)領域のSR飽和域は、台風時など発電機回転速度が過大になろうとすると、SR出力すなわち発電機励磁を強め、発電機発生電力の強化を行うことになり、一種の電力制動を掛け、過速度抑制にも寄与し得る領域である。

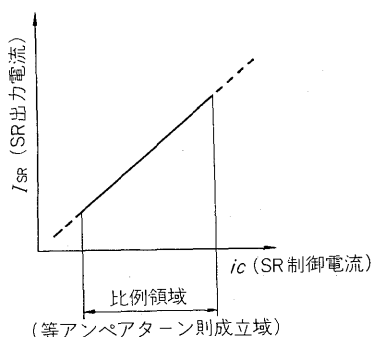
実際の回路においては、上記(A)領域の特性内で発電機電圧の自己立上りは不確実のため、船内バッテリーより若干の励磁電流を得ている。

また、回転速度補正分 αN の効果は、第14図に示すように顕著であり、波の状態に対して最大のパワー取り込みが可能となるように、発電機出力電圧特性の量的及び対回転速度の位置的補正重点域の推移が可能なが推察される。

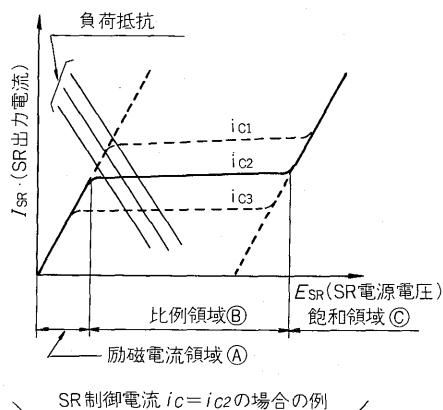


- AIR TURBINE: 空気タービン
- SG: 三相同期発電機
- AC・EX: 同上用交流励磁機
- TG: 回転計発電機
- Tr: 制御用変圧器
- SR: 単相可飽和リアクトル
- $r_1 \sim r_6$: 抵抗
- $C_1 \sim C_3$: コンデンサ
- $D_1 \sim D_3$: ダイオード
- I_f : AC・EX励磁電流
- I_{SR} : I_f 中のSR出力分(予定回転域)
- I_{fB} : I_f 中のバッテリー給電分(始動回転域)
- i_{fC} : I_{fSR} 用固定制御電流
- i_{fn} : I_{fSR} 用回転変動分補正制御電流
- $57R_1$: i_{fC} 調整可変抵抗
- $57R_2$: i_{fn} 調整可変抵抗

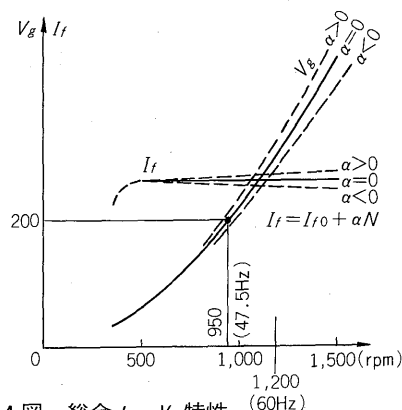
第11図 主回路単線結線図
Fig. 11. Single line diagram of main circuit



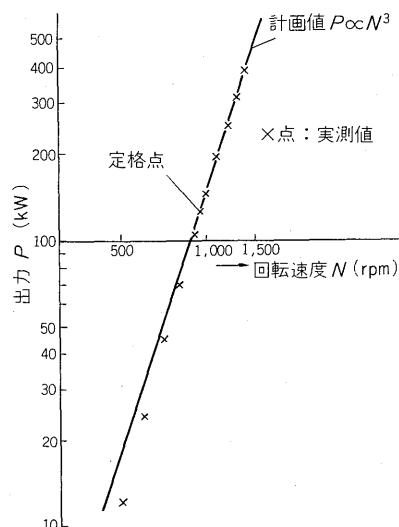
第12図 SRの制御電流-出力電流特性
Fig. 12. Characteristics of saturable reactor, I_{SR} vs. i_c



第13図 SRの電源電圧-出力電流特性
Fig. 13. Characteristics of saturable reactor, I_{SR} vs. E_{SR}



第14図 総合 $I_f - V_g$ 特性
Fig. 14. Total characteristics, V_g vs. I_f



第15図 波力発電機出力特性
Fig. 15. Output characteristics of air turbine generator by wave power

発電機と励磁調整装置を組み合わせ、工場試験で実測した出力特性を第15図に示す。当初の計画どおり回転速度のほぼ3乗に比例した特性が得られている。

VIII. 発電機の構造

本発電機は、一般の発電機と設置条件、環境条件、運転条件などが異なり、

- (1) 空気タービンの円筒風洞内に設置されるため、発電機の外装は極力通風抵抗を小さくする形状であること。
- (2) 無拘束回転速度2,000 rpm (定格の210%)に十分耐え得ること。
- (3) 船体の動揺による加速度(1G)に十分耐え得ること。
- (4) 軸受の潤滑は船体の動揺により潤滑不具合を起こさないこと。
- (5) 空気タービンの風圧による上向きスラスト及びタービン自重による下向きスラスト軸受を有すること。
- (6) 発電機の冷却風は、高湿度でしかも多量の塩分を含んでいるので、耐食性、耐塩害性を有すること。
- (7) 沖合に設置され無人運転のため、信頼性が高くしかも保守点検が少ないこと。

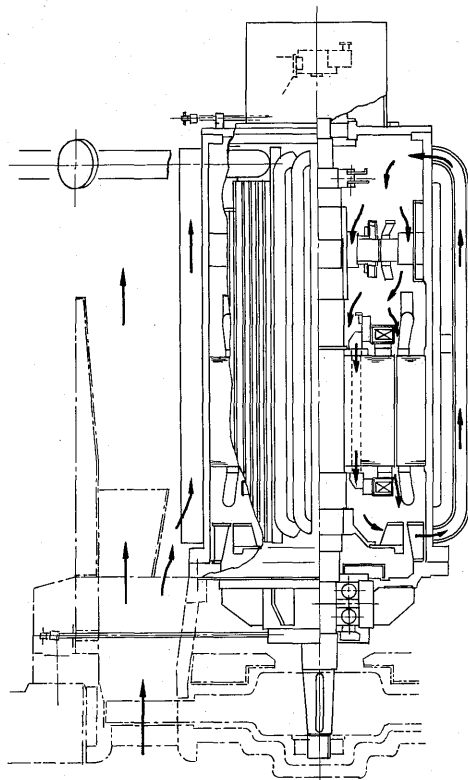
などの諸条件に対し十分な考慮を払い、設計製作している。

1. 冷却方式

高湿度かつ多量の塩分を含んだ雰囲気中で使用されるため、全閉構造を採用している。従来、全閉形は誘導電動機に多数例を見るように、固定子枠外周に冷却フィンを取り付け、熱伝導を利用して冷却する方法と固定子枠外周に冷却パイプを取り付け、内部循環空気を通して冷却する方法がある。同期発電機のように鉄心の空隙が大きく、しかも界磁損失の大きなものは、前者の冷却方法では回転子の十分な冷却は期待できない。また、後者の方式では固定子枠外周部の通風抵抗が増大し、タービン効率を低下させることになる。回転子の冷却効果の向上と通風抵抗の減少という問題の解決を図るため、冷却フィンと冷却パイプを併用する方法を採用し、固定子側の発生損失は主にフィンで、界磁損失は内部循環空気による冷却パイプで放熱する方式とした。フィンとパイプの冷却効果の比率は、それぞれの損失に見合うように設計されており、工場試験結果で固定子と回転子の温度上昇並びに温度差は、計画どおりにおさまり、過負荷運転に十分耐えられることが確認された。

2. 絶縁方式

設置される環境条件は劣悪なものであるため、全閉形としたが、発電機内部に結露することも考慮し、耐湿絶縁を施している。固定子巻線には、エステルイミド系の電線を使用し、コイルエンドテーピングを施し、ワニス含浸したのち、更に耐湿性、耐塩害性に優れたエポキシ



第16図 波力空気タービン発電機断面図

Fig. 16. Section of air turbine generator by wave power

樹脂で表面コーティングを行っている。回転子巻線は、反復的速度変動及び無拘束回転速度2,000 rpmに十分耐えられるように設計され、ガラス電線を使用し、ワニス含浸したのち、エポキシ樹脂表面コーティングを行っている。

3. 軸受

タービン動翼は、発電機の軸端にオーバハングになっているので、タービン動翼の自重による下向きスラスト及び風圧による上向きスラストを受ける軸受を下部に配置し、加速度1G及び過速度に十分耐えられる構造となっている。潤滑はグリースを使用し、排油管は風の抵抗になるため、下部に排油タンクを設けた。

IX. あとがき

以上空気タービン式波力発電について述べたが、実用化に至るには安全性、安定性、経済性の点などに、まだまだ研究開発すべき問題が残っている。また、変動するエネルギーをいかに活用するかという利用技術の開発も行う必要がある。今年度実施される海上実験は、これらの解決策をもたらすものと期待されている。今後もこの面の研究を重ね、波力発電の実用化を図り、将来のエネルギー不足時代に対処し得たらと念願している。

最後に、本発電設備を設計製作にあたり、御指導頂いた海洋科学技術センターの関係各位に厚くお礼申し上げる次第である。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。