

# 直 流 電 気 推 進

## DC Electrical Propulsion of Ships

横 田 馨\* 白 木 勇\*  
Kaoru Yokota Isamu Shiraki

### 内 容 梗 概

船舶の自動化が盛んになるにつれ、とくに特殊船（たとえばしゅんせつ船、砕氷船など）の推進機関に直流電気推進を採用することがヨーロッパ諸国では盛んである。わが国でも現在、南極観測用砕氷船に直流電気推進を計画中であるが、いままでこの種電気推進の実績はほとんどない状態である。日立製作所では直流電気推進の開発を進め、しゅんせつ船用として運輸省第二、および第四港湾建設局に400, 1,800 kW 直流電気推進用電気品を製作納入した。本論文が今後のこの種技術開発に役だてば筆者らの幸いとするところである。

### 1. 緒 言

最近の船舶自動化の発達はめざましいものがある。とくに経済の発達とともに特殊船（しゅんせつ船、砕氷船、消火艇、引き船など）の建造がさかんになり高度の自動化がなされるようになってきた。特殊船はその性質上、船の主要機関である推進機構にヨーロッパ諸国では電気推進を採用するようになってきた。わが国でも、ようやく電気推進に対する関心が高まり特殊船の推進機関にはこれを採用する気運にある。現在南極観測用砕氷船が直流電気推進で計画されていることは特殊船の推進機関の進むべき方向を示すものとして意義深い。

船舶の推進機関に電気推進を採用すると次のような利点がある。

- (1) 原動機と推進器軸を機械的（たとえば歯車）に連結する必要がないので原動機の設置場所が自由になり動力伝達機構が単純化し、ぎ装がしやすく保守が容易になる。
- (2) 容易に遠隔制御が可能であるから操船にあたり操だ室からの一人制御ができる。
- (3) 低速まで連続的な速度制御を行なうことができる。
- (4) 原動機速度を一定にしたままでよく、また推進器の逆転タービンなどの必要がなく操船が簡単で経済的である。

電気推進方式は上記のような利点をもっているが、特殊船ではさらに制御の融通性、広範囲の連続速度制御、逆転の速応性などがとくに要求されるため直流電気推進方式が採用される傾向にある。この方式には定電圧方式、三界磁発電機方式(可変電圧方式)、定電流方式などがあるが、これらに関する論文はわが国では皆無の状態である。

日立製作所では直流電気推進の開発を進めるとともに運輸省第四港湾建設局に400 kW 直流電気推進用電気品一式<sup>(1)</sup>、運輸省第二港湾建設局に1,800 kW 直流電気推進用電気品一式を製作納入し、現在好調のうちに運転中である。以下に直流電気推進計画上の問題点、および上記方式の直流電気推進の概要を製作実施例とともに述べる。

### 2. 直流電気推進装置計画上の問題点

直流電気推進は一般に船舶駆動のあらゆる要求によくマッチしており、とくに操縦性の融通性が要求される特殊船によく適合している。以下その計画上の問題点について簡単に述べる。

#### (1) 推進用発電機台数

推進装置が大容量になれば主発電機台数の決定は重要な問題である。これは、容積重量ひいては船価の点、あるいはまた船の操縦性、故障時または経済運転のための欠台運転時の運転性能など、

\* 日立製作所日立工場

船舶の基本計画上の主要点をなしている。

#### (2) 推進電動機特性

船の備えるべき運転特性、とくに推進器の各種条件における特性を十分検討し、必要に応じ、電圧制御、界磁制御による速度調整を行なうこと。たとえば砕氷船などにおいては、氷海中での船体停動条件(Stalled Ship)において十分なトルクを必要とするため、通常航行条件(Free Running)におけるよりも電動機界磁を強め、この両条件に対しほぼ出力一定となるよう速度制御を行ない、主発電機駆動用原動機には過負荷のかからないように考慮して、原動機の利用率を高める<sup>(2)</sup>。

#### (3) 多軸推進器の動力分配

前後推進器あるいは中央、ならびに左右舷の推進器相互間の動力分配は船の操縦性、運転性能に大きく影響を及ぼすもので<sup>(3)</sup>、これら各推進電動機と発電機との組み合わせについては十分造船メーカーとの打ち合わせを必要とする。

#### (4) 船の後進操作

船を前進から後進へ切り換えた場合、推進器逆転時に回生動力が生ずる。回生動力の大きさは船の重量、速度ならびに推進器の零速度への減速特性に左右される。ディーゼル機関では回生動力として、その出力の約10~20%まで吸収可能であるが、タービンでは、その吸収馬力はきわめて小さい。それゆえ、全速前進から全速後進までの逆転時間の決定には、原動機が回生動力により過速度とならぬよう考慮すべきである。このため主発電機セットはフライホール効果の大きいように設計するのが得策であり、また必要に応じて制御装置に逆電力制限を設けるべきである。

一方推進電動機は逆転時間短縮の点から $GD^2$ の低減をはかる必要があり、必要に応じて二重電気子構造または電動機直結方式が採用される。

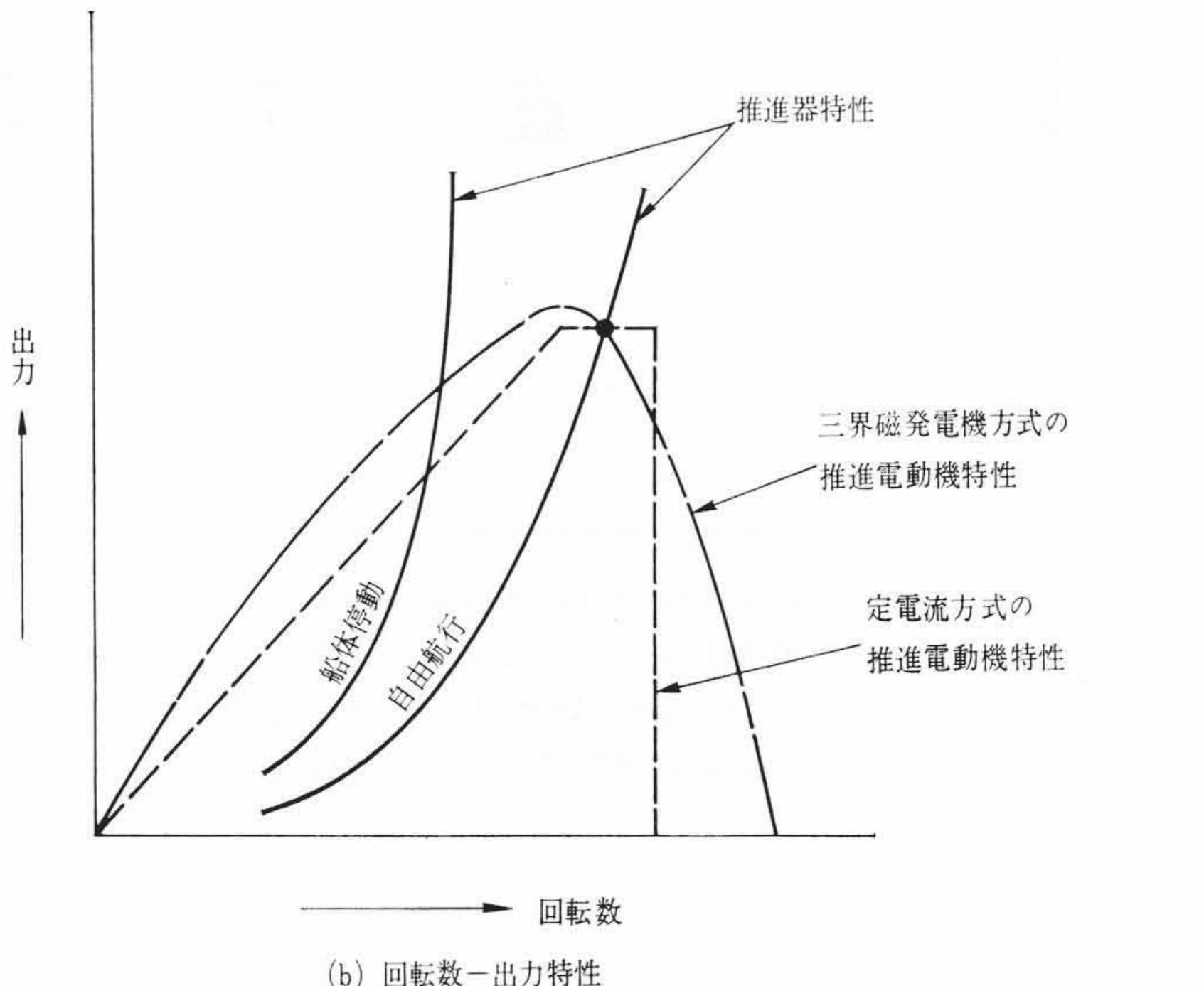
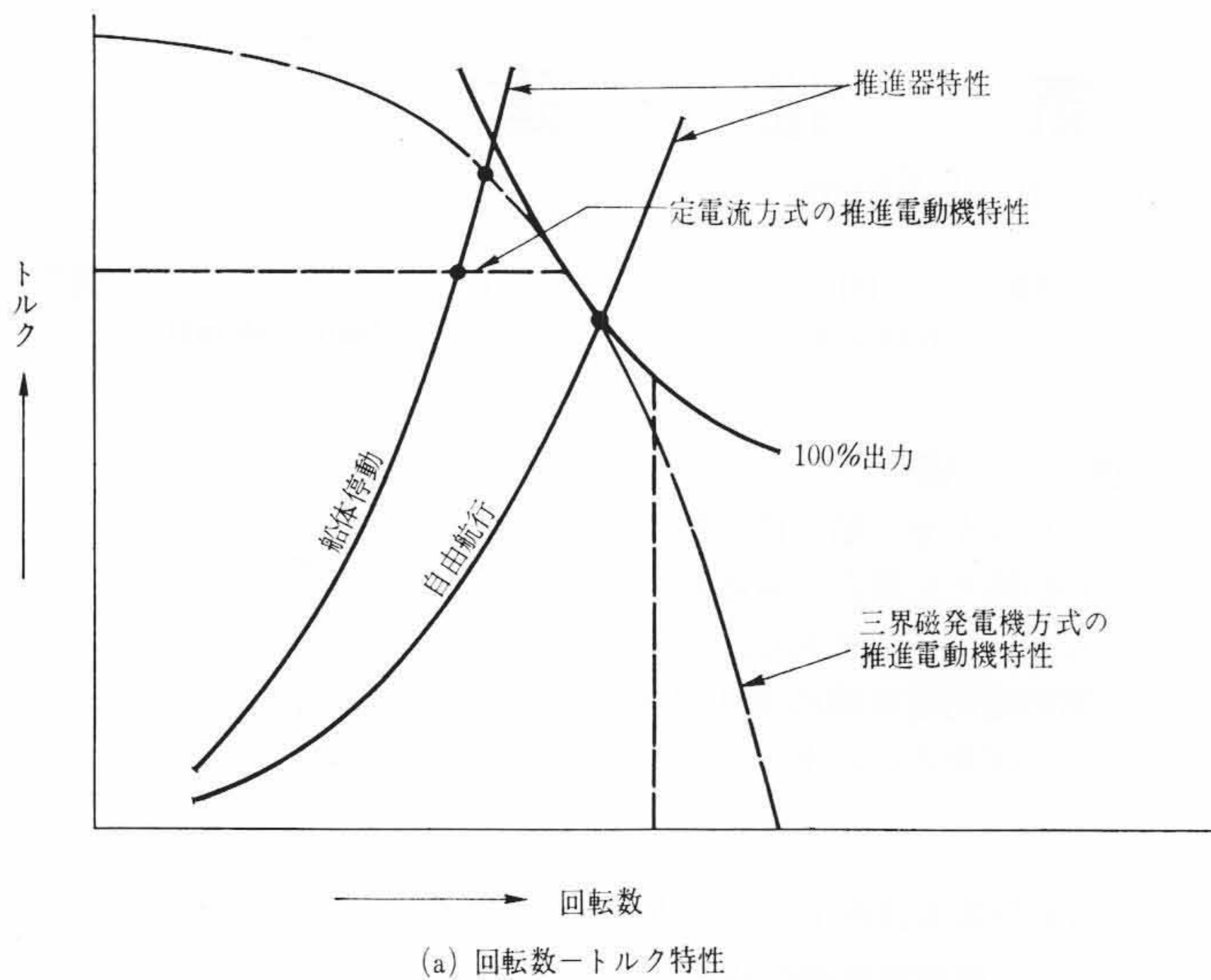
#### (5) 過負荷耐量

推進装置用主機に対しては110~120%程度の短時間(1~2時間)過負荷運転に耐えられるよう考慮が必要である。

また、とくに砕氷船などでは砕氷中の推進電動機にかかる衝撃負荷は相当激しく<sup>(3)</sup>、この負荷変動に対して十分電流抑制効果を発揮できるよう、電気制御系の応答度向上をはかることが肝要である。また推進電動機発電機とも、この急激な負荷変動に対して、過渡整流性能向上のため、たとえば積層継鉄の採用などの考慮を必要とする。

#### (6) 制 御 方 式

直流電気推進装置の制御方式としては後述するように、實際上、可変電圧方式(主として三界磁発電機方式)と定電流方式の二つにしばられると考えられる。このいずれを採用するかは船に要求される運転性能に大いに左右されるが、計画上の重要な点で



第1図 推進電動機 の 特性 曲 線

ある。

定電流方式は、しゅんせつ船におけるように、推進器以外に補機たとえばポンプなどを有しており、これらが同時に全負荷を要求しない場合に、しばしば採用されている<sup>(5)</sup>。この場合これらの電動機を一つのループで制御すると、発電機の設備容量は可変電圧方式よりも節約できるうえに、発電機台数は電動機台数とは全く無関係にその時の状況に応じて自由に選択できる長所をもっている。

両制御方式における推進電動機の回転数—トルクおよび出力特性と推進器の負荷特性を描くと第1図のようになる。これからわかるように定電流方式は三界磁発電機方式に比し、原動機動力の利用率が悪く、また船体停動時のトルクが多少小さい。このためたとえば砕氷船のような、船体停動時に極力大きいトルクの必要な場合にはあまり望ましくないと考えられる。一方三界磁発電機方式では発電機が若干大きくなる欠点もあり、これを少しでも救う方法として発電機用励磁機を三界磁にする方法も考えられる。

次に問題となるのは、直列か並列かの主回路接続方式<sup>(7)</sup>である。一般に直列接続では直流発電機の製作の難易、並列接続では発電機間の負荷平衡について検討を要する。しかし現在のところ原動機特性も含めての負荷平衡は困難な問題が多いためか、直列接続が多く採用されている。また直列接続では主回路の任意の二点間の電圧値が問題であり、目下審議中のNK規格案ではこの値は1,500V以下とされており、直流機端子電圧はこれを考慮して決定する必要がある。

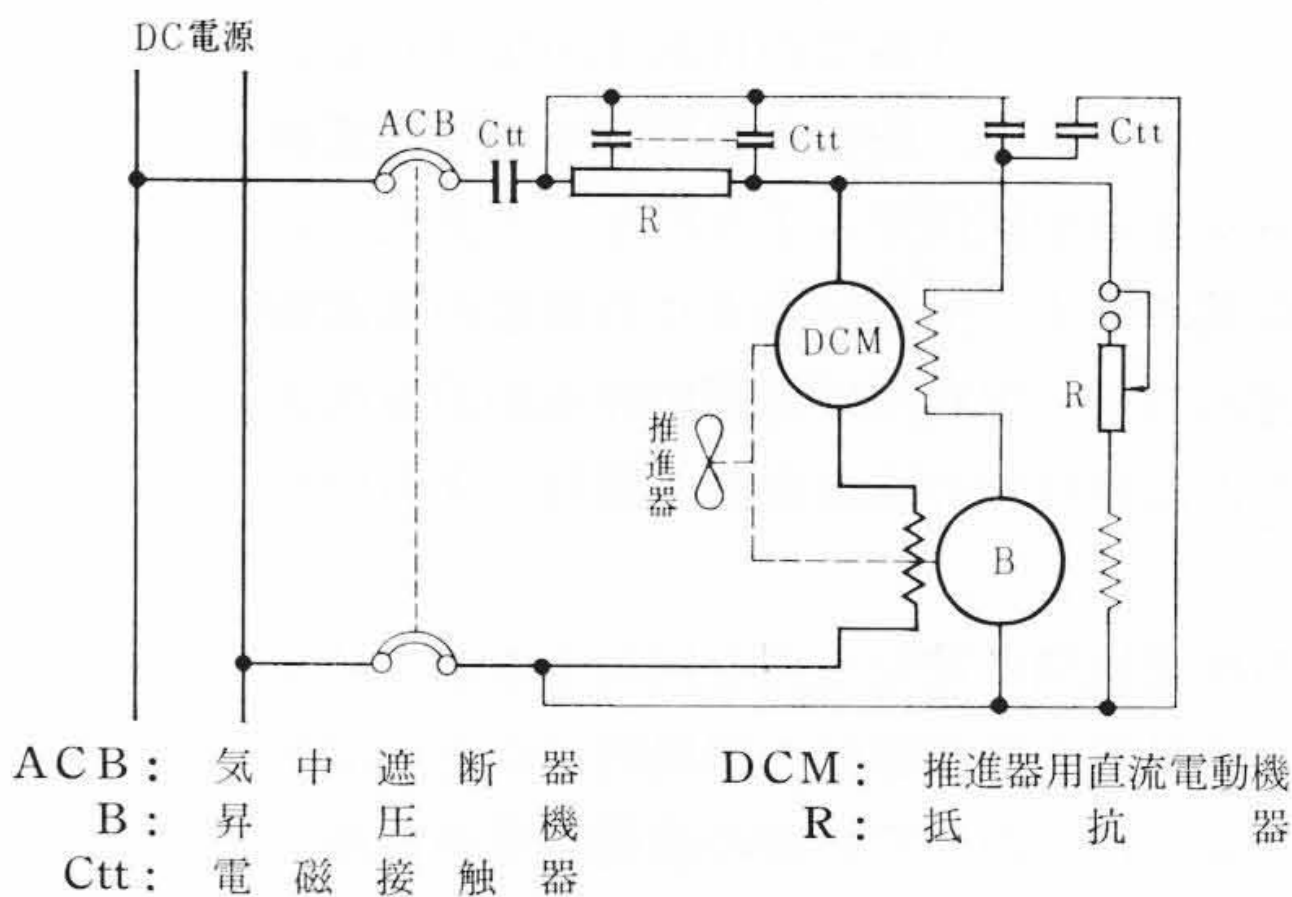
### 3. 直流電気推進方式

#### 3.1 定電圧方式

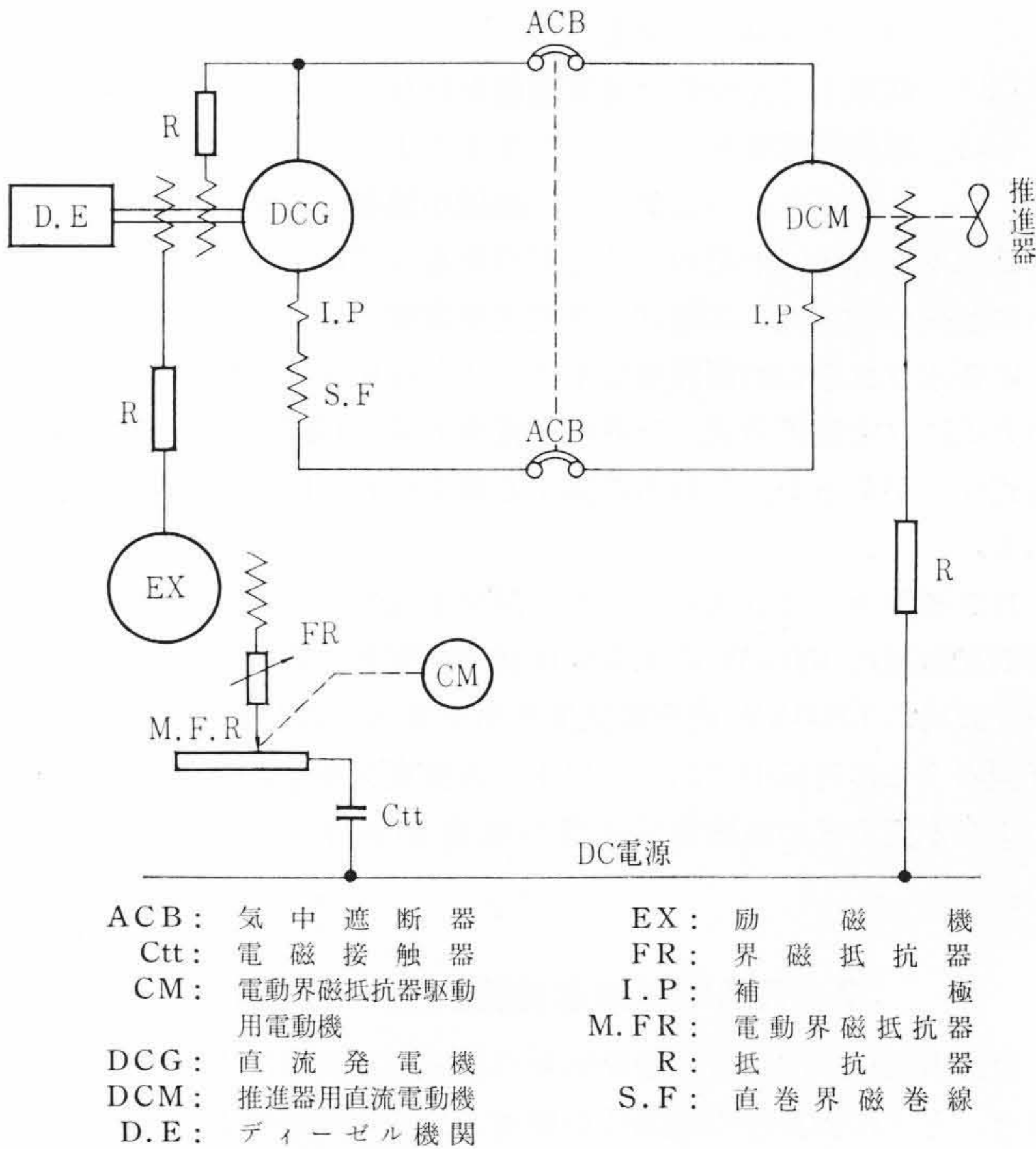
推進器の制御に対しては大別して定電圧方式と可変電圧方式とがあることを前記したが、推進器の動力が船内補機の動力に比較して小さい場合は、主発電機から推進器の動力をとる方が経済的であるので、定電圧方式を用いる場合が多い。この方式では推進器の速度制御は電動機の電機子回路に、直列にそう入した抵抗器の抵抗値を変えることにより、行なわれるので可変電圧方式に比較して、

- (1) 効率が悪い。
- (2) 安定な低速度が得られない。
- (3) 推進器の速度制御範囲を広くしようとすると装置が大きくなり不経済となる。

などの理由から現在では小容量の特殊な場合以外はほとんど用いら



第2図 定電圧方式の電気推進回路



第3図 三界磁発電機方式の電気推進主回路原理結線図

れていない。第2図は定電圧方式の電気推進回路の一例<sup>(5)</sup>を示す。

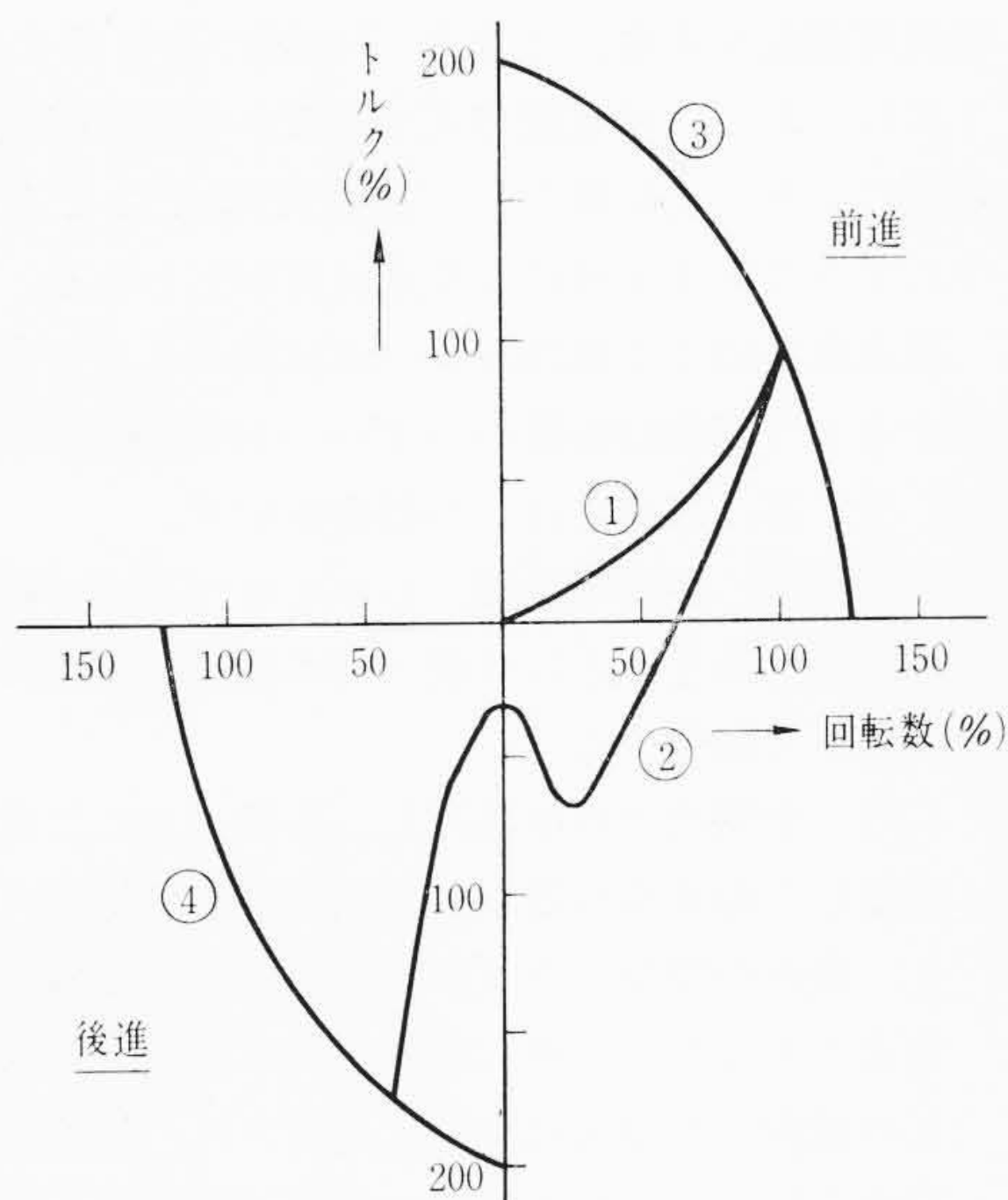
#### 3.2 三界磁発電機方式

可変電圧方式を電気推進に用いる場合は振動、取り扱い、保守の点から電気回路を簡単にし、かつ広範囲に円滑な推進器の速度制御

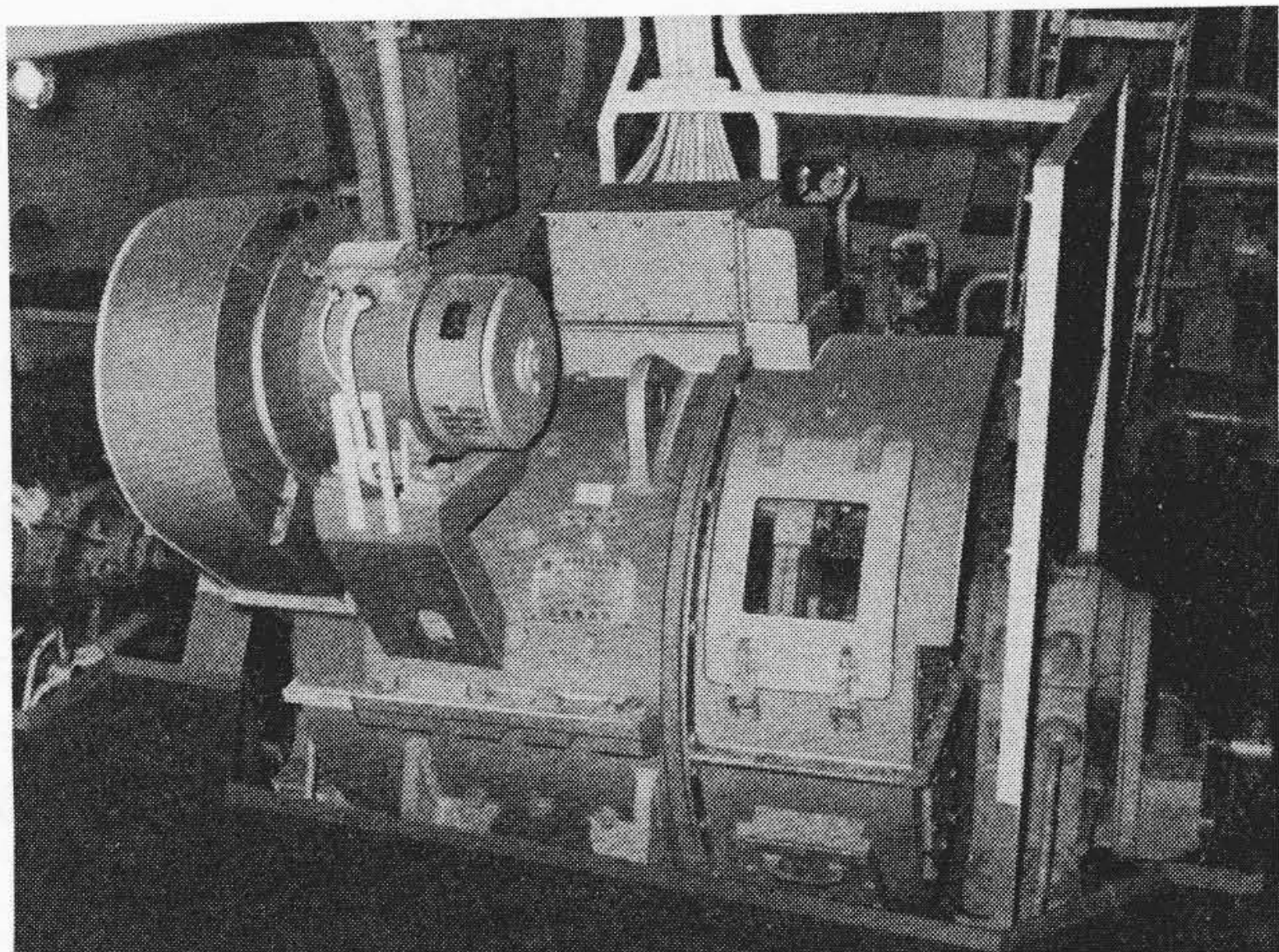
を行なう目的で三界磁発電機方式が多く用いられる。とくに砕氷船のように急激な負荷変動、低速で大きなトルクを必要とする場合には三界磁発電機方式が適している。

第3図は三界磁発電機方式の主回路原理結線図の一例を示し、第4図は電動機の回転数—トルク特性と推進器の回転数—トルク特性の一例を示したものである。

第4図からわかるように船が前進中、推進器が過負荷になると電流を自動的に制限しながら電動機速度を減速して運転を続ける。また推進器が空転した場合、三界磁発電機の無負荷電圧を適当に計画することにより推進器が過速しないようにすることができる。船を急速停止するためには推進器を逆転させる必要がある。この場合第4図曲線②からわかるように推進器は水から与えられている動力を吸収しないと前記したように原動機速度上昇をきたすことがある。



① 航行時の推進器特性  
② 船が全速力で航行中に推進器を逆転したときの推進器特性  
③④ 推進器用電動機が定格出力で運転したときの電動機正回転、逆回転特性  
第4図 推進器および推進器用電動機回転数—トルク特性曲線



第5図 400 kW 推進器用直流電動機

ので制御方式には運転上支障のないよう十分考慮する必要がある。

第5図は運輸省第四港湾建設局納の推進器用電動機の外観を、第6図は推進器用電動機制御盤の外観を示したものである。

推進器用電動機は操だ室、機関室のいずれからでも運転できるよう計画されているが、常時は操だ室からの遠隔操作により発電機他励界磁→発電機電圧→推進器用電動機速度を調整して速度計を監視しながら連続的に円滑な速度制御を行なっている。第7図は推進器運転オシログラムの一例を示したものである。

### 3.3 定電流制御方式

推進器が2台以上で大容量になると推進器用電動機台数および発電機台数が増加する。電気回路として、これらを経済的に結合するためには直列的にすることが好ましく、また推進器を単独に運転しなければならないことからして主回路には定電流を流すいわゆる、定電流制御方式が望ましい。

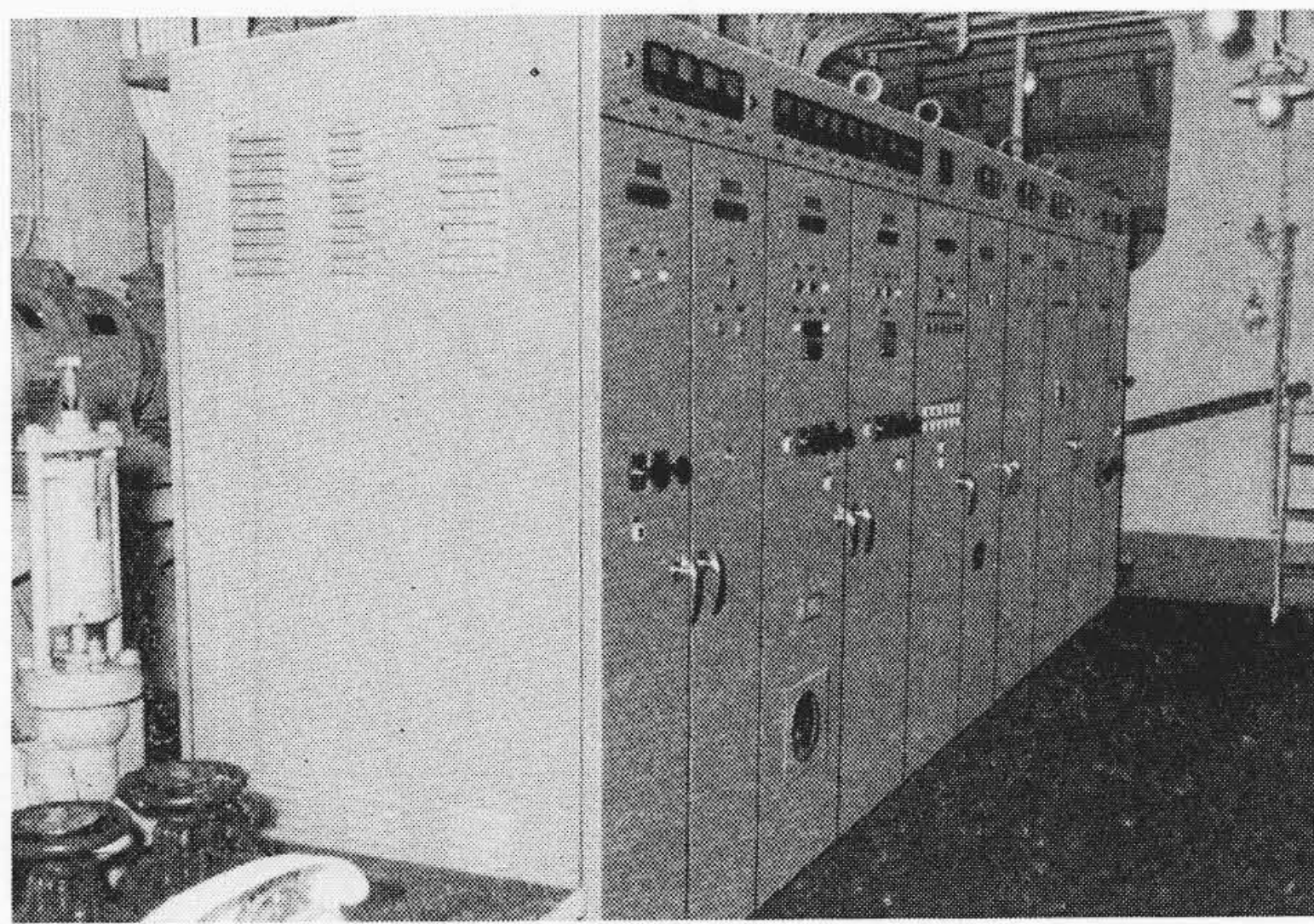
定電流制御方式を電気推進に用いた場合には次のような利点がある。

- (1) 推進器が複数台になった場合は同一主回路にそれぞれの推進器用電動機を結合することができるので電動機の動力源を経済的に計画できる。
- (2) 定トルク制御であるので推進器用電動機の飽和曲線を適当にすることにより電動機の過負荷を自動的に保護できる。
- (3) 発電機、電動機が複数台用いられる場合は簡単な切換装置を設置することにより故障回転機を主回路より切り離し運転を続けることができる。

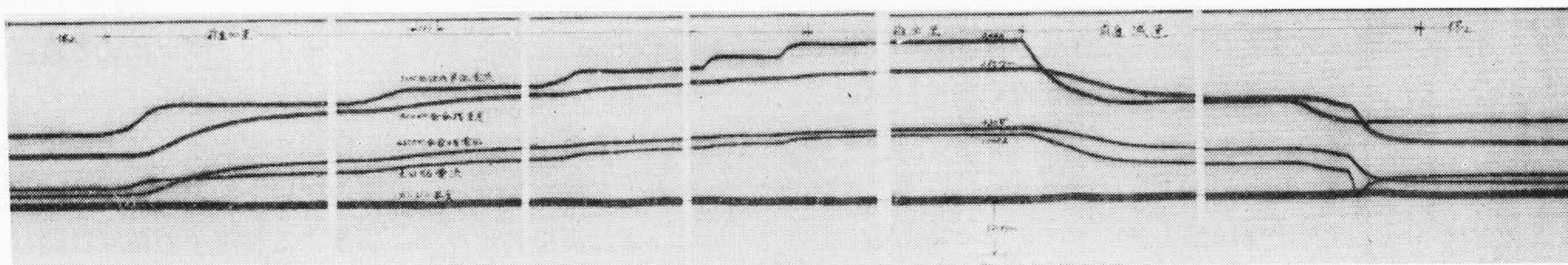
#### 3.3.1 設備の概要

第8図は運輸省第二港湾建設局納3,200 tドラグサクシオン式しゅんせつ船(三菱日本重工株式会社横浜造船所にて建造)で2台の推進器はそれぞれ900 kW 直流電動機により定電流制御方式で駆動された実施例である。

900 kW 推進器用電動機は2台の1,000 kW 直流発電機とそれぞれ交差接続され機関室の左右舷に設置されている。2台の直流発電機は20 kW 励磁機1台により、直流電動機はそれぞれ10 kW 励磁機により励磁されている。推進器用電動機は運転場所切換操



第6図 推進器用電動機制御盤



(停止→前進全速→停止の場合)

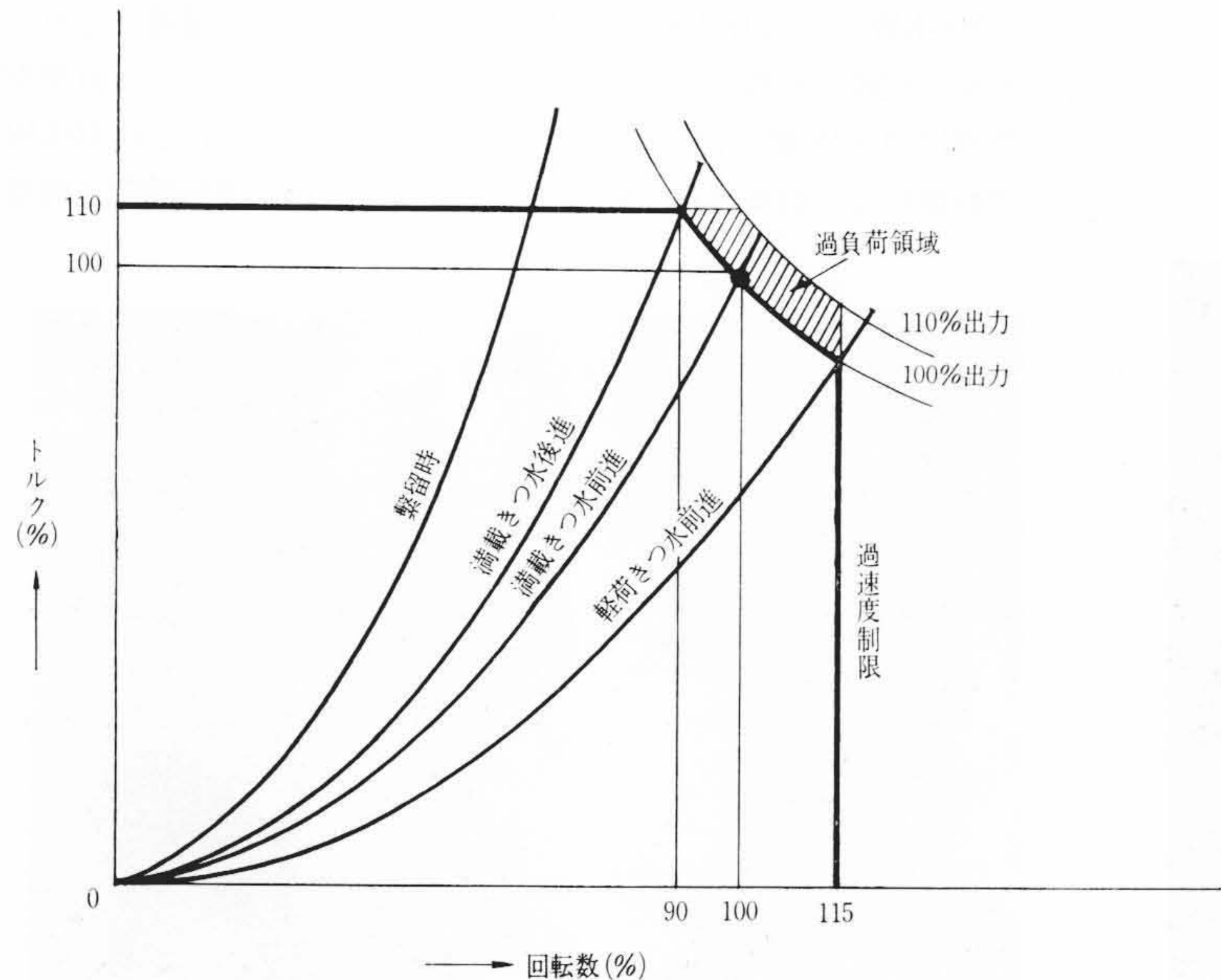
第7図 推進器運転オシログラム

第 1 表 ドラグサクソン式しゅんせつ船回転機仕様一覧表

| 用 途                 | 員 数   | 形 式              | 出力(kW) | 電圧(V) | 回 転 数<br>(rpm) | 定 格 | 備 考                                                      |
|---------------------|-------|------------------|--------|-------|----------------|-----|----------------------------------------------------------|
| 主 発 電 機             | 2     | 全閉内冷強制循環通風, 冷却器付 | 1,000  | 600   | 300            | 連 続 | 横浜MAN, 連続最大出力 1,800PS 360rpm<br>G 8 V 40/50AL ディーゼルにより駆動 |
| 推 進 電 動 機           | 2     | 全閉内冷強制循環通風, 冷却器付 | 900    | 600   | 300            | 連 続 |                                                          |
| しゅんせつポンプ電動機         | 2     | 全閉内冷強制循環通風, 冷却器付 | 450    | 300   | 220            | 連 続 |                                                          |
| 主発電機および推定電動機用励磁機セット | 2 セット | 開 放 防 滴 保 護 形    | 20     | 110   | 1,800          | 連 続 | 主発電機用励磁機                                                 |
|                     |       |                  | 1      | 110   |                |     | 主発電機制御用HTD                                               |
|                     |       |                  | 10     | 110   |                |     | 推進電動機用励磁機                                                |
|                     |       |                  | 10     | 110   |                |     | 定電圧電源用励磁機                                                |
|                     |       |                  | 50     | 440   |                |     | 定電圧駆動用誘導電動機                                              |
| しゅんせつポンプ励磁機セット      | 2     | 開 放 防 滴 保 護 形    | 10     | 110   | 1,800          | 連 続 | しゅんせつポンプ電動機用励磁機                                          |
|                     |       |                  | 1      | 110   |                |     | しゅんせつポンプ制御用HTD                                           |
|                     |       |                  | 15     | 440   |                |     | しゅんせつポンプ駆動用誘導電動機                                         |



第 8 図 3,200 t ドラグサクソン式しゅんせつ船



第 9 図 900 kW 推進器用電動機特性曲線

作を行なうことにより操だ室設置の推進器操作盤、機関室いずれからも運転することができる。以下に本船の回転機の構造、制御装置の概要について述べる。

3.3.2 回転機の仕様と構造

本船に積載された回転機の仕様は第 1 表に示すとおりである。推進電動機は一般の内燃機関による推進器と同様、10% 2 時間の過負荷耐量を有している。主発電機は特殊操作を行なう場合の

過負荷運転を考慮して 25% 2 時間の過負荷に耐えるようにしてある。定電流方式であるから主回路電流は主発電機により一定に保たれ、過電流になることはないの

で、すべて電圧上昇により過負荷がえられる。推進電動機は広範囲なきつ水状況のもとで定格出力を出せるよう定格回転数の +15~−10% 速度制御範囲を有している。第 9 図はその特性を示す。

主発電機、推進電動機、しゅんせつポンプ電動機の構造は本設備の主機として統一的に設計製作されているので一括して説明する。

(1) 全閉内冷形を採用し、各機ごとに二重パイプを使用した海水冷却器および強制通風用軸流ファンを備え、機内の空気を空気炉過器を通して強制循環させる方式<sup>(7)</sup>とした。このため外気からの油、ごみ、湿気などの機内への浸入は完全に遮断され、信頼性は著しく高められた。また下半部の床面下に没する部分は防水構造としローリング、ピッチングにより船底のビルジが機内に浸入しない構造となっている。

(2) 継鉄、エンドカバーなど固定子は二つ割構造となっており分解点検に便利である。

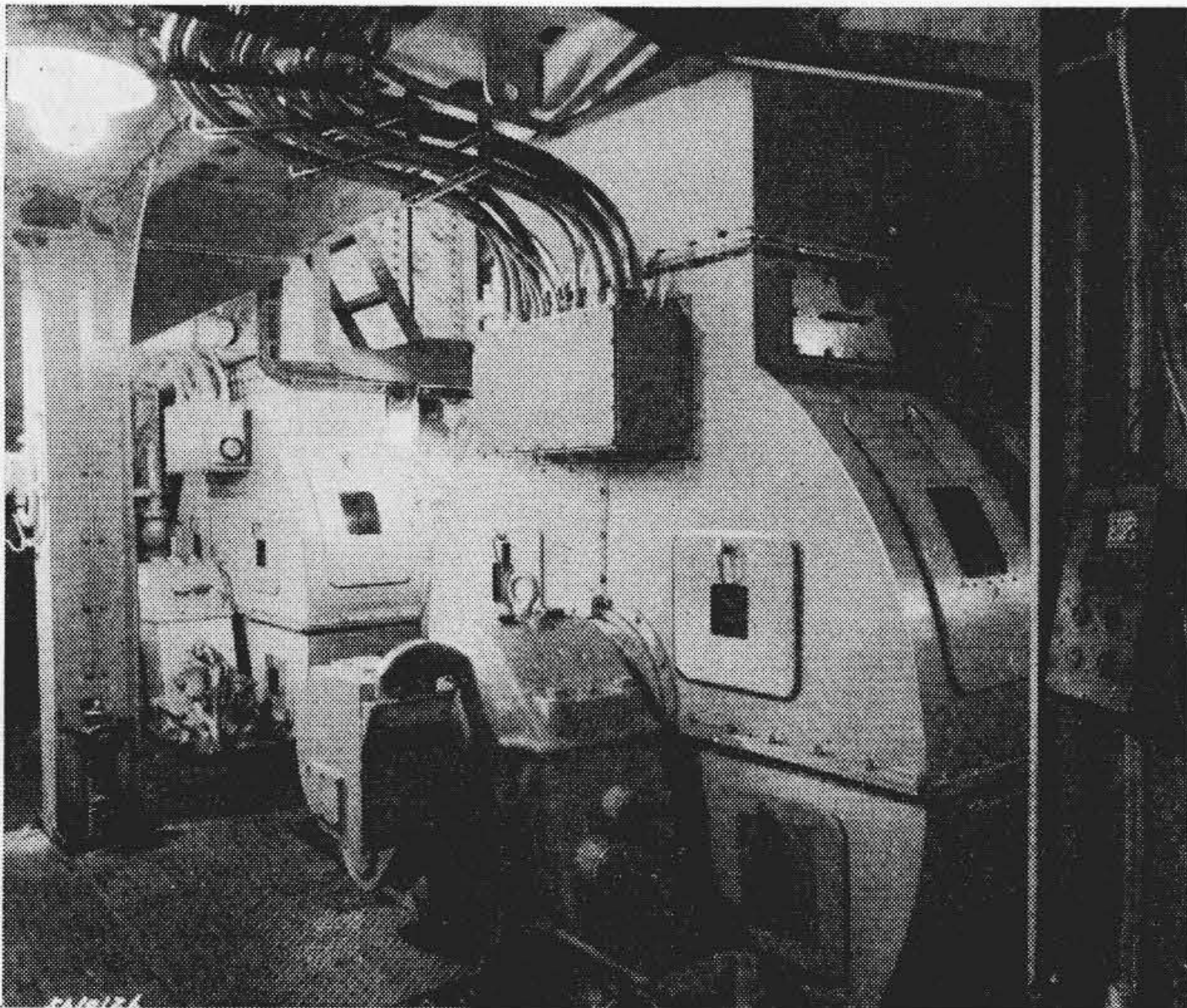
整流子部分には点検用窓および内部照明灯を設け、またブラシの調整、取り換え、整流子の研磨などのため整流子部エンドカバーは端子箱を分解することなしに取りはずし可能な構造<sup>(8)</sup>としてある。

また空気冷却器に近接した風胴には点検用窓および内部照明灯を設け点検に便ならしめた。

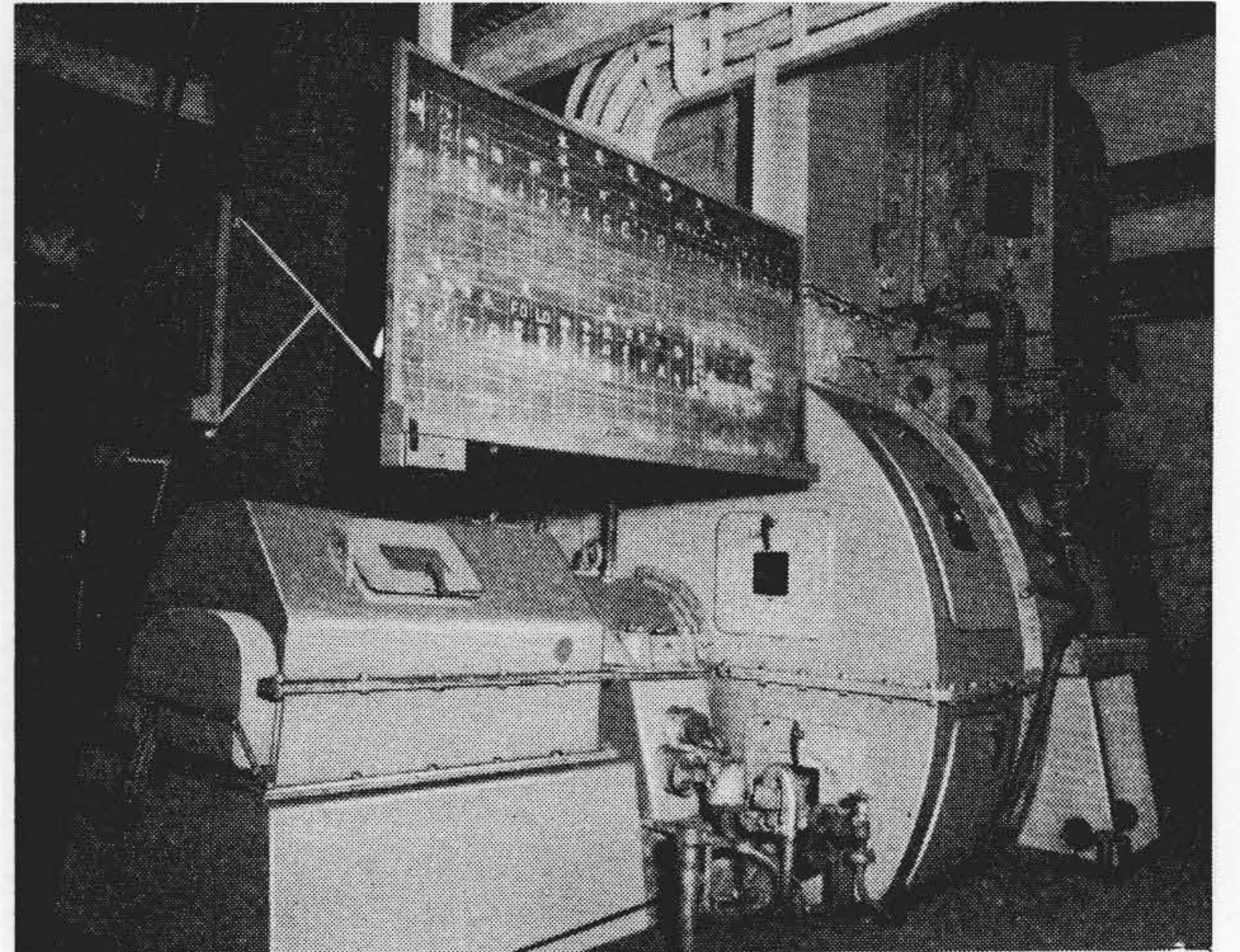
大容量機になると下半部のブラシはほとんど床面より下になるためブラシ取り替えは容易でないが、ブラシ保持器ロック装置をコロで支持する独得の構造<sup>(9)</sup>としたため、ロック装置の固定ボルトをゆるめると小さな力で簡単にまわり、ロック装置をまわしてブラシ取り替えが可能である。

(3) 軸受は、ローリング、ピッチングに対しても油漏れのない構造とし、強制給油方式であるが、給油系統の事故で万一給油が途絶しても暫時の給油を確保し軸受の焼損を防止するよう、オイルリングによる自己給油も併用している。

(4) 電機子巻線には均圧作用を電機子導体で併用させる重波巻方式を採用し、補償巻線の使用とともに整流性能向上に努めた。また直接整流作用に影響する整流子の精度に関しては、設計製作検査の面で特に意を用い、銀入り銅の使用、特殊ターニングプレス上における整流子丸め作業、超短波測定装置その他



第10図 1,000 kW 主 発 電 機



第11図 900 kW 推進器用電動機

による静的ならびに動的状態での整流子表面の偏心、ひずみ、凹凸などの摘出を行ない、これらの絶無を期している。

(5) 主発電機には、原動機の高速ならびに低速保護のための遠心力開閉器と、回転計用発信機が直結されている。

推進電動機には、過速度制限用速度発電機、通電中停止検出用特殊発信器、過速度保護用遠心力開閉器、および回転計用発信機が直結されており、第10図に見るような密閉構造の外箱で保護されている。

(6) そのほか、各主機には冷却空気用警報接点付温度計、固定子巻線用サーチコイル、軸受温度計、油流継電器、液流継電器、スペースヒータなどを備え保護警報の点で万全を期している。

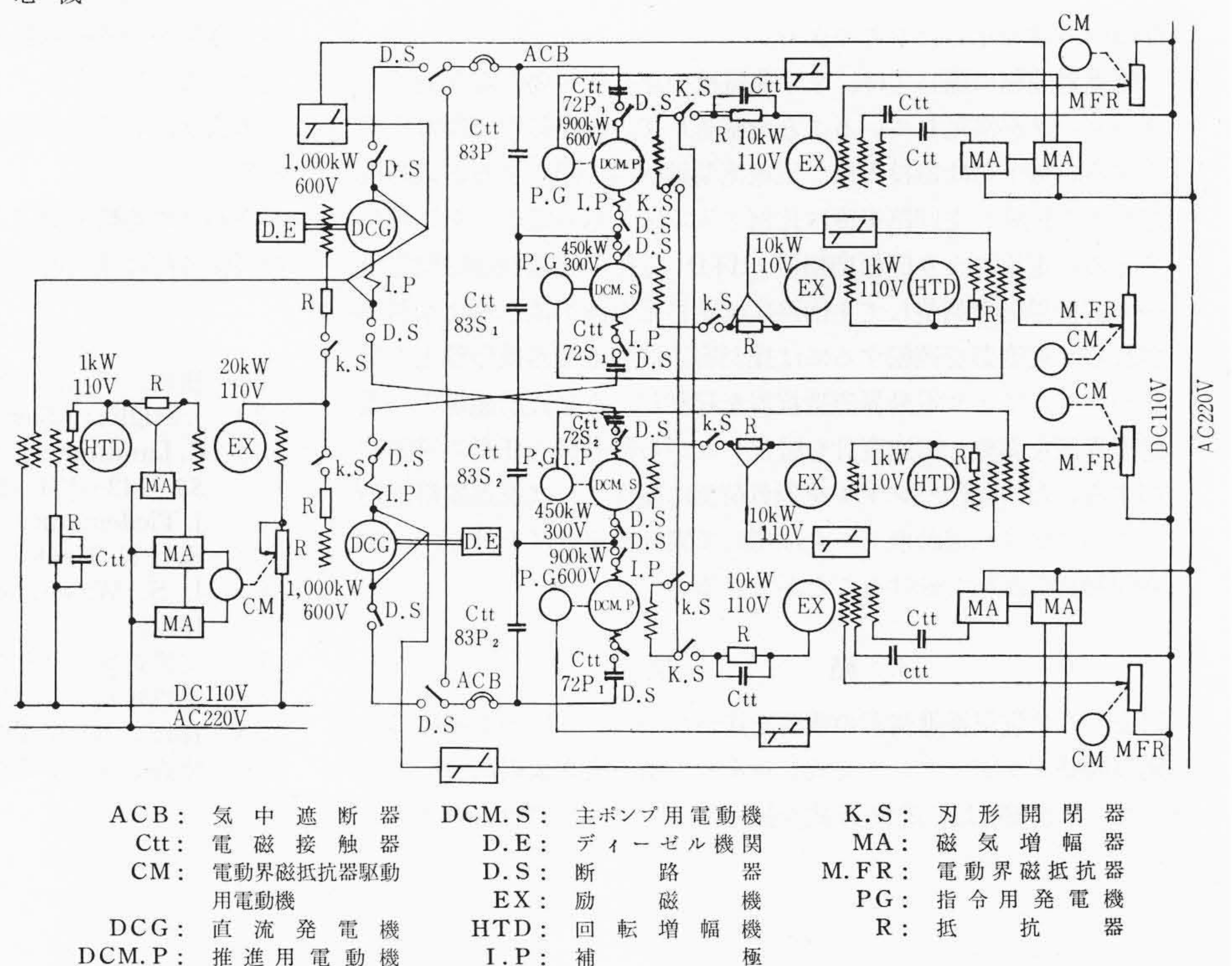
第10図は主発電機の外観を、第11図は推進器用電動機の外観を示したものである。

### 3.3.3 制 御 装 置

第12図は定電流制御方式の電気推進回路をもったドラグサクション式しゅんせつ船の主回路概略結線図<sup>9)</sup>を示したものである。

第9図からわかるように全速航行中、推進器が空転したときは定トルク制御を行なうと過速となることがあるので速度検出用発電機の電圧と基準速度に比例する電圧とを比較し、その差電圧を磁気増幅器→励磁機→推進器用電動機界磁を減磁し、その結果、電動機トルクは減じて推進器の速度上昇をおさえている。推進器を逆転するには操作ハンドルにより推進器用電動機の界磁を逆励磁する。この際、3.2項で述べたと同様に電動機には回生動力を発生するので回生動力を発電機出力の10%以下にするよう発電機の端子電圧を検出し、推進器用電動機の励磁を調整して原動機の過速を保護している。

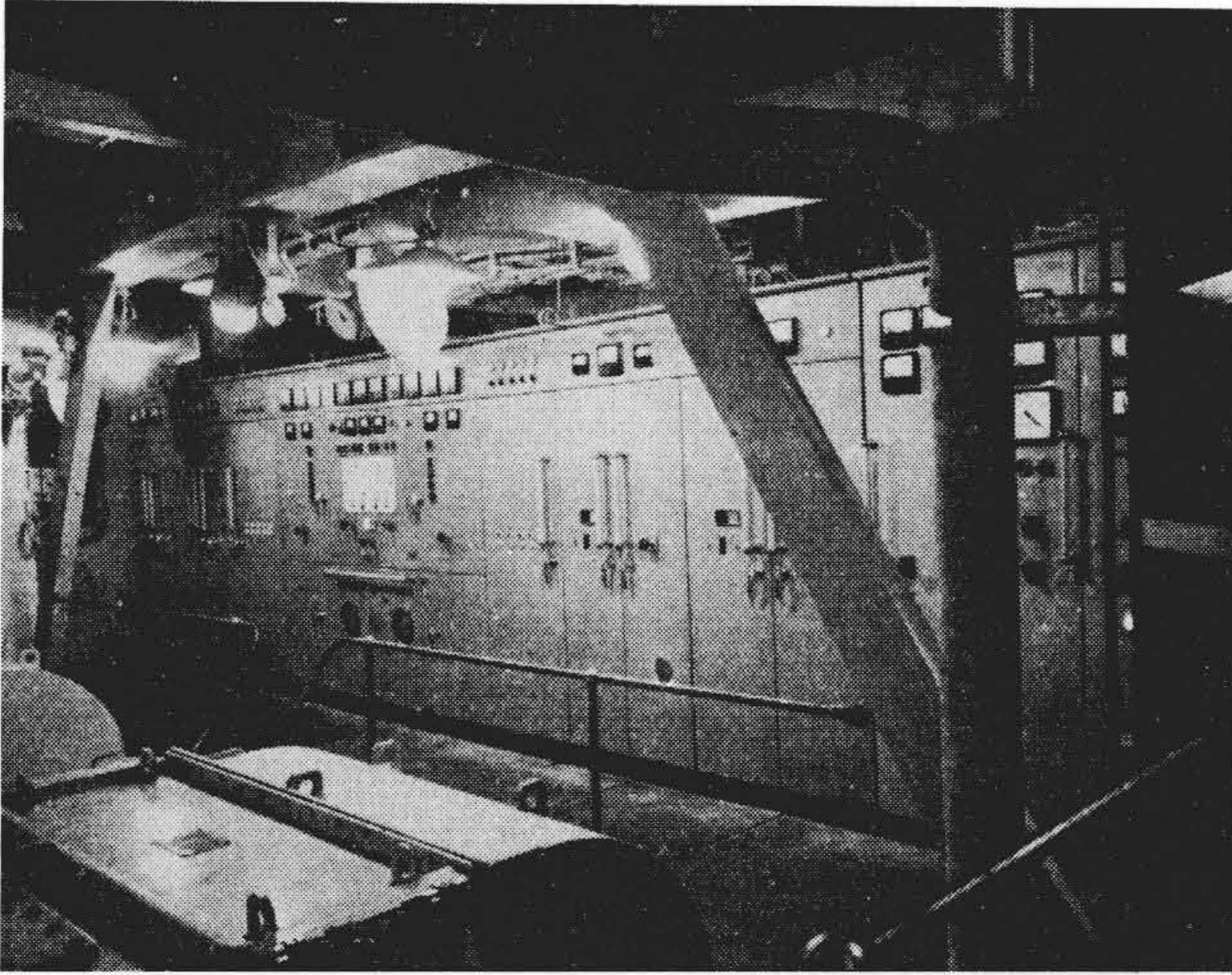
定電流制御方式を用いるため次のような考慮がはらわれている。



第12図 ドラグサクション式しゅんせつ船用主回路概略結線図

- (1) 電動機が一定時間以上、停動した場合は特殊継電器により主回路電流を下げて電動機を保護する。
- (2) 電動機が過速になった場合は遠心力開閉器により主回路気中遮断器を開く。
- (3) 2台の発電機を使用中になんらかの原因で1台の原動機がトルクを発生しなくなった場合、主回路電流により原動機は逆転されるので遠心力開閉器により原動機速度が一定値以下になったら気中遮断器を開いて原動機の逆転を防止する。
- (4) 船舶の主要機関であるため1台の推進器用電動機、1組の電動機励磁機がそれぞれ故障した場合でも断路器の切り換えにより他の1台の電動機、1組の励磁機で運転を続けることができる。なお1台の直流発電機が故障した場合も同じように故障直流発電機を主回路から切り離し、他の1台の発電機で運転を続けることができるよう計画されている。

第13図は推進器用電動機制御盤の外観を、第14図は推進器操



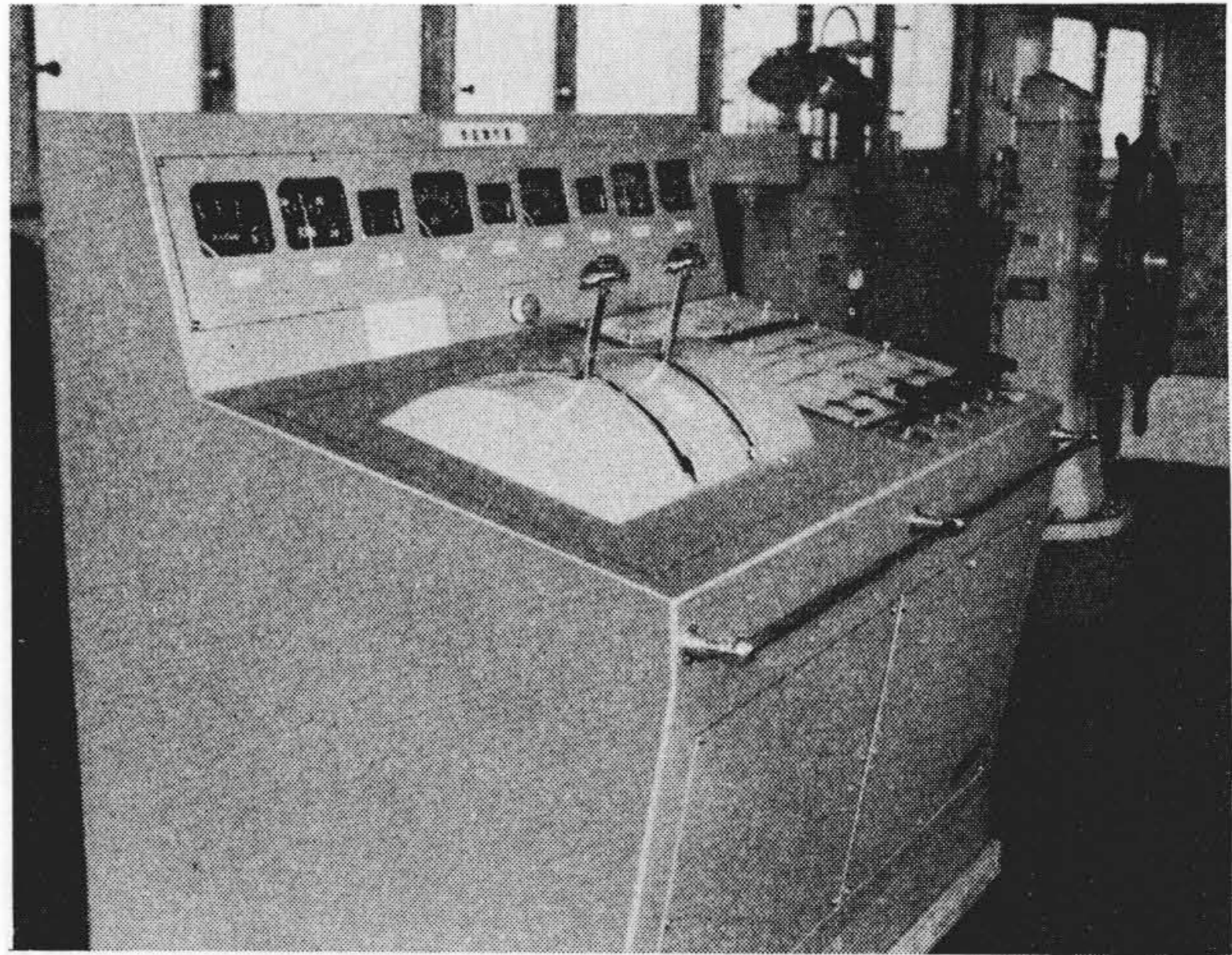
第 13 図 推進器用電動機制御盤

作盤の外観を示したものである。

推進器運転に際しては、まず発電機の運転に必要な電氣的インターロックが満足していることを確認して主回路気中遮断器を投入する。気中遮断器投入後、定電流制御回路を閉成すると電動機電機子を短絡し主回路電流に比例する電圧と基準電圧とを比較してその差電圧により回転増幅器 (HTD) 電圧→発電機励磁機電圧→発電機界磁を調整して主回路には定格定電流が流れるよう制御される。推進器を運転するには操だ室設置の推進器操作盤上の操作ハンドルにより電動界磁抵抗器を起動し、電動機励磁電圧→電動機界磁を調整して速度計を監視しながら電動機を任意に遠隔制御する。なお操作ハンドルを過負荷側に操作すれば推進器用電動機は過励磁され電動機トルクは増して電動機速度は上昇し、一定時間過負荷運転を続けることができる。

#### 4. 結 言

以上、直流電気推進装置の概要を述べたが、とくに運輸省第二港湾建設局納ドラグサクション式しゅんせつ船の推進装置について詳述した。本装置は定電流方式を採用したわが国最初のものである



第 14 図 推進器操作盤

が、今後かかる特殊船には次第に直流電気推進装置が設置される気運にある。

本論文がいくぶんでも今後この種技術開発の参考になれば幸いである。

終わりに運輸省第二、第四港湾建設局、関係造船所、日立製作所の関係各位に多大のご指導をいただいたことを深く感謝する。

#### 参 考 文 献

- (1) 横田, 中山, 二瓶, 本間: 日立評論 43, 521 (昭 36-4)
- (2) J. Stiglitz: Siemeus Review, 221~228 (1962. July)
- (3) C. Landtman: Jahrbuch der Schiffban Tech. Gesellschaft, 55, 142~174 (1961)
- (4) J. Tiedemaun: Schiff. u. Hafen, 887~897 (1958. Jan)
- (5) E. L. N. Towle: M. U. Gazeffe, 232~247 (1958. Sept)
- (6) J. S. Wasmund: T. A. I. E. E., Part. 3, 135~140 (1954. July)
- (7) 実用新案: 昭 37-12307
- (8) 実用新案: 昭 37-7418
- (9) 特許: 昭 37-14355
- (10) 特許: 昭 37-9628~9629

### 第 26 卷 日 立 第 3 号

#### 目 次

- 随 筆.....那 須 良 輔
- 奥 只 見 の 大 鳥 発 電 所 を 見 る
- 道 路 用 ス イ ー バ
- 羽 田 モ ノ レ ー ル 線 工 事 に 活 躍 す る
- オ ー プ ン シ ョ ー ケ ー ス
- 日 立 ハ ロ ッ ク ス 点 火 プ ラ グ
- 新 学 期 か ら テ ー プ レ ッ ス ン で 行 こう !
- キ ー テ レ ホ ン の 大 容 量 化

- フ ェ ラ イ ト の 話
- 明日への道標「五井火力発電機」
- 日立ハイライト「エレベーター, エスカレーター」
- 電線百話「高圧引下線の話」
- 新しい照明施設「東北電力揚川発電所」
- 日 立 だ よ り
- 読 者 の 声 「光るラジオハイフニックジュニア」

発行所 日 立 評 論 社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地  
振替口座 東京 71824 番  
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地  
振替口座 東京 20018 番