

中国電力株式会社水島火力発電所納
160,000 kVA タービン発電機
160,000 kVA Turbine Generator for Mizushima Thermal Power Station,
Chugoku Electric Power Co., Inc.

渡 辺 博*
Hiroshi Watanabe

内 容 梗 概

日立製作所では昭和 36 年 4 月に中国電力株式会社水島火力発電所用 160,000 kVA 水素冷却タービン発電機を完成した。過去にも記録的大容量機を製作したが、地理的条件で 3,000 rpm 機に限られていたが、ここに大容量 3,600 rpm 機を製作したことは意義深いものがある。

固定子は過去の実績および経験にもとづき漸新な設計を採用し、方向性ケイ素鋼板の使用により高能率なることが実証された。

工場試験の結果は、振動も僅少であり、さらに大形化のすう勢にあるタービン発電機の製作について十分の態勢を整え得るに至った。

1. 緒 言

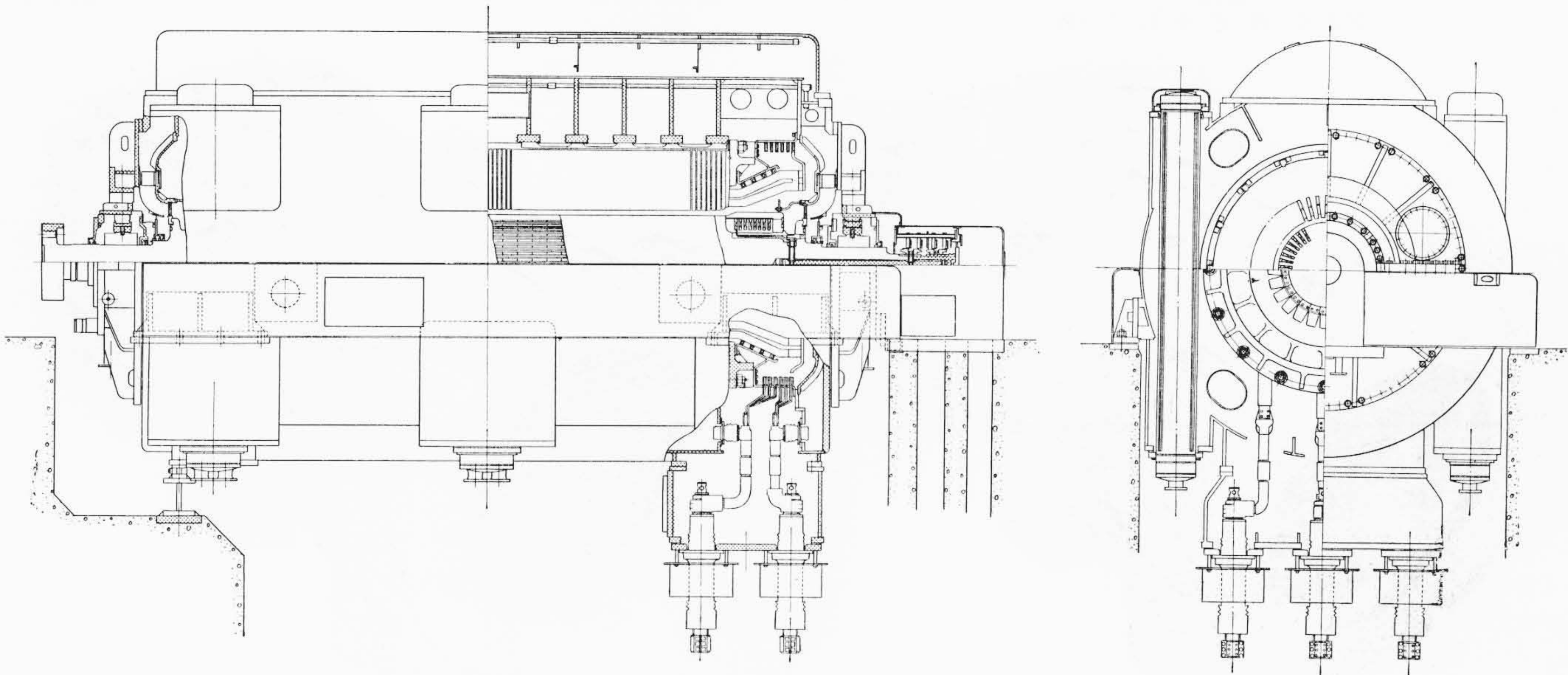
電力需要の急増から火力発電設備が各地に建設されつつあり、しかも単機容量はますます増大するすう勢にある。単機容量が増大すればするほど従来に増して高能率、高信頼度が強く要望される。日立製作所ではすでに多数の記録的水素冷却大形発電機を完成した豊富な経験を有しておりながら、地理的条件から 3,000 rpm 機が多かったが、今回 60 $\sim$ 機として始めての水素冷却機、160,000 kVA を完成した。本機の完成はさらに大容量化の発展過程にある 3,600 rpm 機の設計製作の貴重な実績として意義深いものである。

本機は従来の発電機と類似しているが、合理的設計の固定子わく、新しい通風方式の採用によって軽量にまた一体構造に完成したものである。さらに固定子、回転子構造の細部にわたって種々の新しい設計が採用されている。現在本機よりさらに大容量の 3,600 rpm 機を製作中であるので、本機の記録もまもなく更新されるが、ここに本機の概要を述べて参考に供する次第である。

2. 発電機の仕様

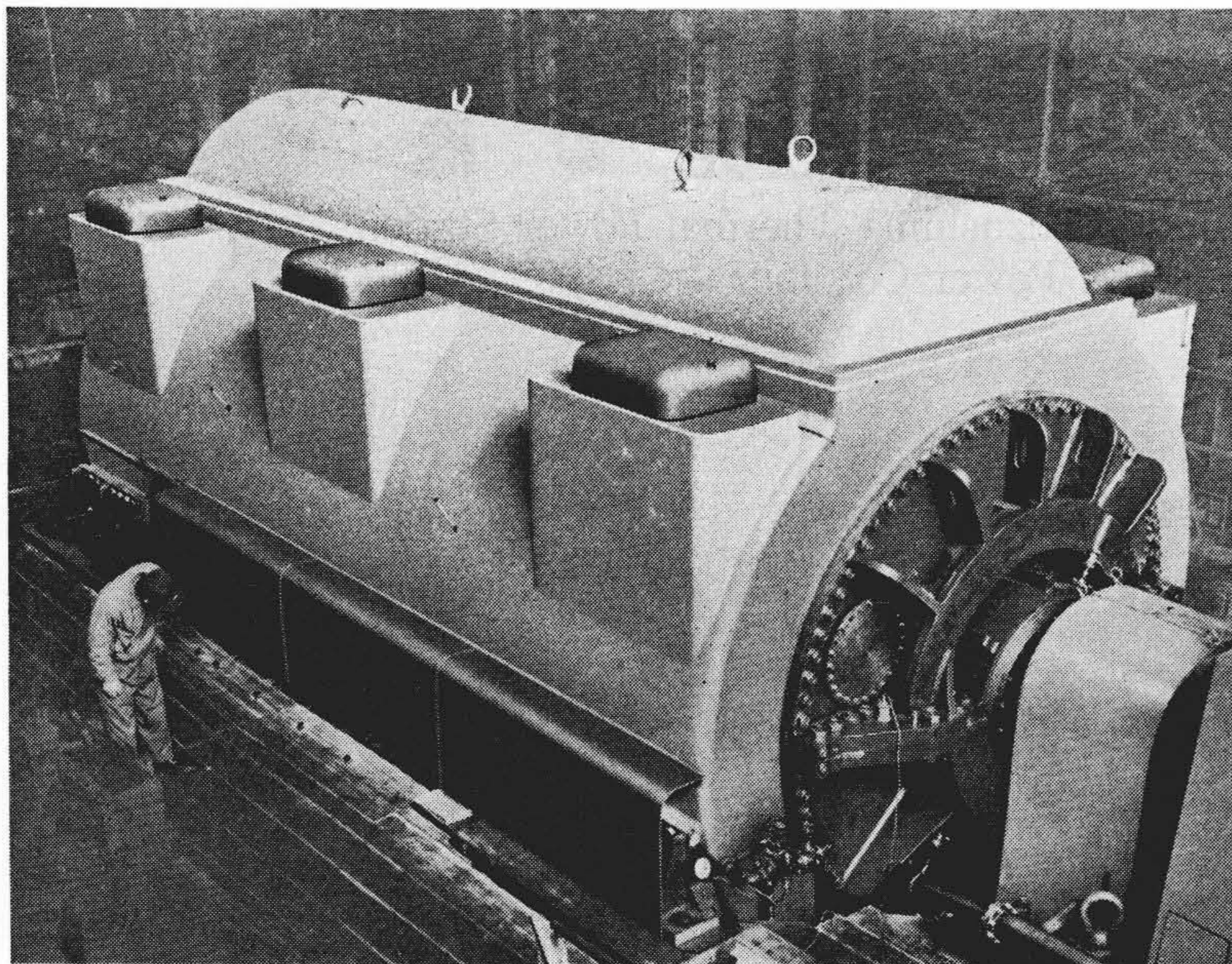
発電機容量 水素圧力 0.05 kg/cm² にて 128,000 kVA

水素圧力	1 kg/cm ² にて	147,000 kVA
水素圧力	2 kg/cm ² にて	160,000 kVA
力 率		0.85 (遅れ)
出 力	水素圧力 0.05 kg/cm ² にて	108,800 kW
	水素圧力 1 kg/cm ² にて	125,000 kW
	水素圧力 2 kg/cm ² にて	136,000 kW
電 圧		15,000 V
回 転 数		3,600 rpm
周 波 数		60 $\sim$
中 性 点		変圧器接地
接 続		二重星形接続 6 本口出
励 磁 電 圧		375 V
励 磁 機	出 力	450 kW
	電 圧	375 V
	回 転 数	900 rpm
	駆 動 方 式	誘導電動機により駆動
誘導電動機	出 力	500 kW
	電 圧	3,300 V
	回 転 数	900 rpm



第 1 図 160,000 kVA 発 電 機 断 面 図

* 日立製作所日立工場



第2図 試 運 転 中

3. 発電機の構造

本機は固定子、回転子ともに普通冷却式であり、従来の豊富な設計製作の経験が各所に採用されている。高能率であり、かつ、簡単な構造が採用されて保守点検も容易である。以下本機の構造を説明する。

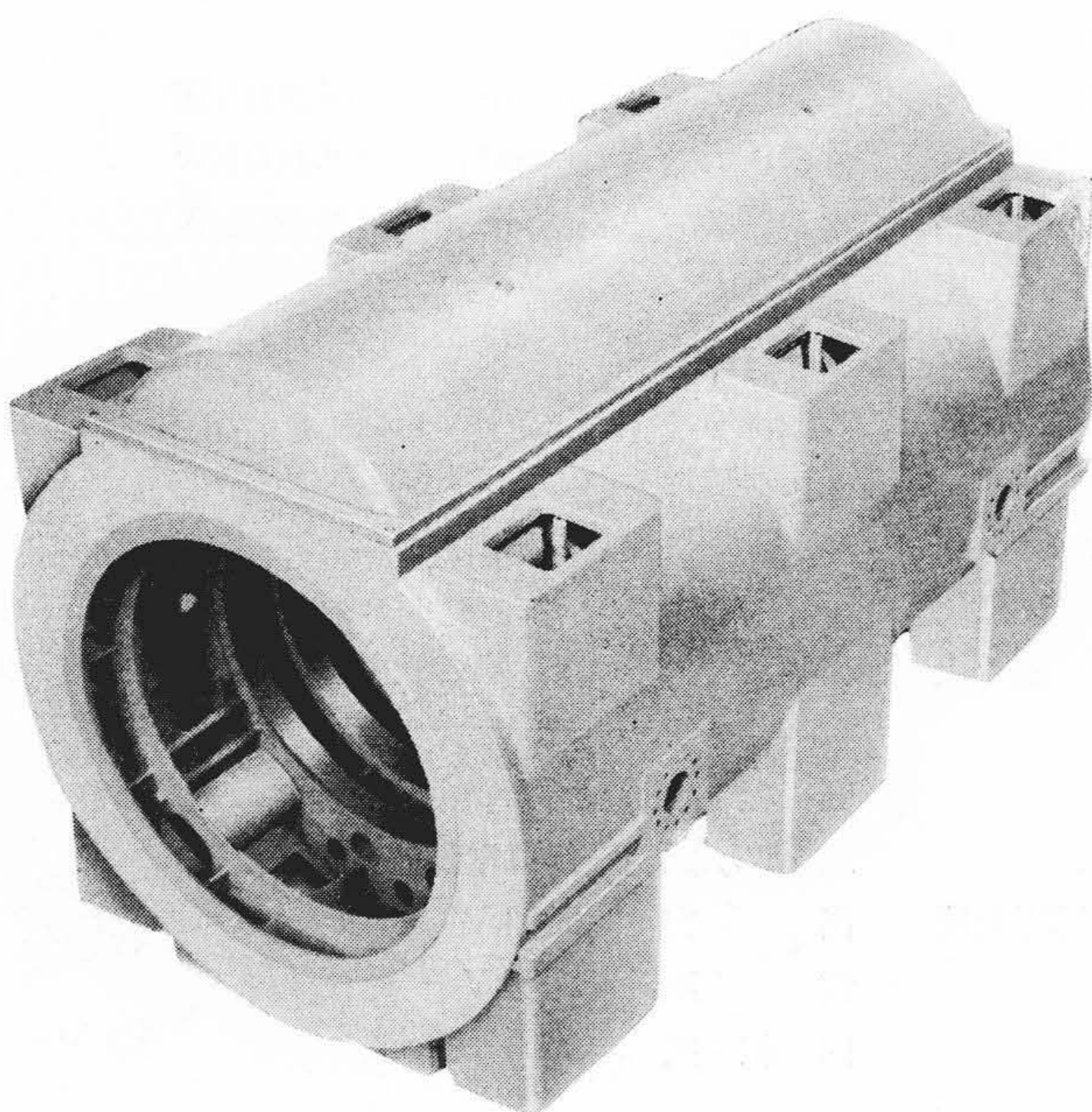
3.1 固 定 子

第1図に組立断面図を示す。基本的な構造は従来製作された160,000 kVA 3,000 rpm, 224,000 kVA 3,000 rpm機に類似している。固定子わくはがん強な鋼板の熔接構造からなり、この両端部および中央部に6本の水素冷却器が堅置されている。固定子わくの両端の端板はブラケットとなっておって軸受および軸密封装置を備えており、ブラケット自身がまた気密わくの一部を形成している。

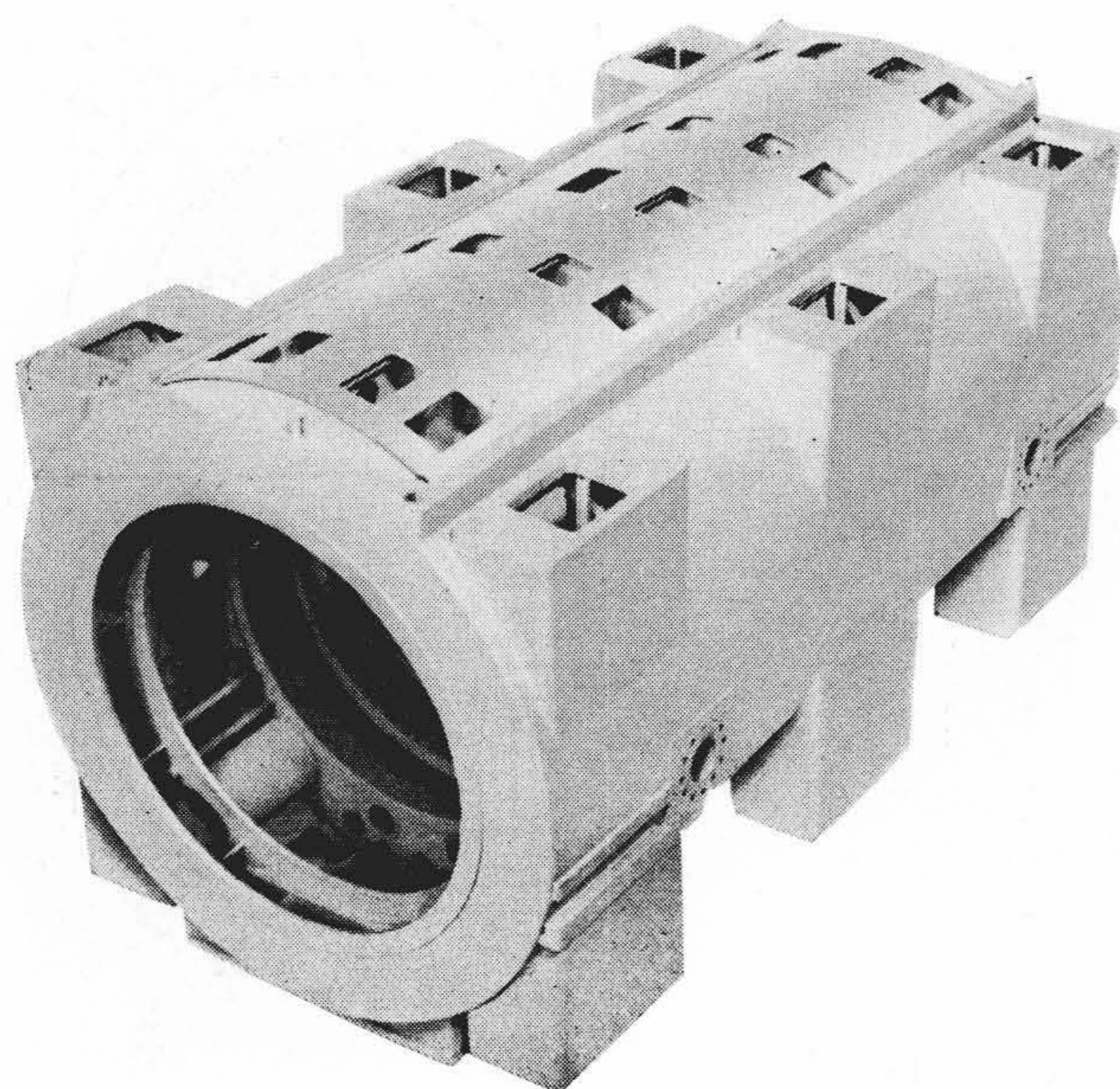
隣接の日立港からは、すでに224,000 kVA, 3,000 rpm機の固定子を一体構造で製作し海路で輸送したことがあり、本機の固定子はより軽量化しているもので、一体構造で完成し海路現地へ輸送する。

第2図に工場試験中の本機の外観を示す。第3図は本機固定子わくの模型であるが、頭頂部の突出部はガスの通風路となっており、水素冷却器より送られる冷却ガスを発電機中央部に送り込むための風洞を形成している。第4図は模型の風洞を除いたもので冷却ガスの中央部への入気室は、頂部側板の通風孔で連絡していることを示している。第5図は頂部側板を除いて内部構造を示している。固定子わくは入気室および排気室に区割されており、頭頂部から各入気室に送りこまれた冷却風は鉄心や線輪を冷却し、6本の水素冷却器を並列に通過して循環をくり返す。この通風方式をスケルトンでわかりやすく示したものが第6図であるが、これによりガス循環の状況が容易に理解されよう。複式分布通風方式の採用は本機のように長大となるにもかかわらず、冷水素ガスが直接中央部に送りこまれるので、長さ方向の各部温度上昇がほぼ均一に保たれている。これらの水素ガスの循環は回転子の両端に取り付けられている強力な軸流ファンによって行われている。

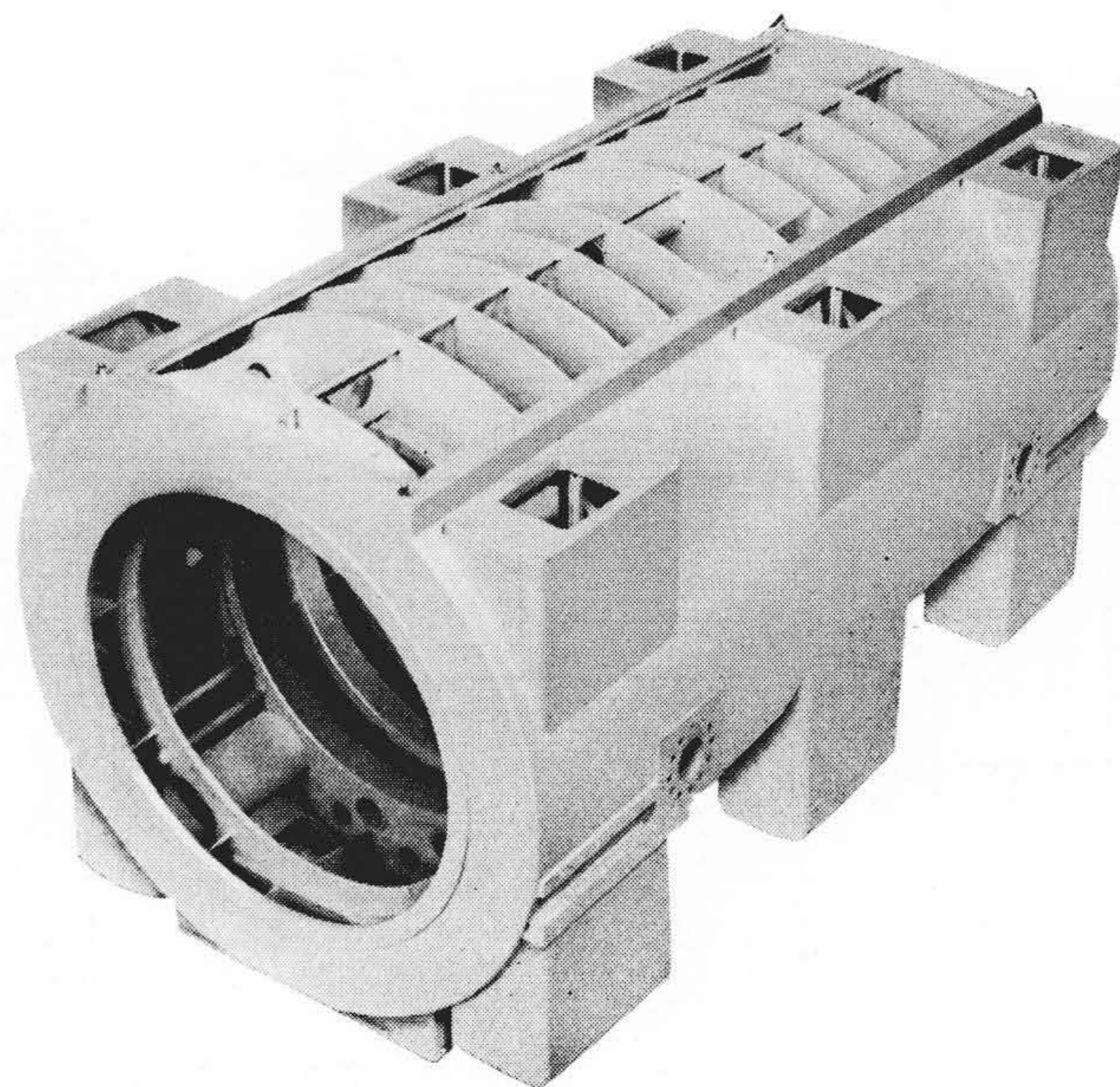
固定子鉄心はキーバーを介して軸方向に取り付けられたスプリングバーによって可とう支持されており、鉄心の二倍周波数の振動を外部基礎に伝えないように支持している。鉄心とキーバーは軸方向



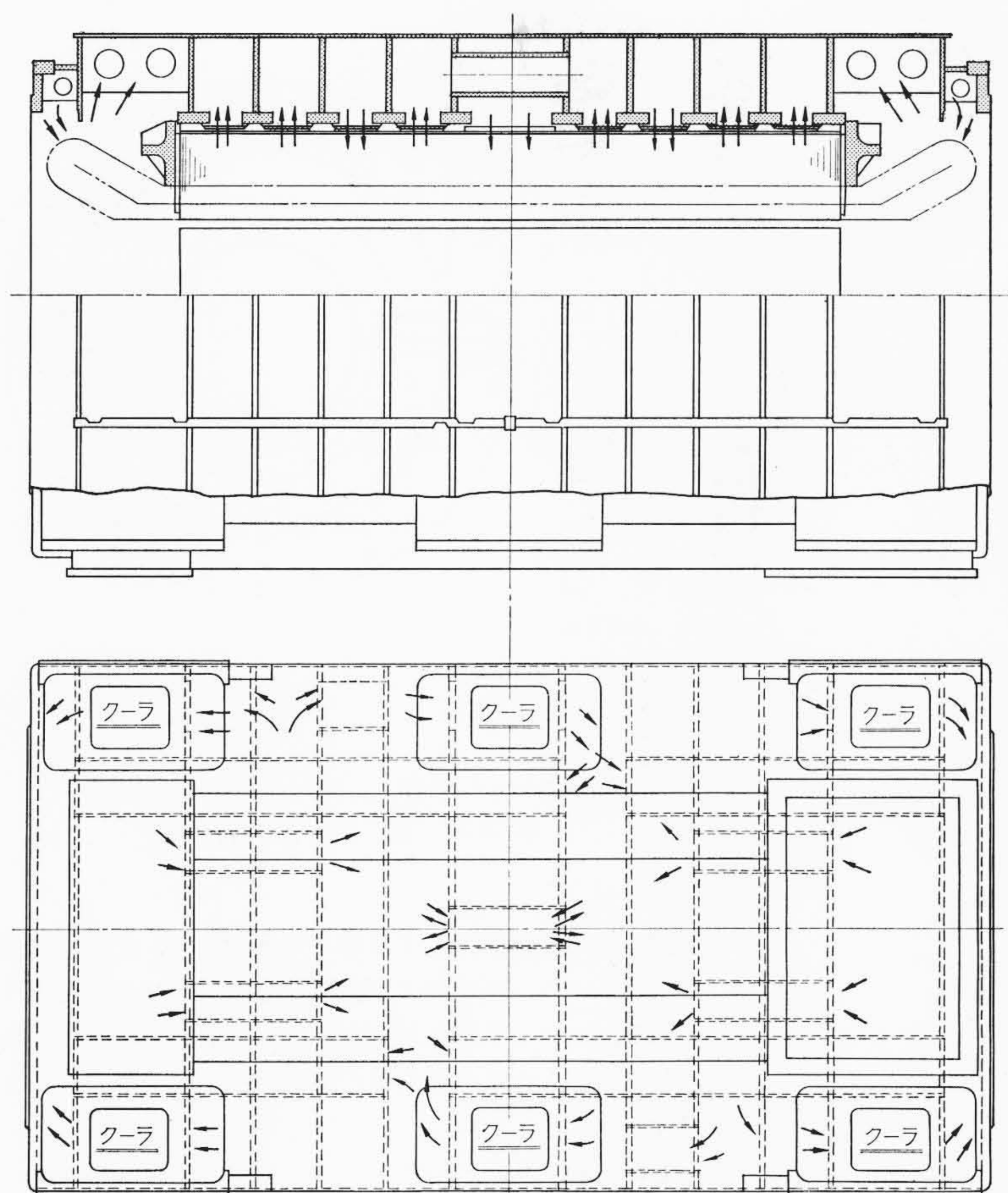
第3図 固 定 子 わ く (模 型)



第4図 固 定 子 わ く (模 型)



第5図 固 定 子 わ く (模 型)

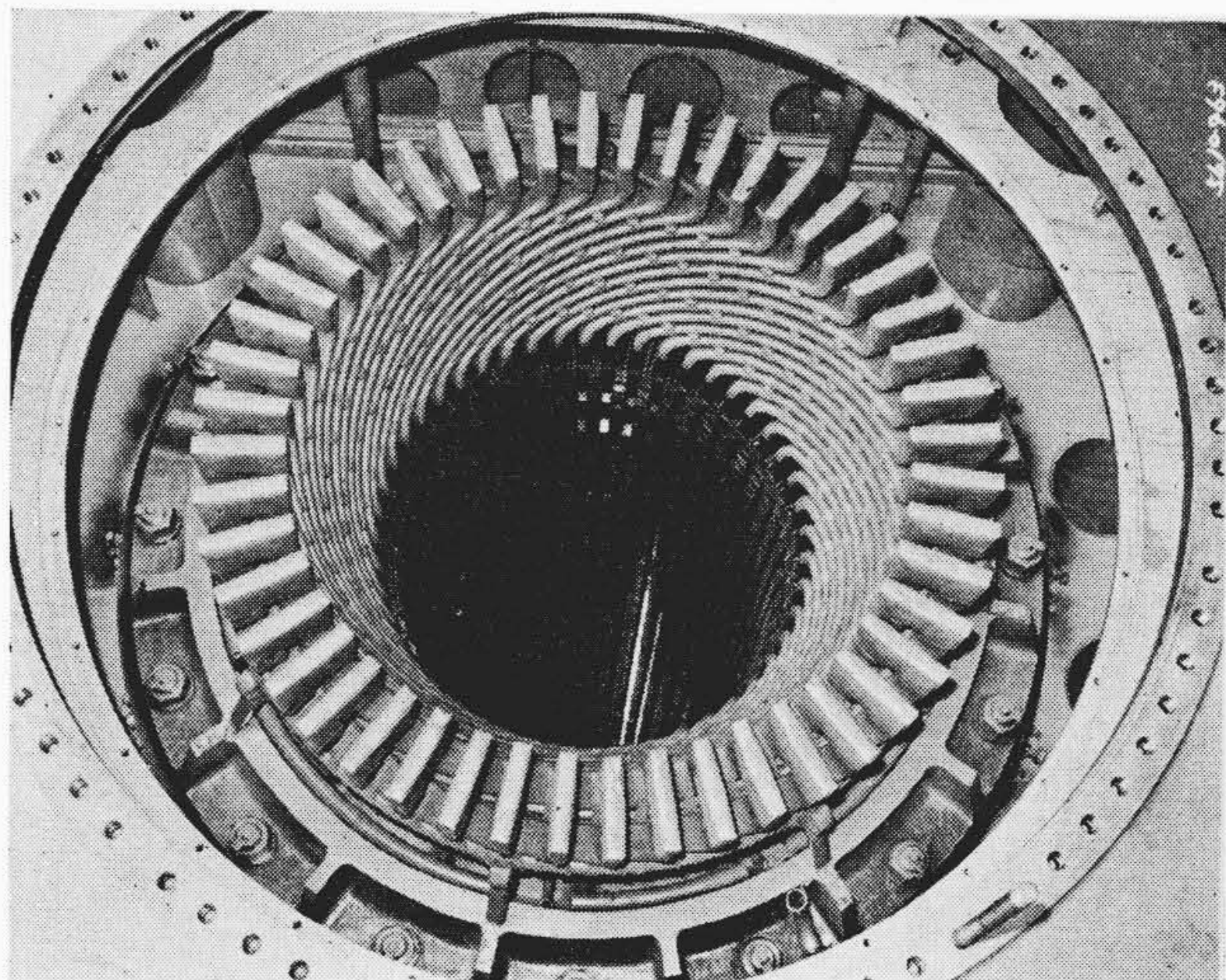


第6図 通風説明図

3箇所圧縮環で締め付けられ、鉄心とキーバーの相対的動きを防止している。

固定子鉄心には方向性ケイ素鋼板を使用した。すでに方向性ケイ素鋼板の使用による鉄損失および鉄心部の磁化特性の性能向上は明らかにされており、本機も鉄心重量、寸法が大幅に軽減することができた。大容量タービン発電機に方向性ケイ素鋼板を使用することは、重量、寸法の軽減および性能の向上など利点があり、材料も国産で入手容易になったことは、タービン発電機がますます高性能、大容量化のすう勢にある現在、非常に喜ばしいことである。

発電機の大容量化に伴い、電機子反作用が大となり固定子線輪端部の漂遊負荷損の占める割合が全損失に比して大きくなるが、この



第7図 固定子線輪

漂遊負荷損を減少させるため、鉄心端部の歯押え金具や鉄心締付金具あるいは線輪ささえ金具には非磁性金属を使用している。さらに鉄心両端部の歯先端部には細みぞを切込んで、この部分に集中する漂遊磁束により歯部の過熱を防止するよう考慮している。

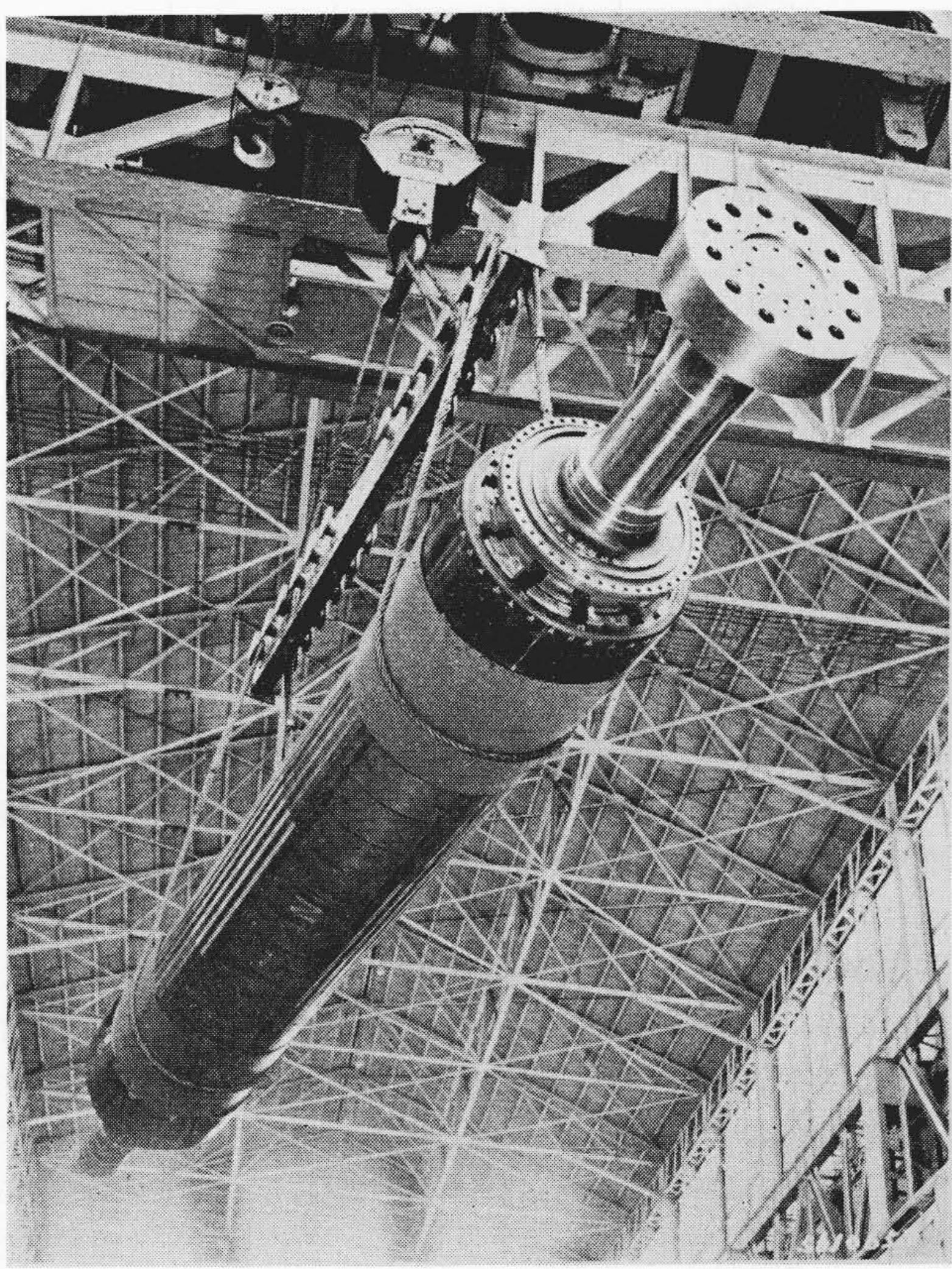
3.2 固定子線輪

固定子線輪は1ターンコイルを採用している。素線はスロット内で完全に転位して渦電流や、表皮作用による損失の増加を防止している。

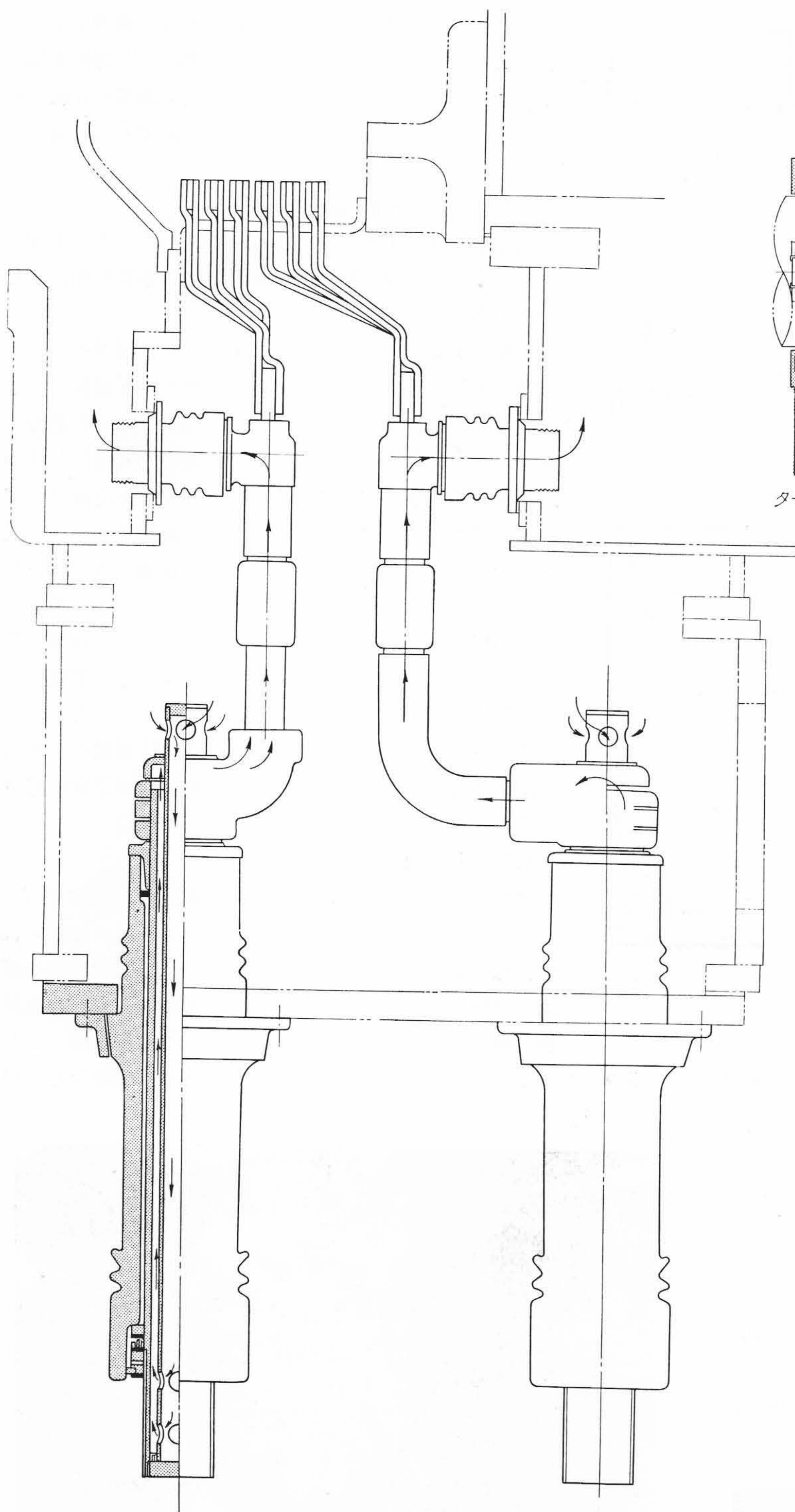
線輪の絶縁にはマイカを主要材料とし、SLSワニスを真空注入したものである。日立製作所が高圧線輪用として開発し、たゆまざる研究によって採用したこの絶縁方式は、すでに多くの大容量タービン発電機に使用し機械的、電気的特性のすぐれたものであることが立証されている。SLSワニスは重合反応によって硬化するので、反応中なら揮発分も発生しないので絶縁層に空気を残すことが本質的に少なくなり、このためコロナの発生はきわめて少ない。ワニス自体としても電気的、機械的特性にすぐれた熱硬化性のもので、硬化後もその柔軟性が失われず、マイカを主体とする絶縁層に注入してもこの特性が生かされて、負荷増減に伴う固定子線輪の加熱冷却による導体の膨脹収縮に対しても絶縁層が完全に追従することができる。

3.3 回転子

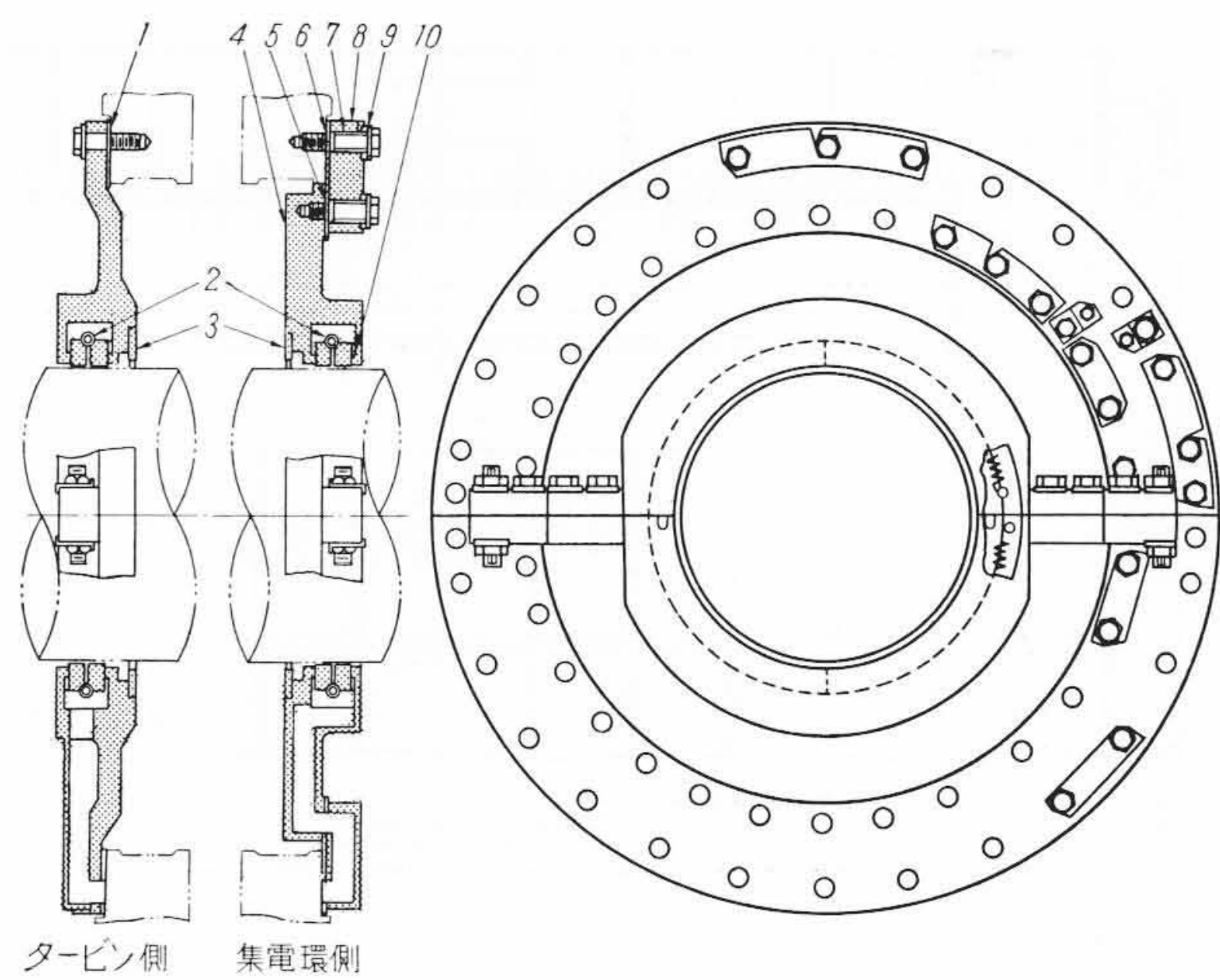
回転子軸材はNi-Mo-V鋼の単一鋼塊で、機械的性質、磁気的特性を超音波探傷試験、コアドリルによる材料試験、磁気試験、各部の組織など詳細かつ厳密な試験で確認し合格したものである。このほか軸材には加熱計測試験を施行し、残留応力そのほかの原因で温度上昇とともに曲りを生じるかどうかを調査したが、この試験にも問題なく合格している。



第8図 回転子



第9図 直接冷却式がい管



- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1. 気密パッキング | 6. 気密パッキング (外側) |
| 2. コイルスプリング | 7. 絶縁筒 |
| 3. 油切り | 8. ケーシング外環 |
| 4. シールケーシング | 9. 絶縁ワッシャ |
| 5. 気密パッキング (内側) | 10. シールリング |

第10図 軸密封装置

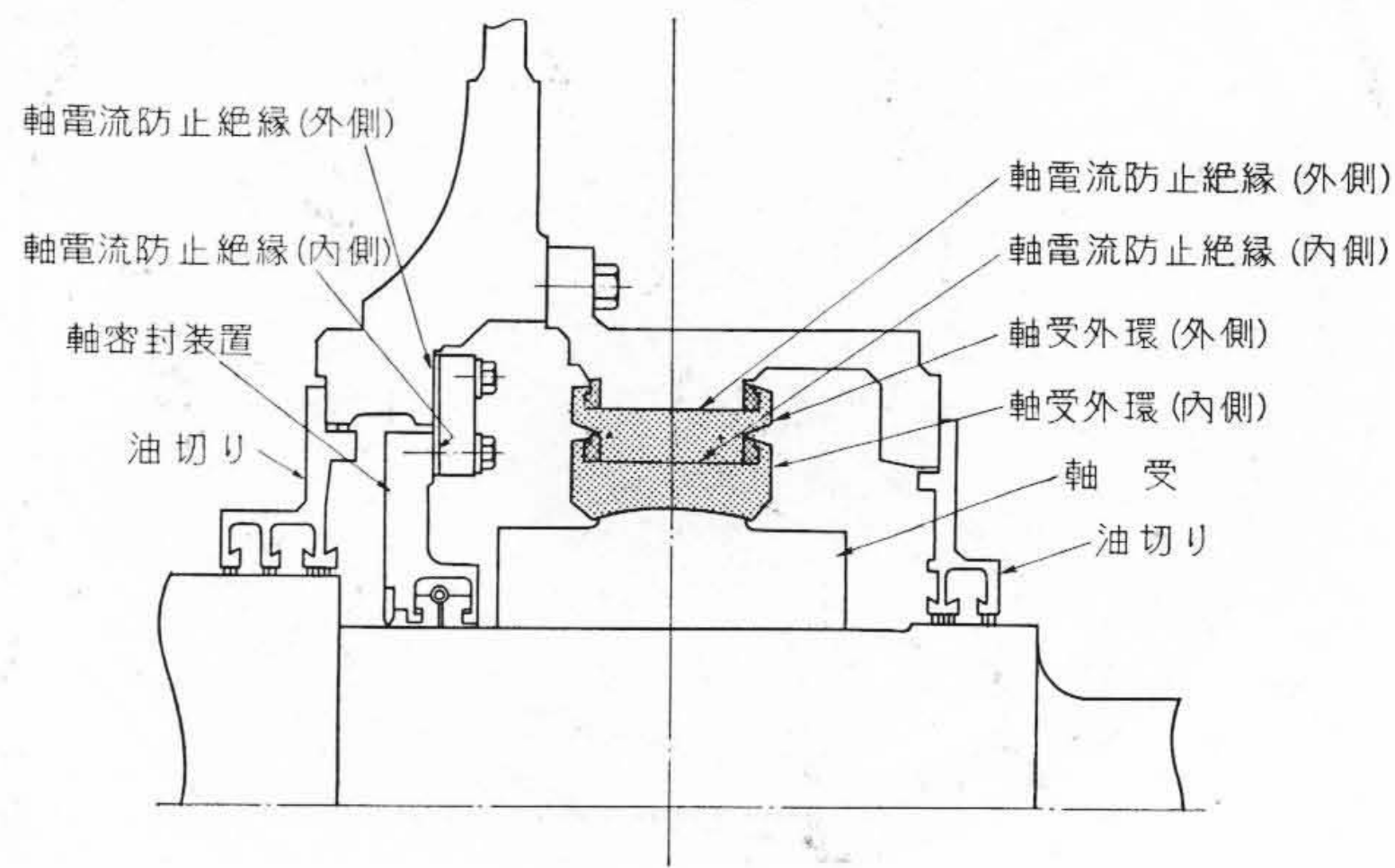
回転子の振動に対しては特に考慮を払い、完全に平衡がとれるよう、両端および磁極部分にバランス孔を設けてあり、スロット加工後から回転子完成まで厳密な平衡試験に合格したものである。第8図は完成した回転子を示す。

3.4 気密ブッシング

本機のように電機子電流が大きく、1本あたり6,160Aにもなる場合には、出力端子のがい子内導体の温度上昇が問題となるが、第9図に示すような直接冷却式がい管の使用によって解決している。がい子内の導体自身を中空とし、機内の差圧を利用してこの中に水素ガスを循環させ冷却するもので、気密ブッシングの寸法の大きくなるのを防止している。

3.5 軸密封および軸電流防止

固定子わくの両端部には第10図に示すように軸密封装置が取り付けられている。リングは特殊合金製のセグメントを組み合わせたもので、それがさらに軸方向に二つに分離され、シールケーシング内に収められ、上下二つのコイルスプリングによって締め付けられている。これらのリングはジャーナル軸径に対してわずかの間げきで組み立てられており、細げき部に油膜が形成され密封の機能をもたせている。リングが温度上昇するとリングとジャーナルとの熱膨張の差によって上述の間げきが広くなって密封油量が増し、冷却効果が改善されるのでシ

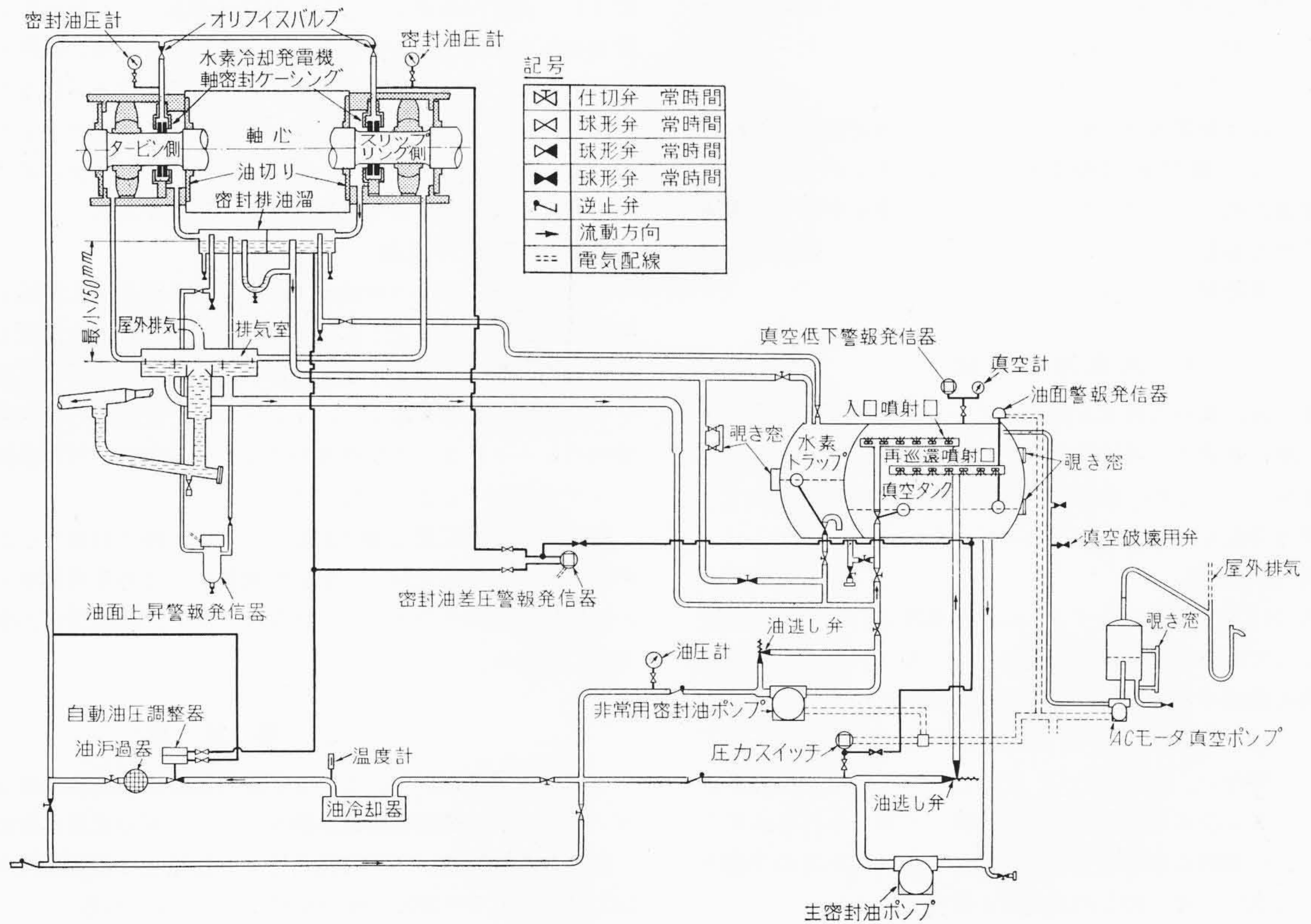


第11図 軸電流防止絶縁

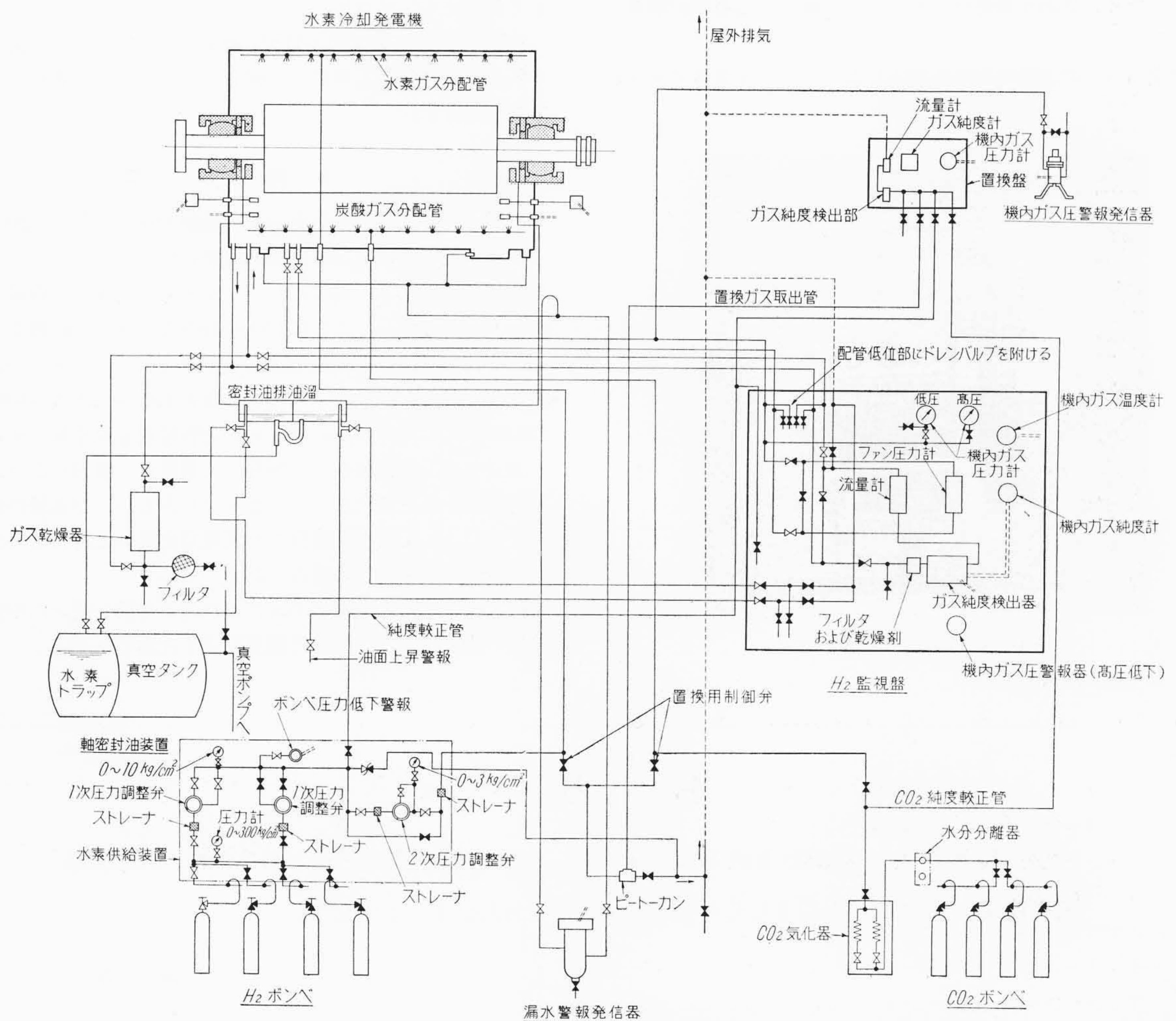
回転子はこの単一鋼塊からけずり出したもので、線輪みぞの底の通風溝および歯間の通風溝を加工して、両者を横孔で連結して、回転子両端より吸込まれた水素ガスがこれらの通風溝を通り、界磁銅損を有効に冷却するようになっている。この通風機構は決して新しいわけではないが、細部にわたり慎重な考慮が払われている。

界磁線輪は少量の銀を添加した硬銅線でクリープ強度を高くしたものである。界磁線輪絶縁物は耐熱性、耐摩耗性に富む材料をマイカとともに運転中絶縁物に加わる以上の温度圧力で焼付けたもので、強固な信頼度の高い絶縁層を構成している。

しかし界磁線輪のクリープ防止および界磁線輪の寿命を長くする見地から、発電機起動時に低速で遠心力の少ない状態で界磁線輪を加熱して、十分膨張させてから昇速する運転方式が好ましい。



第12図 密封油装置系統図



第13図 水素ガス制御系統図

ールリングの過熱は未然に防止される。リングは半径方向には自由に膨張できるが、軸とともに回転できないようにシールケーシングからの突起によって保持されている。

軸電流防止絶縁は集電環側の軸受外環部および軸密封装置の取付部で行われている。第 11 図は軸電流防止絶縁方式を示す。この二重絶縁は信頼度が高いことはもちろんであるが、運転中にも軸電流防止絶縁の点検を容易に行うことができ便利である。軸密封装置の取付部にも二重絶縁方式が採用してある。

4. 水素冷却方式

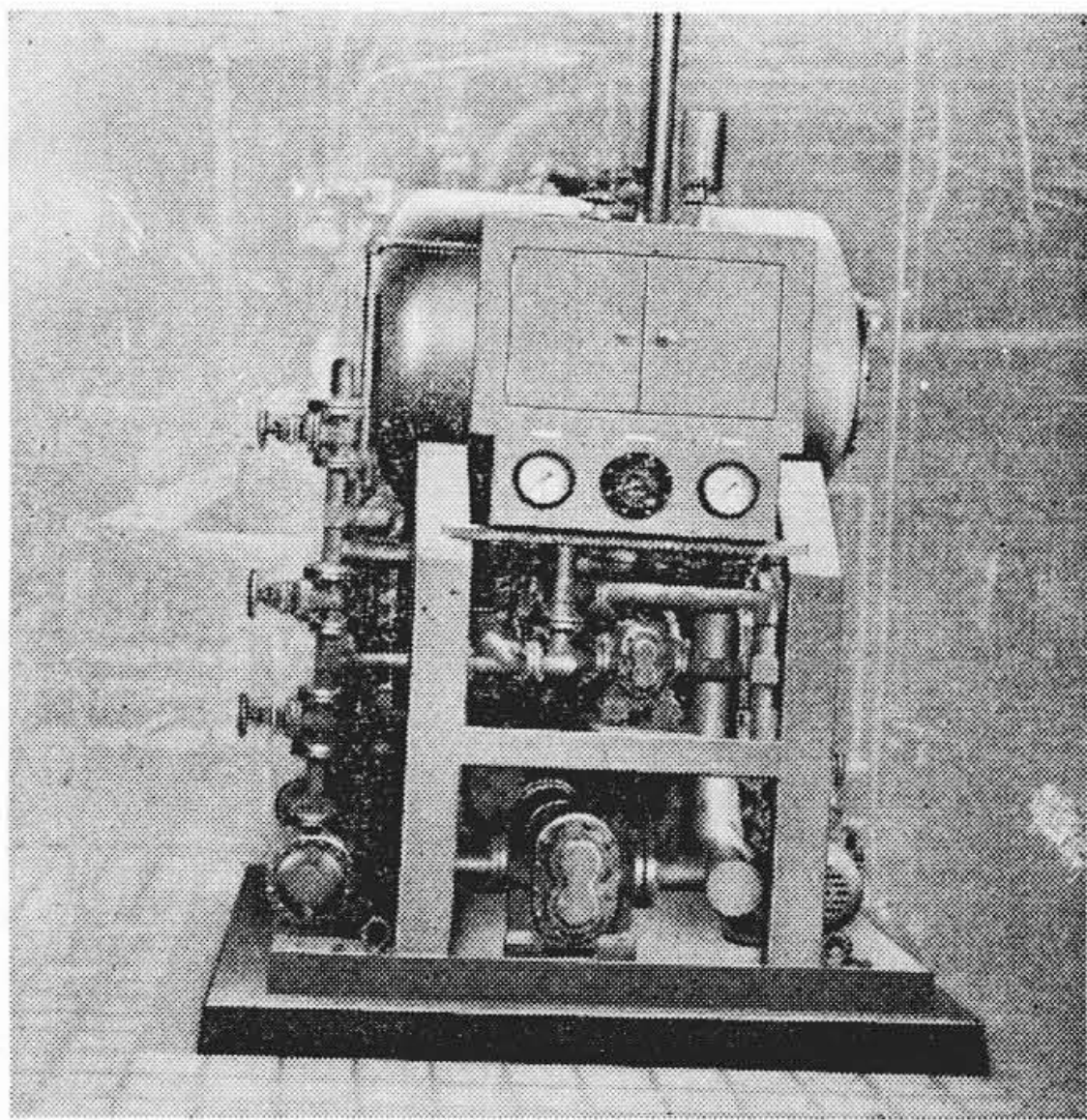
本機の水素冷却は真空処理式を採用している。第 12 図に密封油系統、第 13 図に水素ガス系統を示す。系統の基本的な考え方は従来の方式に類似しているが、全般的に系統が著しく簡略化されて、信頼度高く保守運転も容易なものとなっている。

4.1 密封油系統

真空処理式では第 12 図に示すように真空処理された油が主密封油ポンプによって常時軸密封部に供給されている。したがって軸密封部の水素側に流出する油から、空気や水蒸気などの不純ガスが放出されることはほとんどないので、軸密封部付近で水素純度が低下することはあり得ない。固定子わく、配管などからのやむを得ざる少量の水素漏れおよび水素側密封排油に溶解して持去られる水素の損失に対して、自動的に新鮮な水素を供給する方式であるので機内純度はきわめて高く、98~99%の高純度が保持される。

第 14 図は密封油装置を示す。水素トラップは油タンクの中に納められており、主密封油ポンプと非常用密封油ポンプの立体配置により据付面積の減少することなど、全般的に系統の信頼度に影響を及ぼすことなく、系統が簡略化されており、軸密封油装置の標準である。

主密封油ポンプの故障により吐出圧が低下すると圧力スイッチが



第 14 図 密封油装置

動作し、非常用油ポンプ (D. C. Motor 駆動) が自動起動して必要な密封油圧を保つが、この場合は真空処理しない油が軸密封部に供給される。この状態で長時間運転すれば機内水素ガス純度が低下するが、密封排油溜に設けた排気管から低純度の水素ガスを大気に放出できるよう考慮してある。したがって機内純度は少し低下するけれども非常用油ポンプでも長時間運転が可能である。

4.2 水素ガス系統

水素ガスへの置換は炭酸ガスを使用する間接法を使用し、また置換を迅速容易に行うように温水形炭酸ガス気化器を使用している。発電機内の湿気を除去するためガス乾燥器を備え常に水素ガスがファンの差圧で循環するようになっており、乾燥剤の再活性には乾燥器内のヒータによって加熱蒸発させた水蒸気を、密封油装置の真空ポンプで吸引するようになっている。

置換制御弁の配置も第 13 図のように、操作容易でしかも信頼度の高いものとなっており、水素監視盤内には非常用油ポンプ運転時の低純度水素ガスの大気への排気弁があり、運転保守が便なるよう考慮してある。

5. 工場試験

本機は工場において、これを試験用架台上に完全に組立て、水素ガスを封入して発電機特性試験を行い、所期の成果を収めた。

無負荷飽和特性、三相短絡特性より短絡比は 128,000 kVA で 0.8, 147,000 kVA で 0.695, 160,000 kVA で 0.64 である。

各ガス圧における等価負荷温度上昇試験は、JEC 規格にはもちろん保証値に対しても十分の余裕を有している。各損失も分離されて測定したが発電機効率は全負荷より部分負荷に至るまで保証値に対して余裕をもって合格した。

回転子の過速度試験は 115% 過速度 (4,140 rpm) で施行したが、回転子の点検結果も良好で、回転子のバランス、振動も満足すべき数値を示した。

6. 結 言

中国電力株式会社水島火力発電所納 160,000 kVA 3,600 rpm タービン発電機の仕様および構造の概要について述べた。この発電機は現地据付中である。過去においても多くの記録的大容量水素冷却発電機を製作したが、ここに 160,000 kVA 3,600 rpm 機を完成したことはそれ自身貴重な実績であるばかりでなく、今後の大容量機の製作に一段と自信を深くした。引続き 192,000 kVA 3,600 rpm 機, 224,000 kVA 3,000 rpm 機などの大容量機を現在製作中である。

最近の火力発電設備は高能率、大容量化の傾向にあり、普通水素冷却方式から直接冷却方式に進みつつあるが、日立製作所は試作研究を中心として大形機製作上の問題点を着々と解明しており、火力発電界の需要に応ずる所存である。

終りに、本機の完成に当ってご指導ご激励を賜った中国電力株式会社の関係者各位に深甚の謝意を表す次第である。

お わ び

前号(43 巻 5 号)の裏表紙(表紙 3)に掲載いたしました日製産業株式会社の広告に、同社社名「日製産業」が脱落しておりましたので、つつしんでおわび申し上げます。

日 立 評 論 社