

中部電力株式会社新名古屋火力発電所納

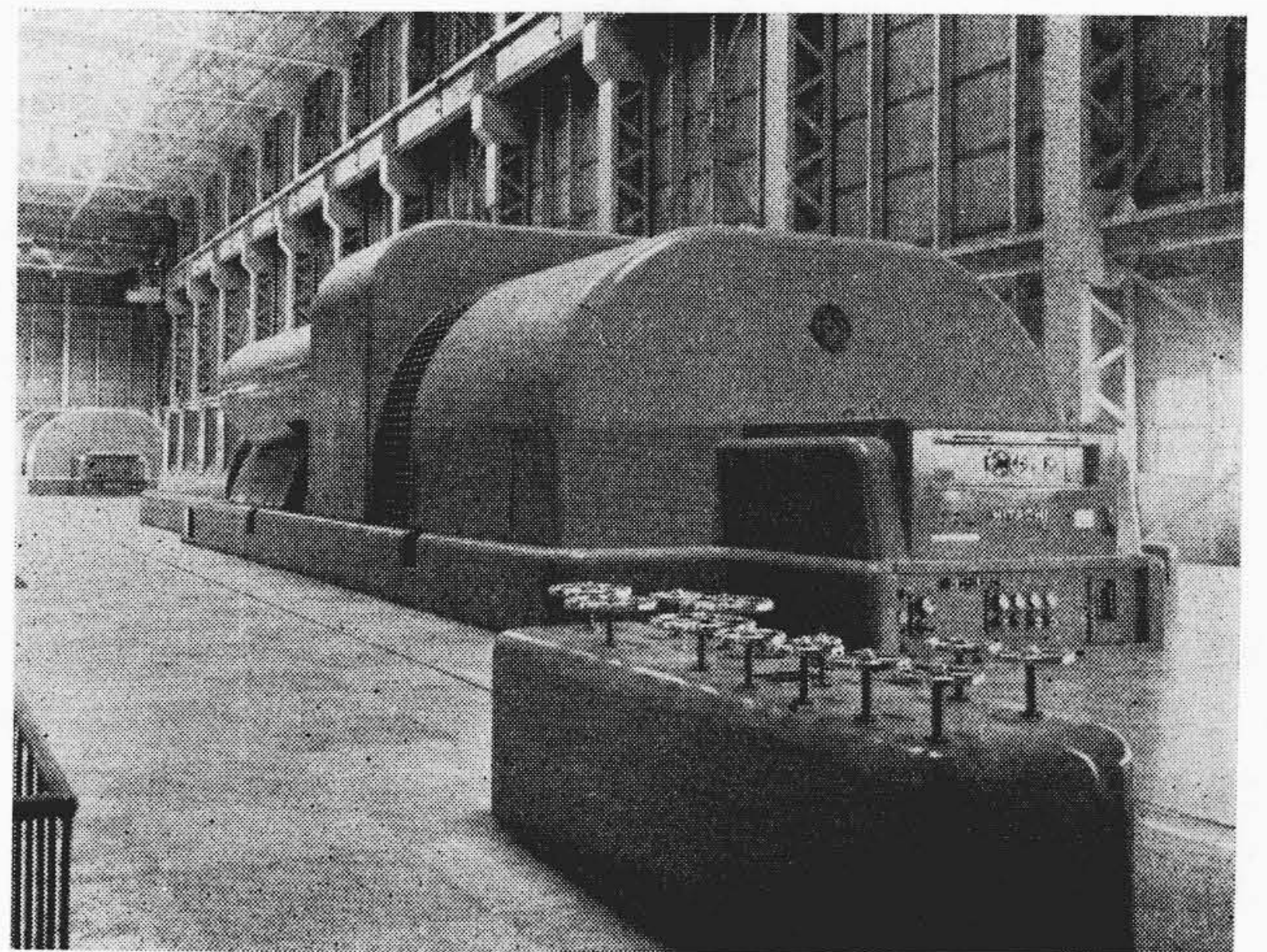
**220,000 kW 再熱タービンおよび発電機設備**220,000 kW Reheat Turbine and Power Generating Equipment Delivered to  
Shin Nagoya Thermal Power Station of Chubu Electric Power Co., Inc.柴 田 祐 作\* 斎 藤 清\*\*  
Yûsaku Shibata Kiyoshi Saitô**内 容 梗 概**

中部電力株式会社新名古屋火力発電所納 220,000 kW 再熱タービン発電機が完成した。本機はタービンは三車室三流排気形 (TCTF-26)、また発電機はギャップピックアップ形直接冷却回転子を採用しており、220,000 kW として標準的な設計であるが、わが国の特殊事情を十分に考慮し、起動を容易にするため主塞止弁バイパス装置を採用するなど、最近の技術的な進歩を随所に採り入れてある。本文ではタービンの構造上および制御装置に特に採用された新技術を述べ、また発電機については直接冷却形回転子を中心として新機軸を紹介した。本タービン発電機の完成した新名古屋火力発電所は、総出力 1,256,250 kW の東洋一の火力発電所として、中部地区の電源確保に一大威力を発揮している。

**1. 結 言**

新名古屋火力発電所第6号機 220,000 kW 再熱タービン発電機は60サイクル地区における国産最大級の容量を有するものであって特に効率と信頼度に重点をおき、慎重な製作を進めてきたが、タービンは昭和38年2月優秀な成績をもって工場試運転を終了し、現在現地にて試運転中である。日立製作所では、昭和36年中国電力水島火力発電所納 125,000 kW を完成したのに引き続き清水共同火力新清水発電所納 75,000 kW × 2 台、中国電力株式会社水島火力発電所および関西電力株式会社春日出火力発電所納 156,250 kW × 2 台に続いて6台目として完成したものである。これらの各機器はすべてきわめて高い効率とともに卓越した信頼性を実証しつつあるが、今回さらに容量的に上回る 220,000 kW 機を完成したことは意義深いものがある。また直結される発電機は 281,600 kVA とタービン同様国産最大級のものであり、単機でこれだけの出力を出すため直接冷却形回転子を採用したことが大きな特長である。

第1図は現地運転中の本タービンを示す。



第1図 現地運転中の 220,000 kW タービン

**2. タービンの計画要目****2.1 計 画 要 目**

本タービンの計画要目は次のとおりである。

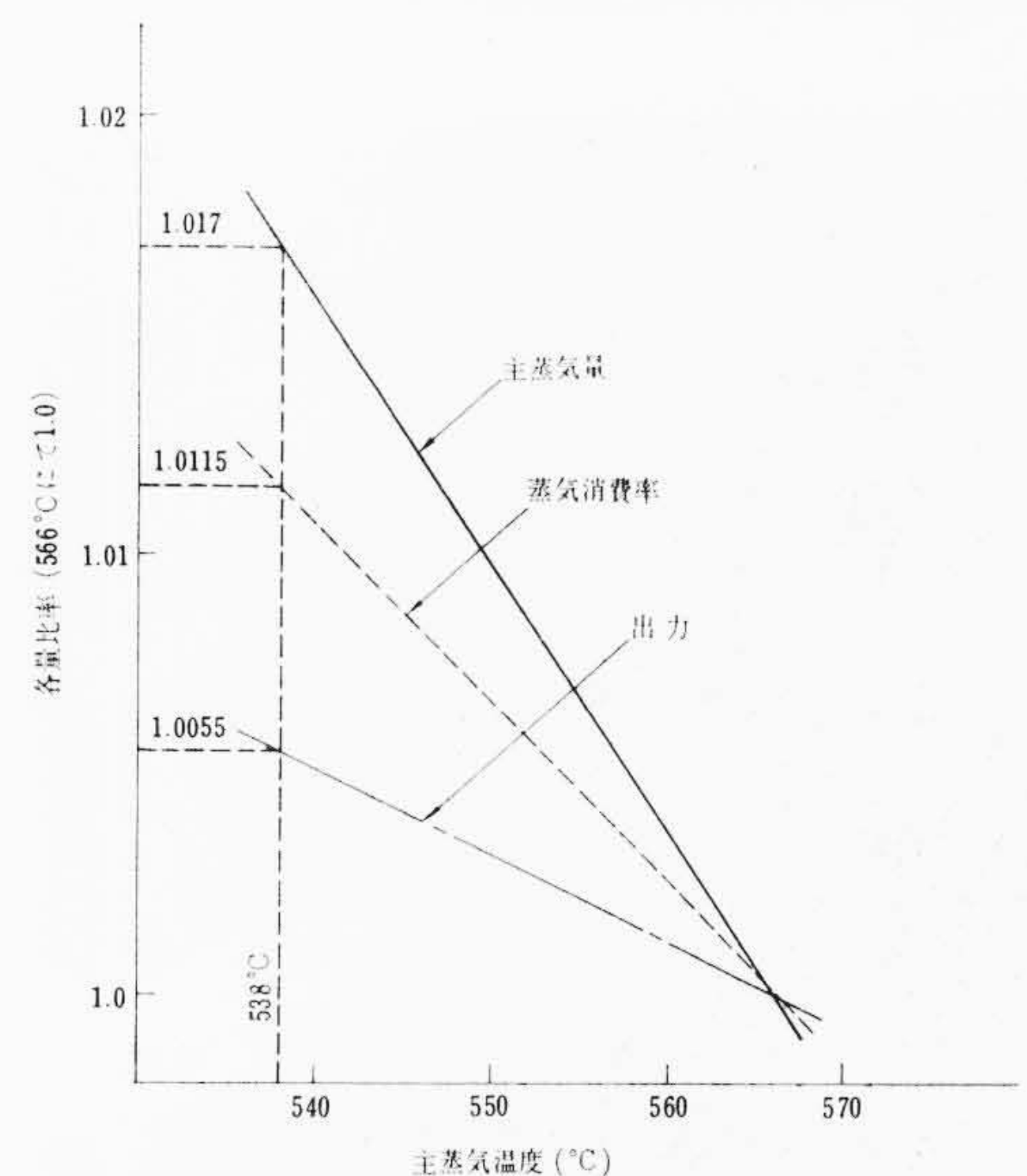
|         |                                                                                                                                                  |     |     |     |     |     |           |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| 形 式     | 衝動再熱式くし形三流排気形                                                                                                                                    |     |     |     |     |     |           |
| 定 格 出 力 | 220,000 kW                                                                                                                                       |     |     |     |     |     |           |
| 主蒸気圧力   | 169 kg/cm <sup>2</sup> g                                                                                                                         |     |     |     |     |     |           |
| 主蒸気温度   | 538°C                                                                                                                                            |     |     |     |     |     |           |
| 再熱蒸気温度  | 538°C                                                                                                                                            |     |     |     |     |     |           |
| 排 気 圧 力 | 722 mmHg                                                                                                                                         |     |     |     |     |     |           |
| 抽 気 段 数 | 8 段                                                                                                                                              |     |     |     |     |     |           |
| タービン段落数 | <table border="1"> <tr> <td>高圧部</td> <td>9 段</td> </tr> <tr> <td>中圧部</td> <td>6 段</td> </tr> <tr> <td>低圧部</td> <td>6 段 × 3 流</td> </tr> </table> | 高圧部 | 9 段 | 中圧部 | 6 段 | 低圧部 | 6 段 × 3 流 |
| 高圧部     | 9 段                                                                                                                                              |     |     |     |     |     |           |
| 中圧部     | 6 段                                                                                                                                              |     |     |     |     |     |           |
| 低圧部     | 6 段 × 3 流                                                                                                                                        |     |     |     |     |     |           |
| 最終段翼長   | 663.6 mm (261 $\frac{1}{8}$ in)                                                                                                                  |     |     |     |     |     |           |

**2.2 蒸気条件と性能**

本タービンは当初主蒸気温度 566°C の標準条件に対して設計されたものであるが、プラント運転上の観点から特に定格主蒸気温度を一段階下げて 538°C としてある。しかし将来 566°C で運転すること

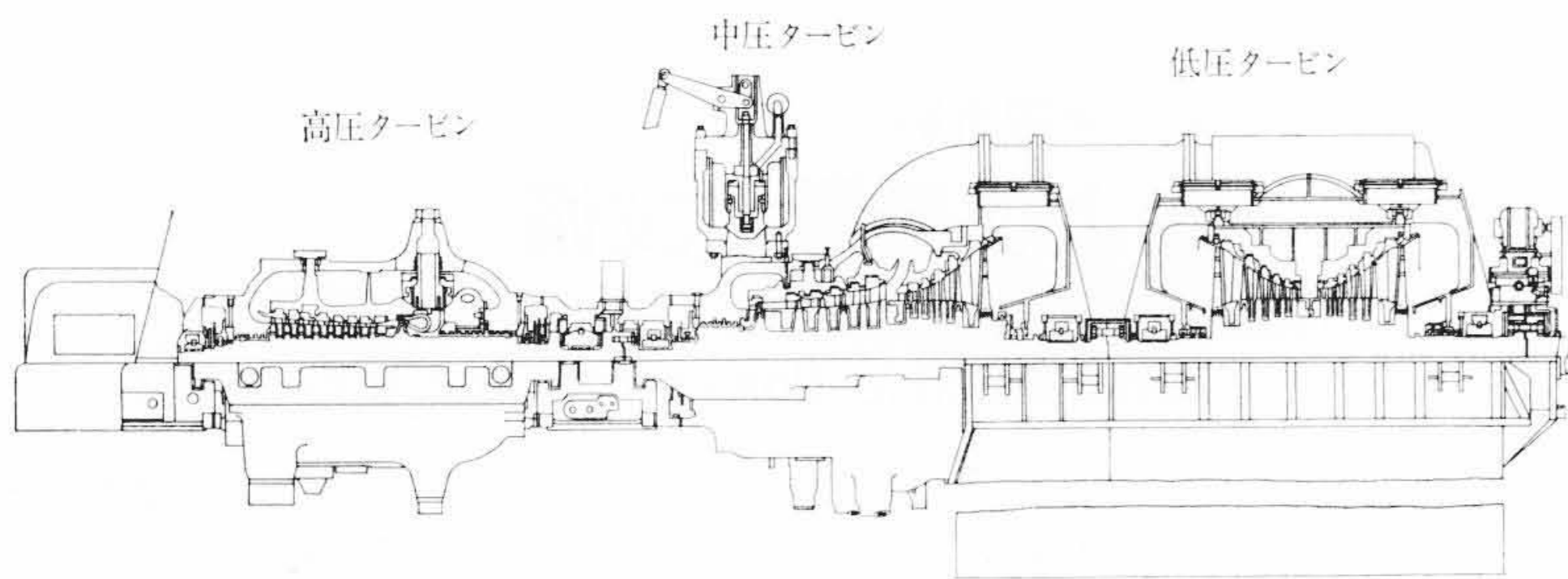
\* 日立製作所電機事業部

\*\* 日立製作所日立工場

第2図 主蒸気温度変化の影響  
(加減弁開度が一定の場合)

も考えられるので、タービンとしては 566°C で運転してもなんらさしつかえないように設計されている。

このように主蒸気温度を変化した場合にタービン可能通過蒸気量がどのように影響されるかが第一の問題である。一般にほかの条件



第 3 図 220,000 kW タービン 構 造 図

(主蒸気圧力、加減弁開度など) が同一であれば蒸気流量(マスフロー)は主蒸気の絶対温度の平方根に逆比例して変化するのである。したがって第 2 図に示すように主蒸気温度が低下すると逆に主蒸気量は増加の傾向がみられる。第 2 図から、主蒸気温度が 566℃ のときのタービン通過蒸気量を 100% としたときに、主蒸気温度が 538℃ となると蒸気量は 1.7% 増加することがわかる。

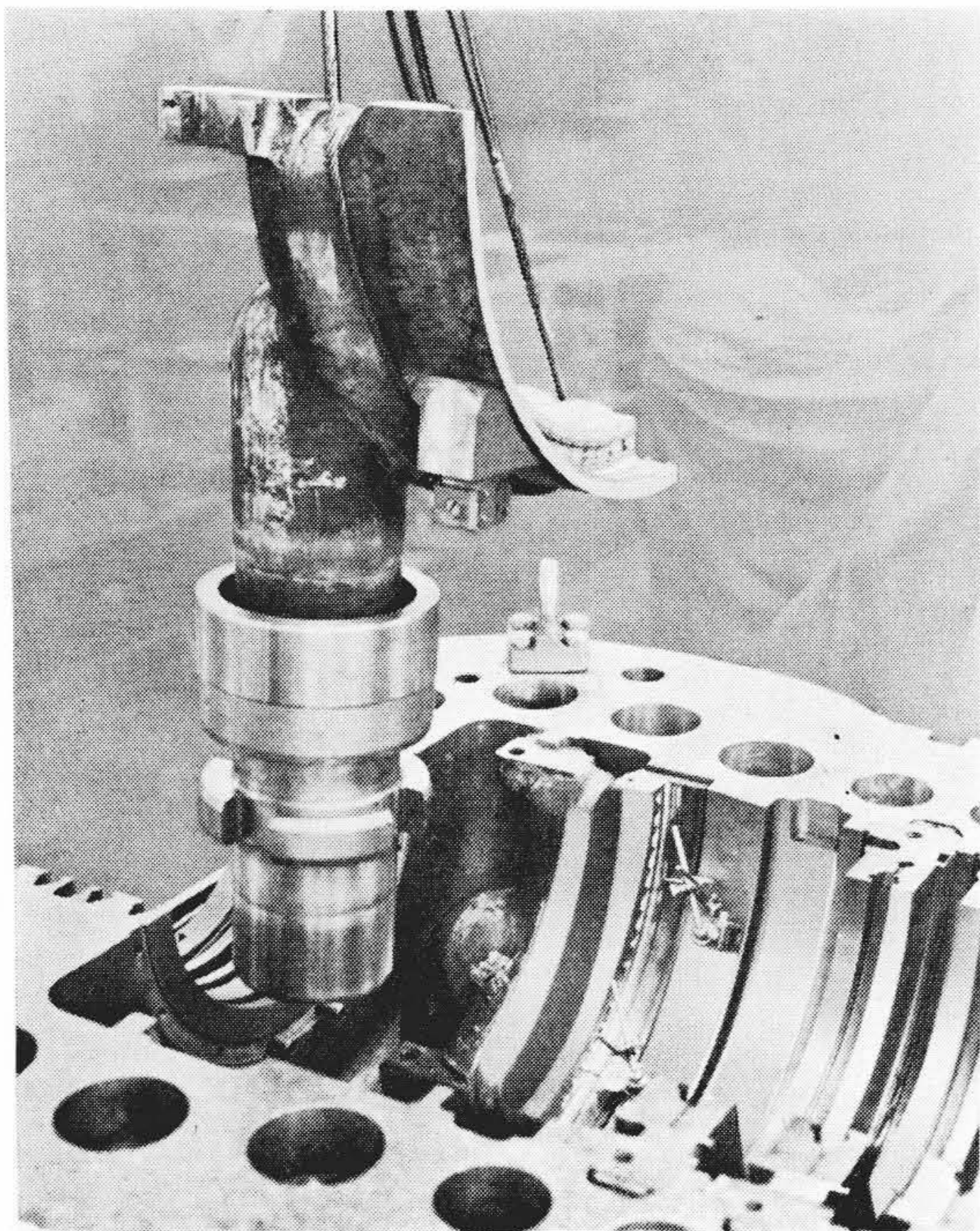
次に、主蒸気温度が低下すると同一出力の発電に必要な主蒸気量(蒸気消費率)が増加するから、この点を十分考慮してプラント全体の計画をしておく必要がある。第 2 図にこの関係を示すが、主蒸気温度が 538℃ になると蒸気消費率は 1.15% 増すことになる。したがって厳密にいうならばボイラなどの容量もそれだけ増加しておく必要があるが、実際的な見地からみれば増さなくとも十分通常の裕度によってカバーされる範囲であろう。タービンとしてはさきに検討したように可能通過蒸気量の増加 1.7% が蒸気消費量の必要な増加量 1.15% を上回っているので、出力からみた余裕は第 3 図に示すようにむしろ 0.55% 増加することになり、この点問題はない。

さらに主蒸気温度の低下によってプラントの発電端熱効率がどの程度低下するかが問題である。主蒸気温度を変化させた場合に計算した結果によると、定格出力時の熱効率は主蒸気温度 28℃ の低下により、比率で 0.7% 低下することとなる。

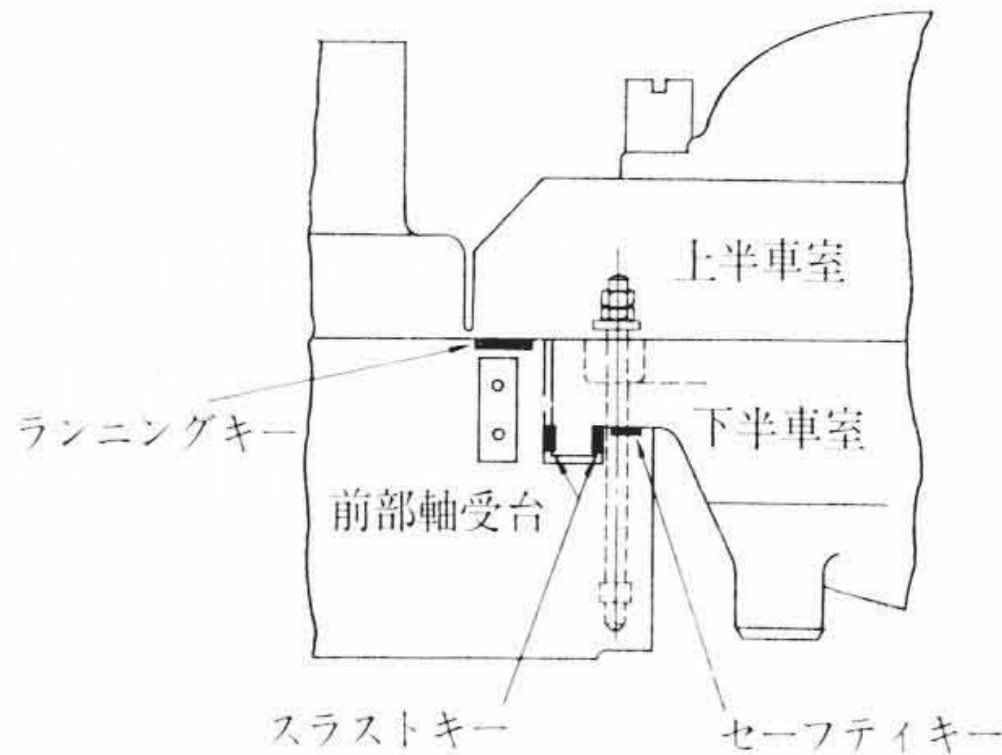
### 3. 構造上の特長

#### 3.1 全 体 構 造

第 3 図に本タービンの全体断面図を示す。図の左から高圧タービ



第 5 図 セパレートノズルボックス組立状況



第 4 図 車室センタラインサポート構造図

ン、中圧+単流低圧タービンおよび複流低圧タービンの三車室からなり、各ロータはそれぞれ両端の軸受で支持されている。低圧最終段翼は 663.6 mm (26<sup>1</sup>/<sub>8</sub> in) 翼 3 流として十分な環帯面積を確保している。

車室に対するロータの軸方向位置を決めるスラスト軸受は高圧タービンと中圧タービンの中間に配置し、伸差は前後に比例配分されるようになっている。タービンロータにかかる蒸気のスラストは、高圧、中圧および低圧それぞれのロータ内部でバランスするように構成されている。また加減弁および中間阻止弁などが急激に全閉するような異常な運転状態に対しても十分な安全性が確保されるよう余裕のあるスラスト軸受が使用してある。

第 3 図に示すように、高圧車室は単純な形状の二重構造とし信頼性の向上を図っている。加減弁は従来車室に直接取り付けるのが標準であったが、200,000 kW を越して、加減弁口径が一段大きくなったのに対応して車室から離れた別置形として安定化を図っている。このように構造上の考慮を払ってあるので、高圧外部車室の材質は従来の標準の Cr-Mo-V 鋳鋼の代わりに、より製作の容易な Cr-Mo 鋳鋼の採用が可能となった。

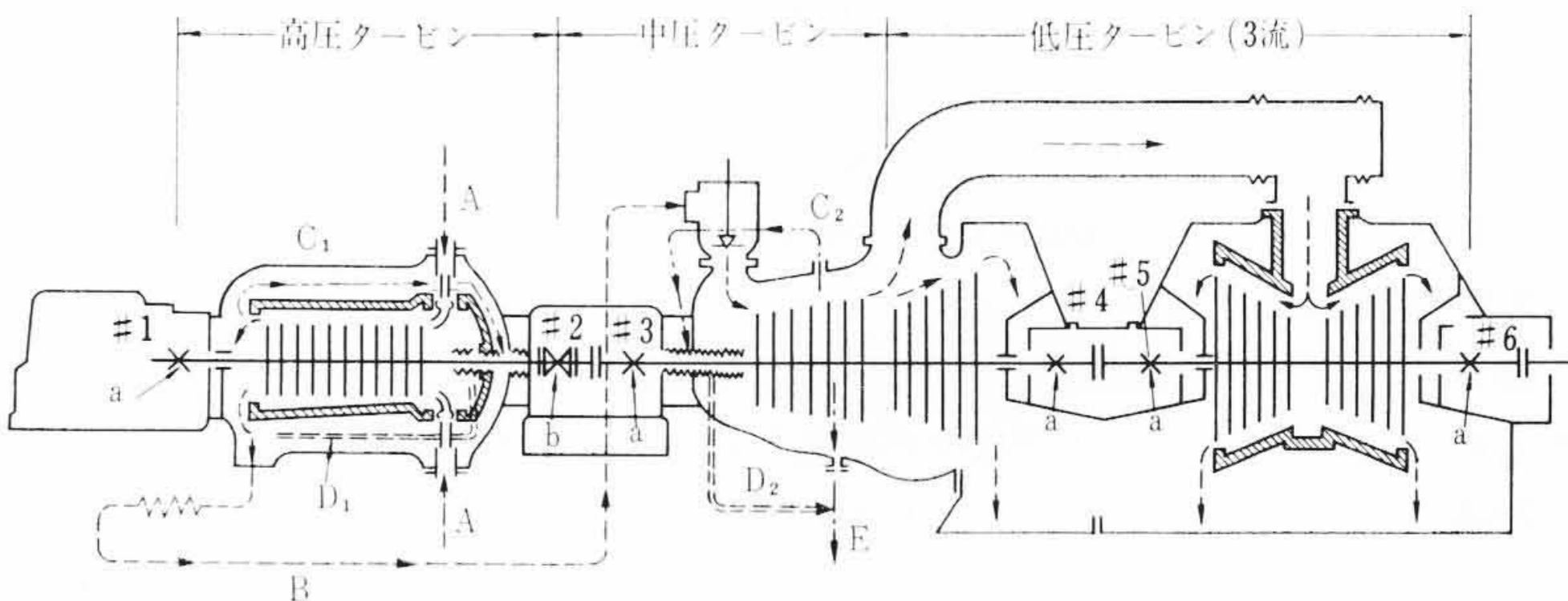
タービン運転中高温となる高圧車室前後部および中圧車室前部は第 4 図のように車室を完全な中心線上で支持するセンタラインサポート方式を採用してあらゆる運転状態において車室とロータの軸心が一致するよう配慮が払われている。

高圧車室の蒸気入口部分は第 3 図および第 5 図に示すように、内外車室のいずれからも独立したセパレートノズルボックスを採用している。このようにしてタービンの中で最も過酷な熱変化を受けるノズルボックスは比較的薄肉となり、かつ自由に熱膨張を逃がしうる構造となっているのでタービンの運転信頼性は著しく増大した。

中圧車室は第 3 図に示すように単流低圧車室を兼ねており、中圧タービンの排気の中の三分の二は外側連絡管を通して複流低圧車室に達している。この連絡管はベローズを二組使用した特殊な構造で熱膨張を自由に吸収すると同時に連絡管内部の蒸気圧の反力が車室にかからないように工夫されている。

#### 3.2 高中圧車室パッキング部の軸冷却

第 3 図に示すように高圧および中圧タービン入口部は中間軸受台(第 2, 第 3 軸受および推力軸受を内蔵している)に近接しているから、タービン内部の高温高圧蒸気がラビリンスくし歯を流れる際タ



第 6 図 軸 冷 却 系 統 図

ービンシャフトに加えられる伝熱によって、軸受部に悪い影響を及ぼす恐れがある。この高温蒸気を低温蒸気と入れ替えることによってシャフト部をむしろ冷却し、軸受部に対する熱影響を極力少なくしようというのが第6図に示す軸冷却である。

高圧タービン第一段を出た約500℃の蒸気は内部車室のラビリンスクし歯を通して第2軸受側に流出しようとするが、第6図のD<sub>1</sub>のように内部に設けた配管によってこの蒸気は高圧排気中に逃がされる。その代わり軸冷却用として高圧排気(約300℃)の一部を高圧車室の間を通じて(C<sub>1</sub>)第2軸受側ラビリンスパッキングに導いている。

一方中圧タービンの初段を出た約500℃の蒸気はラビリンスクし歯を通して第3軸受側に流出しようとするがこれをD<sub>2</sub>の配管によって、第4抽気管(第13段後よりの抽気)に逃がしている。その代わり抽気点の1段前の蒸気(約400℃)を軸冷却用として取り出し、C<sub>2</sub>の配管によって第3軸受側ラビリンスパッキングに導いている。

このように、低圧段の低温蒸気を冷却用としてラビリンスクし歯部に導き、この部の蒸気温度を100～200℃低下させることによって、軸受部に対する熱影響を防ぎ安全な運転を確保している。

### 3.3 ボルト冷却

車室の水平継手は、高温高压に耐えしかも起動停止のような負荷変動においても絶対に蒸気が漏れることのないように特殊な構造を採用している。その締付ボルトとしては高温部には12Cr系のクリープ特性のすぐれた材料を使用し、できるだけ大直径のものをピッチを短く配列している。さらに車室の組み立てに当たってはボルトに貫通する加熱孔に電熱抵抗体をそう入し熱して増締めを施し、クリープ限度に近い締付応力を与えている。本タービンでは特に高圧内部車室の締付ボルトの中で比較的高温部のものに第7図に示すような低温蒸気による冷却を施し、クリープ率を制限することによりボルト締付力の低下(RELAXATION)を防いでいる。ボルト冷却は上述のように定常運転時のクリープ防止を目的とするものであって、起動停止時の伸差あるいは応力調節の目的はもっていない。

冷却用蒸気は高圧タービン第5段後より約450℃の蒸気を抽気し第7図に示すようにボルトシャフトとボルト孔の間の環状部を流れるボルトを冷却し、次々と高圧側のボルトに移る。冷却が終わった蒸気は高圧タービン排気中に排出される。冷却用蒸気量は出口部に設けたオリフイスによって調節されている。このような冷却方法はすでに10年以上も使用されておりすぐれた成果をあげている。

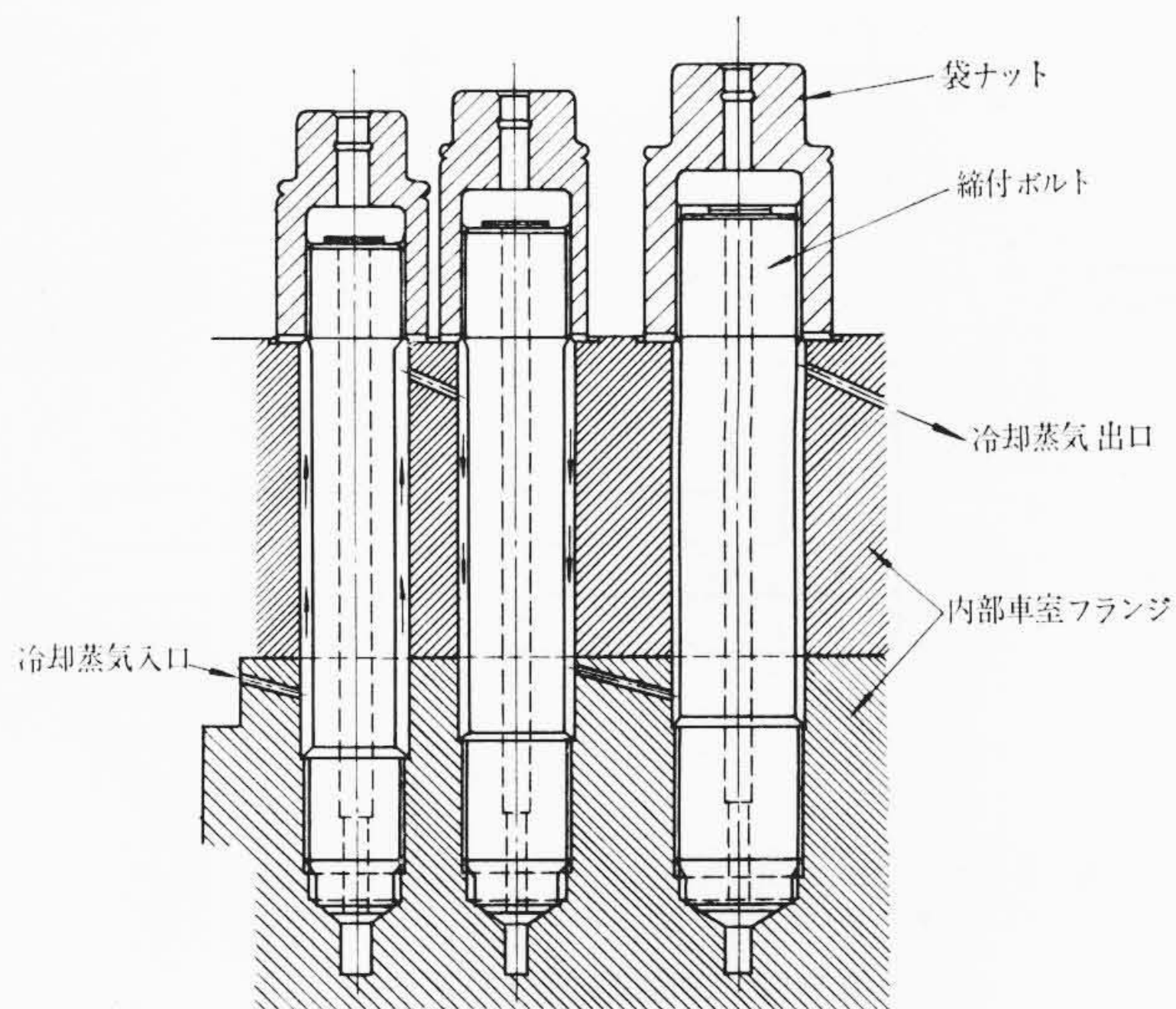
## 4. 制御装置の特長

### 4.1 制御系統

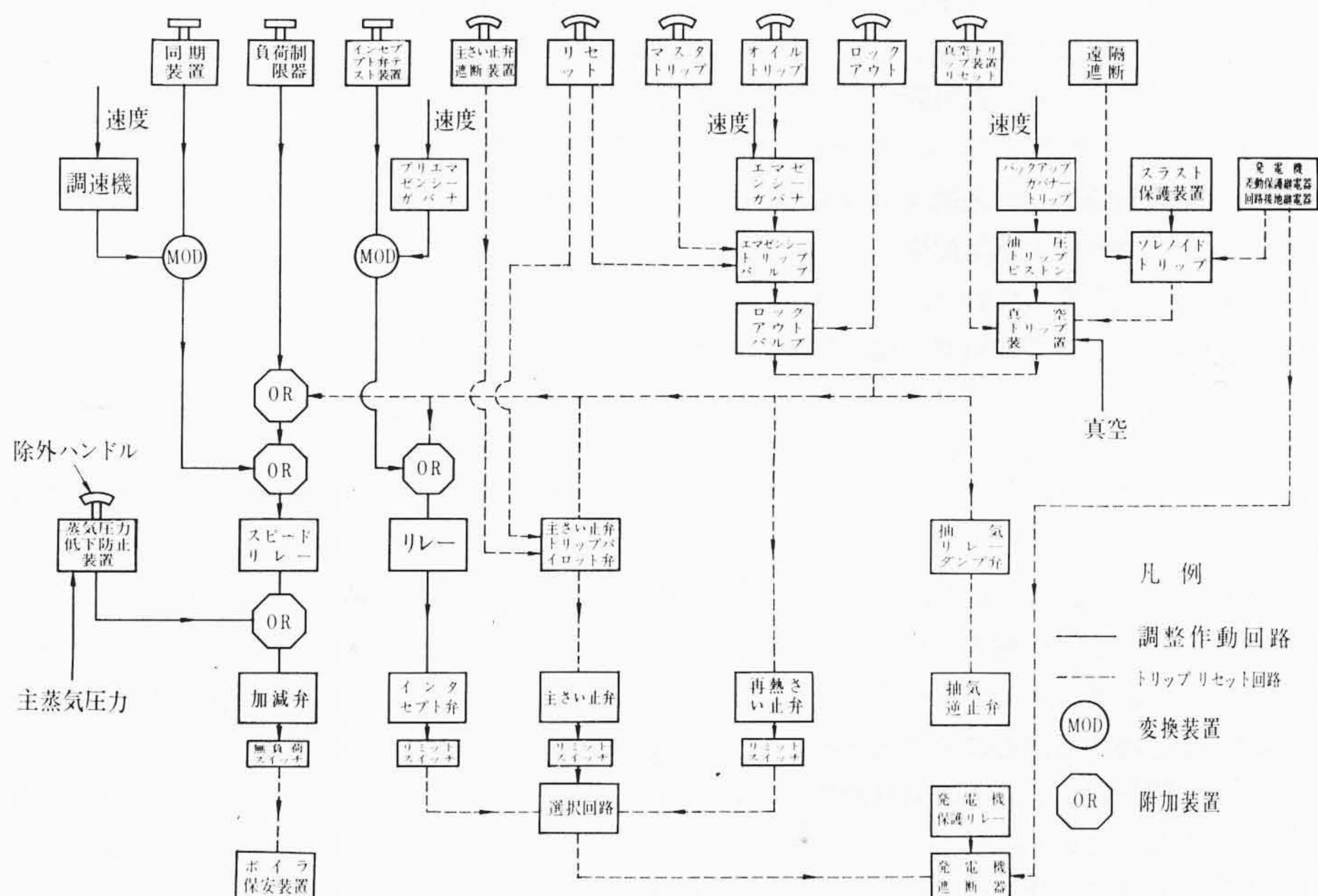
第8図は本タービンの制御系統のブロック線図を示す。

タービンの大形化に伴い随所に新機軸を採用し運転取り扱いの合理化と安全性を図っているが、そのおもな特長は次のとおりである。

- (1) 主塞止弁バイパスによる起動方式を採用し、特に起動負荷運転を容易にし、信頼性を高めた。
- (2) タービンの大形化に伴い加減弁を別置とした。
- (3) 中間阻止弁は中圧車室に直接取り付ける構造とし、残留再熱蒸気による速度上昇を最小におさえた。



第7図 ボルト冷却構造図



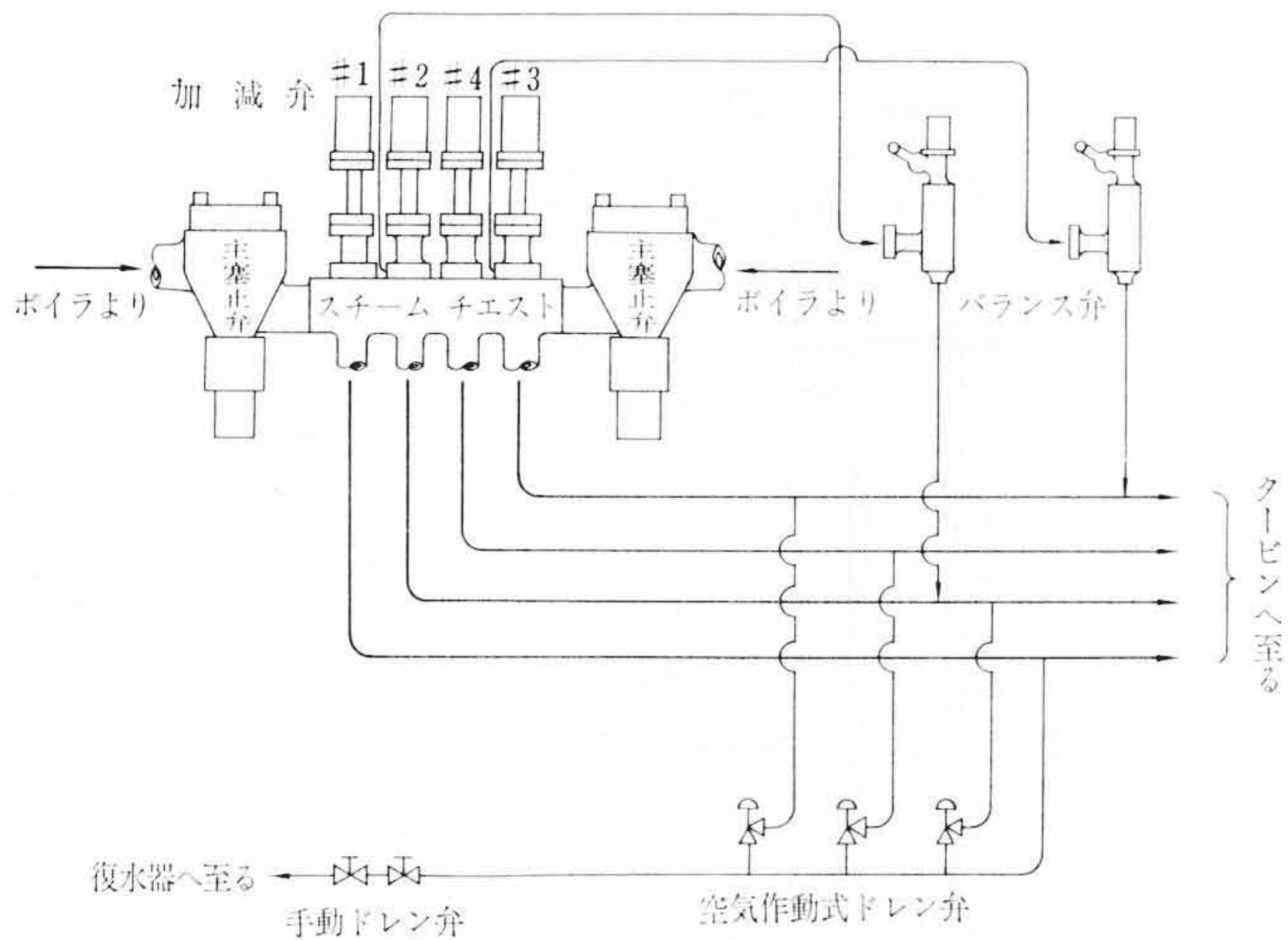
第8図 タービン制御ブロック線図

- (4) すべての操作用ハンドルをタービン前側軸受台前面に設置し、起動、停止ならびに各種作動試験操作の集中化を図った。
- (5) 非常调速機の作動試験をタービン負荷運転中に容易に行なうことができるよう、一時的に応急遮断装置の作動を除外するロックアウト弁を設けた。
- (6) 非常调速機よりわずかに高い速度で作動するバックアップガバナを設け、非常调速機試験時および通常時の過速に対する安全性を増した。
- (7) 油圧式スラスト摩擦リレーの採用により、運転中にスラスト軸受の摩擦状態を調査できるようにした。

このような新しい構造を採用した理由は、大容量となり蒸気条件も上昇しているので最大速度上昇率が大きくなる傾向があり、またスラスト荷重、伸び差などあらゆる運転条件がきびしくなったことによるもので、125,000 kW 以下のタービンについては将来も従来とほぼ同様の制御方式を採用する方針であり、実績からみてもならさしつかえないと考えている。

### 4.2 別置形加減弁

加減弁以降の残留蒸気による影響を小さくし、最大速度上昇率を



第 9 図 別置形加減弁系統図

低くするためには加減弁はできるだけ車室に直接設置するのが望ましい。これはまたタービン全体をコンパクトにし、重量を軽減するためにも望ましいことである。しかし本タービンのように大形となるにつれて加減弁を車室に設置することがむずかしくなってくる。

別置形加減弁の採用に伴い、本タービンの主蒸気配管に第 9 図に示すような自動的ドレン系統を使用することとした。加減弁は 4 個あり車室から離れて主蒸気配管の途中に設けてある。4 個の加減弁は共通の蒸気室をもっており、ボイラからの主蒸気は蒸気室両側の主塞止弁からはいって加減弁を通った後それぞれの加減弁に 1 本ずつの主蒸気管によりタービン車室にいたる。この主蒸気管にはそれぞれドレン配管があり、これは空気作動式ドレン弁を経て 1 本のマニフォールドにまとめられ、手動ドレン弁を通して復水器に連絡されている。

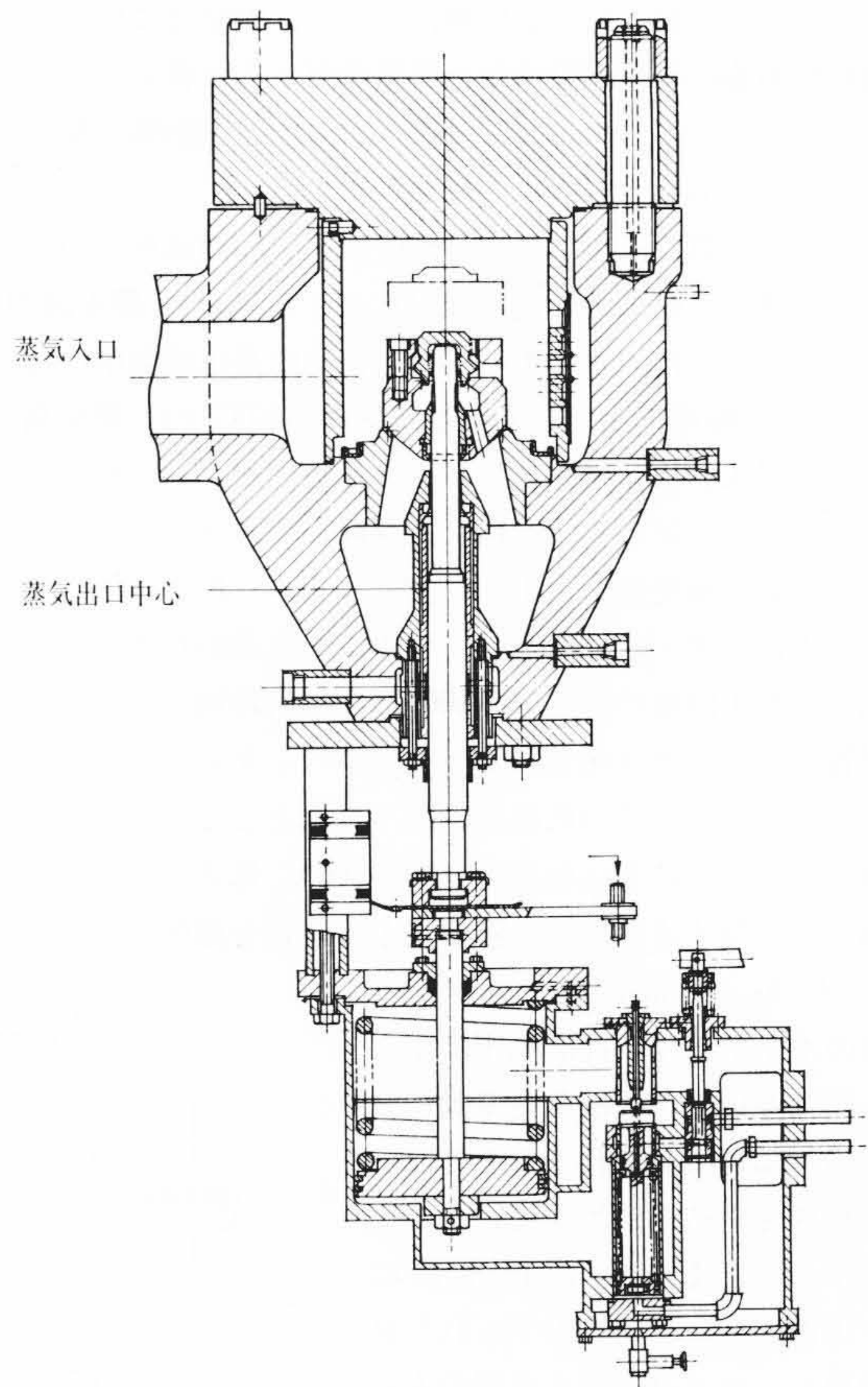
空気作動式ドレン弁は第 2, 3 および 4 加減弁だけにあり、第 1 加減弁にはない。空気作動式ドレン弁は加減弁の開度と連動するようになっており、サーボモータに設けた空気切替弁によって第 2 加減弁が開きはじめると同時に全部閉まる。しかしこのドレン弁は特殊設計で、全閉位置でも若干の開口面積をもっており暖管用蒸気が流れる構造となっている。

第 1 加減弁は子弁付となっており、比較的小きな力で開閉可能である。第 2 および第 3 弁には子弁はないが弁の上部にバランス室をもっており、バランス室は外部のバランス弁を介して出口側配管にバイパスされている。加減弁は開く前にカム操作によってバランス弁が開きバランス室の圧力を出口側に逃がすから、加減弁にかかる蒸気圧はバランスし容易に開くことができる。第 4 加減弁を開くときは蒸気の圧力差が小さくなっているから、蒸気圧のバランスを考えない普通の単座弁を用いている。

#### 4.3 全周噴射起動装置

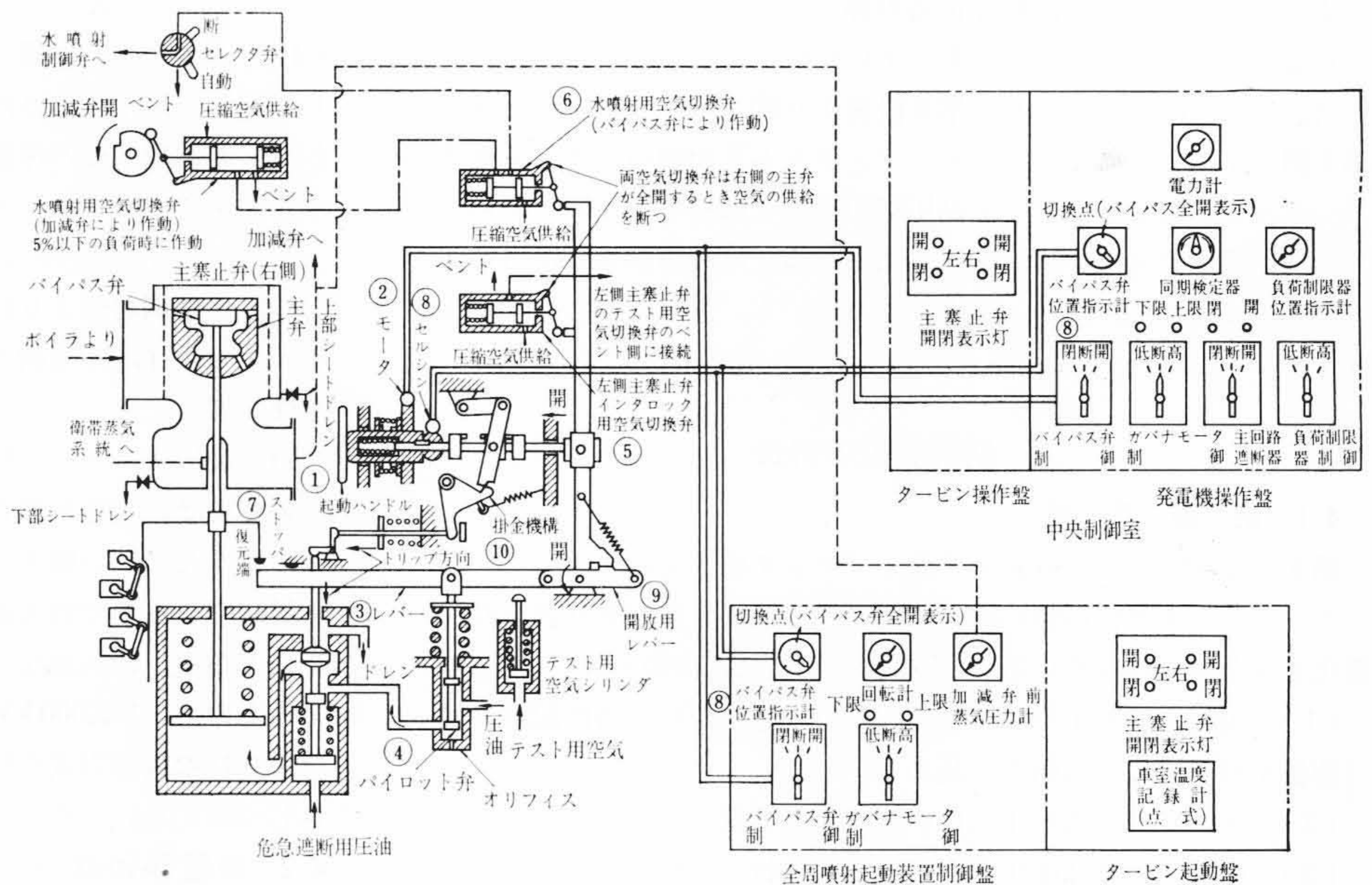
全周噴射起動および負荷の目的は、車室の危険断面における温度差を減少させることによって過渡的な運転時の熱応力発生を防ぐことにある。第 10 図に全周噴射用バイパス弁付主塞止弁を、また第 11 図にその制御系統を示す。

タービンの起動時に最もきびしい条



第 10 図 全周噴射式主塞止弁

件にさらされているのは加減弁のボウル（蒸気通路）であり、この部分の金属部の温度差を  $83^{\circ}\text{C}$  以下にすることが起動負荷時の一つの目標となっている。この目標を達成するためにはボイラの蒸気温度制御もさることながら、主塞止弁バイパスによって初期の起動ならびに負荷運転の間全加減弁を全開し全周噴射運転を行なうことが最も有効であると認められている。このような運転を行なえばタービン車室内部は均一な蒸気流によって均一に加熱され、また蒸気の流速が小さくなることによって熱伝達率も低くなり温度上昇率は緩慢となる。さらに起動および初期の負荷期間中、第 1 段落出口の蒸気温度が部分噴射の際に比べてずっと高くできるという特長がある。



第 11 図 全周噴射起動装置系統図

り、このため特にホットスタートおよびウォームスタートの特性が著しく改善されている。

バイパス弁は2個の主塞止弁の中の一方向の主弁の内部に組み込まれており、その容量は定格蒸気条件にてタービン最大蒸気量の約20%を流しうるように設計されている。タービンを起動する際は最初にガバナモータによって速度調整装置を高速限にし加減弁を全開とする。バイパス弁制御用モータによってバイパス弁を徐々に開いていけばタービン回転数は徐々に上昇する。発電機の同期投入時の操作もバイパス制御用モータによって行なわれるが実際の運転結果によればこの操作は従来のガバナモータによる同期操作と比べてなんら問題ないことが確認されている。同期後さらにバイパス弁の開度を増していけばバイパス弁全開位置で約20% 負荷までかかる。これ以上に負荷を増すには主塞止弁を全開するために加減弁を絞って主塞止弁に背圧をもたせ、主弁の差圧が定格圧力の10~15%になれば主塞止弁は全開できる。このとき今まで全閉していた左側の主塞止弁も全開する。

主塞止弁バイパスは主として起動負荷時に使用されるが、20%以下の低負荷で長時間運転する場合にも使用を推奨している。このような場合に加減弁から主塞止弁バイパスに切り替える方法は起動時の逆にすればよい。タービン停止時には通常主塞止弁バイパスを使う必要はない。

## 5. 発電機仕様

|         |                                            |       |         |
|---------|--------------------------------------------|-------|---------|
| 形 式     | TFCH <sub>2</sub> -KD                      |       |         |
| 容 量     | 水素圧力 2.0 kg/cm <sup>2</sup> にて 281,600 kVA |       |         |
|         | 水素圧力 1.0 kg/cm <sup>2</sup> にて 168,000 kVA |       |         |
|         | 水素圧力 0.05 kg/cm <sup>2</sup> にて 98,560 kVA |       |         |
| 力 率     | 0.85 (遅れ)                                  |       |         |
| 出 力     | 水素圧力 2.0 kg/cm <sup>2</sup> にて 239,360 kW  |       |         |
|         | 水素圧力 1.0 kg/cm <sup>2</sup> にて 143,616 kW  |       |         |
|         | 水素圧力 0.05 kg/cm <sup>2</sup> にて 83,776 kW  |       |         |
| 電 圧     | 12,600 V                                   |       |         |
| 相 数     | 3                                          | 周波数   | 60~     |
| 回 転 数   | 3,600 rpm                                  | 極 数   | 2       |
| 短 絡 比   | 0.62                                       |       |         |
| 接 続     | 4重星形12本口出                                  |       |         |
| 中性点接地方式 | 変圧器接地                                      |       |         |
| 絶縁種別    | 固定子、回転子ともにB種                               |       |         |
| 励磁機(別置) | 1,000 kW                                   | 375 V | 720 rpm |

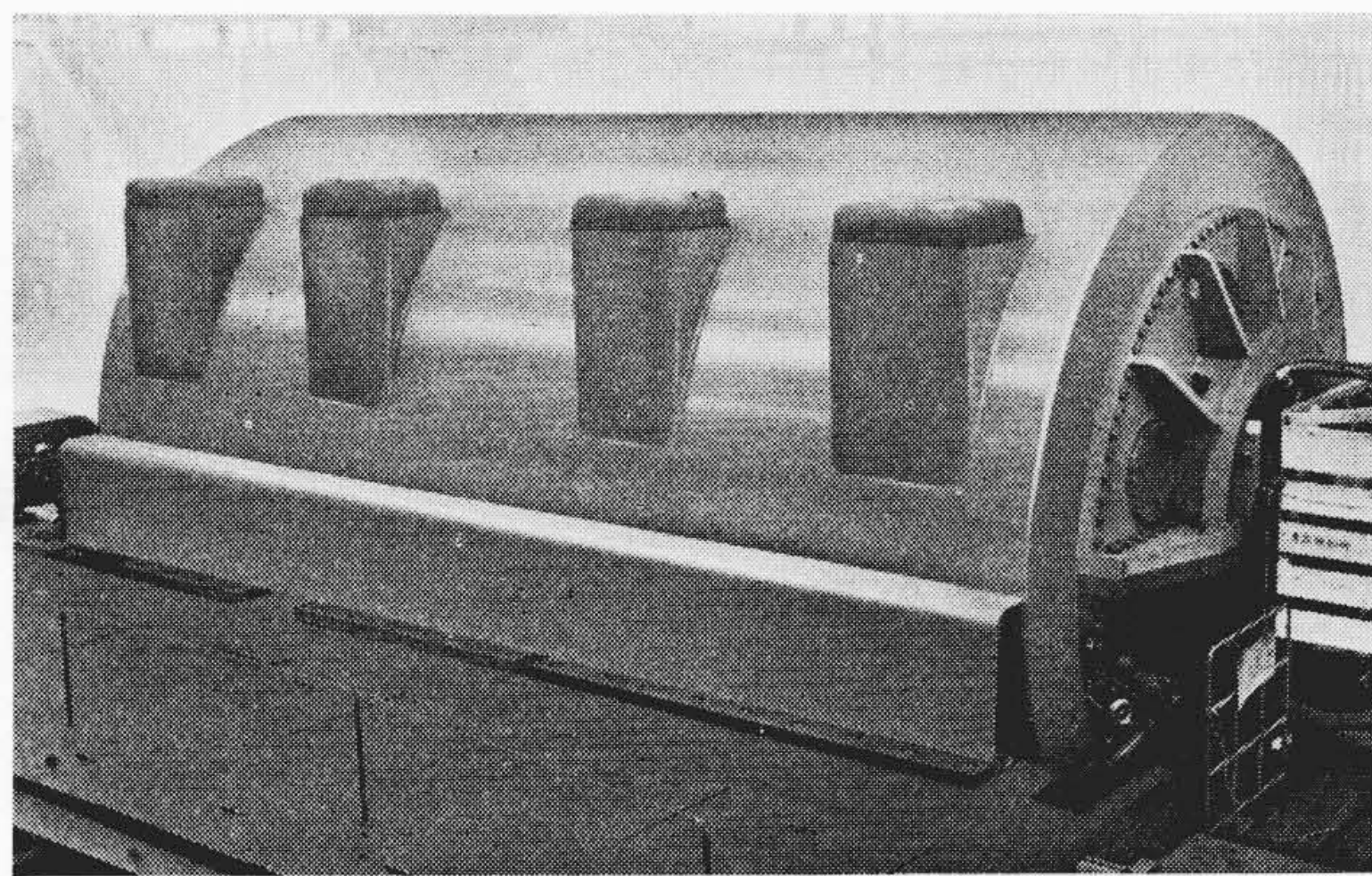
## 6. 発電機の特長

### 6.1 直接冷却形回転子

大容量タービン発電機では、常にシャフトが製作限度を決定している。シャフトの製作技術は絶えず進歩しているが、設計上の条件もあり現在のところ3,600 rpm 機では直径だいたい1,000 mm 胴部長だいたい6,800 mm ぐらゐの組み合わせが安定に運転できる限度と一応の目安が考えられている。

これより3,600 rpm の場合普通形水素冷却機の製作限度は約230,000 kVA 程度と考えられる。したがって本発電機は現状における普通冷却形機の限度を越えたものとなり、直接冷却形回転子の採用により、初めて製作可能になったものである。

回転子の直接冷却方式には種々のものがあるが、本機に採用されたものはギャップピックアップ形と称せられるものである。この方式の詳細は後述するが、その特長とするところは、回転子中空導体への冷却ガスを空けきから吸入し、中空導体を冷却後再び空けきに放出する方式である。この方式によれば、導体の通風路を軸方向に



第12図 工場完成の281,600 kVA タービン発電機

適当に分割できるので次のような利点がある。

- (1) ギャップピックアップのボレピングヘッドは回転子の自転によって生ずる回転方向の風速を利用している。したがってファンの風圧をあげる必要がなく、従来と同形式のファンで十分であり、風損はほとんど増加しない。
- (2) 軸方向に多数に分割できるので通風抵抗が小さくしたがって少量の動力で多量の冷却ガスを通すことができ、冷却ガスの温度上昇を低くすることが可能となり、コイルの最高温度と最低温度の差も小さくできる。

### 6.2 二重わく形固定子

固定子は外わくと鉄心部を別にして製作し、現地で一体に組み立てる二重わく構造をとっている。この構造は大容量機となり、輸送が困難になる場合に普通採用されるものであり、本機のほかに、関西電力株式会社春日出発電所向192,000 kVA 発電機も同様構造である。この構造は、固定子内わくに鉄心を積み、コイルを入れ組み立てられた鉄心部が垂直バネ板によって外わく内に支持されているものである。垂直バネはその構造上鉄心部の水平方向(半径方向)の振動はほとんど完全に吸収できるが、垂直方向(接線方向)の振動は吸収できないので垂直バネの内わく取付け位置は、接線方向の振動がほとんど無視できる点に決められている。

これにより、鉄心部に生ずる2倍周波数の磁気振動をほとんど完全に吸収できる無理のない弾性支持が得られる。

### 6.3 固定子の四回路並列接続

普通水素冷却機の場合、容量を増大して行くと一般に回転子コイルの温度上昇が、固定子コイルより先に限界に達する。

本機は回転子の冷却能力に限界がきたため、回転子のみの直接冷却を採用し、これに普通冷却形固定子を組み合わせたものである。

このように回転子を直接冷却にして小形にするとそれだけ固定子の電気装荷が増大することになり、固定子コイルの設計もまた制約される。ここに従来の方式である一回巻きコイルを2重星形に接続したのでは、相当高い端子電圧でしかも非常に深いスロットにしなければならず占積率が著しく悪くなり冷却の点でも好ましくなくなる。

これを解決するには、固定コイルにも全体冷却のような直接冷却形を採用するのも一つの方法であるが、本機では巻線に特殊な工夫を施した4重星形接続を採用している。これは並列回路数を増せば端子電圧を大幅に低減することができ、したがって対地絶縁厚さを薄くし占積率をよくして、銅線に十分なスペースを与え、冷却が良好になる点に着目したものである。

元来、2極機では採用できる並列回路数は2が限度であり、これを越えると各回路間に平衡した電圧を得ることはできないが、巻線の接続を工夫すれば各回路間の電圧の不平衡は実用上無視できるようになる。

本機は4重星形接続を使用しているため、その端子電圧は従来の常識よりはるかに低い12,600Vとなっている。なお普通水素冷却機の224,000kVA 3,000rpm機も同様の4重星形接続を採用し、端子電圧は12,000Vとなっている。

## 7. 発電機の構造

本機の断面構造を示すと第13図のとおりである。回転子の構造は空げきから水素を吸入したり排出したりするので普通冷却形とは大いに異なっている。しかし外見上は、耐爆気密構造の外わくの四隅および中央部に計8本のガス冷却器を取り付けていることと、固定子わくの両端から口出線用高圧ブッシングを各6本ずつ計12本出している点は224,000kVA 3,000rpmとして多数製作納入したものと大差はない。

### 7.1 固定子

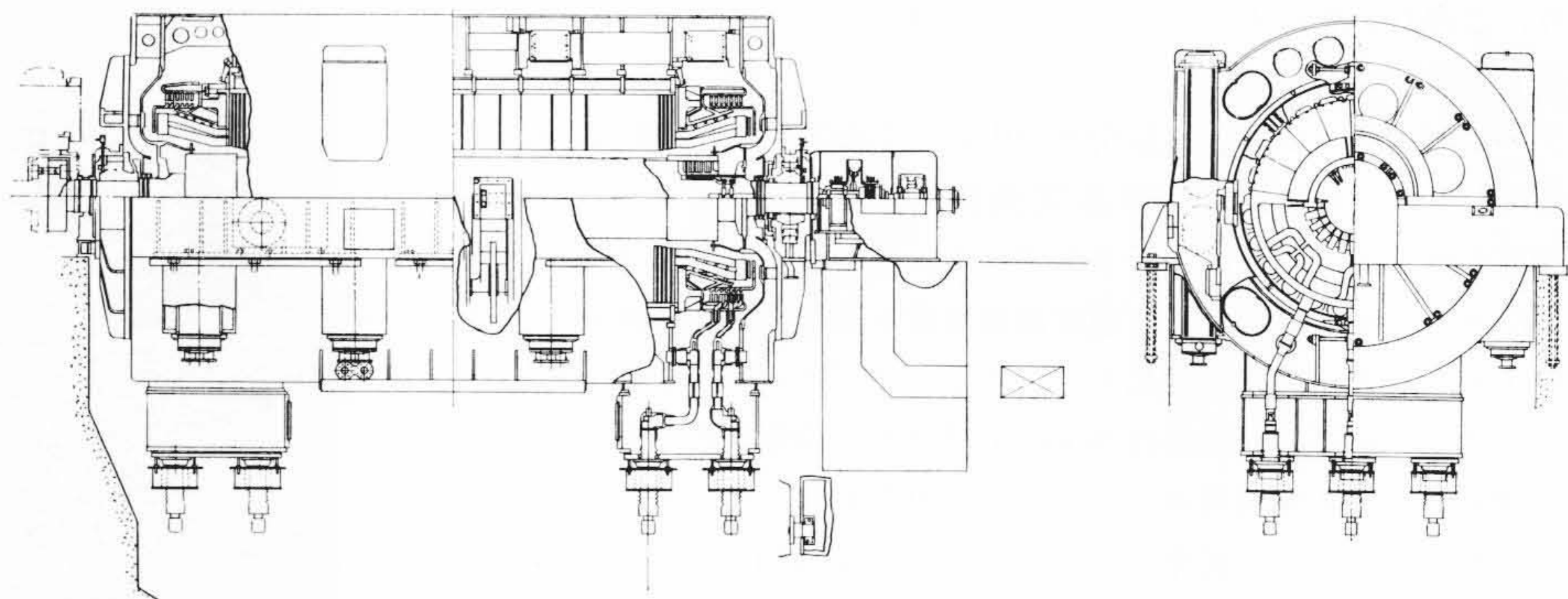
#### 7.1.1 外わく

当初の設計では、輸送制限から外わくは軸方向にほぼ等分に3分割したものを、それぞれ別々に製作し、おのこのフランジをボルトにより締めつけ一体化する構造であったが、輸送状況が詳細に判明するにつれ外わくは一体のまま輸送できることがわかり、3分割構造のままの設計ではあるが、工場にて合わせ目のフランジをボルト締めし、シール溶接して完全な一体外わくとして製作した。外わく内には多数の仕切板が軸方向に配列されており、これによりわく内の空間が入気室と排気室に区画され、それに適当な通風管群を設け、第14図のようにギャップピックアップ形回転子に適合した理想的通風回路を形成している。

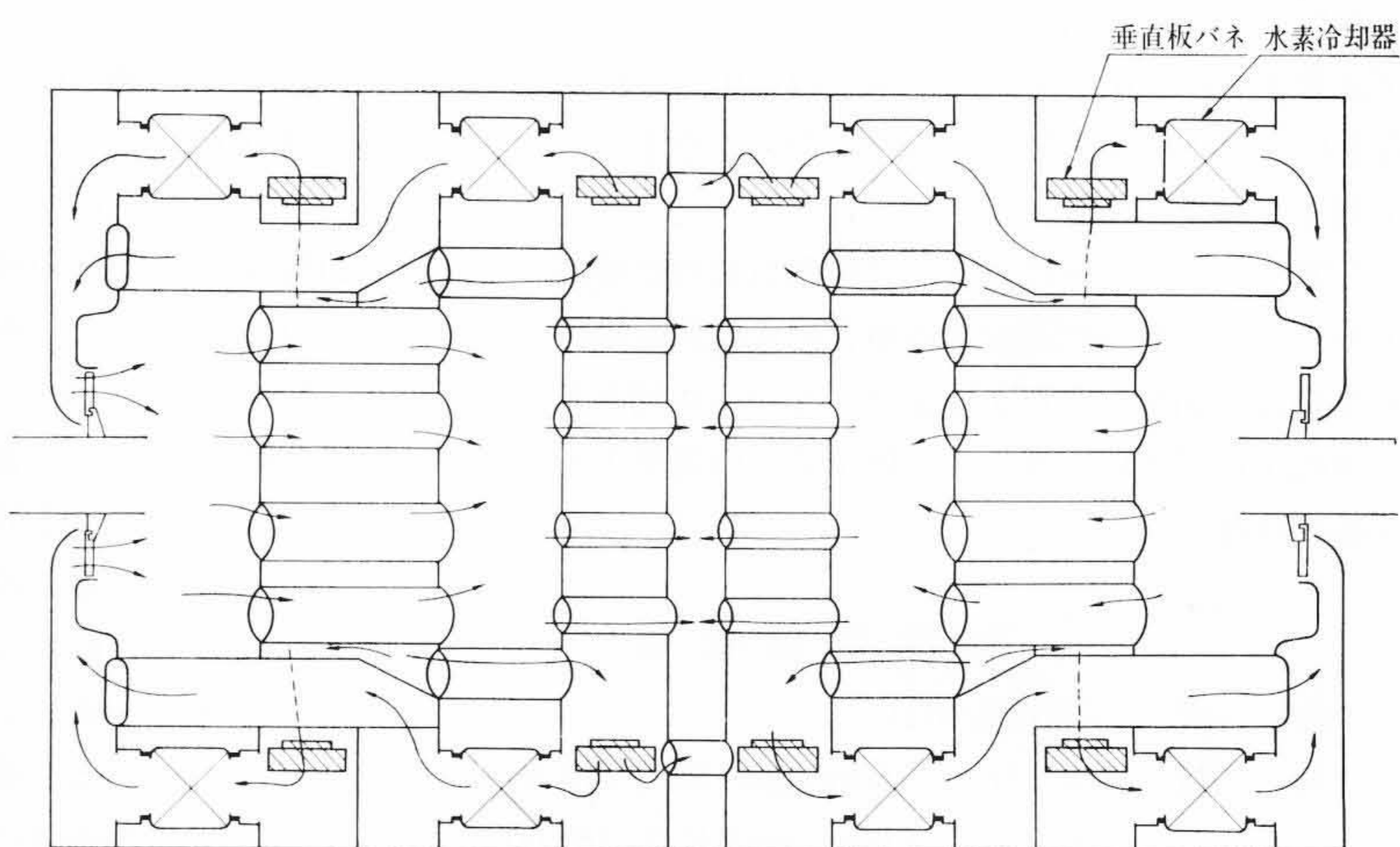
#### 7.1.2 内わくと垂直バネ支持

溶接構造の内わくのキーパーに鉄心が積層されて鉄心部を作り、これが垂直バネ板を介して外わくに支持されている。第15図は完成した鉄心部の写真である。

第16図に示すように、垂直バネ板の一端は外わくに強固に溶接された座にボルト締めされ、他端は内わく中心線上に取り付けられる。このバネ板は左右両側に4枚ずつ取り付けられており、鉄心部の重量およびトルクを支持するばかりでなく、鉄心の半径方向の磁気振動を外わくに伝えないようにしてある。この場合鉄心の接線方向の磁気振動は吸収できないので、垂直バネの支持位置



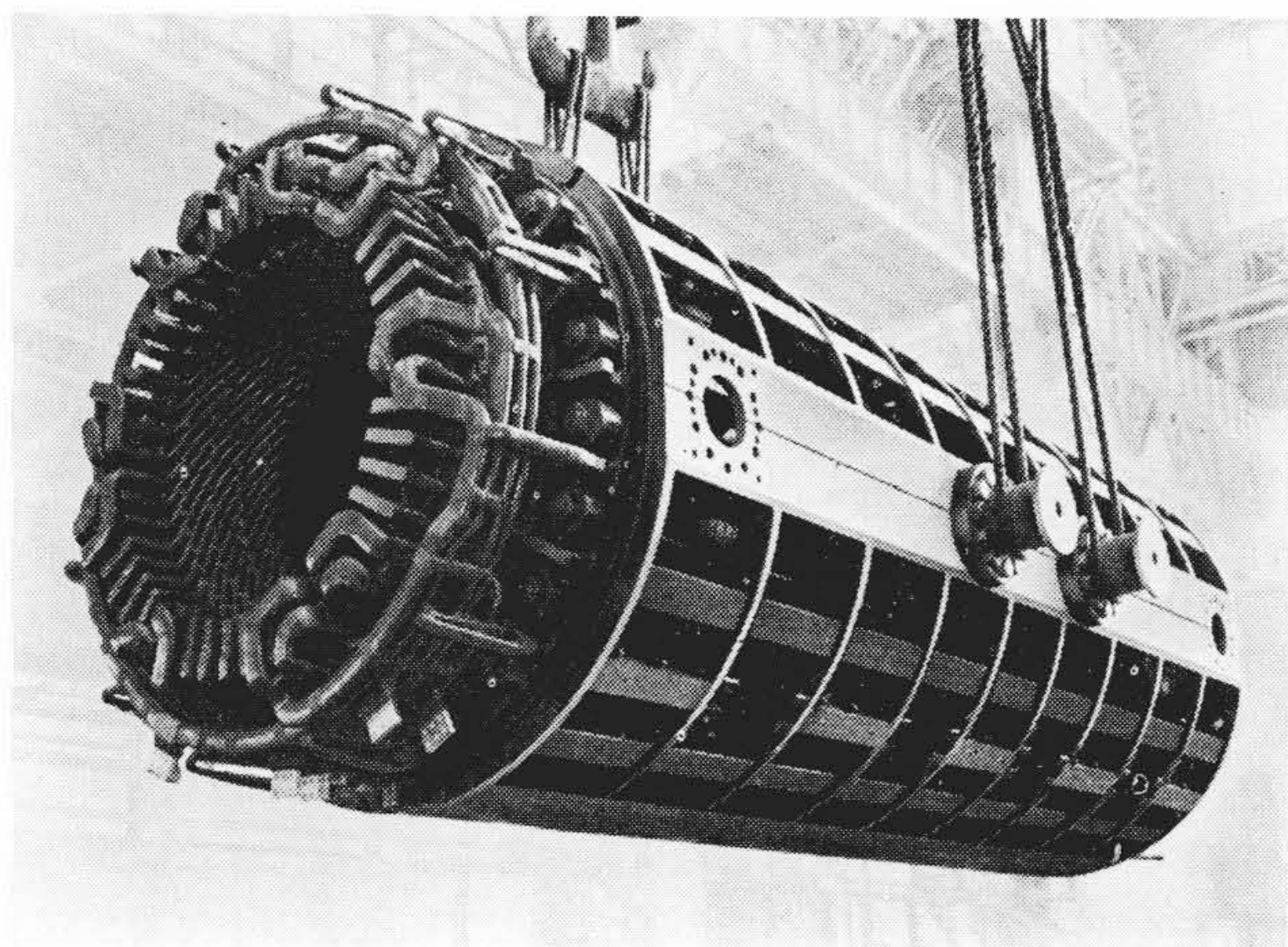
第13図 281,600 kVA タービン発電機断面図



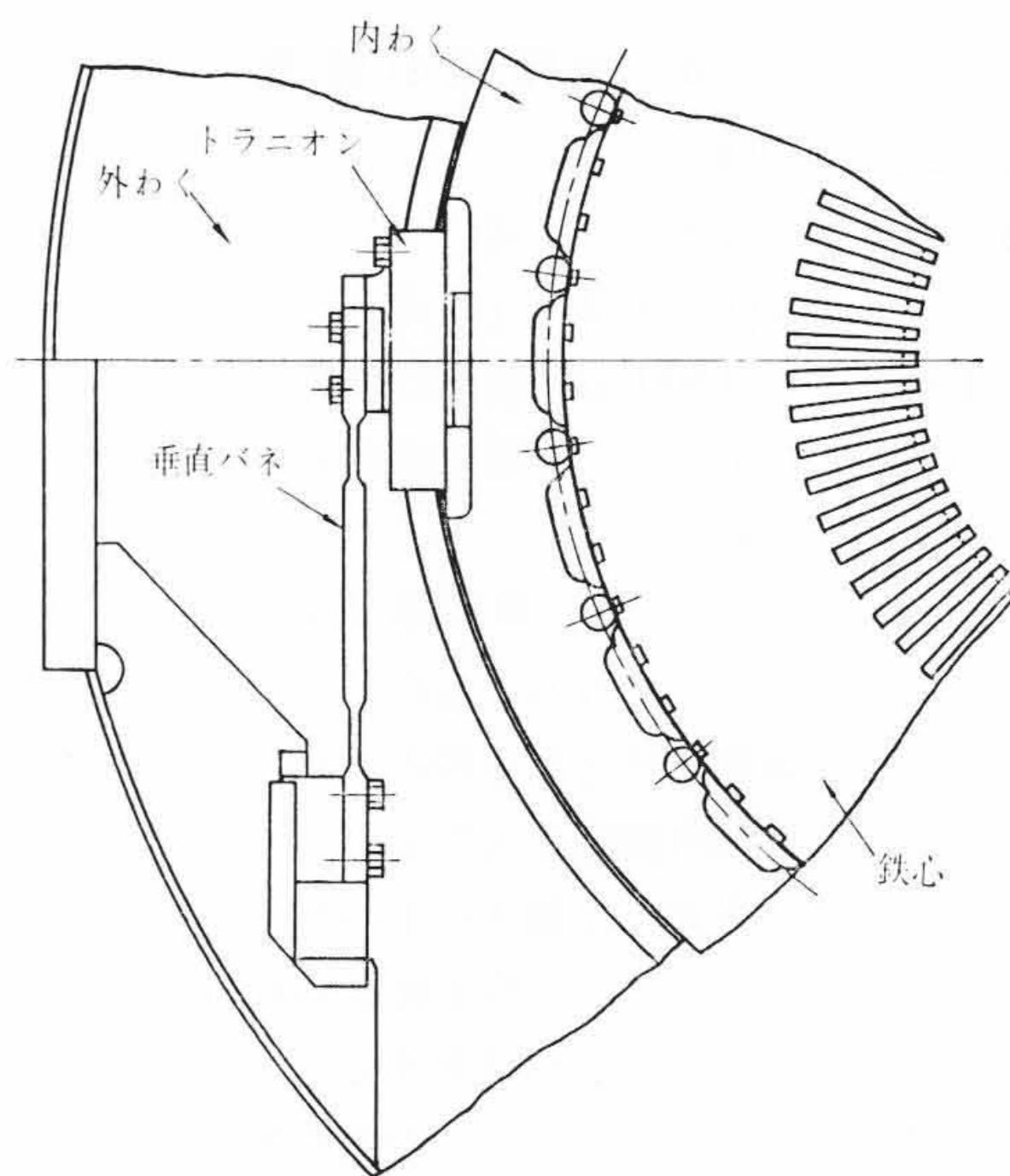
第14図 固定子通風分布図

は内わくの接線方向の振動がほとんど無視できる点でなければならない。

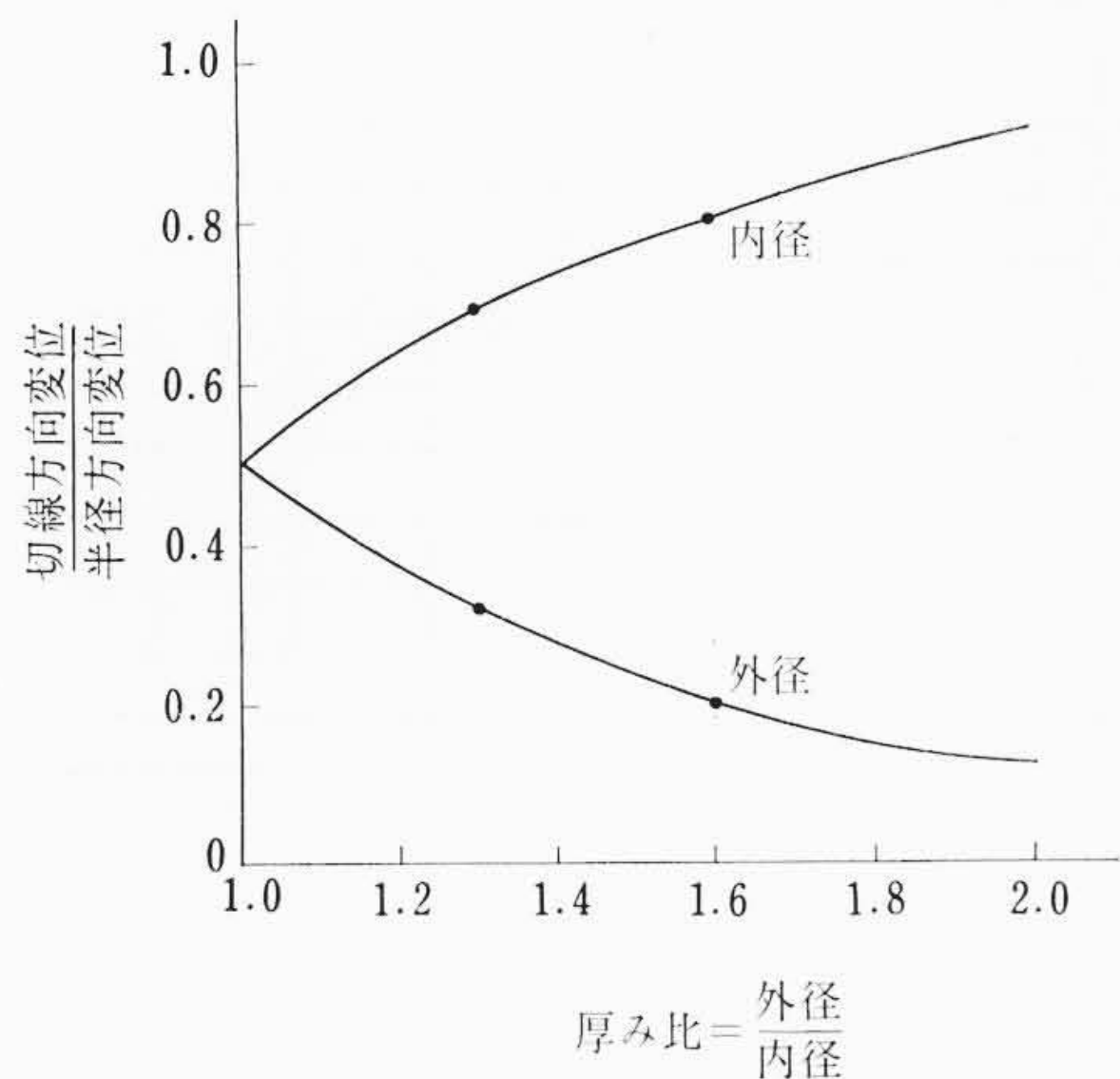
一般に厚みのない薄リングがだ円振動すると、その接線振幅は半径振幅の $\frac{1}{2}$ となるが、リングの厚みを増して行くとリング外周における接線振幅は減少して行き、接線振幅/半径振幅とリング厚みの関係は第17図のようになる。本機では垂直バネ支持点における内わくの接線振幅を大幅に減少するため、鉄心背部の磁束密度を下げ鉄心背部高さを大きくすると同時に、円周方向に4分割された内わくを鉄心積後、強固にボルトで締め付け一体化している。しかしいかに厚いリングでも接線方向を零にすることは不可



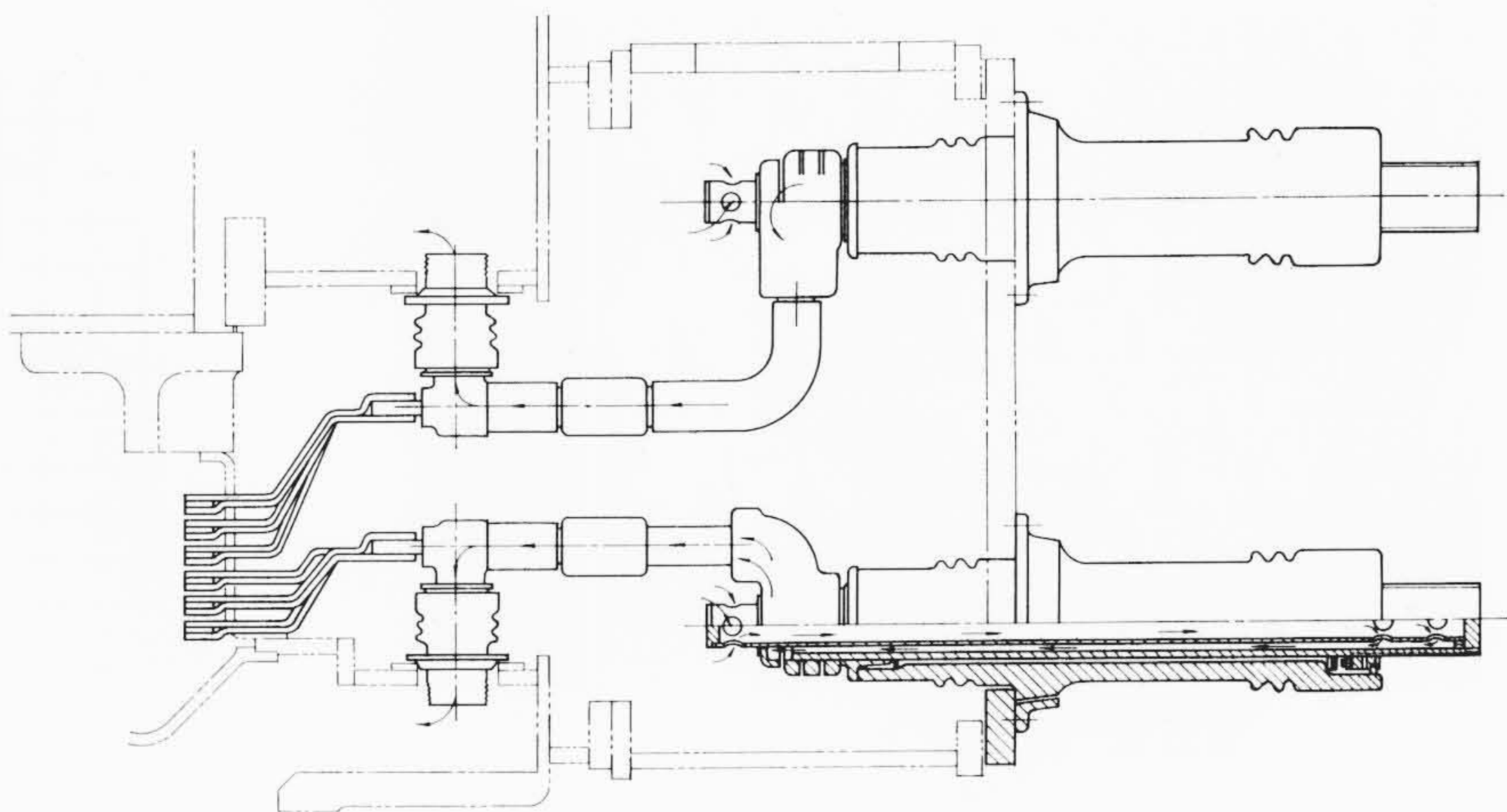
第15図 完成した鉄心部



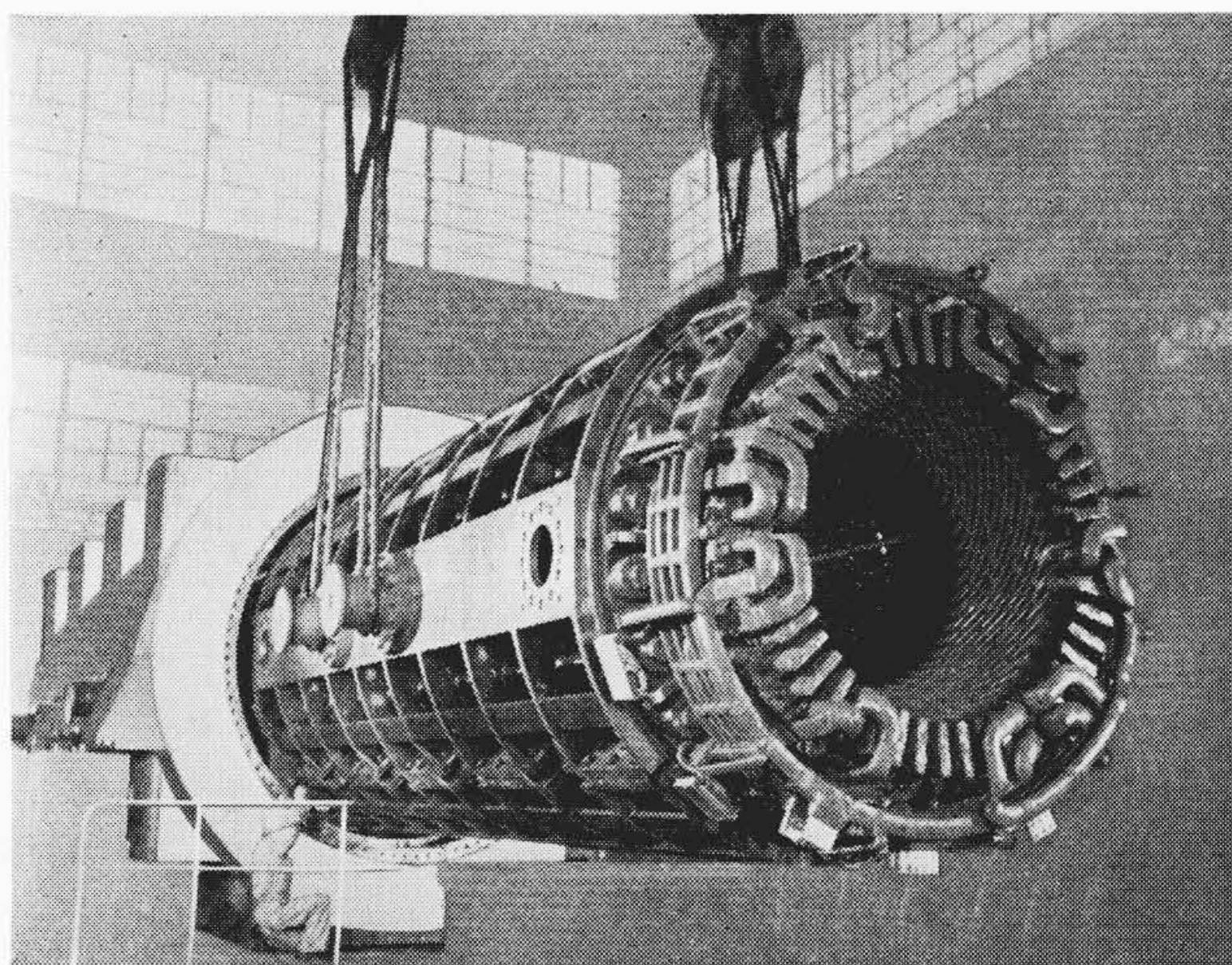
第16図 垂直バネ取付説明図



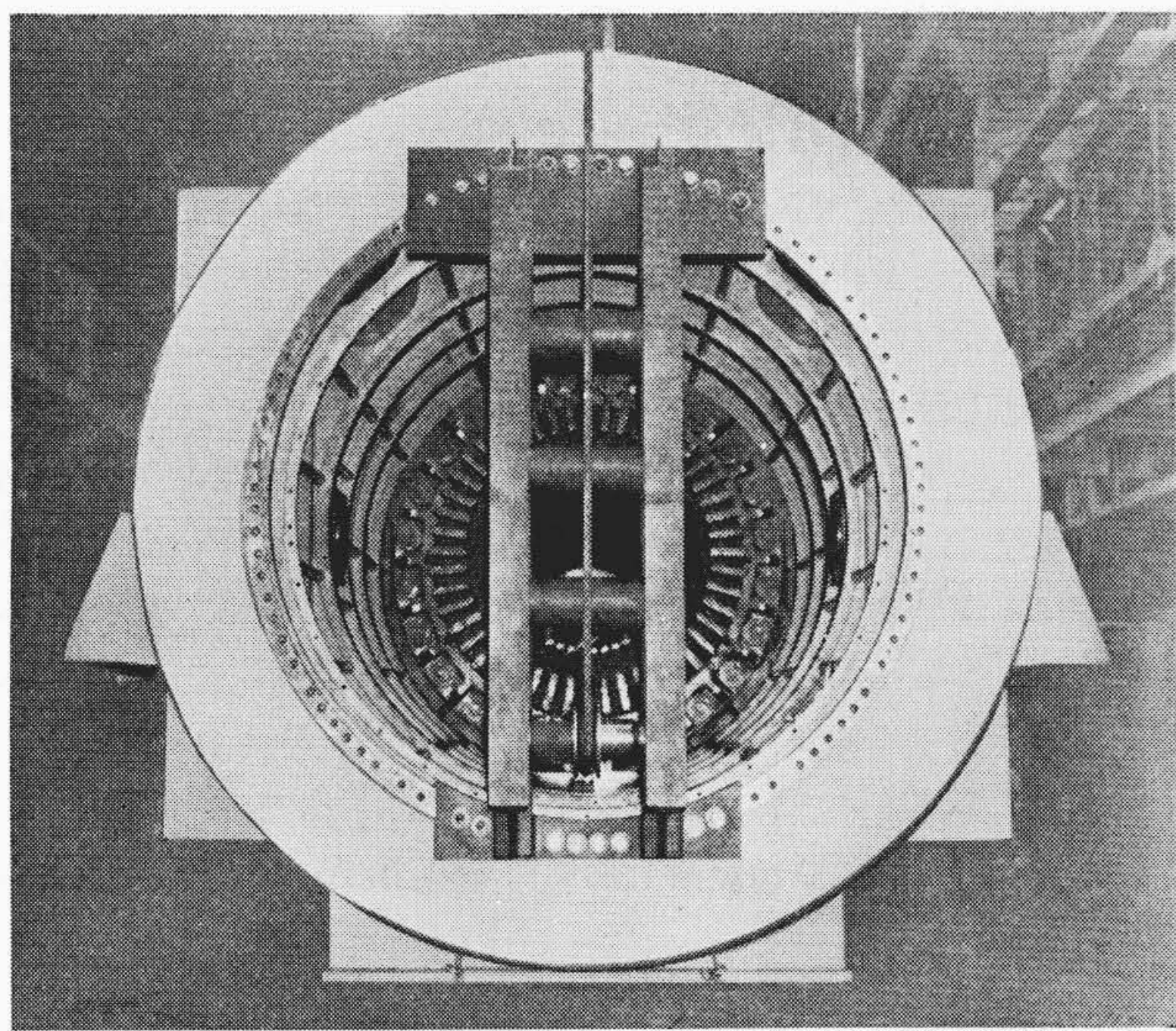
第17図 円板の切線方向変位



第20図 直接冷却式がい管



第18図 鉄心部そう入作業 (スリップリング側)



第19図 鉄心部そう入作業 (タービン側)

能であるが、リングから突起を出すと突起上に接線振動を零にする点が求められる。本機では内わく外周にすぐバネ板を取り付けず、内わく外周にトラニオンを取り付け、これに突起の作用をさせ、そのトラニオンにバネ板を取り付ける方法を採用し、事実上接線振動の無視できる点を支持した。

垂直バネには自重トルクのほかに短絡時の荷重も支持しなければならないが、8本の垂直バネの荷重分担が異なっていたり、垂

直バネが傾斜して取り付けられているとバックリングを起こす心配があるので、ストレインゲージ、レベルゲージを駆使し慎重に作業した。

第18図、第19図は鉄心部を外わく内にそう入する作業を示したものである。

### 7.1.3 固定子鉄心

方向性ケイ素鋼板を採用し、鉄損の大幅な減少を図った。発電機の大容量化に伴い、電機子反作用が増大し、固定子コイル端部の漏れ磁束による漂遊負荷損が大きくなってくる。こうした漏れ磁束を減少せしめるため、従来から鉄心端部の歯押え金具や鉄心締付け金具あるいはコイルささえ金具などには非磁性金属を使用してきたが、さらに本機では鉄心締付金具を銅板でシールドして効果を上げている。

また鉄心両端部の歯先には細みぞを切り込んで、この部分に集中する漂遊磁束により歯端が過熱することを防止している。

### 7.1.4 固定子コイル

本機は多並列回路式になっていることは前述のとおりであるが、低電圧の採用に伴う大きな電機子電流を取り扱うように4重星形結線の巻線のうち2並列回路ずつまとめて、固定子わく両端部よりそれぞれ6本合計12本のブッシングより取り出されている。

両端に取り出されたそれぞれの電圧と位相は、全く等しく各組の並列回路内に僅少な循環電流が生ずるに過ぎない。両端のブッシングの口出線は密閉母線によって、別々に引き出され、昇圧変圧器、低圧側端子前でそれらが並列されている。

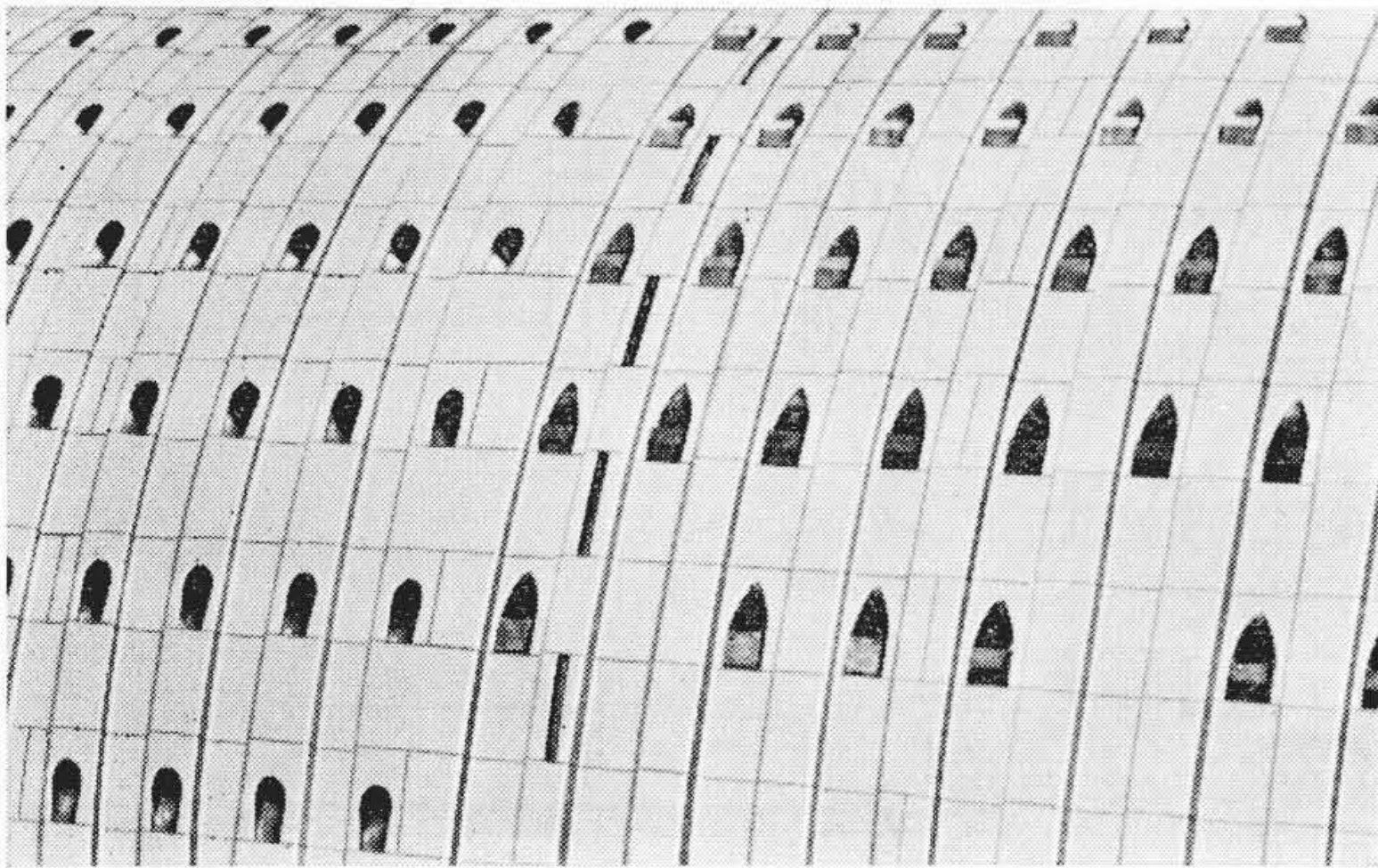
各線輪の絶縁には日立製作所で開発されたSLSワニスが採用されている。

### 7.1.5 気密ブッシング

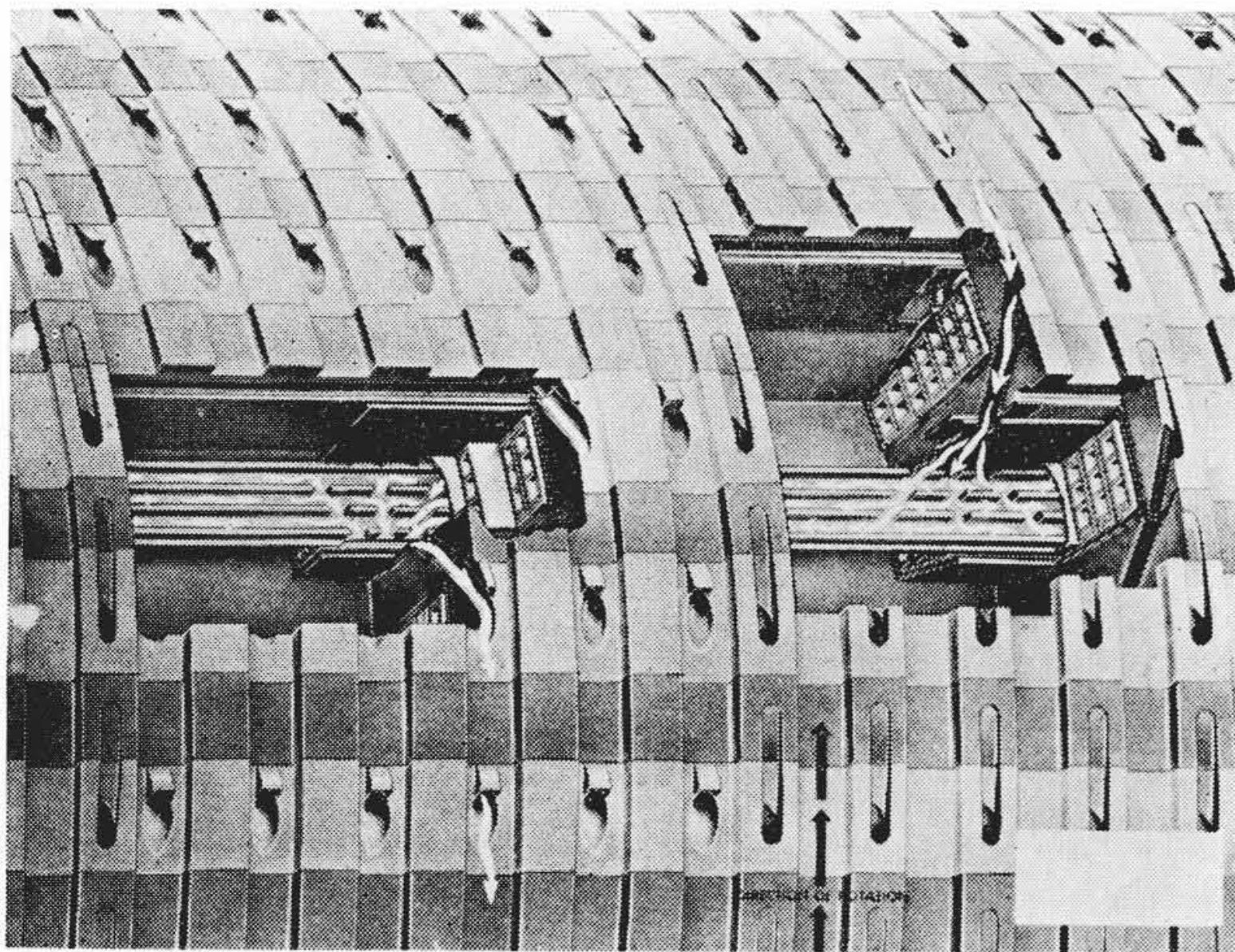
本機のように電機子電流が大きく1本あたり6,450Aにもなる場合には、出力端子のがい子内導体の温度上昇が問題となるが、第20図に示すような直接冷却式がい管の使用によって解決された。これはがい子内の導体自身を中空にし、機内の差圧を利用してこの中に水素ガスを循環させて冷却するもので、これにより気密ブッシングの寸法の大きくなるのを防いでいる。

### 7.2 回転子

回転子はギャップピックアップ形と称し、前述のように空けきの水素ガスを直接回転子コイル内部に導入して熱を取り去る方法をとっている。第21図は回転子の表面の写真であるが、軸方向に吸入孔グループと排出孔グループが数百mm間隔で交互に分布している。同図左方が吸入孔グループであり、右方は排出孔グループになっている。このギャップピックアップ通風機構を立体的に表わした



第 21 図 回 転 子 鉄 心 部 表 面



第 22 図 回 転 子 内 に お け る 水 素 の 流 れ 図

のが、第 22 図である。すなわち吸入孔グループによりエアギャップ部から、すくい込まれた水素は通風路を左右軸方向に分かれて流れ、内部の発生熱を奪い排出孔グループから排出される。

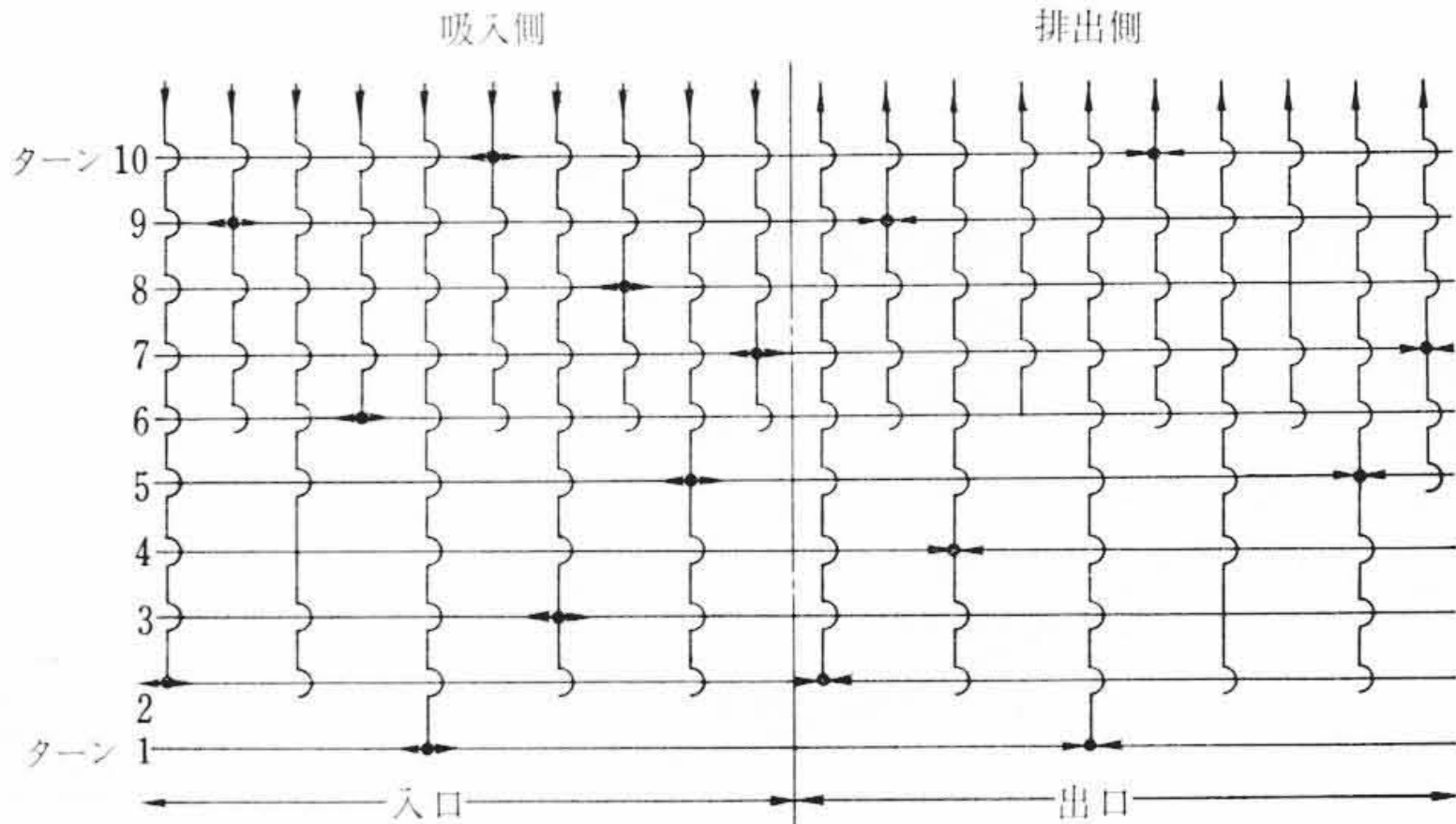
このように吸入孔グループと排出孔グループが交互に配置されているので導体の温度上昇は他の一般の内部冷却方式とは異なり軸方向に対しほぼ一定に保たれ、絶縁物に加えられる熱劣化は少ない。

また特別な高圧ファンも必要としないし水素圧力も  $2\text{ kg/cm}^2$  で十分な冷却効果があげられるので通風損があまり増加せず、きわめて良好な効果があげられる。水素の吸入は回転によるポンプ作用によるから、回転子表面の周速とガスの吸入孔、排出孔の形状により左右される。いま通風経路の一部を図線で示すと 第 23 図 の よう になっ

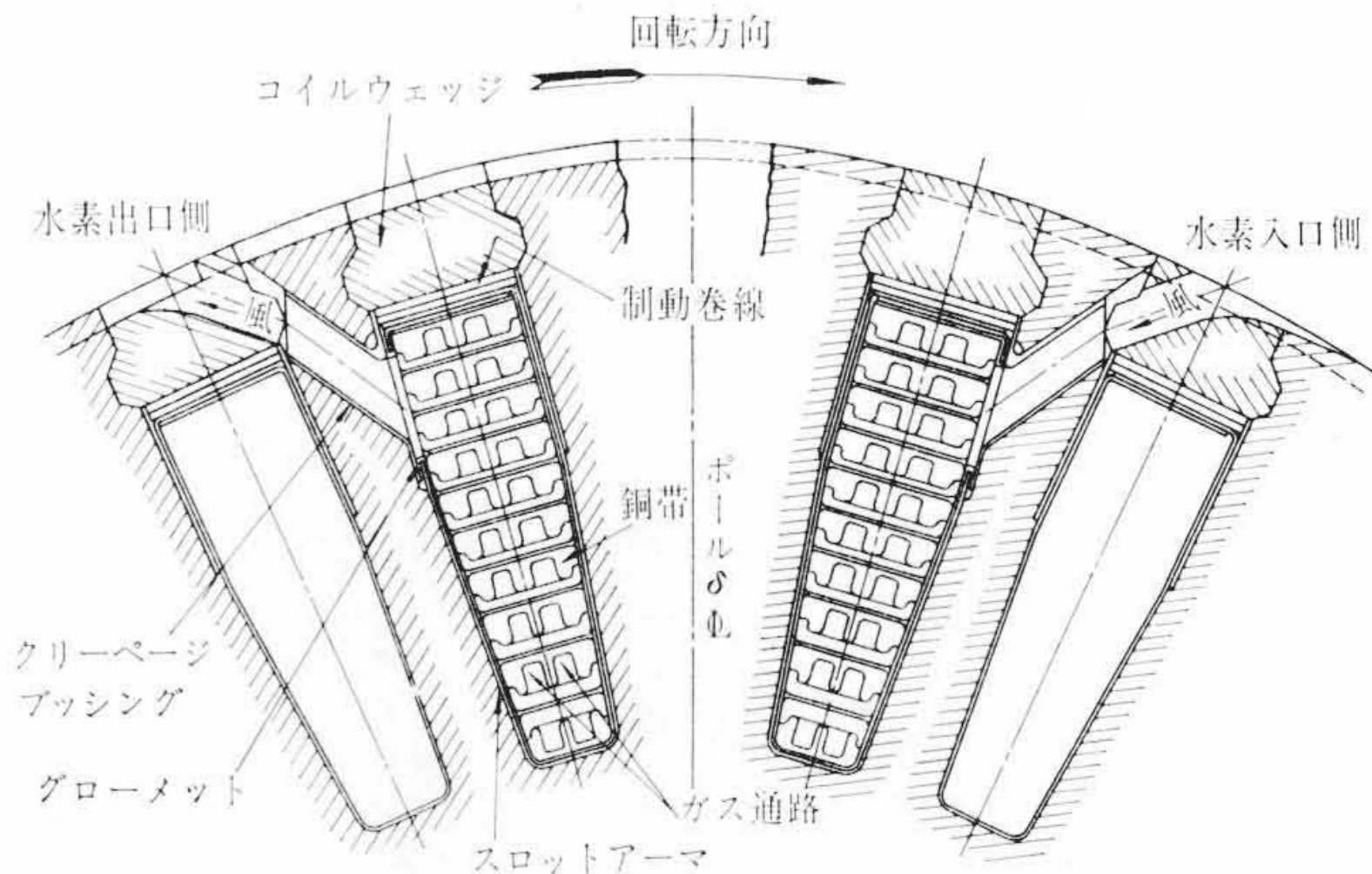
### 7.2.1 回 転 子 軸

第 24 図 は回転子鉄心部の断面を示したものである。普通冷却形の場合に設けられるコイルスロット間のベンチレーションスロットやコイルスロット底のサブスロットはなく、そのかわり、回転子コイルへ水素ガスを導入したり排出するための通風孔が歯部に斜方向にあけられている。この通風孔はコイルウエッジの通風孔と一緒にあって吸入孔、排出孔を形成しその総数は 2,000 個に近いので機械加工の精度には特に注意を払った。

3,600 rpm の機械としては現在において遠心力に耐えうる軸材の限度といわれる径を取っているため、軸材の受入検査には慎重を期した。すなわち材力試験のほかに超音波探傷試験、ヒートインジケーション試験、いおうてん写などを行なった。素材重量は約 45 トンで 160,000 kVA 級とほぼ同じ重量であり、組成は Ni-Mo-V 鋼である。



第 23 図 回 転 子 通 風 ダ イ ヤ グ ラ ム



第 24 図 回 転 子 鉄 心 部 断 面

### 7.2.2 保 持 環

本機のように電機子反作用の大きな場合、従来の磁性保持環では低励磁運転時電機子漏れ磁束による鉄心端部の温度上昇が高くなるので非磁性保持環を使用し、漏れ磁束回路の形成を防ぐこととした。またこのため漂遊負荷損も大幅に減少できた。

保持環の受ける遠心力は非常に大きく、その切線方向の応力は非常に高くなるので、これに耐えうる材力を有する均一なオーステナイト鋼の大径のリングを製作することは製鋼技術上むずかしい問題であったが、日本製鋼所のご努力によりわれわれの要求に適した非磁性保持環の入手が可能になった。保持環の材料は Cr-Mn 系の非磁性鋼で熱間鍛造、冷間鍛造により所定の材力を出し最後に応力除去焼鈍を行なっている。

このリング材は冷間鍛造の関係で内径側が外径側より材力が高くなるので、保持環材料として有利な条件を備えている。

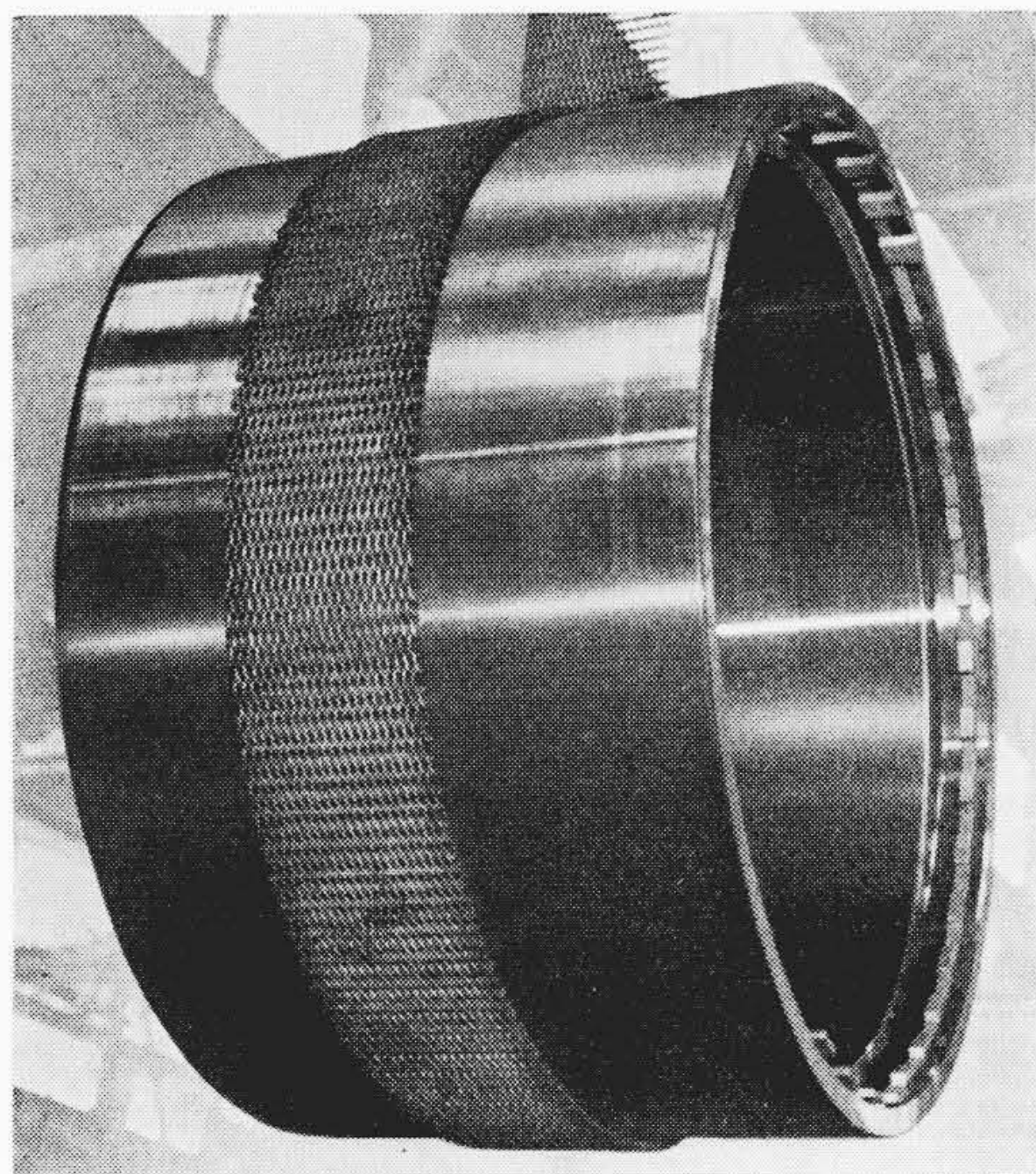
この保持環は従来形と異なり、回転子軸の鉄心部分胴部端部に焼ばめすることとした。この接触部分があるために、短絡事故、不平衡故障時に焼ばめ部に異常に大きな電流が流れ過熱するので、これを防止するため、制動巻線を設け、保持環内で制動巻線を短絡リングにより短絡せしめている。第 25 図 は保持環の写真である。

### 7.2.3 回 転 子 コ イ ル

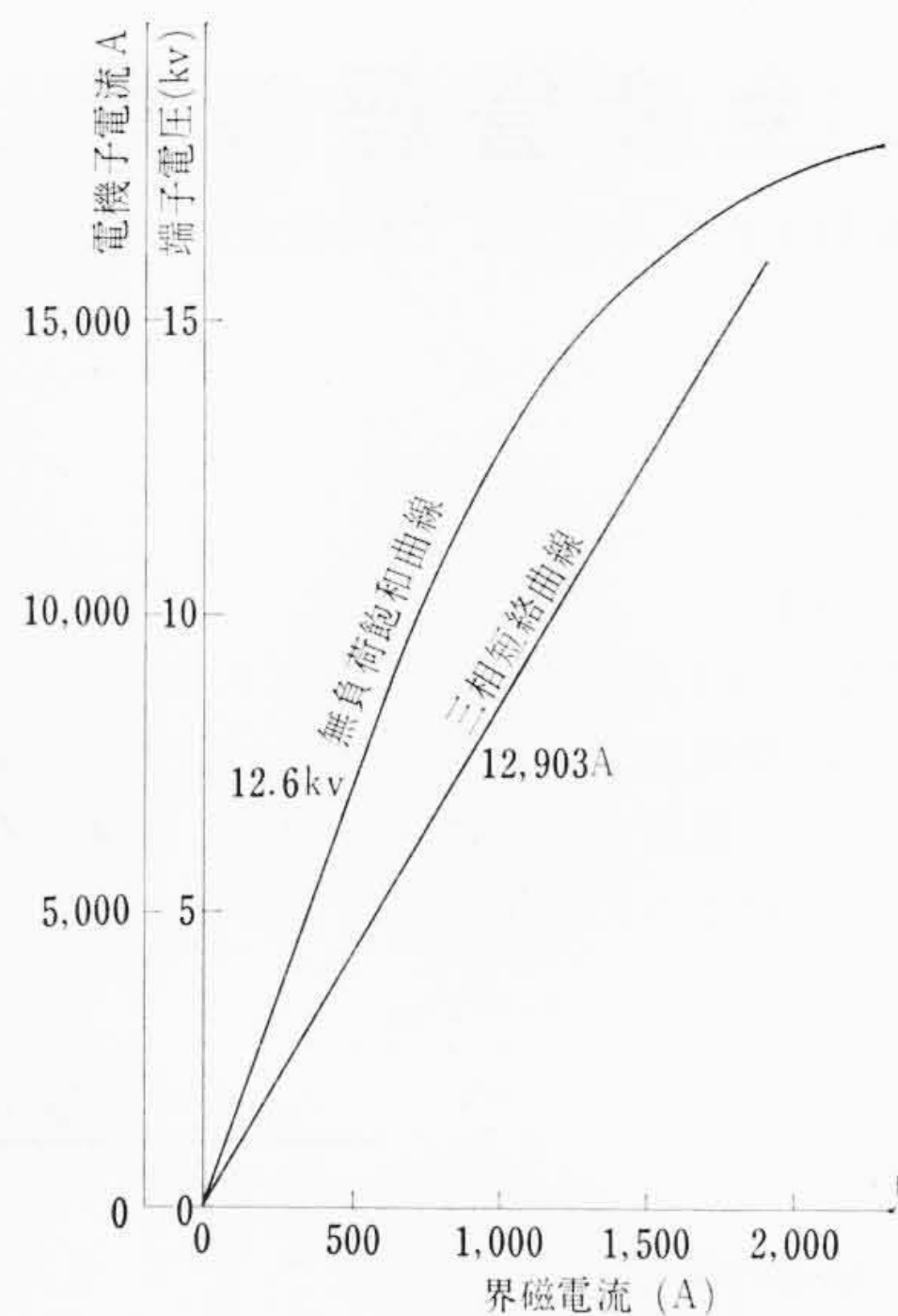
第 22 図 に示すようにくし形、みぞ形の両断面の銅帯を組み合わせて冷却水素ガスの通路を形成させた軸に平行の直線部分と保持環下の軸と直角方向の銅帯（エンドターン）により形成されている。この接合部分は直角となっており、慎重な銀ろう付作業が行なわれている。しかもろう付部は X 線写真により銀ろうが十分内部まではいっていることを確かめている。

この異形銅帯は銀入銅を所定の断面形状に押し出し成形したもので通風孔の仕切り、側面前などは機械加工により行なわれた。

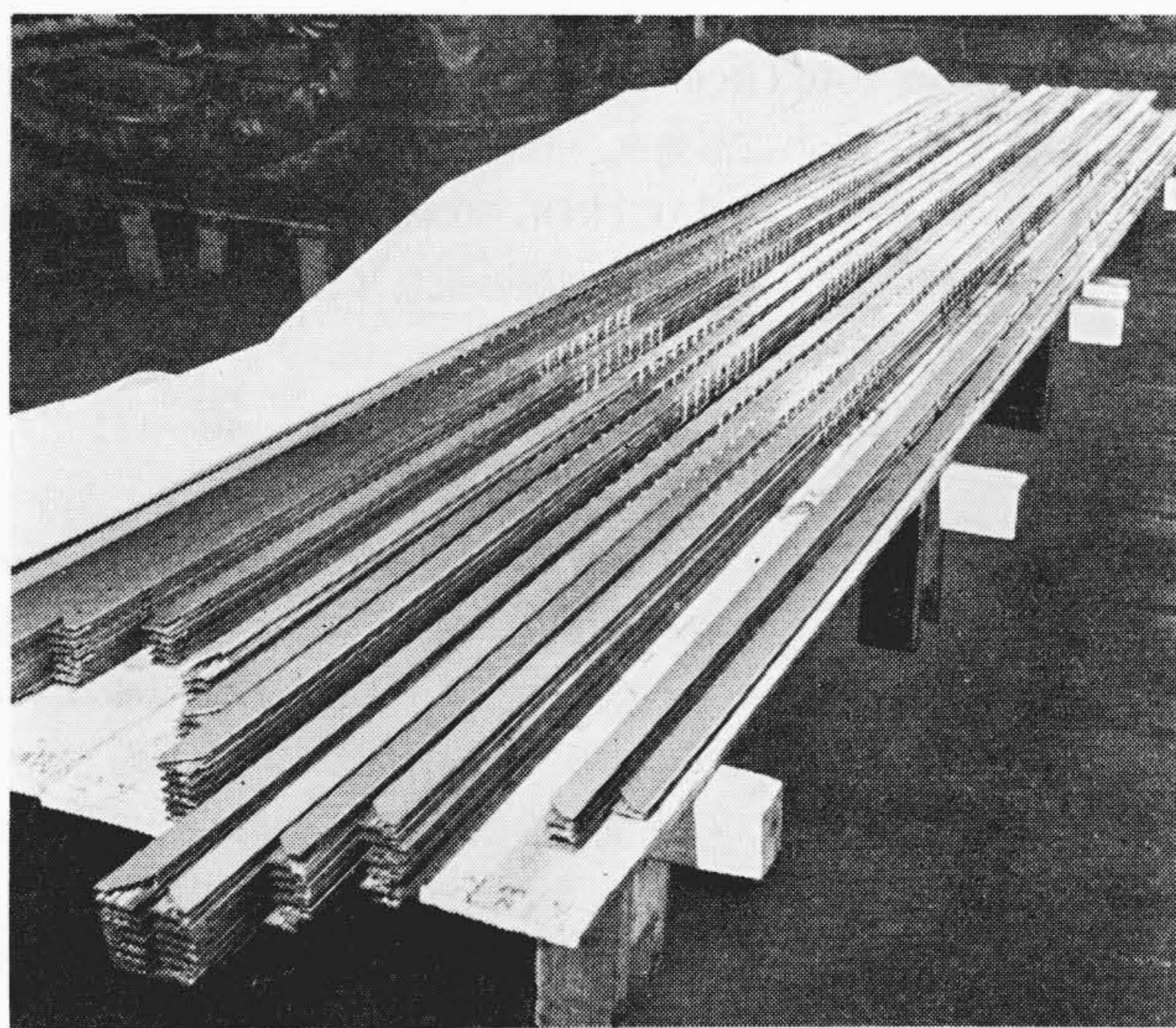
成形されたコイルの一部を 第 26 図 に示す。成形されたコイル



第25図 保 持 環



第27図 特 性 曲 線



第26図 回 転 子 コ イ ル

第1表 温 度 上 昇 試 験 結 果

| 水 素 圧 (kg/cm <sup>2</sup> ) |       | 2.0  | 1.0  |
|-----------------------------|-------|------|------|
| 固定子コイル (°C)                 | 保 証 値 | 45   | 50   |
|                             | 試 験 値 | 32   | 21.1 |
| 回転子コイル (°C)                 | 保 証 値 | 74   | 76   |
|                             | 試 験 値 | 46.7 | 41.8 |

第2表 各 出 力 に お け る 効 率

| 出 力 (kW)                    | 239,360 |       | 143,616 |       | 83,776 |       |
|-----------------------------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|
| 水 素 圧 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 2.0     |       | 1.0     |       | 0.05   |       |
| 力 率                         | 1.0     | 0.85  | 1.0     | 0.85  | 1.0    | 0.85  |
| 損 失 (kW)                    | 1,929   | 2,491 | 1,346   | 1,596 | 1,051  | 1,171 |
| 効 率 (%)                     | 99.20   | 98.97 | 99.07   | 98.91 | 98.76  | 98.62 |

は主軸コイルスロットに収められコイルウエッジで押えられている。

層間絶縁にはガラス繊維を主体としたU形絶縁物を使用している。

回転子表面から吸入された水素ガスは通風孔からスロット絶縁にあけられた穴を通り、コイル内の通風路にはいり逆の順序で出

て行くのである。したがってその部分の絶縁をいかにするかは重要な問題である。吸入孔、排出孔の部分やスロット絶縁の穴部分の保護に対しても層間絶縁と同様のガラス繊維を主体とするポリエステル絶縁物の成形したものを使用している。

#### 7.2.4 スリップリング

直接冷却形の回転子を採用した場合にはその励磁電流値は非常に高くなるので、冷却方式を特に考慮したスリップリングが必要となる。すなわち第13図の構造断面図に示すように2個のスリップリングの間にラジアルファンを取り付け、冷却風がブラシ間を通りスリップリングの表面を横切って流れるようにし、また環の表面近く軸方向の穴を通して風がその中を流れるようにしてある。

また励磁電流値が高いことは数多いブラシを必要とし、したがって中広いリング表面を必要とし取り付け軸は長いオーバーハングの軸となるので万一を考慮してその端部に振れ止めのための軸受を取り付けてスリップリングの振動が大きくなるのを防いでいる。

### 8. 工場試験結果

#### 8.1 各種特性

無負荷飽和特性および三相短絡特性は第27図に示すとおりである。短絡比は281,600 kVAを基準にして0.64、電圧変動率は239,360 kWから無負荷とした場合、力率1.0で30.2%、力率0.85で42.5%である。

#### 8.2 各種定数

281,600 kVAを基準とする各種リアクタンスおよび時定数は下記のとおりである。いずれも不飽和値である。

|            |                   |         |
|------------|-------------------|---------|
| 同期リアクタンス   | X <sub>d</sub>    | 156.5%  |
| 過渡リアクタンス   | X <sub>d</sub> '  | 34.5%   |
| 初期過渡リアクタンス | X <sub>d</sub> '' | 28.0%   |
| 逆相リアクタンス   | X <sub>2</sub>    | 21.2%   |
| 零相リアクタンス   | X <sub>0</sub>    | 12.4%   |
| 短絡初期過渡時定数  | T <sub>d</sub> '' | 0.025 秒 |
| 短絡過渡時定数    | T <sub>d</sub> '  | 0.876 秒 |
| 電機子時定数     | T <sub>a</sub>    | 0.31 秒  |

#### 8.3 温度上昇

温度上昇は風損、鉄損、銅損のそれぞれのヒートランから推定したが、第1表のように試験値は各水素圧とも保証値に対し十分の余裕を持っている。

#### 8.4 効 率

各水素圧における最大出力のときの規約効率を第2表に示したが保証値に対していずれもすぐれた成績を示している。

### 9. 結 言

以上日立製作所において製造された、中部電力株式会社新名古屋火力発電所向 220,000 kW 再熱タービンおよび 281,600 kVA タービン発電機の概要について述べた。本機は60サイクル地区における国産最大級の容量を有するもので、特に高効率と高信頼度に重点をおき慎重に製作されたものである。本機の完成は、今後ますます大容量化していく火力発電プラントに対して、われわれに自信を与えるものである。