

中部電力株式会社武豊火力発電所納

262,388 kVA タービン発電機

262,388 kVA Turbine-generator for Taketoyo Power Station, Chubu Electric Power Co., Inc.

西 政 隆* 斉 藤 清*
Masataka Nishi Kiyoshi Saitō**要 旨**

このたび、中部電力株式会社武豊火力発電所納 220,000 kW 火力発電設備一式が現地にて据付完了し、運転開始されたが、本設備のタービン発電機は最新のエポキシレジン絶縁の固定子コイルの使用、回転子コイルの冷却にダイヤモンドフロー形ギャップピックアップ方式の採用などの新機軸を備えている。本論文はこれら新構造を主体に本機の特長について言及した。

1. 緒 言

中部電力株式会社武豊火力発電所第1号機として 220,000 kW 再熱タービンおよび 262,388 kVA タービン発電機を製作納入した。

本機は既納の中部電力株式会社新名古屋火力発電所第6号機とタービン定格出力は同一であるが、その後あらたに開発された新技術が各所におり込まれた最新の設計になっている。たとえば発電機固定子絶縁に最新エポキシレジンの採用、回転子コイルの冷却にダイヤモンドフロー形ギャップピックアップ方式の採用などの新機軸を備えている。タービンについては本号別項に記載あるので、発電機についてのみ述べることにする。

2. 発電機仕様

形 式	TFQQL-KD
容 量	水素圧力 2.0 kg/cm ² にて 262,388 kVA 水素圧力 1.0 kg/cm ² にて 157,433 kVA 水素圧力 0.05 kg/cm ² にて 91,836 kVA
力 率	0.90 (遅れ)
出 力	水素圧力 2.0 kg/cm ² にて 236,150 kW 水素圧力 1.0 kg/cm ² にて 141,690 kW 水素圧力 0.05 kg/cm ² にて 82,653 kW
電 圧	12,000 V
相 数	3 周波数 60 Hz
回 転 数	3,600 rpm 極 数 2
短 絡 比	0.58
接 続	4 重星形 12 本口出し
中性点接地方式	変圧器接地
絶 縁 種 別	固定子、回転子とも B 種
励 磁 機 (別置)	1,000 kW 375 V 720 rpm

3. 発電機定格

従来水素冷却タービン発電機の最高水素圧力における定格出力はタービン定格出力より若干大きく設計されており、タービンが定格以上の出力を出し得る運転条件のとき、発電機がこれに対処できるようにしてある。普通水素冷却タービン発電機の場合、一般に水素圧力 1 kg/cm² にて発電機出力をタービン定格出力と一致させ、水素圧力 2 kg/cm² の場合は 1 kg/cm² における出力の 125/115 = 1.087 倍にするハンドブック・レイテングが広く採用されているが、中部電力株式会社新名古屋火力発電所向 281,600 kVA, 3,600 rpm 機および東北電力株式会社新潟火力発電所向 320,000 kVA, 3,000 rpm 機の場合、回転子直接冷却方式であるにもかかわらず、最高水

* 日立製作所日立工場

素圧力 (2 kg/cm²) における発電機出力はタービン定格出力の 125/115 倍となっており、タービン出力に対する発電機出力の余裕のみはハンドブック・レイテングの考えをそのまま採用している。この場合は回転子が直接冷却されており、機械寸法が小さくなっているため、水素圧力 1 kg/cm² における出力はタービン定格出力を大幅に下回っている。

今回の計画の場合にも発電機出力の余裕をいくりにするかが問題になったが、タービンが出し得る可能最大出力と最高水素圧力 (2 kg/cm²) における発電機定格出力を一致させることにした。タービンはヒータアウトで復水器冷却水温度 18°C のとき 236,150 kW の出力を出すことが可能であり、これがタービンの可能最大出力であるので、これを発電機定格出力とした。これはタービン定格出力 220,000 kW の 1.073 倍となっている。

次に発電機の定格力率であるが、従来はほとんどが 0.85 であったが、今回は 0.9 を採用した。これは中部電力株式会社の新鋭火力発電所の運転力率はほとんどが 0.9 以上であること、今回の計画も系統運用上 0.9 で十分であること、およびアメリカを含め最近の大容量タービン発電機の定格力率は 0.9 のものが多くなりつつあること、さらに力率を高めると発電機定格容量が小さくなることおよび励磁 AT が楽になることによる発電機寸法の縮小化、価格の低廉化が可能であることから最終的には顧客側にて決定したものである。

短絡比も従来発電機最大容量時 0.64 が一般に採用されていたが、今回は 0.58 を採用した。高性能の速応励磁方式の採用により短絡比を低下せしめても、安定度上の不安はなく、アメリカにおいても 0.58 採用の発電所が増加しており、さらにヨーロッパでは 0.4~0.5 のものも現われている現状から 0.58 を採用することに決定したわけである。

今後の大容量タービン発電機は定格力率 0.9、短絡比 0.58~0.60 が一般化され、短絡比においてはさらに小さいものも出現するものと考えられる。

4. 冷却方式

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 機では胴部直径は 1,000~1,050 mm、胴部長はだいたい 6,800 mm ぐらいの組み合わせが安定に運転できる限度の一応の目安と考えられている。

これより 3,600 rpm の場合普通水素冷却機の製作限度は約 230,000 kVA 程度と考えられる。普通水素冷却機の場合、容量を増大してい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が限界を越えたので、回転子の方に直接水素冷却を採用し、これに普通水素冷却固定子を組み合

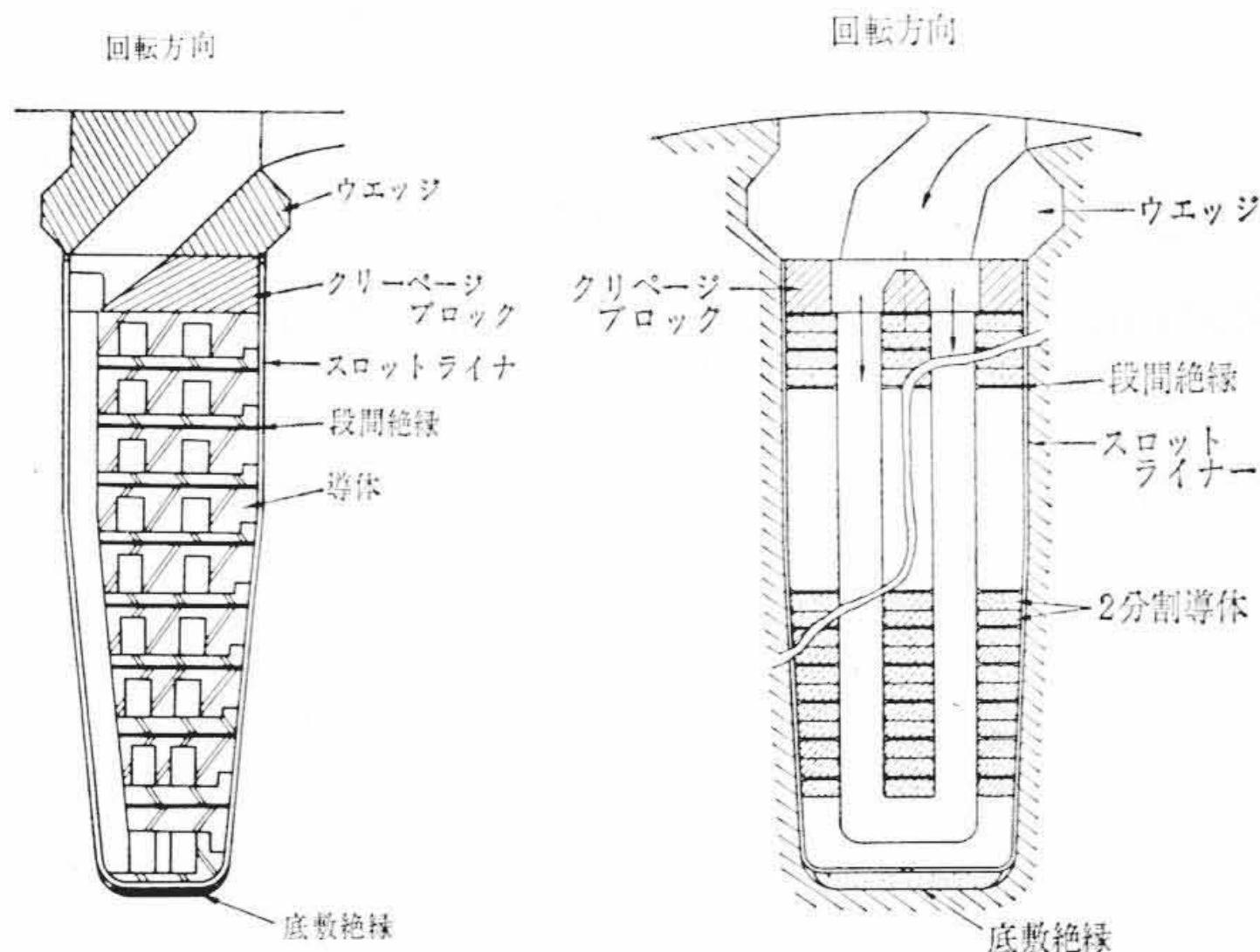


図 1 従来方式コイルスロット断面図 図 2 ダイアゴナルフロー形コイルスロット断面図

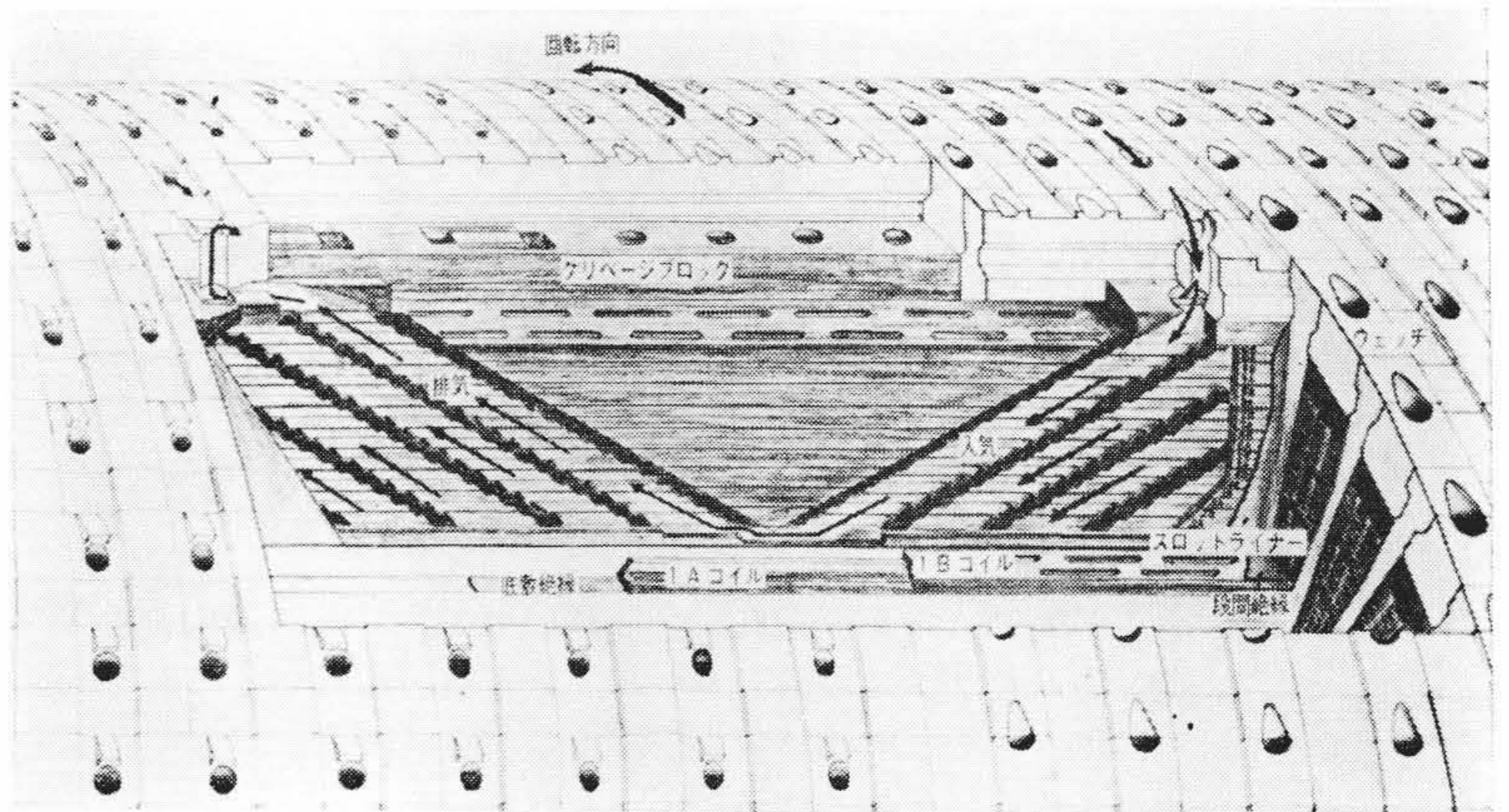


図 3 ダイアゴナルフロー形直接冷却回転子通風説明図

わせたものである。

回転子の直接冷却方式として日立製作所ではギャップピックアップ方式を採用しているが、本機には従来の方式よりさらに性能のすぐれたダイアゴナルフロー形回転子を採用した。本機はすべて日立独自の設計であり、したがって本機に採用されたダイアゴナルフロー形回転子は独自の設計になっているが、すでに昭和電工株式会社向 92,000kVA 機にダイアゴナルフロー形回転子の採用実績を有し、そのすぐれた冷却性能が解析および試験にて確認されている。

ダイアゴナルフロー形回転子は従来のギャップピックアップ回転子(ラジアル・アキシアルフロー形)と比較して後述のように、冷却能力が一段とすぐれているため、従来形に比較し温度上昇が約 70% にしかならず、すぐれた冷却性能を遺憾なく発揮している。

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、端子電圧が約 24,000 V となり、絶縁厚みが厚くなり冷却が悪くなること、占積率が悪くなり、非常に深いスロットにしなければならなくなり、経済的な設計はできなくなる。これを解決するには、固定子コイルにも直接冷却方式を採用するのも一方法であるが、本機では巻線に特殊の工夫を施した 4 重星形接続を採用し、端子電圧を 12,000 V におさえた。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によるコイル内循環電流は実用上無視できるようになる。

5. ダイアゴナルフロー形直接冷却回転子

5.1 構造

図 1 は従来方式(ラジアル・アキシアルフロー形)のコイルスロット断面、図 2 はダイアゴナルフロー形のコイルスロット断面を示したものである。いずれも回転子表面に多数の吸入孔および排出孔を設けエアギャップ中から水素ガスを吸入し、所定の導体の通風みぞに導き、導体に発生した損失を吸収し再びエアギャップに排出する構造である。しかし図 1, 2 を比較すればその構造が大幅に変わることがわかる。

ダイアゴナルフロー形では導体内通風路は方形断面の導体にあけられた 2 列の細長いダクトによって形成されている。

この 2 列のダクトは図 3 のように軸方向に等ピッチであけられているが、導体の各ターンごとに若干ずつ反対方向にずれている。この 2, 3 列のうち上側ダクトは上ターンから下ターンに行くにしたがって右に移動し下側ダクトは反対に左に移動している。これらのダクトのあけられた導体を順に積み重ねると二つの反対方向に進行す

るダイアゴナル形通風路が形成される。

この通風路は最下ターンの導体まで達しており、最下ターンの導体は凹形に成形されたもので反対側ダクトのダイアゴナル通風路へのガスの連絡路を形成している。吸入孔よりはいり一方のダクトを通過して最下ターンに達したガスはここで方向を変え他方のダクトを通過して排出孔に至る。

図 3 に示す通風路が回転子の胴部のほぼ全長にわたり繰り返し設けられている。導体は普通図 2 のように各ターンとも 2 枚の薄い方形断面板から成っている。これは通風ダクトの加工を容易にするためとダイアゴナル通風路の軸方向のずれを大きくするためである。

回転子端部の通風は導体内に軸方向の通風路を設けこれに水素ガスを通して直接冷却している。しかしこの軸方向通風路は非常に短いので、強力なファンは不要で自身の遠心力で十分冷却できる。

5.2 特長

従来方式の構造に比べ次のような特長がある。

- (a) 入手容易な方形断面の導体が使用できる。
 - (b) 通風路ダクトは等間隔で繰り返し配列されるので高速打抜きまたは高速機械加工により能率よくあけることができる。
 - (c) 従来方式ではラジアル通風路のための切り込みが導体側面に設けられているがそれが不要になるのでコイルスロット内の導体の占積率がよくなる。
 - (d) 上記のため回転子の I²R 損失が減少し、したがって励磁機容量が減少する。
 - (e) ダイアゴナル軸の傾斜角(軸方向に対する)を急にすることにより、ダイアゴナル軸に直角なダクト通風面積を増大し、通風路長の短縮と相まって通風区分長を任意に変化する。
 - (f) ダイアゴナル軸の傾斜角を変えることによりターン数に関係なく通風区分長を任意に変化することができる。
 - (g) 従来の方式が持っていた利点である通風損失が少ないこと、特別の強力なファンが不要であること、温度分布が全長にわたりほぼ一様であるなどのすぐれた特性が維持される。特にガスが全ターンを一様に通過することおよびそのガスは熱の良導体である導体と密接に連けいしているので従来方式によりさらに均一な温度分布が維持される。
 - (h) 導体の温度上昇はガスの温度上昇およびガスの導体の温度差で定められる。ここでガスの温度上昇は通風路のガスの流量によって定まりガスと導体の温度差は熱伝達係数と伝達表面積で定まる。
- 一般にダイアゴナルフロー形の場合、伝達表面積は従来方式に比較し若干小さくなる。しかしガス速度が大きくなり、また通風路に段々がついているので、ガス流に大きな乱れができるので、

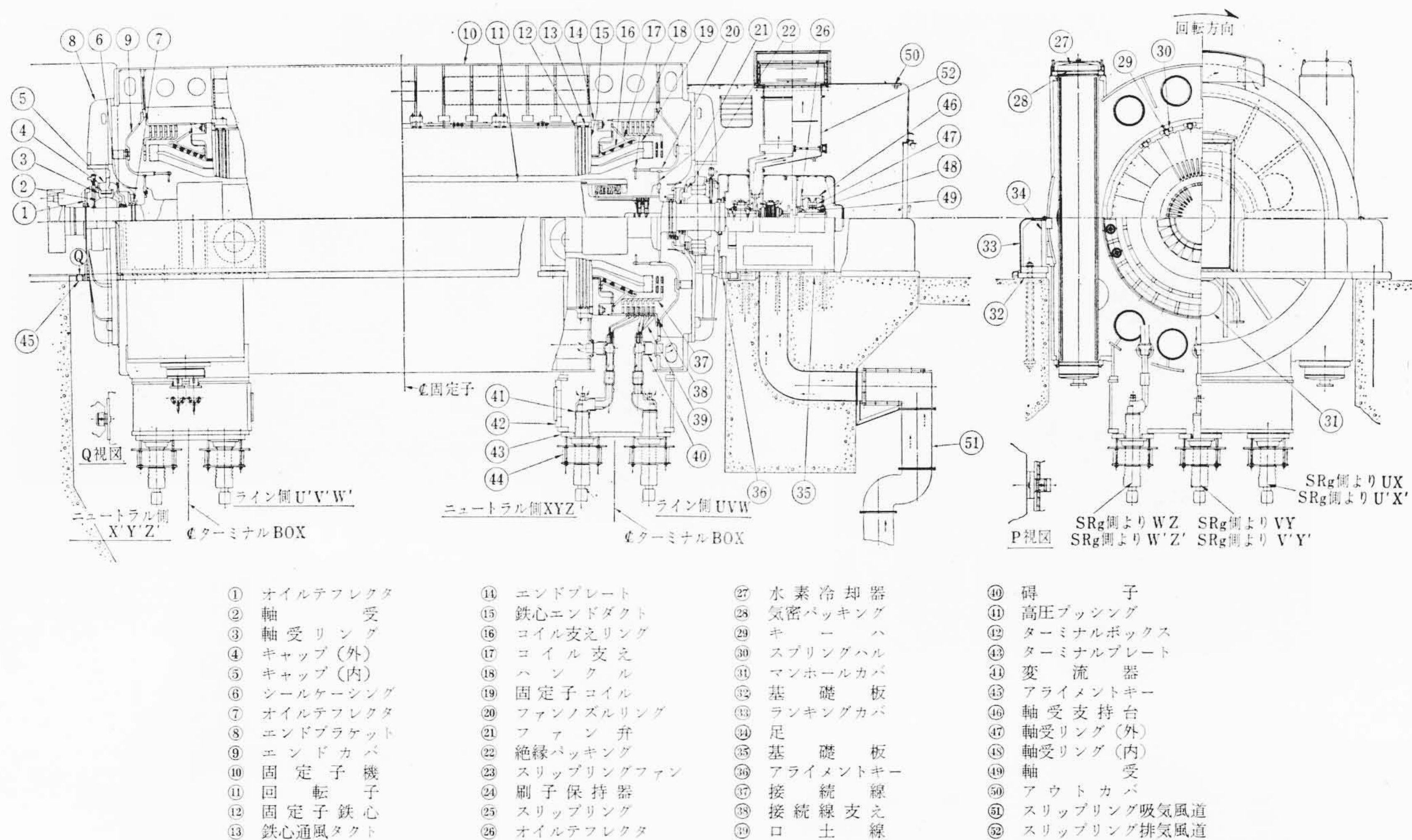


図4 262,388 kVA タービン発電機断面図

熱伝達係数が大きくなる。

したがってガスと導体の温度差は従来方式とほぼ等しくできる。一方ダイヤゴナルフロー形の場合、通風抵抗が小さい構造なのでガス流量が従来方式より増加するのでガスの温度上昇は低くなる。したがって全体の温度上昇を低くすることができる。

(i) 以上の特長により、ダイヤゴナルフロー形は従来方式に比較し、約15%回転子コイルの励磁能力が増加する。

6. 発電機の構造

本機の断面構造を示すと図4のとおりである。回転子にギャップピックアップ方式を採用しているが、外見上は耐爆気密構造のフレームの四隅に合計4本のたて置クーラが取り付けられており、普通水素冷却タービン発電機と類似している。ただし本機は屋外に設置されるため、防水対策が講ぜられている。

6.1 固定子

6.1.1 固定子フレーム

固定子は一体輸送されるため、固定子フレームは一体の溶接による耐爆気密構造になっている。固定子フレームの半径方向の固有振動数が鉄心の磁気吸引力による振動周波数である120 c/sと共振しないよう、一般にフレームの固有振動数は鉄心の振動数より20%以上はなすように設計しているが、本機のフレームの固有振動数は145~155 c/sにはいるようにし、フレームの完成後電磁石式加振器にて加振し、その固有振動数が設計値内にはいることを確認した。

フレームの固有振動数の計算は、フレーム仕切板に通風孔が多数あけられていること、各仕切板にかかる荷重が異なることなどのため相当複雑であるが、電子計算機により非常に精密に求めることができる。

フレーム仕切板は軸方向に多数配列されており、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、ギャップピックアップ形回転子に適合した理想的通風路

を形成している。

6.1.2 固定子鉄心

方向性ケイ素鋼板を採用し、重量、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いく。また進相運転を行なう場合、鉄心端部構造物の温度上昇が大きくなっていく。したがってこのような漏れ磁束を減少するため、従来から鉄心端部の歯押え金具や鉄心締付金具あるいはコイル支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。また鉄心両端部はステップ状に鉄心内径を上げると同時に歯先に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。さらに進相運転を行なう場合、鉄心端部各部の温度上昇を測定する目的で合計20本のサーモカップルが取り付けられている。

固定子鉄心の磁気吸引力による2倍周波数の振動を吸収する目的で、鉄心は軸方向配列のスプリングバーにより固定子フレームに弾性支持されている。

6.1.3 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並列回路ずつをまとめて、固定子フレーム両端部からそれぞれ6本合計12本のブッシングに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、低圧端子前でそれらは並列される。

固定子コイルの絶縁には日立製作所で開発されたエポキシレジン含浸の最新絶縁が採用されている。

従来の日立固定子コイルの含浸レジンにはSLSレジンと称する

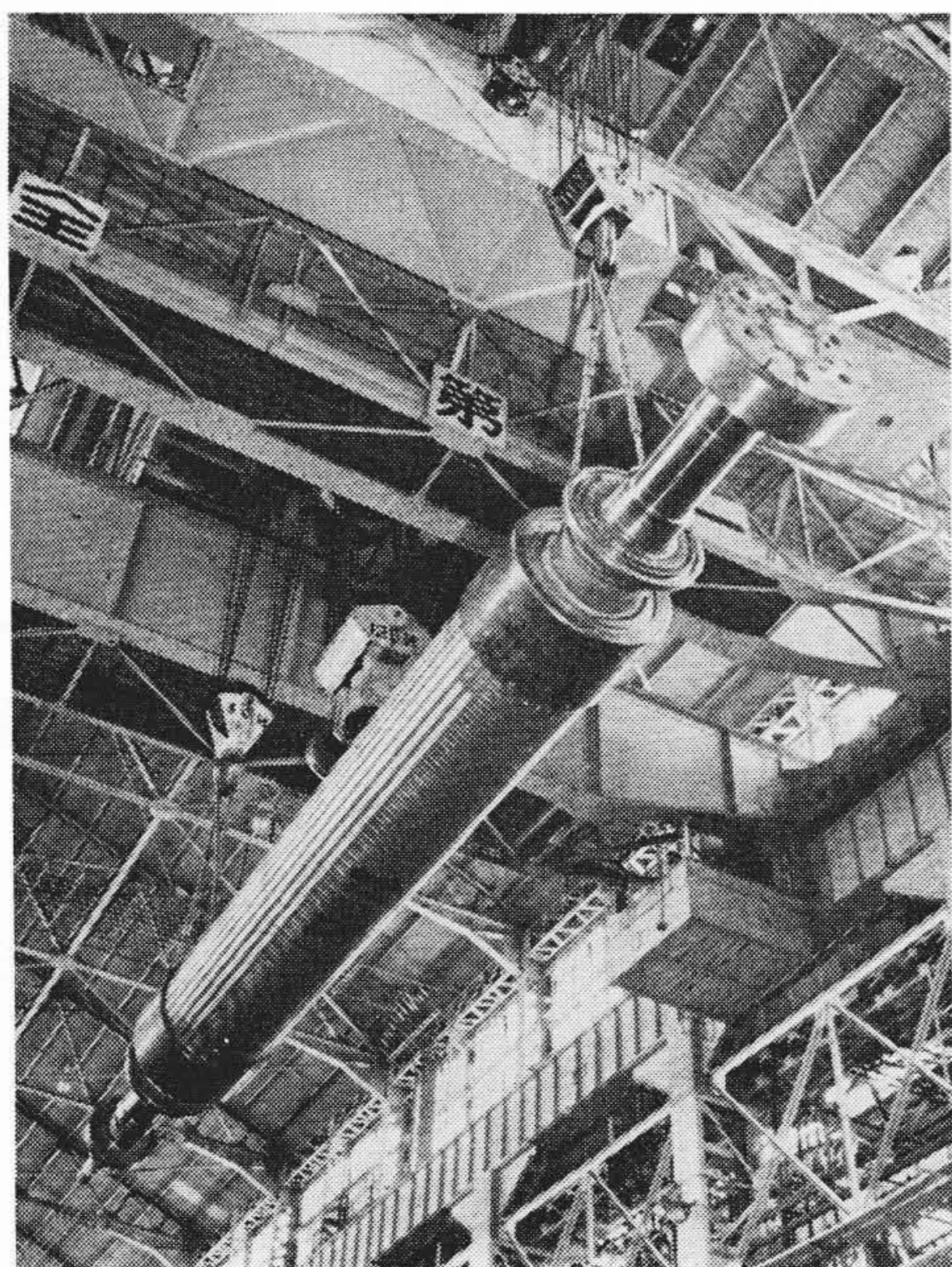


図5 完成した回転子

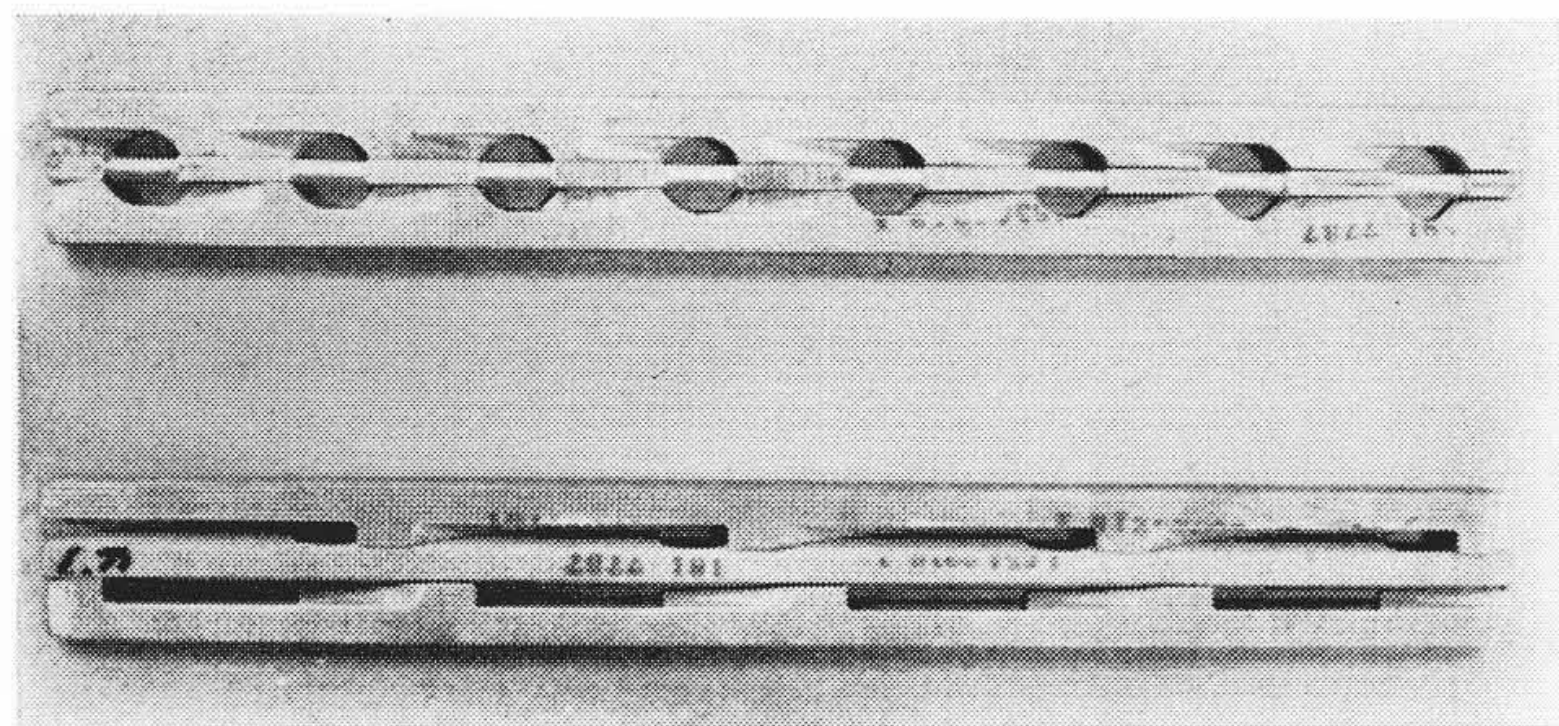


図6 クリーページブロック

不飽和ポリエステル系のもので、優秀な絶縁特性を備えているが、今回採用したエポキシレジンはその自体の特性がSLSレジンより、さらにすぐれており、特に高温時の機械的強度が大きく、収縮率、加熱減量が非常に小さく、加熱モールド時のボイド形成もきわめて少なくなっている。またエポキシ絶縁層とSLS絶縁層とを比較してみると、単位絶縁厚み当たりの耐圧値が約25%上昇し、高温時の機械的強度は約50%高くなっている。タービン発電機はコイルが長くしたがって加熱冷却サイクルの絶縁層に対する影響が大きく現われることになり、普通の発電機より過酷な機械的条件が課せられるが、過酷な加熱冷却サイクル試験による $\Delta \tan \delta$ の変化はSLS絶縁層の $\frac{1}{2}$ 程度であり、また加熱劣化後のコロナパルス発生もSLS絶縁層の10～数10分の1と非常に小さく、劣化がきわめて小さい安定な絶縁層であることが確認されている。

6.1.4 気密ブッシング

本機のように電機子電流が大きく1本当たり6,312 A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、直接冷却式ブッシング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。

6.2 回転子

回転子は前述のようにダイアゴナルフロー形ギャップピックアップ方式で、図5は完成した回転子である。

通風用吸入孔および排出口はすべて回転子みぞウエッジのみに設

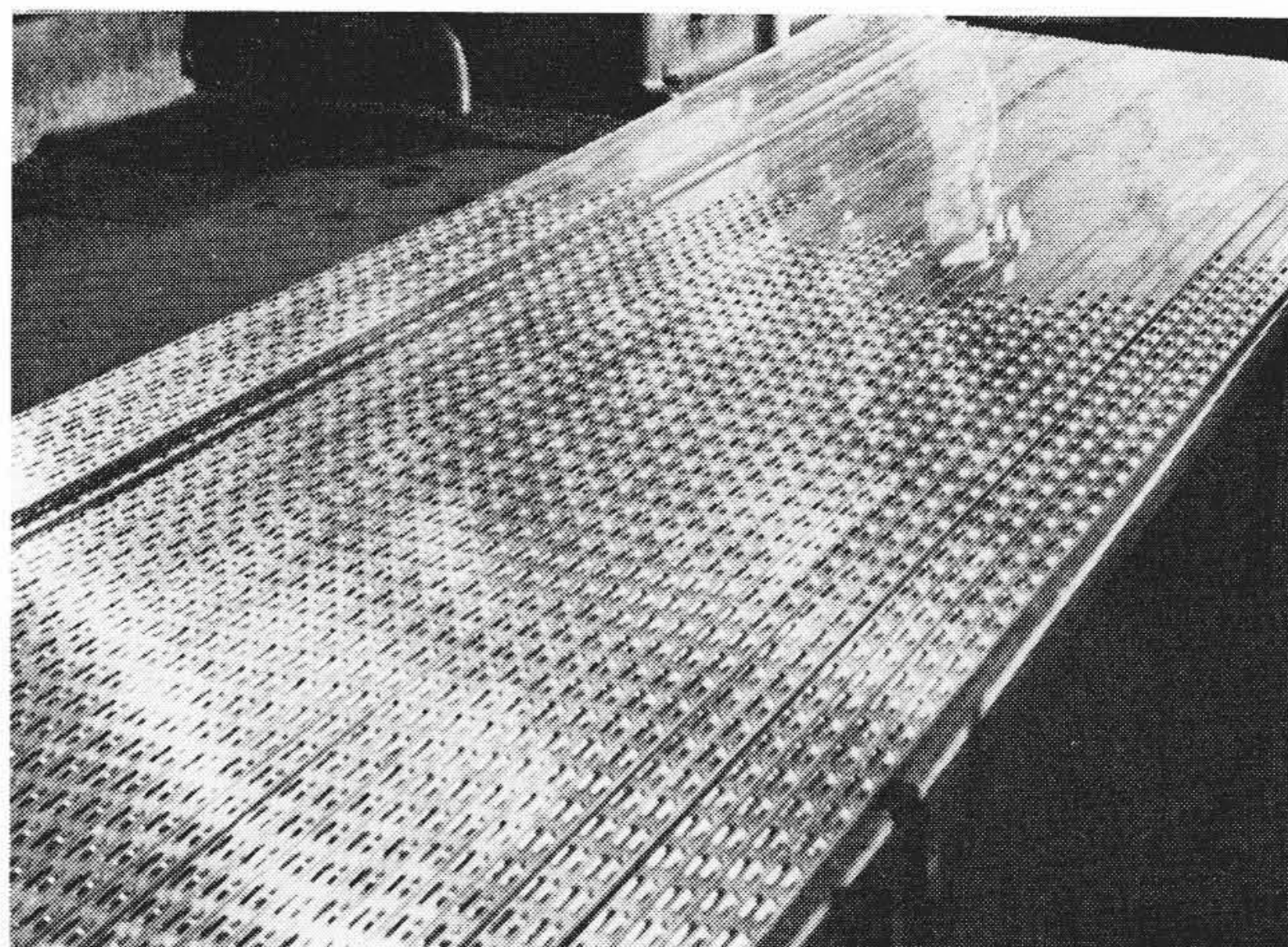


図7 回転子導体

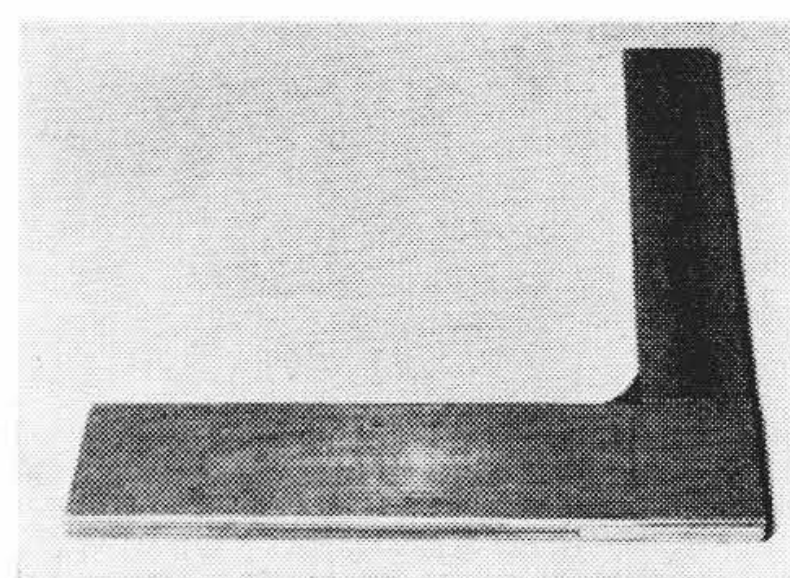


図8 回転子導体エンドコーナ部

けられており、回転子穴加工はいっさい不要になっている。導体とウエッジの間には導体の対地沿面距離を保つと同時に吸入ウエッジ、排出ウエッジと導体との通風路を形成する絶縁物製のクリーページブロックが設けられている。クリーページブロックは絶縁のほかに流体力学的損失が小さくなるようその形状が考慮されている。また100℃以上において強大なコイルの遠心力に対して十分長年月使用できるものである。

図6はクリーページブロックである。

ターン間絶縁にはポリエステル樹脂含浸ガラス積層品を使用するが、これには導体にあけられた通風ダクトよりやや小さい同様な形状の穴がパンチされている。ターン間絶縁は将来エポキシワニスにより導体に接着されている。前記クリーページブロックの使用により、みぞ絶縁も従来のように上部を折り曲げる必要がなくなり、固くて機械的にはるかに強いものを使用することが可能になった。本機に使用したみぞ絶縁物はガラス繊維をエポキシワニスによりモールドした積層板からなっている。

図7は通風ダクトがあげられている回転子導体である。

また前述のように回転子端部の導体は上下二枚の導体の重ね合わせにより軸方向通風孔を形成しているが、コーナ部分は図8のように工作されている。コーナの接続はろう付により行なわれるが、X線により全数のろう付状況が管理されており、ろう付により通風孔がふさがれていないことが確認されてから組線される。

ギャップピックアップ方式の通風ヘッドは大部分吸入孔側ウエッジおよびそれに相応するシャフト歯部分に設けた表面スロープにより、回転子表面のガスの持つ速度水頭を衝突により静圧に変換することにより得られるもので、普通冷却機のようにみぞ内の遠心力差による原理とは全く異なっており、その大きさは実に後者ヘッドの半分以上の値を有するため単位通風長当たりのヘッドは普通冷却または約半軸長を連続して通風冷却する形の直接冷却に比べ、はるかに大きな値を有している。このようにして得られた効果的通風ヘッドに前述のダイアゴナルフロー通風路をマッチさせることにより、他の冷却方式より格段にすぐれた冷却効果を有している。

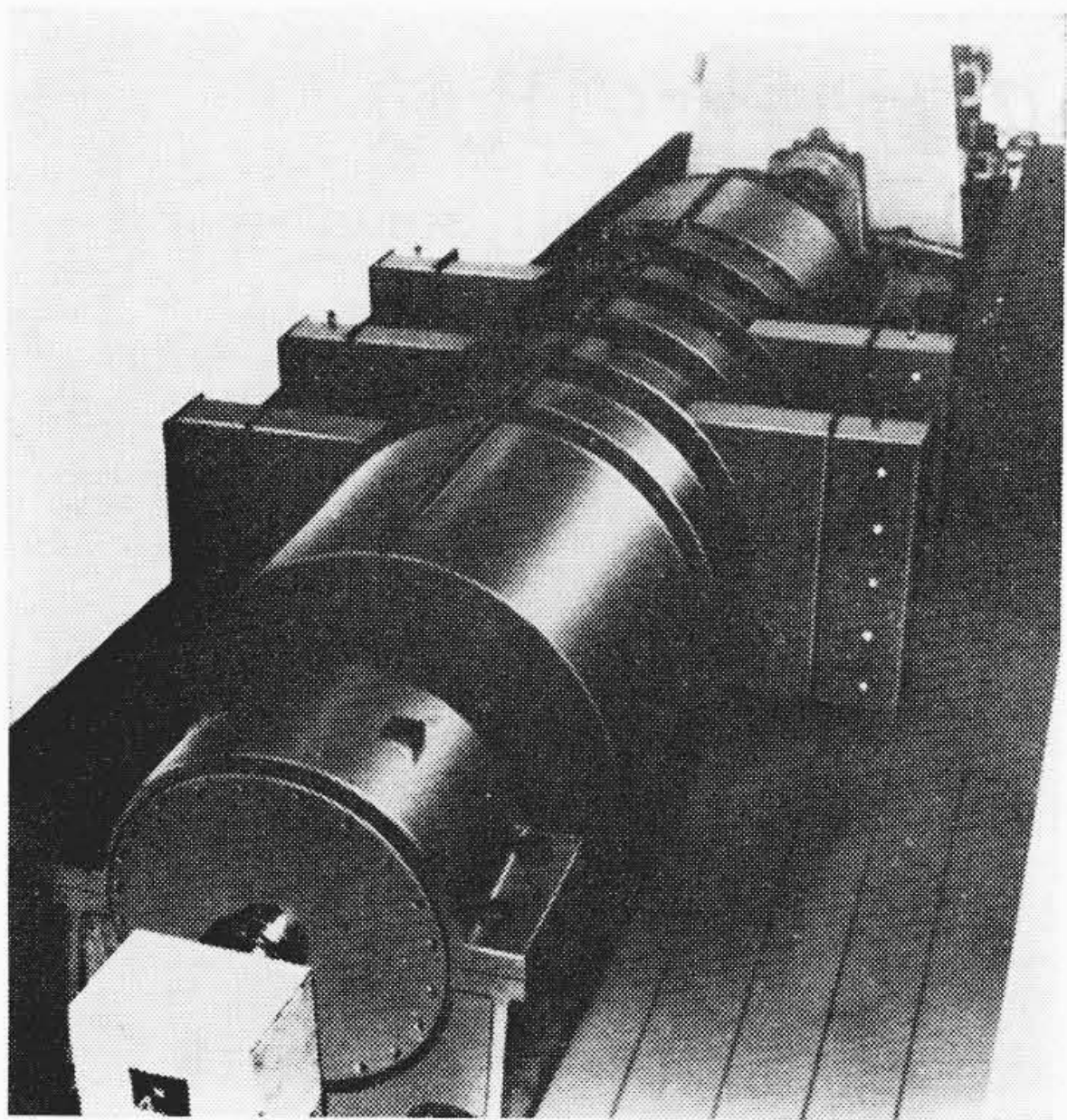


図9 ダイアゴナルフロー形ギャップピックアップアプローチ通風試験装置

図9はダイアゴナルフロー形ギャップピックアップ通風特性の試験装置である。

6.3 不平衡負荷に対する考慮

軸が長大になりたわみも大きいので回転子コイル端部を保持するリテイニングリングは軸の胴端部に焼きばめする構造である。このため不平衡負荷または電機子コイル空間高調波による回転子表皮電流によってこの焼きばめ部が過熱されるおそれがあるため、この焼きばめ部には銀メタライジングを行なうとともに分流用ダンパ板を設けている。こうして普通水素冷却機に比べ電機子アンペア回数は約30～40%増大しているにもかかわらず逆相耐力は普通水素冷却機と同一である。

6.4 集電部分

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。すなわち図6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大形の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表面を横切って流れるようにし、またリング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いる。

また励磁電流値が高いことは数多いブラシを必要とし、したがって幅広いリング表面を必要とし取付け軸が長いオーバハング部分を有することになるので、万一を考慮してその端部に振れ止め用軸受を設けている。集電部分は屋内式と同様のスリップリングカバーにておおわれ、屋外式であるからさらに、雨仕舞ハウジングが設けられている。したがって雨天時でもスリップリング、ブラシの点検が

可能である。また通風は冷空気を架台下からフィルタを経由して集電部分に導かれ、排気はダクトで雨仕舞ハウジング天井より屋外に出るようになっている。排気ダクト内にもフィルタを設け、排気中のカーボンダストにより雨仕舞ハウジングの塗色が黒変することのないようにしてある。

7. 発電機工場試験結果

7.1 各種定数

262,388 kVA を基準とするものであり過渡リアクタンス、初期過渡リアクタンスは不飽和値を示す。

同期リアクタンス	X_d	168.5%
過渡リアクタンス	X_d'	33.4%
初期過渡リアクタンス	X_d''	28.0%
逆相リアクタンス	X_2	23.6%
零相リアクタンス	X_0	14.5%
短絡初期過渡時定数	T_d''	0.025 秒
短絡過渡時定数	T_d'	1.03 秒
電圧変動率 (力率 0.85)		41.7%

7.2 温度上昇、効率

温度上昇の保証値は ASA 規格に従い水素圧力 2 kg/cm^2 にて固定子コイルは 45°C 、回転子コイルは 74°C であるが、固定子、回転子とも十分の余裕を残して規格値内に納まった。特に回転子には、4章にて述べたように冷却能力のすぐれたダイアゴナルフロー形が採用されたため、従来のラジアル・アキシアルフロー形に比べ温度上昇は非常に低くなった。なお回転子コイルの温度上昇の計算をするには非常に複雑な熱回路の解析を行なわねばならないが、これは高速度デジタル計算機を駆使することにより容易に求められる。計算値は試験値とよく一致し、計算式の精度が非常に高いことを確認できた。

発電機効率は定格力率、定格出力時 99.06% と非常に高い値となり、保証値 98.95% をかなり上回った。

8. 結 言

国産技術により、回転子コイルにダイアゴナルフロー形ギャップピックアップ直接水素冷却方式を開発し、冷却特性の優秀なことを遺憾なく発揮した。この新形冷却方式は、以後設計されるものに全面的に採用されることとなり、現在関西電力株式会社堺港火力発電所第5号機 300,000 kVA 3,600 rpm 機、四国電力株式会社新徳島火力発電所第2号機 257,000 kVA、3,600 rpm 機もこの方式によっている。