

最近の大形タービン発電機

The Recent Large Turbine-Generators

是 井 良 朗*
Yoshiaki Korei

内 容 梗 概

最近の火力発電設備の大容量化のすう勢はきわめて激しいもので、各地に画期的な大容量発電所の建設が進められ、この傾向は年とともに益々激しくなると考えられる。

本稿ではこうした時代の要求に対処する大形タービン発電機の構造、性能および使用材料について概要を述べたものである。

1. 緒 言

わが国火力界の発達が目ざましいものがあり、画期的な大容量発電所の建設が各地で進められている。需要の増大に伴い電力系統もますます大きくなり、発電機設備の単位容量も年を追って大きなものが要求されるようになり、これに対処して、信頼度の高い斬新な設計、新しい材料の開発使用、あるいは効果的な冷却方式が採用されて、火力発電機の進歩は文字どおり日進月歩の有様である。

以下にその概要について述べる。

2. 最近のタービン発電機大形化の傾向について

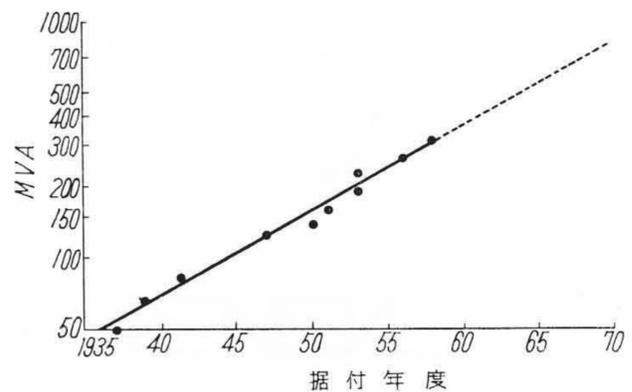
1920年代の末期には 3,600 rpm のタービン発電機は 12,500 kVA が限度と考えられ、当時最大容量の 62,500 kVA 機は 1,800 rpm で製作されていた。現在では斯界の最先端をきわめるアメリカではすでに 300,000 kVA をこえる 3,600 rpm 機が実際の運転にはいり、わが国でもこれに近い大容量機が近く製作される気運にあり、最近の火力発電機の進歩には先人の予想をこえた激しいものがある。第1図はアメリカにおける 3,600 rpm 発電機記録品の kVA (最大容量で示す) と完成された年度との関係を示す曲線で、縦軸は MVA を対数で示したものであるが年度とともに直線的に容量が増大していることは興味深い。図によれば最大容量は 8~9 年間に倍増しつつ今日に至っており、このまま発展をつづけると 1965年には 500,000kVA をこえ、1970年には 800,000 kVA の発電機が完成されることになる。わが国における火力発電機器もこれと似たような発達をとげることが予想され、こうした驚異的大容量発電機の完成は、電力需要の増大と機器自体の今後の研究発達によるもので、日立製作所でも将来の大形機製作上の問題点の解明に全力を傾注しており、着実に成果を収めつつある。

タービン発電機セットの出力の増大を計るために、クロスコンパウンド形がさかんに採用されている。この場合は発電機としては公称 kW の約半分の容量のものを 2 台備えることになり一時的に単位容量は減少することになるので、比較的容易に単位出力の大きなセットを製作することができる。

一般にタービンでは出力が大となり蒸気量が増すと、低圧タービンの最終段の翼長が長くなる。しかしこれは翼の機械的強度や固有振動の点からそれぞれの時代の技術水準によって決まるもので、したがって、最終段出口の数を多くして十分な排気面積をとり、最終段の出口損失を減じてタービンプラント効率の向上を計ることが有利なので、今後クロスコンパウンド方式も多く採用されよう。

大容量タービンプラントでクロスコンパウンド形あるいはタンデムコンパウンド形のいずれが有利であるかは、タービンプラント効率、製造原価、年間稼働率、据付面積、基礎、建家などを総合的に考

* 日立製作所日立工場



第1図 アメリカにおける 3,600 rpm タービン発電機の記録容量年度線

て決めるべきであって、将来はクロスコンパウンド形で容量の増大を計る方法と、一方タンデムコンパウンド形で単機出力の記録を更新して行くのといずれの方式も採用され発展をとげるであろう。

3. 大形発電機の構造と性能

タービン発電機の出力限界はその時代に入手しうる回転子軸材の限度によって制約され、冷却方式の改善によってさらに出力限界を向上して発展してきたもので、軸材と冷却方式改善の歴史がそのままタービン発電機発展史を構成しているといっても過言ではない。

タービン発電機では比較的狭い場所に熱損失が分布しており、また通風路も狭いので温度上昇が大となる懸念があるが、まず複式通風方式が採用されてこの問題が解決されてきた。さらに 1937 年水素冷却方式がタービン発電機に実用されて以来、発電機の冷却能力は飛躍的に増大して今日の隆盛を見る素地がつけられた。こうして 200,000kVA をこえる 2 極大容量発電機が普通冷却式で完成されている実情であるが、電力需要の増大からさらに大きな出力単位の発電機が要求され、回転子軸材の限界の向上のほかに、さらに新たな冷却方法が必要となった。そして直接冷却方式を採用することにより発電機出力をほぼ倍増せしめることが可能となり大形化の傾向はいっそう促進されつつある。

普通冷却方式では電流損が絶縁物を通じて放散されるので相当の温度こう配を生じていたものであるが、直接冷却方式では固定子コイル、回転子コイルともに導体内に冷却媒体を流通せしめて電流損を直接奪い去る方式で、線輪の温度上昇はそれだけ減少させられる。逆にいえば同一温度上昇に対する線輪の電流容量を非常に増大させることになる。

直接冷却方式は冷却媒体の種類および流通方式の変化によって種々の方式が考えられる。どの方式をとるかは冷却効果、信頼度、製作の難易などの技術的問題と効率、機器価格などの経済問題を考慮して選定されねばならないが、回転子についてはギャップ・ピックアップ式（水素ガスを回転子のある空隙のところから吸込み、中空

界磁線輪を通して線輪損失を吸収後別のところからふたび空際に放出する方式)を採用し、また固定子については液体冷却式(中空固定子線輪導体内に油を通じて冷却する方式)を採用して組み合わせることが、これからの大容量化の傾向に対して最も効果的で500,000kVA程度までは比較的容易に実現できよう。

また、回転子、固定子の両方に直接冷却方式を採用しなくても、比較的冷却の容易な固定子は普通冷却で、回転子は直接冷却方式で製作して組み合わせる方式も有効で300,000kVA程度まで実現できよう。

いずれにしても、大容量普通冷却式発電機の構造が基本となって、その上に直接冷却方式が採用されているもので、普通冷却方式の構造は至るところに再現されて、その特長を発揮しているものである。

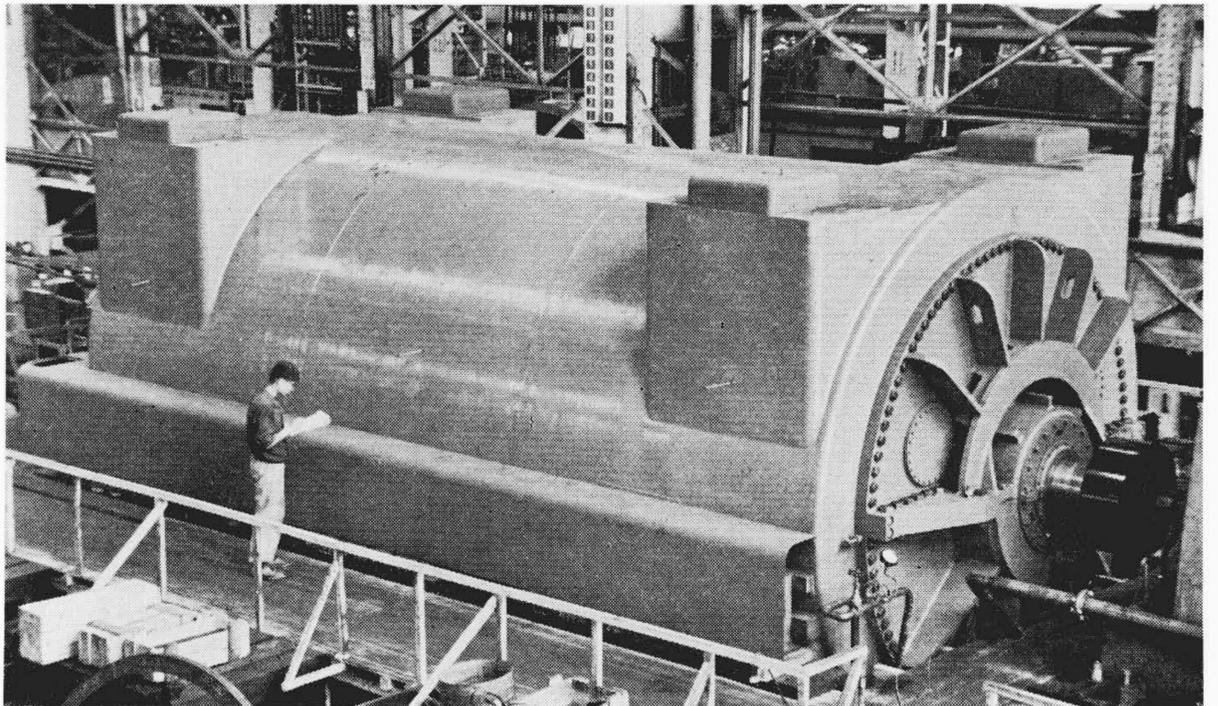
本節では、各方式について最近の大容量発電機の構造を説明し、終りにそれらの性能について述べたい。

3.1 普通冷却式発電機

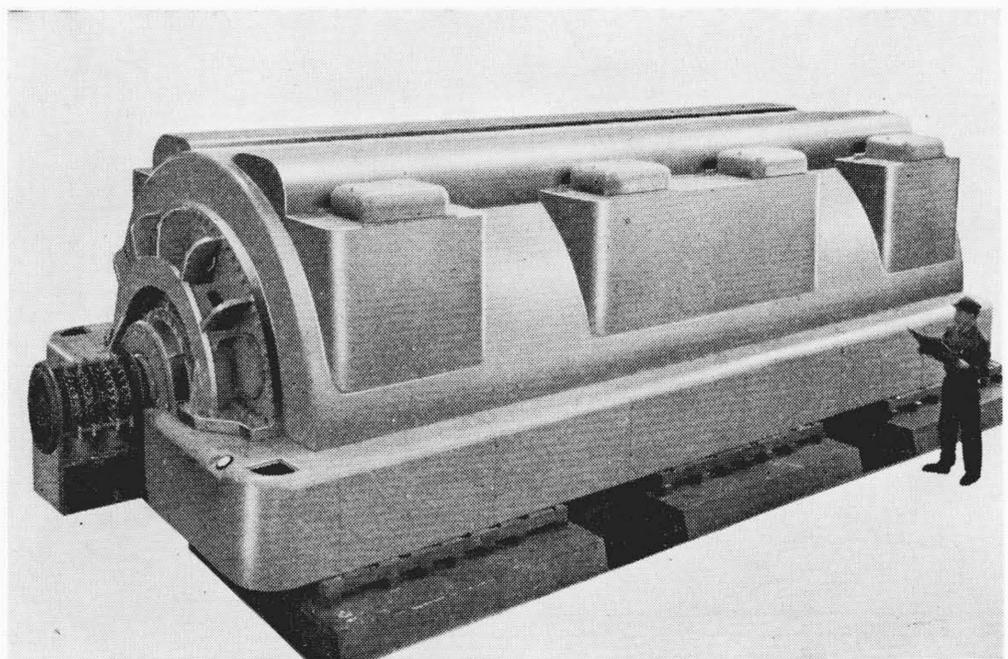
第2図は160,000kVAタービン発電機の外観を示す。この構造のものは水素冷却発電機の基本的形式のもので、がん強な鋼板の溶接構造からなる固定子わくの両端部に4本の水素冷却器が装置されている。固定子わくの両端の端板はブラケットとなっており軸受および軸密封装置を備えており、ブラケット自身がまた気密外わくの一部を形成している。

第3図および第4図は224,000kVAタービン発電機の外観と断面図を示す。基本的な構造は第2図に示したものとときわめて類似しているが、固定子わくの両端部および中央部に8本の水素冷却器がたてに置かれている。この中間程度の容量では6本の水素冷却器をたてに置いたものもある。いずれにしても容量の増大とともに冷却効果の増大を計ったものである。

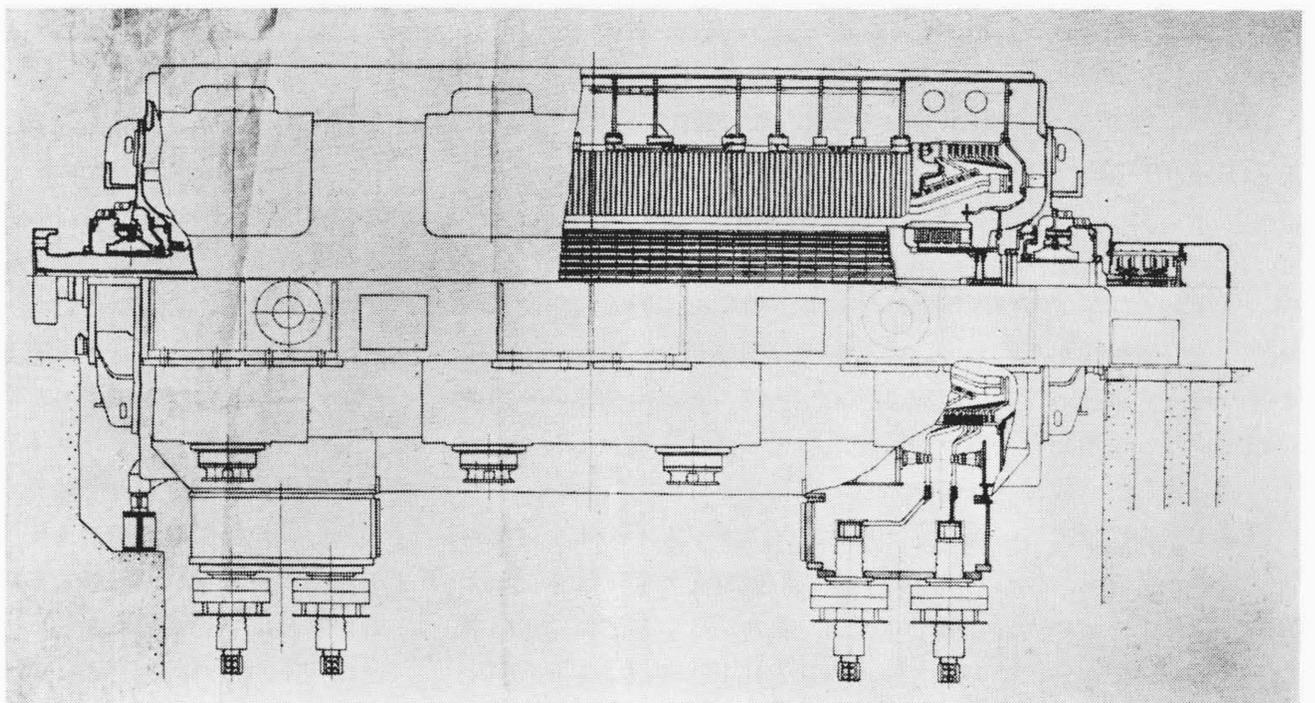
第5図は第3図に示した発電機の固定子わくの模型で上部側板を除いて内部構造を示したもので、各冷却器と仕切板との関係および



第2図 160,000 kVA タービン発電機

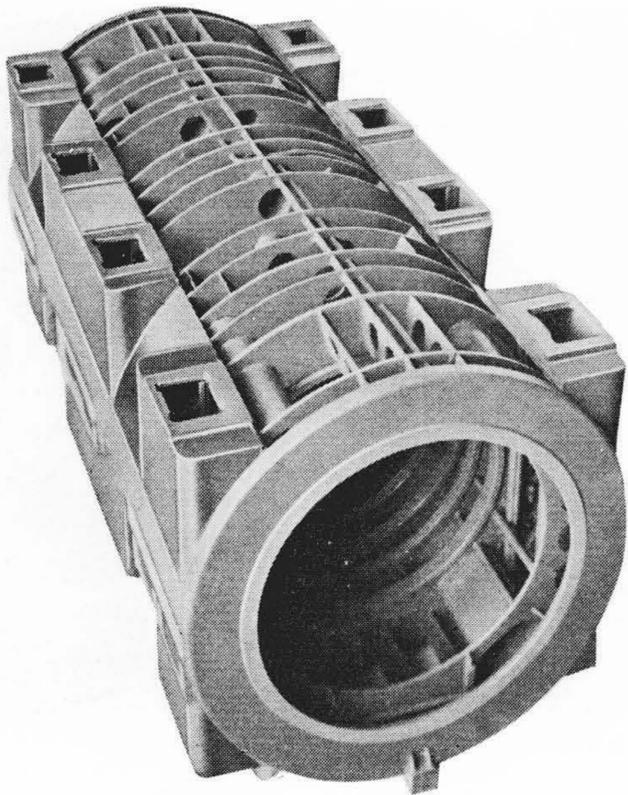


第3図 224,000 kVA タービン発電機

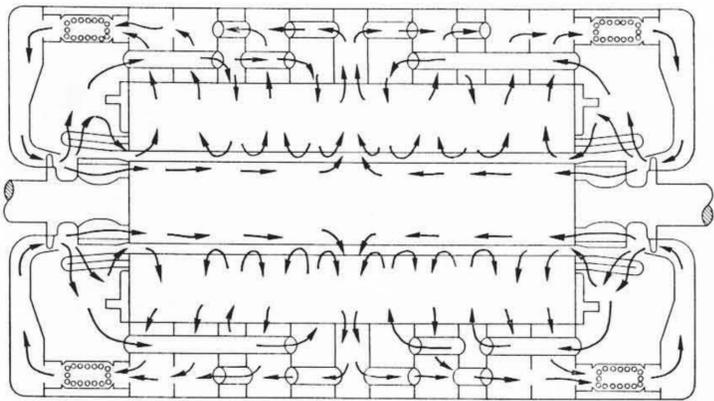


第4図 224,000 kVA 発電機断面図

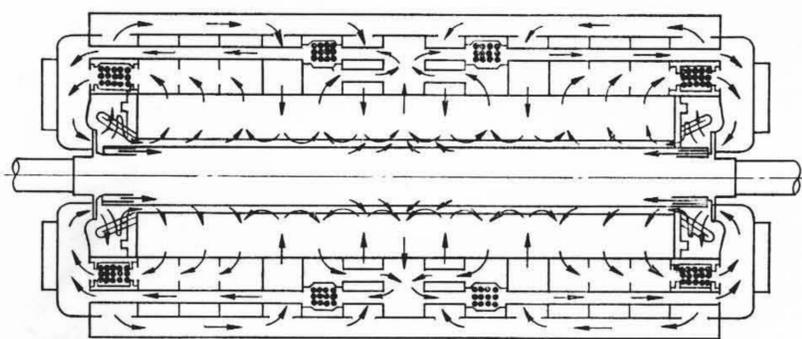
通風路のバランスパイプなどが見られる。第6図および第7図は4本冷却器および8本冷却器の発電機の通風方式をスケルトンでわかりやすく示したものである。各仕切板によって固定子わく内の空間



第 5 図 固定子わく (模型)



第 6 図 通風説明図 (4 本冷却器)

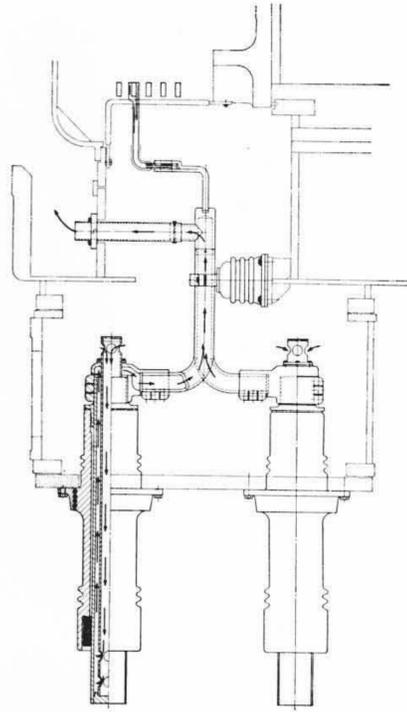


第 7 図 通風説明図 (8 本冷却器)

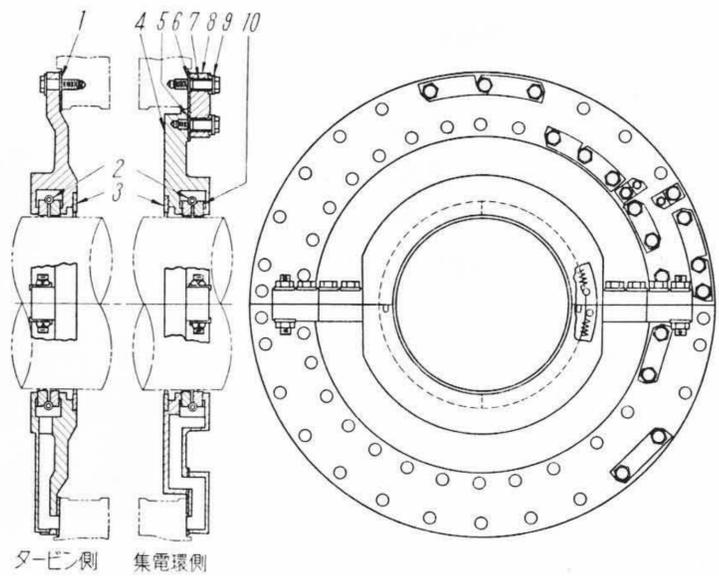
が入気室および排気室に区割されており、冷却風が各入気室に送り込まれ鉄心や線輪を冷却して、各水素冷却器を並列に通過して循環を繰り返す状況が容易に理解されよう。特に 8 本冷却器のものでは固定子わく頭頂部の突出部が冷却風の送風路を形成しており、わく全体が合理的に設計されている点に注目されたい。

固定子鉄心は軸方向に取り付けられたスプリングバーによって可撓支持されており、鉄心部の 2 倍周波数の振動を外部に伝えないように支持している。大容量機で寸法的、あるいは重量的に輸送限界をこえるものでは固定子わくと鉄心部をそれぞれ別個に作り、わくはさらに分割されて、これらがそれぞれ現地へ送られて組み立てられる構造のものもあり、この二重構造式固定子わくのものでは鉄心部を垂直の板ばねで可撓支持したものもある。

大容量機では、電機子反作用が大となり固定子線輪端部の漏えい磁束による漂遊負荷損が大きくなって来る。こうした漏えい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金具



第 8 図 直接冷却式がい管



- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1. 気密バックリング | 6. 気密バックリング(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. 気密バックリング(内側) | 10. シールリング |

第 9 図 軸密封装置

あるいは線輪ささえ金具などには非磁性金属を使用してきたが、さらに鉄心締付金具をしゃへい板でおおって効果をあげるとか、また鉄心両端部の歯先端部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するなどの新しい設計が採用されている。

大容量化に伴い、電機子電流が相当に大きくなり発電機出力端子のがい子内導体の温度上昇が問題となるが、第 4 図の例では固定子わく両端部よりそれぞれ 6 本合計 12 本のがい子を取り出して 1 本当りの電流値を減少させている。また、第 8 図に示すような直接冷却式がい管の使用によっても解決できる。がい子内の導体自身が中空で機内の差圧を利用してこの中に冷却ガスを直接通じて冷却するものできわめて効果的である。

固定子わくの両端部には第 9 図に示すような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が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隙で組み立てられており、細隙部に油膜が形成されて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軸ジャーナルとの熱膨脹の差によって上述の間隙が広がって密封油

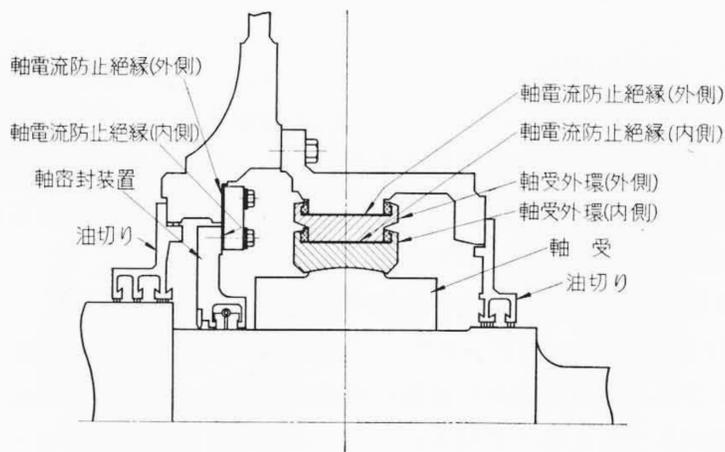
量が増し、冷却効果が改善されるのでシールリングの過熱は未然に防止される。リングは半径方向には自由に膨張できるが、軸とともに回転できないようにシールケーシングからの突起によって保持されている。

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け部で行われている。第10図は軸受外環部の絶縁方式を示す。二重に絶縁されているので防止絶縁そのものの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。軸密封装置の取付け部にも同様の方式が採用されている。

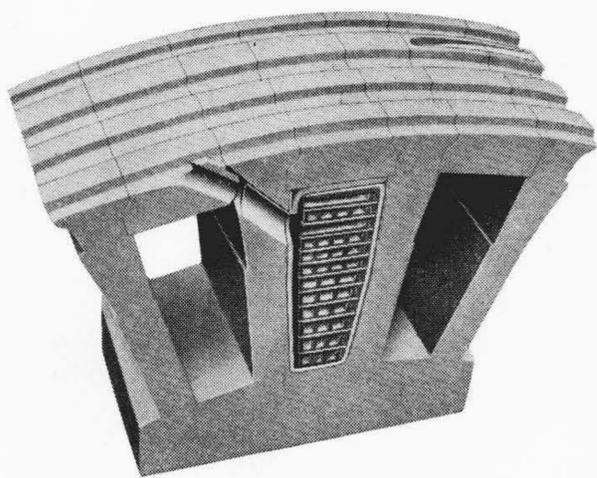
上述の構造上の諸特長は大容量タービン発電機としての基本的なもので直接冷却方式になってもそのまま採用されている。

3.2 直接冷却発電機

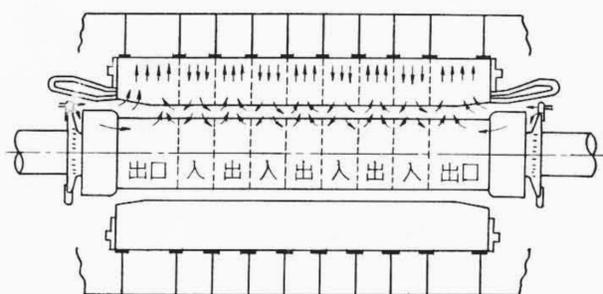
第11図はギャップピックアップ式回転子のモデルを示す。界磁線輪の右向う側の孔が吸入孔でここから空隙中のガスが吸込まれて中空導体の中を通り、左手前側の孔から空隙中へ放出される。実際の設計では空隙からスロット内部にはいった冷却媒体は、導体内の通風路を軸方向に500~600mm流れて冷却したのち、また空隙に放出される。このような過程が長手方向に区分して行われる。



第10図 軸電流防止絶縁



第11図 ギャップピックアップ式回転子のモデル



第12図 ギャップピックアップ式回転子通風説明図

第12図はギャップピックアップ式の通風方式をわかりやすく示したもので、界磁線輪の冷却風の出入口の区分と固定子側の区分とがほぼ一致するように配置されて全体的な通風システムを効果的にしている。一般に導体内を流通するに要する流体の摩擦抵抗は軸方向に分割された並列通風路の数の3乗に逆比例し、また通風路の曲りや膨脹などに伴う通風損失は並列通風路の数の2乗に逆比例して減少する。全体の通風に要する勢力はこの二つの損失の和に等しくなる。

第12図に示す例では、界磁線輪は10並列回路に分割されている。同じ直接冷却方式でも軸方向通風方式では界磁線輪全長が回転子の両端から入気したガスで冷却されて回転子の中央部から放出されることになる。まったく同じ回転子で考えるとギャップピックアップ式に比べて流体摩擦抵抗はほぼ125倍、曲りなどの損失はほぼ25倍に増大するので、強力な多段高圧ブロワがどうしても必要となってくるがギャップピックアップ式ではこうしたものが不要である。したがって発電機全体の構造は簡単で運転、保守、点検また分解組立も容易である。

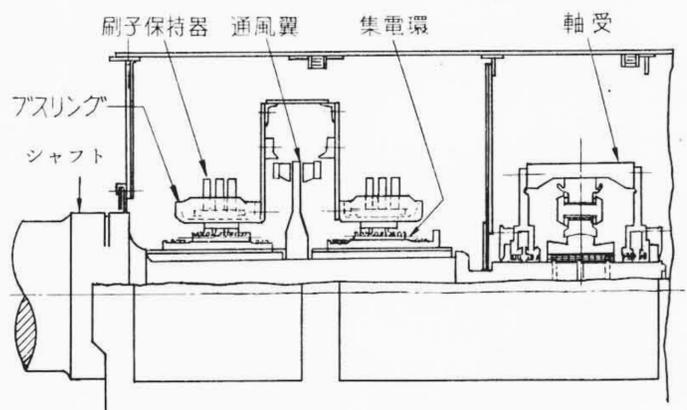
回転子の冷却風は固定子通風ダクトより空隙に供給される冷ガスを吸入使用するので、界磁の最高温度の点は回転子の長さとは無関係になり、軸方向の温度分布をほぼ一様にする事ができる。軸方向通風式では界磁銅損を冷却して温度の高くなったガスが中央部に集中して放出されるが、ギャップピックアップ式では空隙全長にわたって少量の熱量が分布して放出されるので固定子の設計に当たって空隙のガス温度の影響について特別の考慮を払うことを要しない。これはギャップピックアップ式の大きな特長で、この特長を利用して後述のように普通冷却式固定子と組み合わせた設計が可能となる。

ギャップピックアップ式は上述の種々のすぐれた特長を有するものであるがこれらを第1表に整理した。

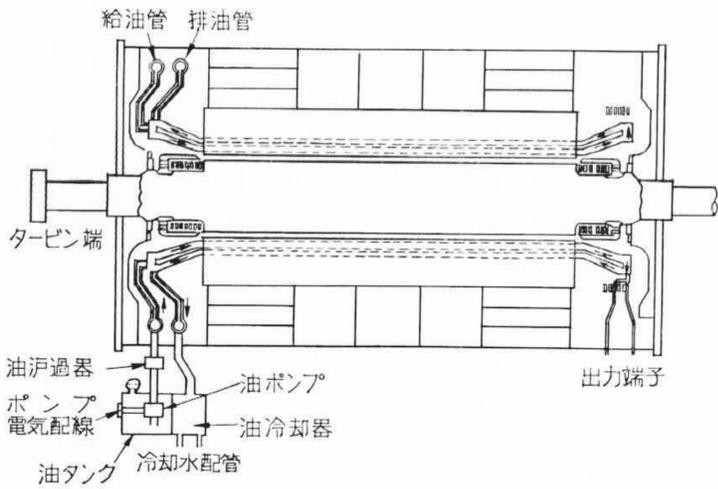
直接冷却回転子では界磁電流が普通冷却方式のもの倍またはそれ以上に達するので集電環部の構造にも特別の考慮が払われねばならない。第13図は大電流容量の集電環の構造例を示す。正負両集電環の間に2組の翼を有する複流通風翼が設置されている。この複流通風翼は刷子集電環外周および集電環にあけられた軸方向通風孔の部分から冷却空気を吸引する。円筒状のブスリングに刷子保持器が取り付けられている。ブスリングは集電環の周囲をめぐって刷子や集電環外周を流通する冷却空気の通風路を形成している。

第1表 ギャップピックアップ式界磁線輪の特長

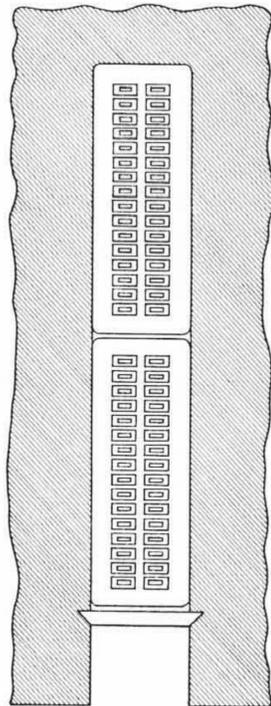
1. 空隙のガス温度は均一で固定子線輪温度へ及ぼす影響が少なく、普通冷却式固定子と組合わせて使用できる。
2. 界磁線輪温度が全長にわたってほぼ均一である。
3. 通風経路が短いので通風損失が少なくてすむ。
4. 特に強力なブロワを必要としない。
5. 銅断面積を大きく取りうるので界磁損失が少なくてすむ。
6. 発電機の全体的な構造が簡単で、保守、運転、組立などが容易である。



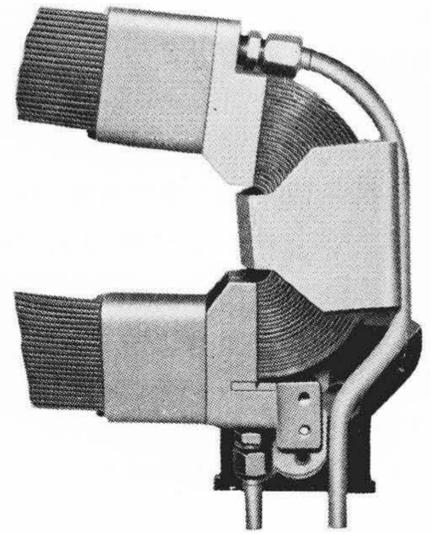
第13図 集電環



第 14 図 液体冷却発電機説明図



第 15 図 液体冷却式固定子線輪



第 16 図 線輪端接続部

大電流容量の集電環は普通のものに比較して多数の刷子を取り付けるので集電環表面も大きくなり、この部分の回転子軸長が長くなるのはやむをえない。また集電環と界磁線輪とを接続するリード線も長くなって来る。こうして長くなった集電環部分の軸がオーバーハングされることは振動の原因となり集電環の良好な運転に支障をきたす原因ともなるので第 3 軸受を設けることが好ましい。

第 14 図は液体冷却発電機の冷却方式を説明したものであり、第 15 図はこの方式の線輪の断面図を示すもので各導体は中空で油の流路を内蔵している。第 14 図に示すように油を循環させるための油ポンプ、油タンク、油戸過器などの付属装置が必要となる。これらはセットにまとめて発電機架台下の適当なところに設置される。冷却油は固定子線輪の電気的接続を行わない側から機内にはいり上コイル内を流れ他端で下コイルに移って帰ってくる。

液体冷却線輪の構造は比較的簡単で、中空導体素線は普通の線輪の素線と同様にスロット内で転位される。第 16 図は線輪端接続部の構造を示すもので、中空導体素線はいったん銅製のはかまに集められ、次の線輪との間は銅条で接続されて電気的な接続を形成している。上下各線輪のはかまにはそれぞれ給、排油口がついて油はここから絶縁管を通じて給、排油の集合環に接続される。液体冷却線輪の絶縁方式は普通冷却方式と大部分同一であり、線輪全体が完全に絶縁されていて裸の部分を残さないことは普通冷却方式の場合と根本的に変りない。したがって大地に対するクリープなどによるフラッシュオーバーの懸念はまったくない。ガス冷却式直接冷却固定子線輪ではガス通風のために比較的大きな通風路を必要とし、この通風路の出口入口の開口に対する絶縁に特別の考慮を払わねばなら

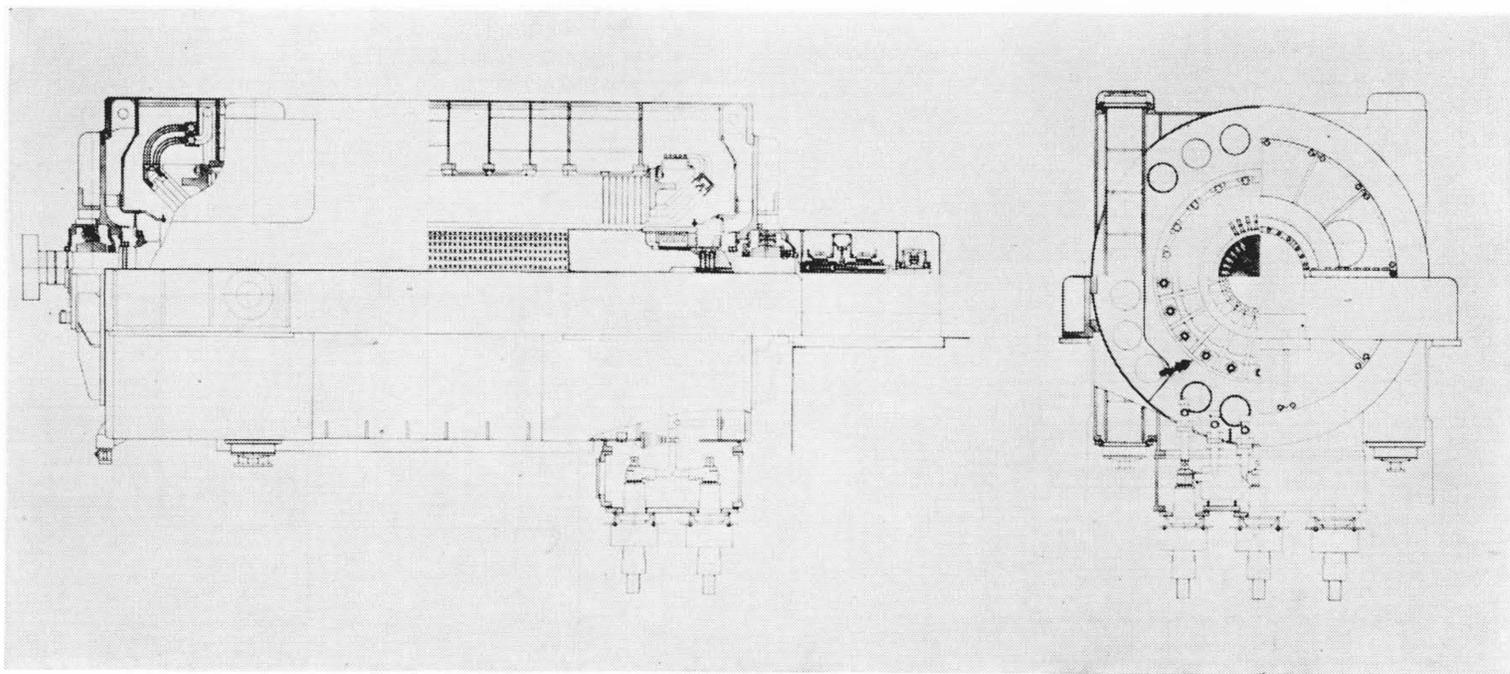
第 2 表 液体冷却式固定子線輪の特長

1. 冷却能力が大であり、容量増加が容易である。
2. 冷却媒体の流通抵抗が少ない。
3. 線輪が温度変化により膨脹収縮の影響をうけることが少ない。
4. 冷却媒体取入口の絶縁距離を十分に取りうる。
5. 発電機の全体的な構造が簡単で、保守、運転、組立などが容易である。

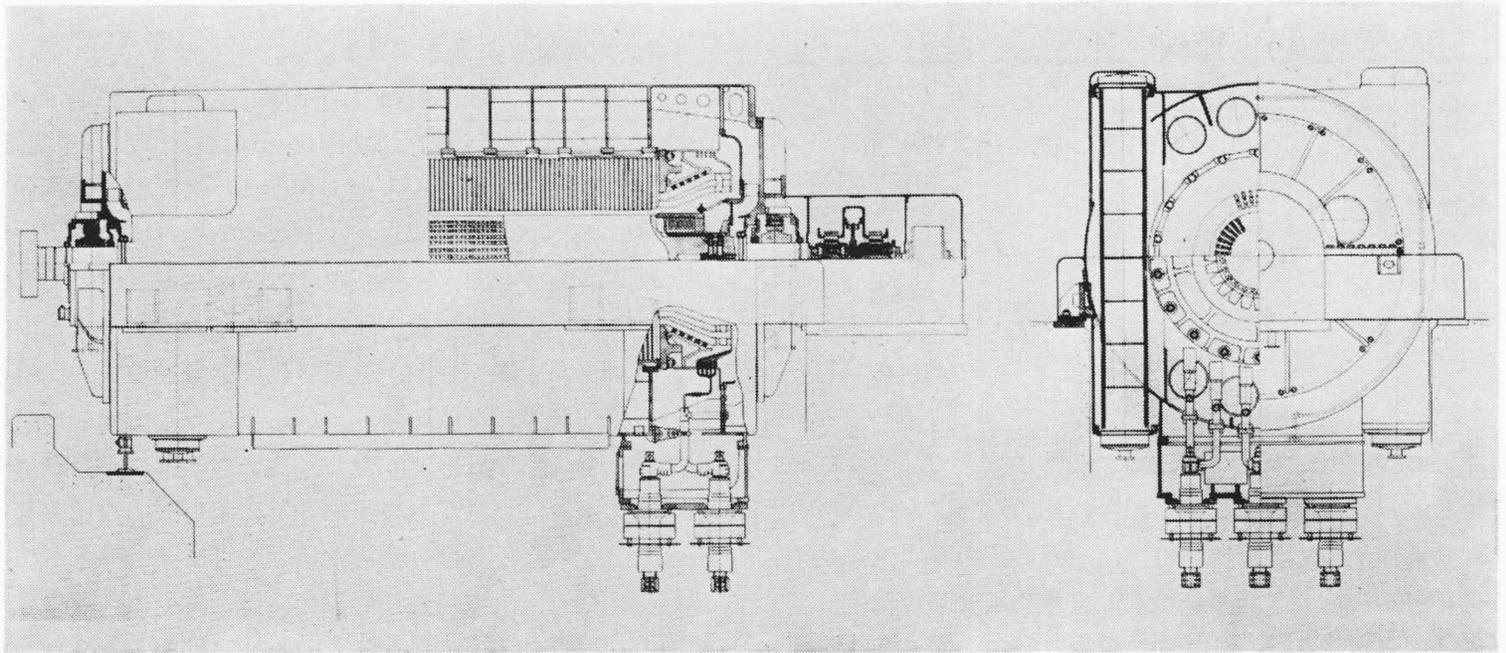
ないが、液体冷却方式ではかかる必要がない。液体冷却方式では液体通路が少なくすむのでスロット内に銅を有効かつ多量に収納することができ、かつ冷却効果も大きいのみならず、絶縁も素線絶縁と大地絶縁のみを考慮すればよいので、大容量機になればなるほどその特長を発揮することができる。

第 2 表に液体冷却式固定子線輪の特長を表示した。

第 17 図はギャップピックアップ式回転子と液体冷却式固定子とを組み合わせた直接冷却発電機の断面図を示す。これからの超大形発電機はこうした形で実現されよう。本機の方式の直接冷却では普通冷却方式の特長である簡単な構造がそのまま残されているところが多い。すなわち、たて形ガス冷却器、低機内ガス圧の採用、方向性珪素鋼板の使用など普通冷却式発電機の項で説明したものと同様である。一方、液体冷却方式自体もきわめて簡単で、固定子線輪のガス冷却式直接冷却方式で必要とされる多段強力ブロワがなく普通冷却式と同様な一段軸流ファンで十分なので、精密なブロワのクリアランスの調整を要せず、また機内圧も高くする必要がなく、複雑な構造の水素シールも不要なので、今まで十分経験した普通冷却



第 17 図 直接冷却発電機断面図（固定子液体冷却式、回転子ギャップピックアップ式）



第18図 直接冷却発電機（固定子普通冷却式，回転子ギャップピックアップ式）

機の保守，点検および運転の技術をそのまま適用することができる。

現状では液体冷却方式の冷却媒体としては変圧器油を使用する予定であるが，変圧器油は高電圧機器に使用された豊富なる実績があり，また化学的にもきわめて安定したものであるため液体冷却発電機の冷却媒体としてただちに利用できるものである。

水は油の約2倍の比熱をもっているため，きわめて高性能の冷却媒体ではあるが，実用上いかにして電気抵抗の高い状態に保つか，また固定子線輪と給配水管とのフラッシュオーバをいかにして防止するか，あるいはまた発電機の運転中，水がいろいろの材質のところを循環するが，これによって腐食の現象が起らぬかなどの諸問題がある。これらが全面的に解決されると固定子の冷却能力はさらに増大することは間違いない。

3.3 普通冷却と直接冷却の組合わせ

第18図は普通冷却式固定子とギャップピックアップ式回転子を組合わせた例を示す。

軸材鍛造寸法の制約を受け狭いところに熱損失と通風路が分布している回転子に比べると，固定子は比較的有効に通風冷却の手段を講ずることができるものである。したがって固定子には構造の簡単な普通冷却式のもの，回転子は冷却能力の大きなギャップピックアップ式を，組合わせたものを採用することはきわめて効果的である。この場合前述のようにギャップピックアップ式回転子は空隙に沿う温度分布が一様で固定子の設計に及ぼす回転子温度の影響が少ないので，かかる組合せが可能となるのである。

また固定子線輪の絶縁物は電力発生に寄与せず線輪内で発生する熱の放散に対して最大の障壁となっている。この絶縁厚さが薄いほど熱放散が容易であり，また鉄心や導体などの電力発生の有効資材に対するスペースファクタもよくなるので低電圧の固定子を採用することによって固定子重量の低減，あるいは固定子出力を増すことができる。大容量火力発電所ではユニットシステムを採用して，発電機は主変圧器およびユニット変圧器を通じてそれぞれ送電線，所内回路に接続されるので，発電機回路の電圧は発電機のみに適した電圧を選定してさしつかえない状況にあり，上述の低電圧固定子の採用は有効な方法である。

東北電力株式会社仙台発電所納 224,000 kVA 機では，通常この程度の容量の発電機は2並列電機子巻線で約20kV付近の電圧が使用されるが，設計上の配慮によって4並列回路12kVが採用され，普通冷却式回転子と組合わされている。また，中部電力株式会社新名古屋発電所の G. E. 社より輸入された 281,600 kVA 12.6 kV 機

第3表 16 kV 48 スロットの場合の出力 kVA を 100% とした
場合の並列回路数の選定による kVA 出力の変化

スロット数 並列数	42	48	54	60	63	66	72
2	98% 14kV	100% 16kV	96% 18kV	94% 20kV		84% 22kV	69% 24kV
3			111% 12kV		112% 14kV		108% 16kV
4							124% 12kV

では低電圧固定子とギャップピックアップ式回転子が有効に組み合わされている。

3.4 大形タービン発電機の性能

大容量タービン発電機の端子電圧については前節に述べたように最近のプラントではユニットシステムが採用されるので発電機本体の設計と付帯電気設備の計画に好都合なように決定してさしつかえない。第3表はある特定の定格をもった発電機について通常の2並列回路の場合の定格を基準としたとき，並列回路数の選択によって電圧および定格が，いかに変わるかを示したものである⁽¹⁾。低電圧固定子を採用すれば固定子出力は増大するが，電流は増大するので相分離母線の容量は増大してまた別の問題が生ずるので，全体的に考えて電圧の選定を行わねばならぬことはもちろんである。

周知のように短絡比は発電機の安定度に対して重要なもので，これが大きいほどシステムの安定度は増すが，短絡比の大きいほど機械の形は大きくなる。また最近は大形タービン発電機の低励磁運転が要求されることが多いのでこの点も考慮されねばならない。現在，わが国の大容量発電機ではタービン定格出力に対して約0.7のものが多く採用されている。

一般に水素冷却発電機では水素圧によって出力 kVA が異なり，したがって短絡比の値も異なってきて比較検討するのに不便である。タービンと関連して考えるならば，タービンの定格出力に対していかなる容量の発電機を選定するかということが大切なことで，短絡比もタービン最高出力に対する実効短絡比として

$$\text{実効短絡比} = \text{ある発電機 kVA 基準の短絡比} \times \frac{\text{発電機基準 kVA}}{\text{タービン定格出力}}$$

で表わすべきであるという考え方もあり⁽²⁾，タービン出力に対応して発電機の短絡比を表現するほうが合理的であると思う。

直接冷却方式は普通冷却方式に比べて冷却効果をよくして電流密度を高くとり，機械の寸法重量を小さくしたものであるから，鉄

第 4 表 各種冷却方式による発電機の比較
200,000 kVA-3,600 rpm-18,000 V

	製品重量	効 率
普通冷却固定子 普通冷却回転子	100%	98.8%
普通冷却固定子 直接冷却回転子	75%	98.6%
液体冷却固定子 直接冷却回転子	65%	98.5%

損、機械損などの固定損に対して電流損が非常に大きくなり、機械の小形化による固定損の軽減を上回る傾向にある。しかも、直接冷却方式の冷却効果はきわめて大きいので、冷却の点のみより論じて機械の軽量化を計るならば普通冷却のものより効率は多少低下してくる。第 4 表は同一定格、同一仕様の発電機に種々の冷却方式を適用したときの性能を比較表示したものである。

さて、以上タービン発電機の容量増大に伴う、発電機の諸方式について述べてきたが、200,000 kVA あるいは 300,000 kVA をこえる大容量機になると、回転子軸材による制約、あるいは輸送上の制約などにより部分的に、あるいは全面的に直接冷却方式を採用することが必然的なものとなってくるが、これ以下の発電機で従来方式で十分製作されてきた出力の範囲に対していかなる方式のものを採用すべきかという問題がある。

直接冷却方式では機械の小形軽量化は実現されるが、構造がやや複雑となり工数もかさむので単位重量当りの価格は普通冷却のものに比して高くなるのはやむをえない。したがって、比較的小容量機に対しては効率を考慮に入れた機器価格、架台、建家などを含めた経済性を主体にして採否を決定すべきものである。これは個々の建設計画あるいは機器配置の方式によっても異なるものであるが、200,000 kVA 以下に対しても直接冷却方式の採用が有利な場合が十分ありうる。

4. 大形発電機用材料

前述のように、タービン発電機の大容量化を制約してきた大きな問題は回転子軸材と冷却方式とに集約され、特にその時代に入手できる軸材の限度によって大きな制約を受けてきたといえよう。他面、前項に述べたような冷却方式の顕著な改善によって与えられた軸材から出しうる出力を増大させながら両者相助けて今日に至ったものである。そして、最近の高効率、高信頼度の発電機の完成には磁性材料と絶縁材料がさらに大きな貢献をしているものと考えられる。

タービンと異なり発電機用材料では、高温高圧という要求はないが、機械的にすぐれた材料、磁性材料、導電材料、絶縁材料などに高性能なものが必要となる点に特異性があり、使用材料の種類もはなはだ広範である。

軸材としては、真空鋳造法の採用によって優秀な特殊鋼鍛造品が使用されている。回転子線輪端部を保護する保持環には高抗張力の磁性鋼が使用されてきたが、直接冷却発電機では非磁性特殊鋼が採用される。

磁性材料としては方向性硅素鋼板が広く採用されている。

導電材料としては銅が依然として使用されており、回転子線輪端部としてはクリープ限度の高いものが要求され、銀入り銅線が広く実用されているが、合金アルミ導体も採用されよう。

絶縁材料についてはタービン発電機のみならずすべての高圧電気機械の重要課題として取り上げられており、またロータ用絶縁材料は特に高抗張力なものが必要で絶えざる試作研究が続けられて、著しい発達を遂げつつある。

以下、発電機構成材料について記述しよう。

4.1 大形軸材の最近の進歩

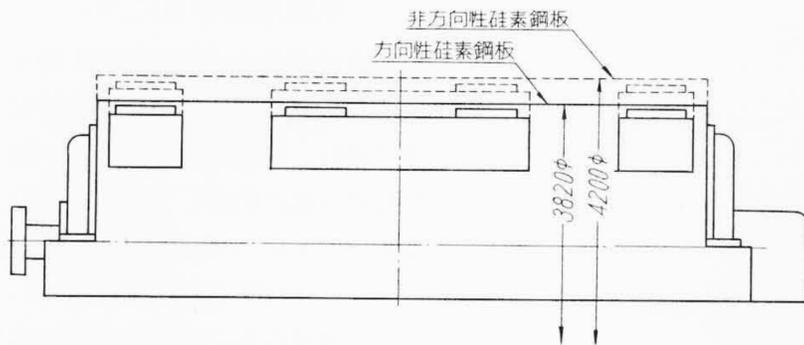
回転子には単一鋼塊の軸材から削り出される構造のものが多いが、いかにして良質の大形軸材をうるかが常に最大の問題で、逆説的には、製鋼技術の進歩によってタービン発電機の大容量化が促進されてきたともいえる。従来ニッケル・クロム・モリブデン鋼軸材がながく使用されてきたが、現在ではニッケルを主体とする添加物中炭素とクロムの含有量を最小限におさえ、モリブデンと少量のバナジウムを加えた組成の材料が採用され、熱処理方法も往時の油焼入れから空気焼鈍方式に改められている。こうして均一な組織の高抗張力でも、磁気特性のすぐれた、高い信頼度の大型軸材が入手できるようになり、これが戦後から今日に至る火力発電機発展の大きな推進力となったことはいなめない。さらにインゴットの鋳造方法自体が改められ、真空鋳造法の採用によって従来にも増して良質の大形鋼塊が得られるようになった。これは熔融鋼を高真空に保たれたインゴットケースに注入する方式で、日立製作所でもすでに実施して効果を収めている。大型鋼材の鍛造に際しては鋼中の水素が非常に重要な要素で白点や水素脆性が問題として取り上げられてきた。真空鋳造法によると鋼中の水素の含有量が半分以下になり、過去久しく問題にされてきた水素の害が半減された訳で、軸材の信頼度ははなはだしく高められた。また真空鋳造法によって酸化物の量は大略従来の3分の2以下に減少するので、いわゆる非金属介在物による鋼塊のよごれが非常に少なくなり、清浄度の高い大型鋼塊が得られるようになった。すでに国産で50 t をこえる優秀な軸材が入手されており、将来こうした新しい方式によってさらに大型の信頼度の高い軸材が入手できることは大型化の実現に明るい希望を与えるものである。

製鋼法の進歩に対応して軸材の検査も厳重に施行されて採否が決定される。通常、胴部両端、中央部、軸端部から試験片をとって材料試験を行い、機械的に十分高性能であることの確認のほかにも均一な性能のものであることが、実証されなければならない。また全面超音波探傷試験を施行して有害な欠陥の無い材料を選択しなければならぬ。一般的にいっていかに高級な軸材であっても超音波探傷試験で文字どおり無欠陥ということは望むべくもないので、試験中発見された欠陥反射についてその大きさ、分布などを詳細に調べ、欠陥反射の生成原因を十分に吟味して軸材の採否を決定しなければならない。このためには、状況に応じてできるだけ精密に調査することが必要である。こうした採否の決定は慎重な調査と過去の絶えざる経験の蓄積によって裏づけられるべきものであって、一定の欠陥反射の基準を定めてこれによって判定する方法も提案されているが⁽³⁾、軸材のようにタービン 電機の生命ともいべきものに対してはやはりそのつど徹底した 査に基づいて判断するべきである。

このほか大型軸材に対しては加⁽⁴⁾ 試験が施行される。これは軸材が残留応力そのほかの原因によ⁽⁵⁾ て温度上昇とともに曲りを生ずるかどうかを調査するものである。タービン軸材ほど高温になることがないので試験温度も120°Cくらいまでで十分であって、曲りについては ASTM⁽⁴⁾ のタービン軸材に⁽⁶⁾ 拠して 0.025 mm 以下程度を以って合格としている。

4.2 保 持 環

回転子線輪端部を保持するもので、円筒状の特殊鋼の鍛造リングである。高抗張力で欠陥のない均一な材質のものが要求される。普通冷却形発電機では磁性鋼のリングが使用されてきたが、大容量直接冷却発電機の出現とともに電機子反作用の増大に伴う漂遊負荷低減のために非磁性のリングが使用されるようになってきた。大型の非磁性リングの製作は製鋼技術上困難なものであるが、ASTM⁽⁵⁾



第19図 224,000 kVA機を方向性および非方向性硅素鋼板で製作せる時の外形寸法

(A288-55)の規格を上回る高性能品を入手することが可能な現状である。

4.3 硅素鋼材

タービン発電機の損失中大きな割合を占める鉄損を軽減させるために、良質の硅素鋼板が久しく要求されてきた。このために高級のT級硅素鋼板を採用して効果を収めてきたが、最近では大形発電機に方向性硅素鋼板が広く採用されて鉄損の軽減と固定子重量の軽減に大きな成果をあげている。

大形発電機では固定子輸送の問題から、寸法的にも重量的にも軽量化がぜひとも要求され、また回転子軸材を有効に使用させる見地から固定子側の磁気抵抗を軽減させることが必要となってくる。方向性硅素鋼板は圧延方向では非方向性のものに比べて鉄損、磁化特性ともに格段にすぐれているが、圧延直角方向では大差ない。タービン発電機では鉄損の大部分は鉄心ヨーク部分において発生し、鉄心セグメントを適切に分割することによってヨーク部分を硅素鋼板の圧延方向とほとんど完全に一致させて、しかも経済的な板取りを行うことができるので、ほかの回転電機に比べて方向性の採用に好適なものといえよう。

日立製作所ではかねてより方向性硅素鋼板の実用化を研究してきたが、まったく同一寸法の鉄心を有するそれぞれ 3,000 kW および 75,000 kW 級の発電機について非方向性を用いたときと方向性を用いたときの特性および作業性を実物試験で確認した。試験の結果、鉄損は約 60~70%に減少し、鉄心部に要する磁化力もまた激減することがわかり、方向性硅素鋼板の使用によって鉄心重量、寸法が大幅に軽減されることが証明された。またこの試験において、焼鈍そのほかの方向性採用に伴う諸問題も解明され、現在の作業方案の骨子をかため得た。

第19図は方向性の採用により、鉄損値を同一とした場合、固定子外形寸法がどうかわるかの一例を示したものである。

鉄損の軽減には鉄心自身が高性能であることのほかに、鉄板一枚ごとの絶縁処理がすぐれていることが必要である。このために一枚ごとに耐熱性の絶縁ワニス塗布して連続式熱風式乾燥炉で均一に焼付けている。

4.4 導電材料

導電材料として銅が使用されることは従来とかわりないが、界磁線輪用導体に対しては特別の考慮を要する。運転中の界磁銅損による温度の上昇に伴い界磁線輪は軸方向へ熱膨脹して伸びようとするが、一方、回転による大きな遠心力で線輪がくさびあるいは保持環におしつけられているので伸びは拘束され導体内部に大きな圧縮力を生じ、これによりクリープ現象が起る。このため線輪端部の導体に変形して絶縁物を損傷または隣コイルに接触するなどの短絡事故を生ずるに至る。最近では少量の銀を添加し、銅の再結晶温度をあげた硬銅線を用いてクリープ強度を高くしたものをを用いてこの現象

の発生を防止している。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予熱して十分膨脹させてから昇速する運転方式は線輪のクリープを防止し、界磁線輪の寿命を長くする見地から大形発電機には好ましい運転方式である。

発電機出力が軸材によって制約されることは前述のとおりであるが軽量のアルミニウムを界磁線輪用導体として使用し遠心力を軽減して大きな径の軸材を採用して出力の増大を計ることができる。アルミニウム導体に対しても上のクリープ特性を考慮して高純度のアルミニウムに微量のFeとMgを添加したアルミ合金が完成され、界磁線輪導体として広く採用されている⁽⁵⁾。直接冷却方式の採用によって小さな軸材から大きな出力を取り出しうようになったので銀入銅線を使用して相当の出力まで実現できるが、さらに大きな出力のものをアルミ合金導体を使用した界磁線輪に直接冷却方式を適用して製作することができるであろう。

4.5 絶縁材料

4.5.1 固定子線輪用絶縁物

最近発電機の大容量化に伴い、端子電圧も一般に高くなり、固定子線輪絶縁の信頼度の高いことがますます強く要望されてきた。固定子線輪は一般に負荷の変動に伴って銅損失による温度上昇が異なり、導体の膨脹収縮が起るので長期間の運転を行うと導体と絶縁層の熱膨脹の差に基因して絶縁層が導体より移動はく離してきれつを生ずるようなことが考えられる。特に大容量タービン発電機では長大な固定子線輪を使用しているのでこの傾向に注意を払わねばならない。この現象が生じると線輪の絶縁耐力は急速に低下しついには絶縁を破壊するに至る。こうした要望にこたえる絶縁方式としてSLSワニスを使用する方式が開発され広く実用されるに至った。

SLSはいわゆる不飽和ポリエステル樹脂の応用であるが、特に高電圧線輪用として研究開発したものであって、一般に使用されているものとはまったく異なる。

SLSはいわゆる重合反応で硬化するので、反応中なんらの揮発分も発生しないので絶縁層に空隙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氣的機械的特性にすぐれた熱硬化性のもので、硬化後も柔軟性が失われず、マイカを主体とする絶縁層に注入してもこの特性が活かされて、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。

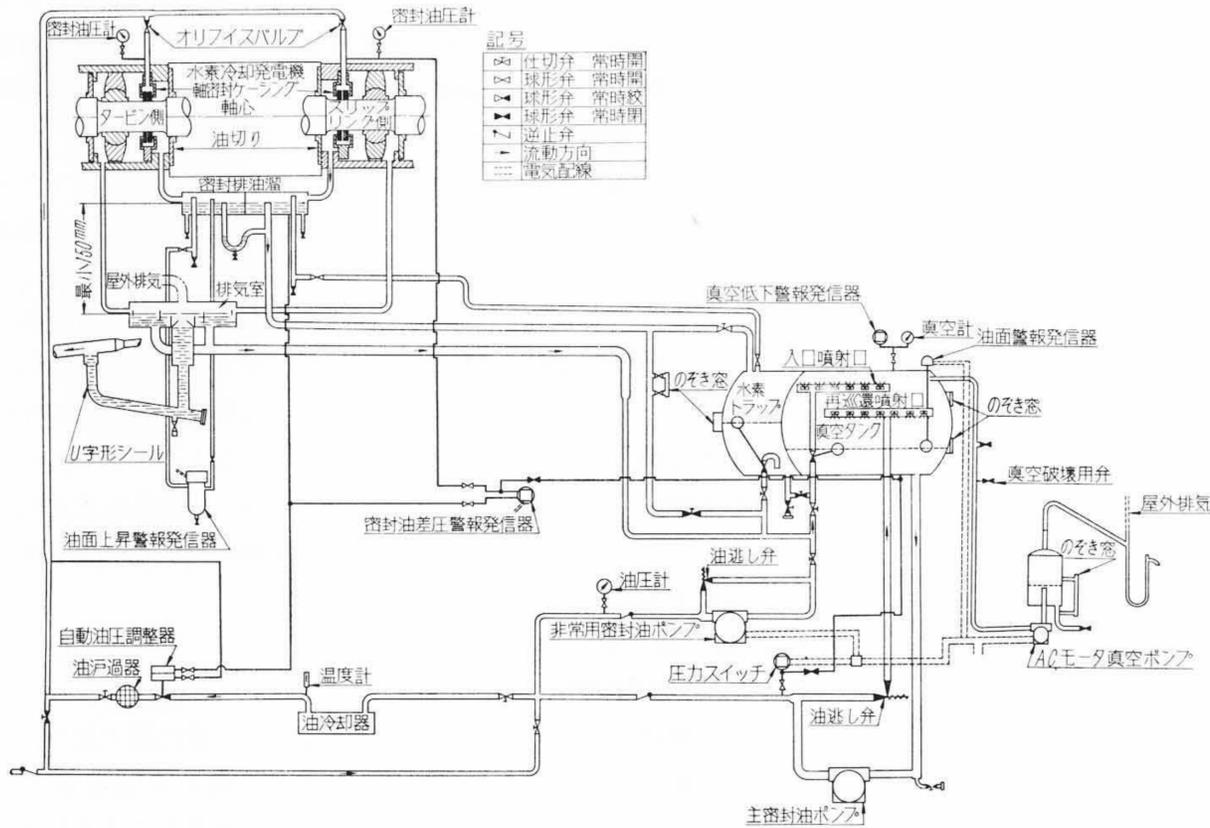
前述のように、マイカテープが依然として絶縁層の主体として採用されていることは変りないが、マイカテープ自身が新しい絶縁方式に適するように改善されていることはいうまでもない。

さらに、マイカテープの裏打材を良質のガラス布とする研究は材質の点、作業性の点、そのほかあらゆる角度から検討されている。また、近年アメリカにおいてマイカマットと称し、機械的に細分されたマイカを加工して成型した絶縁物が使用されている例もある。

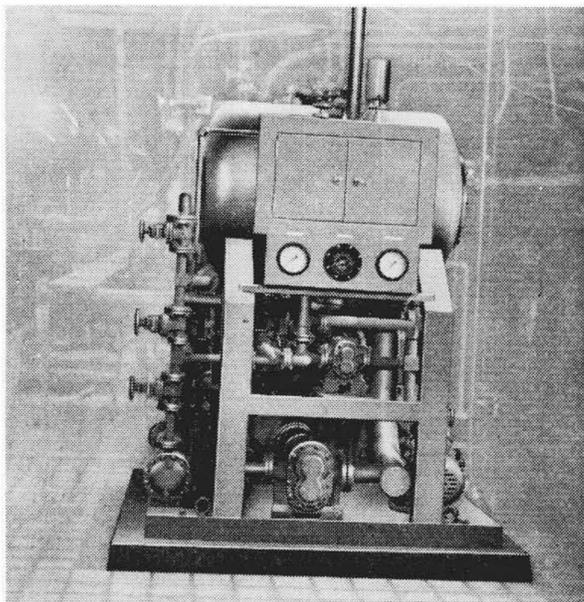
4.5.2 界磁線輪用絶縁物

界磁線輪用絶縁物は絶縁耐力のほかに運転中の高い機械的な力と温度に耐えることが要求されるので、固く圧縮したマイカプレートを主体として使用している。このほかガラスアスベストやアスベストなどの耐熱性、耐摩耗性に富む材料をマイカとともに焼付けて強固な絶縁層を成型させて使用している。また、界磁線輪端部の間隔片には機械的に強固なアスベスト布入りフェノール樹脂積層板を使用している。

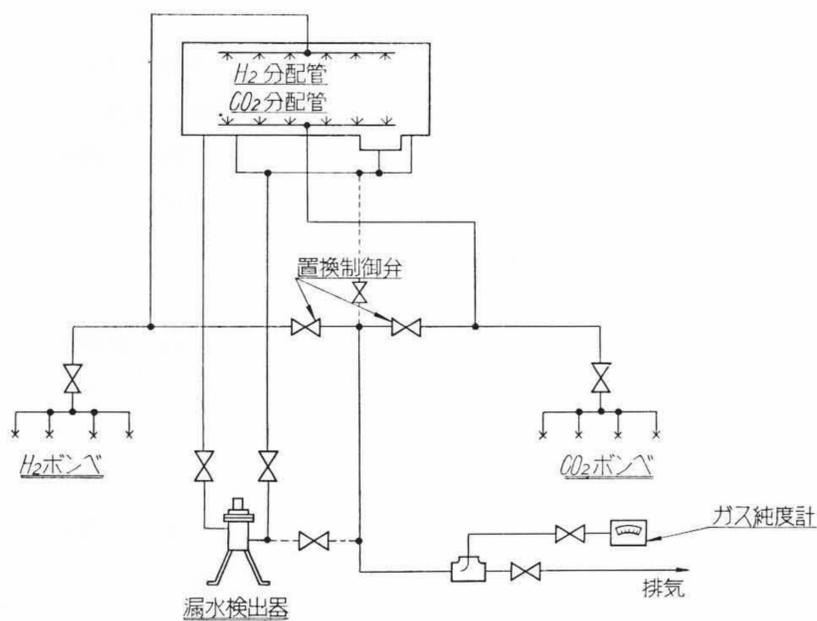
最近界磁線輪段間絶縁材としてポリエステルガラス積層板が使用されつつあるが、本品は電氣的、機械的にすぐれているので漸次広く採用される傾向にある。



第20図 密封油系統(真空処理式)



第21図 密封油装置



第22図 置換制御配管図

5. 水素冷却方式について

水素冷却方式は 100,000 kW 級までは構造、系統ともに簡単な連続掃気式が採用され、真空処理を受けない軸受油を軸密封部に供給している。この方式はすでに十数台の発電機に採用され、いずれも好調に運転されている。これ以上の容量のものには真空処理式が採用されて、軸受油を真空処理して密封部に供給している。

第20図に真空処理式の密封油系統の代表的な例を示す。第21図は密封油装置を示す。最近の系統は、基本的な考え方としては従来の方式に類似はしているが、全般的に簡単化しているので信頼度高く保守運転も容易なものとなっている。第20図でわかるように、油タンク自身の中に水素トラップ用フロートバルブを取ってタンクの数を減らし、また、主密封油ポンプと非常用密封油ポンプを立体的に配置して装置全体の据付面積を減少するなどの新しい方式になっている。

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機器類も減少しているので保守点検も容易となっている。

系統の安全性についても考慮が払われて改善が加えられている。昭和30年以降に製作された油系統では(連続掃気式も真空処理式もともに)すべて排気室と軸受排油溜の間に第20図にも示されるようなU字形のシール排管を介しているので軸密封に思わざる異常があってもタービン油槽内に水素ガスが導入されたりまた延焼したりすることが未然に防止されている。

水素ガス系統についても置換制御弁の配置を第22図のように改めて、漏油水警報発信器配管と分離して全然別個のものとしている。従来の方式では図の点線のように配管していたが、炭酸ガスを使用して機内空気を追出す場合に、弁の操作を誤ると、固定子下半部の濃度の高い炭酸ガスが漏油水警報発信器の配管を通じて、排出ガスに混入するので置換完了を誤って判断することもありうるが、本方式ではこのようなことは防止され、系統操作上の信頼度が高められている。

6. 結 言

以上最近のタービン発電機および今後の動向について二、三の問題を取り上げてその概要を述べた。

大容量化の傾向はますます激しくなり、タービン発電機も普通冷却から直接冷却へ、あるいはクロスコンパウンド方式に移ろうとしている、軸材、絶縁材料、工作精度の向上と相まって大容量化は急速に実現するものと思われる。

参 考 文 献

- (1) 是井：日立評論，No.3 317 (1960)
- (2) C. E. Kilbourne, J. B. McClure: p.372 American Power Conference Volume XV. March 25-26-27, 1953
- (3) A. W. Rankin, C. D. Moiarty: A. S. M. E. 55-A-194
- (4) A. S. T. M. A289-55
- (5) L. B. Barker, C. H. Holley, R. H. Harrington and M. S. Sayer, Metal Progress, May, 1953