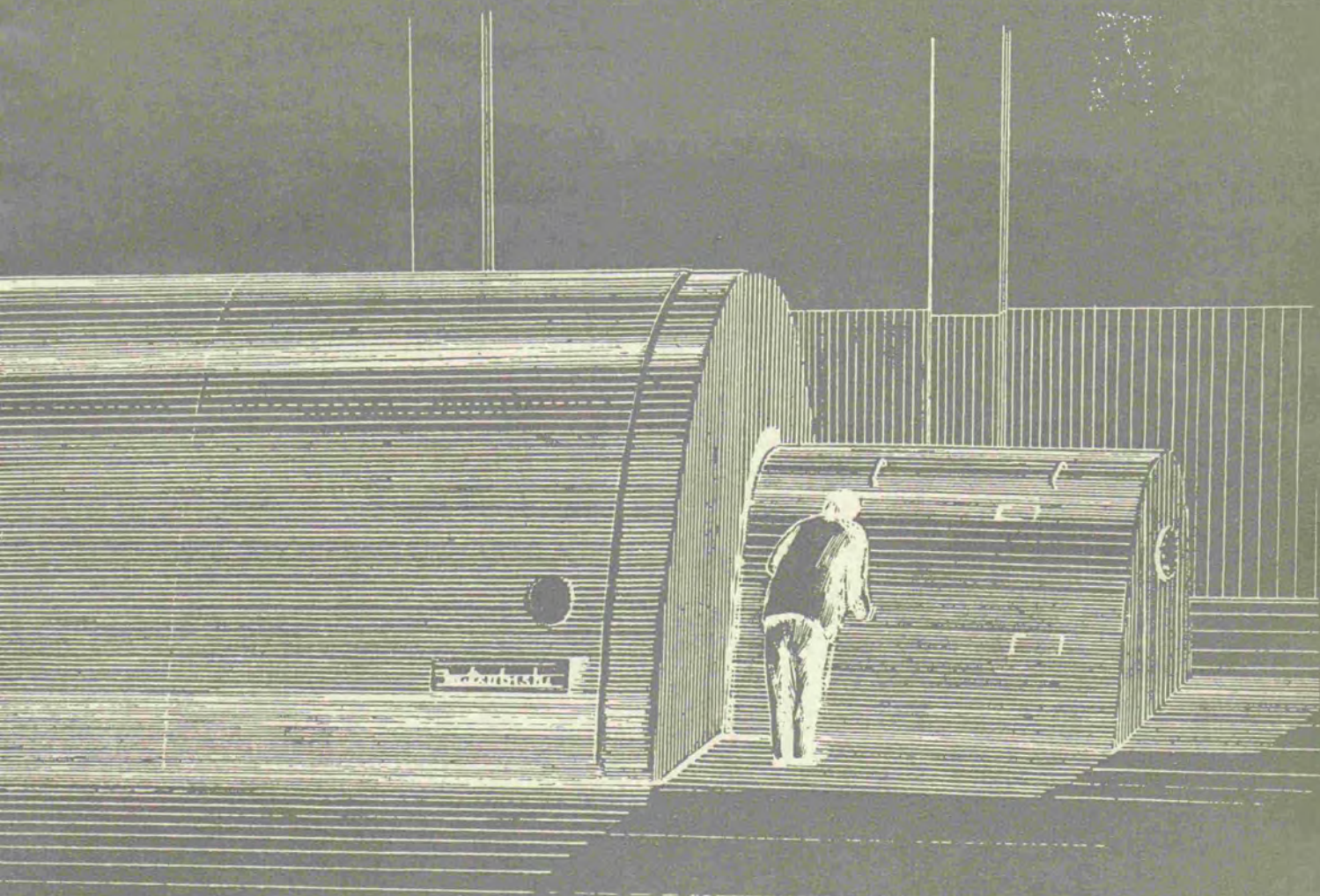


MITSUBISHI DENKI

# 三菱電機

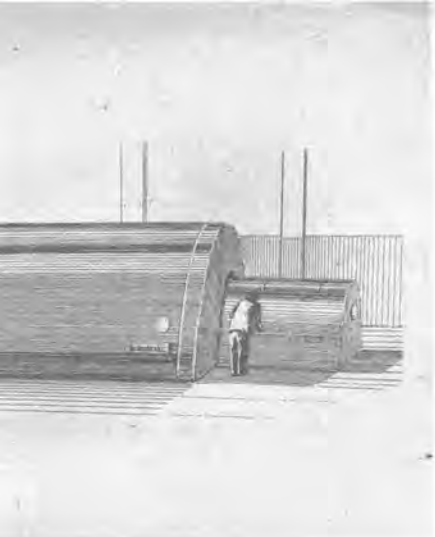


Vol. 27 1953

9

水素冷却タービン発電機特集





# MITSUBISHI DENKI

# 三菱電機

## 表紙説明

表紙のペン画は九州電力株式会社築上発電所  
納め67,600 kVA 13.2 kV 3,600 rpm 水素冷  
却発電機の外形図でありまして、現在営業運  
転中のものとしてはわが国最大容量のもので  
あります。上記の外同一容量のものを（た  
だし電圧は 11 kV）同社相の浦発電所へ納入致  
しております。なお製作中の主なものは  
九州電力相の浦発電所 1×67,600 kVA  
3,600 rpm (#4)  
東京電力鶴見第二発電所 3×81,000 kVA  
13.2 kV 3,000 rpm (#1#2#3)  
(3,000 rpm としてわが国最大)  
関西電力姫路発電所 1×81,176 kVA  
13.8 kV 3,600 rpm  
(3,600 rpm としてわが国最大)  
等であります。

## 三菱電機株式会社

本社 東京都千代田区丸の内（東京ビル）  
(電) 和田倉 (20) 代表 1631・2331  
研究所 兵庫県尼崎市南清水  
神戸製作所 神戸市兵庫区和田崎町  
名古屋製作所 名古屋市東区矢田町  
伊丹製作所 兵庫県尼崎市南清水  
長崎製作所 長崎市平戸小戸町  
大船工場 神奈川県鎌倉市大船  
世田谷工場 東京都世田谷区池尻町  
郡山工場 福島県郡山市宇境橋町  
福山工場 福山市仲野上町  
姫路工場 兵庫県姫路市千代田町  
和歌山工場 和歌山市岡町  
中津川工場 岐阜県中津市駒場安森  
福岡工場 福岡市今宿青木  
札幌修理工場 札幌市北二条東 12  
大阪営業所 大阪府北区堂島北町 8 番地 1  
(電) 福島 (45) 5251-9  
名古屋営業所 名古屋市中区広小路通  
(電) 本局 (23) 6231-5  
福岡営業所 福岡市天神町（三菱ビル）  
(電) 西 (2) 5821-5825  
札幌営業所 札幌市南一条西 5 の 14  
(電) (2) 2378・3911  
仙台事務所 仙台市東一番丁 63  
(電) 仙台 2573・8057  
富山事務所 富山市安住町 23 の 2  
(電) 富山 4692・5273  
広島事務所 広島市袋町 1（明治生命ビル）  
(電) 中 1069・4824  
高松出張所 高松市南紺屋町 34 の 3  
(電) 高松 3178・3250  
小倉出張所 小倉市博労町 63（富士ビル）  
(電) 小倉 3614

昭和 28 年 第 27 卷 第 9 号

(水素冷却タービン発電機特集)

## 目次

66,250 kVA 水素冷却タービン発電機の完成に際して……井上八郎右衛門……	2
水素冷却器の一般的問題……進藤貞和……	4
水素冷却発電機の経済性について……水野直彦……	8
九州電力 66,250 kVA 3,600 rpm 水素冷却タービン発電機……加賀貞広……	13
55,000 kW 水素冷却タービン発電機用水素ガスおよび密封油制 御機器……矢幡源三・今北孝次……	26
画期的な鉄道輸送について……山田不知人・新井興美……	32

### 特別寄稿

大型タービン発電機ロータシャフトの製造について…… ……谷口豊吉・阪部喜代三……	34
九州電力築上・相ノ浦発電所納 55,000 kW 蒸汽タービンにつ いて……津田鉄弥……	44
九州電力相ノ浦発電所納三菱長崎 CE 水管式汽罐について……吉見 豊……	48

## 品質奉仕の三菱電機

# 66,250 kVA 水素冷却タービン 発電機の完成に際して

長崎製作所長

井上八郎右衛門

## Completion of 66,250 kVA Hydrogen Cooled Turbine Generator

Hachiroemon INOUE

Nagasaki Works

A newly completed 66,250 kVA hydrogen cooled turbine generator has built another mile stone in the development of our engineering. Even in America it dates back to only 1926 when hydrogen cooled machines made a successful debut. In buliding the units, difficult problems arise with the increase of their size and capacity. For instance, a machine of 3,600rpm has only 20 % higher speed than that of 3,000rpm but the stress increases by 44 % compared to the latter. The manufacture of rotor shafts for heavy duty is another problem, which needs no little technical skill. Overcoming these difficulties as well as the problems of controlling hydrogen and oil, however, this gigantic machine has been built to glorify our engineering world.

独逸で呱呱の声を挙げた電気機械の水素冷却方式が、米国で一人前になつたのは約 20 年前であつた。わが国でもこの技術を一日も早く実用化すべく研究と努力がなされた結果、11,000 kVA 発電機が国産最初の水素冷却タービン発電機として回転を始めたのは約 15 年前のことであつた。これに続いて水素冷却調相機も完成したが、戦争のため遂にその成果を十分發揮せず埋れてしまった。爾來戦争の激化とついで起つた敗戦との目まぐるしい国情の変化に会い、水素冷却を有利とする重電気機械の進歩は、わずかに調相機に再現されるに止つていた。

戦後ひとたび米国の実情が公開されるや、この混乱期間における彼我の技術の進歩の隙が、余りに大きいのに一驚を喫したものである。この隙をいかに早く縮めて、日本技術の水準を世界の水準に復帰させるかは、われわれ技術者に課せられた大きな問題であつた。

電力の復興および開発が工業復興の源泉として取上げられるや、これに使用さるべき機械として、現今の世界最高の水準にある高能率機械を要求されるのは当然であつた。しかし製作者側として 10 年間の隙を一気に埋

めることは容易なことではなかつた。かくの如き重電気機械装置は、これに関連する諸姉妹工業の総合結果として完成されるものであるから、本機の完成にもそれが必要であつたが、当時は必ずしも満足すべき水準ではなかつた。

かくの如き情勢の中に、技術促進の一課題として提出されたのが、今回の 3,600 回転の 66,250 kVA 水素冷却タービン発電機であつた。3,600 回転の機械は 3,000 回転の機械よりも、わずかに 20% 高速であるだけであるが、応力が 44% も増すため製作上遙かに困難が多く、3,000 回転の空気冷却 62,500 kVA 機は本機よりも寸法的にはずつと大きいにかかわらず、すでに 16 年前に完成しているのに、3,600 回転では戦後やつと 43,750 kVA 機が完成した程度であつた。しかし今日では本機が最初に完成を告げるや、次々にかかる大容量の水素冷却発電機が各社で完成されて行くのは、わが電機工業界において誠に慶賀の至りである。

本機の製作に関する詳しい説明はページを追つて述べられているとおりであるが、最初問題になつたのは、軸材である。タービン発電機の水素冷却の特性については、

前記の 11,000 kVA で十分研究していたので、とくに目新しいこともなかつたが、当時は本機に用いるような大型軸材は専ら輸入品であつた。しかし戦後発電所のプラント輸出さへやろうというようになっていたのに、その軸材が日本でできぬということは、国内技術の発展のみならず、貿易促進にも大きな影響がある。

タービン発電機の発達史を繙けば、必ず回転軸材の発達が大きな役割を演じていることが判る。米国における大容量発電機の発達は、水素冷却方式の採用にも因るが、最も重要なことは軸材用の強力合金鋼の発達に因ることが大きいということである。炭素鋼の軸材しかできなかった時代には、タービン発電機の容量も 7,000~8,000 kW 程度であつたが、ニッケル鋼ができるに及び 20,000 kW 程度、ニッケルクロウムモリブデン鋼等ができるに及び 40,000~50,000 kW と進んで来た。戦前には 2 極発電機の軸材は弾性限が 45kg/mm<sup>2</sup> 程度であつたものが、戦後の米国の技術では 55kg/mm<sup>2</sup>, 65kg/mm<sup>2</sup> と発達し、その結果発電機の容量も 10 万、15 万 kW に上昇している。かく発達した今日でさえ欧米においても、戦前と同様製鋼業者の最大の努力にもかかわらず、かかる大型軸材がいつでも失敗なしにできるということは甚だ困難なことであつて、これがため発電機の納期がしばしば電力会社の計画に齟齬を来すことのあるのは残念なことではあるが、それほどにタービン発電機軸材の製作の困難であることを物語るものである。われわれは今日あるを思い、製鋼技術の発達には電機業者と製鋼業者の緊密な協力が必要であることを思い、またかかる技術は一朝にしてできるものではなく早目に着手しておかねばならぬことを思い、戦後の復興も完成していなかつた製鋼業者にこの問題を提示した所、快く協力され、研究に研究を重ねられた結果、今日では 5 万、6 万 kW という大容量の発電機の軸材が国産でできるようになり、一般電機業者も自由に高級軸材が入手できるようになつたのは、この協力の賜であつて大いに感謝する次第である。

軸材の問題について電機鉄板が日米間では甚しい品質の差があるので、これも同様協力を求めたが、本機までは多少品質が向上したとはいえ、軸材が進歩したほどには到らなかつたのでこれは後日の問題として残つている。

仕様について考えさせられることは短絡比の問題である。本機の仕様には米国標準が多く考慮されたので、短絡比も既製国産品より大きな値を希望された。元来わが国の技術は欧州に倣うべきか米国に学ぶべきかは種々議論のある所である。新しい方式や大容量のものがずんずん現実して行くのは米国の方が遥かに早いとはいえ、米国の設計では材料が十分に便つてあるので高価なものとなる。戦前の発電機が多くの点で米国に学びながらも、

短絡比において欧州に倣つたのは、貧富の程度が米国よりも欧州によりよく似ていたからである。短絡比の大きいことは一応安定度の目安とはなるが、これが安定度を決する総てではない。短絡比を固執するため不経済なものを作ることは、貧乏国日本としては考えねばならぬことである。そのため従来は国情に適するよう材料節約の見地から、短絡比は欧州式に小さくし、その代り安定度は他の補助装置で補うこととして進んできた。しかるに今日では米国でも短絡比のみを固執することの愚を覚り、これを下げんとする説が漸く現われ、また現に下げた発電機が採用され始めた。これらの見地から本機については米国標準より小さい目に希望されたことは賢明の策であつた。

一つの仕事をする時に、今までなされなかつたことを試みて、技術の一里塚を築いて見ようというのは、技術者の絶えざる憧れであり、また技術者の生き甲斐である。よしんばそれが小さいものであろうと、エベレストの頂上はきわめなくとも、前人未踏の地に踏み入ることは、人間の持つて生れた冒険心を満足させ、それが技術を進ませる原動力となる。日本では従来本機のような大型機はいずれも船便で送られていたので、少し大型のものを貨車輸送するとなれば、国鉄のレールのどこかで寝寝をしている前世紀の遺物である特殊貨車シキ 100 号が目覚め位のものであつた。本機は現場の都合により貨車輸送を便としたが、軌間は狭くトンネルは小さい日本の貨車定規では、かかる大型機を輸送することはできないというのが過去の実情であつた。今までできなかったことを何とかしてやつてみたいのが技術者の道楽である。しかしこの道楽は生やさしいものではなかつた。車両会社や国鉄の協力のもとにシキ 100 号をさらに凌駕するものを作つて、大型機輸送に新例を開いたのは、国鉄史上における大きな進歩の一里塚であつた。

かくしてこの発電機が完成するまでにはわが社の華々しい名譽の蔭に、軸材の問題、水素や油の制御装置の問題、輸送の問題等縁の下で力持となつて苦心されて、各方面に新しい技術の一里塚を打立てられた多くの人々の努力があることを忘れてはならない。

やがて 75,000 kW, 100,000 kW さえ話題にのぼる今日、さらに高温高圧用の鋼材、さらに優秀な絶縁物、さらに損失の少ない電気鉄板等、発電機の進む前途には切開かるべき多くの未開の地が残されている。これらの諸工業の水準が片手落ちなく発達して、始めてさらに大容量の発電機ができるのである。

本機の完成に協力された方々に感謝するとともに、最初の大容量水素冷却発電機を送り出すことのできたことを喜び、さらに将来祖国の発電機界発展のために努力せんことを誓うものである。

# 水素冷却器の一般的問題

長崎製作所

進藤 貞和\*

## General Problems on Hydrogen Cooled Machines

Sadakazu SHINDO

Nagasaki Works

Since the introduction of hydrogen gas as an effective coolant of electric machines, the design has made a progress by leaps and bounds and hydrogen cooled units are almost going to supplant other types in large machines. Of various problems concerning the design, the automatic control and the sealing of the hydrogen gas are two major items. To keep automatically the machine from the danger of explosive gas and to maintain the purity of gas above 90 %, various kinds of simple but reliable measuring instruments are required. The determination of hydrogen consumption is another item of consideration.

### 1. ま え が き

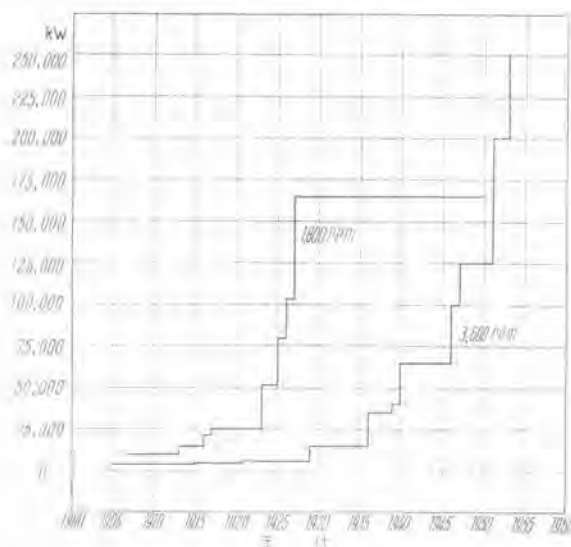
水素を回転電気機械の冷却媒体に使用する考えは相当古く 1924 年に A. B. Field がロンドン大会で水素の利用についての論文を発表した。米国では 1920 年頃から研究に着手し、まず全密閉構造にできる同期調相機に水素冷却式を適用し成功をおさめ、引きつずきタービン発電機の水素冷却式をとり上げた。タービン発電機ではタービンと発電機を直結するので、発電機のエンドカバーが回転軸を貫通する部分がありこの部分で機内ガスを密封する装置が必要となる。しかるに 1923 年 max Schiilar による圧力液体を用いたガス密封法の特許が大西洋を越えて米国に渡り、所期の成果を得て 1926 年 W 社、GE 社ではそれぞれ 6,250 kVA, 3,600 rpm, 7,500 kVA, 3,600 rpm, の水素冷却に成功したのである。その後水素冷却発電機は非常に多数製作されたが、その間多数の運転実績によつて実用性、優秀性が十分証明され 1945 年に米国の電気学会、機械学会協同で制定した標準大容量タービン発電機の標準定格系列では 20,000 kW 以上は水素冷却式を採用するほどに進歩したのである。この標準仕様は 1949 年、1953 年と 2 回に改訂を経て、標準の発電機容量としては 8 系列を規定している。(66,250

kVA 水素冷却発電機 1 表参照) かくの如く水素冷却については米国において著るしい業績が現われたのであるが、これは長い間 4 極 60 サイクル機で採用せられ、2 極機の採用は欧州よりも少なかった。欧州で 2 極 80,000 kVA 機が運転されていたとき米国では 2 極 18,000 kVA 機が運転されていたのであつた。したがつてできるだけ単機出力の大きい 2 極機を製作し機械の大きさを小さくし価格を低れんならしめるという懸命の努力がなされこれを解決するため新しい優秀な材料の研究設計法の改善が行われた。とくに発電機回転子軸材への高張力特殊鋼の採用、通風方式の改善、たとえば固定子線輪、回転子線輪に中空導体の採用、固定子鉄心に方向性冷間圧延珪素鋼板の採用、回転子導体への収縮現象防止用特殊材料の採用、固定子線輪の絶縁に優秀な材料を用いて絶縁耐力、誘電体特性を改善すること等が行われた。すなわち水素冷却の採用は発電機の能率の向上す

1 表 種々のガスの性質の比較

項目	ガスの種類	空気	窒素	炭酸ガス	水素	ヘリウム	酸素	メタン
熱伝導度	1	1.08	0.638	6.69	6.4	0.638	1.29	
密度	1	0.966	1.52	0.0696	0.1378	1.52	0.554	
比熱(定圧)	1	1.046	0.848	14.35	5.25	0.848	2.495	
熱容量	1	1.02	1.29	0.996	0.72	1.29	1.38	
熱伝達率	1	1.03	1.132	1.51	1.18	1.132	1.43	





↑ 図 発電機単機出力増加の有様

Fig. 1. Illustration of increase of single unit output.

という利点はあるが直接の原因は空気冷却の方法に比べて極限出力を著しく増加できることにあつたようである。このような技術的進歩によつてもたらされた発電機単機出力の増加の有様を 1 図に示す。

欧州では 50 サイクル機であり単機出力 80,000 kVA 機 ~10,000 kVA 機は水素冷却を採用しなくても製作可能であり、この程度以上の大容量機の需要がなかつたのでその発達が米国よりも遅れたのである。しかし現在では 100,000 kVA 1,800 rpm 機 75,000 kVA 3,600 rpm 機などの水素冷却機が多数製作されている。ひるがえつてわが国では 1930 年頃から各社が基礎研究に着手したがタービン発電機では当社で 1941 年 11,000 kVA 水素冷却タービン機の完成を見たのみで 10 余年を経過した。もちろんこれは国内事情に大いに影響されたのであるが、近年になつて最優秀の火力発電設備の設置がとりあげられ、その一環として最近の高効率タービン発電機の採用が決定され続々と大容量水素冷却機が製作されつつある現状である。当社では九州電力株式会社築上発電所向、相ノ浦発電所向 66,250 kVA 機 2 台の工場運転を終えいづれも目下現場据付中であり、なお 66,250 kVA 機 1 台、81,000 kVA 機 2 台を鋭意製作中である。ここでは水素冷却発電機一般の問題およびそれに関連する二、三の問題につき限定して述べることにし今回完成した 66,250 kVA 3,600 rpm 水素冷却発電機については触れないこととする。

## 2. 冷却媒体としての水素の利用

タービン発電機を運転すると種々の熱損失を生ずるがこれら熱損失を持ち去るための冷却媒体が重要な因子となる。この冷却媒体として普通意識することなしに

空気が用いられているが、空気よりも熱特性の優秀な密度の小さい水素ガスを用いると空気に比べて機械損が約 10% に激減し、したがつて発電機熱損失が減じ他方冷却媒体への熱抵抗が減ずるので同一熱流に対して温度上昇が小となる。水素ガスの次に考えられる優秀なガスはヘリウムであるが密度が水素ガスの 2 倍であり冷却特性が水素ガスに比べて劣る。したがつて機械の大きさは水素冷却機に比べて 10% 増になる。またヘリウムは水素を用いた場合の如く、空気と混合して爆発性混合ガスを作るという付属する欠点はないが高価であり入手困難なので冷却媒体として採用しがたい。これに反して水素は価格が比較的低廉で無尽蔵に入手できさらに商用水素は冷却の目的に対して必要かつ十分な程度の純度を持つている。すなわち現在では回転機の冷却媒体として利用しうるガスのうちでは水素が最も望ましいガス体である。水素ガスを用いる物理的な理由を明瞭ならしめるために 1 表に種々のガスの性質の比較を示す。

## 3. 水素冷却の特性

水素冷却機の利点は次のとおりである。

(1) 水素の密度は空気の密度の約 7% なので気体の密度に比例する摩擦損と通風損が約 10% に減少し、したがつて発電機効率改善される。大容量 3,600 回転機では摩擦およびこれに冷却媒体を送るための動力は全損失の約 5% にも達するので水素冷却による効率の向上は約 0.75~1% となる。

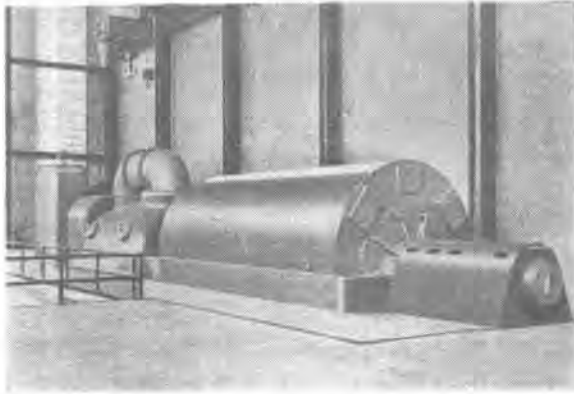
(2) 熱伝導率および表面熱伝達率はそれぞれ空気の 6.69 倍および 1.5 倍となるので有効材料の単位重量あたりの出力が増加し、単機出力の限度を空気のときより大きくとることができる。このため空気冷却ではできない容量のものも水素冷却によると可能である。この点は 2 極 3,600 回転機においてはとくに顕著であるが現在米国では単機出力 200,000 kW 3,600 rpm 機を製作中である。水素ガス圧 0.5 psig で同一冷却方式と考えると機械の大きさは空気冷却機に比べて約 20% 切りつめられるが、回転子線輪、固定子線輪に中空導体を用いる等特殊な冷却方式を用うれば機械の大きさはづつと小さくなる。

(3) 水素は空気より不活性であるので絶縁の寿命が長くなり、全密閉型にされるので騒音が減じ運転員の疲労が少なく補修費、維持費が安くなる。

(4) コロナ高圧が高くコロナ発生が少ない。コロナが出て水素ガス中では絶縁物に及ぼす害が極く僅かではしたがつて固定子線輪の絶縁の寿命が増加する。

(5) 熱伝達率が大きくなるのでガス冷却器が小さくてすむ、したがつて冷却水量も少なくてすむ。また冷却器を発電機枠内に入れるので基礎の構造が簡単となる。

(6) 建築費を減ずるため屋外型にするのに便利である。



2 図 水素冷却タービン発電機

Fig. 2. Hydrogen cooled turbine generator.

#### 4. 水素ガスに対する安全性

水素と空気の混合ガスは容積でいつて約 5% から 70% までの広範囲で爆発性があるので機械の設計および運転方法については常規運転時に爆発性混合ガスが存在しないようにせねばならぬ。常規運転方法の誤操作により生ずる予期できない状態に具えるため、水素冷却機を耐爆型に設計するのが得策と考えられる。ここで耐爆という意味は発電機の固定子枠が破壊せず機械外部の人命や機器に損傷を与えないものと解釈する。すなわち万一爆発すれば機械内部には被害がありまた局部破壊を生ずるかも知れない。熱容量が大きく機械の表面が外気にさらされており機械材料たる金属が大きい質量をもっているため発電機枠内で万一爆発が起つたとしてもそのとき生起する爆発圧力は最大理論値より遥かにずつと少ないのである。理論ならびに経験の結果からして水素冷却発電機の固定子枠は実際の最大圧力に耐えるよう設計すればよいことが判っている。このため空気冷却式に比べて発電機枠の材料が増しかつ気密構造にするために製作費が嵩む。したがって純電気部分は減少するが、構造部分が重くなり全重量は同一定格として空気冷却式の 110~120% になる。

以上のように水素と空気の混合ガスは爆発性になりうるので水素冷却機はたえず安全に運転できるよう設計計画なり運転方法を考慮する必要がある。この目的のために水素冷却機ではガス制御装置および警報装置、油制御装置を用いるが、安全度と信頼度の高いしかも簡単なものである。したがって水素冷却機は空気冷却機に比べて次のような余分の設備が必要となる。

(1) 固定子枠を気密耐爆構造にすること。

(2) タービン発電機では軸が端用いを貫通するのでこの部分を通して機内ガスが漏洩しないように密封にするための密封装置。ただしこの密封装置は調相機周波数変換機では不用である。

(3) 機内の混合ガスを爆発性となしなすための水素ガスを入れたり出したりする装置。

(4) 機内水素ガスの純度、圧力、温度および湿気がある予定した範囲内に保つための装置。

(5) 機内ガス純度を保つために真空処理した密封油を供給する装置、ただし場合によつては密封油を真空処理しないこともある。

ゆえに水素冷却が経済的に有利になる機械の大きさは燃料の価格やその他多くの因子に関係するが現在米国の標準では 16,500 kW 以上の機械は水素冷却方式を採用している点からこの程度の容量以上で水素冷却式が有利であると考えられる。なおこれらの経済的な問題については後掲の論文にゆずることとする。

#### 5. ガスの入替および充填

水素を充填する場合水素と空気とが直接に混合して危険な爆発ガスを生ぜしめないように水素を充填する方法に直接法と間接法とがある。直接法ではまず機内の空気を真空ポンプで吸出し機内の空気が一定量に減じた時に水素を入れる方法で従来は米国の Allis chalmers 社で主に採用せられた方法である。これは間接法のように中間ガスを必要としない代りに真空ポンプを必要とする。とくに密封器において油の吸出し等複雑な障害を及ぼす危険がありまた 600 mm 程度の真空にするので運転中のガスの入替えは困難である。

間接法は空気と水素の間に中間ガスとして水素と混つて危険な混合ガスを作らぬガスを用いる方法で炭酸ガスが主に用いられる。1 表のように炭酸ガスは熱容量は空気より大きく密度は空気の 152% であるため大體冷却効果は空気と大差ないことになりガスの入替充填も水素冷却の場合の 3/2 負荷程度で運転を続けることができる。最後にガス入替充填に必要なガス量を発電機ガス容積の倍数で表わしておく。

空気を炭酸ガスで追出す	1.5 倍 (静 止) 2 倍 (回転中)
炭酸ガスを水素で追出す	2.5 倍 (静 止) 3.5 倍 (回転中)
水素を炭酸ガスで追出す	2 倍 (静 止) 3 倍 (回転中)

#### 6. 水素の消費量

一般に発電機内のガス純度の下がる原因としては

(1) 発電機枠からガスの漏洩。

(2) 液体密封部において機内ガスが若干溶解して持ち去られること。

(3) 密封部において油中の水分が蒸気となつて発電機内に入ること。

(4) 密封部で油中に溶けた空気が機内に入ること。があげられる。すなわち発電機枠の水素純度は主として密封油の真空処理の程度と発電機枠よりのガス漏洩量との函数である。その純度は発電機を最初に起動した時よ

り時間の指函数的に変化し遂にある一定値に達するものである。発電機に連続的に補給を要する水素の量は大体発電機枠からの漏洩量と密封油に吸収される水素量の和に等しい。かかる方式を用いたものが真空処理式では真空タンク、密封油中に溶解した湿気および水素ガス内で放出され真空ポンプで外部に引き出されるので油中には湿気、空気および水素ガスはほとんど含まれていない。したがって上記原因のなかで (3) (4) による水素ガス純度低下は非常に少なく、機内ガス純度および乾燥度を自動的に高い値に保つようにしている。(1) なる原因は発電機の構造、工作方法により決まるし (2) なる原因は液体密封器を使用する限り宿命的なもので避けることができない。しかし真空処理式は装置が幾分複雑で真空ポンプ等の運転や保守が必要であるからこの装置を簡略化し、しかも性能をおとさないようにすることが考えられる。この目標のもとに考えられたのが連続掃気式である。

機内ガス純度を低下さず最も主なものは上記 (4) 密封装置で油中に溶解した空気が発電機内に入ることである。したがって空気ができるだけ機内に入り来らぬようにするために密封装置のガス側の油流れを非常におそくして油量を小量とした。この空気量が発電機内に入つて水素純度を低下させるから機内ガス純度を規定値に保つために機内の若干量の不純水素ガスを絶えず大気に放散しガス圧を一定に保つため新しい水素を補給せねばならぬ。この場合発電機は大容量なので発電機内に若干量の空気が混入しても機内ガス純度は余り悪くならぬ。したがってこれに新しい純度の高い水素を入れ若干量の不純水素ガスを大気に放散するとかなり補給水素ガス量が少なくなる。これに反しこの空気を発電機内に入るまえに小室にみちびきこの小室へ新しい水素ガスを補給し若干量の不純ガスを放散すると補給水素ガス量が著しく減少する。それ故油切り装置と密封装置より密封室を形成しこれを上記小室としこれに補給水素ガスを入れる構造がある。したがって水素冷却機の水素消費量は発電機枠のパッキンおよびその他の部分から逃げるガスと密封油中に溶解して持ち去られるガスの合計であると考えられる。保証消費量は 0.5~30 psig で 100~300 ft<sup>3</sup>/day という製作者もあるがこの程度の値なら相当余裕のあるものと思う。しかしいずれにしても水素冷却機ではできるだけ各部分からの漏洩が少ないように設計し、運転中漏洩が最小となるよう各部分に細心の注意を払うことが必要

である。

## 7. ガス圧を上げた場合の考察

一般に発電機内部ガス圧は、空気が機内にもれこまぬよう若干高く 0.5 psig であるが冷却媒体に密度の小さい水素を使用した大なる利点は、ガス圧を上げて運転し始めて効果があることである。ガスの熱理論より混流による強制対流において、表面熱伝達率はその周囲のガス圧の 0.75 乗に比例し、ガスの熱伝達率はガス圧力に無関係なることがわかつている。すなわち発電機においてガス圧をあげるとコイルその他より熱が多く取り去られガス冷却器に放出されるので負荷を増すことができる。

圧力を上げるとガスの密度は大となるがもともと水素の密度は小さいのでそのための損失の増加は大した値にならない。しかしながらガスの漏洩の点より考えると機器からの水素漏洩量は大約内部ガス圧の平方根に比例して増加し 15 psig のときの水素漏洩量は 0.5 psig のときの約 5.5 倍になる。このため密封装置の構造には最も注意を払っている。現在水素冷却タービン発電機の定格は水素圧力 0.5 psig に対して指定する。したがって水素圧力 15 psig に対しては kVA 定格が 5% 増し、また水素圧力 25~30 psig では kVA 定格が 20~25% 増加する。米国の標準大容量タービン発電機の制定によれば 70,588 kVA 60,000 kW, 85 % PF 機は水素圧力 0.5 psig の時の定格であつてガス圧を 15 psig 30 psig に上昇すれば発電機としては当然 81,176 kVA, 88,235 kVA の出力をもつ。

## 8. むすび

以上水素冷却機に関する二三の点について述べたが、構造上の問題、運転上の問題等いろいろのべねばならぬことが残っている。水素冷却機で最も肝要な点は水素ガスの自動制御装置と密封装置である。発電機内に爆発性混合ガスを絶対作らず機内ガス純度を 90% 以上に自動的に保つための諸種の簡単でしかも信頼性の高い計器がいるがとりわけ水素純度計の製作が困難である。また水素ガスの密封部よりの漏洩防止をいかにするか、これに関連して水素ガスの消費量をどの程度にできるかということである。これらは逐次他の部分について述べられてあるのですべて省略する。また発電機本体、主励磁機等についても空気冷却方式といささか趣をかねている点があるがこれらについてもまた省略することにする。



# 水素冷却発電機の経済性について

九州電力株式会社相ノ浦発電所

水野直彦\*

## Economic Consideration of Hydrogen Cooled Generators

Naohiko MIZUNO

Kyushu Electric Power Co., Ltd.

Comparative studies were made of hydrogen cooled generators and air cooled ones based on three different capacities; 50,000kW, 30,000kW and 10,000kW on the assumption of a proper load duration. Gains and losses when the hydrogen cooled machines were used with the power factors of 100%, 60% and 29.4% respectively were calculated to find the economic limitation compared with ordinary machines, which revealed that in the machine of ordinary use in the steam power plant with a load factor above 60%, the hydrogen cooling is decidedly favourable for the capacity above 30,000kW.

### 1. ま え が き

タービン発電機の水素冷却は世界の趨勢であつて、水素圧力は当初の 0.5 psi, 15 psi より 25 psi, 30 psi と上昇し、現在米国においては標準容量 60,000 kW はいうまでもなく 15,000 kW, 3,600 rpm のものでも水素圧力 30 psi で使用されており、また密封油制御方式、ガス制御方式も当初の真空処理式より、間歇気式、連続掃気式と発達して、水素消費量をさほど増加することなくして装置を簡略化し、操作の簡素化、信頼度の向上、設備費の低減を計っていることは衆知のことである。

わが国においても近時各電力会社における火力発電設備の新增設に当つて、大容量タービン発電機にはほとんどすべて水素冷却を採用している。

本文は水素冷却を採用した場合、発電機効率向上によりどの程度の利得を生ずるかを論ずるものである。

### 2. 発電機負荷の仮定

発電機の効率は負荷により相違し、また水素冷却機と空気冷却機との効率も負荷により相違するが、発電機の年間負荷は汽鍋、汽機その他発電所全般の性能、事故、系統負荷の状態により種々異なるものであり、一義的に決定することは不可能なものである。したがつて大体の予想によりつぎの如く負荷ならびに運転時間を仮定する。

- (1) 常火力 負荷率 60% 程度とし、湯水時および豊水時の負荷状態、停止日数等を 1 表のとおりとする。
- (2) 補給火力 湯水時のみ運転する補給火力については負荷率 30% 程度とし、負荷状態を 2 表のとおりとする。

### 3. 発電機効率差による石炭節約量

水素冷却発電機と空気冷却発電機とは同一容量機においては自ら設計に相違があり、単に空気冷却機の設計のものに水素を使用し、通風損の減少量を以てして効率を表わすことはできない。また発電機の容量、製作者、材料の相違によつても効率に相違がある。したがつて、わが国現今の珪素鋼板を使用した場合の発電機効率を 3 表のとおりとした。なお 50,000 kW 機の空気冷却 3,600 rpm 機は製作可能なものとする。比較の対象として空気冷却 50,000 kW 機を 3,600 rpm とするか、1,800 rpm とするかは一応問題となるが、1,800 rpm とした場合発電機およびタービンの価格上昇の割に効率は向上しないので、ここでは 3,600 rpm 機を比較対象とする。

つぎに原動機の効率であるが、これも負荷により相違する。

汽鍋室効率：汽鍋室効率は設計値は一般に相当地高いものであるが、実際の運転においては、負荷の変動のた

1 表 負 荷 予 想 (負荷率 60%)

負 荷	渴 水 時 (182 日)	豊 水 時 (183 日)	合 計 (365 日)	備 考
100 %	172 日×13 時=2,236 時		2,236 時	
90 %		130 日×13 時=1,690 時	1,690 時	
70 %	172 日×11 時=1,892 時		1,892 時	
50 %		130 日× 4 時= 520 時	520 時	
小 計	4,128 時	2,210 時	6,338 時	
0 %		130 日× 7 時= 910 時	910 時	深夜停止
η	10 日×24 時= 240 時	{45 日(定掃)+8 日}×24 時=1,272 時	1,512 時	事故及定期掃除
小 計	240 時	2,112 時	2,422 時	
合 計	4,368 時	4,392 時	8,760 時	
負 荷 率			60.3 %	

2 表 負 荷 予 想 (負荷率 30%)

負 荷	渴 水 時 (120 日)	豊 水 時 (183 日)	合 計 (365 日)	備 考
100 %	172 日×13 時=2,236 時		2,236 時	
50 %	172 日× 4 時= 688 時		688 時	
小 計	2,924 時		2,924 時	
0 %	172 日× 7 時=1,204 時		1,204 時	深夜停止
η	10 日×24 時= 240 時	183 日×24 時=4,392 時	4,632 時	
小 計	1,444 時	4,392 時	5,836 時	
合 計	4,368 時	4,392 時	8,760 時	
負 荷 率			29.4 %	

3 表 タ ー ビ ン 発 電 機 能 率 比 較 表

機 種	冷 却 法	能 率 (力率 80%)			
		Load 100%	Load 90%	Load 70%	Load 50%
50,000 kW 機 3,600 rpm	H <sub>2</sub>	97.85 %	97.82 %	97.67 %	97.22 %
	Air	96.89 %	96.75 %	96.29 %	95.68 %
30,000 kW 機 3,600 rpm	H <sub>2</sub>	97.61	97.61	97.56	97.23
	Air	96.53	96.42	96.02	95.40
10,000 kW 機 3,600 rpm	H <sub>2</sub>	96.90	96.99	97.02	96.79
	Air	95.98	95.96	95.70	94.95
備 考	上記 50,000 kW, 30,000 kW 空気冷却機の 50% Load における能率は外部送風機を減じた場合として計算したものである。				

4 表 汽 罐 室 効 率

負 荷	100 %	90 %	70 %	50 %
効 率 (乾炭高位)	81.5 %	81.5 %	81.0 %	80.0 %

めの諸損失の増加、罐水のブロー、管系よりの漏洩等のため設計より相当低下する。したがって設計値の 97% 程度とし、各負荷における能率を 4 表のとおりとする。

汽機室効率：これも設計値に比し、実際の運転に当っては汽圧の変化、真空度の変化、汽温の変化、管系よりの漏洩等のため相等低下するので、設計値の 97% 程度とし、各負荷における能率を 5 表のとおりとする。

以上より各機種、各負荷における発電所熱効率を算出すれば 6 表のとおりとなる。

5 表 汽 機 室 効 率

機 種	負 荷	100 %	90 %	70 %	60 %	備 考
50,000 kW 機 (水素冷却)		35.5 %	35.3 %	34.7 %	32.7 %	60kg/cm <sup>2</sup> g480°C
30,000 kW 機 ( " )		35.1 %	34.9 %	34.3 %	32.3 %	" " " "
10,000 kW 機 ( " )		30.8 %	30.6 %	30.1 %	28.4 %	40 " 440 "

6 表 発 電 所 熱 効 率 比 較 表

発 電 機 種 類	発電機冷却法	発 電 所 熱 効 率			
		Load 100%	Load 90%	Load 70%	Load 50%
50,000 kW 機	H <sub>2</sub>	28.92 %	28.78 %	28.10 %	26.09 %
	Air	28.62 "	28.50 "	27.70 "	25.67 "
30,000 kW 機	H <sub>2</sub>	28.60 "	28.42 "	27.78 "	25.82 "
	Air	28.29 "	28.09 "	27.34 "	25.33 "
10,000 kW 機	H <sub>2</sub>	25.10 "	24.93 "	24.39 "	22.71 "
	Air	24.85 "	24.68 "	24.04 "	22.29 "

7 表 消 費 石 炭 量 比 較 表 (負荷率 100%)

種 別		50,000 kW 機		30,000 kW 機		10,000 kW 機	
		水素冷却	空気冷却	水素冷却	空気冷却	水素冷却	空気冷却
年間発電々力量	MWh	438,000	438,000	262,800	262,800	87,600	87,600
石 炭 発 熱 量	kcal/kg	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
同 上 湿 分	%	7	7	7	7	7	7
年間湿石炭消費量	Ton	280,000	282,900	169,900	171,800	64,540	65,200
石 炭 消 費 率	kg/kWh	6.392	6.459	6.465	6.540	7.369	7.440
年 間 熱 効 率	%	28.92	28.62	28.60	28.29	25.10	24.85
消 費 炭 量 差	Ton	⊖ 2,900		⊖ 1,900		⊖ 660	

8 表 消 費 石 炭 量 比 較 表 (負荷率 60.3%)

種 別		50,000 kW 機		30,000 kW 機		10,000 kW 機	
		水素冷却	空気冷却	水素冷却	空気冷却	水素冷却	空気冷却
年間発電々力量	MWh	267,070	267,070	160,242	160,242	55,014	55,014
石 炭 発 熱 量	kcal/kg	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
同 上 湿 分	%	7	7	7	7	7	7
年間湿石炭消費量	Ton	83,630	84,650	50,550	51,200	19,180	19,410
石 炭 消 費 率	kg/kWh	6.490	6.563	6.556	6.640	7.462	7.551
年 間 熱 効 率	%	28.50	28.15	28.20	27.85	24.78	24.50
消 費 炭 量 差	Ton	⊖ 960		⊖ 650		⊖ 230	

ここに算出した発電所熱効率および第2節に述べた運転時間より各負荷率における年間消費石炭量を算出すれば7表, 8表, 9表のとおりとなる。計算式はつぎの

とおりである。

計算式 :-

$P_a$  = 発電所負荷 (kW)

$H_a = a$  なる負荷の持続時間 (h)



9 表 消費石炭量比較表 (負荷率 29.4%)

項 目	種 別	50,000 kW 機		30,000 kW 機		10,000 kW 機	
		水素冷却	空気冷却	水素冷却	空気冷却	水素冷却	空気冷却
年間発電々力量	MWh	129,000	129,000	77,100	77,100	25,700	25,700
石炭発熱量	kcal/kg	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
同上湿分	%	7	7	7	7	7	7
年間湿石炭消費量	Ton	83,690	84,650	50,550	51,200	19,180	19,410
石炭消費量	kg/kWh	6.490	6.563	6.556	6.640	7.462	7.551
年間熱効率	%	28.50	28.15	28.20	27.85	24.78	24.50
消費炭量差	Ton	⊖ 960		⊖ 650		⊖ 230	

10 表 水素冷却発電機による利得

項 目	単位	50,000 kW 水素冷却機			30,000 kW 水素冷却機			10,000 kW 水素冷却機		
所要資金増加 <sup>(1)</sup>	10 <sup>3</sup> 円	50,000			40,000			35,000		
年 固 定 経 費 <sup>(2)</sup>	円	6,800			5,440			4,760		
間 運 転 経 費 <sup>(3)</sup>	円	887			887			887		
経 水 素 費 <sup>(4)</sup>	円	100			100			100		
費 炭 酸 ガ ス 費 <sup>(5)</sup>	円	100			100			100		
増 加 分	円	87			87			87		
計	円	7,974 (7,087)			6,582 (5,695)			5,869 (4,982)		
年 負 荷 率	%	100	60.3	29.4	100	60.3	29.4	100	60.3	29.4
間 消 費 石 炭 量	Ton	2,900	2,010	960	1,900	1,480	650	660	500	230
経 炭 価	10 <sup>3</sup> 円/T	5	5	5	5	5	5	5	5	5
費 石 炭 費	10 <sup>8</sup> 円	14,500	10,050	4,800	9,500	7,400	3,250	3,300	2,500	1,150
減 少 分	円	14,500	10,050	4,800	9,500	7,400	3,250	3,300	2,500	1,150
利 得	10 <sup>3</sup> 円	⊕6,526 (7,413)	⊕2,086 (2,963)	⊕3,174 (2,287)	⊕2,918 (3,805)	⊕ 818 (1,705)	⊕3,332 (2,445)	⊕2,569 (1,682)	⊕3,369 (2,482)	⊕4,719 (3,732)

11 表 タービン発電機価格

種 別	単位	50,000 kW 機	30,000 kW 機	10,000 kW 機
空 気 冷 却	10 <sup>3</sup> 円	200,000	140,000	50,000
水 素 冷 却	円	250,000	180,000	85,000

$$V_a = \frac{860}{\eta_a} \times C \quad (\text{kg/kWh})$$

$$\text{年間乾燥炭消費量} = Q_d = \bar{Z}_a \quad (V_a P_a H_a) \quad (\text{kg})$$

$$\text{湿石炭消費率} = \frac{V_a}{1 - \frac{w}{100}} \quad (\text{kg/kWh})$$

$$\begin{aligned} \text{年間湿炭消費量} &= Q_w = \bar{Z}_a \left( \frac{V_a}{1 - \frac{w}{100}} P_a H_a \right) \\ &= \bar{Z}_a (V_a P_a H_a) \quad (\text{kg}) \end{aligned}$$

$$\text{年間乾燥炭消費率} = \frac{Q_d}{P} \quad (\text{kg/kWh})$$

$$\text{年間熱効率} = \frac{P \times 860}{Q_d \times C} \times 100 \quad (\%)$$

$\eta_a = a$  なる負荷における発電所熱効率 (%)

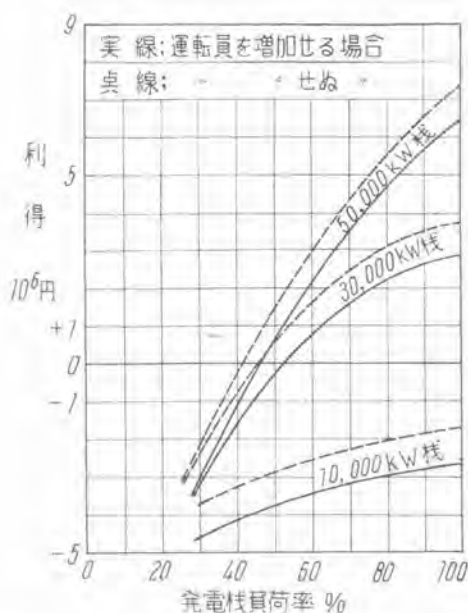
$C =$  乾燥石炭高位発熱量 (kcal/kg)  
(=5,000 とする)

$w =$  石炭湿分 (%) (=7 とする)

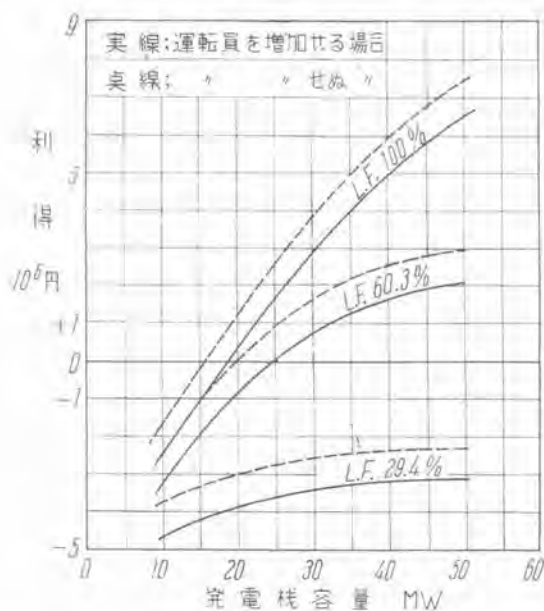
$V_a = a$  なる負荷における乾燥石炭消費量 (kg/kWh)

とすれば

$$\text{年間発電々力量} = P \bar{Z}_a (P_a H_a) \quad (\text{kWh})$$



1 図 発電機負荷率—利得曲線  
Fig. 1. Generator load factor-gain diagram.



2 図 発電機容量—利得曲線  
Fig. 2. Generator capacity-gain diagram.

#### 4. 経済比較

空気冷却機に対し、水素冷却機を使用した場合の損失および利得を 10 表に示す。表中の括弧内の数値は運転経費の増加しない場合（すなわち運転費を増加しない場合のものである）。

##### (1) 所要資金増加

発電機の価格差を所要資金増加額とした。発電機価格は発電機重量その他より推定したもので 11 表のとおり。

##### (2) 固定経費

金利および消却とし、金利 10%、消却 3.6% とした。

##### (3) 運転経費

運転員を 1 直 1 名、予備 1 名計 4 名増加とし 1 名の給料を 1 月 15,400 円、基準外 20% とした。

##### (4) 水素費

補給、充填、昇圧用等で 50,000 kW 機にて年間 1,000 m<sup>3</sup> とし、30,000 kW 機、10,000 kW 機にてそれぞれ 90%、80% とした。

水素価格は 100 円/m<sup>3</sup> とした。

##### (5) 炭酸ガス費

置換用で 50,000 kW 機にて年間 1,000 m<sup>3</sup> とし、30,000 kW 機、10,000 kW 機にてはそれぞれ 80%、60% とした。

炭酸ガス価格は 100 円/m<sup>3</sup> とした。

10 表より明らかなように負荷率 60% 程度の常用火力においては年間を通じ 50,000 kW 機においては約 200

万円、30,000 kW 機においては約 80 万円の利得を生ずることとなる。

なお 10 表より発電機負荷率—利得および発電機—利得の関係を求めたのが 1 図および 2 図であり、これより水素冷却機使用の大体の限界を知りうる。

#### 5. むすび

以上の経済比較の結果はつぎのような結論となる。  
すなわち

- (1) 30,000 kW 機以上の常用火力には水素冷却機を使用すべきである。
- (2) 30,000 kW 機ないし 50,000 kW 機の水素冷却機は負荷率 60% 以上にて使用すべきである。
- (3) 50,000 kW 機以上の水素冷却機は負荷率 50% 以上であればよいということになる。

一般に発電所機器の経済比較は発電所熱効率の比較となることが多いが、年間の発電所熱効率の算定は甚だ困難でほとんど計算不可能と思われる。しかし本文の如き方法でなく負荷持続曲線、効率曲線より積分によりややましな結果をうるができると思うがこれとても計算は甚だ面倒である。本文は簡単な仮定のもとに計算したのであるが、求めるものが熱効率そのものでなく、熱効率の差であるから大差はないものと思う。

わが国においてもここ数ヵ月の中に築上発電所、相ノ浦発電所等で数台の 50,000 kW 級水素冷却機が運転に入るが予想どおりの威力を発揮することを念願してやまない。

# 九州電力 66,250 kVA 3,600 rpm 水素冷却タービン発電機

長崎製作所

加賀貞広\*

## 66,250 kVA 3,600 rpm Hydrogen Cooled Turbine Generator

Sadahiro KAGA

Nagasaki Works

Hydrogen cooling has been gradually superseding air cooling in the design of huge, high speed machines. A 66,250 kVA turbine generator, completed at the Nagasaki Works for the installation to the Chikujō Power Station of the Kyushu Electric Power Company in March 1953, is the largest hydrogen cooled two pole unit with 3,600 rpm. speed, having double rated capacities; 50,000 kW at a gas pressure of 0.5 psig and 55,000 kW at 15 psig. This paper describes about the details of the machine together with the results of tests at the shop.

### 1. ま え が き

近時電気機器設計に関する問題で画期的進歩を遂げたものの一つにタービン発電機の水素冷却方式の採用がある。米国においては数千台の大容量水素冷却機が過去数十年間に製作運転され、また現在多数続々製作されているが、大容量 3,600 回転機については数種の標準定格が設定されタービン定格 16,500 kW およびそれ以上は水素冷却方式を採用するという規定があり(1表参照)、水素ガス圧は 15 psig はもちろん 30 psig まで上昇したときの発電機定格を規定している。また欧州諸国におい

ても水素冷却機は単機出力 100,000 kW 以上は製作されていないが、この容量以下の大容量機は多数製作運転され、すでに実用期にはいつているがわが国においても十数年前より各電機製作者により基礎研究が継続され、この間水素冷却タービン発電機としては 1941 年三菱電機会社で 11,000 kVA 3,600 rpm 機の完成を見たのみであった。しかるに近時電源開発が急速に進展具体化し、九州電力株式会社築上発電所の増設にあたり、発電機の単機出力は 55,000 kW、発電機は水素冷却式を採用に決定され、当社は本機を 1951 年 12 月に受注し鋭意製作中のところ去る 3 月完成し優秀な成績で公開運転を終え

1 表 米国における標準大容量 3,600 rpm タービン発電機

項 目	冷 却 方 式		水素冷却, 水素ガス圧力 0.5 psig						
	空気冷却								
タービン定格 kW	12,650	16,500	22,000	33,000	44,000	66,000	100,000	150,000	
発電機定格 kVA	13,529	17,647	23,529	35,294	47,058	70,588	106,951	160,428	
力 率 %	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	
短 絡 比	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	
力率 0.85 水素ガス圧 15 psig のときの発電機出力 kVA		20,294	27,058	40,588	54,177	81,176	122,994	184,492	
力率 0.85 水素ガス圧 30 psig のときの発電機出力 kVA		22,059	29,411	44,118	58,822	88,235	133,689	200,535	



た。

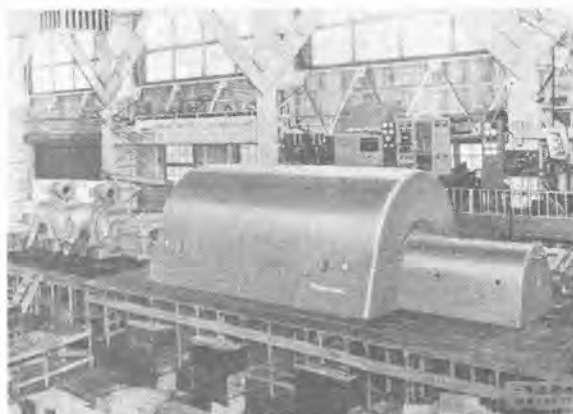
当社では空気冷却式 3,600 回転機としては約 10 年前すでに 31,250 kVA 機 4 台、37,500 kVA 機 4 台を、1 昨年には 43,750 kVA 機 1 台を製作し 3,000 回転機としては 62,500 kVA 機 6 台を製作いずれも好成績な運転結果を得ている。また水素冷却式 3,600 回転機としては約 10 年前 11,000 kVA 機を製作したので、これらの製作経験、運転実績にさらに研究改良を加え今回 66,250 kVA 3,600 rpm 水素冷却機を完成した。本機は単機出力 3,600 回転機として戦前戦後を通じての本邦記録品で先般完成した上記築上発電所向 43,750 kVA 機をはるかに凌駕する容量であり、なお水素冷却式という点でわが国における画期的製品であり現在のタービン発電機技術の最高水準を示すものとして極めて意味が深い。

以下要目構造の概要および試験結果について概述する。

## 2. 要 目

### 主発電機

型式 密閉自己通風耐爆固定子、円筒形界磁水素冷却交流発電機



1 図 工場運転中の外観  
Fig. 1. A generator on test at the shop.

皮相出力	58,800 kVA	66,250 kVA
水素ガス圧	0.5 psig	15 psig
力率	85 %	83 %
相等出力	50,000 kW	55,000 kW
相電流	2,570 A	2,895 A
端子電圧		13,200 V
相数		三相
周波数		60~
回転数		3,600 rpm
発電機ガス容積		50 m <sup>3</sup>

### 主励磁機

型式	閉鎖通風型直結分巻補極付他励磁
出力	200 kW
電圧	250 V
回転数	3,600 rpm

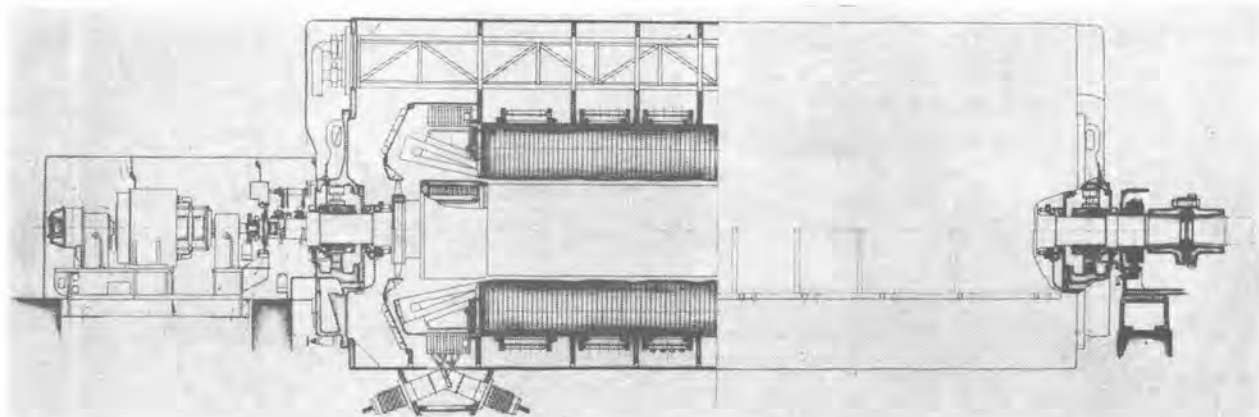
### 副励磁機

型式	閉鎖通風型直結複巻補極付
出力	3 kW
電圧	110 V
回転数	3,600 rpm

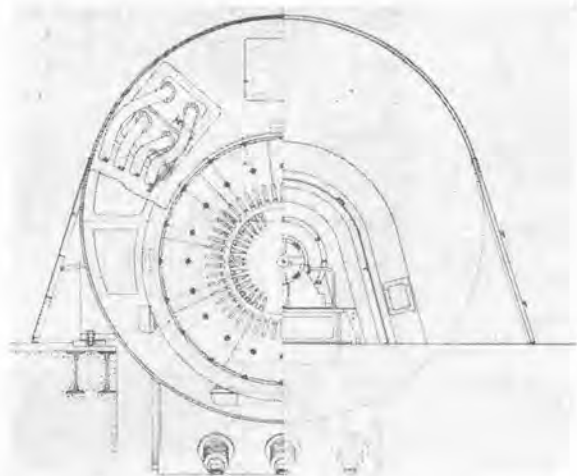
### ガス冷却器

型式	横置表面冷却型
処理ガス量	2,000 m <sup>3</sup> /min
冷却水量	265 m <sup>3</sup> /h
冷却水質	淡水 復水

本機の工場運転中の外観は 1 図のようでタービン発電機との間は固定接手で連結され後部には可撓接手を介して主励磁機、副励磁機を連結し主励磁機、副励磁機、集電環はすべて軟鋼板で作ったカバーで囲つてある。水素冷却機では固定子枠を耐爆気密構造にする必要があるので冷却器を機枠内に設置する。2 図に発電機の縦断面図、3 図にその横断面図を示すが、主発電機内部の冷却媒体は水素ガスで回転軸の両端に取りつけた、軸流送風機によりガスを機内に循環さす密閉自己通風で励磁機および集電環まわりの冷却媒体は空気を用いた閉鎖通風である。なお上述の如く本機のガス圧は常時 0.5 psig であ



2 図 66,250 kVA 発電機の縦断面図  
Fig. 2. A longitudinal section of 66,250 kVA generator.



3 図 66,250 kVA 発電機の横断面図

Fig. 3. A cross section of 66,250 kVA generator.

るがガス圧を 15 psig に上昇することにより 15% の連続過負荷をかけることができるように計画してある。

### 3. 固定子の構造

#### ア. 固定子枠（発電機枠）

発電機の固定子枠は溶接組構式で重量を軽減し強度を増すため、両端の側壁、内側の仕切壁および外板はいずれも焼硫黄分の少ない離用圧延鋼材を使用した。なお固定子枠を耐爆気密構造にするため外板の溶接箇所をできるだけ少くするよう大きな寸法の圧延鋼材を用い、溶接は極めて入念に行うはもちろん外板の母材間および外板と両端の側壁は溶接後十分個々にガス漏洩試験を行った。たとえば外板と両端の側壁の溶接部ではこの溶接部に試験用タップを立てこれに適当な圧力の乾燥空気を加え一定時間内の圧力降下によって溶接部の気密を知る方法を採用した。

水素ガスと空気の混合物で水素ガスが容積で 5%~70% 含まれるものは爆発性ガスであつて、水素が容積で 35% 含まれた時最大爆発を生ずるが、ガス圧 0.5 psig の時の最大爆発圧は研究と実験によつて  $7 \text{ kg/cm}^2$  を超えないことが判つている。またガス圧 15 psig の時の最大爆発圧力は爆発圧力がガス圧の絶対値に比例すると考えれば約  $14 \text{ kg/cm}^2$  を超えないのである。本機では常規運転で水素純度が 90% に下ればすぐに警報を発するよう後に述べる如き簡単な信頼性の高いガス制御装置、油制御装置を付属せしめている。すなわち発電機では水素と空気との混合爆発性ガスが生起できぬよう完全に防護してあつて、絶対爆発の危険はないがなお予期しない故障の場合を考えて空気冷却の場合よりはるかに厚い鉄板を用い固定子枠は  $7 \text{ kg/cm}^2$  の爆発に十分耐え得るよう設計した。したがつて固定子枠の組立が完成した後両端の側壁の開口部を全部盲板でふさぎあるいはテーパープラグで盲にし、 $7 \text{ kg/cm}^2$  の水圧を加えて各部の変形量を実測し固定子枠の機械的強度を確かめ引き続き



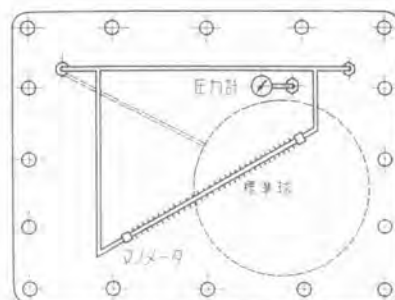
4 図 固定子枠漏洩試験

Fig. 4. Leakage tests on a stator frame.

固定子枠の内部を乾燥し機内に高気圧の乾燥ガスを入れて漏洩試験を行つた。この状況を 4 図に示す。一般に漏洩検査法としては

- (1) 空気の漏出する音によつてその位置を知る方法
- (2) 漏洩検知器によつて漏洩箇所を知る方法
- (3) 石鹼水を塗布して漏洩箇所を知る方法

があるが本機ではまず機内に高気圧の乾燥ガスを入れ接合部に石鹼水を塗布して大きな漏洩箇所を全部調査しこれらの漏洩箇所を手直した後ごく小さな漏洩箇所を特殊漏洩検知器で調査した。この特殊漏洩検知器は一種の燃焼器であつて予め機内に特殊ガスを若干量封入しておくと、漏洩箇所からは空気とこの特有ガスの混合物が漏洩しこの混合物が燃焼器に介入すれば焰の色が変化することにより漏洩箇所を知る方法である。以上二つの方法を用いて接合部の漏洩箇所のないことを確かめその直後に空気の供給を止め 24 時間の見掛けの圧力変化を水銀マンノメータを用いて測定し温度と気圧で補正し漏洩を測定した。このために 5 図に示すような漏洩量測定器を用いたがこの装置は傾斜管圧力計と標準球よりなり、これを発電機本体のマンホールの蓋板と同一寸法に作りこの装置を発電機枠に取り付ける。このとき標準球は発電機枠内に入り傾斜管圧力計が外部に出る。はじめ標準球も発



5 図 漏洩量測定器  
Fig. 5.  
A leakage meter.

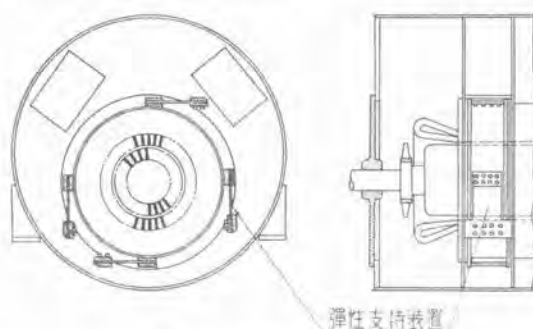
電機も同温同圧のガス圧が入っているが、もし発電機枠に漏洩があれば発電機枠内の圧力が下り標準球と発電機枠とは圧力差を生ずる。この差圧を圧力計で正確に読み空気のときの漏洩量を計算しこれを水素ガスに換算する。

#### イ. 振れ止め固定子枠

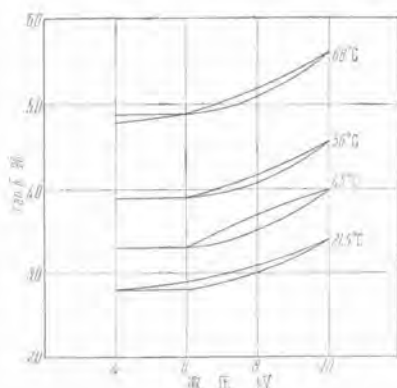
2 極大容量タービン発電機では固有な 2 倍周波数振動がとくに顕著に固定子鉄心に生ずることがある。すなわち 2 極 3,600 回転機では空隙が一様であつても磁束による回転子と固定子の吸引力が、磁極中心とその中間とでは大きな差を生ずるのでこれが固定子枠の彎曲性と重なり、固定子鉄心が 2 倍周波数で楕円形になつたり、戻つたりするために生ずる振動である。この振動が固定子枠や基礎や密封装置に伝わると有害なのでこれを避けるために固定子枠と固定子鉄心との間に適当な振動吸収装置を設けるのがのぞましい。さきに 35,000 kW 3,600 回転機では 12 本の主支持棒で振動を吸収するような方法を採用したが本機では 6 図に示す如く、固定子枠と鉄心支え輪との間に取りつけた数枚の弾性支え板よりなる。2 図にみられるように支え輪に鉄心棒を溶接するが、この支え輪と固定子枠の隔板の間にとりつけた支持板とを弾性支え板を介して取りつける。この弾性支え板は円周に 4 組あり、軸方向にはこれらが数組ある。

#### ウ. 固定子線輪

導体は十分に焼鈍した数本の素線よりなり、これを数本集めて導体となしインポリウト形に型巻きし溝内で撓曲し渦流損を減少するとともに端部で交叉接続し、漂遊負荷損を減少する。素線絶縁はマイカテープ、主絶縁も

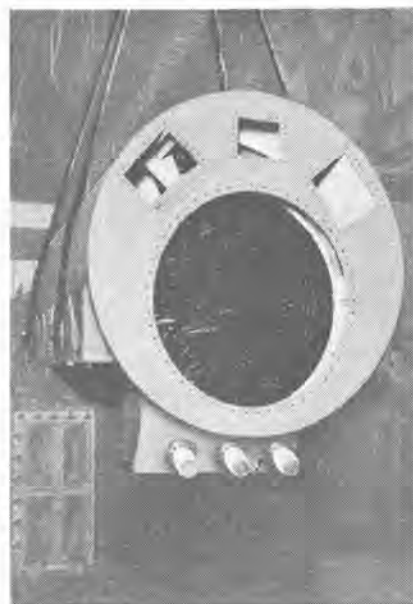


6 図 弾性支え装置  
Fig. 6. Devices for spring mounting.



7 図 固定子線輪の電圧  $\tan \delta$  曲線  
Fig. 7. Voltage  $\tan \delta$  curves of stator coils.

8 図 巻線完成後の固定子枠  
Fig. 8. A stator frame with windings completed.



またマイカテープを採用し真空圧入を行い、主絶縁の外層にコロナ防止塗料を塗布する。また線輪端部は間隔片を挿入するとともに固定子枠に取りつけたマイカ隔板に十分強固に取りつけ万一線路に故障が起つて固定子線輪に大きい衝撃が生じて線輪端部が接地ないしは短絡事故を生じないように考慮した。歯形押え、端板等に特殊磁性材料を用い構造に工夫を施しできるだけ漂遊負荷損を減少するようにした。固定子線輪の組立完成後の  $\tan \delta$  の測定値は 7 図に示すように 10,000 V 21.5°C で約 3.4% であつた。またこの線輪の成極指数(あるいは分極指数という)  $R \frac{10 \text{ 分間}}{1 \text{ 分間}}$  を実測した結果 68°C で 1,000 V で 2.7 10,000 V で 2.6 で大体満足すべき結果を得た。すなわちこの線輪は B 級絶縁物を使用しているが、清浄な乾燥した B 種絶縁物でこの値が 2.5 以上といわれているのである。

#### エ. 固定子鉄心

固定子鉄心の材料は国産珪素鋼板で、入手できた最も鉄損の少ない最高級である T 115, 厚さ 0.35 mm を使用した。なお原材の焼鈍不足を補い打抜き作業による周辺の応力を除き鉄損を減少させるために打抜き作業後十分に焼鈍した。また各鉄板(セグメント)は打抜き後ワニスで絶縁するとともに数層おきに耐熱絶縁紙を挿入し鉄損の増加を除いた。固定子鉄心は 3 図のように円周数セグメントよりなりそれぞれ鉄心支え輪にとりつけた鉄心案内棒をガイドとして順次積みあげられるが各セグメントを積重ねた積層と半径方向のガス溝より成る。最後にはセグメントの背部にもうけた穴に絶縁した通しボルトを軸方向に挿入して、負荷ならびに短絡のさいに生ずるトルクに対し十分なように強固に締付けける。この通しボルトおよび鉄心案内棒には非磁性鋼を用いてある。

#### オ. 発電機端子

発電機リード線は固定子枠にボルト締めした気密コンデンサ型套管より引出すが線路側 3 本、中性線側 3 本、



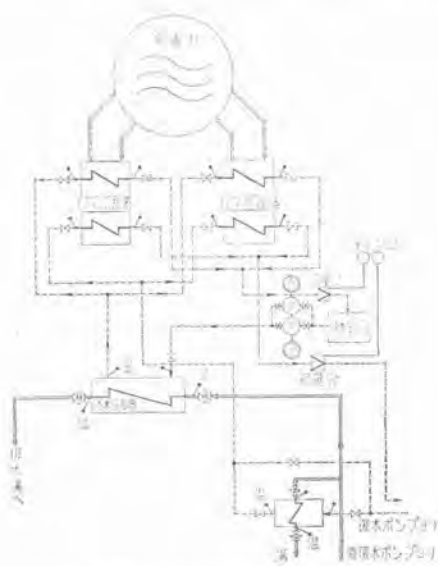
合計6本で2図および3図に示すように励磁機側にあるが8図でその外観が判る。套管の外部は磁器のスリーブで覆つてありしかも接続部には絶縁テープを巻いてあるので電流の通る部分は発電機内部に露出していない。また套管に電流が流れたとき加熱による伸長に応動する装置をつけたり、套管の周囲の磁界による支持板の加熱を防ぐため板の一部に非磁性材料を使用したり種々の工夫をほどこしている。

#### カ. 温度検出装置

固定子溝の上線輪、下線輪の間に埋込んだサーモカップルで固定子線輪の温度を測定する。サーモカップルの個数は12個でそれぞれ異なる溝に等間隔に配置されるが、埋込個所までの軸方向の長さが異なつていたので種種な個所の固定子線輪の温度を測定することができる。また端子板へのリードの引出しは気密構造になるようブッシングを採用して特別の考慮を払つている。その他ガス通路内に温度検出器を置き、高温部低温部のガス温度を測定できるようにしている。また発電機軸受温度、励磁機軸受温度、励磁機への空気の入出口温度を測定するための温度計があるが、これら温度計はすべてまとめて一つの盤面に取り付けるようにした。

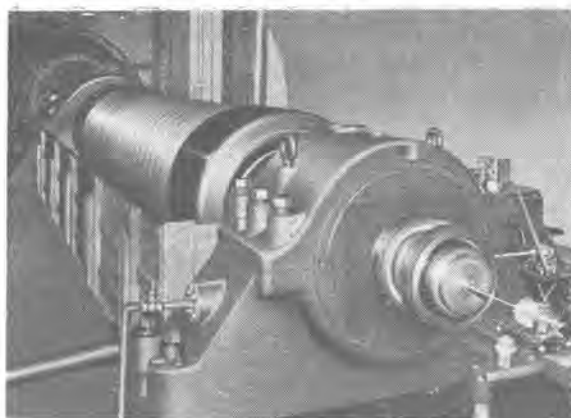
#### キ. ガス冷却器

ガス冷却器は固定子枠内に軸方向に4個並列にならべた。水素ガスは軸流送風機により回転子、固定子および冷却器を通じて循環し、冷却器内で発電機内の発生熱を吸収し冷却水により外部に運び出す。冷却管はUフィン管を使用し、前後部の管板にとりつけた。水管取付は前部は固定子枠にボルト締めしたが、後部は温度変化に対して自由に動き得るよう、可撓板を介して固定子枠に取付ける構造とした。また冷却水路はいわゆる逆方向流動に近い流動とし平均温度差を大ならしめ冷却効果を増すようにし、水室は冷却水が常に充満して流れる如く配



9 図 ガス冷却器の水管系図

Fig. 9. A diagram of cooling water piping for gas.



10 図 過速度試験中の回転子

Fig. 10. A generator rotor on overspeed test.

置した。なお冷却器の左右1個ずつ合計2個に淡水、残り2個に復水を通すように計画し、発電機損失の半分を復水に吸収させ効率の増加を計るようにした。この管系図を9図に示す。この冷却器は片側を掃除する場合でも負荷を若干減少すれば発電機を停めないでできる。

#### 4. 回転部分の構造

10図に過速度試験中の回転子を示すがそれぞれについて説明すれば次のようである。

##### ア. 軸 体

大容量高速度発電機として回転子の計画、設計が肝要な点であるが本回転軸材の寸法選定、工作方法および構造については今までの経験を基にし、その後の改良工夫を加え慎重に計画した。軸体材料は現在入手できるタービン発電機軸鋼の最高級であるニッケルクロームモリブデン鋼の単一打物を採用に決定、日本製鋼所に発注したが何分荒削重量26トンにも及ぶもので、製作面に幾多の困難があつたがこの詳細については“ロータシャフトについて”の論文に譲ることとする。またでき上つた軸材の検査についてはとくに入念に行い超音波探傷器によつて全周全長にわたり詳細に検査するのはもちろん鉄心部ではその深部からコアドリルで試験片をとり磁氣的電氣的機械的試験を行い歯部の半径方向の最大応力のかかる部分の機質を十分に検査した。このコアドリル試験片の本数位置を決めるため超音波探傷器を活用して遺漏なきを期した。

この軸体に軸方向の回転子溝を加工し回転子線輪を収納し線輪を焼付けた後溝上部に非磁性合金クサビを打ちこみ線輪が遠心力をうけても移動しないようにするが、なお回転子の出し得るアンヘアターンを大にするため溝の形状を特殊にしました回転子の2倍周波数振動を防止するために回転子に横溝を加工した。

##### イ. 線輪および絶縁

導体は扁平の特殊銀入銅合金線で層間絶縁、溝絶縁はマイカナイトを用いた。すなわちこの種大容量機になると導体の収縮現象が生じ回転子導体の端部分が変形を生

じ、したがって層間短絡ないしは接地の事故を生ずることがある。この現象による故障を避けるために普通採用される軟銅平線の代りにこれよりも弾性限度の高い軟化点の高い匍匐性の優れている特殊銀入銅合金線を採用した。

#### ウ. 線輪押え環

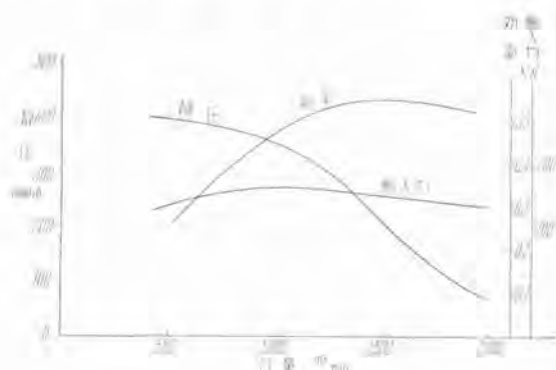
材質はニッケルクロームモリブデン鋼で線輪端部の大なる遠心力に十分堪えうる強力なものである。この端部にニッケルクロームモリブデン鋼の釣合環を取り付け釣合調整および線輪の保護とし、他端は回転子鉄部に焼きばめする。また釣合環は回転中線輪押え環が楕円形に変形することを防止する作用をなすが釣合環と軸との間に大なる空隙をもうけ、冷却効果を良好にし線輪端部に十分な冷却ガスが通ずるよう間隔片を配置した。また線輪端曲部は莫大な遠心力を受けると同時に負荷の変化に応じ軸方向に伸縮するから電氣的機械的に強靱なかつ高温度に耐えうるベークライトアスベストで押え環の内面を裏張りする。

#### エ. 集電環

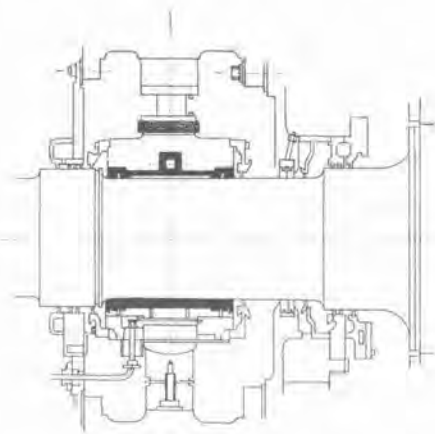
集電環は2図に示すように軸受の外部に取り付けられるが材質は工具鋼で摩耗する面には螺旋状の溝を切り刷子の運転特性を改善し、リングとの接触をよくしている。またリングには冷却面積を増すため穴をあけており、軸に取付け集電環ファンで刷子保持器から冷却空気を引出すようにしている。集電環は絶縁物を介して鋼のブッシングにとりつけるが取り外しは一体としてできる。界磁リードの立上りは絶縁したボルトを通して行すがその両端はゴムで十分に密封してある。

#### オ. 送風機

軸の両端にとりつけた送風機は軸流型を採用し風量を大にし風の流れを良好にし効率を大にするように計畫した。すなわち羽根の干渉を考へて、揚力係数を迎え角と干渉比の函数として求めた実験曲線を基にして設計したので実際に近い値が得られた。この送風機の試験結果を示せば11図のようである。またブレードは耐食性のよいアルミ合金鋳物で試験片による機械的試験を行うはもちろん1枚毎に縦横方向にX線写真をとりキズの有無



11 図 軸流送風機の特性能曲線 (3,600 回転における)  
Fig. 11. Characteristic curves of a propeller blower.



12 図 軸受部の構造  
Fig. 12. Gland seal blering and bearing bracket.

を十分検査した。このブレードはハブに圧入されるがハブの材質はニッケルクローム鋼で回転子軸に焼きばめされている。

#### カ. 軸受および軸受台

軸の彎曲、据付の誤差等のため軸が不当の応力を受けないよう軸受は球面でこれに高压油道、潤滑油道を機工しかつ油切り装置を嚴重にして油漏れを防いでいる。軸受台は両側とも鋳鋼でブラケット型で直接発電機の固定子枠に取り付ける構造であるが軸受間隔が短くなる利点がある。ブラケットには数本の肋材があつて十分な機械的強度を有しヒド二つ割りでこの内に軸受、密封リング油切り装置をもち、下部ブラケットの底部は2図に示すように泡取箱を形造る。固定子枠との取り付けにはパッキンおよび接着剤をもつて接着し、ガス漏れを極力少くする構造としている。また軸受は上部にあるキバーを取り除けば軸受のガス側に密封装置があるので発電機内にガスを封入したままでも点検修理が容易にできる。なお軸受ジャーナル加工にはスハフイニッシュを採用し、ジャーナル部の凹凸を少くし許容軸受圧力の増大、潤滑状態を良好ならしめている。12図に軸受部の構造を示す。

#### キ. 密封装置

固定子枠の端開い部分はかならず軸が貫通するためこの部分より固定子枠内のガスが漏洩するので回転軸の両端で水素ガスは内側に空気は外側にある如く何等かの方法でガスを密封する必要がある。この密封部は12図に示す如く固定して油を供給する部分と、内部に取り付けた2個の環から成り、まず密封リング間の溝に圧油を押しこむと密封リングと軸の隙間を通り油は2方向に流出する。機内ガス圧より密封油圧が高いと油は密封器の水素ガス側に流出し機内からの水素ガスの漏洩を防止することができる。この2個の環は半径方向には自由に動くが、軸とともに回らないようストップで止めてあり、密封環リングの支持環は上記ブラケットに取りつけてある。なお密封油はブラケット内の油道を通り油溝へと通じており密封リングを出た油は下部にある泡取箱に集ま

り密封油管へ流出する。

#### ク. 軸電流の防止

軸電流を防止するため、密封装置支持板とブラケット外側と内側の軸受リング間、油切りとブラケットおよび励磁機軸受台に絶縁物を入れる。

### 5. 通風方式

さきに述べたように本機は固定子枠内にガス冷却器を内蔵し、回転子軸の両端につけた2個の軸流送風機のみで機内ガスを循環させるが、ガスは機内で得た熱をガス冷却器のところで冷却水へ伝える。それからガスは再び送風機へ入りかくして幾度も幾度も循環する。

#### ア. 固定子の冷却

鉄心および線輪を有効に冷却するため複式放射通風式を採用している。このため鉄心を多数のガス溝によつて数十部に仕切りさらにこれを数群に分ち冷却ガスの取入部、排出部とする。これに対応して固定子枠も冷却ガスの取入部、排出部を形造る。通風路系統は13図に示すとおりであるがこれを詳しく説明すればつぎのようになる。

(1) 軸流送風機により  $A_1$  室に入つたガスは2部分に分れるがそのうち1部は線輪端部を冷却して直ちに空隙にはいりガス溝(B)を半径方向に外側に進み  $B_1$  室にはいる。残り一部分のガスは線輪端部を冷却し左右にもうけられたW孔を軸方向に進み  $B_1$  室をとおり越し  $C_1$  室に達し鉄心背部からガス溝Cをとおり空隙に出て左右に分れて軸方向に進む。このうち左側に進んだガスはガス溝Bを半径方向に外側に進み  $B_1$  室にはいる。また右側に進んだガスはガス溝Dを半径方向に外側に進み  $D_1$  室に出る。

(2) ここで  $B_1$  室のガスは13図断面図に示すように直接冷却器を通つて  $B_2$  室に出てU孔をとおり  $A_2$  室に出たり、あるいはすべての隔壁に貫通せるV孔をとおりA部分やC部分にまたがつて後冷却器を通し

てそれぞれ  $A_3$  室や  $C_2$  室に出る。

(3) ガス溝Dに入り  $D_1$  室に出たガスは直ちに冷却器を通じて  $D_2$  室に出たり、あるいはV孔を潜つてC部分にまたがりその後冷却器を通じて  $C_2$  室に出たりする。

(4)  $A_3$ ,  $B_3$ ,  $C_3$ ,  $D_3$  室に出たガスはいずれもすべての隔壁を貫通しているU孔を通り一束となつて  $A_4$  室から軸流送風機に向ふ。

以上述べたように各通風路はいずれも並行に流れ、並行に冷却器を通り後一束となつて両端の軸流送風機に向つて同じ循環を繰返すので鉄心部においては従来の空気冷却機と何の変りもなく冷却ガス全鉄心に十分触れるので局部的加熱を起すようなことは全くない。

#### イ. 回転子の冷却

回転子の表面には螺旋溝を切り冷却面積を増すとともに空隙中のガスの移動を助け表面損失を減少させ能率を上げるようにした。回転子線輪の端部は釣合環と軸との間の隙間から入つたガスで冷却され一部分のガスは導体溝下の通風穴を軸方向に進み歯部にあけた放射穴から空隙に出て、固定子歯の部分で冷却したガスと一緒に固定子のガス溝をとおりBおよびD室にはいりガス冷却器をへて軸流送風機に達する。残りのガスは回転子端部を冷却し端部間隔片の間を通り線輪押え環の風穴に出て、固定子線輪を冷却したガスと一緒に空隙に入りここでガス溝を半径方向に通じ固定子鉄心を冷却しガス冷却器をへて軸流送風機に達する。

#### ウ. 励磁機および集電環まわりの冷却

2図に示すように励磁機および集電環は共通の囲いで蔽つてゐるが内部ではお互の間に仕切りを設けファンを取付けてある。励磁機軸受台の下部にある台板部分の空気入口部から空気濾過器を経て新鮮な空気が入るが、一部分の空気は台板下部を軸方向に進み集電環ファンで吸われ集電環まわりを冷却し風出口室を経て外部に排出される。残りの空気は励磁機ファンで吸われ副励磁機、主励磁機と順次に冷却し風出口室に到り前述の空気と一緒に外部に排出される。したがつて刷子および整流子は主励磁機のとに冷却されるので刷子の粉末が励磁機線輪に付着するようことはない。

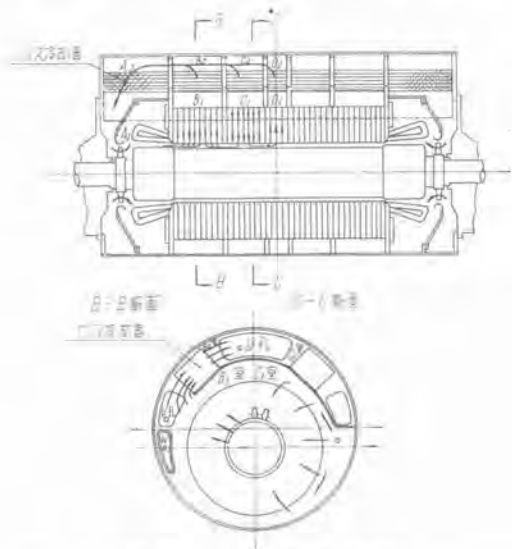
### 6. ガス制御装置

ガス制御装置の系統図を14図に示すがこの装置は炭酸ガス供給装置(15図)水素ガス供給装置(16図)ガス乾燥器警報盤、操作バルブ、密度計、純度計、ガス圧力計等よりなるつぎのような機能をもっている。

(1) 水素ガスを発電機内に充填したりまた追出すに必要な装置を具備する。

(2) 機内ガス圧を予定値に保ち運転者に指示警報する。

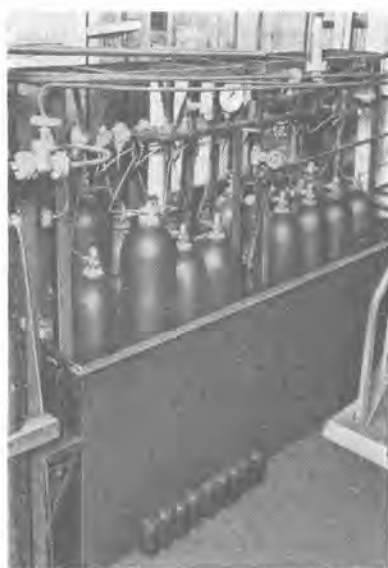
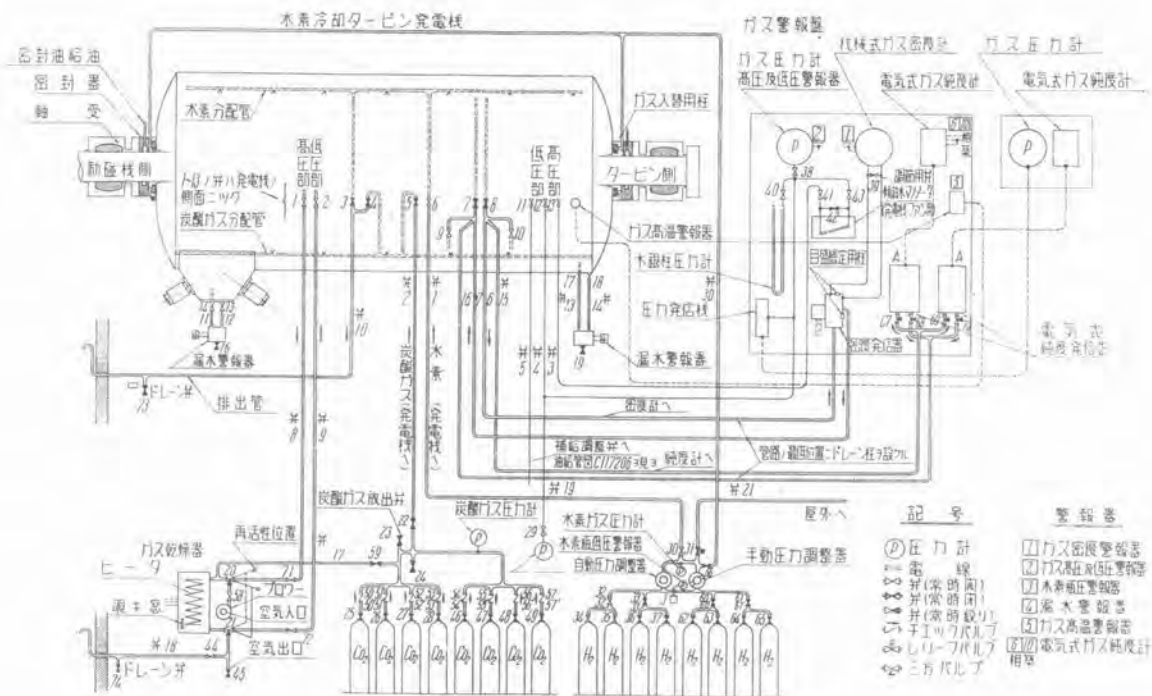
(3) ガス温度、純度をある予定された範囲内に保ち



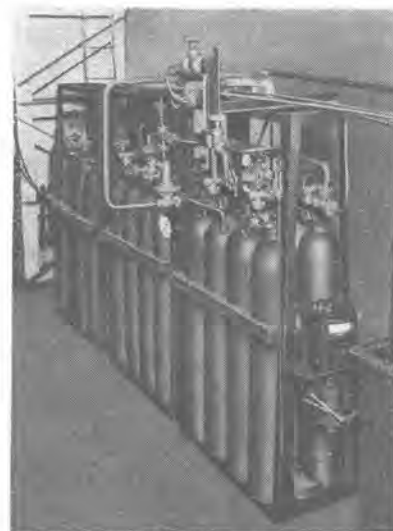
13図 通風路系統図

Fig. 13. A diagram of ventilating system of generator.





15 図 炭酸ガス  
供給装置  
Fig. 15. Carbon  
dioxide supplier.



16 図 水素ガス  
供給装置  
Fig. 16.  
Hydrogen gas  
supplier.

それらに関する機内の状態を絶えず運転者に指示し警報する。

(4) 機内に水が溜ったとき 漏水警報器により 警報指示する。

(5) 機内の水素ガスを乾燥し純度低下を防ぐ、機内水素ガス圧は発電機内に空気が漏れ込まないよう最小 0.5 psig (0.035 kg/cm<sup>2</sup>) に保つのであるがこれは水素瓶連絡管につけた自動圧力調整器で行う、また発電機中の水素純度は常時 95% 以上に保ち 90% になったときに警報を発するようにしているので運転方式制御方式と相俟つて機内ガスが爆発性混合ガスに決してならぬようになっている。すなわち水素ガスを機内に充填したり追い出す場合中間ガスとして炭酸ガスを用い、水素ガス

と空気との混合ガスを決して危険な状態におかないようにしている。

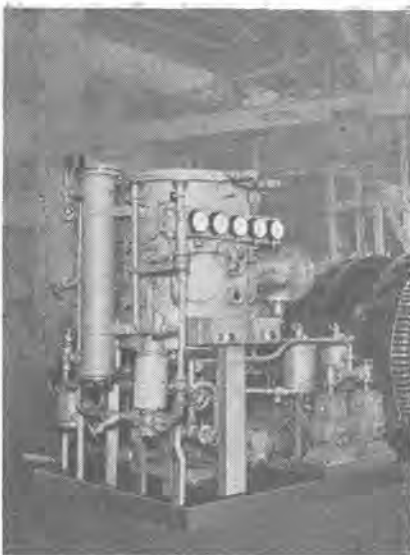
まず炭酸ガスで機内の空気を追い出すのであるが、このとき炭酸ガスシステムの異常時に瓶の圧力が全部管系に加わるのを防ぐ目的でつけた、炭酸ガス放出弁を 7 kg/cm<sup>2</sup> に整定する。炭酸ガスは空気に比べて重いので機内の下部拡散管からガスを入れる。またガス純度は発電機の頂部の所で計測する必要があるのでこのようにできるために発電機枠の側面の下部につけてある、操作バルブを適当に開、閉し密度発信器を動かしておく、ついで炭酸ガス瓶の口弁を徐々に開くが口弁はすぐに凍結しある程度までは徐々に進行するがそれからは比較的速かに凍結するので数本の炭酸ガス瓶を並列におき、瓶に凍結が生ず

ればすぐに隣の瓶の口弁を開くようにし、炭酸ガス圧力を常に一定に保つて供給した。このとき余り早い速度で炭酸ガスを供給すると、機内の入口にある操作バルブと発電機枠の接合部が非常な温度差を生じ発電機枠に好ましからぬ影響を与えるのでこの接合部の温度が余り大きいときは供給ガス圧を少し下げることがある。このとき電気式純度計が 80% 以上を指し、機械式純度計が 140 日盛以上になつたならばガスの供給を止め水素ガスを封入する。

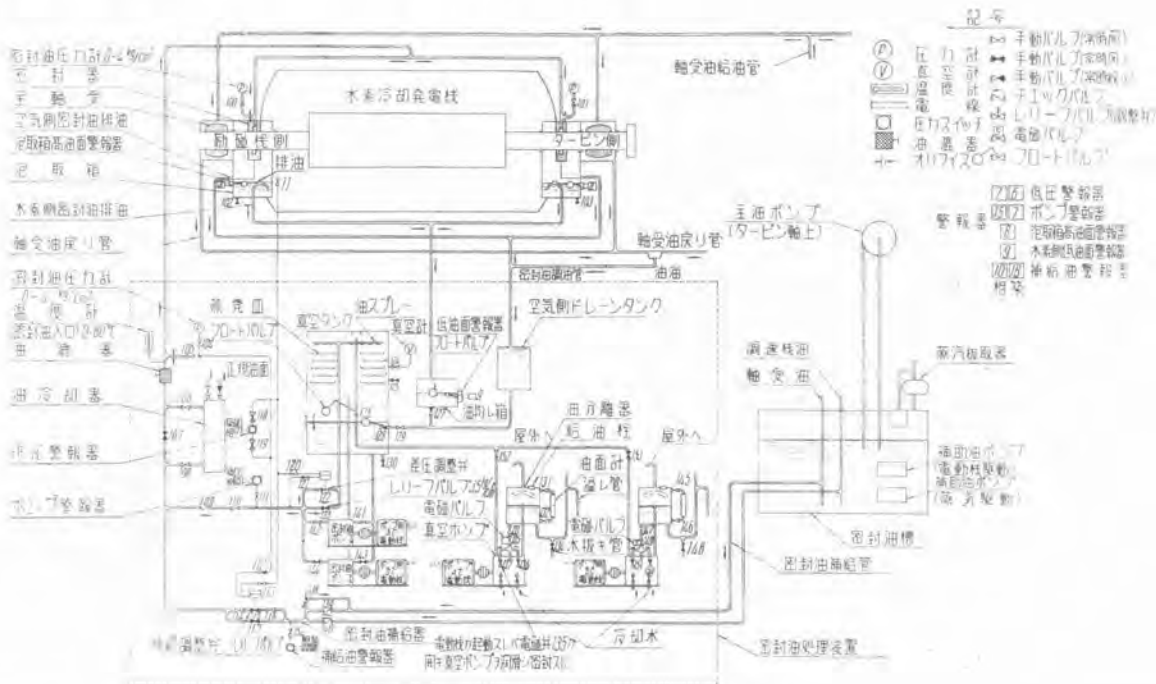
水素ガスは炭酸ガスに比べて軽いので機内の上部拡散管からガス供給したガス純度は発電機の底部で計測する必要があるのでこのようにするため操作バルブを適当に開、閉する。ガス供給管と水素瓶の間に自動圧力調整器と可変圧力調整器が並列にあるが前者は機内ガスを最小 0.5 psig に保持するもので後者は機内ガス圧を 0.5 psig と 15 psig の間に任意の値に保持するものである。すなわち任意の値に整定するのは手動であるが、整定してしまえばそれからあとは自動的に整定した圧力で機内ガス圧を保持することができる。

構造はいずれもスプリング、ダイヤフラムを有する 2 段減圧式で詳細は別項に譲るが、まずこれらの圧力調整器を個々に整定し、指示一次ガス圧で規定ガス量を流し得るようにする。これらの操作が終つてから手動圧力調整器を通じて水素ガスを機内に入れるが、このとき純度計指示が水素 95% 以上になつたらガスの供給をやめ自動圧力調整器、可変圧力調整器を再び整定しそのガス圧で規定二次流量を出しうるようにする。これで水素ガスが発電機枠中に封入し運転できるのであるが、ガス制御装置 (14 図参照) には運転時のバルブの開または閉の位

18 図 油制御装置の外観  
Fig. 18. Oil control equipment.



置が示してある。また活性アルミナを充填したタンク、電熱器、ブロワ、三方コック等よりなるガス乾燥器は発電機内の高圧部、低圧部につないであるのでガスは発電機運転中乾燥器を通じて循環する。吸湿剤で約 1 kg の水をとることができるが、この時乾燥器を発電機より切り離し電熱器でアルミナを熱する。このためにブロワがあり過熱しないようにサーモスタットをつける。活性アルミナの乾燥度は色で見わけることができる。すなわち乾燥時青色のものが湿気をとると灰白色になる。全体の配管としてはネジ込みをやめフランジ接続とし水素ガス用管は銅管を炭酸ガス用管は鋼管を使用した。水素用バルブはガス漏洩の点よりベロー式を採用し座は特殊合成樹脂としバルブ本体材質は黄銅またはブロンズを採用した。



17 図 油 制 御 装 置  
Fig. 17. A diagram of oil control system.

## 7. 油制御装置

油制御装置の系統図を 17 図に示すが、この装置は密封油ポンプおよび電動機、油冷却器、油濾器、真空タンク、空気側ドレーンタンク、油均し箱、真空ポンプおよび電動機、低圧警報器、差圧調整弁、補給調整弁等からなりすべて一体に組立ててあるがその外観を 18 図に示す。この油制御装置の機能をまとめるとつぎのようである。

(1) 空気および湿気を含まない圧油を密封部に供給すること。

(2) 発電機にガスを充填している間はかならず密封器に圧油を供給せねばならぬので万一密封油ポンプが故障でも主油槽から圧油を供給できる。

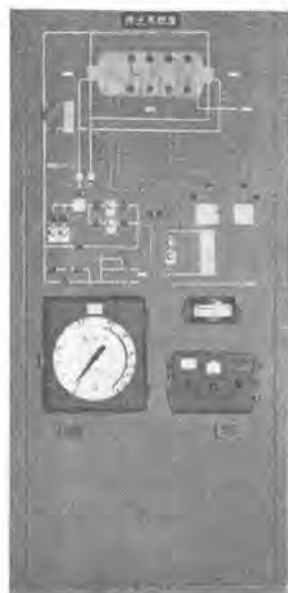
(3) 密封油圧はかならず機内ガス圧よりも 10 psig 高いこと。

つぎにこの油管系を詳しく説明する。密封油ポンプは真空タンクの下部から真空処理し、空気および湿気を含めぬ油を引出し、一部分の油を油冷却器、油濾器を通し密封器に送り大部分の油を差圧調整弁を通じて真空タンク内のスプレノズルに戻す。この差圧調整弁は密封油ポンプの出口側に設けてあつて密封部における密封油圧を常に機内ガス圧より 10 psig だけ高く保たしめ余分の油をこの弁を通じて真空タンクに逆送せしめるものである。この弁はガス圧と油圧の差圧で働く二重ベローとバネの形、座板の形を適当に組合せたものであつて、密封油は密封部に入るまでに何回も真空タンクと密封油ポンプの間を通り十分処理される。ここで機内ガス圧が 0.5 psig から 15 psig に変化しても油圧がかならずこのガス圧より 10 psig 高くなるようこの弁が動作することはいうまでもない。密封リング間の溝に押しこまれた圧油は密封リングと軸の隙間を通り、空気側とガス側に流出す

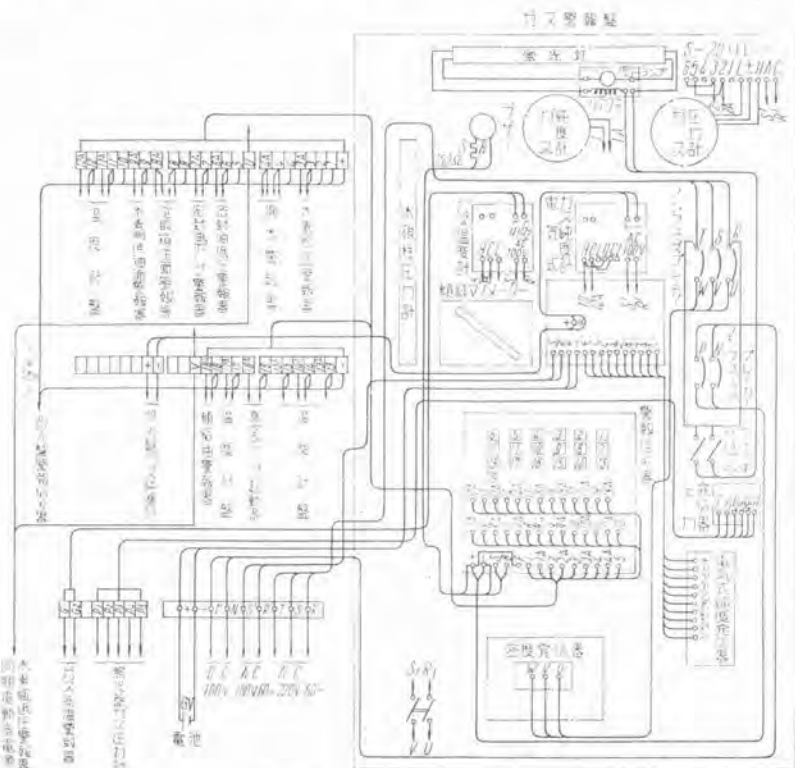
る。機内ガス圧より密封油圧が高いので油は密封器のガス側に流出し、機内からのガスの漏洩を防止する。

密封リングを出たガス側の油は発電機のブラケット下部の泡取箱に入り、空気側の油は空気側ドレーンタンクに入る。泡取箱に入つたガス側の油は、ここで大部分の泡を油から分離する。この泡取箱の油面は高油面警報器により一定に保つようにする。二つの泡取箱から流出した油とさききのべた空気側ドレーンタンクに入つた油はともに真空タンク油面を制御する弁を通り真空タンクに入る。

真空タンク内では油中の不純ガスを真空ポンプで真空にひいて取り除く。なおこれらの間の油のやりとりは適当に真空タンク内にフロートバルブ、油均し箱内のフロートバルブにより自動的に行われる。主油槽からの油管系の密封油への補給調整弁は常に閉じている。そして主油槽からの管系には絶えず約 50 psig の油圧がかかつておりタービン軸受からの約 14 psig の圧油が軸受管系へのつなぎ管にかかっている。この管系を流れる油は両方の差圧により決定されている。ここで密封油ポンプが停止とかその他の原因で密封部の油圧と機内ガス圧との差圧が 7 psig 以下に下ると補給調整弁が自動的に働いて密封部に油を送る。このように機内にガスが封入されている限り密封部へはかならず送油しなければならぬので密封部への給油はさらに油ポンプ用電動機を直流電源に切替えても行うことができるよう 3 段階構えになつている。油関係の管系はすべて引抜き鋼管を用い、バルブは鋳鋼品を使用している。なお密封油は軸受油と同一品



19 図  
照光系統盤  
Fig. 19.  
Mimic piping  
panel.



20 図 警報回路図  
Fig. 20. Alarm circuit diagram.



を使用する。

## 8. ガス警報盤および照光系統盤

ガス警報盤は発電所ではタービン室に据付けられ照光系統盤は配電盤室に据付けられる。前者の盤面には警報接点付機械式ガス密度計、警報接点付ガス圧力計、傾斜マンオメータ、警報接点付電気式純度計、水銀圧力計、警報表示器をとりつけ、後者の盤面には 19 図に示すように油配管、ガス配管の模擬系統、バルブの開の状態を表示するランプ、ガス圧力計および電気式純度計をとりつけた。

なおバルブに接点を作るためにはマイクロスイッチを採用した。ガス警報盤面にとりつけた警報回路系統は 20 図に示すがこの警報装置は発電機本体、油制御装置、ガス制御装置の万一の場合を考えてつけてあるものでその種類はつぎのとおりである。

- |                   |      |
|-------------------|------|
| (1) ガス密度が高い場合     | 低い場合 |
| (2) ガス圧力が高い場合     | 低い場合 |
| (3) 水素瓶の圧力が低い場合   |      |
| (4) 漏水警報器が充満した場合  |      |
| (5) 水素ガス温度の高い場合   |      |
| (6) ガス純度が高い場合     |      |
| (7) 密封油圧が低い場合     |      |
| (8) 密封油ポンプが停止の場合  |      |
| (9) 泡取箱の油面が高い場合   |      |
| (10) 油均し箱の油面が低い場合 |      |
| (11) 補給油をとっている場合  |      |

## 9. 試験結果

本機は去る 3 月工場において立会試験を終つたもので現在現場組立中であるがここでは工場試験の結果のみにつき述べることにする。

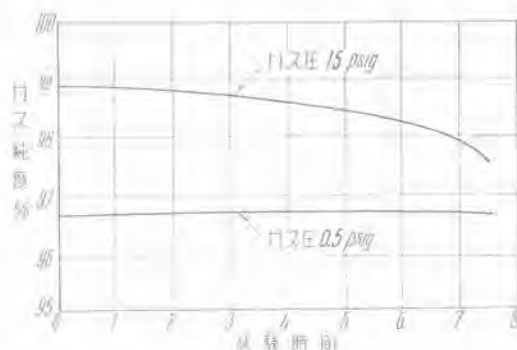
### ア. 漏洩試験

水素冷却機では運転上水素ガス消費量が問題となる。一般に発電機内のガス純度の下がる原因としてはつぎのことが考えられる。

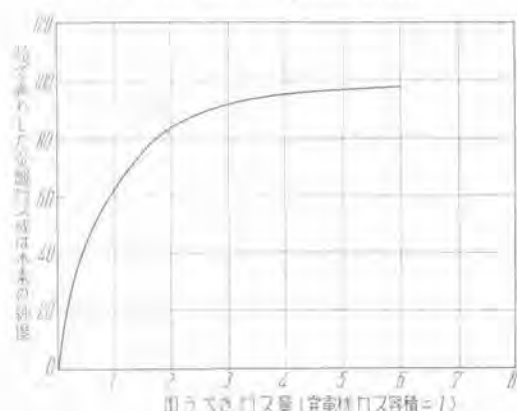
(1) 発電機枠の接合部、種々の配管の接続部、制御装置の種々の計器や弁等からの漏洩であつて、これを最小限に押えるよう材料の選定や製作技術に工夫を施すがなお絶対になくすることができない性質の漏洩である。

(2) 水素の許容最低純度は 90% としているので純度がこれ以下にさがれば水素を補給する必要がある。純度低下の大きな原因は密封油および補給用水素中に含まれている空気と水分であつて、この密封油が密封部においてその中に含んできた空気を機内に放出し、機内純度を低下さすが同時に機内ガスを若干溶解して持ち帰りそのためにさらに機内純度を低下させる。

(3) 密封部において油中に含まれていた水分が機内にはいつて飽和蒸気となるその体積が大となり純度低下の原因となる。



21 図 ガス純度低下曲線  
Fig. 21. Gas purity-time curve.



22 図 発電機にガスを充填する場合の所要量と純度との関係 (ただし炭酸ガスあるいは水素は完全拡散とす)  
Fig. 22. Relation between required gas quantity and purity.

(1) にのべた発電機枠からのガスの漏洩を極力小さくするため発電機枠の油密気密は特殊パッキン、接着剤を用いて厳重に行つてゐるし (2), (3) に述べたように密封部へ供給する油中に空気や水分を溶解せぬようにあらかじめこれら不純物を密封油からとりさるゝようにした真空処理方式を採用している。したがつて水素冷却機の水素消費量は発電機枠のパッキンおよび他の管系部分より逃げるガスと密封油中に溶解して持ち去られるガスの合計である。前者は機内ガスのゲージ圧の平方根に比例し後者は機内ガスの絶対圧力に比例する。

この水素ガス漏洩量を知るため発電機を完全に組立てその付属管系や器具を取りつけた後につぎのような方法を採用した。すなわち密封部には適当な密封油圧を供給し機内に乾燥した高圧空気を入れある一定時間後の圧力降下を測定し全漏洩量を次式で算出した。

$$L = 0.4 S \left( \frac{P_1 + B_1}{273 + T_1} - \frac{P_2 + B_2}{273 + T_2} \right) \times \frac{24}{T}$$

ここで L=大気圧における全ガス漏洩量 (m³/day)

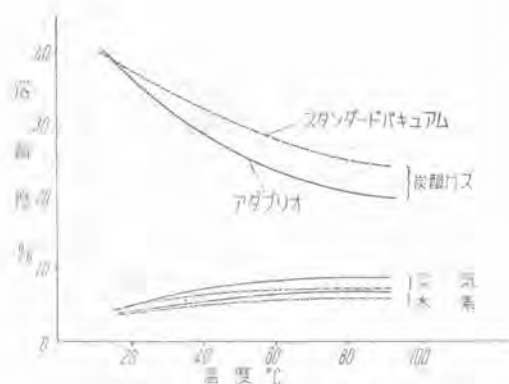
S=管系をも含めた発電機の全容積 (m³)

P<sub>1</sub>=試験を始める前の圧力 (mm Hg)

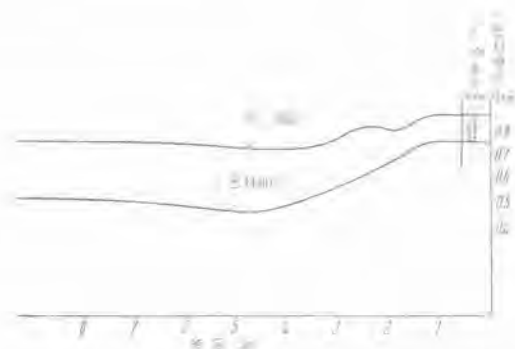
T<sub>1</sub>=試験を始める前の温度 (°C)

B<sub>1</sub>=試験を始める前の大気圧 (mm Hg)

P<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>, B<sub>2</sub> はそれぞれ試験を終つたときの圧力、温度、大気圧を表わす。



23 図 種々のガスの密封油のガス溶解度  
Fig. 23. Solubility of various gases into sealing oil.



24 図 密封油圧とポンプ油圧の関係 (その I)  
Fig. 24. Relation between sealing oil pressures and pump pressures (I)

T=試験に要した時間

なお測定の場合は温度、圧力の試験前後の変化が小さいので、正確に読みとれるよう特別に作った装置を用いた。またガス圧を 0.5 psig に保ち、ガスを絶えず機内に補給してこの量を浮子式流量計で計測しガス純度低下を計測した結果、補給ガス量  $1 \text{ m}^3/\text{day}$  で 5 時間試験を継続したがその前後の純度はほとんど変化なくそれぞれ 96.7% 96.8% であった。これよりガス圧 0.5 psig で水素ガス消費量は約  $1 \text{ m}^3/\text{day}$  であるを知ったが、ガス圧 15 psig では同様な方法で約  $6 \text{ m}^3/\text{day}$  なるを知った。

21 図にガス純度低下曲線を示しておく。

#### イ. ガスの入替および充填

##### (1) 炭酸ガスによる空気の追出し

大気中には容積で約 21% の酸素を含む。水素と空気の混合ガスの爆発上限は水素 70%, 空気 30% であるからこの混合ガス中の酸素の量は  $30\% \times 0.21 = 6.3\%$  となる。

したがって水素を入れるまえに発電機枠から炭酸ガスで空気を追出し酸素量を 6.3% 以下に減ずる必要がある。いま炭酸ガスが完全に拡散すると仮定すれば H. B. Holroyd の式より予定された純度に発電機枠を満すに要するガス量 V は発電機ガス容積を Q とすれば

$$V = Q \times 2.3 \log_{10} \frac{\text{始めの空気の \%}}{\text{終りの空気の \%}}$$

でありこの関係を図に示せば 22 図のようになる。炭酸

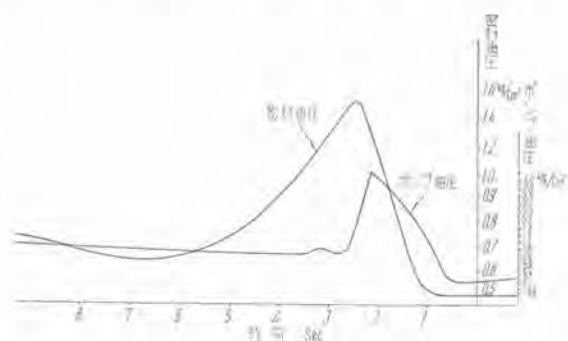
ガス封入を発電機の回転中に行うと、機内で炭酸ガスと空気の混合が多くなり静止の場合に比べて消費量が多くなる。いま運転中発電機ガス容積の 2 倍の炭酸ガスを供給するとすれば、上式または 22 図より完全拡散の場合に空気量は 14%, 実際にはそれより以下に換えれば酸素量は  $14\% \times 0.21 = 3\%$  以下に減少することが判る。ガス入替を回転子静止の状態で行うとすれば空気と炭酸ガスは混合すること少く発電機ガス容積の 1.5 倍の量で上記酸素量に達すると考えられる。本機の入替の一例をのべれば発電機停止中空気と炭酸ガスで追い出し機内ガスの最終純度を 92% にするため 40 分かかつて発電機ガス容積の 1.58 倍のガス量を要した。

##### (2) ガスの充填

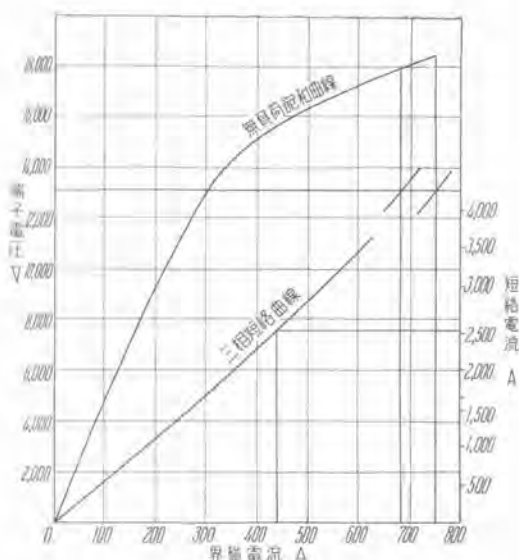
水素冷却機では機内水素ガス純度を容積で 90% 以上普通 97% 位に保つて運転するが運転中炭酸ガスを追い出し水素純度を 95% 以上にするには発電機ガス容積の 3.5 倍の水素を要することが判る。静止の場合には炭酸ガスと水素が混ることが少いので炭酸ガスを追い出し同じ純度にするのに発電機ガス容積の 2 倍を加えれば十分である。本機の入替の一例をのべれば発電機停止中、炭酸ガスを水素で追い出し機内ガスの最終純度を 96% にするため 90 分かかつて発電機ガス容積の 1.8 倍のガス量を要した。いずれの場合でも最終ガス純度の測定は電気式純度計、機械式密度計にて読みとるはもちろんオルザット法を併用した。

#### ウ. 密封油の油量およびガス溶解度

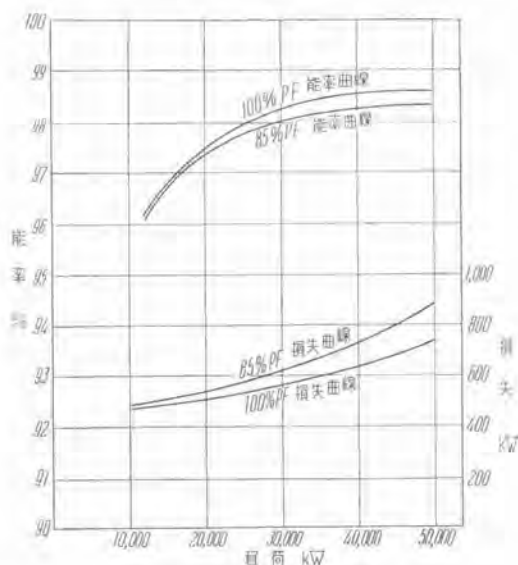
密封器の油量および油圧は内部ガスの漏れおよび外部空気の侵入を止め得る最小限度に止めるのがよいが、本機では差圧調整弁を用いて密封油圧は機内ガス圧よりかならず 10 psig 高い油圧を保つように計画したが詳細は計器の項にゆずる。また密封器における油量はこの密封油に機内ガスが溶解してにげまた空気が油に溶解して機内に入るおそれがありこのためできるだけ油量が少いのぞましい。本機では密封油は軸受油と同一の油を用いたのであるがタイコールアダプリア、スタンダードバキュウム #797 を使用した。23 図には種々のガスの密封油への溶解度を示す。また 24 図、25 図に示すように



25 図 密封油圧とポンプ油圧の関係 (その 2)  
Fig. 25. Relation between sealing oil pressures and pump pressures. (II)

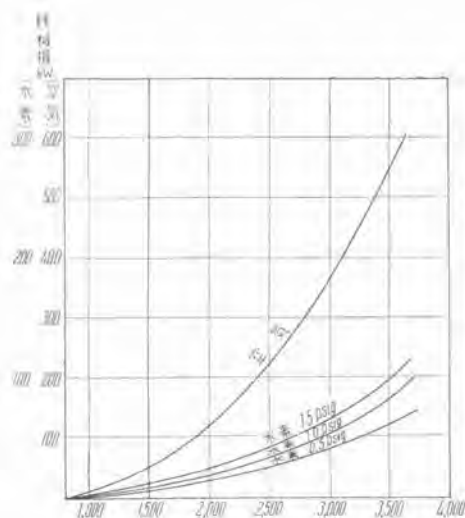


26 図 特性曲線  
Fig. 26. Characteristic curves of generator.



27 図 能率曲線  
Fig. 27. Efficiency curves.

密封油ポンプにより密封油圧を供給した場合および補給調整弁より密封油圧を供給した場合につき各部分の状態、たとえば密封部分の油圧、温度やその過度状態を測定し、いかなる場合でも差圧調整弁や補給調整等が確実に動作していることをオシログラムで定量的に見極めた。24 図には機内ガス圧 0 で 3,600 回転中、供給系統を正規運転から協道運転にかえたときの密封油圧の変化、ポンプ圧力の変化の状態を示すものである。また 25 図は逆に協道運転から正規運転に切り替えたとき密封油圧、ポンプ圧力はいかなる変化をして整定するかを示すものであつて、密封油圧は 2 秒間位で最高値にたつし漸減するがポンプ圧力の変化との相関係が判るのである。なお密封油量は 0.5 psig ガス圧、油温 32°C、油圧 0.9 kg/cm<sup>2</sup> で約 10 l/min であつた。



28 図 機械損失曲線  
Fig. 28. Mechanical loss curves.

## エ. 種々の特性

本機の特性曲線および能率曲線をそれぞれ 26 図、27 図に示す。水素冷却を採用する利点の一つは機械損が著るしく減ずることがある。空気の密度と水素の比は 1 : 0.0696 であるから 0.5 psig, 15 psig における 95% 水素 5% 空気の混合ガスの密度はそれぞれ 0.12, 0.23 である。したがつてガス体の密度に比例する回転子通風損、摩擦損は 95% 水素 5% 空気の混合ガス中で水素圧力をそれぞれ 0.5 psig, 15 psig にしたときに空気の場合に比べて 12%, 23% に激減する。すなわち発電機の能率が改善される。これはタービン発電機のような大型高速機では摩擦およびこれに冷却媒体を送るための動力は全損失の約 50% にも達するからである。この損失を各回転数について比較した一例は 28 図のようになる。その他銅損、鉄損等の結果から能率を求めると 27 図のようになる。水素冷却機では空気冷却機に比べて一定損失である機械損が小さいので全負荷における能率がよいばかりでなく低負荷能率が増加する。

## 10. むすび

水素冷却 3,600 回転の国産記録品である本機が今般完成し好成績で工場運転を無事終了したが、当社では大容量水素冷却機としては引きつづき相ノ浦発電所向 55,000 kW 機 2 台鶴見発電所向 66,000 kW 2 台を鋭意製作中である。今後設置される大容量タービン発電機はすべて水素冷却式になる気運にあるがこのときにあたり本機の完成はわが国におけるタービン発電機製作技術の最高水準を示すものとして極めて意義が深い。しかし技術は日進月歩であり当社では不断に基礎研究を行いこれに斬新な改良工夫をほどこしさらに優秀な機械を製作し、江湖の期待に副うべく努力している次第である。最後にかかる記録品を採用せられた注文主に深甚の謝意を表す。



# 55,000 kW 水素冷却タービン発電機用 水素ガスおよび密封油制御機器

株式会社島津製作所 矢 幡 源 三\*

三菱電機長崎製作所 今 北 孝 次\*\*

## Apparatus for Controlling Gas and Sealing Oil of 55,000 kW Hydrogen Cooled Turbo Generator

Genzo YAWATA • Koji IMAKITA

Shimazu Mfg. Co. Nagasaki Works

Apparatus for the control and measurement in connection with a hydrogen cooled turbo generator were designed and manufactured with a joint effort of the Shimazu Manufacturing Company and the Mitsubishi Electric Manufacturing Company, being proved very satisfactory through various tests conducted continuously for two weeks. The aims of design for them at the outset were simple construction, easy handling and steady and accurate indication, which were all met with excellent results. The explosion proof was another notable feature in the design, which was also attested satisfactory.

### 1. ま え が き

水素冷却タービン発電機は、機体内部に水素ガスを封入し、この水素ガスの純度低下および漏洩を補償するために、水素ガスの圧力と純度の計測ならびに制御を行い、それと同時に、軸貫通部分においては、ガスを遮断するための特殊な油圧による密封機構に、必要な油圧および油量を循環せしめるために、密封油の制御を行なうことが必要である。したがって、これらの目的のために、とくに設計製作せられた機器について、その概略を述べる。

これらの制御機器は、現在、Westinghouse 社において、同種のタービン発電機に使用しているものを参考として、われわれ両社が、相協力してこれに改良を加え、完成したものであつて、常用圧力 0.5 psi 最高使用圧力 15 psi に耐え得るものである。

これらの部品の設計に当つては、構造簡單にして故障絶無、かつ、取扱容易であることを以て主眼とし、さらには、必要な計器としての精度を落さないという点に、十分な考慮が払われている。

### 2. ガス制御関係機器

#### ア. ガス用弁

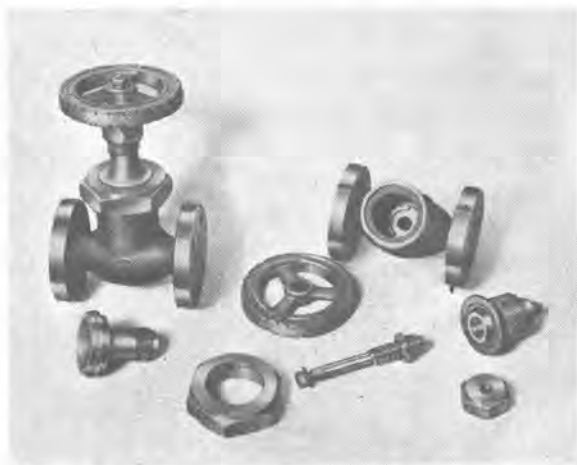
水素ガスが流通する部分に使用するバルブは、すべて青銅系統の材料を使用し、ガスの漏洩を無くするために、バルブ軸はベローズによつて遮断されている。弁座は最も重要な部分であるが、この処には、不銹鋼と特殊な合成樹脂の組合せによつて、弁を閉じたときの漏洩を全く無くし、かつ、耐久度を増すことに成功している。

この一例を 1 図に示す。

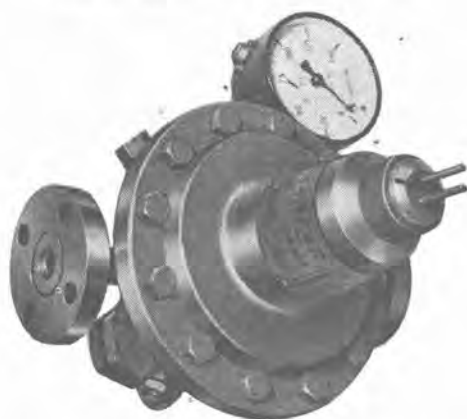
#### イ. 自動圧力調整器

最高 150 kg/cm<sup>2</sup> の圧力を有する水素ポンプ圧を減圧し、機体内部の圧力を自動的に制御する目的のために造られたものであつて、これには 2 種類がある。

一つは、機内圧力が 0.5 psi 以下になると、一定量の補給を開始するものと、今一つは、0.5 psi より 15 psi に至る任意の圧力において、自動的に機内圧力を一定に保つ目的のものである。これらの自動ガス補給器は、従来は設計製作が相当に困難であるとされており、小型に



1 図 水素ガス用弁  
Fig. 1. Hydrogen type tight valve.

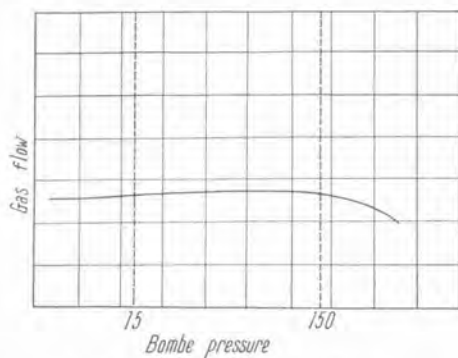


2 図 自動圧力調整弁  
Fig. 2. Automatic pressure control valve.

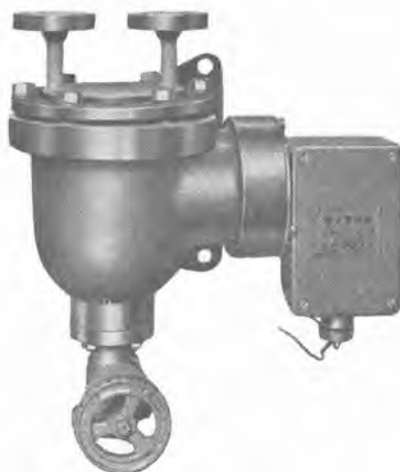
して取扱容易であり、かつ十分に信頼度の高いものは、国内では入手できなかった。2 図は今回製作した自動圧力調整器の外観であるが、これは一度適当な調整を行っておけば、水素瓶圧が変化しても、流量はほとんど変化しない。この関係を 3 図に示してあり、最高  $8 \text{ m}^3/\text{day}$  まで、任意に調整が可能である。

#### ウ. 漏水警報器

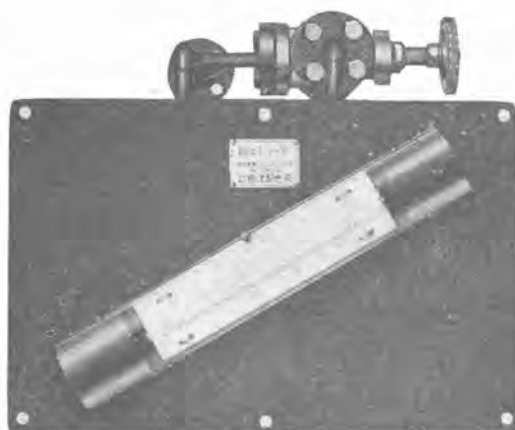
漏水警報器は、機内に水分が溜つたときに、これを機内低部より導き、警報を発する装置である。これは密閉容器内に設けられた浮子の作用によつて、函内に約 100



3 図 流量ポンペ圧力の関係線図  
Fig. 3. Relation between gas flow and bombe pressure.



4 図 洩水警報器  
Fig. 4. Water detector.



5 図 傾斜水マノメータ  
Fig. 5. Inclined manometer for fan pressure detect.

c.c. の水分が溜つた場合に、水銀スイッチを働かせる構造であり、原理ならびに機構は甚だ簡単であるが、試験の結果については、十分に満足すべきものであつた。4 図にその外観を示す。

#### エ. 傾斜マノメータ

機内回転子のガス循環用ブロワーの、高圧ならびに低圧側の静圧を読むためのものであつて、この差圧はガス密度に比例するので、このマノメータの読みから、ガス純度を知ることができる。すなわち、

$$\text{ガス純度} = K \times (\text{マノメータ読み})$$

となる。K は比例常数であつて、発電機運転の際にこの値を決定し、各ガス圧力によるグラフを画き、他のすべての純度計が、万一使用できなくなつたときに、純度の目安とする。

#### オ. 機械式ガス純度計

発電機内のガスを小型送風機に導入し、これによつて生ずるガスの差圧が、密度すなわち純度によつて変ることを利用したものであつて、差圧発生用送風機すなわち密度発信器と、直読型差圧計すなわち純度指示計とから成つている。密度発信器は全閉防爆構造とし、軸承にはシリコングリースを採用する等、長期間の連続使用に耐

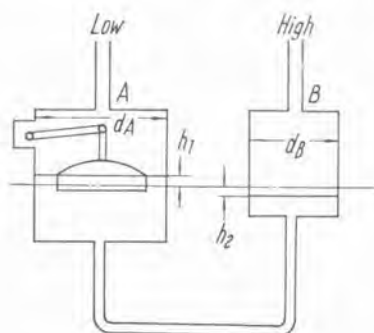
えるものである。差圧計は6図にその原理を示す。すなわち A, B なる密閉管内に水銀を入れ、管 A にフロートをはかりおけば、両管内の圧力差に比例してフロートは上下に動くので、この高さを直接に、指針で指示せしめたものである。この管内は水素ガスで満されているので、ガスの漏洩に対しては十分の考慮が払われてあつて、ことに、貫通部分は独特の構造によつて、精度が高くかつ堅牢なる差圧計となつてゐる。

この差圧計は、0 より 150 までの目盛を有し、較正を行う場合には送風機より空気を送り、バルブ C を調整して目盛を 100 の位置に合せばよい。その状態にて送風機より 100%  $H_2$  を送れば、指針は目盛 7 を指し、100%  $CO_2$  のときは指針は 150 を指すことになる。

送風機によつて生ずる風圧は、ガス圧力、温度、送風機回転数およびガス定数によつて変るものであるが、その関係は次式によつて示される。

$$H = H' \times \frac{P}{P'} \times \frac{T'}{T} \times \left( \frac{N}{N'} \right)^2 \times \frac{R'}{R} \dots\dots\dots (1)$$

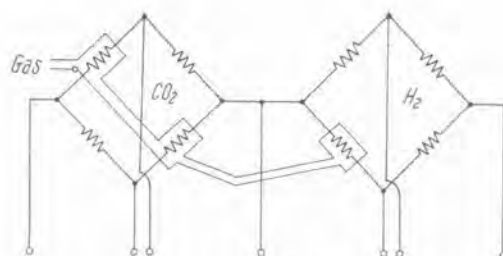
ここに、H, P, T, N, R はそれぞれ、標準状態における差圧、ガス圧力、温度、送風機回転数およびガス定数であり、 $H'$ ,  $P'$ ,  $T'$ ,  $N'$ ,  $R'$  は、それぞれ測定時におけるそれらを表わすものとする。この式から、純度計の誤差は、ガスの状態によつて変化することが判るが、実際に発電機を運転している状態においては、ガス圧力 P の影響を除けば、標準状態を適当に選択することによつて、その指示誤差は  $\pm 1\%$  以内に止めることは容易である。



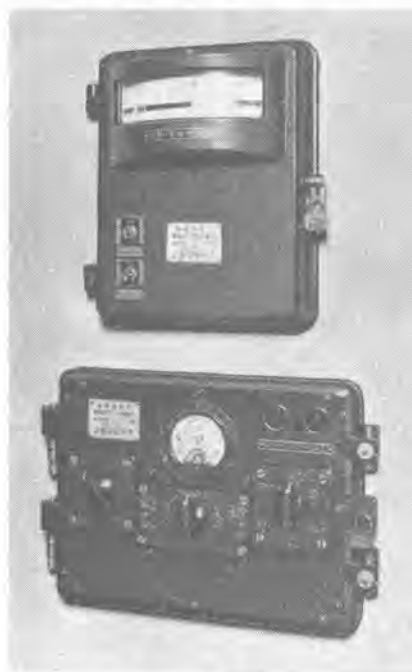
6 図 差圧計原理図  
Fig. 6. Principle diagram of differential pressure indicator.



7 図 機械式ガス密度計  
Fig. 7. Gas density indicator.



8 図 熱伝導型ガス純度計原理図  
Fig. 8. Principle diagram of thermal conductivity type gas purity meter.



9 図 電気式純度計  
Fig. 9. Thermal conductivity type gas purity indicator.

ただし、炭酸ガス封入のときは送風機の負荷が変化し、そのために回転数  $N$  も変化するので、 $P$ ,  $N$  両者によつて較正を行わなければならない。空気で較正の場合には、目盛 100 に指針を合わせたとすると、炭酸ガスおよび水素の純度は、次の如き簡単なる算式によつて計算できる。

$$\begin{aligned} \text{空気と炭酸ガス混合の場合} \\ CO_2 \% &= 2(S - 100) \dots\dots\dots (2) \\ \text{空気と水素混合の場合} \\ H_2 \% &= (100 - S) \times 100/93 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、S は圧力等によつて較正された計器の指示値である。

#### カ. 電気式純度計

機械式純度計と併用して、熱伝導型電気式純度計を採用したが、これは 8 図に示す如く、2 個のブリッジを用い、一方は水素用発信器で他方が炭酸ガス用発信器となつてゐる。精度を高め、時間的遅れを失くし、爆発引火に対して絶対安全を保証し、かつ計器の安定度を高めるために、ブリッジの標準室の構造に独特の考を採り入れ、電源電圧安定装置、フローティングバッテリー、油浸型ス



イッチおよび抵抗器等が、小型に組立てられてある。

この方式の純度計は、前述の機械式純度計と比較してガス圧力、温度等による誤差も少ないので、精度が高く調整を行うことによって  $\pm 0.4\%$  以内に止め得るものである。したがって、この指示計の中に組み込まれた機械的接触部分を持たない光電管式純度警報装置もまた精度は高い。

#### キ. 機械式ガス圧力計

前記機械式差圧計の、A 側を大気中に開放すれば、これは直接ガス圧力計となる。その外観は 9 図に示すが、異なっている点は、A, B 両管を連絡するチューブを長くしたのみである。したがって構造堅牢にして精度も高く、保守もまた容易である。

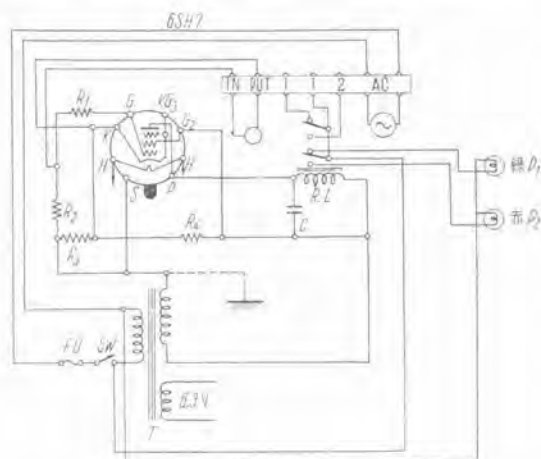
ガス圧力の高低を警報するために、警報用指針が設けられてあり、これは接点の損耗を防ぎ、無火花開閉を行わせるために、真空管式継電器を有している。この継電器のダイアグラムを 11 図に示すが、これは後述する油圧警報器にも、同様のものを使用しており、S-20 型として、その高性能を誇り得るものである。

#### ク. 電気式ガス圧力計

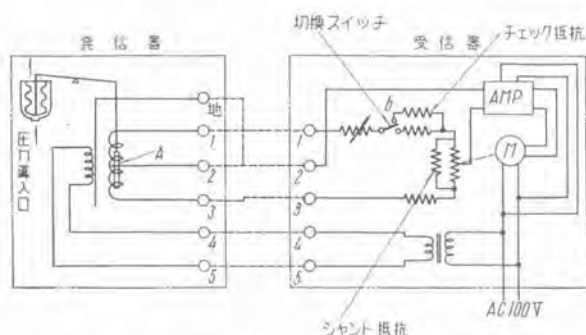
ガス圧力を遠方指示させる目的で、電気式ガス精密圧力計を製作したが、この原理は 12 図に示す如く、発信器内に設けられたベローズにガス圧力を加え、これの



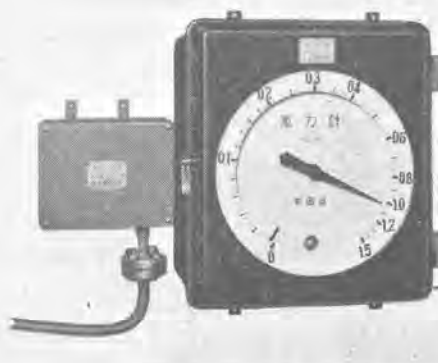
10 図 機械式ガス圧力計  
Fig. 10. Gas pressure indicator with alarms.



11 図 S 20 型継電器  
Fig. 11. S20 type relay.



12 図 精密ガス圧力計回路図  
Fig. 12. Schematic diagram of electric precision gas pressure meter.



13 図 電気式ガス圧力計  
Fig. 13. Electronic type gas pressure indicator.

伸縮の変化をインダクタンスの変化に変え、受信器の抵抗との組合せから成るブリッジの不平衡電圧を増幅し、指針に連結せられた二相電動機を回転し、電圧の平衡した位置によつて、ガス圧力を知る方式のものである。これは一般に、温度、圧力等の指示あるいは記録に使用する自動平衡型計器と、ほぼ類似のものであるが、これに改良を加え特殊な構造によつて、低圧力部分の目盛を拡大し、そのために常用圧力  $0.035 \text{ kg/cm}^2$  以下の圧力をも、正確に測定することが可能となつていて、最高目盛は  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  となつている。さらに、真空管回路の故障の場合には、指針に直結せられた二相電動機に不平衡電圧が加わり、指針は徐々に高目盛側へ回転する。このために、故障の有無を即時に判断することができることも、この計器の特長とするところである。

13 図にその外観を示す。

一般的に見て、計測計器は、最近弱電ことに真空管を使用する傾向が盛んになりつつある。この方法は遠方指示が容易であり、精度を高めることもできるし、小型に組込むこともまた可能であるが、入念な保守と、回路の故障検知に対する方策を、考慮して置かねばならない。

これに反して、機械的計測装置の原理は、甚だ原始的なものであるが、反面堅牢にして、保守は至極容易であるが、精度の点においては、往々にして、真空管方式に劣ると考えられている。

ガス純度計および圧力計に対して、今回は、機械式と

電気式とを併用してみたのであるが、現在までの試験においては、それぞれの特長を発揮して、いずれも満足すべき結果を示している。

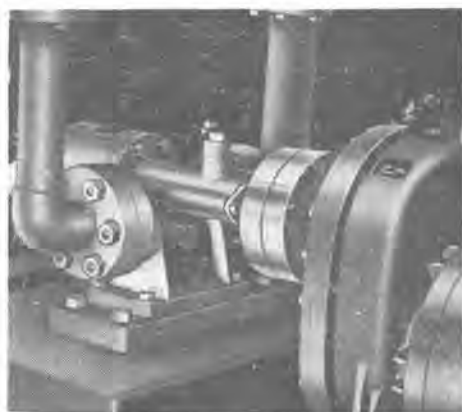
### 3. 密封油制御機器

#### ア. 密封油ポンプ

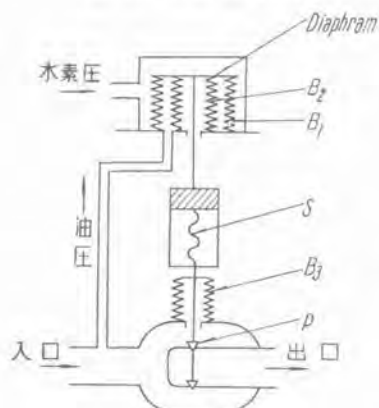
密封油用ポンプは、交流直流各1台設けてあるが、いずれも完全な、水素防爆構造となつている。

直流駆動のものは非常用であつて、交流側が停止した場合に、直ちにそのまま切換えができるように、直流電動機の負荷特性は、交流電動機の特性と合せてある。

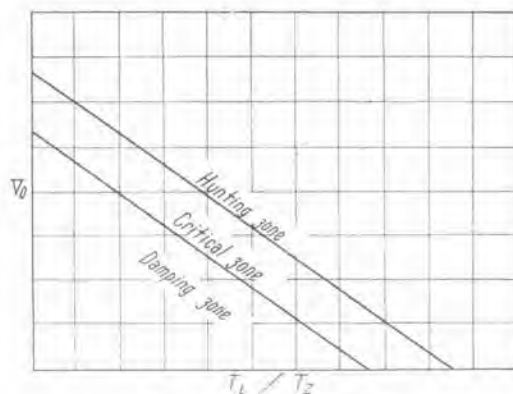
この油ポンプは歯車型であるが、一般のそれと異なる点は、吸込側圧力が真空タンクに連絡している関係上、常に大気圧以下である点である。このために生ずる問題の一つに、キャビテーションがある。もしも、吸込側油管系より気泡が混入すると、ポンプは、非常に高い異音を発生することがある。これは、真空タンクの真空度が高ければ高い程烈しいのであるが、そのために真空度を下げることが好ましくないで、歯車のキャビテーションを減少するために、ダブルヘリカル型を採用し、回転数は比較的低くして、これを防いである。これと同時に、真空タンクよりポンプに至るパイプ系統は、空気の混入を失くするために、バルブはベローズ型とし、ポンプ、



14 図 密封油ポンプ  
Fig. 14. Seal oil pump.



15 図 差圧調整弁原理  
Fig. 15. Principle diagram of differential pressure regulator.



16 図 感度時定数線図  
Fig. 16. Relation between sensitivity and time constant.

バルブ、パイプ等はすべて、気密試験を行つてある。

#### イ. 差圧調整弁

密封油ポンプの出口側に設けられた、差圧調整弁により、発電機密封部分における油圧は、常に、ガス圧力よりも  $0.7 \text{ kg/cm}^2$  だけ高く保たれ、余分の油はこの弁を通して、真空タンクに逆送せしめられることとなる。

この原理は 15 図に示す如くであつて、この図の  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  はベローズ、 $S$  はスプリング、そして  $P$  は弁棒を示している。今、ある瞬間における力の釣合を考えると、

$$P_1 + P_2 + S_1 = P_g + S_1 \quad \text{すなわち}$$

$$(P_1 + P_2) - P_g = S_1 - S_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

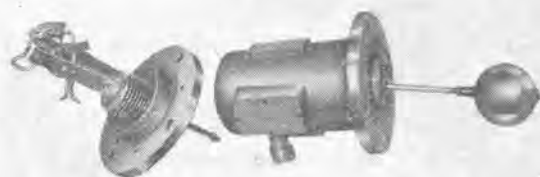
となる。 $P_1$  はダイヤフラムに加わる油圧、 $P_2$  は  $B_3$  内の油圧、 $S_2$  はベローズの力、 $P_g$  はダイヤフラムに加わる水素圧力、 $S_1$  はスプリングの力である。それ故、スプリング  $S$  の力を加減すれば、差圧を変化することができる。

この方式においては、真空タンクへ逆送される油量を、密封油量の数倍に取ることができるので、大部分の密封油は常に、真空タンク内において処理されていることになり、したがつて、油の清浄度は高い。さらに、差圧弁出口の油圧を大気圧以上にとることができるので、真空タンク内のスプレーの効果を高めることができ、真空処理装置としての能率は、密封油直送方式と比較して、相当に高いものである。

ここで問題となることは、この差圧弁の感度はでき得る限り高いことが望ましいのであるが、感度を上げると、ハンチングを生ずるという点である。弁の感度と油管系の時定数との関係は、16 図の如くであるが、この図において、 $V_0$  は感度、 $T_L$  はデッドタイム、 $T_Z$  は遅れを表わすが、この弁を、オーバードampingの状態で使用するには、 $V_0$  と  $T_L/T_Z$  とが、適当なる関係になければならない。感度を高めるためには、 $T_L/T_Z$  を小にする。すなわち、 $T_L$  を小とするかあるいは  $T_Z$  を大としないければならない。しかしながら、 $T_L$  を小さくすることは、油管系が決つてゐるためにできないことであるので、したがつて、 $T_Z$  を大きくしなければならない。これは、



17 図 差圧調整弁  
Fig. 17. Seal oil differential pressure regulator.



18 図 油面警報器  
Fig. 18. Oil level alarm.

差圧弁の上部ベローズに加わる油圧を、途中において十分に絞り、このところで、油圧変化の吸収を大きくすればよいことになる。この状態において、差圧弁は非常に安定に、しかも感度良く作動せしめることができる。

#### ウ. 油面警報器

油面警報器は2種あり、一つは、ブラケット泡取箱内に設けられる高油面警報器であり、他の一つは、油均し箱に設けられた低油面警報器である。

いずれも、構造は全く同一であり、小型フロートの上下動によつて、水銀スイッチを側かせるものであつて、外気との遮断は、特別に造られたベローズを境として、密封されているので、動作確実である。

その外観を18図に示す。

#### エ. 低差圧警報器

密封油圧とガス圧力との差が、5 PSI に下つたときに、警報を発するものであつて、その警報器は2個のベローズを有し、これにガス圧力および油圧が加わる。ベローズは互に連結され、連結軸は圧力差によつて上下に動く。この連結軸の一端に水銀スイッチが設けられてあり、警報接点となる。ベローズ内部のスプリングを調節することによつて、設定点を規定の上下に変化できる構造となつている。

#### オ. 真空ポンプ

真空タンク内を一定真空度に保ち、タンク内の油と分離したガスや蒸汽を引出すために、設けられたものである。

これは KS-80 型を改造し、耐圧防爆型としたものであつて、 $14 \text{ kg/cm}^2$  の圧力試験を行つてある。真空タンクより引出された排気には、油、蒸汽、水分、水素ガスおよび空気を含み、水素純度は、爆発限度内にあることがあるので、排気を導き出した油分離器もまた、防爆構造となつていて、屋外へ排出される。

## 4. む す び

以上が、今回、築上発電所向水素ガスおよび密封油制御機器の概略であるが、まへがきにおいても述べたように、これらの機器は構造簡単にして故障絶無、すなわち、取扱容易を主眼とし、引火爆発に対しては細心の注意をもつて設計したものであつて、接点の大部分は水銀スイッチを採用し、すべての機器にガス抜きを設けてある。

これらは、去る 27 年 10 月より長時日に亘つて、一品々々の入念な予備試験の後に、28 年 3 月 55,000 kW 水素冷却発電機本体と共に、2 週間の総合的試験を行い、優秀な成績を挙げることができたのである。

われわれ両社の技術を総合して完成したこれらの機器はその性能において、決して、外国品に劣るところはないと確信しているのであるが、今後はさらに材料の研究と、一層強固な両社の技術的結合によつて、機器の小型化、簡単化を目標として、改良に努力したいと思つている次第である。



# 画期的な鉄道輸送について

長崎製作所

山田 不知人<sup>\*</sup>・新井 興美<sup>\*\*</sup>

## Epoch-Making Railway Transportation

Fujito YAMADA・Okiyoshi ARAI

Nagasaki Works

On receiving an order for 55,000 kW turbine generators to be delivered to the Chikujō and the Ainoura Power Stations, the first problem to be taken up together with the design of machines was whether the rotors should be transported by land or by water. Although it was evident that to send them by rail was more advantageous viewed from various points, but the size and weight of the rotor prohibited this means as long as the old practice and the limitation in the National Railway was concerned. Then, a new freight car and special equipment were made to capable of sending them overland, which is an epoch-making progress in the transportation by rail.

### 1. ま え が き

国策として諸産業の根源である電源の開発が促進され、漸く軌道に乗りつつある折柄、電機器製造業者としても一日も早く受注品を完成納入し、開発の促進に微力を尽したいと念願致するものであつて、すなわち機器の製作に当つては、品質の向上、納期の短縮、価格の低廉に絶えざる努力をなしつつあり、また輸送の点については「安全輸送」「輸送期間の短縮」「経費節減」の三要素に向つて懸命に研究努力していたが、その一例として先般納入致した築上発電所向 55,000 kW 固定子の場合も、上記輸送の三要素を十分満足せしめたので、その経過を簡単に順次述べることにしたい。

### 2. 海運による場合の検討

固定子の大きさは約高さ 4.1 m、巾 3.6 m、長さ 6.1 m で重量約 100 トンあり長崎港における船積は 150 トンのフローティングクレーンにて至極安全にできるが宇島における陸揚が現地の状況調査の結果淺瀬、護岸工事等多額の費用と日数を要しなお天候に支配されるとともに潮の満干により容易でないことが判明した。

### 3. 陸運による場合の有利

鉄道輸送にする場合を考えるにトンネル、路線、諸施

設に支障なく輸送できるとすれば安全輸送、期間の短縮、経費の節減は期して待つべきものがある。

#### ア. 路線の調査

門司鉄道当局の積極的な協力により築上発電所までのトンネル、路線、各駅のプラットフォーム諸施設の詳細なる調査ができた。

#### イ. 国鉄シキ 100 号を使用する場合の検討

シキ 100 号は 4 トラック 10 軸荷重 80 トンでかつ荷受台の平面長さ 5.5 m でたとえ 100 トンを許容するとしても荷受台の構造上荷積が高くなりトンネルを通らない。ビーム式の荷受台を新設計しても重量の点で軸に加わる荷重が国鉄規定内に入らないなど、各方面から制限され輸送不可能であることが判明した。

#### ウ. 輸送方法の検討

かくて一時は鉄道輸送は不可能かと考えられたが、種々計画を練り検討するとともに国鉄本庁ならびに門司鉄道局各位の積極的な指導とご援助により、4 トラック 12 軸とし特殊な荷受方法にて大体の方針が決定し輸送可能の見通しができた。

#### エ. シキ 120 号の製作決定

ここにおいて当社上司の指示によりいよいよ大容量変圧器の輸送にも併用できる荷重 100 トンの大物貨車の製作と、しかもトンネル、路線、諸施設に支障なく輸送できる特殊機構を有する荷受台を考慮したシキ 120 号が

製作されることとなり、新三菱重工三原車両へその設計製作を依頼することとなつた。

#### オ. 模擬車運転

門司鉄道局の絶大なご協力を得、前広に模擬車を運行しトンネル、路線、諸施設の関係を調査した結果支障なき見通しが付き、一応の自信を得た。

#### カ. シキ 120 号ならびに特殊荷受機構完成

三原車両関係各位におかれても、わが国最初の貨車と特殊荷受機構のものであり、事の重大性を考慮され細心の研究と努力により見事に完成された。

#### キ. 荷受構造物各部のワイヤストレーンゲージによる応力測定

実物輸送の状態として機構各部の応力を測定した結果設計数値とほぼ同数値で十分安全性を有することが実証された。なお設計は 120 トン荷重までできるように計画されている。

#### ク. 本輸送ならびに荷卸

輸送も運行中震動計を設置し、測定しながら支障なく築上発電所に予定時間に無事到着、荷卸操作も予定どおり完了、かくて所期の安全輸送、輸送期間の短縮に成功した。

### 4. む す び

シキ 120 号は現在においては、大物電機器の輸送に偉力を発揮し、当社の輸送陣を強化している次第で、このシキ 120 号誕生を一転期として色々創意工夫された輸送技術が進展することを熱望すると同時に、わが国鉄道輸送に躍進の第一歩を印したことはご同慶に存すると共に、国鉄ご当局の涙ぐましい積極的なご協力と、日本通運ならびに、三原車両関係各位の絶大なご支援の賜であると厚く感謝の意を表する次第である。



55,000 kW 固定子輸送の実況  
55,000 kW rotor in transit.

# 大型タービン発電機

## ロータシャフトの製造について

株式会社日本製鋼所室蘭製作所

谷口 豊吉\*・阪部 喜代三

### Manufacture of Rotor Shafts for Large-Sized Turbine Generators

Toyokichi TANIGUCHI・Kiyozo SAKABE

The Japan Steel Works., Ltd.

Rotor shafts for large sized turbine generators are counted among the products at Muroran Works. To turn out such a gigantic work numerous difficulties must be overcome, for various factors such as chemical composition, making of ingot, heat treatment and forging process have influence on the success in forging, besides the thorough inspection of every procedure. The shaft for 55,000 kW machine was proved to be of excellent quality with the present testing facilities, but uniniformity of mechanical characteristics, microstructure, defects in the center hole and the relieving of internal stress concerning the inside of a rotor body have not been fully studied.

#### 1. ま え が き

近時火力発電における発電連絡の発達，発電施設製作の技術的進歩につれて，発電を集中化し単機容量を増加する傾向に顕著なものがある。タービン発電機に在つても，1884年に1,800 rpm, 7.5 kW タービン直結発電機が創られて以来，今日では1,800 rpm 200,000 kW またさらに3,600 rpm では200,000 kW というような大容量機も造られるようになった。

とくに2極3,600 rpm 機の大容量化は最近20年間にし遂げられたもので，従前は大容量機は専ら1,800 rpm 機によつていたのである。もちろん1,800 rpm の発電機と3,600 rpm の発電機を比較すれば，後者は諸種の制約を受け前者に比し必ずしも秀れてはいないが，タービン側からは高温高压蒸汽を使用しこれを最高速度に駆使するのが絶体有利であるため，発電所全体の効率を向上せしめるには発電機側においても3,600 rpm 機

に移行せざるを得なかつたのである。

しかしてこのことは通風冷却法，絶縁材料，界磁線輪あるいは磁性材料の進歩改良に負うものであるが，とくに大きな影響を与えたものとしてタービン発電機ロータシャフトの発達<sup>(1-3)</sup>—珪素鋼板の打ち抜き鉄心を積層せるもの，あるいは多角形軸に凸極を植え込んだものから現在の大型一体鍛鋼品の採用まで—が指摘されよう。

高速回転を支える一体鍛鋼の大型発電機ロータシャフトは，タービンにおけるロータと共に高級特殊鋼の製造技術の進歩と，大型鍛圧機の出現，鍛造，熱処理技術の発達により初めて完成したものであるが，近年は超音波探傷の如き内部欠陥の探索技術の発達に刺激され製鋼技術も格段の進歩を遂げたので製品の信頼度は大いに向上せしめられた。しかしながら鍛鋼品中最も製造困難なものとして，最高度の製造技術を要するものであることは現在も変わりなく，またその製造設備も大型鍛圧機を必須条件とするため製造会社の数は少く世界を通覧して

も数社に過ぎない。わが国においては筆者の所属する日本製鋼所室蘭製作所がその製作を担当しているのであるが、以下その製造の概略を紹介する。

## 2. タービン発電機ロータシャフト製造の難点

タービン発電機ロータシャフトの特異性あるいは製造の困難なことについては、すでに一、二の文献<sup>(1-3)</sup>において紹介されているが、このタービン発電機ロータシャフトは誘導電動機、凸極交流回転機あるいは直流回転機のロータと異つて、高速度回転の苛酷な負荷に耐えるために励磁すべき鉄心部と、回転を支える軸とを別個の構造部分となし得ず一体の鍛鋼より得ているのであつて、鉄心部となるべき径の最も大きい部分に軸方向の深い溝を切り込み、界磁線輪を格納するようになっている。

この導体溝の深さは大凡径の 20~25 % で、この深さは直接励磁力—出力を左右するから、より深いものが望まれるのであるが、このために高速度に回転する場合界磁線輪の荷重をも支えて歯および鉄心部の応力は極めて大きなものになる。1 図に 50,000 kW 程度の大型タービン発電機ロータシャフトの大凡の形状と鉄心部の運転中における応力分布を図示したが、同図にて明かなように導体溝底に相当する歯の根元においては歯自体の重量

と界磁線輪の全荷重を負担せざるを得ぬから、この部分に最大半径応力を生じ、切線方向応力は中心孔周縁において最大となる。中心孔は単にロータシャフトに内包せられる欠陥を検査するために穿孔せられるもので、この部分は塑性変形を起して応力の変形が見られるから、条件によつては多少の欠陥は許されるが、歯の根元では応力を移譲せしめる部分がないから如何なる欠陥の存在も許されない。

単一鋼塊より仕上げる場合、鋼塊は外殻より内層に入るに従つて漸増し、不純物の凝集層—偏析層を含めて気泡、砂、亀裂等の諸欠陥を内蔵しているので強力な鍛造を行つてもなおかつ、内部は外層に比して脆弱であるから通常鍛鋼品の使用に当つてはでき得る限り内層を外層に表わさぬように努めるのであるが、タービン発電機ロータシャフトの場合は上述の如く鋼材の内層部に最大負荷を与えて使用する訳であり鍛鋼品として最も不利な苛酷な条件に在るということになるのである。

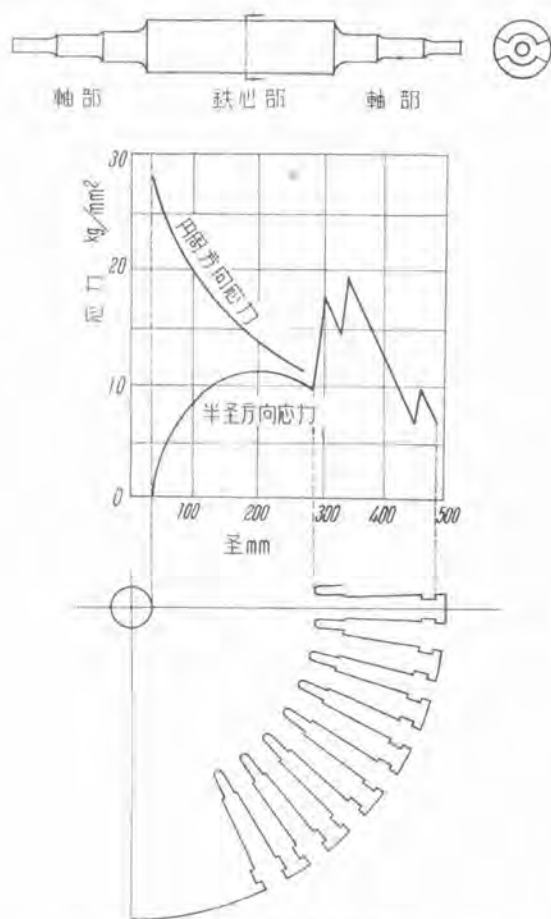
10,000~20,000 kW のタービン発電機ロータシャフトの鍛造には 30~50 トン鋼塊を、50,000~60,000 kW あるいは 80,000~100,000 kW のタービン発電機ロータシャフトの製造にはそれぞれ 70~80 トン、80~120 トン鋼塊を必要とするが鋼塊製造上の困難は鋼塊が大きくなるに従つて激増するものであり、鍛造、熱処理効果も大型になる程内部迄十分に及び難くなるから大型タービン発電機ロータシャフトの製造は著しく不利となる。もちろん鍛鋼として砲身、合成化学の高圧触媒筒あるいは圧延粗ロール等、重量においてロータシャフトに数倍するものも製造できるが、前二者は鋼塊中心部の欠陥の多い部分を予め削り取つて除去し、後者は鋼塊外周を実用面として使用するのであつて、内部欠陥の存在はほとんど問題にならぬものであるから根本的に難易の差は比較にならぬのである。

したがつて多年の経験と技術を有する製鋼業者に在つても無疵、無欠陥の状態で大タービン発電機ロータシャフトを造り上げることは至難の事柄であるから、反面伏在する欠陥をあらゆる手段を用いて探索し、その性情を明らかにすると共に欠陥の分布を判断し実際の使用における安全性を推断して、使用に対する可否を決定する技術もまたゆるがせにできず重要になるのである。

## 3. タービン発電機ロータシャフトの材質

1930 年頃迄は製鋼ならびに鍛造技術も十分でなく、同時にタービン発電機自体の機構上の問題もあつて、炭素鋼製で十分とされていたが、現在はすべてニッケル、クロム、モリブデンあるいはバナジウム等の合金元素を添加した特殊鋼を使用しており、しかもでき得る限り均一な高度の機械的特性を発揮せしめるため、添加元素も単独に使用することなく 2 ないし 3 種のものを同時に添加せしめ、その効果を相乗せしめているのである。

われわれも従前は炭素鋼に引継いで 2.5~3.0 % 単純



1 図 鉄心部の応力分布図

Fig. 1. Stress distribution in rotor body.



1 表 タービン発電機ロータシャフトの材質および化学成分

材 質	化 学 成 分 %							備 考	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	強度* kg/mm <sup>2</sup>	熱処理
1 Ni-Cr-Mo 鋼	25~35	0.15~0.35	0.4~0.7	1.8 以上	0.6~0.9	0.4 以上	—	50	油焼入, 焼戻
2 Ni-Cr-Mo-V 鋼	"	"	"	2.3 以上	"	"	0.10 以下	55 50	油焼入, 焼戻 焼準, 焼戻
3 Ni-Mo-V 鋼	"	"	0.4~0.9	3.0 以上	0.2 以下	"	"	55	焼準, 焼戻

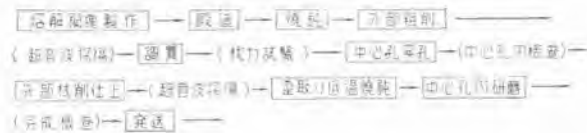
\* 強度は 0.2% 永久伸における降伏強度を示す。

2 表 材質別磁気特性の一例

材 質	熱処理	成 分 %							初帯 磁率	最大 帯磁率	磁化の 強さ	残留 磁化	抗磁力
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Xo	Xmax	Is*	Ir	He
1 Ni-Cr-Mo 鋼	油焼入 焼戻	0.32	0.25	0.42	1.49	1.01	0.44	—	5.5	54.6	1572	1273	13.1
2 Ni-Cr-Mo-V 鋼	焼準 焼戻	0.34	0.35	0.50	2.81	0.51	0.36	0.08	10.1	55.5	1576	1076	10.8
3 Ni-Mo-V 鋼	"	0.30	0.35	0.42	3.36	0.17	0.45	0.14	9.1	110.9	1615	1220	6.1

\* Heff=1.100 Oe

3 表 タービン発電機ロータシャフトの製造工程



ニッケル鋼を好んで使用したが最近の大型 3,600 rpm タービン発電機ロータシャフトに対しては、要求せられる諸特性を満足せしめるために現在 1 表に掲げた如き 3 種の材質のものを使用している。

表中 1 の Ni-Ca-Mo 鋼は比較的小型のものに、2, 3 の Ni-Cr-Mo-V 鋼および Ni-Mo-V 鋼は大型のロータシャフトに用いるが、大型になるに従つて熱処理応力に因る内部亀裂を発生したり、完成後もなお多大の応力を残留して導体溝の加工あるいは長期の使用によつて変形を生ずる懸念を生ずるので、熱処理も強力な油焼入を避け、焼準をなして材料自体の自硬性によつて内外の均一な強度を得きしめている。

また従来これらロータシャフトは機械的特性にのみ重点が注がれてきたのに反して、最近では磁気的特性についても重視すべきことが強調<sup>(2)</sup>せられているのが上記鋼種の磁気特性の一例を示すと 2 表のとおりで、高い磁束密度を要するものに十分なものと考ええる。

今回三菱電機長崎製作所において製作せられた築上、相ノ浦発電所の 3,600 rpm, 55,000 kW 水素冷却発電機のロータシャフトは Ni-Mo-V 鋼を使用して最良の条件の下で製造せられたものである。

4 表 タービン発電機ロータシャフト溶解材料配合比

装入材料	鋳 鉄	精製鋼	鍛鋼屑	削 屑
重量%	35 %	35 %	25 %	5 %

#### 4. タービン発電機ロータシャフトの製造

タービン発電機の製作設計からロータシャフトの仕様が明かにせられると、これによつて材質が決定され製鋼工場における製造計画がたてられる。現在われわれが実施している製造工程を順に列記すれば 3 表のとおりである。上記工程順に実際製造の詳細を若干述べることにする。

##### ア. 溶解、造塊

製鋼操業に使用せられる溶解炉には各種各様のものがあるが大型特殊鋼材の溶解はほとんど酸性平炉に限られている。この炉による精錬過程の理論は完全に解明されていないが<sup>(1)</sup>、高温において長時間緩和な精錬を行い得るので、高級鋼の溶解に最も適しているのである。しかしながら珪酸塩鋼滓の下で精錬が行われるので、塩基性炉による精錬と異つて溶鋼中の燐、硫黄の除去はできぬから、操業に当つてはこれら不純物の少い純粋な原材料を使用しなければならず、精錬時間もまた塩基性炉における時間の 2~3 倍を要するものである。

##### 装入材料：

タービン発電機ロータシャフトの製造に当つて現在実施している溶解材料の配合を 4 表に示したが、これらはすべて純度の高い特殊なものが選択される。したがつて鉄鉄は普通の製鋼用鉄鉄は使用し得ず、良質の低燐鉄鉄

を使用するが、この低磷鉄は戦前は専ら本溪湖あるいは兼二浦鉄を使用していたものであるが、戦後は入手難からスウェーデン鉄および赤鉄鉱あるいは砂鉄を直接電気炉で還元した国内産電気鉄を用いており、磷、硫黄含有量が両者の和で 0.025 % 以下のもののみを用いる。鋼屑もまた履歴の明かな鍛鋼屑、削屑によるが、このうち精製鋼と称するものは一度塩基性平炉または電気炉によつて前以つて酸性平炉の溶解材料として精製したもので、その成分は炭素 0.2~0.5 %、珪素 0.1 % 以下、満俺 0.2~0.3 %、磷、硫黄は両者の和で 0.025 % 以下のものである。4 表の配合比は良質の鋼屑の入手困難な時代にあつても実施し得るもので改変されることはない。

その他附加剤の詳細については省略するが同様の配慮が為されることは論を俟たない。

### 精錬；

炉内に装入した材料が溶融し、鋼浴の温度が十分に上昇すれば鉄鉱石を投入して溶鋼中の炭素をまず  $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{CO} + \text{Fe}$  の化学反応によつて逐次低下せしめる。この際発生した CO ガスは鋼浴を適度に沸騰攪拌し鋼浴中の含有ガス体、非金属介在物等の不純物を鋼滓層に浮上除去し精錬が進行する。鋼浴中の炭素量が適当に低下すれば鉄鉱石の代りに石灰石を投入して鋼滓を調整し、さらに鉄鉄および満俺を添加して脱酸を行う傍ら鋼浴中に懸濁している微細な砂を満俺珪酸塩の形で浮上除去する。精錬が終れば合金鉄を添加し珪素その他の最終脱酸剤を投入して出鋼するのである。

この操業の各段階は普通、溶落期一昇熱期一鉄石投入期一石灰石投入期一強制脱酸、差物期一出鋼期といつて區別されるものであるが、特殊鋼材の性質は溶解作業の良否によつて決定され、各種の成分偏析、非金属介在物の集合に因る砂疵あるいは白点等の発生を左右するものであるから、溶解の各段階においては熟練と経験から独特の手段が採られ、入念に行われるのである。

本邦における酸性平炉操業法は、初めて呉海軍工廠に高級鋼の製鋼技術が導入せられて以来、前者と日本製鋼所において兵器用高級鋼の溶製を中心として育成してきたものであるが、上記の溶解法は石炭法と称せられ英国製鋼技術の伝統を踏襲したものである。

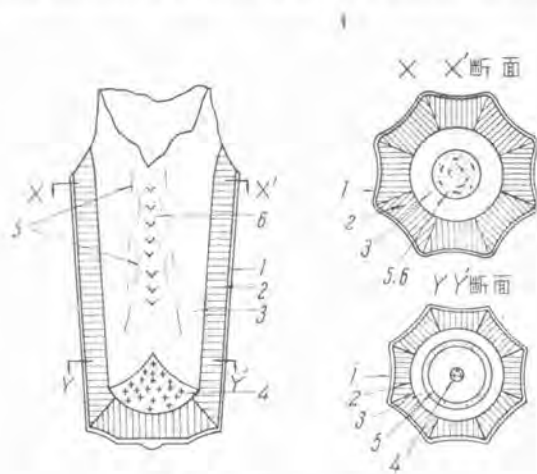
### 造塊；

精錬終了後の出鋼より鑄型へ溶鋼を注入して鋼塊を造る作業が造塊である。出鋼した溶鋼は一度取鍋に受け、出鋼の際溶鋼中に巻き込まれた微粒状の鋼滓あるいは取鍋煉瓦からの砂が完全に浮上する迄十分長時間鎮静せしめた後、上広がり八角形の鑄型の中へ上方より注ぎ込まれるが、この際溶鋼の注入速度を一定にし、流束を齊々ならしめるために普通は懸堰と称する樋を介して間接に鑄込まれる。鑄込温度、鑄込速度は直接に鋼塊の良否を決定するものであるが、鑄型の形状もまた健全鋼塊の製造上極めて重大な因子を占むるのであつて、各製鋼会社の経験、伝統から独特なものが使用されるが、大

型タービン発電機ロータシャフト用にはとくにこれに適した形状に設計したものを使用している。換言すれば鋼塊の形状によつて鑄込速度、時間が調節されともい得る。

かく注入された溶鋼は鑄型によつて熱を吸奪され、さらに鑄型の壁を通して輻射対流により放熱しながら徐々に外周より凝固する。したがつて鋼塊を切断してその断面を観察すれば、最外層に鑄型に溶鋼が接触して急速に過冷せしめられたために生じた微細な結晶粒よりなる比較的薄いチル層があり、これに続いて鑄型壁に垂直に発達した大きな柱状晶が見られる。さらにこれに接して特定の方向性を有しない大きな樹枝状の自由晶、鋼塊中芯部には細い余り判然としない樹枝状晶があつて、鑄型内における凝固速度の相異によるかなり鮮明な結晶の相異が認められる。また鋼塊底部には凝固が鑄型の周縁より進行しつつある時に鋼塊中芯部において生じた結晶核が、その近傍の母液温度が未だ高過ぎるために十分に發育し得ず、微細なままに沈降累積した円錐状の沈澱品の領域が見られる。

またこの凝固過程に従つて、それぞれの晶間とくに細い樹枝状晶間にいわゆる輪状ゴーストおよび V 状ゴーストと称せられる鋼塊偏析の条線が配列されているのを認める。2 図に大型鋼塊の断面を図解したが、これらの規則正しい晶形、偏析群の成分および強さの程度については多くの文献<sup>(6-7)</sup>があるが、鋼塊の凝固の進行は常に鑄型の壁を通して放熱せられることによつて鑄型周縁部と中央部の温度が均等化され、順次凝固温度に達して中心部へ漸進するのであるから、凝固の本質として最初に析出結晶せるものは最も純粋なものであるが、凝固の進行に従つて不斷に母液の不純物を富化し、さらに母液の温度降下によつて平衡の安定度を失ひ、溶解度の低下から不純物、非金属介在物、ガス体を排出する。このことはとくに凝固の進行面に接して押し進められる母液層の不純物の濃度勾配の大きい部分において行われ、析出した不純物自体の上昇傾向と気泡の浮上に助長されて強い



2 図 鋼塊縦断面の図解

Fig. 2. View section of steel ingot.

条線となつて偏析が現われるのである。一度偏析条線を析出すると一時母液を食化するから再び富化する迄ある時間凝固の進行を隔いて析出が繰り返されるのである。この偏析は鋼塊を横断すると輪状に存在しているので輪状ゴーストといわれるのである。さらに鋼塊の中心部ではある程度迄凝固が進行すると、凝固の温度勾配は減少し凝固熱も加つて鋼塊内部の熱変化は平均化するようになって、各点において一時に析出凝固せんとするが、同時に粘調になつた溶鋼は凝固の収縮によつて凝集して沈むから、偏析は懸涯状になつて鋼塊中心部に残るのであつて、これが V 状ゴーストである。

3 図に鋼塊断面のサルファープリントを示したが、これらの偏析は主として溶鋼成分中の燐、硫黄およびその化合物、珪酸塩、過燐酸化物等の酸化物系非金属介在物ならびに酸素、窒素、水素等のガス体によるものであるが、このようにして鋼塊偏析が行われると同時に溶鋼は凝固の際凝集して著るしく容積を減ずるものであるから、最後に凝固する鋼塊の中心部には溶鋼の不足を生じて空洞を生ずる。また凝固後も冷却の進行に従い容積収縮をなすからなお二次的な窩を生ずる。したがつて鋼塊頂部には押湯と称する湯溜りを附して凝固の収縮につれて生ずる空洞へ絶えず溶鋼を補給して流し込むと同時に、押湯の溶鋼自体の重量によつて加圧し、二次的な収縮窩の発生を抑制する手段を採るのである。この押湯は鋼塊が完全に凝固する迄、溶鋼を十分に流動性のある状態に保たねばその機能を發揮しないから普通はこの部分のみ耐火煉瓦を裏張りして断熱状態に保つように心掛け、とくに大型鋼塊の場合は特殊の保温材を使用したり、ガス、電弧等によつて加熱保温に努めるのが普通である。大型ロータシャフト用鋼塊ではたとえ収縮空洞が生じなくとも、大型鋼塊の特長として鋼塊芯部は凝固が各点において同時に開始するため、各結晶間に微細な空隙あるいは亀裂を多数発生するから鋼塊総体重量の約 25% 程度の大きな押湯を附して加圧効果を大きくし、保温もまた最も効果の確実な電弧加熱法を使用しているのである。

このような鋼塊内部の収縮窩、偏析ならびに附随する諸欠陥は必然的に発生するものであるが、鋼塊が大きくなるに従つて、また添加合金成分量が増加する程急激にその程度を増加し重大な障害の発生頻度を高くし、これらの欠陥の大部分は爾後の鍛造、熱処理等の工程においても改善されることなく残存するのが普通であるから大型鍛鋼品にあつてはとくに鋼塊の良否が重要視される訳である。

上記諸欠陥は溶鋼の組成、含有ガス量、流動性および鑄込温度、速度、鋼塊の形状、押湯量等に関連するものであるから十分なる精錬を実施するのはもちろんのことであるが他方人為的に欠陥を軽減<sup>(8, 9)</sup>せしめるため、アルミニウムあるいはチタニウムを添加して偏析を散乱稀薄化せしめさらに凝固進行中の鋼塊を加圧したり、ある

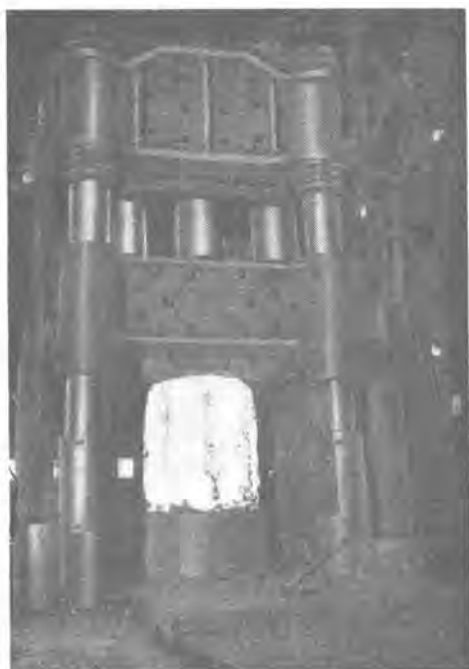
いは逆に減圧して収縮窩、気泡等の発生とそれに伴う偏析の軽減を図り、さらにまた凝固中の鋼塊に振動や回転を与えるか、もしくは鑄型の外側を水冷して偏析成分の析出を阻止することなども企だてられたこともあるがいずれも大型鋼塊への適用は至難であるため現在実施されず、専ら鑄込条件と鋼塊形状から良鋼塊を得ることに重点を注いでいるのである。すなわち高温の溶鋼が高速で鑄込まれた時は凝固に至る迄の容積減少、ガス溶解度減少の絶対値を増加すると共に凝固に要する時間を延長し、偏析、気泡、収縮窩あるいは亀裂を増加するから高温の鑄込は極力回避する。しかし低温の鑄込は溶鋼の流動性を劣化せしめるから、溶鋼より発生した気泡や注湯の際捲き込まれた気泡の脱出や、砂その他の非金属介在物の浮上は困難となり、これらの残存による欠陥の発生傾向の増加することは阻めず、極端な場合は押湯の効果すら減殺するようなことを生ずるからこの相反する微妙な関係の調整<sup>(9)</sup>が重要視されるのである。

また鑄込温度、速度以外に鋼塊の形状<sup>(10, 11)</sup>も大きな影響を有するから、鑄型の壁の傾斜や断面形状について大きな考慮が払われる。大型タービン発電機ロータシャフトに振当てられる鋼塊は、とくに高さが低く径の太いしかも傾斜の大きな特殊なものが用いられる。このことは細長い鋼塊の場合は鑄型の壁よりの吸、放熱が鋼塊の中心部迄速に行われ、凝固が速いから偏析の程度は軽いが中心軸附近に集中する。また凝固はほとんど鑄型の側壁よりの冷却に限られるため、たとえ傾斜を大きくしても押湯の効果は不完全になり易く深い収縮窩を残すことが多い。これに反して傾斜の強い太い鋼塊は輪状偏析は

3 図 鋼塊縦断面の  
サルファープリント

Fig. 3. Sulphur printing of longitudinal section of steel ingot.





4 図 10,000 トンプレスによる据込状況

Fig. 4. Pressing of rotor ingot with 10,000 ton hydraulic press.

拡がり V 状偏析の程度も増加するが、径が大きい為鋳型壁よりの凝固に、比較的径の細い鋼塊底部よりの垂直方向の凝固が加つて、鋼塊の下方より漸次上方に向つて凝固が進行するから偏析物を鋼塊頂部へ堰上ぐると同時に押湯の目的も十分に達せられて中芯部も健全な鋼塊が得られるからなのである。

したがって鋼塊の中芯部を削り取つて使用するような砲身、高圧筒には前者の細長い鋼塊が用いられるのであつて、両鋼塊を比較する場合面白い対称が発見されよう。

#### 4. 鍛造

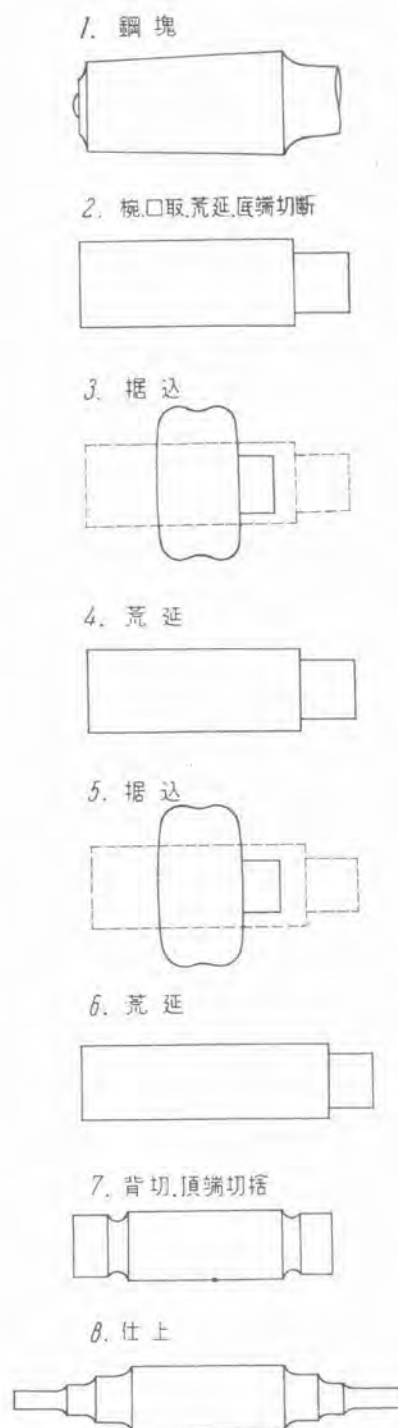
鍛造加工は鋼塊を十分長時間鍛造温度に均熱した後 10,000 トン電動水圧機によつて行われる。

すでに述べた如くタービン発電機の大容量化に従ひ材料の強度、安全度に対する要求度も高められ、より高級な特殊鋼が必要となつた。鍛造作業もただ外形を整えるだけの目的ならば現在の 50,000~60,000 kW 程度のロータシャフトに対しても必ずしも 10,000 トンの如き大型プレスは要しないが、鍛造効果を鋼塊内部迄十分に浸徹せしめ鋼塊内層を改善して機械的強度を高めると共に均等化せしめるためには大型プレスは欠くべからざるものである。

しかして鍛鋼品の機械的性質は主として据込鍛造によつて改善せられるものと考えられており、大型プレスの発達経緯<sup>(12)</sup>もこの点にあるから室蘭における鍛造の特長も 10,000 トンプレスを駆使して十分余力のある据込、延べ鍛造を繰り返すことにある。

タービン発電機ロータシャフトの鍛造は普通 8~9 工程で仕上げられるが、鍛造作業の理解に便なるよう、築上発電所向 55,000 kW 発電機のロータシャフトの実

大型タービン発電機ロータシャフトの製造について・谷口・阪部

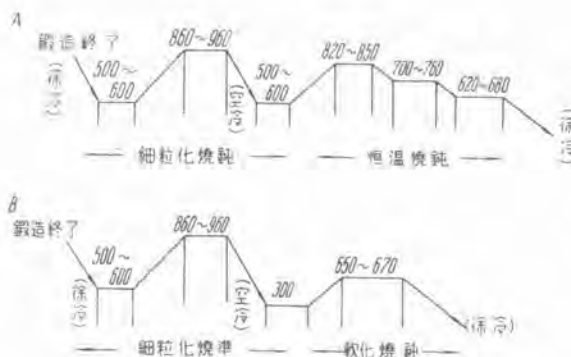


5 図 ロータシャフト鍛造工程図

Fig. 5. Forging process.

施工程を略記図解した。5 図中荒延鍛造後偏析あるいは砂等の介在物の多い鋼塊頂端および底端は切り捨てられるが、その切捨量はロータシャフトの場合多少なりともこれらによる欠陥が残存しないよう、他の鍛鋼品よりは多く頂端側において 35% 以上、底端側において 10% を超える。また据込の工程は同図より窺れるようにロータシャフトに対しては必ず 2 回以上、強力かつ入念に繰り返されるのであつて、この強力な据込は大型プレスのみが為し得る操作であつて機械的強度改善の決定的要素なのである。





6 図 焼 鈍 線 図  
Fig. 6. Annealing diagram.

ここで附記すべきは鋼塊の取扱いで、鋳型に溶鋼が鋳込まれてから鍛造工程を経て焼鈍が終了する迄、凝固および加熱、冷却の熱応力を増加せしめることのないよう、また白点の発生しないように細心の留意がなされるのであつて、常に赤熱状態に保ち冷却されることはないのである。この赤熱状態に保つたままの取扱いを総称して赤材扱いと呼ぶが、この取扱いは常に厳密な直視の下で行われている。

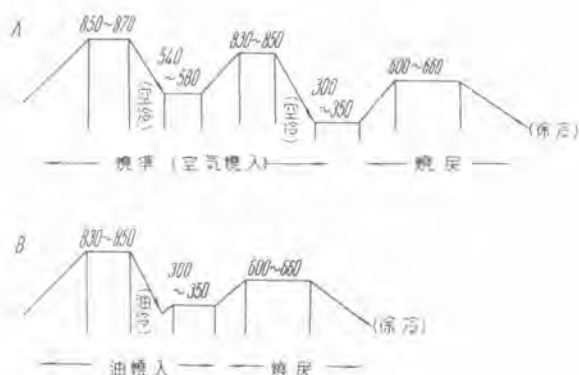
#### ウ. 熱処理

熱処理は焼鈍と調質に分ち得る。焼鈍は鍛造後の内部の成分、組織の均一化、結晶粒度の調整、さらに鍛造による内部応力の除去と共に爾後の機削を容易ならしめるよう軟化せしめることを目的とするもので、通常鋼を変態点以上の温度より除冷する操業である。

現在タービン発電機ロータシャフトに実施している焼鈍線図を 6 図に掲げたが、A, B いずれを選択するかはその前後の製造工程を勘案して決定される。またこの線図中の各保持時間はロータシャフトの径の大きさならびに材質によつて定まる。炉中の加熱冷却速度も同様であるが普通それぞれ 20°C/h, 10°C/h に押えられる。

ここで留意すべきはタービン発電機ロータシャフトの如き大型特殊鍛鋼品の熱処理に当つては常に白点防止に考慮を払わねばならぬことで、この白点と称する毛割状の欠陥は現在の所、水素と各種内応力の協働<sup>(13,14)</sup>によるものと考えるのが妥当なようであるから、焼鈍に当つては拡散によつて鋼材内部の水素の放出を図ると共に、変態応力あるいは冷却による熱応力その他の応力の減少について慎重にまた周到に配慮されている。すなわち 7 図 A は恒温焼鈍と称し、A<sub>1</sub> 変態区間の一定温度に階段的に保持して偏析の甚しい大型鍛鋼品の内外を短時間に確実に軟化せしめる方法であり、B は連続冷却とその後の変態終了時間の最も短い温度で恒温変態に終了せしめて得た変態生成物を A<sub>1</sub> 変態点直下に保つて炭化物と球状に析出せしめて軟化を図るものであるが、同時にこれらの各温度は最も水素の拡散し易い、白点防止に有効な温度<sup>(15, 16)</sup>が採られているのである。

この焼鈍工程を完了するのにおよそ 350~380 時間(約半カ月)の長時間を要し、鋼塊鋳込から連続赤材で取扱れ

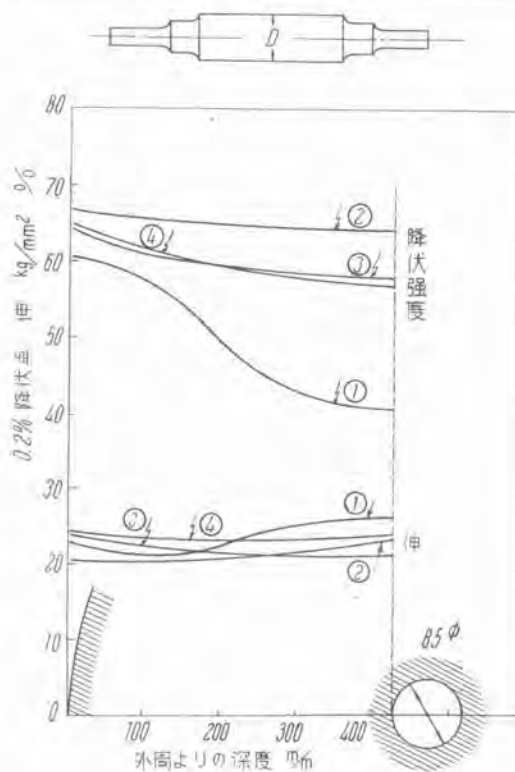


7 図 調 質 線 図  
Fig. 7. Heat-refining diagram.

て来たものがここで初めて室温に冷却されるのである。したがつて鋳込より通算すれば 1 月ないし 2 箇月半もの間、赤熱状態を保つたまま各工程を経て来るのであつて、タービン発電機ロータシャフトの製造が如何に容易ならざるものかがこの点からも窺れよう。

焼鈍後外周を機削粗仕上の後調質を行う。この操作は材料に最も使用状態に適した機械的特性を附与せしめる

	C	Ni	Cr	Mo	V	熱 処 理
1	0.34	1.45	1.05	0.41	1	850°C油冷 680°C油冷
2	0.35	2.81	0.51	0.36	0.08	850°C油冷 630°C空冷
3	"	"	"	"	"	850°C空冷 640°C油冷
4	0.32	3.33	0.13	0.51	0.15	"



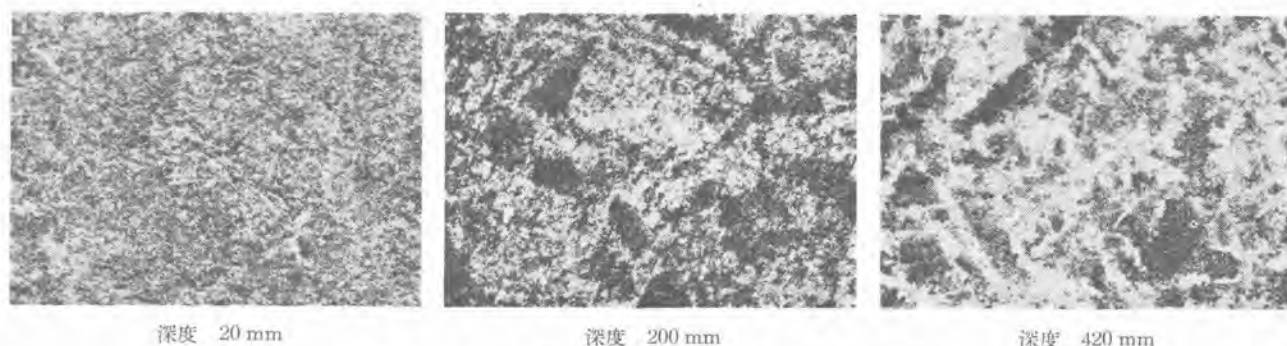
8 図 鉄心部材力曲線 (半径方向試験片による)  
Fig. 8. Mechanical test data of rotor body.  
(by radial test specimens)

ためのものであるが普通変態温度以上から急冷し、焼入硬化せしめ後適当に焼戻すことによつて得られる。ロータシャフトの場合、焼入は仕様によつて要求される機械的強度と材質、形状の大小から油焼入、空気焼入(焼準)のいずれかが選択される。油焼入は余り大型のものでは油冷中に大きな焼入応力を発生して焼割れを生ずる可能性が強く、さらに焼戻後もなおかなりの焼入応力を残留せしめ、導体溝を開鑿する際や、長期の使用中に變形する懼れがあるため、主に 20,000 kW 以下の中小型タービン発電機ロータシャフトにのみ採用し、これ以上の大型のものには材質そのものを自硬性の強いものに変更して焼準による方がよい。

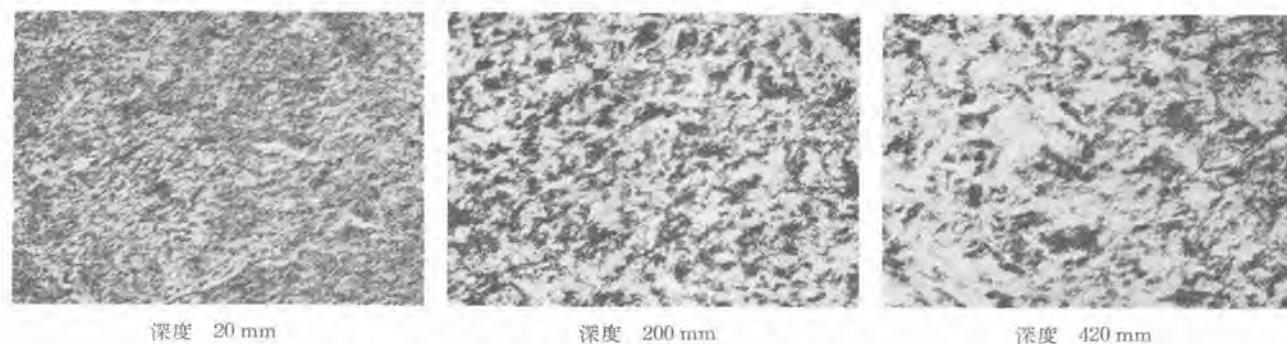
7 図に実施している調質線図を示したが、A は焼準であり、B は油焼入によるものである。

通常狭義の焼入は材料をオーステナイト状態から過冷

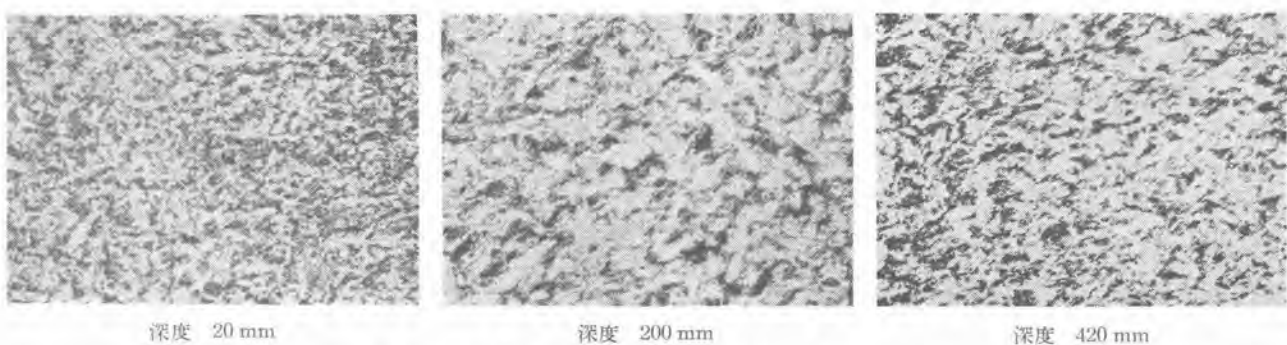
してマルテンサイトを得ることと解せられるが、タービン発電機ロータシャフトの如き大型鍛鋼品にあつては、マルテンサイトを生成せしめるときはその変態応力と冷却熱応力によつて巨大なる内部応力が発生して熱割れを生ずる怖れを有するため、焼入の油冷、空冷を問わずマルテンサイト変態点の直上において恒温変態を実施せしめるのである。したがつて変態を遂行せしめる温度範囲はベイナイト領域であるから完成ロータシャフトの内外の組織は焼入の冷却過程の遅速に従い一部針状フェライトが介在するも爾後の焼戻しによつて均一な焼戻ベイナイト組織となる。この恒温処理を応用せる焼入は焼割れ、焼入歪を防止し調質後の残留応力を減少せしめるのみならず優れた機械的特性が得られるから推奨し得るものと考えられる。8 図および 9 図にロータシャフト内外の材力と組織の一例を示したが、内外にわたつて質量効果の



Ni-Cr-Mo 鋼、油焼入ロータシャフト (8 図 1) の各深度の組織



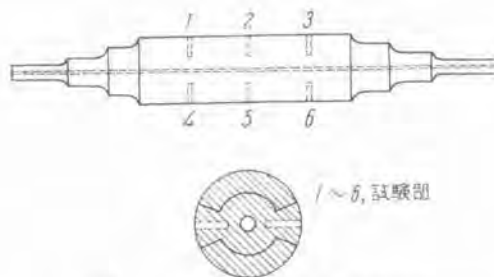
Ni-Cr-Mo-V 鋼、焼準ロータシャフト (8 図 3) の各深度の組織



Ni-Mo-V 鋼、熱準ロータシャフト (8 図 4) の各深度の組織

9 図 タービン発電機ロータシャフト内外の顕微鏡組織

Fig. 9. Microstructures in rotor body.



10 図 コアドリル材力試験片採取位置  
Fig. 10. Location of test specimens.

少い点に留意されたい。

タービン発電機ロータシャフトはつねに内部応力の残留による諸欠陥に留意しなくてはならぬから、出荷前にさらに 400~450°C で応力除去の低温焼鈍が実施される。

調質の各段階の温度、保持時間は焼鈍の場合同様、成分組成の相異、形状の大小に従って若干改変せられるが普通の鍛鋼品に比し極めて慎重に実施せられており、とくに焼戻の工程においては組織の不均一あるいは分解から長期の運転中に歪や、振動の発生することのないよう配慮されていることを附記する必要がある。

## エ. 試験および検査

抗張試験片はコアドリルによつて 10 図の如く鉄心部の或る一定の深度の部分より採取せられる。通常導体溝底部すなわち歯の根元に相当する部分に試験片の標点があるように定められる。このことは導体溝底部に脆弱な偏析層が位置するが 1 図に示したようにこの部分に最大負荷を生ずるから、設計応力に対する安全度を直接推定するのに便なる故である。ただここでコアドリルによつて深部より採取せる試験片は内部応力を有して不安定な平衡状態にあるから、応力除去のため 250°C に 2 時間程度加熱して時効脆化すべきものは時効せしめ、微細な亀裂その他の欠陥の有無を磁気探傷した後試験を実施する。この低温焼鈍については 600°F (149°C) 1 時間とした例<sup>(17)</sup>もあるが時効の点から鑑みても前記温度がより妥当なものと考えられる。同時にこの焼鈍は試験片内の水素の脱出を促した水素脆性<sup>(18)</sup>による材力試験時の一時的な伸、断面収縮率の減少を恢復せしめるのにも有効と考えられる。鋼中の水素は鑄込直後で 3~8 cc/100gr 程度であつて大部は鍛造、熱処理中に拡散脱出せしめられて、残留した水素量はロータシャフトの最深部においても最大 1~2 cc/100 gr 程度のものに過ぎぬが、この水素は鋼材中に偏析<sup>(19-20)</sup>し易く、水素による脆化は鍛造方向に平行な試験片よりも横方向試験片において著<sup>(20)</sup>るしいからコアドリル試験片の材試に当つては十分注意を要する。

材力試験に合格すれば指定の寸法形状に仕上げを行い開鑿した中に孔内を数倍の倍率の腔内検査鏡で疵の有無、性情を人念に確かめ、さらに超音波探傷器によつて全面に亘つて欠陥の内部分布を調査する。この超音波探傷は実際の工程からいうならば調質前と出荷前の完成状態

において繰り返し 2 回実施せられるもので、前者は調質前の諸工程における内部欠陥の有無を調査し欠陥の早期発見に資し、後者は完成検査の一部として行い製品に対する保証あるいは信頼度を高めるために実施するもので正確な欠陥の有無、分布ならびに欠陥の種類についての記録が採られ孔内検査の成績と共に総合的に使用に対する可否が検討されるが、探傷の欠陥反射から性情の判別困難なる場合は、さらにこの欠陥部からコアドリルによつて試験片を採取して判別する。

大型ロータシャフトは全く無疵の状態で完成するのは不可能であるが、孔内検査あるいは超音波探傷によつて、白点あるいは熱応力に起因する亀裂が確認せられた場合は、その発生原因および形状からして高速回転中に局部破壊を進行せしめる懼れが大きいから直ちに廃却とせられるが、比較的無害な砂疵や少数の存在でしかない未圧着の気泡あるいは収縮窩については、その分布および分布厚を厳密に検討し使用条件よりして最も重要な導体溝底部近辺以外に存在するものは程度によつて使用を許す。もちろん中心孔内に露呈せるものはその部分のみ局部的に掘込、孔径を大きくして除去する。

大型鉄鋼品に対する超音波探傷の最近の発達を見るべきものがあり、タービン発電機ロータシャフトの場合も剩す所なく内部欠陥を指摘し得て出荷完成品に対する保証度を著るしく高め得たが、実際探傷に当つては使用する超音波の周波数および探傷器の感度の如何によつて、欠陥反射波形の判定、減衰度に対する解析にかなり相異した結果を得ることも少くないので多数の実際例の結果に基いて判断する必要がある。

タービン発電機ロータシャフトについての超音波探傷法についての一、二の報告<sup>(17-21)</sup>もあるが、具体的な探傷作業標準を得ることは困難と考えられる。ただしこの超音波探傷の結果は材料の冶金学的履歴を照合して初めて判断し得るものであるから、製鋼技術者の自己反省と作業改善の手段として使用すべきものと考えられる。

## 5. 発生する欠陥とその考え方

以上ロータシャフトの製造を概述するに当つて、発生し易き欠陥についても触れてきたが改めて列記すれば

- (1) 熱割れ—調質あるいは加熱、冷却の熱応力による亀裂。
- (2) 白点。
- (3) 鍛造後も未圧着のまま、残存せる気泡、収縮窩。
- (4) 脱酸生成物あるいは外部より混入した非金属介在物による砂疵。
- (5) ゴースト—鋼塊偏析。

に分類される。

これらの欠陥に対する考え方ならびに処置については検査の項において記したが、さらに補足したいのは砂疵およびゴーストに関することである。砂疵は多くは鋼塊の底端側にあつてしばしば中心孔にも現われる。これに



反してゴーストは鋼塊の頂部において強く現われ、導体溝底部および鉄心部と軸部の段落に現われ易いが、いずれも鋼塊には程度の差異こそあれ阻止し得ざるものであるから、とくに大きな砂や、密集し群生し得ざるものであるから、とくに大きな砂や、密集し群生した砂疵また亀裂を伴うような甚しいゴーストを除いては欠陥の対照としないのが普通である。何故ならこれら偏析部から採取した小さな試験片の試験結果は劣値を示すことは否定できないが、大型鍛鋼品の使用状態に対する質的判断に当つては、これらの欠陥が健全部に埋藏され、保護せられており極めて局限された点位であつてほとんど無害と考えて差支えないからである。

## 6. む す び

タービン発電機ロータシャフト製造の変遷を振り返るとき、甚だ感慨の深いものがあるが、何の時代にあつてもこのロータシャフトを十分に打ち上げ完成することが特殊鋼製造業者の一大目標であつた。われわれも戦後の混乱時代から 10,000 トンプレスの再稼動を見る迄の空白は、大型特殊鍛鋼製造技術にとつて手痛い打撃であつたし、さらに大型タービン発電機ロータシャフトの再生産に着手した時は、海外のこの分野における進歩は目覚ましいものがあり、その趨勢に互して現在の生産体勢を確立する迄一時かなりの苦杯を舐めたことを告白するに齊でないが、現有の技術と設備を以つてするならば 100,000 kW 程度のロータシャフト迄は十分に製造可能であり海外諸国の製品に比肩して勝るものと確信している。

水素冷却式による今後の新式大容量機のロータシャフトについてはなお磁気特性の改良、遠心破壊に対する材料の許容応力の向上ならびにロータの均合いないし振動に関する動的あるいは静的歪曲等についての諸問題があり、いずれも今後の研究を急ぐものであるが、国産発電機の性能向上の意味から業界各位のご指導、ご叱正を幾重にも願うものである。

## 参 考 文 献

- (1) H. Ricli; Mechanical Degree of Safety in Large Turbo-Generators. W. P. C. No. 121 (1929).
- (2) 井上八郎右衛門; タービン発電機軸材の特異性. 三菱電機, 第 19 巻, 第 7 号.
- (3) F. D. Huntley, H. D. Taylor; Progress in the Development of Large Turbine Generators. A. I. E. E. Tech. Paper 51-96 (1950).
- (4) G. Fitter; Control of the Acid Open Hearth by Slag Fluidity Tests. Trans. A. S. M. 45 (1945).
- (5) 時田宗次; 鋼塊に起る偏析の研究 (I-VI) 鉄と鋼. 13 年. 7 号~12 号.

- (6) 1st~9th Report on the Heterogeneity of Steel Ingots. Special Report of J. Iron and Steel Inst. (1931~1939).
- (7) F. D. Badenheuer; Die Bildung von Schattenstreifen in Silizierten Stahlblocken. Stahl u. Eisen. 54 (1934) 42.
- (8) 黒川慶次郎; 造塊に関する研究. 鉄と鋼. 30 年. 1 号.
- (9) W. Heishkeil; Einfluss der Herstellungsbedingungen in Stahlwerk auf die Güte von Schmiedeblocken. Stahl u. Eisen. 72 (1952) 12.
- (10) E. A. Loria; Internal Structure of Killed Ingots on the Basis Relation Rates of Solidification. Blast Furnace and Steel Plant. 39 (1951) 11.
- (11) E. Marbing; Accelerated Solidification in Ingot. J. Metals. 5 (1953) 2.
- (12) J. A. Sanderson, J. G. Fith; Review of Application and Design of Heavy Forging Presses. J. Iron and Steel Inst. 161 (1949) 1.
- (13) E. Houdermont, H. Schrader; Das Zusammenwirken von Wasserstoff und Spannungen bei der Entstehung von Frockenrissen. Stahl u. Eisen. 61 (1941) 27.
- (14) C. A. Zaffe, C. E. Sims; Hydrogen, Flakes and Shatter Cracks. Metal and Alloys 11 (1940), 12 (1940).
- (15) J. H. Andrew, H. Lee, A. K. Mallik, A. G. Quarrell; The Removal of Hydrogen from Steels. J. Iron and Steel Inst. 153 (1946) 1.
- (16) J. H. Andrew, H. Lee, H. K. Lloyd; Hydrogen and Transformation Characteristics in Steel. J. Iron and Steel Inst. 156 (1947) 1.
- (17) A. W. Rankin, C. J. Boyle, C. D. Mariarty, B. R. Seguin; Thermal Crack in Turbine and Generator Rotor Forgings. Mechanical Engineering. July (1950).
- (18) 太田鶴一; 合金鋼に現れる特殊の時効現象に就て. 鉄と鋼. 23 年 4 号.
- (19) J. D. Hobson, C. Sykes; Distribution of Hydrogen in Large Ingot and Forgings. J. Iron and Steel Inst. 170 (1952) 2.
- (20) C. Sykes, H. H. Burton, C. C. Gegg; Hydrogen in Steel Manufacture. J. Iron and Steel Inst. 156 (1947) 1.
- (21) D. M. Kelman; Ultrasonics in the Electrical Industry, Symposium on Ultrasonic Testing.



# 九州電力築上・相ノ浦発電所納 55,000 kW 蒸気タービンについて

三菱造船株式会社長崎造船所

津田鉄弥\*

## 55,000 kW Steam Turbines for the Chikujo and Ainoura Power Stations

Tetsuya TSUDA

Mitsubishi Shipbuilding &  
Engineering Co., Ltd.

In the history of turbine building at the Nagasaki Shipyard of Mitsubishi, the steam pressure and temperature had been on the gradual increase until 1941. As to the capacity, the largest recorded was 75,000 kW 1,800 rpm unit built in 1940, and 30,000 kW 3,600 rpm unit in 1942, the latter being even the largest of the kind at that time. After a decade of confused years, 35,000 kW and 55,000 kW units were successively completed, and now a manufacturing license of Escher Wyss has been assigned to Mitsubishi just to enhance the well perfected technique.

### 1. ま え が き

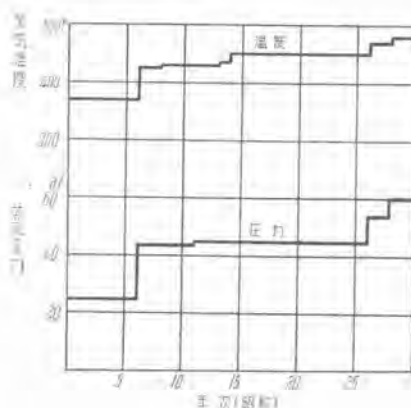
三菱造船株式会社長崎造船所の現在迄の発電用蒸気タービン製作の歴史をたどつてみると、1 図に示すとおり使用蒸汽の圧力、温度は欧米のそれと比較すれば遅れていたとはいうものの、昭和 13 年頃迄は漸次上昇の道をたどつてきていた。また 2 図は単位出力の変遷を示しているが、1,800 回転機では昭和 12 年関西電力尼ヶ崎第二発電所向の 75,000 kW という記録的なものを製作、また 3,600 回転機では昭和 14 年に相ノ浦発電所向の当時世界第一であつた 30,000 kW タービンを製作する迄、年毎に大型機が製作されていた。

しかるにその後は第二次大戦のためこれらの進歩は全く停滞してしまつていたが、漸く戦後の工業力も復活した昭和 26 年に築上発電所向の 35,000 kW タービンを製作、これは出力の点でもまた使用蒸汽条件の点でも画期的なものであつたことは、本誌 26 巻 10 号にも紹介したとおりである。

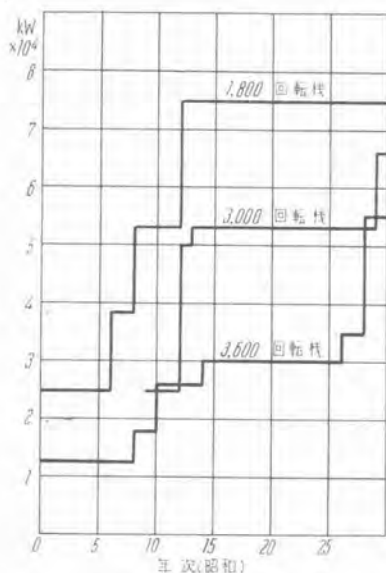
その後昭和 26 年末に九州電力株式会社より築上発電所第 2 号機、および相ノ浦発電所第 3 号機の 55,000 kW タービン各 1 機のご注文を頂き、さらに引続き 27 年 11 月相ノ浦発電所第 4 号機として同型タービン 1 機のご注

文を頂いた。このうち前二者はすでに工場運転を終了し現地で据付中であり、後者は目下当所で製作中である。

これらの設計製作に当つては前の 35,000 kW の経験にかんがみ幾多の改良をなしたが、27 年 11 月にはスイスの Escher Wyss 社との間に蒸気タービン製作のライセンス契約ができたので同社の技術もでき得る限り取入れており、とくにノズルおよび翼の改良に重点をおいて効率の向上をはかつている。なお時期的のずれから前二



1 図  
Fig. 1.



2 図  
Fig. 2.

者と後者では細部については多少異つている。

今回のタービンで従来と異つている点は、ノズルおよび翼の形状、高低圧タービンの配置ならびにこれらの連結法、車室パッキン、主油ポンプ、軸車回転装置、その他で、これらに重点をおき以下本 55,000 kW タービンについて紹介してみよう。

## 2. 蒸汽タービン

### ア. 主要目

型式	三菱衝動式 2 汽筒複排汽型
最大連続出力	55,000 kW
経済出力	50,000 kW
回転数	3,600 rpm

蒸汽圧力(調速弁前で)	60 atii
蒸汽温度( )	482°C
真空度(冷却水温度 22°C,	
経済出力にて)	725 mm Hg
タービン段落数 高圧 15, 低圧 2×5	
抽汽段数	5

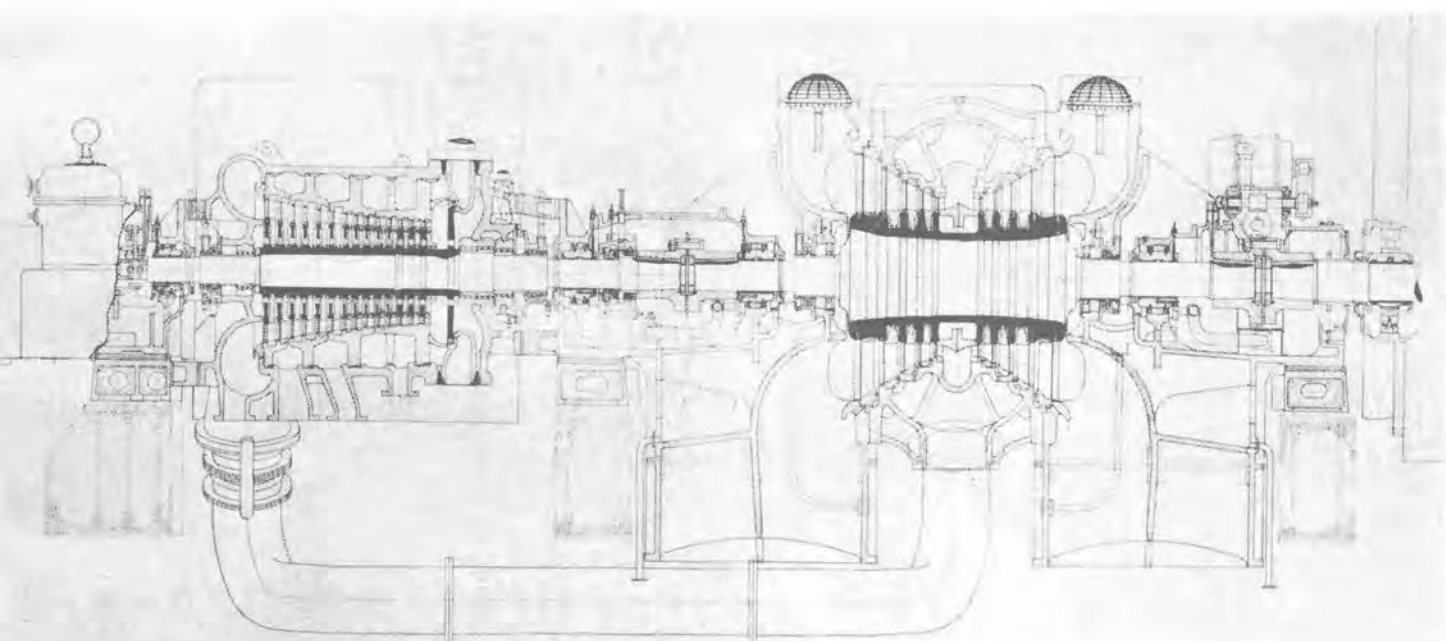
### イ. 車室および車室パッキン

タービン組立断面図(3 図)で判るように、高圧車室は従来の多くのものとは向きが反対になっており、高低圧車室間のレシーバーパイプは床下を通してゐる。このため高低圧車室の解放が楽になり、また外観もすつきりしている。

高圧車室は高圧高温蒸汽を使用するためノズル筐は車室と別個として車室に溶接し、また車室の形状を簡単にし、熱膨脹による不同変形を防止するよう工夫してある。第一段落の翼車はその平均直径を大きくし、その速度比を犠牲にすることなく圧力降下を大きくとり、車室の熱応力および機械的応力を軽減し、かつグラウンド漏洩損失が少くなるようにしてある。また内外車室間、あるいは仕切板と内車室間等漏洩が生ずるであろうと予想される部分には、これを防止する適切な方法を講じている。

低圧車室後部には従来は発電機の前部軸受もあつたが本タービンでは発電機が水素冷却となつたためこれは発電機の方についている。また発電機の調相機運転する場合を考慮し、発電機ロータ用推力軸受を必要に応じすぐ設けられるようにしてある。

車室パッキンは高圧部内側は従来のメタリックパッキンを使用し、その他は水封パッキンおよび Escher Wyss 式カーボンパッキンを併用している。水封パッキンはタービンの機械的損失を増し、起動、停止時の取扱



3 図 タービン組立断面図

Fig. 3. Cross-sectional arrangement of steam turbine.

に注意を要し、また扇車あるいは扇車筐は腐蝕しやすい。このような点から相ノ浦4号機は水封パッキンを廃止してカーボンパッキンとし、グランド蒸汽圧力は自動調整装置で調節し、ペーパーフッドよりの漏洩蒸汽はグランド蒸汽復水器に導くように変更されている。

なお仕切板パッキンも高温部のみメタリックパッキンでその他はすべてカーボンパッキンを使用している。

#### ウ. ノズル、翼および翼車

高温部ノズルはすべて組立式とし、そのうちでも最も高温の部分は耐熱性のある Ti 入りの 18-8 不銹鋼を使用している。低温部は鋳込式でとくにノズル高さの大きい部分の入口角度は幅方向に変化させ、ノズル入口における損失を少なくするよう設計されている。

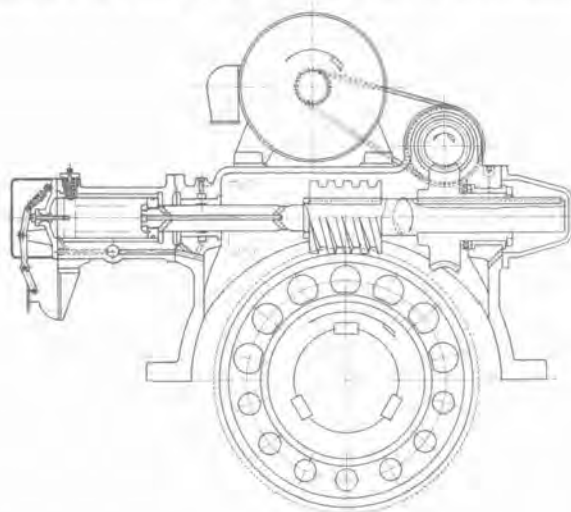
高圧タービンの低温部以降の翼には適当な反動度を与えた振り翼を使用し、長い翼には Ni-Cr-Mo 鋼を使用し、これに Escher Wyss 社特許の特殊ニッケルメッキを施してある。

高圧翼車は高圧部4段のみ削り出しで他は翼車を焼嵌めとし、低圧翼車は削り出しの一体型である。これらはリジッドカブリングで連結され推力軸受は高低圧間に1個のみ設け、このために従来のフレキシブルカブリングに起因する故障をなくすることができる。このような方法と前述の高圧車室の配置と相俟ち、組立時と運転時のノズルと翼との間隙の変動を最少限度に止めることができる。

従来翼の折損の原因としては種々考えられており、グランドフィンと軸の接触による振動もその一原因と考えられているが、本タービンでは大部分にカーボンパッキンを使用しているのでこの原因を除去することができる。

#### エ. 主油ポンプ

高圧タービン心棒前端より咬合接手を介して駆動される遠心式ポンプで高低圧2組の扇車をもっている。この形式にしたため従来しばしば問題をおこしていた油ポン



4 図  
Fig. 4.

1 表 各部の材質一覧表

用途	材質	備考
高圧車室	Cr-Mo 鋳鋼	Cr 1.0%, Mo 0.5%
翼車	Ni-Cr-Mo 鋼	
翼	Cr-Mo 鋼	
組立式ノズル	13Cr 不銹鋼	
グランド	Ni-Cr-Mo 鋼	特殊 Ni 鍍金を施す 最も高温部にのみ使用
主蒸汽管	18-8 鋼+Ti	
復水器管板	13Cr 不銹鋼	
復水器管	Ni プラス カーボン	硬質カーボン
	HCM	
	ネーバルプラス	独乙より輸入
	アルミプラス	
	アルブラック	

プ駆動用のウォームホイールが不用になり、かつ歯車ポンプ特有の騒音をなくすことができた。

#### オ. 軸車回転装置

4 図に示すような構造で軸車を約 6rpm の速度で連続ターニングでき、またターニングしながらタービンを起動した場合自動的にタービン軸から離脱するようになっている。ターニングをかける場合もレバー一つで簡単に咬合させることができる。

駆動用電動機はボールチェンジによる2段変速になっているので、必要に応じては約 2rpm でターニングすることもできる。

#### カ. 急速起動の対策

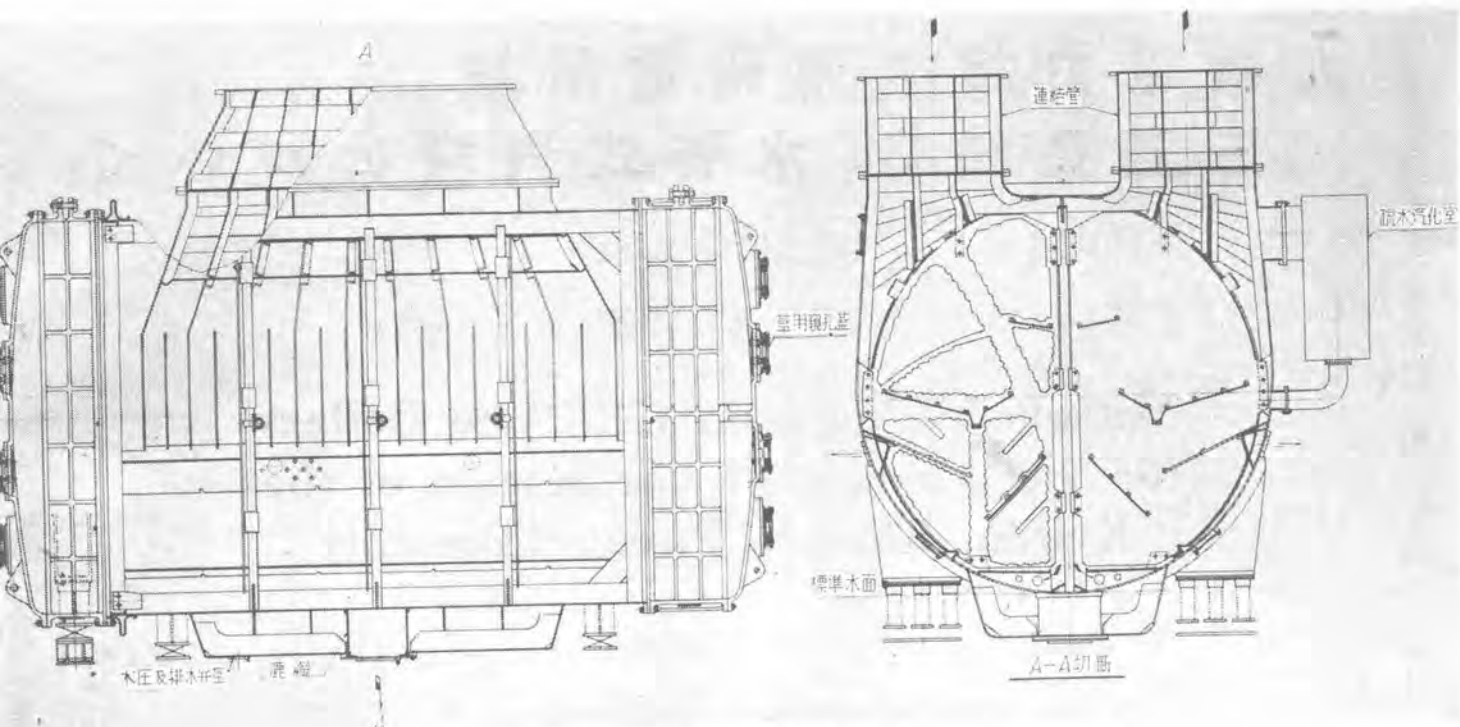
タービンを起動する際時間をかけることはそれだけ発電所の熱効率を低下させることになるので、昨今タービンの急速起動が盛にさげられるようになってきた。本タービンではこれに対し下記のような考慮がはらわれている。

- (1) 自動離脱式高速軸車回転装置により比較的短時間の停止期間中は連続ターニングを行って軸車および車室の変形を防止し、その儘タービンを起動させる。
- (2) 高圧車室のフランジおよびフランジボルトの加熱装置により起動時のフランジ内外側および、ボルトの温度差を少くして過大な熱応力を生ずることなく急速に増速、負荷増加ができる。
- (3) 軸車曲りの指示記録計により軸車の曲りのなくなつた時を見はからつて急速に増速することができる。
- (4) その他高圧車室の形状が簡単のため局部的に熱応力の過大にならないこと、高圧翼車の高温部が一体型で翼車の緩みの心配のないこと等も一役買っており、また必要に応じては潤滑油温を早く上げるため油槽内に加熱装置をおくことも考えている。

#### キ. 安全装置

下記の如き事故を防止しあるいは予知する各種の安全装置を備えている。

- (1) 自動ならびに手動危急蒸汽遮断装置。タービンが過速した場合主塞止弁または调速弁を閉鎖す



5 図 4,700 m<sup>2</sup> 復水構造図

Fig. 5. 4,700 m<sup>2</sup> condenser.

る。

- (2) 電氣的危急蒸気遮断装置. 発電機事故の場合 (1) を作動させる。
- (3) 軸車位置指示記録計およびスラストエマージェンシー装置. 軸車の位置を指示記録して推力軸受の磨耗を知ることができ、また一定量以上軸が移動した場合はタービンを停止する。
- (4) 潤滑油圧低下非常装置. 潤滑油圧が低下した時電動補助油ポンプを起動させ、しかもなお油圧が低下したらタービンを停止する。
- (5) 真空低下非常装置. 真空がある限度以上低下した場合タービンを停止する。また排汽室圧力が大気圧以上になれば車室上部の鉛板が破壊し、異常圧力上昇を防止する。
- (6) 軸車振動記録計. 軸車の振動を記録し、異常振動の発生を察知できる。

### 3. 復水器

#### ア. 主要目

冷却面積	4,700 m <sup>2</sup>
冷却管総数	9,080 本
管板間距離	6,600 mm
冷却水管	13,300 m <sup>3</sup> /h

#### イ. 構造

5 図の如き構造で冷却管は両端共管板に拡管して取

け、胴体には膨脹接手をもっている。管の配列にはとくに留意し、上下部の圧力差を少くし、また下部およびホットウエルの構造は脱気、再熱が十分行われるように設計されている。

管板は 2 枚継ぎでドイツ製品を使用している。

### 4. むすび

築上 1 号機 35,000 kW タービンに引続きほとんど同じ蒸気条件の 55,000 kW タービンが次々に製作され、またさらに 66,000 kW タービンも製作されている今日、本タービンの如きを高圧高温大出力といつて特別扱いする時期はすでにすぎ去りつつあるように思われる。ということはこれらの製作を甘く見ているという意味ではもちろんない。十分な検討の後製作しているし、また今後このクラスのタービンでも改良すべき点が沢山出てくると思う。しかし時代は 1,250 psi, 950°F さらには 1,450 psi, 1,000°F の 75,000 kW 級の再熱サイクルタービンを要求するようになってきている。

本タービンの製作に当つては九州電力火力部、築上、相ノ浦両発電所その他の関係各位の絶大なるご指導を賜り、ここに深く感謝する次第であるが、今後もお本タービンに対し忌憚ないご批判を頂き、以て次の高圧高温大出力タービン製作への躍進の足場として行きたいものと思つている。



# 九州電力相ノ浦発電所納 三菱長崎 CE 水管式汽罐について

三菱造船株式会社長崎造船所

吉 見 豊\*

## Mitsubishi Nagasaki CE Tube Boilers for the Ainoura Power Station of the Kyushu Electric Power Company

Yutaka YOSHIMI

Mitsubishi Shipbuilding & Engineering Co., Ltd.

Three boilers rated 170 T/h, 68 kg/cm<sup>2</sup>, 490°C were built at Nagasaki Shipyard and delivered to the Ainoura Power Station of the Kyushu Electric Power Company. They were manufactured based on the long experience of Mitsubishi incorporated with the well-perfected technique of the Combustion Engineering Company of America, involving a number of notable features such as tilting burners, corner firing and other latest developments which insure high efficiency as the highest roused product of the day.

### 1. ま え が き

今回三菱長崎造船所が九州電力株式会社相ノ浦発電所に納入した 170 T/h, 68 kg/cm<sup>2</sup>, 490°C 汽罐は、当所の多年に亘る高圧高温汽罐の製作に関する研究ならびに経験と、当社が新に提携した米国コンバッションエンジニアリング社 (CE 社) の技術とを基礎とし、鋭意努力製作したもので、第一期工事として 2 罐、第二期工事として 1 罐、計 3 罐を製作したものである。

戦後企業合理化の面より火力発電所の高温高圧化による高効率と、高度の稼働率が要求されている。これらの要求に答えるべく当汽罐には数々の崭新適切な考案工夫が凝らされており、その蒸汽条件、容量および性能の点よりしてもわが国における最高級の汽罐と称することができる。以下にその概略を申述べるが、当汽罐の設計方針ならびにその特長とする点を要約すれば下記のとおりである。

(1) 稼働率高く、しかも高度の信頼性のあること。

火炉容積を大きくし、水冷壁管を密集型 (Tangential tube) として火炉出口ガス温度を下げ、クリンカーおよびスラッシングトラブルを無くするよう努めている。また過熱器、節炭器を始め各部に溶接を最大限に使用し漏

洩事故を無くするようにしている。

(2) 高能率なること。

CE 社のティルティングバーナ (Tilting burner) によるコーナーファイアリング (Corner firing) を採用して炉内の燃焼を完全ならしめ、また汽罐各部の保温を完全にして輻射損失を小にし、排ガス温度を可能なる限り下げないようにしている。

(3) 所内動力をできるだけ小にする。

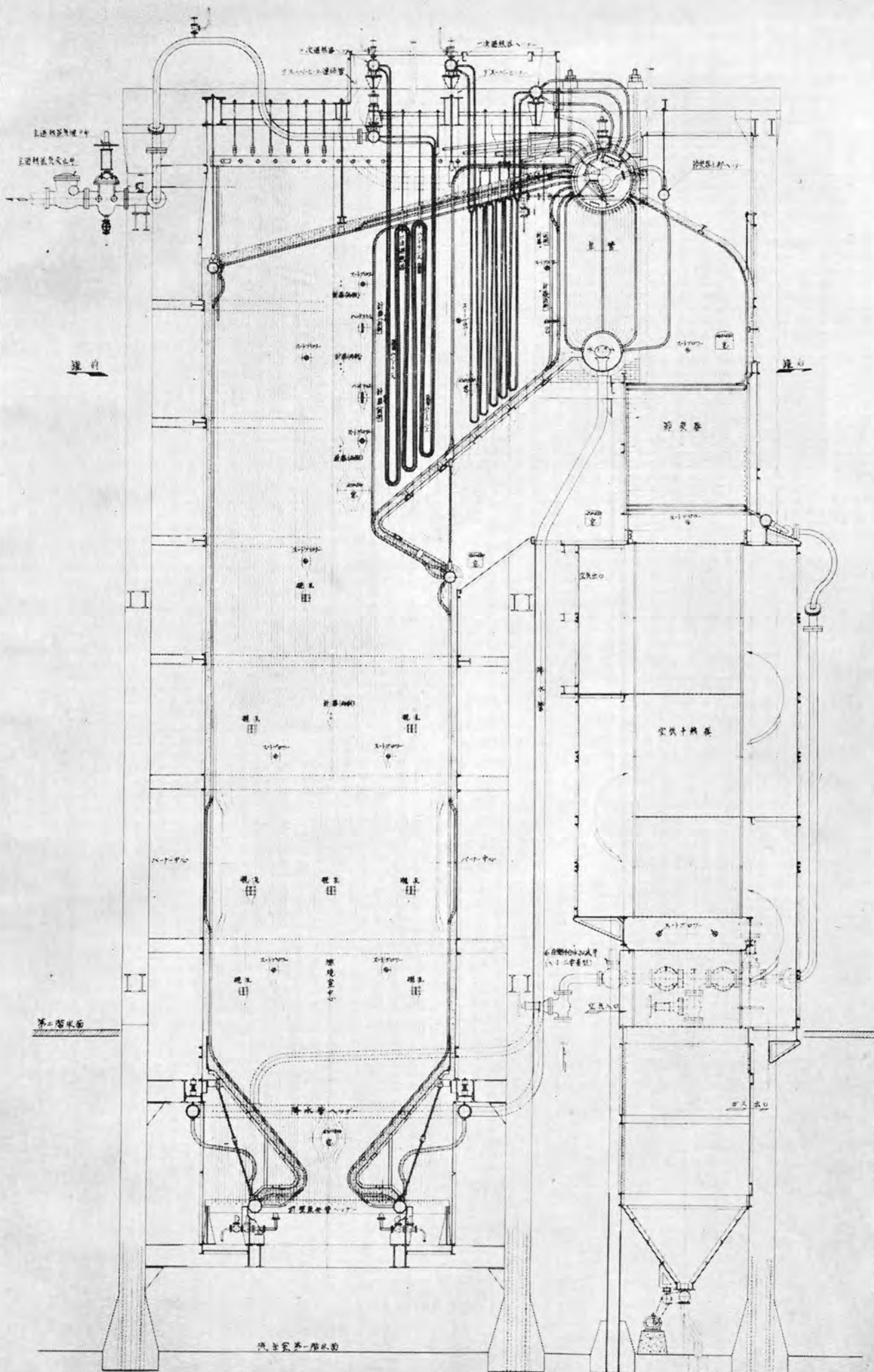
熱吸収と通風損失の両者を勘案し、ガスフローはワンパス (One pass) として通風損失を可能なる限り少くして補機動力の節約を計っている。

(4) 火炉を始め高温部はすべて冷却管にて壁を形成し、その背後に炉壁材を添着する構造として、いわゆる煉瓦積を無くしている。したがって煉瓦積による故障の恐れが無くまた重量も軽減できる。

(5) 有効な冷水分離装置を使用している。

(6) ティルティングバーナの角度の変化により蒸汽温度を負荷の広い変化範囲に対し正規の温度に保ち得る構造としている。

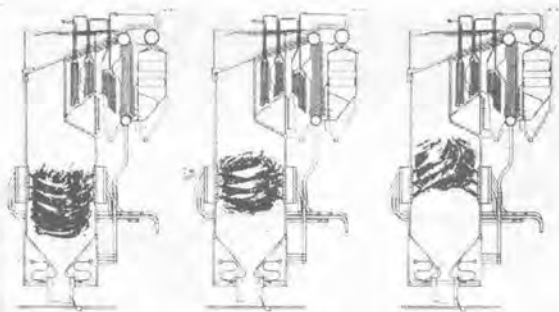
1 図は本汽罐の縦断面図、2 図は据付中の写真、3~5 図はティルティングバーナおよびコーナーファイアリングの説明図である。



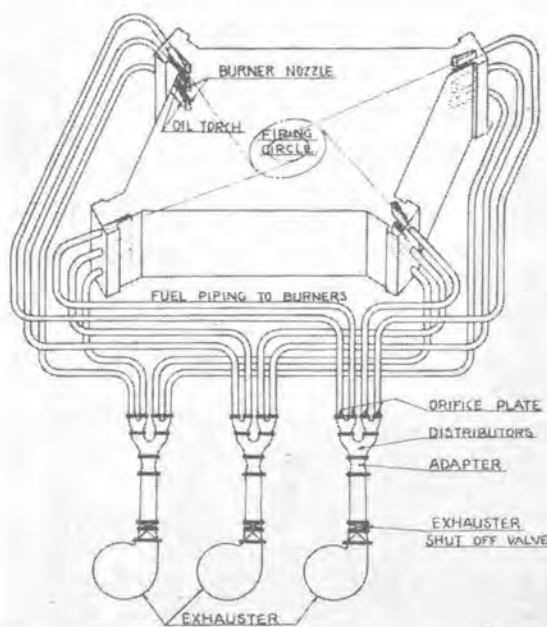
1 図 汽 罐 縦 断 面 図  
Fig. 1. Cross section of boiler.



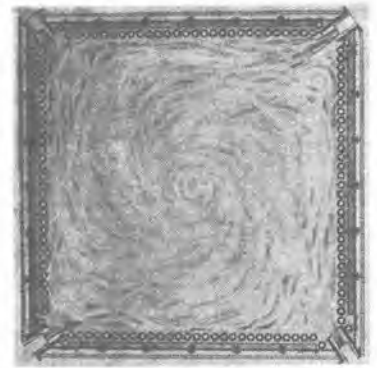
2 図 据付中の汽罐（炉壁冷却管を示す）  
Fig. 2. Boiler under installation.



3 図 ティルティングバーナ説明図  
(バーナ角度の変化により炉出口ガス温度を調節する状態を示す)  
Fig. 3. Illustration of tilting burners.



4 図 コーナーファイアリング説明図  
Fig. 4. Illustration of corner firing.



5 図 コーナーファイアリング説明図  
Fig. 5. Illustration of corner firing.

## 2. 蒸汽発生設備

### ア. 計画要領

型式	三菱長崎 CE 水管式 2 胴輻射型	
蒸汽圧力	ドラムにて	68 kg/cm <sup>2</sup>
蒸汽温度	過熱器出口にて	490°C
給水温度	節炭器入口にて	200°C
空気温度	空気予熱器入口にて	20°C
	空気予熱器出口にて	250°C
各罐蒸発量	最大連続負荷	170,000 kg/h
	経済負荷	145,000 kg/h
使用石炭の性質		
表面水分		7.0 %
固有水分		2.0 %
灰分		34.0 %
揮発分		29.0 %
固定炭素		35.0 %
高位発熱量		5,000 Kcal/kg
灰軟化点		1,280°C
灰溶融点		1,310°C
通風方式	平衡通風	
燃焼方式	単位直接式微粉炭燃焼	
保証効率	石炭低位発熱量基準、経済負荷にて	
	89 % 以上	

汽罐伝熱面積	370 m <sup>2</sup>
過熱器伝熱面積	1,420 m <sup>2</sup>
有効燃焼炉容積	950 m <sup>3</sup>
有効水冷壁面積	1,200 m <sup>2</sup>
節炭器伝熱面積	1,000 m <sup>2</sup>
空気予熱器伝熱面積	6,600 m <sup>2</sup>

### イ. 汽罐本体

汽罐は 2 胴型で上部ドラムは内径 1,500 mm、厚さ 78 mm、下部ドラムは内径 1,000 mm、厚さ 53 mm で胴板は SB 45 鋼板を溶接して製作した。上下ドラムを連結する水管は STB 45 鋼用鋼管で外径 60 mm で、この伝熱面積は 370 m<sup>2</sup> である。ドラム付水面計の内 1 組は透視式とし、他の 1 組は米国ダイヤモンド社製二色式水位計を輸入して装備している。

汽水分離装置は CE 社独特の型式のものを使用し、最大負荷の場合罐水の全固形物が 1,500 ppm の場合にも



ドラム出口の蒸汽の乾燥度および純度を高度に保ち、その電気伝導度を1マイクロモ以下に保つようにしている。6 図は工場において完成せる蒸汽ドラムを示す。

#### ウ. 過熱器

吊下型として第一次伝熱面積 840 m<sup>2</sup>、第二次伝熱面積 580 m<sup>2</sup> の二群に分れている。過熱管は高温部を住友 HCM、低温部を住友 HCK としいずれも外径 50 mm でヘッダーにはすべて溶接にて連結した。ティルティングバーナの調節により蒸汽温度は罐負荷 100 T/h より最大負荷 170 T/h 迄規定の 490°C に一定して保つようにしているが、なお非常の場合に備えて第一次および第二次過熱器の中間管路中にスプレイ式デスーパヒータを設置して温度調節の万全を期している。7 図にデスーパヒータの概略図を示す。アトマイジング用蒸汽は蒸汽ドラムより、スプレイ用水は節炭器前の給水管より採っている。

#### エ. 燃焼炉

ホッパーボトムコーナーファイアリング型で、タンゼンシャルチューブすなわちほとんど相接して並んだ冷却管で四周を囲まれ火炉容積 550 m<sup>3</sup>、水冷壁面積 1,200 m<sup>2</sup> である。冷却管は STB 45、外径 76 mm である。炉容積を十分にとり火炉負荷を最大負荷の場合 119,800 Kcal/m<sup>3</sup>h と十分に低くとついでるのでクリンカーおよびスラッキングによるトラブルは皆無と考えられる。炉壁は米国ジョンスマンヴィル社製の耐火材および保温材を塗布装着して、いわゆる継目無炉壁を形成する構造としている。クリンカーホッパーは水封式のウェットボトム型 (Wet bottom type) で、常に一定量の水を貯え

この中に落下したクリンカーおよび灰を時々噴射水で押し流す構造としている。したがって炉底部の気密は完全で有害な冷空気の侵入は全然ない。

#### オ. 節炭器

弊社特許によるスぺーサー無しのループ型節炭器で、伝熱面積 1,000 m<sup>2</sup>、水管は STB 45 外径 50 mm である。水管はすべて溶接にてヘッダーに接続されていてフランジジョイントが無いので漏洩の惧れない。

#### カ. 空気予熱器

鋼管型で伝熱面積 6,600 m<sup>2</sup> で高温部と低温部の二群に分たれ、低温部には短管を用いて取換えを容易にしている。

#### キ. スートブロワー

米国より輸入したダイヤモンド型で、空気作動蒸汽ブロワーの自動操作式である。すなわち罐前操作盤でボタン一つ押せば各部のスートブロワーが自動的にガスの流れの方向に順次に作動するものである。高温部には拔差式 16 組、低温部には固定式 10 組を配置している。

#### ク. 通風装置

通風装置として下記のものを用意している。風量調節方式としてはいずれも二速度モータによる速度制御とベーンによる制御を併用した。

強圧通風機 1 罐に 2 台宛

両吸込ターボベーン型	ベーンコントロール方式
風量	1,900 m <sup>3</sup> /min
風圧	240 mm 水柱
モータ	153 kW 1,200/900 rpm

誘引通風機 1 罐に 2 台宛

両吸込スターチバンド型	ベーンコントロール方式
ガス量	3,200 m <sup>3</sup> /min
ガス圧	230 mm 水柱
モータ	230 kW 900/720 rpm

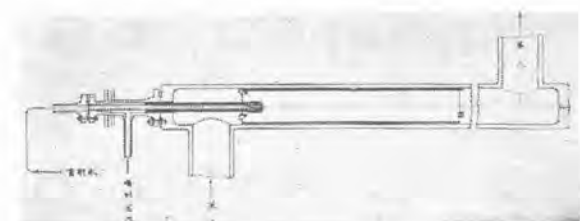
### 3. 微粉炭燃焼装置

単位直接式のチューブミル容量 15 T/h のものを 1 罐に 3 台宛配置した。各機器の概略仕様は下記の如きものである。ミルのトラニオン、ピニオンおよび減速装置にはローラーベヤリングを使用し、ライナーには低マンガン鑄鋼を使用して耐磨耗性を高めている。ガスギヤーおよびピニオンは片面磨耗の際は取付換して反対側をも使用できるようにし、その注油はオイルパス式としている。

バーナは火燭の各コーナーに 3 個宛計 12 個を配置し、CE 社の特許に係るティルティング型で、罐負荷の変動に応じてその角度を自動的に変え蒸汽温度を調節するものである。各コーナーには 2 組の点火用重油バーナがあり、またこのバーナは低負荷時の燃焼安定用をも兼ねている。この重油バーナにはまた電気式着火装置を附属せしめている。8 および 9 図は工場にて組立完了したバーナを示す。

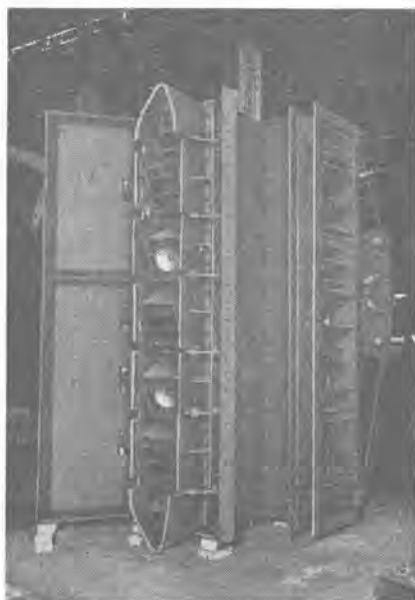


6 図 完成したる蒸汽ドラム  
Fig. 6. Boiler drum completed.

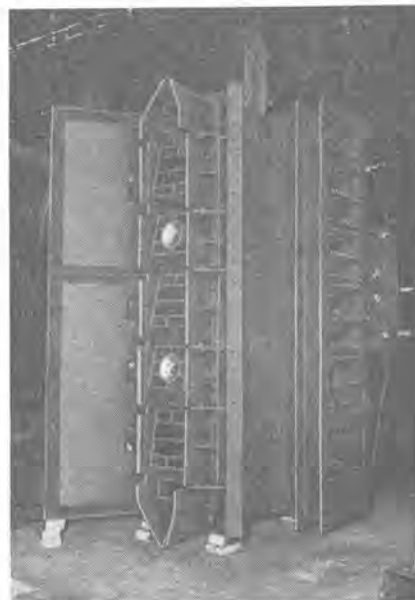


7 図 スーパーヒータ  
Fig. 7. Superheater.





8 図 工場組立を終りたるティルティングバーナ (下向)  
Fig. 8. Tilting burner completed at the factory  
(facing downwards).



9 図 工場組立を終りたるティルティングバーナ (上向)  
Fig. 9. Tilting burner completed at the factory  
(facing upwards).

#### 4. 機 器 要 目

##### (1) 微粉炭機

横置円筒鋼球入回転型 1 罐に 3 台宛

1 台の容量 15 T/h

ただし微粉炭機入口にて、湿分 7% の場合

微粉度 50 mesh 通過 100 %  
100 % 90 % 以上  
200 % 80 % 以上

入口空気温度 200°C

モータ 260 kW 900 rpm

##### (2) 石炭計量機

メリック式自動連続秤量型 1 罐に 3 台宛

1 台の容量 18 T/h

##### (3) 給炭機

テーブル回転型 1 罐に 3 台宛

1 台の容量 18 T/h

##### (4) 粗粉分離器

円錐重力分離型 1 罐に 3 台宛

##### (5) 排炭機

片吸込パドル型 1 罐に 3 台宛

1 台の容量 585 m<sup>3</sup>/min

全風圧 650 mm 水柱

吸込温度 70°C

ダンパーコントロール方式

モータ 150 kW 1,800 rpm

##### (6) バーナ

ティルティング型 1 罐に 12 個宛

1 個の容量 3.3 T/h

(最大 3.75 T/h 迄可能)

点火用重油バーナおよび電気式着火装置付

#### 5. 自動燃焼制御装置

米国ベレー社製品を九州電力でご購入の上設備されることになっている。ここに附言したきことはベレー ACC と共に当所製になるミルレベルコントローラーを採用されたことである。ミル内の石炭量を一定に保つて給炭量を負荷の変化に即応して適正に維持することは、ACC を完全作動させるに必須のことである。当所において製作したものは相ノ浦発電所既設微粉炭機について実用試験を行いその効果の十分であることを確認したものである。

本装置によれば、ミル内に 2 本のドラフトチューブを挿入し、石炭層のレベルの変化をこの 2 本のチューブ内の風圧差を介してリングバランスにとり、自動的に給炭機駆動モータの回転を調節し常にミル内の石炭層のレベルを一定の位置に維持する。

#### 6. む す び

本汽罐はその蒸汽条件においても容量においてもまたその性能においても現在のわが国内の最高水準を示すものである。九州電力株式会社にて本汽罐を採用されるや、中国電力株式会社および関西電力株式会社におかれても相次いで殆ど同容量同蒸汽条件の汽罐をご採用になり、総て当所に製作下命を戴いた。当所は斯る大容量高温高温汽罐製作の経験を生かし、近き将来に実現されようとしている 88 汽圧 510°C あるいは 100 汽圧 540°C 級の高温高温汽罐の製作に備えて、設計、製作ならびに材料に関する研究に一段の努力を傾けている。欧米においてはすでに 100 汽圧以上 550°C 程度の汽罐迄製作されている現状である。優秀なる資材の確保、関連機器の開発等と共に相携えて研鑽努力し欧米製品に比肩する製品を作り出すことを念願すると共にこれをこそわれわれ技術者の責務と考える次第である。

終りに臨み、本罐製作に当り種々厚意あるご便宜を戴いた九州電力の各位に本誌を借り厚く御礼申上げて謝する次第である。