

# 東北電力・八戸火力4号機の発電機

Generator for the No.4 Unit of Hachinohe Thermal  
Power Station, Tohoku Electric Power Co., Ltd.

森 安 正 司\* 矢 郷 昌 三\*  
Shoji Moriyasu Shozo Yago

井 池 政 則\* 佐 藤 昭 二\*  
Masanori Iike Shoji Sato

## I. ま え が き

東北電力・八戸火力4号機は、固定子巻線に間接水素冷却を、回転子巻線に直接水素冷却を採用している。

この冷却方式は、すでに東京電力・川崎火力5、6号に採用し昭和42年6月納入以来、まったく好調に営業運転を行っており好評を得ている。本機の発電機の構造は、基本的には、東京電力・川崎火力5、6号機とまったく同一であるが、励磁機はブラシなし励磁機である。

当社では、2極タービン発電機に対して、自家発も含めてブラシなし励磁方式を標準としている。ブラシなしタービン発電機は1966年に旭化成工業向け22,500kVA機を納入して以来25台、延べ出力1,000MVAがすでに営業運転をしており、シリコン素子の延べ運転時間は550万時間に達している。この間、まったく無事故で運転を継続しており、保守が不要であることに加えてその信頼性の点からも顧客から非常な好評を得ている。本稿でこの発電機の特長を述べ各位の参考に供したいと考える。

## II. 発 電 機 仕 様

発電機および励磁機の仕様は次のとおりである。

### 主 発 電 機

形 式	横置円筒回転界磁水素冷却形同期発電機
出 力	水素圧力 3 kg/cm <sup>2</sup> ・g において 290MVA 水素圧力 2 kg/cm <sup>2</sup> ・g において 220MVA 水素圧力 1 kg/cm <sup>2</sup> ・g において 150MVA
力 率	0.9
電 圧	15,500V
回転速度	3,000rpm
周 波 数	50Hz

冷 却	固定子：間接水素冷却 回転子：直接水素冷却
接 続 法	二重星形
接地方式	三次側抵抗器付計器用変圧器接地
励磁方式	ブラシなし励磁方式
回転整流装置	
形 式	三相グレース接続シリコン整流装置
出 力	1,350kW
電 圧	420V
電 流	3,200A
接 続	10並列1直列ヒューズ付
交流励磁機	
形 式	回転電機子形同期発電機
出 力	1,540kVA
力 率	0.9
電 圧	340V
回転速度	3,000rpm
周 波 数	150Hz

### 永久磁石発電機

形 式	横軸回転界磁形永久磁石発電機
出 力	35kVA
電 圧	220V
力 率	0.4
回転速度	3,000rpm
周 波 数	400Hz

## III. 発 電 機

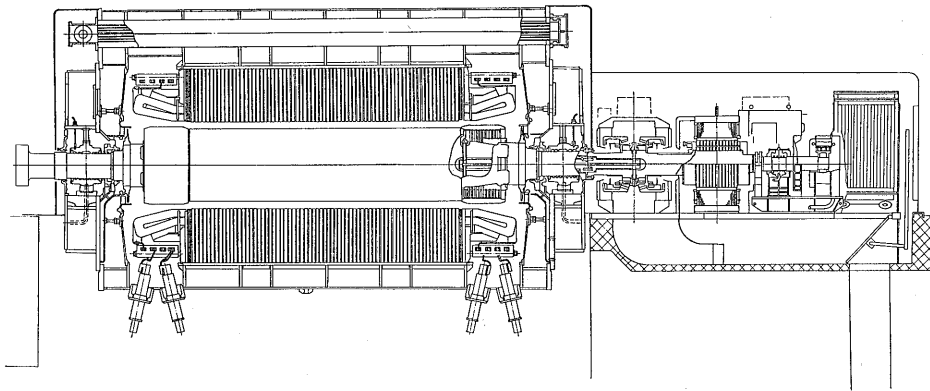
第1図は本体の断面図である。

発電機本体には、当社の標準構造が採用されている。

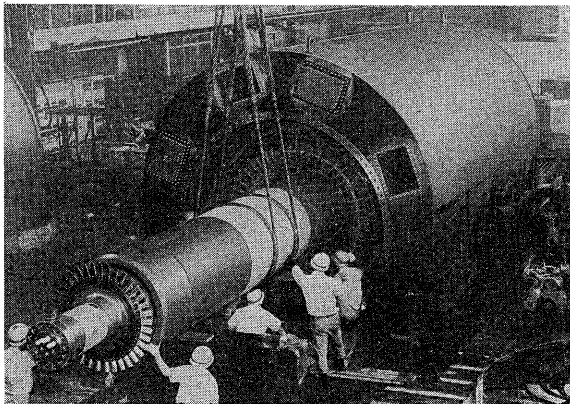
第2図は回転子をつり込む状態の写真である。

冷却方式は、固定子巻線は間接水素冷却、回転子巻線は直接水素冷却である。固定子は、ファンによって機内に押し込まれた水素ガスが鉄心、巻線の各部を冷却したのち、鉄心背面にあるガス冷却器を通して一巡する。回

\* 川崎工場回転機部



第1図 発電機断面図  
Fig. 1. Sectional view of generator



第2図 回転子つり込み図  
Fig. 2. Setting of rotor

転子は、回転子巻線のコイルエンド側面に設けたガス導入開口部から水素ガスが導体内の通風孔に導びかれて軸方向に回転子中央部まで導体を直接冷却する。回転子中央部は排気用半径方向の穴により水素ガスが放出され、固定子鉄心を通してガス冷却器に達する。

### 1. 固定子

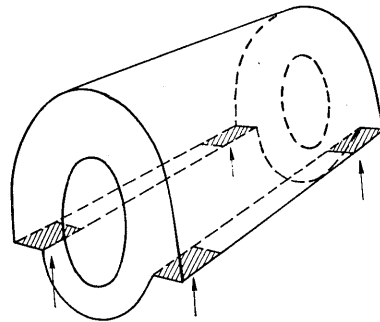
固定子わくは鋼板溶接構造の耐爆形である。水素気密を要求される部分の溶接は十分な検査を行なって欠陥を除き、万一のガス爆発にそなえて10気圧の水圧試験を行なった。多数の中間板は振動と強度を充分考慮して配置され、同時に固定子通風のための仕切板をかねている。

固定子鉄心は、固定子わく内周部にとりつけられたダブルテール形キーによって加熱圧縮を繰り返しながら支持積層され、均等、強固な積層を図っている。

固定子巻線は素線をレーベル転位したギッタ導体がいられ、コイルエンド漏れ磁束による素線電圧の不平衡を防ぐよう特殊な結線方法を採用している。コイルエンドは強固に固定されて短絡時の大きな電磁力に安全に耐えることができる。

各相巻線の端部は接続リング導体を経て、貫通導体により発電機底部より機外に引き出される。貫通導体は安全性が重視される部品であるから負荷試験、短絡試験、気密耐圧試験など入念な部品試験を行なっている。

本機の大きな特長の一つとして固定子の基礎への支持



第3図 固定子四隅支持法

Fig. 3. 4 corners support method for stator

方法があげられる。これは四隅支持法と名づけられるものであって、固定子の基礎台床への据付け部を第3図のごとく四隅のみに限定することにより、鉄心が固定子わくに通常の方法で固定された構造であっても、鉄心振動の基礎への伝達が実用上充分に軽減されている。

### 2. 回転子

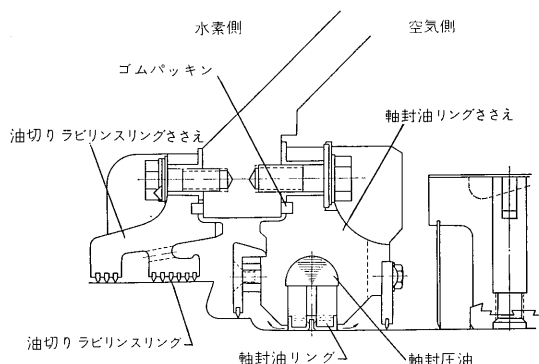
回転子軸材の品質については、極めて厳密な管理が行なわれている。周知のとおり、鍛鋼品の品質は引張り強さ、無欠陥性のみならず、じん性についても重視される。本機の軸材では、通常行なわれている衝撃値、衝撃遷移温度 (FATT) の検査に加え、軸中心部コアについて、Nil Ductility Temperature (NDT) を測定してじん性の評価を行ない、いわゆる Prewarming をすることなく安全に始動することが可能であることを確認した。また鍛鋼品の残留応力についても許容値を定量化し、熱処理過程での問題点の有無をより確実に把握できるようにした。

巻線導体は大きな熱応力を生ずるための匍匐現象によって変形を生じ、層間短絡をおこす危険があるから匍匐限度が普通の銅に比べてはるかに高い銀入銅を使用し、端部を絶縁間隔片によって確実に固定している。巻線は溝内に特殊黄銅のくさびによって押えられる。このくさびは磁極中心部に設けられた銅製ダンパ導体とともにダンパ巻線の役目もかね、逆相負荷の負担能力を向上させている。巻線端の保持環は回転子軸と同様に高い機械的強度が要求され、同時に損失軽減のため非磁性にする必

要があるので冷間加工された高合金非磁性鋼が使用されている。

### 3. 軸封装置と軸封油供給装置

機内の水素ガスが軸を貫通して機外への漏れるのを防ぐためブラケットに軸封装置が設けられる。構造図を第 4 図に示す。軸封装置は軸との間に狭いすきまをもったリングをおき、このすきまに機内ガスよりも高い圧力をもった油を圧送して、空気と水素との間をしゃ断する。機内の水素圧力によってリングが空気側に押しつけられ、リングの自由な動きが拘束されてリング軸の局部過熱や焼損の原因となるので空気側に圧油を供給して機内圧と大気圧の圧力差を補償する。



第 4 図 軸 封 装 置

Fig. 4. Shaft sealing

軸封装置のリングはシール効果をあげるために軸とのすきまをできるだけ狭くする必要がある。したがって、リングは加熱による熱変形が均等に行なわれ、焼損の原因とならぬような構造にすることが重要である。このため、内面に白色合金を鑄込んだ鋼製リングが採用されている。

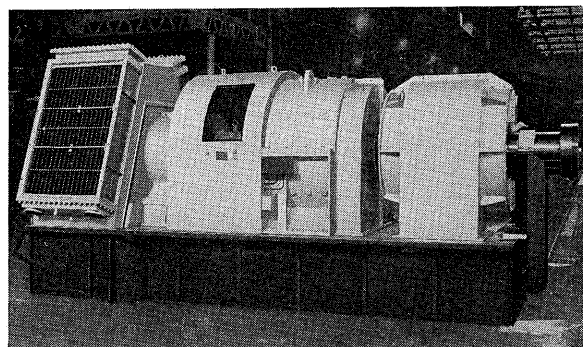
軸封油は機外に設けられた軸封油供給装置から供給され油圧はダイヤフラム式の差圧調整弁によって機内圧に対して常に  $1 \text{ kg/cm}^2$  高い差圧をもつよう調整している。

軸封油の供給が一瞬たりとも断えぬよう軸封油ポンプに予備を設けるほか、軸封油系統はタービン制御油系統に常用と別の差圧調整弁を介して結合されており、常用、予備の軸封油ポンプが故障した場合には自動的にタービン制御油系統から軸封部に油が供給され、さらに、その系統の差圧調整弁が故障した場合は手動により給油可能になっている。

事故を未然に防ぐよう軸封油供給系統にある各種タンク油面の高低、油温、油圧、真空度に対する警報装置が設けられ、これらの警報装置、各種タンクバルブ類は操作しやすい一つのセットにまとめられ、前記の水素ガス制御装置とともに発電機床下に配置されている。

## IV. 励 磁 機

この発電機は標準ブラシなし励磁方式を採用している。これは 2 極タービン発電機に対して当社の標準励磁方式である。第 5 図は励磁機の外観を示す。



第 5 図 ブラシなし励磁機

Fig. 5. Brushless exciter

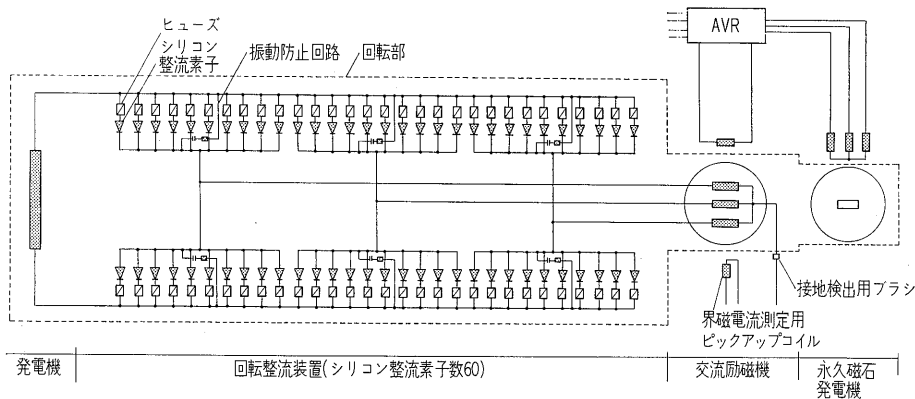
励磁機は、回転整流装置、交流励磁機、永久磁石発電機、励磁機軸受およびこれら装置の冷却用ファンから成り、これらの回転部は共通の励磁機軸に焼ばめられ、その一端は発電機軸端に直結されて発電機軸受によって支えられ、他端は交流励磁機と永久磁石発電機間に設けられた励磁機軸受で支えられている。

励磁機の回転子は、発電機回転子に直結される前に発電機側に仮の軸受を設け、バランスマシン上で高精度にバランス調整されるので、発電機と直結したのちにバランス調整する必要は少ない。本機においても現地据付後のフィールドバランスをとることなく、後章に示すような良好な振幅値におさまっている。

### 1. 回転整流装置

回転整流装置は、シリコン整流素子および冷却体、コンデンサ、抵抗、ヒューズ、結線リード、絶縁物ならびにこれらを遠心力に対して保持する保持環、およびヒューズ溶断監視用ストロボスコープから構成されている。素子数の少ない中小形機では保持環は 1 個であるが、本機ではこれを 2 個に分けて比較的小さな直径にとどめ、運転中の風損と各構成要素に作用する遠心力の増大を抑えている。

回路構成は、第 6 図に示すように 1 アーム当り 10 素子からなる三相グレート結線で、各シリコン整流素子にはヒューズが直列に接続されている。シリコン整流素子は、加圧接触形シリコン整流素子である。この形式のシリコン整流素子は 2 極タービン発電機用励磁機として、すでに数多くの実績を有し、運転実績は現在すでに 550 万時間個に達している。この励磁機は、10 並列素子のうち 2 個分の余裕定格をもち万一素子が故障してヒューズにより回路から切り放されても連続定格運転が可能であ



第6図 整流装置接続図  
Fig. 6. Connection of rotating rectifier

る。当社では必要素子数の20%以上を余裕として回路に付置している。8素子で運転している場合の回転整流装置連続出力は、4,320Aでこれは発電機の定格励磁電流2,200Aに対して約2倍の安全率がある。当社では常に1.5倍以上の安全率をとることを標準としている。

発電機に短絡が生ずると、その瞬間シリコン整流素子に過大な電流が流れる。この時の $I^2t$ 値は8素子運転で素子1個当たり2,600 A<sup>2</sup>S(5ms)であるが、これは素子の許容 $I^2t=55,000$  A<sup>2</sup>Sに対して充分余裕を持っている。シリコン整流素子の直列素子数は、突上げ励磁時においても素子に加わる電圧が素子の推奨定格交流入力電圧を上回らないように選定している。この素子は1直列素子で突上げ時励磁電圧815Vに耐える素子であり、150%の突上げ励磁を考えると定格励磁電圧545Vの発電機の励磁機として使用することができる。本機の励磁電圧370Vに対しては充分な余裕をもっている。

発電機が脱調して非同期運転に移行した場合に、シリコン整流素子にもっとも高い電圧が印加されるが、この値は定格励磁電圧の4倍を越えることは少ない。本機の場合この値は1,500Vであり2個の素子で分担するので繰返し逆耐電圧1,700Vに対して約2.3倍の余裕がある。

## 2. 交流励磁機

交流励磁機の定格は、回転整流装置の定格に対応して決定した。力率は、有効電力と皮相電力の比として決めるべきではなく、界磁巻線の定格が実際値と合致するような力率とすべきである。励磁電流は端子電圧と基本波電流および両者の力率(位相差)によって決まる。この力率は励磁機の次過渡リアクタンスによっても異なるが、0.92~0.94程度であるので安全側にみて力率を0.9とした。周波数は、出力を整流して使用するため性能には、ほぼ無関係である。極数を多くすると、周波数が大となって電機子巻線の皮相効果のため機械の利用率は低下する。逆に著しく少なくして、たとえば2極に選定すると1極当りの磁束が大きくなるので鉄心が大きくなり、また、コイルエンドが長くなって不経済なものとな

る。このため当社では最適極数として6極を励磁機の標準としている。

電機子巻線は、電機子鉄心とともに、エポキシ樹脂の全含浸処理が行なわれている。したがって耐塵、耐湿性を含めた絶縁特性、電機子全体の機械的強度とも向上し、きわめて信頼性が高い。

## 3. 永久磁石発電機

永久磁石発電機は、交流励磁機用励磁電源である一方、AVR用電源としても使用する。磁石の大きさは製作上おのずと制限があるので出力が増大するにつれて極数は多くなる。当社では小容量機では6極を標準にしているが、本機の出力は比較的大きいので、16極としている。

## 4. 保護装置

この発電機の励磁機には運転監視装置として次のものがある。

- (1) ヒューズ動作検出用ストロボスコープ
- (2) 励磁電流測定用ピックアップコイル
- (3) 内部位相角検出装置
- (4) 接地検出用スリップリングおよびブラシ
- (5) 冷却風測定用温度計

## V. 試験結果

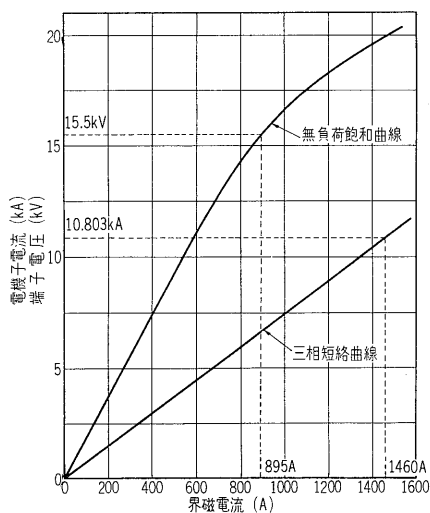
この発電機の社内試験は、発電機単体試験、ブラシなし励磁機単体試験および組合せ試験に分けて詳細に行ない充分満足する結果を得た。

発電機単体試験は、発電機に仮スリップリングを設け通常のスリップリング付発電機とまったく同様の試験をした。

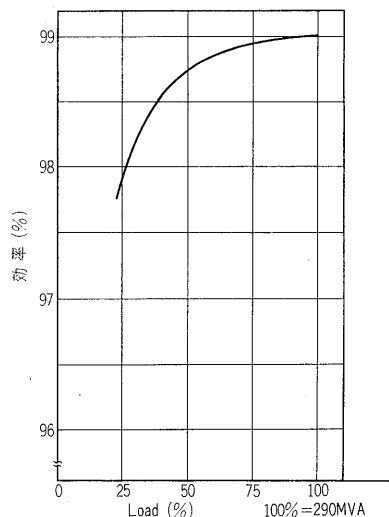
第7図は、この発電機の無負荷飽和曲線および三相短絡曲線である。

第8図は、水素圧力3 kg/cm<sup>2</sup>、力率0.9における効率曲線である。

出力250MW、回転速度3,000rpmにおける軸受振動値(片振幅)は次のとおりである。



第 7 図 無負荷飽和曲線と三相短絡曲線  
Fig. 7. Saturation curve and three-phase short circuit curve



第 8 図 効 率 曲 線  
Fig. 8. Efficiency curve

測 定 部 分		水平方向 ( $\mu$ )	上下方向 ( $\mu$ )
発電機軸受	タービン側	1.2	1.4
	励磁機側	1.7	2.4
励磁機軸受		6.5	2.5

VI. む す び

この稿において東北電力・八戸火力 4 号機として納入されたブラシなしタービン発電機の特長と、試験結果について述べたが、本機の完成にあたり終始ご協力いただいた東北電力の関係各位に感謝の意を表する。

発明の紹介

立 軸 軸 流 水 車

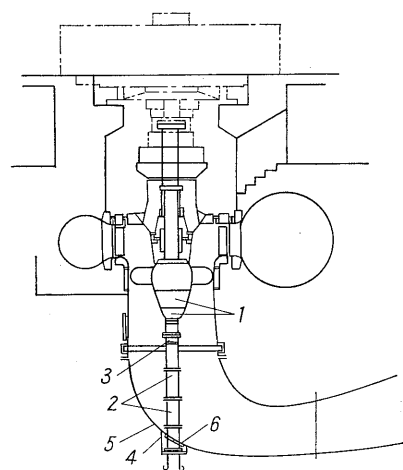
(登録 第 949380 号)

この考案はカプラン水車または斜流水車のごとく水車自体を支持するランナバンドを有しない立軸軸流水車の組立分解を簡単にするための構造に関する。

最近の技術の進歩により発電機は小形軽量化され、発電所内クレーンの容量も経済的に選択することが望まれている。ところが水車はかなりの重量であるため問題があった。

そこでこの考案では、水車の組立分解の際にランナボスカバーの下端を支えるパイプ状ランナ支持装置 2 とジャッキ 3 を支持する据付用孔 4 を下部吸出管 5 のランナ中心に相応する部分に設け、運転時には前記据付用孔 4 を蓋 6 により閉鎖するごとく構成する。

こうすることにより重量の重いランナ部を吊下げるための大容量クレーンを設置する必要がなくなり経済



的となるばかりか分解組立が簡単にかつスピーディに行なえるとともに、作業の安全性が向上する。



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。