

中国電力株式会社玉島発電所納め

390,000kVAタービン発電機のカロリ法による 現地効率試験

Efficiency Test at Site by Calorimetric Method for a 390,000kVA
Turbo-Generator Supplied to Tamashima Power Station

戸川一義*	坂元正義*
Kazuyoshi Togawa	Masayoshi Sakamoto
吉良貞省**	高根文彦**
Sadami Kira	Fumihiko Takane

In foreign countries assembly tests of large capacity generators are not effected at the factory but at site of installation, and this method is increasingly followed in this country, too.

One of the reasons of hampering full-scale adoption of the testing at site lied in the method and accuracy of efficiency tests involved.

The calorimetric method discussed in this article is one of the efficiency test methods available for field testing. The IEC has been conducting investigation is this method over long years, and in this country, with the Electric Society as a leader, extensive research and study has been conducted in the same problem.

Hitachi, Ltd., participating in the same research program, initiated its developing effort in 1964, and has already reached the stage where the method is sufficiently practical so far as the hydraulic turbine generators are concerned, after a long series of field research conducted both at home and abroad.

In the field of turbine generators, the calorimetric method has been proved to be dependable by the results of numerous tests including field tests with medium-sized units. Recently, at the Tamashima Power Station, Chugoku Electric Power Co., a field test using this calorimetric method was conducted with a large-size turbine generator. As a result, the calorimetric method was found to give the same measured values as the other conventional methods proving its practicality.

1. 緒言

火力、水力の大容量発電機においては近來材料の進歩、設計製作技術の改善、標準化とコンポーネントテストあるいは材料購入から加工、部品組立に至る製作各段階における徹底した品質管理により工場における全組立回転試験を行なわなくても現地でトラブルを生ずる懸念はなくなっている。

これらの情勢をもとにアメリカなどでは大容量発電機の工場での組立回転試験をやらないのが通例であり、わが国でも逐次この方向に移行しつつある現状である。

しかしながら、その発電機が新設計のものであるがための性能確認あるいはユーザーに対するメーカーの保証事項確認などの理由により回転試験を行なう場合があり、工場試験に代わる現地試験の方法についての検討が必要である。

大容量タービン発電機の効率試験を工場で行なうときは駆動電動機を用いた損失分離法が最も一般的であるが現地試験ではクーラに回収される熱量により損失を測定するカロリ法が有効と考えられる。

カロリ法の原理そのものはいへん簡単であり測定結果は容易に利用できるように考えられがちであるが、実際には精度、手法上の問題点がありこれらの点を解明する必要がある。

本方法はIEC (International Electrotechnical Commission) で長年にわたって検討され、IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc)でもCooler Method for Lossesとしてその試験法が規定されている。

電気学会機器技術委員会同期機専門委員会でもこの方法による効率測定法を取り上げており近く成案をみることになっている。

日立製作所においては昭和39年本方法の開発に着手し現地での実施例は表1に示すとおりである。水車発電機についてはすでに国内外で数多くの経験を有し、実用段階にはいつている。その代表例として中国電力株式会社新成羽川発電所納め水車発電機および発電電動機のカロリ法による現地効率試験の結果が本誌(VOL. 52 No. 6, 1972)に発表されている。

タービン発電機についてもこれまで幾多の工場試験あるいは中容量発電機の現地試験などによりカロリ法を行なう際の運転条件、測定器の種類、形式、測定位置、測定器の必要精度、熱放散に対する補正などの未知の問題につき一応の基準を把握(はあく)しカロリ法の実用化を検討してきた。

* 中国電力株式会社玉島発電所

** 日立製作所日立工場

表1 カロリ法による現地効率試験実績

No.	納入先	容量	実施年	備考
1	東北電力株式会社 上野尻発電所	21,000 kVA	1967	水車発電機
2	中国電力株式会社 新成羽川発電所	79,000 kVA	1969	水車発電機
3	中国電力株式会社 新成羽川発電所	$\frac{79,000 \text{ kVA}}{73,000 \text{ kW}}$ (3台)	1969	水車発電電動機
4	ギリシア カストラキ発電所	77,390 kVA (2台)	1970	水車発電機
5	十条製紙株式会社 石巻工場	23,000 kVA	1971	タービン発電機
6	ラオス ナムグム発電所	17,500 kVA	1971	水車発電機
7	アメリカ ティムズフォード発電所	50,000 kVA	1972	水車発電機
8	中国電力株式会社 玉島発電所	390,000 kVA	1972	タービン発電機

今回、中国電力株式会社玉島発電所納めの390,000kVAタービン発電機に対し、カロリ法による現地効率試験を実施した。

本機は固定子巻線が水冷、回転子が水素直冷方式のものであり、カロリ法による効率試験を行なったものとしては記録的大容量機である。

本方法による試験結果は工場でのほかの方法による測定値とよく一致した高精度のものであり、カロリ法が大容量タービン発電機に対して十分実用に供しうることが証明された。

2. カロリ法について

カロリ法とは発電機内部に発生した鉄損、銅損、漂遊負荷損、界磁損、風損・摩擦損、軸受損などの発生損失がすべて熱に還元されることから、冷却媒体の流量および温度変化を正確に測定し諸損失を知ろうとするものである。カロリ法は原則として閉鎖通風空冷または水素冷却の機械で内蔵された冷却器を有するものに採用されるが、直接冷却の機械にも適用可能である。負荷時に発生する熱は大部分冷却媒体（たとえば空気、水素）により冷却され、この熱量は熱交換器により冷却水に回収される。したがって熱平衡の状態においてこの熱交換器の給排水の水量と温度差を求めることにより、そのときに発生している損失を求めることが可能である。しかし正確には損失により発生した熱はすべて熱交換器に回収されるのではなく次に示すような部分を通して機外に放散される。

- (1) 熱伝達により大地に逃げる損失。
 - (2) 外気が機械表面に触れ、この面での対流と熱放散により外気へ流出する損失。
 - (3) タービンなど原動機と直結した軸を介して流出入する損失。
- (1)および(3)の損失はわずかであり一般に無視してもさしつかえない値である。(2)の損失に対しては機械表面からの熱放散に対する放散係数が各国から種々の値で提案されている。

今回の試験に際しては放散係数値に風速の影響が明白なノルウェー案を採用した。

2.1 損失計算式

IECの原案^(注1)をもとにした各損失の計算式を示すと次のとおりである。

(注1) IEC Technical Committee 2, Sub-Committee 2D, 2 July, 1965ほか
 (注2) IEC Technical Committee 2, Sub-Committee 2D, 28 February, 1964 Proposals of the French Committee for the revision of IEC Publication 34-2.
 (注3) IEC Technical Committee 2, Sub-Committee 2D, 2 July, 1965 Comments of the Swedish Committee on Document 2D(France)5: Proposals of the French Committee for the revision of IEC Publica-

- (1) 気体冷却器の冷却水への伝熱 P_1 (kW)

$$P_1 = K_1 \cdot Q_1 \cdot \Delta t_1$$

ここに、 Q_1 : 冷却水量 (l/s)

Δt_1 : 冷却水温度上昇 (deg C)

K_1 : 水の換算係数、今回の試験では4.19 (kW-S/l-deg C) を採用

IEC Publication 34-2, 1960, Recommendations on determination of efficiency of rotating electrical machinery の改訂案として各国から出されている提案の中で K_1 の値は次のようになっている。

$K_1 = 4.2$ ……フランス案^(注2)

$K_1 = 4.22$ (0°C), 4.2 (5°C), 4.19 (10~25°C)

……スウェーデン案^(注3)

- (2) 固定子コイル冷却水冷却器の冷却水への伝熱: P_2 (kW)

$$P_2 = K_2 \cdot Q_2 \cdot \Delta t_2$$

ここに、 K_2 : 水の換算係数 (1)項と同じ

Q_2 : 冷却水量 (l/s)

Δt_2 : 冷却水温度上昇 (deg.C)

- (3) 発電機表面、配管表面よりの熱放散: P_3 (kW)

$$P_3 = \sum (K_3 \cdot A_3 \cdot \Delta t_3) \times 10^{-3}$$

ここに、 A_3 : 放散表面積 (m²)

Δt_3 : 周囲温度との温度差 (deg.C)

K_3 : 熱放散係数 (W/m²-deg.C)

K_3 の値をIEC規格からいくらに定めるかは各国から次のように提案されている。

$K_3 = 10$ (W/m²-deg.C) ……フランス案^(注2)

$K_3 = 10$ (W/m²-deg.C) (周囲の空気が静止しているとき)

$K_3 = 20$ (W/m²-deg.C) (周囲の風速が1m/sのとき)

……スウェーデン案^(注3)

$K_3 = 11 + 4v$ (W/m²-deg.C)

ここに、 v : 表面に沿っての空気の平均風速 (m/s)

……ノルウェー案^(注4)

今回の試験ではノルウェー案を採用した。

- (4) 軸受損: P_4 (kW)

$$P_4 = K_4 \cdot Q_4 \cdot C_4 \cdot \rho_4 \cdot \Delta t_4 \dots \dots \text{IEEE規格}$$

ここに、 K_4 : 水の換算係数 (1)項と同じ

Q_4 : 潤滑油量 (l/s)

C_4 : 水に対する潤滑油の比熱

われわれは $C_4 = 0.48$ (50°C)^(注5)を採用

ρ_4 : 水に対する潤滑油の比重

われわれは $\rho_4 = 0.87$ (50°C)^(注5)を採用

Δt_4 : 潤滑油の油度上昇 (deg.C)

- (5) シール油に吸収される損失: P_5 (kW)

$$P_5 = K_5 \cdot Q_5 \cdot C_5 \cdot \rho_5 \cdot \Delta t_5$$

ここに、 K_5 : 水の換算係数 (1)項と同じ

Q_5 : シール油量 (l/s)

C_5 : シール油比熱 (4)項と同じ

ρ_5 : シール油比重 (4)項と同じ

Δt_5 : シール油の温度上昇 (deg.C)

- (6) 発電機基礎への熱放散: P_6 (kW)

フランス、ノルウェーの提案では $P_6 = 0$ である。われわれもこれを無視した。

tion 34-2

(注4) IEC Technical Committee 2, Sub-Committee 2D, 1965 Comments of the Norwegian Committee on Document 2D(France)5: Proposals of the French Committee for the revision of IEC Publication 34-2

(注5) 'Petroleum Science' 1938 および日本石油タービン油90番カタログ値による。

2.2 その他の損失

2.1項で述べた損失のほかで、集電環、刷子の風損・摩擦損、集電環ファンの所要動力およびカップリング摩擦損については空気量と給排気の温度差を測定すれば発生損失を求めることができる。しかしながらこれら損失の総損失に占める割合は比較的小さく、また高精度の実測をするための測定上の都合から今回は実測せず計算値を用いた。

2.3 測定内容

発電機のカロリ法による測定としては、発電機無負荷で機械損、鉄損、漂遊負荷損などの諸損失を測定してそれらから規約効率を求める方法と、負荷状態での損失を測定して実測効率を求める方法とに分けられる。

今回は後者の方法により $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{2}{4}$ 、 $\frac{3}{4}$ 、 $\frac{4}{4}$ 負荷でそれぞれ損失を測定して実測効率を求め1号発電機の工場損失測定結果により、2号機の試験条件での1号機規約効率を求め両者の比較を行なった。

3. 測定計器の精度と測定技術

測定に使用した計器およびその精度を示すと表2のようになる。

表2 使用計器一覧表

No.	測定項目	計器名称	測定点数	測定精度、範囲
1	冷却水量	ポットメータ	5	誤差 0.5%以内
2	軸受給油量	ポットメータ	2	誤差 0.5%以内
3	冷却水温度差	抵抗線形温度検出素子 微温度差計	10 (5点)	0~10deg. 記録計式 最小目盛 0.05deg.
4	潤滑油温度差	抵抗線形温度検出素子 微温度差計	4 (2点)	0~10deg. 記録計式 最小目盛 0.05deg.
5	シール油量	油タンク	1	誤差 1%以内
6	シール油温度	サーモカップル データロガー	4	誤差 0.5%以内
7	ステータ表面温度	サーモカップル データロガ	35	"
8	クーラ部表面温度	サーモカップル データロガ	26	"
9	エンドブラケット部表面温度	サーモカップル データロガ	6	"
10	ベアリングキャップ部表面温度	サーモカップル データロガ	6	"
11	ターミナルボックス部表面温度	サーモカップル データロガ	10	誤差 0.5%以内
12	固定子冷却装置および配管表面温度	サーモカップル 記録温度計	17	誤差 0.5%以内 最小目盛 0.5°C
13	周囲温度	サーモカップル 水銀温度計	3 16	誤差 0.5%以内 最小目盛 0.1°C
14	熱放散表面風速	アネモメータ	3	0~10 m/s
15	出力	特別精密級積算電力計 (盤取付)	1	
16	電圧、電流	交流電圧計 交流電流計 直流電圧計	3 3 2	} 0.5級
17	コイル、ガス温度	記録温度計 コンピュータ	12	最小目盛 1°C

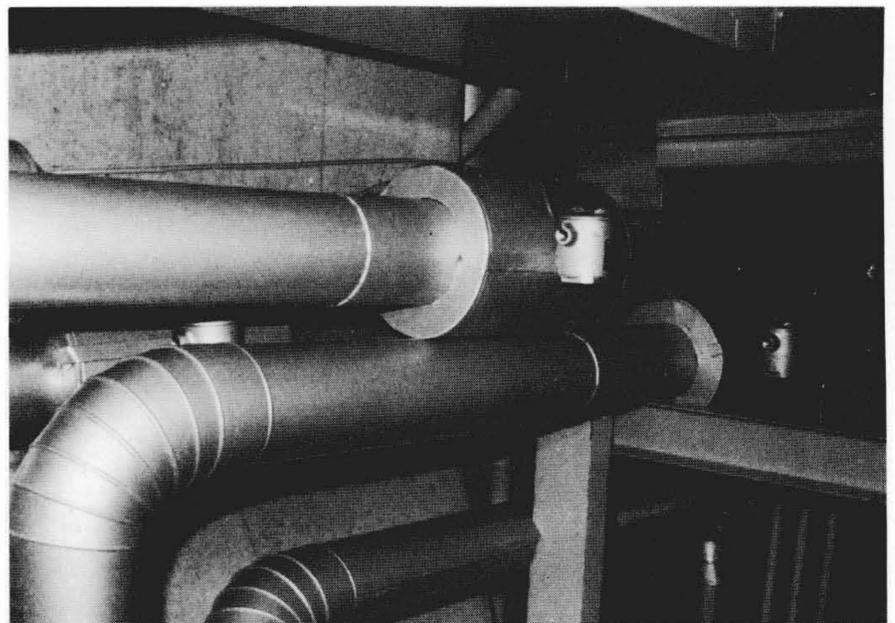


図1 水素冷却器系統ポットメータ取付図

3.1 冷却水、潤滑油の流量測定

水素冷却器、固定子冷却水冷却器の冷却水流量の測定および潤滑油流量の測定法としてはベンチュリ管、オリフィス、ノズル、容積式、超音波式、タービン式などの流量計を使った種々の方式があるが、いずれの方式でもよい。一般に流量測定の誤差は多いものといわれており、この誤差が測定結果の精度に及ぼす影響がきわめて大きいので、±1%以上の精度を有するものでなければならない。われわれは±0.5%の精度のポットメータ（タービン式）を使用した。

流量計の取付けに際しては水平配管部で流量計前後に十分な直管部を有する場所を選んで行なった。一例として水素冷却系統の流量計取付け状態を示すと図1のとおりである。

3.2 冷却水および潤滑油の温度差測定

冷却水および軸受潤滑油の温度上昇測定には抵抗線形温度計あるいはサーモカップルが用いられる。測定法には供給側温度および排出側温度をそれぞれ独立に測定してその差をとるか、あるいは直接に温度差計を使って測定するかの方法があるが、最も好ましい方法は直接温度を測定すると同時に温度差を測定するものでも記録計式であることである。

いずれの場合でも測定精度が±1%以内の装置を使用しなければならない。われわれは、抵抗線形温度検出素子による最小目盛0.05°Cの微温度差計を使用した。冷却水および潤滑油の温度上昇測定に対しては、管路の途中での熱の吸収放散の誤差がはいらぬように、できるだけ熱源に近い部分で水または油がよく混ぜられて温度が均一になるところ（図2、図3）で測定した。

なお、固定子冷却装置については純水系統諸量を直接測定する

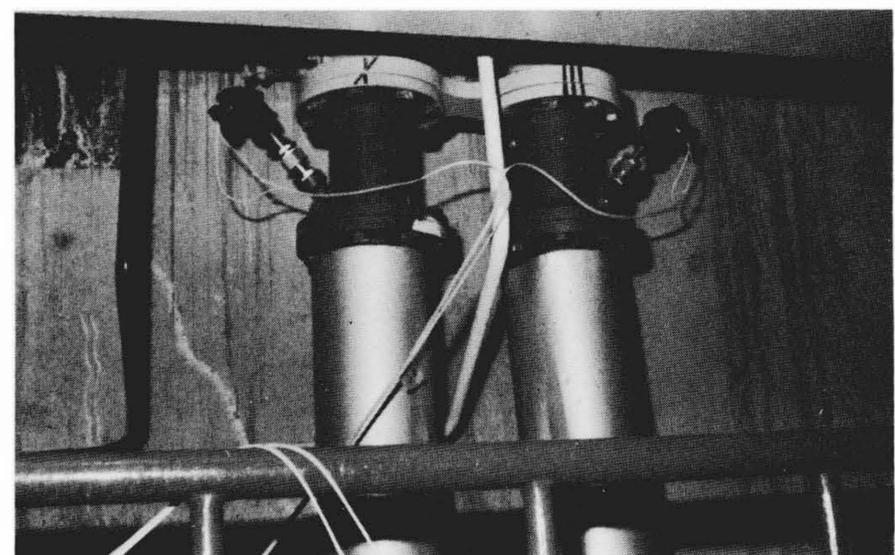


図2 水素冷却器系統温度検出素子取付図

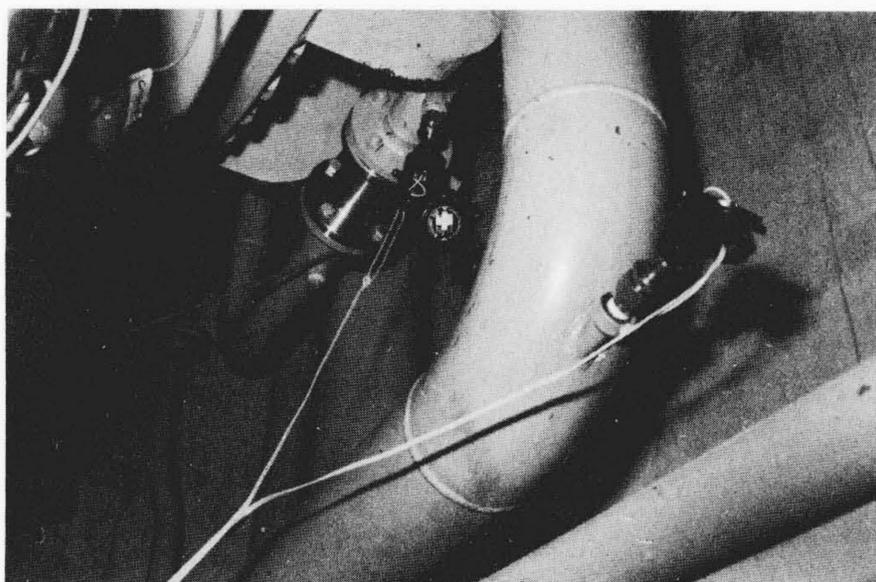


図3 潤滑油系統温度検出素子, ポットメータ取付図

ことはコイル導体の通水路内に異物を入れる危険性が多いため純水冷却器の冷却水の持ち去る熱量を測定する方法をとった。

温度測定は熱平衡に達したのちに行なわなければならない。熱平衡に達した時点の判別に対してはノルウェー案では「0.1°Cの読み誤差を有する温度記録計で監視して冷却給水温度の変化が3時間で0.1°C以下で冷却系統を通る冷却水温度上昇変化が1時間で±0.1deg以下になったとき熱平衡に達したとみなす」と規定されておりわれわれはこの規定に従って測定を行なった。

3.3 その他の温度測定および表面風速の測定

発電機内に発生する損失は一部分は輻射(ふくしゃ)伝熱や対流熱伝達によって発電機ステータ表面, 配管表面などより放散する熱量がある。この熱量を精度よく求めるため, ステータ表面35点, 同クーラ部表面26点, ターミナルボックス部表面10点など合計85点の表面温度をサーモカップルにより測定した。この温度記録は周囲温度などと合わせて測定点がきわめて多かったため図4に示すようにデータログを用いてタイプライタによりタイプアウトした。表面温度については発電機上, 発電機下などで差があるのでいくつかのセクションにわけて熱量の算出を行なった。それによって周囲温度についても各セクションごとに測定し, 測定精度の確保に留意した。周囲温度, 表面温度の測定の一例は図5に, 測定位置は図6および図7に示すとおりである。

ステータ表面, 固定子冷却装置まわりなどでの風速測定におい

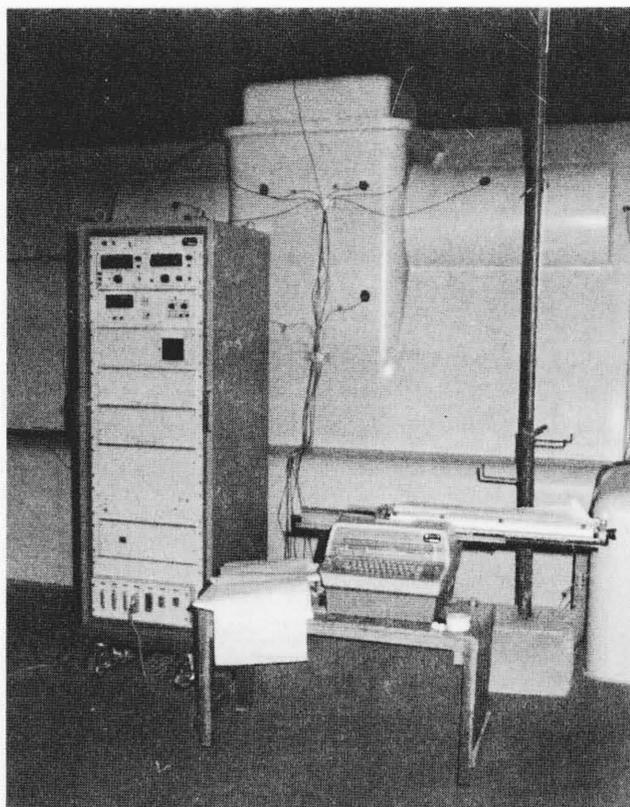


図4 ステータ表面温度測定と温度記録用データロガー外観

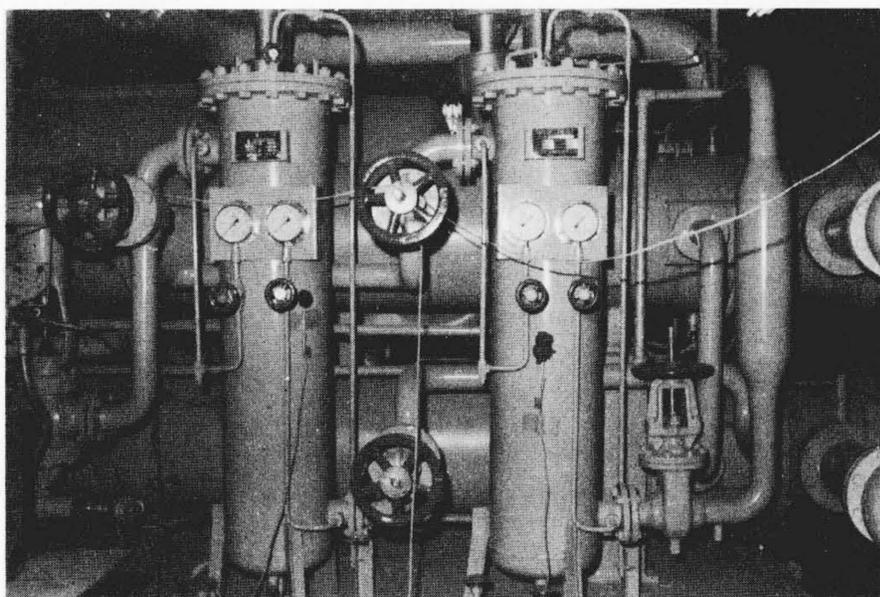


図5 固定子冷却装置表面温度測定

てはアネモメータを用いて行なったが, 今回の測定においてはいずれも風の流れは認められず風速はゼロと考えた。

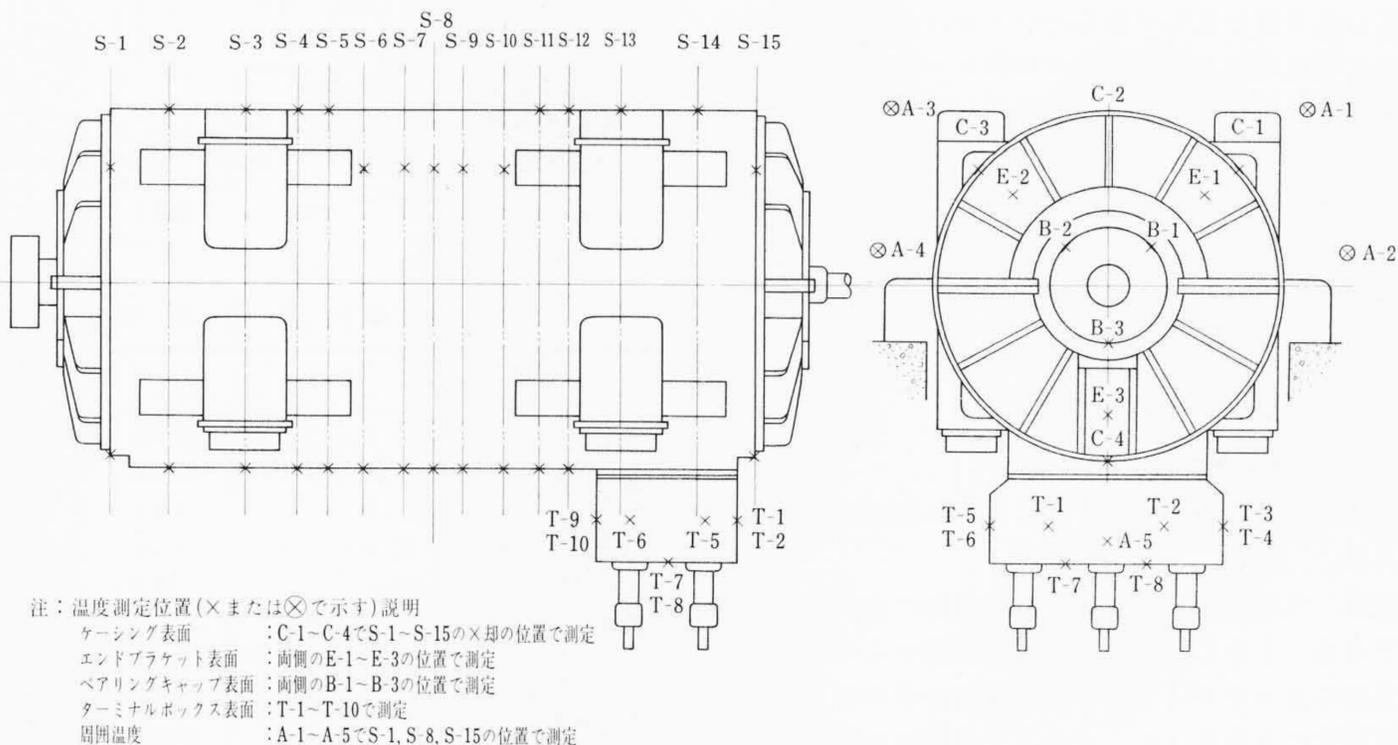
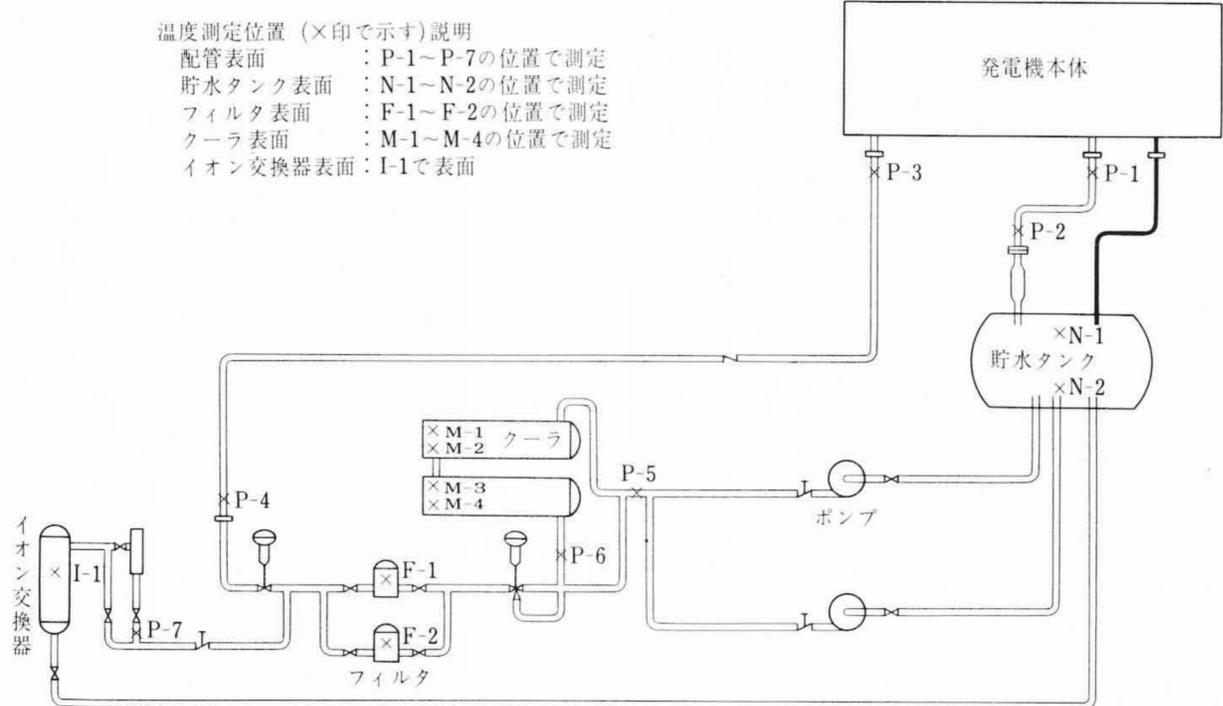


図6 温度測定位置説明図



温度測定位置 (×印で示す) 説明
 配管表面 : P-1~P-7の位置で測定
 貯水タンク表面 : N-1~N-2の位置で測定
 フィルタ表面 : F-1~F-2の位置で測定
 クーラ表面 : M-1~M-4の位置で測定
 イオン交換器表面 : I-1で表面

図7 固定子冷却系表面温度測定位置

3.4 温度上昇最終値の判定

従来の工場試験における入力法による損失測定においては 0.1 deg.C程度の温度変化はあまり問題としなかった。しかしカロリ法においては1けた下のオーダーを問題とするので、完全に熱平衡に達した状態において測定を実施する必要がある。われわれは冷却水温度上昇の変動が1時間で±0.05deg.C以内になるような時点を熱平衡と判定した。水車発電機の場合、過去の実績から熱平衡に達するのに10時間程度を必要とすることがわかってきた。これに対し水素冷却のタービン発電機の場合は熱時定数が水車発電機のそれに比べて小さいので、この時間は2時間程度で十分であることが工場での試験において確認されていた。われわれは今回余裕をみて測定開始4時間前より負荷を一定として、4時間後より10分ごとに5回のデータ測定を行なった。損失はその平均値より2.1項に述べた計算式により算出した。

4. 測定上の留意点

カロリ法は発電機の出力のわずか1~2%の損失を測定するものであるから、測定にあたっては十分な注意を払わなければならない。今回これまでの経験をもとに払った測定上の留意点を列記すると下記ようになる。

- (1) 温度測定は熱平衡に達してから行なわなければならないので余裕をみて測定開始4時間前より負荷を一定とする。
- (2) 軸受油温度が変われば油の粘度が変わり、軸受損失が変わるので各試験に際し、軸受潤滑油の温度を一定とする。
- (3) 風損は回転数が一定であれば冷却気体の密度に比例するので機内圧力を一定とする。
- (4) 発電機周囲の環境および給水温の変化は、熱平衡に達する時間を長くするので注意を要する。

5. 実測結果

5.1 試験項目および試験条件

今回実施した試験は前述のとおり、1/4, 2/4, 3/4および4/4負荷での効率試験である。

発電機端子電圧、力率については発電機の定格に合わせて実施するのが理想である。しかし、試験実施時の系統からの制約により、これらを定格に合わせることは一般的にはむずかしい。したがって今回の試験では各負荷とも、そのときの系統の許しうる最大の無効電力をとった任意の端子電圧、力率において実施した。

5.2 測定項目と測定点数

今回の試験で測定した温度、流量などの項目および測定点数をまとめると表2のようになる。

5.3 実測結果よりの損失算出

測定は十分熱平衡に達した時点において10分ごとに5回行ないその平均値より2.1項に述べた計算式を使って損失を算出した。

算出した諸損失は表3に示すとおりである。

5.4 結果の比較

前述のとおり、系統からの制約により試験は各負荷とも任意の力率で実施したので1号機との比較は次のようにして行なわれた。すなわち1号機の工場実測の損失曲線から2号機カロリ法試験実

表3 測定結果より求めた損失

負 荷 状 態	1/4 負 荷	2/4 負 荷	3/4 負 荷	4/4 負 荷
発 電 機 出 力 (kW)	88,785	172,745	263,250	351,073
水素冷却器に吸収された損失 (kW)	1,162.5	1,480.7	1,768.1	2,150.8
潤滑油に吸収された損失 (kW)	530.8	534.3	538.0	535.8
シール油に吸収された損失 (kW)	29.9	29.5	31.8	32.5
発電機表面より放散された損失 (kW)	25.4	23.2	23.3	23.8
固定子冷却水冷却器に吸収された損失 (kW)	47.2	204.9	433.0	818.0
固定子冷却装置および配管表面より放散された損失 (kW)	6.2	6.2	7.7	10.7
その他計算値使用の損失合計 (kW)	79.0	79.0	79.0	79.0
総 損 失 (kW)	1,881.0	2,357.8	2,880.9	3,650.6

表4 効 率 比 較 表

		負 荷 状 態	1/4 負 荷	2/4 負 荷	3/4 負 荷	4/4 負 荷
2 号 機	現 地 試 験 条 件	発 電 機 出 力 (kW)	88,785	172,745	263,250	351,073
		発電機無効電力 (kVAR)	43,060	83,781	86,346	90,000
		端 子 電 圧 (V)	18,812	19,338	19,312	19,312
		電 機 子 電 流 (A)	3,030	5,742	8,226	10,813
		力 率 (遅れ) (%)	89.9	89.9	95.6	96.9
1 号 機	効 率 (%)	現 地 試 験 (カロリ法)	97.93	98.65	98.92	98.97
		工 場 試 験* (損失分離法)	97.92	98.64	98.90	98.95

注：* 1号機効率は工場において測定した1号機の損失曲線を使って2号機現地試験条件に合わせて算出したものである。

施時の条件での損失および効率を算出し、これと2号機実測値との比較を行なった。

表4は2号機実測効率と2号試験条件での1号機の規約効率との比較を示したものである。表4に示すとおり、効率の差は最大0.02%であり、1号機工場試験の結果ときわめてよく一致した結果が確認された。

6. 結 言

日立製作所は過去数年にわたり工場試験および国内外での主として水車発電機の現地効率試験をカロリ法により実施し多くの実績を有しているが、今回これをもとに中国電力株式会社玉島発電所の2号390MVAタービン発電機の現地効率試験を実施した。事業用タービン発電機のカロリ法による現地効率試験はわれわれにとって初めての経験であったが、タービン発電機についてもカロリ法により十分信頼に足る結果が得られることを実証できた。カロリ法が比較的簡単に行なえる利点、工場と現地で全く二重の測

定を行なう必要のないこと、さらに工場における完全組立、回転試験を行わないことによる時間の節減が、帰るところ運転開始の早期化に寄与することを考えると今後ますます本方法の適用拡大が期待される。ただしその前提として緒言に述べたように工場においては発電機部品のコンポーネントテストあるいは材料購入から加工、主要部品の部分組立に至る製作各段階の徹底した品質管理を必要とすることはいうまでもない。

今回の現地試験に際して、そのもととなった水車発電機のカロリ法を開発されたかたがたならびに終始ご指導をいただいた中国電力株式会社杉山火力部長をはじめ関係各位に深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 新崎ほか：79,000kVA水車発電機および79,000kVA/73,000kW発電電動機のカロリ法による現地効率試験：日立評論 52, 493(昭45-6)

Vol. 54

日 立 評 論

No. 9

目 次

■ 論 文

- ・変動落差の大きい斜流水車計画上の問題点
- ・プロセス制御用言語PCL/1の開発
- ・NTL LSIで構成した小形コンピュータの試作
- ・連続鑄造設備の計算機制御
- ・電子式卓上計算機用多こう表示放電管“ラインスター”
- ・高速揺動形フライングシャー
- ・800t積自動運搬車の構造と性能
- ・鋼管移送騒音防止装置“マグネスキッド”

- ・難燃性ポリウレタンエナメル線の諸特性

■ 大容量蒸気タービ特集

- ・大容量蒸気タービンの動向と計画上の諸問題
- ・タービン長翼の開発
- ・蒸気タービンロータの熱疲労と問題点
- ・中国電力株式会社・島根原子力発電所納め 第1号機465MW原子力タービンの特長
- ・EHG (Electro-Hydraulic Governor) と運転の自動化
- ・大形復水器の運転特性

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内一丁目5番1号
郵便番号 100

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101
振替口座 東京 20018番