

発電機の寿命と保守

小林徳太郎*

The Life and Maintenance of Generators

By Tokutarō Kobayashi
Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The burning damage of the stator coil of generator due to the deterioration of insulation is claiming a sum of about 1,000,000,000 yen out of the annual maintenance expense of power houses of Japan. This figure is equivalent to about 20% of the total loss to be caused by the troubles in operation of power house equipment.

The life of generator is considered to range from 20 to 30 years when viewed in terms of its insulation. The writer suggests in the article the following are a sure way of extending the life limit of generators and cutting the above cited burning damages to a minimum.

- (1) Keep to a continual recording of coil temperatures during generator operation. By supervising the temperature curves the user can know when the maintenance for this vital part of generator is due.
- (2) Maintain the similar constant supervision for the vibration of the machine so as to be able to give an opportune maintenance.
- (3) Those stator coils that have been in use for 20 years or so should be given local repair wherever the fatigue is observed, and those in service for more than 25 years should preferably be replaced with a new one.

の主因とみられる絶縁劣化の問題をとりあげてその寿命および延命対策を述べる。

〔I〕 緒 言

近来水車発電機の寿命がますます重要視されるようになって来たので、これに関する諸問題につき考察してみた。主として電気学会誌（昭28. 8, 9, 10月号）上に掲載された諸資料による故障統計を各角度から検討し、事故

〔II〕 統計上からみた発電機事故

第1表の「発電設備別事故比率」により機器別の事故率を調べるとつぎのごとくなる。

第1表 発電設備別事故件数および総比率（1ヶ年平均）
Table 1. No. of Accident at Apparatus in Power Station

機 器 名	電 力 区	北 海 道	東 北	東 京	中 部	関 西	四 国	合 計	百 分 率
水 車		20.3件	41.2件	167.0件	47.5件	140.6件	21.5件	438.1件	35.4%
発 電 機		10.3"	17.8"	66.9"	39.5"	44.59"	24.5"	203.59"	16.5"
変 圧 器		4.7"	10.7"	18.5"	10.5"	12.5"	4.5"	66.8"	5.4"
配・開・器 具		18.0"	24.4"	36.0"	20.0"	57.0"	43.0"	198.4"	16.0"
諸 機 器		1.0"	49.1"	49.0"	52.5"	60.0"	0.5"	212.1"	17.0"
そ の 他		4.3"	2.3"	100.0"	—	8.5"	5.0"	119.1"	9.6"
合 計		58.6件	145.5件	437.4件	170.0件	323.19件	99.0件	1,238.09件	100.0%

(注) 水路、建物などは計上しない。
不明確な北陸、中国、九州の三社の分は計上しない。

* 日立製作所日立工場

順位	機 器	事故率(%)
1	水 車	35.4
2	諸 機 器	17.0
3	発 電 機	16.5
4	配電, 開閉器具	16.0
5	そ の 他	9.6
6	変 圧 器	5.4

また事故による停電損失量(kWh)からみると第2表のごとくなり、結局停電損失からみた重要度はつきのごとくなる。

順位	機 器	停電損失量(%)
1	発 電 機	70.0
2	水 車	18.7
3	配電, 開閉器具	10.2

第2表 停電損失(kWh)から見た機器別重要度

Table 2. Weight of Apparatus to be Considered from A Standpoint of Loss in Generating Power at Accident

機 器 名	項目	事故百分比(A)	損失百分比(B)	$A \times B = C$	重要度 $\frac{C}{C}$	摘 要
水 車		35.4%	10.43%	339	18.7%	(A)は第1表から転記 (B)は四国電力の調査による (C)は事故件数の比率に1件当り停電損失量の割合を掛けたもので、各原因を停電損失全量から比較した数字となる 重要度は(C)で各(C)を除した百分比である
発 電 機		16.5"	76.5"	1,262	70"	
変 圧 器		5.4"	0.15"	0.81	—	
配, 開, 器 具		16.0"	12.68"	203	10.2"	
諸 機 器		17.1"	0.09"	1.54	—	
そ の 他		9.6"	0.15"	1.44	—	
合 計		100.0%	100.0"	1,807.79 (C)		

第3表 発電機構成部分別事故比率
(数値は一年間における件数を示す)

Table 3. No. of Accident in Parts of Generator

電力区 部分別	北海道	東北	北 陸	東 京	中 部	関 西	中 国	四 国	九 州	合 計	百分比
発電子コイル	2.33件	15.80件	15.30件	29.40件	22.00件	22.30件	17.00件	11.00件	33.50件	168.63件	50.0%
界 磁 極	0.50"	0.40"	1.67"	4.90"	3.00"	3.43"	3.50"	1.50"	4.66"	23.56"	7.0"
励 磁 機	3.83"	0.90"	2.30"	11.90"	6.00"	7.43"	5.00"	4.50"	20.30"	50.01"	18.5"
軸 承	2.67"	0.30"	3.67"	10.35"	2.50"	8.00"	4.00"	4.50"	10.00"	45.99"	13.5"
そ の 他	1.00"	0.40"	0.83"	10.35"	6.00"	3.43"	0.50"	3.00"	12.33"	37.84"	11.0"
合 計	10.33件	17.80件	23.77件	66.90件	39.50件	44.59件	30.00件	24.50件	80.79件	338.18件	100.0%

第4表 絶縁焼損件数の原因別比率
(数値は一年間の事故件数を示す)

Table 4. Causes of Break Down of Armature Coil

電力区 原因別	北海道	東北	北 陸	東 京	中 部	関 西	中 国	四 国	九 州	合 計	百分比
絶 縁 劣 化	1.33 件	6.70件	7.70件	17.40件	7.15件	8.60件	3.00件	8.25件	15.6 件	75.73 件	44.9%
波 及 事 故	0.334"	1.90"	2.40"	2.18"	4.10"	3.40"	3.00"	0.50"	2.90"	20.714"	12.3"
雷 害	0.333"	4.90"	3.85"	5.98"	6.65"	6.70"	6.00"	0.50"	9.50"	44.413"	26.3"
そ の 他	0.333"	2.30"	1.35"	3.84"	4.10"	3.60"	5.00"	1.75"	5.50"	27.773"	16.5"
合 計	2.33 件	15.80件	15.30件	29.40件	22.00件	22.30件	17.00"	11.00件	—	168.630件	100.0%

以上からあきらかなごとく、事故件数においては発電機は水車の48%にすぎないが、1件当りの停電損失率において735%となつてゐるため、故障による損害は水車の370%となつてゐる。これによつていかに発電機事故が大きな損失をもたらすかがわかる。

つぎに発電機事故の内訳を調べると、構成部分別の事故件数比率は第3表のごとくであり、そのうちの発電子線輪事故は原因により第4表のごとく分類される。この発電機線輪事故による損害高を推察してみる。発電機1件当りの停電損失量272MWh(第5表参照)に1年間の線輪事故件数平均168.63(第4表参照)をかけると4587万kWhとなり、電力料金5円/kWhと仮定すると22,935万円となる。これは概算値ではあるが、ほぼ2,000kWの発電所建設費に相当するものとして注目に値する。このうち絶縁劣化事故に負うところの損害高は約1億円である。

第 5 表 発 電 機 寿 命 に 関 連 す る 事 故 統 計
Table 5. Statistics of Accidents Regard to Life of Generator

要 目 電力区	調 査 期 間	調 査 範 囲	発 電 機 事 故 (1ヶ年平均) 件 数 (G)	事 故 件 数 の 原 因 別 割 合 (%)						摘 要 (各 会 社 前 が き)
				(G)対コ イル事故	(G)対絶 縁劣化	(G)対雷 害	(G)対波 及事故	(G)対 風水害	(G)対 その他	
北 海 道	6 年	(52ヶ所 355件)	10.33件	22.6	57.1	14.3	14.3	—	14.3	○発電支障を来したるのみ
東 北	10年	(232ヶ所 366台)	17.80件	88.8	42.4	12.0	31.0	—	14.6	○統計資料としては完全でない
北 陸	6 年	(85ヶ所?) 171台	23.77件	63.6	50.0	25.2	15.4	—	8.3	○自然劣化も絶縁劣化として計上した
東 京	1年10ヶ月	(237ヶ所 800件)	66.90件	44.5	59.2	20.4	7.4	—	13.0	○東京電力となつてからの事故を計上した
中 部	2 年	(170ヶ所?) 342件)	39.50件	55.6	32.6	30.2	18.6	—	18.6	○統計としては不十分だが参考まで
関 西	1年9ヶ月	(232ヶ所 548件)	44.59件	50.0	38.5	30.0	15.6	—	16.1	○昭 26. 5月~7月間は不詳につき省略
中 国	2 年	(86ヶ所 146 台)	30.00件	54.0	18.0	35.0	18.0	—	29.0	○昭 26. 5月から昭 28. 4月まで
四 国	2 年	(61ヶ所 105台 206 件)	24.50件	44.5	36.3	40.8	4.5	—	18.4	○コイル焼損による無効放流防止策望む
九 州	6 年	(176ヶ所 218台)	80.79件	41.4	46.7	28.4	8.5	11.4	5.0	○コイル重点主義で計上, その他省略

損 害 高 計 算: (1,330ヶ所) 338.18件 平均=50% (第3表より)
 (G) 事故1件当り停電損失=272 MWh (四国電力調)
 コイル事故件数=338.18×(50%)=168.63 (第3表より) 故にこれによる損失=272×168.63=45,868 MWh
 =4,587万 kWh

〔III〕 発 電 機 の 寿 命

発電機の寿命は従来 20~30 年といわれているが、これを少しく検討してみよう。

各種絶縁の寿命と温度との関係を表わす式には種々あるが、一例として日月博士の実験式を線図化したものを示すと第1図のごとくである。本式は絶縁劣化は単に温度だけに支配されるとしたものであり、これによれば

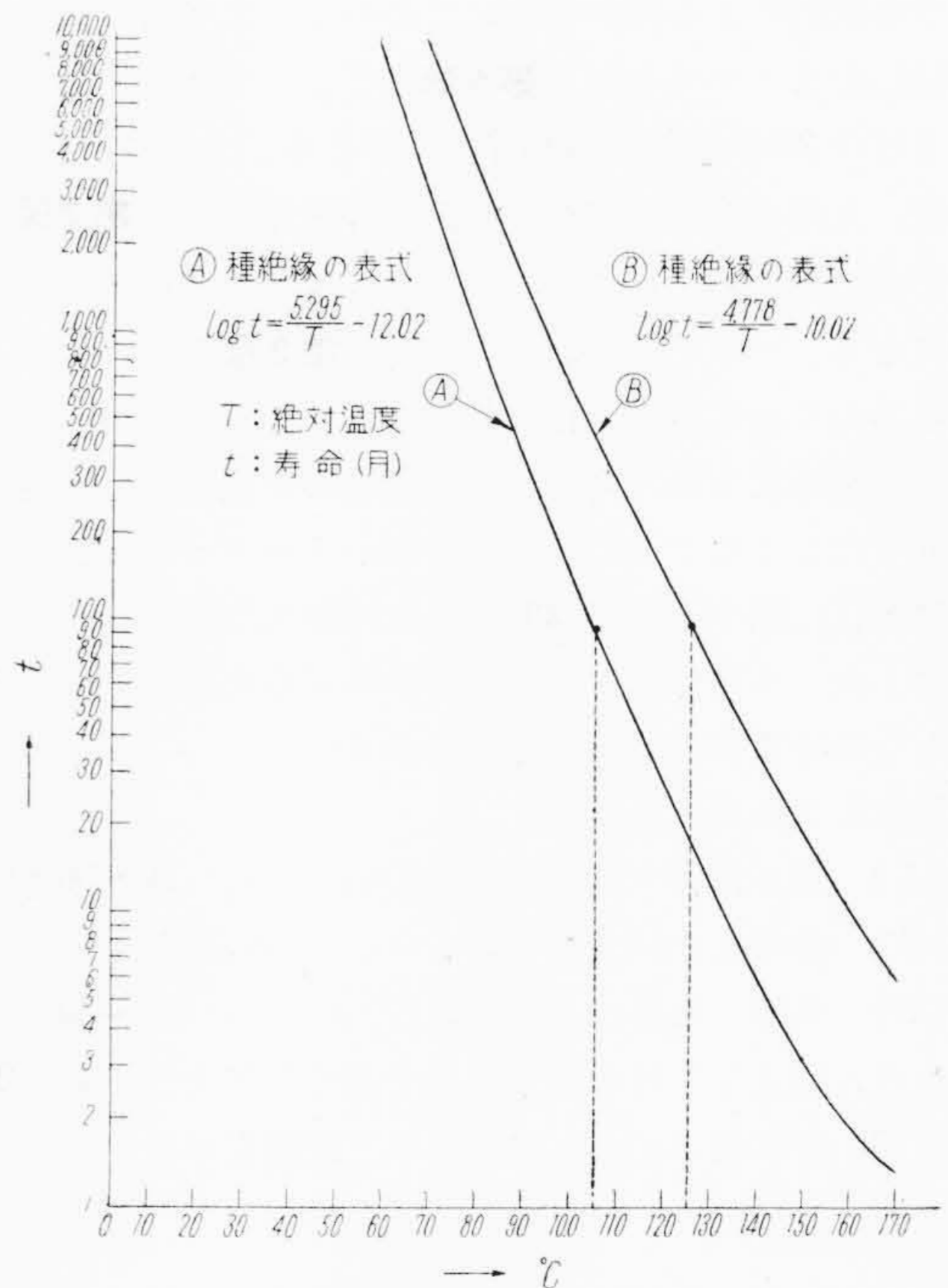
A種絶縁の場合 発電機の運転温度を平均70°Cとし、線輪内最高温度を85°Cとすれば寿命は46年となる。

B種絶縁の場合 運転温度平均85°C、線輪最高温度100°Cとすれば寿命は53年となる。

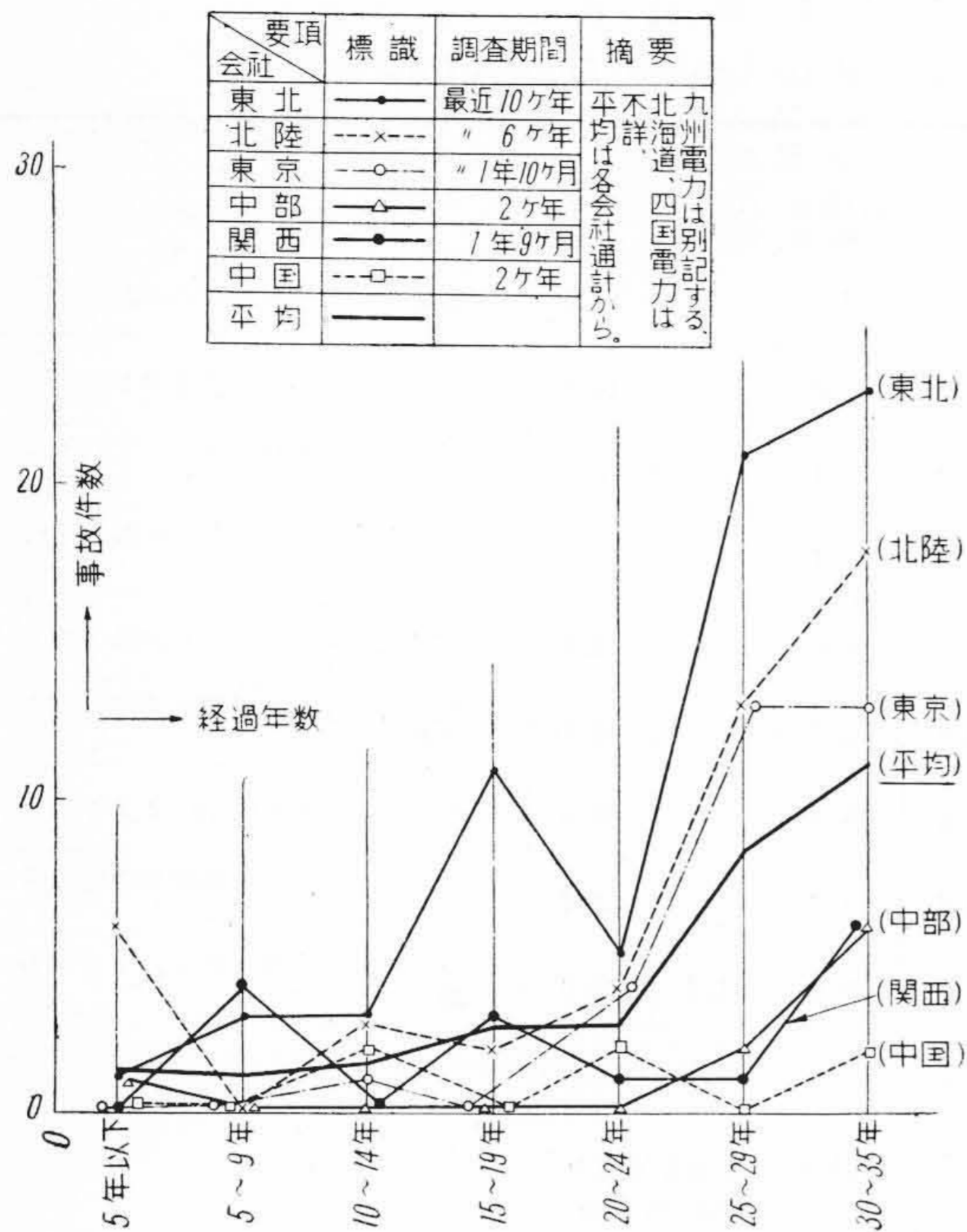
しかしこれらの寿命は静止状態における温度のみの影響を考えたものであるが、実際に線輪絶縁の受ける影響は複雑であり、寿命は温度だけで簡単に決定できない。絶縁におよぼす影響にはおよそつきのごときものが考えられる。

- (1) 熱の間断なきサイクルをうけるための微傷の蓄積
- (2) 乾湿や油塵などの影響から来る電気漏洩的あるいは放電現象的損傷の発生
- (3) 絶縁皮膜の長年月にわたる複雑な化学変化
- (4) 長年月熱風にさらされているコイル絶縁の収縮やコイル緊締部分の弛緩などと帰因する傷害
- (5) 以上を促進させる機械的振動や衝撃

このような総合原因による老化年限の推定は結局信頼



第1図 各種絶縁の寿命と温度の関係
Fig.1. Relation between Life and Temperature of Insulation



第2図 絶縁劣化事故統計図表
Fig.2. Statistic Diagram of Accidents Armature Coil

しうる統計によるほかはないであろう。まず各社提出の「所見」をまとめてみると第6表のごとくであり、これによるほぼ25年前後の線が浮かんでくる。つぎに北海道、四国、九州を除いた六社の統計を線図化すると第2図のごとくであり、これによつてもほぼ25年前後という結論になる。つぎに九州電力の統計は第3図のごとくで、35年あたりから急に老化することがわかる。筆者がこのことに関心をもち、東北、九州両地方を視察して実地に見聞したところでは、歴史ある古いメーカーの製品では自然劣化に関する限り20年以上は耐久していることを確認した。また保守次第では30年ぐらいは支障なく運転しうるのではないかと考えられる。

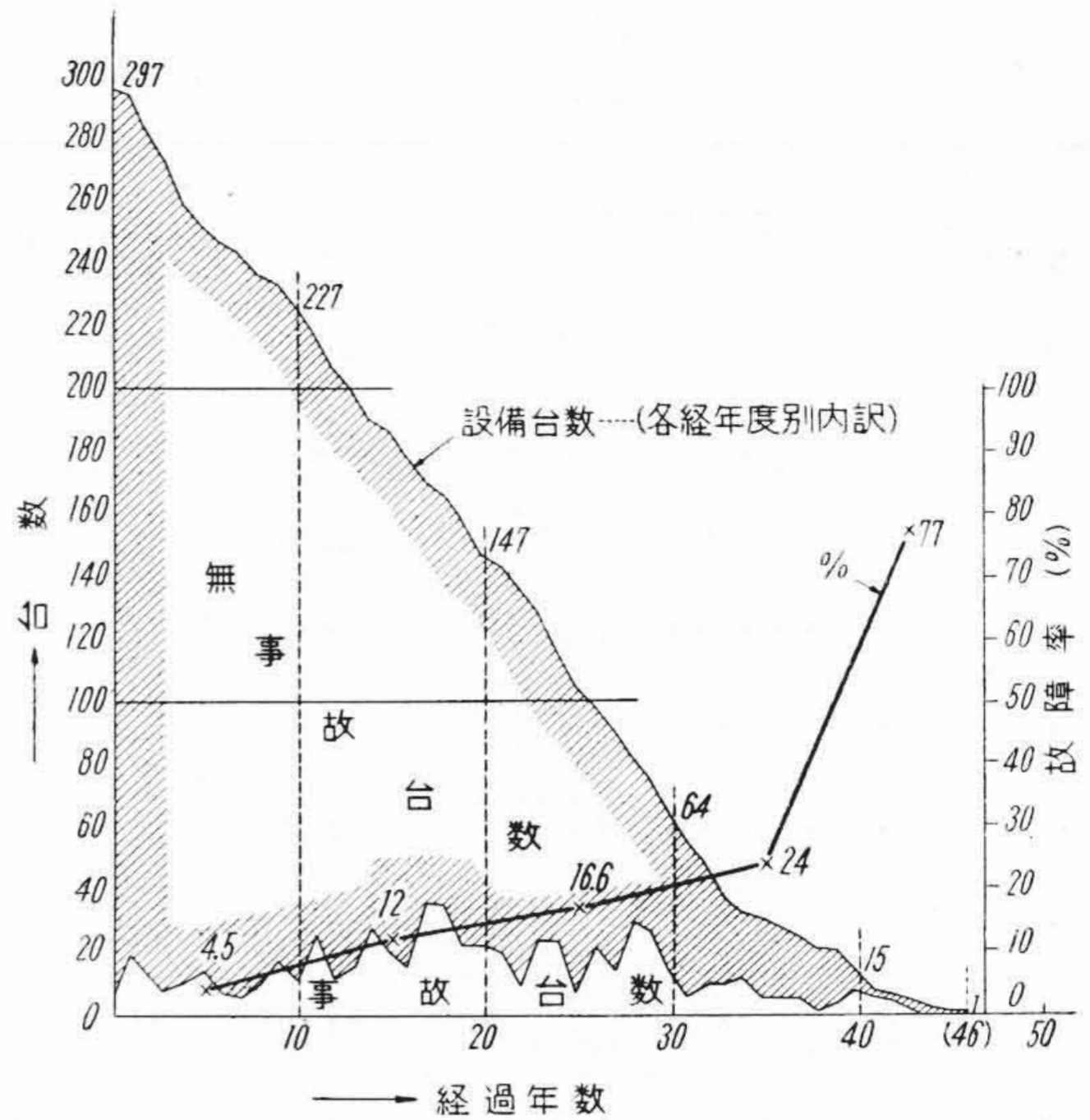
以上をまとめると

- (1) 最も信頼するに足るもの.....20~30年
- (2) 参考とすべきもの.....30年以上
- (3) 目標となるべきもの.....40~50年

となり、適正なる延命対策を講ずることによつて寿命25年を30年に延ばすことはそれほど困難ではないと考える。

〔IV〕 発電機の延命対策

保守による延命対策も重要であるが、積極的にすぐれたコイルを用いることがまず重要なことであり、製作者



第3図 経年度別事故統計図表
Fig.3. Statistic Diagram of Accidents of Generator

第6表 発電機寿命判定資料
Table 6. Data for Decision of Life of Generator

要項 電力区	過去の実績から見た水車発電機の寿命 (電力会社意見)
北海道	特記事項なし、ただしコイル焼損は27年、21年各1ヶ、20年2ヶ、他不詳
東北	25年以上になると事故が急増する。全体の63%におよぶ
北陸	コイルの更新目標を25年経過のものにおいてる
東京	コイル焼損事故は25年以上経過したものが大部分で全体の76%
中部	巻線の焼損は25年以上のものが多いから寿命は大體25年位とみたい
関西	巻線事故は20~29年の間が20%、30年以上が39.3%
中国	20年以上のものゝ事故が全体の約50%を占めている(雷、波及含む)
四国	初回事故までの平均経過年数 24年 無事故機(62.9%)のそれが 22年
九州	総体的に見て当社の水車発電機の寿命は28年ということになる
東電・荻野氏	水路式、貯水池式などの運転状態によつても異なるが大體30年程度とみたい

側の研究努力にまつところが大きい。日立製作所においても従来の絶縁材料および処理法を研究改善して新製コイルの事故絶無を期しているほか新たな絶縁材料使用のコイルを開発しており、これらはすでに試作の域を脱し、製品としてその真価を世に問う段階に至っている。またコイル事故原因の最大部分を占める層間短絡に対しては、層間絶縁の強化、1ターンコイルの採用などにより対処している。これらはすべてコイルの事故、欠陥の経験を基礎として不断の試作研究の結果製作されたもの

であるから新製品に対しては保守上の懸念は軽減されうるといえる。

しかしすでに10年以上を経過したコイルに対しては極力保守の面から劣化防止をはかることは重要なことである。

現在の新品も程度の差こそあれいずれは劣化の運命を辿るものであるから、こゝでいかに保守すべきかを考えることとする。

絶縁が老化して焼損に至る経過を考えると最も重要な事項は熱と振動であることが判然とする。したがって機械各部の冷却効果を保持増進することと、振動緩和策を講ずることが延命対策の根本原則となる。これを少しく具体的にのべてみよう。

(1) 温度管理

絶縁内部温度の実態を監視する意味において正確なサーチコイルの合理的使用が望ましい。さらにこれを経過的に曲線図化して常に機温の傾向を監視することをすすめたい。一例を示せば第4図のごときものである。これを健康診断の一方便としあわせて保守手入などの指針とすればその効果は大きいと思われる。

(2) 振動管理

発電機の運転中に起る振動の種類はおおむねつぎのごときものである。

- (a) 軸の振れまたは基礎の変形などから来る純機械的振動
- (b) 風圧の変動によるエンドコイルなどの動揺
- (c) スロット内部コイルの受ける電磁氣的微動

(d) 鉄心内部の弛みまたは割目接合部の不整のため
に起る磁氣的振動

(e) エンドコイル相互間の電磁氣的牽引反撥的衝動
これらはいずれも永い間には絶縁劣化を促進加速させるものであるからたえず監視して臨機応変の処置を怠らぬ注意が必要である。すなわち

(a) については極力振動の原因を確め、バランスあるいは補強工作などを施行して運転上不安のない範囲にもつて行くことである。一般に考えられる振動増大の原因は

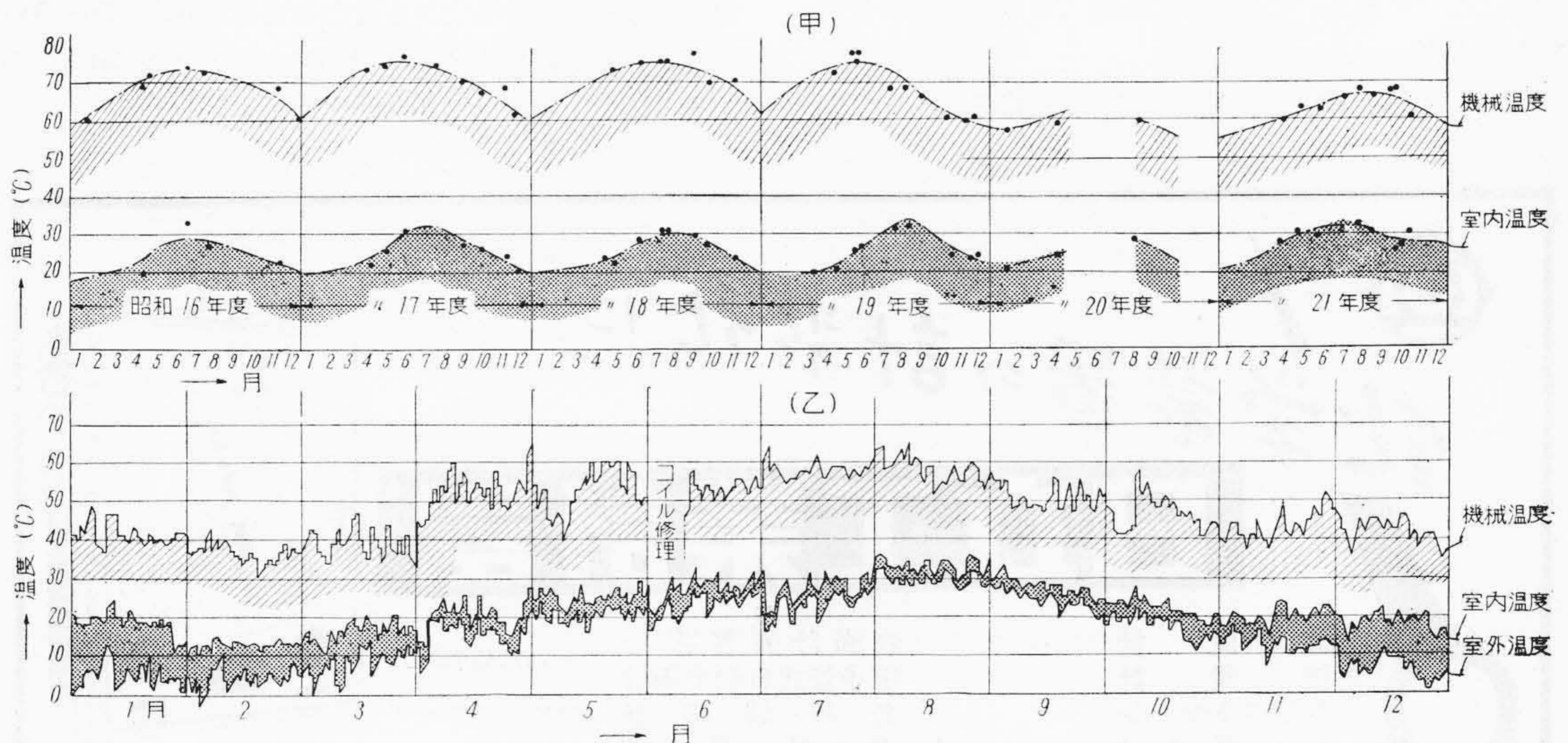
- (i) 据付基礎の変形（沈下、亀裂など）
 - (ii) 界磁極異変（線輪短絡、地気またはギャップ不同など）による磁氣的不平衡
 - (iii) 回転子の動的不平衡力
 - (iv) 分解再組立不馴れなどによる軸心の狂い
- などである。修正範囲を「運転上不安のない程度」としたのは振動の程度（許容限度）をいかに考えるかははな

第7表 発電子コイル焼損状況

Table 7. Accident of Armature Coil

焼 損 箇 所	スロット内	70%	100%
	スロット外	30%	
焼 損 状 況	レヤシヨート	51.5%	100%
	アース	48.5%	
焼 損 経 歴	初 回	37.4%	100%
	5 回 まで	41.2%	
	6 回 以上	21.4%	

注 東京電力株式会社調査による



第4図 (甲) 年度別温度傾向図 (旬間又は週間最高温度)
(乙) 年間温度傾向図 (最高温度)

Fig. 4. Temperature Diagram of Generator

はだむづかしい問題だからである。すなわち機械の振動には振幅（シャフトの水平上の振れ）ばかりでなくその回転数やまたは人間的感覚までも関係があるので機械の型式や特性などによつて一概に論じえないからである。

一般論からいえば、振動によつて起る加速度は振幅と周波数の自乗に比例するものだから同一振幅でも高速機の方がはるかに大きな力をうけることは当然である。

しかしながら人間の感覚に訴える振幅にもおのずから限度があるから周波数と感覚度との両者から許容限度は決定されるべきで、たとえば 3,000~3,600 rpm のものでは 2.5/100 mm, 150 rpm 内外のものでは 20/100 mm 程度まで許しえると考えられる。ただしこれらはあくまで許容限度であるからできるだけ小さい方がよいことはいふまでもない。

(b) についてはコイルの糸縛りやスペーサの弛み修正

(c) についてはスロットウェッジの入れ直し

(d) については程度によつては徹底修理

(e) については(b)と同じ

以上絶縁保守上の指標を解説したのであるが、これらをいかに周到に実行しても絶縁が年とともに老化して行くことは防ぎえない。したがつて最後の手段としては適時適宜のコイル巻替、局部入替または補修などを覚悟せねばならない。

また焼損原因のうち 55% は劣化以外の雷害、波及事故などによるものであり、これらの予防対策が立てられたにしてもなお人力のおよばぬ突発的事故の発生は避けられない。さらに近來複雑化した各種調整機器、継電器などの制御系統の保守いかんも直接間接に発電機事故の原因になつて来る。このようにみてくるとコイルの最後の保守問題は

(a) いかに適時かつ適宜に修理や補修を行つて焼損

事故を減して行くか

(b) いかにして不慮の焼損事故を合理的に処理して損害を最少ならしめるか

にかかつて来る。

私案をもつてすると

(a) に対しては

たとえば 25 年経過の発電機コイルは更新することとし（東北電力の例）それ以後の存廃はメーカーまたは専門機関の検診によつて決定する。20~25年間の事故は補修または局部修理で処理する。


(b) に対しては

老化程度にもよるが年期間際のもの思い切つて全巻替の上新機編入程度に完全なものにすることが望ましいと思う。特に風水害により数時間以上も冠水した場合のごときにおいてはなおさらのことである。

なお最後に注意を喚起したいことは、局部修理は技術的にも困難であり、また「被害による派生的弱化点」の見落としなどのためその弱点が楔となつて損害を増大させる場合が少なくないことである。この場合の好例として第 7 表の焼損経歴がその一端を語つていふものといえよう。要するに発電機の構造上、姑息的な局部修理法は往々にして損害の累次的増大を来す場合があるからできれば元メーカーの進歩せる技術と責任ある指導とに依存するのが賢明の対策である。

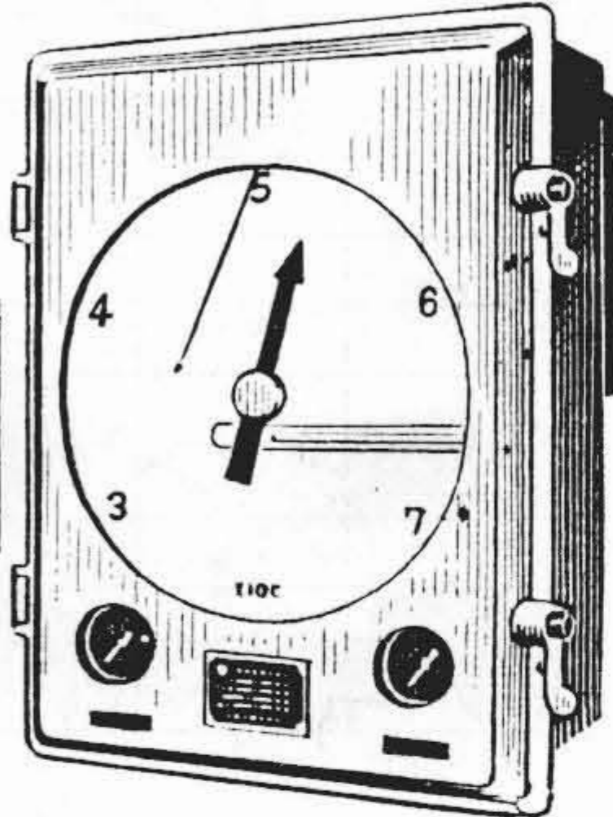
[V] 結 言

コイル絶縁劣化による焼損事故損害は発電所全事故損害の二割強に上り、これを金額に換算すれば 1 箇年約 1 億円となる。絶縁劣化から見た発電機の寿命は 20~30 年と見られるが、平均 25 年と暫定して、これを 30 年程度とする延命策に関する諸問題を検討した。



化学装置の計装化に

日立工業計器



温度計 (熱電及抵抗温度計)

流量計

トラフトゲージ

CO₂ ガス計

液面計兼警報計

電子管式自動平衡計

各種調節計

熱計器

PVQ型電子管式

自動平衡記録調節計

日立製作所