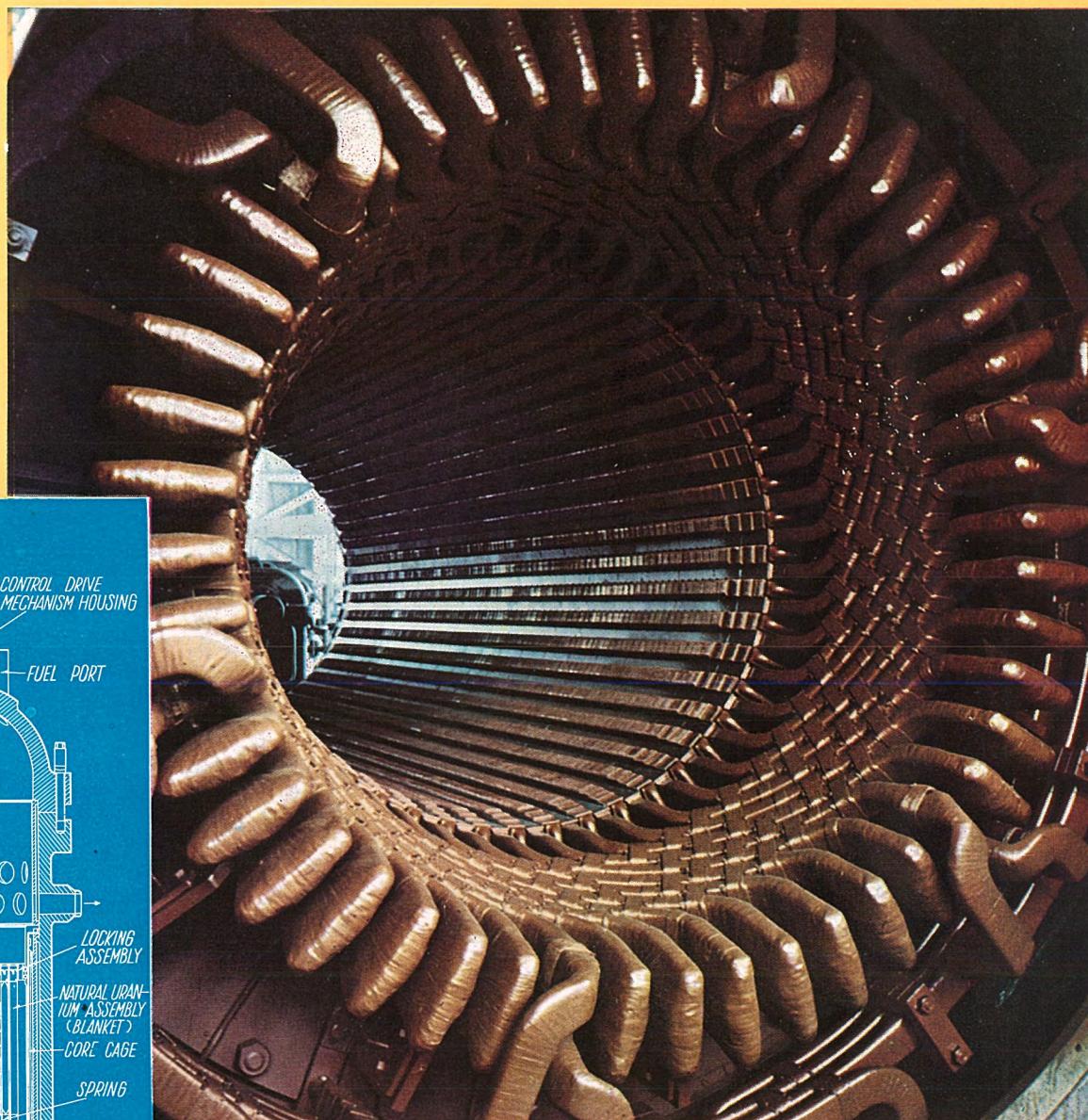


MITSUBISHI DENKI

# 三菱電機

これからの発電所機器特集

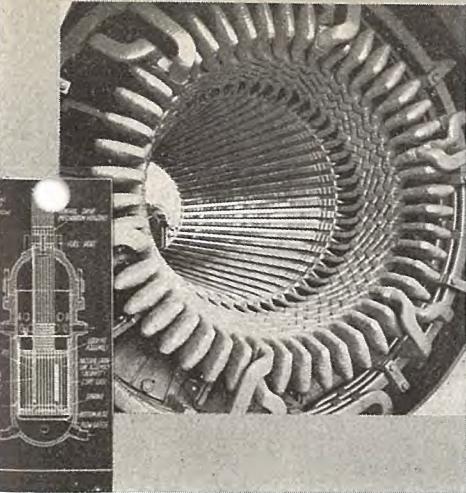


新しい材料 ダイヤラスチックの絶縁を施した固定子

VOL30 1956

5

原子炉縦断面図



MITSUBISHI DENKI

# 三菱電機

## 表紙説明

表紙は明日の火力発電を代表する 2 つのホープ、すなわち原子炉とダイヤレジン絶縁を施した大型発電機の固定子である。

近来発電機器の大型化に伴い、信頼性のある優秀なダイヤレジン絶縁は、機器の能率や耐力の向上にますます大きな役割りを果すようになってきた。

このダイヤレジンと「第 3 の火」すなわち原子力との組合せこそ、まさに明日の動力源を形づくるホープといえよう。

## 三菱電機株式會社

### 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 兵庫県尼ヶ崎市南清水  
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 兵庫県尼ヶ崎市南清水  
長崎製作所 長崎市平戸小屋町  
輪機製作所 兵庫県尼ヶ崎市南清水  
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 福島県郡山市宇摩橋町  
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  
静岡工場 静岡市小鹿 110  
札幌修理工場 札幌市北二條東 12  
大阪営業所 大阪市北区堂島北町 8番地 1  
(電) 大阪(34) 代表 5251  
名古屋営業所 名古屋市中区広小路通  
(電) 本局(23) 代表 6231  
福岡営業所 福岡市天神町  
(電) 中(4) 7031-7036  
札幌営業所 札幌市大通リ西 3 の 5  
(電) 札幌(2) 代表 7236  
仙台事務所 仙台市東一丁目 63  
(電) 仙台(2) 代表 1601  
富山事務所 富山市安住町 23 の 2  
(電) 富山 4692・5273・2550  
広島事務所 広島市袋町 6 (富国生命ビル)  
(電) 中(2) 2211-4  
高松出張所 高松市紺屋町 34 番地  
(電) 高松 3178・3250  
小倉出張所 小倉市京町 10 丁目 (五十鈴  
ビル) (電) (5) 小倉 3614

昭和 31 年 第 30 卷 第 5 号

(これからの発電所機器特集)

## 目次

わが国の原子力発電の将来.....一本松珠機・吉岡俊男	2
内部冷却タービン発電機.....加賀貞広	6
ダイヤラスチック絶縁.....石黒克己・伊佐山好延	13
これから発電所用変圧器.....村上 有	21
最近の発電所用スイッチギヤー.....新井正元	27
三菱スタートバントファンの風量制御.....宮内貞夫	40
発電所と工業用テレビジョン装置.....馬場文夫・鷗村和也	44
電気計算装置の電力系統への応用.....横須賀正寿・馬場準一	51
電気絶縁材料の温度区分に対する最近の情勢.....大西洋一郎	60
ニュースフラッシュ .....	67

## 品質奉仕の三菱電機

# わが国の原子力発電の将来



吉岡技術研究所所長



一本松常務取締役

関西電力株式会社

常務取締役 一本松珠璣  
技術研究所所長 吉岡俊男

## The Future of Atomic Electric Power Generation in Japan

Kansai Electric Power Company  
Tamaki IPPONMATSU  
Toshio YOSHIOKA

Control of the atomic energy by human being was for the first time realized on December 20 in 1942 at Chicago by Fermi and his cooperators. Not much time has elapsed since then, and the atomic electric power generation is nothing but on the experimental stage. Hence, making a forecast to the future development of this power generation in Japan is by no means an easy matter. The writer's intention is to give a brief account of the present world situation of it, then giving his hope in view of the demand and supply of power in future Japan, which will lead to varied problems relative to the atomic power development.

### 1. まえがき

1951年12月に米国アイダホ州アーチ原子炉試験所で高速中性子増殖炉 (EBR-I) による 170 kW の発電に成功した。これは研究用に作られたものであるが、世界最初の原子力による発電である。その後米国では、オークリッジ国立研究所の熱中性子均質炉 (HRE-I) による 140 kW、アーチ原子炉試験所における原子力潜水艦ノーチラス号の原型原子炉である熱中性子加圧水型 (STR Mark-I) による 13,000 kW の実験的発電が行われ、ついで、1955年7月17日にはアーチ原子炉試験所の沸騰水型原子炉 (BORAX-II) による 2,000 kW 発電が短時間ではあるが附近のアーチ町の電燈電力用に送電された。またその翌日7月18日には、ニューヨーク州のウエスト・ミルトンで、潜水艦シーウルフ号の原型原子炉の中速中性子型 (SIR Mark-A) による 10,000 kW の発電が一般供給用に送電せられ、今日に至っているが詳細は判らない。

ソ連ではモスクワから 50 哩離れたカルージスカヤ地区で、1954年6月27日に 5% の U 235 を含む濃縮ウランを使用の熱中性子黒鉛減速加圧水型 5,000 kW の原子力発電所が運転を開始し、今まで相当の成績で電力供給をなしていると発表されている。

以上が今までに運転した原子力発電の概要であるが、「人類による原子力エネルギーの制御そのものが 1942 年 12 月 2 日シカゴにおいて始めてフェルシー等により成功したもので、日なお浅く、まして原子力発電はまだ実験時代にあるものといえよう。したがって、わが国の原子力発電の将来を予想することはきわめて困難であるが、本文では、最初に世界各国における原子力発電の現状と計画の概略を述べ、ついで、わが国の今後のエネルギー需給あるいは電力需給予想から見た原子エネルギー

または原子力発電に対する期待と経済性から見た原子力発電の将来性について私見を述べ、最後に原子力発電開発を進めて行くに当り問題となる技術上、経済上の諸問題について触れて見たいと思う。」

### 2. 各国の原子力発電態勢

ア、米国では 1 昨年原子力委員会 (AEC) が動力用原子炉 5 カ年計画を発表し、約 2 億ドルを投じて、6 種の型の動力用原子炉を建設し、その技術的経済的研究を行っている。(1 表参照)。その中の加圧水型による 60,000 kW の発電所は、AEC とジューケン電燈会社の共同で、ニューヨーク州、シッピングポートに建設中で明年完成の予定である。この AEC の計画と併行して、米国の民間機関が、単独または連合して、昨年より原子力発電建設の計画を進めている。現在 6 団体が、合計出力 84 万 kW、建設費総額 2.6 億ドルの計画を発表している(2 表参照)。

イ、英国ではコルダーホールに天然ウラン 黒鉛減速炭酸ガ

1 表 米国 AEC の動力用原子炉 5 カ年計画

型 式	研 究 所	出力 (MW)		建 設 費 (百万ドル)	完 成 予
		熱	電 气		
加圧水型 (PWR)	ウェスチングハ ウス ジューケン電燈 会社	264	60	85	1957
沸騰水型 (EBWR)	アルゴンヌ	20	5	17	1956
ナトリウム黒鉛型 (SGR)	ノースアメリカン	20	—	10	1956
高速中性子増殖炉 (EBR-2)	アルゴンヌ	62.5	15	40	1958
均質炉 (HRE-2)	オーケリッジ	5	1	3	1956
均質トリウム増殖炉 (TBR)	オーケリッジ	65	16	44	1959

注：建設費には研究開発費を含む

2表 民間機関による原子力発電計画（米国）  
(Industrial Power Demonstration Reactor Proposal)

型 式	提案 グループ	電気出力 (MW)	建設費 (百万 ドル)	kW 当り 建設費 (ドル)	完 成 予 定
加圧水型	ヤンキー・アトミック・エレクトリック	100	24	240	1957
沸騰水型 (二元サイクル)	ニューカレヤ・パワー・グループ (コンモンウェルス・エジソン)	180	45	250	1960
ナトリウム型 黒鉛型	コシシューマー・パブリック・パワー・システムズ	75	24	320	1959
高速中性子 増殖型	アトミック・パワー・デベロブメント (デトロイト・エジソン)	100	45	450	1960
加圧水型 (トロイ 熱式)	コンソリデーデッド・エジソン	236	55	233	1959
均質型	ベンシルバニア・パワーライト	150	65	433	1962

ス冷却型の 50,000 kW の発電所を建設中で、本年 10 月 17 日エリザベス女王を迎えて初運転が行われる予定である。なおこのほかにドーンレーに濃縮ウランまたはプルトニウム、使用の高速中性子増殖、ナトリウムまたは NaK 冷却の熱出力 60,000 kW の原子炉の建造に着手している。その他、ハウエルでも、濃縮ウラン重水型その他各種の型の研究用原子炉の建設計画が進められている。

英國では最近石炭の採掘条件が悪化し、価格も騰貴の傾向にあるので、エネルギー対策から原子力発電を進める必要を痛感し、昨年 2 月に原子力発電 10 ヶ年計画を発表し、3 億ポンドの費用を投下し、12 発電所、出力合計 150 万ないし 200 万 kW の原子力発電所建設に乗り出すこととなった(3表参照)。なおこれに引き続き原子力発電計画を進め、1970 年頃からは新設分の発電所はほとんど原子力によって行い、1975 年には原子力発電所の総出力は 1,000 万~1,500 万 kW に達し、毎年 4,000 万トンの石炭を節約する長期計画を有している。

ウ、仏国は目下マルクールに天然ウラン使用黒鉛減速ガス冷却式のプルトニウム生産と兼用の 5,000 kW の原子力発電所(G-1)を建設中で今年の秋には完成の予定である。これについて発電出力 3 万 kW 程度の G-2, G-3 の建設計画を進めしており、1965 年頃には原子力発電所によるエネルギー自給を期待している。

エ、ソ連 現在運転中の 5,000 kW のほかに 10 万 kW 程度の原子力発電所を建設中であり、最近発表された経済 5 ヶ年計画でも、原子力発電所 200 万~250 万 kW を建設する予定となっている。ソ連も天然ウラン重水減速ガス冷却型、均質型その他各種の型式による原子力発電の研究を進めている。

3表 英国原子力発電 10 ヶ年計画

発電所数	原炉子数	型 式	着工	完成	発電出力 (kW)	工費 (百万 ポンド)
2	4(各2)	ガス冷却 (コールダホール型)	1957	1960~1	20万~40万	30~35
2	4(各2)	ガス冷却 (改良型)	1958~9	1963	20万~40万	30~35
4	4	ガス冷却 (〃)	1960	1963~4	100万以上	125
4	4	液体冷却 (プルトニウム使用)	1960~2	1965	150万~200万	約200
計 12	16					

わが国の原子力発電の将来・一本松・吉岡

オ、カナダ 従来チョーク・リバーで天然ウラン重水型の原子炉の研究を進めていたが、昨年、チョーク・リバーの西北 10 哩の地点に、カナダ原子力公社、オンタリオ水力、カナダ G.E. 会社の共同で、天然ウラン、重水減速、冷却型の発電出力 20,000 kW の原子力発電所を約 1,130 万ドルで建設し、1958 年に完成せしめる計画を発表した。

カ、その他、ベルギーでは 1958 年プラッセルで開かれる万国博覧会に 11,500 kW の DWR 型原子力発電所を米国ウエスチングハウス社に発注し、イタリアでも同様のプラント輸入を米国と交渉中である。またノールウエーでは天然ウラン、重水型の発電所 (2,500 kW) 建設の準備を進めている。その他原子炉の研究を進めている国は多数ある。

キ、わが国では昨年末近く、原子力研究所が発足し、また本年 1 月 1 日原子力委員会の設立を見、漸く原子力研究の準備態勢が整うに至った。原子力研究所としては、差し当りウォーターボイラ型と CP-5 型の原子炉を米国に発注し、来年 6 月および 12 月にそれぞれ運転開始を期している。ついで天然ウラン重水型の国産炉 (熱出力 10,000 kW) の建設を昭和 33 年度中に完成し、昭和 34 年度より動力用実験炉の建設にとりかかる意図を有している。このほか、メーカー、電力会社等でも昨年あたりから原子力平和利用の調査研究に取りかかった状勢である。

### 3. エネルギー問題と原子力発電

前述のように英國、仏国ではエネルギー問題解決のため、原子力発電に力を注いでいる。欧州の諸国は程度の差こそあれ、英仏と同様の立場にある。米国では石炭、石油、天然ガス等が豊富があるので、当面の問題としてはエネルギー面からの要請は少いであろう。

わが国では資源調査会の安芸博士が、ジュネーブ会議で発表している処によると、1975 年のエネルギー需用は石炭換算約 2 億トン (1954 年度の 2 倍程度) 以上で、これに対し推定供給力は石炭 5,500 万トン、水力 2,200 万 kW、石油天然ガス (石油換算) 150 万キロリットル、薪炭 2,200 万石 (原木換算) で、合計石炭換算 1 億 5,000 万トンとなり、差引少くとも 5,000 万トンの不足で、新しいエネルギー源に期待する処が大きいと述べている。

また通産省では昨年 12 月、長期の電力需給想定と原子力発電への期待について、資料を発表している。それによるとわが国の水力は今後 15 年位で経済的に開発できる約 1,700 万 kW が開発尽され、また今後 10 年位で火力発電用炭は、わが国内炭で供給できる 1,500 万トンの限度を超え、この不足分を全部原子力発電で補うものとすれば、1965 年迄に約 80 万 kW、1975 年迄に約 800 万 kW の原子力発電を開発せねばならないとしている。この電力需給想定については需用ののび、開発し得る水力発電の限度、火力用炭の限度、重油等の輸入の程度等、議論の対象となる問題が多いので、はっきりした見通しを樹てることは困難であるが、しかしエネルギー面から原子力発電に期待しなければならない時期はそう遠くないことが予知せられる。

#### 4. 経済性から見た原子力発電

前にも述べたように現在原子力発電所として運転中のものは極めて少く、またこれらは研究用として建設されたものである。営業用の原子力発電所の経済性を判断する資料は極めて少い。しかし今迄発表された各種原子力発電設計計画に関する資料から今後の傾向を推測することとしたい。

##### ア. 建設費

原子力発電所は一般火力発電所の蒸気発生設備の代りに原子炉および熱交換器を設備したもので、タービン以下の電気発生設備は本質的に両者相違はない。しかし原子炉はその型式によって異なるが、炉の本体のほか、冷却、制御、計測、燃料操作装置が複雑であるほか、放射性物質を取扱うので、これに対する保安、衛生設備が充分施されねばならない。また発電所用地も現在のところ、一般火力発電所に比し相当広い面積が要求されている。このほか、原子炉の長期運転を維持するため、原子炉中に連鎖反応に必要な量以上に燃料を当初装入して置かねばならない。以上の諸要件を満すため、原子力発電所の建設費は一般火力発電所より割高となる。現在米国の AEC で研究中の各種原子力発電の建設費は 1 表に示す如く、その建設単価は極めて高い。しかしこれは研究費をも含んだ試作程度のものであるのでこれをもって将来の趨勢を判断することは適当でない。つぎに米国民間機関による比較的大規模の発電計画の建設費は 2 表に示す如く、1 kW 当り 230 ドルないし 450 ドル平均 300 ドルで、加圧水型、沸騰水型は安く、ナトリウム黒鉛型、均質型、高速中性子増殖型は順次高くなっている。これは前者は相当研究も進み、実用段階にあるに対し、後者はこれから開拓される段階にあるからであろう。

つぎに英国のコールダーホール発電所は出力 50,000 kW (将来 92,000 kW に増加可能といわれる)、建設費 165 億円で 1 kW 当り 33 万円 (900 ドル) といわれている。これは研究用であるので高くついているが、この種の発電所で出力 15 万 kW のものは燃料インベントリーを含み 1 kW 当り 158,000 円 (440 ドル)、これを除き 126,000 円 (350 ドル) と予想している。また最近米国の W 社が世界各国に提案した 10,000 kW の原子力発電設備は、原子炉、発電機等の装置一式と技術指導費を併せ、1 kW 当り 400 ドル (144,000 円) を最高保証価格としている。この場合用地、建物、燃料インベントリー、金利等を入れるとこの約 25~30% は増加するものと思われる。しかしこれは実験用発電所としての小規模のものであるので、大規模の営業用の発電所の標準とはならないであろう。

以上の諸資料から 10 万 kW 級の大容量原子力発電所では近き将来米国においては 1 kW 当り 250 ドル (9 万円) 前後を期待し得るようと思われる。これに対し新設火力の建設費は米国では 1 kW 当り 130~160 ドル (4.7~5.8 万円)、わが国では 6~7 万円程度である。

##### イ. 燃料費

天然ウラン 1 kg 当り 40 ドル (14,400 円) は、これを熱量だけで 6,000 カロリーの石炭に換算すると 1 トン 610 円に相

当する。しかしウランを原子炉に燃料として使用する場合、加工成型費や、使用済燃料の処理費が必要であるし、また濃縮ウランを使用するときは濃縮費が加わる。また燃料中の U<sub>235</sub> が全部燃え切らないうちに取替えねばならないからその全エネルギーが利用できないし、その上原子力発電所は一般火力に比し、使用蒸気の気圧気温が低いので能率が悪い。これに反し原子核燃料はそれが燃焼する間に他の燃焼可能な分裂性物質を造り出す性能を持っている。その生成される割合 (増殖率) は炉の型式で異なるが、消費分裂性燃料 1 当り 0.5~1.5 程度で、これが 1 より大きいときは、燃焼と共に消費燃料以上の新しい燃料が生成されることを示している。しかしこの生成物は複雑な化学処理によって取出されるので、その処理費が必要であるが、増殖率の大きな炉では、処理費より生成燃料の価値の方が大きく、燃料費を軽減せしめることができる。

以上の諸要素を考慮した発電々力量 1 kWh 当りの燃料費は、各種文献によると米国において大体 4~1 ミル (1 円 44 銭~36 銭) の範囲で推算している。なお将来、分裂生成物の化学処理費が安くなると 2 ミル (72 銭) 以下に低減し得ると予想している。

これに対し新鋭火力発電所の燃料費は、炭価トン当たり 5,000 円とすれば、2 円程度となるので、とくに炭価の低廉な地域を除き、一般燃料より有利となる可能性が多い。

##### ウ. 発電原価

原子力発電のコストは、前述の燃料費のほか、建設費に比例する固定費 (資本費、減価消却費、税金等) と運転維持費とからなる。

現在米国の AEC で建設中の研究用原子力発電所は前述のように建設費が高いので、到底一般火力発電所のコストに及ばない。しかし 2 表の民間企業の計画している大容量発電所では、ベースロード用に運転 (負荷率 80% 前後) すれば、1 kWh 当り 6~14 ミル (2 円 20 銭~5 円) 程度で発電できるものと推定している。シカゴのコンモンウェルス・エジソン会社では、建設計画中の 18 万 kW の BWR 2 重サイクル型の発電所の建設費を 1 kW 当り、250 ドルとし、その発電コストを、同程度の火力発電所のコストと比較して 4 表のように推定している。すなわち負荷率 60% の場合、原子力発電の場合 1 kWh 当り 10 ミル (3 円 60 銭)、一般火力発電の場合 1 kWh 当り 7.5 ミル (2 円 70 銭) となり、原子力発電の方が高いが、これは第 1 号炉で研究開発費が含まれているので、第 2 号、第 3 号発電所では、更に 3 ミル程度低減できて、火力発電と競争し得るとしている。

米国の新設火力発電所の発電コストは最低 3 ミル (1 円)、平均 6 ミル (2 円 20 銭) 程度であるので、コンモンウェルスの例のように一般には未だ火力発電所と競争できないが、現在の試験用原子力発電所の完成後、つぎに来る大容量の発電所では、とくに燃料の低廉な地域を除き一般火力発電所に匹敵し得るようになるものと期待している。

英国ではコールダーホール発電所の原価は 1 ペソス (約 4.2 円) 程度であるが、これを改良した大型原子力発電所では 0.6

4表 発電コスト計算例 (コンモンウェルス・エジソン会社の計算)

	原 子 力 発 電 (180,000 kW)	火 力 発 電 (150,000 kW)
1 キロワット時当り ミル固定費	7	3.5
燃 料 費	2.2	3.5
運 転 雑 持 費	1	0.5
合 計	10.2	7.5

注 負荷率 60% 年固定費率 15% (原動発電に対し)

ペンス (2円 50銭) で、火力発電所に匹敵し得るとし、またソ連でも、現在の原子力発電所は 20 カペーク (約 6 円) であるが、10万 kW 程度の大容量のものでは 10 カペーク (約 3 円) 程度で一般火力とほぼ同様となるものと予想している。

わが国では最新鋭火力発電所の発電原価が、炭価 5,000 円として、負荷率 80% で、3 円 60 銭～3 円 80 銭程度であるから、原子力発電には米国より有利である。しかし、わが国に原子力発電所を建設するときは、用地費、輸送費、燃料処理費等建設費および経費の面で米国より不利な条件がある。したがってわが国において何時頃、原子力発電が経済的に成立つようになるか、推測することは極めて難しいが、現在アメリカの民間企業の発電計画が運転を始める 1960 年前後には、大体の見極めがつくものと考えられる。

## 5. わが国の原子力発電の見透しと今後の問題点

以上エネルギー面および経済面から今後の原子力発電発展の見込みについて予測を行ったが、結論として、エネルギー面からは、今後ほぼ 10 年以降において原子力発電の本格的開発、運営が要請されている。経済面からは、アメリカの原子力発電の研究、開発計画の成果が判明する 1960 年頃には、その経済性の見透しもつくものと思われる。わが国においても、それから 5 年も経てば、何とか経済的に成立し得る原子力発電所の完成、運転を期待できるのではなかろうか。以上のことから、わが国の原子力発電開発の目標は、今後ほぼ 10 年前後に、大容量の営業用発電所を完成せしめることとするのが、妥当ではなかろうかと考える次第である。

以上の目標を達成するには、今後われわれはいかなる準備を進めて行くべきか、少しく問題点を拾って検討することにしたい。

### ア. 用地の選定と安全対策

本格的発電所を建設する場合はもちろんテストプラントを建てる場合にもまず問題となるのは用地の選定であろう。わが国は原爆の洗礼を受けているので、国民一般は原子力に対する恐怖心を有している。したがって事故時の処理、廃棄物の処理等保安に関する完全な対策が講ぜられ、国民の充分な理解が得られる迄は用地の取得は極めて困難となるであろう。米国の建設計画の例では、十数万 kW 程度の原子力発電所に対し大体数十万坪を予定している。これは一般火力発電所の 10 倍程度で、わが国では建設費に対し大きな負担となる。最近の原子力発電所の設計では、万一の事故の場合でも災害を他に及ぼさないために、原子炉および放射性の機器全体を大きな鋼鉄製の容器(コ

ンテナー)により完全に囲包する方式が採られているので、将来は段々それほど広い土地を必要としなくなるであろう。なお原子力発電所ではタービン、コンデンサーの冷却水が多量に必要なほか、放射能による汚染を除去するためにも水が必要なので、海岸、河岸等大量の水が容易に得られる所が要求され、また送電費を節約するためにはできるだけ、需用地に近いことが望ましい。これらの要望を満す用地を早く確保して置くことが、まず第一に必要な問題である。

### イ. テストプラントの建設

10 年後の本格的開発を進めるためには、それ以前にテストプラントを建設し、運営して見ることが必要である。テストプラントを一つ、いかなる規模で、いかなる型式のものを、いかなる研究体制で建設、運営するかにつき検討すべき問題である。

時期は、本格的プラントの建設時期が定まれば自ら定まるがあまりゆっくりとはできないであろう。規模は 1～3 万 kW 程度のものから始めてはどうであろうか。型式は、現在実用段階に近い、米国の濃縮ウラン使用の PWR、BWR 型、英國の天然ウラン使用のコールダーホール型 (黒鉛減速、ガス冷却)、カナダ、ノールウエー等の天然ウラン重水型等が問題となる。将来のわが国の原子炉の型式の在り方を念頭において定めるべきであろうが、コストが安く、入手しやすいということも条件となるであろう。テストプラントの建設の方法には、米国の AEC の 5 カ年計画の方式、シッピングポートの方式、私企業のデモンストレーション、プログラムの方式等いろいろ考えられるが今後の情勢により自ら定まってくるであろう。

### ウ. 燃料、廃棄物、資材、資金対策

わが国にはウラン、トリウム等の資源は極めて少い。これをいかにして確保するかが問題である。燃料が自由市場から容易に得られるのでなければ、大規模の開発は困難であろう。廃棄物の処理工場もわが国に建設され、燃料の再生、回収等が自足されねば燃料経済を図ることは覚つかない。天然ウラン炉によるとすれば、重水か黒鉛が必要となる。その他ジルコニウム、ステンレススチール、遮蔽材料等の製造工業も必要である。これらの工業の確立には、技術の習得向上はもちろん、多額の資金を必要とする。米国原子力委員会の W. K. DAVIS 氏の論文によると原子力発電所出力 1 kW 当りにこれら関連産業 (燃料および主要資材の製造、処理工場のみ) に新たに必要とする投資は 120 ドルないし 220 ドルに達するものと推定している。これらの燃料、資材等の確保こそ、原子力発電所の円滑な運営上もっとも重要な問題であろう。

### エ. 関連産業の協力と技術者養成

わが国が原子力の研究を始めてから日が極めて浅く、一般技術水準も低い。早く原子力産業を確立するためには、関連産業がたがいに協力して、研究成果を能率的ならしめると共に、海外技術の積極的導入も必要であろう。また技術者の養成には多くの力を注がねばならないが、このためには原子力研究所、大学等における技術者養成に期待すると共に、テストプラントによる実地の習得も肝要であろう。

以上来るべき原子力時代に備え、今から直ちに諸般の準備を進める必要のあることを痛感する次第である。

# 内部冷却タービン発電機

長崎製作所 加賀貞広\*

## Inner Cooling of Generators

Nagasaki Works Sadahiro KAGA

Noteworthy is the tendency of building generators of gigantic capacity. Varied designs are taken up to accomplish it by manufacturers with their peculiar idea. In the Westinghouse practice, inner cooling of the generator, i.e., to bring cooling medium in direct contact with the conductors to remove generated heat effectively, is adopted to increase the rated generating capacity. It will dispense with the forging of huge rotors which is confronted with a number of difficulties. Mitsubishi employs this design in the construction of huge, high speed machines of late, the conventional pattern being thus superseded gradually.

### 1. まえがき

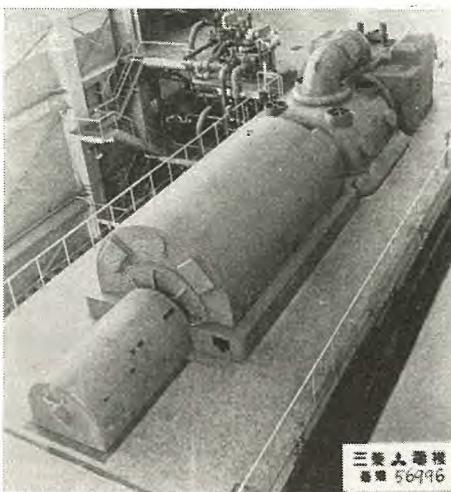
近時わが国で単機容量 50,000 kW, 60,000 kW, または 75,000 kW タービン発電機が商用運転に入り、いずれも良好な成績を収めているが(1 図参照)なお送電系統の強化、連繋にともない単機容量が増大しつつある。すなわち 100,000 kW 級、200,000 kW 級発電機の設置が計画せられ急速に具体化される機運にある。一方国外ではたとえば単機容量 352,000 kVA 機のような超大容量高速度機が製作されているが、この種大容量機を GE 社は Direct Cooled Generator, Allis-Chalmer 社は Supercharged Generator, Westinghouse 社(以下 W 社と称す)は Inner Cooled Generator(2 図参照)と呼んでいる。その構造は製造会社によって種々特長があるが、発電機の固定子コイル、回転子コイルに直接冷却媒体を接触させて、発生熱量を取り去るという考え方換言すれば、導体を直接冷却する方法では各社とも同一である。従来の普通構造の水素冷却 3,600 rpm 回転機の最大容量は、大約 156,000 kW 30 psig すなわち 125,000 kW 0.5 psig であって、この場合回転子軸材は直径 1,100 mm 重量 45 t、抗降伏強さ  $65 \text{ kg/mm}^2$  に及ぶものが必要となる。逆にこれ以上容量をませば回転子軸材の製作が困難となり信頼し得る回転子軸材の入手および許容荷造寸法で発電機容量が制限される。

水素冷却発電機のもっとも大なる特長はガス圧を上昇すれば、発電機に過負荷耐量がかかることがある。最近は運転中のガス圧を上昇させた発電機出力の増加を計るが、後述のように、ガス圧を増加するにつれて、

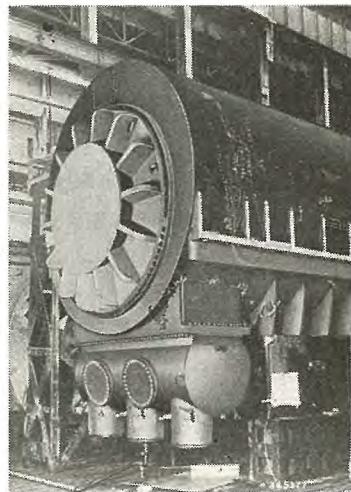
発電機出力の増加の割合は小となる。これは熱損失がコイルを取り巻く絶縁物といふ熱的障害物を通じて放散するような従来の冷却方法では、さらにガス圧をあげてもこれ以上の出力増加は望めないことになる。したがって導体から直接にまたはほとんど直接に発生熱量を取り去るという考え、すなわち導体の直接冷却といふ避け難い改良を生じたのである。ここで従来の普通構造の水素冷却を、普通構造発電機(conventional cooled generator)、この新型機を、内部冷却発電機(inner cooled generator)と呼ぶ。なお本文では W 社で採用されている、内部冷却式について記述することにして他社で採用しているものについては触れない。

### 2. 一般的問題

1930 年代の初期では 35,000 kW 発電機が最大容量機であった。それが水素ガスを冷却媒体に用いて 2 極発電機の特長であった高い風損、摩擦損を除去することに成



1 図 75,000 kW 3,600 rpm 水素冷却発電機  
Fig. 1. A 75,000 kW 3,600 rpm hydrogen cooled generator built by  
MITSUBISHI DENKI.



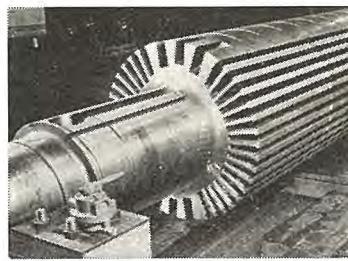
2 図 試験中の内部冷却発電機  
Fig. 2. Inner cooled generator on test.

功し、また冷却方法が改善され製作可能な発電機単機出力が逐次増加し、ことに過去5年間には驚異的に急激に増加し、352,000 kVA機を製作している現状である。このような大容量3,600回転機が製作可能になるために、解決を要すべき種々な技術的問題があるが、なお関連工業の進歩発達に負う所が甚だ多い。発電機のみについて考えれば(1)どのようにして多くの磁束を通すかという磁気的問題、(2)電流をいかに流すかという電気的問題、(3)電圧によく耐えるにはどうするかという誘電的問題、(4)流体的または熱的に熱を伝える方法、(5)以上の諸改良をなしとげる方法と構造技術的問題に大別できる。

### 3. 磁気的問題

これに2つの主な問題があるが1つは回転子軸材、1つは固定子鉄心である。

大容量機の回転子は現在ほとんど単一鍛鋼で作るが、回転子が均一な高い物理的強度を持つことが本質的な問題で、そのため信頼度の高い軸材の入手が肝要事になる。これはその時代の製鋼技術のいかんによるが、なおかつ荒削軸で20~45t位のものを単一軸材で使用するか、あるいは信頼度に重点をおいて機械加工の嵩むのを犠牲にして、いわゆる組立式軸材を使用するかの問題がある。米国や英国ではほとんど大型回転子軸はすべて単一鋼塊軸材を使用するが、欧州の一部の製作者は組立式軸材を採用している。軸材の要求する物理的強度を満足さるために、米国ではニッケル2.5~3%、モリブデン、バナジウム、クロムを若干含んだ合金鋼を採用するが、英国ではかなり大型軸材まで3%クロムモリブデン鋼を採用している。大型軸材では、熱処理応力により内部亀裂を生じたり完成後にも大きな応力が残留し導体溝を加工後または長期間運転後に変形を生ずることがあるので、熱処理も入念に行い油焼入、焼もどしをやめ2重焼準を行って軸材自体の自硬性により軸の内外部にわたって均一な強度を得るようにする。また大型回転子では上記軸材の変形を消失さすため軸材製作後のみならず軸材加工完了後に軸材を加熱箱に入れて熱変形試験を行っている。しかしあくして作った軸材の磁気特性に相当の差異が認められたので研究の結果、炭素とクロムの割合を適当にし熱処理法を改良して、物理的性質のみならず優れた磁気特性を得た。**3図**に内部冷却発電機に用いた単一軸回転子を示す。前述のように単一軸材を使用できるか否かは製鋼技術の発達に待つが、回転子軸が単一鍛鋼で相当大きなものになると材質の均一性の検査に困難を生ずる。この検査のため各国とも最近は超音波探傷技術を導入して非常に有効な鋼中の疵、たとえば熱的割れ等を識別し効果をあげている。筆者の属する会社では、なおかつ熱的割れをもつ回転子の有効強さを決めるため回転子



3図 溝加工を終えた内部冷却回転子  
Fig. 3. Inner cooled rotor finished slot machining.



4図 回転子軸の破壊試験  
Fig. 4. Bursting test of rotor shaft.

が破壊するまで増速する。高速破壊試験を行い充分信頼性のある軸材を使用する研究を行った。**4図**に直径840mm厚さ100mm円板の7,400 rpmにおける破壊の瞬時写真を示す。さてこの材質が均一で優秀な物理的、磁気的性質をもつ回転子軸材の入手であるが大型鋼より小型鋼の方が信頼性が大きいことはいなぬ事実である。後述のように、内部冷却機では普通構造機に比べて、回転子重量を約50%に小さくできる。したがって発電機に内部冷却を採用した最大の寄与は回転子の機械的信頼度が増加したことであると考える。それゆえ普通構造機では単機出力が30 psigガス圧で156,000 kWであったのが内部冷却機では300,000 kW級までも製作しうることになった。発電機の最大定格は信頼すべき軸材の入手いかんによるので、筆者は軸材重量45tが現在の製鋼技術からみて最大重量で、またわが国の製鋼メーカーでこの程度の軸材は製作可能であると考える。

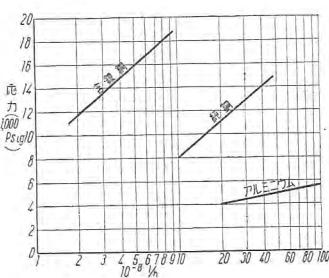
つぎに固定子鉄心材料につき述べる。

タービン発電機の固定子鉄心材料は今まで熱間圧延珪素鋼板を用いたが、方向性珪素鋼板を用いて機械の大きさを小型軽量化することができる。

方向性鋼板は変圧器に随分採用されたが2極タービン発電機に使用されなかった。一般に方向性珪素鋼板は圧延方向に沿って非常に良好な電気的特性をもつ。損失は鋼板の結晶粒の方向が磁路の方向に平行なときは熱間圧延鋼板の50%程度で、直角方向のときは同程度である。タービン発電機では歯部損失に比べて鉄心損失の占める割合が多いので、鉄心部分での磁束の通路ができるだけ結晶粒の方向に近づけるよう鉄板を打抜く。また導磁率が大きいので固定子鉄心に要する起磁力を非方向性鋼板の場合に比べ、平均してすくなくとも50%減少できる。かく損失の減少は通風ガス量の減少となり内部送風機損も低下する。鉄損を同程度にすれば方向性鋼板の場合は非方向性鋼板より約10%磁束密度を増すことができ、機械を軽量にすることができます。その他製造者は鋼板の表面を非常に滑らかにして表面に良好な電気的絶縁抵抗をもつ薄膜を充分密着して焼付け鉄損を著しく減少さよう、またスペースファクタをよくするように努める。このように方向性鋼板を用い、鉄損を相当減少せしめ従来の方向性のない珪素鋼板に代ろうとしている。

#### 4. 電気的導体の改良

単機出力の増加に応じ回転子の寸法が増し与えられた温度にたいし回転子コイルの移動量が大となる。他方回転子直径が増すとコイルの受ける遠心力が増すので遠心力と温度との相互作用により回転子コイル導体が収縮しこのため発電機が長期間運転停止を繰返すと回転子コイルが変形を起し、故障の原因となる。この種収縮現象を防止するためあらかじめコイルに励磁電流を流す運転方法などあるが、製作者としては普通の焼鈍軟銅体の代り



5 図 含銀銅とアルミニウムの  
125°Cにおける匍匐特性  
Fig. 5. Creep rates on 125°C  
silver bearing copper and  
aluminum respectively.

に冷間加工含銀銅体を使用する。この材料の使用は非常に成功で、中型機以上のすべての回転子に使用される。この含銀銅体は軟銅より弾性限度、軟化点高く塑性変形を起し難い匍匐性の優れた材料である。5図に含銀銅とアルミニウムの125°Cにおける匍匐特性を示す。一方回転子半径はコイルを高い遠心力に対して保持する。コイル押えリングの厚みにより制限されるので銅より軽量な材料の使用が望まれた。この点よりある製作者は1940年頃、回転子コイルにアルミニウムを使用したが、これはコイル押えリングの応力にたいし、著しい改良を持ったがコイルに誘起する高い応力には到底たえることができなかつた。しかし最近電気伝導度をさげずにアルミニウムの物理的性質を改良した新材料が実用された。これはアルミニウムを主体とし極微量の鉄、マグネシウム、シリコンを加えた材料でコンダアルと称せられ、運転限度における圧縮弾性限界および匍匐限界が著しく改良された。米国のある製作者は3,600回転機にこの新材料を使用している。

#### 5. 固定子コイルの絶縁

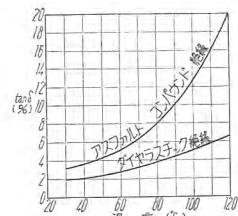
発電機容量が100,000 kWおよびそれ以上になると端子電圧の選定に及ぼす因子が2つある。1つは端子電圧を誘起するに必要な設計条件すなわち、固定溝数、固定子コイルの跨り、磁束密度であって、いま1つは固定子コイル引出線の套管の最大電流容量である。この点から100,000 kW以上では端子電圧として13,800~24,000 Vが選ばれる。しかし欧州の発電機には中型機で30,000 Vというようなかなり高電圧を採用した発電機がある。また套管あたりの電流値は、普通構造の油入套管では6,000 A 内部冷却套管では10,000 A が大体最大許容値と考えられる。

このように高圧発電機になるにつれて絶縁問題はますます重要となり、運転中の機器の故障を防ぐため種々な方法が講ぜられ、絶縁劣化の防止、早期故障検出に努力

が払われている。他方製作者はある限度の厚みで耐高压性でかつ誘電体損の低いこと、電離を最小にして良好な熱伝導率を与えるために内部に気泡のないこと、許容温度で劣化を小にすること等の条件を満足する絶縁物の研究に努めている。

一般に1930年以後、固定子コイル絶縁にはアスファルトコンパウンドを使用した連続マイカテープ絶縁が採用されたが、これは周期的な負荷状態での絶縁部分の熱的膨脹収縮をある程度銅体と順応させていた。この間綿テープ等のA種絶縁の代りにガラステープ、アスペストフィラ等のB種絶縁を用いてコイルを完全B種絶縁とし、これに製作方法、検査方法に改良工夫を加え、品質管理を行いコイルの機械的強度ならびに絶縁耐力の向上を計った。しかしこの絶縁方法ではいわゆる大容量水素冷却機で起りうる剥離現象による故障を絶対に避けることはできなかった。これを確実に防止する目的で米国では1948年新合成樹脂を接着剤とした雲母絶縁を完成した。

これはリニヤーポリエスチルなる合成樹脂を特殊な熱に反応するビニールモノメルに溶かしたものでこの重合物は優秀な電気的機械的性質を有するが、また弾性にとむ絶縁材料で固定子コイルが加熱冷却し熱サイクルを繰返す間に銅、鉄、絶縁物の間に膨脹係数の差はあってもこの原因で雲母の永久変位あるいは破壊等の結果を生じない。また耐湿性が優秀である。筆者の会社でダイヤレジン絶縁と称するのはこれである。6図にダイヤレジン絶縁と従来のアスファルトコンパウンド絶縁の種々な温度におけるtan δの比較を示す。

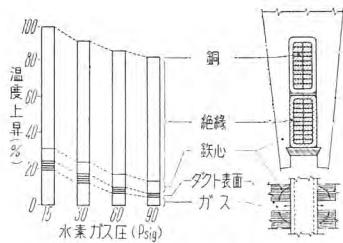


6 図 絶縁特性による温  
度特性の変化  
Fig. 6. Tan δ-°C curve  
on various insulation.

#### 6. 冷却方法の改良（内部冷却式）

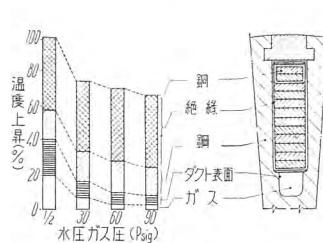
普通構造発電機の固定子コイル、回転子コイルの種々なガス圧に対する温度勾配を7,8図に示す。この通風方式ではガス圧0.5 psigの場合の回転子コイルの温度勾配の中で約40%は溝絶縁物中で生じ、約20%は回転子鉄部で約20%は水素ガスと鉄心部の接触面で、約20%はガスの温度上昇である。これらの値は絶縁の厚みガス溝配置等の設計条件によって異なる。ガス圧が変わっても、溝絶縁物の温度降下、鉄心部分の温度降下は一定である。しかし鉄心部とガスの接触面の表面熱伝達率は絶縁ガス圧の0.8乗に比例して増すので、ガス溝表面の温度降下はこれに逆比例して小となる。またガスの温度上昇はガス密度に逆比例して小となる。発電機の比容量の制限は第1に電気絶縁物の最高許容温度により決り第2に回転子コイル、固定子コイル内の発生熱を放散する能力によって決るからかりに30 psigガス圧で温度上昇を0.5 psigガス圧の場合と同一にすれば回転子電流をもっと

余分に流すことができる。また8図からガス圧を30 psigから60 psigまたは90 psigと順次増すと温度上昇の減りかたがすくなくなる。逆にいえばガス圧をあげるために回転子の出力の増加の割合は小となる。これはガス圧に無関係な回転子鉄部と回転子絶縁部分の温度降下が60%も占めるからであって、固定子コイルについても同様のことがいえる。したがってこれら絶縁物を通さずに直接またはほとんど直接に導体と接触する冷却媒質を循環させ方法（内部冷却法）を導体に適用する



7図 固定子コイルの種々のガス圧に対する温度勾配

Fig. 7. Temperature gradient of stator coils for varied gas pressure in the conventional design.



8図 回転子コイルの種々のガス圧に対する温度勾配

Fig. 8. Temperature gradient of rotor coils for varied gas pressure in the conventional design.

と温度降下の割合は10図のようになる。この内部冷却固定子コイル、回転子コイル温度勾配の分布を9,10図に示す。10図より、内部冷却回転子では絶縁物および鉄心中の温度降下がなくなり温度上昇は、導体とガスの接触面の温度降下とガスの温度上昇の和となりこれがガス圧をあげると1つは絶対ガス圧の0.8乗に反比例して減り1つはガス密度に反比例して減るのでガス圧の上昇により温度上昇が著しく減少する。また9,10図より内部冷却式ではガス圧30 psigと60 psigの温度上昇の減少の割合は普通構造式でガス圧0.5 psigと30 psigの温度上昇の減少の割合とほぼ等しいことが判る。上述のようにガス圧を上昇すれば発電機の負荷を増大できるがこの値は普通構造式では15 psigまでは1 psigにつき1%，30 psigまでは1 psigにつき2/3%であった。これと比べて内部冷却式を考えれば発電機の過負荷耐量は

1表となる。さてこれら導体の内部冷却の概念は古くすでに1912年頃回転子に適用されこれが発電機の大容量化にともない1950年頃から急速に実用化された点に注目すべきである。

水素冷却機の多年の運転経験信頼性の結果運転ガス圧（常用ガス圧）が徐々にあげられ常用ガス圧は普通構造式では大多数30 psigでありこれと比べて内部冷却式では45 psigと考えるのでこれらのガス圧に対するkVA出力が100%になる。したがって内部冷却式は45 psigで、普通構造式は30 psigで種々の性能比較を行うこととする。また間もなく内部冷却式では常用ガス圧が60

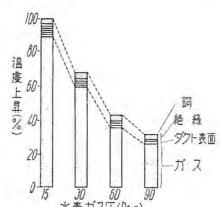
psigになると予想される。156,000 kWで機械の大きさを比較すると2表のようになる。内部冷却回転子は普通構造式に比べて大約50%位の大きさになり、充分信頼性ある回転子軸材を使用できることになる。

最後に内部冷却式では機内ガス圧が高くなるのでそれに応じてガス消費量が増すが固定子枠の製作方法、補器管系の設計法、密封装置等を改良して、60 psigガス圧における消費量が今までの普通構造式30 psigガス圧の消費量にほぼ匹敵する値になった。

## 7. 内部冷却発電機の構造

### A. 回転子コイル

導体から直接発生熱を取去る構造の回転子が種々考案実施されたが、10図または11図に示すように導体をチャンネル型にして2つ組合せて矩形のガス溝を作るのもその一例である。この2つの導体が平行になるのでチャンネルの足部には絶縁物がいらぬ。つぎのターンとの間の絶縁物はチャンネルの背部になるのでガス溝を作らない。また普通構造回転子ではコイル収納溝を放射状にくるがこの溝が平行溝であって、そ

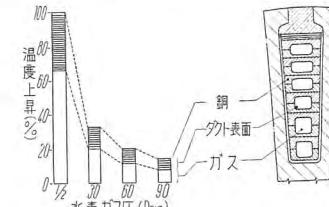


9図 内部冷却固定子コイルの温度勾配

Fig. 9. Temperature gradient of inner cooled stator coils.

1表 内部冷却、普通構造機のkVA出力増加の割合

内部冷却式 ガス圧 psig	kVA出力 %	普通構造式 ガス圧 psig
30	100	0.5
45	115	15
60	125	30



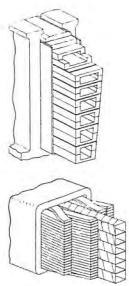
10図 内部冷却回転子コイルの温度勾配

Fig. 10. Temperature gradient of inner cooled rotor coils.

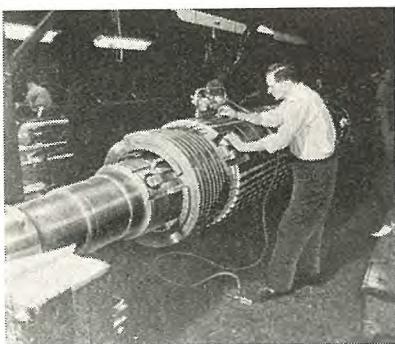
2表 内部冷却普通構造発電機の機械の大きさ

項目	冷却方式	内部冷却式	普通構造式
	ガス圧 psig	45%	30
全重量		72%	100%
回転子重量		58%	100%
最大重量物(固定子)		60%	100%

のためエッジワイズ巻の回転子コイルを順次挿入して絶縁物をはさみコイルを完成することができる。しかし内部冷却式では回転子アンペアターンを増すため収納溝が平行でなく、鉄心歯部が平行なので各ターンのチャンネルの寸法はすべて異なる。それで10図のようにその構造からあらかじめエッジワイズ巻コイルを作って、これをコイル溝に収納することができぬ。それ故J型コイルを作りこのJ型コイルを収納してはつぎのJ型コイルを入れ2つのJ型コイルを高周波誘導加熱を行って溶接する。この方法を繰返して回転子コイルを完成する。（12図参照）



11 図 内部冷却回転子コイルと固定子コイル  
Fig. 11. Inner cooled rotor coil and stator coils.



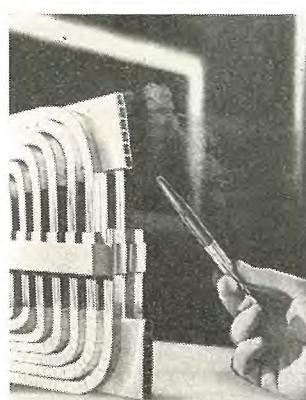
12 図 内部冷却回転子の端部コイル  
Fig. 12. End coils of inner cooled rotor.

#### 1. 固定子コイル

内部冷却固定子コイルは溝内で Röbel 転位を行い、巻線端部で外部転位を行うなど普通構造式と同じであるがつぎの 2 点が異なる。すなわち 11 図 15 図のように 1 つは絶縁した素線は 2 つの別個の列にならべ、これらの列の間に数個の金属製ガス管が配置してある。いま 1 つは固定子コイルの両端に冷却ガスの出入口を設けたことである。この薄い金属製管は、この内部を高圧ガスが流通するが過流損を極力小さくするため高抵抗非磁性材料である。13 図にコイル端部巻線とガス管との関係を示すがこれにシリコンラバーキャップをこの結合部にかぶせガスの出入口を形成する。

#### ウ. 通風方法

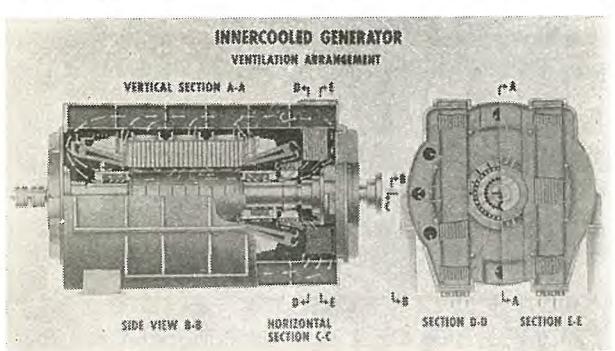
内部冷却発電機の断面図を 14 図、固定子コイルおよび回転子コイルの通風説明を 15, 16 図に示すが要點は (1) コイルの発熱部分に直接冷却ガスを導入すること、(2) 冷却ガスの密度を増すこと、(3) コイルの出入口のガスの圧力差をプロワによって増すことである。タービン側に配置したプロワ、冷却器を通ったガスはつぎの経過を経て冷却系統を完結



13 図 固定子コイルの端部構造  
Fig. 14. End construction of stator coils.

#### 内部冷却発電機の通風説明

明を 15, 16 図に示すが要點は (1) コイルの発熱部分に直接冷却ガスを導入すること、(2) 冷却ガスの密度を増すこと、(3) コイルの出入口のガスの圧力差をプロワによって増すことである。タービン側に配置したプロワ、冷却器を通ったガスはつぎの経過を経て冷却系統を完結

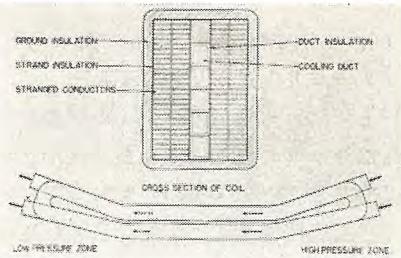


14 図 内部冷却発電機の通風説明

Fig. 14. Inner cooled generator ventilation system.

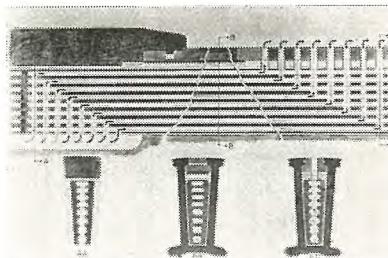
15 図 内部冷却固定子コイルの構造と通風説明

Fig. 15. Ventilation pattern and construction details of inner cooled rotor coils.



16 図 内部冷却回転子コイルの構造と通風説明

Fig. 16. Ventilation pattern and construction details of inner cooled rotor coils.



する。

- (1) 一部分のガスはフレーム内を経て集電環側に達し固定子コイル内のガス管内部を軸方向に通じ右端に出てプロワに再び吸われるが、この間コイルを冷却する。
- (2) フレームにはいったガスは固定子鉄心内のガス溝を半径方向に内側に流れ空隙に達し空隙を軸方向に右側に進みプロワに吸われる。この間固定子鉄心のみを冷却する。

(3) 一部分のガスはフレーム内を経て集電環側に達しコイル押えリングの端板と軸の間の環状空間から回転子に入る。ガスは 2 つに分れ 1 つは各オリフィスを経て導体に達し、ついで導体に沿って軸方向に中央部に向い他の一連のオリフィスを通過して空隙に出、右端に進みプロワに吸われる。残りのガスは、他のオリフィスを経て導体に達し円周方向に端部導体を冷却しコイルの下部にバッフルでできた別の室に半径方向に内側に排出する。この密閉部分からのガスは磁極中心部に切欠いだ穴を経て空隙に出てついで空隙を右端にすすみプロワに吸われる。

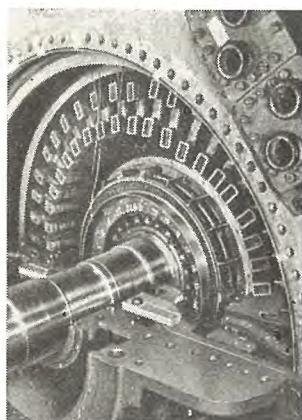
(4) 回転子コイルのタービン側の半分は冷却器をとおった一部のガスタービン側が回転子に入り、上記(3)と同じようにガスを循環させて冷却される。

このように回転子の軸心部と端部を別々に 4 つの並列回路で冷却する理由はガスの通る通路の長さを減じ後述のように回転子の冷却特性を増すためである。またプロワと反対の端にある空隙の風止めはガスが横道をして流れるのを防ぎ回転子および固定子コイルに風を送る圧力室を作る。17 図に内部冷却機の固定子コイルのガス入口部を、18 図に完成した回転子を示す。

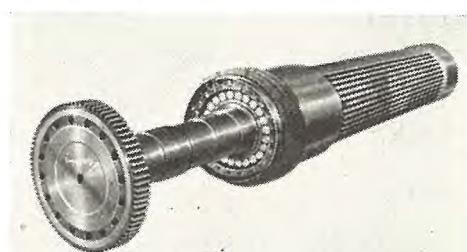
#### 8. プロワ

内部冷却機は普通構造機に比べると 9, 10 図より明かに運転銅温度を同一とすれば相当高いガスの温度上昇を許すので冷却ガス量が少くてすむ。質量流を増すためにはガス密度、またはガス速度を増せばよい。プロ

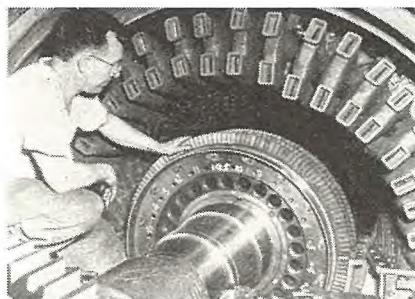
わからいえば質量流を大にするにはプロワ風圧よりガス密度をあげて静圧を増すのが望ましい。これはプロワ損失は静圧に比例して増しまた系統を通るガス量の3乗に比例して増すからである。前述のように内部冷却機では固定子コイル、鉄心の通風はほぼ独立と考えられるがこの固定子コイル内部のガス溝内を高圧ガスを通すために普通構造機に比べれば非常に高い差圧が必要となる。他の通風回路はこれほど高い差圧を必要としないので適当な装置を用いて減圧する。このように高能率で高い圧力を出すプロワが必要となるのでこの目的にかなう多段軸流送風機を採用する。この送風機は図19の如く機



17 図 内部冷却機の固定子コイル端部とベアリングブラケット  
Fig. 17. End view of inner cooled windings and bearing bracket.



18 図 完成せる内部冷却回転子  
Fig. 18. Complete inner cooled rotor.



19 図 プロワを組立てた回転子  
Fig. 19. Assembly of rotor blades and hub of three stage axial blower.

械の一部分として組立てるが表に両者の性能比較を示す。

## 9. ガス冷却器

内部冷却機では許容ガス、温度、ガス圧が高いので、水素冷却器のガス側の熱伝達率は増加する。普通構造機のような低ガス圧運転の場合にくらべると、相当異なるので、内部冷却機の運転に最適なように冷却管の直径とフィンの高さの関係をかえて、その結果冷却管を小さい断面積に収めるようにする。このように冷却器の設計を普通構造式のものと変えれば冷却器の作用容積で考えて40% 小さくできる。冷却器からの冷いガスは前述の如く固定子鉄心と固定子枠外板の間の適当なガス路を通って循環するが、これらのガス路はかなり小さいので固定子枠の大きさを出荷限界内に押えることができる。また内部冷却機は空隙の長さが長くてガス量の減少と相まって回転子と鉄心冷却ガスを集めるガス路として利用される。これは発電機の電流が増すと電機子反作用のため普通構造機程度の空隙では短絡比が減少してくるので同じ短絡比を維持するためにも空隙を大きくせねばならぬので好都合である。

## 10. 温度上昇限度

普通構造機ではコイルの温度のメーター規格は固定子コイルはコイル間の埋込温度計で計測して全温度は $40^{\circ}\text{C} + 60^{\circ}\text{C} = 100^{\circ}\text{C}$ で、回転子コイルは抵抗法で全温度は $40^{\circ}\text{C} + 85^{\circ}\text{C} = 125^{\circ}\text{C}$ でここで $40^{\circ}\text{C}$ は周囲温度である。しかし内部冷却機では同様な計測で固定子コイルは $45^{\circ}\text{C} + 55^{\circ}\text{C} = 100^{\circ}\text{C}$ 、回転子コイルは $45^{\circ}\text{C} + 55^{\circ}\text{C} = 100^{\circ}\text{C}$ 、周囲温度 $45^{\circ}\text{C}$ である。内部冷却コイルではガスは導体溝内を貫通する間に熱を吸収し出口部分で最高温度となる。したがって銅体の温度も同様な傾向となり表面熱降下分

だけ各点においてガス温度より高い。内部冷却回転子コイルの平均温度は普通構造のコイルの平均温度より低い。したがって抵抗法で測った内部冷却コイルに対する温度限度は普通構造式の場合よりも低い値になる。一般に水素冷却機では周囲温度はガス圧を上げると一定ではなくて増加するので、内部

3 表 内部冷却、普通構造発電機の風損の比較

項目	型式	
	普通構造式	内部冷却式
ガス圧 psig	30	45
プロワ圧力 %	100	440
プロワガス量 %	100	20
プロワ効率 %	100	150

冷却式では周囲温度を $45^{\circ}\text{C}$ は増している。絶縁物は許容全温度で制限すべきであつて温度上昇のみで制限してはならない。それ故上述の如く $100^{\circ}\text{C}$ に温度制限をもうければ回転子中央部のガス出口部の銅体が最大温度となりその値が $130^{\circ}\text{C}$ 以内におさまるのである。

固定子コイルでは最大銅温度は鉄心部の外側コイル端部のガス出口に起る。鉄心部内のコイル温度は相当減少し、ガス出口部分の最大温度より多少低い平均値をもつ。内部冷却機ではコイル間の埋込温度計のほかに固定子コイルから放出されるガスの温度をよむ温度計をとりつける。このガス温度計に対してはまだ温度限度は規定されておらぬが約 $105^{\circ}\text{C}$ 位である。逆にこの位の温度であると、コイルの埋込温度計が $100^{\circ}\text{C}$ にはいり、最大銅体温度が許容値を超えることはない。

## 11. リアクタンス

内部冷却機では $45 \text{ psig}$  普通冷却機では $30 \text{ psig}$ を基にして、短絡比を同一に設計するので直軸リアクタンスは同一である。またリアクタンスは固定子溝寸法や空隙の増大のため大となるが普通構造機に比べて内部冷却機の次過渡リアクタンスは200%程度、過渡リアクタンスは175%程度に増加する。このようにリアクタンス

が増す結果、短絡電流が減少し遮断器の負担が軽減しあつ発電機に作動する応力が減少する利点がある。

## 12. 効率

内部冷却機では回転子固定子共重量が軽減するので軸受損、鉄損は普通構造機より小となる。プロワ損は高い差圧、高いガス密度による影響がプロワ効率向上とガス量の減少およびそれにともなう寸法の減少と相殺して、却って少なく、また回転子が小となるので回転子風損も少くなり全風損が少なくなる。また固定子電流、回転子電流を著しく増したために固定子銅損、回転子銅損はともに内部冷却機では著しく増加する。結局内部冷却機は一定損失が減少し可変損失が増大するので内部冷却機では効率が全負荷で若干よくなり低負荷では普通構造機に比べてかなりよくなる。両者の効率の比較を4表に示す。

## 13. 励磁機

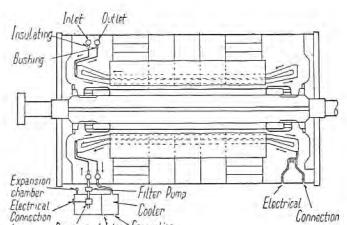
同一 kVA、力率、短絡比の発電機で有効部分の寸法を縮少すると励磁機電力の所要量は必然的に増加する。内部冷却機では回転子コイルの電流容量をますため回転子銅損が著しく増大し、励磁容量が増す。内部冷却機用励磁機の容量は発電機を 80,000 kW~250,000 kW として大約 600 kW~1,400 kW 位で、励磁機電圧は 375 V が主で 500 V のものもある。これは励磁機容量が大となると整流条件と電気的特性を兼備さすために電圧をあげて電流値を小にするためである。直結励磁機では整流

4 表 普通構造、内部冷却機の効率の比較

発電機定格	156,000 kW 30 psig 3,600 rpm	156,000 kW 45 psig 3,600 rpm
冷却方式	普通構造式	内部冷却式
軸受損(%)	16	12
鉄損(%)	15	9
全風損(%)	24	15
(固定子風損) (プロワ風損)	(11) (13)	(4) (11)
回転子銅損(%)	14	29.5
固定子銅損(%)	7	14
漂遊負荷損(%)	24	12.5
全損失(%)	100	92

および整流子の機械的問題から制限を受けて、3,600 回転で約 350 kW が最大容量と考えられるので大容量機用では減速歯車駆動か電動駆動方式が用いられる。後者は高トルク誘導電動機で駆動し、低電圧時の速度減少ができるだけ少くするため蓄勢輪効果を大にする。

励磁方式は簡単で信頼度高く、正確鋭敏に動作し、速応度の大なることが必須条件で、この励磁方式の優劣は 1 つは励磁機の性能 1 つは励磁機を制御する調整器の性能にかかっている。このため (1) 励磁機抵抗器型自動電



20 図 液体冷却発電機  
Fig. 20. Liquid cooled generator.

圧調整器付励磁方式、(2) 磁気增幅器付励磁方式、(3) 回転型増幅付励磁方式等がある。この磁気增幅器は回転型増幅器より動作時間の遅れが短かくて、励磁機と一緒に用いいるときは、速応度が大なる励磁方式を与えかつ回転部分がないので保守点検が容易という利点がある。そのために最近は回転型増幅器の代りに磁気增幅器が用いられる。内部冷却機と普通構造機では、励磁方式に根本的な差異はないが、上記励磁機抵抗器型自動電圧調整器付のものと磁気增幅器付のものがそれぞれ用いられる。

## 14. 液体冷却

内部冷却の他の方法は導体を通してガスの代りに液体を循環せしめる方法である。20 図に液体冷却発電機を示すが、これは固定子に液体冷却を適用している。

この図で、冷却液体は分岐管を通してタービン端から入り、他の導体を通って再びタービン端に戻る。リングヘッダーが 2 つあるが 1 つは低温液体用で、他の 1 つは高温液体用である。また液体循環用に冷却器、ポンプ、タンクがある。

このように導体を水冷却または油冷却することは最も有効であるが、これら液体冷却を採用するのは簡単なガス系統を用いて必要な特性が得られない場合にのみ有意義だと考えている。すなわち高圧水素ガスによる内部冷却法は、他の冷却媒体を用いるときに生ずる種々の複雑な構造装置を除き、冷却システムを簡略化し、普通構造発電機に類似な機械を、運転方法を変えることなしに製作し得るからである。

## 15. むすび

以上大容量高速度タービン発電機の製作にあたって、単機容量が 156,000 kW (30 psig ガス圧) を超えるときには内部冷却法の適用が必要なこと、および内部冷却機と普通構造機との比較検討およびその特長につき述べた。しかもこの内部冷却発電機は従来の普通構造式のものに比べて運転方法はなんら変わらないという大きい特長をもっている。筆者は昨年 W 社の East Pittsburgh 工場で内部冷却発電機を 30 台、総容量約 600 万 kW 製作している状況を見てこの種発電機は急速なる開発期を終りすでに実用期にはいったと実感したものであった。

さらに米国ではこの内部冷却法は 100,000 kW 以下の中型機にも適用される機運にあるのでわが国でこの冷却法を用いた発電機が登場するのは案外近いのではないかと筆者は信じている。本文がこの型の発電機の理解に役立てば幸である。

# ダイヤラスチック絶縁

研究所 石黒克己\*  
長崎製作所 伊佐山好延\*\*

## Dialastic Insulation

Engineering laboratory Katsumi ISHIGURO  
Nagasaki Works Yoshinobu ISAYAMA

With the increase of generator capacity, the dielectric and mechanical strength of their coils have aroused a lot of problems. Especially, the asphaltic compound having the thermoplastic properties may be subjected to the migration of mica flakes under the temperature cycle of the compound, which is liable to bring about serious accident. To cope with the situation, Mitsubishi has developed "Dialastic Insulation" which is based on "Thermalastic Insulation" invented by Westinghouse. The new insulation has been successfully applied to large turbo-generators and water wheel generators.

### 1. まえがき

大型高圧の発電機等回転機器のコイルの絶縁はこの機器の生命を制するものであるから絶縁材料、絶縁方式に関しては從来から不斷の研究が続けられており、一般に主としてアスファルト系の接着剤でマイカ薄片を貼り合せたマイカテープを導体に巻付けて基礎絶縁体を作り、それにアスファルトを主材料としたコンパウンドを含浸させて継目なしの絶縁層を形成させる方が 1930 年頃から実用せられ爾來 20 年間踏襲されてきた。この間機器の要求はますます大型高圧化しコイル長の増加と絶縁強度の信頼性が要求されるに従って幾多の困難に逢着するようになった。

すなわちコイル長の熱的膨張、収縮に対しアスファルトの如き有機材料と導体との熱膨張係数の差は非常に大きかつ熱可塑性であるための不都合が、絶縁剥離の問題を、すなわち膨張収縮を繰り返す間に關係位置のズレを生じ重大なる事故をおこすおそれが予測せられるに至り、コイルの膨張収縮に対して充分な弾性を持ちその応力に耐える絶縁材料と絶縁方式の要求が高まってきた。アスファルト系コンパウンド（以下単にコンパウンドと称す）はこれを加熱の下で真空含浸せしめる技術上および經濟的制約のためその軟化温度を高めることはきわめて困難であつて、その軟化点は 115°C 内外が一応限度とせられており、したがつて機器の温度上昇もこの制約を受けるのは当然である。しかも機器の大きさはますます増大する傾向にあり、絶縁の信頼性に対する要求はますます高められてきた。その電気的性質はもちろん高度のものであることは当然として、温度上昇時における電気的性質が良好であるばかりでなく、適度の弾力性と応力を持つていてコイルの膨張、収縮に対しても充分な適

応性を持つことなどである。しかも作業性の勝れていることは前記の条件にもまして重要な要素である。

これをもっと具体的に言い表わすならば、125°C 前後の温度でも適度の弾力性を持ち、導体および構造材料である銅、鉄の膨張収縮の差によく順応して機械的な破壊に耐えることのできる適當な厚さの絶縁層が容易にできること、すなわち、破壊電圧の強さ、絶縁抵抗、力率等の電気的性質が勝れていることはもちろん、耐湿性、耐薬品性、耐油性等の特性ならびに熱劣化に対する特性が勝れていることが要求される。

こうした困難な条件を満足させるために長年研究が続けられたが当社と技術提携をしているウエスチングハウスマジック会社は 1949 年に不飽和ポリエステル樹脂とビニールモノマーを含浸材料として利用しそれに適合したマイカテープを組合せた新絶縁方式を完成して Thermalastic Insulation と称した。

大型機器の絶縁改善に不断の努力を重ねていた当社はかねてこの種樹脂の研究を怠らなかつたが、マイカテープの改善と、含浸、成型方法の困難をウエスチングハウスマジック会社の指導によつて解決し得たので、当社は Dialastic Insulation と名付けてタービン発電機をはじめ水車発電機その他大型機器の絶縁材料として從来のコンパウンドの代りに採用したのである。

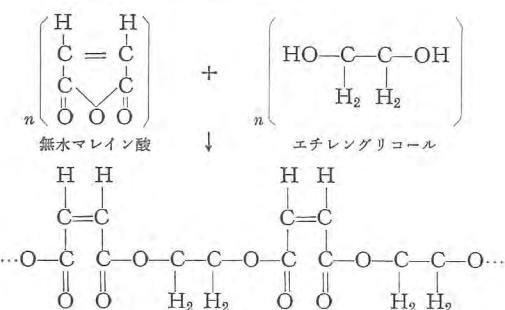
### 2. ダイヤラスチック絶縁

Dialastic Insulation とは W 社のいう Thermalastic Insulation とまったく同様の方式と設備によるほぼ理想的な新絶縁方式でこれによって電気技術者が多年夢に抱いていた絶縁の向上を一気に解決したもので、当社としてはその応用はまだ緒についたばかりではあるが、すでに輝かしい成果を挙げつつあり、なお、今後一

層の発展を期待するものである。

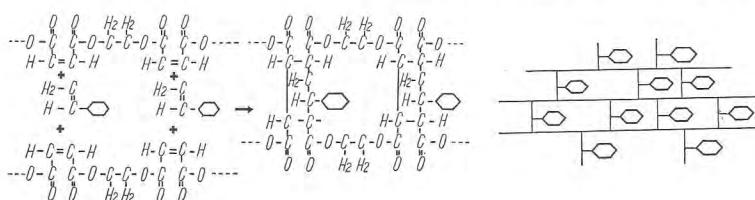
そもそも不飽和ポリエスチル樹脂の研究は古くから行われ、それと重合性のビニール基を持つ单量体との結合による熱硬化性樹脂についても 1930 年代の終り頃から研究せられていたが、著しく発展したのは第 2 次大戦後半以後であって溶剤を使わないところから Solventless Varnish, 100% Reactive Resin あるいは揮発物を発生しないで低圧で成型あるいは単に注入してさえ成型できるところから Contact Resin, Low Pressure Resin あるいは Cast Resin と称せられた。

典型的な不飽和ポリエスチルは不飽和基を持つ二塩基酸たとえば無水マレイン酸とグリコール、たとえばエチレングリコールとを反応せしめて作るものであるが、この二塩基酸（しばしば飽和および不飽和二塩基酸を混合する）の選択とその重合度の選択によって各種各様のポリエスチルを作ることができるが、その反応のコントロールには高度の技術と完全な設備が必要である。



このようにしてできた重合樹脂はかなり粘稠な液体か固体であるがこれを常圧で適当な沸点を持つ反応性ビニール单量体に溶解して普通のワニスのようにすることができる。ビニール单量体としてはいろいろなものがあるが、その代表的なものはスチロルモノマー（沸点は約 145°C, 凝固点 30.6°C）である。この場合スチロルモノマーの溶液は通常のワニスにおける溶剤とはまったくその作用が異なるので簡単に説明を加える。

スチロルモノマーはそれ単独でも重合して重合スチロールとなるのであるが、今ここに不飽和ポリエスチルと共に重合させた場合は 1 図、2 図 の如き 3 次元的のいわゆる網状構造を持った固体のサーモセット樹脂を形成する。すなわち、不溶不融樹脂である。この反応は加熱と重合触媒、たとえばベンゾイルパーオキサイド、メチルエチルケトン、ラウリルパーオキサイドのような過酸化



1 図

2 図

1, 2 図 スチロールと共に重合した不飽和ポリエスチル模型

Fig. 1, 2. Model of unsaturated Polyester copolymerized with Styrol.

物とを用いて容易に進行させることができる。またプロモータと称してナフテン酸コバルトのような金属塩類または芳香族アミン類が過酸化物の作用促進剤として用いられ、それによって重合反応は低温・室温でさえも速やかに行われるようになる。

これまでの記述は、不飽和ポリエスチル樹脂としての基準的なものであるが、たとえば、フタル酸やセバチン酸のような飽和二塩基酸で不飽和多塩基酸の一部を置き換えることもできる。この場合はスチロール等への溶解度の増加とか重合樹脂の可撓、柔軟性の増加等の変化が挙げられている。またビニールモノマーの量も必ずしも模型に示したような形で入る訳ではなく一般的にはむしろ分子当量よりも多く使用することの方が多いこと、したがって或る部分ではビニール同志の重合も起っていると考えられる。また、スチロールモノマーの他にジアリールフタレートやトリアリルシアヌレートのようなものも特殊の性質を發揮する材料として利用されているのでその種類は多種多様であってそれぞれの特長を捉えて適材適所への応用が研究せられている。

このように不飽和ポリエスチル樹脂の種類と利用方法はいろいろ考えられるがいずれの場合にしても見掛けの不飽和ポリエスチル-ビニール溶液は普通のワニスのように溶液状態であるが、含浸後硬化重合反応を起させると溶剤共々に一体に固化してその際に溶剤の揮発はもちろん水分、ガス等の発生を伴わないので空隙のない完全な絶縁層を作り上げができるのが特長である。ダイヤラスチック絶縁に用いられるダイヤレジンはおおむねこの原理に基いて作られたワニスであるからいかに理想的な絶縁工作が可能かは自ら明らかである。ひるがえって従来のワニスは固形分を溶液状態にするため通常 50% 内外の溶剤を含みそれを揮散させねばならなかつたのででき上った絶縁層は約半分に減少するのみでなく溶剤の蒸発に伴う微小な空隙が残り爾後の吸湿その他絶縁劣化の原因となつた。またコンパウンドは含湿を容易にするためにはその軟化温度より数十度高温に加熱して粘度を低くする必要があったが、高温度にすることはコンパウンドを分解、劣化させるおそれがあるばかりでなく他の絶縁材料に及ぼす影響と設備の関係からこの温度にも限度があってその作業時の粘度を充分低くすることは不可能であつて、必然完全な含湿充填を行うために面倒な手数を掛けていた現場作業者の悩みは一挙に解決した。

しかしながら重合反応の際に空気-酸素に接触すると酸素は反応遮滞剤として作用して表面を粘着性にするので空気と樹脂を遮断するために或る程度ゲル化が進んだ時セロハン；あるいはポリビニールアルコールフィルムのような不透性のフィルムで表面を覆うか、グリセリン、油のような液体で空気の接触を避けなければならない。

また或種の金属とくに銅およびその塩類や硫黄などもこの樹脂の重合反応を邪魔するから直接コンダクター等の銅面に触れないようにする必要があり、ワニス処理されたガラス巻き電線かエナメル線を使用すると共に屈曲その他加工中にそれらに損傷を起きないよう注意が入用である。

なおダイヤラスチック絶縁の特長とするところは、本方式に適するマイカテープの研究開発である。高圧の絶縁材料としてマイカテープの重要なことはいうまでもなくそのすぐれた絶縁性と可撓性に負うものであるがマイカの薄片を保持するための接着剤の性能は最も重要である。

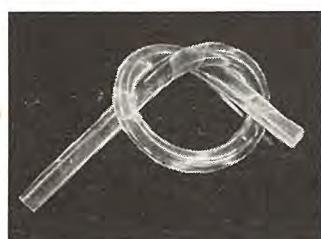
古くからシェラック、松脂、コーパル等の天然樹脂をはじめアスファルト系の材料を用い、常態において長くその粘着性と柔軟性を保持するよう工夫せられていた。このマイカテープを必要厚さになるまで導体周囲に巻き付けた上にコンパウンドを真空圧入してそれらの隙間を埋めることによって完全な絶縁仕上をするのである。

ダイヤラスチック絶縁用マイカテープはポリエステルまたは半重合状態のポリエスチルーピニール系の材料を用いて強力な接着力と半ば永久に変わらぬ柔軟性を持ちながらテーピング後は低粘度の含浸用ダイヤレジンをその空隙に完全に浸透させると共に含浸されたダイヤレジンと前記のような化学反応を起して混然一体のサーモセット樹脂を作るように工夫せられてるので、完成コイルの絶縁層は完全にマイカ片とダイヤレジンが一体となって少しの空隙も残らぬばかりかもはや絶対にマイカ片の移動などを起こすことのない優秀な不溶不融の固体絶縁層となるのである。

このマイカテープに含まれたポリエスチルと含浸用ダイヤレジンに混合せられたポリエスチルとビニール単量体との適当な割合の組合せによって、コイルの絶縁層は適度な強度と弾力性を持つのみならず電気的にも勝れた性質を持ち、吸湿性も少なくまた化学的にも安定でとくに長時間の加熱によっても硬化脆化することのない優秀な絶縁を作ることができたのである。(3図参照)

### 3. ダイヤラスチック絶縁用ダイヤレジンの特性

ダイヤラスチック絶縁の主たる材料であるダイヤレジ

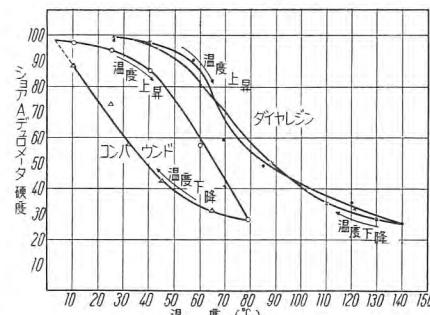


3 図 ダイヤレジン  
Fig. 3. Diaresin.

1 表 ダイヤレジンとアスファルト系コンパウンドの比較

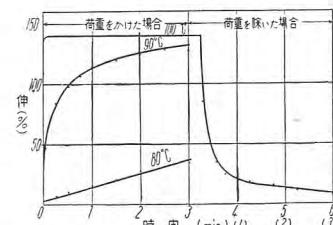
	ダイヤレジン	コンパウンド
比 重 (20°C)	1.083	1.024
比 热 $\times 10^{-4}$	5.12	5.26
硬 度 (20°C) (ショア A)	99~100	94
軟化点 (BR 法) °C	測定不能	105~110
抗 張 力 kg/cm <sup>2</sup>	200	—
吸 湿 量 (80% RH, 30日間) %	0.19	0.25
吸 水 量 (常温水中, 30日間) %	0.27	-0.52
〃 (煮沸10時間) %	0.52	測定不能
加熱減量 (100°C, 10時間) %	0.19	—

ダイヤラスチック絶縁・石黒・伊佐山



4 図 ダイヤレジンとコンパウンドの温度一硬度曲線

Fig. 4. Hardness-temperature curve comparison of hardness at various temperatures.

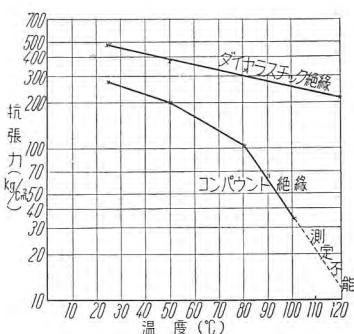


5 図 ダイヤレジンのクリープ特性

Fig. 5. Creep property of Diaresin.

2 表 ダイヤレジンの温度による抗張力、伸の変化

温度	抗張力 kg/cm <sup>2</sup>	切斷時の伸 (%)	試験片寸法
10	197	—	—
30	195	4	—
50	74	8	—
70	13.5	200	—
90	5.6	220	—
100	4.2	200	—
120	3.5	190	—



6 図 ダイヤラスチック絶縁とコンパウンド絶縁の抗張力一温度特性

Fig. 6. Comparison of tensile strength at various temperatures.

ンについては一般化学反応機構を2で詳述したが本章では具体的にその性能を従来使用せられていたコンパウンドと比較し対照しつつ示す。

#### ダイヤレジン溶液の性質

色 微黄色 透明  
比重 (20°C) 0.94~0.95

粘度 (20°C)  
センチポイズ 10±1  
不揮発物% 100\*

酸価 1.5 以下  
注 \* BPO を用い低温で硬した場合

重合硬化せしめた  
ダイヤレジンの物理的および化学的性質  
は1表の如くである。

Ball-Ring法によるコンパウンドの軟化点は110°C位であるが実際には100°C以下でも流動性を帯びるから長時間の間には変形するので、コイルに含浸した場合といえども高温では流動してその位置を変えるおそれすなわち、マイカ片の滑りおよびコンパウンドの流出の危

険を持っているのに反しダイヤレジンでは、135°Cにおいてさえもかなり柔軟にはなるがそのままの形と弾力性を保持しているから流れ出ることはもちろんのことマイカ片の滑りやコイルの変形は絶対におこらないことを特長とする。

これらの性能を具体的に示す試験として軟化状態を硬度の変化で測定

した結果は4図で、クリープ特性を示すものは5図である。この2表はダイヤレジンのみの温度による変化であるが非常に著しい変化が表われているがマイカテープと結合された状態では6図のようになり120°C前後の温度でも充分な強度を維持していることがわかり実用上非常に優秀である。

ダイヤレジンを次表に示すように強

酸、強アルカリおよび溶剤に浸漬して室内に7日間放置後の状態を見たがこれらに対しても強い抵抗力を持つことが判る。とくに耐油性の優れていることはコンパウンドと大いに異なるところである。

#### ダイヤレジン コンパウンド

濃硫酸	多少変色するも異状なし	異状なし
苛性ソーダ(30%)	異状なし	"
稀硫酸その他鉱酸	"	"
エタノール	"	"
ベンゾール	膨潤後溶解	溶解
スチロール単量体	"	"
ブタノール	ほとんど影響なし	幾分溶解
醋酸エチル	膨潤軟化	溶解
タイコール油*	変化なし	"

注 \* 印は30日間

#### 3表 ダイヤレジンとコンパウンドの力率と温度特性

温 度 (°C)	13	40	70	78	100	130
ダイヤレジン tan δ (%)	0.40	0.22	0.20	0.22	0.38	0.54
コンパウンド tan δ (%)	1.20	1.49	4.80	8.75	—	—

#### 4表 ダイヤレジンとコンパウンドの誘電率と温度特性

温 度 (°C)	13	40	44	70	78	100	130
ダイヤレジン	2.85	2.87	—	2.90	—	2.92	2.84
コンパウンド	2.90	—	2.93	—	2.90	—	—

#### 5表 絶縁抵抗と温度特性

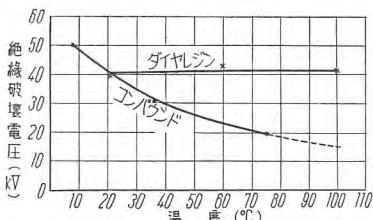
温 度 (°C)	絶縁抵抗 × 10 <sup>12</sup> Ωcm			
	13	45	70	100
ダイヤレジン	—	∞	1500	60
コンパウンド	250	10	0.6	—

板の上に厚さ約0.5mm厚に塗布したコンパウンドの中央に直径70~80mmの電極をその外側に約1mm離してガードリングを銀粉塗料で作ってシェーリングプリッジによってA-C 60c/sで測定した。(3表, 4表)

ダイヤレジンの力率は常温から130°Cまで著しい変化はなかったが、コンパウンドは50~60°C辺から急激に増加して80°Cにては40%以上となって測定不能となった。

ダイヤレジンとコンパウンドの誘電率は力率と同時に測定したが、両者の間にはほとんど差がなく、それぞれの温度の変化に対してもほとんど変化がなかった。

ダイヤレジンの絶縁抵抗はコンパウンドに比し非常に優秀であることは3表で判るとおりで温度係数は大きいが100°C以上でもかなり高い値を持っていることが知られる。



7図 絶縁破壊電圧の温度特性の比較

Fig. 7. Comparison curves of breakdown voltage at various temperatures.

6表 ダイヤレジンに対する接着剤の影響

接着剤添加量	0	10%	20%
tan δ (%) (13°C)	0.40	1.0	1.3
誘電率 (13°C)	2.85	3.40	3.63
絶縁抵抗 × 10 <sup>12</sup> Ωcm (100°C)	60	70	35
絶縁破壊電圧 kV/mm (14°C)	40.0	40.0	39.8

絶縁破壊電圧は厚さ約1mmダイヤレジンの板および銅板上に塗布した厚さ0.4mm厚のコンパウンドについて直径25mmの電極を用い短時間法によって測定した。両者の厚さが著しく異なるので直接の比較は困難であるが厚さmm当たりの温度特性を7図に示す。コンパウンドは温度と共に破壊電圧が低下するのに反し、ダイヤレジンはほとんど変化していないので高温度における両者の差は著しく大きくなっている、ダイヤレジンの優秀性を示している。

以上の如くダイヤレジンの特性は従来のコンパウンドに比べて格段の優秀性が認められるが、2に述べたように実際にマイカテープに用いられた接着剤とダイヤレジンとが混然一体となして、すなわち、ダイヤレジンとマイカ接着剤とはお互に化学反応を行って、はじめてダイヤラスチック絶縁を形成するので、この接着剤の電気的特性に及ぼす影響について試験した(6表)。tan δのみは増加したが20%でもコンパウンドと同程度であってダイヤラスチック絶縁用ポリエステルの優秀さを知ることができる。

#### 4. ダイヤラスチック絶縁の処理方法

ダイヤラスチック絶縁処理されるコイルは厳選された2重硝子巻銅線が用いられる。さきに述べたように銅はダイヤレジンの重合反応に対して防害作用を呈するからピンホールのないこととはもちろん、屈曲加工を受けても硝子センイ絶縁層にキレツの生じないことが必要である。

ダイヤラスチック絶縁コイルは設計に従って適当数の素線にダイヤラスチックマイカテープを所要厚さに巻きつけさらにその上を硝子テープで補強する。テーピングの終ったものは高温度で長時間乾燥して水分はもちろん揮発性物質を完全に除去する。つぎに高真空および加圧を併用して室温で、ダイヤレジンワニスの含浸を行う。ダイヤレジンを含浸せしめたコイルはその形を崩さないような独特の設備によって加熱して重合反応を行わせることでダイヤレジンとマイカテープとは完全に一体となって強固なダイヤラスチック絶縁ができる。

このように記述すればいとも簡単なようであるが、マイカテープの製作技術はもとより、テーピング作業と含浸作業、重合過程はお互に関連してポリエステルと反応性ビニールとの混合比、それらの重合度は互に影響し合って完成コイルの性質に著しい影響を及ぼす。またマイカテープの保存方法、ダイヤレジンの安全な保存と完全な含浸作業、含浸したコイルの取扱い方法、加熱重合操作などにはきわめて精密な科学的管理が要求せられ優秀な加工設備と計測装置と作業者の熟練とが混然として一体となるときはじめて均等な製品を作り出すことができるものである。

ダイヤラスチック絶縁をほどこしたコイルの特性は均一であるべきことは当然のこととして寸度、形状に対する均一度もアスファルト系絶縁のものに対するよりも強く要求されている。

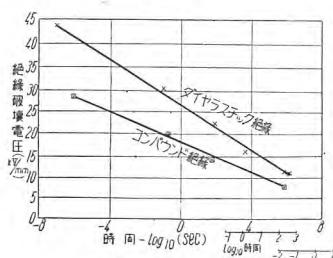
アスファルト系絶縁は熱可塑性であるからコイル組立て作業の時加熱して軟化せしめれば多少の変形ができたがダイヤラスチック絶縁のダイヤレジンは熱硬化性のため弾性と剛性に妨げられるからその弾性限度内で変形を与えるなければならない。このことはとくに水車発電機用その他のフルコイルの巻線作業の場合とくに困難とされコイル製作に当たり正確な形を保たせるプレス装置の考案と製作に非常な苦心を払い今日の成功を見ることができた。

## 5. ダイヤラスチック絶縁コイルの特性

本章においては試験コイルまたは実機のコイルにて実験したダイヤラスチック絶縁の性能の詳細試験した結果について考察を加える。

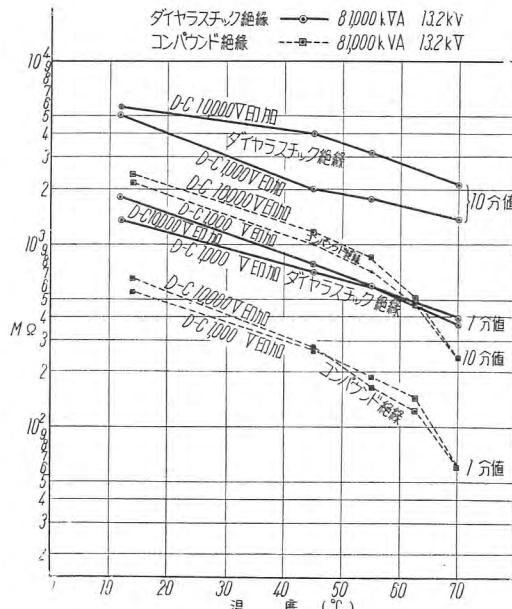
高圧回転機設計において絶縁層の厚さすなわち耐電圧の決定は重要課題で近時発電機の大型化に伴い技術的なうえに経済的見地から絶縁層は薄くて耐電圧の高いものが要求せられつつあることは当然である。

常温におけるダイヤレジンとコンパウンドの絶縁耐力はほとんど差がないにもかかわらずマイカ片と混然一体をなしたダイヤラスチック絶縁は 11kV 級でコンパウンド絶縁に比し約 25% 高い値を示した。また 80°C においてはコンパウンドの絶縁耐力は常温時の約 50% に低下したがってコンパウンド絶縁の 100°C における絶縁耐力も常温に比し 15% 低下するに反し、ダイヤレジンの絶縁耐力は 100°C でも変化しないことを反映して 100°C におけるダイヤラスチック

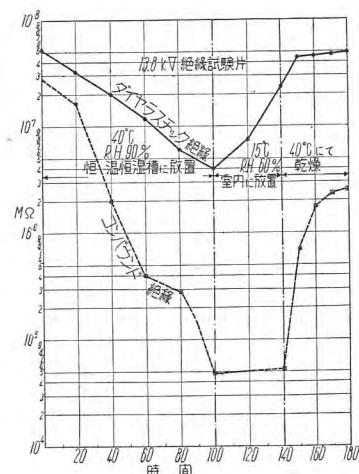


8 図 絶縁破壊電圧の比較

Fig. 8. Break down voltage of Dialastic insulation - of compound insulation.



10 図 絶縁抵抗温度特性  
Fig. 10. Insulation resistance of 13.2 kV class test coils.



11 図 ダイヤラスチック絶縁とコンパウンド絶縁の吸湿特性  
Fig. 11. Moisture absorption of 13.8 kV class test coils.

ク絶縁の絶縁耐力は全然低下しておらない。(8 図)

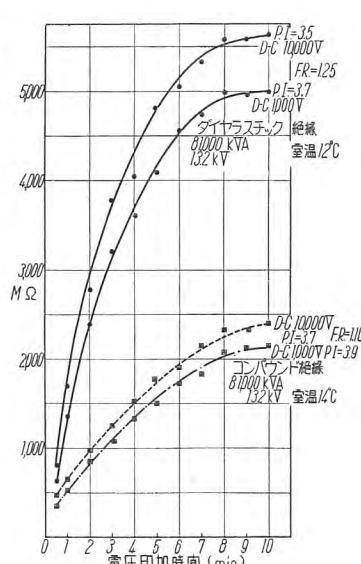
これらの実験結果はつねに高温の下で課電せられている電気機器の信頼性を高めるばかりでなく、その絶縁層の厚さを減少させることができ資材の節約、熱放散の改善を図ることができその結果は後に詳述するようにコイル巻き替えの場合には機器容量を増大せしめることが出来た。

ダイヤレジンの絶縁抵抗もまたコンパウンドに比し非常に高いことはとくにわが国の如き高湿度の地においては絶縁工作上非常に望ましいことである。81,000kVA, 13.2kV ターボ発電機の巻線完了直後に測定した直流吸収特性を 9 図に示す。成極指数 (P.I.) 弱点比 (F.R.) の結果より考察するとダイヤラスチック絶縁もコンパウンド絶縁も共に乾燥状態にあり、内部欠陥もなく非常に良好な状態を示しているが、とくにダイヤラスチック絶縁の絶縁抵抗の絶対値は非常に高く優秀な性能を示している。

同機につき絶縁抵抗湿度特性を測定した結果は 10 図の如くダイヤレジンもコンパウンド同様に温度上昇と共に当然低下するのがコンパウンド絶縁においては 60~65°C 付近で急激に折れ曲っている。もちろん内部空隙、吸湿等とは考えられないでコンパウンドの流動性を帶びてその分子活動が活発になった現われと思われる。

11 図は吸湿特性を 13.8 kV 級試験コイルを用いて絶縁抵抗の変化を以って測定した結果で、コイルはまず充分に乾燥した後 40°C, RH 90% の恒温槽で吸湿せしめた後室内放置および再乾燥による絶縁抵抗の変化を求めた。(コイル表面の漏洩電流を除くためガードリングを用いた。)

コンパウンド絶縁は絶縁層の深部まで吸湿したため室内に放置しても容易に復元の見込みが立たないので 40°C の恒温槽で乾燥せしめたが完全に回復させるためには 100°C 以上の乾燥



9 図 直流吸収特性

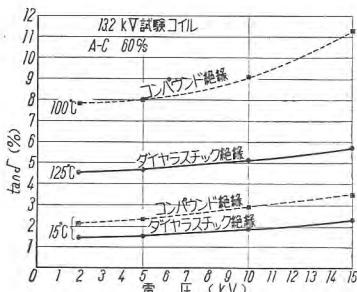
Fig. 9. Dielectric absorption of 13.2 kV class coils.

が必要である。ダイヤラスチック絶縁の吸湿は表面のみにとどまるので回復も早くダイヤラスチック絶縁は吸湿に対し非常にすぐれた特性を持つことを知り得た。このことは水素冷却機、全閉型空気冷却器付き大型機の場合には問題はないが、半密閉型、開放型においては常時注意されていることで、相当期間大気中に放置された場合は吸湿、したがって絶縁抵抗の低下を来すために普通回転乾燥が行われているが、ダイヤラスチック絶縁は吸湿特性が優秀であるから回転乾燥を必要としないか、または表面の湿気を除去するのみであるから乾燥時間を短縮できる。

一般に絶縁コイルの  $\tan \delta$  測定は絶縁物の劣化状況を判定するために実施されているが製作工場においては絶縁工作上に生じた内部空隙の状態判定に用いられている。

高圧絶縁工作中においては内部に空隙を作ることはそこに生ずるイオン化現象により絶縁材の劣化を早めその他の原因になるので避けなければならない。従来コンパウンド絶縁工作中における最も困難な問題はコンパウンドの軟化点を上げてしかもできるだけ低温度で含浸作業を行いその回数も減らすことであるが、これは完全含浸すなわち内部空隙を作らないという方法と相反している。やむを得ずマイカーテーピング作業に当りブランシングボンドを充分に用い含浸作業を数回に分割して行うことによって解決をつけてきたが、なお有機質を劣化せしめない温度範囲内で粘度を低くするためににはコンパウンドの軟化点を充分に高くすることのできなかったことはコンパウンド絶縁の最大の欠点であった。

ダイヤラスチック絶縁は常温で低粘度のダイヤレジンを含浸することによりこれらの不合理な点を一掃した。12図、13図は13.2 kV級絶縁コイルの  $\tan \delta$  の電圧、温度特性を示す。この試験コイルはターボ発電機固定子コイルの試験用として作られたものであるから使用電圧は同じでも絶縁層の厚さはコンパウンド絶縁の方が厚くなっている電界強度が異っているから電界強度を基準に取るとコンパウンド絶縁の  $\tan \delta$  はさらに高い値を示す。(測定に当り電気力線の分布の影響を除外するためガードリングを用いた。) ダイヤレジンの場合と同じくこれらの図においても常温においてはその特性は大差ないがコンパウンド絶縁は  $60^{\circ}\text{C}$  位から上向きに曲り、高温では甚しく高い特性を示すに反しダイヤラスチック絶縁は高温においてもその増加は僅少である。運転中高温にて



12図 誘電体力率電圧特性

Fig. 12. Power factor of 13.2 kV class test coils tan  $\delta$ -voltage.

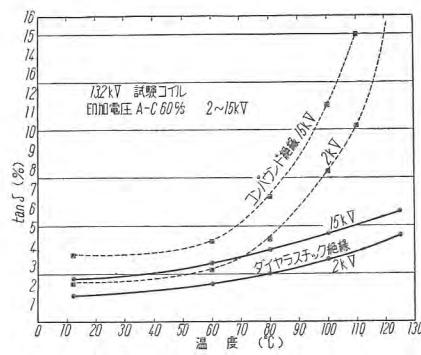
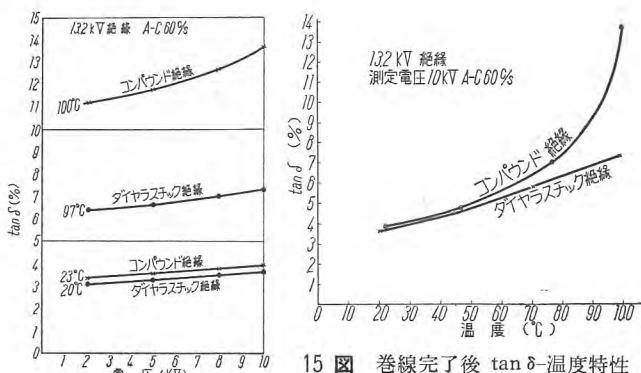


Fig. 13. Power factor of 13.2 kV class test coils tan  $\delta$ -temperatures.



14図 卷線完了後  $\tan \delta$ -電圧特性

Fig. 14. Power factor of the generator  $\tan \delta$ -voltage.

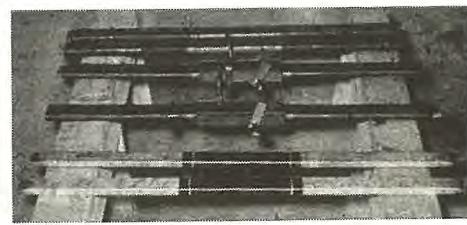
15図 卷線完了後  $\tan \delta$ -温度特性

Fig. 15. Power factor of the generator  $\tan \delta$ -temperature.

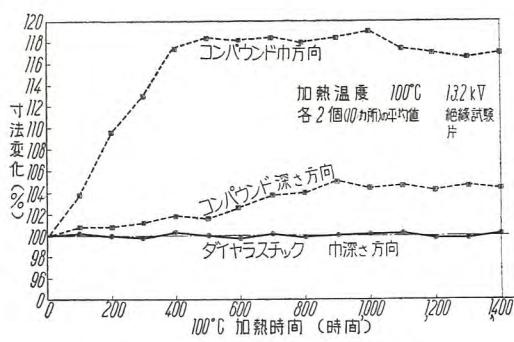
課電されている回転機の  $\tan \delta$  特性は高温において比較検討されるべきでこの点からもダイヤラスチック絶縁の優秀さが認められる。

ダイヤラスチック絶縁においても  $\tan \delta$  が高く出る場合はダイヤレジンの重合反応が不完全で導体周囲に未反応のダイヤレジンを残している場合と重合反応が急激に進行した場合である、したがって重合反応工程は精密に計画せられ操作されなければならない。卷線完了後の  $\tan \delta$ -電圧および  $\tan \delta$ -温度特性を 14 図、15 図に示す。 $\tan \delta$  測定に際しコイルにガードリングのない場合それを付した場合、またそのとり方いかん、コイルを鉄心溝に入れた場合卷線完了した場合と順次その値は上昇していく。この現象は電気力線の分布状態の変化漂遊容量の増加またコイル支持板、間隔片等が付加されたためでありコイル自体の性能は明確に表われてこなくなる。

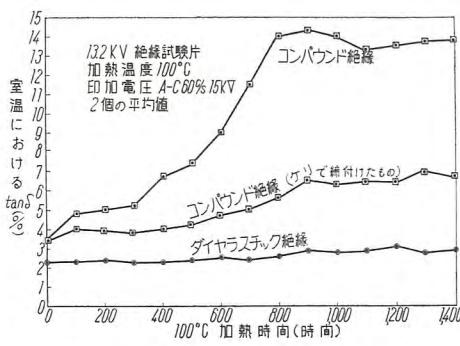
コンパウンド絶縁とダイヤラスチック絶縁の熱劣化の比較試験はつぎのようにして行った。ダイヤラスチック絶縁試験片 2 本、アスファルトコンパウンド絶縁のものは 4 本の中 2 本は熱によって膨大するので、電極部分を大体鉄心溝中で抑えられている程度にクランプを用いて締め付け他の 2 本はそのまま試験用熱風循環式恒温槽にて温度は  $100 \pm 1^{\circ}\text{C}$  で毎日 8 時間加熱を続行した。(16 図) 約半年間毎 100 時間毎に室温で寸法の変化および  $\tan \delta$  の値を測定した。締め付けたコンパウンド絶縁の寸法は測定しなかった。測定結果を 17 図および 18 図に示す。コンパウンド絶縁は 400 時間迄とくに幅方向の膨大が著しく認められ 500 時間位からほぼ一定なり  $\tan \delta$  の値もそれに対応して上昇してくるが相当時間的遅れがある。(19 図) これは膨大に伴い内部空隙を生ずるが始めはコンパウンドの流動が不充分なためではないかと考えられるが内部空隙と  $\tan \delta$  の値の関係究明上



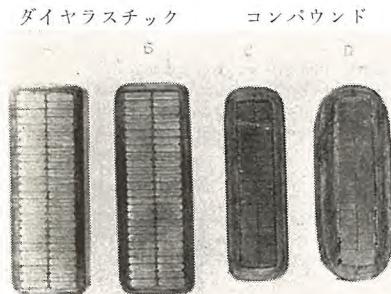
16図 加熱試験用コイル  
Fig. 16. Coils for heat test.



17 図 热劣化による試験片の寸法変化  
Fig. 17. Dimention changes in test coils during heat aging.



18 図 热劣化による誘電体力率の変化  
Fig. 18. Change of power factor during heat aging.



19 図 ダイヤラスチック絶縁とコンパウンド絶縁の加熱前 (A, C) 加熱後 (B, D) の比較  
Fig. 19. Showing changes before (A, C) and after (B, D) heat.

興味ある問題である。これに反しダイヤラスチック絶縁の寸法変化は測定誤差内に入り  $\tan \delta$  の値も空隙ができたという結果にはならない。試験後破壊電圧を測定したところコンパウンド絶縁は約 20% 減少したがダイヤラスチック絶縁は変化を認めなかった。クランプで締め付けたものは  $\tan \delta$  で見ると空隙の発生は少ないが写真に示す如く締め具の両端で甚しく膨大している。(20 図)

実際発電機にてコイルの鉄心端部、鉄心内部の通風溝部分において膨大していることはしばしば見られるが、熱プラスチック性を持つアスファルトコンパウンドを用いる絶縁においてはかかる現象、したがって内部空隙のできることやマイカ片の移動、剥離の現象を防ぐことは甚だ困難であるように思われる。

## 6. 実施結果と将来

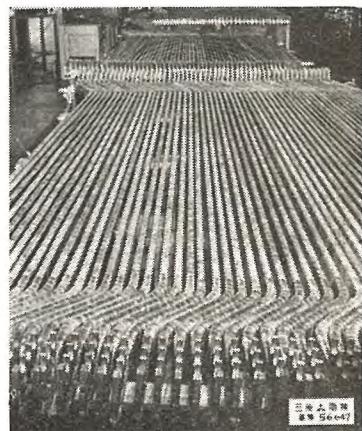
ダイヤラスチック絶縁はその基礎をウエスチングハウスマニッシュ会社の技術におくといえども日本両国間における国情の相違を勘案して材料、設備はもとより工作技術の

面にも広範な研究を行ないそれにもとづいてダイヤラスチック絶縁工場を新たに建設し昭和29年3月第1期工事を完成すると共に実機への応用を開始した。(21図)

さきに述べたように完成したコイルはその弾性と剛性が強くかつ高温においてもその性質をあまり変えないことは巻線作業完了後は甚だ優秀な性能を発揮できるが巻線作業を非常に困難ならしめ応用範囲も限定せられるがハーフコイルの場合はこの困難さが少ない。実用の第1回は国鉄川崎発電所第1号機 32,400 kVA の固定子コイル巻替え工事で昭

和29年3月着手して同年6月コイルは完成した。これを以て本工作法に多くの経験と確信を得たので以後高圧ハーフコイルには全面的に応用して 88,235 kVA (13.8 kV, 3,600 rpm) ターボ発電機以下発電機および予備コイル類の製作を行った。(22図)

一方フルコイルへの応用を研究して水車発電機の如き多極回転機においてはフルコイルでもダイヤラスチック絶縁のもつ弾性限度内の巻線作業は可能であり電気的性質を低下せしめないことがわかり、昭和30年11月東北電力山郷発電所第3号機 17,000 kVA (11 kV) のコイルを完成した。23図、24図(水車へはこれ以前に台湾天冷発電所用の発電機へハーフコイルで応用した。)ダイヤラスチック絶縁応用の製作記録ならびに手持工事を7表に示す。



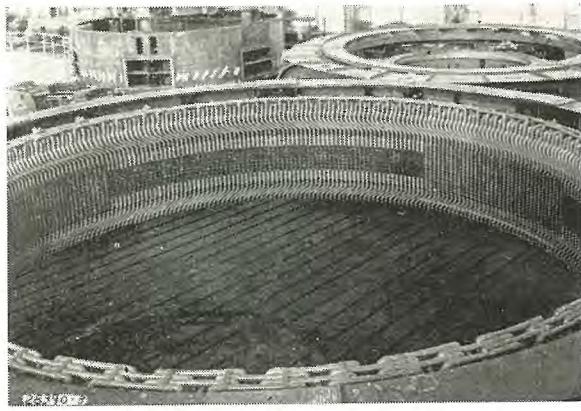
22 図 ターボ発電機用ハーフコイル  
Fig. 22. Haef coils of turbo generator.



21 図 ダイヤラスチック絶縁工場  
Fig. 21. Dialastic insulator factory.



23 図 水車用フルコイル  
Fig. 23. Full coils of water wheel generator.



24 図 山郷発電所第3号機

Fig. 24. Water wheel generator for Yamasato No. 3.

ダイヤラスチック絶縁の耐電圧はさきに常温でコンパウンド絶縁より約20%高いばかりでなく運転状態の高溫時にも常温の時とほとんど変化しないためにアスファルト絶縁に比しその厚さを減少し得られるということを述べた。

従来発電機の絶縁更新に際してはコイル導体断面積は新導体で製作する場合も旧導体断面積と同じにしているのが普通であるがダイヤラスチック絶縁の場合は絶縁層の厚さを規準として新導体の断面積を決定すれば断面積は増していく。最近の巻替え実例では国鉄川崎発電所第3号機 22,222 kVA 6.6 kV(昭和5年BTH製)のコイルをコンパウンド絶縁からダイヤラスチック絶縁に代えたため固定子容量は26,000 kVAに増加した。また目下新コイル製作中の東京電力千住発電所第3号機 25,000 kVA, 11 kV(昭和元年W社製)はマイカフォリウム絶縁であったが、ダイヤラスチック絶縁を用い30,000 kVAとなり20%増加している。これらは固定子のみの増量であるから発電機出力は回転子、励磁機タービンの容量に余裕があるかどうかにかかっている。しかし過負荷に対して安心感、信頼度が大きい。

もちろん新設計の場合は固定子全体の大きさの縮小が可能であってたとえば最近完成し順調な運転の行われている姫路発電所第1号機 88,235 kVAの場合 kW当り寸法重量が日本最小の新鋭機となり得たのはひとりダイヤラスチック絶縁のみの効果ではないにしてもそれに負うところは少くない。

その他高温度における機械的および電気的の性質の良好なことは回転機にとって効果が非常に大きいばかりではなく吸湿性の少ないことは高湿度の気候下にあるわが国の電気技術者にとって非常な喜びとされる。

その上工作上の利益も少くない、すなわち従来アスファルトの真空含浸作業は多大の犠牲を払って数回に分割して行っていたため作業工数はもとより資材の浪費も多かったが、ダイヤラスチック絶縁においてはすでに24kV級の絶縁さえも1回の含浸作業で完全な含浸が行い得ることが明らかになったので高価な材料を使いながら案外工場原価はアスファルト絶縁の場合より高くならないように思われる。ダイヤラスチック絶縁の老化性についてはまだ決定的なデータは出ていないがダイヤレジン絶縁の特性から推して充分満足すべきものであると

7表 ダイヤラスチック絶縁コイル製作記録

注文主	容量	電圧	コイル数	機種	製作年月	摘要
国鉄川崎発電所 #1	32,400 kVA	6.6 kV	120	ターボ発電機	S-29-6	巻替用
" #2	"	"	120	"	29-8	"
関西電力姫路発電所 #1	88,235 kVA	13.8	96	"	29-9	"
東京電力鶴見発電所 #1	81,000 kVA	13.2	96	"	29-10	予備コイル
" #2	"	"	96	"	29-11	"
中国電力小野田発電所 #4	41,177 kVA	11	128	"	29-11	本体+予備
東京電力新東京発電所 #2	81,000 kVA	13.2	96	"	30-2	"
東亜燃料和歌山工場	3,750 kVA	3.3	72	"	30-1	"
台湾電力天冷発電所 #3	28,500 kVA	11	494	水車発電機	30-4	本体+予備
小野田セメント大船渡工場	13,000 kVA	3.3	96	ターボ発電機	30-5	"
国鉄川崎発電所 BTH 製	22,222 kVA	6.6	126	"	30-7	巻替用
山陽化学宇部工場 #2	18,750 kVA	11	96	"	30-9	"
" #1	"	"	96	"	30-10	"
三菱電機伊丹製作所	50,000 kVA	13.2	288	交流発電機	30-10	"
東北電力山郷発電所 #3	17,000 kVA	11	324	水車発電機	30-11	"

現在の手持工事

注文主	容量	電圧	コイル数	機種	完成予定	摘要
八幡製鐵所	9,000 HP	6.6 kV	504	誘導電動機	S-31-2	"
北陸電力白峰発電所 #1	8,500 kVA	6.6	132	水車発電機	31-3	"
東京電力千住発電所 #3	25,000 kVA	11	144	ターボ発電機	31-3	巻替用
北陸電力白峰発電所 #2	8,500 kVA	6.6	132	水車発電機	31-4	"
東北電力山郷発電所 #3	17,000 kVA	11	108	"	31-5	予備
旭化成	1,500 kVA	6.6	108	"	31-5	"
東京電力平発電所	18,000 kVA	11	360	"	31-7	"
関西電力姫路発電所 #2	88,235 kVA	13.8	96	ターボ発電機	31-6	"
住友共同電力	8,000 kVA	6.6	144	水車発電機	31-7	"
東京電力新東京発電所 #4	92,000 kVA	13.2	84	ターボ発電機	31-8	"
住友共同電力	8,000 kVA	6.6	216	水車発電機	32-2	"

思うが今後さらに研究を続けて使用者のご安心のできるようなデータを作りたいと考えている。

このようにその性質は画期的に良くなり信頼性も増しながら原価面では著しく高価にならずむしろ技術的研究によって将来は低下させ得る見込みもあるので今後ますますダイヤラスチック絶縁応用の分野は増加させることができると信ずる。実際に目下研究所、工場一体となり低圧、高圧にかかわらずフルコイルで2極回転機の巻線作業をも可能ならしめ、回転子絶縁にも応用されるダイヤラスチック絶縁の研究を行っておりその成果が期待せられている。

## 7. む す び

電気機器の進歩はつねに材料と共にすることは明らかであるがダイヤラスチック絶縁は第2次大戦後急速に発達した合成樹脂の花形の1つである。不飽和ポリエスチルビニール共重合樹脂を利用して電機技術者が多年理想としていた画期的絶縁方式を一挙に成就し得たもので機器の性能の著しい向上と共に製作費をも低減し得られる段階に近付いたことはひとり品質奉仕をモットーとする当社の喜びであるばかりでなく需要者に対し充分な満足を得て頂けるものと信ずるものである。

しかしながら技術の進歩は1日も停滞を許されないことは明らかで今後ともダイヤラスチック絶縁工作法を一層改良発展させると共にさらにより高い技術の開発に関係者一同努力を続けつつ皆様のご期待に添うことを念願するものである。

終りに臨み本方式の実施に当たり多大のご協力とご援助を賜った関係者各位に厚く感謝を申し上げると同時に本篇に引用したかずかずの基礎的実験にご協力賜った柴田技師、伊藤技師、原技師、太田技師、土居技師、その他多数の方々に心からの御礼を申上ぐ。

# これから発電所用変圧器

伊丹製作所 村上 有\*

## Future Transformers for Power Stations

Itami Works Tamotsu MURAKAMI

With the latest trend of ever increasing capacity for a single unit, large power transformers—specifically those for use in steam power stations—are confronted with the problems of shipment completely assembled. Difficulties, however, have been overcome by the adoption of special three phase construction, and shipment of the unit of enormous capacity has become feasible in completely assembled form in spite of adverse conditions in the transportation of Japan. Meanwhile, station transformers have taken a great stride in dependable construction by using noninflammable oil or dry type construction, which eliminate the danger of firehazard.

### 1. まえがき

最近電力用変圧器は一般に大型化の傾向にあるが、とくに火力発電所においては高温高気圧のボイラと水素冷却発電機の使用により、その単器容量は急速に増大しており、それに伴っていわゆるユニット・システムの採用により、主変圧器の大容量化はますます顕著となっている。米国 W 社においてはすでに 315,000 kVA 変圧器(1 図)を完成し、さらに 360,000 kVA 変圧器を製作中である。わが国では運転中のものでは 82,000 kVA 変圧器(関西電力姫路火力発電所用当社製その他)が最大容量であるが、製作中の変圧器には 160,000 kVA(東京電力千葉火力発電所)があり、さらに 190,000 kVA(関西電力中央火力発電所) 195,000 kVA(中部電力新名古屋火力発電所) 220,000 kVA(東京電力千葉火力発電所)など続々と計画されている。

このような変圧器の大型化にしたがって、変圧器の組立輸送に非常に多くの关心が寄せられてきた。各製造者の異常な努力により、わが国の不利な輸送条件を克服して、154 kV 100,000 kVA 程度まで組立輸送可能の限界を拡大してきたのはきわめて最近のことであったが、当社は昨年



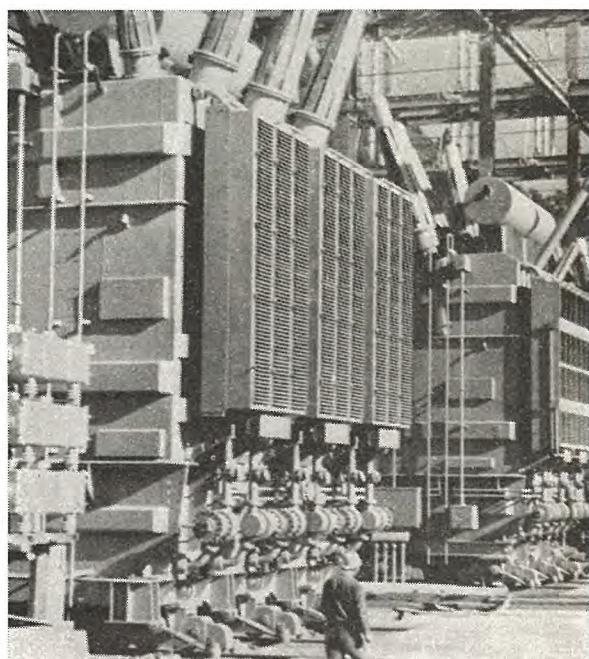
1 図 工場完成近い W 社製 315,000 kVA 変圧器

Fig. 1. Westinghouse 315,000 kVA 3 phase 60 cycle transformer near to completion in the factory.

度完成した電源開発会社佐久間発電所用 287.5 kV 93,000 kVA 4 台(2 図)と 139,500 kVA 1 台の超高压変圧器にたいし、特別 3 相式の画期的な新設計を採用して、かかる超高压大容量変圧器として始めての組立輸送に成功した。今後この特別 3 相式構造の活用により 300,000 kVA 程度までのいかなる大容量器といえども組立輸送ができるのである。

一方変圧器の性能および構造上にも幾多の絶えざる改良進歩が見られ、ここ数年にして過去の変圧器の姿を一新せしめるまでに至っている。

発電所屋内の所内変圧器には不燃性合成絶縁油使用変



2 図 佐久間発電所納入特別 3 相式変圧器  
Fig. 2. 93,000 kVA 287.5 kV special 3 phase Form-fit transformer for Sakuma power station.

圧器や乾式変圧器が新しく登場し、燃えない変圧器として広く普及しつつある。

## 2. 主変圧器

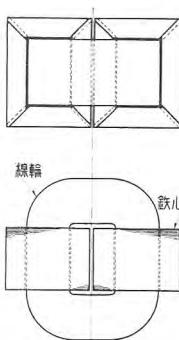
当社は3相15,000 kVA 単相7,000 kVA 以上の電力用変圧器にたいしては、外鉄型を標準構造として採用しているので、発電所用主変圧器は外鉄型で製作する場合が大部分であり、以下に述べるような当社変圧器の特長は主として外鉄型構造に基いている。

### ア. 構造

#### (1) コイル

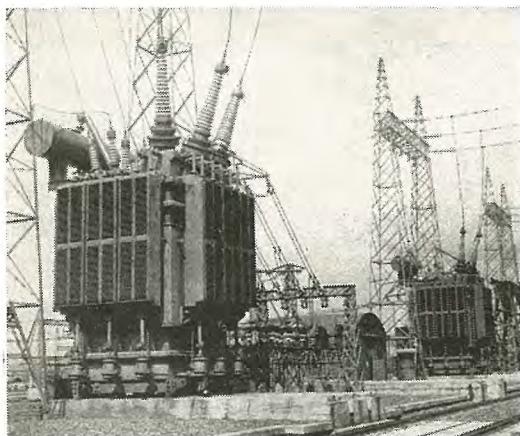
コイルは外鉄型変圧器の標準絶縁構造であるサージブルーフ型を採用して耐雷絶縁が優れているのみでなく、コイルが完全に絶縁物で包まれ、その上の4周を鉄心・コイル押えおよびタンクにより完全に締め上げられているので短絡時の機械力に対してもきわめて強い。

最近はコイルのワニス処理をやめ、コイルの紙巻絶縁として無処理のクラフト紙を用い、最外層のみ特殊粘着性ワニスで処理した紙テープを用いた巻線を製作して、



3 図 額縁型鉄心

Fig. 3.  
D punched core.



4 図 枚方変電所納入送油風冷式 Form-fit 変圧器

Fig. 4. 117,000 kVA 250 kV type FOA Form-fit transformer for Hirakata substation.

機械的強度を充分保つとともに、油の真空含浸を完璧ならしめている。

変圧器は大容量になると、コイル中で渦流損が増大する傾向にあるので、とくに渦流損を減少させるよう考慮して設計している。

#### (2) 鉄心

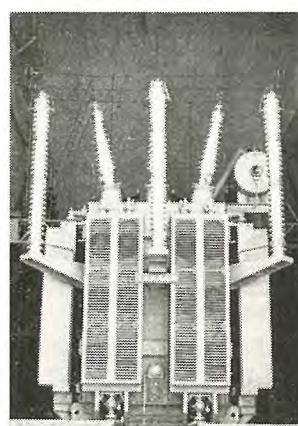
現在は短冊状の熱間圧延高級珪素鋼板 ( $T_{90}$  および  $T_{95}$ ) を使用し、まだ生産量の少ない冷間圧延珪素鋼帶 ( $Y_5$  など) は特殊な場合以外使われていないが、これが近く大量生産されるに至れば、大型変圧器に全面的に使用して、鉄損と励磁電流の少ない変圧器の製作を期待したい。冷間圧延珪素鋼帶を使用するばあいにはその方向性を有効に活用するために3図に示すように額縁型に隅を斜めに切断して鉄心積みを行う。このばあい外鉄型変

圧器では1種類の鉄心幅が使用でき、穴あけの必要もないのできわめて好都合である。冷間圧延珪素鋼帶は高磁束密度においてとくにその優れた特性を發揮するので、磁束密度を高く設計することができ、重量、価格の減少に資するところ大であろう。

#### (3) タンク

Form-fit Tank は昭和27年、関西電力枚方変電所用 250 kV 117,000 kVA 変圧器(4図)に始めて採用されて以来、外鉄型変圧器の標準構造となり、Form-fit 変圧器の製作台数は100台を超え、その優秀性はあまねく知れわたっているのでここに詳細は述べないが(本誌27卷2号参照)要するに外鉄型変圧器においてそのタンクの構造を変圧器中身にぴったり適合するように作ったもので、外鉄型変圧器の特長を極度に發揮し、他の追随を許さない幾多の優れた長所を有する変圧器である。

さらに変圧器の組立輸送上とくに必要なばあいには、特別3相式として下部タンクおよび中部タンクを各相ごとに分割し、上部タンクのみを共通にする構造を採用する。



5 図 姫路発電所納入送油風冷式 Form-fit 変圧器

Fig. 5. 82,000 kVA 80.5 kV type FOA Form-fit transformer for Himeji power station.

#### (4) 車台

従来の発電所用変圧器では、据付場所から発電機室に引き入れるばあいに、トラバーサを使用するのが通常であったが、最近においては変圧器の車輪の方向を90度方向転換する構造とし、トラバーサを省略することがよく行われる。関西電力丸山発電所用 275 kV 72,500 kVA 変圧

器や前記佐久間発電所用変圧器はこの例で、この車輪の方向転換にたいしても Form-fit Tank はすぐれた構造を示し、標準構造のまま平易にかつ安全に方向転換を行うことができる。

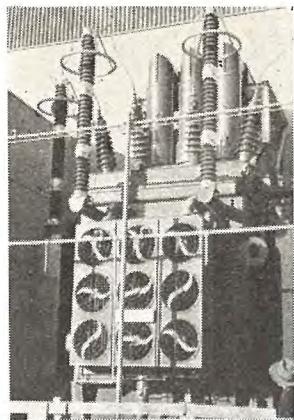
さらに現在製作中の関西電力姫路火力発電所向 88,000 kVA 変圧器のように、据付場所近くで組立を行えばあいには運転中不用な車輪を省略してコロ引きにより据付場所まで運ぶことが行われる。

#### (5) その他

最近の注目すべき構造として避雷器のタンク直付けと相間離隔母体(Isolated phase bus)があり、いずれも今後多く用いられる方法であろう。

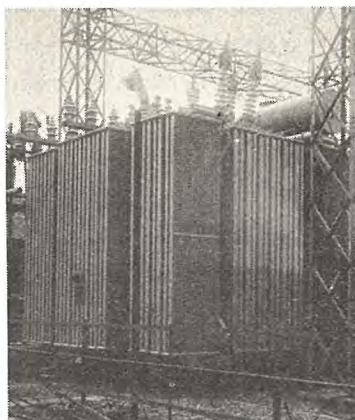
##### a. 避雷器のタンク直付け

関西電力姫路火力発電所納 82,000 kVA 変圧器は高圧



6 図 多奈川発電所用 W 社  
製変圧器 (Isolated phase  
bus (火用))

Fig. 6. Westinghouse 90,000  
kVA 80.5 kV type FOA  
Form-fit transformer for  
Tanagawa power station.

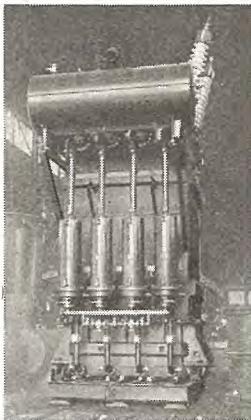


7 図 築上発電所納入自冷式変圧器  
Fig. 7. 45,000 kVA 69 kV 3 phase  
self cooled transformer for  
Chikujo power station.



8 図 小野田発電所納入自冷 /  
風冷 / 送油風冷 変圧器  
(3重定格式)

Fig. 8. 42,000 kVA 110 kV  
OA/FA/FOA triple rated  
transformer for Onoda  
power station.



9 図 上田発電所納入  
送油水冷式変圧器  
Fig. 9. 25,000 kVA  
168 kV type FOW  
transformer for  
Uwada power  
station.

側の避雷器を変圧器自体のタンクに直接取付けて立地と鉄構建築の節約を図っている(5図)。これは米国においては普通に行われている方法で、絶縁協調の上から避雷器を変圧器と一緒に見なしたもので、避雷器の性能の向上にしたがって当然いたるべき構造といえよう。

#### b. 相間離隔母体 (Isolated phase bus)

近時変圧器と発電機との接続にケーブルを用いず銅帯を使用し、これを金属箱で包むいわゆる Enclosed type bus が用いられ、とくに大電流のばあいに多く、安全性と信頼性が大きく、寿命が永久的であり、据付簡単、保守容易などの特長を有している。この方式で各相を別々の箱としたものが Isolated phase bus で安全性が最も大きい。最近完成した関西電力多奈川火力発電所の W 社製 90,000 kVA 変圧器(6図)にはこれを用いており、また前記姫路発電所向 88,000 kVA 変圧器にも採用することになっている。

### イ. 冷却方式

#### (1) 油入自冷式変圧器

油入自冷式変圧器は設備が簡単で運転が容易であり、信頼度、および耐久度の高い点で、もっとも普通に採用され、50,000 kVA 程度の大容量の変圧器も製作できる。しかし大容量になると放熱器数が多くなり、油量、価格、床面積が増大するので、とくに要求がない限り 30,000 kVA 以上の大容量器には自冷式は推奨しない。

7 図は九州電力築上火力発電所に納入した 69 kV 45,000 kVA 変圧器で外鉄型自冷式変圧器として容量最大のものである。

#### (2) 油入風冷式変圧器

自冷式の放熱器は送風機を取付けることによって、油入風冷式にすることが容易にできる。送風機を取付けると、その放熱効果は 150% ないし 200% に増加し、変圧器出力としては、一般に 20% ないし 40% 増大する

ことになる。放熱器の取付け方は 1列の 4ないし 8 個の放熱器にたいして、側面から 2ないし 4 個の送風機で吹き通す方式を標準としている。20,000 kVA 以上の大型変圧器では本方式を採用することによって放熱器数を 67% ないし 50% にすることができて、据付面積や油量をそれだけ減少することができるが、本方式も 30,000 kVA 以上の大容量器には推奨しない。

#### (3) 送油風冷式変圧器

送油風冷式変圧器には、単位放熱効果の大きい U フィン管放熱器を使用するものと、自冷式と同一の放熱器を使用して 3重定格を目的とするものの 2 様式がある。

U フィン管は管の表面に銅線を鎖状にまきつけ、これに強い風を送って放熱効果を著しく増し、一方油を強制循環せしめて油の対流と熱の伝達を促進したので、1組の放熱器で 50 kW ないし 100 kW の熱を放散し得て、普通の放熱器の 10 倍ないし 15 倍の効果があり、したがって床面積も油量も著しく減少することとなる。一方油の循環がよくなり、上下の油温の差は少く、コイルと油の温度差も少くなる利点がある。したがって最近の 30,000 kVA 以上の大型変圧器にはほとんど本方式が採用されるようになっている。枚方変電所用 117,000 kVA (4図) 丸山発電所用 72,500 kVA 佐久間発電所 139,500 kVA および 93,000 kVA 変圧器(2図) 等はすべてこの冷却方式である。

U フィン管式は冷却効果を最大限によくしてあるので油ポンプおよび送風機全停のばあいには連続の自冷容量はない。自冷容量を要求されるばあいには、自冷式の標準の放熱器を使用して、油入風冷式のばあいの放熱器群を 1 側面共通のヘッダを通して、1 個の油ポンプで強制油循環させる方式を採用する。したがって自冷/風冷/送油風冷のいわゆる 3重定格と標準されるのが普通で、その容量比は一般に 60/80/100% である。

8 図は中国電力小野田火力発電所に納入した 42,000 kVA 3 重定格送油風冷式変圧器である。

#### (4) 油入水冷式および送油水冷式変圧器

水冷式は保守が面倒であるから最近では一般に用いられない。据付場所がとくに狭い時、あるいは積雪甚しく送油風冷式の不適当なばあい、良質の水を多量に得られる水力発電所において送油水冷式が採用されることがある。

9 図は東北電力上田発電所用 25,000 kVA 送油水冷式変圧器で、ユニットクーラを変圧器本体に直接取付けた標準型である。

#### (5) 冷却方式と中身の設計

欧米においては送油式変圧器のばあいには、冷却効果がよいので自冷式に比して鉄心の磁束密度および巻線の電流密度を非常に高くとり、中身の設計を切りつめて若干効率が低下しても重量、価格を小さくするのが普通である。これに反しわが国では通常変圧器中身の設計を自冷式のばあいと同一としているので送油式によりとく



10 図 築上発電所用 65,000 kVA 変圧器組立輸送（シキ 120 使用）

Fig. 10. 65,000 kVA Form-fit transformer being shipped assembled on way to Chikujo power station.

に重量が小さくならず、したがって価格が安くなることはない。

これは最近変圧器損失の少ないことがとくに要望される傾向にあり、製造者が競って効果の向上に努めた結果であって一考を要する問題である。むやみに効率を高め、重くて高価な変圧器を造ることは、Initial cost と損失を電力料金に換算したものを考えあわせても、決して得策でないと思われる。欧米流に送油式のばあいはその特長を活かして切りつめた設計とすることは経済的に望ましいのみでなく、重量、寸法の縮少により組立輸送に利する点も見逃し得ないところである。

### ウ. 組立輸送

われわれ製造者が最近最も努力を傾注している問題は大型変圧器の組立輸送である。鉄道が狭軌であり道路橋梁が貧弱な輸送条件に恵まれないわが国においては、変圧器の組立輸送に非常な制限を受け、数年前までは 3 相 154 kV 30,000 kVA 程度が限度であった。その後の輸送技術の進歩は目覚ましいもので、まずこの口火を切ったのは Form-fit 変圧器の出現による輸送可能容量限界の拡大であった。当社では Form-fit 変圧器の特長である（1）横倒しできる（2）外形寸法が小さくなる（3）重量が軽くなることを活用し、またわが国最初の大型変

圧器輸送専用貨車シキ 120 号を製作使用し、変圧器の組立輸送に新機軸を画した。九州電力築上火力発電所納 115 kV 65,000 kVA Form-fit 変圧器はシキ 120 号を使用して横倒し輸送したものである（10 図）。これに刺激されて各社競って大型貨車を製作使用し、各種の輸送法が考案実施され、154 kV 100,000 kVA 程度までの変圧器の組立輸送が可能となった。しかしこれ以上の大容量または超高圧の変圧器になると、重量、寸法とともに増大してどうしても輸送できなくなる。当社が佐久間発電所に納入した超高压 287.5 kV 93,000 kVA および 139,500 kVA 変圧器はこの例であるが、画期的な特別 3 相式の設計により組立輸送を行うことに成功し、組立輸送可能な容量限界は飛躍的に増大されたのである。

佐久間発電所の特別 3 相式変圧器については 29 卷 12 号に詳細記述してあるのでここには省略するが、簡単に述べれば 3 相外鉄型変圧器において各相共通の一部鉄心を大きくして各相の磁気回路を独立させ、3 相として正方形に近い矩形状にする。このように各相に分離した中身を従来の Form-fit 式と同様に下部タンクと中部タンクの中に組立て別々に輸送を行う。現地においてはこれを 3 相共通の車台と共に上部タンクによって一体に組立て、上部タンク内で相間の接続や、タップ切替器、套管の取付などを従来の変圧器と同様に行い乾燥の必要はない。したがって、でき上った外観はなんら普通の 3 相変圧器と変りなく、ただ鉄心重量とタンク重量がわずか増加しただけである。

このように組立輸送にたいして非常な努力が払われているのは、つぎに述べるように組立輸送によって得るところが大きく、使用者と製造者のいづれに対してもきわめて望ましいからである、すなわち

（1）組立輸送することにより現地組立室や起重機を省略することができる。

（2）現地組立の作業がきわめて簡単になり、工期が大幅に短縮される。

（3）工場で油浸した変圧器を現地で再乾燥する必要がない。

（4）工場で完全な試験を行ったそのままの状態で使用することができるので、現地で詳細な試験を行う必要はなく、また絶縁上の安心感も増大される。

火力発電所は都心近く位置し輸送の便に恵まれているのが普通であるから 154 kV 100,000 kVA 程度までは普通の構造で組立輸送できるが、これ以上大容量になると特別 3 相式を採用することになる。特別 3 相式では各相毎に送るため、輸送重量が約 1/3 近くに減少するので、わが国で実現を予想される大容量変圧器はすべて特別 3 相式により組立輸送されることになった。

一方水力発電所では佐久間発電所のように 80 t 程度まで輸送できるばあいはむしろ少く、輸送制限 15 t ないし 30 t 程度のばあいが多いので、2~30,000 kVA 級の変圧器に特別 3 相式を活用して組立輸送の威力を發揮

できる。この例として現在製作中の関西電力兼山発電所向 30,000 kVA 変圧器があり、輸送重量は特別相 3 相式により約 25 t である。

## 工. 現地組立

主変圧器を組立輸送したばあいには現地組立はきわめて簡単であり短時日で行うことができる。特別の作業としては横倒し輸送のばあいは起し作業、特別 3 相式のばあいは 3 相組合せ作業があるが、いずれも二叉を使って行うことができ、中身点検および乾燥の必要はまったくない。なお発電機室の起重機を使用できるときはさらに簡単となる。

つぎに水力発電所において特殊の輸送条件から組立輸送できず、分解輸送を行なうばあいには、現地組立は工場におけるとまったく同様で Form-fit 変圧器では組立に要する最大吊上重量としてはコイル 1 相分できわめて小さい起重機ですむ。現地乾燥には self tank を用いて誘導加熱によるタンク加熱と、同じく誘導加熱を利用した熱風乾燥を併用し、きわめて好成績を得ている。

組立後真空脱気注油を行うのが最近のプラクチスであり、当社では真空脱気装置を用いず、コンサーベータの中にノズルを取りつけ、油濾過器を通して真空注油する際、コンサーベータ内で脱気が行われるようにする方式を標準としている。この方式は特別の脱気装置を必要とせず、操作簡単なばかりでなく、佐久間発電所用変圧器その他に実施した結果より見れば、脱気装置を使用したばあいと同じ脱気効果が得られている。なおノズルはコンサーベータ内に取付けたまま納入するので、将来脱気注油の必要あるばあいにも便利である。

## オ. 運転保守

火力発電所ではボイラやタービン、水力発電所では水車などの原動機関係の運転保守に多大の注意と労力が必要とされるので、変圧器その他変電機器はできるだけ構造が頑丈で絶対に故障を起さず、かつ保守点検に便利なものが要望される。

当社の大型変圧器にはすべてポンベ式窒素封入装置を備え、高圧窒素ポンベから減圧弁を通じて自動的に窒素ガスを補給して、油と大気とを遮断し油の劣化を完全に防止している。したがって従来変圧器の保守の大半を占めていた油の試験や濾過の必要はなく、代って窒素封入装置の保守が要求される。しかし最近の窒素封入装置は改良の結果、漏洩を皆無ならしめているので、ポンベを 1, 2 年に 1 度取りかえるほかは、窒素圧力の点検記録のみを行うだけで保守は簡単である。

冷却方式として送風機や送油ポンプを使用する強制冷却を採用するばあいは、これら補助機の運転制御が直接変圧器の運転すなわち油とコイルの温度上昇を左右する重要な問題であるが、現在では信頼度の高い補助機ができているので、従来の自冷式と同様保守にも手数を要せず、充分安心して使用できる。機器の故障以外に補助電源の事故やその回線器具の故障などによって送風機、送油ポン

プまたは冷却水が停止したばあいも考えられる。しかし大型変圧器においては巻線、鉄心および絶縁油などの熱容量が相当大であるから、自冷容量を有しないばあいでも、補助機全停後引づき 1 ないし 2 時間の全負荷運転は可能で、その間に電源が恢復または不良箇所の修理や取り替えができるので、負荷を制限する必要はない。強制冷却方式の変圧器では送風機あるいは送油ポンプの損失があるので、負荷が軽いときには風冷、自冷への切替、または冷却器ユニットを適宜停止していくことが行われ、変圧器の温度または負荷に応じてこれを自動的に行なうことができる。しかし最近の冷却装置は、信頼度と能率が向上しているので、面倒な装置を用いて微細な損失の軽減策を講ずるよりも、冷却器を充分きかして変圧器温度を低く運転し、変圧器の寿命を長くする方が、大きく見れば得策ともいえ、ばあいによっては温度の低下したための銅損失の減少の方が、補助機損失よりも大きいことがある。

## 3. 所内変圧器

所内変圧器は発電所の運転の動力源となるものであるから、主変圧器同様重要でありその信頼性の高いことが必要である。とくに屋内に設置される小型変圧器においても重要な制御電源を供給するもので、これら屋内機器の万一の事故が火災の大事を起す原因となるから、メタルクラッド型配電盤や気中遮断器の併用と相まって、燃えない変圧器が要望され、最近不燃性合成絶縁油使用変圧器や乾式変圧器がもっぱら採用されている。

### ア. 不燃性合成絶縁油ダイヤクロール (Diaclor) 使用変圧器

不燃性合成絶縁油は絶縁耐力が鉛油よりさらに高く、化学的に安全で、酸化による劣化がほとんどないなどの利点を有しているが、一方 (1) アークにより合成油が一部分解して塩酸ガスを発生する (2) 毒性があり、皮膚を刺激するので取扱に注意を要する (3) 有機物を溶解する性質が大きい。したがってワニスやパッキング材料などの選定にはとくに注意を要する (4)  $\tan \delta$  および  $\tan \delta$  の温度変化がいちじるしい。などの欠点を持っているので使用上注意を要する。

当社の不燃性油は Diaclor と称し W 社の Inerteen と同等品で、国産塩化ジフェニールと三塩化ベンゾールを混合したものに W 社および当社の研究による塩素反応抑制用の特殊添加剤を加え、さらに精製処理した独特のものを使用する。

不燃性油は吸湿による絶縁耐力の低下は鉛油と同様であり、また塩化ベンゾールなどの蒸発により多少粘度の変化するのを防ぐために、完全密封式にするのが望ましい。付属品としてばあいによってはガス吸収装置、HCl 検出装置などを取付け事故時の万全を期している。

不燃性油使用変圧器は不燃性油の特殊な性質のため、必要以上に心配される向が多いが、問題はすべて工場で

の設計、製作および取扱に關わるもので、完全密封されて現地に据付けられた上は、信頼度高く保守もきわめて簡単であるから今後ますます盛に用いられるであろう。

不燃性絶縁油の価格は相当高く鉛油の 10 倍ぐらいであるが、わが国では製造を開始してから日も浅く、今後使用量の増加とともに価格の低下が期待される。

なお不燃性合成絶縁油使用変圧器の詳細については本誌 30 卷 3 号を参照願いたい。

#### 1. 乾式変圧器

従来から小容量、低電圧の変圧器には A 種絶縁物を使用した乾式変圧器が使用されていたが、乾式変圧器では油入変圧器に比し、絶縁距離と温度上昇の点で不利となるので、これにたいして変圧器絶縁に耐熱性の大きいものを使用し、高い温度で使用できることが要求された。そこで雲母、ガラス繊維などの無機質材料を従来のワニスとともに用いた B 種絶縁の乾式変圧器が製作使用された。その後シリコーンワニスが登場するにおよんで、これを用いた H 種絶縁乾式変圧器が急速に注目を浴びて製作されるに至った。

乾式変圧器は油を使用しないので不燃性、非爆発性であり、油の点検、濾過、油洩れなどがない、据付、保守、点検が容易であるなどの大きな長所を有するが、一方絶縁の一部に空気を利用するため、絶縁耐力が弱い欠点がある。とくに衝撃比は油入の 2~2.4 にたいし 1~1.4 で衝撃電圧などにたいする絶縁耐力は弱い。したがって電

圧の高い変圧器では絶縁距離が相當に大きくなり、きわめて不経済となるので、乾式変圧器の最高電圧は 20 kV 級に止めるのがよい。米国の規程では乾式変圧器の衝撃試験電圧を油入変圧器よりも低く規定しており、わが国でも目下試験電圧を作製中である。

このように乾式変圧器は衝撃電圧にたいする絶縁耐力は弱く、一般にビルディング用とか坑内用などケーブル回路に接続され、雷の侵入を受ける心配のない場所に使用されるのが普通である。

もう 1 つ H 種絶縁乾式変圧器の欠点はシリコーンやガラス繊維、雲母などを使用するため価格が相当高いことであるが、上述の長所にかんがみ、不燃性絶縁油使用変圧器とともに、今後ますます盛に用いられることと思われる。

#### 4. む す び

水火力発電所用変圧器に限らず、一般に変圧器に望まれることは、優秀な材料を使用して最新最良の設計工作を行い、完全な試験を行った上で組立輸送を行い、工場で試験したそのままの状態を現地に再現し使用することで、かくして信頼度の高い、運転保守の容易な変圧器が得られるのである。特別 3 相式を始めとする幾多の最新の技術により、われわれの変圧器は上記をほぼ満足するところまで達していると自負するものであるが、なお一層の研鑽を期する次第である。

# 最近の発電所用スイッチギヤー

伊丹製作所 新井正元\*

## Switchgear for Power Plant Use

Itami Works Masamoto ARAI

Bewildering is the latest progress in the switchgear. The engineers on the part of builders are kept busy in the improvement and new development. The case of purchasers are no exception; they must rack their brain to get acquainted with the operations, principles and performances of newly introduced devices before they make a decision which one to apply. Formerly, generators and transformers were thought much of, but it was brought to light gradually that the switchgear is the very thing to govern the cause of troubles or the difficulty of maintenance and operation. The latest tendency and varied problems on the subject are expounded herein.

### 1. まえがき

スイッチギヤーの最近の改良発展は目まぐるしいものがあり、製作者側技術者も新規開発改良に追いまわされていると同様にご使用者側もこれらの選択広用には苦労されて動作、原理、性能その他を勉強されることが大変なことと思われる。最近までは発電機、変圧器等は主機として非常に関心を持たれていたが、これに反してスイッチギヤーはそれ程重要視されていなかったくらいがある。しかし事故の原因あるいは保守運転の難易を左右するのがスイッチギヤーであることに次第に認識を改めつつあるのではないかろうか。以下最近の発電所用スイッチギヤーの動向と遭遇している諸問題について概略申し述べてご使用者各位の選択保守等の参考に供したいと思う。

### 2. 遮断器

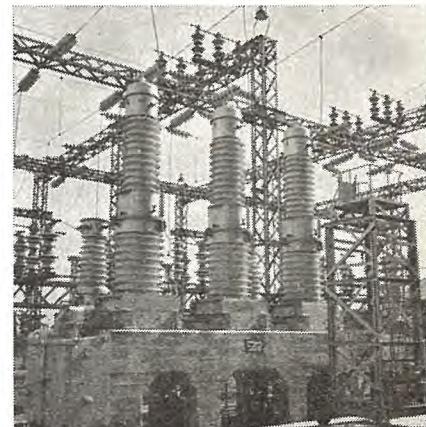
発電所用遮断器としていかなる形式のものが性能優秀で、据付保守点検が容易かつ経済的であるかは、最近のように磁気遮断器、空気遮断器が実用せられる時代には関係技術者にとってもっとも興味ある問題であろう。

#### ア. 高速度遮断器

遮断器の第一の使命が故障回路の急速除去にある以上故障電流遮断が高速度を望まれるのは当然である。当社は1950年11月の姫路変電所で行われた161kV遮断器の現地遮断試験に、小電流より大電流に至るまでほとんど一様に2c/s以下の電弧時間で優秀な成績を収めた実績のあるVertical Flow消弧方式を採用したV.C.B.型碍子型遮断器を中容量遮断器として、69kVないし115kVで1,000MVAないし1,500MVAのものを製作している。1図はその構造説明図と

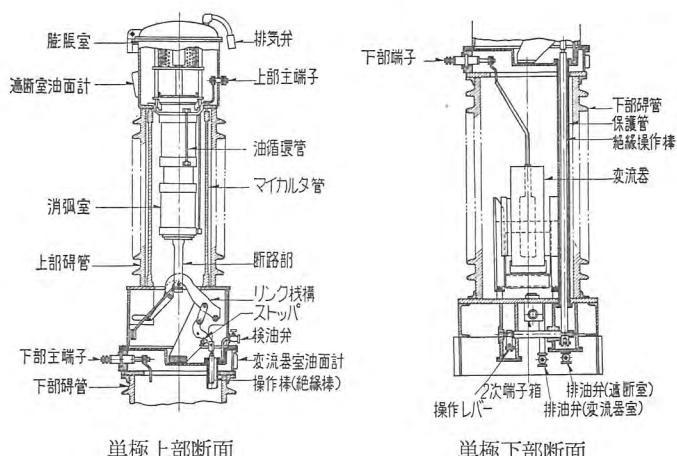
80.5 kV 1,500 MVA V.C.B. 型碍子型遮断器の外観写真である。

しかし最近の電源開発の進歩、送電線の連繋、負荷の集中から次第に161kVで2,500MVAないし3,500MVA 80.5kVで2,500MVAないし3,500MVAの大遮断容量のものが要求されるので、Multi-Flow 消弧方式を採用したM.C.B. 型碍子型遮断器のシリーズを完成した。



1図 80.5 kV 1,500 MVA V型碍子型遮断器外観ならびに構造説明図

Fig. 1. Type V 80.5 kV 1,500 MVA oil poor circuit breaker.



1表 第2次新北幹人工故障試験遮断器比較表

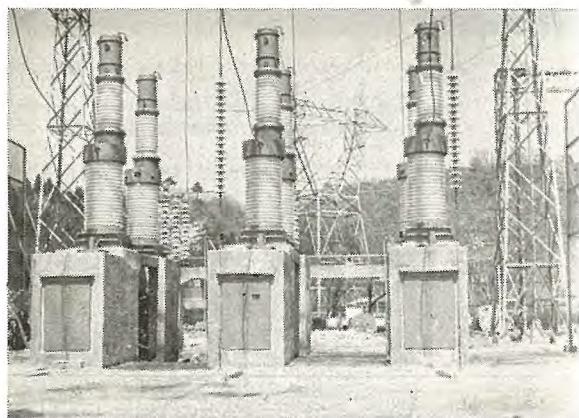
試験番号	故障相(相)	動責作務	新愛本 S/S または樺原 P/S						成出 P/S						備考
			遮断器	試験電圧(対地) (kV)	故障 継続時間 (c/s)	遮断時間 (c/s)	無電圧時 (c/s)	遮断電流 R.M.S. (A)	遮断器	試験電圧(対地) (kV)	故障 継続時間 (c/s)	遮断時間 (c/s)	無電圧時 (c/s)	遮断電流 R.M.S. (A)	
1	C	1φ 0-C	# 30 M. C. B.	151	4.80	2.60	20.6	838	# 3 C. C. B.	144	5.50	3.1	22.5	1110	
2	A	1φ 0-C	# 30 M. C. B.	145	3.90	—	19.50	—	# 3 C. C. B.	145	5.10	2.6	25.3	1450	
3	A	3φ	# 10	144	5.00	2.90	—	620	# 3	144	4.7	3.50	—	1300	
	B	0	C. C. B.	144	5.40	3.30	—	620	C. C. B.	144	4.50	3.3	—	1410	
	C			144	5.70	3.60	—	620		144	5.1	3.5	—	1450	
4	A	3φ	# 30	148	5.00	2.70	26.85	491	# 3	144	4.4	2.9	25.3	1920	
	B	0-C	M. C. B.	145	—	—	—	—	C. C. B.	144	—	—	—	—	2線地絡故障となる。
	C			147	4.00	2.35	27.10	521		144	3.6	2.7	25.1	2000	
5	A	1φ 0-C	# 40 M. C. B.	148	4.00	2.50	20.4	932	# 14 I. C. B.	145	4.58	3.15	19.0	1380	
6	A	3φ	# 40	151	3.80	2.50	22.8	910	# 14 I. C. B.	145	4.55	3.10	19.3	1430	
	B	0-C	M. C. B.	153	(2.0)	2.35	23.1	884	I. C. B.	145	(2.51)	3.06	18.8	1480	
	C			152	(4.0)	2.20	23.6	847		145	(4.25)	3.78	19.6	1550	
7	B	1φ 0-C	# 30 M. C. B.	144	4.00	2.55	18.70	750	# 3 C. C. B.	144	5.0	2.7	23.8	1390	
8	A	1φ 0-C	# 30 M. C. B.	146	4.85	2.60	20.00	545	# 3 C. C. B.	144	5.0	2.5	—	2250	# 3 C. C. B. 3φ遮断す

1表は1953年秋 287.5 kV の新北陸幹線の新愛本変電所および成出、樺原発電所で行われた第2次人工故障試験の成績を示すもので、他社の遮断器は遮断器時間 3 c/s を越すこともあったが当社の M. C. B. は最長 2.7 c/s であった。また昨年秋関西電力小曾根変電所における

る 80.5 kV 級各社遮断器の 1,200 MVA 人工故障遮断試験においても裕々 3 c/s 以下の遮断時間で遮断しているので、M 型碍子型遮断器は高速度遮断器の最高標準を行くものである。2図は 287.5 kV 5,000 MVA M.C.B. 型碍子型遮断器の外観写真と構造説明図である。

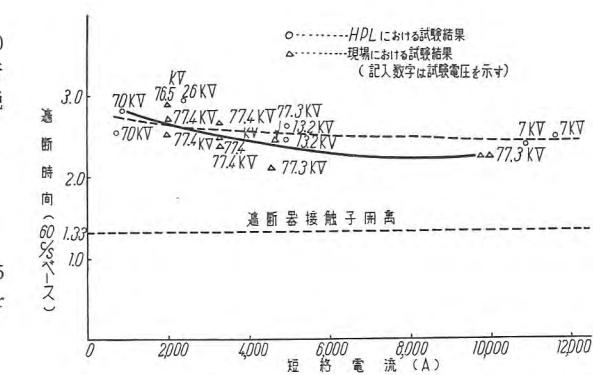
### イ. 現場遮断試験と短絡試験設備での成績比較

一般には現場において遮断器が遭遇する回復電圧の大きさは短絡試験設備のそれよりも固有周波数が小さく並列負荷の減衰抵抗も大きいので楽だといわれている。3図は 80.5 kV, 2,500 MVA の M. C. B. 型遮断器の短絡試験設備での遮断試験の成績と小曾根変電所の現地遮断試験の比較を示すもので、短絡試験設備で電圧を下げて試験した成績も実際の高電圧 F でも全遮断時間は 3 c/s 以下であり違わない。すなわちよく設計製作された遮断器は、短絡試験設備の容量が小さくともその証明方法さえ適切であればよい現場試験の成績を期待し得る。



2図 287.5 kV 5,000 MVA M 型碍子型遮断器外観ならびに構造説明図

Fig. 2. Type M 287.5 kV 5,000MVA oil poor circuit breaker.



3図 70-M-250 型 M. C. B. の小曾根変電所における遮断試験と P. H. L. の成績比較

Fig. 3. Comparison curve of interrupting time between field test and factory test with type 70-M-250 oil poor circuit breaker.

2表 坂上発電所における 140-M-250 型碍子型遮断器の充電電流現地試験

線路電圧 (kV)	充電電流 (A)	再点弧回数*			線路対地異常電圧(倍数)†			使用線路
		A	B	C	A	B	C	
161	12.8	0	0	0	1.0	1.0	—	飛彈旧幹線
"	"	(1)	1	(1)	1.0	1.27	—	笠津瀬戸間
"	"	1	0	(1)	1.78	1.0	—	中性点PT接地
"	"	0	0	0	1.0	1.0	—	

3表 岩松発電所における 170-GW-350 型節油型遮断器の充電電流および励磁電流遮断成績

充電電流試験		
線路電圧(kV)	充電電流(A)	再点弧回数
195.5	約45	5回試験においていずれもなし
195.5	約15	"
励磁電流試験		
電圧(kV)	電流(A)	Tr側対地電圧(倍数)
186	1.78	5回試験において各1.0~1.1
181	1.3	" 1.0~1.1 变压器側対地電圧(倍数)
191	2.04	新札幌側

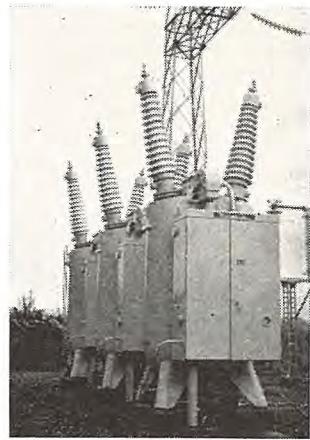
#### ウ. 過電圧遮断と充電電流遮断

日本の送電線は山から里へ長距離の送電線で連結されているために山の方では定格電圧以上で運転されている所が多い。たとえば関西電力黒部幹線では山側は 170 kV を超えて運転されるので充電電流遮断はますます苦しくかつ接地方式が高抵抗あるいはテルペゼンコイル接地であるので一線地絡時の健全線の電圧上昇は大きく、この線の充電電流も遮断しなければならない。また loop を持たないために長い送電線は無負荷で線絡定数の共振あるいは発電機の自己励磁等による電圧上昇を生ずることが多く遮断器はかかる状態の送電線を切らなければならないから発電所の line 側に使用される遮断器の充電電流遮断は

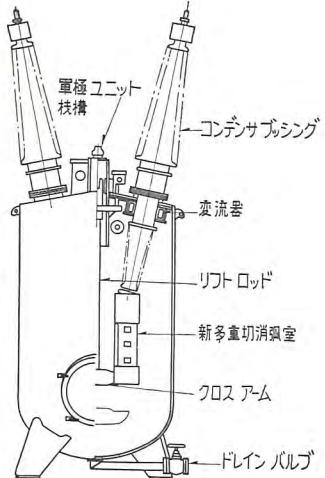
とくに苛酷な要求を受け常規動作時より高い電圧で再点弧 1 回以下というよりは無再点弧が要求される。また長距離送電線に使用される遮断器は自力型 O.C.B. にとっては非常に遮断のしにくい定格遮断電流 1/10 ないし 1/5 程度の故障電流も高速度で遮断することを要求されるので、充電電流の遮断性能向のためと共に強力な油吹付の補助ピストンを必然的に付加しなければならない。2 表は 161 kV 2,500 MVA M.C.B. 型遮断器の坂上発電所における、また 3 表は 195 kV, 3,500 MVA GW 節油タンク型遮断器の岩松発電所における充電電流の成績である。

#### エ. タンク型油遮断器か、碍子型油遮断器か

161 kV 以上では充電電流遮断と定格遮断容量の 1/10 程度の故障電流も高速度で遮断するためには遮断点数の増加が望ましい。碍子型遮断器では碍子で遮断点数が制限せられるのと遮断点数が少いほど遮断時の電圧分布の不均一がなくなりかつ消費エネルギーが少くなるという従来の設計方針により遮断点数を少くしてきたがもはや上記の要求を満足せしめるには遮断点数の増加を自由にできるタンク型に戻らざるを得なくなった。かつ強力な油吹付の補助ピストンを内臓せしめなくてはならず遮断速



4図 (a) GW型節油タンク型遮断器 195 kV 3,500 MVA 800 A  
Fig. 4. (a) Type GW watch case oil circuit breaker 195kV 3,500MVA 800A.



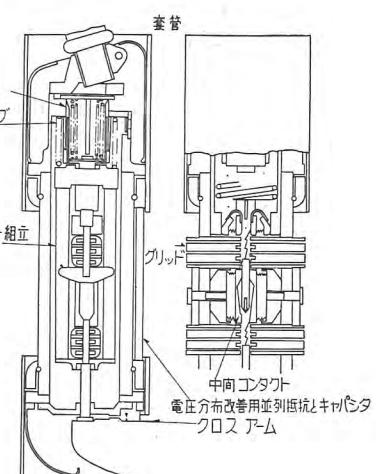
4図 (b) GW 節油型遮断器構造説明図  
Fig. 4. (b) Construction of type GW watch case oil circuit breaker.

4表 170-GW-350 型節油タンク型遮断器遮断試験

動作 責 務	極 数	遮断電流 r.p.s. (A)	給電 与圧 直流分 (%)	回電 復圧 (kV)	再起電圧 周波数 (kc)	遮断時間 減衰時間定数 $\times 10^{-5}$ sec	投入電流 (A)			無電圧 時間 (Po)
							電弧 c/s	全極 半極 1/2 c/s co	電弧 c/s	
0	全極	1260	4.5	100	91.5	1.5	0.9	2.40		
0		2520	3.1	50	89	1.5	1.0	2.50		
0	半極	6650	22.2	14	90.5	1.5	0.78	2.28		
0		11500	11.0	6.6	90	1.5	0.65	2.15		
12	c/s	1290	14.5	100	94.5	2.75	92.5	1.5	0.85	2.35
	co	1180	5.1	89.3				1.4	0.84	2.24
0		2610	13.8	05	92.5	4.8	39.5	1.5	1.15	2.65
	co	2450	0	88.7	5.0	38.0		1.4	1.10	2.50
0		6500	15.5	14	93.0			1.45	0.65	2.10
	co	6000	6.1	89.4				1.40	0.80	2.20
12	c/s	12550	21.5	6.6	90.8			1.50	0.75	2.25
	co	11150	18.2		83.2			1.48	0.72	2.2
0		1610	18.2		91.2	4.5	47	1.5	1.15	2.65
0		1590	8.5	70	91.4	4.5	50	1.5	1.25	2.75
12	c/s	1450	0	85.0	4.6	48.2		1.4	1.15	2.55
	co									2580
										10.6

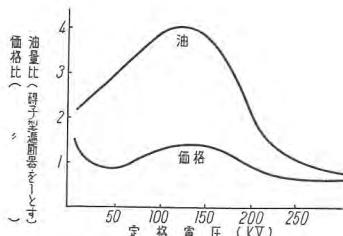


5図 (a) 新多重切消弧室  
Fig. 5. (a) New multi break interrupter for type GW oil circuit breaker.



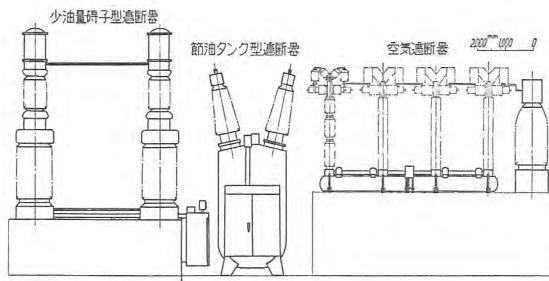
5図 (b) 新多重切消弧室構造説明図  
Fig. 5. (b) Construction of new multi break interrupter.

度を上げざるを得ないとからタンク型が復活する訳である。とくに 287.5 kV, 230 kV, 195 kV 等の超高压を



6 図 碍子型遮断器と鉄槽型油入遮断器の比較

Fig. 6. Comparison between oil poor circuit breakers and steel tank oil immersed circuit breakers.



7 図 287.5kV 5,000MVA 各種遮断器の外形据付比較  
Fig. 7. Comparison of dimensions with varied circuit breaker.

直接接地用としては碍子型では1相に2柱必要となるのでこれをいわゆるウォッチケース型にしてタンク1つに入れて節油タンク型遮断器とするのが有利である。

4図は昨年9月当社が電源開発北海道電力株式会社に納入した195kV直接接地用3,500MVA GW節油タンク型遮断器の外観図構造説明写真で5図はこの遮断器に新しく採用された新多重切消弧室の説明図と外観写真である。4表は当社50,000kVA発電機を用いての遮断試験の成績で再起電圧周波数の高い短絡試験設備においてさえ遮断時間が最長2.75c/sであるので現場での成績はもっと短縮されるであろう。6図はタンク型油入遮断器と碍子型遮断器の油量ならびに価格の比較で超高压になるにしたがって油量も価格も近づいてくる。もちろんタンク型の方が油洩れの心配もなく保守点検据付が便利でかつ水力発電所のように構内敷地に制限がある時には7図のように空気遮断器碍子型遮断器よりもはるかに小さい占有面積で設置できる利点がある。またポテンシャルデバイス、套管型変流器を利用できることも利点で過電圧遮断大容量高速度遮断の高性能油入遮断器として理想的なものである。

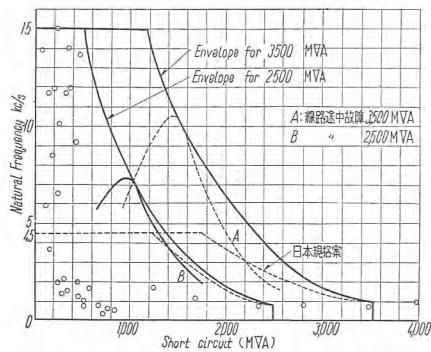
#### 才 空気遮断器か油遮断器か

現在わが国遮断器での空気遮断器の進出は驚異的である。すでに34.5kV以下は空気遮断器の実用時代に入り最近287.5kV, 161kV用も各社研究中のものもありすでに納入されている。しかし空気遮断器が最上のものであるか否かは実際運転の経験が少いために軽々しく批判できないが考慮の余地は充分あると思われる。油入遮断器でも遮断特性は完全に3c/s遮断可能であるから性能的には同等と見なされる。もし圧縮空気系統に異常が発生すれば空気遮断器は遮断不能となりまたある種のものでは圧力低下すれば自動的に投入する等空気を利用するための本質的な欠点がある。この点油入遮断器は遮断には圧縮空気を利用しないで蓄勢されたスプリングの力によって開離するから、非常の際は手動トリップが可能で、空気遮断器よりは安全性がある。空気遮断器は多数のバルブを同時に同速度で動作せしめなくてはならないので特殊材料ならびに精密工作を要する点は問題である。さらに積雪あるいは塩風等の汚損による碍子表面リーケによる遮断点の遮断時の電圧分布の不均一が懸念され、つぎに述べる再起電圧周波数の影響と共に考慮されなくてはならない。

#### 力 再起電圧周波数

油入遮断器の遮断容量は再起電圧の周波数が3,000c/s

以上ではほとんど変わらないのに反し空気遮断器は再起電圧の周波数により違うので遮断容量決定の重要な要素である。空気遮断器の黎明期を迎えた日本では実際の現場の系統で電力遮断器が遭遇する再起電圧周波数が果して如何かといふことが空気遮断器の規格を造る

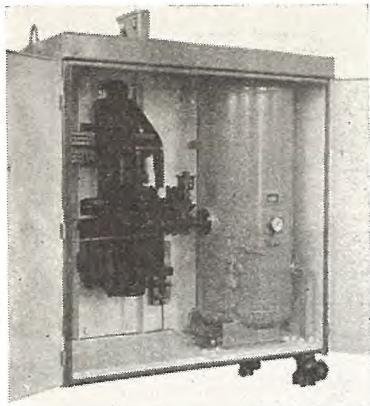


8 図 66~77 kV 系統の再起電圧周波数  
Fig. 8. Recovering voltage frequency of 66~77 kV system.

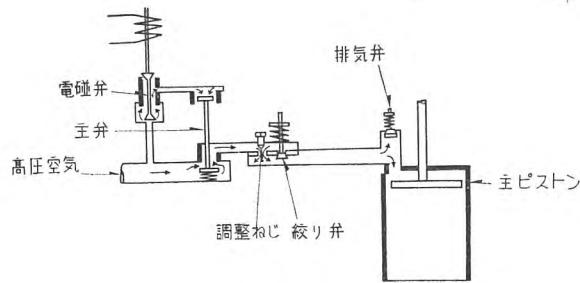
上からも、設計製作上からも必要となり、電気協同研交會で各電力会社が自分の電力系統のデータを提出して再起電圧の周波数を計算あるいは実測した結果、つぎのような日本の電力系統の特殊性がはっきりしてきた。すなわち大都市の負荷増大で山からの送電線は都市周辺で69kVあるいは80.5kVのリング母線に連繋され、これへ火力の発電が増強されてつながれる結果、短絡容量は関西関東それぞれ3,500MVA 2,500MVAと非常に大きくなつた。したがつて火力発電所からつながる80.5kVあるいは69kVの送電線あるいは火力発電所の発電機と変圧器間で故障が起るとこの故障を遮断しなければならない遮断器はほとんど変圧器の固有周波数に近い再起電圧周波数に遭遇し、空気遮断器では遮断しにくいことになる。8図は80.5kV系の相遭する再起電圧周波数をプロットしたもので欧州各国の規格案ではかなりはみだすことが判る。火力発電所用80.5kV 69kV側遮断器を選定される場合にはこの点を注意されることが必要で遮断容量が大きい場合には値段的に高いタンク型油入遮断器を購入されるのも確実安全の見地からはよいのではなかろうか。

#### キ 機械的耐久性

発電所で使用される遮断器はその発電所が尖頭負荷時用発電所かあるいは常時負荷用発電所用かで開閉回数頻度が異なる。すなわち尖頭負荷時用は日に数回開閉されるので数年間には遮断器規格 JEC-57に指定する形式試験の操作回数500回あるいは改定案の2,000回を超過する場合がある。いま迄当社製遮断器の10,000回の耐久操作試験でも繰返し疲労によりばね等が破損することがあって失敗した経験があるので以上のようないくつかの頻繁な場所に使用される遮断器は単に遮断器規格に合



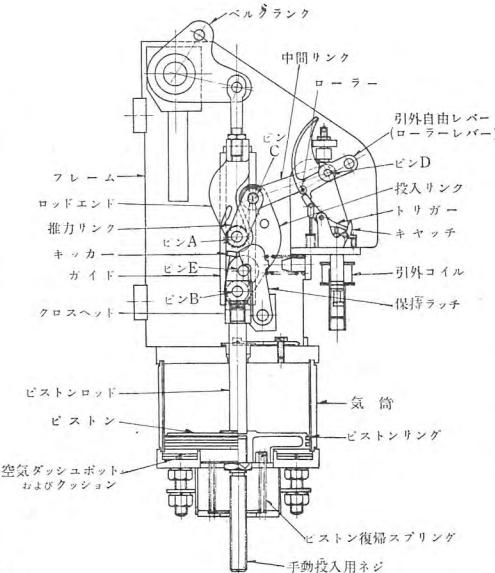
9 図 AA-10型圧縮空気操作機構  
Fig. 9. Type AA-10 pneumatic operating mechanism.



格するというだけでなく充分機械的耐久力のあるものを選定すべきである。

#### タ. 圧縮空気操作機構

最近の高速度遮断器には例外なしに圧縮空気操作機構が使われる。圧縮空気を利用すると電磁石を用うる場合に比較して大きな力を出すことができると共に投入力の立上りを急激にすこがけて便利であるが逆にこのために可動部を加速しすぎて機械的に破損することがある。9図は当社製遮断器に使用されるAA-10あるいはAA-7型圧縮操作機構で制御弁は上述の点を考慮して圧縮空気のピストンへの流入には2つあり、最初はあまり

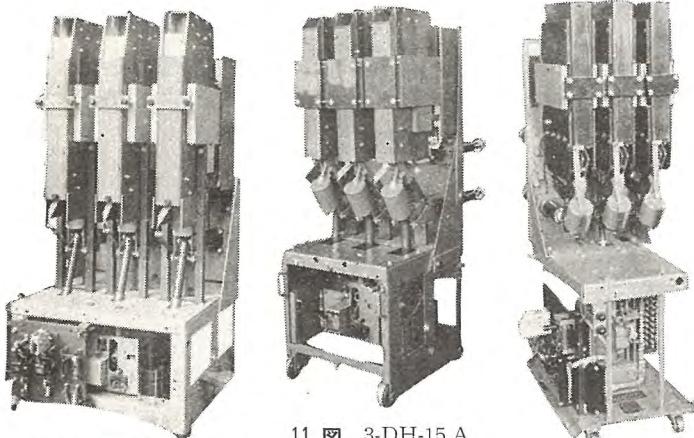


加速しないように1つの穴で圧縮空気を供給し、スプリングがしばられて大きな力が必要なコンタクトを形成する直前にいま1つの穴をあけてやるようになっている。またシリンダピストンの部分には投入最終行程で空気ダッシュポットが形成されるように工夫してあって、投入時の衝撃を緩和すると共に誤操作による空突きでも機構をいためないように設計してある。また従来の如く炭素鋼のトリガで熱処理の良否で破損することのないようマンガン青銅のダイカストに高速度切削バイオのトリディアを埋金して硬度を保たせ摩耗を防いでいる。また山の発電所の

ように寒冷地に使用されてもバルブその他が凍結して事故を起さないように気貯槽バルブ等一切を同一鉄箱内に収めて電熱器で暖めるよう特別に考慮されている。すなわち圧縮空気操作機構に適した合理的に設計された機構であって始めて遮断器全体の機械的耐久性が保証される。

### 3. 磁気遮断器

当社は1952年末よりDH型磁気遮断器を製作しているが、水力発電所発電機回路用として11.5kV 500MVA 1,200Aの10-DH-50型磁気遮断器を10図に示すように1953年関西電力坂上発電所に納入して以来たくさん使用されている。中容量以下の発電所では500MVAの遮断容量があれば充分で従来の油入遮断器の如く火災の心配もなく、すこぶる遮断性能も優秀で保守が楽である。



10 図 10-DH-50型磁気遮断器  
11.5 kV, 500 MVA, 1,200 A

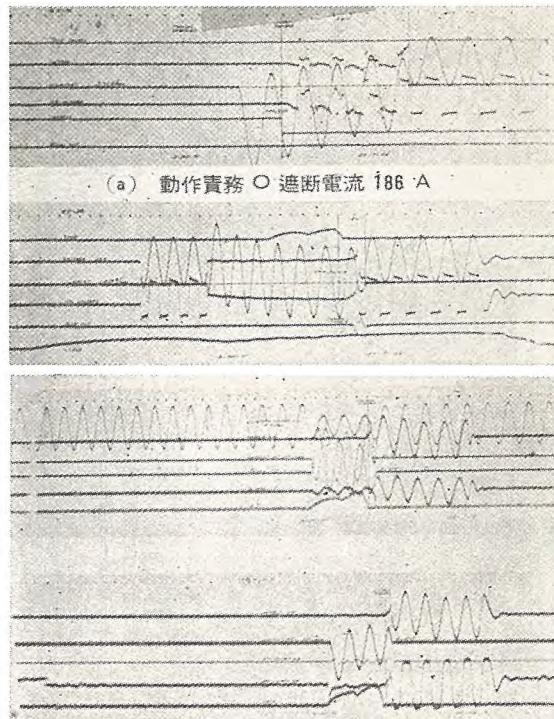
Fig. 10. Type 10-DH-50, Magnetic air circuit breaker 11.5 kV, 500 MVA, 1,200 A

11 図 3-DH-15 A  
型磁気遮断器  
3.45kV, 150MVA  
1,200 A

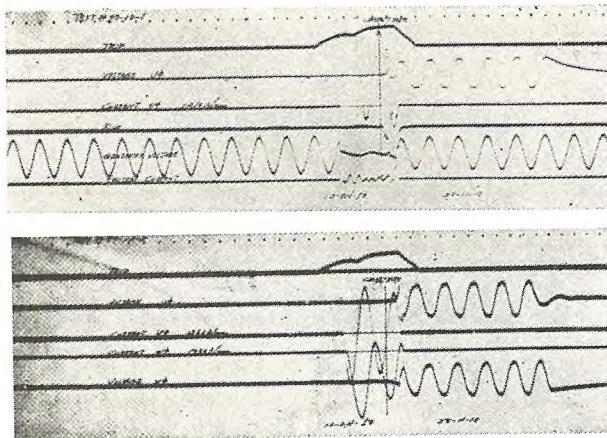
Fig. 11. Type 3-DH-15 A, Magnetic air circuit breaker 3.45kV, 150MVA, 1,200 A

12 図 3-DH-5型磁気遮断器  
3.45kV, 50 MVA, 1,200 A

Fig. 12. Type 3-DH-5, Magnetic air circuit breaker 3.45kV, 50 MVA, 1,200 A



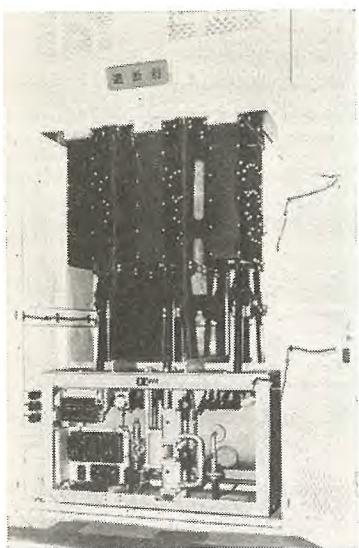
13 図 3-DH-15 A 磁気遮断器遮断試験オシログラム  
Fig. 13. Oscillograms showing interruption tests on 3-DH-15 A breaker.



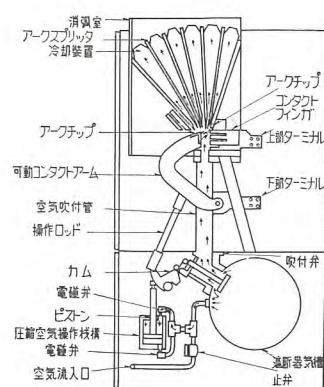
14 図 DH 型磁気遮断器遮断試験オシロ 11.5 kV, 500 MVA, 1,200 A 遮断電流 11.5 kV にて約 30,000 A  
Fig. 14. Oscillograms showing interruption test on 10-DH-50 breaker, 11.5 kV, 500 MVA, 1,200 A.

また水力発電所内盤用あるいは火力発電所の補機用遮断器としては 3.45 kV で 150 MVA あるいは 50 MVA の遮断能力のある 11, 12 図の写真に示すような 3-DH-15 あるいは 3-DH-5 型磁気遮断器がメタルクラッドあるいは別置型に使用されて重宝がられている。油入遮断器に比して現在では高価なことが面白くないが、高性能であることがこの欠点をカバーして余りがある。消弧室の耐熱陶器板の材質については種々研究の結果現在はコージライトを使用しているが、これは遮断電流零値後の残留電流が比較的多いためにコンタクト間に現われる過渡再起電圧の上昇を楽にせしめ、とくに吹上能力の少い 2,000 A 以下の遮断電流での電弧時間を短縮する特質がある。また磁気遮断器では電弧によるアークホーンその他の金属蒸気が消弧板に付着して絶縁が低下し消弧室の寿命が決定されるが、この金属蒸気の付着がコージライトは他の材質に比べて非常に少ないので当社製磁気遮断器を用うれば消弧室をかなり長期にわたって取換える必要がない。

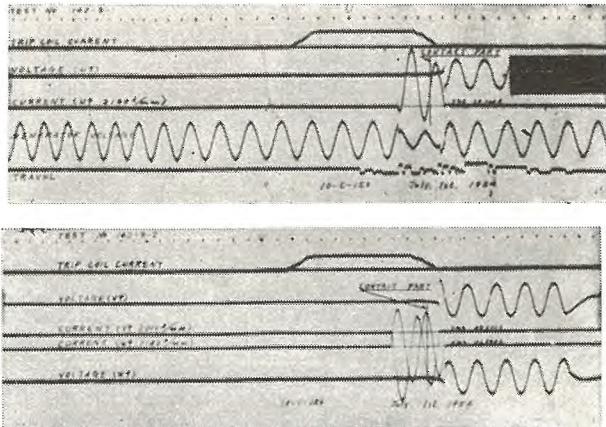
13, 14 図は当社磁気遮断器の 50,000 kVA 短絡発電機を用いての遮断試験の成績



15 図 23 kV 2,000 A 1,000 MVA C 型空気遮断器  
Fig. 15. Type C compressed air circuit breaker 23 kV, 2,000 A, 1,000 MVA.



16 図 圧縮空気流れを示す C 型空気遮断器側面図  
Fig. 16 De-ion air circuit breaker showing the flow of compressed air.

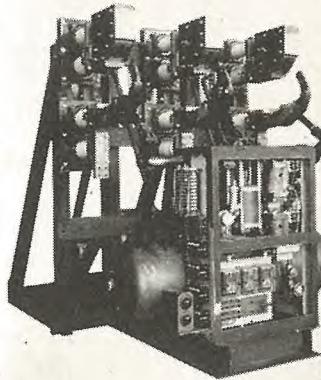


17 図 11.5 kV 1,500 MVA C 型空気遮断器による 6.6 kV, 39,300 A 3 相遮断試験オシロ  
Fig. 17. Oscillograph of 39,300 A interruption test at 6.6 kV 3 phase by Type C compressed air circuit breaker 11.5 kV 1,500MVA.

で電弧時間は大電流範囲ではほとんど 1 c/s 前後で、充電電流、励磁電流遮断も優秀な成績である。

#### 4. 発電機電圧回路用空気遮断器

火力発電所あるいは大きな水力発電所の遮断容量が 500 MVA 以上を要求される発電機電圧回路には 15 図に示すような横吹付の C 型空気遮断器が多く用いられる。本遮断器は 16 図に示すようにコンタクト間に発生した電弧をファイ

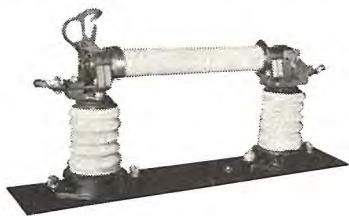


18 図 SA 型同期用負荷遮断器 11.5 kV 3,000 A (椿原発電所)  
Fig. 18. Type SA load interruption switch for synchronizing 11.5 kV 3,000 A.  
(Tsubakihara Generating Station)

バスプリッタ製の消弧室に吹き込んで消弧するので、電弧は圧縮空気で冷却されると同時にファイバスプリッタに面した側はファイバの発生ガスのターブランスで消弧されるが遮断時のファイバ面の絶縁抵抗の低下が過度再起電圧の上昇を抑えるので火力発電所の如き 10,000 c/s 以上の再起電圧周波数を発生する場所でも大きな短絡故障を遮断できる。すなわちノズル型空気遮断器のように抵抗を挿入するようなことを考える必要もない。遮断容量は 2,500 MVA 迄製作可能でまた 3,000 A あるいは 4,000 A 通電容量のコンタクトも楽に設計可能である。コンタクト部操作機構その他が分解することなく外部から近接点検可能なので油なしで火災の恐れがないことと相まって保守が容易である。17 図は 11.5 kV 1,500 MVA C 型遮断器が 6.6 kV で 39,300 A を 0.45 c/s の電弧時間で遮断したオシロである。

また最近大きな水力発電所では発電機回路に遮断

器を省くかわりに、低圧側で同期を取るための負荷断路器が使われる傾向がある。18図は関西電力椿原発電所に納入された SA 型 11.5 kV 3,000 A の負荷断路器で開路時に圧縮空気を吹付けて 3,000 A 迄の負荷電流を閉鎖し得るようにしている。



19 図 BA 型硼酸電力ヒューズ  
3.45 kV, 200A, 160 MVA  
Fig. 19. Type BA boric acid power fuse 3.45 kV, 200 A, 160 MVA.



20 図 遮断試験中の 80.5 kV 1,500 MVA DBA 型電力ヒューズ  
Fig. 20. Type DBA 80.5 kV 1,500 MVA boric acid power fuse under interruption test.

## 5. 電力ヒューズ

日本の過去における電力ヒューズの成績は、芳しくなく電力会社では高圧の計

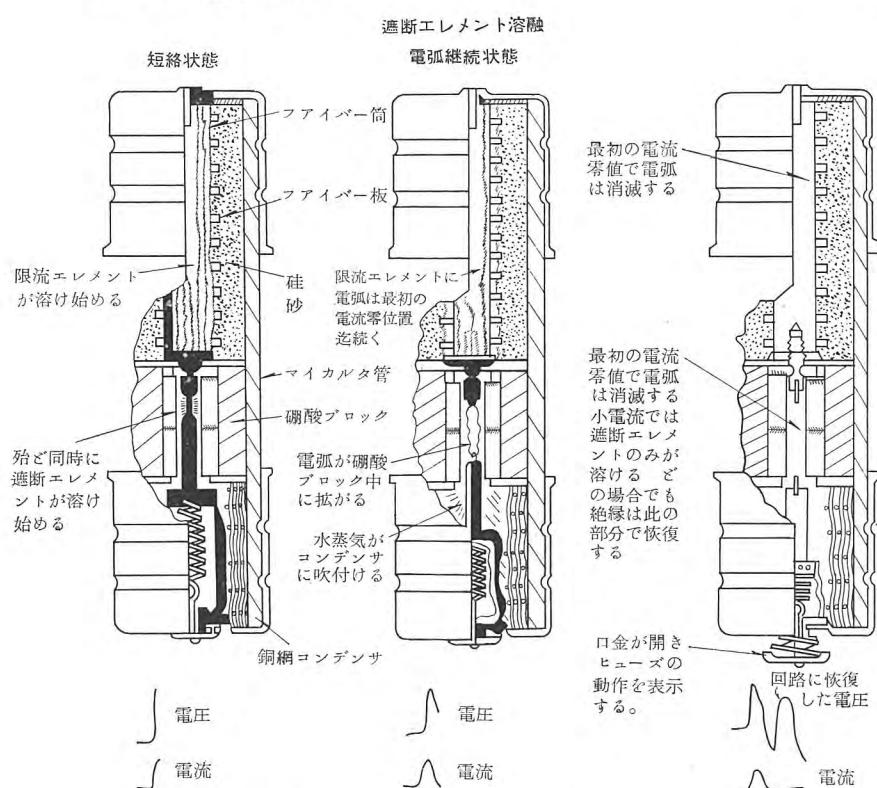
器用変圧器あるいは所内変圧器短絡保護用に電力ヒューズを用いることは、ヒューズ動作時の不完全消弧から故障の拡大その他をますので、あまり使用されなかつた。最近当社で製作せられる硼酸電力ヒューズは、性能が良好で各所で遮断容量不足の旧式油入遮断器と直列に使用して遮断器の補強用に使われたり、工事用発電所用あるいは開閉頻度の少い所内変圧器の1次側に使用されている。

### ア. 使用例

関西電力尼崎東発電所では、建設以来 30 年近くを経過したので接地事故が多く、これが直ちに 2 線地絡へ発展する傾向があり、このため O.C.B. の噴油発火、接続変流器、ケーブルの破壊焼損をまし、大事故となつて停電時間の延引をますので 1953 年に当社の 19 図に示すような BA 型 3.45kV 160 MVA の硼酸電力ヒューズを 73 回線の補器系統に使用したところ故障発生時に、完全に動作して事故波及は皆無となつた実験がある。



21 図 BAL 型限流ヒューズ  
23 kv 1 A 960 MVA  
Fig. 21. Type BAL current limiting power fuse.



22 図 BAL 型電力ヒューズ構造動作説明図  
Fig. 22. Construction of type BAL current limiting power fuse.

最近の発電所用スイッチギヤー・新井

### イ. 電流定格選定上の注意

電力ヒューズの最大の欠点は小電流遮断をさせると溶断時間が長く不揃になることで、上記のように旧式 O.C.B. と動作時間を協調せしめて、過負荷等の小電流は O.C.B. 短絡大電流はヒューズで分担せしめることが必要である。3 相ヒューズで過負荷あるいは微小接地電流のような小電流を遮断せしめると、1 相のヒューズが先に切れて単相運転になることがあるので、この点を考慮して電流定格の選定その他を計画すべきである。とくに短絡容量の小さい回路に電流定格の大きいヒューズを用いることは、2 線地絡から発展した 2 相短絡時に、各相のヒューズの溶断時間が長くかつ相違が大きくなり、1 本のに先に遮断して単相運転になる危険がある。

### ウ. 80.5 kV, 1,500 MVA 電力ヒューズの出現

20 図は 80.5 kV, 1,500 MVA の Drop out 型 DBA 硼酸電力ヒューズの遮断試験中の写真とオシロで、最近計器用変圧器、所内変圧器用として盛んに使用されている。この DBA 型ヒューズの遮断時間は、従来の遮断器とリレーの合計所要時間に比べて非常に早い 3 c/s 前後であるので、今後はもっと積極的にこの種電力ヒューズの利用を考えらるべきではなかろうか。

### エ. 限流型ヒューズ

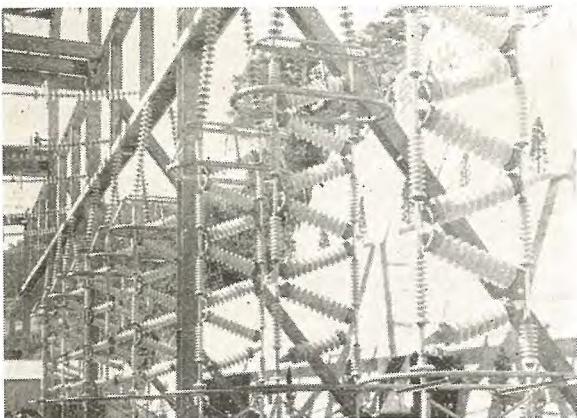
上述の当社製硼酸電力ヒューズ

ズは硼酸の結晶水の分解ガスで消弧するもので積極的な消弧能力を持ってはいるが、急激に事故電流をしぼって過電圧を発生することはない。しかし最近ますます大遮断容量の限流型ヒューズが要求されるので当社は、21図の写真に示すような、11.5kV, 960 MVA, 3.45 kV, 360 MVA の BAL 型ヒューズを製作している。限流ヒーズの最大欠点ともいべき電流遮断による過電圧発生の危険を押えるために 22 図に示すように、小電流遮断を分担する硼酸ヒューズを銀線と、珪砂を使用する限流要素と直列に採用した。この大遮断容量の BAL 型限流ヒューズの出現で大発電所の低圧回路に接続される計器用変圧器、所内変圧器の保護も可能になった。

## 6. 避雷器

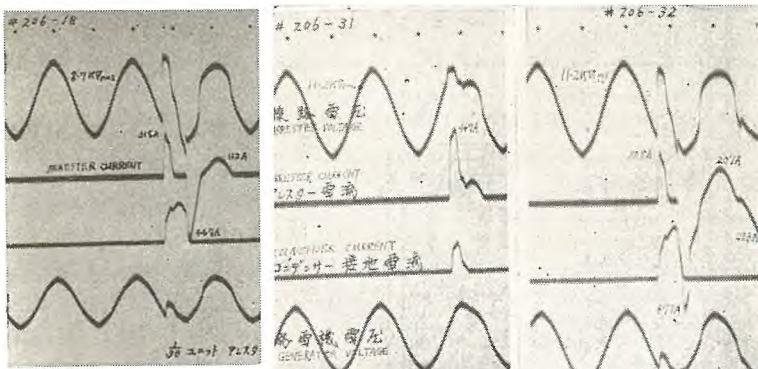
### ア. Long duration surge

雷実測の結果、小電流が長時間継続するいわゆる hot lightning が相当の割合で生ずることが明らかとなり、また系統の switching surge に対しても避雷器の保護効果が期待されるためには long duration surge による試験が各国で問題となっている。現在 NEMA あるいは



23 図 電源開発株式会社佐久間発電所に設置された超高圧 SV-W 型オートバルブ避雷器(許容端子電圧 260 kV)

Fig. 23. Type SV-W 260 kV autovalve arresters at Sakuma power station.



(a) 1.4 相当機圧における 10 回目の試験時オシログラム(透極性)

(a) The oscillogram of tenth duty cycle at rated power voltage-opposite polarity.

(b) 汚損氷結状態における 1.7 E 相当機圧印加時オシログラム(左..同極性 右..逆極性、遮断不能)  
(b) Special test of contaminated and frozen arresters at the elevated power voltage (left-same polarity right..opposite polarity, power current followed).

24 図 許容端子電圧  $8.67 \text{ kV} (=260 \text{ kV} \times \frac{1}{30})$  のユニットによる long duration surge 動作責務試験オシログラム

Fig. 24. Long duration surge operating duty-cycle test on 8.67 kV rated arresters.

は IEC では従来の試験波形の約 100 倍程度長時間の 2 ms で電流は数百分の一の 150 A を 20 回程度加えることを規定しているが、昨年 10 月当社は電源開発株式会社佐久間発電所用として許容端子電圧 260 kV の超高压 SV-W 型オートバルブ避雷器で 2 ms 400 A 20 回の long duration surge に耐えるものを納入した。23 図はこの避雷器の現場据付写真でユニット式のジグザグに上部より懸垂した耐震型である。switching surge は遮断性能の悪い遮断によっても起されるが最近進出めざましく遮断特性のよい空気遮断器でも変圧器の励磁電流の遮断時には電流遮断によって異常電圧が発生するのでこれを避雷器で吸収せしめることは常識的な問題になっている。ことに変圧器付勢時の突入電流で差動繼電器が誤動作して C-O 動作が瞬時に行われた時が突入励磁電流の波形の乱れと、非常に大きな電流値のためにもっとも危険な異常電圧を発生する場合で、遮断器の遮断点の並列抵抗では抑えられないといわれている。

まだ各国では long duration surge による動作責務試験は規定されていないが、当社の避雷器は 1.8 ms 400

5 表 長時間継続 surge による統流遮断限度

状態	機圧	同極性	逆極性
乾燥	1.6E相当	良好	遮断不能
水 1.8E相当	良好	遮断不能	遮断不能
汚損氷結 1.7E相当	良好	良好	遮断不能

25 図 関西電力尼崎東発電所 1 号線 SV-A 型 70 kV オートバルブ避雷器 3 相共通接地線に取付けられたデンソーメータ式衝撃電流記録器で得られた記録紙の顕微鏡写真、穴の断面積は  $0.87 \text{ mm}^2$  で較正曲線からは  $650 \text{ A}$  となるが穴が円く綺麗にこげている所から考え  $200 \text{ A}$  程度の長波尾長 surge によるものと思われる。昭和29年9月26日台風15号により発電所構内にある尼東開閉所の碍子4コ、尼東火力線西島線で碍子破壊事故があり翌日記録器を点検して得られたものである。

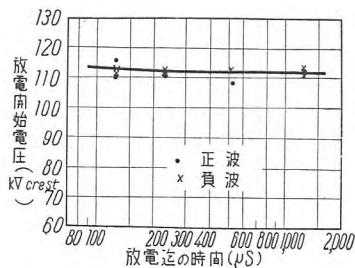
Fig. 25. Microphotography of surge puncture in paper disc of surge current recorder connected with common ground wire of three-phase Type SV-A arresters at Amagasaki-Higashi Station.



A surge による圧印加時の動作責務試験 10 回を経て通過して引続き印加電圧を上げ注水、汚損の如き特殊条件下でも 5 表のように裕度があることが判った。24 図はこの試験の代表的なオシロ記録である。

実際の switching surge に対して避雷器が動作していることは、デンソーメータ式記録器の実測記録中に、雷害でない接地故障などと同時に得られたデータが数多くあることからも推定される。ただデンソーメータ式記録器では surge 等の経続時間の長い電流に対しては、熱的効果によって 25 図のように、紙穴の縁が燃えて割合綺麗な大きな穴となり、 $25 \mu\text{s}$  程度の短い surge に対して描かれた較正曲線から電流値を求めるに過大に出るが、穴の形状や、事故記録を参照して判定すれば、面白い結果が得られる。

### イ. 放電開始特性



26 図 許容端子電圧 39 kV (260 kV  $\times \frac{1}{(1.67)}$ ) のユニットによる V-t 曲線

Fig. 26. Volt-time curve of 39 kV unit arrester.

6 表 特殊気象条件における放電開始電圧

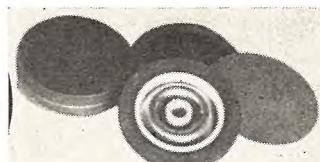
状態	放電開始電圧			
	商用周波 kV eff	緩頭波 surge (515 μs) kV crest	衝撃波 kV crest	
乾燥	88.0	+108.5	-113	+119
注水	97.8	+113	-117	-
汚損	97.2	-	-	+189
霧中汚損	95.8	+109	-118	+202
汚損氷結				-196
				+197
				-156

避雷器の使命が他の重要機器の絶縁保護にあるならば、その放電開始電圧は加えられる surge の波形のいかんにかかわらず衝撃波、中間周波、商用周波にわたって絶縁協調を保つ必要がある。26 図は避雷器ユニットで行った波頭長と放電開始電圧の関係を示す曲線で非常にフラットである。巷間高抵抗シールドを用いた避雷器ではしばしば中間周波あるいは商用周波の放電開始電圧が

衝撃波に比べて非常に高く switching surge に対してはそっぽを向いて保護効果がなく重要機器の絶縁を脅かすことがある。とくにこの傾向はつぎに述べる特殊気象条件の場合に高抵抗シールドの値が変動して放電開始電圧上昇が激しくなるから避雷器の選定にはこの点をよく考慮すべきである。

#### ウ. 特殊気象条件

特殊気象条件については各国で問題となっているが、当社は SV-W 型では放電間隙に 27 図に示す如き抵抗スペーサを使用、シリコンオイルを碍管に焼付処理するこ



27 図 抵抗スペーサを用いた gap.  
Fig. 27. Series gap. electrodes separated by resistance spacers.

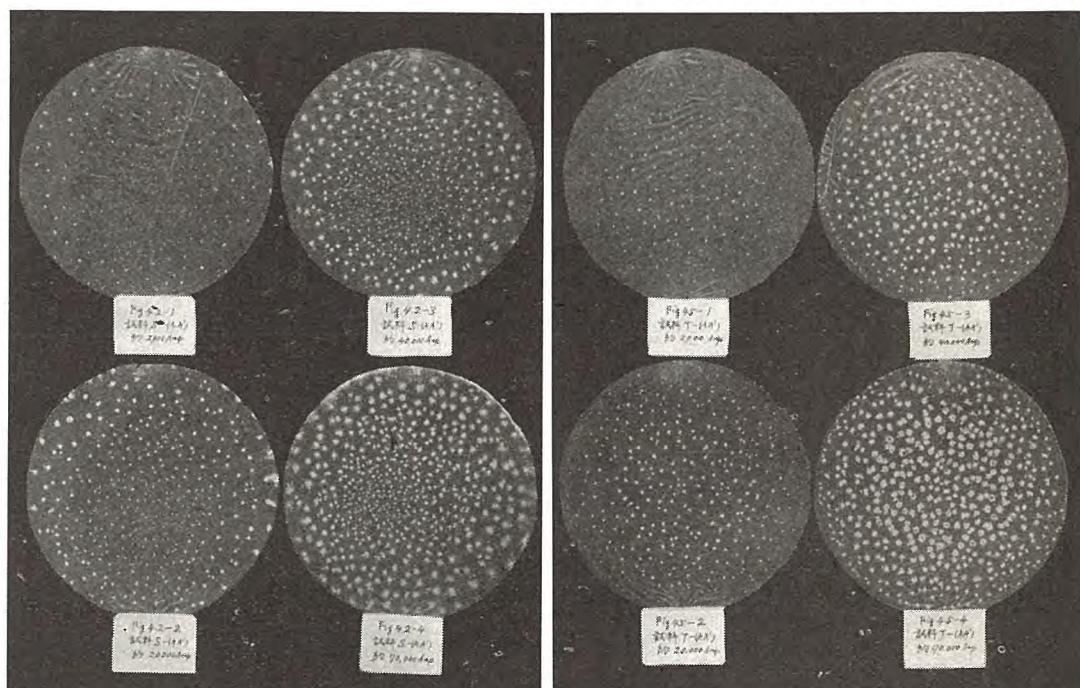
と等によって乾燥、注水、霧中、汚損、霧中汚損、汚損氷結等の各種試験にも、放電開始電圧の変動を 7 表に示すように実用上差支えない程度に押えることができた。

#### エ. 放電耐量

放電耐量は JEC の規程では 20,000 A となっているがこれは波形が半波高時間 15 μs 以上となっているため NEMA 等の 5 × 10 μs の波形（半波高時間で 9 μs 位）であれば電流の波高値はらさに上昇るべきである。佐久間発電所に納入した避雷器は 18 μs の半波高時間で 117,000 A に耐えているから NEMA, IEC 規格の 5 × 10 μs 100,000 A の試験に対しても充分合格し得るものである。

また衝撃大電流による動作責務試験も 1 年前中部電力三重変電所で行われたケーブル系統用避雷器の試験で当社製避雷器は 50 μs、波高値 10,000~15,000 A にも耐えることが証明せられている。

当社製品が long duration surge に耐えあるいは放電耐量が大きい理由の 1 つは抵抗プロックのカーボランダムの充填方式の改良によるもので、プロック通過電流



28 図 避雷器特性要素の電流分布を示す図  
左…従来の同一粒子カーボランダムを充填したプロック (Fig. 4.2-4 上辺の白くなつてい)  
右…3 重充填プロック (特許 215479) (る部分は側面閉鎖の跡である)

Fig. 28. Traces of discharge current passed through thin condenser paper inserted between autovalve blocks. photograph 63157 shows the current distribution of old type block and photograph 63160 shows that of new type block.

が表皮作用で周辺に集中して閃絡あるいは破壊することに注目して、通過電流が均一に流れるよう中央部程カーボランダムの粒子を大きく低抵抗としたためである。28 図はプロックとプロックの間にはさんだ薄い紙に記録された電流痕跡で上記のようにカーボランダムの粒子配列の変更によって熱容量を大にした効果が歴然としている。

#### オ. 定格

わが国の電力系統は有効接地系統がほとんどなく、消弧リニアト抵抗接地あるいは非接地系統なので許容端子電圧は 1.4 E が標準であるが故障発生時には線路定数

の高調波共振や、抵抗接地点分離後に起る健全線の異常電圧上昇その他で避雷器が破壊されることがある。したがってかかる発電所に使用される避雷器の許容端子電圧は、制限電圧および衝撃放電開始電圧が、絶縁レベルと協調し得る範囲で充分高いことが望ましく、JEC の値以下まで競争的に制限電圧を下げることは、続流遮断能力の margin を減少し危険である。いかなる事故に対しても、系統の持続過電圧が、それ程上昇しないということが確められるまでは、衝撃放電開始電圧や制限電圧の低い避雷器を望むより、許容端子電圧にどれだけの余裕があるかを考えるべきではなかろうか。

#### 力 設 置 位 置

避雷器の設置には直撃雷を避けるように近接構内に架空地線を設け、制限電圧が局部的に上って逆閃絡を起さないように接地抵抗を低くすることが必要であるが、最近アナコムあるいは実地試験の結果から設置位置を適切な所に置かないと効果が薄いことが判ってきたので注意を要する。すなわち大きな発電所母線に一括して避雷器を入れれば案外保護るべき変圧器の或るバンクでは保護効果がない。近時変圧器に直か付で避雷器が設置されるのもこのためであるが、逆に構内が広いとの変圧器の避雷器から遠く離れた遮断器、断路器あるいは計器用変成器への保護効果が薄くなるので避雷器の設置位置には充分の考慮が必要である。

### 7. 屋外用断路器

新品の間屋外断路器として本質的な要求を満すものを設計製作することは比較的簡単であるが、太陽・風雨・氷雪および塵埃等が邪魔をし、つねに腐食が行われる屋外で数年間使ってもその性能を保ち得る経済的実用断路器を設計製作することは非常にむずかしい。氷雪に悩まされる水力発電所用あるいは煤煙スラッジのかぶりを避け得ない火力発電所用屋外断路器には特別な考慮が払われなければならない。

#### ア、特殊合金コンタクトの採用

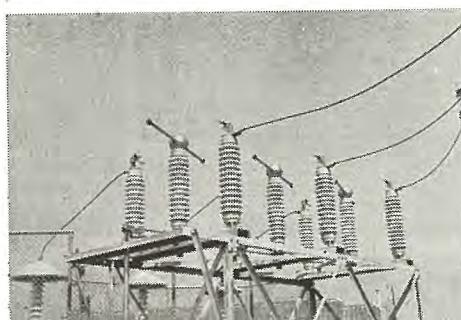
露天にさらされるコンタクトは氷・塵埃・腐食あるいは酸化フィルム等を破るためにには充分な圧力を加えてワイピングさせる必要がある。このためにはコンタクト材料は銀あるいは銅のようなやわらかい材料では、かじりや損耗がはげしく、とくに銅は酸化被膜を形成しやすくこれにより抵抗が増し温度が上れば、急激に酸化が進行し、短絡故障電流の流れた場合も瞬時に数百度に達して焼鈍されやすい。とくに火力発電所用の場合には煤煙のスラッジでワイピングによるかじりが多く、銀メッキ等は新品の間の気休めにしか過ぎない。また從来多く用いられてきた磷青銅板あるいは銅板は加工度の

影響を受けるので、製造工場の違いや、製作ロットによって、一定の硬度その他の機械的性質のものを入手することが困難である。したがってコンタクトに支える圧力が一定で表面硬度も一定なコンタクト受けはさみ板は製作しにくく、そのために従来は別に背後からスプリングで押さなければならなかった。別のスプリングを入れるためには、これを入れるケースが必要で、このケースは塵埃・氷等の溜りとなり故障の原因となることが多い。故にコンタクト材料は抵抗・化学的活性、硬度および焼鈍温度等を基礎として選択されなければならない。JEC の規格が温度上昇限度を 25°C に押えているのも使用中の劣化を考慮したことである。

最近の当社製屋外用断路器には上述のような不具合の点を考慮して時効硬化性銅合金をコンタクトに採用してコンタクトがつねに新品同様で長期間風氷雪、煤煙中で使用されても劣化しない屋外断路器の製作に成功している。これらの合金はいずれも 1,000°C 位で焼入し、500°C 近辺で焼振をすれば所要の機械的性質ならびに導電率が得られるものでコンタクト受け板用 A 銅合金は導電率 40~50%，抗張力 70~80 kg/cm，硬度ショア 30~40，弾性系数 11,000~13,000 kg/mm<sup>2</sup> で、コンタクトとばねを兼ね、従来のように補助ばねが不要でこれを囲むケースがなくなり熱処理で自由に機械的性質が変更できるので一定圧力、硬度のものができる。またブシードコンタクト用 B 銅合金は硬度がブリネル 90 以上でしかも導電率 80% で、いずれも本質的に焼鈍あるいは腐食しにくい理想的な材料である。8 表は銅、A 銅合金、B 銅合金の各板を 250°C で 1 時間空気中で焼鈍後の硬度の比較を示すもので、銅は焼鈍前ショア 20 位のものが半分の

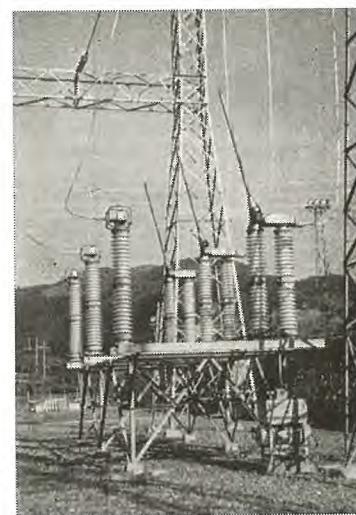
7 表 コンタクト材料の 250°C  
1 時間焼鈍後硬度比較

材 質	焼 鈍 前	焼 鈍 後
銅	ショア 18~20	10~10.5
A 銅合金	ショア 32.5~36	31~34
B 銅合金	ブリネル 93~100	93



29 図 H型水平切屋外断路 80.5 kV 800 A

Fig. 29. Type H outdoor disconnecting switch 80.5 kV 800 A horizontal break type.



30 図 V型垂直切屋外断路器  
230 kV 1,200 A

Fig. 30. Type V outdoor disconnecting switch 230 kV 1,200 A vertical break type.

10位に減少するがA銅合金、B銅合金板はなんら変化しないから当社製断路器は温度上昇でコンタクトの劣化が進行しないことが判る。当社の屋外断路器のコンタクトは以上述べたように、熱処理にて自由に機械的性質を改善し得、導電率高く焼鈍腐食されにくい特殊な銅合金材料を使用し、かつ予備あるいは補助的に銀メッキを施してコンタクトの耐久性の根本問題を解決している。

#### イ. 氷雪対策

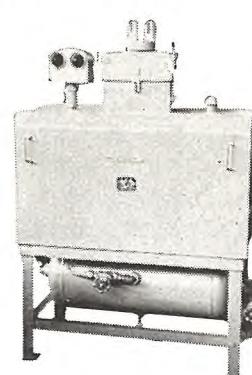
29図は関西電力豊崎変電所に納入された水平切型の80.5kV 800Aの当社H型屋外用断路器で、30図は九州電力山家変電所に納入された垂直切型の230kV 1,200AのV型屋外用断路器である。いずれもいわゆる回転ブレード方式の線接触のコンタクトを採用しているので、使用電圧には無関係でわずかの操作力で開くことができ、ブレードはコンタクト圧力が開放せられてから動くので、軽快で、氷結等の場合も大きな力をコンタクトに加えることができて楽に開閉でき、投入に際しても「コンタクト受けはさみ板」にはさまたった雪や氷をたたき出して完全に投入できる。しかしこのブレード機構形式のものの設計に当っては操作をより軽快ならしめるにはピンやベアリングの数をできるだけ減少すると共に、これらが直接露天にさらされて腐食、塵埃、氷結等で、その機構を失わないようケース内に納めが必要である。また高圧のものはコロナ損失を招かないようだけ突起部分を少なくすることが好ましく、余分のレバーあるいはリングがケース外にあると氷結で操作不能となる恐れがある。以上の点を考慮して当社の屋外断路器のブレード機構は単純でできるだけ動く部分が少く流線型化されている。31図は氷結試験中のV型断路器である。

#### ウ. 操作方式

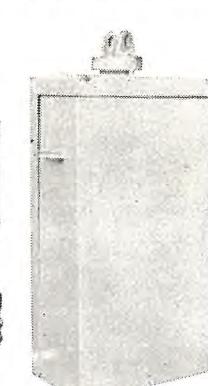
手動操作方式の外に最近の発電所用には遠隔操作ができる圧縮空気操作方式および電動機操作機構が多く用いられる。遮断器の操作に圧縮空気が用いられるので屋外



31図 氷結試験中のV型屋外用断路器  
Fig. 31. V type outdoor disconnecting switch under frosting test.



32図 屋外用断路器圧縮空気操作機構  
Fig. 32. Pneumatic operated mechanism for outdoor disconnecting switch.



33図 屋外用断路器電動操作機構  
Fig. 33. Motor operated mechanism for outdoor disconnecting switch.



34図 161kVH型屋外用断路器による30,000kVA変圧器励磁电流遮断試験

Fig. 34. Magnetizing current interrupting test scenery 161 kVH type outdoor disconnecting switch transformer 30,000 kVA.

遮断器の操作もほとんど圧縮空気操作方式が用いられているが、電動機操作方式も圧縮空気操作方式のように配管施設、空気漏洩の必要もなく配線だけで、簡単容易に据付ができるので重宝がられている。32図は圧縮空気操作機構で33図は電動機操作機構である。

#### エ. ラップ型碍子

碍子にラップ型が最近採用されたが、また値段と耐久性に対する製造方法の根本解決が充分でないので全面的には当社は採用していない。これらの点が解決されるならば機械的強度が強く、電気的特性もよいラップ型碍子に移るものもそんなに遠い将来ではないであろう。

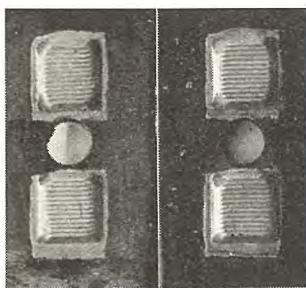
#### オ. 遮断能力

現場において屋外断路器の遮断し得る励磁电流、充電々流あるいはループ電流の限界は所々で実験され或る程度の結論が得られたようだ。幾何学的な関係寸法で遮断能力が定まるので特に大きい電流の遮断を要する場所には別に負荷断路器を考えなくてはならない。

簡単に空気吹付等で遮断能力を増そうとしても異常電圧発生の危険もあり慎重に計量しなければならない。34図は東北電力柳津発電所納め161kV H型断路器による30,000kVA変圧器励磁电流遮断中の光景である。

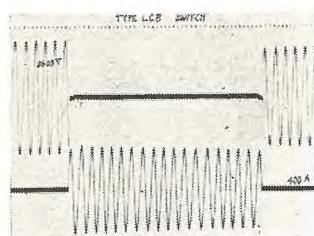
#### 8. 屋内負荷遮断断路器

発電所の所内変圧器あるいは



36 図 LCB 型断路器ブレード  
(200,000 回操作試験後)

Fig. 36. Blade contact of type LCB interrupter switch after 200,000 times operation test.



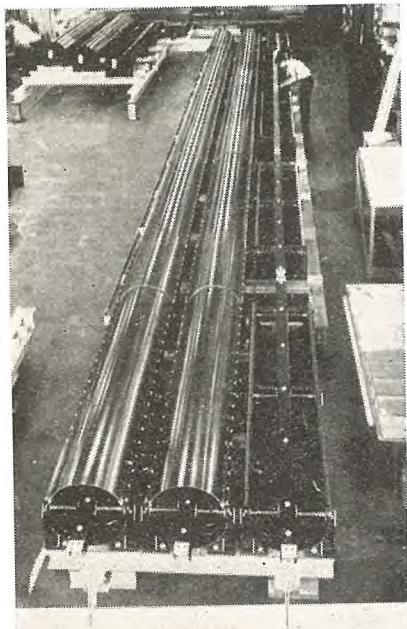
37 図 LCB 型負荷断路器遮断試験オシロ

Fig. 37 Oscillogram of load current interruption test by type LCB load interrupter switch.

は母線切換、1次フィーダーの区分のようにほとんど開閉しないが、時たま負荷電流が流れている状態のままで断路する場合に使って便利なLCB型屋内用断路器がたくさん納入されている。35図に示すようにLC型断路器に早切機構の補助アーキングブレードを付け、尿素樹脂板の細隙中で電弧を発生せしめて発生ガスで消弧するものである。負荷電流遮断回数は、負荷電流の大きさならびに力率で異なるが、力率0.5の回路で500回まで可能な電流は3.45kVで、400A、6.9kVで200A、15kVで100A、23kVで100Aである。コンタクトは36図に示すような、銀の多重線コンタクトで非常に操作力が軽く、20万回の操作回数試験にもあまり損耗することなく耐えた。この種断路器に電力ヒューズを直列にしてあまり使用頻度の多くない発電所屋内の適当な場所に用いれば遮断器の節約になって非常に経済的である。37図は3.6kVで400Aを遮断したオシロで電弧時間は1c/s以下である。

## 9. 相分離母線

最近の大きな水力発電所、あるいは火力発電所にはアメリカ合衆国の発電所で採用せられている、相分離母線が使用された。従来は13.2kVあるいは11.5kVの発電機電圧回路はケーブルを使用していたが、電流容量が増加していくと値段が非常に高くな



38 図 組立中の 13.2 kV 4,000 A 相分離母線

Fig. 38. 13.2 kV 4,000 A Isolated-phase bus under assembling.

ると信頼性が相分離母線に劣りかつ母線に接続すべき変成器その他のもののつなぎ込みが大変やっかいになってくるのでだんだん相分離母線に変りつつある。38図は当所で製作中の13.2 kV 4,000 Aの相分離母線の写真で各相別々に円筒チューブの両側からの支え碍子で筒中央に匂の字型に向い合って曲げられた銅母線を配置したものである。短絡電流に対する機械的強度を充分考慮して円筒型チューブとして強力な碍子を用いてあることはもちろんあるが、電流による温度上昇も考慮して大きい定格電流のものは外装チューブはアルミ合金製である。しかし約4,000 A以下では建物の費用を考慮しても、ケーブルの方が経済的であるが、これからの大発電所のように短絡容量が増してきては発電機側に遮断器のないユニットシステムが採用されるから、発電機母線の信頼性は発電機保護の見地からとくに考慮されなければならない。したがって機械的にも強く、碍子絶縁だから半永久的の絶縁信頼性のある相分離母線の採用は経済的にばかりは処理はできない問題である。

## 10. 乾式計器用変成器

従来乾式計器用変成器にはワニスあるいはコンパウンド含浸のものを製作していたが最近のレジン絶縁材料の進歩は、ダイヤレジン含浸型の乾式計器用変成器を市場に出さずに至った。ダイヤレジンとはいわゆるポリエス

8表

測定項目	測定時間	吸湿条件 96% R/H	
		1日 室温 26°C	48日 室温 16.5°C
ダイヤレジン	1次	絶縁抵抗 (Ω)	$1.88 \times 10^{12}$
		$\tan \delta$ (%)	2
	アース	容量 (P.F.)	99
コンパウンド	1次	絶縁抵抗 (Ω)	$2.13 \times 10^{10}$
		$\tan \delta$ (%)	6
	アース	容量 (P.F.)	9.8

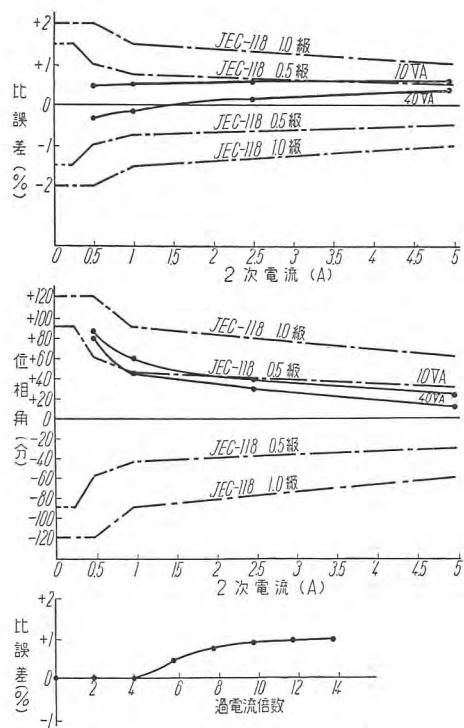
9表

測定項目	測定温度					
		150°C	120°C	90°C	60°C	28°C
ダイヤレジン	1次	絶縁抵抗 (Ω)	$2.00 \times 10^8$	$1.48 \times 10^9$	$2.63 \times 10^{10}$	$3.75 \times 10^{11}$
		$\tan \delta$ (%)	9.4	2.62	2.0	3.1
	アース	容量 (P.F.)	145	133	128	124
コンパウンド	1次	絶縁抵抗 (Ω)		$4.05 \times 10^7$	$2.90 \times 10^8$	$2.24 \times 10^{10}$
		$\tan \delta$ (%)		50<	24.8	74
	アース	容量 (P.F.)		180	147	120

39 図 ダイヤレジン含浸変流器  
6.9 kV 600-300/5 A  
40 VA

Fig. 39. Diaresin impregnated current transformer 6.9 kV 600-300/5 A 40 VA.





40 図 BS 型計器用変流器確度曲線  
定格負荷 40 VA 300 A (ブッシング型) 160 kV  
Fig. 40. Current transformer accuracy curves

テル系のレジンであって、従来のコンパウンドと違って重合反応によって硬化し、硬化時に揮発性ガスを全然発生しないのでレジン内部に気泡を残さない。また硬化前のレジンは粘度が非常に低くコイル細部まで良く含浸されるから耐吸湿性は、8表のように非常に優秀で、しかも、9表の加熱耐久試験に示すように従来のワニスあるいはコンパウンド含浸の変成器では、80°C以下でなければ使用に耐えないので、120°Cの連続運転でも、劣化は

見られず、絶縁抵抗も1桁違う程優秀である。39図は、6.9 kV用、600-300/5 A 40 VA ダイヤレジン含浸型変流器で、この型式の出現は従来の吸湿による絶縁低下も考えられないから、これによって起る事故は皆無となるであろう。

## 11. 套管型変流器

冷間圧延法によって製作される特性の良好な電気鉄板帶が小量ながら入手できるようになつたので、これを利用して套管型変流器を製作すると、かつての巻線型変流器より特性の良好なものができ、従来の套管型変流器は特性が悪くて使いものにならないという概念を廃止しなくてはならなくなつた。40図は195 kV 300/5 A 40 VA の套管型変流器の特性でゆうゆう、JEC 0.5%級に合格し、かつ當時は磁束密度が低い所で使用されるから、過電流特性が非常によいことは当然で、繼電器用としても充分使用できる。また低電流用套管型変流器でも Biased core 方式の採用によって特性は改善され、絶縁の劣化の心配のないことと相まって、今後は変圧器遮断器套管あるいは屋内断路器碍子柱に入れるとかして、できるだけ多く使用することを考えるのが賢明である。

## 12. むすび

上述した当社のスイッチギヤーのいろいろは最近の当社の技術水準を示すものでとくに発電所機器特集号に書いたのではあるが変電所あるいは一般工業受電にも応用できる点が多いと思う。建設計画にしたがって最新の技術を取り入れた最優秀の機械を選択購入することが建設技術者にとっての喜びであり、苦労であることを考えると、われわれ売込側の製造会社技術者として製品の開発改良にますます研究努力を致したい。

# 三菱スタートバントファンの風量制御

長崎製作所 宮内貞夫\*

## Air Volume Control of Startvant Fans

Nagasaki Works Sadao MIYAUCHI

The latest steam power stations having large capacities are essentially provided with highly efficient apparatus, also taking into account the automatization of maintenance.

Boiler draft fans of higher efficiency are then called for coping with the circumstances. The control of air volume by means of an inlet vane and a two speed motor has been proved highly efficient in the partical load, quickly responding to the fluctuation. Mitsubishi Startvant-Fans are the answer to such a requisition.

### 1. まえがき

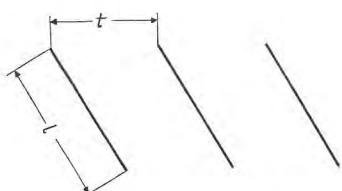
最近大容量の火力発電所が新設され、設備全体の高能率化および保守の自動化が行われている折柄、ボイラ用通風機もますます高性能のものが要求されるようになった。

ボイラ通風装置として、吸込ベーンと2段速度電動機を用いると、部分負荷の通風効率が良くなり、負荷の変動に対して迅速に対応できる。

ボイラの経済出力に対する通風容量は2段速度電動機の低速度で、最大出力に対する通風容量は高速度で満足される場合が多いが、設計の都合で経済出力が高速度の範囲にはいる場合とか、経済出力から最大出力に移る場合には、通風機の速度変換の問題が起る。

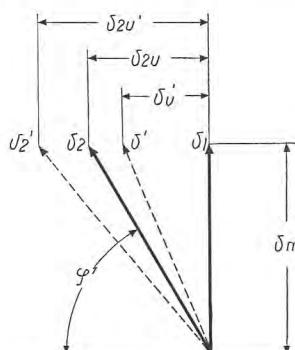
ボイラの出力に見合った通風をするためには、蒸気量とか蒸気圧とかの出力の変動に応じて燃料量を変え、さらに一定の燃料空気比にしたがって給気量を変えるとか直接ボイラの出力に応じて燃料量および空気量を変える方法がある。

ボイラの出力変動に空気量を追随させるには、出力変動の検出および空気量調節の時間的遅れが少く、検出量および調節量が出力変動に正比例することが望ましい。



1 図 吸込ベーンの展開

Fig. 1. Section of inlet vane.



2 図 吸込ベーンの速度線図

Fig. 2. Speed of inlet vane.

一方ボイラの炉内圧力が大気圧より大きくなると熱空気を吹出し、大気圧より小さくなると冷空気を吸込むので、炉内圧力を-1ないし-4 mm水柱に保つことが必要になる。したがって押込通風機の風量が多過ぎるとか、誘引通風機の風量が少な過ぎることは危険である。ここではボイラの自動燃焼装置と連動する吸込ベーンおよびベーン操作機構に必要な性能と、2段速度電動機の極数変換について述べる。

### 2. 吸込ベーンの性能

#### ア. 記号

吸込ベーンは通風機吸込口に放射状に配置した可動案内羽根で、通風機の部分負荷に対する性能を改善する目的を持っている。

吸込口は円錐形になっていて、その頂点を中心とする球面上では吸込速度は一定である。羽根は吸込口の背円錐面に取付けられているので、多少のずれがあるが一応この球面上にあるものと考える。

1図および2図は吸込ベーンを軸と同心の円錐面で切断し、それを展開して得た翼列の図および速度線図である。

これらの図に関係して諸元の記号をつきの如くきめる。

$v$	絶対速度	$\Gamma$	循環
$\theta$	取付角 ( $=\varphi-\alpha$ )	$A$	揚力
$\varphi$	入射角	$W$	抗力
$\alpha$	迎角	$t$	ピッチ
$\rho$	流体密度 ( $=\frac{\gamma}{g}$ )	$l$	弦長
$\gamma$	単位体積重量	$r$	半径
$g$	重力加速度	$Z$	翼数
$C_a$	揚力係数	$p$	圧力
$C_w$	抗力係数	$h$	損失水頭

$$\varepsilon \text{ 抗揚比 } \left( = \frac{C_w}{C_a} \right) \quad F \text{ 空気力}$$

接尾語

$m$ 軸方向	$1$ 入口側	$o$ 外半径
$u$ 周方向	$2$ 出口側	$i$ 内半径

#### イ. 旋回速度および仕事

空気は  $v_1 = v_m$  の速度で流れ込み、損失がなければ  $v_2'$  の速度で流れ去るはずのものが、実際は  $v_2$  の速度で流れると考える。

羽根にかかる揚力および抗力は、 $v_1$  と  $v_2'$  の幾何平均  $v'$  に直角および平行の方向に作用するとした。

いま翼列中のスパン  $dr$  の 1 翼にかかる揚力および抗力は

$$\begin{aligned} dA &= \rho \Gamma v' dr \\ dW &= \varepsilon \rho \Gamma v' dr \\ \Gamma &= 1/2 \text{ Cal } v' \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (1)$$

半径  $dr$  の部分の翼素にかかる周分力および軸分力は

$$dF_u = \rho \Gamma z(v_m - \varepsilon v_{2u}/2) dr \quad (3)$$

$$-dF_m = \rho \Gamma z(v_{2u}'/2 + \varepsilon v_m) dr \quad (4)$$

運動量の理論から

$$dF_u = \rho(\Gamma + \Gamma') v_m z dr \quad (5)$$

$$\Gamma/t = v_{2u}' \quad \Gamma'/t = v_{2u} - v_{2u}' \quad (6)$$

(3) (5) (6) より

$$-\Gamma' = \frac{\varepsilon v_{2u} \Gamma / 2}{v_m - \varepsilon \Gamma / 2t} \doteq \frac{\varepsilon v_{2u}}{z v_m} \Gamma \quad (7)$$

$$\frac{\Gamma}{t} = \frac{v_{2u}}{1 - \varepsilon v_{2u} / 2v_m} \doteq v_{2u} (1 + \varepsilon v_{2u} / 2v_m) \quad (8)$$

オイラーの式より

$$(p_2 - p_1)/\gamma = -v_{2u}^2/2g - h \quad (9)$$

したがって

$$\begin{aligned} -dF_m &= 2\pi r dr (p_2 - p_1) \\ &= 2\pi r (\rho v_{2u}^2 / 2 + \gamma h) \end{aligned} \quad (10)$$

(4) (6) (10) より

$$h = \frac{\varepsilon \Gamma}{gt} \left[ \frac{v^2}{v_m} + \frac{\Gamma}{4t} \frac{v_{2u}}{v_m} \right] \doteq \frac{\varepsilon v_{2u}}{g v_m} \left[ v_m^2 + \frac{v_{2u}^2}{2} \right] \quad (11)$$

循環が一定の時

$$v_{2u}' = \Gamma/t = c/r \quad c = z \Gamma / 2\pi \quad (12)$$

を (11) に入れて

$$h = \frac{c\varepsilon}{gr} \left[ v_m + \frac{c^2}{2v_m r^2} \right] \quad (13)$$

吸込ベーンの損失は

$$\begin{aligned} L &= \int_{r_i}^{r_o} \gamma 2\pi r v_m h dr \\ &= 2\pi \varepsilon \rho c \left[ v_m^2 (r_o - r_i) + \frac{c^2}{2} \frac{r_o - r_i}{r_o r_i} \right] \\ \frac{L}{\pi r_o^2 \rho \varepsilon v_m^3} &= 2s \left[ 1 - \nu + \frac{s^2}{2} \frac{1 - \nu}{\nu} \right] \quad (14) \end{aligned}$$

$$s = c/r_o v_m = v_{2u0}/v_m$$

$$\nu = r_i/r_o$$

吸込ベーンの有効仕事は

$$E = \int_{r_i}^{r_o} \gamma 2\pi r v_m \frac{v_{2u}^2}{2g} dr$$

$$\begin{aligned} &= \pi \rho v_m c^2 \log r_o/r_i \\ \frac{E}{\pi r_o^2 \rho v_m^3} &= -s^2 \log \nu \end{aligned} \quad (15)$$

(2) (6) より

$$\text{Cal}/t = 2v_{2u}'/v' = 4 \cos \varphi' \quad (16)$$

W 式では

$$l/t = \mu > 1 \quad (17)$$

(6) (16) (17) より

$$\begin{aligned} v_{zu} &= \frac{v_{2u}'}{1 + \varepsilon v_{2u}' / 2v_m} \\ &\doteq v_{2u}' \\ &= k v_{2m} \\ k &= 2 \cot \varphi' \end{aligned} \quad (18)$$

吸込ベーンを通過した後の気流の圧力平衡より

$$\frac{v_{2u}^2}{r} + v_{zu} \frac{dv_{2u}}{dr} + v_{zm} \frac{dv_{2m}}{dr} = 0 \quad (19)$$

(18) (19) より積分常数を  $D$  として

$$v_{2m} = D r^{-\frac{k^2}{1+k^2}} \quad (20)$$

$$v_{2u} = k D r^{-\frac{k^2}{1+k^2}} \quad (21)$$

$$D = \frac{(2+k^2)}{2(1+k^2)} \frac{r_o^2 - r_i^2}{r_o^{2+k^2} - r_i^{2+k^2}} v_m \quad (22)$$

吸込ベーンの損失は

$$\begin{aligned} L_W &= \int_{r_i}^{r_o} \gamma 2\pi r v_{2m} h dr \\ &= 2\pi \varepsilon w \rho D^3 \frac{k(1+k^2/2)(1+k^2)}{(2-k^2)} \\ &\quad \times \left[ \frac{r_o^{2-k^2}}{r_o^{1+k^2} - r_i^{1+k^2}} \right] \\ &= \frac{L_W}{\pi r_o^2 \rho \varepsilon w v_m^3} \\ &= \frac{k(1+k^2/2)(2+k^2)^3}{4(1+k^2)^2(2-k^2)} \frac{(1-\nu^2)^3 (1-\nu^{1+k^2})^3}{(1-\nu^{1+k^2})^{2+k^2}} \end{aligned} \quad (23)$$

吸込ベーンの有効仕事は

$$\begin{aligned} E_W &= \int_{r_i}^{r_o} \gamma 2\pi r v_{zm} \frac{v_{2u}^2}{dg} dr \\ &= \pi \rho D^3 \frac{k^2 (1+k^2)}{(2-k^2)} \left[ \frac{r_o^{2-k^2}}{r_o^{1+k^2} - r_i^{1+k^2}} \right] \\ \frac{E_W}{\pi r_o^2 \rho v_m^3} &= \frac{k^2 (2+k^2)^3}{8(1+k^2)^2 (2-k^2)} \frac{(1-\nu^2)^3 (1-\nu^{1+k^2})^3}{(1-\nu^{1+k^2})^{2+k^2}} \end{aligned} \quad (24)$$

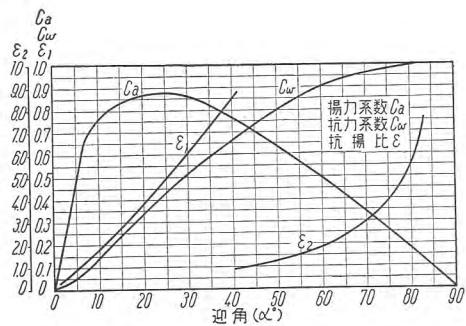
(23) (24) の比を  $\lambda$  とおけば

$$\lambda = \frac{L_W}{E_W} = 2 \varepsilon_w \frac{1+k^2/2}{k} \quad (25)$$

3 図は吸込ベーンを平板と考えた時の翼型特性である。実際の吸込ベーンの断面は、4 図のように中高になっているから、迎角  $0^\circ$  附近では大分異なる。

5 図は入射角と迎角の関係、6 図はベーン取付角と  $k$  の関係を示す。

7 図は取付角と  $\lambda$  の関係を示す。実際のベーンでは



3 図 平板翼の特性

Fig. 3. Characteristic curves of flat plate.

点線のように最底値ができる。

8 図は吸込ベーンの損失と有効仕事の関係を示す。無次元にした形では、循環一定の理想的場合と現在の吸込ベーンの損失はほぼ同じになるが、実際は抗揚比が違うためその差は相当大きくなる。

9 図は現在の吸込ベーンの有効仕事と同量の仕事を、理想的ベーンで行わせた時の  $k$  と  $s$  の関係を示す。

#### ウ. 通風機の効率変化

吸込ベーンによる減少動力  $E_0$  は

$$E_0 = \rho \psi Q u_i c_{ci} \quad \dots \dots \dots (26)$$

とすれば (14) より

$$C_{ci} = \sqrt{3 r_0 S v_m / z R_i} \quad \dots \dots \dots (27)$$

(26) (27) より

$$\begin{aligned} & \frac{E_0}{\pi r_0^2 \rho v_m^3} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} (1 - \nu^2) \psi \frac{r_0 \omega}{v_m} S \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (28)$$

ここで

$R_i$  扇車内半径

$\omega$  角速度

$U_i$  内半径の周速

$\psi$  汚り系数

$C_{ci}$  内半径での絶対周分

速度

(14) (23) (28) より部分負荷の効率は抗揚比  $\epsilon$  または  $\epsilon_w$  によって変わる。

### 3. ベーン操作機構の性能

吸込ベーンの回転角と吐出風量の関係は、風路抵抗の大小によって変化するもので、一般に曲線で示されるが、ベーンと操作機構との間にリンク機構を入れると、ある程度正比例関係に近付けられる。

操作機構回転角  $\theta$  と主電動機回転数  $n$  は吐出風量  $q$  に比例すると考えると

$$q = \frac{n_f(\theta)}{n_0(\theta_0)} q_0 \doteq \frac{n\theta}{n_0\theta_0} q_0 \quad \dots \dots \dots (29)$$

ここで 0 は最大風量の点を示す。

2 段速度電動機の極数変換時にも風量変化は少ないとすれば

$$n\theta = \text{一定} = K \quad \dots \dots \dots (30)$$

主電動機は最初の回転数  $n_1$  から一定のトルクで加速されるとすると

$$n = n_1 + nt \quad \dot{n} = dn/dt \quad \dots \dots \dots (31)$$

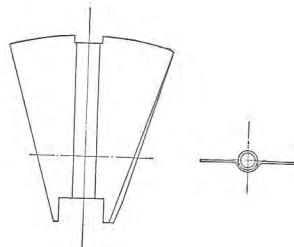
したがって  $\Theta$  を時刻  $t=0$  の回転角とすれば

$$\theta = \Theta [1 - nt/n_1 + (\dot{n}t/n_1)^2 \dots \dots] \quad \dots \dots \dots (32)$$

$$\dot{\theta} = d\theta/dt = \Theta [-\dot{n}/n_1 + 2\dot{n}t^2/n_1 \dots \dots] \quad \dots \dots \dots (33)$$

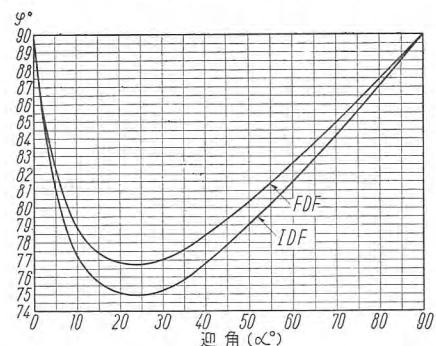
$$\ddot{\theta} = d^2\theta/dt^2 = 2\Theta(\dot{n}/n_1)^2 \quad \dots \dots \dots (34)$$

一般に時刻  $t=0$  でベーンは静止しているから、操作機構に衝撃を与えないで上式を満足させることはできない。操作機構には、ボイラの出力の微小変動に対応して



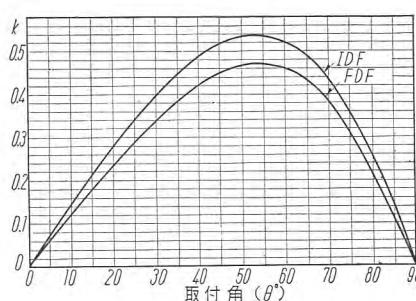
4 図 吸込ベーン

Fig. 4. Inlet vane.



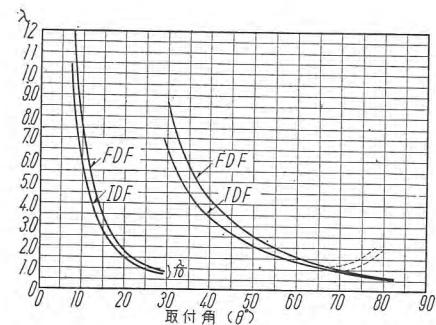
5 図 入射角および迎角

Fig. 5. Relation between  $\alpha$  and  $\phi$



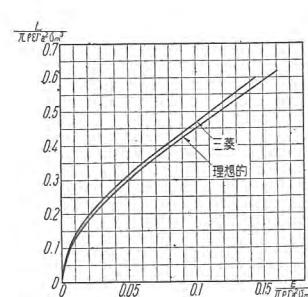
6 図 取付角と  $k$

Fig. 6. Relation between  $\theta$  and  $k$ .



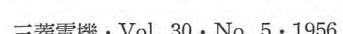
7 図 取付角と  $\lambda$

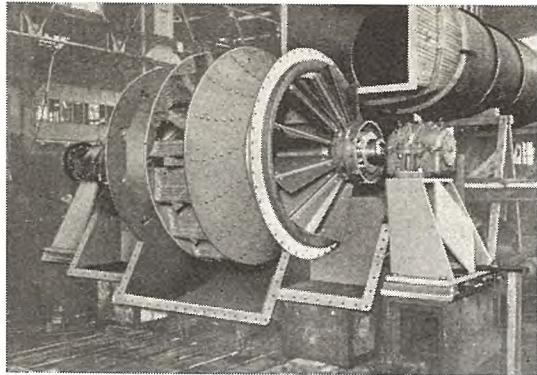
Fig. 7. Relation between  $\theta$  and  $\lambda$ .



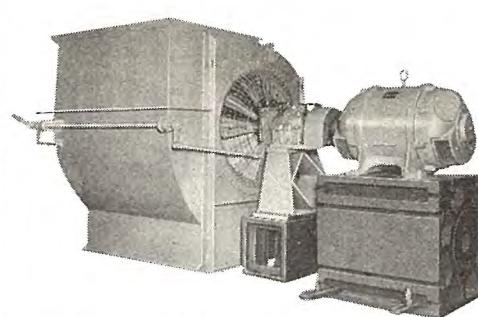
8 図 吸込ベーンの仕事

Fig. 8. Work done by inlet vane. Fig. 9. Relation of  $s$  with  $k$ .





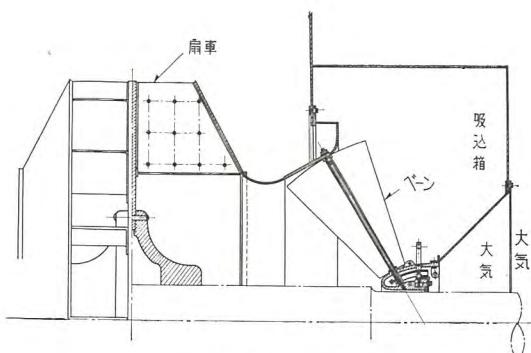
10 図 旭硝子向 ID-1006 両吸込ターボファン  
Fig. 10. ID-1006 DWDI turbovane fan.



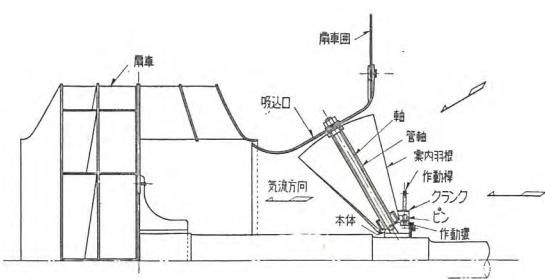
11 図 小野田セメント向 TV-100 両吸込  
ターボファン  
Fig. 11. TV-100 DWDI turbovane fan.



12 図 誘引通風機ベーン  
コントロール  
Fig. 12. Vane control of induced draft fan.



13 図 誘引通風機のベーンコントロール  
Fig. 13. Vane control of induced draft fan.



14 図 強圧通風機ベーンコントロール  
Fig. 14. Vane control of forced draft fan.

操作速度を遅くしたものと、 $-n\Theta/n_1$  に近く相当早くしたものとがある。

吸込ベーンおよびリンク機構の慣性は非常に小さいが、操作機構自身の加速に時間のかかるものは、操作速度が早くても不適当である。

通風機を高速から低速に移す時と、低速から高速に移す場合では所要時間と操作機構回転角が違うため

$-n\Theta/n_1$  は異なる。

したがって極数変換時の風量変化を少くするためには

- (1) 操作速度を  $-n\Theta/n_1$  に近くとる
- (2) 極数変換時の平均吐出量が、最初の吐出量より大きくならないようタイマリレーを置くことが必要である。

四国電力西条発電所納め通風機では

強圧通風機	高 → 低	$15.5^\circ/\text{sec}$
	低 → 高	$-16^\circ/\text{sec}$
誘引通風機	高 → 低	$6.9^\circ/\text{sec}$
	低 → 高	$-3.8^\circ/\text{sec}$

であった。

電動機および通風機加速時間は、余裕トルクおよび慣性モーメントによって変化するから、ある程度角速度を合わせることは可能である。

#### 4. む す び

以上の説明によって三菱スタートバントファンの特長性能はおわかりと思うが、これを要約すれば、

1. ベーンの翼型性能を変えた時の仕事の関係は、8図で示されるように、大略  $\delta$  によって変わる。
2. 循環を一定に近付けると9図のようにベーンの角度が良くなる。
3. ベーン操作機構は(32)~(34)の条件を満すようなものが必要である。

近代の大容量火力発電所の高能率運転には、自動燃焼制御は必要かくべからざるものであり、その一環としてベーンコントロールをもつ三菱スタートバントファンの重要性は言をまたないところである。

ここにその性能の一端をのべて需要家各位のご参考に供する次第である。

# 発電所と工業用テレビジョン装置

無線機製作所 馬場文夫\*・嶋村和也\*\*

## Television Equipment for Power Stations and Industry

Engineering Laboratory Fumio BABA・Kazuya SHIMAMURA

Television equipment for industry is now being put to practical use in various fields with general acknowledgement of its usefulness. Especially, when the equipment of power stations is turned to automatic operation with higher degree of accuracy, the television equipment comes in as an important element to play the part of central supervision. It is also used as an indispensable apparatus to back-up other automated machines.

### 1. まえがき

工業用テレビジョン装置が各種産業に用いられて、作業の安全化、集中化、および企業の合理化等に役立つことは今日すでに常識になっているが、わが国においてはその価格、利用分野に対する理解の点、定量的な価値判断の資料不足などの点から、未だ余り広くは使用されていない。現在最も多く利用されているのは発電所関係の分野で、その主な用途としてはつぎのようなものが挙げられる。

火力発電所 炉内燃焼状況の監視、ボイラ水位計の監視、煤煙濃度、発煙量および色の監視など。

水力発電所 壁堤水位の監視、取水口の流木等監視、水門の開閉状況監視など。

その他 メータ指示の伝送、屋内屋外機器の概況監視など。

工業用テレビジョン装置の概要、設計に関する一般的な問題および当社で製作している機器の具体例についてはすでに詳述されているので、ITV 自体に関する説明は、各種の方式の ITV がどのように利用されているかという点にとどめ、今回はとくに、上記発電所関係の応用として各種利用法、それに伴って生ずる問題点、および発電所関係機器としての希望点等について、実例を併記しながら述べることにする。

### 2. ITV の方式と発電所方面への応用

#### ア. ITV の方式

発電所用として



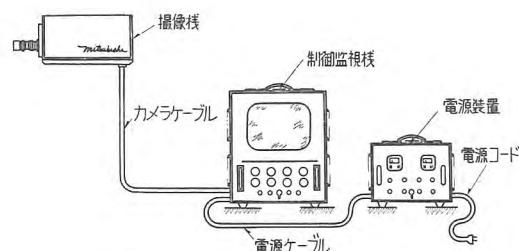
1 図 (b) 撮像機  
Fig. 1. (b) T. V. camera.

ITV を考えるとき、つぎの 2 種に大別される。

#### (1) 近距離用 (当社 IT-1 型および IT-2 型)

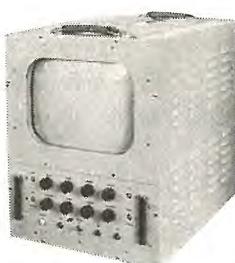
この形式のものの構成は 1 図のようになっており、監視場所にある制御監視機から、直接撮像機が制御され、また、取出した映像信号は、生の周波数成分のままで、撮像機から制御監視機に送られる。この方式によるときは、装置が簡単になると同時に、生の映像信号を送るために映像の質も非常によく、しかも短い閉回路を形成しているために、独自のテレビジョン方式を楽に採用することができ、ITV としての特長を有効に發揮することが可能である。

この方式のものは、火力発電所用として使用する ITV のように、概して近距離のものに適しており、距離が伸びるにつれて、実現が困難になる。

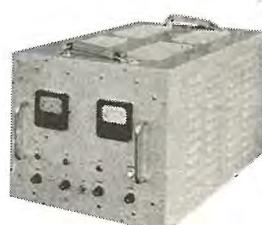


1 図 IT-1 型工業用テレビジョン装置  
(a) 系統図

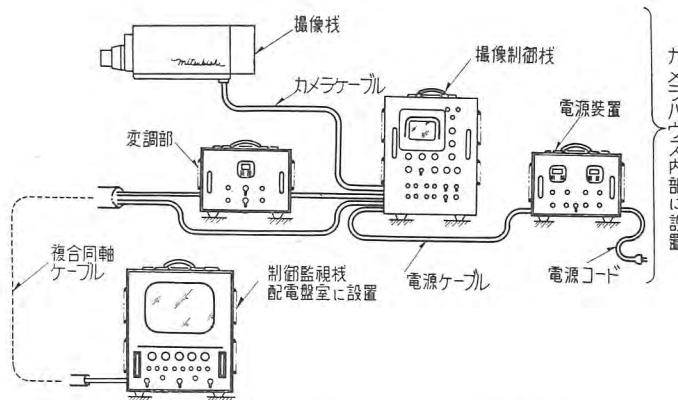
Fig. 1. (a) System diagram of industrial television equipment type IT-1.



1 図 (c) 制御監視機  
Fig. 1. (c) Supervisory control equipment.



1 図 (d) 電源装置  
Fig. 1. (d) Electric power source.



2 図 IT-3 型工業用テレビジョン装置系統図  
Fig. 2. System diagram of industrial television equipment type IT-3.

一般に 300 m 以下の距離では、この近距離用が使用されているが、当社では、300 m 以上の中距離にも、この方式の改良型を採用し、非常な好評を得ている。

中距離用の ITV の構成が、近距離用と異なるところは撮像機の動作と監視機の動作の間に、ケーブル伝送をする時間差をもたせる遅延回路、または、進相回路を挿入することだけで、他は全く同様である。この遅延回路は、簡易なアタッチメントとして制御監視機の内部に組込まれ、簡単な方法で、生の映像信号を伝送するという。近距離方式の、特長を生かして良質の映像を維持することに成功している。

#### (2) 遠距離用 (当社 IT-3 型)

この形式のもの構成は、2 図のとおりで、監視場所にある制御監視機からは、直接の制御はできないので、1 度近距離用の制御回路に当る撮像制御機を通して、撮像機の制御を行う。映像信号の伝送は、ケーブルの距離が長くなるために、変調機により、1 度搬送波にのせて行い、監視場所で、これをさらに復調して、受像管を作させることになる。

この方式は、ケーブルを使用している以外は、放送用のテレビジョンの構成と同様で、近距離用に比し、複雑になると同時に、ある程度映像の質が、低下しやすくなるのも止むを得ない。

水力発電所の堰堤状況を監視するような場合にはこの方式のものとなる。

これらの近距離用、遠距離用の ITV において制御監視機の他に、放送用のテレビ受像機を、副受像機として、数台並列に使用することも可能で、その場合には、放送用のテレビジョンバンドの搬送波を変調する簡単な送り出しのアタッチメントを、付加させればよい。この方法を利用することによって、数カ所で同時に監視の目的を達することができる。

今まで使用されている ITV の方式は大別してこの 2 種であるが、伝送距離に難点があることと、遠距離になるためにケーブル架設費が高価になるという根本的な欠点がある。

距離の問題を、簡単に解決するには伝送周波数を低下させることが第一で、この点から ITV として独自のテレビジョン方式が考えられてもよいと思われる。たとえば、各種の計器類を遠方で監視するような場合、テレメータリングの発達した現在では、ITV は後述するように、テレメータリングの Back up 機器として価値を持つもので、この目的で考えるならば、普通の放送のテレビにおけると全く別の観点で考えることもできるわけである。現在の ITV はすべて眼で見ると同じような映像ということを考慮して、設計されているが、飛行機、船舶などの、航行にレーダーが重要な役割を果していることを見ても、必ずしも、眼で見る状況と完全に同じような映像である必要はない。ITV においてもレーダーと同様な繰返し周波数の低い走査方式と、残光性のブラウン管を使用すれば、映像周波数帯域を極度に減少させることができる。もしこのようにするならば、映像信号伝送用の搬送波周波数も普通の電力線搬送周波数程度に低下させることができ、その場合にはこの伝送距離の問題も簡単に解決できるものと考える。

#### イ. 撮像管

ITV には撮像管として主に小型で高感度のヴィディコン管が使用されているが、とくに照度の高い場所には、イメージディセクタが使用され、とくに照度の低い場合には、イメージオルシコンなどが使用される。簡易性、堅牢性等をとくに要望される ITV として、イメージオルシコン等の高級で、使用方法の難しい撮像管を使用することは好ましいとはいえないが、感度の点でとくに要求のある場合、現在ではその使用も止むを得ない実情である。

近年、米国で Plate 型の光増幅装置が開発され、数年後には実用の段階に入るといわれているが、このような装置の発達によって、テレビジョン用として、感度の点で難点のあった各種の撮像管が再検討される日も遠くないと考えられる。

### 3. 火力発電所における ITV の応用

#### ア. 炉内燃焼状況監視

これは、火力発電所に利用する場合に、第一に考えられる用途で、とくに近年 corner firing の方式を採用したボイラが多くなるにつれて、とくに重要な問題になってきた。すなわち、一方の側壁に全バーナがある形式のボイラでは、その逆側の側壁にある窓から 1 人の監視員が、監視することによって監視目的が達せられるが、corner firing のように四隅にバーナが配置されている場合には、通常 4箇所の窓から監視する必要があり同時にこれを行うためには、4 人の監視員を必要とし、もし 1 人で同時に監視するためには、ボイラ操作室から遠く離れたボイラ天井部に窓を設け、この不便にして危

険な位置から監視せねばならない。

また、ボイラ運転開始時によく起る小規模の back fire など、直接人間が監視する場合には危険のともなうことが多く、これらの危険、不便を除去するために、ITV は非常に有効であるといえる。

### (1) 設 置

実際に ITV を設置する場合の一例を 3 図～4 図に示す。この例は corner firing に対するものであり、ボイラ天井部から燃焼状況を監視する。

3 図は、ボイラに対する撮像機、制御監視機および電源部分の据付概況を示すもので、ボイラ天井部に撮像機、ボイラ操作盤に制御監視機を置き、制御監視機の画面を見ながら操作が行えるようになっている。

4 図、a, b, は、撮像機の装着部分を示すもので、ボイラ天井部にはテレビ用の観窓を開け、この外側に撮像機保護および防塵の目的で、強制冷却を行っている観窓装置が装着され、それを通してボイラ内部の状況がキャッチされる。

撮像機は制御監視機に 1 本のカメラケーブルで接続され、すべての操作はこのケーブルを通して行われる。

### (2) 観 窓

当社で使用している観窓の一例を 5 図に示す。

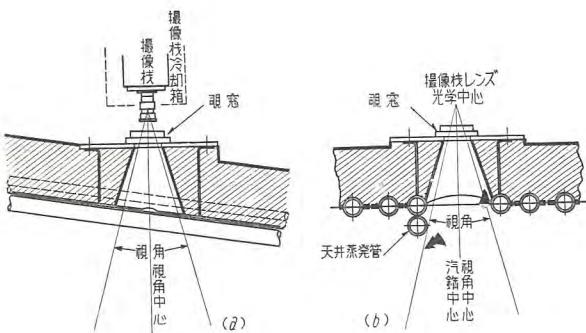
観窓は、耐熱ガラスで囲まれた冷却部を、ボイラ内部から飛来する煤煙および灰がガラス部分に付着することを防止する防塵部との 2 部分から成っているのが普通である。

従来、米国において使用されてきた観窓も、構造としては、大体このようになっているが、防塵用の噴出空気は、下側の耐熱ガラス下面に吹付けられた後、ボイラ内部に向って噴出する形式のもので、実験の結果では充分な防塵効果がないことがわかった。この種の構造のものでは石炭燃焼がほとんど大部である如き運転時においては、充分な効果を現わすが、運転開始の重油バーナ点火時のように油の細粒と煤煙および灰分の混った塵のある場合には、ほとんど効果がない。図示してある観窓は、この点を考慮して設計されたもので、2 重の噴出空気を使用した結果、ほとんど完全な防塵効果を発揮している。

観窓として要求される性能を列挙するとつぎのようになる。

a. 内部の状況が完全に見えること。

このためには、窓としてマカ板のようなものでなくガ



4 図 ボイラ観窓装着部分

Fig. 4. Part of boiler watching window.

ラスを使用しなければならない。

#### b. 高温に耐えること。

観窓部分は冷却せずに放置した場合 500° 以上になることが考えられ、さらにボイラ内部に向って数 10 cm 入った所では 900° 程度の高温になる。これがためガラスとしては、石英ガラス、パイガラスの如き耐熱ガラスが必要とし、さらに、強制冷却を行う必要がある。

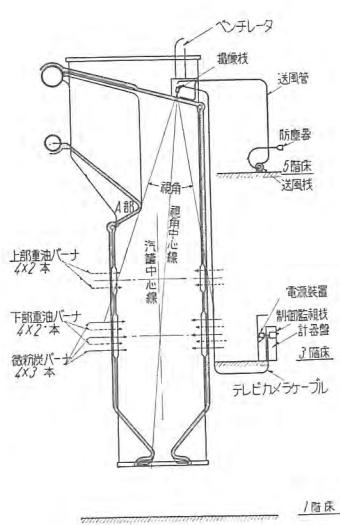
#### c. 熱線吸収

ボイラ内部が、非常に高温である場合ガラスを通じて輻射してくる熱線が、撮像管光電面に悪影響を与えないようにある程度熱線を吸収する必要がある。これがためには熱線吸収ガラスを併用するか、または、強制通水の如き手段を講じなければならない。

#### d. 防 塘

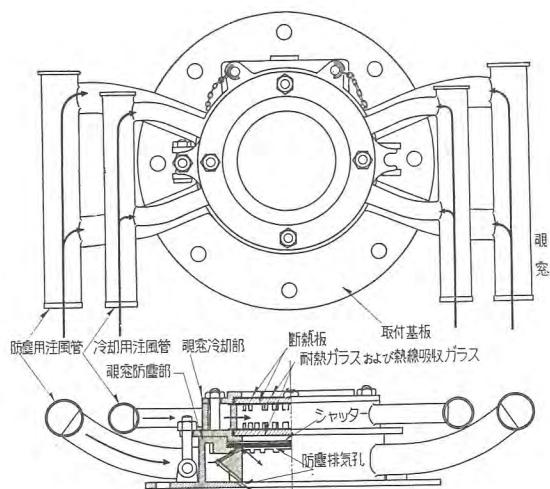
ボイラ内部から飛来する煤煙、灰分等がガラス面に付着するのを防止することが、必要である。このためには送風機によって、常時ガラス面とくに、ボイラの内部に面する部分の高圧の空気を送り、同時に冷却に役立てるような方法がとられている。

ガラス面に吹付ける空気は、ボイラ内部より吹上げる煤煙、灰等が、通常はガラス面に到達しな



3 図 Corner Firing のボイラに撮像機制御監視機および電源部の据付状況を示す

Fig. 3. T. V. camera for corner firing of boiler.



5 図 観 窓

Fig. 5. Watch window.

いように、充分強力なもので、また、それでも付着した塵に対しては、清掃効果の点より、とくに、吹付気流に死点や、渦ができるないように注意されねばならない。

#### e. 保守の便宜

耐熱、耐塵ガラスが、長期の使用により損傷を受けた場合、または、比較的大きなバックファイヤにより、ガラス面に重油タールが多量に付着した場合などには、ガラス部分を簡単に取外して点検できる必要がある。

そのため、観窓ガラス部分は簡単に着脱できるほか、耐熱鋼製シャッタを設けて点検時に炉内外を隔離できる構造とすることが望ましい。

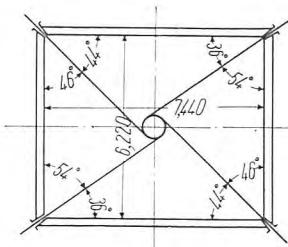
#### (3) ITV 本体

炉内燃焼状況監視の目的には、高い解像度よりもむしろ安定度と操作の簡便さが、要求される。

監視対象が焰であるから、とくに、高い感度は必要な運転開始時の、重油バーナ点火時のような時には、イメージディセクタの如き低感度の撮像管でも実用にはなるが、運転中の炉内白熱状況や、焰の分布を知るためには、微細な明るさの差を炉上部を浮遊する多量の灰を通して観察する必要があるので、これに適当な撮像管として、当社ではヴィディコン 6198 を使用し、安定度と簡易性の点からランダムインターレース方式を採用している。この実例として 7 図～10 図に点火時および運転中の、当社 IT-1 型による受像画面を示す。

#### (4) ITV を設置する場合のボイラその他に対する要望

本項にてとくに取扱った corner firing 方式のボイラでは、普通 4 図の如く上部に撮像機を装置するが、その撮像レンズの光学的中心より、全バーナ部が見渡せるだけの寸法、構造の観窓を設けておく必要がある。その位置は全バーナ口を見渡すに適



6 図 バーナ口におけるボイラ水平断面図

Fig. 6. Horizontal cross section of boiler at burner.

当な位置であることはもちろんであるが、燃焼に当って成るべく温度上昇が低く、また、塵埃の到着が少いような部分であることが望ましい。

炉の天井部は塵埃の影響が大きいので、バーナ口に比較的近い部分、たとえば 4 図 A 部に適当な観窓を設け、とくに、冷却に留意して設置すれば、監視の目的にも非常に好都合である。また、ボイラ底部にとくに強力な防塵装置をほどこした観窓を開け、この部分から監視することも一方法である。

これらの方法は、すべて一長一短があり、いずれが優れているとも断定はできないが、さらに、ボイラ自体の断熱処置や、構造にも一考が払われるべきだと考えられる。

いずれの場合も撮像機の設置場所は、小区域を設けて、ITV 専用位置とするとともに、通風、排気の便宜よく、加熱されることが比較的少いように、注意されることが望ましい。

### 1. 煙の監視

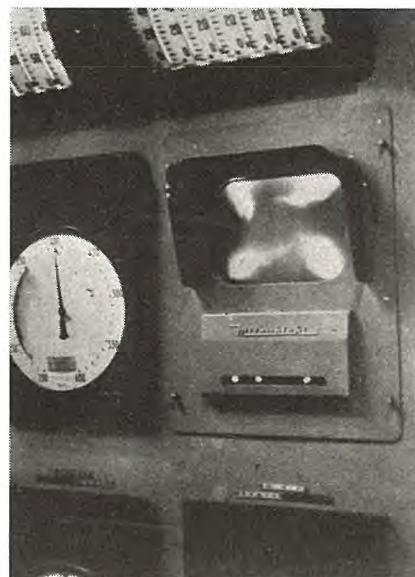
火力発電所において、炉内燃焼効率を高めるためには、とくに煙の量、濃度、色を知ることは重要な手段の一つである。とくにボイラ操作室にあって直接これを監視するならば、直ちに炉の運転調整に応用できるとともに、煤煙の害を軽減するためにも監視する非常な効果があるが、この要求を満たすためには、ITV が最も適している。

沢山のボイラを使用する発電所にあって、それらが、何本かの煙突に排煙されている場合、ITV の画面に同時に受像すれば、各炉の燃焼状況を直接に比較することができる。

#### (1) 設置および機器の方式

撮像機は、発電所本館の外で、煙突全部を適当な視角において見渡せる位置に、カメラハウスを設けて収容するが、その位置は成るべく太陽を背にする如き位置で、時刻、季節のいかんに拘らず、太陽を撮像範囲に含むことがあってはならない。

配電盤室とカメラハウスの間は、カメラケーブルにより接続し、撮像機に対し、レンズ絞調節、撮像管感度調節等を常時



7 図 計器盤前面より制御監視機画面を見た所、受像画面は重油バーナ点火時の炉内状況

Fig. 7. Supervisory control viewed from the front.



8 図 受像画面 重油バーナ点火時

Fig. 8. TV receiving image at igniting oil burner.



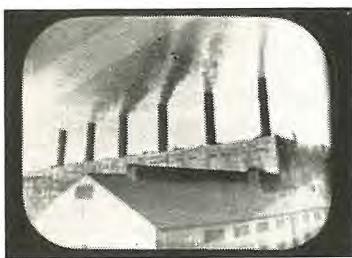
9 図 受像画面石炭専焼時中央の暗部は渦の中心

Fig. 9. TV image of coal firing.



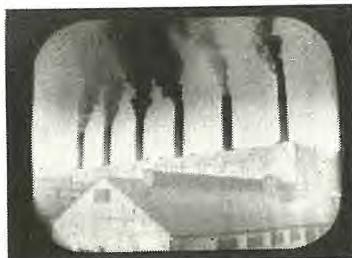
10 図 受像画面ストーブローを行った時

Fig. 10. TV image when soot blow is made given.



11 図 関西電力尼崎第一発電所における排煙監視実験時の受像画面（天候薄曇）

Fig. 11. TV image of watching smoke.



12 図 関西電力尼崎第一発電所における排煙監視実験時の受像画面（天候曇天）

Fig. 12. TV image of watching smoke.

受像側で調整できるのが望ましい。戸外に設けられたカメラハウスと受像機の間に必要なカメラケーブルの長さは、普通 200~500 m 程度必要である。

したがって普通は前述した遠距離用として、映像信号は同期信号と共に 40~100 Mc 程度の搬送波に乗せて、受像機に送られるが、この方式は、同期の安定性、画像の質および保守、価格の点より問題が多いので、当社では特殊な遅延回路を用いた非搬送式の中距離 ITV を開発した。本方式では IT-1 型を中距離非搬送式に改良したもので、比較的簡単な方式ではあるが優れた画像が得られる。本方式により、関西電力尼崎第一発電所における排煙監視実験時の受像画面を 11 図、12 図に示す。

撮像レンズは F1.5 程度の明るいものを使用し、カメラハウスをなるべく発電所建屋に近く、設置できるよう広角のものが望ましい。上記の例ではレンズは F1.5 13 mm 米国エルギート製を使用した。

## (2) 排煙監視用 ITV の特殊性とその対策

排煙監視の最も特殊な点は、照度が天候、時刻等によって変り、また光源の位置も時刻によって異なるし、背景の状況すなわち雲の有無、雲の色もつねづね変化するものありながら、ここで監視したいものは煙そのものの絶対的な色および濃度であるという点である。

機器としては、多数の煙突を同時に観察して、充分な視覚的効果があるよう充分な解像度が要求され、また煙を受像していくかなる時にも肉眼で見た時と色調、量、濃度の受像結果が異なることがあってはならない。また、撮像機、受像機間の距離が比較的長くなるので、その信号伝送の所要時間が画面のずれにならないような方式を用いねばならぬことは前項に述べたとおりである。

色を正しく知るために、天然色方式の ITV が望ましい所であるが、実際には煙の色は普通黒、白のいずれかであるか、またはその中間のことが多くその黑白の程度を知りたいので、この目的なれば Vidicon 管を用いた黑白式で充分達せられる。ただし、ヴィデコンの色温度特性を補正して、眼の視覚に近づけるために紫外線除去フィルタ (UV フィルタ) の常用が望ましい。

また、とくに黑白およびその中間色以外の煙の色を知りたい場合にはもちろん colour ITV が望ましいのである。

が、しかし黑白方式の ITV を使用しても、レンズ前面に各種の色ガラスフィルタを選択入替できる構造をとればフィルタを入れ替えた場合の色調の変化を見て煙の色を推定することができ、機器は確かに簡単でしたがって価格もずっと低廉になる。煙の量の問題については、たとえ画像が環境に対して相対的なものであっても、肉眼の場合と似たような視覚感覚を与える良好な ITV によれば、その量感が異って感じられることはまずないと考えられる。問題は比較的白い煙でもその量が、多い場合黒く映像されたり、照度によって黒い煙が比較的白く感じられたりする恐れがないかという点である。

煙の量が色感覚に影響する恐れは、煙を完全な反射光で観察する場合にはぜんぜんない。照明が煙の斜後方からあるような時にはその透過光線の影響で混同する場合も考えられる。この対策としては、1 日中煙ができるだけ太陽に対して反射光線で観察できるような位置に、カメラハウスを設置することによってほぼその目的が達せられるが、完全を期する場合は、カメラハウスを 2箇所に設けて 2台の撮像機を午前と午後に分けて切換使用するようにすればよい。照度や背景が変化した場合、そのまで正確な色感覚を得ることは甚だ困難である。

ITV そのものの照度に対する感度や背景に対するコントラストは受像機を操作して、撮像機のレンズ絞り、Vidicon のターゲット電圧、利得各調整を行えばいかなる環境にも順応できるのであるが、どのようにした場合に実際の視覚感覚に等しいかは、実際に煙を観察しないとよく判らないことが多い、そのためセッティングの操作を誤って色感覚の非常に異なる画像を得る恐れがある。

色感覚の誤認を防ぐ実際的な方法としては、煙突そのものが普通くすんだ中間色である場合が多いので、これを基準としてその煙突が実際の視覚に近い色合に感じられるように ITV セットを調整することである。

これをさらに、押し進めた対策としては、煙突の付近に煙の色の判断の基準となるような 3色に塗られたパターンを設け、それが肉眼で見た時に近いような画像となるようにセッティングの感度、コントラストを調整する方法がある。

実際には煙突の付近に、パターンを置くとその大きさは巨大となり、汚染した場合の清掃、取替が問題であるから、使用する広角度短焦点レンズの深い焦点深度を利用すれば、カーナーハウスに比較的近い所に設置すれば、そのサイズも小さくて済み、清掃、取替も容易になる。

また ITV セットとしては、いかなる照度の下でも眼の視覚感覚に近いような良質の画像を現わし得る必要がある。それには日の出、日の入り時刻の低照度にも充分な撮像ができるよう、撮像レンズは F1.5 程度の明るいものを用いるとともに、映像信号増幅器は高い S/N 比を

もつ回路を採用する必要がある。高照度に対しては遠隔制御により絞りを調節して、入射光線を制限するとともに target 電圧を下げる、撮像管の感度を下げる。

夜間は、本質的に使用できないが、高感度の Vidicon 撮像機を用いた場合、適当な照明が与えることができれば使用可能である。画像に現れるノイズを辛抱すれば、最低照度 100 lx 程度まで使用できる。

#### ウ. ポイラ水位計監視

ボイラの水位は、普通 2 色式指示器によって表示されるが、これを ITV によってボイラ操作室にて、直接監視することができる。この目的には色ガラスフィルタを併用することも有効である。すなわち、赤および緑の境界を監視するために、たとえば緑フィルタを撮像機レンズに装着すれば、画像を見て水位計ガラス筒のうち、明るい部分が水、暗い部分が蒸気の部分と見ることができるもの。

照明としては水位計裏面より、ガラス筒の部分だけ螢光灯により照明し、透過光により観察する方が、色彩の区別が明瞭で明るくできるので望ましい。

万一色境界の部分が画面外に外れた場合、水位計の明るさは 2 部分に別れない訳であるが、それが赤か緑かどちらの部分であるかの絶対的判断はつき難い。

普通の動作状況では、境界が画面を外れないように、セットする必要があるが、万一の場合を考慮して、絶対色の比較用に赤および緑の同種液体を満たしたガラス筒を、水位計に並べて配置し、同様の照明を行っておくと都合がよい。

### 4. 水力発電所における ITV の応用

水力発電所における通常の用途は、ダム堰堤の水位概況、水門の状況、取水口の流水等を発電所建屋内より、監視するために用いられている。

そのためにはダムの監視すべき箇所を見渡せる位置にカメラハウスを設置し、その中に撮像機および必要な機器を収容し、操作はすべて発電所側で行えるようにして、カメラケーブルにより両地点を結ぶ。

撮像機の包括角度は必要な detail すなわち、水位計の目盛等が読みとれる程度に狭く選び、遠隔制御によって撮像方向を自由に選んで、見たい所をクローズアップするよう構成される。監視対称が多岐に亘るため解像度は、機器が特別に複雑にならない範囲で、できるだけ高い所が望ましく、また、画像の質も良好でなければならない。

また、屋外の撮像が主であるので大きな明暗差に対する適応性をそなえる必要があることは、火力発電所排煙監視の場合と、同様である。

発電所と工業用テレビジョン装置・馬場・鳩村

発電所とダムの間は、普通相当長距離であるので、その間の映像信号伝送は一般に搬送方式による。

#### ア. カメラハウス

水力発電所ダム堰堤監視 ITV 用カメラハウスは、多くの役割をもっている。水力発電所ダムは通常山間地方の谷間に位置する訳であるので、まず厳しい気象条件に耐える必要がある。屋外据付用であるから風雨に対して、機器を充分保護するとともに、冬期には冰雪の付着により、視界が遮られぬよう適当な、暖房装置を設け、撮像窓は window-clearer により清掃できるようする必要がある。また、夏期には、太陽の直射により、カメラハウス内部の温度が上昇しすぎて機器に悪影響を与えないよう適当な通風設備も必要である。

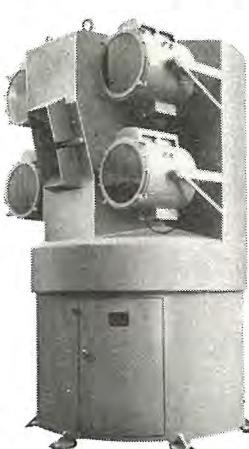
さらに、夜間の監視を可能ならしむるため、また、監視する必要のあるのは悪天候時が多いために、投光機をも設備するが、カメラの撮像方向の移動にしたがって、投光方向も連動させる必要がある。このために普通は左右回転については、カメラハウスの一部がカメラ部分および投光機をのせたまま回転するようにし、上下方向には連動機構を組んだものが使用される。13 図に当社製中国電力湯原発電所用堰堤監視カメラハウスを示す。

投光機はカメラの撮像視覚を適当にカバーする投光角度をもち、監視する場所の最も遠方に対しても、充分な照度を与えるものが、必要である。前記の湯原発電所の例では、最遠隔監視距離は、約 125 m で、その場合、照度は中央部で合計約 400 lx を与え得るものであって、2 kW の投光機 4 台より構成されている。

#### イ. 堤防監視の問題点

カメラハウスの設置に当っては、火力発電所排煙監視の場合と異り、いずれの方向から眺めても良いというわけには行かない。監視場所の光線の具合が昼間はカメラに対して都合がよくない場合が多い。すなわち、表日本ではたいてい、川は北から南へ流れるため、堰堤は、貯水面に対して南側に位置するため、貯水面と堰堤を監視範囲に含めるようカメラハウスをそれらの北側に配置すると、時刻によって、監視目標が逆光になる場合も出てくる。これを考慮に入れて少く共、監視視角内に太陽を含まないような位置に、カメラハウス設置場所を定めることが必要で、カメラハウスとしては余分な光が、レンズ面に当らないようレンズフード効果をもたらせたり、ひさしを設けることも考慮される。

さらに、水面に太陽の反射が表われる所以、偏向フィルタをレンズ面に、着脱できる構造としてこれを防止することも有効である。なお、発電所およびダム間の長距離の伝送を、必要とするため装置としても構成が複雑となり、ケーブルのコストが嵩むと共にカメラハウスも、大規模なものとな



13 図 堤防監視 ITV  
カメラハウス

Fig. 13. TV camera house  
of watching dam.

るので、価格の上昇は免れない。

## 5. バックアップ機器としての ITV

ITV の本質的価値は目の延長として物を観察できるという点であり、この意味から 3. ア. 炉内燃焼状況監視、3. イ. 煙塵監視や 4. 無人堰堤の概況監視等は他の機器によって代用できない所であり、これらの目的については必然的に主たる地位を占める機器として取扱われる。

しかしそれら以外の目的、たとえばメータの監視等は普通のテレメータ機器によって容易に代用され、むしろテレメータ方式による方がより一般的であり、信頼度も高く保守も比較的簡単である上に、警報を動作させたり、他のオートメーション機器と連動させるにはより適当であると考えられる。

すなわちこのように考えるならば ITV はオートメーションの一環としては重要な位置にはつき難いと考えられあくまでも各種のテレメータ方式を利用して運転される場合の Back up として使用るべきものである。

すなわち ITV は目の延長としての認識方法として、テレメータの動作が誤りないか、遠隔操作が果して動作しているか等の不安を一掃する手段として考えられるべきであって、各種オートメーション機器の信頼性を増加する一方法である。

したがってこの種 Back up 機器として眺めた場合、第二義的な機器といえるがその重要性は必ずしも主要機器という理由から少いとはいえない。

### ア. メータの監視

無人発電所等の計器を ITV により監視することはもし機器が不調になった場合にも見えなくなることがあっても指針の向きが異って見えるということはありえない。

したがって ITV によって監視すれば、直接現場へ出向いて監視しているのと同様の安心感があるわけである。

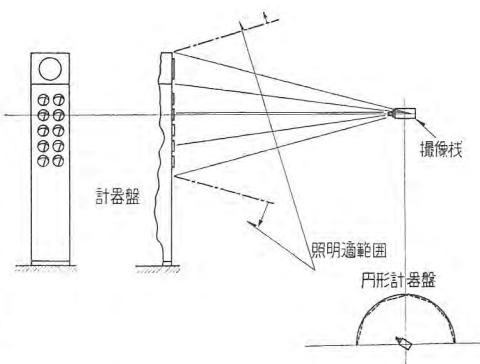
計器監視用 ITV は高い解像度があることは望ましいが、それより装置をなるべく簡単とし、監視計器はクローズアップして精度を上げるようにする。

また監視計器には適当な照明を行うことによって撮像機レンズの絞り調節は省略し、また計器を適当に配置することによって焦点調整も不要であることが望ましい。

#### (1) 監視配電盤の構造

ITV により計器監視を行うためには通常の配電盤に対してカメラが適当な位置を選んで移動するよりもむしろ配電盤が ITV 監視に対して適当な構造をとることが望ましい。

すなわち 14 図の如く配電盤はカメラを中心として円周形に配置し各計器はカメラに向ける如く取付ける。



14 図 ITV による監視に適当な計器盤の構造

Fig. 14. Meter panel for industrial TV watching.

さらに適当な照明を行う必要があるがこれは計器の内部照明によるものが最も望ましい。

もし外部照明によらねばならぬ場合には計器のガラスはなるべく反射が少いものを必要とし、また各計器のガラスに光源がうつらないように注意されねばならない。

また計器は ITV によりなるべく高い精度で読み取れるよう、広角度計器を使用するのが望ましい。

### (2) 監視方法

全部の計器を同時に監視することは不可能であるから、各計器を選択して監視せねばならない。

その方法としては普通は遠隔制御により自由に移動して望む計器を見るのであるが、當時は全部の計器を周期的に映して移動し、望む時には遠隔制御によって希望の計器をとらえうるようにリレー回路を用いてカメラを振らせる方法が推奨できる。

### イ. 屋内外機器の運転状況の監視

テレメータ、テレコントロールの back up として ITV を無人発電所の屋内外機器の監視に使ったり、あるいは近くの機器でも操作室より直ちに目で見ながら運転できる方が望ましいような場合にはこれを使用することによって安心感を増大し、甚だ有用である。

セットとしては照度の変化に対応できるもので良質の画像を必要とするほか、監視方向の選択ができるよう遠隔制御をそなえねばならない。

#### (1) 機器の設置と建屋の構造

ITV で監視する発電所では発電所建設の当所から機器の配置や建屋の構造をある程度 ITV 監視に適するよう用意されることが望ましい。

すなわち監視るべき機器はカメラをできるだけ動かさずに見渡せるように配置してカメラは上下左右の首振り、あるいは精々直線上の移動によって目的が達せられるように考慮が払われる。

建屋の構造についても柱の位置や太さ等できれば都合の良いように考慮しておくのが妥当であろう。

## 6. むすび

本稿は発電所における工業用テレビジョンの最も一般的な利用面について概説したが、工業用テレビジョンの用途は本質的には人間の視覚の拡張としての眼による監視である。この意味において工業用テレビジョンは発電所運転の信頼度を高める他のオートメーション機器の Back up としての有用な役割を演ずるものと極言できる。

将来の工業用テレビジョンの広汎な用途の発展は白黒の色調から天然色や立体映像によってますます飛躍してゆくものと期待される。

# 電気計算装置の電力系統への応用

研究所 横須賀正寿\*・馬場準一\*\*

## Electric Calculators Applied to Electric System

Masatoshi YOKOSUKA • Junichi BABA

A-C calculating boards have been employed for a long time as calculating devices for the electric system engineering. With gradual improvement in the design and betterment in the application, they have come to assume an indispensable part in the power engineering now-a-days. They are, however, giving place to the electronic analog computer and the digital electric calculator of late. The new inventions are now in the limelight in the field of application to the power system. New contrivances and means of calculation are worthy of introduction.

### 1. まえがき

電気計算装置を大別すると計数型計算機 (Digital computer) と計量型計算機 (Analogue computer) となる。欧米においては電力系統の計算には古くより交流計算盤が用いられ、電力潮流・故障時の電圧電流分布・過渡安定度の解析等に偉力を発揮しているが、最近は電子管式アナログコンピュータ、計数型計算機の利用も活発である。わが国においては、この方面は著しく立遅れ、昭和 26 年当社が電気試験所に納入した交流計算盤が最初のものであるが、昨年当研究所に交流計算盤を主体とする電気計算装置が設置され、さらに電力中央技術研究所、九州電力その他にも近く設置される運びとなつてわが国の電力技術も電気計算装置を利用し得る段階となつた。これらはいずれも計量型のもので、計数型計算機の応用はまだ研究段階にあるが、これも近い将来に活用されるに至るであろうことが期待される。

本文には、まず、当社研究所設備の簡単な紹介を行い、ついで電力系統の問題に対する電気的計算装置の新しい

応用面につき概説して、ご参考に供したいと思う。

### 2. 当社研究所の電気計算装置

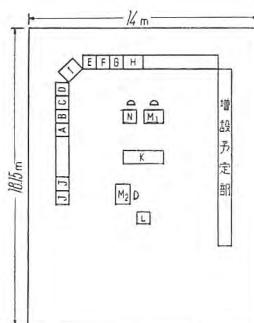
#### ア. 交流計算盤

研究所の交流計算盤は発電機単位 18 機を最終目標としているが、その第 1 期工事によるものは 1 表の如く発電機単位 6 機を主体とするもので、1 図に示すように電子管式アナログコンピュータと同室に設置せられ両者の併用によって最高の計算能率を上げている。500 c/s, 100 V, 1 A, 100 VA, 100 Ω をベースとし、比較的低イ

1 表 交流計算盤

名 称	単位数	性 能
発電機 単位 500 c/s	6	電圧 0~400%, 位相 0~360° 連続的に調整可能
線 路 单 位	40	R...0~159.8% 0.2% step X...0~159.8%
負 荷 单 位	10	R...2998% 2% step X...2998%
負 荷 調 整 单 位	10	300 VA ±14%
キ ャ パ シ テ ィ 单 位	60	4.1 μF 0.01 μF step
单 卷 変 压 器 单 位	10	300 VA, ±20%, 0.5% step
相 互 結 合 单 位	20	1:1...10コ 1: $\sqrt{3}$ ...5コ 1:2...5コ 600 VA
ジ ャ ン パ ー 回 路	20	
ブ ラ グ ボ ー ド	2	
計 测 机	1	
記 录 机	1	

注：3 表の特殊単位も L 素子として使用可能



1 図 交流計算盤

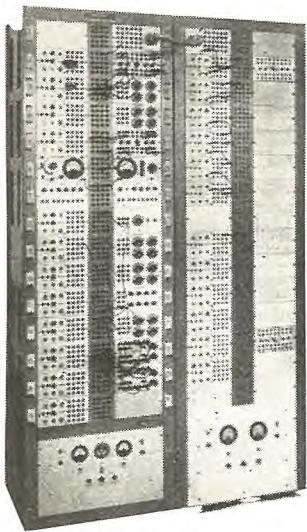
Fig. 1. A-C calculating board.

2 図 計算機室

Fig. 2. Calculator room.

- A 特殊単位
- B 線路単位・容量単位
- C ブラグボード・相互結合単位
- D 線路単位・容量単位
- E 負荷単位・負荷調整単位
- F 单巻変圧器単位
- G ブラグボード・相互結合単位
- H 発電機単位
- I ジャンパー回路
- J 電子管式アナコン
- K 同期スイッチ（機械式）
- L 同 上（電子管式）
- M<sub>1</sub> 計測机（計算盤用）
- M<sub>2</sub> 同 上（アナコン用）
- N 記録机

\* 電気第1研究室長 \*\* 電気第1研究室



3 図 電子管式アナコム  
Fig. 3. Electronic analog computer.

ンピーダンスを選んである上に配線その他に細心の注意を払ってるので同期スイッチと組合せてアナコムとして使用する場合に充分な周波数特性を有する。先年電気試験所に納入した第1号機の経験によって種々改良の結果、顕著な特性の向上を達成することができた。

#### イ. 電子管式アナコム

当社のものは1昨年米国Boeing社より輸入した増幅器計20のものを母体とし、順次必要部分を追加製作して現在は2表の如くなっている。低速度型であってペンオシログラフで結果を記録する。

#### ウ. 同期スイッチ式アナコム

電力系統の過渡現象を解くのは、交流計算盤の素子で回路を組上げ、これを同期スイッチで適当に繰返し開閉することによって過渡現象をブラウン管上に静止像として見ることによって容易に行い得る。この目的のためにアナコム用計算機と同期スイッチ2台を設けてある。また、機械系を模擬する時に損失が少くQの高いインダクタンスを必要とするのでこれも20個用意している。同期スイッチ式アナコムの内容は3表に示してある。

#### 3. 交流計算盤の応用

交流計算盤は電力系統専用の計量型電気計算機であってその歴史は古い。電力潮流、故障時の電圧、電流の分布・安定度の解析等に古くから用いられて、電力系統の研究や設計に偉力を発揮していることは周知である。装置自体の改良に併行して使用法も改良工夫され、その応用範囲は順次拡大してきた。使用上の改良点としては、たとえば、

(1) 発電機電圧の背後リアクタンスを発電機の出力に逆比例する値にして潮

2 表 電子管式アナコム

名 称	単位数	性 能
演算増幅器	40	±50 V, 15 mA (ただし, sign changer は 6 mA)
リミッタ	2	演算増幅器との組合せによって飽和、不感帯、バッファ、クロッシャーの機能が可能
掛算機	2	$\frac{XY}{A}$ , A は 20~50 の範囲に調整しうる
ボテンシオメータ	20	50 kΩ, 直線性 ±0.5%
ブリッジ	1	0.1% まで較正可能なホワイトストンブリッジ
ペン書オシログラフ	1	Brush 社製 2 素子

3 表 同期スイッチ式アナコム

名 称	数	性 能
特 殊 単 位	20	とくに Q の高いインダクタンス 1.4 H, 0.01 H step
発 電 機 単 位	3	60 c/s, 1kVA 単相変圧器 3 台 1 次 100, 200 V, 2 次 40, 60, 80, 100, 200 V.
同 期 スイ チ	2	機械式 10 channel 1 台 電子管式 6 channel 1 台
計 测 机	1	函数発生器内蔵

注：交流計算盤の素子もこの目的に流用する。

流の解析を容易ならしめる。

(2) 使用電圧レベル比と異なる変圧比を補償するための単巻変圧器の活用

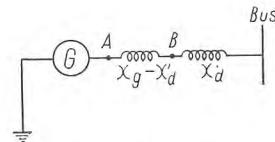
(3) 系統の全損失分を正確に求めるために  $I^2R$ ,  $I^2X$  の和を用いること

(4) 多重事故の解析に成分回路網の活用等が挙げられ、精度の向上、使用の簡便化等が達成された。装置の改良としては、部品、計器、配線等の改良による精度向上と共に、使用の簡便化、測定者の精神的緊張負担の軽減等に努力が払われ、たとえば、前者のものとして Load Adjusting Console の採用、後者のものとして、自動目盛選択装置、記録機 (Recording Table) の開発等があげられ、さらに自動化を試みたものに Watt Regulator, 自動過渡安定度計算装置等がある。ここでは交流計算盤の普通の使用上の問題は省略し、新しい装置、新しい使用法の主なものについて説明する。

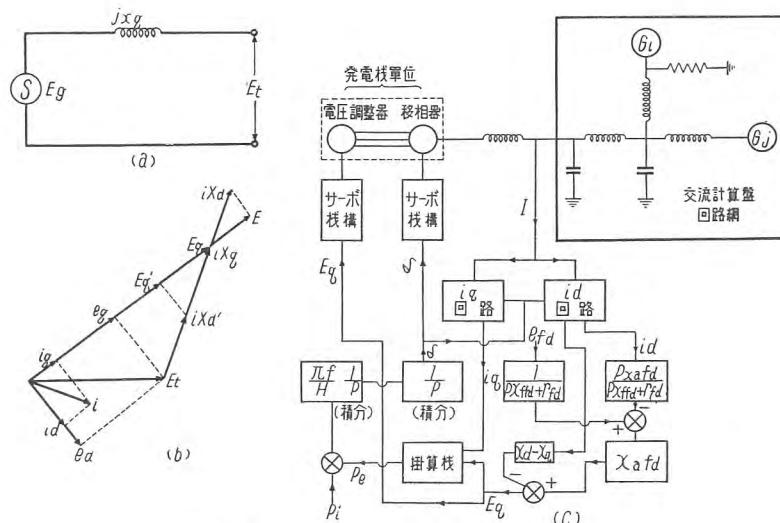
#### ア. 機器の等価回路

(1) 同期機の凸極性の表示<sup>(1)</sup>

同期機の凸極性は従来 4 図に示すように、1 個の発電機単位と 2 個のリアクタ単位とで表示され、B 点における電圧の A 点における



4 図 凸極機の計算回路  
Fig. 4. Calculation circuit of salient pole machine.



5 図 (a) (b) (c) 凸極機の新しい表示法  
Fig. 5. New indicating method of salient pole machine.

る電圧への投影  $E'_q$  が所望の値になる  
如く発電機単位の電圧を調整してい  
た。

最近交流計算盤の自動化に伴い 5 図  
(c) に示すような演算回路が考案され  
ている。5 図 (c) の演算回路は下記の  
ようにして導かれる。

同期機の方程式は、次過渡効果を無  
視し、基本波分のみを考えると (3.1)  
～(3.8) 式で表わされる。

$$e_{fa} = p \psi_{fa} + r_{fa} i_{fa} \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\psi_a = -x_a i_a + x_{afa} i_{fa} \dots \dots \dots (3.2) \quad \Psi: \text{磁束}$$

$$\psi_q = -x_q i_q \dots \dots \dots (3.3) \quad e: \text{電圧}$$

$$\psi_{fa} = -x_{afa} i_a + x_{fffa} i_{fa} \dots \dots \dots (3.4) \quad i: \text{電流}$$

$$e_d = -\psi_q \dots \dots \dots (3.5) \quad x, r: \text{リアクタンス}$$

$$e_q = \psi_d \dots \dots \dots (3.6) \quad s: \text{並びに抵抗。}$$

$$P_e = \psi_d i_q - q_i d \dots \dots \dots (3.7) \quad d, q, fd \text{ はそれぞれ直軸、横軸、界磁に$$

$$\frac{H}{\pi_f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_i - P_e \dots \dots \dots (3.8) \quad \text{関するものを示す。}$$

$P_e$ : 電気的出力

$P_i$ : 機械的入力

$H$ : 単位慣性常数

$\delta$ : 内部位相角

(3.1), (3.4) 式より

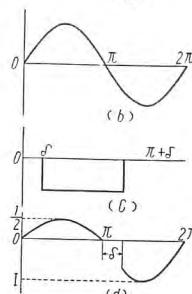
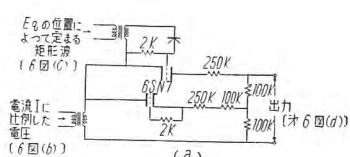
$$i_{fa} = \frac{e_{fa}}{px_{fa} + r_{fa}} - \frac{px_{afa}}{px_{fa} + r_{fa}} id \dots \dots \dots (3.9)$$

また 5 図 (b) に示すベクトル図より

$e_q = E_q - x_q i_a$  であるから

$$P_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d = e_q i_q + x_q i_q i_d = E_q i_q$$

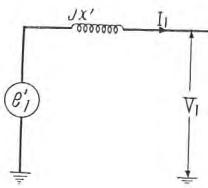
したがって 5 図 (c) に示すような凸極同期機の計算回路が得られる。同図における  $i_d, i_q$  は 5 図に示す回路で得られる。すなわち電流  $I$  に比例した電圧によって、 $I$  が正の半波の間は 6 図 (a) の下側の真空管に電流が流れ出力端子には  $100 \text{ k}\Omega$  の抵抗降下として、 $\frac{I}{2} \times \sin x$  に比例した電圧が得られる。 $I$  の負の半波では 6 図 (a) の上側の真空管が電流を流す筈であるが、 $E_q$  の位相によって定まる矩形波がこの真空管の格子にかかっているために (d) 図に見る如く  $\delta$  だけ位相が遅れて電流が流れ、出力端子には  $200 \text{ k}\Omega$  の抵抗降下として  $I \sin x$  に比例した電流が流れ、結局出力端子の



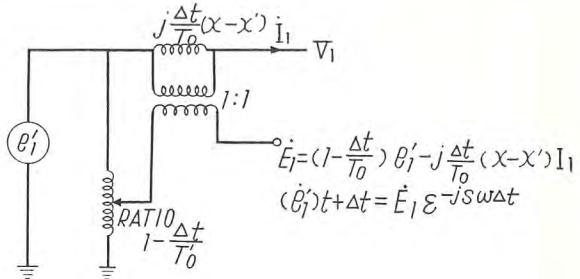
6 図  $i_d, i_q$  の計算回路

Fig. 6. Calculating circuit of  $i_d$  and  $i_q$ .

電気計算装置の電力系統への応用・横須賀・馬場



7 図 誘導機等価回路  
Fig. 7. Induction machine equivalent circuit.



8 図 誘導機の計算回路  
Fig. 8. Calculating circuit of induction machine.

電圧は平均して

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi \sin x dt + I \int_{\pi/2}^{2\pi} \sin x dt = -I \cos \delta$$

となってこれは  $-i_q$  に等しい、矩形波の位相を  $\frac{\pi}{2}$  だけずらせば  $i_d$  を得ることは明らかである。

## (2) 誘導機の等価回路<sup>(2)</sup>

従来誘導機は定インピーダンスで表示されていたが、大容量の誘導電動機の系統安定度に及ぼす影響あるいは誘導発電機の電力動揺の解析等のために、7 図のような等価回路が導かれた。

誘導機の等価回路は 7 図に見る如く、過渡インピーダンス  $j x'$  とその背後の起電力  $e'_1$  とで表わされることとは同期機と全く同じであるが、同期機と異なり起電力  $e'_1$  は誘導機の端子電圧によって定められるものである。この  $e'_1$  の計算回路として 8 図の如き回路が考えられた。

誘導機に関しては、その次過渡効果を無視すれば下記の式が成立つ。

$$e'_1 + T'_0 \frac{de'_1}{dt} + jsw V'_0 e'_1 = 0 \dots \dots \dots (3.10)$$

$$\dot{e}'_1 = \dot{V}'_1 + jx_1 \dot{I}_1, \quad e'_1 = \dot{V}'_1 + jx' \dot{I}_1$$

$$x = x_s + x_m, \quad x' = x_s + \frac{x_r x_m}{x_r + x_m}$$

$$T'_0 = \frac{x_r + x_m}{2\pi f \pi_r}$$

$\dot{V}'_1$ : 誘導機端子電圧

$\dot{I}_1$ : 誘導機の電流

$x_s$ : 誘導機の固定子漏洩リアクタンス

$x_r$ : 同上の回転子漏洩リアクタンス

$x_m$ : 同上の励磁リアクタンス,  $\pi_r$ : 回転子抵抗

$s$ : 滑り,  $f$ : 周波数

$\dot{e}'_1 = \dot{V}'_1 + jx \dot{I}_1 = e'_1 + j(x - x') \dot{I}_1$  であるからこれを (3.10) 式に代入しさらに微分を微少変化で近似すれば

$$\{e'_1 + j(x - x') \dot{I}_1\}$$

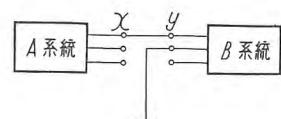
$$+ T'_0 \frac{\Delta e'_1}{\Delta t} + jsw T'_0 \dot{e}'_1 = 0$$

これより

$$(e'_1)'_{t+\Delta t} = \left[ \left( 1 - \frac{\Delta t}{T'_0} \right) e'_1 \right]$$

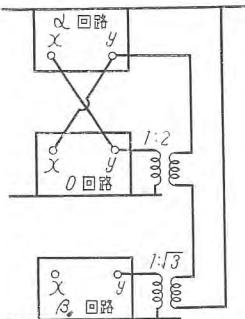
$$e'_1 - j \frac{\Delta t}{T'_0} (x - x') \dot{I}_1$$

$$+ \times \varepsilon - isw \Delta t, \text{ したがつ}$$



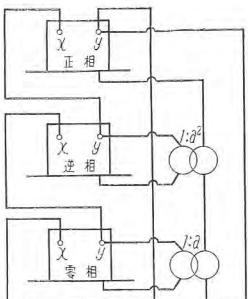
9 図 多重事故回路の一例

Fig. 9. Example of multiple fault circuit.



10 図 (a)  
 $\alpha\beta\gamma$  回路による解法

$$V_\alpha = V_\alpha + V_0 \\ V_\beta = -\frac{V_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} V_\beta + V_0 \\ V_\gamma = -\frac{V_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} V_\beta + V_0$$



10 図 (b)  
対称座標法による解法

$$\textcircled{1} \text{ 理想移相器} \\ V_\alpha = V_0 + V_1 + V_2 \\ V_\beta = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \\ V_\gamma = V_0 + a V_1 + a^2 V_2$$

Fig. 10. (a) Solution by  $\alpha\beta\gamma$  circuit.

Fig. 10. (b) Solution by symmetrical component.

て 8 図の如く単巻変圧器と理想変成器とを用いた回路で、誘導機の電力動揺を段々法で計算し得る理である。

#### イ. 故障計算

故障計算は多くの場合対称座標法によって行われるが故障の種類によっては理想移相器  $a$  または  $a^2 (a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})$  を必要とするようなことも起る。かのような時には、実数の変換式を用いた  $\alpha\beta\gamma$  回路を用いるのが有利である<sup>(3)</sup>。

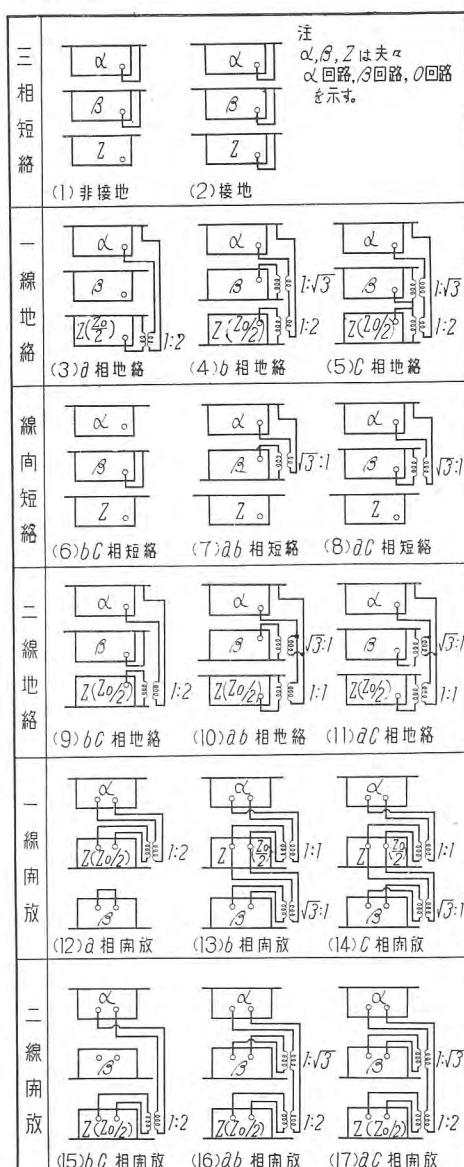
たとえば 9 図のように A, B 2 系統が  $a$  相で混触し、B 系統の  $b$  相で 1 線地絡の起っている場合には  $\alpha\beta\gamma$  回路を用いれば 10 図 (a) に示すようにして簡単に解析できる。対称座標法による時は 10 図 (b) に示す如く理想移相器を必要とする。なお参考までに  $\alpha\beta\gamma$  回路による計算回路の数例を 4 表および 11 図に示してある。

#### ウ. 高調波共振の計算<sup>(4)</sup>

制動巻線のない水車発電機に非対称負荷がかかると高調波を生じこれが外部回路と共振すれば大きな危険電圧を生じることは古くから注目されている。

発電機に波高値  $I_{12}$  の基本波逆相電流が流れると固定子には大きさ  $\frac{3}{2}(x_q'' - x_d'')I_{12}$  (時間零で電流  $I_{12}$  より  $90^\circ$  進み) の正相第 3 高調波電圧を生じる。この起電力により固定子には第 3 高調波逆相電流が流れがこの電流はそれぞれ次の 2 つ違う起電力を生ずる。一般に第  $n$  次逆相電流  $I_{n2}$  が流れると大きさ  $\frac{(n+2)}{2}(x_q'' - x_d'')I_{n2}$  の

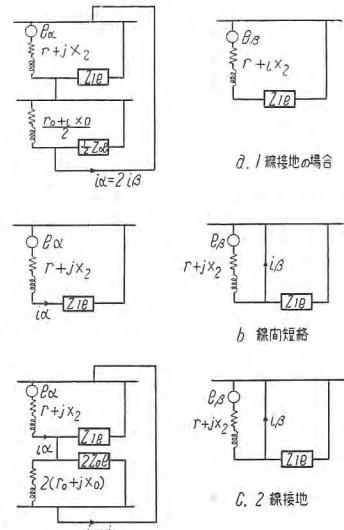
成分回路接続図番号		故障の種類	故障点における電圧成分の満足すべき条件	故障点における電流成分の満足すべき条件
11 図 (1)		3 相非接地短絡	$V_\alpha = 0, V_\beta = 0$	$I_0 = 0$
(2)		3 相接地短絡	$V_\alpha = V_\beta = V_0 = 0$	
(3)	一線地絡	a 相地絡	$V_\alpha = -V_0$	$I_\beta = 0, I_\alpha = 2I_0$
(4)		b 相地絡	$V_\alpha = \sqrt{3}V_\beta + 2V_0$	$I_\alpha = -I_\beta/\sqrt{3}, I_\alpha = -I_0$
(5)		c 相地絡	$V_\alpha = -\sqrt{3}V_\beta + 2V_0$	$I_\alpha = I_\beta/\sqrt{3}, I_\alpha = -I_0$
(6)	線間短絡	b, c 相短絡	$V_\beta = 0$	$I_\alpha = 0, I_0 = 0$
(7)		a, b 相短絡	$V_\alpha = V_\beta/\sqrt{3}$	$I_\alpha = -I_\beta/\sqrt{3}, I_0 = 0$
(8)		a, c 相短絡	$V_\alpha = -V_\beta/\sqrt{3}$	$I_\alpha = I_\beta/\sqrt{3}, I_0 = 0$
(9)	二線地絡	b, c 相地絡	$V_\beta = 0, V_\alpha = 2V_0$	$I_\alpha = -I_0$
(10)		a, b 相地絡	$V_\alpha = V_\beta/\sqrt{3} = -V_0$	$I_\alpha = -\sqrt{3}I_\beta + 2I_0$
(11)		a, c 相地絡	$V_\alpha = -V_\beta/\sqrt{3} = -V_0$	$I_\alpha = \sqrt{3}I_\beta + 2I_0$
(12)	一線開放	a 相開放	$V_\beta = 0, V_\alpha = 2V_0$	$I_\alpha = -I_0$
(13)		b 相開放	$V_\alpha = V_\beta/\sqrt{3} = -V_0$	$I_\alpha = -\sqrt{3}I_\beta - 2I_0 = 0$
(14)		c 相開放	$V_\alpha = V_\beta/\sqrt{3} = -V_0$	$I_\alpha + \sqrt{3}I_\beta - 2I_0 = 0$
(15)	二線開放	b, c 相開放	$V_\alpha = -V_0$	$I_\alpha = 2I_0, I_\beta = 0$
(16)		a, b 相開放	$V_\alpha + \sqrt{3}V_\beta - 2V_0 = 0$	$I_\alpha = I_\beta/\sqrt{3} = -I_0$
(17)		a, c 相開放	$V_\alpha - \sqrt{3}V_\beta - 2V_0 = 0$	$I_\alpha = -I_\beta/\sqrt{3} = -I_0$



11 図 高調波共振の計算回路

Fig. 11. Calculating circuit of higher harmonic resonance.

第  $n+2$  次の高次の正相起電力を発生し、第  $n$  次正相電流  $I_{n1}$  によって大きさ  $\frac{(n+2)}{2} \times (x_q'' - x_d'') I_{n1}$  の第  $n-2$  次の低次の逆相起電力を生じる。この  $n$  次の高周波に対して発電機の呈するインピーダンスは  $\frac{n}{2} (x_d'' + x_q'')$  すなわち逆相インピーダンスの  $n$  倍である。かく基本波逆相電流によって奇数次電圧電流を生じる。回転子電流に直流分があれば偶数次電圧電流を生じるがこれは過渡的のものであって直流分の減衰と共に減衰する。



この問題を取扱うのに発電機の式と外部回路の式とを組合せて解くのは非常に厄介であるので普通は次の仮定によって簡単化して考える。すなわち基本波分、

高調波分はそれぞれ独立に求め得てこれを重畠したものがある電圧電流となるものとする。この場合正相高調波電流によって生ずる低次の逆相起電力は無視する。こう仮定すれば各高調波成分に対する成分回路は12図の如くになり交流計算盤を用いて順次各次数に対する電圧電流を計算できるから共振条件も電圧電流の大きさも容易に求めうる。12図において起電力  $e_a$  はそれより 2 つの次数の低い逆相電流によって誘導される正相高調波電圧と等しく、 $e_b$  はそれを  $\frac{\pi}{2}$  位相を遅らせたものである。インピーダンスとしてはそれぞれ高調波に対するものを用いる。

上記の方法はかなりの仮定を含んでいるが全般的に見てかなりよく定性的にも定量的にも実験結果とよく一致する。たとえば江鈴発電所における実測オシログラムと計算値とをそれぞれ 13 図に示す。

## エ. 交流計算盤の自動化

本章の始めに記したように交流計算盤はその精度の向上と共に使用の簡便化、測定者の精神的緊張負担の軽減等に努力が払われている。それらのものには Load adjusting console, 自動目盛選択装置, 記録机 (Recording Table) Watt Regulator, 自動過渡安定度計算装置等がある。これらものについて簡単に説明しよう。

### (1) Load adjusting console

従来負荷回路を組上げるにはまず負荷の Watt, Var より抵抗ならびにリアクタンス分を計算し、この値を回路素子にセットして回路網に接続し、主計測器にて負荷回路を測定して再び抵抗ならびにリアクタンスを調整し正しい Watt, Var を出すようにしていた。

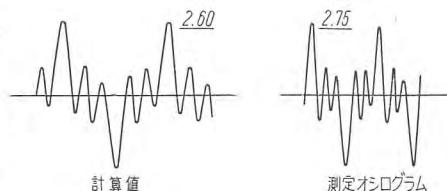
Load adjusting console は計測機のスカラ計器と同様の計器をもった移動計測機で、調整しようとする負荷

単位の処へ移動して接続計測できる。これによって負荷回路は回路網に負荷単位を接続し主計測器にて計測することなくして正しい値に調整できる。

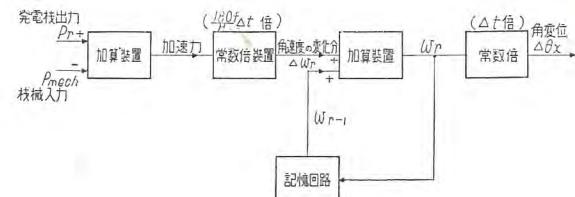
### (2) 自動目盛選択装置

電流の計測に当り電流計の scale out を防止す

ると同時に電流計の scale の低いところで計測を行って誤差の入るのを避けるために適当な目盛を選択



13 図 江鈴発電所における線間短絡試験  
Fig. 13. Line short test at a power station.



15 図 過渡安定度の計算回路  
Fig. 15. Calculating circuit of over stability.

する装置で、これによって計算盤の精度の向上を計り測定者の精神的緊張を軽減する。当研究所のものは 6A, 2A, 0.6A, 0.2A, 0.06A の 5 目盛となっており最高目盛の 1/3 以下で計測を行わぬようしている。

### (3) 記録机

記録机は計測機で読取った計測量を記録するに当って誤記をさけるために工夫されたもので記録を行うべき回路素子を指示しあつその素子の電力流の方向をも併せて示すので記録上の誤りは皆無となる。当研究所のものを 14 図に示す。

### (4) Watt Regulator

多機系統の電力潮流を解析する場合潮流を合わせるのに時間を要するが Watt Regulator を用いれば各発電機の出力は自動的に所望の値に調整されるので極めて便利であると報告されている。

### (5) 自動過渡安定度計算装置

過渡安定度の計算を自動化するか半自動化するかはいわゆる指導理念の問題ともいえる。実際の交流計算盤の使用時間中過渡安定度の計算の占める割合は場合によって異なるであろうが、たとえば米国では経験上約 20% 程度であるといわれており、その僅かな % の計算のために大金を投じて自動化するよりは、比較的廉価で実効の多い途中の筆算部分のみの機械化というのが Westinghouse 電機会社、GE 社、BTH 社等の考え方のようだ。<sup>(5)</sup> 記憶回路を備えた演算回路が報告されている。また現在全自动化は 2, 3 考案されているが、<sup>(6)</sup> 小規模に止っているようでありいずれもが学校の人々によって提案されているのも興味深い。なお小型同期機と 3 相 4 線式回路の組合せで系統を模擬する仏国の micro-machine<sup>(7)</sup> は電力系統の動的模擬とも称すべきもので注目に値する。

ここには半自動化ともいえる段々法の各段階における計算を行う計算回路を示しておく。

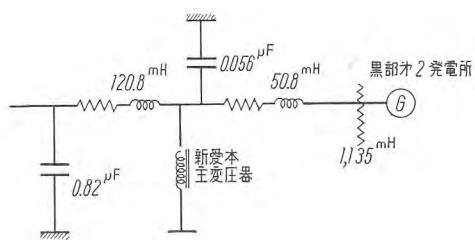
計算のブロック図を示せば 15 図の如くで第 1 段の計算回路で 回転機入力  $P_{\text{mech}}$  1 回転機出力  $P_r$  = 加速力 を計算し第 2 段の計算回路によって角速度の変化分  $\Delta W_r = \frac{180f}{H} \Delta t (P_{\text{mech}} - P_r)$  を計算する。第 3 段の計算回路によって記憶回路の出力に上記  $\Delta W_r$  を加算して角変位  $\Delta \theta_r = (\Delta W + W_{r-1}) \Delta t$  を求めるものである。記憶回路はたとえば各段階の終りにおける角速度  $W_r$  をポランシオメータの平衡をとることによって求められる。



14 図 記録机

Fig. 14. Record desk.

電気計算装置の電力系統への応用・横須賀・馬場



16 図 送電系統

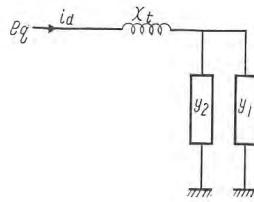
Fig. 16. Transmission system.

#### 4. 電子管式アナログコンピュータの応用

電子管式アナログコンピュータは適当な饋還を施した高利得の直流増幅器によって加算・積分等を行わせるものである。電子管式アナログコンピュータによって解析される問題は極めて広範囲にわたり電力系統関係のものでも(1)AVRの動作特性等の自動制御関係の問題(2)タービン発電機の軸の捩れ振動等の機械系・サージタンク、水槌現象等の水力学系の問題(3)過渡安定度問題<sup>(8)</sup>、(4)非線回路の計算等がある。

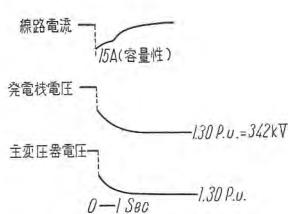
- (1) は自動制御系の問題として周知のことであり
- (2) もまた微分方程式の解法にほかならない。
- (3) に関しては交流計算盤によって解析可能の問題でありまた  $n$  機系に対して  $n(n-1)$  個の演算増幅器と函数発生器とを必要とするので必ずしも実用的方法とはいえない。

電子管式アナログがとくに偉力を發揮するのは鉄の飽和等の非線型要素を含む現象で数学的取扱



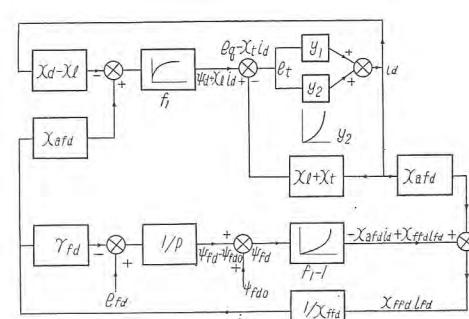
17 図 外部回路のインピーダンス

Fig. 17. Impedance of external circuit.



19 図 発電機 1 台の場合のオシログラム

Fig. 19. Oscillogram of one generator case.

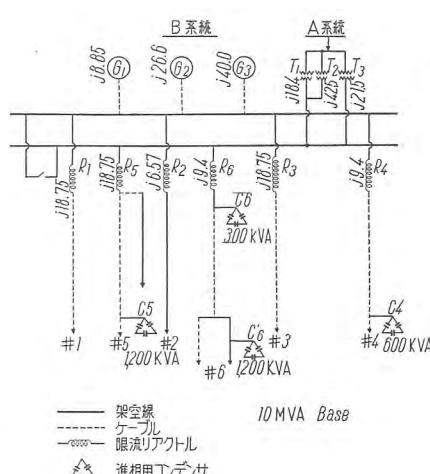


18 図 ブロック図

Fig. 18. Block diagram.

5 表 電圧上昇値

回路条件	発電機端子電圧(P.U.)		新愛本主変圧器電圧(P.U.)		電圧上昇時定数
	瞬時上昇	最終値	瞬時上昇	最終値	
発電機 1 台飽和あり	1.14	1.30	1.18	1.30	約 1 秒
発電機 2 台飽和あり	1.14	1.30	1.18	1.30	約 1 "
発電機 1 台飽和なし	1	1	1.5	6.0	約 10 "
発電機 2 台飽和なし	1	1	1.3	2.8	約 5 "

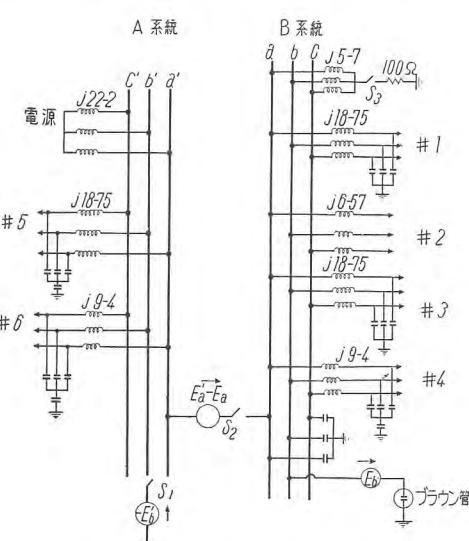


20 図 配電系統図

Fig. 20. Distribution system diagram.

いの厄介な問題である。ウに述べた高調波共振の厳密な解も電子管式アノコムで行うことができる。ここには飽和を考えた計算例として新北陸幹線を成出し遮断した時の黒部発電所の発電機電圧の上昇の計算を紹介する。

送電系統は16図の如くである。同期機に関してはア、(1)におけると同じ仮定を行いかつ発電機の速度上昇およびAVRの動作を無視すれば(3.1)～(3.6)式と同様の式が成立する。ここで飽和を考慮すると磁束の式(3.2)～(3.4)は下記の如くになる。



21 図 アナログ回路

Fig. 21. Analog circuit.

$$\psi_a = -x_a i_d + f_1 [-(x_a - x_e) i_d + x_{af1} i_m] \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

$$\psi_q = -x_a i_q + f_2 [-(x_q - x_e) i_q] \dots \dots \dots (4.2)$$

$$\psi_{ja} = f_3 [-x_{af1} i_a + x_{if1} i_m] \dots \dots \dots (4.3)$$

ここで  $x_e$  は漏洩リアクタンスで  $f_1, f_2, f_3$  はそれぞれ飽和を表わす函数である。同期機においては  $q$  軸は飽和しないとして  $f_2(x) = x$  としつつ  $f_1 = f_3$  と考える。

送電線路に関しては

$$e_d = -\times i_q \quad \dots \dots \dots (4.4)$$

$\times$ ：発電機端子からみた線路インピーダンス

同期機の式と送電線路の式とを組合せて  $x_q i_q = -\times i_q$ , したがって  $i_q = 0$ ,  $e_d = 0$  となる。すなわち電流は  $i_d$ , 電圧は  $e_d$  のみを考えればよいことになる。17図に発電機端子から見たインピーダンスを示す。

以上の諸式を総合してこの送電系統を解析するためのブロック図として 18 図を得、これを電子管式アナコムで解いて 5 表に示す結果を得た。5 表より見る如

く電圧上昇は飽和のために比較的低い値に抑えられ、電圧上昇速度が早くなっている、飽和の影響が著しいことがわかる。19 図にオシログラムを示してある。

## 5. 同期スイッチ式アナコム

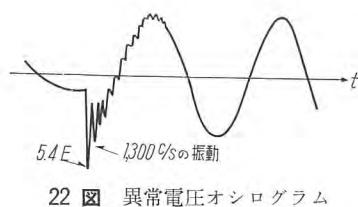
同期スイッチ式アナコムは交流計算盤の素子を用いて電気系あるいは機械系・熱系の模擬をなし、同期スイッチにて過渡現象を繰返し発生せしめ解をブラウン管上に静止像として得るものであるから、この装置の適用範囲は電子管式アナコムと重複する部分が多い。たとえば機械系の振動等は微分方程式の形から電気的等価回路を作るのであるから電子管式アナコムでも容易に解を得ることが多い。しかし電力系統の現象では回路の方程式をたてる代りに直接その回路を組上げればよいので仕事はずっと容易になる。もちろん鉄の飽和、アレスタの  $v-i$  特性等の非線型を模擬することも可能である。

電力系統の問題としては古くからたとえば弧光地絡、開閉サージ等過渡異常電圧の研究に広く使用されて報告も枚挙に違ないが、最近は避雷の問題もこれを用いて研究されまた実際の変電所の設計にも応用されて順次一般的研究の段階から具体的な事故の原因究明さらに計画へ応用されるようになってきている<sup>(9)</sup>。ここには一例として 20 図に示すような工場配電系統における事故原因究明のために多重事故によって発生する過渡異常電圧を解析した例を示そう。計算は系統を 3 相に組上げ重複の理を用いることによって同期スイッチ式アナコムにより容易に行なう。すなわち 21 図において故障前の A 系の  $a'b', c'$  相対地電圧を  $E_a', E_b', E_c'$  とし、B 系の  $a, b, c$  相対地電圧を  $E_a, E_b, E_c$  とする時は A 系の  $b$  相地絡、A, B 系の  $a$  相混触時の過渡現象は 21 図に示すように  $a, a'$  間に  $E_a - E_a'$ 、 $b'$  対地間に  $-E_b'$  を印加した時の過渡電圧に故障前の電圧を加えたものが実際の過渡電圧となる。

解析の結果は  $b'$  相地絡、 $a-a'$  相混触時に 22 図の如く  $b$  相に  $5.4E$  の電圧を発生してこの異常電圧によってさらに事故が拡大したことが判明した。

## 6. 計数型計算機 (Digital Computer) の応用

計数型計算機はタービンの臨界速度の計算・変圧器の設計等電気機器の特性の計算に米国では広く利用されているが電力系統への応用はまだそれ程普及していないようである。しかし近年その応用は段々広くなりつつあり



22 図 異常電圧オシログラム  
Fig. 22. Abnormal voltage oscillogram.

現在文献の示すところではその応用は(1)電力潮流の計算(2)過渡安定度の計算(3)系統の経済的負荷法の計算(4)各種過渡現象の計算(5)負荷増加の予想等に亘っている。<sup>10)</sup>わが国ではまだこの方面に未着手であるが将来の研究課題となるべきものである参考のためにここでは上記応用例のうち系統計算上最も重要なものの 1 つである電力潮流の計算原理<sup>(11)</sup>について述べて見よう。

一般に与えられた  $n$  機系の電力潮流の計算を行うということは(1)すべての負荷の電力と無効電力(2)( $n-1$ )機の電力と無効電力(3)基準母線の電圧と位相角を与えて(A)線路に流れる電力無効電力、(B)すべての母線の電圧と位相角、(C)第  $n$  番目の発電機の電力と無効電力を見出すことである。計算は逐次近似法による方法で下記に示すようなものである。

(1) 大いさおよび位相角の指定されている基準母線以外の母線電圧の大きさを 1.00 per unit、位相を 0 とし、各母線における静電蓄電器の進相容量はあらかじめこれを想定し、かつ線路による電力ならびに無効電力の損失がないものとして任意の電力潮流を仮定しこれを第 1 近似とする。

(2) つぎに第  $i$  番目の線路の電圧降下  $\Delta V_i$  ならびに位相角の変化  $\Delta \theta_i$  を

$$\Delta V_i = [V_i + (P_i R_i + Q_i X_i)/V_i] \sec \Delta \theta_i - V_i \quad \dots \dots \dots (6.1)$$

$$\Delta \theta_i = \tan^{-1} \left[ \frac{(P_i X_i - Q_i R_i)/V_i}{V_i + (P_i R_i + Q_i X_i)/V_i} \right] \quad \dots \dots \dots (6.2)$$

にて計算する。ここで  $R_i X_i$  はそれぞれ第  $i$  番目の線路の抵抗ならびにリアクタンス、 $V_i, P_i, Q_i$  はそれぞれ第  $i$  番目の線路受端における電圧、電力、無効電力である。

(3) 前項で計算した  $\Delta V_i, \Delta \theta_i$  を系統の loop について加算してゆくと仮定した電力潮流は必ずしも正解でないで零とならぬであろう。そこで  $\sum_{loop} \Delta V_i, \sum_{loop} \Delta \theta_i$  を零ならしめるために loop に次式より計算される電力  $P$  ならびに無効電力  $Q$  を環流せしめて  $\sum_{loop} \Delta V_i, \sum_{loop} \Delta \theta_i$  を零ならしめんとする。

$$\begin{bmatrix} -\Sigma \Delta V \\ -\Sigma \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & X \\ X & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (6.3)$$

ここに  $\Sigma \Delta V, \Sigma \Delta \theta$  は loop の誤差電圧、誤差位相角マトリックス、 $P, Q$  は求める環流電力、無効電力マトリックス、 $R, X$  は loop の抵抗ならびにリアクタンスマトリックスである。 $P, Q$  のことを balancing power と呼んでいる。

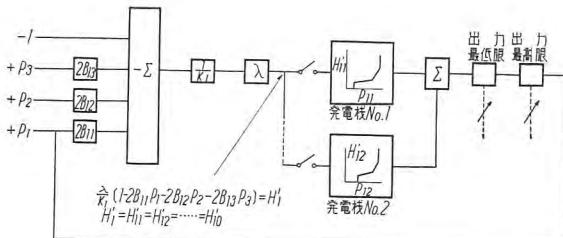
(4) つぎに最初に仮定した潮流に対して

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i &= (P_i^2 + \theta_i^2) R_i / V_i^2 \\ \Delta \theta_i &= (P_i^2 + \theta_i^2) X_i / V_i^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (6.4)$$

によって各線路の損失を計算する。

(5) 第 1 近似の電力潮流に(6.3)式で計算した balancing power ならびに(6.4)式で計算した線路損失を重畠し、また(6.1)式で計算した  $\Delta V_i$  で母線の電圧を





24 図 経済的給電方程式の解法を示すブロック図

Fig. 24. Block diagram showing economical feeding equation.

は  $E$  の共軸値

$S$ : 同上における  $Q/P$  比

$$R_{L'm} = \sum_n^L k_n' R_{nm} \quad \sum_n^L \text{は負荷についての和を表わす}$$

$$R_{L''m} = \sum_n^L k_n'' R_{nm}.$$

$k'_n + jk''_n$  は第  $n$  番目の負荷の全負荷電流に対するベクトル比

$$R_{LL} = \frac{\sum I_b^2 R_b - \sum P_m P_n B'_{mn}}{I_L^2}$$

ただし  $B'_{mn} = \left[ \frac{1}{E_m E_n^*} (1+jS_n) (1-jS_n) \right]$  の実部  $\times (R_{mn} - R_{L'm} - R_{L'n}) + \left[ \frac{1}{E_m E_n^*} (1+jS_m) (1-jS_n) \right]$  の虚部  $\times (R_{L''m} - R_{L''n})$

$$\bar{I}_L^2 = |\Sigma \text{ 発電機電流 } I_i|^2$$

以上の計算は計数型計算機で行うのが便利である。計算のブロック図を示すと 23 図の如くである。23 図においては  $\left[ \frac{1}{E_m E_n^*} (1+jS_m) (1-jS_n) \right]$  の虚部  $\times (R_{L''m} - R_{L''n})$  が小であるとしてこれを省略した場合の計算方式を示している。

#### ウ. 経済的給電方程式の解法

経済的給電方程式  $\frac{\partial f_i}{\partial p_i} + \lambda \frac{\partial L}{\partial p_i} = \lambda$  に損失方程式

$L = \sum P_m B_{mn} P_n$  を代入すれば、

$$\frac{\partial f_i}{\partial p_n} = \lambda [1 - 2 \sum B_{nm} P_m] \quad (7.3)$$

また  $n$  番目の発電所の燃料費を  $k_n$  とし、運転時の熱レートを  $H_n$  とすれば  $f_n = K_n H_n$  であるから

$$\frac{dH_n}{dP_n} = \frac{\lambda}{K_n} [1 - 2 \sum B_{nm} P_m] \quad (7.4)$$

上の方程式を解くには種々の方法があり、American Gas and Electric Co. では Penalty Factor Computer ( $\frac{1}{1 - \frac{\partial L}{\partial p_n}}$  を計算する計量型計算機) と特殊の計算尺とで行っており、Westinghouse 電機会社では Economic Load Dispatch Computer を製作し、Southern Service Inc. では “Early Bird” という computer を開発した。ここでは電子管式アノコムによって解く方法について紹介する。<sup>(14)</sup>

(7.4) 式において  $H_n' = \frac{dH_n}{dP_n}$  は各発電機について既知であるので、24 図に示すブロック図によって解くことができる。これは加算機と非線型要素とによって構成される計算機である。

## 8. むすび

以上簡単に各種電気計算装置の電力系統への応用上の新しい方面、種々の新工夫について紹介した。交流計算盤、電子管式コンピュータの如き計量型計算機はわが国でもやっと自由に使用できるようになったが、計数型計算機の応用は今後の問題である。研究的計画的用途ではなく経済的負荷分配の如き日常の給電業務の方面に計算装置が利用され出したのは新しい分野であって、遠隔測定技術と互いに助けあって、専用計算機の発展へと進みつつあり、われわれも実際に使用される方面との協力により、この方面の研究を早急に促進してゆきたいと念願している。

## 参考文献

1. Synchronous Machine Analogues for use with the Network Analyser J. E. Van Ness Tech Paper 54-261
2. Transient Stability Studies—I  
D. F. Shankle, C. M. Murphy, R. W. Long, E. L. Harder Tech Paper 54-331
3. Circuit Analysis of A.C. Power Systems p. 308～p. 362 E. Clarke
4. 非対称負荷による発電機の異常電圧  
横須賀 昭和 29 年 3 学会支部連合大会部門講演
5. Eight Machine Transient Stability Computer  
K. M. Jones BTH Activities 1950
6. たとえば  
Computer for Automatizing Network-Analyser Operation  
A. Kusko, P. N. Heller Tech Paper 55-5  
Dynamic Operation of an A.C. Network Analyser  
S. Kaneff IEEE Vol. 102, Part A, No. 5, Oct. 1955 p. 597
7. Micro-machine and Micro-reseaux  
R. Robert CIGRE Report 338 1950
8. An Electric Analogue Method for the Direct Determination of Power System Stability Swing curves  
W. B. Boast, J. D. Rector Tech Paper 51-338
9. たとえば  
Transmission Line Design and Performance Based on Direct Lightning Strokes  
E. L. Harder, J. M. Clayton Tech Paper 49-11  
Lightning Protection in Extra-High Voltage Stations  
I. W. Gross, L. B. LeVesconte, J. K. Dillard  
E. E. Vol. 72, No. 11 1953 Nov. p. 967-972
- Surge Protection of Transformers Based on New Lightning Arrester Characteristics  
J. K. Dillard, T. B. Bliss Tech Paper 54-302
10. たとえば  
Digital Computers to Speed Studies  
G. W. Bills El. World April 18, 1955 p. 115  
Use of Digital Computers by Ontario Hydro in System Engineering Problems L. B. Lacey, P. L. Dandens Tech paper 55-574
11. Automatic Digital Computer Solution of Load Flow Studies J. M. Henderson Tech Paper 54-330
12. Coordination of Full cost and Transmission Loss by the Use of the Network Analyser to Determine Plant Loading Schedule  
E. E. George, H. W. Page, J. B. Ward T. AIEE, 1949
13. たとえば  
Tensorial Analysis of Integrated Tranmission Systems Part I The Six Basic Reference Frames  
G. Kron Tech Paper 51-225  
Loss Evaluation II  
E. L. Harder, R. W. Ferguson, W. E. Jacob, D. C. Harker Tech Paper 54-67
- Loss Formula made Easy  
A. F. Glimm, R. Habermann, L. K. Kirchmayer, G. W. Stagg Tech Paper 53-209
14. Acomputer for Economic Scheduling and Control of Power Systems C. D. Morrill, J. A. Blake Tech Paper 55-528

# 電気絶縁材料の温度区分に対する最近の情勢

本 社 大 西 洋 一 郎\*

## Recent Trend on Temperature Classification of Electric Insulator

Head Office Yoichiro OHNISHI

Problems encountering in the establishment of more accurate standards for electric insulator with respect to the limit of temperature rise have been the focus of the world attention. Although they have been left unsolved since the electric apparatus came into being, they are destined to be worked out by all means. This paper accounts for the latest trend of the world in this respect, chiefly on the activities of the AIEE and IEC. Mention is also made on the principle of the testing methods and the necessity of functional tests.

### 1. まえがき

電気機器に用いられる絶縁材料の耐熱性を定める方法にはいろいろの問題があり、さらにそれが電気と材料という2つの分野にまたがっていることから一層複雑になっている。最近の合成化学の進歩により数多くの新しい絶縁材料が紹介されたこと、また、それらを効果的に使用する必要性からも、現在の各国の絶縁材料温度区分の規格は充分でないばかりか、その解釈が困難であり不明確であることが指摘されるようになった。

たとえば、現今絶縁材料および電気機器の温度区分としては A, B, ..., H 種絶縁という言葉が広く使用されているが、これは絶縁の主体が有機物か無機物かまたはシリコンとかいう材料の差異によっている。マグネット線に例をとれば、その絶縁の主体がガラス・アスベストのような無機物であれば B 種であり、有機物であれば A 種となる。しかるに最近の化学工業の発展によって、テフロン・ポリウレタンなどにすぐ続いて現われたマイラ・ダクロン・DC-1360 および Alkanex マグネット線のように、たとえ有機物であっても耐熱性が B 種よりもはるかに高いものも利用できるようになった。しかし現状ではいくら耐熱性があつても有機物であれば A 種であつて B 種と公称することはできない。

したがってこのような温度区分を実情に合致するように設定しようとする提案が行われるもの当然のことである。たとえばスイス等は、従来の A, B, ..., H という区分の中間に新たに E・F 種を設け、これらの種別に相当する材料の分類を過去の経験とある程度の実験から、主として材料の化学組成に基いて行うことを提案している。わが国でも最近 B・H 種の中間を行くものとして、完全 B 種とか D 種とかいう言葉が聞かれる。これに対して長い間の実績と試験によって裏付けされた現

行分類は当分このままとして、この改正には絶縁物の組成それ自体によるよりもむしろ機器絶縁組織としての絶縁物の機能を主体に考えるべきであるとするのが米国の主張である。したがって実際に使われる機器絶縁組織あるいはその模型について広範な研究を進めるためには、まずその基準となる試験法・試験規格の設定が急務であるとし、IEC (International Electrotechnical Commission) でも相当の論議を交わしている。またアメリカ国内では AIEE (American Institute of Electrical Engineers) および IEC 国内委員会等を中心にして活発な調査活動を開始しており、その関心は非常なもので AIEE Transactions だけでも 1945~1954 年の間に絶縁開発および評価の問題に関する約 50 の論文が出ている。これら研究の結果が、やがて新しい規格となって現われることであろう。

以下まず II・III では主として文献 (1) (2) (3) に述べられたこの問題に関する歴史を簡単に紹介しておいて現状を概観し、IV では半ば必然的に生じてきたとも考えられる機能的試験法について述べてみる。

### 2. 電気絶縁温度区分の歴史

現在の AIEE 規格 No. 1 "General Principles Upon Which Temperature Limits Are Based in the Rating of Electric Machines and Apparatus" は 1913 年頃その第 1 版の上梓を見たものであるが、当時はまだ合成材料もなく、天然に存在する材料は有機物か無機物かに分れ、許容使用温度による分類も比較的簡単であった。絶縁種別に対する許容温度は最初簡単な試験を基にして決められたが、分類は構成材料が有機物か無機物かということで大ざっぱに定められた。その後有機材料はまったく有機繊維質のみからなるもの (O 種) とワニス含浸または油浸の状態で使用するもの (A 種) の

2つの区分にわかれ、しかしながら、幾回かの改訂を経てきた AIEE 規格 No. 1 でも“絶縁材料の温度区分はその組成一すなわち、有機物・無機物・有機物接着剤を有する無機物などによって定義する”という原則には変更が行われなかった。英國でも米国の規格に準じて 1917 年、絶縁材料の温度区分の問題を探り上げた。この問題が国際的に初めて討議されたのは 1906 年のミラノ会議でその後 1927 年頃に至って国際的にも認められるようになった。1935 年、IEC で採用された絶縁材料の分類はつぎのようである。

種別	材 料	最高温度
O	{ 木綿、絹、紙、および類似の有機物で含浸もしくは油浸をしないもの	(90°C)
A	{ " したるもの およびエナメル線用エナメル	(105°C)
B	{ マイカ、アスベストおよび類似の無機材料を接着セメントで組合せたもの	(130°C)
C	{ 接着剤を有しないマイカ、磁気、ガラス、石英、その他の類似品	—

AIEE 規格 No. 1 (1930)、VDE 規格 (1912)、英國規格 (1940) もほぼ同様である。

AIEE 規格 No. 1 に大きい変化を与えるようになったのは耐熱性の優れたシリコン樹脂の出現である。これによって、AIEE 規格 No. 1 (1947)<sup>(4)</sup> にはあらためて許容温度 180°C の H 種が設けられたが、この場合もその耐熱性の程度はいろいろ論議の対象になったようである。また 1913 年の規格制定時にすでに一部意見のあった“組成”による温度区分に対して再び強い意見が述べられるようになったが<sup>(5)</sup>、これについては後で述べる。いずれにせよ、この規格には過去 40 年間の伝統が厳としてひかえ動かしがたい力をもっていたわけである。

### 3. 電気絶縁温度区分に対する現状

この問題に関しては米国では AIEE が主体となって活発な研究活動を行っていることについてはすでに述べたが、この AIEE と ASTM (American Society for Testing Materials) の研究グループはつぎのようなものである。

- (1) The Working Group on Functional Evaluation of Rotating Machinery Insulation Systems.  
これは G.E. 社の P.L. Alger 氏が主査となり、回転機絶縁の機能的試験法の作成に当っている。
- (2) The Working Group on Life of Insulating Materials of the AIEE Transformer Committee. G.E. 社の J.L. Cantwell 氏が主査で乾式変圧器絶縁の許容温度を定める機能的試験法および試験規格を立案中である。
- (3) The Working Group on Evaluation of Thermal Stability of Insulating Materials. W 社の T.W. Dakin 氏が主査で絶縁材料の耐熱性を評価する試験方法および規格を研究し、AIEE

電気絶縁材料の温度区分に対する最近の情勢・大西

規格 No. 1 改訂のための資料を作成しつつある。

- (4) Section K on High-Temperature Performance of Electrical Insulation of Sub-Committee XII of ASTM Committee D-9 on Insulating Materials. G.E. 社の K.N. Mathes 氏が主査を務め、(a) 絶縁物に対する高温の影響を研究する、(b) 現行の試験法を検討し、必要があれば新しい試験法を作ることに努力している。

一方、IEC では 1952 年のオランダ Schwenningen における会議ではじめてこの問題が具体的に討議され、現在の絶縁材料分類法を改正するための委員会が設けられた。この会議ではイスから、新しい絶縁種別 E, F を設けること、実績と耐熱性に関する知識を基にし化学組成に従って各種絶縁材料を絶縁種別に分類する、という 2 つの提案が出された。これを簡単に表示するとつぎのようになる<sup>(6)(7)</sup> (1 表)。この提案は 1952 年 12 月、

1 表 絶縁種別 (1952 年 IEC スイス提案)

絶縁種別	主絶縁材料	2 次 絶縁 材 料	最高温度
O(Y)	有機質繊維	なし 鉛油	90°C
A	"	天然油脂、天然樹脂 アスファルト系ワニス	105°C
E	"	天然油脂、天然樹脂 アスファルト系とともに合成樹脂を主とするワニス	120°C
B	無機質繊維	天然油脂、天然樹脂 アスファルト系ワニス	130°C
F	"	合成樹脂、加工油脂 ワニス	155°C
H	"	シリコーン 樹脂ワニス	180°C
C	—	—	180°C 以上

IEC 報告 2C (Secretariat) 6 に述べられてあるが、試験データの不足から絶縁材料を各絶縁種別に並べることには無理があったようである。この提案に対し、米国はかなり反対の意向を示し、またその態度を明かにするため IEC 国内委員会に特別小委員会を設け、この提案をさらに検討した結果を 1953 年 4 月の IEC 報告 15 (USA) 3, 2C (USA) 3 に述べている。1953 年ユーゴスラビヤ Opatja における IEC 会議で米国はその態度を明かにし、絶縁種別の問題については広範囲な研究をただちに開始すべきであるとし、従来の化学組成によつて絶縁材料を分類する代りに将来は絶縁材料の耐熱性を定量的に定める試験法を採用することを強調した。もちろん現状ではかかる試験法としてはまだ認められたものがないので暫定的には IEC Publication No. 34 に AIEE 規格 No. 1 で決めた H 種を加えたものを国際規格とし、絶縁材料の耐熱性を評価しうる試験法の立案を推奨した。この米国の態度に対し、英・独・仏は讃意を示したが、スイスはこれが国際規格になるには相当の年月のかかることを理由に反対し、暫定規格を 1954 年の IEC に提案することになった。

1954 年 9 月の Philadelphia における IEC 会議では先の会議で決議された絶縁材料の温度分類に対する案 2C (Secretariat) 10 および米国国内委員会の提案 2C (USA) 5 “Test Procedure for Evaluation of System of Insulating Materials for Random-wound Electric Machinery” について討議が行われた。その結果、各国委員からの意見を基にして修正が行われ、意

見の一致をみたので、その修正可決案は事務局から推奨案として各国内委員会に送られることになった。また米国内委員会は報告書 2C (USA) 5 の改正に着手し、これを IEC 事務局に送って検討を経た後、各国内委員会に研究用として配布することになった。このような結果をえた裏には広範囲にわたる研究、活発な討議が行われたこと、そして各国相互間の友好的な理解があったことは充分想像できるものである。

温度分類の定義に対してはもちろん意見が多かったが、充分考慮の払われた結果、確然とした区分はもはや存在しがたいものであり、材料評価の問題も早急に解決のつくものとは考えられないから、定義にはかなり広義に解釈できるものを採用している。このことは IEC の推奨案 2C (Central Office) 3<sup>(8)</sup> を見れば容易にうか

がうことができる。すなわちこの第 2 項“温度分類”には“合理的温度限界は経験または充分信頼できる試験によってのみ定まる。絶縁物の温度限界の決定にはかかる経験と試験が承認されるべきである。”

付録にかかげた絶縁材料の分類表（2 表）は指針として便宜上示したものであり、温度限界を定めるにあたっては何らの拘束を与えるものではない。

絶縁物はつぎのような種別に分類できる……”

とあり、Y・A・E・B・F・H・C の各種別に対して定義を与えている。たとえば、B 種に対する定義を引用すれば、

“B 種絶縁とは、マイカ・ガラス繊維・アスベストなどの材料もしくはそれらを組合せたものを適当な接着材とともに用いたものである。その他の材料もしくはそ

2 表 IEC 絶縁種別と絶縁材料

種別	絶縁材料	④の製造の際用いられる接着含浸あるいは塗布材料	絶縁を完全にするために使用される含浸材料
Y	主 綿、絹、再生、センイ、サクサンセンイ ナイロン、紙および紙製品、プレスボード 堅ファイバー、木、アミリン樹脂、尿素樹脂	なし	用いぬ
	補助 アクリル酸樹脂、ポリエチレン、ポリスチレン 塩化ビニール 天然ゴム 加硫物 ワックス	なし	用いぬ
A	主 綿、絹、再生センイ サクサンセンイ ナイロン 紙及び紙製品 ブレボード、堅ファイバー、木 ワニス クロース ワニスペーパ	なし	油性ワニス、セラック、コーバル その他 天然樹脂
	木材基積層品 サクサンセンイ素フィルム サクサン、ブチルセンイ素フィルム ポリエステル 樹脂(フィラーナン) エナメル線用 油性ワニス アミドレジンワニス	油性または油変性合成樹脂ワニス フェノール樹脂	センイ素 エステル エーテルの 溶液または懸濁液 その他 上級に属するもの 絶縁油および合成絶縁液
E	主 エナメル線用 ピニルフォルマール ウレタン、エボオキシ樹脂	なし	上記のものおよび上級に属するもの
	補助 木粉基形造物 綿布、紙基積層品 ポリエステル樹脂 セルローズ、トリニアセテート 皮膜 マイラー、ダクロン	なし	上記のものおよび上級に属するもの
B	主 硝子、ファイバー、アスベスト ワニス硝子クロース、ワニスアスベスト	なし	—
	補助 マイカ製品 (支持材料の有るもの無いもの)	油変性合成樹脂ワニス セラック、アスファルト 油変性 合成樹脂ワニス、アルキッド樹脂 ポリエステル、エボオキシ樹脂	油性、アスファルト、合成樹脂 ワニス、 ポリエステル樹脂、エボオキシレジン(苛酷な 機械的な力を受ける場合は上記のものは不適當 で非変性フェノリックレジンを要す) その他 上級に属するもの
F	主 硝子センイ アスベスト ワニス 硝子 クロスおよびアスベスト マイカ製品(支持材料の有るものないもの)	なし	本種に属する上記のもの及び上級に属するもの
	補助 鉛物質基形造品マイラー	油変性アルキッドワニス	—
H	主 硝子センイ、アスベスト ワニス硝子クロスおよびアスベスト	なし	熱安定性良好なアルキッド、エボキシ、ポリエ ステルおよびポリウレタン樹脂、シリコーンアル キッドおよびシリコーンエンドリック樹脂 その他上級に属するもの
	補助 マイカ製品(支持材料の有るもの無いもの) 硝子基、アスベス基積層品 シリコーン ゴム	シリコーンレジンおよびゴムベスト シリコーンレジン	シリコーン レジン
C	主 マイカ、陶磁器、硝子、石英	なし	硝子、セメントの如き無機接着剤
	補助 ワニス 硝子布、アスベスト、マイカ製品 テフロン、ケル F	熱安定性良きシリコーン (225°C まで) (250°C まで)	熱安定性よきシリコーン (ただし 225°C)

これらの組合せ、必ずしも無機物とは限らない、で経験または信頼できる試験によって B 種の温度で使用可能と判定できたものはこの種別に入れてもよい。”

となっている。その他の種別に対してもほぼ同様な定義となっている。

なお、1954年の会議では IEC 絶縁材料技術委員会 (TC 15) とその専門委員会も開かれ、委員会の協力と専門技術活動を円滑に行うため、米国の提案によって、絶縁耐力・絶縁抵抗・熱安定性などに関する研究グループが暫定的に設けられた。このうち、第5研究グループ（絶縁材料の分類を主として研究する）のスイス代表から絶縁材料分類に関する一般的方法について提案<sup>(9)</sup>が出されているが、これを示すと 3 表のようなもので、絶縁材料を大ざっぱにグループわけした一般的分類法を与えてある。

ドイツでは 1951 年に VDE 委員会 0550 が絶縁材料の分類に関する問題をとりあげており、その審議結果を

IEC に提案している。1953 年には VDE 0530 “電気機械に関する規格”(案)が出されたが、これには従来の Y・(0)・A・B・C 種の外に新たに E・F・H 種が加えられ、規格の 4 節 B および C に温度上昇の問題がとりあげられている。これによると、絶縁種別の増加によって問題が複雑になることを防ぐために、個々の絶縁材料の耐熱性による分類および取扱法についてかなり詳細に述べており、有機ワニスおよび F 種接着剤の判定には試験法が明確に規定されているようである。また許容温度上昇に対しては、IEC と同様に周囲温度を 40°C にとり、推定最高温度の所と測定可能な所との温度差を考慮している。これを示すと 4 表のようなる<sup>(10), (11)</sup>。

イギリスの IEC 国内委員会から ISO に対して絶縁種別の増設およびこれに使用できる材料に関する案が示されているが、その原案はドイツ VDE 規格と大差ない。ただ酢酸セルローズは未決定であるが、ドイツでは

3表 電 気 絶 縁 材 料 の 分 類

絶縁材の最終形態	工作時の補助機構	絶縁材の構造・型		絶縁材料名	
		完成品	半完成品		
気体絶縁材料				ガス	空気、水素、ヘリウム、窒素など
液体絶縁材料				絶縁油	鉱油、植物性油、塩化ジフェニール 沸素誘導体、シリコン油、スルファンなど
固体絶縁材料（工作時に物理的・化学的変形のないもの）		無定形固体			ポリイソブテン
		粉末、碎片、繊維			アスペスト繊維 無機質粉
		单纖維			合成单纖維 ナイロン、サランなど
		糸状固体			ヤーン、糸、コードなど
		ヤーン糸コード			" (左)
		ワニス処理ヤーン、糸、コード			" (左)
		膜状固体(ウスイチューブを含む)	皮膜、シート	無処理皮膜シート	セロファン、酢酸繊維素、酢酸ブチル繊維素 エチルセルローズ、ポリエチレン、ポリステレン PVC、ポリアミド、デフロン、ポリエチレンなど
		紙、繊物		無処理紙、繊物	繊維素紙 アスペスト紙、綿織物、ガラス繊維
		ワニス処理紙 繊物		ワニス処理" "	ワニス処理紙—アスペスト紙—綿織物—ガラス繊維
		積層品		板状積層品	積層マイカ、マイカテープ、積層マイカ板、積層マイカクロース
		塊状固体(厚いチューブを含む)	非積層品	非積層塊状固体	磁器 磁性部品
			積層品	積層塊状固体	熱硬化性成型品
		無溶剤接着材	皮膜シート	Pressure-sensitive接着用皮膜シート	熱可塑性成型品
		板状固体	紙、繊維	" 紙、繊維	その他
固体絶縁材料（工作時に物理的・化学的变化をうけるもの）		積層品		" 積層品	カゼインプラスチック 加硫ゴム
		"	皮膜シート	Heat-sealing 用皮膜シート	積層フェノール—アミノプラスチック
			紙、繊維	" 紙、繊維	積層ポリエチル、積層マイカ
			積層品	" 積層品	g Pressure-sensitive セルローズテープ
		"	皮膜シート		" 紙ベーステープ
			紙、繊維		
			積層品		
		溶剤つき接着材		溶剤反応性接着材を塗布した皮膜シート	シェラック紙
		"	皮膜シート	" 紙、繊維	マイカ箔
			紙、繊維	" 積層品	
ラッピング積層時にボンドを用いるもの		積層品			
		融接		皮膜シート	Wat マイカテープ
		—	"	融接可能な皮膜シート	天然合成ワックス、アスファルト、コンバウンド
		リ固物理化変化によじら	溶剤なし(凝固)	可融絶縁物	" (フィラ入り)
		化変物理化で固化	液(高溫)	" フィラなし	
		(化変化によじら)	溶剤入り(揮発)	フィラなし	
			液(常温)	顔料なし	セルローズ、ラッカ 天然、合成樹脂溶液
				顔料入り	" (顔料入り)
			溶剤なし	溶剤揮発乾燥ワニス	合成樹脂油性ワニス
			液(常温)	" (顔料入り)	" (顔料入り) ペイント
成型充填含浸		化変物理化で固化	溶剤入り(揮発)	溶剤の揮発、化学反応で乾燥するワニス	硬化性、封塞、充填用バテ
			液(常温)	顔料なし	不飽和ポリエチル樹脂、エポキシ樹脂
				顔料入り	" (顔料フィラ入り)
			無定形固体	バテ	エポキシ樹脂
			液(常温)	顔料フィラなし	" (フィラ入り)
				" 入り	glazier バテ
			液(高溫)	フィラなし	
				フィラ入り	
			無定形固体	" (フィラ入り)	
		共重合化で(重合化)	溶剤なし	無溶剤硬化性バテ	

4 表 定格使用時の絶縁の分類および許容温度上昇

1. 2			3	4	5	6	7
番号	分類記号 新　　旧			処理	最高許容持続温度 $\theta_{max}^*$ °C	裕度 $\Delta\theta$ °C	許容温度上昇 $\theta_{max}^*$ °C $\Delta\theta=40°C$
1	Y	O	木綿 繊維素 入網 天然綿糸 紙 ブレスパン ヴァルカナイズド ファイバーワニス 油変成合成ワニス	非含浸	90	5	45
3	A	A	木綿, セルローズ, 入網 天然綿糸 紙 ブレスパン ヴァルカナイズド ファイバーワニス 油変成合成ワニス ワニス アスファルト コンパウンド	含浸剤 液状誘電物含浸	105	5	60
5			エナメル電線(繊維絶縁)合成樹脂ワニス (エーデルブレスパン接着) 積層板, セルローストリニアセメント セルローズ, アセトブテラートベースのもの	含充浸漬			
6	E	Ah	VDE 0320 によるフェノールメラミン樹脂ベースの有機絶縁物を用いた成層品 シェラックペーパー	硬化	120	5	75
7			VDE 0318 によるフェノールメラミン樹脂ベースに紙, 木綿 ファイバーを充填した薄成層品 アスファルト, コンパウンド(軟化点 120°C 以上)				
8			雲母, アスベスト, ガラス繊維, マイカ板, マイカクラースマイカナイト	B種相当の含浸剤および充填剤			
9	B	B	フェノール, メラミン樹脂ベースの無機充填剤を使用する成層品	硬化	130	10	80
10			シェラック				
11	F	—	雲母, アスベスト, ガラスに有機物の加ったもの マイカナイト	F種相当の含浸剤および充填			
12			VDE* DIN* 試験規格に合致する含浸, 接着剤, 变性シリコーンおよび同等の有機材料 あるいは同様な耐熱性を有する有機ワニス 接着剤	—	155	15	(100)**
13	H	—	雲母, アスベスト, ガラスに無機物の加ったもの マイカナイト	H種相当の含浸			
14			純粹シリコーン樹脂およびゴム	—	180	15	(125)**
15	C	C	雲母, 磁気, 石英および同等の不燃性材料	ボンドなし	>180	〔使用材料で制限を受ける〕	

\* 審議中, \*\* VDE 0550 では未採択

明らかに E 種と考えている。

#### 4. 電気絶縁温度区分に関する問題・機能試験

すでに述べたように絶縁材料の分類をその化学組成に基いて行うことに対する批判が多い。たとえば Moses 氏は絶縁材料および絶縁組織の評価についてつきのような提案を行っている。

- (1) 絶縁材料の使用にあたってはその耐熱性を明らかにし、その用途に要求される条件を区別する。
- (2) 絶縁の温度区分は機械的あるいは電気的な持特性もしくはその両者がある値以下になるまでの時間と温度の関係から機能的に評価して決める。
- (3) 使用条件を考慮に入れた絶縁組織の耐熱性を機能的に評価する試験法を作る。
- (4) 新しい絶縁材料および組織を分類する際には、組成によるような定性的な方法を取らず、耐熱性について標準の試験法で一般的な試験を行う。

このような意見が見られるようになってきたため、米国の IEC 国内委員会は 1953 年現在の温度区分を暫定的に認め、一方

- (1) 絶縁材料の高温時の物理的・電気的持性と、ヒートエージングを行った場合の劣化特性を充分評価できるような試験法を作ること。
- (2) 各種電気機器の複合絶縁組織に対しても同様な試験規格を作ること。

を提案した。

この機能的評価法について Mathes 氏は“機能的試験”的意味は目的とする特定の絶縁材料あるいは絶縁組織の使用法によって温度分類および評価法を変えること

であるとし、つぎのような原則を示して今までの試験法に批判を加えている。すなわち彼のあげた原則は

- (1) 試験の結果は実際の性能を推定しうるものであること。
- (2) 使用時に考えられる要因のほとんど、少くとも主要因はすべて試験に含めること。
- (3) 試験法は特定の使用条件を対象に考えること。
- (4) 試験はなるべく絶縁材料を実際的な組合せの形で行うこと。
- (5) 試料は簡単で作製が容易であり、再現性のあること。
- (6) 基本的な形の試料ができるだけ各種の試験に利用しうること。

である。

たとえば、絶縁処理の基本となるワニスの耐熱性はマンドレル試験で測定する<sup>(12)</sup>。しかしワニス処理品は實際にはこれほど曲げられることもないし、普通には組合せて用いられるからこの試験は原則の 1, 2, 3, 4, 6 に反していることになる。また Morgan, Mathes 両氏はマンドレル試験では皮膜に伸びが与えられるから適当でないことを指摘している<sup>(13)</sup>。実際にこのマンドレル試験では 5% 以上の伸びが与えられるので、これはヒート・エージングというよりもむしろキュアを測っているものであろうと考えられる。両氏の推奨するマグネット線の Film-Rupture Test<sup>(14)</sup> はマグネット線とワニスを組合せた形で試験するもので、これはこの組合せが実際に広く用いられていること、またマグネット線に与えられる伸びも実際の巻線の場合には低いことからしてはるかに機能的であるといえよう。

絶縁組織の耐熱性評価に関しては、製品<sup>(15)(16)</sup>あるいはモデルモータ<sup>(17)(18)(19)</sup> (“motorette” といわれている)による結果が報告されており、AIEE でも加速寿命試験を定めた規格を検討している。この種の新しい試験規格としては 1954 年 1 月、AIEE 試験規格 No. 1C<sup>(20)</sup> が試験的に用いる目的で発行され、さらにその改訂版がほぼ完成したようである。この規格の目的はその前文にあるように、絶縁組織の使用限界温度を化学成分によらず試験によって定めるためのものであり、温度分類は A・B・H とし、現行の限界温度 105, 130, 180°C を用途によって変更すべきかどうかが検討されている。

規格の第 1 節では試験に用いる試料として電動機(製

品)とモータレットを定義している。第2節では加速試験で同時にあるいは順次加えて行く温度・振動・湿度について規定している。1サイクルの温度とそれに対応する加熱日数を引用すればつぎのようである。

温度°C	A種(105°C)	B(130°C)	H(180°C)
300±5	—	—	2日
280±3	—	—	8日
260±3	—	—	28日
240±3	—	—	49日
200±3	—	2日	—
180±2	2日	8日	—
160±2	8日	28日	—
140±2	28日	49日	—
125±2	49日	—	—

試験はまず熱劣化させ、つぎに機械的振動を与えた後吸湿させ、電圧を印加して劣化を判定する。破壊が起るまではほぼ10回のサイクルがくり返される。規格の第3節には判定に用いる試験電圧の大きさを規定してあるがその値を表示すればつぎのようになる。

実用時の線間電圧	試験電圧	(60c/s)
Volt rms	対地	巻線間
250以下	300	300
440または550	600	600
		120

試験電圧の大きさ・種類に関しては規格委員会で検討されており近い将来改訂された規格にその結果が発表されるものと思われる。この規格は Cypher, Harrington 両氏の結果を参考にしているようであるが、Saums, Pendleton 両氏は前者の条件がマグネット線のターン間に對しては苛酷すぎるようにいっており<sup>(21)</sup>、Penn 氏も試験電圧 120V を 50V に変えることによってこの試験法は有効になろうといっている<sup>(18)</sup>。

AIEE で作られた2番目の試験規格は合成エナメル線の評価を取扱っている<sup>(23)</sup>。この規格では撲合わせ(twisted pair)の形でエナメル線を試験する方法について充分考慮しているようである。

第3の規格は乾式変圧器に対するもので、ほぼ完成の域に達しているようである。この規格は普通寿命を定めるのに従来のものと比較して行う方法とは異り、あらかじめある試験条件に対する寿命を定めておき、供試物にこの試験を行ってみてその適否を判定しようとするものである<sup>(23)(24)</sup>。なお乾式変圧器の機能試験に関しては Narbut<sup>(25)</sup>, Hamilton<sup>(26)</sup>, Schwenk<sup>(11)</sup>らの論文がある。たとえば Hamilton は、(1) 機種によって試験規格を変えること、(2) 絶縁の評価は材料と組織の両者について行うこと、(3) 絶縁の特性は時間と温度の函数として考えること、を提案し、5表のような試験法を示している。

Schwenk によるドイツの小型乾式変圧器の試験法はまず周囲温度 35°C で通電する。この際抵抗法で測定した巻線中の最高温度上昇が 100°C になるまで 2次電流を増加し 240 時間運転する。この間、60, 120, 180 時間ごとに室温まで冷却し、コイルおよび巻線試験を行う。

電気絶縁材料の温度区分に対する最近の情勢・大西

5表 小型乾式変圧器試験法

順序	試験	時間
1	250°C, 25% RH 電界を加える	24 5 sec/unit } 初めだけ
2	加熱(6台を3組使用、異った温度処理)	120~130
3	最高巻線温度の測定	3 min/unit
4	25°C 50% RH	2
5	電界	5 sec/unit
6	機械力	3 min/unit
7	25°C 50% RH	2
8	100% RH	16
9	電界	5 sec/unit
10	23°C 50% RH	2
	2~9 の順序を破壊するまでくり返す	

なお過酷な要

求のある場合、

温度上昇を

135°C にあげ

て同様な試験

をするように

なっている。

このほかに

AIEE では

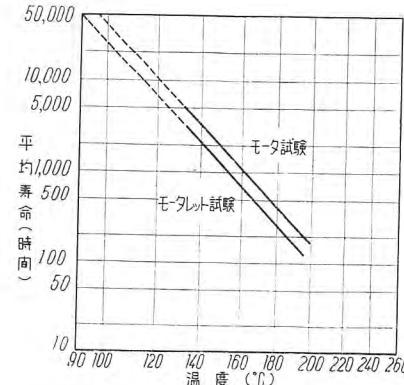
form-wound

コイルの回転

機、小型特殊

変圧器などの

規格も考慮されているようである。



1図 寿命、温度曲線—モータ、モータレット  
Fig. 1. Life versus temperature-motors and motolettes.

さてこのようにえられた短時間の試験結果から実際の寿命を推定することについては Dakin その他の論文があり、いろいろ検討されているが、充分注意をする必要があるようである。1図は上に述べた AIEE 規格 No. 1C の方法でモータとモータレットの寿命試験を行った結果の一例であるが<sup>(27)</sup>、図からえられる 105°C で 10,000 時間 140°C で 1,000 時間以上という寿命の期待値は A種絶縁に対する過去の実績にかなりよく一致しているようである。

複合絶縁組織に対して機能的評価が望ましいということは、絶縁の寿命の終点を定義することが本来不可能に近いことによるものであろう。複合絶縁組織の劣化特性は各材料を個々に試験した結果からはほとんど予測することはできない。したがって、特定の材料がとくにある複合絶縁組織に結びつけられる場合はもちろん考えられることであるが、絶縁組織に対してはやはり機能的試験を行うべきであろう。しかしこのことは、材料間の比較を行いたい場合、個々の材料に対して試験を行うことが無意味だというわけではない。むしろ材料の耐熱性はそれが実際に用いられている形で評価することが強調されているものと思われる。実際われわれは絶縁材料の耐熱性に関するデータが欲しいのであり、耐熱性を測りうる試験法の完成を大いに期待するものである。しかしながら、材料の耐熱性に関するデータが機器の許容温度限界を定める尺度になりうるとは簡単には考えられない。したがって許容温度限界は実績と高温時の機器の特性を考慮に入れて、絶縁組織について考えるものであり、材

料に対しては簡単にいえないであろう。

絶縁材料の機能的試験に関しては現在の所、ワニスとマグネット線の組合<sup>(16)(28)</sup>、マグネット線<sup>(29)(30)</sup>、変圧器絶縁油などの結果が報告されているが、まず新しい材料を評価しうる試験法、規格の完成が切に望まれる所である。

## 5. む す び

以上主として海外の文献から電気絶縁の温度区分およびそれに関連した試験法・規格に対する最近の情勢を概観してみた。

現在用いられている O, A, B, H, C の分類では新しい絶縁材料あるいは方式がいずれの区分に属するかを決めるることは困難である。すでに IEC の提案にもあるように E, F 種を付け加えることが考えられる。しかし分類を現行のものよりさらに細かくすれば、新しい材料の種別を決めるときはもちろん、他の材料を利用するときにも問題を生じてくるであろう。かかる理由から新しい種別を加えることはあまり望ましくなく、もし加えるとしても F 種 1 種のみがよいという意見もみうけられる。

また限界温度は材料の使用法を考慮して規定されるべきものであり、機種によって異ったものになりうる。そのほか試験は簡単で費用がかからず、結果の解析が行いやすいものでなければならぬであろう。

ともあれ、絶縁材料はもはや化学組成によって分類できるものではなく、絶縁組織の寿命試験が温度分類の基準として暫次ひろく用いられつつある。

この問題に関して、アメリカの合理的な考え方とヨーロッパ各国の現実的な行き方とを対比することは興味深いものがあり、わが国における今後のこの種の研究のあり方にも大きい影響を与えるものであり、注目すべきことであろう。

このように温度による絶縁材料の合理的な適用に関しては未解決の問題が多い。当社においてもかなり以前からこの問題について各部門が協力して研究を続いている。合成化学とその応用工学の進歩してやまない今日、この問題は無限に続くようと思われるが、その 1 つ 1 つが解決されて行く時、需要家はもとよりわれわれ製造者もその受ける利益は非常に大きいものとなろう。

当社は昨年他社にさきがけてサイズの切りつめられた新型モータを世に問うたが材料の節約による原価の低減と同時に需要家においても設置空間の縮少と据付費の減少をはかることができるはずで相互に利するところは少くないと信ずる。今後ともわれわれはこの問題の解決のために日々努力を続けるつもりである。

最後にこの調査研究にいろいろご援助いただいた当社研究所の石黒・森田両氏に心から感謝する次第である。

## 参 考 文 献

- (1) L. J. Berberich: International Activities on Thermal Evaluation of Insulating Materials, E. E. 72, 240 (1954).
- (2) K. N. Mathes: Principles for Temperature Classification of Insulating Materials by Functional Test,

Ibid. 72, 243 (1954).

- (3) H. F. Miller: General a Problems Related to the Temperature Classification of Insulating Materials, AIEE S-61, 12 (1954).
- (4) AIEE Standard No. 1: General Principles upon which Temperature Limits are Based in the Rating of Electric Machines and Apparatus, 1947 & 1954.
- (5) G. L. Moses: Re-examination of Temperature Standards for Electrical Insulation, AIEE Transactions Power Apparatus and Systems, Aug. 1952 pp. 681-5.
- (6) R. Snadow: Zur Klassenteilung der Isolierstoffe, ETZ-A Bd. 74 (1953) S. 463.
- (7) IEC Technical Committee No. 15: R. M. 288, Dec. 1952.
- (8) IEC 2 C (Central Office) 3: Recommendation for the Classification of Materials for the Insulation of Electrical Machinery and Apparatus in Relation to Thermal Stability in Service, May 1955.
- (9) K. N. Mathes: Insulating Materials, reprinted from Electrical Manufacturing, Nov. 1954.
- (10) F. Hillbrand: Zur Neufassung von VDE 0530 "Regeln für elektrischen maschinen" ETZ-A 75 Heft 1, 1 Jun. 1954, S. 20-22.
- (11) W. Schwenk: Wicklung Erwärmung bei kleine trockenisolierten elektrischen Geräten, ETZ-A, 75 Heft 11, 1 Juni, 1954, S. 362-364.
- (12) Tests for Insulating Varnish Heat Flexibility, ASTM D 115-52T.
- (13) H. I. Morgan & K. N. Mathes: Wire & Wire Product, 29, 967 (1954).
- (14) H. I. Morgan & K. N. Mathes: Film Rupture Versus Aging for Enamelled Wire Varnish Combination, AIEE S-61 pp. 26-30 (1954).
- (15) G. L. Moses, et al: Motor Tests Evaluate Thermal Endurance of Class H Insulation and Silicone Varnish, AIEE Transactions, Vol. 68, Pt. 2, 1949, pp. 1133-8.
- (16) K. N. Mathes: Aging Small Motors, AIEE Transactions, Vol. 71, Pt. 3, (1952) pp. 254-62.
- (17) G. A. Cypher & R. Harrington: Functional Evaluation of Insulation System, AIEE Tech. Paper 52-57., (1954).
- (18) W. B. Penn: Motorette as a Tool for the Development of Improved insulation Systems, AIEE Tech. Paper 54-365 (1954).
- (19) T. J. Gair: Insulation Systems for Random Wound Motors Evaluated by Motorette Test, AIEE Tech. Paper 54-373 (1954).
- (20) AIEE Standard No. 1 C: Test Code Evaluation of System of Insulating Materials for Random-Wound Electric Machinery, Jan. 1954.
- (21) H. L. Saums & W. W. Pendleton: Effects of Accelerated Aging on the Dielectric Strength & Power Factor of Magnet Wire Measured at the Aging Temperature, AIEE S-61 pp. 30-39 (1954).
- (22) J. E. Dexter: Report on Results of Cooperative Test Program on Test Procedure Used for Evaluation of Thermal Stability of Enamelled Magnet Wire, AIEE Fall-Meeting Oct. 11-15, 1954.
- (23) Proposed Test Code for Functional Temperature Endurance Tests of Ventilated Dry-Type Power & Distribution Transformers, AIEE Tech. Paper 55-435, (1955).
- (24) Paul Narbut: Functional Life Tests of Insulation Systems for Dry-Type Transformers, AIEE Tech. Paper 55-449, (1955).
- (25) Paul Narbut: Temperature Classes for Dry-Type Transformers as Determined by Functional Test, AIEE Tech. Paper 53-246, (1953).
- (26) R. L. Hamilton & H. B. Harms: Functional Evaluation of Insulation for Small Dry-Type Transformers, AIEE Transactions Vol. 73 (1954) Power Apparatus & Systems pp. 605-610.
- (27) P. L. Alger & K. N. Mathes: Electrical Insulation Progress, AIEE Conf. Paper 55-562, (1955).
- (28) C. L. Herman: Motor Insulation Life as Measured by Accelerated Tests and Dielectric Fatigue, E. E. 73, 33 (1954).
- (29) F. A. Sattler: Determination of Thermal Life of Enamelled Wire by Laboratory Test Methods, AIEE Tech. Paper 55-47.
- (30) E. L. Brancato & R. S. Phillips: Functional Evaluation of Magnet Wire Insulation, AIEE Tech. Paper 55-48.

# ニュース フラッシュ

## わが国で最初の電力用単巻変圧器

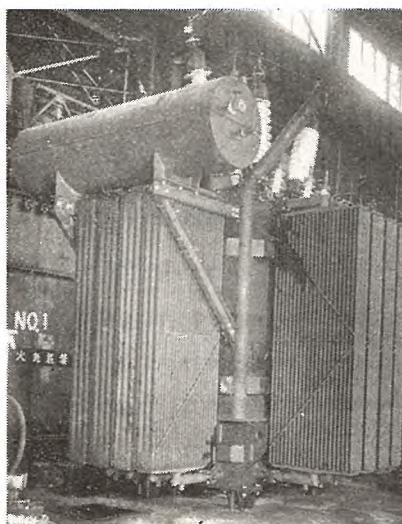
単巻変圧器は普通の2巻線変圧器に比し重量が軽くなり能率がよく漏洩リアクタンスが小さくなる利点を有し古くから特殊用途には盛んに使用されていたが、電力用としてはわが国では系統の構成上採用され難い状態であった。直接接地系統の普及している米国では電力用に盛んに単巻変圧器（Auto-transformer）が使用されていることは周知のとおりであるが、最近わが国においても新しい超高压の系統は直接接地が採用され、なお旧系統を直接接地にして送電電圧を昇圧することが企てられている。

後者の1つとして四国電力で宇和島系の100 kV 昇圧が行われているがこれに使用する 13,000 kVA の変圧器は当社で製作され、わが国初めての単巻変圧器が出現した。直接接地系であればいわゆるインバージョンの問題もなく段絶縁した単巻変圧器が製作できるのである。仕様は

線路容量	13,100 kVA (1 次, 2 次)
1 次	110,000 V (70 号絶縁)
2 次	54,500 V (40 号絶縁)
3 次	10,500 V 6,000 kVA
3 φ	60 c/s 油入自冷式
外鉄型	フォームフィット式

でもちろん中性点は直接接地で低減絶縁、段絶縁が採用されている。(70号絶縁で 110 kV に使用)

単巻変圧器に対しては外鉄型（Shell Form）の構造が絶縁上も機械的にも著しく有利になるもので、とくに高電圧で巻数比が1に近い場合には外鉄型でないと製作できないといわれている。始めての単巻変圧器の出現に対し、この点とくに注目願いたい。（詳細は追って発表の予定）

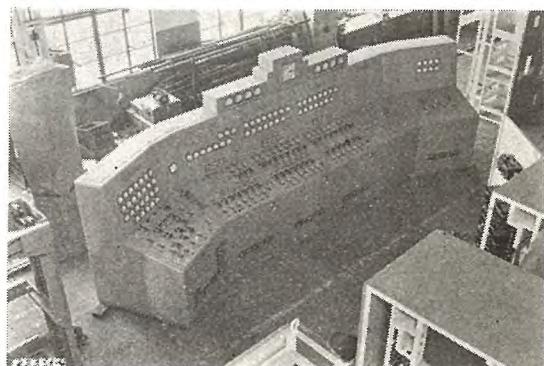


完成した単巻変圧器

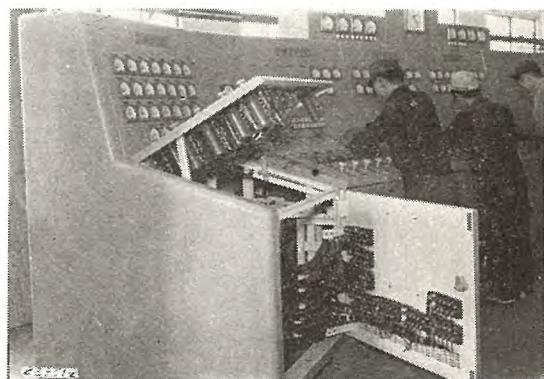
## 縮少型配電盤、東洋レーヨンへ納入

最近は発電所ならびに変電所から縮少型配電盤が要求される傾向が多くなったが、この種の代表的なものとして東洋レーヨン滋賀工場として屋内用メタルクラッド 53 面を制御する縮少型配電盤が完成した。この縮少型制御盤はつきのような特長を持っている。

1. 小型広角度計器を採用したので屋内用メタルクラッド 53 面の制御盤が写真のように極度に縮少された寸法に収納されている。
2. 小型広角度計器の構造は 80×80 mm, 腕径 65mm, 目盛長 130 mm である。
3. 机型配電盤の斜面部および下部が扉式になっているので、内部配線の施行および照査は従来のものに比較して簡易かつ便利にできる。



縮少型制御盤（東洋レーヨン納入）



斜面および前面を開いたところ（同上）

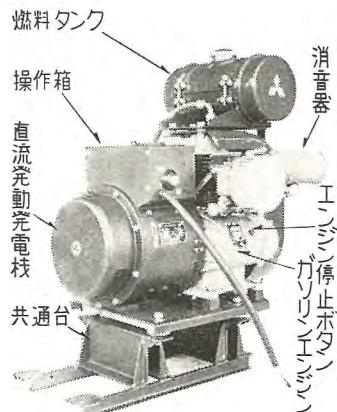
## 日本一大きいダイナモーター

外枠全体が回転軸の周りに回転し得る機構を有し、供試原動機に動力計電機子を直結運転し原動機軸トルクを測定するもので、ガスタービンなど高速度原動機の出力測定、ターボ型送風機など高速動力機の軸入力測定等に使用される。

写真は三菱造船所納入の 900 HP ダイナモーターで容量

900 HP (2×450) 電圧 600 V, 回転数 2,700–4,000 rpm, 制御方式ワードレオナード式, 730 kW 電動発電機の外に下記付属品を有す。

1. トレド形自動秤
2. 電動送風機（通風冷却用）
3. フレーム固定用電磁石
4. 軸承潤滑用油ポンプおよびタンク
5. 共通台秤
6. 電気式回転計



900 HP ダイナモメータ

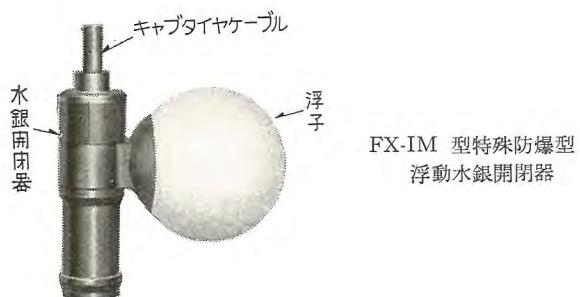
## 蓄電池充電用発動発電機

陸上自衛隊より受注したガソリンエンジン直結 0.85 kW 直流発動発電機 50 台は工場における公試運転も良好なる成績にて無事終了、指定納期どおりに完納することができた。大体の仕様ならびに作動は下記のとおりである。

1. 直流発動発電機  
出力 0.85 kW 電圧 12.5 V 回転数 3,400 rpm
2. ガソリンエンジン  
出力 3 HP 3,400 rpm
3. エンジン始動  
蓄電池容量のある場合は操作箱の始動開閉押ボタンを押して行うなおロープ始動もできる。
4. 発電  
エンジンが全速に達し発電機電圧が蓄電池を充分に充電しうる電圧に達すると、充電自動スイッチが動作し蓄電池を充電する。
5. エンジン停止  
エンジンの停止ボタンを押すとエンジンは停止する。

本器は特殊防爆構造でさらに耐酸、耐アルカリ性をも兼備した浮動水銀開閉器であり、水面に吊り下げて使用する。ロープ滑車ならびに重りなどの必要がなくわずかの水位変化に確実に応動ししかも安価である。

水銀開閉器を樹脂製の円筒に入れ、特殊成形材料（アラダイトレジン）にて一体に埋込んだもので水銀スイッチが防爆構造である点を生かし、欠点であるリードの断線漏気ガラスの破損等を防止し、かりにガラスに亀裂が入っても気密を保つ構造で、材料には金属を使用していないため浸食性の水中で使用するのに適し起動停止にそれぞれ 1 個必要である。



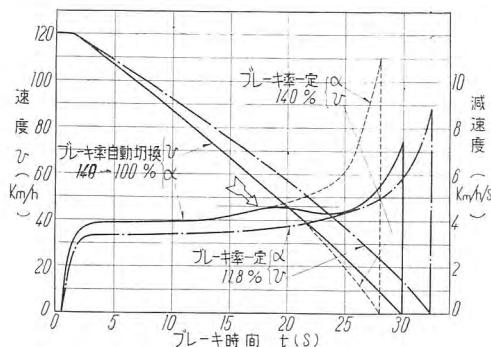
## 電気車の高速化をもたらす スピード・ガバナ・コントロール

一般に編成列車のブレーキ装置としては自動空気ブレーキが用いられてきたが、「非常ブレーキ距離は 600 m 以内」という規則を厳守しての高速度運転のためには、110 km/h に対しては、空走時間短縮のために電磁直通ブレーキの採用を必要とし、さらに 120 km/h におよぶ場合に対しては、ブレーキ率を速度に応じて自動制御する方法、すなわち “スピード・ガバナ・コントロール” の追設を要するというのが JREA (日本鉄道技術

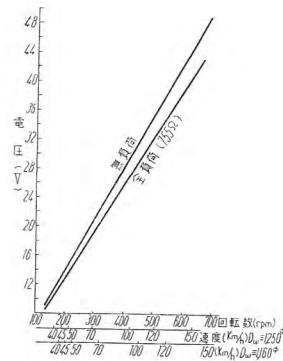
協会)専門委員会の結論とされてきたところである。

一方わが国鉄においては、今秋の東海道全線電化完成に伴う高速化ダイヤの樹立(超特急の出現)を目指して種々の調査研究を進められていることは周知のとおりであるが、その一端としてここに提示する電機品は新三菱重工業三原製作所で製作された空気部品と共に EH 10 形電気機関車牽引の高速試験列車に装備された上、去る 3 月 15・16・17 日の早晩東海道本線藤沢—茅ヶ崎間で行われた高速度ブレーキ性能比較試験に供されたブレーキ率制御装置であり、その試験結果としては上述の JREA 専門委員会の結論通り、ブレーキ初速 120 km/h より 600 m 以内に停車するためには「スピード・ガバナ・コントロール」が不可欠であることが証明された。

なお今回の試験においては、電磁直通ブレーキ装置を装備した客車 4両を牽引する機関車の動輪軸箱の 1箇所に車軸発電機が取付けられてその列車速度に応じた回転数に比例する発生電



ブレーキ率制御の効果。  
(注) 矢印はスキッド限界に接してのブレーキ率自動切換点を示す

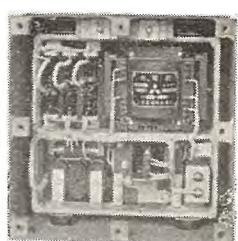
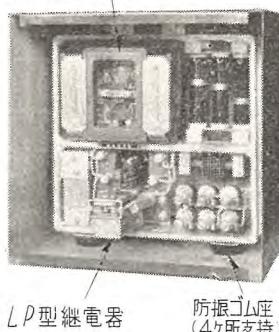


DG-1 型車軸発電機速度特性



DG-1 型車軸発電機

### KP型繼電器



(裏面)

(正面)

### 切換継電器箱

正に対し、2種の組合せ継電器が指定速度で動作するよう調整され、高速度よりのブレーキ適用により励磁された1個の切換電磁弁が継電器の引放し動作によって消磁すれば、空気装置を自動的に制御することによって全列車のブレーキ・シリンダの空圧が円滑に減圧しブレーキ率を低くめるという1段切換装置が用いられた。一方鉄道技術研究所(制動研究室)向としてほとんど同時期に製作納入した3段切換装置は湘南型電車において現車試験される予定となっている。

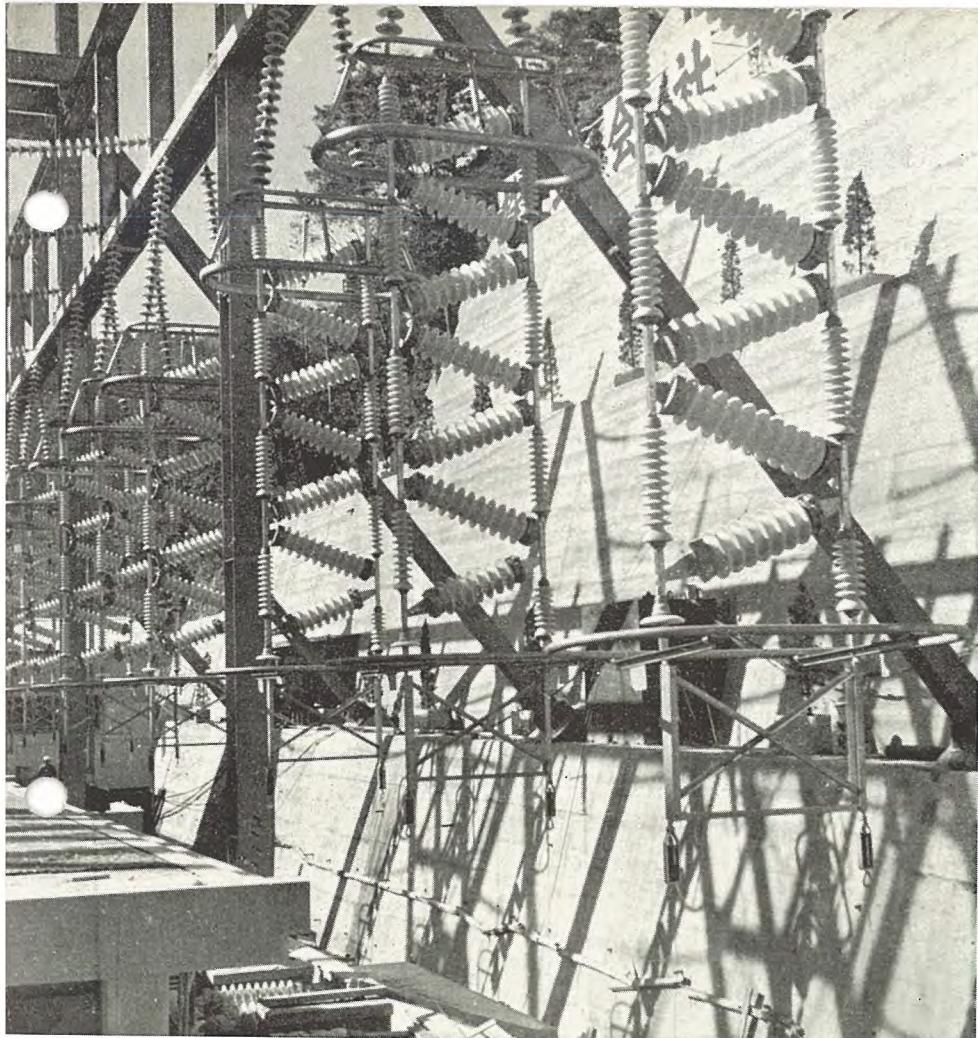
当社がこの新装置のために開発した電気部品の主なものは(a) DG 型直流式車軸発電機——永久磁石を界磁に使用した直流小型発電機で完全防水構造となっている。(b) KP 型継電器——永久磁石と電磁コイルとばねとの釣合作用により数 10 アンペア・ターンで鋭敏な引上げ動作を行う回転構造の継電器、(c) LP 型継電器——KP 型と組合される誘導コイルをもち小型でながら多接点構造となっている。(d) S-23 型空気スイッチ——ダイフラム式ばね速動型で鋭敏な感度をもっているなどである。最後にこの新装置の特長とするとところを述べると

- (1) 高速度でブレーキ・シリンダの空圧を高めてブレーキ率を大きくとることにより一般の場合よりも減速を早め、またより短距離で列車を停めることができる;
- (2) 車輪タイヤ-ブレーキ・シュウ間の摩擦係数が上昇する速度に下がれば自動的にブレーキ・シリンダ空圧を減じて車輪のスキッド(滑走損傷)を防止する;
- (3) 非常に簡単な装置でありながら自動的にほど一定の減速度となる。

という点であり、非常ブレーキおよび減速ブレーキ(制限速度区間進入前)の際の確実な効果はその装置の簡易さに比べて注目すべきものがある。

==== 最近登録された当社の特許および実用新案 =====

区別	名 称	特許または登録日	特許または登録番号	発考案明者	所 属
特許	直流発電機並列運転接続方式	30-12-19	218364	片岡高示	神戸
"	密封型單陽極水銀整流器	"	218365	加藤又彦	伊丹
"	アンテナ方式	"	218366	津喜村連	無線機
"	皮膜抵抗体	31- 1-27	219220	立原芳次	研究所
"	電気弁点弧装置	31- 2- 2	219530	阿部久康	"
"	「ゴム」浮囊舟	31- 2-13	219840	成沢久一	世田谷
"	選択式積算量遠隔計測装置	"	219841	加藤義明	福山
新案	デッドマン型幹制御器	30-12-10	437201	待大鳥和	伊丹
"	密閉型配電盤	"	437202	小路誠	戸神
"	同期機起動装置	31- 1- 5	438122	石橋英樹	戸神
"	可溶器	31- 1- 5	438123	篠崎太郎	古屋
"	油入遮断器	31- 1- 5	438124	新吉元	伊丹
"	並行操作軸の回転互錠装置	31- 1- 5	438125	小橋利雄	"
"	破線定規	31- 1- 5	438126	尾崎俊雄	神姫
"	磁石発電機	31- 1-13	438439	三木隆雄	路
"	積算計器の計量装置	31- 1-16	438645	加藤義明	福山
"	分電盤	31- 1-16	438646	宇佐見重夫	古屋
"	計器継電器の端子函	31- 1-16	438647	佐藤貞雄	福山
"	磁性材料焼成磁化装置	31- 1-16	438648	瀬中村	船山
"	積算計器	31- 1-31	439444	加藤義弘	大福
"	計器用制動装置	31- 1-31	439445	"	"
"	防振座	31- 1-31	439446	津村隆	機所
"	電気弁点弧装置	31- 1-31	439447	平塚篤	研究所
"	伝送線故障点指示装置	31- 1-31	439451	豊田準三	機山
"	積算記録装置	31- 1-31	439538	加藤義明	無線
"	選択式積算量遠隔計測装置	31- 1-31	439539	"	"
"	積層電気機器鉄心	31- 2- 3	439632	神谷昭美	中津川
"	放電燈	"	439633	小椋正勇	研究所
"	ガス分析計の発熱抵抗体素子	31- 2- 7	439805	野加賀貞弘	津崎
"	水車のランナ翼開度自動調整装置	31- 2- 8	439878	尾畠喜行	戸神
"	メタルクラッド配電盤	"	439880	清水喜良	"
"	接地継電器	"	439879	佐々木静	福岡
"	包装容器	"	439940	篠村益	福
"	包装容器	"	439941	"	"
"	金属板の取付装置	"	439942	牟田克己	機崎
"	誘導電動機	31- 2-10	440029	片山仁八	長名
"	電気アイロン	"	440126	野畠昭夫	古屋
"	アイロン	"	440127	東野畠邦	"
"	磁石発電機	"	440128	宮崎秀雄	路姫
"	水銀整流器	31- 2-10	440129	加藤又彦	伊丹
"	分電盤	31- 2-27	440614	篠崎善助	名古屋
"	瓦斯放電燈起動点燈装置	"	440658	船田淳三	大船



わが国最高水準を以て

## 佐久間発電所納入 SV-W 型 (5組) 三菱超高压避雷器

雷害から機器をまもるため

わが国屈指の水力発電所である電源開発佐久間発電所へ納入した SV-W 型避雷器 (5組) は出荷にさきだち工場において  
放電開始電圧 (乾燥, 注水, 汚損, 霧中汚損, 汚損水結, 緩波頭サージ) 動作責務 (衝撃大電流, 長時間継続サージ)  
放電耐量 (衝撃大電流, 長時間継続サージ)  
気密試験

などを行い、いずれも好成績を納めた。

なお上記のほか 140 kV 1組も納入した。

### 仕様

- |  |   |
|--|---|
| 1. 最高回路電圧 287.5 kV                               | 6. 商用周波絶縁耐力 乾燥 500 kV 1分<br>注水 500 kV 10秒                                   |
| 2. 商用周波許容端子電圧 260 kV 以上                          | 7. 衝撃絶縁耐力 1,050 kV 以上   |
| 3. 商用周波放電開始電圧 460 kV                             | 8. 制限電圧 750 kV 以下 放電々流 1,500 A<br>850 kV " " 5,000 A<br>950 kV " " 10,000 A |
| 4. 中間周波放電開始電圧 200~300 c/s にて 800 kV (波高値) 以下     |   |
| 5. 衝撃放電開始電圧 $\pm(0.5\sim2)\times(30\sim50)\mu s$ |   |
| Vt カーブ $2\mu s$ に相当する点で 850 kV 以下                |   |

昭和 31 年 5 月 8 日 印刷 昭和 31 年 5 月 10 日 発行

「禁無断転載」 定価 1 部 金 60 円 (送料別)

### 雑誌「三菱電機」編集委員会

委員長 大久保 謙

副委員長 石川辰雄

委員 浅井徳次郎

荒井 潔 石橋 英樹 市吉 惟浩

伊東祐義

大久保夙郎 岡屋 精二 菅野 正雄

木村武雄

小林治一郎 小堀富次雄 進藤 貞和

田宮利彦

津村 隆 中野光雄 每熊秀雄

松田新市

松尾又一 松尾米太郎 宗村 平

横須賀正寿

幹事 市村宗明 前田幸夫

(以上 50 頁順)

編集兼発行人 東京都千代田区丸の内2丁目3番地 市村宗明

印刷所 東京都新宿区市谷加賀町1丁目 大日本印刷株式会社

印刷者 東京都新宿区市谷加賀町1丁目 長久保慶一

発行所 三菱電機株式会社内「三菱電機」編集部

電話 和田倉 (20) 1631

日本出版協会会員番号 213013

発売元 東京都千代田区神田錦町3の1 株式会社オーム社書店

電話 (29) 0915・0916 振替東京 20018