

MITSUBISHI DENKI

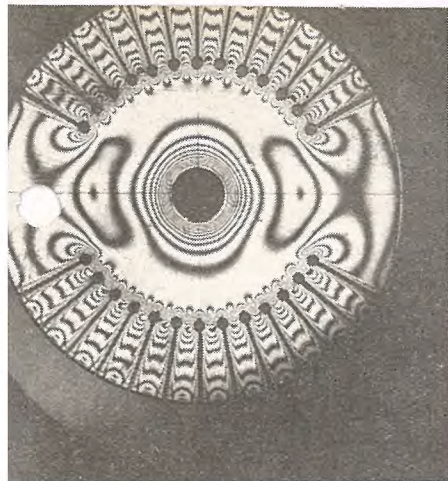
三菱電機

研究所創立 20 周年記念特集



ターボロータの回転
のストレスを表わす
光弾性写真

2
VOL.30 1956



MITSUBISHI DENKI

三菱電機

表紙説明

表紙の写真は2極タービン発電機回転子の遠心力による応力分布を凍結法により光弾性実験で求めたものである。黒い縞は剪断力の等しい位置を結んだものであり縞の次数は剪断力の大きさを示している。この写真では縞の次数は中心孔に近づくほど大きくなっており、求めた応力分布は軸対称回転体として計算した結果と中心孔近傍ではよく一致している。詳細は本文59頁「最近における応力測定とその応用」を参照されたい。

三菱電機株式会社

本社

東京都千代田区丸の内(東京ビル)
(電) 和田倉(20) 代表 1631・2331
研究所 兵庫県尼崎市南清水
神戸製作所 神戸市兵庫区和田崎町
名古屋製作所 名古屋市中区矢田町
伊丹製作所 兵庫県尼崎市南清水
長崎製作所 長崎市平戸小屋町
無線機製作所 兵庫県尼崎市南清水
大船工場 神奈川縣鎌倉市大船
世田谷工場 東京都世田谷区池尻町
郡山工場 福島県郡山市宇境橋町
福山工場 福山市仲野上町
姫路工場 兵庫県姫路市千代田町
和歌山工場 和歌山市岡町
中津川工場 岐阜県中津市駒場安森
福岡工場 福岡市今宿青木
静岡工場 静岡市小島110
札幌修理工場 札幌市北二条東12
大阪営業所 大阪府北区堂島北町8番地1
(電) 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 札幌市大通り西3の5
(電) 札幌(2) 代表 7236
仙台事務所 仙台市東一番丁63
(電) 仙台(2) 代表 6101
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1(明治生命ビル)
(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巻第2号

(研究所創立20周年記念特集)

目次

研究所創立20周年を迎えて	取締役 堀元夫	2
研究所の役割	大野才三	3
模擬回路による直流送電の研究	阿部久康・山口峯男	5
遮断器の残留電流	潮恒郎	11
小型広帯域マイクロ波1/4波長板	喜連川隆・信岡正裕	16
導磁率による鋼の硬度の測定	馬場文夫・渡辺文明	20
加圧水型発電原子炉の設計	長沼辰二郎・弘田実弥	23
赤外線ガス分析計	八島英之・安東滋	28
直視型ガス分析装置	後藤正之	33
硫化カドミウムの光電導性	伊吹順章	38
塗料, エナメル, ラッカ類の諸種の特性試験	村山三郎・紫山恭一・小鯛正二郎・川本善美・西山直次	43
絶縁液体の誘電強度に及ぼす気体有機塩素化合物溶解の影響	白井万次郎・原仁吾・大杉肇	47
電子管電極金属微量酸化の検査法	立原芳彦・秦卓也・鬼塚正浩	51
シュランクガラス	立原芳彦・林次郎	56
最近における応力測定とその応用	前田裕雄・水野茂・穂原智	59
正面切削法による超硬バイトの寿命試験	斎藤長男	64
当社研究所の概況		70

品質奉仕の三菱電機



研究所創立20周年を迎えて

取締役 堀 元 夫

(初代研究所長)

製造工場に研究所の必要なことはいふ迄もないことであるが、当社は創立後 20 年位は研究所でなくて過してきた。といっても全然研究はやらぬ訳でなく、設計工作各分野においてある程度の研究はやっていたのである。しかるに工場が各所に散在し、仕事の種類がふえ、トラブルが増し、新製品の要望が高まってくると、独立した総合研究機関の必要が生ずるのは自然のことというべきであろう。かくして当社の研究部門は昭和 10 年 9 月に誕生した訳である。

さて作るとなるとその規模はどの位にするか、その任務はどうあるべきかということが当時主脳者の間に論議された。あまり大きくすると不景気がくると真先きにつぶされるのは研究所である。これをつぶれぬようにするには儲かる時に相当な研究基金を積んでおけばよいという説の人があった。これに対し、積立金なんて不況時代には真先きに崩れてしまう、儲かる時に研究にどしどし金をかけて研究者に貯金せよという説の人もあった。当社も戦前相当な研究基金を積んであったが、敗戦と共に金の値打が下りどこかにけし飛んでしまったのは笑えぬ悲哀であった。

研究はペイするものであると外国のえらい経営者はいう。この言葉を鵜呑みにして、今にも金の卵を生んで呉れるように考える経営者もあった。研究所のできた当時その期待が大きいだけ当時者としては誠にづらい仕事であった。

なにしろ最初わずかに 6 人の研究員で出発したのでこれを育て上げるのは誠に心細い次第であったが、そうこうしている間に国は戦争に突入し、当研究所も嫌応なしにその一翼を担われ、文字どおり軍の命ずるままに動いてきたのがおよそ 4.5 年はあったと思う。

研究者の努力が足りなくてレーダの完成が遅れ、戦さに敗けたんだと罵られて恐縮したが、今日マグネトロンもレーダも相当なもののできているので、あの時分は何をしていたのかと恥入るのはわれわれ研究者のみではあるまい。

実際レーダができたとして戦さには勝てぬ。原子爆弾、水素爆弾、神が人類を駆使するのに果てしがない。研究には終りはないのである。

原子力というようなはでな問題のみが研究所の任務ではない。大体われわれ電機製造人に与えられた使命は、あらゆる産業の原動力を供給することと、各人をして高度の文化生活を楽しみしめることにあると思う。そしてその研究機関はもっとも手近なところからこれに協力することが大切と思われる。電気をできるだけ安価に造り、これを間違なく需要家に供給するには不断の改良研究が必要であろう。大衆の生活程度にふさわしいテレビ、洗濯機、冷蔵庫等あらゆる文化施設を作り出すための地味な研究もまた大なる意義を有するものと思われる。

20 年後の今日、過去を振り返って見るといろいろなことがあった。今日夜の世界が、店舗にもビルディングにも街頭にも白熱燈が消え失せて螢光燈一色に輝くのを見るとき、1 台のテレビの前にプロ野球に血を沸かす群衆を見るとき、われわれ研究人には涙ぐましい努力と、ほおましい歴史があることを忘れ得ないのである。

天才は蒸気機関を発明し、電磁力を発見し、原子力を世に紹介する。そして多くの凡人がえいえいとしてこれをものにすることに努力する。人間の歴史は永遠である。進歩発達は限りなく続く。研究もまた限りなく続くであろう。

研 究 所 の 役 割

Role Played by
The Engineering Laboratory

Engineering Laboratory Saizo OHNO



研 究 所 長 大 野 才 三

Achievement in the engineering laboratory is a key to future development of the company. The role played by it is by no means a mere academic study on the part of researchers.

On looking back the path walked by our laboratory, nobody would deny our painstaking effort and untiring trials in searching into unknown. Only 20 hands at the outset have now developed into 350 members for past two decades, fully manifesting the raison d'être of the laboratory.

三菱電機株式会社に会社全体の研究機関として本店研究課が設立せられたのは昭和 10 年の秋で今年でちょうど満 20 年を経過したことになる。初めは総勢約 20 名で出発したのであるが会社経営の規模の拡大と共に拡張を続け、今日従業員 350 名を超える研究所にまで成長し外形的には一応安定した姿を備えてきた観がある。当社の先覚諸氏が研究機関の設立を計画され、それに期待せられたところのものが果して満足されているか否か知る由もないが、研究所 20 年の業績とその会社経営上に及ぼした影響を反省して見ることは、研究成果の評価や、ひいては営利会社における研究所の存在価値が云々される今日、あながちむだではないであろう。

研究所の過去の活動状況を記録の上から見るとすると不完全ながら研究報告や特許発明等から見るのが便利であろう。まったく偶然ながら当研究所は設立以来大体 5 年毎に研究内容やその性格がかなり顕著な変化を示しているように思われるので便宜上過去 20 年を 4 つの期に分割してその間の人員変動や、発表された業績数を表にして見ると 1, 2 表のとおりになる。

1 表 研究所人員数

種別 年度	技師(参事)	技手	事務職員	その他	合計
昭和 10 年	9	1		10	20
昭和 15 年	36	15			
昭和 20 年	104	75	17	304	500
昭和 25 年	117	9	17	166	309
昭和 30 年	124	34	51	167	376

2 表 研究所業績数

期 別	種 別	研究 報告	技術 メモ	特 許	新 案	技 術 仕様書
第 1 期	昭和 10~15	71	32	17	38	
第 2 期	同 15~20	74	113	25	22	
第 3 期	同 20~25	84	691	45	42	
第 4 期	同 25~30	167	871	43+(33)	36+(27)	158
合 計		396	1,707	130+(33)	138+(27)	158

注:一括弧内は出願中の件数

以下簡単に各期ごとにその特長と思われる所を述べて見よう。

第 1 期 設立より昭和 15 年末頃まで

本店研究課の発足以前に神戸製作所に研究係があり、昭和 7 年からは研究報告が残っている。昭和 10 年研究課となる迄の間に 37 篇出ていて水銀整流器や亜酸化銅整流器関係の仕事が大部をしめている。本社機関として発足後の 5 年間もやはり神戸製作所の開発や改良に関する問題が多かったのは研究を担当する人員や、その当時の神戸製作所の当社における立場上自然の成行であったろう。この期間の研究中、後日当社の重要製品に発展したものは放電管制御の抵抗溶接器であるが、品質改良のための研究としては誘電損失測定による発電機コイル絶縁の研究、避雷器用炭化硅素の研究、水銀整流器の逆電流、可搬型鉤合試験機等、そのまま今日の研究題目とし

でも必ずしも陳腐とはいわれぬ研究がすでになされ、かつそれぞれに成果を挙げていたことは注目に価する。3相交流から低周波単相交流を作って抵抗溶接を行うという林博士の画期的な発明も（特許に表われたのはつぎの期であるが）着想としてはすでにこの頃からあったのではないと思われる。

第2期 昭和15年より20年終戦まで

この期間の初期は戦争気構えの軍備拡張時代、引続いて戦争-終戦とあわただしい5年間でこの期の状態を簡単に述べることは困難であるが、いちじるしい特長は無線電信機ならびに電波兵器の試作研究に多大の力が注ぎこまれたことである。並行して真空管ならびにその材料関係の研究が進められ蛍光灯の研究もとにかく着手せられているのである。人員の急激な増大が示す如く研究所は当社としては未知の世界の開拓のために膨張を続けた。が他方軍需の要求は研究所をも半ば生産工場化し溶接用イグナイトロンの如きはわが国需要の大半を賄ねばならなかった。この時代になされた研究個々の価値は終戦と共に消失したのも多かったが、外国技術から遮断されて独力で研究を推進した経験の業績が後日当社が無線機製作所を設立して通信部門に進出するに至った足場をなしていることは疑い余地がない。

通信関係以外では絶縁材料の研究が大部分で合成油や硅素樹脂などもすでに研究に着手されている。絶縁の進歩がそのまま電気機械の進歩といって過言でない以上この種の研究が絶えず続けられなければならないことは当然で、これが当研究所の重要責務であることは今も昔も変りがない。

第3期 終戦より昭和25年末まで

終戦と共に研究所は再び本来の姿に立直った。終戦直後には研究目標の大幅な変更に伴う多少の混乱を免れなかったが、研究報告や特許等の数の上では研究になんらの停滞がなかったことを示している。ただ22年頃までの研究報告は内容的にはやや低調といえるであろう。技術メモの数の多いのは戦時中の立遅れを取戻すために海外文献の翻訳紹介を始めたためである。

この期間に研究開発され製品化されたものに超音波探傷器、ラジオヒータ、受信真空管、蛍光灯などがありまた毛細管式冷凍装置、単極型水銀整流器、セレン整流器等についての優れた研究報告がある。これらのうちにはすでに重要製品であるものもあり、あるいは成長期にあるものもある。

第4期 昭和26年以降今日まで

26年4月には米国 Westinghouse 電機会社との契約が復活され再び技術が導入されることとなった。戦時中の世界水準からの立遅れを取戻すためやむを得ない措置であったが、研究所にとってもこれをいかに役立てる

かという新しい課題を提供せられた訳である。もっとも大きい影響を受けたのは絶縁材料ならびに金属材料でこの2部門は米国の水準に追付くために多くの研究を要求せられたしなお要求せられつつある。

28年秋には無線機製作所が伊丹製作所から離れて独立し、その発足を強力ならしめるために研究所における無線関係の研究者は挙げて新製作所に配置せられて今日に及んでいる。今期間の業績の真価を判ずるにはなお時期尚早であるが前期末頃から活発に行われた送電網の異常電圧の実測研究は実を結んで1つの結論に到達した。また最近の状況の一端は本号所載の若干の報告によっても推測されるであろう。

研究所の生産工場に対するサービスをさらに徹底するために技術仕様書の様式が設けられた。研究報告が研究結果の科学的解析であるに反し技術仕様書は研究成果の使い方を簡明に記述したもので工作仕様書や試験仕様書の形式に記述されている。今日までに作成せられた主要なものは蛍光灯、真空管、避雷器等に関するものである。今日以後の問題

過去についての概略は上述のとおりで研究所が当社の営業上何がしかの貢献をしていることには間違いのないところであるが、果してこれが経営的に見て採算のとれるものであったかという点になるとこれはなかなか困難な問題になる。20年前に研究所を設立したために現在維持し得ている営業量のたとえば3%を以て研究所の経費を賄うためには上記営業量は当社生産額の30%に相当する額を要することになる。当社の製品は相互の関連が複雑なものが多く計算の仕方によってはあるいは斯様な数字を計上することも可能かも知れないがこれを最近10年間に新たに加えられた改良や新製品に限定するとすでに困難な数字であり、まして米国などのように4年とか5年に限るとたとえ営業額の5%を充当するとしても不可能であろう。

さればといって研究の主力を営業量の確保し易いものに向けるべきかということこれまた否であろう。研究を維持する終局の目的はもちろん当社の技術水準がつねに世界水準に遅れず向上して行くことにある。技術の進歩がますますその速度を加えて行く今日、研究所がその創意と能力を100%駆使してつねにより高度の技術開発に専念するのでなければ、たちまちにして技術的落伍者となるほかはないであろう。研究にどれだけの費用を充当するか、またそれをいかにして回収するかということは今日技術をもって立つ企業の経営者に課せられた重要課題であるが、同時に研究所も単にその仕事が生産に直結しているというだけで満足することは許されない。つねに最高水準の技術を目標に邁進するのでなければその存在価値を失うのである。

模擬回路による直流送電の研究

研究所 阿部久康* 山口峯男*

Studies on D-C Transmission through Network Model

Engineering Laboratory Hisayasu ABE • Mineo YAMAGUCHI

For the purpose of bringing light on the circuit phenomena in the high voltage d-c transmission system, a network model comprising two complete sets of twelve phase converter stations was taken up for studies. Problems of higher harmonics on d-c lines, fault current and overvoltage ensuing from transient disturbances are thoroughly accounted for in the article. As the fruits of the investigation, successful regulation and protection systems, have been developed, coming to provide an extra rapid current regulation system by means of quick phase control on the rectifier side to Takashima 60 kV 7,000 kW d-c transmission. This, together with quick reclosing, brings the d-c transmission a long way toward perfection.

1. まえがき

スエーデンのゴットランド直流送電が昭和 29 年 3 月から運転に入り、直流送電もいよいよ実用期に入ったものといえる。当社ではかねて計画中の九州本土、岳路-三菱鉱業高島間 60kV, 7,000 kW の直流送電装置がこのほど製作を完了、近く現地試験の予定になっている。

直流送電では元より信頼性ある変換器の製作がこの技術の中樞をなすものであるが、一方制御保護方式についても、送電システムの安定度を確保するため種々特殊な方式が要求される。このたび研究所においては、伊丹製作所における高压変換器の製作と並行して模擬回路を設置し、システムの解析と制御保護回路の検討に努めてきた。

回路現象は交直両系統にわたりその内容はきわめて広汎であるが、今回は変換器と直流回路に関する問題に範囲を限定し、直流線路の脈動、変換器および線路の事故分析、その他回路過渡状態におけるケーブル過電圧などに関する実験および計算結果と必要な故障電流抑制法、

制御保護方式の概要についてご紹介する。なお高島直流送電とは直接関係はないが、分路整流器の運用法、および現象的にはなほだ興味のある直流回路のコンデンサ遮断法についても一部言及しこの方面の文献の乏しい現状に鑑み、関係者のご参考に供したいと思う。

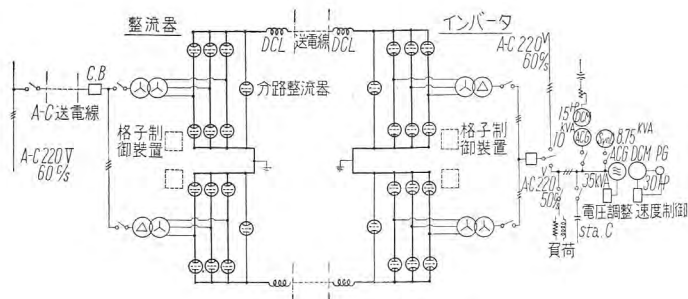
2. 直流送電模擬装置の概要

1 図は製作した模擬装置の主要結線図であり、順逆変換器とも、1 次側 Δ の 3 相全波結線 2 群の直列接続より成り、12 相、直流線間 1,000V, 8 kW の電力を送電する。変換器はサイラトロン(三菱 6G76)を使用し、平均 6.4 A 最大 40 A 順逆耐 2,500V の定格を有する。制御装置は全電子管式に構成され、定電圧、定電流、定周波運転を行い得る。このほか転流リアクタンス、直流ならびに各交流側線路の模擬に対して充分な数の LCR 素子群が準備され、逆変換器交流側の負荷、発電機、調相機に対する模擬回路もすべて揃えてある。

ア. 制御装置

直流送電の変換器では器電位はそれぞれ独立した数 10 kV の高電位にあるから、大地電位上で生じた制御パルスを各器電位に伝送するため特別な考慮を要する。この観点から模擬装置の制御回路は実際の高圧器に適用できるような方法で構成されている。

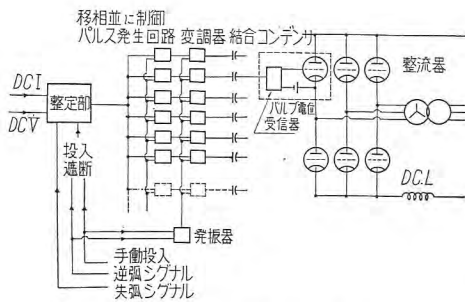
2 図は制御システムの概要を示すものである。図中整定部には直流電流、電圧信号が加えられ基準電圧と比較して一定電圧、電流制御を行い、逆変換器側ではその交流系統の周波数検出要素により定周波運転を行う。また変換器および系統の各種事故信号を導入することにより各種保護操作を実施できる。



1 図 直流送電模擬回路

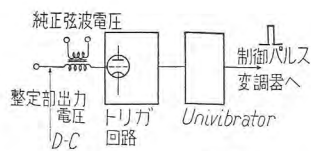
Fig. 1. Model circuit for high voltage D-C transmission.

* 電気第 1 研究室



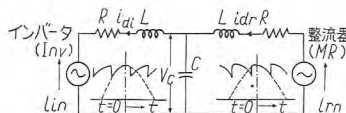
2 図 制御系要図(整流器側)

Fig. 2. Block diagram of control system.



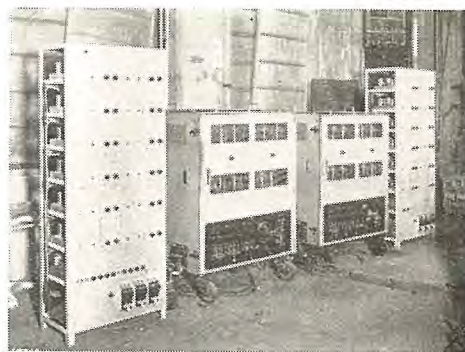
3 図 制御パルス発生回路

Fig. 3. Control impulse generation circuit.



5 図 高周波等価回路

Fig. 5. Equivalent circuit for harmonics.



4 図 直流送電模擬装置(順, 逆変換器および制御装置)

Fig. 4. View of D-C transmission model (converters and their control equipments).

制御パルス発生回路は3図のように構成される。その入力シグナルは基準正弦波と整定部出力直流電圧の重畳波形であり、出力電圧は一定幅の矩形波である。この出力矩形波は整定部の出力電圧すなわち制御量の変化に応じて移相され、搬送波を変調し結合コンデンサを経て各バルブ電位上に伝送される。各バルブには受信装置があり、矩形波に復元しサイラトロンを格子制御して所定の位相制御を行うのである。従来の磁気増幅器, toulon 回路による移相方式ではいずれも固有の時定数を持つが、本方式では瞬時制御が可能であり、また整定部内の CR 素子により制御時定数を零より 10 数サイクルまで広範囲に調整できる。

4 図は模擬装置の順逆変換器および制御装置の写真である。両変換装置の交流系統および直流線路その他測定装置関係はこの写真に現われていない。

3. 高島直流送電における直流回路現象

高島送電回路における各変換器は6相3相全波結線、一端接地方式である。したがって回路模擬のため1図の半設備6相分を使用する。回路定数として両変換器の転流リアクタンス、インバータ側発電機定数のほか、整流器側交流系統として岳路-武雄(佐賀県)間約 80 km の架空線が模擬されている。また直流回路は5km の海底ケーブルを集中容量として取扱った。以下この回路による回路現象のうち、変換器を含む直流回路の主要現象についてその概要を説明する。

ア. 直流線路の脈動

直流送電線は通常ケーブルを含む容量性線路であるから直流リアクトルの選定いかんによって、変換器出力電圧中の第 $6n$ 次高調波(6相)により過大な共振を起す可能性がある。高島送電のようなケーブルの単一回路では5図のような集中容量として現わして差支えない。今このような回路においてケーブルの共振電圧および直流回路の脈動電流を計算してみる。順逆変換器直流電圧中に含まれる高調波電圧は重り角を無視すると、順変換器の第 n 次高調波電圧は

$$e_{rn} = \sum_{n=p, 2p, \dots} (-1)^n \frac{2E_{dor}}{n^2-1} \sqrt{1+n^2 \tan^2 \alpha} \varepsilon^{j(n\omega_r t + \theta_{rn})} \dots (1)$$

逆変換器側では

$$e_{in} = \sum_{n=p, 2p, \dots} (-1)^{n+1} \frac{2E_{doi}}{n^2-1} \sqrt{1+n^2 \tan^2 \gamma} \varepsilon^{j(n\omega_i t - \theta_{in})} \dots (2)$$

ただし、 t : 時間(5図参照), p : 相数

E_{dor}, E_{doi} : 順逆変換器無負荷直流電圧
($\alpha=0, \gamma=0$ の値)

α, γ : 順逆変換器の格子制御角

$$\theta_{rn} = \tan^{-1} \frac{\cos(n+1)\alpha/n+1 - \cos(n-1)\alpha/n-1}{\sin(n+1)\alpha/n+1 - \sin(n-1)\alpha/n-1}$$

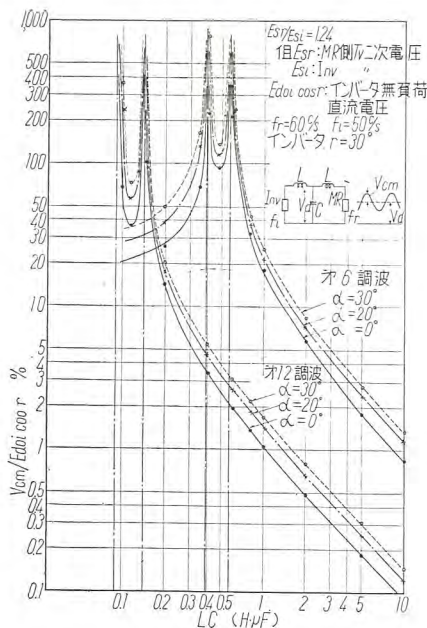
$$\theta_{in} = \tan^{-1} \frac{\cos(n+1)\gamma/n+1 - \cos(n-1)\gamma/n-1}{\sin(n+1)\gamma/n+1 - \sin(n-1)\gamma/n-1}$$

高島直流送電では順, 逆変換装置は 60, 50 c/s の異周波変換であるため、直流回路脈動波形は当然 beat を生ずる。ケーブル電圧、直流回路脈動電流の算定は上記 e_{rn}, e_{in} が5図の MR, Inv 側にそれぞれ独立に作用したものととして重畳の定理を用いて正確な波形を求めることができる。実用上には起り得べき最大値をとれば十分な安全性を保証し得るから(1), (2)式による高調波分の最大値のみを考慮し、よって得た結果を算術的に合算すればよい。

6図と7図はケーブル脈動電圧および整流器側直流電流の脈動分(インバータ側は若干異なる)の計算値である。50, 60 c/s 変換のため、第6, 第12……各調波についてそれぞれ2つの共振点を生ずる。Cの値は直流線路で決まるから、直流リアクトルはこの共振点を充分に外し、7図の関係から直流電流中の脈動分を所定値に抑えるよう設計される。

イ. 逆 弧

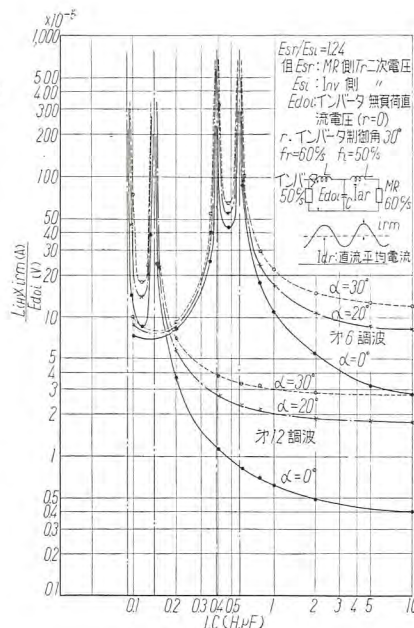
高圧変換器の製作技術は著しく進歩したが、外国の例を見ても現段階において絶無を期することは困難であり、事故電流の有効な制限策をあらかじめ講ずることが肝要である。一方逆弧時の故障電流は交流側より給電される



6 図 直流ケーブルの共振電圧特性
Fig. 6. Resonance Voltage characteristic curves on D-C cable.

ものと直流逆起電力よりの流入分の両者を考えねばならないが、逆弧期間中は各バルブの通電、停止に伴い逐次回路様式は異なり、またその様相は各バルブの点弧位相ならびに変圧器1次2次側インピーダンスの配置で影響されきわめて複雑である。この点直流送電に使用する3相全波回路では直流側よりの逆流分はほとんど数学的に無視できる程度となるから取扱は比較的簡単となる。すなわち8図の挿入図を参照して、3相全波回路は2個の3相整流器の直列とも考えられるから、たとえば図中 T_1 が逆弧すれば T_1, T_3, T_5 3相整流器の逆弧動作を考えればよく、直流側よりの流入分は T_2, T_4, T_6 によって阻止される。9図はこの場合の各バルブ電流波形およびその位相関係を表す。事故電流はすべて交流側より供給され、 T_1 に続く T_3, T_5 がそれぞれの点弧位相において T_1 に短路電流を流入し、逆弧電流は結局図中 i_{b1} のような波形となる。もし電子管式急速遮断により、 T_1 逆弧後 T_5 が点弧する以前に格子遮断が完了すればもはや T_5 は事故電流を供給することなく逆弧電流は9図点線ののように最大値は減少されるであろう。8図は通常および急速遮断の両者について逆弧電流最大値を交流回路の R/X に対して計算したものである。一般に交流側には事故電流制限のため限流リアクトルの挿入が考えられているが、この結果は必然的に力率の低下を伴い定常運転特性を悪くする。高島直流送電では上述の電子管式急速遮断方式を採用することにより、従来の高速度電流継電器式に比し21%最大値を低減でき、これによって $X_b = 5\%$ 程度の限流リアクトルを挿入した効果に匹敵する。

なお逆弧時に際して直流ケーブルに出現する過渡電圧は、回路定数、事故遮断速度によっては過大電圧に上ることもあるが、高島直流送電回路定数で急速遮断を行え



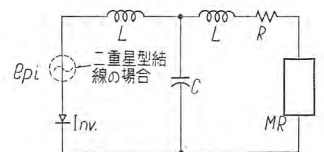
7 図 高調波電流と LC の関係
Fig. 7. Relation between harmonic currents and LC.

ばなら危険電圧に達しないことが実験的に確認された。

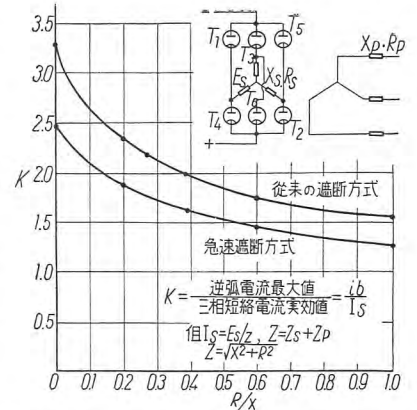
ウ. 転流失敗

転流失敗は逆

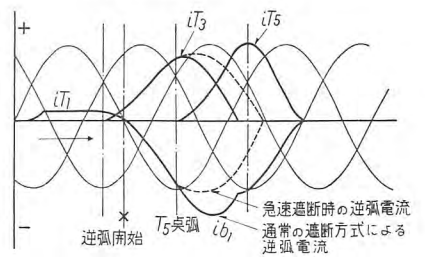
変換器の再点弧現象、制御回路に起因する失弧、通弧等変換装置自体の原因のほか、接続する交流系統の種々な擾乱によっても誘発され、ある程度不可避な現象といえることができる。この結果はただちに直流回路の短絡状態を惹起するから、有効な電流制限策と、さらに一步進めて急速自動再投入により実質的に無停電送電を可能ならしめる方策を講ずべきである。またこの際直流線路の LC によりケーブルに過電圧を発生する危険性についてもあらかじめ十分な検討を要する。現象的には3相全波回路の転流失敗はインバータ出力側端子の完全短絡（厳密には2個のバルブの直列 arc drop で短絡）となるから10図のような等価回路を考えればよい。通常の2重星形結線インバータでは図中 e_{pi} のような相電圧が残り、直流回路電流は e_{pi} による単相交流短絡電流と順変換器による直流短絡電流の重畳波形となり、しかも相間リアクトルの飽和に伴い回路動作様式が異なり⁽¹⁾段々法で計算を行う必要があった。3相全波回路では短絡回路に作用する電圧は順変換器の直流電圧だけでよいから取扱は簡単であり、交流分の重畳がないから2重星形に比し短絡電流が少い有利性がある。



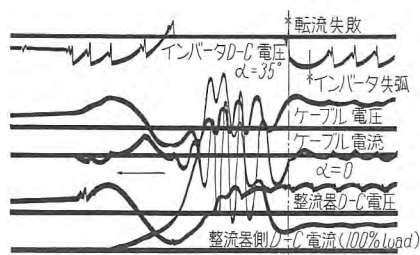
10 図 転流失敗時の等価回路
Fig. 10. Equivalent circuit for shoot-through in inverter.



8 図 R/X と逆弧電流最大値の関係 ($\alpha=0$)
Fig. 8. Factors for determining reverse current during arc-back with A-C feed only.

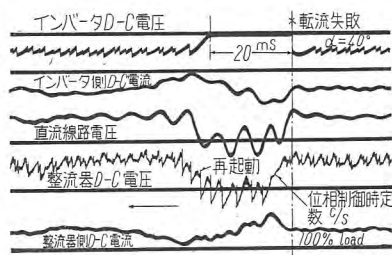


9 図 逆弧時の動作 (8図参照 T_1 逆弧) ただし $\alpha=0$
Fig. 9. Circuit action during arc-back ($\alpha=0$).



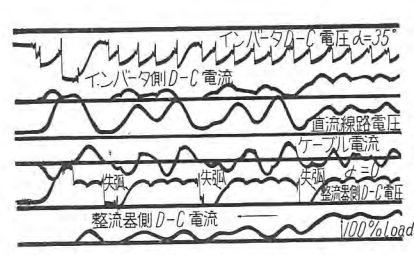
11 図 転流失敗時の波形 (事故後 180° 遅れて整流器側格子遮断)

Fig. 11. Wave forms of shoot-through in the inverter.



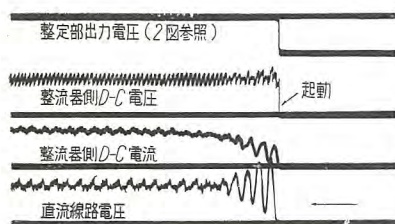
12 図 転流失敗時の急速位相制御再投入時のオシログラム

Fig. 12. Quick phase control and quick reclosing at shoot-through in inverter.

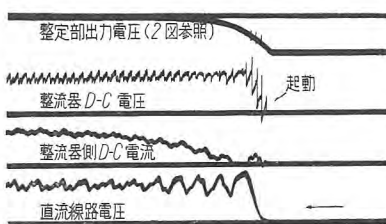


14 図 整流器失弧時の波形

Fig. 14. Wave form in case of misfiring in rectifier.



a. 整流器側全電圧 (α=0) 起動



b. 位相制御起動時定数 0.75 サイクル

13 図 直流送電回路の起動

Fig. 13. Starting on D-C transmission line.

しかし一般に直流リアクトルの飽和特性のため非線形回路となり、ケーブルの C を含めた回路解析はきわめて困難である。11 図は高島模擬回路において人為的に転流失敗を発生させ実験的に求めたオシログラムである。ケーブルには直流リアクトルの飽和に伴うかなり強力な振動が現われるが、定常値以上の過電圧は現われていない。なお短絡電流制限策としてすでに高島 3,000kW 周波数変換器で採用した急速消弧方式⁽¹⁾が直流送電でもきわめて有効であることが実験的に確かめられた。たとえば高島送電回路では転流失敗瞬時に整流器の格子遮断を行えば、短絡電流最大値は定常値の 130% 以下に制限され、ケーブルの過電圧も有効に抑えられる。12 図は転流失敗時、順変換器側電流増大を検出し、電子管式急速制御により順変換器の急速位相制御、自動再投入を行ったオシログラムの一例である。

この結果短絡電流は 2 倍程度に抑えられ、1 c/s 後インバータの自然回復と相まって再投入を完成している。本方式はすでに高島送電装置に具体化されており、この結果インバータ側事故の大半を占める偶発的転流失敗事故に対し実質的に無停電送電を行い、系統の安定度を確保することができる。

エ. 直流線路の地絡

ケーブルの地絡事故は転流失敗と類似現象となるから、と同様な操作により事故電流の制限、遮断を行い、再投入時順変換器側抵抗測定継電器で転流失敗と区別される。

オ. 直流送電回路の起動

直流送電回路の起動は周波数変換器と同様、まずイン

バータを投入し、その後順変換器を起動することによって行われる。この際順変換器側全電圧で起動すれば、直流回路の L, C によりケーブルに過大な過渡電圧が現われる。13 図 a は高島模擬回路で全電圧起動時のオシログラムでありケーブル電圧はおおむね 2 倍に達する。起動時順変換器の位相制御により適当な時定数で電圧を上げれば、過電圧は有効に抑えられる。13 図 b は電子管式制御により

時定数 0.75 c/s で電圧を上げた場合であり、定常値以上の電圧は現われていない。事故に際する急速再投入においても当然位相制御起動は必要であり、その実施例は 12 図のオシログラムに示されている。この例では再起動時の時定数は 0.5 c/s で行われている。

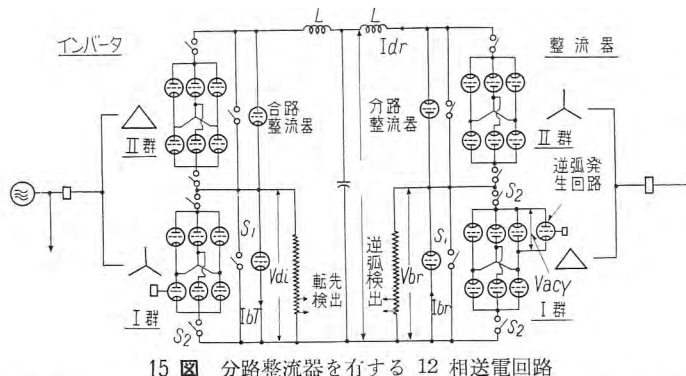
カ. 順変換器の失弧

通常のインバータでは順変換器の失弧は単に一時的な出力低下を伴うに過ぎなかった。しかし直流送電では線路の C のため、失弧発生は起動時と類似現象となりケーブルに過電圧が現われる。14 図は高島模擬回路において 1 相失弧連続時のオシログラムである。失弧が連続し、直流電流が途切れるとケーブルのみならず変換器にも 2 倍程度の危険電圧が現われることはとくに注意を要する。

失弧対策としては当然変換器自体の失弧発生を阻止すべきであるが高島送電装置では点弧子を 2 本使用し、特殊な点弧回路を使用して絶無を期している。なおエキサイトロン型では、イグナイトロンが偶発的な 1 c/s 失弧となるのに比し連続失弧して電流が途切れる可能性が多い。万一失弧すれば回路現象により 1/3 c/s 以内に発生を検出して急速位相制御(遮断)を行えばならん振動電圧を生じないことを実験的に確認した。高島送電では、急速制御後 2 c/s 前後で自動再投入を完了し、無停電運転を期している。

4. 分路整流器 (by-pass Valve) の運用

順および逆変換器の事故に際し無停電送電実施の一案として分路整流器方式がスウェーデンで採用されている。その動作の概要は順逆変換器それぞれの直列群中いずれ

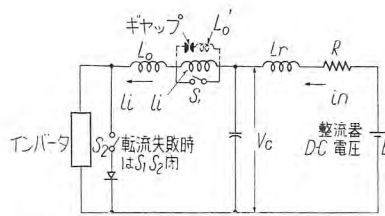


15 図 分路整流器を有する 12 相送電回路

Fig. 15. 12 Phase D-C transmission circuit with by-pass valve for each set of converters.

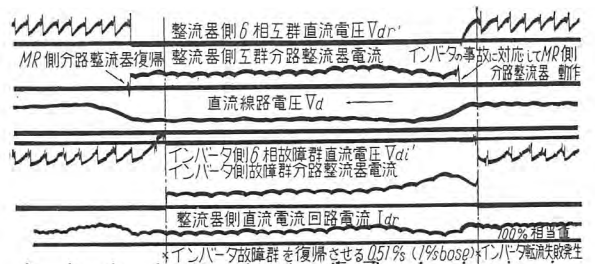
か 1 群に逆弧、転流失敗を生ずると、故障群の格子遮断を行い、同時にそれと並列に接続した分路整流器を動作して回路電流をこのバルブに移し送電を継続する。たとえば順逆変換器がそれぞれ 12 相で 3 相全波 6 相群の 2 個直列で構成している場合(15図)分路整流器で故障群を短絡すれば、他の 1 群で 1/2 送電を行い得る。通常の事故で再投入を行う場合には、故障群を復帰させ同時に分路整流器を消弧して原運転状態に復帰させる。事故の永続、あるいは必要に応じ送電を中断することなく 1 群を回路より離脱する必要を生じた場合は、まずその群の分路整流器を動作して回路電流をこのバルブに移し、15 図 S_1 により分路整流器の電弧電圧下において短絡し、その後 S_2 によりその変換器を系統より離脱することができる。ただし、以上の操作でとくに留意すべき問題は、1 群の短絡により順逆変換器出力電圧の平衡が破れるから送電回路に擾乱を発生する。このため両変換器中いずれかの 1 群の短絡に際し、他変換器中の対応する 1 群の分路整流器も同時に動作させるか、あるいは両変換器の適当な位相制御により回路電流を一定にするような制御方法を講ずべきである。この他転流失敗、および逆弧時における分路整流器の通電過程、復帰に際する消弧方法ならびに動作に伴う過渡状態の究明など検討すべき問題は多い。

分路整流器の具体的な運用法の研究のため、模擬装置により種々実験を行ったがその代表例を 16 図に示す。(オシロ中の符号については 15 図を参照されたい) この実験例ではインバータの転流失敗に対し、事故シグナルの急速な交換により対応する整流器中の 1 群の分路整流器も同時に動作させている。なおこのオシロは屋久島直流送電で線路 C を集中容量とし、それぞれの側の直流リアクトルを 0.4H とした場合の現象に大体匹敵するが、直流回路電流はそのまま継続し、直流線路電圧は 1/2 となり 1/2 送電を行い 4c/s 後適当な格子制御によりそれぞれの側の分路整流器を消弧し再復帰した状態を示している。その他順変換器逆弧発生の場合また分路整流器動作に伴う交流側現象について



17 図 コンデンサによるインバータ消弧回路

Fig. 17. Fundamental circuit for quenching of inverter (in this case, D-C cable serves as quenching inductor).



16 図 分路整流器の動作 (インバータ側 1 群転流失敗)

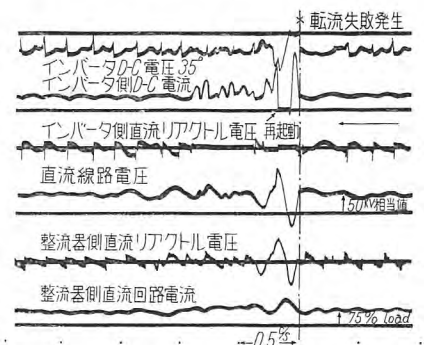
Fig. 16. Operation of by-pass valve.

ても実験例があるが紙面の関係上それらの詳細は割愛する。

5. 直流送電回路におけるコンデンサ遮断法

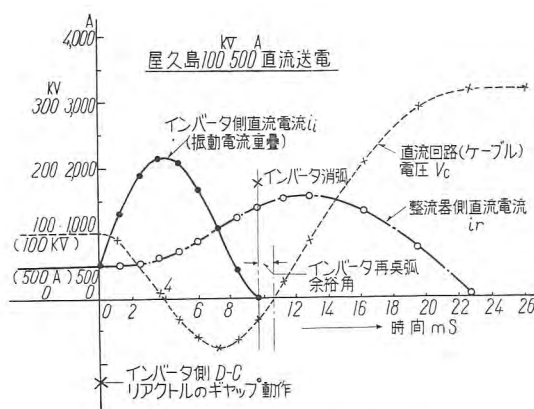
直流送電回路は通常 2 端子のみの回路と考え順変換器側で遮断を行うのが常識である。インバータ側の遮断は格子あるいは交流側いずれにせよただちに転流失敗を惹起する。もしインバータ側遮断が実現すれば両変換器間の遠隔制御は著しく簡便化され、また直流多端子送電線において選択遮断が可能となり直流送電の利用価値は飛躍的に拡大されるであろう。従来この方法に対し、コンデンサの放電電流をバルブに逆流させ消弧を行ういわゆるコンデンサ遮断法が注目され、2, 3 の実験例⁽²⁾⁽³⁾が紹介されているが今回模擬装置により諸種の方法について検討した結果、きわめて簡単な手段でインバータを消弧させる方法に成功した。これは 17 図のようにケーブル線路で単にインバータ側直流リアクトルと直列に充分小さなインダクタンスをもつ消弧リアクトル L_0 を設ける。あるいは直列リアクトル両端にギャップと直列に L_0 を挿入してもよい(17 図点線で示す)。

たとえば転流失敗時のこの回路の動作は、インバータの逆起電力が消滅するため瞬間的に直流リアクトル両端に直流回路全電圧が印加してギャップが動作し L_0 を短絡し、その後 $L_0 C$ による振動電流が事故電流に重畳する。振動電流の振幅は充分大きいから回路電流に零点を作り、直流回路電流の遮断が行われるのである。また事故以外にインバータの運転を停止する場合



18 図 インバータ消弧のオシログラム (17 図回路による)

Fig. 18. Oscillogram for quenching of inverter with the circuit shown in Fig. 17.



19 図 インバータ消弧時の計算波形

Fig. 19. Calculated values of wave form for quenching of inverter.

合は通常の格子遮断と同様、インバータ各パルプの格子を一斉に負とすればよく、この結果は人為的転流失敗の様相となり前述の過程を経て遮断が完了する。

18 図は高島模擬回路において偶発的事故による転流失敗の際、かかる振動電流重畳法を適用したオシログラムの一例であり 1/6 c/s 後再投入が完了している。したがって若干の改良を行えばほとんど完全な無停電送電を行うことも可能となる。

19 図はインバータ格子遮断によるインバータ停止の場合の各部波形を屋久島 100 kV, 50 MW 送電の場合について計算したものである。回路定数は 17 図において $L_o = 0.15H$, $L_r = L_t = L = 1H$, $C = 41\mu F$ (海底ケーブル 100 km 分) $R = 20\Omega$ と仮定し、事故発生時の L_r, L_t, L_o それぞれの初期電流値は 500 A, v_o の初期値は 100 kV としている。計算結果ではインバータ消弧後の再点弧余裕時間は 1 ms で十分な余裕があり、消弧後のケーブル電圧は 315 kV に達するが、これはなんら保護対策を行わない場合であって、順変換器側に定電流あるいは過電流制御を行えば通常値の 150% 以内に抑えることができる。コンデンサ遮断法の共通の欠点は遮断後回路の電磁エネルギーが消弧コンデンサに吸収され、著しい過大電圧に達する危険性があったが、本方法では送電回路自体の充分な C を利用でき、また適当な制御方法の併用によ

り充分低値に抑えられる。事実これに匹敵する消弧コンデンサを特別に設けることは経済的にほとんど不可能に近い。なお上述の結果はきわめて原理的なものであるが、詳細な実験結果はここに割愛し、後日あらためて報告する機会があるものと思う。

6. む す び

以上直流回路現象の概要をきわめて断片的に説明したがこれを要約すると、高島直流送電回路現象は実験回路において忠実に模擬され、詳細な分析の結果直流回路の過電圧発生を防止し、また各種事故に対処して送電の安定性を確保するための速応性ある種々新しい制御保護方式を得ることができた。すなわち逆弧に対しては急速遮断を行うことにより事故電流を効果的に制限し、また失弧、転流失敗に対しては急速位相制御再投入により直流回路の過電圧、短絡電流を制限すると共に無停電送電に近い信頼性を得ることができる。このような方式は電子管式制御回路構成によって始めて得られるものである。一方直流送電の回路定数として直流リアクトルの値は重要な問題であり、線路の共振、事故電流制限上から決定さるべきものであるが、短絡電流は遮断方式の選定により低減し得るから、むしろ直流回路のリップル対策から選定すべき性格のものと思われる。コンデンサによる直流遮断方式は現象的にきわめて興味ある問題であり実用上の意義も大きく今後の研究成果に待つところが多い。

終りに望み、当所電気第一研究室長横須賀参事、伊丹製作所、已斐係長始め直流送電関係者の方々の有益な助言と、装置の製作に多大の協力を与えられた当所工務課浅見主任に厚く御礼申上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 阿部, 山口 水銀アーク周波数変換器の転流失敗, 連大 27-5
- (2) View of High-Voltage Mutators for Direct-Current Transmission Taken at Works
B. B. Rev. Vol. XXXII Sep. 1945 p. 281~324
- (3) 山田, 三上, 関根 直流多端子送電線の保護方式
連大 28-5

遮 断 器 の 残 留 電 流

研 究 所 潮 恒 郎*

Post-arc Current in Circuit Breakers

Engineering Laboratory Tsunero USHIO

Of a variety of studies on the interruption phenomena of a-c current with power circuit breakers, the matter concerning the post-arc current has been especially arousing interest of the circles. In the interruption, the current is broken up when it comes to the natural zero point. But conductivity remaining slightly in the arc path sometimes leads to the flow of very small reverse current after the zero interruption point. This is the post-arc current the investigation of which is believed to give a solution to the problem of interruption. The measurement of this minute current is by no means an easy matter, but it will furnish powerful information about the deionizing process of the arc path.

1. ま え が き

電力用遮断器による交流電流の遮断現象に関する研究は従来より各種の観点から数多く行われてきたのであるが、とくに最近において興味あるしかも重大な問題として浮び上ったものは遮断時の残留電流に関する研究である。遮断器が交流電流の遮断を行う際、電流はその自然零値において遮断せられるが、電弧路に残存するわずかの導電性により遮断零点以後においてもわずかの電流が逆方向に流れる場合がある。これが残留電流 (Post-arc current) であって、その大きさは遮断器の種類およびその状況により著しく異なるが、数千ないし数万 A の遮断電流に対して 10 ないし 0.1 A という程度の場合が多く、多く流れる場合でも数十 A 程度に留まり、その継続時間は 1 ms 以下である。かかる電流ないしは導電性についての研究を進めてゆけば、遮断現象に関してかなりはつきりした説明を与えることのできる重大な鍵となるであろうことは想像される所であり、事実最近各所における研究の成果はこの問題に関する遮断器技術者の強い関心と呼んでいるのである。しかしながら残留電流はその大きさ継続時間ともに遮断電流に比べて非常に小さく、したがってその正確な測定はかなり困難であったため、以前から問題にされながらも本格的な実験的研究が緒に付いたのは最近である。当所においてもこの問題に注目し、測定装置の開発を行うと共に各種の遮断器についての実験研究を実施中である。研究はもちろん初期段階であって、その成果の期待されるのはなお今後であるが、この問題が交流遮断器の性能上有する意義は非常に重要なものである。ここに当所における現在までの研究結果の一部を報告し、諸外国における研究をも引用してこの問題の一端を紹介しご参考に供する次第である。

2. 残留電流に関する一般的考察

古くから遮断器の遮断性能を決定するものは、その遮断零点以後の極間絶縁耐力の回復と再起電圧との競争というモデルで考察されていたのであるが、電流零の瞬間の直後には少くともある短時間だけは電離ガスの路が破壊されずに残されて、少量の残留電流が極間に存在することが期待されるので、それが電弧路の消イオン過程を示す有力な資料となってきた。さらに、その残留導電性がかなり大きい場合には、再起電圧はその固有の波形から著しい変歪をうけると共に、遮断器の遮断成功あるいは電弧継続の岐点となるところでは問題は 1 つのエネルギー平衡の問題となってくるのである。

残留電流の大きさあるいは性質は、遮断器の種類、遮断電流の大きさ等によって著しく異なるものであるが、筆者の考えによって、普通の遮断領域で一応分類を行ってみると 1 表のようになると思う。この表で energy balance という項目に類別したものは結局他の項目の現象に帰着するのであるが、とくにその残留導電性の大きい場合を区別したのである。もちろんこれらの分類はきわめて便宜的なもので、実際の現象は非常に複雑であって、とくにどんな遮断器でも、その遮断能力限界付近になると energy balance で説明されるような領域が現れ

1 表 残留導電現象の分類

遮断機構	残留導電性を左右する主現象	残留電流の大きさ	遮断器の種類
displacement	hard zero	10 ⁻⁴ A 以下	空気遮断器
	イオンの電界移動	
	イオンの衝突移動	
diffusion & recombination	イオンの圧力差拡散	10 ⁻³ A 以上	油吹付遮断器 デアイオングリッ フ、膨脹消弧室 並切り油入型
	イオンの温度差拡散	
	
energy balance	convection loss
	conduction loss	1 A 以上	
	

* 電気第 1 研究室

てくるらしく、簡単に割り切ることが非常に危険であることはいうまでもない。

残留導電現象についての理論的取扱いは詳細はもちろん不可能に近いが、過去においてきわめて概念的な 1, 2 の模型的考察が行われているのでそれらについてごく簡単に説明する。

ア. エネルギー平衡に基づく cassie の模型^{(1), (4)}

これは Kirchstein-Koppelman の気流中の電弧に対する実験に基づき A. M. Cassie の提出した模型で、概念的にいうならば、電弧柱の温度はほとんど一定でその電流密度は変化せず、その導電度は電弧柱の断面積に依存し、かつ電弧柱よりの熱損失はその断面積に比例する強制対流損失であると考えて熱平衡の式を立てたものであって、導電度を g とし、電圧を v とすれば

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = K \left(\frac{v^2}{v_0^2} - 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

なる式に従うことが導出された。この式を見ればただちに判るように、定常状態に関しては定電圧電弧特性となるものであって、比較的電流値の大きい対流損失をうける電弧柱に対して、とくに零点以前の状況に対してはかなり妥当するようである。

イ. エネルギー平衡に基づく Mayr の模型^{(2), (3), (4)}

一方、O. Mayr は電弧柱よりの熱損失が熱伝導によるものとする模型を導出した。これは電弧柱の導電度は温度によって定まる函数であるとし、Saha の熱電離理論に基づいて電弧柱の内部エネルギーと導電度の間に指数函数的関係を仮定し、一方一定の伝導による熱損失率を仮定して

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{v^2 g - N_0}{Q_0} \dots\dots\dots (2)$$

なる式を導いたのである。この模型は磁気吹消型遮断器の残留導電性等に関してはかなりよく説明できるし、別の型の遮断器でもその遮断能力の限界付近ではこれである程度説明できる範囲があるようである。

ウ. イオンの電界移動に基づく Hochrainer の模型⁽¹²⁾

これは空気遮断器等における残留導電性を説明せんとして提出された模型で、電弧路の残留イオンは単に両極間に印加される電界によって電極に移動吸収されてその導電度が単純に減少すると考えたものである。その仮定はきわめて単純であるが、その思想を敷衍して表現すると、

$$g = g_{01} e^{-\alpha_1 u} + g_{02} e^{-\alpha_2 u} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ただし} \quad u = \int_0^t v \cdot dt$$

という型式になる。この模型の妥当性についてはかなり疑問がある。

以上のような模型を回路の特性と組合せて、電流零点付近の現象を説明せんとする試みも 1, 2 行われているが⁽⁴⁾ 実験的資料の比較的乏しい現在、複雑な現象を簡単な模型化すること自体にかなり問題があると思う。

なお、ほとんど残留電流のない、hard zero という状

態も空気遮断器等ではしばしば出現するが、その原因には micro turbulent flow 等があげられているけれども、その説明にはむしろ現在困難を感じている状態である。

3. 残留電流の測定方法

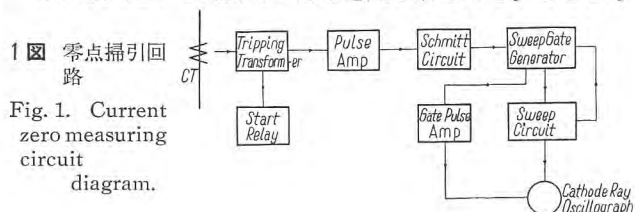
遮断器の残留電流、ないし遮断期間中の電流零点近傍における電流電圧の現象を詳細正確に測定せんとする試みはかなり以前からいろいろと行われていたのであるが、現在においてもなお完全と思われる測定方法は確立されていないようである。なにぶん残留電流はその寸前まで流れている大きな短絡電流に対して $1/10^3 \sim 1/10^6$ という大きさが普通でありとくに空気吹付遮断器等を対象にする場合には、 $1/10^6$ 以下となる場合もあって、しかもその継続時間も $1,000 \sim 100 \mu s$ 、場合によっては数十 μs 以下となることもあり得るので、測定が非常に厄介であることはいうまでもない。この測定を実施するためには、所要の電流零点付近を時間的に正確に把握し、微小残留電流を大電流に邪魔されることなく識別記録することが必要である。これらについて当所で行った方法を以下に概説する。

ア. 零点掃引回路

所要の電流零点付近を時間的に把握するために現在行われている 1 つの方法はフィルムドラムを高速度に回転せしめることであるが、機械的問題からその回転速度には限度があり、数十 kc 以上の現象を詳細に把握することはきわめて困難である。これに対しブラウン管を電流零点近傍のみ所要時間だけ掃引せしめるいわゆる零点掃引回路はさらにすぐれたものとして多く用いられている。^{(6), (15)} 当所において実施している零点掃引回路は 1 図の如くである。まず変流器の 2 次側を Tripping Transformer につなぎ、これによって零点直前を検出し、そこに得られるパルスを増幅してブラウン管の単掃引回路を動作せしめるのである。Tripping Transformer は直流励磁をほどこした一種の尖頭波変成器であって、直流分を含んだ不規則な電流でもその波形のいかに関係せず零点直前を確実に検出することができる。パルス増幅器の出力はシュミット回路によって尖鋭なパルスとなりこれによって周知のブラウン管掃引回路が起動されて数十 μs から数十 ms の直線掃引が得られるようになっている。その動作は実用上十分な確実性を有している。

イ. 残留電流測定用分流器および増幅器^{(6), (7), (9), (14), (15)}

遮断器に残留電流が流れるとその再起電圧波形は回路固有の再起電圧波形から変歪してくるが、たとえばそのような測定から間接的に残留電流を求めんとすることも



1 図 零点掃引回路
Fig. 1. Current zero measuring circuit diagram.

以前から試みられていたが、これを直接的に測定せんとする方法は大別して2つある。第1は比較的高抵抗の分流器を使用し、残留電流によるその端子電圧降下を測定し、大電流に対しては、逆並列に接続した整流器をもってこれを短絡する方法である。あるいはそのかわりに非直線性の分流器を用いることもできる。これは残留電流の測定は比較的楽であるが、ある程度以上大きな短絡電流になると実施が困難になってくる。第2の方法はより直接的で、大きな短絡電流をも流せるような低抵抗の分流器を使用し、その残留電流による端子電圧を増幅して測定するもので、大電流による端子過電圧は増幅器の保護のために振幅截断を行うものである。現在行われている方法は各所ともおおむねこの方法であるが、これにはかなり性能の高い分流器ならびに増幅器を必要とする。現在当所で実施している装置について以下に概説する。

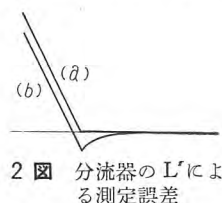
(1) 残留電流測定用分流器⁽¹⁶⁾

この分流器に必要な条件としては

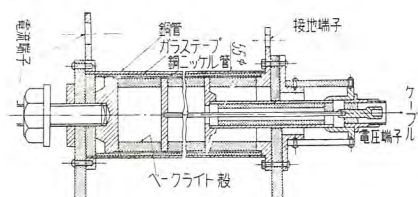
- (a) 大電流に対して充分な熱的容量を有すること。
 - (b) 大電流による電磁力に対して充分な機械的強度を有すること。
 - (c) 時定数ができるだけ小なること。
- (a) (b) は申すまでもないが、残留電流測定用としては (c) は必須の条件である。分流器の端子電圧は

$$v = L \frac{di}{dt} + Ri \dots\dots\dots (4)$$

であって、幾分でもインダクタンスがあるとたとえば真の電流が2図(a)の如くであってもLのために端子電圧は(b)のようになる。したがってLのために残留電流と見誤られるような結果を示すことになる。これが誤差と



2 図 分流器のL'による測定誤差
Fig. 2. Erroneous effect of inductance in shunt.



3 図 同軸型分流器
Fig. 3. Co-axial shunt.

ならないためには遮断電流波高値を I 、残留電流波高値を i とすれば

$$Ri \gg \omega LI \quad \text{すなわち} \quad L/R = T \ll i/\omega I \dots\dots (5)$$

なることが必要で、すなわち 10^{-8} sec 程度の時定数のものが要求される。しかもその抵抗値はできるだけ低いことが望ましいので、この実現は相当困難になる。現在入手容易な抵抗体をもって通常の幾何学的形状ではこの実現は不可能でいろいろな工夫がなされているが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、現在同軸型分流器が最適であると思われる。その構造は3図に示す如くであって、電流は電流端子より外部の導体管を流れ、内側の抵抗体を帰り別の電流端子に戻る。抵抗管内側よりタップによって同軸の対称形式で電圧端子が出ており外部の同軸ケーブルに接続される。すべて軸

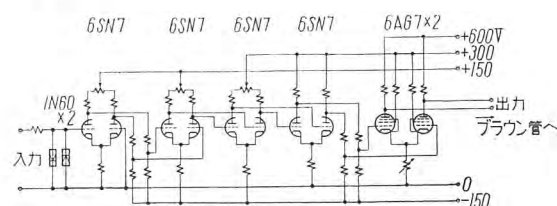
対称にできているので電流電圧端子間の開放伝達インピーダンスのリアクタンス分が内外打消し合う作用で著しく減少されることになる。その特性の一例を示せば、許容電流値 $8 \times 10^6 \text{ A}^2\text{-sec}$ 瞬時、開放伝達直流抵抗値 0.013Ω 、開放伝達インピーダンスの時定数は $0.017 \mu\text{-sec}$ である。

(2) 残留電流測定用増幅器

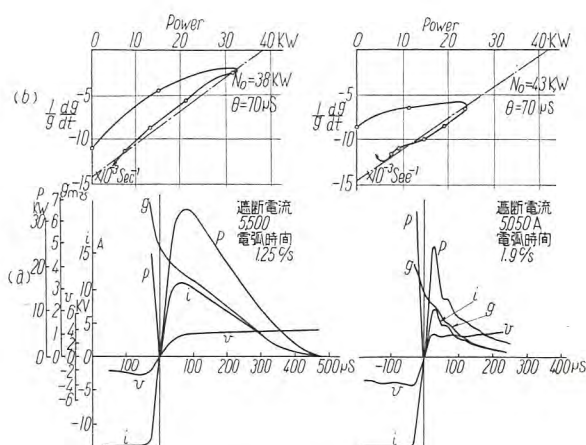
低抵抗の分流器端子電圧を増幅して忠実なブラウン管偏向出力を得るために高利得の直流増幅器を使用する。これは周波数特性が良好であると共に零シフトができるだけ少ないものでなければならない。現用しているものは4図に示すようなもので、ゲルマニウムダイオードによるリミタと5段の平衡直結増幅器よりなり、利得は0～数十kcで約96dbが得られている。

4. 残留電流の測定例

当所において行った残留電流測定結果の例を以下に概要報告する。



4 図 残留電流測定用増幅器
Fig. 4. Post-arc current amplifier.



5 図 磁気吹消型遮断器の残留電流、再起電圧、残留導電度、残流電力

Fig. 5. Recovery voltage, post-arc current, conductance, power in a magne-blast circuit breaker.

ア. 磁気吹消型遮断器

磁気吹消型遮断器はほとんど純粋な伝導冷却機構に基いて消弧せられる遮断器と考えられ、したがって遮断点においては電弧柱のエネルギー平衡が重要な役割を果している。当社の標準製品である3.3kV 磁気吹消型遮断器、3-DH-15について測定した再起電圧 v 、残留電流 i 、コンダクタンス g 、電力 p の代表的な例を5図(a)に示す。開極と同時に発生した電弧は磁気駆動によって電弧

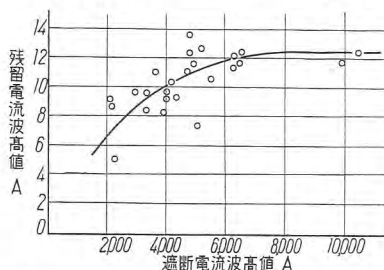
長が延びると共に消弧絶縁板間隙中に押し込められて行き、電弧柱は冷却せられ、電弧電圧には零値直前に extinction peak を生ずるが、 g の零点における値 g_0 がある限界値 g_{0m} よりも大なる限り電流はさらに半 c/s 継続することになる。かかる際には残留電力が熱損失に打ちかつわけである。半 c/s 後では電弧長はさらに延び、電弧はさらに深く消弧板間隙中に駆動せられており、 g_0 は半 c/s 前よりも当然小さくなってきて、extinction peak も高くなってくる。かくして $g_0 < g_{0m}$ となるに及んで遂に遮断が完了することになる。この g_{0m} は回路の状態によっても影響されるが、磁気吹消遮断器においては消弧板の材質によって非常に大きく左右せられるものと思われる。この関係は Mayr の模型によってある程度説明される。

再起電圧の波形はコンダクタンス g の影響を受けるため、同一の回路条件でも再起電圧は振動的となる場合も非振動的となる場合もある。

前述の g_{0m} はかなり大きい値であり、この振動的となる臨界値 g_c よりも一般に大きいものであるので、遮断成功の際の再起電圧ならびに残留電流の様相は多岐にわたる変化を示し、振動的で比較的小さな残留電流の場合から非振動的で g_{0m} ぎりぎりの大きな残留電流の場合まで出現する。なお、さらに電弧電圧が高くなるため、瞬時回復電圧がほとんど零に近い所までシフトしてしまうことが多く、これが同時に g および i に影響することになる。したがって残留電流の大きさそのものから直ちに遮断性能や消弧板の特性の良否を云々することはできないのであって、電弧の継続時間、電弧電圧の大きさ、変化の様相等から総合的に判断しなければならない。

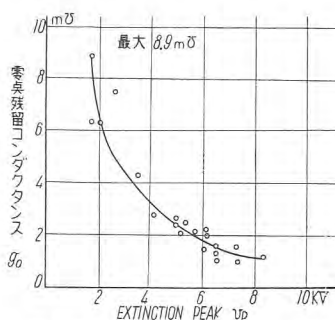
かくの如く、残留電流の大きさというものが決して単純に一義的には定まらないものであるため、遮断電流による残留電流の大きさの変化を示すとたとえば 6 図に見られるようにばらつきが非常に大きい。しかし全体的に見ると遮断電流と共にやや増加する傾向が見られ、しかもその関係は飽和するような傾向が見られるが、これは当然のことでそれ以上の残留電流となれば遮断失敗して半 c/s さらに継続することになるわけである。

零点残留コンダクタンス g_0 はば



6 図 磁気吹消型遮断器の遮断電流と残留電流の関係

Fig. 6. Post-arc current versus current interrupted in a magne-blast circuit breaker.



7 図 磁気吹消型遮断器の零点残留コンダクタンスと EXTINCTION PEAK の関係

Fig. 7. Current-zero conductance versus Extinction peak in a magne-blast circuit breaker.

とんどプラズマの導電性に基づくと考えられる。一方 extinction peak v_p は零点前における冷却の有効性を示す 1 つの目安であるが、 g_0 と v_p との間には比較的是きりした関係の存在することはたとえば 7 図に見る如くである。この関係は 1 つの種類の遮断器については消弧板によって著しくは違わないし、また電流の大きさによってもあまり異ならないで、ほぼ同一の曲線上に乗ってくる。これは零点以前では電弧柱の熱慣性がかかなり小さくその冷却機構は conduction 型よりも、かなり convection 型に近いらしいことが想像されるのであってしたがって g_0 の値は消弧板の特性にはあまり左右されないようである。

しかしながら、零点以後においては、消弧板の特性は支配的な意味をもつようになる。たとえば Mayr の模型

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{v^2 g - N_0}{Q_0}$$

を適用すべく測定結果から $\frac{1}{g} \frac{dg}{dt}$ と $v^2 g = p$ とを計算してプロットして見ると、5 図 (b) のようになるが、同図で判るように、 $\frac{1}{g} \frac{dg}{dt}$ と $v^2 g = p$ との間には零点以後において直線的関係を示す範囲がある。このことは、ある程度 Mayr の模型で説明できるようなエネルギー平衡現象の存在する領域のあることを示している。図より熱損失率 N_0 および熱時定数 $Q_0/N_0 = \theta$ を計算することができるが、 N_0 , θ は消弧板の種類によってかなり変化し、前述の臨界値 g_{0m} が消弧板の特性によってかなり左右せられるゆえんを確認することができるのである。

なお残留コンダクタンスは回路の振動特性に著しい影響を及ぼすが、非振動的となる限界の g_0 すなわち g_c の測定結果と計算値 (回路固有の減衰率をも仮定して計算した値) を比較するとかなり良く一致していることが判る。また回路が振動的となる場合にも g が時間と共に変るため減衰率 d が時間と共に変化する。その一例は、

時間 (零点後) μs	30	60	90	120
$d = \exp\left(-\frac{\alpha 2\pi}{\omega_0}\right)$	0.57	0.615	0.74	0.76

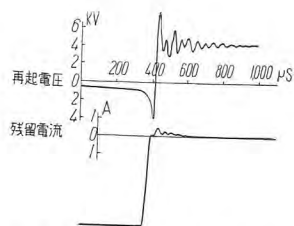
の如くである。

さらに興味あることは、振動的となった場合、電圧、残留

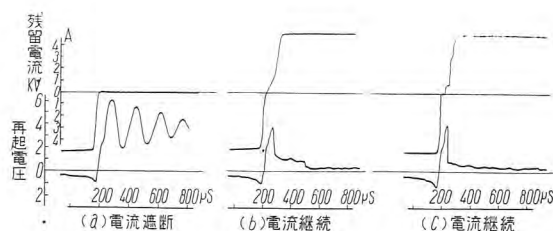
電流のみならず、コンダクタンス g そのものも振動的となることがあるらしい。Mayr の模型のようなエネルギー平衡の観点から考えれば当然ともいえるが、それはなお今後の検討を要する問題である。

しかし、いずれにせよこの種磁気吹消型遮断器においては、電流遮断の成功不成功の限界における残留電流は相当大的いため、遮断性能に関しては、回路固有の特性が及ぼす影響は二義的であるといえることができる。

なお、別の種類の遮断器についても、その遮断能力の限界に近い所では、この磁気吹消型と似たような特性を示す範囲のあるらしいことを付記する。



8 図 油吹付型遮断器の残留電流 (遮断電流 2,800 A)
Fig. 8. Post-arc current in a oil-blast circuit breaker.



9 図 空気吹付間隙の残留電流 (遮断電流いずれも約 2,500 A)
Fig. 9. Post-arc current in a air-blast model gap.

イ. 油流吹付型遮断器

現用される油入遮断器は自力または他力による電弧への油流吹付を行うものが多いが、これらの消弧機構は油流によるイオンの運搬というよりも、むしろ新鮮な油流の供給と発生ガス圧力の増加による拡散と再結合の促進であると考えられる。したがって相当強力な吹付を行うこの種の遮断器では、十分な遮断能力の範囲内においては、磁気吹消型に見られるようなエネルギー平衡に支配せられるような場合は少く、その残留電流はかなり小さくして継続時間も短い。そしてその場合電流零点では、電流継続の場合にも電流に零期間を記録することがしばしばあり、電弧再生は前述のようなエネルギー平衡で考えるよりもさらに急速な局部的火花破壊によって行われるものようである。

当所では今迄にこの種遮断器の代表的な例である VCB (他力型) および MCB (自力型) についてわずかな測定を行ったのみで、十分な遮断能力の範囲内での測定であるため、あまり顕著な残留電流の記録は得ていない。8 図は VCB についての測定結果で 0.5 A 程度の残留電流がわずかに流れている程度である。しかしながら、これらの遮断器でも遮断能力の限度に近づけば、かなり大きな残留電流の流れることは Teshner 等によって報告されている所であり、報告によれば数十 A に達することも記録されている。⁽¹¹⁾ それら限界付近での特性が遮断性能上からはとくに重要な点であり、今後研究を進めて行きたいと考えている。

ウ. 空気吹付間隙の残留電流

最近脚光を浴びている空気吹付遮断器などの空気吹付間隙における消弧は、イオンの拡散、再結合のほか、強力な空気流によるイオンの運搬が主役を演じている。そこでこの場合には、従来からいわれているような絶縁耐力回復特性と、遮断時再起電圧との競争という素朴な表現がかなりそのまま当てはまり、またその絶縁耐力回復特性は同一構造では、その遮断電流の大きさと空気流量とによって定まるといふ実験的結果を生じてくるのである。かつて Cassie は空気遮断器に対してそのエネルギー平衡理論を展開し、いわゆる回路苛酷度なる概念を導入したのであるが、現在ではその考え方は甚だ疑問であり、空気吹付間隙における残留導電性ないし残留電流の本質に関しては現在なお明らかでない。この場合の残留電流の大きさは、十分な遮断能力限度の範囲内では非常に小さいのが普通であって、当所最近測定したモデル間隙についての測定結果の一例を示すと 9 図のようであるが、遮断に成功する場合の残留電流は 0.1 A 以下であって、きわめて小さく、電流が継続する場合には (b) のよう

に電流が一旦しぼられてから再び増加するものや、(c) のように一旦零値期間が現われてから再閃絡するもの等がある。この (b) (c) の電流継続型式は 2 つの代表的な型式と見なすことができるが、それは主として間隙部分における空気の流量と圧力の分布に依存するもののように思われ、通常の空気遮断器においては (c) のような形式が普通であると思われる。

われわれの測定した一例では、同一遮断電流と固有再起電圧に対して、空気槽圧力を変化せしめても、遮断不能に至る近傍まで残留電流の著しい増加は見られなかったが、これはむしろ実験に使用した間隙が空気遮断器の一般的なノズル構造のものと違っていたためで、一般には空気遮断器においては遮断限界に達すると共に著しく残留電流の増すことが考えられ、事実 Teshner 等の報告はこの点を強く指摘している。⁽¹¹⁾

空気遮断器における再起電圧、残留電流、遮断性能の関係は、現在遮断器技術者にとっては 1 つの関心の焦点となっているものであって、今後さらに多くの研究が期待されているものである。

5. むすび

その内容に目覚ましい変化の比較的少ない電力技術において、電力用遮断器は過去 10 年間にもっとも変貌したもの 1 つに数えられるであろう。電力系統の発達にともない、遮断器の性能に対しての要求は文字どおりその日進月歩の改良を促している。これに応えるべく電流遮断現象に関する研究もその重要性をますます強調せられている。

遮断器の残留電流は、その遮断現象を解明するための有力な手掛りであって、強い関心を呼んでいるものの 1 つである。当所においてもこの研究を遂行中であり、現在なお初期段階ではあるが、ある程度の結果も得られたので、ここに残留電流ならびに残留導電現象について簡単に報告し、その測定方法ならびに測定結果の 1, 2 の例を示してご参考に供した次第である。

参考文献

この研究に関連した報告は非常に多い。その代表的なもののみを示す。

- (1) A. M. Cassie: CIGRE 1939 No. 102
- (2) O. Mayr: Arch. Elektrotech. 37 (1943) 588-608
- (3) O. Mayr: ETZ 64 (1943) 645-652
- (4) T. E. Browne: T. AIEE 67 (1948) 141-152
- (5) F. O. Mason: Engineering 193 (1952) 686-9
- (6) L. J. Lewis: T. AIEE 66 (1947) 1253
- (7) F. O. Mason: ERA Report G/XT 132, 1951
- (8) F. O. Mason: ERA Report G/XT 131, 1951
- (9) S. Teshner, A. Guillaume & others: CIGRE 1952 No. 130
- (10) D. Th. J. ter Horst & G. A. W. Rutgers: CIGRE 1954 No. 132
- (11) S. Teshner, J. Blase: CIGRE 1954 No. 145
- (12) A. Hochrainer: ETZ 73 (1952) H 19 P 627
- (13) A. M. Broustein: Elektrichestvo 4 (1949) 39
- (14) Discussion of circuit breaker section in CIGRE 1952 & 1954
- (15) W. G. Hoover: T. AIEE 65 (1946) 1086
- (16) J. H. Park: J. R. of the National Bureau of Std. Res. Paper R. P. 1823 Vol. 39 Sept. 1949
- (17) Hammerlund: The Royal Swedish Academy of Eng. Science Handlingar Proceedings No. 189

小型広帯域マイクロ波 $\frac{1}{4}$ 波長板

研究所 喜連川 隆*・信岡 正祐*

Compact Broadband Microwave Quarter Wave Plates

Engineering Laboratory Takashi KITSUREGAWA・Shosuke NOBUOKA

Of various microwave quarter wave plates some are not considered durable when exposed to atmosphere, while those free from such defects have poor frequency characteristics and unfavorable voltage ellipticity ratio. A new set has been designed to improve these disadvantages. This is a cumulative type finned broadband quarter wave plate consisting of one set of fin having little reflection and two sets of capacitive posts. Their phase shift characteristics cumulatively work to annul the frequency characteristics of phase shift. The set has its voltage ellipticity ratio and voltage standing wave ratio almost unity throughout a broad range.

1. まえがき

マイクロ波 $\frac{1}{4}$ 波長板すなわち円偏波発生装置にはさきに本誌に概説⁽¹⁾したように種々の方式のものがある。波長が非常に短くなってミリメートル波領域に至れば工作精度などの問題から準光学的方法、たとえば透過型金属板格子 $\frac{1}{4}$ 波長板⁽¹⁾の如きものが有効に使われるようになるが⁽²⁾、センチメートル波領域において実用上もとても適当と考えられるのは周囲の閉じた導波管内の2つのたがいに直交する伝送状態の管内位相速度差を利用するものである。ところが、そのうちで誘電体板入り導波管 $\frac{1}{4}$ 波長板⁽¹⁾は既報⁽³⁾のように相当広帯域になし得るが、屋外に曝した場合の酷しい気象条件を考えると耐久性の点においてやや疑問がある。鰭付導波管 $\frac{1}{4}$ 波長板⁽¹⁾および容量性棒装荷 $\frac{1}{4}$ 波長板⁽¹⁾⁽⁴⁾は全金属性であるからかかる心配はないけれども、楕円偏波率の周波数特性があまり良くなくしかも反射もまた少くない。この両者の周波数特性の良くない理由および誘電体板入り $\frac{1}{4}$ 波長板の周波数特性の良い理由を簡単に説明する。

入力電圧定在波率および楕円偏波率の周波数特性が共に広帯域な $\frac{1}{4}$ 波長板を得るために、反射の少い2組の鰭をおのおのの移相特性が差動的に働いてその周波数特性を打消すように組み合わせた差動型鰭付広帯域 $\frac{1}{4}$ 波長板を得た。

これについては別の機会に発表の予定である⁽⁵⁾が軸長がやや長いのが欠点である。そこで反射の少い1対の鰭と2対1組の容量性棒との移相特性が和動的に働いて移相の周波数特性をたがいに打ち消すようにした和動型容量性棒付金属鰭装荷小型広帯域 $\frac{1}{4}$ 波長板について実験を行った結果、かなり良い成績を得たので簡単な理論と実験の結果とについて述べる。

2. 単一鰭付 $\frac{1}{4}$ 波長板の原理と欠点

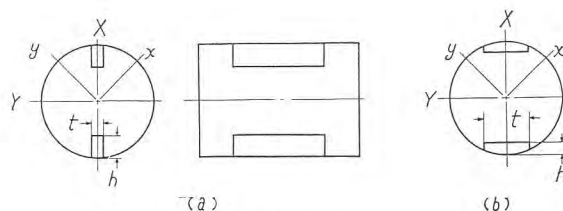
これは1図に示すように円形導波管内にたがいに向い合った1対の鰭を取り付けたもの⁽¹⁾である。1図のY軸方向に電界ベクトルを有する電波を考えると、そのX、Y成分の管内波長 λ_x および λ_y は鰭の影響で異ってくる。そこで鰭の管軸方向の長さを l とすると、鰭を通過した後の両成分の相対位相差 ϕ すなわち両波の移相差は

$$\phi = \frac{\pi}{2} + \delta = 2\pi l \left(\frac{1}{\lambda_x} - \frac{1}{\lambda_y} \right) \dots\dots\dots (1)$$

にて表わされる。この ϕ が $\pi/2$ すなわち δ が零に等しくなるように鰭の寸法を選ぶと、単一鰭付 $\frac{1}{4}$ 波長板が得られる。

楕円偏波の長軸と短軸との比で定義される電圧楕円偏波率 e_v はXY両成分の振幅比が $(1-\alpha)$ になるときに

$$e_v = \left\{ \frac{1 + \sqrt{\sin^2 \delta + \alpha^2}}{1 - \sqrt{\sin^2 \delta + \alpha^2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2)$$



1図 金属鰭 $\frac{1}{4}$ 波長板
(a) 容量性鰭 $\frac{1}{4}$ 波長板
(b) 誘導性鰭 $\frac{1}{4}$ 波長板

Fig. 1. Metallic fin quarter wave plate.
(a) Capacitive fin quarter wave plate.
(b) Inductive fin quarter wave plate.

となり、両振幅が相等しく

$$\alpha=0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

なるときには

$$e_v = \frac{1 + |\sin \delta|}{1 - |\sin \delta|} \quad \dots\dots\dots (4)$$

にて与えられる。したがって電圧楕円偏波率の周波数特性としては

$$\frac{\partial e_v}{\partial \lambda} = \frac{\partial e_v}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \lambda} = \frac{\partial e_v}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial e_v}{\partial \phi} = \frac{1}{1 - |\sin \delta|} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = \frac{\lambda_x \lambda_r}{\lambda^2} \cdot \frac{\phi}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。(7) 式より

$$\phi \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} > 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

なることが明らかであるから、相対位相差 ϕ の絶対値 $|\phi|$ は自由空間波長 λ が増大すると共に増大することがわかる。また、 $\partial \phi / \partial \lambda$ は積 $\lambda_x \cdot \lambda_r$ に比例するから、 $\lambda_x \cdot \lambda_r$ が大きい程、楕円偏波率の周波数特性が悪くなる。

鰭が 1 図 (a) のように高さ h が大で幅 t が小なる場合には X 方向成分に対しては容量性に働き、 Y 方向成分に対してはわずかに誘導性に働くので、鰭のない円形導波管の管内波長を λ_g とすれば

$$\lambda_x \ll \lambda_g, \quad \lambda_r > \lambda_g \quad \dots\dots\dots (9)$$

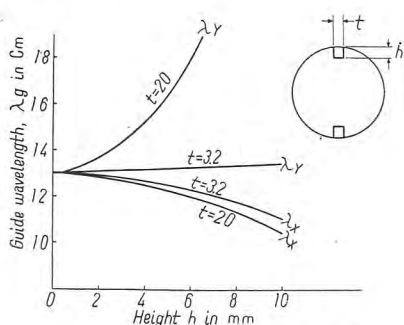
$$\lambda_r \approx \lambda_g$$

となる。また 1 図 (b) のように高さ h が小さく幅 t が大きい場合には、鰭は X 方向成分に対してはわずかに容量性に働き Y 方向成分には誘導性に働くので

$$\lambda_x < \lambda_g, \quad \lambda_r \gg \lambda_g \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\lambda_x \approx \lambda_g$$

となる。よって $\lambda_x \cdot \lambda_r$ は前者の方が後者よりも小さく



2 図 a 鰭付導波管の管内波長
Fig. 2-a. Wavelength in the waveguide with fin.

ϕ したがって e_v の周波数特性も良好である。 λ_x, λ_r および e_v の測定結果の例を 2 図に示す。2 図 (b) は上述のように鰭の幅 h の薄いものほど楕円偏波率の周波数特性が良いことを示しているが、いずれにしても単一鰭付 $1/4$ 波長板は e_v の周波数特性があまり良くない。

ところが一方反射について考えると、鰭の高さ h を大きくする程、インピーダンスの変化分も大きくなり、

小型広帯域マイクロ波 $1/4$ 波長板・喜連川・信岡

したがって反射もまた増大する。したがって e_v を良くすることと、反射を少なくすることは幾分たがいに矛盾する傾向がある。結局、単一鰭付 $1/4$ 波長板は楕円偏波率および入力電圧定在波率が共に広帯域特性をもつものは得られないということになる。

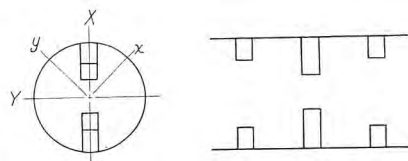
なお、誘電体板入り $1/4$ 波長板と単一鰭付 $1/4$ 波長板とを比べて見ると、後者は λ_x, λ_r の一方がかなり λ_g よりも大きく、小さい方のものも λ_g よりも大きい、前者においては λ_x, λ_r の双方ともに λ_g よりも小さく、小さい方は自由空間波長 λ よりも小さくすることも容易である。したがって誘電体板入り $1/4$ 波長板は既報のように周波数特性の非常に良いもの⁽³⁾ が得られるけれども前述のように耐熱耐寒性、耐久性および機械的強度等の点においては全金属性 $1/4$ 波長板の方が優れているし、誘電率 ϵ の温度による変化により楕円偏波率が温度特性をもつのも誘電体板入り $1/4$ 波長板の欠点である。

3. 容量性棒装荷 $1/4$ 波長板の原理と欠点

3 図に示すように数対の容量性棒を円形導波管内に配列し、電波の X 成分と Y 成分との移相差を $\pi/2$ とすると $1/4$ 波長板が得られる⁽¹⁾。すなわち移相差は容量性棒が X 方向に電界ベクトルを有する電波に対して呈する集中サスセプタンスによる y 方向電波の X 成分の位相変位によって得られるが、数個の集中サスセプタンスを負荷した線路の移相と反射とは共にサスセプタンスの大きさのみならず、各サスセプタンス相互間の線路長に

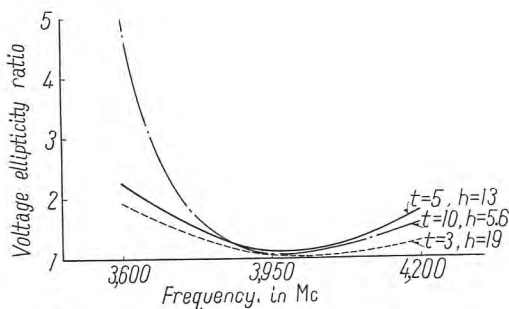
3 図 容量性棒装荷 $1/4$ 波長板

Fig. 3. Capacitive post loaded quarter wave plate.



よっても変化する。したがって周波数による容量性棒間線路の電気的長さの変化のために $1/4$ 波長板がかなりの周波数特性をもつのが欠点である。

一例として容量性棒が 3 対の $1/4$ 波長板⁽⁴⁾ が Simmons 氏によって報告されている。これは直交 2 波の移相を



2 図 b 単一鰭付 $1/4$ 波長板の周波数特性
Fig. 2-b. Frequency characteristics of the metallic fin quarter wave plate.

広帯域に亘って $\pi/2$ に保つために適当な周波数特性をもった容量性棒を用いているので、電圧楕円偏波率は 7,900 ~ 9,200 Mc にわたって 1.1 以下になっている。しかしながら反射については深く考えていないので、入力電圧定在波率は、7,900 ~ 8,600 Mc の間は容量性棒に垂直な電波に対して、また 8,600 ~ 9,200 Mc の間は棒に平行な電波に対してそれぞれ 1.1 を越えている。したがって電

圧縮円偏波率および入力電圧定在波率が共に 1.1 以下なる周波数範囲はほとんどない。

4. 和動型容量性棒付金属鰭装荷小型広帯域 $1/4$ 波長板の原理

この構造は 4 図に示す如くであって、両端にテーパをつけて反射をなくした 1 対の金属鰭の上にたがいに $1/4$ 波長離れた 2 対の容量性棒を植えたものであって、広帯域にわたって反射の少ない金属鰭付導波管の直交 2 波の移相差の周波数特性を相互の間隔が $1/4$ 波長で反射が本質的に少ない 2 対の容量性棒移相器の移相周波数特性にて打消して、楕円偏波率の周波数特性を広帯域化せんとするものである。

まず金属鰭による直交 2 波の移相差 ϕ_1 の周波数特性を考えると第 2 節の第 7 式にて与えられるから、 ϕ_1 が正なるため $d\phi_1/d\lambda$ は正となり、 ϕ_1 は λ の増大と共に増大し 5 図の曲線 B のようになる。後述のように ϕ_1 は $\pi/2$ よりも小さくて済むので反射も少く移相の周波数特性も良好なことが知られる。

そこでつぎに容量性棒について考える。4 図の X 方向に電界ベクトルを有する伝送状態の電波に対して容量性棒の呈する集中サスセプタンスを jB とし、線路の特性アドミタンスを Y_0 とすると、位相変位の大小は B/Y_0 の大小と一致する。容量性棒に垂直な Y 方向に電界ベクトルを有する伝送状態の電波に対しては棒の影響は無視し得るものとすれば、棒による X, Y 方向両波の移相差 ϕ_2 の周波数特性を知るには、 B/Y_0 の周波数特性を求めればよい。

容量性棒が X 方向の電波に対する集中サスセプタンスが $j\omega c$ で表わされるものとすれば B は $1/\lambda$ に比例する。また $1/Y_0 = Z_0$ は λ_0/λ に比例するから結局 B/Y_0 の周波数特性は

$$\frac{B}{Y_0} = \frac{K}{\lambda} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{K}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} \dots\dots\dots (11)$$

にて与えられる⁽⁶⁾。ただし、ここに K は比例常数、 λ_c は金属鰭装荷円形導波管の遮断波長である。 B/Y_0 を λ/λ_c に対して画いたものが 6 図である。図より明らかなように

$$\frac{\lambda}{\lambda_c} < \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{においては} \quad \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{B}{Y_0} \right) < 0 \dots\dots (12)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} < \frac{\lambda}{\lambda_c} < 1 \quad \text{においては} \quad \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{B}{Y_0} \right) > 0 \dots\dots (13)$$

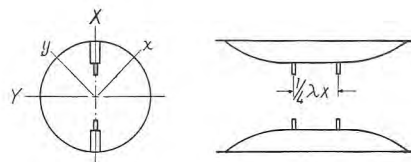
である。

前述のように B/Y_0 と ϕ_2 との大小は一致するから、鰭の高さ h を増大して遮断波長 λ_c を大きくすれば

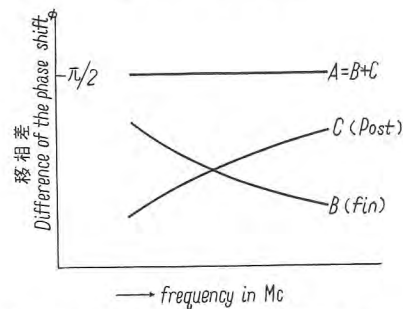
$$\frac{\lambda}{\lambda_c} < \frac{1}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (14)$$

となり

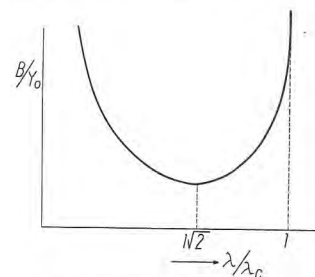
$$\frac{d\phi_2}{d\lambda} < 0 \dots\dots\dots (15)$$



4 図 和動型容量性棒付金属鰭装荷小型広帯域 $1/4$ 波長板
Fig. 4. Compact broadband additional type quarter wave plate.



5 図 和動型容量性棒付金属鰭装荷小型広帯域 $1/4$ 波長板の原理
Fig. 5. Principle of the additional type quarter wave plate with fin and post.



6 図 容量性棒の規準化サスセプタンス
Fig. 6. Normalized susceptance of the capacitive post.

が得られる。これが 5 図の曲線 C である。かくして鰭と容量性棒との移相特性がたがいに打消し合って 5 図の曲線 A のように広帯域にわたって

$$\phi_1 + \phi_2 \approx \frac{\pi}{2} \dots\dots\dots (16)$$

が得られる。

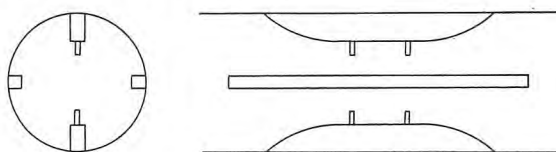
最後に残る問題は容量性棒の反射であるが、 ϕ_1 と同様に ϕ_2 もまた $\pi/2$ よりも小さくて済むからもともと反射が少いが、さらに 2 対の棒間距離を $\lambda_0/4$ とすることによって 2 対の容量性棒による反射は広帯域にわたってきわめて少くなる。鰭の反射もまた前述のように広い帯域にわたってほとんどないから、この和動型容量性棒付金属鰭装荷小型広帯域 $1/4$ 波長板は入力電圧定在波率および楕円偏波率の周波数特性がきわめて広帯域にわたってほとんど 1 に近くなる。

5. 和動型 $1/4$ 波長板の改良と実験結果

容量性棒付金属鰭装荷小型広帯域 $1/4$ 波長板は原理的に金属鰭装荷円形導波管の遮断波長 λ_c を長くして

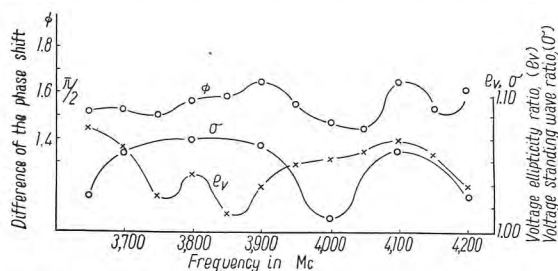
$$\frac{\lambda}{\lambda_c} < \frac{1}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (12)$$

ならしめるために鰭の高さ h をある程度高くする必要
がある。そうすると鰭装荷導波管の直交2波の移相差 ϕ_1
が大きくなりすぎ、容量性棒によりこの周波数特性を完
全に打消したときには $(\phi_1 + \phi_2)$ が $\pi/2$ を越えてしま
うので具合が悪い。そこで7図のように別に1対の幅 t
の狭い副鰭を主鰭と直交して Y 方向に取り付けて、 Y
方向に電界ベクトルを有する伝送形態の電波の管内波長
 λ_r を短かくし、 ϕ_1 を適当な値まで小さくして、鰭と棒
との移相の周波数特性が完全に打消されたときに ϕ_1
 $+\phi_2 = \pi/2$ となるようにする。



7図 副鰭付和動型小型広帯域 $1/4$ 波長板

Fig. 7. Additional type quarter wave plate with the 2nd fin.



8図 副鰭付和動型小型広帯域 $1/4$ 波長板の測定結果

Fig. 8. Performance of the additional type quarter wave plate with 2nd fin.

かくして得られたものの測定結果は8図に示すように
3,650~4,200 Mc にわたって電圧楕円偏波率および入力
電圧定在波率が共に1.08以下という好成績を得たが、入
力電圧定在波率は鰭のテーパの形状を適当に選べばさら
に低くし、1.04程度には充分下げ得るであろう。

6. むすび

和動型容量性棒付金属鰭装荷小型広帯域 $1/4$ 波長板は
小型かつ堅牢にしてしかも楕円偏波率および入力電圧定
在波率が共にきわめて広い周波数帯域にわたって1に近

く、従来のマイクロ波 $1/4$ 波長板よりも非常に優れてお
り、マイクロ波通信用アンテナ⁽⁷⁾⁽⁸⁾ およびレーダ用アン
テナ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ その他に用途⁽¹⁾ が広いものと考えられる。

なお最後にこの研究を遂行するにあたり電々公社臨時
極超短波部井手氏、同技師長室調査課小西氏ならびに電
気通信研究所無線課大橋氏より始終ご指導、ご鞭撻を頂
いたことを深謝する。

参 考 文 献

- (1) 三戸, 浅井, 村井, 薄井, 津村, 喜連川: “マイクロ波
円偏波アンテナ” 三菱電機 Vol. 29 No. 7 無線機特集 pp.
348~355 昭和30年7月.
- (2) J.F. Ramsay and W.F. Gunn: “A polarized Mirror
Duplexer for use with a polarized Lens Aerial” The
Marconi Review Vol. XVIII No. 116 pp. 29~36, 1st
Quarter, 1955.
- (3) 河津, 大橋, 加藤, 石井, 喜連川: “円偏波1次輻射”
電気通信学会アンテナ研究専門委員会資料, 昭和30年11
月15日.
- (4) Alan J. Simmons: “A compact broad-band microwave
quarter wave plate” Proc. I. R. E. Vol. 40 pp. 1089~
1090 Sept. 1952.
- (5) 喜連川, 信岡, 中原: “差動型広帯域マイクロ波 $1/4$ 波
長板” 昭和31年度電気3学会連合大会講演予定
- (6) C.G. Montgomery, R.H. Dicke and E.M. Purcell:
“Principles of microwave circuits” p. 1003, (M.I.T.
Rad. Lab. Series Vol. 8 McGraw-Hill Book Co., 1948).
- (7) 喜連川: “マイクロ波アンテナ” 昭和30年度電気関
係学会関西支部連合大会次第書附部門講演要旨集 pp. 45~
47, 昭和30年10月.
- (8) 喜連川: “マイクロ波アンテナとその諸問題” 三菱電
機 Vol. 28 臨時増刊号無線機特集 pp. 15~27 昭和29年.
- (9) Paul A. Crandell: “A turnstile Polarizer for Rain
Cancellation” Transactions of the I.R.E. Vol. MTT-3
No. 1 pp. 10~15 Jan. 1955.
- (10) David G.C. Luck: “Frequency modulated radar” pp.
43~44 (McGraw-Hill Book Co., Inc., 1949).
- (11) The staff of the R.R.L., Harvard University: “Very
high frequency techniques” Vol. I, pp. 260~264 (Mc-
Graw-Hill Book Co., Inc., 1947).

導磁率による鋼の硬度の測定

研 究 所 馬 場 文 夫*・渡 辺 文 明*

Measurement of Hardness of Steel through Permeability

Engineering Laboratory Fumio BABA・Fumiaki WATANABE

Permeability of steel varies with the quality and heat treatment under a definite condition such as measuring frequency, field intensity and measuring temperature. Hence, the measurement of permeability with respect to a steel of definite quality ought to tell the condition of heat treatment and also the hardness varies with the heat treatment. Moreover, a steel with a definite condition of heat treatment may be surmised of its quality by measuring its permeability. In this article are given first the method of measurement of permeability, the relation of which with the quality and hardness of the material and next the feasibility of measuring the depth of hardness without breaking by changing the measuring frequency.

1. ま え が き

鋼の導磁率(permeability)は測定周波数, 磁界強度, 測定温度など一定の測定条件においては材質, 熱処理条件により変化する. したがって一定材質の鋼材については導磁率を測定することにより熱処理条件が推定され熱処理条件により変化する硬度を推定できる筈である. また一定熱処理条件の鋼材では導磁率の測定によりその材質を推定できる筈である. 本稿においては最初に導磁率測定の方法につき記述し, つぎに導磁率と材質, 硬度との関係についての実験結果を記し最後に硬化深度も測定周波数を変えることにより非破壊にて測定できることを示した.

2. 測 定 の 方 法

導磁率を測定する方法には種々の方法が考えられるが, 本実験は円筒形空心コイルに測定試料を入れた時と空心の時とのインダクタンスの変化量を測定する方法を用いた. 1 図は測定回路の結線図であり, L_x は測定コイル, L_0 は標準インダクタンス R_A, R_B, R_C は可変抵抗であり不平衡電流 I_d が最小になるような R_A, R_B, R_C の値を求めれば L_x は ① 式のようなになる.

$$L_x = (R_B/R_A) \cdot L_0 \dots\dots\dots ①$$

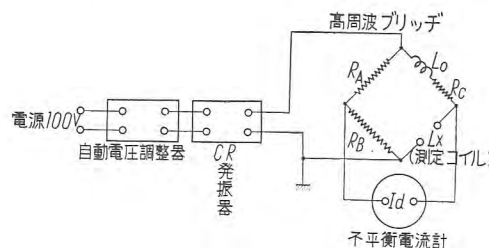
このようにして測定コイルの入力インダクタンスが測定できる. いま空心の時のインダクタンス L_x , 試料を入れた時の値 L_x' とすると試料が円筒形でその長さが直径に比して充分大である場合は②式のような近似式が得られる.

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_x'}{L_x} &= 1 + K_{12}^2 \left\{ \frac{4\delta}{D} (\mu - 1) - 1 \right\} & (4\delta < D \text{ の場合}) \\ \frac{L_x'}{L_x} &= 1 + K_{12}^2 (\mu - 1) & (4\delta > D \text{ の場合}) \end{aligned} \right\} \dots\dots ②$$

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu}} \text{ cm}$$

②式において ρ, μ は測定試料の比抵抗, 導磁率であり, D は測定試料の直径, K_{12} はコイルと試料との結合係数であり, f は測定周波数である. 測定周波数が非常に高い場合は δ (電流深度) が小となり, したがって L_x'/L_x はほとんど $(1 - K_{12}^2)$ となり鋼でも非磁性金属でも寸法が同じであれば同じ値となる. 周波数が低くなるにしたがって μ の変化による L_x'/L_x の差は次第に大となり $4\delta > D$ となればほとんど一定となる. 2 図は銅, 焼入鋼材, 未焼入鋼材について周波数 $10^3 \sim 10^7$ の範囲の L_x'/L_x を測定した結果を示したものでありほぼ②式のような関係が成立することが理解できる.

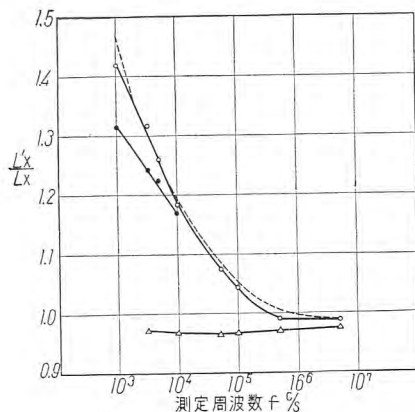
したがって μ の変化に対して L_x'/L_x の変化が最も大きいような最大周波数 f_0 は $4\delta = D$ を満足せねばなら



1 図 測 定 回 路

Fig. 1. Block diagram of measuring circuit.

○ 炭素鋼 (c=0.9%)
8φ×50 未焼入材
● 〃
全面焼入材
△ 銅 8φ×50
コイル寸法 内径 35φ
高さ 50
測定方法
 $f=10^3\sim10^4$ 電橋法
 $f=5\times10^4\sim5\times10^6$
Q メーター
…計算値
($\mu=100$, $\rho=15\ \mu\Omega\text{ cm}$,
 $K_{12}=0.02(2)$ 式)



2 図 $\frac{Lx'}{Lx}$ の周波数特性

Fig. 2. Frequency character of $\frac{Lx'}{Lx}$.

ぬので②式よりつぎのようになる。

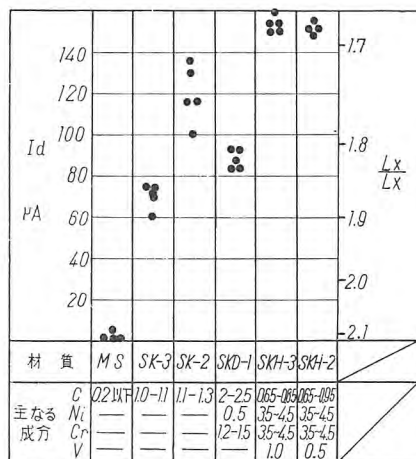
$$f_0 = \frac{4\rho}{\mu D^2} \times 10^8 \text{ C/S} \dots\dots\dots (3)$$

③式において鋼の常数 $\rho=15\times10^{-6}\ \Omega\text{ cm}$, $\mu=100$ の値を入れて計算すると

$$f_0 = \frac{60}{D^2} \text{ C/S} \dots\dots\dots (3')$$

となり、直径 1 cm の鋼材では 60 c/s であり、しかし周波数が低すぎると入力リアクタンスが低くなり測定が困難となる場合もありこの点充分に考慮しなければならない。またとくに表面の状態を知りたい時は $10f_0\sim100f_0$ の範囲の周波数を選ぶのが適当となる。

同じ形状のものを多数測定するような場合は同じ測定コイルを 2 個製作して、1 図における L_0, L_x 端子に接続して $R_A=R_B, R_C=0$ として一方に標準試料を入れ、他方に測定試料を入れたときの I_a を読み、あらかじめ測定材料の硬度と I_a との



3 図 材質と $I_a, \frac{Lx'}{Lx}$ との関係

Fig. 3. Relation between material and $I_a, \frac{Lx'}{Lx}$.

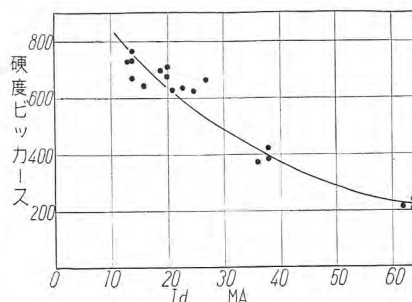
較正曲線を求めて未知試料に対しては較正曲線により較度を推定する方法を用いると便利である。

3. 硬度、材質と導磁率との関係

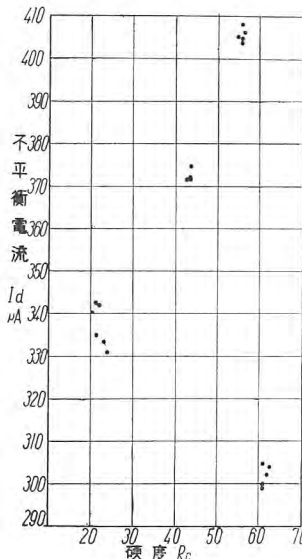
測定周波数、測定磁界を一定とした場合鋼の導磁率は材質 (C, Mn, Cr, Ni, V, Mo などの含有量) および熱処理条件 (焼入温度、冷却速度、テンパの温度、時間など) により変化する。

3 図は未焼入の炭素鋼、特殊鋼 6 種類の導磁率について測定した結果であり、炭素鋼については炭素量の低下にしたがって導磁率が增大する結果となっている。したがって炭素鋼に関しては炭素量の定量にもこのような方法を用いることができる。

4 図はワットメータ用ピボットの硬度と I_a との関係についての実験結果である。ピボットのように非常に直径の小であるものの硬度を測定するにはマイクロビッカース硬度計を使用せねばならないので時間を要し硬度測定した品物は使用することができない。したがって焼入



4 図 ピボットの硬度と I_a との関係
Fig. 4. Relation between I_a and hardness of pivots.

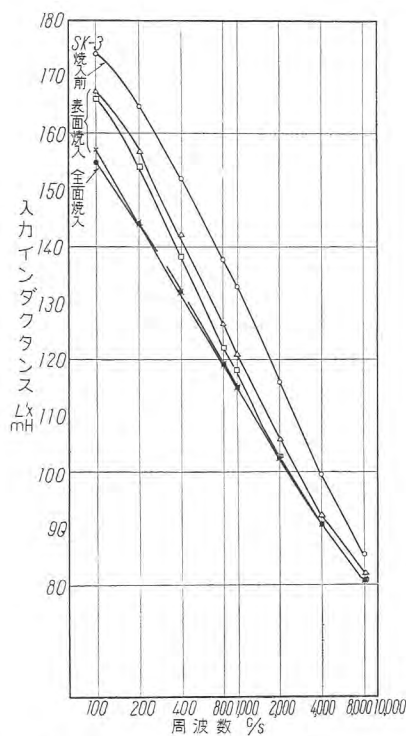


5 図 高炭素クロム鋼の硬度と I_a との関係

Fig. 5. Relation between I_a and hardness of high carbon chromium steel.

状態の良否は抜取試験により判定せねばならないが、導磁率により硬度を推定する方法によれば測定時間も短くかつ全数試験が可能となる。

5 図は高炭素クロム鋼の硬度と導磁率との関係を示したものである。この実験に使用した試料は直径10φ、長さ 60 mm の棒鋼で寸法精度は 1/1,000 以内に仕上げ一定条件で焼入れたもの、これを 200°C でテンパしたもの、300°C でテンパしたもの、および未焼入材の 4 種の試料を各 5 本ずつ作り測定したものである。測定周波数は 4,000 c/s を使用し、CR 発振器出力が一定になるように自動電圧調整器を入れたので測定精度が上り I_a の振れで $\pm 1\ \mu\text{A}$ 以内の精度をもっている。硬度測定はビッカース硬度計、ロックウェル硬度計にて表面硬度を測定してその平均をとった。5 図の結果を検討すると硬度と I_a との相関関係は充分得られているが、 $R_c=5.5$ 付近を



6 図 入力インダクタンス L_x' の周波数特性

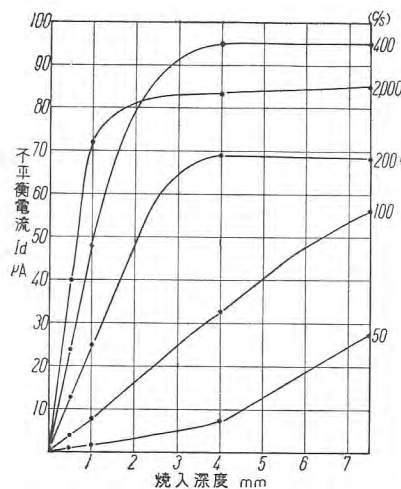
Fig. 6. Frequency character of L_x' .

頂点として硬度が上がっても下っても I_d は低下する曲線を示している。その理由は現在のところ明かでないが、金属組織の変化が非常に大きく μ に影響するものと推定され、このような特性を示す材料については測定の方法を変える必要があるように思われ現在検討中である。

4. 硬化深度の測定

鋼材を高周波焼入した後の硬化深度、滲炭層の深さなどを切断せずに測定する方法として、試料をコイルの中に置きそのコイルの入力インダクタンスの周波数特性を調べる方法が有効である。

すなわち比較的高い周波数では電流および磁界が表面に集中するので、表面のみ硬化されているものと内部まで硬化されているものとは同じようなインダクタンスとなる。低い周波数を使用すれば電流および磁界が内部まで存在するため両者の差が生じ、表面のみ硬化されているものは全然硬化されていないもののインダクタンスに近づく。6 図は未焼入材、全面焼入材、硬化深度 0.5, 1, 4 mm の 5 種類の炭素鋼について周波数 100 c/s から 8,000 c/s の範囲の入力インダクタンス L_x' を測定した結果である。この結果より高い周波数では表面のみ硬化されたものは全面焼入したものに近く、低い周波数では未焼入材に近くなることが判り、また周波数特性により硬化深



7 図 焼入深度と不平衡電流との関係
発振器電圧 10 V 一定、試料 $15\phi \times 60$ SK-3
焼入深度は測定後切断ビッカース硬度 350
の点を深度とした。

Fig. 7. Relation between I_d and harden depth.

度の大略を知ることができる。

7 図は未焼入材を測定コイル中に入れた時不平衡電流 $I_d=0$ なるように R_A, R_B, R_C を調整しておいて、硬化深度の種々変った試料を入れた時の I_d の値を周波数をパラメータとして記したものである。この結果より高い周波数を用いると薄い硬化層の状態を知ることができるが深い硬化層の状態は知り得ない。周波数を低くすると高い周波数の逆となる。したがって測定を要する硬化層の深さにより周波数を適当に選択することが必要である。

この周波数は近似的につぎのような方法で求められる。いま計算を簡単にするため長さの充分長い円筒形鋼材に密着してコイルを巻いた場合につき考えるとその入力インダク

タンス L_x' は④式で与えられる。

$$L_x' = A\Phi \quad \text{④}$$

A は試料およびコイルにより定まる常数、 Φ は磁束密度である。試料は表面より Δ cm だけ硬化されていて、硬化層の導磁率を μ_1 、非硬化層の導磁率を μ_2 とすると Φ は近似的に⑤式のようになる

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_0^\infty \mu H_0 l^{-\frac{x}{\delta}} dx \\ &= \mu_1 \int_0^\Delta H_0 l^{-\frac{x}{\delta}} dx + \mu_2 \int_\Delta^\infty H_0 l^{-\frac{x}{\delta}} dx \\ &= \delta H_0 \{ \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) e^{-\frac{\Delta}{\delta}} \} \quad \text{⑤} \end{aligned}$$

H_0 は表面の磁界の強さ、 δ は電流深度である。

④式⑤式より硬化深度 $\Delta = 0$ (未焼入材) の時の入力インダクタンスを L_{x0} 、 $\Delta = S$ の時を L_{xS} とすれば

$$\frac{L_{xS}}{L_{x0}} = \frac{\mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) e^{-\frac{S}{\delta}}}{\mu_2} \quad \text{⑥}$$

⑥式より硬化深度 Δ が 0 より S まで変る時 L_{xS}/L_{x0} が著しく変化するためには $S \approx 2\delta$ になるように δ を選べばよいことが判る。したがって最適周波数を f_s とすれば②式を参照してつぎのようになる

$$f_s = \frac{\rho}{S^2 \mu_2} \times 10^8 \quad \text{⑦}$$

鋼で 0~2 mm までの硬化深度を測定するためには、 $\rho = 15 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$ 、 $\mu_2 = 100$ 、 $S = 0.2 \text{ cm}$ を⑦式に入れて計算すると $f_s = 375 \text{ c/s}$ となり 7 図の実験結果と大略一致する。

5. むすび

導磁率の測定による鋼の硬度、深度を非破壊で推定する方法について、数種の実験例により記述した。今後の問題として残留磁気、保磁力など新しい磁気的な量の測定による非破壊試験の方法を研究すると共に非破壊試験の実用化に努力する考えである。

加圧水型発電原子炉の設計

研究所 長沼辰二郎*・弘田実弥*

Design on The Core of Pressurized Water Type Power Reactor

Engineering Laboratory Tatsujiro NAGANUMA・Jitsuya HIROTA

The pressurized water type power reactor that employs light water as moderator and coolant has been taken up as a subject. First, consideration is given to the fundamental design of the core from the viewpoint of nuclear design and of thermal design respectively. In the former case, multiplication factor, excess multiplication factor, core dimensions, effect of control rod and time behavior are put under discussion. In the latter, it is manifested that thermal stress being worked upon the cladding and the maximum surface temperature are the most important limiting factors. Lastly, diagrams are given to find dimensions of core fitting for these conditions.

1. まえがき

E. Fermi 氏がシカゴで最初の原子炉を動かすのに成功したのは 1942 年 12 月 2 日であり、これこそ人類が第 3 の火として原子核の連鎖反応を起した最初の日である。その後欧米の多くの国々において種々の実験用原子炉が運転され、さらに米国の高速中性子炉が最初の発電に成功した。またソ連においても APS-1 により 1954 年 6 月 27 日から電気出力 5,000 kW の発電が故障なく行われ、米国および英国等においてもさらに大容量の原子力発電計画が進行中である。

わが国においても、将来のエネルギー源としての原子力の重要性が認識され、近いうちに原子炉を運転することを目指し、学界ならびに産業界の広範囲の分野において、それぞれの研究が始められている。

さて現在発電用原子炉として考えられている型には、加圧水型 (PWR)、沸騰水型 (BWR)、ナトリウム冷却石墨炉 (SGR)、均質炉 (HR) あるいは高速中性子増殖型 (FBR) 等種々の型があり、それぞれの型によってその設計法もおおのずと異なってくるが、ここでは軽水を減速材および冷却材とした PWR を主な対象として、その設計法に簡単な考察を加えた結果について述べる。

2. 核的設計

原子炉設計の最重要点の 1 つは炉心の設計であることは論をまたないが、これは核的と熱的な設計に大別できる。これら両者は相矛盾する場合が多いので、その妥協の上に設計を進めてゆかねばならない。

核的な基礎設計は通常つぎのような順序に行うものである。

ア. 増倍率 k_{∞} の計算

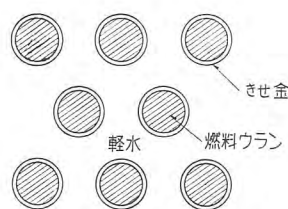
軽水を減速材とした原子炉では濃縮ウランの使用が不可避免的であり、それを低位濃縮ウランとするかあるいは天然ウランに高位濃縮ウランを配合したいいわゆるシード原子炉とするかの 2 通りの場合が考えられる。1 図に示すごとき $U-H_2O$ 格子は前者であり、2 図は後者のシード部分である。

これらに対し次式の 4 因子公式⁽¹⁾にしたがって単位セルの増倍率 k_{∞} を求める。

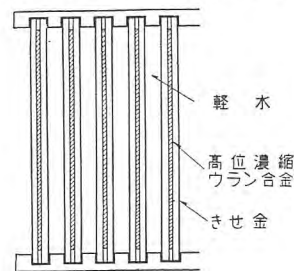
$$k_{\infty} = f p \epsilon \eta \dots \dots \dots (1)$$

ここに f は熱中性子が燃料に吸収される利用率、 p は速中性子が減速の途中 U^{238} の共鳴吸収をのがれる確率、 ϵ は速中性子による U^{238} の分裂効果を示す値、 η は燃料に熱中性子が吸収されたとき発生する速中性子の数である。したがってこれらの積である k_{∞} の値が 1 以上であることが核分裂の連鎖反応を行わせるために必要な条件である。

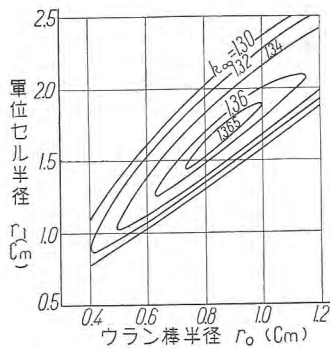
いま金属ウランの濃縮度 2%，ウラン棒半径 0.4~1.2 cm、きせ金は 0.05 cm 厚さの不銹鋼を用いた場合、簡単な拡散理論による k_{∞} の計算結果を 3 図に示し、濃縮度



1 図 燃料棒配列
Fig. 1. Arrangement of fuel rods.

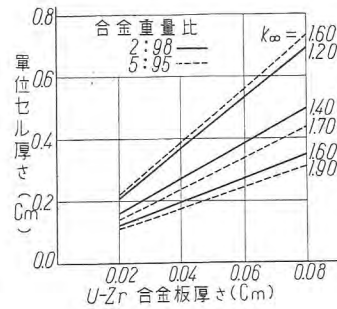


2 図 燃料板配列
Fig. 2. Arrangement of fuel plates.



3 図 U-H₂O 格子の k_{∞}
(濃縮度=2%)

Fig. 3. Contours of k_{∞} for U-H₂O lattice (enrichment=2%)



4 図 板状燃料の k_{∞}
(濃縮度=100%)

Fig. 4. Contours of k_{∞} for fuel plate (enrichment=100%)

100% のウランとジルコニウムの合金板厚さ 0.02~0.08 cm, きせ金は 0.075 cm 厚さのジルカロイ-2 を用いた場合の結果を 4 図に示す。後者の計算は均質的な取扱いによったものであるが、この場合のように薄い燃料板構造に対しては不均質的としてよりむしろ均質的として計算するのが妥当である。

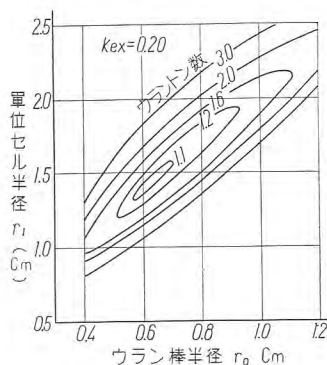
なお高位濃縮ウランを使用した場合は別であるが、軽水炉では軽水とウランの容積比が 2~3 程度であるので、速中性子による U^{235} の分裂効果が大きいことが 1 つの特長である。

イ. 過剰増倍率 k_{ex} の算定

前項の k_{∞} の計算は原子炉の出力が零の場合であるが、実際に炉をある有効出力で長期間運転するためには、燃料の消耗、分裂生成物とくにセシウムおよびサマリウム等の毒作用、炉の温度効果の補償ならびに炉を制御するための余裕等が必要であり、これらの和が炉の設計においてあらかじめ見込まねばならない過剰増倍率 k_{ex} を定めることとなる。

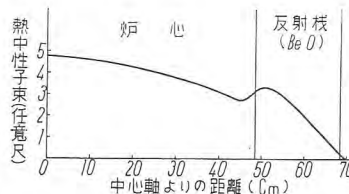
これらの因子のうちでまず温度効果であるが、このような PWR においては、 k_{ex} として $-4 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 程度の負の温度係数を有している。このことは炉の安全性という点からは望ましいが、発電炉の熱効率を高めるには高温運転が必要であり、水の平均温度は 270°C 程度にとらねばならないので、相当大きい温度効果の補償が要求される。

燃料の消耗については、 U^{235} の減少を U^{238} が中性子を捕獲することにより生ずる P_{σ}^{239} が



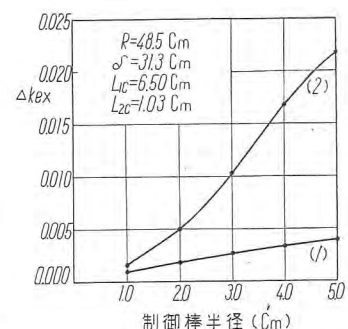
5 図 ウラン所要トン数
(濃縮度=2%)

Fig. 5. Required uranium tonnage (enrichment=2%)



6 図 熱中性子束の半径方向分布

Fig. 6. Radial distribution of thermal neutron flux.



7 図 制御棒効果

Fig. 7. Effect of central control rod.

どの程度これを償ってくれるかが問題となる。

U^{235} と P_{σ}^{239} の転換比の初期値は炉についての特定の値であり、その炉の核的な経済性を示すわけで、できる限り 1 に近い設計が望ましい。

さらにまたセシウムおよびサマリウムの毒作用として $0.03 \sim 0.04$ の k_{ex} を考慮すると、全体として大略 0.2 の k_{ex} が必要となってくる。

ウ. 炉心寸法

実際の炉は有限の大きさであるので中性子の漏洩による損失があるが、この漏洩を小さくするために反射材で炉心をかこむことが望ましい。このことは燃料の臨界量を減少させるだけでなく、炉心内の熱中性子束分布を平均化させるので熱的設計からもこのましいことである。

いま炉心を円筒形とし、その寸法の計算は拡散理論の 2 組近似法によることとすればつぎのようになる。

$$\frac{k_{\infty}}{(1+L_1^2 B^2)(1+L_2^2 B^2)} = 1 + k_{ex} \dots (2)$$

ここに L_1 および L_2 は炉心内の速中性子および熱中性子の拡散距離であり、 B^2 は炉心の材料的彎曲と呼ばれるものである。 B^2 の 2 根を μ^2 , $-\nu^2$ とし、半径方向 γ および軸方向 Z に別々に反射材をつけたとして近似的に取扱うにはつぎのようにおく。

$$\left. \begin{aligned} \mu^2 &= \mu_{\gamma}^2 + \mu_z^2 & \gamma_{1r}^2 &= K_{1r}^2 + \mu_z^2 \\ \nu^2 &= \nu_{\gamma}^2 - \mu_z^2 & \gamma_{1z}^2 &= K_{1r}^2 + \mu_{\gamma}^2 \\ &= \nu_z^2 - \mu_{\gamma}^2 & i &= 1, 2 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここに K_{1r} は反射材の拡散距離の逆数であり、 $i=1$ は速中性子に、 $i=2$ は熱中性子に対するものである。いま (3) 式にて反射材を加えぬ裸の場合の臨界体積最小というような条件を入れ μ_{γ} および μ_z を定めると、 ν_{γ} , ν_z , γ_{1r} , および γ_{1z} も定まる。炉心内と反射材内における半径方向の中性子束分布は、この μ_{γ} , ν_{γ} , および γ_{1r} を使用してあらわせるので、炉心と反射材の境界面における中性子束および中性子流の連続条件から炉心の臨界半径が求められる。

つぎに軸方向の計算も μ_z , ν_z および γ_{1z} を使用して同

様に行うわけであるが、炉の構造上の点から軸方向の反射材は使用困難な場合が多い。

反射材として半径方向に 20 cm 厚きの酸化ベリリウムを使用した場合のウラン臨界量を 5 図に示すが、これは 3 図の結果において $k_{\infty}=0.20$ にとって計算したものである。6 図に半径方向の熱中性子束分布の一例を示すが、炉心内で分布が相当平坦となっていることがわかる。

エ. 制御棒の効果

この炉では相当大きい k_{∞} が必要であることは前述したが、それをどのようにしてシム棒で吸収するかが問題である。炉の中心軸に制御棒を挿入した場合の効果につき 2 組近似法による計算結果を 7 図に示すが、これは炉心半径 $R=48.5$ cm, 反射材による節約 $\delta=31.3$ cm, $L_{1c}=6.50$ cm, $L_{2c}=1.03$ cm に対するものである。

制御棒材料としてはハフニウムとかボロンが考えられるが、7 図の曲線 (1) は中空円筒制御棒の場合、曲線 (2) はその内部に水を加えた場合である。このような軽水炉に対し制御棒が有効でないことは事実であって、これは水の熱中性子に対する吸収断面積が大きく、かつ減速能が大きいので制御棒効果が局所的だという点に理由づけられよう。シム棒挿入位置が炉の中心軸からはずれると当然効果が減少するので、相当数のシム棒が必要という結果になるが、高圧容器中に挿入して操作せねばならぬことを考えると機械的設計上の困難がそこに生ずるように思われる。

オ. 過渡状態および安全性の考察

これまでは定常運転に関するものであるが、炉心設計の重要な因子は運転過渡時の検討、さらにまた予測しうる不意の事態下での安全性の考察である。予測しうる不意の事態としては、炉が相当な出力で運転しているときに冷却材の流れが杜絶した場合がまず考えられる。2 図のごとき燃料構造では、冷却溝が狭いのでなんらかの原因で水の流れが妨げられると、安全装置の設計がよくない場合には燃料の局所的溶融をひき起す結果になるかも知れない。

これらの問題を取り扱うには与えられた炉心につき過渡時を記述する方程式をたて、アナコンを使用して検討するのが便利である。

以上 PWR の炉心の核的設計に簡単な考察を加え、主として低位濃縮ウラン炉に対して拡散理論による基礎的な計算結果を示した。シード原子炉で高位濃縮ウランを環状帯に配置したような炉心についてはその設計計算がさらに複雑になってくるが、いずれにしろ軽水炉の厳密な理論的取扱いはきわめて困難であり、より詳細な設計は種々の実験的資料によらねばならない。

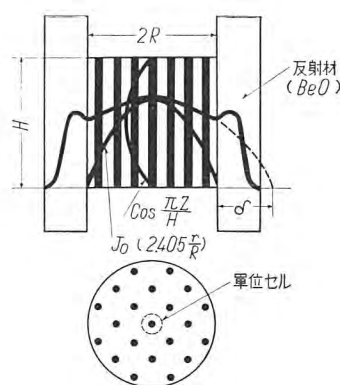
3. 熱的設計

つぎに熱的設計について考察を加えることにする。

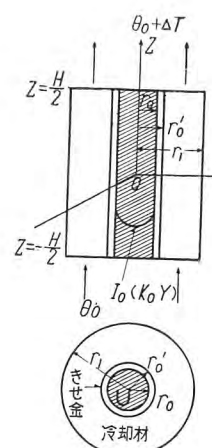
ア. 熱的設計条件

原子炉を熱的に設計するに当って、炉が安全に運転で

加圧水型発電原子炉の設計・長沼・弘田



8 図 炉内の熱中性子束分布
Fig. 8. Flux distribution in the core.



9 図 燃料棒内の熱中性子束分布
Fig. 9. Flux distribution in the fuel rod.

きるようにするためにはつぎのような熱的条件を考慮しなければならない。すなわち

(1) 定常運転時に燃料表面の最高温度点において核沸騰をおこさぬこと。(炉の加圧が 130 kg/cm^2 のときは 330°C 以上にならぬこと)

(2) 燃料であるウランの中心における最高温度が、その変態温度 ($\alpha \rightarrow \beta$) 665°C を越えぬこと。

(3) ウランから冷却材である水へ流れる熱流によって、ウラン表面のきせ金(またはウラン)に生ずる熱応力がその材料の許容熱応力以下であること。

さらにタービンの効率を高めるために

(4) 炉の出口における冷却材の平均温度をできるだけ高い値にすること。

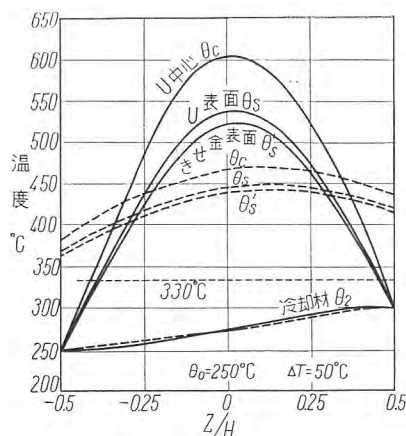
PWR の熱設計をするに当って、上の 3 つの条件 (1), (2), (3) のうちどの条件がもっともきびしい条件となるかを知るために、まず炉内のウラン、きせ金および冷却材たる水の温度分布をしらべることにする。

イ. 炉内の温度分布

温度分布を計算するために、半径 R 高さ H なる円筒形の加圧水型原子炉を考える。炉内における発熱分布は熱中性子束分布に比例するから、軸方向には余弦的分布、半径方向には J_0 分布、ウラン棒内の半径方向には I_0 分布をなすものとする。(8 図, 9 図参照)

さらにウラン棒については Z 方向(軸方向)の熱流を無視し、また冷却材については半径方向の温度変化はないものとし、きせ金と冷却材との間の熱伝達率およびウラン、きせ金、冷却材の物質定数は温度によらず一定とする。このような仮定をすると、反射材のあるときは炉の中心における単位セルについてつぎの温度分布の式を得る。

$$\theta_c - \theta_s = \frac{q_1}{4(H+2\delta')k_uk_0r_0} \cdot \frac{\cos \frac{\pi Z}{H+2\delta'}}{I_1(K_0r_0) \sin \frac{\pi H}{2(H+2\delta')}} \cdot \{I_0(K_0r_0) - 1\} \dots \dots \dots (4)$$



10 図 炉内の温度分布

Fig. 10. Temperature distribution in the core.

$$\theta_s - \theta_s' = \frac{q_1}{4(H+2\delta')k_s \sin \frac{\pi H}{2(H+2\delta')}} \log_e \frac{r_0'}{r_0} \cos \frac{\pi Z}{H+2\delta'} \dots (5)$$

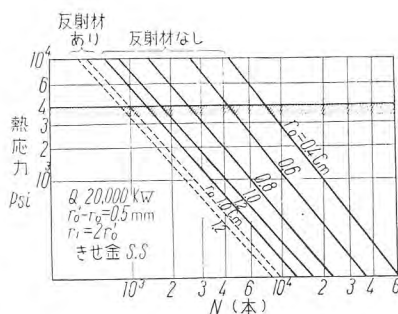
$$\theta_s' = \theta_0 + \frac{\Delta T}{2} \left\{ 1 + \frac{\sin \frac{\pi Z}{H+2\delta'}}{\sin \frac{\pi H}{2(H+2\delta')}} \right\} + (\Delta t)_{\max} \cos \frac{\pi Z}{H+2\delta'} \dots (6)$$

$$\theta_2 = \theta_0 + \frac{\Delta T}{2} \left\{ 1 + \frac{\sin \frac{\pi Z}{H+2\delta'}}{\sin \frac{\pi H}{2(H+2\delta')}} \right\} \dots (7)$$

- ここに θ_0 : ウラン棒の中心温度
 θ_s : ウラン棒の表面温度
 θ_s' : きせ金の表面温度
 θ_2 : 冷却材の温度
 ΔT : 冷却材の温度上昇
 Δt : きせ金表面と冷却材温度との差
 k_u : ウランの熱伝導率
 k_s : きせ金の熱伝導率
 δ' : 炉の上下につけた反射材による節約
 q_1 : 炉の中心におけるウラン棒において単位時間内に生ずる全熱量
 K_0 : 燃料によって定まる定数

いま一例として、炉の発熱量 $Q=20,000$ kW, $H=2R=139.8$ cm, $r_0'=0.8$ cm, $r_0=0.75$ cm, ウラン棒の本数 $N=1,910$ 本のときの温度分布を示すと 10 図を得る。図において実線は反射材のないときの温度分布で、破線は反射材を用いた ($\delta=\delta'=R$) ときのものである。ここに δ は炉の側面につけた反射材による節約を表わす。

ここで A 項で述べた熱的設計条件を振り返ってみると、10 図に示した温度分布は (2) の条件は満足していることがわかるが、きせ金表面の最高温度はいずれの場合も 330°C を越えて (1) 条件を満足していない。ゆえに



11 図 熱応力-N 線図

Fig. 11. Thermal stresses-N diagram.

PWR の熱的設計においては条件 (1) および (3) について吟味してみなければならない。

ウ. 炉の寸法による熱応力の変化

きせ金中における温度降下 $\Delta\theta$ が (5) 式によって与えられているから、この材料中に生ずる Z 方向の熱応力 σ_z は次式 (2) によって求めることができる。

$$\sigma_z = \Delta\theta \frac{E\alpha}{1-\mu} \left\{ \frac{2c^2}{c^2-1} - \frac{c}{\log_e c} \right\} \dots (8)$$

ここに E はヤング率, α は熱膨脹係数, μ はポアソン比, $c=r_0'/r_0$ を表わす。

しかして $\Delta\theta$ は (5) 式からわかるように炉の熱出力 Q が与えられているときは、温度条件 θ_0 および ΔT には無関係

でただ炉の寸法によってのみ定まるから、熱応力 σ_z もまた炉の寸法のみによって定まることがわかる。

(8) 式を用いて熱応力と燃料棒の本数 N との関係を求めた一例を r_0 パラメータとして示したものが 11 図である。図において実線および破線はそれぞれ反射材を用いない場合および用いた場合の熱応力の関係を示すもので、熱応力の制限値を $4,000$ lb/in² にとれば、燃料棒の半径 r_0 の各値に対して燃料棒の最小本数が求まることとなる。

エ. 炉の寸法によるきせ金表面温度の最大値

(θ_s')_{max} の化変

きせ金表面における最高温度 (θ_s')_{max} は (6) 式から

$$(\theta_s')_{\max} = \theta_0 + \frac{\Delta T}{2} + \frac{1}{2} \{ \Delta T^2 + 4(\Delta t)_{\max}^2 \}^{1/2} \dots (9)$$

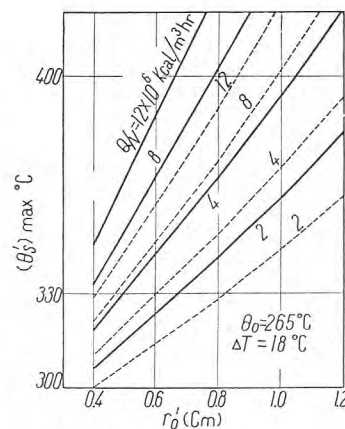
となる。さらに ΔT と $(\Delta t)_{\max}$ との間には

$$(\Delta t)_{\max} = p \Delta T^{0.8} \dots (10)$$

なる関係が成立する。ここに p は炉の熱出力 Q を与えた場合に、炉の幾何学的寸法のみによって定まる定数である。ゆえに (θ_s')_{max} は炉の寸法および温度条件 θ_0 , ΔT によって定まることがわかるが、いま温度条件を $\theta_0=265^\circ\text{C}$, $\Delta T=18^\circ\text{C}$ 一定に選

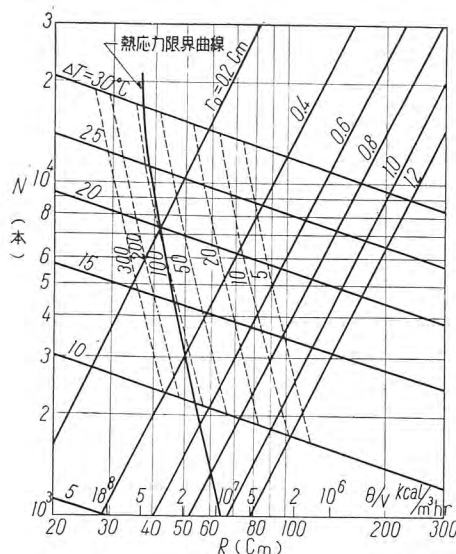
んだ場合、 r_0' によって変化するありさまを計算した一例を 12 図に Q/V をパラメータとして示す。

図において実線および破線はそれぞれ反射材のないときおよび反射材を用いたときの (θ_s')_{max} を示す。これらの曲線から温度条件を一定にした場合、(θ_s') を小さくするには Q/V



12 図 (θ_s')_{max}- r_0' 線図

Fig. 12. (θ_s')_{max}- r_0' diagram.



13 図 熱的条件に適合する炉の寸法を見出すための線図

Fig. 13. Diagram for thermal design of reactor.

の値を小さくすることよりも r_0 を小さくすることの方がより効果的であることがわかる。

さらに (10) 式の p は燃料の形を円筒形とするときよりも、中空円筒あるいは平板状のものを用いるときの方が小さくすることができるから、 $(\theta_s')_{\max}$ を小さくするには、燃料の形を円筒形よりも平板状のものを用いた方がよいことがわかる。

オ. 熱的条件に適合する炉の寸法を見出すための線図

ウ項およびエ項において述べた計算を拡張すると、ア項の熱的条件に適合する炉の寸法を見出すための線図を作ることができる。

13 図は反射材を用いかつ炉の入口温度 $\theta_0=265^\circ\text{C}$ 一定とした場合の線図である。図において熱応力限界曲線とは、この曲線上で表わされる炉の設計値を用いるとき、きせ金中に生ずる熱応力 σ_s がちょうど $4,000 \text{ lb/in}^2$ の値になる点を結んだ曲線で、この曲線の左側の領域は熱応力が上記の値より大きくなる部分で、実際の炉の設計には不適当な領域である。また $\Delta T =$ 一定なる直線の表わす意味は、 ΔT として図示の値を用いたとき表面温

度 $(\theta_s')_{\max}$ が 330°C になることを示す。すなわちたとえば $\Delta T=20^\circ\text{C}$ に選べば、図において $\Delta T=20^\circ\text{C}$ の直線より下の部分は $(\theta_s')_{\max}>330^\circ\text{C}$ となり炉の設計に対して不適当な領域であることがわかる。さらに図中破線で示した曲線は冷却材のポンプ仕事が一一定となる点を結んだものである。ただしこの場合曲線に示した数値はポンプ仕事の大小を示す比例値で、ポンプ仕事の絶対値を示すものではない。

この線図を用いて炉の熱設計を行う場合、 r_0 を他の設計要素によって定めると、線図から明らかなように ΔT の値によって冷却材の循環に要するポンプ仕事に変化する。ゆえに ΔT の値を決めるには発電プラント全体の経済的効率を考慮して決めなければならない。

4. む す び

現在わが国においては、原子力研究の第一歩が踏み出されたとはいえ、いまだ実験用原子炉の1基さえ持たないのが実状である。これも敗戦によって最近まで原子力研究の自由を持たなかったわが国においては致し方ないことであるとも考えられる。

このような現段階において、わが国における発電用原子炉が将来どのような型に落ち着くかを予想することはわれわれにとってきわめて困難なことであるが、欧米における現状においては PWR が発電炉の代表的な型の1つであることは確かである。われわれが本文において PWR を採り上げた理由の1つはこのためである。しかし限られた紙面において、かかる大きな問題の全体を尽すことのできないのは言を待たないし、またわれわれ菲才のよくするところでもない。ただ原子力工業の胎動期における1つの歩みとして記録されれば幸である。

最後に、つねにご鞭撻をいただいた大野所長をはじめ、種々有益な助言を下された当所の原子炉研究会の方々に厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) S. Glasstone & M. C. Edlund; The Element of Nuclear Reactor Theory (1952) P. 84
- (2) 機械工学便覧 (昭和 26 年版) 第 4 篇 P. 106

赤外線ガス分析計

研究所 八島英之*・安東滋*

Infrared Gas Analyzers

Engineering Laboratory Hideyuki YASHIMA・Shigeru ANDO

Every hetero-atomic gas invariably has an infrared absorption band, which is caused by vibration and rotation of the molecule, differing according to its molecular structure.

Its infrared spectrum is a specific character of the gas. Based on this principle, an infrared-ray gas analyzer has been designed, with exceedingly high sensitivity and high selectivity as compared with other gas analyzers making the use of physical or chemical properties such as heat of reaction, heat conductivity and refraction and the like.

The infrared gas analyzer introduced herein is of a single source, double beams and non-dispersive type, employing an optical null method. A detector of this infrared analyzer is a spectrophone having many advantages.

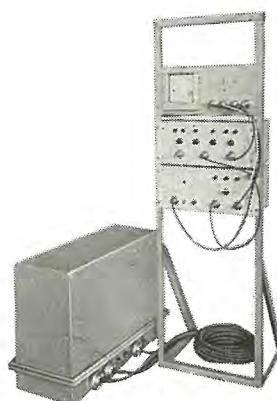
1. ま え が き

化学工場のオートメーション、炭鉱、トンネル内の危険有毒ガスの検知等の必要から、ガスの濃度を連続的かつ選択的に自動記録し、さらに製造工程の制御、エアコンディショニングなどを自動的に行えるような工業計器の出現が従来より期待されていた。赤外線ガス分析計はこの要求をみたす可能性のある計器としてつとに着目され、欧米ではすでに実用の段階に入り信頼すべき計器も2,3製造市販されている。現今もっともよく知られているものの1つは米国パーキン・エルマー社製の“TRINON”と称する分析計であって、硫酸工業でアンモニアを合成する際の触媒に悪影響を及ぼす微量の炭酸ガス、一酸化炭素の定量、石油化学工業の工程の制御などで実用されて、かなり成果を収めていると伝えられている。

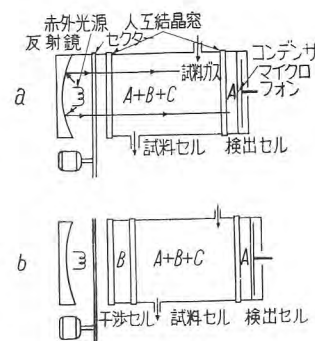
従来、種々の気体濃度測定装置が考案、実用化されてきたが、すべてなんらかの大きな欠点を有している。たとえば、オルザット分析法は1回の濃度測定に数分を要して連続測定は不可能であり、簡単に測定できない気体も多い。熱伝導型および音響型の分析計は、各ガスの物理的性質の差を利用して測定する関係上他のガスの影響を受けて誤差を生じやすく、多成分系中の1成分を選択的に測定することは困難である。

赤外線ガス分析計で測定の対象になる気体は、赤外吸収を持たない単原子気体 (Ar, He 等) と同じ原子よりなる2原子気体 (H_2 , O_2 , N_2 等) を除いたほとんど全部の気体 (CO , CO_2 , NH_3 , C_2H_4 , CH_4 等) であって、これらはおおの分子構造に固有な波長の赤外吸収帯をいくつか持っている。したがって、試料ガスの吸収帯波

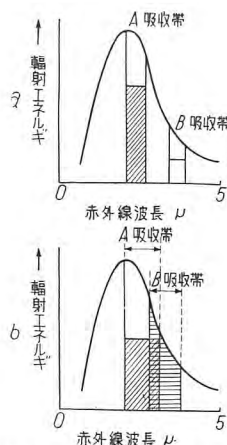
長の赤外線だけに感ずるいわゆる選択性のある検知器を使用するか、または赤外の全波長領域に感度を有する検知器、たとえば熱電対、ボロメータ等と気体をみたしたフィルタ・セルとを併用して測定するので(前者を正型、後者を負型と称する.)、他の気体の影響を避けることができ、多成分系中の測定も可能である。赤外線ガス分析計では試料ガスを赤外線光路の中を流し、その輻射量の変化を電氣的に検知するので、連続測定が可能であり、濃度変化に対する計器の応答は非常に速い。その場合赤外線の吸収量は光路に存在する試料気体の分子数によるので、試料の濃度の稀薄であるか濃密であるかに応じて試料セルの長さを長くあるいは短く設計すればよく、大は100%から小は数十 p.p.m. まで測定可能である。



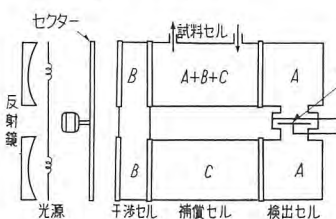
1 図 全装置の外観
Fig. 1. Appearance of equipment.



2 図 正型分析計
Fig. 2. Positive type analyzer.



3 図 正型分析計の波長分布
Fig. 3. Wave length distribution of positive type analyzer.



4 図 Luft 型分析計
Fig. 4. Luft type analyzer.

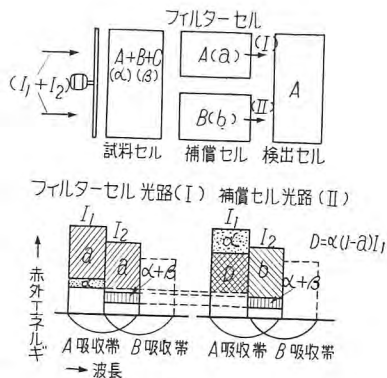
2. 赤外線ガス分析計の原理

赤外線ガス分析計には前述のように正型と負型の2種類があり、その優劣は議論の分れるところで、いずれが理想的であるかはにわかに断定できないが、われわれの試作した分析計は正型の1種であるので、一般論は主として正型について述べることにする。

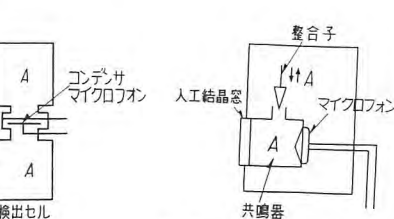
2 図はもっとも簡単な構造の正型分析計を示す。赤外光源は 800~1,000°C に赤熱したニクロム線で、赤外線は反射鏡により反射されて試料セルを通り検出セルに入る。試料セルの両端には赤外線に対して透明な人工結晶 (KCl, AgCl, LiF 等の単結晶) の窓を貼りつけてある。検出セルには測定しようとする気体を 100% 封じ込んであり、赤外線が入射するとその吸収帯のもののみを吸収してセル内の温度は上昇し、したがって圧力が変化してコンデンサ・マイクロフォンの金属箔を変位させる。この変位は静電容量に変化を与える。このような検知方式では、ドリフトを避けるために赤外線をセクタで断続して入射させるので、この容量変化は交流出力として読みとられる。

試料気体中に、測定しようとする気体 A と赤外吸収を有する他の気体 B、赤外吸収を有しない第3の気体 C の3者が共存する場合、3 図 (a) のように A 吸収帯と B 吸収帯が重ならないければ、全輻射量から試料セル中の A による吸収量を差引いた斜線の部分の輻射量が検出セルの出力となる。

3 図 (b) のように AB 両吸収帯が一部重なり合うような場合には、2 図 (a) のような分析計では B の濃度



5 図 正負混合型分析計
Fig. 5. Mixed positive and negative analyzer.



6 図 スペクトロフォン
Fig. 6. Spectrophone.

が変わっても出力の変化を生ずる。したがってそのような場合には 2 図 (b) のようにさらに干渉セルを取付けてその影響を取除く。すなわち、干渉セル中に B を 100% 封じておけば、3 図 (b) に示すように、B 吸収帯の赤外線はことごとく吸収されて、もはや試料セル中の B 濃度が変化しても出力には影響を及ぼさなくなる。

さらに安定度を増すために双光束とした Luft 型分析計⁽¹⁾(4 図) が造られた。現存のものはほとんどこの Luft 型かもしくはこれに近い型式をとっている。この分析計では、セクタによって試料セルと補償セルに同時に赤外線を断続入射させる。したがって試料セル中に A が入っていなければ両光束は強さが等しく交流出力は得られない。しかし A が入ってくるとそれによる吸収量だけ上下2検出セルに入る赤外輻射量に差を生じ、金属箔が変位して交流信号が得られる。

以上の分析計では、干渉セルに干渉ガス B を 100% 封じ込めば、B 吸収帯の輻射エネルギーは全部吸収されると仮定して説明したが、気体によっては全部吸収されないものもある。干渉セルを長くし、圧力を上げれば吸収量は増すが、前者には技術的限度があり感度の低下を免れないし、後者では液化してしまう気体もあり、窓の強度等の点であまり高く圧力を加えることはできない。このような場合に分析計の選択性を維持するためにはつぎのような方法による。

この型は正型と負型の長所をとってこれを折衷したものなので、正負混合型ともいうべきものである。各セルの配置は 5 図に示すとおりで、フィルタセルには測定しようとする気体 A を、補償セルには干渉気体 B をおのおの適当な濃度で封じ込む。このとき両セルの AB 各吸収帯における平均透過率をそれぞれ a, b とする。また、試料セルの A, B 両気体による透過率をそれぞれ α, β 、A 吸収帯の光源輻射エネルギーを B と重ならない部分と重なる部分の2つに分け、おのおの値を I_1, I_2 とする。フィルタセルを通して検出セルに入る輻射エネルギー E_1 はつぎのようになる。

$$E_1 = \alpha a I_1 + \alpha \beta a I_2 + I_3 \dots \dots \dots (1)$$

ただし I_3 は A 吸収帯以外の赤外線輻射エネルギーである。補償セルを通して検出セルに入る輻射エネルギー E_2 はつぎのようになる。

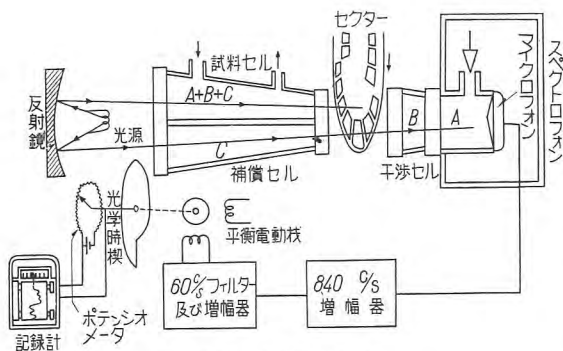
$$E_2 = \alpha I_1 + \alpha \beta b I_2 + I_3 \dots \dots \dots (2)$$

(1) (2) の差に相当するエネルギー D は (3) のようになり、これに比例した交流信号が得られる。

$$D = E_2 - E_1 = \alpha(1-a)I_1 + \alpha\beta(b-a)I_2 \dots \dots (3)$$

ここで $a=b$ であれば第2項は消えて $\alpha(1-a)I_1$ に比例した交流信号が得られ、まったく β にはよらない値となり、干渉ガス B の影響を完全に除くことができる。

正型分析計の検出セルは断続周波数を上げて増幅を容易にするため時定数短く、しかも高感度でなければなら



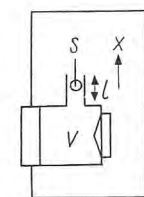
7 図 全装置概略図
Fig. 7. Diagram of equipment.

ないが、この2つの条件は両立し難く、測定しようとする気体の種類に応じてセルの奥行き、容積を適当に選ばねばならない⁽²⁾。また、アルゴン、水素のような比熱の小さい気体が稀釈することも、感度を落さずに時定数を短くする1つの方法であるが、このようにしてもなお断続周波数は30c/s程度に留る。われわれはこれらの点から考えて、赤外分光器の検知器の1つであるスペクトロフォンを利用することにした。

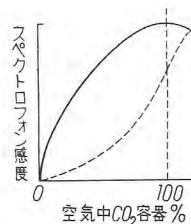
スペクトロフォンとは、6 図に示すように共鳴器にマイクロフォンを取付け、測定しようとする気体を充したものである。共鳴周波数を断続周波数と一致するように設計し、断続赤外線を入射しながら楔型をした整合子を動かしてマイクロフォン出力が最大になるように調節すれば、完全な共鳴状態に置くことができる。試作した分析計のスペクトロフォンは共鳴周波数840c/s、感度1mV/mWのものである。

われわれの試作した分析計は7 図のような構成になっている。各セルの配置は前述 Luft 型分析計とほとんど同じであるが、セクタは図のようなもので、赤外線を840c/sに断続すると共に、その7c/sごとに試料セルおよび補償セルからきた赤外線を交互に切換えてスペクトロフォンに入射する。したがって試料セル内の測定しようとする気体Aの濃度が変化すると両方の光束の強さに差ができ、スペクトロフォンの出力は840c/sの振幅が60c/sで変調を受けたものになる。それを増幅し、濾波してとり出した60c/s出力を平衡電動機に入れ、図のような光学楔を動かす。光学楔は補償セルに入る赤外線を加減し、両光束の強さが等しくなった所で60c/s出力が消失し、光学楔は停止する。すなわち光学楔は試料セル内のAの濃度に自動追尾するわけで、その回転角がAの濃度を示している。この装置では、その軸にポテンシオメータを直結し、電圧変化を記録計に入れて濃度の指示をしている。

通常の分析計では検出セルの交流出力を増幅して電流計で読み、または記録計に直接入れて記録しているが、このような分析計にあっては光源の電圧、増幅器の増幅度が変化すれば、当然結果の濃度指示値は変わってくるので、これらを厳密に一定に保たねばならない。しかるに7 図のようないわゆる光学的零位法を用いる場合にはそ



8 図 スペクトロフォンの共鳴
Fig. 8. Resonance of spectrophone.



9 図 スペクトロフォンの感度と内容気体%との関係
Fig. 9. Relation between the sensitivity of spectrophone and contained gas percentage.

れらがある程度変動しても出力の指示には誤差を生じないことになる。

このように光学的零位法は有効適切な方法であって、前述5 図のような混合型の分析計にも適用できる。第3の光路を別に設け、上下両光束の差に相当する光束を送り、その光路に取付けた光学楔で自動追尾すればよい。

3. スペクトロフォン⁽³⁾

1880 年頃 T. Tyndall, W. C. Röntgen, A. G. Bell 等によって発見されたスペクトロフォンの原理は、その当時適当なマイクロフォン、増幅器が得られなかったので、実用には供せられなかったが、1944 年ソ連の M. L. Veingerov はこれを気体の赤外吸収スペクトル観測に用いた。

スペクトロフォンの断続赤外線による共鳴は、通常の音響共鳴器の強制振動における共鳴と同じであると仮定すると、よく実験結果と一致する。その共鳴周波数は内容積 V 、側管の長さ l および断面積 S 、気体の音速 C の4因子によって完全に決定される。側管の部分の気体が内部の気体によって、その変位に比例した圧力を受けて振動すると考えて振動方程式をたてるとつぎのようになる。

$$S\rho l \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma p \frac{S^2}{V} x = 0$$

(ただし p は圧力、 ρ は密度、 γ は定積比熱と定圧比熱との比)

また $\sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = C$ なる関係があるので共鳴周波数 n はつぎのようになる。

$$n = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}} \quad (4)$$

これを音響学でいわゆる開口端の補正と呼ばれる量 $\delta = 1.7r$ (ただし r は測管の半径) で補正したものはつぎのようになる。

$$n = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(l+\delta)V}} \quad (5)$$

(5) 式を用いて設計した炭酸ガスのスペクトロフォンの共鳴周波数の計算値と実験値は1 表に示したようによく一致している。

スペクトロフォンに使用するマイクロフォンはクリスタル型、コンデンサ型共に好結果が得られるが、機構を簡単にするために前者をとった。

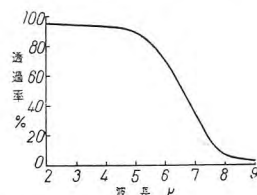
入射窓の材料は LiF の単結晶板を用い、共鳴器の内面はよく磨いて金メッキを施してある。試作したスペクトロフォンの性能を2 表に示す。

1 表

スペクトロフォン	炭酸スガの音速 C (cm sec ⁻¹) (10°C)	S (cm ²)	V (cm ³)	l (cm)	δ (cm)	共鳴周波数 (c/s)	
						計算値	実験値
A	262.5×10^2 (18°C)	0.45	57.2	6.3	0.6	200.0	201.3
B	265.8×10^2 (15°C)	0.32	10.7	6.2	0.5	399.5	406.0
C	264.5×10^2	0.45	7.8	5.3	0.6	416.6	415.1

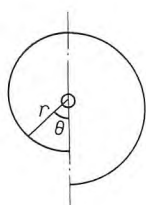
2 表

スペクトロフォン	内容気体	共鳴周波数 (c/s)	感度 (mV/mW)	時定数 (m/sec)
A	CO ₂	210	1.4	63
B	CO ₂	420	0.3	8.5
C	CO ₂	420	0.7	16
D	CO ₂	840	1.0	31
D	CO	840	0.3	20
D	CH ₃ Cl	840	1.3	33



10 図 LiF 単結晶板 (厚さ 5mm) の赤外領域における透過率

Fig. 10. Transparent factor of LiF mono crystal plate in the infra-red range.



11 図 光学楔

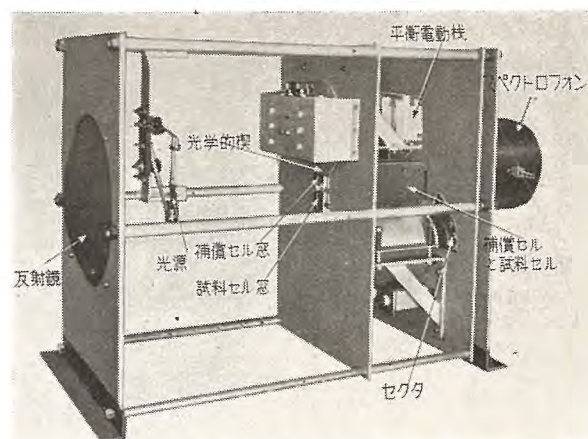
Fig. 11. Photometric wedge.

スペクトロフォンの感度と内容気体%との関係を実験によって確めたのが 9 図である。実線は各%において側管の長さを変えて同調をとった場合、破線は 100%において同調を取り、そのまま気体%のみを変えた場合である。ここで判るとおり、赤外吸収のない気体で少し稀釈した方が感度が上るのは、赤外吸収が共鳴器の中でより一様に起るためと考えられる。

4. 分析計の構造

ア. 分析計本体

赤外線的光路を構成する反射鏡、試料セル、補償セル、干渉セル、検出セル等の内面はすべて鏡面に仕上げた上で金メッキを施し、赤外線の反射率を良くしてある。また窓材料は波長 6μ までの赤外線に対してほとんど完全に透明な LiF の単結晶板を使用している。



12 図 分析計の本体

Fig. 12. Analyzer.

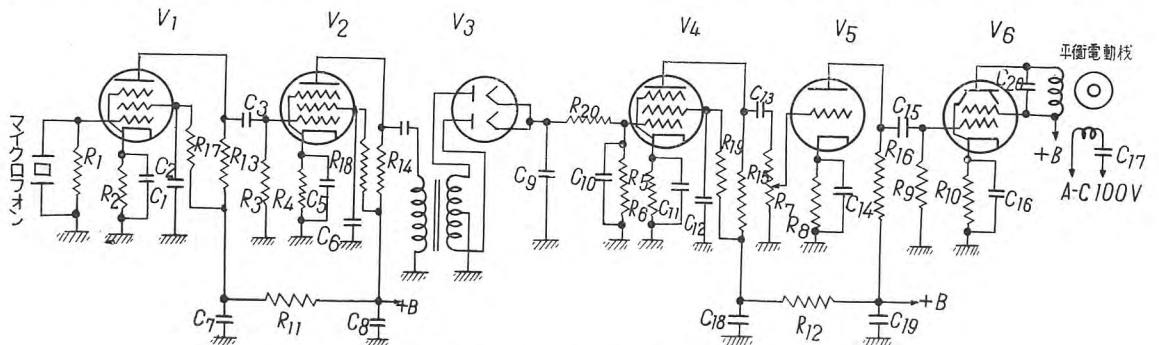
赤外光源はニクロム線をコイル状に巻いて、なるべく点光源に近くなるよう、小さくまとめたもので、800~1,000°C 程度に赤熱しており、消費電力は試料気体により多少の差があるが 50~70 W 位である。

セクタは 28 の窓を有し、1,800 rpm の同期電動機で駆動する。モータの機械的振動およびセクタの回転による音が雑音としてスペクトロフォン中のマイクロフォンに伝わるおそれがあるので、モータの品質、保持の方法、セクタのバランス等にとくに注意を払わなければならない。一方スペクトロフォンの方も外部からの騒音を防ぐために、壁の厚い鋼鉄製の容器に収めてある。

光学楔は 11 図に示すような板で、この回転角 θ と径 r の関係式 $r=f(\theta)$ が記録計の気体濃度目盛を決定する。 r, θ の関係が 1 次式ならば濃度目盛は対数目盛となり、また濃度目盛が等間隔になるように r, θ の関係を選ぶこともできる。試作した分析計では前者の対数目盛を選んだ。また分析計の本体は炭鉱、工場等で使用することを考えて防爆型ケースに収めてある。

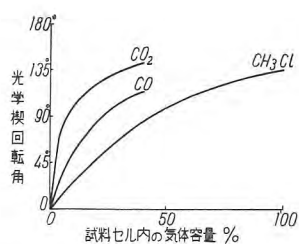
イ. 増幅器

分析計に用いた増幅器を 13 図に示す。普通の低周波増幅器であるが、最後に 60c/s の出力を取出すので、60 c/s の雑音を極力小さくしなければならない。そのために初段管は直流ヒータとし、検波は全波整流として 60 c/s ハムを軽減すると同時に低周波濾波回路の能率を上



13 図 増幅器

Fig. 13. Amplifier.



14 図 光学楔回転角と気体濃度
Revolving angle of photometric
wedge VS gas density.

3 表

測定しようとする気体	干渉気体	記録計振れ (被測定気体 % で表わす)	
		干渉セル内を空 気で充した場合	干渉セル内を干渉 気体で充した場合
CO ₂	10% CO	0.02	±0
CO ₂	100% CO	0.05	0.01
CO	7% CO ₂	0.8	0.05
CO	100% CO ₂	1.0	0.15
CH ₃ Cl	10% CO ₂	0.3	±0
CH ₃ Cl	100% CO ₂	0.8	±0

4 表

測定しようとする気体	濃度目盛上の 記録子振れ	応答時間 (sec)
CO ₂	0~0.7	0.9
"	0~2.5	1.3
"	0~4.7	2.0
"	0~13.5	2.5
CO	0~3.9	1.1
"	0~6.0	1.1
"	0~12.0	1.4
CH ₃ Cl	0~13.0	1.9
"	0~28.0	2.5
"	0~82.0	2.8

げている。

5. 気体の濃度測定

われわれはこの分析計を用いて、炭酸ガス、一酸化炭素、メチルクロライドの3気体について濃度測定の実験を行い干渉セルの効果、精度、安定度、再現性、応答度等を確めた。

ア. 濃度目盛の較正

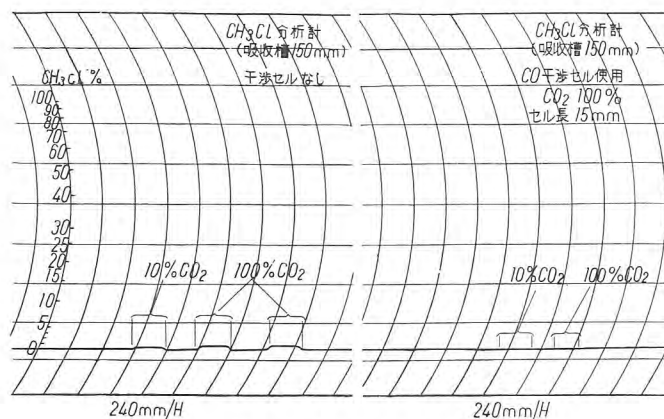
オルザットの装置で正確に濃度の測定できるもの以外は、真空容器に入れて圧力を測る方法を用いなければならない。かくして較正した結果によると、分析計の試料セルの長さ 15cm に対して、CO₂ は 10%，CO は 15%，CH₃Cl は 30% 程度をそれぞれフルスケールに選べば適当であることが判った。われわれの用いた光学楔は r, θ が 1 次の関係にあるので、気体%に対する光学楔回転角は 14 図のようになった。

イ. 干渉セルの効果

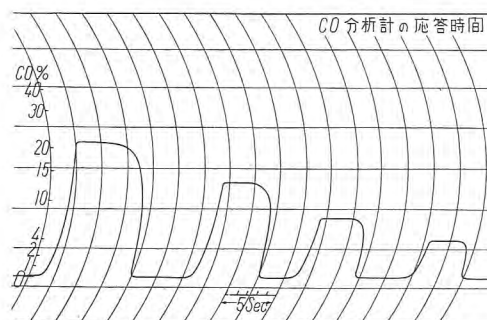
干渉セルの効果を確認するために、試料セル内に干渉ガスを入れ、干渉セルの内部を乾燥空気で充した場合と、干渉気体で充した場合とについて記録計の振れを比較した(3 表)。またその際の記録紙の一例を 15 図に示す。

ウ. 応 答 度

分析計の応答時間を測定するため、試料セルの入射窓にシャッタを急に入れ、記録紙送りを速くして観測し、4 表の結果を得た。ただし応答時間は振れが最大値の 95% に達した時間をとった。



15 図 干渉セルの効果
Fig. 5. Effect of interfere cell.



16 図 分析計の応答時間 (CO の場合)
Fig. 16. Response time of analyzer.

その際の記録の一例として、CO を測定した記録紙を 16 図に示す。

エ. 精度、再現性

分析計の精度は以上 3 種の気体を通じて、全目盛の約 1% 程度であった。また、数日を距てた場合の再現性は 0 点の再調整を行わずに全目盛の 2% 以内の誤差に収まり、3 時間の連続運転では 0 点の移動は全目盛の 1% 以下であった。

6. む す び

われわれがこの分析計を試作した目的は、鉱山、工場等の悪条件下でも有効に動作する工業計器を造ることにあった。この実験では、分析計はとくに恒温装置は付けず、10~30°C の範囲に変化する室温に放置してあったが、前記の結果を得ることができた。しかし、本装置を工業計器として実用に供するためには、なお若干改良すべき点が認められる。この問題につき今後さらに研究を続けたいと考えている。

引 用 文 献

- (1) K.F. Luft: Zeits. f. techn. Physik, **24**, 97 (1943)
- (2) 森一夫: 日本物理学会第 12 回年会予稿, 光学の部, 14H13 (1955)
- (3) M.L. Veingerov: Comt. Rend. U. S. S. R., **19**, 687 (1938)

直視型ガス分析装置

研 究 所 後 藤 正 之*

Direct Visible Gas Analyzer

Engineering Laboratory

Masayuki GOTO

Mass analyzers are in extensive use not only in the field of vacuum industries but also in metal and chemical industries.

A recording type analyzer completed in the laboratory has demerits as well as merits in respect of its time of measurement. An analyzer of novel design making use of the oscilloscope is found very helpful when used with a-c amplifiers in analyzing continuously flowing gases with changing component concentration.

It is featured by direct visibleness of the analytic results, which will find its application into varied spheres of the research.

1. ま え が き

質量分析計は近時真空工業のみならず、金属工業、化学工業方面にひろく応用されるようになった。当所ではさきに金属製記録式質量分析計を完成し、各種ガス分析に使用してきた。ペン記録式は分析装置としては最上の方法であるが、1回の分析に15分を必要とするため、速かに成分、圧力の変化する試料の分析には不適當である。この目的にはスペクトルをブラウン管面上で直視できる型のものが最適であり、Siri⁽¹⁾等により試みられているが、まだ一般に実用化されるに至っていない。われわれはこのような目的で質量分析計直視装置を試作し、一応成功をおさめたので、ここにご紹介する。

2. 質量分析装置

分析計は以前発表したもの⁽²⁾と大体同様であるが、その後改良したところもあるので簡単にその原理、性能、およびペン記録の場合の作動状況とを列記すると

(1) 試料気体 A、あるいは金属試料 B より放出された気体は、マノメータ M でその量 (圧力) を測定したのちガス溜 R に入り、キャピラリ D を通って少しずつ分析管内に導入される (2 図)。そしてイオン源内で電子束 E によりイオン化され、スリット系 S₁, S₂, S₃ で加

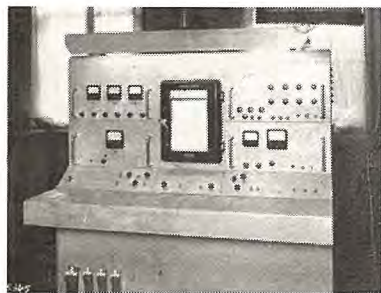
速されて定速度のイオン束となり、磁場で軌道をまげられてイオンコレクタ C に達する。コレクタに達するイオンの m/e と加速電圧 V (ボルト)、磁場 H (ガウス)、イオン軌道半径 r (cm) との間には

$$\frac{m}{e} = 4.82 \times 10^{-5} \frac{r^2 H^2}{V} \dots \dots \dots (1)$$

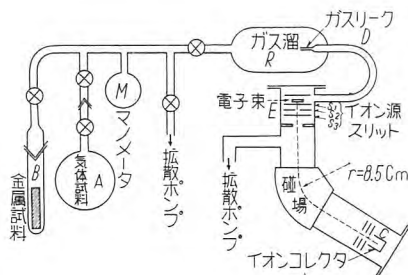
なる関係があるから、磁場の強さを連続的に変えることによりガスのスペクトルがえられる。ここに m/e は水素原子の質量、および電子の電荷をそれぞれ 1 とした値である。

(2) 分析管は金属製 60° 型、イオン軌道半径 8.5 cm、分解能は約 50 である。イオン加速 750 V、電子加速 100 V、全電子流約 500 μ A で、磁場走査 (scanning) により $m/e=2 \sim 50$ の分析ができる。イオン加速を 500 V にすれば $m/e=75$ まで分析できるが、この場合分解能が若干不足する。分析に必要な気体の量は最小 0.1 cc (標準状況) である。分析精度は 0.2% 程度である。

(3) イオン電流は直流増幅 (電流利得 130 db) されてマイクロアンメータでよまれる。同時にこの出力は電子管式自動平衡記録計 (250 μ A, 20 Ω) で記録される。記録紙の送り速度と磁場の走査速度とを一定の関係にしておけば記録紙上にスペクトルがえられる。磁場の走査は 3 図のような回路で行っている。スイッチ S を閉じると蓄電器 C が a, b の電位差で充電され V₁ (6SJ7) の格子電圧が下るから、V₂ (6SJ7) の陽極電流は増し V₃ (6Y6) の格子電圧が下って電磁石電流は最小値となる。その後 S をひらくと C は R を通して放電し V₁ の格子電圧は徐々に上昇するから、それにつれて励磁電流は次第に増加する。V₁ の格子電圧の上昇は時間に対し指数函数的であるため磁場の走査は直線的とはならないが、 m/e と磁



1 図 操作盤前面
Fig. 1. Control panel.

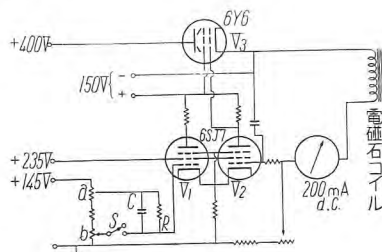


2 図 分析装置の概略
Fig. 2. Schematic diagram of gas handling system and analyzer.

場との関係が自乗形であるから磁場の走査を直線的ならしめることはあまり意味がない。目下のところ走査速度には全然補正を加えてないが記録スペクトルは大体直線にちかいようである。C, R の時定数を適当にえらぶことにより走査速度を任意の値にとることができ、a, b の調節で走査範囲の上下限が決定される。われわれの装置では $m/e=2\sim50$ の走査に約 12 分を要する。記録スペクトルの一例を 4 図に示す。図は石炭ガスの分析例であり、下側の線はバックグラウンドである。

3. 質量分析計用直視装置

このような方式で現在まで混合気体の分析、あるいは各種金属材料からの放出ガスの分析などを行って成果をあげているが、組成の速かに変化する試料の分析、また試料がとくに微量の場合などにはペン記録方式はかならずしも適当でない。このような場合ブラウン管面上にピークを直視する方式をとれば、ピークの短時間の変動をも見ることができて非常に都合がよい。



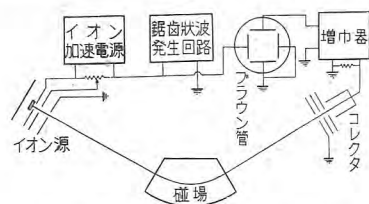
3 図 磁場走査方式
Fig. 3. Scanning circuit.

さて直視式質量分析計は 5 図のようにイオン加速電圧に適当な交流を重畳してイオン流をパルスとしてコレクタに達せしめ交流増幅してオシロで見る方式であるから、その設計の要点はつぎの 2 点に帰着する。

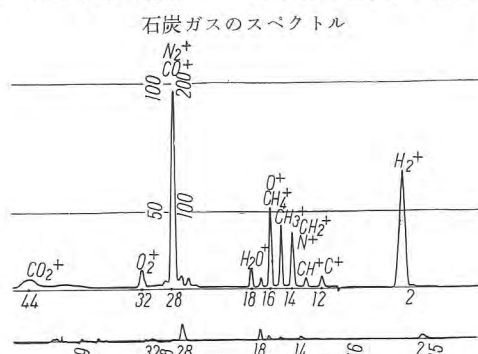
- (1) イオン加速電圧に鋸歯状波(ブラウン管掃引と同一の)を重畳する。その振幅と周波数の選択。
- (2) 分析計コレクタに達するイオン電流の大きさから増幅器の利得を決定し、ピーク波形の再現に必要な周波数特性を持たせること。

ア. 増幅器

まず 18 (H_2O), 28 (CO, N_2) のバックグラウンドピークを 10 mm 程度の高さに出すことを目標にした。これらピークのイオン量は 5×10^{-8} A (直流増幅器で測定) であった。これをブラウン管 120 F-B 7 で 10 mm (42 V)



5 図 直視型質量分析計の構成
Fig. 5. Oscilloscope arrangement.



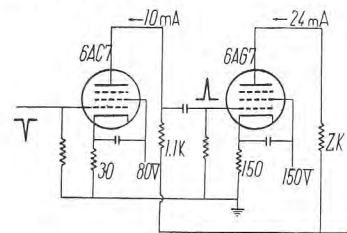
4 図 スペクトル記録の一例
Fig. 4. Example of mass spectra.

どのように作っても $10 \mu F$ 程度の浮遊容量を有するから 100 c/s 以上の交流入力波形に高周波歪をあたえる。この点に関しては科研江副氏がくわしく吟味しておられるが、⁽⁸⁾ 100% の電圧負帰還により入力回路の時定数をかなり減少させることができる。この点は実験的にたしかめることとし、設計の方針としては 1 段の負帰還前置増幅器と 5 段の主増幅器 (120 db の広帯域増幅器) とを組合せることとした。

主増幅器は必ずしも広帯域増幅器の必要はないが、一般のパルス増幅器としても使用しうる点も考慮に入れて帯域をひろくとった。6 図のような素子を基本とした。このような回路の増幅度 A は

$$A = g_m R_L$$

であたえられる。ここに R_L は負荷抵抗、 g_m は相互伝導度である。6AC7, 6AG7 の g_m はそれぞれ $9,000 \mu S$, $11,000 \mu S$ であるが図の動作状況でこれを 7,000, 9,000 程度とすれば、2 段の増幅度は 43 db となる。また上昇時間 (出力が 10% から 90% まで上る時間) は



6 図 主増幅器の基本回路
Fig. 6. Typical pair of stages for main amplifiers.

$$\tau = 2.2 R_L C_e$$

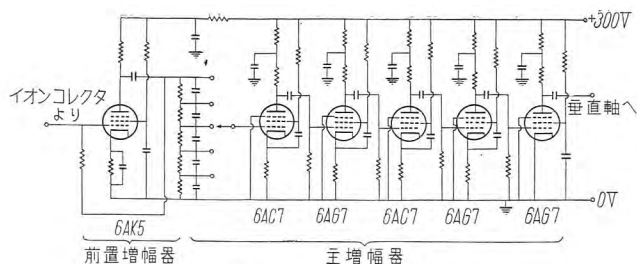
であって、 C_e は R_L と並列にはたらく実効的な電気容量で 5 極管では $20\sim50 \mu F$ である。したがって R_L を数 $k\Omega$ にとれば τ は $1 \mu S$ 以下となりこれは問題にならない。このような増幅器を 2 段組合せ、最終段に 6AG7 を 1 段 (34 db) 付加して 120 db とした。全体の結線は 7 図のようになる。奇数段は負パルスが入るのでパイアスを浅く、偶数段は正パルスが入るので深くとった。同様の意味で終段はゼロパイアスとした。感度(増幅度)の調節は浮遊容量のおそれのある可変抵抗を使用せず、図のように RC の組合せで時定数を一定にたもちつつ ($50 \mu S$), 不連続的に抵抗を切替えるようにした。増幅度をかえた場合の周波数と利得の関係は 8 図のとおりで、希望の利得と切替比がえられていることがわかる。

前置増幅器も 7 図に示されている。100 $M\Omega$ の入力抵抗を使用し、主増幅器初段のグリッドリークから 100% の電圧負帰還をした。これは掃引周波数 500 c/s 以上で高周波歪 (ピークの裾のひろがり) がみとめられたから、結果から判断して、入力回路の時定数は 2 桁位小さくなっていることがわかる。これで実用上充分である。

イ. 掃引周波数と鋸歯状波の振幅

掃引周波数は増幅器の周波数特性、入力回路の時定数

ふらせるには、入力抵抗 100 $M\Omega$ を用いるとして電圧利得 118 db (8×10^5) を必要とする。問題は入力抵抗の 100 $M\Omega$ である。入力部分は



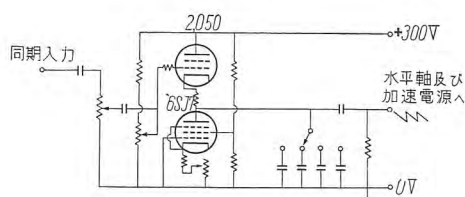
7 図 増 幅 器 回 路
Fig. 7. Circuit diagram of A-C amplifiers.

等と密接に関係があるが、われわれの場合とくに入力回路の時定数は未知数であるから、30c/s~1kc/sの範囲でえられるようにしておいて実験的によい値をえらぶことにした。

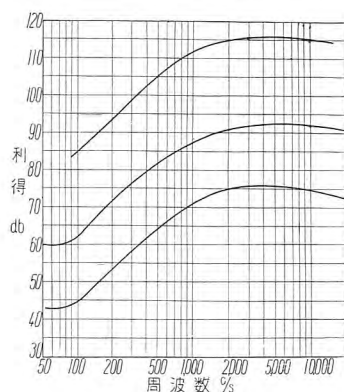
鋸歯状波の振幅はなるべく大きくとった方が同時にひろい質量範囲を直視できて便利である。加速

電圧 600~700V で使用するものとすれば、鋸歯状波の振幅を 200 V にとれば加速電圧の変化範囲が 1/3~1/4 であるから、(1) 式からわかるように $m/e=14\sim18$, 26~32, 36~44 の範囲をそれぞれ同時に掃引できることになる。

サイラトロンと CR 回路により鋸歯状波を発表し真空管で増幅する方法では、300 V の B 電源から 100 V 以上の振幅の波形をうることができなかった。そこで 5 極管を CR 放電回路に直列に入れて、その定電流特性を利用して振幅の大きな鋸歯状波を直接とりだす方式をとった。⁽⁴⁾ 9 図の回路で D-C 300 V の電源から波形のよい 200 V の振幅の鋸歯状波をえた。周波数はコンデンサの切替および 6SJ7 のカソード抵抗の調節により 17~900 c/s の範囲にかえることができる。このような回路において 6SJ7 の内部抵抗は 30 K Ω ~1 M Ω の範囲で変化するためヒータ、カソード間の絶縁が問題となる。2050 と 6SJ7 のヒータトランスの巻線を別々にする必要がある。



9 図 鋸 歯 状 波 発 生 回 路
Fig. 9. Sweep generator.



8 図 主増幅器の周波数特性
Fig. 8. Total gain of main amplifiers.

ウ. 電源操作盤

1 図に直視装置をくみ込んだ操作盤前面をしめしてある。左側上段はイオン加速電源・電子流制御回路・真空計回路・およびフィラメント保護回路がおさめられ、下段は電磁石電源と走査回路である。中央は記録計、右上段はオシロ回路(電源と掃引回路)、下段は増幅器である。分析操作に必要なスイッチ、ツマミ等はすべて下側の傾斜したパネルに集められており操作を容易にしている。

4. 動 作

上にのべたような装置で、イオン加速電圧 650 V (直流) + 200 V (鋸歯状波)、電子加速電圧 100 V、電子流 500 μ A として、磁場を 600~2,800 ガウスの範囲で適当に切換えてブラウン管上のピークを観測した。

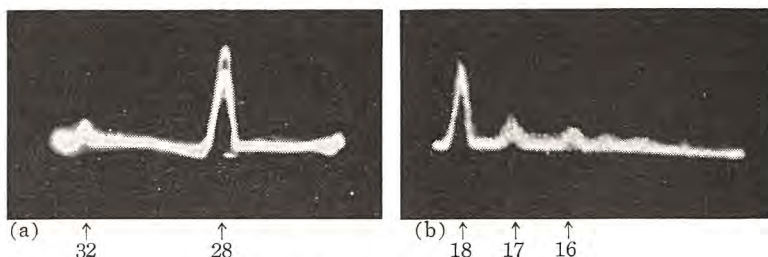
(1) バックグラウンドおよび感度

10 図におもなバックグラウンドのピークをしめす。(a) 図は左から $m/e=18$ (H_2O^+), 17 (HO^+), 16 (O^+ , CH_4^+) のピークが見られ、(b) 図は 32 (O_2^+) と 28 (CO^+ , N_2^+) である。増幅器の感度を最高にしたとき 18, 28 のピークはいずれも高さ 10 mm 位あり、最初の設計どおりの感度がえられていることがわかる。400 c/s で右から左へ掃引している。

(2) 雑 音

主増幅器の雑音は最高感度でブラウン管上 2 mm の幅をしめし、これは入力電圧にして約 10 μ V に相当する。増幅真空管のヒータに A 電池を使用した場合この程度におさまるが、整流直流(リップル数%)を使用すると 20 倍程度に増加してとても使いものにならない。また B 電源も高度の安定性が要求される。6L6, 6SJ7 を使用した安定回路により電源の変動を 1/1,000 以下におさえ、大体満足すべき動作状態がえられた。

前置増幅器の雑音はヒータ点火後 1 時間程度は相当はなはだしく 50 μ V あるが、その後は安定して約 10 μ V におちつく。入力抵抗として被膜型リケノーム 100 M Ω とモールド型 40 M Ω (10 M Ω \times 4) とを用いて比較したところ前者の方が雑音が少く好成績であった。真空管 6AK5 の良否がかなり雑音に影響するようにいわれているが、ここでは 2 本(国産と米国製)試用して相違をみとめなかった。前置増幅器自体のノイズと混同され易いが、入力部のシールド不十分による雑音は非常に重大である。



10 図 バックグラウンドのピーク
Fig. 10. Background peak.

(3) ピークの形と掃引周波数

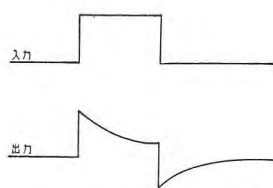
パルス増幅器における重要な問題の 1 つはその低周波特性であり、低周波の増幅度が不十分であると over-shoot とよばれる垂下波形をしめす。すなわち矩形波を入れたときの出力波形が 11 図のようになる。結合容量を C_c 、次段のグリッドリークを R_g とすれば出力の垂下波形は

$$e^{-t/R_g C_c}$$

の形になり、時間 T の間の垂下を 2% 以下に止めるには

$$C_c \geq 50 T/R_g$$

としなければならない。したがって $100 \mu\text{S}$ のパルスに対しては $R_g = 500 \text{ k}\Omega$ 、 $C_c = 0.01 \mu\text{F}$ でよいわけである。主増幅器の回路では $R_g = 500 \text{ k}\Omega$ 、 $C_c = 0.1 \mu\text{F}$ にとってあるから問題はないが、1 カ所だけ低周波雑音をのぞくため結合容量を $500 \mu\text{F}$ におとした所があるので、これが $100 \mu\text{S}$ のパルスに対して約 30% の over-shoot をしめす。これは掃引周波数を上げると除去され

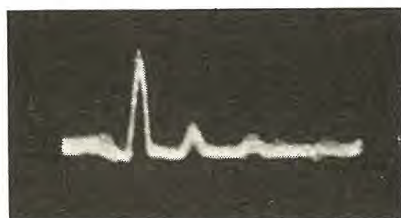


11 図 低周波特性の影響
Fig. 11. Over shoot.

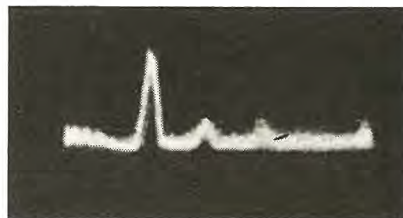
見よう。

これまで行っていた分析方法は、2 図のように試料 B を高真空中で密閉し一定温度で一定時間加熱したのち、ガス量をはかり記録式分析計で分析するのであるが、この場合放出した気体は高温中で 30 分～1 時間保持されるため、ガス相互あるいはガスと金属とのあいだで反応をおこして成分が変化するおそれがある。事実 CO 、 CO_2 の存在にともなって生ずる C イオン、 O イオンの量等は不可解な挙動をしめす。普通このような C イオン、 O イオンは CO 、 CO_2 ガスが分析管イオン源内で熱分解または電子衝撃により分解して生成するものとかんがえられており、これらのイオン量の間には 1 表にしめすような一定の関係がある。この関係は分析計イオン源の状況によりきまるもので金属試料の温度には無関係なはずである。ところが高温金属から放出されるガスを上の方法で分析すると 2 表のように C イオン、 O イオンの量が温度の上昇にともなって増加する。しかも測定値のばらつきがかなり大きい。 CO_2 、 H_2 等にも似たようなことがみとめられる。これらのことは熱反応の存在を示唆している。

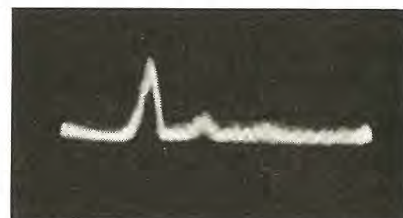
このようにかんがえると放出ガスはなるべく速く試料容器からとり去ることがのぞましい。それには 13 図のよ



(a) 200 c/s



(b) 400 c/s



(c) 500 c/s

12 図 ピークの形と掃引周波数

Fig. 12. Sweep frequency response.

るが、3. アにのべた高周波歪から上限が制約されるため適当な周波数の選択がむずかしくなる。12 図に実測したピークの形と掃引周波数の関係をしめしてある。200 c/s で顕著な overshoot が認められ (a 図)、400 c/s で多少よくなるが (b 図)、500 c/s 以上で高周波歪 (頭が低くなり裾をひく) をしめすので (c 図) これ以上周波数をあげることはいできない。したがって 400 c/s 近付で多少の overshoot を許容して使用するのがよいとおもう。

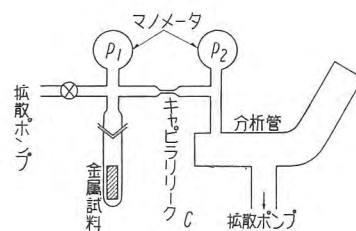
5. 応用例——金属材料の放出ガスについて

はじめにのべたように直視型質量分析計は、速かに成分の変化する試料の分析に最適である。真空管排気操作中の放出ガス変化の状況、あるいは金属材料熱処理中の各段階におけるガス放出の状況等を直ちに見ることができる。その一例として軟鋼材料の放出ガスを取りあげて

うに放出ガスをキャピラリー C を通して分析計に流入させながら測定するのが最もよい方法である。分析計に流入するガス成分、圧力は刻々変化しているから、この分析には直視式分析計がより有効であろう。ペン記録をするには走査をごく短時間に行う必要があるので困難ともなう。直視装置によりこのような分析法を採用する場合気体量が直接測定できないが、キャピラリーのコンダクタンス C (cc/sec) がわかっていれば真空計 M のよみ P (mmHg) を時間に対してよんでおけば

$$Q = \int C(P_1 - P_2) dt \dots \dots \dots (2)$$

により気体量 Q (mmHg·cc) が計算される。(一般に P_2 は P_1 に比



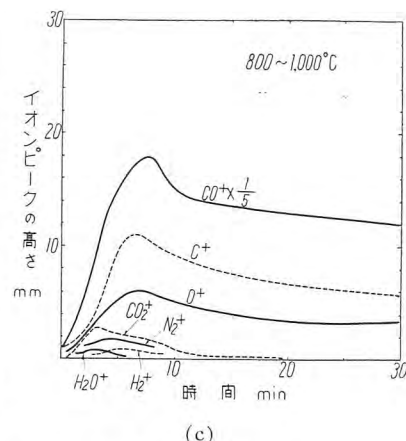
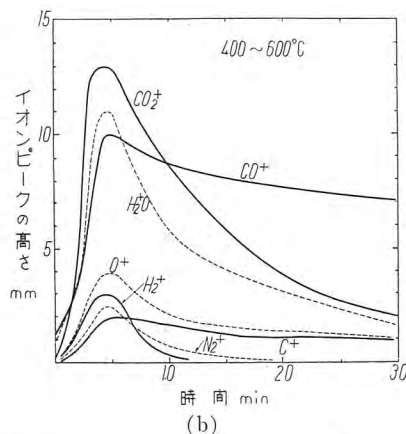
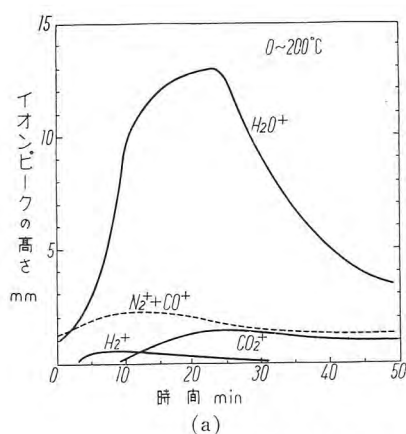
13 図 金属材料放出ガスの分析法
Fig. 13. Analysis of gases from metal samples.

1 表 CO よりの分解イオン

気体	生成イオン (m/e)	量
CO	CO^+ (28)	100
	O^+ (16)	3.5
	C^+ (12)	9

2 表 CO 分解イオンと金属試料の温度との関係

イオン	500°C	800°C	1,000°C
CO^+	100	100	100
O^+	10	16	18
C^+	7	10	20



14 図 軟鋼試料のガス放出状況

Fig. 14. Gases from natural steel.

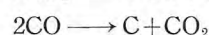
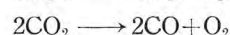
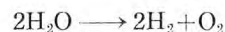
3 表 軟鋼よりの放出ガス (その1)

温 度	0~200°C	200~400°C	400~600°C	600~800°C	800~1,000°C
全放出ガス量	39 μ·l	67 μ·l	59 μ·l	268 μ·l	613 μ·l
H ₂		21.4	48.5	20.0	14.0
H ₂ O	65.0	31.3	12.1	1.2	tr.
N ₂	1		5.0	2.0	1.0
CO	1.5	17.8	7.9	54.6	70.8
CO ₂	29.0	23.2	23.6	6.5	3.0
CH ₄	1.5	1.8	0.8		
C				8.2	6.4
O				6.5	4.4
他	3.0	4.5	2.1	1.0	0.5

4 表 軟鋼よりの放出ガス (その2)

温 度	0~200°C	200~400°C	400~600°C	600~800°C	800~1,000°C
全放出ガス量	148 μ·l	167 μ·l	104 μ·l	276 μ·l	614 μ·l
H ₂	6.3		12.0	11.4	2.0
H ₂ O	78.0	45.2	29.4	5.2	
N ₂	2.2	6.2	4.1	3.0	
CO		6.1	19.2	56.2	95.5
CO ₂	11.5	39.1	31.0	22.3	2.5
CH ₄		1.2	1.8		
他	2.0	2.0	2.5	1.9	

力上昇のためにその後のガス放出が制限されることの2点が問題である。3表において低温度側でガス量が多くに小さく出ていることは、この第2の理由によるものであろう。事実リザーブを取付けて容積を大きくすれば気体量も増加して、4表の値に近づくことはこの説明の裏付となる。また高温においてCO、CO₂の量の関係が相異なること、さらにAの方がC⁺、O⁺の量が多くH₂⁺の量もH₂O⁺に比べて多いことも反応の存在を示唆している。定量的に裏付けはできないが気体と高温金属とが共存して



等の反応が行われるためであろう。とにかくB法では一応気体と金属とが接触している時間が短いため、これらの反応による誤差は少くなるものと思われる。そして実際の放出状況がよく知られるものと思う。

6. む す び

試作した直視型ガス分析装置の構造、性能の概要をのべ、その応用の一例として軟鋼の放出ガスを分析し結果を従来の分析法と比較した。このほか電子管排気中の放出ガスの分析、反応進行途上の成分分圧の測定等、応用しうる範囲は非常にひろい。性能の向上と応用分野の開発は今後の問題である。研究にあたりいろいろご援助、ご指導をいただいた物理第二研究室八十田室長、藤永技師に、また回路の試作にご教示、ご協力をいただいた工務課浅見技師、無線第三技術課開発技師に謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) Siri, W.: Rev. Sci. Instrum. **18**, p. 540 (1947)
- (2) 後藤: 三菱電機, **28**, No. 12 (1954)
- (3) 江副: 科研報告, **28**, No. 5 (1952)
- (4) Chance, etc.: Waveforms, p. 264 (1949)

して小さいから無視してよい)。

同一種試料についてこのような2方法で分析した結果について比較し吟味してみよう。使用した試料は軟鋼片(約20g)をトリクロルエチレン、アルコールで洗ったものである。ペン記録法により2図の方法で抽出した放出ガスを分析して3表の結果を得た(以上この方法をAとよぶことにする)。一方直視式分析計により13図の方法で放出ガスの時間的変化の状況を測定すると14図(a), (b), (c)のようになる。この曲線を積分して全気体量および成分の百分比をだすと4表のようになる。以下この方法をBとよぶことにする。3表と4表は多少その趣をことにする。この2法は異った測定方式であるため、直接その量を比較して云々することは冒険であるが、ある程度の定性的比較は可能である。上にのべたようにA法においては(1)放出ガスが高温金属試料と共存するため反応を起す可能性があること、(2)放出ガスによる圧

硫化カドミウムの光電導性

研 究 所 伊 吹 順 章*

Photo-conductivity of Single Crystal Cadmium Sulfide

Engineering Laboratory Sumiaki IBUKI

As one of photo-conductive materials which have drawn attention with their application to the videcon, xerography and photo-conductive cell of late, single crystal cadmium has been given thorough studies on its varied properties. A direct measurement on the time lag of the photo-conductive current of this material has revealed the mobility of electrons in the crystal to be about $20 \text{ cm}^2/\text{V cm}$. Infra-red quenching effect of photo-conductive current has been carefully examined as a means to determine the impurity level. Various investigations made on the photo-conductive mechanism has given a proof that holes have great bearings on the phenomena.

1. ま え が き

半導体に光を照射するとその電気抵抗が少くなる現象いわゆる光電導が発見されたのは比較的古く⁽¹⁾, 当時種々の光電装置にも利用されたようであるが, 主としてその時間的遅れの長いことから, 光電子放射の現象が発見されて以来応用面から顧みられなくなった. しかし戦時中から戦後にかけてふたたびその研究が盛んになり, それと共に数多くの応用も見られるようになった. その実用方面の主なものを上げてみるとつぎのようなものがある.

- (1) Photo-conductive Cell⁽²⁾
- (2) Xerography (Electro photography)⁽³⁾
- (3) Videcon⁽⁴⁾

この種の応用研究がふたたび盛んになった理由としては, 高感度であること, 暗抵抗が高いこと, 時間的遅れが少ないこと, 使用中に安定であること, 性質が均一なものを比較的容易に製作しうること等の条件を備えた光電導物質が作られるようになったからである. その1つとして最近硫化鉛 (Pb S)⁽⁵⁾, 硫化カドミウム (Cd S)⁽⁶⁾ (以下 CdS と略称する), 三硫化アンチモン ($\text{Sb}_2 \text{S}_3$)⁽⁷⁾ が注目されてきている.

筆者は光電導物質に関する研究を進めてきたが, 本文にはまず単結晶 CdS の光電導性に関して行った種々の実験の結果を報告する.

2. 単結晶 CdS の製法

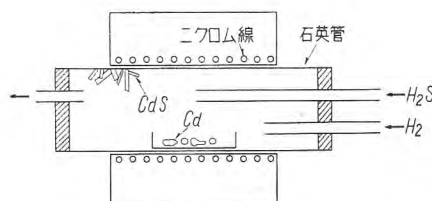
CdS は六方晶系と立方晶系との2種の結晶形をもっているが, 後者は

粉末しか得られずまた光電導性を示さない. 前者の大きい単結晶を作る方法としては, 2, 3 の方法が知られているが⁽⁸⁾, そのうち比較的操作が容易で見事な結晶を得る方法として気相反応による Frerichs の方法を採用した.

その装置の概要は1図に示すとおりで, 電気炉の中に反応管の石英管を入れ水素を通じながら熱し, 800°C になったとき, りつぽに入れた Cd を挿入し, さらに硫化水素を流してやると半時間もすれば管壁にきれいな結晶が成長する. かようにして大きさが $10 \times 3 \times 0.1 \text{ mm}$ 程度の見事な六方晶系の黄色い結晶が得られた.

この結晶に $3,650 \text{ \AA}$ の紫外線を照射するとわずかに赤色の蛍光を発するが, 分光分析の結果は Si , Mn , Fe , Cu の痕跡が認められるかあるいは認められない程度の優れたものであった.

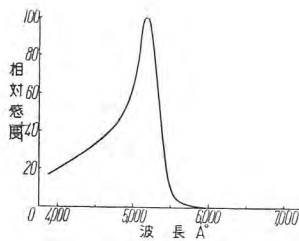
かくして作られた結晶をステアタイトで絶縁したニッケルの電極上にのせシルバーペーストで固定して試料を作製した. いま大きさ $2 \times 0.7 \times 0.1 \text{ mm}$ 程度の結晶に直接電圧 100 V を印加すると, 室内光で数十 μA の光電流が流れる. 以下このものの光電導の諸性質について述べる.



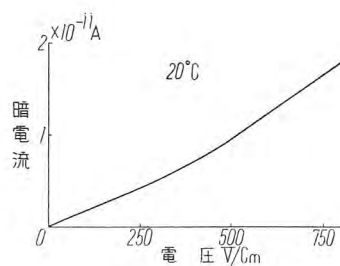
1 図 CdS 単結晶の製法
Fig. 1. Grown method of single crystal CdS .



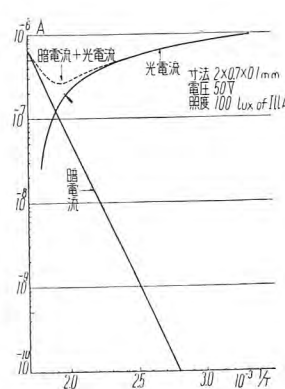
2 図 CdS 単結晶
Fig. 2. CdS single crystal.



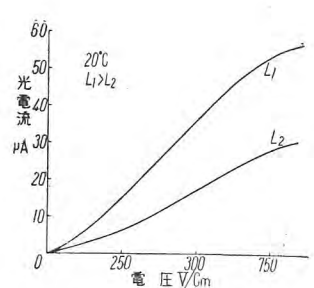
3 図 光電導の波長感度
Fig. 3. Spectral sensitivity of photo-conductive current for equal energy illumination.



4 図 暗電流の電圧特性
Fig. 4. Voltage dependence of dark current.



5 図 暗電流および光電流の温度特性
Fig. 5. Temperature dependence of the dark current and the photo current.



6 図 光電流の電圧特性
Fig. 6. Voltage dependence of photo current.

3. 光電導に関する諸性質

ア. 分光感度

まず上に述べた光電流の波長感度を調べたのが 3 図である。図から明らかなように吸収端にピークがあり、それより短波長側では感度が下がっている。これに対しては短波長側では光の吸収が強く、そのために表面での電子と正孔との密度が大きく再結合の確率もふえて感度が下るけれども、吸収端近くでは光が内部まで入りこみ、そこで生ずる電子と正孔との再結合の確率が少なくなるから光電流が増大すると解釈することで説明できる⁽⁹⁾。

このピークの位置は電圧の変化 (30~1,000 V/cm) に対しても変化しない。しかし温度の上昇と共にピークは長波長側に移動する。その温度係数は約 $7 \times 10^{-4} \text{ eV/}^\circ\text{C}$ である。

イ. 暗電流

まずその電圧特性を 4 図に示す。500 V/cm 位までは直線的であるが、それ以上の高電圧では非直線的になる。

つぎにこの温度特性であるが、この結晶は吸湿性が強く、また結晶によっては浅い捕獲準位のためと思われる凹凸の多いカーブを画くものもあるので、100°C 程度に充分温めて水蒸気の影響を除き浅い捕獲準位から電子を追い出してやった結果の一例を 5 図に示す。この図より熱的活性化エネルギーを算出すれば室温から 250°C の範囲にわたって 0.78 eV になる。

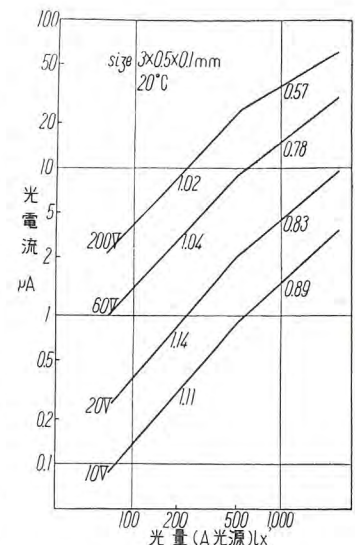
ウ. 光電流

光電流の電圧特性を測ったがこの結果によると一般に 3 つの部分に分れる。すなわち低電圧部ではその上昇が直線的より大きく、ついで電圧の増加につれて直線的となり、さらに高い電圧範囲では飽和の傾向を示す。またもちろん光量の函数でもある。この特性の一例を 6 図に示す。しかしながら結晶によっては低電圧部でも光電流が印加電圧によく比例するものもあり、電極を蒸着インジウムに代えてもやはり 6 図に示すような形をとるものもあり、直線性が電極の材質のみによるとはいえないように思われる⁽¹⁰⁾。

また光電流は温度の上昇につれて 1 度増加してそれから減少するものと、すぐ減少し始めるものとありその状況は簡単に表わされない。その一例を 5 図の中に加えて

おく。

つぎに光量の変化に対する光電流の特性を調べたがその一例を 7 図に示す。これからわかるように光量の少ない範囲と多い範囲とでその直線の傾斜が異なる。また傾斜は光電流の函数でもあって光電流の少いときはやや急であるが光電流のまずにつれて緩やかになり、光の弱いときは 1.0 に光の強いときは 0.5 に近づく。ただしこの特性の折



7 図 光電流対光量特性
Fig. 7. Photo current versus irradiation characteristics.

れ目の生ずる光量の位置は光電流の大きさによらない。

このような特性はどうして起るか。一般に電導電子の数を n 、単位時間に励起される光電子の数を Q 、再結合常数を B 、trap の数を M とすれば光電流の時間に対する変化は

$$\frac{dn}{dt} = Q - Bn(n+M) \dots \dots \dots (1)$$

で表わされる。いま定常状態では $dn/dt=0$ であるから

$$n(n+M) = Q/B \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで光が弱くて $n \ll M$ ならば

$$n = Q/BM \dots \dots \dots (3)$$

となって光電流は光量に比例するが、光が強くて $n \gg M$ ならば

$$n = \sqrt{Q/B} \dots \dots \dots (4)$$

となって直線の傾斜が 0.5 となるのであって、折れ目は $n=M$ なるときに生ずる。したがって折れ目の生ずる位置の光量が少いほど結晶の純度はよいといえる。

エ. 時間遅れ

試料に照射する光を点滅する際これに応ずる光電流の時間遅れの測定には、結晶に照射する光を同期電動機につけたセクタで切断し、それによる光電流の変化をオシロスコープに書かせてその図形より算出した。

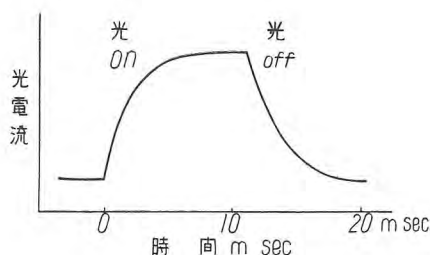
この際結晶にセクタで切らない光を重ねてあらかじめ光電流を流しておいてやると時間遅れは減少する。また感度のよい結晶程やや遅れは大きい。これは (1) 式を積分して光電流が $1/e$ に落ちる時間 τ を出すと

$$\tau = 1/B(M + 2n_0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

n_0 : 測定したときの電導電子の数

と表わせることから光電流が大きい程 τ が小さいことがわかる。

その一例を示せば光電流が $3\mu A$, $10\mu A$, $30\mu A$ で τ はそれぞれ 8 ms, 3 ms, 1.5 ms (50 V にて) なる値が得られた。曲線の形を 8 図に示す。



8 図 セクタによる光電流波形

Fig. 8. Photo current wave form by sector rotation.

つぎに結晶に充分光を当てて置いてこれに短形波電圧を印加したときの光電流の模様を測定した。短形波の発振器には Rutherford Model B-2 A pulse generator を使用し、光電流の波形は Dumont 陰極体オシログラフ 303-AH に書かせた。この場合光電流は陽極の近くに存在する自由電子が陰極に達したときに飽和し、この時間より電導電子の移動度がわかる。

その一例をあげると、電極間距離 1 mm の結晶に約 3,000 lx の電燈光を照射し両極間に 50 V の矩形波を印加したとき飽和光電流は約 $10\mu A$ 流れているが、この際飽和するに要した時間は約 $10\mu s$ であった。一方移動度 μ は両極間距離を L cm, 印加電極を V volt, 両極間を電子が走るのに要する時間を t 秒とすれば

$$\mu = L^2/tV \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表わされるから、上に得た値を代入すると

$$\mu = \frac{(0.1)^2}{10^{-5} \cdot 50} = 20 (\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

なる値が得られる。また電導電子と吸収した光量子の比として得られる光電導のゲイン G は

$$G = \tau/t \quad \dots\dots\dots (8)$$

で与えられるから⁽¹¹⁾、上記の値を入れてみると

$$G = 3 \times 10^{-3}/10^{-5} = 3 \times 10^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

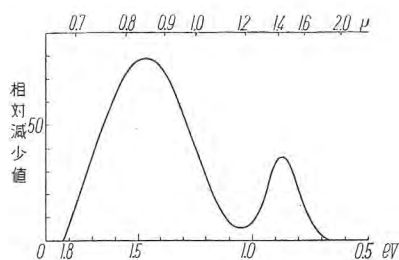
といった値が得られる。

オ. 赤外線による影響

CdS は $520 \text{ m}\mu$ より短波長の可視光によって光電導性を示す。ゆえに CdS に緑色の光を照射して置いてさらに緑色の光を加えれば光電流は増加する。ところが赤外線を第 2 の光として与えてやれば光電流は逆に減少する現象を呈する。

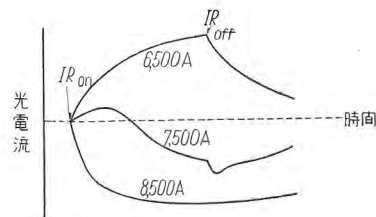
この変化の程度は最初の緑色光の光量と後に加える赤外線の光量との比による。後者が弱い間は照射する赤外線の量にほぼ比例して光電流が減少するが、強くなると早く減少してある一定値に達する。また赤外線を照射したときに光電流が減少して一定値になる時間と比べて照射を中止したときに元に戻る時間の方が長い。とくに最初の光電流が少い場合は著しく異なり後者は数十秒にも達する。

以上のような赤外線の重畳による光電流の減少する効果はいかなる波長の赤外線によって生ずるかを調べたの



9 図 Infrared quenching の波長感度

Fig. 9. Spectral sensitivity of infrared quenching.



10 図 赤外線照射および中止時の電流変化

Fig. 10. Dynamic quenching curve for several wavelength irradiation.

が 9 図である。図からわかるように $850 \text{ m}\mu$ (1.46 eV) と 1.45μ (0.86 eV) と 2 つの山がある。この値は E. A. Taft の値に近い⁽¹²⁾。面白いことには $650 \text{ m}\mu$ の光を照射するとわずかながら光電流は増加するが、 $750 \text{ m}\mu$ の光では光電流は 1 度増加して後減少し、照射を中止すると今度は逆に光電流が 1 度減少した後に徐々に増加する。しかし $850 \text{ m}\mu$ の光の照射では単純に減少するのみであった。この模様を 10 図に示しておく。

光電流の減少を生ずる効果の極大である波長は電圧の変化 (30 V/cm $1,000 \text{ V/cm}$) に対して変化しない。また温度を上昇すればこの効果は次第に減少して 170°C 付近で消失するがその波長位置も相対的な山の高さもほとんど変化しない。

この他暗電流を測定中に赤外線を照射すると暗電流が増加するのが見られ、赤外線を長い間照射しておくと光電導の感度が下るのが観測された。

さてかような効果は燐光における Quenching の現象に似ており、infra-red quenching と呼ばれているが、この現象の生ずる原因については後に詳述する。

カ. 可視光線以外の放射線に対する感度

CdS は可視光のみならず紫外線、X 線、 α , β , γ 線に対しても感度を持つ。これはこれらの放射線によって導電帯に生ずる低速電子のためによると思われる。そこで

1 表 単結晶 CdS の放射線に対する感度

放 射 線	距離 cm	電圧 V/cm	電流 μA	
紫外線	3650 Å 7 mW/cm ²	300	200	
	2537 Å 0.2 mW/cm ²	500	1	
X 線	Cu target 30 kV 5 mA no filter	10	2000	0.6
β 線	Sr ⁹⁰ (Y ⁹⁰) 2.2~2.3 MeV 20 mC	5	2000	0.8
γ 線	Co ⁶⁰ 1.33, 1.17 MeV 13 mC	5	2000	0.8

かかる放射線による光電導を調べた結果を1表に示しておく。

4. 光電導の機構に関する考察

以上述べたような光電導に関する諸現象はいかなる機構の下に起るのかについて考察したい。これを解決するにはそのような諸現象に関係する準位の位置を決定する必要がある、このためには infra-red quenching, 螢光, それに thermal stimulation⁽¹¹⁾ といったものの研究が重要な意味をもっている。

11 図に示すようにまず光電導は a なる基礎吸収の結果生ずると思われる。これに対して基礎吸収はもっと短波長において起り, かかる光電導は S イオンの exciton の吸収によるものとしなければ極低温で見られる緑色螢光の微細構造が説明できないという説がある⁽¹³⁾。しかし緑色螢光の微細構造は格子振動によるものとの解釈をすれば⁽¹⁴⁾ 基礎吸収と見てよいようである。ただ常温において赤色螢光を励起する波長はこのモデルによれば長すぎるように思われる。

さて a なる基礎吸収の結果自由電子と自由正孔とが生ずるわけであるが自由正孔はすぐ (1), (2) のような中心に捕えられる。しかもこの中心は非常に大きい正孔捕獲断面積を持つが1度正孔を捕えれば電子に対しては非常に小さい捕獲断面積しかもたない。他方電子も (3) (4) (5) のような中心に捕えられ, あるいはここを通じて正

孔と再結合をする訳であるがこの量は捕えられた正孔の量と比べてきわめて少く, その結果残った多量の電子が電導に与って n 型半導体の性質をもつものと思われる。そしてさらに a なる吸収光の強さを増してやると電子がふえ, (1), (2) の中心も再結合に加わって, かかる状態で定常状態に達する⁽¹⁵⁾。

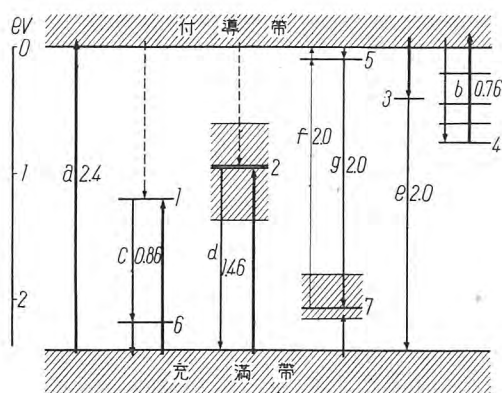
つぎに a なる光をきった時は自由正孔はすぐに (3), (7) のような中心を通じて電子と再結合するが, 残りの自由電子は (1), (2) のような中心を通じてゆっくり捕えられた正孔と再結合を行い, 自由電子がなくなれば光電導が見られなくなる。このように自由正孔の寿命は短いが, 自由電子の寿命は非常に長いと考えることは, 赤外線による quenching の解釈だけでなく, 螢光の時間遅れが小さいのに比べて光電導の遅れが長いことを説明するのに好都合である⁽¹⁶⁾。

暗電流は (4) に示すような1群の電子捕獲から熱エネルギーを得て b のように導電帯に上った電子によって生ずる。その捕獲位のうち一番深いものが伝導帯より 0.76 eV 下にあると考えられる。

さて赤外線による quenching はいかにして起るか。これは赤外線によって (1), (2) に捕えられている正孔が c, d のように励起されて充満帯に上って自由となる。ところがこの自由正孔はすぐ多量に存在する自由電子と再結合してその結果光電流が減少すると解釈できる。この自由正孔は電子と再結合する迄電導に与かることもできるので, この間は光電流は増し infra-red quenching の初期に光電流の増大が見られるのである。しかし赤外線照射中止後の光電流の回復の遅いことは正孔が捕えられる前にすぐ自由電子と再結合してしまうことで説明できないことはないがやや不完全である。ここで 0.89 eV における quenching は -50°C 以下で見られぬことから⁽¹⁵⁾, 正孔は (1) 中心より充満帯の少し上にある (6) 中心を経由して充満帯に上ると考えられる。また quenching の初期に光電流が増大することを説明する1つとして, quenching を生ずる波長域中の短波長側では正孔励起と同時に電子, 伝導帯への励起も起っていると見なしてもよいと思う。さらに一説には (1), (2) のような中心の位置は quenching の threshold wavelength によって決まるともいわれている⁽¹⁵⁾。

赤色螢光の機構を考えるに当っては時間遅れとの関係より見れば (3) のように捕えられた電子が e のように自由正孔と結合するとき赤い螢光が出ると解釈する方が都合がよい⁽¹⁶⁾。しかし f に示すように赤い波長の光で光電導が生ずる場合も報告されているので⁽¹⁷⁾, g のように電子が深い捕獲準位 (7) に落ちる時に螢光を発するとも見なし得るし, この両方が共存するとも考えられる。

最後に以上述べたような中心はいかなるものからなりたっているか。それについてはいろいろに考えられる。まず infra-red quenching を生ずる (1), (2) 中心は正イオンの空孔, あるいはそれに1個の正孔が捕捉された



11 図 光電導のモデル

Fig. 11. Model for photo conductivity.

ものと考えられ、暗電流や螢光に関係する (3), (4), (5) 中心は負イオンの空孔に電子が捕捉されたものや不純物として入っている 1 価イオンたとえば Ag^+ , Cu^+ , Cl^- と推察できる。また (7) の中心については Cd 原子と考えて見たい。

以上この節の最初にも述べたように光電導機構の明確なモデルを決定するのは現在のところ困難であって、諸現象をいろいろな角度から検討した結果と一番矛盾しない機構を採用するということに落ちつかざるを得ない。そしてこれには低温におけるいろいろな実験が重要な意味を持つものと思われる。

5. む す び

以上 Frerichs の方法によって製作した CdS の単結晶のすぐれた光電導性について述べ、その機構にも言及した。

すなわち CdS 単結晶は暗比抵抗が高く、しかも緑色光に対して感度がきわめてよく、時間遅れも数 ms 程度の短時間で、防湿をしてやれば安定に長時間使用できるし、X 線や β, γ 線にまで感度を持つという特長がある。ただ赤外線を重ねれば感度が悪くなる点は留意せねばならない。

したがってこれを用いて光電導セルを作れば真空を必要としないから製作工程および構造が簡単で、非常に小さい照射面積に対して高感度であり取扱いが便利なセルができ上る。だからこれを使えば簡便な光学的測定器として、また光電管の代用としてリレーの作動、光線による種々の制御、製品の計数等が可能である。さらに X 線の検出器として X 線による制御、検査、また β, γ 線用の crystal counter の製作といった応用面も考えられる。

最後に物質として見ればやや不純な単結晶や粉末を焼結したものなどについても面白い性質が観測されるし⁽¹⁰⁾⁽¹⁷⁾、相当な光起電力を発生するようなものも報告されており⁽¹⁸⁾、螢光についての種々の研究もあって⁽¹⁹⁾、幾多の未解決の分野が今後の開拓を待っている次第で、目下この方面にも研究が続けている。

末筆ながら本研究にご指導、ご支援を賜った大野所長、

菅野物理第一研究室長、神崎研究員、吉松研究員、柳瀬技手、大船工場村井技師に厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) W. Smith: Ame. J. of Sci. **5** 301 (1873)
- (2) E. Schwarz: Proc. Phys. Soc. B. **64** 821 (1951)
C. K. Teal et al: J. A. P. **17** 879 (1946)
F. A. Stahl: E. E. **70** 518 (1951)
- (3) P. H. Keck: J. O. S. A. **42** 221 (1952)
- (4) P. K. Weimer et al: RCA Rev. **12** 306 (1951)
B. H. Vine et al: RCA Rev. **13** 3 (1952)
- (5) O. Simpson: Phil. Trans. of the Roy. Soc. London **243** 547 (1951)
窪田武一: 応用物理 **21** 208 (昭 27)
- (6) 宮澤久雄: 日本物理学会誌 **6** 160 (昭 26)
橋本一二: 日本物理学会誌 **7** 276 (昭 27)
- (7) S. V. Forgue et al: RCA Rev. **12** 335 (1951)
S. Ibuki and S. Yoshimatsu: J. Phys. Soc. of Japan **10** 549 (1955)
- (8) R. Frerichs: P. R. **72** 595 (1947)
S. J. Czyzak et al: J. A. P. **23** 932 (1952)
R. H. Bube and M. Thomsen: J. C. P. **23** 15 (1955)
- (9) T. S. Moss: Photoconductivity in the element 44 (1952)
- (10) R. W. Smith: P. R. **97** 1525 (1955)
S. M. Thomsen and R. H. Bube: R. S. I. **26** 664 (1955)
- (11) R. H. Bube: J. C. P. **23** 18 (1955)
- (12) E. A. Taft and M. H. Hebb: J. O. S. A. **42** 249 (1952)
- (13) 上原康夫: 東芝レビュー **9** 255 (1954)
- (14) K. Huang and A. Phys: Proc. Roy. Soc. London A **204** 406 (1950)
F. A. Kröger et al: Z. physik. chem. **203** 1 (1954)
- (15) R. H. Bube: P. R. **99** 1105 (1955)
- (16) J. Lambe and C. C. Klick: P. R. **98** 909 (1955)
J. Lambe: P. R. **98** 985 (1955)
- (17) S. Yoshimatsu et al: J. Phys. Soc. Japan **10** 493 (1955)
- (18) D. C. Reynolds et al: P. R. **96** 533 (1954)
- (19) K. W. Boër und U. Kümmer: Z. physik. chem. **200** 193 (1952)
I. Broser und R. Warminsky: Z. Physik **133** 340 (1952)
C. C. Klick: P. R. **89** 274 (1953)

塗料, エナメル, ラッカ類の諸種の特性試験

研究所 村山三郎*・柴山恭一***・小鯛正二郎**・川本善美**
本社 西山真次***

Tests on Various Characteristics of Paints, Enamels and Laquers

Engineering Laboratory Saburo MURAYAMA・Kyoichi SHIBAYAMA・
Head Office Shojiro KODAI・Yoshimi KAWAMOTO
Shinji NISHIYAMA

The J.I.S. have been established to judge the quality of various painting materials, and almost all products in the market are claimed to be in conformity with them. Practical experiences, however, have proved that those qualified by the standards often fail in actual application, suggesting the present standards alone are not reliable. Especially to synthetic products newly introduced, the J.I.S. give little help in examining the characteristics.

A new testing method of our unique conception is now being applied in the selection of paints, enamels and lacquers, which makes successful in getting familiar with the characteristics of each painting material and in improving the work a great deal.

1. ま え が き

塗料類の良否を判定する基準として JIS が制定されているが、市販品はほとんど全部が JIS に合格しながら、なお実用上時々故障を生ずることがあるから、JIS のみに頼るのはやや不安なことがある、また最近に続々と発表される合成樹脂系の新製品は、JIS の試験のみではおのの特性を詳細に明かにし得ないので選択に際して採否決定に迷うことが多い。当所では JIS 試験に併せて独特の試験方法を考案実施して、塗料の選択と、塗装法の改善に役立てているのでそれらを紹介する。

2. 塗料原液の試験

ア. ラッカシンナ

ラッカシンナ(ラッカうすめ用)は、1 表に示すように一般性質に大差のない 2 社の製品も (1)~(6) の試験では、かなりの差異を示すから、その比較検討によって最適のものを選ぶことができる。

組成の概要を知るとは塗装条件をも併せ考えて使用に適しているかどうかを決めることができる。

試料 200cc を Widmer 精溜管 (高さ 30cm) を用いて蒸溜し、各溜分の屈折率を測定した。Widmer 精溜管では完全な精溜は望めないし、また試料はアルコール、

(1) 精 溜

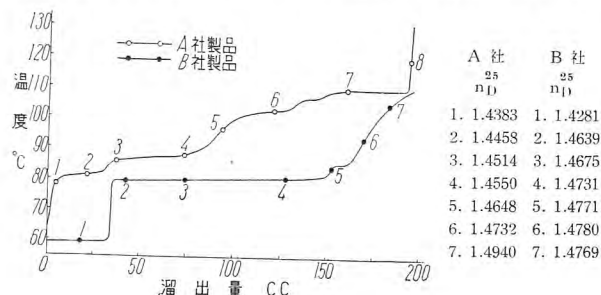
1 表 シンナの一般性質

	比 重 (25°C)	屈 折 率 (25°C)	エステル価	水溶性成分 (容積 %)
A 社	0.868	1.4670	129.5	21.2
B 社	0.873	1.4653	116.8	24.0

エステル、エーテル、芳香族炭化水素、などからなる多成分系で、複雑な共沸混合物を作ることが予想され、この結果だけで組成を正確に推定することは難かしいが、エステル価、水溶性部分等の結果を参考として、かなり明瞭に組成を知り得ることがある。1 図と 2 図に示すように両者の成分組成はかなり相違していることが判る。

(2) トルオール稀釈度

ラッカをシンナで稀釈して、使用中および塗布後、乾燥塗膜を形成する迄の間、塗膜形成々分と揮発成分からなる系は、均一相に保たなければならない。したがってシンナはラッカに対して適度の溶解力を持つことが必要で、溶解力の弱いシンナでうすめて吹付塗りをすると、塗り上りは艶が少なくなったり、平滑性を欠くことがある。溶解力を知るためには種々の方法が考えられるが、ここでは一定の固形分を含むラッカ稀釈液を作り、これに沈澱剤(たとえばトルオール)を加えて行って、液が不均一になるまでに要する沈澱剤の多少によって、溶解力の大小を知る方法を採用した。実験はクリヤラッカを A, B 2 種のシンナで 1:4 に稀釈し、これにトルオールを沈澱剤として滴下して、白濁するまでの滴下量を求めた。トル



1 図 蒸溜曲線

Fig. 1. Distillation curves.

オールは滴下量は稀釈液の調製後の経過時間によって若干変化するので、ここでは2時間後に行った。クリヤラックはその成分組成（硝化綿、レジン、軟化剤、溶剤、など）の明かにされたものを標準品として選定すべきであるが、この試験では便宜上 C 社の製品を使用した。試験の結果は 2 表に示すように約 40% の差が出た。

2 表 トルオール稀釈度

稀釈液 20 g に対する トルオール滴下量 (cc)	
A 社	10.6
B 社	14.4

3 表 稀釈後の粘度

シンナ	粘度 (センチポイズ)		
	25%	35%	50%
A 社	9.5	20.9	49.7
B 社	7.8	18.1	54.2
醋酸ブチル	9.8	20.5	55.7

(3) 稀釈後の粘度

シンナは粘度を引き下げる力が強ければその使用量が少なくてすむと共に、同じ厚さの乾燥皮膜を作るのに塗り回数少なくてすむ。C 社のク

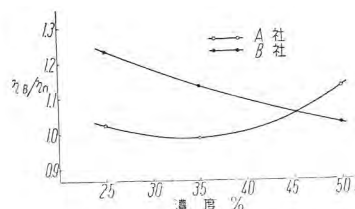
リヤラックをシンナでうすめて、それぞれ 25, 35, および 50% 溶液を作り、その粘度を 25°C でオストワルド粘度計で測定し、その値 η_n と醋酸ブチルにて稀釈した場合の値 η_B との比を粘度指数とした。

$$\text{粘度指数} = \frac{\eta_B}{\eta_n}$$

試験結果は 3 表および 2 図に示すように 50% 溶液では A 社の方が良いが、45% 以下では B 社の方が稀釈性が良いことが判る。

(4) 蒸発速度

ラッカを塗ったときの乾燥の遅速は分溜試験結果から推定することができるが、この試験はある成分の沸点とその量を測定しているのであるから、常温における乾燥の遅速とは一致しないことがある。乾燥状況に近づけた試験として、常温の蒸発速度を求めるためつぎのように試験した。3 図に示すように試料 20cc を 50cc のメスシリンダ（高さ 225mm、内径 20mm）に入れ、口はガラス管 2 本と寒暖計を取りつけたゴム栓で閉じ、ガラス管の 1 本は先端を内径 1.5mm にしぼりシリンダ底部から 5mm の箇所に位置するようとり付ける。硫酸を通した乾燥空気をこのガラス管の先から液中に吹き込み、一定流速になるよう他方のガラス管からアスピレータで引き一定時間ごとに試料の減量をメスシリンダの目盛で読む。装置全体を（流速計を除き）30°C の恒温槽中につけ試料の温度を $29.7 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 、空気流速は 0.5l/min とした場合の結果は 4 図に示すように、蒸溜曲線から予想した以上に B 社の方が蒸発速度は速い。しかしこれはシンナ単独の場合であって、実際にラッカに混合した場合は、ラッカ中の溶剤の影響する程度が各成分によって異なるから、全体

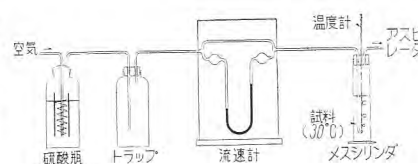


2 図 粘度指数

Fig. 2. Viscosity index.

3 図 蒸発速度測定装置

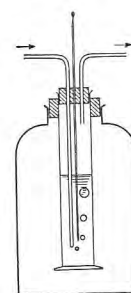
Fig. 3. Measuring device for evaporation speed.



としての蒸発速度もここに得られた結果と若干違った様子になるであろう。ここでは単に蒸発速度のみを求めたが、稀釈したラッカの溶媒（シンナと原液中の溶剤）の蒸発に伴う組成変化が稀釈液の均一性、流動性等に与える影響は硝化綿その他の成分の配位状態したがって塗膜の構成に関連するので別に実験したいと考えている。

(5) 蒸発に伴う温度低下

ラッカの乾燥すなわち揮発分の蒸発に伴い残分は蒸発熱を奪われて温度が下るのでそのときの空気中の湿度によっては塗面が露点以下に下り、塗面はブラッシング（白化する、艶消しになる）を起すことがあるから、あまり温度低下の大きいシンナは使用できない。前項と同様の装置を用い、ただメスシリンダを恒温槽媒体（30°C の水）から、ある厚さの空気層で遮断しておき、試料の蒸発に伴い液温の低下する状況を調べた。すなわち 5 図に示すように広口瓶の中にメスシリンダを入れ、この広口瓶を恒温槽内に浸けた。単位時間に蒸発によって奪われる熱量と空気層を通じて与えられる熱量とが等しくなるときまで試料の温度は下る筈である。もちろん蒸発により熱を奪われる割合を一定にすることは、比較的容易であるが、周囲から与えられる熱量を異る装置について、補正することは困難であるから、装置の形状、寸法などは一定にしておかなければならない。



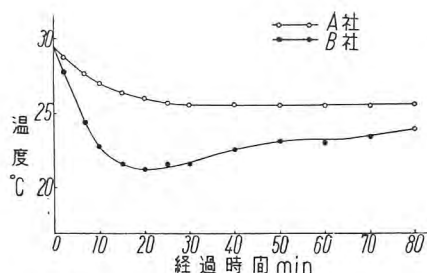
5 図 温度低下測定瓶

Fig. 5. Measuring bottle for temperature drop.

試験の結果は 6 図に示すように B 社製品は温度低下が大きいからブラッシングを起す恐れがあることを明かに示した。

(6) 塗膜構成試験

上述のような溶解力、稀釈力、蒸発速度、などの性質を持ったシンナを用いて、実験にラッカ塗膜を作った場合、シンナによってどのような差ができるかを調べた。前項までの性質と乾燥塗膜の性質との関係を詳しく知るためには、後述するような、塗膜試験の方法がさらに完備したものになることが必要である。C 社クリヤラッカをシンナで 1:1 に稀釈し、この溶液をゼラチン膜を剥し



6 図 蒸発に伴う
温度低下
Fig. 6. Temperature drop
with evaporation.

写真乾板 (55×120mm) に流し塗りして、乾燥時間、白化の有無、塗膜の一様性、時間の経過による硬度の上り方(スワードロック硬度計)を調べた。

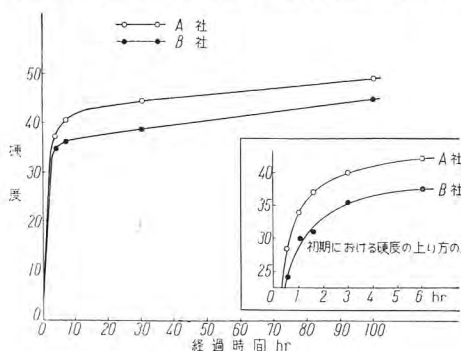
a. 乾燥時間 いずれも 10 分以内に乾くが、B 社シンナによるものは塗面が少し白化した。(気温 23.5°C, RH 75%)。

b. 塗膜の状態 いずれもほぼ均一で透明であるが、B 社のは表面に少し凹凸がある。

c. 硬度の上り方 7 図に示すように B 社のは硬度の上り方が遅く、最終硬度も低い。この傾向は気温が高いと一層著しいようで、その原因は蒸発が速すぎるため、塗膜の表面、内部共に、塗膜構成成分の最適配位が阻害されるように思われる。

イ. サンディング・シーラ

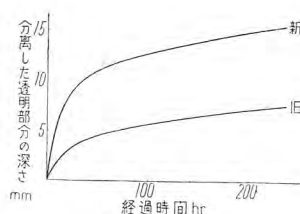
塗料のような有機の高分子重合物のコロイド溶液に対しては、無機物と違って溶質を溶かす力のある溶剤と、溶解力はないが溶液をうすめることのできる稀釈剤とがある。そして稀釈剤でうすめるときに、ある限界を越えると均一な溶解状態を保ち得ないで溶質が分離するが、この分離の仕方は重合物の種類によって相違するから、原液の比重や粘度の測定では溶質の相違を知り得ない場



7 図 硬度の
上り方
Fig. 7. Rise
of
hardness.

合でも、稀釈試験を行えば明かになし得ることがある。

試験方法として、原液をシンナで 1:1 にうすめ(重量%),これを試験管に 100 mm の深さに入れ数日間静置して、不溶性部分の沈降速度を調べる。



8 図 沈降速度

Fig. 8. Precipitation speed.

同一品質ということで継続入着していたサンディング・シーラが、この試験によって内容の変ったことの判った例がある。それを 8 図に示す。

3. 塗装試験片による試験

一般に塗装の目的は、被塗面に対する装飾的な意味と、保護的な意味を併せ持ったものであり、塗装の優劣の判定にもっとも重要なことは、塗装後ある環境に置かれた場合、その目的を発揮する能力がどの位あるかを知ることである。塗装部に生ずる欠陥は、塗装の種類によって多種多様であるばかりでなく、どの場合にも物理的、化学的の複雑な劣化現象が重なり合って起り得るものである。したがって、これらの欠陥を防ぐために塗料ないし塗装方法の試験を行う際は、単純な性質のそれぞれおよびそれらの相互関係を知り得るような方法を採用しなければならない。

塗装試験片による試験は被塗面との関連において、塗膜の性質を調べるもっとも基本的な塗料の試験で、種々の方法が行われているが、上述のように影響する因子が複雑であるため、結果の解釈が困難な場合が多く、さらに有用な方法を見出すために、物理的、化学的な種々の立場から研究が続けられている。その 1 つとして、比較的簡単な機械的性質である耐磨耗性について、相当再現性の良い測定が行われるようになったのでその方法を紹介する。この性質は磨耗硬度として塗膜の強度の一面を示すもので、またつぎのような重要性がある。

下塗、中塗、上塗を塗り重ねるときに、各層ごとにサンドペーパーをかけて平滑にしながら塗り重ねるので、“とき”の難易は塗装作業に大きな要素を占めている。ときおろしの難易を調べるには、硬い紙またはサンドペーパーで塗面をこすって磨耗度を調べる方法があるが、この方法は硬さの一定な紙や粒度の一定なサンドペーパーが得がたいことや、こすっているうちに目がつまるときの条件が変わることなどでうまく行かないことが多い。この欠点をさけるために、エナメル線の耐磨耗性試験器(NEMA 式)の摩擦部分を変形加工して、ピアノ線で塗膜をこすようにしたものを作ったが、この方法によると塗膜の粉が目をつめることや、線が磨耗することは考えなくてよい。塗装試験片は 10×100mm に作り、3mmφ の鋼棒に 0.5mmφ のピアノ線を 1 回巻きつけ、この上に 800 g の荷重をかけ、ピアノ線の方を試験片の長さの方向に平行にして塗膜上におき、10mm の長さの往復運動をさせて塗膜を磨耗し、素地の金属面が露出するまでの往復回数を求めた。ピアノ線と金属面が接触したとき、リレーの動作で回転計が止まるようにした。仕上塗が組立中や完成後にきずがつきにくいかどうかを知るにも、この方法を適用して磨耗度を知ることができる。各種の塗料について試験した結果を 4 表に示した。

4. 塗料薄膜による試験

前項の始めに述べたことから当然つぎのように、塗膜自体の薄膜が試験片として要求される。すなわち塗膜の吸湿性や機械的強度などを知りたいときに、素地の上に

4 表 磨 耗 試 験

種 別	A 社 サンデング シーラ (新)	C 社 サンデング シーラ	C 社 ウッド シーラ	D 社 サンデング シーラ	C 社 ジクロロ メート プライマ	C 社 フタル酸 プライマ サーフェーサ	G 社 フタル酸 プライマ	G 社 メタライト プライマ サーフェーサ	E 社 下 地 漆	E 社 地 付 漆	E 社 仕 上 漆	E 社 低温焼付漆	H 社 クリヤ ラッカ
回数/0.1 mm	6.3×10^2	3.4×10^2	4.9×10	1.2×10	4.0×10^2	1.0×10^3	2.0×10^2	2.0×10^2	3.0×10^3	9.2×10^3	3.4×10^3	2.5×10	9.0×10^2

5 表 薄 膜 の 透 湿 度 (g/cm, hr, mmHg $\times 10^{-8}$)

C 社 ジクロロメート プライマ	C 社 フタル酸 プライマ サーフェーサ	E 社 下 地 漆	F 社 上塗用メラミン エナメル白	F 社 メラミン プライマ	G 社 フタル酸 プライマ	G 社 メタライト プライマ サーフェーサ	G 社 エポンプライ マ	H 社 クリヤラッカ
6.44	15.82	10.46	12.61	14.82	6.91	4.92	11.17	8.09

6 表 飽 和 吸 湿 量 (%)

C 社 ジクロロメート プライマ	C 社 アルキッドレ ジンプライマ サーフェーサ	E 社 下 地 漆	F 社 上塗用メラミン エナメル白	F 社 メラミン プライマ	G 社 アルキッドレ ジンプライマ	G 社 メタライト プライマ サーフェーサ	G 社 エポンプライ マ	H 社 クリヤラッカ
0.85	0.55	0.95	0.86	0.88	0.95	1.1	0.55	0.65

7 表 抗張力 (kg/mm²) と伸び (%) (括弧内は伸びの % を示す)

C 社 ジクロロメート プライマ	C 社 アルキッドレ ジンプライマ サーフェーサ	E 社 下 地 漆	F 社 上塗用メラミン エナメル白	F 社 メラミン プライマ	G 社 アルキッドレ ジンプライマ	G 社 メタライト プライマ サーフェーサ	G 社 エポンプライ マ	H 社 クリヤラッカ
0.44 (6.0)	0.45 (9.4)	0.31 (5.8)	0.78 (6.8)	0.38 (23)	0.57 (36)	0.48 (5.2)	0.37 (5.5)	0.73 (8.5)

塗料を塗った試験片によって試験すると、試験結果には素地の影響が大きく出て塗膜自身の性質がはっきりしない場合が多い。素地のない塗料だけの薄膜で試験をすれば、要素が単純化されるからきわめて好都合である。薄膜を作る方法として発表されているのは、銅板表面を加工(水銀アマルガム、澱粉液、塗付等)してからこの上に塗料を塗り、乾燥後に塗膜を剥し取るのであるが、合成樹脂系の焼付塗料は焼付温度が高いからこの方法では均一な連続した薄膜を作ることはできない。

当所の方法はシリコン樹脂や弗素樹脂の表面に塗料の付着力が弱いことを利用したもので、これらの樹脂の平滑な面の上に塗料を塗ると、焼付乾燥後にも容易に塗膜を剥し取ることができる。実用上シラスティック・クロース(当社世田谷工場製品)を使用しているが、耐熱性が強いから高温焼付塗料にも適用し得る。塗料薄膜によって透湿度、吸湿度、抗張力、などを正確容易に測定し得たのでその結果を報告する。

ア. 透 湿 度

塗装部の化学的侵食に対しては、塗膜の気密度、いい替えれば種々の気体、液体の拡散恒数が重要な性質である。この中のもっとも基本的と思われる透湿度をつぎのようにして求めた。

透湿度試験器に蒸留水を入れ、上面開放口に塗料薄膜を貼ってから、塩化カルシウム入デシケータ中に入れ、24時間後(20°C)に秤量して減量から透湿度を求めた。

(5 表)

イ. 吸 湿 度

2~3g の 1 枚の薄膜をまるめて秤量瓶に入れ、あらか

じめデシケータに入れて恒量になるまで乾燥した後、90% RH (20°C) の恒湿恒温容器に入れ、ときどき秤量して飽和状態(50~100 時間後)の吸湿度を求めた。(6 表)

ウ. 抗張力と伸び

塗膜の機械的強度を知るために塗装試験板に対する種々な試験方法が考案されているが、いずれも便宜的な方法であって、もっとも基本的な性質である抗張力、伸び等を塗料自体の薄膜について、知ることが必要である。150×15×0.2mm の薄膜を作って抗張力を測定した。(7表)

ここに掲げた塗料薄膜の性質に関する測定値はいずれもある特定条件で塗料膜を作った場合の結果であって塗装方法たとえば重ね塗りの場合や焼付条件によって影響を受けることは当然である。とくに抗張力と伸はその差が著しいから乾燥方法あるいは焼付条件の検討に役に立つ筈である。また従来のアンドレルの周囲に曲げる試験とも一脈通ずるところがあるので両試験の理論的考察によって試験方法の確立を期することもできると思う。

5. む す び

一般試験に併せて以上のような特性試験を行うと、塗料の持つ性質をよくつかむことができるから、塗装目的によって性質に重みの差異をつけて評価すれば、最適の塗料を選択決定することは容易である。また塗装後にその性能が完全に発揮されるように、作業条件の改善にも役立てることができる。しかし特性を明かにするのに以上の試験のみで充分とはもちろんいえないから、今後もさらに新しい良い方法を研究して塗料および塗装の改善の実を挙げたいと考えている。

絶縁液体の誘電強度に及ぼす 気体有機塩素化合物溶解の影響

研究所 白井万次郎*・原 仁吾**・大杉 肇*

Influence of Absorption of Gaseous Organic Chlorinated Compound Working on Dielectric Strength of Liquid Dielectric

Engineering Laboratory Manjiro SHIRAI・Jingo HARA・Hajime OSUGI

Ofttimes such organic chlorinated compound as Freon and vapor of CCl_4 happen to come in touch with such liquid dielectric as mineral oil and askarel of oil filled electric apparatus under test. Influence of absorption of these gases on the dielectric strength of the liquid dielectric has been experimented to arrive at the following conclusion: the maximum solubility of Freon into the dielectric is fairly large in comparison with oxygen and nitrogen, decreasing with the rise of temperature. The vapor of CCl_4 is absorbed into the dielectric almost without limitation. If once absorbed, chlorinated compound thus produced will hardly evaporate in spite of it being left in touch with air above the liquid helps it evaporate but still a small quantity remains. Absorption of these chlorinated compounds is found lowering the 60 cycle and impulse dielectric strength, but the absorption does not seem to give especially dangerous influence when the quantity is little.

1. ま え が き

油入機器のあるものはその検査の途上で、鉱油や不燃油のような絶縁液体と、フレオンや四塩化炭素の蒸気のような気体の有機塩素化合物が接触する場合がある。この場合フレオンや四塩化炭素が絶縁液体に溶解する。これらの気体の溶解が絶縁液体の誘電強度に及ぼす影響について実験した結果をここに報告する。

2. フレオン 12 の絶縁液体に及ぼす影響

ア. 飽和溶解量

フレオン 12 の鉱油および不燃油中への飽和溶解量を各温度について測定した。鉱油は JIS 規格の市販変圧器油であり、不燃油は国産の変圧器用不燃油である。気体の溶解量はトリチェリーの真空を利用した方法⁽¹⁾によって測定した。液上の気体の圧力は 1 気圧に保った。気体の容積は 30°C, 1 気圧の容積で示し、

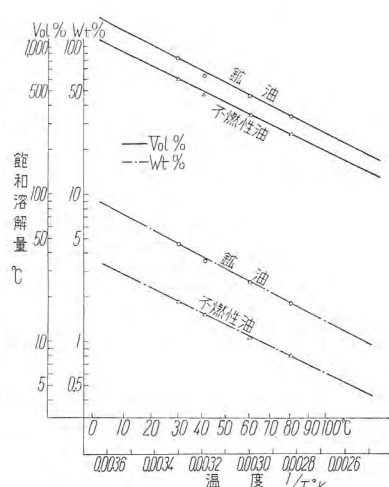


Fig. 1. Maximum solubility of Freon 12 in mineral oil and askarel.

油に対する容積パーセントと重量パーセントで示す。溶解した気体の容積および重量パーセントを対数目盛で縦軸に、絶対温度の逆数を横軸にとって実験結果を表わしてみると 1 図のようになる。ほぼ直線関係にあって、温度の上昇とともに液中へのフレオンの飽和溶解量は減少する。不燃油に対するフレオンの溶解量は鉱油に対するより少し小さい。

液体中への気体の飽和溶解量は溶解理論よりつぎの関係があることが知られている⁽²⁾。

$$\ln x = \ln \frac{P}{P_0} - \frac{\Delta H_m}{RT} \quad (1)$$

ここに x は液体中に溶解した気体のモル分率であり、 P は液上の気体の圧力、 P_0 は飽和蒸気圧、 ΔH_m は混合熱、 T は絶対温度、 R は気体恒数である。ここに P_0 は Clausius-Clapeyron の式によりつぎのように示される。

$$\ln P_0 = \frac{\Delta H_c}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

ここに ΔH_c は気体の凝縮熱、 T_b は気体の凝縮温度である。液上の気体の圧力を 1 気圧とすれば、(1), (2) より

$$\begin{aligned} \ln x &= -\frac{\Delta H_c}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T} \right) - \frac{\Delta H_m}{RT} \\ &= -\frac{\Delta H_c}{RT_b} + (\Delta H_c - \Delta H_m) \frac{1}{RT} \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 式は $\ln x$ と $1/T$ が直線関係にあることを示し、 $\Delta H_c > \Delta H_m$ ならば気体の液体中への飽和溶解量は温度

の上昇とともに減少する。鉱油および不燃油中にフロン 12 が溶解する場合はこの場合に当たるとされる。鉱油に気体が溶解する場合はかならずしも温度の上昇により飽和溶解量は減少せず、空気、酸素、窒素の場合、油への飽和溶解量は温度の上昇とともに増加することが知られている⁽³⁾⁽⁴⁾。

また(3)式は気体の凝縮温度 T_0 が低いほど飽和溶解量の小さいことを示し、鉱油の場合、水素、酸素、窒素の順に飽和溶解量は増加し、フロン 12 は以上の気体に比べて凝縮温度ははるかに高いから、溶解量もそれらの気体に比べてはるかに大きい。

イ. 溶解速度

静止した絶縁液上にフロンを接触した場合には液面から気体が溶解してゆくのであるから、直ちに飽和溶解量には達しない。一定時間後の溶解量を知るにはフロンの絶縁液体に溶解する速度を知ることが必要になる。絶縁液体の量が深さに比例している場合は、溶解する気体の平均溶解量は液の深さと液面上の気体の圧力によって異ってくる。気体の圧力を 1 気圧とした場合の平均溶解量は 2 図のようになる。気体の液体中への溶解を液面からの拡散によるとすると、気体の液中への平均溶解量と時間との間には拡散理論により近似的につぎの関係がある⁽⁵⁾。

$$\bar{C} = C_0 \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 D}{4h^2} t \right] \right\} \quad \dots\dots (4)$$

ここに C_0 は気体の飽和溶解量、 \bar{C} は時間 t における気体の平均溶解量、 h は液体の深さ、 D は気体の液体中の拡散係数で、一定温度では一定である。(4)式は書き変えたとつぎのようになる。

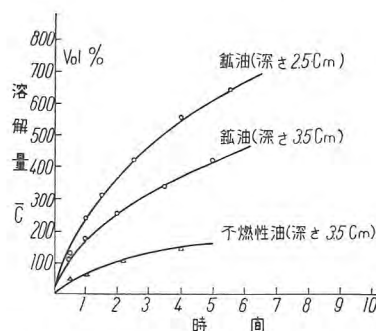
$$\ln \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{C_0 - \bar{C}}{C_0} \right) = -\frac{\pi^2 D}{4h^2} t \quad \dots\dots (5)$$

この関係より $(C_0 - \bar{C})/C_0$ を対数目盛で縦軸に、 t を横軸にとれば、平均溶解量と時間の関係は直線となり、その傾斜より拡散係数を求めることができる。2 図の平均溶解量より $(C_0 - \bar{C})/C_0$ を作り時間との関係を求めてみると 3 図のようになり、ほぼ直線となる。この直線の傾斜より D を求めてみると、鉱油の場合液の深さ 2.5 cm で $D = 0.59$ (cm²/hr)、液の深さ 3.5 cm で $D = 0.58$ (cm²/hr) となり、ほぼ等しい値を得る。不燃油の場合は $D = 0.41$ (cm²/hr) となり、鉱油の場合より拡散係数が小さい。

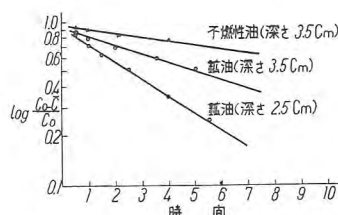
以上は平均溶解量であって、これが飽和溶解量に達するまでは液の深さによって気体の溶解量は異っている訳である。気体の溶解量と時間および深さの間には拡散理論により近似的につぎの関係がある。

$$C = C_0 \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi x}{2h} \exp \left[-\frac{\pi^2 D t}{4h^2} \right] \right\} \quad \dots\dots (6)$$

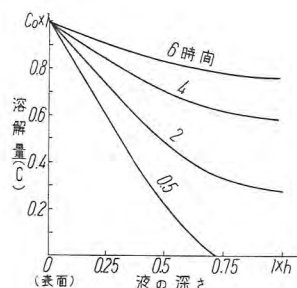
鉱油で液の深さが 2.5 cm の場合のフロン 12 の溶解量と液の深さとの関係とその時間的変化を計算して図に示してみると 4 図のようになる。



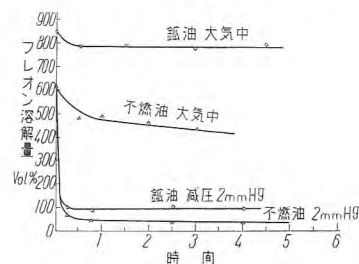
2 図 フロン 12 の絶縁液中の溶解量と時間の関係 (I)
Fig. 2. Absorption rate of Freon 12 in liquid dielectrics (I)



3 図 フロン 12 の絶縁液中の溶解量と時間の関係 (II)
Fig. 3. Absorption rate of Freon 12 in liquid dielectrics (II)



4 図 溶解量と液の深さの関係
深さ 3.5 cm の鉱油とフロンの場合
Fig. 4. Solubility of Freon 12 and liquid depth. oil depth 3.5 cm.



5 図 溶解したフロンの蒸発
Fig. 5. Evaporation of Freon 12, absorbed in liquid dielectrics.

ウ. 溶解後の蒸発

フロン 12 が絶縁液体に溶解後、これが簡単に除去することができれば、絶縁液体に対する影響は問題とならない。よって鉱油および不燃油にフロン 12 を溶解して飽和に達せしめた後、空气中に放置して溶解したフロン 12 の量の減少を測定してみた。液の深さは 3.5 cm である。結果は 5 図に示すようにフロン 12 の蒸発は鉱油、不燃油ともにきわめておそい。不燃油の方が鉱油よりやや蒸発しやすい。

液上を真空にした場合のフロン 12 の溶解量の減少も 5 図に示した。この場合の液面上の圧力は 2mmHg となり、フロン 12 の溶解量は 1/10 程度にすみやかに減少する。これは減圧により溶解しているフロン 12 が液中で気泡になって蒸発するためである。しかし 1/10 程度になってからのフロンの

減少はゆるやかになる。不燃油の場合も大体同じような経過をとる。工場で真空にひいた場合おそらく真空度はこの程度であろうから、少量のフロンが絶縁液中に残るであろう。

エ. 破壊電圧に及ぼす影響

(1) 60 c/s 破壊電圧

試料の絶縁液体は濾紙にて濾過した後、2 mmHg 程

度の真空中に噴射して脱気する。この際脱水も行われると思われる。この液体にフレオン 12 を溶解し飽和させたものと脱気したままの液体を適当に混合して各種のフレオン溶解量の試料を作り、その 60 c/s 破壊電圧を測定した。直径 12.5 mm の球電極を用い、電極間隔は 1.5 mm とした。試験法は JIS の方法に従い、約 3 kV/sec の割合で電圧を上昇し、各試料とも 5 回ずつ放電させてその最初の値は捨て、後の 4 回の放電電圧の平均をとり破壊電圧とした。実験結果は 6 図に示す。鉱油も不燃油もほぼ同じような傾向を示し、フレオン溶解量の増加とともに 60 c/s 破壊電圧は減少する。この場合フレオン溶解量が零の試料も絶縁液体の脱気が完全でないから 0.3 % 位の空気を含んでいる。

鉱油の破壊電圧は普通連続放電に達する電圧以下で前駆放電が見られるのであるが、フレオンを溶解した場合は前駆放電が見られなくなる。不燃油の場合は前駆放電がなく、衝撃破壊電圧が比較的に低いことが報告されているので⁽⁹⁾、鉱油もフレオンのような有機塩素化合物を溶解した場合は衝撃破壊電圧が比較的に低くなるのではないかと考え、つぎに衝撃破壊電圧を測定した。

(2) 衝撃破壊電圧

電極は 60 c/s の場合と同じで、電極間隔は 0.75 mm とした。各試料とも $1 \times 40 \mu\text{s}$ の衝撃波を印加して電圧-時間曲線を求めた。いずれも $1.5 \sim 2 \mu\text{s}$ 以下で破壊電圧は急に上昇し、これ以上の時間ではほぼ平らな曲線となる。7 図に示す破壊電圧の値は各試料に対する電圧-時間曲線がほぼ平らになった $2 \sim 3 \mu\text{s}$ の時間に対する値である。印加電圧の極性はいずれも正で、極性を負にするとほんのわずかに破壊電圧は低下する傾向がある。鉱油、不燃油ともに衝撃破壊電圧はフレオン溶解量の増加とともに減少するが、60 c/s 破壊電圧より下りかたが少い。ただし不燃油の場合にフレオン溶解量の零の試料の破壊電圧がいちじるしく高くなっている。

Dakin の報告⁽⁶⁾では、直角端を有する 10 in 平板電極で 60 c/s では不燃油が鉱油より破壊電圧が高く、衝撃波 ($1.5 \times 40 \mu\text{s}$) では両者が大体等しくなり、その衝撃比は不燃油 1.38、鉱油 2.0 である。また不燃油の衝撃強度は電極の形状によっていちじるしく影響され、電極の端効果が少なくなるほどその破壊電圧は鉱油に比して顕著に増加し、直径が大きく端部に $1/4$ in の丸味をつけたほぼ平等電界では衝撃比が不燃油 1.66、鉱油 1.73 と

報告されている。筆者らの実験結果では 60 c/s 破壊と衝撃破壊の間隔長が異なるので正確を期し得ないが、平等電界における 1.5 mm と 0.75 mm 間隔の破壊電圧の比を 1.75 として⁽⁷⁾、衝撃比を求めると、不燃油では約 1.5 ~ 1.7、鉱油では脱気したものでは約 1.2 でフレオンの溶解量の増加とともに増加し、フレオン 800 vol % では約 1.6 に上昇する。フレオンの溶解が鉱油の衝撃破壊電圧にとくにわるい影響を与えることは見られない。鉱油の 60 c/s 破壊電圧が不燃油より高いこと、および鉱油の衝撃比の小さいことは鉱油が充分精製されているためと考えられる。鉱油は精製によって衝撃破壊電圧はあまり上昇しないが、60 c/s 破壊電圧が顕著に上昇するからである。

いずれにしてもフレオン 12 の少量の溶解は絶縁液体の破壊電圧にとくに危険な影響を与えることはないといえる。

3. 四塩化炭素の絶縁液体に及ぼす影響

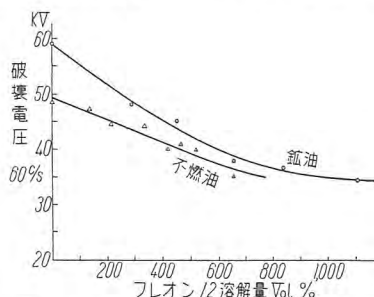
ア. 溶解現象

四塩化炭素は室温で液体なので取扱いに便利のためフレオンに代って使用されることがある。この場合四塩化炭素の蒸気は絶縁液体に触れるとやはり液体中に溶解する。液体の四塩化炭素と鉱油および不燃油はいかなる割合でも溶解しあうから、四塩化炭素の蒸気も鉱油、不燃油にいくらでも溶解してゆき、フレオンのように飽和量というものはない。

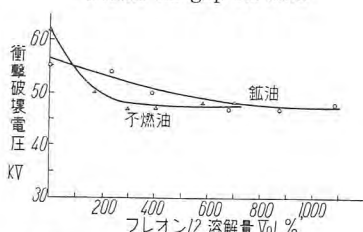
液体の四塩化炭素を入れたデシケータ中に鉱油を 1.8 cm の深さに容器に入れて、室温で放置しておく。この場合室温は 30°C であったから、四塩化炭素の蒸気圧は 140 mmHg であってデシケータ中に四塩化炭素の蒸気が充満しこれが鉱油中に溶解してゆく。この量を重量増加で測定し、鉱油に対する重量パーセントであらわしたのが 8 図である。溶液中の 1 つの成分の蒸気圧は、Rault の法則に従う場合はつぎのようになる。

$$P_1 = P_0 \alpha \dots \dots \dots (7)$$

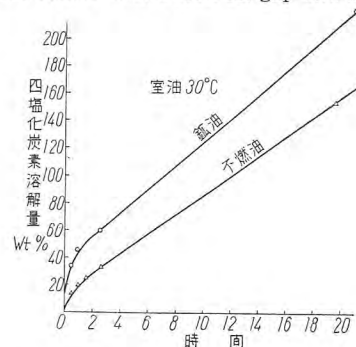
ここに P_0 はその温度におけるその成分のみがあった場合の蒸気圧、 α は溶液中のその成分のモル分率、 P_1 は溶液中のその成分の蒸気圧である。この関係により、溶液中のその成分の蒸気圧は純液体の蒸気圧よりつねに小さいから、純液体より蒸発した分子は溶液にいつまでも溶解してゆく。鉱油-



6 図 フレオン 12 を溶解した絶縁液体の 60 c/s 破壊電圧 電極間隔 1.5 mm
Fig. 6. 60 c/s dielectric strength of liquid dielectrics with Freon 12. gap 1.5 mm.



7 図 フレオン 12 を溶解した絶縁液体の衝撃破壊電圧 電極間隔 0.75 mm
Fig. 7. Impulse strength of liquid dielectrics with Freon 12. gap 0.75 mm.



8 図 絶縁液体への四塩化炭素蒸気の溶解量と時間の関係
Fig. 8. Absorption rate of CCl_4 vapor in liquid dielectrics.

四塩化炭素系が Rault の法則に完全にあてはまらないとしても、溶液中の四塩化炭素の蒸気圧は純四塩化炭素の蒸気圧よりも小さいから、溶液にはいつまでも四塩化炭素が溶解して重量が増加する。同様な実験は不燃油についても行ったが、この場合不燃油の最初の深さは 1.2 cm であった。溶液の重量増加は 8 図に示してある。

絶縁液体中への四塩化炭素の溶解量は大きいから、溶解実験中液の深さは一定にならず増加してゆく。

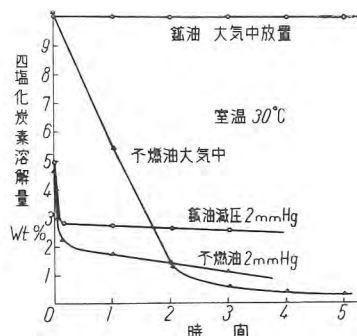
イ. 溶解後の蒸発

溶解後の四塩化炭素の蒸発をやはり重量変化で測定した。約 10% の四塩化炭素を含む鉱油を空气中に放置して 5 時間まで行ったがほとんど重量変化がない。9 図はこれを示したものである。1 度溶解した四塩化炭素は蒸発し難いことがわかる。これに対して約 10% の四塩化炭素を含む不燃油の場合は蒸発がいちじるしく、重量が減少する。この場合不燃油中の三塩化ベンゾールも蒸発するので、不燃油のみを等しい容器に入れて空气中に放置し重量減を測り、これを四塩化炭素を含む不燃油の重量減よりひいて 9 図に示している。三塩化ベンゾールの蒸発量はあまり大きくない。蒸発に際しての鉱油と不燃油の差はフレオンの場合も少し認められたが四塩化炭素の場合はいちじるしい。これは両溶液中の四塩化炭素の蒸気圧曲線の違いによるものである。

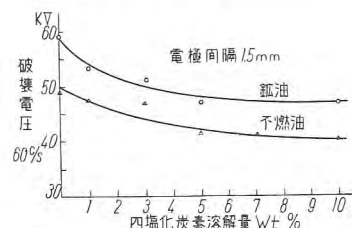
液上を 2mmHg に減圧すると、鉱油の場合始め約 5% の四塩化炭素を含むものが 3% まで急に減るが、その後減少はゆるやかになる。不燃油の場合も 2% 余までは急に減少し、後はゆるやかに減少する。いずれにしても 1 度溶解した四塩化炭素はその後液面上を数時間の真空処理を行っても、なお少量の四塩化炭素が油中に残るものと思われる。

ウ. 破壊電圧に及ぼす影響

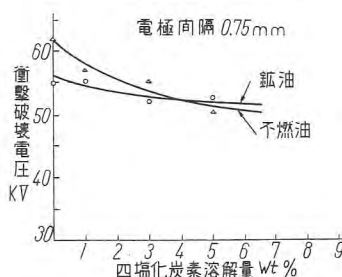
四塩化炭素を溶解した絶縁液体の破壊電圧の測定をフレオンの場合とまったく同様に行った。60 c/s 破壊電圧の結果は 10 図に、衝撃破壊電圧の場合を 11 図に示す。傾向はフレオンの場合とよく似ているが、破壊電圧の低下の割合はフレオンよりわずかに少ないようである。衝



9 図 油中の溶解した四塩化炭素の蒸発
Fig. 9. Evaporation of CCl_4 , absorbed in liquid dielectrics.



10 図 四塩化炭素を溶解した絶縁液体の 60 c/s 破壊電圧
Fig. 10. 60 c/s dielectrics strength of liquid dielectrics with CCl_4 , gap 1.5mm.



11 図 四塩化炭素を溶解した絶縁液体の衝撃破壊電圧
Fig. 11. Impulse strength of liquid dielectrics with CCl_4 , gap 0.75 mm.

撃比は不燃油では 1.5, 鉱油では約 1.2~1.4 である。

4. むすび

以上の実験結果を要約するとつぎのことをいえる。絶縁液体中へのフレオン 12 の飽和溶解量は酸素や窒素に比べるとかなり大きく、温度の上昇とともに減少する。不燃油中への飽和溶解量は鉱油よりやや小さい。フレオン 12 の絶縁液中の拡散系数は鉱油の場合室温で約 $0.58 (\text{cm}^2/\text{hr})$, 不燃油の場合は約 $0.41 (\text{cm}^2/\text{hr})$ で鉱油よりやや小さい。1 度液中に溶解したフレオン 12 は空气中に放置しておいても容易に蒸発しない。液上を真空にひくと蒸発するが、いくぶん残る。溶解したフレオンは溶解量の増加とともに絶縁液体の 60 c/s 破壊電圧および衝撃破壊電圧を下げる。衝撃破壊電圧の方が下りかたがやや少い。

四塩化炭素の蒸気は絶縁液体の方へいくらかでも溶解してゆく。鉱油に溶解した四塩化炭素は大気中に放置しても蒸発し難いが、不燃油の場合はかなり蒸発する。液上を真空にひいても溶解した四塩化炭素は少し残る。溶解した四塩化炭素の絶縁液体の破壊電圧に及ぼす影響はフレオンの場合と同様で、60 c/s および衝撃破壊電圧は四塩化炭素の溶解量の増加とともに低下する。

少量のフレオンおよび四塩化炭素の溶解は絶縁液体の破壊電圧にとくに危

険な影響を与えるものとは思われない。

終りにこの研究の機会を与えられた伊丹製作所工作部および実験の一部にご協力を賜った研究所電気第 1 研究室蔭山技師に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 河村, 電研月報, Vol. 3 No. 5 p. 31 (1953)
- (2) Hildebrand, "The Solubility of Nonelectrolytes" III Ed. p. 245 (1950).
- (3) F. M. Clark, J. Frank. Inst. p. 39 (1933).
- (4) P. B. Kaufman, AIEE TP. 55-66.
- (5) W. Jost, "Diffusion" p. 37 (1952).
- (6) T. W. Dakin, AIEE TP. 52-228.
- (7) 電気工学ハンドブック p. 497.

電子管電極金属微量酸化の検査法

研 究 所 立原芳彦*・秦 卓也**・鬼塚正浩***

Testing of Minute Oxydation of Metal in Electronic Tubes

Engineering Laboratory Yoshihiko TACHIYARA・Takuya HATA・Masahiro ONIZUKA

Minute oxydation is liable to occur in the metal parts of electronic tubes such as cathodes, anodes and grids when the metal undergoes the process of making ingot, rolling, annealing and forming. The oxydation, even though so slight a quantity, affects a great deal on the electronic tube degrading the characteristics and leading to uneven quality of the products.

Electron emission of the oxide coated cathode is sharply affected by slight oxydation of impurities contained in the nickel core metal. However, the testing methods used for the metals and parts of tubes-by means of chemical analysis and practical test through electronic tubes-involve various disadvantages and are not very reliable. A new method, then, has been devised by making use of the fact that corrosion rate of metals in acid or alkaline solution is markedly affected by minute oxydation.

1. ま え が き

受信管酸化陰極基体金属ニッケルスリーブの検査法としてはスペクトル分析, 化学分析, 2 極真空管によるエミッションテスト等による方法が行われてきたが, これらの各試験を通過合格したニッケルでもなお実際受信管に使用された場合の成績は予期に反することがしばしばあって安心して真空管を製造することができなかった. この主なる原因は, 活性剤としての還元性不純物のスペクトル分析, 化学分析による定量分析ではこれら不純物の未酸化有効分と既酸化無効分とを分別定量することができなかったことと, 2 極管によるエミッションテストの成績は排気台が異ればもちろん, 排気中の発生ガス量したがって管内ガス圧の異なる他の種類の実際の真空管にはそのまま適用することができないことにある.

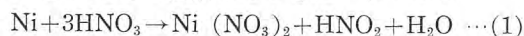
われわれは試料真空管の製造諸条件に影響されないで試料金属本来の特性を知る目的で, 酸溶液に試料金属を溶解せしめてその溶解減量対時間関係曲線を解析することにより, 活性不純物量, 酸化の程度, 酸化の深さ, 酸化に対する抵抗性を評価する方法を考案して従来の検査法の欠陥を除くことができた.

2. 検査法の原理

ニッケルは普通マンガ, マグネシウム, シリコン, アルミニウム等還元性不純物が微量添加されているので, これを酸に溶解した場合純ニッケルの酸への溶解機構のほかに局部電池に

よる溶解機構も重畳する. いま簡単のためマグネシウムのみ含有されている場合を考えてみる. Mg, Ni, MgO の単極電位および相互間の起電力は 1 表のごとくである.

局部電池が Mg/Ni の場合は Ni が Mg より電位が高いため 1 図(a)のように Ni より Mg の方へ電流が流れ, Mg がさきに溶解してつぎにニッケルの

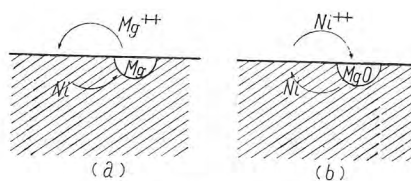


反応にて溶解するが, Mg は微量しか存在しないので溶解曲線は 2 図(a)のように直線的に観察される. Ni/MgO の局部電池の場合は MgO が Ni より電位が高いため, 1 図(b)のように MgO より Ni の方へ電流が流れて Ni

1 表 単 極 電 位*

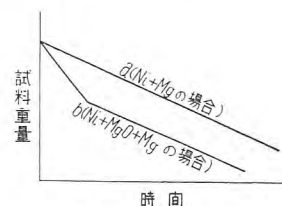
金属および酸化物	単 極 電 位	起 電 力
MgO	+1.4 V	MgO 対 Ni 1.648 V
Ni	-0.248 V	Ni 対 Mg 1.302 V
Mg	-1.55 V	

(* 電気化学の理論および応用上巻 亀山直人)



1 図 局部電池作用

Fig. 1. Local electric cell action.



2 図 溶解曲線

Fig. 2. Dissolution curve.

が先に溶解する。この機構による Ni の溶解と (1) 式の反応による溶解と重畳するので溶解速度、すなわち直線の傾斜は 2 図 (a) よりも大きい。MgO 付近の Ni が溶解すれば MgO は溶液中へ脱離するので、これ以後は 2 図 (a) と同様な緩慢な溶解を起して溶解曲線は 2 図 (b) のように曲りができてくる。

このように酸素が完全な酸化物を形成していないで金属中に溶解しているような場合でも、結晶粒界の存在で酸素の分布は不均一となっているから、酸素の豊富な所は $\text{Ni}/\text{Ni}^{++}/\text{H}^{+}/\text{H}_2$ 電池において水素の蓄積しないようにする復極作用が大きいため、酸素の少ない所より高電位性となりやはり局部電池の機構により溶解速度が大きい。酸化被膜の存在も同様な機構を現出する。

このように溶解曲線から試料金属の酸化の深さ、酸化の程度、不純物の多少が判るので標準品と溶解曲線を比較して良否を比較検査し品質変動を知ることができる。

3. 操作法

ニッケルスリーブ 10 本 ($1.1\phi \times 1.0\phi \times 27\text{mm}$) を醋酸ブチル、石油ベンジンにて洗浄後 $1,000^\circ\text{C}$ 、10 分間水素処理を行い、これを 3 図のようにタングステン等難溶解性の細線 (約 $0.08\text{mm}\phi$) で感度 0.2mg の振り秤りに吊り下げ、試料ニッケルスリーブを 30% 濃度の硝酸溶液 100 cc と 3% 濃度の過酸化水素水 10 cc との混合溶液中に浸漬して液温を 40°C に保ちつつ、試料ニッケルスリーブの重量変化を 20 秒毎に読みとり、重量を縦軸に時間を横軸にとって曲線として表わし、この曲線の傾斜、屈曲点の位置を標準試料のそれと比較して良否を上記の原理によって判定する。この判定を簡便ならしめる方法として下記のような曲線の評価方法を行うことができる。

4. 試験値の評価法

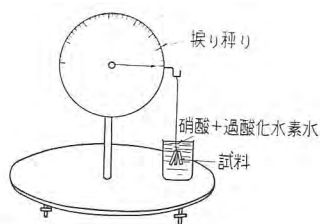
溶解曲線を求めて酸化程度等を比較する場合に数値で表わした方が便利であるため、つぎの方法で表わすようにした。

ア. 酸化程度

4 図のような溶解曲線が求められた場合、屈曲点 O から横軸に平行に引いた直線と縦軸との交点を C とする。また 2 段目の溶解曲線を延長して縦軸との交点を B とする。AC は表面酸化層が溶解した時の重量であるが、Ni/MgO による局部電池作用と (1) 式との反応による溶解減量である。AB は Ni/MgO による局部電池作用のみによる酸素拡散層の溶解減量である。いま

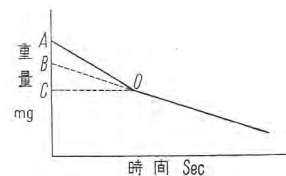
$$\text{酸化程度} = (\overline{AB}/\overline{AC} \times 100)\%$$

とする。完全に酸化していれば 100% となり、酸化していなくて一直線になっている時は 0% となり、酸化の程度を % で表わすことができる。



3 図 操作法

Fig. 3. Operating method.



4 図 溶解曲線

Fig. 4. Dissolution curve.

イ. 酸化に対する抵抗性 (酸化難易度)

酸化に対する抵抗性は試料金属中に含有される還元性元素の種類および量によって異なるので、生の試料金属の酸化程度とこれを酸化雰囲気中で加熱して酸化した試料金属の酸化程度との比によって表わす。

$$\text{酸化に対する抵抗性} = \left(\frac{\text{生の試料金属の酸化程度}}{\text{酸化せしめた試料金属の酸化程度}} \times 100 \right) \%$$

これにより故意に酸化雰囲気中で加熱しても酸化しないものが 100% となり、その酸化抵抗性を % で表わすことができる。

ウ. 酸化の深さ (酸化膜の厚さ)

還元性不純物のニッケルスリーブ最表面への拡散速度はスリーブ表面酸化層の厚さに反比例する。⁽¹⁾ この厚さを溶解曲線の曲り点迄の時間をもって表わす。

A. S. T. M. Active 級の酸化物陰極用ニッケルスリーブを酸化雰囲気中で酸化したものとの酸溶解曲線より求めた酸化時間と酸化の深さとの関係は

$$y^2 = kt \quad y \cdots \text{上法で求めた酸化の深さ (sec)}$$

$$t \cdots \text{酸化時間 (min)}$$

$$k \cdots \text{酸化速度係数}$$

となり、酸化の拋物線法則に合致することから曲り点迄を酸化の深さとすることは合理的である。

エ. 溶解速度 (還元性元素の量)

含有されている還元性元素の量は試料金属の酸溶解曲線の屈曲点以後の直線の傾斜より判る。還元性元素の量の多いもの程直線の傾斜が急であるから、溶解速度をもってその多少を比較することができる。これを $\text{mg/sec}/100\text{cm}^2$ の単位で表わす。

5. 実測値および真空管製造作業への応用

上記の方法にて酸化物陰極用基体ニッケルスリーブの酸化程度、酸化抵抗性、酸化の深さおよび溶解速度を求めるために使用したニッケルスリーブの分析値と ASTM

2 表 酸化物陰極基体金属用ニッケルの分析値

試料		Ni+Co	Mn	Si	Fe	Cu	C	Mg	S	Al
ASTM	Active	99.0 以上	0.10	0.05 0.15	0.05 0.10	0.04	0.08	0.05 0.15	0.005	—
	Normal	"	0.20	0.01 0.05	0.20	0.20	0.08	0.01 0.10	0.008	—
	Passive	"	0.02	0.01	0.05	0.04	0.05	0.01	0.005	—
A社	# 8	99.04	0.03	0.11	—	—	0.02	0.17	tr	0.05
試ル	#78	99.60	0.21	0.06	0.04	0.01	0.01	0.12	0.001	—
作ス	#12	99.41	0.12	0.19	0.21	—	—	0.05	0.001	—
ニリ	MN-1	—	0.05	0.031	0.04	0.0012	—	0.056	—	0.01
ツ	#327	—	0.003	0.04	0.25	0.002	0.014	0.09	—	—
ケ	Vac # 4	—	0.03	0.033	0.04	0.0091	—	0.005	—	0.02

の Active, Normal, Passive 規格値を 2 表に示す。分析組成から見て Active 級のニッケルには A 社製の #8, #12, #78 が分類され, Normal 級のニッケルには MN-1 および #327 が分類され, Passive 級のニッケルには Vac #4 が分類される。

ニッケルスリーブ (1.1φ×1.0φ×27 mm) を 3 とおりの処理法, すなわち醋酸ブチル洗浄〔醋酸ブチル洗浄〕+〔水素処理(1,000℃, 10 分間)〕, および酸化させるために水素に水蒸気を混じた雰囲気中 (H₂674 mm Hg, H₂O 93 mm Hg) で, 1,000℃ 5 分間および 10 分間加熱処理したものについての酸溶解曲線を解析した結果を 3 表に示す。これより溶解速度および酸化抵抗性は Active, Normal, Passive のニッケル地金により差があることが判った。

数十種のニッケルスリーブの酸溶解曲線の解析結果から Active, Normal, Passive 地金を分類すると 4 表のようになる。

酸化程度, 酸化深さはスリーブ地金メーカおよびスリーブメーカの製造技術により差がでてき, また製造のロット間の品質変動として現われる。たとえば 5 表, 6 表, 7 表のような例がある。

6. 従来の試験方法との比較

酸化物陰極の電子放射活性度とその寿命に最も大きく

3 表 ニッケルスリーブの酸溶解曲線の解析値

(ニッケルスリーブの大きさ 1.1φ×1.0φ×27 mm)

試料	処 理 法	酸化程度 (%)	酸化抵抗性 (%)	酸化の深さ (sec)	溶 解 速 度 mg/sec・100 cm ²
# 8	醋酸ブチル洗浄	0	—	0	1.34
	醋酸ブチル + H ₂ 処理	0	—	0	
	(H ₂ +H ₂ O) 処理 5 分間	30.0	3.3	80	
	" 10 分間	30.0	3.3	80	
#78	醋酸ブチル洗浄	0	—	0	1.18
	醋酸ブチル + H ₂ 処理	0	—	0	
	(H ₂ +H ₂ O) 処理 5 分間	0	100	0	
	" 10 分間	35.7	2.8	40	
#12	醋酸ブチル洗浄	35.1	—	65	1.06
	醋酸ブチル + H ₂ 処理	40.3	87.0	308	
	(H ₂ +H ₂ O) 処理 5 分間	—	—	—	
	" 10 分間	—	—	—	
MN-1	醋酸ブチル洗浄	18.1	—	140	1.06
	醋酸ブチル + H ₂ 処理	18.1	—	140	
	(H ₂ +H ₂ O) 処理 5 分間	30.0	60.3	270	
	" 10 分間	30.0	60.3	270	
#327	醋酸ブチル洗浄	0	—	0	0.70
	醋酸ブチル + H ₂ 処理	0	—	0	
	(H ₂ +H ₂ O) 処理 5 分間	0	100	0	
	" 10 分間	0	100	0	
Vac #4	醋酸ブチル洗浄	0	—	0	0.70
	醋酸ブチル + H ₂ 処理	0	—	0	
	(H ₂ +H ₂ O) 処理 5 分間	0	100	0	
	" 10 分間	0	100	0	

4 表 Active, Normal, Passive, ニッケルの溶解速度, 酸化抵抗性

(試料スリーブの大きさ: 1.1φ×1.0φ×27 mm)

種 別	溶 解 速 度 mg/sec・100 cm ²	酸 化 抵 抗 性 %/10 min
Active	1.06 ~ 1.33	2.4 以上
Normal	0.70 ~ 1.06	60 ~ 100
Passive	0.70 以下	100

5 表 酸化程度, 酸化の深さとエミッション

試 料	傍熱型 3 極管エミッション (mA)	生のニッケルスリーブ	
		酸化程度 (%)	酸化の深さ (sec)
試ニ #125	99	0	0
作ケ #128	55	42.5	90
「ケ #99	105	0	0
「ス #85	100	0	0
「ス #90	100	0	0
「マ #109	105	0	0
「リ #127	100	0	0

(同一のメーカの製造ロットの品質変動が予知できた)

6 表 酸化程度, 酸化の深さとエミッション

(スリーブの大きさ: 1.1φ×1.0φ×27 mm)

試 料	傍熱型整流管エミッション (mA)	生のニッケルスリーブ	
		酸化程度 (%)	酸化の深さ (sec)
試チケ #7	230	0	0
作ブル #9	210	52.9	60
「ス #77	220	41.4	40
「リ #78	240	0	0

7 表 酸化程度, 酸化の深さ, 溶解速度

(スリーブの大きさ: 1.27φ×1.17φ×27 mm)

試 料	酸化程度 (%)	酸化の深さ (sec)	溶 解 速 度 mg/sec・100 cm ²
国産 Active #77	37.5	60	1.39
Passive #MP-1	0	0	1.71
当社製純ニッケル Passive スリーブ	0	0	1.24
米国製 #A-30 Superior Tube Co	43.0	60	1.71

影響する基体金属ニッケルの品質検査法を従来の方法で行えばつぎのような欠点がある。

ア. 従来のものの欠点

a. 化学分析では電子放射活性度に最も著しく影響する還元性含有不純物の量は判っても, 無効な既酸化の不純物と実効のある未酸化不純物との含量しか判らず, また時間がかかり費用がかかる。

b. 2 極真空管を試作して標準試料と電子放射を比較したり, 実際の真空管を試作して実用試験をしたりする方法では費用, 時間がかかり, 多角的な電気測定を要し, かつ試験試料と組合せて用いる他の部品の品質およびその品質変動の影響を受け易く, 真空管排気作業に用いる排気台の排気速度により影響される。したがって試験試料を実際に製造用に用いる場合と全く同一部品, 同一設備, 同一作業条件で行う必要があり, したがって真空管製造工場の作業の邪魔になる。

イ. 本方法の優れている点

a. 試料をただ酸溶液に溶解するだけの操作で, その溶解減量と時間との関係曲線を解析することによって含有不純物の量, 酸化の程度, 酸化の深さ, 酸化に対する抵抗性等を知ることができる。これらを数値として相対的に表示することによって試料の電子放射に対する活性度を知ることができる。

b. 試料で実際に真空管を試作してみる必要もなく, 時間, 費用がかからず, 真空管組立に用いる他の部品および真空管製造用排気台等の設備の特性あるいはその変動に影響されず, 試料そのものの特性が判り, 真空管製

造工場の作業も邪魔しない。

c. とくに迅速を必要とする場合は、試料金属を管球用部品としての必要寸法にまで加工しないで 0.5 mm 位の厚板あるいは線のままで測定することができるので、労力の節約になると共に速やかに試料金属の用途変更も行うことができる。

d. 光干渉法、電解法、光電効果、X 線廻析法、電子廻析法等の方法による酸化膜の測定は本方法に比して設備に費用がかかり、操作が難しく、迅速には結果が判明しない。

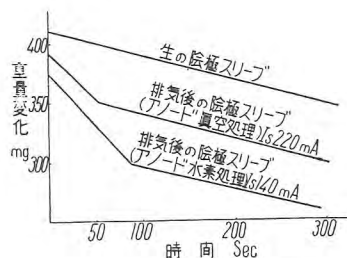
7. その他の応用面

つぎに本方法の他の用途としての応用法をのべる。

a. 金属インゴットを製造するまでの溶融技術、圧延焼鈍技術の巧拙は製品金属中の微量酸化物の存在とその多少により判定できるので、本方法は溶融、圧延、焼鈍作業の品質管理およびその改善の方法とすることができる。

b. 陽極用ニッケル板、鉄板またはそれらのクラッド板あるいは合金板の品質検査法として用いられる。

c. 鉄、ニッケルまたはそれらの合金以外でもたとえばタングステン線のように微量酸化が品質に著しく影響する電極金属について同じ目的にこの試験法を用いるこ



5 図 アノードのガス放出の形勢
(アノード処理条件の
差異によるカソード
スリーブニッケルの
酸化の影響を酸溶解
曲線で示す)

Fig. 5. Effect of anode gas release.

8 表 排気中の管内放出ガス圧の影響

グループ種別	圧 力	酸化程度(%)	酸化の深さ (sec)	エミッション (mA)
GT グループ	低	0	0	60
MT グループ	高(約 4 倍)	62.5	280	20

9 表 封じ作業の影響

(6AR5 MT スリーブ # 24-13)

種 別	酸化程度 (%)	酸化の深さ (sec)
生のスリーブ	0	0
生のカソード	0	0
封じカソード	11.1	500
排気後カソード	35.7	500

(ほとんど封じ作業で酸化していることが判明したので、封じ方法を改善し良好なるエミッションを得た)

10 表 排気台の相異の影響

(6AR5 MT, スリーブ # 24-13)

種 別	酸化程度(%)	酸化の深さ(sec)	排 気 系
生のスリーブ	0	0	—
新排気台で排気後のカソード	9	170	キニポンプ+油蒸気ブースタ+水銀拡散ポンプ
旧排気台で排気後のカソード	9	400	油回転ポンプ+水銀拡散ポンプ

とができ、したがって蛍光放電燈等ガス入り放電管用アルゴンの純度試験、蛍光燈排気作業の適否検討にも応用できる。

d. 電子管電極部品への成形加工、ないしはそれを用いる球の組立、封じ、排気等の各作業条件の良否検討およびその改善の研究の方法として用いることができる。たとえば 5 図、8 表、9 表、10 表のような例がある。

8. 本方法の吟味

酸化汚染層の酸に対する溶解速度は酸化していない深部の溶解速度より大きいことは実験の示すとおりであるが、いま金属の酸に対する溶解機構を今日までの電気化学の知識で反省してみても、この溶解速度観察の意義を考えて見よう。

ア. 酸への金属の溶解機構

一般に金属が酸に溶解するのは M/M イオン // 水素イオン/水素なる電池を生じ、それぞれの電極電位 e_M, e_H によって

$$E = e_M - e_H = e_M^0 - \frac{RT}{n_M F} \ln a_M - \left(e_H^0 - \frac{RT}{n_H F} \ln a_H \right)$$

なる起電力を生じて電流が流れ、この起電力は単極(標準)電位 e^0 の他に濃度または活量 a の大小が影響することになり、その他 e_H に対しては水素過電圧 π_H が含まれ、 $e_M < e_H$ ならば M 金属が溶け水素ガスが発生する。逆に水素より電極電位の大きい金属にあっても、その金属よりも高電位性で水素過電圧の小さい金属を夾雑物として含有していると酸によく溶け腐食する。

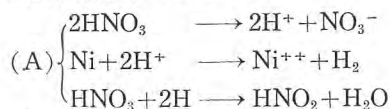
腐食の速度に作用する因子としてこの他に水素が蓄積しないようにする復極剤がある。すなわち酸化ニッケル、酸化性酸 (HNO_3 等)、酸化剤 (MnO_2, H_2O_2 等) が存在する時の水素の圧を P 、存在しない時の圧を P_1 とすると、水素電極電位は $e_H = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P}{P_1}$ で、 $P < P_1$ なる故常圧 ($P_1 = 1$) の水素電極電位よりも小さくなる。したがって $E_M - E_H$ は大となり、流れる電流も大きくなって金属の溶解が速くなる。

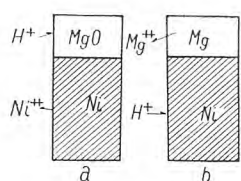
このような復極作用のある酸素の分布が不均一であれば、または復極剤の到達が不均一であれば、酸素の豊富な所は他の部分より復極が容易だから他部に対し高電位性となって局部電池を生じ、他部は低電位性となって溶ける。同様に不均一に酸化皮膜ができるとこの部分は不動態になり、陽極となって他部の腐食を助長する。

イ. 純ニッケルの酸への溶解機構

純ニッケルといっても結晶粒の歪みとか異なる結晶面とかによって、すなわち金相的には不均一組織であって局部電池が形成されるが、それはさておき純ニッケルの硝酸への溶解反応の機構を考えてみる⁽²⁾。

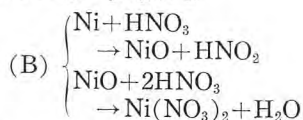
直接溶解機構としての





6 図 局部電池作用
Fig. 6. Local electric cell action.

なる反応にて $\text{Ni} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ni}^{++} + \text{H}_2$ では非常に遅い反応であることが報告されており、これに比べると一旦酸化後溶解する反応は非常に速いことが認められている。すなわち



なる機構の酸化溶解機構の方が速度が大であって、この酸化は空気中より液中に溶解した酸素の吸着によっても行われる。初めから酸化を受けているニッケルを酸に浸漬する場合は当然この機構に従い溶解速度は大である。またわれわれの用いた酸では過酸化水素を加えているため、直接溶解機構によったとしても $2\text{H} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ となって水素ガスの発生は少い。したがって酸溶解進行中試料金属が浮力を受けることは少く、浮力を受けるとすればそれは主としてつぎに述べる局部電池溶解機構による発生水素のためである。

ウ. 微量不純物含有ニッケルの酸への溶解機構

ニッケル中に微量の不純物が含有されている場合の溶解機構と水素ガス発生による試料の浮力増加の関係を考えてみよう。

a. ニッケル中にニッケルよりも高電位性の不純物（たとえば MgO ）を含んでいる場合、6 図(a)のような局部電池を形成して溶解速度が増大し、 MgO の表面で水素ガスの発生が起るが、この場合の局部電池としての陽極部 Ni に比べて陰極部 MgO の面積は非常に小さい（あるいは MgO 表面での水素過電圧が小さい）ので、 $2\text{H} \rightarrow \text{H}_2$ なる水素ガス発生は迅速に起り浮力の増加は大きい。

b. ニッケル中に Ni よりも低電位性不純物（たとえば Mg ）を含んでいる場合は 6 図(b)のような局部電池を形成し、この場合真の溶解速度は純ニッケルよりも低下する筈であるが、局部電池による水素イオンの放電のためイの (B) 機構の溶解を妨げ、(A) 機構の溶解を加重し、純ニッケルよりも水素ガスの発生が大となって浮力が大となる。したがって見かけの溶解速度が純ニッケルよりも大きくなる。

したがって本方法はむしろ水素ガス発生速度を主として比較していることになる。

エ. 酸化の厚さ測定の方法との比較

酸化膜剥離試片を作った電子廻折法、X 線廻折法、化学分析法、電子顕微鏡法、あるいは薄膜の干渉色による光学的方法等の方法は別として、本方法のような酸溶解中の水素発生速度（詳言すれば局部電池の陰陽極逆転のために水素過電圧の急変による水素発生速度）の変化するに至る時間を以て酸化の深さを測る方法に似たものとして、電気化学的に行う Electrometric method がある⁽³⁾。試料金属を適当な電解液中に浸し、これを陰極、

白金を陽極とし、既知の微弱一定電流を流して電解的に還元を終るに要する時間を測定する。還元が進行中はその試料電極の電位は一定であるが、還元が終了すれば電位は突然水素イオン放電位にまで上昇するから、約 10 秒毎に第 3 電極としての探針電極を陰極表面に接して陰極の電位を測定する。それによると

$$\text{酸化膜の厚さ} = \left[\frac{IM \times 10^5}{2\rho A \times 96,500} \right] \text{オングストローム}$$

I ……電流 (mA)

t ……時間 (sec)

M ……酸素 1 g 原子に対応する酸化物のグラム数

ρ ……酸化物の密度 (g/cm^3)

A ……表面積 (cm^2)

しかしこの方法も非常に精密な計器と、熟練とを要するが、われわれの方法は非常に容易簡単であり、ニッケル地金製作条件が一定である限り酸化層の酸腐食機構は同じであろうと考えられ、酸化層の厚さ d 対 t （ただし t は溶解曲線の屈曲点までの時間）と考えて差支えなく、この時間を測ることを以て品質管理の方法とすることができ

完全酸化膜でなく金属と酸化物が混合している程度、あるいは酸素が拡散分布している程度の酸化層の厚さの測定は酸化膜剥離試片を作った電子廻折法等では面倒で誤差が多い⁽⁴⁾が、本方法はそれらをも鋭敏に比較することができ、その精度は吸着膜程度のものも検出可能である。

参 考 文 献

- (1) 中井, 中村 電子放射研究会, 物理学会
- (2) J. A. Electrochem Soc. 99. 22 (1952)
- (3) W. E. Campbell and Thomas U. B. Transaction electrochem Soc. 76 (1939) 303.
- (4) Kubaschewski and Hopkins: Oxidation of metals & Alloys p. 87, p. 112.
- (5) 社内研究報告 第 379 号 昭 27—12
酸溶解によるニッケルスリブ試験法
- (6) " 第 446 号 昭 29—2
酸化物陰極用 Active ニッケル
- (7) " 第 476 号 昭 29—12
"
- (8) " 第 495 号 昭 30—8
酸化物陰極用 Normal ニッケル
- (9) " 第 489 号 昭 30—6
陽極用ニッケル板
- (10) 技術メモ 第 13493 号 昭 30—9
ニッケルクラッド鉄板
- (11) " 第 13036 号 昭 28—3
B 社製酸化物陰極用ニッケル
- (12) 試験依頼報告 研タ—9450 昭 30—7
サイラトロン陰極用ニッケル
- (13) 技術メモ 第 13035 号 昭 28—3
蛍光燈用タンゲステンフィラメント

シュランクガラス

研究所 立原芳彦*・林次郎**

Shrunk Glass

Engineering Laboratory Yoshihiko TACHIARA • Jiro HAYASHI

With a trade name of "Vycor" shrunk glass is being sold on the market in America.

Its similar characteristics to quartz glass, and yet inexpensive prices make it applicable as a substitute of the latter. This is made from boro-silicate glass, easy to melt and form, by melting out alkali and boric acid. It is characterized by its similarity to the quartz glass in thermal expansion coefficient, softening point and ultraviolet ray transmittivity. Mitsubishi has been successful in producing this glass and is using as a substitute of the quartz products in the electronic industry. The glass is also appreciated by chemical researchers of its excellent quality.

1. ま え が き

このガラスは、"Vycor" という商品名で米国で売り出されており、その特性が石英ガラスに類似し、しかも、価格が低廉であるという点から、石英ガラスの代替品として、盛に使用されているのであるが、当社においても、水銀燈製作のための石英ガラスの代替品として、このガラスの研究に着手した。

このガラスは、まだわが国においては充分研究が進んでいないために、製造上のあらゆる点で、最も適当な点をみつけ出すのに研究は非常な困難をきわめた。

これは、溶融、成型ともに容易な特定の組成範囲の硼珪酸ガラスを、500~600°C で数日間熱処理した後、塩酸、または、硫酸にて 90~100°C で酸処理する。この時、硼珪酸ガラス中のアルカリ分、硼酸分が溶出し、ほとんど SiO_2 のみとなり、最後にさらに 900~1,000°C で熱処理すると、透明な石英類似の Shrunk ガラスが出来上る。なお、最後の熱処理の際、ガラスは若干収縮するので、Shrunk ガラスといわれているのである。特性として、熱膨脹係数、軟化温度等も、石英ガラスとほとんど変わらないので、溶接等、加工上全く支障をきたさない。また、酸処理の際、鉄等の不純物も完全に溶出されるので、石英ガラスと同様に紫外線透過率もよい。

つぎに、このガラスについて概略説明する。

2. ガラスの組成ならびに溶融

ガラスの酸化物組成は、 SiO_2 、 B_2O_3 、 Na_2O からなる3成分系であるが、それぞれの重量比率はある特定の範囲に限られる。

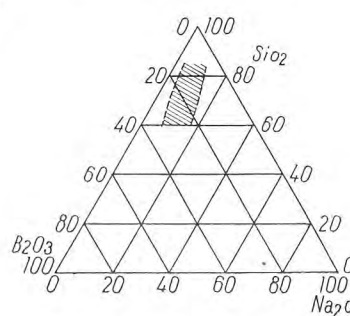
1 図に示した陰影部分が概略の組成範囲であるが、実際には、極く小部分しか目的のガラスとして得られない。この組成範囲のガラスを溶融するために、珪石粉、硼酸、硼砂、硝酸ソーダ、ソーダ灰等の原料を使用する。各原料は充分に攪拌せられ、一様なガラスの

網目構造を形成するように、適当な温度と時間で充分溶融せねばならない。このことは、すべてのガラスについての根本概念であるが、このガラスについては、とくに注意せねばならない。一様な網目構造が形成されない場合、後述する熱処理の際、2 相への分離が完全に行われず、したがって、アルカリ分、硼酸分を溶出させる酸処理過程において、溶出が均一に行われないので、ガラスが破れる原因となる。ガラスの均一な溶融は、槽窯の場合は割合にうまく行くが、ネコ埵埵による場合は、ガラス素地の攪拌等に頼らねばならぬが、このガラスは粘度が大きくて簡単に攪拌ができず、大変困難な問題である。

3. ガラスの2相への分離

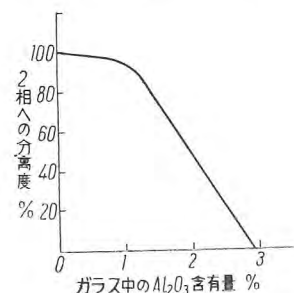
熱処理により、ガラスは珪酸にとむ部分と、硼酸分とアルカリ分にとむ部分の2相へ分離され、続いて行われる酸処理の際、硼酸分とアルカリ分とが溶出し易くなる。

ガラス成分中の Al_2O_3 の含有量が多くなるにしたがい、ガラスは2相へ分離し難くなるので、成分中に Al_2O_3 を添加することはもちろん、原料中にも不純物として Al_2O_3 の存在することは許されない。2 図は、 Al_2O_3 含有量と2相への分離度(2相への理想的分離状態を100とする)



1 図 $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系ガラス組成における2相への分離範囲

Fig. 1. The range of the separation into two phases in the glass of the system of $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.



2 図 Al_2O_3 含有量と2相への分離率との関係

Fig. 2. Relationship between the separation rate and two phases and Al_2O_3 content in the glass.

との関係を示している。

これからわかるように、 Al_2O_3 含有量が約1%まではほとんど影響をおよぼさないが、1%をこえるにしたがい急速に2相への分離状態が悪くなり、したがって易溶部分の溶出が行われない。

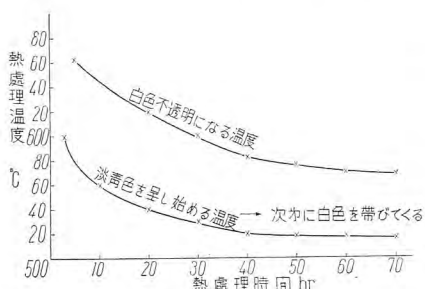
熱処理温度は500~600°Cであり、適当な温度で処理された場合、ガラスは淡青色を呈するようになる。温度が高すぎた場合は、珪酸にとむ部分は次第にクリスバライトの結晶となり、失透をおこすために、ガラスは白色不透明となり、酸処理の際ガラスが破れる原因となる。また、低すぎた場合は、当然2相への分離が完全に行われず、酸処理の際易溶部分が十分に溶出しない。3図は、1図の陰影部分の中、概して上方部分のものの、2相への分離温度と時間との関係を示している。また、4図は1図の陰影部分の中概して下方部分のものの、2相への分離温度と時間との関係を示している。

いずれの場合においても、2つの曲線間の温度と時間がほぼ適当であるが、3図の方が分離可能な範囲が広いことから考えても、ガラスの組成としては、1図の陰影部分の中、上方部分をとる方が熱処理の結果が良好である。なお、この時のガラス各部における温度差はごく僅かしか許されず、許容以上の温度差がある場合は、各部における分離過程が同一でないので、酸処理の時の溶出過程も違い、ガラスがわれる原因となる。このために、熱処理用の炉の温度分布が非常に問題であり、温度分布のよい炉の設計ということがこのガラス製造上の重要課題である。

なお、熱処理されたガラスは、歪が残らないように徐冷されなければならない。

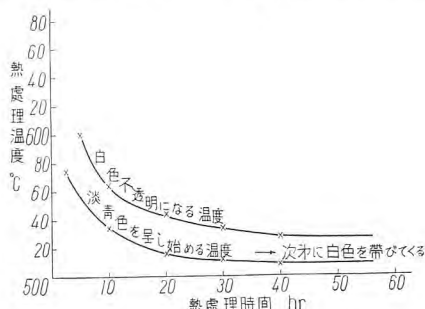
4. 易溶部分の溶出

熱処理の終わったガラスは、硼酸分とアルカリ分とを溶出させるために酸処理をする。この時に、上述したガラスの溶融、また熱処理がうまく行われていないと、溶出過程がガラスの各部に亘って一様に行われないので、よ



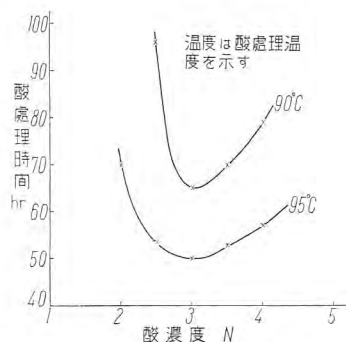
3 図 1 図の陰影部分の中、上方部分の組成における熱処理時間と熱処理温度との関係

Fig. 3. Relationship between the temperature of the heat treatment and its time in the composition of the shadowed part of Fig. 1.

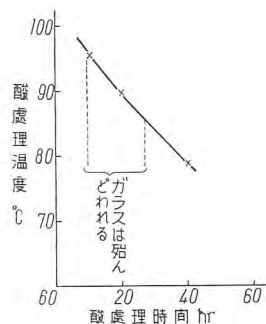


4 図 1 図の陰影部分の中、下方部分組成における熱処理時間と熱処理温度との関係

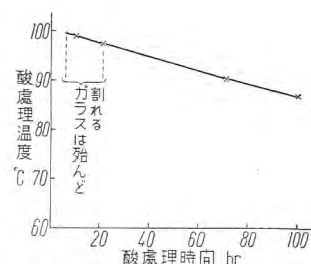
Fig. 4. Relationship between the temperature of the heat treatment and its time in the composition at the shadowed part of Fig. 1.



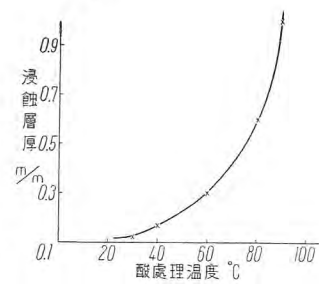
5 図 酸濃度と酸処理時間との関係
Fig. 5. Relationship between the acid concentration and the time of acid treatment.



7 図 1 図の陰影部分の中、下方部分の組成における酸処理時間と酸処理温度との関係
Fig. 7. Relationship between the time of acid treatment and its temperature in the composition at the shadowed part of Fig. 1.



6 図 1 図の陰影部分の中、上方部分の組成における酸処理時間と酸処理温度との関係
Fig. 6. Relationship between the time of acid treatment and its temperature in the composition at the shadowed part of Fig. 1.



8 図 1 図の陰影部分の中上方部分の組成における酸処理温度と侵食層厚との関係
Fig. 8. Relationship between the temperature of acid treatment and the thickness of erosion in the composition at the shadowed part of Fig. 1.

く溶出される部分と、されない部分との間で、応力の均衡が崩れてガラスは破れる。

酸は3Nの塩酸が適当であり、温度は常温よりやや高い所から溶出が行われ、高温になる程浸透速度は速い、がガラスのわれる率が多いので、低温で長時間処理を行う方が良好な結果が得られる。

5図は、ガラス厚1mmを完全に溶出させる酸濃度と時間との関係を示している。

これからわかるように、3Nの塩酸が酸処理時間が最も短い。しかも、酸処理温度が低くなる程、酸処理時間に対する酸濃度の影響が大きくなっている。

6図は、ガラス厚1mmを完全に溶出させる酸濃度と処理時間の関係を示している。ガラスの組成は、1図の陰影部分の中概して上方部分のものである。また7図は、1図の陰影部分の中概して下方部分の組成のもの、温度と時間の関係を示している。

また8図は、1図の陰影部分の中上方部分の組成のものを使用し、酸濃度は3N、酸処理時間は90時間の時の、酸処理温度と侵食層厚との関係を示している。

6図、7図を比較して判るように、下方部分の組成のものは溶出が非常に速かであるが、ガラスがほとんど破れるので、実際には上方部分の組成のものの方が良好な結果が得られる。

なお、この酸処理のための容器として、3Nの塩酸で90°C位の温度に耐え得られるものとしては、加工性のよい金属はほとんどすべてが侵食されるので、現在では硬質ガラスか、あるいは弗素樹脂位しか考えられない。またこの処理でも温度分布が均一であることが必要である。

この酸処理の結果、ガラスは硼酸分とアルカリ分の低

1表 再ガラス化のための熱処理温度と時間との関係

温度 (°C)	時間 (hr)	状態
800	0.5	白色不透明
900	0.5	半透明
950	0.5	より半透明
1,000	0.5	透明(やや軟化す)
"	1	"

2表 各種ガラスの特性

	当社製 Shrunk ガラス	コーニング社 "Vycor"	石英ガラス	硬質ガラス
線膨張係数 $\times 10^{-7}$	8.5~9.5	8~9	5~6	50~60
軟化温度 (°C)	1,150~1,250	1,200~1,300	1,400~1,600	600~700
組成	SiO ₂ 93.5 B ₂ O ₃ 5.8	SiO ₂ 94.5 B ₂ O ₃ 5.0	SiO ₂ 99.8 B ₂ O ₃ 5.0	SiO ₂ 71.5 R ₂ O ₃ 3.0 B ₂ O ₃ 17.0 Na ₂ O 5.5 K ₂ O 3.0
(分析値を重量 比率で示す)	Na ₂ O 0.7	Na ₂ O 0.5	Na ₂ O 0.2	

か、鉄等の酸に可溶な不純物も完全に溶出し、ほとんどSiO₂のみの多孔質なものとなる。

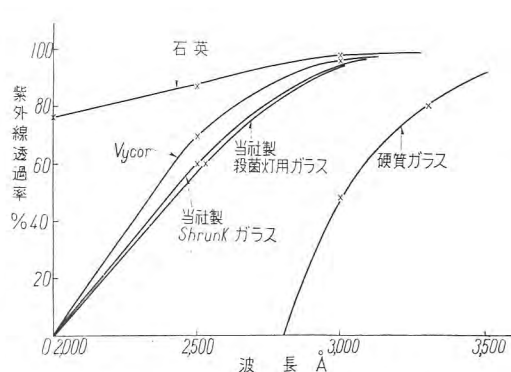
つぎに、この多孔質なガラスの中に充満している酸液を蒸留水で置換するために水洗するが、できれば塩化物の状態となっている金属塩の溶出を一層速くするために、温水を使用の方がよい。

5. 再ガラス化のための熱処理

水洗の終わったガラスを十分に乾燥し、900~1,000°Cで加熱することにより、多孔質で白色不透明な状態のものが再びガラス化し、透明なものが得られる。

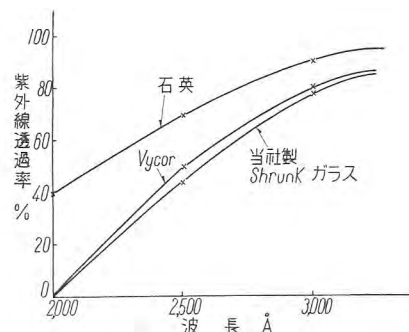
1表は、再ガラス化のための熱処理温度と時間との関係を示している。

なお、熱処理される前のガラスは、非常に熱的衝撃に弱いので、200°C位までは徐々に温度を上げなければならない。



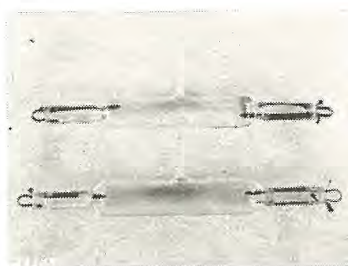
9図 各種ガラスの紫外線透過率

Fig. 9. Ultraviolet ray transmissivity of the various kinds of the glass.



10図 各種ガラスのソーラリゼーション

Fig. 10. Solarization of the various kinds of the glass.



11図 シュランクガラス使用の水銀燈

Fig. 11. Mercury lamp using shrunk glass.

い、また、水分、その他のガスを十分に放出させつつ温度を上昇させなければ、これらのガスがガラス中に残り、酸水素焰で細工する場合に発泡して細工がし難い。この熱処理の結果、ガラスは、もとの寸法の約15%収縮して再び透明なものとなる。

6. 特性

2表に、その特性の一部を、他のガラスと比較して示した。

これからわかるように、石英ガラスとほとんど変わらないが、いくらかいわゆる“やわらかい”ガラスである。

9図はこのガラスの紫外線透過率を、他のガラスと比較して示した。

10図は、紫外線照射による紫外線透過率の減衰を示す。紫外線源は500W高圧水銀燈、照射距離10cm、照射時間は100時間である。

9図と比較して判るように、いずれのガラスも、いくらか、紫外線透過率が減衰している。

7. むすび

以上、いろいろな角度から研究を進め、最近、その製造に成功し、当社では電子管工業における石英ガラスの代替品として、一部使用し始めた。既述したごとく、その特性が、石英ガラスに類似しており、しかも、価格が低廉であるので、電子管工業のみならず、石英製のピーカ、坩堝を使用する分野等、あらゆる分野において、石英に代るべき製品として、使用し得るであろう。

最後に、この研究に当り、いろいろと、ご援助をいただいた諸氏に、深く感謝する次第である。

最近における応力測定とその応用

研究所 前田祐雄*・水野茂*・穂原智*

The Latest Practice in Stress Analysis and Its Application

Engineering Laboratory Sachio MAEDA・Shigeru MIZUNO・Satoru HAGIWARA

In line with the recent trend of designing machines with high speed, great capacity and light weight, a number of problems annoying engineers are being overcome one after another. Studies on the analysis of stress in the machines under operation with a photoelastic method have been kept on since 1900. As a result a resistance strain gauge method and brittle coating method have been devised extensively with success and are finding their application to the betterment of machine design.

1. ま え が き

最近の機械の傾向は高速度化、大容量化、軽量化がとくに著しい。したがって重量の軽減、効率の上昇、材料の節約等の面で必要かつ充分な部品の設計を要求されるようになってきた。一方材料の進歩と共に金属材料の破壊機構の研究が著しい発達をみた現在、多くの機械が安全に充分な長年月の運転に耐え得るか否かはその機械が運転中にうける応力の状態を正確に知ることによって可能となる。力学、材料力学、弾性理論等はこれらの要求と相まって発達した。しかし設計者は複雑な形状の応力状態、あるいは形状が簡単であっても加っている外力の算定がむずかしいような場合にたえず遭遇する。このような場合に応力の状態を実験的に求め、理論的考察を行って、実際に適用できる理論方式を求めることによって確実な設計を行うことができる。応力測定方法も理論の発達と相まって種々な方法が考案され、実用されるようになってきた。応力測定に古くから行われているものは偏光を用いた光弾性試験である。第2次大戦中発達をみたものに応力塗料と抵抗線歪計による応力測定法があり、戦後にわが国でも広く利用されるようになった。以下これら3種の応力測定法について行った例についてのべる。

2. 光 弾 性 試 験

光弾性試験は透明な材料、たとえばガラス、プラスチックが力をうけると内部に生じた応力のために単光軸結晶体のような光学的性質を示し、これを偏光の場の中におき光の干渉縞より2次元応力状態を知る方法である。使用される材料はフェノールレジン、フォステライトレジン、エポキシレジン、マーコレジン等で、これらの

材料で応力状態を求めようとする形状の模型を作り、外力を加えて円偏光の場の中におくと1図のような明暗の縞模様を生じる。これを等色線 (isochromatic lines) とよび剪断力の等しい点を結んだ線である。縞の次数をしらべることによって剪断力の大きさが求まる。自由境界端では垂直応力が零となり、剪断力の大きさより直に最大主応力を知ることができる。多くの最大応力点は境界端面に生ずるためにこの縞模様だけでも最大応力の判定に十分に役立つ。つぎに平面偏光の場の中で模型をみると上述の等色線と別の暗色がみられる。これは主応力の方向が偏光軸と一致した点を結んだ線である。偏光軸を回転させるとこの線も移動してゆく。これを等傾線 (isoclinic lines) とよぶ。等傾線が求まれば幾何学的作図で主応力線 (isostatic lines) を求めることができる。このように剪断力の分布と主応力の方向が解析できるが、完全な応力解析を行うには主応力を求めることが必要である。そのために前者と弾性理論の基礎方程式の助けをかりて、数学的操作により自由境界面より順次応力を求めてゆくことができる。また平面問題であるから厚みの変化を精密に測定できる場合は2主応力の和が簡単に求まり、代数的演算により各主応力を求めることができる。光弾性材料として初めガラスが用いられたが、フェノー



1 図 タービン発電機ロータ軸の遠心力による光弾性写真

Fig. 1. Fringe photograph of centrifugal stress in model disk of turbo-generator rotor shaft.

* 材料研究室

ルレジンが使用されるようになり光弾性感度も高く模型製作も容易なので著しく進歩した。さらに凍結法がみいだされた。これはフェノールレジンに120°Cの温度で荷重を加えてそのまま室温まで徐冷すると光弾性の縞模様がそのまま凍結され常温で荷重を除いても、あるいはこれを切断しても、これらの縞模様に変化しないので応力状態を凍結できる。この方法を利用すると遠心力のように回転によって生ずる応力状態を凍結させて、回転を停止させて光弾性試験を行うことができる。また3次元応力の状態を適当な2次元の組立てと考えて光弾性試験を行える。

このような凍結法を行えるプラスチックが最近つぎつぎとでき、フォステライトレジン、マーコレジン、エポキシレジン等がこれである。これらが従来のフェノールレジンの欠点を補い、大型模型の製造が可能になって3次元の光弾性試験が試みられるようになった。

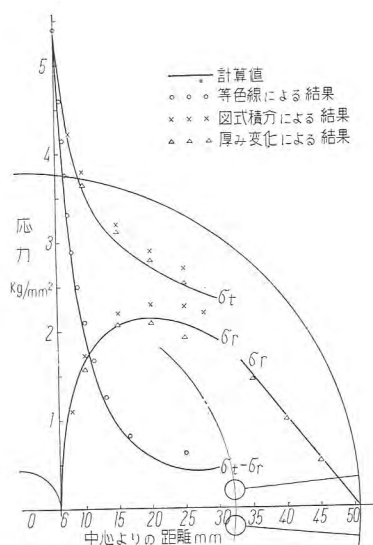
1図は長崎製作所において破壊試験を行ったタービン発電機ロータ軸の模型の凍結法による遠心力の光弾性写真である。これは実物の約1/8.3厚さ約5.6mmのエポキシレジンで作り、ロータ軸ではスロットに導体を入れてあるが模型では細い溝を入れて切線方向応力を切り、歯の最小断面の応力はほぼ実物と比例するようにした。スロット底の半円弧切欠は実物と同じ寸法比になっており応力集中を一致させるようにしてある。

この模型を120°C恒温槽中にて3,540rpmで回転させ、徐冷して凍結した時の遠心力の縞模様である。磁極の中心にある黒点が剪断力零の点であり、それから1, 2, 3……と縞次数が増加し、中心穴で13となっている。中心穴半径の約3倍まではほぼ同心円の縞模様となっている。ターボロータ軸の遠心力による応力分布はスロット底を結ぶ円で円板を2つに分け、外部の遠心力は中心の円板の周縁に外向に働く引張力と考えて求め2図に実線で示した。光弾性試験により求めた結果を点で示してあるが、中心穴の近くでは理論値とよく一致している。

3. 応力塗料

応力測定を模型によらず実際の構造物について行いたいという希望がかなり古くからあった。その一方法として松やに、石灰等を塗った面が歪によってきれつを生じたり、剥離するのを利用して歪を求めようとしたのが応力塗料の始りである。第2次大戦中通常の塗料のようにスプレーで吹きつけ乾燥させ、歪を与えると、きれつを生じる塗料が研究され戦後国内でも実用化された。

この塗料は測定しようとする構造物にスプレーで塗り約60°Cで数時間乾燥すると、必要な塗膜面が得られる。乾燥条件や塗装条件で異なるがこの構造物に一定の荷重を加えると



2図 タービン発電機ロータ軸模型円板の応力分布

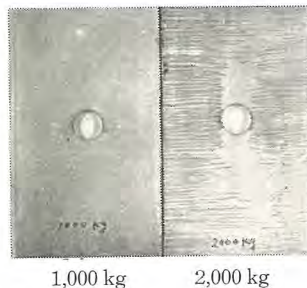
Fig. 2. Stress distribution in model disk of turbo-generator rotor shaft.

ものである。荷重2,000kgの場合はほぼ一様にきれつが発生しているが、このときの歪は0.08%である。

4図はプラスチック製の扇風機羽根である。この羽根が回転するとき、羽根に生ずる応力を応力塗料でしらべたものである。羽根の形状が単純なものではなく、回転中に荷重として考えられるものは遠心力と風圧で、その分布状態も複雑であるが、塗料により羽根の根元の部分に最大応力が生じ、主応力の方向も同時に知ることができた。さらにこの結果を抵抗線歪計により確めた。

4. 抵抗線歪計

抵抗線歪計は、太さ1ミル程度のたとえばコンスタンタン線を格子状やコイル状に紙または絶縁板にはりつけたものである。これを測定しようとする部分に適当な接着剤ではりつけ、応力をかけるとそれに比例した歪の変化が生じ、線の抵抗値が変化することを利用したものである。現在用いている歪計は通常120Ω程度のもので、歪についての測定の精度は 5×10^{-6} 程度、最大(5,000 ~ 10,000) $\times 10^{-6}$ 程度まで測定できる。



3図 円穴をもつ帯鋼板の応力塗料による試験

Fig. 3. Strain figure in steel plate by brittle coating.



4図 扇風機プラスチック羽根の応力塗料による試験

Fig. 4. Strain figure in plastic blade of fan by brittle coating.

ア. 60,000kW 級水素冷却タービン発電機固定子枠の 応力測定

5 図は水素冷却タービン発電機固定子枠の水圧試験の際抵抗線歪計を約 150 点はりつけて行った応力測定の一例である。固定子枠は 6 図のように円筒と鏡板とタイパで構成された圧力容器であって、タイパが偏心して取付けられているため計算がむずかしくなるが、若干の仮定を用いると円筒殻の理論で近似計算を行うことができる。構造上応力の最大となるところは円筒と鏡板との接合部で、タイパの位置から遠いところにある。水圧試験のためタイパは圧力水中に入るので、抵抗線歪計をアルライト No. 101 でシールし、リード線はビニール絶縁ケーブルを用い、容器の貫通部には特殊なプラグを用いて、水圧中の歪を測定した。測定結果はタイパについては計算値とよく一致している。

接合部応力は理論値の約 2 倍になっており、検討した結果では鏡板の剛性がメクラ板や補強板のためにかなり大きくなり計算値の約 2 倍と見られることがわかったので、この補正を行えば測定値とよく一致する。この試験はほぼ同じ大きさの 2 種の固定子枠について同様の結果を得ている。

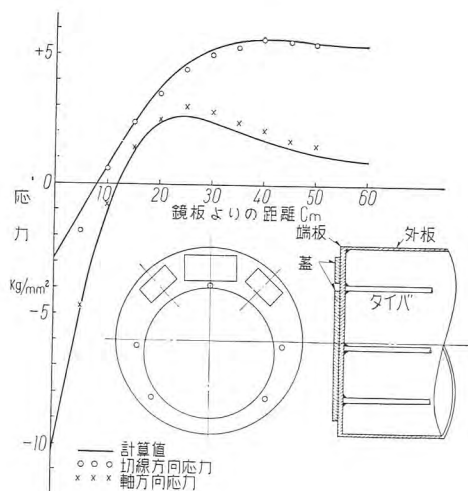
イ. タービン発電機回転子軸破壊試験における弾塑性 変形の測定

長崎製作所においてタービン発電機回転子軸材の回転

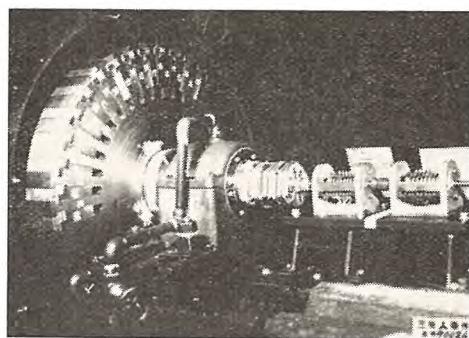


5 図 水素冷却タービン発電機固定子枠の抵抗線歪計はりつけ状況

Fig. 5. Resistance strain gages on stator frame of hydrogen cooled generator.



6 図 固定子枠の外板応力分布
Fig. 6. Stress distribution of stator frame.



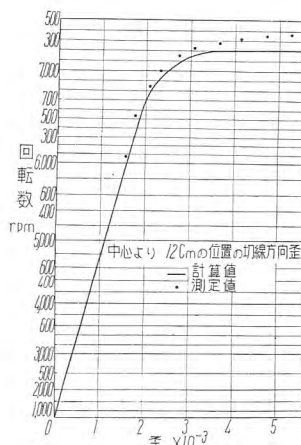
7 図 タービン発電機ロータ軸破壊試験円板の抵抗線歪計

Fig. 7. Resistance strain gages and slip rings at bursting test of turbo-generator disk.

破壊試験を行っている。この試験に使用されている円板は直径 845φ、厚さ 100mm、重量約 500kg の実物大の円板で、遠心力の荷重状態は実物の回転子軸と同じである。この円板が回転の上昇につれて、どのような応力を受け変形して行くかを抵抗線歪計を用いて破壊の瞬間まで測定することができた。7 図は回転円板にはりつけられた抵抗線歪計およびその配線を引き出すスリップリングを示している。抵抗線歪計はアクティブゲージを 1 個測定点にはりつけ、リード線はすべて軸の内部を通して、軸端にはりつけたダミーゲージとともにブリッジに結合され、軸端のスリップリングを通じて外部に引出される。この方法で円板の回転数が約 7,800 rpm の破壊回転数に達するまで測定することができた。測定点は円板の中心穴、その付近および歯の最弱断面の部分等である。測定結果は 8 図に示してあるが、このように 7,200 rpm までは円板として無制限塑性流れを生じないことがよくわかった。

円板の応力分布の理論計算は光弾性実験によっても、実験値とよく一致することは前記のとおりであるが、抵抗線歪計を用いた測定結果も弾性変形内では理論計算とよく一致している。

円板材料の降伏点は中心部で約 42kg/mm²、スロット底で 50 kg/mm² となり、断面の平均値は 45kg/mm² で、円板の平均応力がこの値になるのは約 6,700 rpm であり、無制限塑性流れは 7,200 rpm で生じている。これは降伏が剪断歪エネルギー説によって起ると考えるとよく一致する。またこのように材料の強さが穴の中心と外部で異なるときにはその断面の平均値を考えれば上述の降伏理論で説明のつくことがわかった。9 図は 7,220 rpm で歯が飛んで駆動軸を折って転り出した円板である。この円板は全域が塑性変形を起していると見られるので、抵抗線歪計をポール方向とそれと直角の方向の位置に各点にそれぞれ半径方向ならびに切線方向に 50 箇



8 図 回転円板の回転上昇に伴う歪の変化
Fig. 8. Revolution-strain curve of rotor disk at bursting test.

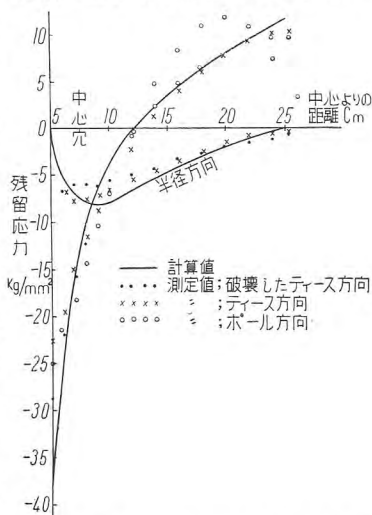
所計 100 個はりつけ、図の黒線のように切断して残留応力を測定した。10 図はその測定結果で、7,200 rpm で全域が降伏したと考えて、剪断応力説によって計算するとよく一致している。

ウ. 水車発電機の無拘束試験における応力測定

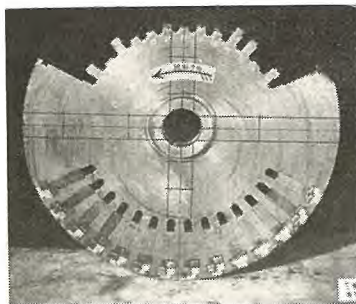
30,000kW 傘型水車発電機の無拘束試験の際各所の応力がどう変化するかを測定した。11 図は水車発電機のリムに抵抗線歪計をはりつけ配線した状態を示している。この級の発電機回転子のリムは薄鋼板を扇形片に打抜いたものを成層し、上下両端には厚鋼板を用い、締付ボルトにて一体としたものであって、リムと鋳鋼のスポークを焼ばめで組立ててあり、リムは単体の材料と同じ剛性を有するものとして設計がなされている。無拘束速度では遠心力による応力が大きく、焼ばめがはずれることになる。12 図は実測値と計算値が回転数の上昇によっていかに変化するかを示している。リムの外縁のスポークの線上 (1) の点について見ると、焼ばめにより引張りを受けており、それが 280 rpm の焼ばめがはずれる時から応力が急に増加することがわかる。リム内縁のスポークの近くの点 (2) について見ると、焼ばめの応力が零に近いので応力がほぼ直線的に増大して折れ目が明らかでない。このような構造の発電機では簡略した仮定による計算がよく測定と一致することが認められた。

エ. 炭鉱用巻上機の巻胴に生ずる応力の測定

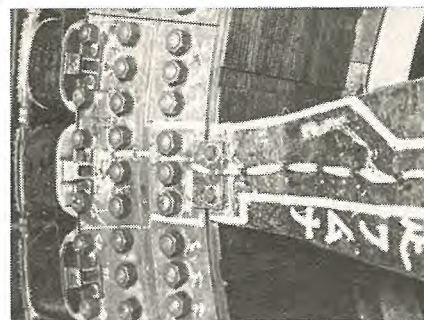
炭鉱用巻上機は張力をもった鋼索を巻胴に巻き込んで行くもので、鋼索を幾段にも巻き込むとき巻胴にどのような応力が生じているかを測定した。13 図は巻上機の外観、14 図は巻胴の内面にはりつけた抵抗線歪計とその配線の状況を示している。巻胴に生ずる応力は鋼索の張力と巻胴の寸法から、巻胴に働く平均外圧に換算して、巻込み段数に応じて実験による一定の係数をかける方法が古くから用いられていたが、この計算方法では説明のできない結果があらわれている。15



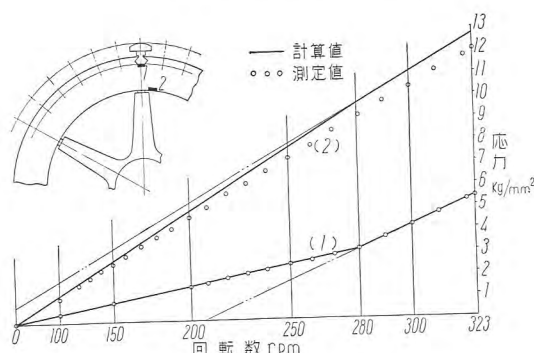
10 図 破壊した回転円板の残留応力分布図
Fig. 10. Residual stress in burst rotor disk.



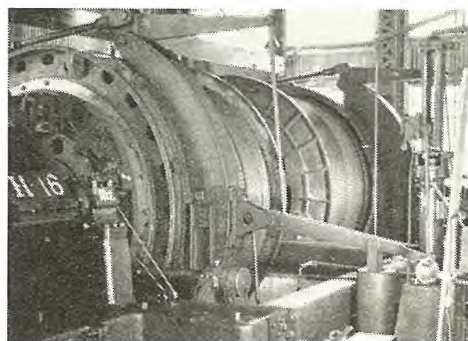
9 図 破壊した回転円板
Fig. 9. Burst rotor disk.



11 図 30,000kW 水車発電機の抵抗線歪計
Fig. 11. Resistance strain gages on 30,000 kW water turbine generator at runaway speed test.



12 図 水車発電機の無拘束試験における回転数と応力
Fig. 12. Revolution-stress curve of water turbine generator at runaway speed test.



13 図 炭鉱用巻上機
Fig. 13. Mine winder.

毎に、巻胴の応力が切線方向と軸方向に増加するが、その増加割合は切線方向では徐々に減少していく。従来の計算式では、5 段以上では増加は全くないことになっているが、これはあてはまらないことが推定される。上述の測定値から張力と巻胴応力の一般関係式はただちに導きにくいので、巻上機のモデルを製作してさらに正確な工場実験を行い、この関係を解明しようと長崎製作所で準備中である。

オ. パラボラアンテナの応力測定

4,000Mc パラボラアンテナは風速 60m/sec の風雨がいずれの方向からきても充分安全であることが要求されている。試験としては風圧に相当する荷重を土嚢による静荷重におきかえて、風の方向を考慮してアンテナを傾斜させ、角度に応じて荷重を加減し、反射鏡および支持

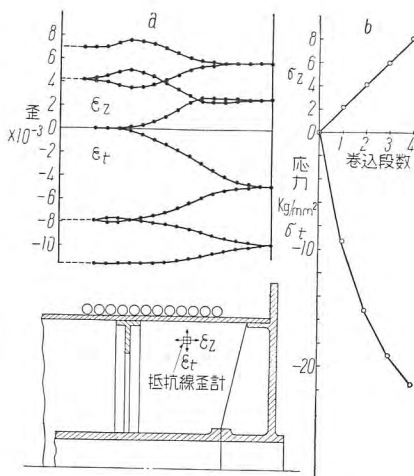


14 図 巻上機巻胴内面の抵抗線歪計

Fig. 14. Resistance strain gages on winder drum.

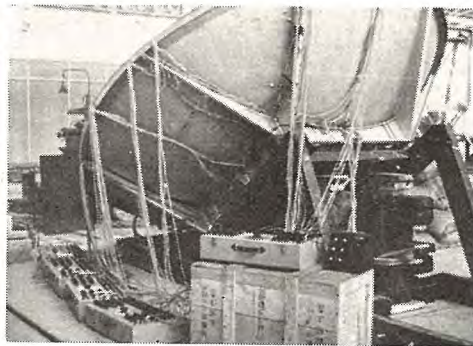
杵の各所に抵抗線歪計をはりつけて応力を測定した。16 図はその状況を示したものである。測定の結果について見ると、反射鏡の最大引張応力は 1 kg/mm^2 で、土嚢による荷重の不平均のためとくに大きくでていると考えられるが、純アルミの引張強さ $8 \sim 10 \text{ kg/mm}^2$

mm^2 に比較して安全係数は $8 \sim 10$ となり充分安全である。支持杵においては 40° 傾斜の場合最大応力は支持ボルトを取付ける梁に生じ、最大引張応力は 14.8 kg/mm^2 、最大圧縮応力は 12.2 kg/mm^2 を示していた。この構造は立体的のものであるが、簡単に梁に曲げおよび捩りがかかるとして計算すると、最大応力は 16.8 kg/mm^2 となり、



15 図 巻上機巻胴の巻数と応力

Fig. 15. Wire-turns-stress curve on winder drum.



16 図 5,000Mc パラボラアンテナの応力測定

Fig. 16. Resistance strain gages on 5,000 Mc parabola antenna.

ほぼ一致し、一般構造用圧延鋼板を使用しているので、その抗張力 $41 \sim 50 \text{ kg/mm}^2$ に比較して安全係数は 3 となりなお充分安全である。

5. むすび

以上 3 種の応力測定法についてのべたが、結論としてどの測定法もおのおの一長一短があるので、

使用に当ってはその特長を生かし、場合によってはおのおの測定法を併用して目的を達成するよう選択しなければならない。精密な応力集中係数を求めたり、あるいは弾性論による計算式との適合状態をくわしく知りたいような場合は、モデルを用いた光弾性実験がよく、最大主応力の位置ならびに主応力線をさぐりたいときには応力塗料が便利である。実物の機械や構造物については抵抗線歪計による測定が便利であり、とくにこれを数多く用いると応力分布状態を知ることでもでき、弾性論による計算式の検討もできる。

以上最近の応力測定法について測定の実例をもとにして、その特長について述べたが、今後設計者諸兄の研究改良の手段としてこの方法を大いに活用されることを希望してやまない。

参 考 文 献

- (1) 凍結法による回転円板の応力分布の測定 日本機械学会 第 30 期定期総会講演 4. 1953 萩原
- (2) Experimental stress analysis in pressure vessel. 第 4 回 応用力学会講演会論文集 3. 1955 前田・萩原
- (3) タービン発電機回転子輪材高速破壊試験 電気学会誌 8, 1955 井上・進藤・今北

正面切削法による超硬バイトの寿命試験

研究所 齋 藤 長 男*

Life Test of Sintered Carbide Tools by the End-surface Cutting Method

Engineering Laboratory Nagao SAITO

The end-surface cutting method, in spite of its long standing as the simplest and most economical way of the life test of single point tools, has not been extensively used on account of some doubts on its reliability. After a careful analysis and meticulous study, however, troubles unusual wear at a low cutting speed and excessive wear of the tool have been found attributable to the poor accuracy of the method adopted. To overcome this handicap, repeat cutting of the surface of a thin cylindrical shell has been suggested, the results being quite successful with a marked coincidence with those available by the longitudinal surface cutting method.

1. ま え が き

正面切削はバイトの試験法として、時間の上からも、材料節約の上からも経済的であるが、その信頼性や、とくに定量的な取扱いによる寿命時間の算定には、従来から多くの疑問が持たれている。しかしながら、超硬質合金工具が近時飛躍的に改良され、内外の工具共、高速度鋼工具に比し数倍ないし十数倍の耐磨耗性能を発揮するものが多くなった現在では、超硬バイトの工場における購入受入試験などを長手切削で行うことはきわめて不経済であり、正面切削をもう1度省みて、その欠点を改良して精度を上げ、長手切削の代用としたいと考える。

正面切削法は本来切削速度が連続的に変化する範囲を切削して、ある一定切削速度におけるバイト磨耗を推定しようとするものであるから、正面切削の切削速度変化範囲では、磨耗が連続的に変化するという仮定に立脚している。したがってバイト磨耗はそのような仮定が置けるかどうかということから出発しなければならない。そのためまず長手切削法による場合、バイト磨耗がいかに進み、また、異った切削速度では、いかなる相異があるかということを確認することから始める。

2. 長手切削によるバイト磨耗

ア. 正常な磨耗

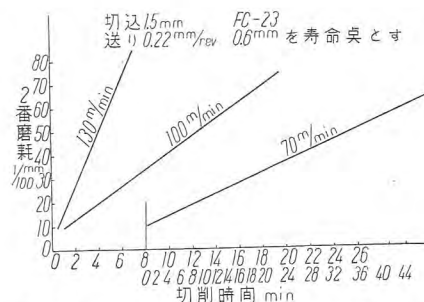
バイト刃先の2番磨耗を切削時間と共に測定することは古くは Lyensetter⁽¹⁾ により

行われている。最近米国で⁽²⁾⁽³⁾ 放射性物質を加えたバイトによる磨耗実験が行われ、2番磨耗の切削時間に対する直線性が確かめられて以来、2番磨耗を切削時間に対して求める方法は広く行われるようになった。1図に示すのは三菱金属鋳業株式会社大井工場による長手切削実験結果である。この結果はつぎの条件によるものである。

切削速度範囲	S系	200 m/min~270 m/min
	G系	70 m/min~130 m/min
バイト型式	1-3型	0.5 mm の nose radius
切込	G. 1.5 mm	送り G. 0.22 mm/rev
	S. 1 mm	S. 0.11 mm/rev

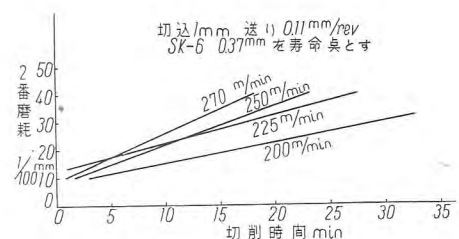
この結果を2番磨耗のある一定値について整理すると、2図のように対数方眼紙で直線となる。3図は、C₀に放射性物質を加えたバイトを用いた磨耗集積放射能と2番磨耗との関係を示す米国資料の転載である。以上の結果から判ることは、この程度の切削速度と切削時間の範囲ではバイト2番磨耗は切削時間に比例するから、

$$w/t = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (a)$$



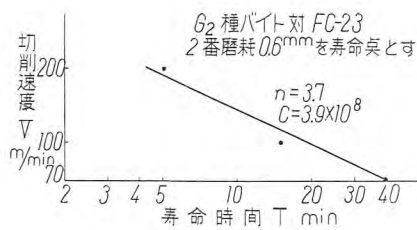
1図 (a) G₂ バイト 2 番磨耗切削時間曲線 長手切削 (三菱金属鋳業)

Fig. 1-(a). Relation between wear on flank and total cutting time for G₂ grade.



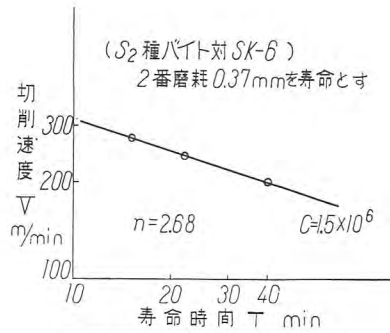
1図 (b) S₂ バイト 2 番磨耗切削時間曲線 長手切削 (三菱金属鋳業)

Fig. 1-(b). Relation between wear on flank and total cutting time for S₂ grade.



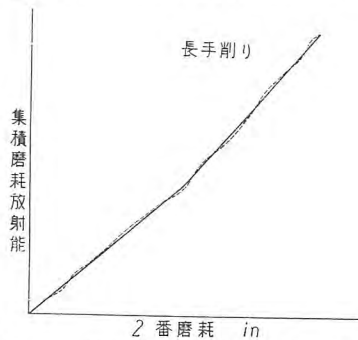
2 図 (a) 切削速度寿命線図
V-T curve (G_2 for FC 23)

Fig. 2-(a). Cutting speed-time curve.



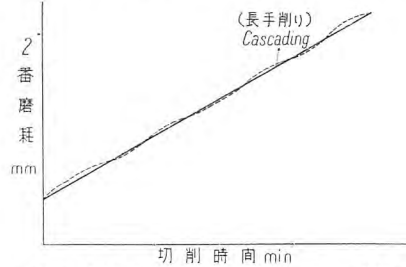
2 図 (b) 切削速度寿命線図
V-T curve (S_2 for SK-6)

Fig. 2-(b). Cutting speed-time curve.



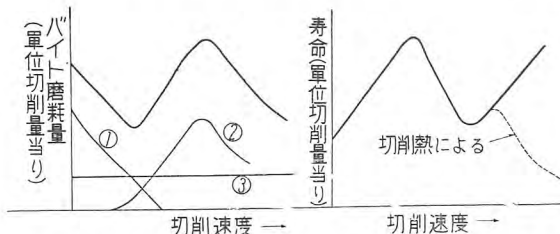
3 図 (a) 2 番磨耗と集積放射能との関係

Fig. 3-(a). Relation between accumulated radioactivity on chips and flank wear.



3 図 (b) 2 番磨耗と切削時間との関係

Fig. 3-(b). Relation between wear on flank and total cutting time.



4 図 (a) バイト磨耗量と
切削速度

Fig. 4-(a). Relation between wear on flank and cutting speed.

4 図 (b) バイト寿命と
切削速度

Fig. 4-(b). Relation between cutting life and cutting speed.

が成立し、異なった切削速度の間にはテイラーの法則すなわち

$$TV^n = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (b)$$

が成立する。ただし

- w : 2 番磨耗 [mm]
- t : 切削時間 [min]
- T : 一定 2 番磨耗値に達する切削時間 [min/mm]
- V : 切削速度 [m/min]
- n : 定数

イ. 異常な磨耗

(1) 低速異常磨耗

低速異常磨耗について W. C. Shaw⁽⁴⁾ は、バイトの 2 番磨耗は (1) 冷間溶着 (2) 熱間溶着 (3) 引掻の 3 要素からなり、低速切削範囲では冷間溶着による磨耗が多いと述べている。4 図は Shaw の示したバイト磨耗線図 (切削量一定) である。

(2) 過大な磨耗

バイトの切削時間が長くなりバイト磨耗が進んである

点までくると、急激に磨耗が増加し今までの直線性が失われるといわれる。Wallichs⁽⁵⁾によると Widia バイトで鋼を削る場合、寿命点で砕け散るといわれている。また、ある研究者⁽⁶⁾⁽⁷⁾ は 2 番磨耗は削り長さのある点までくると、破壊を起し、それ以後は今までと異なった磨耗を示すといっている。いずれも、2 番磨耗が大きくなりある値に達すると、磨耗が急激に進むことを示唆している。この磨耗進度の彎曲点がどの位の値かということは、バイトと被削材との組合せによってきまるものであり、文献に現われた所ではつぎのようなものがある。

FC-19 と G_1 (WC-Co 系)⁽⁸⁾

彎曲点 約 1.2 mm

FC-23 と G_2 (WC-Co 系)⁽⁹⁾

約 0.7~1.1 mm

SF-50 と S_2 (WC-TiC-Co 系)⁽¹⁰⁾

約 0.2~0.3 mm

正面切削法では、このような異常磨耗が、切削範囲に入ってくるのを避けなければならない。

3. 正面切削によるバイト磨耗

ア. 長手切削から正面切削への変換

正面切削は被削材の中心部に設けられた穴 (Ro) から削り始められ、一定回転数、送りの条件で外周に向かって切削される。したがって前項 2 に述べた異常磨耗の範囲を除いて切削すれば、つぎのように長手切削を正面切削に変換できる。

前出 (a), (b) 式は (1), (2) のように常数を書きかえる。

$$w/t = f(v) = w_t \quad [\text{mm/min}] \quad \dots (1)$$

$$TV^n = C \quad \dots\dots\dots (2)$$

T は一定磨耗に達する切削時間であり、単位は [min/mm] である。したがって $T = \frac{k}{w_t}$ $\dots\dots\dots (3)$

$$(3) \text{ を } (2) \text{ に代入し } \frac{k}{w_t} \cdot V^n = C$$

$$\text{よって } w_t = \frac{k \cdot V^n}{C} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{k}{C} = \frac{1}{C_k} \quad \text{とおく}$$

w_t を正面切削を行っている時間について積分すれば、2 番磨耗の総量となる。これを (W) とすれば

$$(W) = \int_0^t w_t \cdot dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、 V は切削時間と共に送りによる直径増加分だけ増

加するから

$$V = \frac{2\pi(R_i + N \cdot t \cdot S) \cdot N}{1,000} \dots\dots\dots (6)$$

ここに

V : 切削速度 m/min, N : 回転数 rpm
 t : 切削時間 min, S : 送り mm/rev
 R_i : 円板の中央の穴の半径 mm
 R_0 : 切削を終了した点の半径 mm

故に

$$\begin{aligned} W &= \int_0^t \frac{V^n}{C_k} \cdot dt = \int_0^t \frac{[2\pi(R_i + N \cdot t \cdot S)N]^n}{C_k \times 1,000^n} \cdot dt \\ &= \frac{(2\pi N)^n}{C_k \times 10^{3n}} \int_0^t (R_i + N \cdot S \cdot t)^n \cdot dt \\ &= \frac{(2\pi N)^n}{C_k \times 10^{3n}} \cdot \left[\frac{(R_i + N \cdot S \cdot t)^{n+1}}{(n+1) \cdot N \cdot S} \right]_0^t \\ &= \frac{(2\pi N)^n}{C_k \times 10^{3n}} \cdot \left[\frac{R_0^{n+1} - R_i^{n+1}}{(n+1) \cdot N \cdot S} \right] \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

1 図によれば、切削時間が零の時に磨耗曲線が零点を通らないから、最初の欠損を見込み、それを A とする。

$$W = \frac{(2\pi N)^n}{C_k \times 10^{3n}} \cdot \left[\frac{R_0^{n+1} - R_i^{n+1}}{(n+1) \cdot N \cdot S} \right] + A \dots\dots\dots (8)$$

ただし W は初期欠損 A を見込んだ 2 番磨耗 (3) 式より $k = T \cdot w_L$ であるから、寿命と定めた 2 番磨耗 w_L まで切削した場合は、 $T = t$ となり、結局 $k = w_L$ となり、 k は寿命時間 T を定める時の一定 2 番磨耗値を意味する。したがってテイラー公式の常数 C はつぎのようになる。

$$C = kC_k = w_L \cdot C_k \dots\dots\dots (9)$$

w_L : 寿命時間 T を定めた時の 2 番磨耗 [mm]

前項 2 に述べた低速および過大磨耗を見出し、試験結果から除外するためには、円板の内径を比較的大きく、外径は比較的小きくするのが得策である。

しかしその結果 1 回の切削によるだけでは 2 番磨耗が少ないので、数回切削するということが考えられる。そうすればバイト磨耗値そのものも、偶発的事故によるものなどが見出され易く、信頼度も高まると考えられる。

したがって、くり返して正面切削を行った場合には、(8) 式の W の代りに、 m 回切削した磨耗総量を m で割った値を使えばよい。

以上の式に示すように、未知数は n と C_k とであるから N または、 W が変化するように異なる 2 条件で切削を行えば n, C_k が求まり、したがってある切削速度におけるバイト磨耗が求まることになる。すなわち、 N を変え R_0, R_i を一定とした場合の W を求めるか、または N を一定とし R_0, R_i などを変えた場合の W を求めるかのいずれかである。

いま、 N を変えた場合と、 R_0, R_i を変えた場合の形を示すとつぎのようである。

a. N をかえた場合

N_1 の場合 W_1, A_1 , とすると
 N_2 の場合 W_2, A_2

(8) 式より

$$\frac{W_1 - A_1}{W_2 - A_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^n \cdot \frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{n-1} \dots\dots\dots (10)$$

これより n が求まりしたがって C_k が求まる。

b. R_0, R_i をかえた場合

W_1 の場合 R_{01}, R_{i1}, A_1
 W_2 の場合 R_{02}, R_{i2}, A_2

(8) または (10) 式より

$$\frac{W_1 - A_1}{W_2 - A_2} = \frac{R_{01}^{n+1} - R_{i1}^{n+1}}{R_{02}^{n+1} - R_{i2}^{n+1}} \dots\dots\dots (10)$$

なお (10) 式はいま、便宜上

$W_1 - A_1 = (W_1)$ $W_2 - A_2 = (W_2)$ とすると、

$$\log \frac{(W_1)}{(W_2)} = (n-1) \log \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{\log (W_1) - \log (W_2)}{\log N_1 - \log N_2} = n-1$$

この式は 5 図に示すごとく対数座標で直線となる。5 図の傾斜は $n-1$ を示す。しかしながら W_1, W_2 がそれぞれテイラー法則に従い、 n, C_k の同じ値をもっていなければならない。そのためには、幾つかの回転数で、 W の値をとって見て、対数座標で整理する。もし、異常磨耗を含む、 W があると、対数直線から外れることになるわけである。

4. 正面切削によるバイト磨耗

つぎに前述の事柄をたしかめ、しかも、異常磨耗を見出すため実験を行った。

実験に当たってとくに留意した諸点は、

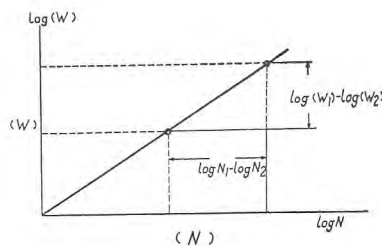
1. バイトの Charge 番号を明かにし、バイトの固有差を極力少くした。これは全部三菱金属鉱業株式会社のご好意によるものである。

S_2 , No. 0909, WC, TiC, Co 系

G_2 , No. 0858, WC, Co 系

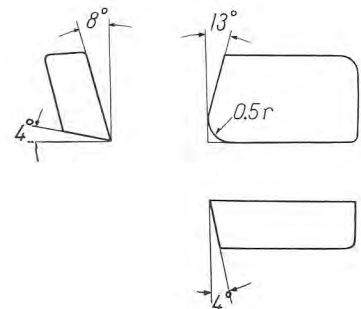
2. バイト研磨は、GC-90 の後、ダイヤモンド-180 をかけ、また研磨は、角度台に固定して行った。

3. 内径 120 mmφ, 外径 220 mmφ の円板の端面を



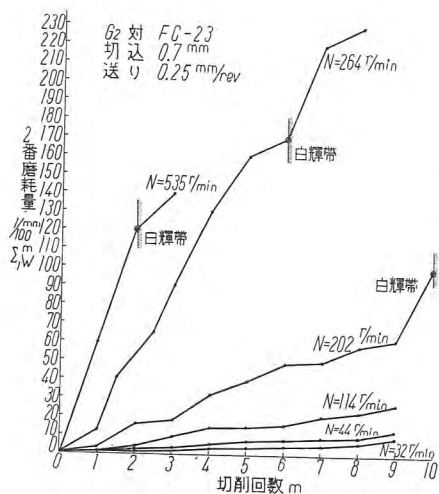
5 図 2 番磨耗と回転数

Fig. 5. Relation between wear on flank and revolution.



6 図 バイト形状 S_2, G_2 共通

Fig. 6. Figure of a single point tool.



7 図 切削回数と 2 番磨耗

Fig. 7. Relation between wear on flank and number of times of cutting.

切削した。

(4) 実験条件

旋盤 KOHAN 7.5 HP
被削機 SF-50 ブリネル硬さ 140
SK-6 ブリネル硬さ 214
FC-23 ブリネル硬さ 170
切込 0.7 mm

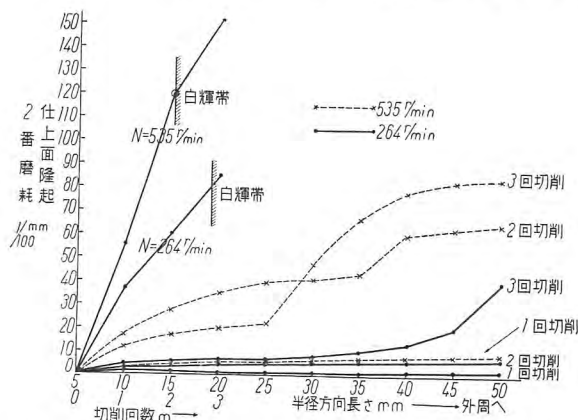
送り S_2 の場合 SF-50 0.16 mm/rev
SK-6 0.10 mm/rev
 G_2 の場合 0.25 mm/rev

バイト形状 6 図

測定は尖端 2 番磨耗をコンパレータによりバイト綾線を基準として測定した。

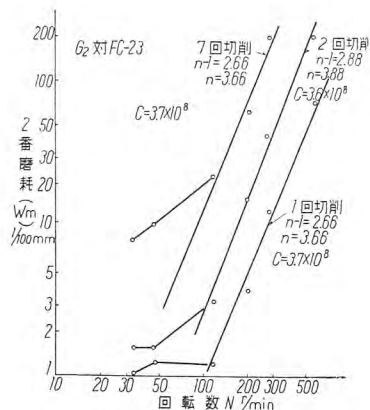
ア. G_2 で FC-23 を切削した場合

7 図は、2 番磨耗 W_m と切削回数 m との関係であり、パラメータは、回転数 N である。初期欠損 A はほとんど零に近い。8 図は (12) 式に従い $\log(W)$ と $\log(N)$ との関係を示す。 $N=44, 32$ rpm (平均切削速度 23 m/min, 17 m/min は同一直線上に乗らないから、低速異常



9 図 2 番磨耗と切削回数および仕上面隆起と半径方向長さ

Fig. 9. Relation between wear on flank and number of times of cutting.
Rising of finished and at various radii.



8 図 2 番磨耗と回転数

Fig. 8. Relation between wear on flank and cutting speed in r.p.m.



10 図 白輝帯が外周に現われている。外径大なる円板の場合を示す

Fig. 10. Visible white bright bond.

磨耗と見てよい。しかしこの値は、13 図の S_2 の場合に比し遥かに小さな値である。ところが、7 図の $N=535, 264, 202$ rpm の場合に、2 番磨耗が大きくなると白輝帯が現われている。これは、果して正常な切削が行われているか否かを確かめる必要がある。そこで $N=535$ rpm と 264 rpm とにつき、2 番磨耗 W と切削表面突起状態とを、切削回数についてとってみた。表面突起状態は、切込量が、維持されているか否かを確かめるためのものである。もっともこの場合、白輝帯を早く生じさせるため、切込を 1 mm とし送りを 0.3 mm/rev として、多少重切削に近い状態とした。これが 9 図である。これによると白輝帯を生じた地点では、明瞭に突起が発生し、切込の減少が行われている。これは、2 番磨耗としては、急激な増加を示さないで、見落し易いが、切込減少が起り最初の条件が維持されていないので、当然異常な状態として取扱うべきである。また 10 図には、外径の大きな円板を正面切削した場合の写真を示す。外周には白輝帯が現れている。したがって、この場合の 2 番磨耗は使用してはいけなわけである。

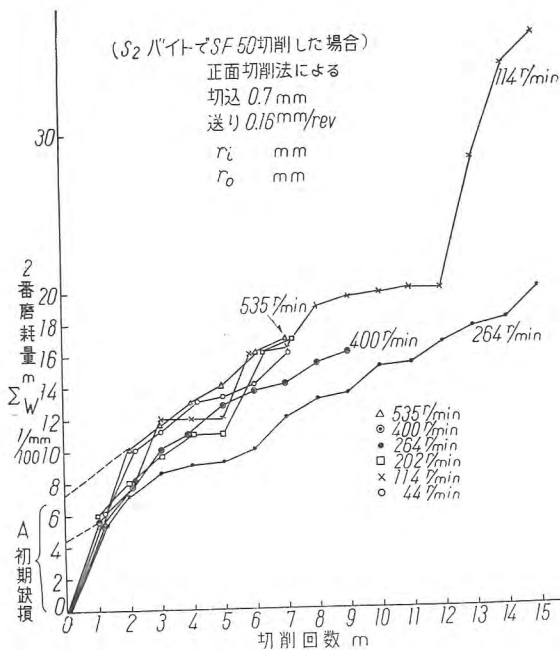
2 番磨耗がどの程度円板試験によって再現性を示すかについて実験したものを 11 図に示す。これによれば、正常な切削では、極めて良好な再現性を示すが、白輝帯が現われた後は、ばらつきがで易いことが判る。

イ. S_2 で SF-50, SK-6 を切削した場合

12 図は S_2 で SF-50 を切削した場合である。これも前と同様、2 番磨耗 W と切削回数 m との関係を示すもので、パラメータは回転数 N である。これを切削回数 2 回、4 回、7 回の場合に、 $\log(W)$ と $\log N$ との関係をとってみると、1 本の直線とはならず、2 本の直線となっている。この場合は、明らかに $N=264$ rpm 以下

11 図 2 番磨耗と切削回数

Fig. 11. Relation between wear on flank and number of times of cutting.



12 図 2 番磨耗と切削回数

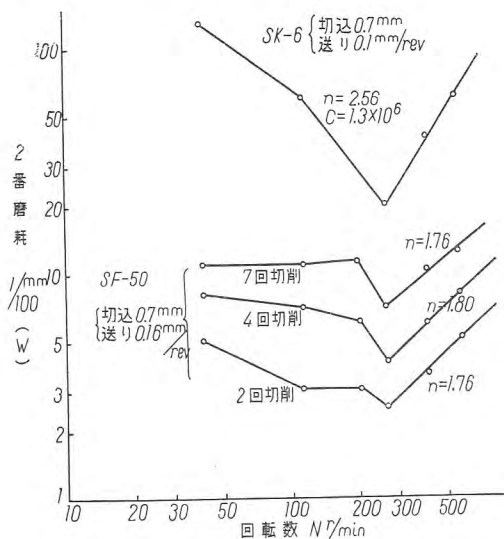
Fig. 12. Relation between wear on flank and number of times of cutting. (S_2 for SF-50)

の回転数では、低速異常磨耗を示す。(13 図)

12 図についてみると、 $N=114$ rpm の場合、切削回数 $m=12$ 回以上で過大磨耗を示している。初期欠損は、どの回転数の場合も約 $4/100 \sim 6/100$ mm 程度であることが判る。

S_2 バイトで SK-6 を切削した場合も、13 図に併記した。低速異常磨耗は一層明瞭に認められ、 $N=264$ rpm 以下であることは、SF-50 の場合と同様である。

以上ア、イに述べた方法で $\log(W)$ と $\log N$ とを座標にとってみれば、低速異常磨耗は極めて良く判別されることが判った。 G_2 にも僅少ながら低速異常磨耗は存在するが、それは約 23



13 図 2 番磨耗と回転数 (S_2 対 SK-6, SF-50)

Fig. 13. Relation between wear on flank and cutting speed in r.p.m. (S_2 for SK-6, SF-50)

m/min 以下であるが、 S_2 では、値が異常に大きい上に、約 140 m/min 平均速度以下である。

S 系の試験においては、この点に充分注意する必要がある。もっとも、回転数 N が 264 rpm 以上、すなわち、平均切削速度で 140 m/min、内径 R_s の初切削速度が約 100 m/min 以上なら低速異常磨耗の心配はまずないと見てよいだろう。またくり返し切削法によれば、初期欠損 A が判明する。さらに白輝帯を生じた場合は正常磨耗とはみなし得ないことも判明した。

14 図には、 S_2 をもって SF-50 をくり返し正面切削を行った場合についての写真を示す。

ウ. 正面切削と長手切削との比較

ア、イに述べた実験結果を (8)(9)(10)(12) 式から計算して求めた n , C の値と、前記長手切削による n , C の値を比較してみる。

G_2 -FC-23

正面切削法

長手切削 (2 図-a より)

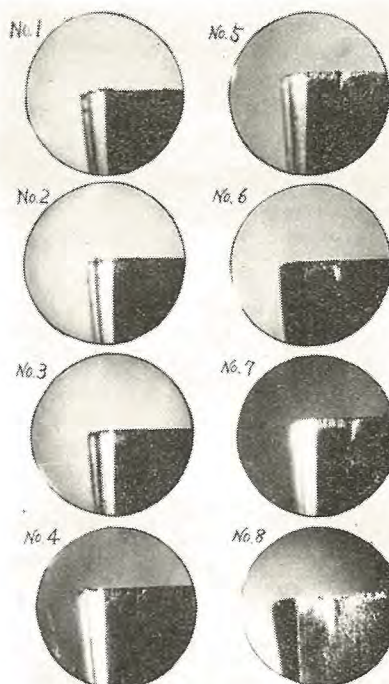
	n	C	n	C
1 回切削	3.66	3.7×10^8		
2 回切削	3.88	3.6×10^8	3.7	3.9×10^8
7 回切削	3.66	3.7×10^8		

[注] 正面切削法の場合は (12) 式より n を求め、(9)(10) 式より、 $N=202$ rpm について計算する。 $n=3.6$, $W/m=6/100$ mm とした (長手切削はこの際寿命点磨耗を $w=0.6$ mm としているから)

(10) 式より $C_k=6.18 \times 10^8$ $w=0.6$ mm なる故

(9) 式より $C=3.7 \times 10^8$ となる。

S_2 -SK-6



切削回数 m	ΣW
No. 1	1
2	3
3	5
4	7
5	9
6	11
7	13
8	25
切込	0.7 mm
送り	0.16 mm/rev
回転数	264 r/min
切削速度	100~190 m/min

14 図 2 番磨耗の写真 S_2 対 SF-50

Fig. 14. Micro-photography of wear on flank. (S_2 for SF-50)

正面切削法

長手切削 (2 図-b より)

	n	C	n	C
1 回切削	2.56	1.3×10^6	2.68	1.5×10^6

〔注〕 計算法は G_2 -FC23 と同様である。

$C_k = 3.5 \times 10^6$, $w = 0.37$ mm であるから $C = 1.3 \times 10^6$ となる。正面切削で n, C が僅かながら少なめに出ているのは、正面切削がこの場合 1 回切削であるため、初期欠損 A を見込んでないからである。もし 1 図-b から初期欠損を 7/100 mm とすると $n = 2.7$, $C = 1.5 \times 10^6$ となる。

なお、 S_2 -SF50 について 13 図に示すとおり、 n を求めてみると、当然のことながら $n = 1.76 \sim 1.8$ を得て各切削回数共大体一致している。

実際問題としては、 n, C を正面切削から求めて、長手切削の V, T 曲線を描くのであるが、 n, C がどの程度異なれば、2 番磨耗の差がいか程になるかということの方が問題である。

〔例〕 G_2 -FC-23 について、正面切削によって求めたものと、長手切削によって求めたものとを比較してみる。(前出)

正面切削法 (w_{t1})	長手切削法 (w_{t2})
$n = 3.66$	$n = 3.7$
$C = 3.7 \times 10^8$	$C = 3.9 \times 10^8$

(4) 式より $w_t = \frac{k \cdot V^n}{C}$, w_t の比をとってみると、

$$\frac{w_{t1}}{w_{t2}} = \frac{V^{3.66} \times 3.9}{V^{3.7} \times 3.7}$$

いま $V = 100$ m/min について計算してみると $w_{t1}/w_{t2} = 0.9$ となり、かなり良く合っていることを示す。

5. 総 括

以上を総括するとつぎのようになる。

(1) 正面切削を行うことによって、バイト 2 番磨耗を長手切削の場合に換算することができる。

(2) 換算に当っては、2 番磨耗と、回転数との関係に対数座標に整理すると、低速異常磨耗を見出すことができる。一般に G_2 は、平均切削速度が 23 m/min 以下の場合であるが、 S_2 は、100 m/min 以下であり、しかもその量は S_2 の場合非常に大きい。

(3) くり返し正面切削法によれば、初期磨耗を見出し、しかも、2 番磨耗値の信頼度を増すことができる。

(4) 過大磨耗は除去しなければならないが、一般に S_2 で 0.2~0.3 mm, G_2 で 0.7 mm 以上と考えられる。白輝帯を生ずる場合も、1 種の過大磨耗であり、これは切込の減少が行われている。

(5) 以上より、実験及び計算によって、正面切削と長手切削との結果が極めて良く一致することを確かめた。

なお、正面切削を行う場合の注意を補足的に述べるとつぎのようになる。

(6) S 系バイトの試験においては、送りを 0.2 mm/rev 以上にする場合は、円板の外周まで削り終って外れる瞬間に、大きな欠けを作る場合があるから、注意を要する。このような時は外周より少し内側でバイトを外すようにすることが必要である。

(7) 円板の内周、外周の黒皮を完全にとっておくことはいうまでもない。

(8) n を求めるのに、正面切削を行った面の隆起状態から推定しようとするのは、一見便利のように見えても非常に危険がある。1 例として筆者が (8) 式から求めた値と仕上面隆起から求めた値とを示すと、(8) 式のものの

$$n = 3 \sim 3.5$$

仕上面隆起より求めたもの $n = 9 \sim 11$

仕上面隆起を用いる方法は、バイトの熱膨張または構成刃等の影響があると推定せられる。

(9) 従来のテイラー式 $TV^n = C$ の C は当然寿命点をきめた 2 番磨耗値 w によって変わるわけで、この点、筆者が用いた C_k の値は、 w によっては変らないから、この方が、より本質的であるといえる。ただしこの報告においては、 $C = w \cdot C_k$ として、 C を算出して比較をした。

6. む す び

正面切削の誤差原因を見出し、その精度を向上させることができたことは、超硬バイトの購入受入試験ならびに、切削条件指導標などを、短時間、と少い資材で、求められることになる。

この報告中の長手切削試験結果は、すべて三菱金属鋳業株式会社大井工場で行われたものを使用させていたものであり、関係各位に深く感謝申上げる。

参 考 文 献

- (1) W. Leyensetter: Grundlagen und Prüfverfahren der Zerspannung insbesondere des Drehen.
- (2) E.J. Tangerman: Radio active Tracers speed tool life study American machinist, Dec. 24, 1951, p. 100~101.
- (3) Radioactive Cutting Tools-for Rapid Tool-life Testing. Trans. ASME August 1953, p. 549~559.
- (4) W.C. Shaw: American machinist Oct. 29, 1951, p. 100.
- (5) Ripper: クローネンベルグ著、切削学綱要 p. 270 (蒲池訳).
- (6) 木暮正夫: 機械学会昭 28 年 4 月東京大会予稿.
- (7) 竹山秀彦: 精密機械 Vol. 21, No. 8.
- (8) 前出 (7)
- (9) (10) 筆者の実験, 7 図および 12 図参照



現在の研究所玄関
Front of the present laboratory.

I. 一般

所在地 兵庫県尼崎市南清水字中野 80
敷地 10,260 坪
延建坪 4,100 坪
従業員 376 人

II. 年譜

1935 年

9 月、社内全体の研究機関として、神戸製作所構内に本店研究課が誕生した。課長には堀元夫参事が就任、鉄骨スレート葺延 700 坪の建物が実験室に当てられた。

1940 年

3 月、課が部に昇格し本店研究部と改称した。

1941 年

6 月、尼崎市南清水字中野の新屋へ移転した。当初の実験室は木造平屋および 2 階建の 4 棟と煉瓦造 1 棟の延 2,143 坪であった。

1942 年

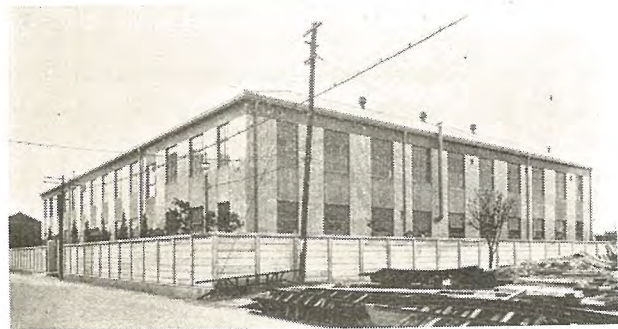
7 月、電気・物理・化学第 1・化学第 2・無線第 1・無線第 2・試作の 7 課に組織された。

1943 年

10 月、事務課が増設され、また神戸製作所にあった特許課が研究所に編入されて部内は 9 課となった。

1944 年

3 月、部が所に昇格し研究所となった。初代所長には引ついで堀元夫参事が就任した。



神戸時代の建物
Building in the day of Kobe activity.

General view of Our Laboratory

研究所の概況



初代所長 堀 元夫
First chief M. Hori.



二代所長 若山高根
Second chief T. Wakayama.



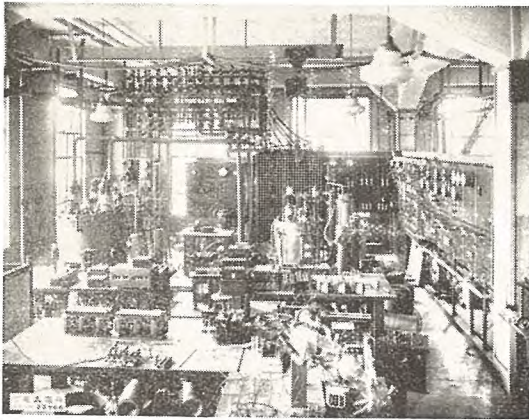
三代所長 弘田実禧
Third chief M. Hirota.



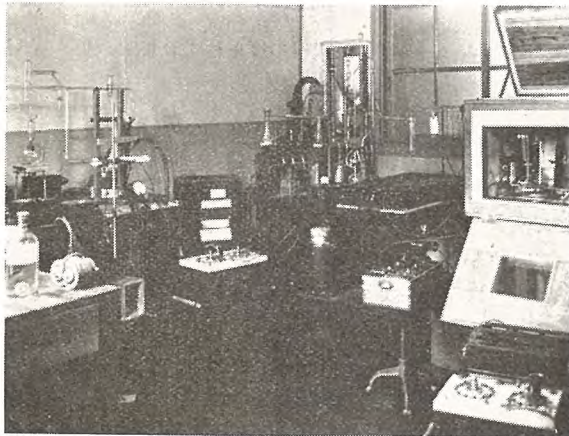
現所長 大野才三
Present chief S. Ohno.



創立当時の陣容（前列左より）
管野正雄、大形透、大野才三、古丸藤太、堀元夫、横田哲二郎、
浜田時夫、尾島学二、高橋盛一の諸氏（福住一郎氏渡米中）
Staff in the day of foundation.



神戸時代の強電波実験室
Laboratory of heavy machine engineering at Kobe.



神戸時代の真空実験室
Laboratory of vacuum engineering at Kobe.

4 月，鉄筋コンクリート延 1,785 坪の本屋が完成した。

この年に装備された主要な実験設備は磁気材料試験装置・水銀整流管試験設備・2,000 kV 衝撃電圧発生装置・50,000 A 衝撃電流発生装置・2,000 kVA 遮断試験装置および断熱材料研究用としての特殊試験装置などがある。

1945 年

4 月，真空管試作工場を大阪市鰻谷町長堀に設置した。

1946 年

1 月，伊丹製作所無線機部が研究所に移管され無線技術課・無線工作課となった。

4 月，無線第 1 課と無線第 2 課が統合して無線研究課と改称された。

1947 年

2 月，堀所長が常務取締役役に昇任，2 代目所長には名古屋製作所副長若山高根氏が就任した。

3 月，無線技術課と無線工作課が伊丹製作所に移管された。

1949 年

12 月，大阪市長堀の真空管工場を閉鎖した。

1951 年

8 月，研究員制度が設けられると同時に，職制が総務部（事務課・整備課），特許部（出願課・調査課），電気第 1 研究室，電気第 2 研究室，物理研究室，化学第 1 研究室，化学第 2 研究室，材料研究室，工務課に改変された。

1953 年

4 月，物理研究室長大野才三参事が研究所副長に就任した。

当社研究所の概況

5 月，新ワニス工場が完成した。

5 月 30 日，若山所長死去された。3 代目所長には伊丹製作所所長弘田実禧取締役が兼任された。

7 月，放射線実験室が完成，中型ベータトロンが設置された。

8 月，弘田伊丹製作所所長兼研究所長は常務取締役に昇任，4 代目所長としては大野副長が任命された。

1954 年

2 月，特許部が本社の直轄となって研究所から転出した。

8 月，物理研究室が第 1 と第 2 に分割された。

12 月，ワニス工場を含む塗料部が新設された。

1955 年

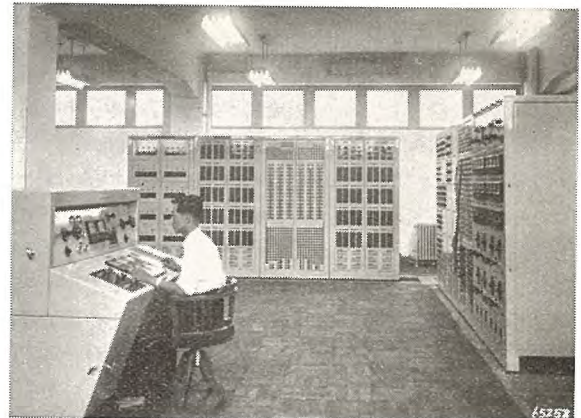
3 月，電気計算器室 104 坪が増築され，電子管式アナログコンピュータおよび交流計算盤が設置された。

III. 現 況

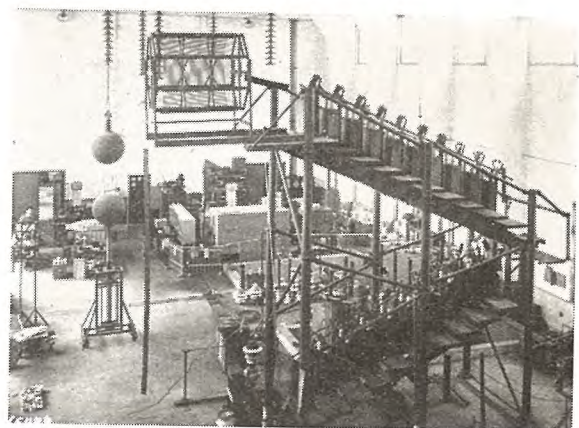
つぎに簡単に各実験室の主要活動状況ならびに設備について紹介する。

1. 電気計算機室

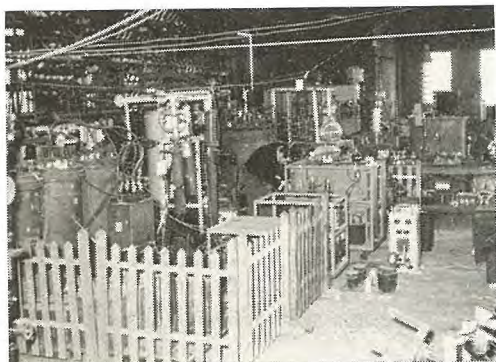
交流計算盤と電子管アナログコンピュータを主力とした汎用相似型計算装置があり，電子管アナコンは 29 年暮から，また交流計算盤は昨年夏から運転を開始した。電子管アナコンは演算増幅器 40 の低速度型で，自動制御の問題，微分方程式の解法等に威力を発揮している。交流計算盤は最終 18 機の予定であるが，現在稼動しているのは 6 機である。これは同期開閉器の併用によるアナコンとしても使用できるように設計されており，専用の計測機，同期スイッチ，高 Q の特殊インダクタンス等もそなえている。



電気計算機室（交流計算盤）
Electric computation room.



高圧実験室
High voltage laboratory.



水銀整流器実験室（逆弧等価試験装置）
Mercury rectifier room.

上記計算装置は社内の各種計算はもちろん、社外から依頼の計算も実施している。

2. 高圧実験室

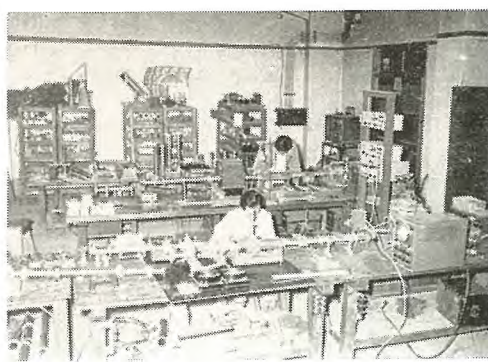
変圧器、遮断器、避雷器のような高圧機器、絶縁劣化の如き絶縁問題等を取扱っている。主要設備としては、2,000 kV 衝撃電圧発生器、100 kA 衝撃電流発生器、2,000 kVA 短絡試験設備、350 kV 試験用変圧器、150 kV シェリング電橋、絶縁物寿命試験設備等がある。試験法、測定法もこの実験室の担当範囲の1つであって、特殊測定装置としては、遮断器の再帰電圧測定装置、4素自動高速ブラウン管オシロスコープ他があり、各種電力問題の現場試験にも活発に活動している。

3. 水銀整流器実験室

当社の水銀整流器、とくにイグナイトロン整流器発達の原因力として活発に活動しており、整流器本体のみならず、その制御保護回路や、溶接器のような応用方面等の研究も実施している。試験用電源設備は 3,000 V から 200 V 迄 3,000 kVA 以上を有して各階級の整流器の試験ができ、ことに最近完成した逆弧等価試験装置によって大容量の整流器でもその容量限度迄試験研究ができるようになって着々成果をあげつつある。サイラトロン使用の直流送電模擬セット（12相、1 kV）はその電子管式制御回路と相まって任意条件任意状態での運転試験ができ、目下工場で製作中の高島直流送電の設計に多大の寄与をした。またここに自動電界模写装置があるが、整流器の電極構造の研究のほか、電子管の構造研究、高圧絶縁の電位分布等各種の用途に広く利用されている。

4. マイクロ波実験室

マイクロ波アンテナ、導波管伝送、マイクロ波用材料の特性の測定等を行っている。電々公社の大阪—東京—仙台間の中継線の空中線系、さらに仙台—札幌間の円偏波輻射パラボラ方式も当室の研究活動の認められた結果である。この



マイクロ波実験室
Micro-wave laboratory.

力により、4,000 Mc で 100°/db 以上の偏波回転率が得られている。

レドームに関しても成果があげられており、ミリメートル波の研究もその緒についている。

5. 極超短波管実験室

各種マグネトロンならびに進行波管の製作から最終試験までを行っている。

マグネトロンの構造はすべて磁石の小型化をはかって磁石組込型を採用し、陽極共振回路は多量生産が容易に行い得よう考慮してある。最近の記録品としては東京中央気象台納め気象用レーダの送信用マグネトロン MX-501 である。これは 5,300 Mc 帯で尖頭出力 300 kW のもので、同周波数帯で尖頭出力 300 kW のマグネトロンは外国においてもその例をみないものである。

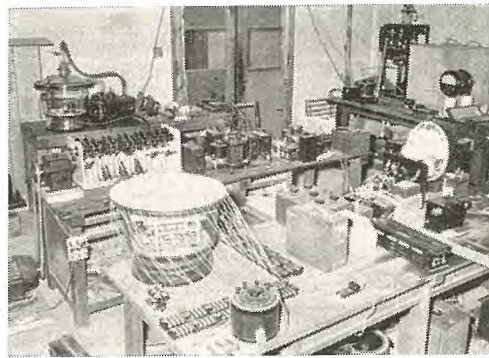
6. 高周波応用実験室

主として高周波パルス技術の電力系統への応用、および高周波加熱関係を取扱っている。前者は閃絡点故障標定器が主体で、当室の電力線搬送の B 型方式は海外の注目もあびており、またその同時標定方式も実故障に対する実績が得られるようになって、今後が期待されている。

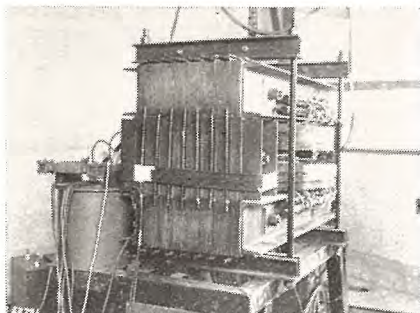
高周波誘電加熱は一般のビニール、ガラスウール等の接着は実用化し、目下特殊のものについて研究がすすめられている。誘導加熱はすでに工場で各方面に利用されているが最近サイラトロン制御による精密調整法が完成した。鋼材の焼入硬度、深度の測定の問題も取扱い、共に非破壊的に推定可能な方法を求



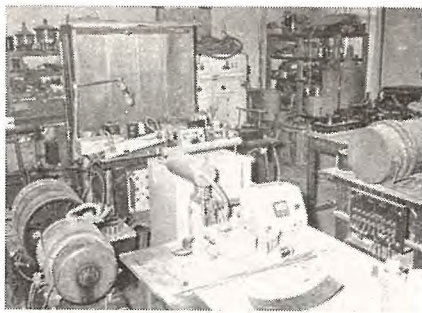
高周波応用実験室（閃絡点故障標定器）
High frequency application laboratory.



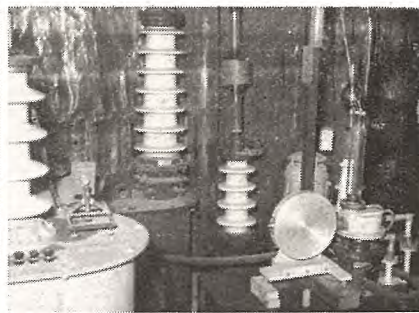
電気材料実験室
Electric materials laboratory.



20 MeV ベータトロン
Betatron.



熱および流体実験室
(小型風洞および冷凍機)
Laboratory of heat and fluid body.



分析用 X 線装置
X-ray.

めることができた。

その他トランジスタ回路の応用研究も開始した。

7. 電気材料実験室

電気絶縁材料の試験、ならびに磁性材料、抵抗金属材料の試験、および試験法の研究を担当している。

絶縁材料試験には、耐電弧試験器、高絶縁抵抗試験器、各種の機械的強度試験器等が完備して、材料使用上、工作上の立場から材料の特性を明かにしている。

磁性材料試験は珪素鋼板の試験はもとより、最近の磁気増幅器用材料の如き特殊性能の要求されるものの増加に対処して、それぞれの目的に応じた測定法、測定装置の考案に努力が向けられている。

8. 放射線実験室

研究所東隅にあって、中型ベータトロンを有し、その放射線を使用しての実験ならびに応用、および Co^{60} 、 Sr^{90} 、 C^{14} 等放射性同位元素の工業的応用の研究を行っている。同時にこれらに必要な各種放射能測定装置の研究を進め、多種の測定装置がすでに完成して社外でも実用されている。

ベータトロンはわが国唯一の Flux-Forced Field-Biased 型で、電子軌道半径 18.5 cm、鉄心重量 2.5 ton、目下 20 MeV で運転中であるが、30 MeV 迄上げる予定である。X 線源、電子線源、ならびに中性子線源として利用できる。

9. 熱および流体実験室

冷凍機を主対象にした理論的研究、断熱材の試験等の熱工学

の問題と、主として大型機器の冷却系を対象とした流体力学の問題を担当している。

冷凍機理論の解明は特殊測定法による熱伝導度測定装置の活用と相まって、当社電気冷蔵庫、冷凍機の性能向上に大いに寄与するところがあった。流体力学関係では現有の Eifel 型風洞を活用して、たとえば水素冷却発電機の冷却系の設計に貢献し、ここで開発された熱線風速計は現場での測定に大いに役立っている。さらに研究の進捗をはかるために、ノズル径 500 mm の Göttingen 型風洞を目下組立中である。

10. X 線実験室

X 線発生装置自身の研究ならびに回析図その他 X 線解析による材料研究を担当している。避雷器用炭化珪素の X 線による結晶学的検討、高性能磁性材料開発に対する貢献等その果たした役割は顕著なものである。目下主体となって活動している装置は回転陽極 X 線装置 2 台であって、陽極回転数 800~1,500 rpm、Wilson seal を使用している。撮影時間は線および粉末試料で 2~30 分で非常に短く、また X 線源が非常に小さいのできわめて尖鋭な写真が得られる。

11. 光学実験室

分光分析および光度、色度等の測定、ならびに測定装置の改良等を担当している。分光光度計は当実験室で製作したもので、蛍光燈、電球等の可視部分光エネルギー分布を約 3 分間で自動記録する。3 色色度計も同じく当室の試作になるもので、試料の色度を JIS 方式またはマンセル方式で迅速に表示できる。

赤外線ガス分析計の如き応用計測器も研究されており、試作

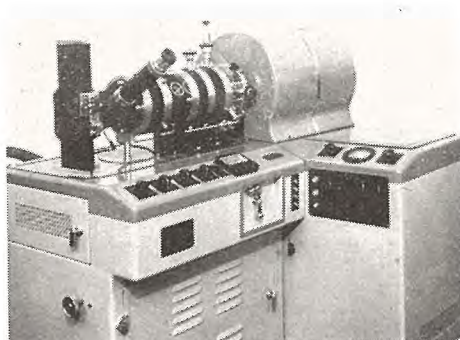
完了した赤外線ガス分析計は CO_2 0~10%、 CO 0~20%、 CH_4 0~20% の範囲を連続定量し自動記録できる。

12. 電子顕微鏡実験室

最近運転を開始したばかりで、今後の活躍が期待される。顕微鏡は島津製 SM-C3 型で引伸して



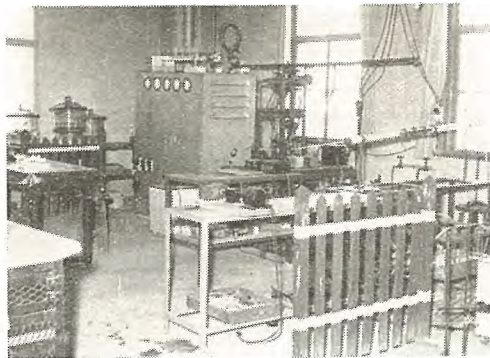
光学実験室
Photometry.



電子顕微鏡
Electron microscope.



真空技術実験室（質量分析計）
Vacuum engineering laboratory.



半導体実験室（ゲルマニウム単結晶製造装置）
Semi-conductor laboratory.

の性能向上、新種のものの開発に努力している。

光電導物質の研究も併せ行われており Cd-S 結晶光電導セルも完成している。

16. 電子管材料実験室

陰極、陽極、格子材料、ゲッター、螢光物質等の電子管材

60,000 倍迄得られる。電子回析装置としても使用できる。

13. 真空技術実験室

真空技術およびその応用に関する研究を行っているが、とくに真空ポンプ等の真空用装置、漏洩の検出、真空材料の測定等に重点がおかれている。ここで設計した真空ポンプは当社工場で広く使用されており、試作完成したハロゲン型ならびに質量分析型漏洩検出装置は当社のイグナイトロンを始めとする真空構造機器の品質向上に多大の貢献をしている。またここで考案試作された質量分析型ガス分析装置は真空材料の放出ガス分析を始め、高性能合金製造法の研究等に威力を発揮している。

14. 螢光燈実験室

当所で研究開発された螢光燈は大船工場で製品化されたが、引続きその性能向上、新品種の開発試作に努力している。試験設備、寿命試験設備等を有して絶えず工場との連絡の下に研究を行っている。一般用管の研究は一段階し、目下はスリムライン管、ラビッドスタート管の性能向上ならびに改良に主力が注がれている。

15. 半導体実験室

半導体物質の基本的研究ならびにトランジスタ、ダイオードの試作を行っている。電気伝導度、ホール係数、荷電粒子の寿命時間等の測定装置をはじめ、材料の精製装置、試作装置を有しており、すでに低周波用トランジスタ数種、各種性能のゲルマニウムおよびシリコンダイオードの試作が完了し、さらにそ

料の研究を行っている。

陰極については基体金属の研究を始め、自動陰極塗布装置、静電塗装機等を駆使しての製造法的研究も行っており、各種新型陰極の開発に成果を収めている。陽極、格子材料についても、材料の試験、処理方法等を確立し、工場製品の品質向上、均一化、価格の低下に寄与している。

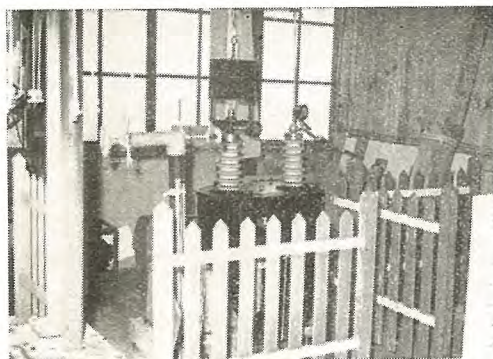
螢光物質は各種螢光燈、ブラックライト、ブラウン管等各種目的に応じた螢光物質の開発に成功し、実際の製品に使用されている。さらに螢光物質製造上、また塗布焼付作業中に起る諸問題の解決、ならびに輝度寿命の向上に努力が続けられている一方、螢光探傷等応用方面の研究も行われている。

17. 絶縁塗料実験室

当社各製作所、工場で使用する絶縁用ワニス、コンパウンド類の品質向上、新品種の試作、ならびに試験を行っている。最近では合成樹脂を主成分とする耐久性のあるワニス類を多数開発して実用に供している。とくに不飽和ポリエステル型無溶剤ワニス（ダイアレジン）の研究は終了して工場製品に使用されており、大型発電機コイルの絶縁特性を大幅に引上げることができた。

一般塗装用塗料の試験もここで担当しており、その工作法および試験方法の確立などに寄与している。

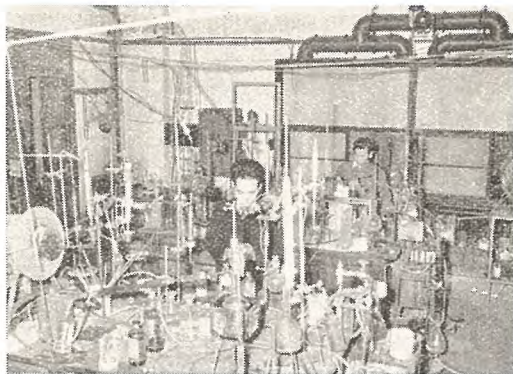
大量の試作段階は塗料工場の設備を利用して行われ、ここで研究的試作段階に対する試作設備ならびに試験装置を有している。（塗料課の項参照）



電子管材料実験室（静電塗装装置）
Electric tube laboratory.



絶縁塗料実験室
Insulating varnish laboratory.



合成樹脂実験室
Synthetic resine laboratory.



高抵抗材料実験室
High resistance material laboratory.

新しい分析法としてはいわゆる装置化分析法が近年盛んであるが、当実験室においても、真空管材料（ガラス、蛍光物質、陰陽極材料等）や金属材料の分析にポーログラフ装置、光電比色計、スペクトロフォトメータ等を使用して良好な成果をあげ、日常の作業に使用している。

18. 絶縁油実験室

絶縁油の特性の究明および工作上の立場になつての研究が行われている。絶縁油の精製方法についてはすでに広汎な研究を行ったが、とくに溶解ガスの研究は脱気装置の製作、処理工程管理に寄与するところがあつた。絶縁油の劣化現象とその試験方法の確立については長期の努力が続けられており、さらに劣化防止の研究にまで続いている。

不燃油としてクロルベンゼン、クロルジフェニール等の合成の研究も夙に行つたが、現在は市販品が実用に供せられるに至つたので研究の方針を使用者としての立場に指向し、目下その劣化防止法に関する研究に努力が向けられている。

19. 合成樹脂実験室

最近の目覚ましい合成樹脂、合成ゴム製品の出現に対処するために、常時新材料の入手とその特性の試験、応用方法を研究し、またその使用中に起るトラブルの解決に當っている。

有機珪素化合物、メラミン樹脂、不飽和ポリエステル等の合成と応用の研究は、当社の B 種および H 種絶縁工作上貢献するところが少なくない。なお特殊な有機珪素化合物合成のためのパイロットプラントがほぼ完成に近づいており、完成後の研究の進捗が期待されている。

20. 分析実験室

ここでは社内各方面の分析作業を引受けて実施している外、分析作業の能率および精度向上のための新分析技術の確立、ならびにそれらの現場技術への普及に努力している。

またイオン交換樹脂を用いるイオン交換分析法も取り入れ、蛍光体やガラスの分析に応用実験中で、すでに相当の成果を収めている。

21. 高抵抗材料実験室

炭化珪素を主材料とする避雷器素体とその関連器材の組織的研究を行い、当社避雷器の性能を著しく向上せしめたが、さらに一層の改善を図るべく努力がつづけられている。ほかに通信機用小型抵抗をはじめ、計器回路用あるいは遮断器回路用の大型特殊抵抗体の試作研究も完了した。

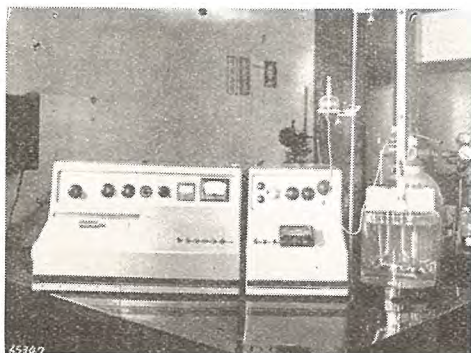
マイカレックスもガラス質と雲母類の基礎的研究の上にたち、特殊低融点ガラスの作成に成功してはじめて低廉、良質な製品を作り上げることができるようになった。

またチタン酸バリウムおよびその応用に関する研究も行われている。

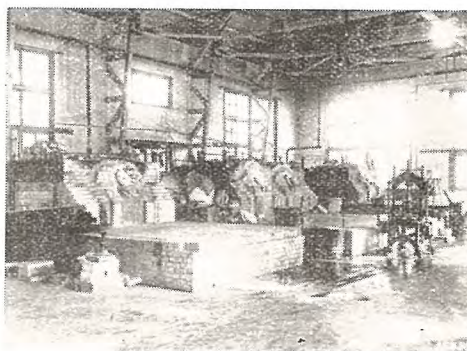
22. ガラス実験室

換熱式ガス溶融炉 3 基、同重油炉 1 基を有し、各種特殊ガラスの研究試作を行うと同時に、当社で使用するガラス材料のうち特殊なものの自給を行っている。

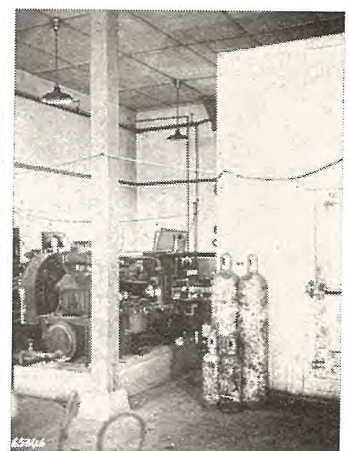
目下研究の主力は Shrunk ガラス、導電ガラス等にむけられているが、最近完成したものに紫外線透過用の各種のガラスがあり、それぞれ殺菌ランプ、蛍光健康ランプ、ブラックライトランプ等に使用されている。高周波絶縁碍子用ガラス「ダイヤ



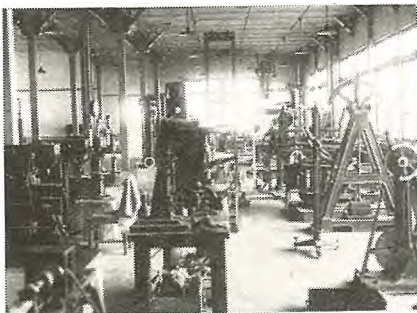
分析実験室（ポーログラフ）
Chemical laboratory.



ガラス実験室
Glass laboratory.



機械実験室（低温装置）
Machinery laboratory.



機械実験室（材料試験室）
Machinery laboratory.



工作工場
Machine works.



塗料工場（ワニス精製室）
Paint works.

レックスも」ここで製造されている。

23. 金属実験室

Cu 合金, Fe 合金, および Al 合金等種々の合金の溶融試作, ならびに金属材料および加工法の金相学的研究を担当している. このため高周波溶融真空炉, 真空および水素炉, ならびに種々の加工機械を有している.

最近の主な成果としてはガラス封着用合金, 高導磁率磁性 Ni 合金等があり, いずれも当社世田谷工場における製造的研究に協力して当社製品として製造されるに至っている.

24. 機械実験室

切削, プレス, 放電加工等の機械加工, 材料試験, 応力解析等の材料力学等を担当している. 材料試験用装置としては金属顕微鏡, 50 ton アムスラーをはじめとする各種材料試験機, 表面検査器, 200 kV X 線装置等があり, また低温室を有していて -30°C 迄の低温での材料特性を測定し得る.

抵抗線歪計による応力測定も活発であって, ターボ回転子破壊試験その他に多大の成果を収めている. また衝撃加速度測定装置 (2,000 g) を駆使しての耐衝撃設計の研究も行われている.

25. 管球試作工場

送信真空管, 受信真空管, テレビ画像管, 熱陰極放電管, イグナイトロン, 水銀放電管等の研究開発試作, ならびに中間段階の生産を行っている. 仕事の性質上研究は数量的に行う必要があるため, それに必要な製造設備, 試験装置を完備している.

26. 工作工場

研究所内の実験設備, 試作品の工作を担当する. 研究所製品の製作も行っている.

機械工作には工作機械約 40 台, 産業機械約 10 台があり, また電子管回路等の組立設備も有し, 研究活動に特有な特殊な工作要求に対処するための工作法の研究も実施している.

27. 塗料工場

当社の製作所, 工場で使用する絶縁ワニス, 特殊の小部分のものを除き, すべて本工場で生産され供給されている. 技術的な見地から絶縁ワニス自給に着手したのは昭和 16 年であっ

たが, 研究所の現位置への移転に伴い, 塗料工場も拡大新設されて自給体制が確立した. 戦後の混乱時代を切抜けてから, 米国 Westinghouse 電機会社との技術提携復活に際してその新技術を消化し, 合成樹脂系の新ワニス製造のために新工場が増設されて, いよいよ内容が充実した. 新工場はダウサムボイラーによる新加熱方式を採用しているから, 品質優秀な合成樹脂ワニスを能率よく製造することができる.

IV. 研究所製品の紹介

ここに掲げるものは, なお開発途中にあるため便宜上研究所において生産されている若干の製品紹介である.

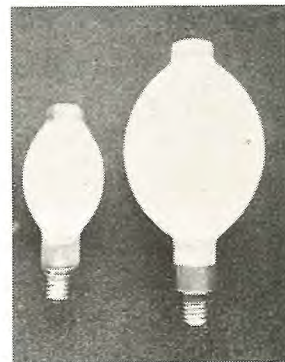
1. 水銀燈

当社の水銀燈はすでに 20 余年の歴史を有し, 太陽燈超高压水銀燈および青図焼付用高压水銀燈にはじまり, 最近では照明用蛍光水銀燈にいたるまで, 種々の水銀燈を製作してきたが, 現在当所で生産担当しているものは蛍光水銀燈を主とする高压水銀燈である.

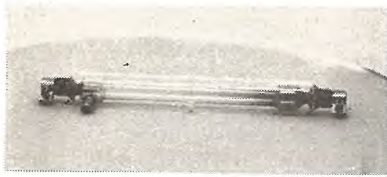
2. 閃光燈

普通の写真撮影では相当高速度のものでも $1/1,000$ 秒のシャッターで概して困らないが, さらに高速度運動の場合はシャッターのみに頼ることができない. 通常の機械的シャッターでは $1/1,000$ 秒が限度であり, 電気的シャッターではさらに短時間の露出が可能であるが光量不足のため撮影できない場合が多い. このような場合きわめて短時間発光し, かつ高燭光のランプで被写体を照明することによって鮮明な写真が得られる.

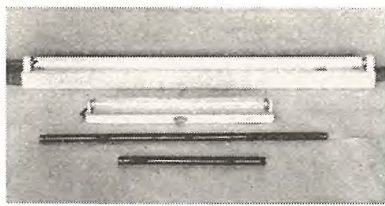
閃光燈は飛行中の弾丸, 回転中のプロペラのように高速度の運動体を撮影する場合およびストロボスコープとして使用するもので, フラッシュ時間は 10^{-6} sec, 光度



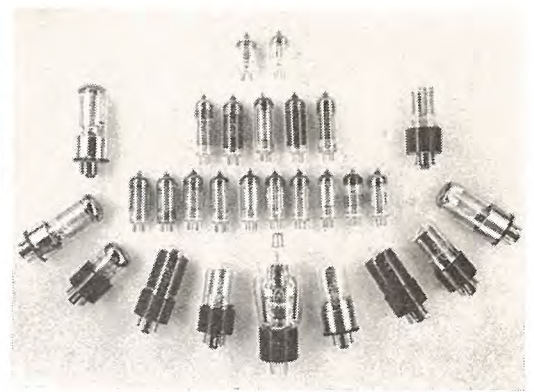
蛍光水銀燈
Fluorescent mercury lamp.



閃 光 燈
Flash lamp.



ブラックライトおよび
蛍光健康ランプ
Blach light and sun tan lamp.



各種受信真空管
Receiving tubes.

は最大 10^8 lm に達している。なお閃光燈は普通の写真撮影および飛行機の着陸用としても使用される。

3. ブラックライトランプ

近紫外線（可視線に近い波長の紫外線）が写真作用その他化学作用のあることはよく知られているが、ブラックライトランプは水銀の放電を蛍光物質によって効率よく近紫外線に変換するもので、可視光線をほとんど含まないところからブラックライトランプと呼ばれている。

用途は、物質の鑑別、蛍光物質と併用した計器盤や広告用照明および蛍光探傷法等である。

4. 蛍光健康ランプ

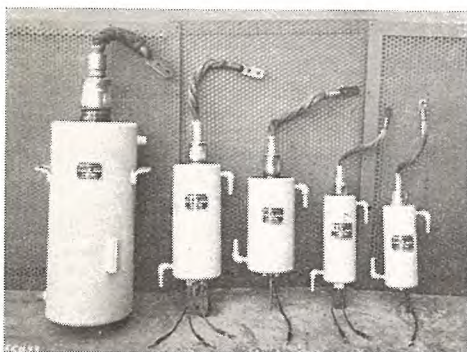
地上に到達する太陽光線の中には皮膚に日焼作用をする紫外線が含まれているが、これは波長 2967 オングストロームのものが最も効果的で、体内にビタミン D を生成する作用があり健康上重要な影響をもつところから健康線と呼ばれている。

蛍光健康ランプはこの健康線をきわめて効率よく発生するので、用途としては病院、家庭等で佝僂病の治療、虚弱体質の改善、また学校、事務所、百貨店、室内遊技場、地下室、無窓工場、および都会、冬季曇天の多い雪国等で用いれば保健上きわめて有効である。そのほか家畜家禽の飼育に使用して繁殖率、体重の増加をはかることができる。

5. イグナイトロン（ガラス型および金属管型）

溶接器用イグナイトロンはスポット、シーム、プロジェクションあるいはフラッシュバット溶接器の制御用として、すでに広く使用されている。

整流器用イグナイトロンはガラス整流器、ポンプ付整流器あ



封込イグナイトロン
Shield-off ignitron.
右から MI-1100
MI-1101
MI-1200
MI-1201
MI-1401

るいは直流電動発電機に代るものとして、製鉄、化学、鋳山用そのほか各種工場の直流電源に、また電動機の手速度制御に適し、かつ小型であるから電鉄の交流電化用の車載整流器として、坑内等の移動変電所として大変便利である。

6. 受信真空管

受信真空管は新管種に対する要求が盛んで生産工場においてすべての開発を行うことは困難であり、またなかには要求数量が僅少で量産工場で生産し難いものもある。

当所では改良途上にあるものおよび特殊用途向けの GT 管、MT 管を若干製作している。

7. 熱陰極整流管

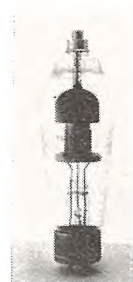
交流電源から 1 A ないし 100 A 程度の整流電流を得るものであり、管内に稀ガスまたは水銀蒸気を封入しているためわずかの管内損失で比較的大電流を流し得る。

通信機用そのほか産業用の装置に広く用いられ、自動制御や遠隔操作の装置にとくに適当である。用途や容量に応じて多種あるが、当所で製作しているものは自然冷却 2 極管 2H66, 2H67, 4H72, 4H88A, 5H58, 5H69B, 6H61, 7H57B 等である。

8. 格子制御放電管

1 個ないし 2 個の格子を持つ熱陰極形の稀ガスまたは水銀蒸気入り放電管で、格子により一方向の電流の導通開始を静電的に制御し得る。

一般にこの種放電管は起動時のみの制御で電流制御の可能な



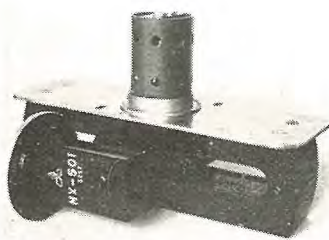
整流管
6H61
Mercury-vapor
rectifier
MP-5561.



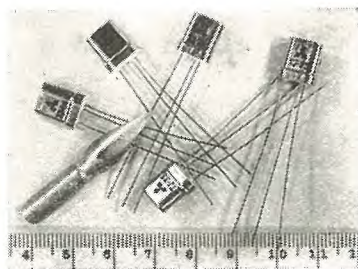
4 極サイラトロン
6G24
Four-electrode
mercury-vapor
thyatron
MQ-624.



ガス入
4 極サイラトロン
2D21
Four-electrode
inertgas-filled
thyatron
2D21.



マグネトロン MX-501
Magnetron MX-501.



トランジスタ
Transistor.



ゲルマニウム ダイオード(右)
シリコンダイオード (左)
Germanium diode.
Silicon diode.

ダイオードは 1N21A, 1N21B, 1N21C と 1N23A, 1N23B (周波数変換用) 1N22 (検波用) 級のものである。

12. 硫化カドミウム 光電導セル

光をあてるとその電気的抵抗が変化する物質 (光電導物質) は古くから知られていたが、これを

利用して入射光に対し電気的出力を得る装置 (光電導セル) が注目されはじめたのは比較的最近のことで、光電導物質の単結晶を作る技術が進歩したためである。

当所で製作している、光電導物質として硫化カドミウムの単結晶を用いたものは、感度が高く小型でまた寿命は半永久的な特長がある。

13. 光 電 管

当所では真空光電管 VP-929 とガス入り光電管 GP-5581 を作っている。

VP-929 は RCA の 929 と同等の光電管で光電面は Sb-Cs であるが、その分光感度は視感度にきわめて近いことが特長で、Ag-O-Cs 系統のものに比して可視光線に対する感度が遥かに大きい。A 光源に対する感度は陽極電圧 90V で $25 \mu\text{A/lm}$ 以上である。

GP-5581 は RCA の 5581 と同等のもので、光電面、外形は VP-929 と同一である。A 光源に対する感度は陽極電圧 90V で $75 \mu\text{A/lm}$ 以上である。

14. MW 型可搬式釣合試験機

発電機等大型高速度の回転子については、重量、寸法あるいは回転速度の制限から普通の釣合試験機は使用できない。

当社で発明した本試験機は被試験機自身の軸受上で釣合をとり得るもので短時間に高精度の釣合修正を行うことができる。

装置は振動検振器、補助発電機、増幅器の3つの部分からなっており、測定範囲は 200~4,000 rpm でターボロータのような大きなものから数馬力程度の小型回転子にいたるまで修正可能である。

15. 放射能測定装置

放射能測定装置は放射線によって検出器に生ずる電気的出力

場合に用いられ、直流回路における鋭感な起動継電器として、あるいはイグナイトロンと併用して抵抗溶接器用として使用される。また交流を直流に整流できることはもちろん直流電源を格子制御により 1,000 c/s 以下の交流出力に変換する場合にも使用できる。

当所で製作しているサイラトロンは十数種におよび、一部は無線機製作所で生産に移している。

9. マグネトロン

マグネトロンは通信機用あるいはレーダ等の送信管であるが、当所では 6,700 Mc 帯 P.T.M. 通信機用 MX-702 および 5,300 Mc 帯気象レーダ用 MX-501 を製作しており、また 9,400 Mc 帯の 2J55, 2J42 等も相次いで開発中である。

10. トランジスタ

当所で製作しているトランジスタは TJ-32, TJ-33, TJ-34, TJ-35 の 4 種類で、これらは合金接合型である。いずれも雑音指数は平均 10 db 以下の低雑音のものである。なお現在高周波用を開発中である。

11. 半導体整流器

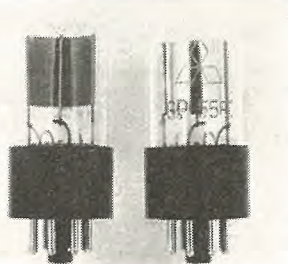
(シリコンダイオード、ゲルマニウムダイオード)

最近の通信機器や計算装置等の回路中には多数のゲルマニウムダイオードが用いられている。またマイクロ波多重通信においてシリコンダイオードは欠くことのできない重要部品になっている。すなわちこのような高い周波数では真空管で検波増幅できないので、まずシリコンダイオードによって低い周波数に変えて後、検波増幅される。

現在当所で製作しているゲルマニウムダイオードは 1N34A (一般用)、1N38, 1N39 (高逆耐圧型)、1N54 (高逆抵抗型)、1N56 (高伝導型)、1N60 (映像検波用) 級のものと、シリコン



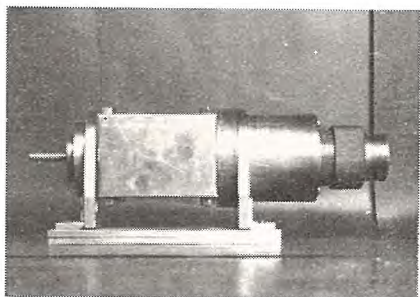
硫化カドミウム光電池
Cadmium-sulfide photocell.



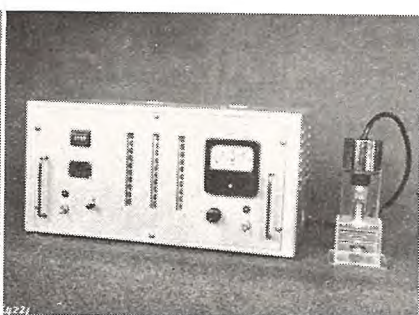
光 電 管
GP-5581
Photo-electric cell.



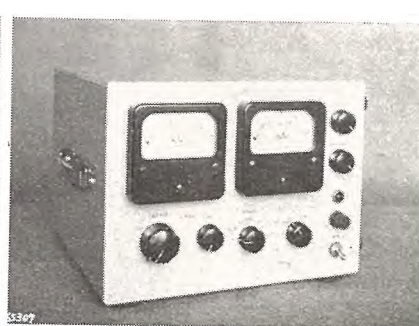
釣合試験機、増幅器
Amplifier.



釣合試験機, 補助発電機
Sine wave generator.



DS-T2 放射能測定装置
DS-T2 type scaler.



電子管メガー IT-10-E 型
Electronic megger type IJ-10-E.

で放射線強度を測定するもので、放射能検出器の代表的なものが GM 計数管である。

GM 計数管はガス封入の 2 極管で放射線が入射するごとに放電し、この放電はきわめて短時間に自己消滅するから個々の放射線粒子を検知できる。これを記録し、また計数率計によって指示するのが本装置である。

放射線には β 線, γ 線, X 線等の別があり、それによって GM 計数管の構造も幾分異なる。

(1) DS-H3 型放射能測定装置

精密測定用で 10 進法 2 段と記録器による 100 進法計数回路, GM 管用プレアンプ, 高圧電源よりなっており、幾何学的測定条件を一定にたもつためアクリル樹脂製のサンプルホルダが付属している。

(2) SU-L1 型サーベーター

GM 計数管を使用したサーベーターで、計数率計による指示方式を採用している。感度は 1,000 c/min, 5,000 c/min, 25,000 c/min の 3 段切換ができる。

(3) SU-P1 型サーベーター

携帯用サーベーターでレシーバによる検知方式である。放射性物質による汚染度の検出やウラン・プルトニウム探索用に便利である。

(4) DS-T2 型放射能測定装置

DS-H3 型を改良したもので 10 進法 3 段の 1,000 進法になっている。

16. 電子管メガー

電気装置の絶縁状態を知る 1 つの方法としてメガーによる絶縁抵抗測定は古くから用いられているが、当所では用途によって 3 種類の電子管メガーを製作している。

絶縁物の劣化程度の判定や直流耐圧試験 (最高 15 kV D-C) 等に利用できる可搬式試験機である。

17. パルス式回転計

通常使用されている機械的または電気的回転計は、その精度は 1% 程度であるが、この回転計は 0.05% 以上の高精度で 10,000 rpm まで測定できる。

装置はパルス発電機、計数装置、タイマ装置および電源部から構成され、操作はきわめて簡単でパルス発電機と計数装置を電線で連続してスタートスイッチを入れると毎分の回転数がネオンランプによって指示される。

電源入力は A-C 100 V 350 W である。

18. MP 型瞬時圧力計

水圧、油圧、蒸気圧等の変動を電磁オシロに記録する目的の圧力計には、従来蓄電器型のもものが広く使用されていたが、これは感度、周波数特性は良好でも、現場で取り扱うには調整が困難で、かつ不安定な欠点がある。

MP 型瞬時圧力計はこれらの欠点を除くため、電磁平衡型 AM 方式を採用し、励磁源として 50, 60 c/s 商用周波数と 5 kc 発振器とを有し、応答度は 50, 60 c/s に使用時は 5 c/s まで、5 kc 使用時は 500 c/s までである。

受圧ヘッドは I 型と II 型があるが、それぞれ 30 kg/cm², 70 kg/cm² まで測定できる。

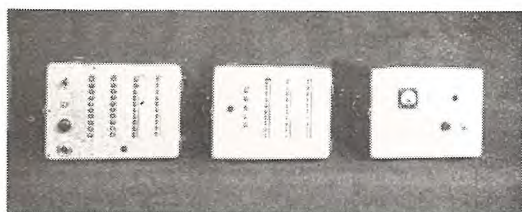
19. 熱線風速計

この風速計は、加熱白金線を検知要素とし Magnan Planiod の回路を採用している。

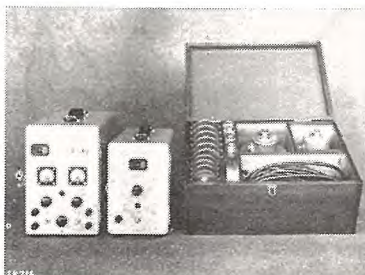
測定範囲は 30 m/sec までで、遠隔操作が容易に行われる。

20. 静電荷除去装置

静電気の起す障害は大は落雷から小は塵埃付着まで広汎にわたるが、生産工場においても電気絶縁性の高い材料を取扱う作



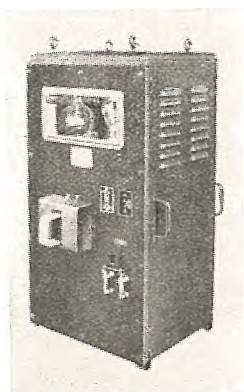
パルス回転計
Couinier type tachometer.



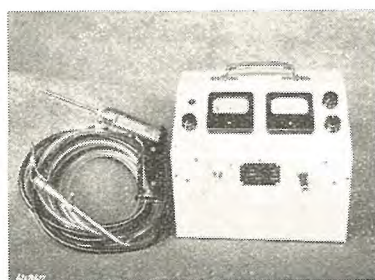
MP 型瞬時圧力計
Type MP instantaneous pressure measuring device.



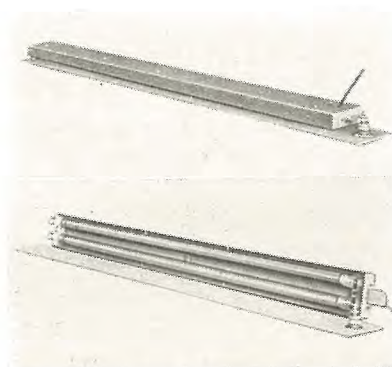
熱線風速計
Hot-wire anemometer.



イグナイトロン磁化機



H 型漏洩検知装置
Leak detector H type.



正方向

静電除去装置
Charge eliminator.

裏面

業工程では、しばしば著しい静電気が発生して障害を伴う場合が少なくない。たとえばゴム引作業では静電気の放電火花がゴム溶剤に引火して火災を招き、紡績では棉に帯電して糸が引けなかったり、また印刷工場で多彩グラビヤ印刷が困難になる等は一般によく知られている。

本装置は除電器と直流高圧電源からなっており、入力 A-C 100 V 1.5 A、出力は D-C 13 kV で 100 M Ω の安全抵抗（人物に対する）を経て除電器に荷電される。

21. イグナイトロン磁化器

永久磁石の励磁用としては、(1) 直流電源を用いて直流大電流を流すもの、(2) 蓄電器の充電、あるいは放電の際の瞬間電流を利用するものなどもあるが、イグナイトロン磁化器はこれらに比較して、(a) 操作が簡単で迅速なこと、(b) 均一な磁化を行う、(c) 直流電源を必要とせず、かつ電力消費が僅少である、(d) 被磁化物の加熱を考慮するにおよばない等の特長がある。また本器は減磁補償回路を有しきわめて効果的に磁化することができ、磁化電流は最大 40,000 A である。

22. 漏洩検知装置

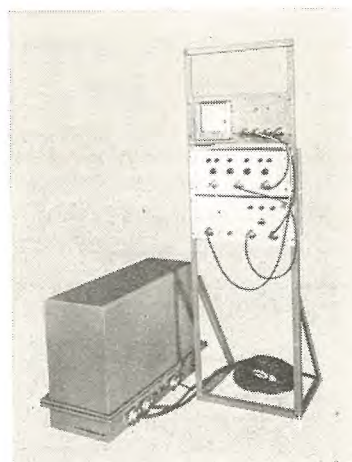
(1) H 型漏洩検知装置

真空装置、冷凍機等の漏洩を容易に検知でき、これら装置の製作、補修に利用される。

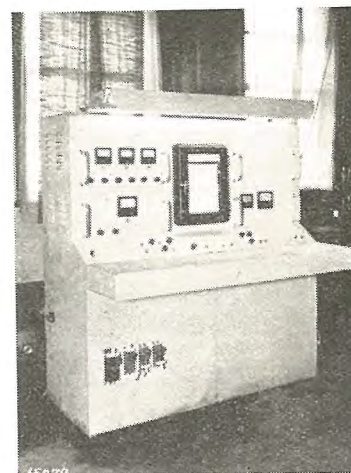
検知限度は 10^{-4} μ Hg l/sec (5 c. c./年) 程度までで、これより小さい漏洩はつぎの MS 型検知装置によらねばならないが、水素冷却発電機のように大容量のタンクの場合、また冷凍機のように内部にハロゲン化合物を充填している場合にはとくに有効に動作する。



MS 型真空漏洩検知装置
Vacuum leak detector MS type.



赤外線ガス分析装置
Infrared gas analyzer.



質量分析型ガス分析計
Mass spectrometer type gas analyzer.

(2) MS 型真空漏洩検知装置

質量分析計の原理を用いて微少な真空漏洩を検知するもので各種真空管、放電管、真空装置の漏洩を検知できる。 10^{-7} μ Hg l/sec 程度までが検知限度であるが、これは 1 l の容積のものを 1 年間放置して数 μ Hg の真空度劣化を示す程度で、加圧試験などで検知できない微少漏洩発見にとくに威力を発揮する。

23. 赤外線ガス分析計

化学工場における工程の自動制御、炭坑の爆発性ガス検知などの問題に対する要望から製作したもので、ガスの赤外線吸収を応用し、検知器はスペクトロフォンの原理に基いて作られている。このガス分析計は在来分析計に比較して

- (1) 選択性があり、多成分系の分析に適する
- (2) 応答度が速く連続測定ができる
- (3) 精度が高く（全目盛の 1% 以上）微量成分の分析ができる
- (4) 比較的複雑な有機気体の分析にも適する等の特長を有する。

24. 質量分析型ガス分析計

真空工業はもとより冶金その他の方面でも、微量のガス成分が問題にされることが多くなってきたが、この装置は分子量 2~50 の気体試料を 0.1% の精度で分析可能でさらに分解能をおとせば 2~90 の範囲を分析できる。

各種金属材料の放出ガスの定量分析、一般混合気体試料の分析はもちろん特定気体中の微量不純物の検出（たとえば蛍光燈用アルゴン中の微量窒素、水素の測定、水素冷却発電機用水素中に含まれる水蒸気の定量等）にも利用でき、ブラウン管による直視型もある。