

JAERI-M

5 2 2 3

照射用大出力 X 線発生装置

1973年5月

大島 裕之助・綿貫 孝司・亀山 研二・田中 隆一

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

照射用大出力 X 線発生装置

日本原子力研究所高崎研究所開発試験場

*大 島 裕之助

**綿 貫 孝 司

亀 山 研 二

田 中 隆 一

(1973年2月12日 受理)

高崎研究所に放射線化学の研究や食品照射などに用いる大出力の照射用 X 線発生装置を設置した。本装置は電源として出力 200 kVp, 1 A の容量の変圧器をもち, X 線管はこの変圧器の下部に懸垂されている。電子線発生部は直径 0.3 mm, 長さ 1.7 cm のタングステン線を 16 本平行に配置したもの 2 組からなっており, X 線発生部は銅板の上に厚さ 30 μm の金をメッキしたターゲットを用いこれは水冷されている。

設置以来装置は照射用線源として安定した運転が行なえるまでには技術的に解決しなければならない多くの問題が生じた。これらの問題点を 1 つずつ解明し改良を加えることによって予定の性能であるターゲットから 5 cm の位置で 2×10^4 R/min の線量率が得られた。本報告では装置の構造と最終性能が得られるまでの技術的改良の経過について述べてある。

* 大洗研究所材料試験炉部原子炉第 2 課

** 管理部安全管理課

High-Power X-ray Generator for Irradiations

* Yunosuke OSHIMA

** Takashi WATANUKI

Kenji KAMEYAMA

Ryuichi TANAKA

Takasaki Radiation Chemistry Research Estab. JAERI.

(Received February 12, 1973)

The high-power X-ray generator was constructed for research in radiation chemistry and food irradiation in the Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment. The power of 200KV, 1 A is supplied from a transformer to the X-ray tube, which is suspended below it. The filament unit is of two components, each with 16 parallel tungsten wires, 0.3 mm in diameter and 170 mm long. X-rays are generated at the gold-plated (30 μ m) copper targets cooled with water.

To have stabilized operation of the high-power generator, many technical difficulties were encountered, which were subsequently solved. It is now in operation at the design output of 2×10^4 R/min at 5 cm from the target, with the possibility of its long-term, continuous irradiation. construction of the generator, its improvements, and the irradiation characteristics are described.

* Division of JMTR Project, Reactor Section II.

** Safety Section.

目 次

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1. ま え が き | 1 |
| 2. 装 置 の 概 要 | 3 |
| 2.1 電 源 回 路 | 3 |
| 2.2 真 空 排 気 装 置 | 3 |
| 2.3 X線管 | 3 |
| 2.4 電 子 線 発 生 部 (陰 極) | 9 |
| 2.5 X線発生部 (陽 極) | 9 |
| 2.6 冷 却 系 | 11 |
| 2.7 制 御 系 | 14 |
| 2.8 建 家 お よ び 附 属 設 備 | 15 |
| 2.8.1 装 置 室 | 15 |
| 2.8.2 X線遮蔽 | 15 |
| 2.8.3 コ ン ベ ヤ | 18 |
| 3. 電 子 線 発 生 部 (陰 極) の 改 良 | 19 |
| 3.1 フ イ ラ メ ン ト 断 線 と そ の 対 策 | 21 |
| 3.2 陰 極 構 造 の 改 良 | 24 |
| 3.3 ト リ ウ ム 入 り タ ン グ ス テ ン 線 の 試 用 | 25 |
| 3.3.1 フ イ ラ メ ン ト 線 の 比 較 | 25 |
| 4. X線発生部 (陽 極) の 改 良 | 27 |
| 4.1 第 1 段 階 | 27 |
| 4.2 第 2 段 階 | 28 |
| 5. 真 空 放 電 現 象 と そ の 対 策 | 30 |
| 5.1 真 空 放 電 | 30 |
| 5.2 本 装 置 に お け る 放 電 現 象 | 30 |
| 5.3 対 策 の 実 施 | 33 |
| 5.3.1 X線管の絶縁耐圧向上 | 33 |
| 5.3.2 放電エネルギーの抑制 | 33 |
| 5.3.3 電源系 (配電線路) の保護 | 33 |
| 5.4 出力上昇運転の方法 | 36 |
| 5.5 X線管, 電極材料からのガス放出性 | 36 |
| 5.5.1 金属材料からのガス放出 | 36 |
| 5.5.2 吸蔵ガスの放出 | 38 |
| 5.5.3 電子衝撃によるガス放出 | 38 |
| 6. X線の線量分布異状 | 39 |
| 6.1 線量分布の異状現象 | 39 |

| | |
|------------------------|----|
| 7. 出力特性 | 44 |
| 7.1 ファイラメント加熱特性 | 44 |
| 7.2 管電圧と管電流特性 | 44 |
| 7.3 発生X線の線量率 | 44 |
| 8. 線量測定 | 49 |
| 8.1 線 質 | 49 |
| 8.2 吸収線量分布 | 52 |
| 8.2.1 平面強度分布 | 52 |
| 8.2.2 表面での後方散乱 | 53 |
| 8.2.3 深部線量分布 | 55 |
| 8.2.4 深部線量分布の均一性 | 57 |
| 9. あとがき | 59 |
| 文 献 | 60 |
| 付 録 | 61 |

1 ま え が き

放射線化学をはじめ食品照射などの放射線照射に用いられる線源としては ^{60}Co γ 線と加速器による電子線とが広く一般に用いられている。 ^{60}Co 線源は原子炉による中性子照射で容易に得られ、また半減期も5.26年と手頃であり安価なために多くの放射線照射に利用されてきた。しかし ^{60}Co からの γ 線はエネルギーが1.25 MeV(正確には1.33 MeVと1.17 MeV)であり透過力が強く、例えば水中での半価層は11 cmもあり、薄物照射の場合の利用効率はよくない。最近では ^{137}Cs 線源も用いられるようになったがその γ 線のエネルギーは0.667 MeVでありあまりよい利用効率の照射は期待できない。一方加速器による電子線照射の場合、電子の物質中での透過力は小さく例えば3 MeVの電子の水中での飛程は1.5 cm程度である。放射線化学および食品照射の分野ではポリエチレンフィルムのような薄物の照射からオートクレーブの照射のような厚物の照射まで要求される。また重合のように収率が線量率に依存するものや、架橋とか食品照射、放射線殺菌のように照射効果が線量率に依存しないものもある。このために利用効率を上げるためには被照射物質に適合した線源を選択することが必要である。そこで透過力が ^{60}Co γ 線と電子線の間にある線源として実効エネルギーが100 KeV程度のX線を考えてみる。実効エネルギー100 KeVのX線の水中での半価層は約5 cmであり、放射線化学で照射する高分子物質の多くは水と等価と見なされる。このような考えに立って実効エネルギー100 KeVのX線発生装置を計画し高崎研究所に設置した。この程度のエネルギーのX線では ^{60}Co 線源や電子線加速器と比較して遮蔽が容易になることも工業用線源として利点の一つにあげられるだろう。

X線発生装置そのものも古くから非破壊検査用にまたは診断用に用いられているが、これらは利用の点からみて線源の大きさが小さい方が好ましい。しかし照射用X線源は被照射物質が有限の面積をもちこの面積内では出来るかぎり均一な線量を得ることが好ましいので線源の大きさも有限の面積をもつ必要がある。このようなX線発生装置としてはすでにドイツのAEG社で製作されたものがありその性能は120 kVp, 500 mAである。この程度の容量の装置ではその遮蔽の簡易さとあいまって可搬型にすることも可能でありその用途は広いと思われる。

当研究所でX線発生装置の仕様を作るにあたってはまずX線ターゲットから5 cmの位置で $2 \times 10^4 \text{ R/min}$ の線量率が得られることを基準にした。X線管電圧は300 KVまでなら高い方が好ましいが、製作の難易さを考慮して200 KVまで可能なものとした。X線管電流はいろいろの文献を参考にしたが本装置のようにターゲットが有限の面積をもつ場合についての推定は困難であるのでAEG社のデータから類推して1 Aの容量をもつものを設計した。

本X線発生装置は高崎研究所の3号加速器として1965年9月ごろより仕様の検討が行なわれ、66年3月に発注した。67年2月初旬には製作が終り現地に搬入され、3月より調整運転を開始した。その後フィラメントの断線、ターゲットの破損、絶縁破壊などのトラブルが発生し装置の設計について再検討するに至った。そこでこれらの点を逐次改良しまた真空系についても改良を加えることにより一歩ずつ予定の性能に近づいた。しかし出力が増加した時点において新たに線量分布が不均一になるという問題点に遭遇した。これについては電子線発生部に問題があることがほぼ明らかとなったが、本現象が出力増強の過程で一時的に起ったこと

から明確な対策をたてることが困難である。現在では線量率も定格に達し十分照射に使用し得る状態で長時間運転を続行することも可能である。

本報告はまず装置の概要について述べ、調整時期に遭遇したいろいろのトラブルとその対策について記し、さらに線量率分布の測定結果などをまとめた技術的報告書である。

2. 装置の概要

2.1 電源回路

本装置の系統図をFig.1に示す。X線管に高電圧を供給する高電圧回路は、配電線路より交流3相50Hz 6.6Kvを受電し、3相誘導電圧調整器を遠隔操作することにより、0~13Kvに任意に変圧して整流器用変圧器(12.5Kv/165Kv)に送りその交流出力をシリコン整流器を用いた3相全波整流回路に送る。整流回路の出力直流0~200KvpをX線管電圧としている。電源操作のスイッチとしては高圧交流気中電磁接触器を採用した。整流器用変圧器、シリコン整流器は油入自冷式の高圧電源タンクに組込まれている。

X線管の陰極フィラメントを点火するフィラメント回路の絶影変圧器(210V/250V)は電源タンクに組込んでいる。X線管電流の調整は、フィラメント変圧器一次側の単巻変圧器をスライダック式に遠隔操作することによっておこなう。

X線管電圧の測定は高圧電源タンク内に設けられた2000M Ω ブリダーによって測定している。

本装置のような場合の電源機器については、とくにサージに対して対策を講じなければならない。このために出力側には直列インダクタンス、入力側には保護抵抗器を取付けてある。受電側電路には避雷器を設置したほか過電圧、過電流、低電圧、接地継電器からなる保護装置を備えている。Photo-1に本装置の外観を示す。

2.2 真空排気装置

X線発生装置において運転時におけるX線管の真空度の良否は得られる出力の安定度に大きな影響をもつ。このため、真空排気装置によってX線管内を 3×10^{-6} Torr程度以上の高真空度を保つ。

X線発生時には14"油拡散ポンプ(4,000 ℓ /sec)を主体とする4"油エゼクターポンプ、キニー型回転ポンプで構成された系の運転を行なう。この場合に油の逆拡散を防ぐために、水冷バップルおよび液体窒素を使用した冷却トラップを使用する。

X線照射休止時および低出力運転時には400 ℓ /secの排気能力をもつイオンポンプを運転している。

真空計としては、X線管側部排気口付近および冷却トラップと主弁の間にそれぞれ電離真空計を、油回転ポンプの先にはガイスラー管を使用している。

Fig.2に真空排気系統図を示す。

2.3 X線管

陰極で発生した電子線をX線発生ターゲットに向かって加速する真空槽である。上蓋にはアルミナ磁器製の絶縁碍管が下蓋にはX線ターゲットが取付く。

絶縁碍管は大地側ターゲット(陽極)に対して陰極を300KVDCの絶縁を保ち、かつ支持するためのものである。電位分布を均一化するために絶縁碍管の内面にそれぞれ無酸素銅製の

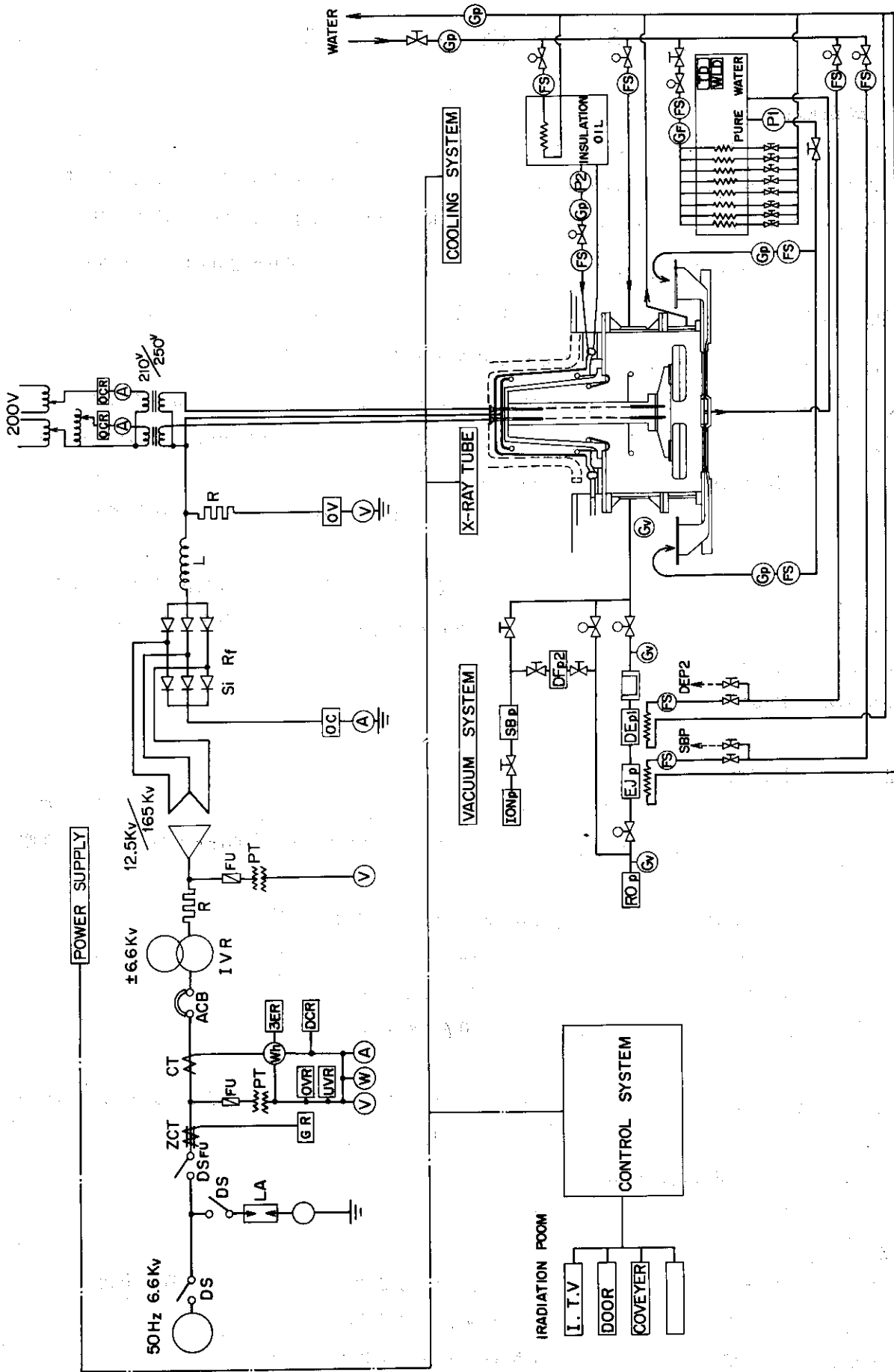


Fig. 1 照射用大出力 X 線発生装置の系統図

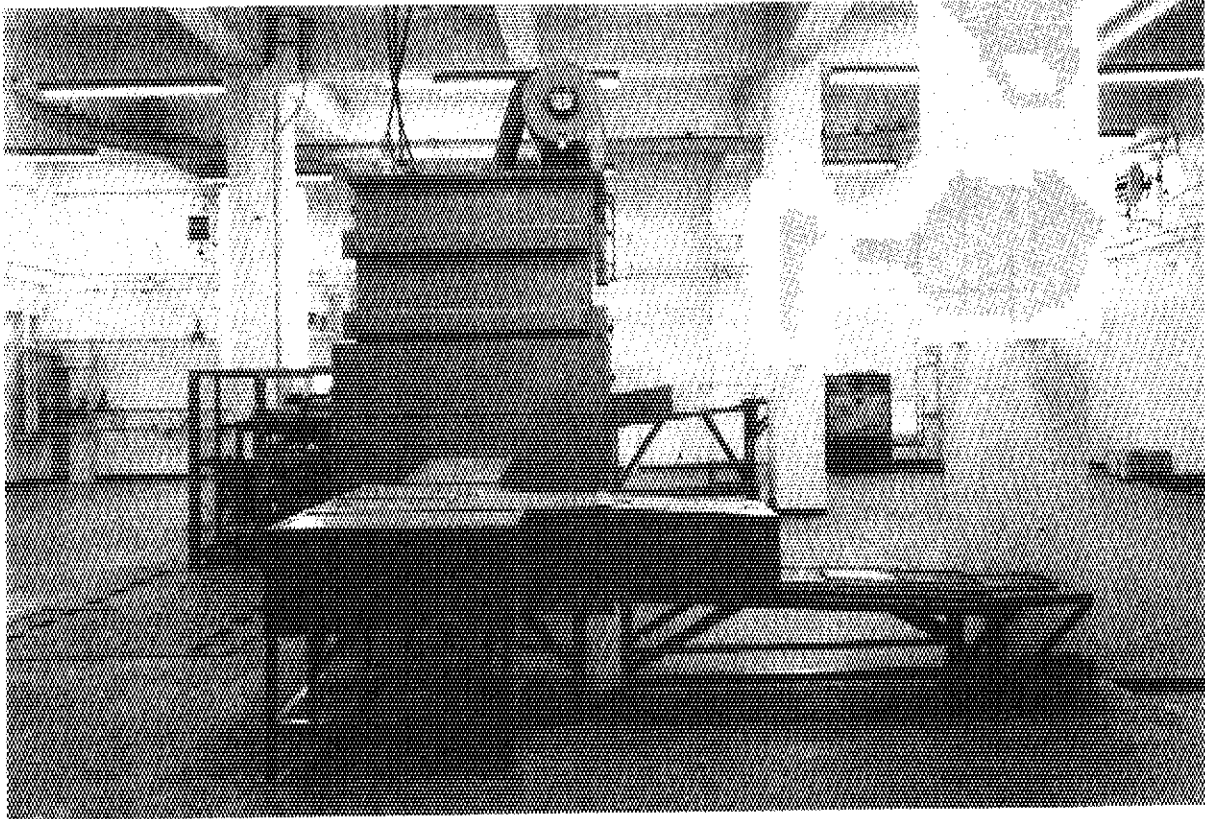
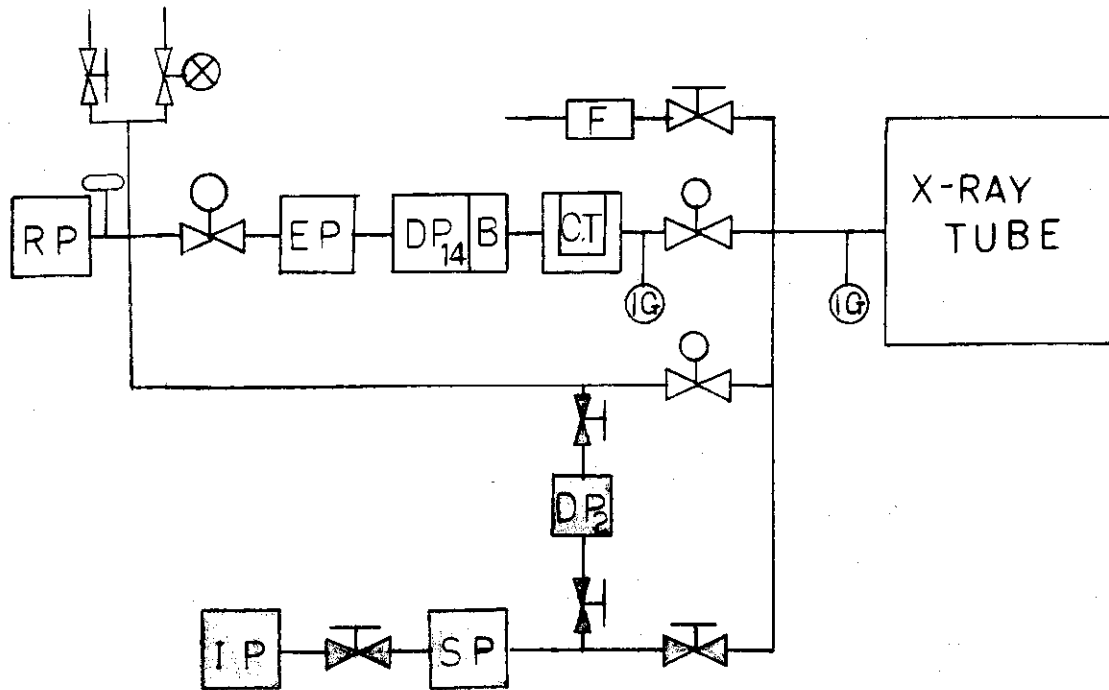


Photo-1 照射用大出力X線発生装置の外観



- | | |
|------------------|------------------|
| C.T | COLD TRAP |
| B | BAFFLE |
| DP ₁₄ | DIFFUSION PUMP |
| EP | EJECTOR PUMP |
| RP | ROTARY PUMP |
| F | LEAK FILTER |
| DP ₂ | DIFFUSION PUMP |
| SP | SUBLIMATION PUMP |
| IP | ION PUMP |

Fig.2 真空排气系統図

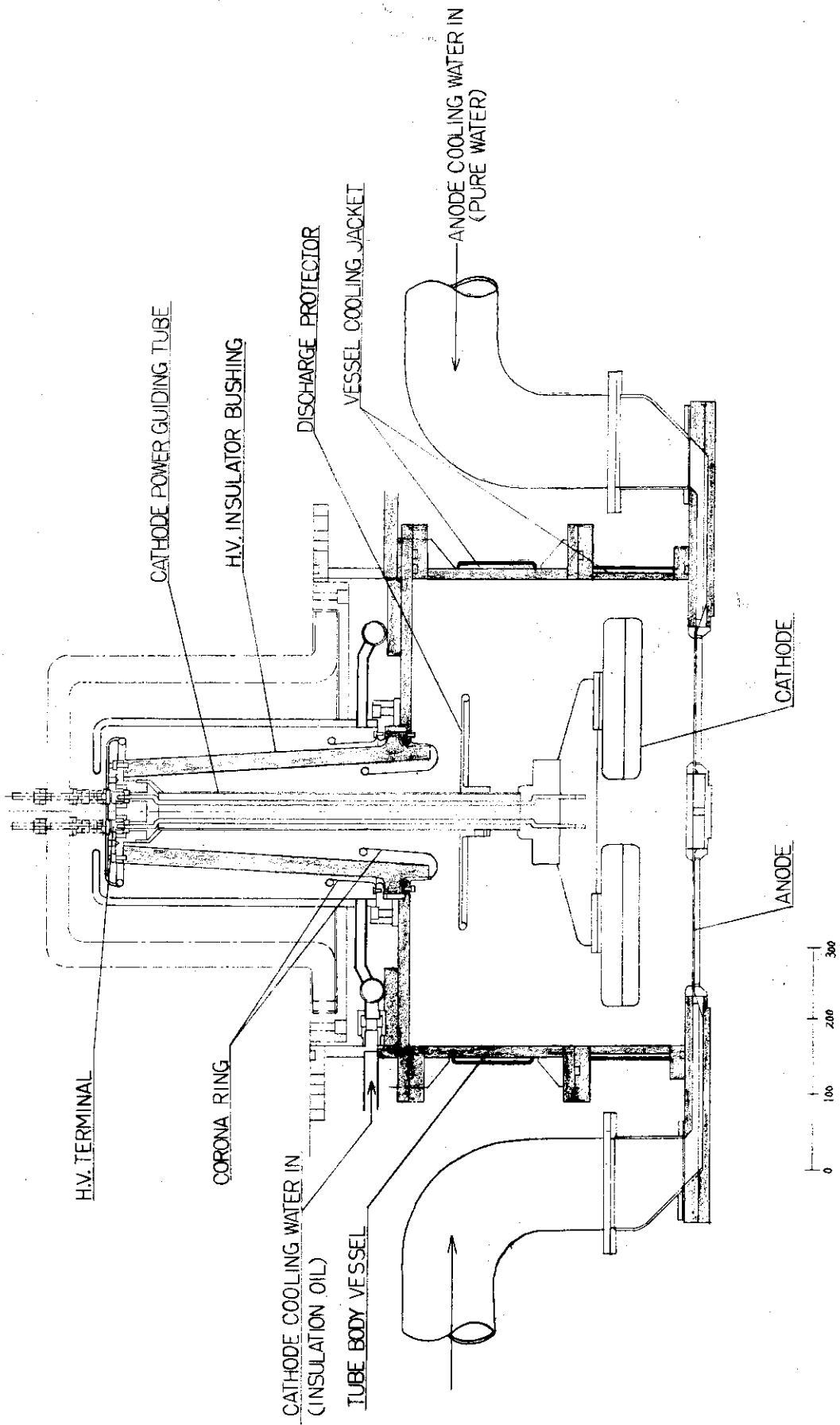


Fig. 3 X線管の構造図

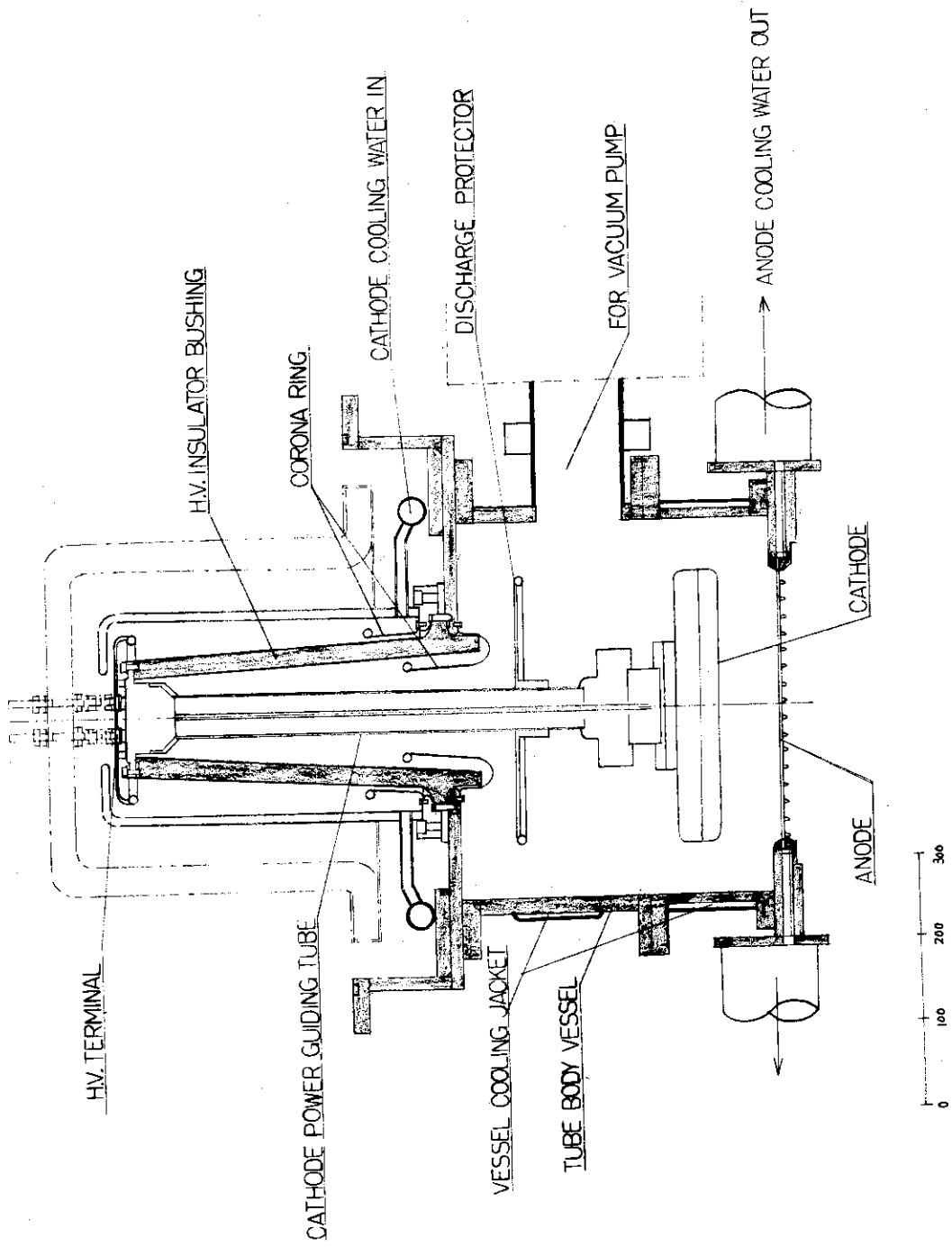


Fig.4 X線管の構造図

の均圧環が設けてある。

X線管の横側には14"真空排気系に継がる排気孔が設けてある。

X線管側壁は2重構造にして中に冷却水(井水)を通して冷却している。Fig.3およびFig.4にX線管の構造を示す。

2.4 電子線発生部(陰極)

電子線の発生は、フィラメントを加熱して熱電子線を得るのであるが、本装置における電子線発生部は次の3点が満たされなければならない。

- 1) 電子線がターゲット面に均一に分布する。
- 2) ターゲット面以外に電子線が散逸しない。
- 3) 熱電子が効率良く放射され、しかもフィラメントは長寿命であること。

これらの条件を満たすとともに、X線量の変化をフィラメント加熱電流で行なうためには、動作温度は印加X線管電圧に対して温度制限領域におかななければならない。

電子線発生部は、純タングステン線0.3mmφのものを平行に16本並べ電気的には直列に接続されたもの2組よりなっている。

フィラメント支持部近傍はエンドクーリングのため電子放射がないので、タングステン線の長さは約17cmにしてある。このような長い線状のフィラメントになると、高温になるにつれて伸びることと、抗張力が弱まることで中央部が垂れ下がるようになる。このためにフィラメントの片端にはスプリングを取付け常に張力を加えるような構造になっている。また、フィラメント中央部にタングステンで作られたアンカを設け、これによって懸垂したわみを抑えている。

ターゲット面以外に電子線が散逸することを防ぐためにフィラメントブロックの周囲にステンレス製のカバーを取付けてある。このカバーは陰極近傍の電位傾度を均一化して放電防止にも役立っている。

陰極への高電圧印加の中継およびフィラメント加熱用交流電力の供給は支持導入管によって行なわれる。

支持導入管は高電圧電極電位であり、支持導入管のなかにはフィラメント用電力導入線として無酸素銅線5mmφのもの2本があり、これによって左右フィラメントに加熱電流を供給している。Photo-2に電子線発生部(陰極)を示す。

2.5 X線発生部(陽極)

電子線発生部で発生し高電圧によって加速された電子線が衝突してX線を発生する部分で、X線ターゲットおよび冷却水ヘッダーからなっている。

電子線による制動放射X線発生の転換効率¹⁾はKulenkampff¹⁾により $50\text{Kv} < U < 1000\text{Kv}$ のものについては次式が成立つと考えられる。

$$N = 2.2 \times 10^{-8} Z U^{3/4} \quad \text{----- (1)}$$

U : X線管電圧 (V)

Z : ターゲット物質の原子番号

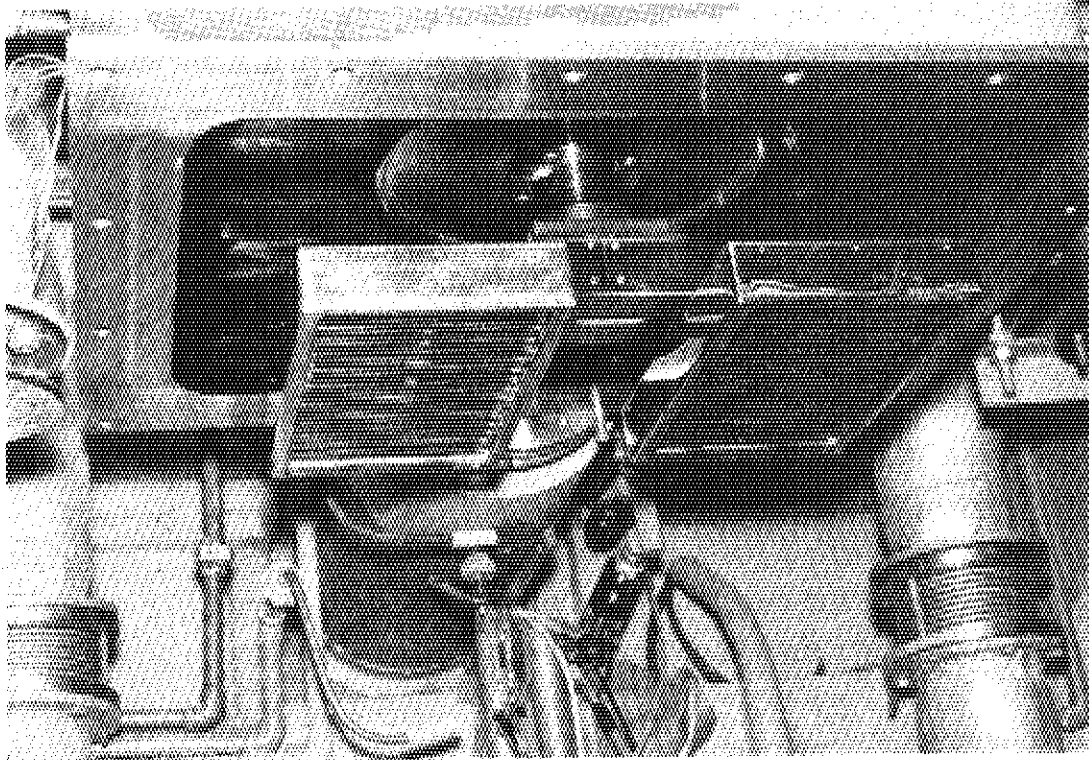


Photo-2 電子線発生部 (陰極)

本装置のX線ターゲットには、電子線からX線への転換効率が他の物質に較べてよいAuを採用した。

電子線によってX線を発生する場合のターゲットの厚さは、加速電子が完全に止められてしまいう厚さ(最大飛程)よりわずかに厚い程度が最も経済的である。

電圧200Kvで加速された電子線に対するAuの最大飛程はSchanland²⁾によって次式で与えられている。

$$R_p = c \left[(1 - \beta^2)^{1/2} + (1 - \beta^2)^{1/2} - 2 \right] \quad (2)$$

$\beta = 0.695$ $\rho = 19.32 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ $C = 0.40$ を用いてRを計算すると $R_p = 44 \text{ (mg/cm}^2\text{)}$ となり

$R = 23 \times 10^{-8} \text{ m}$ を得る。

Gledenin³⁾によって与えられた。

$$R_p = 407 E_\beta^{1.38} \text{ (mg/cm}^2\text{)} \quad (3)$$

を用いて計算しても43(mg/cm²)程度の結果を得る。

したがって本装置ではAuターゲットの厚さを30μmとしている。ターゲットAu30μmは銅基板上に金メッキを施してある。

本装置のようにX線がX線発生部(陽極)を透過してから照射に利用される形式のX線発生部の構造については、次の点に留意しなければならない。

- 1) できるかぎりX線吸収の少ない構造とする。
- 2) (1)式に示したように、電子線からX線への転換効率は非常に低く99%程度が熱エネルギーとなって消費される。したがって冷却方法が重要な問題となる。
- 3) X線発生部のターゲット面は高真空に保たれ、冷却回路をはさんで下面は大気側となるから十分な気密と機械的強度が要求される。

Fig.5 に電子線発生部(陰極)およびX線発生部(陽極)の概略構造を示す。

冷却水路には仕切帯を設けて、冷却水を均一に流し冷却作用を一様化して冷却効果を高めるとともに機械的強度を増している。また仕切帯の下部大気側に補強リムを設けて機械的強度を補っている。Photo-3にX線発生部の外観を示す。

2.6 冷却系装置

冷却系は、X線発生部(陽極)水冷却、高電圧接続部油冷却、X線管側壁および真空排気装置への水冷却に大別される。

X線発生部(陽極)冷却は、1次側閉ループとし冷却面に腐食生成物が付着すると、いちじくしく過熱するおそれがあるので冷却材としては純水を使用している。

ターゲット面での流速は13cm/sec程度である。

1次冷却水に接する面は原則としてステンレス鋼にて製作されている。循環ポンプには多段渦巻形ポンプを使用している。容積約2000ℓの1次冷却水槽内には管型蛇管式の熱交換器を設けてあり、熱交換器2次側は水道水(井水)によって冷却している。

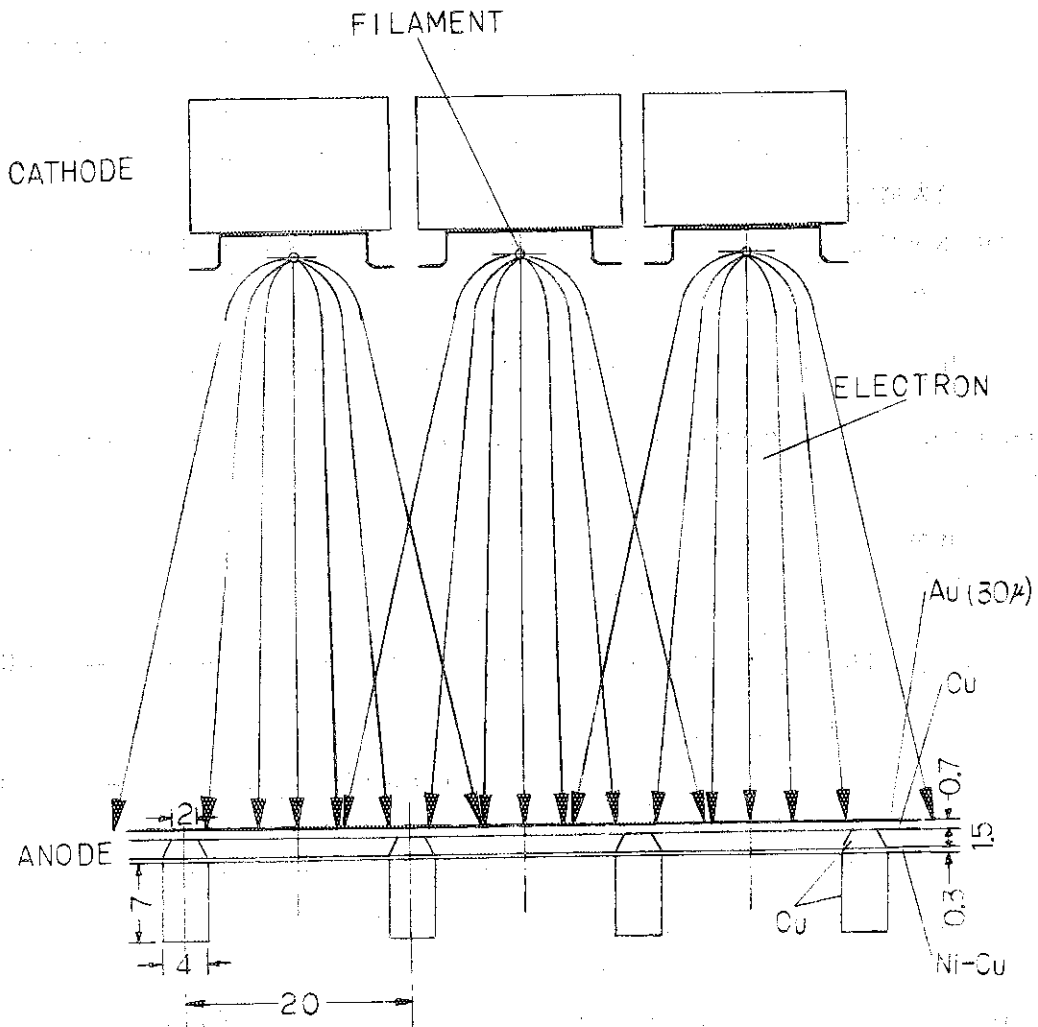


Fig.5 電子線発生部（陰極）とX線発生部（陽極）

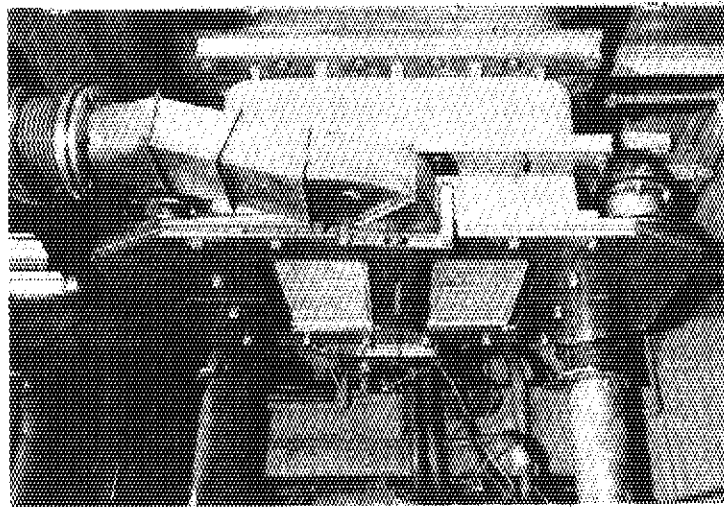


Photo-3 X線発生部（陽極）の外観

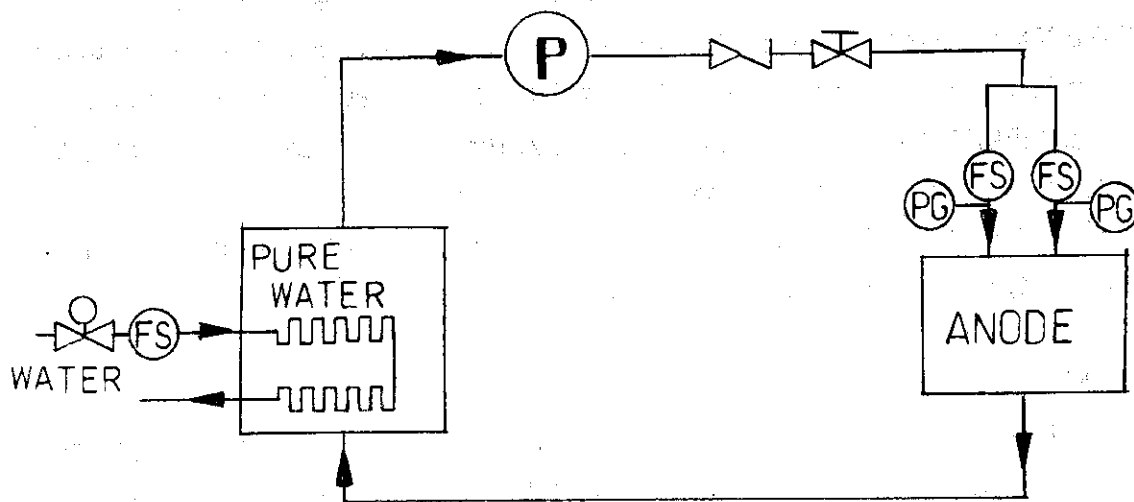


Fig. 6 X線発生部 (陽極) の冷却系

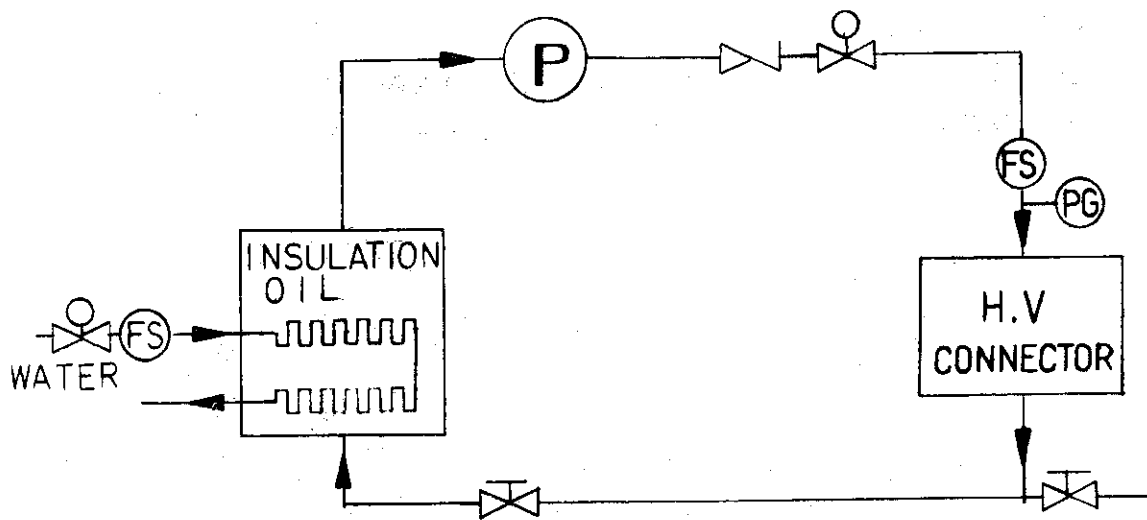


Fig. 7 高電圧接続部の冷却系

高電圧接続部を含む絶縁碍管の外側は、陰極フィラメントからの発熱を冷却するとともに直流高電圧電源とX線管の接続部を絶縁油で充填循環させることにより、接続部をケーブルレス方式として小型化している。したがって1次閉ループとして冷却材には絶縁油を用いている。

400ℓ 絶縁油槽内に熱交換器を設け交換器2次側を水道水によって冷却している。絶縁油の循環ポンプにはギャーポンプを使用している。

X線管側壁、真空排気装置の冷却は水道水によって行なわれている。Fig・6およびFig・7に陽極および高電圧接続部の冷却系統を図示する。

2.7 制御系

本装置が照射用線源機器として利用されるためには、簡便な操作が出来ることが必要であり、また運転中一部に事故が発生した場合に、これが他に類をおよぼさないようなインターロックを各部の制御回路に入れた。放射線安全については特に照射室—装置間のインターロックを嚴重にした。この様な観点から操作回路及び制御回路を一つの型に集めて一人で運転出来る様にした。(回路については付録 総合結線図を参照)

Photo 4はこの制御盤で全部押ボタン操作になっている。真空排気系、冷却系、高電圧発生電子線発生回路の操作、制御およびこれらに必要なメータが盤に集められ、左から順次ボタンを押すと運転状態になる配列にした。制御盤の脇に照射室内の状況を監視する16"TVモニターを備え照射の状況を監視しながら運転することができる。各部の操作回路の説明は省略するがここではインターロックに関する概念だけを列記しておく。

- 1) 照射室扉のキーは施錠しないとはずれず、キーは制御盤と共通でキーを制御盤に挿入しないとX線管電圧は印加できない。
- 2) 照射室扉が完全に閉じていないと(機械的、電氣的に)X線管電圧は印加できない。
- 3) 照射室内の緊急スイッチを操作すればX線管電源はOFFとなる。

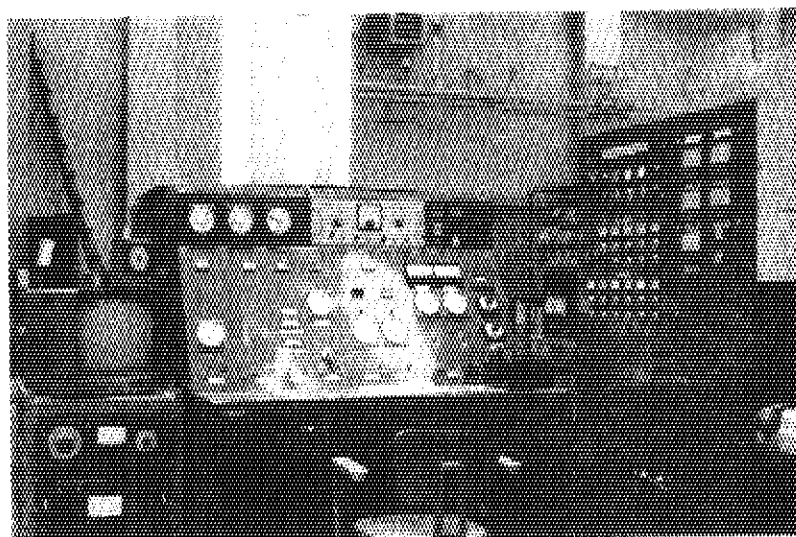


Photo 4 制 御 盤

2.8 建家および附属設備

2.8.1 装置室

本装置を設置した高崎研究所3号加速器棟の建家平面図および断面図をFig.8に示す、建家は装置室と研究室群に分けられるが、ここでは装置室についてのみ述べることにする。

装置室は広さ21m×21m、高さ7mの室でこのほば中央にX線発生装置本体とこれに付属するコンベヤーが設置されている。装置の電源系機器である高電圧交流電源盤、誘導電圧調整器、保護抵抗器などは直上階の電源機器室に収められ、また冷却系装置は床下ピット内に収められている。

放射線照射施設にはコンクリートで遮蔽したセルがつきものであるが、本X線発生装置の場合も当初の計画では装置室の中央部にコンクリートの厚い壁で遮蔽された照射室およびX線装置室を設け、遮蔽窓を通して照射室内を監視し、照射室への出入は遮蔽扉による従来の方法を考えていた。しかしコンクリートの厚壁を有する照射室を装置室と区別して設けることは、いろいろの照射実験に対してスペース的に融通がきかないことと、また、100~200kVのX線の遮蔽は容易であることなどの理由から取りやめにした。すなわちX線発生装置を装置室の中央に設置しX線発生部の周りを鉛の遮蔽板で取囲む方法をとった。この点が従来の加速器などの場合とは大いに異なる点である。

この鉛板で囲まれた照射部は2m×3.4mの広さを有し、高さは約1.6mである。内部には監視用TVカメラを備え照射の状況を16"モニターにより制御盤付近で監視できるようになっている。TVカメラは放射線による損傷をさけるために、X線防護箱内に備え、別に設けられた金属製の鏡に映る照射状況をとらえている。またTV監視に必要な照度を得るために蛍光灯および散光型白熱電球を設けてある。

遮蔽壁内に発生するオゾンや熱を外に排気し、新鮮な空気を送るために15cmφの羽根を有する給気および排気ファンを設けてある。

2.8.2 X線遮蔽

放射線の遮蔽を設計するには遮蔽物の外側の各点での線量率分布を正確に計算する必要があるが、本装置の場合はX線発生系およびコンベヤーの配置などにより複雑であり、またX線が連続スペクトルをもつなどの理由によって近似的な計算で設計せざるを得ない。そこで点状線源を仮定し逆二乗則による計算を行なって各点の線量率を概算し、さらにAEGの装置によるデータを参考にして設計した。各方向でのX線エネルギーは次の計算式から求めた。

$$E' = \frac{E}{1 + 1.96E(1 - \cos \phi)} \text{ (MeV)}$$

ここでEはX線管電圧をMeVで表わしたものである。

低エネルギーX線の遮蔽には原子番号の大きい物質が有効であることから鉛を用いた。すなわち2~3mmの鉄板で保護したサンドイッチ状の鉛板を使用している。照射部の側壁は厚さ7mm、また高圧電源タンクの側壁は厚さ4mmの鉛板を用いて全周にわたって囲んでいる。また照射部は床面下25cmまで厚さ7mmの鉛板を全周にわたって埋設しX線の漏洩を防いでいる。

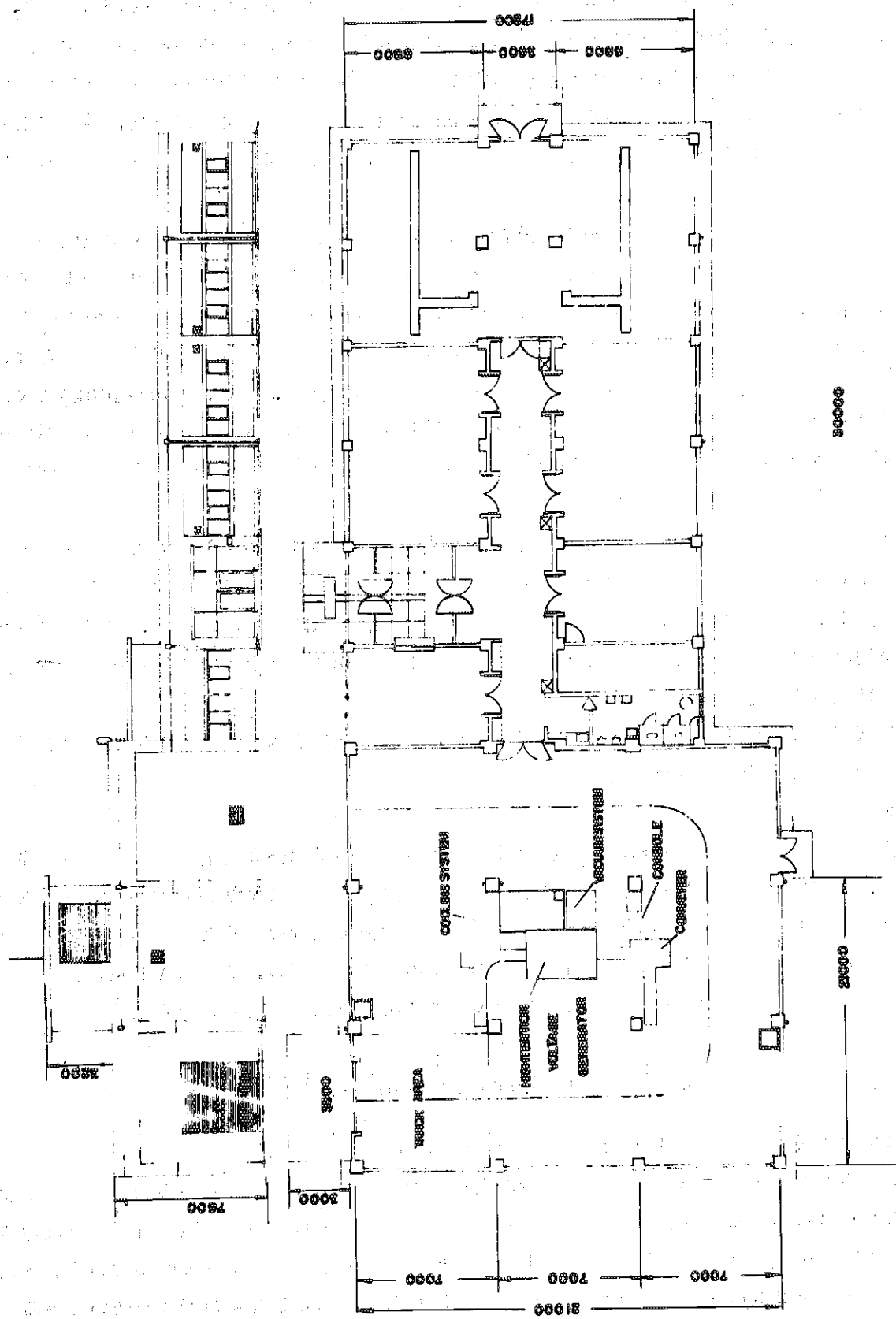


Fig. 8 本装置の設置された高崎研3号加速器棟

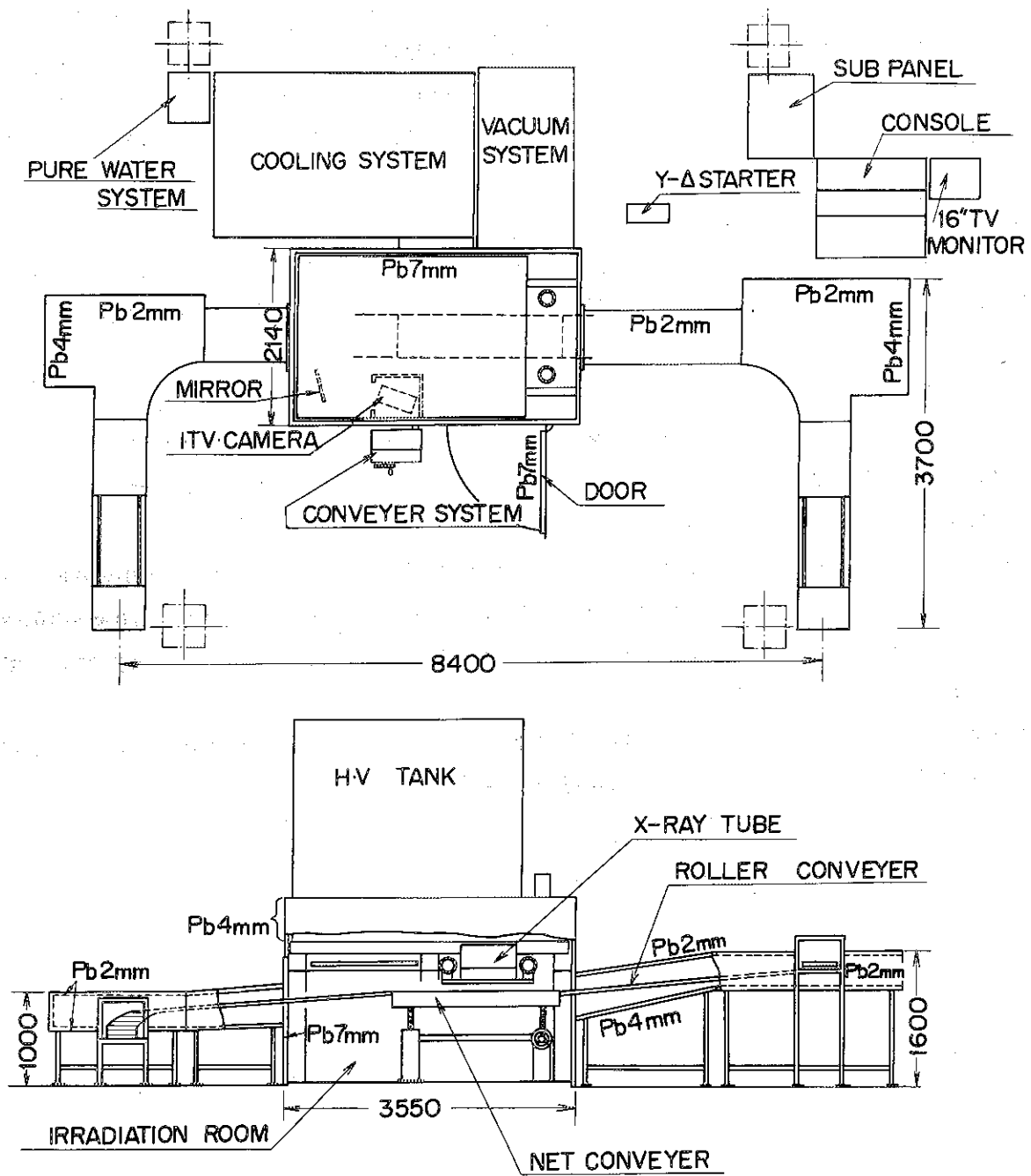


Fig. 9 装置の配置および遮蔽

コンベヤ部の遮蔽はX線発生部を直視する部分である照射部側壁から170cmはなれたところまでの下部および左右両側面は厚さ4mmの鉛板を用いその他は厚さ2mmの鉛板を使用した。またX線は少くとも3回散乱線以上でないとして外部に漏洩しない構造とした。コンベヤの上部の遮蔽板は簡単に取りはずしのできる構造になっており容易に点検ができる。Fig.9に本装置の配置ならびに遮蔽板の厚さを示す。

試運転時に実測したところ、遮蔽板と架台との接合部より漏洩があったので接合部にサンドイッチ状の鉛板を用いて補強を行なった。その後は出力上昇ごとに実測を行ない、真空排気系導入部、コンベヤ駆動部、扉の建穴付近など漏洩の見出された数箇所については手直しを行なった。

2.8.3 コンベヤ

連続照射のために巾40cmのローラコンベヤとネットコンベヤを組合せたコンベヤを設置した。材質はX線照射野のネットコンベヤ部がステンレス製で、ローラコンベヤ部は硬質アルミニウムである。

X線照射野のネットコンベヤは遮蔽壁外に設置された駆動装置により10cm~60cm/hの速度で駆動される。またネットコンベヤの上面とX線発生ターゲット面との距離が50mm~300mmの任意の値になるようハンドル操作で高さが調節できる構造になっている。この調節に応じてローラコンベヤ部の高さも調節される。

ローラコンベヤ部は傾斜による試料の重力落下方式を採用している。各コンベヤは取外し取付けが簡単にできるのでX線管球部の保守点検を容易にしている。

3 電子線発生部（陰極）の改良

電子線発生部（陰極）は、2.4で述べたが

- 1) 電子線がターゲット面に均一に分布する。
- 2) 電子線がターゲット面以外に散逸しない。
- 3) 熱電子放射効率が高く、フィラメントが長寿命である。

3条件を満たすととも、照射X線量の変化をフィラメント加熱電流の変化によって行なうためには動作温度は印加X線管電圧に対して温度制限域におかなければならない。これらを満たすためにフィラメントとして0.3mm ϕ の純タングステン線とトリウム入りタングステン線について検討し、純タングステン線を採用した。

電子線をターゲット面に均一に分布させるために集束電極を設ける構造とした。そして電子線の集束状態を調べるために荷電粒子軌道追跡装置⁴⁾を使用しその結果からFig.10に示すような電極形状を決定した。2.3で述べたがフィラメントは加熱によって変形するがこれを防ぐためスプリングにて常時張力を加え、さらに1本のフィラメントに6カ所をアンカーで支える構造とした。支持方法の概略をFig.11に示す。

またターゲット面以外へ電子線が散逸することを防ぐためにフィラメントブロックの周囲にカバーを取付けた。このカバーは陰極近傍の電位傾度を均一化することにより放電の防止にも役立っている。Fig.12に概略構造を示す。

陰極全体としては0.3mm ϕ の純タングステン線を1組につき15本並行に張り電氣的には直列に接続した。これを2組使用してPhoto 5に示すように配列した。

フィラメントは加熱電流7A、加熱温度2300°K付近にて使用する。上述した構造および使用条件のものが当研究所に据付られた当初の「陰極」であった。

これを装備しての初期の運転では、陰極フィラメントの断線が繰返し起ったが以下これを述べる。

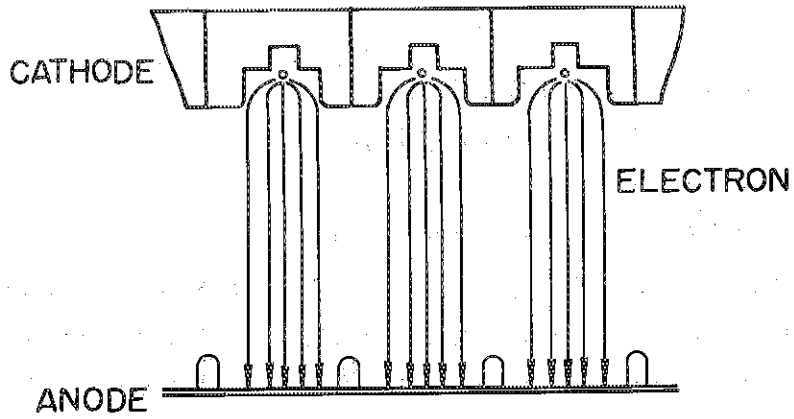


Fig.10 初期の電極構造

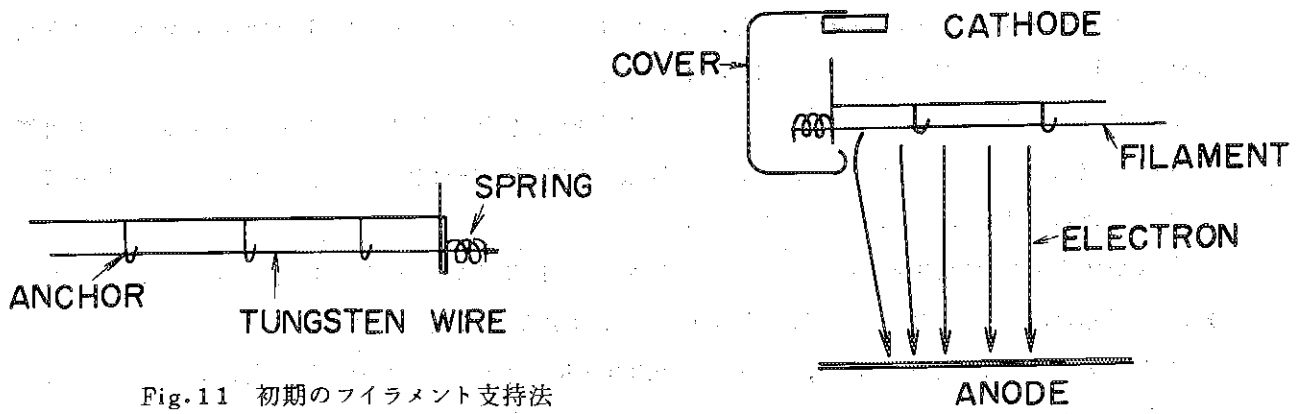


Fig.11 初期のフィラメント支持法

Fig.12 初期の陰極構造

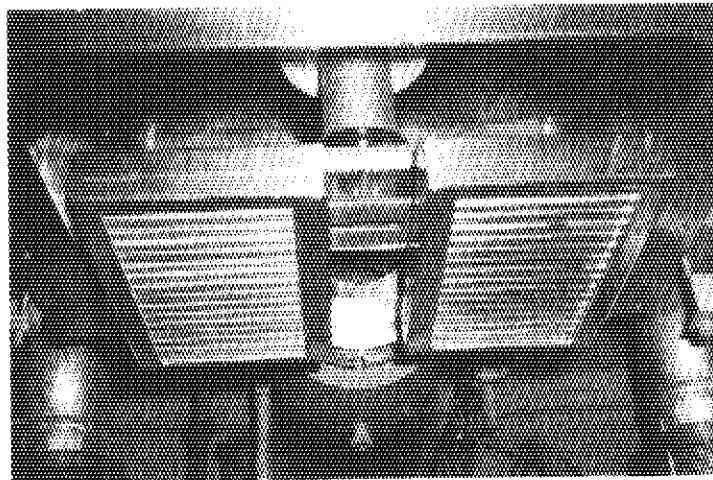


Photo-5 初期の陰極

3.1 ファイラメント断線とその対策

前述した陰極を装備して1967年3月10日よりファイラメントエージングを開始したが、早くも3日後にはファイラメント断線が起った。

この断線については、X線管構造物の脱ガス不足により残留ガスに含まれる炭素がタングステンに作用して炭化層を作り断線に至ったと判断し、予備の陰極に交換しエージングを続けたが、断線、交換が繰返された。

断線したタングステン線ファイラメントは顕微鏡写真、X線アナライザ等による検査結果から炭化による断線であることが確められた。photo-6に断線したファイラメント線の顕微鏡写真を示す。Aは未使用の0.3 mm ϕ 純タングステン線である。B、Cは断線したファイラメントと同じ陰極に組込まれたファイラメントの同一線上(17cm)における中間温度付近Bおよび高温部Cのものである。それぞれの外側は写真撮影のために施した銅メッキ層である。Bでは約1/2が炭化しており、Cでは完全に中心まで炭化して大きなクラックが生じている。またCでは体積、線径が増大しておりこの状態から断線に至るものと推定した。Photo-7は高温部の表面状態を示す。この炭化による断線の原因については、この時期には次によるものと判断した。

1) X線管構造物よりの放出ガスによる

2) 拡散ポンプ油の逆拡散による

1)の対策として、X線発生部(陽極)取付け位置を利用して使用できる構造の真空加熱用ヒーター(タングステン製5KW)を製作し、これを用いてX線管のベーキングを実施した。

2)の対策としては、次の事項を実施した。

a 拡散ポンプ油にシリコーン油の採用

この時期には拡散ポンプ油として合成油(石油系炭化水素)を使用していたが、これをシリコーン油(DC704)に変更した。これは合成油よりは蒸気圧が低いことと炭素の含有量が少ないことによりタングステン線を炭化させる作用が少ないと推測したためである。以後現在に至るまでシリコーン油を使用している。

b コールドトラップの改良

トラップについては、液体窒素封入量と吸着面積を増大しトラップ板の増設を行なった。

c イオンポンプの設置

オイルフリーの清浄な高真空を実現することを目標に、この当時入手可能な最大級のイオンポンプ(400 l/sec)とサブリーメーションポンプとを組み合わせた複合ポンプ系を新設した。(2・2真空排気装置参照)

この複合ポンプ系の単独運転を出力上昇運転の過程で試みたが、X線管内の放出ガスが多いことによって排気能率が悪く実用的には問題があると判断した。以後現在に至るまで低出力運転時およびX線発生休止時におけるX線管内の高真空度保持にはイオンポンプの単独運転で行なっている。以上の対策を講じたことにより、ファイラメントの寿命は300~400時間程度になった。

また、ファイラメント断線の原因に炭化によるもののほかに、放電エネルギーによる溶断がみられたが、これについては放電対策の項で述べるが、1968年2月に高圧電源回路のインピーダンスを増加して放電電流を減少させるために、交流側回路に電力用鋳鉄グリット抵抗器40 Ω /相の挿入工事を実施した。この結果は実験により出力側短絡電流の減少することが確められた。またこれ以後は放電が原因とみられるファイラメント断線は発生していない。このイ

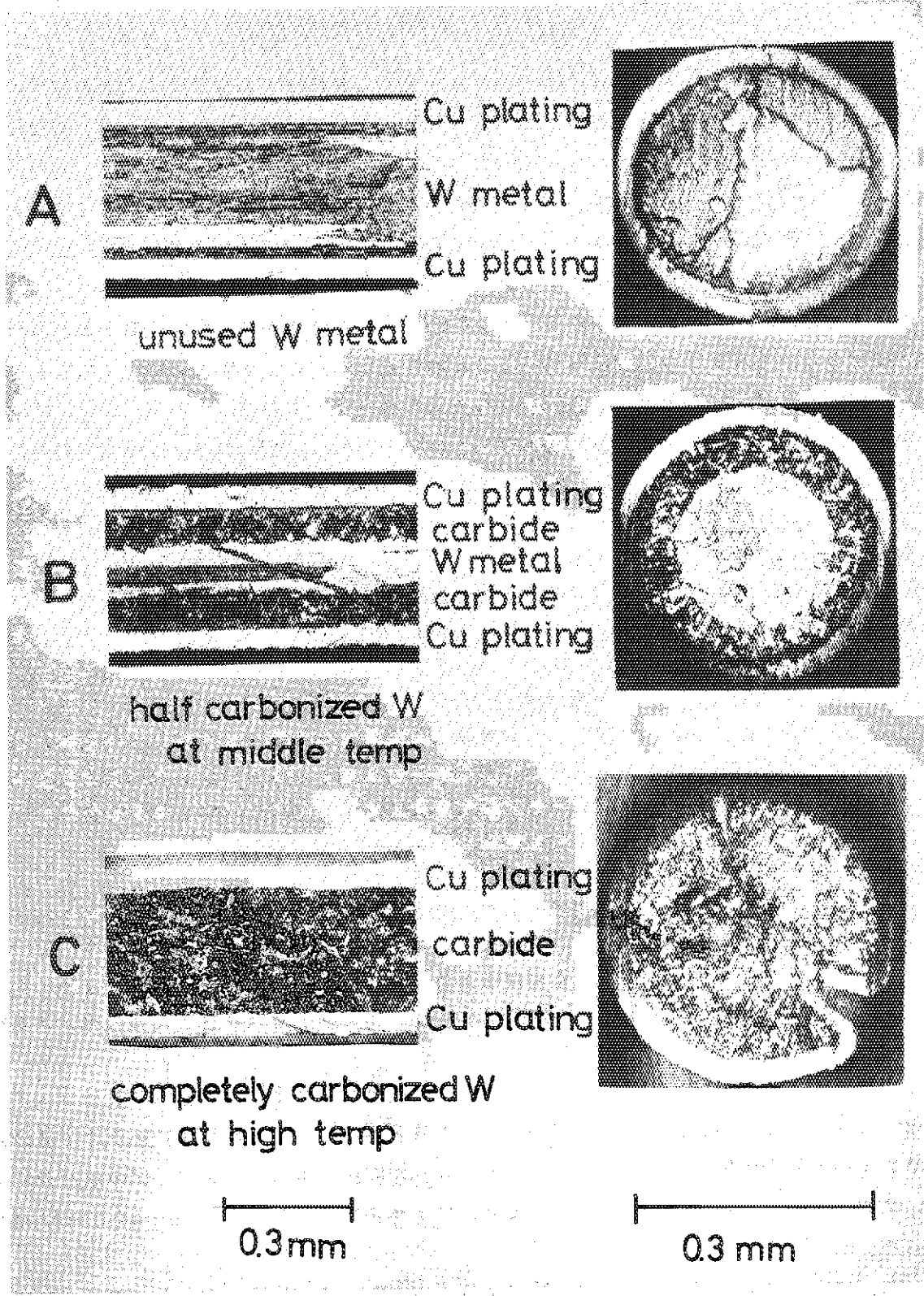


Photo-6 断線したフィラメントの顕微鏡写真

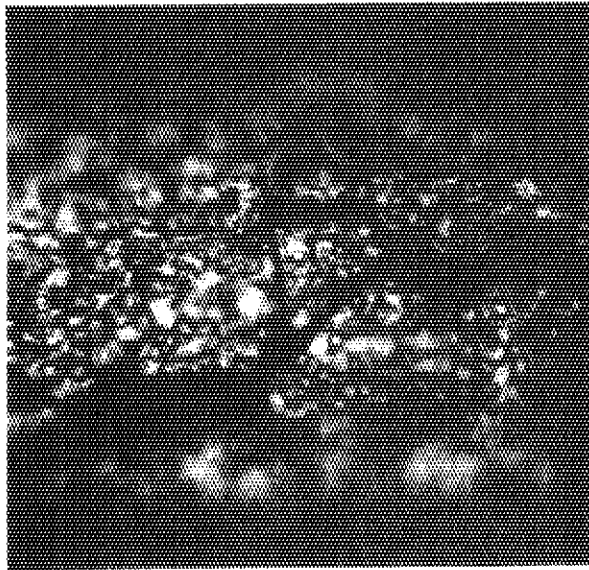


Photo-7 断線直前のフィラメント線表面状態

インピーダンス増加策は、1970年2月に $70\Omega/\text{相}$ の追加挿入工事を実施して合計 $110\Omega/\text{相}$ となり現在に至っている。

上述した諸対策を講じた結果、68年2月以後は 120KV_p 300mA 程度の安定した運転が実施できるようになった。しかし出力上昇運転を開始直後に4.1で述べるX線発生部で問題を生じたので出力上昇運転を中止した。

X線発生部の大改造を終えた68年9月以後の出力上昇運転は順調に進み 160KV_p 500mA 程度の連続運転が可能となったが、出力上昇運転、連続運転で得られたデータから陰極に次の欠点のあることが判った。

- 1) 陰極構成素材の重量が大きく、したがって放出ガス量が多い。
- 2) 電子線を集束電極により、X線発生ターゲット面に集束したが、フィラメントが熱変形、電界作用等によりわずかでも位置変動するとターゲット面の電子線分布が不均一となり、局部に集中分布する危険を生ずる。
- 3) タングステンフィラメントを張っているタングステン製のコイル状スプリングが温度上昇によって弾性を失う。
- 4) フィラメントを支えているアンカーは、フィラメント1本(17cm)に6カ所であるが、この部分で温度低下をきたし、電子放出が低下する。

以上の欠点を改良するため、電子線発生部(陰極)構造の全面的な改造にせまられた。

3.2 陰極構造の改良

前述した欠点の改良のため、陰極の全面的な改造を実施したが、その主な改造部分について述べる。

3.2.1 集束電極の改良

X線発生ターゲット面に均一な電子線分布を得るための集束電極は、結果的には電子線分布の不均一をもたらしてしまった。また局部に集中集束する危険を生じたため、集束電極を取り除きターゲット面全体を均一な電子線密度とするため、集束電極の代わりにモリブデン板にてフィラメントの背面電極を設けた。(Fig.5 参照)

ターゲット面以外への電子線の散逸防止は改造前と同様にカバーによった。

3.2.2 スプリングの改良

フィラメントを張っているスプリングについては、不変の弾性が要求されるが、出力上昇に伴う温度上昇によって、コイル状スプリングは弾性を失ってしまった。

これをタングステンおよびモリブデン板にてつくられた板バネに変更した。板バネは放熱面積も増加したので、温度上昇も抑えられ長時間スプリング作用が発揮されている。また、分解点検時にも大きな変形はみられない。

スプリングの改造は必然的にフィラメント本数が偶数本となるがPhoto 8 に示したものの8ヶを直列接続にして16本で1組の陰極を構成している。

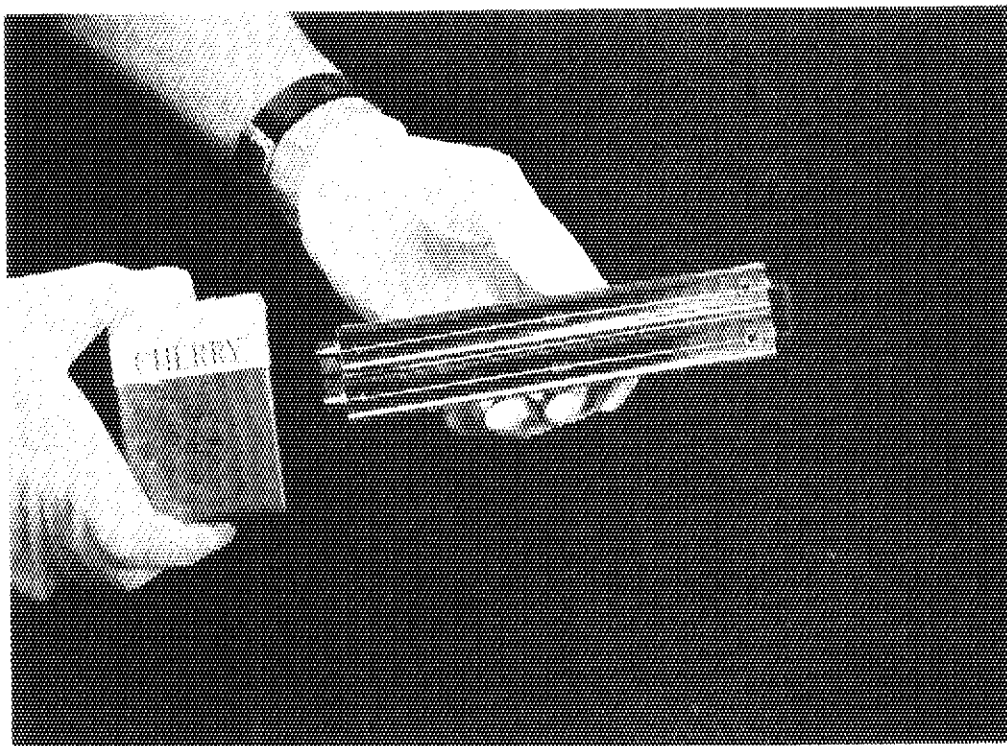


Photo 8 フィラメント単体

3.2.3 陰極重量の軽減化

陰極重量は、集束電極の除去によって大幅に軽減されたが、さらに他の陰極構造部品を改良して改造前の約半とした。これによって陰極よりの放出ガス量も半減し、エージングに要する時間も短縮された。

3.3 トリウム入りタングステン線の試用

68年末から、69年5月にかけて前述した改造後の陰極にトリウム入りタングステン線を試用した。

この時期までに陰極構造の改良のほか真空排気系の整備およびX線管のベーキング等を終えたが、未だ純タングステン線の炭化現象の軽減に実績がなく不安が残ったために、次の理由からトリウム入りタングステン線を試用した。

- 1) トリウム入りタングステン線は純タングステン線に比較して、低温度で熱電子放射が行なえる。したがって炭化現象が軽減されるであろうと推定できる。
- 2) さらに、純タングステン線に較べて低温度で運転できることは、陰極構造物のスプリングや絶縁材の熱劣化が少なくなる。

しかしトリウム入りタングステン線フィラメントを装備しての運転では、運転時間を増すにしたがいX線の線量分布が悪化した。これについては、温度の局部変化が純タングステン線に較べて熱電子放射特性に大きく影響をおよぼすことによる現象であると判断し、トリウム入りタングステン線の試用を中止した。

3.3.1 フィラメント線の比較⁵⁾⁶⁾⁷⁾

トリウム入りタングステン線の熱電子放射能率は純タングステン線よりはるかに高いが、実際の陰極に使用するときには別の考慮が必要である。すなわち、加熱電力、加熱電流、X線管電圧などの問題である。

純タングステン線は熱電子放射能率の低い欠点はあるが、高温に耐えるので温度を高くして大電流を放射させることができる。

トリウム入りタングステン線は純タングステン線よりも低い温度で豊富な放射電子の得られる利点があるが、使用中にわずかではあるが表面のトリウムが蒸発し、不足したトリウムはタングステン内部から徐々に補充される。しかし適温で使用してもやがて表面のトリウムが不足して電子放射が衰えてしまうときがある。再び活性化を行ない熱電子放射を若返らせる方法もあるが本装置では不可能である。また表面が活性化しているので陽イオン衝撃によって表面が破壊されることから一般に陽極電圧が5.000V以上の電子管には使用されていない。

純タングステン線は一度点火すると機械的強度が減少するが、電気的には丈夫である。表面も特に活性化してあるわけでないから、陽イオンの衝撃をうけても電子放射が損なわれること

* トリウムの蒸発速度を遅くして陰極の寿命を延ばすには炭化処理が有効である。これはベンゼン、ナフタリン、アセチレン、その他の炭化水素の気中で陰極を1600°Kに加熱する方法で、タングステンの表面にできたW₂C層のために内部からのトリウムの拡散が減少すると同時に、表面のトリウムの蒸発速度も半に減ずる。熱電子放射は多少減少するが、寿命が延びるとともに電子放射の安定になることが利点である。

がない。したがって、一般に高電圧の真空管であるX線管，高電圧整流管の陰極はタングステ
ンが用いられている。Table 1に熱電子放射体の特性を示す。

Table 1 熱電子放射体の特性⁶⁾

| CATHODE | A ($A/cm^2 \cdot deg^2$) | ϕ (eV) | TEMPERATURE (°K) | EMISSION (mA/cm ² ·W) | ANODE VOLTAGES (V) |
|---------|-------------------------------|----------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| W | 60.2 | 4.52 | 2,500 | 2~10 | >5,500 |
| Th-W | 3.0 | 2.63 | 1,900 | 5~100 | 750~5,000 |
| BaO+SrO | 0.01 | 1.0 | 1,000 | 10~1,000 | <750 |

4. X線発生部（陽極）の改良

X線発生部は、現状に至るまで大きく2段階の構造上の変遷があったがこれについて述べる。

4.1 第1段階

X線発生部の構造は2.5で述べたように、1) X線吸収の少ない構造 2) 適切な冷却方法 3) 十分な気密と機械的強度の3条件を満たすと同時に、ターゲットの厚さ $Au\ 30\ \mu m$ を考慮してX線発生部の構造は最初次のように設計した。

- 1) 銅板を張り合せた構造とし中間に冷却水を通す。
- 2) ターゲット $Au\ 30\ \mu m$ は銅板上にメッキを施す。
- 3) 機械的強度を増すために補強リムを設ける。

またX線発生部を陰極に対応する片側ごとにX線管と分離し着脱可能な構造とし、着脱面にパッキングを用いる方式とした。

据付当初のものは、ターゲット側大気側ともに銅板 $0.3\ mm$ 厚のものであったが、製作上の歩留りは非常に悪かった。Fig. 13 に初期のX線発生部（陽極）の概略図を示す。

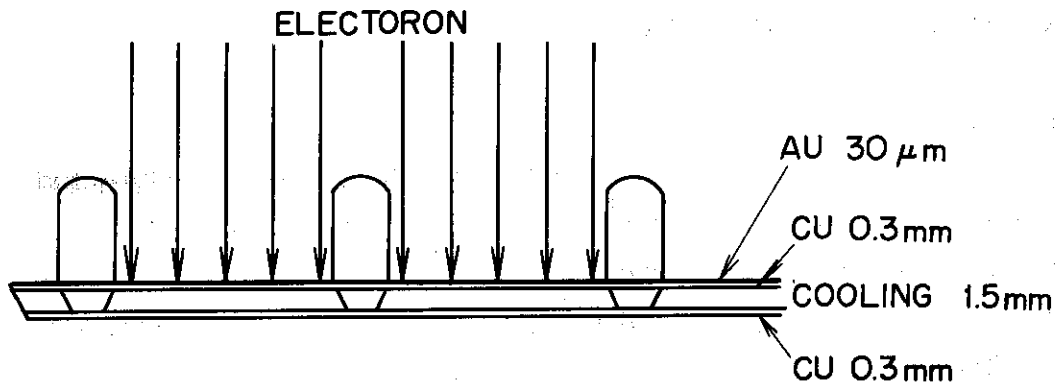


Fig. 13 初期のX線発生部（陽極）

これを装備しての運転では、ターゲット側、大気側両面のロー付部で冷却水漏れを生ずる破損が繰返された。

この破損については、この時期に次のように考えた。

- 1) ロー付加工は水素炉において銀ロー付けされるのであるが、加工時に銀ローが銅板に侵蝕するために銅板としての機械強度が低下する。
- 2) 陰極の問題に関連するが、電子線分布が乱れることによって電子線の一部が補強リムに当たりこの部分が過熱される。

これらの問題のうち 1) については銅板厚さを $0.4\ mm$ および $0.5\ mm$ としたものを製作し、これを装備しての運転結果から銅板厚さは最低限 $0.5\ mm$ 以上必要なことが判った。これについては「銀ロー付けの侵蝕実験」を行なった結果から次のことがはっきりした。

銀ローの侵蝕および拡散は $0.04\sim 0.05\ mm$ で銅板厚さに対し両側を合せ $0.1\ mm$ の侵蝕を考え

る必要がある。

ローはCu表面のみでなく結晶境界を深く浸入し、単なる平均値的浸蝕でなく、片側0.1mm両側を合せて銅板厚さに対して0.2mm程度の割込み深さを考えねばならない。また銀ローの割込みからCu結晶1ヶの配列では繰返しの機械的脆化に対する危険性が伴うであろうこと等が予想された。

2) に対しは陰極についての対策を別に進めていたが、ターゲット側の補強リムの撤去または位置変更をすることについて検討した結果、補強リムを大気側に位置変更することにした。

これらの改良が一段落した67年末には、陰極の一部改良、真空排気系の整備も進んだ。68年にはいってから120KVp 300mA程度の安定運転が実施できるようになった。20時間連続運転等を行なった後、出力上昇運転を開始したが、新たにX線管体との取付部に問題が生じた。前述した取付部のパッキングには最初インジウムを使用した。X線発生時と休止時の温度変化によって、ステンレス鋼にて作られたX線管体とインジウムの熱膨張が異なることにより真空度保持に問題があったので、この時期にはシリコンゴムパッキングを採用していた。

しかし出力上昇によってパッキングが過熱され熱損傷を受けることが判った。これは取付部に対する冷却方法の不備および電子線分布の乱れによるものと判断した。

ここに至り、この時期までに得られた運転実績および出力上昇運転の過程で得られたデータの検討からX線発生部の大改造にせまられた。

4.2 第2段階

前述したX線発生部を装備しての出力上昇運転で得られたデータおよび製作実績等から68年2月頃には次の諸点がはっきりした。

- 1) 冷却回路の能力を拡大しなければならない。
- 2) 陰極フィラメントに対応する片側ごとに脱着可能な構造とすることは、冷却方法、シール法等に問題があり困難である。
- 3) 銅板厚さは最低限0.5mmは必要である。

上述の諸点を基に新設計されたX線発生部は、左右フィラメントに対応するターゲット、冷却回路を一体とした陽極構造にした。われわれはこれを放射口部と称した。Photo 9にこれを示す。

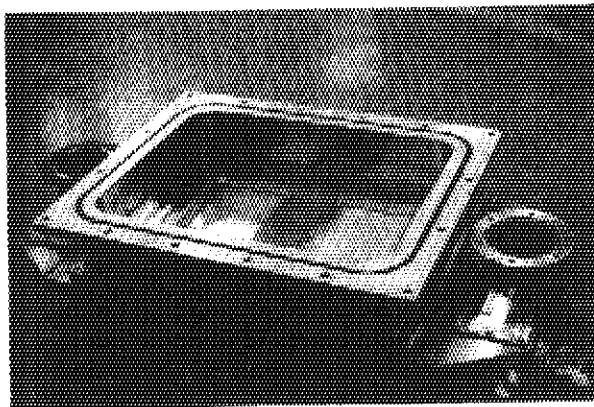


Photo 9 放射口部 (陽極)

この放射口部は溶接加工によって一体化した。X線管体との接続は、管体最下部にパッキングをとおして取付けられる。パッキング下面は冷却水路になっている。

この構造で銅板厚さをターゲット側，大気側ともに 0.5 mm とした。このX線発生部は 68年8月に完成した。

この時期には別に進められていた電子線発生部の改良も一応完了していたので，この放射口部を装備しての出力上昇運転は比較的順調に進み 160 KV_p 500 mA 程度の安定した連続運転が可能となった。

銅板厚さについては69年にはいって 170 KV_p 700 mA の運転実験を得た。しかしながら69年4月にはX線管内の真空度が 10^{-5} Torr 台に低下したが，この調査結果はターゲット側銅板の破損であった。4.1で述べたように製作過程における銀ローの侵蝕，拡散状況とそれが機械的強度におよぼす影響が明らかになっていたので，放射口部として2回目装備については次の仕様にした。

- (1) ターゲット側については銅板厚さ 0.7 mm
- (2) 大気側は Cu-Ni 合金 0.3 mm

Cu-Ni 合金については，実験では銀ローによる侵蝕は非常に少なかった。

2回目放射口部を装備をしてから今日に至るまでにおおよそ $3,000$ 時間の運転を続けX線管電圧 200 KV_p ，X線管電流 700 mA の運転にも耐えることが出来たのでX線発生部についてはこの時期に完成したといえる。

以上に述べなかったが，均一な線量分布が得られなかったことにも関連して，銅板，Cu-Ni 合金板等の材料管理や金メッキの工程管理等についてはメーカーに徹底していただいた。また，Cu-Ni 合金板の材料入手の困難なこともあって，現在高崎研究所に放射口部の予備品として保管しているものはターゲット側，大気側ともに銅板厚さ 0.7 mm のものである。

5. 真空放電現象とその対策

5.1 真空放電⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾

真空放電の機構について、すなわち、電極間を短絡する荷電粒子がどのような機構によって発生して放電に至るかという問題については、古くから多くの仮説が提案されてきたが、定説はまだ確立されていない。しかし、仮説は大きく分けて次の3つのグループにまとめることができる。

1) 放出電子流の電極加熱を原因とする説

陰極から放出された電子が陽極に衝突することによって電極から蒸気が発生する。この場合生じた気体がイオン化し陰極付近で空間電荷を形成し、その電界が2次電子放出を盛んにする。また、電子放出が金属全面から行なわれるのではなく、とがった点状のところで行なわれる。そのため電流が集中し、その抵抗損によって温度が上昇して軟化した点に機械的な力が加わって遂には蒸発させて破壊が起る。

2) 粒子相互交換説

電界により電極から放出された荷電粒子が、対向電極で反対の電荷を持った流子や光子を放出(二次放出)し、その粒子がその粒子を放出した電極と対向する電極で二次放出する。この過程の繰返しにおいて、電極から放出される粒子の数が増幅され、電極表面の微小部分の破壊が起る。

3) Clump 説

電極表面にたとえば酸化膜などの比較的弱い力で付着している微片(Clump)が、静電力によって電極を離れ、帯電しているために電界で加速されて対向電極の微小部分に高温部をつくる。ここから蒸気、熱電子、帯電分子集団が出ることを繰り返して破壊が起る。

これらの仮説が、互いに独立した絶縁破壊機構なのか、それとも互いに従属した絶縁破壊機構なのか、はっきりした結論は出ていない。しかし、これらの仮説には共通した点がある。それは、最終的に絶縁破壊される時点において、電極表面の微小部分が熱的に、あるいは機械的に、破壊するということである。

このように真空放電機構はいまだ十分に解明されていないが、現状では低電界では電界放出電流による温度上昇とClumpの剝離によって生ずるものと理解されている。それゆえ電極などに吸蔵されているガスを取り除くことが必要であって、真空加熱による脱ガスが放電電圧の上昇に効果をもち、また幾度か放電させることにより電極表面にあるClumpをあらかじめ取り除けば、放電電圧が上昇する。すなわちコンディショニング(Conditioning)が有効である。そして、コンディショニング効果としては、本装置のように電極対向面積の大きいものほど多数回を必要とする。

5.2 本装置における放電現象

本装置のように大型のダイヤモンド装置では、出力上昇運転の初期の過程においてX線管内に真空放電が発生することは避けられないことである。

前述したように、放電はX線管内の残留ガスに起因することが大であり、X線管内構造物の

脱ガスを十分に実施する必要がある。しかし本装置の場合には、これを実際の運転時に実施しなければならない。このためエージングには長時間の運転を必要とする。X線管内に放電が発生すると装置に悪影響を与える。すなわち、陰極フィラメントの破損やサージ電圧によって電源系に絶縁耐圧上の問題を生ずる。試運転を開始して以来、われわれは真空放電現象によって起る種々の問題点について検討を行ない、対策を講じてきたので以下これをのべる。

運転開始の当初はX線管本体、陽極および陰極を含むX線管内構造物の脱ガスが十分でなく放電が頻発して、これによるフィラメント断線が繰返し起った。

すでにのべたように運転開始の初期には、電子線発生部（陰極）、X線発生部（陽極）をはじめ装置構成部ごとに問題があり、また脱ガスが十分に実施されていないことなどによって出力上昇も進まなかったが、67年12月に120KV_p300mAでの出力上昇運転中にX線管内のアルミ磁器製の厚さ20mmの絶縁碍管に絶縁破壊を生じた。この絶縁破壊は、碍管外側の固定板に貫けており、支持導入管の表面にも放電痕跡が多数みられた。絶縁破壊の原因については、この時期に次のように判断した。

- 1) 絶縁破壊部の電界強度が高い
- 2) 支持導入管の表面状態が悪い

この絶縁破壊の対策および放電によって電源系に発生する異常電圧値を推定し抑制方法を検討するため、68年2月に次の実験を行なった。

X線管内の放電を模擬するため、出力電圧を下げた状態において真空しゃ断器で電流を切ったときの発生電圧を測定した。Fig.14に測定回路を示す。

真空しゃ断器で1A以下の少電流を切った場合には、切れ味が良すぎるため極間に現れる電圧は予想以上に高く、定常値の6倍以上の電圧が現われることが判った。しかし実際のX線管内で真空放電し、これが切れたときに発生する異常電圧は6倍という高い値にはならないはずである。なぜならばこの時期までに陰極冷状態では、170KV_p程度の運転実績があり、電圧上昇運転の過程で放電が起っても、X線管回路は必ずしも絶縁破壊していない。もし6倍以上とすれば1000KV以上の電圧がX線管にかかることになり、この電圧でX線管が絶縁破壊しないはずはない。したがってX線管内の真空放電々流が切れた状態を真空しゃ断器OFFで模擬したことは必ずしも適切ではなかった。しかしながらこの測定実験のデータから多くの知見が得られたので主要結果をのべる。

- (1) サージ電流抑制用に入れてある18Hの空心リアクトルが異常電圧発生に影響するとおもわれたが、L=18Hを0としてもそれほどサージ電圧の低下はみられなかった。DC電圧10KV、しゃ断電流0.6Aとしたとき

| | | |
|----------|-------|---------|
| L = 0 H | ----- | 55.5 KV |
| L = 6 H | ----- | --- |
| L = 12 H | ----- | 63 KV |
| L = 18 H | ----- | 63 KV以上 |

これは、Lと直列に等価的に整流器用変圧器の漏れリアクタンス3.28H（1相1.64H）相当のLがあるためと考えられる。

- (2) 異常電圧抑制方法として、CR振動防止回路をとりつけた場合の異常電圧抑制効果についてDC電圧10KV、しゃ断電流0.6Aとしたときの測定結果をまとめたものをFig.18

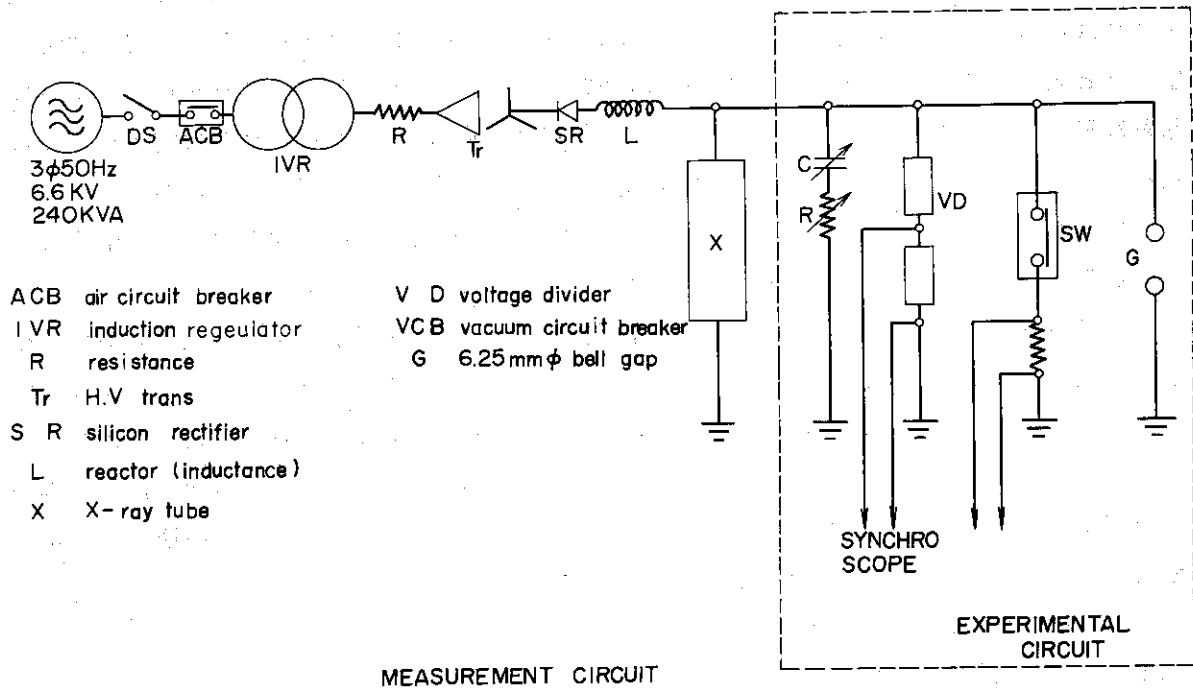


Fig.14 振動電圧測定回路

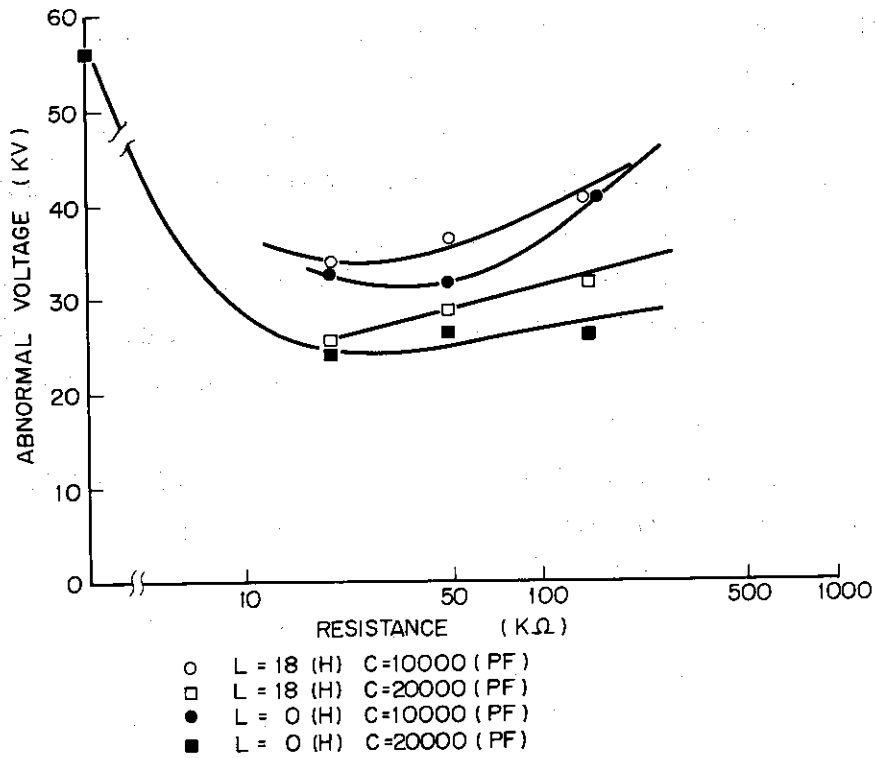


Fig.15 振動電圧特性曲線

に示すが、この異常電圧はCR振動防止回路でかなり低い値に抑えられることが判った。

- 3) 放電エネルギーを抑制するために、交流高圧回路に保護抵抗器として電力用鋳鉄グリッド抵抗器を40 Ω /相とりつけてあったので、この効果についても実験の結果、出力側短路電流は交流側インピーダンスが高い程減少することが確められた。

5.3 対策の実施

5.3.1 X線管の絶縁耐圧向上

破壊した絶縁碍管については、破壊前と同じアルミナ磁器製の厚さ20mm、直流試験耐圧300KVの予備品に交換した。絶縁碍管の内面および外面には無酸素銅製の均圧環を設けて電界強度の均一化を計った。支持導入管については、軟鋼製80mm ϕ であったものを、表面状態を良好するとともに大地側との距離を増すためにステンレス鋼にて50mm ϕ とし鏡面仕上げとした。

さらに次の理由から放電防止板を設けた。絶縁碍管の周囲にイオンによって電荷が蓄積することを防ぐイオントラップ的な働きを期待するとともにX線管内では放電防止板と均圧環との離隔が電極間隔として最小になるようにしておき、ある値以上の異常電圧が生じた場合には放電防止板(陰極電位)と均圧環(陽極電位)との間で放電させX線管球としての絶縁破壊を防止する。

放電防止板はステンレス製32cm ϕ の円板で支持導入管に固定されるがその取付け位置は分解組立の際には調節出来る構造にした。

5.3.2 放電エネルギーの低減

出力側短路電流を低減するための、交流高圧回路のインピーダンス増加策としては、電力用鋳鉄グリッド抵抗器の設置を68年1月に40 Ω /相実施した。この効果については実験でも確認できたので、70年2月に70 Ω /相の追加挿入を実施して合計110 Ω /相として現在に至っている。Photo 10にこれを示すが、このインピーダンス増加策を実施した後は、放電が原因とみられるフィラメント溶断事故は発生していない。また、この結果は6.6KV配電線路への動揺を軽減することにもなった。

すでにのべた実験からCR振動防止回路を設けることによって、異常電圧をかなり低い値に抑えられることが判ったが、本装置にCR保護回路を追加するためには、高電圧電源タンクを含む大改造を必要とするので現在まで、これを実施していないが、今後本装置のようなものの建設にあたってはCR振動防止回路を設けることが望ましい。

5.3.3 電源系(配電線路)の保護

初期の出力上昇運転の過程で放電が頻発して、X線管の絶縁破壊を生ずるに至った。この現象は当然6.6KV配電線路に波及する。本装置の電源保護継電器は当初は3Fリレーのみであった。3Fリレーは1個で過負荷、不平衡負荷、欠相の動作要素をもつが、電圧変動に対する動作要素をもたず、また誘導型であるために動作時限が長い。X線管内の放電によって生ずる異常現象の配電線路への波及を避けるために、次の保護継電器からなる保護装置を68年7月に設置した。高速度過電流継電器、過電圧継電器、不足電圧継電器、零相変流器および接地継電器である。保護継電器による異常の検出は操作用主開閉器である高圧交流電磁接触器に連結

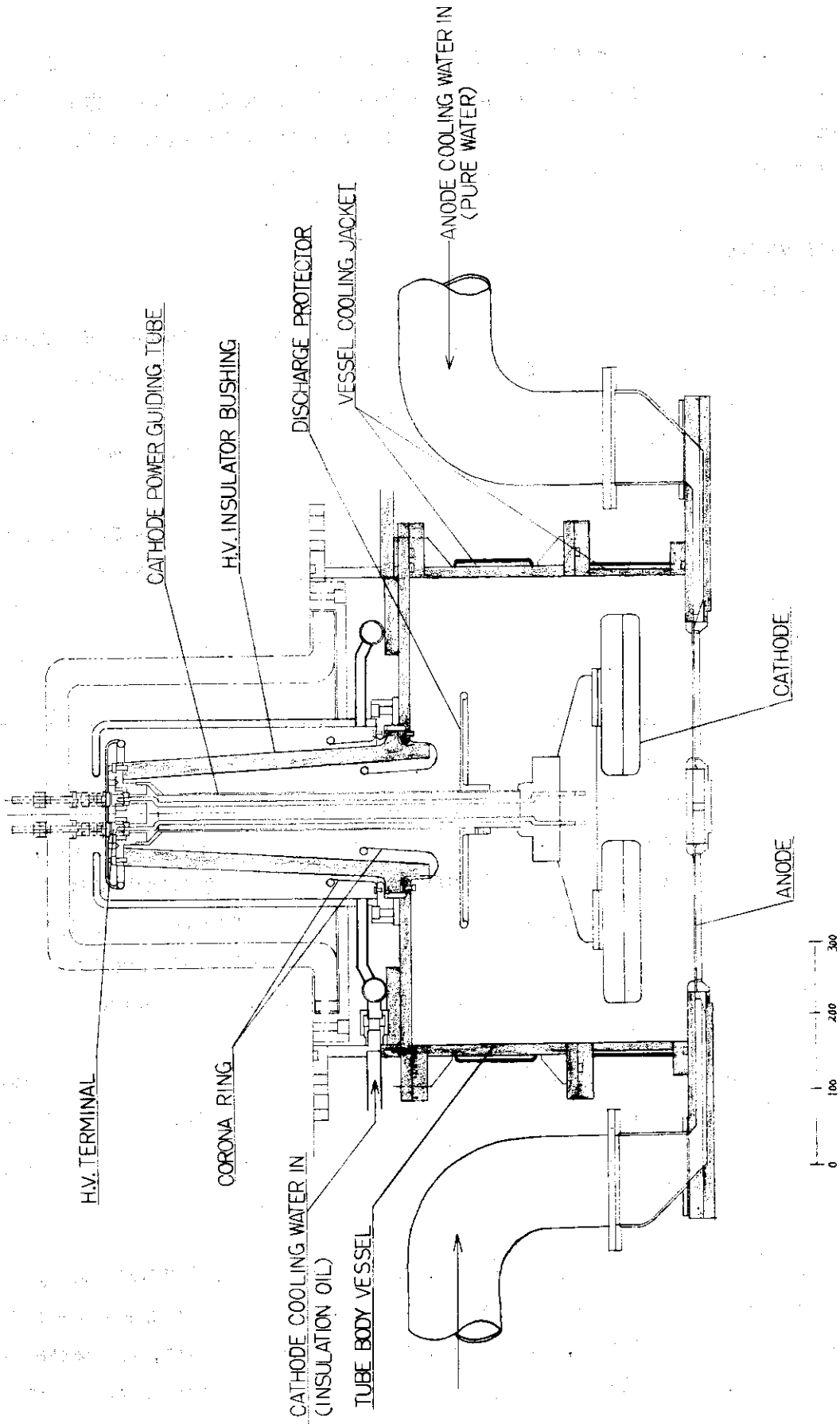


Fig.16 X 線管の構造

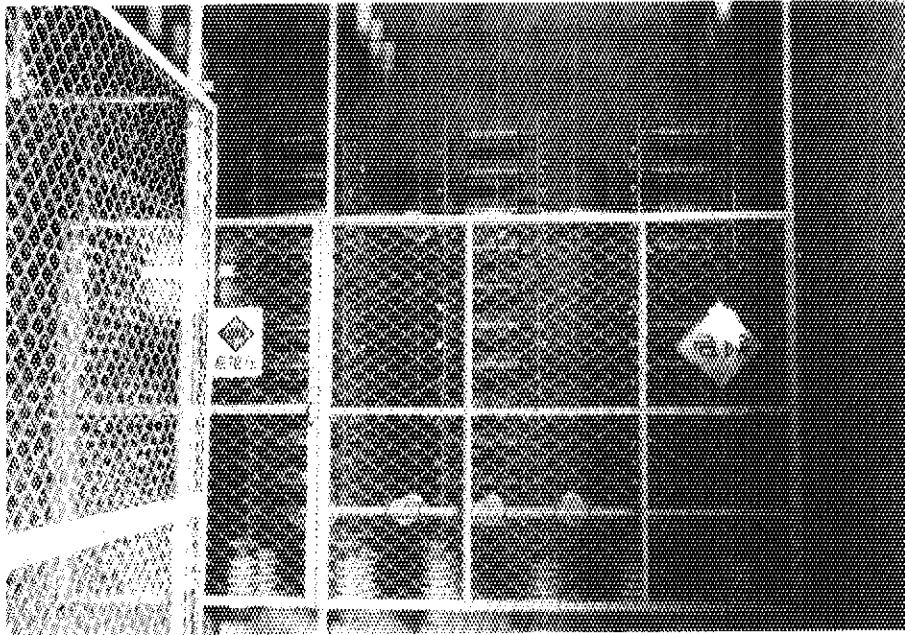


Photo-10 保護抵抗器

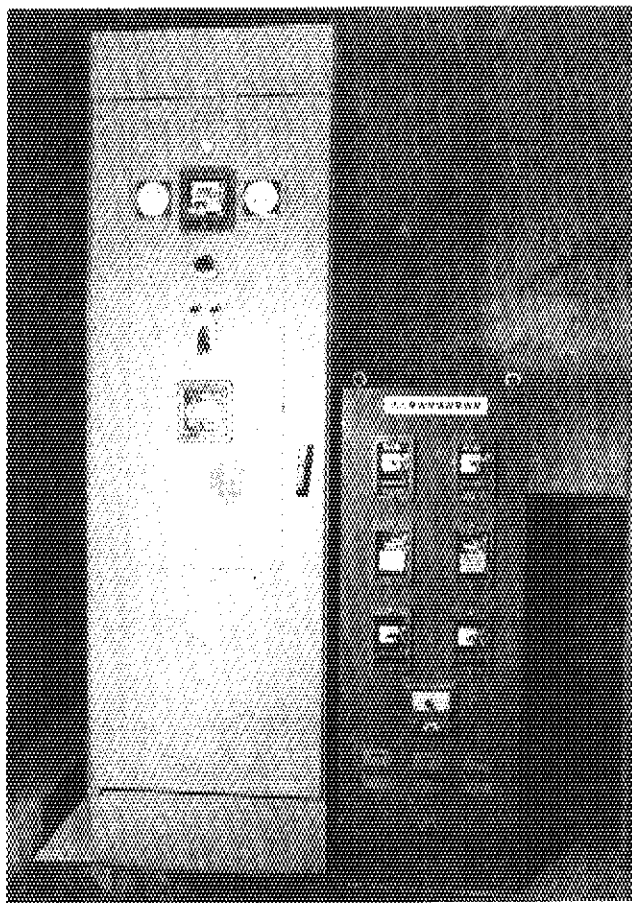


Photo-11 電源開閉器と保護継電器盤

して一連の保護動作が完了される。(Fig.1 電源回路参照)

Photo 11 に電源開閉器と保護継電器盤を示す。

5.4 出力上昇運転の方法

本装置の出力上昇運転の過程は、電子管製造における排気工程に似ている。しかし本装置の場合には、陰極、陽極をはじめX線管構成材の十分な高温処理が出来ないところに難しさがある。

一般の電子管球製造の場合には、部品中はともかくとして、排気時には400~500°Cで十分な脱ガスが行なえるが、本装置ではこれが不可能である。したがって、これが終始放電に悩まされる基になっている。

すでに述べたように放電に対する安定性を得るには、装置が十分脱ガスされてはじめて可能になる。本装置にあっては、陰極、陽極および量的には少なくなるがX線管体よりの放出ガスと気密封止部よりの漏れが重なるので現実には難しさが生ずる。

放電については、フィラメントを加熱しない冷状態の場合とエミッションをとっている場合とに別けて考えた方が、実際の出力上昇運転を進めるにはよい結果をもたらしている。

ここでは、一定期間の運転を経た後フィラメント断線などにより陰極交換を実施したような場合の出力上昇運転の方法についてのべる。

最初に陰極の脱ガスを行なうが、このときには、X線管電圧を印加せずにフィラメント電流を得るに十分なフィラメント電流値より若干高い電流値まで増加させる。

次に陰極冷状態(フィラメントには通電しない)でX線管電圧を印加し除々に上昇してX線管の耐電圧を向上させる。この段階でX線管電圧を180~190KV_pまで上昇させる。

次にフィラメント電流を段階的に増加してエミッションをとりながらX線管電圧をかける。電子線をとること結果的にX線発生部(陽極)の脱ガス操作を行なうことになり、X線発生部が新品である場合にはそれなりの困難がともなう。このような操作中にあまり放電が激しいときには、陰極を冷状態にもどして耐圧を安定させてから再開する。このような操作を繰返して出力上昇を行なうことがよい結果をもたらしている。Fig.17にこれを示す。

5.5 X線管、電極材料からのガス放出性⁵⁾⁶⁾¹³⁾

金属は真空装置内に入れてだけで多量のガスを放出し、加熱されると一層多量のガスを出しさらに電子衝撃が行なわれるときは単純な加熱によるよりも同温度で多くのガスが出る事が認められている。

すでに述べてきたように、本装置の安定性についてはX線管内の脱ガスに帰結される問題が多い。ここでは、陰極、陽極をはじめとするX線管内の構造物よりのガス放出について述べる。

5.5.1 金属材料からのガス放出

金属材料からのガス放出は、表面に吸着したガスおよびガス化成分の化学反応による生成放出。含有溶解ガス、含有ガス化不純物成分の金属面への拡散と表面反応によるガスの生成放出。気相中の不純物と金属表面不純物との反応による放出などが考えられる。

表面吸着ガスは主としてH₂O, CO₂であり、真空中低温でも除き易い。ただ物理的吸着から

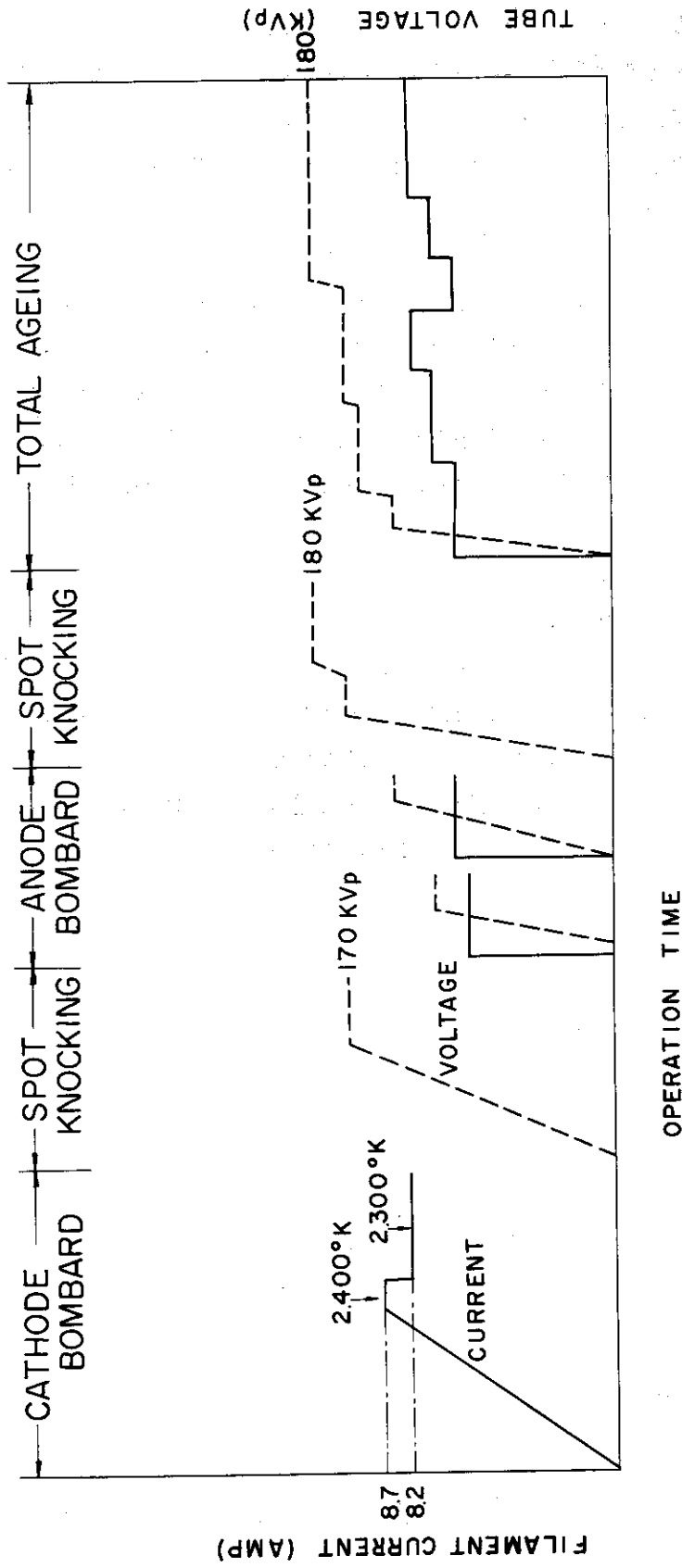


Fig.17 出力上昇運転の方法

化学的なものに移行した場合、水酸化物、炭酸塩などに变化していると除去がやや困難となる。付着した塵芥、油類もガス源となる。

本装置においてはX線管球部の組立時に陰極、陽極、X線管内壁などの表面は十分な洗浄を行ない、その取扱いに注意しているので表面吸着ガスはかなり少なくすることができる。また陰極エージング（熟成）における加熱排気の段階でも比較的簡単に除去できるので、あまり問題ではない。問題となるのは材料中の吸蔵ガスの放出である。

5.5.2 吸蔵ガスの放出

金属内部には数種の元素が別々の化合物として存在しており、これらが真空中で加熱されたときに両者の化学反応によって生成するガスを放出する場合、たとえば鉄、ニッケル内の不純物である炭素または炭化物と酸化物の反応により一酸化炭素または炭酸ガスを放出するようなときである。これらの反応はガス化成分のCまたはOのなくなるまで行なわれるので、真空処理は、可能な範囲の高温で時間を長くするほど効果がある。処理結果は温度が指数関数的に効き、だいたい厚さに逆比例、時間に正比例する。

5.5.3 電子衝撃によるガス放出

一般に電子管用金属のように、電子衝撃が行なわれるときは単純な加熱によるよりも同温度で多くのガスが出ることが認められている。その衝撃による増加の様子をFig.18に示す。この電子衝撃によるガス放出の増加現象は電極材などを事前によく水素処理したり、高温真空処理したものには認めにくい。本装置のようにこれらを大気中に放置したもの、処理不完全のものにおいては顕著に現われる。放出ガスの量は電流量に比例し、かつ高圧なほど速やかに内部の層まで影響をおよぼすことが明らかにされている。

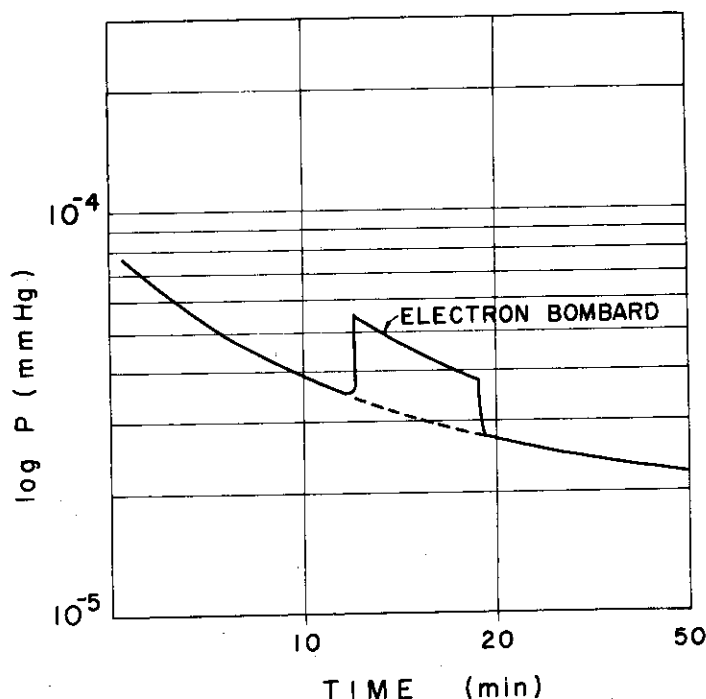


Fig.18 電子衝撃によるガス放出⁵⁾

6. X線の線量分布異状

据付から68年にかけては、すでに述べたように諸々の問題が発生して出力上昇が進まず、低線量照射実験に終始していた。したがって、この時期には出力上昇対策を主にしており、X線の線量測定は断片的にしか行なっていなかった。

69年に至り、陰極、陽極改造をはじめとする一連の改良が進み、160KVp 500mA程度の連続運転が実施できるようになり、この時点から、線量分布についての問題がクローズアップされてきた。以下この問題について述べる。

線量分布の均一度については、ターゲット面積(30cm×15cm×2)の80%において

±20%以内 at 5cm

±10%以内 at 10cm

の仕様とした。

電子線発生部(陰極)およびX線発生部(陽極)は、上述の仕様に基づき、X線発生ターゲット面上の電子線分布が均一であると仮定し電子計算機によって計算した結果¹⁴⁾から決定した。しかしながら線量測定の結果は満足できるものではなかった。このことについては3.3でも若干述べたが、ここでは現象およびその原因について述べる。

6.1.1 トリウム入りタングステン線の現象

すでに3.3で述べたが68年12月～69年5月にかけてトリウム入りタングステン線フィラメントを装備しての運転を行なったが、そのときの線量分布をFig.19に示す。線量分布の理想状態を点線で付記してある。X-X'の方向についてはほぼ良好であるが、y-y'方向の分布は異状であることが判る。測定はPMMA(Poly Methul Methacrylate)線量計¹⁵⁾によって行った。

トリウム入りタングステン線は3.3で述べたように試用を中止した。

6.1.2 純タングステン線の現象

トリウム入りタングステン線フィラメントを装備しての運転では、良好な線量分布が得られなかったので69年6月に純タングステン線フィラメントを装備しての運転を開始した。線量分布の測定結果は経時的に変化しており単純ではない。経時的に線量分布の変化してゆく様子をFig.20に示す。

6.2 原因

前述した現象について、あらゆる角度から原因の追求を試みたが大別して次の3点になる。

1) フィラメント自体の問題 2) 装置の構造上の問題 3) 電界分布の問題、以下これについて述べる。

6.2.1 フィラメント自体の問題

一定期間の運転を経た後にX線管を分解点検すると、フィラメントに局所的な温度上昇の著しい箇所がみとめられる。

この局所的な温度上昇がみとめられる位置に対応するX線発生ターゲット直下の線量率は高い。

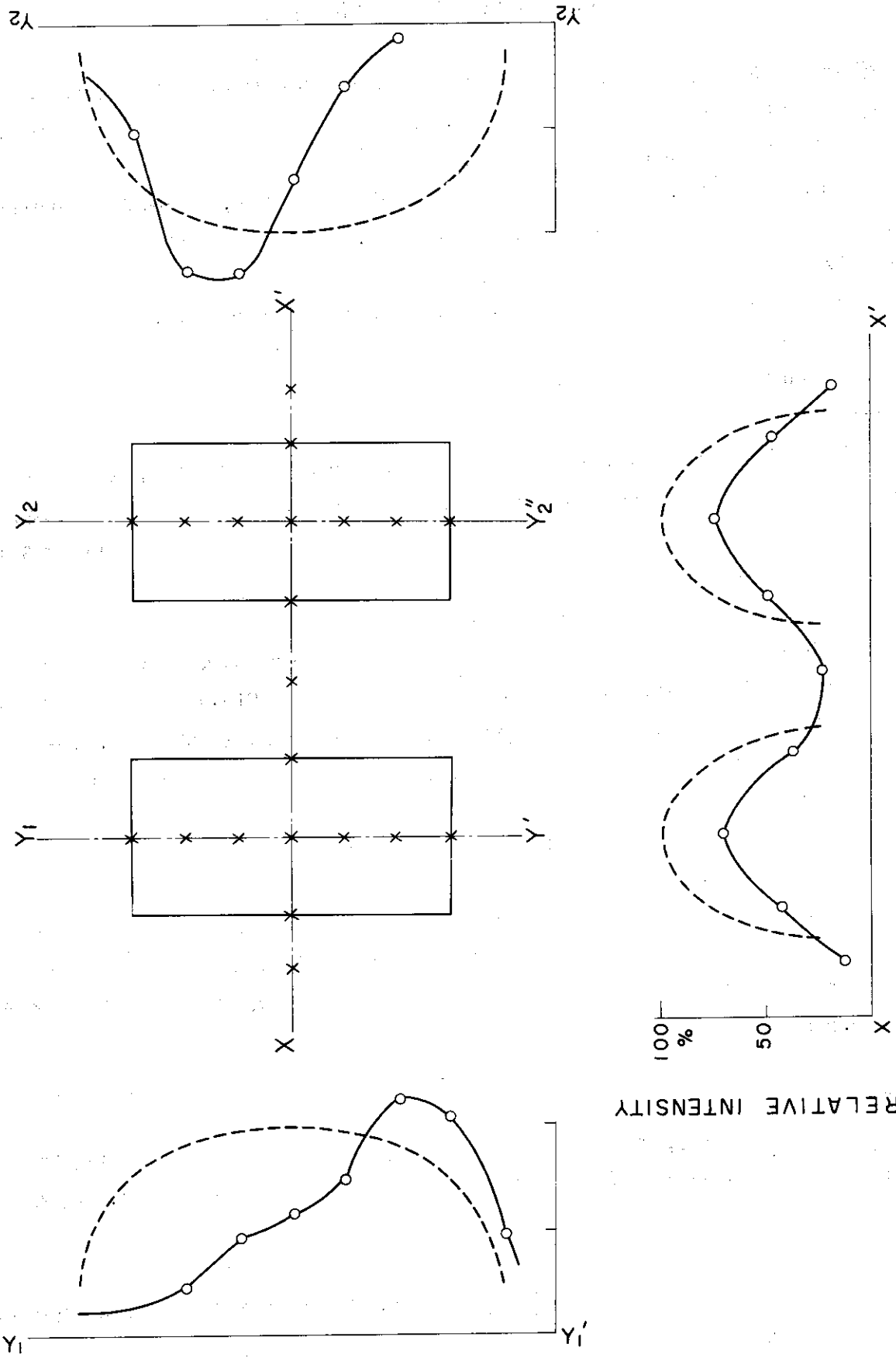


Fig.19 TWフイラメントを用いた場合の線量分布

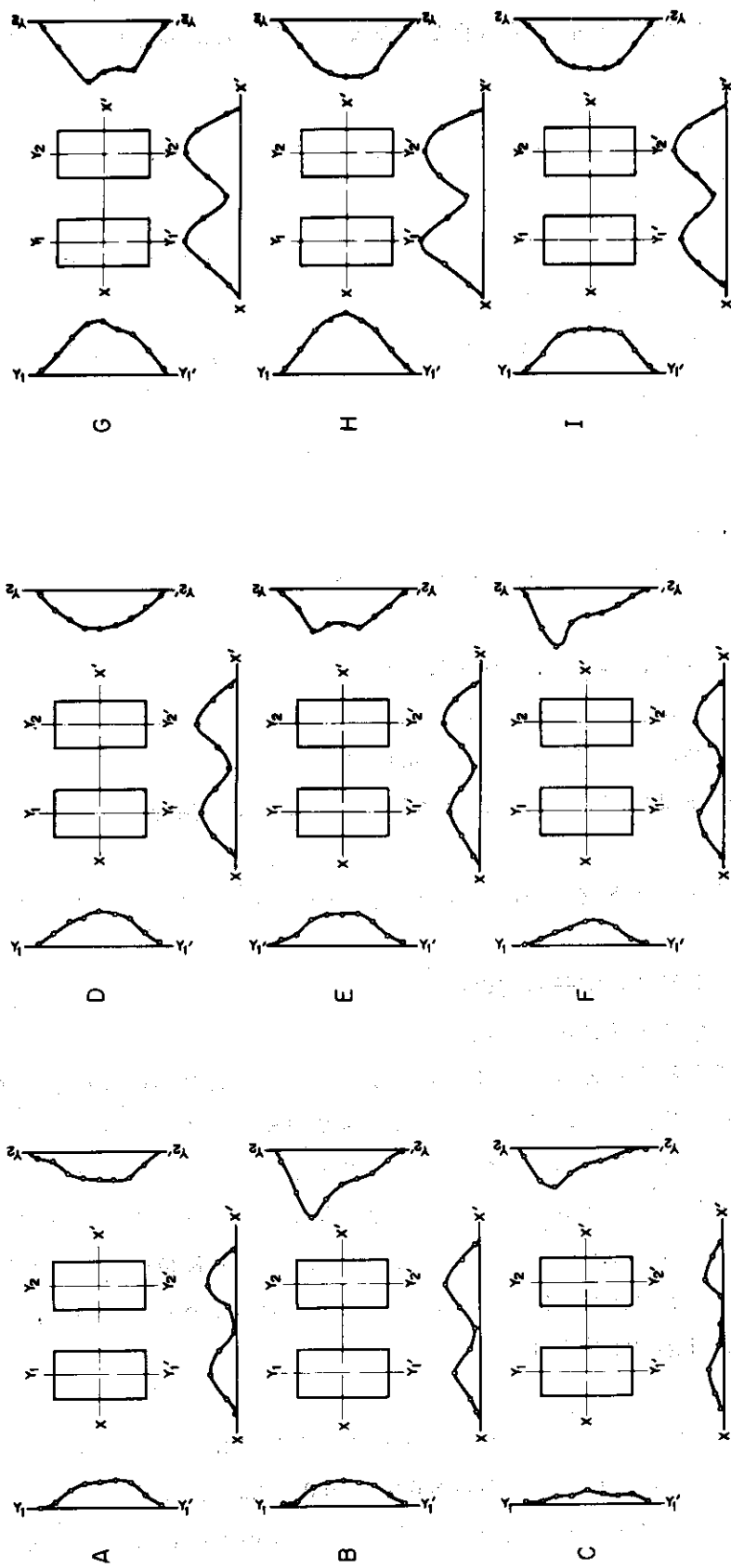


Fig.20 X線線量分布の経時変化

フィラメントの温度が熱電子放出に大きく影響することから、これがX線強度のムラを生ずる原因と推定される。フィラメントの局所的な温度ムラを生ずる原因としては次の2点が考えられる。

④ フィラメント素線(タングステン線)に線径のバラツキがあり、直列接続であるため線径の細い部分(電気抵抗大の部分)に加速度的な加熱が促進される。

⑤ フィラメント素線の炭化現象により局所的に電気抵抗が増大して温度上昇しその部分の炭化がさらに進行する現象が起り加速度的に加熱が促進される。

以上の2点が考えられるが、タングステン線の線径については、太さの偏差1%以内に厳重な品質管理が実施されており、⑤の炭化現象による影響が最も大きく影響しているように考えるが、④、⑤が相関してバラツキを増長しているとも考えられる。

6.2.2 構造上の問題

この問題については、いくつかの見方がある。

① X線発生ターゲットである金メッキ層の厚さのバラツキ

② X線発生部(陽極)でのX線吸収のバラツキ。

これは、金ターゲット、銅基板、仕切帯、冷却水路等におけるX線吸収のバラツキ

③ X線管の排気口位置による局所的な真空度のバラツキ

以上のうち、①、②については線量分布の経時的な変動を説明できないこと、また③については線量分布のムラと排気口の位置の相関がないこと等によって構造上の欠陥とは考えにくい。

6.2.3 電界分布の問題

電子軌道の乱れやフィラメント周辺の電界分布の不均一を問題とするもので次の考え方があ

① フィラメントの変形による電子軌道の乱れ

② エミッション電流がフィラメント加熱電流に重畳する

①については熱変形によるものと電界による引張り力がある。これらの作用がフィラメントを変形させる原因となるので板バネ、アンカー等によって変形を防ぐ構造となっている。また仮に変形しても電子線は集束されない陰極構造となっているので原因としては考えにくい。②についてはフィラメントと背面電極板との電位差の片寄りによってどちらかの端部にエミッション電流が重畳される。しかしこれが原因とすれば電子線分布が常に位置的な相関をもつはずであるが、線量分布は経時変化とともにランダムな位置で変動していることから、これも原因としては考えにくい。(Fig. 21 参照)

6.2.4 原因の推定

以上に述べたように線量分布の異状現象の原因として大別して3点が考えられるが、未だはっきりした原因は判明できない。しかしながら800~900時間運転後に断線したフィラメントの検査結果でも、フィラメントの炭化状態が局所的に異っている。したがって炭化現象によって熱電子放出が局所的に異なることが最も有力な原因と考えられるので、X線管内の除炭素問題として帰結されるものと考えられる。

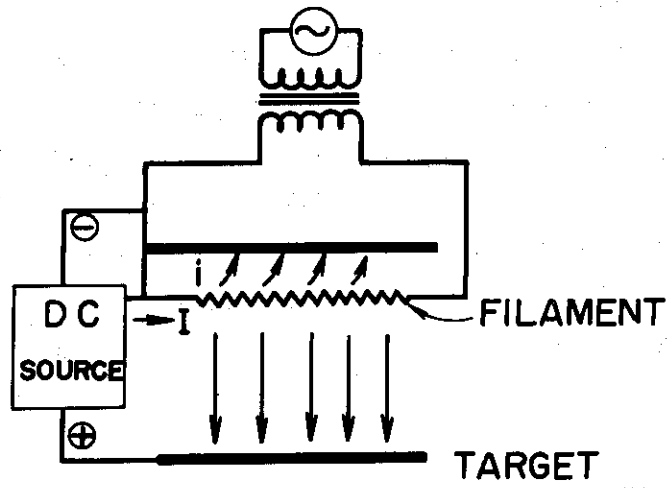


Fig. 21 エミッションのフィラメント電流への重畳

7. 出力特性

本X線装置は、現在一般に用いられている熱電子放射を利用したX線管球（クーリッジ管）と原理的にはまったく同じである。しかし構造的には一般のX線管球のように電極が封じ込み式でなく真空ポンプで排気しながら使用する組立式であることと、発生X線が陽極を透過してから照射に利用される点で大いに異なる。

本装置も一般のX線管球と同じようにX線管電流はフィラメントの温度すなわち加熱電流によって定まる熱電子によって制限されるのでX線管電流を増加するにはフィラメントの加熱電流を増加する。すなわちX線管の管電圧と管電流との間にはFig. 22に示すような関係がある。したがって本装置（X線管）は高電圧で使用することにより、温度制限領域（temperature saturated region）で動作し、管電流の調節はフィラメント電流の変化によっておこなうから、照射実験に応じて管電圧と管電流を独立に選ぶことができる。ゆえに本装置を運転するために必要なX線管特性もまた一般X線管球と同様にフィラメント加熱特性および管電流特性である。

7.1 フィラメント加熱特性

Fig. 23 はフィラメント電圧を次第に高くしたとき加熱電流がどのように変わるか、加熱電圧と加熱電流との関係を示したフィラメント加熱特性である。フィラメント線の材質はもとより線径および長さが同一であるから陰極として大体同じ特性をもつはずであるが、実際は管球エージングの際の蒸発状態や支持アンカーとの接触状態の相異などによって特性に若干の幅がある。

7.2 管電圧と管電流特性

本装置において、管電圧と管電流とを別個に調整できることはすでに述べたが、フィラメント加熱電流を一定にして、管電圧を次第に上げてゆきながら管電流の状況を見ると、管電流は管電圧の上昇に伴って増加してゆく。しかし管電圧がある限度（飽和管電圧 saturation tube-voltage）に達すると管電流は飽和する。したがって本装置の実用管電圧の範囲ではさらに大きい管電流が必要な場合にはフィラメント加熱電流を増さねばならない温度制限領域にあることが判る。Fig. 24 に管電流特性を示すが、飽和管電流はフィラメント加熱の温度によって左右される。飽和の熱電子密度 i はリチャードソンの式 $i = aT^3 e^{-6/T}$ で表わされフィラメントの温度が上るにつれて管電流は急激に増すことが判る。すなわち加熱電流が大きいほどフィラメントの温度は高くしたがって飽和管電流や飽和管電圧も大きい。Fig. 25 はさらに実用的な特性で放射電流特性とよばれる曲線である。管電圧をパラメーターとして横軸に加熱電流、縦軸に管電流をとった曲線で管電圧が与えられたとき、フィラメント加熱電流いくらで管電流いくらを示す特性曲線である。

7.3. 発生X線の線量率

すでに2.5においてのべたが、本装置のような制動放射によるX線の線量率は、電子線のエ

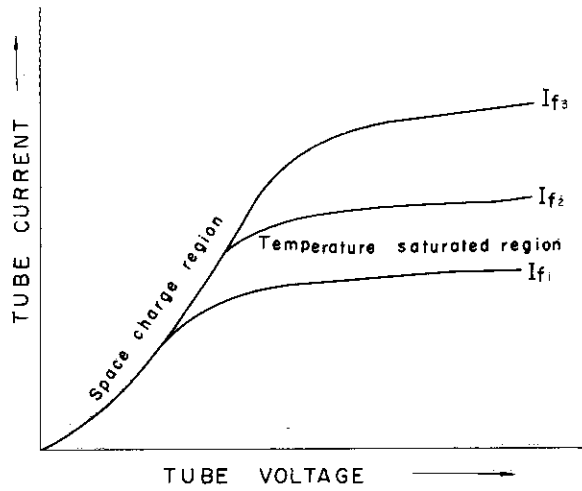


Fig.22 X線管電流特性

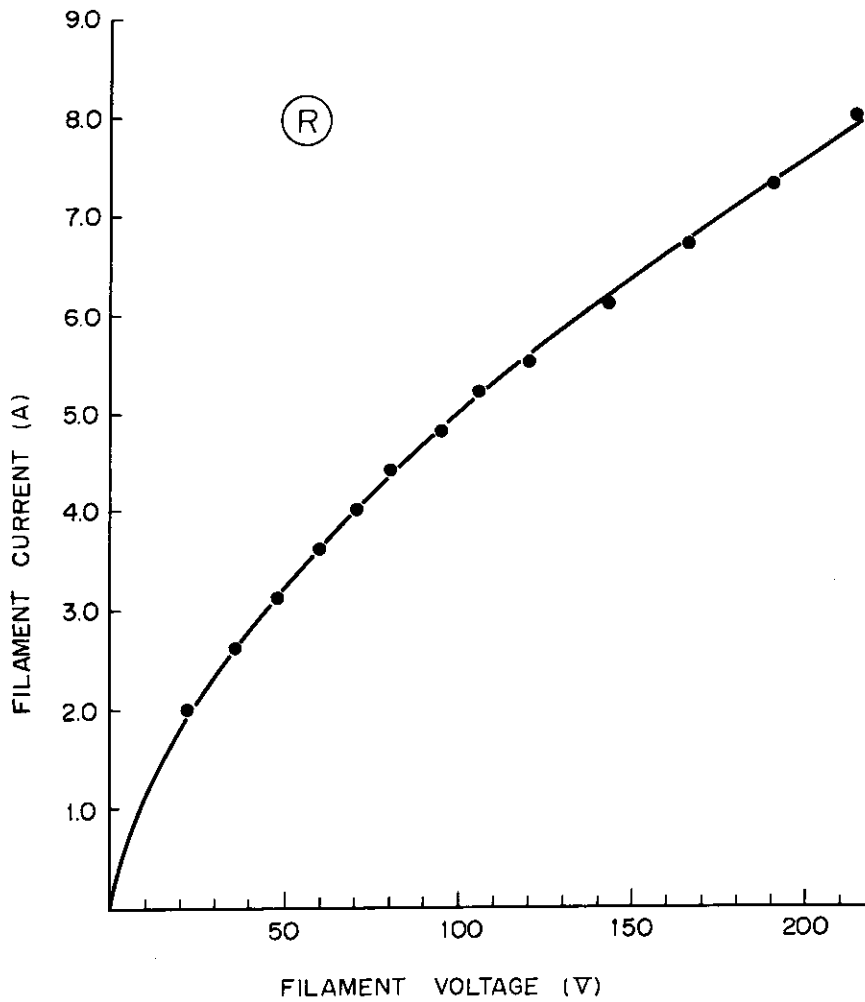


Fig.23 フィラメント加型特性

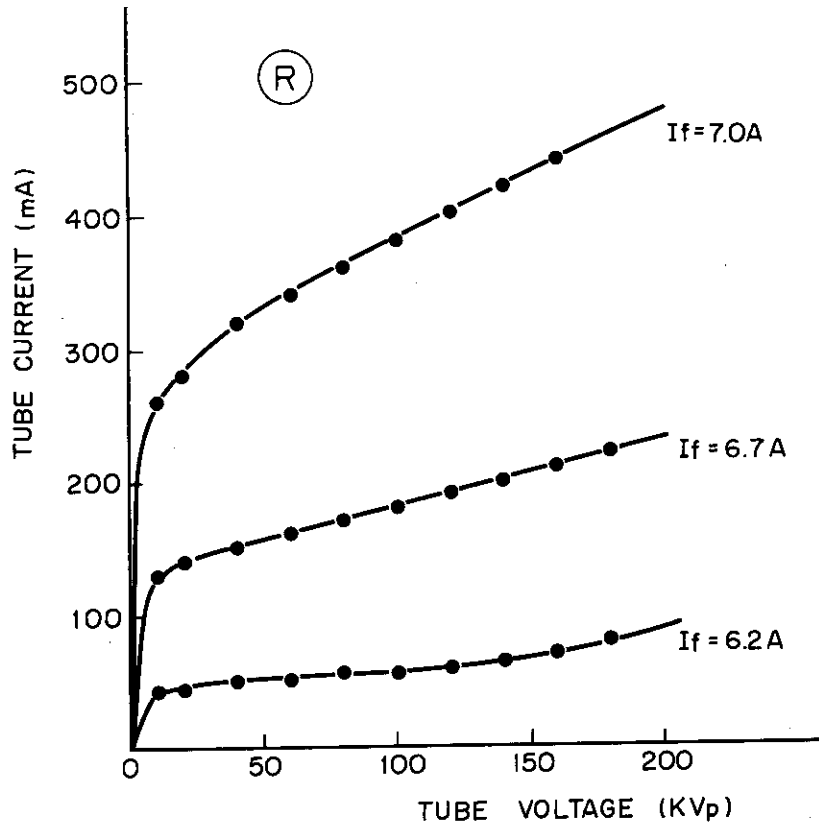


Fig. 24 管電流特性

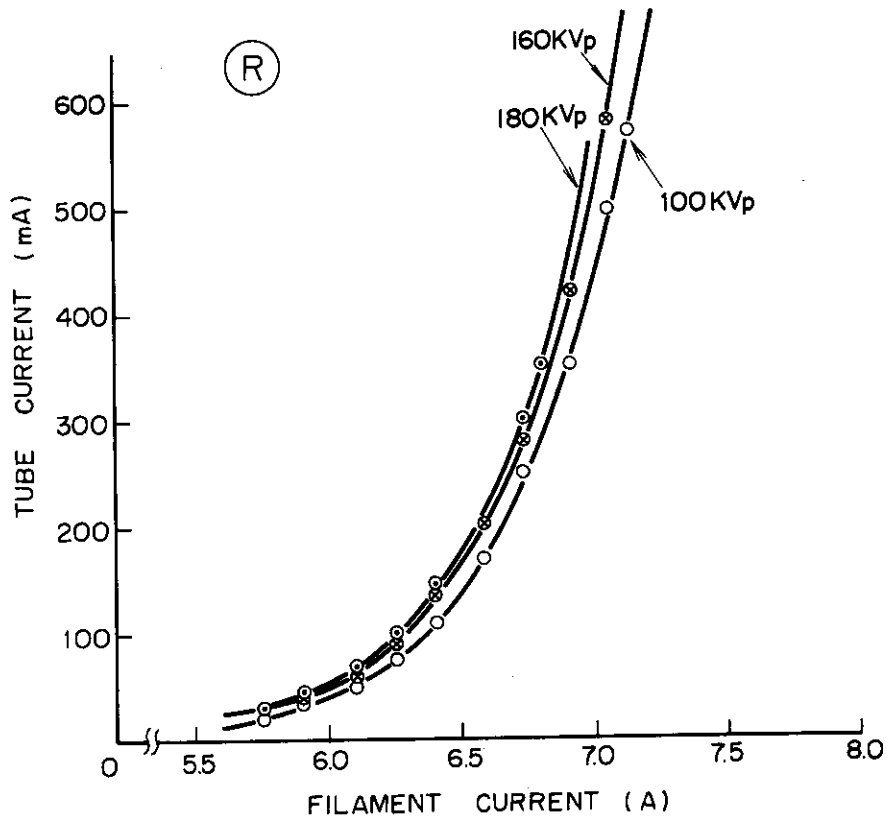


Fig. 25 放射電流特性

エネルギーおよび電流、ターゲット物質、ターゲットよりの距離などによって変わる。Fig.26にターゲット面よりの距離5cmの各管電圧における管電流と発生X線の線量率の関係を示す。X線の線量率は各管電圧で管電流に比例して増加する。管電圧180KV_p 管電流400mA で目標値であった20,000R/minを得ることができた。なお陰極は2組に分けられてあり点火も各々におこなうことができる。したがって被照射物が大きい場合には2組同時に点火するので管電流は2倍となる。

また、ターゲット面からの距離をパラメータにして得られた相対的な平面強度分布をFig.27に示す。ターゲット中の領域内で顕著な山型の分布がみられるが、これは主としてターゲット内でのX線の発生方向および陽極透過の際に散乱が非常に大きいことを示している。ターゲット面からの距離が大きくなるにしたがって分布は平坦化されていき、平均強度は小さくなっていく。

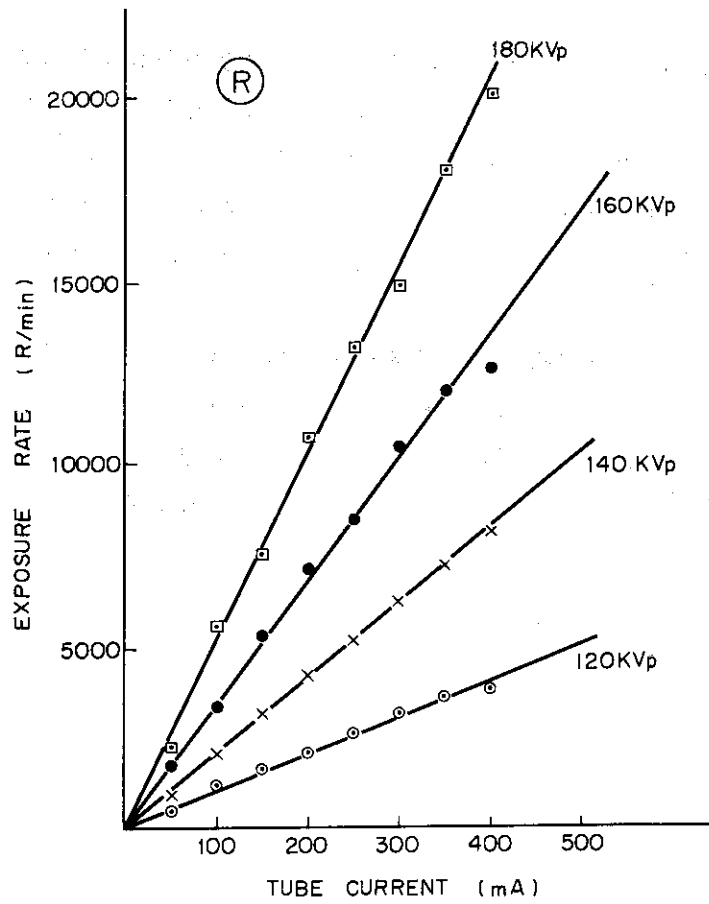


Fig. 26 ターゲットより距離 5 cm における X 線強度

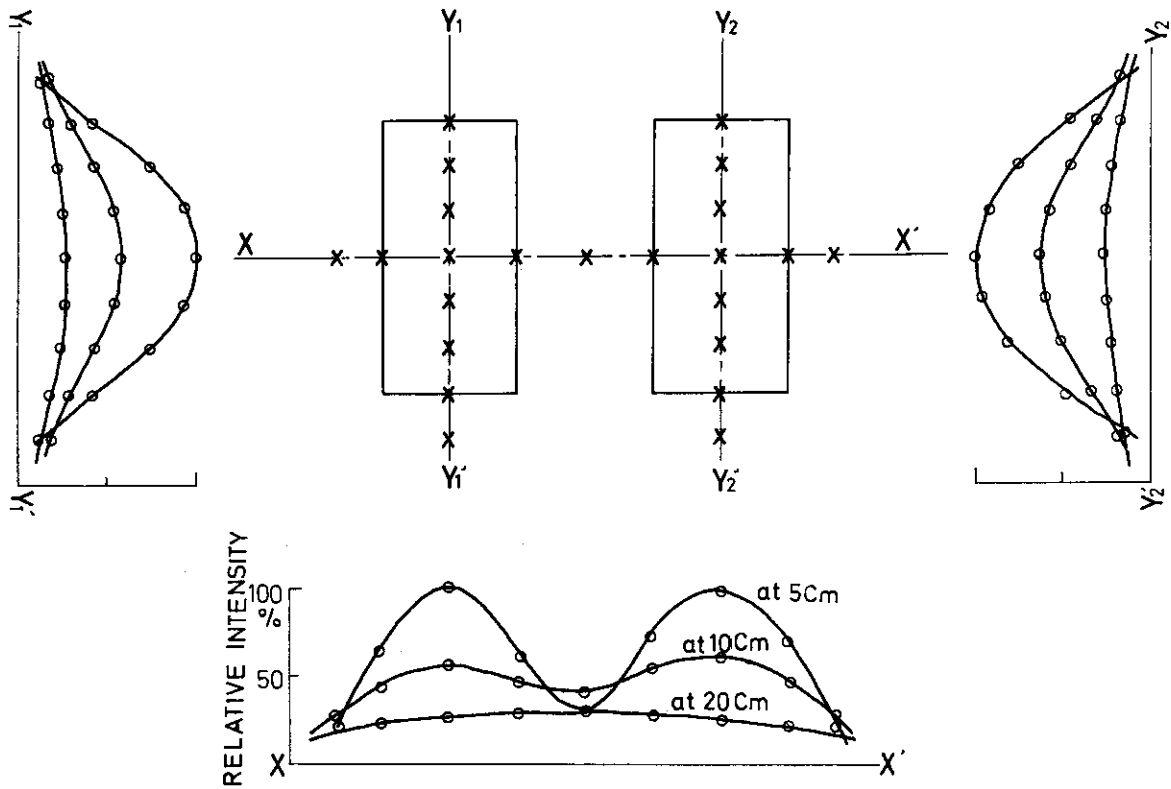


Fig. 27 平面強度分布

8. 線量測定

照射用X線源としての利用の立場から最も必要とされるものは、照射野における被照射物質中の立体的な吸収線量分布である。100~200KV_pのX線源に対していろいろな原子組成をもつ媒質中の吸収線量を求めることは以下に述べるようになり面倒である。⁶⁰Co γ線の場合には信頼できる照射線量率の空間分布が与えられれば、その空間におかれた被照射物質の吸収線量は既知の質量エネルギー吸収係数の比を照射線量率から簡単に求めることができる。しかしX線の場合はこうした単純な関係を用いることができない。その理由は、X線のエネルギー分布がコンプトン効果の領域から光電効果の領域に広くまたがっているために、被照射物質の実効質量エネルギー吸収係数が原子組成に強く依存することによるものである。

X線の減衰曲線あるいは半価層の値はX線の線質を知る上で有用である。医療用のX線照射装置の場合は焦点が小さいので、深部線量分布は半価層やfield sizeをパラメータにしてすでに詳しく測定されつくしてきたので、半価層さえわかればテーブル¹⁶⁾から深部線量分布を予測することは可能である。しかし本装置のような特殊な照射方法に対してこのテーブルは適用できない。したがって標準となる深部線量分布は、信頼できるプラスチック線量計を用いてそれと等価な媒質中での吸収線量を測定することにより決定された。媒質中の立体的な吸収線量分布は、照射野での平面的な強度分布と深部線量分布が互に独立である。すなわち百分率深部線量分布は照射野の範囲内である。すなわち百分率深部線量分布は照射野の範囲内ではどこでも同じであるという仮定のもとに決定された。

8.1 線質

X線の線質を物理的に正確に特性づけるにはエネルギースペクトルを実験的に知ることであるが、特に連続スペクトルをもつX線に対しては、この方法は非常に面倒であるので、多くの場合、線質は銅やアルミニウム中のX線ビームの透過曲線を照射線量率の測定から求めることによって知られる。X線の実効エネルギー(equivalent KV)は単一エネルギーにおける質量吸収係数との対比から決定される。こうして得られた銅の半価層の値と実効エネルギーの関係をFig. 28に示す。

銅の吸収板の厚さを増加させたときの照射線量率の減衰測定は以下の方法で行なわれた。ターゲット面から20cm下方に銅板をターゲット面に対して平行におき、そのすぐ下にビクトリン型のラドコン・プローブの電離電流の読みの減衰を測定した。プローブはターゲット面の中心からおろした垂線上におかれた。

Fig. 29に種々の管電圧に対して測定された銅板によるX線の減衰曲線を示す。このグラフから各管電圧に対する銅の半価層の値が求められ、それを用いてFig. 1からX線の実効エネルギーが求められるが、その結果をTable 2に示す。ただし、ここに示された半価層は次の2つの理由によりかなりの誤差を含んでいると考えなくてはならない。まず第1に測定法がnarrow beam geometryの条件を満たしていないので銅板中の散乱X線のビルト・アップのため半価層の測定値は正しい値よりも高めになることである。¹⁷⁾第2にターゲットが点状ではなく面状であるために、銅板に入射するX線ビームの方向は各管電圧に応じて広い角度分布を

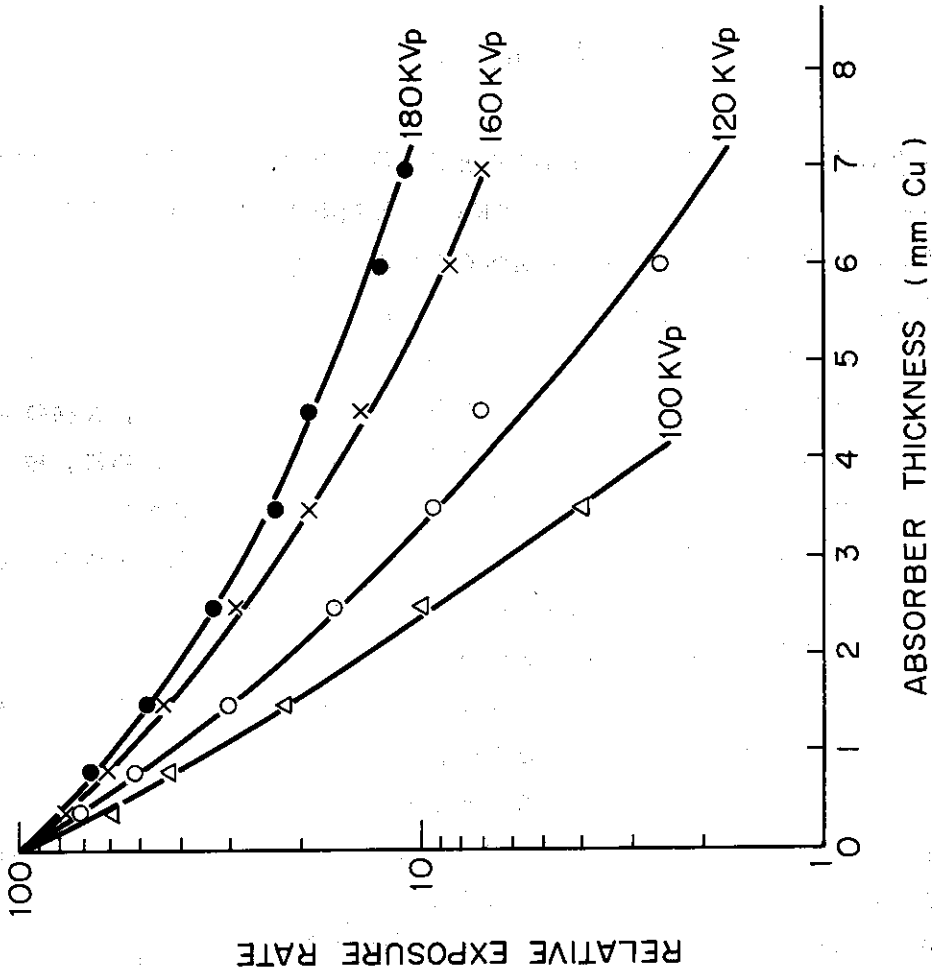


Fig.29 RELATIVE EXPOSURE RATE AS A FUNCTION OF ABSORBER THICKNESS OF COPPER FOR DIFFERENT TUBE VOLTAGES

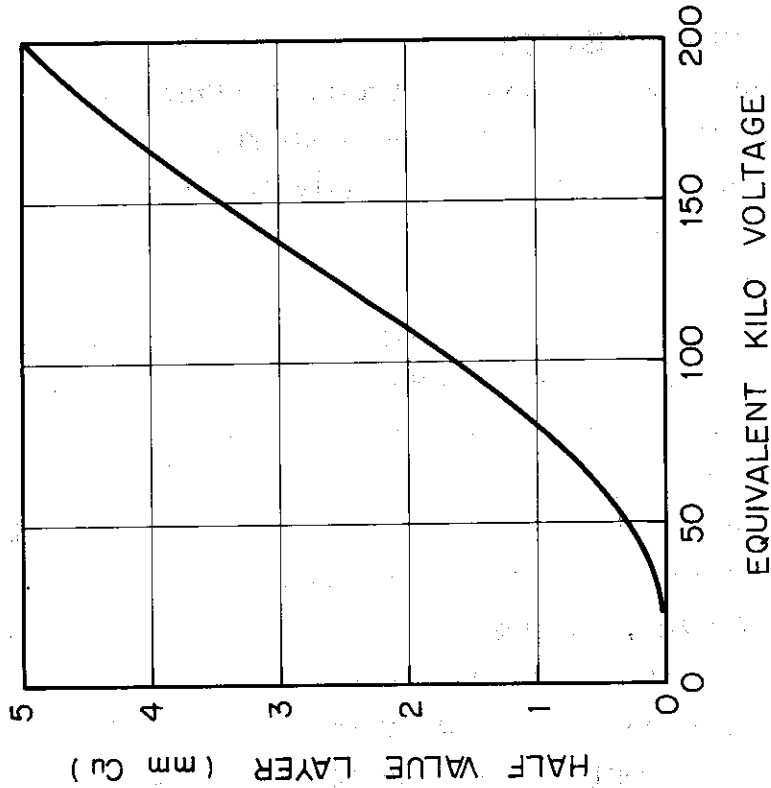


Fig.28 RELATION BETWEEN HALF VALUE LAYER IN MM OF COPPER V AND THE EQUIVALENT KILO VOLTAGE

Table 2 EQUIVALENT KV OBTAINED FROM DIFFERENT TUBE VOLTAGES

| KVP | HVL (mm Cu) | EQUIVALENT KV |
|-----|----------------|------------------|
| 180 | 1.3 | 90 |
| 160 | 1.1 | 82 |
| 120 | .83 | 60 |
| 100 | .60 | 49 |

もっており、X線が銅板を通過する平均の path length は銅板の厚さよりも大きな値になることである。2番目の効果は見かけ上低めな半価層を与えるので、これは第1の誤差要因を相殺する方向に作用する。上記の問題以外にもこのような装置では照射室内にかなりの散乱X線が充満していると考えられるので、それによるバック・グラウンドの照射線量率の誤差も予想される。これらの種々の誤差要因を除くためには、銅板の前後を鉛などで十分コリメートすることが望しいが、X線発生部の構造が複雑であるために実質的に困難である。その上厳密な narrow beam geometry によって得られた半価層そのものは、広い均一なターゲットをもつ本装置を有効に特性づけるものとは言えないだろう。以上の意味から Table 1 の半価層の値は正確に定義づけられた半価層ではなく、geometry の特殊性が含まれ実用的な意味での半価層として取扱わなくてはならない。

半価層の測定値は管電圧に対してかなり大きめの値を示しているが、この相違は上に述べた geometry によるものではなく、ターゲット冷却用の放射口部によるX線の filtration に起因すると考えられる。この部分の filtration は実効的には $0.5\text{mm Cu} + 3\text{mm H}_2\text{O} + 0.5\text{mm Cu}$ によるものであり、あわせて $\text{Cu } 1\text{mm}$ の効果が特に大きいと考えられる。Al が 1mm の場合の $\text{Cu} + \text{Al}$ の filtration における半価層の Cu フィルターの厚さに対する依存性については Trout¹⁸⁾ら (1962) によって測定されているが、その結果から半価層が Cu フィルターの厚さに対して非常に敏感であることがわかる。Trout らが用いたフィルターのうち Al 1mm は本装置のフィルターの $\text{H}_2\text{O } 3\text{mm}$ と同等に評価することはできないにしても $\text{Cu } 1\text{mm}$ のフィルターのみについて比較すれば、本装置の半価層の値と Trout らの結果はかなりよく一致しているといえる。

X線の減衰曲線からX線の線質についてさらに詳しい情報を得る方法は absorption method¹⁹⁾として簡単にエネルギースペクトルを予測するのに便利であるが、Fig. 29の減衰曲線の測定では narrow beam geometry の条件が満されていないのでこの方法を適用することはできなかった。

8.2 吸収線量分布

広い平面ターゲットを用いたX線照射方法による媒質の吸収線量分布は、点線源として近似できる一般のX線照射装置に対して得られてきた深部線量分布の種々のデータを適用して予測することはできない。また ^{60}Co 線照射や電子線照射の場合のように簡単な計算から分布を予測することも不可能である。したがって本装置に対する吸収線量分布は適当な標準媒質中での吸収線量分布を実測することによって決定しなければならない。

媒質中の三次元的な吸収線量分布が厳密に要求されるときには、一連の二次元の isodose curve を求めなくてはならないが、三次元の isodose curve の作成はあまりに面倒である。したがってわれわれは被照射物質の大きさをターゲット面と同じ大きさに制限し、かつ被照射物質の厚さもあまり大きくないと考えて、電子線照射の場合と同様に立体的分布を平面強度分布と百分率深部線量分布に分離することが近似的に可能であると仮定して、それぞれ別々に測定を行なった。この場合、百分率深部線量分布はターゲット面を下方に平行移動した平面的照射領域内ではどの場所でも同じになると仮定したことになる。ただし電子線照射の場合と比較してX線は透過力が大きく、散乱効果も大きいので、照射野の各場所での入射X線の角度分布の相違が深部線量分布の形に若干の影響を与える可能性も考えられる。

8.2.1 平面強度分布

ここで述べる平面強度 I は照射野の平面内の単位面積あたりに入射するX線のエネルギー束密度 ($\text{erg}/\text{cm} \cdot \text{sec}$) を意味している。照射線量率を dx/dt (R/sec) であらわすと次の関係式が成立つ。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{87} \cdot I \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{air}}$$

ここで $(\mu_{en}/\rho)_{\text{air}}$ はX線のエネルギースペクトルに対して平均化された空気の質量エネルギー吸収係数である。照射野の平面内でのX線エネルギースペクトルは近似的に一定であると仮定すれば $(\mu_{en}/\rho)_{\text{air}}$ も一定であるから、照射線量率は強度に比例することになる。エネルギースペクトルは実験的に知られていないから、 $(\mu_{en}/\rho)_{\text{air}}$ は正確にはわからないが、実効エネルギー (equivalent KV) から近似的に知ることは可能である。

照射線量率の測定から強度分布を求める方法以外に二次的な固体線量計を用いる方法がある。光学的吸収法などを用いて吸収線量測定ができるような薄い厚さの平板状の媒質を照射野においてX線を照射すれば、媒質の吸収線量 D_{med} (rad) は次式で与えられる。

$$D_{\text{med}} = \frac{1}{100} \cdot I \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{m}} \cdot t$$

ここで、 $(\mu_{en}/\rho)_{\text{m}}$ は媒質の質量エネルギー吸収係数 t は照射時間である。したがって、 D_{med} の分布が測定できれば、 $(\mu_{en}/\rho)_{\text{med}}$ の曖昧さがあるにしても、すくなくとも相対的な強度分布がわかる。照射線量率を測定する方法が照射平面内で線量率計プローブを移動しなければならないので、かなり面倒であるのに反して、固体線量計を用いる方法は同じ照射条件のもとで同時に照射されるので、一回の照射で分布がわかり、かつよい再現性をもった分布

が得られるので、われわれは後者の方法で測定した。用いた固体線量計は1mmの厚さのポリメチルメタリレート (PMMA) の板で、X線の吸収線量は290m μ での吸光度の増加から得られた。¹⁵⁾

上の方法で得られた相対的平面強度分布の典型的結果はターゲット面からの距離をパラメータにしてFig. 30に示す。ターゲット幅の領域内で顕著な山型の分布が見られるが、これは主としてターゲット内でのX線の発生方向およびフィルターによる散乱が非常に大きいことを示している。ターゲット面からの距離が大きくなるにしたがって分布は平坦化されていき、平均強度は小さくなっていく。

いま一定の厚さの媒質が照射平面内におかれたとすれば、その表面での吸収線量分布は近似的にFig. 30の強度分布と相対的に一致するはずである。百分率深部線量分布は照射平面のどの場所でも同じになると一応仮定しているが、おそらくFig. 30にみられるように、ターゲットからの距離が大きくなっていくときの強度分布の平坦化と同様な現象があると考えられる。照射の目的からすればあまり厚い物質を照射することは考えられないから、この散乱の効果は一応無視した。

8.2.2 表面での後方散乱

吸収線量におよぼす後方散乱の効果は特にX線が入射する被照射物質の表面で問題となるが⁶⁰Co γ 線の場合には多くとも数%以下であるからあまり問題にならない。しかし100~200KV_PのX線ではその効果は非常に大きい。X線照射において後方散乱の大きさを示すために用いられている後方散乱係数 B_L は次のように定義されている。

$$B_L = X_m / X_a$$

X_a は線源から定った距離にある空間点における照射線量であり、 X_s は同じ場所で検出器の後方に後方散乱の効果が十分飽和するだけの厚さをもつ媒質を検出器に接しておいたときの照射線量である。 X_s は媒質からの後方散乱の分だけ X_a より大きい値を示す。 X_a 、 X_s は適当な変換係数 $f (=0.87 (\overline{\mu_{en}/\rho})_m / (\overline{\mu_{en}/\rho})_{air})$ を用いて、次式のように吸収線量に変換され得る。

$$D_m = f_m X_m, \quad D_a = f_a X_a$$

f_m と f_a は後方散乱の有無による線質の相違も多少はあると考えられるので、全く同じ値にはならないが、だいたい等しいと考えてよいから、 $B_L \approx D_m / D_a$ とみなしてもさしつかえない。したがって

$$D_m \approx B_L \cdot D_a = B_L \cdot f_a \cdot X_a$$

となるので、 B_L が実測され、かつ空気に対する媒質の実効エネルギー吸収係数比がわかれば媒質が十分厚いときの表面線量 D_m が推定できる。

Fig. 31に B_L を実測した結果を示す。媒質には標準的な被照射物質としてPMMAファントムを用いた。測定にはラドコン・プローブ607を用い、ターゲット面の中心から下方の空

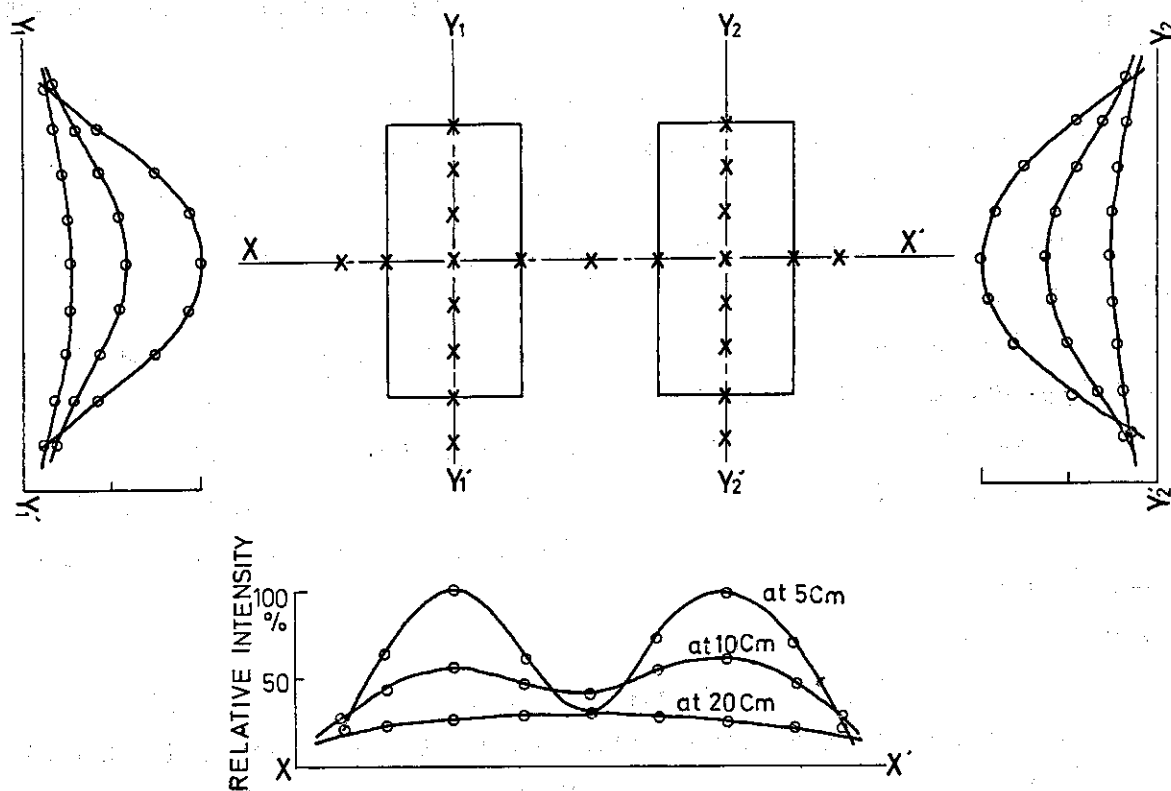


FIG. 30 INTENSITY DISTRIBUTION IN IRRADIATION FIELD

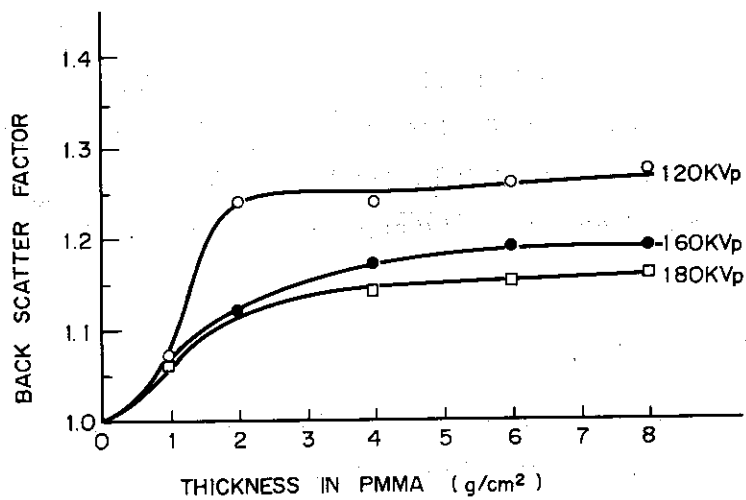


FIG. 31 THE EFFECT OF ABSORBER THICKNESS ON BACK SCATTERING FOR DIFFERENT TUBE VOLTAGES

間点で、後方に十分広い面積をもつ PMMA 板をおき、その厚さを増していったときの電離電流の変化を測定した。飽和に達する PMMA の厚さは 120KV_P の場合は 2g/cm² であるが、160KV_P の場合は 2g/cm² であるが、160KV_P, 180KV_P の場合は 4g/cm² 以上である。B_L は 120KV_P で 1.25, 180KV_P で 1.15 であった。

これらの結果はターゲットが点線源でかつ照射野が狭い範囲に制限されている通常の X 線発生装置によって測定された結果²¹⁾とは同列に比較はできないが、照射野が開放されている幾何学的条件のもとでは B_L が予想外に小さい。これは線源としてのターゲット面が広いため、固体の媒質がない場合でも検出器に入射する X 線のうち、照射室の壁、その他構造物からの散乱線の寄与が非常に大きいためと考えられる。この場合、媒質は一方で検出器への散乱線の入射量を増加させるが、他方では、照射室の壁、その他から散乱線を遮蔽する効果をもつことになる。そのため B_L は見かけ上小さくなっていると考えられる。このことを考慮すると B_L を用いて吸収線量を推定する方法はかなり誤差を含むことは避けられないだろう。

8.2.3 深部線量分布

深部線量分布を実測によって求める場合、標準媒質として PMMA を選んだが、その理由としては次の 3 点があげられる。

- ① 本装置は主として有機的組成をもつ化合物の放射線効果を調べることを目的としていること
- ② PMMA 自体を 2 次線量計として用いることが可能であり、その測定可能な線量の領域が十分高いこと
- ③ 大部分の C, H, O の元素を主成分とする有機化合物の水溶液の質量エネルギー吸収係数は、KeV 程度の X 線に対して PMMA の質量エネルギー吸収係数と ±10% 以内で一致していること。

深部線量分布は ICRU (1963)²²⁾ の定義にしたがって百分率深部線量 (Percentage depth dose) を用いた。それは次の関係式で与えられる。

$$\text{Percentage depth dose} = 100 \times D_x / D_0$$

ここで D_x は深さ x での深部線量、D₀ は表面での線量である。400KV 以下の X 線に対しては表面線量は実質的な最大線量になる。

Fig. 32 は 120KV_P, 180KV_P の各管電圧での PMMA 中での百分率深部線量分布を示したものである。PMMA 媒質の密度は 1.19g/cm³ である。照射は線量測定に用いる PMMA 試料をターゲット面と同じ平面的形状をもち、高さ 10cm の PMMA ブロックの中のビーム中心軸にうめこんで行った。ブロックの入射側の表面はターゲット面から 5cm 下方の位置に固定した。入射面からの深さが増すにしたがって線量は減少していくが、180KV_P の場合、その減少の仕方はかなりの深さに達するまで直線的傾向を示している。180KV_P および 120KV_P に対して深部線量の減少の割合はほとんど一致しているが、これは PMMA の質量エネルギー吸収係数は、150KeV から 60KeV までエネルギーが低下する間に、10% 以下の変動しかないということから十分説明できる。どちらの場合に対しても 50% 線量になる深さは約 5g/cm² であり、20% 線量になる深さは約 10g/cm² である。

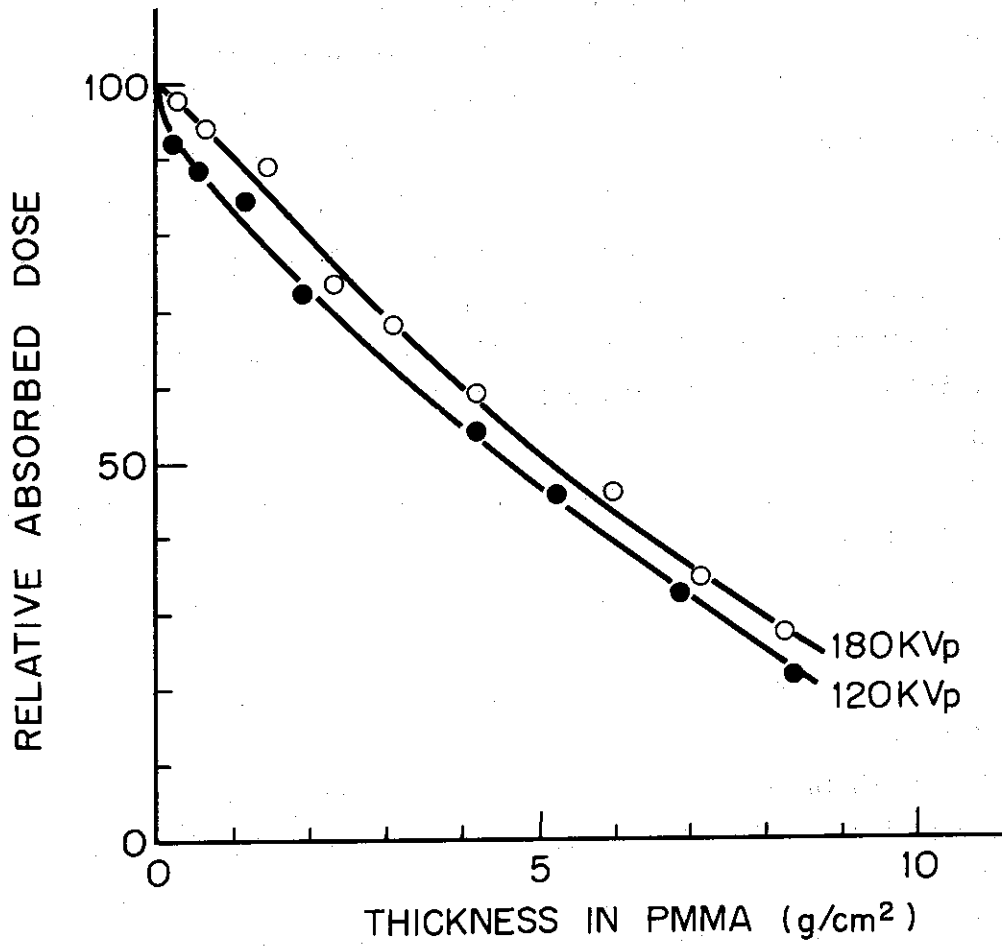


Fig. 32 PERCENTAGE DEPTH DOSE DISTRIBUTION
IN PMMA FOR 120KVp AND 180KVp

PMMAブロックの表面吸収線量は、管電圧160KV、管電流50.0mA、ターゲット面より5cm下の最大強度の場所で1Mrad/hrであった。

Fig. 32の百分率深部線量分布は質量エネルギー吸収係数においてPMMAと等価でない媒質や、複雑な形状をもつ媒質に対しては適用できない。例えば同じプラスチックでも、ポリ塩化ビニールのようなもの²³⁾は実効原子番号がアルミニウムに近いのでPMMAの場合とは異なった深部線量分布を示す。一般の被照射物質中の吸収線量を測定から求めるのは⁶⁰Coγ線照射の場合に比べてかなり面倒であるが、次の2つの方法が考えられる。その1つは媒質と等価な原子組成をもつ壁、および小さな電離容積をもつ空洞電離箱を用いることである。²⁴⁾ただし電離気体と壁の原子組成が異なる場合には質量阻止能はX線エネルギースペクトルの不明確さのために十分正しく評価することはできないが、質量エネルギー吸収係数比に比較すればずっと正確である。この方法は吸収線量を正確に求めることができるという点で優れているが、技術的に面倒である。もう一つの方法は媒質の原子組成に近い固体の小さな2次線量計を媒質中に挿入して照射し、その2次線量計自身の吸収線量からその近傍の媒質の吸収線量を求めることである。すなわち媒質の吸収線量 D_m は $D_m = (\mu_{en}/\rho)_m / (\mu_{en}/\rho)_s \times D_s$ によって与えられる。 (μ_{en}/ρ) および D_s はそれぞれ2次線量計の質量エネルギー吸収係数および吸収線量である。この方法は簡便ではあるが、質量エネルギー吸収係数比が媒質と2次線量計との間の原子組成の一致度がよくない場合は大きな測定誤差を生じやすい。

8.2.4 吸収線量分布の均一性

ある任意の大きさや形状をもつ静止している物体にX線量を一定量だけ照射する場合、物体中の吸収線量分布の均一性が問題になる。PMMAと同等な原子組成をもつものでも、形状が複雑であったり、平面的大きさがターゲット面より大きい場合は、吸収線量分布を予測することができないので均一度は実測により知る以外にない。ターゲット面よりも小さく、かつ厚さが一定の板状のものに対しては、上に述べた平面的強度分布と深部線量分布から、均一度を評価することができる。吸収線量分布の均一度は近似的には平面強度分布の均一度と深部線量分布の均一度の積のような関係で与えられる。ただし、これらのデータから推測される均一度は板状の媒質の下方および横方向を等価の物体で蔽って照射するという条件を仮定している。もしこの条件が満たされていないときは散乱の平衡条件が異なってくるので、全体の均一度は多少悪くなるだろう。

被照射物体の吸収線量の均一度が、水平方向に対しても深部方向に対しても±10%以下の精度が要求されている場合(物体中の全空間に対して±20%の許容度)を考えると、標準的な平面強度分布と百分率深部線量分布から被照射物体の大きさの許容度は平面的大きさについて横方向11~13cm、縦方向16~18cm、また深部方向については約2g/cm²である。

均一性をよくするためには2つの方法が考えられる。深さ方向の均一性は被照射物体を反転して照射することにより得られる。Fig. 32にみられるように180KV_pのときの深部線量分布曲線は約5g/cm²の深さまで直線的に減少しているので、5g/cm²以下の厚さをもつものに対しては完全な均一性を得ることができる。たとえ厚さが10g/cm²まで増しても、反転照射による均一性は±5%以下である。

水平方向の吸収線量の均一性を改良するのは簡単ではないが、最も単純な方法は被照射物体

を水平方向にある定った幅だけ走査することである。ターゲットの横軸方向についての走査によって左右のターゲットの存在を有効に利用して均一な積分強度を得るように工夫すれば、横軸方向についてかなり長い物体に対して均一な照射が可能になるだろう。

9. あとがき

本X線発生装置は据付け以来所期の性能に達するまで幾多の問題に遭遇した。これらの問題については今までに述べてきた通りである。ところがこの装置が今までにない大出力でありまたこれまでの加速器やX線発生装置とは大きく異なる構造をもっていることから、われわれが過去において経験したことの無いような問題が発生し、その上これらの問題点のどれをとってみても単純な原因によるものではなくいくつかの原因が重って発生したものであり完全に解決したとはいえない。これらの問題点の解明にはさらに基礎的な研究の積重ねが必要であろう。

本装置は現在までジャガイモの照射をはじめとしてコンクリートポリマー、強化プラスチック(FRP)およびキュアリングなどの照射に使用してきた。これらの使用経験から工業用の線源としてはいろいろな問題のあることが明らかになった。そのいくつかを述べると次の通りである。

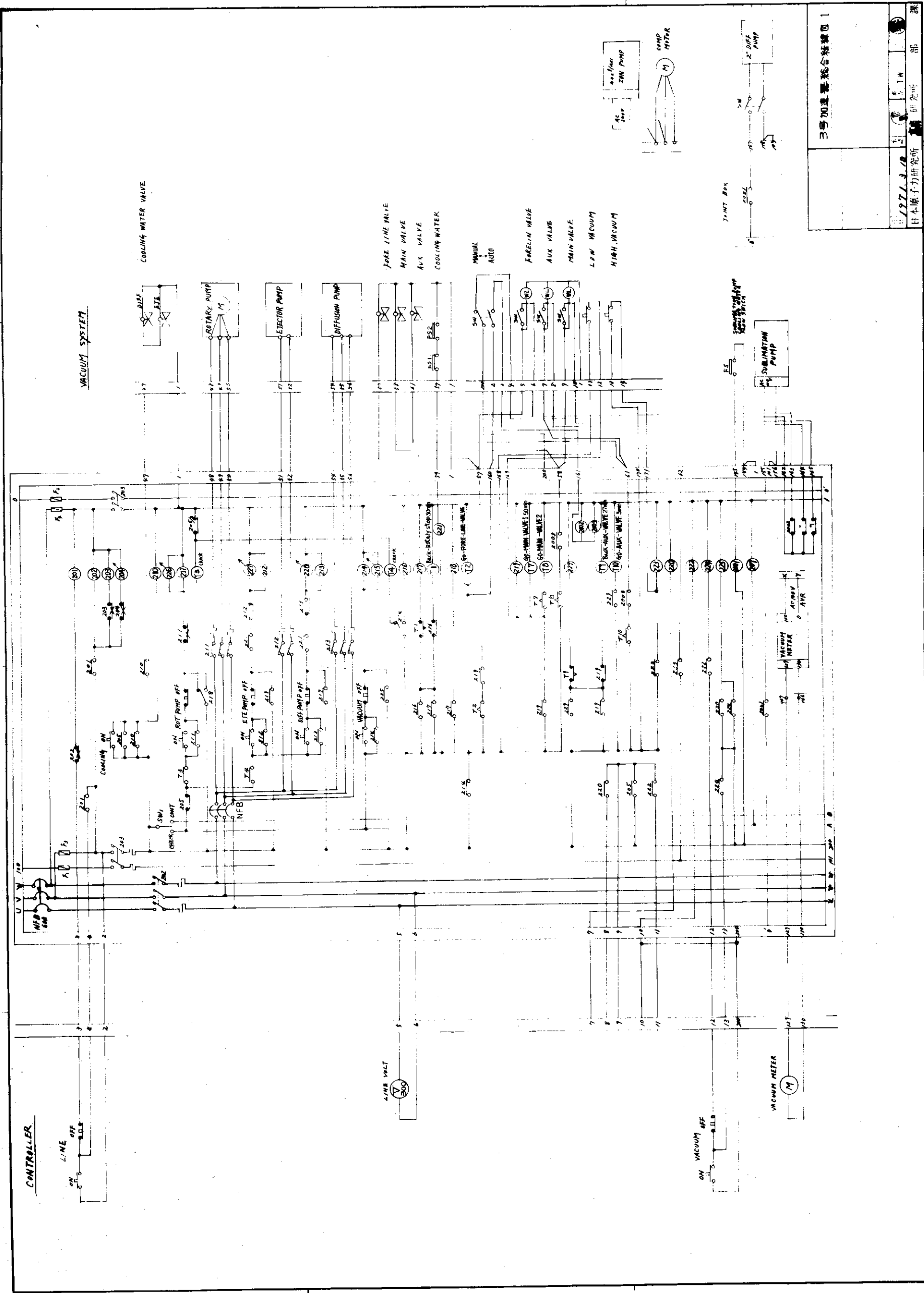
- 1) 管電圧が200KV程度のX線では透過力が小さく照射用としては少なくとも300KVの管電圧が必要となる。
- 2) 本X線発生装置のように大出力でも線量はたかだか 10^6 R/hrであり、放射線化学で照射するときの必要線量は約 10^8 Rであることから照射時間が長くなり工業的に用いるには出力不足である。
- 3) 低エネルギー電子のX線への転換効率は非常に小さく経済的にみても有利とはいえない。
- 4) 真空の維持が困難であり、とくにターゲットなどが新品のときのベーキングに多くの時間が必要である。

ただし低エネルギーのX線発生装置は遮蔽が容易であることから移動可能な照射線源として低線量で効果の期待される照射などには有望と思われるが、信頼性および稼働率を向上するにはまだ解決しなければならない多くの問題が残されている。

最後に本装置の調整に際して御激励を頂いた阿部滋忠元理事、沢柳元所長、本島元所長に厚く御礼申上げる。また惜しめない御協力を頂いた東芝電気株式会社計測技術部鈴木徹氏および電子管技術部山本実氏に心から感謝申上げる。さらに最終段階の査読にいたるまで御指導いただいた重松開発試験場長に深謝申上げる。

参 考 文 献

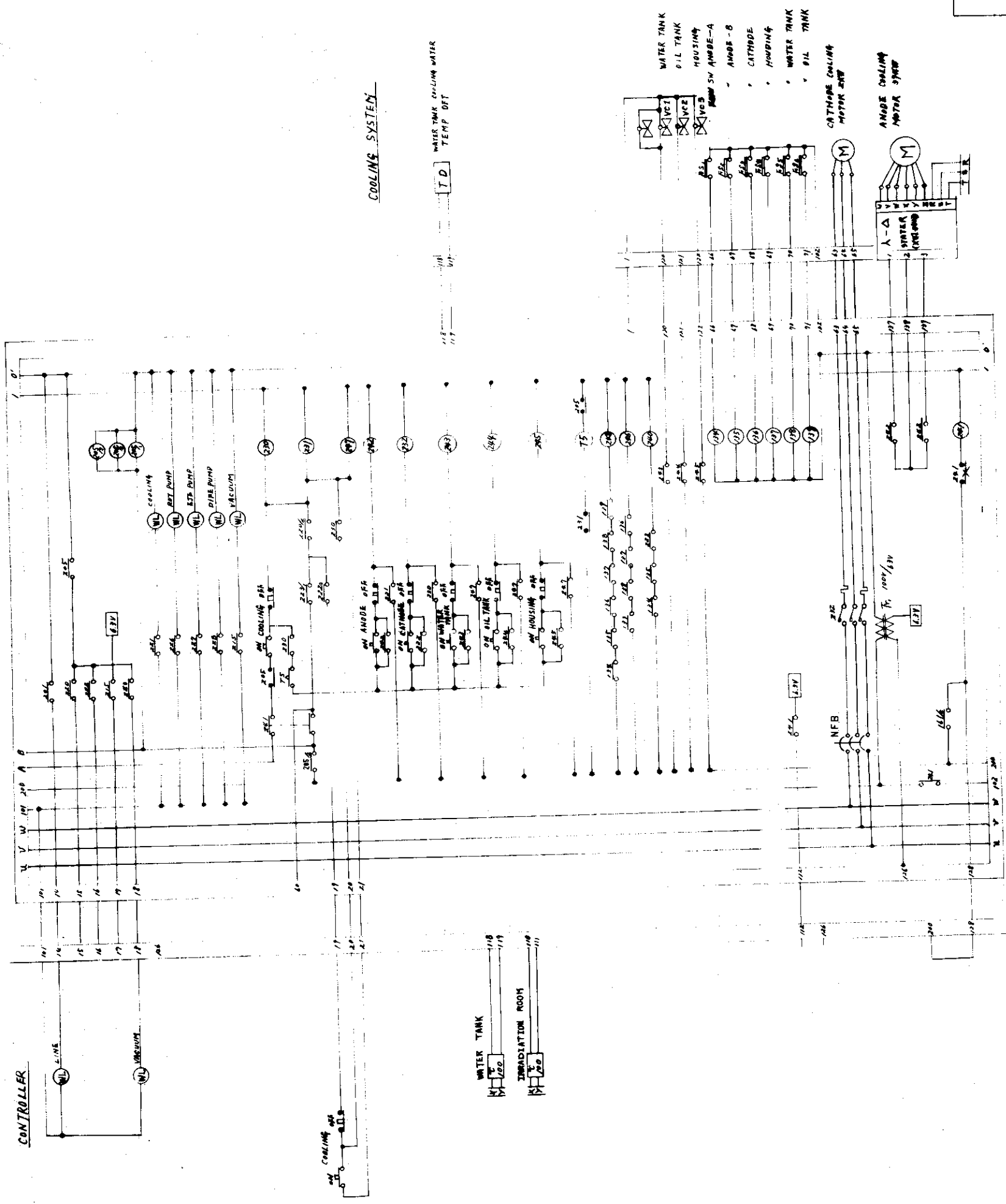
- 1) Kulen Kampff: H Rontgens trahlen Fiat Review 12 108 (1953)
- 2) Schanland
- 3) Glendenin Nucleonics 2 12 (1948)
- 4) 永見初太郎 他 東芝レビュー 17巻5号(1962)
- 5) 日本金属学会真空用金属研究委員会編 電子管用金属材料 (1958)
- 6) 江副博彦 工業物理講座 電子管 日刊工業新聞社 (1957)
- 7) Kal R Spangen Deg Fundamentals of Electron Devices 訳 小池勇二郎・他
電子装置の基礎 近代科学社
- 8) 鳥山四男 他 高電圧工学 コロナ社 (1968)
- 9) Cranberg : J. Appl, Phys 23 518 (1952)
- 10) D. Alpert, et al : J Vacuum Sci Technolgy 1 (2) 35. (1965)
- 11) 秋葉稔光 他 三菱電機技報 44巻2号 (1970)
- 12) 柳沢一二三 他 明電舎時報 92号 (1970)
- 13) 鳳誠三郎 他 電子, 電気材料の特性と選択 地人書館 (1964)
- 14) 吉田, 筒井, 永見, 田之上, 応用物理学会第27回講演会(1966年秋季)
- 15) 田中, 三友, 大島 : JAREI-memo 4121 (1970)
- 16) H.E. Johns : Brit J. Radiol. Supplement No 10, "Peptth Dose Tables for
Use in Radiology " 25 (1961)
- 17) H.E Johns : "The Physics of Radiology " 2nd ed Thomas Springfield,
252 (1961)
- 18) E.D. Trout, et al, : Am, J. Roentgenal, 87 574 (1962)
- 19) H.E. Johns : " Radiation Dosimetry III " 2nd ed. Academic Press, 34
(1969)
- 20) 大島, 四本, 田中, 他 JAREI 1190 (1970)
- 21) H.E Johns : Brit J Radiol 27, 443 (1954)
- 22) ICRU Report 10d "Clinical dosimetry" (1963)
- 23) H. Behrens and H. Erdeck : Kernenergie, 8, 312 (1965)
- 24) O. Hecker, H. Behrens, and P. Kraak : Kernenergie 8, 358 (1965)



3号加温器総合特種図1

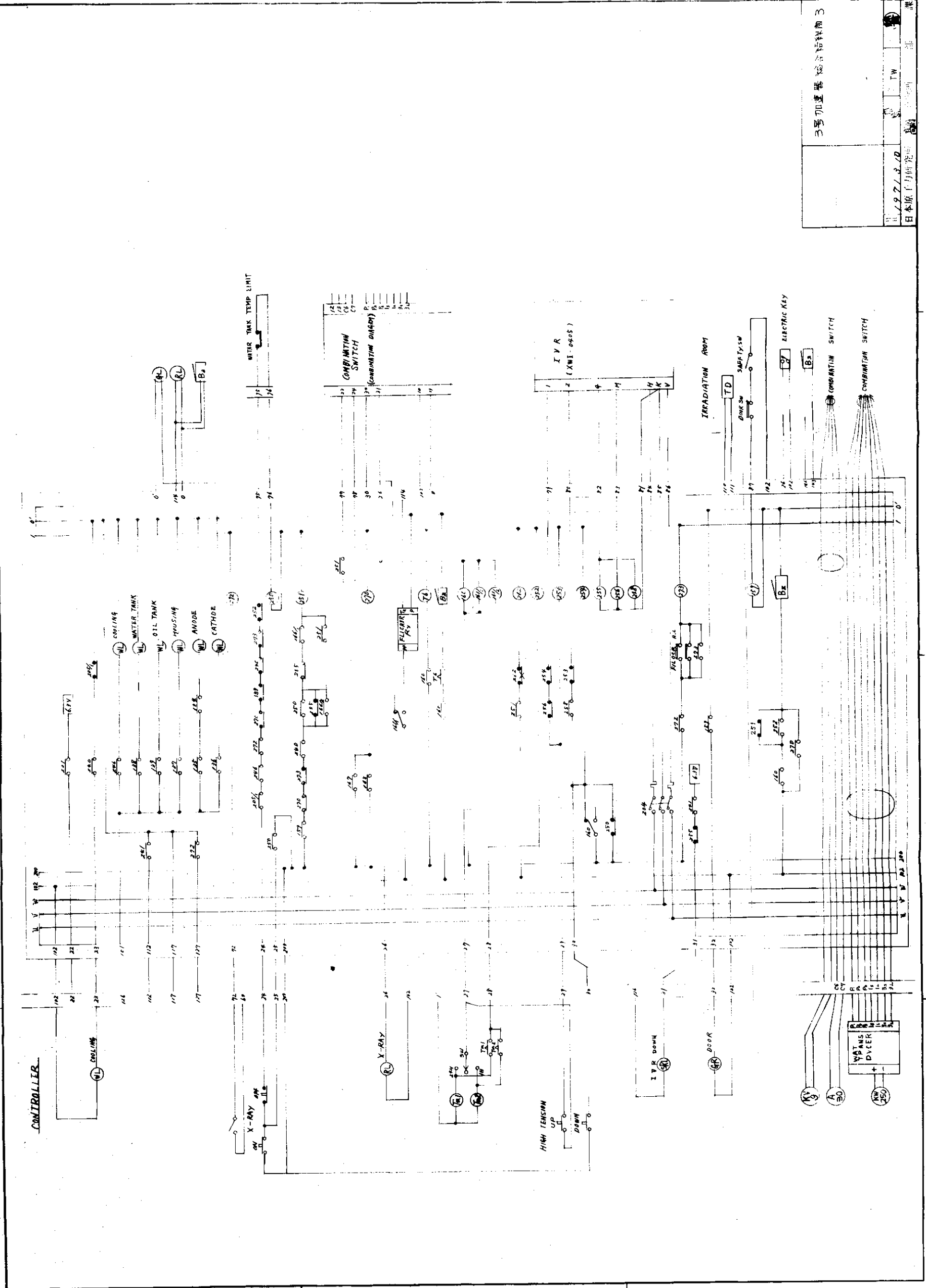
1977.3.18

日本原子力研究所 研究部



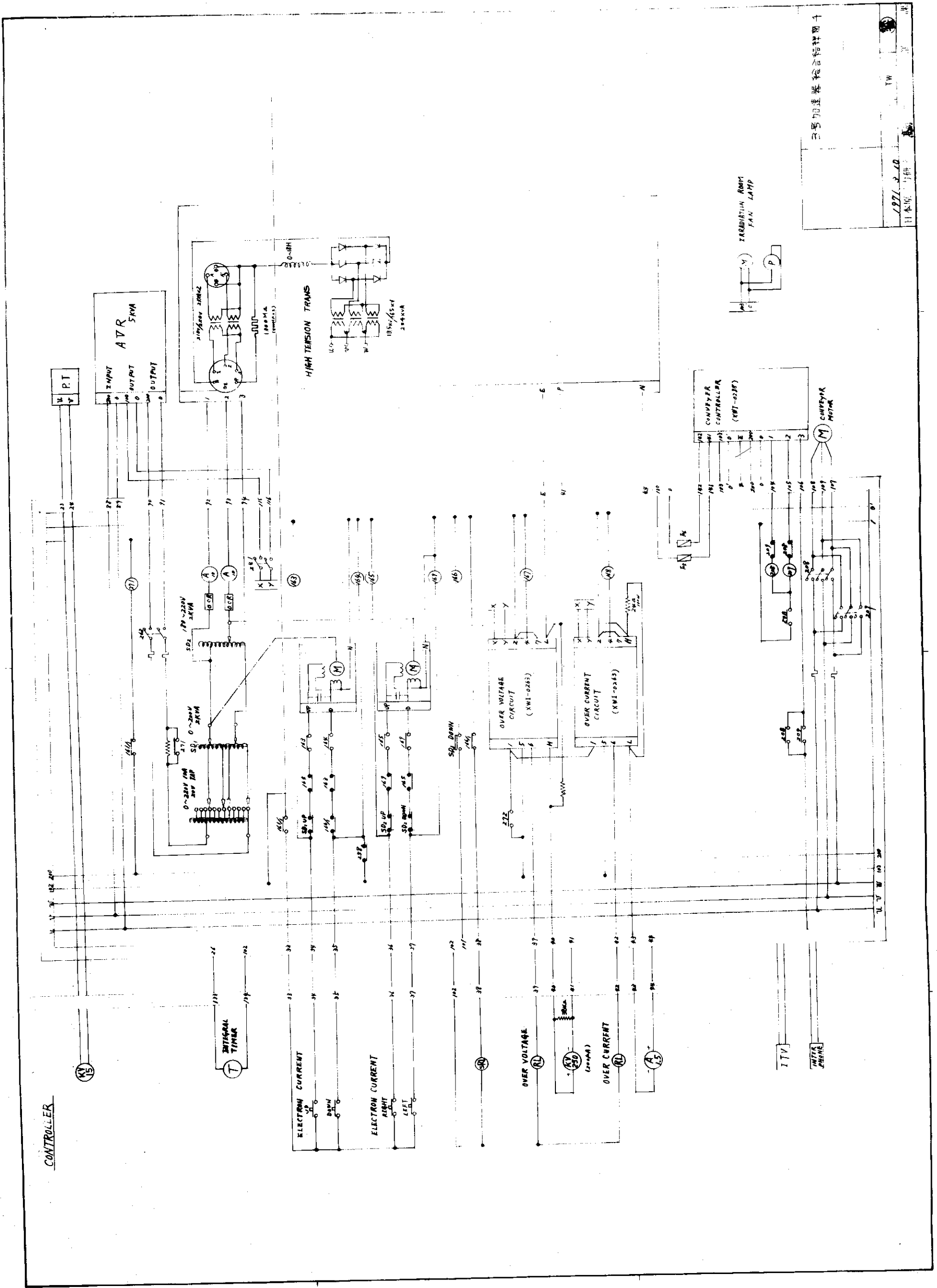
COOLING SYSTEM

| | |
|--------------|-----|
| 3号加蓋基給合格線圖 2 | |
| 1942/12/28 | TW |
| 日本原子力研究所 | 研究所 |



3号加濃器施設配線図3

1971.3.10
日本原子力研究所



1971. 2. 10
TW
日本原 与 研
三石加速器総合制御図十