

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「CNX 冷陰極X線管」特有真空環境の最適化
及びX線発生装置の開発

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人日本産業技術振興協会

目次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 1
- 1-2 研究体制 2
- 1-3 成果概要 3
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口 4

第2章 研究成果

- 2-1 シミュレーションによる電界分布、電子放出方向等の解析と新X線管構造設計 5
- 2-2 160kV CNX冷陰極型X線発生管の試作 9
- 2-3 X線管フラッシング装置の開発と条件だし 15
- 2-4 X線管フラッシング条件と加速寿命試験 20
- 2-5 傾斜機能付セラミック固体絶縁筒を用いた全固体絶縁X線発生装置の試作開発 22

第3章 全体総括 27

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車への電子部品の搭載率は年ごとに多くなっており、最近では普通乗用車では総コストの28%、ハイブリッドカーでは47%が電子部品で占められている。その多くがパワーデバイス、ECU（電子制御ユニット）対応の半導体、フラットパネルディスプレイ、センサー等である。さらに、ランプ、反射板、ミラー、外装部品等は真空装置により製造されるが、これらの部品は高品質・高信頼性が求められ、一般の家電製品に比べて厳しい規格及び管理に基づいて生産されている。一方、自動車も情報家電と同様に価格低減が要求されており、これに伴って、様々な課題が浮上してきている。

まず、自動車搭載電子部品の検査では目視検査から非破壊検査(透視検査)が重要となる。すなわち、自動車用エンジン制御用電子回路の微細欠陥(例;ハンダ内部空隙欠陥)を工場インラインで発見するためには、出力安定度に優れたX線源による高性能X線透視検査システムが必要である。また、検査工程の時間は、自動車の生産工程のスループットを規定してしまうので、検査工程の時間短縮と効率化が求められ、さらに、昨今の厳しいコスト管理において検査工程設備も例外ではなく、低コスト化が求められている。

従来の熱陰極X線源による非破壊検査システムは出力変動等の課題があり、厳しい検査を要求される自動車産業用(例;電子回路のハンダ内部空隙欠陥検査)には導入が進まなかった。本研究の目標は、優れた出力安定性を有する「CNXによる新しい冷陰極」をX線源として実用化すべく、課題であった「長寿命化(15,000時間)」を、真空X線フラッシング及びセラミックスX線管技術等により、冷陰極特有の真空環境の維持・最適化を図ることで達成し、工場内インラインX線非破壊検査システムに適用する。この過程で真空装置に関しても、特有環境下での真空維持を達成する。

さらに今後は、ナノテクノロジー産業においても、最先端の技術を駆使して製品、部品、材料等の開発・改良が行われる。カーボンナノチューブを中心とした新材料が新しい電子部品材料として注目され、新しい用途開発等が進められているが、そのため、特にフラーレン・ナノ材料観察用に高精細度な冷陰極X線顕微鏡が必要になっている。また、一般に真空装置の省スペース、省エネルギー、長寿命化、高信頼化が広く求められている。

上記目標に対して、以下の研究項目を設定し、個別に検討を進めた。

- 1) シュミレーションによる電界分布、電子放出方向等の解析と新X線管構造設計

- 2) 160kV CNX冷陰極型X線発生管の試作
- 3) X線管フラッシング装置の開発と条件だし
- 4) X線管フラッシング条件と加速寿命試験
- 5) 傾斜機能付セラミック固体絶縁筒を用いた全固体絶縁X線発生装置の試作開発

結果は第2章以降に詳しく述べる。

1-2 研究体制

1) 研究組織

統括研究代表者 (PL)

財団法人日本産業技術振興協会 産業技術部長 守谷哲郎

副統括研究代表者 (SL)

株式会社サンバック 代表取締役 木村博司

再委託先、研究者氏名

株式会社サンバック

技術部 部長 榎山恒久

技術部 課長 山崎 徹

独立行政法人産業技術総合研究所

計測フロンティア研究部門極微欠陥評価研究グループ

グループ長 鈴木良一

株式会社ライフ技術研究所

代表取締役 石黒義久

技術開発部 技術担当顧問 羽場方紀

2) 管理体制

事業管理者

財団法人日本産業技術振興協会

管理員 産業技術部技術振興課長 大澤吉直

(経理担当者) 総務部 経理課長 中松豊子

(業務管理者) 総務部長 杉山佳延

再委託先

株式会社サンバック

(経理担当者) 総務部 千葉明美

(業務管理者) 代表取締役 木村博司

独立行政法人産業技術総合研究所

(経理担当者) 財務会計部門 経理室長 宮本晃之

(業務管理者) 計測フロンティア研究部門長 秋宗淑雄

株式会社ライフ技術研究所

(経理担当者) 研究支援部長 小林 勇
(業務管理者) 代表取締役 石黒義久

3) アドバイザー

独立行政法人産業技術総合研究所 中部センター
エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ
ウェハ・評価研究班 技術総括 松畑洋文
独立行政法人産業技術総合研究所 関西センター
光技術研究部門 主任研究員 平賀 隆

1-3 成果概要

1) シミュレーションによる電界分布、電子放出方向等の解析と新X線管構造設計

CNX 冷陰極型 CNX 冷陰極型X線管について、160kVの管電圧を実現するため、CNX 陰極-接地極及び接地極-ターゲット陽極間に外部から高電圧を±80kV印加したときの電界電子放出シミュレーション解析を行った。電界強度分布及び電子ビーム軌道解析を小電力用及び大電力用の2種類のX線管について検討を行い、最適なディメンジョン・構造のデザインを得た。

2) 160kV CNX冷陰極型X線発生管の試作

シミュレーション解析から図面化したメタルセラミックX線管について、セラミック絶縁筒、冷陰極側、ターゲット陽極側等の詳細構造設計を行った。管内部については、エージングによる電子線出射下の脱ガスフリー化、シミュレーションによる電界強度の高い部分の抑制による放電フリー化など真空環境の設計を行い、CNX-X線管を試作した。

3) X線管フラッシング装置の開発と条件だし

業界でも前例の無い高真空、高温、高電圧下で使用可能なX線管フラッシング装置について

1. 真空容器と排気系
2. 加熱機構
3. 高電圧印加によるWターゲットによる発熱除去

の研究を進め、使用条件に付いての条件出しを行った。

4) X線管フラッシング条件と加速寿命試験

開発したX線管について、エージング処理及び真空封止を行った後、連続して200時間X線を出し続ける寿命試験を行ったところ、寿命試験の前後において特性に顕著な劣化は見られなかった。この結果から外挿すると、万時間のオーダーの寿命は十分にあると予想される。この性能は、医療や非破壊検査等の一般的な用途には十分な寿命である。

- 5) 傾斜機能付セラミック固体絶縁筒を用いた全固体絶縁X線発生装置の試作開発
大変寿命信頼性が高い冷陰極CNX-X線管を市場の要求にマッチさせるために、固体モジュール化技術の開発を進めた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人日本産業技術振興協会

産業技術部長 守谷 哲郎

電話 029-855-1267 FAX 029-855-1279

E-mail : moriya@jita.or.jp

第2章 研究成果

2-1 シミュレーションによる電界分布、電子放出方向等の解析と新X線管構造設計

CNX冷陰極型X線管は、図2-1-1のようにカーボンナノ構造体電子源（CNX陰極）、接地極、ターゲット陽極で構成し、外部から高電圧を印加することによって電界電子放出により電子ビームをタCNX陰極-接地極-ターゲット陽極間に外部から高電圧を印加することによって電界電子放出により電子ビームをターゲットに入射してX線を発生させる。

X線透過像の撮影などのイメージングに用いるX線管は、ターゲットに入射する電子ビームの焦点サイズが小さいほど分解能の高い像が得られる。CNX陰極は、大面積化することは容易で、面積が大きいほど電流を流すことができる。しかし、面積が大きいと一般的にターゲットに入射する焦点サイズも大きくなり、X線イメージの分解能が劣化する。

そこで、大きい面積のCNX陰極でもターゲットにおける電子ビームのサイズが小さくなるよう図2-1-2，図2-1-3のように電子源陰極を凹面として、その周囲に電界集中を抑えて放出電子が集束するような電界を生じさせるためのガード電極を配置する。このガード電極は、電子源と同じ電位とする。これによって、陰極に電圧をかけるだけで電子を出すことができるようになる。この陰極と接地極間に生じた電界で放出された電子は、接地極の穴を通して接地極-陽極間に入り、陽極に正の高電圧をかけることによって電子をさらに加速させてターゲットに入射する。この構造を各種の場合に応じて最適化するためのシミュレーションを行った。

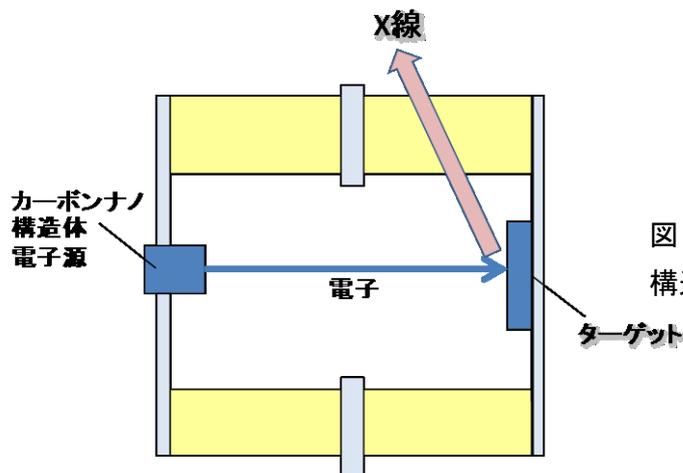


図2-1-1. カーボンナノ構造体X線管の基本構造

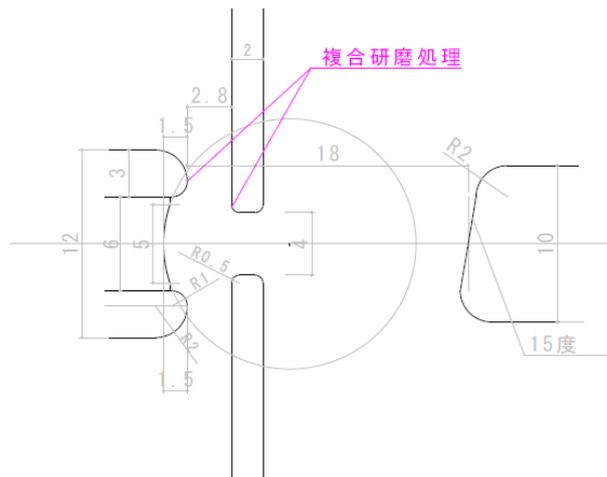


図 2-1-2. 電子源のサイズが 6mm の場合の陰極・中間電極・陽極の断面図

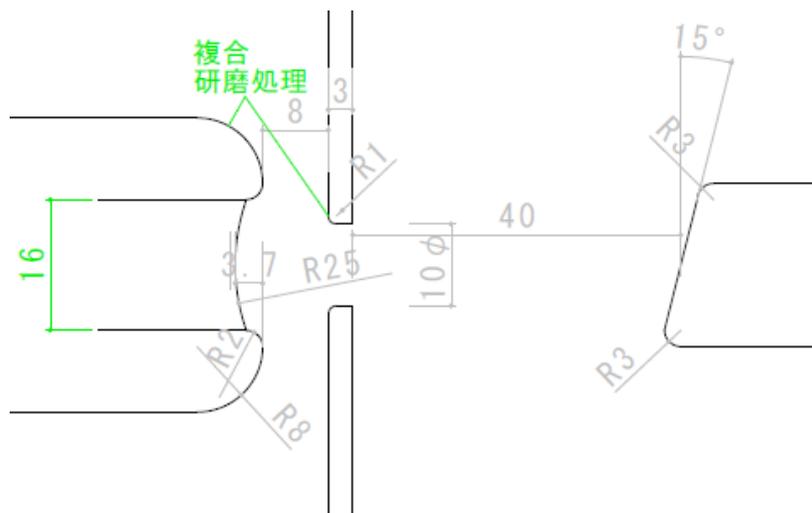


図 2-1-3. 電子源のサイズが 16mmφ の場合の陰極・中間電極陽極の断面図。

図 2-1-4 に、図 2-1-2 の X 線管に ±40kV を印加したときの電界分布を基にして行った、電子の軌道シミュレーション結果を示す。この条件での電界強度の最大値は、ガード電極の部分で 16MV/m 程度である。この電界は高真空中では放電せずに保つことは可能であるが、倍の ±80kV を印加すると放電の可能性が高まる。この放電の可能性を弱めるには、陰極・設置電極間の距離を広げるか、電界が集中する部分の形状の曲率半径を大きくする必要があり、その対策をとった X 線管のシミュレーションも行った。

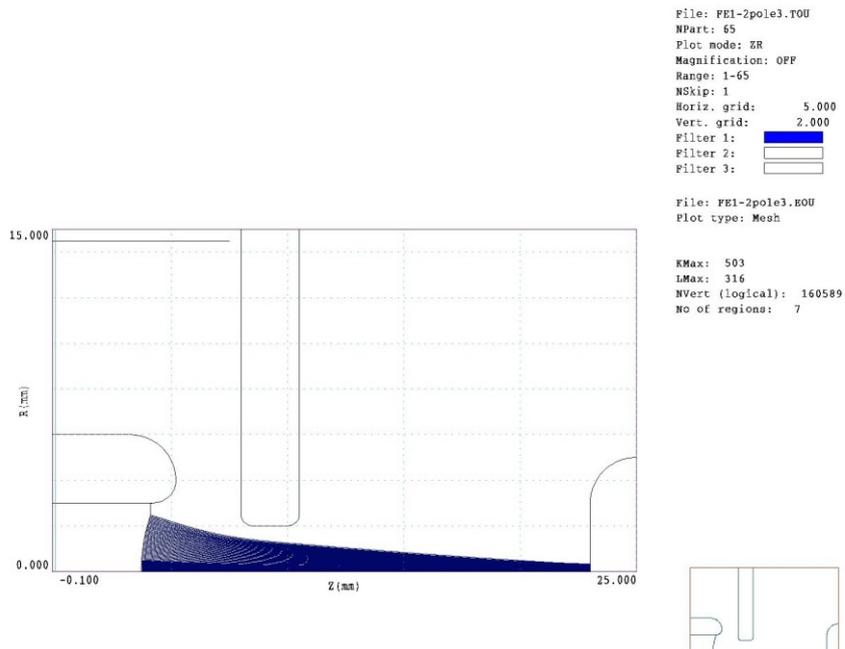


図 2 - 1 - 4. 小電力用 X 線管軌道シミュレーション

その結果によると、 $\pm 80\text{kV}$ の電圧をかけた場合、 26MV/m 程度の電界が生じる。表面処理などを行えば放電無しに使用できる値であるが実用上は安全率を考慮してもう少し低い電界のほうが良い。

小電力 X 線管はカソードのサイズに制約があり、ガード電極の曲率半径はあまり大きくできないため、片側数十 kV 以上を定常的に印加することは難しい。そこで、CN X カソードの径が 16mm の高電力 X 線管のシミュレーションを行った。

図 2 - 1 - 5 に、高電力 X 線管の電界分布に基づく軌道シミュレーションを示す。

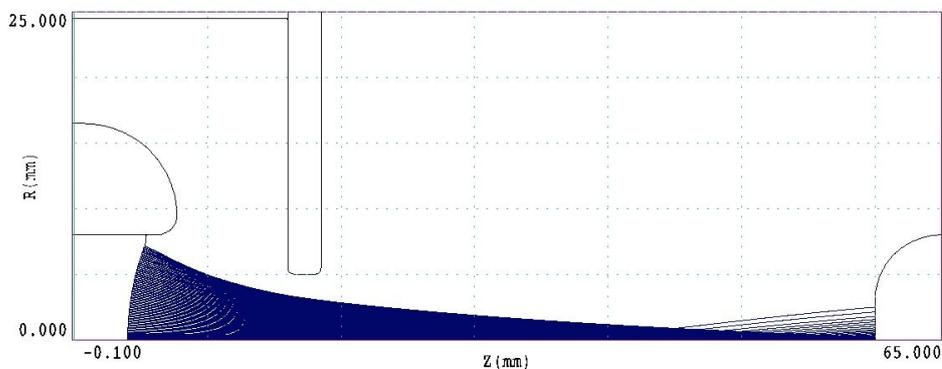


図 2 - 1 - 5. 高電力用 X 線管の軌道シミュレーション

以上のように、電子面を凹面としガード電極を使うことにより、陰極と接地電極との間に電界を印加すると電子ビームはターゲットの部分でビームが収束するようになれる。シミュレーションによる検討の結果、大電力用 X 線管は $\pm 80\text{kV}$ (160kV) では十分余裕があり、小電力用も構造を最適化すれば $\pm 80\text{kV}$ も可能であることがわかった。

2-2 160kV CNX冷陰極型X線発生管の試作

前節のシミュレーション解析から図面化したX線管について、セラミック絶縁筒と冷陰極側、ターゲット陽極側の詳細構造設計を行った。図2-2-1は、シミュレーションを行った160kV大電力用CNX冷陰極X線管の外形構造設計図である。

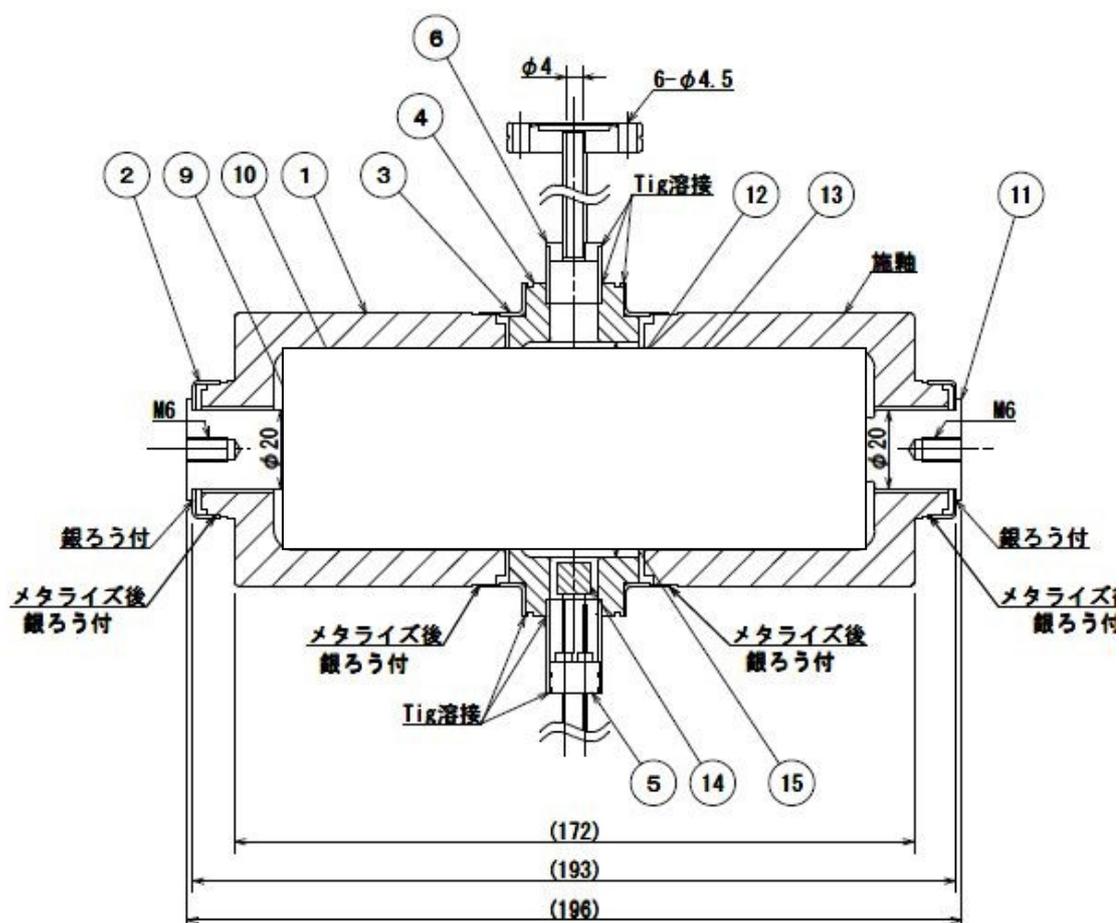


図2-2-1. 160kV用X線管の外形構造設計図

このX線管では、X線管内部とX線管外部の耐電圧（陽・陰極側共100kV）の補償設計が重要となる。管内部については、電極の電解研磨による表面の平滑化、エージング処理による電子線出射下の脱ガスフリー化、シミュレーション設計による印加電圧による放電フリー化を実現する真空環境の設計を行った。シミュレーションでは、前節のとおり、±80kV印加時において電界の最大値が20MV/m以下であり、電界による放電までに十分余裕を持った設計にしている。

真空環境を作り出す真空排気システムは、到達真空度 10^{-6} Pa 以下とし、ターボモレキュラー・ポンプ+スクロールドライ・ポンプ系をオイルフリーとした。構成部材については、接地電極・陰極電極は SUS316L を、陽極はWターゲット埋込無酸素銅材とし、92%アルミナセラミック焼結筒はメタライズ処理後、活性金属を介し、両電極と適した温度プログラムにより真空昇温加熱ロー付けで組み立てる。最終組立は接地極と TIG 溶接する。

図 2-2-2 は、この手法で製作した図 2-2-1 の 160 kV 用大電力 X 線管である。



図 2-2-2 試作した大電力用 CN X-X 線管

また、この大電力用 X 線管よりも軽量・コンパクトな小電力用 X 線管も試作した。小電力用 X 線管は、 ± 80 kV は設計に余裕がないが、 ± 120 kV 程度であれば問題無く使用できると考えられる。図 2-2-3 と図 2-2-4 は試作した小電力用 X 線管で、図 2-2-3 は真空を保持するゲッターとしてリード線による抵抗加熱によって活性化するゲッター、図 2-2-4 は局部某熱加熱により活性化するゲッターを使用している。

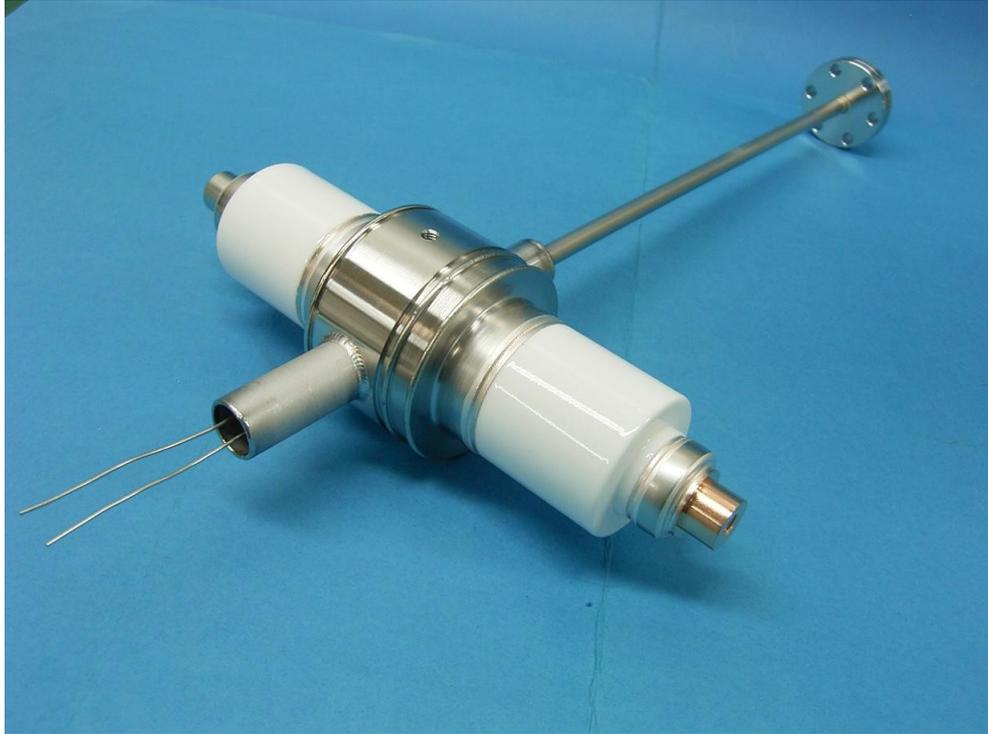


図 2-2-3. 小電力用 X 線管。抵抗加熱活性化型ゲッター使用



図 2-2-4. 小電力用 X 線管。局部某熱加熱型ゲッターを使用

本研究では、CNX-X線管の寿命15,000時間以上を目標として、その寿命試験等を行うために図2-2-5に示すように16個分のX線管を試作した。

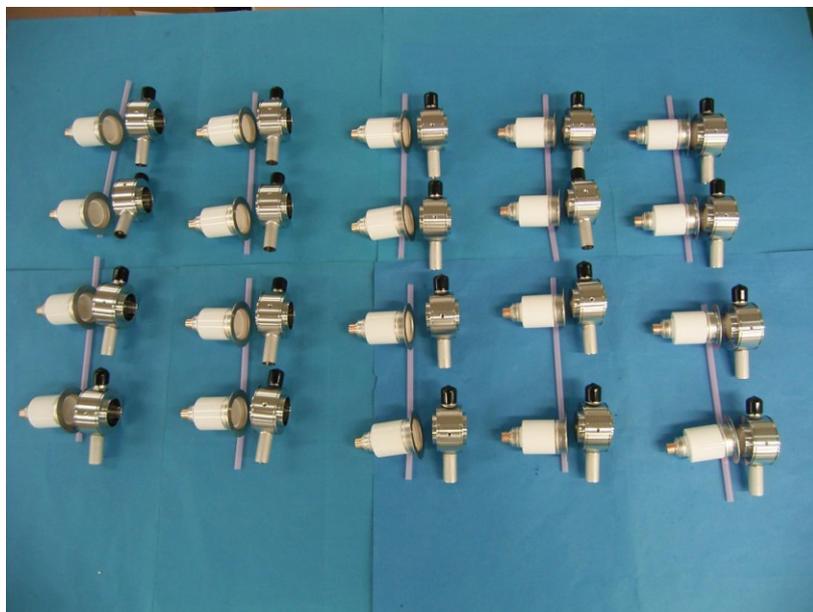


図2-2-5. 寿命試験のために試作したX線管（組立前）

このX線管は、双極型のX線管で、陽極にも正の高電圧を印加するが、陽極は電子ビームによりターゲットが加熱されるため高電圧を印加した状態で冷却をしなければならない。そこで、図2-2-6に示すセラミックを用いた放熱板を試作した。この放熱板はアルミナ製で、陽極と接続するために銅のネジを付けた構造になっている。

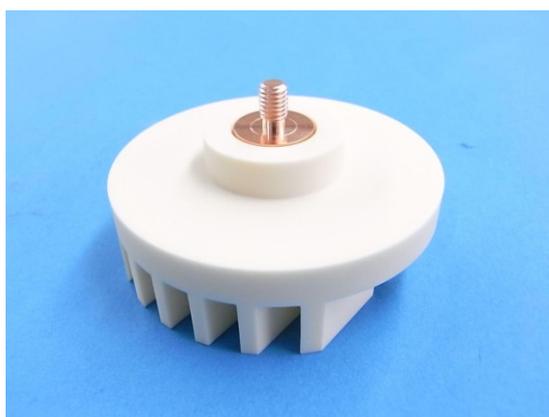


図2-2-6. 試作したアルミナ製放熱板

CNX-X線管をX線源として使用する場合、高電圧を印加する高圧電源も必要だが、可搬型X線源の場合は高電圧源ができるだけ小さいものが望ましい。

また、図2-2-6のセラミック放熱板を陽極につけたモールドX線管（図2-2-7）も試作した。このX線管は、外部の高圧電源から電力を供給するもので、モールドは円筒状にしている。

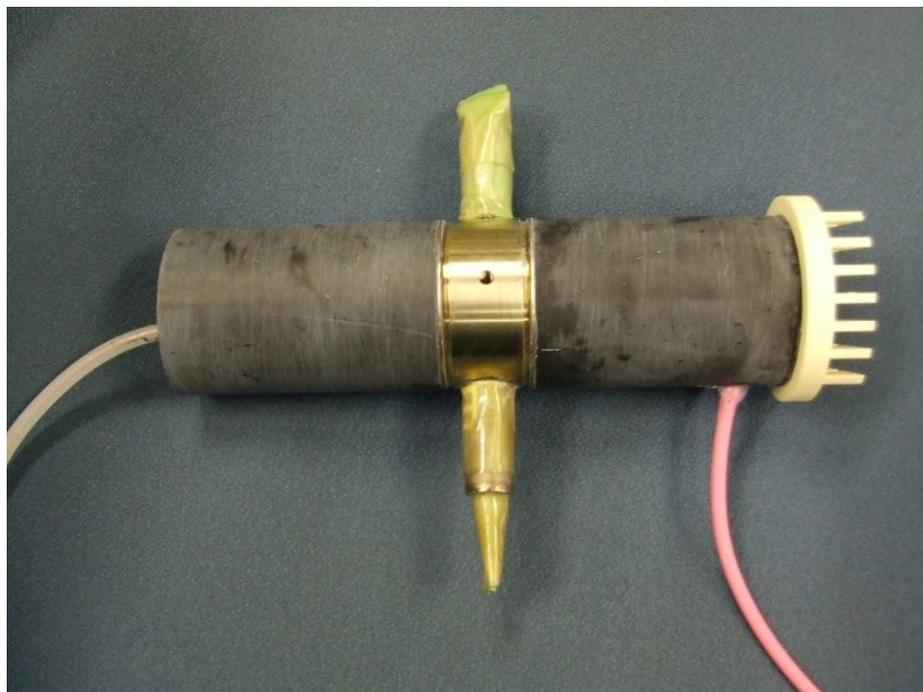


図2-2-7. セラミック放熱板付モールドX線管

図2-2-8は、X線管と電源を16cm x 11cm x 24cmのケースに入れた可搬型X線源で、単三乾電池4本で駆動できるようにしている。

図2-2-9, 2-2-10には、図2-2-8のX線源を用いて撮影したX線透過像である。小電力用のX線管は、設計どおり120kV以上の管電圧で動作でき、金属製の配管部品や碍子などをX線が透過して検査することが可能であることを確認した。



図2-2-8. CNX-X線管と電源をケースに入れた可搬型X線源

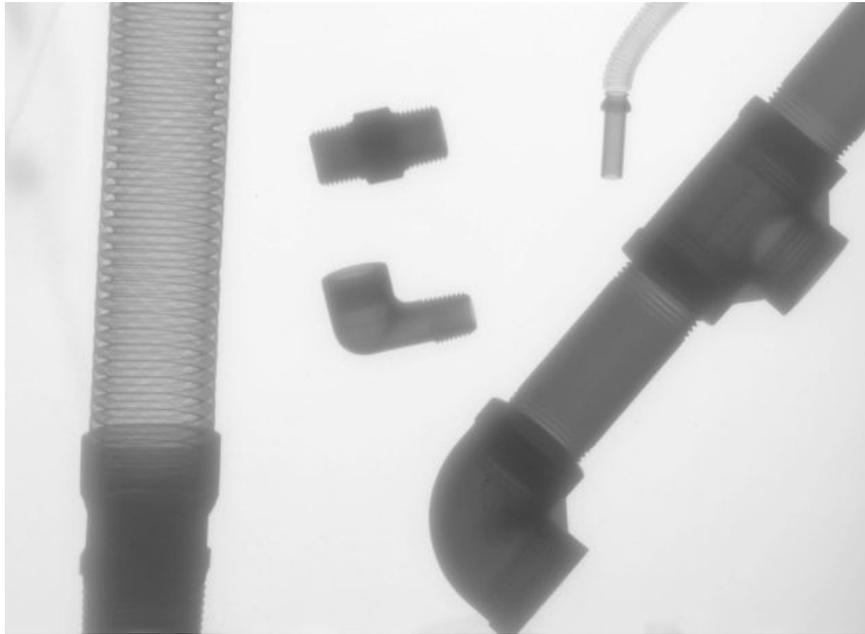


図 2-2-9. 開発した X 線源で撮影した金属製配管の X 線透過像

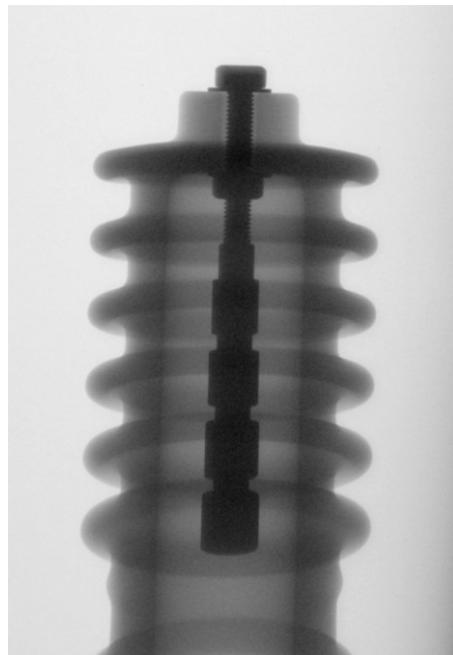


図 2-2-10. 開発した X 線源で撮影した碍子電極の X 線透過像

2-3 X線管フラッシング装置の開発と条件出し

X線管フラッシング装置について設備開発項目

1. 真空容器と排気系
2. 加熱機構
3. 高電圧印加によるWターゲットによる発熱除去

について研究を進めた。以下は設備開発の内容である。

1. 真空容器と排気系の開発

A. 真空容器は高真空到達及び内部に配置するX線管の高電圧印加に耐えうる構造を必要とする。

- (1) 真空容器の内壁の突起部をなくす目的で、内壁はバフ研磨に電解研磨の表面処理を施す。
- (2) 溶接構造は内面溶接で溶接ビートが滑らかで凹凸無いような施工。
- (3) 付属するフランジポートの付け根部の溶接も滑らかなるよう施工。
- (4) X線管に長時間の加熱条件が付加するため真空容器は水冷構造。
- (5) X線管からX線放射遮蔽対策として、真空容器及びポート類に鉛板3tを外壁に被覆施工。

B. 排気系を構成するターボ分子ポンプはX線被爆で極度のポンプ劣化になるため、対策として排気口に鉛板複数枚で構成する邪魔板式の遮蔽板を設けた。

2. 加熱機構の開発

真空容器内でのX線管ベーキングの加熱機構にはヒーター類による直接、間接加熱は高電圧印加及びX線放射の条件から不向きである。計測センサーの内部設置も同条件で危険を伴う。以上のことからX線管から距離を置ける放射エネルギーによる加熱機構を開発した。

A. ハロゲンランプ加熱機構の開発条件

- (1) 対象物、X線管周囲を均一に加熱する。
- (2) X線管に高電圧印加することから、ランプユニットはX線管から距離を離す必要がでて、ランプ光の放射が広範囲なり、加熱効率が悪いと共に真空容器内壁を加熱するため、ガス放出が多くなる。内部の付属物の加熱対策も必要。
- (3) X線管の温度計測及び温度調節は放射温度計によるが、X線遮蔽の鉛ガラス(14t)を通して計測する。

B. ハロゲンランプユニットの開発

- (1) ユニットケース及び構成部品、固定ボルト類など突起部が無いR加工を施す。
- (2) ハロゲンランプ放射光の集中化の反射板を設計製作。
- (3) ランプ光の角度可変機構の設計製作。

C. X線管温度300~600°Cを計測する放射温度計センサーは5~10 μ m帯の素子を使用するが、計測窓に使用する鉛ガラス14tは透過できない。

高温用センサー約2 μ m帯ではハロゲン光を感知する。このように放射温度計では計測が不可能なので、計測システムを開発。

- (1) ハロゲンランプ加熱はフラッシング(間歇)加熱とする。
- (2) 放射温度センサーは鉛ガラスを透過する高温用センサーを使用。
- (3) 計測はランプ加熱時間と加熱停止時間を決め、停止時、X線管表面の放射温度のみが計測でき、計測時の温度から温度調節をする。

X線管は熱容量を持っているので温度降下は小さく、表面温度の計測は間歇時間調整で、連続観測しても $\pm 3\%$ 以内に入る。

3. 高電圧印加によるWターゲットの発熱除去

X線管への高電圧印加によるWターゲットの発熱を冷却機構で除去する方法を開発した。

Wターゲット部に冷却用接触子を取りつけ、接触子を連続冷却、及び発熱部導体の熱伝導を利用し発熱を除去する方法、さらに冷却媒体には超純水があるが抵抗値管理には大型設備が必要になるので、小型化の出来る絶縁油(シリコンオイル)を媒体にした冷却装置を考案した。

絶縁油の抵抗値の管理条件

- (1) 絶縁油(シリコンオイル)には水分や気泡が含有しており、絶縁破壊の原因になるため、除去機能が必要。
- (2) 発熱除去に伴う絶縁油の昇温対策。
- (3) 絶縁油の劣化対策

以上の条件を満足する冷却装置には真空加熱・脱泡・攪拌・オイル冷却用チラーを装備し、真空脱泡、乾燥後窒素充填で絶縁、及びオイル劣化を防ぐ方法を取る。

構成は

- a. オイル量60Lの真空容器
- b. 攪拌機
- c. ヒーター
- d. 真空ポンプ及びその排気系

e. オイル冷却用チラーと冷却じゃ管

f. 接触子冷却用噴射ポンプ

以上 3 項目を主開発項目とした真空 X 線管フラッシング装置の試作開発を行った。

以下に、上記各研究開発項目に関する、装置完成状態での写真を示す。

図 2-3-1. 装置完成全景

図 2-3-2. 真空容器冷却水構造

図 2-3-3. X 線管取り付け

(次ページ以下に掲載)

また、図 2-3-4 に X 線管フラッシング装置の真空系の設計図を示す。



图 2-3-1. 装置完成全景



图 2-3-2. 真空容器冷却水构造

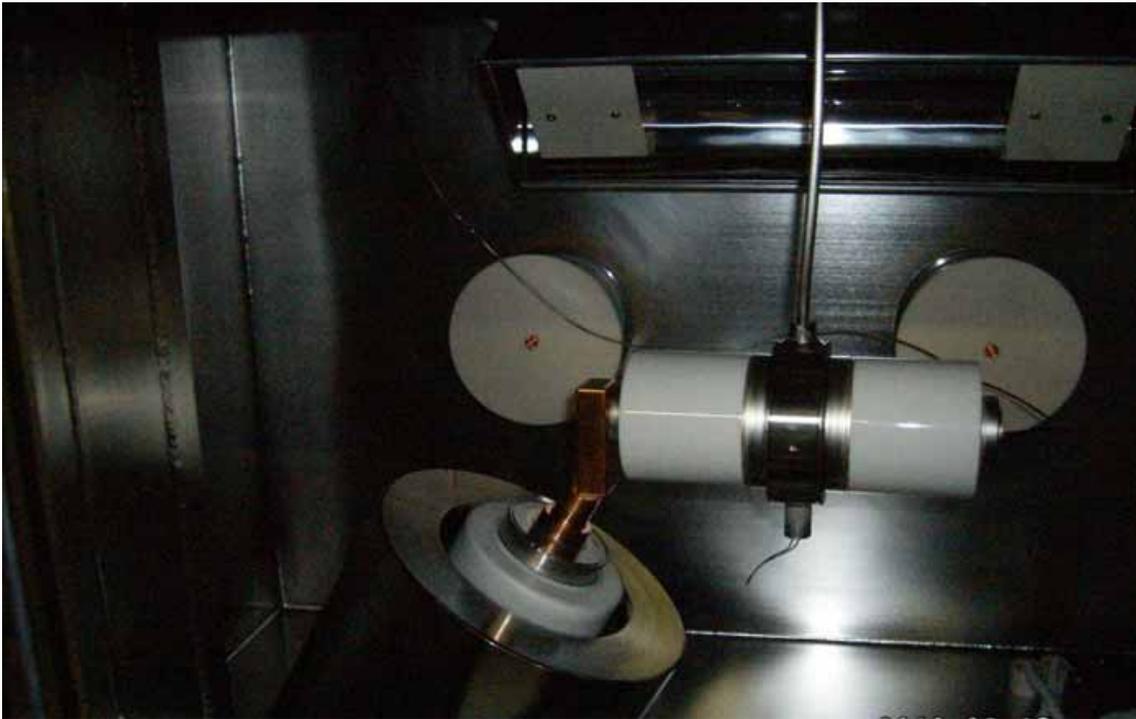


図 2-3-3. X線管取り付け

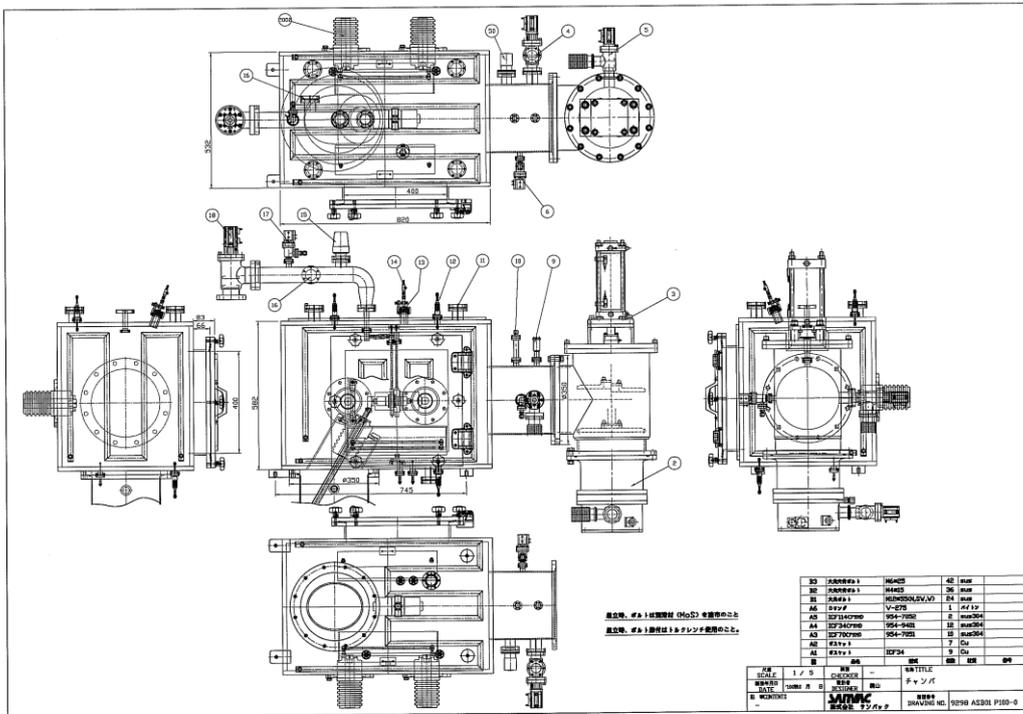


図 2-3-4. 真空系の設計図

2-4 X線管の寿命試験

図2-2-3のX線管を真空排気し、陰極・陽極に電圧をかけることによって電子をターゲットに入射してガス出し・エージング処理を行った後、ゲッターを活性化させて真空を封止してX線管を完成させた。このX線管のエージング処理では、陰極に徐々に電圧をかけて電子を出していく。図2-4-1の左側の曲線のように、当初低電流では比較的低い電圧から電子が出だすが、電圧を上げて電流を出すと数分から数時間のオーダーで電流電圧特性が変化し、図2-4-1の右側の曲線のようになる。このエージング時の電流よりも低い電流値で使用すると、長時間安定した電流電圧特性を得ることができる。

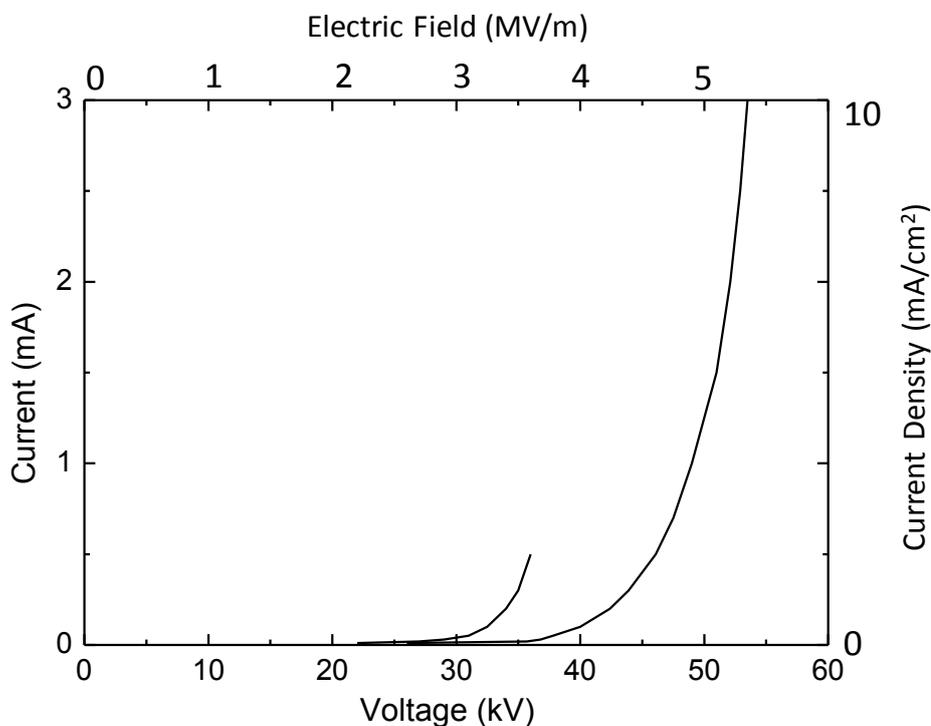


図2-4-1. エージング前後のCNX-X線管の陰極の電流電圧特性

図2-4-2は、エージング処理（最大電流3mA）、真空封止を行った後、0.5mAで200時間X線を出し続ける寿命試験を行ったX線管である。この写真の右側が陽極で、X線が放出された部分のセラミックは濃い黄色に変色している。この寿命試験の前後では、真空状態や電流電圧特性にほとんど変化は見られなかった。この結果から外

挿すると、万時間のオーダーの寿命は十分にあると予想される。

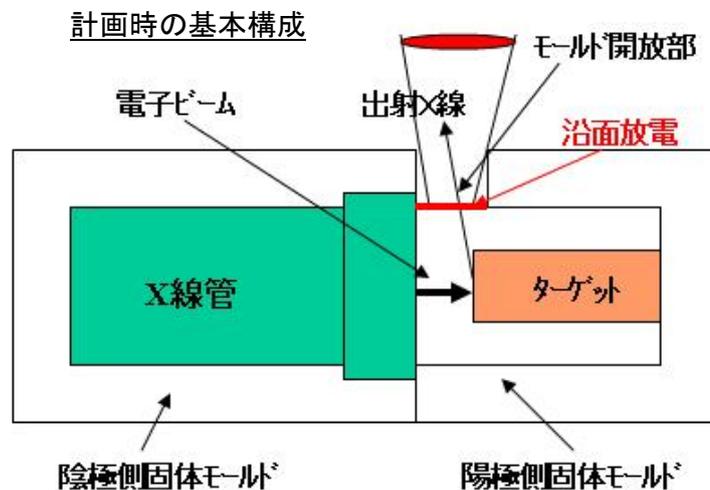


図 2 - 4 - 2 . 寿命試験後の CN X - X 線管

2-5 傾斜機能付セラミック固体絶縁筒を用いた全固体絶縁X線発生装置の試作開発

試作したX線管を用い、発生装置を試作する。従来はパイレックス等硬質ガラス製2極管のため、絶縁油中に浸漬し、高電圧とターゲットロスによる発熱対策を同時に行っていたが、X線管を収納するのに絶縁油入り金属箱を使用するため、大型化し重量も重くなる。また絶縁油の冷却は別置き水冷ユニットを用いるなど更に大型化する。今までこの種のX線発生器の設置場所などでは寸法、省エネルギー性、重量などに対する制約はあまり論じられなかった。しかし国内の空港手荷物検査場など設置面積の制約・電力さらにはX線のCT化高機能化などによる大型X線発生装置となってきており、今までのような装置は適用出来なくなりつつある。即ち、より小型高性能化軽量化、省エネルギー化が求められる。この要求に答えるためには、X線管としては、小型・軽量・低電力・高性能は実現できても、発生装置にする場合の冷却の問題、高電圧への対応をいかに考えていくかが、市場の要求にマッチさせるポイントである。この章では大変寿命信頼性が高い冷陰極CNX-X線管を市場の要求にマッチさせるための固体モジュール化をすることを目的とした開発について報告する。

まず計画時では、冷陰極型X線管にたいしては、全固体高分子絶縁モールド方式を採用し試作したモデルでは、X線出射部「窓」を開放しないと、固体モールドを構成する「高分子材料」がX線を吸収し劣化する。従って、寿命低下の要因となるため、陰極側を全固体高分子絶縁モールド構成にし、陽極側を全セラミック固体モールド絶縁構成にする2段階での技術開発を行う。



- (1) 高分子固体絶縁モールド型X線管ユニットの試作
試作したX線管の写真を写真2-5-1に示す。



写真2-5-1. 試作X線管

試作仕様としては、

X線管 メタル-セラミックタイプ
管電圧 150kVp (最大)
エネルギー 4 J/p (20ms 巾)
一般型 600g、 Be窓軟X線領域拡大型 700g

モールド仕様

耐電圧 160kV
高電圧回路一体型
冷却方式 自然冷却(X線管が直接筐体に取り付けられるようにする。)

上記の簡単な仕様をもとに開発を行った。開発項目として

- ① 高耐圧にもちいる樹脂
- ② メタル-セラミックX線管と樹脂との界面制御
- ③ 高電圧回路一体に対する耐電圧マージン
- ④ モールド品の形状と重量

とくに小型軽量を重視した。

- ① 高耐圧にもちいる樹脂の検討

一般にシリコン樹脂かエポキシ樹脂のどちらかを用いる。
今回は重電メーカーの経験を生かし、エポキシ樹脂を採用した。

② メタル-セラミック×線管と樹脂との界面制御

樹脂とセラミックとの密着性及びセラミックへの適度な圧縮応力をえるために、まずセラミック絶縁筒は耐電圧を持たせるため施釉している。この施釉は樹脂との接合の障害となるため、サンドブラストで剥離する。つぎに密着性をえるために、シラン処理を行う。このような処理は高電圧ユニットに用いる全部品（抵抗、コンデンサー、ダイオード）にも行う。

③ 高電圧回路一体に対する耐電圧マージン

エポキシの絶縁耐圧特性から樹脂厚を決定し、その厚みに対してマージンをかけた。当初の計算で求めた値はマージンが2.5と大きかった。製作メーカーと協議し最適値とした。

④ モールド品の形状と重量

まず×線管・回路を含めたモールド形状がどのようになるか実際にエポキシモールド調べた。つぎに最適化したモデルを設計することとした。目標値として、200×130×80mmとした。

結果及び考察

まず×線管と高電圧回路一体化モールドを予備的に作り、耐電圧破壊試験を行った。製作したエポキシモールド品の写真2-5-2を示す。

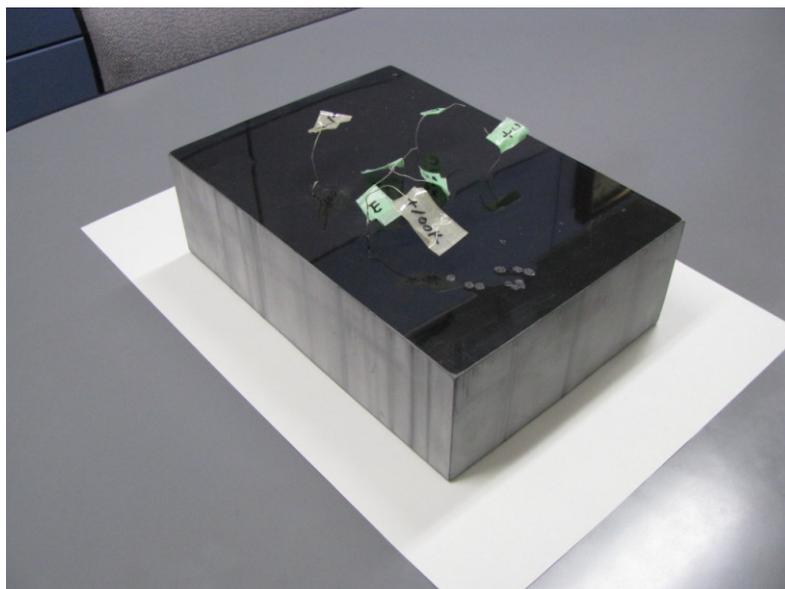


写真2-5-2. モールド品写真

耐電圧試験では 平均耐電圧 190kV 最低値 185kV とかなり良い結果となった。

この結果をもとに、形状・重量を考慮したモールドの設計を行った。金型が左右に分かれたものとなるが、X線出射窓がターゲット側の場合と、Be窓（中間接地極）の場合があることで、このような設計とした。また陽極側には高負荷対応X線管（コンスタント電源使用）を想定し、～300W（管電圧160kV－管電流）まで冷却可能な絶縁型冷却フィン取り付け可能な構造としている。

写真2-5-3に製作したエポキシモールドユニットにドライバー回路を搭載した状況を示す。

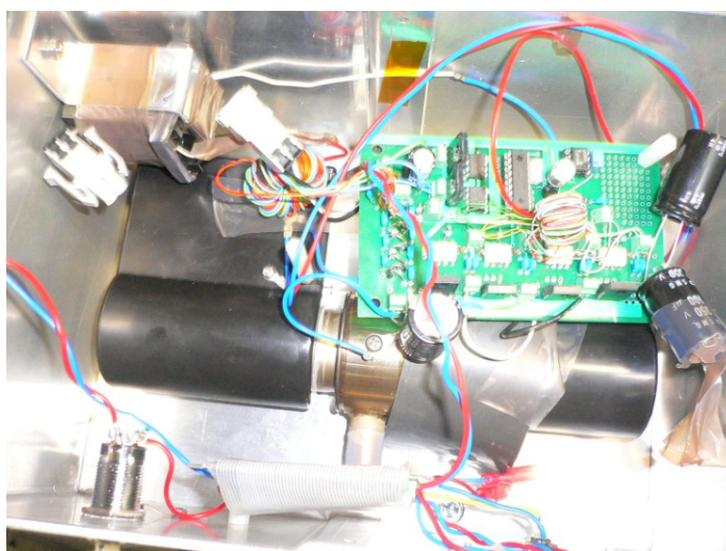


写真2-5-3. 製作したエポキシモールドユニットとドライバー回路

また完成したパルス式CNX-X線発生器（乾電池駆動）は寸法160×100×160mm、重量4kg程度に収まっている。

この試作品は現在市販されている小型携帯型X線発生器に比べ、非常にコンパクト、軽量、省エネルギー性において、優位性を持っている。

(2) セラミック絶縁構成ユニットの開発

ターゲット側絶縁構成が高分子型の場合、X線により劣化が懸念される。一般の使用ではX線管の寿命から問題とならないが、最近のインラインタイプのように24時間稼働など高使用が望まれる場合を想定し開発する。

基礎検討及び計画設計

陽極側アルミナ・施釉品の外周にアルミナ粉を充填して電気試験した場合、

せん浴時に釉薬が破壊される現象が発生した。エポキシの場合は施釉を剥離したため、高耐電圧であったが、今回は剥離しなかったためこのような結果となった。詳細を示すと

【測定条件】

気温：22℃、湿度：50% 気圧：988 hPa、真空度： 1.0×10^{-3} Pa

【試験結果】

アルミナ筒（92%粉充填）：平均値：41.8kV（max；45kV、min；40kV）

外観：添付写真参照。

釉薬が破壊された後、再度破壊試験を行ったが破壊前と変わらぬ値であった。これは母材アルミナの特性が変化しないことによっていると考えられる為、釉薬はやはり剥離させておく必要があることが分かった。

試験前後の陽極側ユニットの写真を写真2-5-4に示す。



写真2-5-4. 釉薬破壊写真

この結果からすると、陽極側耐電圧を保障するためには、陽極-接地極間のアルミナ絶縁筒のリーク長さを考慮すれば製作可能との結論を得た。

設計としては

アルミナ絶縁筒+アルミナ粉末充填方式

リーク長は1000V/mm（設計値マージン2）として

陰極/陽極で160kVの電圧分担1/2とすると、陽極側80kV（定格）となる。これに必要なリーク長は $80/1 = 80$ mm

この基準で製作すればよいことが分かった。

今回の開発では、この基準のX線管試作は間に合わなかったが、別途製作を発注済みである。

第3章 全体総括

様々な応用にも耐える汎用・低価格のX線透視検査システムを完成させるためには、出力の安定した高性能のX線源技術の確立が不可欠である。

熱フィラメントからの熱電子を加速しX線を発生させる手法は安定した技術であるが、エネルギー・ロスが大きい。また、相対的には、冷陰極からの電界電子放出と比較すると、熱雑音を拾うためX線の焦点が絞りにくい。一方、株式会社ライフ技術研究所が独自開発したCNX型電子源では、陰極面にナノレベルのグラフェン・シートが多重に巻きあって、火山のような炭素の山脈ができています。基板から順次成長させているので基板に固定されており、真空中で高電界をかけても安定しているのが特徴です。本研究グループは「CNXによる新しい冷陰極」の利用に関して既に多くのノウハウを有しており、本事業の推進によりX線管の「長寿命化（15,000時間）」の実現を目指して研究展開し、実用製品としての市場への提供に近づくことが出来た。

具体的には、CNX冷陰極型CNX冷陰極型X線管について、160kVの管電圧を実現するため、CNX陰極-接地極及び接地極-ターゲット陽極間に外部から高電圧を±80kV印加したときの電界電子放出シミュレーション解析を行い、電界強度分布及び電子ビーム軌道解析を小電力用及び大電力用の2種類のX線管について、最適なディメンジョン・構造のデザインを得た。

また、シミュレーション解析から図面化したメタルセラミックX線管について、セラミック絶縁筒、冷陰極側、ターゲット陽極側等の詳細構造設計を行った。管内部については、エージングによる電子線出射下の脱ガスフリー化、シミュレーションによる電界強度の高い部分の抑制による放電フリー化など真空環境の設計を行い、高性能なCNX-X線管の試作に成功した。

さらに、従来からの課題であった大型のフラッシング装置の必要性から、業界でも前例の無い高真空、高温、高電圧下で使用可能なX線管フラッシング装置について、1)真空容器と排気系、2)加熱機構、3)高電圧印加によるWターゲットによる発熱除去、の研究を進め、使用条件に付いての新たな知見を得ることが出来た。

X線管フラッシング条件と加速寿命試験に関しては、開発したX線管について、エージング処理及び真空封止を行った後、連続して200時間X線を出し続ける寿命試験を行ったが特性に顕著な劣化は見られなかった。この結果からの想定では、万時間のオーダーの寿命は十分であると予想され、医療や非破壊検査等の一般的な用途には十分な寿命であることが判明した。

傾斜機能付セラミック固体絶縁筒を用いた全固体絶縁X線発生装置の試作開発については準備段階に留まったが、長寿命・高信頼の冷陰極CNX-X線管を市場の要求にマッチさせるためには、固体モジュール化技術が鍵となることが分かった。

以上の結果を基に、今後は実際に検査現場等で使用可能な製品化・システム化に向けて、注力していきたいと考えている。

総括として、本研究によって当初の目標はおおむね達成されたと考える。

今後の展開（方向性）並びに必須目標として、以下の項目が見込まれるとの結論に至った。

<展開（方向性）>

- ① . CNX 冷陰極 X 線管の信頼性を確たるものとする。
⇒ 今回製作した X 線管フラッシング装置による処理法の高度化に基づく製品の長寿命化と寿命試験の継続は不可欠である。
- ② . 既存の熱フィラメント型 X 線管の機能にとらわれない、広範な応用ニーズの探索を行う。

<必須目標>

- ① . 低コスト、製造時間短縮、量産化可能な技術へのレベルアップ
- ② . 従来品である熱フィラメント型 X 線管との競合が少ない市場分野の開拓。
- ③ . より高性能な CNX 冷陰極を目指すための、基礎的材料研究との連携。

今後は上記課題に取り組むことで、より高度な製品化を行っていきたいと考えている。