

平成22，23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24年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 社団法人研究産業・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 . . . . . 1
- 1-3 成果概要 . . . . . 3
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口 . . . . . 3

## 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
  - 2-1-1 改良型カソードのシミュレーション
  - 2-1-2 微小カソード
  - 2-1-3 放電防止対策のシミュレーション
  - 2-1-4 高電圧発生基板設計
  - 2-1-5 まとめ
- 2-2 高出力冷陰極X線管、及び全固体絶縁X線発生装置の開発 . . . . . 19
  - 2-2-1 新型X線管の開発
  - 2-2-2 ロウ付組立技術の開発
  - 2-2-3 まとめ
- 2-3 超高真空内X線発生装置組立技術の開発 . . . . . 33
  - 2-3-1 超高真空内X線発生装置組立工法設計
  - 2-3-2 超高真空内X線発生装置組立装置の開発
  - 2-3-3 超高真空下1350°Cにおけるタングステンターゲットベーキング
  - 2-3-4 600°C～ロウ付け温度及びロウ付け時間内の真空圧力制御
  - 2-3-5 ロウ付け時、ロウ材溶融に伴う加重0からの回復時間特性の改善
  - 2-3-6 まとめ

## 第3章 全体総括 . . . . . 47

# 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。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。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）が重要となってきた。すなわち、自動車用エンジン制御電子回路の微細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高性能 X 線電子顕微鏡が不可欠であり、さらに検査工程の時間短縮と効率化も求められる。各種透視検査に用いられる高性能 X 線電子顕微鏡では、X 線管の取替え回数低減と X 線出力変動を極力抑え、撮影画像の安定化が必要である。このため、同顕微鏡の電子線源を従来の熱フィラメント型熱陰極から CNX 型新冷陰極に変え、省エネルギー化し、出力変動を抑えると共に、長寿命化のため冷陰極 X 線管製造時に特有の真空環境の維持・最適化技術を独自に開発してきた。今後は、複数の因子を一工程で処理できる真空装置を試作開発し、それを用いてさらに性能を安定化し、長寿命化した X 線管を完成する。取り替え頻度についても 15,000 時間以上とし、同時に生産コストの低減を目指す。

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
- 2) 高出力冷陰極 X 線管、及び全固体絶縁 X 線発生装置の開発
- 3) 超高真空内 X 線発生装置組立技術の開発

結果は第 2 章に詳しく述べる。

## 1-2 研究体制

### 1) 研究組織

#### 統括研究代表者（P L）

社団法人研究産業・産業技術振興協会 企画交流部 守谷哲郎

#### 副統括研究代表者（S L）

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 梶山恒久  
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  
技術顧問 羽場方紀  
技術開発部 主任研究員 王 佳宇  
技術開発部 主任研究員 谷口洋和

## 2) 管理体制

### 事業管理者

社団法人研究産業・産業技術振興協会  
(経理担当者) 総務部 松田香織  
(業務管理者) 専務理事 大嶋清治  
総務部長 清水 淳  
企画交流部 守谷哲郎

### 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  
技術部部长 梶山恒久

#### 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 井佐好雄  
(業務管理者) 計測フロンティア研究部門長 大久保雅隆

#### 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  
技術顧問 羽場方紀

## 3) アドバイザー

#### 独立行政法人産業技術総合研究所

##### 先進パワーエレクトロニクス研究センター

ウェアプロセsteam チーム長 松畑洋文

#### 独立行政法人産業技術総合研究所

電子光技術研究部門 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  
シミュレーションソフトを用いて、重負荷対応X線発生管の構造(数条件)について計算し、解析を行った。その結果を試作で検証し、X線管の定格仕様を満たすように、さらに再度繰返し解析を行い限界設計の基準を構築した。
- 2) 高出力冷陰極X線管、及び全固体絶縁X線発生装置の開発  
陽極熱容量の高いX線管の開発を、構造では平型タイプで設計し、製作工程では事前エージング処理を駆使し、最終的には真空内一体ロウ付け法により試作した。この試作品に固体絶縁モールドを施しX線発生器を開発した。
- 3) 超高真空内X線発生装置組立技術の開発  
10<sup>-6</sup>Paの超高真空かつ900°Cの高温下で、不純物を取り去りながら全部品一体組立製造を行った。ロウ付け時の昇温プログラムと炉内真空維持及びX線管への荷重プログラムとの関係を把握し、製造工程の合理化と、信頼性の向上及び大幅なコスト低減を実現した。

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

社団法人研究産業・産業技術振興協会

企画交流部 守谷哲郎

電話 029-886-3652 FAX 029-886-3653

E-mail : moriya@jria.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

#### 2-1-1 改良型カソードのシミュレーション

針葉樹型カーボンナノ構造体を用いたX線源は、図2-1-1のようにカーボンナノ構造体電子源、中間電極（接地極）、ターゲット（陽極）から構成され、外部から電子源に負の高電圧、ターゲットに正の高電圧を印加することによって、電界電子放出により放出された電子ビームをターゲットに入射してX線を発生させる。

カーボンナノ構造体陰極は、大面積化することが容易で、面積が大きいほど電流を流すことができる。しかし、面積が大きくなる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、図2-1-2のように大面積のカーボンナノ構造体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に電子源陰極を凹面として、その周囲にガード電極を配置し放出電子が集束するような電界を生じさせる。この陰極に負の高電圧、陽極に正の高電圧を印加すると、陰極と接地極間に生じた電界によって電子が放出し、接地極の穴を通して陽極側に入る。この電子は、接地極—陽極間に生じている電界によってさらに加速されてターゲットに入射するが、ガード電極や陰極の曲率を適切な値にすることによって電子ビームをターゲットで焦点を結ばせることができる。

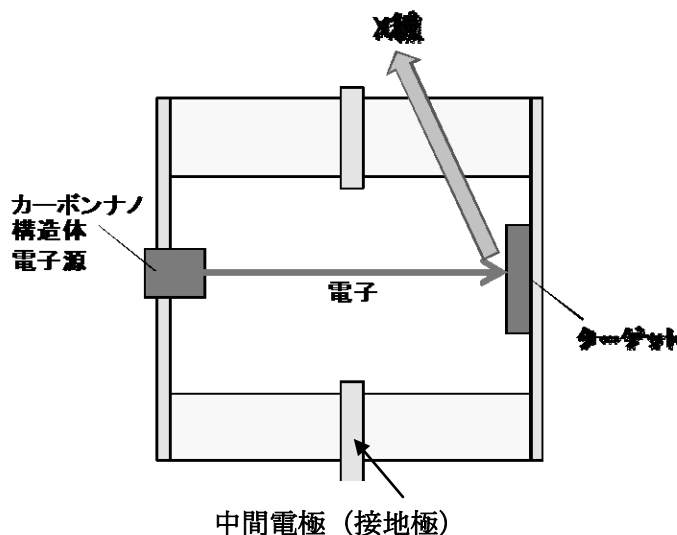


図2-1-1. カーボンナノ構造体X線管の基本構造

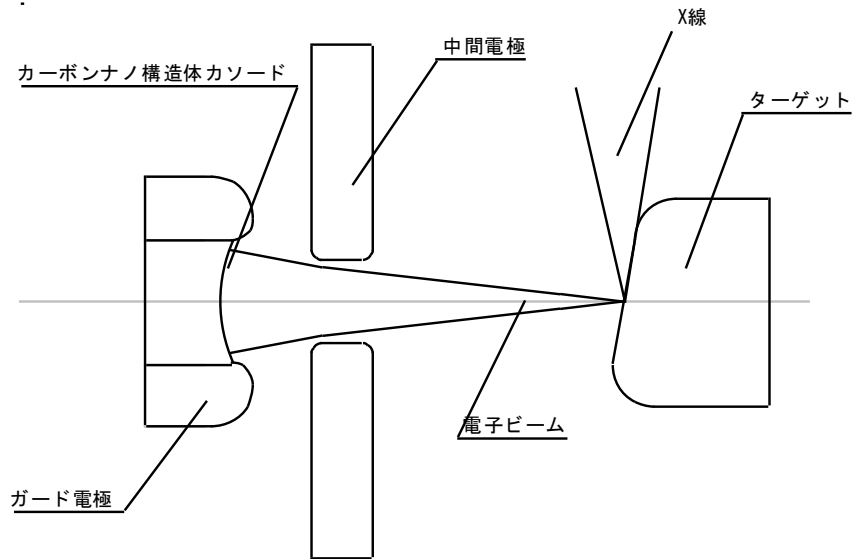


図 2-1-2. 陰極・中間電極・陽極の断面構造。

平成 21 年度に、図 2-1-2 の構造の陰極のシミュレーションおよび試作を行い、シミュレーションによる設計のとおり X 線を発生できることを確認している。しかしながら、平成 21 年度の設計の構造では、凹面のすべての領域から電子を放出させると、図 2-1-3 上図のようにターゲットで収束しない電子が出てくるといった問題があった。そこで、ガード電極とカソード放出面との間に電界の低い領域を設け、この領域で電子ビームの放出が無いと仮定して図 2-1-3 下図のようにターゲットにほとんどの電子を収束させることができるような設計にした。しかしながら、実際の X 線管では、高エネルギー X 線を出

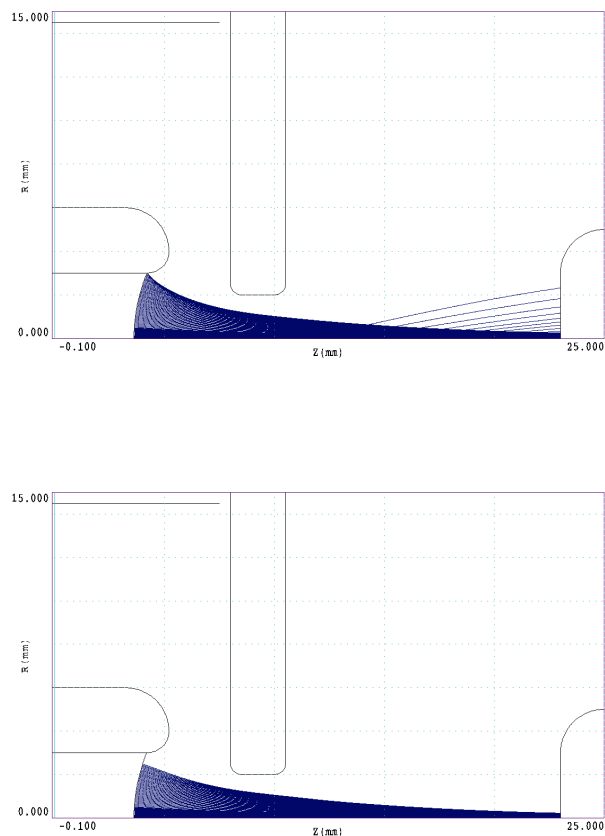


図 2-1-3. 改良前の X 線源の放出電子軌道。  
(上) 凹面全てから放出。(下) 周辺部の放出無。



そうして高電界を印加する場合もあり、その場合にガード電極とカソード面の境界近傍の収束されない電子が X 線のイメージングで悪影響を及ぼすという問題があった。また、低い電界で使う場合でもカソードの放出面積が小さくなることによって大電流の放出も難しくなるという問題もあった。そこで、凹面のほとんどすべての領域から放出された電子がターゲットで収束するよう新たな形状の陰極の設計とシミュレーションを行った。

従来の形状では凹面の周辺部が収束しなかったが、これは周辺部にかかる電界が弱く電子ビームの軌道が大きく曲がることに起因していた。そこで、周辺部にも電界がかかるようガード電極とカソード面との形状を図 2-1-4 左図の形状から右図の形状に修正した。これは、ガード電極とカソードをできるだけスムーズにつなぐことによりカソード面中心部からカソードとガード電極の境界まで均等に電界がかかるようにしたものである。

改良前と改良後の陰極に電圧を印加した時の電界分布を図 2-1-5 に示す。ガード

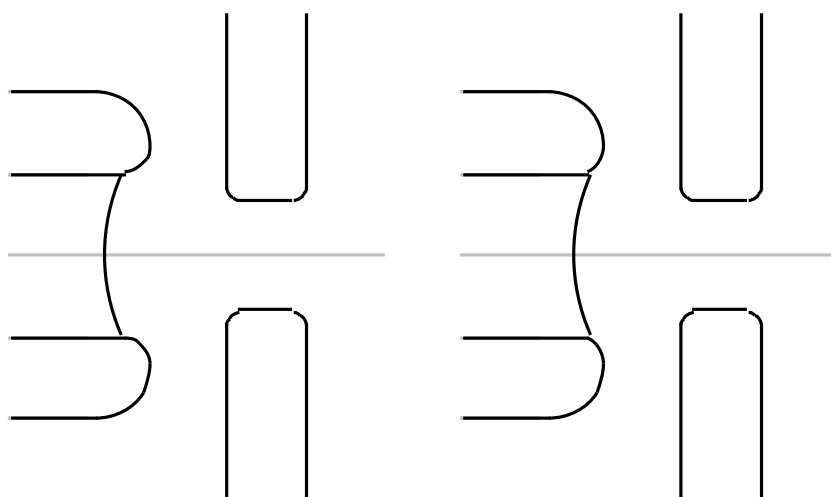


図 2-1-4. 改良前（左）と改良後（右）の陰極の構造。

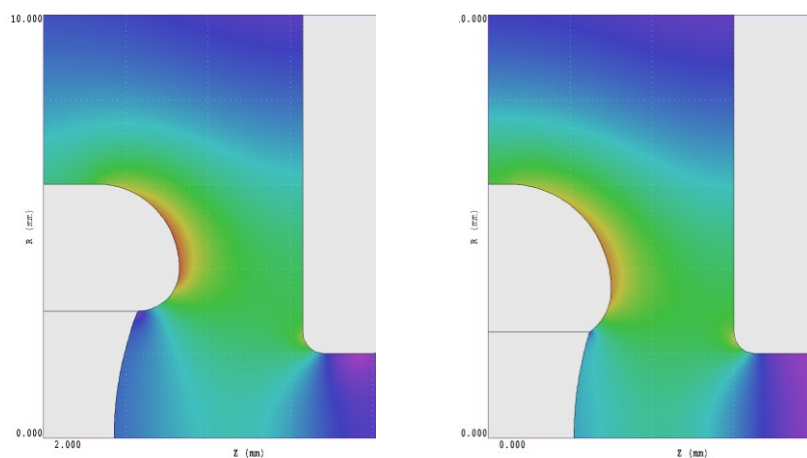


図 2-1-5. 改良前（左）と改良後（右）の電界分布。

電極と引出電極の距離および印加電圧は改良前も改良後も同一条件にしている。この図のように改良型はカソード周辺部にも電界がかかるようになった。また、カソード全体にかかる電界の強度も改良前よりも高くなっている。これは、より低い印加電圧でも電流を引き出すことができることを示している。図 2-1-6 に改良後の電子ビーム軌道を示す。この図のように、ガード電極とカソード面の境界部から放出された電子もターゲットに収束しており、ガード電極の形状を変更することによってカソード周辺部も有効に使うことができるようになった。

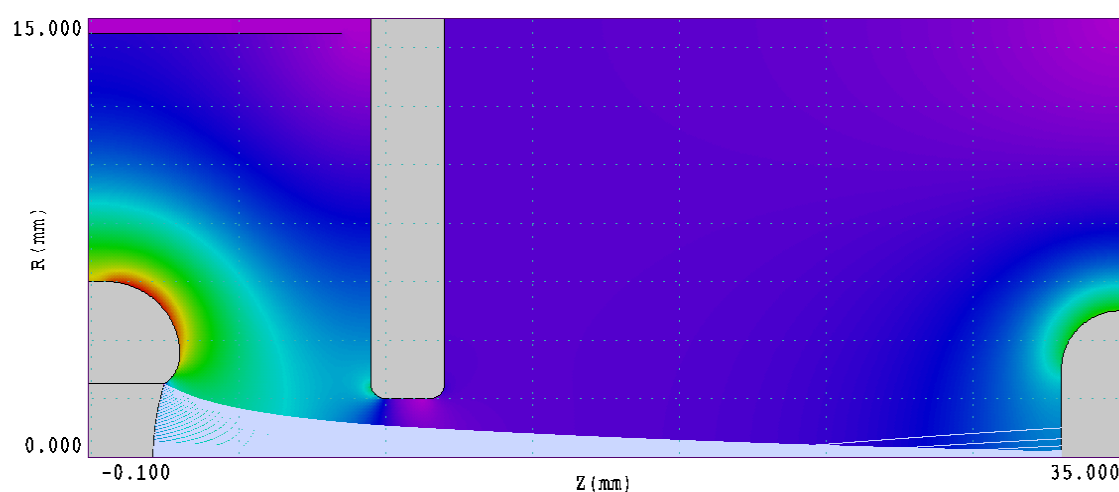


図 2-1-6. 改良後の電子ビーム軌道。

上述のように平成 22 年度は、図 2-1-2 の構造の陰極で、陰極に均一に電界がかかるようにして電子を出やすくした陰極構造や微小な陰極のシミュレーションおよび試作を行って、非破壊検査等の X 線源として利用できることを明らかにした。しかしながら、このカーボンナノ構造体陰極の X 線源を医療現場でのレントゲン撮影用 X 線源として利用するには、管電圧 80~120kV で、電流・時間積が 50mA・s 以上出す必要がある。照射時間が 0.5 秒では、100mA、0.2 秒では 250mA の電流を出さなければならず、これまでシミュレーション及び試作を行ってきた直径 4mm (カソード面積約 12.5mm<sup>2</sup>) のカソードでは電流密度が高くなりすぎて、カソードが劣化してしまう。一昨年にシミュレーションを行った直径 16mm (カソード面積約 200mm<sup>2</sup>) の大電力用のカソードなら対応できるが、このカソードはガード電極を含めると直径が 35mm あり、真空及び絶縁体がさらにその外を囲むため、X 線源の径は 10cm 以上必要で、X 線管が大きく重くなり、可搬型の X 線源

の用途には使えない。

そこで平成 23 年度は、昨年度までのシミュレーションの成果を生かしつつ、カソードのサイズを直径 8mm(カソード面積 50mm<sup>2</sup>) とし、カソード面積を直径 4mm のものの約 4 倍とした小型高強度 X 線源のための電子軌道シミュレーションを行った。

図 2-1-7 は、直径 8mm のカソードに対してガード電極の厚みが 6mm(陰極の外径 20mm) と、ガード電極の厚みが 4mm(陰極の外径 16mm) の電界分布である。図 2-1-7 で、ガード電極の厚みが 6mm の場合は、電界が比較的広い範囲でかかり、電界の集中が無いが、ガード電極の厚みが 4mm の場合は若干電界が集中する。しかし、医療用途は、管電圧が最大 120kV(正負で±60kV) 程度あれば良いので、この程度の電界の集中は問題無い。ガード電極が 4mm にできると、陰極全体のサイズは直径 16mm にできるので、小型の X 線管に入れることもできる。そこで、カソードの径が 8mm、ガード電極厚み 4mm の陰極を用いた X 線管についてシミュレーションを行った。

また、カソードの凹面の曲率半径が 10mm, 12mm, 20mm 等での電子ビーム軌道を計算した。カソードの凹面の曲率半径が 10mm の場合、電子ビームはターゲットの手前で焦点を結ぶ。一方、曲率半径が 20mm の場合、焦点を結ばずほぼ平行にビームが出る。ターゲットで焦点を結ぶようにするには、曲率半径が 12mm 程度であればよいことがわかった。

電子ビームの焦点を結ぶ位置は、陰極と中間電極との距離によっても変化する。陰極の先端と中間電極の距離を 7mm, 5mm から 10mm の範囲で変えてシミュレーションを行った。距離を狭めると焦点を結ぶ位置が後ろにずれることが分かった。一方、距離を広げるとカソードの周辺部の電子が焦点を結ばなくなる。この距離は、低い電圧で出す場合は狭く、高い電圧で出す場合は広くしなければならないが、片側 60kV 程度の電圧の場合は 7mm 程度が適していると考えられる。

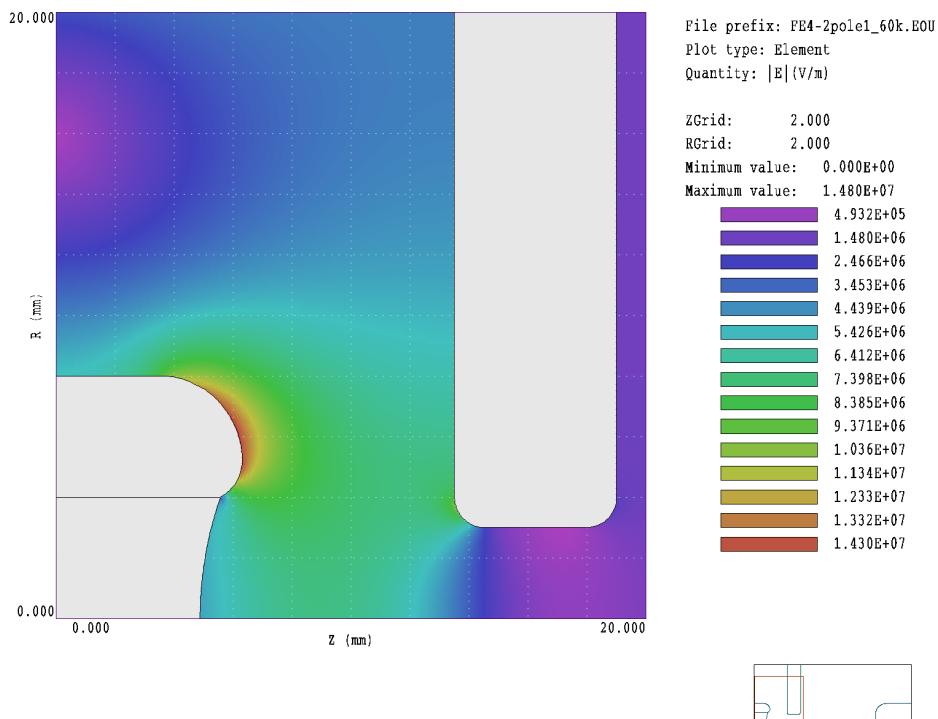
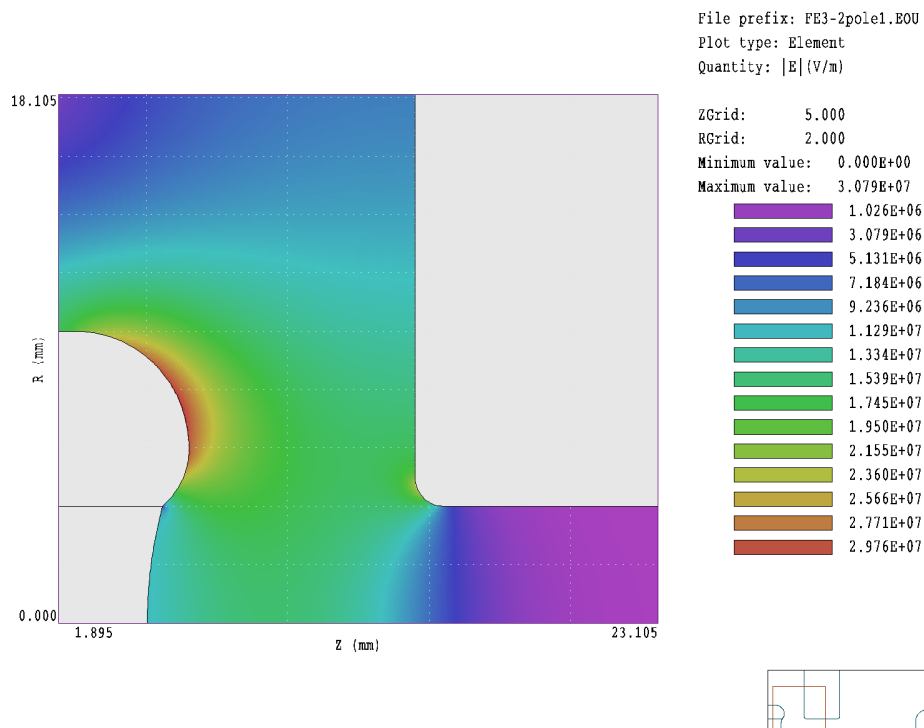


図 2-1-7. 直径 8mm のカソードを用いた陰極と中間極との間の電界分布

医療等に用いる可搬型の X 線源は、管電圧を 70kV 程度から 120kV 程度まで可変できることが要求される。そこで、引出電流（陰極の電圧）は変えずに陽極の電圧を変えた時の電子ビーム軌道のシミュレーションを行った。図 2-1-8 はその結果であり、陰極は -60kV とし、陽極を 10kV から 60kV まで変化させた。陰極と陽極の電圧を合計した管電圧としては、70kV から 120kV まで変化させていることになる。このように管電圧を変化させた場合でも、図 2-1-8 のように電子ビーム軌道はほとんど変化しないことがわかる。

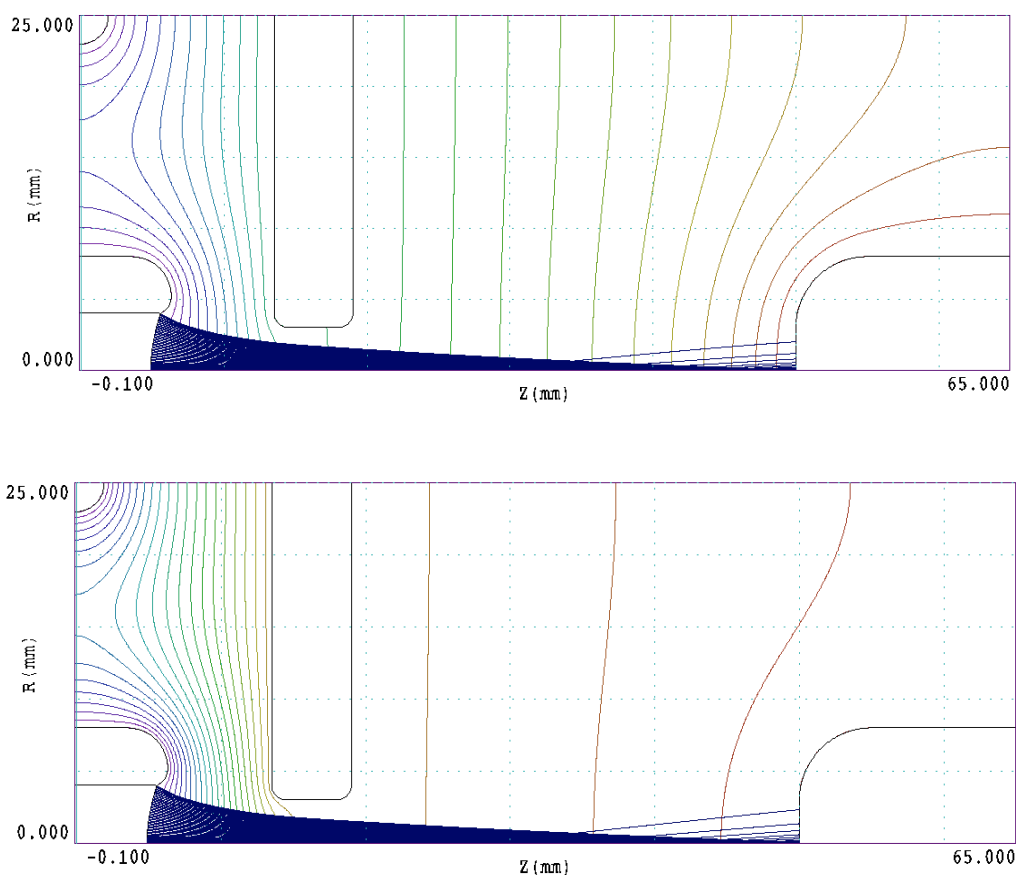


図 2-1-8. 陽極（ターゲット）の電圧を変化させた時の電子ビーム軌道  
（上）60kV, （下）10kV

## 2-1-2 微小カソード

前節では、面積の大きなカソードで電子ビームを収束できる形状について検討したが、いくつかの用途では電流はそれほど必要とせずターゲットに入射する電子ビームの焦点サイズが小さな X 線管が要求される。そこで、凹面よりも径が小さな微小カソードについての検討を行った。直径が 2mm 以下の微小カソードは、面を凹面に精度よく加工することが難しいことから、シミュレーションでは微小カソードの面はフラットとした。

図 2-1-9 は、凹面に対する微小カソード面の位置を 60  $\mu\text{m}$  ステップで変化させた時の電子ビームの軌道を示している。凹面と微小カソード面の位置を変化させると電子ビームのターゲットでの収束が変化する。シミュレーションから凹面と微小カソード面の位置が数十マイクロメートル変化するとビームの収束がかなり変わることがわかった。また、カソードがフラットな場合、図 2-1-6 よりも小さな焦点サイズにすることが難しいこともわかった。

これらのシミュレーションの結果は、微小カソードを取り付ける場合は、再現性・精度の高い加工を行うか、あるいはなんらかの調整機構が必要であることを示している。

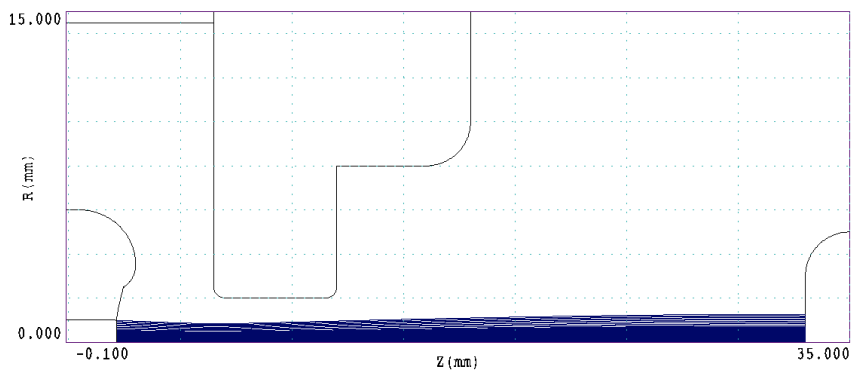
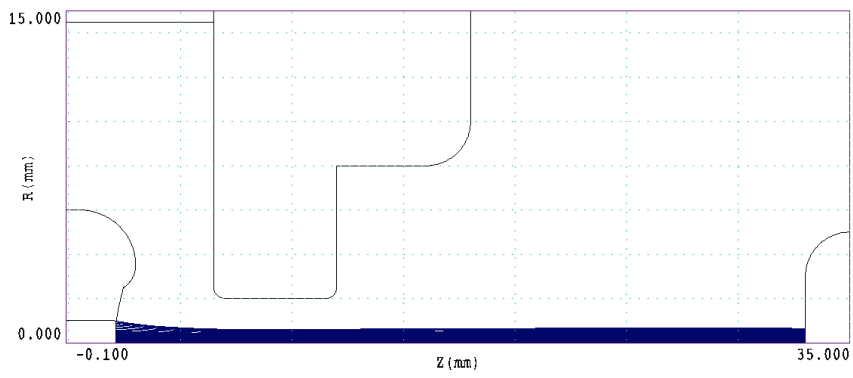
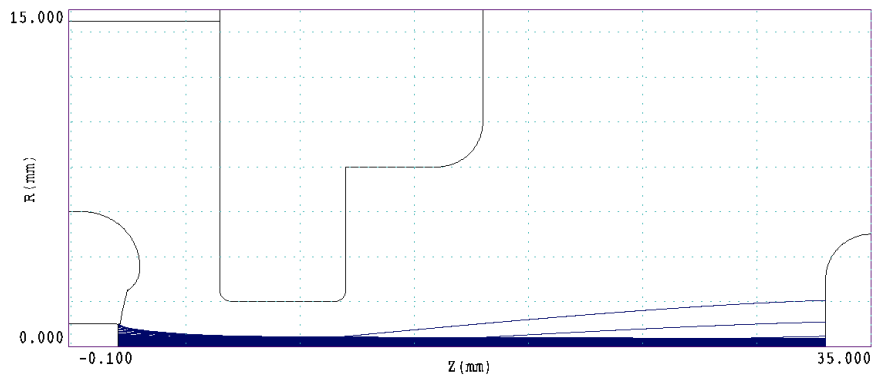


図 2-1-9. 2mmφの微小カソードの電子ビーム軌道。  
 凹面と2mmφのカソードとの相対位置：上から $-60\mu\text{m}$ ,  $0\mu\text{m}$ ,  $+60\mu\text{m}$ 。

### 2-1-3 放電防止対策のシミュレーション

カーボンナノ構造体 X 線管を製作する時に真空中で高電圧を印加しエージング処理を行うが、このエージングの過程で放電が生じ、カーボンナノ構造体及びメタライズしたセラミックが壊れリークが発生するという問題が生じた。図2-1-10は平型 X 線管の放電の様子、図2-1-11は高電圧印加後リークがあった平型 X 線管の写真を示している。これらの写真から、メタライズ部近傍で放電が起きて壊れやすいことが推測さ



図2-1-10. 平型 X 線管の放電の様子。

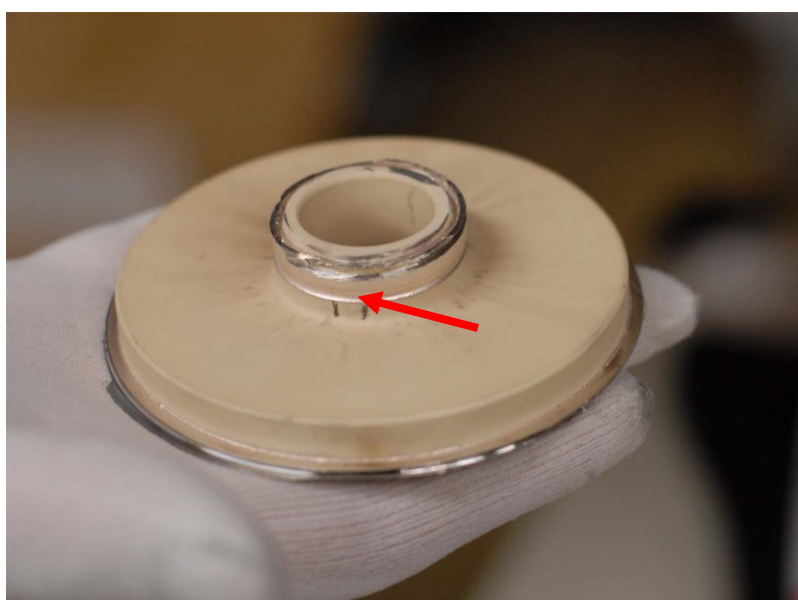


図2-1-11. 陰極部を分解してリーク箇所を調べた平型 X 線管。  
矢印部分がリーク箇所。



れた。そこで、放電防止対策をとるため、電界分布のシミュレーションを行い、対策を検討した。

図2-1-12は、X線管を模擬したメタライズしたセラミックに電圧をかけた時の電界分布を示している。このシミュレーションでは、真空の誘電率を1、アルミナの誘電率を10とした。

図2-1-12のように、メタルとセラミックの境界に電界が集中していることがわかった。また、セラミックのR部分にも電界集中があることがわかった。このメタルとセラミックの境界の電界を下げる対策として、メタル・セラミック境界の外側に金属製のリングを設けることが考えられる。そこで、いくつかの形状のシミュレーションを行った。その結果、金属はセラミックに接すると高い電界を生じてしまうことから、金属製リングをセラミックに接触させないようにする形状の電界分布をシミュレーションした。放電防止リングを付けると、メタル・セラミックの境界には電界が生じないようにすることができる。そのかわり、放電防止リングのRの部分に電界が生じるが、金属のRの部分は、研磨処理やエージング等によって表面が平滑で高電界に耐えることができる。

図2-1-13は、この放電防止リングを取り付けた陰極セラミックの高電圧エージングをしている写真である。カソード無の状態、放電リング有り無しの違いを見たところ、放電防止リングを取り付けることによって、70kV以上まで大きな放電無に電圧を印加させることができ、放電防止リングの効果を確認した。

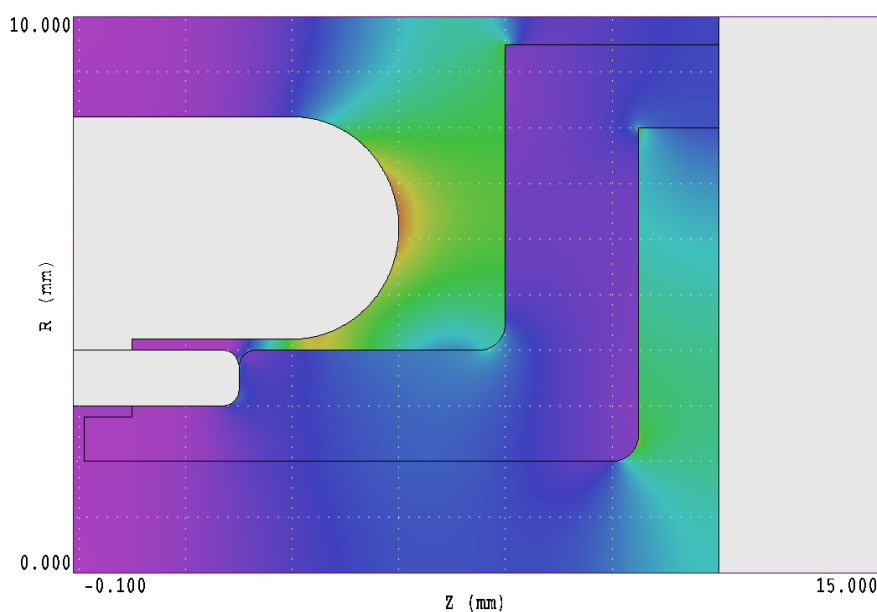


図2-1-12. 放電防止リングを付けたメタライズセラミックの電界分布

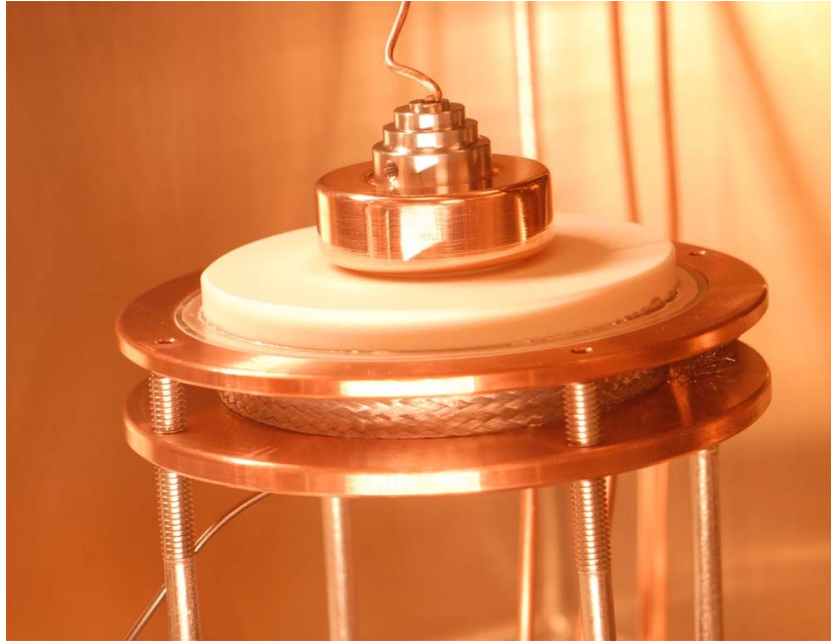


図 2-1-13. 高電圧エージング装置内で放電防止リングを取り付けた陰極セラミック部

#### 2-1-4 高電圧発生基板設計

開発しているカーボンナノ構造体 X 線管は、正と負の高電圧を発生して X 線管の陰極と陽極に電圧を印加するが、高出力の X 線管ではそれに対応した電圧源も必要である。そこで、高電圧を発生するための回路及び基板を設計した。この回路は、PIC マイクロコントローラーを用いて FET ドライバによって高電圧トランスに接続された FET をドライブする回路で、高電圧トランスの 2 次側は耐圧 15kV1000pF のコンデンサ及びダイオードをコッククロフト構成にして昇圧するものである。発生した電圧は、抵抗分割により分圧して電圧をモニタし、所定の電圧になったら PIC の駆動を止めるようにする。

従来の X 線源に用いていた高電圧発生回路に比して、今回開発した回路では約 5 倍の電流を発生できる。コンデンサを大きくして 1 桁近く電流を増加させることも可能であり、今回シミュレーションを行ったカソードを駆動するのに十分な出力が得られる。図 2-1-9 にこの回路の基板、図 2-1-10 に製作した高電圧源の写真を示す。

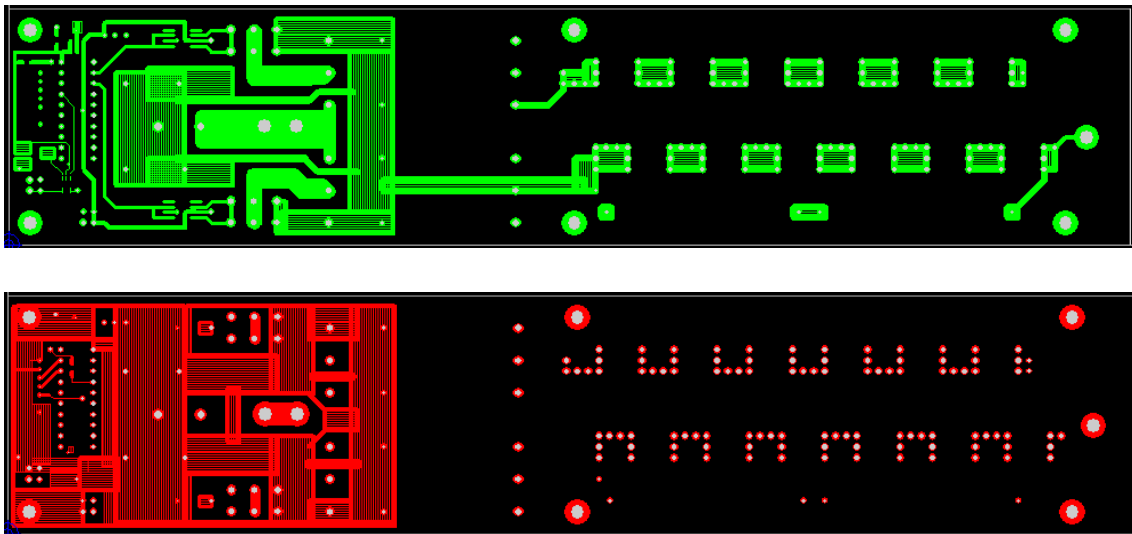
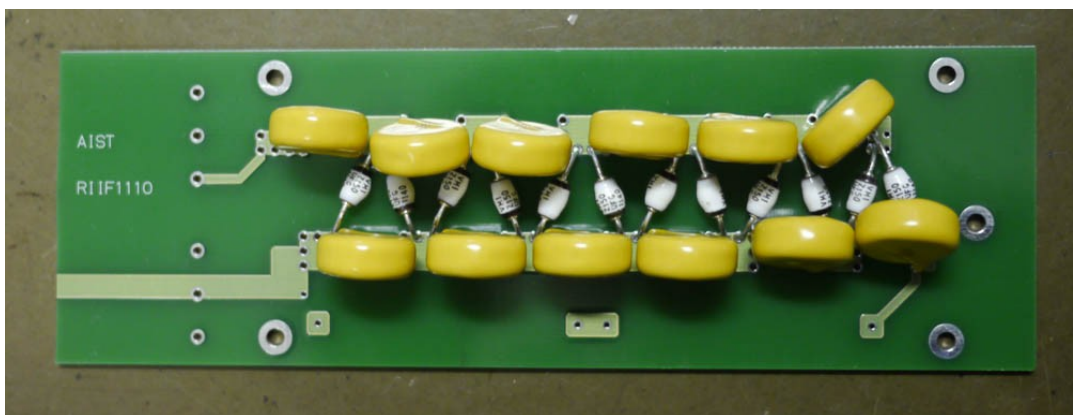


図 2-1-14 高電圧発生回路のプリント基板パターン  
 (上) 部品面 (下) 半田面



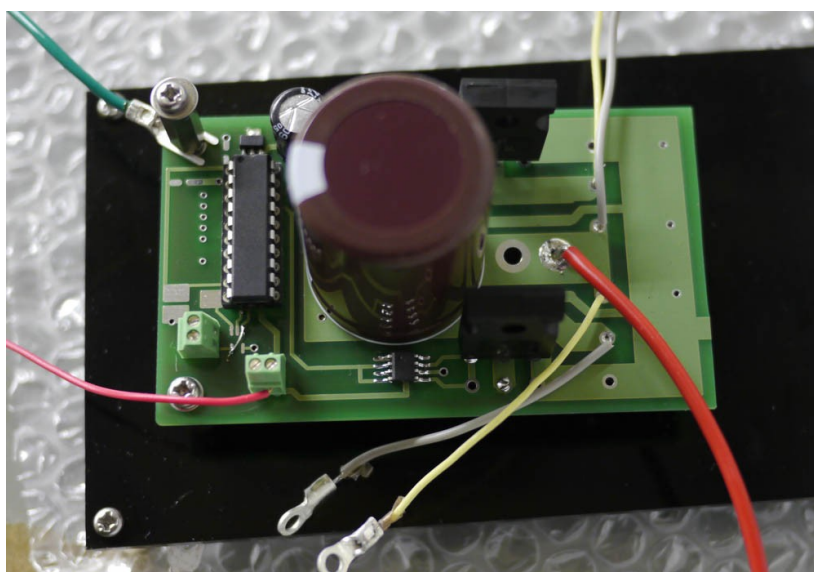


図 2-1-15 高電圧発生回路  
(上) コッククロフト回路、(下) 高電圧トランスドライブ回路

#### 2-1-4 まとめ

新型 X 線管の開発において生じた、ガード電極・カソード面の境界からの電子の収束、微小カソードから放出される電子の収束、セラミックメタライズ部の放電等の課題についてシミュレーションを行い、問題点を明らかにするとともに、その対策を検討した。これらの対策を取ることによって、新型 X 線管の性能や信頼性が向上することが期待される。

カーボンナノ構造体 X 線源を携帯型の医療用レントゲン撮影装置等に使用するための高出力小型 X 線管のシミュレーションとその駆動回路の設計・試作を行った。この X 線管は、出力 100mA 以上の出力でも安定に動作し、従来の X 線管にひけをとらない性能を有することから、医療分野だけでなく様々な X 線源に利用できると期待される。

## 2-2 高出力冷陰極X線管の開発

### 2-2-1 新型X線管の開発

平成 21 年度から進めていた直管型X線管で必要性能は確保できることが分かったが、X線管として他社製品に比べ小型・軽量化は図れているが大幅な差別化は出来ない。またコストを考えると1台当たり量産したとしても20~30万円程度となり、魅力に欠ける。この課題 ①コストの大幅低減対策として、部品点数及び製造工程の低減

具体的にはコストにおいて10万円以下

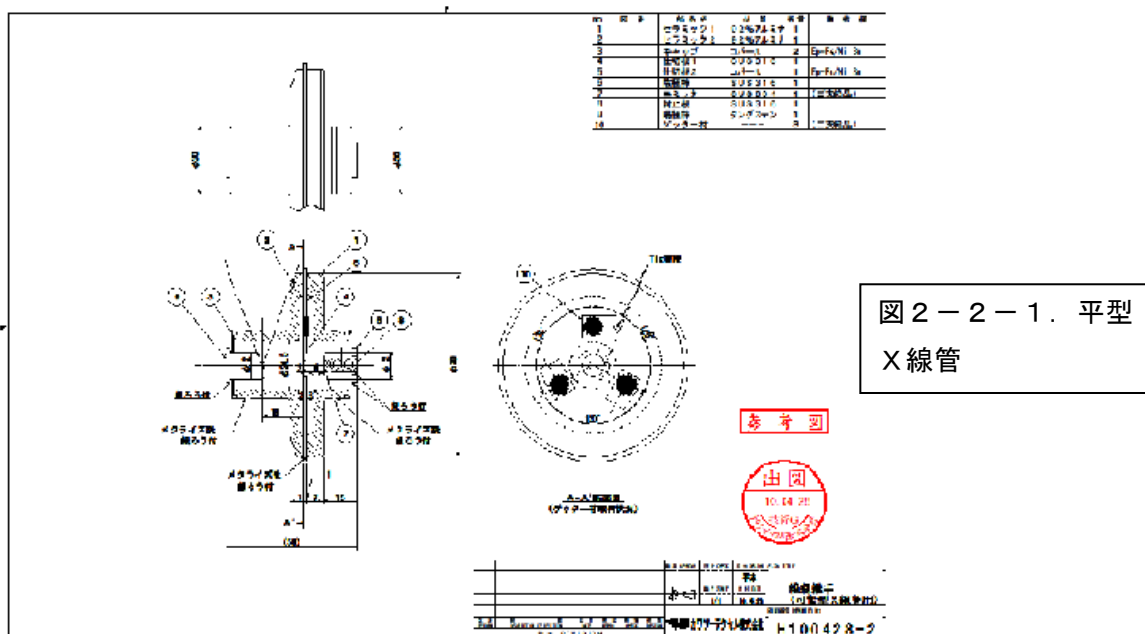
②大幅なX線管設計見直しによる小型・軽量化

具体的には体積  $222 \text{ cm}^3 \rightarrow 101 \text{ cm}^3$ 、重量  $800\text{g} \rightarrow 400\text{g}$

の目標を掲げ、2-1節において、基本的な新設計を行った。この新設計X線管を従来型（直管）に対し、平型X線管と呼ぶ。

基本設計した平型X線管の具体的な図面化（計画図面）を行った。またこの平型に適した製作工法として、従来型で行っていた工法の最大のコスト要因となっている排気管をなくする事を考えた。この排気管がなくなる事で設計の自由度が大きくなる。従来型でも排気管レスは考えられたが、直管型では特に中央管とカソード・アノードの長さを短く出来ず、重量・体積的軽減が図れない。そこでカソード・アノードの短縮化を図る事を第一とし、耐電圧確保に対するアルミナ絶縁筒の沿面距離を考慮した結果、平型X線管構造にいたった。

図2-2-1と図2-2-2に従来型X線管と平型X線管の計画図（構造図）を示す。



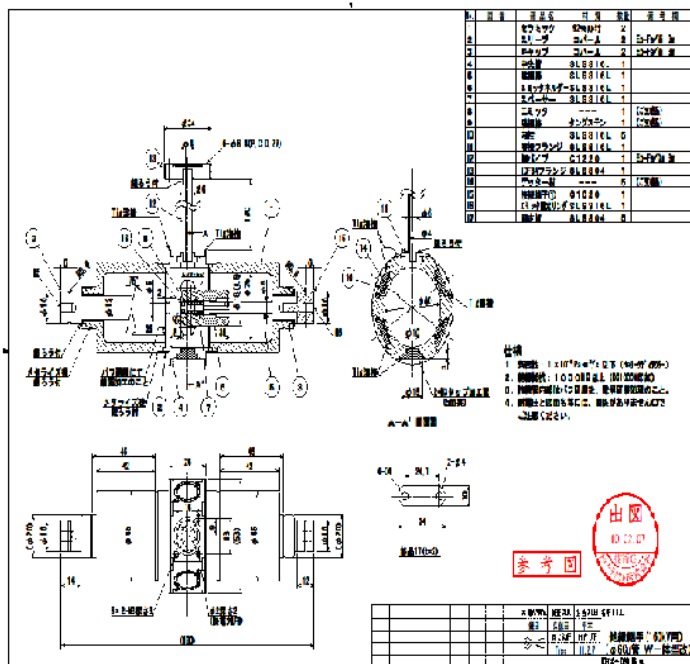


図 2-2-2. 従来型 X 線管

図から明らかのように、従来型に比べ、平型は非常に簡潔な構造となっている。特に排気管部がなくなっていることがその要因である。

また X 線管は高電圧仕様である。従来は直管方向で耐電圧を確保していたのに対し、平型は円周方向で耐電圧を確保する。このため、直管を圧縮し  $\phi 58\text{mm}$  から  $\phi 80\text{mm}$  と直径は 1.4 倍となったが長さ方向では 0.34 倍と大幅に短くなっている。この長さ方向の短縮化は X 線管が動作時発生する熱処理を容易にするばかりでなく、ターゲットの径寸法を大きくし、負荷を大きく取ることを容易にしている。

従来型 X 線管と平型 X 線管の部品構成を比較したところ、従来型は部品点数 22 に対し平型は 12 と半減している。また図 2-2-1 と図 2-2-2 から分かるように部品の寸法と重量の軽減が設計されている。従って、部品購入変動費は量産時、従来型 約 13 万円に対し、平型は 4 万円と予測している。

ただしこの変動費でも、現状のガラス管式 X 線管に比べると 2 倍程度である。もともと現在市販されているメタルセラミック型 X 線管はガラス管式 X 線管よりも高価である。従って、10 万円以上でないと製造できないと言われている。何故ならば、メタライズ処理セラミックとコバルト金属などの使用と組立工程などが、従来のガラスを用いた工法に比べ複雑であることによる。しかし、ガラスは加工に際し、職人技術が必要であり、なかなか機械化が難しいし、バーナなどの火炎処理が必要となる。

主な理由には、部材が高価なこと及び構造が直管型に近いこと、及び排気管付で工程が複雑なことなど、多くの課題を含んでいる。

今回提案した排気管レス平型 X 線管は、市販のメタルセラミック型 X 線管の課題を

凌駕した新設計を元に、排気管レス工法の開発を含めて初めて実現するものである。排気管レスのメタルセラミック管は電力系統で使用されている真空開閉器・スイッチに一部のメーカーが採用している。ただし、電力用のスイッチは20年の耐用年数が必要で真空信頼性が確保されている。しかし電力系統でスイッチが開極するのは事故時で20年間に数える程度の回数しかない。

X線管の使用頻度はこれに比べようが無いほど多い。X線管として動作時、カソードから出た電子が加速されアノードターゲットに衝突しX線が発生すると同時に、ターゲットの発熱ロス（入力の99%）とWターゲットから内臓ガスが管内に放出され、多いときには管内で放電が発生し、カソードの損傷を起こし、劣化が生ずる。

この放電防止がX線管の性能と寿命を左右する。従って、排気管レスX線管は構造設計的にも、製造工程設計的にも電力スイッチは参考になるが、はるかにハードルの高い製品と言える。まだ世の中に排気管レスX線管はない。今回の平型X線管を世に出すことが出来れば、新しい技術を持ったX線管の登場となる。図2-2-3に排気管レスX線管を実現する工程について、従来工法と区別して示した。

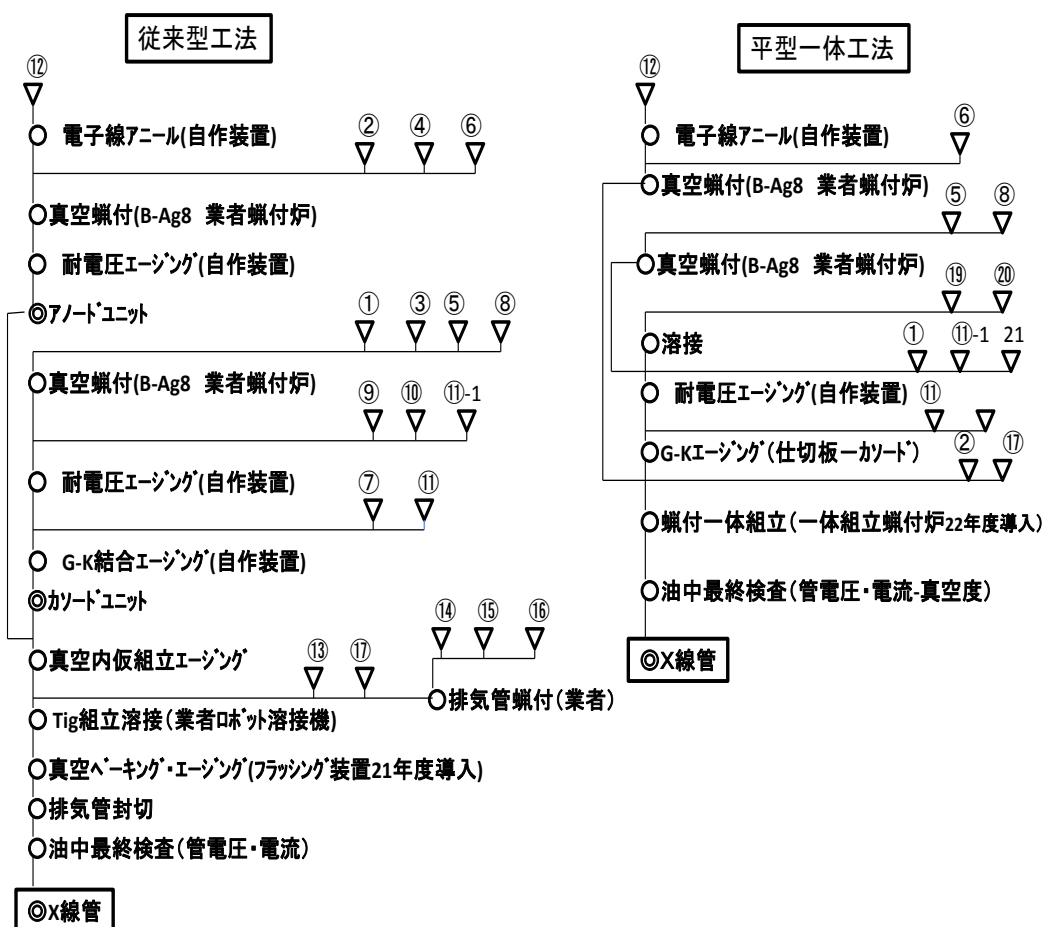


図2-2-3. 従来型X線管と平型X線管（本開発）の製作用法

図2-2-3から分かるように大幅な工程軽減が図られている。工程では、前述したX線管動作時の管内ガス発生による真空度低下とそれに伴う放電の発生を低減する考慮がされている。従来工法では、11工程に対し、新工法では8工程となる。特にX線管を組立ててからのエージング及び排気管、ゲッター活性などが必要であるが、新工程では、組立蟻付け時すべてを一括して行うことが工程短縮さらにはコスト削減に大きく寄与する。

試作した排気管付平型X線管の部品写真を図2-2-4に示す。また図2-2-5に従来直管型X線管と比較した写真を示す。図から排気管が残るが平型X線管の差別化が明確に分かる。また図2-2-5には今まで開発してきた120kV 定格φ35（アルミナ絶縁筒径）直管型X線管と160kV 定格φ45（アルミナ絶縁筒径）直管型X線管を比較して載せた。

平型は定格160kVを想定し、重量・形状など斬新である。この種のデザインは市販されているX線管には見られない。またこの形状を縮小していけば、最近市販が始まった小型X線管にも対応できる。さらに陽極側に電子収束コイルなど取り付け、透過型（筒状陽極）にすればマイクロホーカスX線管、CT管にも応用できる。

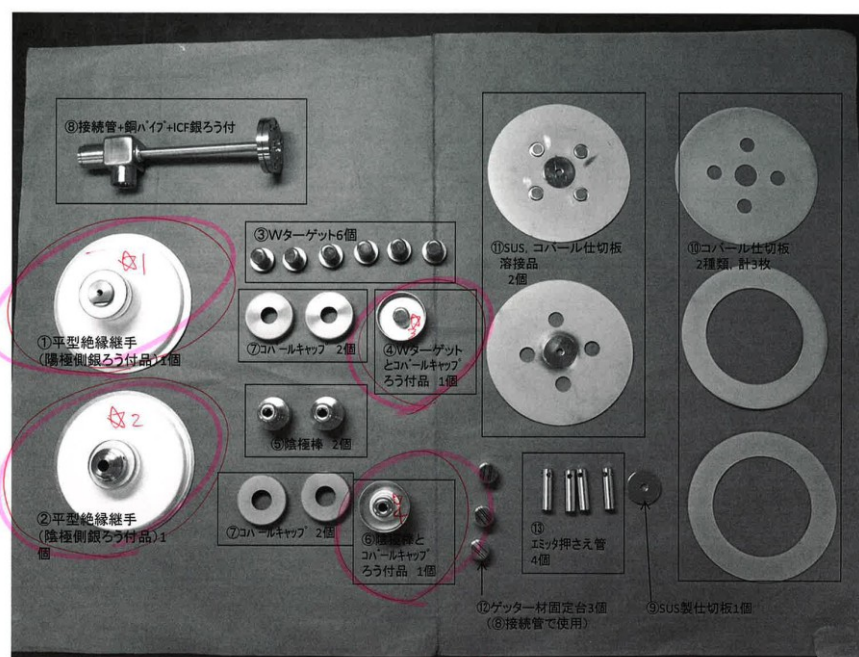


図2-2-4. 平型（機能試作）X線管に用いた部材



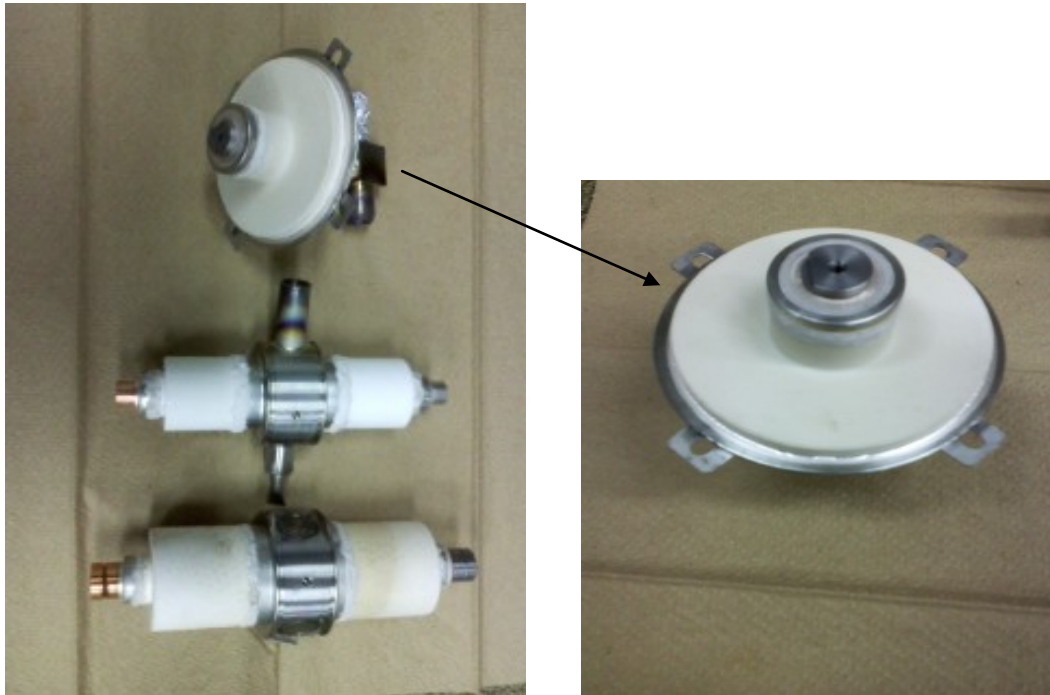


図 2-2-5. 排気管付平型 X 線管と従来（直管）型 X 線管

平成 22 年度に平型 X 線管の開発を行い、従来型に比べ、性能的にもコスト的にも優れていることを実証した。

冷陰極 X 線管についての新たな要望は

- ① 低電圧・低出力小型軽量固体化絶縁 X 線器

X 線管に加え金属箱収納された X 線器

- ② 医療用 X 線管

管電圧 100kV 管電流 30mA s（最大 80mA s）

の 2 テーマが残っていた。

この課題が達成されると、下記の範囲を冷陰極 X 線管が対応できるようになる。

産業用（管電流としては数 mA）

～ 80kV エスカレータ、食品対応、被覆配電線、植林など

～ 160kV 一般産業用途

（～ 300kV 未開発）

医療用（院内移動式）

～ 100kV ICU など院内移動式撮影

一般に産業用は管電圧範囲が広く、かつ対象によっては 300kV 以上になる。

それに対して医療用では管電圧はほぼ 100kV 程度であるが、管電流が大きいのが特徴である。図 2-2-6 に医療用に用いられる撮影照射条件と人体部位との関係を示す。

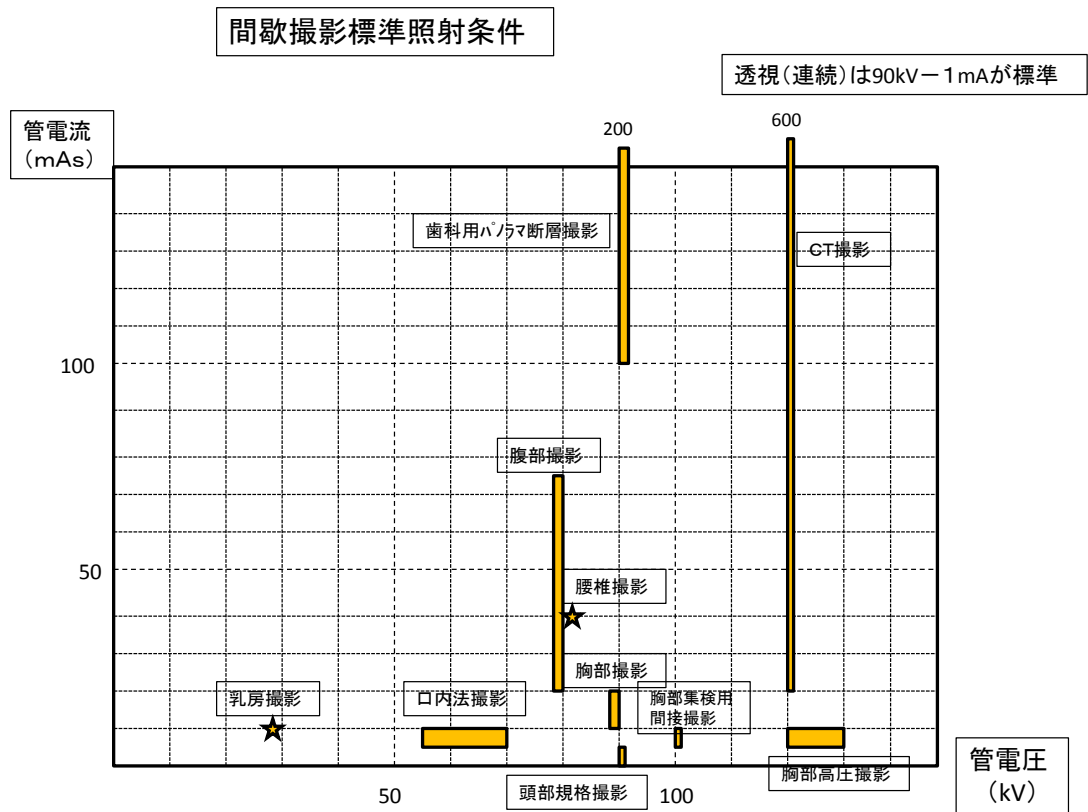


図 2-2-6. 医療用に用いられる X 線撮影照射条件と人体部位

### 2-2-1-1 低管電圧・低出力全固体 X 線器の開発

平成 23 年度に低管電圧・低出力 X 線管を設計した。この X 線管の特長は X 線出射窓が Be で構成されている。低エネルギー X 線管では X 線が窓で吸収されないようにするため、Be 窓の開発を行った。Be は毒性があることで管理された工場で作業する必要がある。X 線管には Be 窓にたいして、耐真空保持と X 線透過の 2 つの機能をもたせるため、板厚としては 250 μm 程度を使用した。

またロウ付も難しいため国内でも限られた企業でしか取り扱わない。我々は、今まで X 線管の部材とロウ付を外注加工していた協力会社と共同開発した。図 2-2-7 にロウ付加工組立後の X 線管 (重量は 400g) を示す。

つぎに、この X 線管を固体絶縁モールドした X 線器を図 2-2-8 に示す。この X 線器は高圧線を電源と接続すればすぐに使うことができる。表 2-2-1 に製作した X 線管の電圧-電流特性を示す。今まで製作したのものとは異なり、かなり低電圧で安定した出力電流特性を示している。この X 線管は東北地方の被覆配電線の劣化検証として、試験的研究に適用されている。

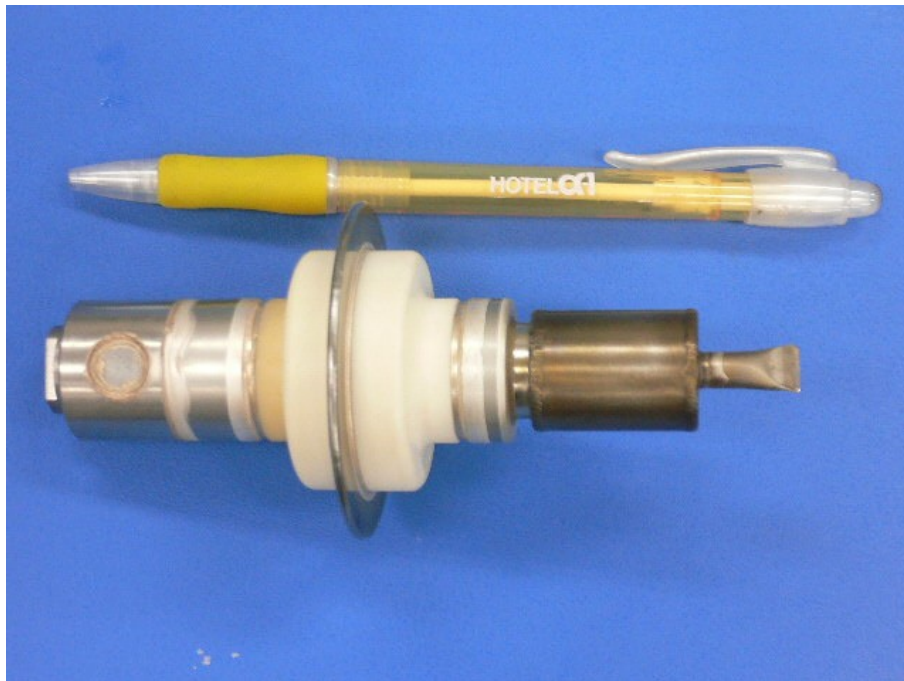


図 2-2-7. ロウ付加工組立後のX線管（重量は400g）

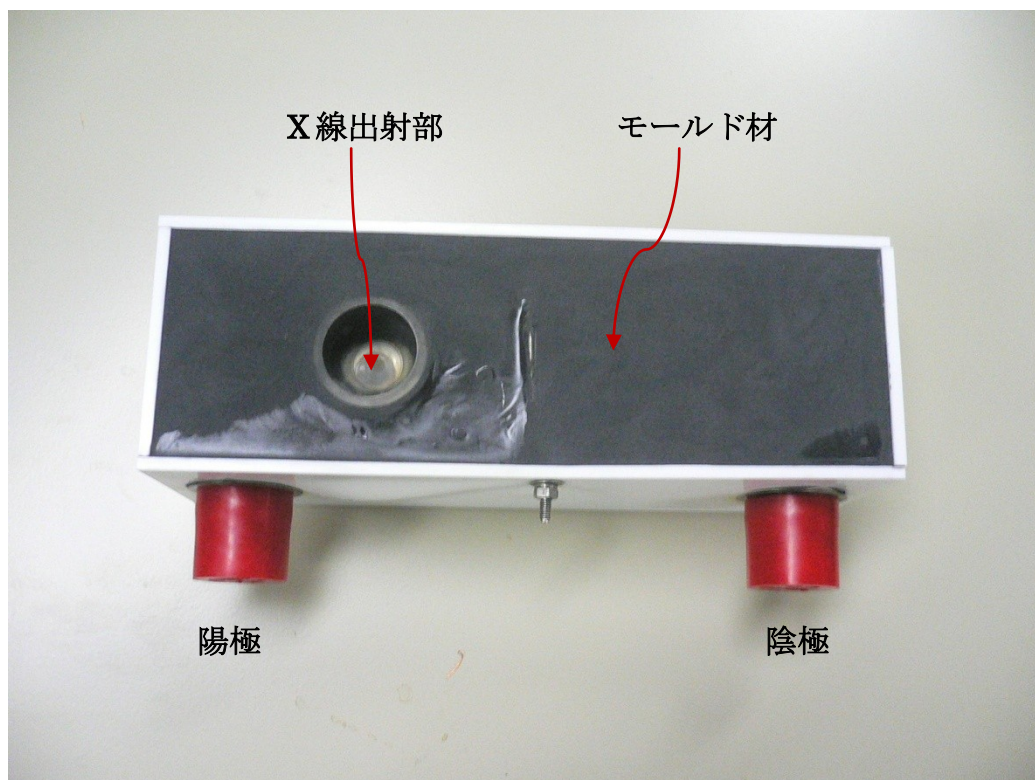


図 2-2-8. X線管を固体絶縁モールドしたX線発生器

表 2-2-1. 製作した X 線管の電圧-電流特性

正電圧 (kV)	正電流 (mA)	負電圧 (kV)	負電流 (mA)
5.00	0.010	5.00	0.020
10.00	0.010	10.00	0.020
15.00	0.020	15.00	0.030
15.00	0.020	15.00	0.030
15.00	0.040	18.00	0.050
15.00	0.060	19.00	0.070
15.00	0.130	20.00	0.150

2-2-1-2 医療用 X 線管

現在国内・海外の ICU などで使用される移動式 X 線撮影装置は装置重量が 0.6 ton もあり、人力で移動させることが困難なため、電動力で運転し、患者のベッドまで持っていく。また X 線発生器は重量が重く、一方向のみ可動できる。X 線撮影はバッテリー駆動で電池消耗が激しい。現場からは操作の面で苦情が多いのが現状である。

また、病院での聞き取り調査から肺撮影が主であり、その他の撮影でもせいぜい 30 mA s であればよいことが分かった。80 mA s などの大電流を必要とする場合は固定式 X 線撮影装置を用いる。従って回診用移動式 X 線管は軽量小型化が必要である。図 2-2-9 に今回開発の目的とした回診移動式 X 線撮影装置のブロック図を示す。また、表 2-2-2 に簡単な仕様を示す。

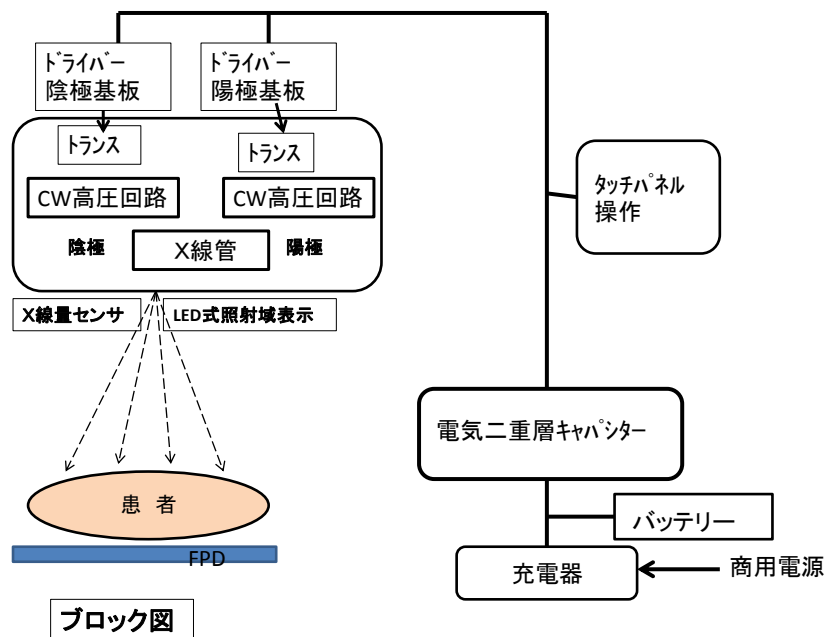


図 2-2-5. 回診移動式 X 線撮影装置のブロック図

表 2-2-2. X 線管の仕様

X 線管の電気特性			
・管電圧	定格	100 kVp	最大定格 120 kVp
・管電流	定格	30 mA <sub>p</sub>	最大定格 40 mA <sub>p</sub>
・実効焦点	1 ~ 2 mm		
・爆射入力	20 ms ~ 100 ms		3 kJ/p

X 線管としては、外部耐電圧保障は固体絶縁で、また必要な電流値 30 mA<sub>s</sub> を目標とし、X 線管の熱特性を重視した設計となっている。

この開発では、φ 14 mm の W ターゲットを用い、重負荷に対応して、W ターゲットは今まで 1000 °C 熱処理で D e - ガス処理していたが、更に導入した真空ロウ付炉により、1350 °C - 1 h の熱処理後、電子線アニールにより、W ターゲット内部の D e - ガス処理を行った。

製作したX線管の絶縁油中でのI-V特性を表2-2-3に纏めた。

表2-2-3. 100kV-X線管特性

100kV-X線管特性			
陰極側		陽極側	
-43.6kV	1.31mA	17.0kV	1.12mA
-45.3kV	1.71mA	19.2kV	1.42mA
-46.0kV	2.03mA	25.1kV	1.83mA
-46.0kV	2.03mA	35.1kV	1.90mA
-46.0kV	2.03mA	40.0kV	1.96mA

この測定はDCで実施した。

次に試作したパルス電源により、0.1sの照射時間における測定を実施し、電源側から見た特性では、管電圧(-60kV、+40kV)において、波高値25mA sの値であった。特性は再度の繰り返し電圧印加に対しても安定した値を示した。これは新一体ロウ付法が優れていることを意味する。

## 2-2-2 ロウ付組立技術の開発

本開発の主要な目的は、一体ロウ付組立技術を開発し、X線管の性能安定化及び大幅なコスト低減を図ることである。

コスト低減については、昨年度の報告書で述べたように、製作部材数の低減が出来、実際に今年度X線管を製作し、100kV X線管で確立できた。

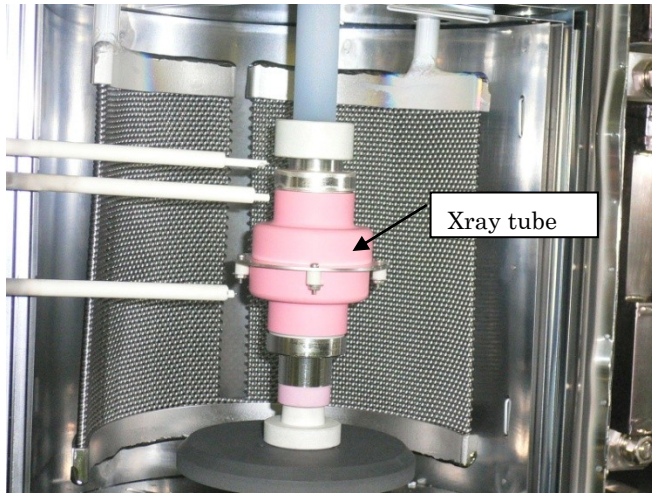
ロウ付炉については、当初X線管の一体ロウ付を行う事を目的していたが、新たに、1300°Cで10<sup>-6</sup>Paの超高真空環境が得られることが分かり、Wターゲットの熱処理、及び金属金具部材の熱処理に適用することができた。これは部材の外注費低減につながる技術となった。

図2-2-10にX線管のロウ付セッティング図を示す。またロウ付後のX線管を図2-2-11に示す。

今までの製作方法は、

- ①Wターゲットとフランジを先ずロウ付
- ②陰極側・陽極側それぞれをロウ付
- ③Tig溶接で組立

であった。本ロウ付炉では、全工程を一度のロウ付で完了できる。



Set Up of X-ray parts at  
Vaccum Brazing Furnace

図 2-2-10. X線管の  
ロウ付セッティング

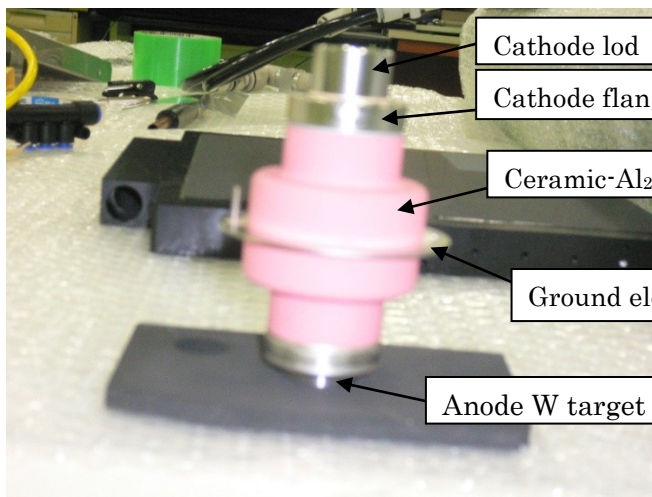


図 2-2-11. ロウ付後  
のX線管

### P-3 Cold-Cathod X-ray Tube Brazing Product

ロウ付温度プログラム、ゲッター活性温度プログラム、ロウ付時の真空環境制御とロウ付時の荷重追従制御を独立して行えるシステムが出来たことにより実現が可能となった。本製法完成は、従来ロウ付け後大気中に放置されることがプロセスであったのに対し、完全に大気と接触することをなくしたことによる。

製造プロセス開発で最終的に決定した製造プロセスを図 2-2-12 に示す。

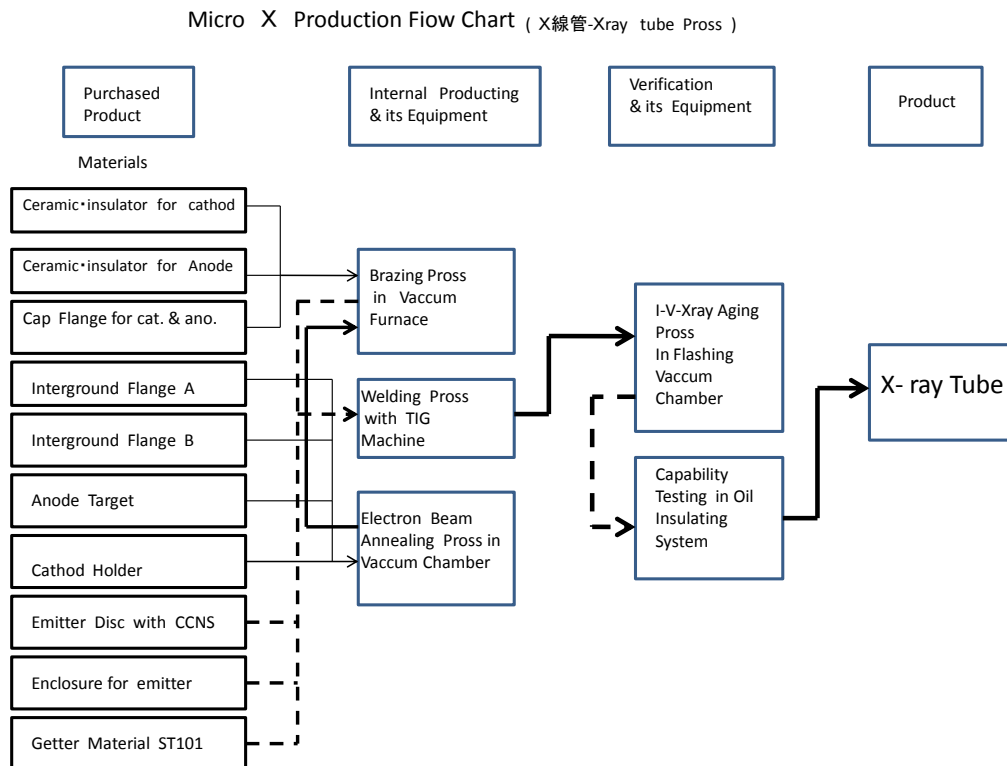


図 2-2-12. 最終的に決定した製造プロセス

### 2-2-3 まとめ

平成 22 年度のまとめとしては、以下の 2 項目になる。

- ① 平型 X 線管は従来型 X 線管に比べ魅力的である。
  - 1) 市販されているガラス管式 X 線管に比べても、製造コスト的には 1.5 倍程度と見積もれる。
  - 2) 販売においては、その性能・形状安定性などに加え、固体モールド化が容易であるため、大幅な小型軽量化が可能である。ガラス管では依然として絶縁油中、絶縁ガス中で使用されている。従って十分に対応していけることがわかった。
- ② 平型 X 線管の性能把握のため、排気管付 X 線管を試作し、その性能を調べた結果設計定格に見合った特性であることが分かった。

平成 23 年度には、本研研究開発で当初計画した新型 X 線管を用いた全固体絶縁 X 線発生器を完成させた。その構造を図 2-2-13 に示す。



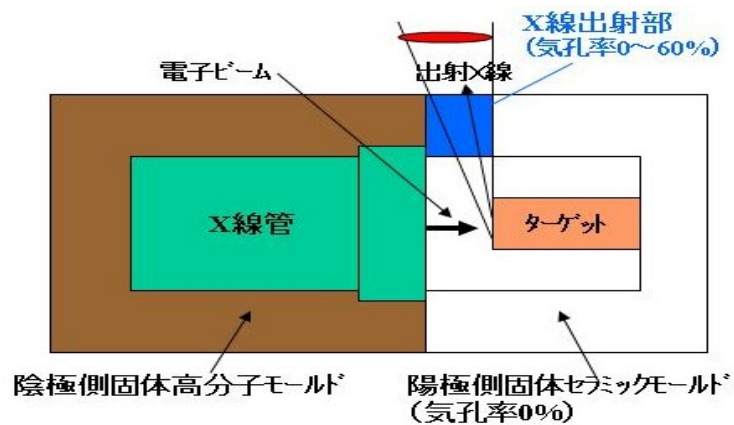


図 2-2-13. 提案した全固体絶縁 X 線管の構造

新型 X 線管を駆動するための高圧回路と、この高圧回路を含めて絶縁モールドした全固体 X 線管の写真を図 2-2-14 に示す。初期の目標にかなり近い製品化が行えるところまで来た。

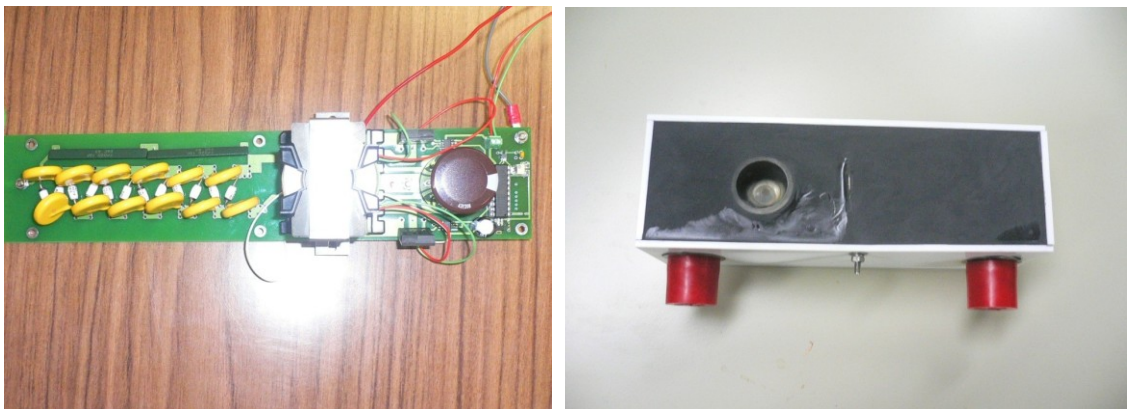
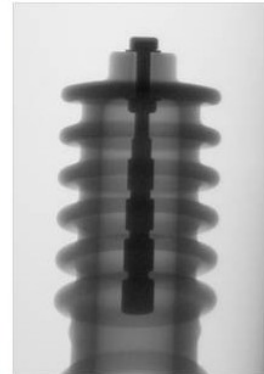


図 2-2-14. 高圧回路（左）と絶縁モールド（右：図 2-2-8 再掲）

本研究開発で完成した、小型冷陰極 X 線管を用いると、電池駆動による高性能ポータブル X 線発生器を容易に作成する事が出来る。図 2-2-15 に試作したポータブル X 線発生器と撮像した X 線透過像の例を示す。医療応用や非破壊検査応用に大いに期待が膨らむところである。



CNX-X線管と電源をケースに入れた可搬型(ポータブル)X線源



開発したX線源で撮影した碍子電極のX線透過像

図2-2-15. ポータブルX線発生器と撮像したX線透過像

本研究開発の成果として、産業技術総合研究所とライフ技術研究所がX線管製作仕様を提携先企業に提供することとしている。

## 2-3 超高真空内X線発生装置組立技術の開発

### 2-3-1 超高真空内X線発生装置組立工法設計

図2-2-1に示した平型X線管は排気管レスである。排気管レス組立工法を先ず設計した。

設計仕様として、

- ① 蝟付温度：750℃以上及び真空度： $10^{-4}$ Paとした。
- ② 蝟付封着後のX線管内真空度維持にはst101吸着ゲッターを用いる。

この2点を同時に満足する蝟付工法を考案する。

#### 1) st101ゲッター

st101ゲッターのメーカーから提供された活性化特性を図2-3-1に示す。st101は低温500℃以下では部分的にも活性化しない。従って500℃で十分なベーク時間が取れるため、この温度領域で炉内真空度を $10^{-5}$ Paに保つことで炉内及び平型X線管部品の水分およびHCx、 $N_2$ などの不純物ガスの除去を十分に行う事が可能となる。ここでの残留ガスは殆ど $H_2$ となる。

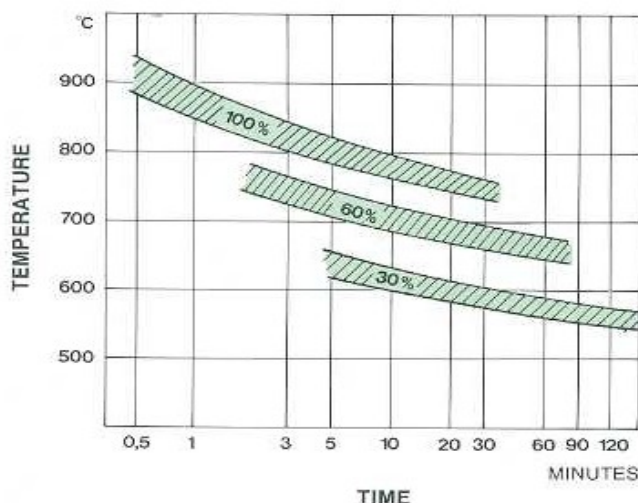


Fig. 2  
Efficiency of  
ACTIVATION for  
St 101 getter alloy  
as a function  
of the temperature  
and of the  
heating time.

図2-3-1. st101ゲッターの活性化特性

$H_2$ はこのままst101を900℃の高温で活性化しても、高温でのゲッターの $H_2$ 吸着量は少ない。900℃で $10^{-3}$ Paでの $H_2$ は $1\text{ cm}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mg}^{-1}$ に対し200℃では $10^3\text{ cm}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mg}^{-1}$ の能力となる。ゲッターはX線管が動作する室温では吸着能力は桁違いに大きい。したがって活性化時 $10^{-3}$ Paの真空度であっても室温まで冷却

してきたときには、 $10^{-10}$  Paの超高真空が達成できる。この真空度がX線管内で常時保たれればX線管の性能は十分発揮できる。

この優れたゲッターの真空度維持を実現するためには、 $850^{\circ}\text{C}$ —1分あるいは $800^{\circ}\text{C}$ —5分の活性化が必要である。この活性化条件と蝟材の作業温度との関係が重要になる。

## 2) 蝟付温度との関係

平型X線管の部品は蝟付時、カソード（メタライズ処理アルミナセラミック+エミッタを取り付けた陰極棒及びキャップ）ユニットとアノード（メタライズ処理アルミナセラミック+Wターゲット及びキャップ）ユニットで一部Niメッキ処理した仕切板（接地極）を挟み込み、その間にBAg-8蝟材をセットし、 $750^{\circ}\text{C}$ 以上の温度で蝟付する。

ゲッターと蝟材による蝟付け組み立てを両立させる炉昇温プログラムとその時の炉内真空度のプログラムを図2-3-3に示す。

一体組立炉内真空度・昇温スケジュール

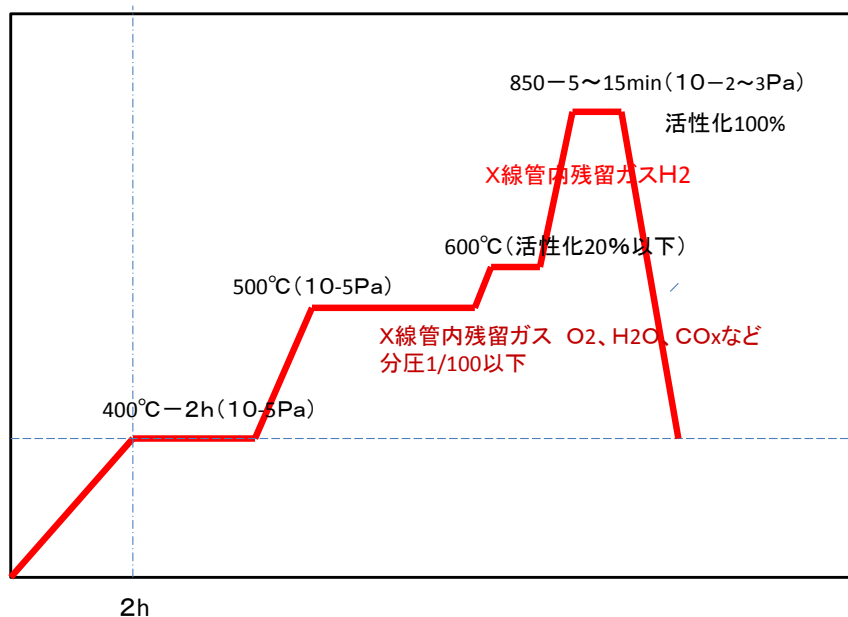


図2-3-3. 蝟付組立プログラム

このプログラムが実現できるように蝟付炉は設計・試作する。

## 2-3-2 超高真空内X線発生装置組立装置の開発

2-2節で詳述した新型X線管の効率よい製造のためには、超高真空内X線発生装置組立を可能にする真空装置の開発が不可欠である。

### 1) X線管製造の概要

CNX冷陰極3極型X線管の製作は従来、

- ①陽・陰極ユニットを蝟付け組立する。
- ②中間極をTig溶接して結合組立する。
- ③その後フラッシング装置を用いX線管内の主に陽極ターゲットのアウトガスを除去、CNX陰極のエージングを同時に行い性能の安定化を計る。
- ④この処理後、ゲッター活性工程で内部真空度の高度化を計る。
- ⑤中間極の銅パイプを封切りする。

このように多くの工程を経て製作されるため、コスト高になる。特性はフラッシング処理により決定されるため、安定化にばらつきを生じる。

この工程の短縮と特性の安定化を同時に解決するため、全ての構成部品を1回の蝟付け工程で行い、さらに特性の安定化を900℃以上の高温でかつ $10^{-5}$ Pa以下の超高真空中で封切する方法で解決する装置を試作した。

### 2) 上記目的を達する各システムの構成説明

#### 2-1) 超高真空排気系の構築

- (1) 900℃以上の高温下で真空槽内の構成材料から発生する多量の放出ガスを排気する。
- (2) 昇温下でも真空槽内圧を $10^{-5}$ Pa以下に安定する排気時間を短縮する。

#### 2-2) 加熱炉

ガス放出が少ない材料を使用することからヒーターはタングステンメッシュヒーター、熱遮蔽材料はタングステン主体にモリブデン、sus316で構成した。

X線管は陰極、中間極、陽極に別れ、構成部品材質はそれぞれ違いがあるので、その物性特性を把握し、一体蝟付けを行なわねばならない。

#### 2-3) 加熱プログラムと圧力コントロール

温度制御は高真空度下でゲッター材料の活性化温度保持と活性化時間経過後に、蝟材を溶かす温度プログラムを外部のコントローラによって、十分な温度精度で温度上昇、維持、下降が可能になっている。

ゲッター材の活性化時、蝟材質の温度と蒸気圧の関係から、温度コントロール中に圧力がより低くなった場合には、蝟材は低い温度で溶けることになり、活性化終了前に封じ切ってしまう。ゲッター材からの放出ガス排気が不完全で、封じ切ったX線管は所定の圧力より高い状態で性能不良になる。

このことから、高温ゲッター材を使用する場合、ゲッター活性化温度と蝟付け温度との差が、僅差のため、圧力コントロールは必須条件である。圧力コントロールは付属しているスロットルバルブの調整で可能である。

#### 2-4) 真空圧キャンセル機構の装備

①空圧キャンセル機構は真空槽内と外気との圧力差で上部ロッドにその差圧分の荷重が掛かることを除去する機構で、ロードセル荷重計表示では0 (N) である。

②蠟材の形状は線材等、大気中で圧延加工し成形したものが大半で、真空中で成形したものはまれと思われる。従って蠟材内に含有するガスは溶ける寸前で放出ガスが発生する。この場合、高真空下であるので、含有ガス量が少量でも、大きく圧力上昇を起こし、高真空に回復する前に、蠟材は溶けてX線管を封じきることもある。

これを防ぐため、真空圧キャンセル機構にX線管構成材の上部をロッドに固定、高真空回復まで、封じきりをさせない構造を有している。つまり、X線管構成材の上部が蠟の毛細管現象発生時、重しにならないようにする。

#### 2-5) 荷重機構の装備

全ての構成部品を一回の蠟付け工程で行うには、構成部品それぞれの加工精度及び母材の角をカットやフィレットし、蠟材が外に出っ張らない加工をする。高電圧をかけることから、蠟材の出っ張りは放電が起こる恐れがある。構成部品は加熱によるひずみで蠟の液体が浸透する面が一様でなくなり、構成部品間の隙間に差異が生ずれば、ぬれの不均衡が発生し、漏れの原因になる。これを防ぐため、荷重をかけることで、ぬれの均一性を図れる。

また、降温して蠟材が半凝固時に荷重を掛け、発生する応カムラの対策も取れる荷重プログラムが用意されている。荷重プログラムは荷重、保持、非荷重を蠟付け行程の温度プログラムに付加し、引張・圧縮型高精度荷重計（ロードセル）で0~100N 制御できる。

以上が一体化蠟付け工程における問題点を解決する試作機の内容である。

### 3) 装置の仕様と設計図

図2-3-4, 5に上記の性能を備えた「真空内一体成形装置」の設計図と装置写真を示す。

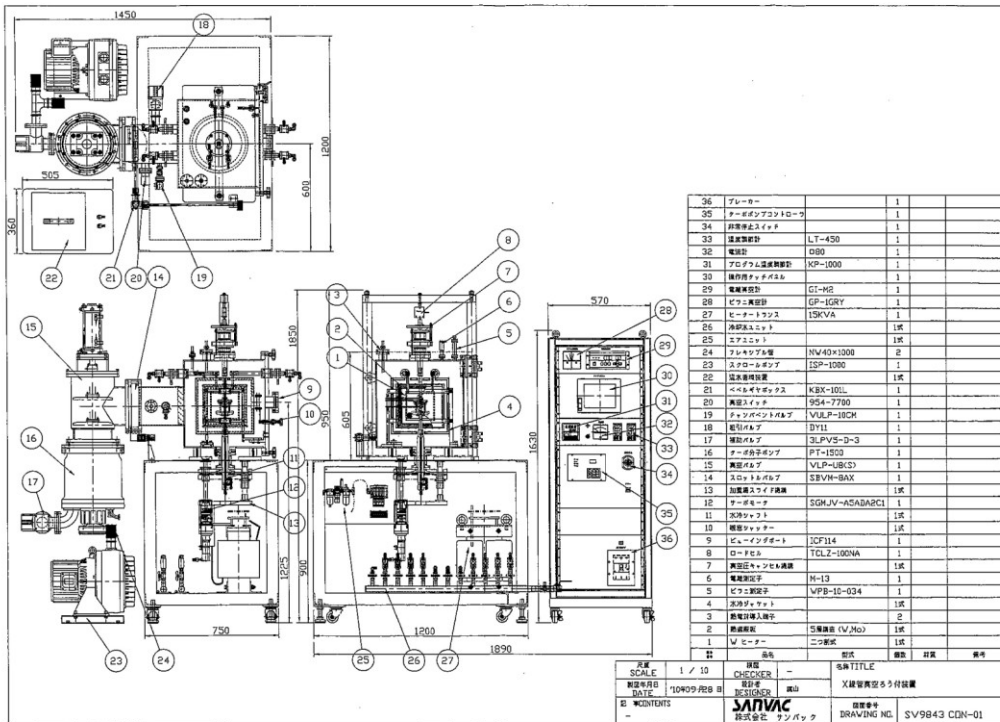


図 2-3-4. 超高真空蝾付け装置全系図



図 2-3-5. 真空内一体成形装置全景

平成 22 年度に開発した超高真空内 X 線管組立装置を使用していくと、X 線管開発担当からの装置に対する下記の要望が提出された。

- 1) 超高真空下 1350℃におけるタングステンターゲットベーキング
- 2) 600℃～ロウ付け温度及びロウ付け時間内の真空圧力制御
- 3) ロウ付け時、ロウ材溶融に伴う荷重 0 からの回復時間特性の改善

当初装置は上記 3 件について自動制御等の配慮はされていなかったため、今年度は開発装置の性能完成を目指し技術開発する。

### 2-3-1 超高真空下 1350℃におけるタングステンターゲットベーキング

冷陰極 X 線管は管内放電により劣化する。この放電は、陰極から電子が放射され電圧により加速されてタングステン (W) ターゲットに衝突したとき、ターゲットから放出されるガスにより発生する。このため、製造工程において、まずターゲット加工後 1000℃での熱処理品を納入してもらい、ロウ付け組立前にフラッシング装置を用い、電子線によりベーキング加工を行っている。この電子線ベーキングはかなり時間を必要とする。

またベーキング時発生する放電により、ベーキングエミッタが破損し問題となっている。電子線ベーキング処理の短縮を図る。

超高真空内 X 線発生装置（以下真空ロウ付け炉と呼ぶ）はロウ付けを目的としたため、目標は最高温度 1100℃で  $10 \sim 10^{-5}$  Pa の状態を作ることであった。W ターゲットの熱処理は 1300℃以上、1 時間保持を必要としたため、以下を検討した。

- ① 1350℃、1 時間以上の加熱・保持
- ② ①の条件を達成するための、装置上の課題の抽出と対策
- ③ 実サンプル (W ターゲット) による高温熱処理確認

①についてはヒータ容量からして問題ないとの結論に至った。

②については、トランス容量（特にタップ電圧 5V）、冷却水、及び排気系（ポンプ）、そしてチャンバーの耐熱性を先ず机上検討した。

トランス容量には問題なし。冷却水については、水温上昇がどの程度なのか。現状の加熱冷却装置の能力でよいかを予備動作確認した。その結果、

1) トランスについてはタップ 5V では目標温度に加熱するのが限界であり、ヒータの経時変化により、加熱困難となる。

将来トランス変更必要（容量は現状、2 次側タップ電圧を 8V）

2) 冷却水については 1000℃までは 60℃程度に収まっていたが、それ以上になると冷却能力不足となる。予備試験時は水槽水を取替水温を 70℃以下にして実験した。

従って冷却水の冷却能力向上を必要とする。

これについては循環式冷却チラーを新設して対応することとした。図 2-3-6 に従来用いていた循環式水槽と新たに設置したチラーを示す。





図 2-3-6. 循環式水槽と空冷式チラー（6 kW）

③実サンプルでの熱処理については、Wターゲットをロウ付炉にセットし、真空排気後チャンバー内真空度が $\sim 10^{-6}$  Pa になってから、加熱を行った。

加熱プログラムは

室温 $\rightarrow$ 400 $^{\circ}$ C      昇温スピード 20 $^{\circ}$ C/min 20min 保持

400 $^{\circ}$ C $\rightarrow$ 900 $^{\circ}$ C      昇温スピード 20 $^{\circ}$ C/min 10min 保持

900 $^{\circ}$ C $\rightarrow$ 1350 $^{\circ}$ C      昇温スピード 15 $^{\circ}$ C/min 60min 保持

で行った。

このときの真空度は 400 $^{\circ}$ Cまでは、 $10^{-4}$  Pa 程度までガス放出により悪くなったが 400 $^{\circ}$ C-20分保持で  $10^{-6}$  Pa となった。1350 $^{\circ}$ Cでは  $10^{-5}$  Pa を維持した。

タングステンは鍛造品であり、内部にガス成分などを含みやすい。この熱処理によりほぼ内部ガス分子状成分は除去できたと考えられる。しかし、結合した不純物ガス化分はやはり、電子線ベーキングしないと除去できない。しかしそのベーキングは簡素化した。

### 2-3-2 600℃～ロウ付け温度及びロウ付け時間内の真空圧力制御

当初ロウ付け時の圧力制御はメインバルブ前に取り付けられたバタフライバルブを手動操作で制御する設計となっていた。実ロウ付け時、10インチバタフライバルブを操作しロウ付け圧力 $10\sim 10^{-2}\text{Pa}$ の制御を試みたが、バルブコンダクタンスが大きく制御範囲を逸脱してしまい制御不能の状態となっていた。実際は $10\sim 10^{-4}\text{Pa}$ の範囲でバルブの開閉操作ではなく、全閉で圧力上昇を待ち、圧力が上がり過ぎる状況となり、開放してもすぐには圧力が低下せず、しばらくすると急に $10^{-4}\text{Pa}$ 以下となる。

このように、コンダクタンスが大きすぎるバルブでは制御ができないことが分かった。ロウ付け時の圧力制御システムとしては、適度なコンダクタンスをもつ別の排気系を作り、ロウ付け時のみ動作させる方法とした。

コスト的と納期的にコントロールバルブはバタフライバルブによるリニア開度制御ではなく、ベローズバルブによるON-OFF制御とすることにした。

キャノンアネルバ製広帯域真空計からの圧力信号は上限設定と下限設定が取れることを確認した。制御は信号をシーケンサに落とし、ベローズバルブの開閉をリレーで行う構成である。また圧力制御排気系のコンダクタンス範囲外となることを防止することと制御圧力の安定化のため、流量制御バルブをベローズバルブ後段に取り付けた。この圧力制御系の排気ポンプはタンデム構成となっているメインTMPと後段のTMPとの間に系を挿入し、制御時は

メインバルブ	閉
メインTMP	起動
中間バルブ	閉
制御系ラインバルブ	開

とし、圧力制御スイッチをタッチパネル上に作図し、プッシュ起動すると自動制御運転する。バルブ操作はすべてニューマチック自動とした。

実際の動作確認を行った結果、700℃からロウ付け温度一保持後700℃までの降温時まで $10^{-1}\text{Pa}\sim 10^{-2}\text{Pa}$ の制御範囲で圧力コントロールしていることを確認した。図2-3-7に追加した圧力制御排気系の系統図を示す。また図2-3-8に実際に設置した配管等の写真を示す。

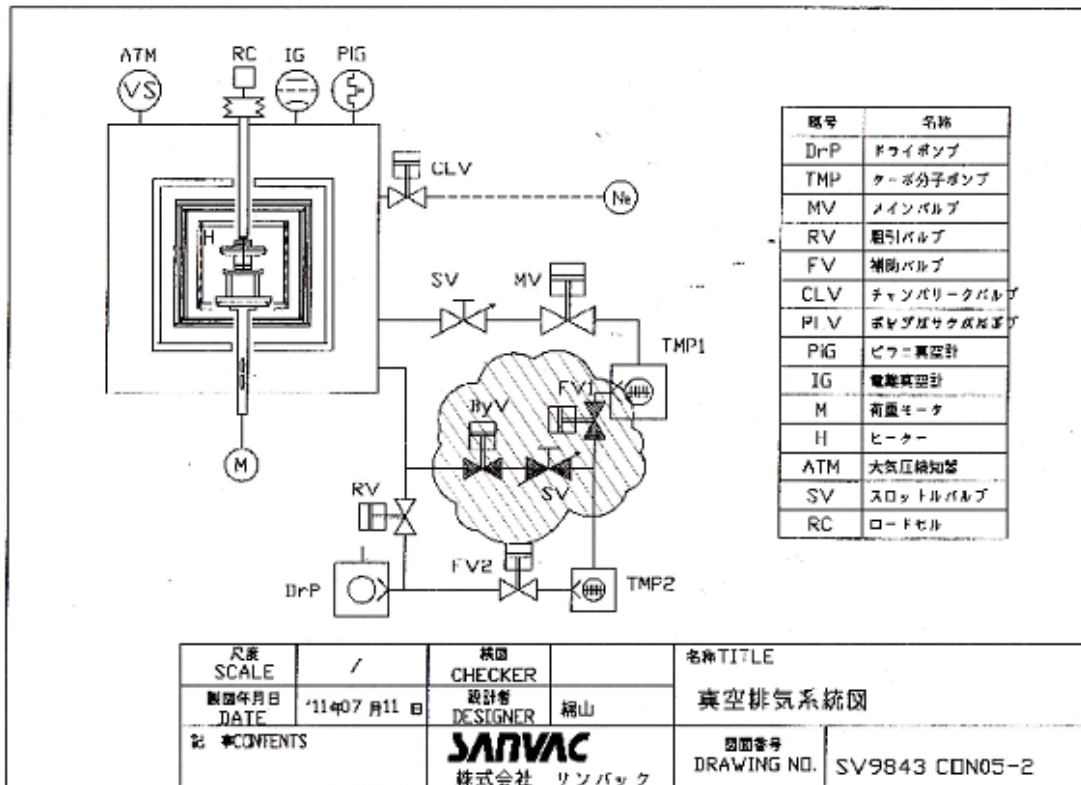


図 2-3-7. 圧力制御排気系の系統図

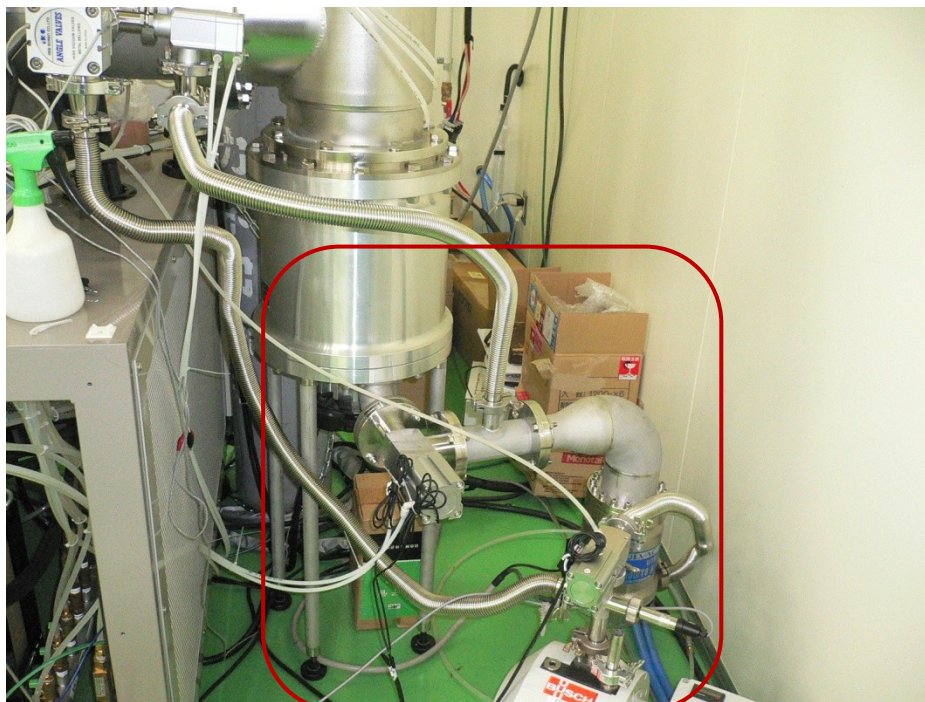


図 2-3-8. 圧力制御排気系部写真

### 2-3-3 ロウ付時、ロウ材溶融に伴う荷重0からの回復時間特性の改善

真空ロウ付炉には最大100Nの荷重がX線管仮組立部品にかけられる設計となっている。さらに先ずチャンバーにロウ付部品をセットしたのち、昇降機構により下部機構を上昇させ、荷重を数Nかけ、チャンバー扉を閉じ、真空排気する。この真空排気により、チャンバー構成壁等の伸縮により、荷重が自動的にかかるようになるため、荷重制御を行い、 $10^{-6}$ Paに真空度をとする。

次に加熱プログラムを起動しロウ付を行う。加熱プログラムに従って昇温していくと、チャンバーの熱伸縮により過荷重がかかるが自動制御により30N程度に抑えている。600°Cになった時ロウ付時荷重50Nを設定し制御しながら昇温していくと、使用するB-Ag8ロウ材の溶融温度780°C付近で溶解に伴い、荷重が0となる。この荷重計の目視観察から確実にロウ材が溶解したことは温度と対応し確認できる。しかし荷重が0となってから50Nへのリガバリー時間は長くロウ付温度プログラムが降温に入り、ロウ材が凝固するまで回復しない。即ち、一番荷重がかかってほしいときに荷重制御出来ないことになる。この間はロウ付部品をセットしたときスペーサとして用いるSUSブロックの重量が荷重となっており、X線管としての芯出しが出来ず、軸がずれたロウ付X線管となる課題が出た。

先ず、

1. 荷重は当初の最大100Nロードセルでは、感度的に過敏すぎ荷重変動を起こすことがわかったので、1kNのロードセルに変更し荷重自体も100N以上の範囲で制御する。
2. 下部昇降機構を動かすサーボモータのスピード制御を見直す。  
ただし課題として、スピードを早くすると、制御ポイントに対し、過大オーバシュートを起こす。
3. 荷重0から設定荷重までの応答時間はロウ付時の昇温スピードが $10\sim 30^{\circ}\text{C}/\text{min}$ であることと、780°C溶融点（真空圧により、金属の蒸気圧が変わるため、溶融点も変わる）付近からゲッター活性点860°Cまでの間で荷重回復点を800°Cと設定し、30秒以内での回復を目標にする。
3. 昇降機構に取りつけたロウ付治具の可動範囲を加熱ヒータ内に閉じこめるため、上下リミットスイッチを取付け、可動によるヒータ反射板の破損防止を行う。

機器的には制御し易い1kNロードセルにセンサーを変更し、荷重の制御と応答特は下部昇降機構のサーボモータのスピードをコントロールする荷重制御器の設定とシーケンス改造を行った。

図2-3-9にサーボ駆動機構の構成写真を示す。

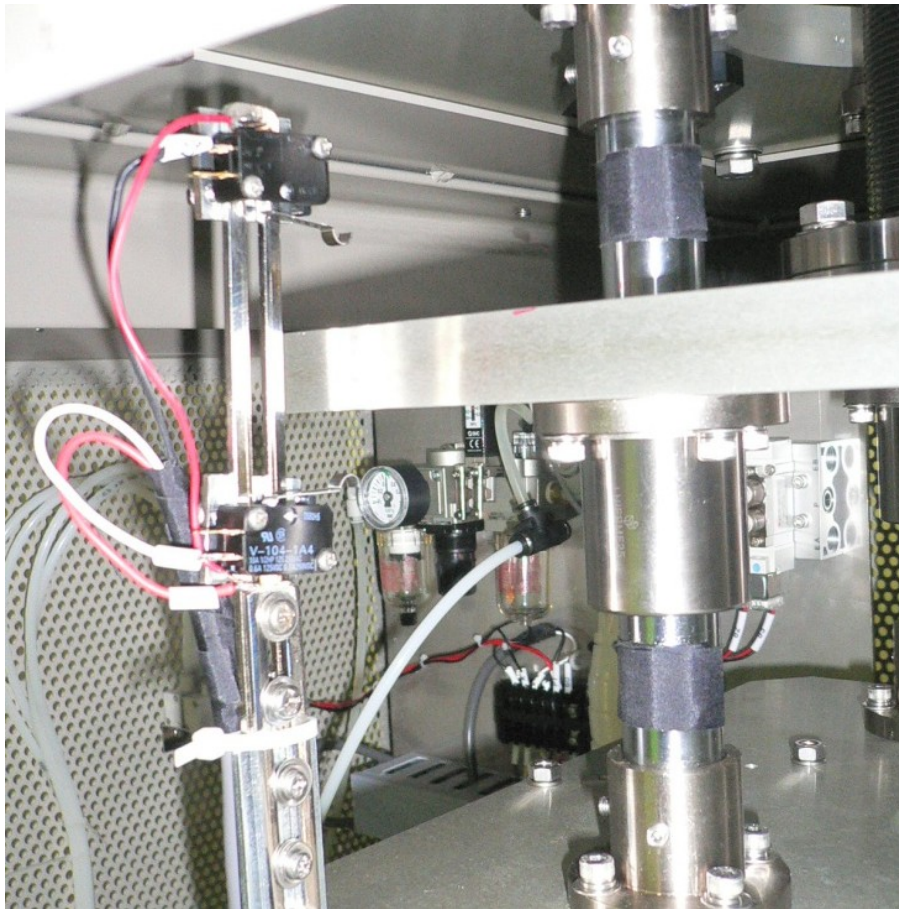


図 2-3-9. サーボ駆動機構の構成写真

その結果、良好な温度・荷重を得た。回復時間は、30秒以内であり、荷重のオーバーシュートは観測されなかった。

#### 2-3-4 まとめ

真空内一体成形装置（蝾付け炉）の完成により、本開発で当初に提案した冷陰極小型 X線管の量産化に目途を付けることが出来た。

ロウ付け後の X線管内の真空度維持はゲッターポンプにより行うこととしている。X線管は常に電子を高速でターゲットに当てるため、X線管内の真空度は同種の真空スイッチ等に比べ非常に厳しい。この問題の解決法を本研究開発で考案した。その概念図を図 2-3-13 に示す。この作業工程は、既に 2-3-3, 4 節で検証された。本研究開発で確立された、ゲッターとロウ材によるロウ付け組み立てを両立させる炉昇温プログラムと、その時の炉内真空度のプログラムの概要を図 2-3-10 に示す。一体成形装置内にセットされたロウ付け対象 X線管の写真を図 2-3-11 に示す。また、図 2-3-12 には各種小型 X線管が、図 2-3-13, 14 にはロウ付け後の X線管が示されている。

一体組立炉内真空度・昇温スケジュール

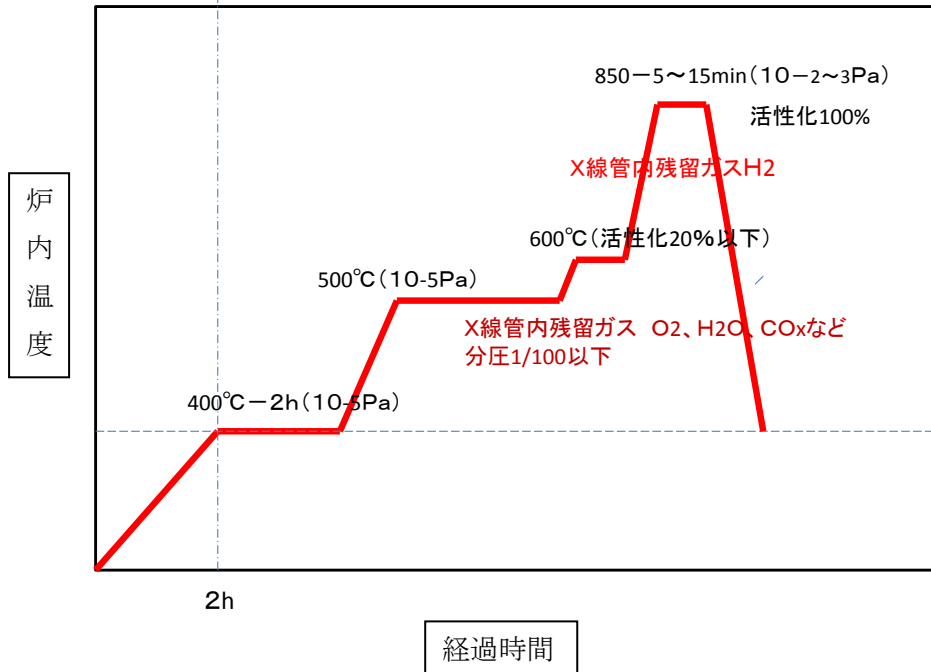


図2-3-10. 考案された炉内温度・真空度のプログラム

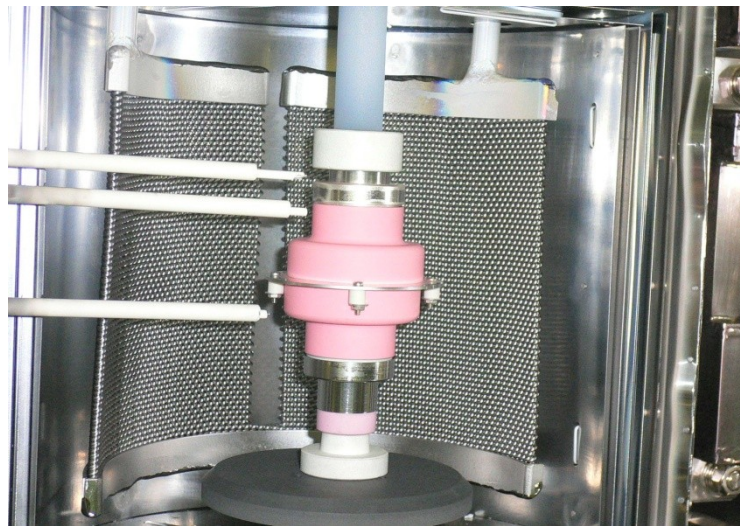


図2-3-11. 一体成形装置内にセットされたロウ付け対象X線管

図2-3-12に試作した新型(平型)X線管と新たに設計した超小型X線管の写真を示す。様々なX線管形状での蠟付け作業のノウハウを取得中である。



図2-3-12. 各種小型X線管 左(2個): 平型X線管  
右(ピンク色): 超小型X線管

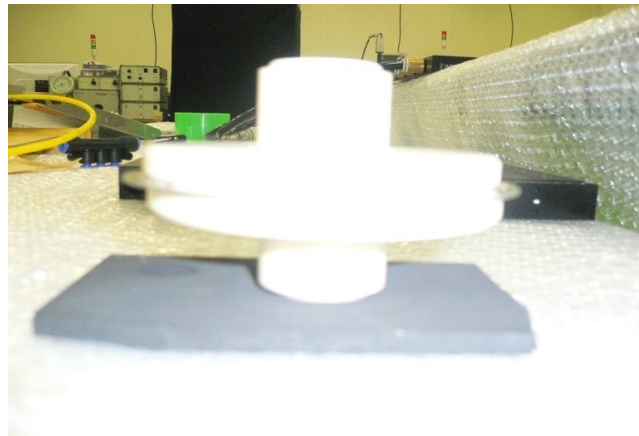


図2-3-13. ロウ付けした平型X線管

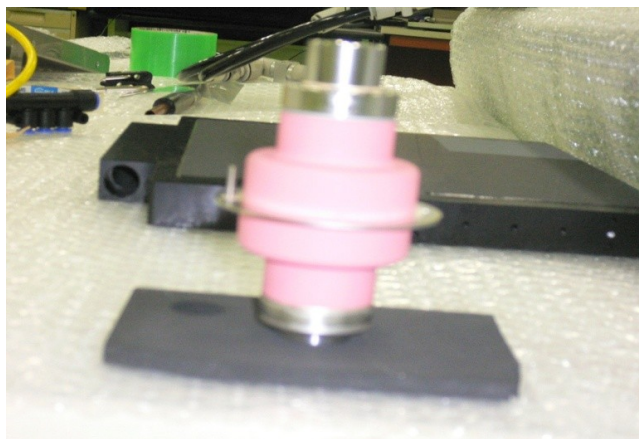


図2-3-14. ロウ付けした超小型X線管

まとめとして、冷陰極X線管の製作に関して2年間にわたり課題の抽出とその対策を実施し、本真空ロウ付炉の取扱説明書とした。また、本年度はシーケンスラダーについても纏めた。



### 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つた剣山状の構造体で出来ており、冷陰極で効率よい電子放射が可能である。また、基板から順次成長させているので基板に固着されており、真空中で高電界をかけても安定しているのが特徴である。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いるが、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。

上記の基盤技術に基づいてこれまでに直管型X線管を開発しており、軽量・小型高性能な製品化レベルの性能が発揮できるので、サンプル出荷（3社）を行っている。しかし市場の反応は性能が良くても価格が市販品の5倍以上では受容れてくれない。大手需要先（購入ロットが200台以上）の回答は価格が現状の1/10になるという見込みが出来た時点でエンジニアリングサンプルの購入を考えたいと言うものである。従って、平成22年度開発の新型構造X線管を早期に完成させて市場投入したい。その時期は23年度上半期内と位置づけ、国内外のX線管発生器販売企業との交渉を開始した。

また小口（ロット規模が10台程度）購入社は食品検査、特殊検査に可搬で軽量・電池駆動への魅力を感じている。彼らの要望は第一が価格であり、産業の裾野に位置する所への普及をになうので、世界にはないユニークな製品を多分野に展開する尖兵となってくれる。量産・低価格の技術が確立したのでそれに答えたい。

本研究開発の具体的成果は以下の通りである。

#### 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

シミュレーションソフトを用いて、重負荷対応X線発生管の構造（数条件）について計算し、解析を行った。その結果を試作で検証し、X線管の定格仕様を満たすように、さらに再度繰返し解析を行い限界設計の基準を構築した。

今年度開発の新工法に最適で同性能において、従来のコスト比1/10程度、重量比1/2となる新X線管構造の解析を行い、新構造を試作した。最適化設計見直しと残る金属窓付X線管については、23年度上半期に設計を終了した。

実用化製品を対象に、より精度を上げたシミュレーションを行う事としている。

## 2) 高出力冷陰極X線管、及び全固体絶縁X線発生装置の開発

陽極熱容量の高いX線管の開発を、構造では平型タイプで設計し、製作工程では事前エージング処理を駆使し、最終的には真空内一体ロウ付け法により試作した。この試作品に固体絶縁モールドを施しX線発生器を開発した。

1) で行った新設計の基本性能を把握する為、従来工法で平型X線管の試作を行い、機能検証を終えた。この機能検証から一体組立工法のため、陽極・陰極の前処理が必要な事が分かった。解決のために①電子ビームアニール前処理と②陰極の安定化前処理が有効でありそれに必要な試作装置を完成し、稼働させた。

試作した新型（平型）X線管は、旧X線管と比較して大幅に小型・軽量となった。更に超小型X線管（直径約5cm）を試作した。試作品により実用化レベルの性能が得られることが確認できたが、寿命試験については継続して行いデータを蓄積して信頼性を確認する必要がある。絶縁モールドに関しては高圧回路を含めて、試作に成功している。X線遮蔽などを含めて製品の最終デザインに向けた詰めが必要な段階に来ている。

産業技術総合研究所とライフ技術研究所が共同で100kV X線管製作仕様書を作成し、技術供与の準備を完了した。

## 3) 超高真空内X線発生装置組立技術の開発

10<sup>-6</sup>Paの超高真空かつ900℃の高温下で、不純物を取り去りながら全部品一体組立製造を行った。ロウ付け時の昇温プログラムと炉内真空維持及びX線管への荷重プログラムとの関係を把握し、製造工程の合理化と、信頼性の向上及び大幅なコスト低減を実現した。

具体的には、新型X線管の基本設計と試作による構造性能検証を行うことと並行して、真空内で一体組立できる超高真空蝟付け炉の設計を進め、装置を完成させた。X線管は900℃で一体蝟付けする。この時に管内の真空度の10<sup>-5</sup>Pa以下を実現した。蝟付け後のX線管内の真空度維持はゲッターポンプにより行う。X線管は常に電子を高速でターゲットに当てるため、管内の真空度は同種の真空スイッチ等に比べ非常に厳しい。この問題の解決法を考案し、その温度処理プロセスをグラフ化し、炉制御プログラムを完成させた。

「真空内一体成形装置」の性能が予想通り出せるかどうかにより製品化行程効率アップの成否がかかっていた。周辺装置に関しては産総研（つくばセンター）が今回の大震災で被災したため、何点かの設計仕様見直しをして装置性能の修復並びにより高度化を目指したため研究開発がやや遅れたが、真空内一体成形装置は長岡工場に設置したため、予備実験は順調に進み計画通りの成果が得られた。

以上の結果を基に、今後は実際に医療応用や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、本年度に計画された当初の目標はおおむね達成されたと考える。

また、今後の課題解決の方向性、並びに事業化の展開として、以下の項目が見込まれるとの結論に至った。

#### <課題解決の方向性>

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、当該事業の推進によりX線管の「長寿命化（15,000時間）」を実現すれば、実用製品として市場に提供する事が出来る。

X線管では、陰極から出射した電子は陽極に印加された電圧により加速されターゲットに衝突し内部に浸透する。この時X線が発生すると同時にターゲット中の不純物ガスが管内に発生し、放電を起こす原因となる。このため従来工法ではX線管に排気管を取付け最終溶接組立後、ベークと真空排気を行ったのち、定格以上の電圧印加を行い、脱ガス処理による安定化を行ってきた。また同時に陰極エミッタの安定化を結果として兼ねる効果もあった。しかしこの工程は大変時間を要しコスト高の原因でもあった。

平型X線管に対して案出された新工法では一回の蝟付けで組立を終了する。900℃、10<sup>-5</sup>Pa以下という高温・高真空下での処理だけではターゲットの脱ガス・エミッタの安定化は難しい事が事前の実験で分かった。そこで新工法では事前に真空下でのエミッタ電子放出による安定化処理、ターゲットの電子ビームアニーリングによる脱ガス化処理を行い、最終的にはクリーン環境下で部材の仮組立を行い一体蝟付け組立を行うことで、X線管内部でのX線出射時の真空環境変化を極力抑制する必要がある。

これらの課題を解決するため、平成23年度は前処理として電子ビーム前処理装置の充実、エージング装置の導入を行い、後処理としてエージング装置、性能検査としてX線出射性能測定装置、X線管電気特性測定器の導入を行った。

#### 「重要指針」

- ① CNX冷陰極X線管の信頼性を確たるものとする。  
⇒ 既に完成しているX線管フラッシング装置による処理法の高度化、それ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。

⇒ 今回新たに考案した新型（平型）X線管を用いたX線発生装置の高性能・長寿命化を含めた早期完成を目指す。

⇒ 真空内で一体組立できる超高真空蝟付けをより効率化して、大量・低価格生産を実現し、同時に性能の安定化を確立する。

- 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、C N X冷陰極小型・軽量X線管の広範な応用ニーズの探索を行う。

### <事業化の展開>

開発状況としては、準備がほぼ整ったと思われる。一体化工法への投入X線管の部材展開・試作、前処理課題解決法、工法の具現化条件設定、真空炉装置製作がほぼ完了した。なによりも見通しがよいのは、事前の直管型の従来工法で確認しているデータで平型の性能と完成度の見積もりが容易な点である。この廉価版X線管の客先評価はかなり高く、今までにない用途を客先は考えている。従って、早期エンジニアリングサンプルの提供は当初計画した事業化プログラムより早めて、汎用型X線管では23年9月と具体的に落としこむ事が可能となった。

汎用型としては、平成22年度から既に、直管型X線管のサンプル提供を行っていたが、現在国内企業の何社かが機能確認のための予備研究をおこなっている最中であり、採用待ち状態である。

医療応用については、国内では既存X線管（ガラス製）との競合があり参入は困難である。そこで、救急医療のニーズが高い海外企業と共同で、輸出又は現地生産を前提に共同推進事業を計画中である。平成24年度開始を目指している。また、ポータブル型を売りにして、国内での現場持ち込み型の非破壊検査応用にビジネスチャンスがあるか検討中である（表3-1参照）。X線による非破壊検査市場は、

表3-1. 現場持ち込み検査対象分野例

現場持ち込み検査対象分野(新市場)	携帯型X線装置の特徴	備考(照会依頼先)
化学などプラント工場	運転時検査が可能	エンジニアリング振興協会
ボイラーなど	運転時検査が可能	発電技検と特許共同出願中
ビル、住宅	現地検査(立会い、仕上げ確認など)	国土交通省と調整中
災害調査	瓦礫内部診断	人命救助
トンネル内部	現地検査(劣化診断など)	社会インフラ総点検計画
道路内陥没検査	反射波診断	社会インフラ総点検計画
橋梁	現地検査(劣化診断など)	社会インフラ総点検計画
航空機の機体・エンジン等整備	離発着時に簡易検査実施可能(一層の安全確保)	商社からの照会
水際検査、不審物検査	コンテナ内立入り検査可能。	テロ対策、関税局
自動車完成検査	組立時不具合をチェック	自動車搭載用半導体検査
その他一般産業	非破壊検査	

現状の技術レベルの放射線機器をベースとして、約 1100 億円である。新規追加市場も見込まれるので大いに有望な分野と考えている。

低エネルギー型では X 線管設計の標準がほぼ出来上がってきた。絶縁モールドや X 線遮蔽外装の工夫が残されている。高エネルギー型では未だ設計の標準が確立していない。セラミックスを外壁とした CNX 冷陰極 X 線管の原理的能力は高エネルギー型に十分堪えると予想されているが、実機での試作を未だ繰り返す必要があり、補完研究の対象である。産総研との共同研究を期待している。

販売面では、まだサンプル供給の段階であり、ユーザーのニーズあるいはユーザビリティについて未達の面が多い。現在共同でビジネス展開しようとしている海外企業の製品ノウハウに一部頼っているのが現状である。製品が実用現場で試されるようになれば、製造へのフィードバックも期待できるので、早くその状況を作りたい。

また X 線管量産についても、まず明電商事・カワソーテクセルラインで実施するための準備を行っている。製造責任の問題については、(株)リガクで X 線管の性能評価を行い解決する手段を構築した。このようにして販売はライフ技術研究所が主となり展開するが、サンバックは X 線管の製造設備を製作メーカーに提供する事となる。

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。

今後は下記の期待に応えられるよう、より現実的な製品化を行っていきたいと考えている。

- 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を期待する。
- ② ポータブル・緊急医療画像用など、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分野への進出が大いに期待出来る。
- 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が望まれる。



**リサイクル適性 (A)**

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。