

## Development of X-band Thermionic RF Electron Gun using Choke Structure

Yoshihiro Taniguchi<sup>1A)</sup>, Fumito Sakamoto<sup>A)</sup>, Takuya Natsui<sup>A)</sup>, Tomohiko Hashimoto<sup>A)</sup>, Eiko Hashimoto<sup>A)</sup>,  
Mitsuru Uesaka<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>B)</sup>, Toshiyasu Higo<sup>B)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>B)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Nuclear Engineering, School of Engineering, the University of Tokyo  
2-22, Shirakata Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188

<sup>B)</sup> KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

At the University of Tokyo, we are developing a compact Compton scattering X-ray source to apply to the medical application. X-band (11.424GHz) 3.5-cell thermionic cathode RF electron gun is adopted as an electron beam injector. We chose Nd: YAG laser which can switch a wavelength and energy (532 nm/ 1.4J, 1064nm/ 2J) as a photon source to collide the electron beam.

Now, we are developing a new RF electron gun which contains new two key ideas to achieve more efficient operation. First, choke structure is adopted as an RF interceptor, which allows spring to have only to role as a stabilizer of the cathode rod, therefore stable operation will realize. Second, cylindrical waveguide is adopted as the coupler for feeding RF to the cavity. It also enables the gun to operate with few RF problems. In this presentation, we will report the details of new X-band thermionic cathode RF-gun and experimental results on cavity property measurement.

## チョーク構造を用いた改良型X-band熱陰極RF電子銃の開発

### 1. 東大コンプトン散乱X線源の概要

東大原子力専攻では、二色X線CTなどの医療用画像診断への応用を目指した逆コンプトン散乱単色X線源の開発を行っている。逆コンプトン散乱とは、高エネルギーの電子ビームとレーザーなどの光子との衝突によってより高エネルギーの光子が発生する現象である。通常の意味でのコンプトン散乱は、静止電子と光子の衝突によって起こる現象である<sup>[1]</sup>。

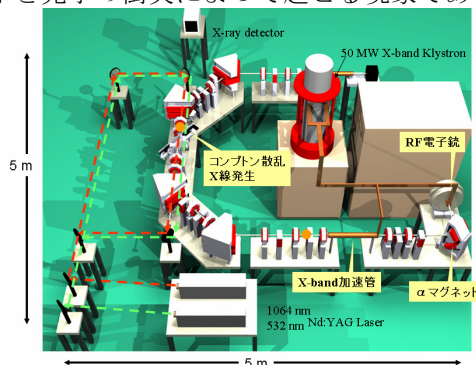


図1 東大単色X線源

単色X線発生に逆コンプトン散乱を用いることのメリットは、高強度かつ短パルスのX線を小型の装置で発生可能であること、およびエネルギー調整の容易さが挙げられる。様々な研究機関で、このメリットを生かした医療、生物、材料工学等への応用が研究されている<sup>[2, 3, 4, 5, 6, 7]</sup>。東大コンプトン散乱X線源の概略図を図1に示す。電子ビーム源として、加速周波数11.424 GHz (X-band) の3.5-Cell熱陰極

RF電子銃を採用し、3-4 MeVの電子ビーム (マルチバンチ) を発生させる。これを同じくX-bandライナックで約30MeVに加速し、衝突点においてレーザー光子と衝突させることにより20-40 keVの準単色X線を発生させることができる。レーザー源には、Nd: YAGを用いており、波長1064 nmの基本波と波長532 nmの2倍高調波を切り替えることで、発生するX線のエネルギーを調整することができる。

これまで、電子ビーム発生試験を行ってきた。しかし、電子ビームの特性は設計値と測定値との間に大きな差があった。その原因として無酸素銅製の電子銃空洞の内部表面がSUSにより汚染されていたことが明らかとなった。SUSによる空洞汚染は、熱カソードロッドを支持し、RF遮断の目的で挿入されたSUSスプリングがカソードの熱により昇華し、空洞内に散乱したことで起こった<sup>[8]</sup>。スプリングをより融点の高いタングステン製に交換して実験を継続しているが、長時間高電力のRFにさらされることで、タングステンは600-800°Cの高温となる。これはタングステンの融点3400°Cよりもはるかに低いが、長時間の高温状態にあることで結晶構造が変化し、延性から脆性に特性が変わる<sup>[9]</sup>。それによるスプリングの破損、それに伴う放電が多発し、安定したビーム発生が困難となっており、新規の電子銃の開発が必要である。

新規電子銃の開発は現在進行中である。これまで、RF遮断・カソードロッド支持構造、およびRF供給カプラの構造を改良することにより、より安定した

<sup>1</sup> E-mail: yoshihiro@nuclear.jp

電子ビーム発生を可能にするべく設計を行った。本稿では、その設計について詳述し、新規電子銃開発の進捗状況について述べる。

## 2. 新規RF電子銃の設計

新規電子銃の設計に際しては、大きく2つの改良点がある。第一に、カソードへのRF遮断構造としてチョーク構造を採用したこと。第二に、カプラ構造を従来の同軸構造を廃して、円形導波管構造に変更したことである。それぞれの詳細について、以下に述べる。

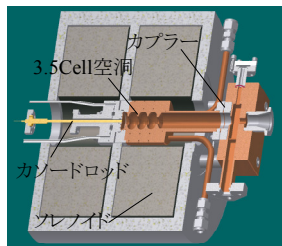


図2 新規電子銃見取図

### 2.1 チョーク構造

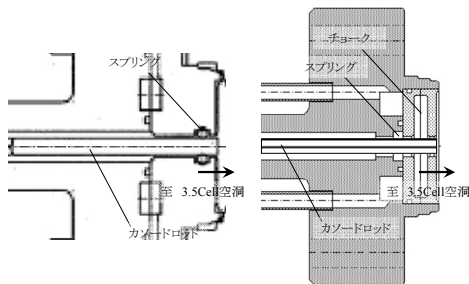


図3 (左) 現電子銃・(右) 新規電子銃カソード

現電子銃と新規電子銃のそれぞれのカソードロッド周辺の構造の模式図を図3に示す。現電子銃では、カソードロッドとその收容体によって同軸構造となっている。このため、空洞内に蓄えられたRFを遮断するために、カソードロッド周囲を囲うようにスプリングを挿入している。スプリングは前述したように、カソードロッドを支持する役割も果たす。ところが、スプリングがRFにさらされることにより破損、放電を起こすという問題も含んでいる。

新規電子銃では、この同軸構造の部分にチョーク構造を持たせることにより、RFを遮断することができる。RFの波長の1/4倍の径を持たせることにより、チョークへ進入したRFと、同軸をそのまま直進したRFの位相差が $\pi$ となり、相殺し合うことにより、チョークより先へのRFの侵入を遮断することができる。ただし、実際の径の寸法は、厳密に波長(m)の1/4ではない。なぜなら、上の議論がチョークの幅をゼロに限りなく近づけた時に成立することであり、有限の幅を持つチョークの設計にはシミュレーションが必要だからである。そのため、SUPERFISHを用いて2.5次元の数値計算を行い、RFが遮断されるような寸法を決定した。

図4、5にその結果を示す。チョークなしの現電子銃の場合と比較すると、チョークによるRF遮断の効果がよく分かる。チョーク構造の導入により、RF遮断にスプリングを使う必要がなくなる。スプリングは、カソードロッドを同軸上に保つために引き続き用いるが、現在頻発しているトラブルを回避できると考えられる。

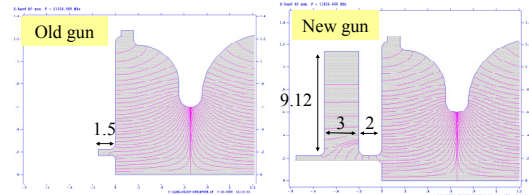


図4 SUPERFISHによる計算結果

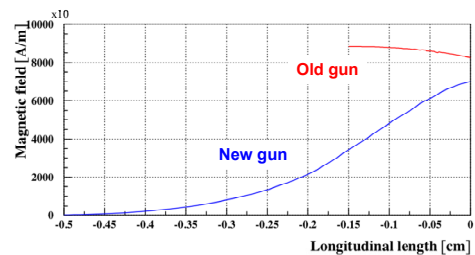


図5 カソードロッド周りの磁場分布  
(0mm: カソード端板)

### 2.2 カプラ構造

新規電子銃では、カプラとして、矩形-円形導波管構造を採用した。RF伝播の概念図と兼ねて図6に示す。

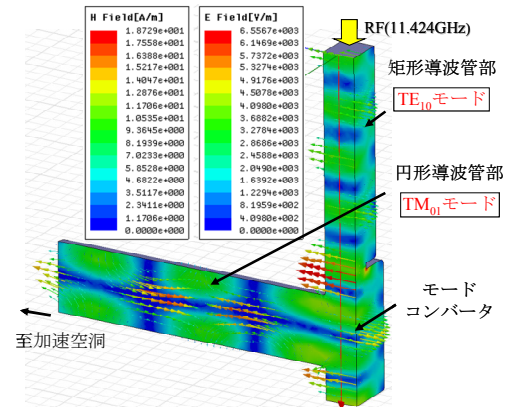


図6 新規カプラ概念図

クライストロンからのRFがまず矩形導波管に供給され、モードコンバータを介して円形導波管へと導く。現電子銃は同軸構造を持ち、内導体と外導体の間隙をTEM波が伝播する構造である。構造は複雑でありX-bandを用いる場合、精度よく位置を固定することが難しく、RFの安定供給を妨げる要因となる。それに対して、新規電子銃の採用する円形導波管構造は簡素な構造であるため、RFの供給安定性に優れているといえる。しかし、安定性に優れる反面、電子ビームに与える影響を考慮に入れる必要がある。現電子銃において、ビームは同軸構造の内導

体の内側（ドリフトスペース）を通過するため、ビームに与える影響はほとんどないと考えられるが、新規電子銃では、ビームが円形導波管内を通過するのからである。

そこで、設計に当たっては、(1)円形導波管内に電子ビームに径方向の力を与えるような電場成分が生じないこと、(2)周波数11.424GHzのRFが十分に電子銃の3.5セル空洞に供給されるようにすること、の二点に留意した。この二点を同時に実現するために、HFSSによる3次元計算により検討を行った。

カプラの矩形導波管入口、円形導波管出口をRF供給ポートとして設定し、Sパラメータが最適化されるように構造、寸法の決定を行った。理想的なRFの伝播条件は、図6に示すとおり、11.424GHzのRFが矩形導波管をTE<sub>01</sub>モードで伝播し、モードコンバータを介して、円形導波管をTM<sub>10</sub>モードで伝播することであり、かつ矩形導波管への反射が十分に小さいことである。前者に関しては、TE<sub>01</sub>モードが矩形導波管における基本モード（最低次のモード）であることを考慮して、より高次のモードが遮断されるような寸法を選べば、矩形導波管を伝播するモードは望みのTE<sub>10</sub>モードに限定される。しかし、円形導波管においては、基本モードはTE<sub>11</sub>モードであり、TM<sub>01</sub>モードはその次の高次モードである。従って、TE<sub>11</sub>モードは寸法による遮断は不可能である。そこで、モードコンバータにおいて、磁場結合の対象性を確保することにより、構造的にTE<sub>11</sub>モードの伝播を抑えることとした。TE<sub>11</sub>モードを遮断せねばならない理由は、TE<sub>11</sub>モードは電場が径方向の成分を持ち、電子ビームを径方向に蹴ってしまうからである。後者に関しては、HFSSによる3次元計算を行い、Sパラメータを評価することにより、条件を満たすように寸法を決定した。

図7に最終的な設計条件におけるSパラメータを周波数の関数として示す。

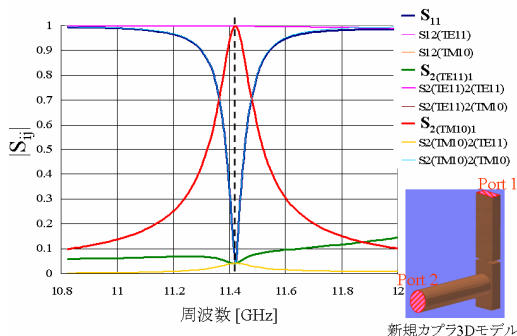


図7 新規カプラSパラメータ計算結果

矩形導波管入口をポート1、円形導波管出口をポート2として、 $|S_{ij}|$  ( $i, j=1, 2$ ) を求めた<sup>[10]</sup>。ここで、 $|S_{ij}|$ はポートjから入射して、ポートiより出力されるRF電力の割合である。本カプラでは、ポート2においては2種類のモード (TE<sub>11</sub>, TM<sub>01</sub>) のRFが存在し得るので、例えば、 $|S_{2(TE11)}|$ は、ポート1から入射し、ポート2からTE<sub>11</sub>モードとして出力される電

力の割合を示している。望みの条件をSパラメータで表現すると、周波数11.424GHzにおいて、 $|S_{2(TM10)}| \approx 1$ ,  $|S_{2(TE11)}| \ll 1$ ,  $|S_{11}| \ll 1$ , であることである。図7ではそれが満たされていることが確認された。

### 3. 測定

#### 3.1 チョーク構造導入の現電子銃の特性測定

カプラと空洞に現電子銃を用いて、チョーク構造を導入したものによる試験を行った。~kW程度の低電力のRFを電子銃に供給し、チョーク構造を用いても空洞内にRFが供給されることが確認された。図8に示す。

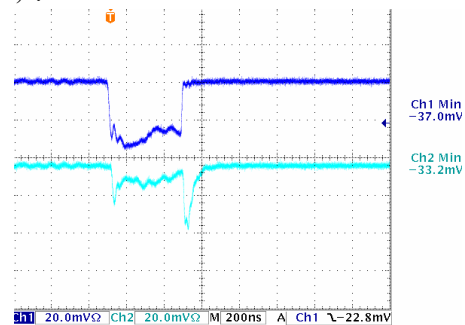


図8 カソード導入現電子銃空洞内RFパルス波形

### 4. まとめと今後の展開

コンプトン散乱単色X線源の問題点を電子入射器である熱陰極RF電子銃の構造に見出し、新しいコンセプトを盛り込んだ新規電子銃の開発によって改良を目指している。望ましいビーム発生が可能となるような設計を完了した。

今後は、新規電子銃の特性を低電力、高電力の各条件下で行い、単色X線源に導入する予定である。また、今回は電子銃の中でも、カソード部とカプラ部のみの改良に留まったが、さらなるビームの質向上のためには、空洞部の改良設計を行うことも必要である。

### 参考文献

- [1] F. Sakamoto, Dissertation, Tokyo Univ., 2006
- [2] F. V. Hartemann, et al., Proceedings of PAC 07, 2007
- [3] A. V. Bondarenkoa, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 575 11–13, 2007
- [4] V. Androssov, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 543 58–64, 2005
- [5] F. E. Carol, et al., AJR 2003 181 1197–1202, 2003
- [6] A. E. Vliet, et al., SLAC-PUB-11689, 2005
- [7] R. Kuroda, et al., Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 2007
- [8] LLNL Science & Technology Review, “Taking a Gander with Gamma Rays”, 2006
- [9] F. Sakamoto, et al., Proceedings of Atomic Energy Society Spring Meeting 2008, Osaka
- [10] 中島 将光, 「マイクロ波工学-基礎と原理」, 森北出版, 1995