

# 小型硬 X 線源のための X バンドライナックの数値解析

深澤 篤<sup>A)</sup>、飯島 北斗<sup>A)</sup>、上坂 充<sup>A)</sup>

浦川 順治<sup>B)</sup>、肥後 寿泰<sup>B)</sup>、明本 光生<sup>B)</sup>、早野 仁司<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設

〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

<sup>B)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

レーザー逆コンプトン散乱小型硬 X 線源用の小型加速器として、X バンドライナックを計画している。電子銃は X バンド光陰極 RF 電子銃を開発する。ここでは電子輸送計算コード PARMELA を用い、数値的な設計を試みた。スケール則に基づいた 1.5 セルキャビティでは、陰極表面での最大電場の設計値が 400MV/m になり現実的ではなくなってしまう。そこで、電場を弱くする分をセル数を増やすことで補うことにした。2 セル増やした設計では、240pC、2.1MeV、5.3  $\pi$  mm.mrad のビームを得た。しかし、このビームはエネルギー広がりが 8% もあるため、通常用いられるエミッタンス補正用ソレノイド磁石は逆にエミッタンスを増大させてしまうことが判明したためはずしてある。この後 X バンド加速管で 50 MeV 程度まで加速する。加速管は単純なディスク型で S バンドの加速管を波長の分だけ縮小したものである。最終的には、240pC、47.3MeV、8.5  $\pi$  mm.mrad の電子ビームを得た。この電子ビームとスーパーキャビティからのレーザーでは  $1.3 \times 10^5$  photons/shot 程度の X 線しか得られないため、電子ビームのマルチバンチ化や、10J/pulse 以上の短パルスレーザーのマルチパスシステムの検討を進めている。

## 1. はじめに

今年度より文部科学省のプロジェクト「先進小型加速器開発」が始まった。この計画では、小型の重イオンシンクロトロンと小型硬 X 線発生装置の開発を行う。この研究はその一方の小型硬 X 線発生装置の開発に関するものである。

小型硬 X 線発生装置とは、電子ビームとレーザーとを衝突させる逆コンプトン散乱を用いて、非常にコンパクトな装置で硬 X 線を発生させる装置である。この研究はいかに装置を小型化できるかがポイントであるため、電子ビームを発生させる加速器に X バンド線形加速器を開発する。また、レーザーも小型でエネルギーの高い装置を開発する必要がある。小型硬 X 線発生装置の概念図は図 1 の通りである。電子は X バンドレーザー光陰極 RF 電子銃で発生する。

これは将来レーザープラズマカソードに置き換わるかもしれない。その後 X バンド加速管で加速された電子はアクロマティックに曲げられた後にレーザーと衝突する。これは加速時の制動放射の影響を避け、低ノイズで X 線を取り出したいからである。

発生した硬 X 線は電子ビームとほぼ同じ短パルスであるため、様々な高時間分解 X 線実験を行うことが可能になる。特に医療応用として、動的アンジオグラフィを行うためには 10ms 以内に  $10^{11}$  photons の X 線を得る必要がある。

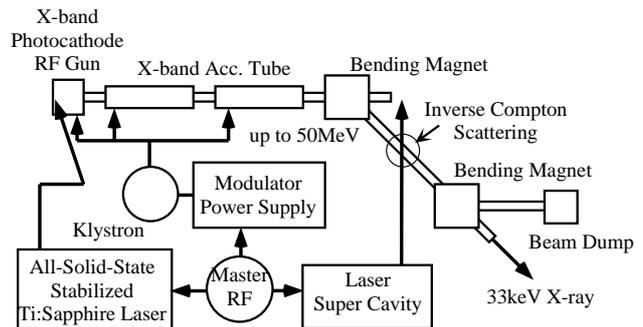


図 1 : 小型硬 X 線発生装置の概略図

## 2. X バンドライナック

### 2.1 RF ガン・スケール則

スケール則にしたがって設計を行えば、RF ガンのエミッタンスは電荷と RF 周波数に関して以下の式のようにスケールされるはずである<sup>[1]</sup>。

$$\varepsilon = \sqrt{(aq^{2/3})^2 + (bq^{4/3})^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon \propto \lambda^{-1} \quad (2)$$

ここで  $\varepsilon$  はエミッタンス、 $q$  は電荷、 $\lambda$  は RF 波長、 $a, b$  は適当な定数である。

図 2 の点はシミュレーションの結果であり、曲線は式(1)をそのデータにフィッティングさせたものである。きれいにフィッティングされており、電荷に関するスケール則は正しいことがわかる。図 3 に S

<sup>1</sup> E-mail: fukasawa@tokai.t.u-tokyo.ac.jp

バンドと X バンドのエミッタンスと距離のグラフを示す。両軸ともにスケール則に従ってそれぞれの RF 波長で割っている。この 2 つはほとんど一致しており、RF 周波数のスケール則は確認された。しかし、このスケール側では陰極表面での最大電場が 400MV/m となってしまうので、実際の設計としては現実的ではない。

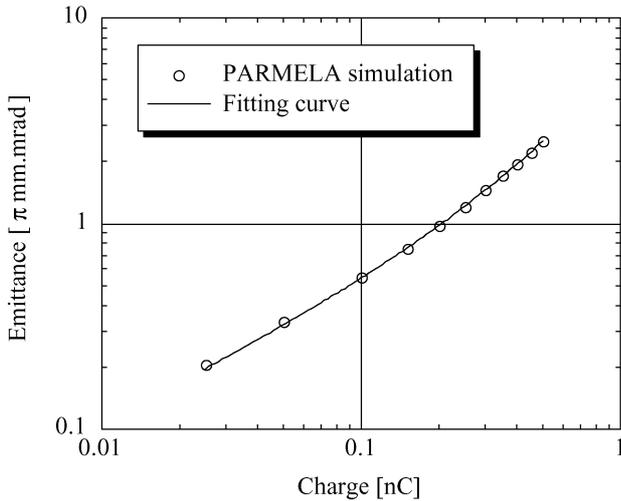


図 2 : 電荷量に関するスケール則

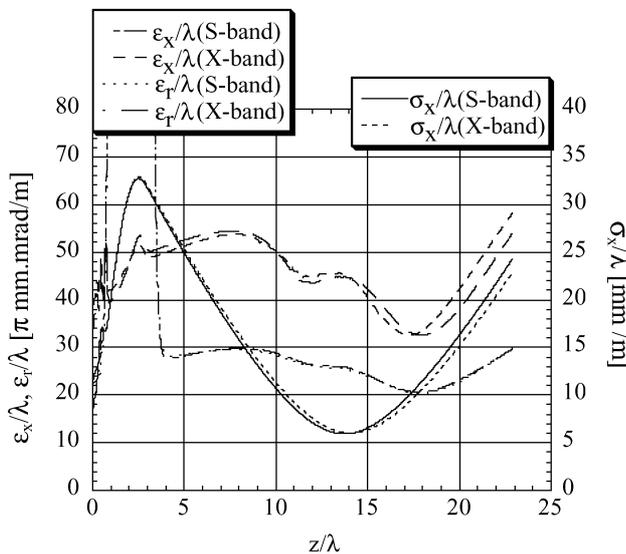


図 3 : 波長に関するスケール則

## 2.2 X バンド 3.5 セル RF ガン

実際に使用するために最大電場を 140 MV/m にした。この値でいくつかの研究所では S バンド RF ガンを運転している。1.5 セルにこの値を適用しようとすると、電子は 1 MeV にも達せず空間電荷効果の影響を大きく受け、電子銃として役に立たない。もう少し高いエネルギーを得るために、そこに 2 セルを加え 3.5 セルの RF ガンを設計した。

図 4 にキャビティ形状と SUPERFISH による電磁場解析の結果を示す。πモードで全てのセルに大体均等な強さの RF が立っている。このガンからは 240pC, 2.1 MeV, 8π mm.mrad のビームを得ることができた。エミッタンス補正用ソレノイド磁石を入れたときのエミッタンスの変化の様子を図 5 に示す。エミッタンスはソレノイド磁場がないときの方が低いことがわかる。また、ガンを出た後もパルス幅がどんだのびていってしまう(図 6)。これらはビームのエネルギー広がりが 8% と大きいために起こる。パルス幅が伸びないうちに早く加速管に入れたいので、ソレノイド磁石ははずし、加速管をなるべくガンの近くに配置するようにした。

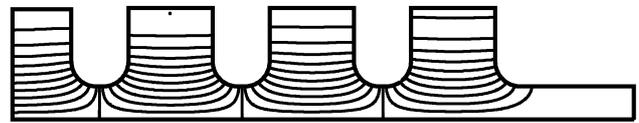


図 4 : 3.5 セルキャビティ形状

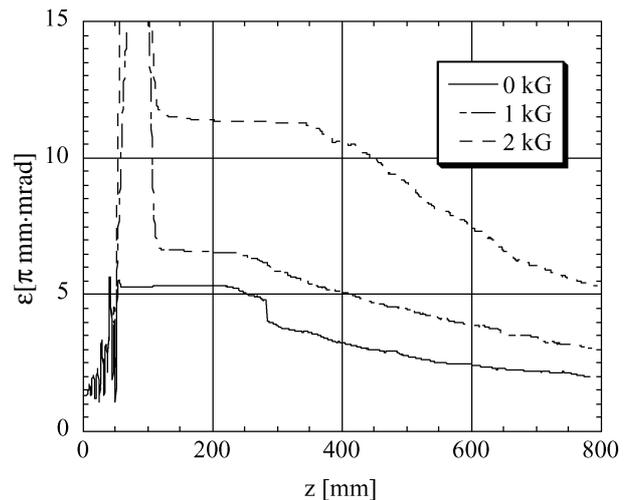


図 5 : ソレノイド磁場の影響

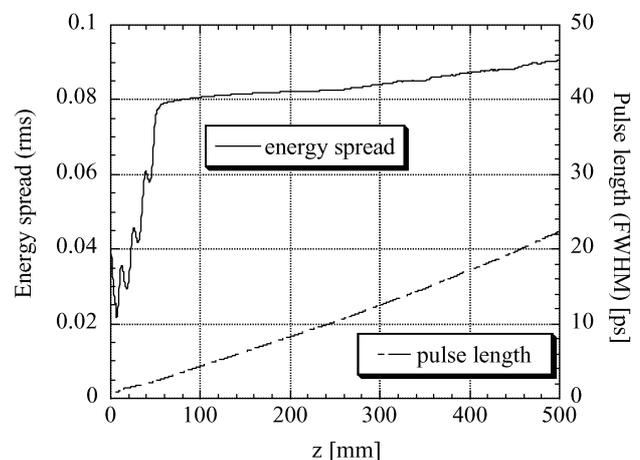


図 6 : パルス長の広がり

## 2.3 X バンド加速管

X バンド加速管は単純にディスク型とし、また 2 つに分けて一段目にはソレノイドを付加した。ここでは最大電場を 60 MV/m とする。加速された電子ビームはアクロマティックに曲げられて、最終的には 240 pC, 47.3 MeV, 8.5  $\pi$  mm.mrad, 4.2ps(FWHM)の電子ビームを得ることができた。正確なエネルギーは設計がもう少し進んで空でよいので、ここでは 50 MeV 程度であればどのような値でもかまわない。

## 3. 逆コンプトン散乱 X 線

### 3.1 逆コンプトン散乱

逆コンプトン散乱により発生する X 線のフラックスは次の単純な式<sup>[2]</sup>から見積もった。

$$F = 8.4 \cdot 10^{16} \cdot f \cdot \left( \frac{L}{Z_R} \right) \cdot I_b \cdot P_0 \cdot \left( \frac{\Delta\omega}{\omega} \right) \quad (3)$$

$F$ [photons/s]は一秒間この反応場と電流が保持された場合に発生する X 線のフラックスである。 $f$ はレーザーと電子ビームの衝突点での断面積の比であり、レーザーの断面積より電子ビームの方が小さくなると場合は 1 となる。つまり反応場に入っている電子ビームの割合である。 $Z_R$ はレイリー長で、 $L$ は反応長である。ここでは反応する範囲を 2  $Z_R$ に限定しているため、反応はその範囲かレーザーパルスの半分の長さかのどちらか短い範囲でしか起こらないためにある因子である。 $I_b$ [A]はビーム電流、 $P_0$ [GW]はレーザーピーク強度である。この式から、高フラックスを狙うためには電子ビームを小さく絞れること、電荷量が多いこと、レーザーのパルス幅はレイリー長の 4 倍程度の範囲内でエネルギーが高いことが求められることが分かる。

### 3.2 レーザーの選択

使用するレーザーはスーパーキャビティ、高強度短パルスレーザーを検討している。

用いたキャビティのことで、強度を  $10^3$ - $10^6$  に増幅でスーパーキャビティとは、反射率の高いミラーをきるものを高エネルギー加速器研究機構の浦河助教教授が開発を進めている。これを用いると定常的にレーザー場を保持できるため、何度も電子が通過する場合に好ましい。しかし、そのレーザーのエネルギー密度が低いため、ワンスルーのライナックでは高フラックスは期待できない。実際、100 MW.7ns のパルスを仮定して PARMELA による結果とあわせて式 (3)に入れると、 $1.3 \times 10^5$  photon/shot しか得られない。

高強度短パルスレーザーは逆にエネルギー密度は高いが、繰り返し 10pps 程度でしか運転できない

めパルストレインに対しては無力である。1 ショットだけならば、12TW.50fs のレーザーで  $2.0 \times 10^6$  photons/shot とスーパーキャビティよりも一桁大きい。

### 3.3 電子ビームのマルチバンチ化

フラックスを増加させるための方策としては、電荷量を増やすことが考えられる。しかし、1バンチ当たりの電荷量は限界に近い。そのため、超高速反応ではなく、ミリ秒程度の現象や積算量でいい場合には、電子ビームをマルチバンチ化することでフラックスを増やすことを考えている。これは RF ガンに入射するレーザーをマルチパルス化することで、RF のマクロパルス中に電子ビームのパルストレインを作り出すものである。現在検討中である。

### 3.4 高量子効率陰極の開発

電子ビームをマルチバンチ化するためには、レーザーをマルチパルス化する必要がある。そのときに陰極の量子効率(QE)が低いとレーザー側に負担がかかる。マルチパルスレーザーの発生を容易にするためには高量子効率の陰極が必要である。

現在の主流は Cu カソードであり、その QE は  $10^4$  である。次期候補としては Mg(QE  $10^3$ )が有力である。それより高いものとして半導体カソードが取り上げられてきた(CsTe  $10^2$ )が、超高真空が必要なために取り扱いが難しいとされてきた。ところが、ダイヤモンドを使用すると酸化に強いので取り扱いが容易になる。QE も 50%と非常に優れている。問題を挙げるとすれば、そのエネルギーギャップが 5.5eV と比較的高いことであろう。また、更なる工夫として後ろからレーザーを当てる透過型のカソードにすることができれば、小さな X バンド RF ガンでもレーザーの入射に頭を悩ませることがなくなり、垂直入射で高い QE を期待できる。

## 4. まとめ

小型硬 X 線発生装置について数値的に設計を行った。X バンド RF ガンは 1.5 セルでは加速が足りず、マルチセルが必要であることが分かった。3.5セルのガンはエネルギー広がり大きいので、加速管に早く入れた方がよいことが分かった。

今後高フラックスを得るために、電子ビームのマルチパルス化、高 QE カソードの開発が必要である。

## 参考文献

- [1] J. Rosenzweig et al., in *Advanced Accelerator Concepts*, AIP Conf. Proc **335** 724 (1995)
- [2] E. Esarey et al., *Phys. Rev. E* **48** 3003 (1993)