

## 論文内容の要旨

論文題目 X-band RF Gun and RF System for Compact Compton Scattering Hard X-ray Source  
(小型コンプトン散乱硬 X 線源用 X バンド電子銃・RF システム)

氏名 深澤 篤

### 1. はじめに

単色の硬 X 線を用いることで硬 X 線利用の高度化が期待できるが、それらが実質的に利用できるのは大規模な放射光リングのみである。利用の促進をとくに医療分野での応用を図るため、病院に設置できる程度の大きさの小型硬 X 線源を開発している。コンプトン散乱を利用することで 50MeV 程度の電子ビームと波長  $1\mu\text{m}$  レーザーで数十 keV の硬 X 線の生成が可能となる。

東京大学原子力専攻では小型コンプトン散乱硬 X 線源を開発している。加速器は入射部、加速部、衝突点へのビーム輸送部からなる(図 1)。入射部は X バンド(11.424GHz)の熱カソード 3.5 セル RF 電子銃とアルファ磁石で構成される。加速は X バンドの進行波型加速管で行われている。

本研究では、この小型コンプトン散乱硬 X 線源に関して X バンドの熱カソード RF ガンと 磁石から成る入射部のバンチ長圧縮に着目した最適化を行う。また、RF システムに関してビームローディングを考慮した検討と RF システムのエージングを通した RF システムの問題点の整理、エージング手法の検討を行う。そして新たに次世代加速器の候補として低ノイズ放射線型加速器として低エネルギー型熱カソード RF 電子銃の設計と電子ビームを廃棄する前に減速過程を導入するためビーム輸送系の設計を行う。

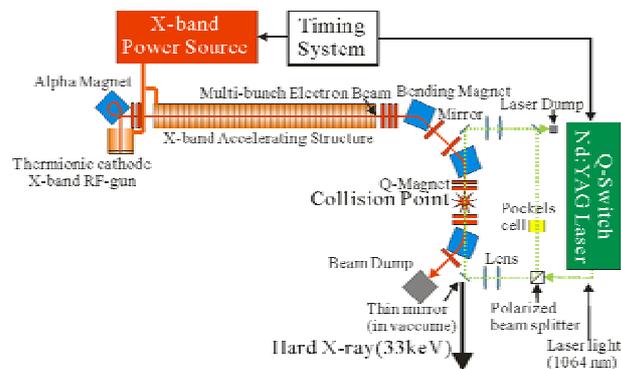


図 1. 東京大学で開発中の小型硬 X 線源

### 2. 熱カソード X バンド RF 電子銃

質のいいビーム源として RF 電子銃がある。電子の発生方法で熱電子を利用する熱カソードと光電子を利用する光カソードに分けられる。熱カソード RF 電子銃は S バンド(2856GHz)を利用したものは利用されており、X バンドの RF 電子銃としては SLAC で光カソード RF 電子銃が研究されているが、X バンドの熱カソード RF 電子銃は世界で初めてである。

X バンド加速器として従来の加速器よりも難易度が高いことには、加速ビームのバンチ長に求められる条件の厳しさがあげられる。これは加速器中で生じるエネルギー広がりがバンチ長の 2

乗に比例するため、従来の S バンドよりも 1/16 にしなければならないことがわかる。我々はコンプトン散乱のために電子ビームにエネルギー広がり 1% 以下という目標を立てており、これを満たすように加速器を設計してする。

電子銃からのビームはエネルギー幅、バンチ長ともに広く X バンド加速器で加速するためにはバンチ圧縮が必ず必要である。バンチ圧縮をするためにアルファ磁石を用い、またそこで必要ない低エネルギー成分を除去する。最適化は熱カソード RF 電子銃の部分は計算コード PARMELA を用いて求め、その結果をもとに転送行列を利用して最適化を行った。最適化の計算を行った結果、現在の体系では電子銃のカソード電場が 90MV/m のときにバンチ圧縮が可能で、0.72ps までのバンチ圧縮が確認できた(図 2)。このときの電子ビームのエネルギーは 1.7MeV でエネルギー広がり 3% であった。より高いエネルギーのビームを圧縮するためにはアルファ磁石でより強力な磁場勾配が必要であり、あるいはドリフトスペースの延長が必要であることが判明した。より低いエネルギーのビームは逆に弱い磁場のため、ビーム軌道が大きくなるのでより大きなアルファ磁石が必要である。だが、3.5 セルのこの設計ではエネルギーの低いビームは電荷量が少なく、エミッタンスも悪化するため、別に新たな設計が必要である。

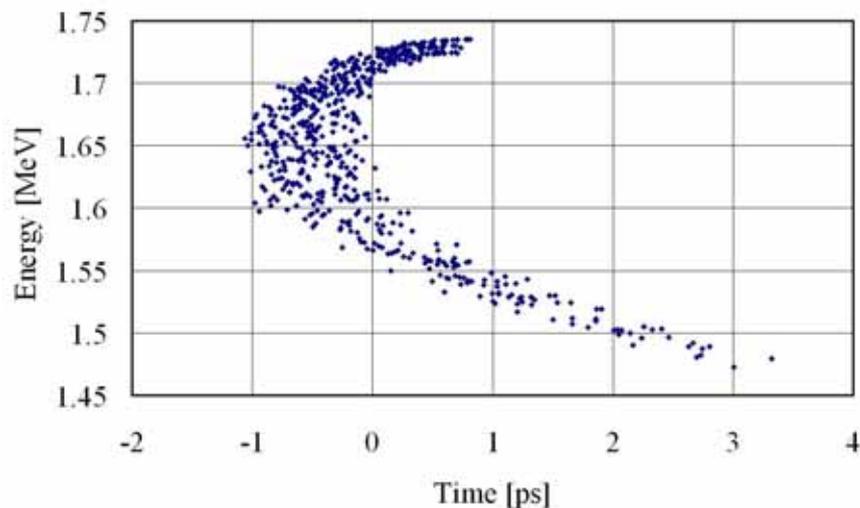


図 2 . 磁石後のバンチ圧縮

### 3 . X バンド RF システム

小型コンプトン散乱硬 X 線源の RF システムは一つのクライストロンで RF 電子銃および主要加速管を同時に駆動するシステムであるため、独立にはそれぞれ投入 RF パワーを制御することはできない。そのため、あらかじめ影響を考慮した設計をする必要がある。加速に影響を与えるものとしてビームローディングに関して計算を行い、その影響を評価した。

RF 電子銃ではその影響は小さかったが、主要加速管では 1 割ほどの加速エネルギーの低下が見積もられた。この減少分を補う RF パワーを考慮した設計が必要であることがわかった。また、初期のエネルギーが高くなる部分への対処としては、エネルギー回収型ライナックに見られる減速位相へのビームの再投入があげられるが、現在のシステムでは難しい。

東京大学原子力専攻では医療用加速器実証試験の準備が進められている。クライストロンを所定のパワーで動作させるにはエージングが必要であり、その運転に参加した。X バンドの加速器としてのシステムはそれほど成熟しておらず、ここでの RF エージング中に起きた問題点を整理し、後のシステムの構築に役立たせる。

充電電源の故障が何度かあり、高圧システムの難しさを実感させた。ダミーロードの保管状況が悪く錆びつかせてしまい、化学洗浄までしたが結局放電は収まらず、新たに実績のあるものを KEK より借用することとなった。RF 電子銃のエージング時に放電が止まらず、一週間以上エージングが進行しないことがあった。これは様々な原因を疑ったが、パルス幅を極短くすることでエージングが進むようになったことから、エージング手法にも問題点があったことが分かった。

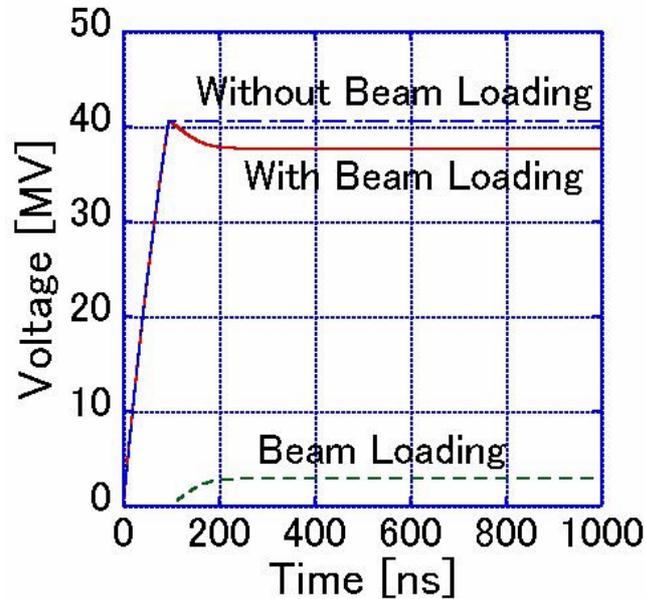


図3．加速管におけるビームローディングの影響

#### 4．低ノイズ放射線加速器設計

放射線の遮蔽を考えると、放射線はエネルギーの 3 乗にほぼ比例するので、ビーム除去時のエネルギーはなるべく低いほうが望ましい。アルファ磁石における低エネルギー成分除去時とコンプトン散乱後のビームダンプ時が考えられ、それぞれのビームエネルギーを下げるために、低エネルギー型熱アソード RF 電子銃と減速システムの導入を提案する。低ノイズ放射線加速器を図 4 に示す。加速・減速は一本の低在波型加速管で行われる。電磁場計算には POISSON/SUPERFISH、ビームの運動解析は PARMELA、ビーム輸送計算には GRAPHIC TRANSPORT を用いた。

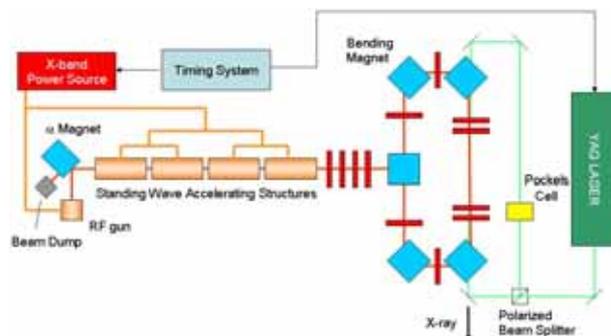


図4．低ノイズ放射線硬 X 線源

アルファ磁石でビームを排除したときの 1.5 セル 0.9 MeV の RF ガンを設計した。3.5 セルの減速システムの場合と同様の入射系を考え、バンチ圧縮の最適化条件の下計算を行った結果、エネルギー

ギ- $0.92\text{MeV} \pm 1\%$ 、バンチ長  $1.2\text{ps}$  であり、加速後見積もられるエネルギー広がり  $0.7\%$  と十分に加速の条件を満たすビームの生成が可能であることが分かった。また、電荷量  $20\text{pC}$ 、規格化エミッタンス  $x, y$  がそれぞれ  $8.4, 16.3 \pi\text{mm.mrad}$  となりビームの質も現システムと比べても見劣りしない。

減速システムはビーム輸送系が短くなることから、低在波型加速管を用いた対向型減速システムを選択した。エネルギー差により設計軌道からのずれが生じるため、横方向および進行方向の色分散を消すようにラティスを設計する。

図5は設計された磁石配置とビームのエンベロープの振る舞いを表している。磁石配置は衝突点で対称として、設計は衝突点を始点として開始し、最終的に加速管のビームに適合するように設計を行っている。大きさは  $1.5 \times 2.0 \text{ m}$  程になり、小型化をもう一段階進める必要がある。

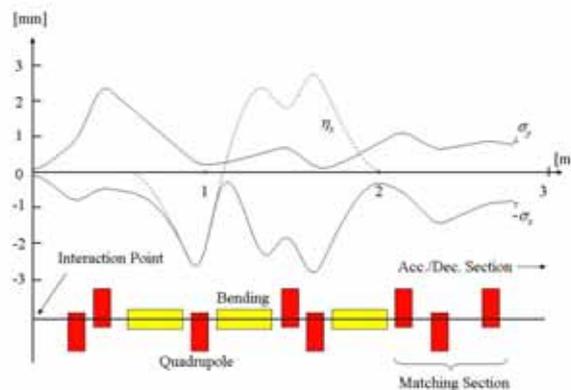


図5 . ビーム輸送

PARMELA により計算した結果、イソクロナスは達成されていないことが分かった。これは偏向磁石のフリンジ場による2次の効果によるもので、この問題を解決するためにはビームサイズを小さいまま発散角を押さえつけて輸送しなければならず、これは輸送系の小型化と相反するためいまだ有効な減速システムを提示できてはいない。

イソクロナスは完全ではないが、減速の計算も試みた。減速ビームは加速ビームと軌道が重なるように再入射時にビームサイズと発散角をそれぞれ合わせたので、ほとんど同じエンベロープになっている。そのため、減速中にビームロスはない。最終的にビームは平均  $4.6\text{MeV}$  にまで減速させられることが計算された(図6)。

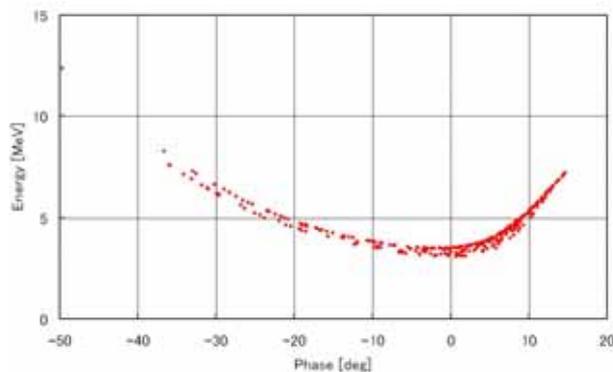


図6 . 減速後のビームのエネルギー分布

## 5 . 結論

東京大学原子力専攻において小型コンプトン散乱硬 X 線源の開発が進んでいる。世界で初めてとなる 3.5 セル熱カソード RF ガンについて解析を行った。磁石におけるバンチングとドリフトスペースにおけるバンチングを考慮することで、1.7MeV のバンチで最適なバンチ圧縮を得られることを示した。

ビームローディングの計算を行い、現システムでは対応の難しいノイズ源となりうるエネルギーの高いビームが発生することを示し、これに対処するためには減速位相へのビームの投入が考えられることを述べた。また、エージングにおいて数々の問題点を整理し、システムの完成度を上げるための貢献をした。

ノイズ放射線を減らすと言う新たな概念の元、低ノイズ放射線加速器について設計を行った。アルファ磁石内でのノイズ放射線を減らす 0.9MeV の RF ガンについてキャビティの設計し、アルファ磁石でのバンチングについて計算を行い、現システムと同等の品質のビームが得られることを示した。一つの低在波型加速管で加速と減速を同時に行うシステムを設計し、47 MeV までの加速と 4.6 MeV までの減速を確認した。これにより、放射線のパワーは 0.1%、遮蔽の厚さは 39 % に削減できることが分かり、減速機構の有効性を示した。また、完全なイソクロナスなシステムを構築するためには 2 次の効果を考慮し、ビームのサイズと発散角を低く抑えてビーム輸送する必要があることを示した。