

審査の結果の要旨

氏名：深澤 篤

論文は東京大学原子力専攻で開発中の小型コンプトン散乱硬 X 線源に関するものである。この装置に用いられる電子線形加速器の入射部のパラメータに関する最適化、加速に利用される X バンド RF システムの条件と立ち上げ時の問題点の整理、そして次世代の低ノイズ型加速器のための低エネルギー型熱カソード RF 電子銃、減速機構のためのビーム輸送系の設計に関して検討がなされている。

第一章は論文ではまず始めに小型コンプトン散乱硬 X 線源に関して説明されている。単色硬 X 線を利用することで既存のレントゲン写真のような像よりも鮮明な像を取得できることや、2つの異なるエネルギーの硬 X 線を用いることで有効原子番号等元素の情報まで取得できるが、その利用が放射光施設に限られている現状を改善するため、この装置の開発が行われているとされている。X バンド(11.424GHz)50MeV 電子線形加速器と Q スイッチレーザーで構成されるこの装置は加速器を用いた硬 X 線源としては小型と言え、硬 X 線のスペクトルも空間分布こそあれ微小範囲では単色と言える。このシステムの構築にあたり、本論文は熱カソード RF 電子銃の入射部の最適化、および RF システムの問題点の検討、さらに次世代の低ノイズ型加速器の設計までを研究の範囲としている。

第二章では X バンド加速器ではエネルギー広がりを抑えるためにバンチ長を従来の S バンド(2856MHz)の加速器と比べ 1/16 にしなければならないことを示し、バンチ圧縮の重要性を述べている。それに対して熱カソード RF 電子銃のビームはエネルギー広がりもバンチ長も大きいことを上げ、バンチ圧縮が必要であるとしてその最適化の意義を示している。バンチ圧縮はアルファ磁石を用いるシステムで行われ、そこで発生するバンチ長への影響とドリフトスペースでの影響をエネルギー広がりに対して一次の近似式を用いて最小化している。この手法はバンチ圧縮の設計としては一般的であり、疑問の余地はない。電子銃でのビームの運動はシミュレーションコード PARMELA を用いて計算して、電子銃出口でのビームの性質を数値化し、この数値を元に最適化は行われている。最適化の確認は同コードを用いてされている。結果として現システムでは磁場強度の限界、およびアルファ磁石の領域の制限から電子ビームが条件を満足する圧縮を受けるのは、カソード電界が 90MV/m のときであることが示された。ビームは 0.72ps まで圧縮され加速後に 0.4% のエネルギー広がりとなることが見積もられ、条件を満たすバンチ圧縮が可能であることを示した。

第三章において、RF システムは一つの RF 源で電子銃と加速管の二つを同時に駆動するため、それぞれに投入する RF を独立に変更できないことを示し、あらかじめ RF 電子銃と加速管の関係を厳密に求めておくことの重要性を示した。特にビームローディングと呼ばれるビームの加速エネルギーを低下させる現象は電子銃と加速管では影響の大きさが異なるため、それに関する計算がなされている。結論として、加速管でのビームローディングが大きく、特にパルスの先頭におけるビームローディングを受ける前のビームが一割ほどエネルギーにおいて高くなってしまい、強い放射線ノイズ源となりうることを示されている。これに対する対策としては、現システムのままでは難しいことが示され、可能性のある改善策としては減速位相にビームを再投入してビームローディングの効果を打ち消すことを提案している。エネルギー回収型ライナックに用いられている手法であり、可能な解決策と言え、次に示される減速機構そのものでもある。また、実際の X バンド RF システムのエージングについても触れている。X バンドクライストロンのビームエージング、RF エージング、および熱カソード RF 電子銃のエージング過程で起こった機器の故障、ダミーロードの保管不良による錆つき等の問題点や、エージングの進みが停止したときに極短パルスにすることでエージング進行が再開するなどのエージング手法の知見が整理されており、

今後のシステムの運用に関して非常に重要な知見が述べられている。

第四章ではさらに装置の軽量化を図り、遮蔽を減らすためにビームをダンプする部分での低エネルギー化を行う低ノイズ型加速器の設計を論じている。これはバックグラウンドのノイズ放射線を低減することにもつながり、X線の測定環境も期待できるため、画期的な発想である。低エネルギー化は2箇所で行われ、一つはアルファ磁石でのビーム除去時のエネルギーを下げるための低エネルギー型熱カソードRF電子銃であり、もう一つはコンプトン散乱後の電子ビームを減速するシステムとしている。低エネルギー型熱カソードRF電子銃は現在のシステムの3.5セルのRF電子銃への投入RFパワーを下げるだけでは達成できないことが示され、新たにセル数を1.5セルに減らしたRF電子銃が設計されている。この電子銃を用いた入射部の設計が行われ、現システムに劣らぬ質のビームの供給が可能であることが示された。減速システムは加速管を加速と減速で使い分ける分離型、加速と減速するビームを同じ方向に入れる循環型、反対方向に進ませる対向型との三つの方式が示されている。分離型ではコストが倍になり、循環型ではビーム輸送系が多少大掛かりになることが示され、我々の目的では対向型が最も適していることを説明している。設計のポイントはビーム輸送系にあり、イソクロナスのシステムの構築が必要であることが述べられている。また、医療応用等を考慮し、X線照射方向の輸送系のアークの幅を最小化することも必要とある。設計はGRAPHIC TRANSPORTという転送行列を計算するコードを用いて行われており、これにより三個の偏向磁石を用いたイソクロナスなシステムが設計されている。これをPARMELAで確認したところイソクロナスは達成されていないことが示された。この原因としては偏向磁石における二次の効果の影響が示され、ビームサイズや発散角を小さくしたままの輸送が求められることが示された。これはビーム輸送系の小型化とは相反しており、さらに有効な設計を示すことはなされていない。しかしながら、ここで設計されたシステムを用いても、47.4 MeVから4.6MeVまでの減速は確認しており、減速システムとしては十分機能していると言える。

以上のように本論分は既存のシステムの入射部の最適化、RFシステムの考察から始まり、それらから得た知見をもとに次世代の低ノイズ型加速器の設計を行った。最適化の手法は堅実なものであり、RFシステムの考察は今後のXバンドシステムのために必要不可欠なものである。また低ノイズ型加速器の概念は非常に独創的であり、加速器の発展方向として新たな道筋を示すものであり、非常に価値の高いものとなっている。また、システム量子工学の発展に寄与するところが大きいと判断される。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。