

論文の内容の要旨

論文題目 産業・医療用 X バンドライナックの実証研究

氏 名 夏井 拓也

高周波電子ビーム加速の分野ではリニアコライダーなどの研究分野で X バンド周波数帯の加速器開発がなされてきた。X バンド周波数帯は従来よく用いられてきた S バンド周波数帯の 1/4 波長の高周波であり、S バンドに比べて加速効率がよく波長が短いため高周波機器が小さくなるという利点がある。

近年、この X バンド周波数帯を産業用のライナックにも利用する動きが活発になってきている。上坂研究室でも医療用コンプトン散乱 X 線源や非破壊検査用ライナックに X バンド高周波加速を応用する研究を進めている。私の研究テーマはこの X バンド高周波加速を用いて効率よく大電流ビーム加速を実現させることである。

非破壊検査用 950 keV ライナックは可搬型にまでシステムを小さくすることを目標とするため、低電力の高周波パワーでいかに安定に大電流加速を実現させるかが重要となる。また、コンプトン散乱 X 線源ライナックシステムは将来的に病院で使用できる装置を目指している。そのため、一部屋に収まる装置サイズで準単色の X 線発生を可能にするビームが求められる。そのためにも小型で高効率安定な高周波加速システムを開発しなければならない。

このように、X バンドを用いた高周波ビーム加速には応用上大きなメリットがある。しかしながら、それを実現するためには多くの課題があり、本研究ではそれらを克服し X バンド高周波加速に必要な技術を構築していく。

950 keV ライナックにおいてはビーム電流量が $2.5 \mu\text{sec}$ のパルス内で振動することが問題になっていた。このビーム振動の原因は、さまざまな実験と考察から加速管そのものの特性であることが分かった。加速管の特性の問題点はシミュレーションでは計算できない過渡的な現象に起因していることになる。また、ビームを少なくすると振動現象がなくなることから、ビームと高周波の相互作用によりこの現象が引き起こされることが予想された。しかし、ビーム試験の段階でははっきりした原因の特定にはいたらなかった。

そこで、ビームと高周波の相互作用を時間領域で計算できる方法のシミュレーションが必要となった。このような現象を計算できる方法として PIC(Particle In Cell)法があるが、今回の現象には適用できないと結論付けた。なぜなら、PIC 法で計算できる時間スケールは高周波の周期で数周期分ほどの時間で、今回のように 1000 周期以上の計算では時間的にも難しい。さらに、加速管のように Q 値が高い共振空洞の連成振動体においては、個々の空洞のわずかな周波数差であっても性能に大きく影響が出る。そのようなものを PIC で計

算しても長時間計算では誤差が蓄積されて正確な結果を出すことは非常に難しい。

そこで、時間的、精度的に今回の現象に適している方法として等価回路計算を応用することにした。等価回路計算とは加速管を考えると、電磁場を直接解くのではなく、共振空洞連性振動体としての加速管特性を電気回路に置き換える、という方法である。この方法では、各空洞の共振周波数、結合係数、 Q 値などが直接設定できるため、加速管特性を決定付けるこれらの数値に誤差が入ることがない。そのため長時間計算でも正確に加速管の特性を再現できる。また、計算速度も非常に速い。この方法にビーム加速計算を繰り返すことで今回の現象をシミュレーションできる。

このような方法を採用し、プログラミング言語 C++を用いてコーディングを行った。実際に、950 keV ライナックのパラメータを入力し、実験の状況を再現した結果、シミュレーション上もビーム電流量振動が起こった。ビーム振動の周波数は計算では 13.3 MHz、実験では 9.4 MHz であり、ビーム振動現象を定性的に再現することができた。また、ビーム電流を小さくすると振動現象が起こらないという点も一致した。計算結果から、ビーム振動はビームローディングに起因し、加速管の中のわずかな電磁場の変化がビーム加速に影響し、加速管内の高周波ストアドエナジーが大きく揺れ動くということが分かった。

計算の結果、やはり加速管の構造自体に問題があり、加速管中の高周波の状態にビーム加速が強く影響してしまう構造であることがビーム振動という問題を引き起こしてしまったと結論付けられる。

950 keV ライナック 1号機は上記のような問題を抱えているので、それを克服した 2号機を設計した。1号機の大きな問題は、電子ビームのエネルギーによって大きく速度が変化する 1 MeV 以下の領域において非常に多くの空洞を使い長い距離をかけて加速を行うため、加速位相からビームが容易に移動してしまうということが上げられる。これを改善するためには、高い電場をかけ、短い距離で加速を行い、特に速度が変化しやすい低エネルギー領域を早く抜け出すために前半の加速空洞の電場を高くする設計が必要になる。そこで、加速効率が高く電場分布を比較的自由に設計できるサイドカップル空洞を採用した。

設計は、まず加速空洞の 2次元計算を行うことで基本特性を理解し、加速に必要な電磁場分布を決定した。この分布を実現するための結合係数を求め、それにあった結合空洞を設計するために 3次元計算で空洞を設計した。3次元での電磁場計算は MW-studio を用いた。設計した空洞でのビーム加速シミュレーションを GPT で行い、950 keV、90 mA の加速ビームが得られることが分かった。また、等価回路モデルによる計算も行い、1号機のような振動問題が起こらないことも確かめた。このように 1号機の問題を解消した 2号機の設計を完了できた。

コンプトン散乱 X線源用 Xバンドライナックシステムは、医療用の単色 X線撮影用として東大上坂研究室で開発が進められてきた。コンプトン散乱 X線とは、高エネルギー電子と光子が散乱を起こし、光子がエネルギーを与えられ X線領域の光子に変化する現象である。我々の装置は Xバンド熱陰極高周波電子銃で電子ビームを発生させ、そのビームを X

バンド進行波形 $2\pi/3$ モード加速管で 30 MeV まで加速する装置である。その高エネルギー電子ビームとレーザーパルスを衝突させることでコンプトン散乱を起こし X 線を発生させる。レーザーは Nd:YAG レーザの 2 倍高調波 532 nm を使用する。H20 年度に高周波電子銃を一新してからは、ビーム発生での問題が解消してビーム輸送試験に移ることができた。

本研究では、ビームラインのさまざまな不具合を解決しビームライン最終まで、27 MeV の高エネルギー電子ビームを輸送することに成功している。また、電子源である RF 電子銃からの電子ビームエネルギー測定も行った。電子銃への入力高周波電力が 3.5 MW のときビームエネルギーは 2.4 MeV を最大値として 0.15 MeV ほどのエネルギー幅であることが分かった。

電子ビーム、レーザー光衝突実験は、レーザーサーキュレーションを使った複数回の衝突は行わず、電子ビームマクロパルスあたり 1 回のみの衝突を行った。これは、電子ビームマクロパルスもレーザーパルスもどちらも 10 nsec 程のパルス幅であることを考慮すると適した方法である。発生した X 線は NaI シンチレータと光電子増倍管(Photomultiplier Tube; PMT) で検出する。

しかし、現在コンプトン散乱由来の X 線は観測できていない。これはノイズ X 線が大きく、しかもノイズ量がショットごとに揺らぐため、バックグラウンドレベルを決められないからである。このノイズの原因は制動放射 X 線の 2 次 X 線であると予想される。ただし、今の問題はその絶対量ではなく、ショットごとの不安定な揺らぎである。この原因について調べた結果、クライストロンモジュレータの HV 電源の充電電圧の揺らぎに起因していることを突き止めた。充電電圧の揺らぎは、仕様上は $\pm 0.1\%$ となっているが、現在 $\pm 0.3\%$ の揺らぎが観測されている。この小さな電圧の揺らぎが RF パワー、ビーム電流量には大きな影響となり、ノイズ X 線の除去を困難にしている。

950 keV ライナックでは X バンドを使うことで小さな空間で大電流を加速することを目指したが、そのためにビーム振動という問題が発生した。その原因を解明するために新しく等価回路モデルとビーム加速を組み合わせた計算コードを開発した。その結果、ビーム振動現象を定性的に再現し、振動の原因もビームエネルギーと加速管の特性が定常状態を消失させていると結論付けられた。また、2号機設計においてはサイドカップル空洞を採用して問題が起こらないような加速管を設計できた。

コンプトン散乱 X 線源システムにおいては、ビームとレーザーの衝突実験を実現させ、新たな問題を発見することができた。現在は X 線発生に至っていないが、クライストロンモジュレータの充電電圧の揺らぎを解決出来ればコンプトン散乱による X 線を観測できると結論づけられる。