

氏名 上 富 勇

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大乙第1号

学位授与の日付 平成5年9月30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位論文題目 電子線型加速器のビーム負荷特性とビーム不安定性に
関する研究

論文審査委員 主査教授 佐藤 勇

教授 高田 耕治

教授 小早川 久

助教授 小林 仁

教授 高崎 榮一

（高エネルギー物理学研究所）

論文内容の要旨

本論文は、筆者が約20年間三菱電機(株)で電子ライナックの開発、設計、試験に従事し、取得した知識と技術、及び1991年から約2年間高エネルギー物理学研究所の受託研究員として学んだ最新のライナック技術が基礎になっている。

大電流、大出力の照射用などの中小型ライナックを設計する際に、解決しなければならない加速管の研究開発課題を中心に、筆者独自の発想と考え方を多く織り込んで纏めあげた研究成果である。

一つは、加速管のビーム負荷特性に関する研究で、従来の定インピーダンス型と定電界型加速管を包含する形でビーム負荷特性理論を確立し、実用的に便利な解析解を得たこと及び過渡特性やビーム負荷効果を考慮した加速管冷却系の実用的な設計理論を確立したことである。

もう一つは、ビーム不安定性に関する研究で、HEM₁₁進行波電磁界理論からbeam blowup開始電流を計算する方法と多重反射理論で重畳したdipole transverse wake potentialを用いてビームの偏向軌道解析を行い、beam blowup開始電流を判定する方法を確立したことである。

I章では、ライナックの発展の歴史と最も大きな関心事であったビーム不安定性の問題、即ちbeam blowup対策の時代的な流れについて言及すると共に、筆者が携わったライナックの研究開発についても言及した。

II章では、従来の定インピーダンス型加速管と定電界型加速管のビーム負荷特性理論を完全に包含する形で、新しいビーム負荷特性理論(拡張理論)を構築することに成功した。

導入したビーム負荷パラメータ α は、加速管軸に沿ってのディスク孔径の変化を表すパラメータである。 $\alpha = 0$ は従来の定インピーダンス型加速管に、 $\alpha = 2$ は従来の定電界型加速管に相当する。

$\alpha > 2$ の場合は、従来の定電界型加速管より軸に沿ってのディスク孔径の変化が大きく、従って軸に沿っての電界強度の減少が改善された加速管で、特に拡張型加速管と名付ける。

拡張理論では、ディスク孔の半径の変化を実用上自由に変えて加速管の設計が出来るため、従来より一層融通性に富む加速管の最適化設計が可能となる。

III章では、加速管の拡張理論を過渡ビーム負荷特性領域まで拡張することに成功した。過渡領域のエネルギースペクトルなどの特性を自由に計算出来る実用的な解析解を提供する。

過渡ビーム負荷特性理論の応用例として二つのテーマを取り上げた。

一つは、加速管の軸に沿って過渡領域を含めて、損失を正確に計算出来る新しい損失理論で、ビーム負荷が大きく変わる大電流用加速管の冷却系設計に役立つ。

もう一つは、過渡領域のエネルギースペクトルを改善する方法で、従来の一本の加速管で行う方法を拡張して、複数本の加速管からなるライナックで、ビームと加速管毎のマイクロ波の時間位相をシステマティックに設定する方法である。

エネルギースペクトルの良いビームが得られる上、ビームトランスポート系のアクセプタンスも小さく出来ると言う実用的なメリットがある。

エネルギースペクトルの良いビームを得るためには、加速管の軸に沿っての温度変化を出来るだけ小さくすることが望ましい。

IV章では、ビーム負荷効果と過渡特性を考慮した加速管の損失が、軸に沿ってほぼ直線的に変化することに着目して、加速管の実用的な新しい冷却理論を確立した。

この結果から、加速管に二系統の冷却経路を作り、ビーム負荷に応じて、冷却水の流量や流す方向を木目細かく設定すると、いつもほぼ一様な軸方向の温度分布が得られる。この結果、加速管温度に対して動作点毎に最適化されたエネルギースペクトルが得られる。

大きなビーム電流になると、beam blowup現象が起り、ビームが不安定になる。ライナック設計に際して、beam blowup開始電流を予測する研究を以下の章で行った。

V章では、加速管内に出来るHEM₁₁進行波電磁界理論からbeam blowup開始電流を計算する理論を構築し、P. B. Wilsonの後進波発振理論(BWO理論)と類似の結論を導く事が出来た。

三菱電機中央研究所のML-2型ライナック(5MeV, 500mA)で測定したbeam blowup開始電流とこのHEM₁₁理論で計算した値とは良く合っている。

この理論は群速度を必要としない便利さを含めて、小型ライナック設計の際、beam blowup開始電流を予測するのに役立つ実用的な理論である。

VI章以降は、加速管内のdipole transverse wakefieldを評価する方法を構築し、macro-particle modelに基づくビームの横方向の運動方程式を用いて、バンチ毎の微細偏向軌道を求め、導入した偏向衝突距離と出口偏向量を判定基準にして、beam blowup開始電流値を予測出来るようにしたことである。この理論はemittance growthの評価にも威力を発揮する。

まず、VI章では、定インピーダンス型加速管内の加速管の両端に反射係数の考え方を導入し、dipole transverse wake potentialを評価する多重反射理論を構築し、こうして得られたwake potentialを用いてビームの偏向軌道解析を行ない、beam blowup開始電流の判定を行った。

ML-2型ライナックの加速管に対して、wake potential、入射ビームの偏向量と発散角、ベータatron波数、反射係数等をパラメータにして、ビーム偏向軌道解析を行い、beam blowupの成長過程を考察した。SLACデータからscalingしたwake potentialを使って求めたbeam blowup開始電流は、実測データと良く合うことが分かった。

最後に、VII章では、定電界型加速管の作用領域内のwake potentialを評価することが出来るdephasing理論を構築し、多重反射理論を用いて重畳したwake potentialを用いて、ビーム偏向軌道解析を行ない、beam blowup開始電流を判定する方法を確立した。

この理論は異なる偏向波共鳴周波数を有する定インピーダンス型加速管を2本以上使用したライナックにも適用出来る。

従って、大電流を加速するライナックを設計する際に、従来のBWO理論に加えて、V章のHEM₁₁理論とVI及びVII章のビーム偏向軌道解析法で、beam blowup開始電流を予測出来るため、より一層確かなbeam blowup開始電流を見極めることが出来る。

以上述べたように、加速管の長さやビーム電力変換効率等の最適化設計が出来ること、ビーム電流の動作点に合わせて最適な加速管冷却系が設計出来ること、エネルギースペクトルの良いビーム加速系の設計が出来ること、beam blowup開始電流の確かな予測が出来ることなどの研究成果は、大電流、大出力ライナックの高性能化、高効率化、高安定化、コンパクト化に役立つ。

論文の審査結果の要旨

電子線形加速器は素粒子、原子核、放射化学、放射光等の学術研究用、放射線効果を利用した医療工業用、或いは電子シンクロトロンや電子・陽電子貯蔵リングの入射器等に活用され、そのエネルギー領域も数百KeVから数十GeVまで広がり、その用途は非常に広い。又、最新は理想的な光源として自由電子レーザーの開発研究が盛んになり、その線源として大出力の中小型電子線形加速器の重要性は拡大の一途を辿っている。

博士論文提出者である上冨勇氏は電子線形加速器のメーカーである三菱電機で20年以上電子線形加速器の設計に携わり、電子線形加速器技術を培って来た。[電子線形加速器のビーム負荷特性とビーム不安定性]に関する研究は、これらの新応用分野に必須である中小型電子線形加速器を設計する際に、解決しなければならない加速管の研究課題を積極的に取り上げ、論文提出者の長年の経験を基に、独創的な発想と考え方を多く織り込んで纏め上げた、研究成果である。

本論文の骨子を大別すると二つになる。一つは加速管のビーム負荷特性に関する研究であり、加速管の電界減衰係数をビーム電流負荷を含む形に定式化し、広範な加速管構造のビーム負荷特性を記述出来るような数式で表している。この考え方を、加速管に高周波電力を供給する時、又は、加速管にビーム負荷がある時に発生する過渡現象にまで拡張し、電子線形加速器のエネルギー利得を解析的に記述する一般式を導いた。もう一つは、ビーム不安定性に関する研究であり、同じ構造の加速空洞で構成される加速管でマイクロ秒を越える長パルスの電子ビームを加速する時、BWO理論(P. B. Wilsonの理論)に補正関数を導入し、加速ビームが加速管に励起する進行波偏向電磁界と相互作用して不安定になるビーム電流値を予測するに数式を考案した。同時に、この予測ビーム電流値と実際の加速管でビーム不安定性が発生する電子ビームの電流値を比較して、その数式がBWO理論より正確である事を実証した。又、大電流のビームを加速する電子線形加速器では、弱いウェーク場による偏向電磁界も無視できない事を指摘し、ウェーク場が励起する条件を仮定し、加速管構造に依存する固有な偏向電磁界と複合させて、ビーム軌道を簡便な数式でビジュアル化し、ビームが不安定になる電流値を予測する一般式を作り、この式が実験事実と良く合う事を示した。

本論文は電子線形加速器の設計者が長年求めていた簡便な設計手法を実用化したものであり、加速管のデスク穴径を任意に選べる、過渡現象領域のエネルギースペクトルの最適化、ビーム発散が開始する電流値の予測とビーム発散状態の定量化等、数値計算によらない設計法を確立した意義は大きい。以上の研究成果はユニークで且つ独創的であり、博士論文に相応しい内容であると判断した。

又上富氏に対する博士論文に関わる専門分野並びに基礎となる分野の学識を口述により試験した。例えば、加速管の構造とインピーダンス、群速度とポインテングベクトル、加速電磁界モードとビーム偏向電磁界モード、加速管構造とビーム負荷特性との関係等、電子線形加速器の基礎知識に関する種々の質問を行ったが、同氏はいずれの質問に関してもの的確に答えた。又、上富氏はどのような加速管のビーム・シュミレーションも解析的に取り扱える手法を編み出し、それを過渡現象まで拡張したが、これらの数式の物理的な意味について、色々な角度から質問したが、何れの事項にも的確に応答した。又、上富氏は数学的素養があり、加速管と電子ビームが相互作用する際に表れる物理的な諸現象に対する広い理解力と鋭い分析力が備わっていると判断した。加速管を通過する加速ビームが発散するメカニズムについての説明では、これまでに研究されてきた歴史的な経過とそれぞれの理論の特徴を述べ、ビーム不安定理論の弱点を補足する方法を模索して独創的見解を提示した。

上富氏はJ J A Pに英語論文2編、三菱電機技報に英文論文5編を既に発表しており、博士課程を修了した者と同等の学力並びに語学力があると判断した。