

氏 名	バレリー バチェスラボビッチ カピン Valeri Vyacheslavovich KAPIN
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 1804 号
学位授与の日付	平 成 9 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 第 二 専 攻
学 位 論 文 題 目	A New Analysis of 4-rod RFQ Linac with Intrinsic Field Distortions (4 ロッド高周波四重極 (RFQ) 型線形加速器における構造固有の電場の歪みを含む場合の特性の新しい解析法)
論文調査委員	(主 査) 教 授 井 上 信 教 授 野 田 章 教 授 笹 尾 登

論 文 内 容 の 要 旨

申請者バレリー バチェスラボビッチ カピンは高周波四重極 (RFQ) 型線形加速器の一つの構造である 4 ロッド型 RFQ 共振器の電場解析の新しい方法を開発し、これを実際の設計例に適用して解析した。

このためにまず、4 ロッド型 RFQ 共振器を 4 本の棒状導体をシールドした伝送線システムとして解釈した。実際にはこの導体が適当な間隔で周囲のシールド空洞に支柱で固定されるので、その一定の周期で導体が有限なインピーダンスを通して空洞にアースされると考えられる。申請者はこのように周期性をもった 4 本の導体からなるシールドされた伝送線システムに通信理論で使われるマイクロ波伝送線の方程式を適用することを試みた。これにより 4 本の導体の各点での電位が等価回路の計算から求められることを示した。RFQ 型加速器にとっては各導体の電位から計算される粒子ビームの軌道位置での電場が計算できることが重要であるが、このとき RFQ 型共振器では四重極電場が基本であり、他の例えば二重極電場はビームを曲げてしまうので望ましくない。しかし、4 ロッド型 RFQ 共振器では各導体の電位そのものでは四重極成分と二重極成分が分離して見分けにくい。そこで次に申請者は 4 本の導体の電位を用いて、コモンモード (コアクシャルモード)、四重極モード、二つの二重極モードの 4 種類の直交するモードに焼きなおして解析するいわゆるノーマルモード解析法を適用した。この 4 つのモードから変換式を使って元の 4 本の導体の電位を示すこともできるのは当然であるが、この 4 つのモードに対応する電位の大きさを調べることによってビームの安定性を見透しよく計算できることを示した。

申請者は電場分布の解析のためにこのような準備をしたうえで、実際の RFQ 型共振器にとって避けられない電場分布の歪みについて取り扱っている。RFQ 型共振器は上述のように 4 本のロッドを周期的に置いた支柱でアースしているために電場分布がビームの進行方向について周期的に変化することが避けられない。また支柱は対向するロッドに対称に取り付けられないので理想的な四重極のみの電場にはできず、若干の二重極場が生ずる。申請者はノーマルモードに対応する電位分布関数を導出して、コモ

ンモード，二重極モード，四重極モードの周期的変化を示した。申請者はさらに申請者の解析方法が信頼性のあることを示すために実際の設計例における電場分布および数値計算コード MAFIA を用いて計算した電場分布と申請者の開発した方法による電場分布とを比較して，この解析的方法がよく電場分布を表していることを示した。

この電場分布関数を用いて申請者はさらに4 ロッド RFQ 型線形加速器におけるビームの安定性を調べた。ビームの安定性を調べるための振動方程式はヒル方程式あるいは特殊な場合はマシュー方程式となるが，電場分布を申請者の求めた関数で表現することにより，その安定性を調べている。その結果，ロッドを支える支柱の周期がある条件のときにはビームが不安定な振動を起こす危険性があることを示した。

申請者はさらにこの理論の正しさを示すために，ビーム軌道を数値的に計算するシミュレーションコードを開発して比較した。その結果は支柱の周期が長いときには，二重極電場が四重極電場の5%あればビームの透過率が，電場の歪みの無いのきが95%であるのに比べ60%に減少し，エミッタンスも増大することを示しており，申請者の開発した解析的方法の有用性を明らかにしている。

論文審査の結果の要旨

申請者，バレリー パチェスラボビッチ カピンはこれまで不十分であった高周波四重極 (RFQ) 型線形加速器の構造固有な電場の歪みとビームの安定性の解析的な評価の方法について研究を行った。RFQ 型線形加速器はビームの集束と加速をとともに高周波電場で行う画期的な方式の加速器でロシアのカプチンスキーが発明したものであるがこれに必要な電場の発生方法としては4 ベーン型，4 ロッド型などがある。原理的には理想的な四重極電場の発生が望ましいが，実際には工作誤差等による統計的な誤差や，共振器の構造上避けられない誤差もあって理想的な電場分布にはならない。従ってこれによるビームの理想的な加速からのずれがおり，場合によっては加速効率が減少してしまう危険性がある。特に4 ロッド型のものは支柱で4本の導体を適当な間隔で支えるという構造上周期的な電場の変化が避けられない。また支柱で支えるために四重極の対称性が乱れる。ドイツの研究者は彼らの4 ロッド型の RFQ 線形加速器でビームが理想的な場合の50%以下しか加速できないという経験をしており，これに対して構造固有の歪みと統計的な組立誤差にその原因を求めている。彼らは数値計算的にはその現象を説明しているが，理論的に普遍的な理解には至っていない。

申請者はこのような4 ロッド型 RFQ 線形加速器における電場の歪みとビームの安定性について解析的に見透しのよい理論の構築をめざした。加速器のビームの安定性を論ずるには周期的構造をもつ場合にはヒル方程式ないしその特殊な場合であるマシュー方程式の形での解析が行われることが多い。申請者も4 ロッド型 RFQ 構造の場合のマシュー方程式を立てて論ずるわけであるが，この場合の構造に固有な項の表現が従来困難であったものを，電場分布に対するノーマルモード解析法という方法を取り入れた表現により理解しやすいものにした。

このために申請者は4 ロッド RFQ の共振器を4本の導体を一つのシールド空洞で被い，導体を適当な間隔で適当なインピーダンスでシールド空洞にアースするという等価回路に置き換えた。これは申請者が初めて開発した手法であり，一般に4 ロッドに限らずマルチロッド型のシステムにも適用できる画期的な

アイデアで高く評価できる。

さらに4本の導体のアースからの電位分布そのものではRFQ型線形加速器としての電場分布として見透しがよくないので、申請者はこれをコアクシャル（コモン）モード、四重極モード、2つの二重極モードの4つのいわゆるノーマルモードで構成できるように書き換えて解析する方法を用いた。このことによってRFQ型加速器にとって必要な四重極成分と障害になる二重極成分を分けて論ずることができるようになった点が高く評価できる。

申請者はこの解析法によって実際の設計例に基づいてマッシュー方程式の安定性を論じ、4本のロッドを支える支柱の周期が長いときにはビームの不安定性が起こることを示し、さらにこれを数値計算によるシミュレーションでも確かめている。これは申請者の開発した解析方法が4ロッドRFQ型線形加速器の設計段階での解析に極めて有用なものであることを示すもので高く評価できる。

以上のように4ロッドRFQの構造固有の電場の歪みとビームの安定性について見透しの良い解析的理論を創り上げたのは申請者が初めてであり、ビーム物理学的検討は高く評価される。

よって本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値あるものと認める。

なお、論文内容とそれに関連する口頭試問を行った結果合格と認めた。