

氏名 澁谷 真二

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第6号

学位授与の日付 平成4年 3月16日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 超低速重イオン用分割同軸型RFQの研究

論文審査委員 主査 教授 高田 耕 治  
教授 木 原 元 央  
教授 佐 藤 勇  
教授 山 崎 良 成  
(高エネルギー物理学研究所)

助教授 高 崎 栄 一  
助教授 新 井 重 昭 (東京大学)

# 論文内容の要旨

近年不安定原子核のビームを使った研究が急速に発展しつつある。不安定原子核のビームは、中性子過剰核、超重核など極限領域の核物理や、宇宙に於ける元素合成過程の研究など、他の手段では実現できない核物理、天体核物理を開拓できる他、物性物理、放射化学、原子物理など様々な分野でも新しい研究領域を広げることが出来る。これに伴い、これらの短寿命核を加速するための加速器への関心が急速に高まってきた。しかし高エネルギー粒子による核破碎反応で生成され、イオン化された短寿命核は、多くの場合荷電数対質量数比 $\epsilon$ が数十分の一であり、中には $1/100$ 以下という非常に小さいものもある。このような場合イオン源から得られるビームエネルギーは核子当り $1\text{ keV}$ 程度となり、この時の速度は光速の $0.1\%$ 程度という非常に低い値となる。このような超低速重イオンを加速する場合には加速器の初段に特別の前段加速器が必要になる。高周波四重極電場を用いてビームの加速と集束を同時に行えるRFQ線形加速器(以下RFQと略す)は、このような目的に最適であると考えられている。

わが国においては大型ハドロン計画において不安定核ビームファシリティの建設が構想されており、これに伴い入射エネルギーが $1\text{ keV/u}$ 、 $\epsilon$ が $1/60$ 以上の超低速重イオンを加速できるRFQの開発研究が筆者らによって行われている。筆者の研究目的は超低速重イオンの加速を行えるRFQの実用化を図ることである。

筆者らは $\epsilon=1/30$ の超低速重イオンを実際に加速できる実機モデルの研究開発を行っている。この実機モデルは内直径 $90\text{ cm}$ 、長さ $70\text{ cm}$ のモジュール空胴を三台つなぎ合わせた全長 $2.1\text{ m}$ のマルチモジュール型共振空胴であり、運転周波数は $25.5\text{ MHz}$ 、 $\epsilon$ が $1/30$ 以上のイオンを $1\text{ keV/u}$ から $45.4\text{ keV/u}$ まで加速出来るものである。

本研究の成果は、高周波テスト及び加速テストの結果から大幅な設計の変更をせずにこのSCRFQの実用化が可能であるという結論を得た事である。以下に本研究の成果について述べる。

1. 分割同軸型構造を採用することにより、共振周波数のわりに空胴径を小さくする事が出来た。
2. 四電極にはヴェインを採用している。ヴェインとは軸方向に周期的に波形をつけた板状電極であり、これを用いるとビームアパーチャー内の電場分布をKapchinskij-Teplyakovの電位関数の低次の項だけで正

確に表すことが出来る。SCRFQ にヴェインを採用するのは筆者らが初めてである。

3. この加速器は実機の実用化を実現するために作られたモデルであるので、電極及び加速空洞の設計手法、加速器の高周波試験及び加速試験の結果から実機の評価が行えるように設計製作を行なった。また、ステムフランジを考案することによって、内導体と外導体で独立に加工組立が行え、かつ精度よい電極の組み込みが行える構造(マルチモジュール構造)の開発に成功した。この構造の採用により内導体の設定精度を大幅に向上させることが出来た。

4. 対向電極には結合リングが取り付けられている。結合リングの役割は対向電極を等電位に保ち電場の二重極成分の混入を防ぐと共に、ヴェインの位置精度を上げる事である。

結合リングを取り付けて、空洞への入力電力と共振周波数の変化量との関係を調べたところ、入力電力 85 kW(デューティー 10%) で共振周波数の上昇は 130 kHz であった。一方、結合リングを分割して同様の測定を行ったところ、入力電力 80 kW(デューティー 20%) で周波数の上昇は 53 kHz であった。更に、結合リングの有無による加速性能の変化を出射エミッタンスと透過効率の測定結果から調べたが、両者の間に変化は見られなかった。このことから SCRFQ では結合リングは必要ない事が分かった。

5. 冷却系の設計は十一本の冷却管を用いて行なった。管の半径や流量は電極の熱による歪みで電場分布が 1%以上ずれない事を条件として決定した。高周波結合器はループカップラーを用いる。高電力に対応するため、ループは銅パイプで作られており、水冷却を行う。

結合リングが取り付けられている状態での冷却水の温度上昇は、入力電力 85 kW(デューティー 10%) で平均 0.5°C であった。一方、結合リングを分割して同様の測定を行ったところ、入力電力 80 kW(デューティー 20%) で平均 0.9°C であった。このことから結合リングを外せば、デューティー 20%位までであれば空洞をフルパワーで運転しても、現在の冷却系でも空洞の冷却能力は十分であることが分かった。

6. 共振周波数の調整はステムとフランジによって囲まれた空間(窓)に生じるインダクタンス(ステムインダクタンス)を調整する事によって行う。空洞の周波数が 25.45 MHz となる様にインダクタンス(窓の面

積)を調整し、最終的にブロックチューナーで周波数を 25.5 MHz に合わせた。この時の無負荷の Q 値は計算値の約 80%であった。

7. ヴェイン間及びビーム軸近傍の電場分布の測定は誘電体を用いた摂動法によって行なわれた。測定の結果、ヴェイン間の電場の四回対称性からのずれは目標値である±1%より良く、ヴェイン全域にわたって±0.67%以内であった。またビーム軸近傍でのビーム軸に沿った電場強度分布は Kapchinskii-Teplyakov の電位関数に、設計時のセルパラメータを代入した計算によって定性的に説明できた。
8. 高電力試験ではまずモニターループの較正を行い、共振抵抗の測定、Q 値の測定を行いこれらの数値を使って求めたヴェイン間電圧と入力電力の関係がほぼ一致していることを確認した。また、高電力運転時のエージング時間と放電の頻度の関係について調べた。
9. ビーム輸送系を入射側と出射側についてそれぞれ設計した。またビームの輸送に必要な入射側のアインツェルレンズ、イオンセパレータ、静電ステアラー、出射側の Q ダブレットの設計製作をした。またビームの性質及び加速性能を評価するためのビームモニターとしてファラデーカップ、エミッタンスモニター、ビームスリットの設計製作をした。
10.  $\epsilon$ が 1/28 の  $N_2^+$ を 1 keV/u から設計値 (45.4 keV/u) まで加速する事に成功した。1 keV/u 以下の超低速重イオンの加速に成功した例は、世界的に見てもほとんどない。
11. 加速テストでは入射及び出射エミッタンス、ビームの透過効率、エネルギースペクトルの測定を  $N_2^+(\epsilon=1/28)$ 、 $N^+(\epsilon=1/14)$ 、 $Ne^+(\epsilon=1/20)$  についてそれぞれ行なった。
12. ヴェインの加工を二次元で行った。二次元加工したヴェインの影響は透過効率に顕著に現れ、80%以上の透過効率を得るにはヴェイン間電圧を設計値より 30%上げなければならなかった。二次元加工したヴェインの影響を考慮した計算コード (Modified PARMTEQ) で行った透過効率の計算値は計算コード PARMTEQ による計算値よりも測定値に近い事が分かった。二次元で加工されたヴェインを使った加速器の加速性能を実験的に評価したのは筆者らが初めてである。

## 論文の審査結果の要旨

渋谷真二君の博士論文内容は、超低速重イオン用分割同軸型RFQ加速器について、1) 高周波電磁場の解析 2) 加速電極を実用的に単純化した場合の設計計算 3) 製作された実機の高周波試験 4) ビーム加速テスト及び観測されたビーム特性のモデル計算との比較、からなる。

高周波4重極電極(RFQ)をもちいた加速器は陽子のように比較的速度の早い粒子の加速ではすでに実用に供されている。しかし、本研究でとりあつかう重イオンのように遅い粒子の加速器にはRF周波数を低くしなければならないが、それに伴う空洞寸法の巨大化を避けるために特殊な電極をもちいなければならない。これが分割同軸型RFQであって東大原子核研究所の新井氏により創案されたものである。本研究は荷電数対質量数比が $1/30$ 以下の重イオンを加速するためにこの特殊な電極を採用した加速管についての世界で初めての実験報告である。

同君の研究の眼目一つは加速電極の単純化の問題である。電極の形状は厳密な意味では3次元のラプラス方程式を解いて求めなければならない。しかしこのような電極を製作するためには複雑なNC加工が要求され実用的ではない。そこで本研究では断面が不変であるより単純な場合、即ち2次元近似の電極を研究した。とくに、加速に使われる基本波成分がこの近似によって低下する割合を評価し、低エネルギー領域でのビームのアクセプタンスにどの程度悪影響を及ぼすかを詳しく検討した。それを実験に加速されたビームの諸特性と比較し比較的によく一致していることを証明した。これは世界的に初めての成果であり、今後のこの種の加速器の実用化に貴重な智見を与えるものである。

さらにこの新しい型の加速管について信号電力レベルから大電力テストに致るまで、極めて詳しい理論的検討と実験結果の報告がなされている。これも一つの新しい型の加速管を実用化する際の欠くことのできない資料であり学問的に大変価値が高いものと考えられる。

以上のように本研究は数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文としての内容に値し、さらに基礎的な電磁界の解析に深い理解のあることが示されており、大規模な実験装置の組立、運転、測定等に極めて優れた実験技能を發揮

してきたことも伺われ、専門的にも総合的にも大変優秀な研究業績を上げていると判断した。