

氏 名 藤 村 哲

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第246号

学位授与の日付 平成9年3月24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 大強度H<sup>-</sup>RFQリニアック入射用低エネルギービーム輸送系の研究

論文審査委員 主 査 教 授 佐藤 康太郎  
教 授 山崎 良成  
教 授 平松 成範  
助 教 授 入江 吉郎  
助 教 授 生出 勝宣  
教 授 森 義治（東京大学）

## 論文内容の要旨

大型ハドロン計画 (Japanese Hadron Project : JHP) に用いるような大強度高エネルギー陽子リニアックにおいては、高エネルギー部のビームの質が非常に重要なものとなる。この高エネルギー部のビームの質は、低エネルギー部のビームの質が大きく影響するため、低エネルギー部でのビームの質が重要となる。JHPでは、負水素イオン源から引き出した負水素イオンビームを加速する最初の線形加速器として、共振周波数432MHzのRHQ (Radio Frequency Quadrupole) リニアックが開発された。したがって、低エネルギー部でのビームの質が重要であるという意味から、負水素イオン源から引き出した負水素イオンビームをこのRFQリニアックへ入射する低エネルギービーム輸送系 (Low Energy Beam Transport : LEBT) でのビームの質が重要であり、LEBTで質の良い負水素イオンビームをRFQリニアックに入射する必要がある。今回、LEBTのビームの質の指標として、実効的エミッタンスを定義した。この実効的エミッタンスの増大が少ないときLEBTでのビームの質が良いと言える。また、LEBTの設計を行うとき、この実効的エミッタンスの増大が最も小さくなるように設計する必要がある。

従来、共振周波数400MHz帯のRFQリニアックに負水素イオンビームを入射するためのLEBTとして、Superconducting Super Collider Laboratory (SSCL) で、静電場を利用した集束レンズを用いたLEBTの研究開発が行われてきた。一方、Los Alamos National Laboratory (LANL) では、静磁場を利用した集束レンズを用いたLEBTが開発されている。しかし、このSSCLやLANLで研究開発されたLEBTではビームの質が悪く、JHPでの要求を満たしていない。さらに、エミッタンス増大について、十分な検討がされておらず、エミッタンス増大の原因が明らかにされていない。このため、JHPの初段の線形加速器として開発された共振周波数432MHzのRFQリニアックへ負水素イオンビームを入射するLEBTの開発が必要となった。

本研究の目的は、JHPで用いるLEBTの開発を行うとともに、大強度高エネルギー陽子リニアックに用いる共振周波数400MHz帯のRFQリニアックにビームを入射するためのLEBTの設計に対して、今後の指針となりうる設計法を示すことである。

LEBTについて検討するとき、エミッタンス増大を抑制するという観点から、ビーム最大径を小さくすることが望ましく、このためLEBTはできるだけ小型であることが望まれる。近年、希土類金属永久磁石を用いた集束レンズが開発され、この集束レンズを用いることで、非常に小型のLEBTが構成できると考えた。またランニングコストをほとんど必要としないため、理想的なLEBTができると考えた。そこで、まず初めに、希土類金属永久磁石を集束レンズとして用いたLEBTについて検討を始めた。その結果、このLEBTでは、集束レンズの幾何収差が大きく、LEBTでのビームの質は良くないことが明らかとなった。このレンズの幾何収差を低減することを検討した結果、ソレノイドコイルを用いれば、幾何収差が低減される可能性が示された。そこで、次にソレノイドコイルを集束レンズとして利用したLEBTについて検討を加えた。ソレノイドコイルは従来から用いられている集束レンズであるが、LANLで開発されたLEBTでのエミッタンス増大に見られるように、注意深く設計されていない可能性があった。今回ソレノイドコイルを集束レンズに利用した2種類のLEBT、BT-SM1とBT-SM2について検討を行い、ソレノイドコイルを用いたLEBTのパラメータについ

でも検討を行った。ここで、BT-SM1は、常電動ソレノイドコイルで発生できる上限と考えられる磁場を発生し、最大ビーム径を最小にするように設計した。また、BT-LEBTはLANLでのエミッタンス増大の原因を検討するため、LANLで開発されたLEBTの機械的寸法とほぼ同じ寸法とした。また、一般に、ソレノイドコイルと比較して、四極磁石の方が幾何収差が小さいとされるため、比較のため3重四極磁石を集束レンズに用いたLEBT、BT-TQMについても検討した。

まず、近軸近似での粒子の運動と現実の粒子の運動について比較検討した。近軸近似では、磁場分布は1次の磁場分布であり、またビーム軸方向速度は全ての粒子で等しく、時間に依存しない一定値である。このとき、集束レンズは幾何収差のないレンズとなる。しかし、イオン源から引き出された粒子のエネルギーは、全ての粒子で等しいエネルギーであると考えられ、粒子の発散角 $\alpha$ に依存して軸方向速度が異なる。このため、1次の磁場分布であっても、この粒子の発散角 $\alpha$ の差に依存した幾何収差が生じる。3重四極磁石を集束レンズに用いたとき、発散レンズにより発散角が増大し、粒子間の発散角の差が拡大するので、大きな幾何収差が生じると考えられる。ビーム軌道を計算した結果、3重四極磁石を用いたとき、発散角の最大値は258mradと大きく、大きな幾何収差が生じた。実際の四極レンズを用いた場合、磁場分布に含まれる高次の成分により幾何収差はさらに増大すると考えられる。すなわち、四極磁石は共振周波数400MHz帯のRFQリニアックにビームを入射するためのLEBTの集束レンズとして不適であるといえる。一方、ソレノイドコイルは集束レンズとしてのみ作用するため、粒子の発散角は3重四極磁石程には大きくならず、このため、この粒子の発散角の差に依存した収差は小さいと考えられる。ソレノイドコイルを用いたとき、発散角の最大値はBT-SM1、BT-SM2で3重四極磁石を用いたときの約半分の大きさであり、幾何収差はほとんど見られなかった。四極磁石は共振周波数400MHz帯のRFQリニアックにビームを入射するためのLEBTの集束レンズとして不適であることが示されたので、次に磁場計算プログラムで計算した現実の磁場分布を用いて、BT-SM1、BT-SM2のビームシミュレーションを行った。その結果、BT-SM1でのビームの質が最も良いことが明らかとなった。この小型で強い磁場を発生するソレノイドコイルを集束レンズに用いたBT-SM1では、レンズの幾何収差の影響がほとんど見られず、JHPで開発されたRFQリニアックに負水素イオンビームを入射するLEBTとして、最も適していると考えられる。そこで、このBT-SM1を実際に開発し、横方向エミッタンスの詳細な測定を行った結果、レンズの幾何収差の影響が極めて小さいことが示された。

以上まとめると、

- ・共振周波数400MHz帯のRFQリニアックへのビーム入射用LEBTの集束レンズとして3重四極磁石を用いた場合、発散レンズにより発散角の差が拡大し、大きな幾何収差が生じることを示した。
- ・ソレノイドコイルを集束レンズに用いたLEBTを注意深く設計した時、幾何収差は十分小さく、共振周波数400MHz帯のRFQリニアックへのビーム入射用LEBTの集束レンズとして、ソレノイドコイルが最も適していることを初めて示した。
- ・共振周波数432MHzのRFQリニアックへのビーム入射用LEBTとして、小型で強い磁場を発生するソレノイドコイルを集束レンズに用いて、レンズの幾何収差による実効的エミッタンス増大のほとんど見られないLEBTを開発することができた。

## 論文の審査結果の要旨

藤村哲君の論文は、イオン源で作られた大強度の $H^-$ ビームを次段のRFQ線形加速器へ導くための輸送路についての研究をまとめたものである。大強度のビームを輸送する際に最も重要なことは、加速器機器の放射化を避けるためにビーム損失を極力減らすことである。ビーム損失の主な原因はビームの横方向の広がり(エミッタンスと呼ばれる量)の増大である。本研究の目的は、輸送途中でのエミッタンス増大が最小となる $H^-$ ビーム輸送路の最適設計を探ることと、この設計に基づいて建設された輸送路で測定を行い性能を確かめることである。

設計を始めるにあたりビームのパルス幅が長いことを考慮し、 $H^-$ ビームがビームによって電離したイオンをビームの中に閉じこめ、自己電場をほぼ消去するという中和化を仮定した。この仮定は他の測定結果から見て妥当なものであり、実際にこの実験で建設された輸送路で中和化率を測定することによっても確かめられている。(ちなみに、中和化を仮定しない場合には自己電場の非線形力によってもエミッタンス増大が起こるため、最適設計の条件が異なる。)

イオンによる中和化を利用するために、輸送路のレンズ系を電場ではなく磁場で構成することにして、ソレノイド磁場と四極磁場を用いた二つの場合を比較検討した。ソレノイド磁場について検討した結果、エミッタンス増大に寄与するレンズ収差を減らすには中心磁場を強くする必要があることがわかり、永久磁石よりも中心磁場を強くできる電磁石を用いたほうがよいということがわかった。また四極磁場を用いると四極磁場の出入り口での周辺磁場による収差によってエミッタンスが増大することも確かめた。以上の結果、ソレノイド電磁石2台のレンズ系が最適であることがわかったが、さらに実際の輸送路で必要とする真空機器や検出器を組み込むことを考慮し、電磁石の最適な位置と強さを求めた。

この研究で得られた設計方針のもとに建設された輸送路において、エミッタンスの測定を行い増大が生じていないことを確かめた。さらに輸送路での真空度を変えることによりイオンによる中和化率の評価を行い、輸送路の設計の基盤となっている中和化も実験で確かめた。

イオンによる中和化の仮定をもとにした研究であるが、この仮定そのものは多くの $H^-$ ビーム輸送路において妥当なものであるため、この研究結果は一般的な結論を含んだものであり、今後建設される他の低エネルギー輸送路の設計の普遍的指針となるものである。以上の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するものと判断した。