

論文内容の要旨

論文題目：Experimental Study on Direct Plasma Injection Scheme into RFQ Linac

(高周波四重極ライナックへのプラズマ直接入射法の実験的研究)

氏名 竹内 猛

重イオンビームの大強度化は、クォーク・グルーオン・プラズマ状態の探査を主目的とした高エネルギー物理学領域、また不安定核の研究を軸にした最近の原子核物理学の展開、さらに放射線療法で癌を治療する放射線医学領域などにおいて早急なる要請がなされている。ピーク電流値 mA 級の大強度重イオンパルスビームの生成にはいくつかの種類のイオン源が候補としてあげられるが、その1つとしてシンクロトロンへの入射に適するビームパルス時間幅 (μs ~数拾 μs)、繰り返し周波数(数 10 Hz)を有するレーザーイオン源 (Laser Ion Source: LIS) が理化学研究所 (RIKEN、日本)、欧州原子核研究機構 (CERN、スイス)、理論実験物理学研究所 (ITEP、ロシア) などで現在研究開発されている。LIS は真空中に配置された固体ターゲットに、集光したレーザー光を照射することにより生成されたプラズマをイオン生成源とし、高電圧ステージによりプラズマから多価イオンを引き出し 100 mA 級のピーク電流値を持つイオンビームを生成する。生成されたビームは大強度で、多価チャージであるため、低エネルギー領域 ($< 1 \text{ MeV}$) においてイオン間のクーロン力である空間電荷効果が強く働きビームは発散、またビームエミッタンスの増加をもたらすビーム損失となる[1]。そこで CERN 研究所ではこのような問題に対し、LIS とその後段加速器となる高周波四重極ライナック (Radio Frequency Quadrupole linac: RFQ linac) の間に静電レンズなどを配置した低エネルギービームラインを設けビーム発散に対応するよう試みた。その結果、LIS から RFQ linac まで (約 300 mm) のビーム電流値透過率は 8 % から約 40 % に増加した[2]。一方、東京大学・理化学研究所ではこの問題に対し「プラズマ直接入射法」を提案した。本論文は、「プラズマ直接入射法」の実験的研究を行い、レーザーイオン源の低エ

エネルギービームラインでのビーム損失の問題点を解決する方法を確認することを目的とする。

「プラズマ直接入射法」は、LIS のレーザープラズマ発生ターゲットを後段加速器となる RFQ linac の入口近くに置き、レーザープラズマのもつ運動エネルギーで RFQ linac にプラズマを直接入射する方法である。この方法によれば、電気的に中性であるレーザープラズマが RFQ までのビームライン中を輸送されるので、クーロン力による空間電荷効果は起こらない。そして RFQ linac 入射後には、プラズマから引き出されるイオンビームは強力な RFQ field により空間電荷効果が抑制されて、加速輸送される。十分加速された高エネルギーイオンビームでは、空間電荷効果の影響は小さいので RFQ linac より後段の加速器では低エネルギー程には問題にならない。

まず RFQ linac へ入射されるレーザープラズマの放出角度、プラズマ中の各チャージステートイオン種のカレント量、時間パルス波形を明らかにするために理化学研究所において、RIKEN-LIS を製作しその特性測定を行った。

RIKEN-LIS の全景を図 2 に示す。レーザー、ターゲットチェンバー、アナライザー、ファラデーカップ等検出器から構成される。CO₂ レーザーとターゲットチェンバー内レーザービーム集光レンズによりターゲット表面で約 10¹¹ W/cm² のパワー密度を達成した。回転ターゲットを用いレーザープラズマ放出角度を測定し、レーザープラズマ中イオンの断熱膨張広がり有効角度は±20 度であることがわかった。アナライザーを用い、ターゲットからの距離に依存する各チャージステートイオン種のカレント量(表 1)と時間パルス波形(図 3)を測定した[3]。

Fraction	Current
C ⁴⁺ 47 %	25.50 mA
C ³⁺ 31 %	16.82 mA
C ²⁺ 14 %	7.60 mA
C ¹⁺ 8 %	4.34 mA

表 1：プラズマ中イオン種の割合とターゲットからの 254mm でのカレント (積分量)

ターゲットからの距離に依存する各チャージステートイオン種のカレント量(表 1)と時間パルス波形(図 3)を測定した[3]。得られたレーザープ

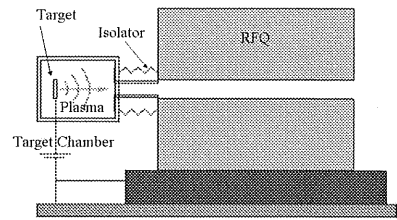


図 1：「プラズマ直接入射法」のコンセプト

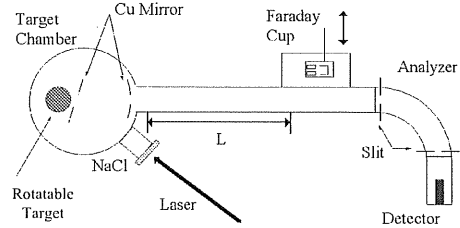


図 2：理研レーザーイオン源

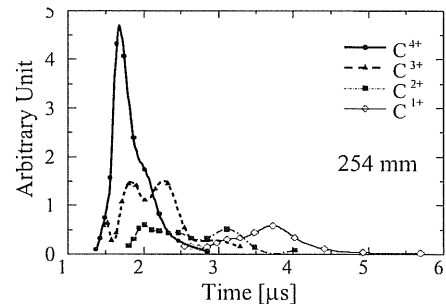


図 3：ターゲットからの距離 254 mm でのプラズマ中イオン種パルス波形

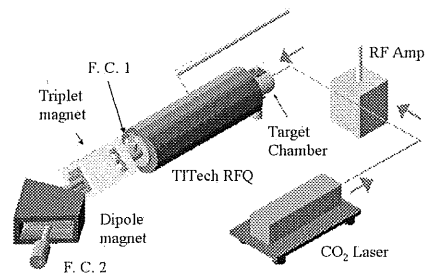


図 4：プラズマ直接入射法実験装置全景

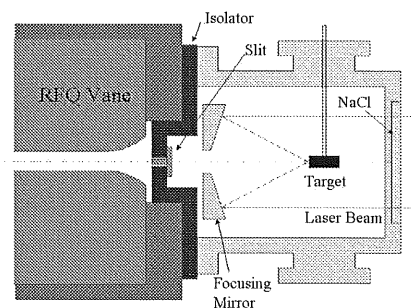


図 5：ターゲットチェンバー構造

プラズマ特性から「プラズマ直接入射法」実験装置の製作を行った。実験装置の全景を図4に示す。レーザーより発振されたレーザー光はターゲットチェンバーの真空容器内に輸送され、固体ターゲット表面に収束されることで固体表面垂直方向にプラズマが発生・膨張する。このプラズマはRFQ linacに入射され、ビームは加速・収束を受けてRFQ linac出口より放出される。出口直後に設置されたファラデーカップ1 (F.C.1) は加速ビームを検出し、ダイポール分析磁石後のファラデーカップ2 (F.C.2) はイオン荷電分析されたビームを検出する。RFQ linac 後のビーム輸送のためにトリプレット4重極磁石をダイポール分析磁石前に設置した。RFQ linac は東京工業大学高周波4重極重イオン線系加速器が用いられた。

図5で示されるターゲットチェンバーは、プラズマが入射しRFQ linacの異なる極性ヴェイン間に放電が起こらないようビームサイズを制限するため、

RFQ入口に4 mm径スリットが設けられた。反射集光ミラー(曲率半径240 mmで直径100 mm、中心に16 mm穴)を用いターゲット表面への入射レーザー集光レンズ系が製作された。

実験は炭素をターゲットとし、ターゲットチェンバー電圧20 kV、RFパワー74 kW、RFQ linacの運転周波数は81.075 MHz、ターゲットとスリット先端との間の距離は254 mmの実験条件で行われた[4]。プラズマを直接入射するために懸念されていたヴェイン間の放電は無く、F.C.1(有効直径15 mm)で図6の信号波形が得られた。約3.24 μ sを頂点にするピークは最大値24.6 mAの電流値を示している。波形が81.075 MHzでバンチングされていることとTOF計算結果からビームはRFQ linacの加速チャンネルに正常に捕獲されRF加速(214 keV/u)が実現されていることがわかった。バンチングされている波形を1周期で平均化し、プロットした波形のピーク値

(平均化ピーク電流値)は7.84 mA、パルス時間幅(90%)は1.22 μ sであった。F.C.2(有効直径15 mm)でC⁴⁺、C³⁺の平均化ピーク電流値はそれぞれ2.65 mA、1.18 mAであった、パルス時間幅(90%)は0.46 μ s、0.41 μ sであった(図7、8)。また多数回の実験のなかで、F.C.1で得られた平均化ピーク電流値の最高記録は9.22 mAであった。

さらに、「プラズマ直接入射法」でのビームの現象を考察した。図9はRFQ入射部を示しており、slit端からRFQ電極までの距離は6mmである。レーザープラズマの空間制限電流の計算、イオン源プラズマシミュレーションコードIGUNによる計算から今実験の場合、

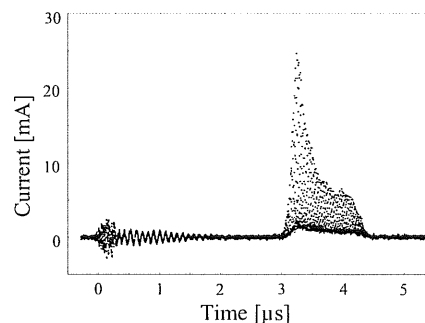


図6：F.C.1での炭素ビーム波形

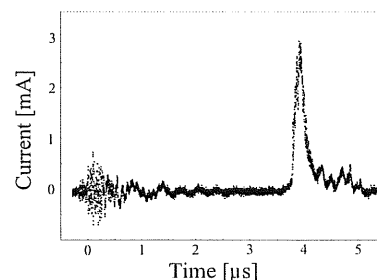


図7：F.C.2でのC⁴⁺ビーム波形

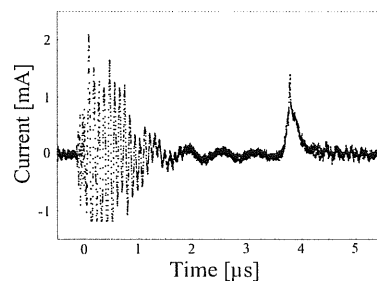


図8：F.C.2でのC³⁺ビーム波形

レーザープラズマは入口スリット端面でプラズマ面を形成し slit 端から RFQ 内部にはイオンビームが入射されていることが類推された。次に、slit 端から RFQ 電極までの距離 6mm のビームは空間電荷効果を加えた 3 次元 RF 4 重極電場粒子トラッキングコードにより求められ、RFQ 電極からは RFQ linac 内の粒子シミュレーションコード PARMTEQ を改造し多種のチャージステートイオンについて計算可能に改造した pteqHI を用い RFQ 後の加速された炭素イオンビーム電流値を求める。図 10 はターゲットチェンバー電圧 15 kV での RF パワー (vfac) 依存による出力ピーク電流値の実験結果 (●) と計算結果 (○) をプロットしたものである。得られた計算値は実験値をほぼ再現する値が得られた。そして、RFQ の RF パワーが高いときつまり 4 重極電場の強いとき、ビームはそれ自身による空間電荷効果のための発散を RFQ の 4 重極電場により抑えられ、有効に加速が行われていることがわかった。

表 2 は今研究による加速ビーム電流値と他研究所との比較を示す。異なる核種、ビームエネルギーを比較するため $\frac{q/M}{E_{in}^{3/2}}$ をピーク電流値に掛けた値を用いる。 E_{in} は初段加速器への入射エネルギーである。「プラズマ直接入射法」によるこの値は最も大きく、このことは「プラズマ直接入射法」がイオン源から RFQ 入口近傍までの低エネルギービームラインでの空間電荷効果を抑制し、他研究所に比較してより有効なビーム加速が行われるということを示している。以上の結果から「プラズマ直接入射法」はレーザーと RFQ からなる簡便な装置で、レーザーイオン源の低エネルギービームラインでのビーム損失の問題点を解決し 大電流の重イオンビームを加速する入射方法であることを確証した。

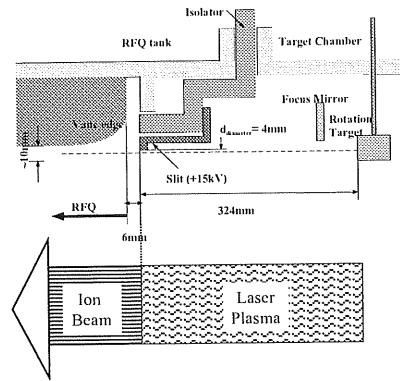


図 9 : RFQ 入射部

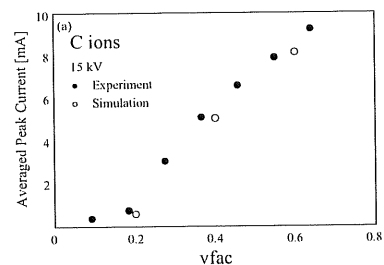


図 10 : 加速 C イオンビームのピーク電流値実験結果 (●) とシミュレーション結果 (○)

研究所 (イオン源タイプ)	核種	ピーク電流値 [mA]	初段加速器エネルギー [keV/u]	$\frac{q/M}{E_{in}^{3/2}} \times I_{peak}$ [mA]
CERN (LIS)	$^{180}\text{Ta}^{20+}$	5	6.9→100	3.0e-2
GSI (MEVVA)	$^{238}\text{U}^{4+}$	3	2.2→120	1.5e-2
ITEP (LIS)	$^{12}\text{C}^{4+}$	1.5	16 (IH)	7.8e-3
U. Tokyo and RIKEN (LIS プラズマ直接入射)	$^{12}\text{C}^{4+}$	3.9	5.0→214	1.2e-1

表 2 : 低エネルギー重イオンビームラインでの加速ビームのピーク電流値比較

References

- [1] J. Collier et al., Laser and Particle Beams, **14**, p. 283, (1996).
- [2] J. Collier et al., Rev. Sci. Instrum., **67**, p. 1089, (1996).
- [3] T. Takeuchi et al., Rev. Sci. Instrum., **73**, p. 767, (2002).
- [4] T. Takeuchi et al., Rev. Sci. Instrum., **73**, p. 770, (2002).