

ガス・ストリッパーの新設と基礎実験

加速器センター 大和良広

論文要旨

加速器センターのタンデム加速器では、負イオンを正イオンに変換するためにフォイル・ストリッパーを使用してきた。しかし、低エネルギーの重イオンや分子イオン等の利用を求めるユーザーが増えてきたため、今回フォイル・ストリッパーの弱点を補う装置としてガス・ストリッパーを新設し、動作テスト、基礎実験を行ったので本稿にて報告する。

1. はじめに

筑波大学加速器センターのタンデム加速器は、中心部の高電圧電極（ターミナル）に最大+12MV（1200万ボルト）の電圧を発生させる事ができる。ターミナルは内部が真空の加速管によって加速器の入口側と出口側に接続されている。加速される粒子は、イオン源から負のイオンで加速器に入射される。イオンは加速管の中を静電場で加速されながらターミナルに達し、通常フォイル・ストリッパーと呼ばれる厚さ数 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程のカーボンの薄膜を通過する際に原子衝突によって幾つかの電子が剥ぎ取られて正イオンに変換され、更に入射側と反対側の加速管中を加速し加速器からとりだされ実験に使われる。

しかし、フォイル・ストリッパーの実用的な問題はカーボン薄膜の寿命である。ヨウ素などの重いイオンを3MV程度の低いターミナル電圧で加速する時などはこのカーボン薄膜の寿命は極めて短く、数時間も経たないうちに破壊されてしまう。フォイル・ストリッパーは加速器の中に入れておける枚数に限りがあり、新品フォイルと交換するためには長期間加速器を使った実験ができなくなってしまう。

このフォイル・ストリッパーの欠点を補う物として希薄なガスの層を加速器中心部に作り、荷電変換をガスで行うガス・ストリッパーがある。ガス・ストリッパーで必要なガスの圧力は1/1000気圧以下で良いので、ターミナル内にイオンビームが通過する小孔だけを設けたガス閉じ込め空間を作り、その小孔から漏れて失われるガスの容積が十分小さくなるようにしておけば、数リットルのボンベに50気圧程度のガスを詰めておくだけで数か月から半年の期間にわたって使用することができる。

フォイル・ストリッパーとガス・ストリッパーでは、荷電変換における物理的現象や寿命に対してそれぞれ一長一短がある。したがって加速するイオンの種類やエネ

ルギーによってそれぞれの特徴を生かして使い分けると、イオンビーム加速時間を大幅に伸ばす事が可能となり、加速器の有効利用と研究成果の向上に寄与することとなる。

加速器センターには、加速器を建設した米国 NEC 社が設置したガス・ストリッパーがあったが、これまで様々な理由で積極的に使用することがなかった。

最近、低エネルギーの重イオンや分子イオン等の利用を求めるユーザーが増えてきたため、今回のこのガス・ストリッパーの整備に着手した。本稿では、コントローラーの作製・配線・ターミナル部への N_2 ガス充填ボンベ設置・ガス導入系の作製を新たに行い、動作テスト・基礎データの取得・イオンビームによる基礎実験を行ったことについて報告する。

2. ガス導入系とその制御装置

米国 NEC 社が設置したコントローラーはスイッチやメータの老朽化が進み実際にガス・ストリッパーとして動作しなかったため撤去し、新たに加速器センターで作製した。

最初の作業は制御のための電氣的結線の調査と修正であった。2階コントロール・コンソールより7階のターミナルコントロールロッドモーター（加速器内部の最上部 写真-1）までの6ヵ所の中継端子盤の結線が結線図通りになっておらず、モーターの回転が期待通りにならなかった。そのため全箇所結線チェックを行って結線修正を行いターミナルコントロールロッドモーターの回転制御を正常化した。写真-1はターミナルコントロールロッドの駆動モーター、クラッチ、ギヤ、リークバルブ用ロッド回転角読み取りポテンシオメータ等のタワー外観である。

写真-2はコントロール・コンソールに取り付けられた新しいガス・ストリッパーの制御パネルである。

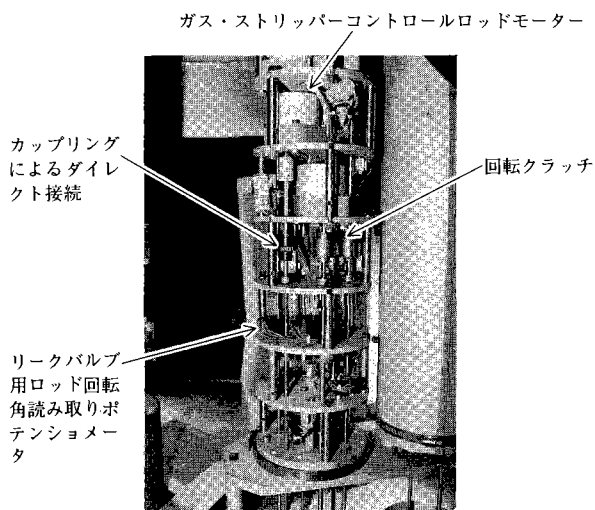


写真-1 ターミナルコントロールロッドモーター
タワー外観

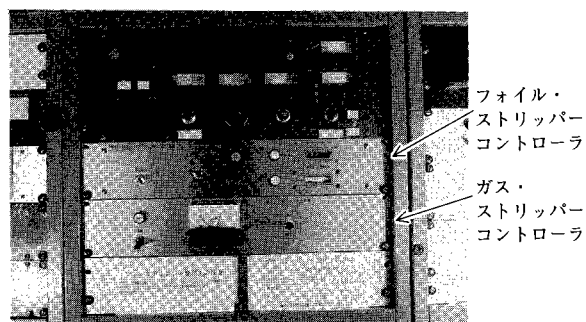


写真-2 新・ガス・ストリッパー制御パネル

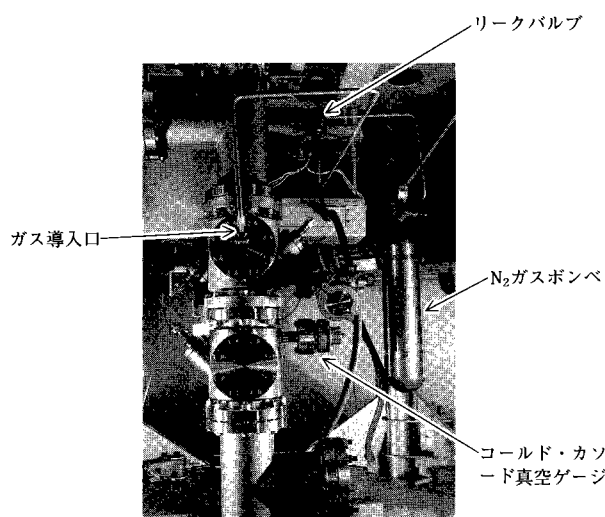


写真-3 加速器ターミナル部 ガス導入系

ガスの導入は、ターミナル部に取り付けられた既存のリークバルブ（写真-3）を用いた。バルブの使い方として、ガスの導入方向はリークレートがいくらか緩やかなリークバルブのIN/OUTを逆接続にした状態にし、バルブの開閉は高電圧に対する絶縁のためアクリル製の

棒で加速器中心部制御用に6本備えられているターミナルコントロールロッド（以下 TCR Terminal Control Rod）1本の回転により行う。ロッドの回転は2階コントロール・コンソールにあるガス・ストリッパーコントローラ（以下 GSC Gas Stripper Controller の略）（写真-2）で遠隔制御する。

また、荷電変換用のガスとしては元々設置されていた小型ボンベに高純度窒素ガス720PSI（ $=50.4\text{kg}/\text{cm}^2 = 5\text{MPa}$ ）をつめて使用した。（写真-3）

3. ターミナルにおけるガス圧力の測定

ガス・ストリッパーを使用するとき、前節に記したリークバルブの制御と共にターミナルにおけるガスの圧力を測定する必要がある。しかしながら、現在ターミナル部には真空ポンプも真空計も設置されていない。その理由は、加速器の通常の運転状態ではターミナルは高電圧であり、ターミナル内に電気機器を設置しようとすると、機器電源およびターミナルと加速器外部の間の制御・計測信号の伝送系に高電圧放電・絶縁対策を施さなければならず、ターミナル機器の設置には複雑な技術を要するからである。勿論、複雑とは言え不可能ではないから、近い将来、ターミナル機器の設置を進めることになるであろうが、それまでの暫定的な手段として以下に述べる間接的方法でターミナルにおけるガス圧を推定する。

ガス・ストリッパーは図-1に示す構造で、ガス・ス

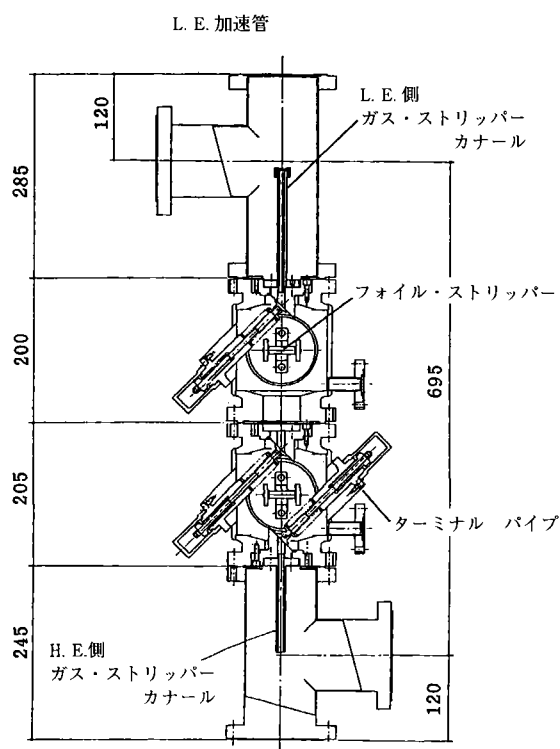


図-1 ターミナル部詳細図

トリッパーチャンネルパイプとその上端に取り付けた直径7mmのオリフィスでガスを閉じ込める。中央部から流入したガスはオリフィスを通して入射側と出口側の加速管内に漏れ出し、それぞれ加速管用真空ポンプにより排気される。定常状態ではガス流量が一定となり、加速管内の圧力勾配も一定と考えられる。したがって、加速器の入射側（以下 L. E. Low Energy の略）真空度または出口側（以下 H. E. High Energy の略）真空度からターミナル部の真空度を推定することができるであろう。そのためターミナルに臨時的真空計を取り付けて、L. E., H. E., ターミナルの真空値並びに加速管中の N_2 の分圧を、リークバルブコントロールロッドの回転角度を変えながら測定した。

実際に加速器を運転する際、比較的容易に監視し得る物理量は L.E., H. E. および TCR の回転角度に比例するポテンシオメーターの電流値である。これらは2階のコントロール・コンソールで読み取ることができる。しかしリークバルブの開閉状況に直接関係する機械的な量として、ポテンシオメーターの電流値と TCR の回転角度の比例関係も校正しておくことにした。回転角度は TCR に指針を取り付け、指針の近くに 10° 刻みの目盛を置いて目視で読み取った。L. E., H. E., ターミナルの真空計にはバルザス社製のコールドカソードゲージを用い、加速管中の N_2 の分圧測定にはバルザス社製のマス

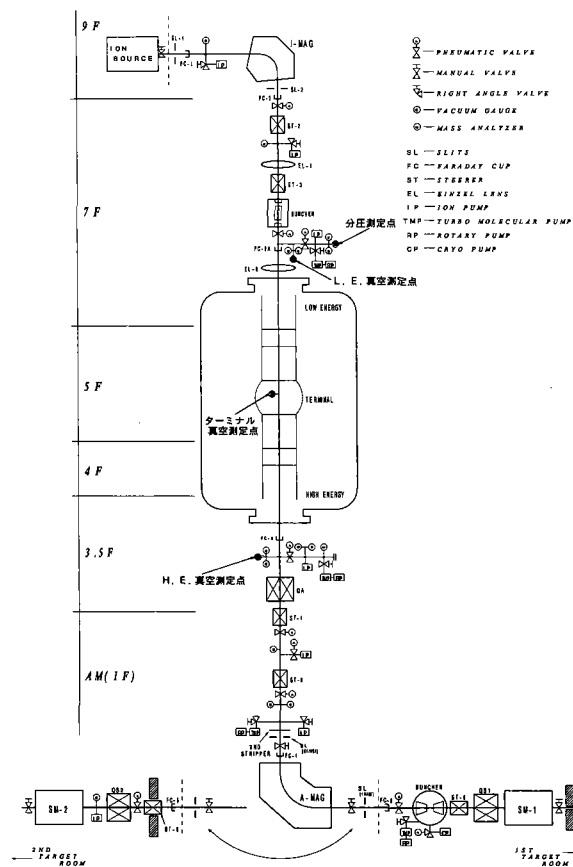


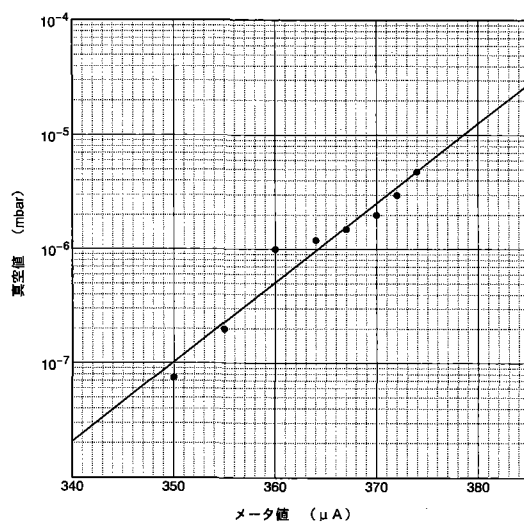
図-2 加速器全体図と圧力測定点

アナライザーを使用して $N_2 + CO$ の分圧を測定した。圧力の測定箇所は図-2 に示す通りである。

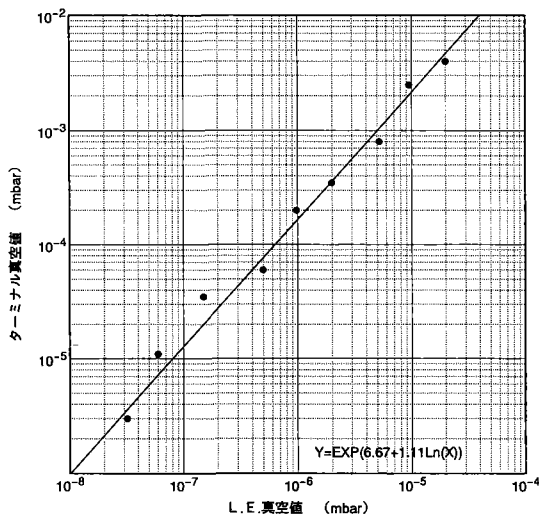
最初にガス・ストリッパーを使用しない場合の各部の圧力を測定した。既に述べた通りターミナル部には真空ポンプが無い。加速管は加速器の外部で入射側と出口側にそれぞれ1台ずつ設置されたイオンポンプによって真空排気されている。ターミナルからポンプまでの加速管の長さは入射側も出口側も同じで約9mであり、コンダクタンスは決して大きいものではない。したがって通常の動作状態では加速管内にはかなりの圧力勾配が生じていると予想されるが、これまで、ターミナルと L. E. 又は H. E. とでどれだけの圧力差があるかは定量的に詳しく測定されていなかった。L. E. と H. E. のイオンポンプで十分に真空排気をした後の測定値は、L. E. 8.0×10^{-9} mbar (8.0×10^{-7} Pa), H. E. 7.0×10^{-9} mbar (7.0×10^{-7} Pa), ターミナル 9.5×10^{-7} mbar (9.5×10^{-5} Pa) であった。これより通常の運転状態でターミナル部の圧力は L. E. よりも約2桁高いことが確かめられた。

次にターミナル部にガスを導入して各部の圧力を測定した。測定結果の内、ポテンシオメーターの電流値と L. E. の関係をグラフ-1 に、L. E. とターミナルの圧力との関係をグラフ-2 に示す。この実験結果によって、ターミナルに真空計が無くてもポテンシオメーターの電流値、L. E., H. E. の真空の値などからターミナル部のガス圧を推定することが出来るようになった。グラフ-1, 2 のデータは10回の慎重な測定を繰り返して得られたもので、データの安定性・再現性について充分検討された結果である。

この実験の途中でリークバルブの開閉に一つの注意が必要であることが分かった。ある値のガス圧を設定した後、この圧力を下げる時にはバルブを一度多めに閉めてから、再び開ける方向に操作すると、圧力の再現性が良



グラフ-1 メータ値と L. E. 真空値の関係



グラフー2 ターミナル真空値とL.E.真空値の関係

いということである。これはTCRとバルブの駆動軸との間の機械的結合部のバックラッシュによるものである。

4. ガス・ストリッパ各種パラメータ計算ソフトウェアの作製

3. の実験で測定したデータによりグラフー1, 2等からパラメータ設定値を読む事ができるが、細かい部分で読みづらい場合があったため、各種パラメータから予想値を計算するソフトウェアをPC-9801シリーズ用にTUROBO C++で作製した。

例えば、L.E. 真空値を入力するとGSCメータ値・ターミナル真空値・ガス分子層の厚さ等を計算し表示する。同じ様にGSCメータ値、使用ガス分子層の厚さ値の入力でそれぞれの予想パラメータが瞬時に計算される。これによりガス・ストリッパを用いてビームの加速をするときに必要なパラメータを直ちに得ることが出来るようにしてある。

プログラムで使用した計算式は、3. の実験で測定したデータより求めた。例えば、L.E. 真空値を入力し、ガス分子層の厚さを求める場合は、

ガス分子層の厚さ = $3.6 \times 10^{16} \times \exp(6.67 + 1.11 \times \ln(L.E. \text{真空値})) \times \text{ガス・ストリッパ領域長}(68.5)$ 等である。

ここで、しばしば必要になるパラメータとしてガス分子層の実効的な厚さがあるが、これについては3. の実験で荷電変換領域におけるガス圧の分布までは測定されていないので、実験値から評価することができない。しかし非常に大雑把な目安として、ターミナル部の圧力が均一で、入口と出口にある二つのオリフィスの間(ガス・ストリッパ・カナル内部)のみガスが存在すると仮定したときのモル数を $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ に換算し、これをガス分

子層の厚さとしてその計算値を出力するようにした。

5. ガス・ストリッパを用いたビーム加速実験

新設したガス・ストリッパを使用して実際にイオンビームを加速器に通す実験を行った。実験に使用したビームは、酸素、塩素、ヨウ素でガス圧やエネルギーを変えてデータを取った。加速器に入射される前にイオンビーム量を測定する点はファラデーカップ2 (以下FC-2) で、加速器を通過して加速された後のイオンビーム量を測定する点はファラデーカップ3 (以下FC-3) である。(それぞれの位置は図ー2参照)

FC-3の平均電流を平均平衡電価 (\bar{q}) で割った値に対するFC-2の電流値 ($I_{(FC-3)} / \bar{q}$) / $I_{(FC-2)}$ は、FC-3とFC-2のイオン数の比に相当するので、これをビーム通過率と称して加速器の性能の指標の1つとしている。

実験の結果として、酸素、塩素、ヨウ素の加速におけるビーム通過率をそれぞれグラフー3, 4, 5に示す。グラフを見るとわかる様にストリッパガス(ターミナル部の窒素ガス)の圧力が高ければ高いほどビーム通過率が良いというわけではなく、一番ビーム通過率の良い圧力がありそれよりも高くても低くてもビーム通過率が低下してしまう事がわかる。

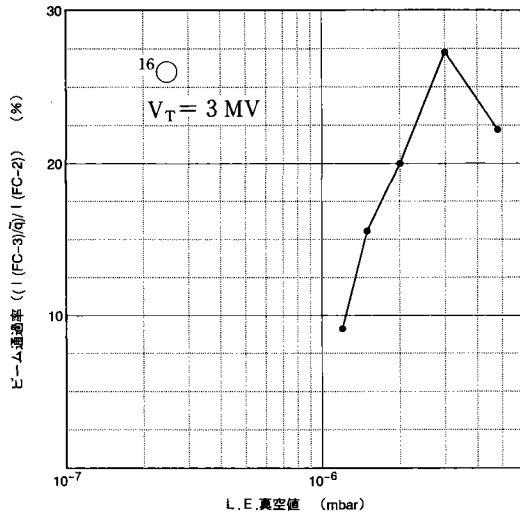
グラフー3はターミナル電圧(以下、 V_T) 3MVで、ガス・ストリッパのガス圧を変えながら酸素イオンを加速したときのビーム通過率であるが、L.E.の真空値が 3.0×10^{-6} mbar 付近で通過率は27%で最大になる。このときのターミナルのガス圧力は 5.6×10^{-4} mbar と推定される。また $V_T = 3$ MVでは酸素の負イオンが正イオンに替るとき、正イオンの電荷は $2+ \sim 3+$ が殆どの割合を占めることが既に知られている。一般に、荷電変換において何価の正イオンの割合が最も多くなるかは、負イオンがストリッパに入射するときの速度すなわちターミナル電圧で決り、ストリッパの厚さには関係しない。

なお、平均平衡電荷は実験データ等より酸素2.5, 塩素4.5, ヨウ素3としている。

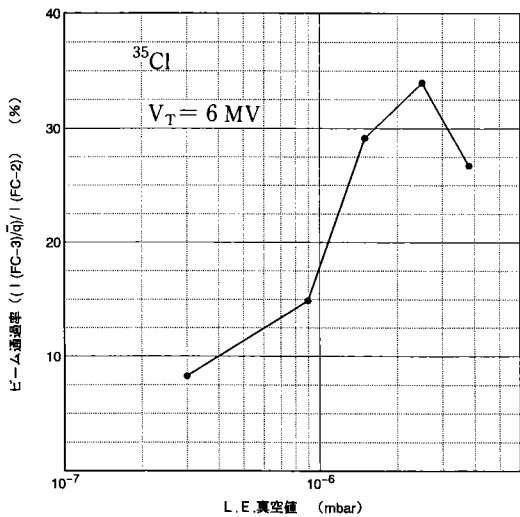
同様にグラフー4は $V_T = 6$ MVで塩素イオンを加速した場合で、L.E. 真空値 2.4×10^{-6} mbar (予想ターミナルガス圧 4.4×10^{-4} mbar) で最大の通過率34%が得られた。

ヨウ素イオンの加速ではグラフー5のようにL.E. 真空値 1.8×10^{-6} mbar (予想ターミナルガス圧 3.2×10^{-4} mbar) のとき最大通過率27%を得た。

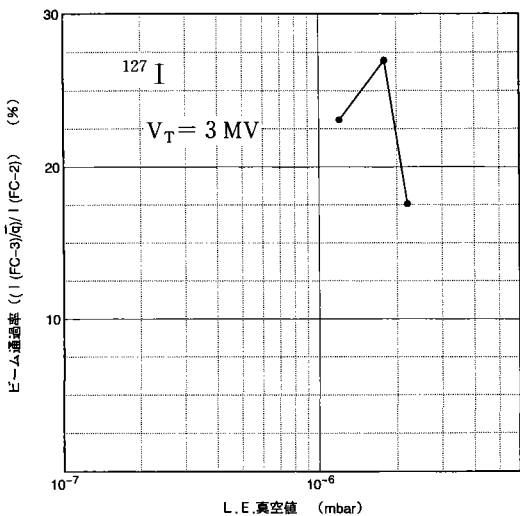
更に、実験中に問題になった点として、ロスカレントの増大がある。ロスカレントとは加速器ターミナル部に供給される電流値を I_s 、ターミナルから加速管および



グラフ3 L.E.真空値に対する酸素ビーム通過率



グラフ4 L.E.真空値に対する塩素ビーム通過率



グラフ5 L.E.真空値に対するヨウ素ビーム通過率

絶縁コラムの電位分布を一様にするために設けたコロナ針を通して戻って来る電流を I_C 、ビーム電流を I_B とするとき、ロスカレント $I_{Loss} = I_S - (I_C + I_B)$ で定義される。

$I_{Loss} = 0$ ならばターミナルは一定電圧に保たれるが、 $I_{Loss} > 0$ のときに、多くの場合、加速管の中で不必要な電子が発生していることを意味する。電子はすべてターミナルに向かうので、電流としてはターミナルから流出する向きになる。その分だけ余計にターミナルに向かって電荷を運ばなければならず、これがロスカレントとなる。また、加速管の中で放電が起こっていると電子が発生しロスカレントが増大する。このような理由により、ロスカレントは加速器が安定な動作状態にあるか否かを診断する1つの指標としている。

今回のビーム加速実験では加速器へのビーム入射量を増やした時、更にターミナル電圧が高い時にロスカレントが増大した。その原因として、ターミナル部に真空ポンプが無いために加速管内に多量のガスが漏れ出し、電場のある領域でのイオンとガス分子との衝突で不要の電子が多量に発生したためと推察される。加速管内に多量のガスが漏れ出していると考えられるもう一つの理由は、加速されたビームをビーム分析電磁石を通すと著しくビーム強度が低下することである。ガスが加速管に漏れ出していれば荷電変換が行われる領域がターミナルの中だけではないので、結局エネルギーが広がることになるからである。

6. まとめ

今回の一連の作業で、従来使用できなかったガス・ストリッパーを取り敢えず使用できるようにした。高強度のビームや高いエネルギーのビームを得る事は現状では難しいが、ターミナル電圧 3 MV 程度の低エネルギーで 10nA 程度のビーム量の実験ならば十分に使用できる。これにより、フォイル・ストリッパー交換による加速器整備で加速器が使用出来なくなる期間を遅らせる事が出来、今まで使用しづらい条件だった低エネルギーの重イオンや分子イオンの提供が可能となった。

ガス・ストリッパーを使用すると現状ではターミナル部に真空ポンプが付いていないので L.E., H.E. 側の加速管内部の真空度もかなり悪くなってしまい、ビームに対して悪影響を及ぼしている。本来ガス・ストリッパーはターミナルストリッパーチャンネル内部にのみ荷電変換ガスが存在している状態が望ましいのでターミナル部に真空ポンプを設置するのが今後の課題である。これについては現在設置の準備を進めている。

また、現状のリークバルブではガスの導入が非常に急激であり GSC による最適なガス圧操作が難しいため、

今後もっとリークの緩やかなバリアブルリークバルブに交換する等の措置が必要だと思われる。

さらに、コントローラのメータ表示はデジタルにした方が設定しやすいであろう。

7. 謝 辞

今回の作業では実に沢山の方の協力を得ました。

ターミナルコントロールロッドの調整，ターミナル部窒素ガスポンベの設置，リークバルブの設置・調整等機械的部分の全体を行ってくださった加速器センター技官

石井 聡氏，同氏には基礎データ収集実験，ビーム加速実験にも多大なる協力を得ました。

また，加速器センター技官 皆倉輝志氏，高橋 努氏，大島弘行氏，物理学系 石原豊之助教授には，結線間違いの発見・結配線整備，コントローラー作製の電気系統全般に援助・協力くださいました。

更に，本稿に対する助言を物理学系 古野興平教授，物理工学系 島 邦博講師に頂きました。

この場をお借りしまして，協力くださいました方々に心より感謝の意を表します。