

JAERI-M  
5 0 3 2

2 MV VdGによる窒素イオンの加速

1972年11月

小林 千明・神田 将

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

2 M V V d Gによる窒素イオンの加速

日本原子力研究所東海研究所物理部

小林千明・神田将

(1972年10月24日受理)

1972年6月核物理第1研究室の2 M V V d Gによる窒素イオン加速の特性について述べる。 $N^+$ イオンは0.7 MeV, 6  $\mu$ A得られ、照射損傷の実験には充分な値であることが確認された。イオン源はR F型を使用したのでV d G高圧端子部の改造はわずかであり、陽子、重陽子加速に変換する作業性も良い。イオン源の寿命は約100時間である。

真空系の改造、分析電磁石の増力により、さらに高エネルギー、高強度の重イオンビームが期待できる。

Acceleration of nitrogen ions by 2 MV

Van de Graaff accelerator

Chiaki KOBAYASHI and Susumu KANDA

Division of Physics, Tokai, JAERI  
( Received October 24, 1972 )

The results of nitrogen-ion acceleration by the JAERI 2 MV Van de Graaff accelerator are given.

The nitrogen ions ( $N^+$ ) of energy 0.7 MeV and current  $6 \mu A$  impinging on a target are obtainable. This magnitude ion beam is sufficient for some experiments on radiation damage. The existing RF-type ion source was used for this purpose, so that only little modification to the high voltage terminal is necessary for conversion to the proton or deuteron acceleration is easy. The lifetime of the ion source is about 100 hours.

The acceleration of heavy ions to higher energy and intensity are possible simply by improving the vacuum system and increasing the power of the analyzing magnet.

# 目 次 な し

## 1. はじめに

核物理第1研究室にある、High Voltage Engineering社<sup>\*</sup>製の2MV VdGは、陽子、重陽子、電子加速用として設計されたものであるが、近年重イオン照射用としての使用希望もあり、このため、46年度中頃より、イオン源テスト、VdG高圧端子部の改造に着手した。

47年6月に窒素イオンの加速試験、および、固体物理研究室による、照射実験を行ない、ほぼ予想通りの成果を収めた。

以下、窒素イオン加速の問題点、結果、および、イオン源テストデータ等を中心に報告する。

## 2. 2MV VdGを重イオン加速器として使用するための問題点

## 1) 装置について

## 1-a) 90度ビーム分析電磁石

90度ビーム分析電磁石（以下分析電磁石と略す）は、2MeV、 $\alpha$ 粒子までの設計であるので、これより、重い粒子、言い換れば、 $m/e \cdot Q$  が大きいものでは、加速エネルギーを低くするか、偏向角を小さくしなければならない。

偏向角の変更は、分析電磁石の大巾な改造を意味し、不可能であるので、この場合前者を取りざるを得ない。

これを偏向可能エネルギーに当てはめると、Fig. 1 のようになり、 $N^+$  では 0.7 MeV となる。

将来、分析電磁石のコイルを巻き足して磁束密度を 1.5 倍程度まで上昇する予定であるが (Fig-1 点線)，これでも 1.28 MeV 位にしかならない。

したがつて、より高エネルギーのイオン、あるいは、より重い粒子に対し使用可能にするためには、 $m/e \cdot Q$  の分母を大きくすること、つまり多荷チャージのイオンをイオン源で発生させることが必要である。

次式より、多荷イオンは非常に有利であることがわかる。

$$B = \frac{1}{R} \sqrt{2V \frac{m}{e \cdot Q}}$$

B : 磁束密度 [WB/m<sup>2</sup>]

e : 電子の電荷 [Coulomb]

m : イオンの mass [Kg]

Q : イオン価数

R : 曲率半径 [m]

V : 加速管印加電圧 [V]

\* High Voltage Engineering Corporation, Burlington, Massachusetts, U.S.A.

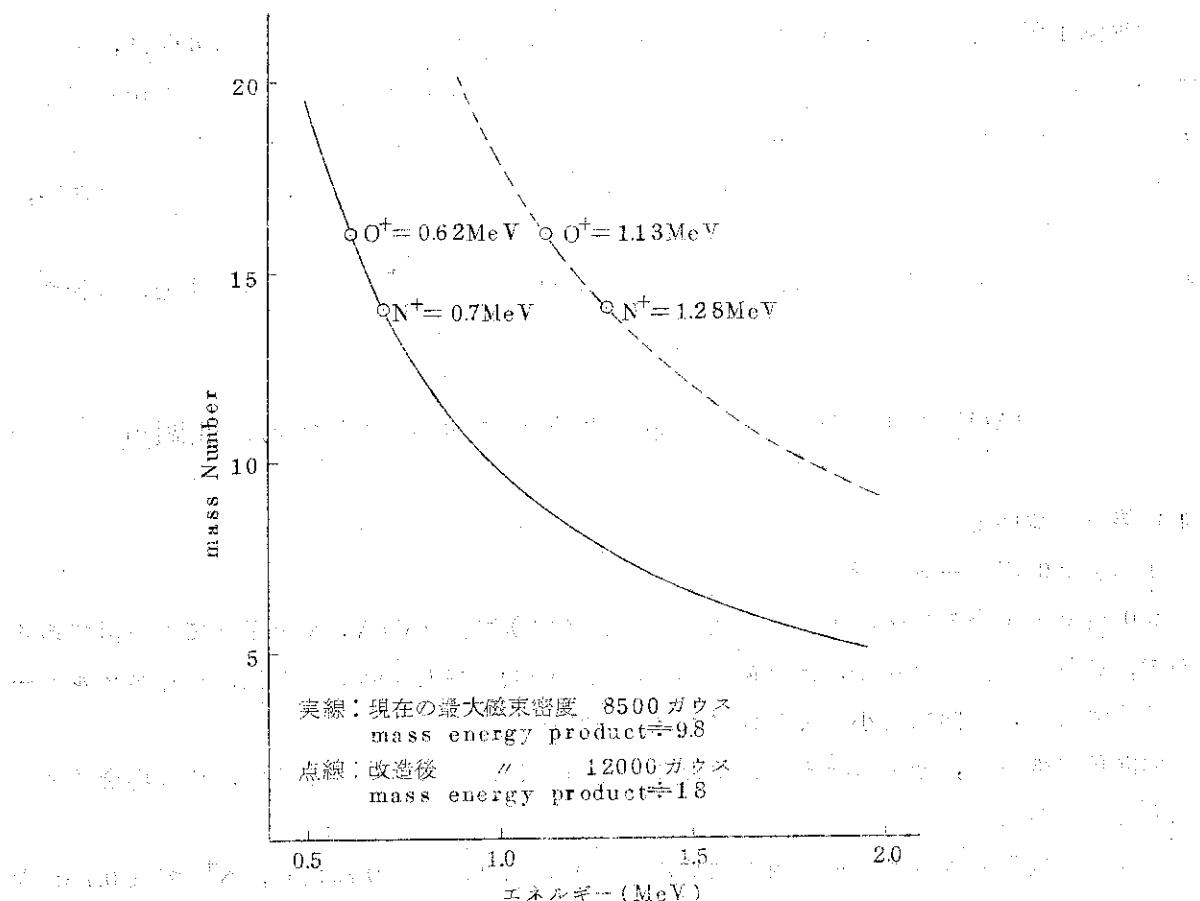


Fig. 1 分析電磁石が最大磁束密度のときの偏向可能エネルギー

と mass Number との関係

## 1-b) 真空系について

現在の真空排気装置は、イオン源、加速管、分析電磁石に至る範囲と、振分け電磁石、ビームエクステンションの範囲を、それぞれ  $200 \text{ l/s}$  水銀拡散ポンプ 1 台ずつで受持つており、平均的な圧力は  $5 \times 10^{-6} \text{ Torr}$  である。

この真空度は、陽子、重陽子に対しては充分であるが、窒素イオンに対しては、良いビームフォーカスを得るために  $10^{-6} \text{ Torr}$  1 台が必要である。

しかし、真空度改善のためには、抜本的な策が必要であり、加速器の長期運転休止の必要なことや、コストの点から、今回は見送らざるを得なかつた。

## 2) VdG 運用について

当 VdG は、マシンタイムの約 7 割が陽子、重陽子、3 割が電子加速として使用されて来たが、将来とも、この配分は続くと思われる。

したがつて、重イオン加速用としての改造は、今まで通りの陽子、重陽子、電子の性能と、それらに変換する際の作業性などを損なわないようにするなど、種々の制約がある。このため今回行なつた改造の範囲、方法などは重イオン加速用として、不満な点も少くない。

### 3. 重イオン加速用のため試験、改造した部分

#### 1) イオン源<sup>1)</sup>

重イオン加速を行なうためには、イオン源の性能がもつとも重要であることは云うまでもないが、前述の種々の制約から、高圧端子の大巾改造を必要としないHigh Voltage 社製のBK-S05型、RFイオン源<sup>2)</sup>(陽子、重陽子用)を採用した。

この場合のRF型イオン源の長短としては、

##### 長所

- a. 高圧端子部分や、レンズ系部品がほとんど流用できる。
- b. 操作が簡単である。
- c. ガス消費量が少い、したがつて真空ポンプの負担が少い。
- d. 発熱がほとんどないので冷却しなくてよい。

##### 短所

- a. ピーム引出口(キャナール)の損耗が激しい、したがつて、出力ピームを少なくしなければならない。
- b. 試料によつてはガラス内壁が汚れ、イオン化に必要なRF, Powerが入らなくなる。
- c. 多荷イオンはほとんど期待できない。

などであるが、一般的に、短所 a, b が原因で重イオン用に使用されるケースは少ない。

今回の場合は、窒素ガスを使用するので、bは問題なく、a, の点につき充分なベンチテストを行なつた。

ベンチテストに際して、RF発振器、ガス流量調節器は実際に使用するものと同一のものを使用した。

Fig. 2は、BK-S05型RFイオン源の構造である。Fig. 3は、押出電圧対出力、寿命の特性であり、2~3μAのN<sup>+</sup>ならば、100時間の使用に耐えることが判明した。

これは、通常のマシンタイムの1サイクルを充分カバーすることができる。

Fig. 4は、新品キャナールと、100時間使用後のものの写真である。使用後のものは、キャナール上面内周が、イオンの衝突によりえぐられていっているのがわかる。この面が平坦でないと、イオンビーム押出電場が歪み、ビーム出力減少、フォーカス悪化、ビームふらつきの原因になる。

Fig. 5は、RF発振器出力が、それぞれ、22W, 34W, 47Wのときの、ガス流量に対するビーム出力の関係である。

Fig. 6, 7, 8 は、ガス流量が最適値である0.6 cc/hrに於ける、押出電圧対ビーム出力の関係で、それぞれ、RF発振器出力が、22W, 34W, 47Wのときのものである。

このテストでは、当初期待していなかつた、N<sup>2+</sup>と思われるものがかなり得られているが、VdGに取付けたときのデータでは、非常に低い値となつてゐる。(このことについては後述する。)

以上、種々データより、押出電圧を1500V以内で使用すれば、照射実験に必要な2~3μAのN<sup>+</sup>が、充分得られることが確認された。

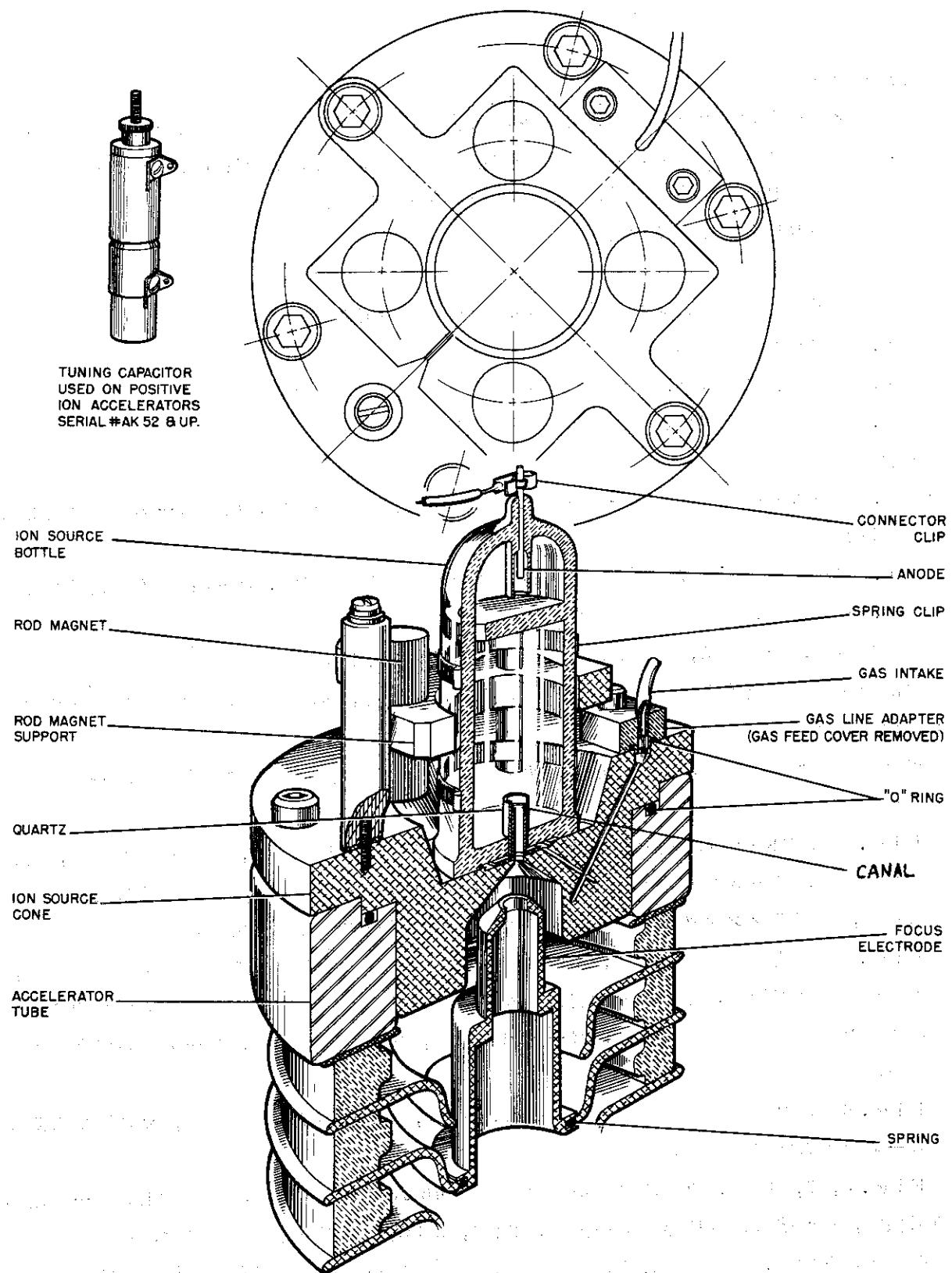


Fig. 2 BK-SO 5型 R.F. イオン源

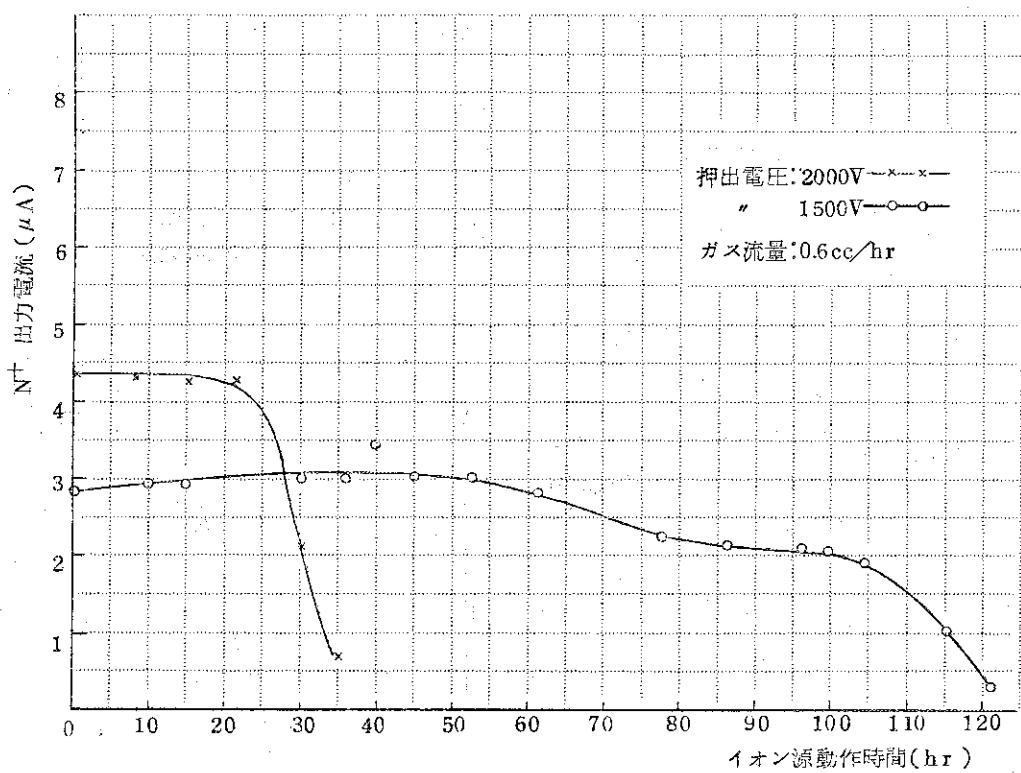
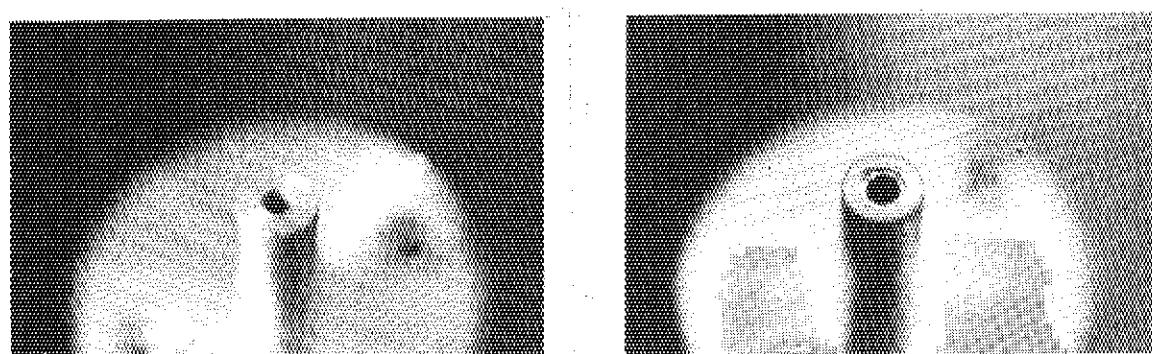


Fig. 3. 押出電圧とイオン源の出力寿命特性



新品のキャナール、材質はアルミニウム

100時間使用後の状態

Fig. 4. 使用後のイオン源キャナールの損傷状態

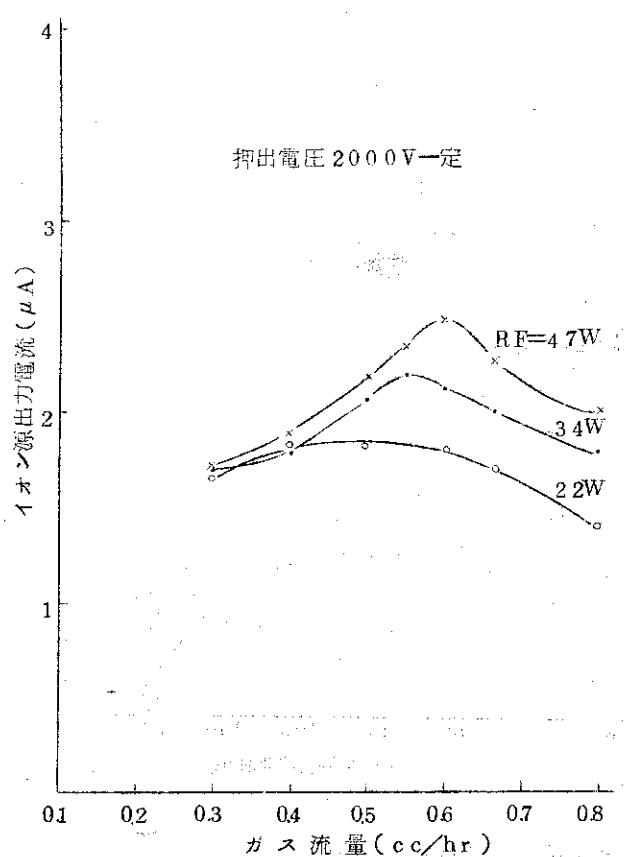
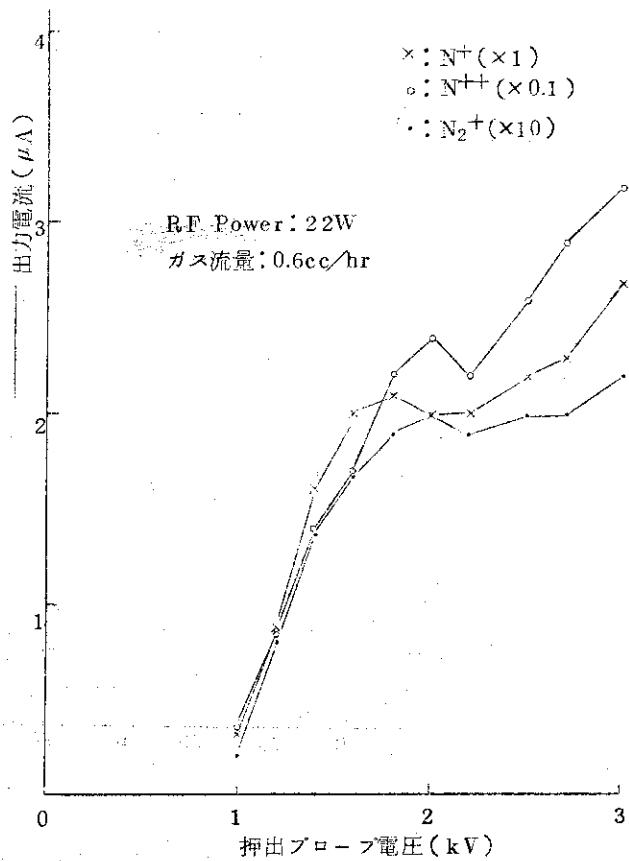
Fig-5 ガス流量と  $\text{N}^+$  出力との関係

Fig-6 ガス流量0.6cc/hrの時の押出電圧と出力の関係

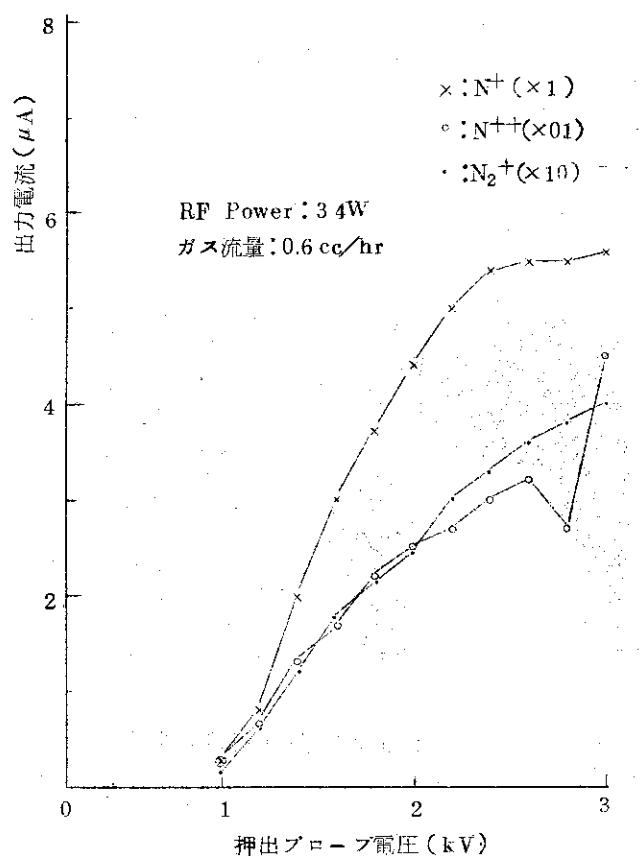


Fig-7 ガス流量0.6cc/hrに於ける押出電圧と出力電流の関係

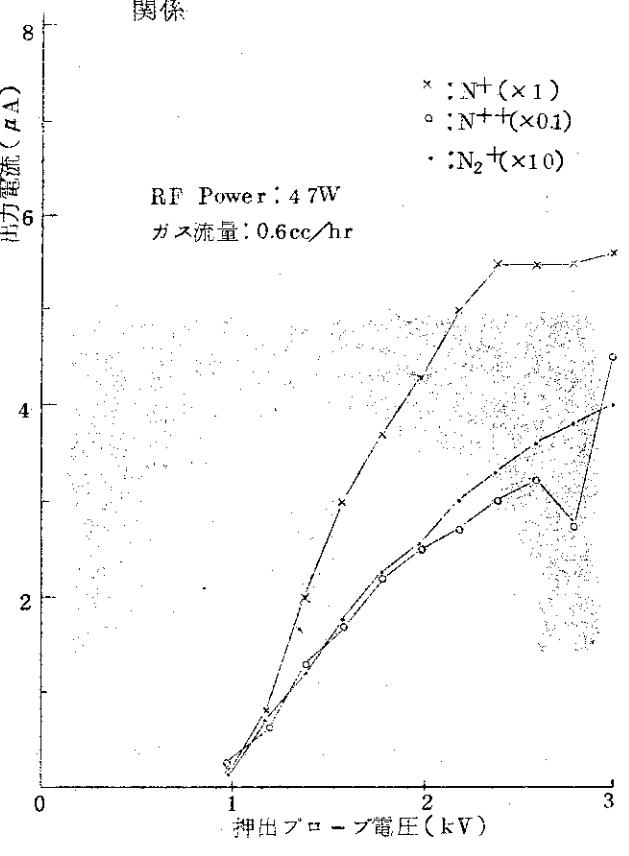


Fig-8 ガス流量0.6cc/hrに於ける押出電圧と出力電流の関係

## 4. VdGによる窒素イオンの加速

## 1) VdG および附属設備

VdG および附属設備は Fig. 9 の通りである。

VdG 高圧端子は、イオン源、ガスボンベ、RF発振器、電源等で構成されている。

VdG 直下には、分析電磁石があり、VdG で加速されたイオンビームのうち、設定された  $m/e \cdot Q$  のもののみが 90 度偏向され、通過できるようになっている。

分析電磁石を通過したイオンビームは、振分け電磁石に入り、適当なチャンネルに振分け使用される。

真空ポンプは、VdG 加速管出口、および、振分け電磁石下にあり、ともに  $200\ell/s$  の水銀拡散ポンプである。

イオン源より生成されたイオンは、加速管で加速されると同時に集束作用を受け、分析電磁石入口にフォーカスし分析電磁石通過後は、この電磁石シムで、振分け電磁石入口にフォーカスするよう調整されている。

VdG の能力は、最高発生電圧 2MV、陽子、重陽子電流  $50\mu A$  (分析後  $25\mu A$ )、端子電圧 安定度  $\pm 2\text{KV}$  である。

## 2) イオンの出力、および分析

表 1、および、Fig. 10 は、VdG 端子電圧 0.7MV、イオン源動作条件は、RF入力  $21\text{W}$  ガス流量  $0.6\text{cc/hr}$ 、押出プローブ電圧  $1500\text{V}$  のとき分析電磁石で分析されたイオンビームの値である。このとき、分析電磁石に入る全イオンビームは、約  $40\mu A$  であつたが、分析電磁石の巻線許容値が  $5\text{A}$  なので、 $N^+$  より  $m/e$  が大きく、エネルギーが  $0.7\text{MeV}$  以上のものは測定されてない。多分、 $30\mu A$  位は  $N_2^+$  であろう。

表-1 加速電圧  $0.7\text{MV}$  における分析イオンビーム強度

分析電磁石電流 (A)	分析ビーム強度 ( $\mu A$ )
1.13	0.04
1.50	0.6
2.99	5.0
4.40	6.0

測定に際して、VdG 端子電圧は、分析電磁石出口スリットとコロナスタビライザーによるフィードバック型の端子電圧安定機構により、分析電磁石電流を変えると端子電圧もそれにつれて変るので、端子電圧が  $0.7\text{MV}$  を指示したとき (0.5% の精度) の、分析電磁石電流を、

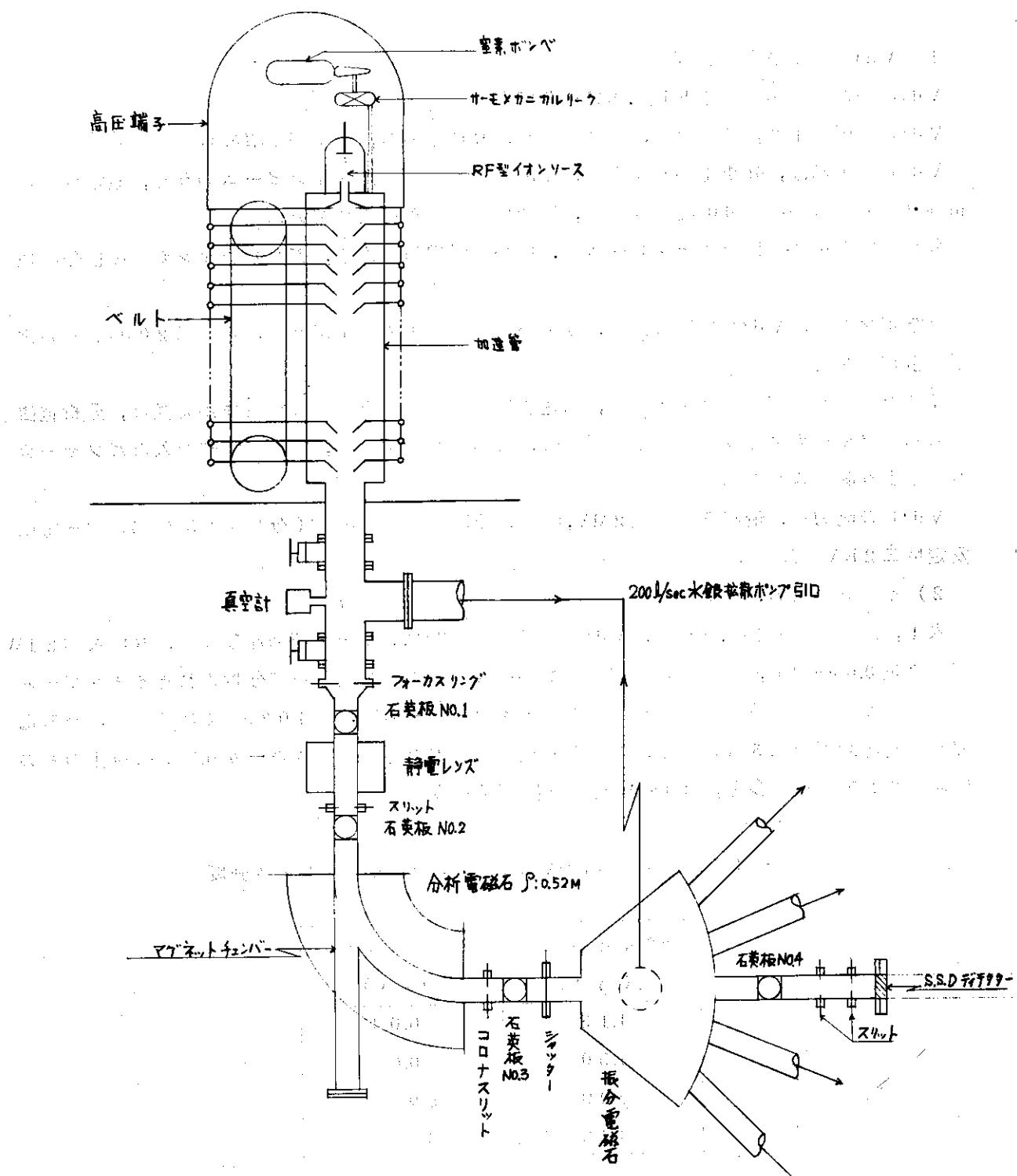


Fig. 9 2 MV V. d. G. および附属設備

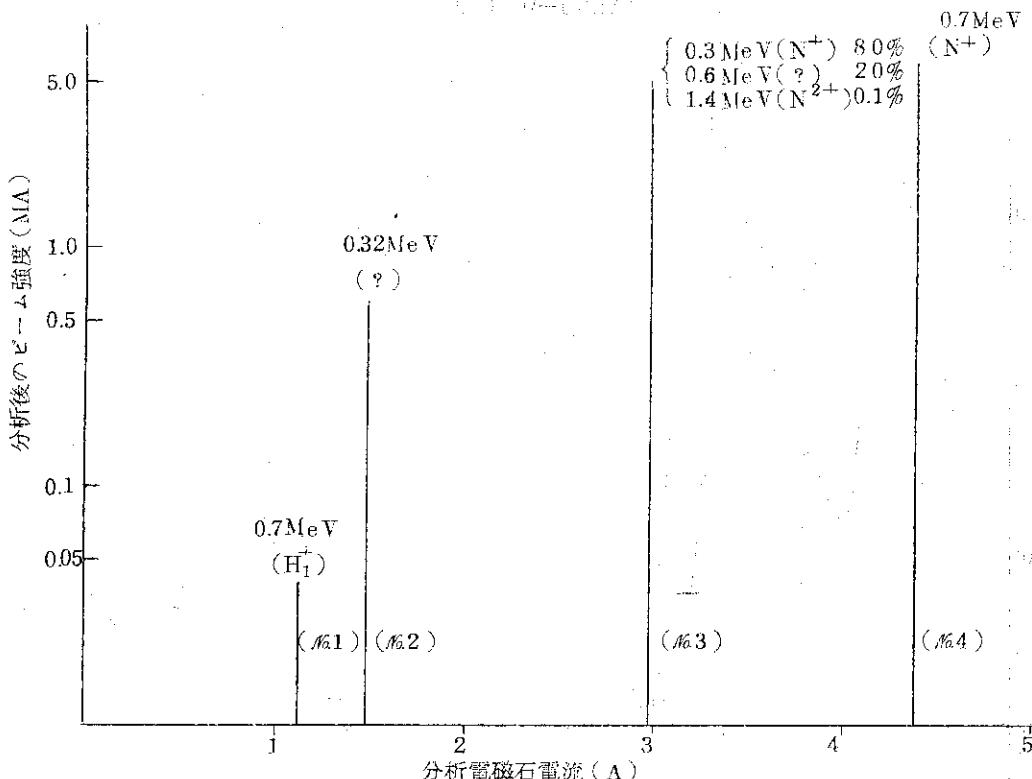


Fig. 10 加速電圧 0.7 MV に於ける分析イオンビーム

読みとつてある。したがつて、Fig. 10 の各ピークのエネルギー巾は、端子電圧安定度によつて決定される  $\pm 2 \text{ keV}$  である。

また、イオンの種類、値数を知るには、各イオンのエネルギーを知る必要があるので、SSD を使用し、エネルギー測定も併用した。これは、イオン源ガスの不純物によつて、イオン源で発生する窒素以外のイオンや、加速管、ビームダクト内の残留ガスが、加速されたイオンと衝突しイオン化したもの、あるいは、分析電磁石入口スリットや分析電磁石内真空ダクト壁面に当り、散乱を受け、エネルギーを適当に失つたイオンなど、種々のものが存在する可能性があり、磁場による偏向だけでは、イオン種類、電荷の決定ができないためである。

SSD は分析電磁石で分析されたイオンビームを、直接受けるように配置した。(Fig-9) この場合、そのままではイオンビームの量が多過ぎ、SSD を破損する可能性があるため、前面には  $10\mu$  のニッケル箔にピンホールをあけたものを置き、ビームを絞つて測定した。

Fig. 11 は、分析電磁石によつて偏向された各イオンビーム (Fig-10 のもの) のエネルギーを、SSD によつて測定したものである。このエネルギー値,\* および、分析電磁石電流値より、各イオンビームの、陽子に對する  $m/\alpha$  比を計算したものが表 2 である。これから、分析電磁石電流値  $1.13 \text{ A}$  のもの (NO. 1) は、 $0.7 \text{ MeV}$  の  $H^+$  である。陽子が存在する理由としては、イオン源ガスの容器、配管を、水素ガス用として、今まで使用していたものを流用したため水素が、壁面等より放出し窒素に混入したものと思われる。次の  $1.50 \text{ A}$  のもの (NO. 2)

\* SSD の粒子入射面は、金が  $200 \text{ \AA}$  厚で被覆されており、入射粒子はエネルギー・ロスをする。したがつて、Fig-11 での各ピークのチャンネルは、実際のエネルギーよりも低いところに相当するチャンネルに表示されている。

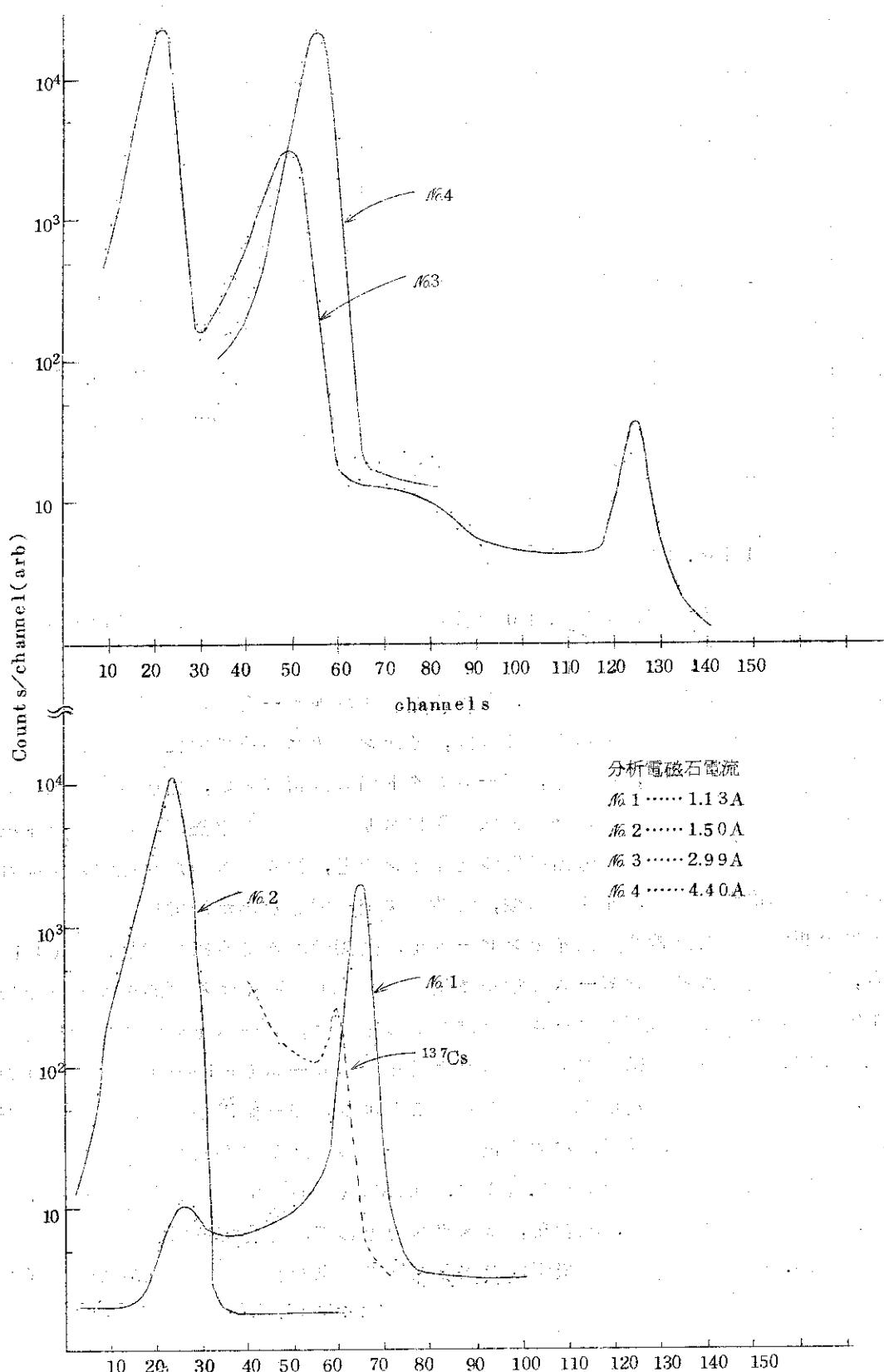


Fig.11 加速電圧 0.7 MV にて分析された各イオンビームのエネルギー測定結果

JAERI-M 5032  
表-2 加圧電圧 0.7 MV に於ける分析イオンビーム  
の陽子に対する  $m/e$  比

Fig-10 で示す分析 ビーム番号	陽子の $\frac{m}{e}$ を 1 とした 場合の比
NO. 1	1.00
2	3.98
3	7.2 11.8 14.0
4	14.0

は、エネルギー  $0.32 \text{ MeV}$ ,  $m/e \cdot Q = 4$  程度のものであるが、 $m/e \cdot Q = 4$  のものの残留は考えられないので核種推定は困難である。 $2.99 \text{ A}$  のもの (NO. 3) は、エネルギーのピークが 3ヶ所あり、低い方から順に、 $0.3 \text{ MeV}$ ,  $0.6 \text{ MeV}$ ,  $1.4 \text{ MeV}$ , であり強度は各々  $4 \mu \text{A}$ ,  $0.75 \mu \text{A}$ ,  $5 \text{nA}$  である。 $m/e \cdot Q$  比は 14, 12, 7 である。14 のものは  $30 \mu \text{A}$  程度の  $\text{N}_2^+$  が、分析電磁石真空ダクトに当り、そこで発生した  $\text{N}^+$  であろう。12 のものは  $\text{C}^+$  とすれば、加速管途中より発生したものでなければ、エネルギーが合わず、加速管途中で  $\text{C}^+$  の発生源もないのに何であるか不明である。7 はエネルギーが  $1.4 \text{ MeV}$  であるから、イオン源で発生した  $\text{N}^{2+}$  である。イオン源のベンチテスト時に於ける  $\text{N}^{2+}$  は  $0.1 \sim 0.2 \mu \text{A}$  程度存在すると予想したが、この場合、分析電磁石の電流値より推定しただけであるので、あるいは同じ様な機構で  $\text{N}_2^+$  が解離し、エネルギーをかなり失つた  $\text{N}^+$  であつたものと思われる。ちなみに、この  $2.99 \text{ A}$  の分析電磁石電流は、丁度  $1.4 \text{ MeV}$  の  $\text{N}^{2+}$  の偏向電流値であり、粒子のエネルギー測定をしないと、 $0.3 \text{ MeV} \text{ N}^+$ ,  $0.6 \text{ MeV} \text{ C}^+$  (?) の混在が判明しないケースである。

最後に  $4.43 \text{ A}$  のもの (NO. 4) は、エネルギー  $0.7 \text{ MeV}$ ,  $m/e \cdot Q = 14$  で  $\text{N}^+$  である。以上の他、微少電流値で観測されるものは、分析電磁石電流値全域に亘り無数に存在している。これらは、加速管、ビームダクトなどの真空度が良くないことや、ビームダクト壁面などに種々の物質が附着していることなどが原因であろう。

### 3) イオンビームの形状、および安定度

イオンビームの観測手段としては、イオンビーム通路各所にある石英板でイオンビームをさえぎり、直接目で見る方法と、アパーチャ、スリットなどに當る電流を測定する方法を用いた。

加速電圧  $0.7 \text{ MV}$  で、全イオン電流  $40 \mu \text{A}$  のとき、イオンビーム通路各位置における石英板観測は Fig. 12 で示す。

分析電磁石以後は、 $\text{N}^+ 5 \mu \text{A}$  のものである。比較のため陽子加速のときの状態も示してあるが、これと比べるとフォーカス悪化が、かなりあることがわかる。

イオンビームを照射実験等に使用できる位置は、最つとも近いところで振分け電磁石中心よ

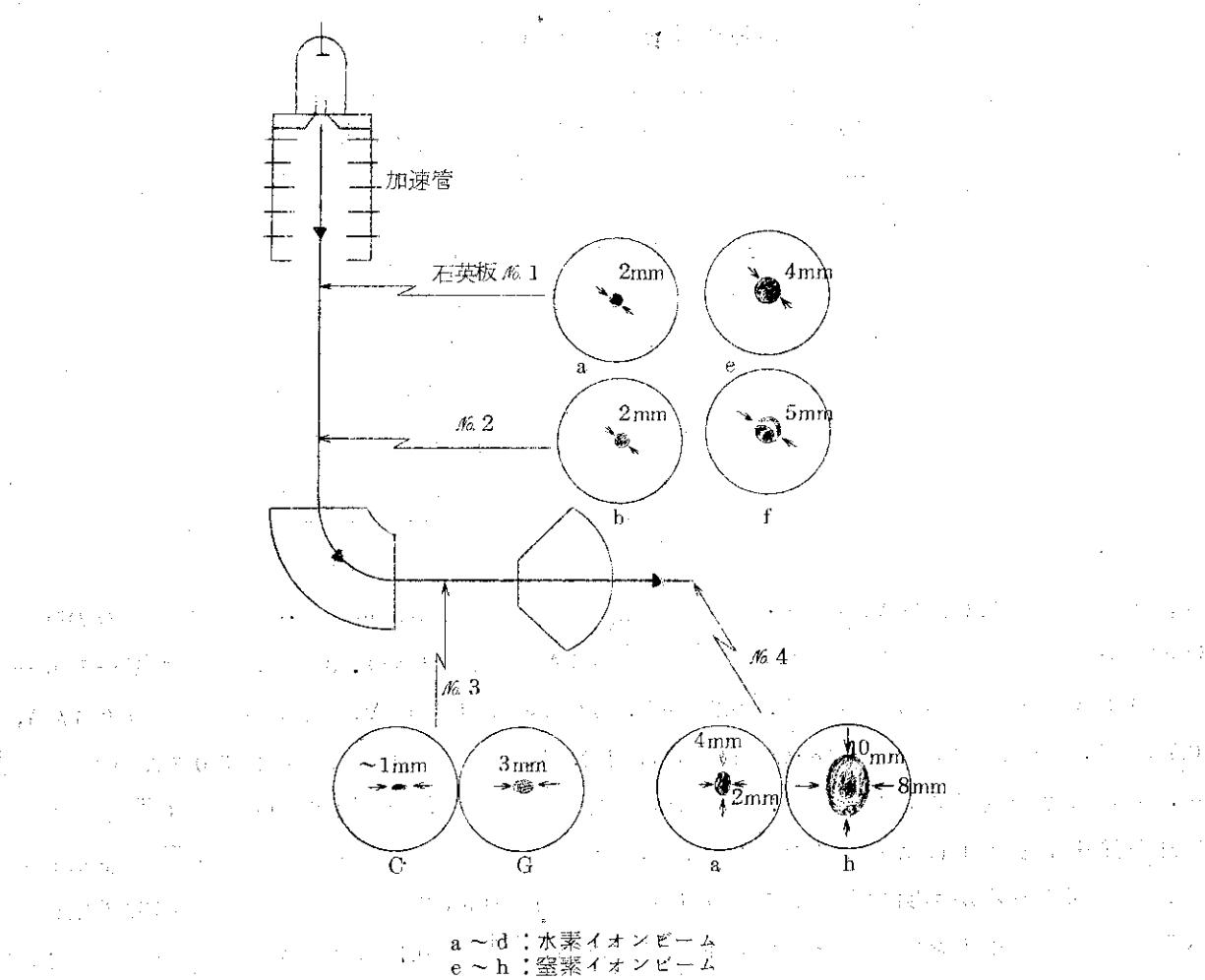


Fig-12 加速電圧 0.7 MV に於けるイオンビームの大きさ

り約 1 m であり、 $0.7 \text{ MeV}$ ,  $\text{N}^+$  のフォーカスは Fig. 12 の如く、約  $1 \text{ cm}\phi$  である。イオンビームの強度は中心程強く、周辺になるに従つて弱くなり石英板発光の状況より判断すると、 $1 \text{ cm}\phi$  の外周辺で約 70% 位である。

照射試料などに、均一にイオンビームを当てる場合は試料を極く小さくするか、イオンビームをスキヤンニングする必要があろう。

イオンビーム形状をもつと大きくして使用する場合は振分け電磁石中心より距離をとれば良いが、真空度が良くない場合はイオンビームの損失が多くなり得策ではない。

また、Qレンズ等を用いて、イオンビーム形状を少々小さくすることは可能であり、 $2 \text{ mm}\phi$  位の形状にすることができるが正確に円形にすることは Q レンズ入射前のイオンビームの発散角が、タテ、ヨコ違うので不可能である。これは分析電磁石と振分け電磁石の入出口にあるイオンビーム集束用磁場が、ビーム断面 x, y 方向に均等にかけることができないためである。

イオンビーム安定度は極めて良好で、全期間 1 ケ月（イオン源動作約 70 時間）を通して、全く変化がみられなかつた。当初心配された加速管電極のダメージは、認められず、この程

度の真空度 ( $6 \sim 8 \times 10^{-6}$  Torr) ならば、加速管電極に衝突する程、イオンビームのフォーカス悪化は、起つてないと思われる。

#### 4) 分析後の $N^+$ より生じる $N^{2+}$ , $N^{3+}$

分析電磁石で分析された  $N^+$  は、振分け電磁石に入り、適当なチャンネルに偏向されて使用するが（偏向しないで使用できるチャンネルもある）このとき、三種類の  $m/e \cdot Q$  比のものが、振分け電磁石電流に対し観測されている。

電磁石電流値に対する各々のビーム強度は表 3 の通りであるが、同一偏向角に対する電磁石電流の割合は、丁度 1 : 2 : 3, となつており、明らかに  $N^{2+}$ ,  $N^{3+}$  の発生が認められる。

表-3 分析イオンビームの同一偏向角に於ける振分け  
電磁石電流とイオンビーム強度の関係

$N^+$	振分け電磁石電流 (A)	ビーム電流 ( $\mu A$ )	ビーム強度比
$N^+$	1.32	3.5	600
$N^{2+}$	0.66	2.0	280
$N^{3+}$	0.42	0.017	1

振分け電磁石に入る全イオン電流:  $\sim 6 \mu A$

イオンエネルギー:  $0.4 MeV$

振分け電磁石偏向角: 22.5 度

確認のため、静電偏向による各ビームの偏向角も測定したが、これも丁度整数倍となつており、計算とよく一致する。

$N^+$  が価電変換<sup>3)</sup>を行なう過程としては、固体、気体との衝突が起つているはずであり、前者は分析電磁石出口より 40 cm のところにある VdG 端子電圧安定用のスリット（コロナスリット），後者は真空中の残留気体である。

しかし、この場合は、 $N^{2+}$ ,  $N^{3+}$ , がエネルギー的に良く揃つてゐることから、どこか特定の場所一ヶ所で価電変換が行なわれてゐることになる。

したがつて、最つとも可能性の高い場所としてコロナスリットが考えられる。

コロナスリットは、30 mm 巾, 2 mm 厚のタンクステン板で、間隙は 2 mm に調整されており、イオンビームの 90% が通過できるようになつてゐる。

しかし、この場合、スリット端面をかすめて通過するイオンは、イオンビームの断面が円形と考えれば、極めて少く、発生した  $N^{2+}$  の量から、仮に  $N^+ \rightarrow N^{2+}$  の変換効率が 100% としても、計算上合致せず、今後更に測定、解析しないと原因がはつきりしない。

照射実験等でイオンビーム照射量を算出する場合、通常試料片に當る電流値の積算をもつて行なうが、この場合注意すべきことは、2 倍, 3 倍あるいは逆に電子捕獲によつて中性、あるいは価数減少となつた粒子の存在が考えられる点である。これ等が混在したビーム量は電流計の測定からでは誤差の多いものとなる可能性がある。

## 5. 重イオン加速のため改良すべき点

短期間のテストであつたが、重イオン加速上の問題点として指摘されるべき点は、数多くあつた。これらを項目別に整理し、性能向上のための指針としたい。

### 1) イオン源について

今度のテストではRF型を使用したが、これは3章で述べているように重イオン用としては本質的な欠陥を持つており、より多種な元素を扱うことは不適当である。特に当VdGのように分析電磁石の容量が小さいものにあつては多荷イオンの発生が必須の条件であり、この面からもよろしくない。

低エネルギー加速器を、照射実験用として用いる場合のイオン源の具備すべき条件は種々あると思うが、ここでは現実的にすぐに解決できる方法——つまり2章で述べた種々な制約を考えて——を探らねばならない。

第一は1つのイオン源で陽子、重陽子、および多種の重イオンビームを発生可能にすることであり、種々の実験のマシンタイム配分に自由度を持たせ、VdGの使用効率を向上させることにある。

第二は多荷チャージのイオン発生を可能にすること。これは高エネルギー化とともに、さらに重い元素を加速可能にするために必要であり、現在の分析電磁石能力より、加速管の集束作用が良くなる最低電圧1MVで加速すると分析電磁石通過可能な質量数と電荷数の関係はFig. 13のようになる。

第三はVdG高圧端子に取付けて使用するための問題として、寿命、保守、操作性、消費電力がある。

以上第一より第三の条件を満すイオン源は、市販などされて無く、研究、開発を進め自製によることとなる。一応の目標として、現存する種々のイオン源を考えた場合、PIG型<sup>4)</sup>がもつとも有望である。このイオン源はサイクロトロンの重イオン源<sup>5)</sup>として一般的なものであり当VdGに使用する場合は寿命およびビームのエミッタンス<sup>6)</sup>を改良すれば、ほぼ満足できよう。

### 2) 真空について

現在の真空系は平均的な圧力として $5 \times 10^{-6}$ Torr程度であり、部分的な圧力差も一桁程度あると見なければならない。石英板によるビーム観測でもフォーカス悪化が、かなりあることが判明したが、これより推察するとビーム損失もかなり大きいはずである。したがつて、真空度の改善は、窒素よりもはるかに重いものを加速する場合も考え方本的な策が必要である。現在真空度の限界となつているものを考えると、ポンプ排気速度、排気ダクトやバルブ類の排気抵抗、種々のところより発生する放出ガスであり、これらすべてを改善しないと真空度の好転は望めない。

質量数40程度のイオンが現在の陽子と同程度のフォーカスを保つためには大略 $1 \times 10^{-7}$ ～ $5 \times 10^{-8}$ Torr程度の圧力にする必要がある。これは～ $7 \times 10^{10}$  atoms/cm<sup>2</sup>/mに相

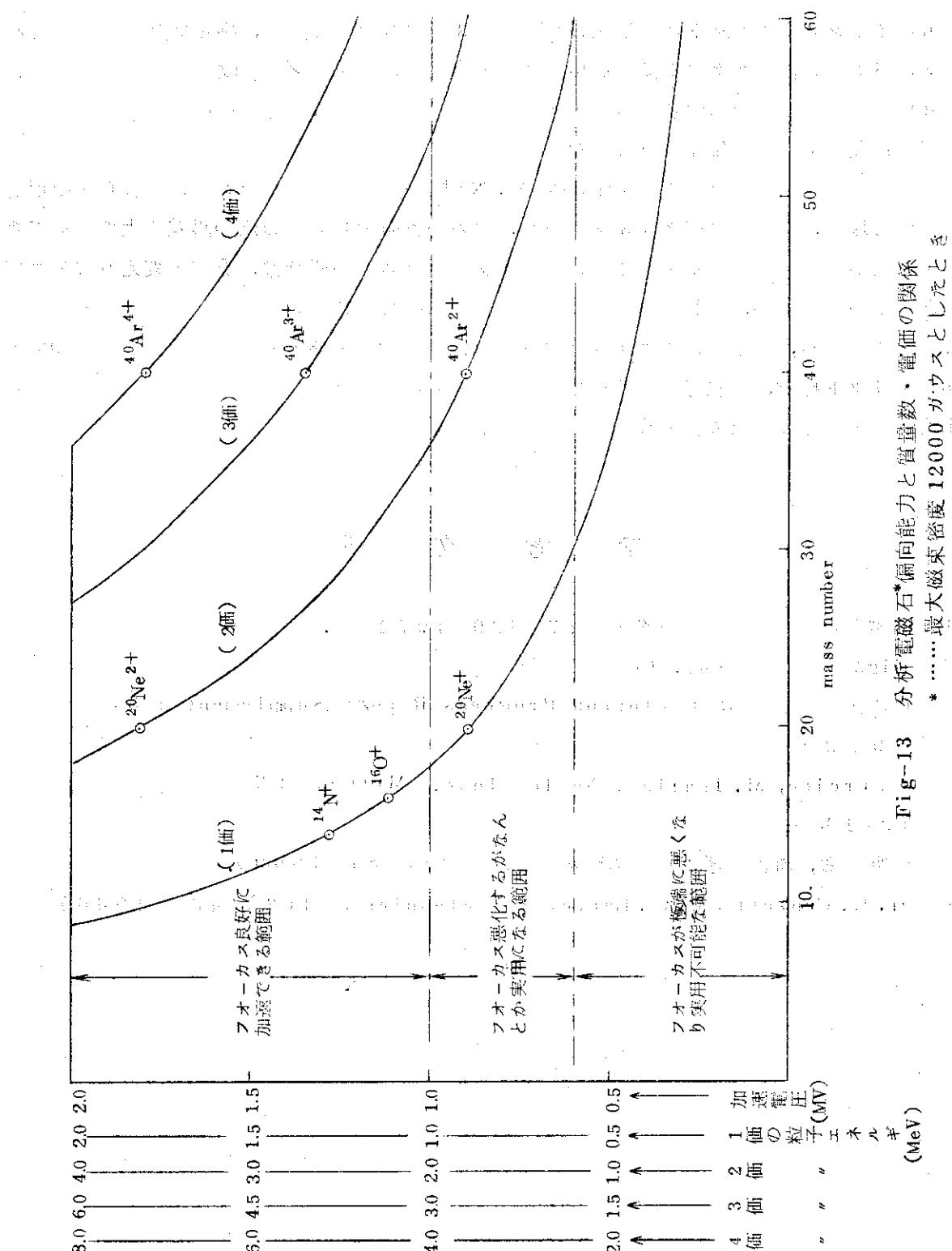


Fig. 13 分析電磁石\*偏向能力と質量数・電圧の関係  
\* .....最大磁束密度 12000 ガウスとしたとき

当し、具体的には次の処置が必要とされる。

- a) ポンプは現在の  $200 \text{ l/s}$  を  $2000 \text{ l/s}$  にする。さらに分析電磁石のところへ  $1000 \text{ l/s}$  のポンプを設置する。
- b) イオンビームダクト径を現在の 2 時より 3 時のものに交換し、排気抵抗の減少を計る。
- c) パッキン、ガスケット類は放出ガスの少い金属、テフロン等に改める。
- d) イオン源より流出するガスをできるだけ少くできるイオン源の採用。

### 3) 加速後発生する多価イオンの問題

分析電磁石の出口スリットで発生する  $\text{N}^{2+}$ ,  $\text{N}^{3+}$  のような多価イオンは、それらを積極的に利用する以外、目的にすべきイオンの減少、あるいは照射量算出の際の誤差増大など有害なケースとなつている。これら多価イオン発生のメカニズム等の研究は、見方を変えれば極めて興味あるものであるが、さし当たり除去に努力しなければならない。

今までのところ、発生源がコロナスリットまたはその近くであると云う以外何もわかつてないが、スリット材質、形状等による発生の特性を知る必要がある。

本文をまとめるにあたり次の文献を参考した。

### 参 考 文 献

- (1) 高木俊宣：エレクトロニクス， 17, 629 (1972) ..
- (2) High Voltage Eng. Co. 技術資料
- (3) 戸沼正雄：IPCR-Cyclotron Progress Report Supplement, 2, 37 (1972)
- (4) K. Prelec, M. Isaila : Nuclear Inst. Methods, 92, 1 (1971).
- (5) 河野 功, 唐沢 孝: 日本物理学会誌, 24, 787 (1969).
- (6) H. E. Conzett, B. G. Harvey : Nucleonics, 24(2):48 (1966)