

資料(再録)

荷電粒子計測器校正装置*1

三宅 互*2 佐川 永一*3 川辺 明*4 喜岡 理砂*4

(1995年12月19日受理)

CALIBRATION SYSTEM FOR CHARGED PARTICLE ANALYZER

By

Wataru MIYAKE, Eiichi SAGAWA, Akira KAWABE, and Risa YOSHIOKA

A new system has been developed for calibration of charged particle analyzers, including ion mass spectrometers, on board spacecraft. The system provides a spatially uniform, parallel, and mono-energetic beam of a single ion species over the energy per charge range up to 30 keV. The mass per charge of ions can be selected to be as large as or larger than 4 (He^+). The system includes an imaging ion beam monitor and an automatic control of acquiring the transmission characteristics of a charged particle analyzer as a function of incident angles and energy of ion beams. This paper describes the outline and the obtained characteristics of the system.

[キーワード] 校正装置, 荷電粒子計測器, 透過特性, イオンビーム, イオン質量選別.

Calibration system, Charged particle analyzer, Transmission characteristics, Ion beams, Ion mass selection.

1. はじめに

本装置は観測ロケット及び衛星搭載用の低エネルギー荷電粒子(10eVから30keVのイオン及び電子)計測器の基礎開発実験, 及び飛翔前の校正試験を行うためのものである。実際のロケットあるいは衛星観測で得られるデータは粒子のカウント数であり, この生データから粒子のエネルギー・ピッチ角分布あるいは3次元速度分布関数などの物理量を得るためには, 印加電圧・視野方向などの計測器運用パラメータとともに, 分析器の幾何学的定数(G-Factor)とよばれる「感度」に相当する値をはじめとする計測器特性を知る必要がある。ここで必要となる計測器の特性とは以下の通りである。

(1) エネルギー(及び質量)特性

分析器の電極への印加電圧と粒子のエネルギー(及び

イオン質量)との関係, さらにその分解能($\Delta E/E$, $\Delta m/m$).

(2) 視野の2次元角度特性

視野の中心方向, およびその周辺への広がり(分解能)。これは一般にエネルギー(及びイオン質量)とカップルしており, (1)と合わせて, センサーへの入射粒子のエネルギー(E)と2次元角(α , θ)に対する分析器の透過特性 $C_m(E, \alpha, \theta)$ として理解されるべきものである。

(3) G-Factor

計測器の感度に相当するもので, センサー部の幾何学的形状のみで決まる。ここで静電エネルギー分析器を例にとれば, 荷電粒子のフラックス $F(E)$ ($/\text{cm}^2 \text{ str keV sec}$)と計測されたカウント数 C_0 ($/\text{sec}$)はG-Factor G をもちいて次式で関係づけられる。

$$C_0 = F(E) \cdot G \cdot E \cdot \epsilon \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで E は分析器を透過してカウントされる粒子の中心エネルギーであり, ϵ は検出器効率である。粒子のエ

*1 (再録) 季報 Vol.42 No.2 June 1996 (pp.245-252)

*2 宇宙科学部 宇宙計測研究室

*3 平磯宇宙環境センター

*4 東京学芸大学

エネルギー (E) と2次元角 (α, θ) にたいする分析器の最大透過率を1とした時の透過特性を $C(E, \alpha, \theta)$ とすると、 G は次式によりあたえられる。

$$G = (S/E) \iiint C(E, \alpha, \theta) dE d\alpha d\theta \quad \dots\dots(2)$$

ここで S は分析器の最大開口面積である。

(4) 検出器効率 ϵ

(1)式の ϵ を、一般論としてはエネルギー (及びイオン種) 特性を含めて、知っておく必要がある。

(5) 計測器の背景ノイズとなる紫外線や高エネルギー粒子に対する特性。

本装置はこれらの特性の計測に供されるものであるが、特に重点をおいているのは分析器透過特性及び G -Factor の測定・導出である。分析器透過特性 $C_m(E, \alpha, \theta)$ を実験的に得るには、一様 (粒子入射口の位置によらない) ・平行 (α と θ の分散がない) ・モノエナジエック (E の分散がない) な単一イオン種のビームを発生させ、 $E, \alpha, \theta, (m)$ を精度よく変え、計測器からのカウント数出力との対応データをとる必要がある。そのデータは3次元空間における分布を表すもので (イオン種 m を入れると4次元)、一般には膨大な計測が必要となるため、計測をプログラム化して、エネルギー・2次元角度 (・イオン種) を手早く自動掃引してデータを取得していくことが望まれる。

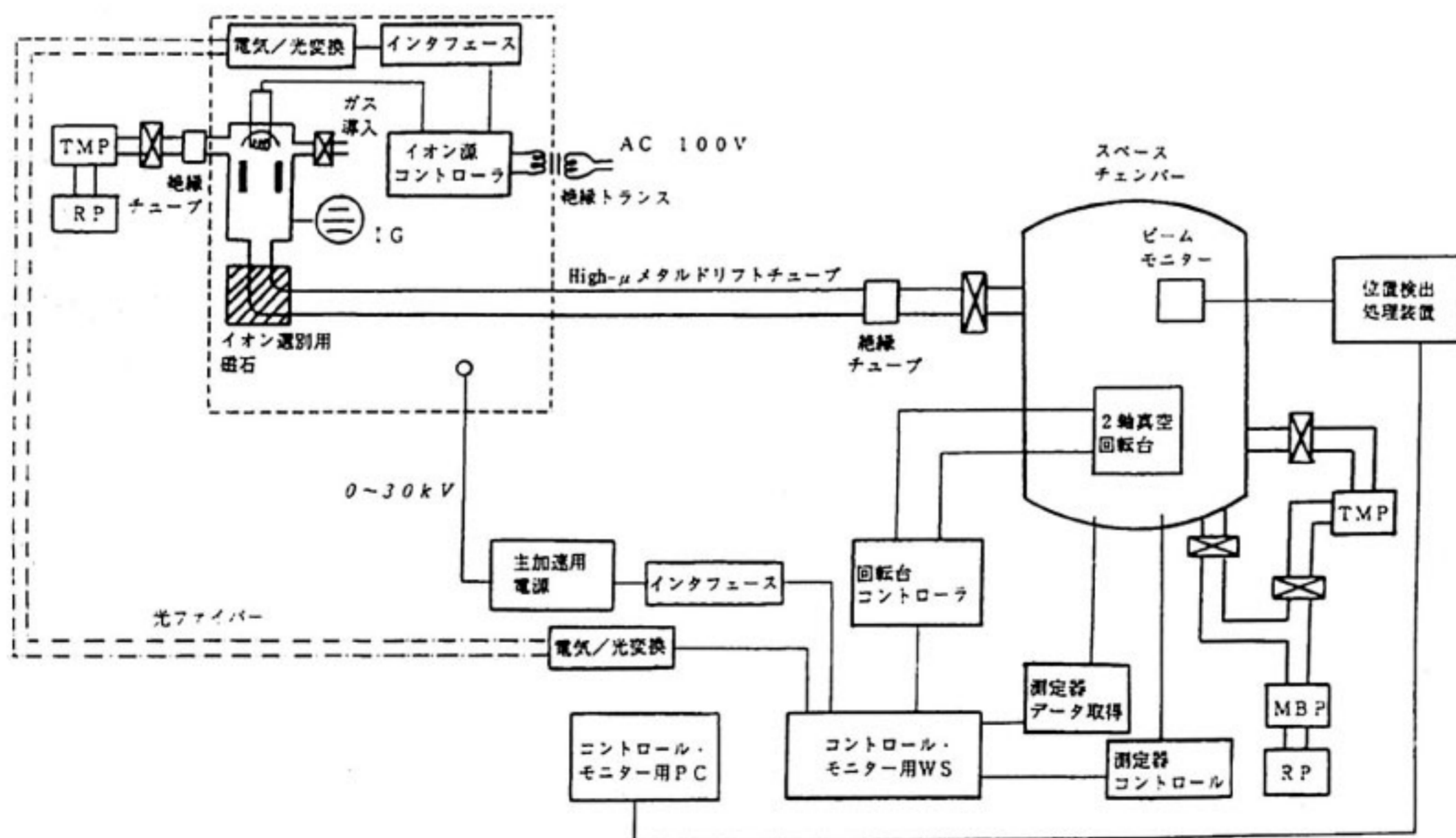
この報告では、平成3年度より開発を開始し7年度に

すべてのハードウェアの設置・調整が終了した校正装置の概要と基礎データを紹介します。この種の装置としては、スイスのベルン大学で開発され、GEOS や ISEE, DE などの衛星に搭載された荷電粒子計測器の校正実験に使用されたもの⁽¹⁾の他、日本では文部省宇宙科学研究所に設置され、科学衛星「おおぞら」、「すいせい」、「あけぼの」などの荷電粒子計測器の開発に使用されてきた装置がある⁽²⁾⁽³⁾。ここで紹介する装置は、その基本原理は上記装置と同一のものであるが、近年の情報処理技術の発展をうけて、その自動制御・データ取得・解析において最新のものとなっている。

2. システム概要

本装置の概要を、第1図に示す。大きく分けて、図中右の主チェンバーとその排気系、チェンバー内の2軸真空回転台とその駆動系、図中左上のイオン源、及び下のイオン源・主チェンバー内の測定系の制御・モニター系の4つからなる。

中性ガスを電離して生成されたイオンは、電場により加速され磁気回路に入射される。電場による加速ではすべてのイオン種について E/q が同じになるが、磁場による偏向では $m \cdot E/q$ により運動が決定される。この電場と磁場による荷電粒子の運動の違いを利用して、エネルギー (E/q) と質量 (m : 即ちイオン種) の両者を分離制御することができる。しかしながら、磁場強度の安定性の理由からイオン選別用磁気回路として永久磁石



第1図 荷電粒子計測器校正装置の概要

を用いているため、あるイオン種を選択するとその E/q も決定されてしまう。そこでこのイオン源全体を浮かせ、電位を制御することで最終的なエネルギー制御を行う。このため、イオン源の制御・モニターは光ファイバーを介して行われ、また電源の供給も絶縁トランスを介して行われる。

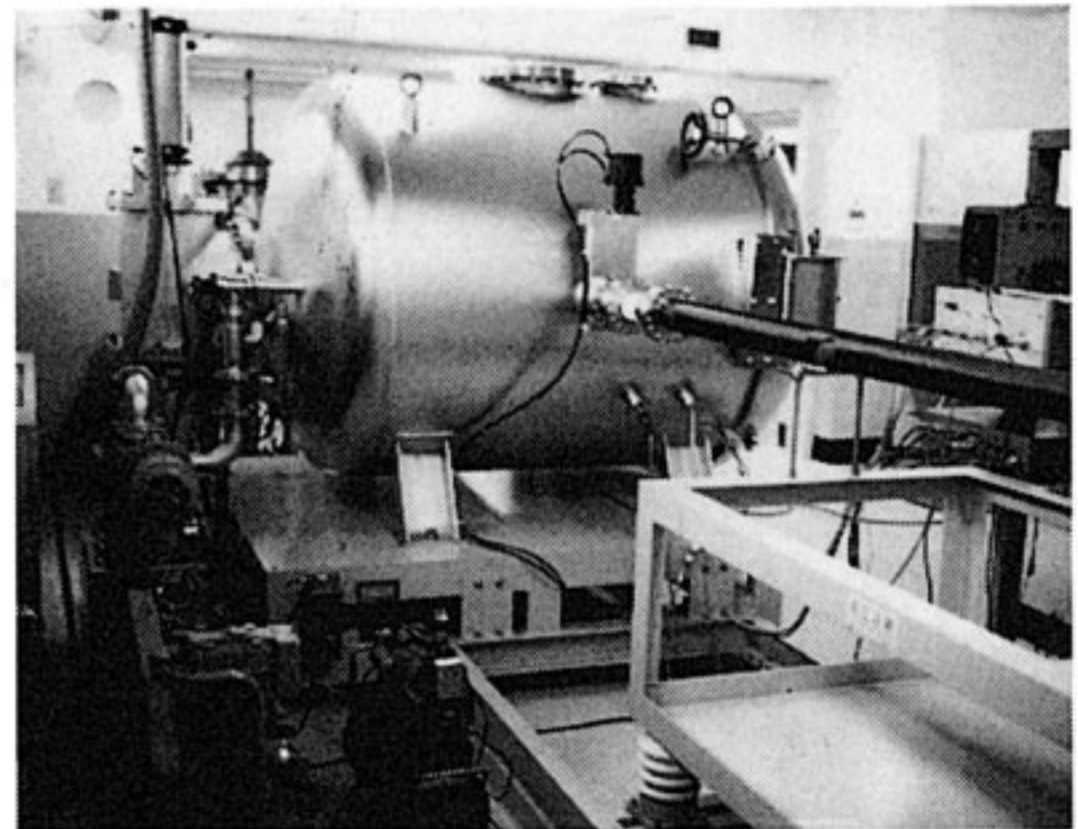
平行かつ一様なビームを得る方法として、イオン源を遠方に置き、遠方からくる星の光は平行かつ一様である原理を用いている。長い距離を運動する間の地球磁場による偏向を受けることを避けるため、イオン源と主チャンバーを結ぶドリフトチューブはHigh- μ metalで巻かれ、イオンの直線運動を実現する。

チャンバー内にはビームモニターが置かれ、後述するようにビーム量および2次元断面分布のモニターとなっている。(2)式の $C_m(E, \alpha, \theta)$ を得るためには、ビームのエネルギーと入射角度を自在に変える必要があるが、イオン源側のパラメータを変えることはその変更速度や安定性を考えると不利な方法であり(例えば、単に加速のエネルギーを変えるとビームの絶対量も変化する等)、特にビームのチャンバーに対する入射角度を大きく変えることはこの装置では不可能である。そこでチャンバー内の荷電粒子計測器のパラメータの側を等価的に変える手法が通常とられる。計測器はチャンバー内の2軸回転台に乗せられ、計測器の側の姿勢の2次元角度を自在に変えることで、ビームの入射角度を制御する。また静電分析器を例にとれば、エネルギー分析のための電極に印加する電圧を変えることで、等価的にビームのエネルギーを変えた場合の特性を得ることができる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これらチャンバー内の機器の制御及びデータ取得のための各種機器が用意されている。

3. 主チャンバーと排気系

このチャンバーは荷電粒子計測器専用のもではなく、ひろく宇宙の真空状態を再現し、他の衛星搭載機器の真空試験や真空を利用した各種実験に使用されるためのスペースチャンバーとして設置されたものである。ここで紹介している荷電粒子計測器校正装置のほかに、真空紫外光発生・分光装置を装備している。

チャンバーは直筒形形状、横置きで片側扉開閉式である。大きさは、円筒内径1200mm、長さ1200mmである。第2図にチャンバーと排気系、ドリフトチューブの写真をしめした。主排気系はL型バルブを介してターボ分子ポンプ1500L/sec、油回転真空ポンプ1300L/minのシリーズのラインである。粗引系はバイパスラインを通してメカニカルブースターポンプ100m³/hr、上述の油回転真空ポンプのラインとなっている。この排気系



第2図 スペースチャンバーとその排気系、及びイオンビームを導入するドリフトチューブ(右側の黒い配管)

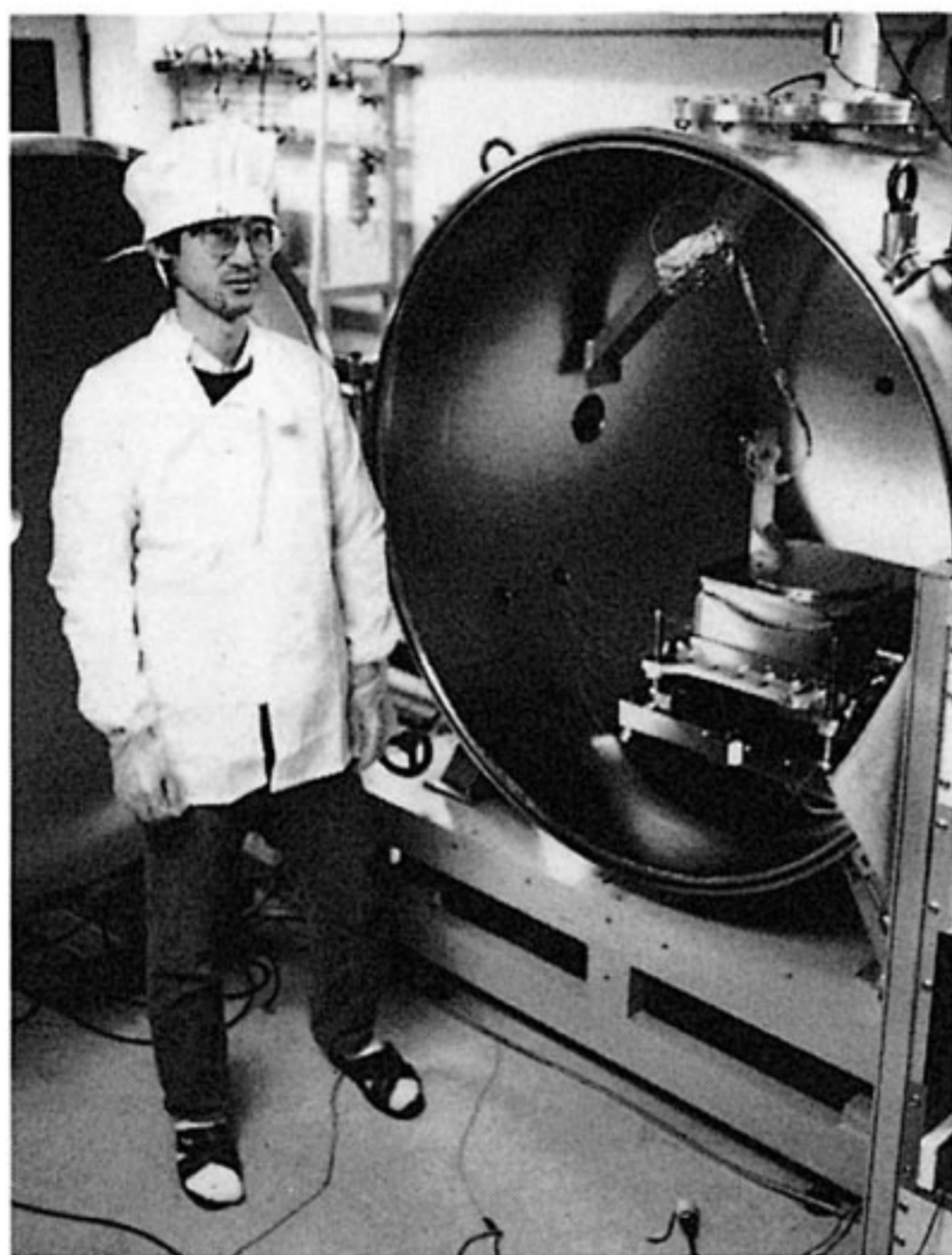
はチャンバー内になにも物を置かない状態で、5時間以内に、大気圧から 10^{-8} Torrの真空を作る能力がある。

真空度のモニターとしてコールドカソードイオン真空ゲージとピラニー真空ゲージが装備されており、20Torrから 10^{-8} Torrにわたって測定・記録ができる。全排気系は完全な自動運転が可能で、これらの真空計からの出力と各ポンプの運転状態のモニター出力から、粗引/主排気系の選択と各バルブの開閉が制御される。運転の制御及びこれらの真空度・各ポンプ/バルブの運転開閉の状態のモニターの表示は、ラックマウントされた単一の制御・モニターパネルにて全て行われる。

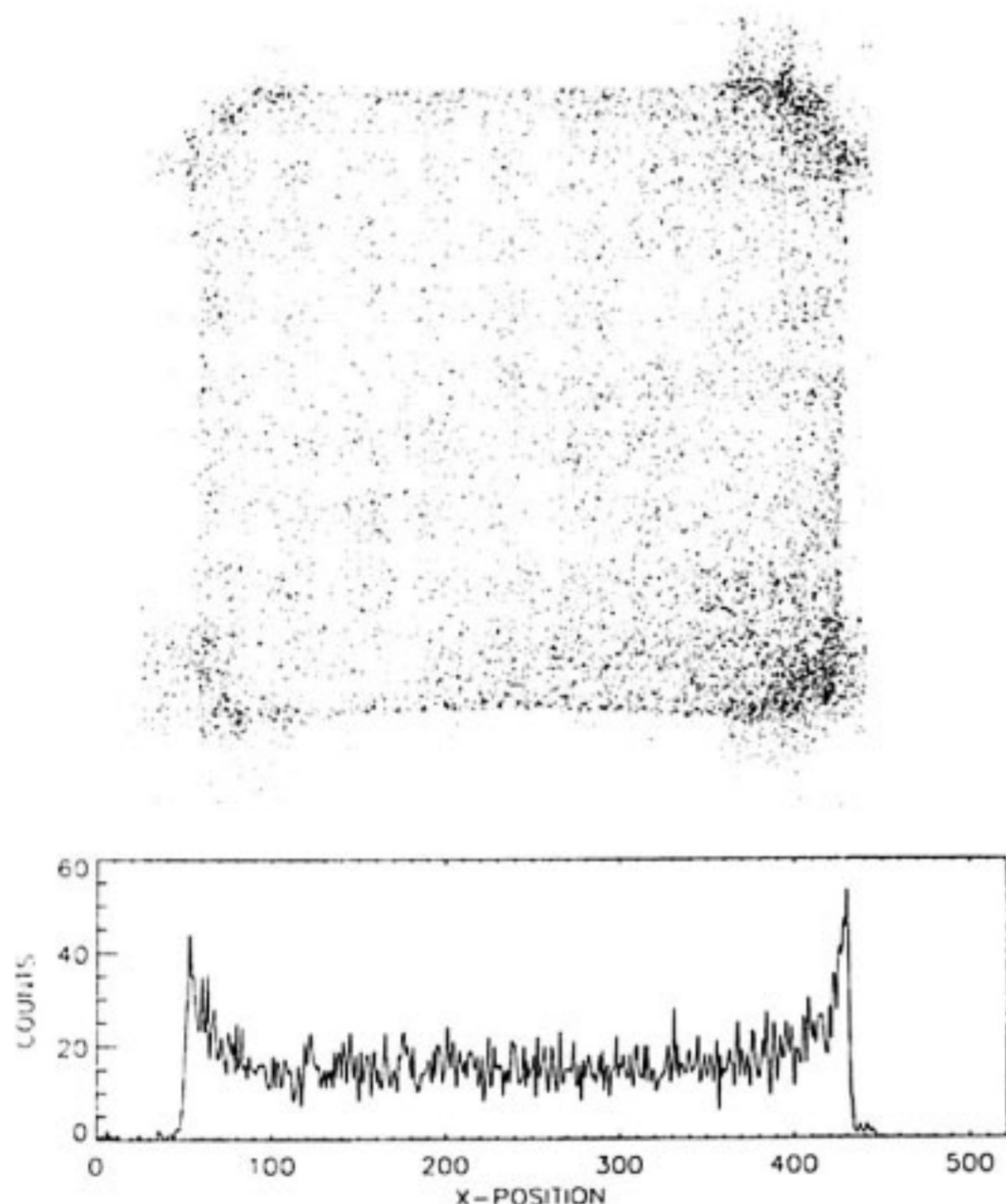
ポンプはすべて空冷式で、断水の影響をうけない。また、停電時には全てのバルブは閉となり、復旧時にそのまま停止状態で待機か自動運転再開かの設定の選択も可能である。

4. 2軸真空回転台

チャンバー内には350mm x 350mmのテーブルの内部架台があり、手動で上下±50mmの移動が可能である。この架台上に2軸回転台が設置されている。これは、±20°の可動範囲をもつ傾斜台に360°の可動範囲の回転台を乗せ、結合したものである。回転精度は傾斜・回転とともに0.1°であり、グリスを用いない高真空用のパルスモーターが使われている。回転テーブル中心上200mmの位置に傾斜軸と回転軸の交点(傾斜・回転運動に対する不動点)があり、イオン源からのビームの中心がこの点を通るように内部架台上の水平位置およびその上下位置をあわせてある。校正実験にあたっては、ここに計測器センサー部の粒子入射口がくるように計測器を設置する。回転テーブルはφ300mmの大きさで、計測器を取り付ける治具のためにピッチ30mmでM5の



第3図 扉を開けたチェンバーと内部に設置された2軸回転台



第4図 ビームモニターで得られた窒素分子イオンビームの強度の2次元像とX（横）方向の強度分布

ネジ穴が一面に切られており、耐荷重は15kgである。

第3図にチェンバーの扉を開けて、内部を写した写真を示す。左の壁にうがたれた穴がビームの導入口で、2軸真空回転台がチェンバー中心に見える。なお、チェンバーは高真空を達成するため、人体の皮膚の油や水分、ほこりによる内部の汚染を防止する必要がある。このためチェンバー内の作業にあたっては、第3図に見られるように防塵服と手袋が必須である。

5. ビームモニター

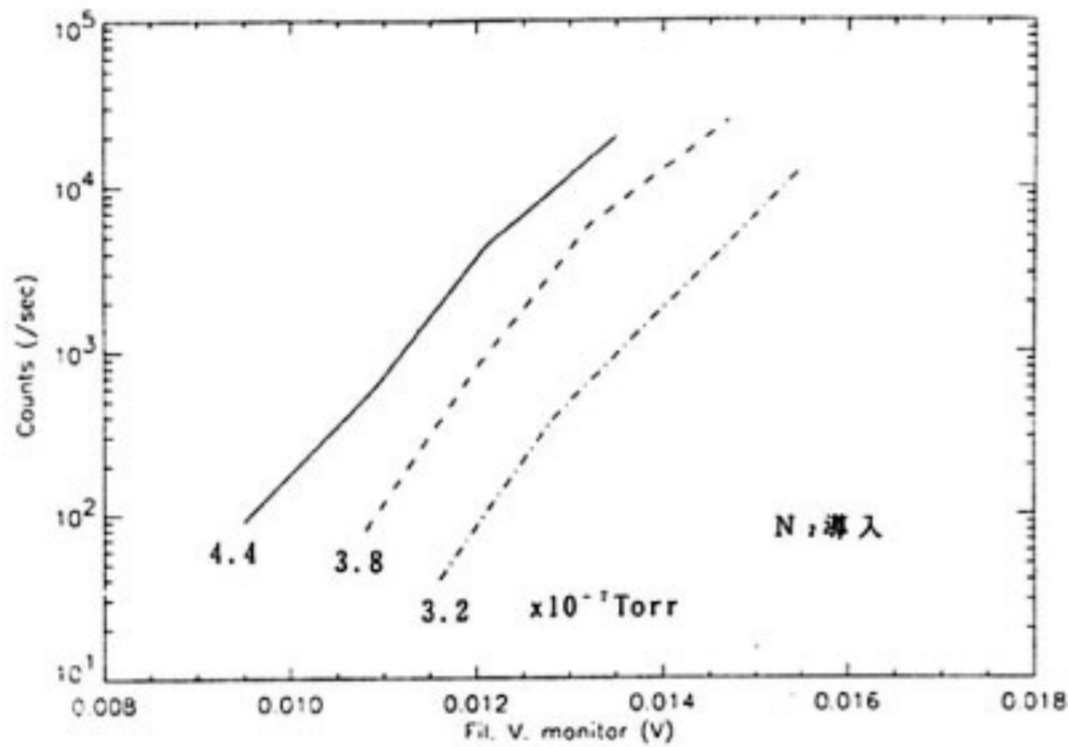
主チェンバー内にはイオンビームの到達・強度・一様性の確認のために、ビームモニターが設置されている。これは、PSD（半導体位置検出素子）をもつMCPを検出器に使用し、そのプリアンプ・高圧電源、位置検出処理装置、制御・データ表示用パソコンからなり（第1図参照）、20mm x 20mmの有効口径内の最大 10^4 cps以上の入射粒子について、その位置情報を0.05mmの精度で求めうる性能をもつ⁽⁶⁾。

このMCPは、通常はチェンバー内上部から吊された回転アーム（回転精度 0.1° 、耐荷重1kg）の先端に取り付けられ、アームを回転させることにより、ビーム放出口と回転台上の計測器の間にMCPを運んだり、またアームの位置を戻したりすることで、ビームをモニターしながら実験を行う。第3図の写真で、チェンバー内の上方から斜めにビーム放出口へ延びているのが回転アームである。なお、この写真ではビームモニターはアームの先端から外され、回転台上に設置されている。

第4図にこのビームモニターで得られた窒素分子イオンのビーム（520eV）の2次元画像と、そのX方向の強度分布のデータを示す。画像データは512x512の画素上に16ビットの強度情報をもっている。20mm x 20mmの有効口径の端の部分は、絶縁材の帯電のためと思われる、像の不自然な歪や強度の上昇が見られるが、それ以外の中心部ではビームの一様性が確認できる。なお、MCPの位置をずらして実験を行っても常に端で強度の上昇が見られることから、第4図の端での強度の上昇は実際のビームの不均一によるのではないことを確認している。

6. イオン源・質量選別部

イオン源としては、ULVAC-PHI社製の差動式イオン銃USG-5を用いている。導入された中性ガスに、フィラメントからの熱電子を180Vの電位で加速・衝突させイオン化する。ガス導入には3種までのガスの混合ができるガス混合器が接続されている。差動排気圧は1000:1以上あり、ガス導入をしても主チェンバー側を高真空



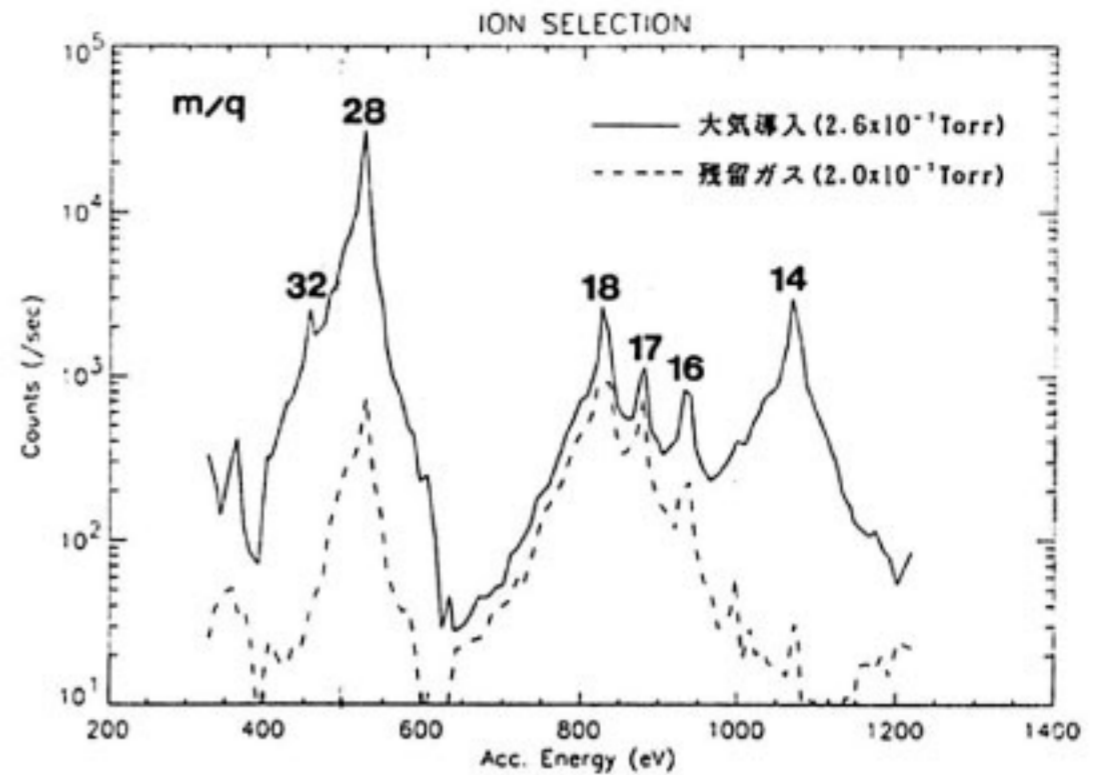
第5図 ビーム量とフィラメント電流のモニター出力の関係を3つのガス圧について示したもの

に保つことができる。ガス導入の対向側には、60 L/secのターボ分子ポンプと90 L/minの油回転真空ポンプから成る排気系があり、ガス導入と釣り合わせて、イオン源内部の真空度を安定させる。生成されたイオンは引出し口から出ていき、X-Y偏向電極、フォーカス電極をへて、イオン選別用磁気回路へ放射される。

磁気回路とフォーカス電極の間に電離真空計(第1図中のIG)を置き、イオン源の真空度モニターとして使用している。ビーム量はガス圧とフィラメントに流す電流量で制御される。窒素ガスを導入し、主チャンバー内に設置したビームモニターで計測したビーム量(有効口径内のカウントの総和)を、イオン源のガス圧とフィラメントからの放射電流のモニター出力の電圧値との関係について示したのが第5図である。荷電粒子計測器で計測されるカウント数はそのプリアンプ部の応答速度から現状では $\sim 10^6$ /secまでであり、通常の校正実験では 10^3 /sec程度のカウント数でおこなわれる。第4図から、校正実験に十分なビーム量のチャンバー中心への到達が確認されたといえる。

第1表 磁気回路の設計から期待される各種イオンを選択するための加速エネルギー

イオン種	m/q	エネルギー (eV)
O_2^+	32	456
N_2^+, CO^+	28	522
H_2O^+	18	812
OH^+	17	860
O^+	16	913
N^+	14	1044



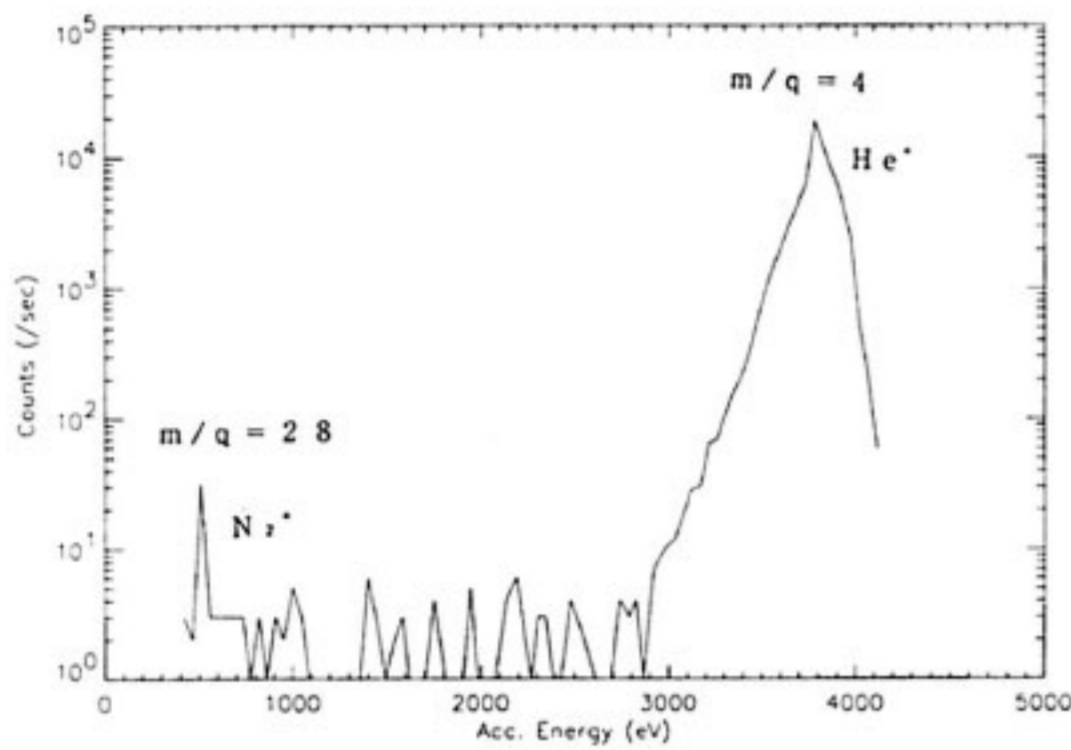
第6図 磁気回路によるイオン選別特性(その1)

イオン選別用の磁気回路としては、磁場強度660 Gauss, 中心回転半径270mm, 回転角 90° の扇型の平行平板磁石によるものを使用している。イオン源での最大加速電圧は4 kVであり、上記磁場強度と回転半径から第1表のようなイオンの選別が各加速電圧に対して予想される。

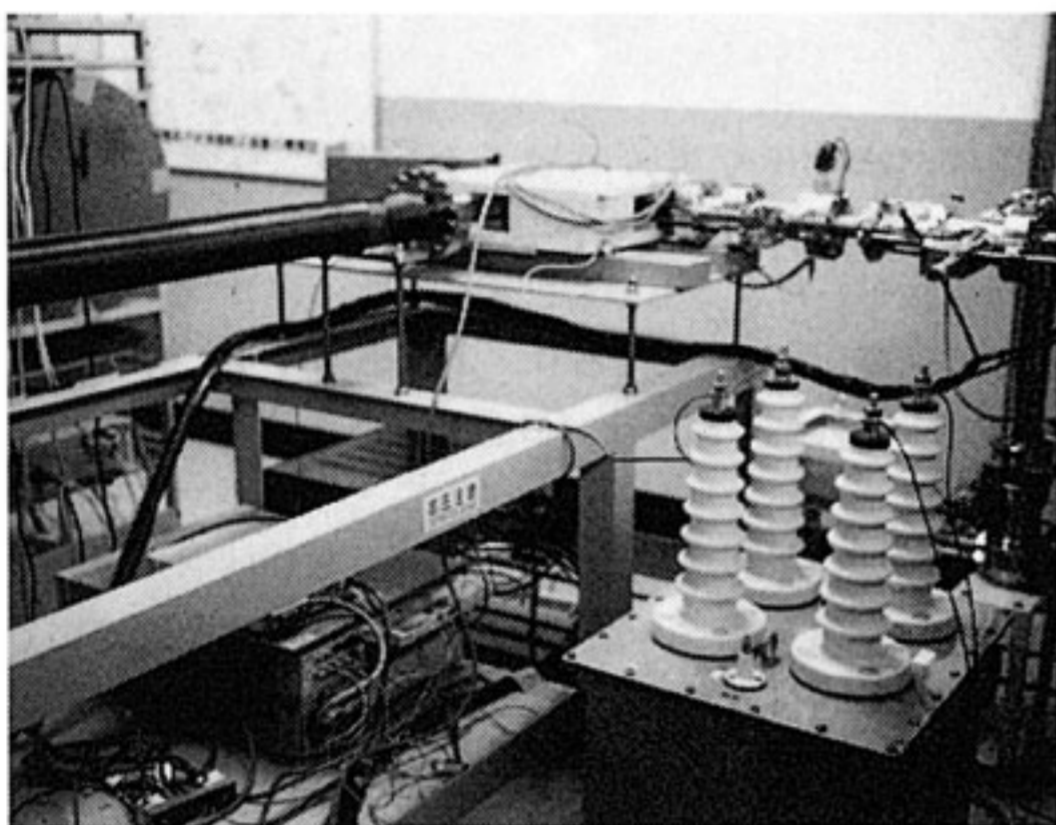
残留ガス(なにもガス導入から入れない状態)と大気を導入した場合について、イオン源の加速電圧を掃引した時の、主チャンバーのビームモニターにおけるカウント数を第6図に示す。図中、破線が残留ガス、実線が大気を導入した場合である。第1表で予想されたのとほぼ同じエネルギーのところいくつかカウント数のピークがあらわれている。真空ポンプで引いて行くときに、水がしつこく残り、高真空をつくる妨げとなることはよく知られている。残留ガスの場合、水分子イオン(H_2O^+ , OH^+)が期待されるところに目だつピークがある。また、窒素分子イオンが期待される520eVあたりにもピークがあるが、窒素の真空ポンプでの引きやすさを考慮すると、 CO^+ がかなりを占めていると思われる⁽⁷⁾。

大気を導入した場合、水分子イオンと期待されるピークはわずかな上昇を示しただけである。一方、窒素分子イオンが期待されるピークは大きく上昇している。また窒素分子が解離してできる窒素原子のイオンが予想されるピークも大きく上昇しており、大気の主成分である窒素の量の増大を反映した結果と思われる。この実験では、イオン質量分析器を導入し直接にビームとして放射されるイオン種を確認することは行っていない。しかし、ほぼ予想されたエネルギーでピークが現れたことと、大気導入による変化から、磁気回路によるイオン質量選別はほぼ設計どおりに働いていると確信される。

磁気回路の磁場強度と回転半径はヘリウムイオンがイオン源の最大加速電圧の範囲内で出せることを考慮して



第7図 磁気回路によるイオン選別特性 (その2)



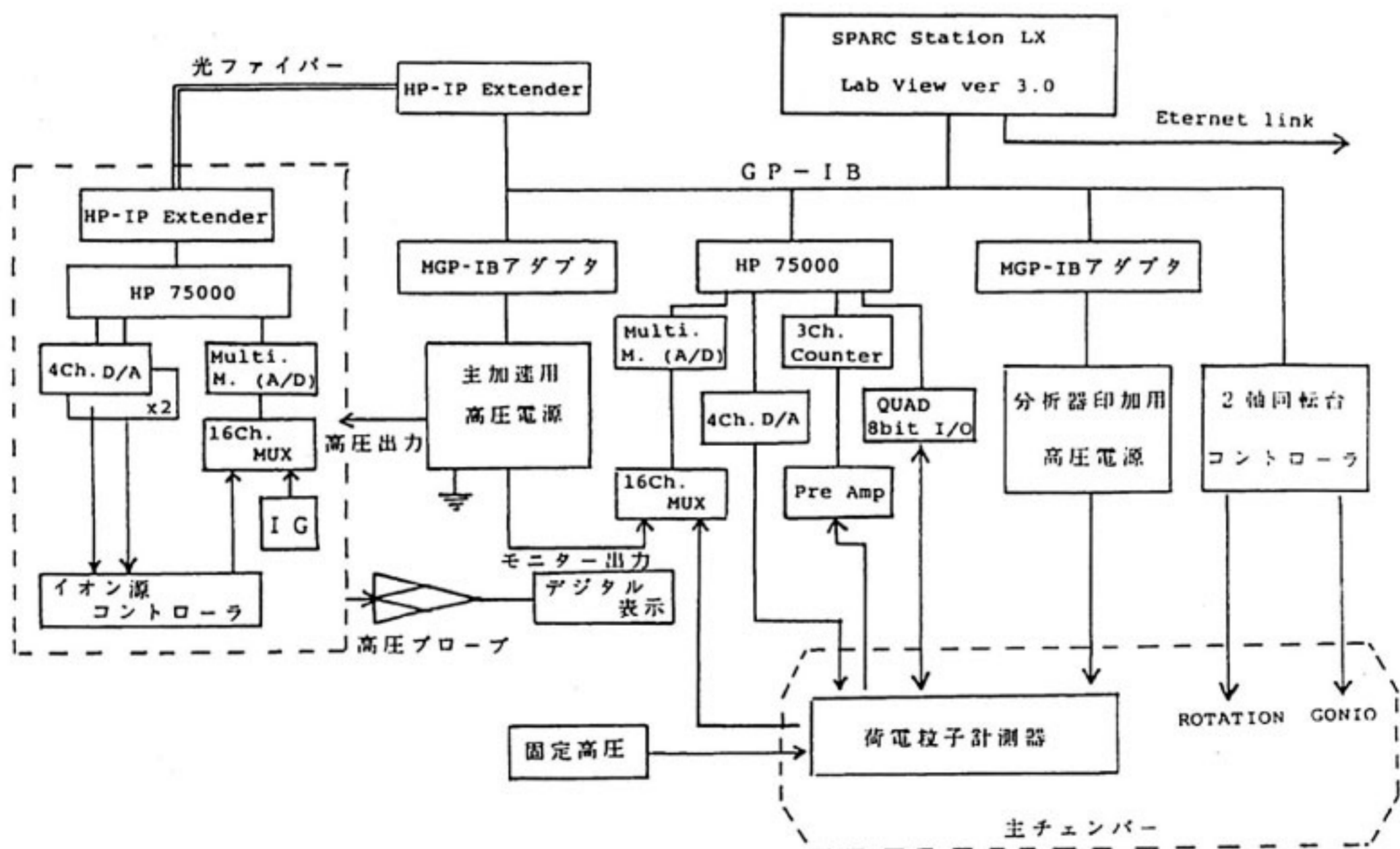
第8図 イオン源・質量選別部

決定された。ガス混合器で窒素とヘリウムの混合ガスを作って導入し、イオン源の加速電圧を最大まで掃引した時のビームモニターのカウント数を第7図に示す。3700eVあたりにヘリウムイオンと思われるピークがあらわれている。なお、ガス混合器では窒素とヘリウムの分圧を10:1以上にしてあるが、易動度の違いからヘリウムが圧倒的に多くイオン源に入り、窒素分子イオンのカウント数との大きなちがいがいとなっている。

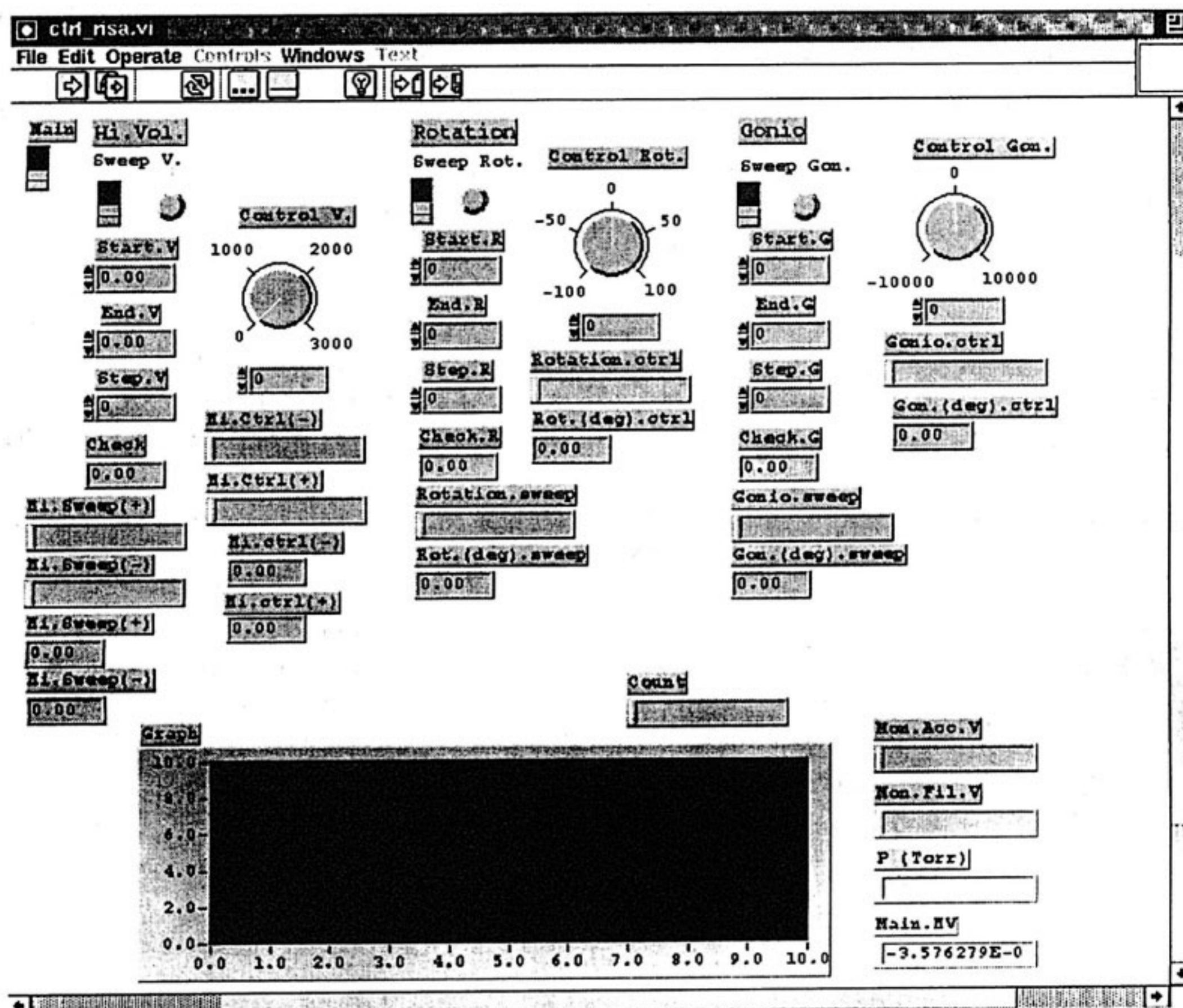
第8図にイオン源・質量選別部の写真を示した。右下の4本の絶縁碍子をはえているがイオン源に電力を供給する耐圧30kVの絶縁トランスである。左下に見えるのがイオン源であり、左へ延びた配管は中央上部の磁気回路にサンドイッチ状に挟まれ、90°曲げられた後、黒く見えている左上のドリフトチューブへとつながっている。「高圧注意」の札が張られた架台には絶縁碍子の足に支えられ、イオン源コントローラやそのインターフェースが乗っている。

7. 制御・データ取得系

本装置は、荷電粒子計測器の透過特性という3(または4)つの変数をもつ関数を実験で求めるため多くの計測を系統だてて素早く行う必要があること、及び、イオン源が高電圧に浮くことから手動による操作は危険であることの2つの理由から、コンピュータによる遠隔・自動の制御・データ取得が必然となっている。第9図に制



第9図 制御・データ取得系のブロック図



第10図 ワークステーションのウィンドウ上の操作画面

御・データ取得系の詳細図を示す。SPARC Station から GP-IB により各機器は制御されている。イオン源の制御・モニターは、光/電気信号の変換をへて、HP75000 のメインフレームを介して各プラグインモジュールにより行っている。イオン源上の機器の制御・モニターは全てアナログであり、イオン源コントローラからの出力の他、電離真空計からの出力も A/D 変換して取り込んでいる。また HP75000 のメインフレームとプラグインモジュールは、チェンバー内の計測器の制御・データ取得にもう 1 台用意されており、アナログ・デジタルの入出力の他、パルスの増幅・カウントが行える。さらに、分析器の電極に印加する電圧を制御するための ± 3 kV 出力の高圧電源が用意されている。

これらの機器は Lab View で作られたプログラムで操作される。第 10 図に計測器の透過特性取得用の画面を示す。1 台の測定装置をイメージした画面となっており、画面上のつまみをマウスで回したり、スイッチを押し上げた

りして、実在の各機器を操作する。また各モニター値が所定の場所に表示される。左下のパネルには、エネルギー・2次元角を掃引した時のデータが、横軸が掃引パラメタ、縦軸がカウンターからのカウント値としてグラフ表示される。得られたカウントデータは、掃引パラメタ、固定パラメタの他、加速電圧、フィラメント電流モニター値、真空度モニター値など必要な情報を付加してファイルに書き込まれ、全データ取得終了後、解析・積分操作がなされ、(2)式の透過特性・G-Factor の導出がなされる。

8. ま と め

イオンビームを利用した飛行体搭載用荷電粒子計測器の較正装置を開発し、その基本特性を測定した。結果はそのビーム量、一様性、質量選別能力など、満足の得られるものであった。また、ビームの平行性はその幾何学的配置から、エネルギーの均一性は磁気回路がエネルギーフィルターにもなっていることなどから、十分な性能に

なっていると確信される。今後の搭載用荷電粒子計測器の開発に力を発揮するものと期待される。

参 考 文 献

- (1) A. G. Ghielmetti, H. Balsiger, R. Banninger, P. Eberhardt, J. Geiss and D. T. Young, "Calibration system for satellite and rocket-borne ion mass spectrometers in the energy range from 5 eV/charge to 100 keV/charge", *Rev. Sci. Instrum.*, 54, pp. 425-436. April 1983.
- (2) 平尾邦雄, 伊藤富造, 向井利典, 賀谷信幸, "低エネルギー粒子計測器校正装置", 宇宙科学シンポジウムプロシーディング, pp. 581-585, 1982.
- (3) 金川俊英, 向井利典, 賀谷信幸, 松本治, 伊藤富造, 平尾邦雄, "粒子計測器校正装置のイオンソースの特性", 宇宙科学シンポジウムプロシーディング, pp. 195-198, 1983.
- (4) V. M. Vasyliunas, "Deep space plasma measurements", *Method of Experimental Physics*, vol. 9, Part B, pp. 49-88, 1971.
- (5) J. T. Gosling, J. R. Asbridge, S. J. Bame, and W. C. Feldman, "Effect of a long entrance aperture upon the azimuthal response of spherical section electrostatic analyzers", *Rev. Sci. Instrum.*, 49, pp. 1260-1268, Sept. 1978.
- (6) 大塚英治, 黒野剛弘, 土屋裕, "フォトンカウンティングイメージング", 浜松ホトニクス(株)技術資料, 1985.
- (7) 堀越源一, "真空技術", 物理工学実験 4, 東京大学出版会, 1983.



三宅 互
Wataru MIYAKE
宇宙科学部宇宙計測研究室
磁気圏物理学
E-Mail: miyake@crl.go.jp

川辺 明
Akira KAWABE
宇宙科学部宇宙計測研究室(研修生)
プラズマ物理学

佐川 永一
Eiichi SAGAWA
平磯宇宙環境センター
地球物理
E-Mail: esagawa@crl.go.jp

喜岡 理砂
Risa YOSHIOKA
宇宙科学部宇宙計測研究室(研修生)
プラズマ物理学

