

JAERI-M

6048

トカマクプラズマのイオン温度測定用マルチ
チャンネル中性粒子エネルギー分析器

1975年3月

竹内 浩・高橋興起・白形弘文・船橋昭昌

日 本 原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JAERI - M 6048

トカマクプラズマのイオン温度測定用マルチチャンネル中性粒子
エネルギー分析器

日本原子力研究所東海研究所核融合研究室
竹内 浩，高橋興起，白形弘文，船橋昭昌

(1975年2月10日受理)

トカマクプラズマのイオン温度測定時間の短縮と測定精度の向上のため，マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器が製作された。この分析器は電荷ストリッピングセルと10チャンネルの静電エネルギー分析器とイオン検出器から構成されている。最高検出粒子数は 10^6 cpsである。

また，静電エネルギー分析器の電子ビームによるエネルギー較正およびプロトンビームによる透過率較正の実験が行なわれ，分析器として正常に作動することが示された。一方，水素に対するストリッピングセルの効率測定も行なわれ，測定値は計算値と一致した。

Multi-Channel Neutral Particle Energy Analyser for Measuring
Ion Temperatures in Tokamak Plasmas

Hiroshi TAKEUCHI, Koki TAKAHASHI,
Hirofumi SHIRAKATA and Akimasa FUNAHASHI

Thermonuclear Fusion Laboratory, Tokai, JAERI

(Received 10 February 1975)

Multi-channel neutral particle energy analyser has been constructed for reducing the time of measurement and improving the accuracy of measurement in Tokamak plasmas. It consists of a charge stripping cell, a 10-channel electrostatic energy analyser and an ion detector. The maximum number of detected particles in the analyser is 10^6 cps.

Energy calibration of the electrostatic energy analyser was made with an electron beam, and transmission efficiency calibration was experimented with a proton beam. The analyser was found to properly for measuring the ion temperatures in Tokamak plasmas. The stripping cell efficiency for H_2 gas also measured; the value is in agreement with that calculated from the charge-stripping and charge-exchange cross sections.

目 次

1. はじめに	1
2. 装 置	1
2.1 静電エネルギー分析器	1
2.2 検出器及び信号処理係	3
3. 電子ビームとプロトンビームによる静電エネルギー分析器の較正実験	6
3.1 電子ビームによる静電エネルギー分析器の較正	6
3.2 プロトンビームによる透過率較正実験	6
4. 電荷ストリッピングセル効率の測定	12
5. おわりに	13
文 献	
謝 辞	
付 録	

1. はじめに

これまでJFT-2トカクマクのイオン温度測定に用いられて来た中性粒子エネルギー分析器¹⁾はシングルチャンネルであるために、イオン温度決定に時間がかかり、測定値にプラズマの再現性に起因する不明確さを残した。そこでこれらの欠点を取り除いて、測定時間を短縮し、測定の精度を良くするために、マルチチャンネルの中性粒子エネルギー分析器が製作された。

この報告には製作した10チャンネル中性粒子エネルギー分析器の構成および静電エネルギー分析器の電子ビームによるエネルギー較正とプロトンビームによる透過率の測定結果が述べられている。また、この測定器の電荷ストリッピング反応の標的として用いる水素ガスに対するストリッピングセル効率の測定結果について述べられている。

2. 装置

マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器の概念図をFig.1に示した。プラズマからの高速中性粒子は差動排気によって、電荷ストリッピングセルに溜められたガスによってイオン化され、10チャンネルの平行平板静電エネルギー分析器に入り、エネルギー選別されて、粒子のエネルギーに応じて、出口スリット各部に配置された検出器に入る。検出器にはチャンネル型の二次電子増倍管を用いている。二次電子増倍管により増幅されたシグナルは、増幅器、計数回路を経てメモリーに入る。メモリーからの出力は2つあり、1つはテーブプリンターであり、他はデジタルプリンターである。また差動排気は1000ℓ/secのスプッターイオンポンプによって行なわれている。

2.1 静電エネルギー分析器

エネルギー分析器は従来の45°入射平行平板静電エネルギー分析器²⁾を拡張することにより設計された10チャンネルのエネルギー分析器である。この分析器の動作機構はFig.1に示してあるように、電位差Vのある二枚の平行平板に角度45°で入射した粒子は放物線軌道を描き、粒子のエネルギーに応じて、出口スリット各部に配置された検出器に到達する。

入射粒子のエネルギーEと偏向板電極間の電圧Vの関係、入射角による粒子の到達位置のずれB、入射位置による到達位置のずれdx等は次の様に与えられる。

$$V = \frac{2d}{X} E \quad (1)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dx_1 + dx_2}{2X} (1 + \sec 2\Delta\theta) - (1 - \sec 2\Delta\theta) \quad (2)$$

$$B = -2\Delta\theta \cdot x \quad (3)$$

$$dx = dx' \quad (4)$$

1. はじめに

これまでJFT-2トカクマクのイオン温度測定に用いられて来た中性粒子エネルギー分析器¹⁾はシングルチャンネルであるために、イオン温度決定に時間がかかり、測定値にプラズマの再現性に起因する不明確さを残した。そこでこれらの欠点を取り除いて、測定時間を短縮し、測定の精度を良くするために、マルチチャンネルの中性粒子エネルギー分析器が製作された。

この報告には製作した10チャンネル中性粒子エネルギー分析器の構成および静電エネルギー分析器の電子ビームによるエネルギー較正とプロトンビームによる透過率の測定結果が述べられている。また、この測定器の電荷ストリッピング反応の標的として用いる水素ガスに対するストリッピングセル効率の測定結果について述べられている。

2. 装置

マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器の概念図をFig.1に示した。プラズマからの高速中性粒子は差動排気によって、電荷ストリッピングセルに溜められたガスによってイオン化され、10チャンネルの平行平板静電エネルギー分析器に入り、エネルギー選別されて、粒子のエネルギーに応じて、出口スリット各部に配置された検出器に入る。検出器にはチャンネル型の二次電子増倍管を用いている。二次電子増倍管により増幅されたシグナルは、増幅器、計数回路を経てメモリーに入る。メモリーからの出力は2つあり、1つはテーブプリンターであり、他はデジタルプリンターである。また差動排気は1000ℓ/secのスプッターイオンポンプによって行なわれている。

2.1 静電エネルギー分析器

エネルギー分析器は従来の45°入射平行平板静電エネルギー分析器²⁾を拡張することにより設計された10チャンネルのエネルギー分析器である。この分析器の動作機構はFig.1に示してあるように、電位差Vのある二枚の平行平板に角度45°で入射した粒子は放物線軌道を描き、粒子のエネルギーに応じて、出口スリット各部に配置された検出器に到達する。

入射粒子のエネルギーEと偏向板電極間の電圧Vの関係、入射角による粒子の到達位置のずれB、入射位置による到達位置のずれdx等は次の様に与えられる。

$$V = \frac{2d}{X} E \quad (1)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dx_1 + dx_2}{2X} (1 + \sec 2\theta) - (1 - \sec 2\theta) \quad (2)$$

$$B = -2\Delta\theta \cdot x \quad (3)$$

$$dx = dx' \quad (4)$$

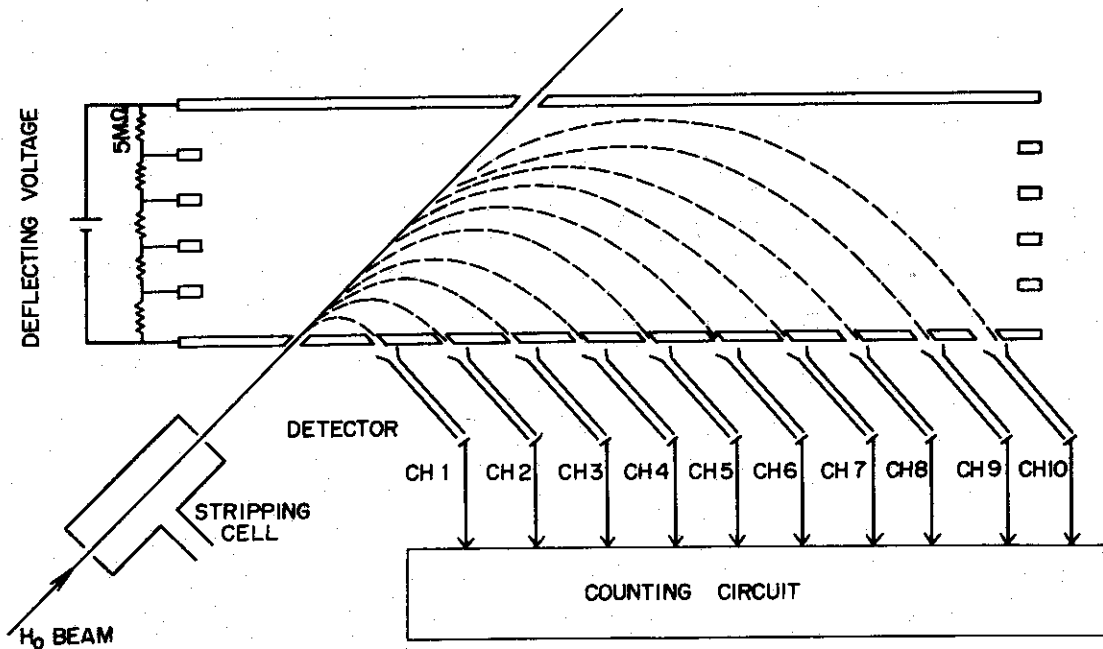


Fig.1 マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器

	X	$d = 90 \text{ mm}$ $\frac{2d}{X}$	dX_2	$\frac{dX_1 = 5.92 \text{ mm}}{dX_1 + dX_2}$ $\frac{dX_1 + dX_2}{X}$
CH 1	2.5cm	7.20	6.76mm	50.7 %
CH 2	5.0	3.60	6.61	25.1
CH 3	7.5	2.40	6.63	16.7
CH 4	10.0	1.80	6.55	12.5
CH 5	12.5	1.44	6.12	9.63
CH 6	15.0	1.20	6.20	8.08
CH 7	17.5	1.02	8.05	7.98
CH 8	20.0	0.90	9.17	7.54
CH 9	22.5	0.80	10.92	7.48
CH 10	25.0	0.72	13.00	7.56

Fig.2 マルチチャンネルエネルギー分析器の特性

ここで、 d は平行平板の間隔、 x は入射スリットの中心から出口スリットの中心までの距離、 $\Delta\theta$ は入射角、 dx_1 は入射スリット幅、 dx_2 は出口スリット幅、 dx' は入射スリットの中心から測った、入射位置のずれである。入射角 $\Delta\theta$ が小さい時、式(2)は近似的に

$$\frac{dV}{V} = \frac{dx_1 + dx_2}{X} \quad (5)$$

になる。

Fig. 2に各チャンネルの X 、 dx_1 、 dx_2 、 $2d/X$ 、 dV/V を示した。これらの数値の決定は、プラズマのイオン温度算出には、流入する中性粒子束の変動が大きく影響するので、エネルギー分解能をある程度犠牲^{*}にして粒子束の量を多くし、ストリッピングセルを出た粒子はすべて分析器の出口スリットを通りぬけという方針で行なった。したがって、具体的数値の基準になる値はストリッピングセル入口の口径である。この値はJFT-2プラズマの測定経験から4mm ϕ とした。以下ストリッピングセルの出口の口径4mm ϕ 、エネルギー分析器の入口の口径を4.2mm ϕ とした。分析器の各チャンネルの出口スリットはビームの入射角に拡がり considering して矩形にした。各スリットのサイズは式(3)、(4)で決まるビームの進行方向のずれを考慮して、 dx_2 が決まり、ビームの進行方向に垂直である方向のサイズは垂直方向の入射角で定まる。また、分析器のチャンネル数は10であり、チャンネル1とチャンネル10とのエネルギー差は10倍に取ってある。

エネルギー分析器の平行平板電極は入射ビームに対して、 45° に配置され、入射側をアースポテンシャルにし、反対側の偏向電極は電圧 V を与える。電極はステンレスの平板で出来ており、アース電極と高圧電極の間には電場の乱れを防ぐために4枚のガード電極が入っている。これらの電極の電位は5M Ω の抵抗で、偏向電極間の印加電圧 V を等分配している。ガード電極の絶縁はパイロフェライトを用いた。偏向電極は直進ビームの方向に、軸合わせのためと、ストリッピングセルでイオン化されなかった中性粒子とプラズマからの光を逃がすために穴をあけてある。また出口スリットにはイオン検出器のチャンネル型の二次電子増倍管に印加する-4.5kVの電圧が分析器の電場を乱さないようシャドウマスクを取り付けてある。

2.2 検出器及び信号処理係

検出器はチャンネル型の二次電子増倍管であるセラトロン(村田製作所EMW1081B)を用いた^{**}。セラトロンはセラミックで出来ており、イオン検出の場合Fig. 3の様にセラトロンの両端に-4.5kVを与え、コレクターは200Vほどセラトロンの終端よりも電位をあげて使用する。10個あるセラトロンへの電圧供給はリップル0.01%の1台の電源から分配供給される。セラトロンの利得は $10^7 \sim 10^8$ であり、レスポンス時間は 10^{-9} 秒程度である。

* イオン温度算出のための、チャンネルによる分解能の違いの補正と、粒子の飛行距離の差の影響について付録1に示してある。

** セラトロンの特性試験については、付録2参照のこと。

スパッターイオンポンプからもれ出て来る低速のイオンがセラトロンに流入するという問題がある。その対策として、スパッターイオンポンプの排気口をセラトロン設置場所から離して、かつ排気口についたてを立たせた。またセラトロン間の相互干渉を防止するために、セラトロンを個々に独立したステンレスの箱の中に入れて使用し、かつ真空容器とセラトロンボックスを結ぶリード線は完全にシールドした。この2つの対策でノイズは各セラトロンによって異なるが50~200cpm程度におさえられた。

信号処理は入射粒子束が少ないため、パルス計測法を採用した。Fig. 4に電子回路のブロック図を示す。おのおのセラトロンから出たシグナルはそれぞれ微分回路、前置増巾器、リニアアンプ、ディスクリミネーターを経て、スケーラーで別々に計数される。計数開始時点からのカウンタ数は、任意に設定されたサンプリング時間ごとに分割されて、メモリーに記憶される。メモリーの数は、各チャンネルあたり10個、計100個またサンプリング時間は1~20msecの10点切換方式となっている。したがって計数時間は10~200msecである。詳細はTable. 1に示す。この回路の最高計数率は 10^6 cpsである。この値はアンプの時定数で制限される*。

メモリーからの出力は、データをその場で検討するための10進法で印刷するデジタルプリンターおよびデータの計算処理のために2進法で紙テープに穿孔するテーププリンターの2方式を有している。

Table 1 マルチスケーラーの特性

サンプリング時間	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20, m sec
1チャンネルのサンプリング数	10
デットタイム	スタート時 0.2μ sec, サンプリング時 0.5μ sec
計数時間	10 m sec ~ 200 msec + 5μ sec
1メモリーの記憶数	9999

* この分析器の検出粒子数の上限はセラトロンではなく、上述のごとく、電子回路の最高計数率で制限される。

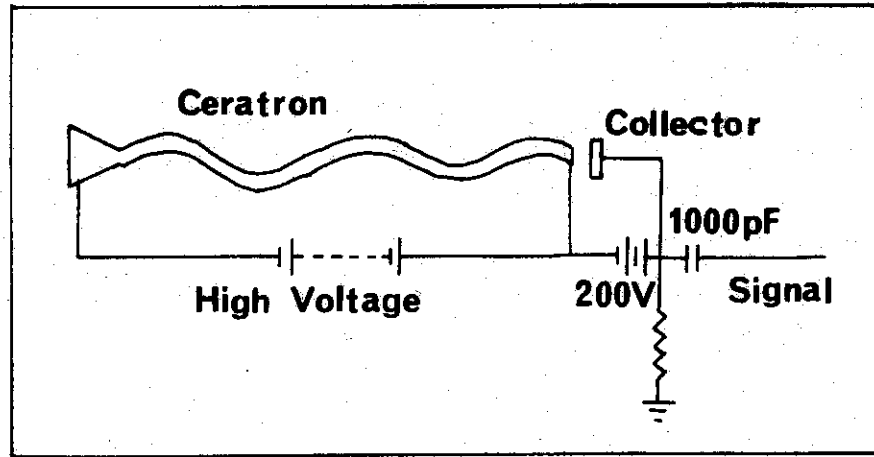


Fig.3 セラトロンへの電圧供給法

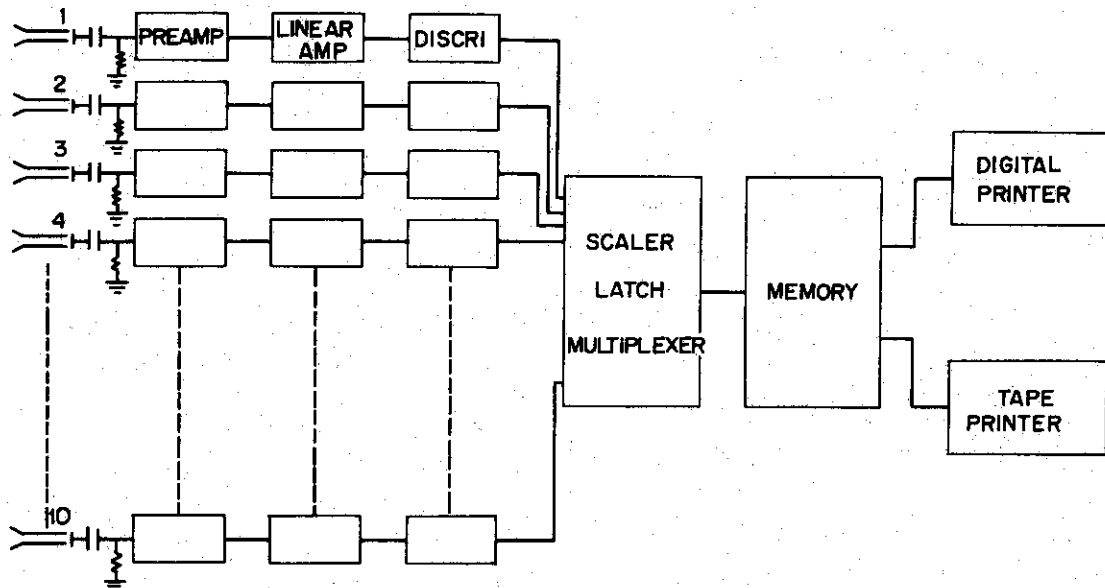


Fig.4 電子回路のブロック図

3. 電子ビームとプロトンビームによる静電エネルギー分析器の校正実験

イオン温度の測定を実施するに先立って、この静電エネルギー分析器が設計値どおりエネルギー分析をしているかどうかを確かめるため、電子銃によるエネルギー校正実験を行なった。

一方この分析器は出口スリット近傍の電場の乱れを防止するためのシャドーマスクを取り付けているので、透過率が減少する。また、分析器をマルチチャンネル化したため、電極配置にわずかの幾何学的ずれが生じてもチャンネルやエネルギーに依存した透過率の差を生じる可能性がある。これらの問題を検討するため、プロトンビームによる透過率の校正試験を行なった。

校正実験のための実験装置の概略構成を Fig. 5 に示した。

3.1 電子ビームによるエネルギー校正実験

電子銃による校正は Fig. 5 において、ストリッピングセルの S₃ スリットの手前に電子銃を設置し、分析器の出口にフラデーカップを置いて行なった。校正方法は電子銃の加速電圧を一定にして、偏向電圧を掃引して、X-Yレコーダーにプロフィールを描いて、その図から各チャンネルの出力がピークになる時の偏向電圧を求めた。Fig. 6 (a), (b) はチャンネル 10~チャンネル 4 において入射エネルギーが 200, 400, 600, 800, 1000 eV で、偏向板電圧 V を掃引して X-Yレコーダーに描いたプロフィールを示してある。同様に、チャンネル 3 は入射エネルギー 200, 300, 400, 550, 700 eV, チャンネル 2 は 200, 300, 400, 500, 600 eV, チャンネル 1 は 100, 200, 300 eV に対するプロフィールである。これらのプロフィールから偏向電圧と入射エネルギーの関係をグラフにしたのが Fig. 7 である。この図より偏向板電圧から入射エネルギーを求める換算係数を設計値と比較したのが Fig. 8 (a) である。これによるとチャンネル番号の多いほど設計値とずれている。この度合いはチャンネル 10 で 5.5%, チャンネル 9 で 3.7%, チャンネル 8 で 2.2% と徐々に減少するこの原因は偏向板電極の幾何学的ずれに起因する電場の誤差であると考えられる。

各チャンネルのエネルギー分解能の実測値は Fig. 6 のプロフィールから計算される。式 (3) から計算される設計値は半値巾に対する量でなく全値巾に対する分解能であるので、Fig. 8 (b) には設計値と半値巾と全値巾に対する分解能を示した。設計値と全値巾に対する分解能はほとんど一致し、半値巾に対する分解能と全値巾に対する分解能の差がチャンネル番号の増加とともに少なくなっている。これはチャンネル 7 番以降において出口スリットが入射スリットよりも広いため、電子ビームが出口スリットよりも細いので、出力プロフィールが Fig. 6 (b) のチャンネル 7~チャンネル 10 の様にブロードになったためである。

3.2 プロトンビームによる透過率校正実験

エネルギー分析器の透過率測定はプロトンビームを用いて行なった。プロトンビームの生成は Fig. 5 において、電荷交換セルと電荷ストリッピングセルのガスを全部排気した状態で、高周波（以下 RF という）イオンリースから水素イオンビームを引き出して、60°型の質量分析器でプロトンビームを引き出して、60°型の質量分析器でプロトンビー

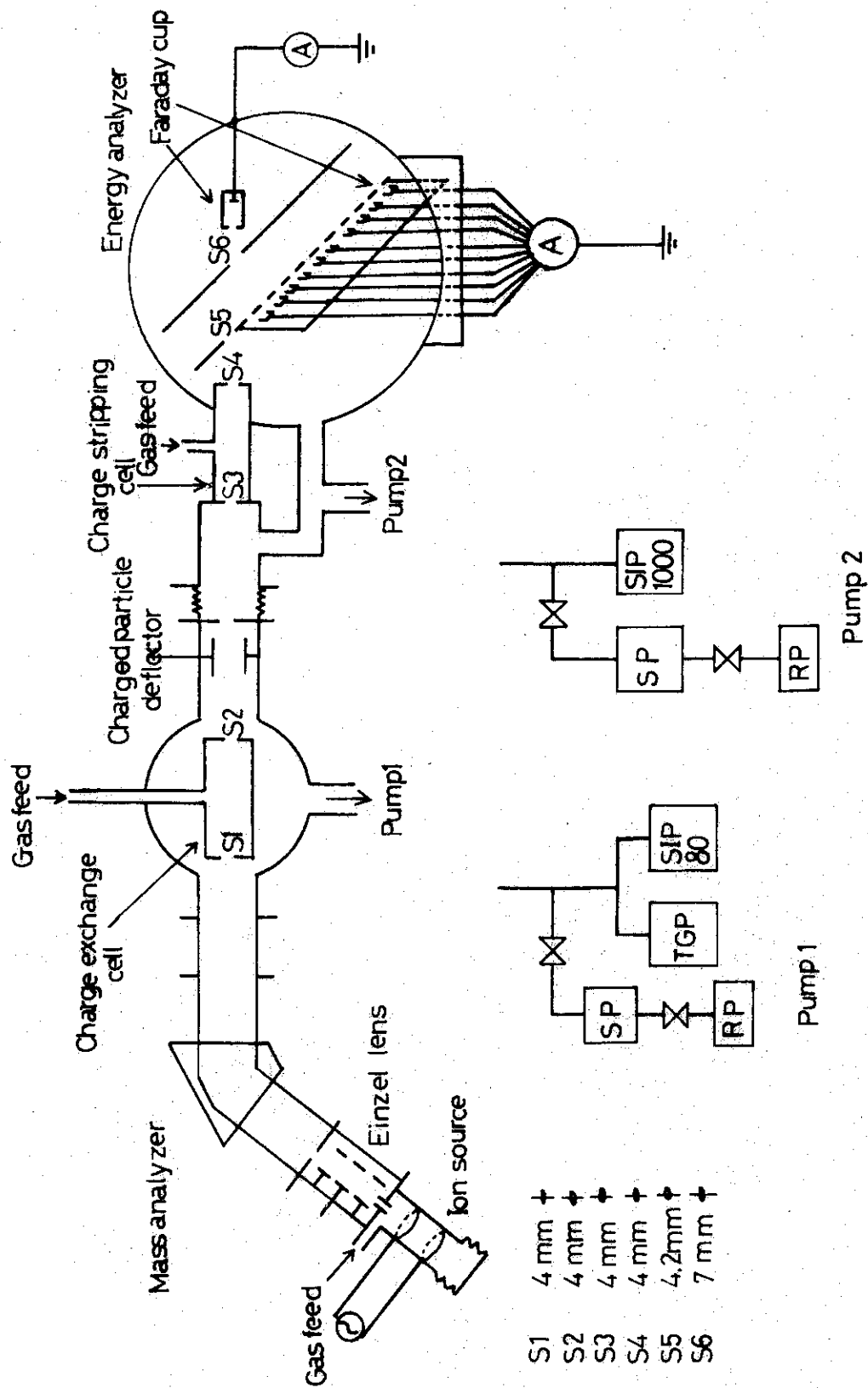


Fig. 5 ストリッピングセル効率測定用中性粒子源

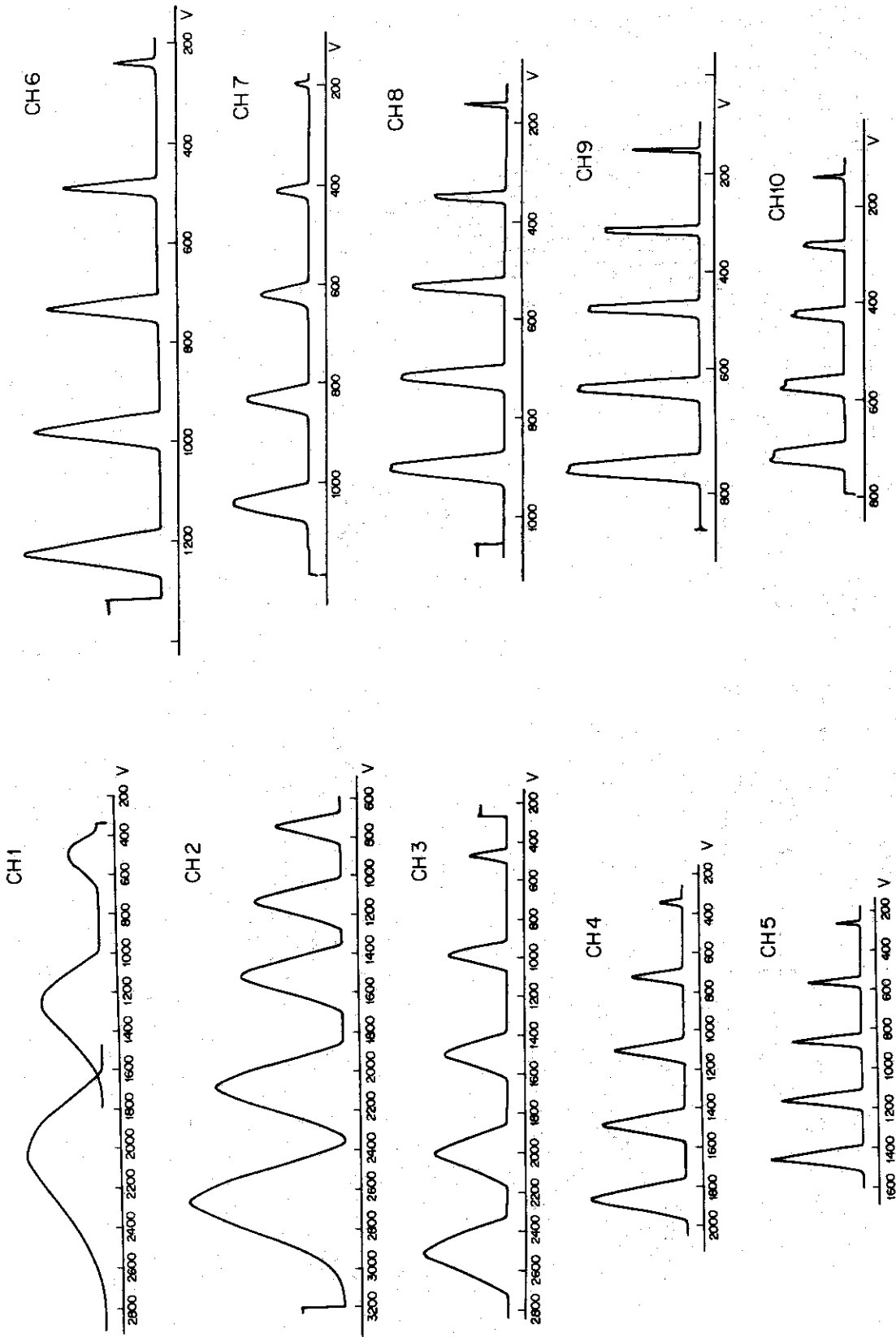


Fig.6 (b) チャンネル6～チャンネル10のプロファイル

Fig.6 (a) チャンネル1～チャンネル5のプロファイル

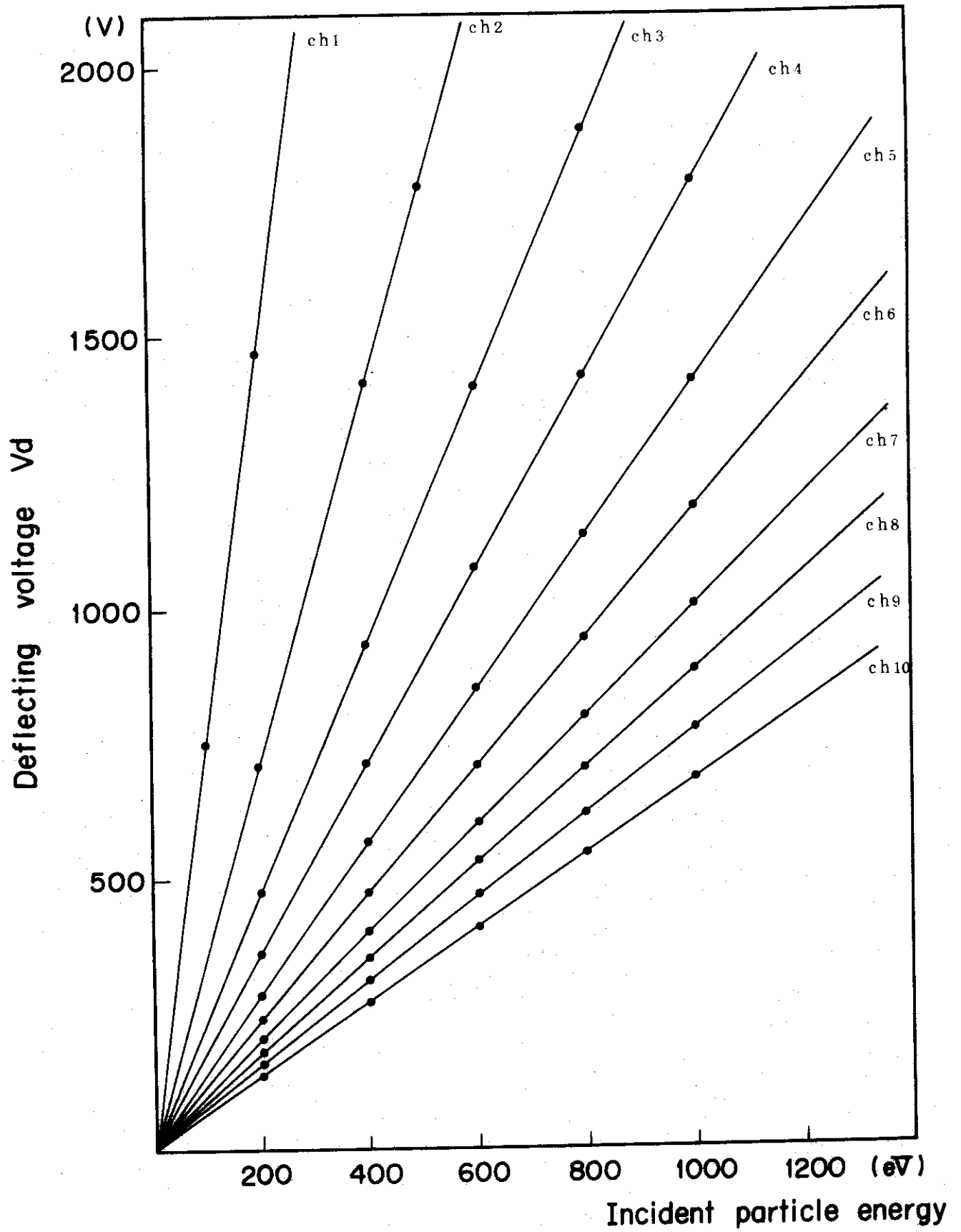


Fig.7 電子ビームによるエネルギー分析器のエネルギー較正

ムを引き出して、 60° 型の質量分析器でプロトンビームを取り出すことにより行なわれる。透過率の測定はこのプロトンビームをまずエネルギー分析器の偏向板電圧を与えないで、エネルギー分析器の後に設置されたファラデーカップで直進電流 I_d を測定し、次にエネルギー分析器の偏向板に電圧を与えて、プロトンビームを曲げて各チャンネルに取り出し、その電流値 I_c を測定する方法で行なった。ファラデーカップの電流測定法はコレクターにおける入射イオンによる二次電子をグリッドにバイアス電圧を加えておさえ、入射イオンのコレクターにおける反射はグリッド電流を測定する方式¹⁾を用いた。

Fig.9 にこうして得られた結果を入射エネルギーをパラメーターとして各チャンネルの透過率として示した。この図より、このエネルギー分析器はシャドーマスクを用いているので、透過率は50%であり、チャンネルによる相違もなく、エネルギー依存性もないことがわかった。

したがってエネルギー分析器は入射エネルギーと偏向板電圧の関係、分解能、透過率をチェックした結果、正常に動作することが確認された。

CH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
設計値	7.2	3.6	2.4	1.8	1.44	1.2	1.02	0.9	0.8	0.72
実験値	7.37	3.46	2.35	1.78	1.42	1.18	1.00	0.88	0.77	0.68

Fig. 8(a) 入射エネルギーと偏向板電圧の関係における，実験値と設計値の比較

CH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
設計値	5.07%	25.1	16.7	12.5	9.63	8.08	7.98	7.54	7.48	7.56
半値幅の $\frac{dV}{v}$	25.0%	12.8	8.76	6.60	4.20	4.20	4.44	4.46	4.76	5.26
全値幅の $\frac{dV}{v}$	51.6%	27.5	16.7	11.6	8.03	9.63	7.29	7.30	7.48	7.65

Fig. 8(b) 分解能の設計値と実測値の比較

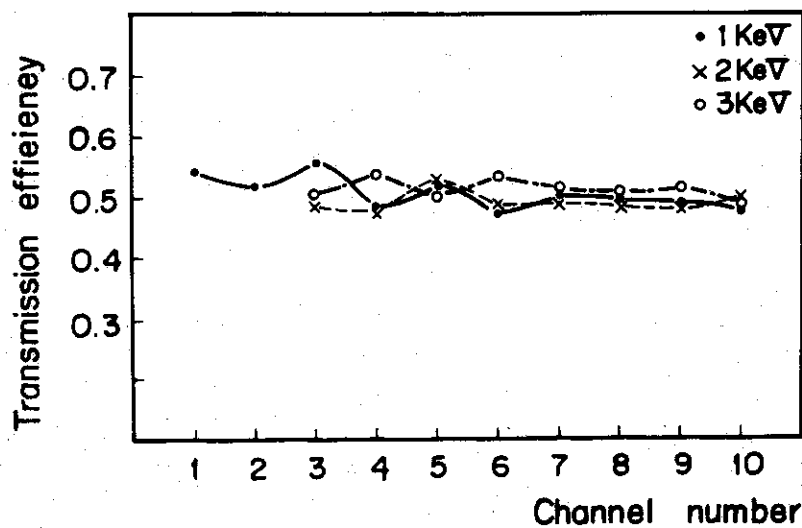


Fig. 9 マルチチャンネルエネルギー分析器の透過率

4. ストリッピングセル効率の測定

これまで用いられていたシングルチャンネル中性粒子エネルギー分析器のストリッピングセルの標的ガスとして窒素ガスが使用されており、窒素ガスに対するストリッピングセル効率はすでに較正実験が行なわれている¹⁾。その結果は400 eV以上において、ストリッピングセル中での衝突過程として、ストリッピング反応と電荷交換反応を考慮した計算値と一致とした。

一方JFT-2などのトカマク装置においては、不純物を出来るだけ少なくするための努力がつけられている。したがって中性粒子エネルギー分析器においても、出来るだけ、不純物の混入を防ぐ必要がある。その対策として、ストリッピングセルの標的ガスとして窒素のかわりに水素を使用することが提案され、このマルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器においては、水素ガスを使用することに決定した。そこで、水素ガスに対するストリッピングセル効率を調べる必要がある。

水素に対するストリッピングセル効率は窒素の場合とストリップされたイオンの角度分布は大差ないと考えられるので³⁾、水素に対して計算値を使用してもさしつかえないと思われる。しかし一度はストリッピングセル効率の測定値と計算値が一致するか確かめる必要がある。そこでイオンビームの安定しているkeVの領域で水素ガスに対する水素原子ビームのストリッピングセル効率の測定を行なった。

マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器のストリッピングセルは長さ20 cm、入射および出口スリットの口径はそれぞれ4 mmφである。測定方法は従来用いられてきた方法¹⁾と同じであり、使用したストリッピングセル効率測定装置はFig. 5に示した。まずRFイオンソースで作られた水素イオンビームから60°型の質量分析器によってプロトンビームを取り出し、そのプロトンビームを電荷交換セル中に差動排気によって溜められた 1×10^{-3} Torr程度のH₂ガスと衝突させて、水素原子ビームF₀を作る。F₀の強度決定は次の様にして行なわれる。水素原子ビームを作る前に、エネルギー分析器の後方に設置されたファラデーカップにプロトンビームを入れて、ファラデーカップのコレクターである銅の表面での、プロトンによる二次電子放出比 γ_p を求める。次に水素原子ビームを作り、水素原子による二次電子を測定し、プロトンによる二次電子放出比 γ_p と水素原子に対する二次放出比 γ_H が等しい⁴⁾として水素原子ビームF₀を求める。そして次にストリッピングセルに水素ガスを入れて、水素原子ビームと衝突させて、イオン化したストリッピングイオンをエネルギー分析器によって分離して、ファラデーカップでストリップイオンの強度F₁を測定した。10⁻¹² A程度であるストリッピングイオンの測定にはセラトロンを用いず、ファラデーカップを用いた理由は、セラトロンは信号の計数回路の最高計数率が10⁶ cpsであり、セラトロン自身も入射ビームが10⁸ cps程度になると劣下して来るためである。ストリッピングイオンをファラデーカップで測定した強度F₁はエネルギー分析器の出口スリットに張ってあるシャドーマスクを通過した量であるので、正味のF₁'はプロトンビームで測定したFig. 9に示されている透過率で補正する必要がある。したがってストリッピングセル効率はF₁' / F₀を求めることによって得られる。

Fig. 10に水素に対するストリッピングセル効率の実測値と計算値を示した。計算値の求め方

は文献1)で行なわれた方法*と同じである。Fig.10よりストリッピングセル効率の実測値は計算値と一致することがわかった。

Fig.10 0.048 Torr cmのH₂に対するストリッピングセル効率

	2000 eV	3000 eV	4000 eV
実 験 値	5.7×10^{-2}	7.8×10^{-2}	7.6×10^{-2}
計 算 値	6.2×10^{-2}	7.5×10^{-2}	7.4×10^{-2}

5. おわりに

マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器を電子ビームによるエネルギー較正とプロトンビームによる透過率測定の結果、エネルギー分析器として正常に作動していることを確認した。また、水素ガスに対する水素原子のストリッピングセル効率を測定した結果、計算値と一致した値であることを確認したので、マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器のストリッピングセル効率は水素ガスに対しての計算値を用いられることがわかった。

文 献

- 1) 北村 晃, 高橋興起, 矢野淑郎; JAERI-M5275 (1973)
- 2) G.A.Harrower; Rev.Scient.Instrum. 26 850 (1955)
- 3) H.H.Fleischmann, C.F.Barnett, J.A.Ray; ORNL-4954 (1974)
- 4) P.M.Stier, C.F.Barnett, C.F.Evans; Phys.Rev. 96 973 (1954)

謝 辞

本装置の製作および較正実験に際し、有益な助言と指導を賜った、矢野淑郎神戸商船大学教授に感謝します。また本装置の製作の製作函面の発注製作について、工作課山本正弘(現核融合研究室臨界プラズマグループ)、浜野昇両氏に感謝します。終始、御指導下さいました森茂核融合研究室長に厚く御礼申し上げます。

* 計算式は付録3に示した。

は文献1)で行なわれた方法*と同じである。Fig.10よりストリッピングセル効率の実測値は計算値と一致することがわかった。

Fig.10 0.048 Torr cmのH₂に対するストリッピングセル効率

	2000 eV	3000 eV	4000 eV
実験値	5.7×10^{-2}	7.8×10^{-2}	7.6×10^{-2}
計算値	6.2×10^{-2}	7.5×10^{-2}	7.4×10^{-2}

5. おわりに

マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器を電子ビームによるエネルギー較正とプロトンビームによる透過率測定の結果、エネルギー分析器として正常に作動していることを確認した。また、水素ガスに対する水素原子のストリッピングセル効率を測定した結果、計算値と一致した値であることを確認したので、マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器のストリッピングセル効率は水素ガスに対しての計算値を用いられることがわかった。

文 献

- 1) 北村 晃, 高橋興起, 矢野淑郎; JAERI-M5275 (1973)
- 2) G.A.Harrower; Rev.Scient.Instrum. 26 850 (1955)
- 3) H.H.Fleischmann, C.F.Barnett, J.A.Ray; ORNL-4954 (1974)
- 4) P.M.Stier, C.F.Barnett, C.F.Evans; Phys.Rev. 96 973 (1954)

謝 辞

本装置の製作および較正実験に際し、有益な助言と指導を賜った、矢野淑郎神戸商船大学教授に感謝します。また本装置の製作の製作凶面の発注製作について、工作課山本正弘(現核融合研究室臨界プラズマグループ)、浜野昇両氏に感謝します。終始、御指導下さいました森茂核融合研究室長に厚く御礼申し上げます。

* 計算式は付録3に示した。

付1 マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器によるイオン温度算出

プラズマのイオン温度が T_i のマックスウェル分布をしている場合に、プラズマから出て来る中性粒子を立体角 $d\Omega$ 、エネルギー E 、検出時間 Δt 、検出効率 $\eta(E)$ の場合に各チャンネルへの出力信号 S_{op} は

$$S_{op} = \frac{4}{\sqrt{2\pi M k T_i}} \int \sum_j (n_i n_0 \frac{d\Omega}{4\pi} \cdot \sigma_{exj}) dV \left(\frac{E}{k T_i} \right) \exp\left(-\frac{E}{k T_i}\right) \Delta E \eta(E) \Delta t \quad (A-1)$$

で与えられる。ここで n_i 、 n_0 はそれぞれイオン、 j 種の中性粒子の数密度、 $\sigma_{exj}(E)$ はエネルギー E のイオンが、低いエネルギー (\leq 数 eV) の中性粒子 j と電荷交換する断面積で、 $\int_V dV$ は検出器に入射する立体角内に含まれるプラズマの有効体積である。 ΔE はそのチャンネルのエネルギー分解能で決まるエネルギー巾である。

マルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器に使用しているエネルギー分析器の分解能は各チャンネルごとに違っているために、イオン温度算出には各チャンネルの出力信号を規格して用いなければならない。規格化した出力信号を S_{opn} とすると、 T_i と S_{opn} との関係は

$$S_{opn} / \sigma_{exj}(E) \cdot E^2 \cdot \eta(E) \propto e^{-E/kT_i} \quad (A-2)$$

であるので、エネルギー E に対して左辺の量を縦横に対数でプロットし、直線になれば、その傾斜からイオン温度を求められる。

このマルチチャンネルエネルギー分析器は各チャンネルへの粒子はそれぞれ飛行距離が違うので、この差がイオン温度の測定時間にあたえる影響について考察する。Fig. A-1 の様にマルチチャンネル中性粒子エネルギー分析器を設置した場合に、プラズマの表面からチャンネル 1 までの飛行距離は約 204 cm、チャンネル 10 まで約 242 cm である。チャンネル 1 とチャンネル 10 との測定する粒子のエネルギー差は 10 倍であるので、プラズマからチャンネル 1 とチャンネル 10 に到達する時間差はチャンネル 1 の方がチャンネル 10 より 2.67 倍時間がかかる。プロトンのエネルギーを eV で表わすと、プラズマからプロトンがチャンネル 1 とチャンネル 10 に到達する時間はそれぞれ、 $t_1 = 1.47 \times 10^{-4} / \sqrt{V}$ sec、 $t_{10} = 5.55 \times 10^{-5} / \sqrt{V}$ sec、である。トカマクプラズマの放電時間は数百 m sec のオーダーであるために、計数装置のサンプリング時間 Δt は最小 1 m sec であるので、 T_i が 100 eV のプラズマのチャンネル 1 に入る粒子のエネルギーは 100 eV 程度であるので、プラズマから検出器に達する時間はサンプリング時間の $1/100$ であり、この 1 m sec のサンプリング時間内において同時測定しているとみなしてよい。しかしながらもっとみじかいサンプリング時間で使用する場合に各チャンネルの時間差を考慮してデータ処理する必要がある。

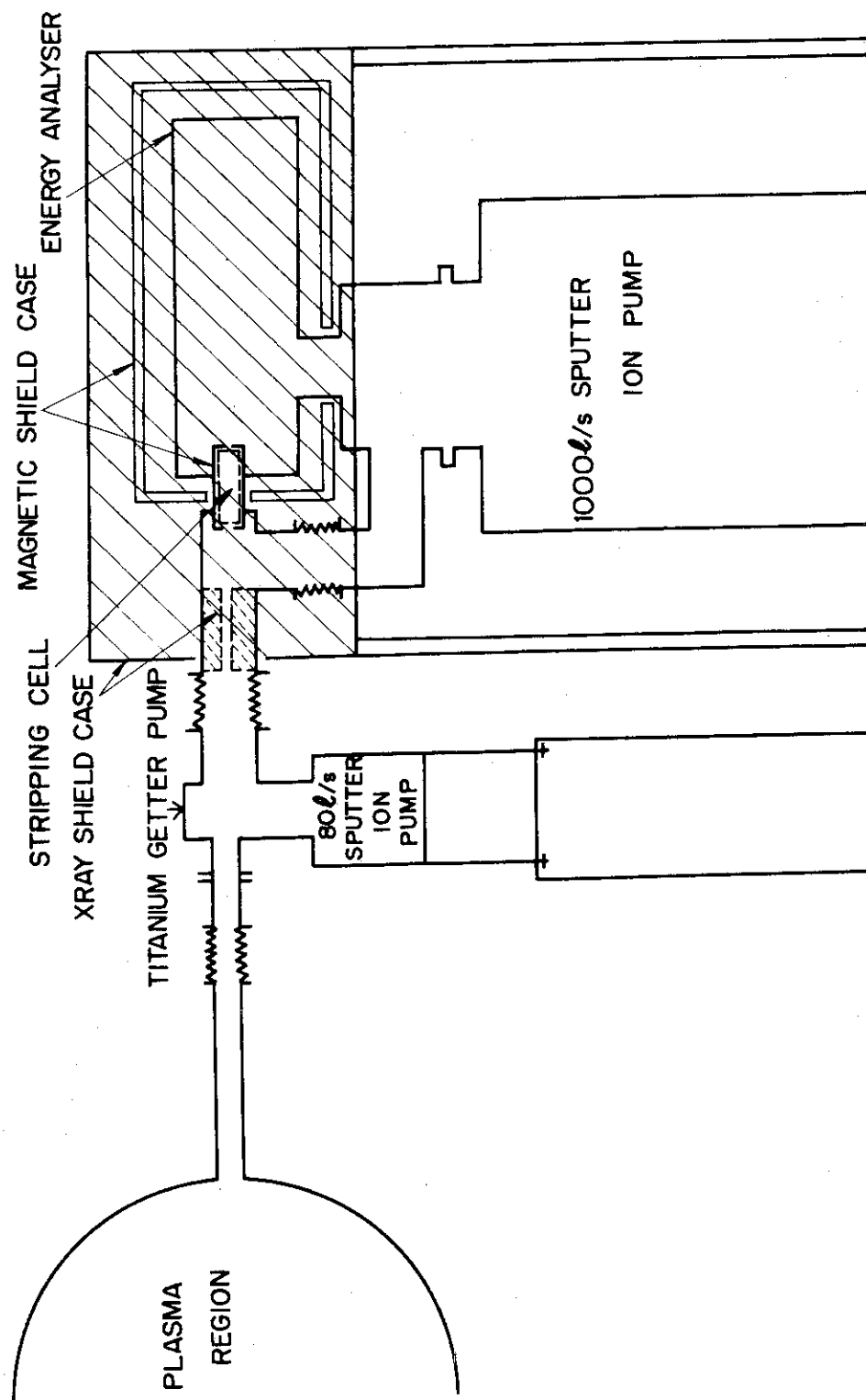


Fig. A-1 プラズマへの接続図

付2 セラトロン特性

セラトロンをパルス計測として使用するのに、セラトロンへの印加電圧決定とディスクリミネーターのレベル決定のために、カウント数に対するプラトー曲線、印加電圧に対するパルスハイト分布を調べた。

Fig.A-2(a)(b)に印加電圧-4.5 kVと-3.5 kVの場合のパルスハイト分布を示し、Fig A-3(a)(b)に 10^5 cpsと 10^3 cpsの場合のプラトー曲線を示した。 10^5 cps程度のカウント数の場合はイオンリースを使用し、 10^3 cps程度の場合は電離真空計のヌードゲージで作られるイオンを使った。

FigA-2, Fig. A-3よりセラトロンへの印加電圧は-4.5 kV、ディスクリレベルは0.6 Vが最適であるとした。

付3 ストリッピングセル効率の計算

ここに文献1)で述べられている方式で記す。ストリッピングセルにガスをB, 中性粒子をA, Aの強度を $F_0(\pi)$, イオン A^+ の強度を $F_1(\pi)$ とすると、 $F_0(\pi)$, $F_1(\pi)$ は

$$\frac{dF_0(\pi)}{d\pi} = -F_0(\pi)(\sigma_{01} + \sigma_{0s}) + F_1(\pi)\sigma_{10} \quad (A-3)$$

$$\frac{dF_1(\pi)}{d\pi} = F_0(\pi)\sigma_{01} - F_1(\pi)(\sigma_{10} + \sigma_{1s}) \quad (A-4)$$

σ_{01} は電荷ストリッピング反応の断面積、 σ_{10} は電荷交換反応の断面積である。 $\pi = 6.61 \times 10^{16} P \cdot \ell$ でありPはBの圧力、 ℓ はストリッピングセルの長さである。

境界条件 $F_0(0)=J$, $F_1(0)=0$ のもとで(A-3), (A-4)式を解き、 $\sigma_{0s} = \sigma_{1s} = 0$ とすると、

$$F_0(\pi) = \frac{J}{\sigma_{10} + \sigma_{01}} [\sigma_{10} + \sigma_{01} e^{-\pi(\sigma_{01} + \sigma_{10})}] \quad (A-5)$$

$$F_1(\pi) = \frac{J \sigma_{10}}{\sigma_{10} + \sigma_{01}} [1 - e^{-\pi(\sigma_{10} + \sigma_{01})}] \quad (A-6)$$

となる。

したがってストリッピングセル効率は式(A-6)より計算される。

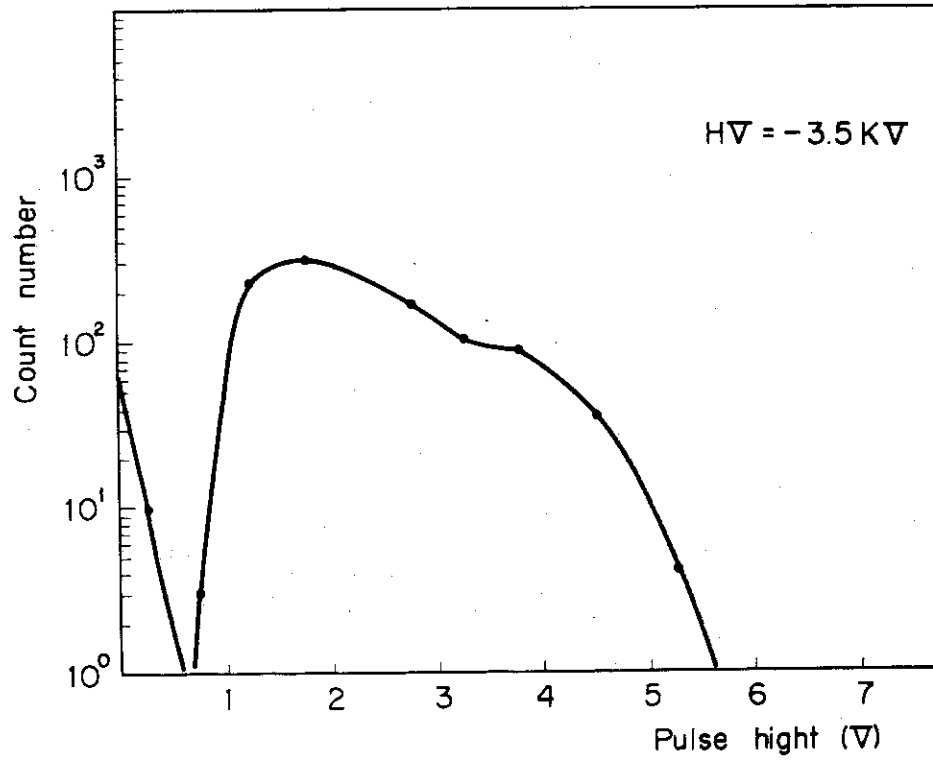


Fig. A-2(a) - 3.5 kV のパルスハイト分布

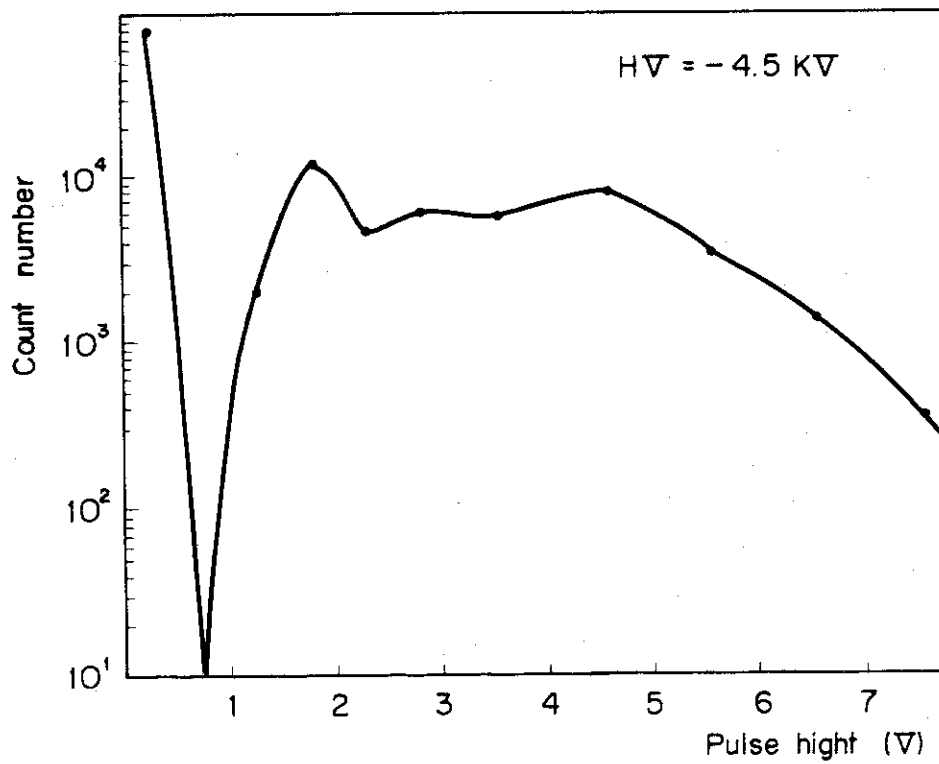


Fig. A-2(b) - 4.5 kV のパルスハイト分布

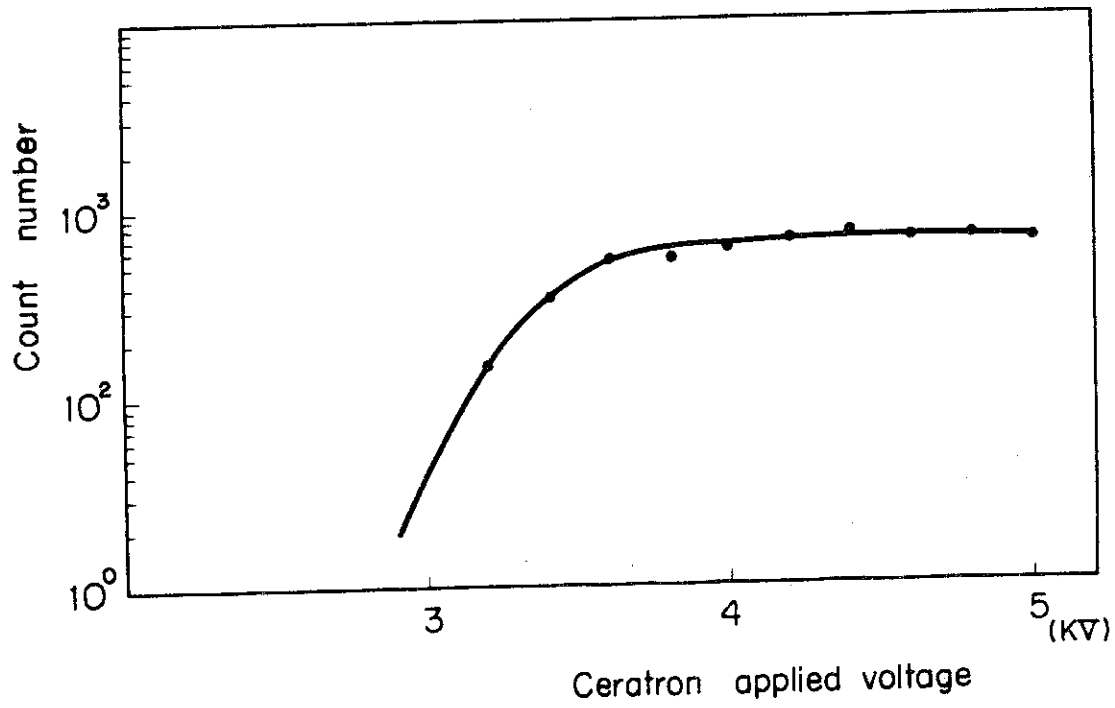


Fig. A-3(a) 10^3 cps のプラトー曲線

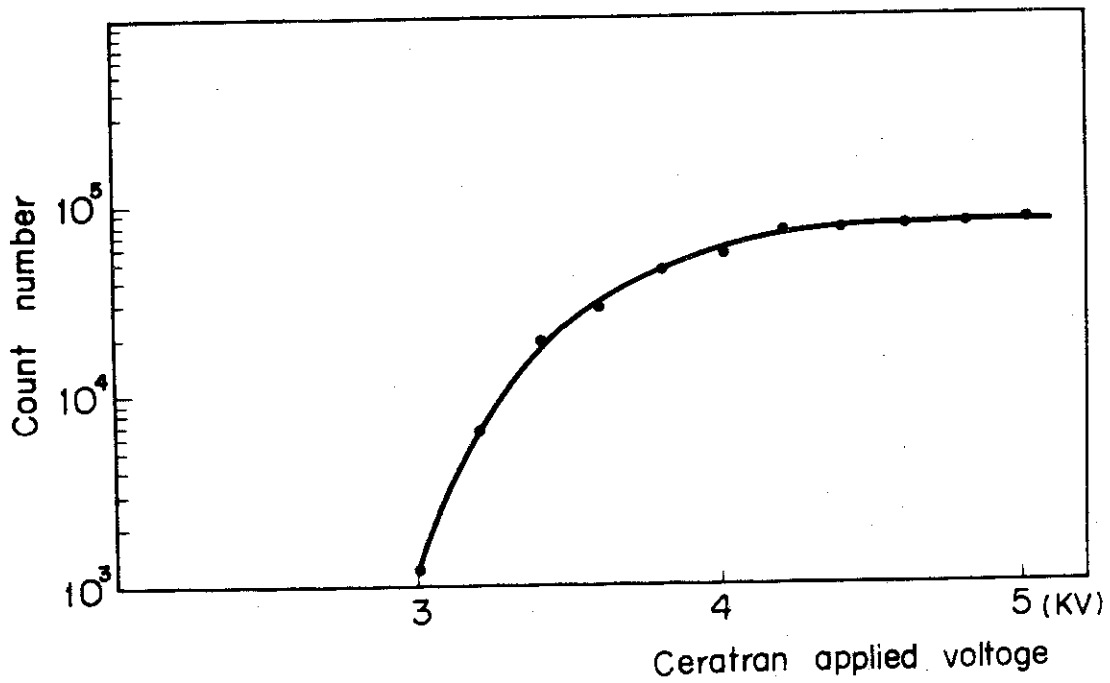


Fig. A-3(b) 10^4 cps のプラトー曲線