

J A E R I - M

89-018

飛行時間測定法による低エネルギー中性粒子の
エネルギー分析装置

1989年3月

三浦 幸俊・岡野 文範・松崎 誠

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 倍高野高速印刷

飛行時間測定法による低エネルギー中性粒子のエネルギー分析装置

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

三浦幸俊・岡野文範・松崎 誠⁺

(1 9 8 9 年 1 月 2 7 日受理)

飛行時間測定法 (Time Of Flight) による低エネルギー (10 eV から 1000 eV まで) 中性子の測定原理の検討及び測定装置の設計検討を行なった。 T O F に用いるチョッパーとしては、真空中で高速回転するターボ分子ポンプを改造して用いることとし、検出器としては光電子増倍管を改造して使用することで検討した。ターボ分子ポンプの回転数として 40000 rpm 程度、チョッパーの半径を 50 mm, チョッパーのスリット幅を 0.15 mm とすると、飛行距離 2 m で水素 1 keV のエネルギー分解能 ($\delta E/E$) が 20 % 以下とできるので、比較的小型の測定器となることが分った。

Low Energy Neutral Particle Energy Analyser by Time of Flight Method

Yukitoshi MIURA, Fuminori OKANO and Yoshimi MATSUZAKI⁺

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 27, 1989)

The design study of a low energy neutral particle analyser by using the time of flight method is performed. The chopper system can be made by a modified turbo molecular pump. A modified photo-electron-multiplier with a gate assembly may be suitable for the detector of this system. If a turbo molecular pump can rotate with a speed of about 40000 rpm, then the energy resolution ($\delta E/E$) of 1 keV hydrogen particles is less than 20 % with the flight length of 2 m (It is assumed that the chopper radius is 50 mm and the width of a slit is 0.15 mm).

Keywords: Time of Flight, Low Energy Neutral, Chopper, Turbo Molecular Pump, Energy Resolution, High Rotation Speed

+ Department of JT-60 Facility

目 次

1.はじめに	1
2.飛行時間測定法について	1
2.1 飛行時間測定法の理論	1
2.2 ゲート開時間の有限時間効果	3
3.装置の設計について	4
3.1 チョッパー部と飛行距離について	4
3.2 スリットをどのようにするか	5
3.3 検出器	6
3.4 データ収集部	6
3.5 チョッパーの回転モニタ	7
3.6 全体構成	7
4.結び	7
謝辞	8
参考文献	8
付録 光だけを通すことができるスリットについて	9

Contents

1. Introduction	1
2. Time of Flight Method for Energy Analysis	1
2.1 Time of Flight Theory	1
2.2 Finite Gate Time Effects	3
3. Design Study of a Low Energy Neutral Particle Analyser	4
3.1 Chopper and Flight Length	4
3.2 Design of a Slit	5
3.3 Detector	6
3.4 Data Acquisition System	6
3.5 Rotating Monitor	7
3.6 Total System	7
4. Conclusion	7
Acknowledgements	8
References	8
Appendix The Slit for Only Light	9

1. はじめに

最近のトカマクプラズマの実験において、閉込め特性の良い放電（H-mode）が実現されている〔1-5〕。H-modeは、放電洗浄による第一壁の状態、トカマク放電における周辺での水素リサイクリング量等の条件によりその特性が変わっている。また ICRF 加熱時の密度上昇および不純物の混入には、比較的低エネルギーの中性粒子の寄与が大きいように思われる〔6-7〕。そこで放電洗浄またはトカマク放電の際に周辺で発生し、重要な役割を果たすと考えられる100eV程度の中性子束のエネルギー分布を測定することが必要になった。

100eV程度の低エネルギーの中性粒子に対するストリッピング効率は低く、従来から行われていたガススリッピングセルと電磁場を用いた測定法〔8〕では、この低エネルギーの中性粒子の測定は困難である。

このためPLT〔9〕、ASDEX〔10〕等で行なわれているような、低エネルギー中性粒子をチョッピングし、その飛行時間に対する強度を測定することで中性粒子束量とそのエネルギー分布を測定する飛行時間測定（Time Of Flight）の検討及びTOFによる測定器の設計検討を行なった。測定対象としての低エネルギー中性粒子は10eVから1000eVの水素または重水素粒子であるとし、TOFに用いるチョッパーとしては真空中で高速回転するターボ分子ポンプを改造して用いることとした。また検出器としては光電子増倍管を改造して使用することとして検討した。

2. 飛行時間測定法について

2.1 飛行時間測定法の理論

始めに

- (1) 測定器により見込まれている領域から放出される中性粒子の角度分布および強度は、その見込まれている領域の中で場所に依存しないとする。
- (2) チョッパーによる開口時間関数はデルタ関数であるとする。

JFT-2Mのプラズマにおいて、低エネルギー中性粒子が主にプラズマ周辺にあると考え、プラズマを平面の中性粒子発生源であるとする、プラズマは約60cm × 800cmとなるため、測定において視野が広くても5cm × 5cm程度なら、仮定(1)は満足していると考えられる。

チョッパーの開口時間を τ_g 、飛行時間を τ_{fl} とすると $\tau_g/\tau_{fl} \ll 1$ なら開口時間をデルタ関数とした仮定(2)は満足される。例えば製作可能な装置パラメータで考えてみる。飛行距離(L_{cd})を2mとし500eVの水素粒子(速度 V_p)を考え、チョッパーの回転数(ω_c)が42000 rpmであり、回転スリットは半径(r_s)50mmに位置し、そのスリットの幅(W_s)を0.15mmとすると、スリットの回転スピード(V_s)は、 $r_s\omega_c$ となり、

1. はじめに

最近のトカマクプラズマの実験において、閉込め特性の良い放電（H-mode）が実現されている〔1～5〕。H-modeは、放電洗浄による第一壁の状態、トカマク放電における周辺での水素リサイクリング量等の条件によりその特性が変わっている。また ICRF 加熱時の密度上昇および不純物の混入には、比較的低エネルギーの中性粒子の寄与が大きいように思われる〔6～7〕。そこで放電洗浄またはトカマク放電の際に周辺で発生し、重要な役割を果たすと考えられる100 eV程度の中性子束のエネルギー分布を測定することが必要になった。

100 eV程度の低エネルギーの中性粒子に対するストリッピング効率は低く、従来から行われていたガススリッピングセルと電磁場を用いた測定法〔8〕では、この低エネルギーの中性粒子の測定は困難である。

このため PLT 〔9〕、ASDEX 〔10〕等で行なわれているような、低エネルギー中性粒子をチョッピングし、その飛行時間に対する強度を測定することで中性粒子束量とそのエネルギー分布を測定する飛行時間測定（Time Of Flight）の検討及びTOFによる測定器の設計検討を行なった。測定対象としての低エネルギー中性粒子は 10 eV から 1000 eV の水素または重水素粒子であるとし、TOF に用いるチョッパーとしては真空中で高速回転するターボ分子ポンプを改造して用いることとした。また検出器としては光電子増倍管を改造して使用することとして検討した。

2. 飛行時間測定法について

2.1 飛行時間測定法の理論

始めに

- (1) 測定器により見込まれている領域から放出される中性粒子の角度分布および強度は、その見込まれている領域の中で場所に依存しないとする。
- (2) チョッパーによる開口時間関数はデルタ関数であるとする。

JFT-2Mのプラズマにおいて、低エネルギー中性粒子が主にプラズマ周辺にあると考え、プラズマを平面の中性粒子発生源であるとすると、プラズマは約 $60\text{cm} \times 800\text{cm}$ となるため、測定において視野が広くても $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 程度なら、仮定(1)は満足していると考えられる。

チョッパーの開口時間を τ_g 、飛行時間を τ_{fl} とすると $\tau_g / \tau_{fl} \ll 1$ なら開口時間をデルタ関数とした仮定(2)は満足される。例えば製作可能な装置パラメータで考えてみる。飛行距離 (L_{cd}) を 2 m とし 500 eV の水素粒子（速度 V_p ）を考え、チョッパーの回転数 (ω_c) が 42000 rpm であり、回転スリットは半径 (r_s) 50 mm に位置し、そのスリットの幅 (W_s) を 0.15 mm とすると、スリットの回転スピード (V_s) は、 $r_s \omega_c$ となり、

$$\omega_c = (2\pi)(42000)(1/60) = 4.40 \times 10^3 \text{ [rad/sec]}$$

$$\tau_g = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_s}{r_s \omega_c} \sim 0.682 \mu\text{sec}$$

$$\tau_{f\ell} = \frac{L_{cd}}{V_p} = \frac{L_{cd}}{(2E/m)^{1/2}} \sim 6.5 \mu\text{sec}$$

これより $\tau_g / \tau_{f\ell} \ll 1$ にすることが可能であることが分かる。

ここで仮定(1), (2)よりプラズマから放出される中性粒子の微分フラックス ($dI/dEd\Omega$) 単位は $[\text{cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ eV}^{-1} \text{ ster}^{-1}]$ を以下に示す 3つの理由によりステータスリットの前にあると考える。

理由(1) 測定のインターバル(約 $100 \mu\text{sec}$)程度ではプラズマは変化しないと考えるから。

(2) プラズマは平面中性粒子源でありチョッパーまでに中性粒子は減衰しないとするから。

(3) プラズマーチョッパー検出器のライン上での狭い立体角についてのみ考えるから。

今、検出器の前には面積 (A_{ap}) のアパーチャーがあり(ただしチョッパーからの距離は L_{ca}), そのアパーチャーに入った粒子はすべて検出器に入ると考える(図 2.1 参)。そしてゲートが開いてから検出器に来た粒子を $(dN/dEd\Omega)\delta\Omega$ とする。ここで $\delta\Omega$ は $A_{ap}/(4\pi L_{ca}^2)$ である。また、チョッパーの前面にプラズマから来ている粒子は $(dI/dEd\Omega)$ であるが、スリットの面積が A_c であり、ゲートの開いている時間は τ_g であるので、 $(dI/dEd\Omega)A_c\tau_g\delta\Omega$ が検出器に向う。これらは等しいから

$$\left(\frac{dN}{dEd\Omega} \right) \delta\Omega = \left(\frac{dI}{dEd\Omega} \right) A_c \tau_g \delta\Omega \quad ①$$

と書くことができる。各エネルギー (dE) に対する粒子のフラックス (dI) は、粒子が検出器まで飛行する時間により分離される。そこで t から単位時間に検出器に当る粒子の個数を $I(t)$ とすると

$$\left(\frac{dN}{dEd\Omega} \right) \delta\Omega dE = I(t) dt \quad ②$$

と書ける。ここで $E = Mm_p V^2 / 2 = Mm_p (L_{cd}/t)^2 / 2$ であり、(Mm_p) は測定しようとする粒子の質量であり(ただし m_p は水素の質量), L_{cd} はチョッパーと検出器の間の距離である。

$$\frac{dt}{dE} = E^{-\frac{3}{2}} L_{cd} (Mm_p/8)^{\frac{1}{2}} \quad ③$$

となることから②に代入し

$$\left(\frac{dN}{dEd\Omega} \right) \delta\Omega = E^{-\frac{3}{2}} L_{cd} (Mm_p/8)^{\frac{1}{2}} I(t) \quad ④$$

を得る。これは①よりプラズマからの微分フラックス ($d\Gamma/dEdQ$) を用いた形に書き換えられて

$$\left(\frac{d\Gamma}{dEdQ} \right) A_c \tau_g \delta Q = E^{-\frac{3}{2}} L_{cd} (Mm_p/8)^{\frac{1}{2}} I(t) \quad ⑤$$

となる。これより

$$\left(\frac{d\Gamma}{dEdQ} \right) = \frac{L_{cd} (Mm_p/8)^{\frac{1}{2}}}{A_c \tau_g \delta Q} E^{-\frac{3}{2}} I(t) \quad ⑥$$

が得られ、 $\delta Q = A_{ap}/(4\pi L_{ca}^2)$ であったから

$$\left(\frac{d\Gamma}{dEdQ} \right) = \frac{4\pi L_{cd} L_{ca}^2 (Mm_p/8)^{\frac{1}{2}}}{A_c A_{ap} \tau_g} E^{-\frac{3}{2}} I(t) \quad ⑦$$

を得る。このようにして $I(t)$ を測定することにより目的としている ($d\Gamma/dEdQ$) が測定されることが分る。ここで $I(t)$ の測定には 2 次電子増倍管と電流電圧変換回路を用いると、以下の定数を用いることにより電圧の時間変化 $V(t)$ として測定することができる。

e : 電子の電荷量

$\eta(E)$: 2 次電子放出係数

f_c : 2 次電子収集係数

G_M : 2 次電子増倍率

G_P : 電流電圧変換係数 (V/A)

とすると $e\eta(E)I(t)$ が 2 次電子の電流であるから電圧としては

$$V(t) = e\eta(E)f_c G_M G_P I(t) \quad ⑧$$

となる。これを⑦に代入し

$$\left(\frac{d\Gamma}{dEdQ} \right) = \frac{4\pi L_{cd} L_{ca}^2 (m_p/8)^{\frac{1}{2}}}{A_c A_{ap} e f_c G_M G_P} \cdot \frac{M^{\frac{1}{2}} V(t)}{E^{\frac{3}{2}} \tau_g \eta(E)} \quad ⑨$$

を得ることができる。これから $V(t)$ の時間変化を測定することにより、中性粒子のエネルギー分析をできることが示される。

2.2 ゲート開時間の有限時間効果

今までの計算では、ゲートの開く時間は、仮定(2)よりデルタ関数としてきたが、実際には有限時間 (τ_g) があるので考慮する必要がある。またこの考察より装置を設計するための多くの情報が得られる。

エネルギーの等しい粒子でも τ_g が有限であるために $\tau_{f\ell}$ としては最大 $\pm \tau_g$ 異なることになる。この飛行時間の不確定性が、⑦式におけるエネルギーに依存する頂 $E^{\frac{3}{2}}$ 、 $\eta(E)$ を通して ($d\Gamma/dEdQ$) に現れることになる。

$$E = M m_p (L_{cd} / t)^2 / 2 \quad (10)$$

であるから、時間 δt はエネルギー δE と次式で与えられる関係を持つ。

$$\frac{\delta E}{E} = 2 \left(\frac{\delta t}{t} \right) \left\{ 1 + 1.5 \left(\frac{\delta t}{t} \right) + O \left[\left(\frac{\delta t}{t} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

今、 $(\delta t / t)^2$ のオーダーは無視して考える。そして τ_g をゲートがフルオープンからクローズするまでの時間としフルオープンの時の面積を A_c とすると、アパーチャーフィルタ関数 $A(t)$ は下式のようになる（図2.2参）。

$$A(t) = \begin{cases} A_c (1 - |t| / \tau_g) & |t| \leq \tau_g \\ 0 & |t| > \tau_g \end{cases} \quad (12)$$

このアパーチャーフィルタ関数を積分した面積において、どれだけかは無視できるとして捨てて考えることにする。つまりアパーチャーフィルタの面積が小さいときのフラックスは無視できるとして有限時間効果は δt ($< \tau_g$) であると考える。そのめやすとして f を用いて下式により δt を決めるところにする。

$$\int_{-\delta t}^{\delta t} A(t) dt = (1 - f) \int_{-\infty}^{\infty} A(t) dt \quad (13)$$

これに(12)式の $A(t)$ を代入し δt を求めると

$$\delta t = \tau_g (1 - f^{1/2}) \quad (14)$$

を得る。例えば $f = 1/e$ とすると(14)より δt が決まる。ここで(11)の t は実際には $\tau_{f\ell}$ であるから

$$\frac{\delta E}{E} = 0.787 \left(\frac{\tau_g}{\tau_{f\ell}} \right) \left[1 + 0.590 \left(\frac{\tau_g}{\tau_{f\ell}} \right) \right] \quad (15)$$

が得られる。これより装置のエネルギー分解能はゲート開時間と粒子の飛行時間で決ることが分る。

3. 装置の設計について

3.1 チョッパー部と飛行距離について

ゲート開時間 (τ_g) の有限時間効果からチョッパー部と飛行距離をどれだけに設計しなければならないかが決る。なぜなら τ_g は、チョッパー部の回転数 (ω_c) およびチョッパーの半径 (r_s) とスリットの幅 (W_s) で決り、 $\tau_{f\ell}$ は飛行距離 (L_{cd}) と粒子のエネルギーで決るので、(11)式で与えられるエネルギー分解能とフラックス強度 (L_{cd}^2 で決る) の制約から W_s , ω_c , r_s , L_{cd} を決めることができる。ターボ分子ポンプの改造により製作できそうな装置のパラメータ ($\omega_c = 42000$ rpm, $W_s = 0.15 \text{ mm}$, $r_s = 50 \text{ mm}$, $f = 1/e$) で、 L_{cd} , E をパラメータとして $\delta E/E$ を計算

$$E = M m_p (L_{cd} / t)^2 / 2 \quad (10)$$

であるから、時間 δt はエネルギー δE と次式で与えられる関係を持つ。

$$\frac{\delta E}{E} = 2 \left(\frac{\delta t}{t} \right) \left\{ 1 + 1.5 \left(\frac{\delta t}{t} \right) + O \left[\left(\frac{\delta t}{t} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

今、 $(\delta t / t)^2$ のオーダーは無視して考える。そして τ_g をゲートがフルオープンからクローズするまでの時間としフルオープンの時の面積を A_c とすると、アパーチャーフィルタ関数 $A(t)$ は下式のようになる（図2.2参）。

$$A(t) = \begin{cases} A_c (1 - |t| / \tau_g) & |t| \leq \tau_g \\ 0 & |t| > \tau_g \end{cases} \quad (12)$$

このアパーチャーフィルタ関数を積分した面積において、どれだけかは無視できるとして捨てて考えることにする。つまりアパーチャーフィルタの面積が小さいときのフラックスは無視できるとして有限時間効果は δt ($< \tau_g$) であると考える。そのめやすとして f を用いて下式により δt を決めるところにする。

$$\int_{-\delta t}^{\delta t} A(t) dt = (1 - f) \int_{-\infty}^{\infty} A(t) dt \quad (13)$$

これに⑫式の $A(t)$ を代入し δt を求めると

$$\delta t = \tau_g (1 - f^{1/2}) \quad (14)$$

を得る。例えば $f = 1/e$ とすると⑭より δt が決まる。ここで⑪の t は実際には $\tau_{f\ell}$ であるから

$$\frac{\delta E}{E} = 0.787 \left(\frac{\tau_g}{\tau_{f\ell}} \right) \left[1 + 0.590 \left(\frac{\tau_g}{\tau_{f\ell}} \right) \right] \quad (15)$$

が得られる。これより装置のエネルギー分解能はゲート開時間と粒子の飛行時間で決ることが分る。

3. 装置の設計について

3.1 チョッパー部と飛行距離について

ゲート開時間 (τ_g) の有限時間効果からチョッパー部と飛行距離をどれだけに設計しなければならないかが決る。なぜなら τ_g は、チョッパー部の回転数 (ω_c) およびチョッパーの半径 (r_s) とスリットの幅 (W_s) で決り、 $\tau_{f\ell}$ は飛行距離 (L_{cd}) と粒子のエネルギーで決るので、⑪式で与えられるエネルギー分解能とフラックス強度 (L_{cd}^2 で決る) の制約から W_s , ω_c , r_s , L_{cd} を決めることができる。ターボ分子ポンプの改造により製作できそうな装置のパラメータ ($\omega_c = 42000$ rpm, $W_s = 0.15 \text{ mm}$, $r_s = 50 \text{ mm}$, $f = 1/e$) で、 L_{cd} , E をパラメータとして $\delta E/E$ を計算

してみた。この結果（図3.1参照）より最もエネルギー分解能が悪くなる1keVの水素粒子のエネルギー分解能を0.2以下にしようとすると、 L_{cd} として約1.5mが必要であることが分かる。ただし、 L_{cd} を大きくすればするほど分解能は良くなるが、 L_{cd}^2 で粒子の強度は減少する。このようにしてチョッパーと飛行距離をどのような値にしなければならないが決められる。

3.2 スリットをどのようにするか

ターボ分子ポンプを改造してチョッパーを製作するとき、ASDEXで使用されているような回転円筒にスリットを付けたチョッパー〔10〕にすると、180度反対側のスリットに課せられる条件を検討しておく必要がある。このような形のスリットにする利点は、ポンプそのものの排気能力をそのまま使えることである。ただしスリットの長さは強度から決められるが、今はスリット幅のみ検討する。

- (1) T OFによる測定では、ゲートが開いた瞬間に検出器（ここでは電子増倍管を考えている）はプラズマを直接見込まなくてはならないので、中性粒子以外の光あるいはX線が強い強度で検出器に当り検出器が飽和しまうことが考えられる。そこで今考えているような回転円筒のチョッパーでは、180度反対側のスリットを工夫することにより、その光をカットする可能性も考えられる。しかしその光はゲート開時間とアパーチャーフェンスの良いモニターになるため、ゲート付電子増倍管を用いることにより減衰させ、今の場合は積極的に測定することにする。
- (2) チョッパーの回転スピード ω_c [rad/sec]、ステータスリットおよび回転スリットの幅を W_s とする。
- (3) 光を通すために反対側のスリットは図3.2の位置では通っていなくてはならない（光の速度は無限大として）。図より180度反対側では、回転スリットの中心線から左側は $2\theta_1 + \theta_2$ だけ開いていなくてはならない。ただし、 θ_1 は回転スリットの開口角の半分であり、 θ_2 はステータスリットの開口角の半分である。
- (4) 前面のスリットが閉じてからも測定しようとしている粒子の中で最もスピードの遅い10eV（重水素）が通り抜けるまで開いていなくてはならない（図3.3参）。10eV（重水素粒子）の粒子のスピードを V_{10} とすると、この粒子が反対側のスリットに達する時間(τ_{10})は $2r_s/V_{10}$ であるから、角度としては、

$$\theta_{10} = \omega_c \tau_{10}$$

となり、回転スリットの中心線から右側は $2\theta_1 + \theta_2 + \theta_{10}$ だけ開いている必要がある。

- (5) 実際にどのくらいになるか計算してみると図3.2、3.3より

$$\theta_1 \sim \theta_2 \sim \frac{W_s}{2r_s}$$

であるから、 $r_s = 50\text{mm}$, $\omega_c = 42000\text{rpm}$, $W_s = 0.15\text{mm}$ とすると

中心線から左側は、 $r_s (2\theta_1 + \theta_2) = 0.225\text{mm}$,

中心線から右側は、 $r_s (2\theta_1 + \theta_2 + \theta_{10}) = 0.935\text{mm}$,

となる。最低これだけは開けておく必要がある（実際には製作精度の点から考えて中心から両側

に 1.5 mm くらい開けておくのが適當だと思われる。)

- (6) スリットは 1 周に何個置くことができるかは、スリットの回転スピードと検出器までの飛行時間で決る。つまり L_{cd} / V_{10} ($= \tau_{10}$) の間は次のスリットが開いてはいけないから、この時間にチョッパーがどれだけ回転するかを求めることになる。つまりチョッパーの回転数は ω_c としたから、次のスリットまでの間隔を $\omega_c \tau_{10}$ の角度だけ取らなくてはならないことになる。
- (7) L_{cd} を 2 m とすると、 τ_{10} は約 6.5 μsec であるから、この $\omega_c \tau_{10} \sim 0.284 \text{ rad} \sim 16.3 \text{ deg}$ だけチョッパーは回転している。それゆえ、このパラメータでは最高約 17 deg おきにスリットを置くことができる。しかし 180 度反対側に大きなスリットがあることから回転スピードを 42000 rpm としたとき最高約 34 度おきにスリットを作ることができることになる。つまり、40 度おきくらいに 9 個のスリットを作るのが適當だと思われる。
- (8) 製作精度を上げるために材料は検討する必要がある。

3.3 検出器

Cu あるいは Be - Cu のプレートに中性粒子を当てて、それから放出される 2 次電子を電子増倍管で增幅し電流電圧変換を行なうことにより測定する。良い中性粒子源がなく 2 次電子放出係数が較正できない場合、参考文献 [10] に示されているのと同じ材料を用いて同様の 2 次電子放出係数を用いて使用する。

また $\delta E / E = 0.2$ とすると、 τ_{fel} から要求される時間応答はかなり速くなくてはならず、最低でも約 0.2 μsec は必要と考えられる。

$$\begin{aligned} L_{cd} = 2 \text{ m} \text{ として } 0.9 \text{ keV の水素で } \tau_{fel} &= 4.82 \mu\text{sec} \\ 1.0 \text{ keV の水素で } \tau_{fel} &= 4.57 \mu\text{sec} \\ 1.1 \text{ keV の水素で } \tau_{fel} &= 4.36 \mu\text{sec} \end{aligned}$$

トムソン散乱による電子温度測定等に使用されている、市販のゲート回路付光電子増倍管を改造することにより使用できそうである。

3.4 データ収集部

データ収集およびデータ処理はパソコンを用いて行なう。そのときデータは CAMAC のクレートコントローラからすべて読めるものとしておく。このようにすることで、JFT-2M のデータ処理用ミニコンからのアクセスも簡単にできる。以下に各モジュールをどのように使用するか簡単にまとめる。

- (1) JFT-2M からの主トリガを受け、LeCroy model 8501 (クロック発生器) によりサンプリングを開始させるクロックパルスを発生させる。このクロックパルスをバーストモードで使用する、もう一つの model 8501 へのスタートパルスとして入力し、サンプリングクロックを発生させる。ストップパルスとしては、前者 model 8501 の出力を使用する。
- (2) 2 次電子増倍管の出力と、タイミングを取っているフォトダイオードの出力、あるいは検出器

O F F のパルスをモニターとしてトランジエントレコーダに入力する。検出器O F F のパルスは、回転モニターの出力を LeCroy model 2323A に入力し、任意時間のパルスを作り電子増倍管への入力とする。

- (3) LeCroy model 6103は入力のアンプ（出力可変）として使用し、トランジエントレコーダはTR8818AあるいはTR8828Cを2台とする。この機種はメモリが簡単に増設できるので、予算とデータ処理可能な量で決まるメモリを付ける。
- (4) これらのモジュールはクレートコントローラを通してパソコンでコントロールされる。パソコンの機種は検討する必要があるが、以下のものが必要と思われる。

R A M ディスク	2 ~ 4 MB
ハードディスク	40 MB
M T	1台
プリンタ	1台
C R T	1台

3.5 チョッパーの回転モニタ

この回転モニタは、発光ダイオードあるいは半導体レーザーによる光と、フォトダイオードを用いて行なう。最近は高出力の光源と高速応答のアバランシェフォトダイオードがあるので、比較的簡単に、小型でノイズに強いものができると考えられる。

3.6 全体構成

全体構成は、図3.4のようになると考えられる。

4. 結び

上記T O F型中性粒子測定器は、チョッパーとして磁気浮上型で自在に固定できるターボ分子ポンプ（例えば大阪真空社製TG360M）の改造、検出器としてThomson散乱による電子温度測定に用いられている光電子増倍管の改造により昭和63年度に製作し、昭和64年度には測定を開始する予定である。J F T-2Mへの取り付けは、空間の許す限り自在であるが、現在は上部に取り付け、上部にヌル点のあるシングルヌルダイバータプラズマのダイバータ部も測定できるような設置を考えている。

OFFのパルスをモニターとしてトランジエントレコーダに入力する。検出器OFFのパルスは、回転モニターの出力を LeCroy model 2323A に入力し、任意時間のパルスを作り電子増倍管への入力とする。

- (3) LeCroy model 6103は入力のアンプ（出力可変）として使用し、トランジエントレコーダはTR8818AあるいはTR8828Cを2台とする。この機種はメモリが簡単に増設できるので、予算とデータ処理可能な量で決まるメモリを付ける。
- (4) これらのモジュールはクレートコントローラを通してパソコンでコントロールされる。パソコンの機種は検討する必要があるが、以下のものが必要と思われる。

RAMディスク	2～4 MB
ハードディスク	40 MB
MT	1台
プリンタ	1台
CRT	1台

3.5 チョッパーの回転モニタ

この回転モニタは、発光ダイオードあるいは半導体レーザーによる光と、フォトダイオードを用いて行なう。最近は高出力の光源と高速応答のアバランシェフォトダイオードがあるので、比較的簡単に、小型でノイズに強いものができると考えられる。

3.6 全体構成

全体構成は、図3.4のようになると考えられる。

4. 結び

上記TOF型中性粒子測定器は、チョッパーとして磁気浮上型で自在に固定できるターボ分子ポンプ（例えば大阪真空社製TG360M）の改造、検出器としてThomson散乱による電子温度測定に用いられている光電子増倍管の改造により昭和63年度に製作し、昭和64年度には測定を開始する予定である。JFT-2Mへの取り付けは、空間の許す限り自在であるが、現在は上部に取り付け、上部にヌル点のあるシングルヌルダイバータプラズマのダイバータ部も測定できるような設置を考えている。

謝 詞

本低エネルギー中性粒子測定器の検討の当初から御指導、御助言を賜わりました前田彦祐プラズマ実験研究室長、鈴木喜八郎装置技術管理室長に心から感謝申し上げます。また、終始御指導、御鞭撻を賜わりました田中正俊核融合研究部長（現在那珂研究所所長）、島本進核融合研究部次長及び森茂副理事長に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] F. Wagner and et al., Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1408.
- [2] S.M. Kaye and et al., J. Nucl. Mater. 121 (1984) 115.
- [3] N. Ohyabu and et al., Nucl. Fusion 25 (1985) 49.
- [4] K. Okajima and et al., Proc. of Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Kyoto 1986) IAEA-CN-47/AIII-2.
- [5] S. Sengoku and et al., J. Phys. Soc. Jpn. 57 (1988) 903.
- [6] S.A. Cohen and et al., Nucl. Fusion 24 (1984) 1490.
- [7] H. Tamai and et al., JAERI-M 87-078 (1987).
- [8] H. Takeuchi and et al., Japan. J. Appl. Phys. 16 (1977) 139.
- [9] D.E. Voss and S.A. Cohen, Rev. Sci. Instrum 53 (1982) 1696.
- [10] H. Verbeek, J. Phys. E: Sci. Instrum 19 (1986) 964.
- [11] H. Tamai and et al., JAERI-M 88-120 (1988).

謝 詞

本低エネルギー中性粒子測定器の検討の当初から御指導、御助言を賜わりました前田彦祐プラズマ実験研究室長、鈴木喜八郎装置技術管理室長に心から感謝申し上げます。また、終始御指導、御鞭撻を賜わりました田中正俊核融合研究部長（現在那珂研究所所長）、島本進核融合研究部次長及び森茂副理事長に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] F. Wagner and et al., Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1408.
- [2] S.M. Kaye and et al., J. Nucl. Mater. 121 (1984) 115.
- [3] N. Ohyabu and et al., Nucl. Fusion 25 (1985) 49.
- [4] K. Okajima and et al., Proc. of Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Kyoto 1986) IAEA-CN-47/AIII-2.
- [5] S. Sengoku and et al., J. Phys. Soc. Jpn. 57 (1988) 903.
- [6] S.A. Cohen and et al., Nucl. Fusion 24 (1984) 1490.
- [7] H. Tamai and et al., JAERI-M 87-078 (1987).
- [8] H. Takeuchi and et al., Japan. J. Appl. Phys. 16 (1977) 139.
- [9] D.E. Voss and S.A. Cohen, Rev. Sci. Instrum 53 (1982) 1696.
- [10] H. Verbeek, J. Phys. E: Sci. Instrum 19 (1986) 964.
- [11] H. Tamai and et al., JAERI-M 88-120 (1988).

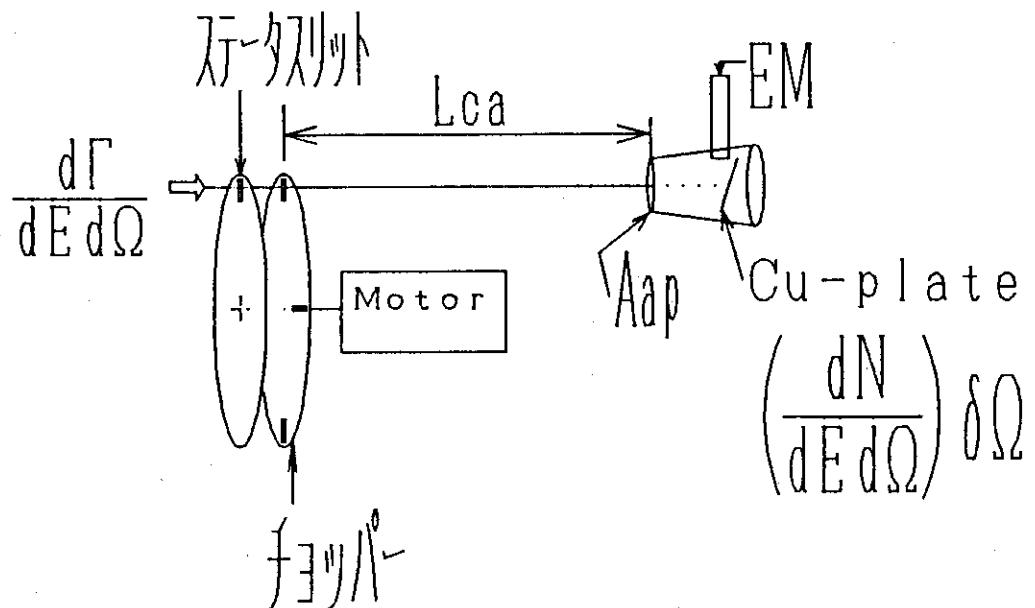


図 2.1 飛行時間測定による中性粒子測定の概念図

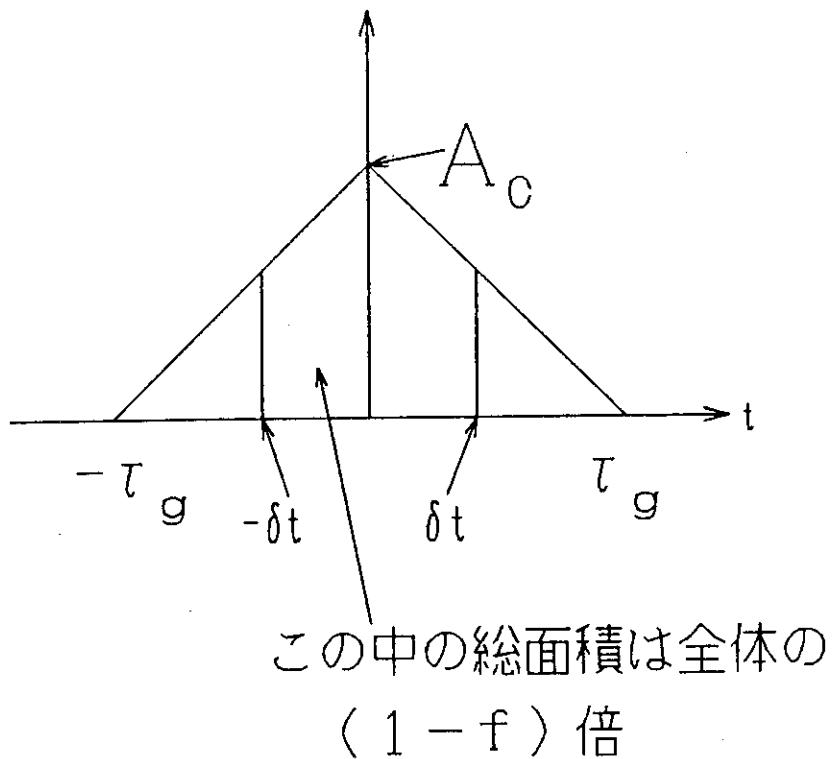


図 2.2 アパー チャー 関数

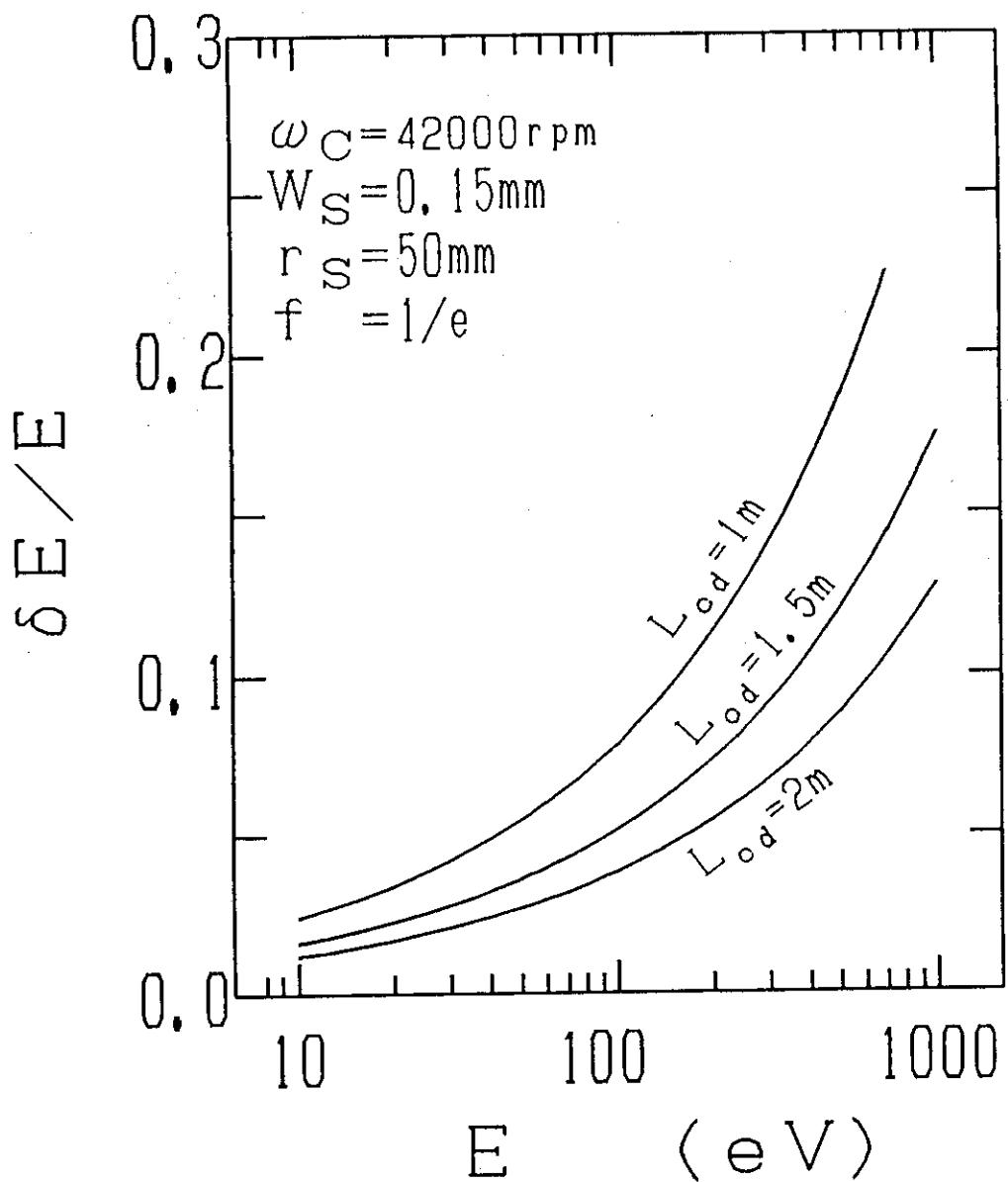
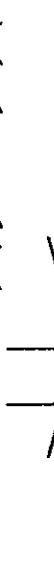


図 3.1 エネルギー分解能 $\omega_c = 42000 \text{ rpm}$, $W_s = 0.15 \text{ mm}$, $r_s = 50 \text{ mm}$, $f = 1/e$ として計算した。

ステータスリット

ステータスリット



ここでは開いてはならない

図 3.2 ゲートが開く直前の回転スリットとステータスリットおよび 180 度反対側のスリットの位置関係

中心線

中心線

ここまで開いていることが必要

 $\theta_1 + \theta_2 = \theta_{10}$
 $2\theta_1 + \theta_2$
 r_s

180 度反対側のスリットの位置関係

図 3.3 ゲートが閉じたところでの回転スリットとステータスリットおよび 180 度反対側のスリットの位置関係

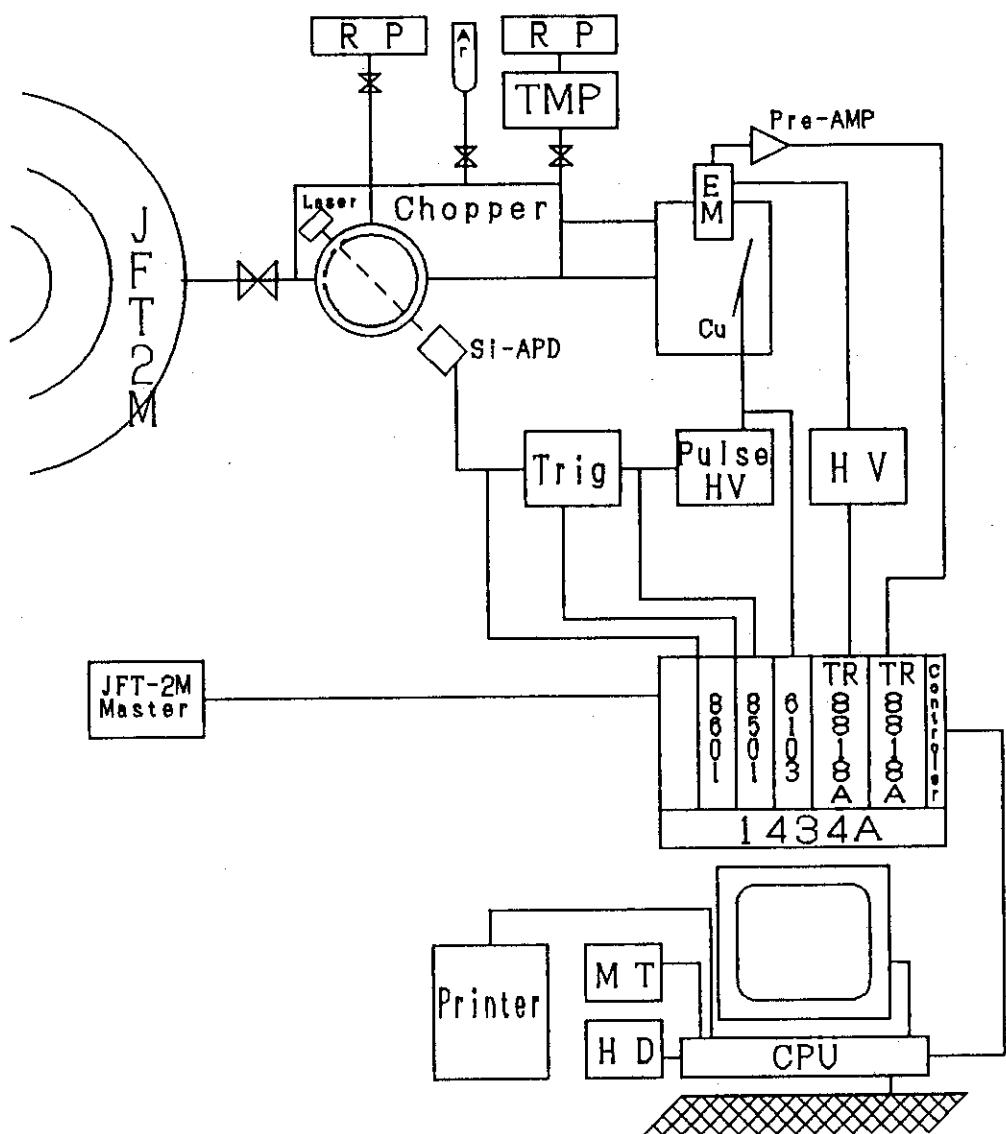


図 3.4 飛行時間型低エネルギー中性粒子エネルギー分析器の全体構成

付録 光だけを通すスリットについて

放射損失はプラズマからのエネルギー損失の1つであり、プラズマの輸送係数などの解析では、その空間分布の情報を必ず必要とする。JFT-2Mにおいて放射損失の測定〔11〕は、空間2次元で開始されている。放射損失測定はボロメータ等の検出器により温度上昇を測定するのだが、その場合プラズマから放射される光と中性粒子を分離して測定することはできない。そこで光だけを通すスリットをチョッパーにより構成することで、放射損失量における光だけの寄与を測定することができる。

(A-1) 図A.1のx-y座標系において回転するスリットを考える。y=Y₀にはステータスリット(幅W_s)がありy=2r_s及びy=0のところには移動するスリット(幅W_s)があるとする。y=2r_sにあるスリットはこの図の左から右側へ速さv_cで移動しており、y=0にあるスリットは右から左側へ速さv_cで移動しているとする。また時間はこの図の状態の時をゼロにする。

(A-2) ステータスリットがあるのでy=0の位置でx<0, x>W_sでは、光及び粒子が来ないとする。つまり平行光及び平行に走る粒子のみを考えることにする。

(A-3) y=0, x=X<W_sの位置に光または粒子が到達している時間は、光または粒子の速度をv_cとすると

$$\frac{X}{v_c} + \frac{2r_s}{v} < t < \frac{X}{v_c} + \frac{2r_s}{v} + \frac{W_s}{v_c} \quad A-①$$

である。

(A-4) y=0, x=Xの位置でスリットが開いている時間は、

$$\frac{W_s - X}{v_c} < t < \frac{W_s - X}{v_c} + \frac{W_s}{v_c} \quad A-②$$

である。

(A-5) X/v_c=τ_x, 2r_s/v=τ_d, W_s/v_c=τ_gとおくと、A-①, A-②の条件は、

$$\tau_x + \tau_d < t < \tau_x + \tau_d + \tau_g \quad A-③$$

$$\tau_g - \tau_x < t < 2\tau_g - \tau_x \quad A-④$$

となる。A-③の右辺と、A-④の左辺を比較すると(τ_x+τ_d+τ_g)-(τ_g-τ_x)=2τ_x+τ_d>0であるため、y=0, x=Xで光または粒子を受けられないようにするためには、A-③の左辺がA-④の右辺より大きければ良い、つまり(τ_x+τ_d)>(2τ_g-τ_x)である必要がある。これより

$$2\tau_x + \tau_d > 2\tau_g \quad A-⑤$$

となる。 $x = 0$ で τ_x は最小値0であり、 $\tau_d > 0$ であるから、 $x = 0$ で受けられない光または粒子は、 $0 < x < w_s$ でも受けられない。

(A-6) A-⑤より 10 keV以下の粒子が $x = 0$ で受けられない条件を考えてみる。

$v = (2E/m)^{1/2}$ ただし $E = 10 \text{ keV}$, $m = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ とし $\omega_c = 42000 \text{ rpm}$, $r_s = 50 \text{ mm}$ という[3.2節(5)]で用いたパラメータを用いると、A-⑤から

$$w_s < r_s \frac{\omega_c}{v} \quad \text{A-6}$$

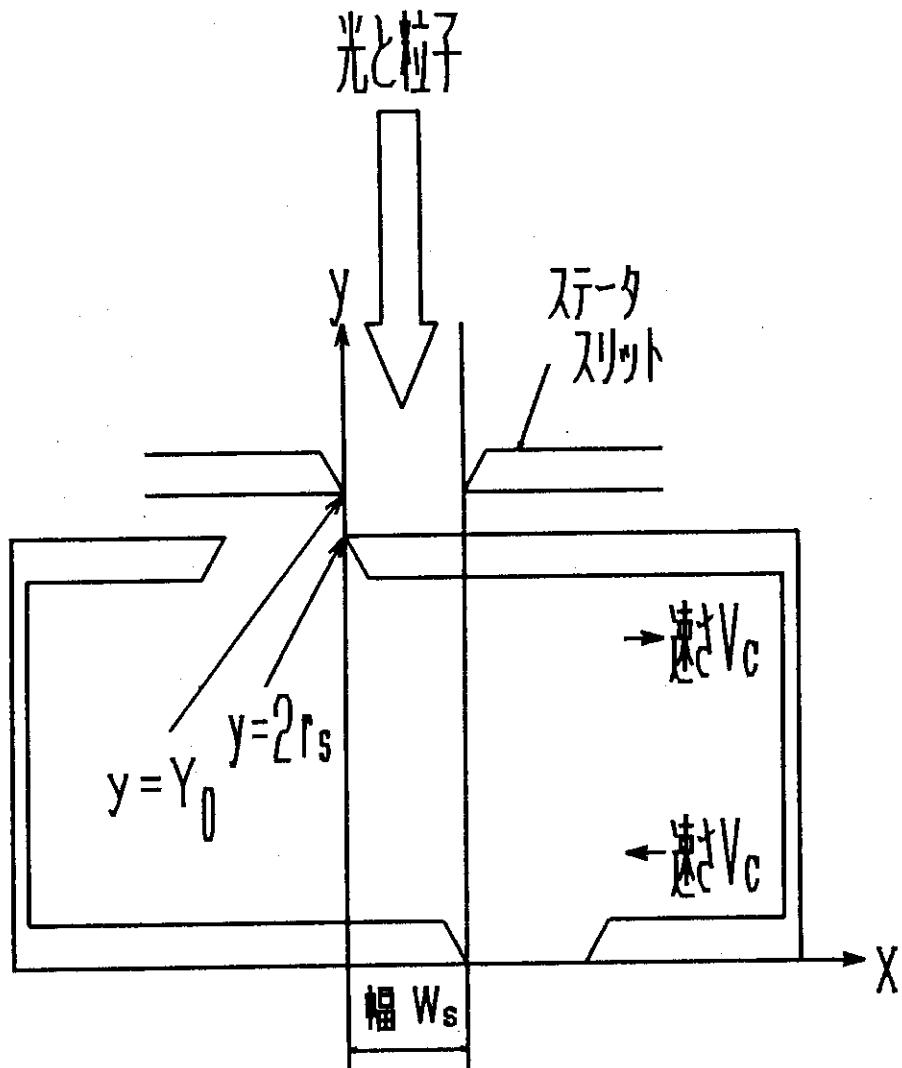
となることより、 $w_s \sim 7.9 \mu\text{m}$ となる。

(A-7) スリットが回転していると考えると、10 eVの重水素粒子が $x = 0$ に達するまでの時間にスリットの回転角度は[3.2節(4)]より θ_{10} であり、 $\omega_c = 42000 \text{ rpm}$, $r_s = 50 \text{ mm}$ のパラメータを使うと、 θ_{10} は約 0.81 deg となる。つまり最大約1度おきに360個のスリットを作ることができる事になる。

(A-8) スリット幅が非常に小さく、実際に精度良く製作することができるかどうかは疑問である。また、このようなスリットによる測定ではスリットの開口面積が

$$\epsilon = \frac{360 w_s}{2 \pi r_s}$$

倍だけ小さくなるため、この効果だけでも ϵ 倍だけ検出器の出力が小さくなってしまうというもう1つの問題である。



図A.1 回転スリットをスリット幅が小さいとして $x - y$ 座標系で考えるための概念図。 $y = Y_0$ にはステータスリット(幅 W_s)があるとする。 $y = 2r_s$ および $y = 0$ のところには移動するスリット(幅 W_s)があるとする。 $y = 2r_s$ にあるスリットはこの図の左から右側へ速さ v_c で移動しており、 $y = 0$ にあるスリットは右から左側へ速さ v_c で移動しているとする。