

大口徑 MCP を用いた
低エネルギー二次ビーム位置検出器の開発

鈴木 博才

2015 年

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目標	2
第 2 章	実験装置	5
2.1	動作原理	5
2.1.1	ディレイラインを用いた位置検出器	5
2.1.2	二次電子反射型位置検出器	6
第 3 章	実験 (MCP ディレイライン装置の性能評価)	8
3.1	MCP ディレイライン装置の仕様	8
3.2	性能試験	11
第 4 章	実験 (二次電子反射型位置検出器の性能評価)	13
4.1	性能試験	13
4.2	データ収集	15
第 5 章	結果・解析	16
5.1	MCP ディレイライン装置	16
5.1.1	ディレイラインの両端の相関	16
5.1.2	MCP2 次元像	17
	チャンネル・時間変換	17
	時間差・距離変換	18
	直交座標変換、原点合わせ	20
5.1.3	位置分解能	21
5.2	二次電子反射型位置検出器	22
5.2.1	位置分解能	22
5.2.2	S/N 比	22
第 6 章	考察	25

6.1	二次電子反射型位置検出器	25
6.1.1	位置分解能	25
第 7 章	結論と課題	31
7.1	MCP ディレイライン装置	31
7.2	二次電子反射型装置の位置分解能	31
参考文献		34

目次

1.1	ガンマ線核分光実験の例	2
1.2	ドップラーシフトの影響	4
2.1	有効径 120 mm の MCP	5
2.2	MCP の構造と電子増幅の仕組み	5
2.3	ディレイラインの構成と概念図	6
2.4	電子反射型位置検出器の構成図	7
2.5	電子反射型位置検出器の電子加速部側	7
3.1	MCP ディレイライン装置の写真	8
3.2	3 層ディレイラインを MCP の反対側から見た図	10
3.3	MCP+ ディレイライン装置の性能試験のセットアップ	11
3.4	線源側から見た MCP ディレイライン装置の写真	12
4.1	二次電子反射型位置検出器のセットアップ	14
4.2	信号処理の回路図	15
5.1	3 層ディレイラインの両端の TDC 2 次元スペクトル	17
5.2	U 層と V 層による 2 次元像	19
5.3	V 層と W 層による 2 次元像	19
5.4	W 層と U 層による 2 次元像	19
5.5	時間差から距離への変換	20
5.6	ディレイラインの相関がとれたイベントにゲートをかけた時の 2 次元像 (ワイヤーピッチは 3 mm)	23
5.7	ディレイラインの相関がとれている、かつ、シリコン検出器との同期がとれているイベントでゲートをかけた時の 2 次元像 (ワイヤーピッチは 3 mm)	23
5.8	ディレイラインの相関がとれたイベントにゲートをかけた時の 2 次元像 (ワイヤーピッチは 1 mm)	24
5.9	ディレイラインの相関がとれている、かつ、シリコン検出器との同期がとれているイベントでゲートをかけた時の 2 次元像 (ワイヤーピッチは 1 mm)	24

6.1	電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の二次電子の軌道 文献 [12] の Fig 4.4	26
6.2	電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の二次電子の軌道 文献 [12] の Fig 4.1	26
6.3	電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の加速部付近の電位分布 文献 [12] の Fig 4.8 下段	27
6.4	電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の加速部付近の二次電子の軌道 文献 [12] の Fig 4.8 下段	27
6.5	電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の加速部付近の電位分布 文献 [12] の Fig 4.8 上段	28
6.6	電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の加速部付近の二次電子の軌道 文献 [12] の Fig 4.8 上段	28
6.7	電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の反射部付近の電位分布 文献 [12] の Fig 4.9 下段	29
6.8	電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の反射部付近の二次電子の軌道 文献 [12] の Fig 4.9 下段	29
6.9	電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の反射部付近の電位分布 文献 [12] の Fig 4.9 上段	30
6.10	電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の反射部付近の二次電子の軌道 文献 [12] の Fig 4.9 上段	30

表目次

3.1	RoentDek HEX120 の特性	9
5.1	TDC のチャンネルから時間への変換係数	18
5.2	MCP デイレイライン装置の横方向と縦方向の位置分解能	21
5.3	ワイヤーピッチが 3 mm の場合の二次電子反射型装置の横方向と縦方向の位置分解能	22
5.4	ワイヤーピッチが 1 mm の場合の二次電子反射型装置の横方向と縦方向の位置分解能	22

概要

近年、核物理研究センターや理化学研究所の RIBF などの加速器施設で、不安定な原子核をビームとして用いた実験により、安定線から離れた領域での原子核の研究が可能になってきた。そこでは、入射核破碎反応などを用いて二次ビームが作られる。それを核子当たり 5 MeV 程度に低エネルギー化することで核融合反応や核子移行反応などの低エネルギー核反応を活用した研究が展開されようとしている。そのような低エネルギー二次ビームの像は大きく広がっているため、標的への入射角などの情報を一粒子ごとに調べる、ビーム診断装置が必要となる。

本研究では、大口径 MCP (マイクロチャンネルプレート) を用いた低エネルギー二次ビーム実験で使用可能な位置検出器の開発を行った。MCP は直径 10 μm ほどの円筒が平面上に多数配置された構造の電子増倍素子である。本研究で開発する検出器は、二次ビームの像の広がりをカバーするために、有効径 120 mm の大口径 MCP を用いている。また、ビームのエネルギーロス、角度広がりを低く抑えるために、二次ビームの通過部分は物質厚の小さい薄膜 1 枚のみである。ビームライン上の薄膜をイオンが通過する際に放出される二次電子を、MCP で増幅させ、それを 3 層のディレイラインで読み出す方式を採用した。

MCP を用いた位置検出器を開発する上で基礎的な情報である、電子が MCP で増幅され、ディレイラインの両端で読み出されるまでの位置の広がりの評価を行うため、直径 1 mm の穴が直交格子状に並んだコリメータを用いた測定を行った。位置分解能を評価するため、MCP の直前にコリメータを置き、MCP の 2 次元像上に作られるローカスの大きさを穴の大きさと比較した。また、位置検出器のプロトタイプとして、二次電子反射型装置を取り付けた位置検出器を組み立て、その性能評価を行った。

第 1 章

序論

1.1 背景

自然界には、水素からウランまでの元素、その同位元素も含めると約 270 種類が存在し、これらは核図表において安定線を形成する。これまでの安定線から離れた原子核の研究により、安定な原子核領域で常識と考えられていた魔法数 [1, 2] が、安定線から離れた不安定核の領域では消失したり [3]、逆に新たに現れたりするなど [4, 5]、安定線付近の原子核のみを説明する既存のモデルでは説明がつかない性質が見つかってきた。また、宇宙における元素合成の過程は不安定核領域を經由して起こると考えられているため、不安定核の性質は元素誕生の解明に密接に関係している。このように、原子核の基本的性質の究明や、元素の起源を探る上で、安定線から離れた原子核を人工的に生成することが必要不可欠である。近年、理化学研究所の RIBF などの加速器施設では、入射核破碎反応やウランビームの飛行核分裂などの中間エネルギー核反応を用いて得られる不安定な原子核をビームとして用いることで安定線から離れた原子核を作り出している。このような、不安定核をビームにしたものは二次ビームと呼ばれている。

我々の研究グループでは、中性子過剰領域の ^{48}Ca 近傍の原子核の超変形状態 (長軸、短軸の比が 2 : 1 と大きく変形した状態) によって発生すると予想されたバナナ型変形などの新たな八重極変形の研究とその解明に取り組もうとしている。それらの状態の発見には中性子過剰原子核の高スピン状態を生成する必要がある。入射核破碎反応で得られる中間エネルギー二次ビームをエネルギー減衰板で核子当たり 5 MeV 程度に減速させることで作り出した低エネルギー二次ビームを二次標的に照射することにより、核融合反応を用いた中性子過剰核の高スピン状態の生成が可能となる。核融合後の生成核はビームの入射方向に運動しながらガンマ線を放出するため、生成核からのガンマ線のエネルギーは、ドップラーシフトを起こす。二次ビームは像の広がり、角度広がり、エネルギーの広がりが大きいいため、ドップラーシフトの補正は一粒子ごとに行う必要がある。

そこで本研究では、立ち上がり時間が 20 ns 程度の優れた時間特性をもつ MCP (マイクロチャンネルプレート) を用いた位置検出器を開発する。MCP の信号の立ち戻り時間から、 10^7 pps オーダーの大強度の二次ビームに耐えられると考えられる。従来位置検出器として用いられてきた PPAC (Parallel Plate Avalanche Counter) [6] は 10^5 pps 程度のビーム強度で放電してしまう

ため、これが実現すると PPAC の 100 倍程度の強度の二次ビーム実験で使用できることになり、これまで位置検出器のレート耐性で制限のあった大強度二次ビームでの実験が行える可能性がある。また、核子当たり 5 MeV 程度の低エネルギー二次ビームの検出器での核子当たりのエネルギーロス、総物質厚 30 μm 程度の PPAC では 1 MeV 程度であるのに対し、MCP 位置検出器は物質厚 0.5 μm 程度の薄膜を用いた場合には 10 keV 程度であり、検出器でのエネルギー広がりを抑えることができる。

1.2 目標

ここでは、低エネルギー二次ビーム実験で位置検出器が求められる位置分解能を具体的に評価する。図 1.1 のようなガンマ線核分光実験のセットアップを考える。

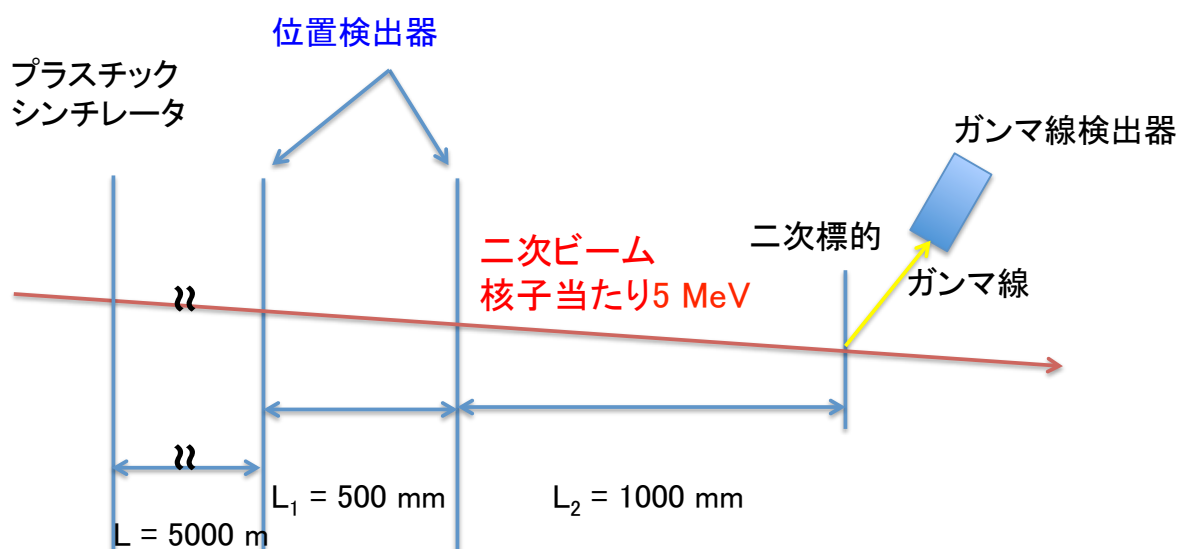


図 1.1 ガンマ線核分光実験の例

二次ビームが二次標的に照射されると、核融合反応により、様々な核種が生成される。目的の核種からのガンマ線のエネルギーをガンマ線検出器で測定する。核融合反応により生じた原子核はアルファ線や中性子等の蒸発粒子を放出した後にガンマ線を放出する。二次標的の後ろに位置検出器を置くことで、反跳核による角度のずれを測定することができるが、ここでは蒸発粒子による反跳は無視する。ガンマ線検出器で観測されるガンマ線のエネルギー E_γ は、ドップラーシフトを起こす。ドップラーシフトを起こす前のガンマ線の本来のエネルギーを求めるために、式 1.1 を用いて一粒子ごとにドップラーシフトの補正を行う必要がある。

$$E_\gamma = E_{\gamma 0} \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta} \quad (1.1)$$

$E_{\gamma 0}$ は本来のガンマ線のエネルギー、 β は光速に対する原子核の運動速度、 θ は原子核の運動方向

とガンマ線の観測方向とのなす角である。二次ビームは核子当たり 5 MeV のビームを用い、プラスチックシンチレータと位置検出器との間の 5 m 程度の粒子の TOF を、時間分解能 100 ps で測定する場合を考える。二次標的の 1 m 程度上流側に 50 cm 程度離して 2 台の位置検出器を置いてビームの軌道とターゲットに当たる位置を外挿することとする。ガンマ線検出器の固有エネルギー分解能は 0.3% 程度とし、二次標的から前方 60° の位置に 15 cm くらい離して置き、そこで 3 mm 程度の位置分解能でガンマ線の位置を測定できるとする。この時、 $\beta = 0.1$ 、 $\Delta\beta/\beta = 1.6 \times 10^{-2}$ である。

^{40}Ca の超変形状態は、ガンマ線のエネルギー分解能が 0.5% 程度の時に発見されたが [7]、 ^{48}Ca でも同程度のエネルギー分解能が必要であると考えられている。そこで、ガンマ線のエネルギー分解能が全方向で 0.5% 程度となるために角度広がりをどの程度に抑える必要があるかを考える。ドップラーシフトの補正後の本来のガンマ線のエネルギー分解能は、式 1.2 で与えられる。

$$\left(\frac{\Delta E_{\gamma 0}}{E_{\gamma 0}}\right)^2 = \left(\frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}\right)^2 (\Delta\theta)^2 + \left(\frac{\beta - \cos \theta}{(1 - \beta^2)(1 - \beta \cos \theta)}\right)^2 (\Delta\beta)^2 + \left(\frac{\Delta E_{\text{intr}}}{E_{\gamma 0}}\right)^2 \quad (1.2)$$

図 1.2 は、ドップラーシフトの補正後のガンマ線のエネルギー分解能に対する、角度の広がり $\Delta\theta$ 、速度の広がり $\Delta\beta$ 、固有エネルギー分解能 ΔE_{intr} の寄与を示している。青色の線、赤色の線、紫の線はそれぞれ式 1.2 の右辺の第一項、第二項、第三項である。緑の線は左辺の、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\beta$ 、 ΔE_{intr} の全ての寄与を足したエネルギー分解能である。 $\Delta\theta = 39$ mrad の時で計算しており、全方向でエネルギー分解能が 0.5% 以下である。 $\Delta\theta = 39$ mrad を満たすために、二次標的の上流に置かれた位置検出器は $\Delta x = 14$ mm の位置分解能が必要である。そこで、本研究では、 $\Delta x = 14$ mm を満たす位置検出器の開発を行う。

電子が MCP で増幅され、ディレイラインの両端で読み出されるまで（以下、MCP ディレイライン装置）の電子の位置の広がり情報は、MCP を用いた位置検出器を開発する上で基礎的なもので、今後の開発に繋がる重要な情報である。本研究では、次の 2 つの項目を目指した。

MCP ディレイライン装置の位置分解能の評価

二次電子反射型位置検出器の位置分解能の評価

二次電子反射型装置は、信号読み出しを陽極板 1 枚で行う時間検出器として用いられてきたが [8, 9]、信号読み出しにディレイラインを採用した位置検出器としての使用例は少ない。一連の研究の中で、MCP ディレイライン装置の組み立て、MCP の 2 次元像の変換、2 つの実験のセットアップと測定で得られたデータの解析については、特に私が主体的に行ったものである。

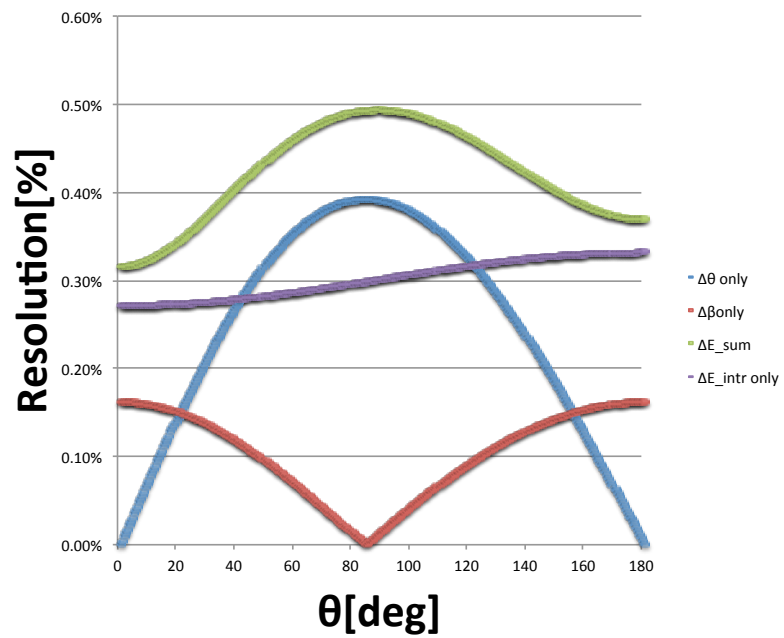


図 1.2 ドップラーシフトの影響。青色の線、赤色の線、紫の線はそれぞれ式 1.2 の右辺の第一項、第二項、第三項である。緑の線は左辺の、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\beta$ 、 ΔE_{intr} の全ての寄与を足したエネルギー分解能である。

第 2 章

実験装置

2.1 動作原理

信号読み出しにディレイラインを用いた位置検出器と、二次電子反射型位置検出器の動作原理について述べる。ここでは、検出器の一般的な動作原理について述べ、実験で使用した検出器の特性などについては第 3 章と第 4 章で述べる。

2.1.1 ディレイラインを用いた位置検出器

MCP(Micro Channel Plate) は、直径 $10\ \mu\text{m}$ ほどの円筒が平面上に多数配置された構造の電子増倍素子である。図 2.1 は、本研究で使用した有効径 120 mm の MCP で、黒色のプレート部分が MCP である。MCP の表面には電極用の金属が蒸着されており、電極間に高い電圧をかけると、陰極側に入射した電子は加速され、MCP のチャンネルの内壁に衝突し、複数の二次電子を放出する。内壁で何度も衝突を繰り返すことで増倍された電子は陽極側から放出される。MCP の構造と電子増幅の仕組みを図 2.2 に示した [10]。チャンネルは、イオンのフィードバックを避けるために MCP の表面に対して角度（バイアス角）が付いている。

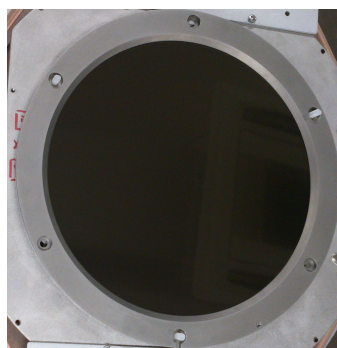


図 2.1 有効径 120 mm の MCP

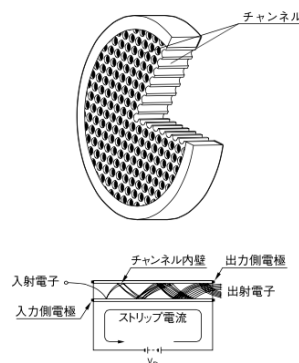


図 2.2 MCP の構造と電子増幅の仕組み

位置読み出しには、信号が銅線ワイヤーの両端に到達する時間差を利用して位置情報を得るディレイライン方式を採用する。本書では、陽極板 (Anode Holder) と陽極板に巻かれた位置検出に使われるワイヤーをまとめて「ディレイライン」と呼ぶことにする。図 2.3 は、ディレイラインの構成とディレイラインによる位置読み出しの概念図である [11]。ワイヤーは陽極板の周りに等間隔に平行に巻かれており、電子がワイヤーの何列目に当たったかにより、ワイヤーとワイヤーの巻かれている向きと垂直な向きの位置情報を得ることができる。2 層以上のディレイラインを組み合わせることにより、2 次元の位置検出が可能となる。

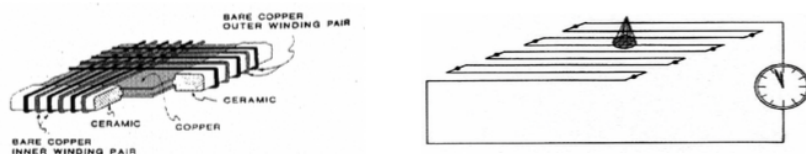


図 2.3 ディレイラインの構成と概念図。ワイヤーは陽極板の周りに等間隔に平行に巻かれている。右の図はディレイラインによる位置読み出しの概念図である。

2.1.2 二次電子反射型位置検出器

今回開発した二次電子反射型位置検出器の構成図を図 2.4 に示す。検出器は以下のものから構成される。

- 二次電子放出膜
- 電子加速部
- 電子反射部
- MCP
- ディレイライン

イオンは図 2.4 の右側から左側に移動し、 を通過すると、その場所から二次電子が放出される。膜のイオン入射側には二次電子の数を増加させる効果のある CsI を蒸着している。放出される二次電子の数は、膜の厚さにはあまり関係なく、膜のごく表面付近での通過イオンと相互作用する電子の密度に大きく依存する。放出された二次電子は薄膜と の薄膜の反対側に等間隔に張られたワイヤー間に掛けられた 1 kV 程度の電圧差により加速される。 は 、 に対して 45° の角度を持っており、両側にワイヤーが張られている。内側のワイヤーは のワイヤーと同じ電圧で、外側のワイヤーは よりさらに 1 kV 程度低く設定する。電子が に対して 45° の角度で入射すると、90° 向きを変え、 の MCP に到達する。MCP で増幅された電子は のディレイラインで検出される。以後、検出器全体を「二次電子反射型位置検出器」、 と の部分を合わせた部分を「MCP ディレイライン装置」と呼ぶ。図 2.4 は二次電子反射型位置検出器の の薄膜側の写真である。以後、膜の水平方向をビームから見て左を正として X 軸、垂直方向を上を正として Y 軸と定義する。

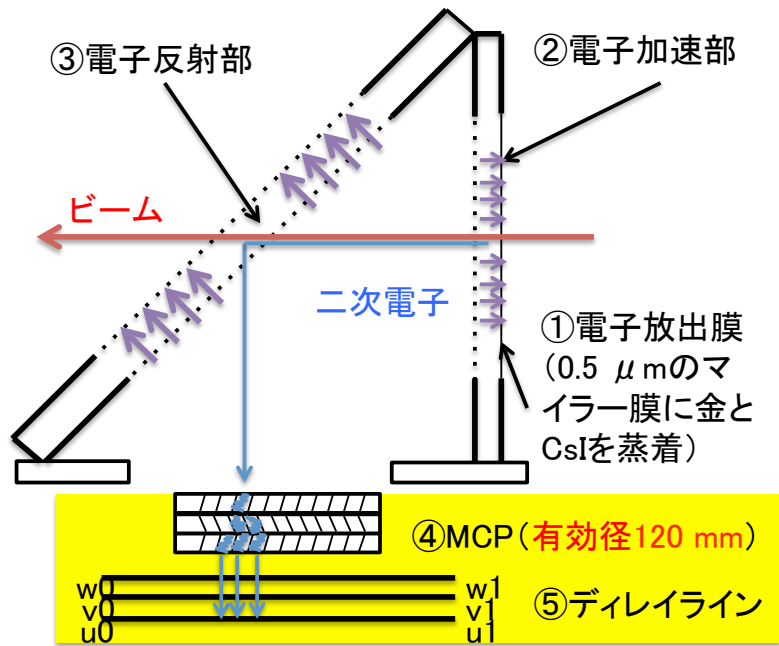


図 2.4 電子反射型位置検出器の構成図

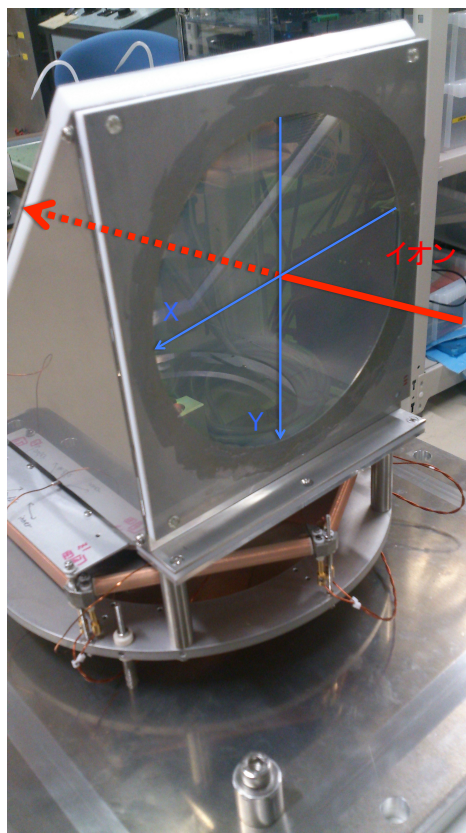


図 2.5 電子反射型位置検出器の電子加速部側。二次電子放出用の薄膜が張られている。

第3章

実験

(MCP ディレイライン装置の性能評価)

この章では、MCP ディレイライン装置の性能評価のための測定について述べる。

3.1 MCP ディレイライン装置の仕様

MCP とディレイラインは共に RoentDek 製の HEX120 という型のものを使用した [11]。その写真を図 3.1 に示す。有効径は 120 mm で、一般的に使われている有効径 20~90 mm の MCP に比べて大口径である。使用した MCP とディレイラインの特性を表 3.1 にまとめる。

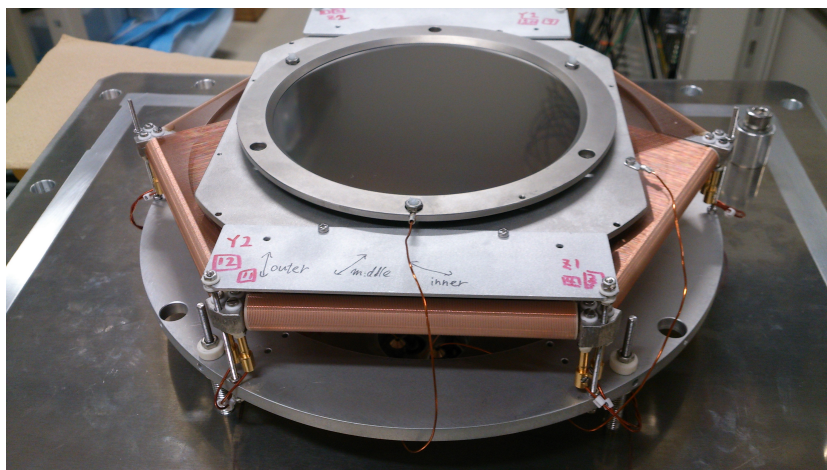


図 3.1 MCP ディレイライン装置の写真

MCP の物理的特性	
有効径	120 mm
厚さ	1.5 mm
穴の中心間隔	32 μm
穴径	25 μm
バイアス角	19 °
開放部比	>60 %
電極材質	ニクロム (80/20)
ワイヤーの特性	
ワイヤーの材質	銅
ワイヤーの太さ	0.2 mm
ワイヤー間隔	1 mm
電気的特性 (MCP×3, Z-stack 型配置)	
電子増倍率 (@3600 V)	10 ⁸
典型的動作電圧	3600 V

表 3.1 RoentDek HEX120 の特性

用いたディレイラインは、図 3.2 のように 3 層のディレイラインがそれぞれ 60° 毎に組まれている。原理的には 2 層で位置検出が可能であるが、1 層の冗長な層があることでマルチヒットイベントを拾うことができる。

3 層のディレイラインによる信号読み出しを可能にするため、3 枚の MCP をそれぞれのバイアス角が逆になる Z-Stack 型で重ねて使用し、 10^8 という高い増幅率を得る。ディレイラインは MCP の陽極側に設置されており、太さ 0.2 mm のワイヤーが銅製のホルダー電極の周りに 1 mm 間隔で巻かれている。1 層につき 2 本のワイヤー (“signal”, “reference”) が交互に巻かれており、それぞれのディレイラインの両端 (“0”, “1”) から計 12 本 ($u_0^{signal}, u_0^{reference}, u_1^{signal}, u_1^{reference}, v_0^{signal}, v_0^{reference}, v_1^{signal}, v_1^{reference}, w_0^{signal}, w_0^{reference}, w_1^{signal}, w_1^{reference}$) の信号を読み出す。それぞれの層の “signal” と “reference” は 36V (12V 電池 × 3) の電圧差があり、それらの差分をとることで共通のノイズを打ち消すことができる。差分を取った後の 6 つの信号を $u_0, u_1, v_0, v_1, w_0, w_1$ と呼ぶことにする。それらは Constant fraction discriminator (CFD) により論理信号に変換され、Time to digital converter (TDC) で時間を記録される。

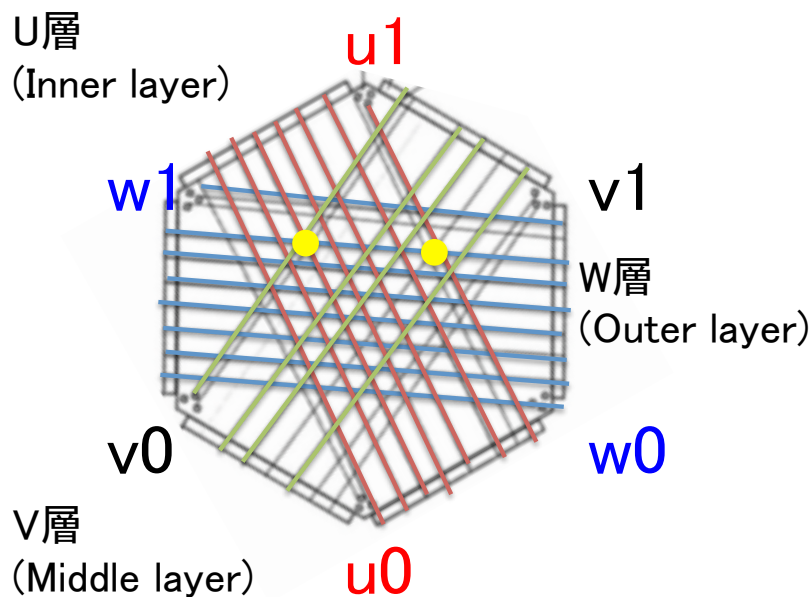


図 3.2 3 層ディレイラインを MCP の反対側から見た図。赤色、青色、緑色の線はそれぞれ U 層、V 層、W 層のディレイラインを表している。図の 2 つの黄丸の位置に電子が同時に到達した場合、W 層と U 層もしくは V 層の 2 層のみでは、2 つのイベントを区別することができない。

3.2 性能試験

MCP ディレイライン装置の性能評価を図 3.3 のセットアップで行った。MCP ディレイライン装置を真空チェンバー内に設置した。MCP ディレイライン装置と ^{241}Am のアルファ線源は、チェンバーの両端に置き、MCP の中心軸上に線源が置かれている。MCP の上に、1 mm 径の穴が直交格子状に 10 mm 間隔で並んでいる、厚さ 1 mm のアルミコリメータを設置した (図 3.4)。アルファ線を二次電子に変換するために、コリメータの上には厚さ $11\ \mu\text{m}$ のアルミホイルを貼った。コリメータと MCP の間の距離は 2 mm 程度で、この間の二次電子の位置の広がりを抑えるため、MCP とコリメータ間には 500 V の電圧差をつけた。アルファ線との相互作用によって電離された電子が 10 eV 程度のエネルギーを持って全方向に放射されたとすると、500 V で加速し 2 mm の距離を移動した後の電子の広がり最大で 0.6 mm 程度である。

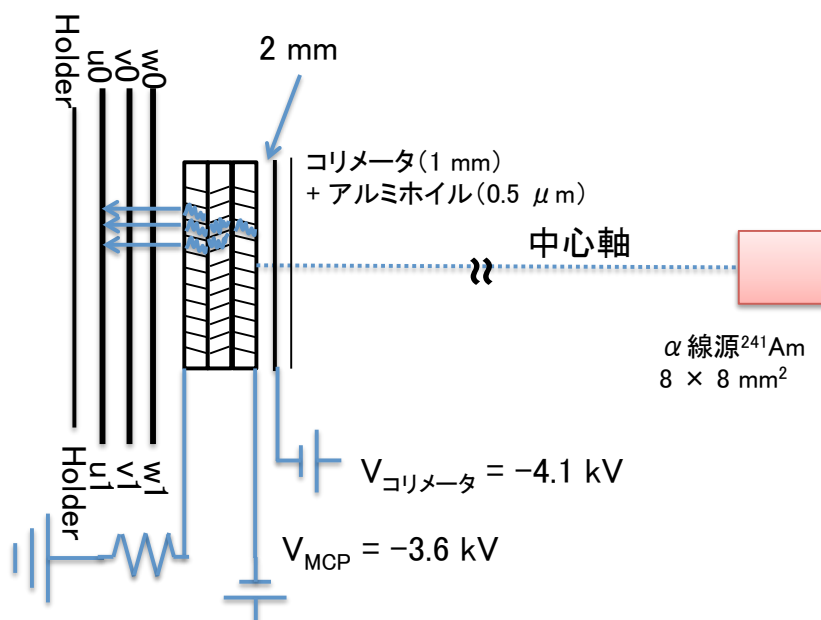


図 3.3 MCP+ ディレイライン装置の性能試験のセットアップ

図 3.4 は、使用したコリメータの写真である。コリメータの向きを識別するために、線源側から見て中心軸の右下 45° 方向の、中心から 1 つ目の穴、2 つ目の穴の大きさをそれぞれ 2 mm 径、3 mm 径に変え、右上 45° 方向の中心から 1 つ目の穴、2 つ目の穴の間には、1 mm 径の穴が追加してある。MCP ディレイライン装置では、膜の水平方向を線源から見て左を正として X 軸、垂直方向を上を正として Y 軸と定義し、穴の位置を座標で表すことにし、例えば、中心の穴の位置を (0, 0)、3 mm 径の穴の位置は (-20, -20) である。(単位は mm)

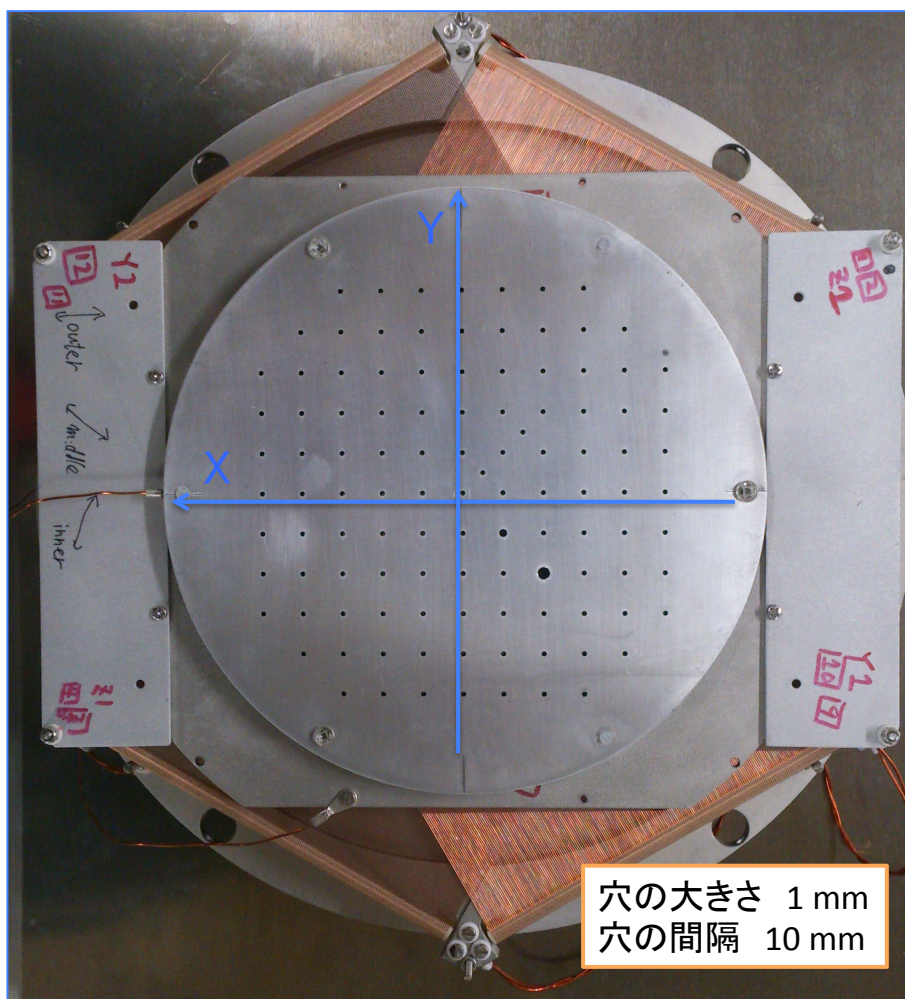


図 3.4 線源側から見たコリメータ設置後の MCP ディレイライン装置の写真 (写真の下が地面方向)

第 4 章

実験

(二次電子反射型位置検出器の性能評価)

4.1 性能試験

二次電子反射型位置検出器の性能評価を図 4.1 のセットアップで行った。真空チェンバー内に MCP ディレイライン装置を設置し、その上に二次電子反射型装置を取り付けた。薄膜の直前には第??章で用いたコリメータを設置し、コリメータの上に ^{241}Am のアルファ線源を置いた。アルファ線由来のイベントのみを取り出すため、アルファ線の軌道上に Si 検出器を設置した。アルファ線が の電子放出膜に入射すると二次電子が放出される。放出された二次電子は 電子加速部で加速され、 電子反射部で 90° 下の MCP に反射され、 の MCP に運ばれる。MCP で増大された二次電子は ディレイラインに到達する。

電子加速部では、薄膜と二次電子反射型装置の内側のワイヤーとの間に 0.70 kV の電圧をかけた。 電子反射部では、1.6 kV の電圧をかけた。 の MCP 間には 3.6 kV の電圧をかけた。MCP の陰極側と二次電子反射型装置の内部は等電位である。

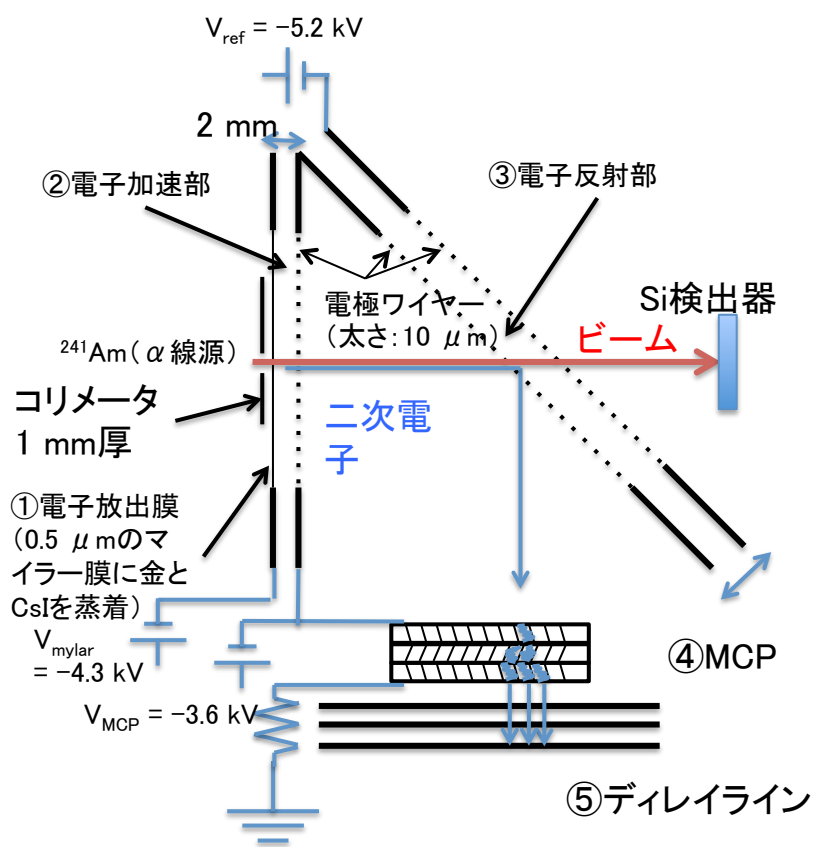


図 4.1 二次電子反射型位置検出器のセットアップ

4.2 データ収集

測定を行った際の回路図を図 4.2 に示す。TDC は CAMAC の KC3781A を使用した。そのフルスケールは 200 ns で分解能は 1 ch あたり 50 ps 程度である。線源側の MCP から取り出した信号 (MCP-Front)、ディレイラインの両端から取り出した差分を取った後の 6 つの信号 (u0, u1, v0, v1, w0, w1)、Si 検出器の信号 (Si) は、それぞれ Constant Fraction Discriminator (CFD) によって論理信号に変換され、時間信号として TDC に取り込まれる。TDC は COMMON スタートモードで使用し、MCP-Front の時間信号をスタート、ディレイラインと Si 検出器からの時間信号をストップに用いた。MCP-Front の出力は正信号だったので、Linear Fan-in/Fan-out (F-in/F-out) で負信号に変換した。Si は Pre Amplifier (PA) の後に時間とエネルギーの信号に分けられ、それぞれ Fast Amplifier (FA)、 Shaping Amplifier (SA) によって整形増幅され、FA 後の信号を CFD に入力する。

フィードスルーの大气側の読み出し口には、信号の高周波成分を除去するための保護回路を接続している。二次電子反射型位置検出器の測定では、保護回路の故障により CFD の threshold にかかる波高を取り出すことが出来なかったため、F-in/F-out 後の信号に PM AMP を通して波高を増幅させた後、CFD に入力した。モジュールを通過することで、スタート信号の遅れが生じるが、2次元像に用いる場合はディレイラインの両端の時間差を用いるため、遅れは打ち消される。

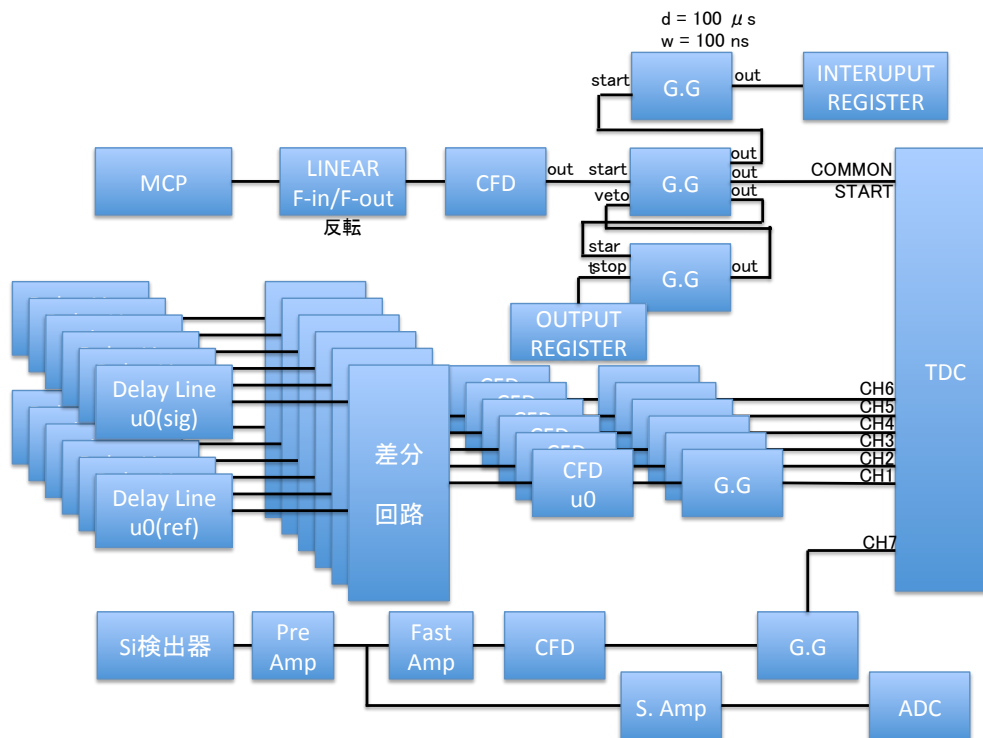


図 4.2 信号処理の回路図

第 5 章

結果・解析

ここでは、第 3 章と第 4 章で行った測定の結果、及び、行った解析について述べる。

5.1 MCP ディレイライン装置

ここでは、第 3 章で行った MCP ディレイライン装置の測定の結果、及び、行った解析について述べる。

5.1.1 ディレイラインの両端の相関

線源由来の二次電子がディレイラインに到着した場合のイベントは、各層の両端に到着する時間の和が一定である。シングルヒットのイベントのみを取り出すため、ディレイラインの両端の相関がとれたイベントにゲートをかけた。図 5.1 の上段は、左から順に U 層、V 層、W 層の両端の TDC の 2 次元ヒストグラムで、下段は上段の図の黒線で囲まれた範囲にあるイベントを抜き出したものである。位置分解能の解析では、ここで選別したイベントを用いて解析を行う。

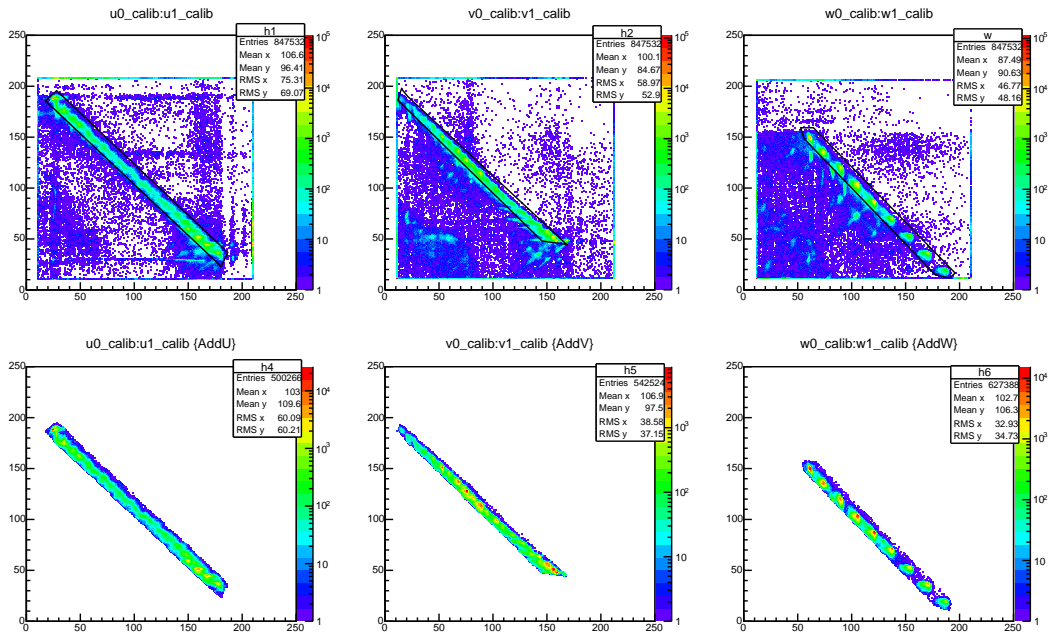


図 5.1 3層ディレイラインの両端の TDC 2次元スペクトル (上段：左から順に U 層、V 層、W 層の両端の相関、下段：上段の黒線で囲った範囲のイベント)

5.1.2 MCP2 次元像

ここでは、ディレイラインの両端の時間差の情報から、MCP の 2 次元像を作る方法を記す。3 層の時間差情報の組み合わせから 3 組の 2 次元像を作ることができる。それぞれの 2 次元像に対して時間差と距離の校正を行うことで、直交座標 (X_{uv}, Y_{uv}) , (X_{vw}, Y_{vw}) , (X_{wu}, Y_{wu}) に変換する。最後に中心位置を原点 $(0, 0)$ に調整する。手順をまとめると次のようになる。

- チャンネル時間変換
- 時間差・距離変換
- 直交座標変換、原点合わせ

これから各手順について詳しく説明する。

チャンネル・時間変換

時間校正は、Clock generator で生成したパルス信号を 2 つに分け、時間差をつけて TDC のスタートとストップに入力することで行った。第 4.2 節で定義した 6 つの時間信号 u0, u1, v0, v1, w0, w1 について TDC のチャンネルから時間への変換係数を求めた結果が表 5.1 である。

時間信号	変換係数 [ps/channel]
u0	48.0 ± 0.1
u1	48.1 ± 0.1
v0	47.6 ± 0.1
v1	48.6 ± 0.1
w0	47.0 ± 0.1
w1	47.9 ± 0.1

表 5.1 TDC のチャンネルから時間への変換係数

時間差・距離変換

U 軸、V 軸、W 軸における距離は、TDC に記録された T_{u0} 、 T_{u1} 、 T_{v0} 、 T_{v1} 、 T_{w0} 、 T_{w1} の時間差 $T_u = T_{u0} - T_{u1}$ 、 $T_v = T_{v0} - T_{v1}$ 、 $T_w = T_{w0} - T_{w1}$ を使って次のように求められる。

$$U = d_u \times T_u \quad (5.1)$$

$$V = d_v \times T_v \quad (5.2)$$

$$W = d_w \times T_w \quad (5.3)$$

ここではその変換係数 d_u 、 d_v 、 d_w を求めた。図 5.2、図 5.3、図 5.4 は、それぞれ、 T_u と T_v 、 T_v と T_w 、 T_w と T_u の 2 次元ヒストグラムで、線源由来の信号のみを選び出すため、図 5.1 のゲートをかけたイベントを選別している。

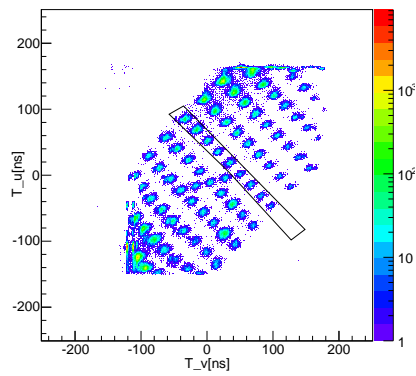


図 5.2 U 層と V 層による 2 次元像 (黒線はコリメータの中心の穴を通る縦列のゲート範囲)

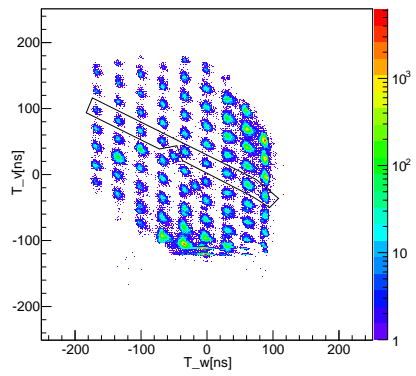


図 5.3 V 層と W 層による 2 次元像 (黒線はコリメータの中心の穴を通る縦列のゲート範囲)

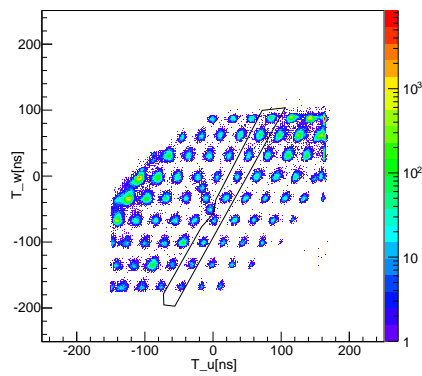


図 5.4 W 層と U 層による 2 次元像 (黒線はコリメータの中心の穴を通る縦列のゲート範囲)

図 3.4 の中心を通る縦列の穴に対応するローカスの列 (図 5.2、図 5.3、図 5.4 の黒線の列) を選
び出し、コリメータの穴の位置 [mm] と 2 次元像上の対応するローカスの位置 [ns] とを比較したと
ころ、u 軸、v 軸、w 軸にそれぞれ図 5.5 のような線形性がみられ、 $d_u = 0.30 \pm 0.01$ [mm/ns]、
 $d_v = 0.31 \pm 0.01$ [mm/ns]、 $d_w = 0.31 \pm 0.01$ [mm/ns] が得られた。

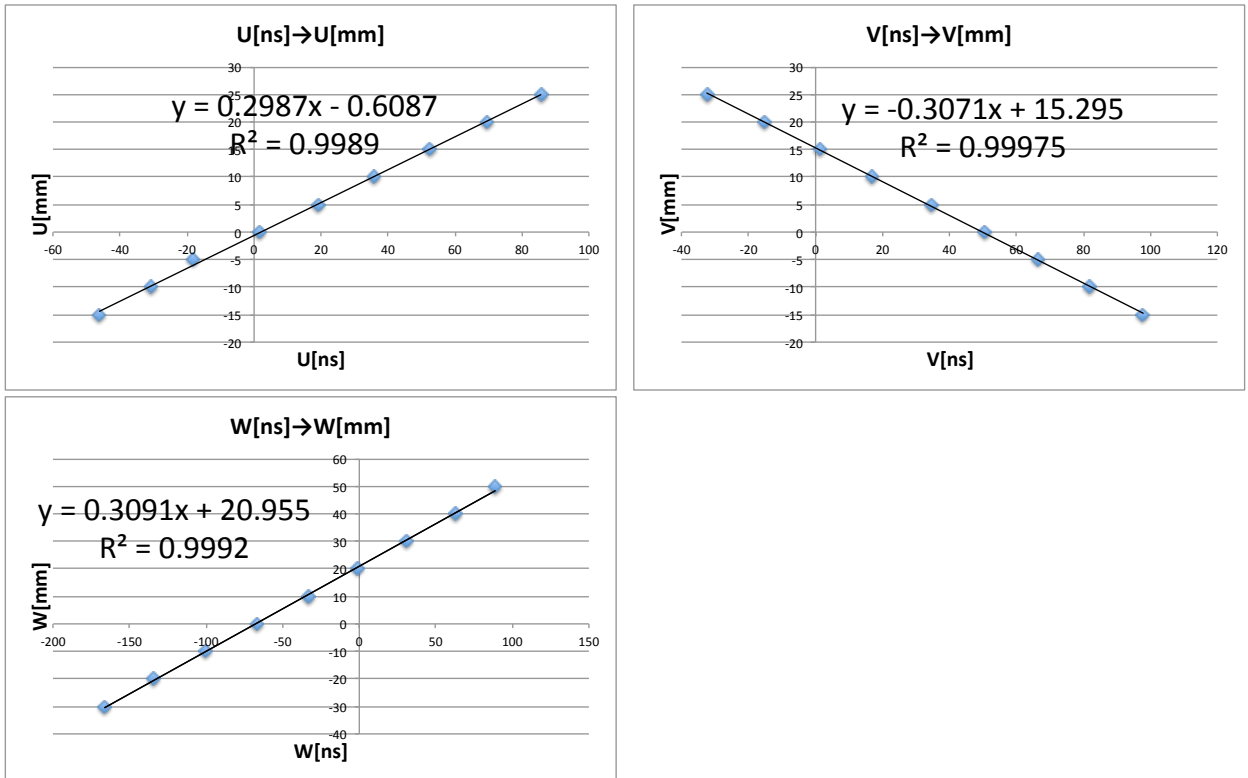


図 5.5 時間差から距離への変換

直交座標変換、原点合わせ

ディレイラインの 3 層の組み合わせから得られた 3 通りの 2 次元像 (U, V)、(V, W)、(W, U) を、次のような 1 次関数で直交座標での位置に変換した。

$$\begin{cases} X_{uv} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U + V) + O_{x(uv)} \\ Y_{uv} = U - V + O_{y(uv)} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$\begin{cases} X_{vw} = \frac{1}{\sqrt{3}}(2V + W) + O_{x(vw)} \\ Y_{vw} = W + O_{y(vw)} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\begin{cases} X_{wu} = \frac{1}{\sqrt{3}}(2U - W) + O_{x(wu)} \\ Y_{wu} = W + O_{y(wu)} \end{cases} \quad (5.6)$$

$O_{x(uv)}$ 、 $O_{y(uv)}$ 、 $O_{x(vw)}$ 、 $O_{y(vw)}$ 、 $O_{x(wu)}$ 、 $O_{y(wu)}$ は直交変換後の 2 次元像の、コリメータの中心の穴によるローカス位置から、 $O_{x(uv)} = -9.3 \pm 0.1$ [mm]、 $O_{y(uv)} = 15.1 \pm 0.1$ [mm]、

$O_{x(vw)} = -6.0 \pm 0.1$ [mm]、 $O_{y(vw)} = O_{y(wu)} = 20.8 \pm 0.1$ [mm]、 $O_{x(wu)} = -12.6 \pm 0.1$ [mm]と求められた。

5.1.3 位置分解能

ここでは、MCP ディレイライン装置の中心の穴の縦方向と横方向の位置分解能の結果を示す。

二次電子が直径 a [mm] のコリメータの円内に一様に降り注いだ場合の標準偏差は $a/4$ であるので、MCP ディレイライン装置の固有位置分解能 はピークの標準偏差 を用いて

$$\delta = \sqrt{\sigma^2 - (a/4)^2} \quad (5.7)$$

と表される。コリメータの中心の穴の直径は $a = 1.00 \pm 0.05$ mm で、中心の穴のイベント数は 685 である。

U 層と V 層を用いた横方向と縦方向の位置分解能 δX_{uv} 、 δY_{uv} 、V 層と W 層を用いた横方向と縦方向の位置分解能 δX_{vw} 、 δY_{vw} 、W 層と U 層を用いた横方向と縦方向の位置分解能 δX_{wu} 、 δY_{wu}

横方向の位置分解能 [mm]		縦方向の位置分解能 [mm]	
δX_{uv}	0.80 ± 0.02	δY_{uv}	0.94 ± 0.03
δX_{vw}	1.03 ± 0.03	δY_{vw}	0.89 ± 0.03
δX_{wu}	0.83 ± 0.02	δY_{wu}	0.89 ± 0.03
加重平均 δX	0.87 ± 0.01	加重平均 δY	0.90 ± 0.02

表 5.2 MCP ディレイライン装置の横方向と縦方向の位置分解能

5.2 二次電子反射型位置検出器

5.2.1 位置分解能

二次電子反射型位置検出器の位置分解能の評価方法は、5.1.3 と同様である。ワイヤーピッチが 3 mm の場合、1 mm の場合の位置分解能の結果を表 5.3、表 5.4 に示す。

横方向の位置分解能 [mm]		縦方向の位置分解能 [mm]	
δX_{uv}	1.50 ± 0.04	δY_{uv}	24.29 ± 0.66
δX_{vw}	2.63 ± 0.07	δY_{vw}	24.52 ± 0.66
δX_{wu}	2.44 ± 0.07	δY_{wu}	24.52 ± 0.66
加重平均 δX	1.93 ± 0.03	加重平均 δY	24.4 ± 0.4

表 5.3 ワイヤーピッチが 3 mm の場合の二次電子反射型装置の横方向と縦方向の位置分解能

横方向の位置分解能 [mm]		縦方向の位置分解能 [mm]	
δX_{uv}	1.13 ± 0.03	δY_{uv}	4.26 ± 0.1
δX_{vw}	1.65 ± 0.05	δY_{vw}	5.13 ± 0.1
δX_{wu}	1.42 ± 0.04	δY_{wu}	5.13 ± 0.1
加重平均 δX	1.34 ± 0.02	加重平均 δY	4.77 ± 0.07

表 5.4 ワイヤーピッチが 1 mm の場合の二次電子反射型装置の横方向と縦方向の位置分解能

5.2.2 S/N 比

二次電子反射型位置検出器の検出効率を知るために、図 4.1 のセットアップで、シリコン検出器とのコインシデンスの有無の結果を比較した。図 5.6、図 5.8 は、ディレイラインの両端の相関がとれたイベントにゲートをかけ、ワイヤーピッチがそれぞれ、1 mm、3 mm の時の MCP 2 次元像である。図 5.7、図 5.9 は、ディレイラインの両端の相関がとれている、かつ、シリコン検出器との同期がとれているイベントでゲートをかけ、ワイヤーピッチがそれぞれ 1 mm、3 mm の時の MCP 2 次元像である。図 5.6 と図 5.8 では、アルファ線由来ではないノイズイベントが見えているが、シリコン検出器とのコインシデンスを取ることで、図 5.7 と図 5.9 のようにノイズイベントを除去できていることを確認できた。ワイヤーピッチが 3 mm、1 mm の場合、それぞれ約 95 %、約 88 % のノイズイベントを除去することができた。

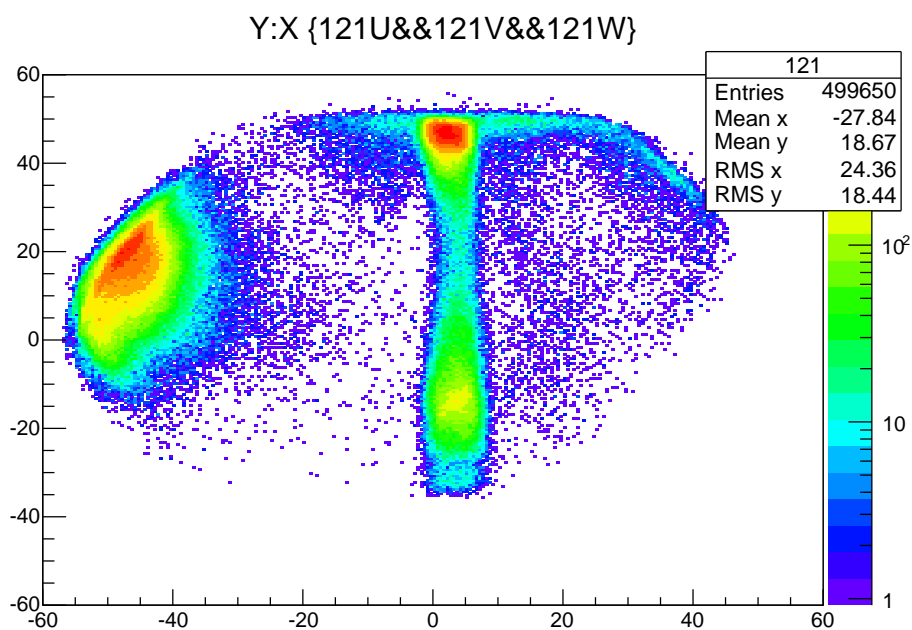


図 5.6 ディレイラインの相関がとれたイベントにゲートをかけた時の 2次元像 (ワイヤーピッチは 3 mm)

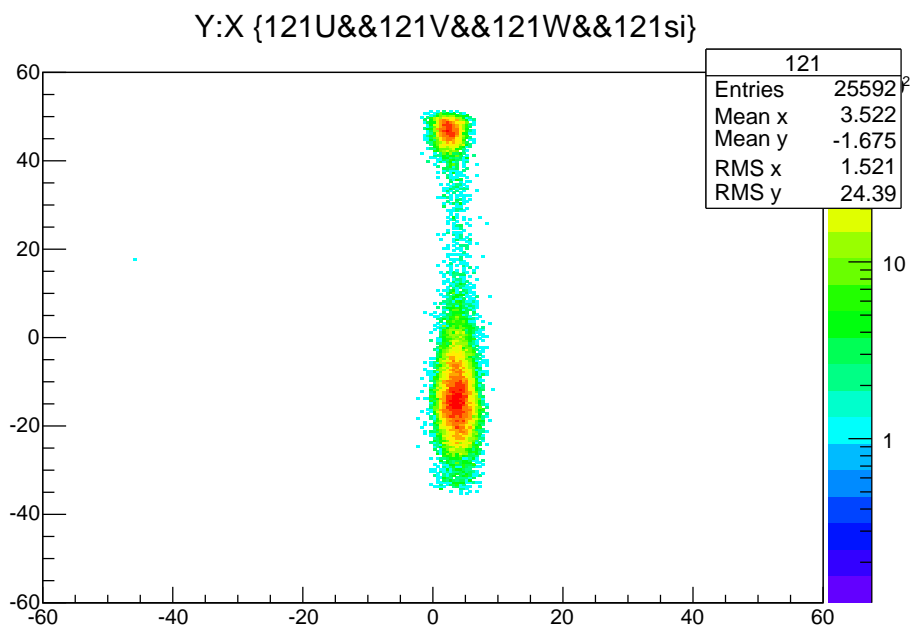


図 5.7 ディレイラインの相関がとれている、かつ、シリコン検出器との同期がとれているイベントでゲートをかけた時の 2次元像 (ワイヤーピッチは 3 mm)

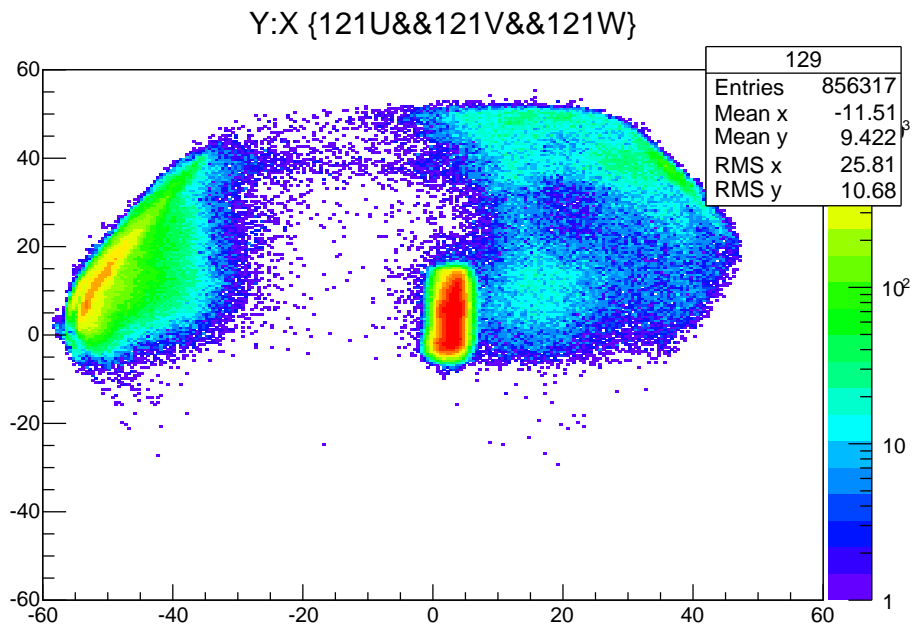


図 5.8 ディレイラインの相関がとれたイベントにゲートをかけた時の 2次元像 (ワイヤーピッチは 1 mm)

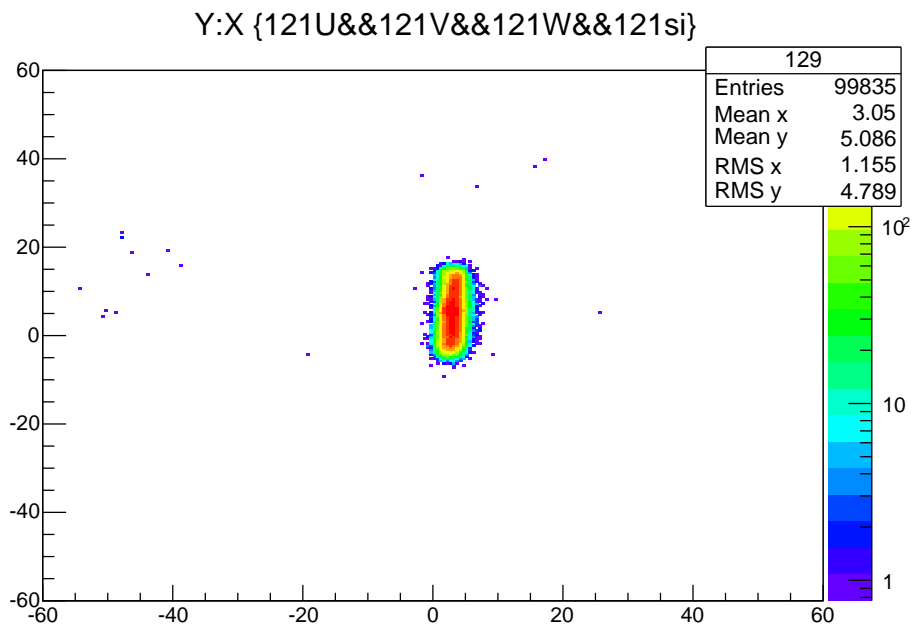


図 5.9 ディレイラインの相関がとれている、かつ、シリコン検出器との同期がとれているイベントでゲートをかけた時の 2次元像 (ワイヤーピッチは 1 mm)

第 6 章

考察

6.1 二次電子反射型位置検出器

6.1.1 位置分解能

5章で求めた結果から、ワイヤーピッチが 1 mm の場合の縦方向、横方向の位置分解能、ワイヤーピッチが 3 mm の場合の横方向の位置分解能は 1.2 の目標とする位置分解能を満たしているが、ワイヤーピッチが 3 mm の場合の縦方向の位置分解能は目標を達成できていないことがわかった。この実験結果を理解するために、これまでに行われたシミュレーション [12] との比較を行った。

シミュレーションは、二次電子反射型装置の内部の電場計算を有限要素法電磁場解析コード ANSYS Maxwell[14] と CERN で開発されたガス検出器シミュレーションプログラム Garfield[15] を用いて行われ、加速部、反射部の電圧差はそれぞれ 700 V、900 V に設定されている。その時のシミュレーションの結果を図 6.1-図 6.10 に示した [12]。

図 6.1 と図 6.2 は電場形成電極のワイヤーピッチがそれぞれ 3 mm、1 mm の時の二次電子の軌道を表している。図 6.3、図 6.4、図 6.5、図 6.6 は電場形成電極のワイヤーピッチがそれぞれ 3 mm、1 mm の時の加速部付近の電位分布と二次電子の軌道、図 6.7、図 6.8、図 6.9、図 6.10 は電場形成電極のワイヤーピッチがそれぞれ 3 mm、1 mm の時の反射部付近の電位分布と二次電子の軌道を表している。図 6.3、図 6.5、図 6.7、図 6.9 から、ワイヤー付近の電位分布が乱れていることがわかる。また、図 6.4、図 6.6、図 6.8、図 6.10 から、特に加速部の出口付近の電位分布の乱れが二次電子の軌道に大きく影響していることがわかる。

この結果から、5.2 節で加速部のワイヤーピッチが 3 mm の場合に横方向に比べ縦方向に像が伸びているのは、加速部のワイヤーピッチが大きいため、加速部の出口付近の縦方向に均一な電場が形成できていないためと考えられる。ワイヤーピッチをより小さくしていくことで、加速部の出口付近に均一な電場を形成することができ、二次電子の縦方向の広がりを抑えることができると考えられる。しかし、ワイヤーピッチをあまり細かくすると、ビーム粒子がワイヤーに衝突する可能性が大きくなり、検出効率が悪化してしまう。ワイヤーピッチの最適化は今後の課題である。

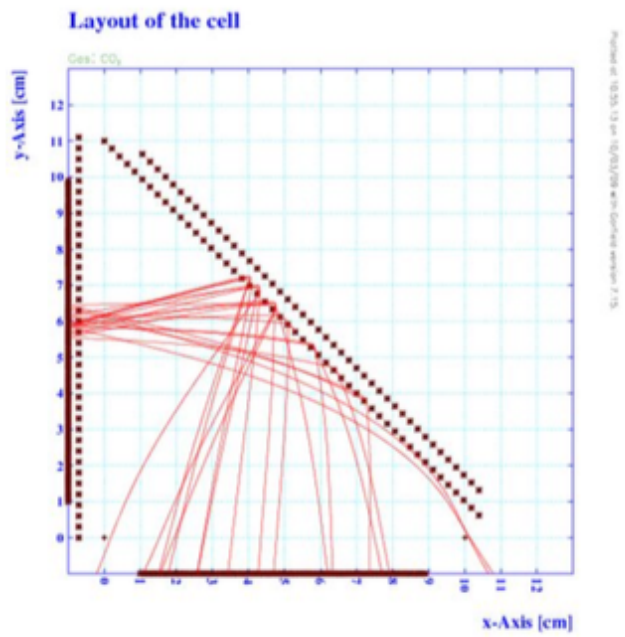


図 6.1 電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の二次電子の軌道
文献 [12] の Fig 4.4

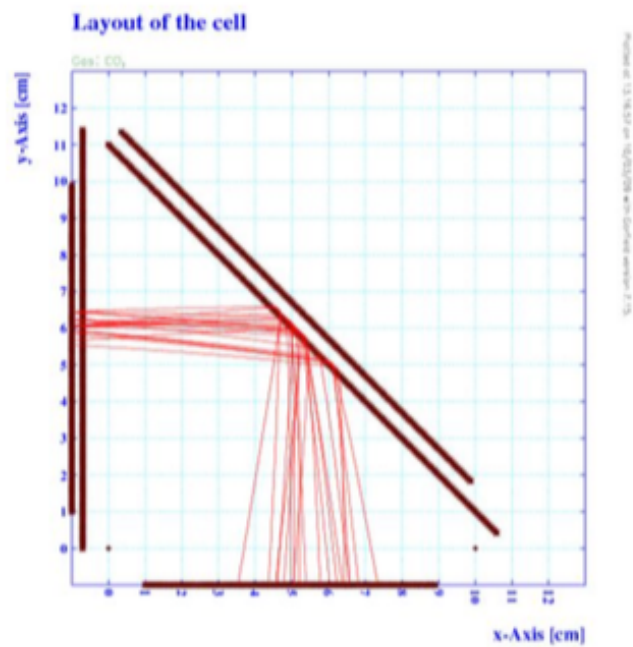


図 6.2 電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の二次電子の軌道
文献 [12] の Fig 4.1

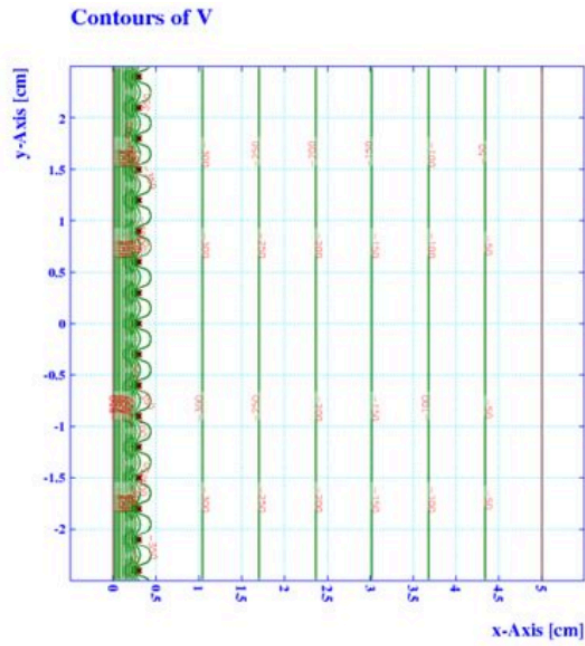


図 6.3 電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の加速部付近の電位分布
文献 [12] の Fig 4.8 下段

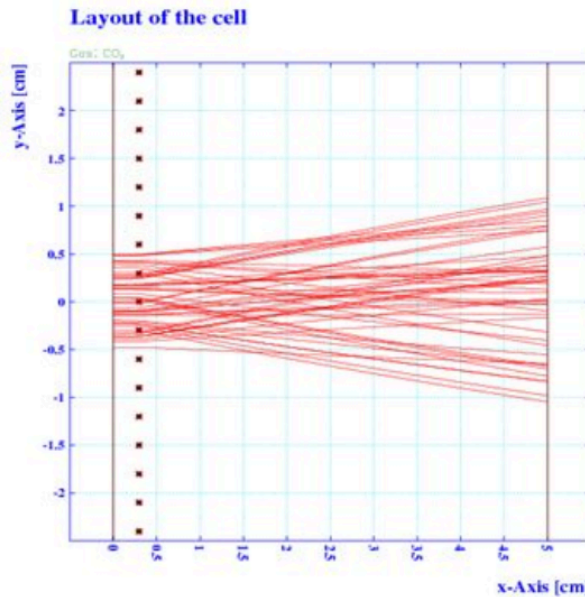


図 6.4 電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の加速部付近の二次電子の軌道
文献 [12] の Fig 4.8 下段

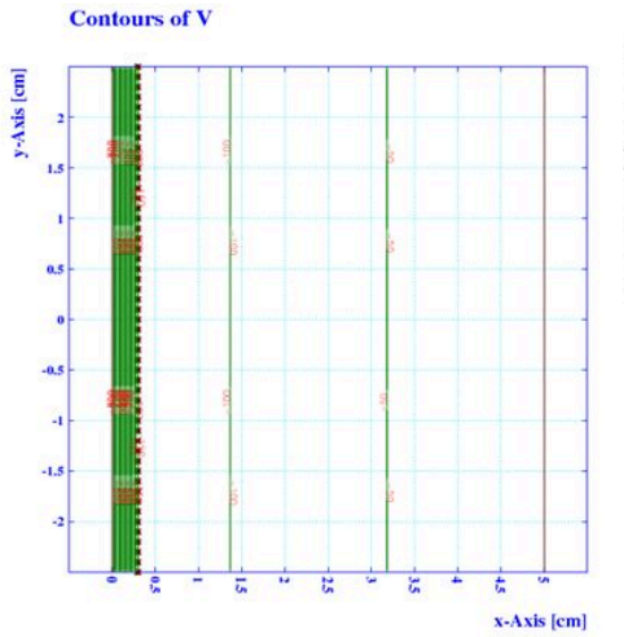


図 6.5 電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の加速部付近の電位分布
文献 [12] の Fig 4.8 上段

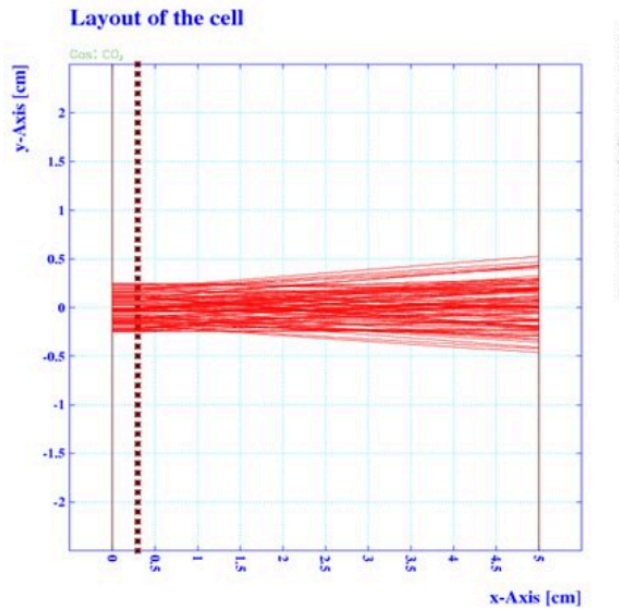


図 6.6 電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の加速部付近の二次電子の軌道
文献 [12] の Fig 4.8 上段

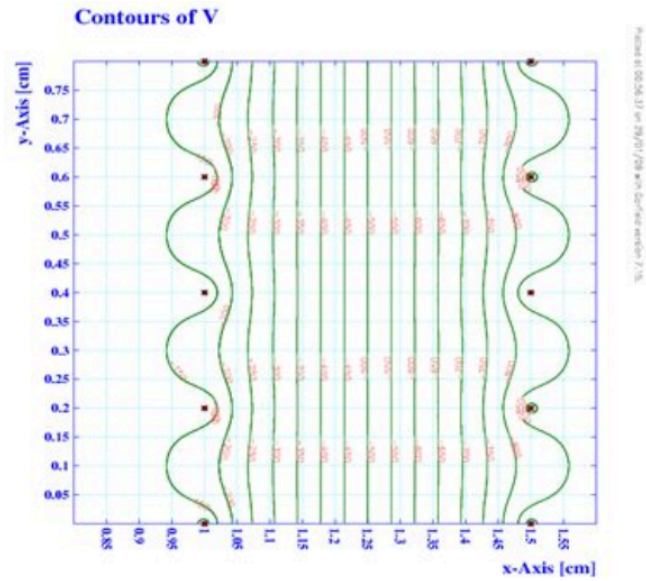


図 6.7 電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の反射部付近の電位分布
文献 [12] の Fig 4.9 下段

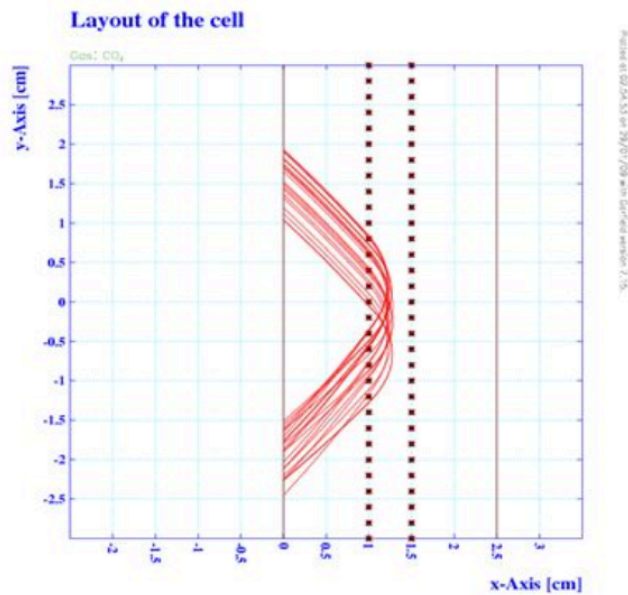


図 6.8 電場形成電極のワイヤーピッチが 3 mm の時の反射部付近の二次電子の軌道
文献 [12] の Fig 4.9 下段

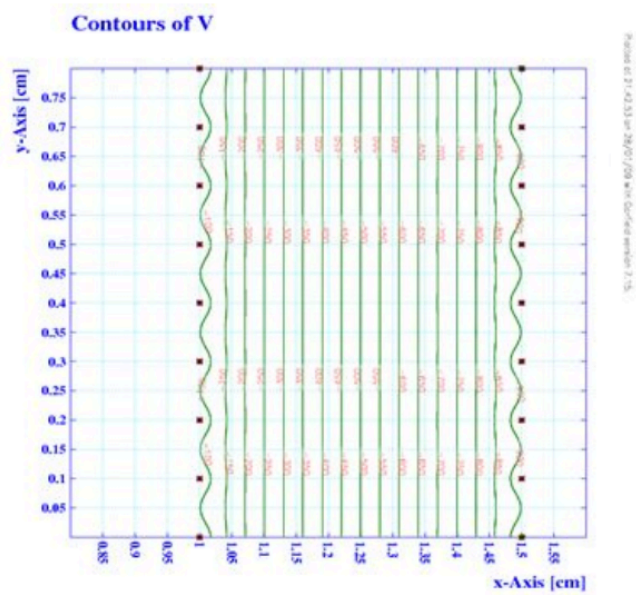


図 6.9 電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の反射部付近の電位分布
文献 [12] の Fig 4.9 上段

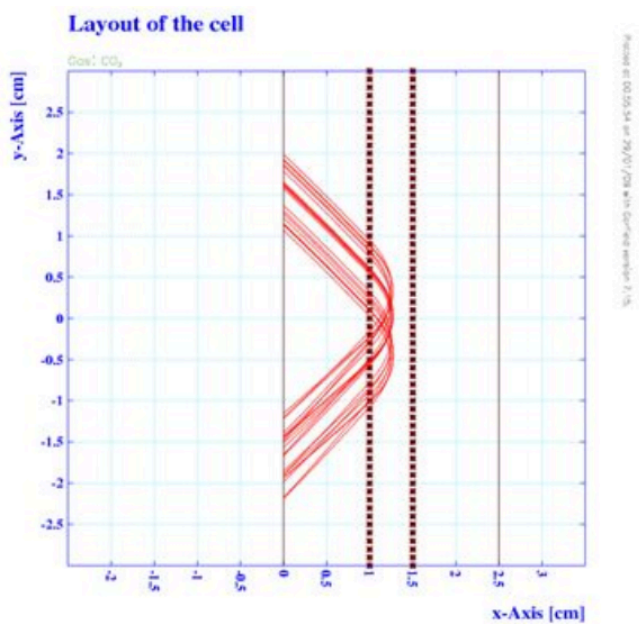


図 6.10 電場形成電極のワイヤーピッチが 1 mm の時の反射部付近の二次電子の軌道
文献 [12] の Fig 4.9 上段

第7章

結論と課題

核融合反応を用いた中性子過剰核の高スピン状態の測定実験のため、二次電子反射型位置検出器を制作した。検出器の性能評価はまず、位置検出を司る MCP ディレイライン装置で行った。次にそれを二次電子反射型装置に組み込み、検出器全体の性能評価を行った。

7.1 MCP ディレイライン装置

MCP ディレイライン装置の固有の位置分解能は横方向が 0.87 ± 0.01 mm、縦方向が 0.90 ± 0.01 mm であることがわかった。MCP とディレイラインの印加電圧の最適化は行っておらず、今後の課題である。

7.2 二次電子反射型装置の位置分解能

二次電子反射型装置の位置分解能はワイヤーピッチが 3 mm の場合、縦方向は 24.4 ± 0.4 mm、横方向は 1.93 ± 0.03 mm、ワイヤーピッチが 1 mm の場合、縦方向は 4.77 ± 0.07 mm、横方向は 1.34 ± 0.02 mm であった。ワイヤーピッチが 1 mm の場合の縦方向と横方向、ワイヤーピッチが 3 mm の場合の横方向の位置分解能は 1.2 節で示した位置分解能 14 mm を満たすが、ワイヤーピッチが 3 mm の場合の縦方向の位置分解能は満たさないことがわかった。ワイヤーピッチを小さくすることで加速部の出口付近の縦方向成分の電場は均一になっていき、縦方向の広がりは抑えられるが、ビーム粒子がワイヤーに衝突する可能性も大きくなり、検出効率が悪化する。ワイヤーピッチの最適化は今後の課題である。また、時間分解能、検出効率、レート耐性、位置分解能の位置依存性の評価も今後の課題である。

謝辞

本論文の執筆は、多くの方々のご協力のもとで完成しました。ここでは、本論文の執筆に貢献して頂いた方々への感謝の意を示します。

指導教官である井手口栄治准教授には、本研究の全般において指導いただきました。頭の痛くなるような文章の添削、徹夜の発表準備、勉強不足の私に対する個人講義、管理区域での事件などなど、様々なお迷惑をお掛けしました。そのような私に対して匙を投げることなく、最後まで熱心にご指導いただけましたことに厚く感謝いたします。

理研の研究者である森本幸司さんには、MCP について全く知らなかった私に辛抱強く付き合ってくださいました。忙しい中、毎日実験室に足を運んで、一緒に問題を考えて議論して頂いたことは非常に心強かったです。手持ちの限られた情報から次の一步をどのように踏み出すかを論理的に考えて、問題点を一つずつ潰していく検出器開発の難しさや面白さを学ばせていただきました。

理研の研究者である加治大哉さん、道正新一郎助教、青井考教授にはミーティングでのディスカッションで、有益なアドバイスを多く頂きました。加治さんは、私の拙い文章に対して添削もしていただきました。道正さんは、本論文の核心部分である位置分解能の評価方法について議論していただきました。青井さんには、データ解析において多くの助言をいただきました。

RCNP のスタッフの方々に感謝致します。鈴木智和助教、技術補佐員である健司さんには、論文の構成についてのアドバイスをいただきました。研究以外でも、日常の様々な事柄について話をし頂き、よい頭の体操になりました。技術職員の吉田英智さんには実験器具の購入時や真空装置の取扱いの際に特にお世話になりました。発表練習にも夜遅くまで付き合ってくださいました。橋本尚志特任助教（当時）には、私が研究を開始したばかりの時に、先行研究を紹介していただきました。その他にも特任研究員の松宮亮平、岩本ちひろさん、野地俊平特任助教、王恵仁特任講師、民井淳准教授にお世話になりました。

RCNP の学生の先輩である山本哲也さん、伊藤健さん、鎌倉恵太さん、山我拓巳さん、田中純貴さんには研究の随所随所で適切なアドバイスをいただきました。特に山本さんは、理解の遅い私との議論に辛抱強く付き合ってくださいました。他の人に聞けないような初歩的な質問にも呆れることなく対応してくださり、物理の基礎の理解を助けていただきました。同期の田中まなさん、三浦正季くん、井上梓さん、砂金学くんには、大学院の授業や勉強会、各自の研究についてたびたび議論に付き合ってくれました。おかげで、原子核物理の理解を深めることが出来ました。個性あふれるメンツの中で劣等感に苛まれる日々でしたが、2年間の研究生生活を一緒に頑張ってきた日々は一

生忘れません。

RCNP の事務の方々にもご協力いただきました。特に、研究協力係の西崎敦子さん、研究企画室の森本文子さん、庶務係の大石一星さん、松田真由美さんには、実験器具の運搬や事務手続きの処理などで大変お世話になりました。抜けていることの多い私に対して、親切に接していただきました。

2年間の研究生生活は、独立行政法人日本学生支援機構により奨学金を貸与していただくことで成り立ちました。

本研究に貢献して下さった全ての方々へ感謝の意を表します。ありがとうございました。

参考文献

- [1] M.G. Mayer, et al Phys. Rev. 75 (1949) 1969
- [2] O.Haxel, J.H.D. Jensen, et al., Phys. Rev. 75 (1949) 1766
- [3] P. Doornenbal, et al., Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 212502
- [4] A. Ozawa, et al., Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5493
- [5] D. Steppenbeck, et al., Nature. 502 (2013) 207
- [6] H. Kumagai, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 470 (2001) 562
- [7] E. Ideguchi, et al., Phys. Lett. B 686 (2010) 18
- [8] D. Kaji, et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 46 (2013) 190
- [9] K. Morimoto, et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 46 (2013) 191
- [10] HAMAMATSU, "MCP & MCP ASSEMBLY SELECTION GUIDE",
<http://www.hamamatsu.com/> .
- [11] RoentDek, "MCP Detector With Delay-line Anode", <http://www.roentdek.com/> .
- [12] 藤森康之 (2009) 「SHE 探査実験に用いられる検出器 TOF の開発と電場計算」山形大学卒論
- [13] 眞山圭太 (2012) 「超重核実験用大口径飛行時間検出器の開発」山形大学修論
- [14] ANSYS, "ANSYS Maxwell", <http://www.ansys.jp/products/electromagnetics/maxwell/>
- [15] CERN, "Garfield", <http://garfield.web.cern.ch/garfield/>