

# 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標 的の開発

2018 年度 修士論文

大阪大学核物理研究センター  
平川 景史

2018 年 3 月 5 日

# 概要

宇宙の誕生からおよそ1秒～3分の間に重陽子が誕生した。2核子からなる系、中性子-中性子, 中性子-陽子, 陽子-陽子の内、中性子-陽子 (重陽子) だけが束縛状態を得ることができるが、そのおかげでその後の様々な元素合成につながり現在の宇宙が形成された。2核子系の中で陽子-中性子 (重陽子) にのみテンソル力が作用し、このテンソル力が重陽子を束縛させるポテンシャルの大半を担っている。テンソル力は、高相対運動量で相関を持つ陽子-中性子対を生み出す性質を持つが、原子核研究において幅広く用いられている平均場模型やシェルモデルでは、こうした高運動量成分の正確な取り扱いが難しい。テンソル力は古くからの未解決な問題である核内短距離相関を生み出している可能性があり、また、近年の研究においては、不安定核内の核子の一粒子軌道がテンソル力によって大きく変化することで、原子核に様々な構造変化を生み出していることが分かってきた。従って、テンソル力の効果を解明することが今後の原子核研究においては宇宙の誕生を解明する上で重要であり、テンソル力を陽に含む新しい原子核理論の構築が必要である。テンソル力の効果を実証するために、高エネルギー (300 MeV) の核子移行反応を用いた高運動量核子をピックアップする実験を  ${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$  で計画している。 ${}^6\text{Li}$  標的では陽子と対を組んだ中性子をピックアップするため、テンソル相関により生じた高運動量成分があるはずである。一方、 ${}^6\text{He}$  標的では、中性子対をピックアップするため、テンソル相関由来の運動量成分はないと考えられる。両者の比較からテンソル力の効果が明らかにできる。この実験は、小さい断面積と二次ビームの使用による影響で統計量が十分確保できないことが予想されているため、その解決策として、大きいビーム強度 ( $10^7$  Hz) と厚い標的 (10 mm) を使う予定である。厚い標的の使用は、反応点の不定性に伴う励起エネルギーの分解能の悪化をもたらす、大きいビーム強度の使用は、パイルアップ事象を引き起こす。本研究では、これらの問題を解決するために、反応点が特定できる標的を新規開発した。標的にプラスチックシンチレータを採用したことで、本来の機能であるエネルギー損失の測定とプラスチック (CH) 中の陽子を標的として使うことが可能である。また、プラスチックシンチレータを多層構造に設計しているため、各プラスチックシンチレータからエネルギー損失の和と相関の情報を得ることができる。プラスチックシンチレータのエネルギー損失の和から標的中の反応点を特定することで、高いエネルギー分解能を維持しつつ厚い標的を使用することができる。また、パイルアップ事象はエネルギー損失の相関から分別が可能である。開発したアクティブ標的は東北大学 CYRIC で性能評価実験を行い、反応点特定の精度つまり、標的中の位置分解能を評価した。

# 目次

第 1 章	イントロダクション	1
1.1	テンソル力	1
1.2	テンソル力の探索	3
1.3	${}^6\text{Li}$ と ${}^6\text{He}$ を用いたテンソル力探索実験	5
第 2 章	多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的の開発	8
2.1	アクティブ標的概要	8
2.2	多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のソフトウェア開発	10
2.3	多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のハードウェア開発	16
2.4	多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的改良型	21
第 3 章	東北大学 CYRIC での性能評価実験	24
3.1	p(p,pp) 反応による性能評価実験	24
3.2	実験ビームライン	24
3.3	実験セットアップ	26
3.4	外部検出器	30
第 4 章	実験の解析と性能評価	39
4.1	外部検出器の性能評価	39
4.2	外部検出器による反応点の特定	42
4.3	多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のエネルギーキャリブレーション	43
4.4	多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のエネルギー分解能	47
4.5	Pileup 対策のアルゴリズム	47
4.6	多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的による反応点の特定	49
4.7	反応点特定 $10^4$ Hz 結果	53
4.8	反応点特定 $10^6$ Hz 結果	54
第 5 章	結論・展望	56
	参考文献	58

## 第1章

# イントロダクション

### 1.1 テンソル力

原子核内の核子を結びつける力のことを核力と呼ぶ。その核力の一つの成分にテンソル力が存在する。核力のポテンシャルは下記の式で表される。

$$V_{\text{核力}} = V_{\text{中心力}}(r) + V_{LS}(r)\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + V_{\text{tensor}}(r)S_{12} \quad (1.1)$$

核力の一つ目の項である中心力は、軌道角運動量を保存するもので、この項が核力に大きな影響を及ぼす。二つ目の項は、スピン軌道力と呼ばれ軌道角運動量を保存する運動量の1次の項として扱われる。そして、3番目の項がテンソル力と呼ばれる力で、軌道角運動量を保存しない、かつ、運動量にも依存しない力である。テンソル演算子は、

$$\begin{aligned} S_{12} &= 3 \frac{(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{r})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{r})}{r^2} - (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2) \\ &= \frac{3}{r^2} \sum_{i,j} (x_i x_j - \frac{1}{3} r^2 \delta_{ij}) \sigma_{1i} \sigma_{2j} \end{aligned} \quad (1.2)$$

で表される。この演算子がテンソル力と呼ばれる理由は、演算子の中に2階のテンソルであるクロネッカーのデルタとパウリ行列を含んでいることに由来している。テンソル力は核子のスピン方向と相対座標との間の角度に依存する力であり、テンソル力の方向に関する理解として、核子のスピン方向と同じ向きに磁石を導入すると容易に理解ができる。



図 1.1 2核子が並行に並び、スピンの向きが同じ場合は、互いに隣接する極性は等しくなるため、2核子間で働く力は斥力となる。その一方、スピンの向きが異なる場合は、互いに隣接する極性は反対になるため、2核子間で働く力は引力となる。

テンソル力は3つの特徴を有している

1. テンソル力は pn 間でのみ働く
2. 高相対運動量の p と n の対を生み出す
3. テンソル力は、2粒子2空孔 (2p-2h) 配位を作り出す

1. を考えるためにまず、2核子系の波動関数を考える。

$$\psi(1, 2) = \phi(\mathbf{r})\varphi(1, 2)v(1, 2) \tag{1.3}$$

一つ目の $\phi(\mathbf{r})$ は空間部分の波動関数。二つ目の $\varphi(1, 2)$ がスピン部分の波動関数。三つ目の $v(1, 2)$ がアイソスピン部分の波動関数である。アイソスピン T は、核子の交換に対して対象である T=1 と反対称交換である T=0 を持ちうるのでそれぞれについて考える。

T = 1 の時、 $T_z = (1, 0, -1)$  となり、アイソスピン三重項の状態を持つ。これらの状態は、クーロン力を無視すると縮退しており全てが非束縛状態となる。最も低い順位の場合、空間部分の波動関数の重なりが最大になる  $L = 0$  の S 状態をとる。その時のパリティは  $(-)^L = +$  となる。核子はフェルミオンでありパリティは反対称となる。従って、スピンは反対称でなければならないため、 $S = 0$  となる。

T = 0 の時、 $T_z = 0$  となり、アイソスピン 1 重項の状態を持つ。空間部分のパリティは T = 1 の時と同様に + となる。従って、スピンは対称になり、 $S = 1$  となる。

	アイソスピン	スピン
一重項 (np)	T=0	S=1
三重項 (np,nn,pp)	T=1	S=0

そして、テンソル演算子  $S_{12} = 3\frac{(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{r})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{r})}{r^2} - (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)$  は  $S = 0$  の時は、 $\boldsymbol{\sigma}_1 = -\boldsymbol{\sigma}_2$  つまり  $S_{12} = 0$  となり、テンソル力は働かない。従って、S=1 の時のみテンソル力は働き、それは p-n ペアのみとなるため、テンソル力は p-n 間でのみ働く力と言える。

2.核力は $\pi$ 交換で生まれる力で、 $\pi$ ポテンシャルは

$$V_\pi = \frac{f_\pi^2}{3m_\pi^2} \frac{k^2}{k^2 + m_\pi^2} (-\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 - S_{12}(\mathbf{k})) \boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2 \tag{1.4}$$

となる。このポテンシャル中の、 $S_{12} \frac{k^2}{k^2 + m_\pi^2}$  の項があるため、核子は高運動量を持ちうる。

3. テンソル力により、2粒子2空孔配位が原子核の基底状態に混合することになる。例えばs軌道に占める中性子・陽子ともにp軌道に遷移するような配位である。テンソル力によって軌道角運動量が $\Delta L=2$ と変化する。それと同時に、 $\uparrow$ または $\downarrow$ の中性子陽子ともに向きを変えるため $\Delta S=2$ となる。2p2h配位の混合により原子核反応の際、反応の終状態が変わる。従って、終状態の断面積を測定すれば、テンソル力効果を探ることができる。

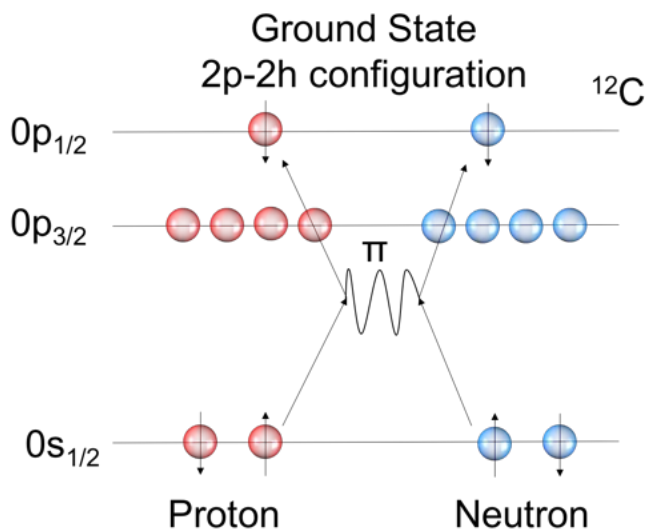


図 1.2  $^{12}\text{C}$  の基底状態. テンソル力によって 2p-2h 状態が混合している.

## 1.2 テンソル力の探索

従来の安定核の研究では、平均場近似による核構造論によって原子核を理解してきた。しかしながら、最近の不安定核研究では、原子核内核子の一粒子軌道が不安定核では大きく変化するなど、ベータ安定線近傍の原子核研究で構築された平均場模型では説明できない実験結果が報告された。不安定核研究では、とりわけテンソル力の扱いが重要であることが示唆されているため、新しい原子核理論の構築が必要と言える。テンソル力を陽に取り入れた原子核理論により、不安定核のみならず平均場模型では説明がつかなかった安定核の研究も発展させられると考えている。

### 1.2.1 テンソル力に関する先行研究

軽い原子核である $^{16}\text{O}$ 原子核内で高運動量中性子の直接測定に成功し、テンソル力の関与を示す結果が得られた。この実験は $^{16}\text{O}(p, d)$ 反応が用いられた。この理由として、例えば knock out 反応を用いた実験では、 $^{12}\text{C}$  から  $^{208}\text{Pb}$  まで核内のテンソル力効果が調べられたが、短距離力に代表される力の影響により、テンソル力による効果を明白に抽出することができなかった。その一方、 $(p, d)$  反応では、中性子の運動量を選択的に利用することができるという利点がある。 $(p, d)$  反応では、入射陽子が標的核から一つの中性をピックアップすることで、重陽子が生成される。この生成過程において、運動量移行である入射陽子と散乱重陽子の運動量の差  $\mathbf{P}_d - \mathbf{P}_p$  は、入射陽子からピックアップされた重陽子中の中性の運動量に等しい。従って、様々な運動量移行の値を取り、かつ、中性子ピックアップに関する反応断面積の運動量依存性を調べることで、中性子の運動量分布を決定することができる。実験は RCNP サイクロトロン施設の WS コースで行われた。198, 295, 392 MeV のエネルギーの陽子ビームを使用し、中性子をピックアップすることで生成された重陽子は、Grand Raiden で運動量が測定された。2 fm $^{-1}$ での運動量測定するために、重陽子の散乱角を 5° から 25° までの角度において数点で測定を行なった。測定結果が図 1.2 で、図 1.2 の $^{16}\text{O}(p, d)^{15}\text{O}$  反応の励起スペクトルは、入射陽子と測定された散乱重陽子の角度、運動量を用いて得られたものである。測定時間は約 1 時間、ビーム強度は約 2 nA で、 $^{15}\text{O}$  の基底状態及び励起状態に対するいくつかのピークを観測することができた。一般的な理解としては、反応断面積は運動量依存性を持ち高い運動量移行に対応して減少する。しかしながら、(a) と (b) を比較すると、(b) から (a) へと入射陽子のエネルギーを大きくする高運動量領域の中性のピックアップ反応においては、 $^{15}\text{O}$  の 5.2 MeV 付近の正のパリティの状態が負のパリティ状態と比較すると、カウント数が緩やかな減少または相対的に増加していることがわかる。

図 1.3 は、励起状態の散乱断面積を基底状態の散乱断面積で割ったもので、励起状態との相対強度を見るためのものである。白い記号  $R_-$  は第 3 励起状態  $\frac{1}{2}^-$  を表し、黒い記号  $R_+$  は第 2 励起状態  $\frac{5}{2}^+$  を表している。黒の三角形が今回の実験で得たデータである。 $R_+$  の断面積の値が急激に大きくなっている。また、三本の曲線のうち上と下の曲線は、通常の散乱模型と殻模型の波動関数を用いた計算結果であるが、どちらに関しても、比は大きく変化していない。その一方、真ん中の曲線は、テンソル力の効果を含んだ $^4\text{He}$  の波動関数を用いて作られた理論計算だが、実験値とよく一致している。つまり、 $^{15}\text{O}$  の第 2 励起状態への遷移はテンソル力の効果を受けていることが示唆された。また、テンソル力の効果を示唆している今回の実験は、 $(p, d)$  核子移行反応がテンソル力研究において有効な手段であること明示している。

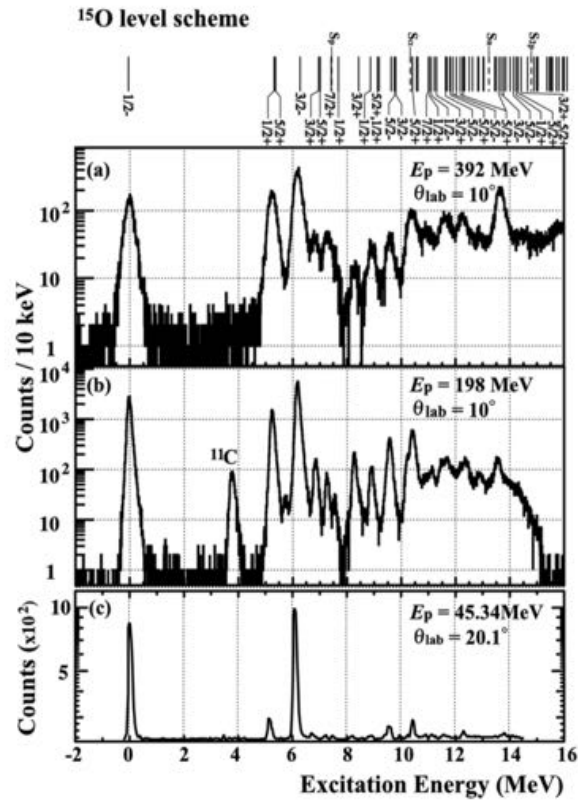


図 1.3 (a) は入射陽子のエネルギーが 392 MeV, 入射ビームに対する重陽子の散乱角が実験室系で  $10^\circ$  の場合。(b) は入射陽子のエネルギーが 198 MeV, 入射ビームに対する重陽子の散乱角が実験室系で  $10^\circ$  の場合。(c) は入射陽子のエネルギーが 45.34 MeV, 入射ビームに対する重陽子の散乱角が実験室系で  $20.1^\circ$  の場合。

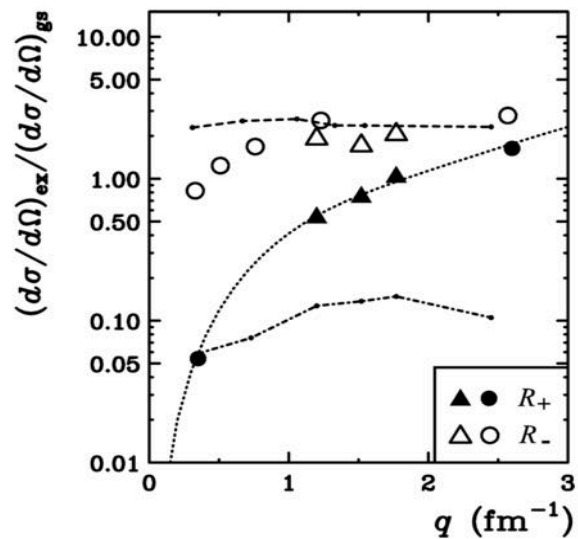


図 1.4  $\frac{1}{2}^-$  の負パリティと  $\frac{5}{2}^+$  の正のパリティを基底状態  $\frac{3}{2}^-$  で割り比率で表したもの。今回の実験で得られたデータは黒の三角形。そのほかのデータは、45,65,100,200 及び 800 MeV の陽子ビームを用いて得られたものである。真ん中の曲線はテンソル力の効果を含んだ理論値。上と下の曲線は通常の散乱模型と殻模型によって得られた理論値。

### 1.3 ${}^6\text{Li}$ と ${}^6\text{He}$ を用いたテンソル力探索実験

1.1.2 で示したように、テンソル力の効果を的確に抽出しその効果を調べるためには、核子移行反応を利用した  $(p, d)$  反応が有効である。 $(p, d)$  反応の利点を活かしつつテンソル力の効果を調べる実験として、我々は逆運動学に基づく質量欠損分光法 (missing mass) を用いた  ${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$  の比較実験を計画している。この  ${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$  の比較実験では、1.1.1 で示したテンソル力の特徴を生かしている。 ${}^6\text{He}$  は陽子2個中性子4個、言い換えると、 $\alpha$ 粒子と  $n$ - $n$  ペアで構成されている。その一方  ${}^6\text{Li}$  は陽子3個中性子3個、言い換えると、 $\alpha$ 粒子と  $p$ - $n$  ペアで構成されている。テンソル力は  $p$ - $n$  ペア間で働く力であるため、 ${}^6\text{He}$  と  ${}^6\text{Li}$  を比較することは、テンソル力の効果の違いを見ることになる。今回の実験で利用する逆運動学とは、不安定核物理を研究する時に用いられる手法である。通常の順運動学では、調べたい原子核を標的として取り扱いそこにビームを照射する方法のことで、調べたい原子核を標的として扱える場合にのみ用いることが可能である。その一方寿命の短い不安定核では、調べたい原子核を標的として捕捉しておくことが不可能であるため順運動学を用いることはできない。しかしながら、ビームと標的との関係を逆にする、つまり、不安定核をビームとして利用することで、不安定核においても実験を行うことが可能となる。これを逆運動学と呼ぶ。質量欠損分光法 (missing mass) では、不安定核であるため直接測定できない  ${}^5\text{He}$  と  ${}^5\text{Li}$  の質量エネルギーを、入射粒子のエネルギーと反跳粒子の角度・エネルギー、 ${}^5\text{He}$  と  ${}^5\text{Li}$  以外の粒子の質量を用いて計算によって求める方法である。この質量欠損分光法によって、調べたい原子核の基底状態と励起状態の断面積を知ることができる。図 1.4 は  ${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$  の反応である。 ${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$  は似ている反応を用いているため、実験の際には、異なる実験セットアップを使う必要がなく、systematic エラーを小さくできる特徴を持っている。

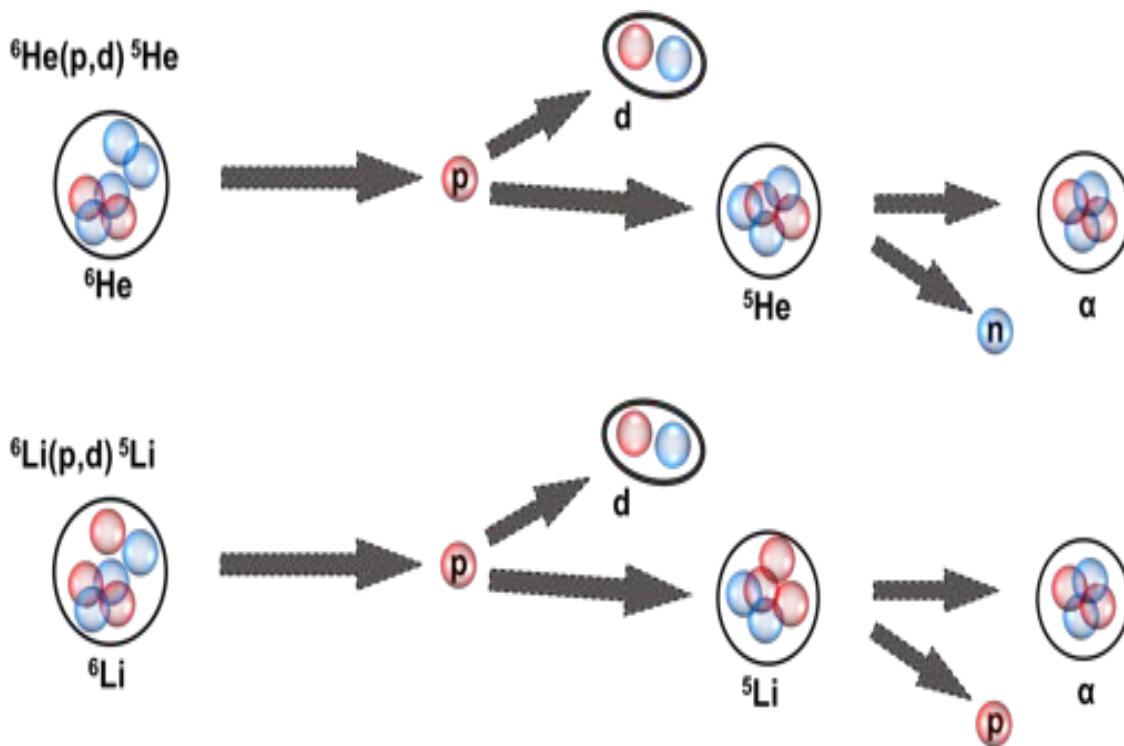


図 1.5  ${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$  の反応式。 ${}^5\text{Li}$  と  ${}^5\text{He}$  はともに不安定核なのですぐさま二体崩壊する。どちらの反応も同じセットアップで実験を行えるため、systematic エラーを小さくすることができる。



図(1.6)は確率密度  $\rho(k)$  の波数分布である。 $k = 2[\text{fm}^{-1}]$  で最外殻核子の密度  $\rho(k)$  が二桁異なることが確認できる。我々は、不安定核である  ${}^6\text{He}$  を 400-800 MeV/u の2次ビームとして使用するため、中高エネルギーのビームを実現でき、かつ、入射角破砕片分離装置を有しているドイツ GSI での実験を計画している。

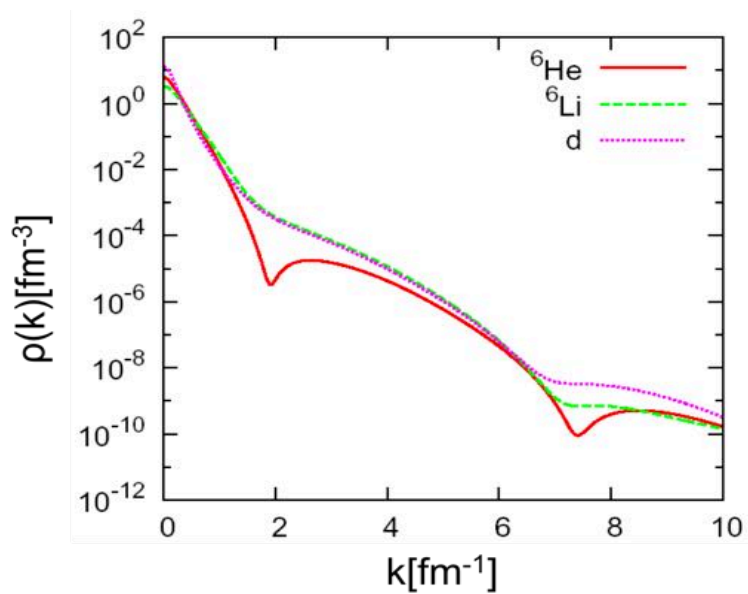


図 1.6 横軸:波数  $k$ 。縦軸:確率密度  $\rho$ 。出展: W. Horiuchi and Y. Suzuki, PRC76(2007)

### 1.3.1 探索実験の要請

計画している ${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$ と ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$ の比較実験は、 $2\mu\text{b}/\text{sr}$ と断面積が小さく不安定核ビーム生成のために2次ビームを使用するため、統計量が十分でないことが予想されている。統計量を補うための手段は、標的を厚くする、または、ビーム強度を上げることである。目標とする統計量を100イベントに設定し、必要なビーム強度、標的厚の算出を行った。

$$\text{Yield} = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Delta\Omega \cdot N_{\text{thickness}} \cdot N_{\text{Beam}} \approx 100(\text{event}) \quad (1.5)$$

微分散乱断面積 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ は $2\mu\text{b}(\text{cm}^2/\text{sr})$ 。重陽子を測定するスペクトロメータの立体角 $1\text{msr}$ 。標的の厚さ $1.02\text{g}/\text{cm}^3 \cdot 10\text{mm}$ 。ビーム強度 $10\text{Hz}$ 。この条件で統計量は163カウント得られるが、標的厚の増加は反応点の不定性を招き、検出する散乱粒子のエネルギー分解能の劣化を招いてしまう。実験目標である第二励起状態と第三励起状態のおよそ $2\text{MeV}$ の区別ができなくなってしまう。シミュレーションでは、これらの励起状態を区別するためにはターゲットの位置分解能を、現在の $2.9\text{mm}$ ( $10\text{mm}$ 厚)から $0.29\text{mm}$ 以下にしなければならないという結果を得た。実験要件を満たすためには、標的の厚さは $10\text{mm}$ のまま、位置分解能を $0.29\text{mm}$ 以下にしないといけない。この問題の解決策として、多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的を開発した。この装置により、十分な標的厚を確保しつつ標的の位置分解能が向上できる。なお、アクティブ標的に関する詳細は2章で解説を行うとする。

## 第 2 章

# 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的の開発

### 2.1 アクティブ標的概要

#### 2.1.1 標的の選定

${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$  の実験を計画しているため、標的は陽子を使う予定である。陽子標的としてポリエチレンや液体水素標的、固体水素標的が候補に挙げられる。ポリエチレンは水素 (陽子) 以外にも炭素を含んでおり、その炭素によるバックグラウンドの影響が大きい。液体水素標的はポリエチレン標的の欠点を補えるように開発されており、例えば、標的由来のバックグラウンドや多重散乱による影響を抑えることができる。利点がある一方、陽子を液化するために冷却ガスの使用やそれに伴う高真空の維持など装置の保持にデリケートな管理を要する。また、これらの標的は、我々が計画しているような断面積が小さくかつ 2 次ビームを利用する実験においては、統計量の確保のための標的厚の増加によって、標的中の反応点の不定性を増大させてしまう。反応点の不定性は、標的中の粒子のエネルギーの不定性を招いてしまい、その結果、エネルギースペクトルの分解能の劣化を引き起こしてしまう。

#### 2.1.2 その他のアクティブ標的

アクティブ標的とは、標的と検出器の両方の役割を持つもので、名前の由来は粒子検出可能な状態 (アクティブ) を保持したままターゲットとして使えることから来ている。特に最近では、アクティブ標的を用いて反応点近傍で起こる物理現象を調べたり、反応点を特定することで反応点の不定性に伴うエネルギー分解能の劣化を防ぐことを目標に開発されている。関連研究として、京都大学の川畑グループでは、ガス型アクティブ標的の開発が行われている。京都大学のガス型アクティブ標的の特徴は、粒子の散乱を 3 次元的にトラッキングでき、反跳粒子のエネルギーを測定できることである。京都大学の川畑グループは、 ${}^{10}\text{C}(\alpha, \alpha'){}^{10}\text{C}$  反応の実験を計画しているため、標的ガスとして  ${}^4\text{He}$  を使用している。三次元トラッキングシステムの原理は、荷電粒子である  ${}^{10}\text{C}$  が媒質である  ${}^4\text{He}$  原子の電子を電離させ、その電離した電子は一様電場中をドリフトする。電場に平行な 2 次元位置情報に関しては、ドリフト時間から構成を行う。ガス検出器の底面に設置してあるマイクロピクセルチェンバーにドリフトしてきた電子が電気信号を誘発することで、電場に垂直な 2 次元位置情報は取得される。それぞれの 2 次元位置情報を再構成することでガス検出器中の飛跡を三次元的に知ることができる。

### 2.1.3 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のコンセプト

多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的は、標的にプラスチックシンチレータを使用し、そのプラスチックシンチレータを多層に重ねた構造をしている。プラスチックシンチレータの組成はCHであり、陽子標的として利用できる点を活用している。また、プラスチックシンチレータの通常の用途であるエネルギー検出の機能を使うことで、多層に重ねられたプラスチックシンチレータからエネルギーデポジットを得ることができ、そのエネルギーデポジットの相関を読み解くことで原子核反応の反応点を出すことを開発のコンセプトとしている。ガス型アクティブターゲットとの違いとして、ガスアクティブターゲットの場合、三次元的に原子核反応の反応点を特定できる一方、膨大なチャンネル読み出しや開発コストの高騰と長期化、空間電荷効果の影響によるビーム強度の制限などの影響を受けてしまう。しかしながら、多層プラスチックシンチレータ型アクティブターゲットの場合は、反応点の特定をビーム方向に特化することにより、既存の製品であるプラスチックシンチレータとフォトマルチアノード (PMT) のみで開発を行うことができ、開発のコストを抑えられる特徴がある。1章で述べたように、実験条件を満たすためには、標的の位置分解能を2.99 mm から0.29 mm にしなければならない。図2.1が多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的の概形である。1 mm 厚のシンチレータが10枚多層構造になるよう配置されている。 ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$ の反応で、反応点が5<sup>th</sup>レイヤーの場合、各レイヤーでのエネルギーデポジットは下記のグラフのようになる。

Pl layer	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
dE(MeV)	1.2	1.2	1.2	1.2	2.2	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

反応前は400 MeVの ${}^6\text{He}$ が落としたエネルギー。Bethe-Blochの式 $dE/dx \sim Z^2/\beta^2$ からもわかるように、高いエネルギーの時は比較的荷電粒子はエネルギーを落とさないため、各レイヤー(1<sup>st</sup> ~ 4<sup>th</sup>)でのエネルギーデポジットは小さい。その一方反応後は、 ${}^5\text{He}$ と $d$ にエネルギーが分配される。 ${}^5\text{He}$ は寿命の短い原子核なので、生成後まもなく $\alpha$ と $n$ に崩壊する。各粒子のエネルギーは入射粒子に対しておおよそ半減するため、エネルギーロスの値は大きくなる。また、反応後は ${}^5\text{He}$ と $d$ の2粒子によるエネルギーロスの影響があるため、各レイヤー(6<sup>th</sup> ~ 10<sup>th</sup>)でのエネルギーデポジットは反応前より大きくなる。

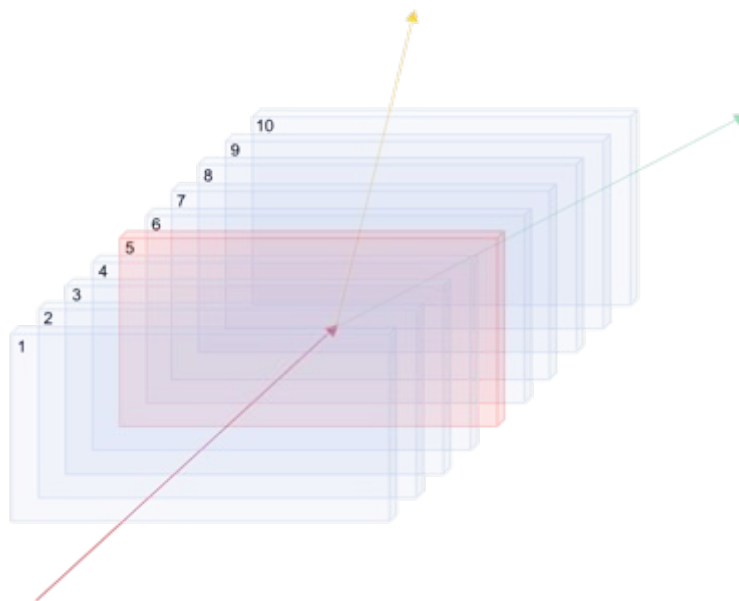


図2.1 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的の概形



図 2.2 左図:ターゲットとしての機能. 右図:検出器としての機能.

## 2.2 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のソフトウェア開発

### 2.2.1 シミュレーションコードの開発

多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的の開発は初期段階であるため、まず、シミュレーションを行い開発コンセプトに妥当性があるかどうか調べる必要がある。妥当性の確認の後は、反応点特定のための計算プログラムの開発が必要となる。以上の理由で、シミュレーションのための計算プログラムを新規開発した。なお、ソースコードには C 言語を使用した。

### 2.2.2 相対論的運動学に基づく二体反応

想定している本実験は、400-800 MeV/u のビームを使用するため、エネルギー領域的に相対論の補正が必要になる。 ${}^6\text{Li}(p, d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$  の反応では、2 体反応を相対論的運動学に基づいて計算しなければならない。計算プログラムは基本的に、『Nuclear and Particle Physics』の TRANSFORMATION BETWEEN CENTER OF MASS AND LABORATORY SYSTEMS の章を参考にした。計算プログラムの概略は、計算したい原子核反応を実験室系で設定する。その後、反応前の 2 粒子の運動量が等しくなるよう重心系を決める。エネルギー・運動量の保存則から、原子核反応後の重心系での 2 粒子の運動量・エネルギーを求める。最後に、重心系から実験室系への座標変換のために、ローレンツブーストを行うことで 2 体反応の計算が行える。 $\tan \theta_{LAB} = P_x^{LAB} / P_y^{LAB}$  の関係式を、を重心系の値に変換すると下記の式が得られる。

$$\tan \theta_{LAB} = \frac{P_3^{CM} \sin \theta_{CM}}{\beta \gamma E_3^{CM} + \gamma P_3^{CM} \cos \theta_{CM}} \quad (2.1)$$

これを  $\cos \theta_{CM}$  について展開すると、

$$(\tan \theta_{LAB} \gamma P_3^{CM})^2 + (P_3^{CM})^2 \cos^2 \theta_{CM} + (2 \tan^2_{LAB} \beta \gamma^2 E_3^{CM} P_3^{CM}) \cos \theta_{CM} + (\tan_{LAB} \beta \gamma E_3^{CM})^2 - (P_3^{CM})^2 = 0 \quad (2.2)$$

が得られる。式 (2.2) の  $\cos \theta_{CM}$  の 2 次方程式を解き、その関係式をソースコードの中に入れることで、実験室系で散乱角を指定した場合でも、散乱粒子エネルギーと反跳粒子の角度とエネルギーが計算できる。

### 2.2.3 三次元運動をしている粒子の二体崩壊

通常の 2 体反応の場合、ビームに水平な 1 次元方向しか速度を持たないため、ローレンツブーストは下記の式となる。

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

その一方、三次元運動をしている粒子が二体崩壊する場合、実験室系から重心系に変換するときに注意が必要である。3次元の場合、二つの系の空間座標が平行ではないためローレンツブーストすることができない。ローレンツブーストを行うためには、二つの系の空間座標系が互いに平行になるよう座標系の回転を加えなければならない。下記の式が一般方向のローレンツ変換である。

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta_x\gamma & -\beta_y\gamma & -\beta_z\gamma \\ -\beta_x\gamma & 1 + (\gamma - 1)\hat{\beta}_x^2 & (\gamma - 1)\hat{\beta}_x\hat{\beta}_y & (\gamma - 1)\hat{\beta}_x\hat{\beta}_z \\ -\beta_y\gamma & (\gamma - 1)\hat{\beta}_x\hat{\beta}_y & 1 + (\gamma - 1)\hat{\beta}_y^2 & (\gamma - 1)\hat{\beta}_y\hat{\beta}_z \\ -\beta_z\gamma & (\gamma - 1)\hat{\beta}_x\hat{\beta}_z & (\gamma - 1)\hat{\beta}_y\hat{\beta}_z & 1 + (\gamma - 1)\hat{\beta}_z^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$\hat{\beta}_i = \frac{\beta_i}{\beta} \quad (i = x, y, z)$$

計算プログラムの概略は、2.2.2章で計算した2体反応の粒子の内2体崩壊を起こす粒子に対して、重心系と実験室系のそれぞれの空間座標が平行になるよう実験室系の空間座標を回転させる。2体崩壊の計算方法は2体反応と同じであるため、エネルギー・運動量が保存するように崩壊粒子のエネルギー・運動量を求める。その後、重心系から実験室系に座標変換するためにローレンツブーストを行い、重心系と実験室系のそれぞれが平行になるよう回転させた空間座標をもとに戻す。これら一連の操作を一般方向のローレンツ変換と呼ぶ。

#### 2.2.4 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的中の dE 計算

dE 計算をするために Range の式を使用した。荷電粒子の物質中での range 式は下記で記述される。 $k, \gamma, c$  は range 式のフィッティングパラメータ、 $A$  と  $Z$  は荷電粒子の質量数と電荷、 $E/A$  は荷電粒子の核子あたりの運動エネルギー。

$$R \simeq k \frac{A}{Z^2} \left( \frac{E}{A} \right)^\gamma + cA \quad (2.5)$$

フィッティングパラメータは、エネルギーロスシミュレーションソフトである SRIM のデータを用いて行った。

Parameter	k	$\gamma$	c
${}^6\text{He}$	0.1427	1.4531	-17.3188
${}^6\text{Li}$	0.1354	1.2523	-7.3435
d	0.3028	1.3438	-135.0289
p	0.0177	1.81018	0.0059
$\alpha$	0.2124	1.3937	-23.4828

Parameter	k	$\gamma$	c
${}^6\text{He}$	0.01657	1.77573	-0.05133
${}^6\text{Li}$	0.01558	1.78769	-0.00145
d	0.03361	1.64447	-5.54623
p	0.0523	1.5 6599	-3.63761
$\alpha$	0.01969	1.74072	-0.195347

物質の厚さを  $t[\text{mm}]$  とすると、物質通過後の Range は  $R-t$  で記述できる。物質通過後のエネルギーを  $E'$  とすると (2.6) 式と  $t$  を用いて表される。

$$E' = \left( \frac{Z^2}{kA} (R - t - cA) \right)^\gamma A \quad (2.6)$$

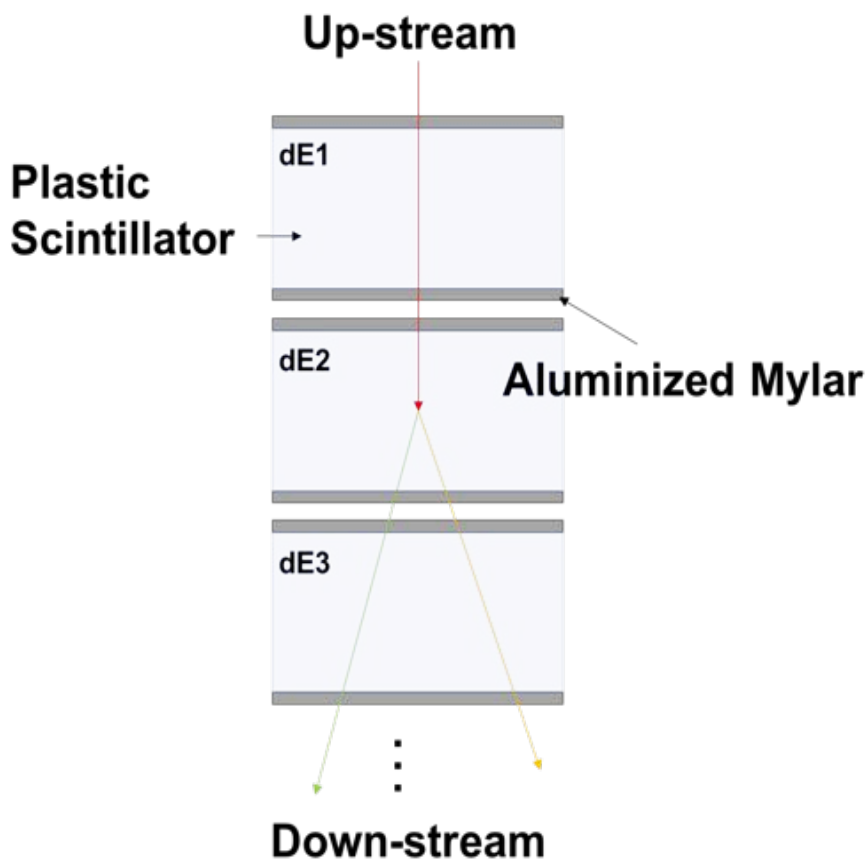


図 2.3 アクティブ標的エネルギーロスのシステム

(2.7) 式で物質通過後の  $E$  は計算できるので、物質中での  $dE$  は  $E-E'$  で表すことができる。

図 (2.4) は多層プラスチックシンチレータ型アクティブターゲットの概略図である。各々のプラスチックシンチレータをアルミナイズドマイラーで巻いているため、両端はアルミ層が存在する。プラスチックシンチレータのサイズは縦 30mm, 横 60mm なので、散乱・反跳粒子は全てのプラスチックレイヤーを通過すると仮定して計算している。 $dE$  のシステムは原子核反応の反応点及び散乱・反跳粒子のエネルギー・角度に依存するため、反応点を基準として 3 つに場合分けをして計算プログラムを開発した。プラスチックシンチレータの数を  $n$ 、厚さ  $T$  [mm]、反応点を  $r$  [mm] とする。

(i) は反応が起こるプラスチックレイヤーよりも前での  $dE$  のシステム。入射粒子は、アルミナイズドマイラー→プラスチックシンチレータ→アルミナイズドマイラーの順番でエネルギーを落としていく。1 枚目のプラスチックレイヤーでエネルギーを落とした後は、2 枚目のプラスチックレイヤーでエネルギーを落とす。このように、エネルギーロスしていった入射粒子のエネルギーを次のレイヤーに継承し、反応レイヤーのひとつ前まで繰り返すことでエネルギー計算をしていく。

(ii) は反応が起こったプラスチックレイヤーでの  $dE$  のシステム。入射の入り口でアルミナイズドマイラーによってエネルギーを落とす。その後、反応レイヤーにおいて反応が起こる前までの  $dE$  は  $r - \sum_{i=1}^{\text{floor}(r)-1} T$  [mm] の range 分エネルギーロスをする。原子核反応を起こした後は、散乱角とエネルギーが得られるため、反応が起こって反応レイヤーを通過するまでの距離に相当する  $\left( \sum_{i=1}^{\text{floor}(r)} T - r \right) / \cos \theta$  [mm] 分のエネルギーロスをそれぞれの散乱・反跳粒子に対して計算を行う。最後に、アルミナイズドマイラー分のエネルギーロス計算をする。

(iii) 反応後のプラスチックレイヤーでの  $dE$  のシステム。基本コンセプトは (i) と同じである。異なる点は粒子が二つあること、粒子の軌跡が直進ではなく角度を持つことである。反応レイヤーの次のレイヤーからは  $T/\cos \theta$  分のエネ

ルギーロス計算を、それぞれの散乱・反跳粒子に対して行う。この一連の計算を最後のレイヤーまで継続して行う。

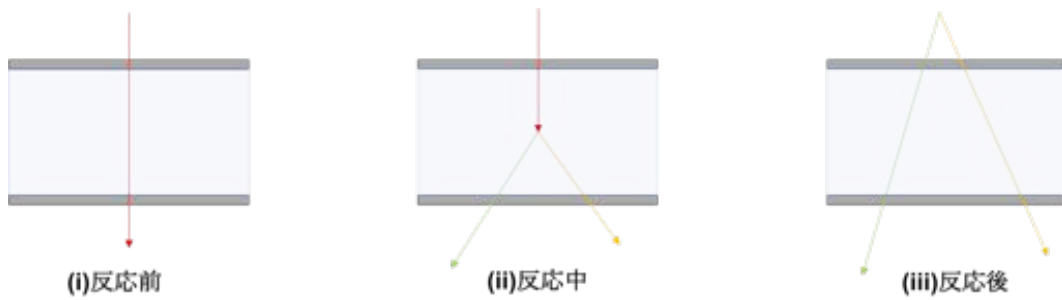


図 2.4 2体反応のシステム

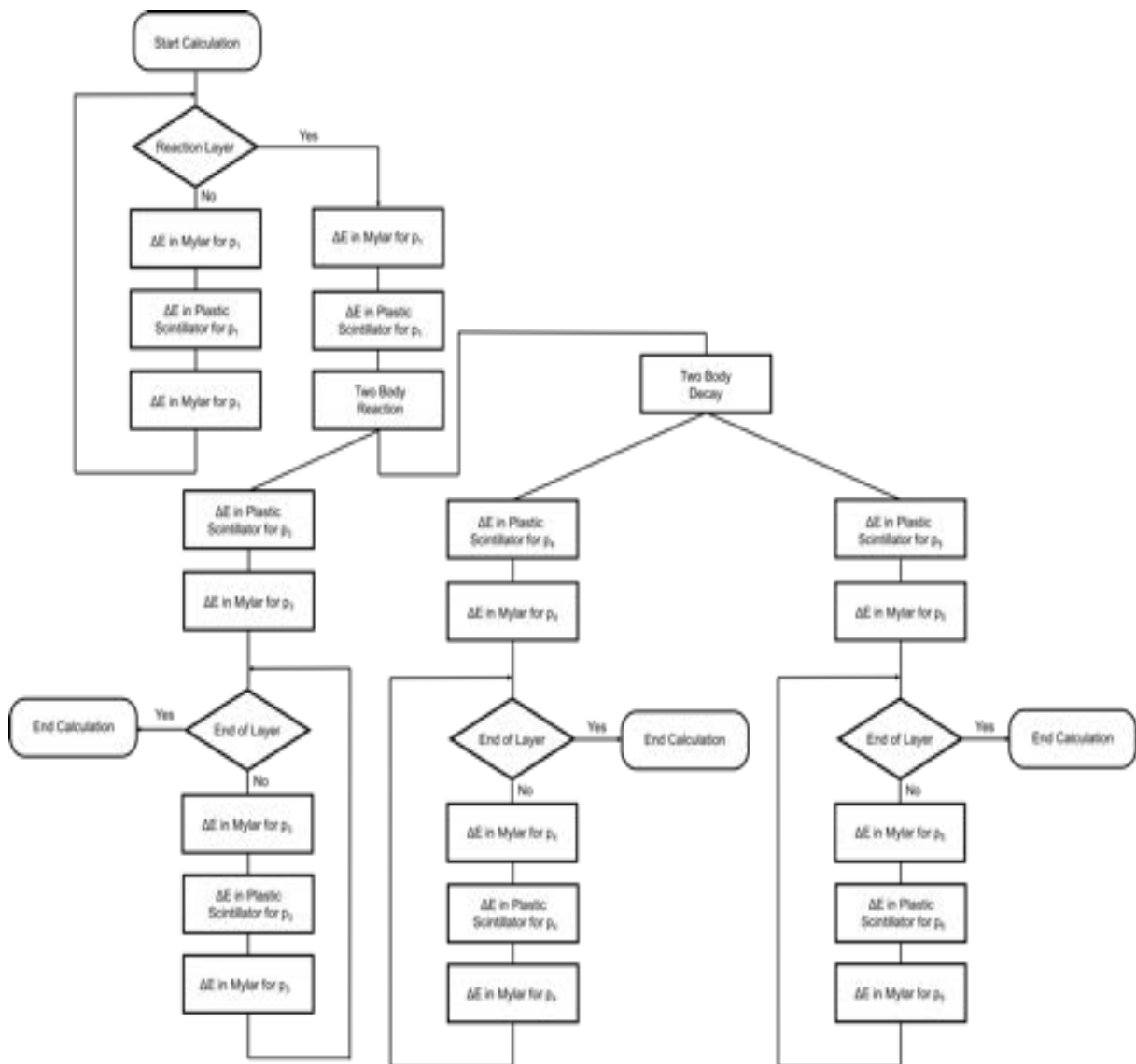


図 2.5 計算プログラムのフローチャート

図 2.5 本実験を想定した計算プログラムのフローチャートである。例えば、 ${}^6\text{He}(p, d){}^5\text{He}$  の場合は、2 体反応で  ${}^5\text{He}$  と  $d$  が生成される。その後、 ${}^5\text{He}$  は平均寿命が短いため、 $\alpha$  と  $n$  に 2 体崩壊する。従って、アクティブ標的でのエネルギーデポジットの計算は、 $d, \alpha, n$  について行わなければならないが、 $n$  はシンチレータ中でエネルギーロスはしない



ため計算からは除外している。

### 2.2.5 モンテカルロシミュレーション

相対論的運動学の計算過程では、重心系の散乱角度を解析的に解くことができない。つまり、重心系の散乱は等方的であるということが導かれる。重心系の散乱角に乱数を与えることで、原子核反応のモンテカルロ・シミュレーションを行うことができる。乱数生成プログラムは、メルセンヌ・ツイスタを用いた。メルセンヌ・ツイスタは、長周期 ( $2^{19937} - 1$ )・高次元 (623 次元) 均等分布を持ち、乱数生成速度が早い事で有名である。メルセンヌ・ツイスタで与えられる擬似乱数は、0~1 までの一様実乱数であるため、等方的な角度に対して乱数を与える場合には、単位球面に一様分布する乱数を作らなければならない。間違いやすい例として、 $\theta, \phi$  の極座標 ( $x = \sin\theta\cos\phi, y = \cos\theta\sin\phi, z = \cos\theta$ ) を導入して、 $\theta$  に  $0^\circ \sim 180^\circ$   $\phi$  に  $0^\circ \sim 360^\circ$  の一様乱数を与えると、 $\cos\theta$  の変化量が  $0^\circ$  に近いほど大きくなることで生じる角度依存性により、乱数分布に偏りが生じてしまう。また、 $(\theta, \phi)$  においては、ヤコビアンは  $\sin\theta d\theta d\phi$  であるため。ヤコビアンを簡単に扱うため、 $z = \cos\theta$  で変数変換を行い  $dz = -\sin\theta d\theta$  とする。 $z$  に対しては  $[-1, 1]$  に乱数を与え、 $\phi$  に関しては  $[0, 2\pi]$  に乱数を与える。

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{1 - z^2} \cos \phi \\ y &= \sqrt{1 - z^2} \sin \phi \\ z &= z \end{aligned} \quad (2.7)$$

$(z, \phi)$  の2変数を用いることで、図 2.3 の球面上の一様乱数が得られる。今回のシミュレーションでは、標的中の  $dE$  の分布を調べることに特化しているため、断面積の運動量と角度依存性は考慮していない。

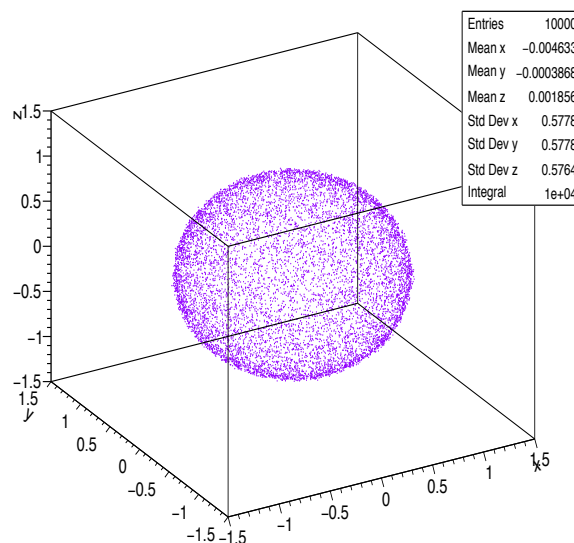


図 2.6 メルセンヌ・ツイスタによる一様乱数. 乱数の分布に偏りは無い。

### 2.2.6 ガウス乱数の生成

アクティブ標的の反応点特定の妥当性があるかどうか確かめるために、プラスチックシンチレータと PMT の分解能も考慮してシミュレーションを行いたい。シンチレータの分解能は、発光量の変動、発光集率の変動で決まる。PMT の分解能は、光電面の量子効率、光電子のダイノードへの収集効率、ダイノードの2次電子の増倍の比で決まる。これらのゆらぎをガウス乱数で表す。ガウス乱数生成は Box-Muller 法を用いた。Box-Muller 法は範囲が  $(0, 1)$  の二つの

独立な乱数を用いて表す。二つの独立乱数を  $r_i, r_j$  とすると、ガウス分布に従う互いに独立な確率変数  $Z_k, Z_l$  が得られる。

$$\begin{aligned} Z_k &= \sqrt{-2\ln r_i} \cos 2\pi r_j \\ Z_l &= \sqrt{-2\ln r_i} \sin 2\pi r_j \end{aligned} \quad (2.8)$$

平均を  $\mu$  標準偏差を  $\sigma$  とすると、ガウス分布は、

$$\text{ガウス分布} = \sum_{i,j}^n (\mu + \sigma \cdot Z(r_i, r_j)) \quad (2.9)$$

で得られる。

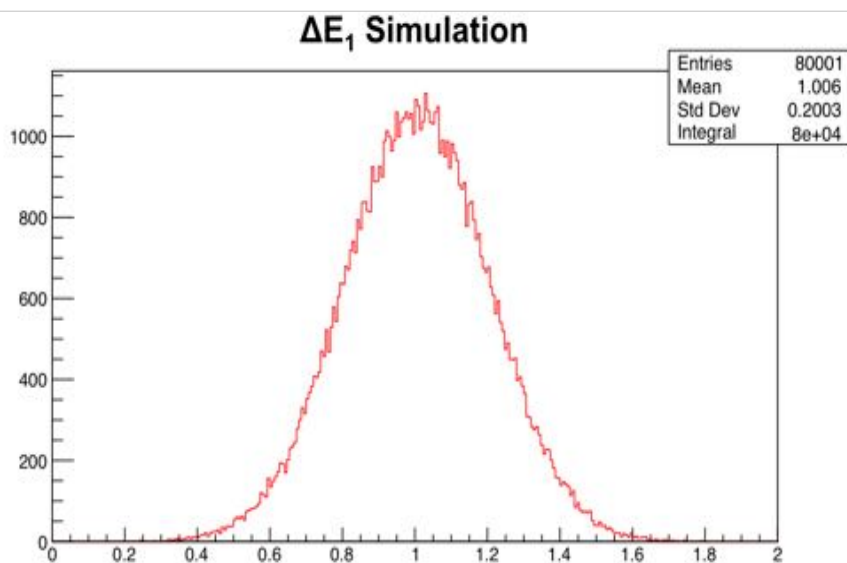


図 2.7 Box-Muller 法によって求めたガウス関数.  $\mu$  = プラスチックシンチレータ 1 枚目のエネルギーデポジット  
 $\sigma$  = 分解能 20%

## 2.3 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のハードウェア開発

多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的の開発は0からスタートした。2017年5月からスタートさせ2018年までに2回のビームを用いた性能評価実験を行った。第一段階として、多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的初期型を開発し、2018年6月に東北大学CYRICで1回目の性能評価実験を行った。この実験で得た改善点を改良型に反映させ、2017年11月に2回目の性能評価実験を行った。

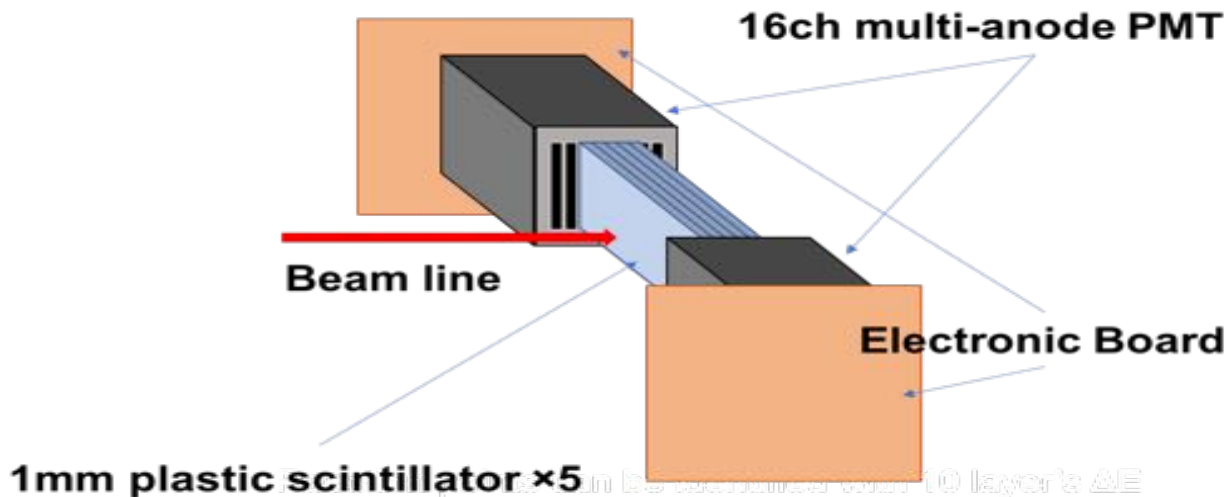


図 2.8 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のレイアウト

### 2.3.1 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的初期型

本実験では10 mm厚のプラスチックシンチレータを使用する予定だが、現段階は開発初期であり原理が実証できることに重きがおかれているため、開発難易度を下げるという意味で5 mmシンチレータで開発を行った。図2.8はアクティブ標的初期型の概略図である。中心に縦30 mm横60 mm厚さ1 mmのプラスチックシンチレータを設置し、その両端を16ch PMTで挟んで両端読み出しを可能にしている。両端読み出しをすることで $1\sqrt{2}$ 分だけエネルギー分解能をよくすることができる。PMTの端には読み出しボードを取り付け信号読み出しを行っている。

### 2.3.2 マルチアノード PMT とプラスチックシンチレータ

アクティブ標的の反応点特定は入射ビーム方向に特化しているため、入射ビーム方向に信号読み出しが分割されているH10515B-20を検出器として選んだ。フォトカソード一本あたりの厚さは0.8 mm、カソード間のピッチ1.0 mmであるため、プラスチックシンチレータの厚さ1 mmを設置する条件を満たしている。プラスチックシンチレータはNE-102Aを使用した。密度1.032 g/cm<sup>3</sup>、屈折率1.581、C/H比1.104、波長423 nm。図2.11は一体化したプラスチックシンチレータ。5枚のシンチレータの間と両サイドにフォトンの外部漏洩を塞ぐためにアルミナイズドマイラーで覆われている。PMTのフォトカソードは1 mmピッチで配列されているため、1 mm厚のシンチレータを隙間なく配置することで、フォトカソードとシンチレータの中心の位置は等しくなる。プラスチックシンチレータの両端はテフロンテープで巻いてある。

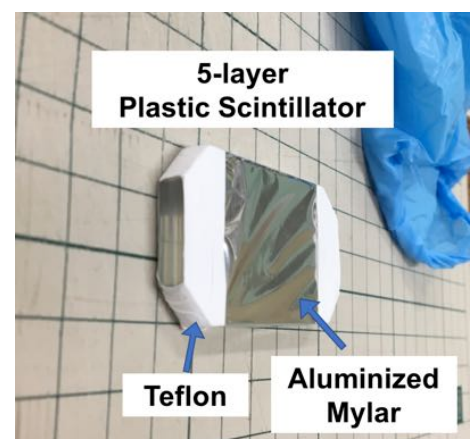


図 2.11 プラスチックシンチレータ. プラスチックシンチレータは隙間を開けることなく一体化している。



図 2.9 プラスチックシンチレータ.NE-102A

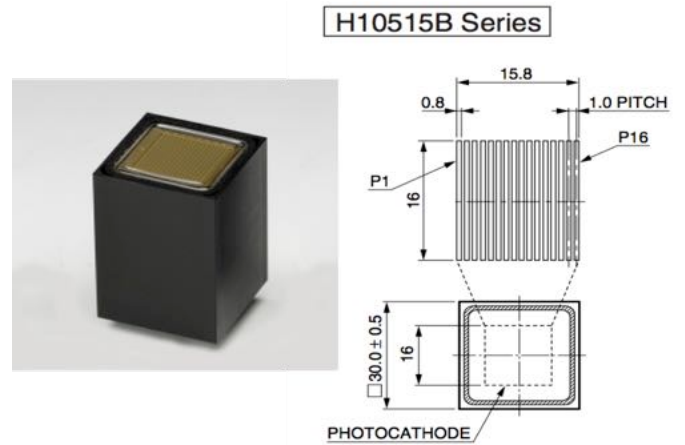


図 2.10 マルチアノード PMT.H10515B-20

### 2.3.3 読み出しボードの設計

図 2.24 は開発初期段階のデザインである。基盤の配線および抵抗の設置は立体的な構造をしており、プラスチックシンチレータと PMT を固定するサポーターと干渉してしまう。この干渉を減らすために、プリント基盤加工機を使いかさばらない基盤を製作した。

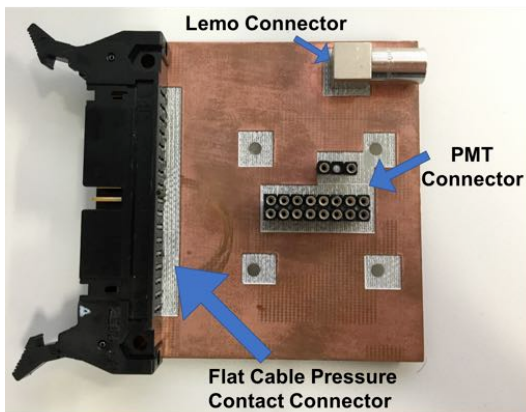


図 2.12 読み出しボード表

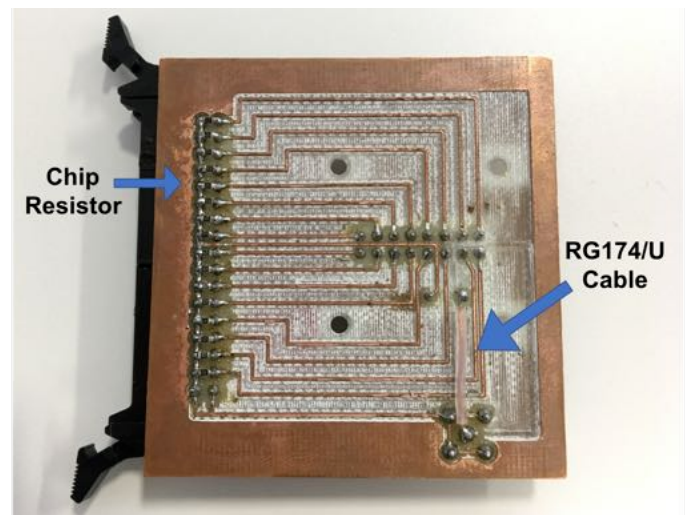


図 2.13 読み出しボード裏

マルチアノード PMT は読み出しの数が 16 ch あるので、16 ch 分のシグナル線と 1つのグランド線、HV 供給ラインをなるべく干渉が起きないように設計した。使用する HV は 600-900 V を計画していたので、その電圧に耐えられるものとして PMT への HV 線の供給は LEMO コネクタ経由で行った。途中の配線は RG174/U の外膜を剥ぎ芯線と透明の絶縁膜を使用した。HV 線とグランド線は対になっており電圧にふらつきがでないようにされている。マルチアノード PMT からのシグナルはグランドとともに圧着型フラットケーブル用コネクタに送られる。16 ch のシグナルとグランドは並行に圧着型フラットケーブル用コネクタに送られているが、その途中にチップ抵抗を使用している。チッ

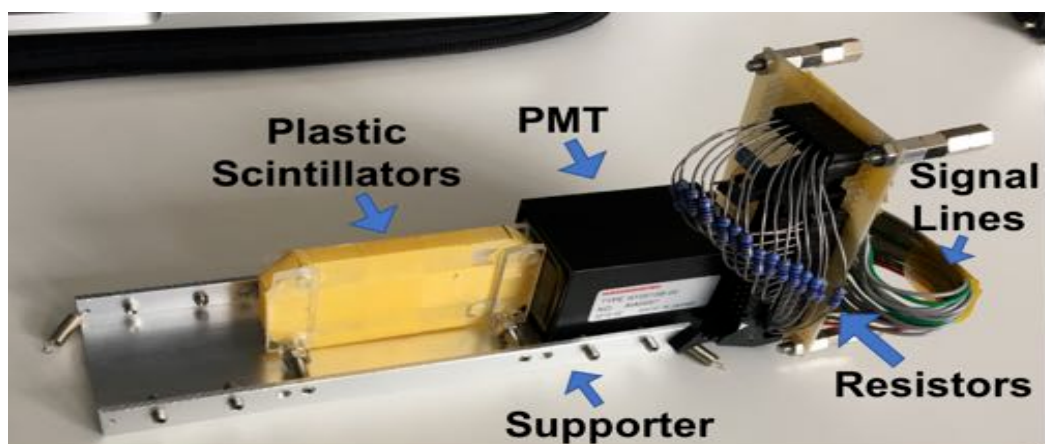
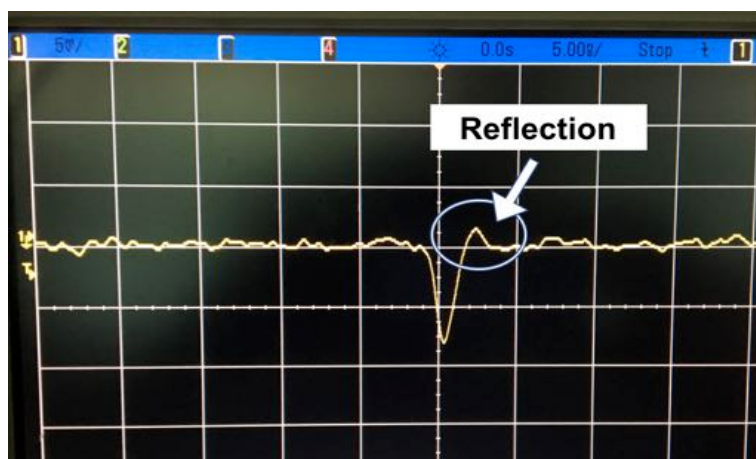


図 2.14 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的 (プロトタイプ)

抵抗はローム社製の MCR03EZJP シリーズを使用した。チップ抵抗の役割は信号の反射を減らすことを目的に取り付けた。

抵抗の値は、 $51\ \Omega$ ,  $100\ \Omega$ ,  $110\ \Omega$ ,  $120\ \Omega$ ,  $130\ \Omega$ ,  $150\ \Omega$  を使用し、オシロスコープで一番反射が少なくなる  $120\ \Omega$  の抵抗値を採用した。

図 2.15 オシロスコープで反射が一番小さくなる抵抗を採用. 上図は  $120\ \Omega$  の時の波形.

### 2.3.4 プラスチックシンチレータと PMT の固定

プラスチックシンチレータと PMT の光電面の間には、ガラスと同じ屈折率のオプティカルグリースによって接着されている。オプティカルグリースは粘性があり接着の機能はあるが固定するには不十分であるため、サポーターの調整ネジによって、プラスチックシンチレータと PMT の固定を行った。プラスチックシンチレータが隣接するフォトカソードをオーバーラップしてしまうため、フォトカソード間の距離が 2 mm であることを考慮すれば、プラスチックシンチレータと PMT の相対位置の調整の精度は 1 mm 以下で行わなければならない。散乱槽内の中心位置を標的の系の中心位置と仮定することで、サポーターの下流側と上流側の 2 つの端点を基準点とした計測によって相対位置確認を行った。サポーターは横 130 mm 縦 40 mm であるため、上流側のサポーターの端を基準点として、シンチレータの上流面まで 17 mm、PMT の上流側面まで 5 mm の位置関係になるよう調整を行った。下流側のサポーターの端も同様に、シンチレータ下流面まで 18 mm、PMT の下流側側面まで 5 mm の位置関係になるよう調整を行った。

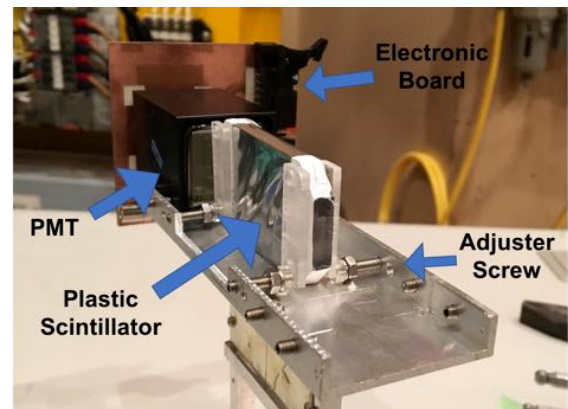


図 2.16 プラスチックシンチレータと PMT を固定するサポーター. 左右 12 のネジによってプラスチックシンチレータと PMT を挟み込む。

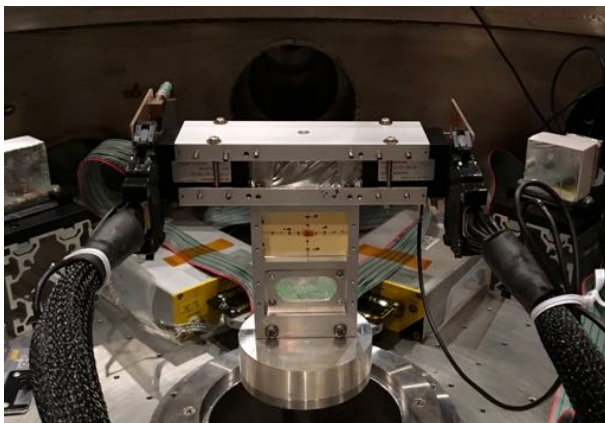


図 2.17 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的初期型. 表

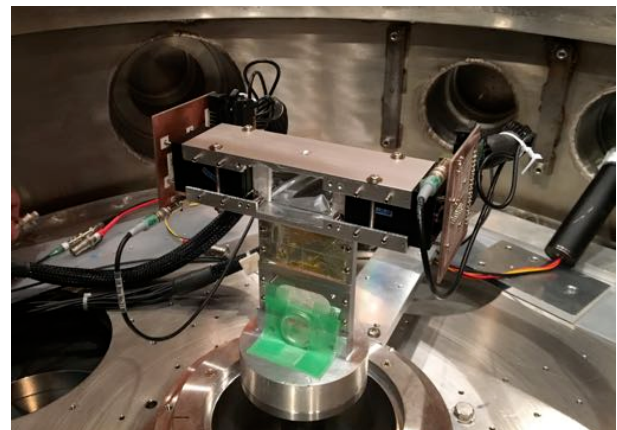


図 2.18 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的初期型. 裏

### 2.3.5 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的初期型の改善点

2017 年 6 月の東北大学 CYRIC での性能評価実験では、多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的初期型の性能は予想していたよりも悪い結果になった。原因はプラスチックシンチレータと PMT の固定法に問題があるという結論を得た。初期型のプラスチックシンチレータの配置の場合、プラスチックシンチレータは隣接しておりアルミナイズドマイラーで覆えていないところがある。そのような場所においては、他のレイヤーへのフォトンの漏洩現象が生まれてしまいクロストークが大きくなってしまふ。また、プラスチックシンチレータと PMT の相対位置調整に関しては、調整が目分量で行なわれており精度に問題があると考えた。また、ビーム方向に関する位置調整は行なっていたが、プラスチックシンチレータが中心にくるような調整 (ビームに対して横方向の調整) は行えない仕組みも改める必要があった。この問題点は、プラスチックシンチレータがビーム中心に調整できていないだけでなく、両端の PMT

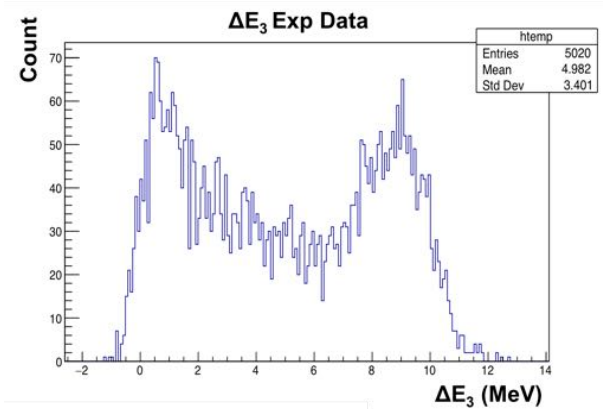


図 2.19 プラスチックシンチレータ 3 枚目の実験データ。無反応ピークと反応ピークが区別が困難。

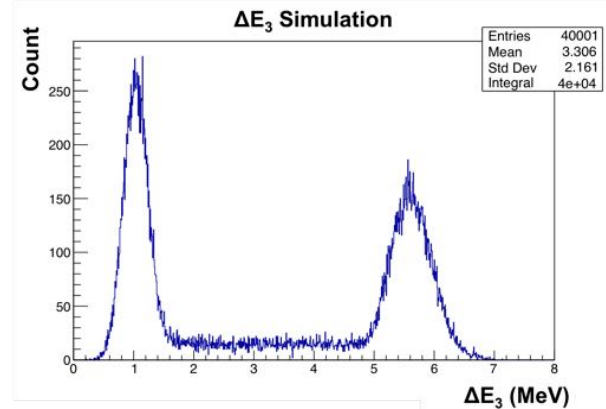


図 2.20 プラスチックシンチレータ 3 枚目のシミュレーションデータ。無反応ピークと反応ピークの区別が容易。

がプラスチックシンチレータを挟み込む力がないことを意味し、接触の悪さによるノイズの増加を引き起こしていたかもしれないと考えられる。

図 2.20 はプラスチックシンチレータ 3 枚目の時のシミュレーション結果である。反応点はプラスチックシンチレータ 0 - 5 mm の領域で一様乱数を与えた。角度は実験セットアップ的に 40° から 50° の範囲で乱数を与えた。プラスチックシンチレータの分解能を考慮するため、エネルギー分解能 20% と仮定して、得られたプラスチックシンチレータのエネルギーデポジットにガウス乱数を与えた。図 2.20 の左側は、粒子が原子核反応せずに通過した場合のエネルギーデポジットのピークで、右側のピークは反応後のエネルギーデポジットのピークである。シミュレーションでは、プラスチックシンチレータの分解能を考慮しても無反応ピークと反応後ピークが容易に区別できる。しかしながら、多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的初期型を使用した実験データである図 2.19 では、ノイズの割合が大きく無反応ピークと反応後ピークの区別が難しい。

## 2.4 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的改良型

多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的改良型では以下の4点に留意して開発を行った。

1. プラスチックシンチレータと PMT の固定
2. プラスチックシンチレータと PMT のビーム方向の相対位置調整 (シンチレータの中心とフォトカソードの中心を合わせる)
3. プラスチックシンチレータと PMT との接地圧の向上
4. クロストークの軽減

### 2.4.1 サポーター及びクッキー製作

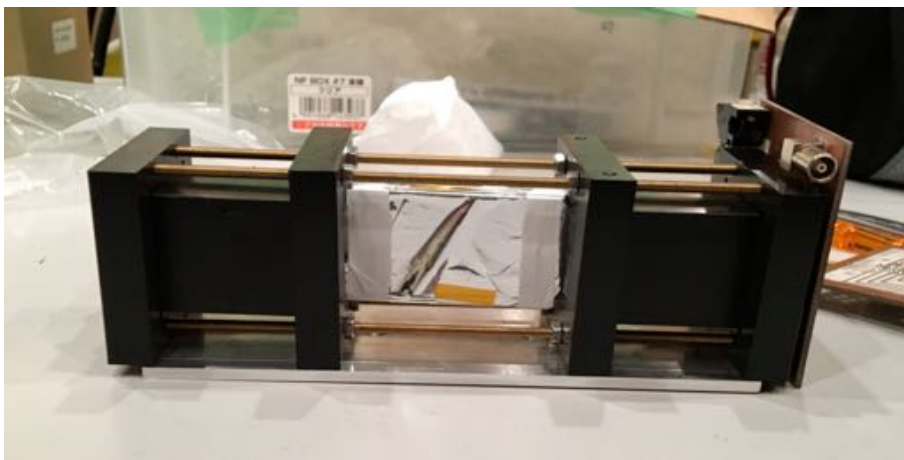


図 2.21 合計4つのクッキーによってPMTとプラスチックシンチレータを固定する

初期型はサポーターと PMT 及びプラスチックシンチレータの固定はビーム方向とその逆方向からのネジによる固定しかされていなかったため、改良型ではサポーターと PMT を固定するための間接固定装置としてクッキーを製作した。PMT に対して両側から固定するため1つのPMTに対して2個のクッキーを作った。クッキーの材料はジュラコンであるため、高温時の耐熱水性、耐アルカリ性、耐油性に優れている。PMT の光電面側のクッキーは底面にサポーターとの固定のためのネジ穴が開けられている。ネジ穴の固定により回転台及びサポーター中心とクッキー及びPMT の中心は設計段階で調整されたことになり、初期型のように改めて位置調整を行う必要がなくなった。クッキーの両端に開けられた穴に棒ネジを通し、クッキーによってPMT を挟み込むようにナットを締めることでクッキーとPMT は固定されている。この機構では、PMT 後方側のクッキーを中心方向に押し出せるため、プラスチックシンチレータと PMT との接地圧を向上させることができる。また、プラスチックシンチレータの配置にも変更を加えた。初期型では各プラスチックシンチレータが隣接するよう配置されていたが、改良型では、各シンチレータが1 mm の間

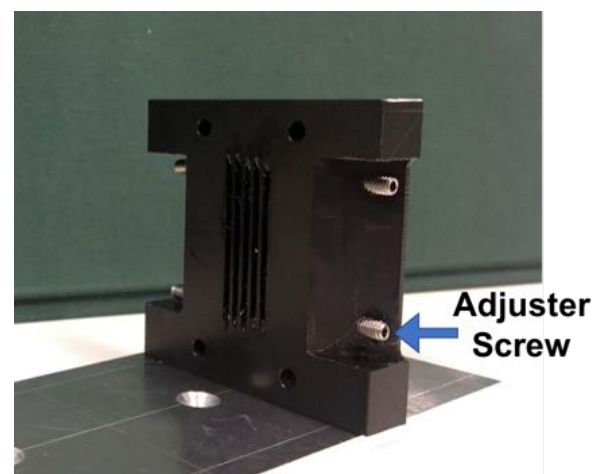


図 2.22 クッキー表



隔を設けた。こうすることで、プラスチックシンチレータの接触による影響と読み出しフォトカソードの隣接による影響を減らすことができ、クロストークの割合を減らすことができる。光電面側のクッキーの左右が削られているのは、外部検出器に散乱する粒子との干渉を防ぐためである。

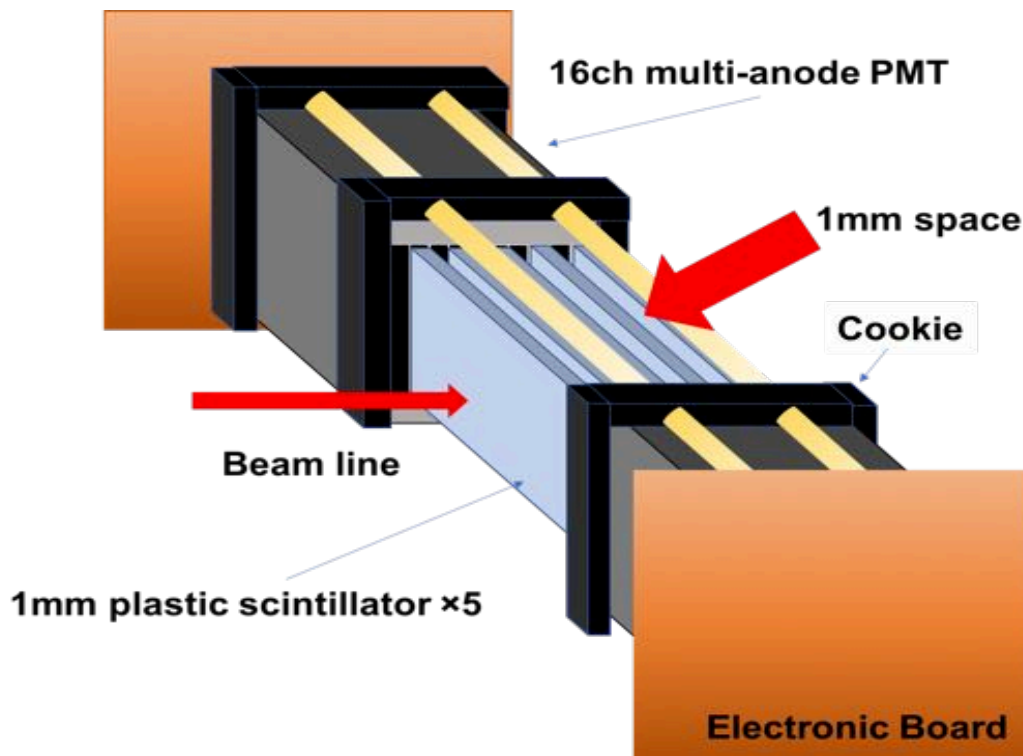


図 2.23 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的改良型モデル

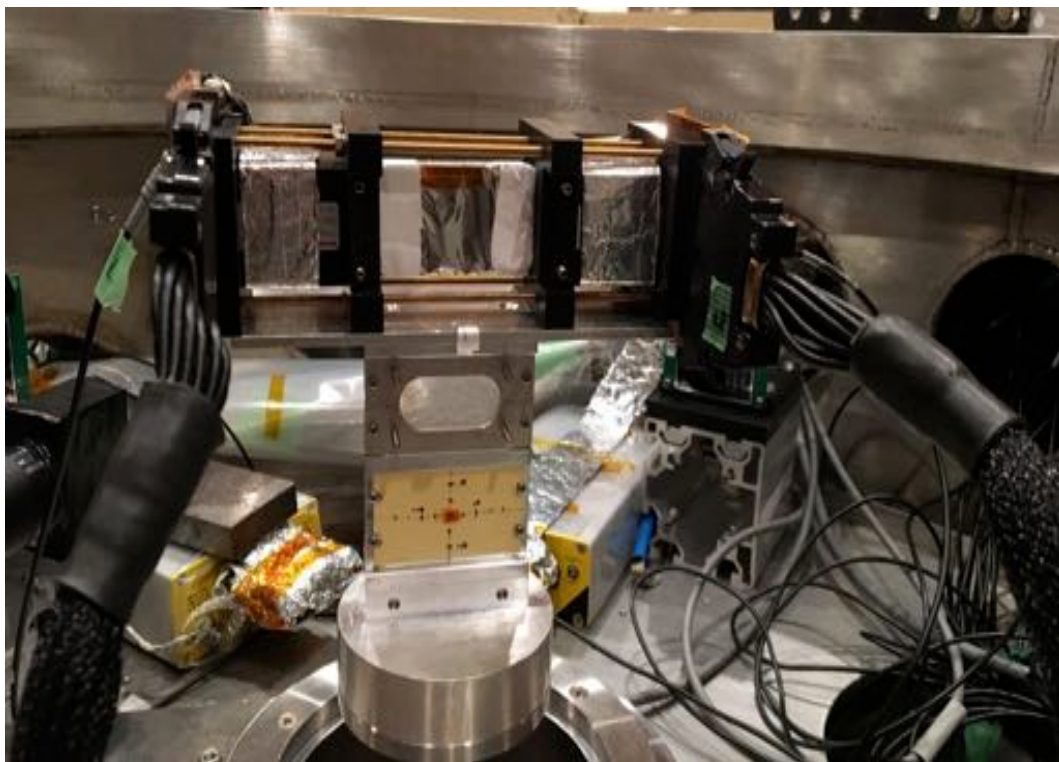


図 2.24 多層プラスチックシンチレータ型アクティブターゲット改良型実機

## 第 3 章

# 東北大学 CYRIC での性能評価実験

### 3.1 p(p,pp) 反応による性能評価実験

本実験では  ${}^6\text{Li}(p,d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p,d){}^5\text{He}$  の実験を計画しているが、本実験を忠実に再現するとなると不安定核ビームを使う必要があり、アクティブ標的の性能評価という点で考えると不向きである。性能評価実験では主にプラスチックシンチレータのエネルギーデポジットに焦点が当てられており、各レイヤーのプラスチックシンチレータのエネルギーデポジットの関係が本実験の  ${}^6\text{Li}(p,d){}^5\text{Li}$  と  ${}^6\text{He}(p,d){}^5\text{He}$  に近い値であれば性能評価は行うことができる。本実験に代わる性能評価を行える原子核反応として入射ビーム 70 MeV の p(p,pp) 反応を選択した。

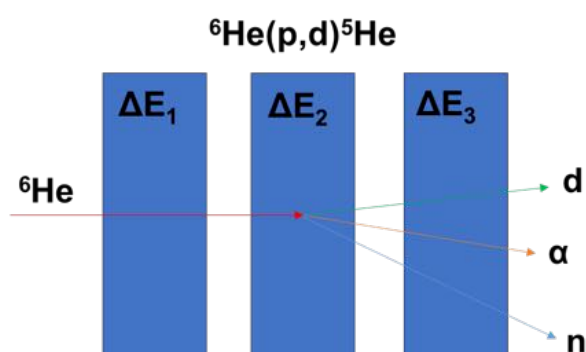


図 3.1  ${}^6\text{He}(p,d){}^5\text{He}$ .  ${}^5\text{He}$  は短寿命核であるため、生成後すぐに二体崩壊して  $\alpha$  と  $n$  になる。

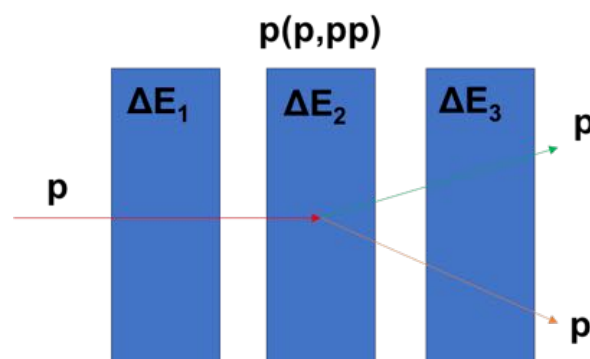


図 3.2 p(p,pp) 弾性散乱は断面積が大きく実験難易度が低い。

この時のプラスチックシンチレータのエネルギーデポジットは、 ${}^6\text{He}(p,d){}^5\text{He}$  の場合、 $\Delta E_1 = 1.24$  MeV,  $\Delta E_2 = 2.21$  MeV,  $\Delta E_3 = 3.02$  MeV。p(p,pp) の場合、 $\Delta E_1 = 0.93$  MeV,  $\Delta E_2 = 2.15$  MeV,  $\Delta E_3 = 3.50$  MeV。各シンチレータのエネルギーデポジットは近い値を取っている。従って性能評価実験は、エネルギーデポジットの関係が似ていて、かつ、断面積が大きい p(p,pp) 反応を用いた。

### 3.2 実験ビームライン

性能評価実験は、東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター (CYRIC) 第 4 ターゲット室で行われた。東北大学 CYRIC の加速器は 930 型 AVF サイクロトロンを使用した。930 型 AVF サイクロトロンの基本スペックは、質量分解能 1/100000、最大磁場 2 テスラ、質量 200 トン。イオン源から供給されたイオンは、サイクロトロン内部の 2 つの Dee 電極の電極アース板を移動する時に電場勾配の影響を受け加速される。その 2 つの電極には、正と負の電

圧が一定周波数かける事で加速されているがこの周波数が Radio Frequency (RF) である。加速されたイオンは各ビームラインに供給される。第4ターゲット室は高分解能ビームラインと大型散乱槽が設置されている。ビームのスポット調整と運動量分析は、1/6000のエネルギー分解能をもつ双極電磁石 ANA1, ANA2 とスリットによって行われている。加速されたイオンは第4ターゲット室中の大型散乱槽に輸送される。大型散乱槽は独立して回転させることができる2つの駆動系を持っているため、散乱槽内の検出器やターゲットを遠隔操作によって駆動させることができる。

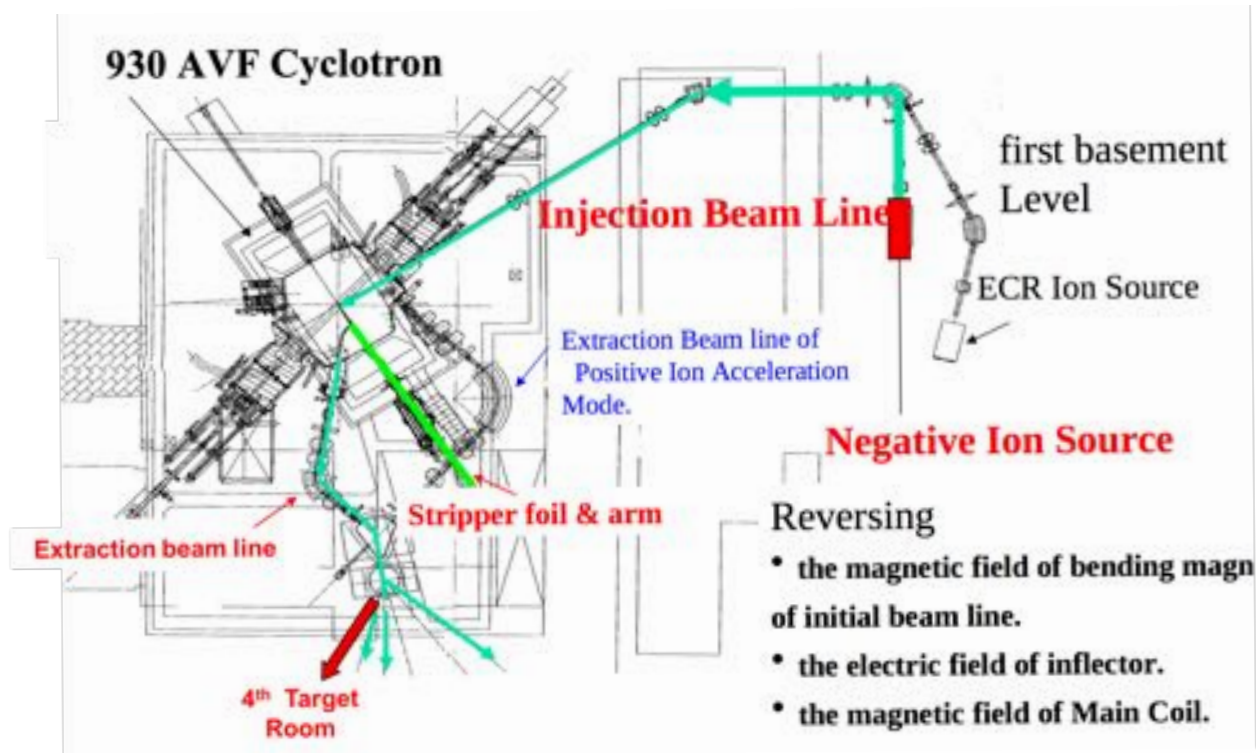


図 3.3 東北大学サイクロンラジオアイソトープセンター (CYRIC) の全体図. 出典: 『「東北大サイクロでの中性子利用と大強度化に向けて」Power Point スライド』

### 3.3 実験セットアップ

アクティブ標的の反応点特定の性能評価を行うためには、他の検出器による反応点特定による評価が必要である。反応点特定のための外部検出器として、縦 50 mm, 横 50 mm, 5 mm ピッチの Si-strip 検出器と縦 50 mm, 横 50 mm, 55 mm 厚の CsI(Tl) 検出器を利用した。この 2つの検出器によって角度・エネルギーの測定、粒子識別を行うことができる。図 3.4 は実験セットアップである。Si-strip 検出器と CsI(Tl) 検出器は回転台中心に対して 45° に設置してある。その横にある MPR-16 は Si 用のプリアンプで真空中でも使えるものである。散乱槽の中に設置してある理由は、検出器とプリアンプの間の距離が長くなると、その間でノイズ信号が混入した際にノイズが増幅される影響を低減させるためである。散乱槽中心に多層プラスチックシンチレータ型アクティブターゲットを設置している。多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的は、横 60 mm 縦 30 mm 厚さ 1 mm のシンチレータ 5枚、両側には 16 ch マルチアノード PMT によって構成されている。散乱槽右側にあるビームプラスチックは、散乱槽の駆動系によってビーム中心に持って行くことが可能で、ビームレートを測定するための検出器である。

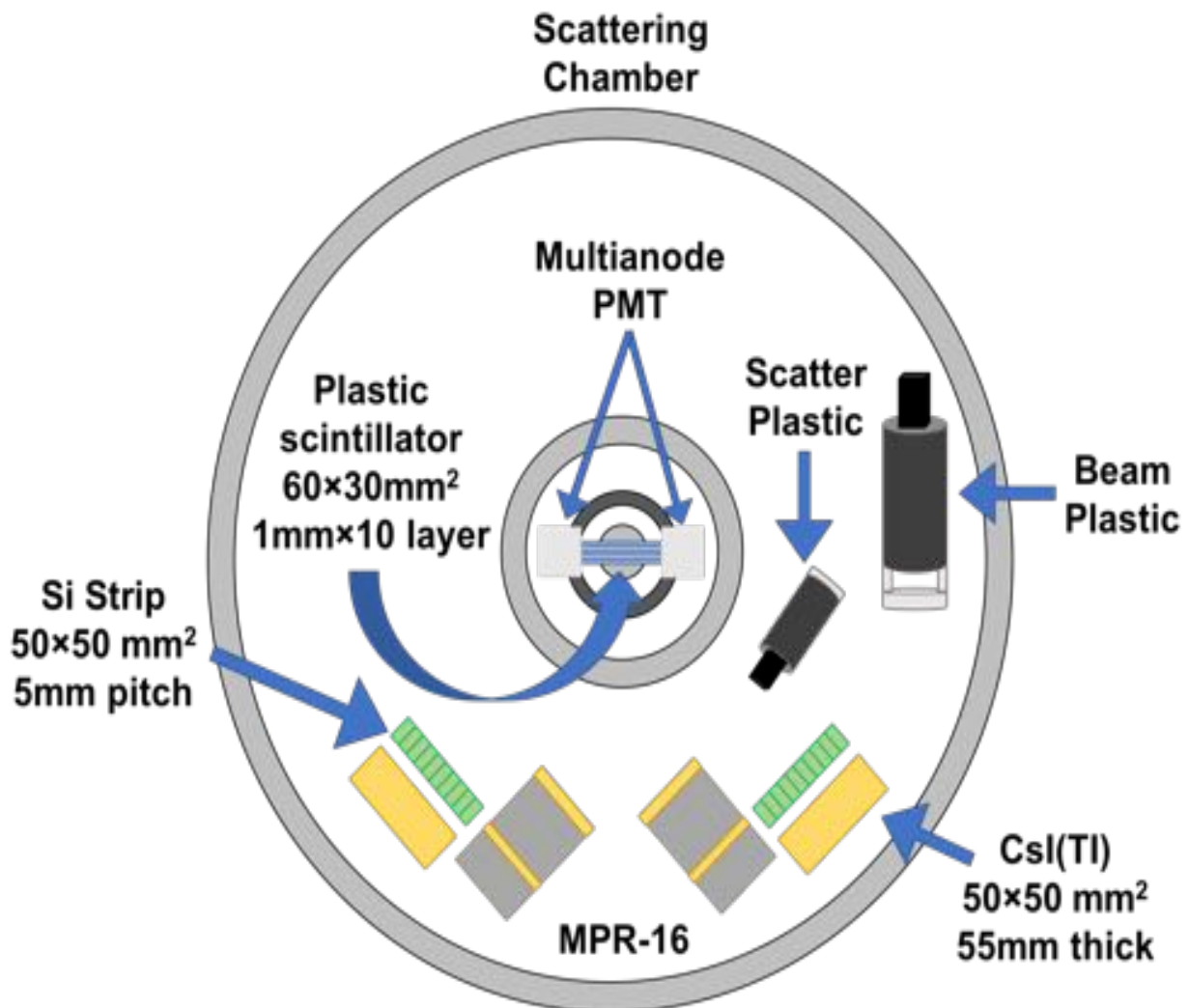


図 3.4 実験セットアップ

前回の実験では、ビームレートは測定できたがアテネイターとの値に矛盾が生じてしまい、その値に信頼性がなかった。その原因として、ビームプラスチックは 1400 V という高い値の HV を直接使用していたためである。従って今回の実験では、ビームプラスチックの HV 供給にブースターを追加した。ビームプラスチックの隣にあるスキャタープラスチックは、 $p(p,pp)$  反応のタイミングを確認するためのものである。この検出器は、2017 年 6 月実験のビームタイム中の回路調整が上手くいかなかったことの反省から今回の 2017 年 11 月実験で導入した。

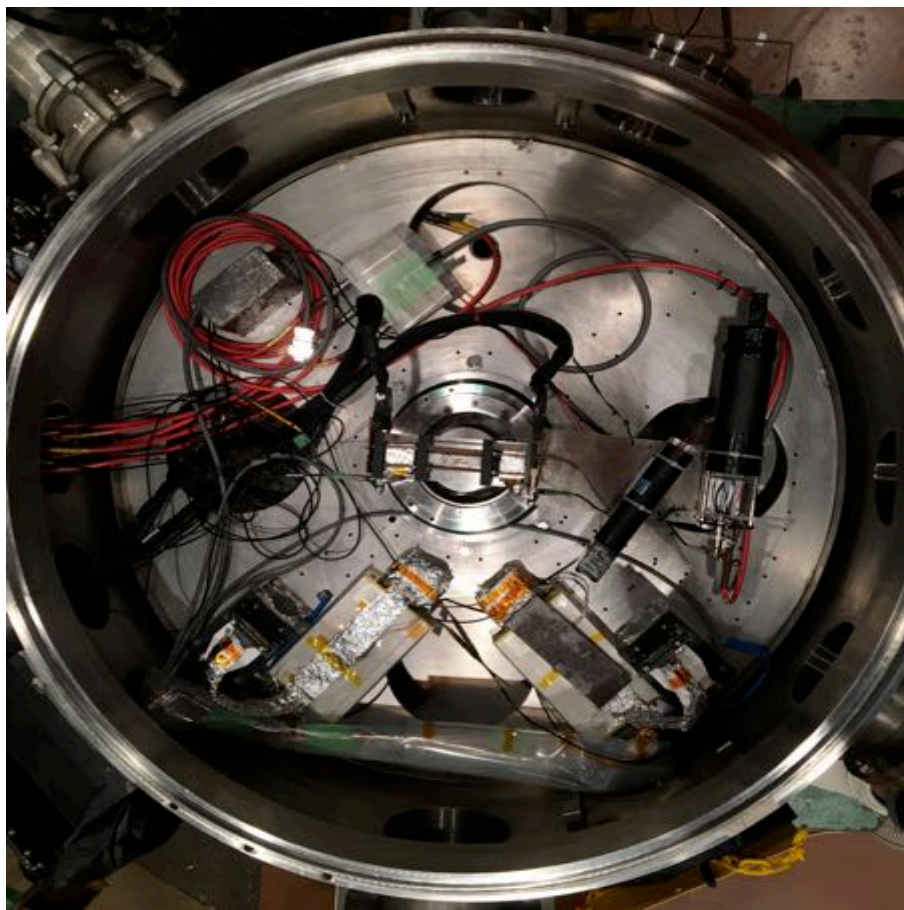


図 3.5 散乱槽内のセットアップ. 散乱槽内の駆動系によって回転台を動かすことが可能. 回転台を動かすことでビームプラスチックをビーム最上流の中心に合わせることができる. スキャタープラスチックで散乱粒子のタイミングを測定するときは、回転台の回転によって Si-strip 検出器の前方にセットできる.

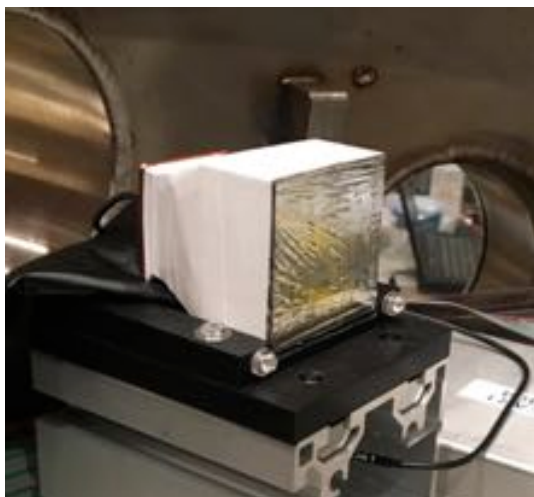


図 3.6 Si-strip 検出器



図 3.7 CsI(Tl) 検出器

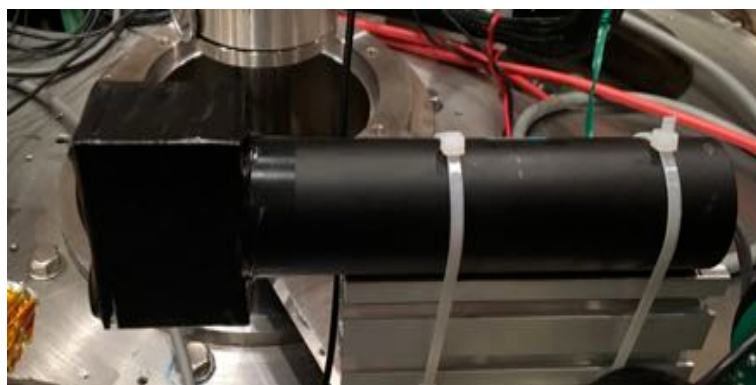


図 3.8 ビームプラスチック



図 3.9 スキャタープラスチック

### 3.3.1 CH<sub>2</sub> 標的の製作

アクティブ標的のデータを主に測定したが、外部検出器の性能評価を行うために、厚さによる影響が少ない標的を使う必要がある。外部検出器の性能評価を行うために、CH<sub>2</sub> 標的を自作した。

ターゲットラダーの上段に CH<sub>2</sub> 標的を使用している。この標的は市販されているサランラップを用いている。この市販されているラップを 16 枚重ねて、それを鉛ブロックで一晩プレスして製作した。面積は最小単位が 0.5 mm の定規を用い、読み取り誤差がその最小単位の半分はあるため、縦 24.0±0.25 mm 横 45.0±0.25 mm となる。質量の計測は、最小単位 0.01 g のデジタルはかりを使用したため、質量は 0.18±0.001 g である。厚さ (μm) は、最小単位 50 μm のノギスで測定を行い、250±25 μm であった。測定サランラップに表示されている 1 枚あたりの厚さは 10 μm だが、精度に関して信頼性がないため、合計 3 つの方法で厚さ (g/cm<sup>2</sup>) を求めた。面積 cm<sup>2</sup>、質量 g、厚さ μm は計測した値で、密度 g/cm<sup>3</sup> は旭化成の技術資料から低密度ポリエチレンの値 0.91g/cm<sup>3</sup> を引用した。誤差を含んだ計算式は下記に示す。ある数 M<sub>1</sub> に対する誤差を ε<sub>1</sub> とし、M<sub>2</sub> に対する誤差を ε<sub>2</sub> と表記する時、誤差を含んだ乗除の式は、

$$(M_1 \pm \epsilon_1) \times (M_2 \pm \epsilon_2) = (M_1 \times M_2) \pm \sqrt{(M_2 \epsilon_1)^2 + (M_1 \epsilon_2)^2} \quad (3.1)$$

$$\frac{M_1 \pm \epsilon_1}{M_2 \pm \epsilon_2} = \frac{M_1}{M_2} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{M_2} \epsilon_1\right)^2 + \left(\frac{M_1}{M_2^2} \epsilon_2\right)^2} \quad (3.2)$$

#### 1. 面積 cm<sup>2</sup> と質量 g

$$t_1 = 0.017 \pm 0.001(\text{g/cm}^2) \quad (3.3)$$

#### 2. 計測による厚さ μm と密度 g/cm<sup>2</sup>

$$t_2 = 0.023 \pm 0.002(\text{g/cm}^2) \quad (3.4)$$

#### 3. 表示の厚さ μm と密度 g/cm<sup>3</sup>

$$t_3 = 0.015 \pm 0.001(\text{g/cm}^2) \quad (3.5)$$

この 3 つの値に対して加重平均をとる。加重平均と加重平均の誤差の式を下記に示す。

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sigma_i^2} g_i\right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (3.6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (3.7)$$

加重平均をとった CH<sub>2</sub> の厚さ t は、

$$t = 0.017 \pm 0.001(\text{g/cm}^2) \quad (3.8)$$

この厚さ (g/cm<sup>2</sup>) の値は、CH<sub>2</sub> ターゲットを用いた解析、特に Si と CsI のキャリブレーションや分解能評価の際に使われる。



図 3.10 CH<sub>2</sub> ターゲット



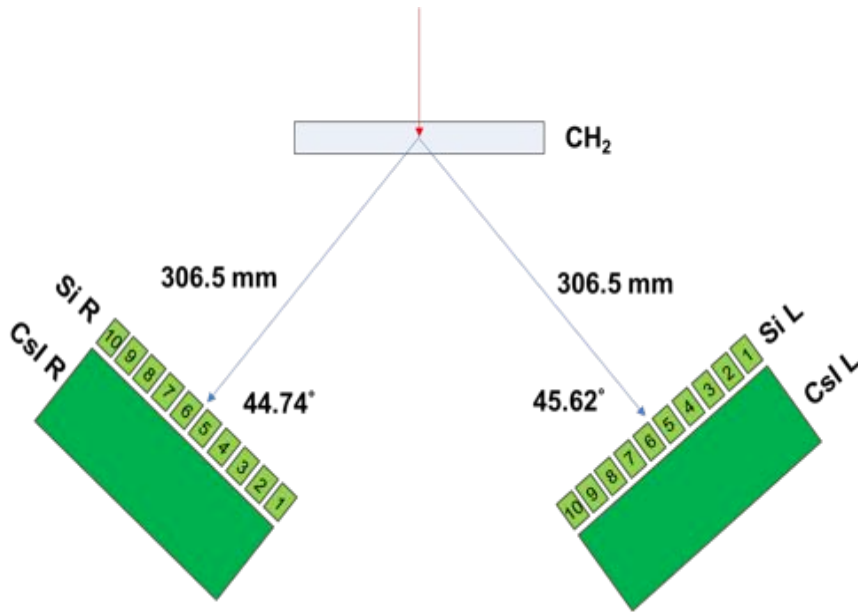


図 3.11 外部検出器のジオメトリー初期

### 3.4 外部検出器

#### 3.4.1 外部検出器のジオメトリー

外部検出器 Si-strip と CsI(Tl) は一対の関係にある。前方の Si-strip で角度情報を取得しその情報を CsI に入れ込むことで角度に応じたエネルギー測定が可能となる。従って、角度情報を正確に把握することが非常に重要になる。図 3.11 は角度と距離のジオメトリーである。表示されている値は、Si-strip の中心 (5th と 6th の間) との角度とその間の距離である。Si-strip は 5 mm ピッチで各ストリップは 0.92° の角度差がある。

$$\theta_L = 45.62 + (5.5 - j) * 0.92 \quad (j = \text{Strip No}) \quad (3.9)$$

$$\theta_R = 44.74 + (j - 5.5) * 0.92 \quad (j = \text{Strip No}) \quad (3.10)$$

Si-strip No	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
Left Angle	49.76	48.84	47.92	47.00	46.08	45.16	44.24	43.32	42.40	41.48
Right Angle	40.60	41.52	42.44	43.36	44.28	45.20	46.12	47.04	47.96	48.88

CsI(Tl) 検出器のエネルギーキャリブレーションによって、外部検出器のジオメトリーチェックを行った。解析のために CH<sub>2</sub> ターゲットの測定結果を利用した。CH<sub>2</sub> ターゲットは陽子標的のみならず炭素も含んでいるため、p(p, pp), C<sup>12</sup>(p, d)C<sup>11</sup>, C<sup>12</sup>(p, p)C<sup>12</sup><sub>1st</sub>, C<sup>12</sup>(p, p)C<sup>12</sup><sub>3rd</sub> の反応を利用した。測定条件は 70 MeV、Si-strip 5th と 6th のゲートを CsI に与えた。散乱後の粒子は、CH<sub>2</sub> 標的と Si 検出器でエネルギーロスした後の計算結果を縦軸に表示している。横軸は CsI 検出器の ch 情報である。フィッティングによるキャリブレーションパラメータは、

$$E_L(\text{MeV}) = 0.01186 * \text{ch} - 0.890775 \quad (3.11)$$

$$E_R(\text{MeV}) = 0.011107 * \text{ch} + 1.350096 \quad (3.12)$$

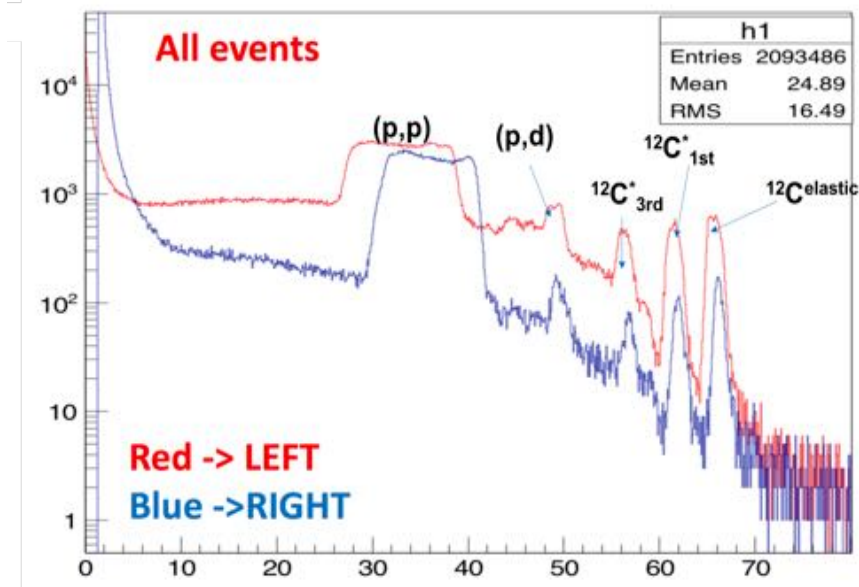


図 3.12 CsI 検出器のエネルギー分布

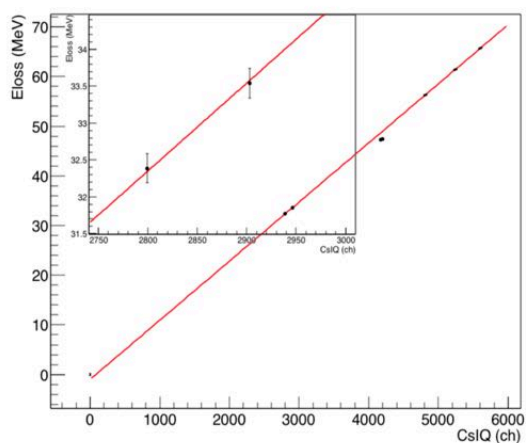


図 3.13 CsI Left エネルギーキャリブレーション

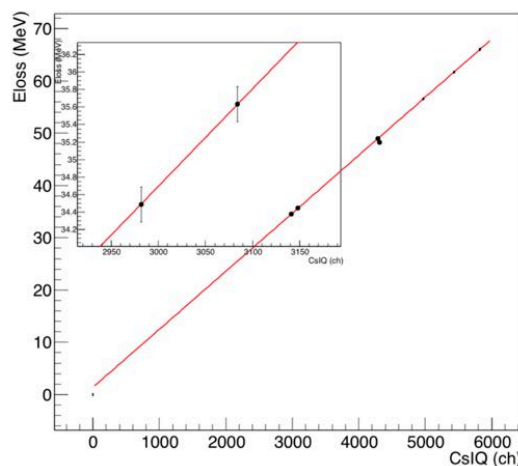


図 3.14 CsI Right エネルギーキャリブレーション

ジオメトリーの関係図 (Si-strip の角度) が正しく求められない場合、キャリブレーションの値がずれてしまう。外部検出器が正しいジオメトリーに設置されている場合は、全てのピークが重なるが、図 3.12 を見てもわかるように、(p,p) 反応のピークが大きくずれている。

### 3.4.2 外部検出器のジオメトリ補正 ver1

角度に不定性をもたらす要素として、入射ビームの位置、Si-strip からターゲット中心までの距離、ターゲットと Si-strip の相対角度の3つの不定性の自由度がある。一つ一つのパラメータを変えて角度補正を行うこともできるが、大変困難であることが予想される。従って、角度の補正は補正項を追加することで行った。また、1つ前の解析ではペDESTALを考慮していなかったが、補正項を求めるにあたりペDESTALピークを 0 MeV として解析を行った。

$$\theta_L = 45.62 + (5.5 - j) * 0.92 + \text{補正項} \quad (j = \text{Strip No}) \quad (3.13)$$

$$\theta_R = 44.74 + (j - 5.5) * 0.92 + \text{補正項} \quad (j = \text{Strip No}) \quad (3.14)$$

補正項の求め方は、補正項の値を変えた時の角度の値から計算で求めた各散乱粒子を縦軸にプロットする。そのプロットした点をフィティングさせた時に  $\chi^2$  の値が一番小さくなるものを補正項として選んだ。

$$\theta_L = 45.62 + (5.5 - \text{Strip No}) * 0.92 - 0.6 \quad (3.15)$$

$$\theta_R = 44.74 + (5.5 - \text{Strip No}) * 0.92 - 0.5 \quad (3.16)$$

$$E_L(\text{MeV}) = 0.011815 * \text{Ch} - 0.488788 \quad (3.17)$$

$$E_R(\text{MeV}) = 0.011411 * \text{Ch} - 0.397834 \quad (3.18)$$

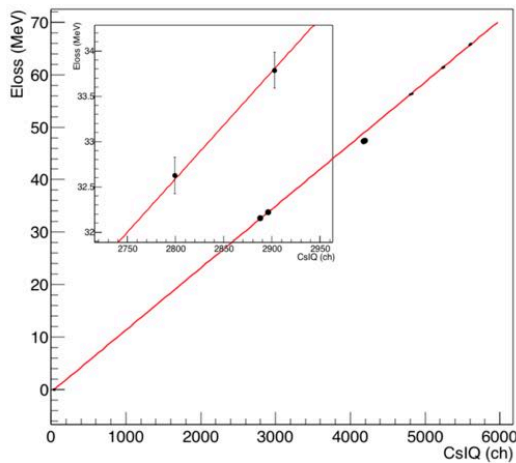


図 3.15 CsI Left エネルギーキャリブレーション

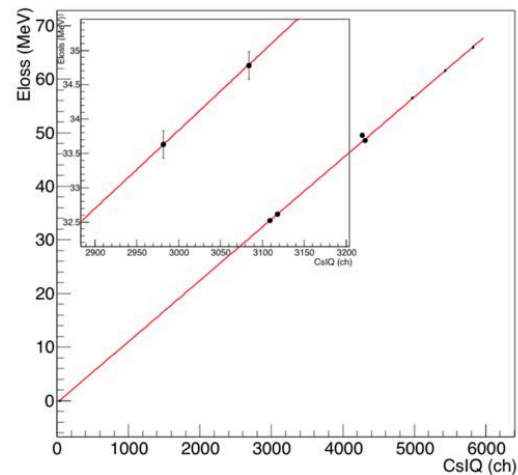


図 3.16 CsI Right エネルギーキャリブレーション

ジオメトリ補正によって得られた角度をもとに Si strip 6th で CUT をかけた時の CsI Left と Right のエネルギー分布を求めた。図 3.17 から分かるように、CsI Left と Right で p(p,pp) 反応のピークを合わせられていることが確認できる。

表 3.1 角度表

Si-strip No	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
Left strip Angle	49.16	48.24	47.32	46.40	45.48	44.56	43.64	42.72	41.80	40.88
Right Kinematics Angle	39.80	40.72	41.63	42.55	43.47	44.39	45.31	46.24	47.16	48.09
Right strip Angle	40.10	41.02	41.94	42.86	43.78	44.70	45.62	46.54	47.46	48.38

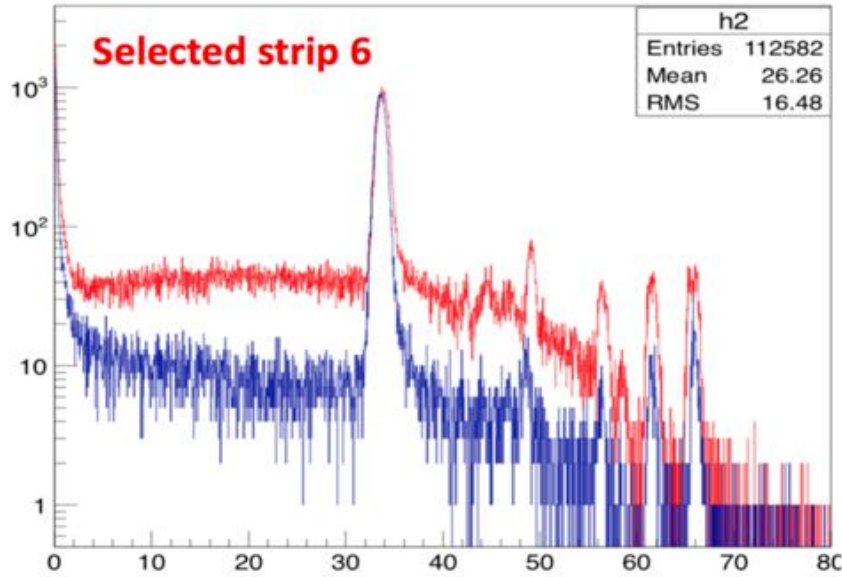


図 3.17 Si 6th でカットをかけた時の CsI 検出器のエネルギー分布

しかしながら、補正を入れた角度関係では、Kinematics の実験結果を満たしていないことが図 3.18 から確認することができる。図 3.18 は Si Left と Right の Hit ID である。例えば、赤枠で囲まれた部分を考えると、Si Left 7th に粒子が散乱した時もう一方の粒子は Si Right 6th に散乱していることを表している。この実験結果を表 3.1 が満たしているかどうか確認すると、表では Si Left 6th(44.56°) に一つの粒子が散乱した時、もう一方の粒子は p(p,pp) の Kinematics によると 44.39° に散乱することになる。この 44.39° は Si Right 検出器の 6th に散乱したことになる。この結果は先ほどの実験結果と一致しない。従って、今回の補正の方法は、Kinematics を満たしていないという理由で使えないことがわかる。

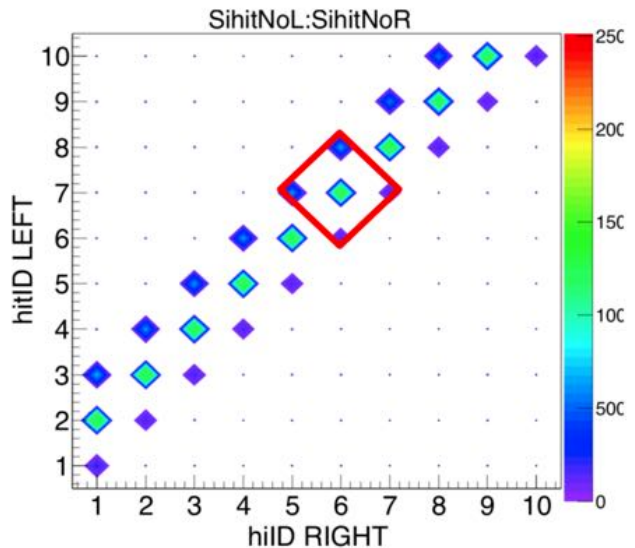


図 3.18 縦軸:HitNo Left. 横軸:HitNo Right

### 3.4.3 外部検出器のジオメトリ補正 ver2

図 3.18 の実験事実を尊重する角度関係を求める。Si-strip 検出器は設置当初は、ターゲット中心に対して Si-strip 中心 (5th と 6th の間) がちょうど 45° にセットしていた。この仮定を基準に角度を求め直した。Si-strip Left 7th に粒子が散乱した場合、Kinematics 的にはもう片方の粒子 45.33° に散乱する。45.33° Si-strip Right 6th に一番近い値であり、図 (3.18) の実験事実と整合性が取れる。

表 3.2 実験セットアップ初期に基づいた角度表

Si-strip No	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
Left strip Angle	49.14	48.22	47.30	46.38	45.46	44.54	43.62	42.70	41.78	40.86
Right Kinematics Angle	39.83	40.74	41.66	42.57	43.49	44.41	45.33	46.25	47.18	48.10
Right strip Angle	40.86	41.78	42.70	43.62	44.54	45.46	46.38	47.30	48.22	49.14

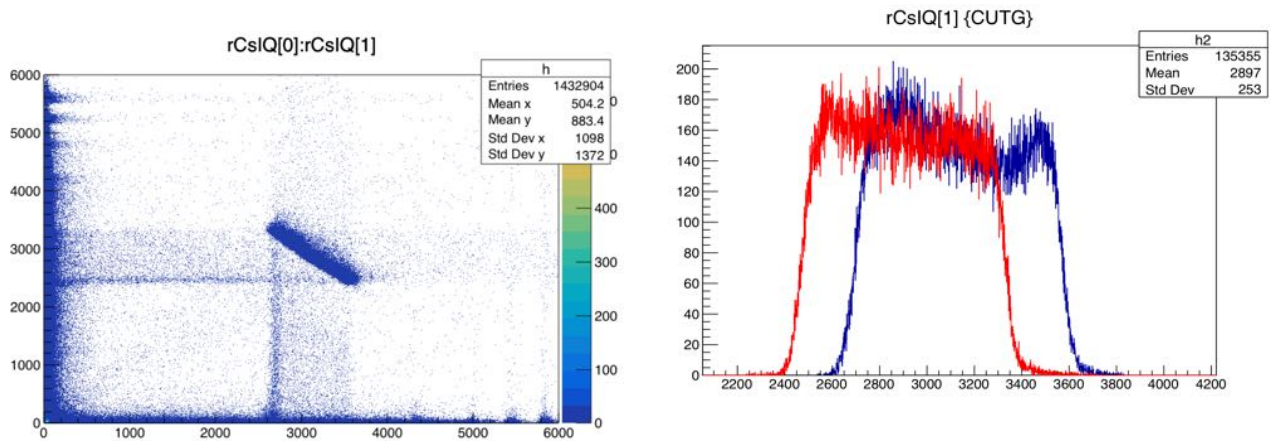


図 3.19 CsI L vs R

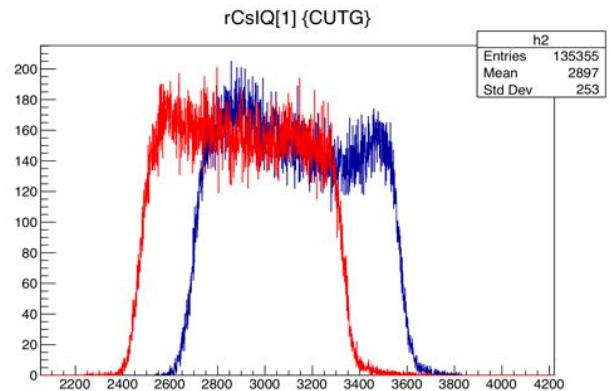


図 3.20 左の相関が取れている領域の CUT を追加した CsI Left と Right のエネルギー分布. efficiency の問題は解消されたが、エネルギー領域にずれがある。

しかしながら、表 3.2 の角度関係の場合、図 3.18 の Kinematics は満たしているが、エネルギーの関係を表している図 3.20 は満たしていない。図 3.20 が示していることは、角度関係が 1 strip 分ずれていることである。つまり表 3.2 の関係を満たし、かつ、1strip 分のずれを補正する必要がある。1strip の角度差は 0.92° あるので、解決策として、Si Left を +0.46° Si Right を -0.46° の角度調整を行う。角度調整を行った場合の角度関係表が下の表 3.3 である。

表 3.3 確定版の角度表

Si-strip No	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
Left strip Angle	49.60	48.68	47.76	46.84	45.92	45.00	44.08	43.16	42.24	41.32
Right Kinematics Angle	39.37	40.28	41.20	42.12	43.03	43.95	44.87	45.79	46.72	47.64
Right strip Angle	40.40	41.32	42.24	43.16	44.08	45.00	45.92	46.84	47.76	48.68

表 3.3 を元に、エネルギーキャリブレーションを CsI に対して行った。CsI L6 は 33.10 MeV、CsI R6 は 33.04 MeV となり、エネルギーの問題も解決されている。

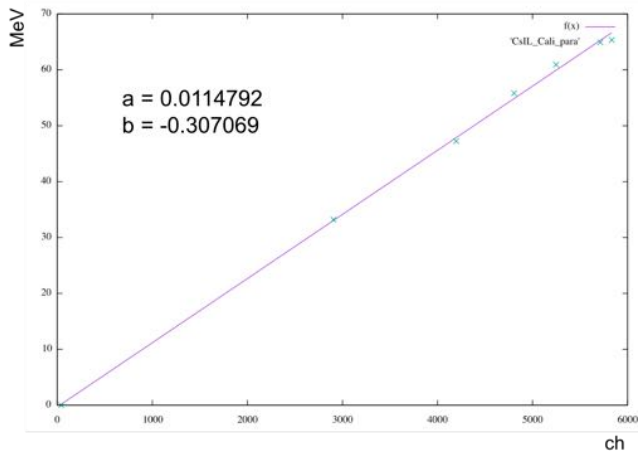


図 3.21 CsI Left エネルギーキャリブレーション

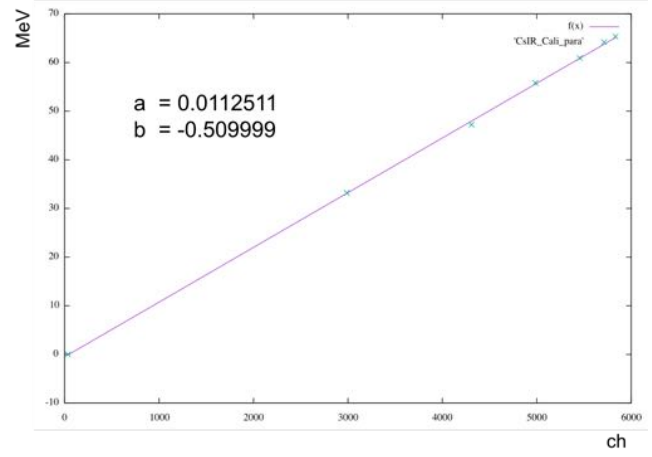


図 3.22 CsI Right エネルギーキャリブレーション

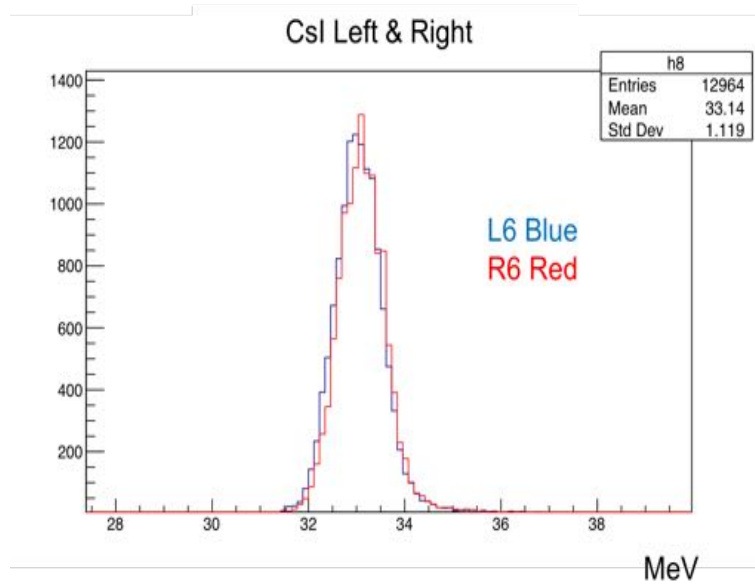


図 3.23 CsI Left と Right の 6 th

### 3.4.4 多層レイヤーの位置による角度関係

プラスチックシンチレータは 1mm 間隔で配置されており、また多層プラスチックシンチレータ型アクティブターゲットの中心はターゲット中心から 0.5mm ずれている。シンチレータの中心が各々違うため、同じ Si-strip に入射する場合でも異なる角度をとる。Si-strip left 6th の場合、1 枚目のプラスチックシンチレータの角度は、 $44.41^\circ$ 、2 枚目は  $44.67^\circ$ 、3 枚目は  $44.93^\circ$ 、4 枚目は  $45.20^\circ$ 、5 枚目は  $45.47^\circ$ 。以下全ての場合についてのプラスチックシンチレータと Si-strip の相対角度を求めた。これらの角度の値はアクティブ標的が標的中の反応点を出すための関数のパラメータを求める際に使われる。

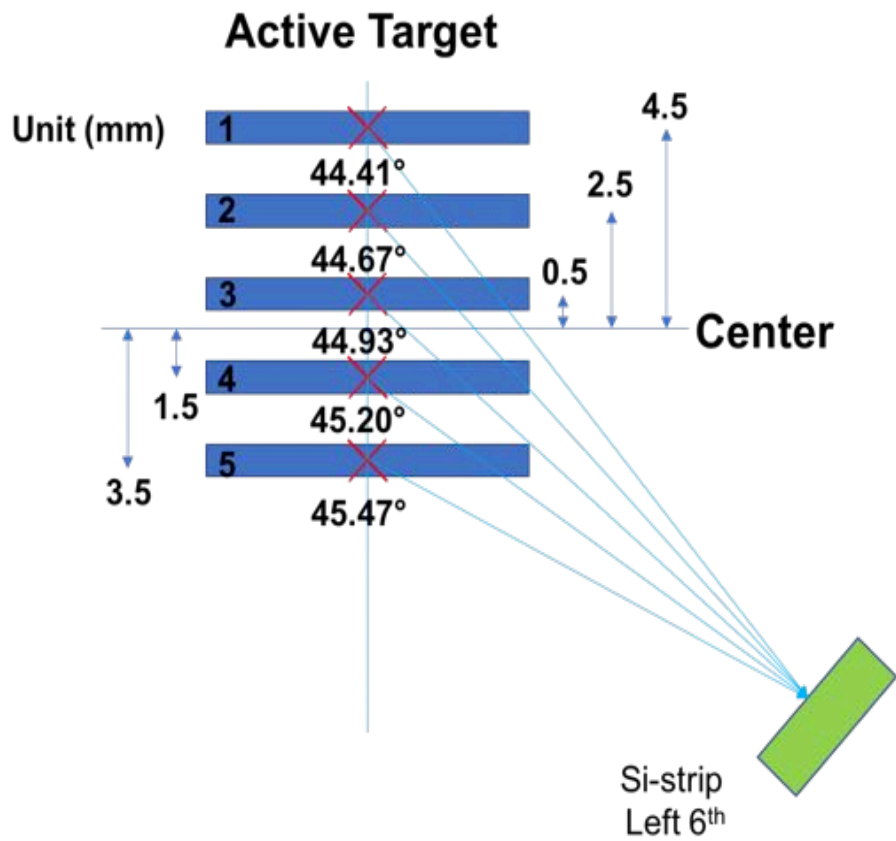


図 3.24 Si L 6th の時の各シンチレータの角度の関係図

表 3.4 アクティブ標的角度 Left

Target-SiR	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
Active Target 1st	48.97	48.06	47.14	46.23	45.32	44.41	43.50	42.59	41.68	40.77
Active Target 2nd	49.25	48.33	47.42	46.50	45.59	44.67	43.76	42.84	41.93	41.01
Active Target 3rd	49.53	48.61	47.69	46.77	45.85	44.93	44.02	43.10	42.18	41.26
Active Target 4th	49.81	48.89	47.97	47.05	46.12	45.20	44.28	43.35	42.43	41.51
Active Target 5th	50.10	49.17	48.25	47.32	46.39	45.47	44.54	43.61	42.68	41.75

表 3.5 アクティブ標的 Right

Target-SiR	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
Active Target 1st	39.86	40.77	41.68	42.59	43.50	44.41	45.32	46.23	47.14	48.06
Active Target 2nd	40.10	41.01	41.93	42.84	43.76	44.67	45.59	46.50	47.42	48.33
Active Target 3rd	40.34	41.26	42.18	43.10	44.02	44.93	45.85	46.77	47.69	48.61
Active Target 4th	40.58	41.51	42.43	43.35	44.28	45.20	46.12	47.05	47.97	48.89
Active Target 5th	40.83	41.76	42.68	43.61	44.54	45.47	46.39	47.32	48.25	49.17



図 3.25 回路図 1



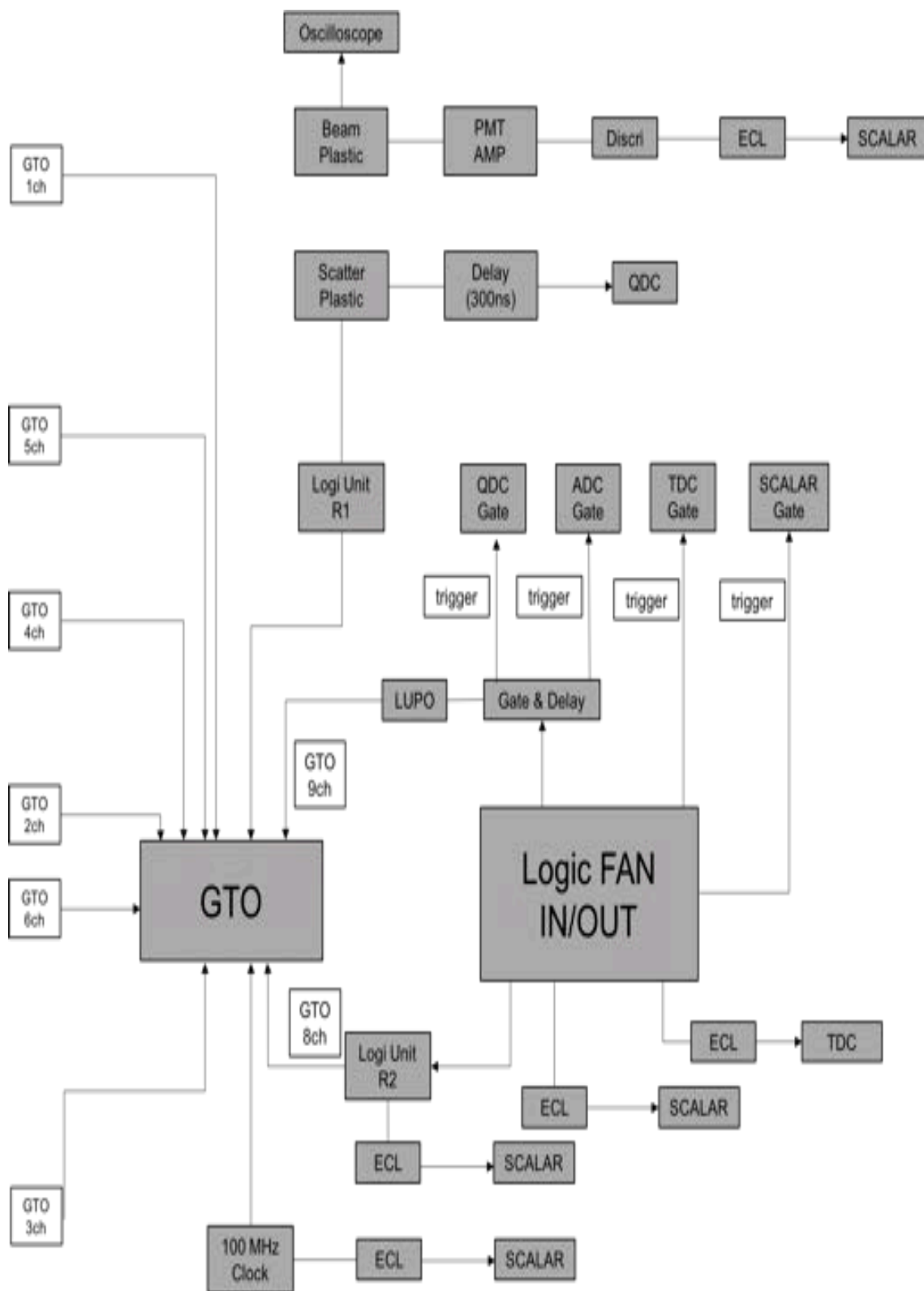


図 3.26 回路図 2

## 第 4 章

# 実験の解析と性能評価

### 4.1 外部検出器の性能評価

外部検出器の性能を評価するためにエネルギー分解能を調べる。外部検出器から標的中での反応点を特定する時、CsI 検出器のエネルギーを用いる。つまり、エネルギー分解能は、外部検出器がターゲット中の反応点を決める際の精度に影響を及ぼすため、エネルギー分解能を正しく評価する必要がある。多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的の反応点特定の性能を評価するためには、その精度よりも外部検出器の精度の方が優位性を持たなければならない。Si-strip は主に角度情報取得のために使われる。外部検出器のエネルギー分解能の解析では、ビーム強度  $10^7$  Hz、ビームカレント 800pA、Si-OR トリガー、標的によるエネルギーの広がり を極力抑えるために  $\text{CH}_2$  標的の測定を利用した。

#### 4.1.1 Si-strip 検出器の性能評価

$\text{CH}_2$  ターゲットでは、ターゲット粒子は陽子だけでなく炭素も含まれているため、陽子・陽子弾性散乱のチャンネルを選ばなければならない。陽子-陽子弾性散乱の選択は、Si Left と Right の Coincidence を利用した。

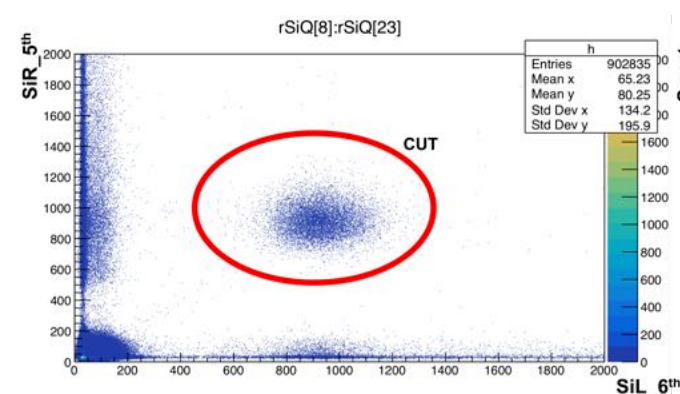


図 4.1 Si-strip Left Right の二次元ヒストグラム

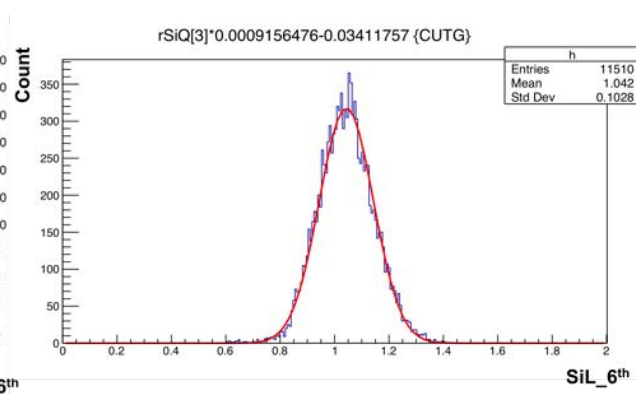


図 4.2 Si-strip 6th ヒストグラム

Si-strip 検出器のエネルギーの揺らぎは CsI 検出器のエネルギーの揺らぎに比べて大きくないため、CsI 検出器のエネルギーへの影響は無視してよく、散乱角度に対して CUT を用いる時にのみ使用される。なお、外部検出器からの反応点特定の際の計算では、Si-strip でのエネルギーロス は考慮されている。

### 4.1.2 CsI 検出器のエネルギー分解能

外部検出器の役割として、角度の測定は Si-strip 検出器で行い、エネルギー測定は CsI(Tl) 検出器で行う。CsI 検出器のエネルギーを用いて標的中の反応点を特定するため、CsI 検出器のエネルギー分解能を調べることは重要である。図 4.3 は、Si strip L6 と R5 で CUT をかけた CsI Left と Right のエネルギーの和である。CsI L + R の和から得られた  $\sigma$  を  $\sigma_{exp}$  とする。 $\sigma_{exp}$  は、下記の要素を含んでいる。

$$\sigma_{exp}^2 = \sigma_{Beam}^2 + \sigma_{Target}^2 + \sigma_{Intrinsic}^2 + \sigma_{Kinematics}^2 + \sigma_{Si}^2 \quad (4.1)$$

ビームの広がりとは固有分解能は除去できない。 $\sigma_{Kinematics}$  は Si の 1 つの strip の Kinematics の広がりを意味し、この値と  $\sigma_{Si}$  は CsI 検出器を解析する際必ずつきまとう除去できないものである。CsI

検出器のエネルギー分解能を出す目的は、CsI 検出器からターゲット中の反応点を特定することが目的であるため、 $\sigma_{Target}$  の厚さ分のコンボリューションは除去できる。 $\sigma_{Target}$  は実験データから求めることはできないため、2章で開発したシミュレーションから求めた。シミュレーション条件は、入射ビームを陽子、標的を CH<sub>2</sub>0.187 mm、散乱角をそれぞれのストリップの角度とした。

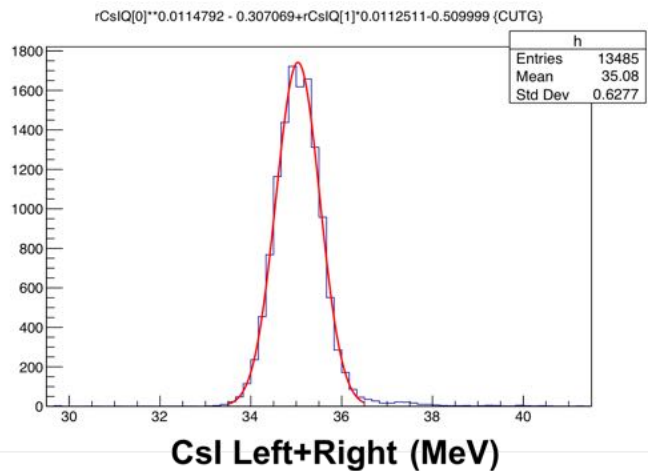


図 4.3 Si strip L6 と R5 で CUT をかけた CsI Left + Right のエネルギー

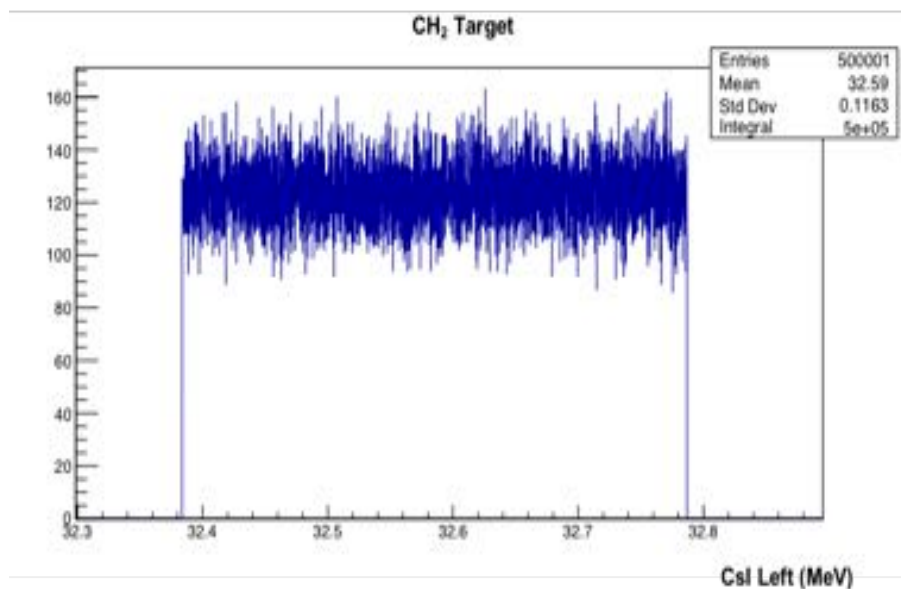


図 4.4 CH<sub>2</sub> ターゲットのエネルギーの広がり. 条件:CH<sub>2</sub> の厚さ 0.187 mm, 入射粒子陽子, エネルギー 70MeV, 散乱角度 Si 6th(44.54°)

CH<sub>2</sub> 標的の広がりの影響を受けた CsI 検出器のエネルギー分布は連続一様分布となる。例として、Si L6 と R5 で CUT をかけた場合、CsI Left 検出器への入射角度は 44.54°(Si R は一意的に決まる) となり、 $\Delta$  は 0.40MeV となる。この時 CH<sub>2</sub> ターゲットの厚さの標準偏差は、

$$\sigma_{\text{Target}} = \frac{\Delta}{\sqrt{12}} = 0.20 \text{ (MeV)} \quad (4.2)$$

従って、求めたい CsI L6 と R5 のエネルギー分解能は、

$$\sigma_{\text{CsIL}}^2 = \sigma_{\text{exp}}^2 - \sigma_{\text{Target}}^2 = 0.43 \text{ (MeV)} \quad (4.3)$$

となる。全 10 個の Si-strip に対して、散乱角度を変えて全ての標準偏差を求める。下記の表が求めた標準偏差からエネルギー分解能 ( $\sigma$ ) を求めたものである。なお、Si L1st に対応する Si R の strip が存在しないため実験データはない。

表 4.1 CsI & R のエネルギー分解能

CsI L&R-SiL	Si 1st	Si 2nd	Si 3rd	Si 4th	Si 5th	Si 6th	Si 7th	Si 8th	Si 9th	Si 10th
$\sigma_{\text{exp}}$	No data	0.52	0.50	0.46	0.46	0.48	0.47	0.46	0.49	0.52
$E_{\text{CsI}}(\text{MeV})$	No data	67.70	67.64	67.45	67.31	67.27	67.31	67.44	67.60	67.69
$\Delta E_{\text{Target}}(\text{MeV})$	No data	0.73	0.72	0.715	0.70	0.70	0.70	0.70	0.71	0.72
$\sigma_{\text{Target}}(\text{MeV})$	No data	0.21	0.20	0.206	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
$\sigma_{\text{CsI}}(\text{MeV})$	No data	0.47	0.45	0.415	0.42	0.43	0.42	0.42	0.44	0.47
$R(\sigma)(\%)$	No data	0.71	0.67	0.62	0.62	0.65	0.64	0.62	0.66	0.70

### 4.2 外部検出器による反応点の特定

外部検出器の反応点特定は、Si-strip で (p,p) 反応を選び、CsI 検出器のエネルギー測定によって行われる。図 4.5 は CsI 検出器による反応点特定の原理である。Si Left 8th と Right 2nd は (p,p) 反応を選んで表している。アクティブ標的 1 枚目で反応が起きた時と 2 枚目で起きた時では、標的中のエネルギーロスが異なるため、CsI L&R が受け取るエネルギーに違いが出る。反応が 1 枚目の時は、E=42 MeV、その一方 2 枚目の時は、E=46 MeV となる。

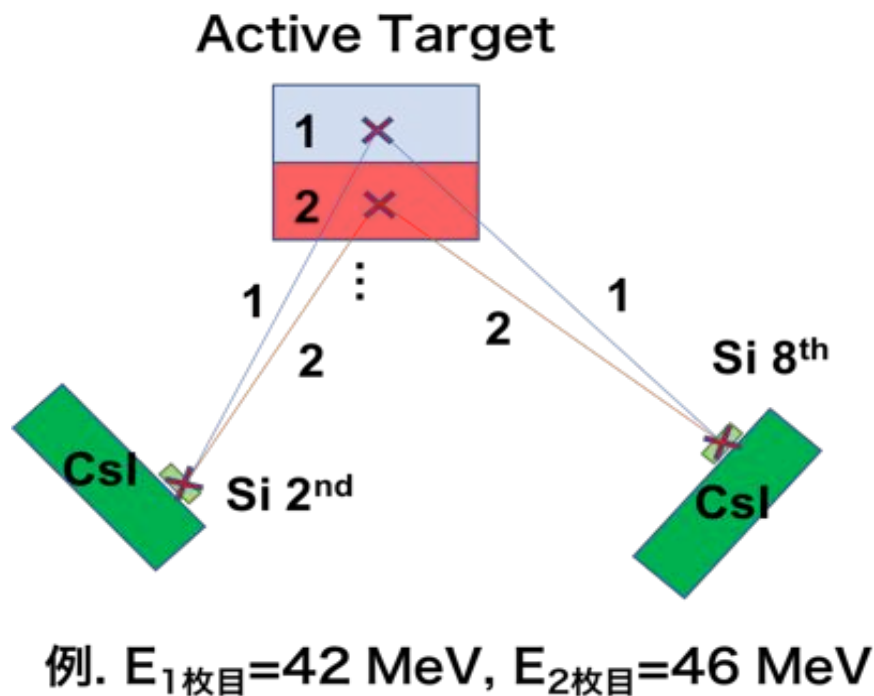


図 4.5 CsI 反応点特定の原理

具体的な CsI 検出器による反応点特定の手法は、計算プログラムに基づいた CsI のエネルギーから標的中の反応点を出すことができる関数を用いた。この関数は、計算プログラムから得た反応点とエネルギーの 2 次元プロットを range 式でフィッティングさせることで得た。フィッティングで range 式を用いた理由は、標的中の反応点がエネルギーロスに基づいて決定できることに由来している。A=質量数、Z=電荷、 $E_{CsI}$ =CsI が測定したエネルギー、 $k, \gamma, c$  はフィッティングパラメータである。今回の測定は、陽子陽子弾性散乱なので、 $A=Z=1$  である。

$$\text{Reaction Point(mm)} = k \frac{A}{Z^2} \left( \frac{E_{CsI}}{A} \right)^\gamma + cA \tag{4.4}$$

各 strip に対するフィッティングパラメータの結果は以下ようになった。Si は Left を基準として、Si Right の角度は計算プログラムの Kinematics によって一意的に決定している。

表 4.2 CsI 検出器反応点特定のためのフィッティングパラメータ

Parameters-Si	Si 1st	Si 2nd	Si 3rd	Si 4th	Si 5th
$k \times 10^{-2}$	1.87212	2.14083	2.48936	2.74147	3.24992
$\gamma$	1.74606	1.72054	1.69146	1.67876	1.64649
c	-0.071879	-0.771153	-1.56165	-2.41438	-3.41677

Parameters-SiL	Si 6th	Si 7th	Si 8th	Si 9th	Si 10th
$k \times 10^{-2}$	3.79922	4.88075	5.17192	5.31946	5.79363
$\gamma$	1.6192	1.56826	1.56748	1.5747	1.56693
c	-4.53299	-5.89347	-7.1478	-8.49032	-10.0339

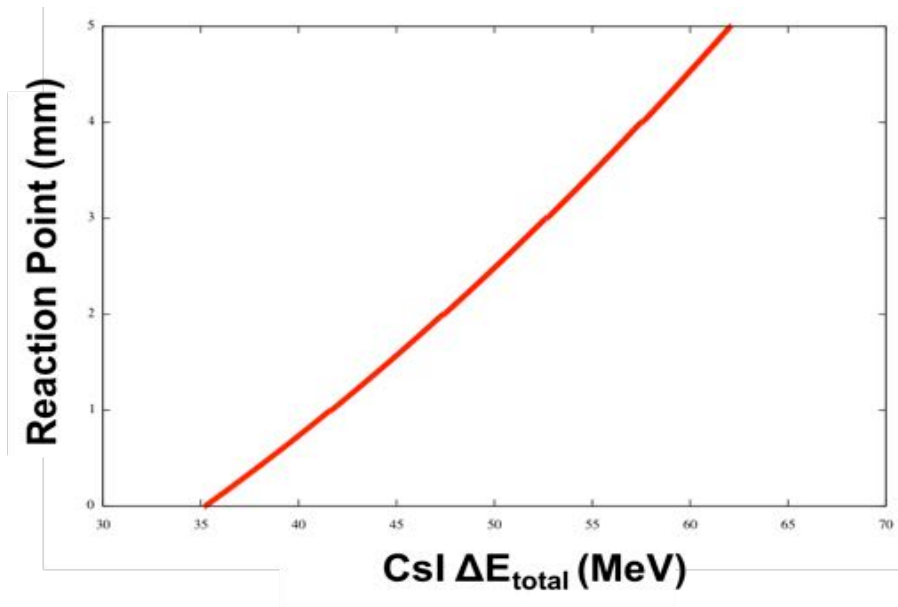


図 4.6 反応点 (mm) vs CsI 検出器 (MeV)

### 4.3 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のエネルギーキャリブレーション

プラスチックシンチレータのエネルギーキャリブレーションは、線源を用いたキャリブレーションを行えないため、実際のビームを使用し、多層プラスチックシンチレータの AND トリガーのデータを用いた。AND トリガーのデータを使用した理由は、ビームがプラスチックシンチレータを反応せずに通過した際のピークが使えるからである。

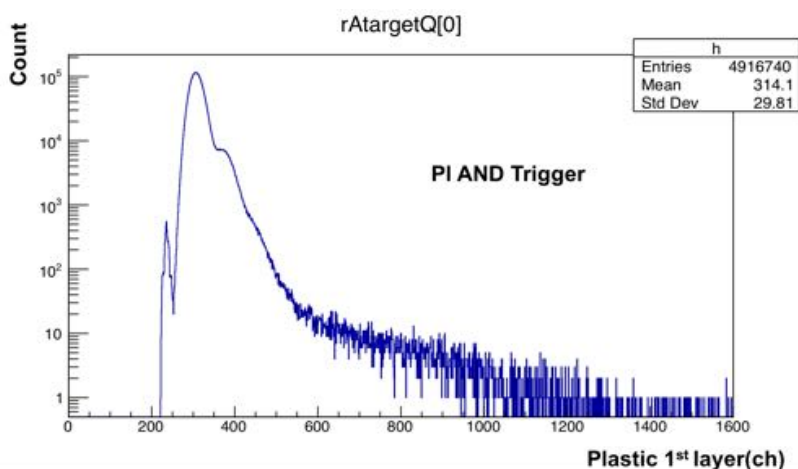


図 4.7 アクティブ標的 AND トリガー

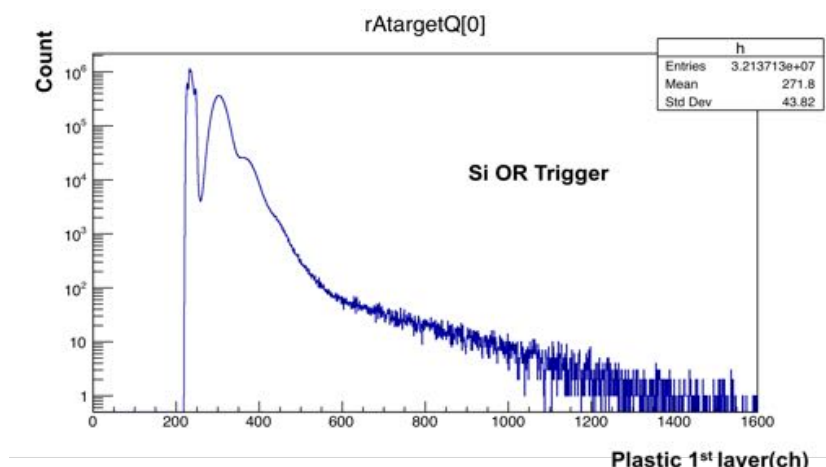


図 4.8 Si OR トリガー

図 (4.7) が、プラスチックシンチレータ AND トリガーのデータである。このデータはプラスチックシンチレータ自身がトリガーをかけているためペDESTALが切れている。ペDESTALの横のピークがプラスチックシンチレータを通過した際にビームが落としたエネルギーから生まれるピークである。Si OR トリガーの場合でも、レイヤー前方であればターゲット中で無反応のピークも測定できるが、Si OR トリガーの性質上、ターゲット中で反応を起こしたイベントをメインに測定している。図 (4.9) は、アクティブ標的自身がトリガーではないためペDESTALピークが現れている。プラスチックシンチレータ AND トリガーから、ビームがシンチレータで反応せず通過した時のピークを読み取り、Si OR トリガーからペDESTALピークを読み取った。エネルギーキャリブレーションに必要なビームがシンチレータで反応せず通過し、エネルギーロスした時の値は計算プログラムから求めた。

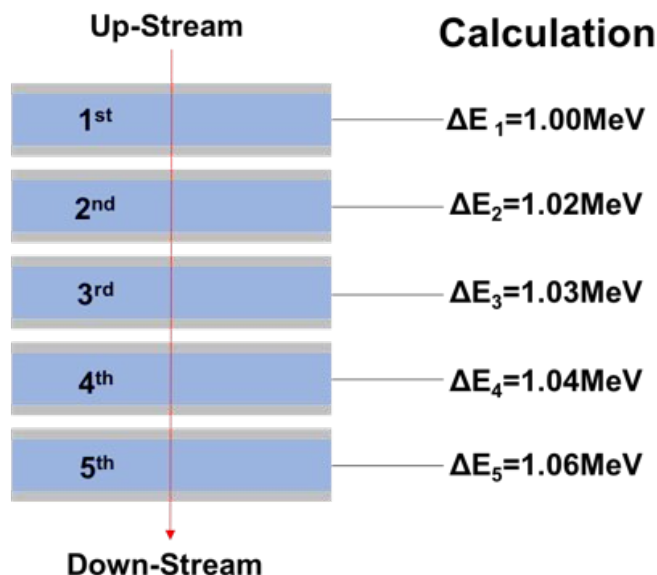


図 4.9 計算プログラムから得た各シンチレータでのエネルギーデポジットの計算値

エネルギーキャリブレーションが妥当であるかどうか確かめるために、シミュレーションとの比較を行った。シミュレーションは反応点に一様乱数、ピークの広がりの再現には  $\sigma$  20% のガウス乱数をそれぞれ与えた。アクティブ標的の各シンチレータのエネルギー分布は、CsI Left Right と アクティブ標的の和を表す 2 次元ヒストグラムで相関が取れている領域で CUT をかけることで求めた。実験データが赤色でシミュレーションデータが青色である。

表 4.3 シンチレータエネルギーキャリブレーションのパラメータ Ver.1

Active Layer	L 1st	L 2nd	L 3rd	L 4th	L 5th
Slope	0.014898	0.015407	0.0109436	0.0116646	0.0122564
Offset	-3.49877	-3.0783281	-2.3296697	-2.6860159	-2.8141996

Active Layer	R 1st	R 2nd	R 3rd	R 4th	R 5th
Slope	0.0111297	0.0113366	0.0128084	0.0130823	0.0115852
Offset	-2.460995	-2.6704602	-2.9493849	-3.0603331	-2.7313175

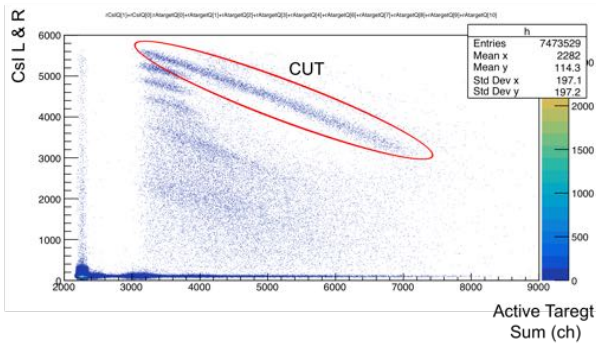


図 4.10 CsI LR vs Active Target 2次元ヒストグラム.ppの相関が現れている領域でCUTをかける.

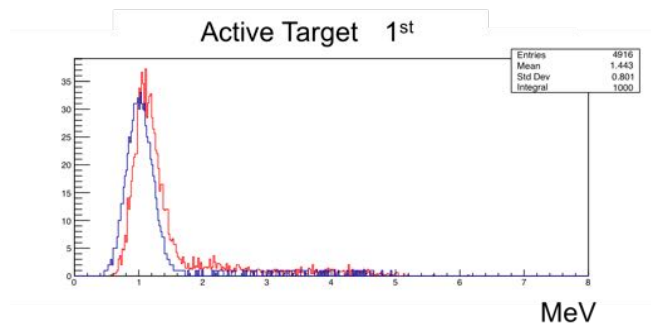


図 4.11 アクティブ標的1枚目のエネルギー分布

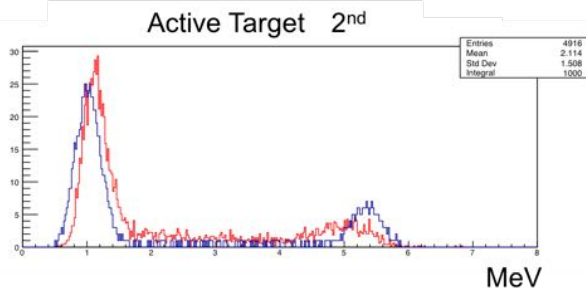


図 4.12 アクティブ標的2枚目のエネルギー分布

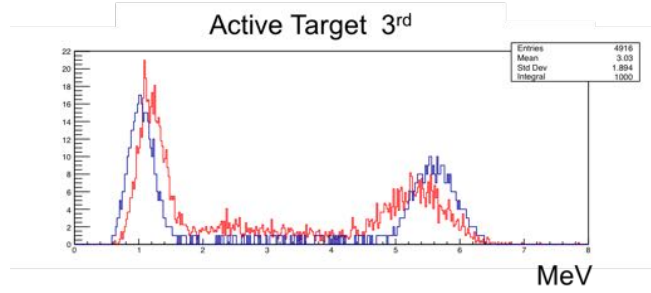


図 4.13 アクティブ標的3枚目のエネルギー分布

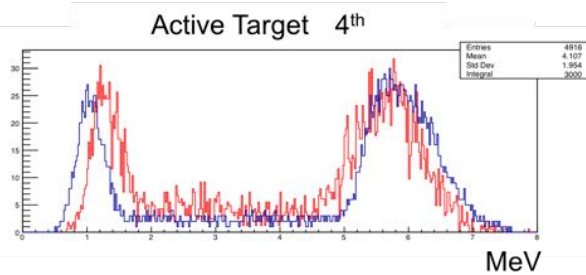


図 4.14 アクティブ標的4枚目のエネルギー分布

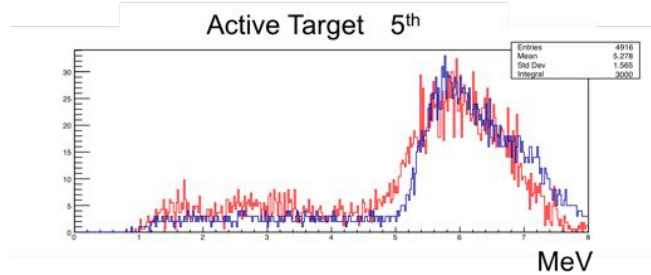


図 4.15 アクティブ標的5枚目のエネルギー分布



シミュレーションとの比較を行うと 1-4 枚目のそれぞれのピークの中心値がずれていることが確認できる。反応点特定のための手法はシミュレーションと同じ計算プログラムをベースにしているため、それぞれのピーク中心がずれていることは反応点特定の精度に影響を及ぼす。従って、5 枚目を除く各レイヤーのエネルギーキャリブレーションは、実験から得たエネルギーのピークとシミュレーションのそれが同じ値になるよう行った。再度エネルギーキャリブレーションした結果が表 4.4 である。

表 4.4 シンチレータエネルギーキャリブレーションのパラメータ Ver.2

Active Layer	L 1st	L 2nd	L 3rd	L 4th	L 5th
Slope	0.0136976	0.01766129	0.01235135	0.01220513	0.0122564
Offset	-3.1905852	-3.78387097	-2.92243243	-2.86564103	-2.8141996

Active Layer	R 1st	R 2nd	R 3rd	R 4th	R 5th
Slope	0.010577	0.01288235	0.01406154	0.0140654	0.0115852
Offset	-2.3417991	-3.3604602	-3.5493849	-3.5803331	-2.7313175

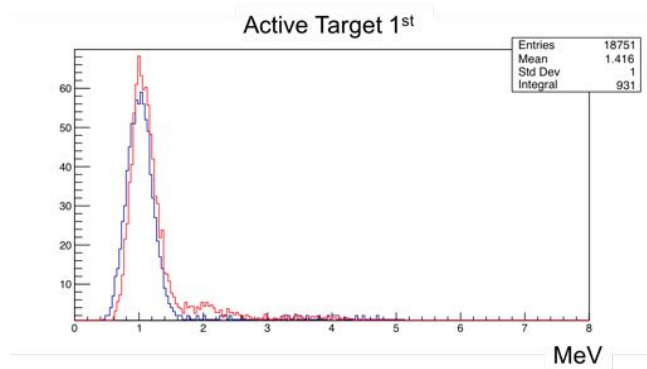


図 4.16 アクティブ標的 1 枚目のエネルギー分布

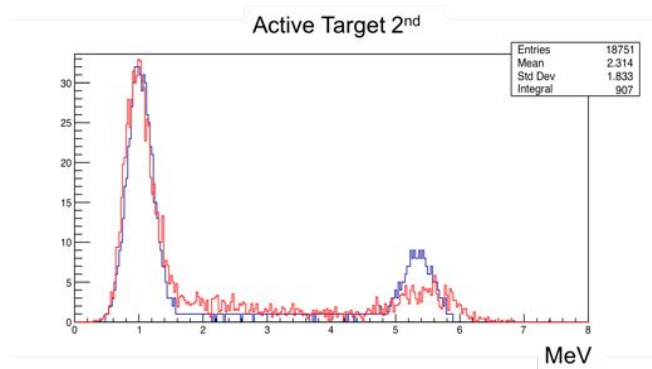


図 4.17 アクティブ標的 2 枚目のエネルギー分布

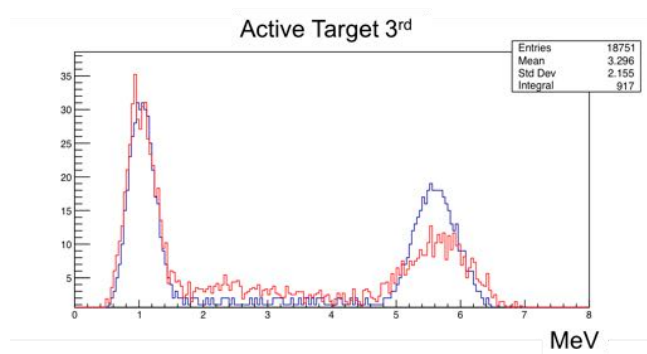


図 4.18 アクティブ標的 3 枚目のエネルギー分布

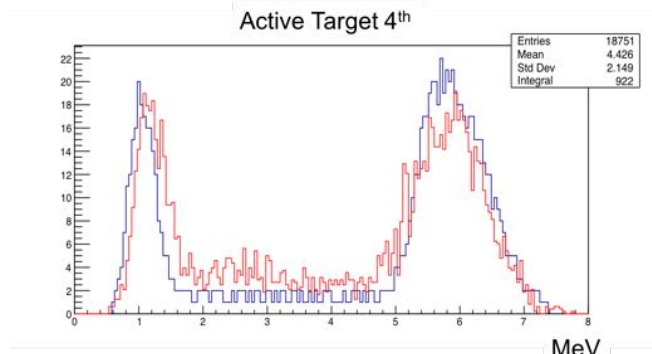


図 4.19 アクティブ標的 4 枚目のエネルギー分布

### 4.4 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的のエネルギー分解能

アクティブ標的のエネルギー分解能は、両側付きの PMT の和を用いた。和を用いることによって、片側だけの場合に比べて  $1/\sqrt{2}$  だけ分解能がよくなる。

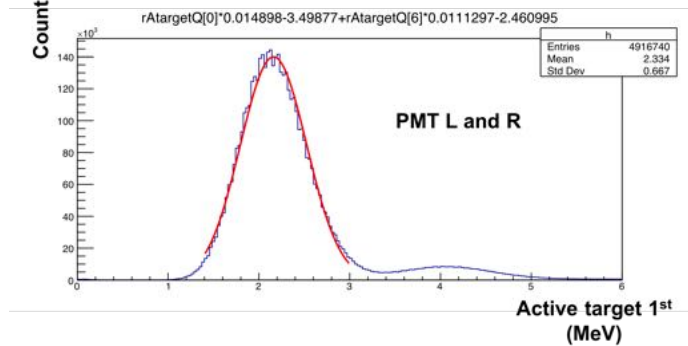


図 4.20 アクティブ標的 1 枚目の PMTL と R の和

Active Target layer	1st	2nd	3rd	4th	5th
Resolution( $\sigma$ ) %	17.0	16.4	15.9	16.2	15.8

アクティブ標的による反応点特定は、実験から得られたエネルギーに基づいて行うため、エネルギー分解能が反応点特定の精度につながる。

### 4.5 Pileup 対策のアルゴリズム

性能評価実験を行なった東北大学 CYRIC 第 4 ターゲット室のビームは、サイクロトロン加速器からのビームで、ビームの周期は RF(Radio-Frequency) によって決まる。そのビームの粒子数の時間分布は一定ではなく、ポアソン分布に従う。ポアソン分布は、

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \tag{4.5}$$

と表される ( $\lambda > 0, X$  と  $k$  は自然数)。ビーム強度を  $R$ 、ゲート幅を  $\Delta t$  とすると、ビーム粒子の数の期待値は、

$$\lambda_N = R \cdot \Delta t \tag{4.6}$$

となる。ある粒子によってビームトリガーができ、このトリガー信号が QDC ゲートを作るとき、トリガー粒子以外の粒子が来るイベント (Pileup イベント) が起こる確率は、

$$\begin{aligned} P(k \geq 1) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_N^k e^{-\lambda_N}}{k!} = e^{-\lambda_N} \left( \frac{\lambda_N}{1!} + \frac{\lambda_N}{2!} + \frac{\lambda_N}{3!} + \frac{\lambda_N}{4!} + \dots \right) \\ &= e^{-\lambda_N} (e^{\lambda_N} - 1) \\ &= 1 - e^{-\lambda_N} \end{aligned} \tag{4.7}$$

今回の実験は、QDC ゲート 91n sec、ビーム強度  $2 \times 10^6$  Hz であるため、 $\lambda = 0.18$  となる。パイルアップが起こる確率は、

$$P(k \geq 1) = 16.47\% \tag{4.8}$$

1 pileup が起こる確率は

$$P(k = 1) = 15.03\% \quad (4.9)$$

2 pileup が起こる確率は

$$P(k = 2) = 1.35\% \quad (4.10)$$

3 pileup が起こる確率は

$$P(k = 3) = 0.08\% \quad (4.11)$$

Pileup 対策として二つの方法を考えた。

1. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨て反応点特定の精度を高める手法
2. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨てない手法

『1. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨て反応点特定の精度を高める手法』について。No Pileup の場合 (a)、シンチレータのエネルギーデポジットは 1 MeV。1 Pileup の場合 (b)、2 MeV。2 Pileup の場合 (c)、3 MeV。3 Pileup の場合 (d)、4 MeV。エネルギーデポジットの値で場合分けをして Pileup 事象の選別を行った。許容できるエネルギー幅は実験から得たエネルギー分解能の値から 20% とした。この解析の問題点は、シンチレータ 1 枚目で反応が起こった場合のイベントを捨てることになり、全体の統計量を減らしてしまうことである。

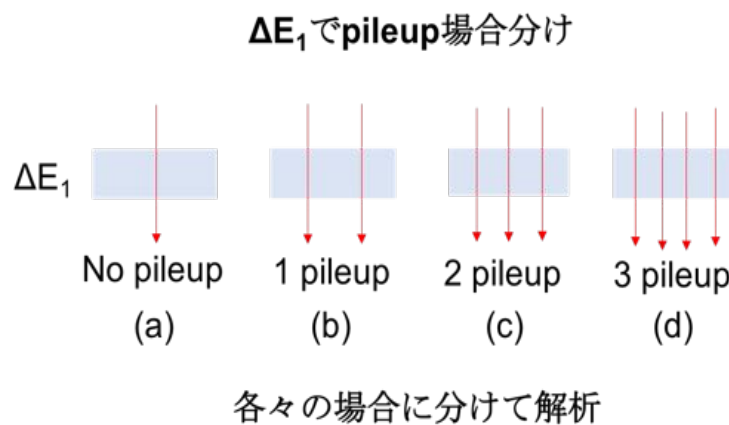


図 4.21 1. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨て反応点特定の精度を高める手法

『2. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨てない手法』について。シンチレータ 1 枚目の反応を捨てないために、まず最初に簡易的にどこのレイヤで反応が起きたか調べる。簡易判定の方法は、原子核反応に伴う標的中のエネルギーロスのシステムが反応前後で急激に変化する物理現象を利用している。つまり、シンチレータのエネルギーデポジットの各前後レイヤの差を読み、その値が最大になる場所が反応レイヤと判定できるということである。この簡易判定で、反応レイヤが 1 枚目ではない場合は、『1. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨て反応点の精度を高める手法』と同じ手法を使うことができる。その一方、簡易判定によって反応が 1 枚目であると判定された場合は、異なる手法で反応点を特定する。計算シミュレーションから、それぞれの Pileup 事象のエネルギー領域を把握しているため、その結果を元に Pileup の分別を行う。No Pileup の場合 (a) は、25-30 MeV。1 Pileup の場合 (b) は、30-35 MeV。2 Pileup の場合 (c) は、35-40 MeV。3 Pileup の場合 (d) は、40-45 MeV。

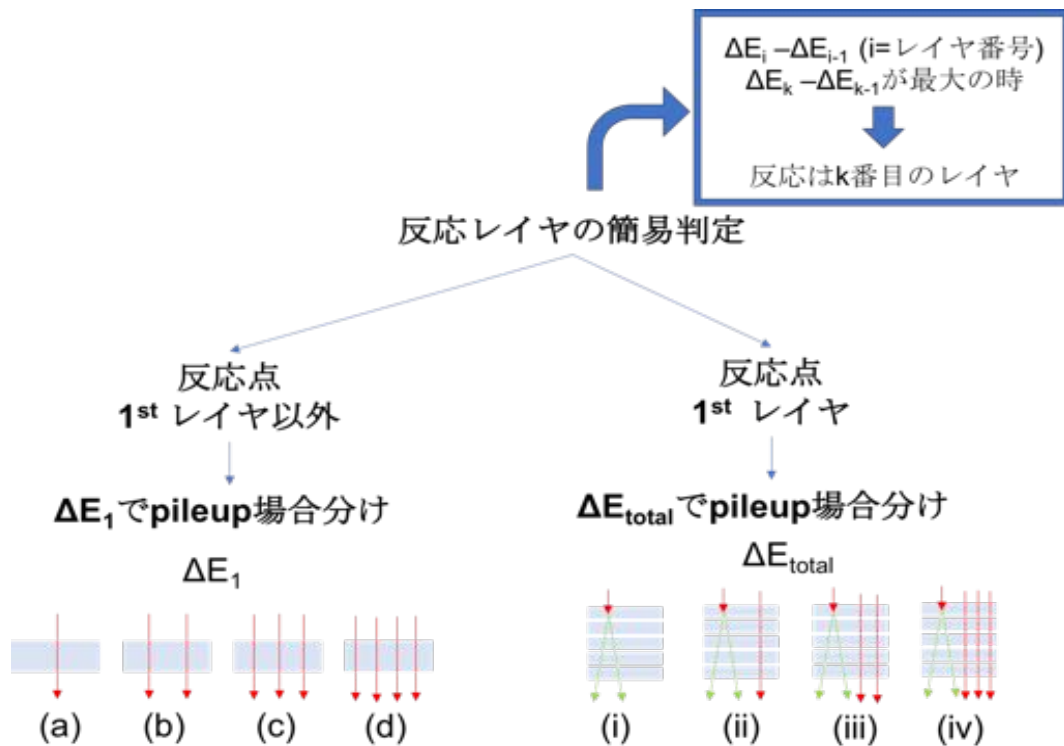


図 4.22 2. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨てない手法

### 4.6 多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的による反応点の特定

各シンチレータから得られたエネルギーデポジットの和からアクティブ標的の反応点の特定を行う。図 4.23 は反応点特定がプラスチックシンチレータの和から行えることを表している。荷電粒子のエネルギーロスはベータプロットホの式で考えると、エネルギーが小さいほどエネルギーロスが大きい。つまり、標的中でのエネルギーロスは、反応が早い段階で起きた時のほうが大きくなる。また、反応後は 2 粒子が角度を持って散乱するため、シンチレータのエネルギーデポジットは反応前に比べると優位に大きくなる。

$$\text{ReactionPoint(mm)} = -k \frac{A}{Z^2} \left( \frac{E_{\text{CSi}}}{A} \right)^\gamma + cA \tag{4.12}$$

具体的な反応点特定の手法は、計算プログラムから得られた反応点 (mm) とアクティブ標的エネルギーデポジットの和の 2 次元ヒストグラム図 4.24 を式 4.12 の関数でフィッティングさせることで、エネルギーから反応点を出すことができる関数を得た。図 4.24 のエネルギーの値は、各シンチレータの角度差が考慮されている。

図 4.25 は実験から得たアクティブ標的のエネルギー和の 1 次元ヒストグラムである。この実験結果を式 4.12 を用いることで、図 4.26 の反応点の 1 次元ヒストグラムが得られる。

今回の性能評価実験では、Si は 10 strip あり、それぞれ散乱角度は変わるため、それぞれに応じた反応点特定のための関数のパラメータを求めた。なお、Si Left 1st に関しては対応する Si Right の strip がないため使用しない。

表 4.8 は Pileup が起きない時の反応点特定のパラメータで、本実験で計画しているビーム強度は  $10^7 \text{Hz}$  であり、Pileup 事象が発生するため、それに対応したパラメータも求めた。Pikeup は、ビーム粒子の時間分布をポアソン分布であると仮定した時、確率的に同時に 4 粒子が来る 3 Pileup ままでが起こると仮定してパラメータを求めた。

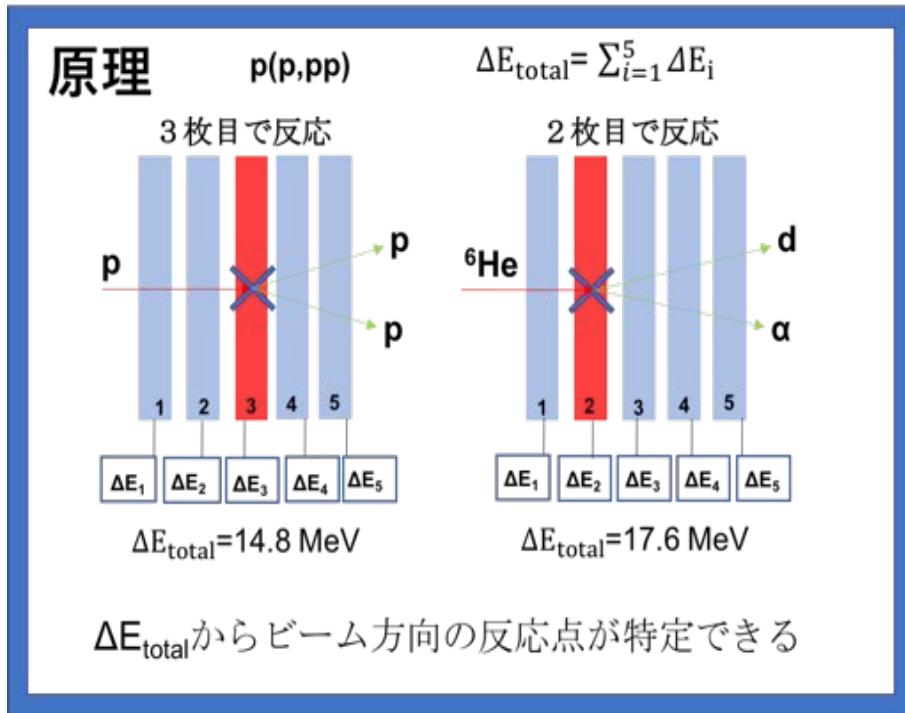


図 4.23 アクティブ標的の反応点特定の原理

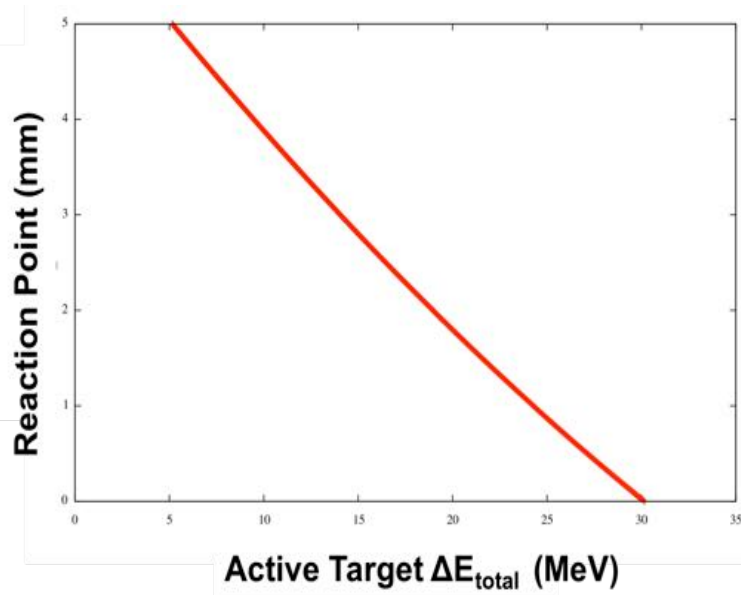


図 4.24 反応点 (mm) vs アクティブ標的 (MeV)

表 4.5 No pileup の場合の反応点特定のパラメータ

Parameters-SiL	Si 1st	Si 2nd	Si 3rd	Si 4th	Si 5th
k	No data	0.577686	0.5239	0.502719	0.503787
$\gamma$	No data	0.719824	0.750417	0.764955	0.766427
c	No data	6.93017	6.83326	6.79777	6.80484

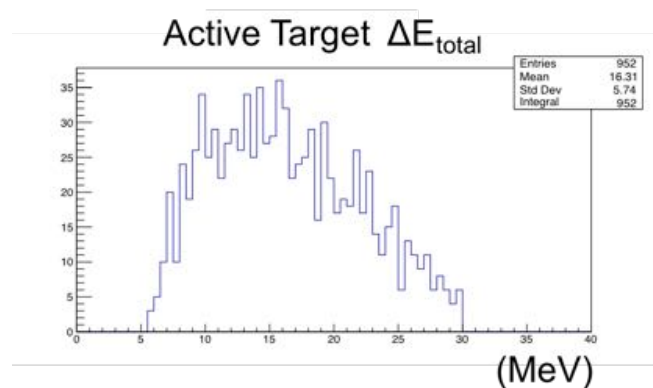


図 4.25 アクティブ標的エネルギーデポジット和

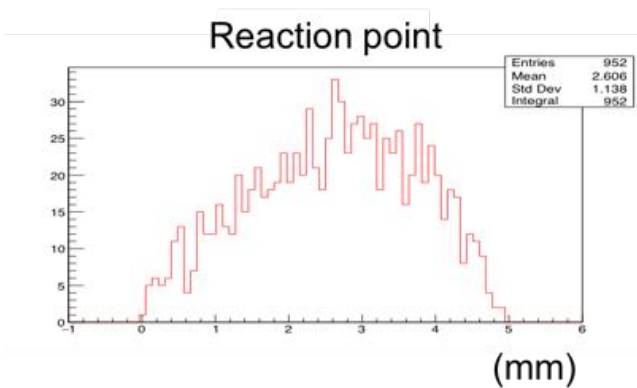


図 4.26 アクティブ標的反応点

Parameters-SiL	Si 6th	Si 7th	Si 8th	Si 9th	Si 10th
k	0.522192	0.56106	0.629075	0.752401	0.99494
$\gamma$	0.757369	0.737367	0.705048	0.6556	0.582265
c	6.84419	6.92075	7.04809	7.26774	7.67182

表 4.6 1 pileup の場合の反応点特定のパラメータ

Parameters-SiL	Si 1st	Si 2nd	Si 3rd	Si 4th	Si 5th
k	No data	1.13698	0.906908	0.812935	0.78721
$\gamma$	No data	0.586448	0.641932	0.670796	0.680724
c	No data	9.51086	9.08789	8.91519	8.87813

Parameters-SiL	Si 6th	Si 7th	Si 8th	Si 9th	Si 10th
k	0.809909	0.881867	1.02266	1.28649	1.84346
$\gamma$	0.675227	0.655329	0.620104	0.566574	0.486962
c	8.939	9.096	9.37854	9.86669	10.7986

表 4.7 2 pileup の場合の反応点特定のパラメータ

Parameters-SiL	Si 1st	Si 2nd	Si 3rd	Si 4th	Si 5th
k	No data	2.14435	1.55033	1.32519	1.26385
$\gamma$	No data	0.481387	0.549956	0.585583	0.597699
c	No data	13.0512	12.0175	11.6094	11.5144

Parameters-SiL	Si 6th	Si 7th	Si 8th	Si 9th	Si 10th
k	1.31375	1.48094	1.82862	2.54688	4.3445
$\gamma$	0.590601	0.565572	0.521511	0.454822	0.35605
c	11.6411	11.9915	12.6542	13.8848	16.5672

表 4.8 3 pileup の場合の反応点特定のパラメータ

Parameters-SiL	Si 1st	Si 2nd	Si 3rd	Si 4th	Si 5th
k	No data	4.19288	2.75012	2.22617	2.07909
$\gamma$	No data	0.381715	0.459636	0.50186	0.516815
c	No data	18.3427	16.0751	15.1839	14.9498

Parameters-SiL	Si 6th	Si 7th	Si 8th	Si 9th	Si 10th
k	2.19516	2.55854	3.42273	5.20431	9.45524
$\gamma$	0.507427	0.478499	0.42466	0.351334	0.25796
c	15.2108	15.9044	17.3962	20.0985	25.6727

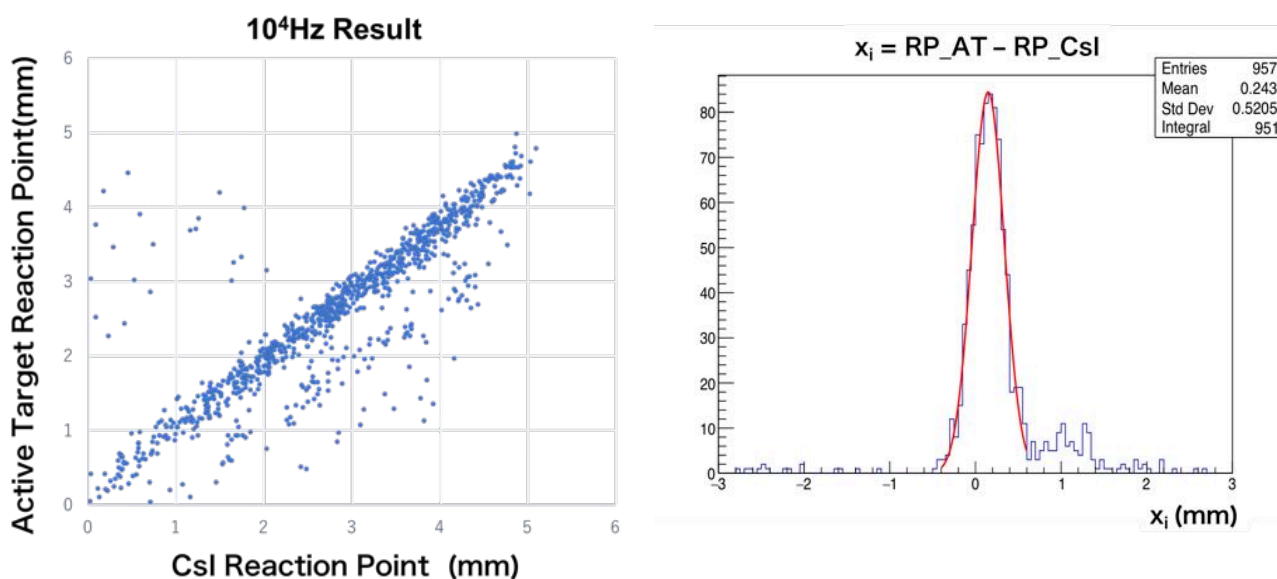
4.7 反応点特定  $10^4$  Hz 結果図 4.27  $10^4$ Hz 結果.Pileup 対策無し

図 4.28 反応点 (アクティブ標的) - 反応点 (CsI) の 1 次元ヒストグラム

ビーム強度が小さい場合である  $10^4$  Hz の場合を考える。図 4.27 は、横軸を CsI から決めた反応点、縦軸をアクティブ標的から決めた反応点の 2 次元散布図である。係数 1 の正比例の関係にあるラインの下に、主に二つの相関の見える縞模様がある。このバックグラウンドを考えると、 $10^4$  Hz の場合 Pileup が生じる確率は非常に小さいため起こり得ないと考えることも計算からできるが、ビーム強度は一定ではないため Pileup の影響も否定はできない。図 4.27 の左上に見えるバックグラウンドは、明らかな原子核反応であると考えられる。解析では、Si-strip 検出器を用いた Kinematics による  $p(p,pp)$  反応を抽出する粒子識別を行っているため、炭素由来の反応は除外している。しかしながら、 $^{12}\text{C}(p,pp)^{11}\text{B}$  の準弾性散乱は除外されていないため、その影響も考えられる。図 4.27 から位置分解能を評価するため、位置分解能をアクティブ標的から CsI 検出器の反応点を引いた値から標準偏差を求めた値とする。 $x_i$ =反応点 (アクティブ標的)-反応点 (CsI 検出器)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (4.13)$$

$10^4$ Hz の場合、イベント数=957、位置分解能 (mm)=0.60 mm。この結果は、バックグラウンドの影響を含んでいる結果である。これらのバックグラウンドを考慮しない位置分解能の結果を別の方法で求める。

位置分解能を異なる方法で求めたものが図 4.28 で、アクティブ標的と CsI 検出器の反応点の差の 1 次元ヒストグラムである。このガウス分布をフィッティングさせることで位置分解能を求め、その結果は  $\sigma = 0.19$  mm となった。この解析の手法でバックグラウンドを除外させることができた場合は、位置分解能は目標としている 2.99 mm 以下を達成できていることが確認できる。



### 4.8 反応点特定 10<sup>6</sup> Hz 結果

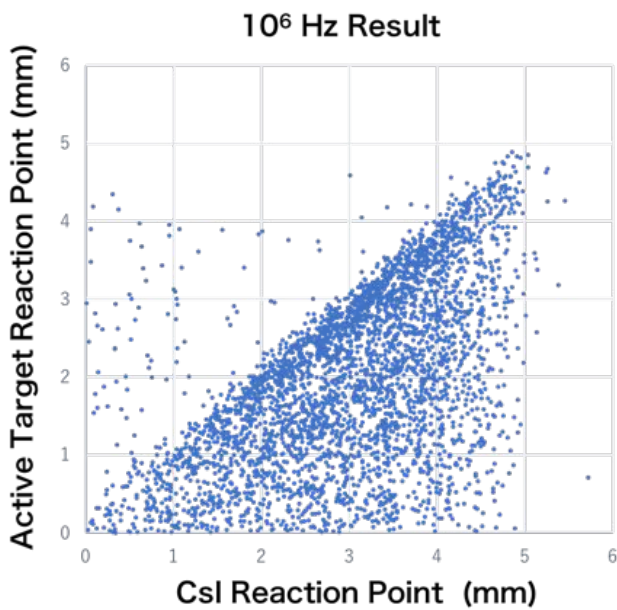


図 4.29 10<sup>6</sup>Hz 結果.Pileup 対策無し

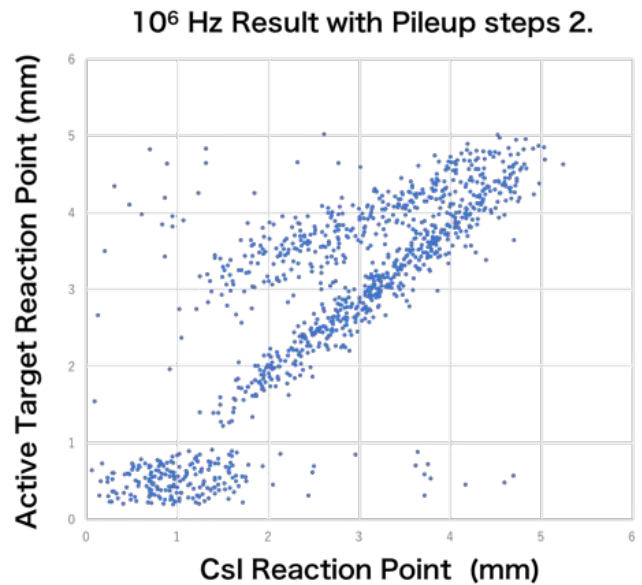


図 4.30 10<sup>6</sup>Hz 結果.Pileup 対策 2.『シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨てない手法』

図 4.29 は、10<sup>6</sup> Hz の時の反応点特定の結果である。係数 1 の正比例の関係にあるラインの右下は Pileup の影響を受けていることがわかる。左上は 10<sup>4</sup> Hz の時と同様にその他の原子核反応の影響が表れている。この結果を『2. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨てない手法』で Pileup 対策を行った結果が、図 4.30 である。右下の Pileup の影響は消えているが、その左上に相関のあるラインが現れている。また、反応点 0-1 mm の反応点特定に問題があることが明らかにわかる。この原因は、『2. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨てない手法』の反応点特定の簡易判定に問題があることや 1 枚目で反応が起こった時の反応点特定の手法に問題があることを意味している。

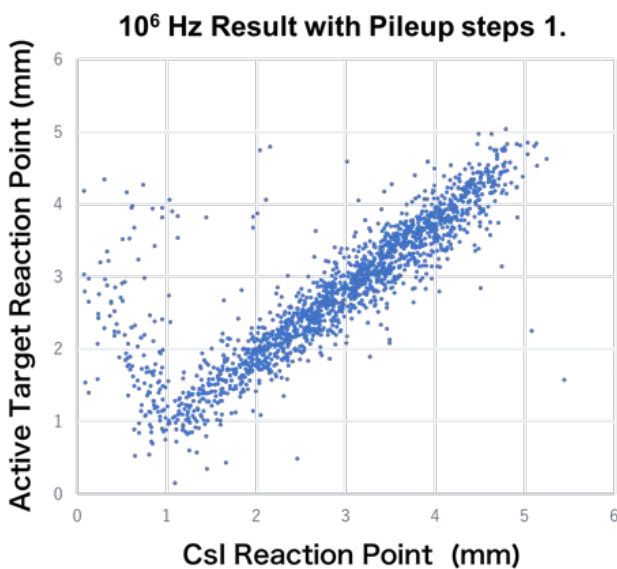


図 4.31 10<sup>6</sup>Hz 結果.Pileup 対策 1.『シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨て反応点の精度を高める手法』

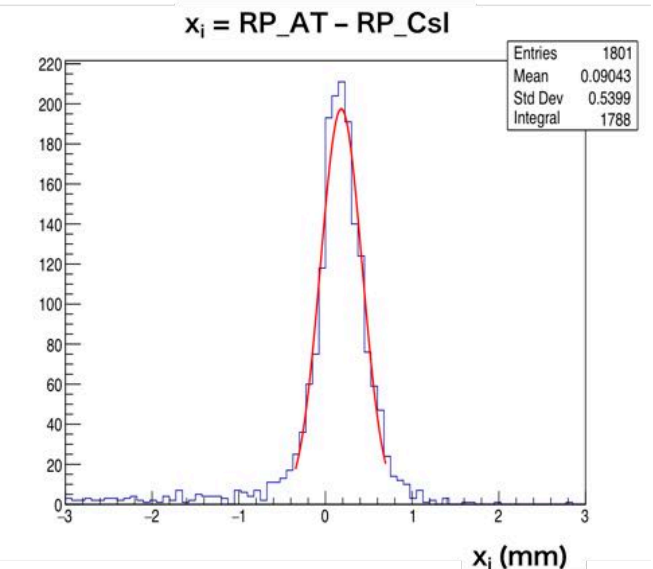


図 4.32 反応点 (アクティブ標的) - 反応点 (CsI) の 1 次元ヒストグラム.Pileup 対策 1 を使用した場合.

図 4.31 は、『シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨て反応点特定の精度を高める手法』で解析した結果である。右下の Pileup の影響は消え係数 1 の正比例の関係にあるラインに移動していることが確認できる。しかしながら、アクティブ標的 1-3 mm に意味のある相関が表れた。この原因は、0-1 mm で反応が起きた場合を切るアルゴリズムにあり、その中身は、1 枚目で反応した時のエネルギーデポジットと、1 枚目以外で反応が起き同時に 1 Pileup も起きる時のエネルギーデポジットが、同じエネルギー領域にあることである。図 4.32 は、図 4.31 の差を 1 次元ヒストグラムにした結果である。この時の位置分解能は、0.24 mm で統計数は 1801 となり、Pileup 対策なし (統計数 3700) の統計数から 48.68 % 減となった。10<sup>6</sup> Hz のケースでも、目標の位置分解能 (0.29 mm) は達成できたが、統計量の大幅な減少が課題である。

## 第 5 章

# 結論・展望

本論文では、 $10^7$  Hz に起因する Pileup に対応でき、かつ、10 mm 厚のポリエチレン標的を使用した場合でも、位置分解能 0.29 mm を実現できることを目標とした多層プラスチックシンチレータ型アクティブ標的の開発を行った。アクティブ標的は、標的中の反応点の特定によって位置分解能の向上を図ることを開発コンセプトとした。アクティブ標的の開発は初期段階であったため、ハードウェアとソフトウェアの両方を新規で開発した。アクティブ標的のハードウェア設計では、1 回目の性能評価実験の反省を活かし、シンチレータと PMT の接地圧の向上やシンチレータ中心と PMT 中心が重なっていることを線源で確かめられる機構を実装した。ソフトウェア開発では、実際のアクティブ標的を想定した原子反応の計算プログラムを開発し、エネルギーから標的中の反応点を特定できるアルゴリズムを開発した。開発したアクティブ標的は東北大学 CYRIC で実験を行い、反応点特定の精度を評価した。 $10^4$  Hz の場合、位置分解能 0.19 mm を達成した。なお、この結果のバックグラウンドには、準弾性散乱である  $^{12}\text{C}(p, pp)^{11}\text{B}$  の反応が混入しているため、その原因の解明と対策が今後必要となる。 $10^6$  Hz の場合、『1. シンチレータ 1 枚目のイベントを切り捨て反応点特定の精度を高める手法』で解析した結果は、位置分解能 0.24 mm、統計数の減少率 48.68 % になった。目標とする位置分解能は 0.29 mm であるため、この点は克服されているが、今回の実験は 10 mm 厚ではなく 5 mm 厚の標的を使用していることや、ビーム強度が本実験の  $10^7$  Hz よりも 1 桁少ない値で行われているため、今後の開発ではそれらの影響を考慮しなければならない。また、本実験では少ない統計量であることがシミュレーションで予想されているため、統計の数を減らさない Pileup 対策のアルゴリズム開発が必要となる。その他、 $10^7$  Hz のビーム強度で生じる問題 (PMT のゲイン変化特性やシンチレータの損傷) を得られた実験データから検証していく必要がある。また、アクティブ標的の位置分解能を評価する際に、外部検出器の位置分解能の影響を受けているため、その影響がどのくらいであるか評価すること、つまり、外部検出器の位置分解能をエネルギー分解能から求めることが必要である。

# 謝辞

王恵仁さんは、修士論文執筆のために1回目の失敗の後に2回目の実験をして頂きました。そのおかげで修士論文を書くことができ大変感謝しております。日々の研究においても多くのことを仁さんから学びました。共同研究者の寺嶋知さんは、アクティブ標的の性能評価実験を主導して頂き、寺嶋さんがいなければ実験は成立していなかったほど力を貸して頂きました。青井考さんは、解析結果改善のための最適なアドバイスをして頂き、そのおかげで見違えるほど結果がよくなりました。修士の2年間の中で一番楽しかった思い出は、青井さんと研究内容に関して議論したことです。同じ研究グループの trong さんは、ROOT 初心者の私に使い方を1から教えてくださり、解析の手法に関しても多くのアドバイスをしてくださりました。trong さんはいつも優しく頼りになる存在でした。東北大学での実験では、CYRIC の松田洋平さん、伊藤正俊さん、石橋陽子さん、岡本潤さん、理化学研究所から西隆博さん、京都大学から松本翔汰さんのお力をお借りして実験を行うことができました。実験に協力して頂いた皆様には大変感謝しております。M1 の時には、田中純貴さんに大変お世話になりました。甲南大学の実験に誘って頂き、実験を通して多くのことを学ぶ機会を提供していただきました。実験終了後は、シミュレーションのための計算プログラムの作り方を教えて頂き、その計算プログラムは私の研究テーマの根幹となる反応点特定のアイディアに繋がりました。加速器グループの鎌倉恵太さんからは、位置分解能の評価方法に関してアドバイスを頂きました。副査の神田浩樹さんは、修士論文の審査の過程で、解析結果改善のために親身になって付き合ってくださいました。そのほか RCNP にいる多くの人からご指導いただきました。嶋達志さんは実験 TA を通して回路周りを教えていただいたほか、興味深い物理の話をしてくださいました。吉田英智さんは、物理のモチベーションパートの資料を提供して頂いた他、勉強会では多くの質問を投げかけてくださり、吉田さんから深く考える必要性を感じるきっかけをいただきました。坂口治隆さんは、解析内容に関して相談に乗って頂きました。M1 の時には、井上梓さんが実験に誘ってくださり、そこで実験とはどういうものなのか感じる機会を頂きました。民井淳さんは、特に勉強会で多くのアドバイスをしていただきました。小林信之さんは、非常に有能なウェブサイトを通じて”陰ながら勝手”に支援をしていただきました。同期の皆さんとは、研究に限らず私生活でもお世話になりました。特に、理論部の星君、はしもん、茶園君とは研究分野は異なってはいましたが、一緒に食事をしたり卓球をしたりできたおかげで、無味乾燥になりがちな毎日にちょっとした楽しみを見出すことができました。事務の大石さんは、自転車京都旅行や城崎温泉旅行など、旅行友達として仲良くさせて頂きました。研究をここまで進めることができたのは、多くの核物理研究センター職員の方々のおかげです。

最後に、大学院進学をサポートしてくれた両親に深く感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] H.J.Ong et al., Phys. Lett. B 725 277-281,(2013)
- [2] 中村隆司,“不安定核の物理: 中性子ハロー・魔法数異常から中性子星まで (基本法則から読み解く物理学最前線)”,(2016)
- [3] W. Horiuchi and Y. Suzuki, Phys. Rev. C 76, 024311,(2007)
- [4] D.R. Tilley et al.“Energy Levels of Light Nuclei A = 5”,(2001)
- [5] R.Subedi et al, Science 320 (5882), 1476-1478,(2008)
- [6] 谷畑勇夫 “核構造におけるテンソル力の効果と隠された相互作用の研究”,(2014)
- [7] 那須祐,“崩壊 $\alpha$ 粒子測定による炭素 13 の $\alpha$ クラスターガス状態の探索”,(2017)
- [8] 浜松ホトニクス,“LINEAR ARRAY MULTIANODE PMT ASSEMBLIES AND MODULES”,(2015)
- [9] <https://www.polyplastics.com/jp/product/lines/pom/index.html>
- [10] ポリエチレンの基礎. サンファイン技術資料 ; PE002. 旭化成.<http://www.ak-sunfine.com/jpn/PEpdf/pe-002.pdf>
- [11] ELJEN Technology,“Organic scintillatos physical constants and cross-reference”
- [12] 柴田望洋,“明解 C 言語入門編”,(2004)
- [13] <http://www.epii.jp/articles/note/physics/relativity/generallorentztrans>