

荷電変化断面積を用いた
C同位体の荷電半径の研究

奈良女子大学 人間文化研究科
博士前期課程
物理学専攻

谷口愛実

平成23年2月21日

概要

核破砕反応を利用した RI (不安定核) ビーム法が開発されて以来、安定線から離れた不安定核における核反応の研究が急速に展開されてきた。その後、不安定核は、新たな魔法数の出現等の面白い性質や、中性子スキンや中性子ハローなどの新たな核構造を持つことが発見され注目を浴びている。これら不安定核の核構造の解明には、核内核子の陽子及び中性子の密度分布の情報が必要である。

不安定核な原子核の陽子分布と中性子分布を独立に決定するためには、物質半径と陽子分布の半径 (荷電半径) の決定が必要である。物質半径は反応断面積及び相互作用断面積の測定により決定されてきた。一方、陽子分布半径は、アイソトープシフトの測定により決定されてきた。ところが、ホウ素からネオンまでの核では、陽子分布の半径は、重心運動の取扱いの不定性の為に実験的に決定することが困難である。この問題を解決するために、荷電変化断面積による測定法が導入された。荷電変化断面積はホウ素からネオンまでの核にも適応でき、アイソトープシフト法よりも容易に核半径を導出できると期待されている。

本研究の目的は、荷電半径を導出することをめざして、炭素同位体の荷電変化断面積 (Charge Changing Cross Section : CCCS) を測定することである。

実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP) の EN コースで 2 度にわたって行った。一回目は 2009 年 10 月、二回目は 2010 年 9 月に行われ、それぞれお実験では、一次ビームとして 80A MeV の ^{18}O 及び、80A MeV の ^{22}Ne を用いた。一次ビームを Be 標的と核破砕反応させ種々の RI ビームを生成し、その中から本研究の対象となる炭素同位体を電磁石や Al degrader からなる入射核破砕片分離装置を用いて選別した。分離した粒子を 2 次ビームとして、 ^{12}C 標的に入射し、トランスミッション法を用いて CCCS を決定した。

一回目の実験では $^{12,15}\text{C}$ の荷電変化断面積 (CCCS) を導出したが、解析による系統誤差が約 8 % もあり統計的にも不十分であったので、二回目の実験では、さらに精度をあげるために、統計の改善及び検出器の改善、実験手法の改良を行った。

本論文では、この実験手法の有効性の検証と $^{13,15}\text{C}$ の CCCS 測定の結果を述べる。

目次

| | | |
|------------|---|-----------|
| 第1章 | 序 | 1 |
| 1.1 | 背景 | 1 |
| 1.2 | 荷電変化断面積 (Charge Changing Cross Section: CCCS) | 2 |
| 1.3 | 目的 | 3 |
| 第2章 | 実験手法・実験 | 4 |
| 2.1 | トランスミッション法 | 4 |
| 2.2 | 不安定核ビームの生成 | 5 |
| 2.2.1 | 原理 (RI ビーム生成法) | 6 |
| 2.3 | 実験装置 (核破碎片分離装置) | 8 |
| 2.4 | 入射粒子識別 | 9 |
| 2.4.1 | ΔE -TOF による測定原理 | 10 |
| 2.4.2 | 散乱標的上流の検出器系 | 11 |
| 2.5 | 2次標的 (散乱標的) | 14 |
| 2.6 | 2次標的通過後の粒子識別 | 14 |
| 2.6.1 | 散乱標的下流の検出器系 | 14 |
| 2.6.2 | ΔE - ΔE - ΔE -TKE による測定原理 | 16 |
| 2.7 | 測定回路 | 20 |
| 2.7.1 | イベントトリガー | 20 |
| 2.7.2 | TOF 回路 | 21 |
| 2.7.3 | Pile Up rejection | 22 |
| 第3章 | Veto カウンターの開発 | 23 |
| 3.1 | 目的 | 23 |
| 3.2 | Veto カウンターの製作 | 23 |
| 3.3 | Veto カウンターの性能評価 | 26 |
| 第4章 | データ解析 | 30 |
| 4.1 | 解析の手順 | 30 |
| 4.1.1 | 各検出器の Calibration | 30 |
| 4.1.2 | TDC の Calibration | 30 |
| 4.1.3 | ADC Calibration | 31 |
| 4.2 | 入射粒子の定義 | 33 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.2.1 | 不純物の混合 | 41 |
| 4.2.2 | 散乱標的の下流の粒子判断基準 | 44 |
| 4.3 | 誤差 | 51 |
| 第5章 | 結果・議論 | 53 |
| 5.1 | 結果 [荷電変化断面積の決定] | 53 |
| 5.2 | 結果からの考察 | 56 |
| 5.3 | 第一回実験結果 | 62 |
| 5.4 | 実験結果の比較 | 63 |
| 第6章 | 結論 | 65 |
| 付録A | 双極磁石 D1, D2 の磁場設定 | 68 |
| 付録B | 式の導出 | 69 |
| B.1 | CCCS の導出 | 69 |
| B.2 | ベーテプロッホの式 | 69 |
| B.2.1 | Degradер 通過後の双極磁石による分析 | 70 |
| 付録C | データ収集系回路の全体図 | 72 |
| 付録D | $^{13,15}\text{C}$ の CCCS の結果 | 73 |
| 付録E | F0 ターゲット ラダーのアライメント | 78 |
| E.1 | アライメント作業の詳細 | 79 |
| E.1.1 | 作業の手順 | 79 |
| E.1.2 | Target 駆動系線形抵抗の交換 | 79 |
| E.1.3 | PC 制御の確認 | 80 |
| E.1.4 | セオドライトの設定 | 80 |
| E.1.5 | Target position calibration | 81 |
| E.1.6 | まとめ | 83 |

第1章 序

1.1 背景

原子核は陽子と中性子から成り、陽子数 Z と中性子数 N の組合せにより核の性質は異なる。陽子数 Z によって元素の種類が決定し、現在、陽子数 1 の水素から陽子数 92 のウランまでの元素が天然に存在すると確認されており、それより多くの陽子数をもつものは人工的に作られたものである。それぞれの元素には、同じ陽子数で異なる中性子数をもつ同位体が存在し、自然に変化することのない安定な核を安定核、時間が経つと崩壊し、別の核になってしまう核を不安定核と呼ぶ。原子核の研究は、粒子や重イオンを衝突させその散乱や反応を観測することによってなされてきた。しかし、近年まではその研究対象のほとんどが安定核同士の核融合反応や直接反応過程によって生成することができる安定核近傍に限られていた [1]。

1980 年代半ばに谷畑勇夫氏を中心とする研究グループによって、寿命が短い不安定核をビームとして利用する「RIビーム法」が発明された。これを機に、中高エネルギー重イオン反応を用いて β 安定線から遠く離れた不安定核を生成し、これを 2 次ビームとして種々の核反応を起こさせる実験が盛んに行われるようになった [2]。

不安定核には安定核にはみられないユニークな性質が発見され、その中に軽い不安定核の研究を急速に発展させる契機となった中性子ハローと中性子スキンがある。中性子ハローとは、中性子過剰核でその断面積が異常に大きいことから見いだされ、その中性子密度分布が長い裾を持つものをいい、芯の核の周りを 1 ないし 2 中性子の広くひろがった雲が覆っている描像を意味する。また、中性子スキンとは、中性子ハローのように薄くひろく広がった中性子の雲ではなく、核表面に通常の密度をもつ中性子の層が形成されているものである。図 1.1 にその概念図を示す。単に中性子数 N が陽子数 Z よりも大きいから生じるものではなく、今後より重い不安定核の研究が可能になるにつれて広範に見いだされるものと期待されている [3, 4]。

中性子と陽子という 2 種類のフェルミオンからなる有限量子系としての原子核の特質をより深く理解するためにはそれぞれの核内核子の半径を比較することが重要である。中性子スキンの存在は、中性子過剰核の相互断面積の測定によって Glauber 理論から導かれる相互作用断面積と中性子分離断面積の間に成り立つ関係より提唱された。[5]

また、反応断面積の測定から核子分布半径を導出する実験も行われてきた [6]。しかし、荷電変化断面積より荷電半径を導出することは本研究が初めての試みである。軽い元素においては、アイソトープシフト測定による荷電半径の導出がなされたが、多体効果の取扱いの不定性のためホウ素からネオンまでの軽い核では、測定値から抽出した陽子半

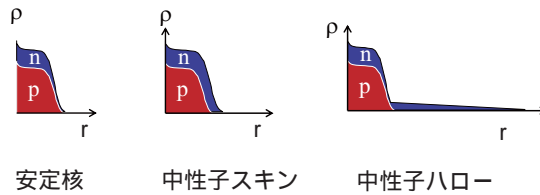


図 1.1: 中性子ハローと中性子スキン (概念図): 縦軸は密度を示している。横軸は中心からの距離を示している。

径の誤差を大きくする。荷電変化断面積の測定は、次章で詳しく述べるようにトランスミッション法を用いて粒子の計数から導出できる。この手法が、有効なものであるといえたとさらに広範囲にわたった元素の荷電半径のデータをえることができるので、不安定核の構造の研究がより発展すると期待している [7]。

1.2 荷電変化断面積 (Charge Changing Cross Section: CCCS)

中性子過剰核の研究では中高エネルギー領域での重イオンビームを利用した実験がなされている。以下の図に中高エネルギー領域に特徴的な原子核・原子核衝突における反応の定義を示す。

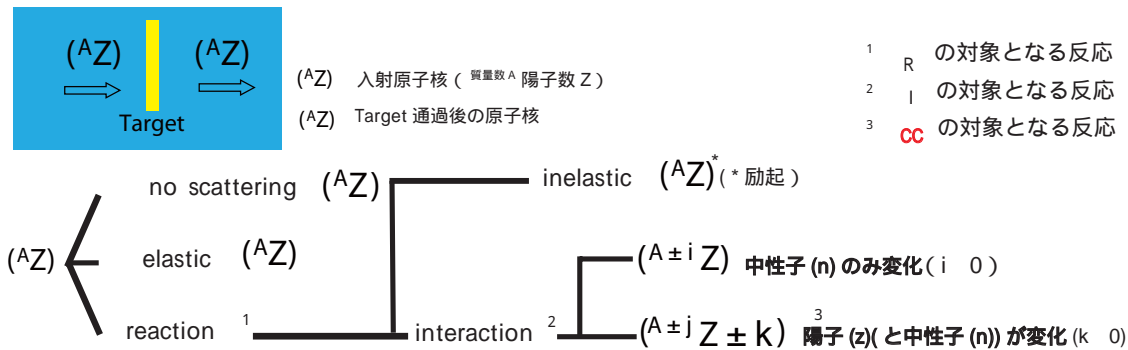


図 1.2: 中高エネルギー領域における重イオン反応の定義

図 1.2 中 σ_R は反応断面積、 σ_I は相互作用断面積、また、 σ_{cc} は荷電変換断面積を示している。したがって荷電断面積は入射粒子の陽子数 Z が標的通過後変化したものを示す。 σ_R は σ_I と非弾性散乱を含める反応で定義されるが、入射粒子のエネルギーが数百 MeV/nucleon ~ 数 GeV/nucleon 程度の高エネルギー領域 (相対論的エネルギー) では、非弾性散乱の断面積は相互作用断面積のと比較して小さいことが実験的に確認されている。したがって、測定がより簡単である相互作用断面積を反応断面積として近似的に使われている。

断面積とは、それぞれの反応(相互作用)の起こりやすさを面積単位で評価する値である。ここで、十分に薄い厚さ dx [g/cm^2] の標的に対して、粒子ビームが入射され、入射粒子と原子核の反応が起こる場合を考える。

厚さ dx の標的中で反応の起こる確率を入射粒子数 N [個] が 1 g あたりの標的核の個数 n [個/ g] の標的中で dx 進んだときの入射粒子の微少な減少量 dN を表すと以下のような式で示すことができる。

$$-dN = \sigma N n dx \quad (1.1)$$

標的の厚さ x [g/cm^2] として入射粒子数 N_0 中、標的通過後 N が反応を起さずに残ったとすると式 1.1 より以下のような式が得られる。

$$N = N_0 \exp(-\sigma n x) \quad (1.2)$$

したがって粒子の計数により断面積が決定できることがわかる。本実験手法となる具体的な荷電変換断面積の決定については 2.1 で述べる。

測定した断面積から荷電半径の導出は、近年の研究よりグラウバー理論を用いると、うまく再現できることが知られている [8, 9]。

1.3 目的

本研究の目的は C 同位体の安定核近傍から C 同位体の未だ陽子密度分布の知られていない領域まで荷電変換断面積の値を決定し、C 同位体における不安定核の核構造の研究に寄与することである。

第2章 実験手法・実験

本実験は、不安定核を入射ビームとして散乱標的と衝突させ、その荷電変化断面積 (CCCS) をトランスミッション法によって測定する。本章では、トランスミッション法の原理と実験装置を以下のように順を追って述べる。初めに、本研究のテーマとなる CCCS の測定法を述べる。

2.1 トランスミッション法

本実験の CCCS の測定手法は、トランスミッション法である。トランスミッション法とは、入射粒子と標的通過後透過してきた粒子 (反応をおこさなかった粒子) の計数から断面積を導出する方法である [10]。図 2.1 にトランスミッション法の概念図を示す。

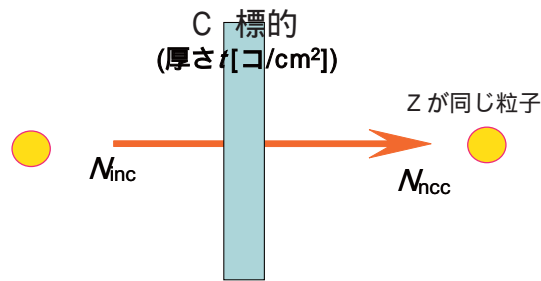


図 2.1: トランスミッション法による CCCS の測定概念図

この手法は、入射粒子が標的と反応を起こした粒子に比べ、反応を起こさなかった粒子はエネルギーや角度分布の広がりが小さいため、計数しやすいことが利点である。

本実験の CCCS の測定においては、標的に入射した粒子数 N_{inc} と標的で荷電変化反応を起こさなかったもの (Z が変化していないもの) N_{ncc} を測定する。入射粒子 N_{inc} 個が厚さ t [cm²] の標的を通過したとき、 N_{ncc} 個の粒子が荷電変換反応を起こさなかったとすると式が得られる。

$$N_{ncc} = N_{inc} e^{-\sigma_{cc} t} \quad (2.1)$$

この式は式 1.2 の標的の厚さ x [g/cm²] を標的核の単位面積当たりの個数で置き換えるこ

とによって得られる。

$$t = xn \quad (2.2)$$

$$n = N_A/A \quad (2.3)$$

N_A はアボガドロ数: 6.02×10^{23} [mol] および A は原子量 [g/mol] である。これより入射粒子と荷電変換反応を起こさなかった粒子の計数から荷電変換断面積 CCCS は以下の式で導かれる。

$$\sigma_{cc} = \frac{1}{t} \ln \frac{N_{inc}}{N_{ncc}} \quad (2.4)$$

しかし実際には、検出器中で荷電変換反応を起こしてしまった粒子などが含まれ、標的以外の部分で生じた反応を直接区別することができない。そこで、実験では標的を抜いた状態で同様に測定を行い、標的以外で荷電変換反応をおこしたものを補正するために以下の式を定義して、CCCS を求めた。

$$\sigma_{cc} = \frac{1}{t} \ln \frac{\gamma_0}{\gamma} \quad (2.5)$$

$$\gamma_0 = \frac{N_{0ncc}}{N_{0inc}}, \quad (\text{標的なし}) \quad (2.6)$$

$$\gamma = \frac{N_{ncc}}{N_{inc}}, \quad (\text{標的あり}) \quad (2.7)$$

この式の導出の過程は付録に述べる。

この補正を行うことは、標的以外での反応の効果をとり除くだけでなく、解析方法においての系統誤差を小さくする面でも非常に有効である。

上に述べたように、荷電変化断面積をトランスミッション法で測定するには対象とする原子核を入射粒子としているので、安定核のものから中性子を過剰にもつ不安定核までが測定対象になっている。不安定核を入射ビームとして扱うことは、RIビーム法によって可能になる。しかし、実際にRIビーム法より生成し分析された入射ビームの中には、測定対象の粒子以外のものが含まれてくる。したがって、入射粒子の数を得るためには、この中から入射粒子を識別し、正確に入射粒子を定義しなければならない。本実験の入射粒子の計数を得るための方法については、以下の2.4に詳細に述べる。また、2.5では本実験で用いた散乱標的について述べる。入射粒子が散乱標的通過後に荷電変化反応を起こさなかったものを選び出し、計数をする。

さらに、2.6では、荷電変化反応を起こさなかった粒子を正しく選択するために用いた検出器とその手法について述べる。具体的な実験の情報(磁場設定値、実験回路図)は付録に記載した。

2.2 不安定核ビームの生成

荷電変化断面積を用いて、安定線から遠く離れた不安定核の研究を行うには、RIビーム法を用いて測定対象とする入射粒子を得る必要がある。このRIビーム法の原理と入射

粒子を得るために用いた本実験の装置について述べる。

2.2.1 原理 (RIビーム生成法)

RIビームは1次ビームと1次標的との核破砕反応によって生成される [11, 12]。本実験では、80A MeV に加速された ^{22}Ne と1次標的 Be の核破砕反応より測定対象とする $^{12,13,15}\text{C}$ を生成した。

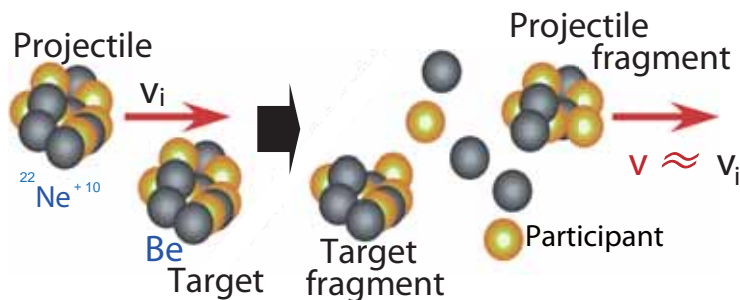


図 2.2: 核破砕反応の概念図

ここで核破砕反応の特徴を述べる。 $E/A > 50$ MeV における実験事実より、標的と核破砕反応を起こした粒子の運動量の分布はガウス型でその核子あたりの中心運動量は入射粒子の核子あたりの運動量と同じでその幅 σ は、以下の式から得られる。

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{\frac{F(A-F)}{A-1}} \quad (2.8)$$

$$\sigma_0 \sim 90 \text{ MeV}/c \quad (2.9)$$

A 核破砕反応前の原子核の質量数

F 反応後の質量数

σ 運動量分布の幅

式 2.9 より、実際 ^{12}C の場合を挙げると、215 MeV/c ほどの広がりをもつことになる。したがって破砕反応によって生成される種々の原子核は入射核とほとんど等しい速度で放出されるという特徴をもつ。

破砕反応後、種々の生成核が混ざりあった状態から、目的の核を分離する必要がある。その分離方法は、図のように運動量を分析する磁気分析器の磁気剛性 (Magnet Rigidity) とその間の Al Degradar を用いて行う。以下にその分離の原理を述べる。

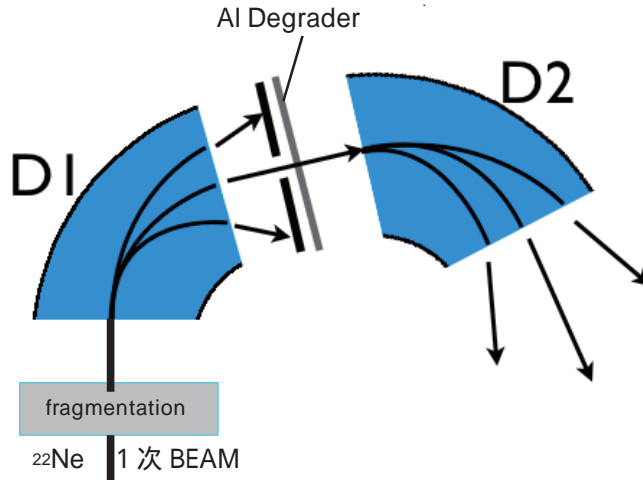


図 2.3: 分離装置の原理

双極磁石による磁気剛性 (magnetic Rigidity) 分析

磁場 B [T] 中を軌道半径 ρ [m] で円運動をする運動量 p [MeV/c]、電荷 q [c] の magnetic Rigidity ($B\rho$) は式 (2.10) によって求まる。また、破碎反応後の種々の粒子の速度はほぼ一定であるので、放出される核の運動量はその質量数 A に比例する。さらに、放出される核の電荷は Ze [c] であるので、曲率 ρ は式 (2.11) のような関係をもつ。

$$B\rho = p/(300q) \quad (2.10)$$

$$\rho \propto (A/Z)\beta \propto A/Z, \quad \beta = V/c \quad (2.11)$$

p 運動量

q 電荷

V 粒子の速度

これより磁場を用いて Rigidity($B\rho$) の違いによる核種の分離ができる。

Al Degradator での減速

原子核が物質中を通過すると、電荷に応じて異なった減速をする。厚さ d 薄い Degradator 中のエネルギー損失は、ベータブロッホの式 (付録参照) より非相対論的な近似を適用すると、入射粒子の運動エネルギー E と原子番号 Z に依存する。

$$\Delta E \propto \frac{Z^2 d}{E} \quad (2.12)$$

このエネルギー損失によって運動量の異なりが生じるので Degradер を通過した後、もう一度磁場を通過させると式に示すような関係式が得られ、より純度のよい入射粒子を生成できる。

$$B\rho_2 \propto \frac{A^{2.5}}{Z^{1.5}} \quad (2.13)$$

式の導出については付録に述べる。

以上より核破砕反応により生成した種々の粒子は、2重にふるいをかけられるので特定の A 及び Z をもつ粒子を選び出すことができる。

2.3 実験装置 (核破砕片分離装置)

ここでは、2.2.1 で述べた RI ビームを生成するために用いた施設及び装置について述べる。



図 2.4: RCNP 実験施設の概略図

本実験は、大阪大学核物理研究センター (RCNP) の不安定核ビームライン (EN コース) で行った。AVF サイクロトロン及びリングサイクロトロンによって加速された $80 \text{ MeV/nucleon} (\beta \simeq 0.39)$ 、およそ $\sim 0.5 \text{ pnA}$ 、 $3 \times 10^9 \text{ cps (count per second)}$ の ^{22}Ne を一次ビームとして用いた。

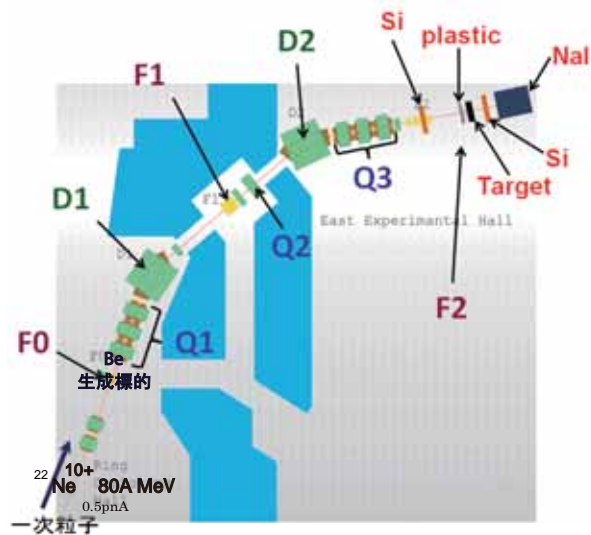


図 2.5: 本実験のビームラインとセットアップ

2.2.1 で述べた入射核破砕分離装置は図中の F0 から F2 までを指す。サイクロトロンで加速された 1 次粒子である ^{22}Ne が F0 中の Be 生成標的と核破砕反応を起こす。それによって生成された核種の中から特定の核種を F1 を挟んだ 2 台の双極磁石 (D1, D2) と F1 中の Al ディグレーダによって分離する。

図 2.5 は本実験の全体のセットアップを示すが 2 次ビームラインについては以降の章で述べる。

核破砕片分離装置によって目的の入射粒子を生成分離した後、D2 下流の 3 台の四重極磁石によって収束する。この装置によって選ばれた特定の RI の中から目的となる核種のみを ΔE -TOF によって識別するために 2 次標的 ^{12}C の上流には、F2 シリコン検出器と F2 プラスチックシンチレータを設置した。またここには記述されていないが、F2 中には 2 台の平行平板型電崩計数器 (PPAC)、F2 プラスチックシンチレータの上流には Veto カウンターを設置した。これらの入射粒子識別については 2.4 で詳しく述べる。二次ビームを二次標的に入射させた後、その散乱粒子は、3 枚のシリコン検出器と NaI(Tl) シンチレータを用いて、 ΔE - ΔE - ΔE -TKE (ΔE はエネルギー損失、TKE は粒子の残りの全エネルギー) によって識別した。この散乱標的の下流の粒子識別についての詳細は 2.6 で述べる。

2.4 入射粒子識別

トラスミッション法によって CCCS の測定を行うためには入射粒子の数を得る必要がある。2.2 でも述べたが目的となる入射粒子は 2 次ビームであり、核破砕反応によって生成されたものである。入射核破砕片分離装置により分離された粒子の中には、 A/Z の近い粒子など、目的とする核種以外の核も同時に入射粒子に含まれてくる。したがって、こ

の中から目的の粒子を識別し、精度よく入射粒子を定義しなければならない。そのために本実験では TOF- ΔE による入射粒子識別法を用いた。また、より純度のよい入射粒子を定義するために、F0 から F2 プラスチックまでの TOF と E 以外にも位置情報も用いて入射粒子を定義する。ここでは入射粒子識別の原理と入射粒子の定義に用いた検出器について述べる。

2.4.1 ΔE -TOF による測定原理

この手法は、F2 プラスチックシンチレータと RF との時間差情報より求めた粒子の飛行時間 (Time Of Flight) と F2 に設置したシリコン検出器からエネルギー損失 (ΔE) より粒子を識別する方法である。それぞれの物理量からは、以下のような関係式が得られる。

$$\text{TOF} \propto \frac{1}{\beta} \quad (2.14)$$

$$\Delta E \propto \frac{Z^2}{\beta^2} \quad (2.15)$$

ΔE は、式に示したベータブロッホの式より得られる。これより TOF は粒子の速度 β のみに依存し、 ΔE は速度 β と原子番号 Z にのみ依存する。

2.2.2 で述べたように双極磁石の $B\rho$ によって Rigidity の異なる粒子は分離されているため ΔE と TOF による相関図を書くことで種々の粒子を識別することができる。

また、実際の実験データの ΔE -TOF をプロットしたものと実験で用いる設定値からシミュレーションしたものと比較することによってそれぞれの粒子を判断する。

図 2.6 に ^{12}C の粒子識別に用いたシミュレーションによる相関図と実験データを用いたスカッタープロットを示す。

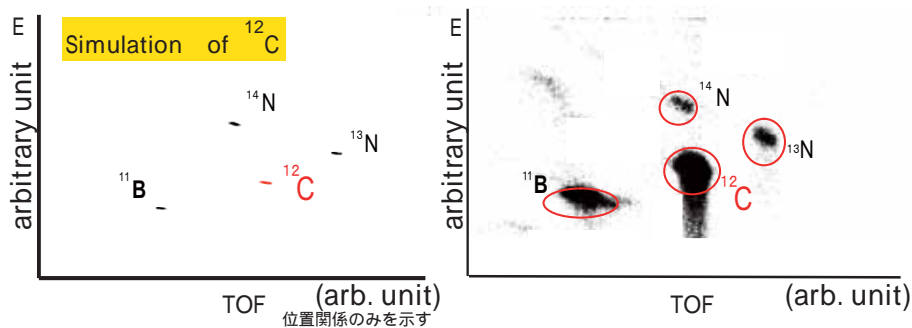


図 2.6: 散乱標的あり 左: シミュレーション結果 (位置のみを示す。), 右: 実験測定結果

これよりそれぞれの粒子を識別できることがわかる。入射粒子を識別した後、その入射粒子について、時間 TOF(ns) 及びエネルギー損失 ΔE (MeV)、位置 X(mm) などの測定

物理量を用いて各スペクトルの範囲を決定し、純度のよい入射粒子を定義する。具体的な入射粒子の選択については、4章で述べる。

2.4.2 散乱標的上流の検出器系

ここでは一次粒子 ^{22}Ne と ^9Be 標的との破砕反応により生成された核種から目的とする入射粒子を識別し、純度よく定義するために用いた検出器について述べる。

本実験の装置の2次標的上流に設置された入射粒子識別用の検出器は、2.2.1で述べたように上流側から、平行平板型雪崩計数管 (F2U PPAC, F2D PPAC)、シリコン検出器 (F2Si)、プラスチックシンチレータ (Veto カウンター、F2プラスチック) である。

以下にそれぞれの検出器について述べる。

平行平板型雪崩計数管 (以下の章より **F2U PPAC**、**F2D PPAC** と呼ぶ)

PPAC とは、薄い2枚の平行電極を3~4mmの間隔で設置し平板は細いたんざく状の多くの電極からなりそれぞれディレイラインに接続されている。全体は、3~50Torrのガス中におかれた図2.7に示すようなものである。

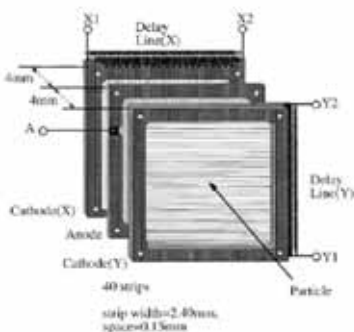


図 2.7: PPAC の構造 [13]

以下にその特徴をまとめる。

1. 透過型の位置検出器としては最もエネルギー損失が少ない。(1.3mg/cm² ~ 4.5mg/cm²)
2. ガスカウンターであるから放射線損傷が少ない。
3. 出力信号の立上り、立下りが速く (3 ~ 6ns)
4. 高時間分解能 (FWHM= 0.1 ~ 1ns)、高計数率 (~ 10⁶cps) の計測が可能である。

5. 欠点は出力が小さく、高エネルギー軽イオン (H,He,Li など) の測定が困難であることである。

荷電粒子が PPAC 内のガスでエネルギー損失する事でガスを電離しイオン-電子対を生成する。そのイオンと電子が Anode と Cathode に印加した電場により電極に移動する。電子は移動する間に別の中性ガスをイオン化するのに十分なエネルギーまで加速され、ガスをイオン化する事で多数のイオン-電子対を生成する。Cathode に誘起された信号は delay-line を通過し、両端から信号を取り出す。

本実験では、PPAC の時間測定から位置情報を得た。得られた TDC の時間信号の差から荷電粒子の通った位置を測定する。

目的の入射粒子は、四重極磁石によって散乱標的の位置で focus するようにした。位置情報をえることで目的の粒子が正しく focus されているかを確認することができる。また、2つの PPAC の設置位置関係より、そのトラッキングによって散乱標的手前に設置した F2 プラスチックシンチレータでの粒子の位置情報も得られる。PPAC の TDC の時間信号の差から位置情報を得る方法とトラッキングについては 4 章で述べる。

シリコン検出器 (F2Si)

入射粒子のエネルギー損失を測定するためにシリコン検出器を F2 に設置した。F2Si の ADC 信号は 2.3.1 で述べた入射粒子識別法での ΔE の情報を得るために必要である。

ここでは F2 で用いたシリコン検出器の動作原理及び特徴を述べる。シリコン結晶中を荷電粒子が通過すると結晶中の空乏層に電子-空孔対が生成され、逆バイアスの印加電圧により電極に集められる。集められた電荷量からシリコン中を通過した荷電粒子のエネルギー損失を得ることができる。また、シリコン検出器の特徴は、イオン化ポテンシャル (energy gap = 1.12 eV) が低く、電子-空孔対が生成される平均エネルギー ~ 3.6 eV は通過粒子が失うエネルギーに比べ非常に小さく多数の電子・空孔対が生成されるのでエネルギー分解能が良いことである。

F2 に設置した使用したシリコン検出器は浜松ホトニクス製の製品であり、48 mm (縦) \times 48 mm (横) \times 0.25 mm (厚さ) である。以下の表に製造番号とその仕様を示す。

表 2.1: 浜松ホトニクス S4276-01

| | |
|------------------------|--|
| Active area | 48 × 48 mm |
| Thickness | 250 ± 10 μm |
| Uniformity thickness | 5 μm |
| Surface orientation | 111 |
| Dead layer thickness | 1.5 μm max.(front side), 2 μm max. (rear side) |
| Full depletion voltage | 100 V _{max} |
| Dark current | 1000 nA _{max} |
| Terminal capacitance | 1000 pF _{typ.} |

プラスチックシンチレータ (F2プラスチックシンチレータ)

F2プラスチックシンチレータ及び2010年に行った実験で新たに開発したVetoカウンターとして、本実験ではプラスチックシンチレータを用いている。Vetoカウンターの開発の目的及び特徴については3章に述べる。

ここではF2プラスチックシンチレータについて述べる。F2プラスチックは粒子の時間検出器としてTDCに入力された情報を読み出す。本実験においてF2プラスチックシンチレータの重要な働きは3つある。1つは、イベントトリガーである。F2プラスチックシンチレータに入射した粒子のみをイベントとして検出する。2つ目は入射粒子識別法でのTOF(粒子の飛行時間)の情報をえることである。TOFの情報はRFの時間信号との差をとることで得られる。TOF情報を読み出す回路については2.7で詳しく述べる。3つ目は、左右の時間差を用いて粒子の位置情報を得ることである。

F2プラスチックの寸法は28mm × 25mm × 100μmで左右両読み出しを行った。ライトガイドは30mm × 50mm × 3mmである。

検出器の時間を測定する検出器としてプラスチックシンチレータは広く用いられている。有機シンチレータの1つであり、荷電粒子が通過すると粒子が失った運動エネルギーのごく一部が蛍光エネルギーに変換され、シンチレーション光を発生させる。

プラスチックシンチレータを用いる利点として、時間分解能がよく発光量が多い(感度がよい)があげられる。その時間応答はプラスチックに依存する蛍光準位への励起を表す時定数とその減衰を表す時定数に依存する[14]。

F2プラスチックに用いたプラスチックシンチレータは、BICRONの製品であり、BC404 (Vetoカウンター: BC400)を使用している。以下の表2.2にそれぞれBC404とBC400の仕様を示す。イベントトリガー及びTOFに使用するF2プラスチックシンチレータには、時間性能のよいBC404を使用した。

表 2.2: BC404 と BC400 の仕様

| Properties | BC-400 | BC-404 |
|---|--------|--------|
| Light output, % Anthracene | 65 | 68 |
| Rise time (ns) | 0.9 | 0.7 |
| Decay time (ns) | 2.4 | 1.8 |
| Pulse width, FWHM (ns) | 2.7 | 2.2 |
| Light attenuation length (cm) | 160 | 140 |
| Wavelength of max. emission (nm) | 423 | 408 |
| No. of H atoms per cm^3 ($\times 10^{22}$) | 5.23 | 5.21 |
| No. of C atoms per cm^3 ($\times 10^{22}$) | 4.74 | 4.74 |
| Ratio H:C atoms | 1.103 | 1.100 |
| No. of electrons per cm^3 ($\times 10^{23}$) | 3.37 | 3.37 |

これらの入射粒子用の検出器を用いた具体的な入射粒子の定義の手順は 4 章で述べる。

2.5 2 次標的 (散乱標的)

CCCS から荷電半径の導出するためには、既知の密度分布をもつ原子核を標的として用いる必要がある。 ^{12}C は中性子数と陽子数が同じで安定な核であり、陽子及び中性子の核子密度分布もよくわかっている。したがって本実験では、散乱標的として ^{12}C を用いた。

また、トランスミッション法を用いて CCCS を決定するためには、散乱標的の厚さを正確に知る必要がある。本実験で用いた ^{12}C 散乱標的の断面積は $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ その厚さは $0.652 \pm 0.001\text{ [g/cm}^2\text{]}$ であった。

2.6 2 次標的通過後の粒子識別

2.1 で述べたように、トランスミッション法では散乱標的通過後、入射粒子が反応を起こさずに透過してきた粒子の計数を測定する。

2.6.1 散乱標的の下流の検出器系

ここでは、散乱標的を通過してきた粒子を識別するために、本実験で用いた検出器について述べる。散乱標的通過後の粒子は、 ΔE - ΔE - ΔE -TKE 法より識別される。

これらの測定量は、散乱標的以下の上流から、3 枚のシリコン検出器を NaI(Tl) シンチレーションカウンターである。以下に実験で用いたそれぞれの検出器について特徴とその原理を述べる。

シリコン検出器 (Si1、Si2、Si3)

散乱粒子のエネルギー損失 ΔE を 3 枚のシリコン検出器を用いて測定する。実験では 3 枚ともすべて同じシリコン検出器を用いた。散乱粒子識別に用いたシリコン検出器の仕様について以下の表に示す。

表 2.3: 絶対最大定格

| 項目 | 記号 | 定格値 | 単位 |
|------|------------|--------|----|
| 逆電圧 | VR_{max} | 200 | V |
| 動作温度 | T_{opr} | 0 ~ 60 | °C |
| 保存温度 | T_{stg} | 0 ~ 80 | °C |

表 2.4: 寸法のおよび電気的特性 $T_a = 25^\circ\text{C}$

| 項目 | 記号 | 最小値 | 標準値 | 最大値 | 単位 |
|-----------|-------|-----|-------|------|---------------|
| 有感領域 | | | 90×60 | | mm |
| 厚さ | | 305 | 320 | 335 | μm |
| 面方位 | | | (111) | | |
| 有感領域厚さ均一性 | | | | 6 | μm |
| 全空乏化電圧 | V_D | | | 120 | V |
| 不感層厚 (表面) | | | | 1.5 | μm |
| 不感層厚 (裏面) | | | | 20 | μm |
| 暗電流 | I_D | | 200 | 1000 | nA |
| 端子間容量 | C_t | | 2000 | 2200 | pF |

また、2.6.2で散乱粒子を 2 枚のシリコン検出器の ΔE - ΔE の相関で識別することを述べたが、相関図より、2 枚のシリコン検出器はチャネリングを起こしていることがわかる。チャネリングとは、荷電粒子が結晶を通りぬける際、結晶原子のポテンシャルを受け、荷電粒子が一定の方向にだけ通り抜けやすくなる現象をいう。結晶面に対して並行に動く荷電粒子は任意の方向に動く粒子に比べて低いエネルギー損失率を示す現象、チャネリングを起こしやすい。チャネリングを起こした粒子の ΔE は、実際よりも小さくなってしまいうため、識別が困難になる。

本実験で用いた Si 検出器は表に示したように面方位 (100) であるため、検出器に対して垂直方向に粒子が入るとチャネリングがより起こりやすくなってしまふ。そこで Si1 ~ 3 を設置する際、5 度傾けることによってこの効果を小さくする工夫を行った。同じ製品である 3 枚のシリコン検出器は、断面の方向も同じにすると、ほぼ同じ比率でチャネリン

グを起こすと考えられる。つまり、1枚目でチャネリングを起こした粒子が2枚目でもまた、チャネリングを起こす確率は乗倍されるためチャネリングを起こした粒子も3枚のシリコンによって識別することができる。

NaI (Tl) シンチレーションカウンター (NaI)

本実験では TKE (Total Kinematic Energy) を測定するために NaI(Tl) シンチレータを Si3 枚の下流に設置した。NaI(Tl) シンチレータは無機シンチレータの1つである。

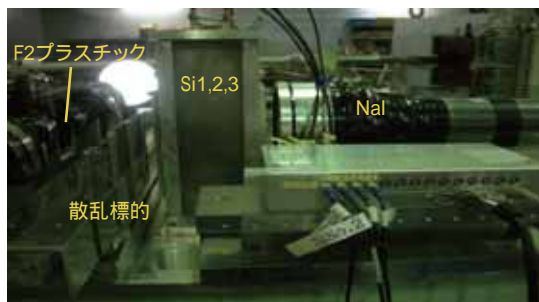


図 2.8: 実験で用いた NaI (Tl) シンチレーションカウンター。

NaI(Tl) シンチレーションの効率は、1 MeV の入射エネルギーに対して約 38000 個の光子を放出する。これは平均すると 26 eV に一個の光子を放出することに相当する。放出光子のエネルギーはほぼ 3 eV(415nm) であり、入射エネルギーに対する放出光子の効率は 12 %程度と比較的高い。

2.6.2 ΔE - ΔE - ΔE -TKE による測定原理

本実験での反応は荷電変化反応であるので、標的通過後に入射粒子の陽子数 Z が変化していないものの計数をする。したがって、標的通過後の粒子から、 Z の変化しなかった粒子を識別しなければならない。そこで散乱標的通過後の粒子識別に ΔE - ΔE - ΔE -TKE による粒子識別法を用いた。

これは、2次標的の下流に設置された3枚のシリコン検出器と NaI (Tl) シンチレータを用いて行う。つまり3枚のシリコン検出器を通過したときのエネルギー損失 ΔE と NaI (Tl) に入射した粒子の全エネルギーを用いる。実験の設定値は NaI (Tl) シンチレータ中ですべての粒子がとまるように決めてあるので、NaI (Tl) シンチレータでの情報は粒子の全運動エネルギー (TKE) として用いることができる。

散乱標的後の粒子識別を行うにあたって、その解析の方針をしっかりと定義しておかなければいけない。検出器で得られる情報はそれぞれの物理量のスペクトルであり分布

をもつ。そのため、その分布の何%までを採用するのか、また、検出器中で反応がおこった粒子の反応を含めるか否か、という定義の違いが生じる可能性がある。この定義の違いによる誤差は、2.1で述べたように散乱標的の有無によって補正されるが、すべてのデータに対しては同じ方針で判断する必要がある。したがって、標的通過後の粒子の判断基準と手順は予め定義しておく。以下に ΔE - ΔE - ΔE -TKEによる粒子識別法を用いて決定した解析手順を行うための判断基準について述べる。

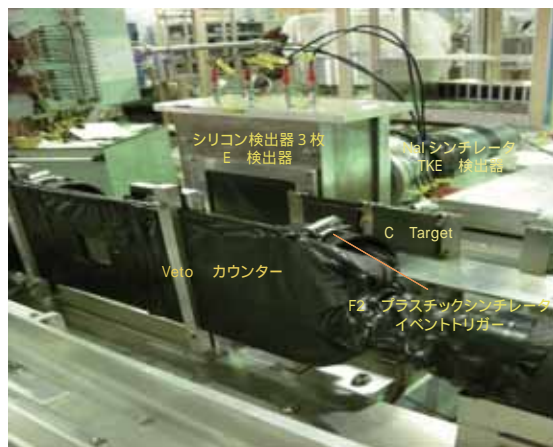


図 2.9: 散乱標的の下流の検出器の写真

本実験ではそれぞれ2つの検出器を組み合わせた相関をとることによってそれぞれにおいて判断基準を設ける。ここで用いた2つの検出器の組み合わせ (ID1 ~ 5) をそれぞれ以下に定義する。

ID1 Si1-Si2 の相関 (ΔE - ΔE)

ID2 Si2-Si3 の相関 (ΔE - ΔE)

ID3 Si1-Si3 の相関 (ΔE - ΔE)

ID4 Si3-NaI の相関 (ΔE -TKE)

ID5 Sium-NaI の相関 (ΔE_{sum} -TKE) Sium= ΔE (Si1)+ ΔE (Si2)+ ΔE (Si3)

ID1, 2, 3は2枚のシリコン検出器で ΔE - ΔE のスキャットプロットをみるためのものである。 ΔE はZAだけでなく β にも依存するので、単独の ΔE 測定のみでは識別できない。また、シリコン検出器3枚を使うことで、そのうちの1枚で何らかの原因で判断できない場合、残りの2枚で識別できる。

粒子の個数を決定するための具体的な判断基準については4.1.3で述べるが、ここではID1～3までの相関から判断できる散乱粒子の反応について述べる。初めに、 ΔE - ΔE 相関について述べる。ID1, 2, 3はそれぞれ違うシリコン検出器の組み合わせだが、反応の見え方は同じであるのでここでは例として ^{12}C を入射粒子としたときのID1でみた実際の実験データを図2.10に示す。

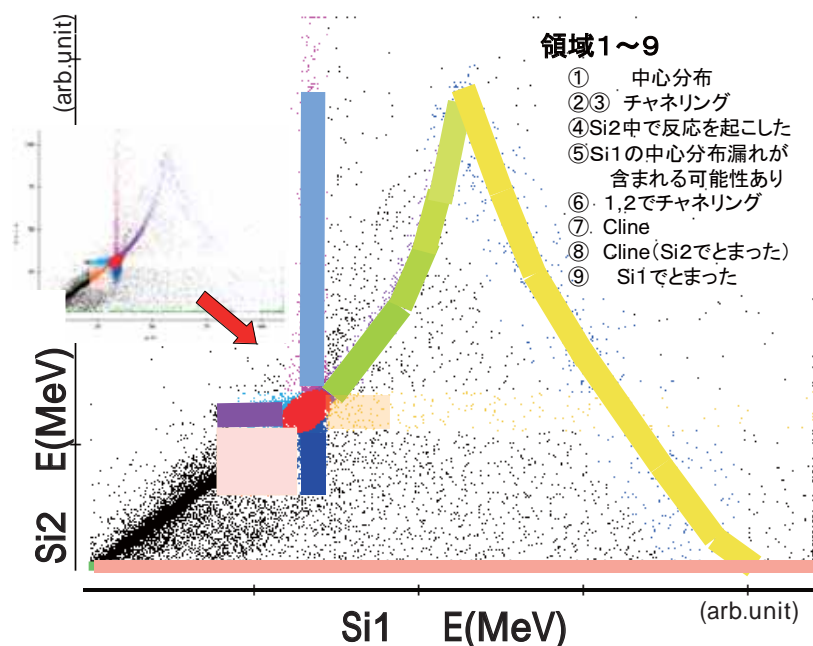


図 2.10: ID1 の判断基準 (領域 1 ~ 9)

図より色付けした部分が ^{12}C である可能性があるとして判断していく。ここで色付けされていないものはZが変わっていると判断している。このように粒子の反応によって9つの領域にわけて判断できる。

- 領域 1 Si 1-2での中心分布にくる粒子が含まれる
- 領域 2 Si 2でチャネリングを起した粒子が含まれる (Si 2でチャネリングを起した為に Si 2でのエネルギー損失が少なくなったの粒子が含まれる)
- 領域 3 Si 1でのチャネリングを起した粒子が含まれる
- 領域 4 Si 2で核反応をおこした粒子が含まれる
- 領域 5 中心分布付近で中心分布範囲から少しずれた粒子が含まれる

- 領域6 Si 1, 2ともにチャネリングを起した粒子が含まれる
- 領域7 炭素のエネルギーロスの軌跡が含まれる
- 領域8 Si 2の途中でとまった粒子が含まれる
- 領域9 Si 1の途中でとまった粒子が含まれる

次にID4についても同様に ^{12}C のデータを用いて示す。

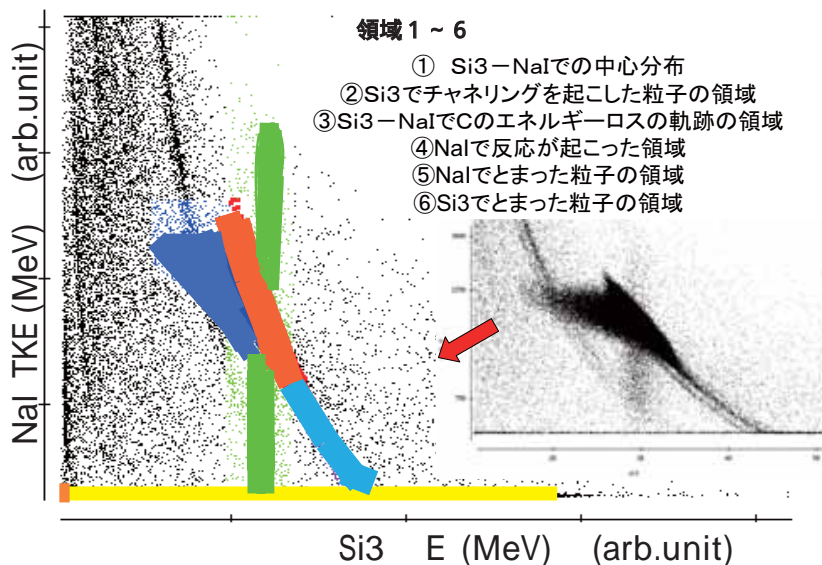


図 2.11: ID4 の判断基準 (領域 1 ~ 5)

ID4 では 6 つの領域で判断する。

- 領域1 Si 3-NaIでの中心分布のものが含まれる
- 領域2 Si 3でチャネリングを起した粒子が含まれる
- 領域3 Si 3-NaIで炭素のエネルギーロスの軌跡が含まれる
- 領域4 NaIで反応を起した粒子が含まれる
- 領域5 中心分布付近で中心分布範囲から少しずれた粒子が含まれる
- 領域6 Si3 枚のどれかの途中でとまった粒子が含まれる

最後に ID 5 について図 2.12 に示す。

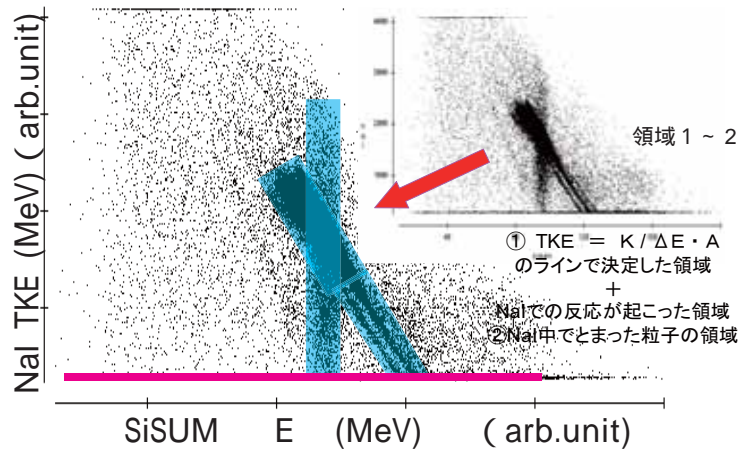


図 2.12: ID5 の判断基準 (領域 1 ~ 2)

ID5 は ID1 ~ 4 までで判断できなかったものを判断するので補助的な役割をもつ。dE と E のプロットを用いると質量数の違うものが分離してみえる。散乱標的通過後に生成された炭素同位体の中で質量数の一番少ない核種の分布と一番多い核種の分布を両端に含むように範囲を決定した。

領域 1 炭素同位体が含まれる可能性のある領域 + NaI で反応を起こしたものが含まれる

領域 2 Si 中で止まった粒子が含まれる

これらの 5 つの ID をそれぞれの判断基準を用いて粒子を選出していく。

2.7 測定回路

ここでは本実験で用いた回路について述べる。全体の回路図は付録で示した。

2.7.1 イベントトリガー

実験でのイベントトリガーはトリガーシンチレーター (プラスチックシンチレータ) の信号を用いた。図 2.13 に使用したトリガー回路及び、F 2 プラスチックの測定回路を示す。

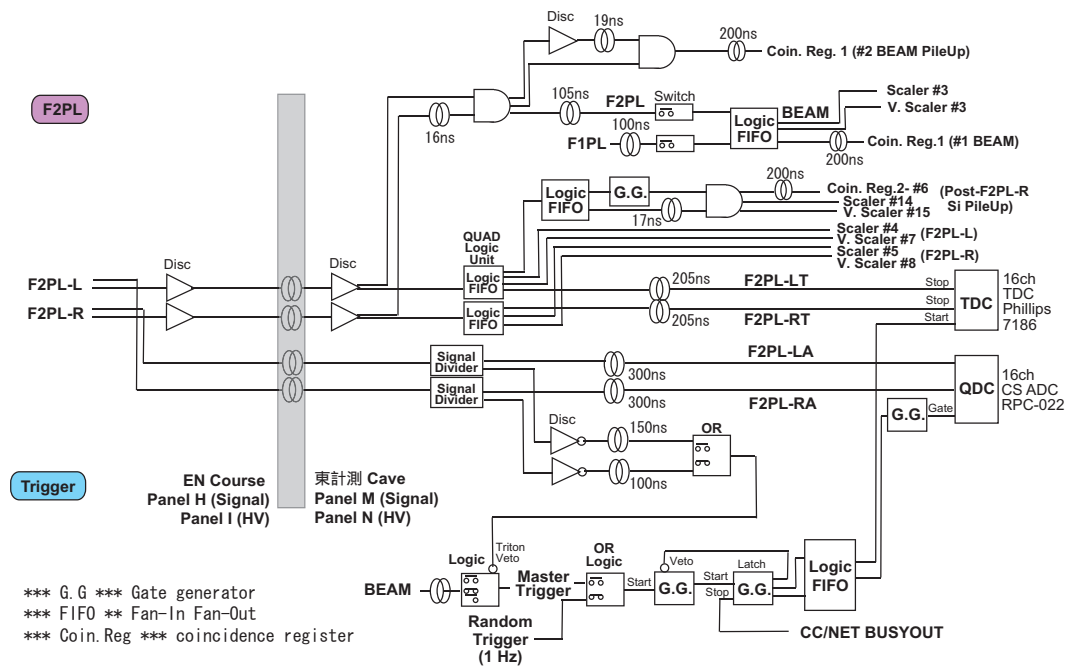


図 2.13: F2 プラスチック回路

G.Gはゲートジェネレータであり、時間の幅と出力のタイミングを調節するために使用した。また、Logic FIFOは、ファンインファンアウトのことを指し、入力信号を足し合わせて出力する。

BEAMと定義された信号は、左右のPlasticR、Lの2つの2つのロジック信号のコインシデンスととったものである。コインシデンスとは、2つのロジック信号がほぼ同時に入り、ロジック信号が重なったとき重なった時刻を起点として、1つの出力信号を出力するものであり、コインシデンスをとることによってPMTのノイズなどによる偶発的なトリガーを除くことができる。このBEAMを使用し、それぞれの検出器に用いるトリガー回路を設定した。

2.7.2 TOF 回路

本実験のTOF情報は、RFとF2プラスチックのTDCの信号より得られる。RFとは、高周波数のことを指し、本実験で使用したAVFサイクロトロンビームの周波数は9.32MHz(周期107.3ns)である。イオン源からの直流ビームはサイクロトロン入射前にRF加速周波数に同期したパルスビームにバンチングされる。そのため、ビームはサイクロトロン加速周波数に同期したパルス構造をもっている。

2次粒子の粒子識別に用いるTOFの情報は、F2プラスチックの時間情報によるstart信号、RFによるstop信号で設定した。TOFの情報は2次粒子の速度の情報を与える。stop

信号としてはRFを間引き、2つに1つの信号を用いた。間引き回路を用いることで、各粒子の分布は2つにわかれて現れることになる。これによって速度の遅い粒子でも統計を減らすことなく測定することができる。したがって、このRFとF2プラスチックのTDCの信号を用いた回路によりTOF情報を得ることができた。

2.7.3 Pile Up rejection

信号源からのパルスの減衰時間が長くて、かつパルスの頻度も大きいと、次々とパルスが重なり合ってしまうパルス高を正しくはかることができない。この現象をパイルアップ (pile up) という。本実験では、除去する pile up は2種類ある。1つは、F2プラスチックに入射した粒子の中で同時に検出される粒子による pile up である。プラスチックシンチレータは時間の分解能がよく立ち上がり時間は1ns以下(表2.2)である。それに対し、シリコン検出器は立ち上がり時間が数 μ sとなるので、Pile upの検知はF2プラスチックによって行う。もう1つは、同時に飛んできた粒子の1方がF2プラスチックに入射し、散乱標的より下流の検出器は検出範囲は広いために同時に2つ以上の粒子を検出してしまうときにおこるものである。

後者は2010年に行われた実験で新たに開発したVetoカウンターを用いて除去される。このpile upについては3章で詳しく述べる。ここでは、前者のpile upを除去するためのF2プラスチックによる検知回路について述べる。

図2.14にpile up検知部分の回路図を示す。

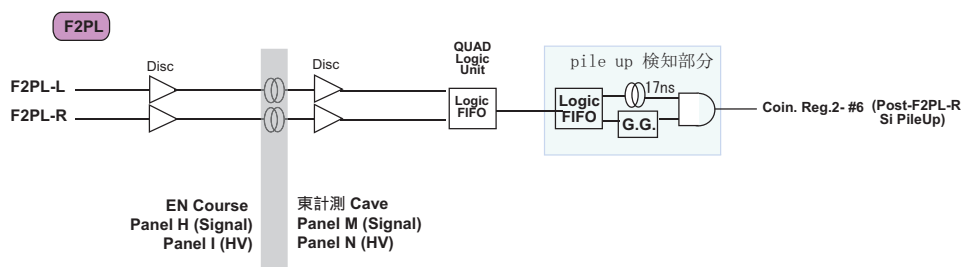


図 2.14: F2 プラスチックの Pile up 検知部分の回路図

ここで使用しているそれぞれの記号の意味は

Discr. Discriminator (論理信号に変換)

coin. reg. Coincidence register

Gate Generator によるゲート幅を広めに調節し、その間のタイミングでほぼ同時にきた信号を検知するように設定した。このゲート幅はシリコン検出器の信号幅を考慮して数十 μ sに設定する。

第3章 Vetoカウンターの開発

本実験では、2009年に行った実験からさらに精度のよい実験を行うために Veto カウンターを開発した。ここでは Veto カウンターの開発の目的と製作過程及び、実験データを用いた性能評価について述べる。

3.1 目的

Veto カウンター開発の目的は F2 プラスチックシンチレータの pile up 検知回路では除去できない pile up を除去することである。イベントトリガーである F2 プラスチックシンチレータの検出断面積よりも散乱標的以下の 3 枚のシリコン検出器及び NaI の検出断面積の方が大きいために、シリコンの方は F 2 プラスチックシンチレータを通過しない粒子にも応答してしまう。

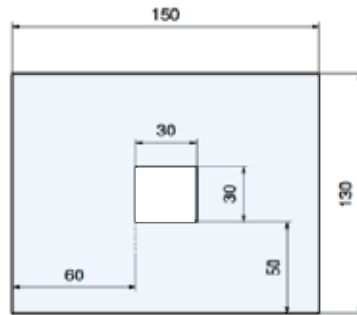
2.7.3 で述べたように F2 プラスチックシンチレータに 1 つの粒子が入射したときに、散乱標的の下流の検出器には Gate 幅内に 2 つ以上の粒子が入射し pile up を起こしてしまう可能性がある。

2009 年の実験では、これによって生じてしまう pile up を除去できなかった。

この章では、F2 プラスチックシンチレータをトリガーカウンターと呼ぶ。

3.2 Vetoカウンターの製作

Veto カウンターのプラスチックシンチレータは BICRON の製造番号 BC400 のものを使用している。(表 2.2 参照)トリガーカウンターに入射してしまう測定対象以外の粒子を除去できるようにトリガーカウンターぎりぎりの 30 mm × 30 mm の穴のあいたプラスチックシンチレータを設計した。図 3.1 にその寸法図を示す。



正面図
厚さ 3.0mm

図 3.1: 寸法図

次にライトガイドの製作について述べる。Veto カウンターに用いた PMT の受光断面のサイズは $\phi 47\text{mm}$ でありシンチレータ部分は $130\text{mm} \times 150\text{mm}$ であるので片側 3 枚のライトガイドを使って集光率を失わないようにした。ライトガイドの原料はアクリルであり、アクリルと空気の屈折率は約 1.49 と 1.0 である。これより、臨界角 (42 度) よりも小さい曲げ率でそれぞれのライトガイドをひねり、PMT へ接着した。PMT での接着の強度を上げるため、クッキー (アクリル製) を用いた。以下に用いた PMT の主な仕様・特徴とライトガイドの設計図を示す。

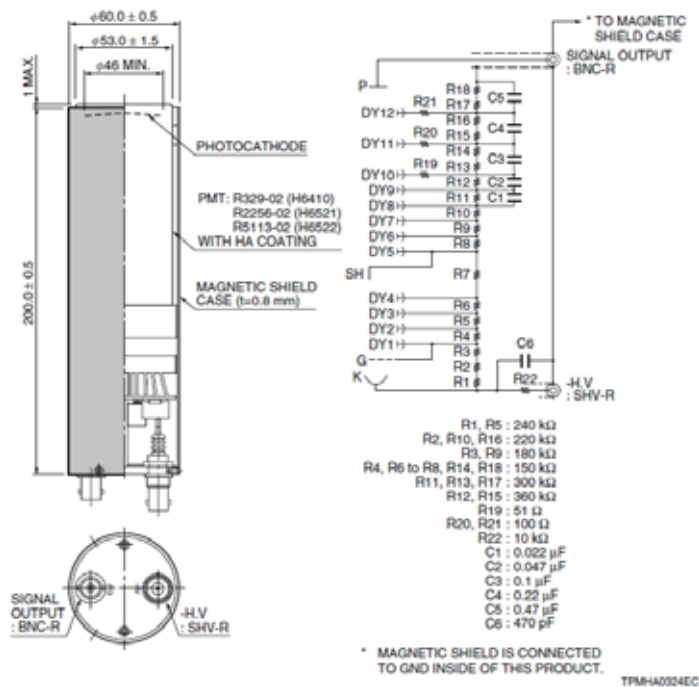


図 3.2: PMT 浜松ホトニクス R329-02 アセンブリは H6410 を使用

表 3.1: PMT の主な仕様

| | |
|-------------------------|--------------------|
| [絶対最大定格] 陽極-陰極間電圧 | -2700 V |
| [陽極特性] ゲイン Typ. | 3.00×10^6 |
| [時間特性] 上昇時間 (Tr) Typ. | 2.7 ns |
| [時間特性] 走行時間 (T.T.) Typ. | 40 ns |

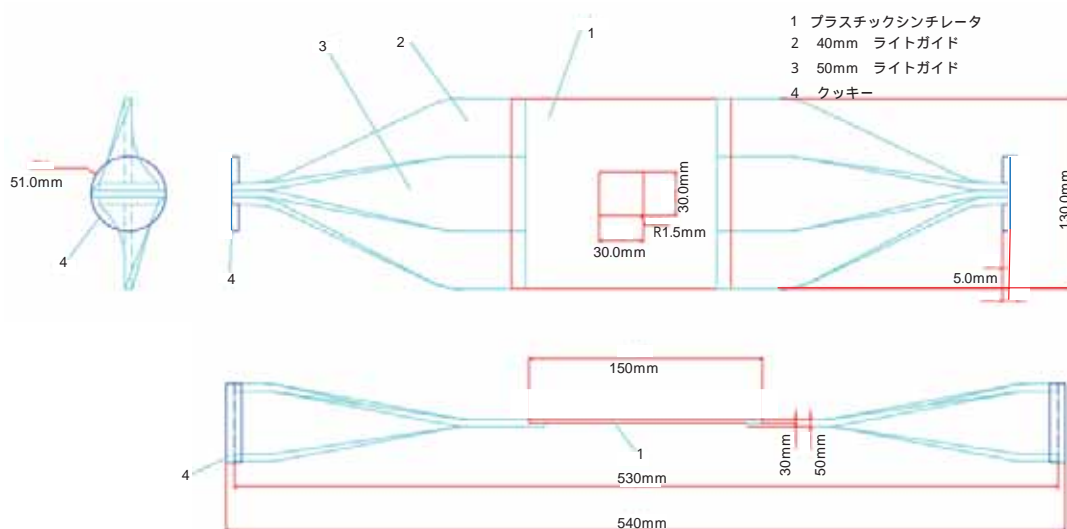


図 3.3: ライトガイドの設計図

Veto カウンターのシンチレータ部分の穴は、トリガーカウンターのシンチレータ部分と一致するようにマウントする必要がある。また、Veto カウンターとトリガーカウンターはできるだけ近い距離にマウントしなければならない。

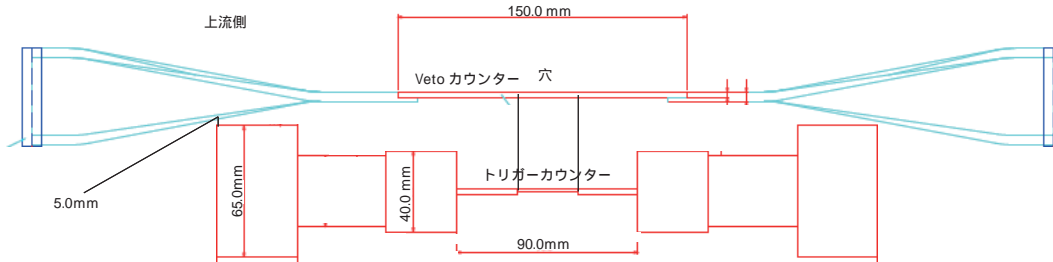


図 3.4: トリガーカウンターと Veto カウンターの位置関係

Veto カウンターのライトガイドの捻りの部分がトリガーカウンターと最先端にあたる位置でビームの focus 条件を考慮した計算でロスされる検出部分がなくなるように 5mm の距離を離して、マウント台を設計した。

3.3 Veto カウンターの性能評価

Veto カウンターは pile up を除去するために開発した。ここでは実際に実験データを用いて Veto カウンターによって入射ビームの純度にどれくらい影響するのかを評価する。Veto カウンターは両読み出しであり、各信号は TDC と QDC に入力されている。(参照 付録 C) これ以降では、TDC の各入力信号を TVetoL、TVetoR、QDC の各入力信号を QVetoL、QVetoR と呼ぶ。Veto カウンターの信号によるカットはコインシレジスタを用いて行う。ここで、本実験での pile up の除去は Veto カウンターによって除去されるものと F2 プラスチックシンチレータの検知回路によって除去されるものがある。ここでは、F2 プラスチックの検知回路を用いて pile up 除去した信号を pile up 1、Veto カウンターを用いて除去した信号を pile up 2 と呼ぶ。pile up 1 においては、2009 年の実験でも行った。F2 プラスチックシンチレータの pile up 除去については 2.7 で述べた。

まずは、Veto カウンターの信号を無視した場合の ^{12}C の $\text{TOF}(\text{ns})-\Delta E (\text{MeV})$ の相関をみる。

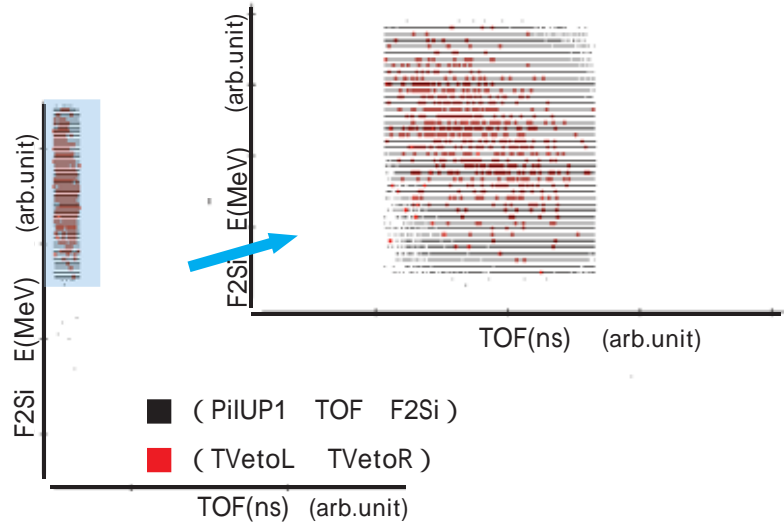


図 3.5: ^{12}C pile up 1 & TOF & F2Si selecton TOF- ΔE 赤色の部分は Veto カウンターにきた信号 (TVetoLUTVetoR)

このとき pile up1 & TOF & F2Si で選択した粒子の全イベント数は 971000 であり、赤色で示した TVetoL or TVetoR のイベント数は 3884 であった。つまり pile up1 & TOF & F2Si で選択した粒子のうち 0.4 % のものが Veto カウンターに入っていたものであることがわかる。同様に、PPAC のトラッキングから算出したトリガーカウンターでの位置情報 (以下 plaY, plaX と呼ぶ) で Veto カウンターに入射した粒子をみる。トラッキングについては、4.2 で詳しく述べる。

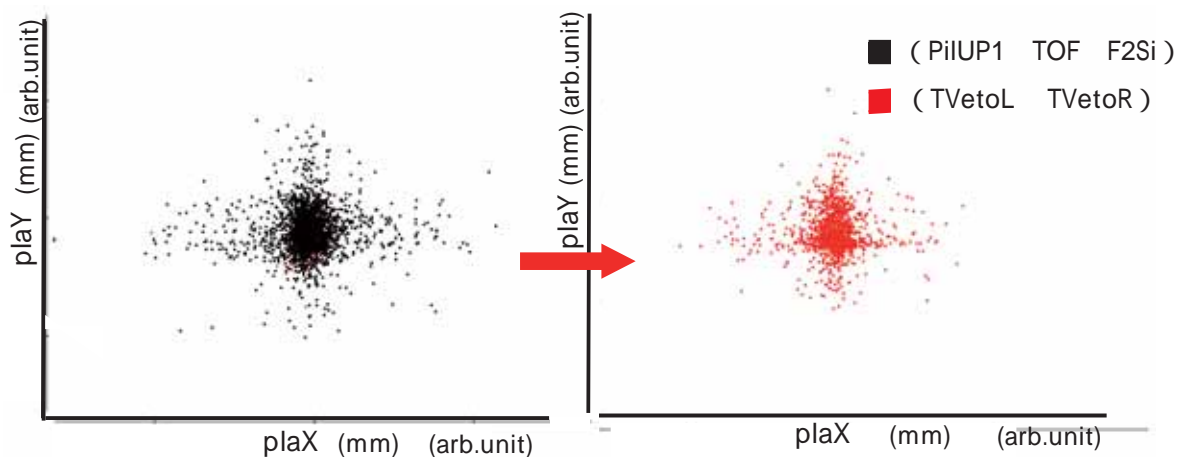


図 3.6: ^{12}C pile up1 & TOF & F2Si selection plaY-plaX 赤色の部分は Veto カウンターにきた信号 (TVetoLUTVetoR)

図 3.6 からわかるように、第一回目の実験では、これらの粒子を識別することができなかったので Veto カウンターによって入射粒子の純度が上がったことがわかる。この Veto カウンターによる pile up2 のイベントが実際の CCCS の決定にどれくらい影響するのかを概算し以下に示す。

- Veto カウンターの pile up 除去

| | |
|------------|---------|
| 散乱標的あり | |
| 全イベント数 | 498977 |
| 非反応数 | 474186 |
| γ | 0.95031 |
| 散乱標的なし | |
| 全イベント数 | 383466 |
| 非反応数 | 378426 |
| γ_0 | 0.98686 |
| CCCS | 1154 |

- Veto カウンターの情報なし

| | |
|------------|---------|
| 散乱標的あり | |
| 全イベント数 | 501222 |
| 非反応数 | 474186 |
| γ | 0.94606 |
| 散乱標的なし | |
| 全イベント数 | 385191 |
| 非反応数 | 380151 |
| γ_0 | 0.98692 |
| CCCS | 1293 |

となる。

もし、散乱標的の下流の Si1 で pile up が起こると、 ΔE の波高が重なり大きくなってしま
うので、その粒子は反応を起こした粒子という判断になる。したがって、pile up2 のイベ
ントが入射粒子に混合していると、そのイベントは散乱標的の下流の粒子識別では非反応
数としてカウントしてしまう。その仮定により概算した結果から CCCS が 12% も大き
くなるのがわかる。これより、Veto カウンターの開発により、より精密な実験を行うこ
とができたといえる。

第4章 データ解析

4.1 解析の手順

本研究における解析は DataDesk を用いて行った [16]。電荷変換断面積をトランスミッション法により決定するため、目的となる入射粒子を正しく選択し、標的通過後の粒子が標的前後で電荷が変わっていない粒子を選出していく。以下にその手順を述べる。手順の詳細を具体的に述べるためにここでは ^{12}C をとりあげて説明する。

4.1.1 各検出器の Calibration

各検出器から得られる ADC 及び TDC のチャンネル (ch) の情報をそれぞれ時間 (ns) やエネルギー (E) 及び位置 (mm) の物理量に校正するため、それぞれ Calibration を行った。

4.1.2 TDC の Calibration

TDC の Calibration は ANAPOW を用いて行った。TDC の情報 [ch] を時間情報 [ns] にするため、一定の間隔 (20ns) のパルスを出す Time Calibrator を用いた。それぞれ Fitting によって得られた値より校正直線を決定した。以下に TDC の Calibration の一例を示す。

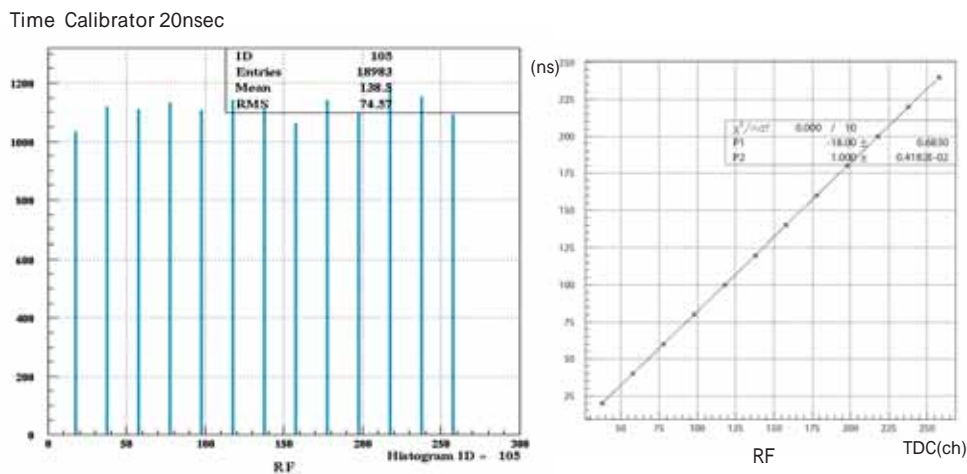


図 4.1: RF の TDC の Fitting 結果

次に TDC(ch) を時間スケールの絶対値 (ns) に補正したそれぞれの式を示す。

$$\begin{aligned} \text{RF(ns)} &= 0.064 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{F2plasticL(ns)} &= 0.062 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{F2plasticR(ns)} &= 0.062 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{PPACUL(ns)} &= 0.051 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{PPACUR(ns)} &= 0.051 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{PPACUU(ns)} &= 0.051 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{PPACUD(ns)} &= 0.051 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{PPACDL(ns)} &= 0.050 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{PPACDR(ns)} &= 0.051 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{PPACDU(ns)} &= 0.051 \cdot \text{TDC(ch)} \\ \text{PPACDD(ns)} &= 0.051 \cdot \text{TDC(ch)} \end{aligned}$$

決定したパラメータを用いて 2 章で述べたように RF と F2 プラスチックシンチレータの時間情報による TOF を次式で定義した。

$$\text{TOF} = 0.064T_{rf} - (0.062(\text{TF2plR} + \text{TF2plL})/2) \quad (4.1)$$

解析ではこれらの時間情報を利用して F2 プラスチックシンチレータや PPAC の位置情報を用いるがその位置 Calibration の補正については 4.2 で述べる。

4.1.3 ADC Calibration

ADC の Calibration は、実験後 $A/Z=2$ の設定で Calibration 用のデータと ^{19}C の設定で測定したデータを Data Disc に取り込みオフライン解析で行った。図 4.3 に示すようにそれぞれのデータを TOF- ΔE (F2Si) のスキャタープロットで見ると、 $A/Z=2$ 及び $A/Z=3$ のラインが見られる。

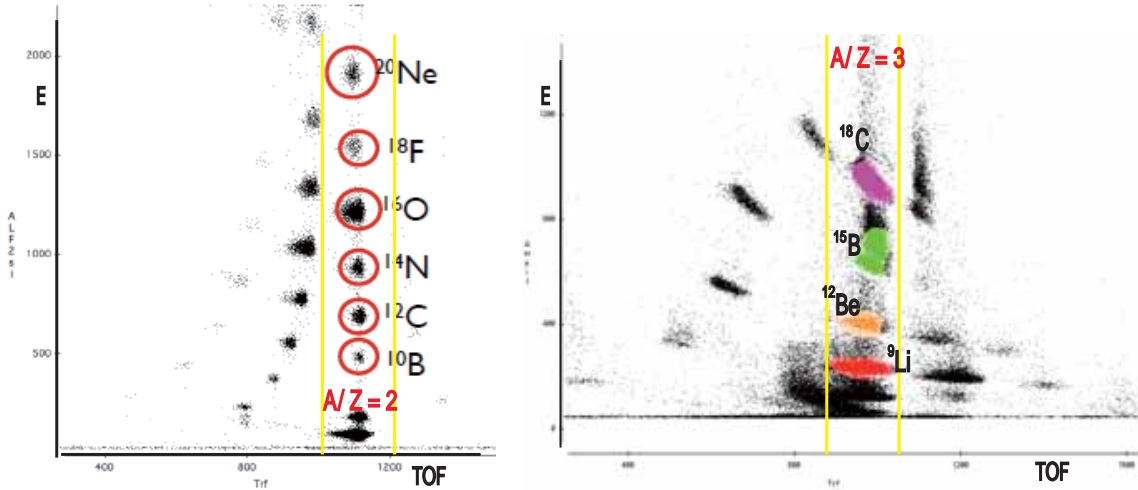


図 4.2: ADC Calibration 用のデータ

このライン上にみえる ^{18}C 、 ^{15}B 、 ^{12}Be 、 ^9Li について、シミュレーションで得られるエネルギー損失 (MeV) の値と ΔE 検出器である F2Si と 2 次標的の下流の Si3 枚の各 ADC 情報 [ch] によってエネルギー補正をする。以下に F2Si、Si1、Si2、Si3 の順に ADC の Calibration に用いたデータとその結果の一例を示す。

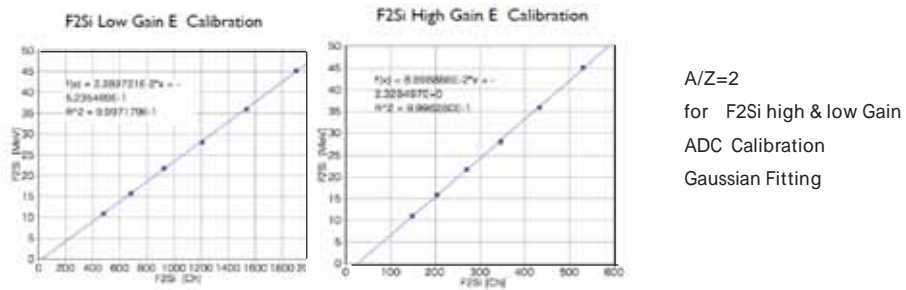


図 4.3: ADC の Fitting 結果: 左 low gain F2Si, 右 high gain F2Si

次に ADC(ch) をエネルギー損失値 (MeV) に補正したそれぞれの式を示す

$$\begin{aligned}
 F2sil(\text{MeV}) &= 0.089 \cdot AHF2si(\text{ch}) - 4.730 \\
 F2sih(\text{MeV}) &= 0.024 \cdot ALF2si(\text{ch}) - 1.164 \\
 si1h(\text{MeV}) &= 0.032 \cdot AHsi1(\text{ch}) - 0.025 \\
 si1l(\text{MeV}) &= 0.062 \cdot ALsi1(\text{ch}) - 0.051 \\
 si2h(\text{MeV}) &= 0.038 \cdot AHsi2(\text{ch}) + 0.079 \\
 si2l(\text{MeV}) &= 0.063 \cdot ALsi2(\text{ch}) + 0.090 \\
 si3h(\text{MeV}) &= 0.046 \cdot AHsi3(\text{ch}) + 0.012 \\
 si3l(\text{MeV}) &= 0.064 \cdot ALsi3(\text{ch}) + 0.016
 \end{aligned}$$

4.2 入射粒子の定義

ここでは入射粒子を正確に定義するために行った解析方法について述べる。目的対象となる入射粒子は ΔE -TOF によって識別することができるが、エネルギー損失 ΔE と飛行時間 TOF の情報を用いても、完全に入射粒子の中のお他核種の粒子の混合を取り除くことができない可能性がある。本実験では 1% 以内の精度で CCCS の決定することを目的としている。そのため、入射粒子の不純物の混ざりを時間、エネルギー、位置による情報を使って厳密に見積った。その手順を以下に示す。

pile up イベントなどのバックグラウンドの除去

pile up イベントは入射粒子及び標的通過後の粒子の識別に支障をきたすため、全てデータから除いた。

図 4.4 にバックグラウンドを除去する前後の ΔE -TOF のスカッタープロットを示した。

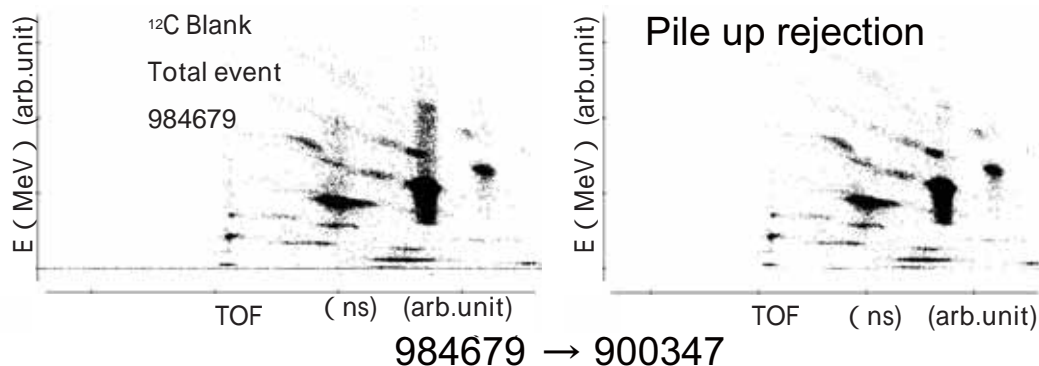


図 4.4: 左 : pile up 除去前 右 : pile up 除去後 (^{12}C blank run59)

図 4.4 より pile up 除去前では各粒子のスペクトルが縦(E)方向に上に伸びているのがわかる。pile up 除去後、上に伸びていた部分が除去されている。

TOF (F2プラスチックシンチレータ & RF) による Gate

TOF は速度の違う粒子を識別することができるので目的の入射粒子の TOF の情報によって Gate をかける

2.4 で述べたように ΔE -TOF の相関より目的の粒子を識別した後、他の粒子を除去し、正確に入射粒子のみを選択するためにそれぞれの検出器によって Gate をかける。TOF の ^{12}C がガウシアンで Fitting できる場合は 2σ 、そうでない場合はスペクトルのピークのカウント数の 5% のレベルまでを範囲とした。

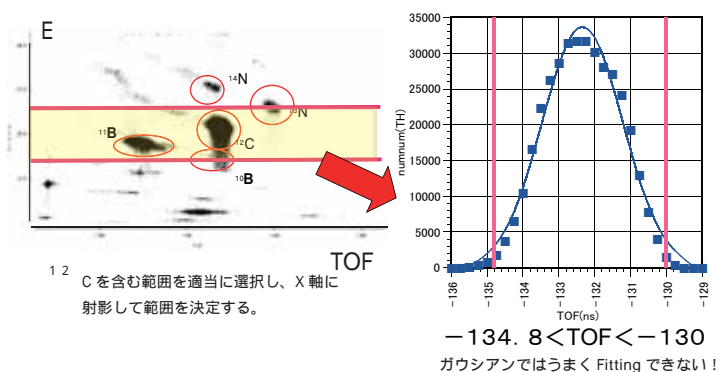


図 4.5: TOF

ΔE (F2Si) による Gate

ΔE は式 2.14 示すような関係式による違いを持つので目的の入射粒子の ΔE の情報によって Gate をかける。

TOF と同様に F2Si 検出器で測定した ΔE で ^{12}C の範囲をピークのカウント数の 5% のカウント数の範囲までをとる。

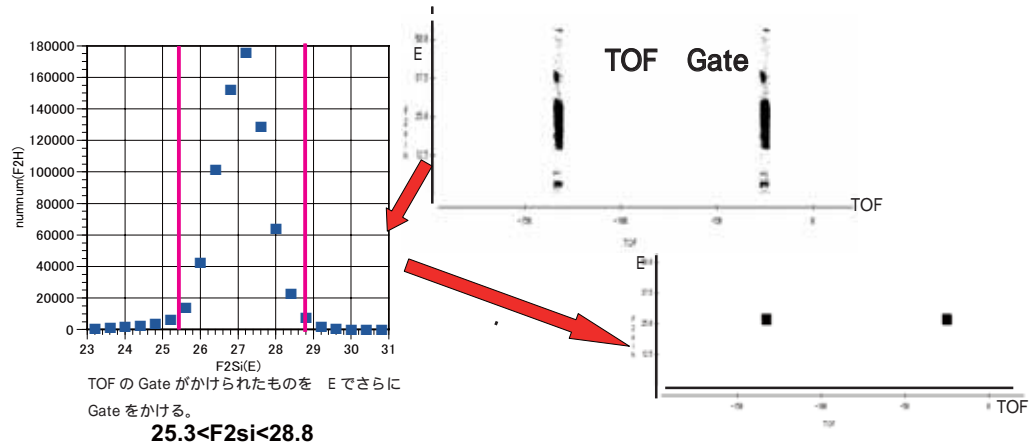


図 4.6: F2Si による Gate 右上に示した TOF による Gate をかけたイベントを F2Si でみた (左上の図) 決定した F2Si の分布の範囲 (左上の図のピンクで囲まれた部分) F2Si での Gate をかけたときの ΔE -TOF のスカッタープロット (右下の図)

Position 1 (F2PPAC) による Gate

PPAC の位置情報によって PPAC の位置で入射粒子が標的中心付近を通過しているかどうかを確認することができる。また、TOF や ΔE で除去できなかった不純物を位置情報により分離することも可能になる。

標的上流に置かれている 2 枚の PPAC はそれぞれ 1 枚のアノード電極と 2 枚のカソード電極で構成される PPAC (F2UPPAC、F 2 DPPAC) は 1 枚の Anode 面と 2 枚の Cathode 面で構成されている。各 Cathode 面にはそれぞれ x 、 y 方向の位置情報を得る為に、strip 電極が刻まれ、それぞれの strip 電極に delay-line が接続されている。X、Y 面で得られた両端で取り出された信号の時間差から、粒子の通過位置を測定する。位置 x は以下の式

$$X(\text{mm}) = 0.5 * (L * K - R * K - A_{\text{offset}}) / p_{\text{gain}} - B_{\text{offset}} - G_{\text{offset}} \quad (4.2)$$

$$Y(\text{mm}) = 0.5 * (U * K - D * K - A_{\text{offset}}) / p_{\text{gain}} - B_{\text{offset}} - G_{\text{offset}} \quad (4.3)$$

で得られる。

- L,R,U,D : TDC データ (ch)
- K : それぞれの TDC Calibration より得られた時間係数 (ns/ch)
- A_{offset} : ケーブルの長さなどによる 2 本の信号の時間差が 0 となるように決定したパラメータ (ns)
- p_{gain} : PPAC 作成段階で決定される位置係数 (理研の熊谷さんのパラメータを使用)

- B_{offset} : PPAC 固有の補正值
- G_{offset} : 中心とビームライン中心との幾何学的なずれの補正值

各パラメータを表 4.1 に示す。

表 4.1: PPAC パラメータ

| | $K(\text{ns}/\text{ch})$ | $A_{offset}(\text{ns})$ | $p_{gain}(\text{ns}/\text{mm})$ | $1/p_{gain}(\text{mm}/\text{ns})$ | $B_{offset}(\text{mm})$ | $G_{offset}(\text{mm})$ |
|----------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| F2ppacUR | 0.05069 | | | | | |
| F2ppacUL | 0.0508 | 1.25 | 0.7473 | 1.338150676 | -37.7 | -4.3 |
| F2ppacUU | 0.05073 | | | | | |
| F2ppacUD | 0.0505 | 0.85 | 0.7217 | 1.385617293 | -3.425 | -2.3 |
| F2ppacDR | 0.05046 | | | | | |
| F2ppacUL | 0.05061 | 0.5 | 0.7916 | 1.263264275 | 1.18 | -1 |
| F2ppacDU | 0.0507 | | | | | |
| F2ppacDD | 0.0506 | 2.6 | 0.773 | 1.293661061 | -2.1 | -1.3 |

PPAC の 2 本の読み出しからの時間の和は原理上、一定となるはずである。しかし実際のデータをみると、ピークが裾を引いたような形になる。

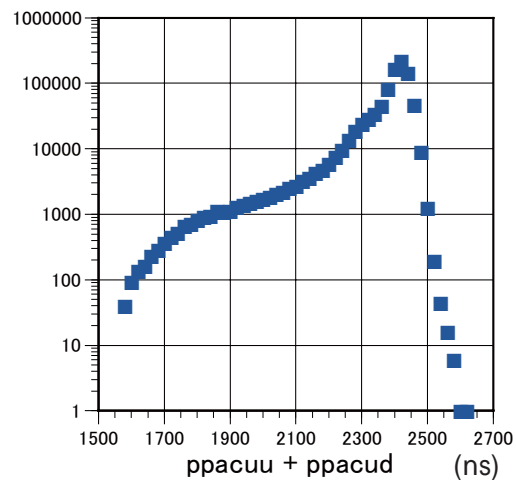


図 4.7: 331ppacdelta

これは荷電粒子が物質を通過するとき荷電粒子が物質内の電子とクーロン相互作用を起こすことによって生じる。接近の度合によって原子が励起され励起原子を形成したり、電離されてイオン対を生成したりするため、特に荷電粒子と電子が接近した衝突で

は、電子は非常に大きな衝撃を受ける。それにより粒子が入射した際に高い運動エネルギーを持った電子が PPAC 中を走り、誤った信号を出してしまう。したがって、PPAC の 2 本の信号の和は図 4.4 のような分布となる。このようなデータを除くために、PPAC の 2 本の読み出しからの時間の和から得られるスペクトルのピークのカウンタ数の 5 % の高さ以下のイベントを除外した。

Position2 (F2 プラスチックシンチレータ) による Gate

F2 プラスチックシンチレータの左右の TDC 信号より位置情報が得られる。F2 プラスチックシンチレータは散乱標的のすぐ上流にあるので入射粒子のビームサイズが F2 プラスチックシンチレータの有効範囲内に収まっているかどうかをみることができ、この位置情報で Gate をかけることで入射粒子の位置の広がりを狭くすることができる。そのために左右の TDC の情報から位置を求める。

単純に左右の時間情報の差をとった以下の式は以下のような関係式となる。

$$-0.062 \cdot (TF2plL - TF2plR) \quad (4.4)$$

この式で得られる情報を plaposi と呼ぶことにし、粗い位置情報として用いた。

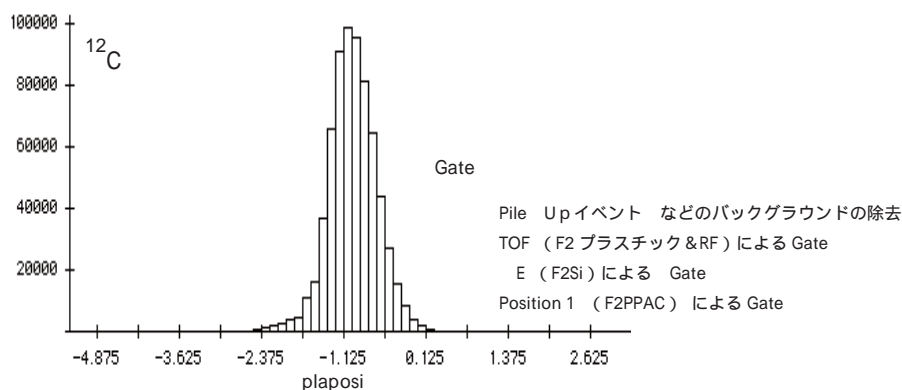


図 4.8: plaposi(式 4.4 より得られる位置情報)

図 4.8 はこれまでに述べた Gate1~4 をかけて plaposi のヒストグラムをみたものである。

1. Pile Up イベント などのバックグラウンドの除去
2. TOF (F2 プラスチックシンチレータ & RF) による Gate
3. ΔE (F2Si) による Gate
4. Position1 (F2PPAC) による Gate

また、F2プラスチックシンチレータの検出範囲を決定するために、ライトガイドに当たった粒子のイベントをみる。入射粒子がライトガイドを通過すると余分にエネルギー損失してしまう。したがって、ライトガイドに当たった粒子のスペクトルが図のヒストグラムのどの範囲にくるのかわかるために、F2プラスチックシンチレータより下流の検出器である散乱標的下流に設置したSi1での ΔE と式4.4による位置情報との相関をみる。

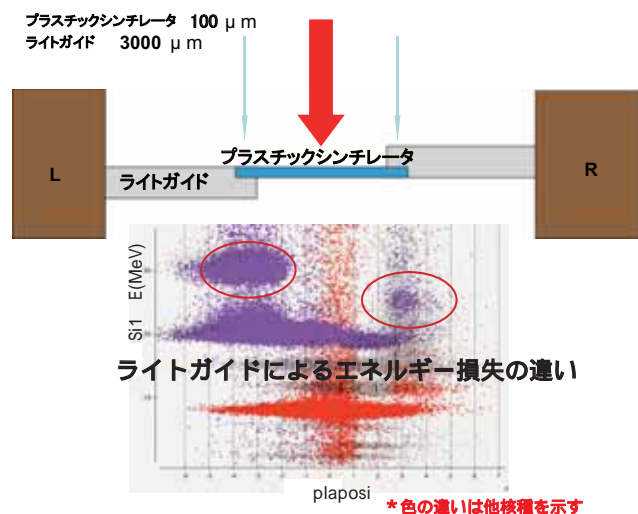


図 4.9: 散乱標的下流の Si1 の ΔE とライトガイドにあたった部分のエネルギーロスが異なって見える

図 4.9 より、左右にライトガイドによって異なるエネルギー損失をしたスペクトルがみられた。左右に見られるそれぞれの異なるエネルギー損失をしたイベントの分布よりプラスチックシンチレータの有効範囲を定める。これらの分布のピークのカウンタ数の 5% のレベルのところをプラスチックシンチレータとライトガイドとの境目とした。この結果、F2プラスチックシンチレータの有効範囲は $-2.62 < (\text{式 4.4}) < 2.45$ と決定した。

また F2プラスチックシンチレータで位置情報 (mm) でみた ^{12}C の位置分布は F2プラスチックシンチレータの有効範囲内に収まっていた。その分布をガウシアンで Fitting し、 2σ 以内のイベントを採用した。

トラッキングによる Gate

ここでのトラッキングとは、2枚の F2U, DPPAC を置くことで、F2プラスチックシンチレータ位置におけるビームの広がりを推測することを意味する。図にそれを模式的にあらわしたものを示す。まず、粒子は F2 チェンバーの上流側に設置された F2UPPAC に入り、続けて粒子は下流の F2DPPAC に入る。この F2UPPAC 上の位置と F2DPPAC 上の位置を 1 イベントごとに直線で結び、その直線と二次ターゲット位置平面との交点をプ

ロットしたものが F 2 プラスチックシンチレータでの粒子の位置である。これを用いて 2 次ターゲット位置におけるビームの広がりを求めることができる。

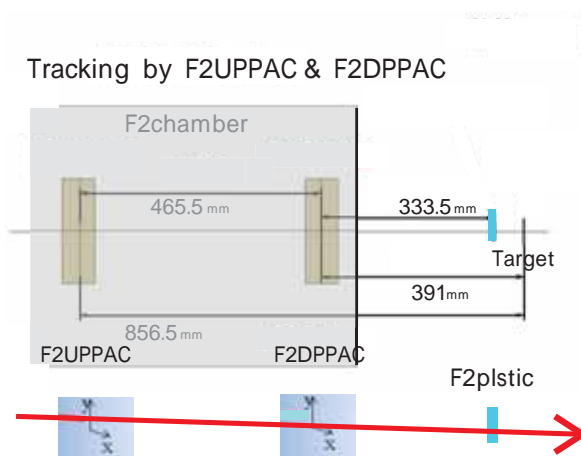


図 4.10: PPAC によるトラッキング

PPAC による外装から算出した F2 プラスチックシンチレータでの位置情報の式を以下に示す。

$$plaY = (333.5/465.5) \cdot (F2ppacdY - F2ppacuY) + F2ppacdY$$

$$plaX = ((333.5/465.5) \cdot (F2ppacdX - F2ppacuX)) + F2ppacdX$$

これより推測した F2 プラスチックでの X-Y のビームの広がりを実際のデータで見たものを図に示す。

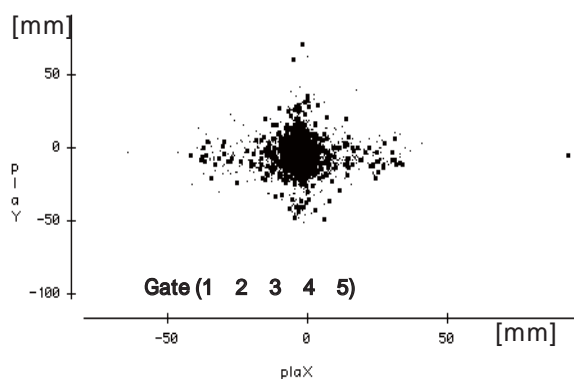


図 4.11: plaY Gate

本来、入射粒子の条件は以下のものとする予定であった。

1. Pile Up イベント などのバックグラウンドの除去
2. TOF (F2 プラスチックシンチレータ & RF) による Gate
3. ΔE (F2Si) による Gate
4. Position1 (F2PPAC) による Gate
5. Position2 (F2 プラスチックシンチレータ) による Gate

しかし、上記の条件のもとで決定した散乱標的なしの ^{12}C 入射粒子を、散乱標的の下流の Si1 ΔE -Si2 ΔE の相関で見ると散乱標的なしにも関わらず、2.1.4 で述べた領域 7 (粒子のエネルギーロスの軌跡) にきた粒子のイベント数が多いことがわかった。これは、入射粒子の一部が何かの物質でエネルギー損失をしてしまったことが考えられる。実際に Si1 ΔE -Si2 ΔE の領域 7 にきた粒子を選択して plaX-plaY の相関をみると、Si1 ΔE -Si2 ΔE の領域 1 (中心分布) にきた粒子を選択して plaX-plaY の相関とみたときとで図 4.9 に示すように明らかに入射粒子の入射した位置に偏りがみられた。

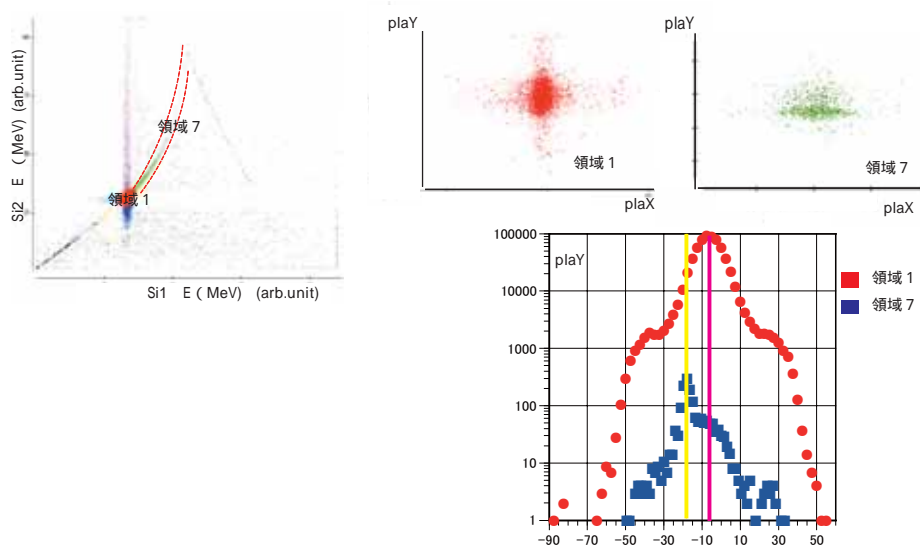


図 4.12: plaY Gate

これより下側に何かの物質があり下よりに入射してきた粒子はエネルギーを損失してしまったことがわかった。このイベントは散乱粒子の識別に影響を及ぼすので PlaY によってエネルギー損失の異なる粒子のピークの 2σ の範囲を除外した。

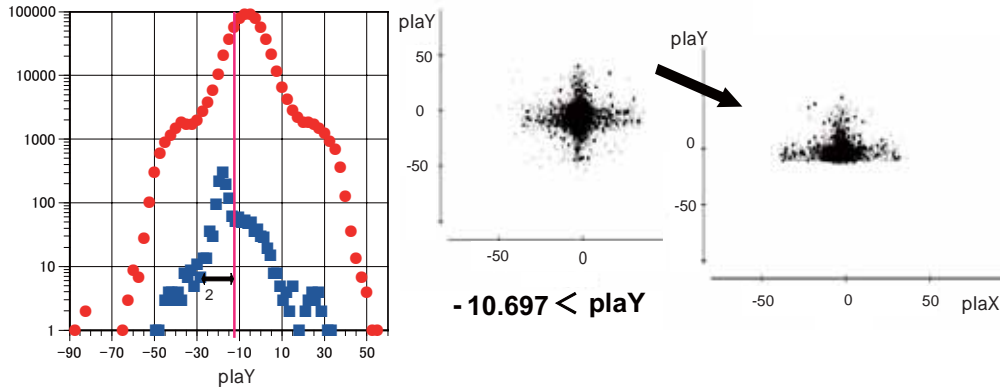


図 4.13: plaY Gate エネルギー損失の異なる粒子のスペクトル(青色でプロットしたもの)をガウス分布として幅 2σ までをエネルギー損失の異なる部分が含まれる範囲とする。plaY の範囲はそのエネルギー損失の異なる部分の最大値以上と決定した。

各 run ごとにスペクトルの幅やピークの値は異なるので、それぞれの run で上で述べた 6 つの Gate (1n2n3n4n5n6) かけたものを入射粒子と定義した。

1. Pile Up イベント などのバックグラウンドの除去
2. TOF (F2 プラスチックシンチレータ & RF) による Gate
3. ΔE (F2Si) による Gate
4. Position1 (F2PPAC) による Gate
5. Position2 (F2 プラスチックシンチレータ) による Gate
6. Position3 (plaY) による Gate

4.2.1 不純物の混合

4.1.1 で述べたように入射粒子を定義した。ここでは定義した入射粒子の中にどれだけ他の粒子が混合しているかを見積もる方法を述べる。例として ^{12}C (標的なし) の実際のデータを用いて実際に混合数を決定した手順を述べる。

混合する可能性のある粒子の選択

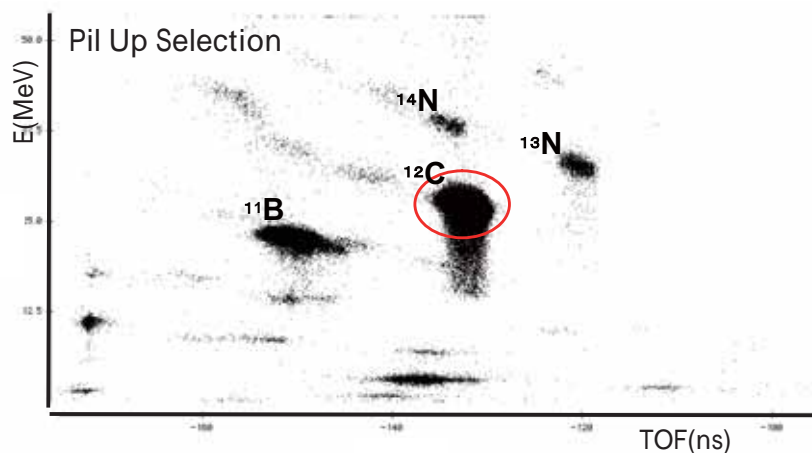


図 4.14: E-TOF の相関から対象の粒子 ^{12}C に混合する可能性のある粒子を見つける

図 4.14 は F2 プラスチックに入射した粒子に Pile UP などのバックグラウンドを除いたもの (4.1.1 の手順 (2) Gate) を TOF と F2Si ($\text{TOF}-\Delta E$) でプロットしたものである。これより入射粒子である ^{12}C に混合してくる可能性のある粒子は ^{14}N と ^{10}B である。この 2 つの粒子の混合は、図の縦のラインでみたとき (TOF) ではほぼ同じところにきてしまう。さらに、横のライン (F2Si の ΔE) でも混合する可能性があるのでこの 2 つの粒子について混合数を見積もる。

それぞれの粒子のスペクトルの形状をみる。

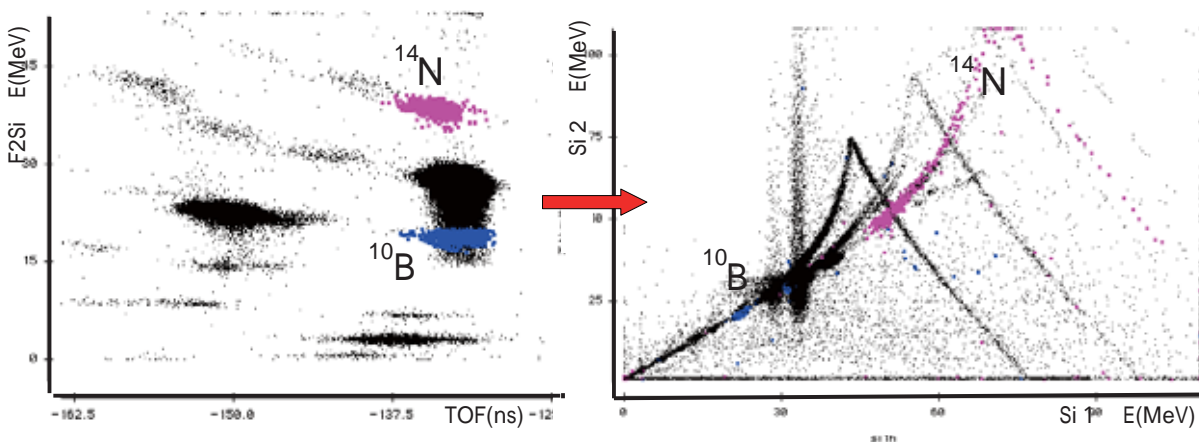


図 4.15: 左 TOF-F2Si ΔE の相関図 右 Si1 ΔE -Si2 ΔE の相関図

図 4.15 は TOF-F2Si ΔE の相関より適当に ^{14}N 及び ^{10}B を選択し、その選択した範囲を 2 次標的以下に設置された Si 1 と Si2 の相関でみたものである。Si1-Si2 の相関でみると、 ^{14}N 及び ^{10}B のラインが見られる。それぞれのライン上の確実に ^{14}N 及び ^{10}B であるところを選択し、その範囲を ^{14}N , ^{10}B のスペクトルとする。

ヒストグラムによる混合数の見積もり (exp. ^{14}N)

TOF による Gate (4.1.1 の手順 (2) Gate) のかかったデータと、(2) で選択した ^{14}N 及び ^{10}B のスペクトルを F2Si ΔE のヒストグラムでみる。

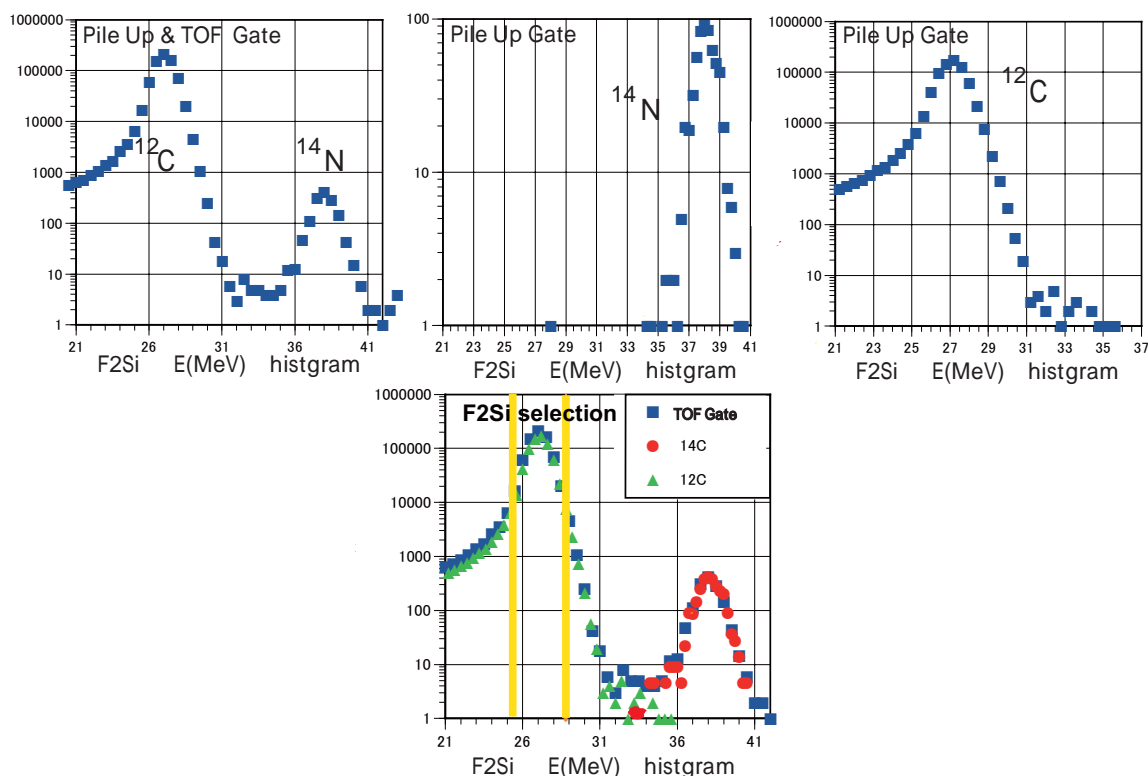


図 4.16: 左上 (TOF 3.3.1 (2) Gate), 中上 (^{14}N) 右上 (^{12}C) F2Si ΔE histogram, 下:上の 3 枚のスペクトルを F2Si ΔE histogram でプロットしたもの

図 4.16 下図より TOF でみると明らかに ^{12}C に ^{14}N が混合していることがわかる。しかし、F2Si による Gate (4.1.1 の手順 (3) Gate: 図黄色ライン) 中に ^{14}N は入ってきていないので F2Si の Gate によって ^{14}N と ^{12}C は完全に分離されていることがわかる。ここで図 4.16 下図の ^{14}N は TOF Selection でみたときの ^{14}N のピークと重なるように定数倍されている。 ^{14}N の混合数は最大を見積って入射粒子の範囲内に 1 カウント含まれるとすると 0.00001 となる。同様にして ^{10}B についても混合数はみられなかった。 ^{12}C に混合してく

る可能性のある ^{14}N , ^{10}B の見積もりの合計となり入射粒子の不純物の混合数は 0.001 % 以下となった。

4.2.2 散乱標的の下流の粒子判断基準

2.6 で述べたように散乱粒子は、標的の下流に設置した 3 枚のシリコン検出器 (Si1, Si2, Si3) の ΔE と NaI での TKE によって判断し、選出する。それぞれの領域の決定は各検出器によるそれぞれのスペクトルのピークより決定するが、そのピークのカウント数の何 % のレベルまでを採用するかを 3 通りの選択範囲基準で解析し、定義した範囲の違いによる誤差を検討する。

また、入射粒子が各検出器中で反応を起こすイベントもあるので、検出器中での反応を含む場合と含まない場合によって結果にどれくらいの揺らぎが発生してしまうのかを確かめるために、それぞれの場合で解析を行う。

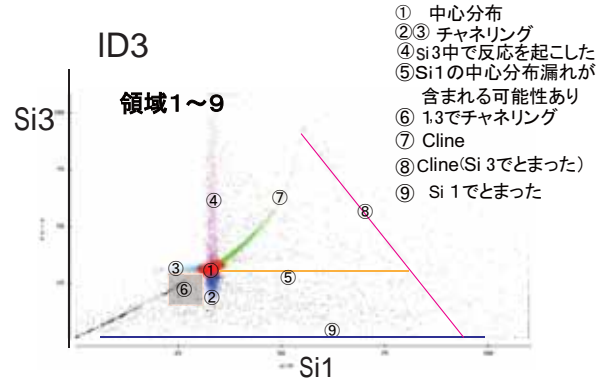
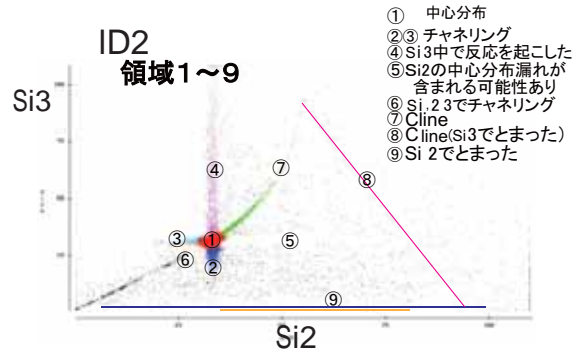
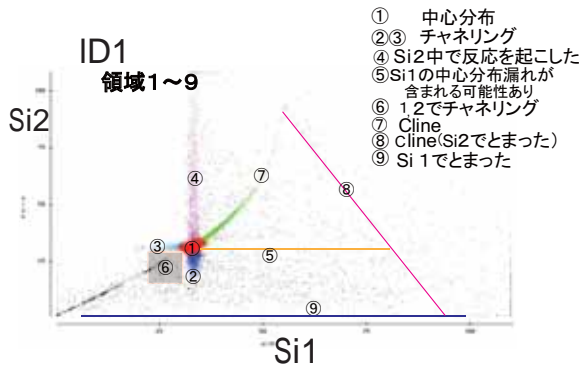
検出器中で反応が起こったものの各判断基準での領域は 2.6.1 で示したが、検出器中で反応が起こると反応が起こった検出器下流の検出器は使えない。したがって、反応が起こった検出器上流のみの検出器の情報のみで判断しなければならない。これより判断が困難になるので、検出器中で反応を起こった粒子を含めない方針で判断するか否かで場合わけをする。原理的には、どの基準をとっても等しくなるはずだが、系統誤差を見積もるために基準をわけて解析を行う。

つまり

1. 反応を含める場合 × 各選択範囲基準の場合わけ (3 通り)
2. 反応を含めない場合 × 各選択範囲基準の場合わけ (3 通り)

計 6 通りに分けてそれぞれの基準における系統誤差を検討する。それぞれの選択基準は、2.1.3 (ID1 ~ 5 各領域) で定義した。ここですべてのデータにおいて、定量的に解析を行うためにはそれぞれの領域における判断方針をあらかじめ定めておく必要がある。散乱標的の通過後の全イベントは最初に ID 1 (Si1DeltaE-Si2DeltaE の相関) によって分類される。図に 2.4.1 で述べた ID1 ~ 5 のそれぞれの領域わけと全イベント数が ID1 の領域にどれくらいの比率で分布されるのかを示す。各領域にきた比率 (%) を赤字で示す。

- ID1 Si1 E (MeV) - Si2 E (MeV)
- ID2 Si2 E (MeV) - Si3 E (MeV)
- ID3 Si1 E (MeV) - Si3 E (MeV)
- ID4 Si3 E (MeV) - NaITKE(MeV)
- ID5 SiSum (MeV) - NaITKE(MeV)



Detector 中での反応
含まない

| ID 1 | |
|-------|---------|
| total | 100 |
| 1 | 94.85 |
| 2 | 0.264 |
| 3 | 0.276 |
| 4 | 8.02E-3 |
| 5 | 0.012 |
| 6 | 0.053 |
| 7 | 0.187 |
| 8 | 0.000 |
| 0 | 4.351 |

Detector 中での反応
含める

| ID 1 | |
|-------|---------|
| total | 100 |
| 1 | 95.02 |
| 2 | 0.372 |
| 3 | 0.263 |
| 4 | 8.01E-3 |
| 5 | 0.011 |
| 6 | 0.053 |
| 7 | 0.186 |
| 8 | 0.000 |
| 0 | 4.083 |

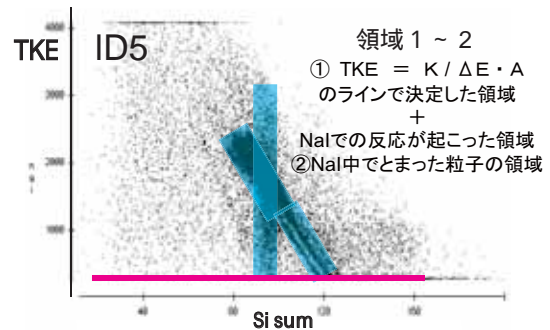
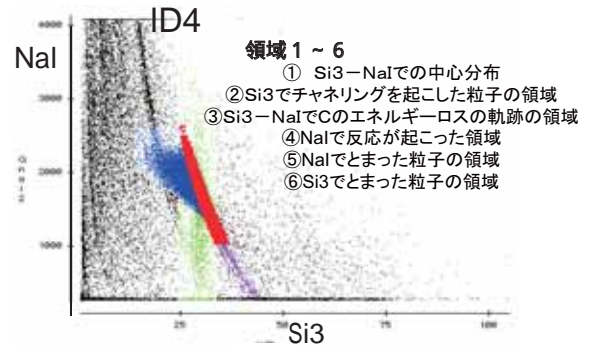


図 4.17: 左 : 全イベント数の Detector 1 による内訳, 右 : Detector1 ~ 5 の領域わけ

次に具体的な判断基準について述べる。判断基準を示すために表を用いる。まずは、表のみかたについての説明するために図 4.18 に例を示す。

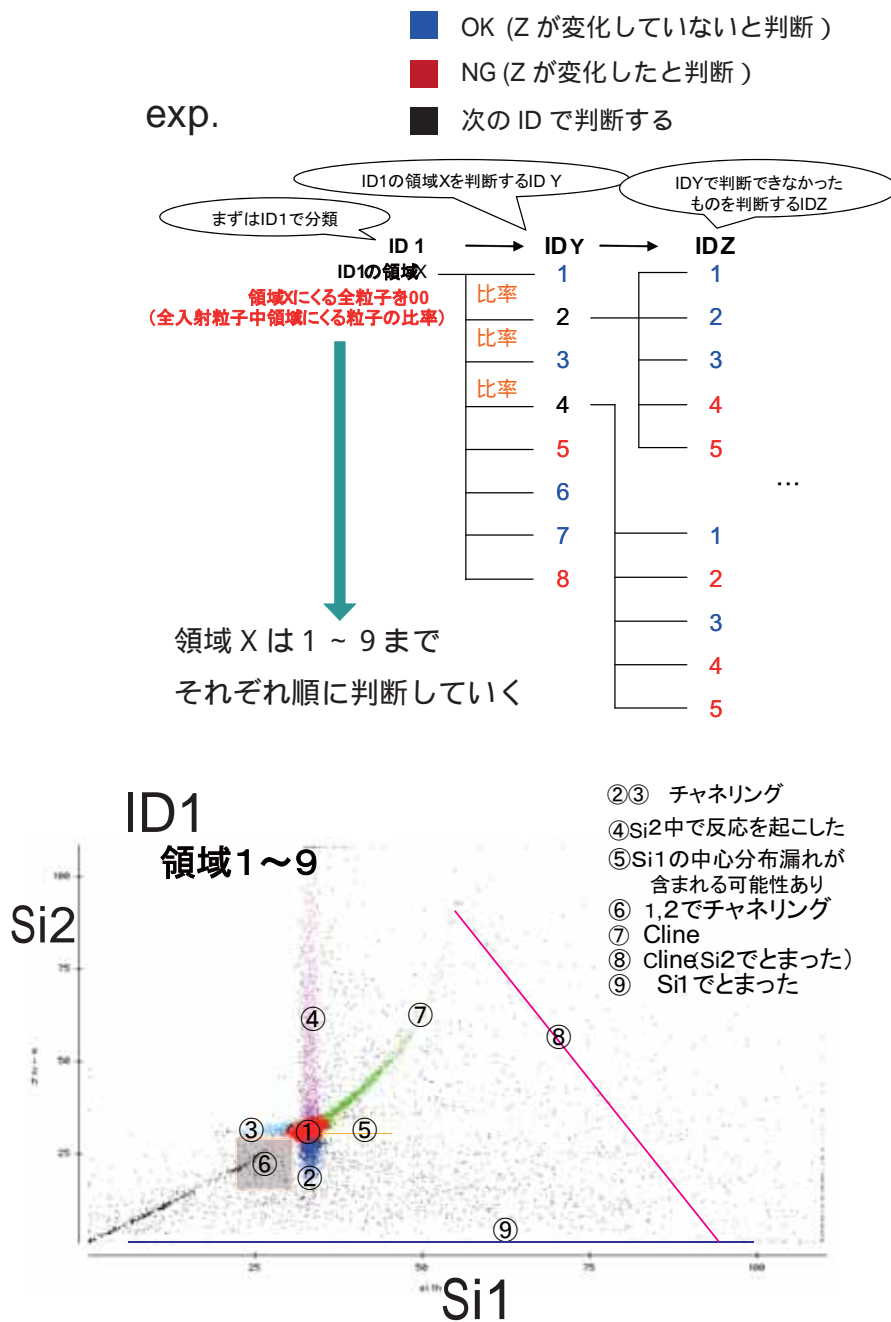


図 4.18: 判断基準表の見方

各表の上には ID 名 (1 ~ 5) が示されており右から順に示した ID を用いて行う。ID 名 (1 ~ 5) の下に書かれた数字は各 ID (1 ~ 5) の領域を示している。その数字の黒色は、未確

定(次のIDで判断)を示す。また青色はその時点でOK(Zの変化していない粒子)と判断することを示す。赤色は、その時点でNG(Zがかわった粒子)と判断することを示している。また、表の枝分かれした部分に表示された数字は、ID 1の各領域にきた粒子を全体(100)としたときの、全体に対する比率(%)を指す。全体100の下の()には全入射粒子に対する各領域の比率(図4.1.2の左図参照)を示す。以下より各判断基準をID 1の領域1~8の順に示す。表は縦線を挟んで検出器中での反応を含めない場合(左)と反応を含める場合(右)に分かれて示されている。ID 1の領域9にきた粒子はNG(Zがかわった粒子)と判断するので表には示さなかった。

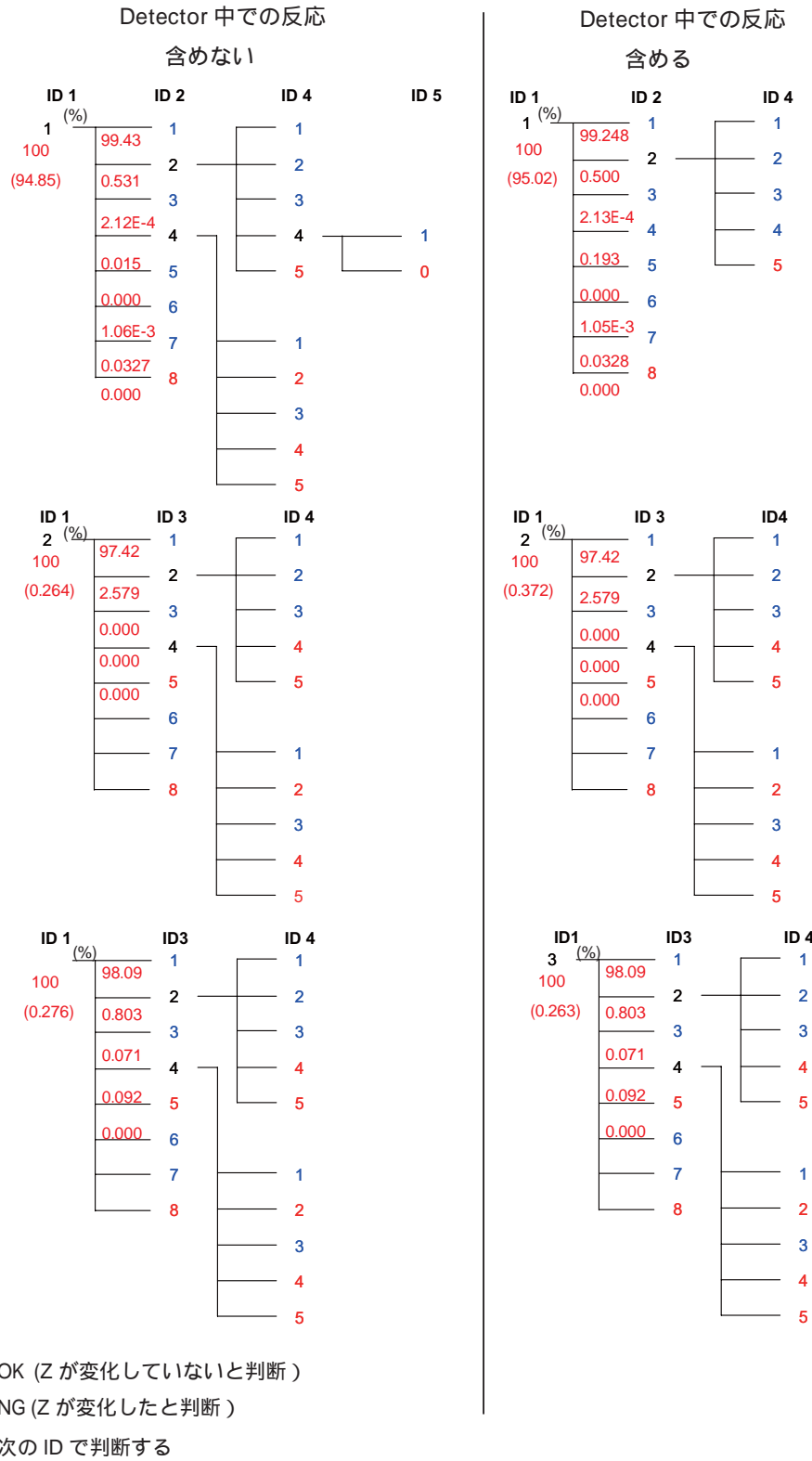
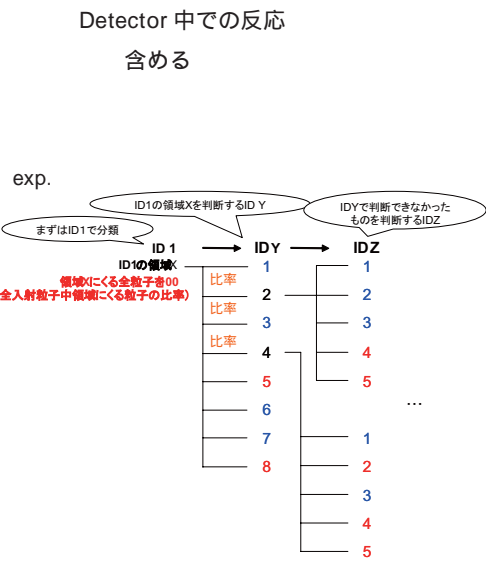
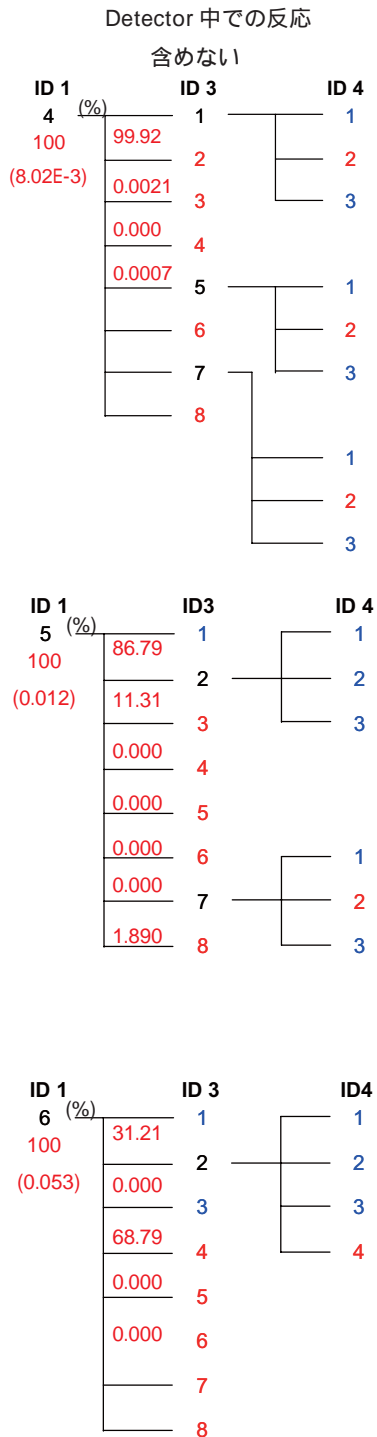


図 4.19: ID1 の領域 1 ~ 3 の各判断基準

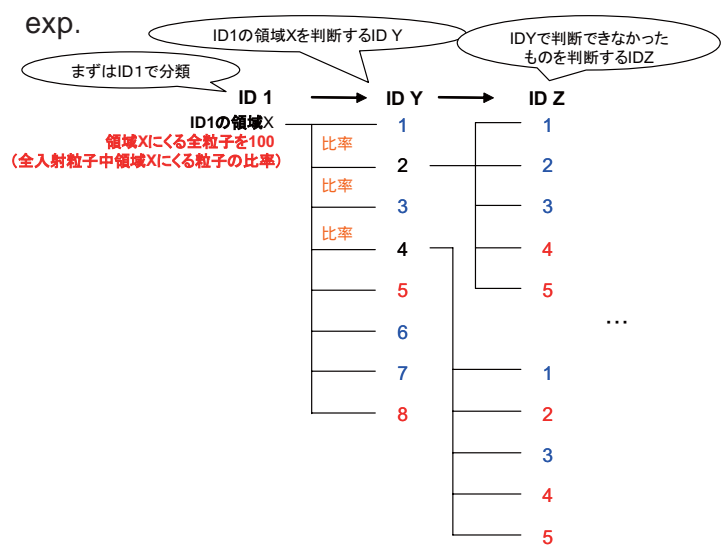
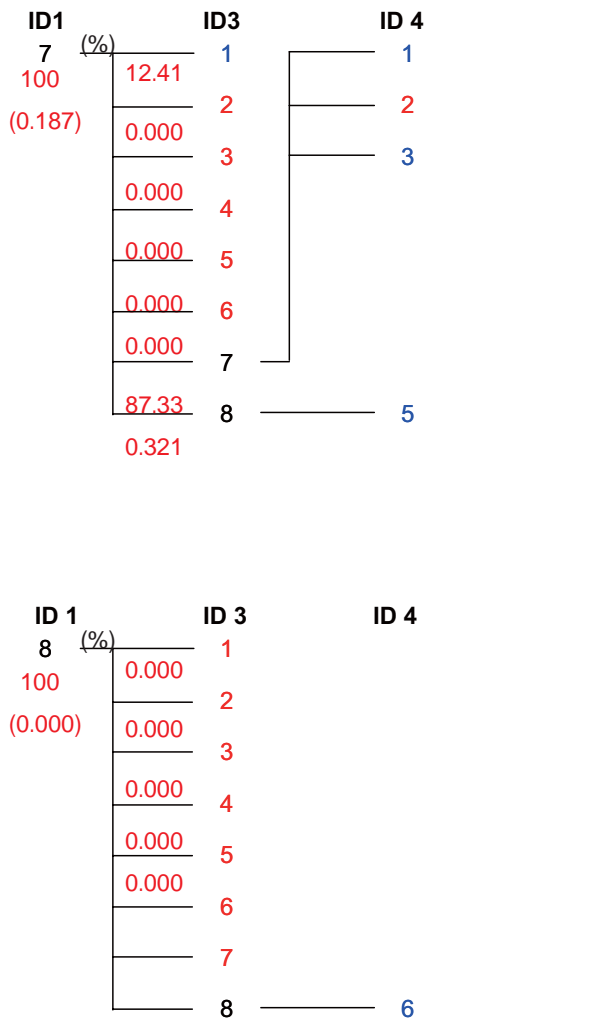


領域 4 以降は
Detector 中での反応を含めないと
同じ選択基準

- ID1 Si1 E (MeV) - Si2 E (MeV)
- ID2 Si2 E (MeV) - Si3 E (MeV)
- ID3 Si1 E (MeV) - Si3 E (MeV)
- ID4 Si3 E (MeV) - NaITKE(MeV)
- ID5 SiSum (MeV) - NaITKE(MeV)

- OK (Z が変化していないと判断)
- NG (Z が変化したと判断)
- 次の ID で判断する

図 4.20: ID1 の領域 4 ~ 6 の各判断基準



- ID1 Si1 E (MeV) - Si2 E (MeV)
- ID2 Si2 E (MeV) - Si3 E (MeV)
- ID3 Si1 E (MeV) - Si3 E (MeV)
- ID4 Si3 E (MeV) - NaITKE(MeV)
- ID5 SiSum (MeV) - NaITKE(MeV)

- OK (Z が変化していないと判断)
- NG (Z が変化したと判断)
- 次の ID で判断する

図 4.21: ID1 の領域 7 ~ 8 の各判断基準

表 1 番目よりほとんどの粒子は ID 1 の領域 1 にくることがわかる。したがって ID 1 の領域 1 の判断基準は、より重要になってくる。そこで、以下に ID 1 の領域 1 を例に挙げての判断基準をどのように決定したかについての説明(表の補足)を行う。

領域 1

ID1(Si1-2のスカッタープロット)で領域 1 にくる粒子は基本的に選出する方針である。こ

の範囲にきたものを ID2(Si2-3 のスキャタープロット) によって選出していく。ID2 の領域 1 にくるものは Si 1, 2, 3 すべてにおいて中心をとってきたものなので Z が変化していないと判断する。ID1 領域 3, 4, 5, 6, 7 は Si 2 の中心分布ではないのでくるはずのない範囲である。しかし選択基準の決定は Si1-2, Si2-3 の相関でそれぞれ決定しているので領域の定義が異なってしまう場合がある。たとえば ID1 で中心分布と判断したものが ID2 では領域 3 (Si2 でチャネリングをおこしたものが含まれる) または領域 5 (Si2 での反応が起こったものが含まれる) にきたものは、中心分布のより近い位置にあるが ID2 では中心分布と判断しなかったことになる。つまり ID1 では中心分布にきたもの、ID2 では中心分布により近くにきたものとなるので OK とする。ID2 領域 2 のものは Si3 でのチャネリングのものが含まれる範囲となりここだけでは判断できないが、ID1 で中心分布であるので ID4 によって、ID4 領域 2 にくるものは選出する。ここでも同様に領域 1, 3 にくるものも OK とする。ここで領域 4 にくるもの NaI で反応が起こったものは反応を含める場合と含めない場合によって選出基準を変える。反応が起こったものを含めないとする場合は ID5 の領域 1 のもののみ選択する。

4.3 誤差

1.3 でも述べたが本研究では、CCCS を 1 % 以内の誤差で決定することを目標としている。ここでは、CCCS の決定に伴う誤差の定義について述べる。CCCS の決定において実際は 4.2.1 で述べたように各入射粒子 N_{inc}, N_{0inc} の不純物の混合を考慮しなければならないが、本解析の結果、不純物の混合が無視できるほど小さくなった (不純物の混合数は 0.0001 個以下) ので式 2.1 はこの補正の影響を受けない。したがって CCCS は 2.1 より得られる。

誤差の伝播則より、 σ_{cc} の誤差を式のように定義した。

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{cc}}{\sigma_{cc}}\right)^2 = \left\{ \frac{1-\gamma}{N_{inc}\gamma} + \frac{1-\gamma_0}{N_{0inc}\gamma_0} + \left[\frac{\Delta(\gamma/\gamma_0)}{\gamma/\gamma_0} \right]^2 \right\} \left(\frac{1}{\sigma_{cct}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 \quad (4.5)$$

式は各データの統計誤差及び系統誤差による項と反応標的における厚さの誤差による項とで大別される。散乱標的の厚さは 2.5 で述べた通り $x = 0.652 \pm 0.001$ [g/cm²] である。ここで以下に示す、各データの統計誤差及び系統誤差による項について述べる。

$$\left\{ \frac{1-\gamma}{N_{inc}\gamma} + \frac{1-\gamma_0}{N_{0inc}\gamma_0} + \left[\frac{\Delta(\gamma/\gamma_0)}{\gamma/\gamma_0} \right]^2 \right\} \left(\frac{1}{\sigma_{cct}}\right)^2 \quad (4.6)$$

内の第一項及び第二項はそれぞれ二項分布による標的あり及びなしのデータにおける統計誤差を示し、その標準偏差は以下のように定義される。

$$\Delta N_{ncc} = \sqrt{N_{inc}\gamma(1-\gamma)}, \quad \Delta N_{0ncc} = \sqrt{N_{0inc}\gamma_0(1-\gamma_0)} \quad (4.7)$$

また第三項は解析手法における系統誤差を示し、4.2.1 で述べた定義した入射粒子に含まれる不純物の混合数 $\Delta_{inc}, \Delta_{0inc}$ と 4.2.2 で述べたそれぞれの選択判断基準で決定した値に対する誤差が含まれる。第三項をその 2 つの要素により以下のように表記できる。

$$\left(\frac{\Delta(\gamma/\gamma_0)}{\gamma/\gamma_0}\right)^2 = \left(\frac{\Delta(\gamma/\gamma_0)_N}{\gamma/\gamma_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\gamma/\gamma_0)_S}{\gamma/\gamma_0}\right)^2 \quad (4.8)$$

ここで、第一項は不純物の混合によ ($0 \ll 1$) となるので実際は判断基準の違いによる第二項のみとなる。第二項において本解析では、選択判断基準による場合わけによる誤差の検証と、検出器中での反応を含める場合とそうでない場合による場合わけによる誤差の検証を行った。しかし、後者はここで述べた CCCS の誤差に含めず、最終的にそれぞれの場合で決定した CCCS の比較に用いた。この系統誤差については後に結果を用いて議論する。

第5章 結果・議論

- 本章では、解析結果より決定した CCCS の決定の結果を示す。また得られた結果より、本測定手法の有効性の検証及び考察を行う。また 2009 年に行った実験値との比較による議論を行う。

5.1 結果 [荷電変化断面積の決定]

ここでは実験結果を示す。2.1 で述べたように γ 、 γ_0 の定義、及び CCCS の計算式は次式のようになる。

$$\sigma_{cc} = \frac{1}{t} \ln \frac{\gamma_0}{\gamma} \quad (5.1)$$

$$\gamma_0 = \frac{N_{0ncc}}{N_{0inc}}, \quad (\text{標的なし}) \quad (5.2)$$

$$\gamma = \frac{N_{ncc}}{N_{inc}}, \quad (\text{標的あり}) \quad (5.3)$$

以下に 4.2.2 で述べた判断基準に従って、散乱標的通過後に陽子数 (Z) が変化しなかった粒子の計数結果を ID 1 での領域別に示す。また、それぞれの領域の計数が全体 (標的通過後の透過計数) のどれくらいの割合を占めているのかを表す比率 (全体を 1 とする) も示す。

表 5.1: ^{12}C 散乱標的あり (Detector 中での反応を含めない場合)

| | Total Incident | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|--------------------------|-------------|-------------|------|-------------|
| 0.001 | 498977 | 473293 | 1861 | 1316 | 40 | 53 | 266 | 931 | 0 | 477760 |
| 比率 | | 0.948526686 | 0.003729631 | 0.002637396 | 8.0164×10^{-5} | 0.000106217 | 0.000533091 | 0.001865817 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.957479002 |
| 0.003 | 498977 | 472024 | 1897 | 1309 | 62 | 56 | 277 | 3577 | 0 | 477382 |
| 比率 | | 0.942336019 | 0.003801778 | 0.002623367 | 0.000124254 | 0.00011223 | 0.000555136 | 0.007168667 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.956721452 |
| 0.005 | 498977 | 469583 | 1936 | 1345 | 70 | 66 | 296 | 3884 | 0 | 477180 |
| 比率 | | 0.941091473 | 0.003879938 | 0.002695515 | 0.000140287 | 0.000132271 | 0.000593214 | 0.007783926 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.956316624 |
| 0.01 | 498977 | 467816 | 1906 | 1347 | 104 | 58 | 316 | 5412 | 0 | 476959 |
| 比率 | | 0.937550228 | 0.003819815 | 0.002699523 | 0.000208426 | 0.000116238 | 0.000633296 | 0.010846191 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.955873718 |
| 0.015 | 498977 | 465328 | 1917 | 1344 | 118 | 55 | 322 | 7399 | 0 | 476483 |
| 比率 | | 0.932564026 | 0.00384186 | 0.002693511 | 0.000236484 | 0.000110226 | 0.00064532 | 0.014828339 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.954919766 |
| 0.02 | 498977 | 462501 | 1920 | 1364 | 150 | 51 | 351 | 10141 | 0 | 476478 |
| 比率 | | 0.926898434 | 0.003847873 | 0.002733593 | 0.000300615 | 0.000102209 | 0.000703439 | 0.020323582 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.954909745 |
| 0.045 | 498977 | 441622 | 2124 | 1500 | 280 | 41 | 501 | 29023 | 0 | 475091 |
| 比率 | | 0.885054822 | 0.004256709 | 0.003006151 | 0.000561148 | 8.21681×10^{-5} | 0.001004054 | 0.058165006 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.95213005 |

表 5.2: ^{12}C 散乱標的なし (Detector 中での反応を含めない場合)

| | Total Incident | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.001 | 383466 | 379190 | 657 | 216 | 23 | 28 | 20 | 145 | 0 | 380279 |
| 比率 | | 0.988849077 | 0.00171332 | 0.000563283 | 5.99792×10^{-5} | 7.30182×10^{-5} | 5.21559×10^{-5} | 0.00037813 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.991688963 |
| 0.003 | 383466 | 378666 | 753 | 240 | 28 | 20 | 28 | 400 | 0 | 380135 |
| 比率 | | 0.987482593 | 0.001963668 | 0.00062587 | 7.30182×10^{-5} | 5.21559×10^{-5} | 7.30182×10^{-5} | 0.001043117 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.991313441 |
| 0.005 | 383466 | 378397 | 743 | 211 | 22 | 18 | 34 | 467 | 0 | 379892 |
| 比率 | | 0.986781097 | 0.00193759 | 0.000550244 | 5.73714×10^{-5} | 4.69403×10^{-5} | 8.8665×10^{-5} | 0.001217839 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.990679747 |
| 0.01 | 383466 | 378035 | 755 | 240 | 46 | 20 | 42 | 652 | 0 | 379790 |
| 比率 | | 0.985837076 | 0.001968884 | 0.00062587 | 0.000119958 | 5.21559×10^{-5} | 0.000109527 | 0.001700281 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.990413752 |
| 0.015 | 383466 | 377493 | 791 | 257 | 53 | 20 | 38 | 1005 | 0 | 379657 |
| 比率 | | 0.984423652 | 0.002062764 | 0.000670203 | 0.000138213 | 5.21559×10^{-5} | 9.90961×10^{-5} | 0.002620832 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.990066916 |
| 0.02 | 383466 | 376650 | 817 | 362 | 88 | 20 | 48 | 1646 | 0 | 379631 |
| 比率 | | 0.982225282 | 0.002130567 | 0.000944021 | 0.000229486 | 5.21559×10^{-5} | 0.000125174 | 0.004292427 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | 0.989999113 | |
| 0.045 | 383466 | 368194 | 1021 | 587 | 167 | 20 | 113 | 8448 | 0 | 378550 |
| 比率 | | 0.960173783 | 0.002662557 | 0.001530775 | 0.000435501 | 5.21559×10^{-5} | 0.000294681 | 0.022030636 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.987180089 |

とそれぞれの結果を示している。それぞれの計数の結果より得られた CCCS の値、及び各統計誤差と系統誤差などの 4.3 でのべた誤差の各パラメータを以下の表に示す。ここで

$\gamma(\gamma_0)$ 散乱標的あり (なし) での透過率

X 散乱標的の厚さ (g/cm^2)

t 散乱標的の厚さ ($1/\text{cm}^2$)

σ_{cc} CCCS (mb)

N_n 不純物の混合数(個) ここでは N_n をすべて最大で見積もり、0.00001 個 ($\ll 1$) とした。

$\Delta(t)\sigma$ 散乱標的の厚さによる誤差 (mb)

$\Delta(\text{stat.})\sigma$ 統計誤差 (mb)

$\Delta(\text{sys.})\sigma$ 系統誤差 (mb)

$\Delta\sigma$ 誤差の伝播則より得た CCCS の誤差 (mb)

表 5.3: ^{12}C (Detector 中での反応を含めない場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|-------------------------|---------------|--------------------------|
| 0.957479 | 0.991689 | 1.03573 | 0.0351057 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1073.9 | 1091.7 |
| 0.956721 | 0.991313 | 1.03616 | 0.0355184 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1086.5 | |
| 0.956317 | 0.990680 | 1.03593 | 0.0353023 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1079.9 | |
| 0.955874 | 0.990414 | 1.03613 | 0.0354970 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1085.9 | |
| 0.954920 | 0.990067 | 1.03681 | 0.0361452 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1105.7 | |
| 0.954910 | 0.989999 | 1.03675 | 0.0360872 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1103.9 | |
| 0.952130 | 0.987180 | 1.03681 | 0.0361508 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1105.9 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1-\gamma)/(N_{inc}\gamma)$ | $(1-\gamma_0)(N_{inc}\gamma_0)$ | $(\Delta\gamma/\gamma_0)/(\gamma/\gamma_0)^2$ | $1/\sigma_{cc}t$ | $\Delta t/t$ | |
| 0.00001 | 0.0032 | 8.90007×10^{-8} | 2.18551×10^{-8} | 1.0817×10^{-16} | 0.00093119 | 0.001534 | 8.49204×10^{-6} |
| 0.00001 | 0.003162278 | 9.06581×10^{-8} | 2.28512×10^{-8} | 1.0817×10^{-16} | 0.000920369 | 0.001534 | 8.49204×10^{-6} |
| 0.00001 | 0.003162278 | 1.0076×10^{-7} | 3.38658×10^{-8} | 1.0817×10^{-16} | 0.00090427 | 0.001534 | 8.49204×10^{-6} |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat.})\sigma$ | $\Delta(\text{sys.})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 1.6 | 10.2 | 13.3 | 16.8 | | | | |
| 1.7 | 10.3 | 13.3 | 16.8 | | | | |
| 1.7 | 11.5 | 13.3 | 17.6 | | | | |

表の 1 列目は CCCS 決定に用いる各パラメータ (式 2.5 参照) 及び CCCS の値を示している。表の 2 列目は CCCS の誤差 ($\Delta\sigma_{cc}$) を与える各パラメータ (式 4.5 参照) を示している。表の 3 列目は $\Delta\sigma_{cc}$ を散乱標的の厚さ t による誤差 $\Delta(t)\sigma$ 、統計誤差 $\Delta(\text{stat.})\sigma$ 、系統誤差 $\Delta(\text{sys.})\sigma$ に内訳したそれぞれの値と $\Delta\sigma_{cc}$ を示している。 $\Delta(\text{sys.})\sigma$ の値は判断基準の違いによって得られた CCCS の値をすべてとりうる値であるとして決定している。この誤差においては 5.2 で詳しく述べる。

種々の核種は Detector 中での反応を含めなかった場合と含めた場合に基準をわけた。上に述べたものは ^{12}C の反応を含めなかった場合である。 ^{12}C の反応を含めた場合及び $^{13,15}\text{C}$ の結果については付録 D に示す

CCCS 決定における各パラメータと CCCS の値を述べた。これらの $^{12,13,15}\text{C}$ の結果を以下にまとめて示す。

表 5.4: $^{12}\text{C}, ^{13}\text{C}, ^{15}\text{C}$ の CCCS(反応を含めない)

| 核種 | σ_{cc} (mb) | $\Delta\sigma_{cc}(\%)$ | $\Delta\sigma_{cc}(t)$ | $\Delta\sigma_{cc}(\text{stat})$ | $\Delta\sigma_{cc}(\text{sys})$ |
|-----------------|--------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| ^{12}C | 1092 | $\pm 17(1.6)$ | $\pm 2(0.1)$ | $\pm 10(1.0)$ | $\pm 13(1.2)$ |
| ^{13}C | 1044 | $\pm 33(3.1)$ | $\pm 2(0.2)$ | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 31(2.9)$ |
| ^{15}C | 1157 | $\pm 32(2.7)$ | $\pm 3(0.3)$ | $\pm 23(2.0)$ | $\pm 27.2(2.3)$ |

表 5.5: $^{12}\text{C}, ^{13}\text{C}, ^{15}\text{C}$ の CCCS(反応を含める)

| 核種 | σ_{cc} (mb) | $\Delta\sigma_{cc}(\%)$ | $\Delta\sigma_{cc}(t)$ | $\Delta\sigma_{cc}(\text{stat})$ | $\Delta\sigma_{cc}(\text{sys})$ |
|-----------------|--------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| ^{12}C | 1087 | $\pm 17(1.6)$ | $\pm 2(0.1)$ | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 14(1.3)$ |
| ^{13}C | 1040 | $\pm 33(3.2)$ | $\pm 2(0.2)$ | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 31(2.9)$ |
| ^{15}C | 1152 | $\pm 35(3.0)$ | $\pm 3(0.3)$ | $\pm 27(2.3)$ | $\pm 28(2.4)$ |

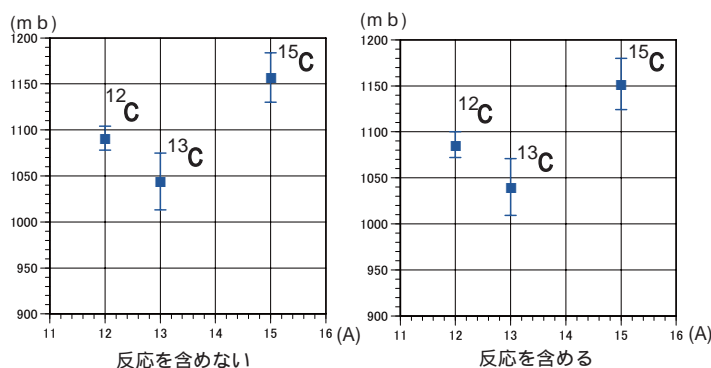


図 5.1: CCCS の決定

図 5.1 より CCCS の値を 4% 以内の精度で得ることができた。2009 年の実験では 8% 以内の精度しか得られなかったため、2010 年の新たな実験によって CCCS の有効性をより高めることができたといえる。

5.2 結果からの考察

結果より $^{12}\text{C}, ^{13}\text{C}, ^{15}\text{C}$ の CCCS を約 3% の精度で決定することができた。

ここで $\Delta\sigma_{cc}$ 内訳について考察を行う。 $^{12}\text{C}, ^{13}\text{C}, ^{15}\text{C}$ の CCCS に対して以下の結果を得た。

| | |
|---------|---|
| 厚さによる誤差 | $\Delta t \leq 0.3\%$ |
| 統計誤差 | $\Delta(\text{stat.})\sigma \leq 2.3\%$ |
| 系統誤差 | $\Delta(\text{sys.})\sigma \leq 3\%$ |

これより Δt は $\Delta(\text{stat.})\sigma$ や $\Delta(\text{sys.})\sigma$ と比べるとかなり小さいので、 $\Delta\sigma_{cc}$ は統計誤差 $\Delta(\text{stat.})\sigma$ と系統誤差 $\Delta(\text{sys.})\sigma$ に依存していることがわかる。 $\Delta(\text{stat.})\sigma$ は $^{12,13}\text{C}$ においては 1% となるが、 ^{15}C の統計数が少かったため 2.3% の精度しか得られなかった。散乱標的ありの ^{15}C の入射粒子数は 1 6 0 4 1 3 であり、標的なしでの、 ^{15}C の入射粒子数は 3 7 0 3 2 3 であった。散乱標的ありでの入射粒子数が 3 5 0 0 0 0 あれば統計誤差を 1% 以内に改善できる。また、系統誤差 $\Delta(\text{sys.})\sigma$ において、不純物の混合による影響は無視できるほど小さいので $\Delta(\text{sys.})\sigma_{cc}$ の値は判断基準による誤差のみに依存する。この判断基準による誤差の要因は明確でないため、以下に述べるような検証を行った。

判断基準の違いは選択範囲の幅に依るものなので、幅を広げることでバックグラウンドの影響が大きくなる等の要因が考えられる。したがって、 ^{12}C において選択範囲基準を細かく変化させて CCCS の値が選択範囲の幅にどう依存するかをみた。3.1.3 でも述べたが、選択範囲は各ピークのカウント数の何%のレベルまでのイベントを採用するかによって決定した。

^{12}C においては

- 0.1% (比率 0.001)
- 0.3% (0.003)
- 0.5%(0.005)
- 1% (0.01)
- 1.5%(0.015)
- 2% (0.02)
- 4.5%(0.045)

と細かく分類し、それぞれの場合で CCCS の決定を行った。ここで、この範囲の幅による CCCS の依存性をみるために各選択範囲基準での CCCS の値をプロットしたものを図 5.2 に示す。

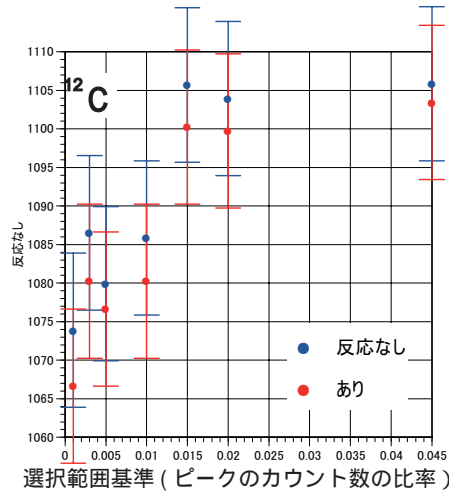


図 5.2: CCCS の値

ここでの誤差棒は各 $\Delta\sigma_{cc}(\text{stat})$ を示している。図 5.2 に示すグラフの横軸の値は、ピークのカウンタ数の何%のレベルまでを範囲として採用しているかを示している。つまり、この値が小さいほど選択範囲が広がる。図 1.2 より 1.5% (0.0015) よりも小さい値にすれば CCCS の値は小さくなる傾向があるように見える。本来なら同じ値になるはずの CCCS の値が小さいということは、非反応率が大きいことを示すので、余分なイベントを選択してしまっていることが考えられる。範囲を広げれば広いほど多くのバックグラウンドを拾ってしまうことになるので、これがバックグラウンドにおける影響であれば、1.5% よりも広い範囲になればバックグラウンドの効果が現れると考えられる。ここで、1.5% よりも狭い範囲で CCCS を決定したときの 3 つの CCCS の値より、系統誤差を考慮した結果を以下に示す。

表 5.6: ^{12}C (Detector 中での反応を含めない場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|----------------|--|
| 0.954920 | 0.990067 | 1.036806 | 0.0361452 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1105.7 | 1105.2 |
| 0.954910 | 0.989999 | 1.036746 | 0.0360872 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1103.9 | |
| 0.952130 | 0.987180 | 1.036812 | 0.0361508 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1105.9 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma) / (N_{inc} \gamma)$ | $(1 - \gamma_0) / (N_{inc} \gamma_0)$ | $(\Delta \gamma / \gamma) / (\gamma / \gamma_0)^2$ | $1 / \sigma_{cc} t$ | $\Delta t / t$ | $(\Delta \sigma_{cc} / \sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 9.87186×10^{-8} | 2.63826×10^{-8} | 1.12807×10^{-16} | 27.66618239 | 0.001534 | 0.000104247 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 9.86611×10^{-8} | 2.65645×10^{-8} | 1.12956×10^{-16} | 27.71064182 | 0.001534 | 0.00010465 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 1.05135×10^{-7} | 3.41497×10^{-8} | 1.13097×10^{-16} | 27.66187223 | 0.001534 | 0.00011507 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 1.7 | 10.8 | 1.1 | 10.9 | | | | |
| 1.7 | 10.8 | 1.1 | 10.9 | | | | |
| 1.7 | 11.4 | 1.1 | 11.5 | | | | |

表 5.7: ^{12}C (Detector 中での反応を含める場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|---------------|-------------------------------------|
| 0.956599 | 0.991632 | 1.036622 | 0.0359672 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1100.2 | 1101.1 |
| 0.956567 | 0.991582 | 1.036605 | 0.0359507 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1099.7 | |
| 0.953695 | 0.988724 | 1.036729 | 0.0360709 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1103.4 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma)/(N_{inc}\gamma)$ | $(1 - \gamma_0)/(N_{inc}\gamma_0)$ | $(\Delta \gamma/\gamma_0)/(\gamma/\gamma_0)^2$ | $1/\sigma_{cc}t$ | $\Delta t/t$ | $(\Delta\sigma_{cc}/\sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 9.53405×10^{-8} | 2.22296×10^{-8} | 1.13281×10^{-16} | 27.80313887 | 0.001534 | 9.93754×10^{-5} |
| 0.00001 | 0.003162278 | 9.51277×10^{-8} | 2.23623×10^{-8} | 1.13281×10^{-16} | 27.72315008 | 0.001534 | 9.87917×10^{-5} |
| 0.00001 | 0.003162278 | 1.02029×10^{-7} | 3.00415×10^{-8} | 1.13097×10^{-16} | 27.72315008 | 0.001534 | 0.000109998 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 1.7 | 10.5 | 2.0 | 10.7 | | | | |
| 1.7 | 10.5 | 2.0 | 10.6 | | | | |
| 1.7 | 11.1 | 2.0 | 11.3 | | | | |

表 5.8: Detector 中での反応を含めない場合

| 核種 | σ_{cc} (mb) | $\Delta\sigma_{cc}$ (%) | $\Delta\sigma_{cc}$ (stat) | $\Delta\sigma_{cc}$ (sys) |
|-----------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| ^{12}C | 1105 | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 1(0.1)$ |

表 5.9: Detector 中での反応を含める場合

| 核種 | σ_{cc} (mb) | $\Delta\sigma_{cc}$ (%) | $\Delta\sigma_{cc}$ (stat) | $\Delta\sigma_{cc}$ (sys) |
|-----------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| ^{12}C | 1101 | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 2(0.2)$ |

この結果 $\Delta\sigma_{cc}$ (sys) は

Detector 中での反応を含めない場合 0.1%

Detector 中での反応を含める場合 0.2%

と非常に精度よく CCCS を決定することができた。ここで、同様に $^{13,15}\text{C}$ における 1.5% (0.015)、4.5% (0.045) の CCCS によって系統誤差を決定した結果を以下に示す。

表 5.10: ^{13}C (Detector 中での反応を含めない場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--|------------------------|---------------|-------------------------------------|
| 0.936777 | 0.968988 | 1.034385 | 0.033807 | 0.652 | 3.06×10^{-23} | 1034.2 | 1056.5 |
| 0.928498 | 0.961827 | 1.035896 | 0.035267 | 0.652 | 3.06×10^{-23} | 1078.8 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma)/(N_{inc}\gamma)$ | $(1 - \gamma_0)/(N_{inc}\gamma_0)$ | $(\Delta \gamma/\gamma_0)/(\gamma/\gamma_0)^2$ | $1/\sigma_{cc}t$ | $\Delta t/t$ | $(\Delta\sigma_{cc}/\sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 9.46×10^{-8} | 4.63×10^{-8} | 4.06×10^{-17} | 29.57966915 | 0.001534 | 0.000131777 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 1.08×10^{-7} | 5.75×10^{-8} | 4.06×10^{-17} | 28.35530357 | 0.001534 | 0.00014145 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 1.6 | 11.5 | 31.5 | 33.6 | | | | |
| 1.6 | 12.4 | 31.5 | 33.9 | | | | |

表 5.11: ^{13}C (Detector 中での反応を含める場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------|----------------|--|
| 0.940291 | 0.972378 | 1.034125 | 0.033555 | 0.652 | 3.06×10^{-23} | 1026.5 | 1051.3 |
| 0.933080 | 0.966487 | 1.035802 | 0.035176 | 0.652 | 3.06×10^{-23} | 1076.0 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma) / (N_{inc} \gamma)$ | $(1 - \gamma_0) / (N_{inc} \gamma_0)$ | $(\Delta \gamma / \gamma_0) / (\gamma / \gamma_0)^2$ | $1 / \sigma_{cc} t$ | $\Delta t / t$ | $(\Delta \sigma_{cc} / \sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 8.90×10^{-8} | 4.11×10^{-8} | 4.06×10^{-17} | 29.80159669 | 0.001534 | 0.000124043 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 1.00×10^{-7} | 5.02×10^{-8} | 4.06×10^{-17} | 28.42835492 | 0.001534 | 0.00013028 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 1.6 | 11.4 | 35.1 | 36.9 | | | | |
| 1.6 | 12.4 | 35.1 | 37.2 | | | | |

表 5.12: ^{15}C (Detector 中での反応を含めない場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------|----------------|--|
| 0.933459 | 0.969891 | 1.039029 | 0.03829 | 0.652 | 3.06×10^{-23} | 1171.2 | 1168.5 |
| 0.904696 | 0.939839 | 1.038845 | 0.03811 | 0.652 | 3.06×10^{-23} | 1165.8 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma) / (N_{inc} \gamma)$ | $(1 - \gamma_0) / (N_{inc} \gamma_0)$ | $(\Delta \gamma / \gamma_0) / (\gamma / \gamma_0)^2$ | $1 / \sigma_{cc} t$ | $\Delta t / t$ | $(\Delta \sigma_{cc} / \sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 8.90×10^{-8} | 4.11×10^{-8} | 4.06×10^{-17} | 29.80159669 | 0.001534 | 0.000124043 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 1.00×10^{-7} | 5.02×10^{-8} | 4.06×10^{-17} | 28.42835492 | 0.001534 | 0.00013028 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 3.4 | 22.7 | 8.2 | 23.0 | | | | |
| 3.4 | 28.3 | 8.2 | 28.6 | | | | |

表 5.13: ^{15}C (Detector 中での反応を含める場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------|----------------|--|
| 0.931103 | 0.967663 | 1.039266 | 0.0385145 | 0.652 | 3.06×10^{-23} | 1178.2 | 1172.4 |
| 0.902433 | 0.937511 | 1.038871 | 0.0381343 | 0.652 | 3.06×10^{-23} | 1166.5 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma) / (N_{inc} \gamma)$ | $(1 - \gamma_0) / (N_{inc} \gamma_0)$ | $(\Delta \gamma / \gamma_0) / (\gamma / \gamma_0)^2$ | $1 / \sigma_{cc} t$ | $\Delta t / t$ | $(\Delta \sigma_{cc} / \sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 9.46×10^{-8} | 4.63×10^{-8} | 4.06×10^{-17} | 29.57966915 | 0.001534 | 0.000131777 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 1.08×10^{-7} | 5.75×10^{-8} | 4.06×10^{-17} | 28.35530357 | 0.001534 | 0.00014145 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 3.4 | 22.7 | 3.8 | 23.0 | | | | |
| 3.4 | 28.3 | 3.8 | 28.5 | | | | |

表 5.14: 反応を含めない

| 核種 | σ_{cc} (mb) | $\Delta\sigma_{cc}(\%)$ | $\Delta\sigma_{cc}(\text{stat})$ | $\Delta\sigma_{cc}(\text{sys})$ |
|-----------------|--------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| ^{12}C | 1105 | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 1(0.1)$ |
| ^{13}C | 1056 | $\pm 34(3.2)$ | $\pm 12(1.1)$ | $\pm 32(3.0)$ |
| ^{15}C | 1172 | $\pm 28(2.4)$ | $\pm 28(2.4)$ | $\pm 8(0.7)$ |

表 5.15: 反応を含める

| 核種 | σ_{cc} (mb) | $\Delta\sigma_{cc}(\%)$ | $\Delta\sigma_{cc}(\text{stat})$ | $\Delta\sigma_{cc}(\text{sys})$ |
|-----------------|--------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| ^{12}C | 1101 | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 11(1.0)$ | $\pm 2(0.2)$ |
| ^{13}C | 1051 | $\pm 37(3.3)$ | $\pm 12(1.1)$ | $\pm 35(3.3)$ |
| ^{15}C | 1168 | $\pm 28(2.4)$ | $\pm 28(2.4)$ | $\pm 4(0.3)$ |

これより $^{12,15}\text{C}$ の $\Delta\sigma_{cc}(\text{sys})$ は 1% 以内の精度で CCCS を決定することができた。しかし、 ^{13}C においては 3% と改善されなかった。これは各 run ごとにバックグラウンドの異なってくるため、 ^{13}C においては 1.5% の選択範囲基準でも、バックグラウンドの影響がおおきくなってしまった可能性がある。したがって ^{13}C においても、バックグラウンド依存性を検証する。

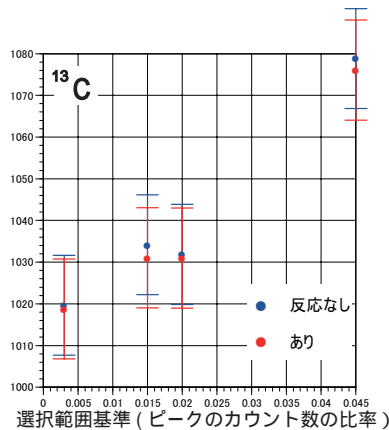


図 5.3: ^{13}C 各選択範囲基準の CCCS

これより、選択範囲基準の近い 2% (0.02) と 1.5% (0.015) では CCCS がほぼ一致し、1.5% 以下で小さくなる傾向が見られる。しかし 4.5% (0.045) において 3% も大きくなってしまいうことがバックグラウンドの依存性では説明できない。

結局、選択範囲基準の近いところでの一致は、幅の広がり小さいために値の変化があまりなかったためであり、1.5% (0.015) よりも広い範囲を適応することで CCCS の値を決定することも不確かである。これより、CCCS の系統誤差は約 3% の精度である。という

結論に行き着く。ここで Detector 中で反応をおこしたものを含めるものとそうでないものの違いによるそれぞれの CCCS の値について検証する。それぞれ独立に決定した CCCS の値を以下に示す。

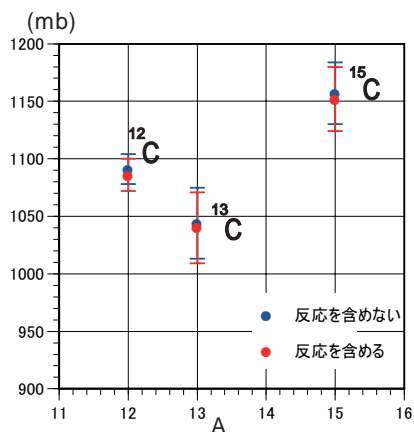
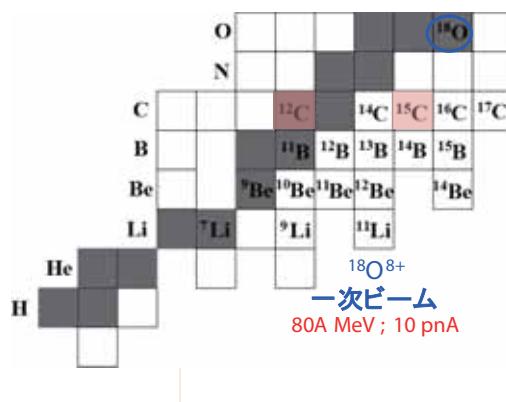


図 5.4: Detector 中の反応を含むか否かによる CCCS

これより Detector 中での反応を含むか否かにおける判断基準の違いによる CCCS の値はそれぞれの run ですべて 1% 以内の精度でうまく一致した。

5.3 第一回実験結果

CCCS の測定の第一回目は 2009 年 10 月に行った。



一次粒子 ^{18}O と一次標的 ^9Be との核破砕反応により生成した ^{12}C 及び ^{15}C を二次標的 ^{12}C に入射し、散乱された粒子を 4 枚の SSD と NaI 検出器を用いて識別した。この実験で得られた結果を以下に示す。

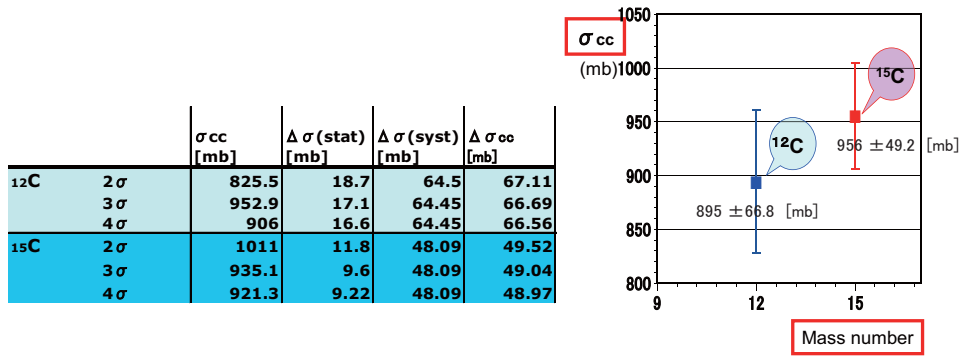


図 5.5: 2009 年 10 月の実験での CCCS の決定

左に示す表での σ_{cc} は CCCS の値、 $\Delta\sigma_{cc}(\text{stat})$ は統計誤差、 $\Delta\sigma_{cc}(\text{syst})$ は系統誤差、 $\Delta\sigma_{cc}$ は統計誤差と系統誤差から決定した誤差を示す。ここではそれぞれ ^{12}C 、 ^{15}C の CCCS は

$$^{12}\text{C}: \quad 895 \pm 66.8 \text{ [mb]}$$

$$^{15}\text{C}: \quad 956 \pm 49.2 \text{ [mb]}$$

と決定した。この結果、統計誤差は 1~2% で測定することができたが系統誤差が 7~8% となり全体では 7~8% の精度しか得られなかった。

5.4 実験結果の比較

今回の実験値との比較を行うために 2 回の実験で決定した $^{12,15}\text{C}$ の CCCS をプロットしたものを以下に示す。

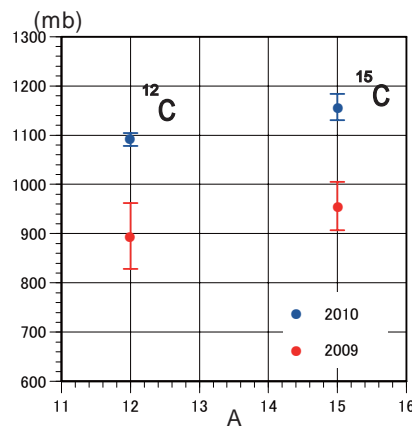


図 5.6: CCCS の比較

これより、前回7～8%だった誤差が今回約3%の精度で決定できた。しかし、両者のCCCSが誤差の範囲で一致していない。

2009年と2010年の解析手法は、方針的な違いはないが選択基準は異なるものを用いた。原理的にこの選択基準の違いがあっても両者とも、散乱標的ありとなしのデータにおいては同じ基準を用いているため、CCCSの値には影響しないはずである。また、2009年と2010年では同じ核種において散乱標的の中心でのエネルギーが異なる。

表 5.16: 2009年と2010年の散乱標的の中心での $^{12,15}\text{C}$ のエネルギー

| | 2009年 | 2010年 |
|--------------------|----------|----------|
| $^{12,15}\text{C}$ | 55 A MeV | 45 A MeV |

表 5.16 よりエネルギーの差は 10 A MeV ある。CCCS はエネルギー依存性を持ち、エネルギーが低いほど CCCS は小さくなることが知られている。反応断面積のエネルギー依存性のデータを以下に示す。

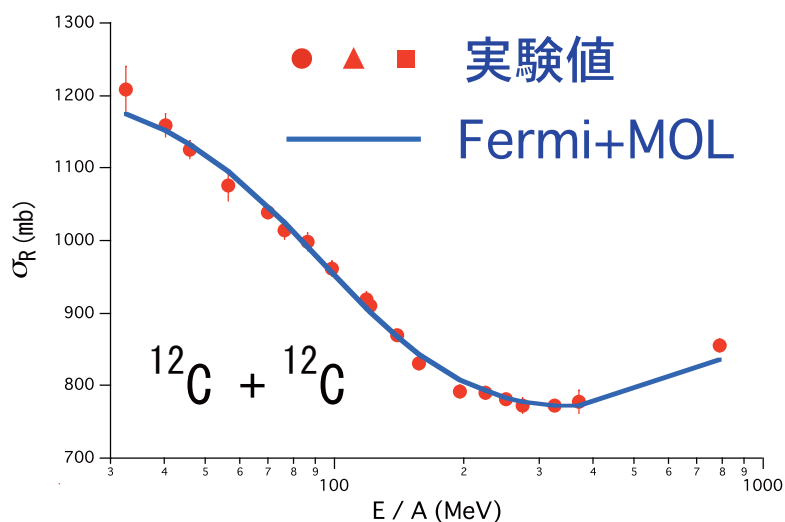


図 5.7: 反応断面積のエネルギー依存性

2009年と2010年の結果55A MeVと45 A MeVでは反応断面積の値は1.8%ほど小さくなる。しかし、本実験結果では約22%も異なっている。したがって、両実験結果のCCCSの値のずれはエネルギー依存性だけでは説明できない。したがって、その要因は不確かであるため、再度、解析手法をつめる必要がある。

第6章 結論

本実験は、2010年9月に大阪大学核物理研究センター (RCNP) の EN コースで行われた。核破砕片分離装置によって $^{12,13,15}\text{C}$ を生成し、それらを入射粒子として ^{12}C と衝突させた。実験手法にはトランスミッション法を用いた。散乱標的の上流及び下流に設置した検出器よりその計数を測定し、得られた計数より荷電変化断面積を決定した。得られた結果は、以下のようになった。

^{12}C : 1091 ± 17 (mb)

^{13}C : 1044 ± 33 (mb)

^{15}C : 1157 ± 35 (mb)

したがって、それぞれの CCCS を約 3 % の精度で決定することができた。しかし、2009 年に行った実験結果との値が一致せず、決定した CCCS の値が不確かであることがわかった。今後の展望を以下に述べる。

- 系統誤差がまだ完全に理解できていないことから、その要因を再度検証しなおす。
- 前回の実験のデータと今回の実験データ双方において解析手法を改め、その要因を明らかにしより精密な実験を行うための考察を行う。
- 精度のよい CCCS の値を得て、さらに中性子過剰な C 同位体へ適応する。
- それぞれの CCCS から荷電半径を導出し、C 同位体における不安定核の構造を理解する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、温かいご指導、ご協力、ご助言を頂いた皆様に心から感謝しております。他大学生でありながら、RCNPのような素晴らしい実験施設で最先端の研究を行うことができたことは、私にとって人生の貴重な財産です。その機会を与えて下さった指導教官である谷畑勇夫先生、並びに比連崎悟先生には厚く御礼申し上げます。谷畑勇夫先生は、研究のノウハウに留まらず、ありとあらゆる面で惜しみなくその知識を分け与えて下さりました。比連崎悟先生は、ゼミや日常生活において、手厚くご指導頂きました。また、私の研究生生活を常に気にかけて、温かく見守り続けて下さりました。

また、同じく王恵仁先生は、無知で不器用な私に終始熱心にご指導下さりました。実験の楽しさ・努力を継続することの大変さ・達成感をこの2年間で実感させて下さったこと、感謝の気持ちでいっぱいです。

坂口治隆先生には、多大なる助言と励ましの言葉を頂きました。基礎的なことも知らなかった私にいつでも温かく親身になってご指導下さったこと心より感謝しております。

大阪大学理学研究科の福田光順先生、松多健策先生、三原基嗣先生、西村太樹さん、筑波大学の小沢顕さん、鈴木宏さん、長江大輔さん、横山和幸さん、京都大学の川畑貴裕さん、理研の武智麻耶さん、埼玉大学の山口貴之さん、高知工科大学の百田佐多生さんには、実験共同者としてご協力とご指導を頂き、心より感謝しております。同じく、高橋豊さん、住重加速器サービスの皆様、放射線管理室の皆様、本実験を成し遂げることができたのは、皆様のお陰です。本当にありがとうございました。

中井浩二先生には、日頃より教育及び研究における多大なるご指導を頂いて参りました。深く感謝いたします。民井淳先生、藤原守先生、鈴木智和さん、銭廣十三さんをはじめ、RCNPの皆様には、終始温かなご支援、ご指導を頂きました。元気で明るいRCNPの皆様と過ごせた2年間は、私にとって大変楽しく、充実感の得られた、そしてかけがえのない日々でした。本当にありがとうございました。

奈良女子大学の永廣秀子先生は、研究のことから生活面に関わる悩み事でも、親身になって相談に乗って頂きました。心より感謝しております。

大阪大学の廣田航介先輩、奈良女子大学の同研究室の先輩方はいつも温かく、よきア

ドバイスを下さりました。また、同期の内藤卓真くん、池野なつみさん、岩崎るりさんには大変お世話になりました。内藤卓真くんには、2年間わがままばかりで散々迷惑をかけてしまいましたが、そんな中でも常に温かく支えてくれました。

池野なつみさんと岩崎るりさんは、楽しいときも、落ち込むことがあっても、いつも親身になって相談にのってくれました。大阪大学の田中純貴くんは、いつも明るく、研究生生活を和ましてくれました。熱心な姿にも大変励まされました。同じく共に過ごしてきたたくさんの友人達に支えられ、今日までくることができました。素晴らしい先輩方・友人達・後輩達に恵まれたこと心より感謝しております。

最後にどんなときでも私のことを見守り続けてくれた両親と家族には、どんな言葉をもってしてもこの感謝の意を十分に述べることはできません。私を支えてくれたすべての方々、本当にありがとうございました。

付録A 双極磁石D1, D2の磁場設定

| 粒子 | 1次ターゲット (mm) | D1 (mT) | Degrader (mm) | $X = d_0/R$ | D2 (mT) |
|-------------------|--------------|--------------|---------------|-------------|---------|
| ^{15}C | 1.5 | 1377 | 2.0 | 0.264 | 1259 |
| $^{15}\text{C}_b$ | 2.5 | 1242 | 2.5 | 0.495 | 1024 |
| ^{13}C | 1.5 | 1221 | 2.0 | 0.359 | 844 |
| $^{13}\text{C}_b$ | 6.0 | 1101 | 2.0 | 0.495 | 867 |
| ^{12}C | 1.5 | 1165 | 2.5 | 0.427 | 1014 |
| $^{12}\text{C}_b$ | 3.5 | 1008 | 2.5 | 0.491 | 780 |
| 粒子 | F1 Slit (mm) | 2次ターゲット (mm) | | | |
| ^{15}C | ± 5 | 0.68 | | | |
| $^{15}\text{C}_b$ | ± 5 | 0 | | | |
| ^{13}C | ± 5 | 0.68 | | | |
| $^{13}\text{C}_b$ | ± 5 | 0 | | | |
| ^{12}C | ± 2 | 0.68 | | | |
| $^{12}\text{C}_b$ | ± 9 | 0 | | | |

付録B 式の導出

B.1 CCCSの導出

標的の厚さを t 、入射粒子が通過した標的以外の物質の厚さ(検出器を含む)を t^* とすると

- 散乱標的ありのとき

$$N_{ncc} = N_{inc} e^{-\sigma_{cc}(t+t^*)} \quad (\text{B.1})$$

- 散乱標的なしのとき

$$N_{0ncc} = N_{0inc} e^{-\sigma_{cc}(t^*)} \quad (\text{B.2})$$

求めたい CCCS は $\sigma_{cc} = \sigma_{cc}(t+t^*) - \sigma_{cc}(t^*)$ である。

$\sigma_{cc} t^* = \ln(N_{ncc}/N_{0ncc})$ より

$$\sigma_{cc} = \frac{1}{t} \ln \frac{N_{0ncc}/N_{0inc}}{N_{ncc}/N_{inc}} = \frac{1}{t} \ln \frac{\gamma_0}{\gamma} \quad (\text{B.3})$$

$$\gamma_0 = \frac{N_{0ncc}}{N_{0inc}}, \quad (\text{標的なし}) \quad (\text{B.4})$$

$$\gamma = \frac{N_{ncc}}{N_{inc}}, \quad (\text{標的あり}) \quad (\text{B.5})$$

B.2 ベーテブロッホの式

高速の荷電粒子は、物質を通過すると主に物質中の電子との電磁相互作用によってエネルギーを失う。電子より重い粒子の場合、エネルギーを失う過程で運動方向を殆んど変えないので、通過した物質の単位厚さ当りのエネルギー損失 dE/dx (阻止能とも呼ばれる)を一意的に定義する事が出来る。ここでの dx の単位を $[cm^2/g]$ とすると以下の式を用いることができる

$$-\frac{dE}{dx} = Dz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (\text{B.6})$$

ここで Z 、 A 、 I は吸収物質の原子番号と質量数、及び平均励起エネルギーである。また、 z は入射粒子の荷電数で、 $\beta = v/c$ は光速で規格化した入射粒子の速度、 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ は相対論の γ 係数である。 $m = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ は電子の質量である。

T_{max} は入射粒子が自由電子に与える最大の運動エネルギーである。また D はアボガドロ数 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ と、古典電子半径 $r_e = 2.82 \times 10^{-15} \text{ m}$ を使って以下の式で定義される定数である。

$$D = 4\pi N_A r_e^2 m c^2 = 0.3071 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g}$$

これよりエネルギー損失は、入射粒子の電荷 (z) と速度 (v) のみに依存し、入射粒子の質量によらない。ここでは速度がほぼ一定であると考えるので物質による変化は Z/A に依存している。

B.2.1 Degradер 通過後の双極磁石による分析

M_0 を核子の質量として、ベーテプロッホの式より厚さ d の Degradер 通過後の磁気剛性を導出しよう。 M_0 を核子の質量とすると不安定核ビームの質量は AM_0 となる。

$$-\frac{dE}{dx} = k_0 \frac{Z}{A_d} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (\text{B.7})$$

$$E = \frac{1}{2} AM_0 c^2 \beta^2 M_0 = 931 \frac{\text{MeV}}{c} \quad (\text{B.8})$$

β^2 を E の関数として B.7 に代入し、以下に示す。

$$-\frac{dE}{dx} = k_0 \frac{Z}{A_d} \frac{2c^2 AM_0 z^2}{E} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (\text{B.9})$$

また B.9 式の $[\ln]$ の部分は E の変化に対してゆっくり変化するので以下の式が得られる。

$$-\frac{dx}{dE} \simeq \frac{A_d}{k_0 c^2 M_0 Z} \frac{1}{z^2} \frac{E^\alpha}{A} \quad (\text{B.10})$$

今無視した $[\ln]$ の部分を取り入れて、近似的に $\alpha \simeq 0.9$ となる。この B.10 を積分することにより、荷電粒子の飛程 R は以下のように示される。

$$R = \int_E^0 -\frac{dx}{dE} dE = \int_0^E \frac{dx}{dE} dE = \frac{A_d}{k_0 c^2 M_0 Z} \frac{1}{\alpha + 1} \frac{A}{z^2} \left(\frac{E}{A} \right)^{\alpha + 1} \quad (\text{B.11})$$

したがって、Degradер 通過後の入射粒子の質量数 A 、原子番号 Z 、エネルギー E 、Degradер の厚さ d で入射する荷電粒子の飛程 R は

$k_1 \equiv \frac{A_d}{k_0 Z M_0 c^2 \gamma} \gamma = \alpha + 1$ と置き換えて以下に示す式になる。

$$R \simeq k_1 \frac{A}{Z^2} \left(\frac{E}{A} \right)^\gamma \quad (\text{B.12})$$

$$(\text{B.13})$$

$$k_1 \equiv \frac{A_d}{k_0 Z M_0 c^2 \gamma} \gamma = \alpha + 1 \quad (\text{B.14})$$

また、本文中の磁気剛性と運動量の関係式 2.10 を用いると入射エネルギー E は以下のように表すことができる。

$$B\rho = \frac{P}{300z} \quad (\text{B.15})$$

$$E = \frac{1}{2AM_0} p^2 = \frac{(300zB\rho)^2}{2AM_0} \quad (\text{B.16})$$

$$E = k_2 \frac{z^2}{A} (B\rho)^2 \quad (\text{B.17})$$

$$k_2 \equiv \frac{300^2}{2M_0} \quad (\text{B.18})$$

式 B.13 に式 B.17 を代入し、 $k_3 = k_1 k_2^\gamma$ とおくと、以下の式が導出できる。

$$R \simeq k_3 \frac{Z^{2\gamma-2}}{A^{2\gamma-1}} (B\rho)^{2\gamma} \quad (\text{B.19})$$

したがって、Degrader 通過後のもう 1 つの双極磁石による磁気剛性 (Magnet rigidity) $B\rho_2$ は、Degrader による磁気剛性の減少分を考慮して近似的に以下のように表すことができる。

$$B\rho_2 = B\rho_1 \left(1 - \frac{d}{R}\right)^{1/2\gamma} = B\rho_1 \left(1 - \frac{d A^{2\gamma-1}}{k' Z^{2\gamma-2}} (B\rho_1)^{-2\gamma}\right)^{1/2\gamma} \quad (\text{B.20})$$

上式の第 2 項は小さいとして Taylor 展開すると次式となる。

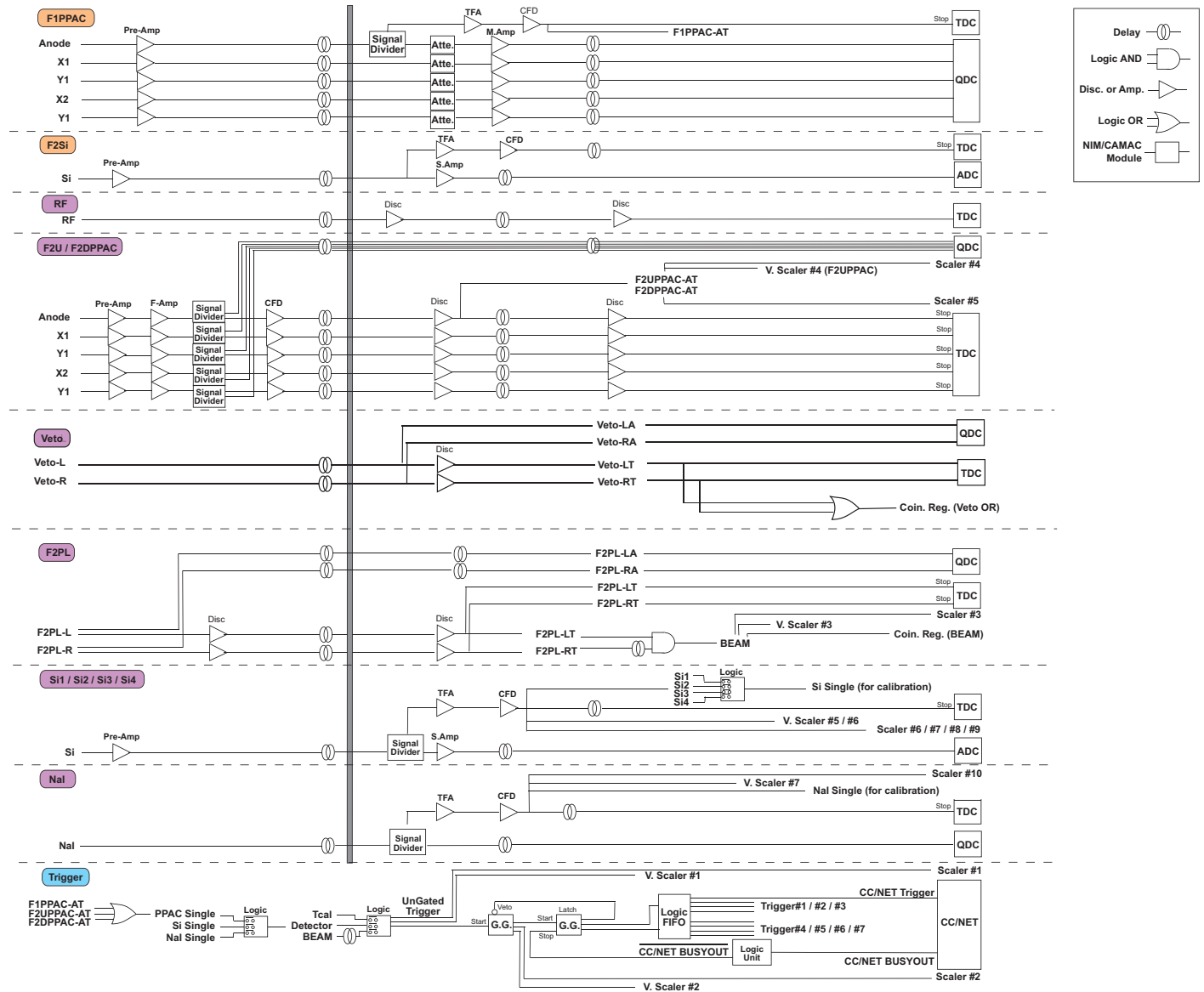
$$B\rho_2 = B\rho_1 \left(1 - \frac{1}{2\gamma} \frac{d A^{2\gamma-1}}{k' Z^{2\gamma-2}} (B\rho_1)^{-2\gamma}\right) \quad (\text{B.21})$$

異なるイオン間の $B\rho_2$ の差 $\Delta B\rho_2$ は以下のようなになる。

$$\Delta B\rho_2 \propto \frac{A^{2\gamma-1}}{Z^{2\gamma-2}} \quad (\text{B.22})$$

$\gamma \simeq 1.75$ と与えられるので、これより $\Delta B\rho_2 \propto A^{2.5}/Z^{1.5}$ が得られる。

付録C データ収集系回路の全体図



☒ C.1: Run information

付録D $^{13,15}\text{C}$ のCCCSの結果

表 5.1~5.6 に示した ^{12}C の反応を含めない場合と同様に ^{12}C の反応を含めた場合及び $^{13}\text{C}^{15}\text{C}$ の測定結果を以下に示す。

表 D.1: ^{12}C 散乱標的あり (Detector 中での反応を含める場合)

| | Total | Insident | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|--------|----------|--------|--------|--------|----------------------|-------------------------|--------|--------|------|-------------|
| 0.001 | 498977 | | 474135 | 1861 | 1316 | 40 | 53 | 266 | 931 | 0 | 478602 |
| 比率 | | | 0.9502 | 0.0037 | 0.0026 | 8.0×10^{-5} | 0.0001 | 0.0005 | 0.0018 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.959166 |
| 0.003 | 498977 | | 471034 | 1897 | 1309 | 62 | 56 | 277 | 3577 | 0 | 478212 |
| 比率 | | | 0.9439 | 0.0038 | 0.0026 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0005 | 0.0071 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.958385 |
| 0.005 | 498977 | | 470414 | 1936 | 1345 | 70 | 66 | 296 | 3884 | 0 | 478011 |
| 比率 | | | 0.9427 | 0.003 | 0.003 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0005 | 0.0077 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.957982 |
| 0.01 | 498977 | | 468646 | 1906 | 1347 | 104 | 58 | 316 | 5412 | 0 | 477789 |
| 比率 | | | 0.9392 | 0.004 | 0.003 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0006 | 0.011 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.957537 |
| 0.015 | 498977 | | 466166 | 1917 | 1344 | 118 | 55 | 322 | 7399 | 0 | 477321 |
| 比率 | | | 0.9342 | 0.004 | 0.003 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0006 | 0.0148 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.956599 |
| 0.02 | 498977 | | 463328 | 1920 | 1364 | 150 | 51 | 351 | 10141 | 0 | 477305 |
| 比率 | | | 0.9285 | 0.004 | 0.0027 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0007 | 0.020 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.956567 |
| 0.045 | 498977 | | 442403 | 2124 | 1500 | 280 | 41 | 501 | 29023 | 0 | 475872 |
| 比率 | | | 0.8866 | 0.0042 | 0.0030 | 0.0005 | 8.2168×10^{-5} | 0.0010 | 0.0581 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.953695261 |

表 D.2: ^{12}C 散乱標的なし (Detector 中での反応を含める場合)

| | Total | Insident | 1 Si1-2 | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|--------|----------|---------|--------|--------|---------|----------------------|----------------------|-------------------------|--------|------|-------------|
| 0.001 | 383466 | ok | | 379770 | 657 | 216 | 23 | 28 | 20 | 145 | 0 | 380859 |
| % | 1 | | | 0.9903 | 0.0017 | 0.0006 | 5.9×10^{-5} | 7.3×10^{-5} | 5.2×10^{-5} | 0.0004 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | | 0.993201 |
| 0.003 | 383466 | ok | | 379249 | 753 | 240 | 28 | 20 | 28 | 400 | 0 | 380718 |
| % | 1 | | | 0.9890 | 0.0019 | 0.0006 | 7.3×10^{-5} | 5.2×10^{-5} | 7.3×10^{-5} | 0.0010 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | | 0.992834 |
| 0.005 | 383466 | ok | | 379018 | 743 | 211 | 22 | 18 | 34 | 467 | 0 | 380513 |
| % | 1 | | | 0.9884 | 0.0019 | 0.00055 | 5.7×10^{-5} | 4.7×10^{-5} | 8.8665×10^{-5} | 0.0012 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | | 0.992299 |
| 0.01 | 383466 | ok | | 378626 | 755 | 240 | 46 | 20 | 42 | 652 | 0 | 380381 |
| % | 1 | | | 0.9874 | 0.0020 | 0.0006 | 0.0001 | 5.2×10^{-5} | 0.0001 | 0.0017 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | | 0.991955 |
| 0.015 | 383466 | ok | | 378093 | 791 | 257 | 53 | 20 | 38 | 1005 | 0 | 380257 |
| % | 1 | | | 0.9860 | 0.0021 | 0.0007 | 0.0001 | 5.2×10^{-5} | 9.9×10^5 | 0.0026 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | | 0.991632 |
| 0.02 | 383466 | ok | | 377257 | 817 | 362 | 88 | 20 | 48 | 1646 | 0 | 380238 |
| % | 1 | | | 0.9838 | 0.0021 | 0.0009 | 0.0002 | 5.2×10^{-5} | 0.0001 | 0.0043 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | | 0.991582044 |
| 0.045 | 383466 | ok | | 368786 | 1021 | 587 | 167 | 20 | 113 | 8448 | 0 | 379142 |
| % | 1 | | | 0.9617 | 0.0027 | 0.0015 | 0.0004 | 5.2×10^{-5} | 0.0002 | 0.0220 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | | 0.988724 |

表 D.3: ^{12}C (Detector 中での反応を含める場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------|---------------|-------------------------------------|
| 0.959166 | 0.993201 | 1.03548 | 0.0348689 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1066.7 | 1086.7 |
| 0.958385 | 0.992833 | 1.03594 | 0.0353138 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1080.3 | |
| 0.957982 | 0.992299 | 1.03582 | 0.0351956 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1076.6 | |
| 0.957537 | 0.991955 | 1.03594 | 0.0353132 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1080.2 | |
| 0.956599 | 0.991631 | 1.03662 | 0.0359672 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1100.2 | |
| 0.956567 | 0.991582 | 1.03660 | 0.0359507 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1099.7 | |
| 0.953695 | 0.988724 | 1.03673 | 0.0360709 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1103.4 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma)(N_{inc}\gamma)$ | $(1 - \gamma_0)(N_{inc}\gamma_0)$ | $(\Delta \gamma/\gamma_0)/(\gamma/\gamma_0)^2$ | $1/\sigma_{cc}t$ | $\Delta t/t$ | $(\Delta\sigma_{cc}/\sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.0031623 | 8.53184×10^{-8} | 1.78505×10^{-8} | 1.0817×10^{-16} | 28.67883795 | 0.001534 | 9.33459×10^{-5} |
| 0.00001 | 0.0031623 | 8.70224×10^{-8} | 1.88229×10^{-8} | 1.09081×10^{-5} | 28.3175115 | 0.001534 | 0.0088404 |
| 0.00001 | 0.0031623 | 9.7305×10^{-8} | 2.97411×10^{-8} | 1.1031×10^{-5} | 27.72314983 | 0.001534 | 0.008584298 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 1.6 | 9.8 | 14.3 | 17.3 | | | | |
| 1.7 | 10.0 | 14.3 | 17.4 | | | | |
| 1.7 | 10.9 | 14.3 | 17.9 | | | | |

表 D.4: ^{13}C 散乱標的あり (Detector 中での反応を含めない場合)

| | Total Incident | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|-------------|----------------|--------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|------|----------|
| 0.003 比率 | 713728 | 657931 | 3909 | 3036 | 77 | 54 | 532 | 7022 | 0 | 672561 |
| γ | | 0.9218 | 0.0055 | 0.0043 | 0.0001 | 7.5×10^{-5} | 0.0007 | 0.010 | 0 | 1 |
| 0.015 比率 | 713728 | 647227 | 3673 | 2993 | 136 | 28 | 808 | 13739 | 0 | 668604 |
| γ | | 0.9068 | 0.0051 | 0.0041 | 0.0002 | 3.9×10^{-5} | 0.0011 | 0.0192 | 0 | 1 |
| 0.045 比率 | 713728 | 611100 | 5417 | 4293 | 270 | 33 | 1194 | 40388 | 0 | 662695 |
| γ | | 0.8562 | 0.0075 | 0.0060 | 0.0004 | 4.6×10^{-5} | 0.0017 | 0.0566 | 0 | 1 |
| | | | | | | | | | | 0.928498 |

表 D.5: ^{13}C 散乱標的なし (Detector 中での反応を含めない場合)

| | Total Incident | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|------------|------|----------|
| 0.003 比率 | 713728 | 659645 | 3909 | 3036 | 77 | 54 | 532 | 7022 | 0 | 674275 |
| γ | | 0.9242 | 0.0054 | 0.0043 | 0.0001 | 7.6×10^{-5} | 0.0007 | 0.010 | 0 | 1 |
| 0.015 比率 | 713728 | 649735 | 3673 | 2993 | 136 | 28 | 808 | 13739 | 0 | 671112 |
| γ | | 0.910339793 | 0.005146218 | 0.004193474 | 0.000190549 | 3.92306×10^{-5} | 0.001132084 | 0.01924963 | 0 | 1 |
| 0.045 比率 | 713728 | 614371 | 5417 | 4293 | 270 | 33 | 1194 | 40388 | 0 | 665966 |
| γ | | 0.8608 | 0.0076 | 0.0060 | 0.0004 | 4.6×10^{-5} | 0.0016 | 0.0566 | 0 | 1 |
| | | | | | | | | | | 0.933081 |

表 D.6: ^{13}C 散乱標的あり (Detector 中での反応を含める場合)

| | Total Incident | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|----------------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|--------|--------|------|----------|
| 0.003 | 690573 | 668643 | 1490 | 446 | 50 | 34 | 500 | 1635 | 0 | 672798 |
| 比率 | | 0.9682 | 0.0022 | 0.0006 | 7.2×10^{-5} | 4.9×10^{-5} | 0.0007 | 0.0024 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.974261 |
| 0.015 | 690573 | 663882 | 1374 | 496 | 40 | 30 | 104 | 3231 | 0 | 669157 |
| 比率 | | 0.9613 | 0.0019 | 0.0007 | 5.8×10^{-5} | 4.3×10^{-5} | 0.0002 | 0.0046 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.968988 |
| 0.045 | 690573 | 641656 | 2576 | 2132 | 46 | 177 | 98 | 17527 | 0 | 664212 |
| 比率 | | 0.9292 | 0.0037 | 0.003 | 6.6×10^{-5} | 0.0002 | 0.0001 | 0.0253 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.961827 |

表 D.7: ^{13}C 散乱標的なし (Detector 中での反応を含める場合)

| | Total Incident | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|----------------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|--------|--------|------|----------|
| 0.003 | 690573 | 670338 | 1490 | 446 | 50 | 34 | 500 | 1635 | 0 | 674493 |
| 比率 | | 0.9706 | 0.0021 | 0.0006 | 7.2×10^{-5} | 4.9×10^{-5} | 0.0007 | 0.0023 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.976715 |
| 0.015 | 690573 | 666223 | 1374 | 496 | 40 | 30 | 104 | 3231 | 0 | 671498 |
| 比率 | | 0.9647 | 0.0020 | 0.0007 | 5.8×10^{-5} | 4.3×10^{-5} | 0.0006 | 0.0047 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.972378 |
| 0.045 | 690573 | 644874 | 2576 | 2132 | 46 | 177 | 98 | 17527 | 0 | 667430 |
| 比率 | | 0.9338 | 0.0037 | 0.0031 | 6.7×10^{-5} | 0.0003 | 0.0001 | 0.0253 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | 0.966487 |

表 D.8: ^{13}C (Detector 中での反応を含めない場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|---------------|-------------------------------------|
| 0.942321 | 0.974261 | 1.03389 | 0.0333325 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1019.7 | 1044.2 |
| 0.936777 | 0.968988 | 1.03438 | 0.0338070 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1034.2 | |
| 0.928498 | 0.961827 | 1.03590 | 0.0352668 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1078.8 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma)/(N_{inc}\gamma)$ | $(1 - \gamma_0)/(N_{inc}\gamma_0)$ | $(\Delta \gamma/\gamma_0)/(\gamma/\gamma_0)^2$ | $1/\sigma_{cc}t$ | $\Delta t/t$ | $(\Delta\sigma_{cc}/\sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 8.576×10^{-8} | 3.82574×10^{-8} | 4.05998×10^{-17} | 30.00068527 | 0.001534 | 0.000120113 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 9.45597×10^{-8} | 4.63448×10^{-8} | 4.05998×10^{-17} | 29.57966915 | 0.001534 | 0.000131777 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 1.07896×10^{-7} | 5.74706×10^{-8} | 4.05998×10^{-17} | 28.35530357 | 0.001534 | 0.00014145 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 1.6 | 10.8 | 30.8 | 32.7 | | | | |
| 1.6 | 11.4 | 30.8 | 32.9 | | | | |
| 1.7 | 12.4 | 30.8 | 33.2 | | | | |

表 D.9: ^{13}C (Detector 中での反応を含める場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------|---------------|-------------------------------------|
| 0.944723 | 0.976715 | 1.03386 | 0.0333035 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1018.8 | 1040.4 |
| 0.940291 | 0.972378 | 1.03412 | 0.0335552 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1026.5 | |
| 0.933081 | 0.966487 | 1.03580 | 0.0351761 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1076.0 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1-\gamma)/(N_{inc}\gamma)$ | $(1-\gamma_0)/(N_{inc}\gamma_0)$ | $(\Delta\gamma/\gamma_0)/(\gamma/\gamma_0)^2$ | $1/\sigma_{cc}t$ | $\Delta t/t$ | $(\Delta\sigma_{cc}/\sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 8.19804×10^{-8} | 3.45222×10^{-8} | 4.05998×10^{-17} | 30.02686721 | 0.001534 | 0.000113532 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 8.89703×10^{-8} | 4.11349×10^{-8} | 4.05998×10^{-17} | 29.80159669 | 0.001534 | 0.000124043 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 1.00484×10^{-7} | 5.02116×10^{-8} | 4.05998×10^{-17} | 28.42835492 | 0.001534 | 0.00013028 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 3.0 | 10.4 | 31.1 | 32.8 | | | | |
| 3.0 | 11.0 | 31.1 | 33.0 | | | | |
| 3.1 | 11.9 | 31.1 | 33.3 | | | | |

表 D.10: ^{15}C 散乱標的あり (Detector 中での反応を含めない場合)

| | Total Incident | 1 Si1-2 | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|----------|
| 0.001 | 160413 | ok | 150873 | 328 | 763 | 154 | 148 | 92 | 1127 | 0 | 153118 |
| % | 1 | | 0.9382 | 0.0021 | 0.0048 | 0.0010 | 0.0009 | 0.0006 | 0.0070 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.954524 |
| 0.015 | 160413 | ok | 143447 | 258 | 716 | 701 | 126 | 124 | 3989 | 0 | 149361 |
| % | 1 | | 0.8942 | 0.0016 | 0.0045 | 0.0044 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0251 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.931103 |
| 0.045 | 160413 | ok | 131834 | 229 | 1488 | 946 | 147 | 141 | 9977 | 0 | 144762 |
| % | 1 | | 0.8218 | 0.0014 | 0.0092 | 0.0059 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0622 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.902433 |

表 D.11: ^{15}C 散乱標的あり (Detector 中での反応を含めない場合)

| | Total Incident | 1 Si1-2 | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|----------|
| 0.001 | 160413 | ok | 150873 | 328 | 763 | 154 | 148 | 92 | 1127 | 0 | 153485 |
| % | 1 | | 0.9405 | 0.0020 | 0.0048 | 0.0010 | 0.0009 | 0.0005 | 0.0070 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.956811 |
| 0.015 | 160413 | ok | 143825 | 258 | 716 | 701 | 126 | 124 | 3989 | 0 | 149739 |
| % | 1 | | 0.8966 | 0.0016 | 0.0045 | 0.0044 | 0.0008 | 0.0008 | 0.0249 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.933459 |
| 0.045 | 160413 | ok | 132197 | 229 | 1488 | 946 | 147 | 141 | 9977 | 0 | 145125 |
| % | 1 | | 0.8241 | 0.0014 | 0.0093 | 0.0059 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0621 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.904696 |

表 D.12: ^{15}C 散乱標的なし (Detector 中での反応を含める場合)

| | Total Incident | 1 Si1-2 | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|----------------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|----------------------|--------|------|----------|
| 0.001 | 370323 | ok | 357440 | 203 | 4398 | 1294 | 832 | 11 | 2562 | 0 | 366740 |
| % | 1 | | 0.9652 | 0.0005 | 0.0118 | 0.0034 | 0.0022 | 3.0×10^{-5} | 0.0069 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.990325 |
| 0.015 | 370323 | ok | 341985 | 165 | 4961 | 1724 | 898 | 26 | 8589 | 0 | 358348 |
| % | 1 | | 0.9235 | 0.00045 | 0.0133 | 0.0047 | 0.0024 | 7.0×10^{-5} | 0.0232 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.967663 |
| 0.045 | 370323 | ok | 318913 | 145 | 8060 | 2587 | 1300 | 110 | 16067 | 0 | 347182 |
| % | 1 | | 0.8612 | 0.0004 | 0.0217 | 0.0070 | 0.0035 | 0.0003 | 0.0434 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.937511 |

表 D.13: ^{15}C 散乱標的なし (Detector 中での反応を含める場合)

| | Total Incident | 1 Si-2 | 領域 1 | 領域 2 | 領域 3 | 領域 4 | 領域 5 | 領域 6 | 領域 7 | 領域 8 | total |
|----------|----------------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|------|-------------|
| 0.001 | 370323 | ok | 358248 | 203 | 4398 | 1294 | 832 | 11 | 2562 | 0 | 367548 |
| % | 1 | | 0.96739333 | 0.00054817 | 0.011876119 | 0.003494247 | 0.002246687 | 2.97038×10^{-5} | 0.006918285 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.992506542 |
| 0.015 | 370323 | ok | 342810 | 165 | 4961 | 1724 | 898 | 26 | 8589 | 0 | 359173 |
| % | 1 | | 0.925705398 | 0.000445557 | 0.013396413 | 0.004655395 | 0.00242491 | 7.0209×10^{-5} | 0.023193266 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.969891149 |
| 0.045 | 370323 | ok | 319775 | 145 | 8060 | 2587 | 1300 | 110 | 16067 | 0 | 348044 |
| % | 1 | | 0.863502942 | 0.00039155 | 0.021764784 | 0.006985793 | 0.003510449 | 0.000297038 | 0.043386449 | 0 | 1 |
| γ | | | | | | | | | | | 0.939839005 |

表 D.14: ^{15}C (Detector 中での反応を含めない場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|----------------|--|
| 0.954524 | 0.990325 | 1.037507 | 0.036820 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1126.3 | 1157.0 |
| 0.931103 | 0.967663 | 1.039266 | 0.038515 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1178.2 | |
| 0.902433 | 0.937511 | 1.038871 | 0.038134 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1166.5 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma) / (N_{inc} \gamma)$ | $(1 - \gamma_0) / (N_{inc} \gamma_0)$ | $(\Delta \gamma / \gamma) / (\gamma / \gamma_0)^2$ | $1 / \sigma_{cc} t$ | $\Delta t / t$ | $(\Delta \sigma_{cc} / \sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 2.97002×10^{-7} | 2.6382×10^{-8} | 4.61535×10^{-16} | 27.15883849 | 0.001534 | 0.000247021 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 4.61279×10^{-7} | 9.02381×10^{-8} | 4.61535×10^{-16} | 25.96422796 | 0.001534 | 0.000380293 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 6.73981×10^{-7} | 1.79988×10^{-7} | 4.61535×10^{-16} | 26.22313534 | 0.001534 | 0.000595727 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 3.3 | 17.3 | 27.2 | 32.3 | | | | |
| 3.4 | 22.7 | 27.2 | 35.4 | | | | |
| 3.4 | 28.3 | 27.2 | 39.2 | | | | |

表 D.15: ^{15}C (Detector 中での反応を含める場合)

| γ | γ_0 | γ_0/γ | $\ln(\gamma_0/\gamma)$ | x | $1/t$ | σ_{cc} | 平均 |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|----------------|--|
| 0.954524 | 0.990324 | 1.037507 | 0.036820 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1126.3 | 1157.0 |
| 0.931103 | 0.967663 | 1.039266 | 0.038515 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1178.2 | |
| 0.902433 | 0.937511 | 1.038871 | 0.038134 | 0.652 | 3.059×10^{-23} | 1166.5 | |
| N_n | $\sqrt{N_n}$ | $(1 - \gamma) / (N_{inc} \gamma)$ | $(1 - \gamma_0) / (N_{inc} \gamma_0)$ | $(\Delta \gamma / \gamma) / (\gamma / \gamma_0)^2$ | $1 / \sigma_{cc} t$ | $\Delta t / t$ | $(\Delta \sigma_{cc} / \sigma_{cc})^2$ |
| 0.00001 | 0.003162278 | 2.97002×10^{-7} | 2.6382×10^{-8} | 4.61535×10^{-16} | 27.15883849 | 0.001534 | 0.000247021 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 4.61279×10^{-7} | 9.02381×10^{-8} | 4.61535×10^{-16} | 25.96422796 | 0.001534 | 0.000380293 |
| 0.00001 | 0.003162278 | 6.73981×10^{-7} | 1.79988×10^{-7} | 4.61535×10^{-16} | 26.22313534 | 0.001534 | 0.000595727 |
| $\Delta(t)\sigma$ | $\Delta(\text{stat})\sigma$ | $\Delta(\text{sys})\sigma$ | $\Delta\sigma$ | | | | |
| 3.3 | 16.8 | 27.2 | 32.5 | | | | |
| 3.4 | 22.2 | 27.2 | 35.6 | | | | |
| 3.4 | 27.9 | 27.2 | 39.4 | | | | |

付録E F0 ターゲット ラダーのアライメント

ターゲットラダー駆動装置が故障したので、修理してそのアライメントの再確認をした。確認情報は以下の通りである。

1. ターゲット位置

| | 電圧 (V) | PC(mm) |
|----------|---------|----------|
| ZnS (穴) | 1.568 | -2.468 |
| No.1) | 2.237 | -42.745 |
| No.2) | 2.892 | -82.149 |
| No.3) | 3.559 | -122.340 |
| No.4) | 4.220 | -162.100 |
| No.5) | 4.888) | -202.350 |

位置設定の精度はバックラッシュまで含めて0.2mm 程度と思われる。

2. ターゲット挿入の上限，下限をきめるリミットスイッチも正常に動作していることを確認した。

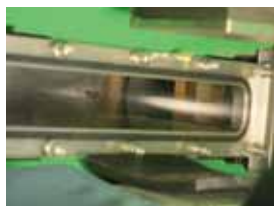


図 E.1: F0 真空チェンバー内に挿入されているターゲット

E.1 アライメント作業の詳細

E.1.1 作業の手順

EN コース F0 ターゲット ラダーのアライメントは以下の手順で行った。

1. 破損した Target 駆動系線形抵抗の交換。
2. PCで制御できることを確認する。
3. セオドライトを SW3 磁石上に設置して、各 Beam ラインエレメントのケガキ位置の正しさを確認する。
4. セオドライトを F0 ビームラインの延長線上に設置する。
5. Target Position の Calibration を行う。

E.1.2 Target 駆動系線形抵抗の交換

今回の交換に使用した線形抵抗器はすでに製造停止になっており、ターゲット駆動系を製作したリフテックの吉田さんが予備品として持っていたものを1台ゆずって頂いたものである。実験中に破損した線形抵抗器を取り外してこの新たなポテンシオメータの取り付けを行った。次ページ示す図 E.2 のように接続した。この状態ではターゲットラダーが最も出た状態で端子2と端子3の間の抵抗が 0Ω で、端子2と端子1の間の抵抗が $10k\Omega$ になる。

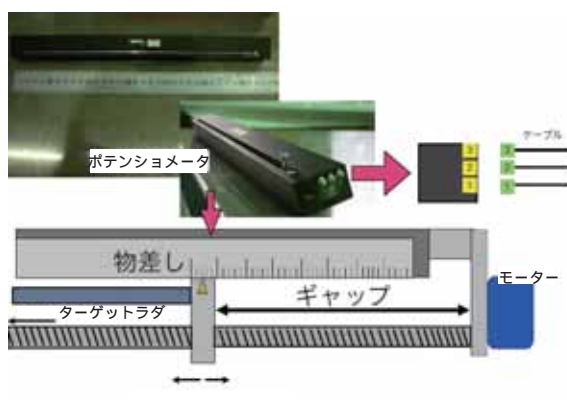


図 E.2: ターゲット駆動系の駆動部分の概念図： 線形抵抗器（図ではポテンシオメータ）は物差しの下側に設置されている。パルスモーターで長い棒ネジが回転してターゲットラダーの支持板が移動する。現場での位置の読みは物差しの読みとギャップの間隔も併用した。

図 E.2 の説明にもあるように、ここで Target Position Calibration を行うために、物差しでの読み値と図 E.2 に示すような Gap の値を使う。

E.1.3 PC 制御の確認

ターゲットラダーの駆動用のプログラムは OASIS にあるので、OASIS に入ってプログラムを起動する。

E.1.4 セオドライトの設定

EN コース用のセオドライトは鉛直軸を保ったまま、水平方向に自由に移動できるのを使用した。SW3 上にレーザーを設置して、その光を頼りにしてセオドライトの大体の位置を決める。セオドライトの高さは巻尺でおよその高をあわせたのちに、TMSD-T1 Q-mag. の横についているケガキ線に合わせた。

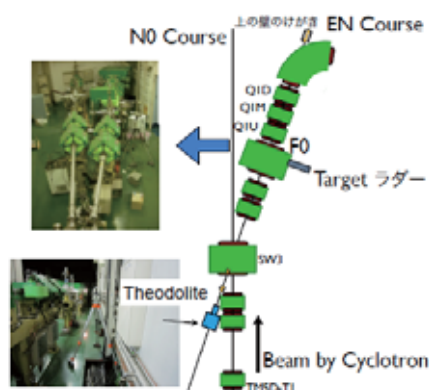


図 E.3: F 0 付近のビームラインエレメントの配置とセオドライトの設置場所

高さが決まったのちに前述の上壁のケガキと SW3 のケガキを交互に見ながらセオドライトを水平方向に微調整してビーム軸上にのせた。このようにしてセオドライトの位置と方向を決めた後に、SW3 上流の床上にあるピンにあるケガキをみたところびたりと一致していた。図 E.4 は F 0 ビーム軸上にねせたセオドライトの写真である。



図 E.4: セオドライトの設置位置

E.1.5 Target position calibration

まず真空系を開放してセオドライトでターゲットが見えるようにする。手順

1. 真空ダクト (SW3 から FO まで) のリーク

- (a) GV7-N0 を close リーク後にエアーを逆に入れ強制 open させる
- (b) GV6-T1 を close
- (c) VS7-EN を off

の手順を踏んだ後、リークを開始する。

- 2. EN コースの延長線上にある SW3 上流のアクリルフランジを取り外す。
- 3. FO ターゲットの前にある Viewer をあげて、ターゲットが見える状態にする。
- 4. セオドライトから真空ダクトを通してターゲットラダーを確認する。

Calibration

セオドライトでターゲットをみながらラダーを動かして行き、それぞれのターゲット中心の位置を読み取った。駆動系のバックラッシなどによる誤差を考慮して行きと帰りの位置を測定した。図 E.6 にその結果を示す。

表 E.1: Fig. 5-a 行き の 測定値

| | 電圧 (V) | PC(mm) | 物差 (mm) | 物差 GaP (mm) | ノギス Gap (mm) |
|---------|----------|----------|---------|-------------|--------------|
| ZnS(十字) | 1.563 | -2.228 | | | |
| ZnS(穴) | 1.568 | -2.468 | 206.4 | | 125.8 |
| No.1 | 2.237 | -42.745 | 165.9 | 166.5 | |
| No.2 | 2.892 | -82.149 | 126.0 | 206.5 | |
| No.3 | 3.559 | -122.340 | 85.8 | 246.5 | |
| No.4 | 4.220 | -162.100 | 46.2 | 286.4 | |
| No.5 | 4.888 | -202.350 | 6.3 | 326.5 | |
| Limit | 4.914 | | | | |

表 E.2: Fig. 5-b 帰りの測定値

| | 電圧 (V) | PC(mm) | 物差 (mm) | 物差 GaP (mm) | ノギス Gap (mm) |
|---------|----------|---------|---------|-------------|--------------|
| ZnS(十字) | 1.564 | | | | |
| ZnS(穴) | 1.568 | -2.468 | 206.2 | 126.6 | 125.8 |
| No.1 | 2.237 | -42.745 | 165.6 | 166.5 | |
| No.2 | 2.892 | -82.179 | 126.1 | 206.7 | |
| No.3 | 3.558 | -122.28 | 85.8 | 246.8 | |
| No.4 | 4.221 | | 46 | 286.5 | |
| No.5 | | | | | |
| Limit | | | | | |



図 E.5: 左から順番に ZnS No.1, No.2, No.3, No.4, No.5 と呼ぶことにした。

表の ZnS (十字) というのは ZnS の中心を表すケガキ線に焦点を持っていくときの場合を示し、それに対して ZnS (穴) は ZnS ターゲットの穴の中心に焦点をあわせた場合を示している。つまり、この ZnS ターゲットのケガキ線の中心と穴の中心は微妙に一致

していなかった。表の limit というのはリミッターが作動して自動的にとまったところでのそれぞれの値である。電圧 (V) と PC (mm) は OASIS の PC に入って endev の制御ソフトの読み値である。物差 (mm) というのはポテンシオメータの上に基準としておかれているメモリの読み値で Gap は 4 で述べた距離を物差で測定した値である。またノギスというのはノギスで測った値である。

行きのデータは、それぞれのターゲット中心をラダーの中心ケガキに合わせながら、それぞれの値を測定したものになっている。また帰りのデータは、再現性を確かめるために、PC 指令値に行きで決定したそれぞれの Target 中心位置を入力し、セオドライトで位置が再現できていることを確認した。

ここで設定電圧は 5.0V であるのに対し、実際デジタルの測定値は、4.9884V であった。以下に測定結果とそれらを線形フィットしたグラフを示す。

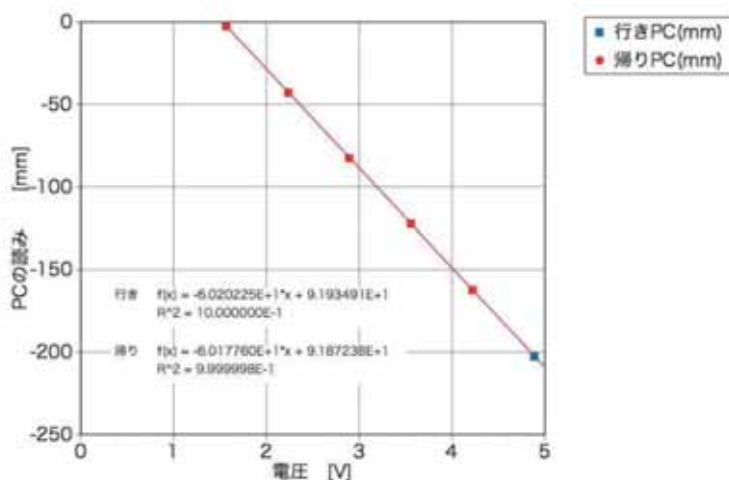


図 E.6: PC の電圧 (V) と距離 (mm) の関係

E.1.6 まとめ

F0 ターゲットラダーのアライメントを行うときに SW 3 下流にある最初の Q マグネットのケガキの位置が Beam に乗って左に 1 mm ずれていた。

表 E.3: 決定したおのおののターゲット中心位置と設定値

| | 電圧 (V) | PC (mm) |
|---------|--------|----------|
| ZnS (穴) | 1.568 | -2.468 |
| No.1 | 2.237 | -42.745 |
| No.2 | 2.892 | -82.149 |
| No.3 | 3.559 | -122.340 |
| No.4 | 4.220 | -162.100 |
| No.5 | 4.888 | -202.350 |

参考文献

- [1] 市村宗武, 松柳研一、坂田文彦, 原子核の理論 (2001).
- [2] 谷畑 勇夫, 日本物理学会誌 第49巻 第11号, p433-439 (1994).
- [3] I. Tanihata, *NUCLEAR RADII OF PROTON DISTRIBUTION Toward the EOS of asymmetric matter Progress at RCNP RIB* (2005).
- [4] I. Tanihata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **55**, 2676 (1985).
- [5] A. Ozawa, T. Suzuki, I. Tanihata *et al.*, NPA. **693**, 32 (2001).
- [6] B. Blank, *et al.*, Z. Phys. A **343**, 375 (1992).
- [7] M. Fukuda and I. Tanihata, *E333 RCNP Proposal* (2009).
- [8] A.S. Goldhaber, Phys. Letters Volume **53B**, Number 4 (1974).
- [9] R.R. Roy, *Nuclear physics theory and experiment* (1996).
- [10] L.V. Chulkov *et al.*, Nucl. Phys. A **674**, 330 (2000).
- [11] H.H. Heckman *et al.*, Phys. Rev. Lett. **28**, 926 (1972).
- [12] 谷畑 勇夫, 日本物理学会誌 第41巻 第11号, p905-908 (1986).
- [13] H. Kumagai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **470**, 562 (2001).
- [14] W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* (1994).
- [15] EG&G Ortec, *Modular Pulse-Processing Electronics and Semiconductor Radiation Detectors* (November 1994).
- [16] Data Desk manual, <http://www.datadesk.com/>.
- [17] 廣田航介, 大阪大学理学部研究科 修士学位論文 (2010).