

2021 年度卒業論文

RHIC-sPHENIX 実験における  
中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサーでの  
エネルギー損失測定の評価

奈良女子大学理学部数物連携コース  
高エネルギー物理学研究室  
杉山由佳

2022 年 3 月 4 日

## 概要

現在、奈良女子大学高エネルギー物理学研究室では、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の重イオン衝突型加速器 (RHIC) で 2023 年から稼働予定の sPHENIX 実験で導入される中間飛跡検出器 (INTT) の開発を行っている。INTT の開発には、奈良女子大学のほか、理化学研究所、立教大学、BNL、台湾大学、台湾中央大学、その他研究機関が参加している。

本研究では、INTT のエネルギー損失測定的能力を評価するために、2021 年 12 月に東北大学電子光学研究センター (ELPH) で実施したビームテスト実験で、通過荷電粒子 (Minimum Ionizing Particle: MIP) のエネルギー損失測定、斜め方向に入射する荷電粒子の測定と、データの解析を行った。ビームは 1 GeV の陽電子ビームで、3 つの INTT ラダーをビームに対して垂直に並べて配置する。ビーム上流から L0, L1, L2 とし、各ラダーで検出された ADC を DAC 値に変換しイベント選定やクラスター化を行うことで、各ラダーにおけるエネルギー損失量を評価する。その結果、通常の DAC 設定において L0 では  $89.41 \pm 0.11$  となった。次に、精密な MIP のエネルギー損失を測定するために、各 DAC の閾値を細かく設定し全 DAC 範囲を網羅したうえで、エネルギー損失量を測定した (DAC スキャン)。その結果、320  $\mu\text{m}$  厚の INTT ラダーで落とす MIP のエネルギーは、 $76.52 \pm 0.23$  であることがわかった。次に、通常の DAC 設定と DAC スキャンの違いを確認するために、それぞれのエネルギー損失の分布を比較した。その結果、DAC スキャンを行うことで、精密な MIP のエネルギー損失量に加えて、ノイズと信号を見分けられると考えることができた。次に、斜め方向に入射する粒子が検出可能か調べるために、INTT ラダーが入った暗箱を縦または横方向に回転させて測定を行った。その結果、エネルギー損失の分布から斜め方向に入射する粒子を検出できることがわかった。さらに、縦または横回転させることで MIP エネルギーのピークが原理どおりに変化するのか調べるために、原理と結果の比較を行った。原理は、MIP ピークの変化率が縦回転では約 3 % 上昇、横回転では約 14 % 上昇するというものである。その結果、縦回転、横回転ともに原理どおりの MIP ピークの変化率が得られなかった。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>7</b>
1.1	素粒子物理学	7
1.1.1	素粒子の標準模型	7
1.1.2	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)	7
1.2	半導体	8
1.2.1	半導体検出器の原理	8
1.2.2	物質中を通過する荷電粒子のエネルギー損失	8
1.3	研究背景	9
1.3.1	Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)	9
1.3.2	sPHENIX 実験	10
1.3.3	Monolithic-Active-Pixel-Sensor-based Vertex Detector(MVTX)	11
1.3.4	INTermediate Tracker(INTT)	11
1.3.5	Time Projection Chamber(TPC)	11
1.4	研究の目的	12
<b>第 2 章</b>	<b>中間飛跡検出器 INTT</b>	<b>13</b>
2.1	INTT ラダー	13
2.1.1	シリコンセンサー	13
2.1.2	FPHX チップ	14
2.1.3	High Density Interconnect(HDI)	14
2.2	データ読み出しシステム	14
2.2.1	Read Out Card(ROC)	14
2.2.2	Bus-extender	15
2.2.3	Conversion Cable	16
2.2.4	Front End Module(FEM)	16
2.2.5	FEM - Interface Board (FEM-IB)	16
<b>第 3 章</b>	<b>テストベンチでの INTT ラダーの動作確認</b>	<b>18</b>
3.1	キャリブレーションテスト	18
3.2	キャリブレーションテストの結果	20
<b>第 4 章</b>	<b>ビームテスト実験におけるエネルギー損失の評価</b>	<b>21</b>
4.1	実験目的と方法	22

4.2	原理 . . . . .	22
4.3	セットアップ . . . . .	23
4.4	データセット . . . . .	24
4.5	解析方法 . . . . .	25
	4.5.1 イベント選定によるノイズ除去 . . . . .	25
	4.5.2 クラスタ化 . . . . .	25
	4.5.3 DAC スキャンにおけるエネルギー損失分布の扱い . . . . .	26
4.6	解析結果 . . . . .	28
	4.6.1 通常の DAC 設定におけるエネルギー損失 . . . . .	28
	4.6.2 DAC スキャンにおけるエネルギー損失 . . . . .	28
	4.6.3 通常の DAC 設定と DAC スキャンとの比較 . . . . .	29
	4.6.4 垂直、縦/横回転時におけるクラスタ化前後の比較 . . . . .	30
	4.6.5 縦方向に回転させた場合のエネルギー損失 . . . . .	31
	4.6.6 横方向に回転させた場合のエネルギー損失 . . . . .	33
<b>第 5 章 結論</b>		<b>36</b>
<b>参考文献</b>		<b>38</b>

# 目次

1.1	素粒子の標準模型 . . . . .	7
1.2	pn 接合した半導体による検出原理 . . . . .	8
1.3	RHIC の全体図 . . . . .	10
1.4	sPHENIX 実験で用いられる飛跡検出器 . . . . .	11
2.1	(上)：シリコンセンサーモジュール (下)：シリコンセンサー Type-A と Type-B のシリコンセルサイズとその数 . . . . .	13
2.2	テストベンチにおけるデータ読み出しシステム . . . . .	14
2.3	ROC9 の写真 . . . . .	15
2.4	Bus-extender の写真 . . . . .	15
2.5	Conversion Cable の写真 . . . . .	16
2.6	FEM(右) と FEM-IB(左) の写真 . . . . .	17
3.1	INTT テストベンチの様子 . . . . .	18
3.2	テストベンチにおけるキャリブレーションテストでの読み出しの流れ . . . . .	19
3.3	キャリブレーションテストに使用される GUI の写真 . . . . .	19
3.4	(左)chip1 での入力 amplitude と出力 ADC の相関分布。横軸：amplitude、縦軸：ADC (中)chip1 での入力 amplitude と出力 ADC の相関分布。横軸：channel、縦軸：amplitude (右)over15 の表示例 . . . . .	20
3.5	各チップでの入力 amplitude と出力 ADC の相関分布。横軸：amplitude、縦軸：ADC . . . . .	20
3.6	各チップでの入力 amplitude と出力 ADC の相関分布。横軸：channel、縦軸：amplitude . . . . .	20
4.1	ビームテスト実験の様子 . . . . .	21
4.2	(左) 縦回転時における荷電粒子の通過距離の模式図 (右) 横回転時における荷電粒子の通過距離の模式図 . . . . .	22
4.3	シリコンモジュール配置図 . . . . .	23
4.4	ビームテストでのシリコンモジュールとシンチレーションカウンタのセットアップ . . . . .	24
4.5	ビームの照射箇所から離れたところにおけるヒット数が多いイベントの除去例 . . . . .	25
4.6	3つの channel を通過した場合のクラスター化のイメージ図 . . . . .	26
4.7	ADC7 の除去前と除去後 . . . . .	27
4.8	重ね合わせた 8 個のエネルギー損失分布を 1 つの分布にする過程 . . . . .	27
4.9	通常の DAC 設定におけるエネルギー損失分布 . . . . .	28
4.10	DAC スキャンにおけるエネルギー損失分布 . . . . .	29

4.11	通常の DAC 設定と DAC スキャンとの比較 . . . . .	30
4.12	垂直または縦/横回転時におけるクラスター化前後の比較 . . . . .	31
4.13	垂直時と縦回転時におけるエネルギー損失分布と MIP ピークの位置 . . . . .	33
4.14	垂直時と横回転時におけるエネルギー損失分布と MIP ピークの位置 . . . . .	35

# 表目次

1.1	式 (1.1) や (1.2) で用いるパラメータ . . . . .	9
3.1	キャリブレーションテストでの DAC 閾値設定 . . . . .	19
4.1	データリスト . . . . .	24
4.2	各 DAC スキャンにおける DAC 設定値 . . . . .	27

# 第1章

## 序論

### 1.1 素粒子物理学

#### 1.1.1 素粒子の標準模型

素粒子とは、物質を構成する最小単位の粒子であり、それ以上分解することができないと考えられている。素粒子には、半整数スピンをもつフェルミ粒子と、整数スピンをもつボース粒子が存在し、さらにフェルミ粒子はレプトンとクォークに分類することができる。レプトンは、電子 ( $e$ )、ミュー粒子 ( $\mu$ )、タウ粒子 ( $\tau$ ) の3種類と、これらに対応する電子ニュートリノ ( $\nu_e$ )、ミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ )、タウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) を合わせた、計6種類ある。クォークは、u(up)、d(down)、s(strange)、c(charm)、b(bottom)、t(top) の6種類ある。ボース粒子は、スピン1のゲージ粒子と、スピン0のヒッグス粒子に分類することができる。ゲージ粒子には、強い相互作用を伝えるグルーオン、電磁相互作用を伝える光子、弱い相互作用を伝えるW粒子とZ粒子が存在する。グルーオンにより、クォーク同士がハドロン内部において強い力で結合している。[6]

フェルミ粒子				ボース粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代	ゲージ粒子	スカラー粒子
レプトン	$e$	$\mu$	$\tau$	$g$ (グルーオン)	$H$ (ヒッグス粒子)
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$\gamma$ (光子)	
クォーク	$u$	$c$	$t$	$W^+, W_-$ (W粒子)	
	$d$	$s$	$b$	$Z$ (Z粒子)	

図 1.1 素粒子の標準模型

#### 1.1.2 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

通常の温度・密度では、ハドロン内部でクォークとグルーオンは強い相互作用をしているため、それらを単体で取り出すことはできない。これは、クォークの閉じ込めと呼ばれている。しかし、超高温・超高密度下では、この閉じ込めが破れることで、クォークとグルーオンがばらばらになり、プラズマ状態が観測される。この状態を、クォーク・グルーオンプラズマ (Quark-Gluon Plasma: QGP) という。QGP は、ビッグバン後の数  $10 \mu$  秒間の初期宇宙で実現していたと考えられている。[7]

## 1.2 半導体

半導体とは、導体と絶縁体の中間の性質があり、わずかに電気を通す物質である。結晶構造とエネルギーバンド構造をとる。代表的なものは、ケイ素 (Si またはシリコン) である。真性半導体に電気を流れやすくした不純物半導体には、n 型半導体と p 型半導体の 2 種類がある。電荷を運ぶキャリアはそれぞれ電子、正孔である。正孔とは、電子が外側の軌道に逃げたときに生じた穴で、正に帯電している。[8]

### 1.2.1 半導体検出器の原理

n 型半導体と p 型半導体を接合すると、接合部分では p 型半導体の正孔が n 型半導体に、n 型半導体の電子が p 型半導体に移動する。このとき、接合部分ではキャリアの存在しない空乏層が生じる。この半導体に逆バイアス電圧をかけると、空乏層が拡大し、半導体全体が空乏層となって全空乏化する。空乏層に荷電粒子が入射すると、荷電粒子の電離作用により電子・正孔対が生じる。電子や正孔がそれぞれ空乏層から電極に移動すると誘導電荷が生じ、信号が読み出される。この一連の流れから荷電粒子を検出することができる。Si 半導体では、1 個の電子・正孔対を作るのに必要なエネルギーは 3.64eV である。[9][12]

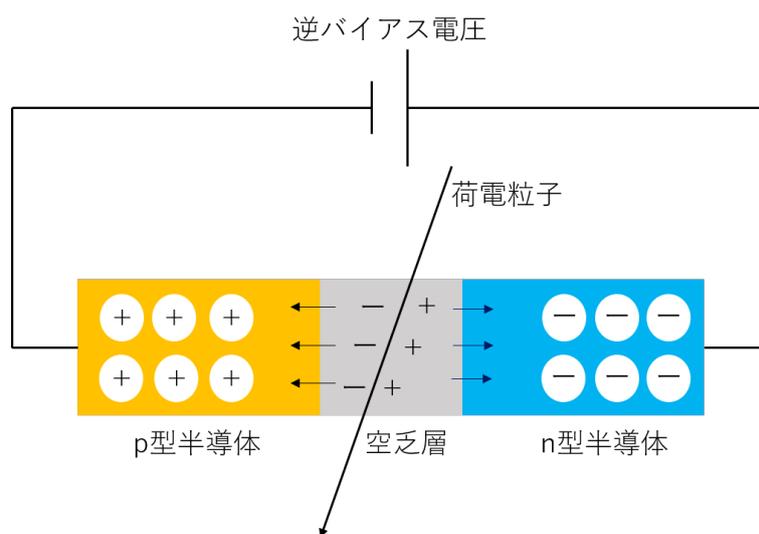


図 1.2 pn 接合した半導体による検出原理

### 1.2.2 物質中を通過する荷電粒子のエネルギー損失

荷電粒子が物質中を通過すると、物質を構成する原子または分子中の電子との電磁相互作用により物質が励起またはイオン化するために、荷電粒子はエネルギーを損失する。一般的に、エネルギー損失は Bethe-Bloch の式 (1.1) で表され、パラメータを表 1.1 に示す。

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (1.1)$$

式 (1.1) は物質中の原子番号と原子量の比  $Z/A$  および入射粒子の電荷の 2 乗に比例する。また、入射粒子の速度  $\beta$  が小さい時は速度の 2 乗に反比例する一方、速度  $\beta$  が大きくなるとやがてエネルギー損失はほぼ一定の値をとる。このエネルギー損失がほぼ一定となる場合の粒子を、MIP (Minimum Ionization Particle: 最小電離粒子) という。

表 1.1 式 (1.1) や (1.2) で用いるパラメータ

記号	定義	使用する値・単位
K	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$ (微分断面積 $dE/dx$ の定数)	0.307075 MeV mol <sup>-1</sup> cm <sup>2</sup>
z	入射粒子の電荷	1(muon)
Z	吸収体の原子番号	14(Si)
A	吸収体の原子量	28.0855(3) g/mol (Si)
$\rho$	吸収体の密度	2.329 g/cm <sup>-3</sup> (Si)
$\beta$	入射粒子の $\frac{v}{c}$	
$\gamma$	$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$	
$\delta(\beta\gamma)$	イオン化損失エネルギーの密度効果補正	
$m_e c^2$	電子の質量 $\times c^2$	0.5109989461(31) MeV
$W_{max}$	単一衝突における電子への最大エネルギー移行	$\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1+2\gamma m_e/M+(m_e/M)^2}$ MeV
I	平均励起ポテンシャル	173.0 eV (Si)

荷電粒子が厚さ  $x$  の物質を通過した場合のエネルギー損失の最確値は、式 (1.2) のように記述され、ランダウ分布に従う。

$$\Delta_p = \xi \left[ \ln \frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2}{I} + \ln \frac{\xi}{I} + j - \beta^2 - \delta(\beta\gamma) \right] \quad (1.2)$$

ここで、 $\xi = (K/2)\langle Z/A \rangle z^2 (x/\beta^2)$ 、厚さ  $x$  の単位は  $g/cm^2$ 、 $j = 0.200$  である。[13][14]

例えば、1GeV の  $\mu$  粒子における単位密度単位長さあたりのエネルギー損失は約  $1.15[\text{MeV/g} \cdot \text{cm}^{-2}]$ 、シリコンの密度は  $2.329[\text{g/cm}^3]$  より、1 GeV の  $\mu$  粒子が  $320\mu\text{m}$  厚のシリコンを通過した場合の MIP のエネルギー損失は、

$$1.15[\text{MeV/g} \cdot \text{cm}^{-2}] \times 0.032[\text{cm}] \times 2.329[\text{g/cm}^3] = 0.0857[\text{MeV}] \quad (1.3)$$

## 1.3 研究背景

### 1.3.1 Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

RHIC は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にある、世界初の重イオン衝突型加速器で、2000 年から稼働している。QGP を生成し、その性質を解明することが目的である。2つの加速器リングからなり、その周長は約 3.8km である。これらのリングが交差する衝突点は 6 カ所設けられている。主に、金原子核同士の衝突を行っており、他に重陽子・金原子核衝突や銅原子核・金原子核衝突なども行っている。金・金原子核衝突、陽子・陽子衝突における最大重心系エネルギーはそれぞれ 200GeV、510GeV である。[10]

### 1.3.2 sPHENIX 実験

sPHENIX(the super Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment) 実験は、米国ブルックヘブン国立研究所の RHIC を用いて行われる、2023 年稼働予定の実験である。この実験は、2000 年から 2016 年まで行われていた PHENIX 実験を高度化したものである。QGP における輸送係数の温度依存性や色電荷のデバイ遮蔽長を決定することを目的に、ジェット、ジェット-光子相関、ウブシロン粒子 ( $\Upsilon$ ) を測定する計画である。この測定には、高い検出効率と大きな検出範囲をもつ、ハドロンカロリメータや電磁カロリメータ、3つの飛跡検出器が用いられ、 $\Upsilon$  粒子の3つの状態を区別するために十分な質量分解能を有するとされる。ジェットや光子を観測するために、RHIC の 20 週間の稼働で、 $5 \times 10^{11}$  回の金・金衝突を行う予定である。ハドロンカロリメータは、陽子・陽子衝突や陽子・金衝突において偏りのないジェットをトリガーし、全システムにおいて偏りのないジェットを観測することを可能にする。また、飛跡検出器は、内側から MVTX、INTT、TPC の3つで構成されている。[11]

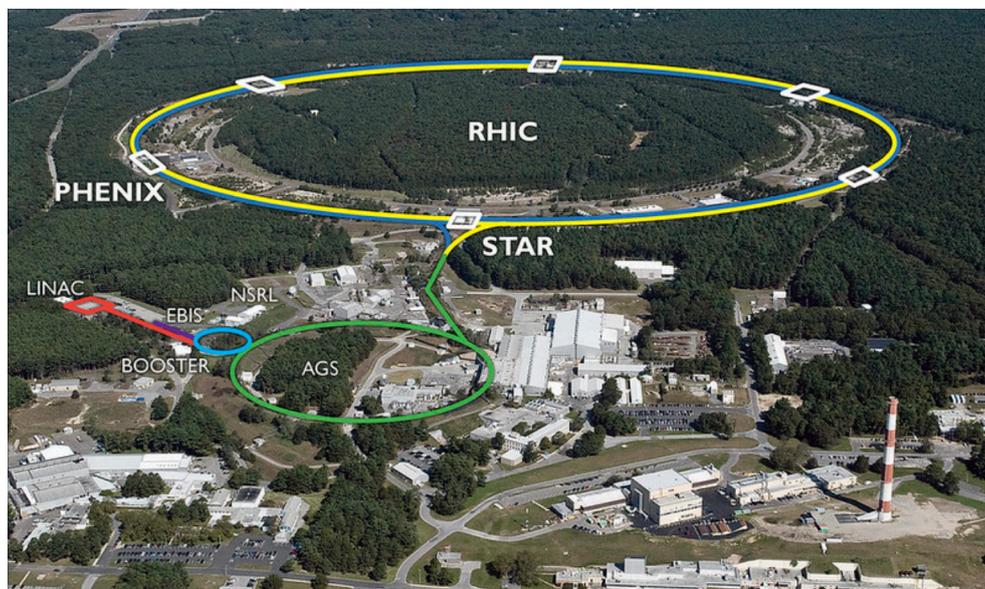


図 1.3 RHIC の全体図

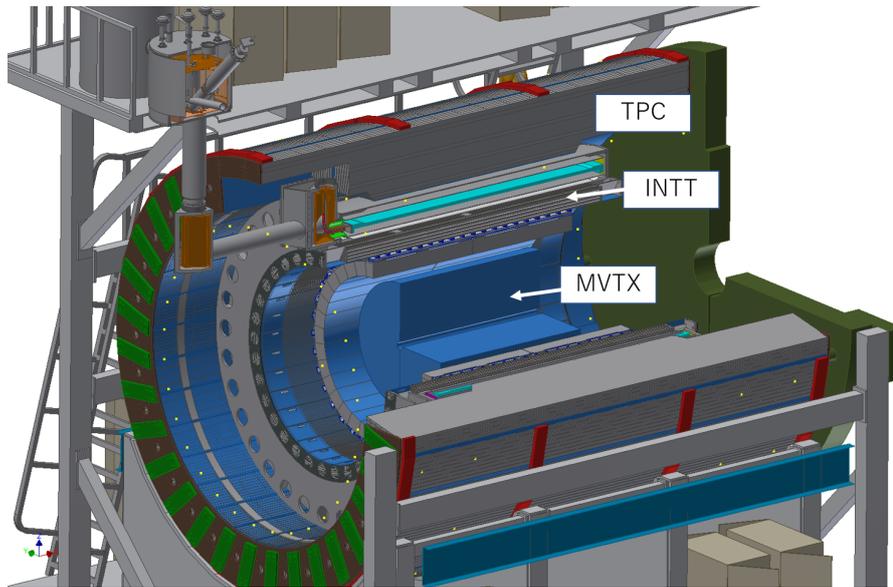


図 1.4 sPHENIX 実験で用いられる飛跡検出器

### 1.3.3 Monolithic-Active-Pixel-Sensor-based Vertex Detector(MVTX)

MVTX は、飛跡検出器群のうち最内層にあるピクセル型シリコン検出器である。CERN の LHC 加速器を用いた ALICE 実験において開発された Monolithic Active Pixel Sensor (MAPS) を用いる。衝突中心からビーム軸方向に  $\pm 10\text{cm}$ 、方位角方向に対して  $2\pi$  の範囲を覆っている。高精度の飛跡再構成が可能であり、衝突点と生成粒子の最近接距離を測定することで重いクォークの検出を行う。[1]

### 1.3.4 INtermediate Tracker(INTT)

INTT は、飛跡検出器群のうち MVTX と TPC の間 (ビームパイプから  $6\text{cm} - 12\text{cm}$ ) にあるストリップ型シリコン検出器である。衝突中心からビーム軸方向に  $\pm 23\text{cm}$ 、方位角方向に対して  $2\pi$  の範囲を覆っている。INTT には、56 本のラダーが用いられる。ラダー 1 本は、2つのシリコンモジュールで構成されている。シリコンモジュールは、シリコンストリップセンサー、FPHX、HDI、Bus Extender、Conversion Cable で構成されている。MVTX と TPC の飛跡をつなぎ、運動量分解能を上げるとともに、各トラックに 1 ビームバンチの時間情報を与える役割を果たす。[1]

### 1.3.5 Time Projection Chamber(TPC)

TPC は、飛跡検出器群のうち最外層 (ビームパイプから  $20\text{cm} - 78\text{cm}$ ) にあるガス検出器である。衝突中心からビーム軸方向に約  $\pm 1\text{m}$ 、方位角方向に対して  $2\pi$  の範囲を覆っている。48 枚の読み出しパッドにより、高い位置分解能をもつ。荷電粒子の運動量測定において中心的な役割を果たす。[1]

## 1.4 研究の目的

奈良女子大学は現在、sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT を開発し、その性能評価を行っている。本研究では、INTT ラダーの性能評価を目的として実施したビームテスト実験でのデータを解析し、様々なセットアップや条件におけるエネルギー損失量について報告・議論する。

## 第 2 章

# 中間飛跡検出器 INTT

### 2.1 INTT ラダー

INTT のセンサー部分である INTT ラダーは、シリコンセンサー、FPHX チップ、HDI、Conversion Cable、Bus-extender で構成されている。

#### 2.1.1 シリコンセンサー

INTT 用シリコン検出器では、ストリップ型のシリコンセンサーを採用している。図 2.1 のように、ストリップ長の異なる  $16\text{mm} \times 9.984\text{mm}$ (Type-A) が  $8 \times 2$  個、 $20\text{mm} \times 9.984\text{mm}$ (Type-B) が  $5 \times 2$  個のセルで、1 つのシリコンセンサーが構成されている。sPHENIX 実験では INTT ラダーがバレル構造をとるよう配置されることで、センサーの位置により収集できる粒子数が異なる。そのため、ストリップ長の異なる 2 種類のセンサー (Type-A、Type-B) が組み合わさっている。各セルは 128 個のストリップに分割され、セル 1 個に 1 つの読み出しチップ (FPHX チップ) が接続されている。これ以降、セルを chip、ストリップを channel と呼ぶ。

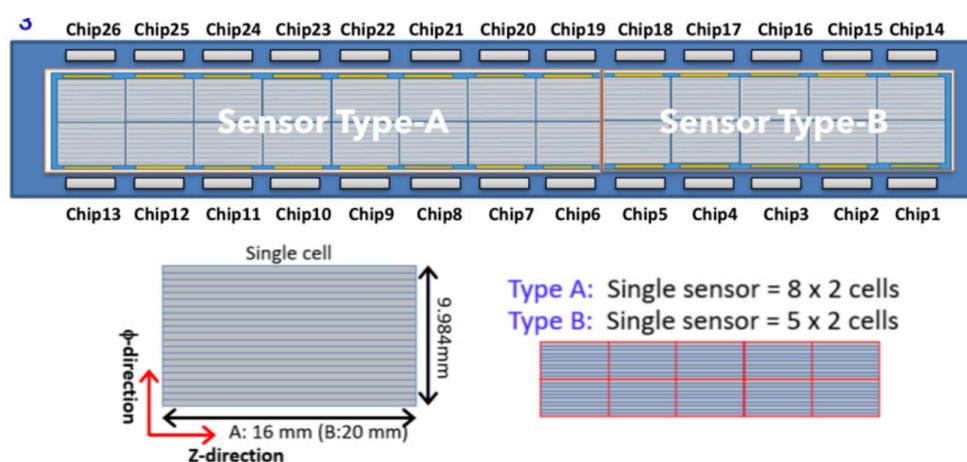


図 2.1 (上)：シリコンセンサーモジュール  
(下)：シリコンセンサー Type-A と Type-B のシリコンセルサイズとその数

## 2.1.2 FPHX チップ

FPHX チップは、シリコンセンサーから読み出した信号を変換し、後段のモジュールに送り出す役割をもつ。シリコンセンサー 1 個あたり 26 個の FPHX チップが搭載されている。1FPHX チップあたり 128 個の読み出しチャンネルを持っており、各チャンネルで波形整形を行って 3bit の ADC を出力する。ADC の閾値は 8 bit の DAC 値で設定可能で、このときの電圧変換は  $V[mV] = 210 + 4 \times DAC$  とする。HDI とはワイヤーボンディングで接続されている。

## 2.1.3 High Density Interconnect(HDI)

HDI は、FPHX チップへの入出力配線と FPHX チップやシリコンセンサーへの電源供給を行う基板である。FPC (Flexible Printed Circuits) と呼ばれる高柔軟性の薄い基板で作られている。ROC とは Bus-extender または Conversion Cable を介して接続されている。

## 2.2 データ読み出しシステム

テストベンチやビームテスト実験における、検出器のデータ読み出しシステムを図 2.2 に示す。データを同期させるために、FEM-IB で同期信号を生成している。この信号を Beam Clock(BCO) といい、その頻度は 9.4MHz(106ns) である。Beam Clock Distribution Board で BCO を光から電気信号に変換して ROC や INTT ラダーに送信している。

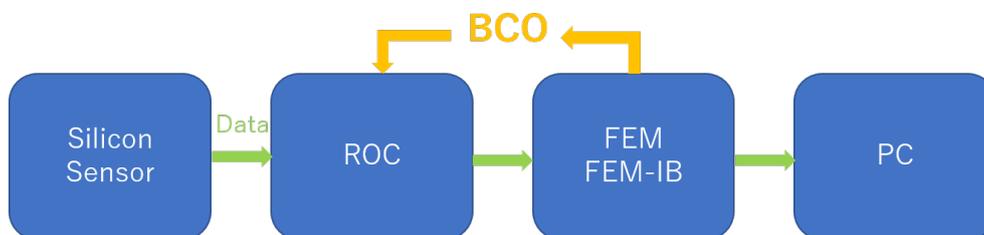


図 2.2 テストベンチにおけるデータ読み出しシステム

### 2.2.1 Read Out Card(ROC)

ROC は、複数の FPHX チップから送られてきたデータの同期と結合を行い、次の読み出し回路に転送する読み出し基板である。ROC1 枚あたり  $4 \times 4$  個のセンサーモジュールからのデータを取り扱うことができる。ROC にはデータ処理用 FPGA が 4 個搭載されており、各 FPGA は 4 個のシリコンセンサーモジュールから転送されたデータを整形する。また、FPHX チップへの測定条件や閾値といった情報を指定されたチップへ転送する機能や FPHX チップの読み出し回路の動作確認を行うためのキャリブレーションパルスを発生させる機能、センサーモジュールへの電源供給機能も持つ。

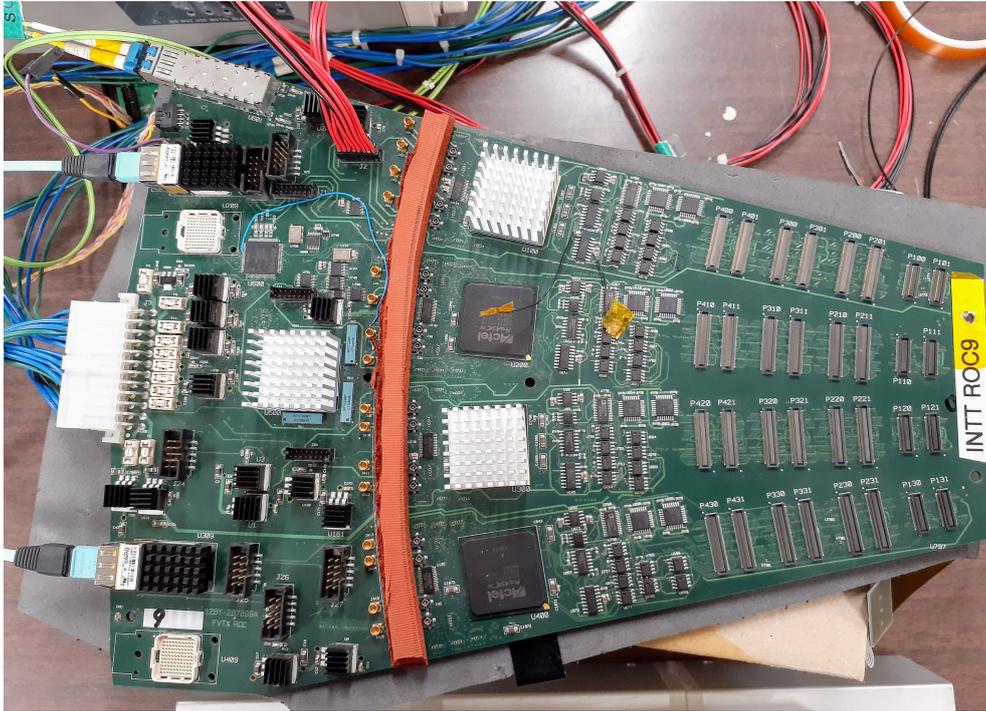


図 2.3 ROC9 の写真

## 2.2.2 Bus-extender

Bus-extender は、ROC と HDI を接続するためのデータ送信ケーブルであり、その全長は 1.2 m である。長尺 FPC により、柔軟性が高く、高密度ながら厚みを抑えつつ全長 1.2 m を実現した。



図 2.4 Bus-extender の写真

### 2.2.3 Conversion Cable

Conversion Cable は、ROC と HDI で異なるコネクタを整合するためのデータ送信ケーブルで、全長は 20cm と 40cm の 2 種類がある。Bus-extender と同様、FPC であるため、柔軟性が高い。sPHENIX 実験では、20cm の Conversion Cable と Bus-extender を併用する予定である。



図 2.5 Conversion Cable の写真

### 2.2.4 Front End Module(FEM)

FEM とは、VME 規格の読み出し基板である。ROC から送られたデータをまとめ、sPHENIX 共通のフォーマットに変換し、他の検出器の情報と結合を行うモジュールへと転送する役割を持つ。FEM1 枚あたり ROC 半分の出力を担っており、ROC1 枚のデータを送るには 2 枚の FEM が必要となる。ただし、ROC への命令信号である Slow Control は、1 枚の FEM で行うことができる。また、FEM にはデータ処理用 FPGA が搭載されており、トリガーモードを変更する際は FPGA の書き換えが必要となる。

### 2.2.5 FEM - Interface Board (FEM-IB)

FEM-IB とは、FEM と同様に VME 規格の基板で、FEM 全体を制御する役割を持つ。主に、検出器全体を統括するクロック信号やトリガー信号、FEM 制御信号を受け取る。



図 2.6 FEM(右) と FEM-IB(左) の写真

## 第3章

# テストベンチでの INTT ラダーの動作確認

INTT 検出器の性能評価や読み出しシステムの動作確認を行うために、2018年に奈良女子大学にテストベンチが構築された。確認方法は、テストパルスを用いたキャリブレーションテストと、外部トリガーを用いた宇宙線測定との2つである。本章では、キャリブレーションテストについて記述する。



図 3.1 INTT テストベンチの様子

### 3.1 キャリブレーションテスト

キャリブレーションテストとは、テストベンチ全体の動作確認を行うためのテストである。ROC で生成されたテストパルス (アナログ信号) は、FPHX チップでデジタル信号に変換され、ROC、FEM を通り PC でデータとして出力される。ここで、64 段階の波高 (amplitude) のテストパルスを、シリコンセンサーの各

channelに10回ずつ入力している。キャリブレーションテストでのDAC閾値について表3.2に示す。また、ノイズを減らすために、シリコンセンサーに50Vの逆バイアス電圧をかけることが有効である。

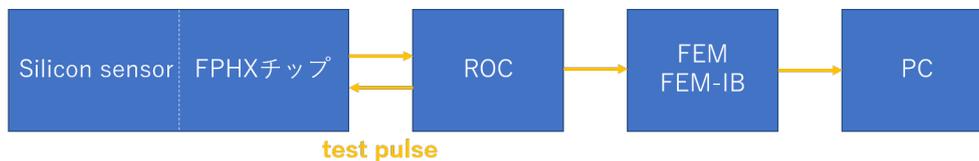


図 3.2 テストベンチにおけるキャリブレーションテストでの読み出しの流れ

表 3.1 キャリブレーションテストでの DAC 閾値設定

ADC	DACvalue	Threshold[mV]
0	20	290
1	25	310
2	30	330
3	35	350
4	40	370
5	45	390
6	50	410
7	55	430

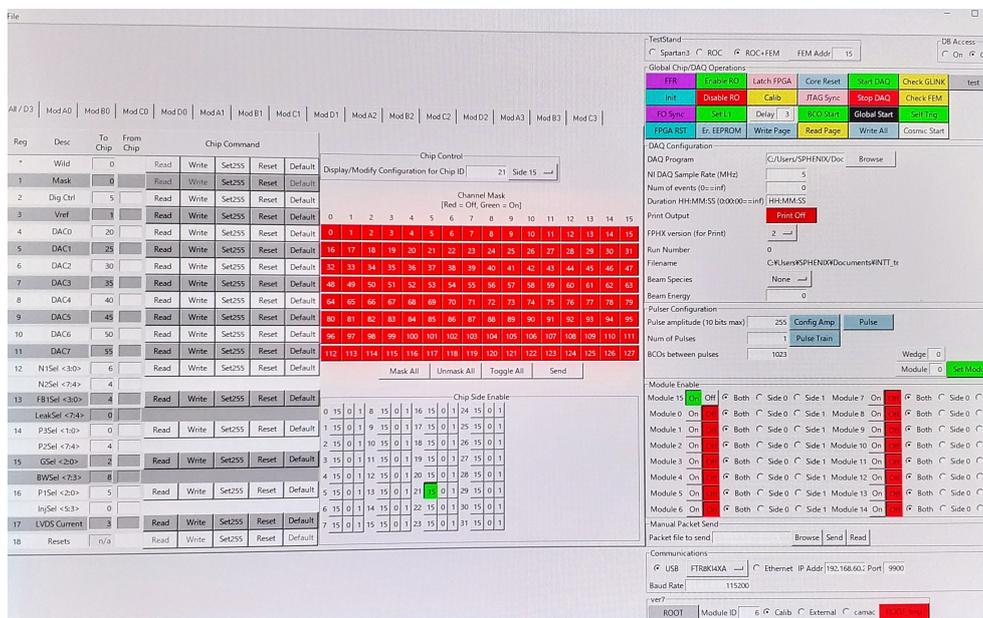


図 3.3 キャリブレーションテストに使用される GUI の写真

### 3.2 キャリブレーションテストの結果

図 3.4(左) は chip 1 における入力 amplitude と出力 ADC の相関関係を示しており、赤色、緑色、青色に変化するにつれてヒット数が少なくなる。図 3.5 は全チップでの相関分布であり、右下が chip1、左下が chip13、右上が chip14、左上が chip26 の順に並んでいる。この図より、全チップにおいて入力 amplitude と出力 ADC には DAC 設定に基づいた比例関係が見られるため、正常に動作していると言える。

図 3.4(右) は chip1 におけるヒットチャンネル位置と入力 amplitude の相関分布であり、色はヒット数を示している。また、ヒット数が 15 を超えると「over15」が表示される。図 3.6 は全チップにおける相関分布であり、並び順は図と同様である。この図より、全チップ、全チャンネルにおいて同等のヒット数が確認できるため、正常に動作していると言える。

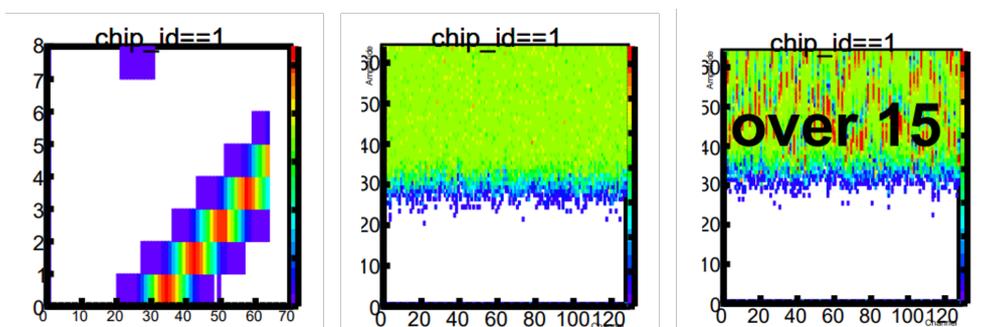


図 3.4 (左)chip1 での入力 amplitude と出力 ADC の相関分布。横軸：amplitude、縦軸：ADC  
 (中)chip1 での入力 amplitude と出力 ADC の相関分布。横軸：channel、縦軸：amplitude  
 (右)over15 の表示例

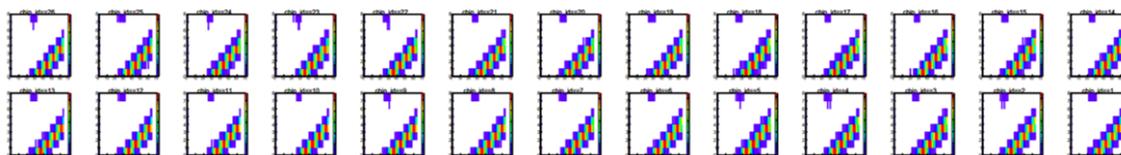


図 3.5 各チップでの入力 amplitude と出力 ADC の相関分布。横軸：amplitude、縦軸：ADC

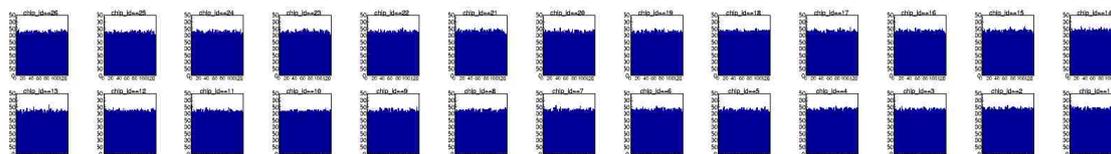


図 3.6 各チップでの入力 amplitude と出力 ADC の相関分布。横軸：channel、縦軸：amplitude

## 第4章

# ビームテスト実験におけるエネルギー損失の評価

2021年12月に東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) で、INTT ラダーの性能評価を行うために、1GeV の陽電子ビームを用いたテスト実験を行い、得られたデータを解析した。チーム全体での評価項目には、検出効率の測定、配置を変更した場合の ADC 分布、DAC スキャン、Bus-extender を用いた場合の検出効率と ADC 分布がある。本章では様々な条件での ADC 分布および DAC スキャンの結果について記述する。図 4.1 にビームテスト実験の様子を示す。ビームは図 4.1 のように、写真左の円筒部分から暗箱に対して垂直に入射する。暗箱の中に4つの INTT シリコンモジュールを図のように平行に配置する。また、水と冷却器を用いて INTT ラダーの冷却を行っている。

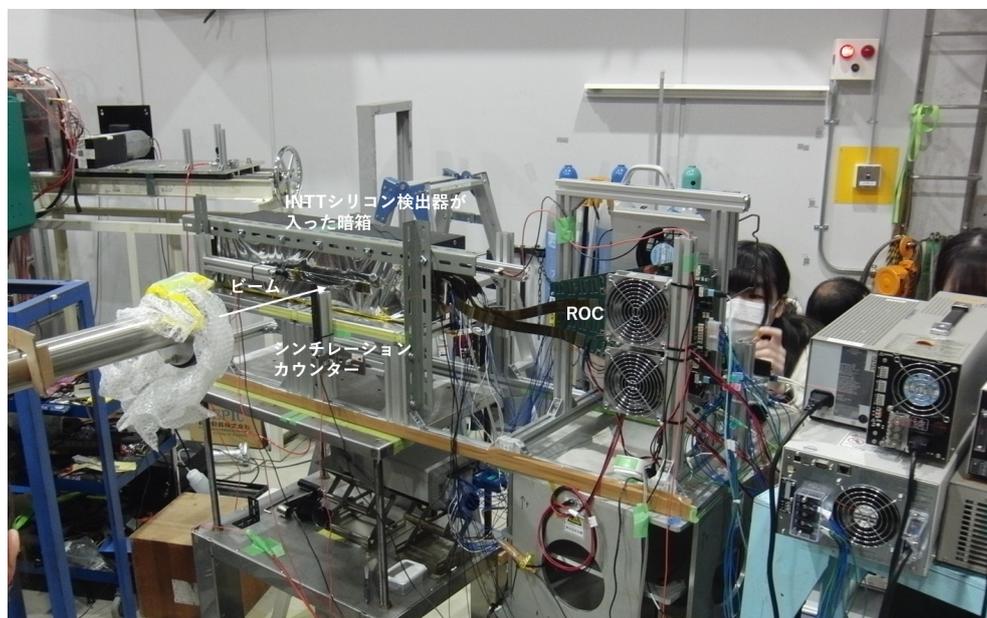


図 4.1 ビームテスト実験の様子

## 4.1 実験目的と方法

FPHX チップの各 channel において波形整形を行い、3bit の ADC が出力される。この時の ADC の各閾値を、8bit の DAC 値で設定する。通常、DAC 設定は 15,30,60,90,120,150,180,210 としている。この時、ADC、DAC 値ともに、損失エネルギーに対応する。本実験では、以下の目的で DAC 設定や元のセットアップを変更し、それぞれの条件におけるエネルギー損失について評価を行った。

第一に、通常の DAC 設定における MIP (Minimum Ionization Particle: 最小電離粒子) のエネルギー損失を測定するために、DAC 設定は変更せずに測定を行った。以降、この方法を通常の DAC 設定と呼ぶ。第二に、精密な MIP のエネルギー損失を測定するために、DAC 設定を細かく変更し ADC 測定を行った。DAC 設定を変更し、DAC 範囲を網羅することを DAC スキャンという。以降、この方法を DAC スキャンと呼ぶ。第三に、ラダーに対して斜めに入射する粒子についても検出し、そのエネルギー損失量を求めるために、元のセットアップ (垂直時) を縦方向に約  $13.7^\circ$ 、横方向に約  $29.05^\circ$  にそれぞれ回転させて測定を行った。以降、この方法を縦回転または横回転と呼ぶ。

## 4.2 原理

荷電粒子がラダーを通過する距離が長いほどエネルギー損失は大きくなる。ここで、垂直時、縦回転時、横回転時におけるラダー通過距離はそれぞれ  $320\mu\text{m}$ 、 $329\mu\text{m}$ 、 $366\mu\text{m}$  である。このことから、縦回転時では垂直時よりも約 3% 多く、横回転時では垂直時よりも約 14% 多くエネルギー損失を起こすと考えられる。

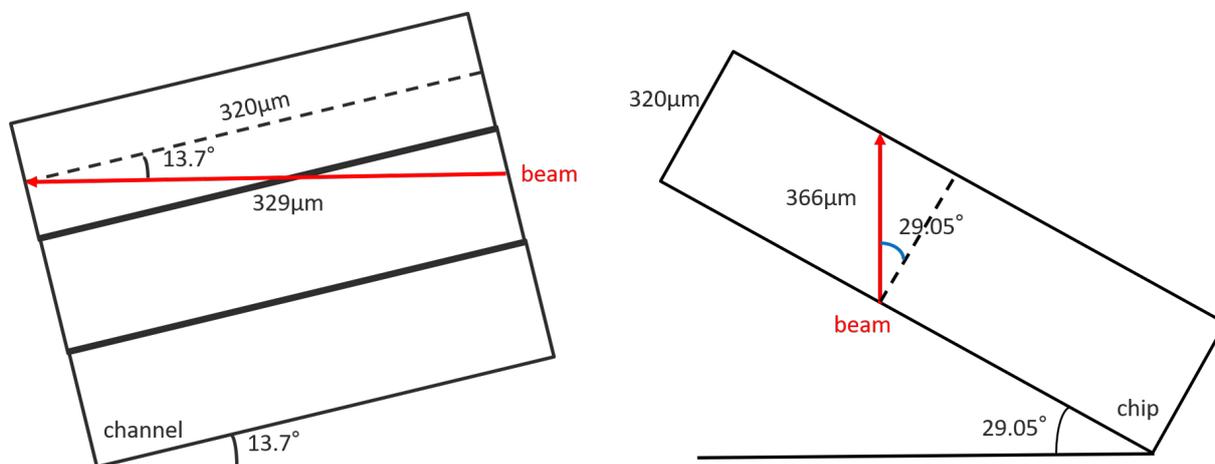


図 4.2 (左) 縦回転時における荷電粒子の通過距離の模式図  
(右) 横回転時における荷電粒子の通過距離の模式図

### 4.3 セットアップ

暗箱の中の4つのシリコンモジュールをそれぞれ26mm間隔で配置している。ただし、上流に一番近いシリコンモジュールはバイアス電圧が上手くかからなかったため、ビームテスト本番では未使用である。使用した3つのシリコンモジュールを、ビーム上流からL0, L1, L2とする。さらに、箱の側面（ビーム軸方向に垂直な面）にシンチレーションカウンタを3つ置き、シンチレーションカウンタBとCをトリガーとしている。ここで、シンチレーションカウンタは、シリコンセンサーとのコインシデンスをとることで、ノイズを減らしビーム由来の信号を検出する役割を果たす。ビーム上流側をシンチレーションカウンタD、シンチレーションカウンタB、下流側をシンチレーションカウンタCとする。シンチレーションカウンタB、Cのサイズは、シリコンセンサーをぴったり覆うサイズの $232.2\text{mm} \times 22.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、シンチレーションカウンタDのサイズは $115\text{mm} \times 11.6\text{mm} \times 5\text{mm}$ である。シリコンモジュールにかけたバイアス電圧はそれぞれ50Vである。シンチレーションカウンタの光電子増倍管にはどちらも-1kVのバイアス電圧をかけている。



図 4.3 シリコンモジュール配置図

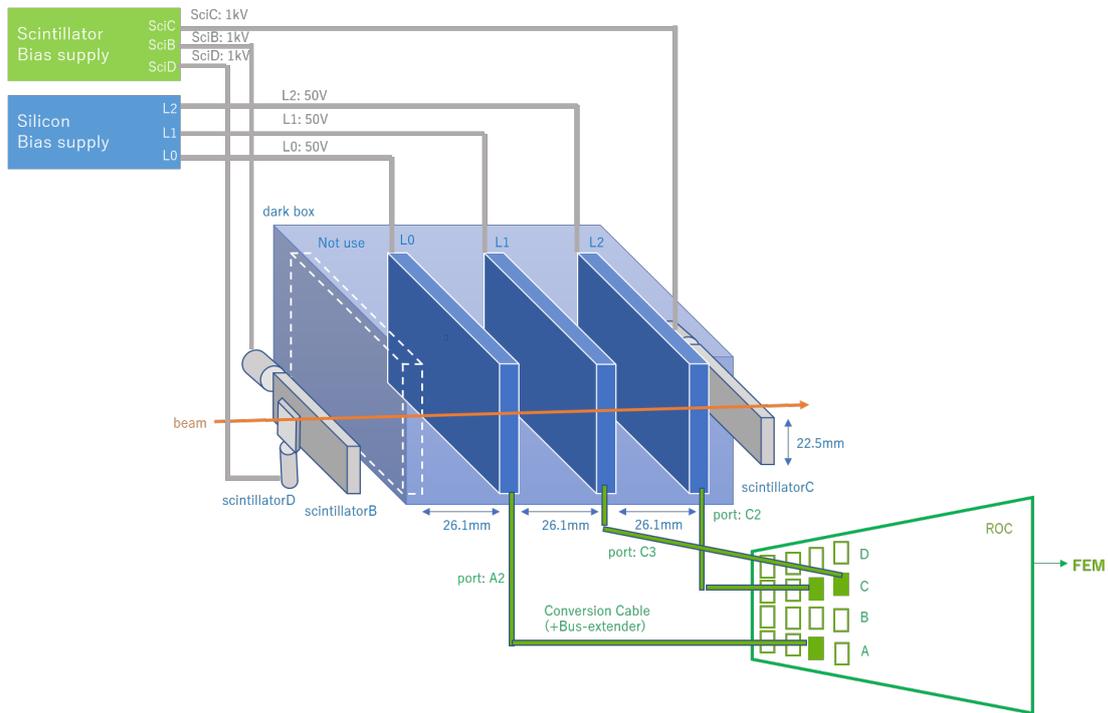


図 4.4 ビームテストでのシリコンモジュールとシンチレーションカウンタのセットアップ

## 4.4 データセット

今回のビームテストでは全部でおよそ 70 の Run データを得た。そのうち Run21-39 はセットアップや DAC 値、veto の幅の調整を行った際のデータ、Run40-59 はシリコンラダーの位置変更と TDC の連続データ問題に取り組んだ際のデータ、Run60-63 は縦/横方向への回転により、斜めに入射する粒子を検出し、エネルギー損失との関係を求めることを目的としたデータ、Run64 はセットアップ上流に鉛板を置いた際のデータ、Run65-89 は Bus-extender 有無の比較を目的としたデータ、Run67-86 は後述する DAC スキャンを目的としたデータである。まず、基準として通常の DAC 設定におけるエネルギー損失について評価を行うため、Run89 でのデータ解析を行った。Run89 の全エントリー数は 1,127,176 エントリーである。

表 4.1 データリスト

Run	Dataset
21-39	セットアップや DAC 値、veto 幅の調整
40-59	シリコンラダーの位置変更と TDC の連続データ問題
60-63	縦/横方向への回転
64	セットアップ上流に鉛板を置く
65-89	Bus-extender の有無
67-86	DAC スキャン

## 4.5 解析方法

ビームテスト実験で得られたデータを解析するにあたって、以下の手法を用いた。

### 4.5.1 イベント選定によるノイズ除去

本解析では、3種類のノイズの除去を行った。

1つ目は、存在しないモジュールから出力されるデータの除去である。荷電粒子がシリコンセンサーを通過すると、ROC上のポートに接続されたモジュールからROC、FEMを介してPCにデータが送られる。しかし、ROC上のポートに接続しておらず、存在し得ないとされるモジュールからデータが出力される場合がある。これは、ROC上のポートに接続されているモジュールを選択することで除去可能である。

2つ目は、ビームの照射箇所から離れたところにおけるヒット数が多いイベントの除去である。本来、ビームの照射箇所におけるヒット数はその他の箇所よりも多く、ヒットマップからもその様子が確認できる。しかし、その他の箇所におけるヒット数の方がはるかに多くなる場合がある。本解析では、図4.5のようにビームの照射箇所から離れているにも関わらず、ヒット数が多くなっている箇所におけるイベントを除去する。

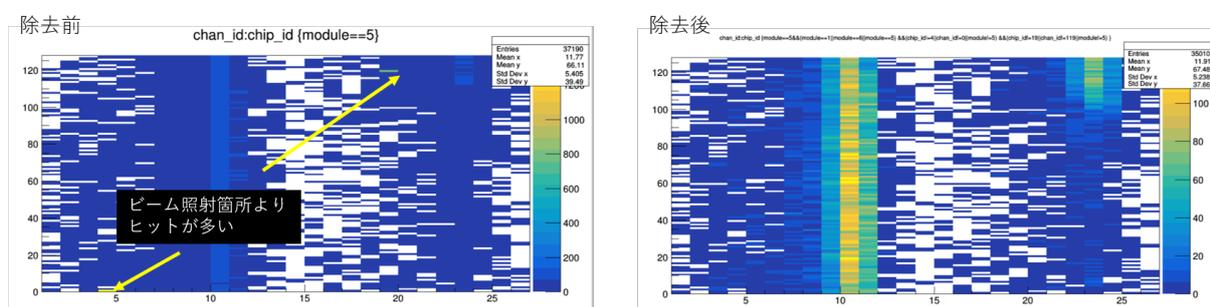


図 4.5 ビームの照射箇所から離れたところにおけるヒット数が多いイベントの除去例

3つ目は、同じヒットが2イベント連続で出力されるデータの除去である。このイベントのことを、double saving eventと呼ぶ。前後のイベントにおいて、時刻を表すパラメータBCO fullの差が $\pm 5$  ( $\Delta \text{BCO full} \leq 5$ )の時にdouble saving eventが出現する割合が高いと考えられている。本解析では、 $\Delta \text{BCO full} \leq 5$ でchip、channel、ADC、moduleが同一のヒットがある場合、2個目のイベントを取り除くことにする。

### 4.5.2 クラスタ化

荷電粒子がシリコンセンサー表面に垂直方向に入射した場合、あるchipにおいて1つのchannelのみを通過する。一方、荷電粒子が斜め方向に入射した場合、あるchipにおいて複数のchannelに跨がって通過する。この時、1粒子のイベントが、各channelに分かれて記録される。同時刻、同一chipでchannelが隣り合うヒットを1つにまとめ、各channelでのエネルギー損失量を足し合わせることで(クラスタ化)、1つの荷電粒子がセンサーを通過した際のエネルギー損失を評価することができる。

クラスター化の手順を以下に示す。

1. 同時刻におけるイベントを vector に入れる。
2. channel,ADC が格納された 2 種類の vector を pair に入れる。
3. chip 番号ごとに channel 番号で pair のデータを並び替える。
4. 不要なイベント (double saving event 起因) を除去する。
5. ADC を DAC 設定値に変換する。
6. クラスター数が 1 以上の chip 番号のデータをクラスター化する。
  - (a) channel が隣り合うとき、1 粒子のイベントとし、DAC 値を足し合わせる。
  - (b) channel が隣り合わないとき、それぞれ別のヒットにおける DAC 値とする。

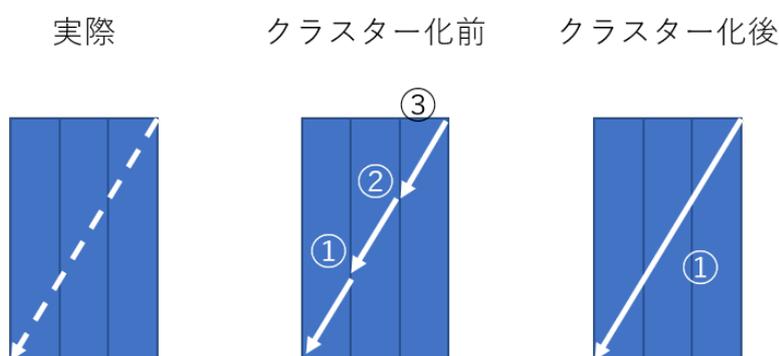


図 4.6 3つの channel を通過した場合のクラスター化のイメージ図

#### 4.5.3 DAC スキャンにおけるエネルギー損失分布の扱い

DAC スキャンでは、DAC 設定のパターンが複数個あるため、それぞれのエネルギー損失分布を重ね合わせる必要がある。表 4.2 のように、各 DAC 設定でのデータを DAC スキャン 1 から 8 とする。

DAC スキャン解析の手順

1. 各 DAC スキャンにおいて、それぞれ 8 個のエネルギー損失分布を求める。  
※ ADC7 について、閾値以上の電圧パルス信号を拾い、ADC0-6 よりも ADC7 のヒット数をはるかに多いため、クラスター化前に ADC7 を除去している。(図 4.7 参照)
2. 1 で求めたエネルギー損失分布を重ね合わせた後、その分布の外枠の線を採用することで 1 つのエネルギー損失分布を求める。(図 4.8 参照)

表 4.2 各 DAC スキャンにおける DAC 設定値

	DAC 設定値							
	scan1	scan2	scan3	scan4	scan5	scan6	scan7	scan8
ADC0	8	28	48	68	88	108	128	148
ADC1	12	32	52	72	92	112	132	152
ADC2	16	36	56	76	96	116	136	156
ADC3	20	40	60	80	100	120	140	160
ADC4	24	44	64	84	104	124	144	164
ADC5	28	48	68	88	108	128	148	168
ADC6	32	52	72	92	112	132	152	172
ADC7	36	56	76	96	116	136	156	176

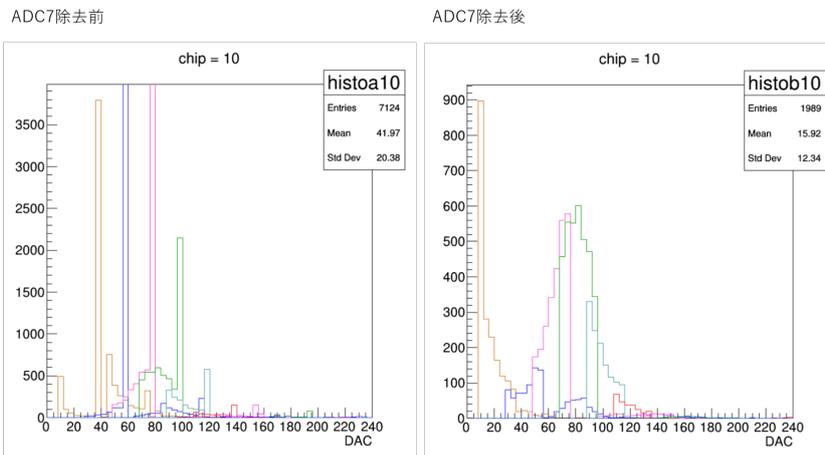


図 4.7 ADC7 の除去前と除去後

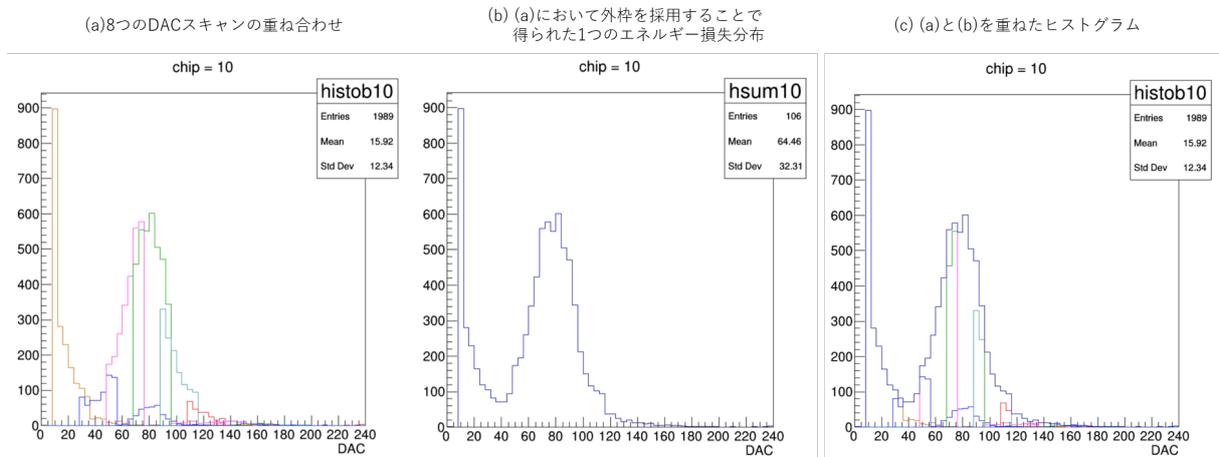


図 4.8 重ね合わせた 8 個のエネルギー損失分布を 1 つの分布にする過程

## 4.6 解析結果

### 4.6.1 通常の DAC 設定におけるエネルギー損失

通常、ADC0-7 に対応する DAC 設定は {15,30,60,90,120,150,180,210} である。MIP のエネルギーに対応する DAC 値を測定するために、Run-089 においてこの DAC 設定のもと測定を行い、そのデータを解析して得られたエネルギー損失分布を図 4.9 に示す。上から順に、L0、L1、L2 それぞれの全 chip のエネルギー損失分布で、横軸はエネルギー損失に対応する DAC 値、縦軸はカウント数である。

L0,L1,L2 ともに chip9,10,11 において比較的ヒットが多いことから、ビームがラダーに対して垂直に入射していることが分かる。MIP(Minimum Ionization Particle: 最小電離粒子)のエネルギーに対応する DAC 値を測定するために、DAC 設定を細かく変更した結果について次小節で記述する。

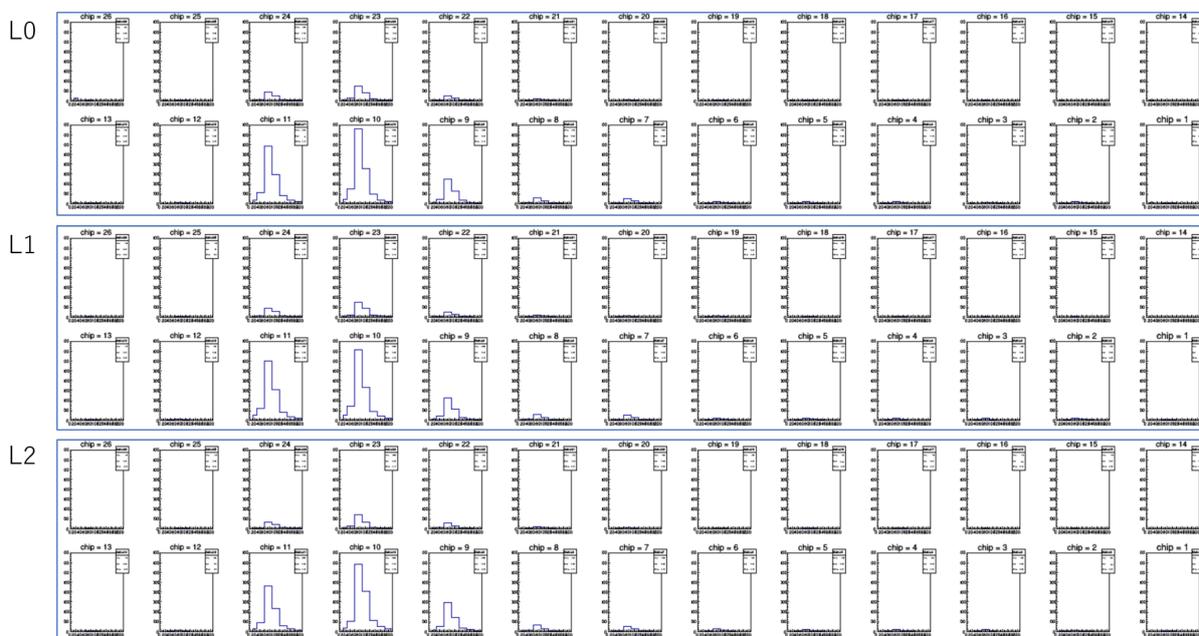


図 4.9 通常の DAC 設定におけるエネルギー損失分布

### 4.6.2 DAC スキャンにおけるエネルギー損失

精密な MIP のエネルギーを測定するために、DAC 設定を細かく変更し ADC 測定を行った。表 4.2 のように、各 DAC 設定でのデータを DAC スキャン 1 から 8 とする。この測定データを用いて、4.4.2 で述べた解析方法により求めた DAC スキャンのエネルギー損失分布を図 4.10 に示す。ここで、左から順に、L0、L1、L2 の chip10 におけるエネルギー損失分布で、横軸は DAC 値、縦軸はカウント数である。また、赤線はヒストグラムに関数 Gaus+Expo で Fitting したものである。Fitting により得られたピークを、MIP ピークにおけるエネルギー損失量とし、その値を分布右上に示す。

MIP ピークは、L0 では  $74.97 \pm 0.25$ 、L1 では  $79.82 \pm 0.26$ 、L2 では  $77.72 \pm 0.28$  であることが分かった。通常の DAC 設定と DAC スキャンでは、エネルギー損失分布の特徴に違いがあるか確認するために、比較を行った結果について次小節で記述する。

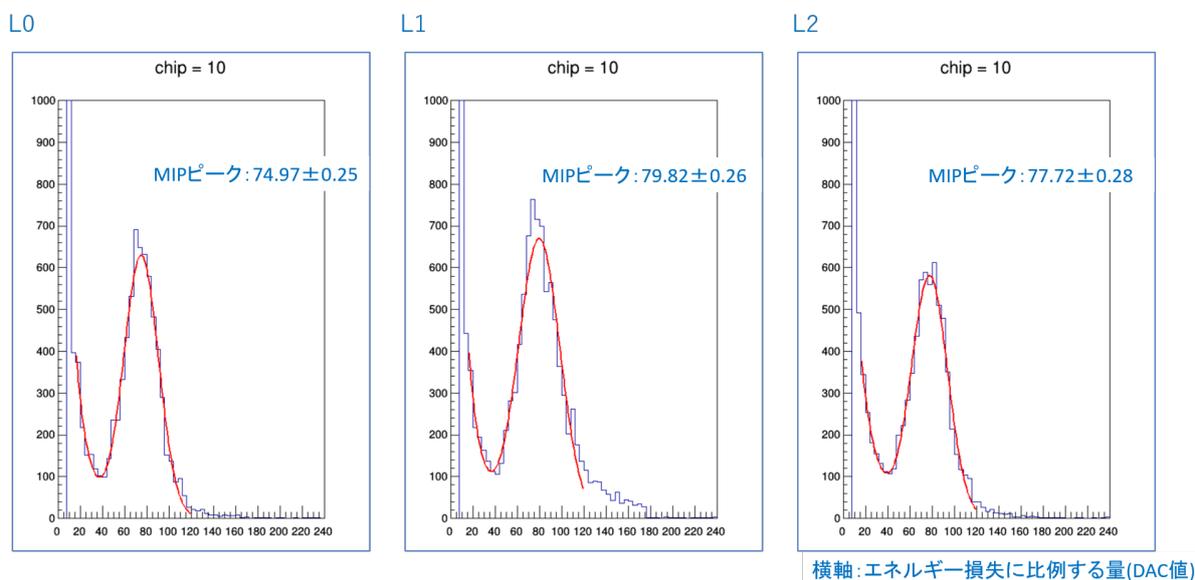


図 4.10 DAC スキャンにおけるエネルギー損失分布

### 4.6.3 通常の DAC 設定と DAC スキャンとの比較

通常の DAC 設定と DAC スキャンにおいて、エネルギー損失分布の違いを比較した結果を図 4.11 に示す。ここで、左から順に、L0、L1、L2 の chip10 におけるエネルギー損失分布で、横軸は DAC 値、縦軸はカウント数である。また、青色、赤色のヒストグラムはそれぞれ通常の DAC 設定、DAC スキャンの分布で、分布右上に示す青色と赤色の数値は、それぞれ通常の DAC 設定、DAC スキャンにおける MIP ピークの値である。ヒストグラムの平均値を、MIP ピークの値としている。

通常の DAC 設定では、MIP ピークが 80 前後の山型の分布となっている。一方、DAC スキャンでは DAC 値を細かく設定しており、40 より小さい領域ではノイズによるエネルギー損失、40 より大きい領域では信号によるエネルギー損失を示すと考えられる。このことから、DAC 設定を細かく設定することで、精密な MIP エネルギーの導出やノイズと信号の判別が可能となることが分かる。

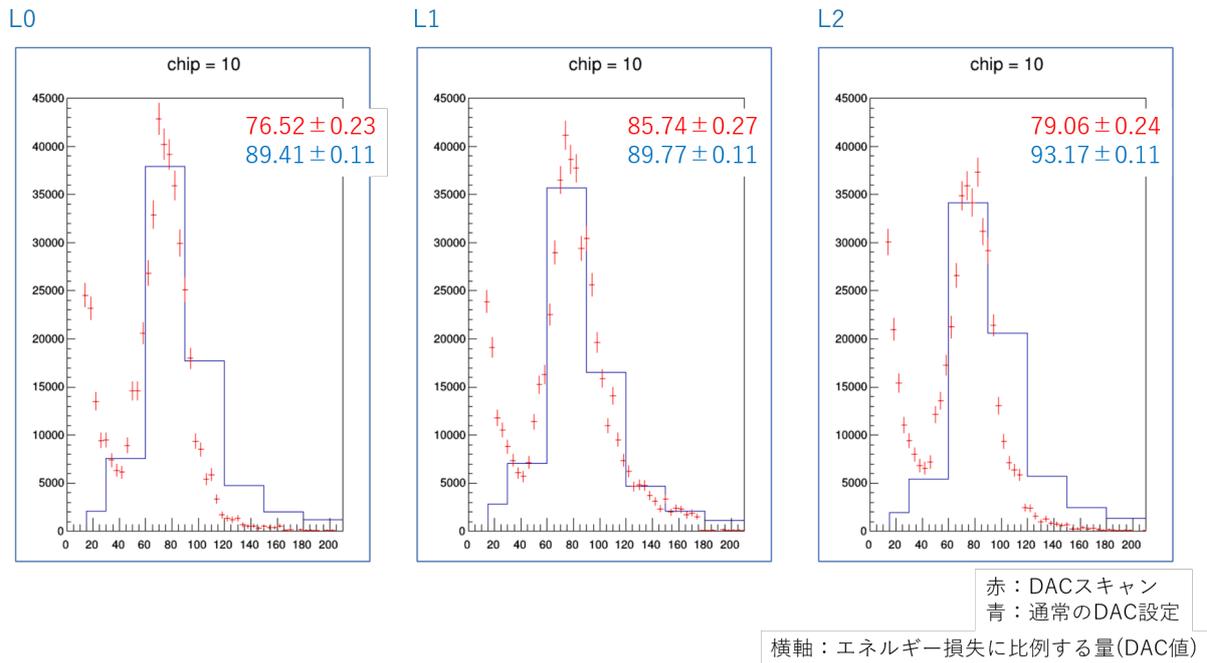


図 4.11 通常の DAC 設定と DAC スキャンとの比較

#### 4.6.4 垂直、縦/横回転時におけるクラスター化前後の比較

垂直時・縦/横回転時において、クラスター化の影響について調べるために、クラスター化前後のエネルギー損失分布の比較を行った結果について図 4.12 に示す。ここで、左から順に、垂直時、縦回転時、横回転時の L0 の chip10 におけるエネルギー損失分布で、横軸は DAC 値、縦軸はカウント数である。青色、赤色のヒストグラムは、それぞれクラスター化前、クラスター化後の分布で、右上に示す青色と赤色の値は、それぞれクラスター化前、クラスター化後における MIP ピークの値である。ヒストグラムの平均値を、MIP ピークの値としている。

垂直時と横回転時に比べて、縦回転時ではクラスター化の前後で MIP ピークの変化が大きく、ヒットストリップ数が増加していることがわかる。このことから、縦回転させた場合、荷電粒子が複数の channel をまたがって斜めに通過したと考えられる。

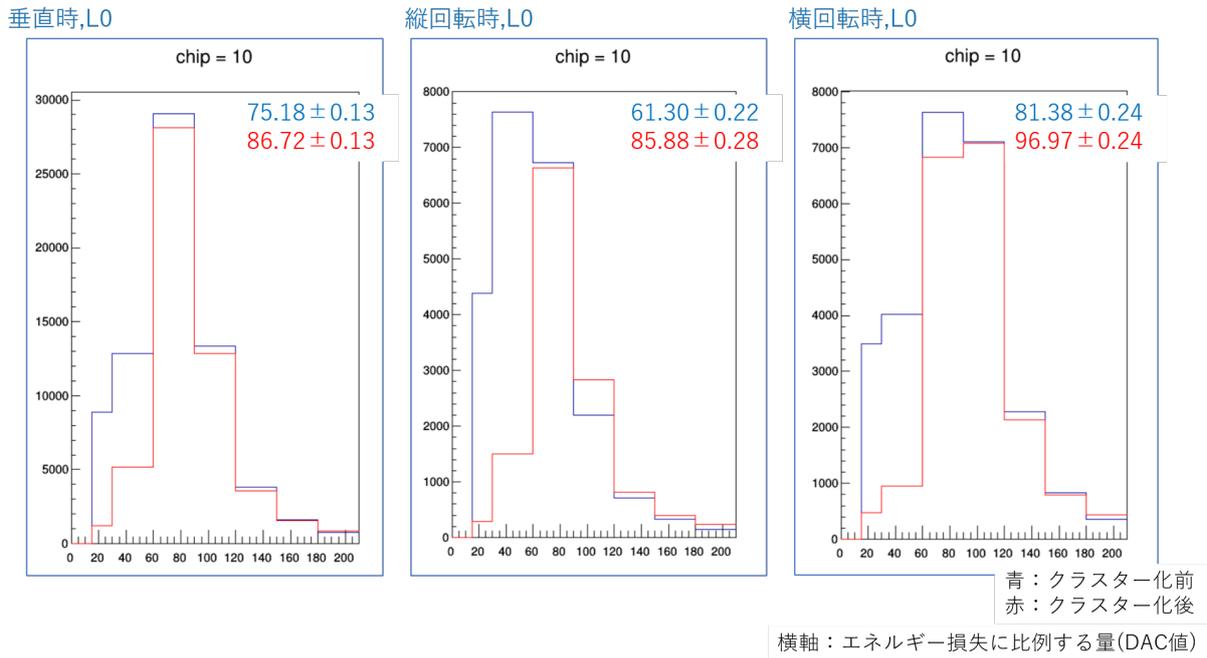


図 4.12 垂直または縦/横回転時におけるクラスター化前後の比較

#### 4.6.5 縦方向に回転させた場合のエネルギー損失

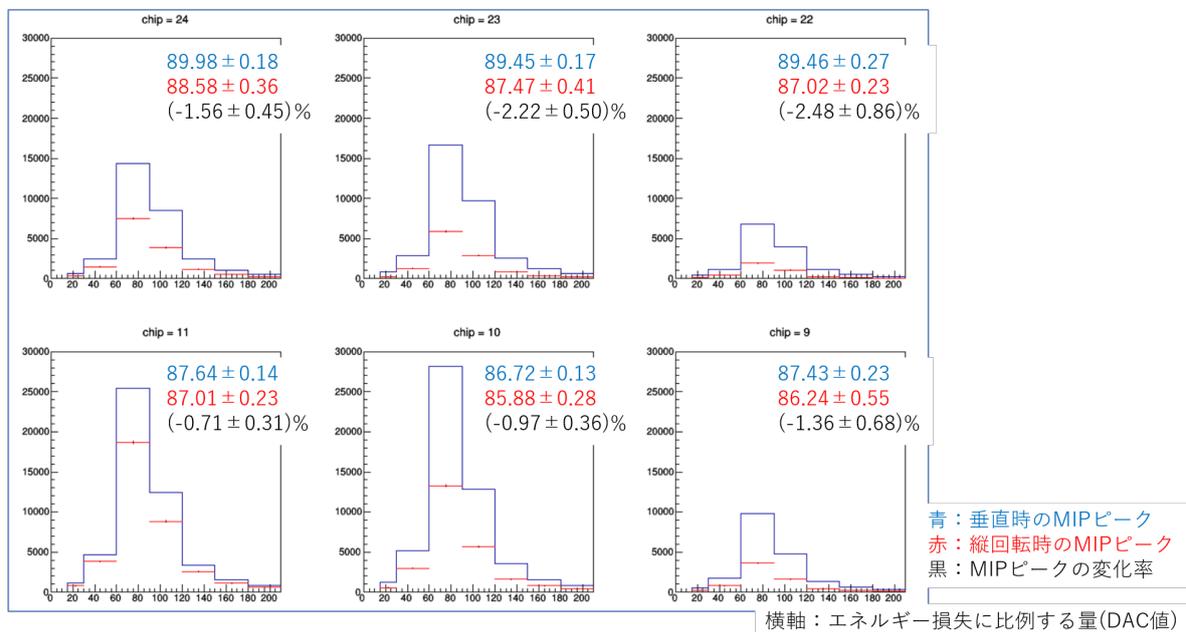
Run-061 において、シリコンモジュールが入った暗箱を縦方向に約  $13.70^\circ$  回転させた場合の測定データを解析し得られたエネルギー損失分布を図 4.13 に示す。ここで、ビームの照射位置付近かつ比較的ヒットが多い chip9-11,22-24 のエネルギー損失分布で、横軸は DAC 値、縦軸はカウント数である。青色と赤色のヒストグラムは、それぞれ垂直時、縦回転時の分布である。また、右上に示す青色や赤色、黒色の値は、それぞれ垂直時の MIP ピーク、縦回転時の MIP ピーク、MIP ピークの変化率である。ここで、MIP ピークの変化率とは、垂直時に比べて縦回転時では MIP ピークがどの程度変化するかを示した変化率である。

L0 から L2 にかけて下側の chip から上側の chip に順に入射していることから、斜め方向に入射した粒子を検出できたことが分かる。MIP ピークの変化率に関して、L0,L1 では chip9-11,22-24 において、縦回転させた場合 MIP ピークが減少している。L2 では chip9,11 において、縦回転により MIP ピークが上昇している一方、chip10,22-24 においては減少している。

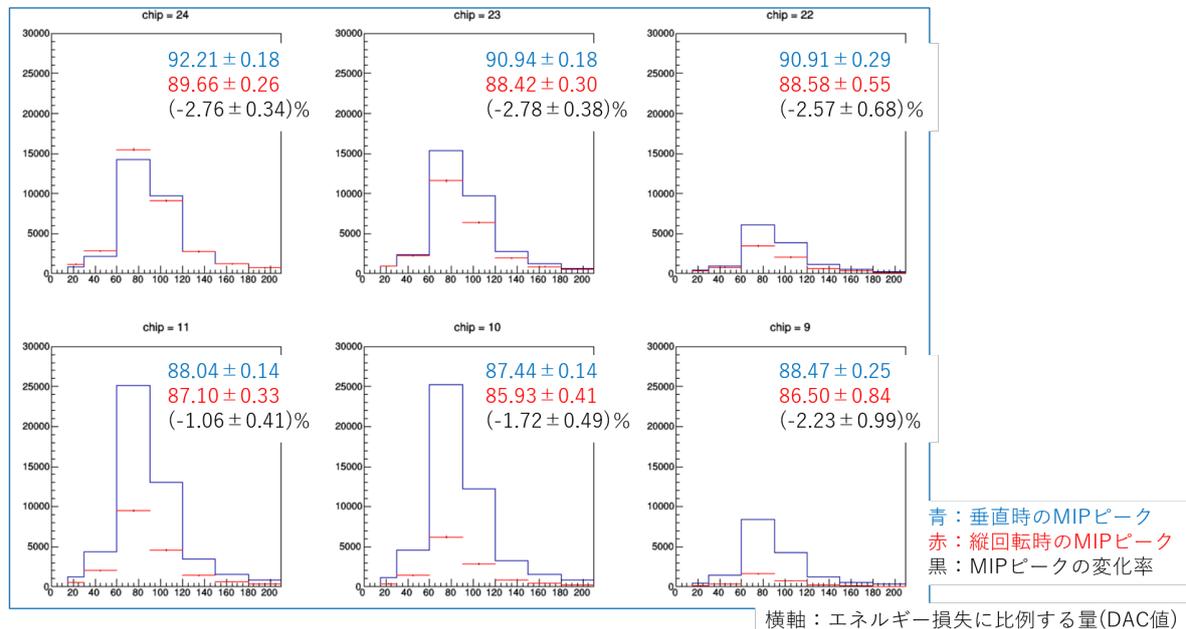
4.2 節で述べた原理では MIP ピークが約 3% 上昇する予想であったが、実際は殆どの chip において予想とは異なる値になった。この原因として、2つの仮説が挙げられる。1つ目は、予想では約 3% というわずかな上昇率のため、測定分解能が劣り約 3% という値は得られないと考えられる。その場合、誤差の範囲内で MIP ピークの変化率が 0% となるはずだが、殆どの chip においてその値にはなっていない。このことから、1つ目の仮説のみが原因ではない。2つ目は、chip 別にクラスター化を行っており、chip の端に位置する channel0、127 に荷電粒子が斜めに通過した場合のエネルギー損失量を過小評価してしまったと考えられる。これに関して、chip 別にクラスター化を行うのではなく、上下に位置する chip において channel0-255 にしてからクラ

スター化を行うなど、解析の検証を行うことが今後の課題である。

L0



L1



L2

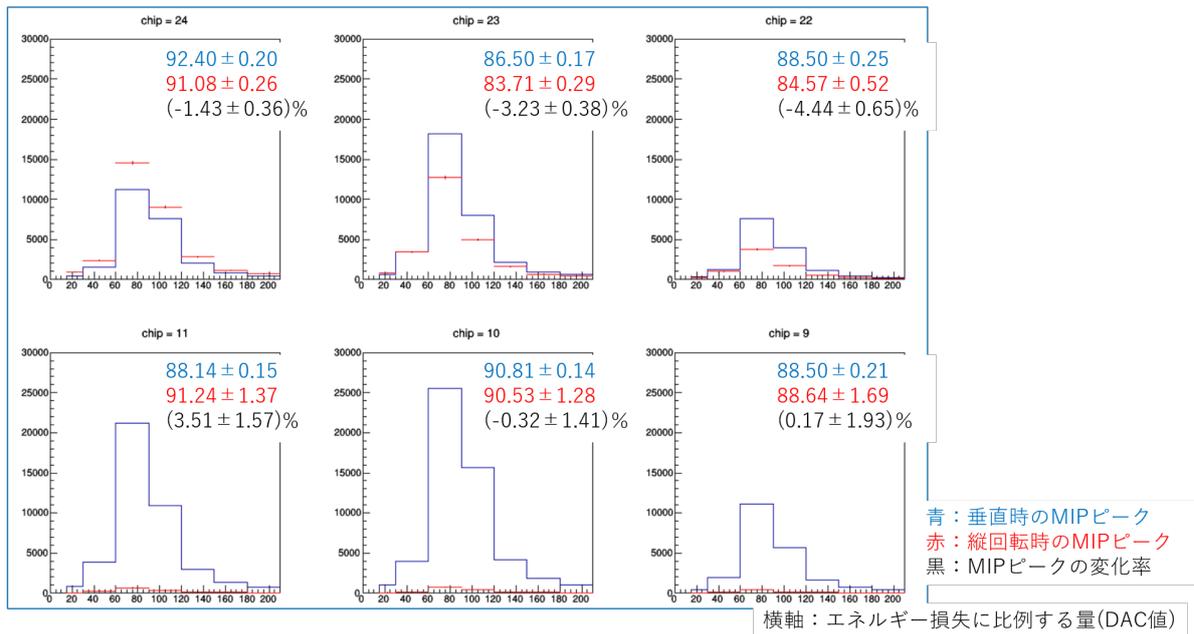


図 4.13 垂直時と縦回転時におけるエネルギー損失分布と MIP ピークの位置

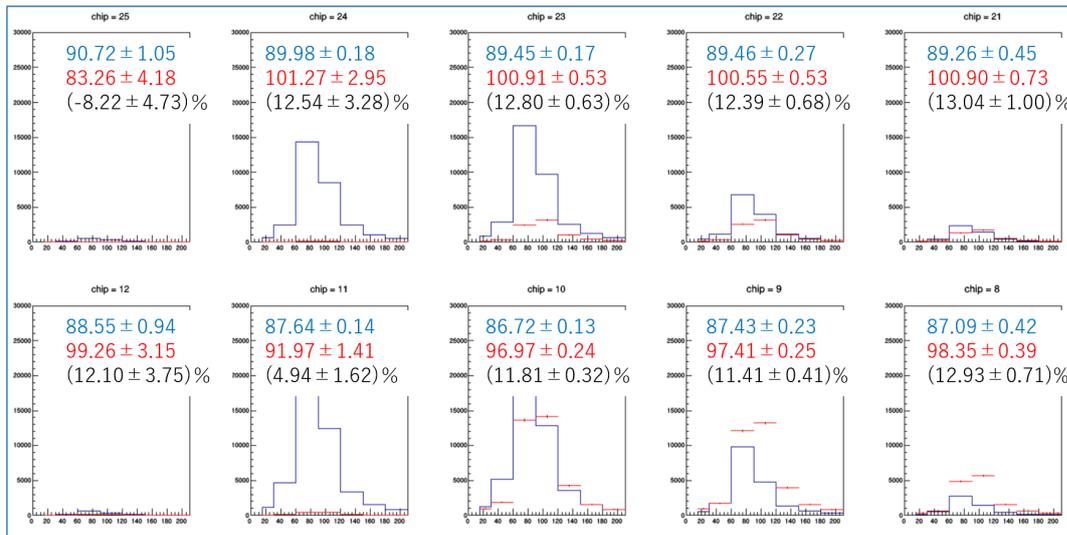
#### 4.6.6 横方向に回転させた場合のエネルギー損失

Run-063 において、シリコンモジュールが入った暗箱を横方向に約  $29.05^\circ$  回転させた場合のエネルギー損失分布を図 4.14 に示す。ここで、ビームの照射位置付近かつ比較的ヒットが多い chip8-12,21-25 のエネルギー損失分布で、横軸は DAC 値、縦軸はカウント数である。青色と赤色のヒストグラムは、それぞれ垂直時、横回転時の分布である。また、右上に示す青色や赤色、黒色の値は、それぞれ垂直時の MIP ピーク、横回転時の MIP ピーク、MIP ピークの変化率である。ここで、MIP ピークの変化率とは、垂直時に比べて横回転時では MIP ピークがどの程度変化するかを示した変化率である。

L0 から L2 にかけて右側の chip から左側の chip に順に入射していることから、斜め方向に入射した粒子を検出できたことが分かる。MIP ピークの変化率に関して、L0,L1,L2 ともに変化率が誤差の範囲内で約 14% である chip がある一方、約 14% に満たないもしくはそれ以上の chip もあることが分かる。

4.2 節で述べた原理では MIP ピークが約 14% 上昇する予想であったが、実際は半数以上の chip において予想とは異なる値になった。この原因として、chip 別にクラスター化を行っており、左右に隣り合う chip にまたがって通過した場合のエネルギー損失量を過小評価してしまったと考えられる。これに関して、hip 毎にクラスター化を行うのではなく、左右に位置する chip で同時にヒットがあった場合、エネルギー損失量が大きい方の chip でエネルギー損失が起きたとするなど、解析の検証を行うことが今後の課題である。

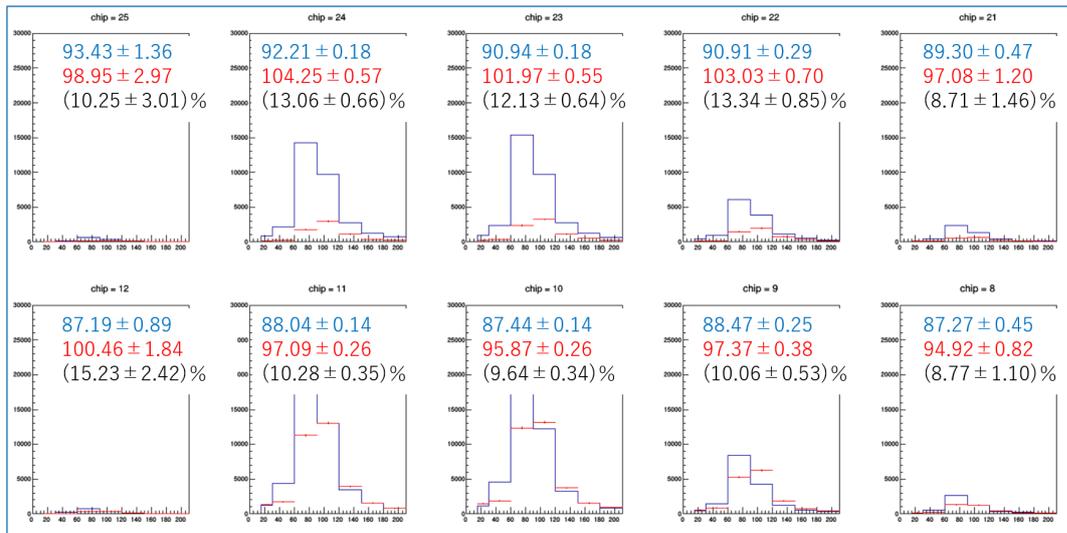
L0



横軸：エネルギー損失に比例する量(DAC値)

青：垂直時のMIPピーク  
赤：横回転時のMIPピーク  
黒：MIPピークの変化率

L1



横軸：エネルギー損失に比例する量(DAC値)

青：垂直時のMIPピーク  
赤：横回転時のMIPピーク  
黒：MIPピークの変化率

L2

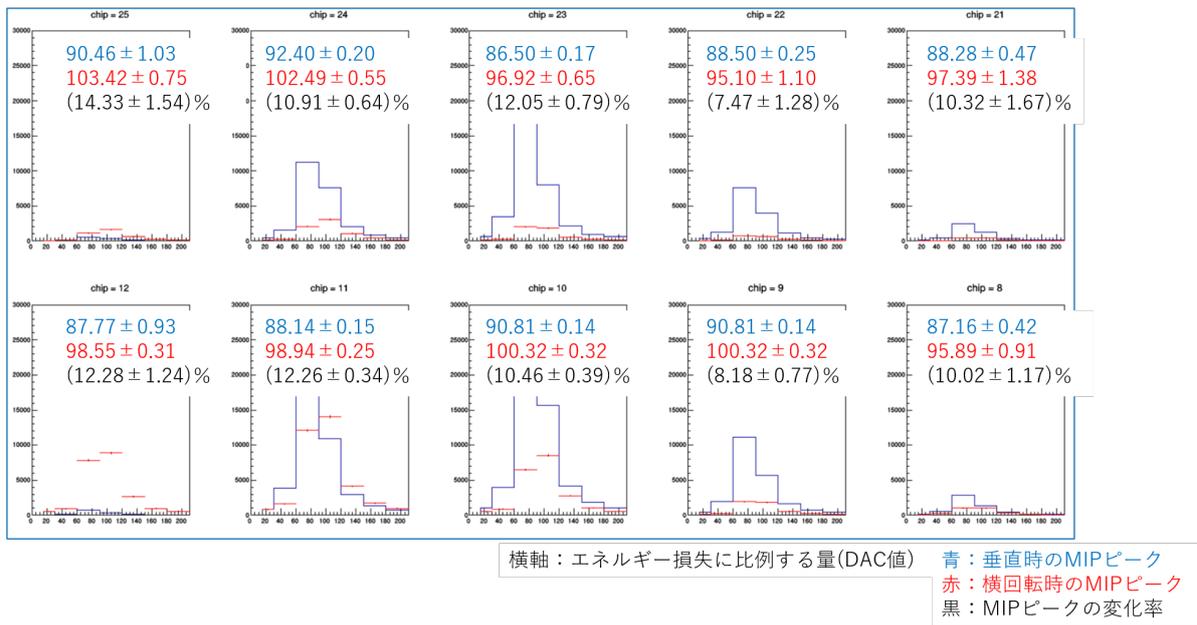


図 4.14 垂直時と横回転時におけるエネルギー損失分布と MIP ピークの位置

## 第 5 章

### 結論

本研究では、RHIC-sPHENIX 実験における INTT シリコン検出器の性能を評価するため、2021 年 12 月に東北大学 ELPH で実施したビームテスト実験のデータ解析を行い、INTT シリコンモジュールのエネルギー損失量を評価した。ビームテスト実験では、1 GeV の陽電子ビームを 3 つのシリコンモジュールに対して入射し、各シリコンモジュールで検出されたエネルギー損失に対応する ADC に着目した。各シリコンモジュールをビーム上流から L0, L1, L2 とし、ノイズ除去によるイベント選定と、同一 chip において複数の channel をまたがった場合にクラスター化を行い、エネルギー損失量を求めた。

通常の DAC 設定では精密な MIP ピークやエネルギー損失の振る舞いが得られなかったが、DAC スキャンでは、MIP ピークが L0 で  $74.97 \pm 0.25$ 、L1 で  $79.82 \pm 0.26$ 、L2 で  $77.72 \pm 0.28$  であること、およそ 40 を境にしてノイズと信号が見分けられることが分かった。

縦回転では L0 から L2 にかけて下側の chip から上側の chip に順に入射し、横回転では L0 から L2 にかけて右側の chip から左側の chip に順に入射していることから、斜め方向に入射する粒子の検出が可能であることがわかった。原理から、縦/横回転ではそれぞれ約 3 %、約 14 % 多くエネルギー損失を起こすと考えられるが、実際はその値とならない chip が数多くあった。この原因について、今後より深く解析を進める。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りましたことを感謝申し上げます。

指導教官の蜂谷先生には、ソフトウェアやデータ解析の手法、物理学の知識、研究に取り組む意識や論理的思考の培い方など様々な事柄をお教えいただきました。初めはデータ解析について不安な思いでしたが、初心者の私に解析手法について分かりやすくお教えいただき、さらに進捗をその都度お聞きいただいたことで、ここまで至ることができました。また、本研究へアドバイスを頂いた理化学研究所の秋葉さん、中川さん、糠塚さんにも心より感謝申し上げます。研究室ミーティングにおいて、コメントやアドバイスを下さった林井先生、宮林先生、下村先生及び高エネルギー物理学研究室の先輩方にも感謝申し上げます。同じ INTT グループの森田先輩、並本先輩には、テストベンチに関する用語から取り扱いまで様々なことをお教えいただき、質問しやすい状況をお作りいただいたうえで質問に対して真摯にお答えいただいたことに感謝申し上げます。また、同学年の今井さん、田頭さん、波多さん、渡部さんのおかげで、本研究に行き詰りながらも進めることができました。最後に、経済的・心身的に支えてくれた家族に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 鈴木彩香 2020 「RHIC-sPHENIX 実験における INTT 検出器の性能評価のためのビームテスト実験のデータ解析」, 修士論文, 奈良女子大学大学院.
- [2] 森田美羽 2020 「RHIC-sPHENIX 実験におけるバスエクステンダーの性能評価」, 卒業論文, 奈良女子大学.
- [3] 柴田実香 2020 「RHIC-sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサーによる宇宙線測定」, 卒業論文, 奈良女子大学.
- [4] 並本ゆみか 2021 「放射線源を用いた sPHENIX 実験-中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサーの性能評価」, 卒業論文, 奈良女子大学.
- [5] 西森早紀子 2021 「sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT の宇宙線を用いた検出効率の研究」, 卒業論文, 奈良女子大学.
- [6] Halzen,Francis/Martin,Alan D. 1984 「Quarks and Leptons」,John Wiley & Sons Inc.
- [7] 理化学研究所 2018 「宇宙初期物質の小さなしずくを創成 - RHIC 衝突型加速器で強い証拠を発見 -」, Accessed January 2, 2022 from [https://www.riken.jp/press/2018/20181211\\_1/index.html](https://www.riken.jp/press/2018/20181211_1/index.html) .
- [8] 竹内淳 2007 「高校数学でわかる半導体の原理」, 講談社
- [9] 攻池明 2007, 岩波書店.
- [10] 秋葉康之 2014 「クォーク・グルーオン・プラズマの物理」, 共立出版.
- [11] sPHENIX 2019 「SPHENIX」 Retrived January 3, 2022 from <https://wiki.bnl.gov/sPHENIX/index.php/SPHENIX>.
- [12] 三井真吾 2010 「Super-LHC 用 p 型シリコンマイクロストリップセンサーのバルク部の放射線損傷」, 修士論文, 筑波大学大学院.
- [13] PDG 2019 「Passage of Particles Through Matter」.
- [14] PDG 2019 「AtomicNuclearProperties」.