

## 第 1 章

# トラックの解析

### 1.1 トラック情報の解析の概要

MAIKo TCP の解析では背景事象の除去とトラック情報の抽出の 2 つが必要となる．検出ガスには  $^{12}\text{C}$  だけでなく，陽子や  $^4\text{He}$  が含まれる．そのため，中性子と陽子， $^4\text{He}$  との散乱事象を取り除く必要がある．陽子や  $^4\text{He}$  との散乱では複数の荷電粒子が生成されないので，トラックの本数から識別することができる．その後，中性子と  $^{12}\text{C}$  との散乱事象に対してトラックの情報を抽出する．トラックの情報は中性子と  $^{12}\text{C}$  とが散乱した座標， $\alpha$  粒子が停止した座標である．anode image から  $z, y$  座標を，cathode image から  $x, y$  座標を決定することができる． $x, z$  座標は  $\mu\text{-PIC}$  の信号を検出した strip のチャンネル番号に  $400\text{ }\mu\text{m}$  をかけることで求めることができる．TPC では， $y$  座標を荷電粒子が通過した位置から読み出し面に到達するまでの時間として測定する．そのため，anode image, cathode image の clock にドリフトスピードをかけることで  $y$  座標を求めることができる．このようにして決定した anode image, cathode image の座標を合わせることで，3 次元の座標を求めることができる．

散乱点と停止点の座標から粒子が飛行した方向ベクトルと距離が決定される．粒子が分かれば，飛行距離から運動エネルギーが決まる．図 1.1 に  $50\text{ hPa}$  の  $\text{CH}_4$  中での荷電粒子の飛行距離と運動エネルギーの対応を示す．飛行距離と運動エネルギーの関係は SRIM [?] を用いて求めた．SRIM は，荷電粒子が物質中を通過する際の，イオンの飛程，エネルギーロス等を算出するシミュレーションソフトウェアである．この対応関係から粒子の運動エネルギーを決定する．粒子の運動エネルギーを  $T$ ，質量を  $m$ ，単位方向ベクトルを  $(dx, dy, dz)$  とすると，粒子の 4 元運動量は

$$p = \begin{pmatrix} E \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T + m \\ \sqrt{(T + m)^2 + m^2} dx \\ \sqrt{(T + m)^2 + m^2} dy \\ \sqrt{(T + m)^2 + m^2} dz \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

となる．決定した 3 つの  $\alpha$  粒子の 4 元運動量を足し合わせることで， $^{12}\text{C}$  の 4 元運動量を再構成できる．このようにして求めた  $^{12}\text{C}$  の 4 元運動量から，運動エネルギー，散乱角度，励起エネルギーを求めることができる．

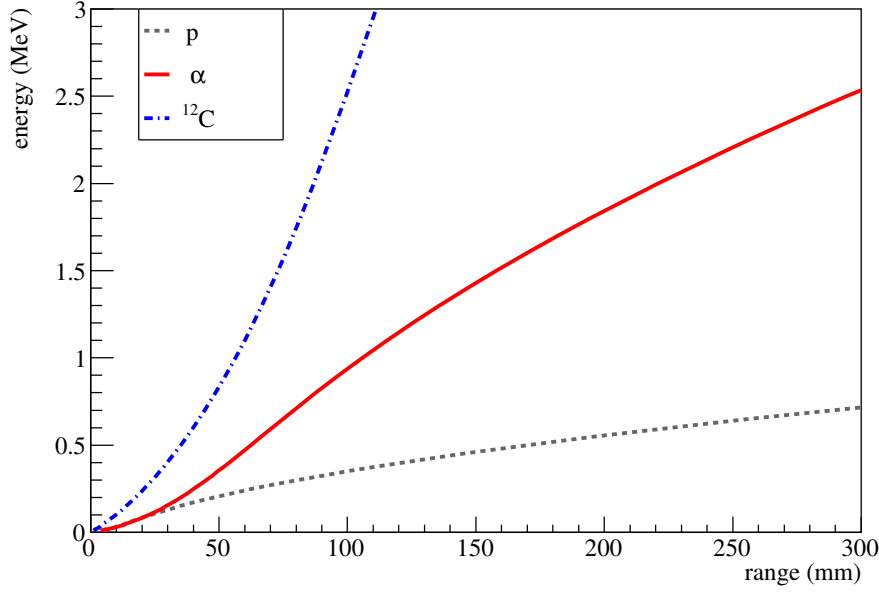


図 1.1:  $\text{CH}_4$ (50 hPa) 中での荷電粒子 ( $p$ ,  $\alpha$ ,  $^{12}\text{C}$ ) の飛行距離と運動エネルギー．この相関は SRIM を用いて求めた．

## 1.2 eye-scan によるトラックの解析

本研究ではトラックの本数の識別と散乱点，停止点の抽出を人間の目 (eye-scan) で行った．ここではトラックが 3 本確認できるイベントを  $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')3\alpha$  イベントとした．本研究では  $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')3\alpha$  イベントに対して解析を行った．検出ガスの決定のために，??節のシミュレーションで生成したデータのうち，有感領域中で 3 つの  $\alpha$  粒子が停止したイベントに対して解析を行った．

### 1.2.1 解析効率

実際には  $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')3\alpha$  イベントであっても，各  $\alpha$  粒子のエネルギーや放出角度，トラックの太さによっては 3 つのトラックを区別することができず， $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')3\alpha$  イベントとして認識できない場合がある．そこで，eye-scan によって正しくトラックが 3 本と認識できる割合（解析効率）を評価する．eye-scan は各検出ガスについて 100 events ずつ行った．eye-scan によって決定したトラックの本数の割合を表 1.1 に示す．表 1.1 の 3 本の割合が解析効率となる． $\text{CH}_4$  単体と  $\text{CH}_4$  (4) + He (6) 以外は約 90 % の解析効率となっている．

### 1.2.2 エネルギー分解能

eye-scan により決定した  $\alpha$  粒子の飛行距離の分解能により，エネルギー分解能が決まる．シミュレーションで粒子を生成した時に決定した  $\alpha$  粒子の運動エネルギー ( $E_{\text{ideal}}$ ) と eye-scan によって決定した  $\alpha$  粒子の運動エネルギー ( $E_{\text{eye-scan}}$ ) の相関を図 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 に示す．縦軸がシミュレーションで

表 1.1: eye-scan によって決定したトラックの本数の割合.

gas	3 本 (%)	2 本 (%)	1 本 (%)
CH <sub>4</sub>	55	37	8
CH <sub>4</sub> (3) + H <sub>2</sub> (7)	91	9	0
CH <sub>4</sub> (4) + He (6)	78	22	0
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + H <sub>2</sub> (9)	87	11	2
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + He (9)	90	10	0

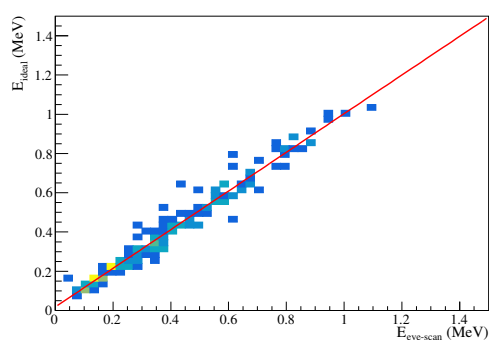
図 1.2: CH<sub>4</sub> の場合の  $E_{\text{eye-scan}}$  と  $E_{\text{ideal}}$  の関係.

表 1.2: シミュレーションで決定したエネルギーと eye-scan で決定したエネルギーの相関係数.

gas	$p_0$	$p_1$
CH <sub>4</sub>	0.985	$1.79 \times 10^{-2}$
CH <sub>4</sub> (3) + H <sub>2</sub> (7)	0.991	$2.60 \times 10^{-3}$
CH <sub>4</sub> (4) + He (6)	0.972	$1.57 \times 10^{-2}$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + H <sub>2</sub> (9)	0.929	$3.09 \times 10^{-2}$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + He (9)	0.962	$1.66 \times 10^{-2}$

決定した運動エネルギー, 横軸が eye-scan で決定した運動エネルギーである. この相関に対して 1 次関数 ( $E_{\text{ideal}} = p_0 \times E_{\text{eye-scan}} + p_1$ ) でフィットした結果を表 1.2 にまとめる. どの検出ガスについても, ほぼ  $E_{\text{ideal}} = E_{\text{eye-scan}}$  となっている.

$E_{\text{eye-scan}}$  をフィットした 1 次関数 ( $f(x)$ ) で補正したエネルギーと  $E_{\text{ideal}}$  と差分を  $dE$  ( $= E_{\text{ideal}} - f(E_{\text{eye-scan}})$ ) とする. 各検出ガスでの  $dE$  の分布を図 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11 に, ガウス分布でフィットした平均と標準偏差を表 1.3 に示す. エネルギー分解能は, CH<sub>4</sub> (3) + H<sub>2</sub> (7) の場合に最も良いことが分かる.

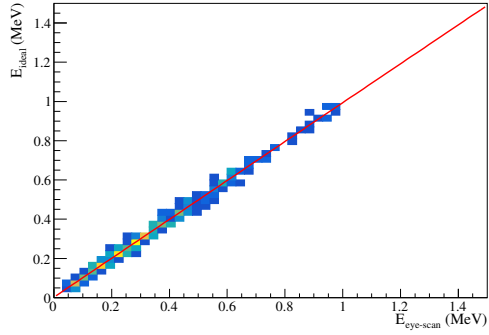


図 1.3:  $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (7)  
の場合の  $E_{\text{eye-scan}}$  と  
 $E_{\text{ideal}}$  の相関.

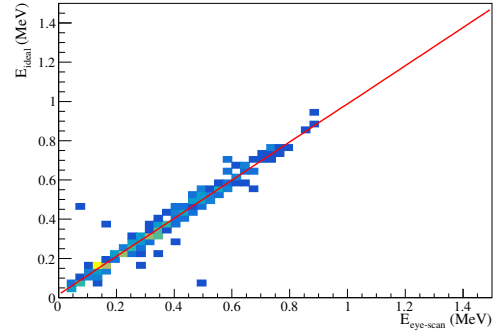


図 1.4:  $\text{CH}_4$  (4) +  $\text{He}$  (6)  
の場合の  $E_{\text{eye-scan}}$  と  
 $E_{\text{ideal}}$  の相関.

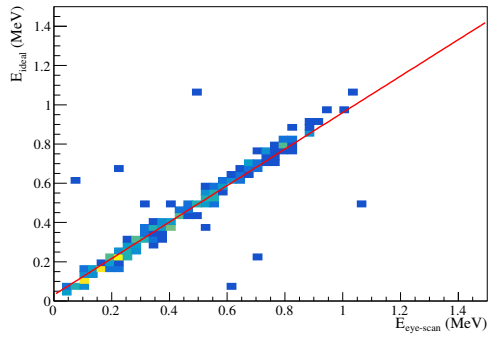


図 1.5: iso-  
 $\text{C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{H}_2$  (9)  
の場合の  $E_{\text{eye-scan}}$  と  
 $E_{\text{ideal}}$  の相関.

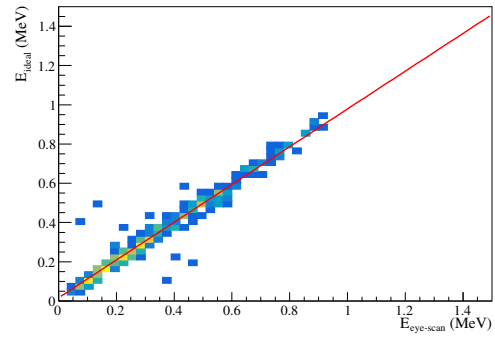


図 1.6: iso-  
 $\text{C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  $\text{He}$  (9)  
の場合の  $E_{\text{eye-scan}}$  と  
 $E_{\text{ideal}}$  の相関.

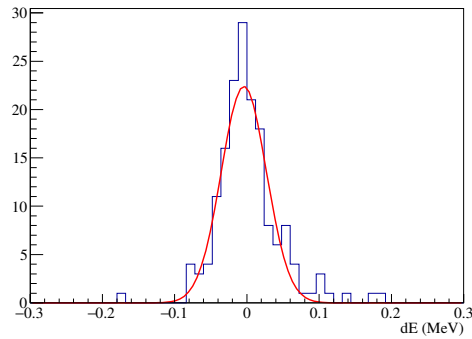


図 1.7:  $\text{CH}_4$  の場合の  
 $dE$ .

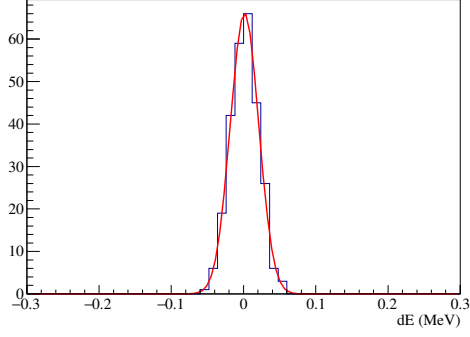


図 1.8:  $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (7)  
の場合の  $dE$ .

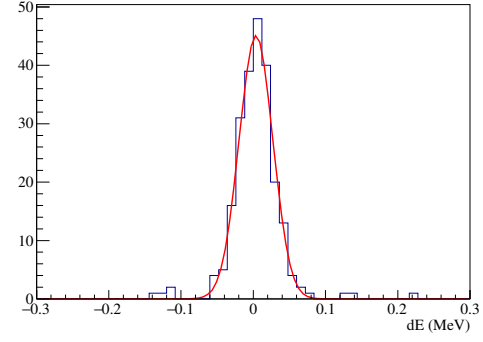


図 1.9:  $\text{CH}_4$  (4) +  $\text{He}$  (6)  
の場合の  $dE$ .

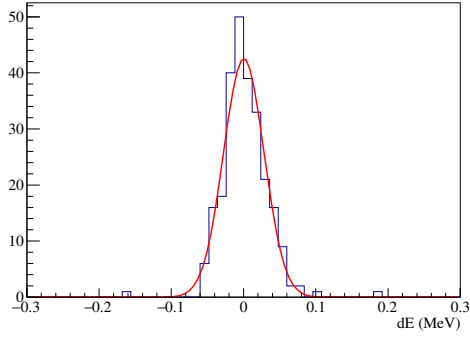


図 1.10:  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  
 $\text{H}_2$  (9) の場合の  $dE$ .

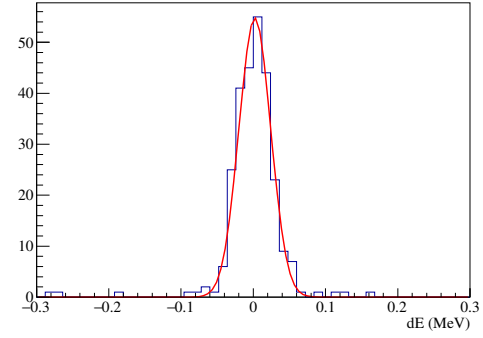


図 1.11:  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  
 $\text{He}$  (9) の場合の  $dE$ .

表 1.3: エネルギーの差分の平均と標準偏差.

gas	$dE$ (MeV)	$\sigma_{dE}$ (MeV)
$\text{CH}_4$	$1.10 \times 10^{-2}$	$3.30 \times 10^{-2}$
$\text{CH}_4$ (3) + $\text{H}_2$ (7)	$1.25 \times 10^{-3}$	$2.00 \times 10^{-2}$
$\text{CH}_4$ (4) + $\text{He}$ (6)	$9.30 \times 10^{-3}$	$2.37 \times 10^{-2}$
$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + $\text{H}_2$ (9)	$4.56 \times 10^{-3}$	$2.36 \times 10^{-2}$
$\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (1) + $\text{He}$ (9)	$5.00 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-2}$

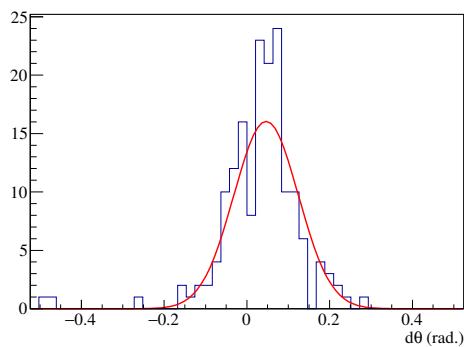


図 1.12:  $\text{CH}_4$  を用いた場合の極角の差分.

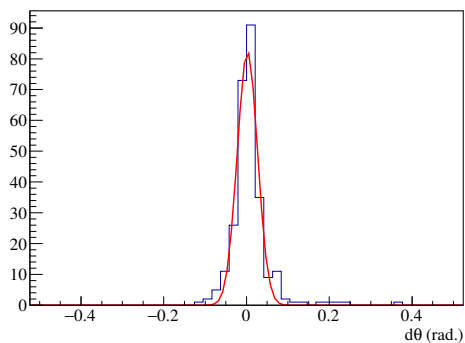


図 1.13:  $\text{CH}_4$  (3) +  $\text{H}_2$  (7) を用いた場合の極角の差分.

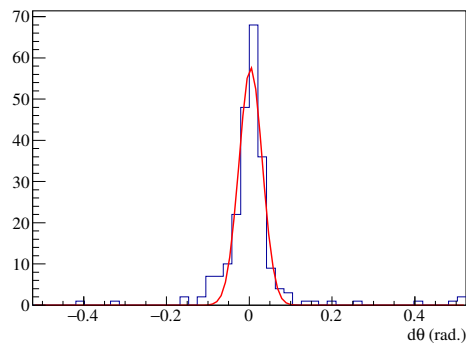


図 1.14:  $\text{CH}_4$  (4) + He (6) を用いた場合の極角の差分.

### 1.2.3 角度分解能

#### 極角分解能

シミュレーションで決定した  $\alpha$  粒子の極角と eye-scan での極角の差分を  $d\theta$  とする. 各検出ガスでの  $d\theta$  の分布を図 1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16 に, ガウス分布でフィットした平均と標準偏差を表 1.4 に示す. 極角分解能は,  $\text{CH}_4$  単体の場合に悪いことが分かる.

#### 方位角分解能

シミュレーションで決定した  $\alpha$  粒子の方位角と eye-scan での方位角の差分を  $d\varphi$  とする. 各検出ガスでの  $d\varphi$  の分布を図 1.17, 1.18, 1.19, 1.20, 1.21 に, ガウス分布でフィットした平均と標準偏差を表 1.4 に示す. 検出ガスに  $\text{CH}_4$  単体を用いた時に悪いことが分かる.

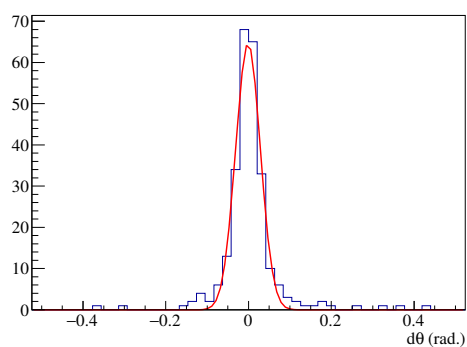


図 1.15: iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) +  
H<sub>2</sub> (9) を用いた場合の極  
角の差分.

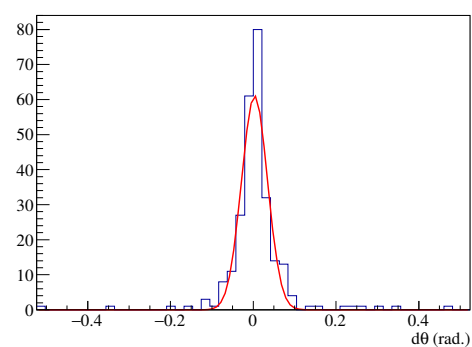


図 1.16: iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) +  
He (9) を用いた場合の極  
角の差分.

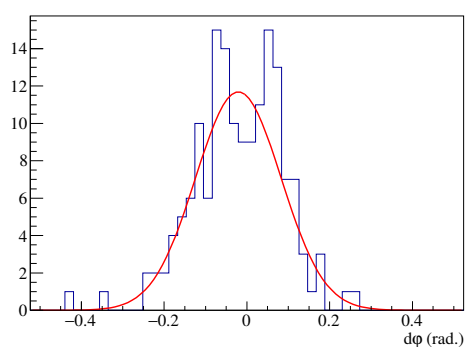


図 1.17: CH<sub>4</sub> を用いた場  
合の方位角の差分.

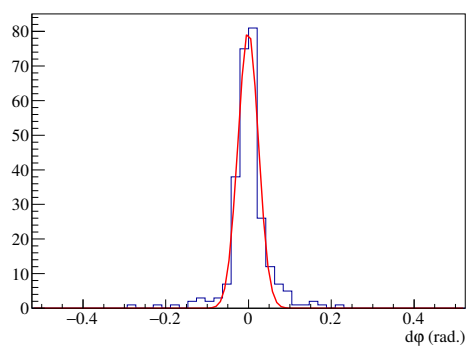


図 1.18: CH<sub>4</sub> (3) +  
H<sub>2</sub> (7) を用いた場合の方  
位角の差分.

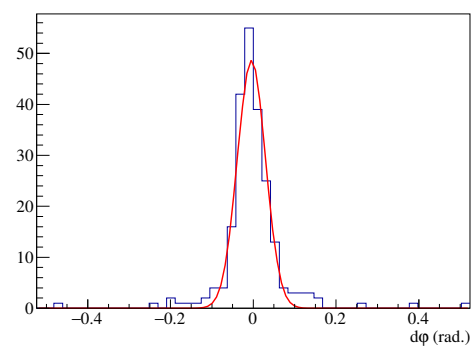


図 1.19: CH<sub>4</sub> (4) +  
He (6) を用いた場合の方  
位角の差分.

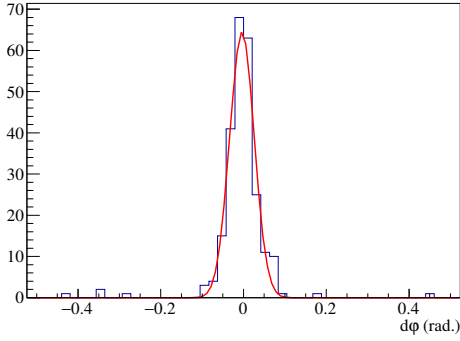


図 1.20: iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) +  
H<sub>2</sub> (9) を用いた場合の方  
位角の差分.

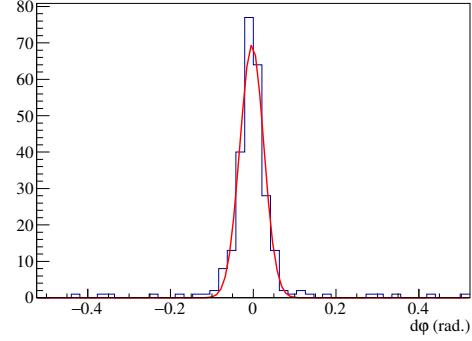


図 1.21: iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) +  
He (9) を用いた場合の方  
位角の差分.

表 1.4: 角度の差分の平均と標準偏差.

gas	$d\theta$ (rad)	$\sigma_{d\theta}$ (rad)	$d\varphi$ (rad)	$\sigma_{d\varphi}$ (rad)
CH <sub>4</sub>	$4.64 \times 10^{-2}$	$7.79 \times 10^{-2}$	$-2.08 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-1}$
CH <sub>4</sub> (3) + H <sub>2</sub> (7)	$2.10 \times 10^{-3}$	$2.46 \times 10^{-2}$	$-8.28 \times 10^{-4}$	$2.47 \times 10^{-2}$
CH <sub>4</sub> (4) + He (6)	$3.34 \times 10^{-3}$	$2.82 \times 10^{-2}$	$-4.46 \times 10^{-3}$	$3.40 \times 10^{-2}$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + H <sub>2</sub> (9)	$-1.27 \times 10^{-3}$	$2.98 \times 10^{-2}$	$-3.83 \times 10^{-3}$	$2.97 \times 10^{-2}$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + He (9)	$3.05 \times 10^{-3}$	$3.14 \times 10^{-2}$	$-3.41 \times 10^{-3}$	$2.89 \times 10^{-2}$

#### 1.2.4 励起エネルギー分解能

<sup>12</sup>C の励起エネルギーの分解能が悪ければ各励起状態を特定することができない．シミュレーションでは  $0_2^+$  状態経由での崩壊を考えているので，<sup>12</sup>C( $0_2^+$ ) の励起エネルギーは 7.65 MeV となる．eye-scan で決定した <sup>12</sup>C\* の不変質量から基底状態の <sup>12</sup>C の質量を引くことで励起エネルギーを求め，7.65 MeV を再構築できるか評価する．各検出ガスで再構成した励起エネルギーを図 1.22, 1.23, 1.24, 1.25, 1.26, 表 1.5 に示す．どの検出ガスにおいても  $0_2^+$  状態を再構成できていることが分かる． $0_2^+$  状態と隣り合う <sup>12</sup>C の励起状態は  $2_1^+$  の 4.44 MeV と  $3_1^-$  の 9.64 MeV であるので，分解能も隣り合う励起状態と分けるのに十分良いことも分かる．

### 1.3 検出ガスの決定

表 1.6 に各検出ガスの優劣をまとめた．○ が優，△ が可，× が不可を表す．表の各項目から考えると，CH<sub>4</sub> (3) + H<sub>2</sub> (7) または iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) が適すると判断できる．CH<sub>4</sub> (3) + H<sub>2</sub> (7) と iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) とで含まれる <sup>12</sup>C の量を比較すると，iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) の方が 4/3 倍多い．よって，検出ガスには iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (1) + H<sub>2</sub> (9) (100 hPa) を用いる．



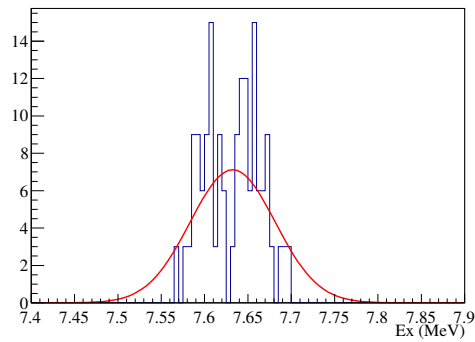


図 1.22:  $\text{CH}_4$  の場合の  
 $^{12}\text{C}$  の励起エネルギー.

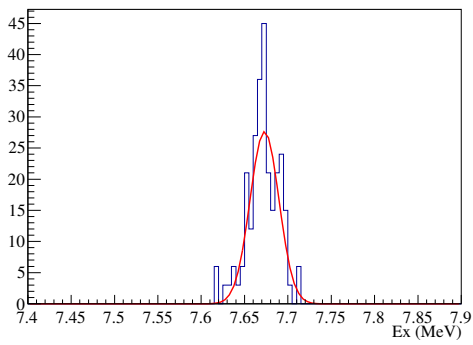


図 1.23:  $\text{CH}_4$  (3) +  
 $\text{H}_2$  (7) の場合の  $^{12}\text{C}$  の  
励起エネルギー.

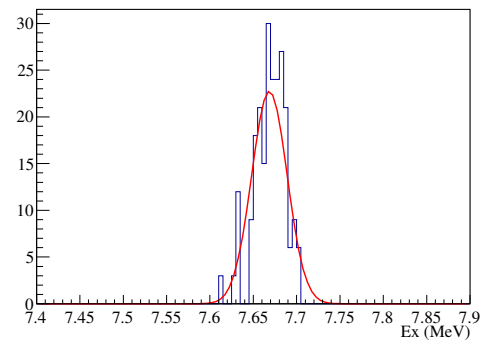


図 1.24:  $\text{CH}_4$  (4) +  
 $\text{He}$  (6) の場合の  $^{12}\text{C}$  の  
励起エネルギー.

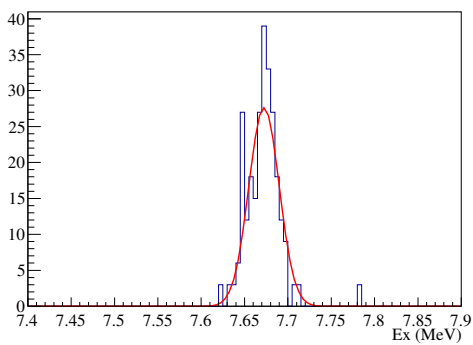


図 1.25:  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  
 $\text{H}_2$  (9) の場合の  $^{12}\text{C}$  の  
励起エネルギー.

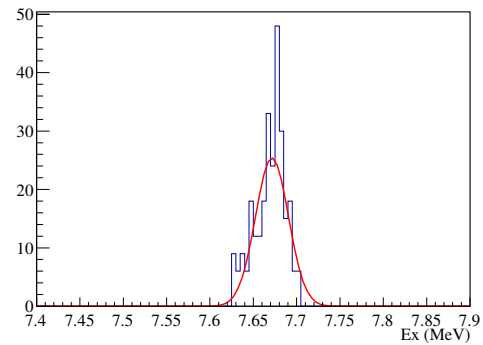


図 1.26:  $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$  (1) +  
 $\text{He}$  (9) の場合の  $^{12}\text{C}$  の  
励起エネルギー.

表 1.5: 各ガスで求めた励起エネルギーの平均と標準偏差.

gas	Ex (MeV)	$\sigma_{\text{Ex}}$ (MeV)
CH <sub>4</sub>	7.63	$4.91 \times 10^{-2}$
CH <sub>4</sub> (3) + H <sub>2</sub> (7)	7.67	$1.66 \times 10^{-2}$
CH <sub>4</sub> (4) + He (6)	7.67	$2.05 \times 10^{-2}$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + H <sub>2</sub> (9)	7.67	$1.75 \times 10^{-2}$
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + He (9)	7.67	$1.90 \times 10^{-2}$

表 1.6: 各検討項目に対する検出ガスの優劣. 標的の量は CH<sub>4</sub> に含まれる量を 1 とした.

gas	解析効率	ディフュージョン	励起エネルギー分解能	標的の量
CH <sub>4</sub>	×	×	△	1
CH <sub>4</sub> (3) + H <sub>2</sub> (7)	○	○	○	0.6
CH <sub>4</sub> (4) + He (6)	△	△	○	0.8
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + H <sub>2</sub> (9)	○	○	○	0.8
iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (1) + He (9)	○	△	○	0.8