

ハイパーカミオカンデ実験に向けた水標的 シンチレーティングファイバートラッカーの 開発

修士論文発表会

素粒子実験（加速器）

若林大貴

目次

- 背景
- 本研究で行った実験
 - ファイバー熱溶着システムの開発と最適温度の探索
 - 溶着クリアファイバー光量損失評価
 - 耐水テープの粘着力耐久試験
- 性能評価(シミュレーション)：短い飛程の陽子検出
- まとめ

ニュートリノの未解決問題

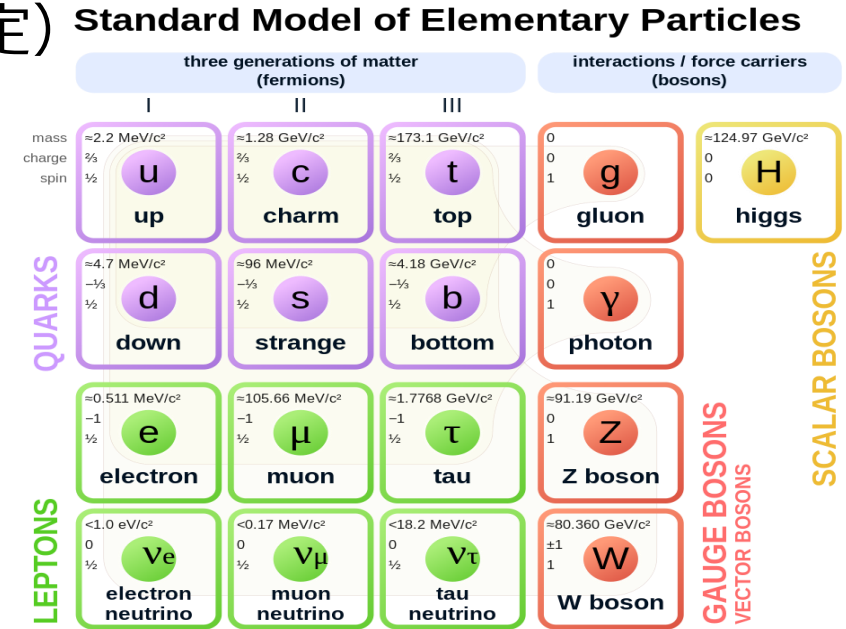
- 質量の大きさ (ニュートリノ振動によって有限だと確定)
- 質量順序
- (レプトンの)CP対称性 (物質優勢宇宙の条件の1つ)

クォークのCP対称性の破れよりも
最大で**3桁**大きい可能性がある。

CP対称性の破れを**ニュートリノ振動**によって調査可能

時間発展によってニュートリノフレーバーが変化する現象。
ニュートリノに質量差がある場合にのみ観測される。

ニュートリノと反ニュートリノで振動確率が異なる
⇒(レプトン)CP対称性が破れている証拠

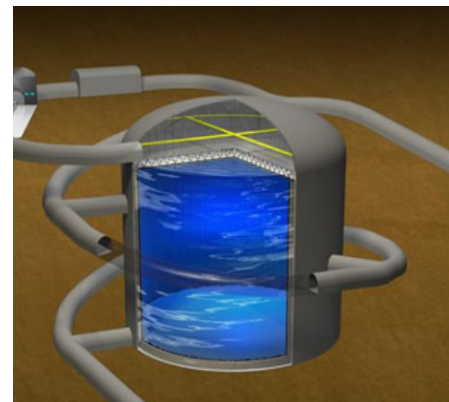


ハイパーカミオカンデ(HK)実験

加速器ニュートリノ振動実験

目標：CP対称性の破れを**5 σ** の信頼度で示す

2027運用開始大型水チェレンコフ検出器
スーパーカミオカンデの**約8倍**の有効体積

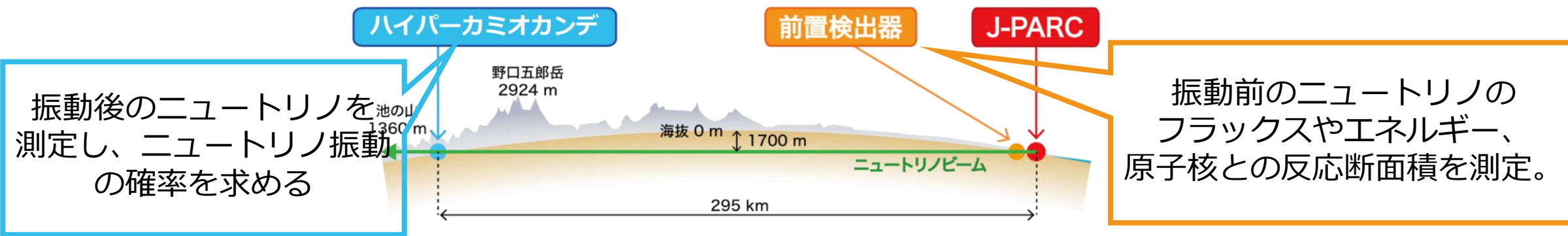


HKの完成イメージ



本体空洞ドーム部

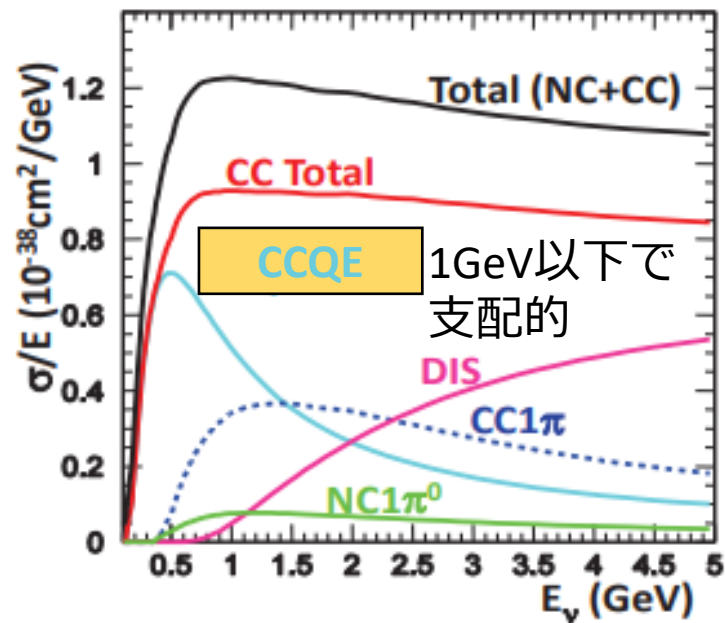
J-PARCからのニュートリノを2つの検出器で観測



$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ における振動確率の違いからCP対称性の破れを発見。

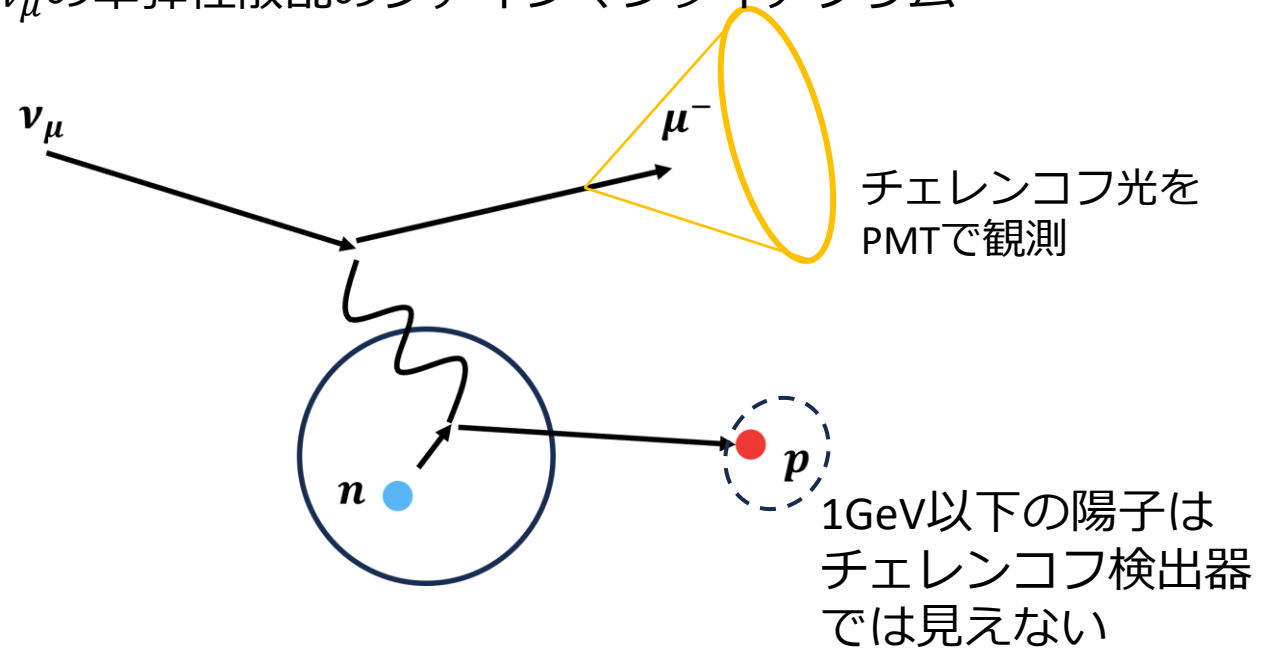
HKにおけるニュートリノの観測方法

- 原子核との反応で生じる荷電レプトンのチェレンコフ光を検出
- 信号事象：荷電カレント準弾性散乱（CCQE）



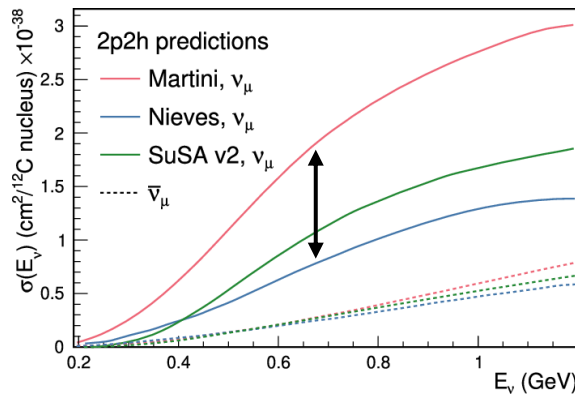
ニュートリノと核子の反応断面積

ν_μ の準弾性散乱のファインマンダイアグラム



準弾性散乱(CCQE)のバックグラウンド

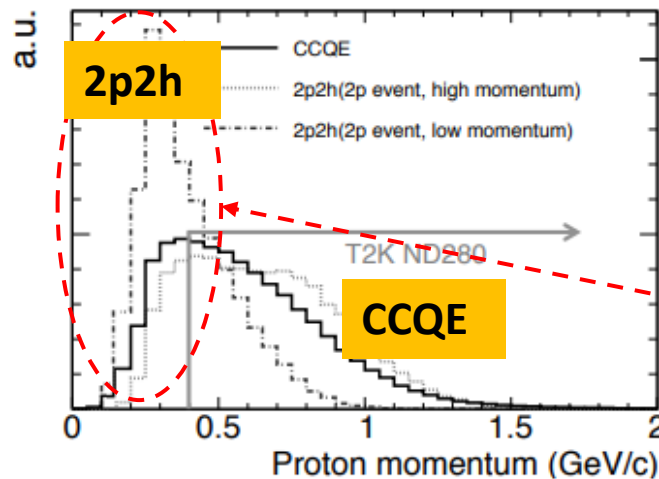
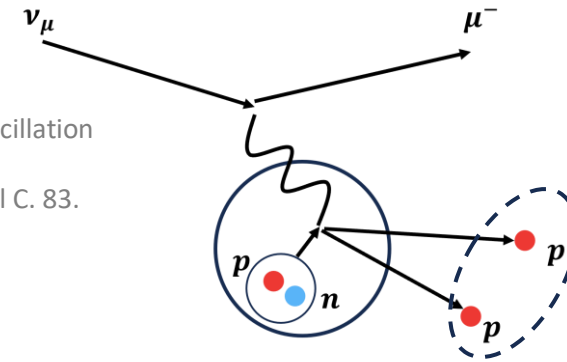
- **2p2h反応**：2つの核子が出現
 - CCQEの10%程度とされるが断面積は未測定でモデルによる不定性が大きい。



主要理論モデルごとの
2p2h反応断面積の違い
2~3倍異なる

Abe, Katsushige et al. (2023). Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using 3.6×10^{21} protons on target. The European Physical Journal C. 83. 10.1140/epjc/s10052-023-11819-x.

チェレンコフ検出器では見えない。
⇒CCQEと誤る。



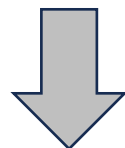
事象を正しく判別するためには
前置検出器で低運動量陽子を検出し、
反応断面積を精密測定する必要がある。

前置検出器の課題

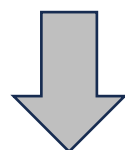
- 標的の違い

- 前置検出器：(主に)プラスチックシンチレータ (炭素)

- HK：水



標的の違いによる系統誤差削減が課題

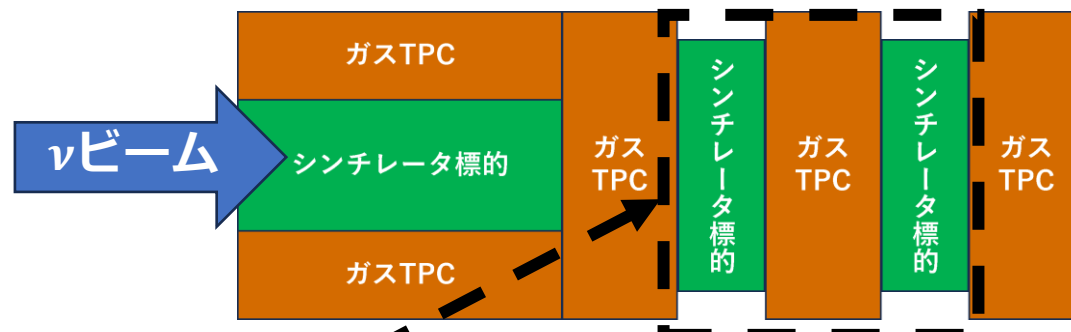


- 水標的の検出器導入：水+SciFiのTracker

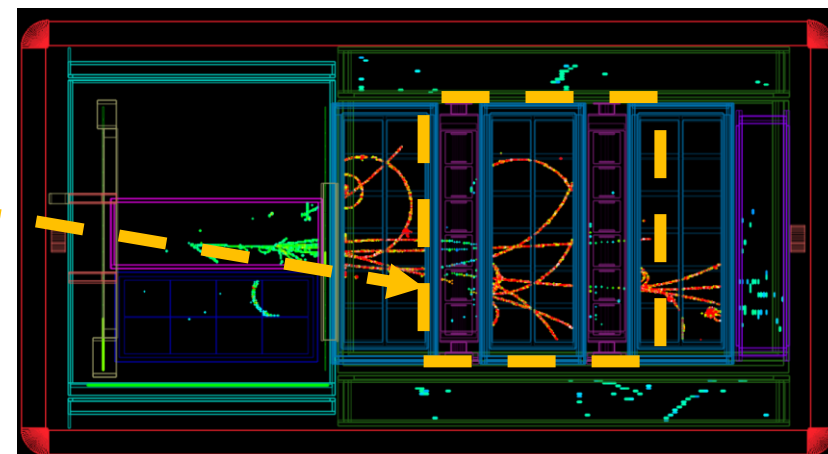
- 高い水の比率

- プラスチックシンチレータ検出器に劣らない飛跡再構成効率や検出効率

前置検出器ND280検出器の構成

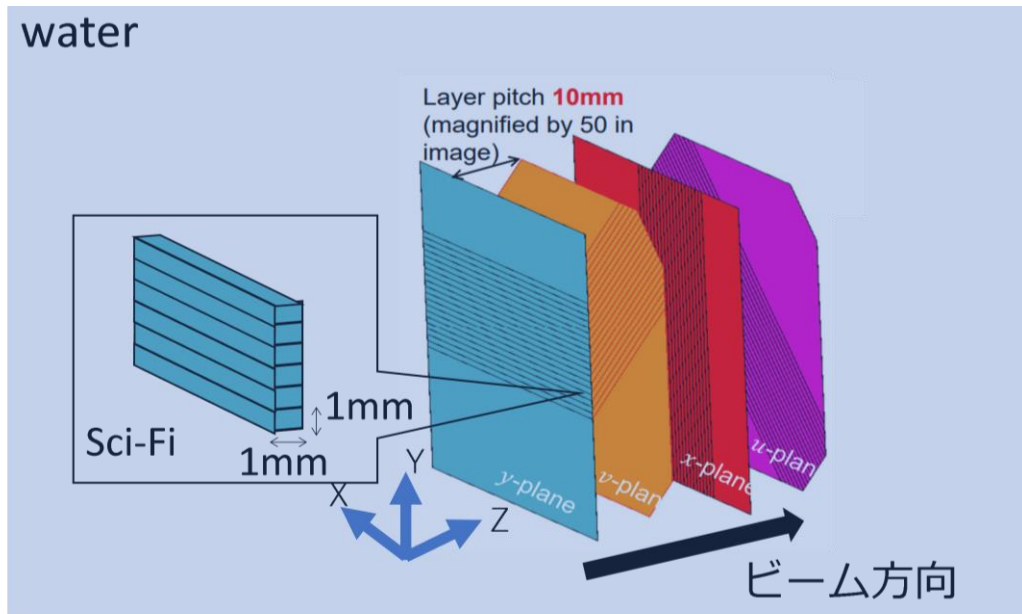


現在の構成におけるイベントディスプレイの例



*SciFi = Scintillation Fiber

Sci-Fi Trackerの概要



Sci-Fi Trackerのイメージ

- 1mm角SciFiを並べたシートを作成
- XY(UV)を向いて一定間隔でビーム方向に並ぶ
- 水タンクに沈める。(10mm間隔で水90%)

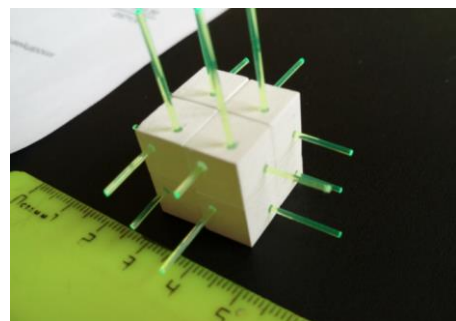
1mmの位置分解能

⇒粒子が多い事象でも飛跡再構成可能

SFGDとSci-Fi Trackerの比較

検出器	SFGD	Sci-Fi Tracker
体積[m ³]	1.9*1.8*0.6	2*2*0.5
H2Oの比率[%]	0	90
光量 [p.e./MIP]	35/cube ^[1]	18/fiber ^[2]
channel数 [ch]	60k	100k

cf.) SFGD検出器.
1cm角のシンチレータ
キューブからの光を3方
向に挿入した
波長変換ファイバーで
読み出す。



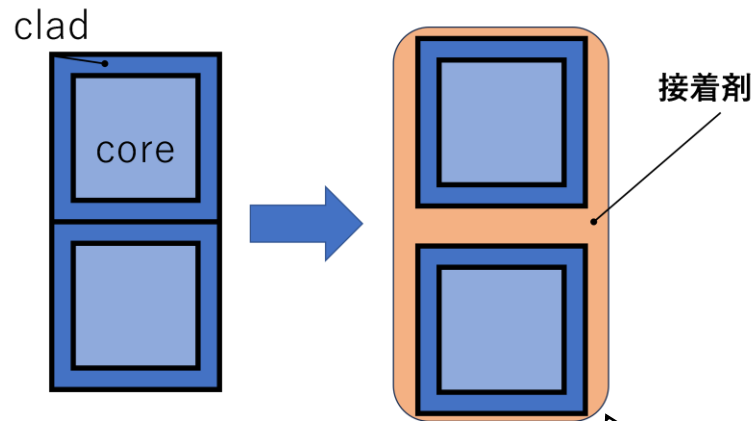
[1]A. Blondel, "A fully-active fine-grained detector with three readout views" arXiv:1707.01785 (2018).

[2]平本 綾美, "ニュートリノ反応測定実験に用いる高位置分解能 Scintillating Fiber Trackerの開発" 京都大学修士論文 (2017).

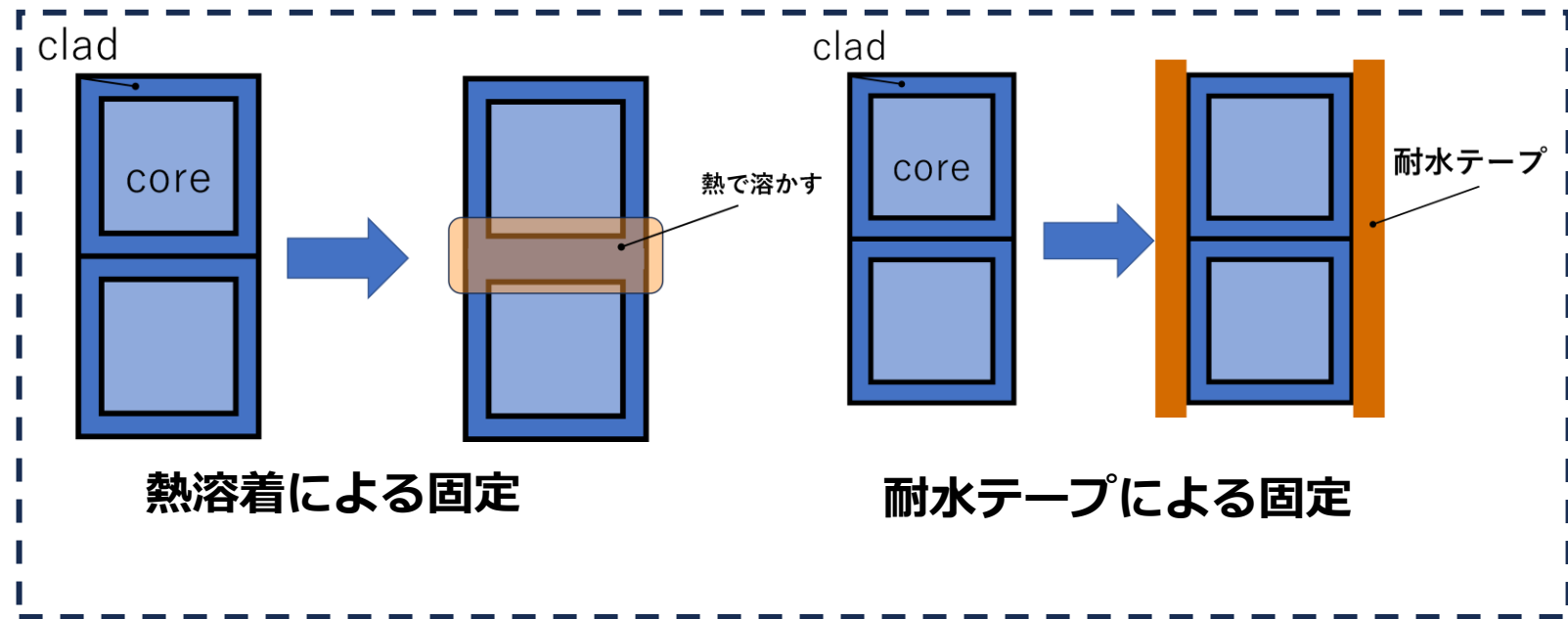
ファイバーシートの作成

- ファイバ固定法：接着剤・熱溶着・耐水テープなどいくつかある。

ファイバ断面図

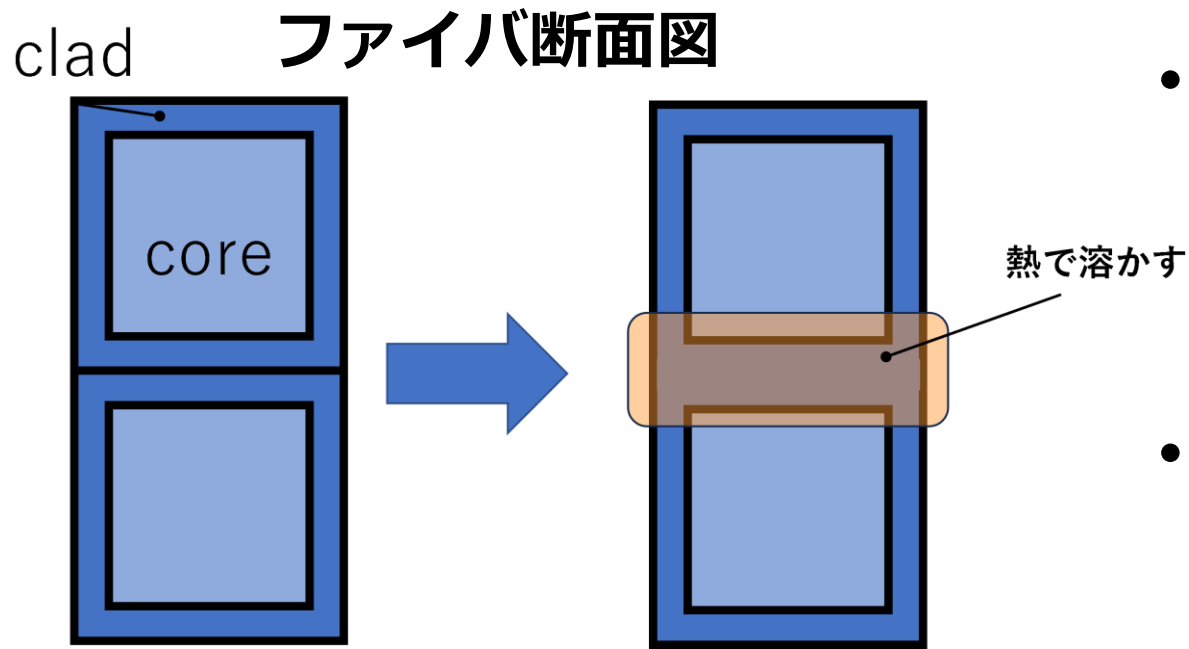


本研究で検討



ファイバー間に接着剤を挟むので検出器の不感領域が増える。

熱溶着による固定



熱溶着による固定
ファイバ同士を直に接着する

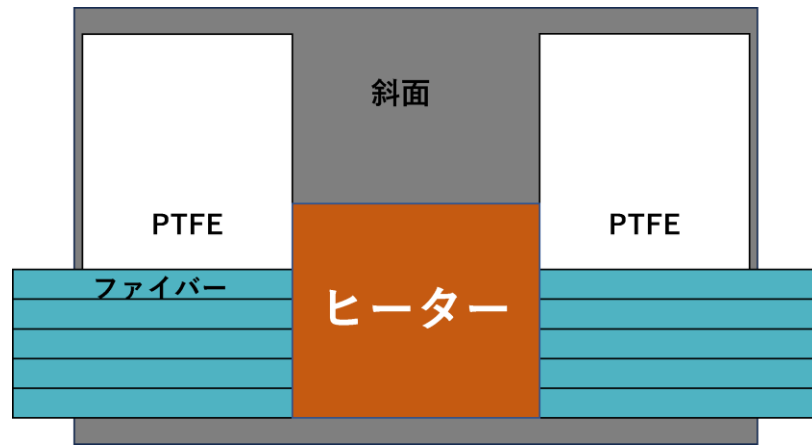
- メリット
 - 不感領域が増えない
 - クラッド同士が直に接着されるため長期安定性が期待される。
- 課題
 - 熱溶着時に**ファイバーが損傷**し伝達光量が減少するおそれがある。

目次

- 背景
- 本研究で行った実験
 - **ファイバー熱溶着システムの開発と最適温度の探索**
 - 溶着クリアファイバー光量損失評価
 - 耐水テープの粘着力耐久試験
- 性能評価(シミュレーション)：短い飛程の陽子検出
- まとめ

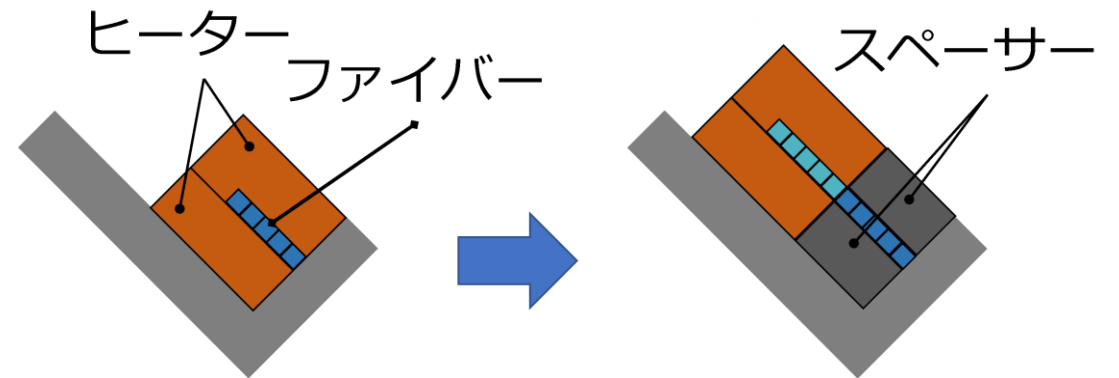
熱溶着システムのコンセプト

ファイバーを**局所的に加熱**し、
損傷を減らす。



正面から見た図

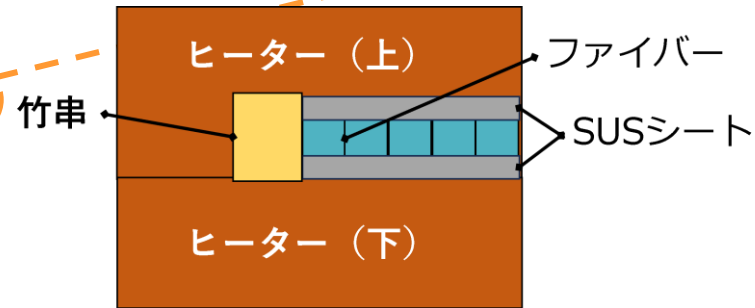
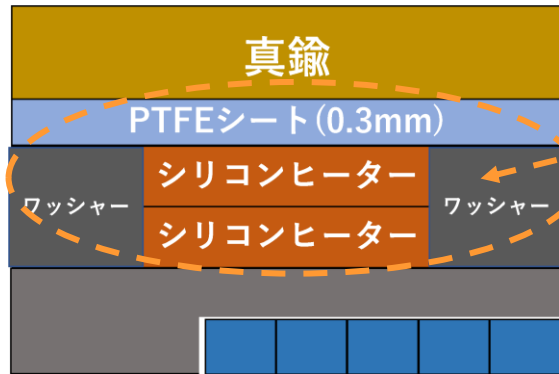
ヒーターを斜面上方向に移動させながら
溶着してファイバーシートを拡大する。



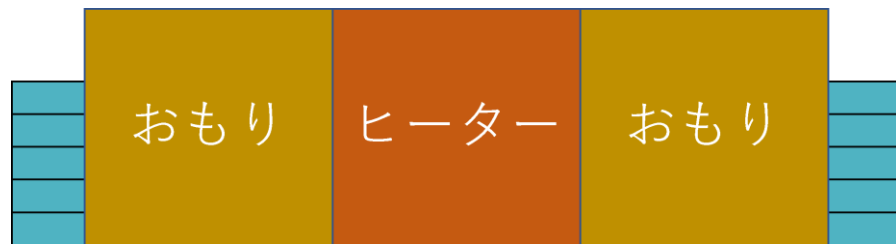
横から見た図

最終的なセットアップ

上ヒーター治具



治具の食い込み防止



ファイバーの折れ曲がり防止

開発した治具の設計ポイント

- 十分な昇温性能
(ワッシャーなどで断熱、ヒーターの増加)
- ファイバー変形の抑制
(おもり、スペーサー、カバー)

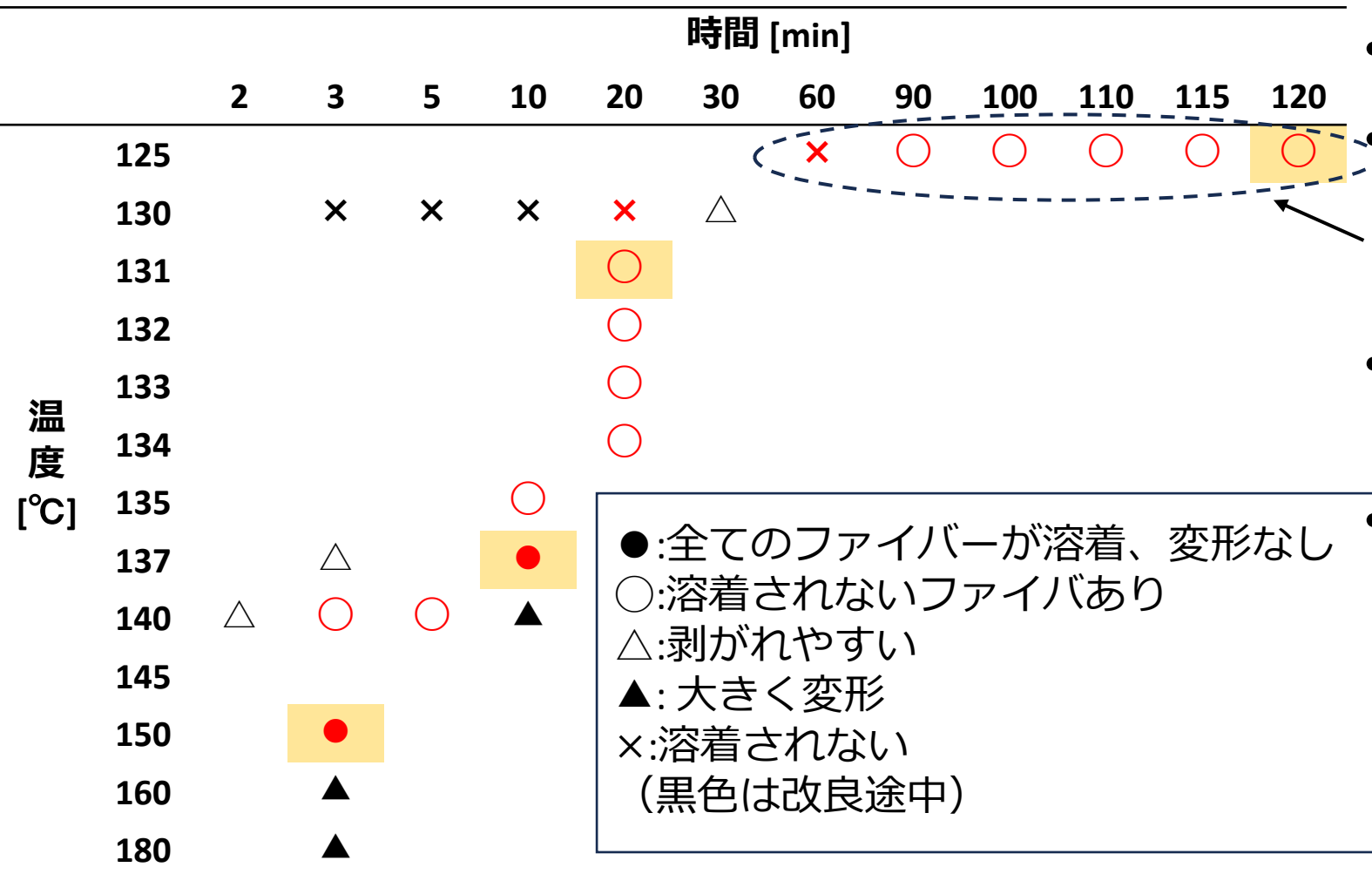
成功例



失敗例



溶着温度パラメータ探索：結果



●:全てのファイバーが溶着、変形なし
 ○:溶着されないファイバあり
 △:剥がれやすい
 ▲:大きく変形
 ×:溶着されない
 (黒色は改良途中)

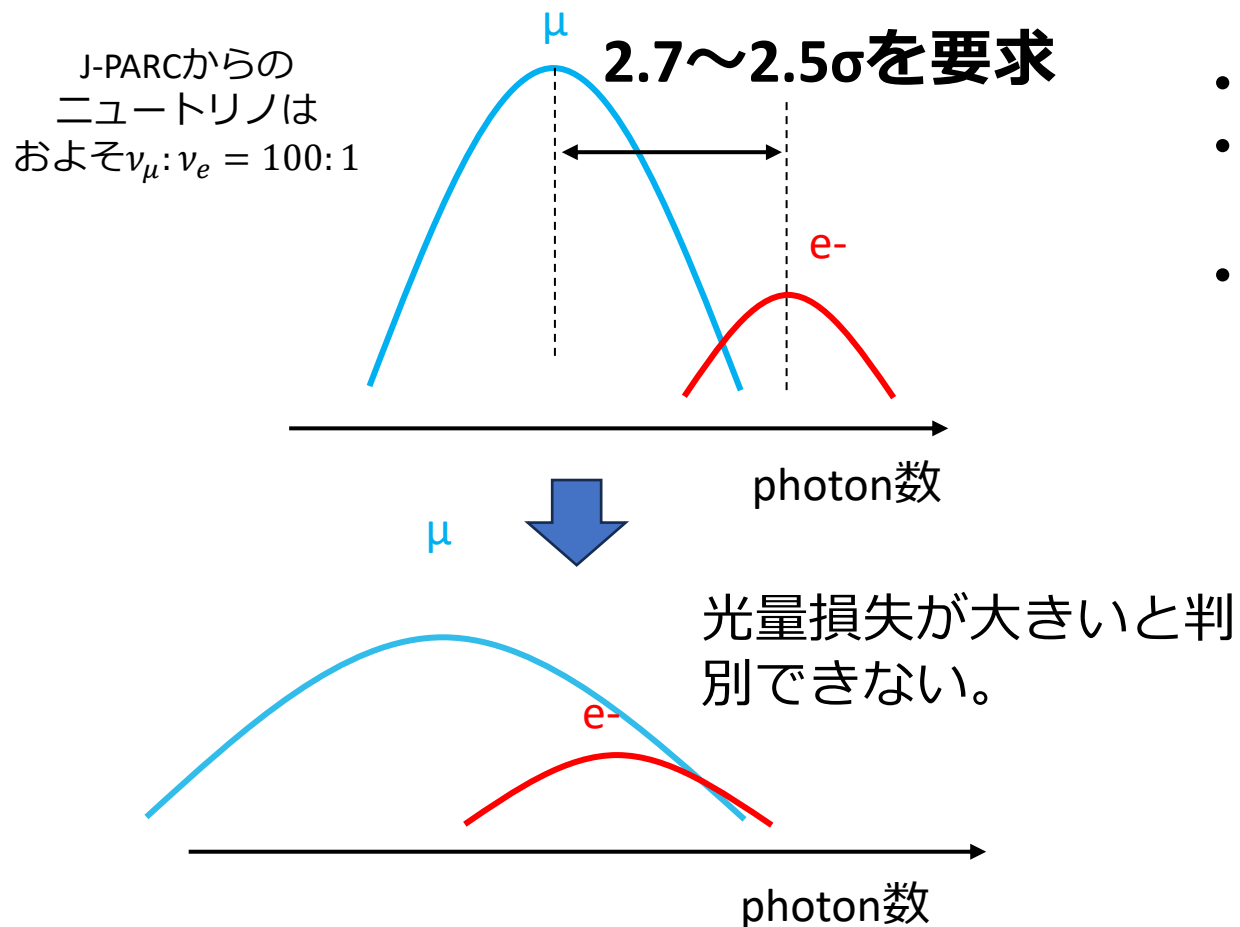
- 温度と時間を調整し溶着に成功
- 高温
 - 溶着時間が短く済む。
 - 変形しやすい
- 低温
 - 溶着されないファイバあり
- 黄色背景の温度と時間の組み合わせで光量損失率を測定した。

目次

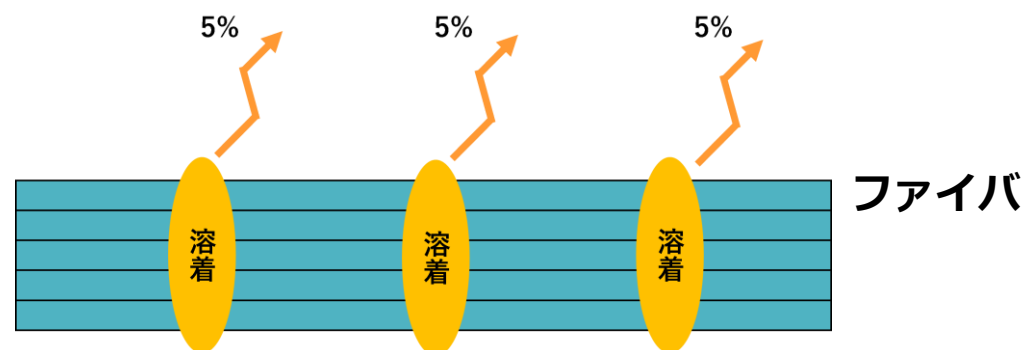
- 背景
- 本研究で行った実験
 - ファイバー熱溶着システムの開発と最適温度の探索
 - **溶着クリアファイバー光量損失評価**
 - 耐水テープの粘着力耐久試験
- 性能評価(シミュレーション)：短い飛程の陽子検出
- まとめ

光量測定：光量損失率の目標値

- 目標：2mのファイバシートを3箇所溶着しても電子とミュオンを光量 (dE/dx) で区別できる性能を保つ (3レイヤー通過を仮定)



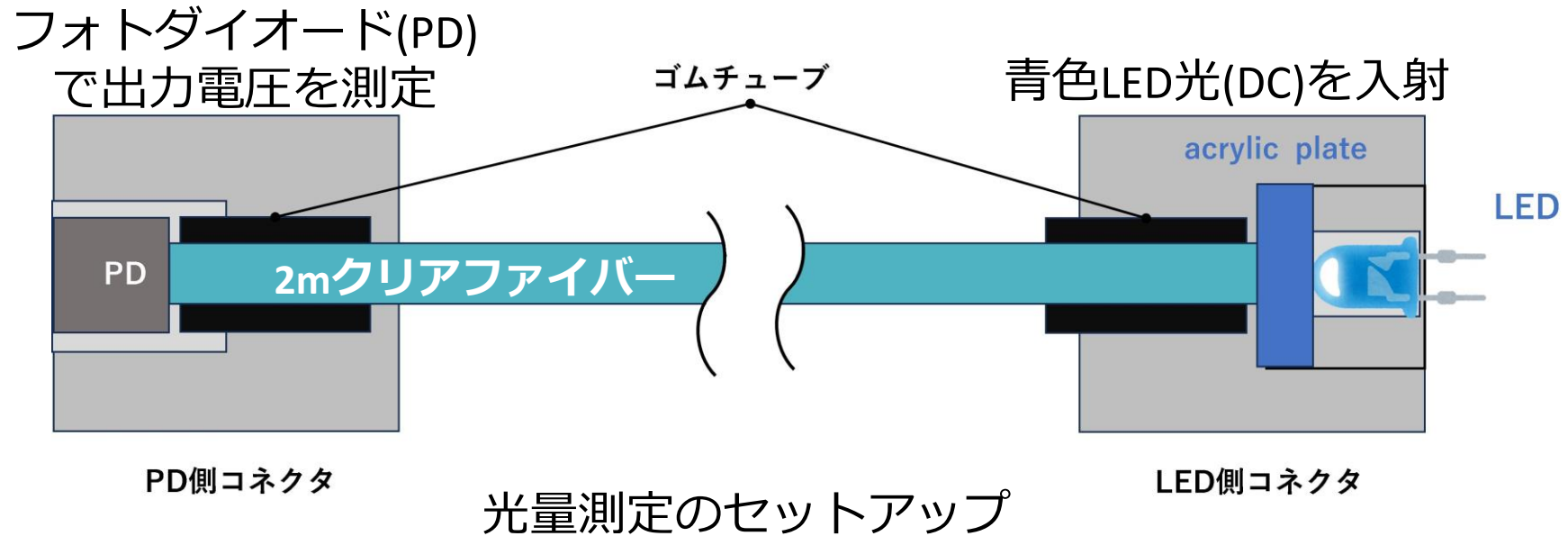
- 損失がない \Rightarrow 平均光量を 3σ で区別できる
- 溶着後の要求：2.7~2.5 σ の識別能を要請 (損失率約15%に相当)
- 溶着1回の許容損失率 \Rightarrow 5%



光量測定：目的と実験方法

• 目的：2mクリアファイバーを3回溶着し、損失が15%に収まるか調べる。

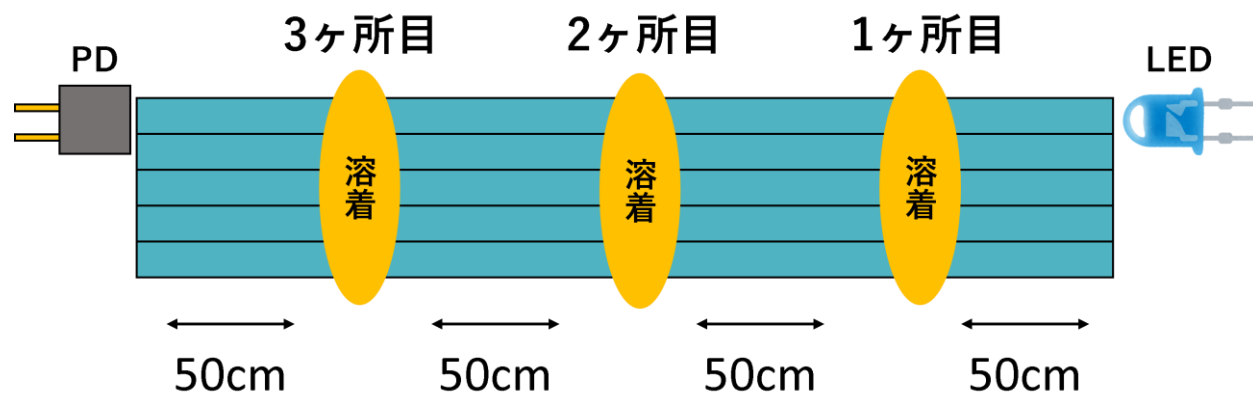
• 方法：溶着前後の光量の比を測定する。



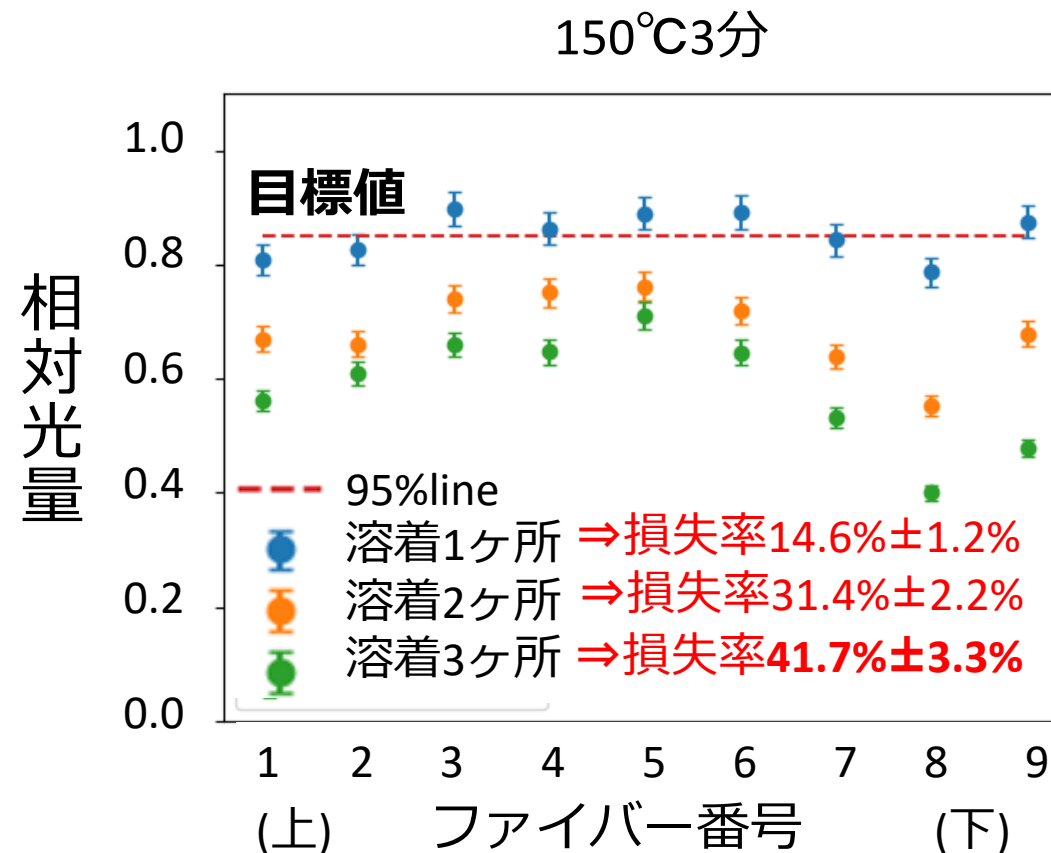
• 初めに150°C3分で溶着した。

光量測定：2mファイバー複数回溶着の結果

- (相対光量) = (溶着後の信号電圧)/(溶着前の信号電圧)
- 目標にはほど遠い。



LED側から50cmごとに溶着



光量測定：温度依存性の調査

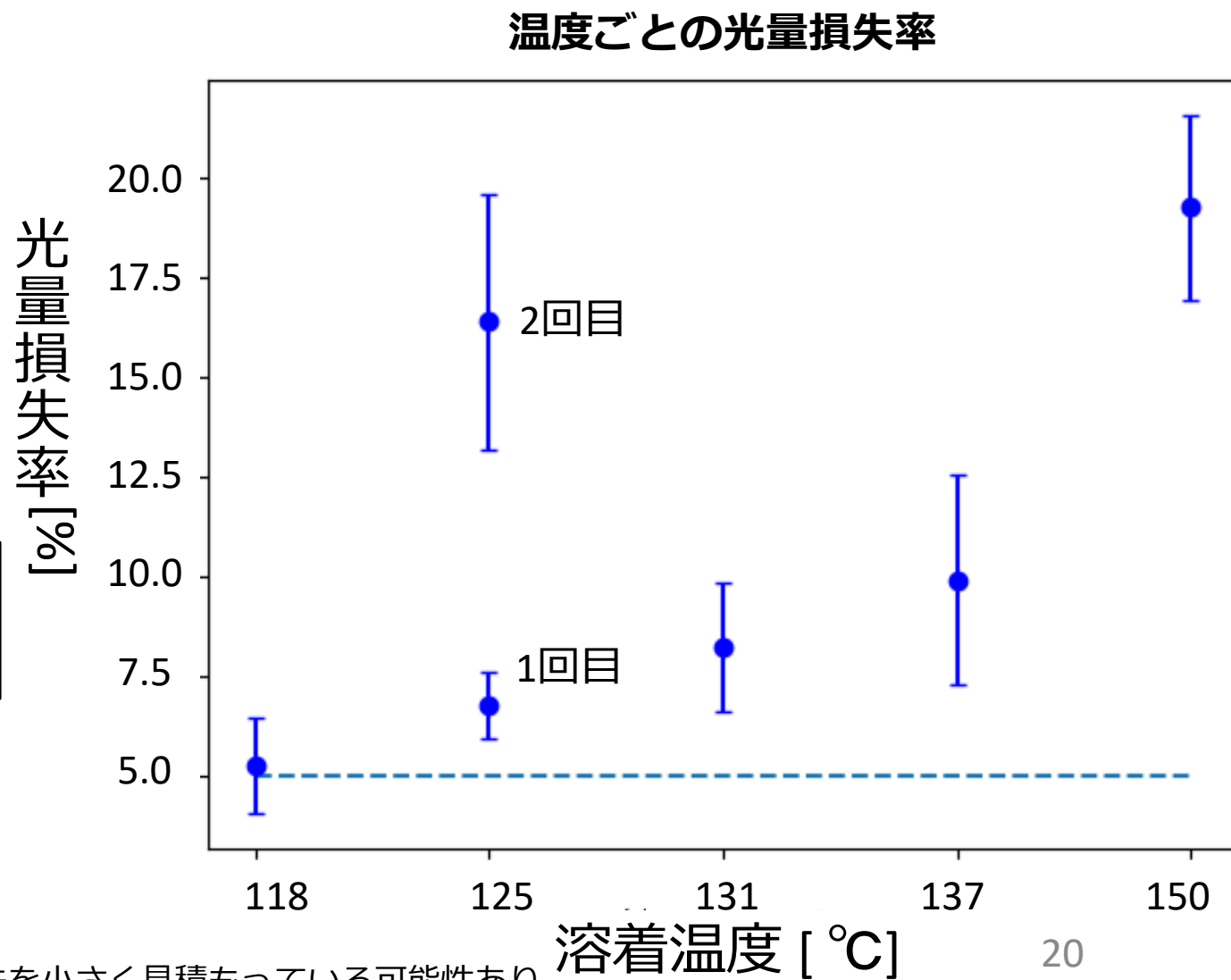
- 他の5つの温度でも測定を行った。
 - 118°C12時間
 - 125°C120分
 - 131°C20分
 - 137°C10分
 - 150°C3分
- 簡単のため30cmファイバを1回溶着して測定を行った。
⇒目標：5%以下の損失率

光量測定：温度依存性の調査の結果

- 温度が低いほど光量損失率が小さい傾向があった。
- 118°C12時間の溶着で損失率を5.2%まで抑制できた。

ここでの傾向や値を有意として結論づけることはできない。

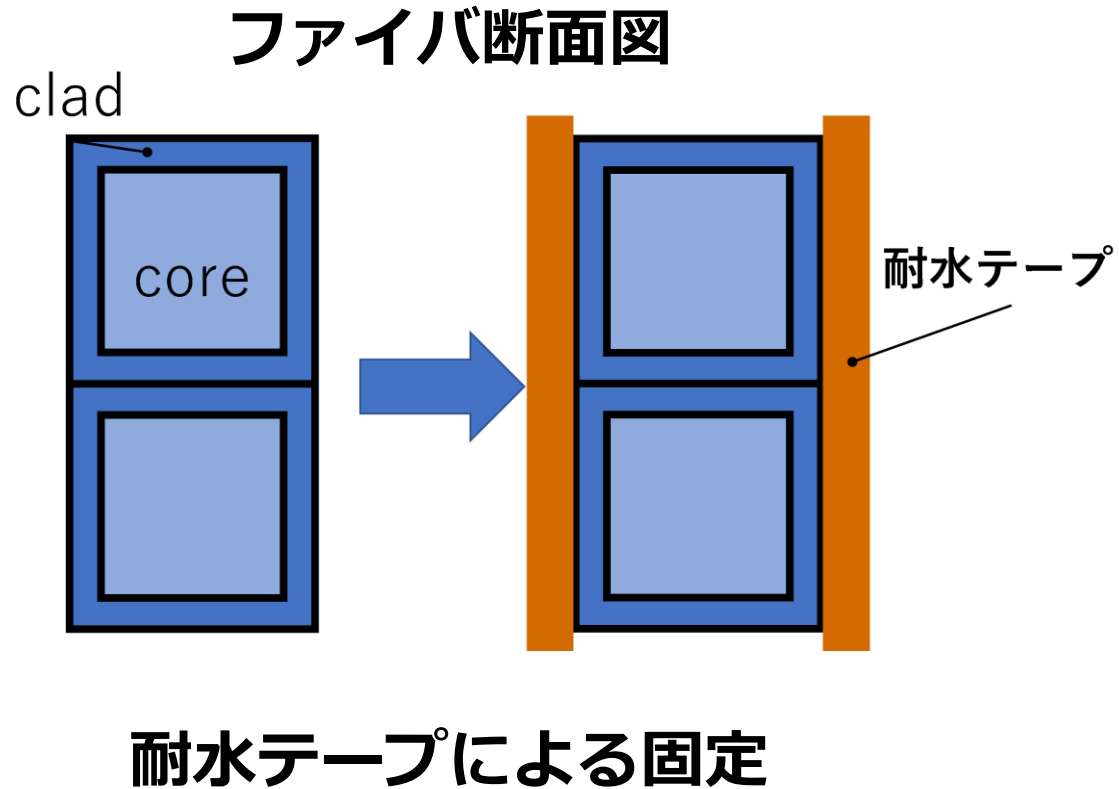
125°C120分
1回目：6.8%±0.6%
2回目：16%±3%



目次

- 背景
- 本研究で行った実験
 - ファイバー熱溶着システムの開発と最適温度の探索
 - 溶着クリアファイバー光量損失評価
 - **耐水テープの粘着力耐久試験**
- 性能評価(シミュレーション)：短い飛程の陽子検出
- まとめ

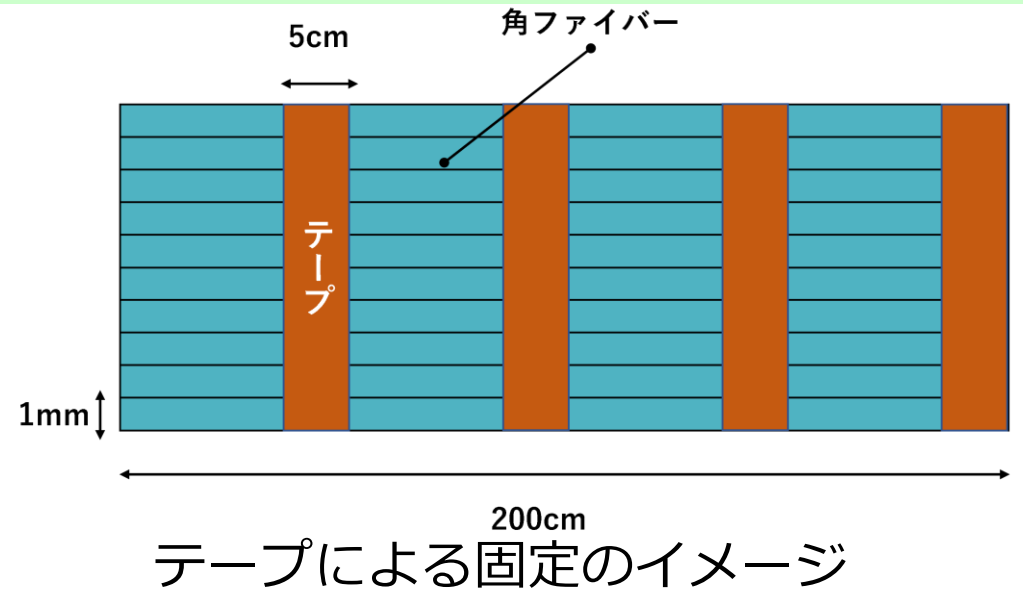
耐水テープによる固定



- メリット
 - 不感領域が増えない。
 - ファイバーを固定時に損傷しない。
- 課題
 - **テープが劣化して剥がれるおそれあり。**
 - 粘着剤が化学的に損傷するおそれあり。

耐水テープの粘着力試験

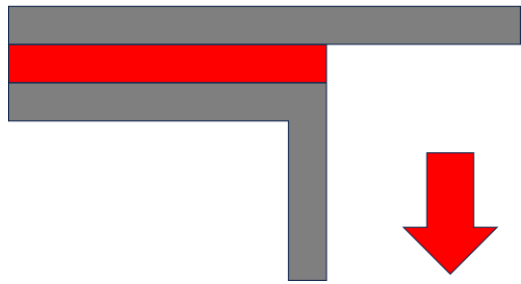
- セキスイのOPP テープ No.882Eを試験
- 基材：ポリプロピレン
⇒高い機械強度が特徴
⇒少ないテープで固定可能
- 粘着剤：アクリル系



- このテープの粘着力がファイバーを固定するのに十分か調べた。
 - テープの90°剥離強度と剪断強度を測定した。
(両者で同様の傾向がある。剪断は十分強いため割愛。)

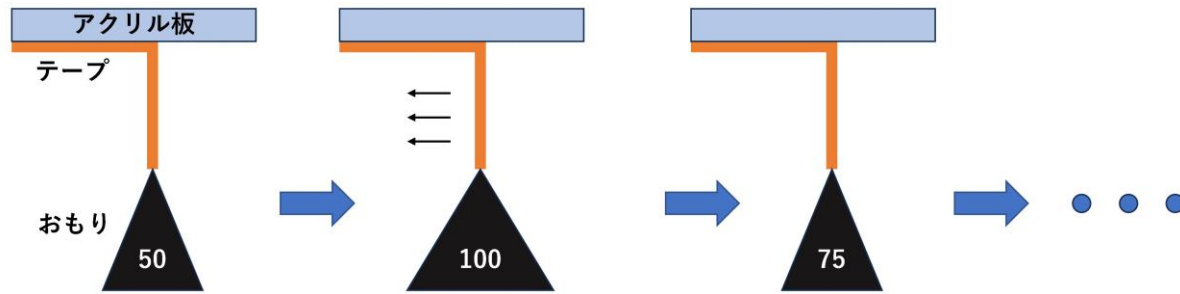
90°剥離強度測定：方法と結果

90°剥離強度



許容強度の要求： $1.1\text{g}/\text{mm}^2$
(安全率3で0.3Gの地震の横揺れに耐える)

接着面の条件を一定にするため、
表面が平らなアクリル板を使用した。
この試験のサンプルでは許容強度25.4g



50gで剥がれない 100gで剥がれた 75gで剥がれない

測定方法

- 1分間でテープが剥がれない重さの上限
⇒テープの剥離強度
- 強度は203.5gと許容強度よりも十分に大きかった。

水中における粘着剤の劣化

- 検出器は**水中で10年スケールの運用**を想定
⇒水中における粘着剤の劣化を見積もる必要がある。
- 水中の**加速劣化試験**を行い、劣化したテープの粘着力を時間ごとに測定した。

加速劣化試験：原理

- 化学反応速度定数 k はアレニウスの式*

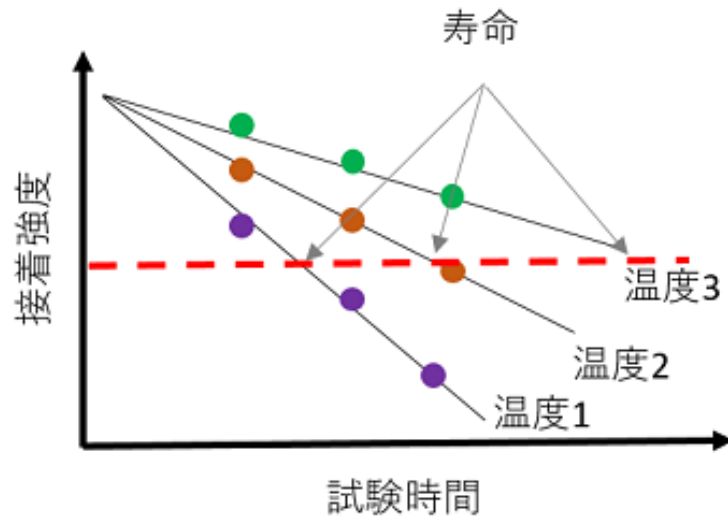
$$k = A \exp \left[-\frac{E_a}{RT} \right]$$

に従う。(Ea:活性化エネルギー、R:気体定数、T:温度)

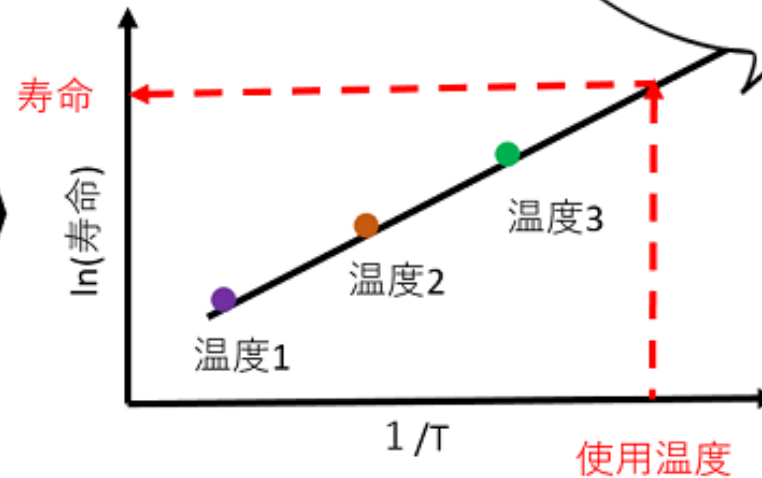
*1つの濃度に依存する一次反応の速度

パナソニックグループプロダクト解析センター。
接着剤の劣化評価 - 材料耐久性 評価。

<https://holdings.panasonic.jp/corporate/pac/reliability/durability/adhesive.html>.



温度ごとに接着強度が許容強度に達するまでの寿命を測定



外挿によって使用温度での寿命を予測できる。

OUTPUT
・使用温度0°Cで接着寿命0年
・0年後の接着強度はON ...等

加速劣化試験：方法

- 70°C、80°C、90°Cに設定した電気ポット内に、テープを貼ったアクリル板サンプルを入れる。
- 期間をおいてサンプルを取り出し90°剥離強度を測定した。
(最大4週間)



十分な枚数を入れる



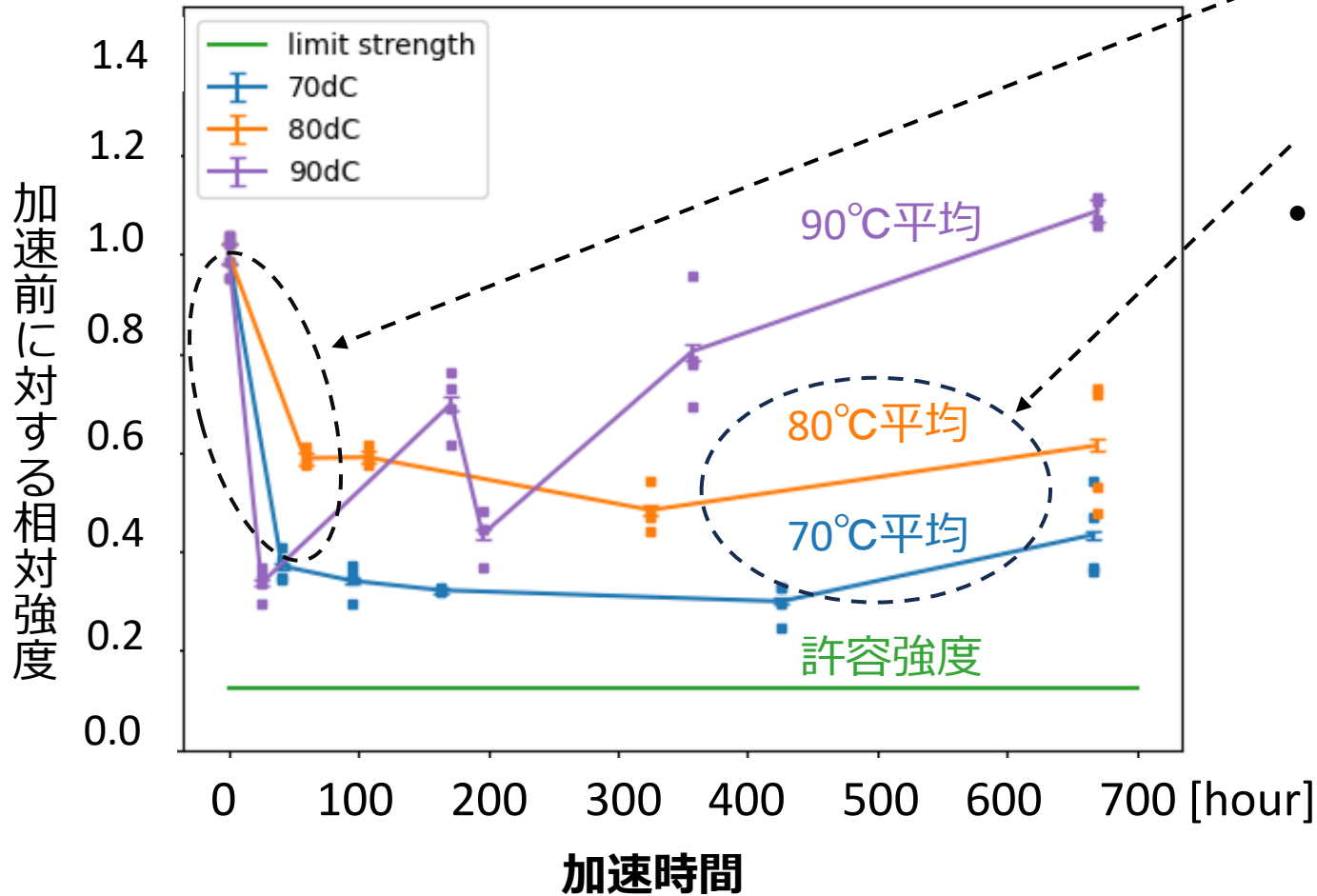
90°C

80°C

70°C

加速劣化試験：結果

90°剥離 結果



- いずれの温度でも最初に急激に減少したが、その後も許容強度より十分な強度があった。
- しかし、予想に反して70°Cでは他の温度よりも強度が小さくなった。

加速劣化試験：考察

- 許容強度に達しなかったため寿命の推定ができない。
 - 低温の70℃で強度がより小さくなる原因は不明。
 - 温度水準と試験期間を増やし、温度ごとの劣化傾向を見る必要がある。
- あるアクリル系粘着剤の活性化エネルギーEaを21kcal/molとする文献が見つかった^[1]。
 - このEaでは70℃700時間の加速は**約14年**の劣化に相当。
- しかし、反応速度はEaに大きく依存する。
 - 実際に使用している粘着剤のEaを得ることが重要。
 - Eaの測定を行ったが失敗に終わった。

cf.)アレニウスの式

$$k = A \exp \left[-\frac{E_a}{RT} \right]$$

[1] Hiroshi Wada Kazuhiko Shibata. 両面接着テープ及びその製造方法.

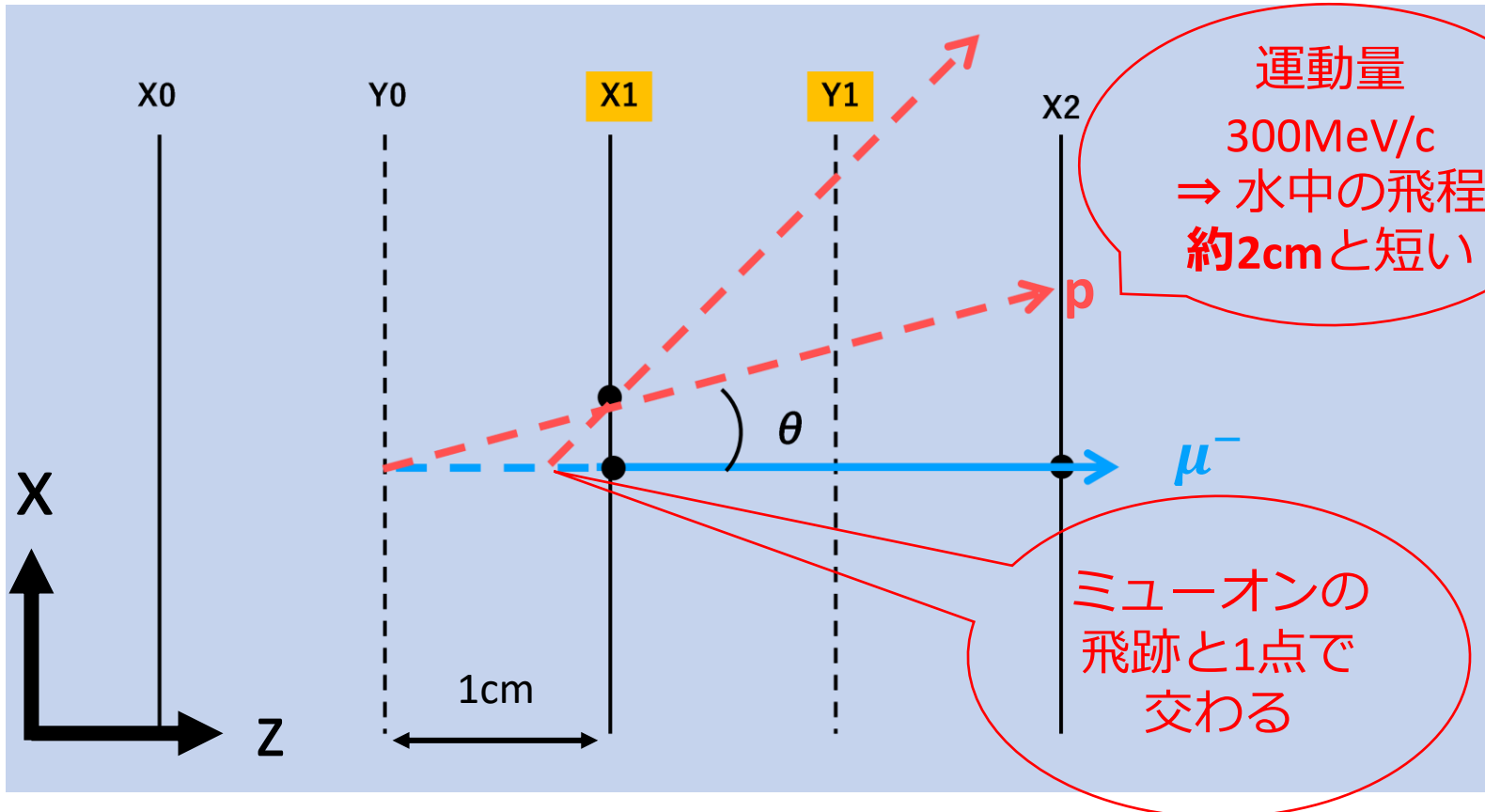
<https://patents.google.com/patent/JP2006143856A/ja>, 日東技報 Vol.27, No.2 (Nov. 1989)

目次

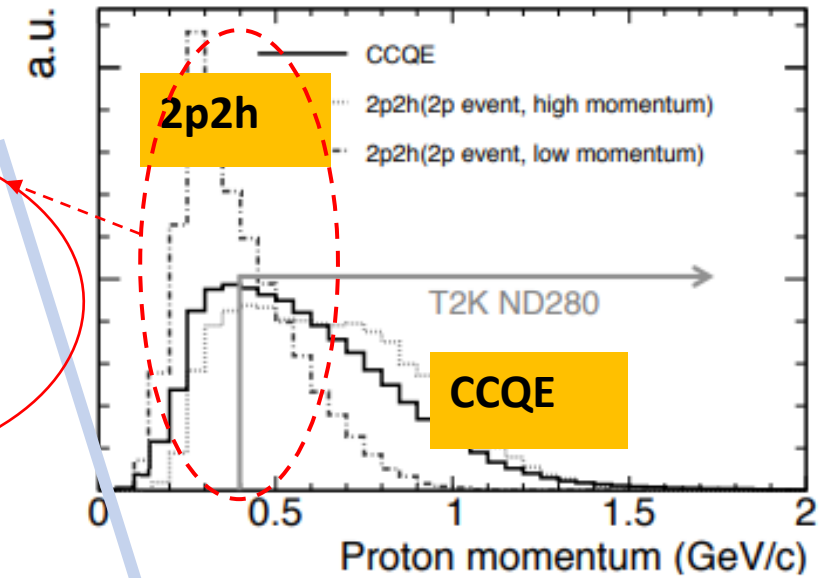
- 背景
- 本研究で行った実験
 - ファイバー熱溶着システムの開発と最適温度の探索
 - 溶着クリアファイバー光量損失評価
 - 耐水テープの粘着力耐久試験
- **性能評価(シミュレーション) : 短い飛程の陽子検出**
- まとめ

短い飛程の陽子検出

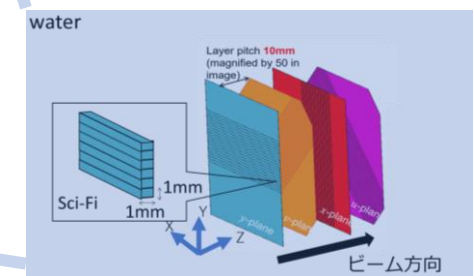
- 目的：ミュオンの長い飛跡を利用して、飛程の短い陽子の運動量を見積もる。



低い運動量の陽子の検出が重要

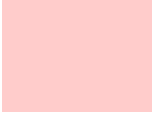



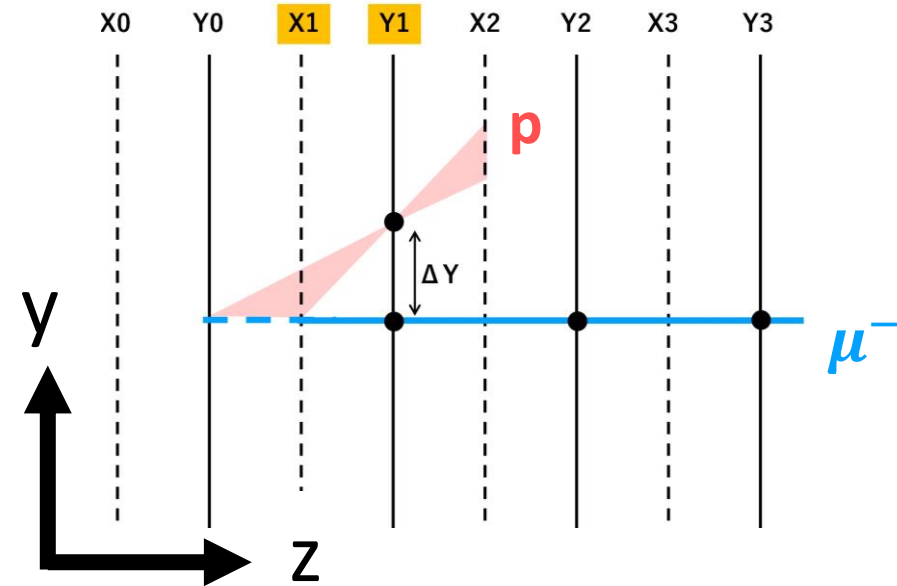
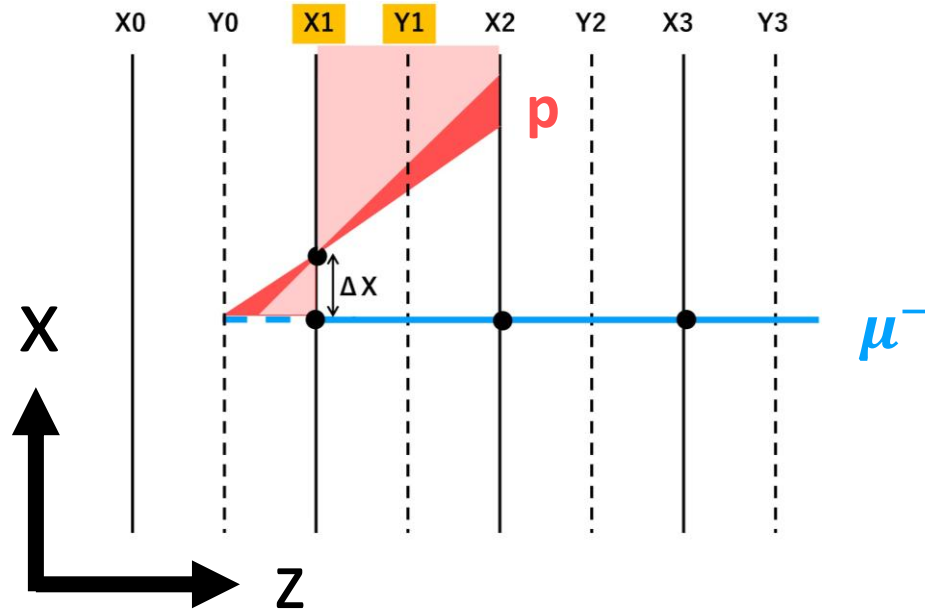
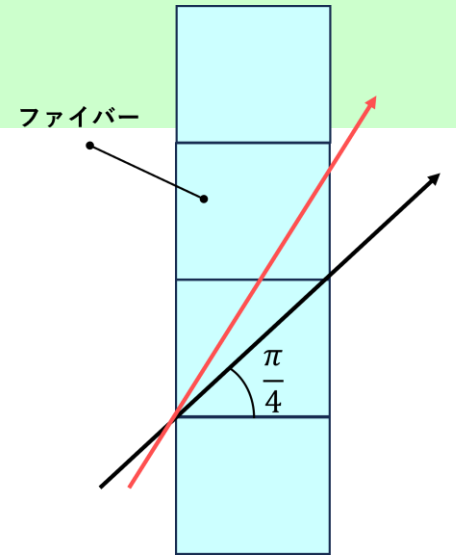
簡単のためXレイヤーとYレイヤーだけの場合を考える。



少ないヒット数でも角度と運動量を制限できる。

例：2レイヤーを通過する場合

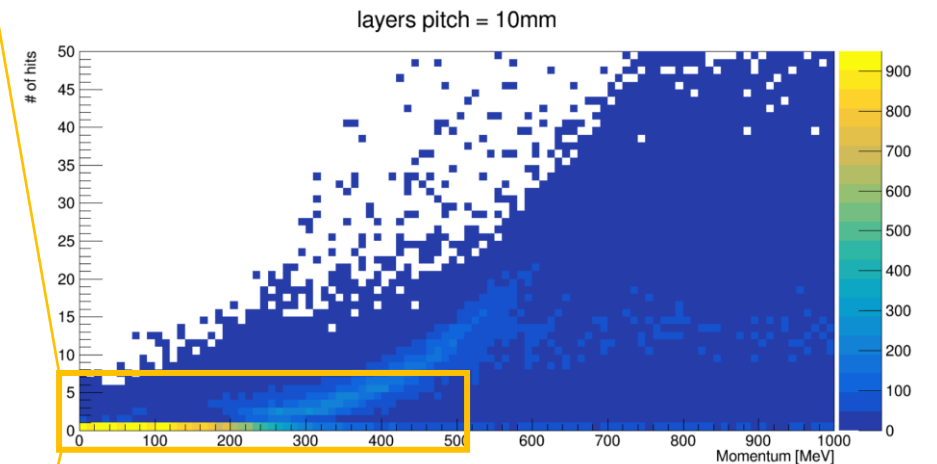
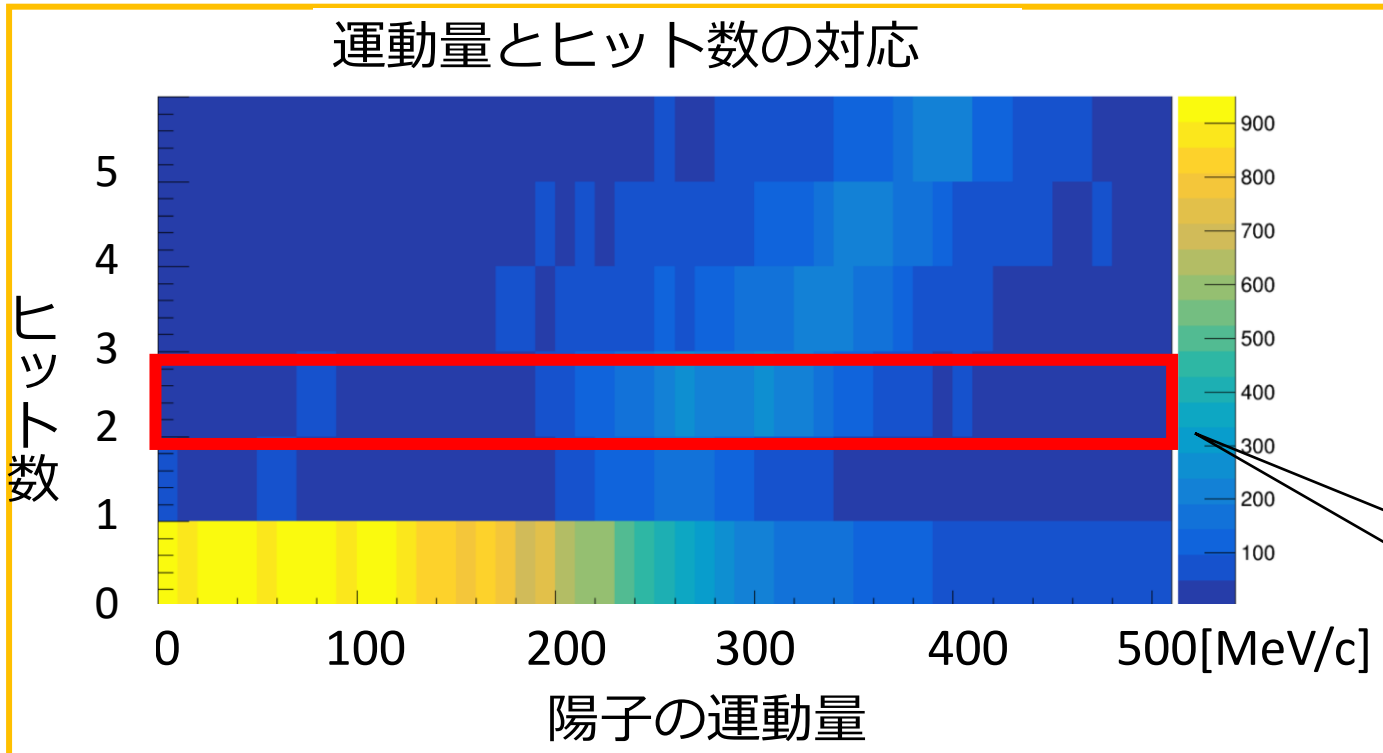
- 図中の  : 飛程がある可能性
- 同じレイヤー内で1ヒットならば陽子の散乱角 $\theta < 45^\circ$
⇒ さらに  の領域に絞られる。



2レイヤー通過に相当する運動量の推定

- シミュレーション設定

- 縦300mm×横300mmのシートをビーム方向に10mm間隔で水中に50枚並べた。
- 0から1000MeV/cの一樣な運動量を持つ陽子を空間的に一樣等方に発生させた。
- イベント数：10k



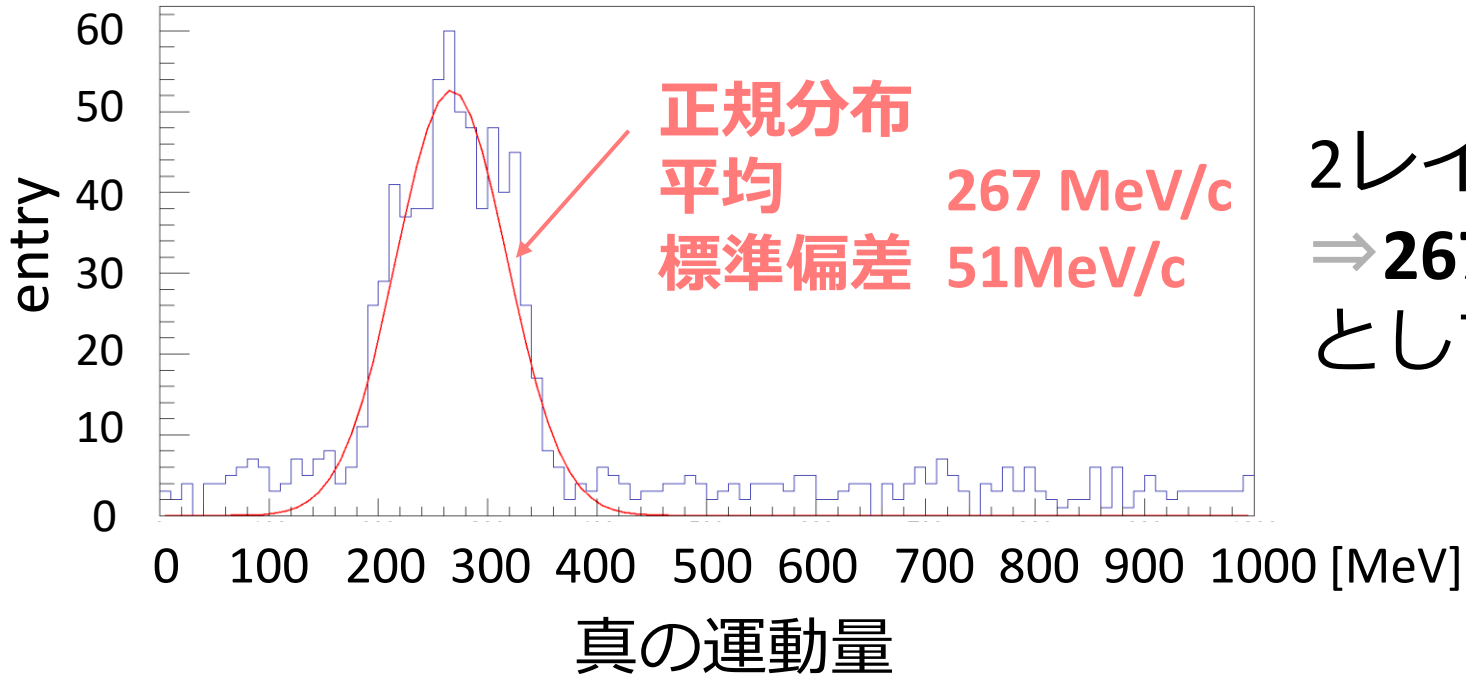
2ヒットのイベントを
1次元ヒストグラムに。

2レイヤー通過に相当する運動量の推定

- $\theta < 45^\circ$ のセレクション

⇒ 45° 以上なら同一レイヤー内で2つ以上のヒットがあるので区別可能

2ヒットかつ 45° 未満のイベント

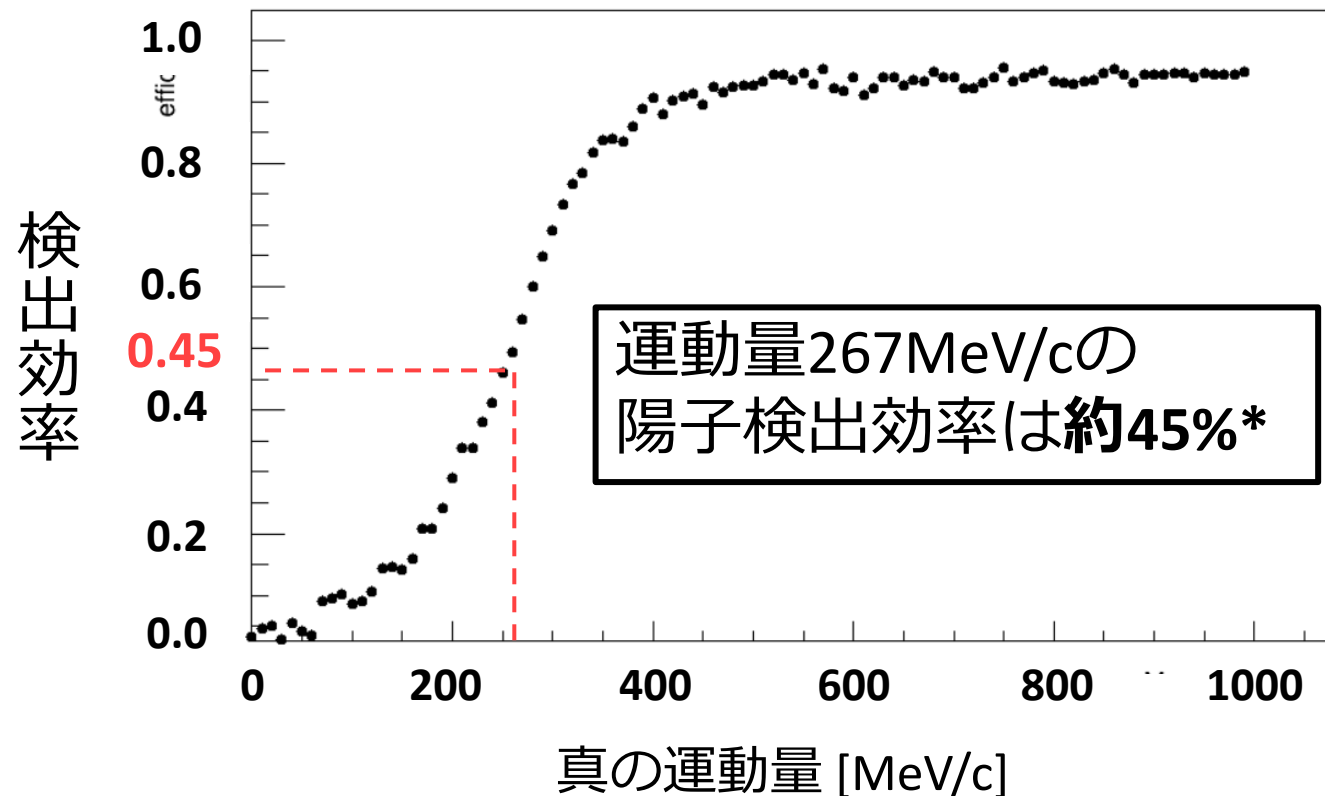


2レイヤーのヒット

⇒ **$267 \pm 51 \text{ MeV/c}$** の運動量を持つ陽子として再構成可能

検出効率の運動量依存性

- (検出効率) = (2ヒット以上のイベント数) / (全イベント数)
- 200から400MeV/cで急激に変化



*ただし、同一レイヤー内で2ヒット以上のイベントも含む。
(本来は別レイヤーで2ヒットのイベントを考慮すべき)

まとめ

- ハイパーカミオカンデ実験ではニュートリノのCP対称性の破れを 5σ の信頼度で示すことを目標としている。
 - ⇒ニュートリノと水の原子核反応の理解が不可欠である。
 - ⇒本研究では水標的のSciFi Trackerを検討。
- 溶着システムを開発し、ファイバーの溶着を行った。
 - 低温ほど損失が小さく、 118°C 12時間の溶着で光量損失率5%以下をほぼ達成した。
 - ただし、溶着にばらつきがあり有意であるとは断言できない。
- 耐水テープの加速劣化試験では寿命を推定できなかった。
 - 試験期間中で十分な強度を保ったが、試験の有効性は保証できなかった。
- 検出器シミュレーション
 - 運動量 $267\text{MeV}/c$ の陽子に対して45%の検出効率が期待された（過大評価）。

Backup

2p2h反応のダイアグラム

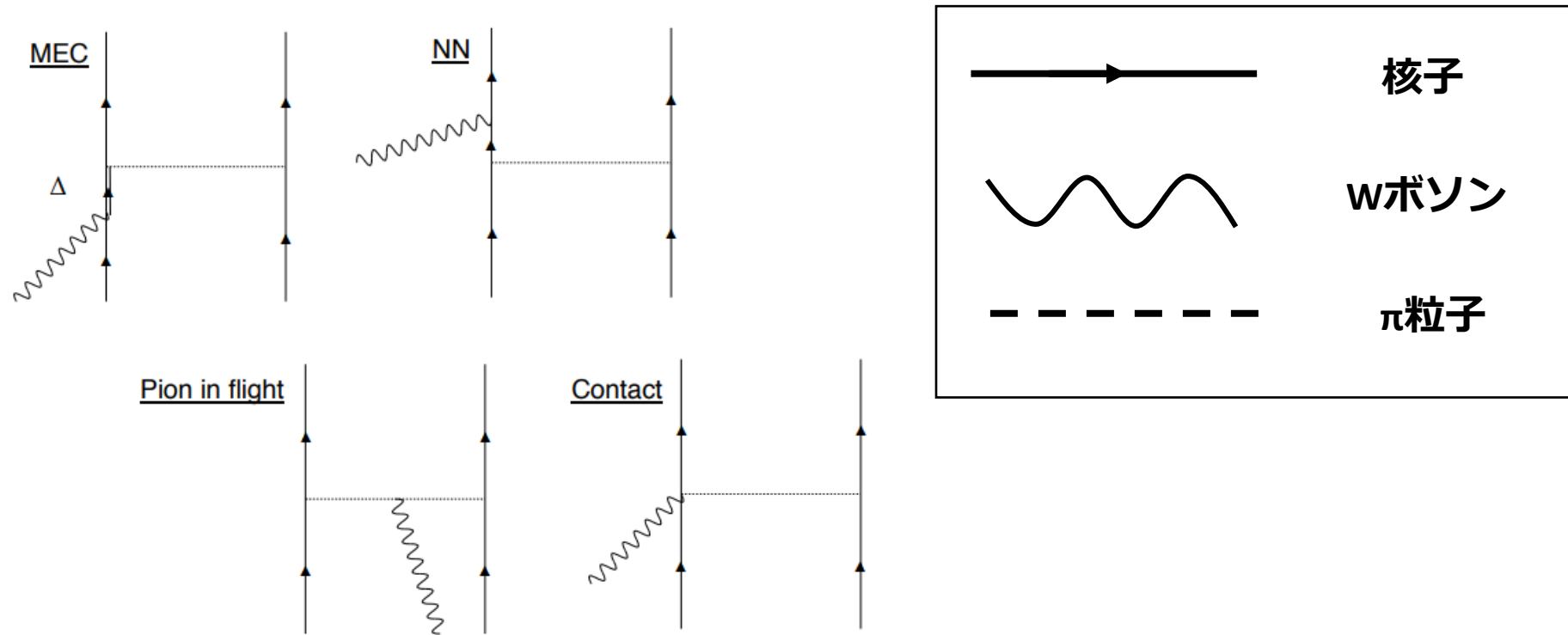
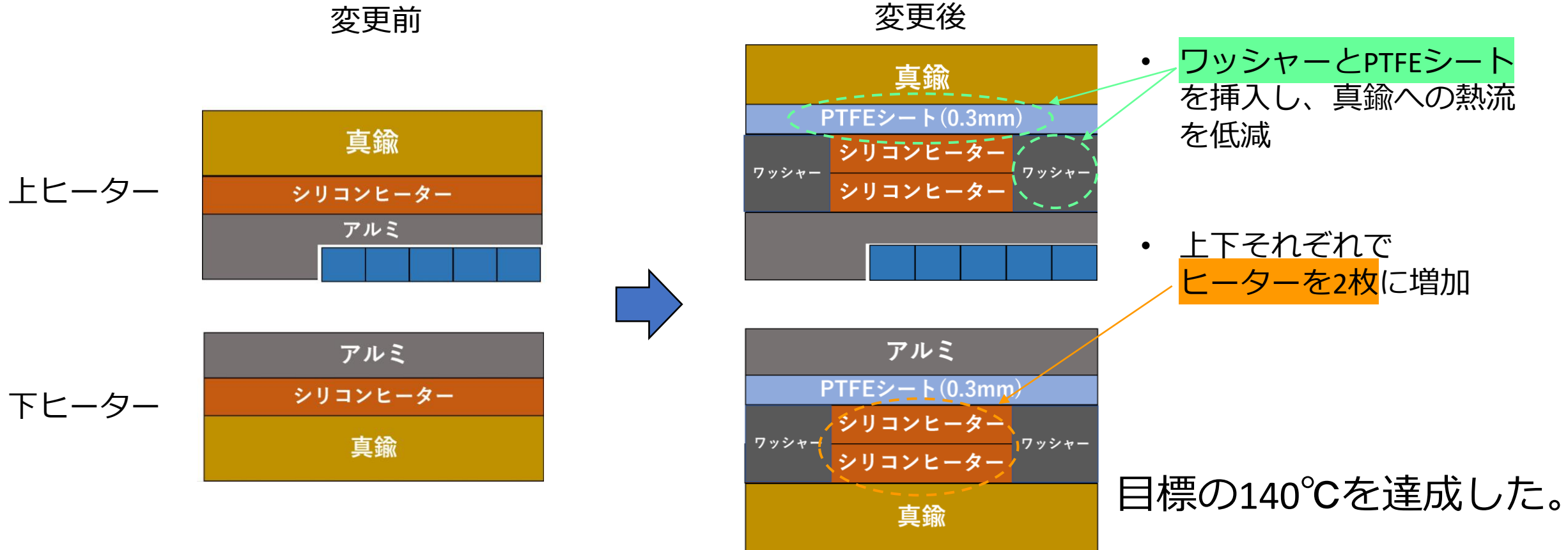


Figure 3.7: Diagrams of the 2p2h interactions. The solid lines are nucleons, the dotted lines are pions, the wavy lines are W bosons, and the double line is Δ .

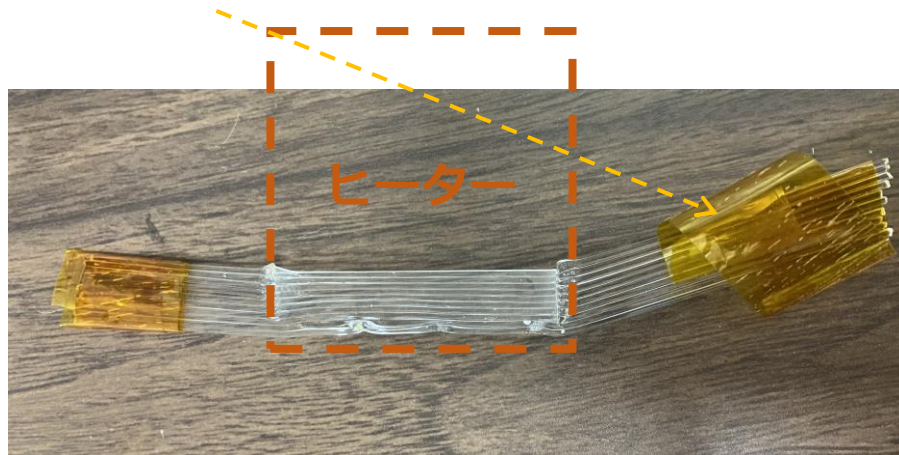
溶着システムの開発：治具の構造

- 目標温度：140°C（アクリル(PMMA)の軟化点は最大で約120°C）
- 目標に届かなかったため、改良を施した。

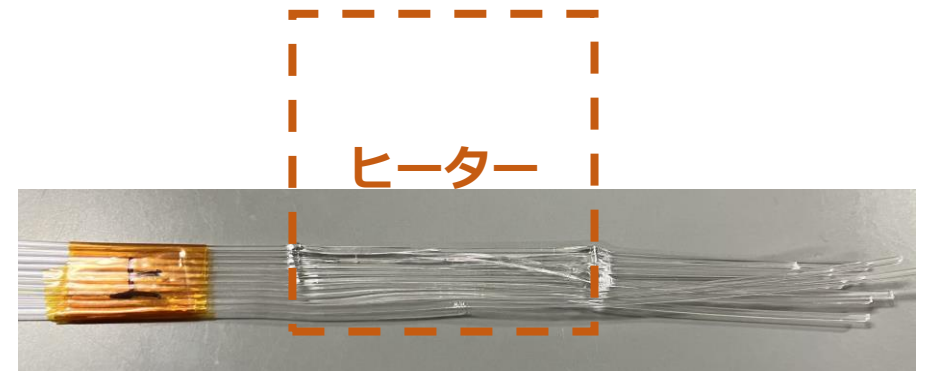
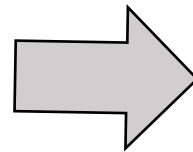


溶着システムの開発：曲がり抑制

- ファイバーがヒーターの両端で折れ曲がってしまった。



ヒーターの両脇におもりを置いて荷重をかけ
ファイバーの変形を抑制する

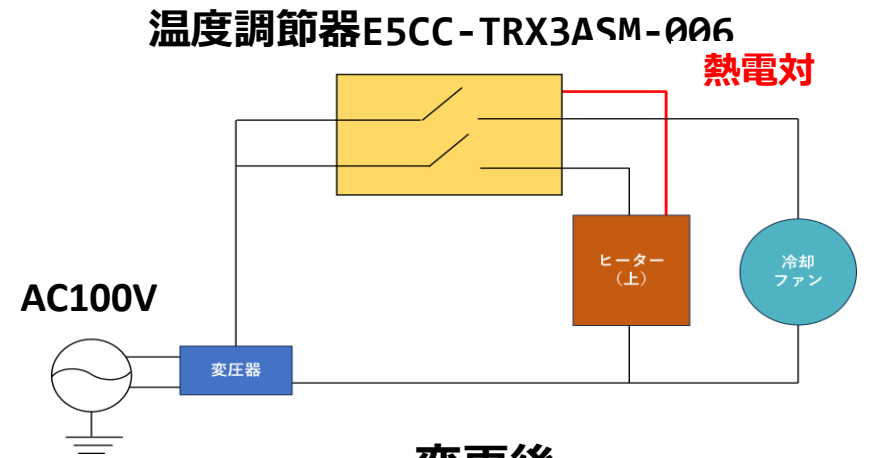


おもりを載せて
溶着

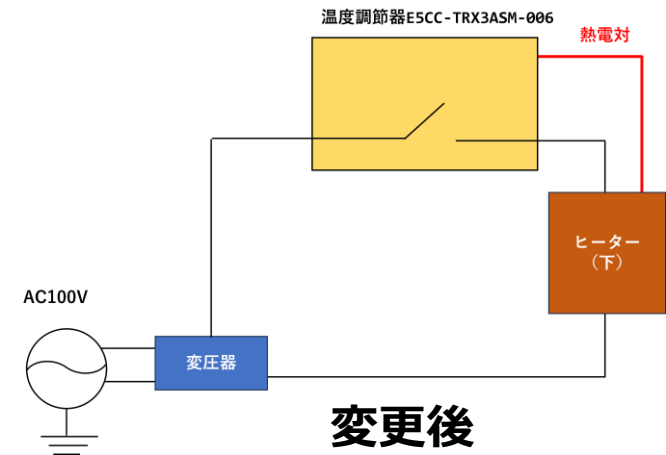
ファイバーが真っ直ぐになった。

溶着システムの開発：配線変更

- 変更前
 - 上ヒーターの温度を基準に定値・ON/OFF制御
⇒変圧の度合いによって温度の立ち上げ時間と溶着の強さが変わってしまった。
- 変更後
 - プログラム可能な温度調節器を使用
⇒温度の立ち上げ時間を一定にした。
 - 上下のヒーターを独立にPID制御
 - 冷却ファンを導入⇒溶着後の冷却時間を短縮
- この溶着システムでファイバー溶着に最適な温度と時間の組み合わせを探索した。



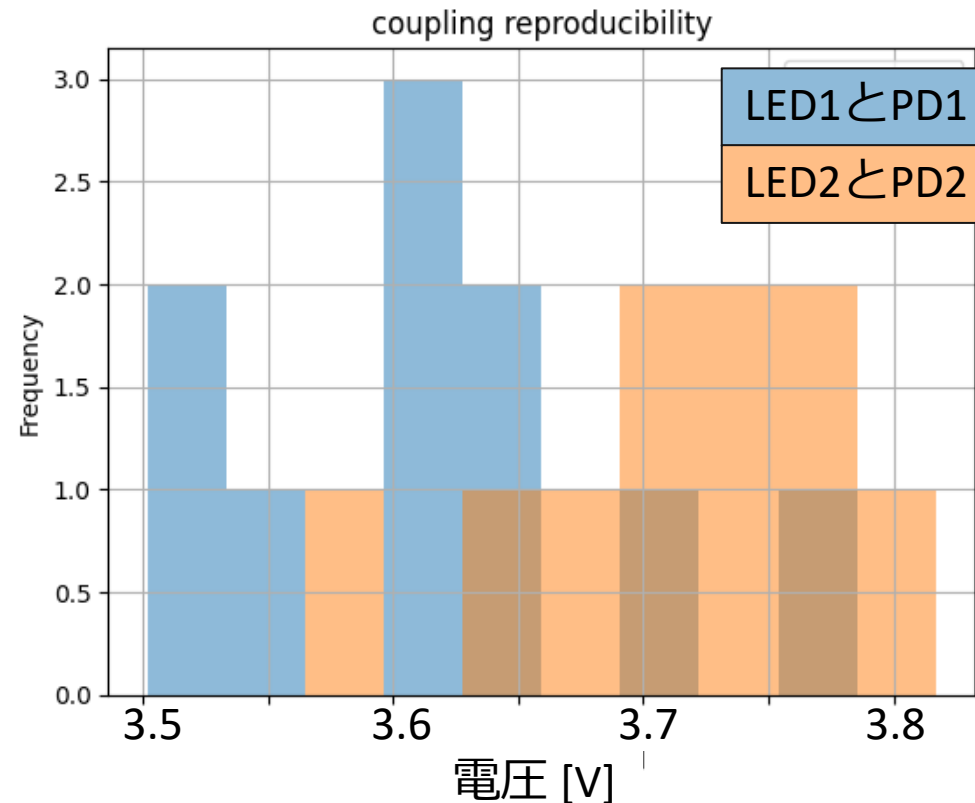
変更後
上ヒーターの配線図



変更後
下ヒーターの配線図

光量測定：ファイバー着脱の再現性

- ファイバーとコネクタのカップリング再現性を確認するためにファイバーの着脱を繰り返した。
- LED1 は PD1 と、LED2 は PD2 と組み合わせ、着脱と測定を 10 回行った。
- LED1とPD1で2.34%、LED2とPD2で1.73%と十分な精度が得られた。

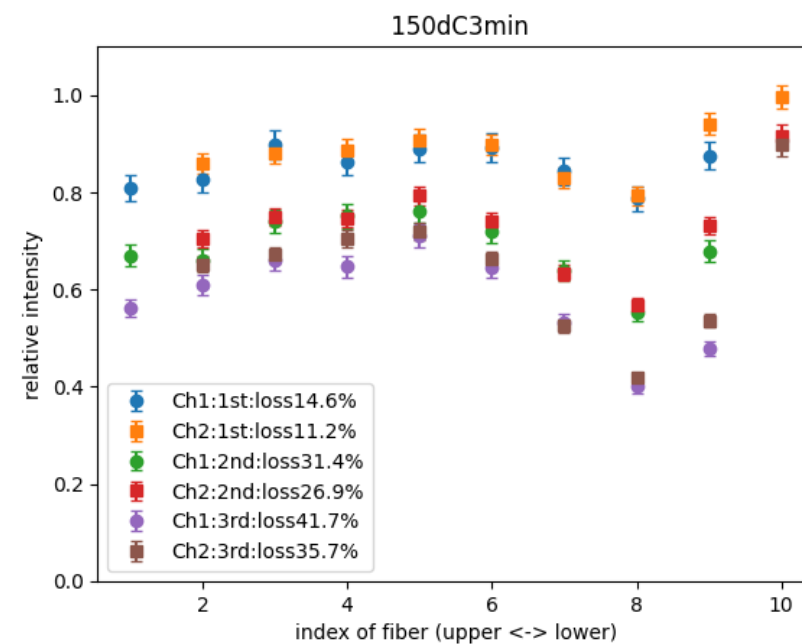
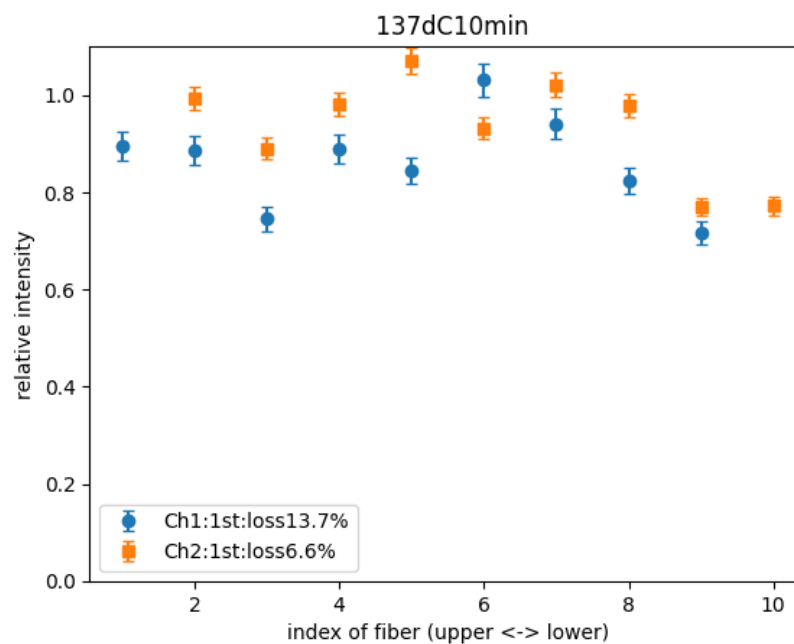
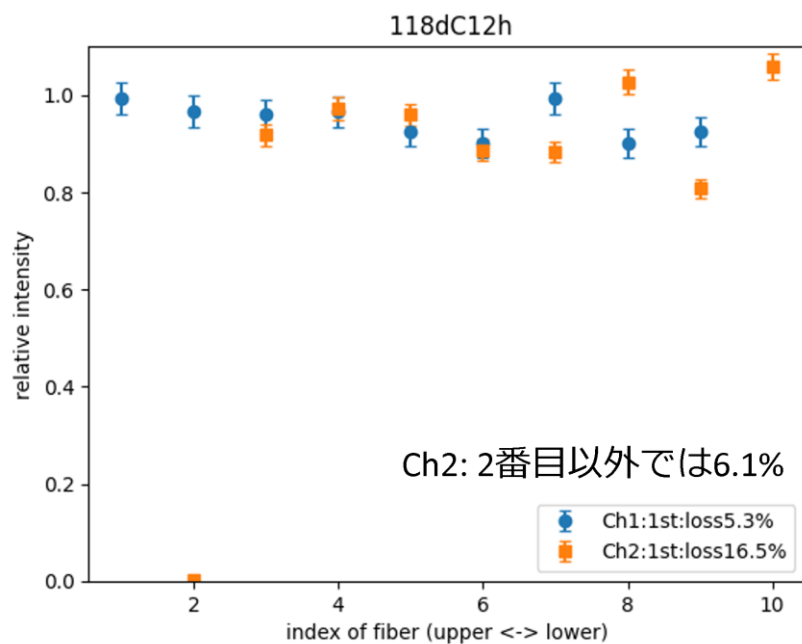


光量測定：光量損失率の目標値

- 目標：シートを3箇所溶着しても電子とミュオンを光量(dE/dx)で区別できる性能を保つ
 - 675MeV/cの電子の平均光量 29.4 p.e./mm
 - ミュオンの平均光量 18.0 p.e./mm
- 光量はポアソン分布に従ってふらつき、ミュオンと電子の平均光量は1.7標準偏差離れている。
- ヒット数がnのとき、標準誤差は $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ であるため、n=3で3 σ の信頼度で区別できる。
- 溶着による損失が15%ならばミュオンと電子の平均光量の差は1.6標準偏差。
⇒粒子識別への影響は限定的だと考えられる。
- 2mファイバーを3箇所溶着したときに10~15%
⇒**1回の溶着で3~5%の損失に抑える必要がある。**

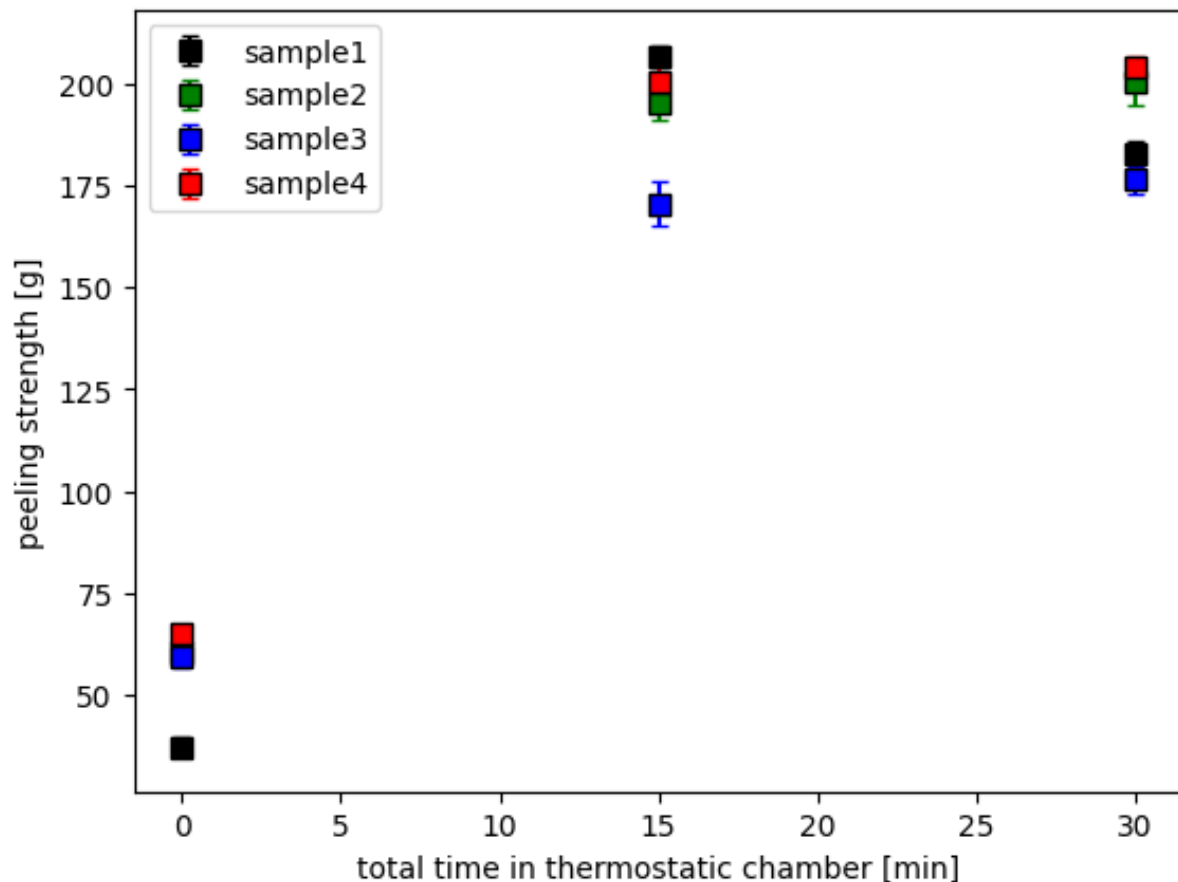
10番目のファイバー

- LED2とPD2では
- チャンネル2についても結果を測定している。



Ch2で2番目のファイバーを除外すると、6.1%

恒温槽での予熱

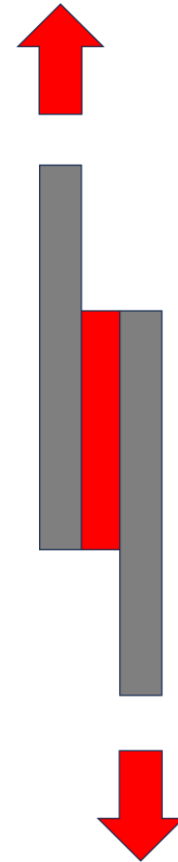


- 粘着力は時間経過で上昇。
- 恒温槽で予熱して15分で平衡に達した。
- 予熱後
 - 剪断強度：203.5g
 - 剥離強度：8.10kg

剪断試験:セットアップ

- ファイバではなく表面が平らなアクリル板を使用。
- 粘着力に対する要求
- 剪断の限界許容強度
(安全率3で空気中の自重に耐える)

剪断強度 限界 : 32g



加速劣化試験:セットアップ

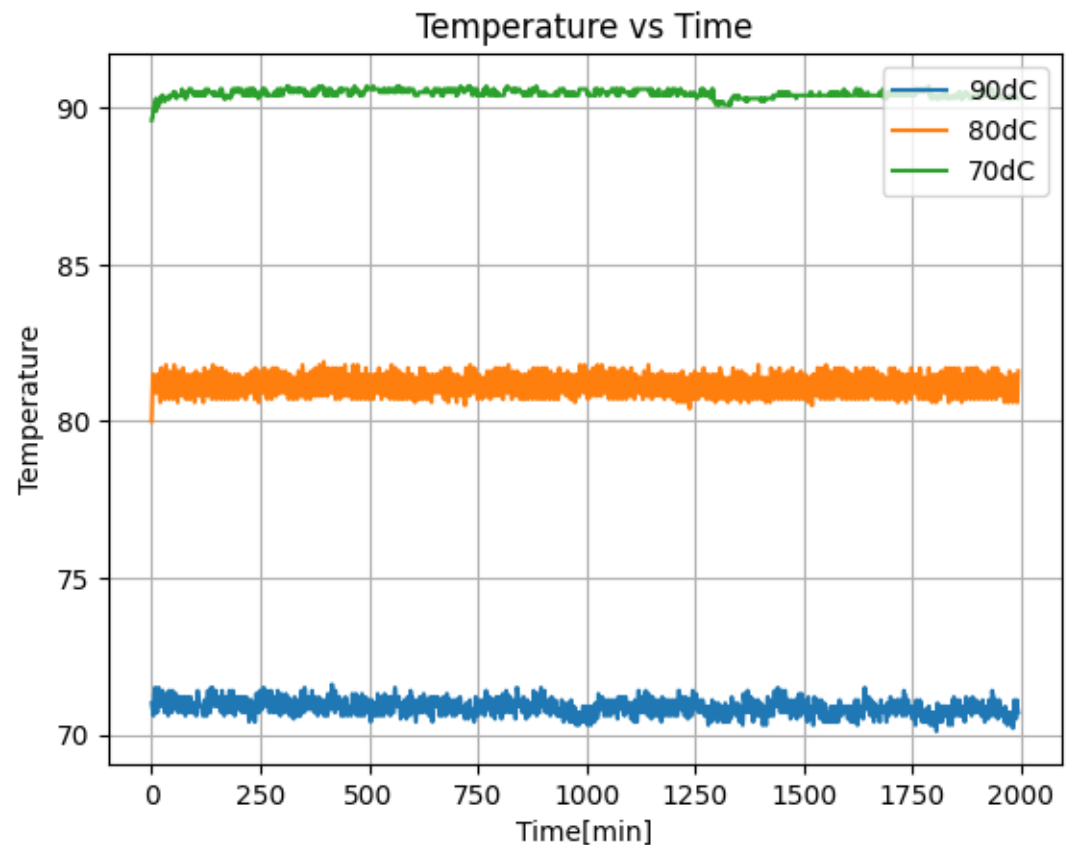
- 70°C、80°C、90°Cに設定した電気ポットで加速劣化試験を行った。
- 十分な温度定常性を確認した。



90°C

80°C

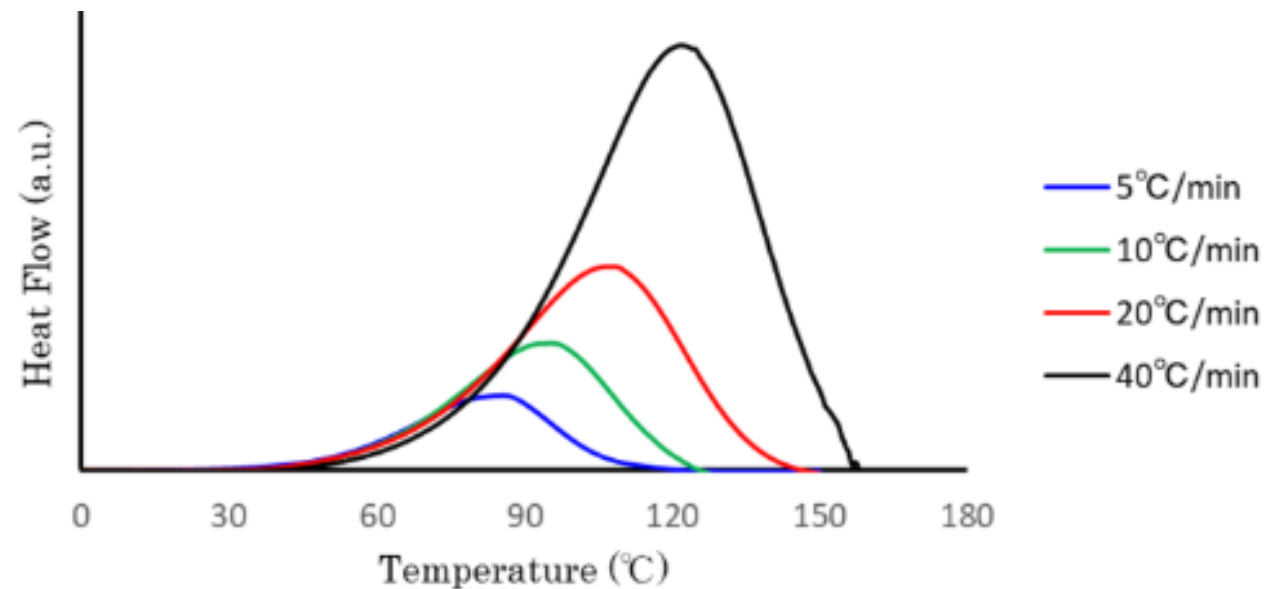
70°C



活性化エネルギーの測定：DTA法

DTA: Differential Thermal Analysis

- DTA: リファレンスとサンプルの温度差を測定し、化学反応に伴う発熱・吸熱ピークを得る。

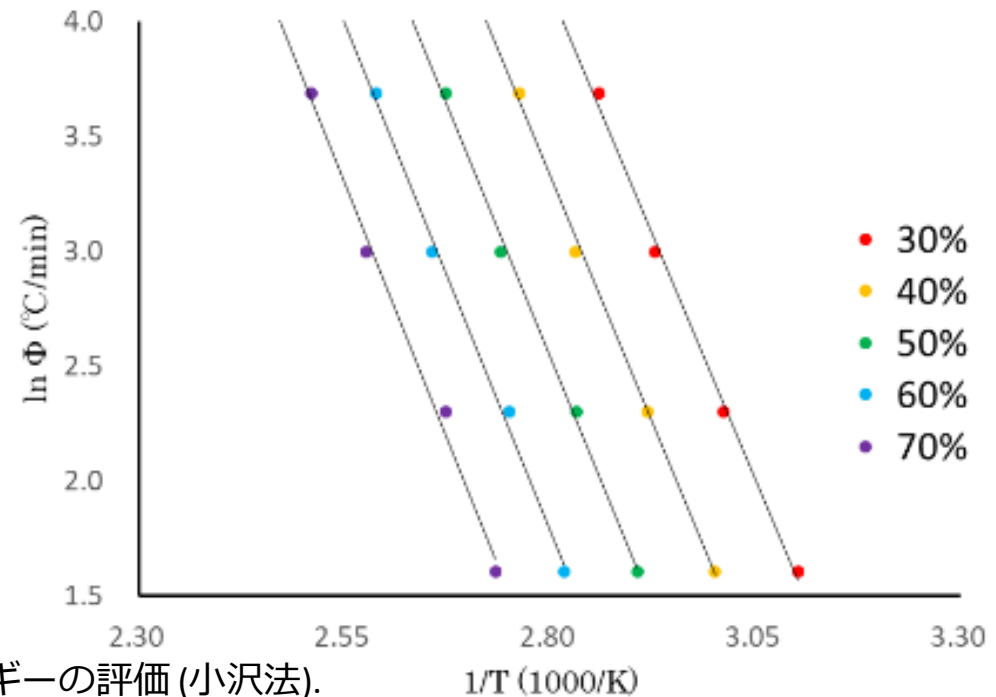


- DTAを用いた小沢法によって活性化エネルギーの測定を行った。

小沢法

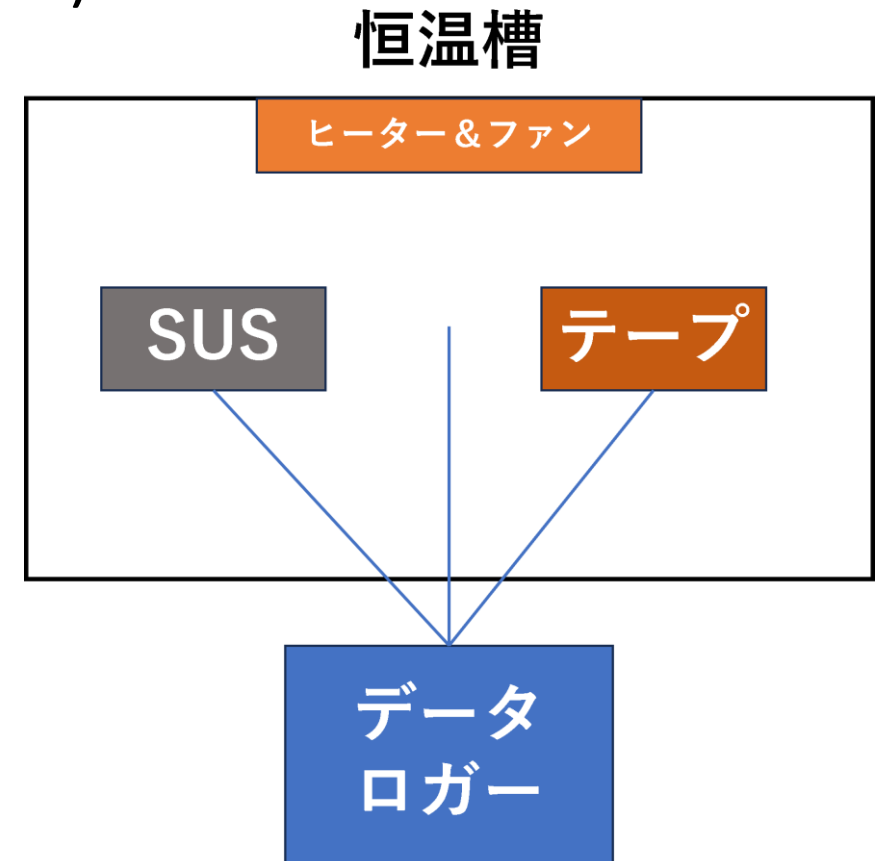
- 小沢法

- 昇温速度を変えて複数回DTAを行い、昇温速度 Φ ごとに、一定の反応率に達する温度 T をプロットすると $\ln\Phi = -1.052 \frac{E_a}{RT} + \ln A$ に従う。
- この傾きから活性化エネルギー E_a を算出する。



DTA：セットアップ

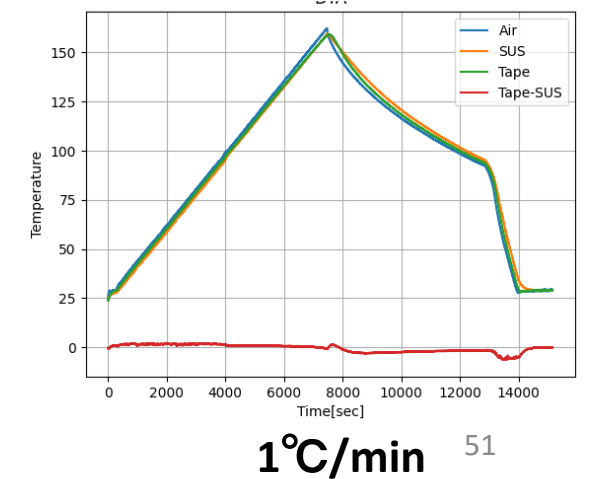
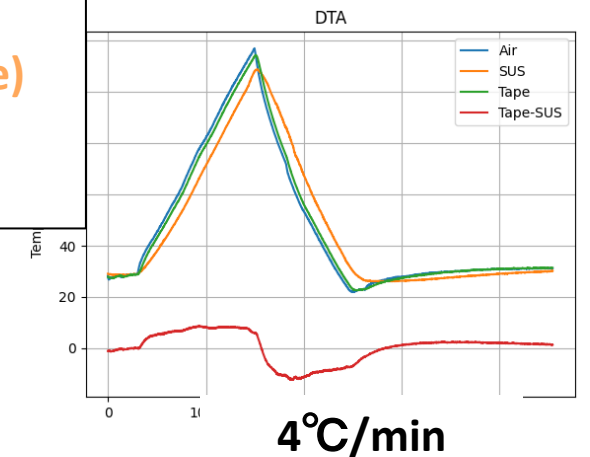
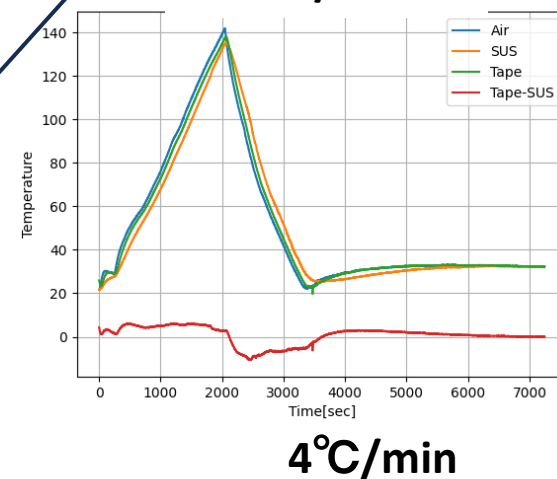
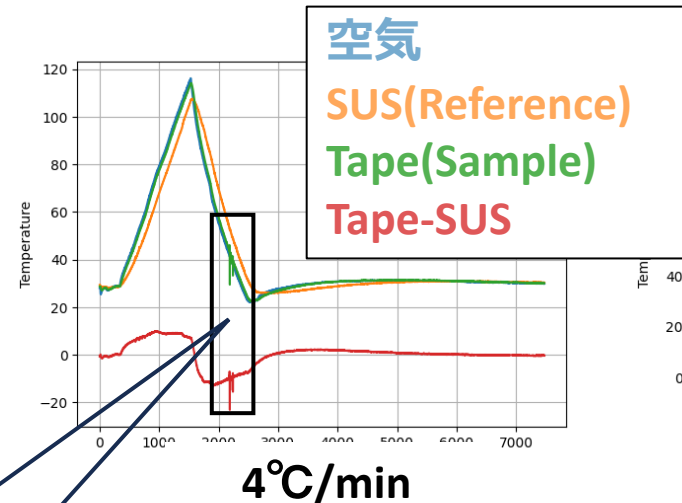
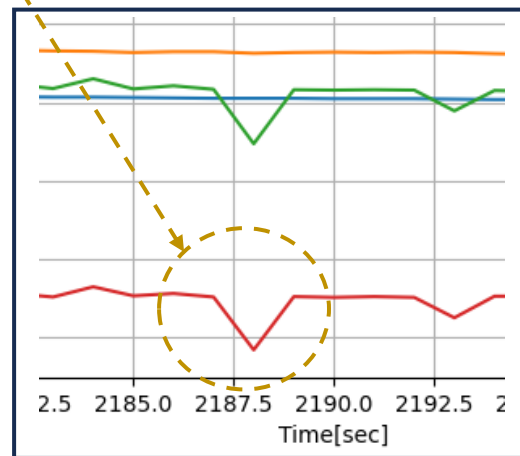
- 3点の温度を測定(サンプリングレート 1Hz)
 - 恒温槽内の気温
 - リファレンス(SUS 50g)
 - サンプル(OPPテープ約30cm)
- 昇温速度4°C/minで3回、1°C/minで1回行った。
- リファレンスとサンプルはヒーターからの距離を等しくした。



上から見た図

DTA : 結果

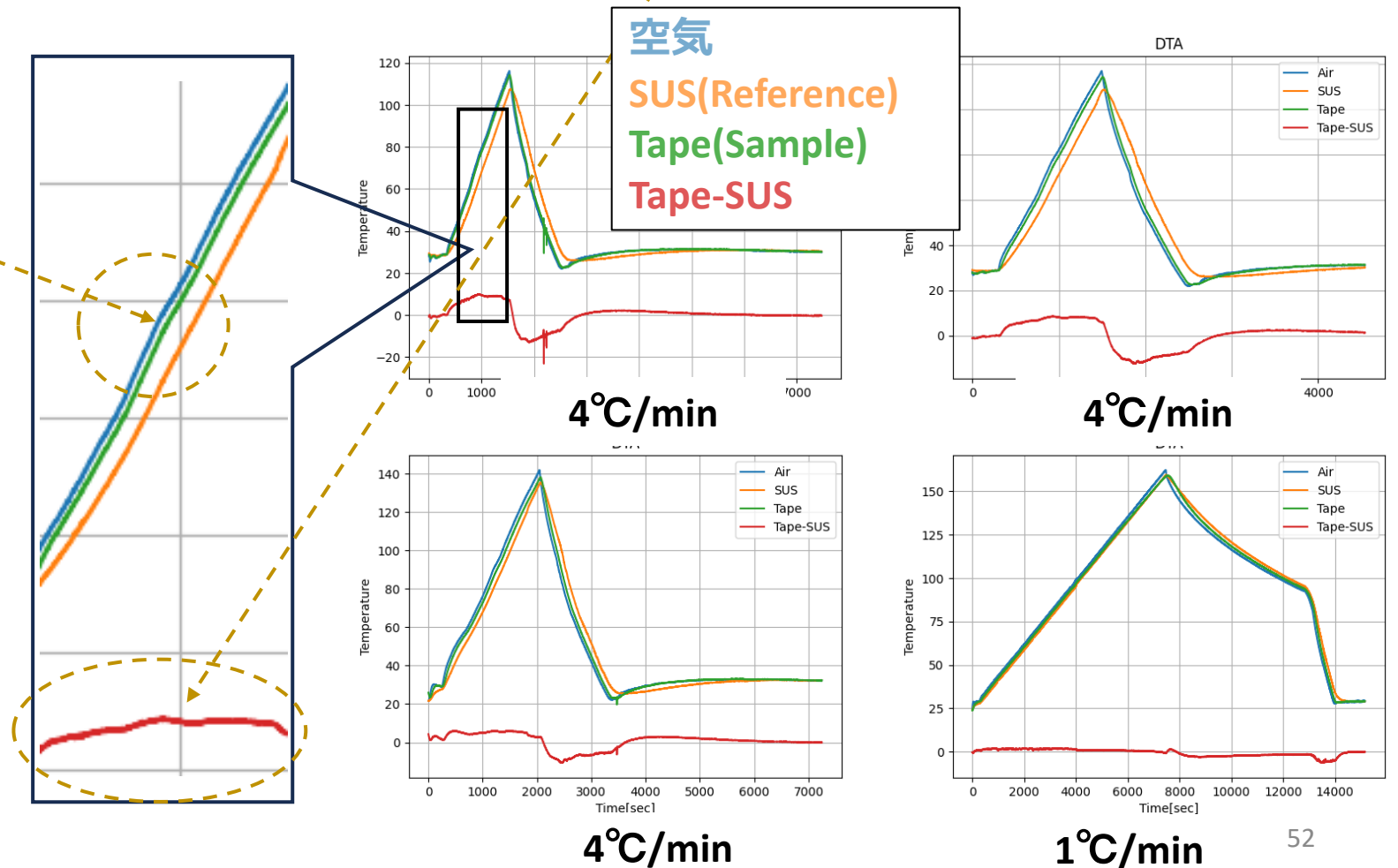
- 活性化エネルギーの測定を試みたが、顕著な上向きピークは確認できなかった。
- 下向きピークもあったが1秒未満しか発現せず、物理的変化であるとは断言できない。



DTA : 結果

- リファレンスとサンプル温度差には小さな凹凸も確認できる

- しかし、槽内の気温と同期しているため、槽内空気温度の乱れが原因であると考えられる。
⇒ **テープの熱容量が小さく、槽内空気の乱れを受けている。**

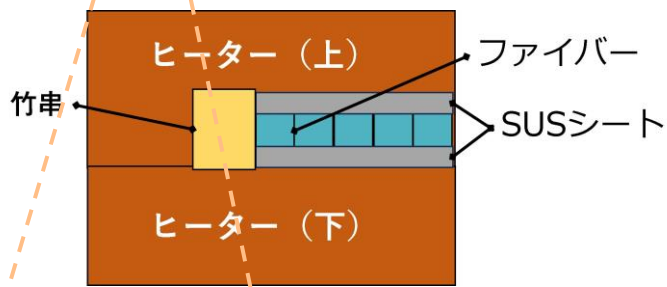


DTA：考察

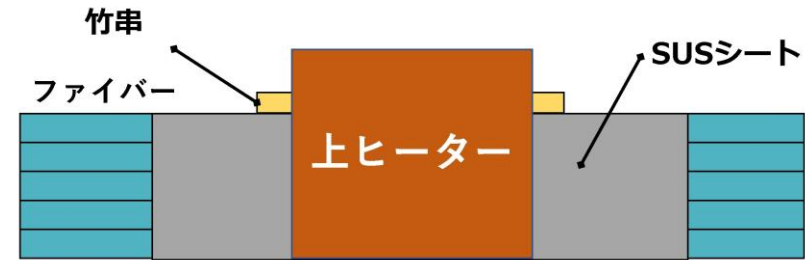
- サンプルとリファレンスの熱容量を揃えるには、7mのOPPテープが必要。
- それでも見えない場合には、より高温より速い昇温速度で行う必要がある。

溶着システムの開発：食い込み抑制

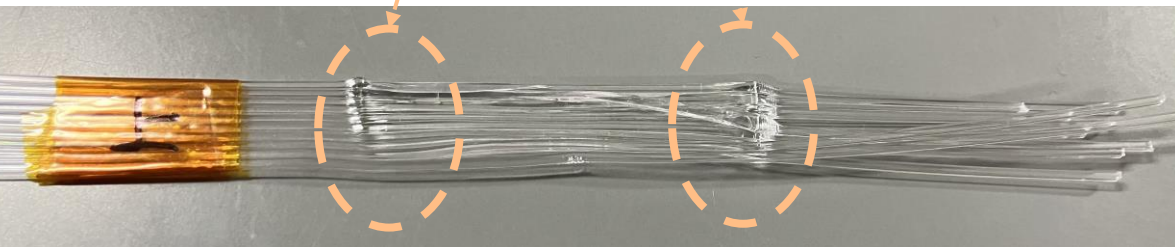
- 治具の食い込み跡がある。
- これを竹製スペーサーとSUSカバーを使って保護した。



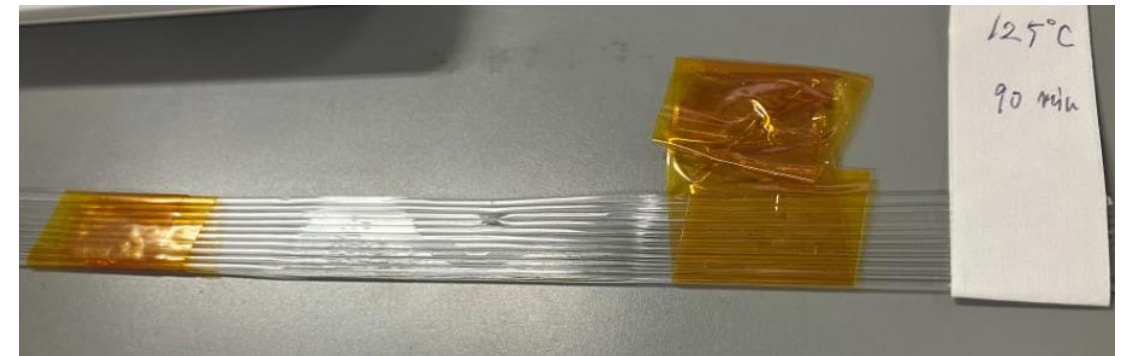
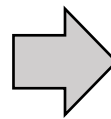
横から見た図



正面から見た図



カバースペーサーで保護する前

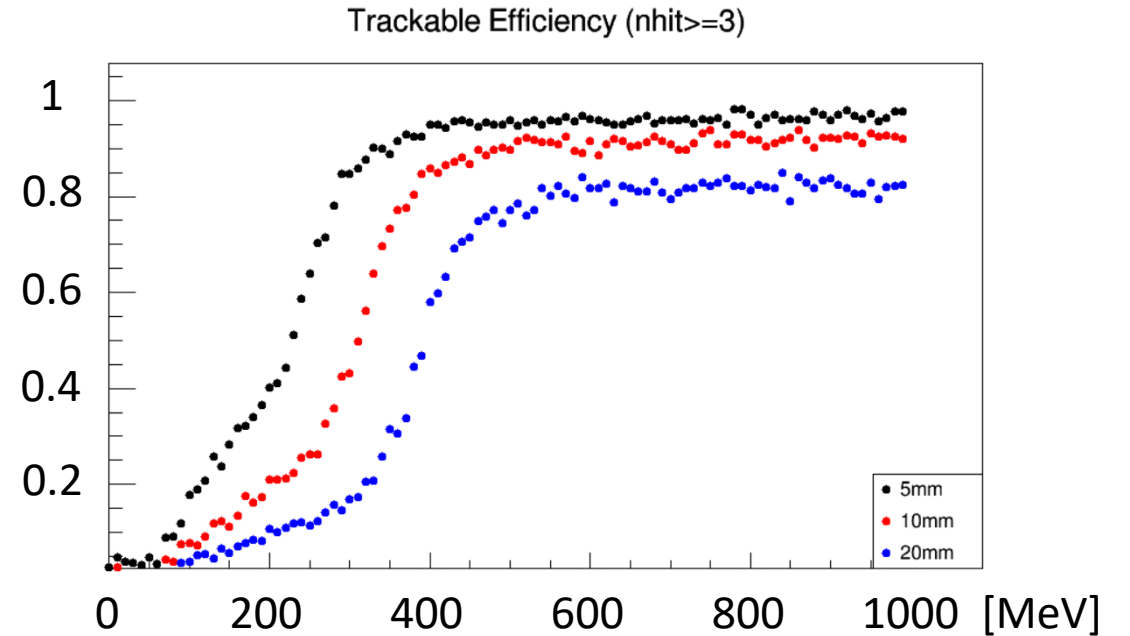
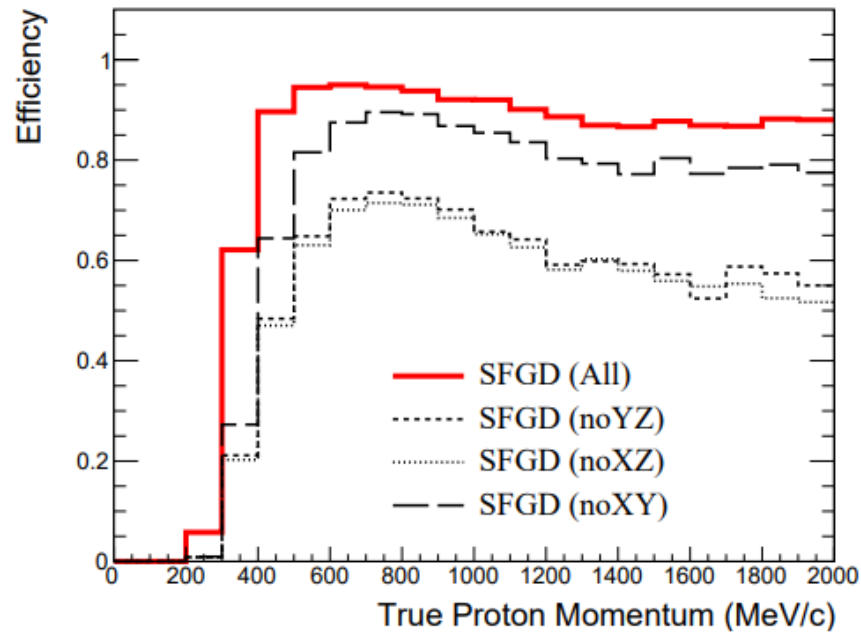


カバースペーサーで保護した後

SFGDとの性能比較

- 飛跡再構成効率

Simulation on GENIE, simulator of neutrino interaction with nucleus



運動量[MeV/c]	SFGD 飛跡再構成効率	SciFi Tracker (10mm間隔) 飛跡再構成効率
[200, 300]	5%	20~40%
[300, 400]	65%	40~80%

短い飛跡の再構成

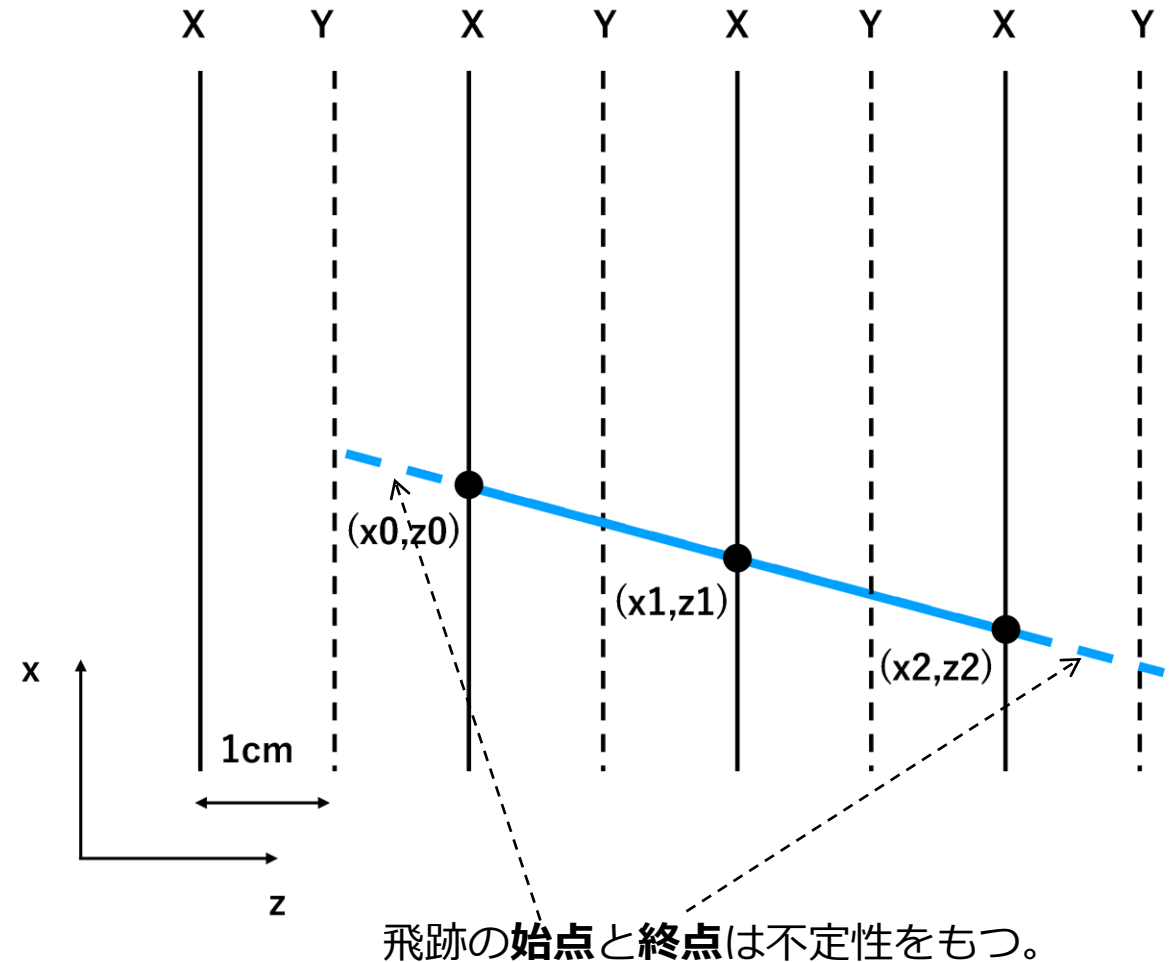
- 4層のレイヤーを通過するとXZ-viewとYZ-viewにおける飛跡の射影

$$x = az + b$$

$$y = cz + d$$

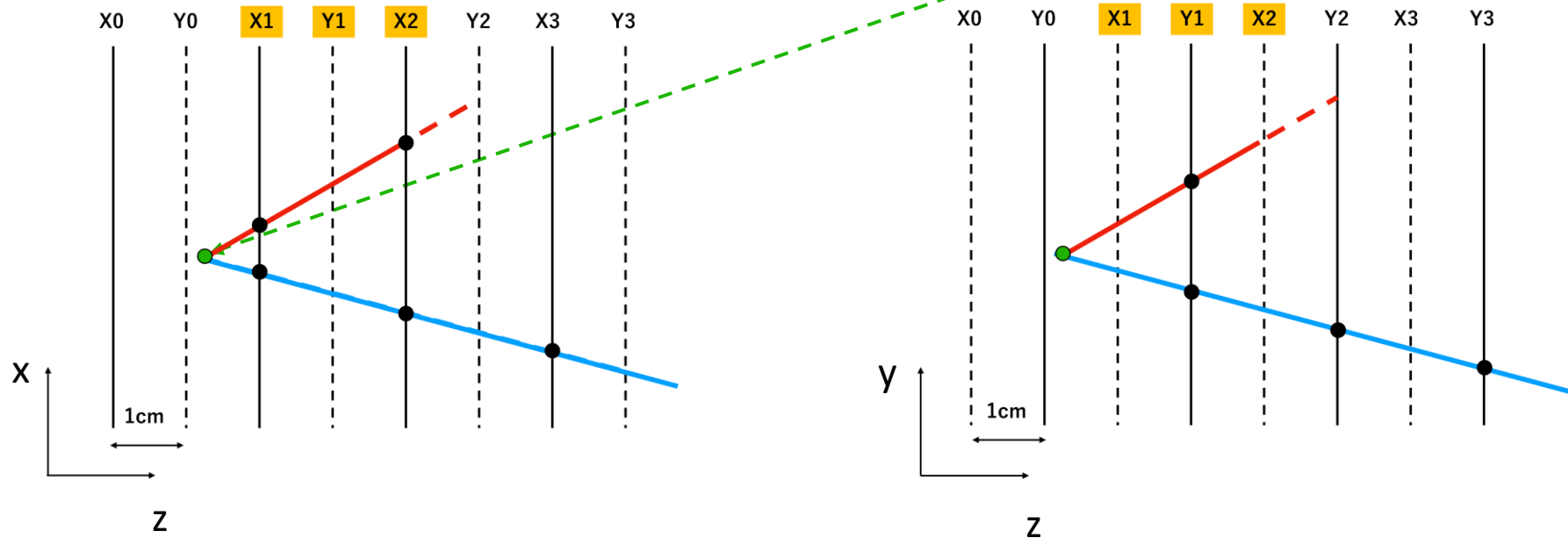
が決まり、粒子の飛跡を決定できる。

- ただし、ニュートリノの荷電カレント反応では、陽子とレプトンがある1点から生成される。
 - ⇒2本（以上）の飛跡から反応点（始点）を決定できる。
 - 飛程の長いレプトンの飛跡情報を使用すると**飛程の短い陽子の飛跡再構成や検出**が可能。



3レイヤーの飛跡再構成

- XレイヤーとYレイヤーだけからなる場合を考える。
- 陽子が3枚のレイヤーを通過すると、一方のビューでは反応点が決まる。他方のビューではその反応点を利用してトラックを引ける。



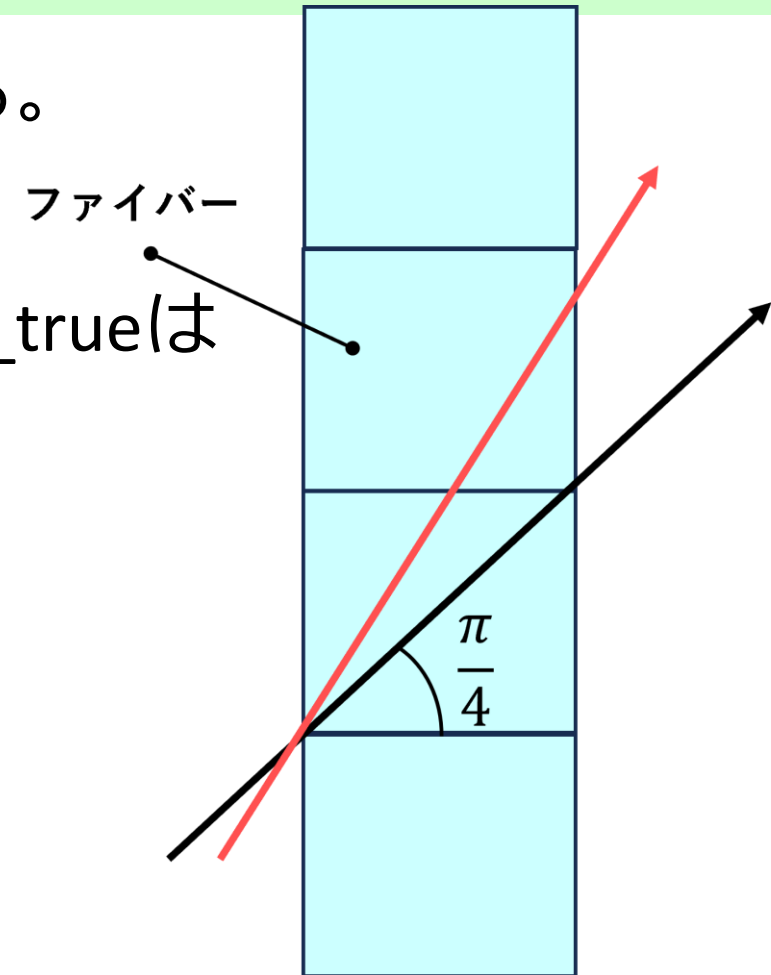
同一レイヤー内でnヒット

- 45°以上でもある程度は検出可能だと考えられる。

- 同一レイヤー内でnヒットあるとき、真の角度 θ_{true} は

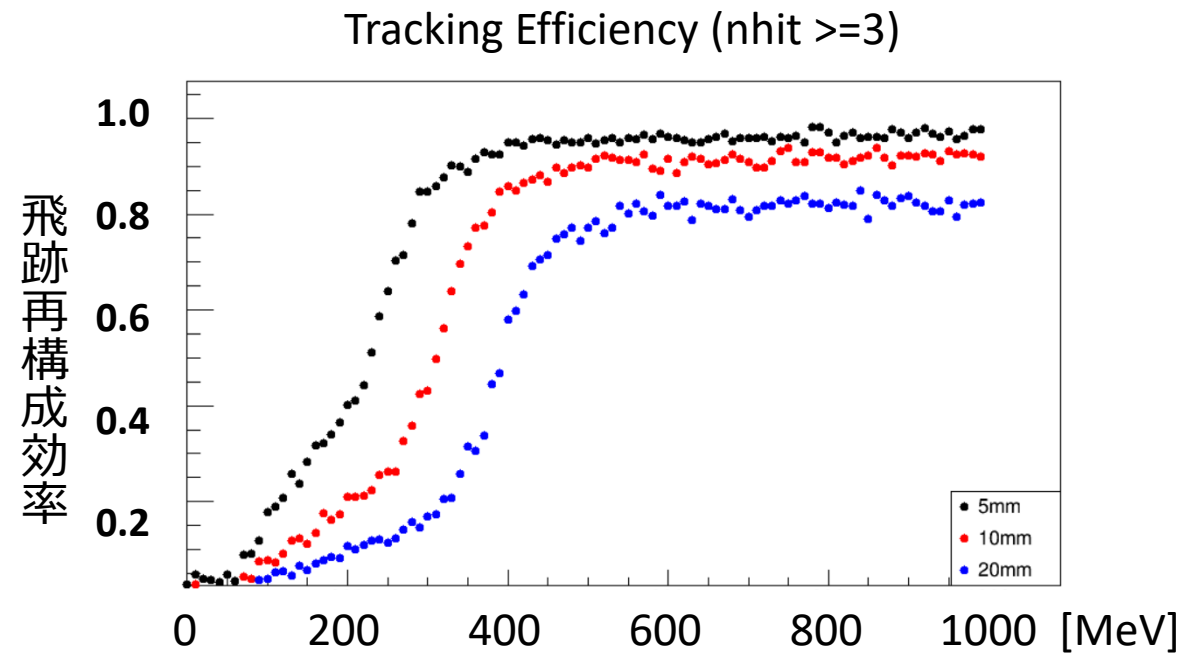
$$H(\text{nhit}-2) \cdot \arctan(\text{nhit}-2) < \theta_{\text{true}} < \arctan(\text{nhit})$$

と制限されるため、同一レイヤー内 $\text{nhit} > 2$ でも
飛程と運動量に制限をかけられる。



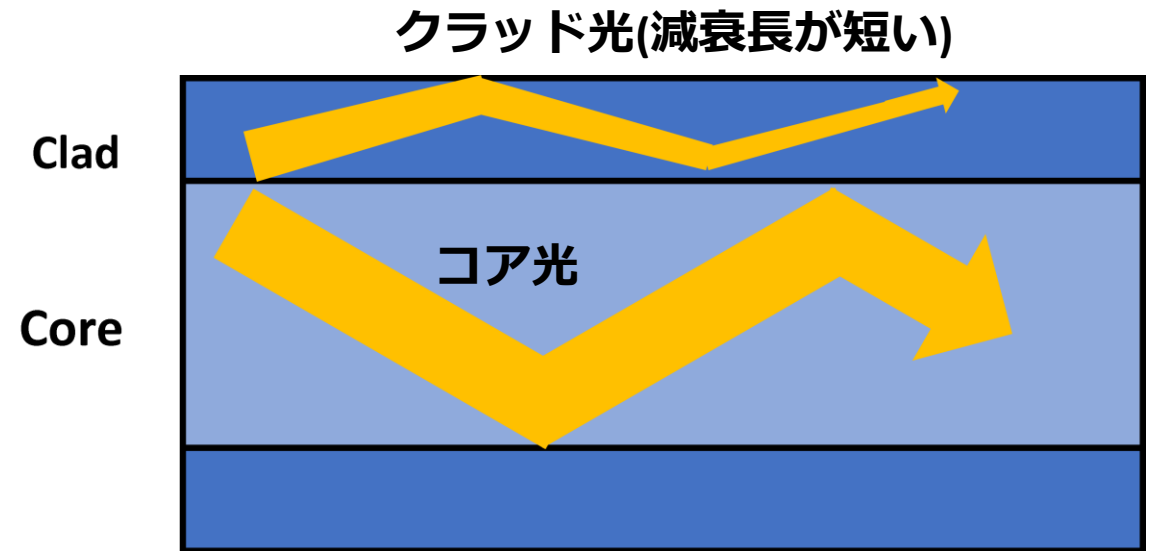
飛跡再構成効率と検出効率

- $(\text{飛跡再構成効率}) = (\text{3ヒット以上のイベント数}) / (\text{全イベント数})$
- 10mm間隔では運動量267MeV/c付近の陽子を約40%の効率で検出できる。
- 効率は200～400MeV/cの運動量領域では、2から3倍程度異なる。



光量測定：30cmファイバーでの測定

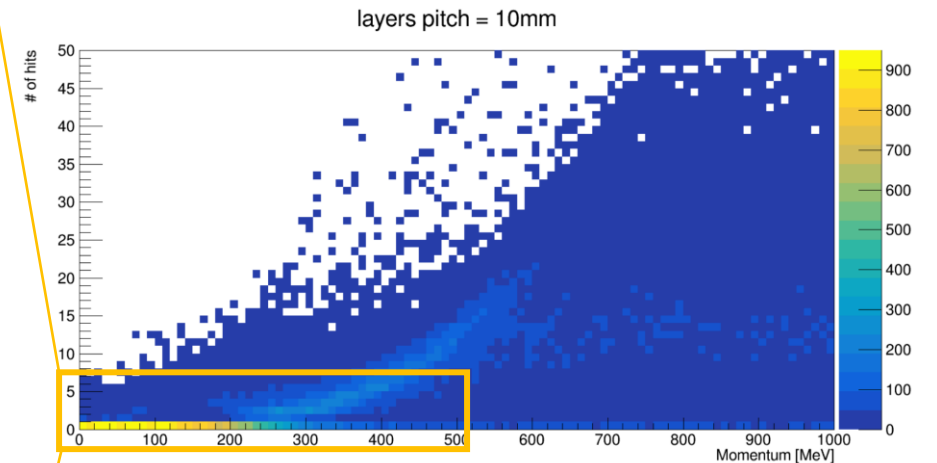
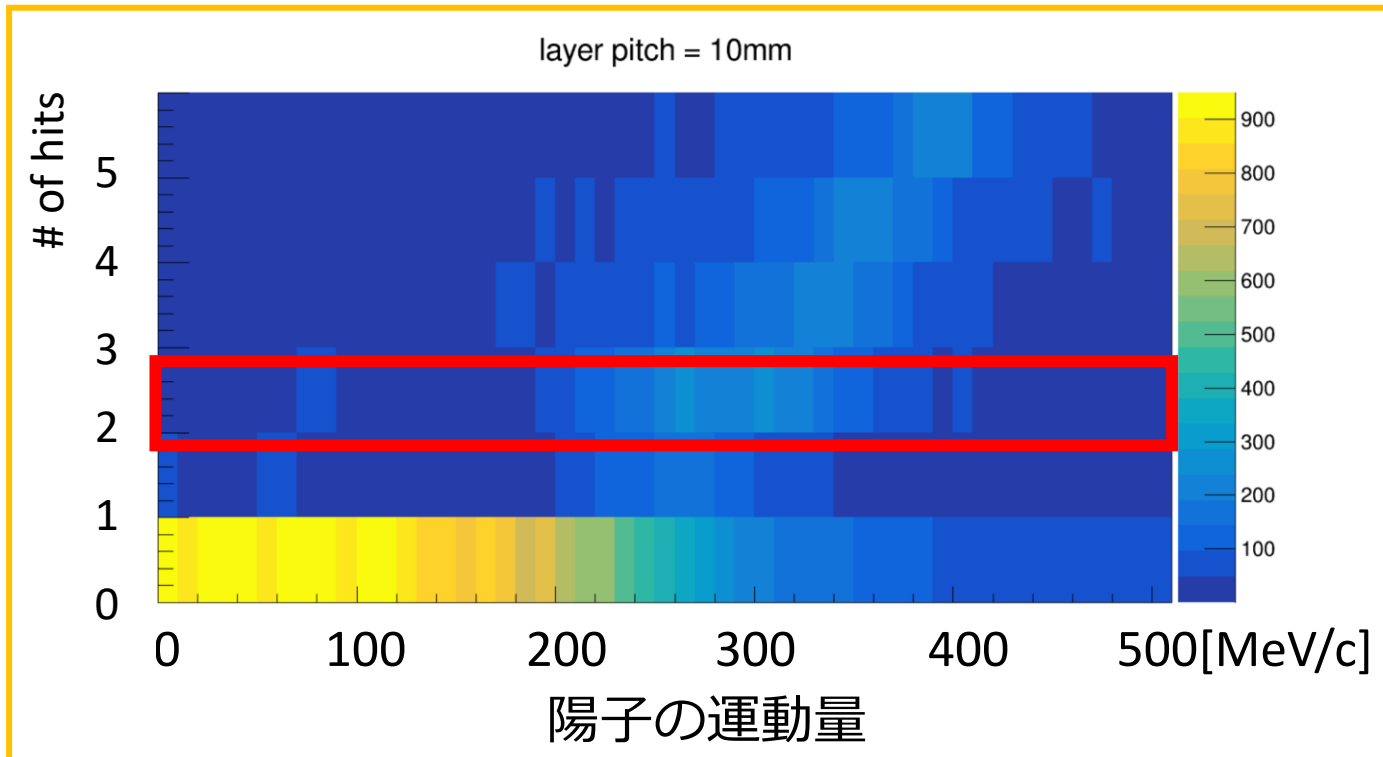
- ファイバを伝達する光にはクラッド光とコア光の2種類がある。
 - 2mファイバ測定に寄与するのはコア光
 - 30cmファイバでは測定にクラッド光も寄与するが、クラッド光の減衰長は短いので溶着で損失しても構わない。
- クラッド同士を溶着するため、クラッド光の損失が大きいと期待される。
- 30cmファイバを使用する測定では光量損失が5%以上でも問題ないと考えられる。



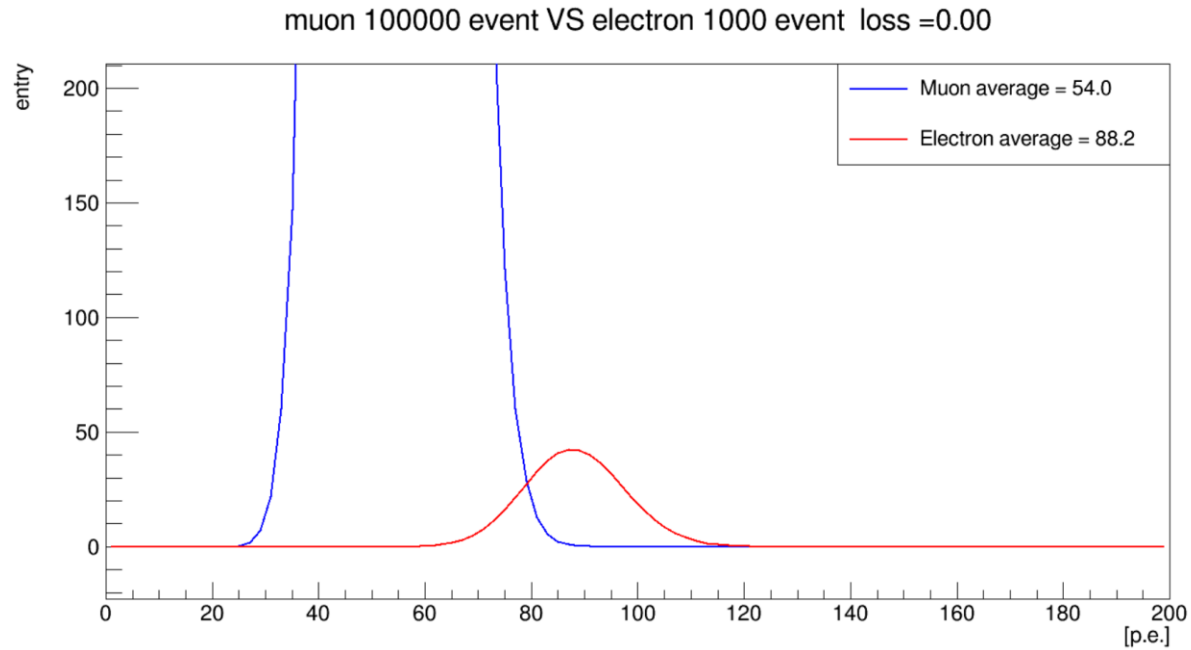
	2m	30cm
クラッド光の割合	0.13%	33%

拡大図

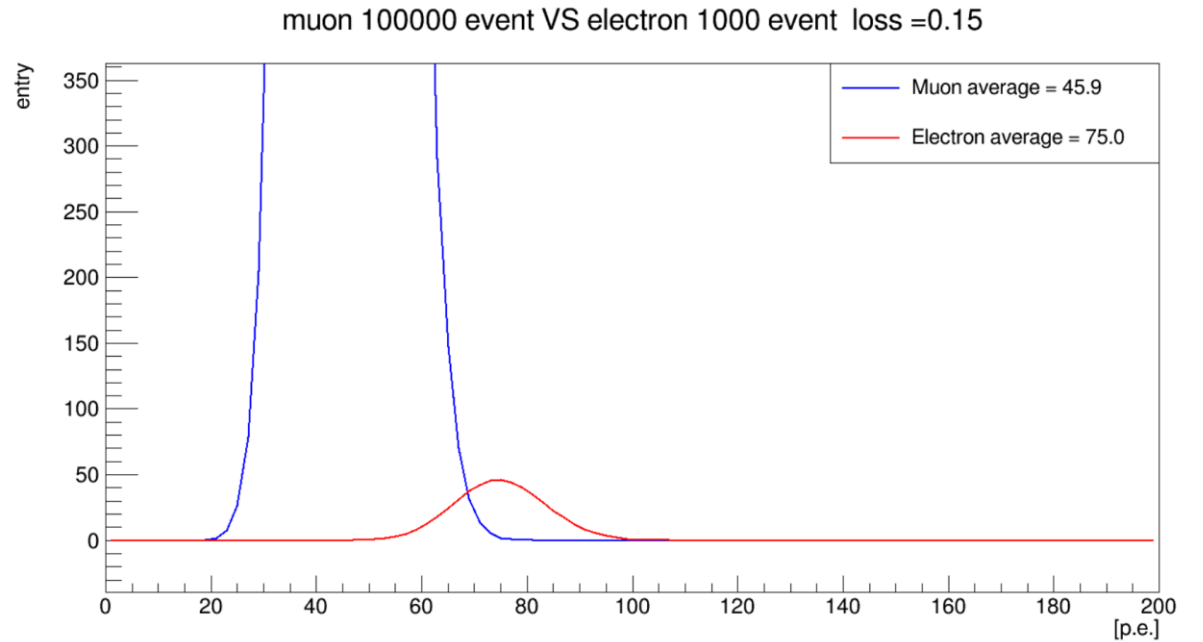
- 2レイヤー通過に相当する運動量の推定



2.5 σ の要求

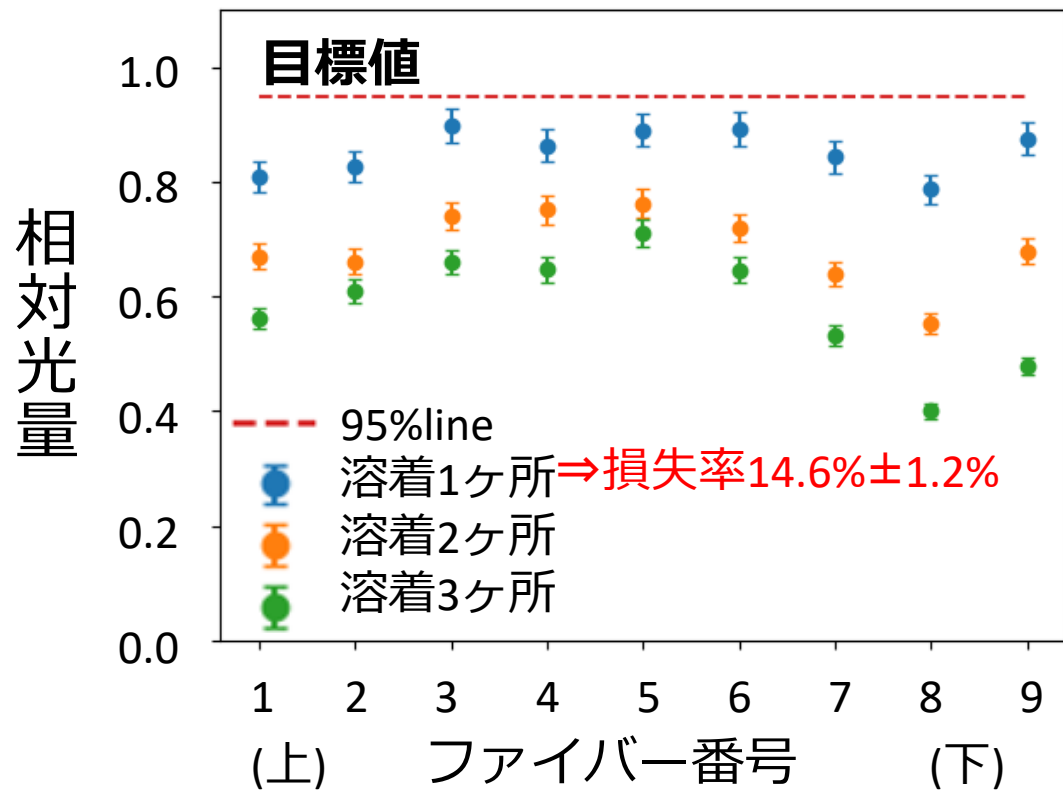


損失がない場合

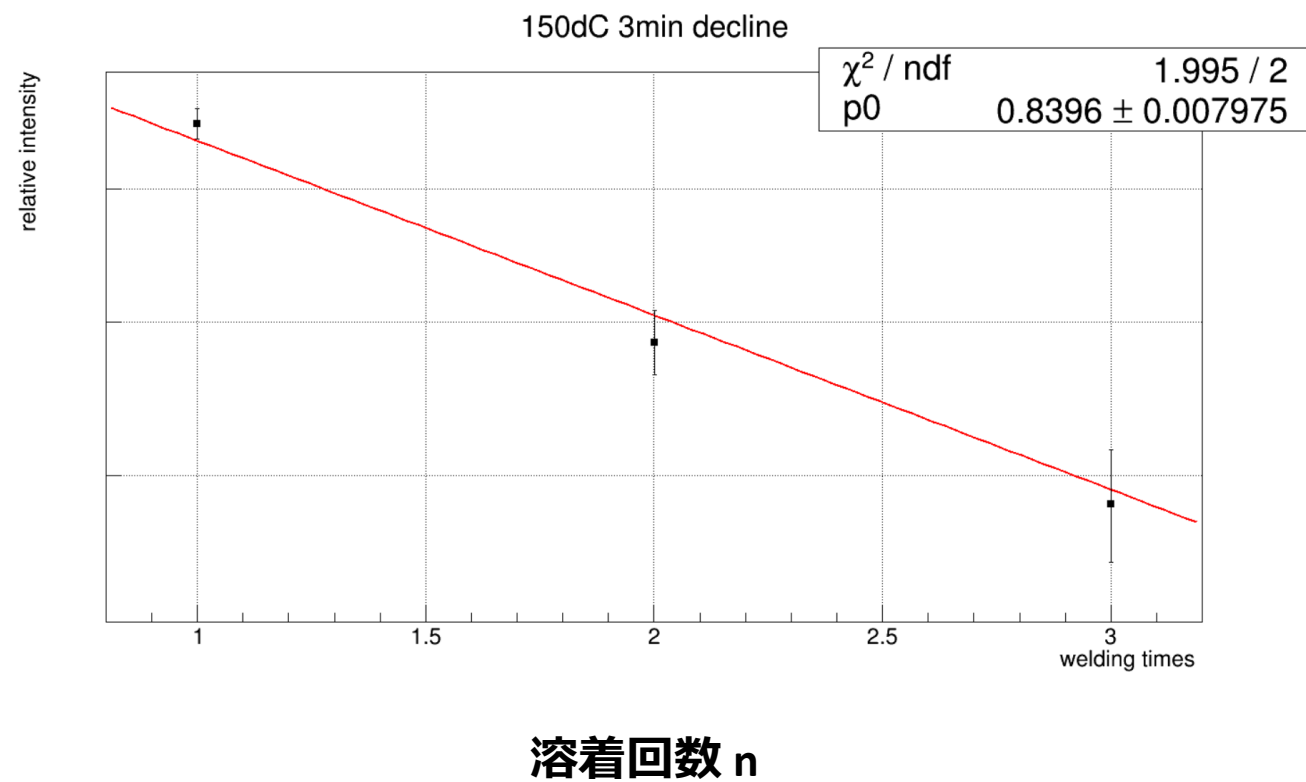


損失15%

150°C3分

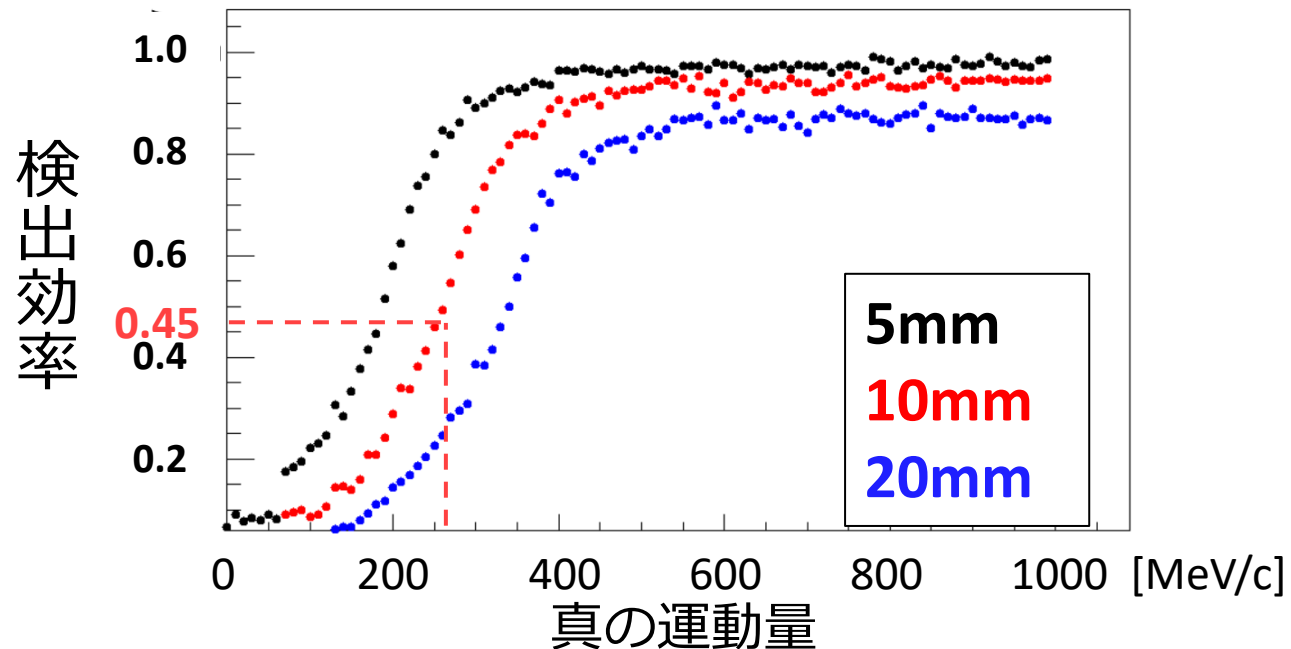


$$(1 - p_0)^n$$



陽子の検出効率

- (検出効率) = (2ヒット以上のイベント数) / (全イベント数)
- 効率は200~400 MeV/cの運動量領域では、2から3倍程度異なる。
 - ただし、同一レイヤー内で2ヒット以上のイベントも含んでいる（過大評価）。



Overestimation of detection efficiency

