

T2K実験新ニュートリノ検出器の開発及び製作と それを用いたニュートリノ反応の研究

高エネルギー物理学研究室

木河達也

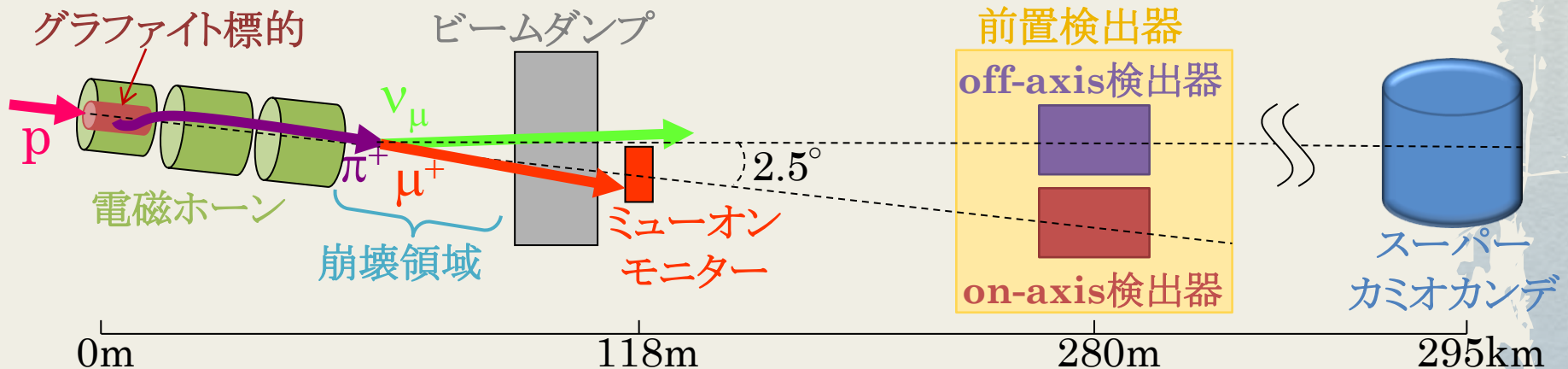
イントロダクション

T2K実験

- ◆ 長基線ニュートリノ振動実験
- ◆ J-PARCでミューニュートリノビームを生成
- ◆ 前置検出器とスーパーカミオカンデでニュートリノを検出

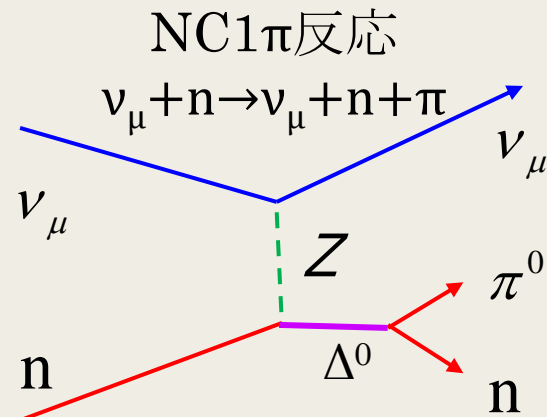
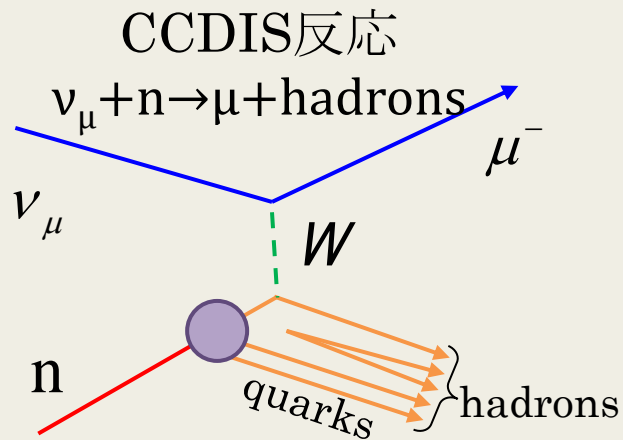
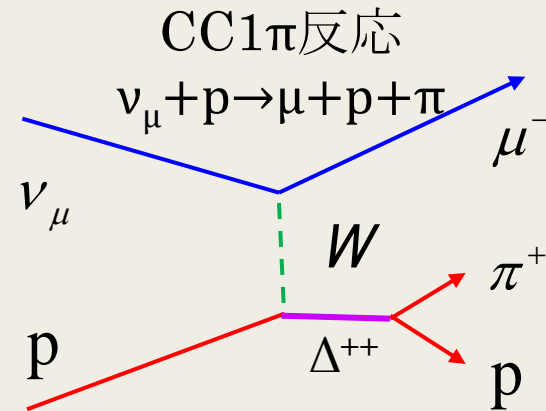
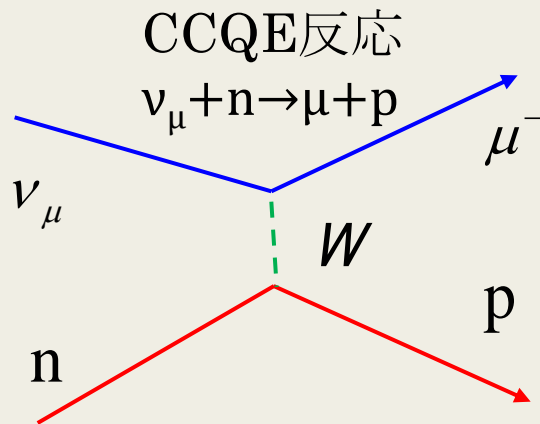
目的

- ◆ 世界初の電子ニュートリノ出現モードの発見 ($\rightarrow \theta_{13}$ の測定)
- ◆ ミューニュートリノ消失モードの精密測定 ($\rightarrow \theta_{23}, \Delta m_{23}^2$ の測定)



ニュートリノ反応の不定性

- ◆ ニュートリノ反応には様々なモードがあり、それぞれの反応断面積に15~30%の不定性がある→振動解析において系統誤差となる
- ◆ それぞれの反応断面積を測定することにより、不定性を抑制



新型前置ニュートリノ検出器の導入

目的

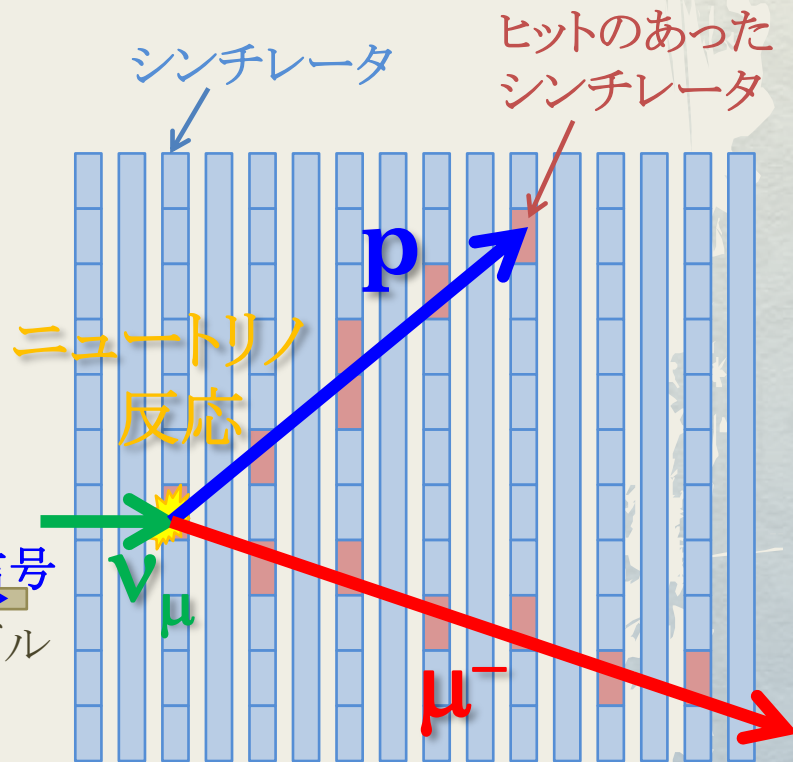
- ◆ 各反応モードの反応断面積の精密測定。

要請

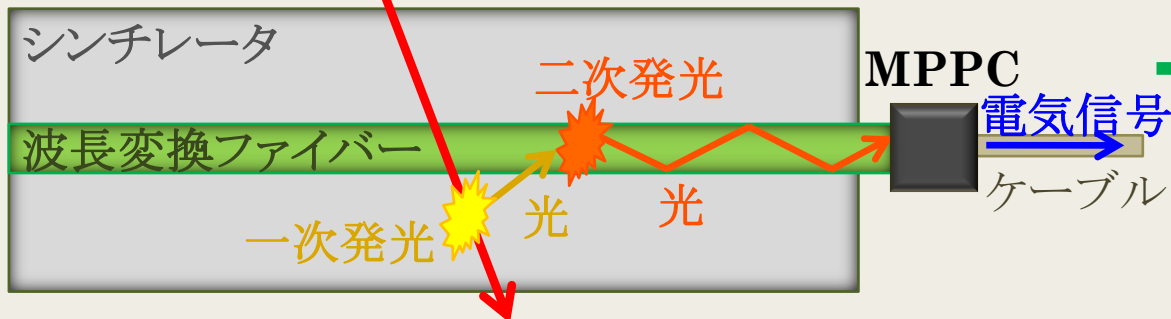
- ◆ ニュートリノ反応の終状態の全ての荷電粒子を高効率で検出し、ニュートリノ反応モードを識別すること

構造

- ◆ 細長いシンチレータを並べた飛跡検出器
→ 不感領域がない
- ◆ 波長変換ファイバー・MPPC読み出し
→ 十分な光量を得るため



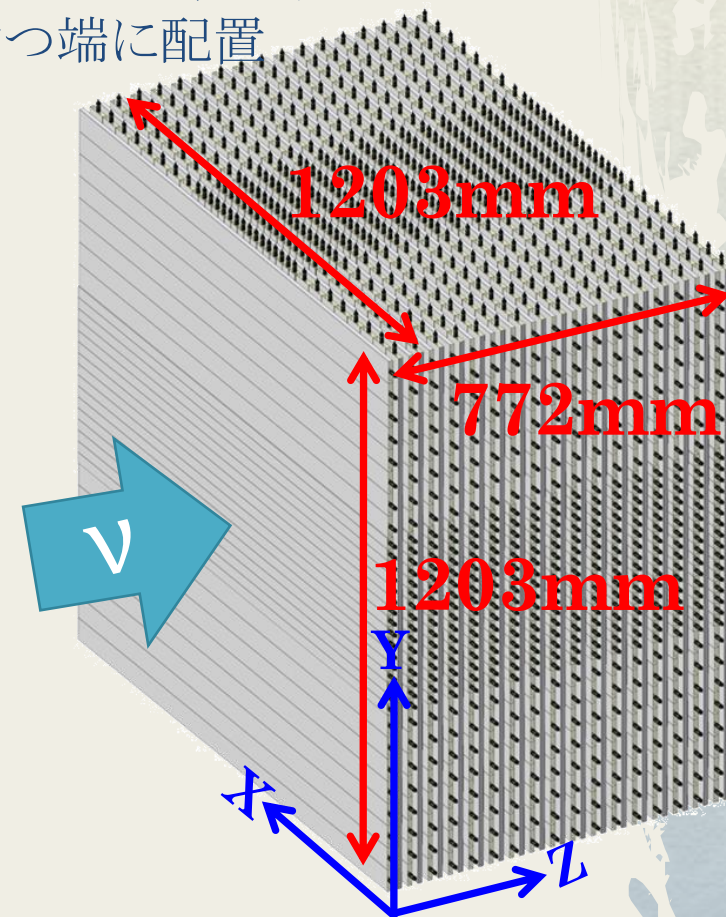
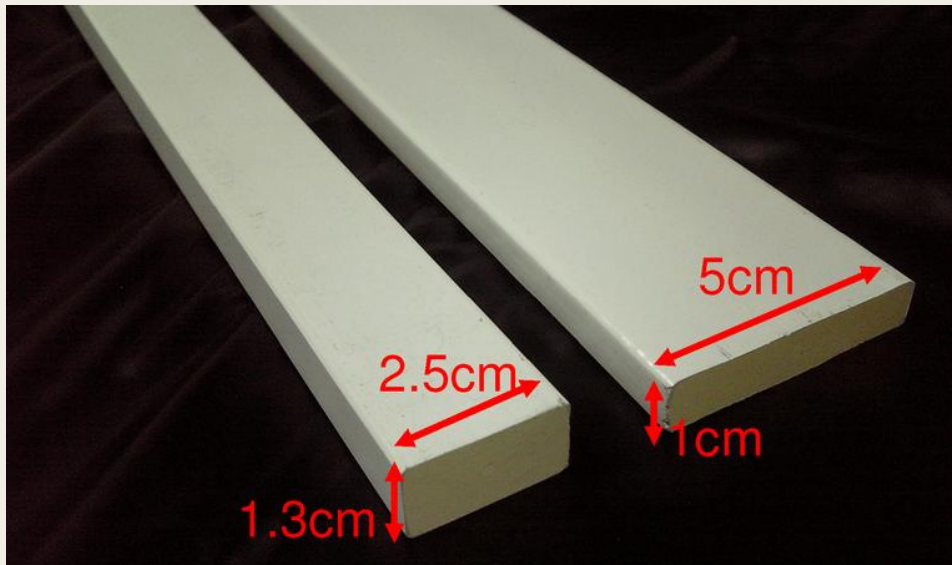
● 荷電粒子



デザインの決定

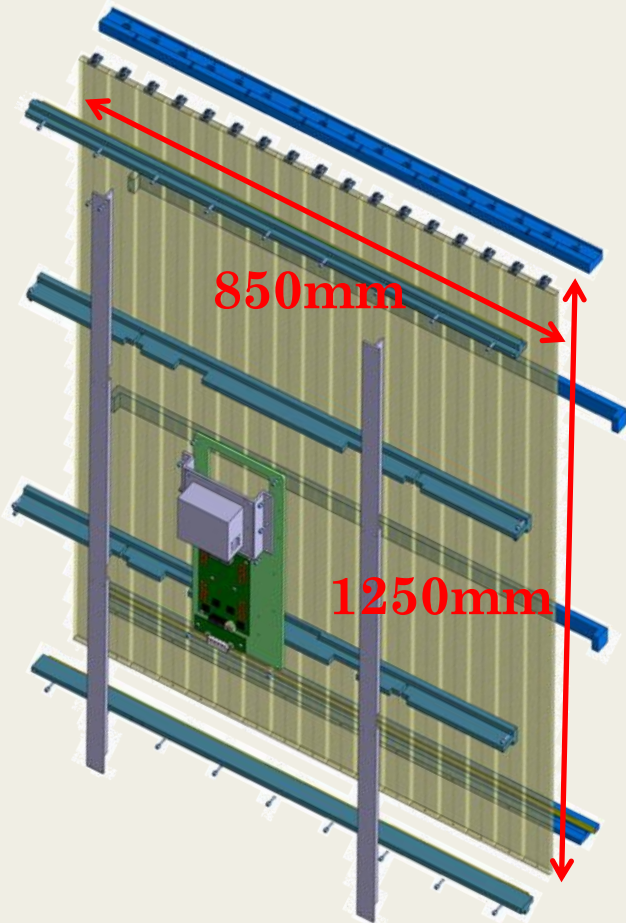
新型ニュートリノ検出器 Proton Module

- ◆ 36層のシンチレータ層(トラッキングプレーン)を縦向きと横向きに交互に配置
- ◆ 1層は $10 \times 50 \times 1203 \text{mm}^3$ のシンチレータ16本と $13 \times 25 \times 1203 \text{mm}^3$ のシンチレータ16本から構成
- ◆ $13 \times 25 \times 1203 \text{mm}^3$ のシンチレータ16本は中央に配置し、 $10 \times 50 \times 1203 \text{mm}^3$ のシンチレータは8本ずつ端に配置
(中央部で検出効率が最大となるため)
- ◆ 各層は23mmずつ間隔をあけて配置
(モンテカルロ・シミュレーションにより最適化)

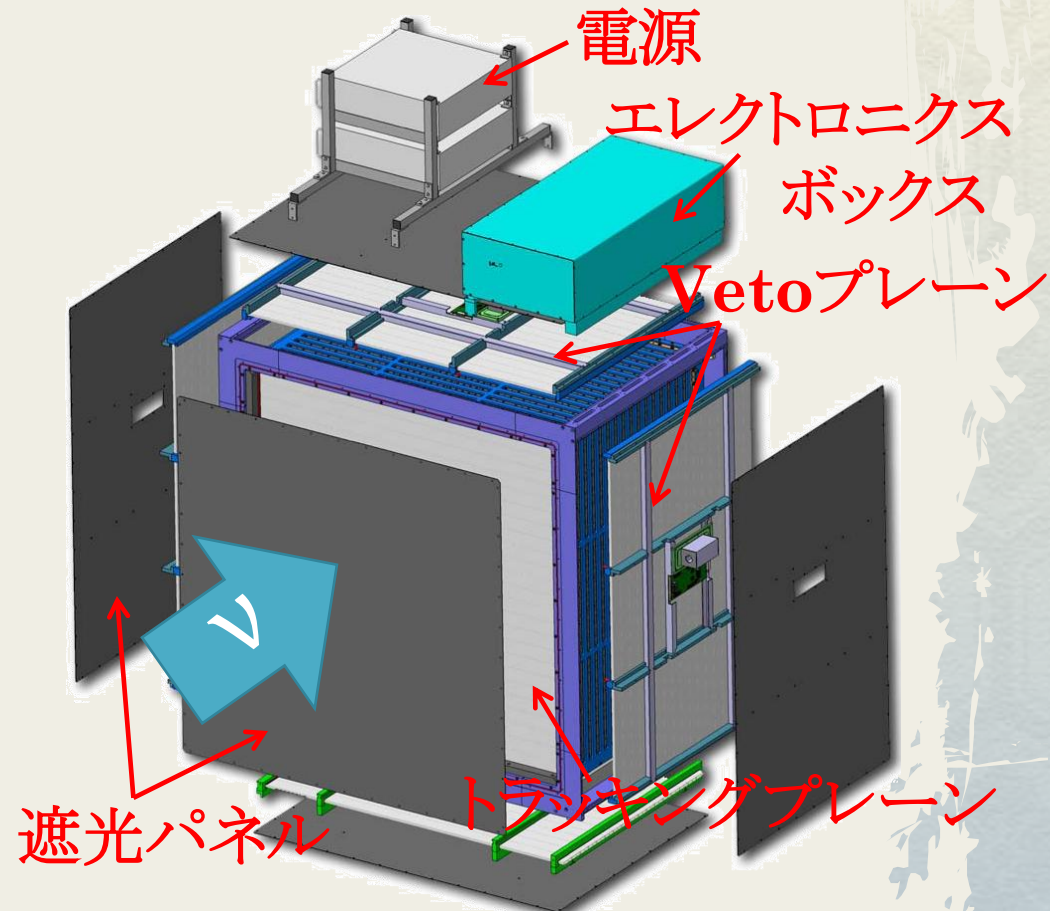


新型ニュートリノ検出器 Proton Module

- ◆ トラッキングプレーンの上下左右にはVetoプレーンを設置
 - ◆ 外部から入射する粒子を検出し、ニュートリノイベントと区別



Veto プレーン(プラスチックシンチレータ)

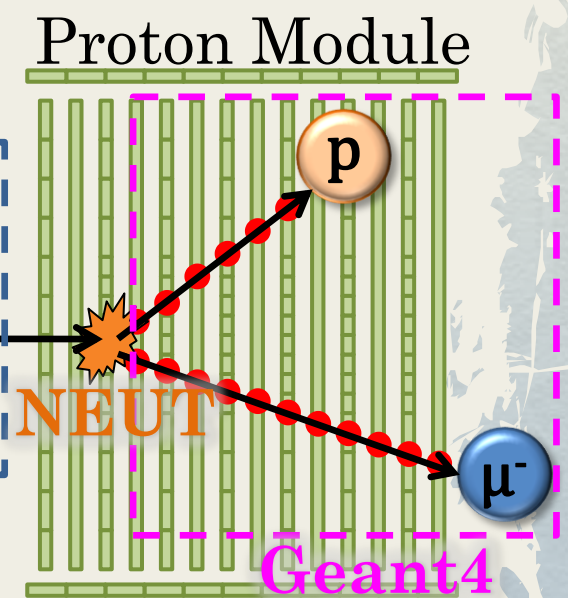
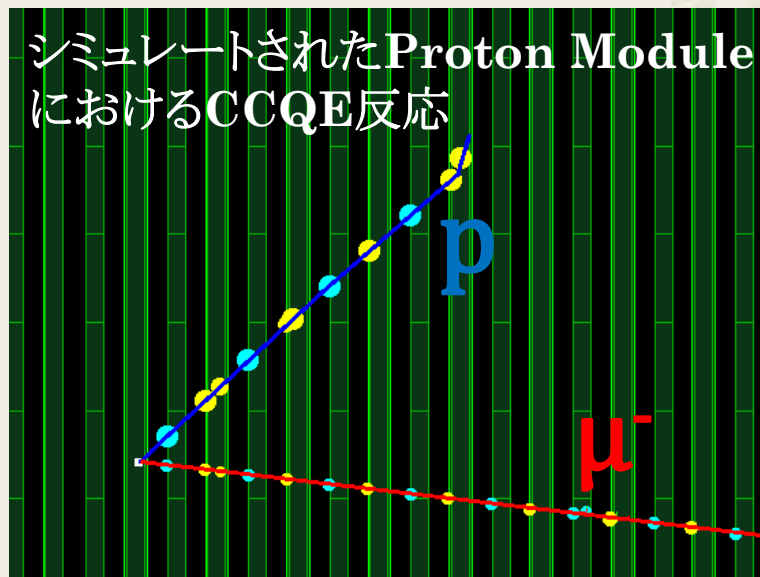
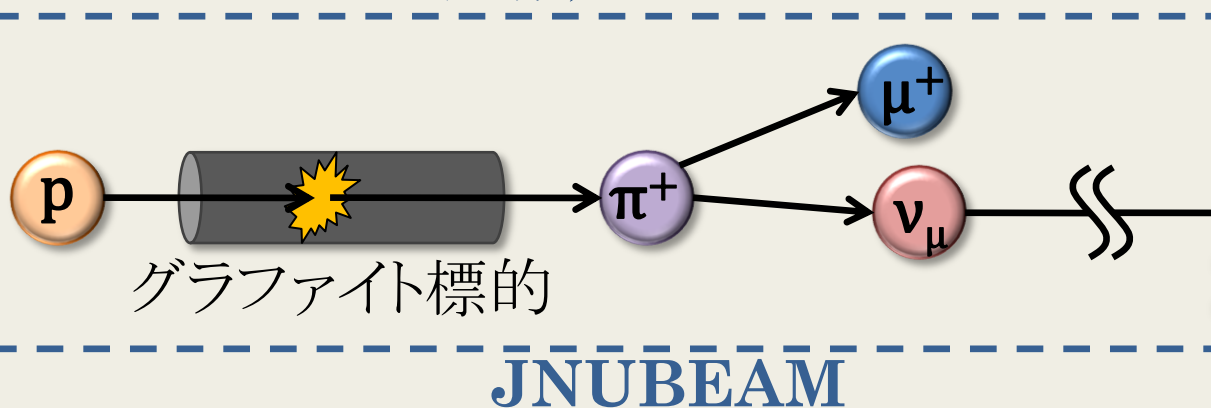


全体図

モンテカルロ・シミュレーション

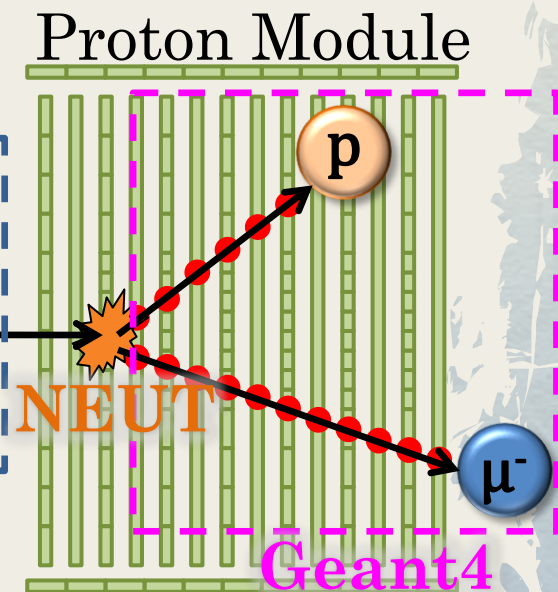
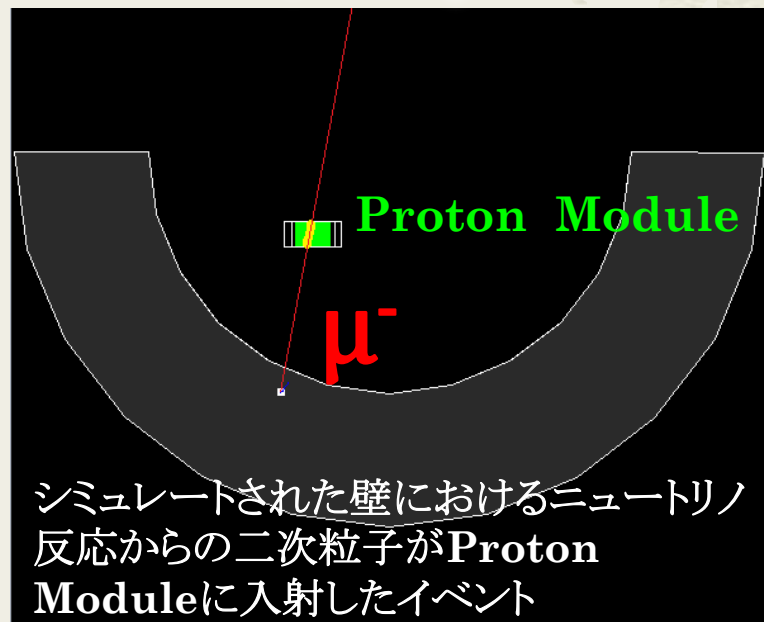
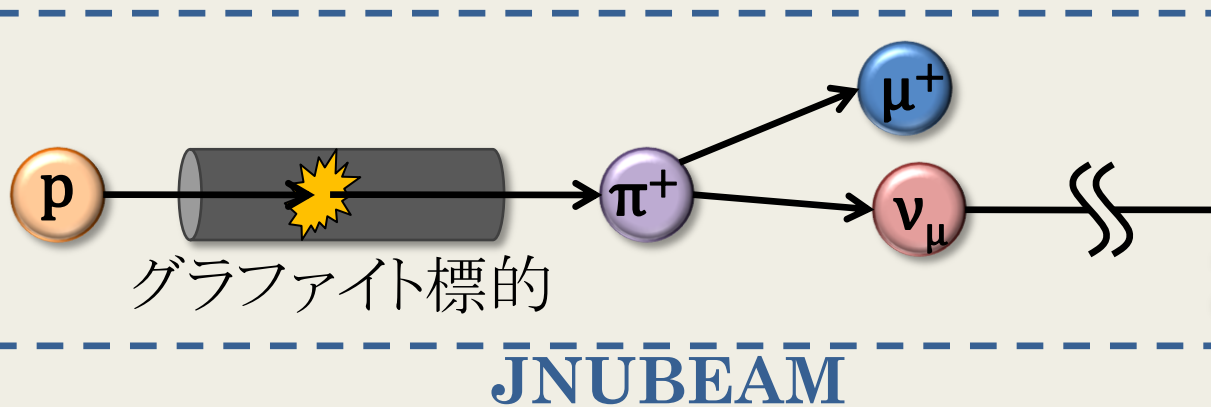
モンテカルロ・シミュレーション

- ◆ JNUBEAM
ニュートリノビームラインシミュレーション
- ◆ NEUT
ニュートリノ反応シミュレーション
- ◆ Geant4
検出器シミュレーション
- ◆ Proton Moduleにおけるニュートリノイベントと壁におけるニュートリノ反応からの二次粒子がProton Moduleに入射するイベントをシミュレート



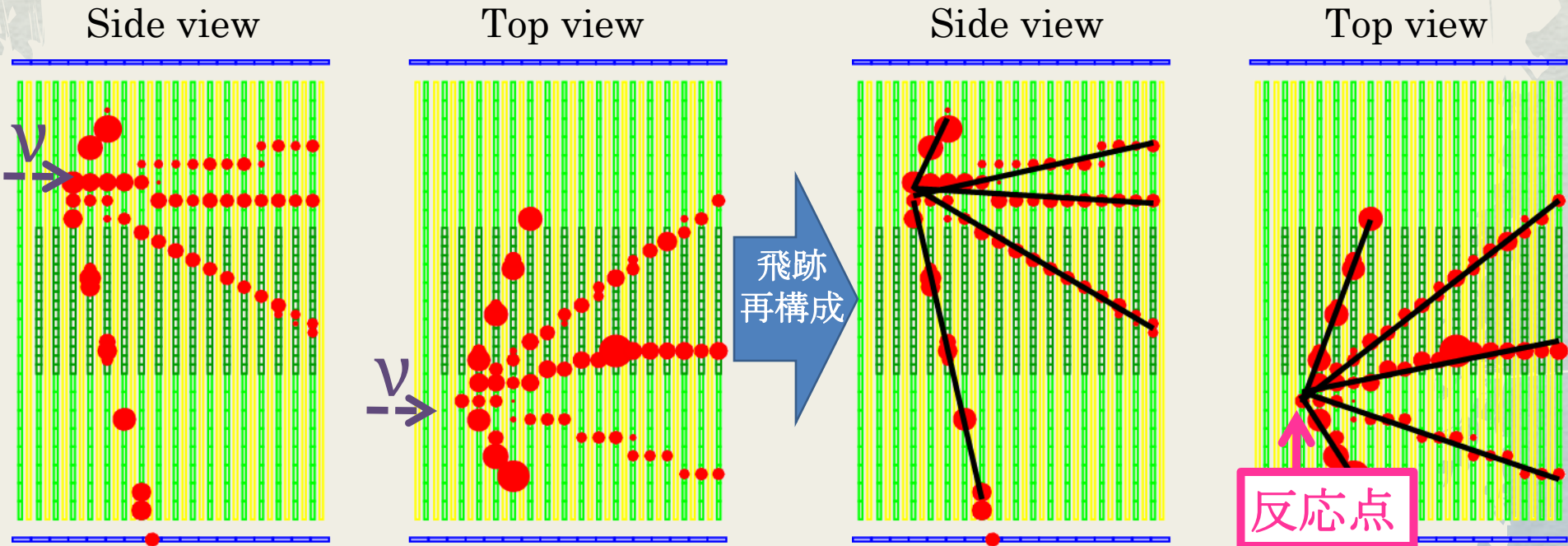
モンテカルロ・シミュレーション

- ◆ JNUBEAM
ニュートリノビームラインシミュレーション
- ◆ NEUT
ニュートリノ反応シミュレーション
- ◆ Geant4
検出器シミュレーション
- ◆ Proton Moduleにおけるニュートリノイベントと壁におけるニュートリノ反応からの二次粒子がProton Moduleに入射するイベントをシミュレート



飛跡の再構成

- ◆ セル・オートマトンとよばれる、離散的計算モデルを応用した、飛跡再構成方法を確立
- ◆ 複数の飛跡を再構成することが可能
- ◆ 飛程が短い粒子でも3層以上でヒットを起こせば、飛跡を再構成できる

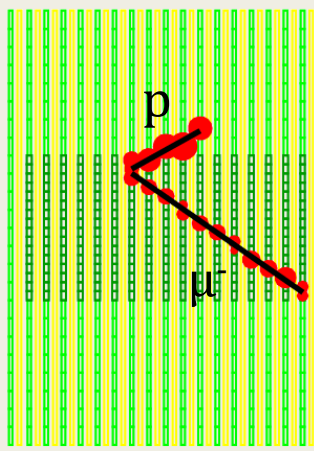


モンテカルロ・シミュレーション

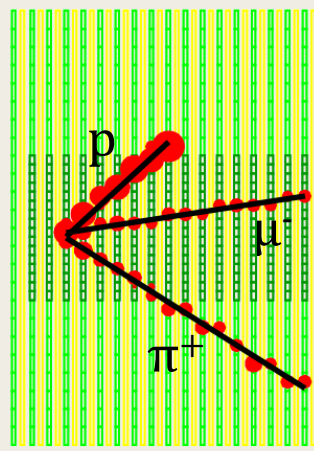
- ◆ ニュートリノ反応からの様々な粒子を検出することができる。
- ◆ 期待されるニュートリノイベント数は100kWでの一年のビーム運転で 8.58×10^4 イベント
- ◆ 壁におけるニュートリノ反応からの二次粒子がProton Moduleに入射するイベント数は100kWでの一年のビーム運転で 1.12×10^6 イベント

モード	イベント数
CCQE	2.32×10^4
CC1 π	2.29×10^4
CCDIS	4.29×10^3
CC other	1.20×10^4
NC elastic	9.44×10^3
NC1 π	9.42×10^3
NCDIS	2.50×10^3
NC other	3.43×10^3

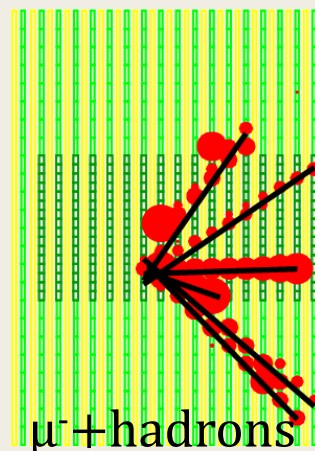
CCQE
($\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$)



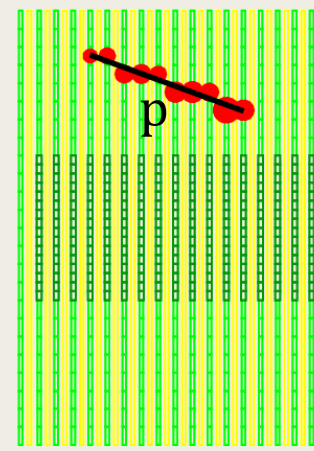
CC1 π^+
($\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + p + \pi^+$)



CC DIS
($\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \text{hadrons}$)



NC elastic
($\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + N$)



NC1 π^0
($\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + N + \pi^0$)



実機の製作および試験

Proton Moduleの製作

- ◆ 2010年4月から7月にかけて製作
- ◆ 2010年7月31日に完成



Proton Module全体(正面から)



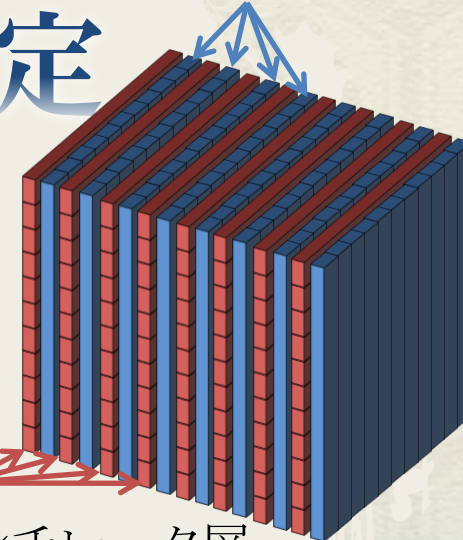
検出器上面の読み出し部



エレクトロニクスボックス内部

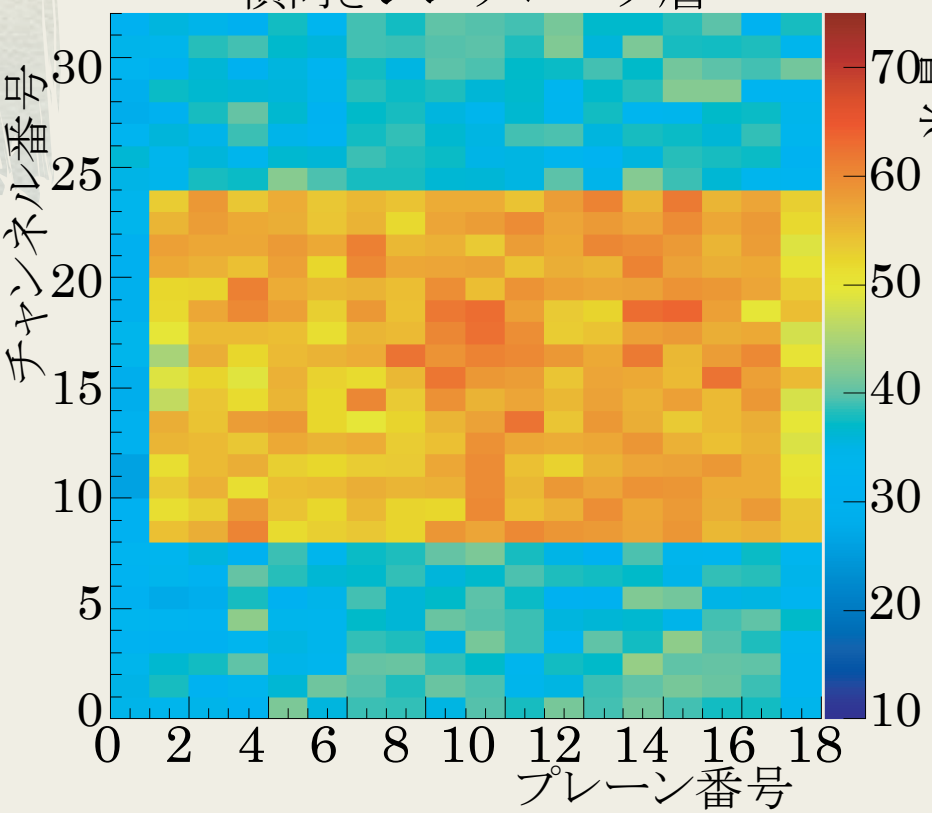
宇宙線を用いた光量測定

縦向きシンチレータ層

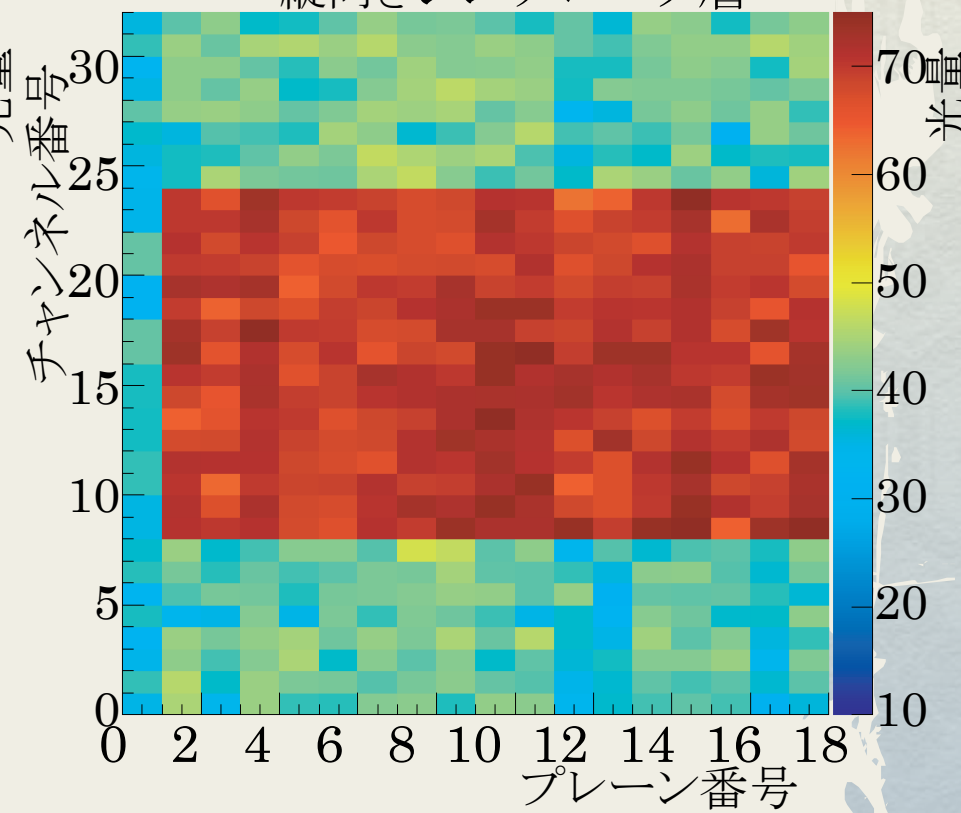


- ◆ すべてのチャンネルで十分な光量(>20p.e.)
→99%の検出効率を得るのに十分な光量

横向きシンチレータ層



縦向きシンチレータ層



ビームデータの取得および解析

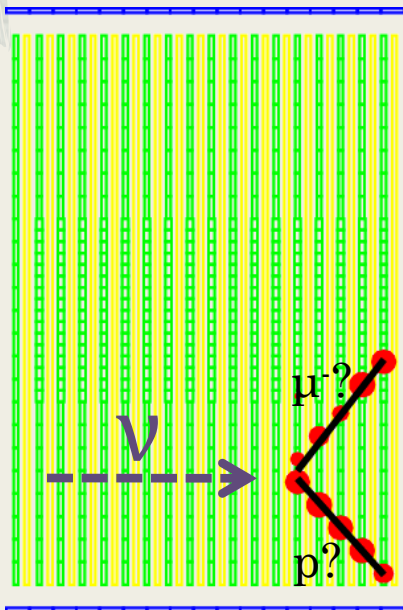
ビームデータの取得

- ◆ 11月16日からビームデータを取得開始
- ◆ 11月18日にニュートリノイベントを初観測
- ◆ 12月25日まで取得したデータを解析
 - ◆ ニュートリノイベントを選択し、モンテカルロ・シミュレーションと比較
 →Proton Moduleが期待される動作をしているか確認

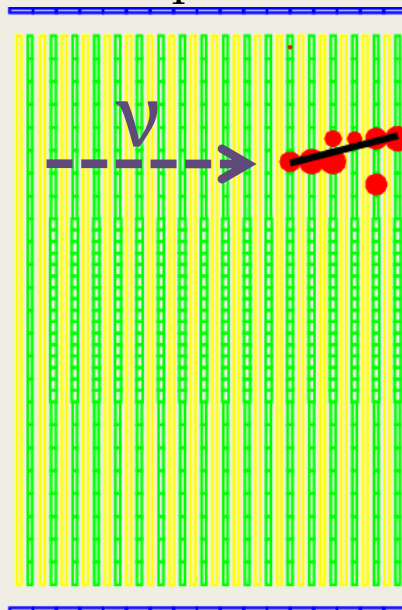
解析に用いたデータセット

期間	11/16~12/25
総スピル数	584121
照射された陽子数	4.06×10^{19}
取得したスピル数	584071
データ取得効率	99.99%

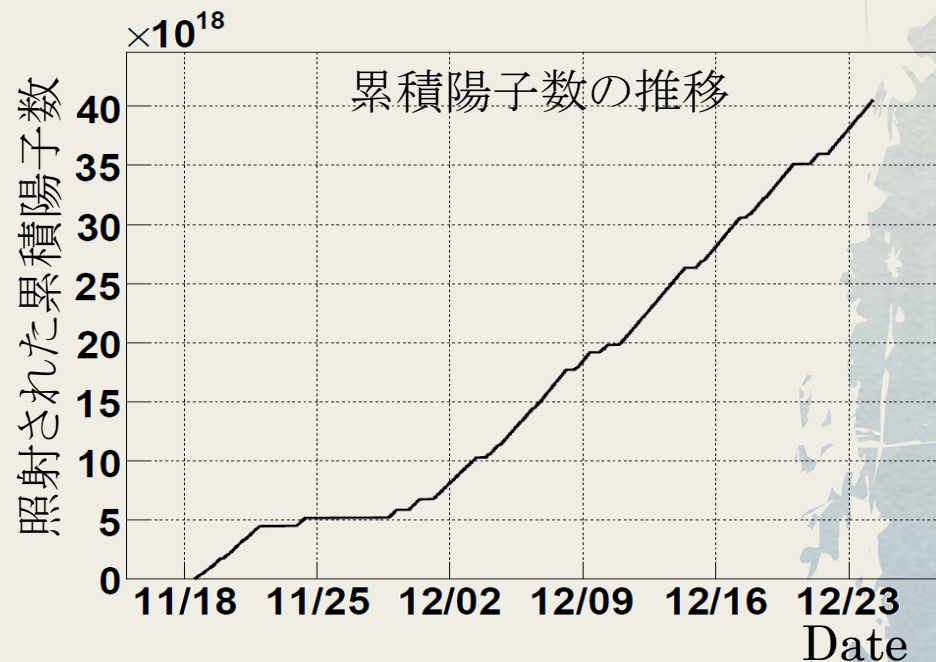
Side view



Top view

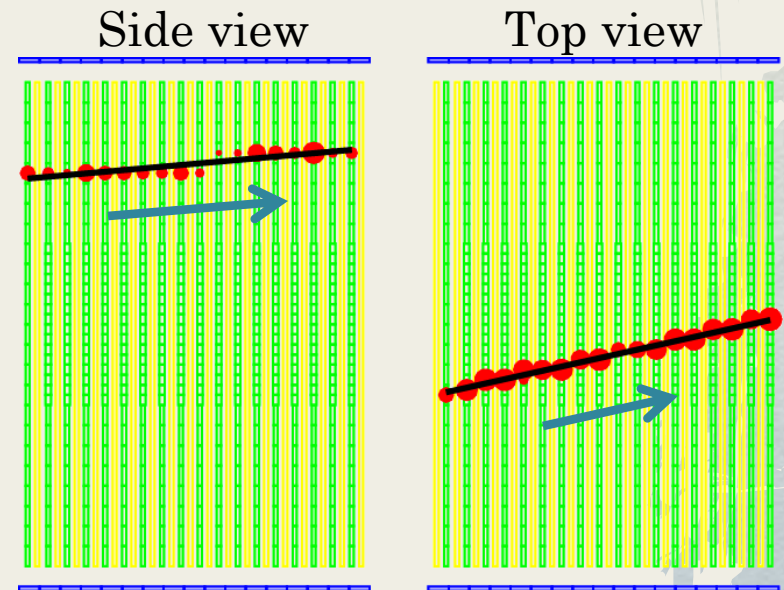
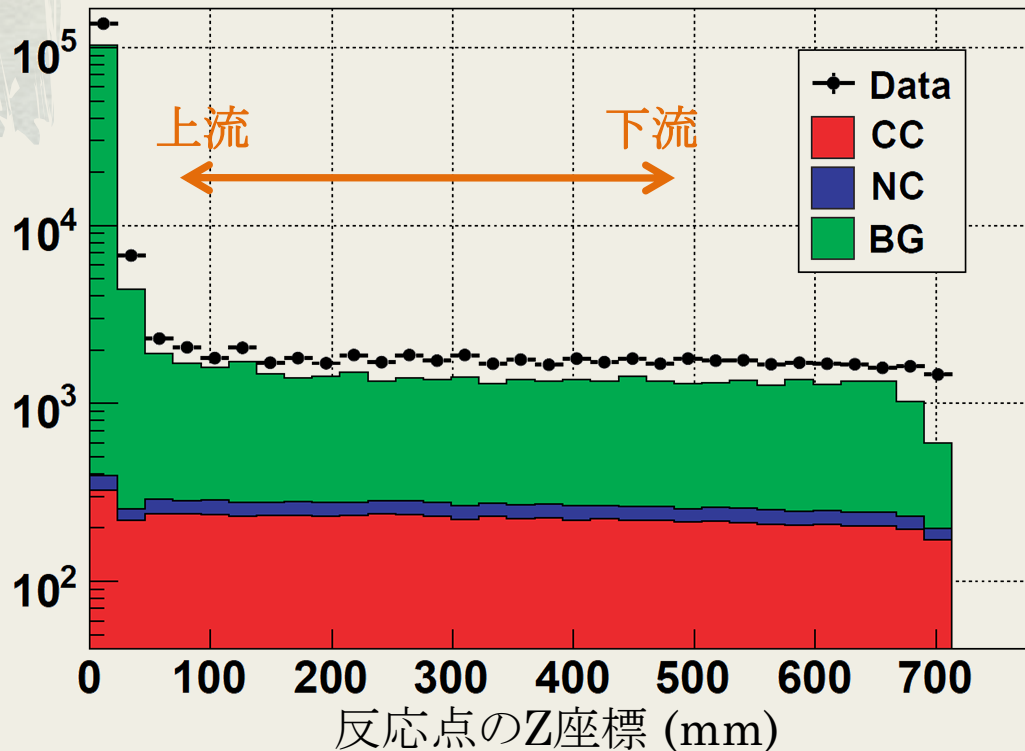


初ニュートリノイベントのイベントディスプレイ



バックグラウンドの規格化

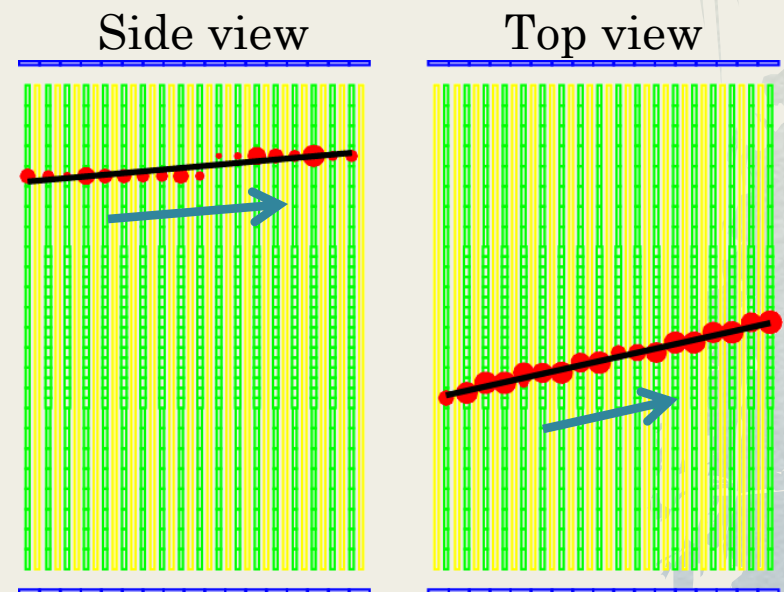
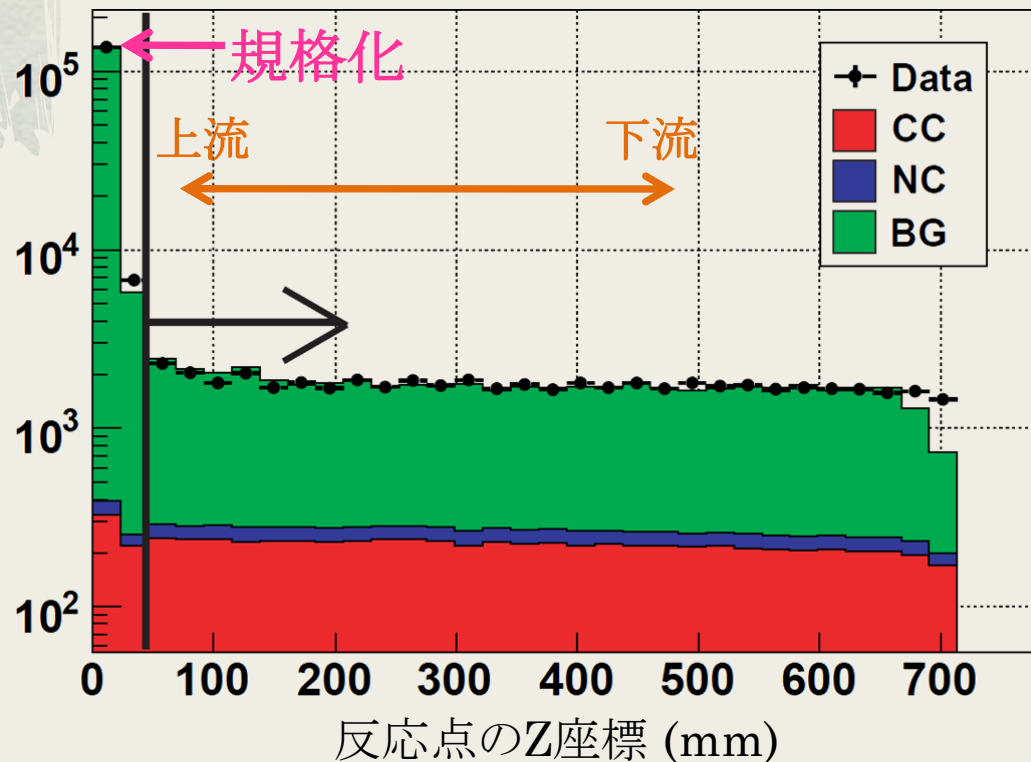
- ◆ 飛跡を再構成→飛跡が再構成されるイベントを選択
- ◆ 飛跡が再構成されるイベントの大半が壁で起きたニュートリノ反応からの二次粒子がProton Moduleに入射したイベント
- ◆ イベント数がモンテカルロシミュレーションの見積もりより多い
→バックグラウンドを規格化(1.34倍)



排除されるイベントの例

バックグラウンドの規格化

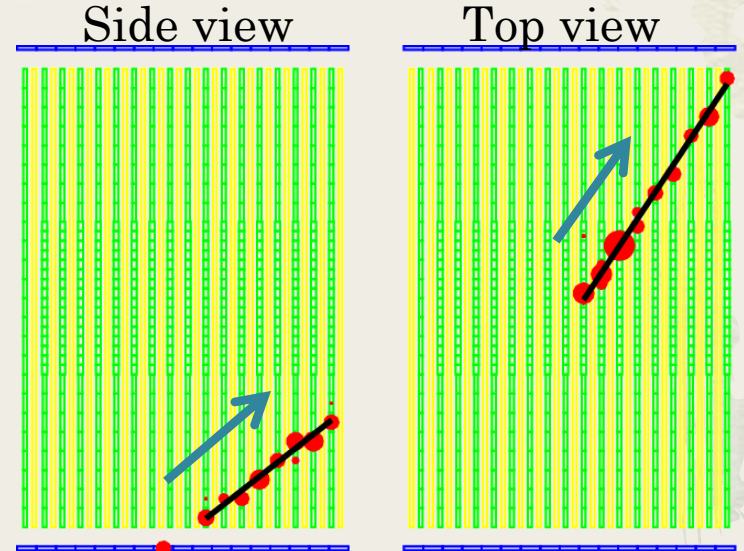
- ◆ 飛跡を再構成→飛跡が再構成されるイベントを選択
- ◆ 飛跡が再構成されるイベントの大半が壁で起きたニュートリノ反応からの二次粒子がProton Moduleに入射したイベント
- ◆ イベント数がモンテカルロシミュレーションの見積もりより多い
→バックグラウンドを規格化(1.34倍)



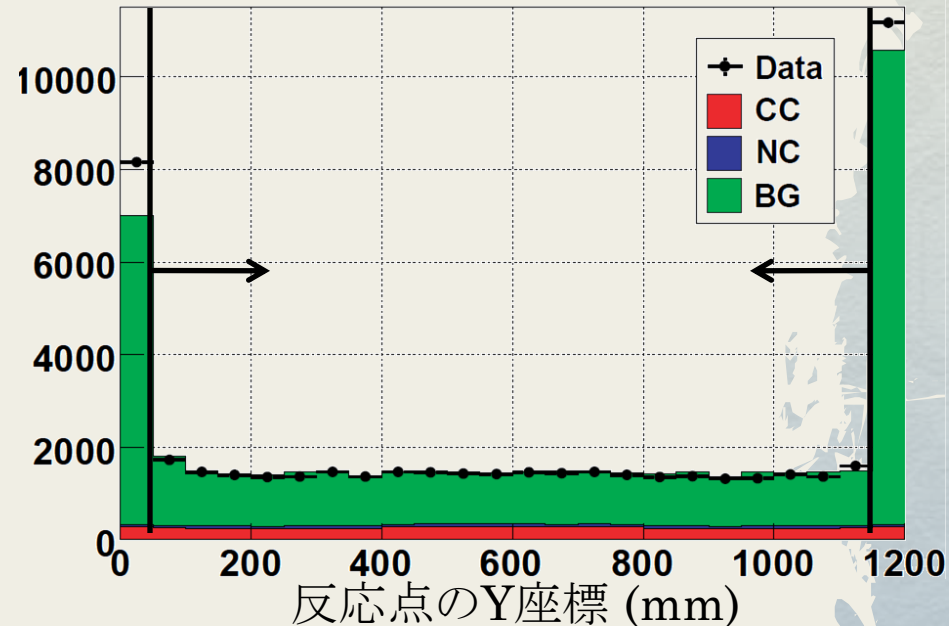
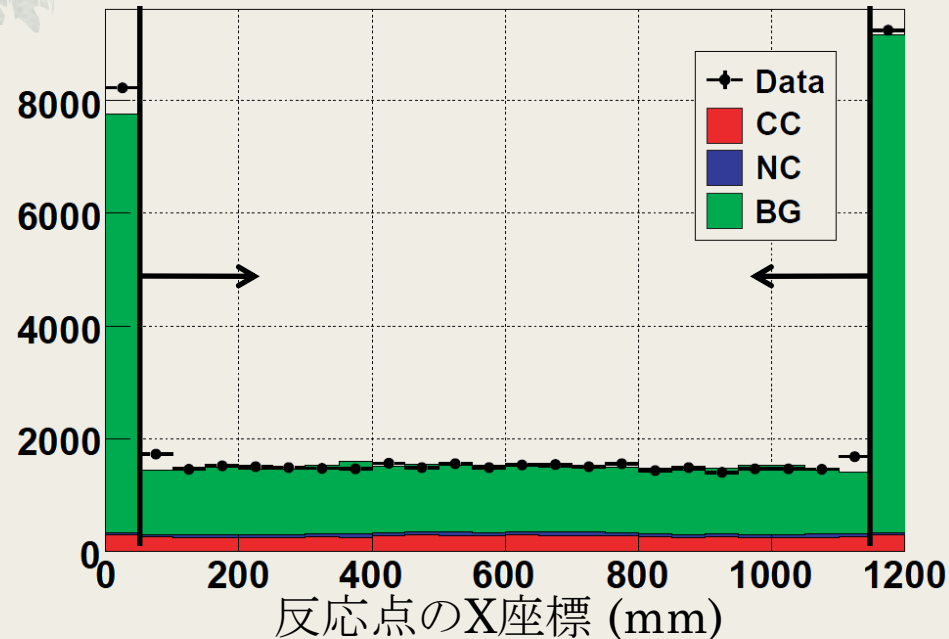
排除されるイベントの例

イベント選択1

- ◆ 再構成された飛跡の上流の延長線上のVetoプレーンがヒットしているイベントを排除
(側面から入射する荷電粒子によるイベントを排除)

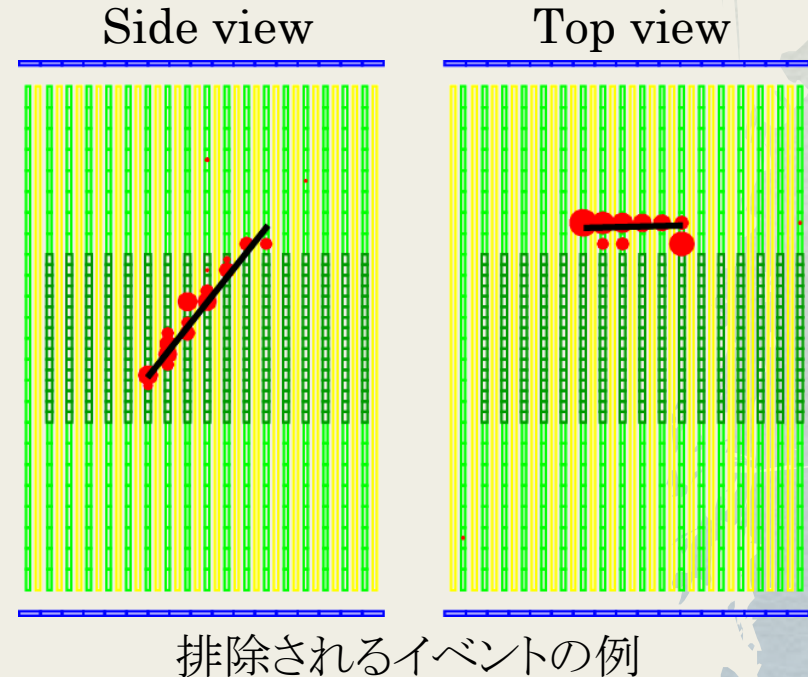
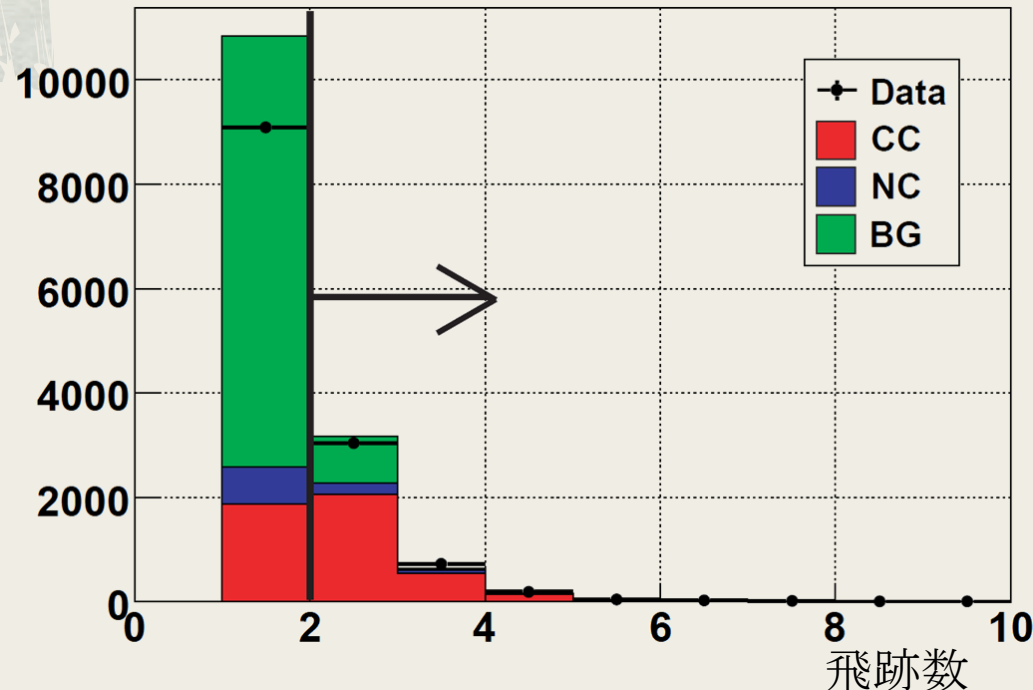


排除されるイベントの例



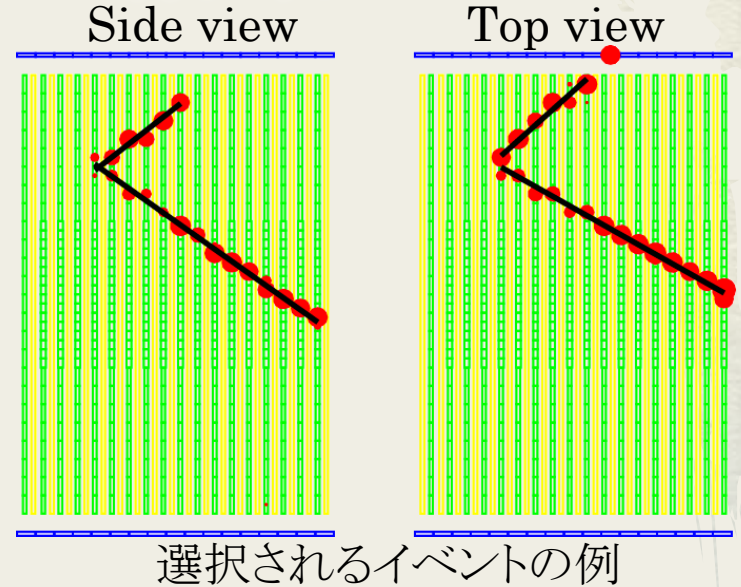
イベント選択2

- ◆ これまでのカットで外部から入射する荷電粒子によるイベントは十分排除できた。
- ◆ 外部から入射する中性粒子(中性子、 γ)が内部で荷電粒子を叩き出すイベントが排除できない。
- ◆ 再構成された飛跡数が1本のイベントを排除



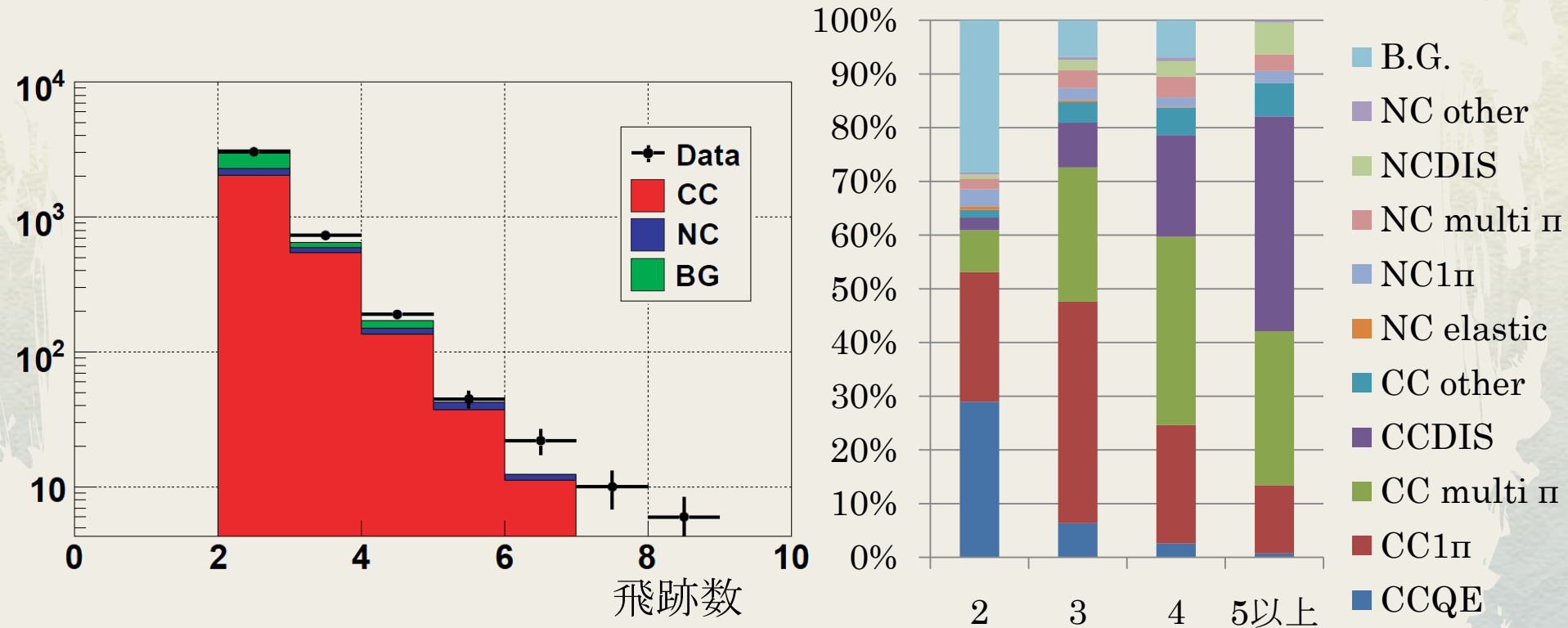
イベント選択の結果

- ◆ 最終的なニュートリノイベント選択効率は30.2%
- ◆ 最終的なバックグラウンド混入率は23.8%
- ◆ 最終的に選択されたイベント数はデータで4042、モンテカルロ・シミュレーションで4045でありほぼ一致



	測定データ	モンテカルロ・シミュレーション				
		ニュートリノイベント	バックグラウンド	合計	ニュートリノイベント選択効率	バックグラウンド混入率
飛跡の再構成	194197	8330	186442	194772	81.7%	95.7%
最上流のカット	50835	7670	42623	50293	75.2%	85.2%
Vetoプレーンのカット	29594	7152	23820	30972	70.1%	76.9%
端チャンネルのカット	13120	5652	9224	14876	55.4%	62.0%
飛跡数によるカット	4042	3083	962	4045	30.2%	23.8%

飛跡数分布



- ◆ データとモンテカルロ・シミュレーションがよく合っている。
- ◆ Proton Moduleは正常に期待されたとおりの動作をしている。
- ◆ 粒子識別方法を確立した上で、反応モードの識別を行う

まとめ

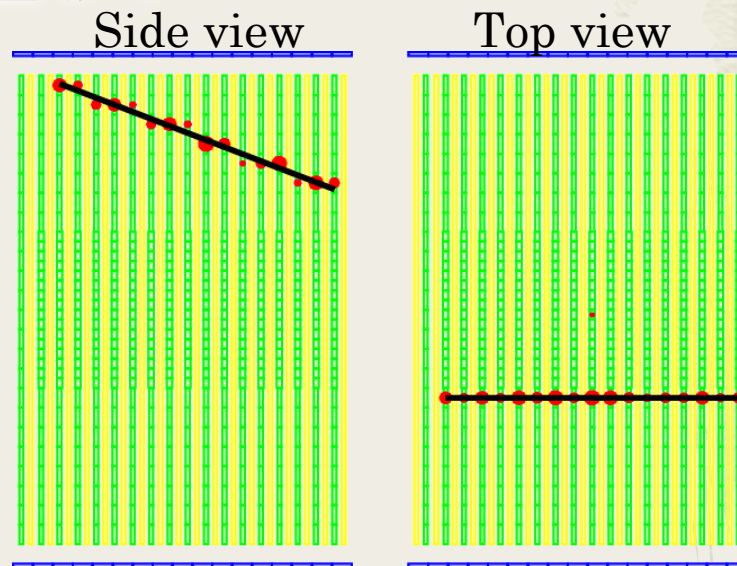
- ◆ T2K実験の振動解析において系統誤差を生む、ニュートリノ反応の不定性を抑制するために、新型検出器Proton Moduleを開発した。
- ◆ モンテカルロ・シミュレーションを元にデザインを最適化し、十分な性能が期待できることを確認。
- ◆ 2010年4月から7月にかけて実機を製作。
- ◆ すべてのチャンネルが正常に動作していることを確認し、設置。
- ◆ 取得したデータをモンテカルロシミュレーションと比較した結果、ほぼ一致していることを確認→Proton Moduleは正常に期待された通りの動作をしている。
- ◆ 反応モードの識別方法とよりよいニュートリノイベント選択方法を確立し、ニュートリノ反応の精密測定を行う

バックアップ

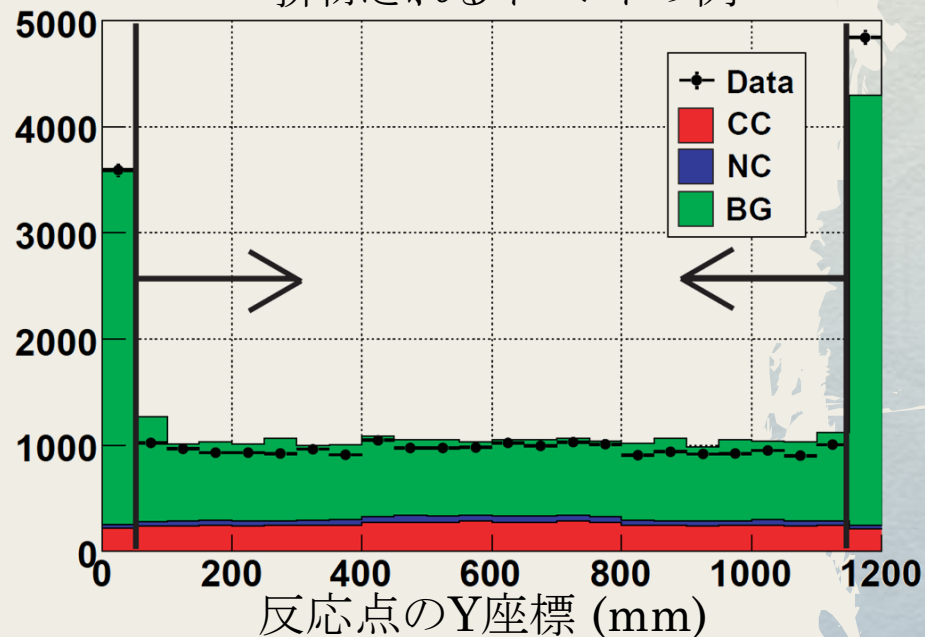
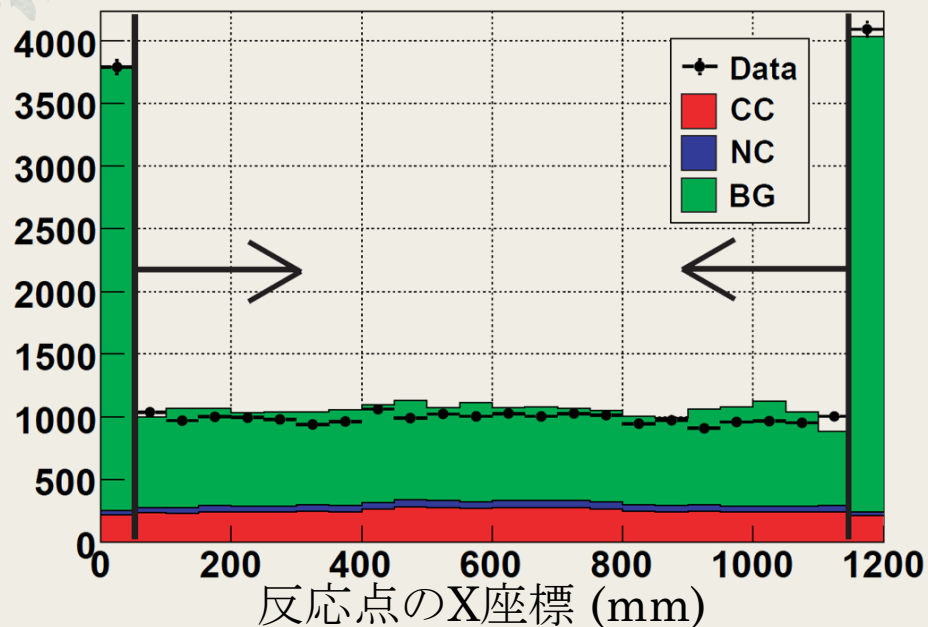
イベント選択

- ◆ 再構成された飛跡の最上流点が、最も端のチャンネルのイベントを排除

(Vetoプレーンの隙間から入射する荷電粒子によるイベントを排除)



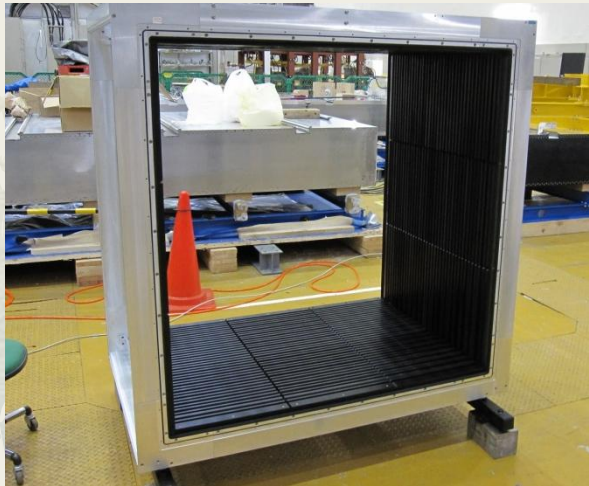
排除されるイベントの例



Proton Moduleの製作

◆ 2010年4月から7月にかけて製作

0.組み立て前



1.シンチレータの取り付け



2.ファイバー入れ



5.Veto planeと遮光パネルの設置



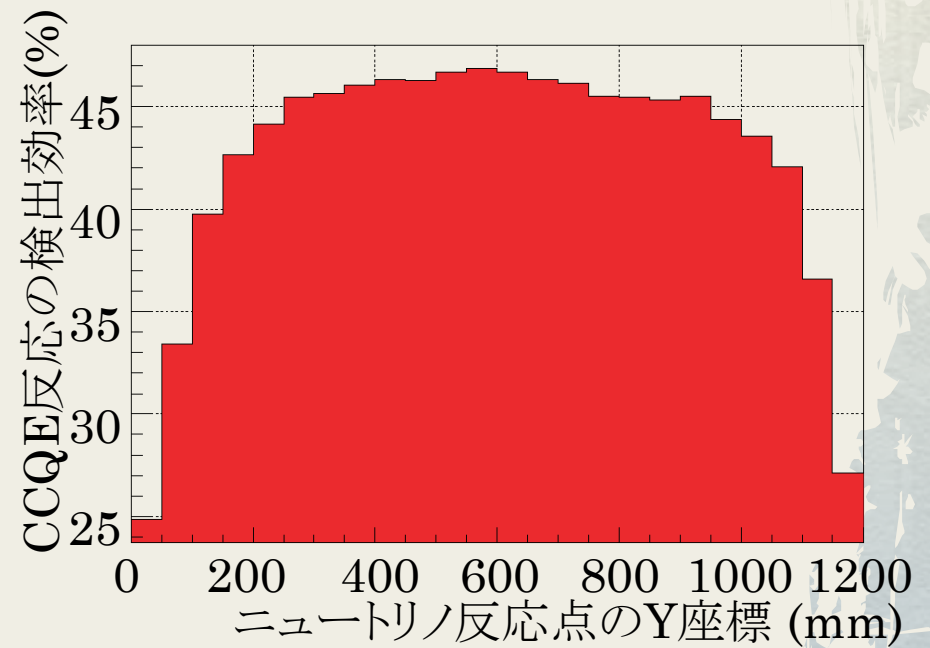
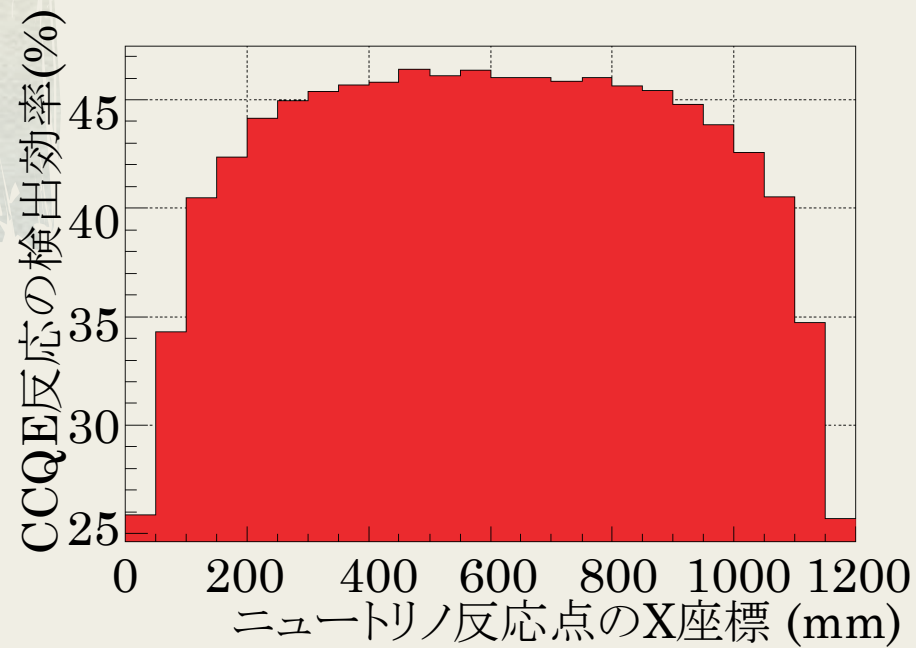
4.MPPCの取り付け+ケーブリング



3.ケーブルとボードの接続

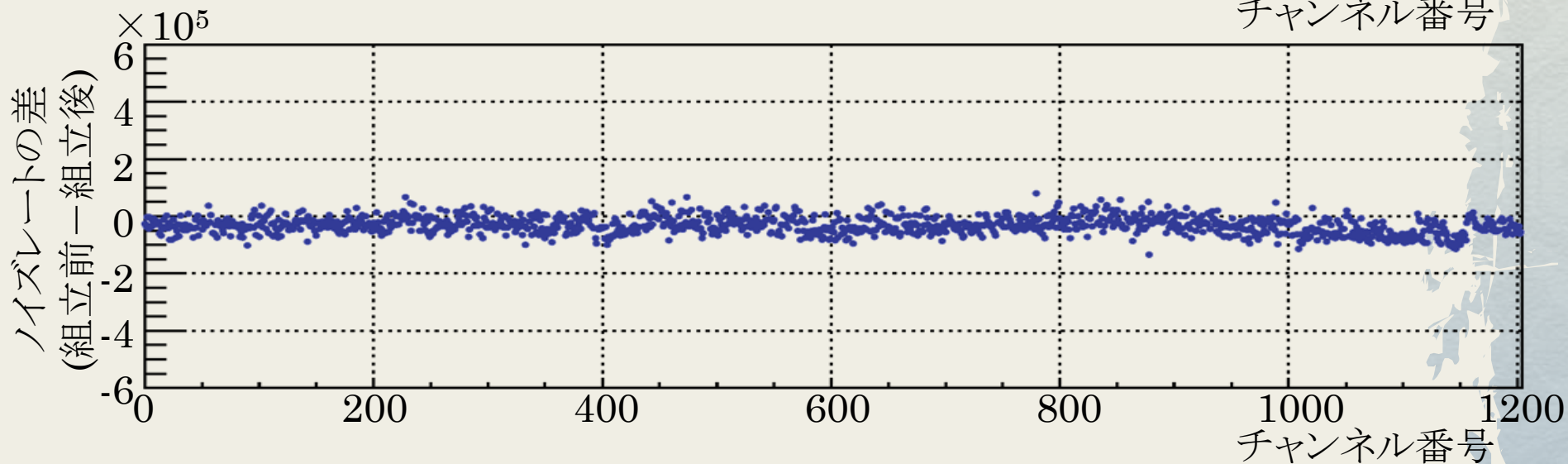
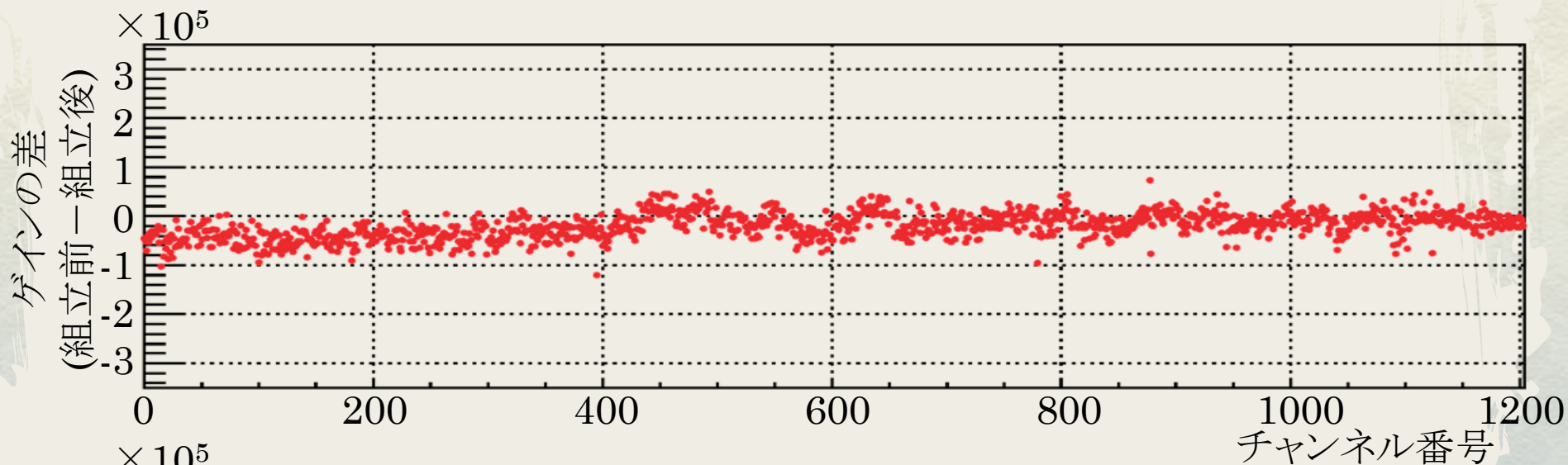


新型ニュートリノ検出器 Proton Module

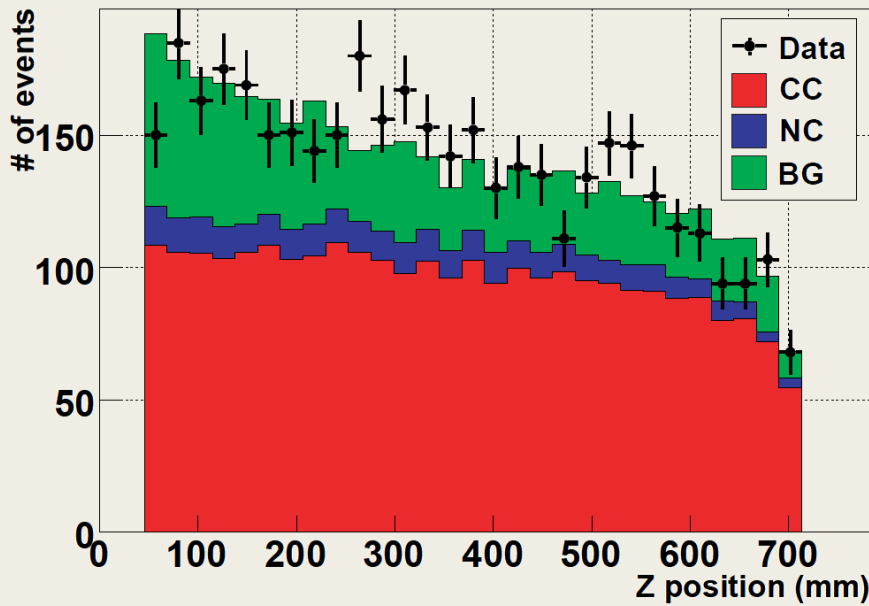
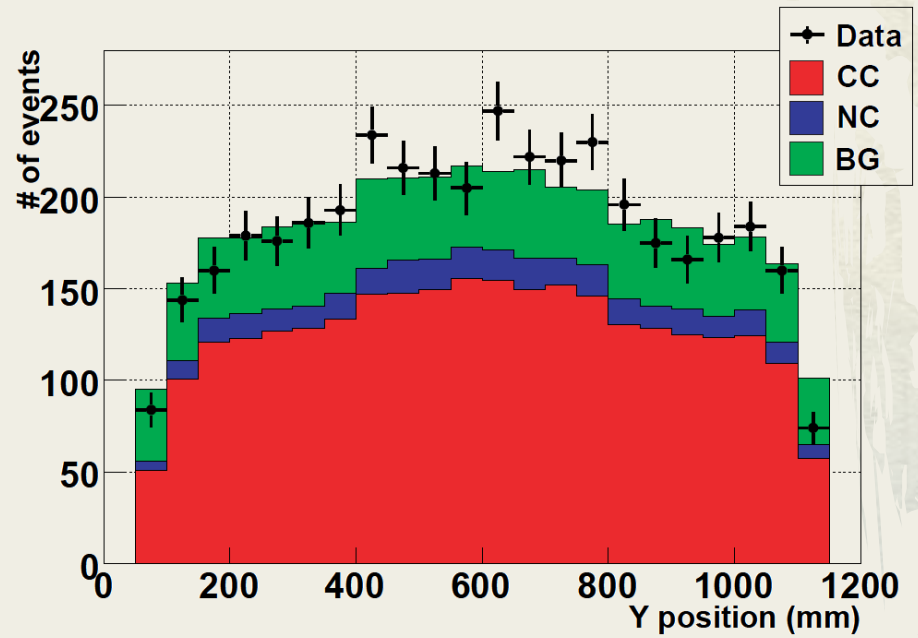
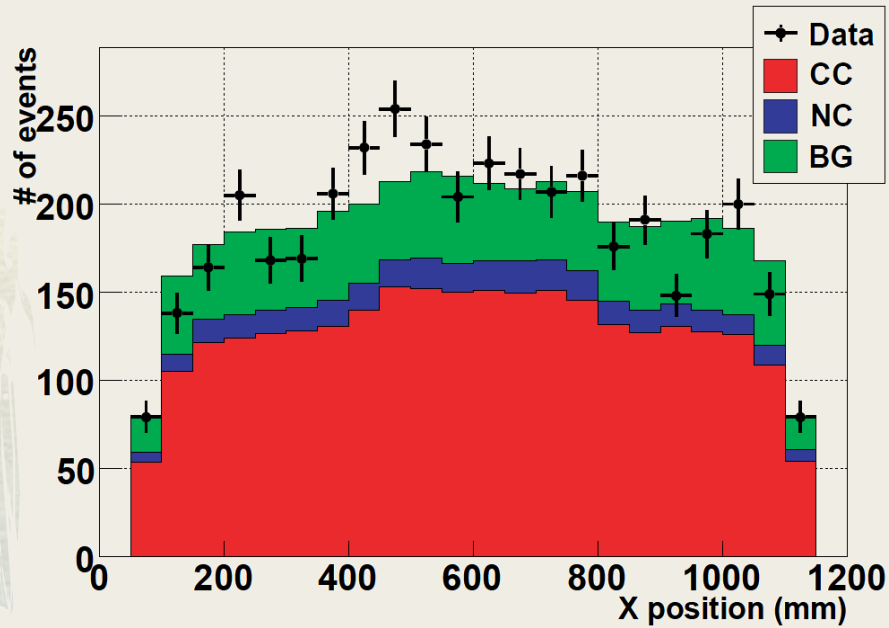


MPPCの暗電流による基礎特定の測定

- ◆ ゲインとノイズレートの組立前と組立後の測定値を比較
- ◆ 全てのチャンネルでほぼ一致

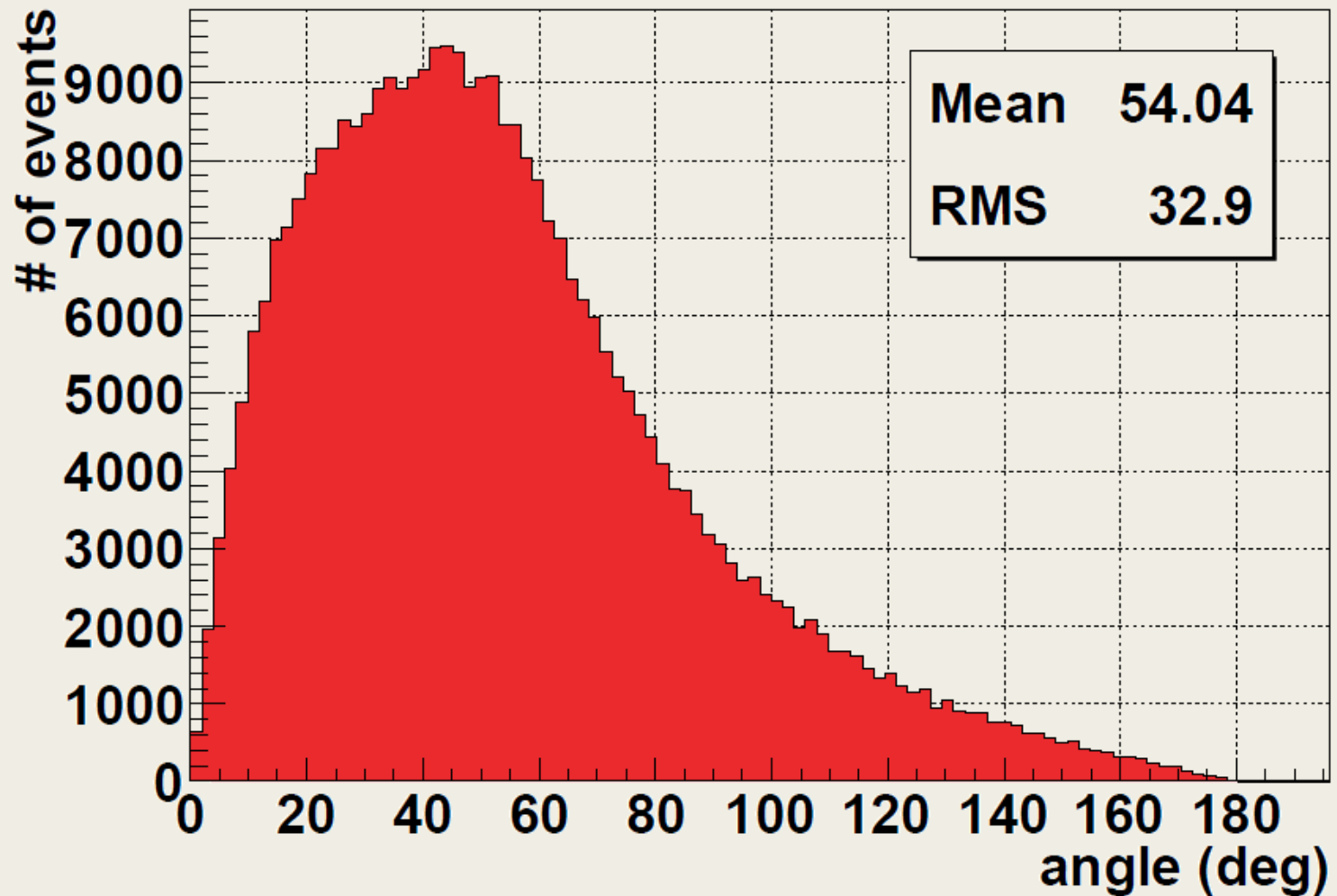


反応点分布

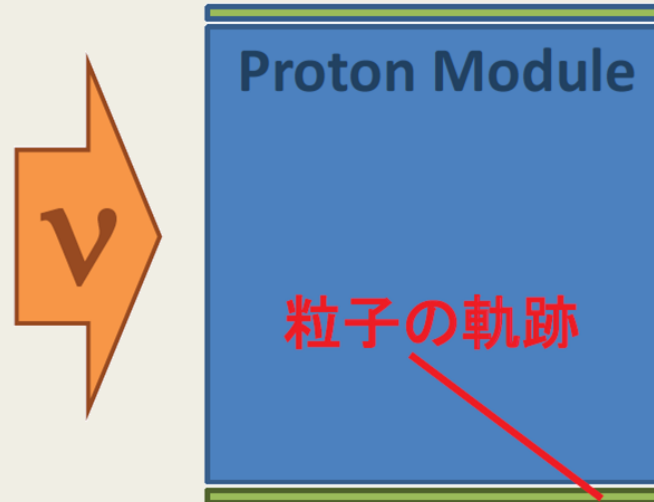
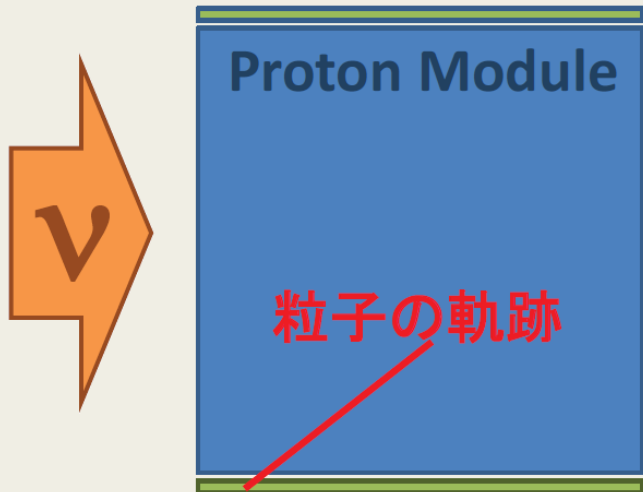
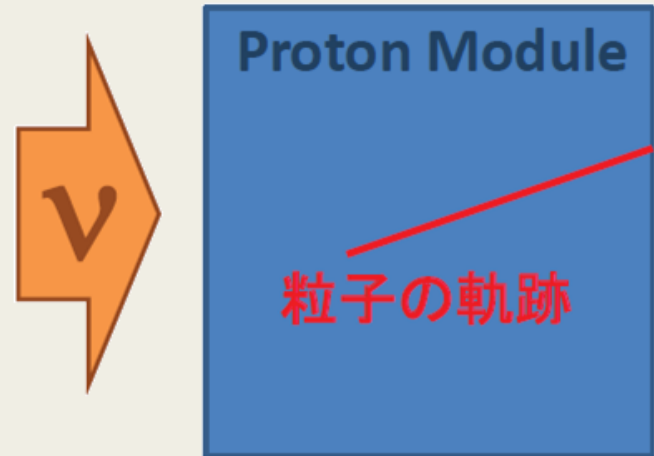
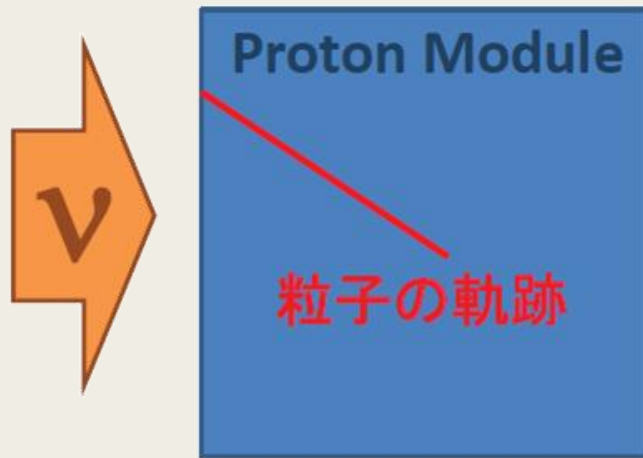


◆ 統計誤差が大きいですが、データとモンテカルロ・シミュレーションがよく合っている。

二次粒子の角度分布



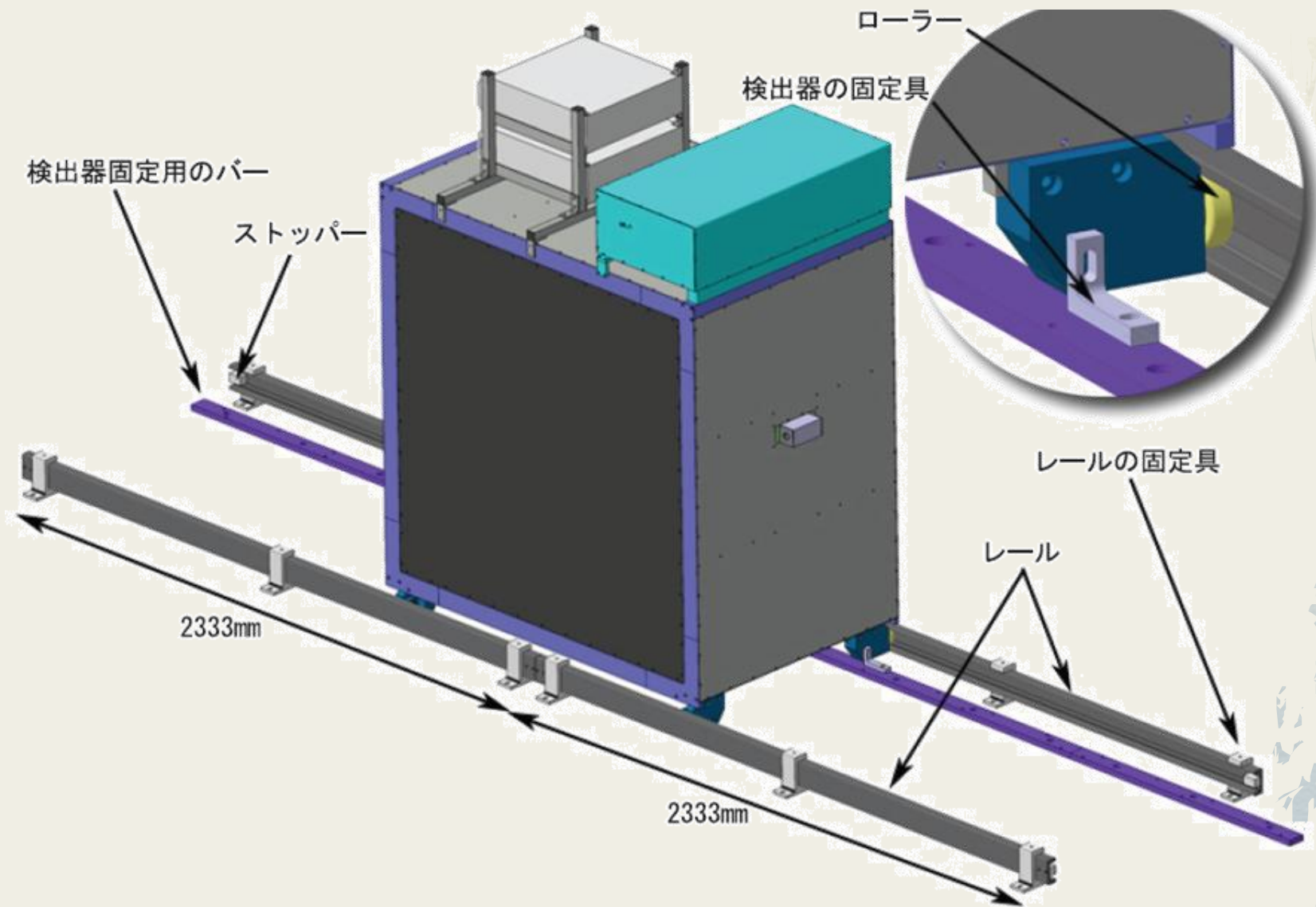
イベント選択



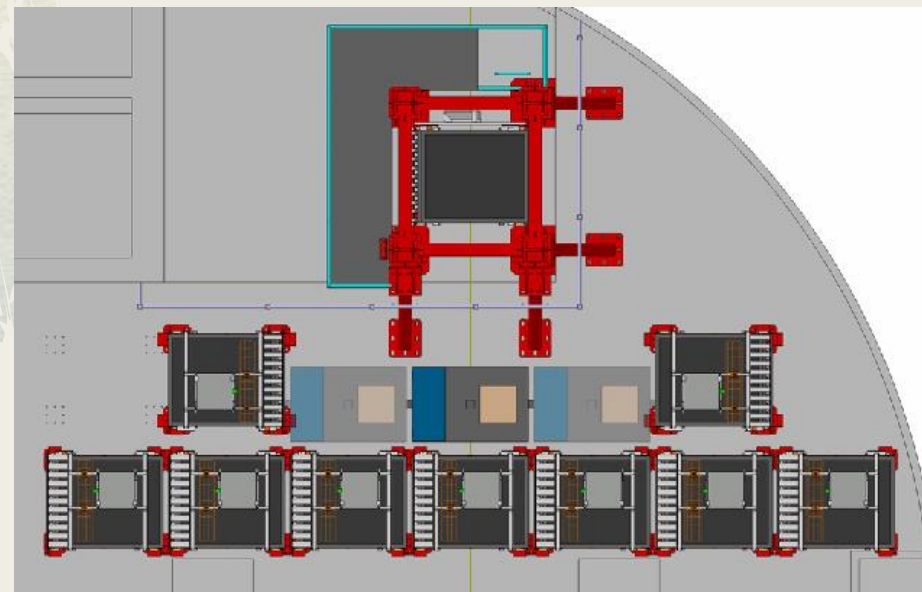
排除するイベント

選択するイベント

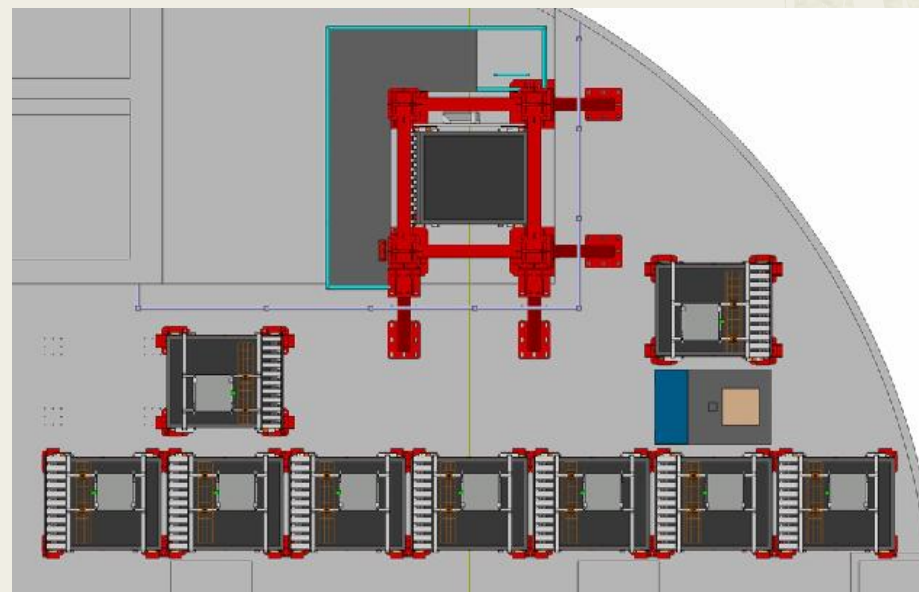
検出器の移動構造



検出器の移動



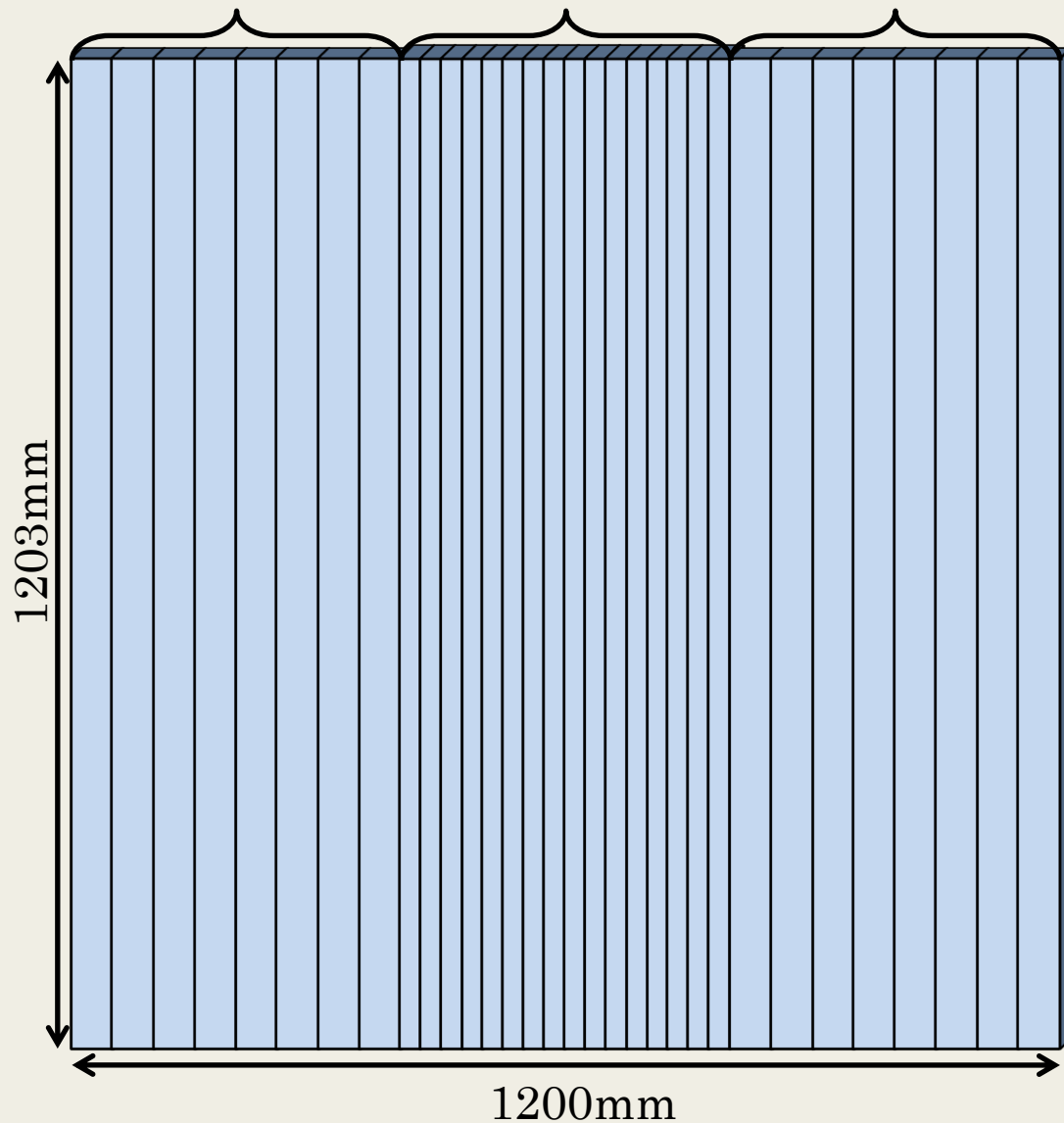
当面の移動計画



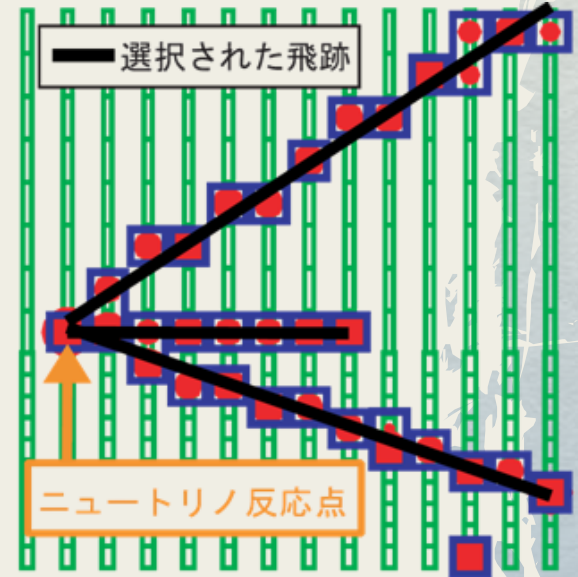
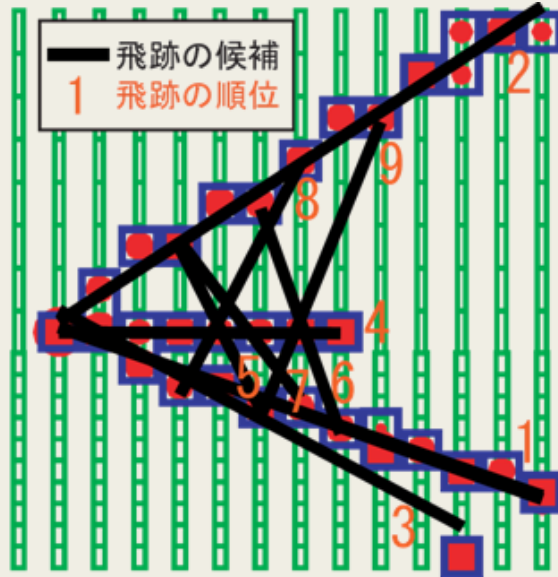
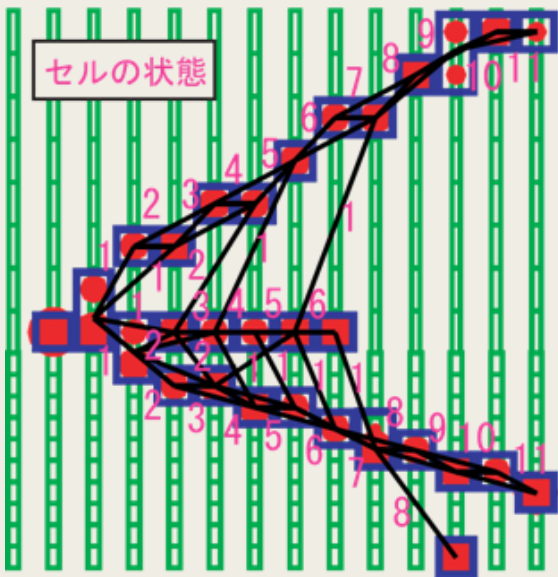
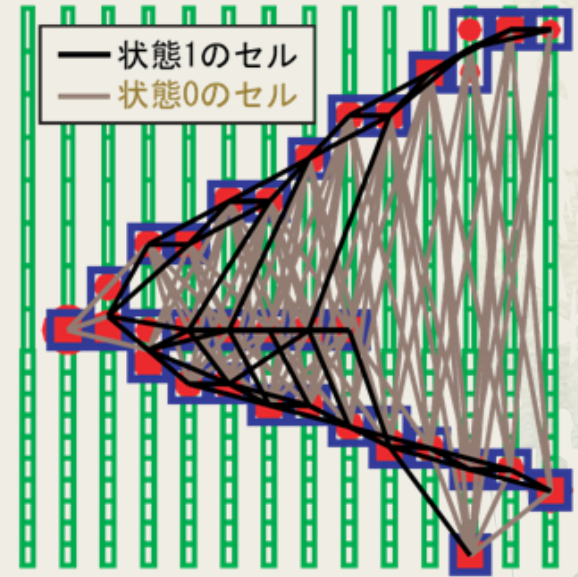
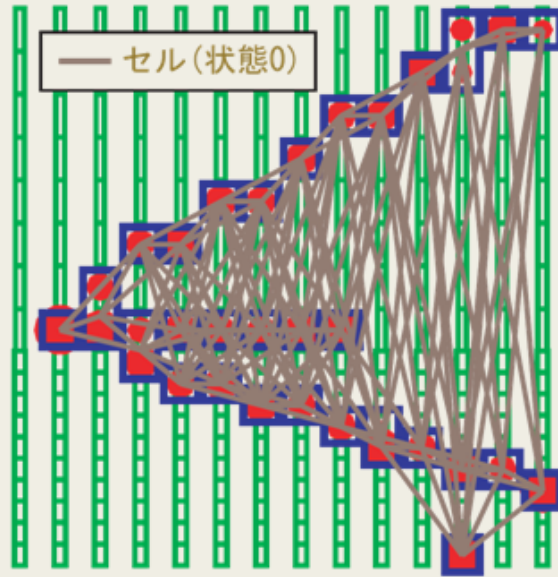
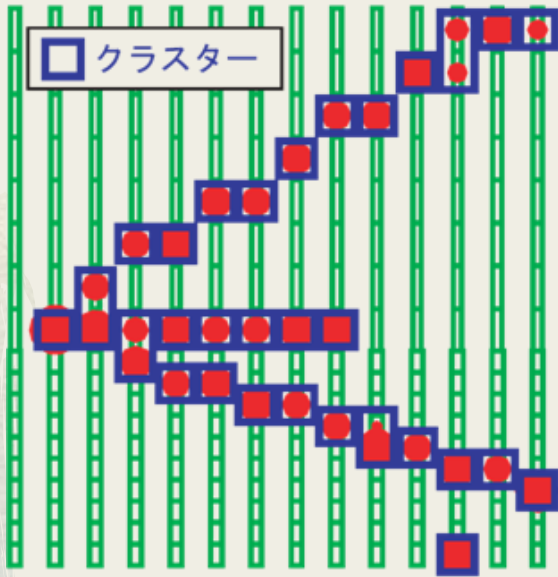
将来的な移動計画

プレーンの構造

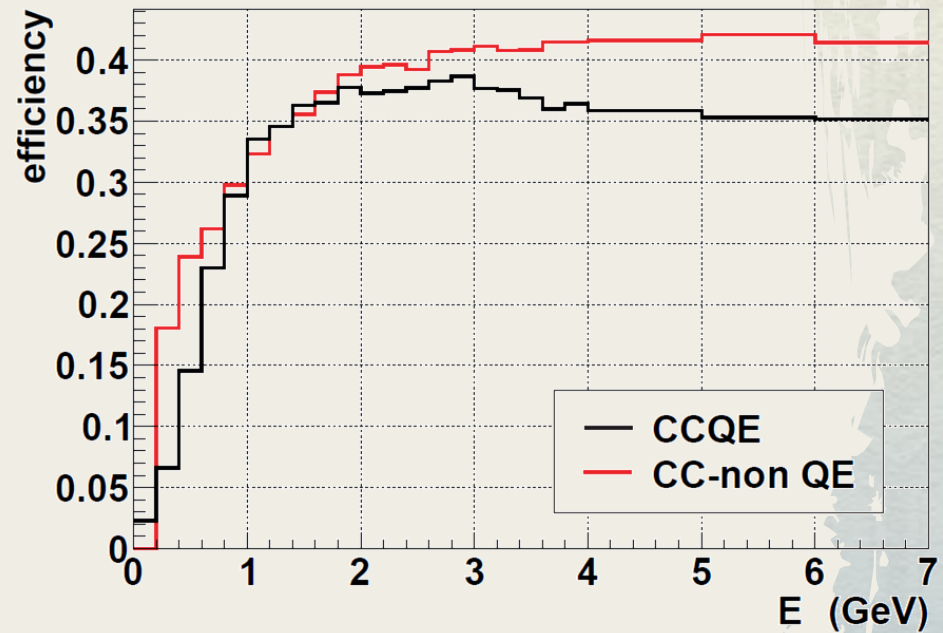
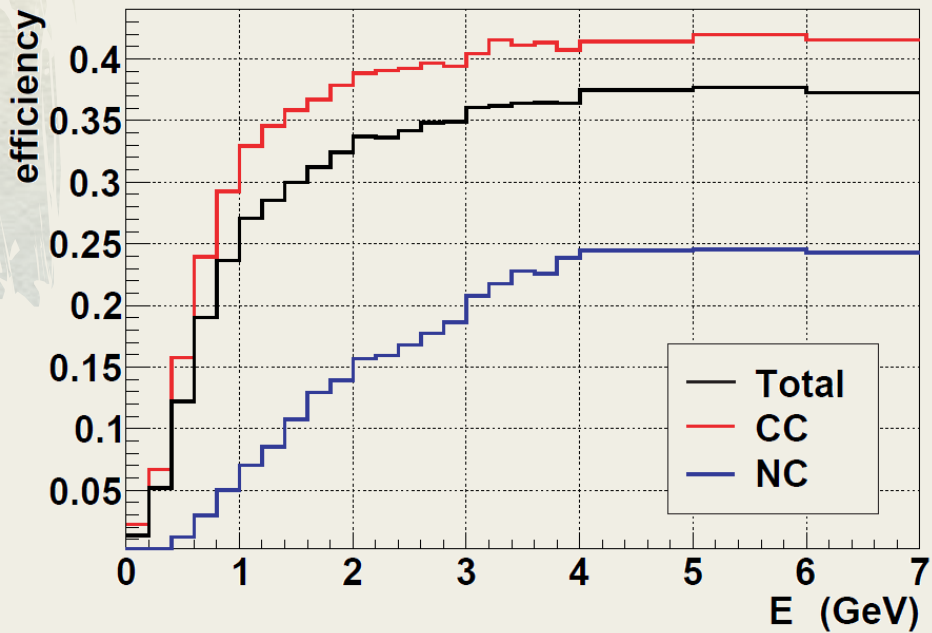
INGRID型×8本 SciBar型×16本 INGRID型×8本



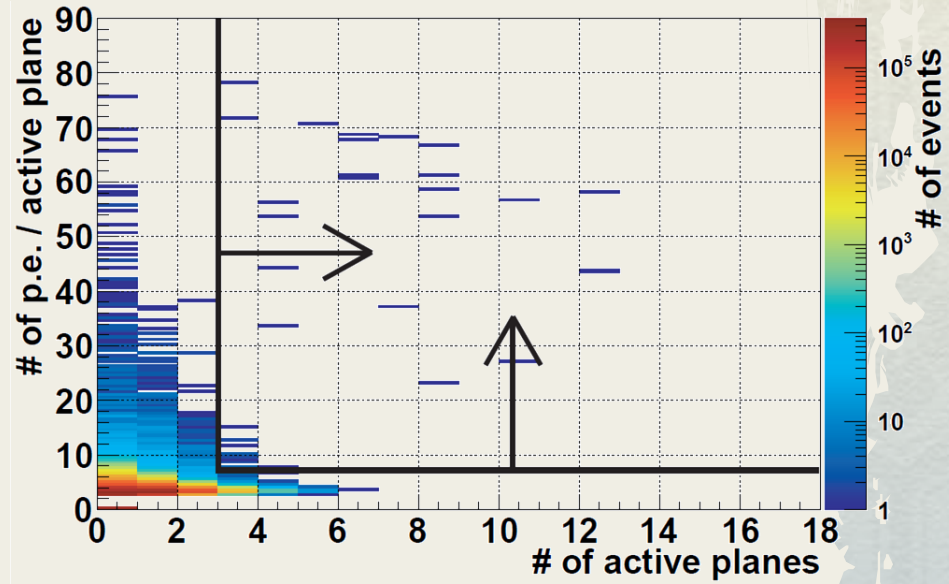
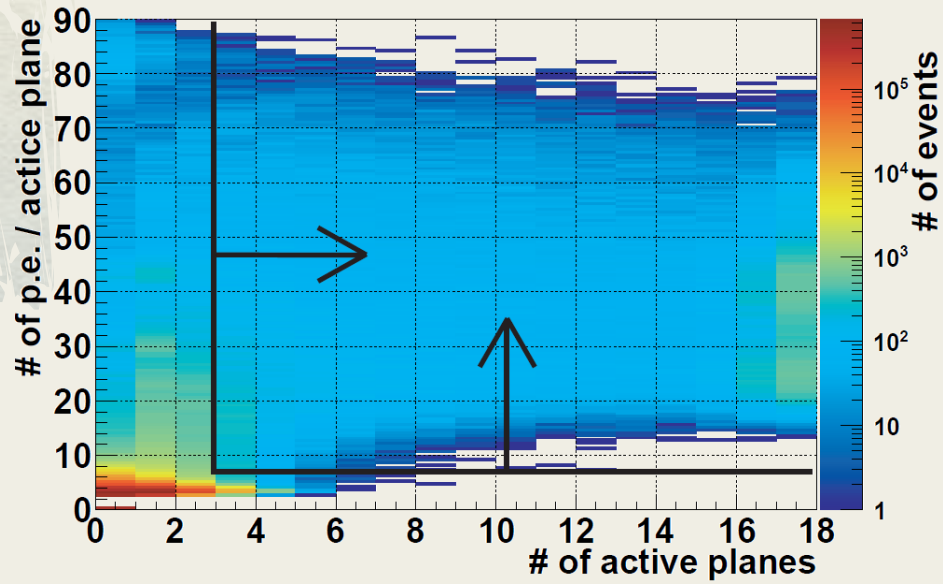
飛跡再構成



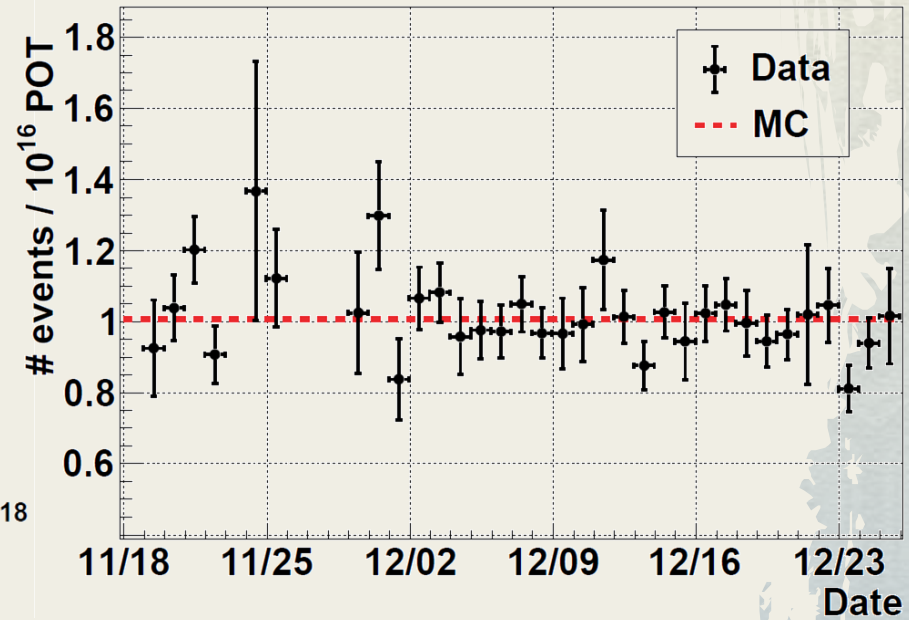
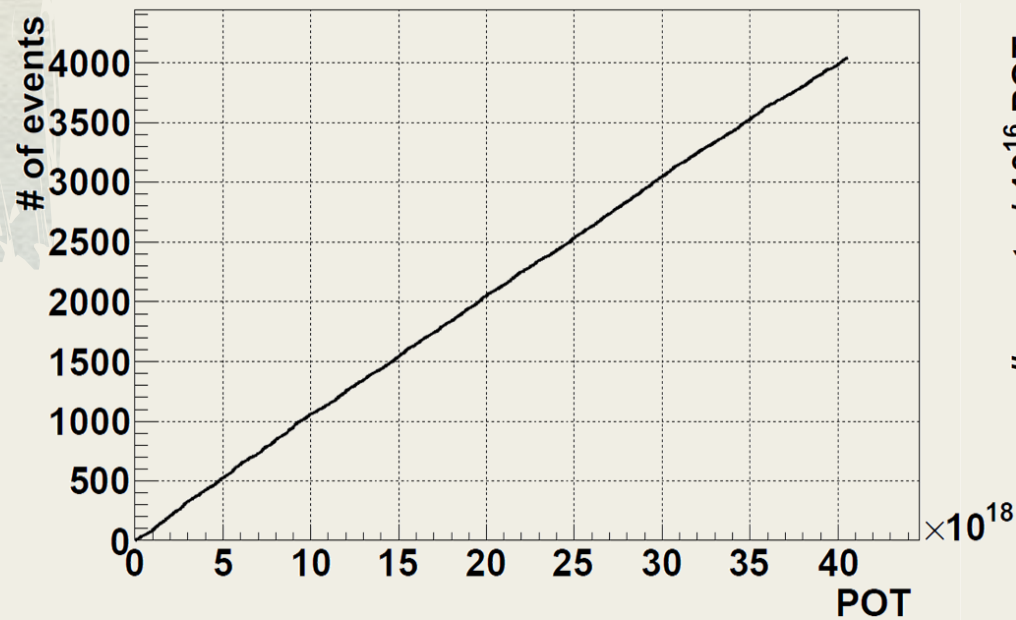
検出効率



イベント選択

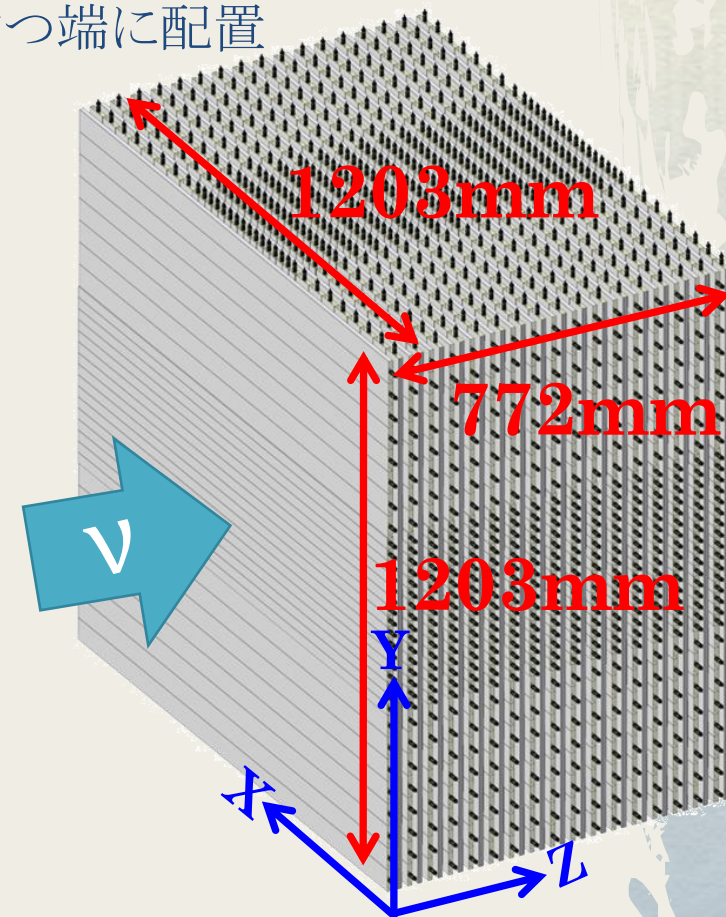
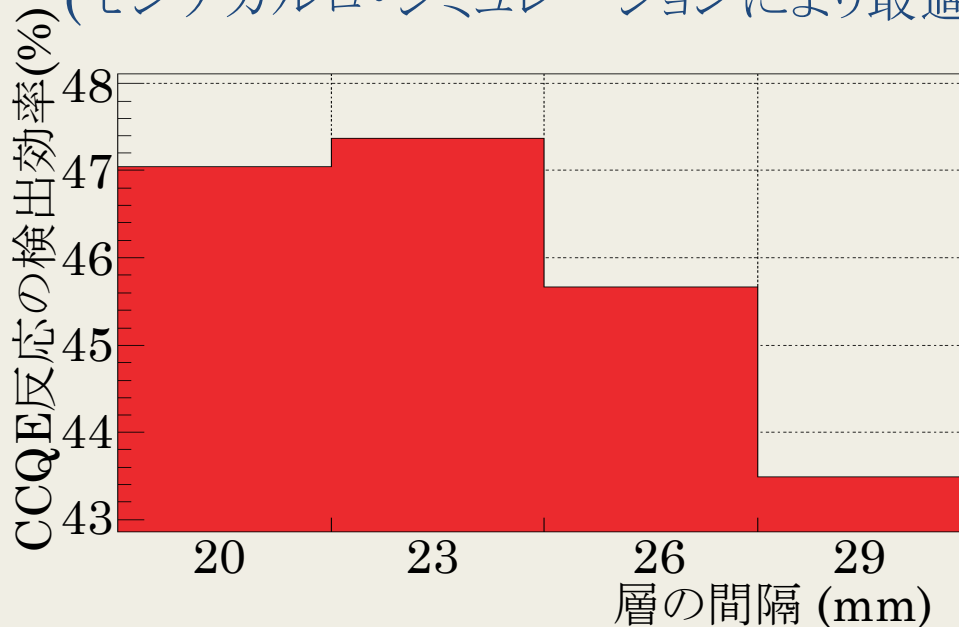


データ取得の安定性



新型ニュートリノ検出器 Proton Module

- ◆ 36層のトラッキングプレーン(縦向きと横向きに交互に配置)
- ◆ 1層は $10 \times 50 \times 1203 \text{mm}^3$ のシンチレータ16本と $13 \times 25 \times 1203 \text{mm}^3$ のシンチレータ16本から構成
- ◆ $13 \times 25 \times 1203 \text{mm}^3$ のシンチレータ16本は中央に配置し、 $10 \times 50 \times 1203 \text{mm}^3$ のシンチレータは8本ずつ端に配置
(中央部で検出効率が最大となるため)
- ◆ 各層は23mmずつ間隔をあけて配置
(モンテカルロ・シミュレーションにより最適化)



新型ニュートリノ検出器 Proton Module

- ◆ 36層のトラッキングプレーン(縦向きと横向きに交互に配置)
- ◆ 1層は $10 \times 50 \times 1203\text{mm}^3$ のシンチレータ16本と $13 \times 25 \times 1203\text{mm}^3$ のシンチレータ16本から構成
- ◆ $13 \times 25 \times 1203\text{mm}^3$ のシンチレータ16本は中央に配置し、 $10 \times 50 \times 1203\text{mm}^3$ のシンチレータは8本ずつ端に配置
(中央部で検出効率が最大となるため)
- ◆ 各層は23mmずつ間隔をあけて配置
(モンテカルロ・シミュレーションにより最適化)

