

ニュートリノ中性カレント反応理解のための 中性子・酸素原子核反応に関する研究

田野智大、小汐由介、蓬萊明日、白石悠樹、芦田洋輔^A、中家剛^A、
WENDELL Roger^A、森正光^A、COLLAZOU Gianmaria^B、
IACOB Fabio^B、KONAKA Akira^C、嶋達志^D

岡大理、京大理^A、Padova Univ.^B、TRIUMF^C、RCNP^D

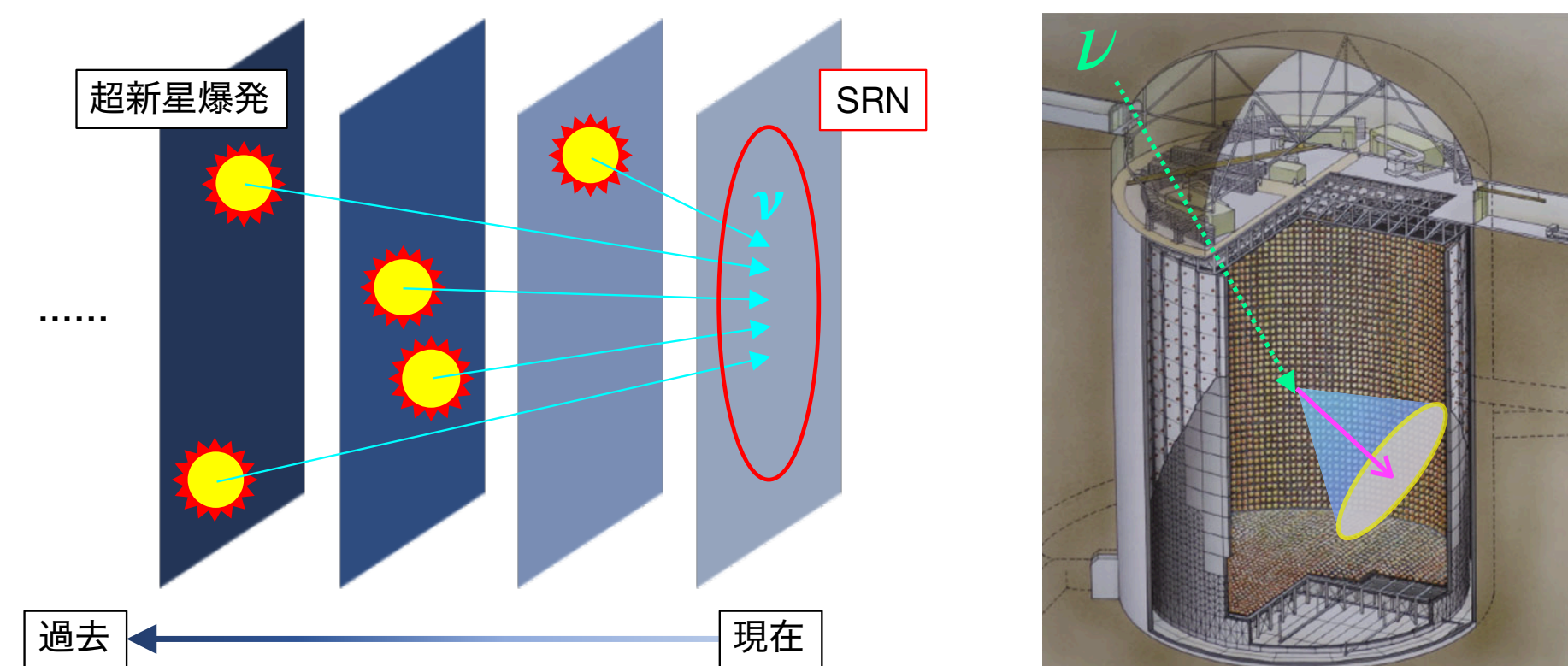
目次

1. 研究背景
2. E525実験
3. 中性子フラックスの系統誤差
4. フィッティング手法の改善
5. まとめ・展望

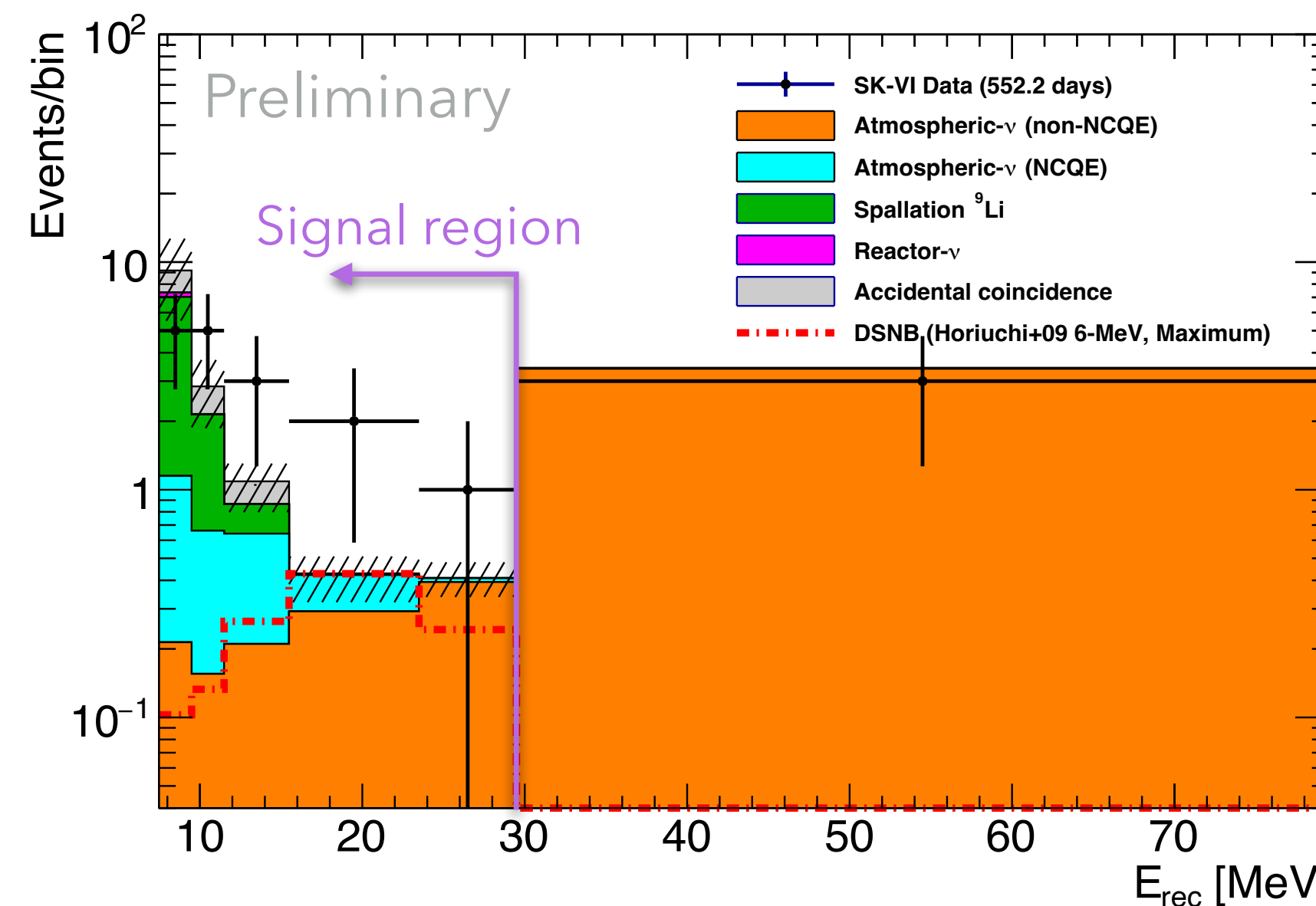
SK-Gd実験

スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウム(Gd)を導入 → 中性子検出効率の向上

- 超新星背景ニュートリノ (SRN)
 - ▶ 過去の超新星爆発によるニュートリノの重ね合わせ
 - ▶ 爆発機構・重元素合成過程の解明につながる
- SK-Gd実験におけるSRN探索
 - ▶ 逆ベータ崩壊($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)事象を探索
 - ▶ e^+ とGd(n, γ)の同時遅延計測 → 背景事象との識別
 - ▶ 中性子を放出する反応は取り除くことが難しい
 - 大気ニュートリノのNCQE反応



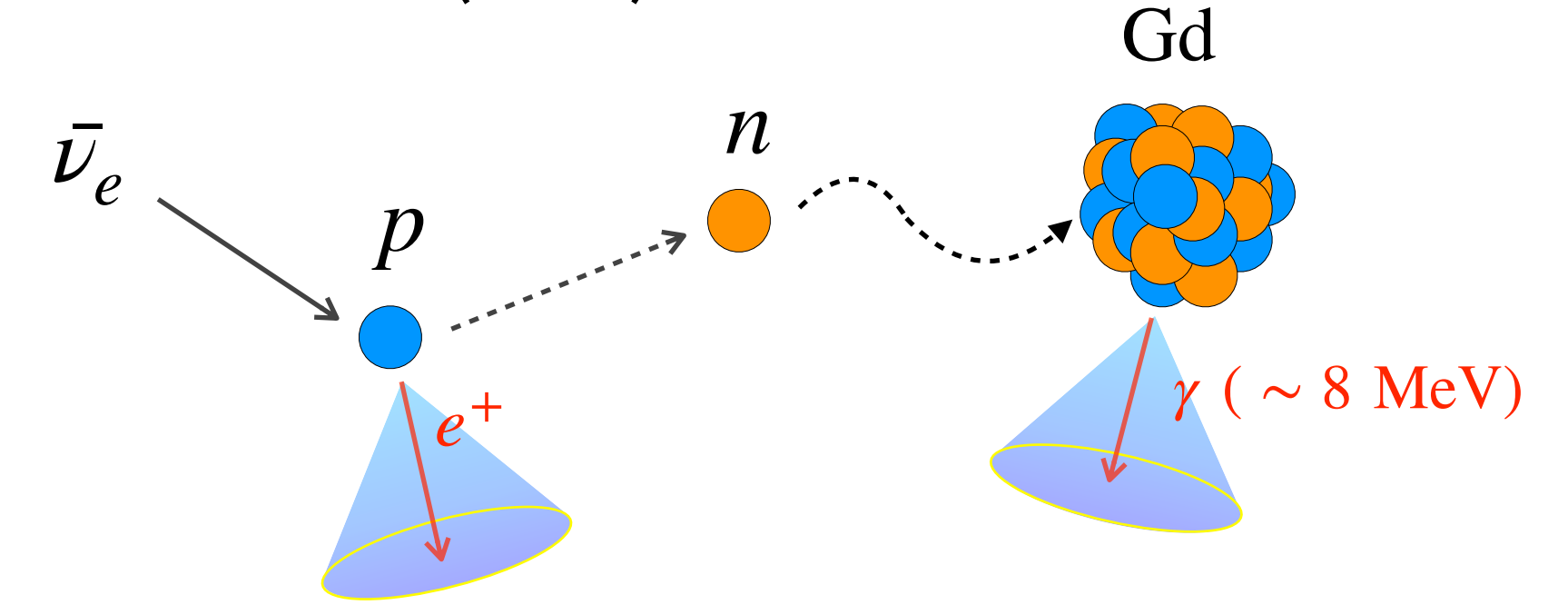
SK-GdにおけるSRN探索結果 (原田さん 23pW3-1)



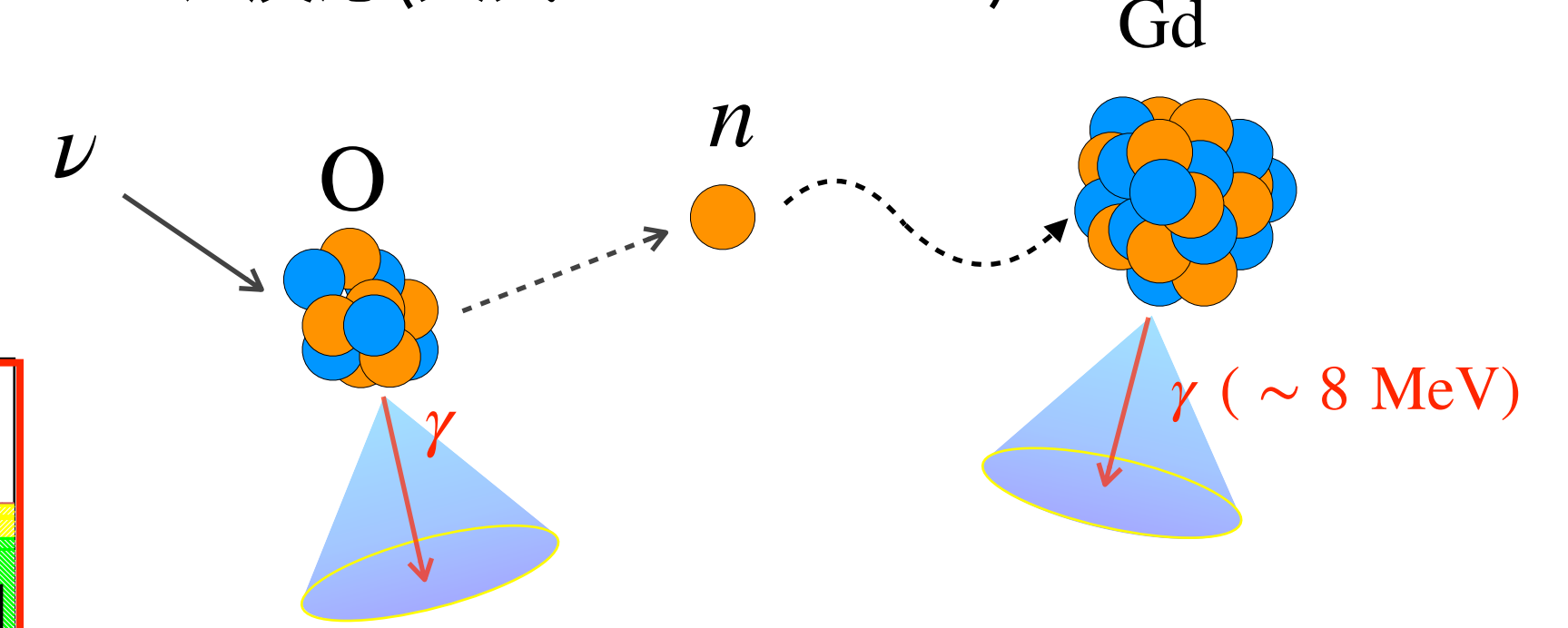
大気ニュートリノによるNCQE反応

- 大気ニュートリノと酸素原子核の反応によって中性子が放出される
- SRNの逆ベータ崩壊と区別できない
→ シミュレーションを用いた事象数の見積もり
- 反応の正確な理解とシミュレーションへの導入
- T2K実験のニュートリノビームを用いた断面積測定
 - チェレンコフ角分布にデータとMCで差異あり
 - 大角度部分は中性子と酸素原子核反応によるガンマ線が影響

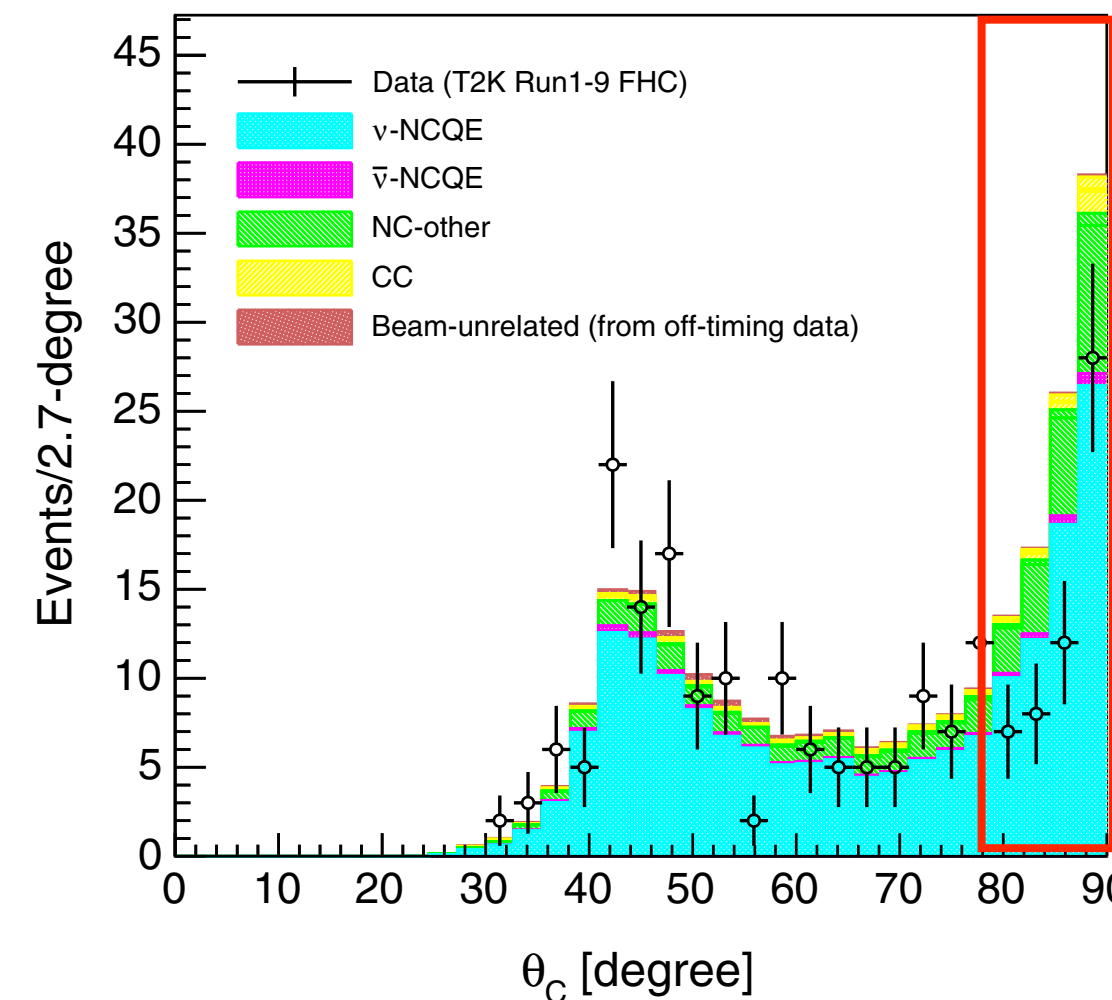
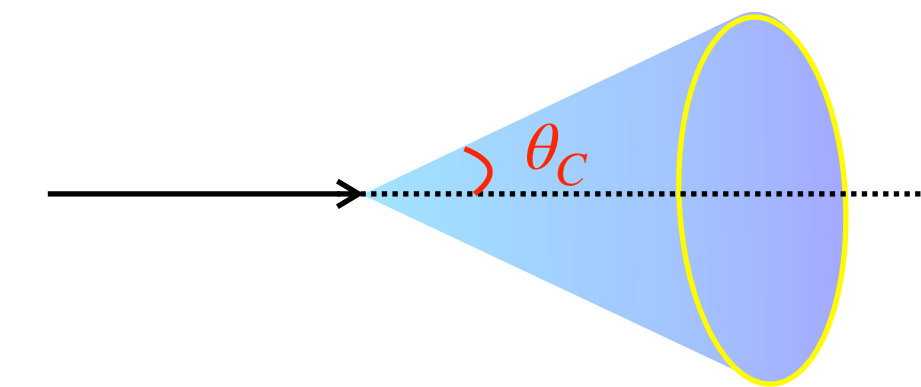
逆ベータ崩壊(SRN)



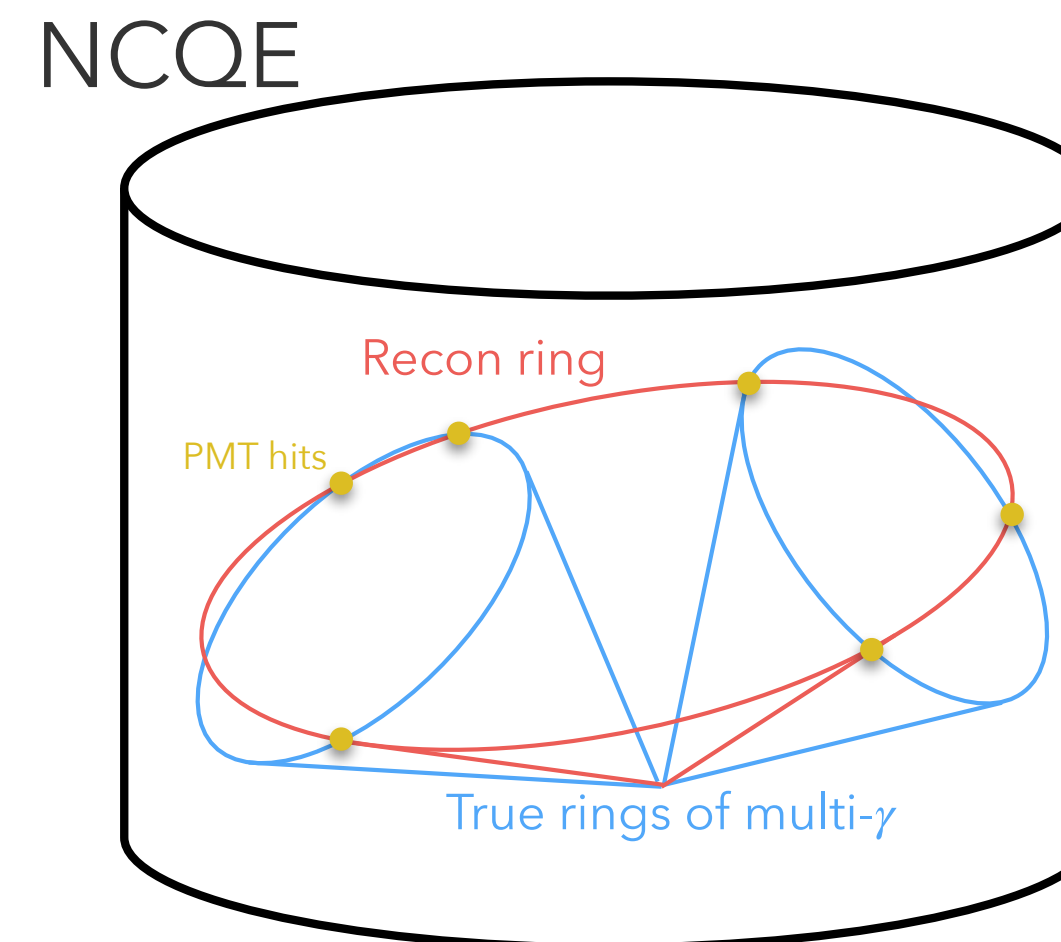
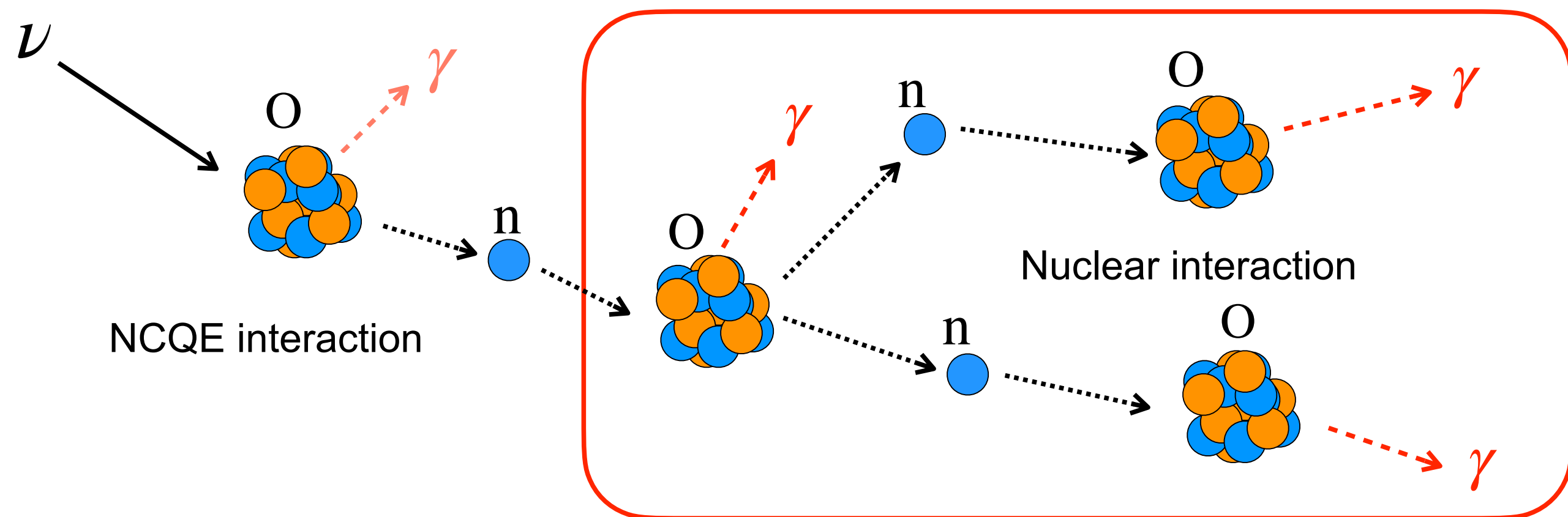
NCQE反応(大気ニュートリノ)



チェレンコフ角



1次ガンマ線と2次ガンマ線

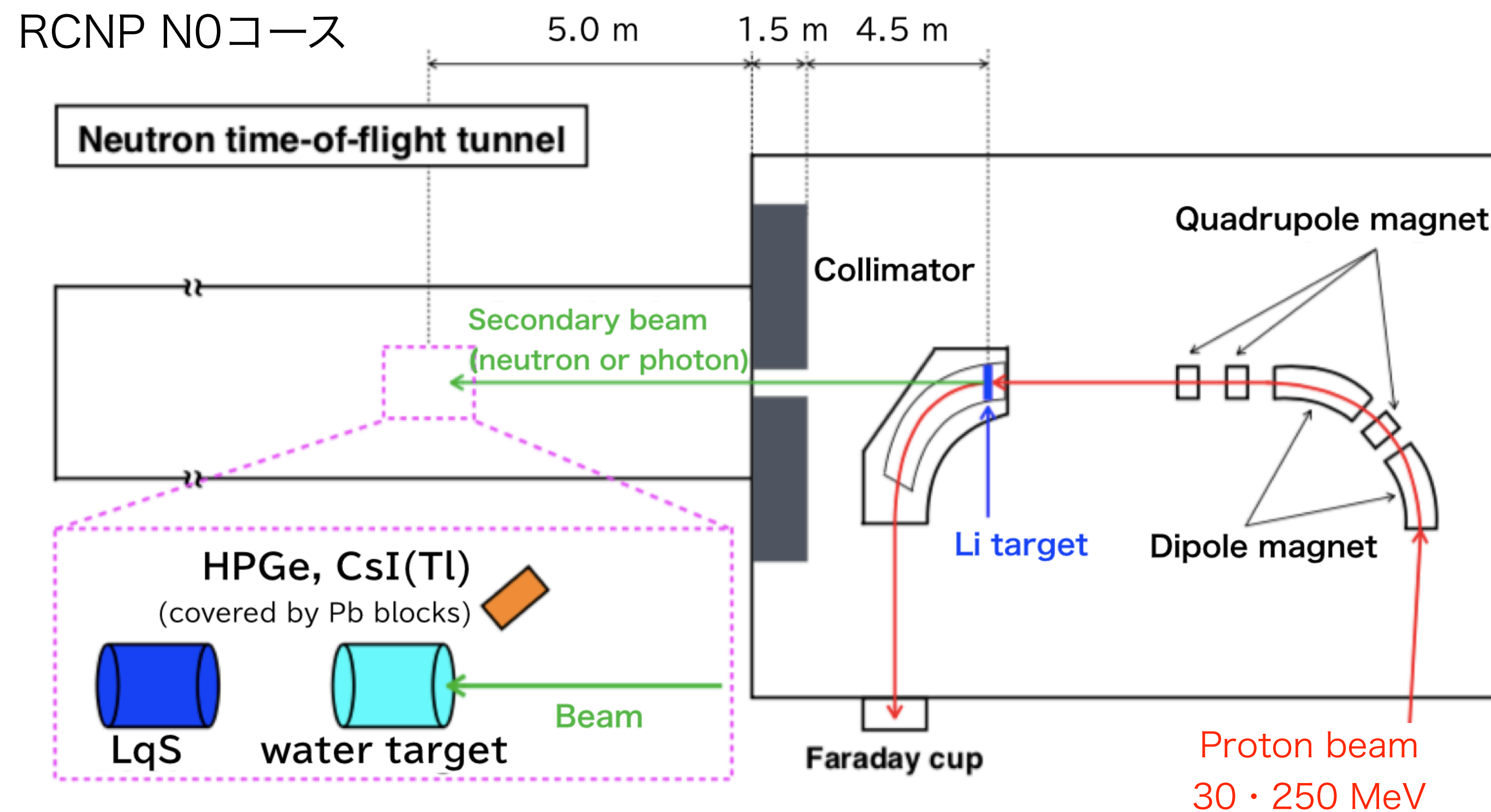


- 1次ガンマ線：NCQE反応によるガンマ線
- 2次ガンマ線：NCQE反応後の中性子と酸素原子核の反応によるガンマ線
- SKではこれらのガンマ線を区別できない → チェレンコフ角は大角度に再構成
- 2次ガンマ線の不定性が最も大きい
- **中性子と酸素原子核反応の理解が必要**

FHC	ν -NCQE	$\bar{\nu}$ -NCQE	NC-other	CC	Beam-unrelated
Event fraction	75.0	2.0	17.8	3.7	1.5
Neutrino flux	6.7	8.6	7.3	6.4	...
Neutrino interaction	3.0	3.0	8.2	16.5	...
Primary- γ production	11.0	10.6	6.0	6.6	...
Secondary- γ production	13.5	13.4	19.5	17.6	...
Oscillation parameter	4.1	...
Detector response	3.4	3.4	2.0	5.2	...
Total error	19.2	19.7	23.3	26.7	3.0

E525実験

- 2018年10月30日・12月16日 @大阪大学RCNP
- 中性子ビーム(30・250 MeV)を水標的に入射し、放出されるガンマ線を測定
- 各ガンマ線の発生確率(生成断面積)を算出



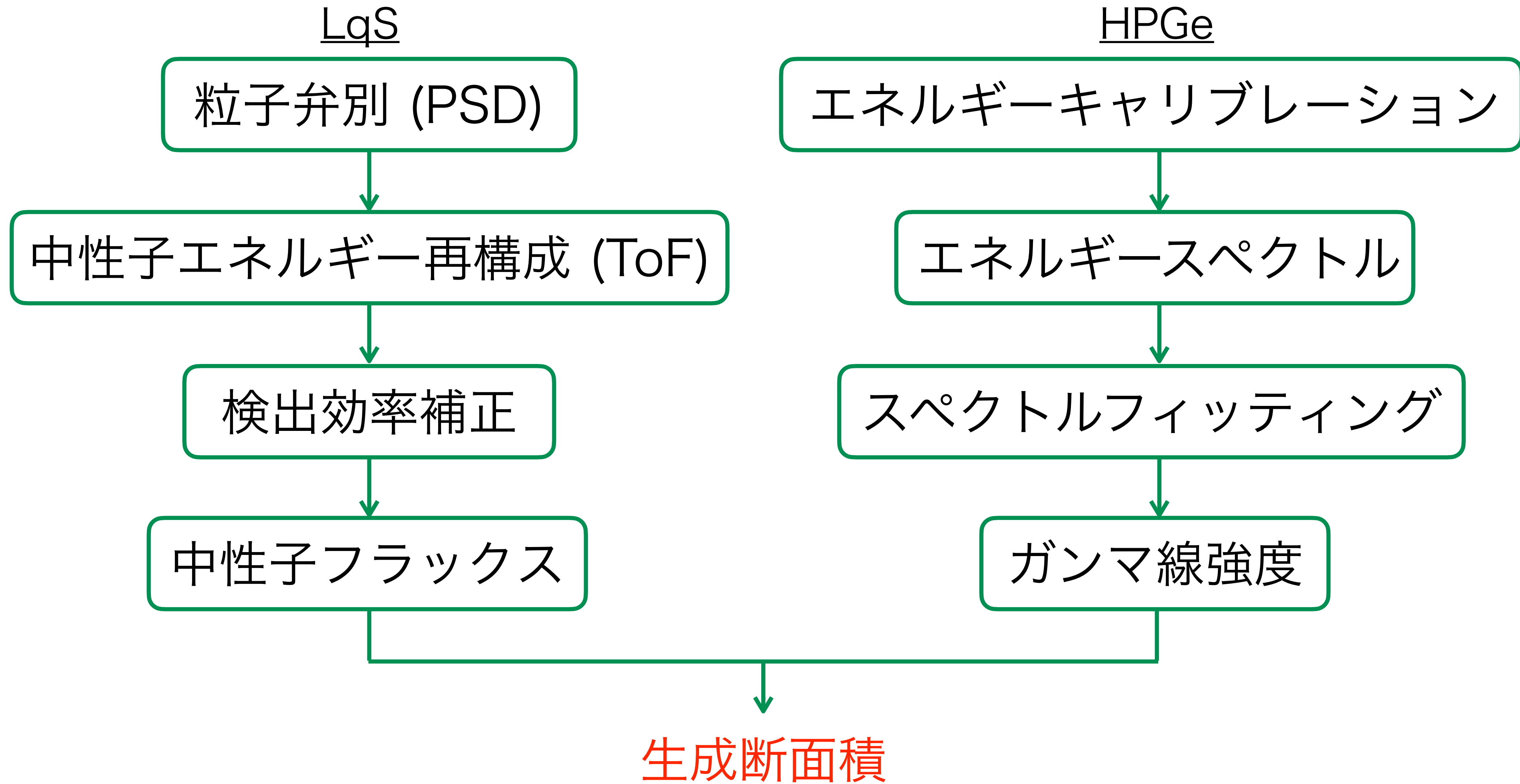
検出器

- 中性子
 - ▶ 液体シンチレータ (LqS)
- ガンマ線
 - ▶ ゲルマニウム検出器 (HPGe)

本研究

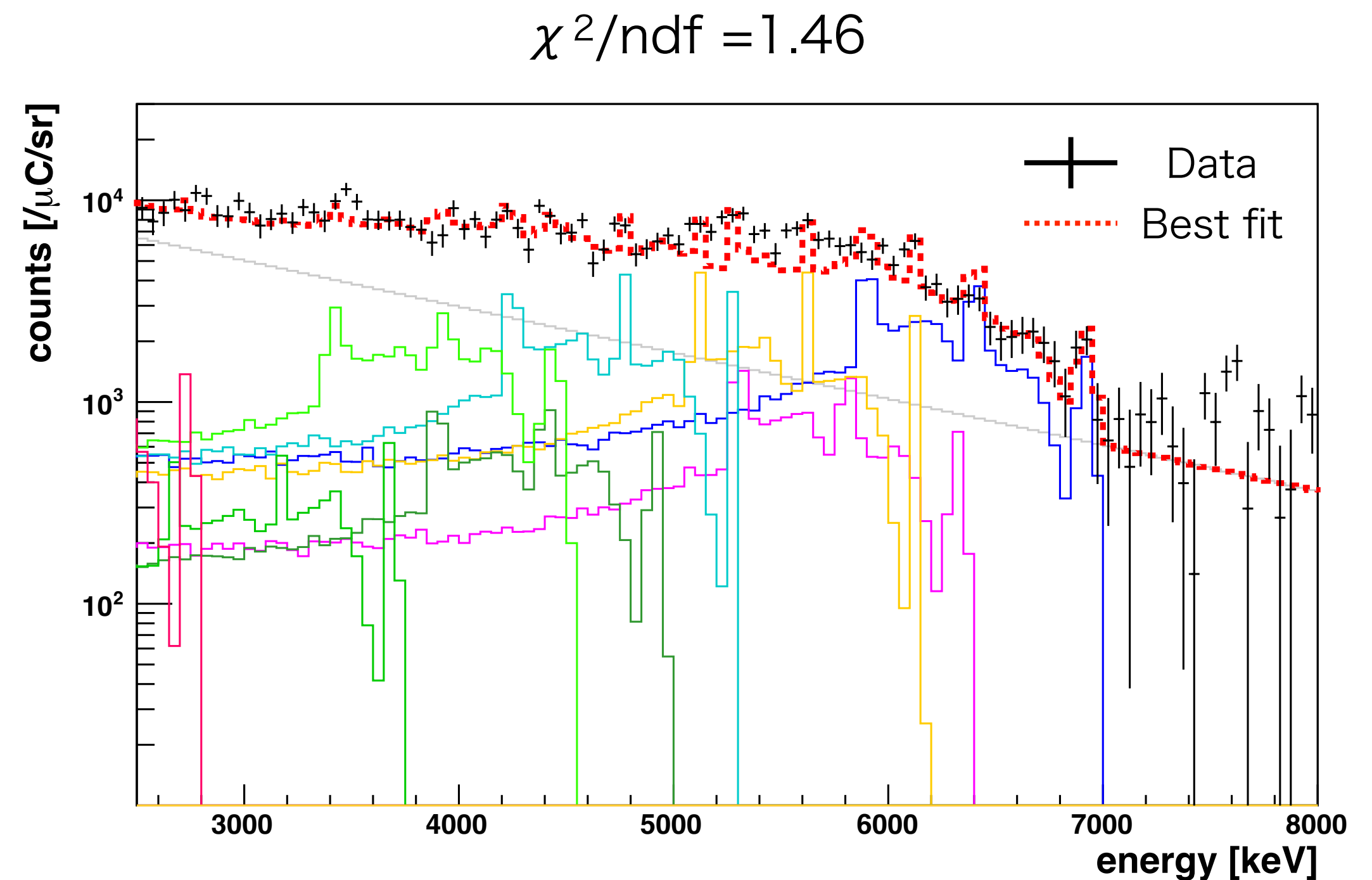
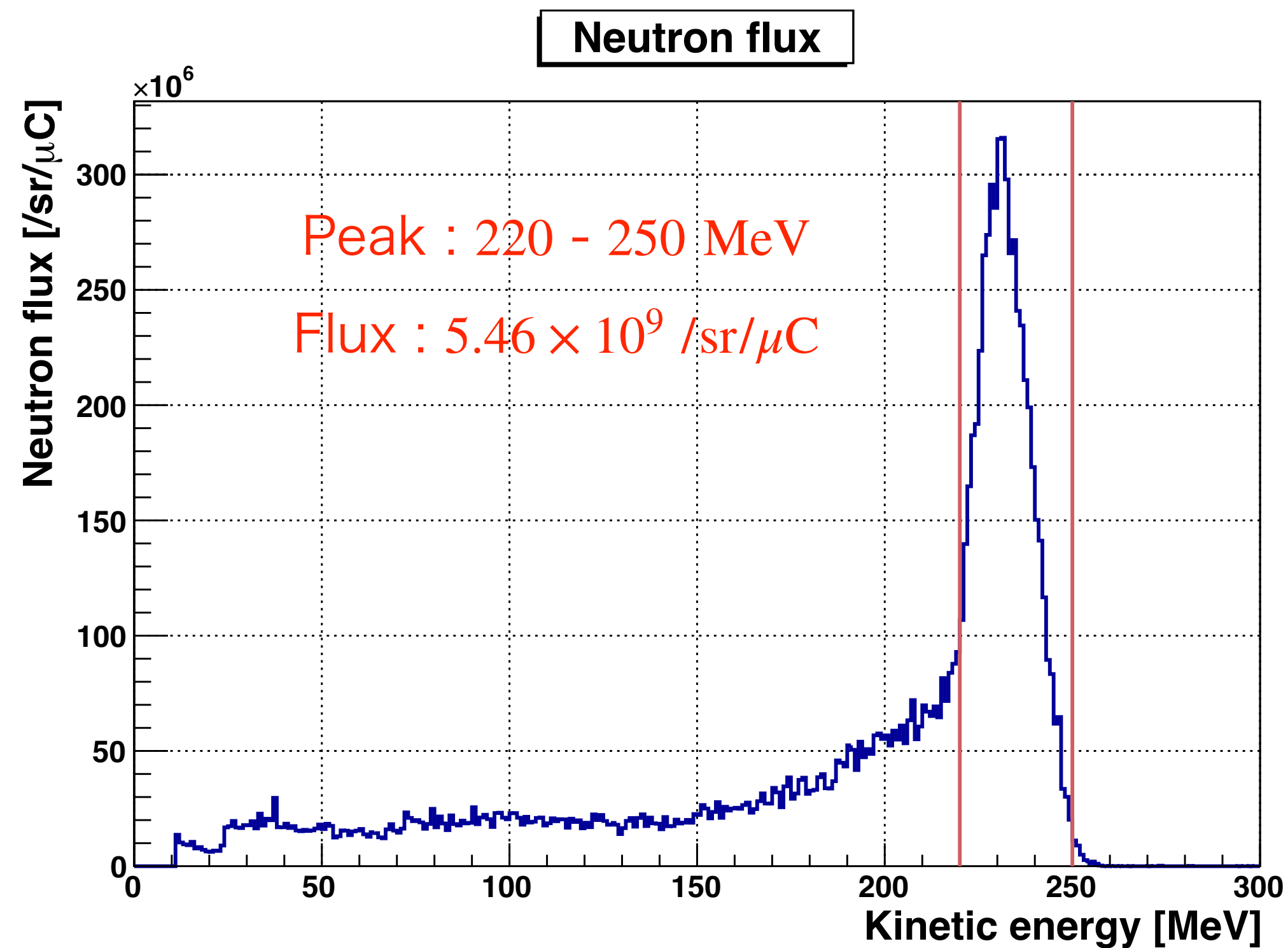
250 MeV実験のデータ解析

解析の流れ



リマインダー

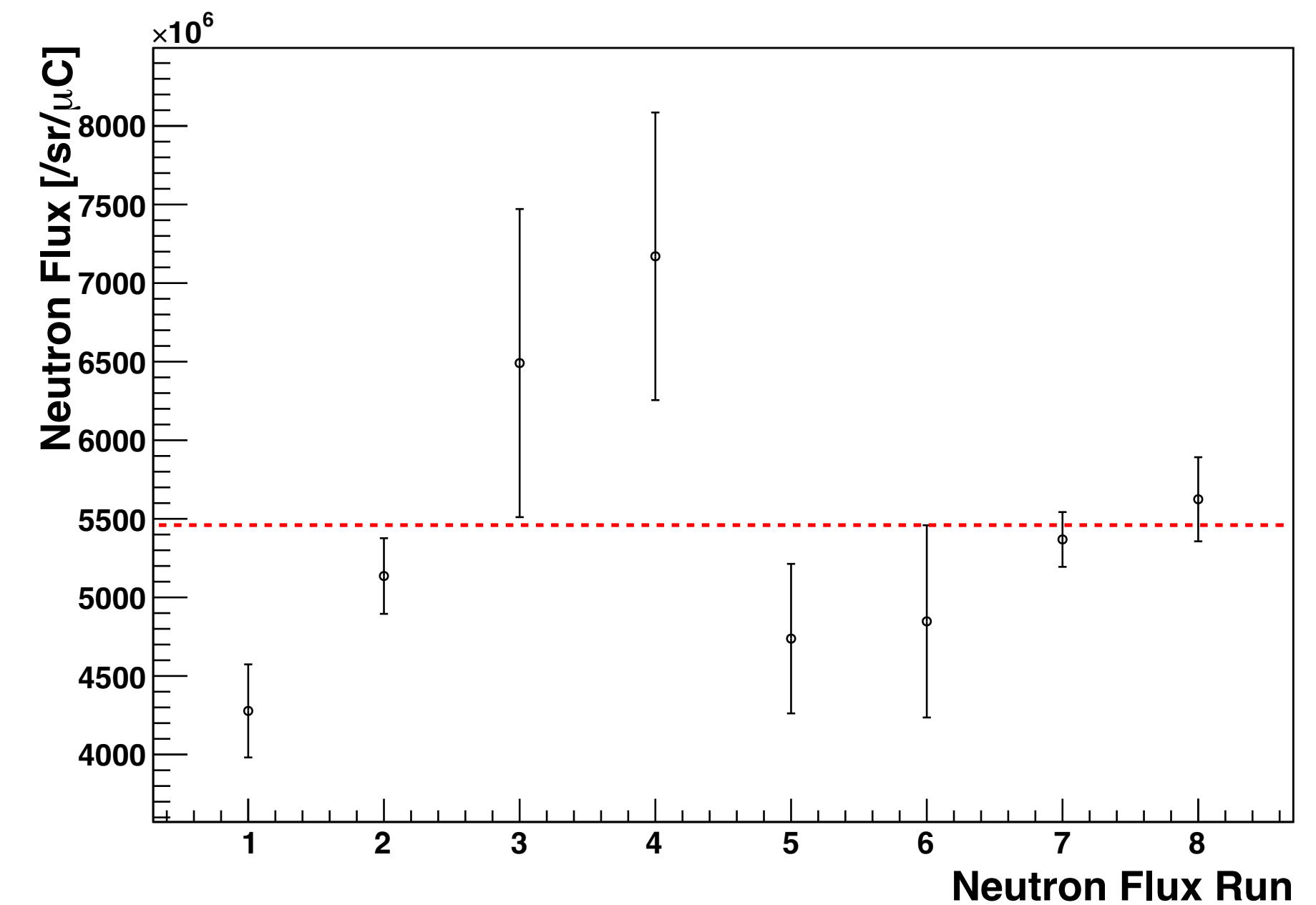
- 220 - 250 MeVにピークを持つ中性子フラックスが得られた (2022年 年次大会 15aA122-3)
- ガンマ線スペクトルフィッティングを行った (2022年 秋季大会 7aA561-8)
- 今回は、中性子フラックスの系統誤差の評価とフィッティング手法の修正について報告



中性子フラックスの系統誤差

誤差の要因	誤差 [%]
ビーム不安定性	31%
検出効率の計算	10%
粒子弁別 (PSD)	3%
その他	< 10%

- 最も主要な系統誤差は、ビームの不安定性に由来する
- 合計8回行われた中性子フラックス測定の実験それぞれについて中性子フラックスを算出し、その不安定性を系統誤差とした
- 中性子エネルギー再構成の系統誤差については現在評価中



フィッティングの修正

- Input : Signal template (10個)、Background template (1個) 計11個

従来の手法 (2022年秋季大会)

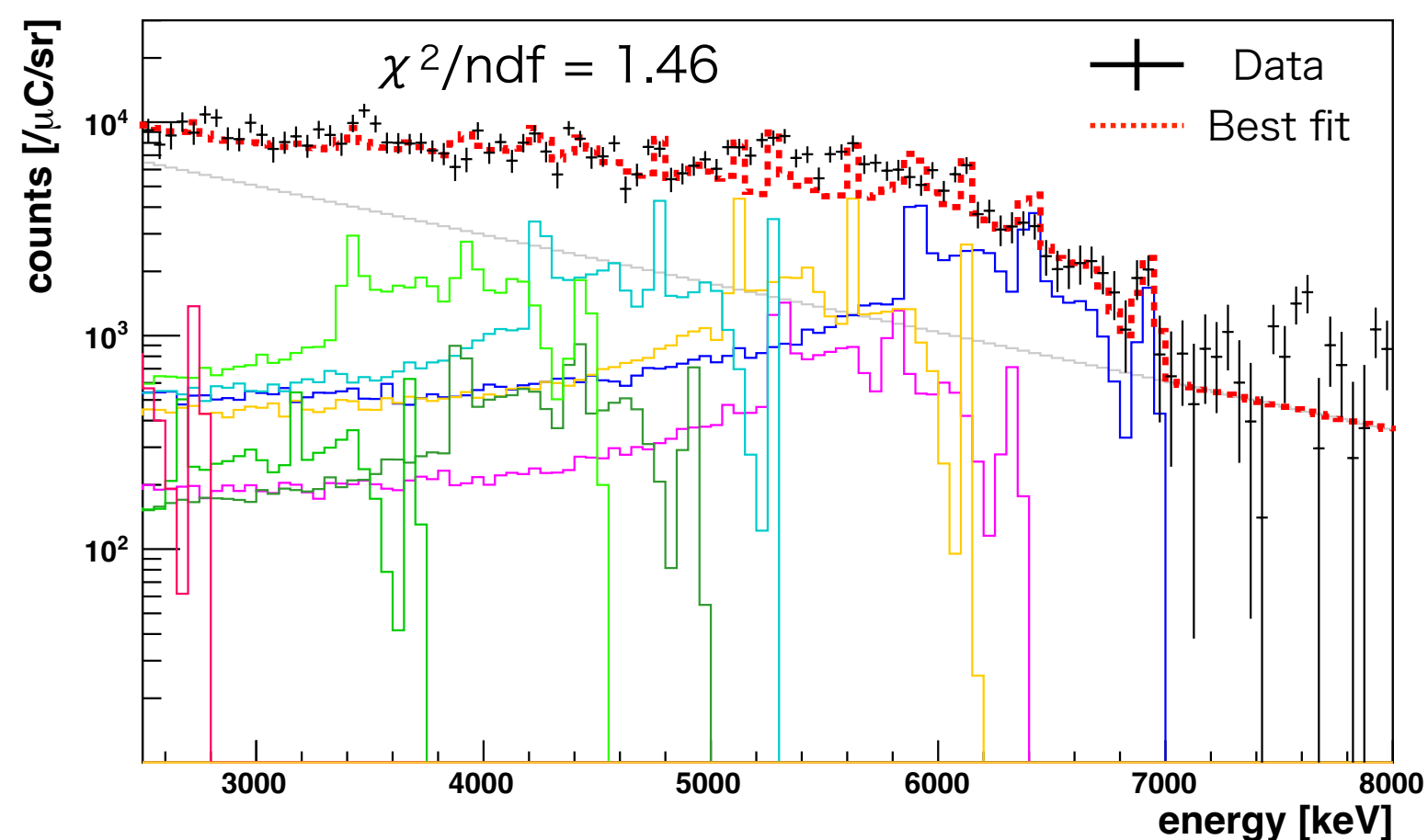
- ① 11個のパラメータを同時にフィッティング



- ② バックグラウンドのパラメータを
得られた値に固定



- ③ 各ガンマ線のパラメータを高エネルギー側から
一つずつフィッティング (光電吸収ピークを用いる)



修正後の手法

- ①・②・③の後

- ④ 各ガンマ線のパラメータを固定して
バックグラウンドをフィッティング



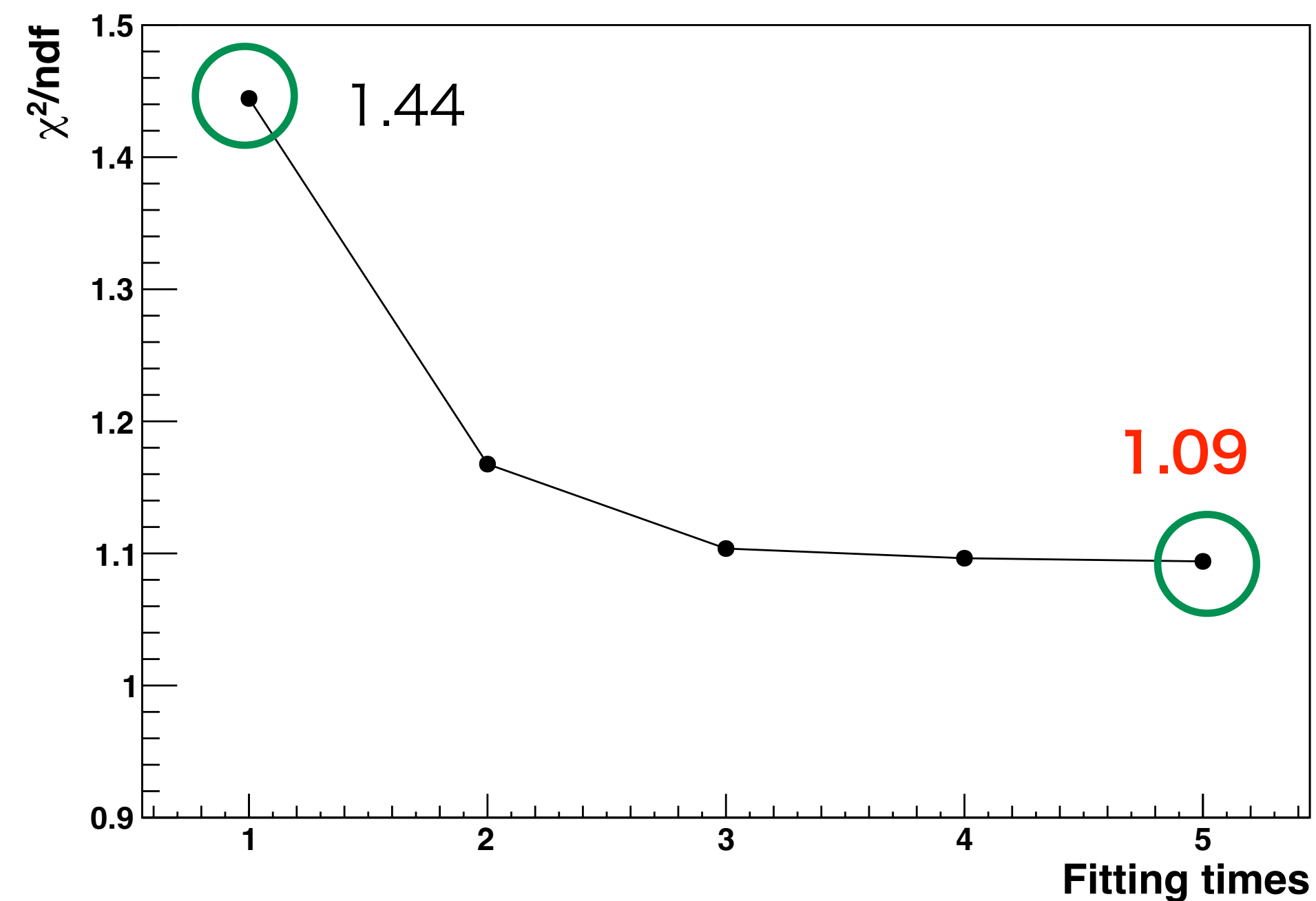
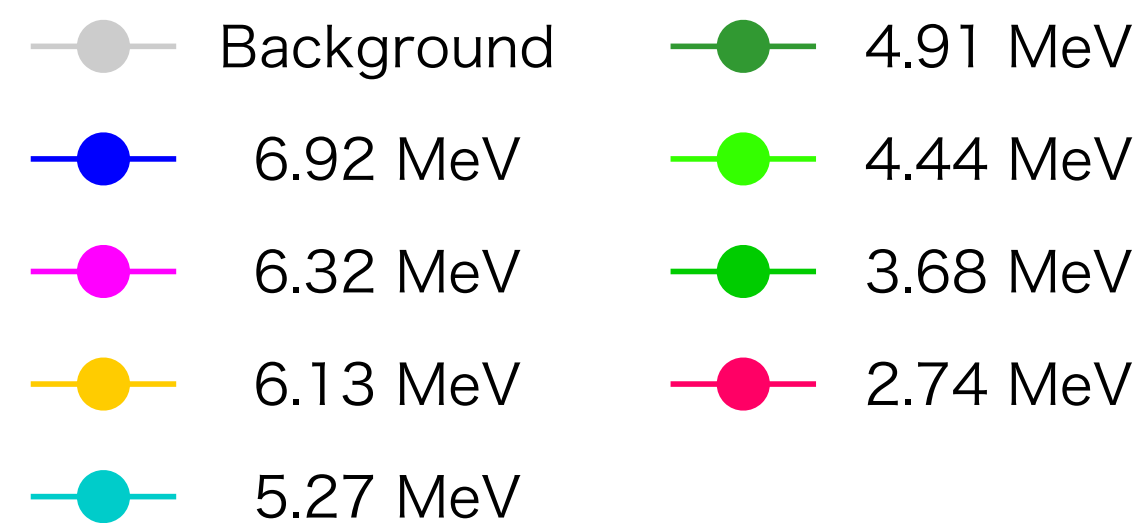
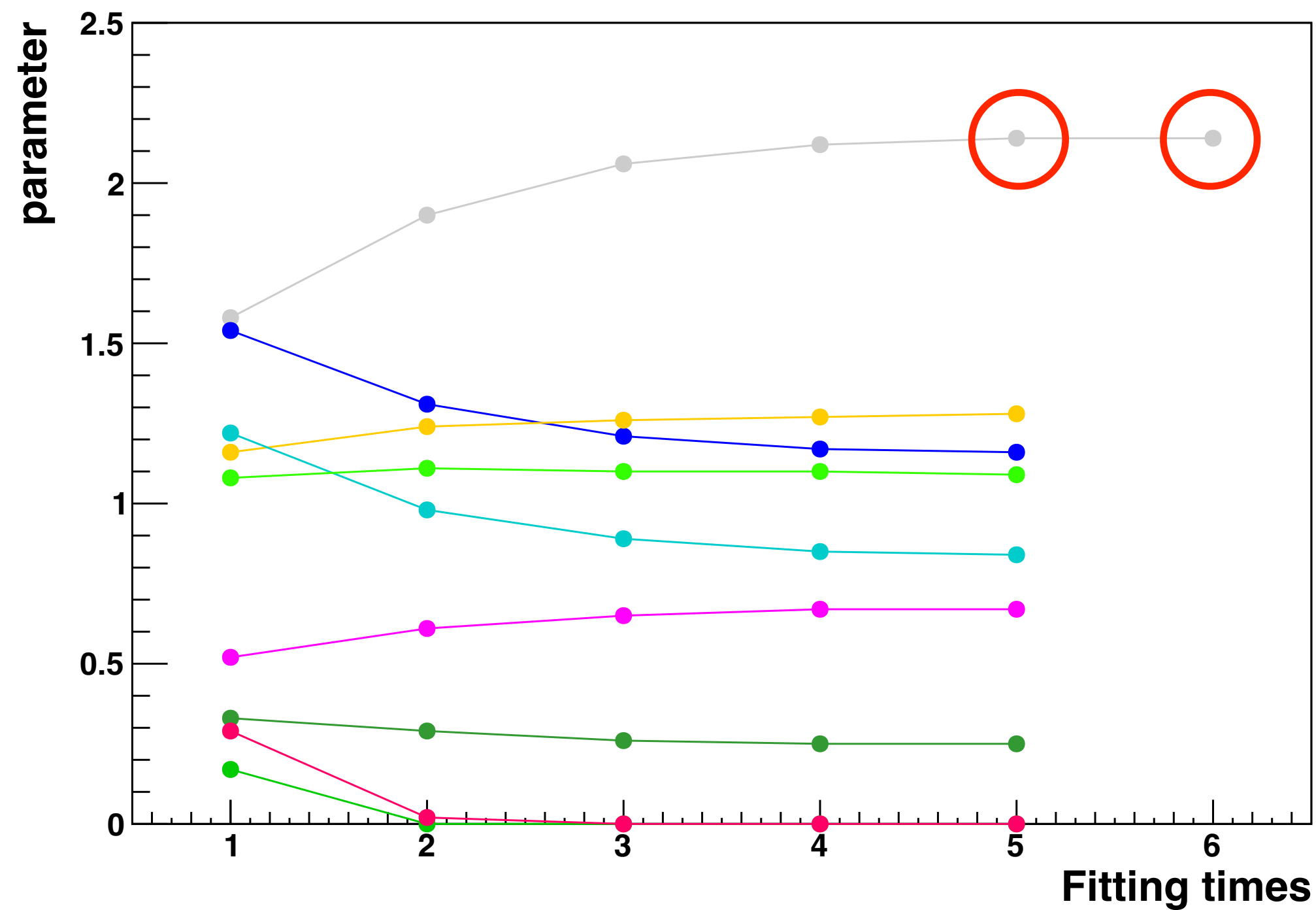
- ②・③・④を繰り返し行う



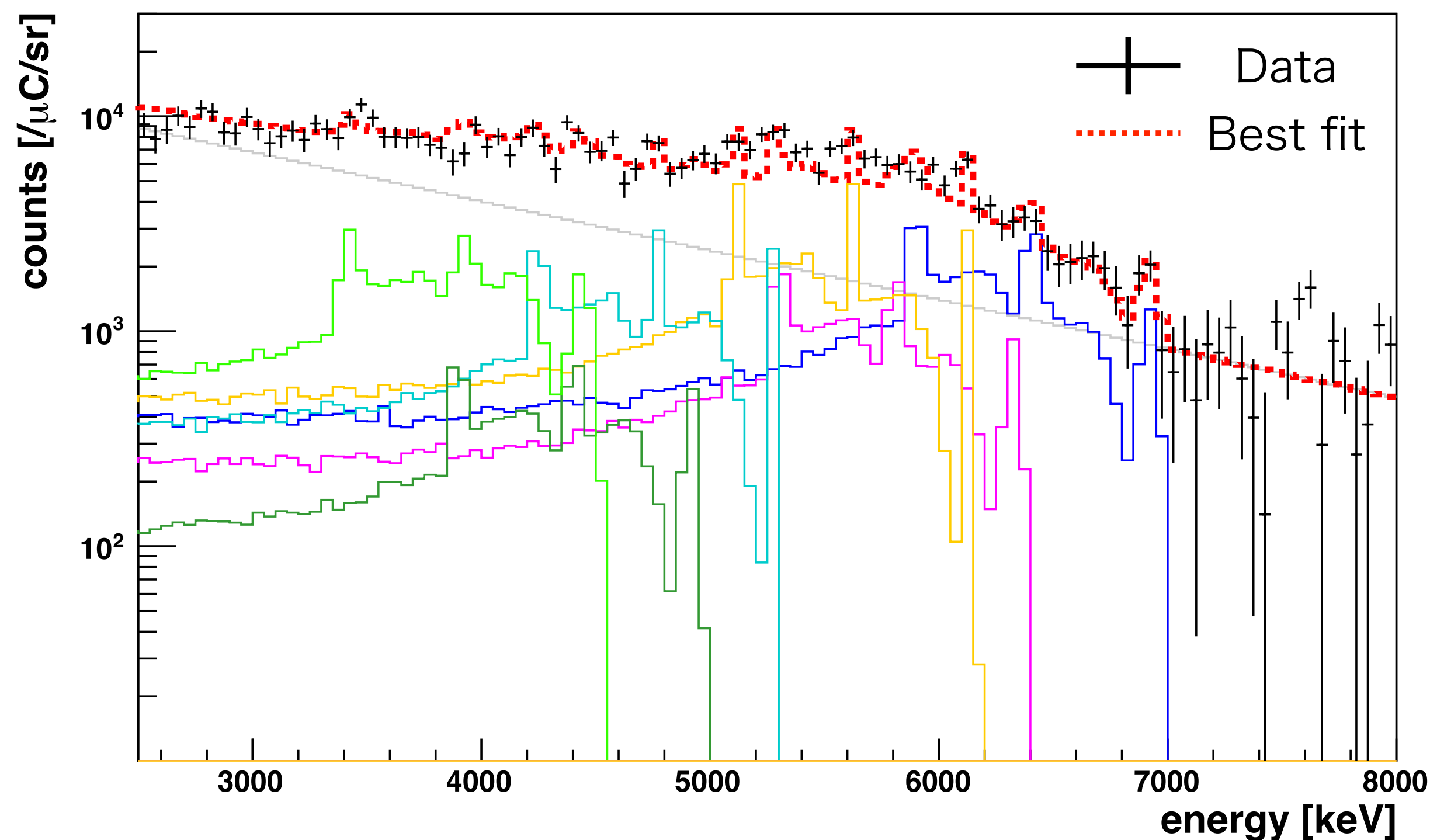
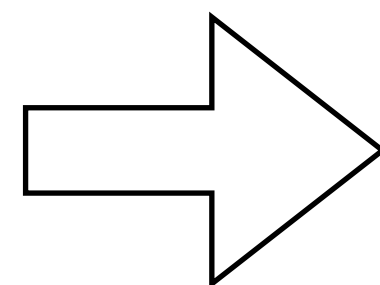
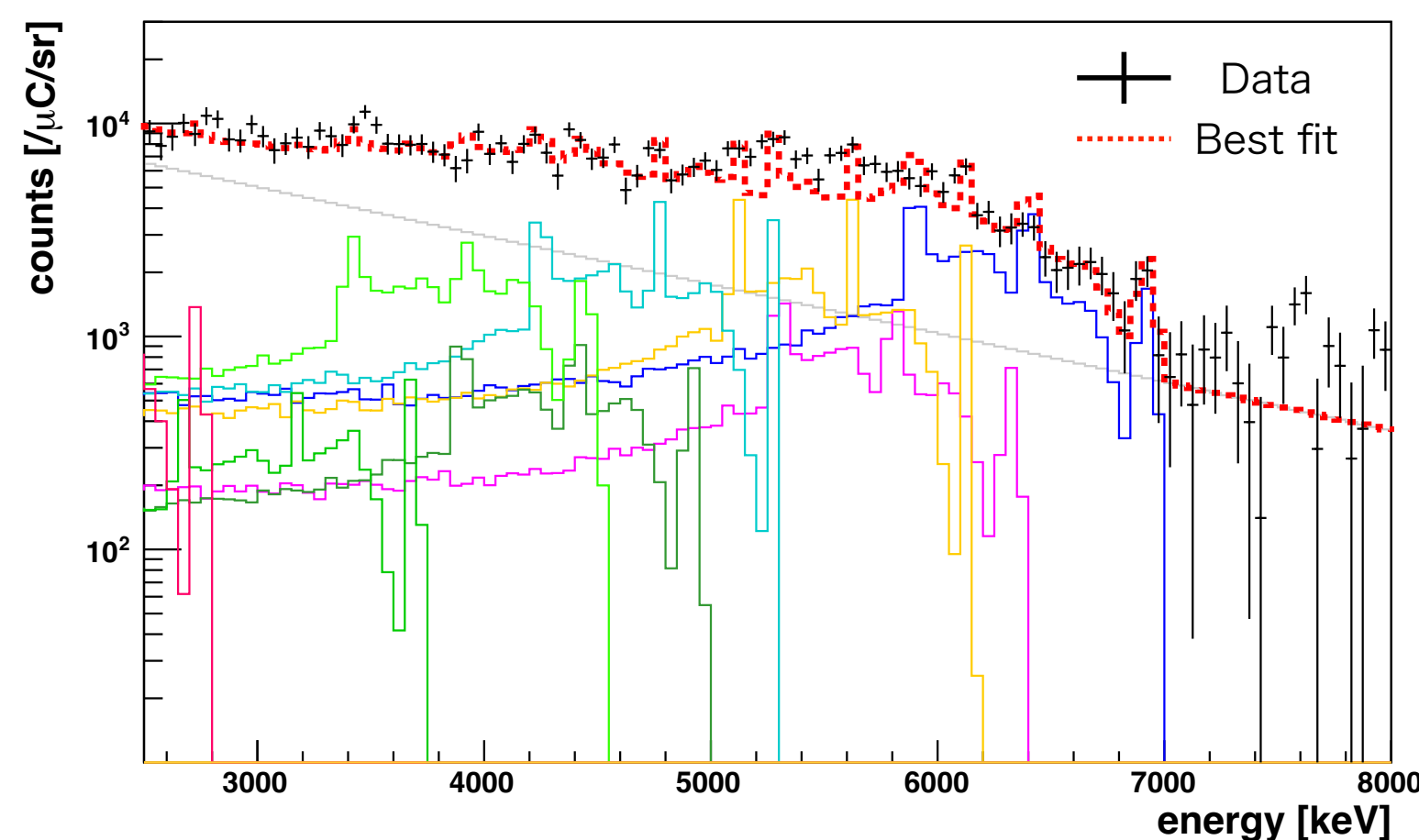
- ④において、1 loop前と同じ値が
得られたら終了する

フィッティングの様子

- 6回目のフィッティングで、バックグラウンドのパラメータが5回目と一致した
- χ^2/ndf : 1.44 \rightarrow **1.09**



フィッティング結果



- 最も強く確認されたピークは、6.13 MeVのガンマ線
 - ▶ $^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}$ 反応によって、 ^{16}O の第2励起状態から放出される
- 今後はフィッティング結果を用いて各ガンマ線の生成断面積を算出する
- その結果をシミュレーションに導入することで、NCQE反応由来の不定性の削減が期待される

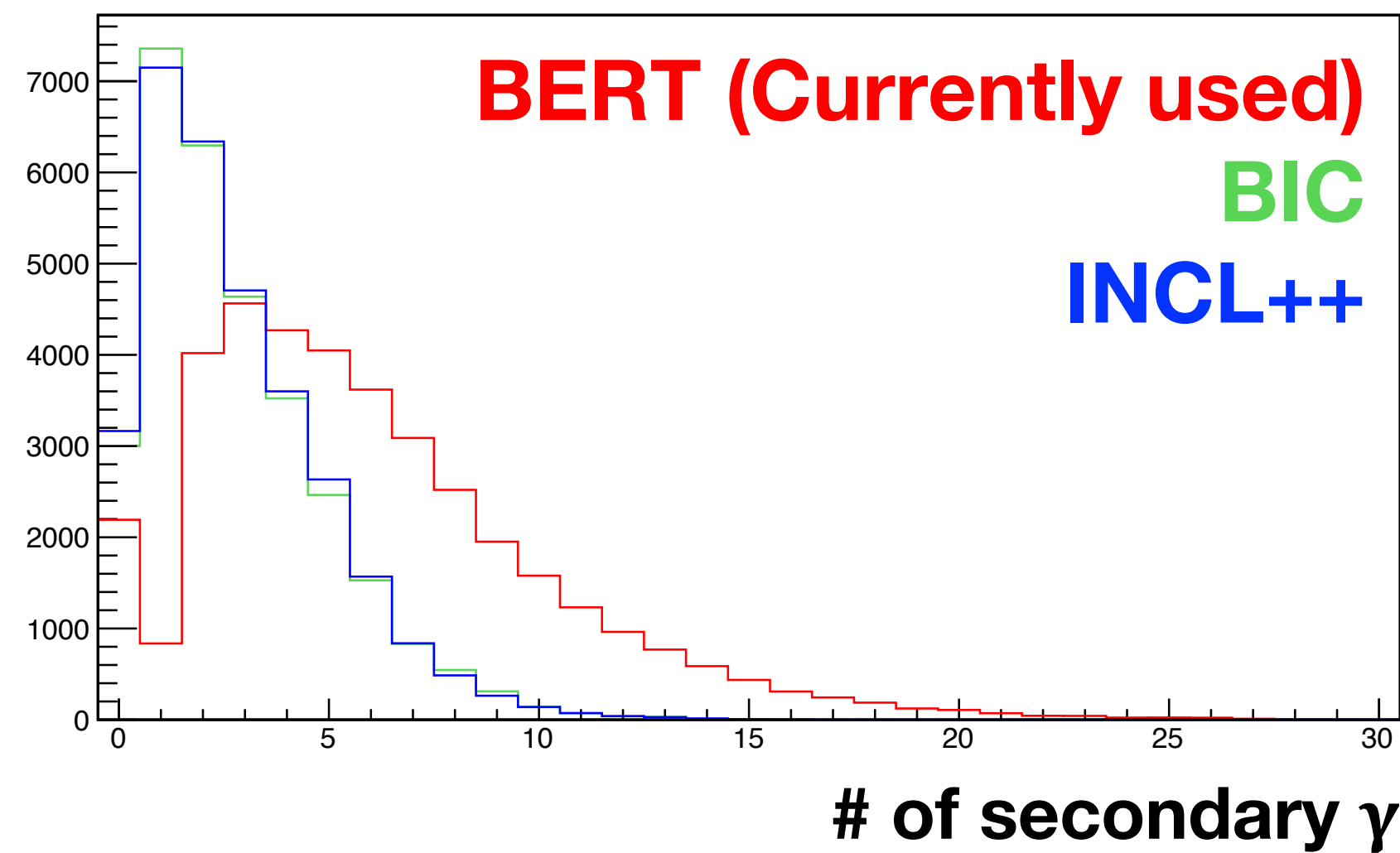
まとめ・展望

- 大気ニュートリノによるNCQE反応は、SK-Gd実験でのSRN探索において、主要な背景事象の一つであり、特に中性子と酸素原子核の反応によって放出されるガンマ線による不定性が大きい
- 大阪大学RCNPにおいて、中性子と酸素原子核反応を測定するE525実験が行われた
- 30 MeV・250 MeVの中性子ビームを水標的に入射させ、放出されるガンマ線が測定された
- 現在は250 MeV実験のデータ解析を進めている
- 中性子フラックスの系統誤差を見積もったところ、ビームの不安定性由来のものが最も大きく、誤差は31%であった
- ガンマ線スペクトルのフィッティングの手法を改良したところ、 χ^2/ndf がより小さいフィッティング結果を得た。
- $^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}$ 反応によって ^{16}O の第2励起状態から放出される6.13 MeVが最も強く確認された
- 今後は生成断面積の計算を行う
- これらの実験データに合うようにモデルを修正することで系統誤差の削減が期待される

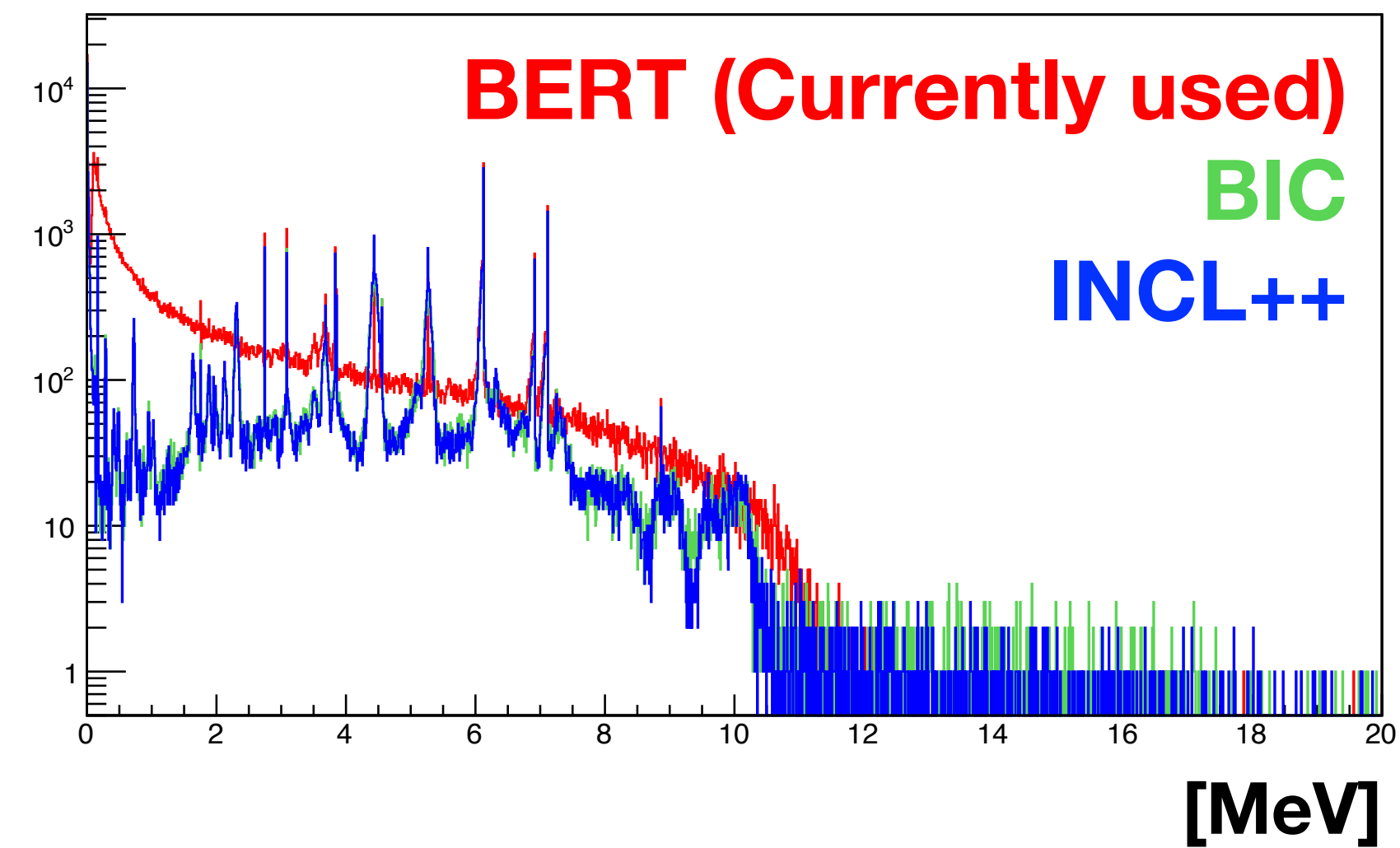
Backup

- ・ 中性子と酸素原子核の反応は実験データがほとんど存在しない
- ・ 2次ガンマ線の本数やスペクトルはモデルによって異なる (酒井さん 23pW3-2)

of secondary γ (MC, true)



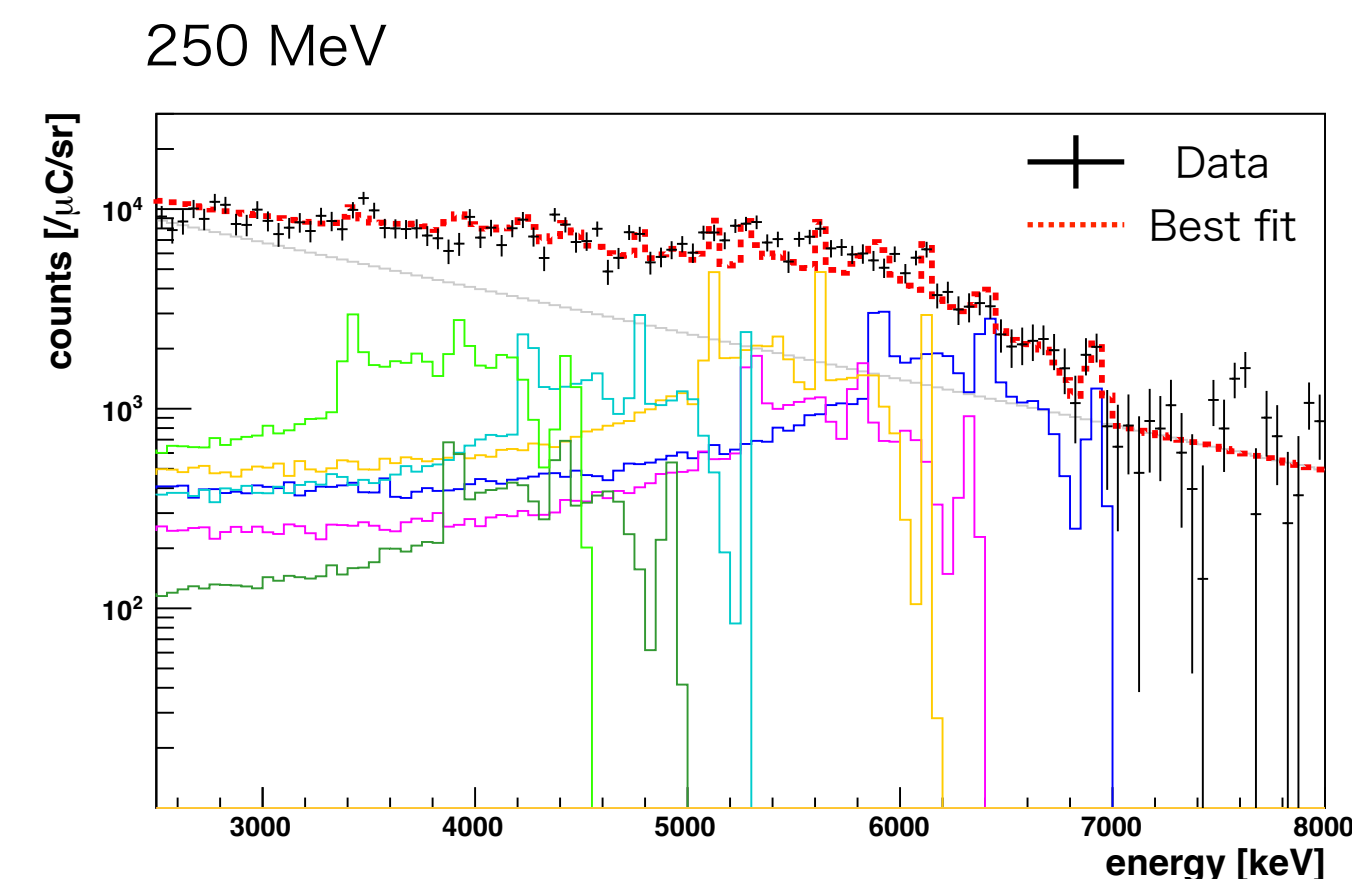
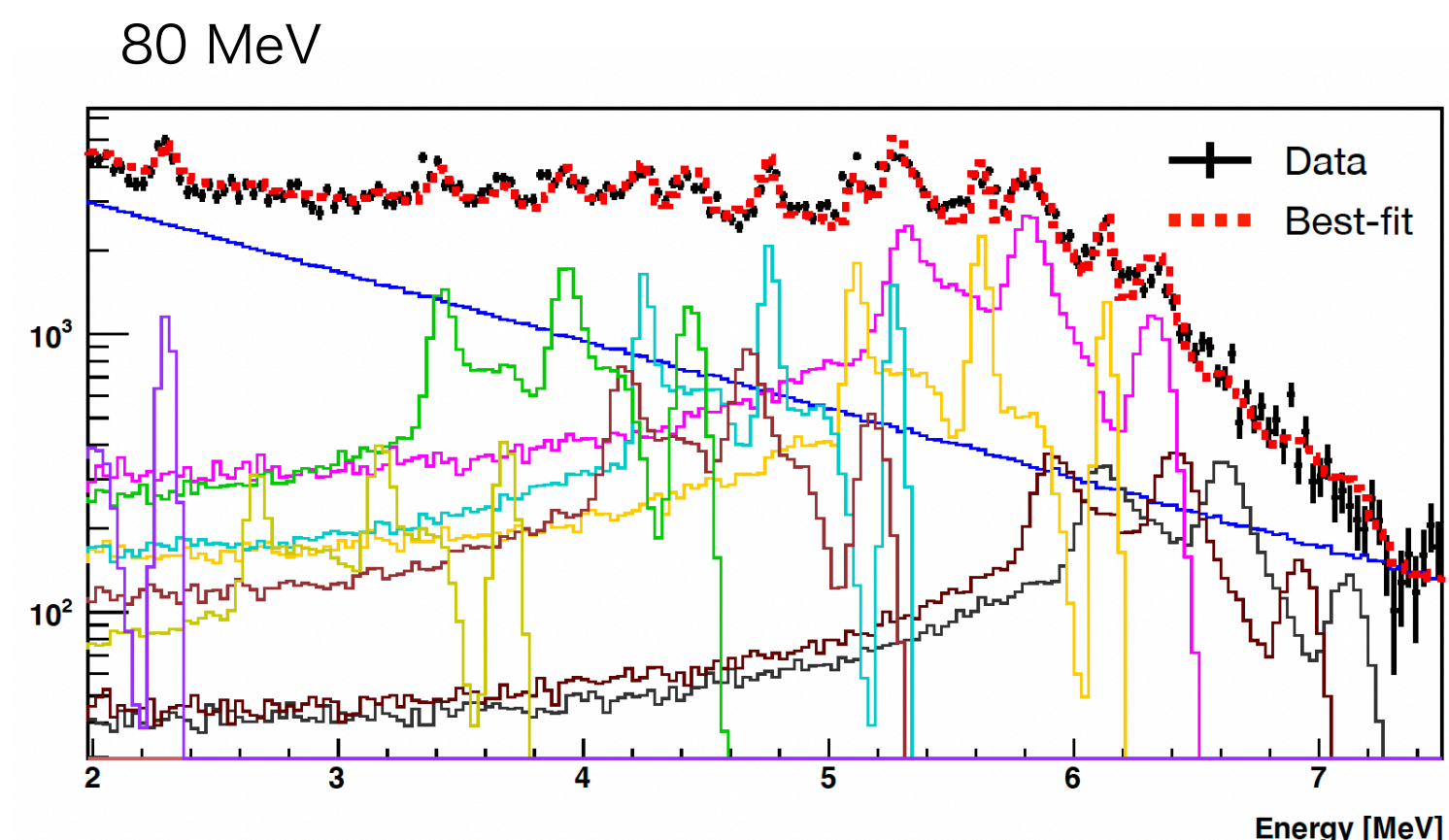
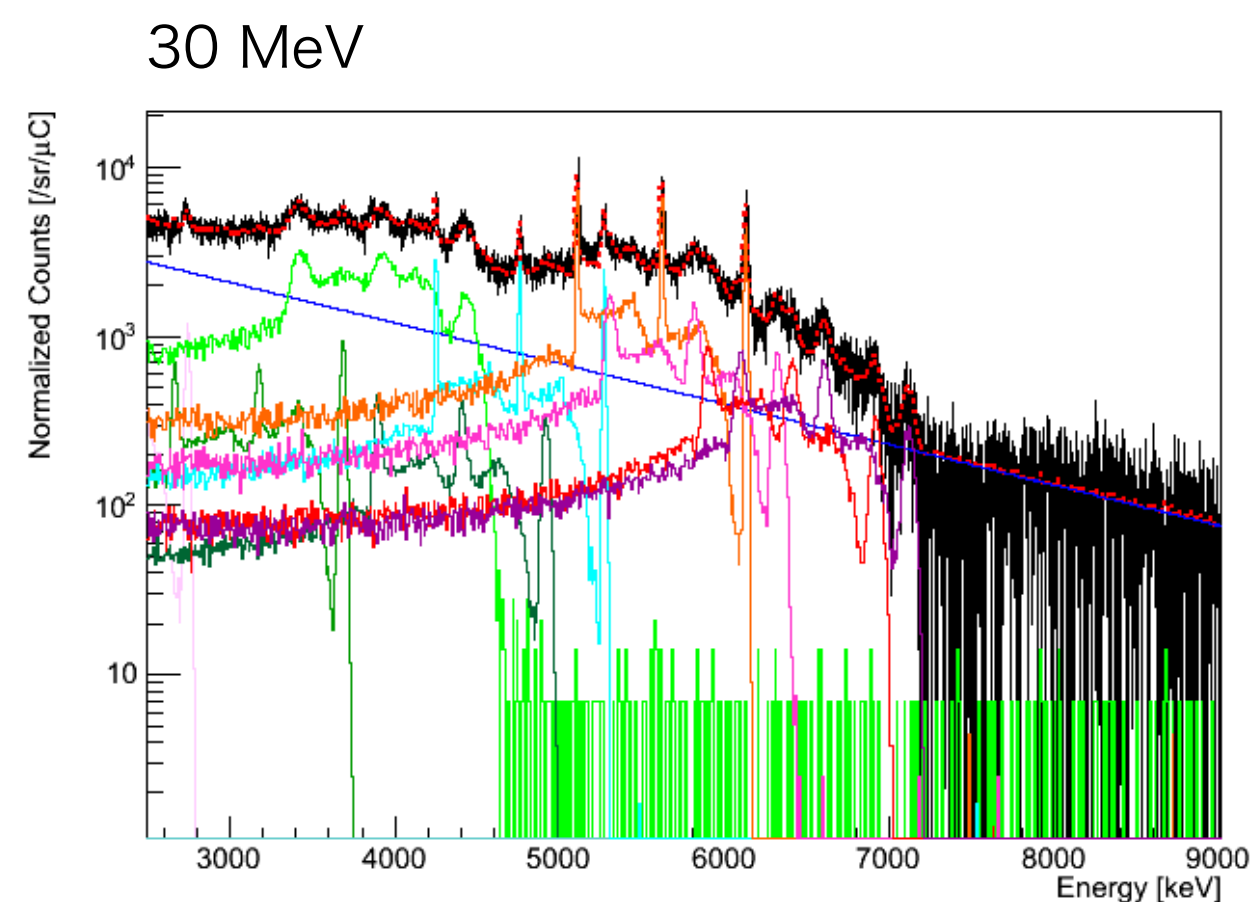
Energy of secondary γ (MC, true)



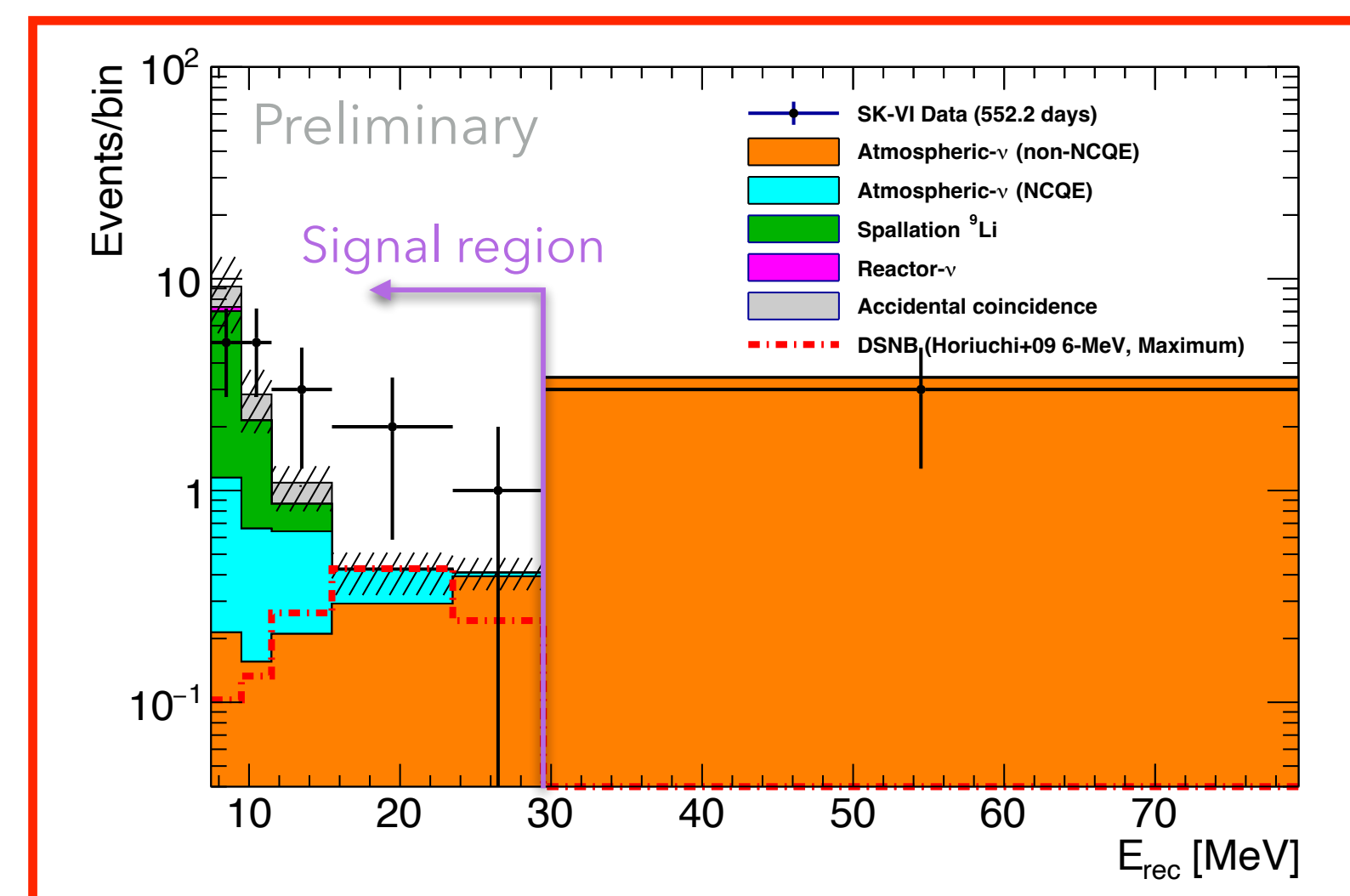
中性子と酸素原子核反応の測定実験を行い、実験データに合うようなモデルを作成する

シミュレーションへの導入

- 中性子・酸素原子核反応の測定実験データを再現するようにモデルを修正
→ 2次ガンマ線由来の不定性削減

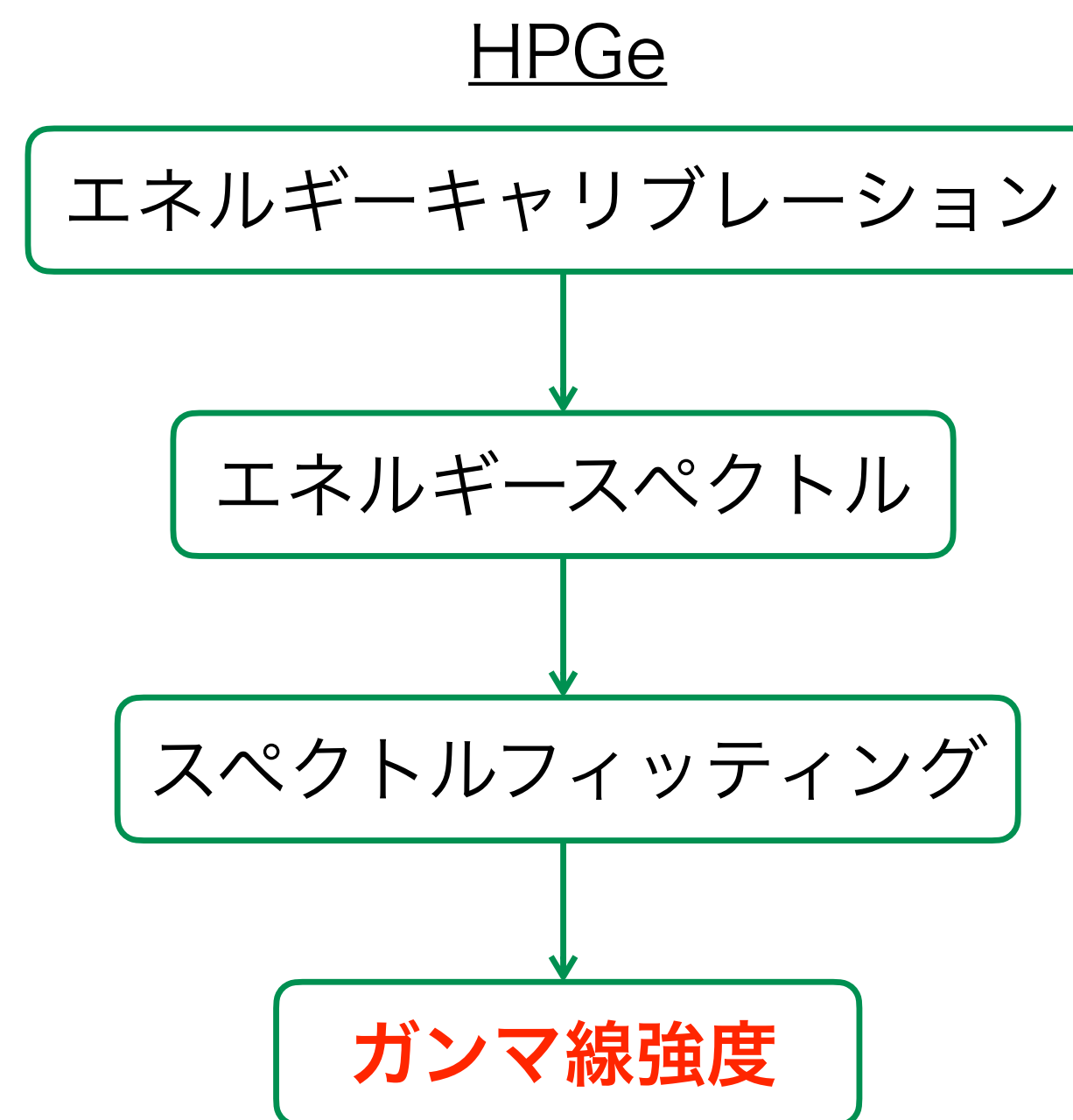
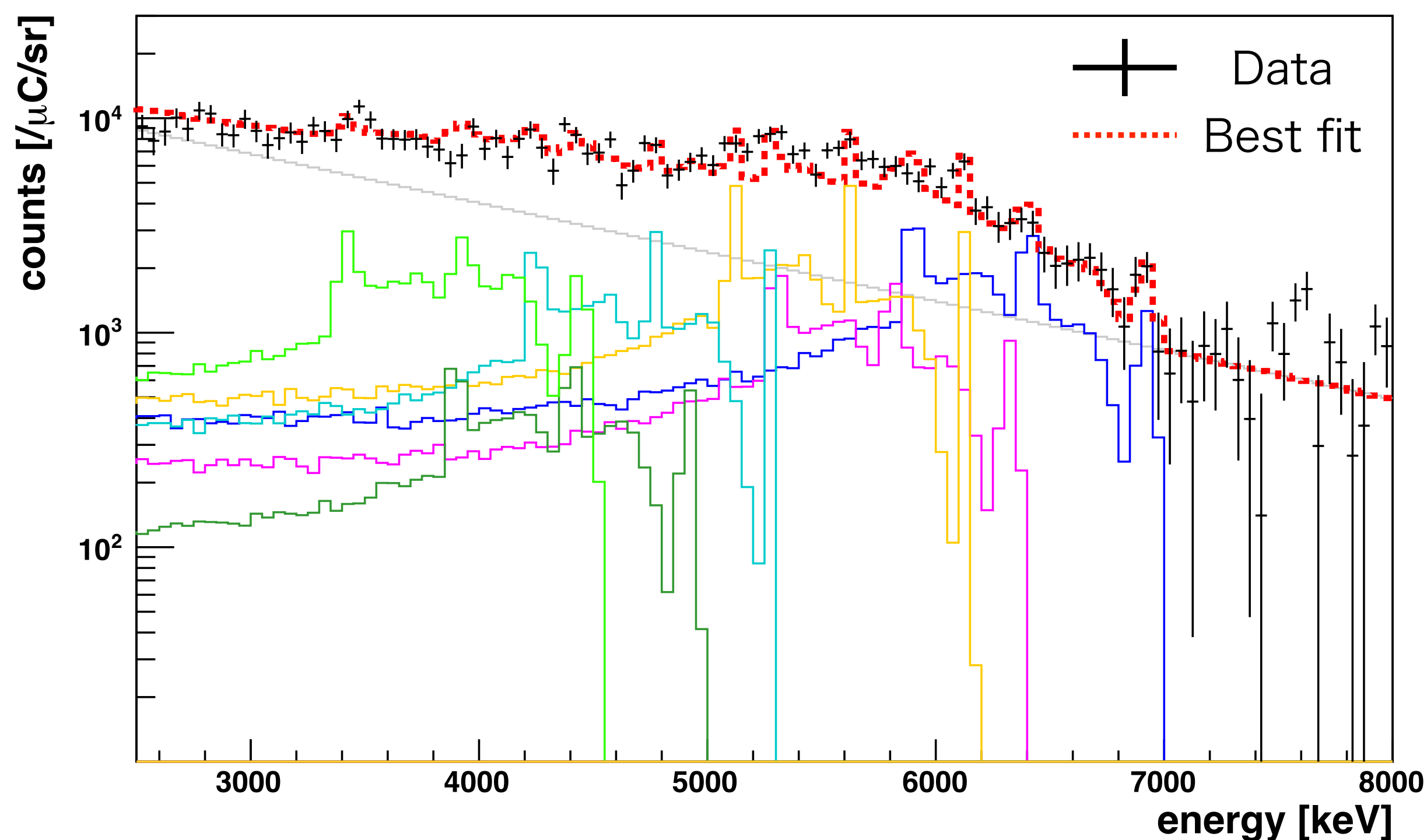


- SRN探索における、NCQE反応由来の系統誤差の削減が期待される



ガンマ線スペクトル

- ガンマ線スペクトルをフィッティングして各ガンマ線の強度を求めた
- 最も強く確認されたピークは、6.13 MeVのガンマ線
 - $^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}$ 反応により、 ^{16}O の第2励起状態から放出される
- 現在は断面積計算と系統誤差の評価を行っている その後論文を執筆する予定



生成断面積

- フィッティングで得たパラメータを用いて生成断面積を算出した

$$\sigma_{\gamma,j} = f_j \cdot \frac{N_{MCgenerated}}{\phi_n \cdot T}$$

$$N_{MCgenerated} = 10^8$$

ϕ_n : 中性子フラックス

f_i : フィットで得たパラメータ

T : 酸素原子核数

ガンマ線エネルギー [MeV]	生成断面積 [mb]
6.92	33.6
6.32	19.4
6.13	37.0
5.27	24.3

ガンマ線エネルギー [MeV]	生成断面積 [mb]
4.91	7.23
4.44	31.5

生成断面積 (30 MeV)

ガンマ線エネルギー [MeV]	生成断面積 [mb]
7.12	$9.31 \pm 0.95(\text{fitting}) \pm 1.21(\text{flux}) \pm 0.25(\text{target})$
6.92	$9.53 \pm 1.08(\text{fitting}) \pm 1.24(\text{flux}) \pm 0.26(\text{target})$
6.32	$18.9 \pm 1.12(\text{fitting}) \pm 2.45(\text{flux}) \pm 0.51(\text{target})$
6.13	$33.6 \pm 1.03(\text{fitting}) \pm 4.35(\text{flux}) \pm 0.90(\text{target})$
5.27	$12.8 \pm 0.88(\text{fitting}) \pm 1.66(\text{flux}) \pm 0.34(\text{target})$
5.10	<0.39
4.91	$4.11 \pm 1.32(\text{fitting}) \pm 0.53(\text{flux}) \pm 0.11(\text{target})$
4.44	$52.2 \pm 1.61(\text{fitting}) \pm 6.76(\text{flux}) \pm 1.40(\text{target})$
3.68	$6.30 \pm 1.24(\text{fitting}) \pm 0.82(\text{flux}) \pm 0.17(\text{target})$
2.74	$4.48 \pm 1.20(\text{fitting}) \pm 0.58(\text{flux}) \pm 0.12(\text{target})$