



SK-Gd実験における

Am/Be線源を用いた中性子同定効率評価

岡山大学 原田将之

2022年3月15日 @日本物理学会第77回年次大会（オンライン）

小汐由介(岡山大),

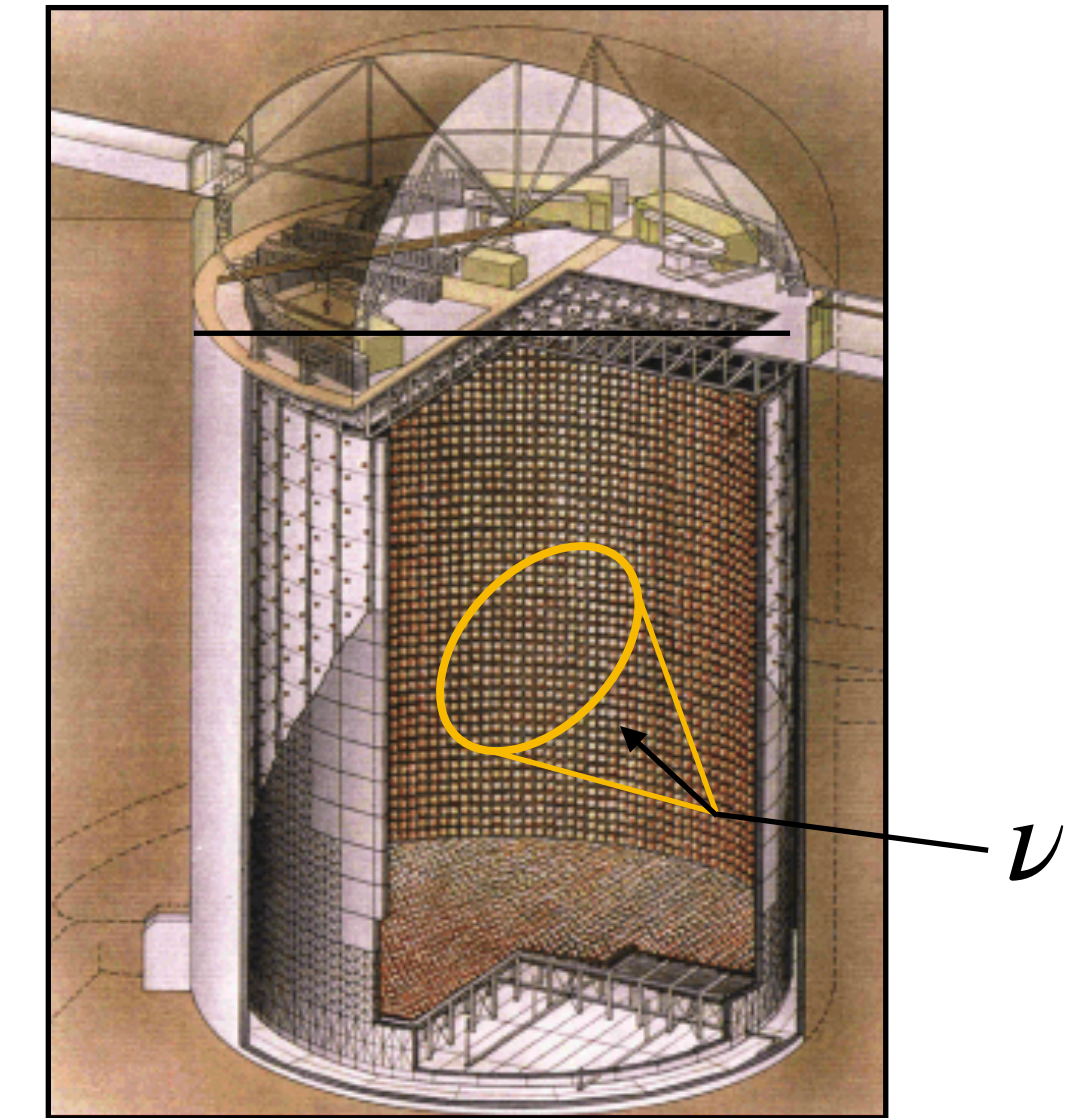
Han Seungho, 渡辺柊平, 矢野孝臣, 奥村公宏, 関谷洋之, 森山茂栄(東大宇宙線研),

中島康博(東大理), Roger Wendell(京大理)

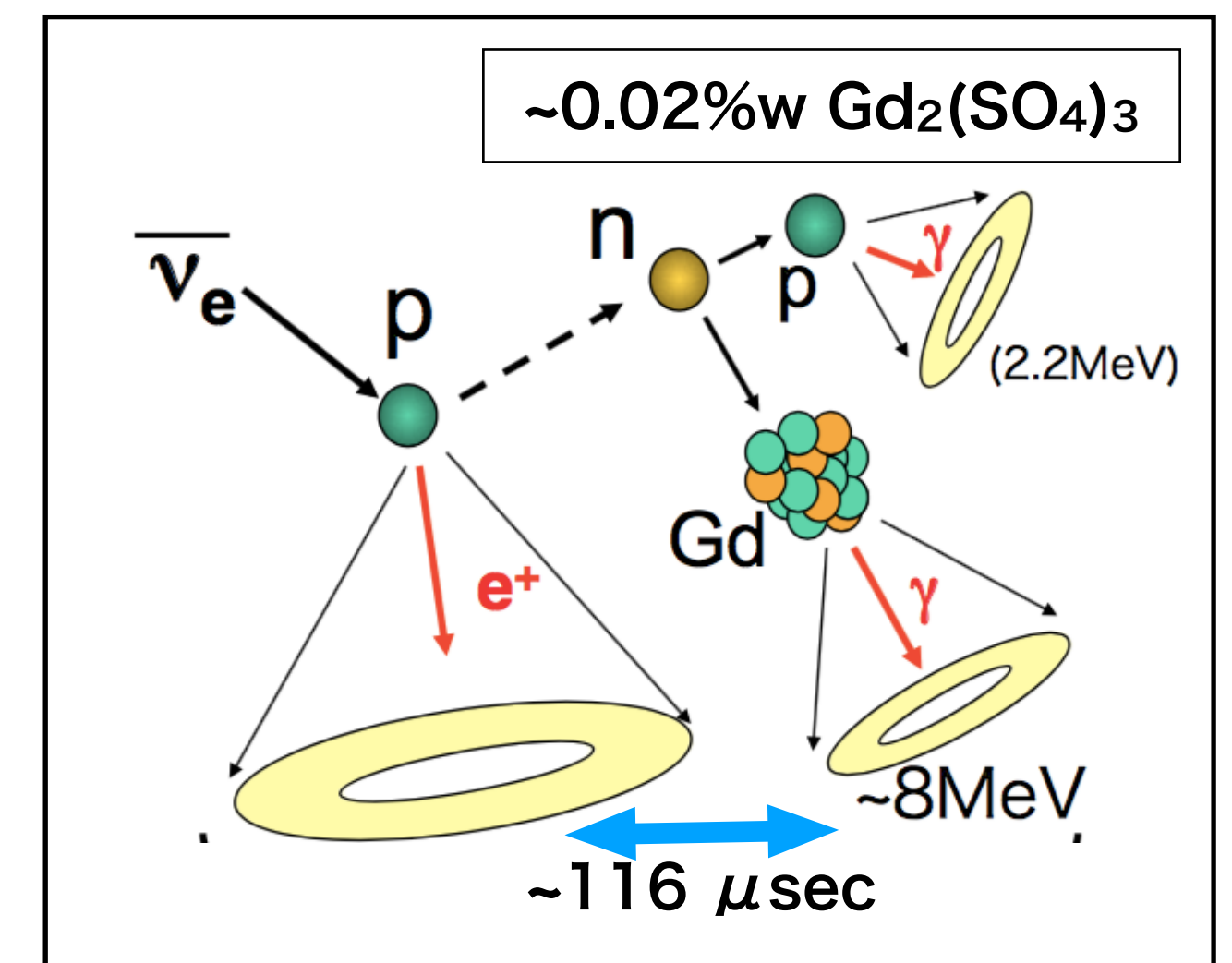
他Super-Kamiokande Collaboration

Super-Kamiokande検出器の超純水に硫酸Gdを導入し、
中性子信号を高効率で検出する

- 検出器：Super-Kamiokande(SK)
- Gdの中性子捕獲：SKで観測可能な合計~8 MeVのガンマ線
- 先発荷電粒子 + 中性子の熱中性子捕獲→同時遅延計測
↳超新星背景ニュートリノなどの観測感度の向上
- 2022年3月現在、Gd濃度0.011%w相当が導入済(15aA442-1)
↳Gdの中性子捕獲~50% × Gd(n,γ)Gdの同定効率~80%
= 中性子同定効率~40%



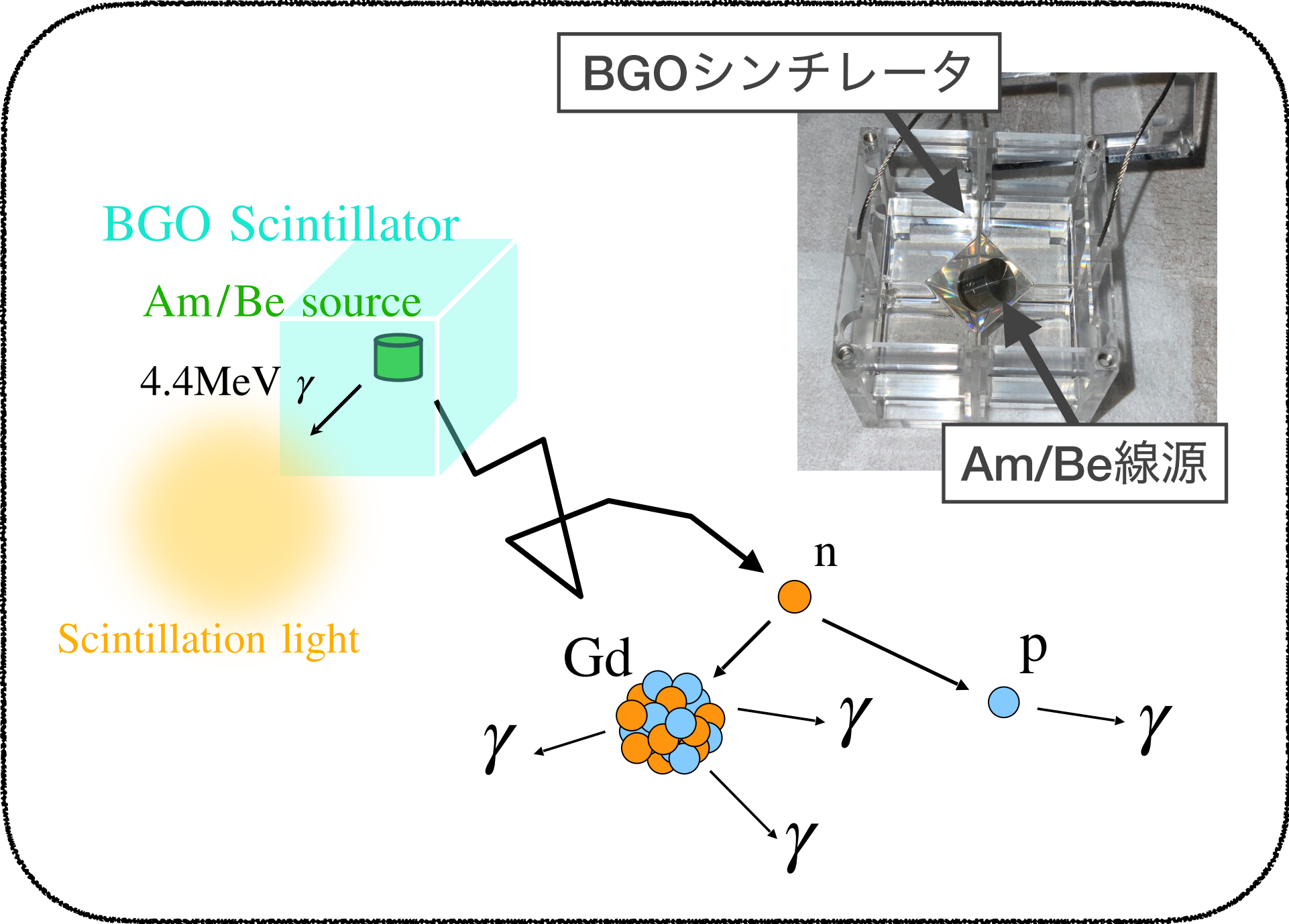
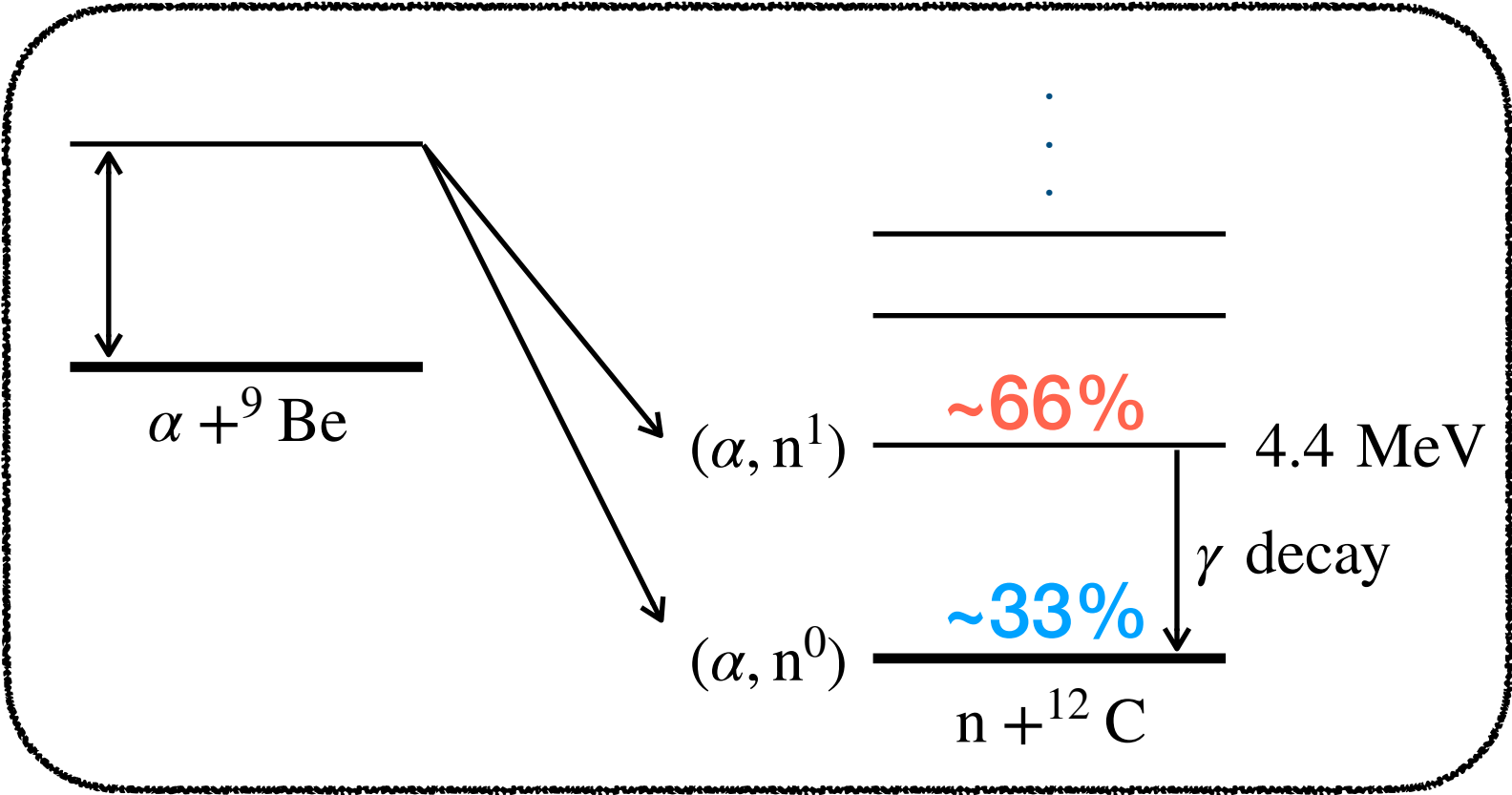
例: 逆ベータ崩壊($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)



目的：中性子同定効率の見積もり・MCとの比較→系統誤差

- Am/Be線源は
 $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n + \gamma(4.4\text{ MeV})$ (Fraction ~ 0.66)
 ${}^{12}\text{C}(\text{GS}) + n$ (Fraction ~ 0.33)
で中性子を生成
- AmBe + BGOシンチレータ
↳ 4.4 MeV ガンマ線から大光量の先発事象を作成
- 前回JPSでは測定データとMCにおける中性子同定効率 ϵ_n について相対的に $\sim 10\%$ の差異が見られていることを報告

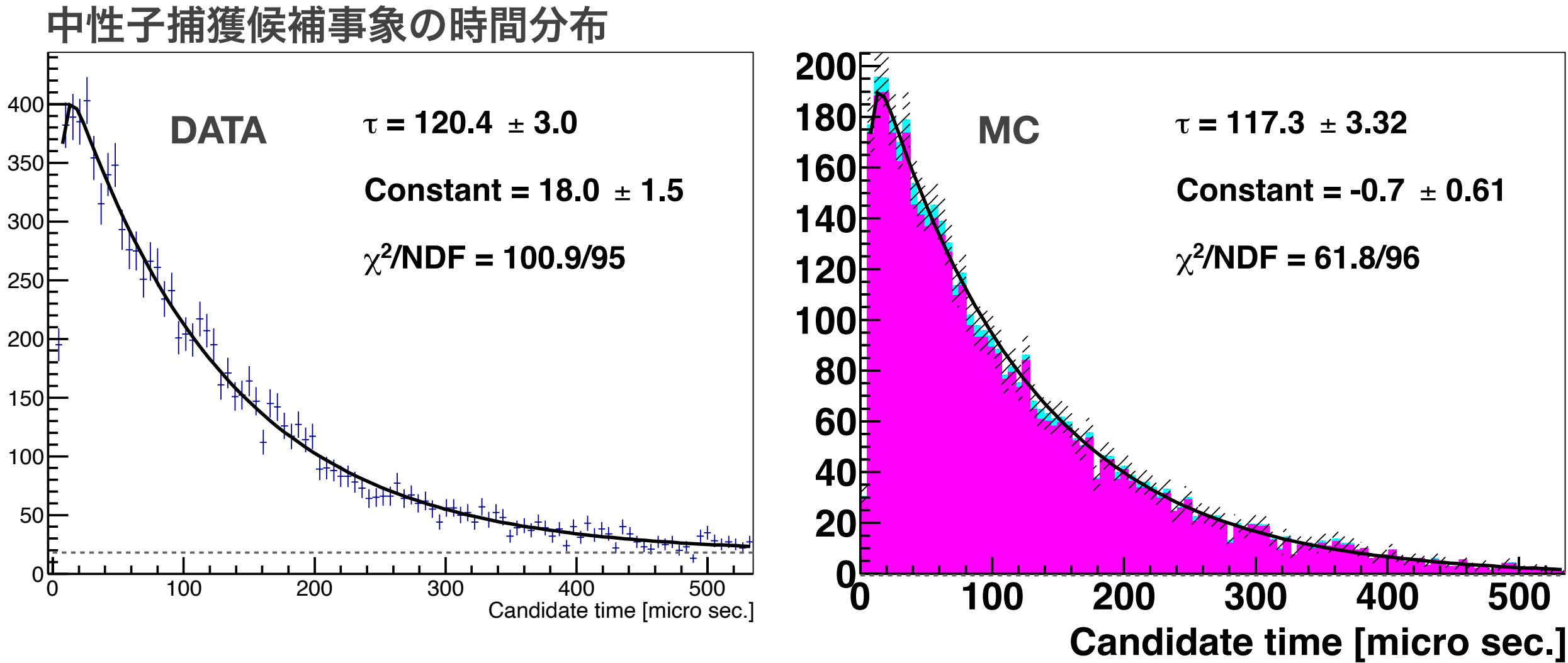
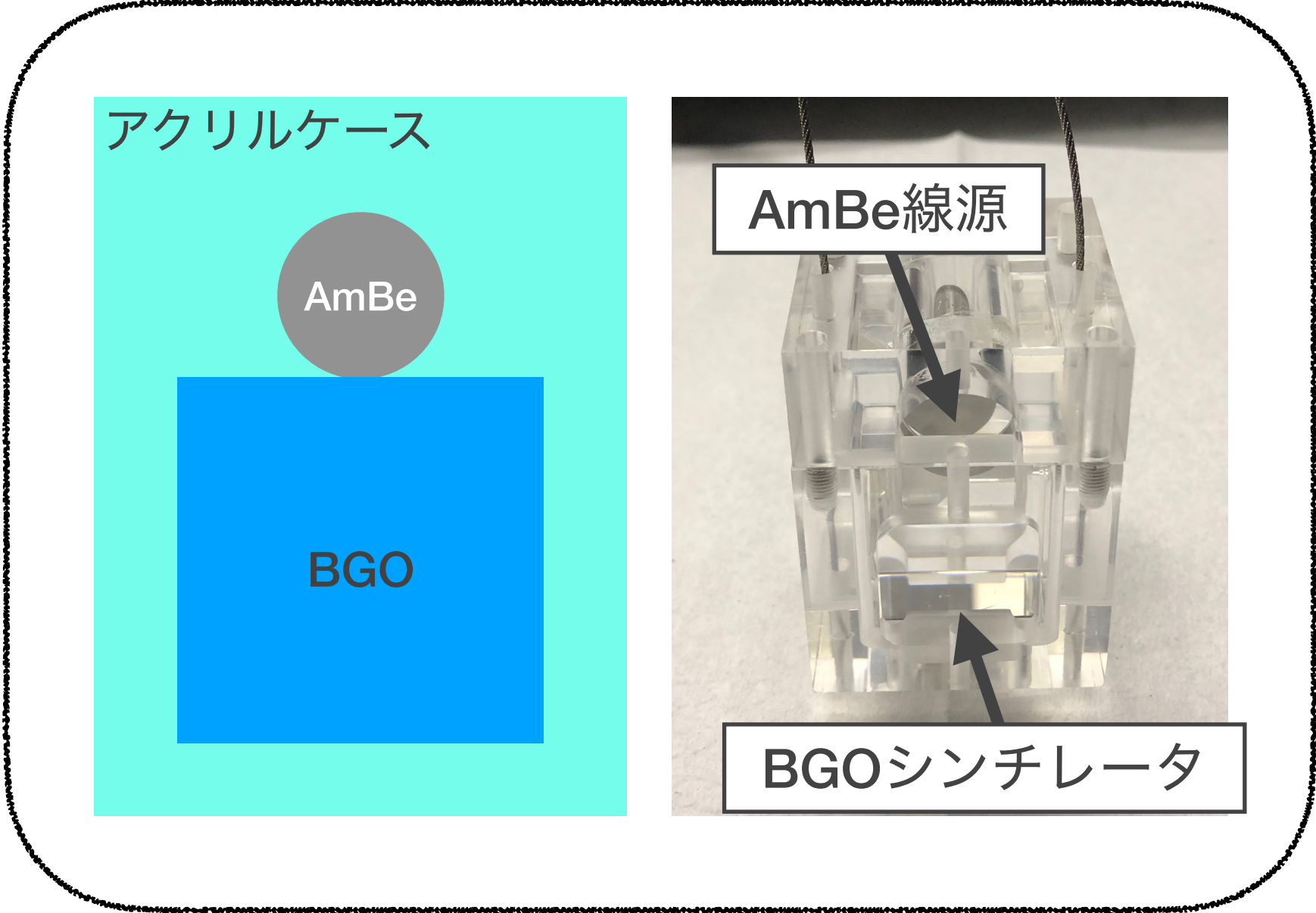
8BGO	DATA	MC	(DATA-MC)/MC
ϵ_n	$34.5 \pm 0.5\%$	$39.6 \pm 0.3\%$	$\sim 13\%$



BGOの被覆率を変えた測定

- BGOが中性子に与える影響をMCで再現できていない可能性
- 線源に対するBGOの被覆率を減らした測定
↳BGOの影響を見積もる

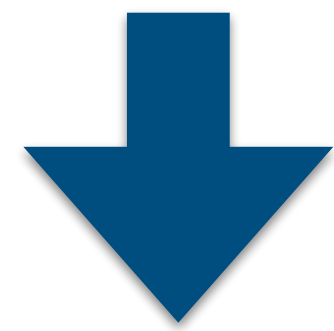
$$\epsilon_n = \frac{(\text{\# of Tagged candidates}) - (\text{\# of Background candidates})}{(\text{\# of Prompt Event})}$$



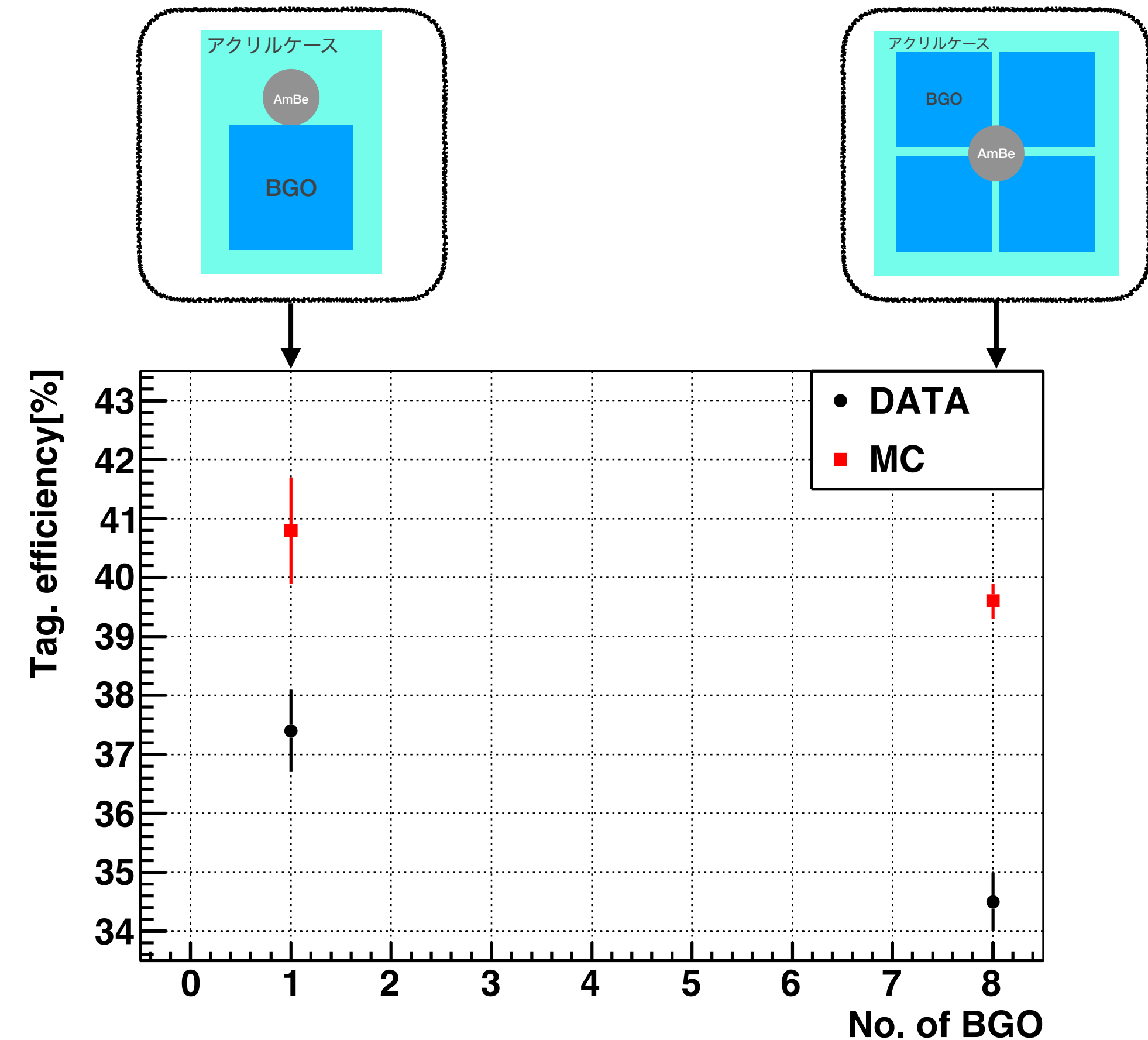
1BGO	DATA	MC	(DATA-MC)/MC
ϵ_n	$37.4 \pm 0.7\%$	$40.8 \pm 0.9\%$	$\sim 8\%$

中性子同定効率とBGO被覆率の関係

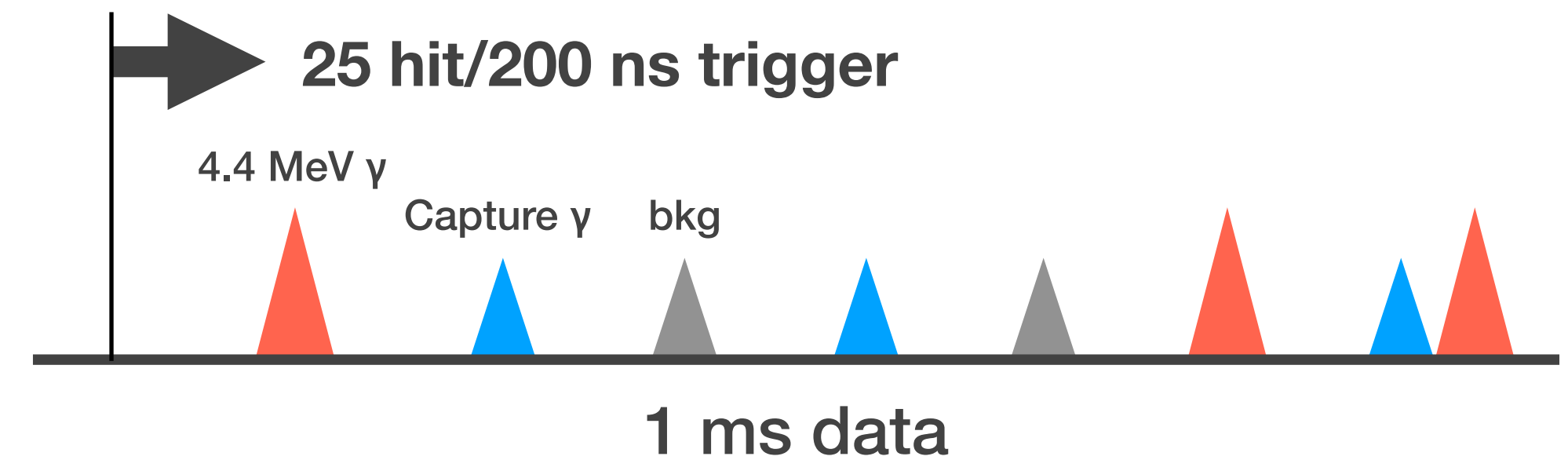
- BGOの被覆率と中性子同定効率に負の相関を確認
↳ BGOの影響で同定効率が $\sim 1.5\%$ ↓
- BGOの線源被覆率に依存して、DATA/MCに相対値で
 $\sim 10\%$ の差異が見られた



- ✓ DATA/MCの乖離はBGOだけに由来するものではない
- ✓ 線源の理解やMCの中性子モデルに原因があると考えられる
↳ 線源特性を理解するための別解析が必要

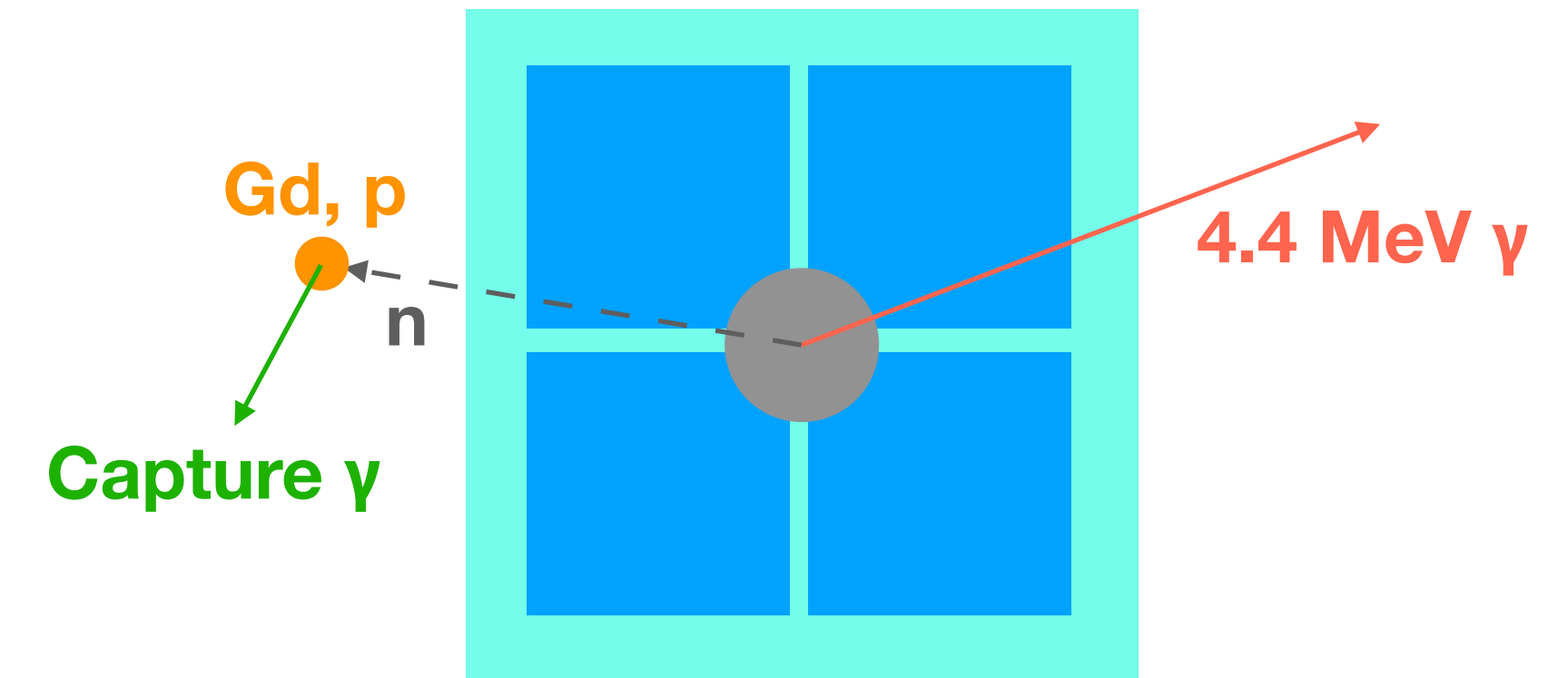


- Am/Be線源をタンクに入れた状態で25 hits/200 ns閾値でイベントをトリガー
(通常の解析：大光量のイベントのあと500 μ sを保存→解析)
↳ ガンマ線と中性子の時間に依存しない解析でAm/Be線源由来のガンマ線、中性子事象を理解する
- 線源由来のガンマ線 (4.4 MeV ガンマ線、捕獲ガンマ線) をMCで生成→スケールフィット
↳ SKで測定される中性子、4.4 MeVガンマ線のレート (R_n , R_γ) を見積もる
- 予想値 (中性子とジオメトリとの反応がない場合)
 R_γ : Ge検出器を用いた別測定→ 141.3 ± 14.1 Bq
 R_n : $R(n):R(n+\gamma)=1:2$ を仮定→ ~ 200 Bq

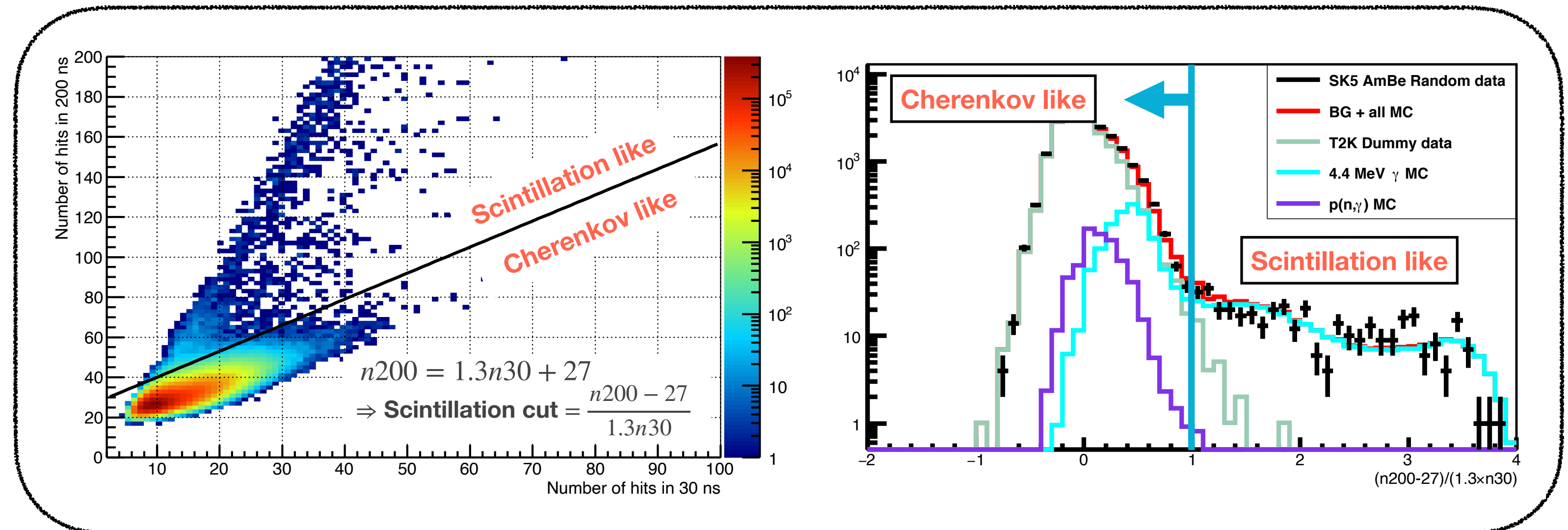


ガンマ線MC・解析手法

- ガンマ線MC：線源周りのジオメトリも構築
- 線源由来の4.4 MeVガンマ線：線源中心から生成
- 中性子捕獲由来のガンマ線：
中性子MCから位置・エネルギーなど取得→MC生成

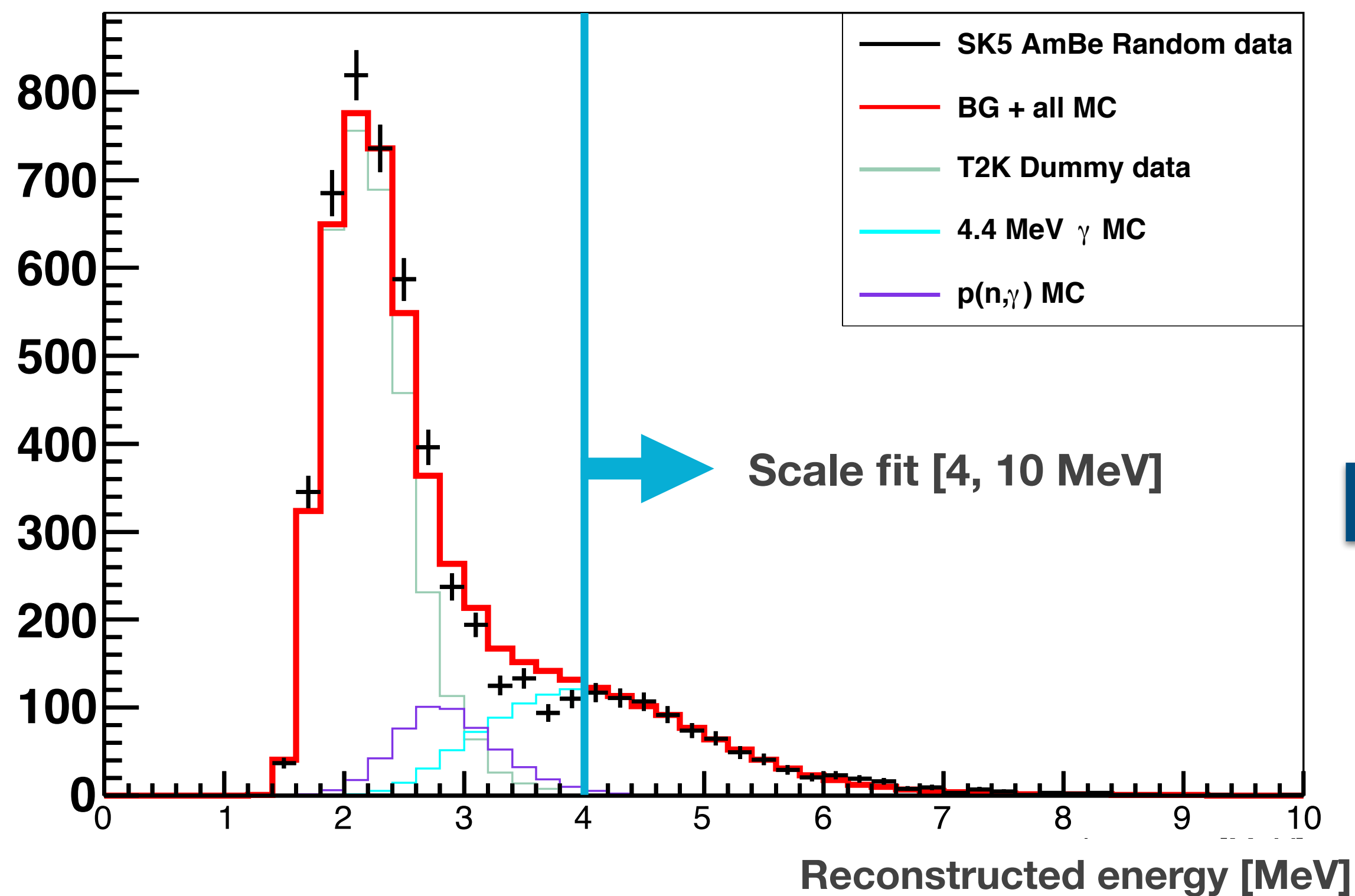


- Event selection
- Scintillation cut < 1.0
- timing goodness > 0.4
- pattern KS-test < 0.4
- 線源からの距離 < 300 cm



純水期間でのデータ解析

- 純水期間：中性子信号は $p(n, \gamma)d$ (>99.5%)
↳ 4.4 MeV ガンマ線のレート(R_Y)の見積もり

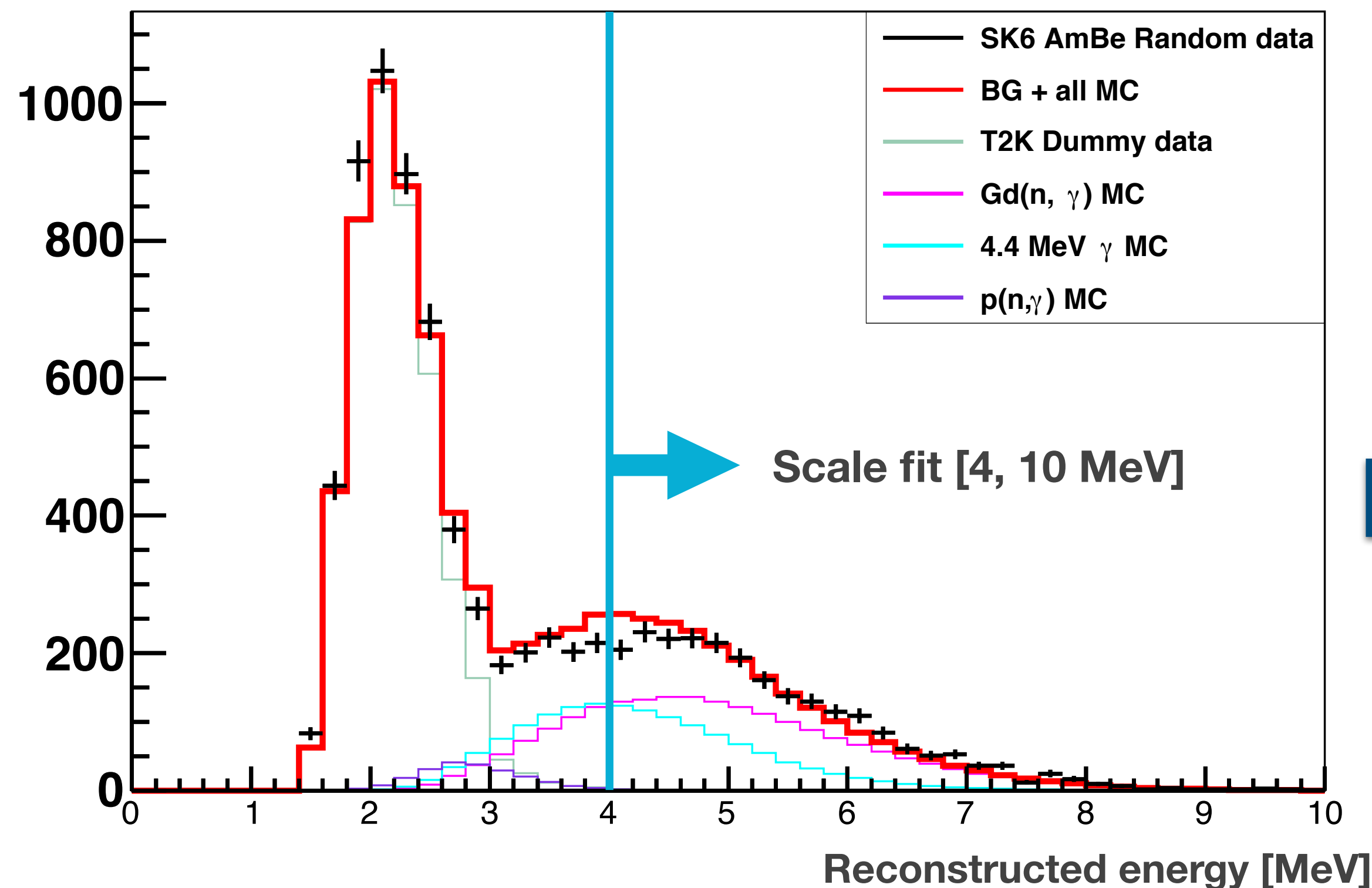


- ✓ $R_Y = 132.8 \pm 7.8$ Hz ($\chi^2/\text{ndf} = 16.8/30$ bin)
↳ Ge検出器を用いた測定(141.3 ± 14.1 Bq)と矛盾しない結果
- ✓ ガンマ線とジオメトリの反応は正しく導入できている

SK-Gd期間でのデータ解析

- SK-Gd期間：中性子信号は $p(n,\gamma)d + Gd(n,\gamma_s)Gd$ (>99.5%)

↳ Gd信号を使った中性子レート(R_n)の見積もり



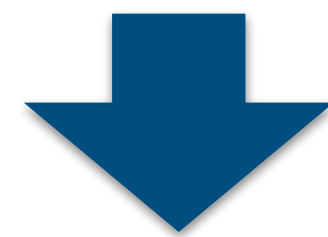
✓ $R_n = 150.1 \pm 7.8$ Hz ($\chi^2/\text{ndf} = 57.3/30$ bin)
↳ 生成された中性子が全て捕獲された場合
(~200 Bq)の**75%**

✓ ジオメトリと中性子の反応
↳ 観測されるレートが減少している

SK-Gd期間でのデータ解析(ジオメトリによる影響)

- 1BGO、BGOなし(0BGO)のデータで R_n 測定

↳ジオメトリの影響の見積もり



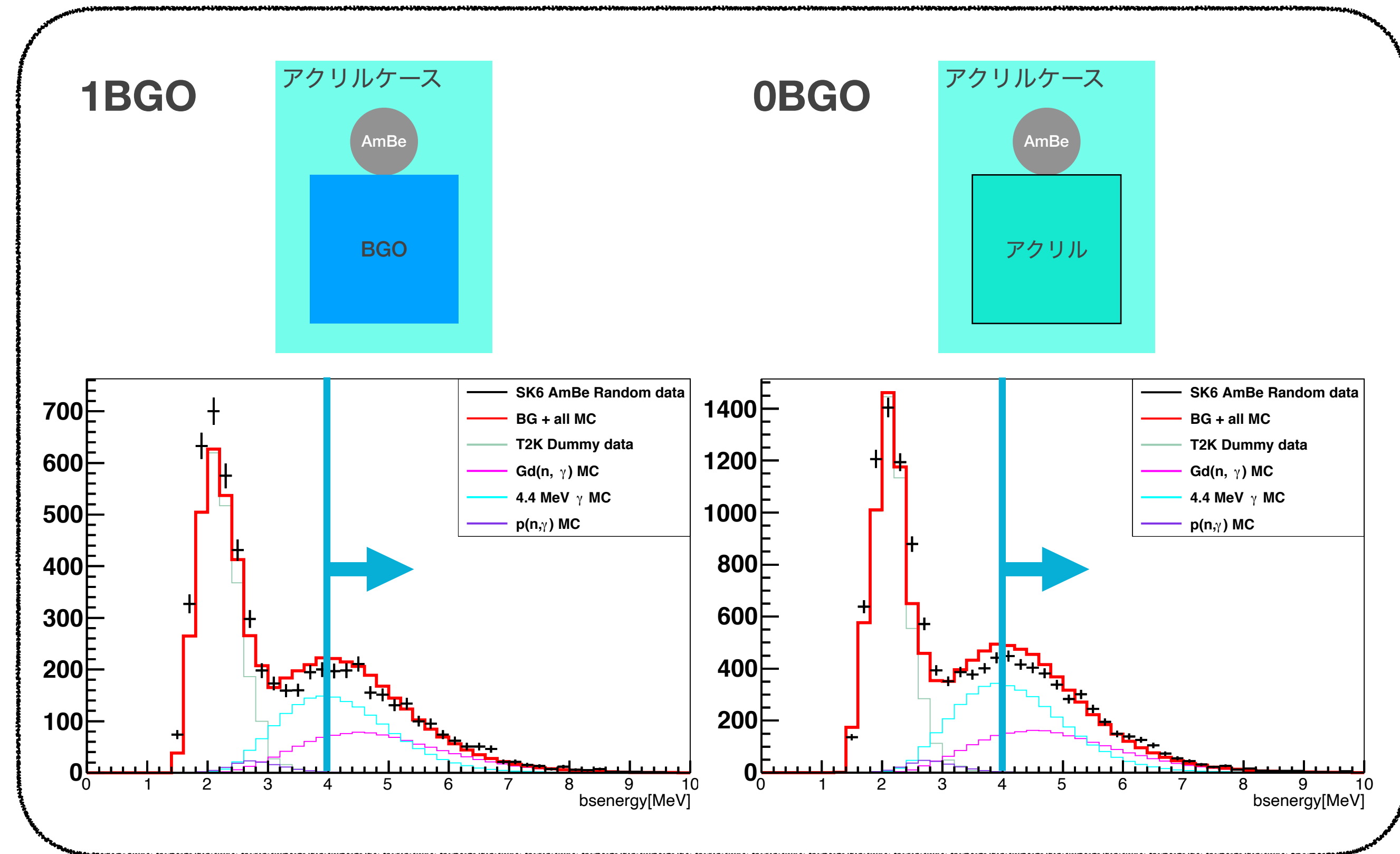
✓ $R_n : \frac{133.6 \pm 10.7 \text{ Hz (1BGO)}}{133.6 \pm 7.6 \text{ Hz (0BGO)}}$

↳生成された中性子が全て捕獲された場合
(~200 Bq)の~**65%**

- ✓ 0,1 BGO間で R_n がよく一致していることを確認

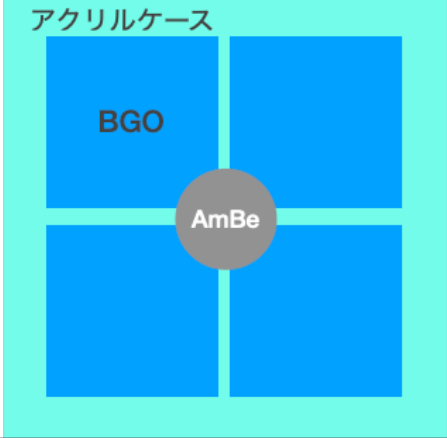
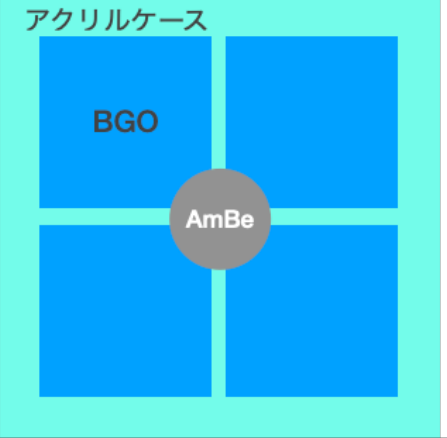
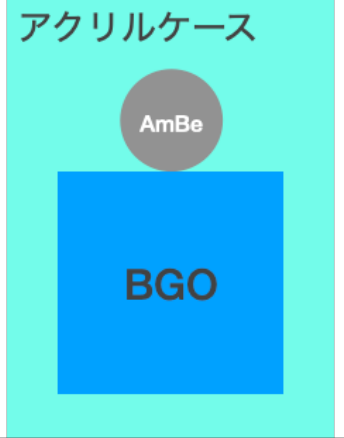
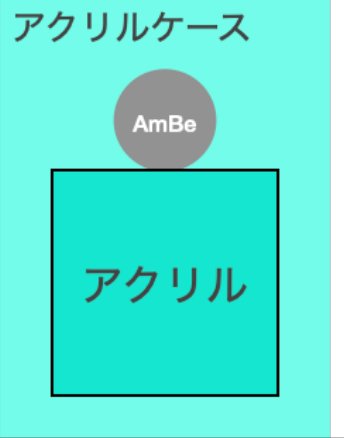
- ✓ 8BGOよりSKで見える中性子が~17 Hz少ない

↳線源周囲のジオメトリの影響が見えている



ランダムデータ解析まとめ

- ✓ SKで観測できる中性子レート R_n は線源の強度期待値から65-75%に減少しているように見える
 - ↳ 中性子が線源ジオメトリで吸収される影響が見えている
- ✓ 周囲を覆う物質がBGO(8BGO)→アクリル(0,1BGO)に変わった場合、 R_n が~17 Hz減少する
 - ↳ アクリルの中性子遮蔽の効果が見えている

	SK-V 8BGO	SK-VI 8BGO	SK-VI 1BGO	SK-VI 0BGO	SK外部の測定からの 期待値
Shape of geometry					
neutron rate (g.s. +1st ex.)	—	150.1±7.8 Hz (χ^2/ndf 57.3/30)	133.6±10.7 Hz (χ^2/ndf 41.6/30)	133.6±7.6 Hz (χ^2/ndf 71.2/30)	~200 Bq 
Gamma rate (1st ex.)	132.8±7.8 Hz (chi2 16.8/30)	—	—	—	141.3±14.1 Bq

- ✓ SK-Gd実験でのAmbe線源測定で、中性子同定効率について
DATA/MC~10%の差異の原因を見積もるため、線源のジオメトリを変えて測定した
↳ ジオメトリによらず~10%の差異を確認した
- ✓ ランダムデータ解析から、SKで観測できる中性子・ガンマ線のレートを見積もった
↳ 線源そのもののレートに対して~**30%**の中性子レートの減少が見られた
 - ・ 線源ジオメトリと中性子の反応が再現しきれていない
 - ・ 線源で生成される中性子のレートが正しく導入されていない
- ✓ 中性子の減少が同定効率の差異を説明する要因になっている可能性がある
↳ ・ 中性子強度を測定するために産総研での測定
 - ・ 新しい線源装置を作成（中性子に影響を与えにくいケース作成・シンチレーションの入らない線源）