

中性子起源の γ 線バックグラウンド

中島恭平 (福井大学)
第3回B02班若手ミニ研究会
2015年5月18日 @ 神戸大学

中性子測定コンソーシアム

自己紹介

- KamLAND (東北大)
- Double Chooz (東北大/新潟大)
- CANDLES (大阪大)
- 今月~ 福井大

Double Chooz: 原子炉反ニュートリノ観測 (θ_{13} 観測)

→ 逆ベータ崩壊($\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$)で観測

→ 中性子を伴う事象がBG → 高速中性子BG解析

CANDLES: 高エネルギー事象の理解 (5-10MeV)

→ (n, γ)事象解析

目次

- (n, γ)事象について
- CANDLES実験における(n, γ)事象
- Geant4シミュレーションの検証
- (n, γ)シミュレーション
- 対策とか

中性子捕獲反応

- **(n,γ)反応**: 熱中性子が原子核に吸われてγ線などの放射線を発生
 - ▶ $n + {}^A_ZX \rightarrow ({}^{A+1}_ZX)^* \rightarrow {}^{A+1}_ZX + \gamma$
 - ※ 生成した原子核はγ線などを放出して安定に
- 捕獲断面積、発生γ線エネルギーは原子核によって異なる

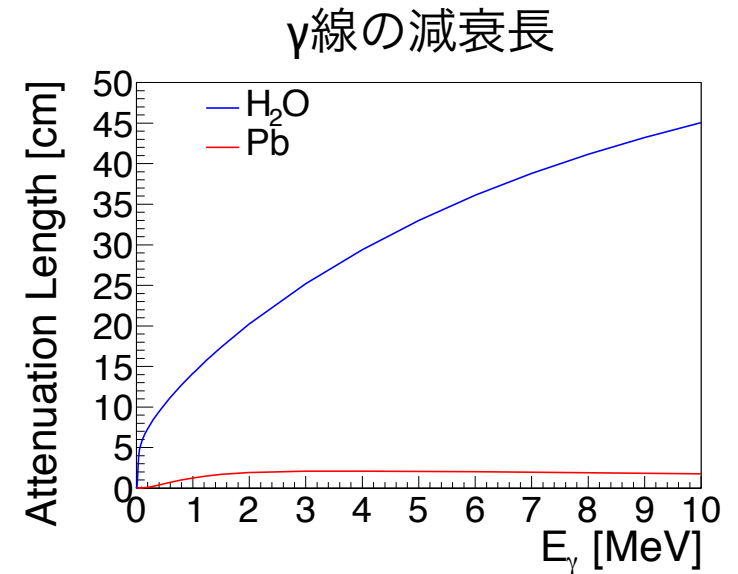
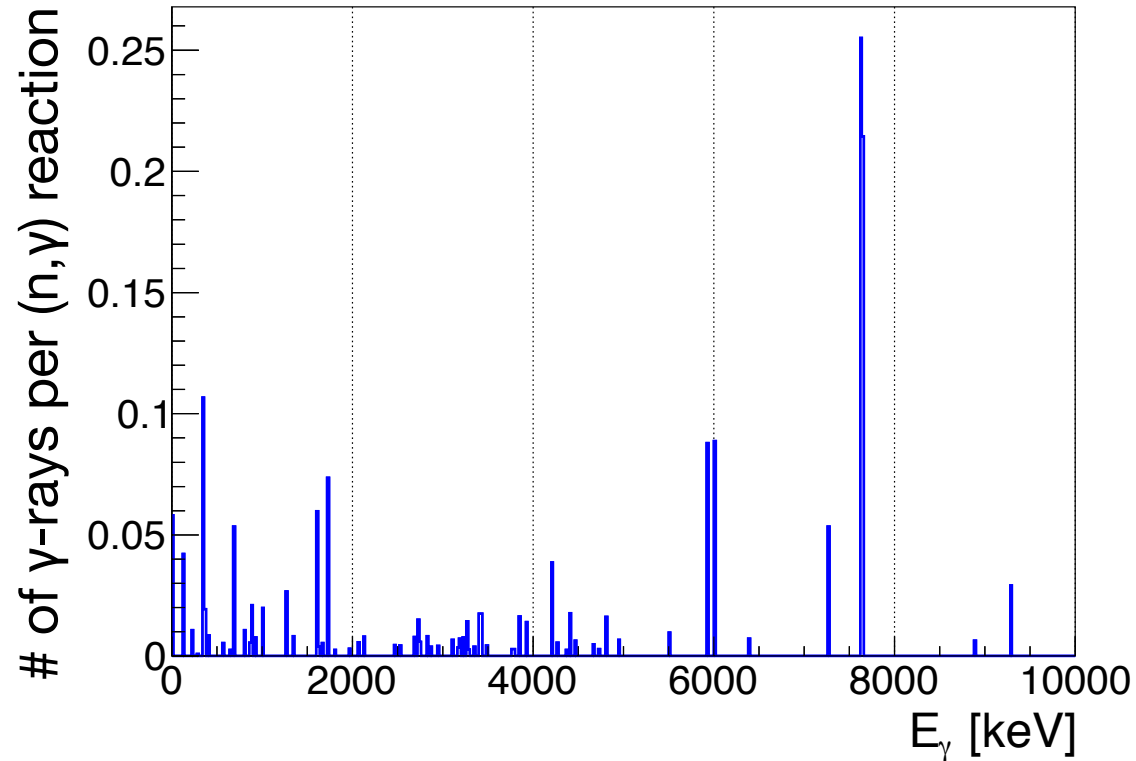
主な原子核の(n,γ)反応

原子核	自然存在比	断面積 [barn]	主な発生放射線
${}^1_1\text{H}$	99.9885%	0.332	$E_\gamma = 2.22 \text{ MeV}$
${}^{10}_5\text{B}$	19.9%	3838	$E_\alpha = 2.31, E_\gamma = 0.478 \text{ MeV}$
${}^6_3\text{Li}$	7.59%	940	$E_\alpha = 4.78 \text{ MeV}$
${}^{113}_{48}\text{Cd}$	12.22%	20650	$\Sigma(E_\gamma) \sim 9 \text{ MeV}$
${}^{157}_{64}\text{Gd}$	15.65%	254000	$\Sigma(E_\gamma) \sim 8 \text{ MeV}$

- 脱励起の分岐は複数あり、複数のγ線を発生 (合計エネルギーは一定)

例: Feにおける(n, γ)

個別の発生 γ 線エネルギー



- (n, γ)反応は高エネルギーの γ 線を発生するため、透過力が強く検出器内に侵入しうる → CANDLESのBG
- 例: 8MeVの γ 線に対して、水で40cm、鉛で2cmの減衰長

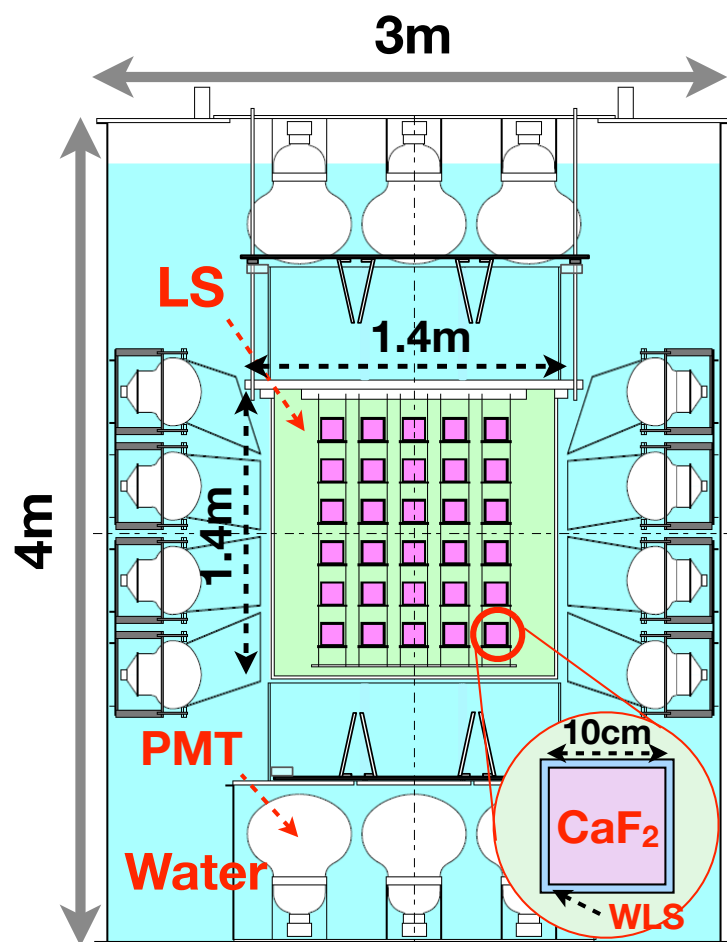
CANDLES III (U.G.) 検出器

Under Ground

Q値4.3MeVの ^{48}Ca を用いた二重ベータ崩壊実験

CANDLES検出器

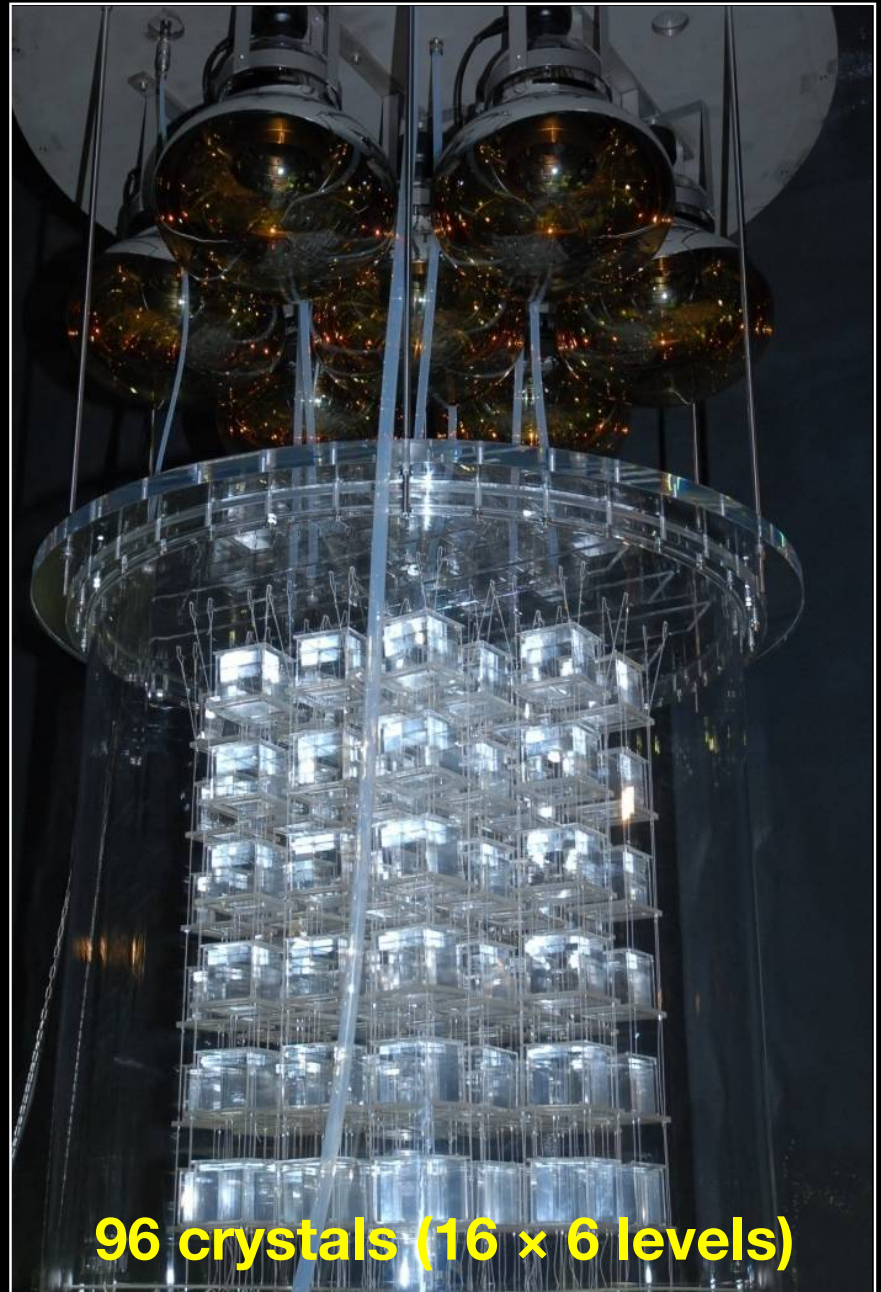
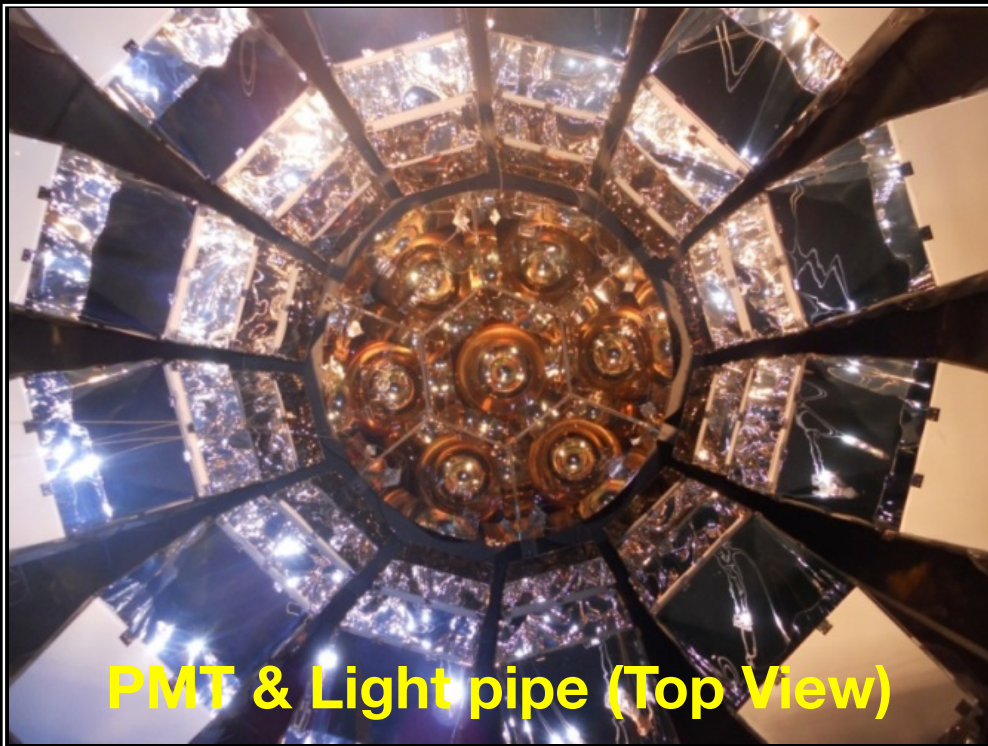
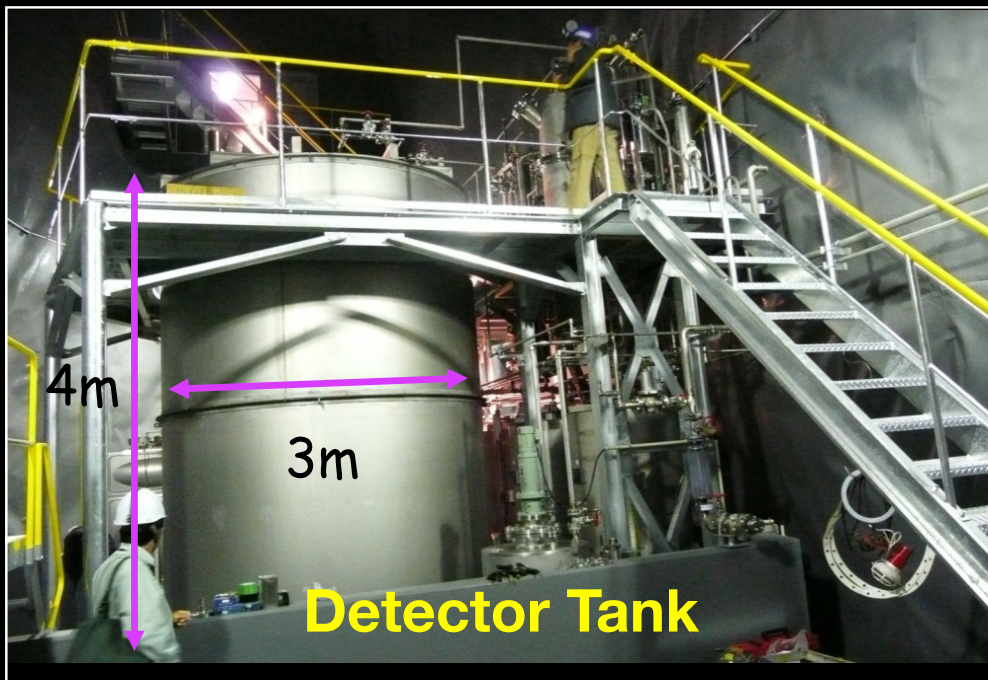
@ 神岡 (2700 m.w.e.)



検出器構成

- **CaF₂結晶**
 - 10×10×10 cm³ × 96結晶 (305 kg)
 - ▶ ^{48}Ca ~350 g (自然存在比0.187%)
 - 波長変換層 (WLS)
 - ▶ 280 (CaF₂発光) → 420 nm (PMT感度領域)
- **液体シンチレータ (LS)**
 - アクティブベトー (内外部由来の γ 線ベトー)
 - ϕ 1.4m × H1.4m (アクリルタンク), V~2 m³
- **純水**
 - 外部由来の γ 線、中性子を遮蔽
 - ϕ 3m × H4m (ステンレスタンク), V~30 m³
- **62 PMTs**
 - 13インチPMT × 48 (側面)
 - 20インチPMT × 14 (上下面)
 - ライトパイプ: 反射率 ~ 93% @ 420 nm

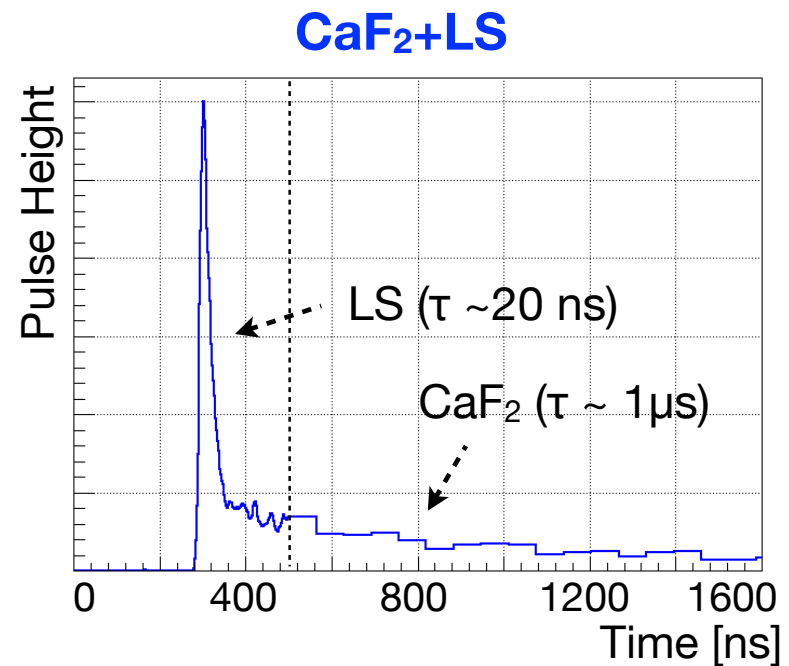
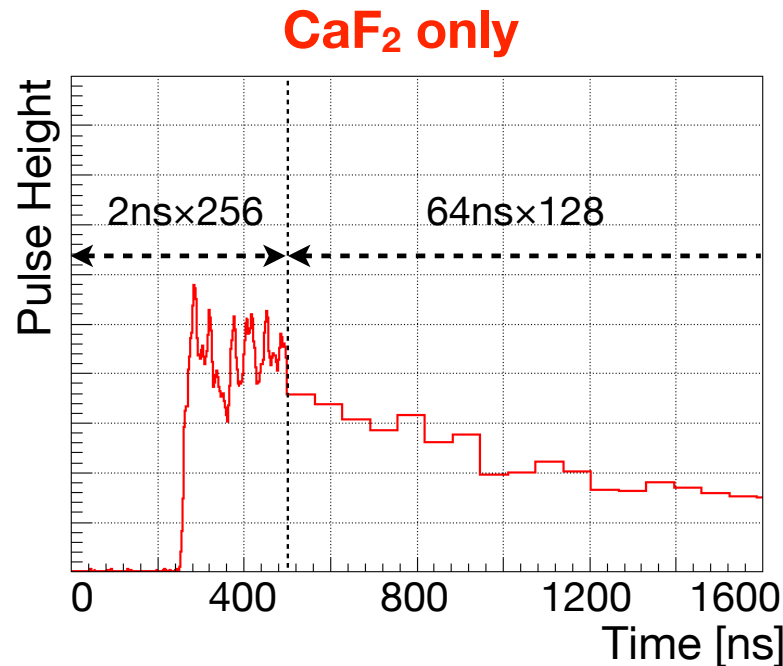
中性子測定コンソーシアム



CANDLESの特徴: LSアクティブベトロー

- LSアクティブベトロー: 外部および内部起因の γ 線事象を大きく低減
- CaF_2 結晶とLSの発光時定数が大きく異なることを利用
 - CaF_2 : $\sim 1 \mu\text{s}$, LS: $\sim 10 \text{ ns}$
- 波形弁別により、“ $\text{CaF}_2 + \text{LS}$ 事象”をベトロー (例: γ 線のコンプトン散乱)

全PMTのサム波形

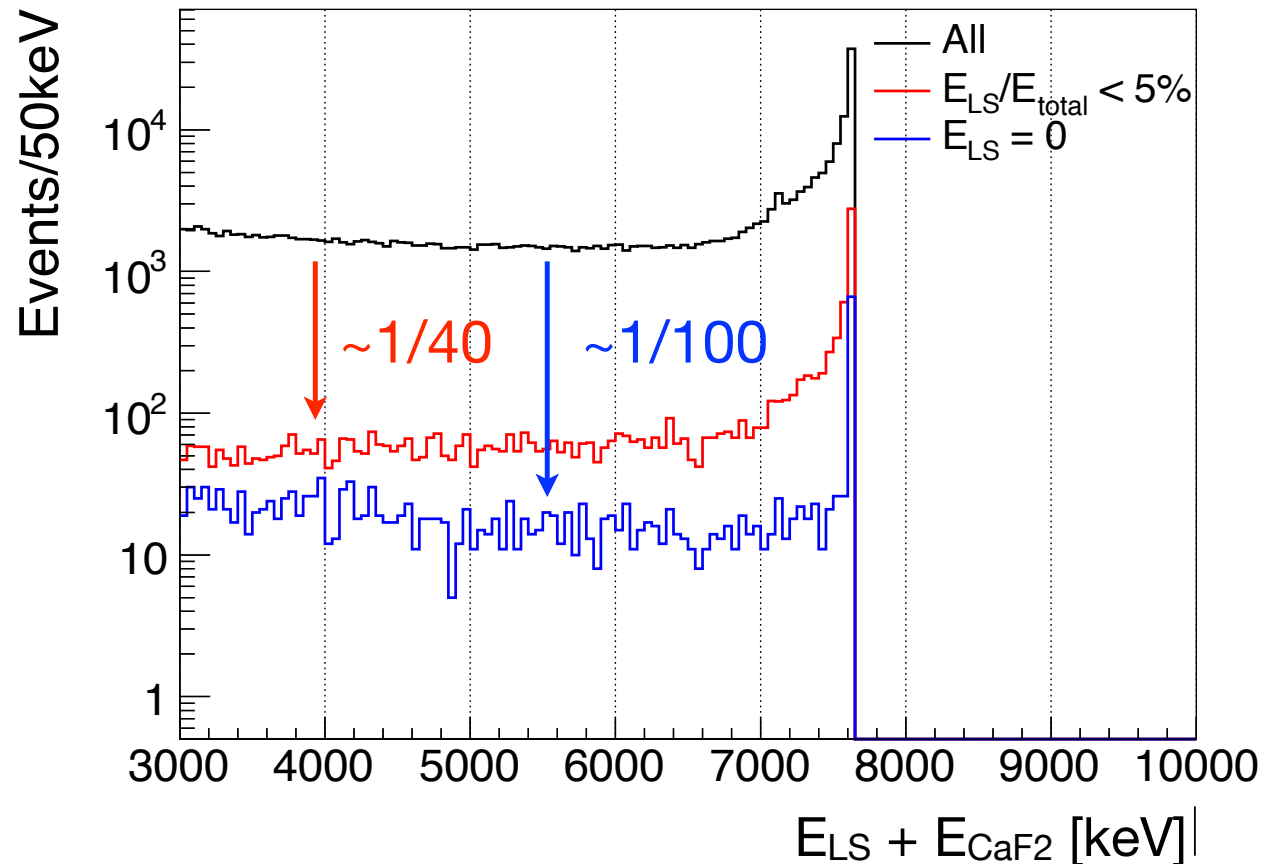


PSD cut: $E_{\text{LS}}/E_{\text{total}} < \text{数}\%$ \rightarrow CaF_2 のみが発光した β 事象を探す

下江ノ湖定コノノノノム

例: LSアクティブベトーの効果

MC: 検出器外から7.6MeV γ 線を打ち込んだ場合のエネルギー損失分布



LSアクティブベトーによって、7.6MeV γ 線は1/40~1/100にまで減少

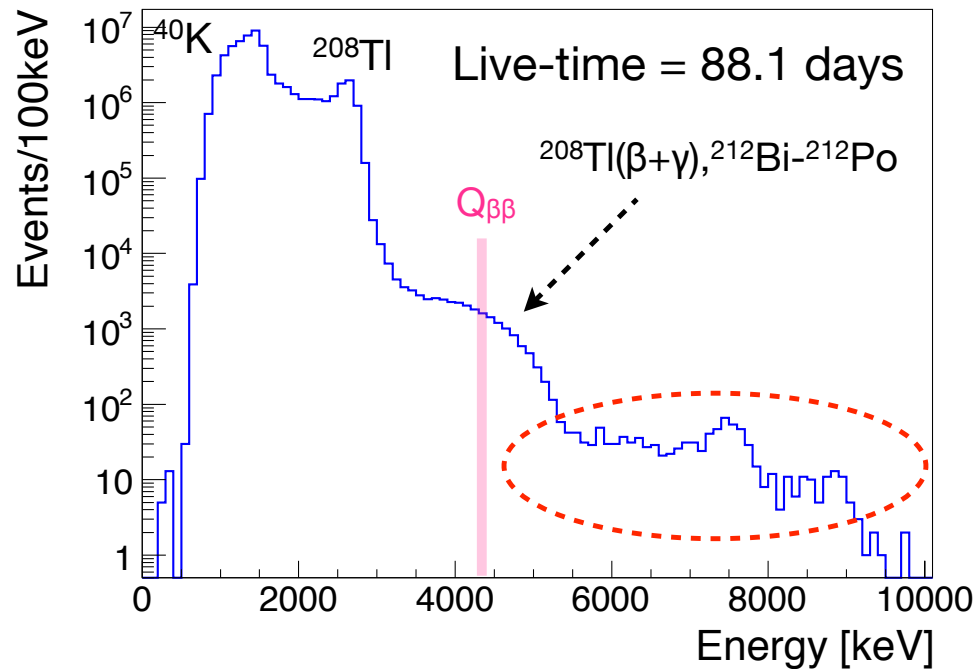
CaF₂結晶のみが発光した γ 線が若干残る

中性子測定コンソーシアム

CANDLESにおける(n, γ)事象

エネルギースペクトル

(統計量を稼ぐため、緩めのPSDカット)

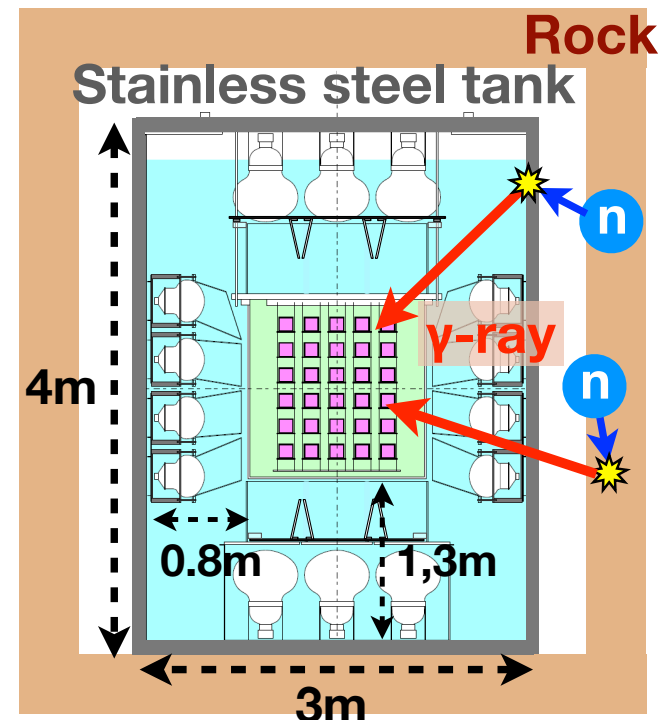


- ✓ 検出器周りにある大量の物質が(n, γ)起因
 - 岩盤, ステンレスタンク
- 厚みの薄いところで80cm程度 (減衰長 $\times 2$)

- 高エネルギー事象は以下の2つの手法により、(n, γ)反応と同定

1. ^{252}Cf 線源を用いた測定
2. Geant4による(n, γ) MC

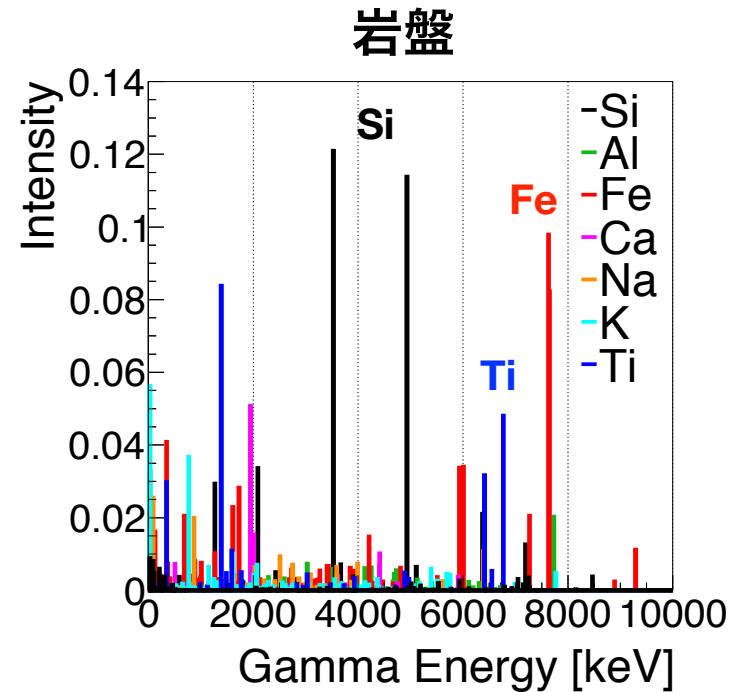
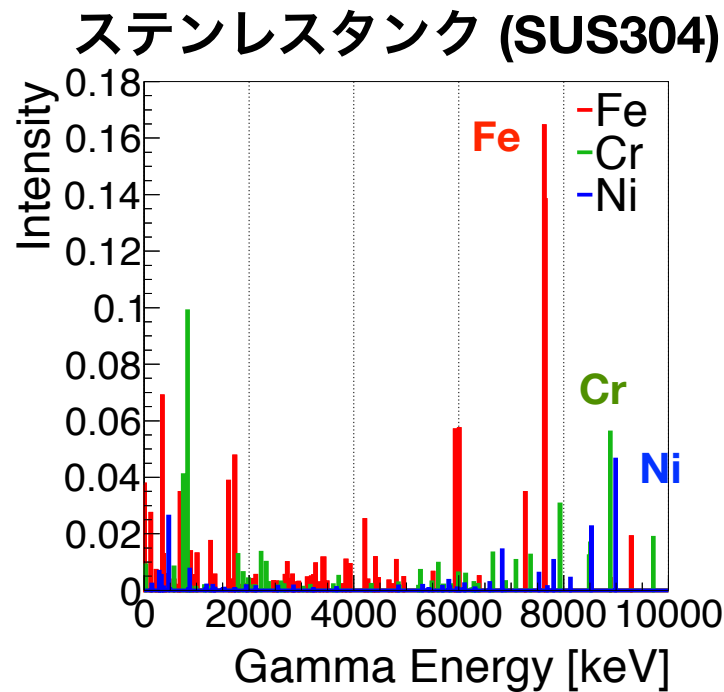
(n, γ)反応の概観図



中性子測定コンソーシアム

(n,γ)スペクトル

- IAEAデータベース (<https://www-nds.iaea.org/pgaa/>): 同位体毎の(n,γ)スペクトル
 - 別のデータベース: CapGam ← 絶対γ線強度が与えられていないもの有
- 物質の組成比が分かれば、(n,γ)スペクトルは計算可

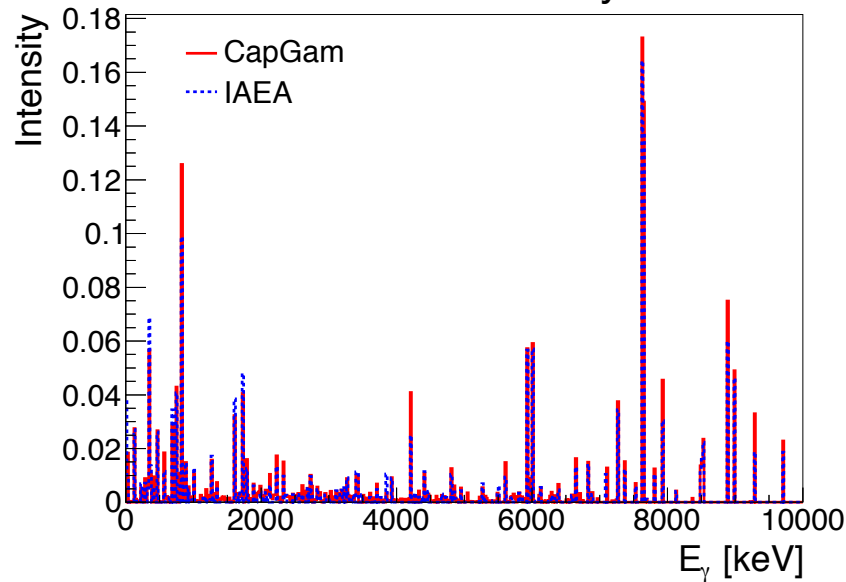


- 一般的なSUS304の化学組成比
 - ▶ Fe : Cr : Ni = 71.0 : 20.2 : 8.8
- 7.6MeV, 9MeVのγ線が特徴

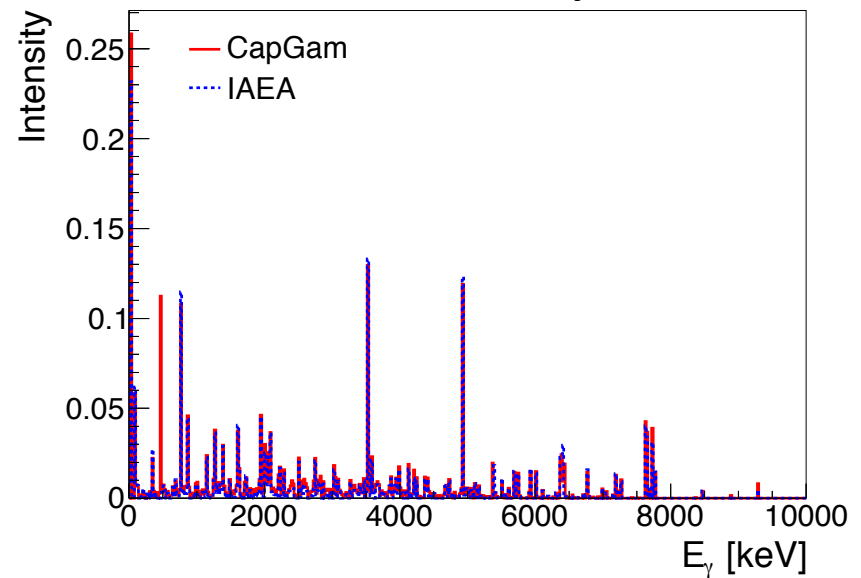
- 神岡鉱山内の岩石組成の文献は二種類存在 (あとで説明)

Comparison of (n, γ) Spectrum

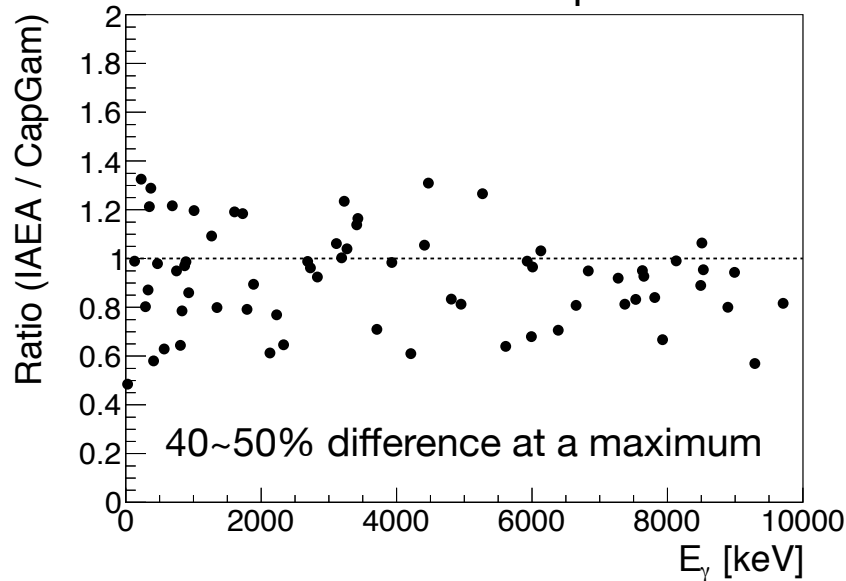
SUS304: Intensity



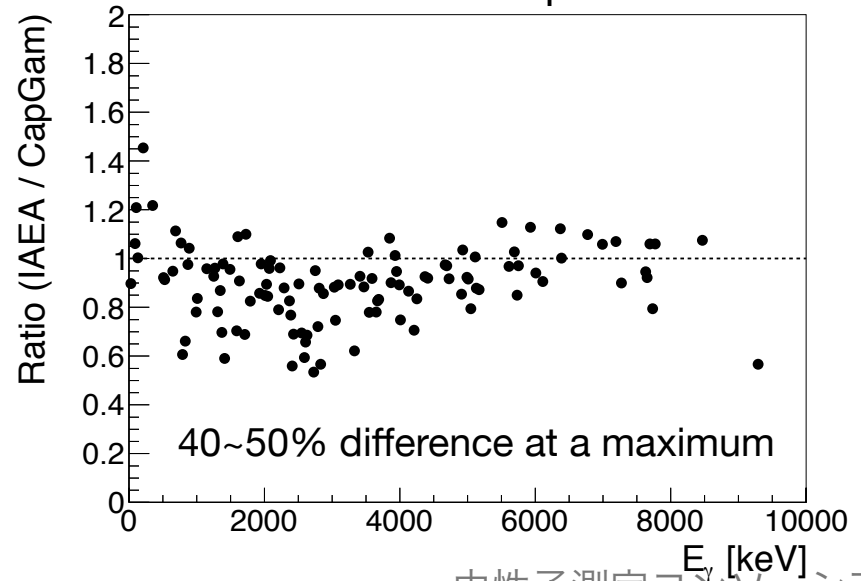
Rock: Intensity



SUS304: IAEA / CapGam



Rock: IAEA / CapGam



中性子測定コンソーシアム

岩盤組成比

- 文献1: “Muon simulations for Super-Kamiokande, KamLAND, and CHOOZ”, PRD74, 053007 (2006)
- 文献2: “飛騨帯神岡鉱床周辺の変閃緑岩・変斑れい岩類”, 資源地質 (Resource Geology, 45(1), 25-40, 1995)

文献1

TABLE II. Chemical composition of the Ikenoyama and Ardennes rock in elemental percentage. The Ardennes rock composition is the average of several samples. The CHOOZ rock data are approximate values only. Details are documented in an internal note [23].

Chemical formula	Ikenoyama %	Ardennes %
SiO ₂	60.70	58
TiO ₂	0.31	
Al ₂ O ₃	17.39	19
Fe ₂ O ₃	1.10	
FeO	1.22	17
MnO	0.15	
MgO	0.93	4
CaO	6.00	
Na ₂ O	6.42	
K ₂ O	3.47	2
P ₂ O ₅	0.18	
H ₂ O	0.97	
S	0.01	
CO ₂	0.96	

池の山の岩の組成比

文献2

茂住坑における3種類の岩盤の組成を掲載
特に実験室で一般的な種類のサンプル12個のデータあり → 平均値を採用

sp. no.	Type C												
	Mozumi											Tochibora (N)	
	87M03	87M05f	87M05c	87M09	87M11	87M13	87M18f	87M27	87M28	87M29	82104	82106	82309
SiO ₂	51.11	49.75	54.06	55.93	47.39	54.67	53.79	62.05	50.78	53.22	48.05	48.02	59.09
TiO ₂	1.20	1.38	1.20	1.09	0.44	1.00	0.70	0.80	1.22	1.13	1.53	1.56	0.80
Al ₂ O ₃	19.27	18.32	17.40	17.76	18.55	18.16	17.59	17.73	18.39	17.42	17.70	17.60	18.22
Fe ₂ O ₃	2.67	2.72	2.62	2.48	3.16	2.37	2.38	2.21	3.06	2.45	3.83	3.77	2.17
FeO	7.77	8.47	6.85	5.38	7.68	5.17	5.37	3.97	6.99	7.74	7.66	7.42	3.97
MnO	0.15	0.21	0.17	0.22	0.15	0.14	0.13	0.14	0.22	0.19	0.15	0.15	0.13
MgO	3.15	4.15	3.76	3.06	8.35	3.21	4.58	1.98	4.34	3.60	4.74	4.77	2.08
CaO	5.96	7.33	6.29	6.79	7.88	7.50	7.53	5.85	6.07	5.67	8.13	8.13	5.56
Na ₂ O	3.02	2.74	2.92	3.21	1.56	3.07	2.34	2.97	2.61	3.56	3.24	3.39	4.37
K ₂ O	2.96	1.57	1.47	1.47	1.31	0.84	2.08	1.02	2.51	1.64	1.46	1.48	1.18
P ₂ O ₅	0.58	0.35	0.37	0.34	0.12	0.46	0.19	0.25	0.31	0.29	0.15	0.23	0.21
Ig.loss.	1.86	1.93	0.95	1.86	2.90	3.28	3.24	0.77	2.79	2.41	2.48	2.94	1.41
Total	99.70	98.92	98.06	99.59	99.49	99.87	99.92	99.74	99.29	99.32	99.12	99.46	99.19

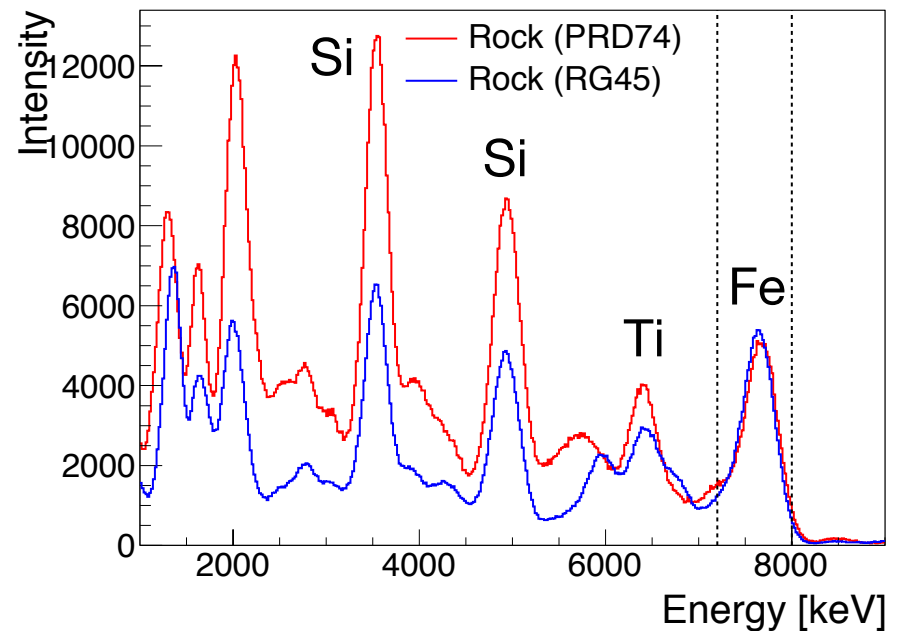
(Mozumi: Mozumi mine, -500mL; Tochibora(S): Tochibora mine, -200mL, Tochi(N):South of Atotsu)

中性子測定コンソーシアム

二種類の岩盤組成比の比較

Isotope	PRD74 [%]	RG45 [%]
SiO ₂	52.83	52.4±4.0
TiO ₂	0.36	1.10±0.32
Al ₂ O ₃	25.69	17.99±0.54
Fe ₂ O ₃	2.54	2.81±0.52
FeO	1.27	6.71±1.33
MnO	0.15	0.168±0.032
MgO	0.54	4.14±1.50
CaO	4.87	6.93±0.89
Na ₂ O	5.76	2.89±0.51
K ₂ O	4.73	1.65±0.57
P ₂ O ₅	0.37	0.30±0.12
Others	0.865	2.28±0.79

分解能(6.0%/√E)を加えた(n,γ)スペクトル



7.6MeVのピーク積分値で規格化

違いが分かりやすいよう、分解能を与えている

影響の大きいFeの原子数が、文献により倍異なる

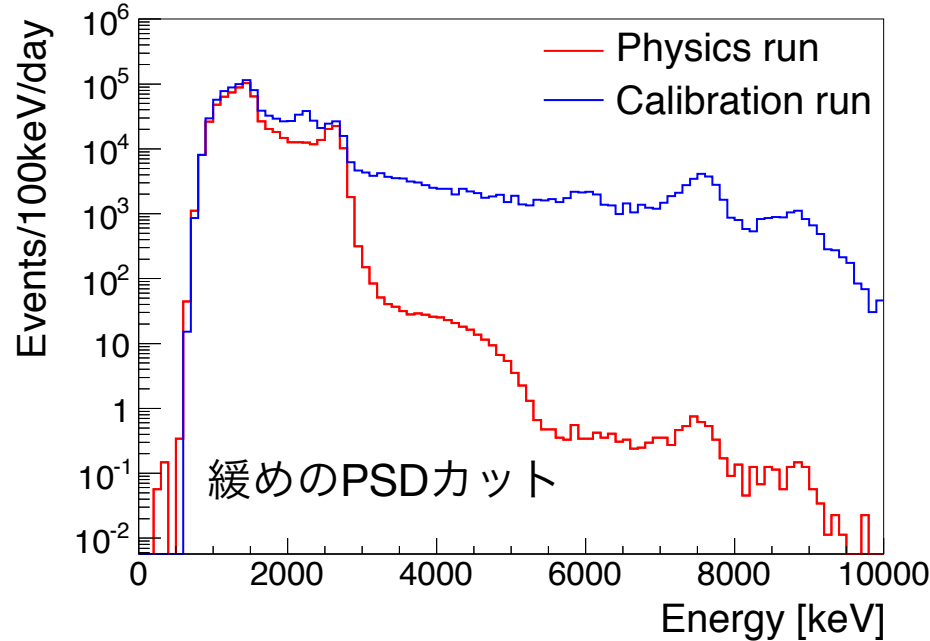
→ 全体のスペクトルも倍程度変わりうる

中性子測定コンソーシアム

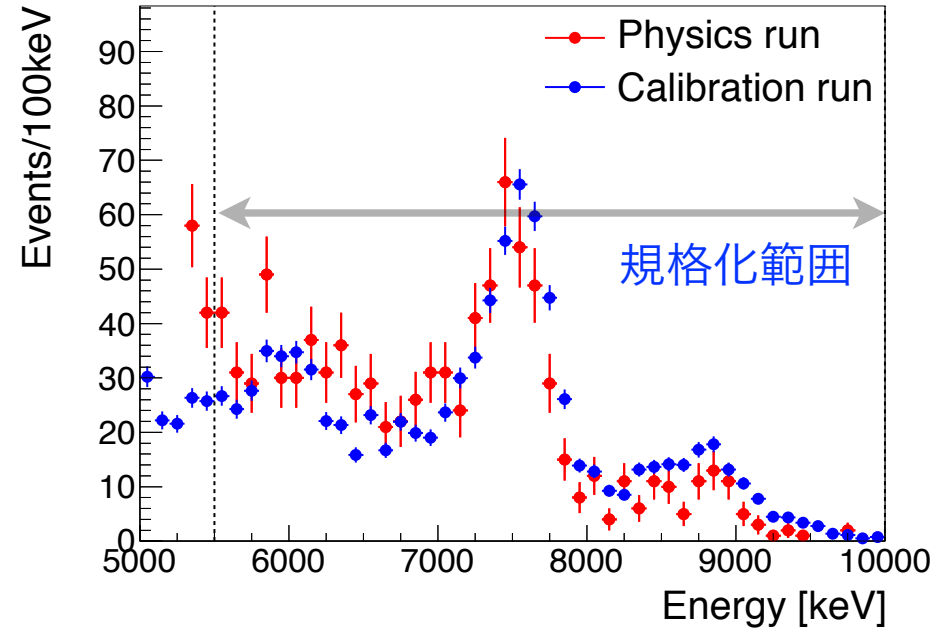
中性子線源ラン

検出器外部に ^{252}Cf 線源(0.4MBq)を設置

エネルギースペクトル

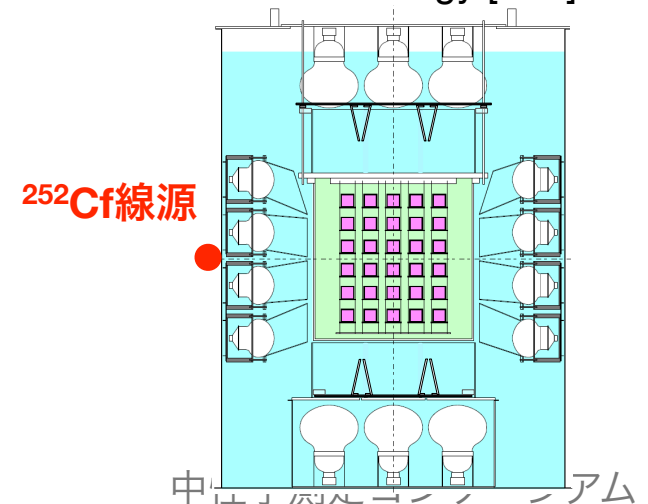


規格化後のスペクトル



- 観測時間: 物理ラン = 88.1日, 中性子ラン = 3.1時間
- **中性子ラン1.5時間 = 物理ラン1年分の統計に相当**
- 5.5MeV以上のスペクトルがほぼ一致
 - ▶ 高エネルギー事象は(n, γ)と当たりがついた

→ シミュレーションスペクトルと比較



Geant4シミュレーション

- 目的: 観測スペクトルの成分を理解し、Q値4.3MeVにおけるBG量を見積もる
- 流れ: 中性子の熱化 → (n,γ)反応 → γ線シミュレーション
- 検証: Geant4で(n,γ)反応が正しく動作するかチェック
- シミュレーション条件
 - Geant4.10.0.p01
 - Physics list: QGSP_BERT_HP
(20MeV以下に適用される中性子ライブラリNeutronHPが適用)

ref. 中性子熱化MCの検証

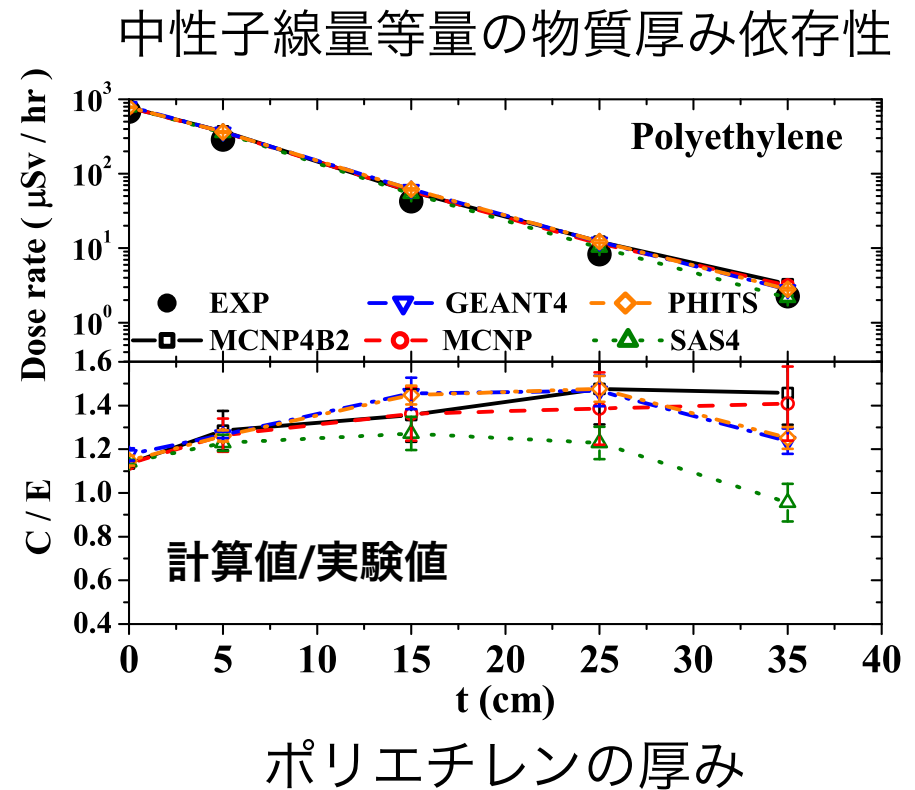
GEANT4 and PHITS simulations of the shielding of neutrons
from ^{252}Cf source

Jae Won Shin,¹ Sang-In Bak,² Doyoon Kim,² Chong Yeal Kim,³ and Seung-Woo Hong^{1,*}

¹Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea
²Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea
³Department of Radiation Science & Technology,
Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

(Dated: 26 March 2014)

arXiv:1402.1847

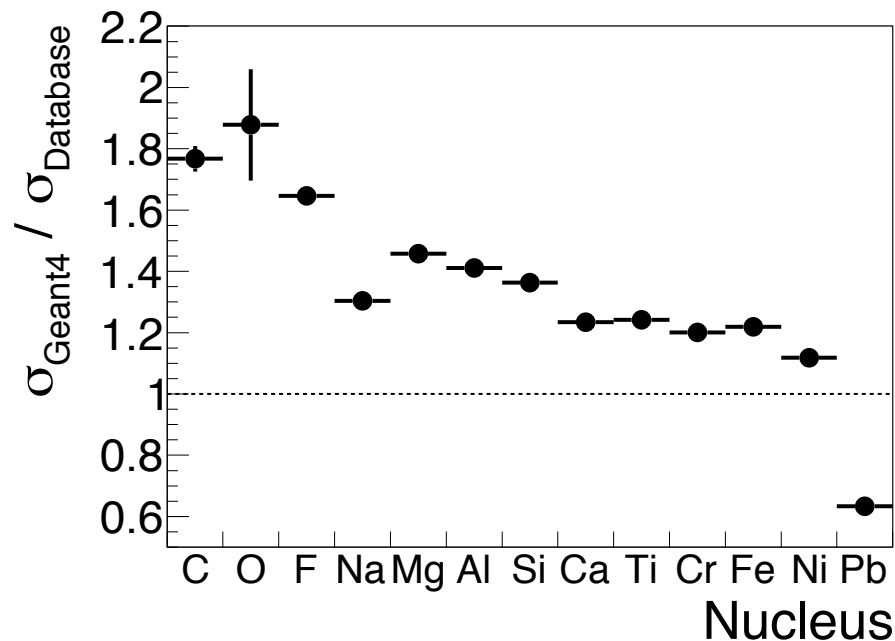


- ^{252}Cf を使って、各物質のシールド効果を比較
- グラファイト、鉄、ポリエチレン等を比較
- 最大で実験値とシミュレーションとの差は40% (ポリエチレン以外は20%)

(n,γ)シミュレーションの問題点

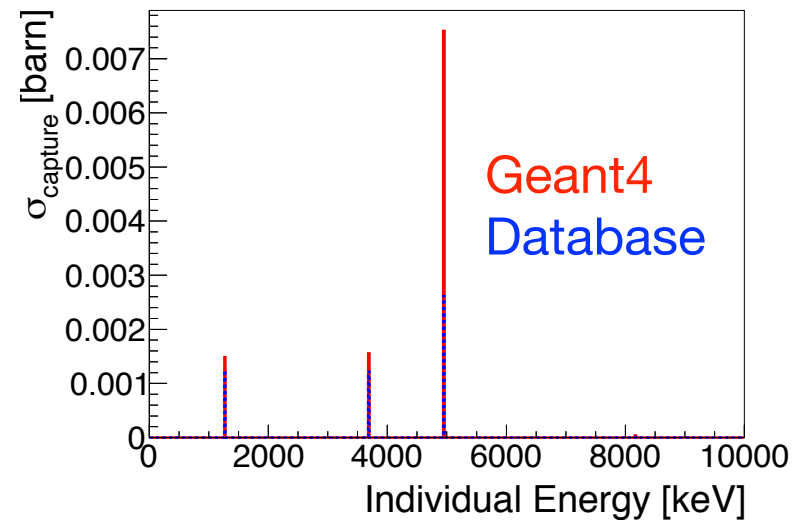
- ☑ Geant4とデータベースの中性子捕獲断面積比
 - 岩盤とタンクの主な原子核: **< 40%の不定性**
- ☑ (n,γ)反応によるγ線スペクトル: H以外異なる
 - **データベースを元にγ線を発生させる**

Geant4とデータベース間の中性子捕獲断面積比



✓ 断面積比は最大でも2倍以内

例: Cの(n,γ)スペクトル

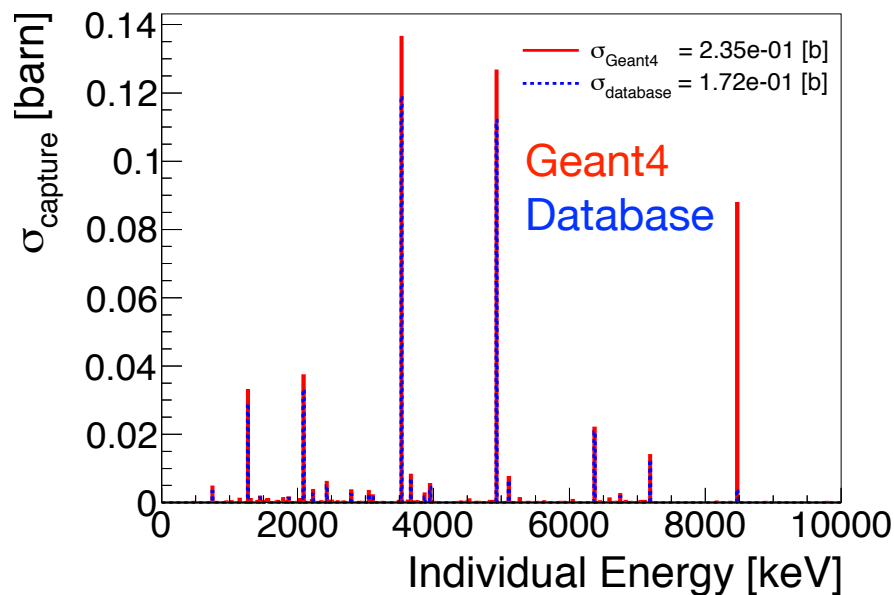


次ページに別の原子核例

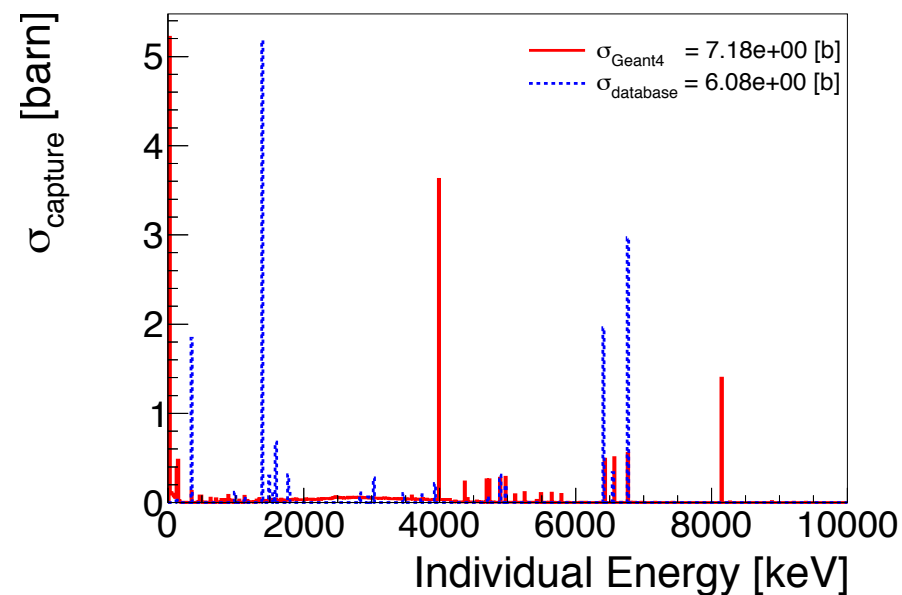
中性子測定コンソーシアム

他の(n, γ)スペクトル例

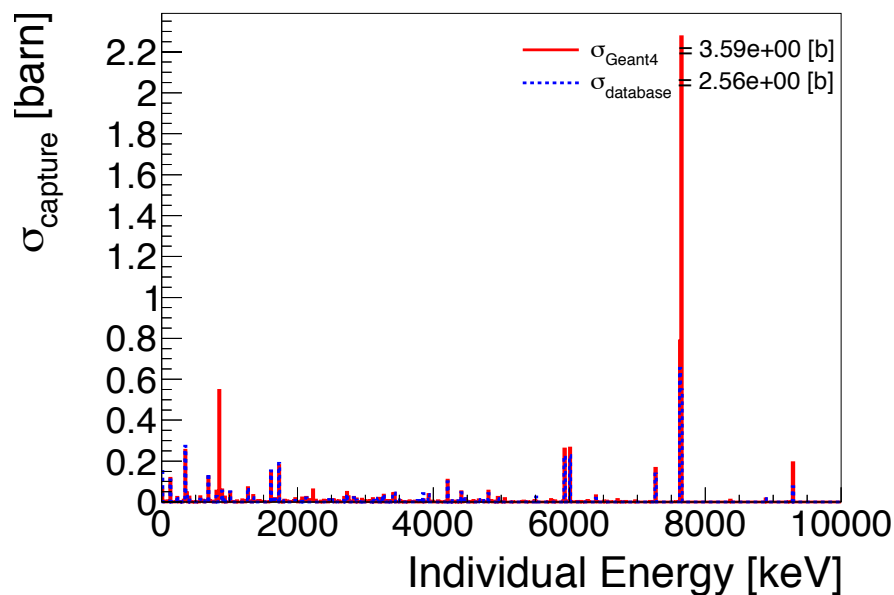
14Si



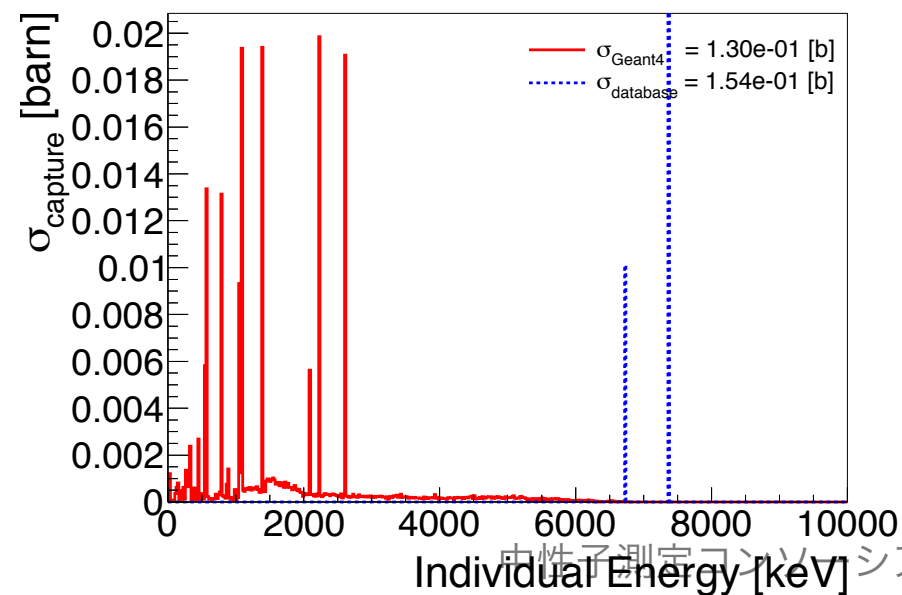
22Ti



26Fe



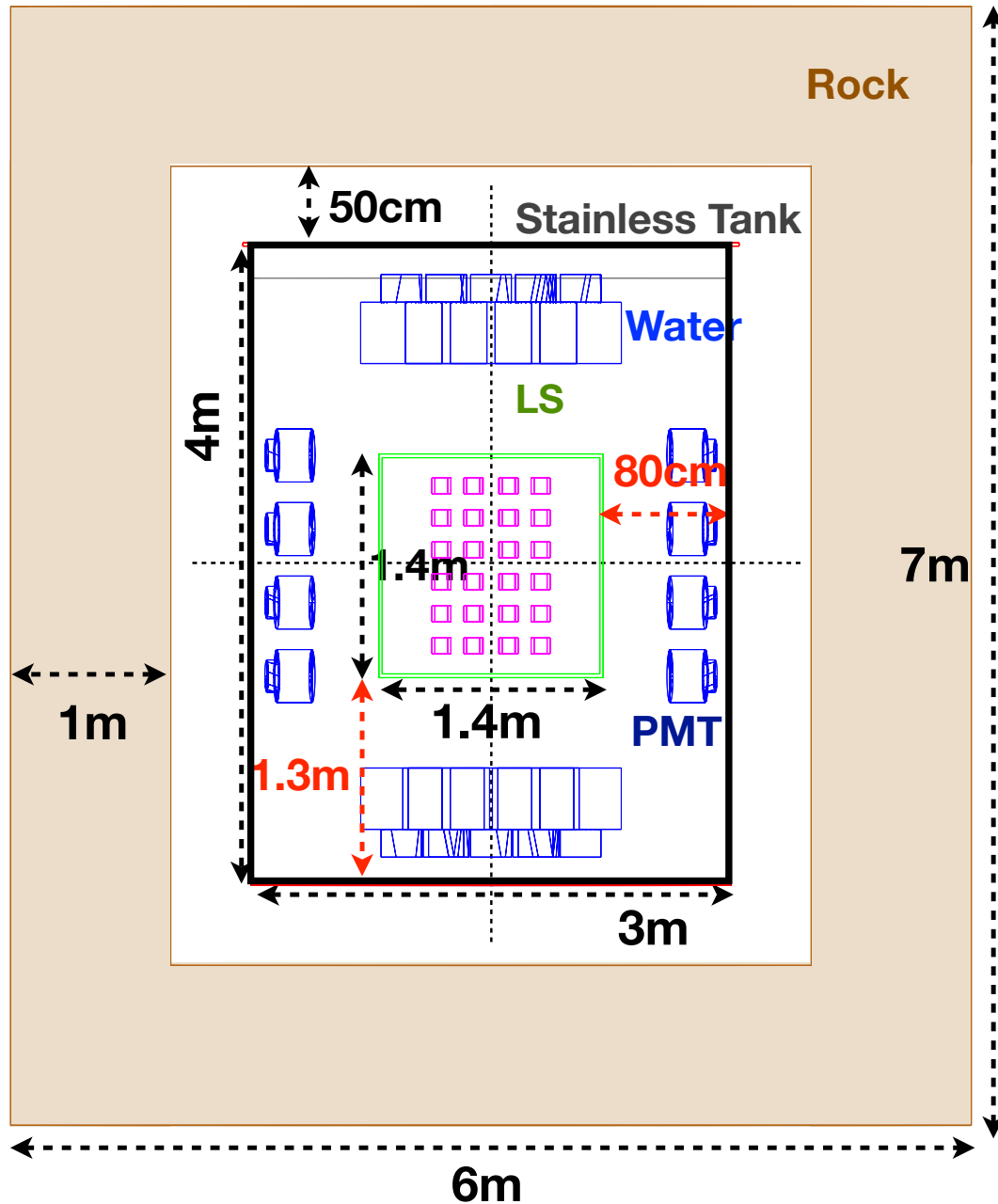
82Pb



(n,γ) MC不定性のまとめ

- 中性子の熱化: 20~40%
- 捕獲断面積: < 40%
- (n,γ)スペクトル: 40~50%
- 岩盤組成比: 最大で100%

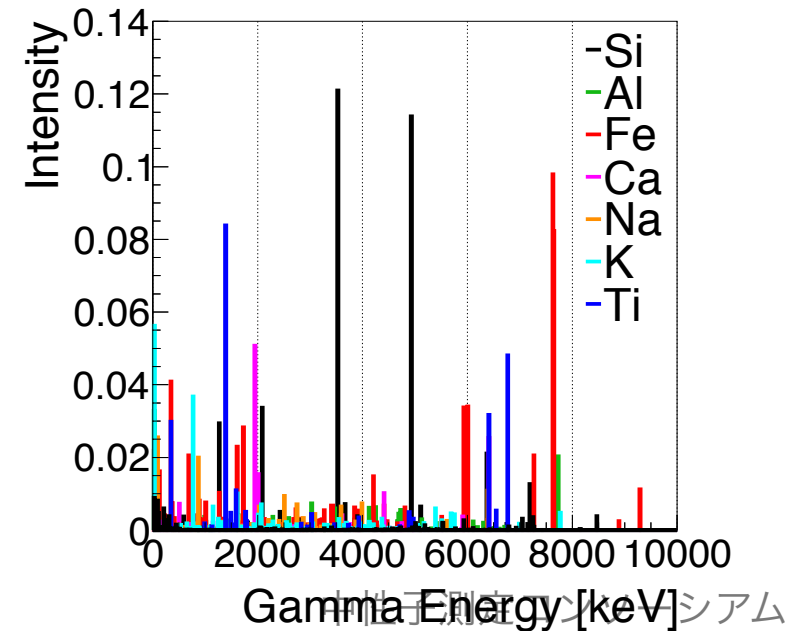
検出器ジオメトリ (MC)



γ線 MC 条件

- エネルギー: 岩盤、タンクの(n,γ)スペクトルに基づいて発生
- 位置: 厚み1mの岩盤 or ステンレスタンクに一様発生
- CaF_2 結晶、LSのエネルギー損失

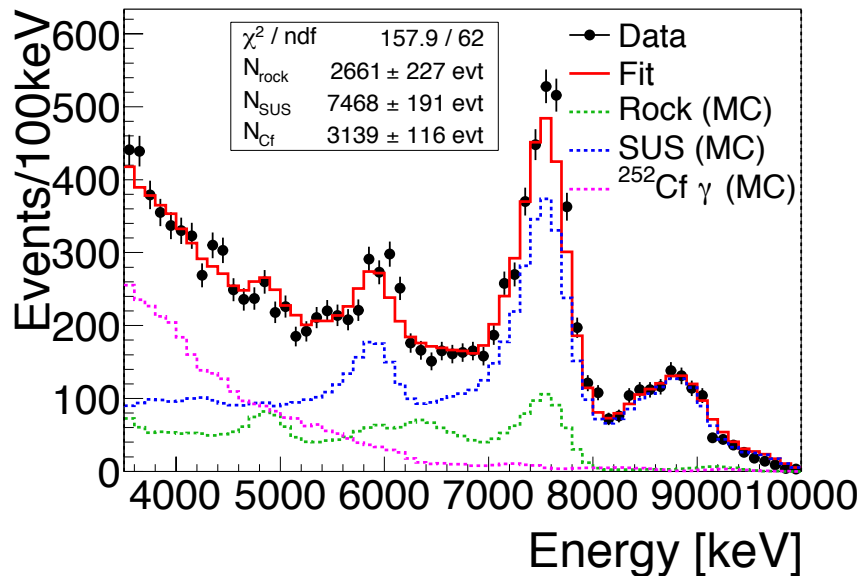
例: 岩盤の(n,γ)スペクトル (RG45)



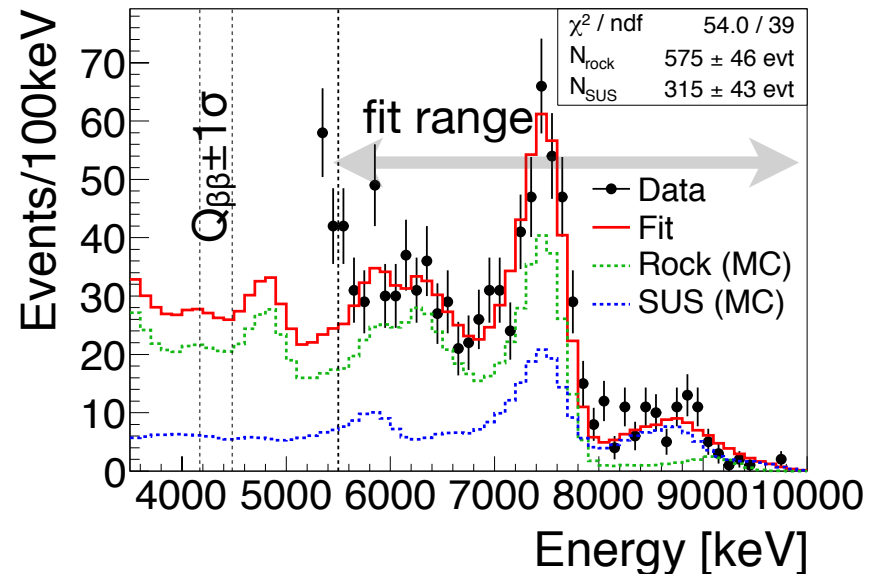
データとMCの比較

- 岩盤、タンクのエネルギー損失スペクトルを $6.0\%/\sqrt{E[\text{MeV}]}$ の分解能でなまらす
- データスペクトルを、2つのMCスペクトル(+ $^{252}\text{Cf } \gamma$)でフィット

^{252}Cf Run (3.1 hour)



Physics Run (88.1 days)



☑ MCスペクトルで観測スペクトルを再現

- Q値の(n, γ) BG量はMCで見積もり可能

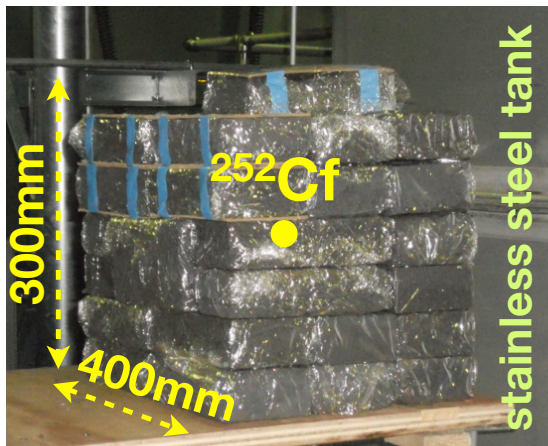
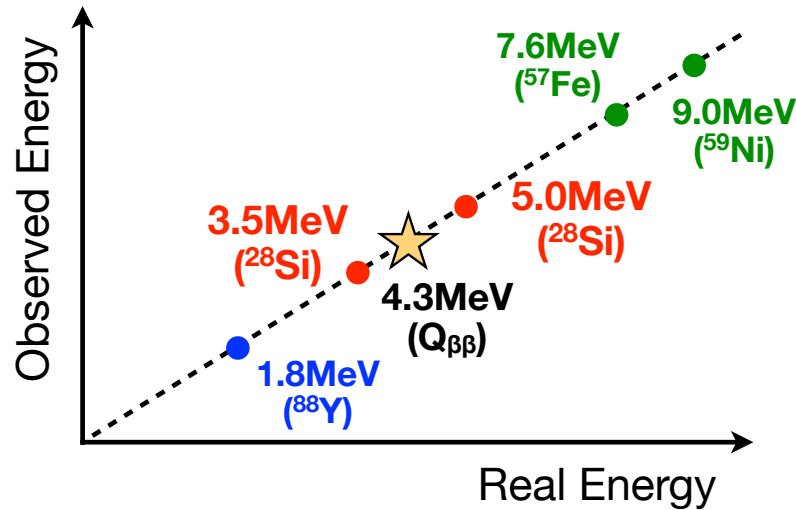
✓ Q値での岩盤/タンク比 ~ 4 (RG45の場合)

✓ (n, γ) BG: 76 ± 9 (stat.) events/year/96crystals

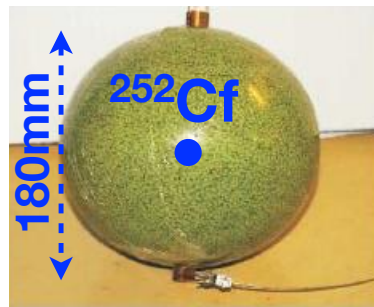
定コンソーシアム

(n,γ)反応の応用

- 通常使用の較正線源: ^{88}Y (1.836 MeV)
- cf. $Q_{\beta\beta} = 4.3 \text{ MeV}$
- **(n,γ)反応をエネルギー線源に利用**

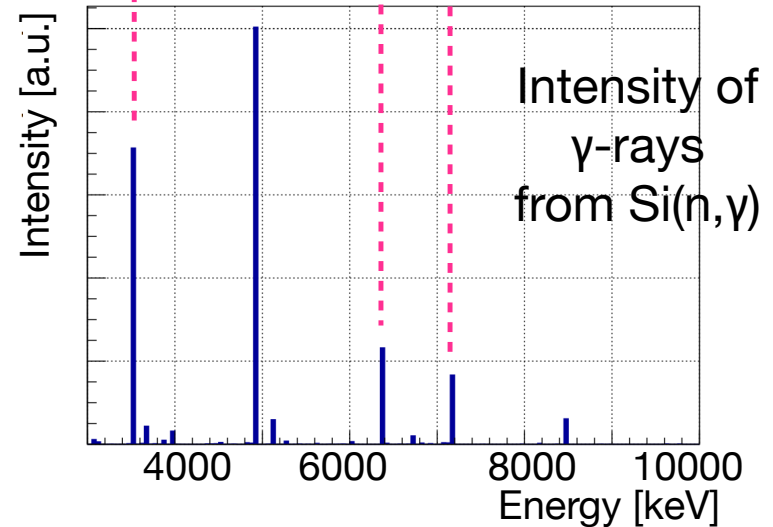
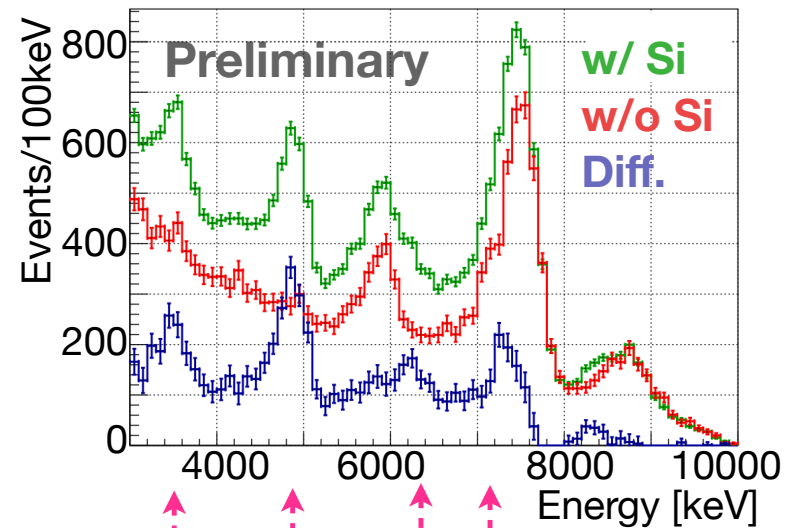


Siブロック
(Si:PE:Bond=3:1:1)



Niボール
(NiO:PE=1:2)

観測スペクトル (~1day)



✓ 10MeVまでのエネルギー
スケールを調査可能

環境中性子フラックスと観測イベントレートの比較

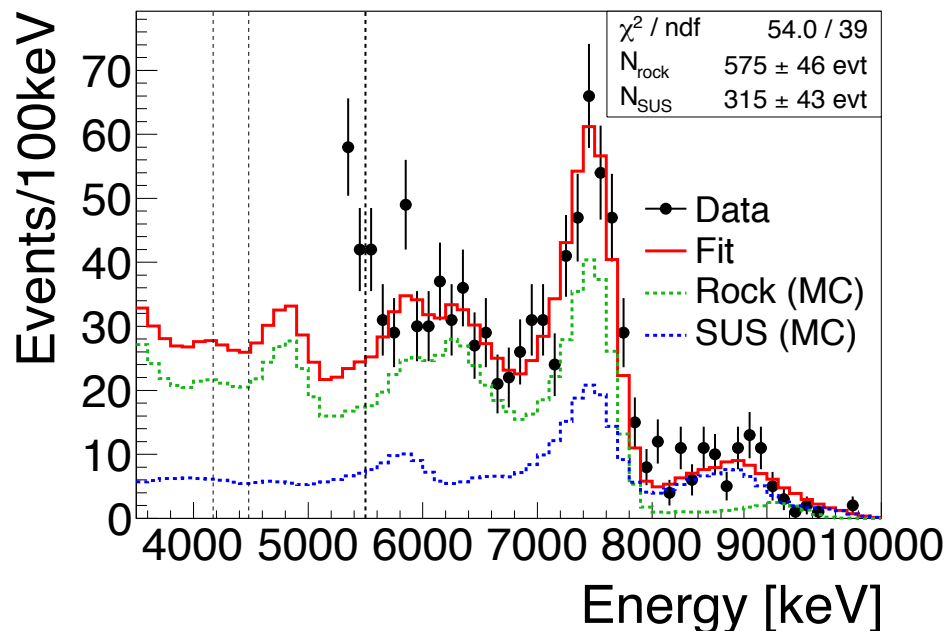
- 環境中性子フラックスから観測イベントレートが説明できるか、Geant4シミュレーションで確認する
- 神岡での環境中性子フラックス (ref. 南野彰宏, 2004年修士論文)
 - $\Phi_{\text{thermal}} = (8.26 \pm 0.58) \times 10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ ($E < 0.5 \text{ eV}$)
 - $\Phi_{\text{non-thermal}} = (1.15 \pm 0.12) \times 10^{-5} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ ($E > 0.5 \text{ eV}$)
 - $\Phi_{\text{fast}} = (2.06 \pm 0.21) \times 10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ ($E > 0.5 \text{ MeV}$)
- Geant4の(n, γ)反応による γ 線エネルギーは正しくないため、以下の手順を踏む
 1. **中性子MC**: 中性子を岩盤に一様発生 (中性子源は岩盤と想定)
 - タンクの中性子通過数を記録 → 中性子フラックスと比較
 - 岩盤、タンクでの中性子捕獲数を記録 → 発生 γ 数と比較
 2. **γ 線MC**: 岩盤、タンクから一様に γ 線を発生
 - 中性子MCの結果を元に、スペクトルをスケール可

中性子MCの結果

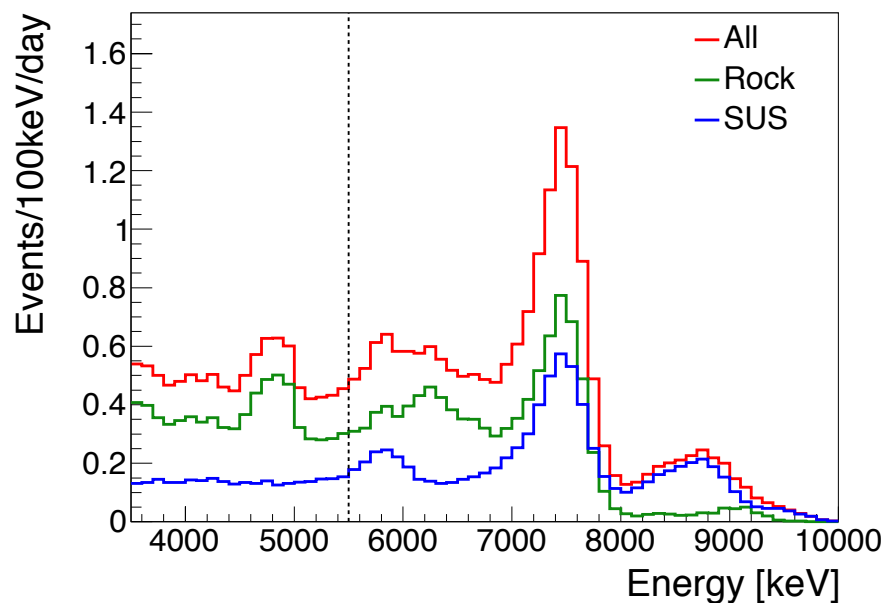
- 発生中性子エネルギー ($1/E_n$ で発生)
 - Non-thermal: 0.5 eV - 10 MeV
 - Fast: 0.5 MeV - 10 MeV
- 位置: 岩盤に一樣発生 (厚み2mあれば十分)
- 中性子発生数
 - $N_{\text{non-thermal}} / N_{\text{fast}} = 1.6$
 - $N_{\text{non-thermal}} + N_{\text{fast}} = 2.0 \times 10^4 / \text{m}^3 / \text{day}$で発生させると、環境中性子フラックス ($\Phi_{\text{thermal}} / \Phi_{\text{non-thermal}} = 0.72$) をほぼ再現
- γ 線発生数 ((n, γ)反応数ではない)
 - 岩盤 = $3.5 \times 10^4 / \text{m}^3 / \text{day}$
 - タンク = $3.3 \times 10^5 / \text{m}^3 / \text{day}$ (or $2.1 \times 10^3 / \text{m}^2 / \text{day}$)
 - ▶ 表面で熱中性子は吸われるため、単位体積に直すと見かけ上多い

環境中性子MCの結果

通常データ (88.1日)



中性子フラックスに基づくMC結果

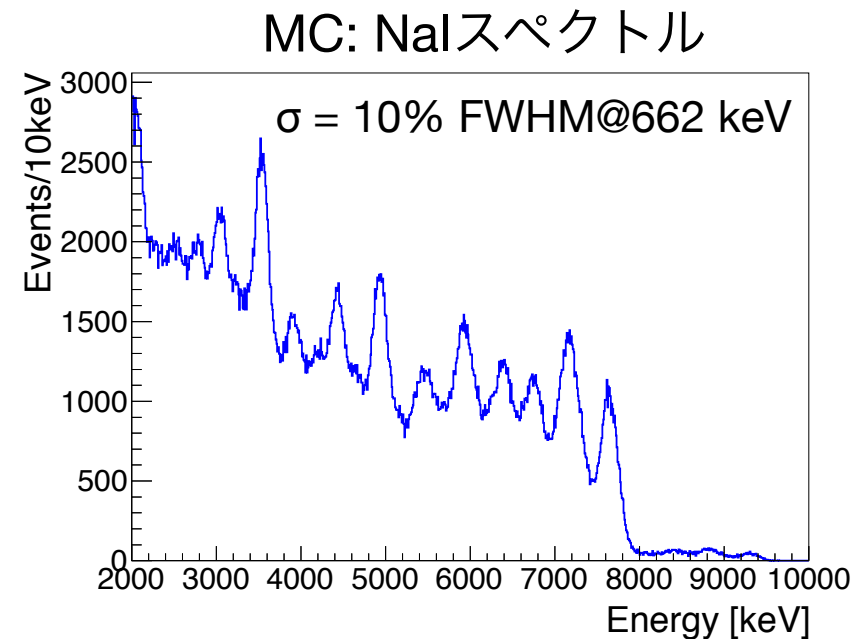
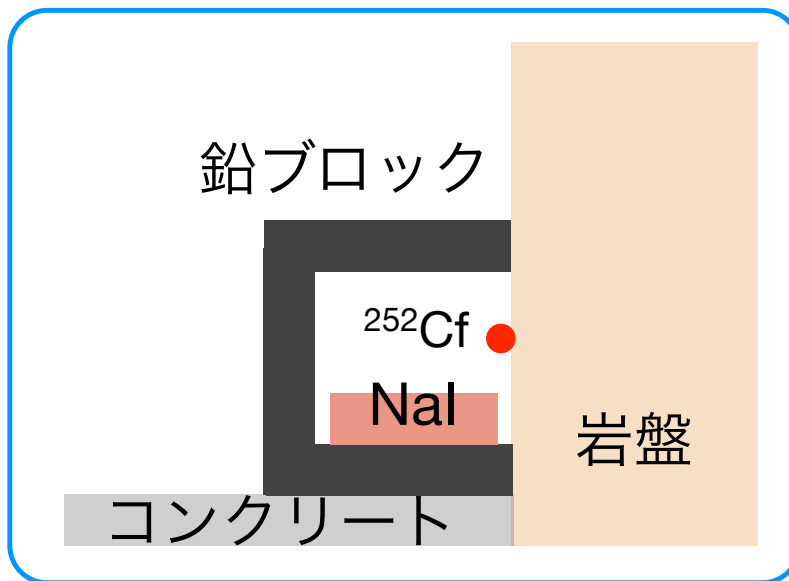


Type	5.5 < E < 10 MeV	Rock:Tank @ 7.6 MeV
Data	14 \pm 1 evt/d	0.67:0.33
MC	18.4 evt/d	0.58:0.42

- 中性子フラックスから観測レートは説明可能
- 岩盤とタンク比は、岩盤の組成モデルの不定性に依存

岩盤組成比の測定計画

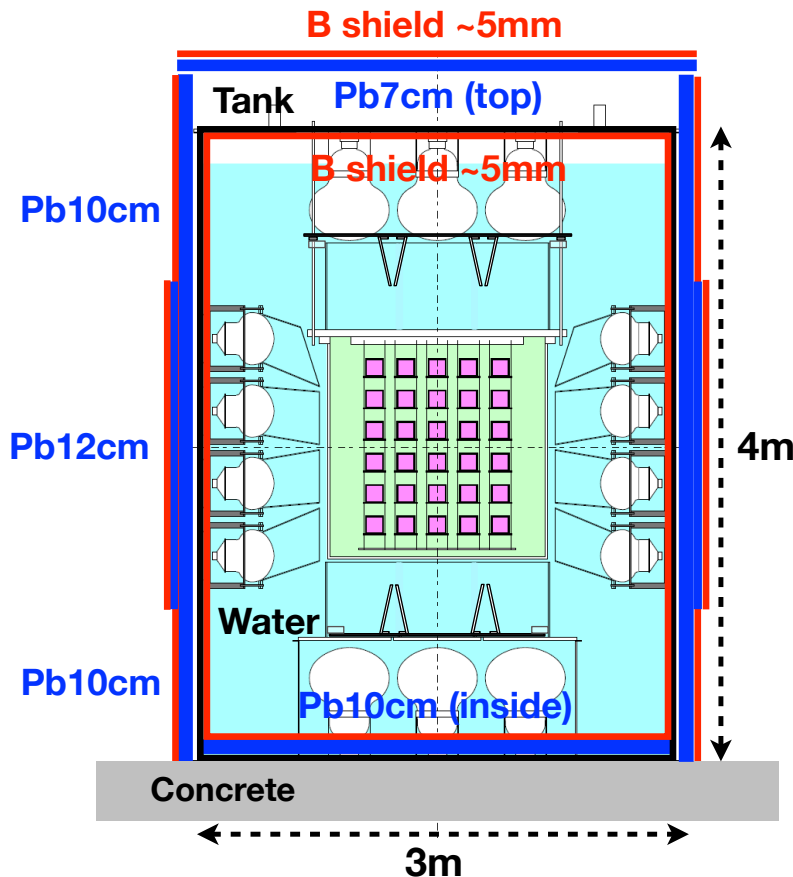
- 岩盤そばに ^{252}Cf 線源を設置してNaIで測定
 - 平均中性子エネルギー 2.1MeV
- 観測データと二種類の岩盤組成モデルを比較
- 1MeV中性子が90%が捕獲される距離が90cm, 99%が130cm
(by Geant4)



中性子測定コンソーシアム

(n, γ)事象の対策

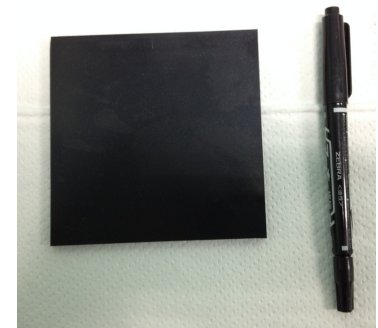
- 外部シールドの設置により(n, γ)事象を低減する
 - ▶ **目標値: ~1 events/year/96crystals (~1/80 level)**
- Geant4を用いて、シールドの厚みを決定
 - 岩盤からの γ 線: Pbシールド
 - タンクの中性子: B入りシートをタンク内外に設置



(n, γ) BG Estimation (MC)

- **Total: ~0.7 ($\pm 50\%$) evt/y**
- ▶ **Rock γ : ~0.3 evt/y**
- ▶ **Tank γ : ~0.4 evt/y**

B Sheet Sample



- 側面の鉛シールドは今春設置済み
- シールド全体は年内の設置を目指す

中性子測定コンソーシアム

まとめ

- CANDLESでは、LSアクティブベトー後でも (n,γ) がQ値で最大のBGとなっている。
- Geant4では (n,γ) 反応で正しいエネルギーの γ 線が発生しない
 - 2段階でシミュレーションを行う
- 岩盤とタンクの (n,γ) でCANDLESでの観測スペクトルを再現
- 環境中性子フラックスで観測レートは説明できる
- 岩盤組成比の不定性を抑えるため、別測定を計画中