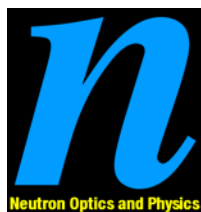


J-PARC/BL05における中性子寿命 測定実験：2022年までの中性子寿命 解析結果の現状

東京大学理学系研究科 茂木駿紀

不破康裕 長谷川拓郎 広田克也 細川律也 市川豪 猪野隆 岩下芳久
北口雅暁 古賀淳 松崎俊 三島賢二 森川滉己 音野瑛俊 關義親
関場大一郎 嶋達志 清水春樹 清水裕彦 角直幸 角野浩史 谷田征輝
山下了 矢野浩大 吉岡瑞樹



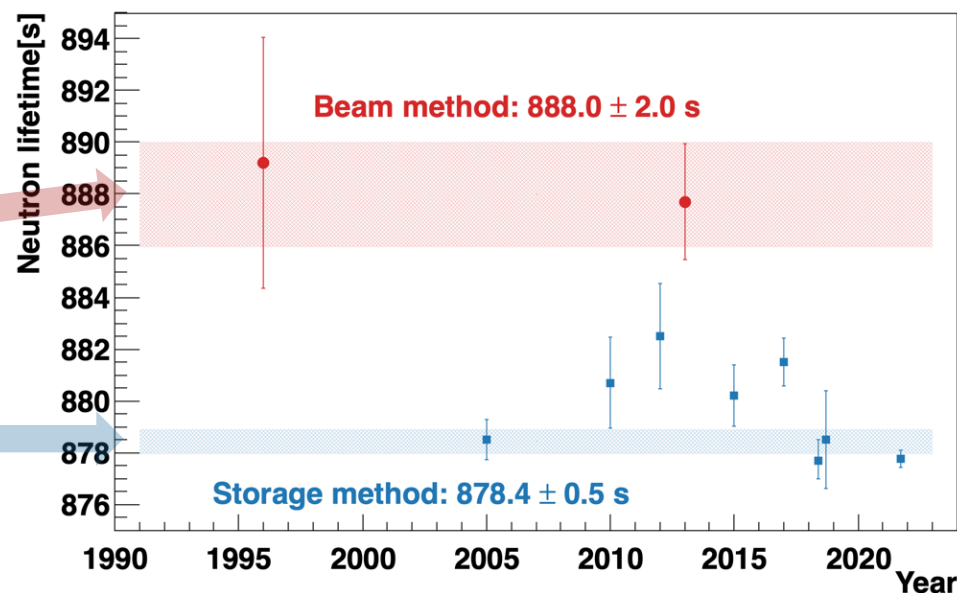
中性子寿命

中性子は平均寿命 $\tau_n = 878.4 \pm 0.5$ s (PDG2022) で電子・陽子・反電子ニュートリノに β 崩壊
中性子寿命はBig Bang元素合成、CKM行列のユニタリティに関する重要なパラメータ

PDG 2022
Phys.Rev.Lett. 162501 (2021)

2つの測定手法により測定値に9.5 s
(4.6 σ)の差が存在

- **Beam法**：検出器に中性子を入射、 β 崩壊による**陽子**を計数
- **Storage法**：超冷中性子を容器に貯蔵し、残存**中性子数**を計数



この測定値の差は測定誤差由来か、未知の物理由来かは分かっていない
➔ “中性子寿命乖離問題 (Neutron Lifetime Puzzle)”

従来実験とは系統誤差の異なる方法で、**1 s (0.1%)**精度での寿命測定を目指す

➔ β 崩壊の**電子**を計数 + Fluxを同じ検出器で同時測定

実験概要

J-PARC MLF BL05 (NOP)の偏極パルス中性子を使用し、SFCでビームを整形、TPCで中性子崩壊を測定
 パルス周波数: 25 Hz, 偏極率: 97-94%, エネルギー: ~10 meV

- Spin Flip Chopper (SFC)

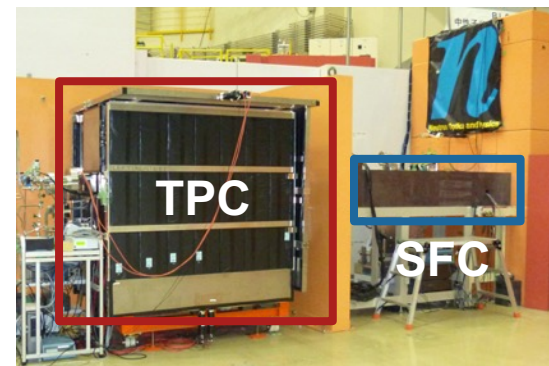
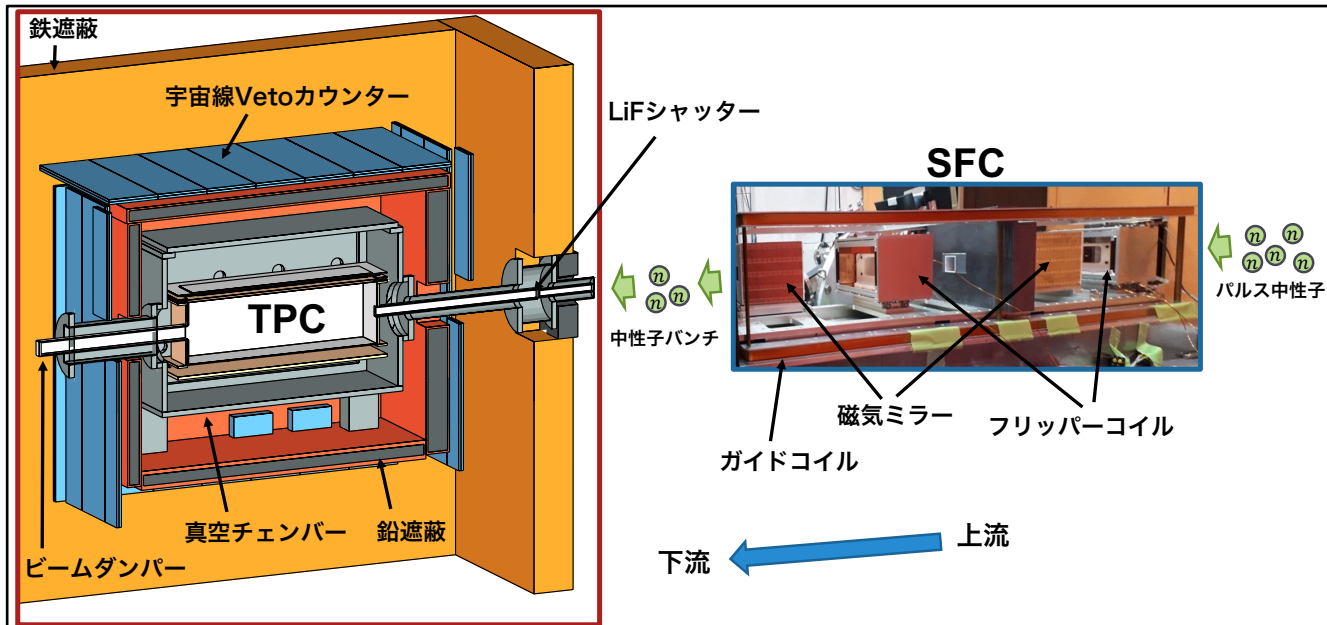
- フリッパーコイルと磁気スーパーミラーで偏極パルス中性子ビームをバンチ化
- バンチの長さはTPCの半分、1パルスあたり5バンチに分割

- Time Projection Chamber (TPC)

- MWPC, ドリフト面, LiF内壁から成るガスTPC
- 同一検出器でβ崩壊と中性子フラックスを同時に計測

$$\tau_n = \frac{1}{\rho \sigma_0 v_0} \frac{(S_{\text{He}}/\epsilon_{\text{He}})}{(S_{\beta}/\epsilon_{\beta})}$$

信号選別で計数 (S_{He}/ε_{He})
 ρσ₀v₀ (3He導入量から決定)
 シミュレーションで見積もり (S_β/ε_β)



MLF BL05 (NOP)

現在までの結果

最初の物理解析結果 (2014-2016)

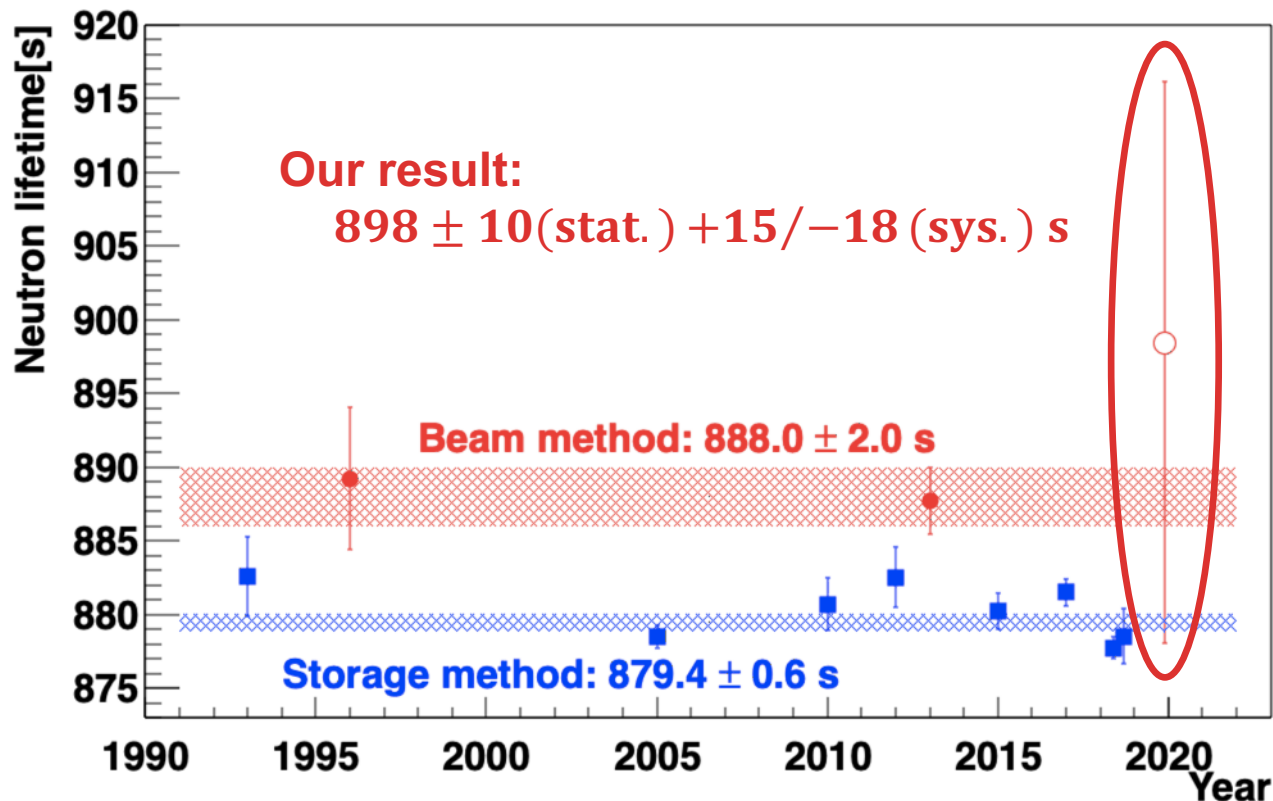
$$\tau_n = 898 \pm 10(\text{stat.}) + 15/-18 (\text{sys.}) [\text{s}] \quad \text{PTEP 2020, 123C02}$$

データ取得は2022年まで実施 (2020 – 2021はSFCアップグレード作業)

現在の測定精度ではBeam法、Storage法と矛盾無し

中性子ガス散乱起因のバックグラウンドが主要な系統誤差 (+2/-14 s)

→系統誤差改善に向けた解析を行っている



系統誤差改善に向けた低圧力測定

ビーム内中性子の一部はTPC動作ガス(He + CO₂)によって散乱され、散乱中性子が起こす以下の事象はβ崩壊の背景事象となる

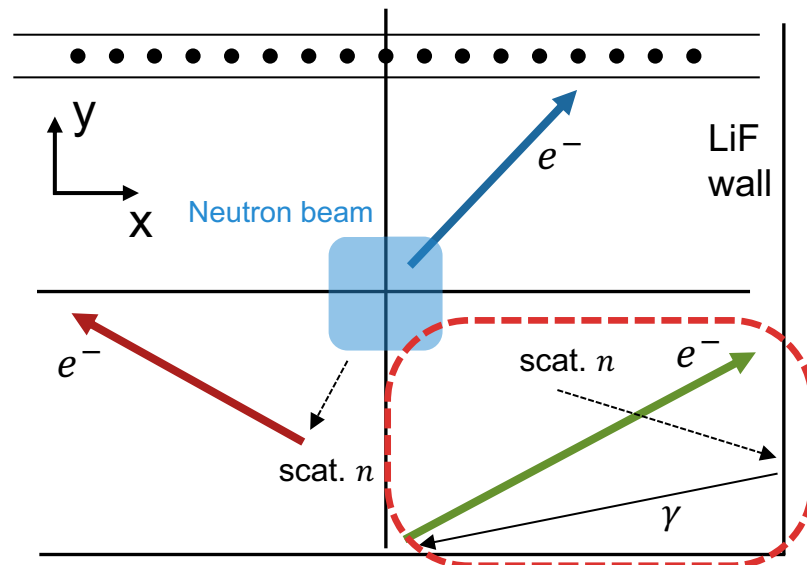
- 散乱中性子によるβ崩壊
- 散乱中性子による(n, γ)反応

ガス散乱背景事象((n, γ)反応)の量は、測定値とMC計算値で**4.6倍**の差が存在

- 実測値: $S_{\text{gas BG}}/S_{\beta} = 4.6\%$
- 計算値: $S_{\text{gas BG}}/S_{\beta} = 1.0\%$

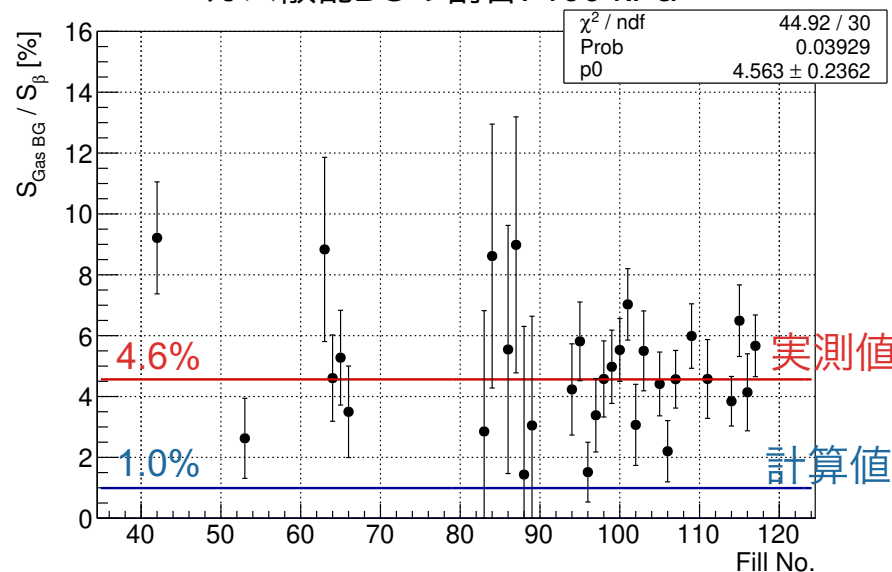
➡ ガス散乱BGの系統誤差として **+2/-14 s** の不確かさ

➡ 動作ガス圧力を下げることで、系統誤差の主要な原因であるガス散乱背景事象を減らすことができる



散乱起因事象

ガス散乱BGの割合: 100 kPa



低ガス圧での寿命測定

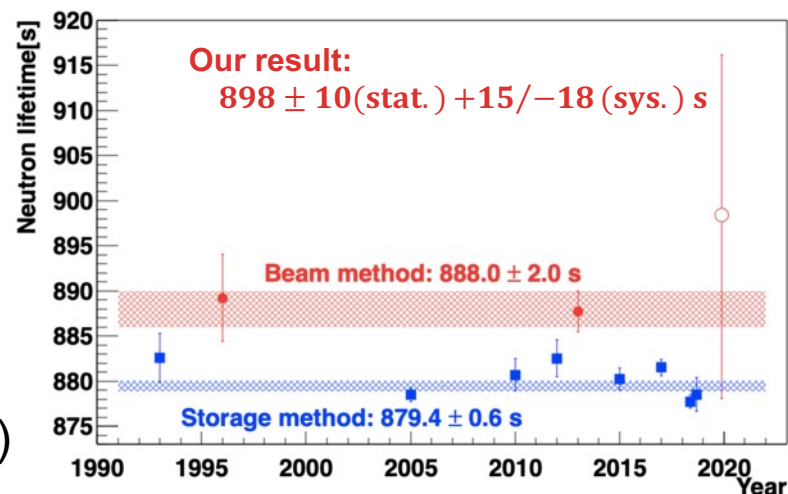
First result (2014-2016):

TPC動作ガス100 kPaでの測定

(^4He : CO_2 : ^3He = 85 kPa: 15 kPa: 50 – 200 mPa)

散乱中性子を減らすために、動作ガス**50 kPa**での測定を実施

(^4He : CO_2 : ^3He = 42.5 kPa: 7.5 kPa: 50 – 200 mPa)



50 kPaでの測定にあたり、以下の対応が必要

- 低圧測定の安定化
 - ➔ 放電し得る箇所を減らし、また動作ガス導入前の真空度を高めることで安定した測定が可能となった
- 50 kPa条件でのMCシミュレーション最適化
 - ➔ 以下のデータ(統計精度 ~ 8 s)を使用してMCパラメータ最適化を行なった

データ取得年度	ガスフィル数	MLF Power [kW]	DAQ time [hours]	入射中性子数 [$\times 10^{11}$ neutrons]
2017	3	150,300	271	0.6
2018	3	400, 500	319	1.8

50 kPa MCシミュレーション

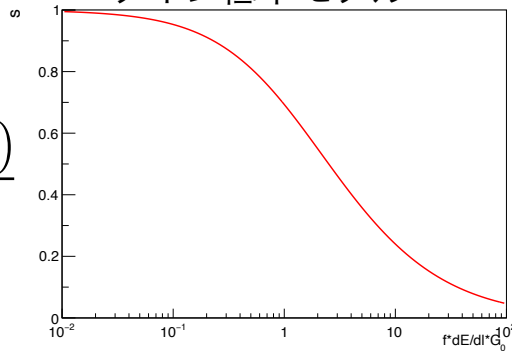
空間電荷効果のパラメータ最適化、MCワイヤー検出効率の改善を行い50 kPaのMCシミュレーションを作成

日本物理学会2021年秋季大会

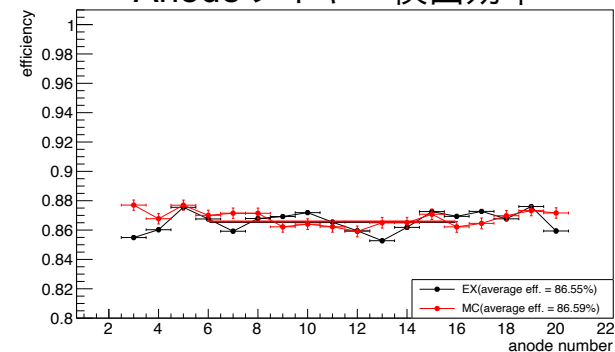
➔ 100 kPaと同様にエネルギー損失を再現

ゲイン低下モデル

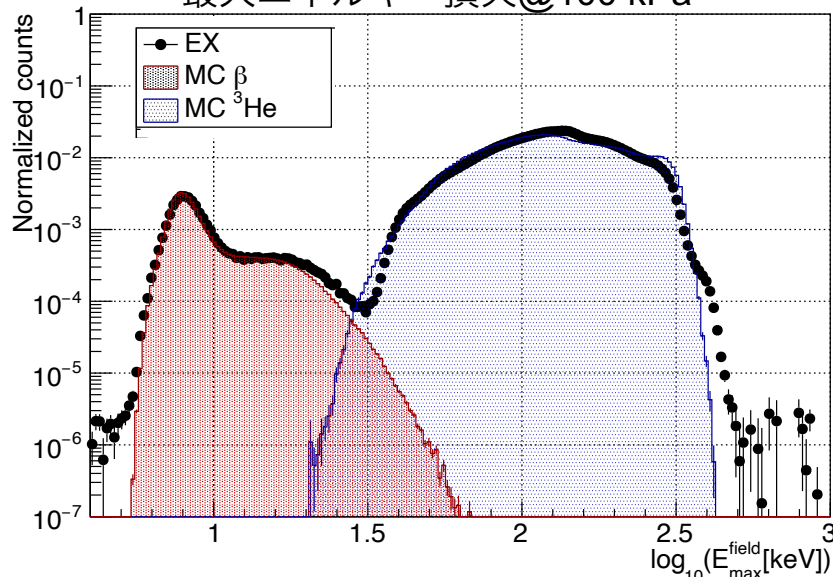
$$s = \frac{\log\left(1 + f \frac{\Delta E}{\Delta l} G_0\right)}{f \frac{\Delta E}{\Delta l} G_0}$$



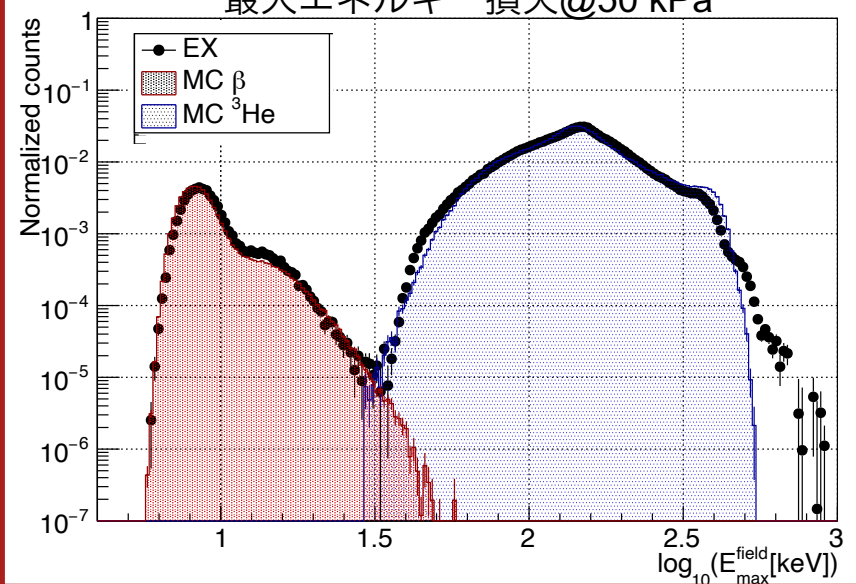
Anodeワイヤー検出効率



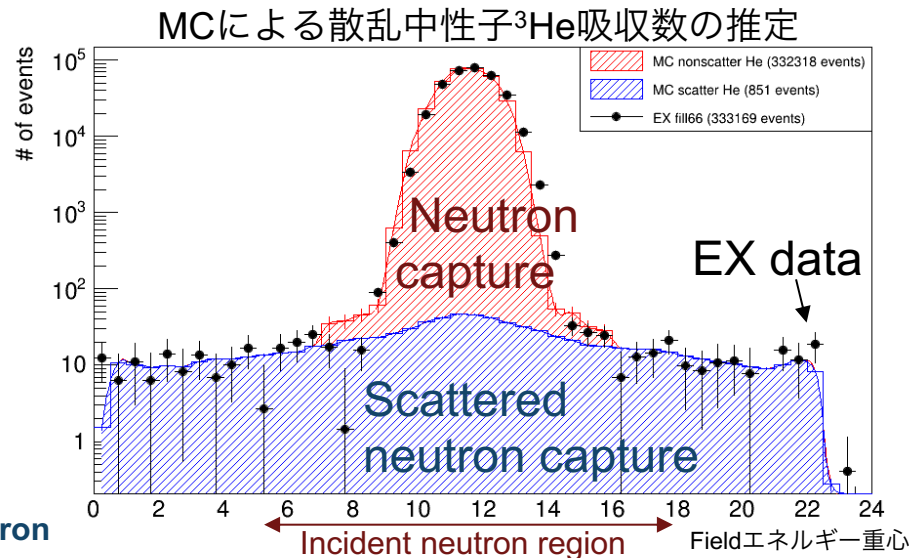
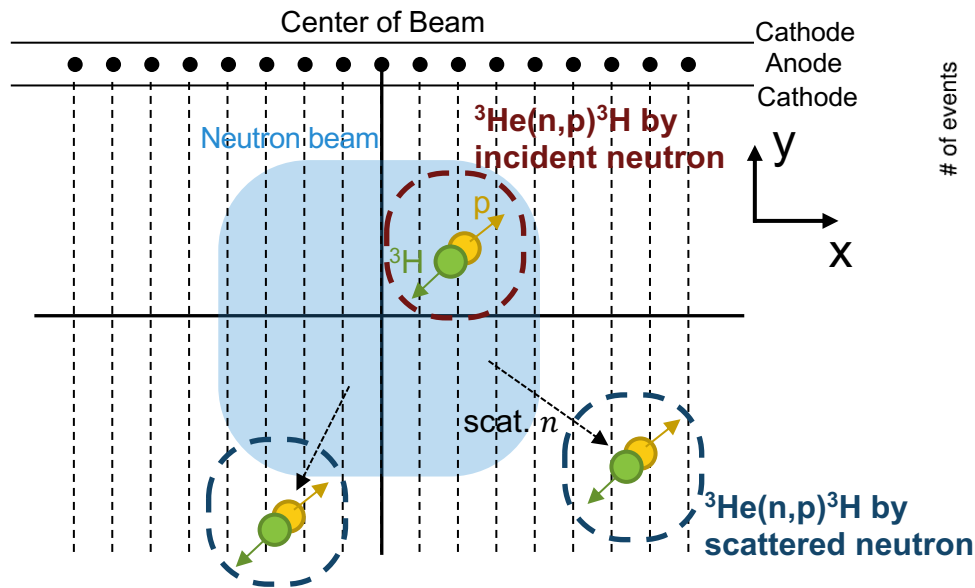
最大エネルギー損失@100 kPa



最大エネルギー損失@50 kPa



ガス散乱事象



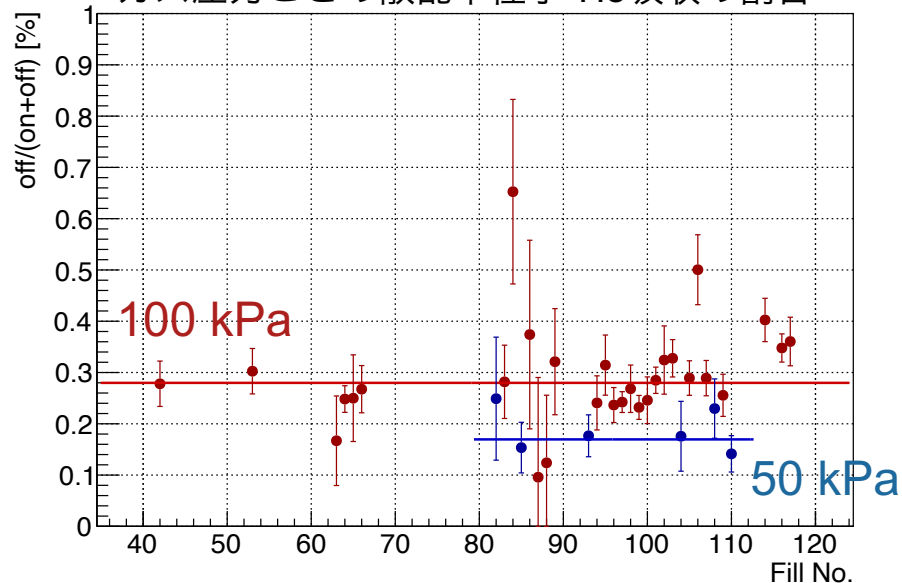
MCシミュレーションと測定値から中性子³He吸収事象の内、散乱中性子が吸収される割合を計算

- 100 kPa: $0.280 \pm 0.008 \%$
- 50 kPa: $0.17 \pm 0.02 \%$

散乱中性子の³He吸収事象の割合は50 kPaで $61 \pm 7\%$ になる

➔ 圧力半分で散乱中性子数が約6割

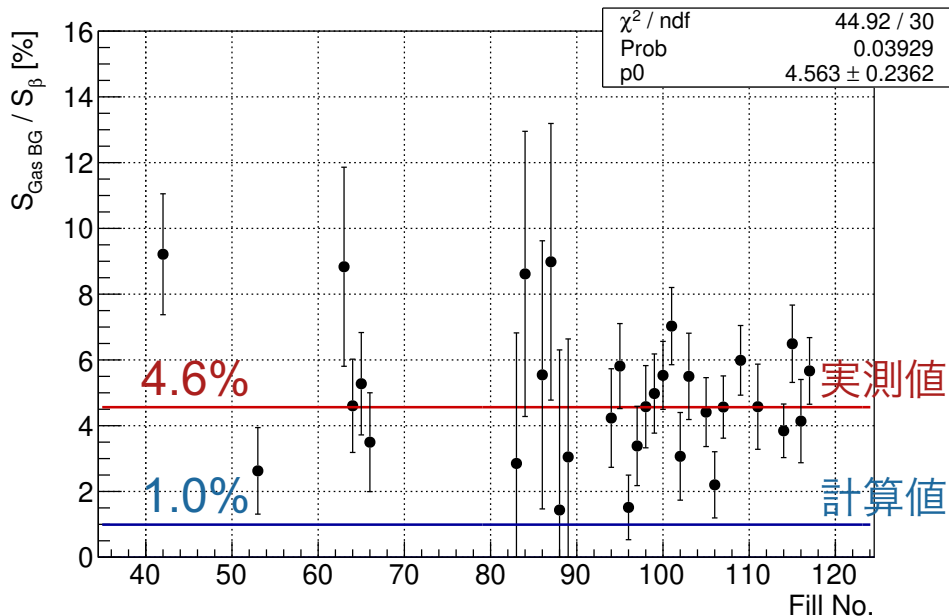
ガス圧力ごとの散乱中性子³He吸収の割合



ガス散乱事象

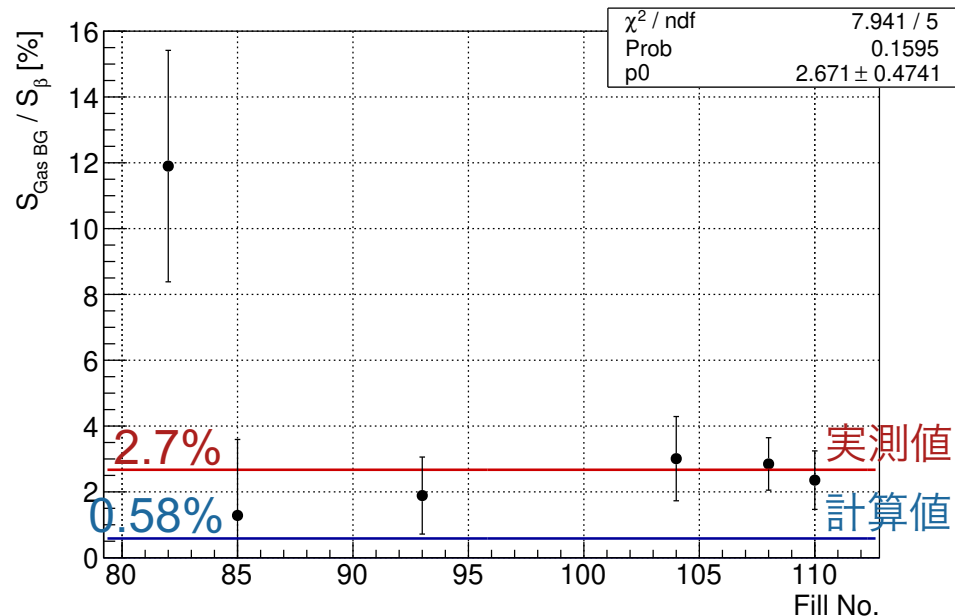
β 崩壊に対するガス散乱背景事象数の割合を100 kPa, 50 kPaで比較

ガス散乱BGの割合: 100 kPa



$$100 \text{ kPa: } S_{\text{gas BG}}/S_{\beta} = 4.6 \pm 0.2 \%$$

ガス散乱BGの割合: 50 kPa



$$50 \text{ kPa: } S_{\text{gas BG}}/S_{\beta} = 2.7 \pm 0.5 \%$$

実測値/計算値は約4.5倍で100 kPaと同じ

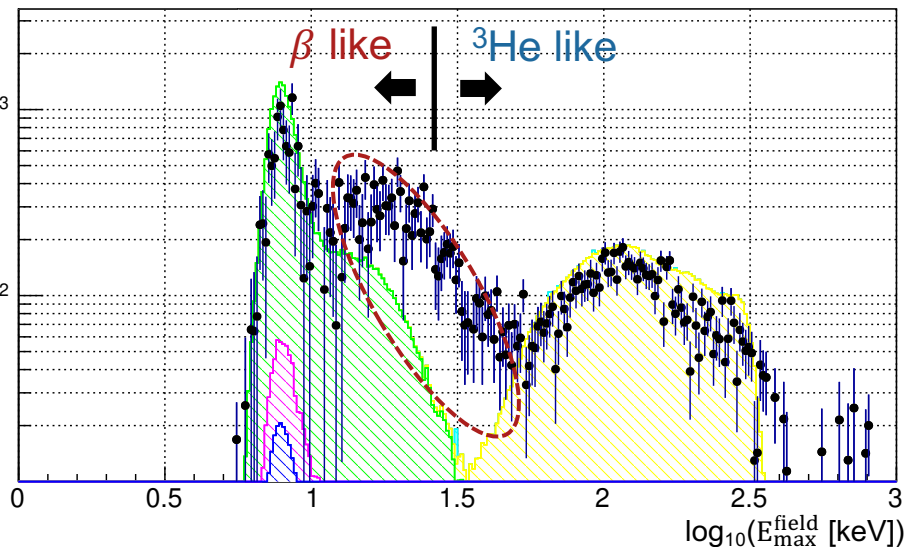
50 kPa測定でのガス散乱背景事象の量は100 kPaの $59 \pm 11\%$ に減少する

➔ 散乱背景事象の系統誤差は $S_{\text{gas BG}}/S_{\beta}$ に比例、**50 kPaの測定で系統誤差を100 kPaの6割にできるため低圧力測定は精度改善に有効**

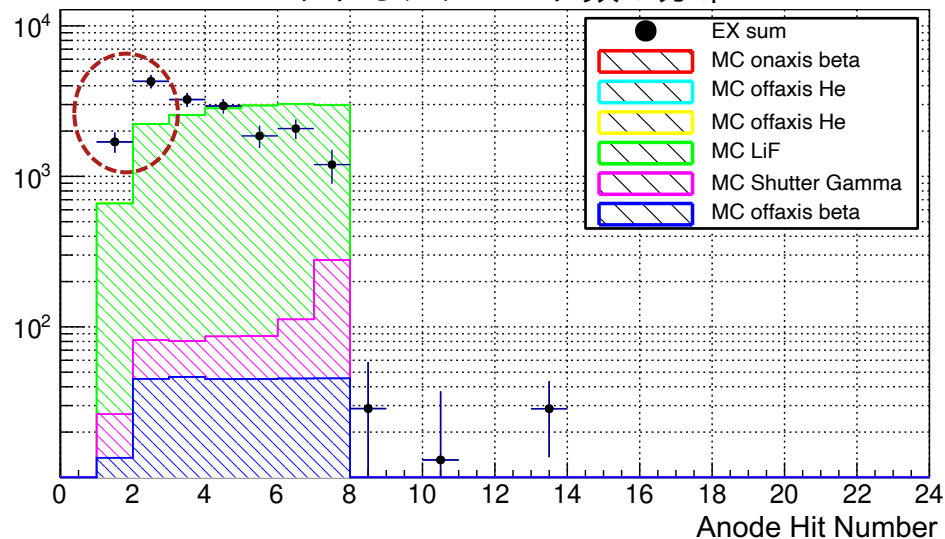
エネルギー・飛跡長分布@100 kPa

β 崩壊の背景事象を抽出するカット条件をかけたときの分布

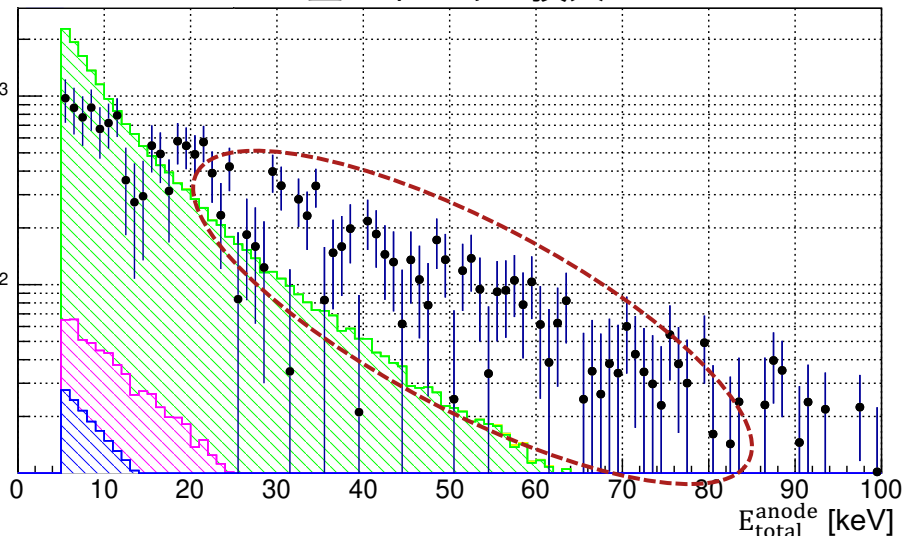
ワイヤー辺りの最大エネルギー損失



ヒットしたアノード数の分布



全エネルギー損失



100 kPaでは

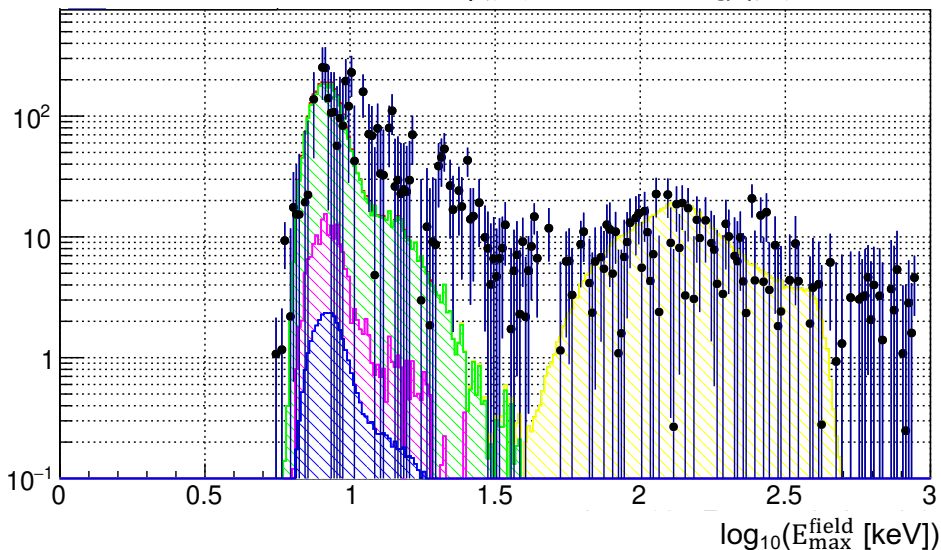
- β -like領域の高エネルギー側で実験値の背景事象数超過が見られる
- ヒット数の小さい領域で実験値がMCを超過

➡ 起源未特定の背景事象は短い飛跡を持つと考えられる (細川講演: 7pA442-6)

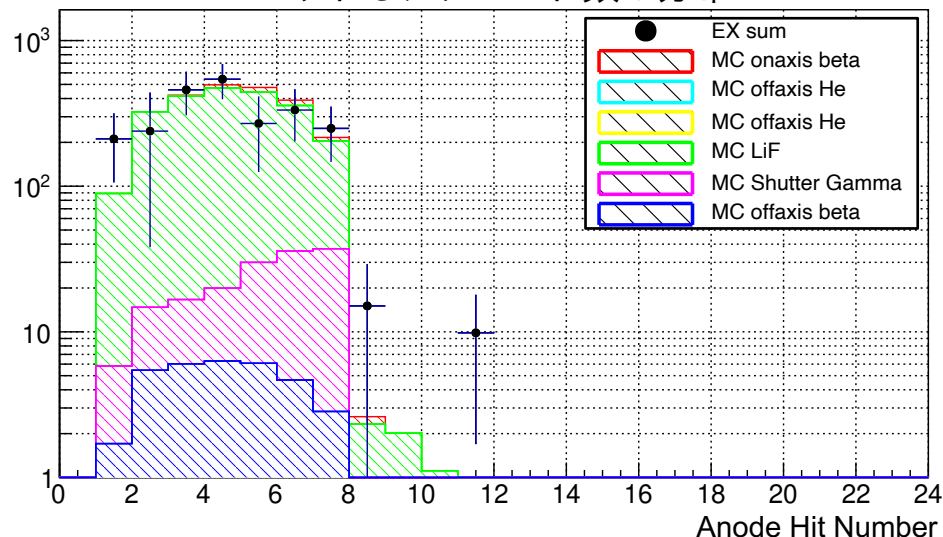
エネルギー・飛跡長分布@50 kPa

50 kPaでも同様の分布を確認

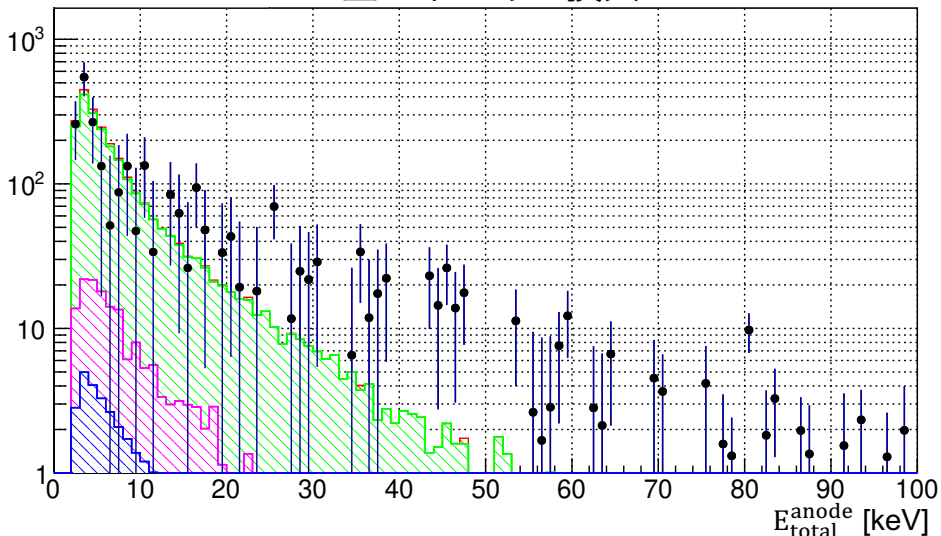
ワイヤー辺りの最大エネルギー損失



ヒットしたアノード数の分布



全エネルギー損失



50 kPaでは2017 – 2018データの統計精度で有意な違いは見えない

低圧力測定で詳細な背景事象解析を行うためにも更なる統計が必要となる

➔ より短時間の測定で統計量を増加させるための改良が必要

中性子フラックスの増強

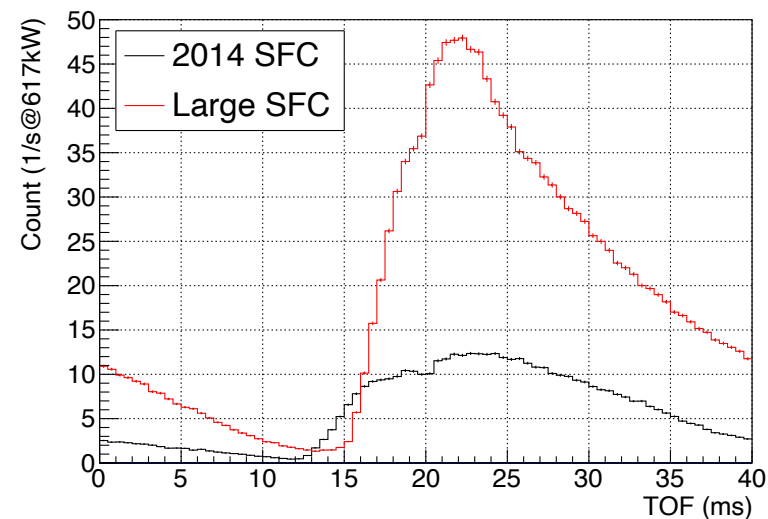
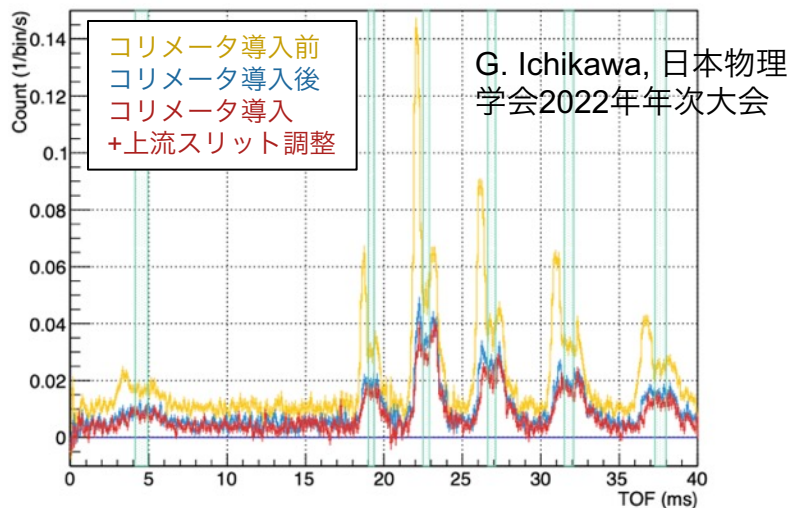
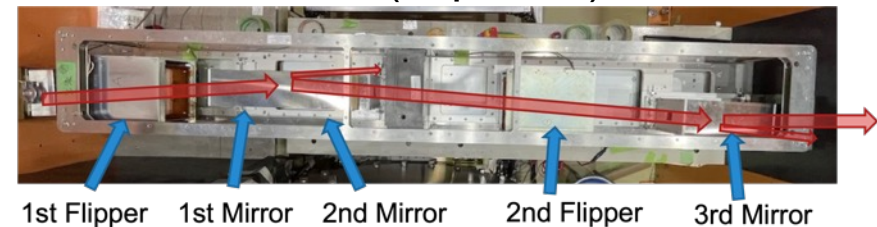
従来のビーム強度では1 sの統計精度到達に500日以上 of 測定が必要

➔ 2020年よりビームサイズ拡大・中性子光学系をアップグレード作業を実施

- ビーム拡大に対応するため、大型フリップパーコイルと磁気ミラーを作成・導入
- ビーム増加に伴う γ 線背景事象を抑えるため、TPC上流にLiF+鉛コリメータ導入

➔ 以前と比べて約3倍の中性子強度を達成

SFC (Top view)



2022年2月にSFCアップグレードを完了

2022年3月から新しい中性子光学系を用いて物理測定を実施した

取得データ

2014 – 2022に43個のガス条件で物理測定を行なった (市川講演: 7pA442-5)

- 100 kPa測定

データ取得年度	ガスフィル数	MLF Power [kW]	DAQ time [h]
2014	1	300	70
2015	1	500	33
2016	4	200	453
2017	14	150, 300, 400	1186
2018	6	400, 500	558
2019	3	500	302
2021	1	700	34
2022	2	800	166

First result
(統計10 s)

統計精度
~ 2.7 s

SFCアップ
グレード

合計で2.0 s
の統計精度

- 50 kPa測定

データ取得年度	ガスフィル数	MLF Power [kW]	DAQ time [h]
2017	3	150,300	271
2018	3	400, 500	319
2021	1	600, 700	58
2022	4	800	422

統計精度
~ 3.0 s

SFCアップ
グレード

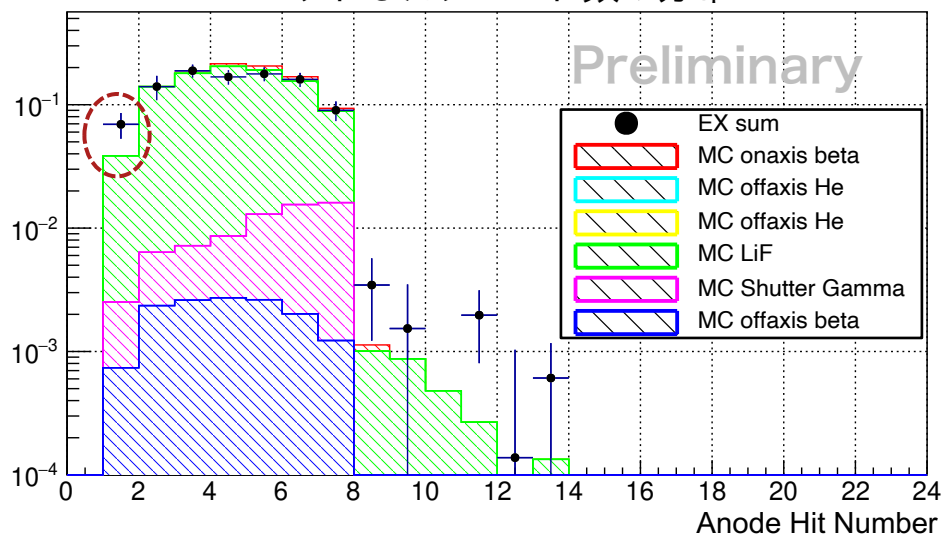
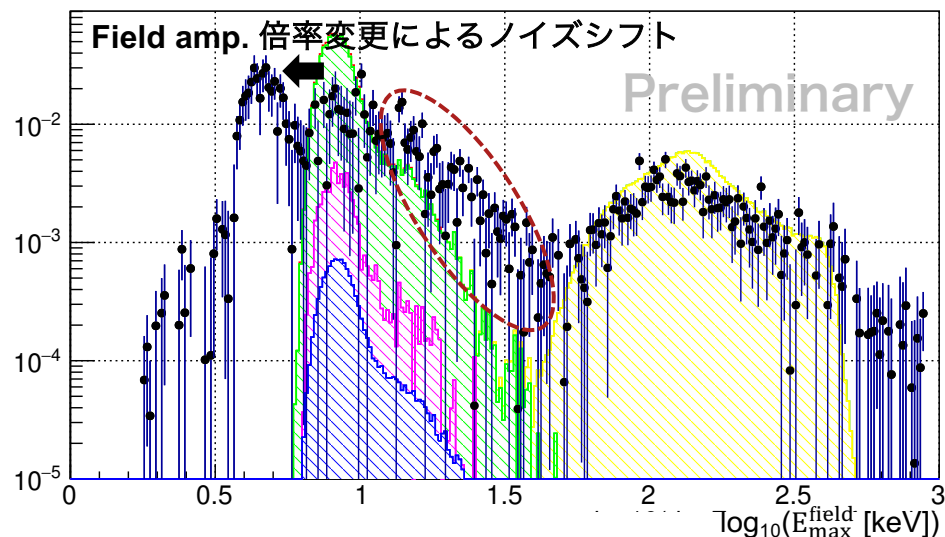
50 kPaの安定運転が可能となったため、今後は50 kPaを中心に測定する

2022年測定データ

2022年までの全データ(50 kPa)を使用し、 β 崩壊背景事象カットに対する各分布を確認

ワイヤー辺りの最大エネルギー損失

ヒットしたアノード数の分布

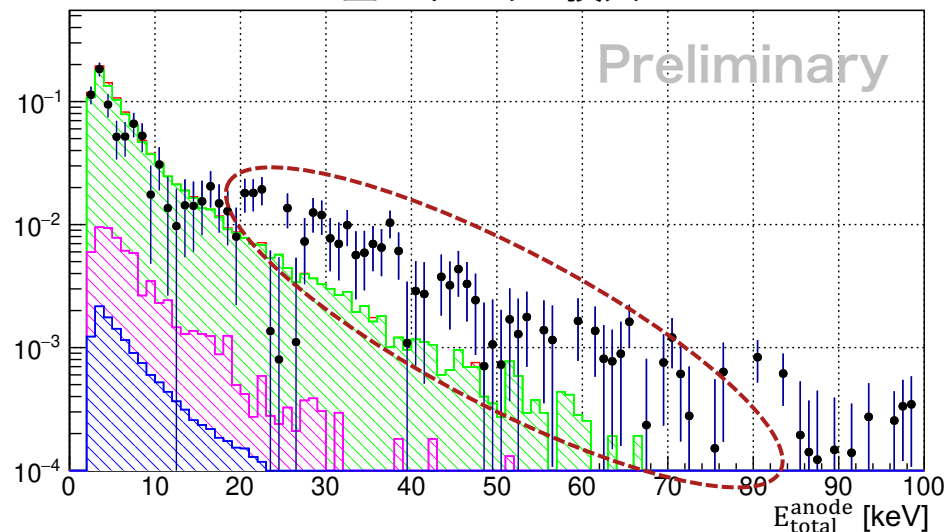


全エネルギー損失

※MCは2017-2018測定データ

100 kPa測定と同様に、 β -like領域の高エネルギー側に飛跡の短いイベントの存在が示唆される

➡ その他の分布も使用した詳細な背景事象解析は進行中



Summary

- J-PARC MLF BL05において、従来とは異なる手法での中性子寿命測定実験を行なっている
- 最初の物理解析結果 (2014-2016):
$$\tau_n = 898 \pm 10(\text{stat.}) + 15/-18 (\text{sys.}) [\text{s}]$$
- SFCのアップグレードを経て、2022年までデータ取得を実施した
 - 100 kPa
 - ▶ 統計精度 ~ 2.7 s
 - ▶ ガス散乱起因背景事象が大きな系統誤差として存在 (+2/-14 s)
 - 50 kPa
 - ▶ 統計精度 ~ 3 s
 - ▶ ガス散乱背景事象の数は100 kPa測定の60%程度に減少
 - 全データで2 sの統計精度、現在解析中
- 1 s精度到達に向けて、更なるデータ取得と散乱中性子起因背景事象の解析が進行中