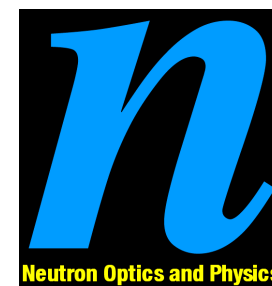


冷中性子ビームを用いた 中性子寿命測定のためのTPC開発

細川 律也

九州大学先端素粒子物理研究センター

2022年12月9-10日
MPGD & Active媒質TPC2022研究会@KEK



アウトライン

➤イントロダクション

➤中性子寿命測定のための低バックグラウンドTPC

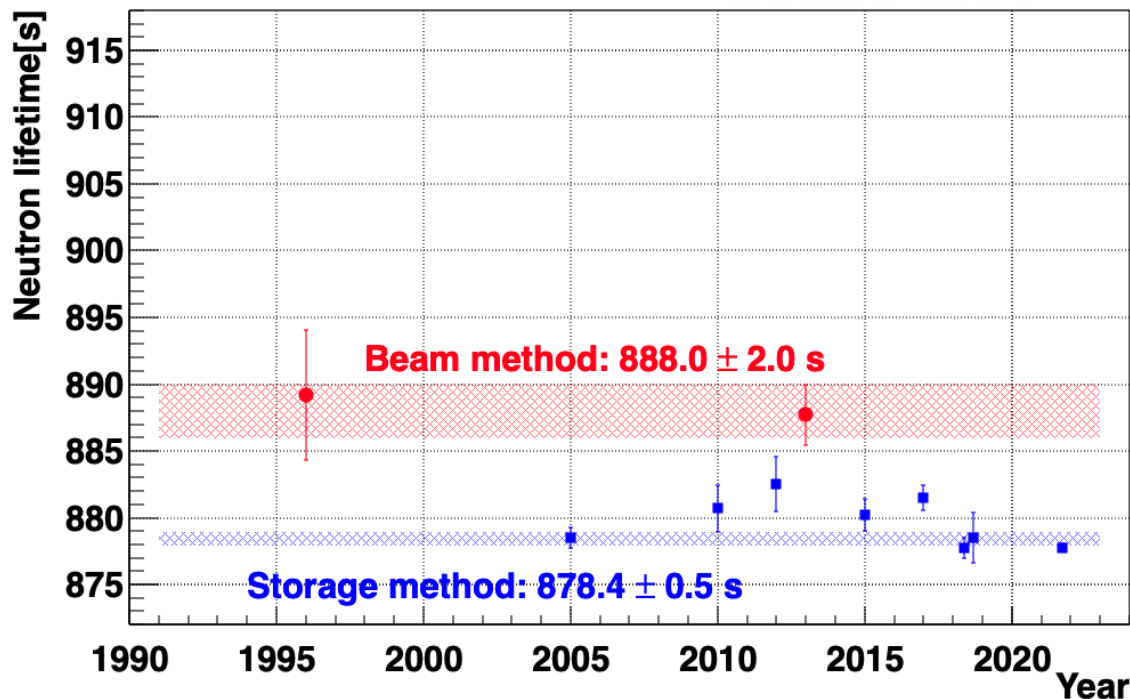
- PEEKフレーム製TPC
- 磁場印加中で動作する多層型TPC

➤まとめ

➤イントロダクション

中性子寿命問題

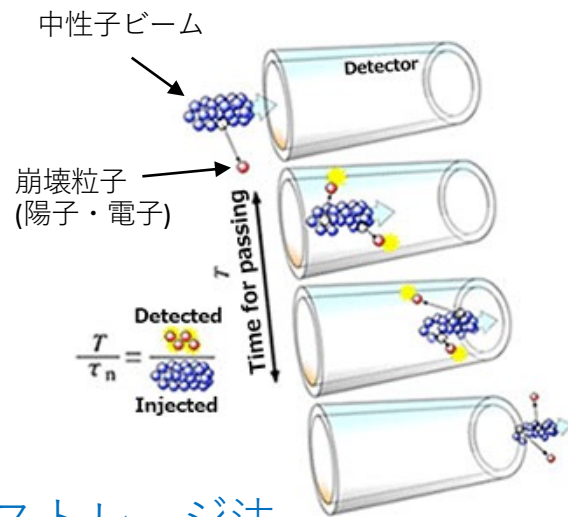
- 自由中性子は $878.4 \pm 0.5 \text{ s}$ (PDG 2022) の寿命でベータ崩壊する $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$



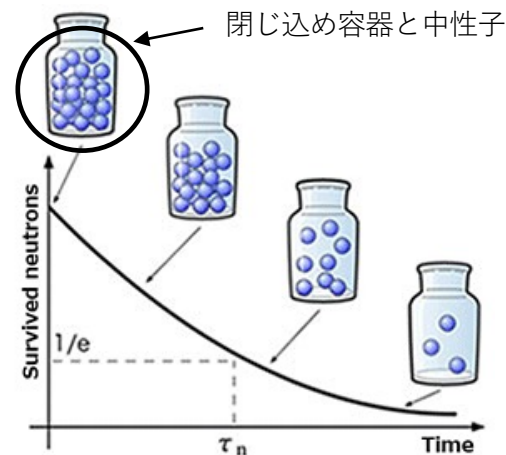
- ビーム法とストレージ法の結果間には 4σ の乖離
 - ・ 未考慮な実験的誤差によるもの?
 - ・ 未発見の物理現象? (e.g. Dark decay, Dark matter との散乱)
- 従来のビーム法は誤差が大きい (ストレージ法の4倍)

➡ 新たな手法による寿命測定実験によって
中性子寿命問題の解決に迫る

- ビーム法
 - ・ 崩壊生成粒子数を計数



- ストレージ法
 - ・ 閉じ込め後の残存中性子数を計数

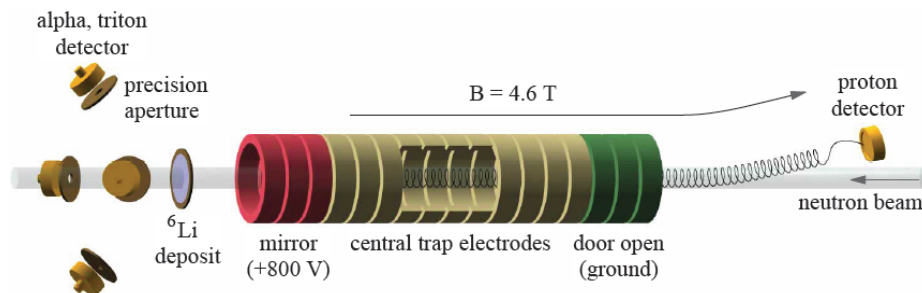


ビーム法による先行研究の代表例

➤ トラップ装置を用いた陽子計数法

(Phys. Rev. C 71, 055502 (2005))

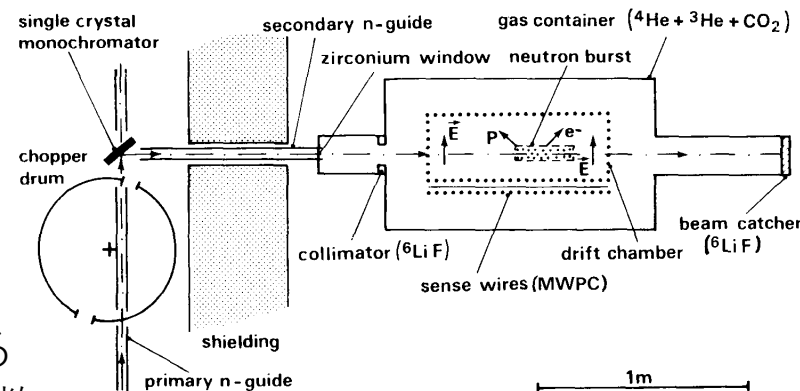
- 中性子源: 原子炉
- 結果: $886.6 \pm 1.2 \text{ (stat.)} \pm 3.2 \text{ (syst.) s}$
- 長所: 低バックグラウンド
- 問題点: 中性子フラックスモニターによる系統誤差大



➤ TPCを用いた電子計数法

(Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 284, 120 (1989))

- 中性子源: 原子炉
- 結果: $878 \pm 27 \text{ (stat.)} \pm 14 \text{ (syst.) s}$
 - 誤差が大きく、測定原理検証にとどまる
- 長所: 崩壊電子数と入射中性子数を同時計数
 - ➡ 計数における系統誤差を減少
- 問題点: バックグラウンドが多い、中性子バンチ化における損失大
 - ➡ 計数における系統誤差増大、統計量の減少による統計誤差増大



先行研究における問題点を解決し、1 s (0.1%)精度での寿命測定を目指す

新たな実験手法

➤ 加速器による中性子ビームを用いた電子計数法による測定

- 初の、加速器を用いた中性子寿命測定実験
- 原理検証にとどまっていた電子計数法を改良し、
1 s (0.1%)精度での測定を目指す

大強度パルス中性子源
(J-PARC,物質生命科学実験施設(MLF))



大強度の偏極中性子ビームを供給

RF制御による中性子ビームバンチ化
(Spin Flip Chopper (SFC))



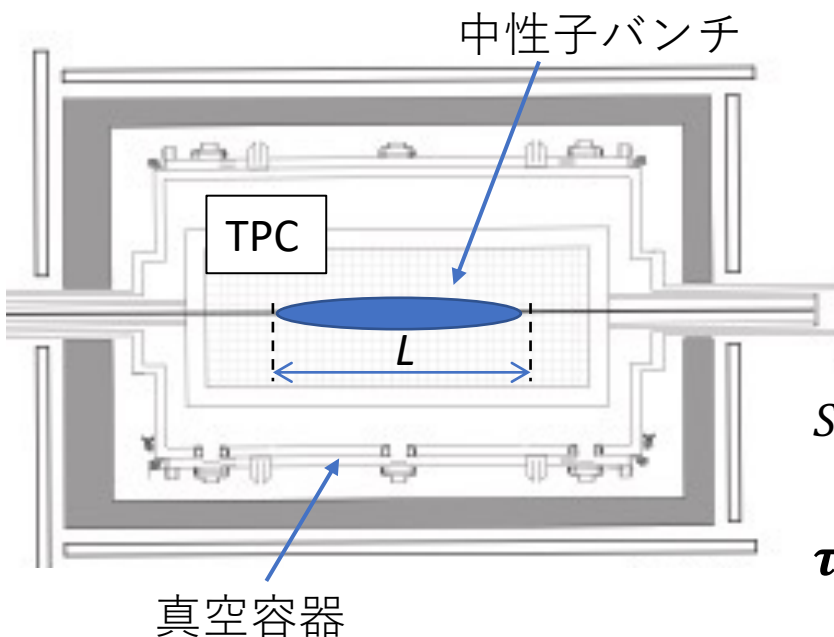
高コントラストで
長さの揃ったバンチを形成

低バックグラウンドTPCを用いた測定

電子計数法の測定原理

➤ 検出器 : TPC

- 動作ガス : $^4\text{He}-\text{CO}_2 + ^3\text{He}$
 - 容器中に封じ切る
- 検出部 : MWPC



τ_n	: 中性子寿命
N	: 中性子数
L	: Fiducial volume
ρ	: ^3He 密度
σ	: 任意速度での $^3\text{He}(n, p) ^3\text{H}$ 反応断面積
v	: 任意の中性子速度
σ_0	: $^3\text{He}(n, p) ^3\text{H}$ 反応断面積参照値 (@ 2200m/s)
v_0	: 中性子速度参照値 (2200 m/s)
S_{He}	: $^3\text{He}(n, p) ^3\text{H}$ 反応数
S_β	: β 崩壊事象数
$\varepsilon_{\text{He}}, \varepsilon_\beta$	: 検出効率

$$S_\beta = \varepsilon_\beta N \frac{L}{\tau_n v} \quad S_{\text{He}} = \varepsilon_{\text{He}} N \rho \sigma L$$

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

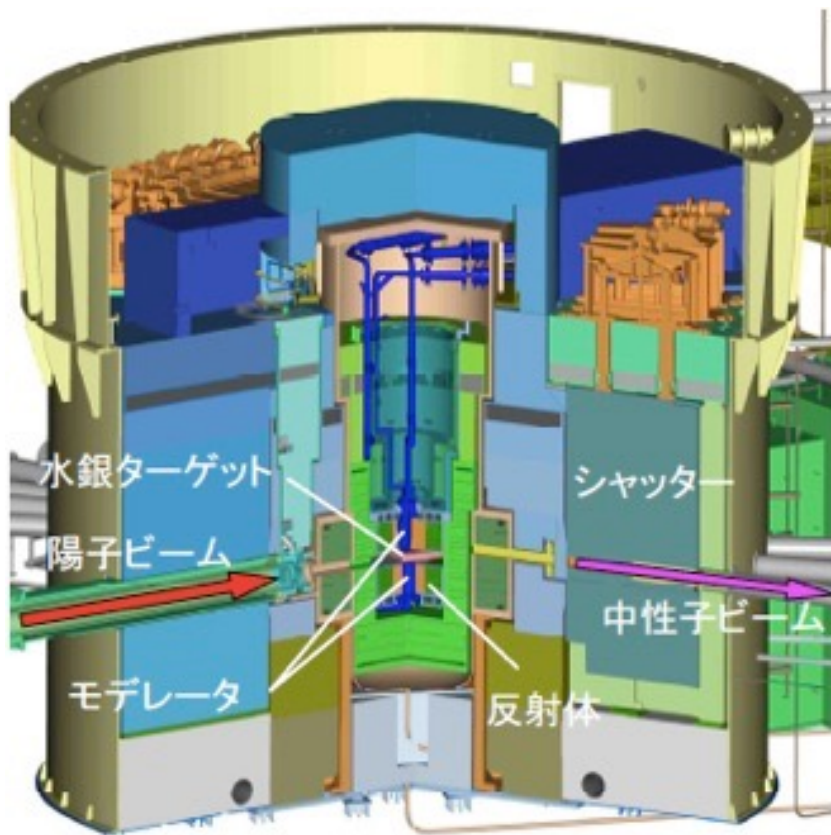
- L はキャンセル
- σ は $1/v$ に比例するため、 $\sigma v = \sigma_0 v_0$

➤ 電子生成事象と $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 反応は TPC 内でのエネルギー損失の違いで弁別

➤ 中性子崩壊からの電子数と、 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 反応数を同時計数

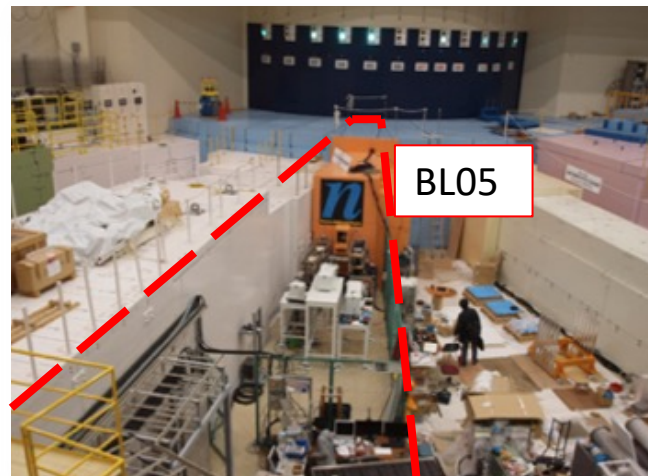
→ 計数における系統誤差が一部キャンセルされ、寿命を高精度で決定可能

大強度パルス中性子源 (J-PARC,物質生命科学実験施設(MLF))

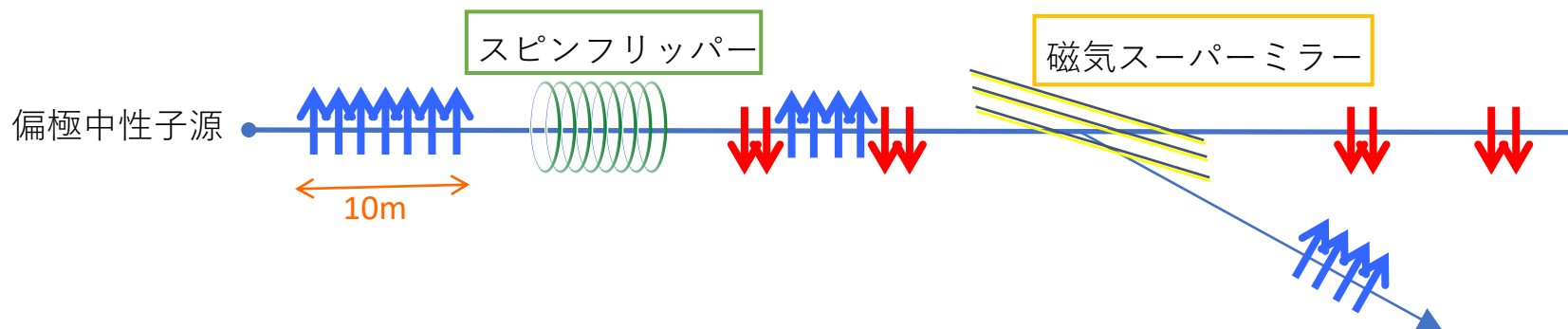


ビームサイクル	25Hz
モデレーター	結合型 (20 K)
ビームサイズ	10 cm x 4 cm
フラックス	3.9×10^7 /s/cm ² (1MW 時)
偏極率	95%
エネルギー	1 ~ 20 meV
波長	0.2 ~ 1 nm
速度	500 ~ 2000 m/s

- MLFビームライン5番 (BL05)の
偏極ビームブランチで実験

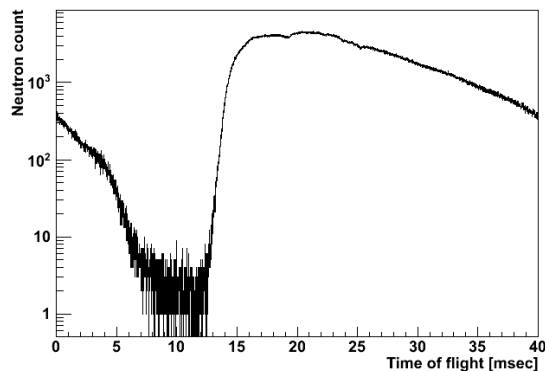


RF制御による中性子ビームバンチ化 (Spin Flip Chopper (SFC))

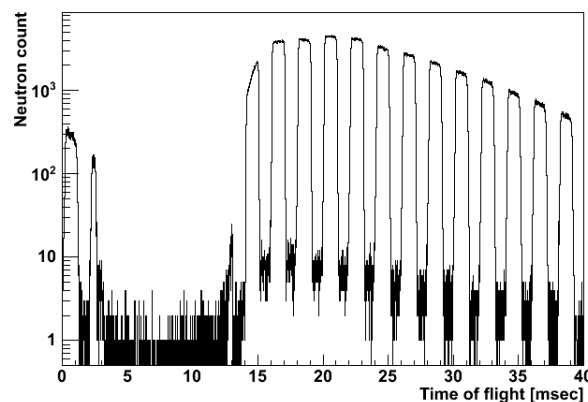


スピントリッパーでパルスの一部のスピンを下向きに反転

磁気スーパーミラーで上向きスピンのみがポテンシャル差を感じて反射



バンチ化



➤中性子寿命測定のための低バックグラウンドTPC

PEEKフレーム製TPC

磁場印加中で動作する多層型TPC

PEEKフレーム製TPC TPCの概要

ビームキャッチャー

MWPC部

アノードワイヤー

フィールドワイヤー

中性子

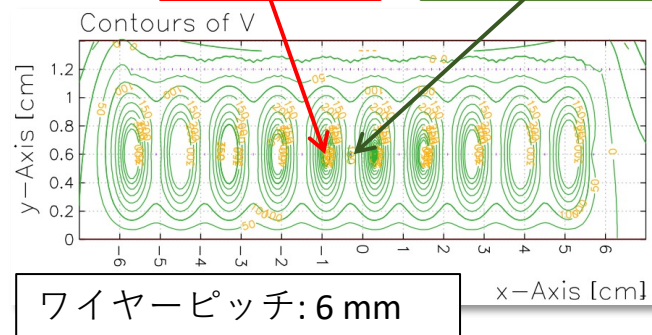
カソードワイヤー

ビームガイド

ドリフト方向

アノード

フィールド



アノードワイヤー	29本, Au coated W, +1780V
フィールドワイヤー	28本, BeCu , 0V
カソードワイヤー	120本, BeCu , 0V
ドリフト長, ドリフト電圧	30 cm, -9000V
動作ガス	He:CO ₂ =85kPa:15kPa or 42.5kPa:7.5kPa
寸法(mm)	300 x 300 x 970

放射性物質起因バックグラウンド

➤ 試作段階のTPCフレームにはG10を使用

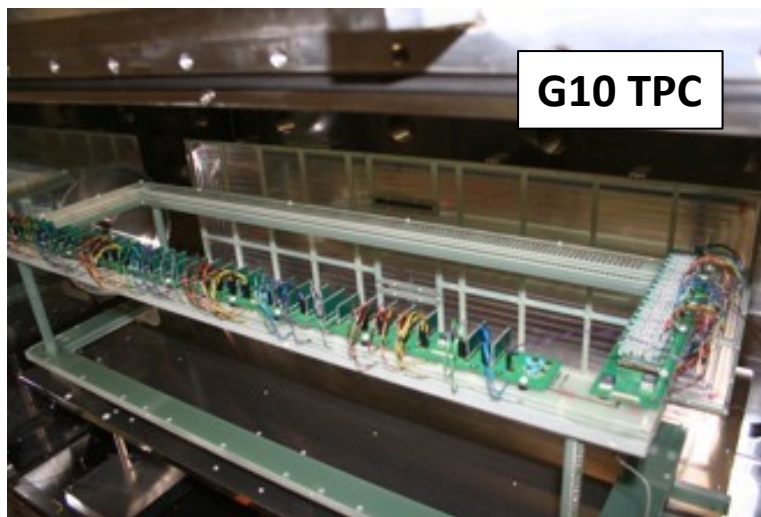
- ガラス起因の放射性物質をGe検出器で検出： $\sim 0.3 \text{ Bq/cc}$

- 1 cpsは 0.01 Bq/cc に相当

- $\sim 30 \text{ cps}$ のバックグラウンドレート

➡ 中性子崩壊レート ($0.1 \text{ cps (@220 kW)}$ – 0.4 cps (@1 MW)) に対して非常に高い

- 中性子崩壊レート $0.1 - 0.4 \text{ cps}$ は、一様な環境バックグラウンドと比較する際
デューティー比 $40(\text{ms})/2.8(\text{ms}) \sim 14.3$ を考慮すると $1.4 - 5.7 \text{ cps}$ に対応

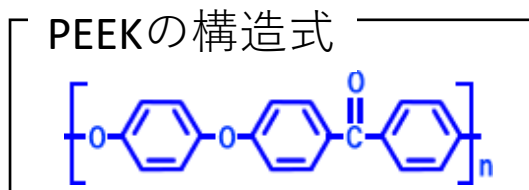


Isotope	^{212}Pb	^{214}Pb	^{228}Ac	^{214}Pb	^{208}Tl	^{214}Bi	^{212}Bi	^{208}Tl	^{228}Ac	^{40}K	^{214}Bi	Total
E_γ [keV]	239	295	338	352	583	609	727	861	911	1461	1765	
G10 [cps]	0.048	0.0272	0.0424	0.0257	0.0135	0.0201	0.0480	0.0142	0.0412	0.022	0.0267	0.27

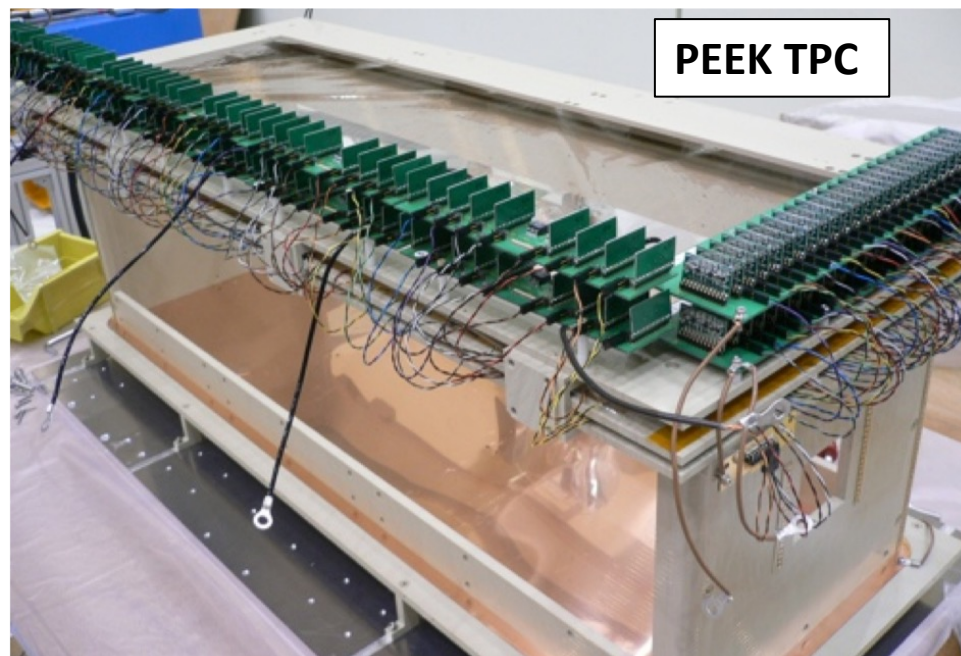
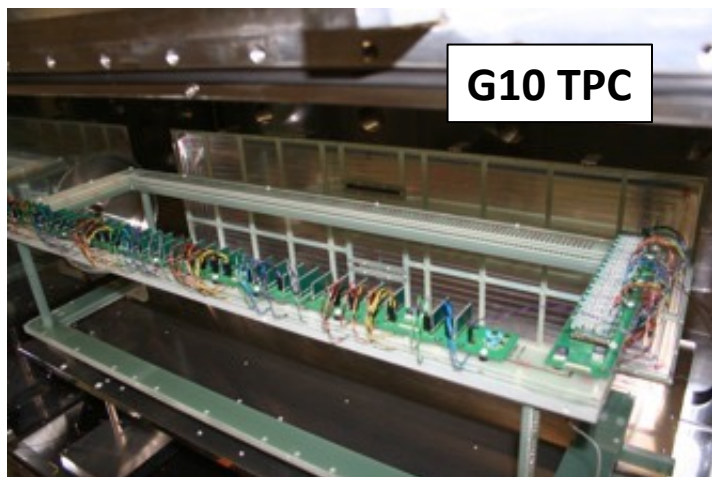
PEEKフレーム製TPC 低放射性物質TPCの作成

➤ フレームの材質として **PEEK (Poly Ether Ether Ketone)** を用いた

- C、H、Oから合成 → 放射性物質含有量が一般的なGe検出器の感度以下

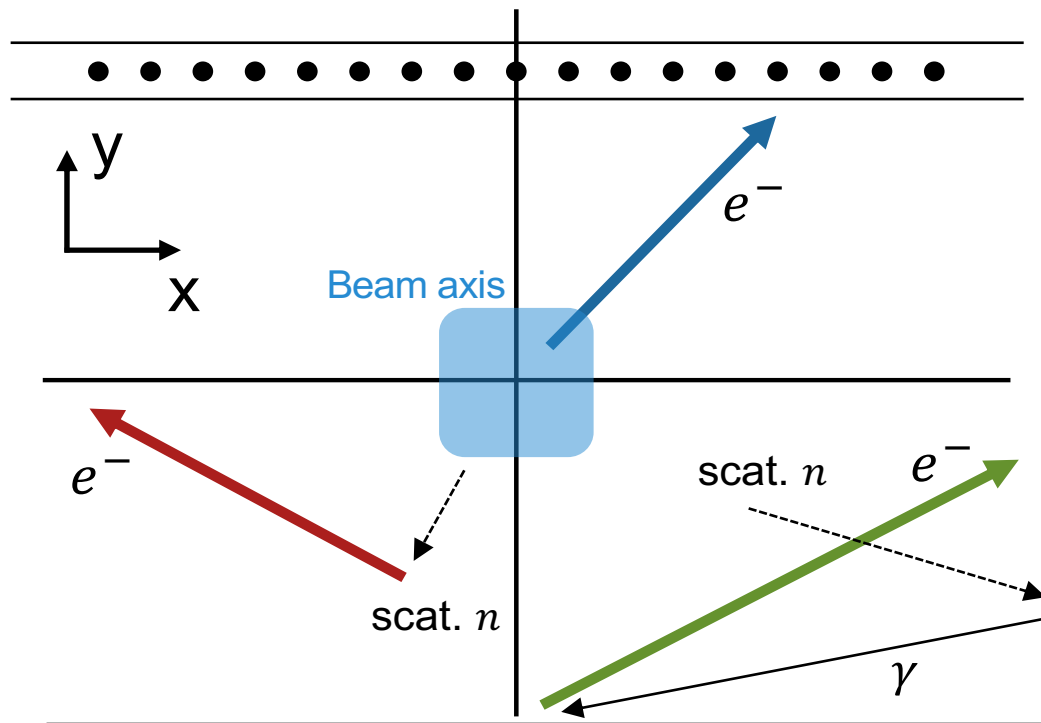


- 溶接が可能 → 1 m程度の構造物を100 μm 以下の精度で工作可能
- バックグラウンドレート : 30 cps → 0.1 cps



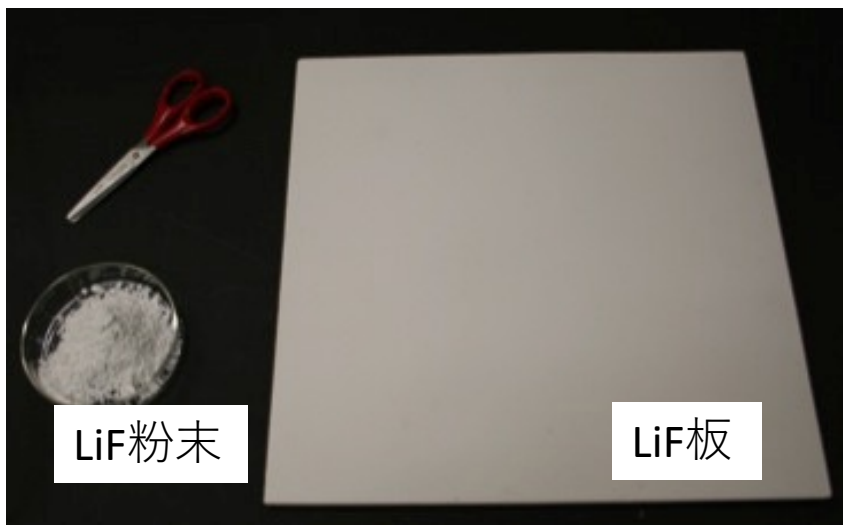
ガス散乱中性子起因バックグラウンド

- 中性子ビームの一部が動作ガスとの相互作用により散乱され、バックグラウンドを生成する
 - 散乱中性子の β 崩壊事象
 - 散乱中性子による (n, γ) 反応からのガンマ線生成
- 本実験における主要な系統誤差要因



散乱中性子起因バックグラウンドの抑制

- 散乱中性子の吸収と**即発γ線**が主なバックグラウンド生成要因
 - ほとんどの核種では即発γ線を伴う吸収反応が多い
 - $n + Z \rightarrow Z' + \gamma + \dots$
 - ^3He 、 ^6Li は即発γ線を伴わない吸収反応が主
 - $n + Z \rightarrow Z' + Z''$
- ^6Li は優れた中性子吸収材
 - 吸収長 $500\mu\text{m}$ ($^6\text{Li} + n \rightarrow \alpha + ^3\text{H}$)
- ^6Li を95%まで濃縮した粉末LiFをテフロンと混ぜて焼結し、TPC内壁に取り付け
 - LiF : テフロン = 30wt% : 70wt%



TPC内壁へ
取り付け



➡ 散乱中性子起因のバックグラウンドを取り付け前の0.2%程度にまで抑制

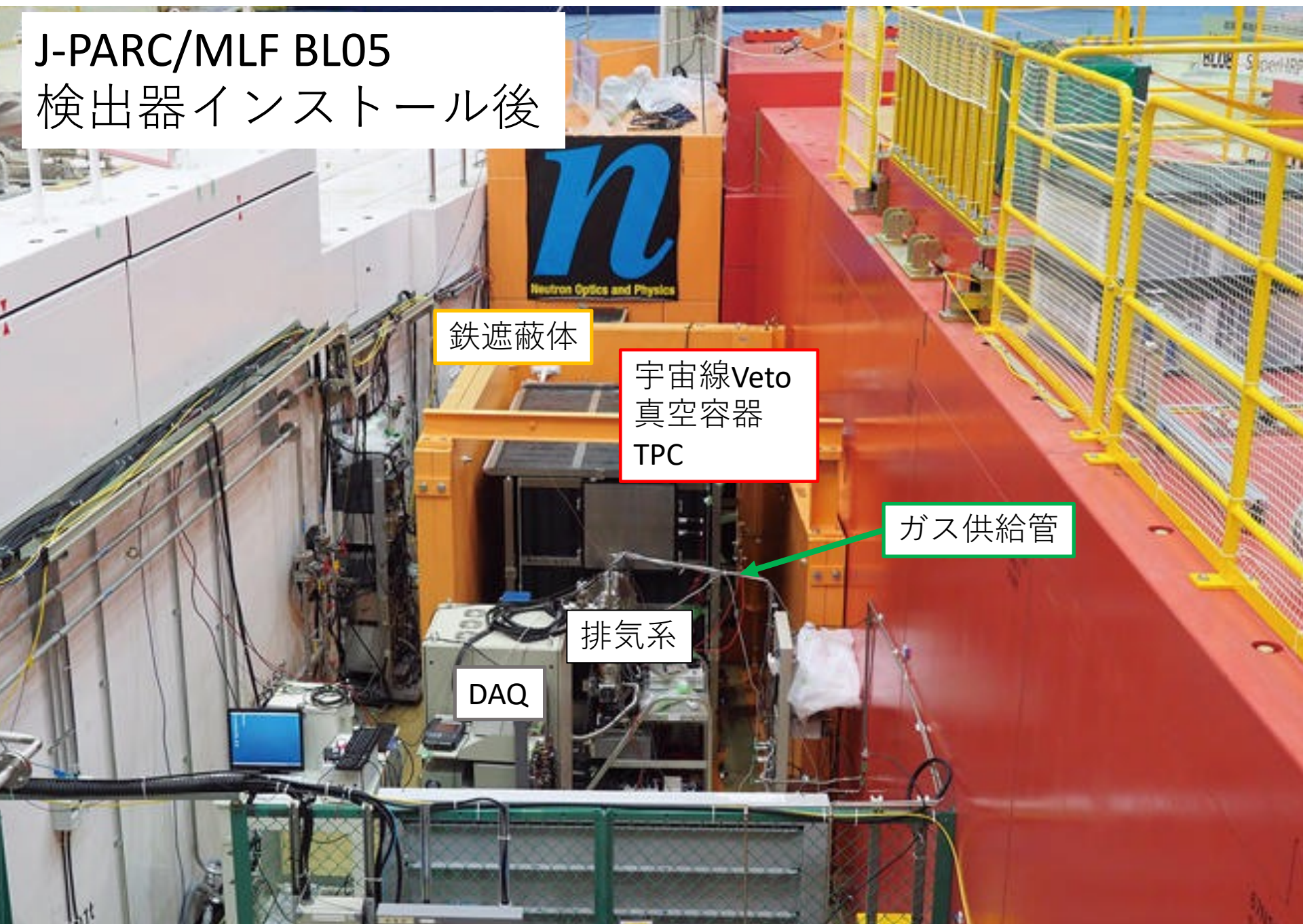
J-PARC/MLF BL05 検出器インストール前

非偏極ビームブランチ

偏極ビームブランチ

低発散ビームブランチ

J-PARC/MLF BL05 検出器インストール後



鉄遮蔽体

宇宙線Veto
真空容器
TPC

ガス供給管

排気系

DAQ

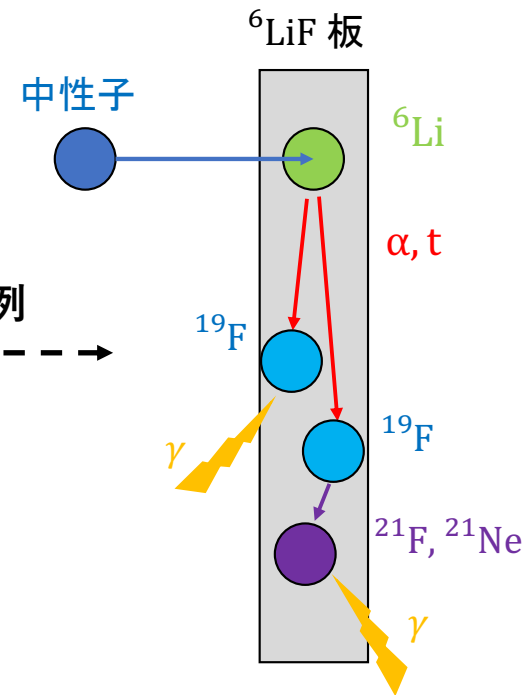
PEEKフレーム製TPC 実験の現状

➤ PEEK TPCを用いた実験は2014年から物理データ取得を開始。2022年現在もデータ取得中

- 現在までに統計精度 ~ 2.0 sを達成
- あと100日程度のデータ取得で統計精度 ~ 1 sに到達
- 想定より多くのガス散乱中性子起因バックグラウンドを観測

- 最大の系統誤差要因 (+2/-14 s)
- (n, γ)反応以外の反応の寄与が無視できない? -----> 例
- 想定以上のバックグラウンドを生じる起源を調査中

(日本物理学会 2022年秋季大会 7pA442-6、「J-PARC/BL05における中性子寿命測定実験: TPCを用いた中性子寿命測定における背景事象の調査」)



➤中性子寿命測定のための低バックグラウンドTPC

PEEKフレーム製TPC

磁場印加中で動作する多層型TPC

磁場印加中で動作する多層型TPC 実験コンセプト

➤ TPC内壁にLiF板取り付けの上、ビーム軸方向に磁場を印加

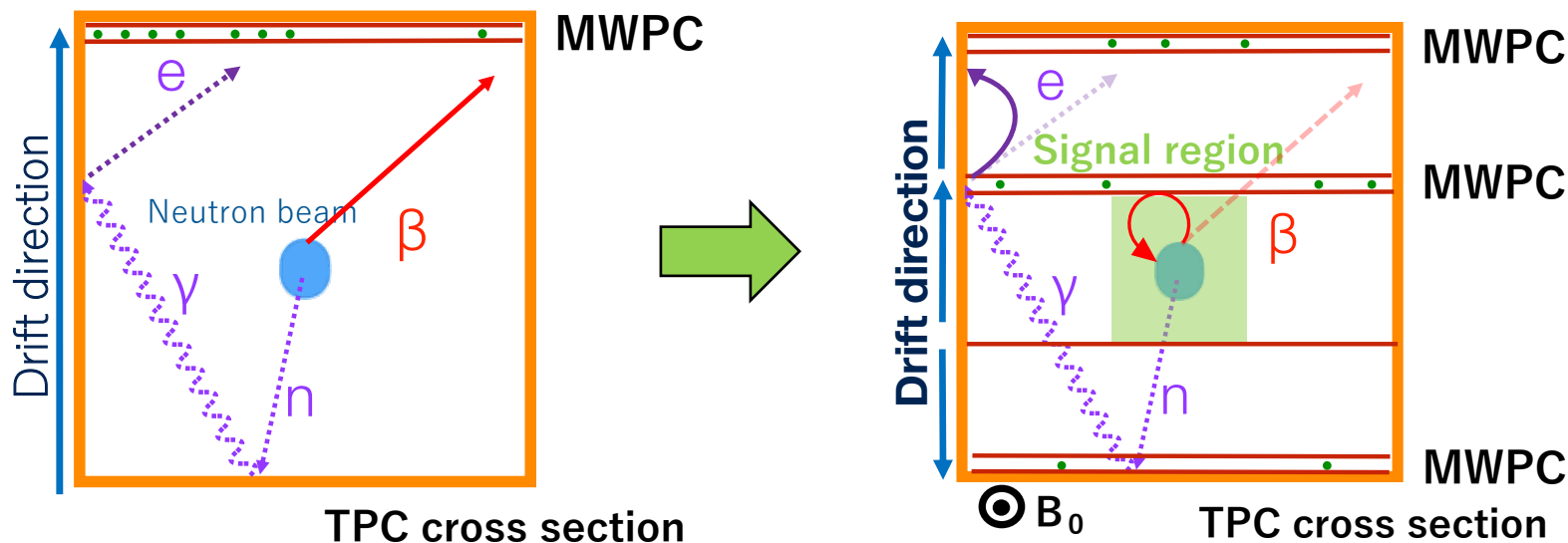
- 信号領域を制限し、信号と散乱中性子起因バックグラウンドの分離を効率化

➤ 読み出し領域を多層化し、バックグラウンドVetoを行う

➤ 無磁場環境と比べて大幅に散乱中性子起因バックグラウンドを抑制

- 600 mT 印加の場合、2%程度まで抑制可能
- バックグラウンド補正量を0.1%程度以下にまで抑制

➡ 散乱中性子起因バックグラウンドによる系統誤差を削減



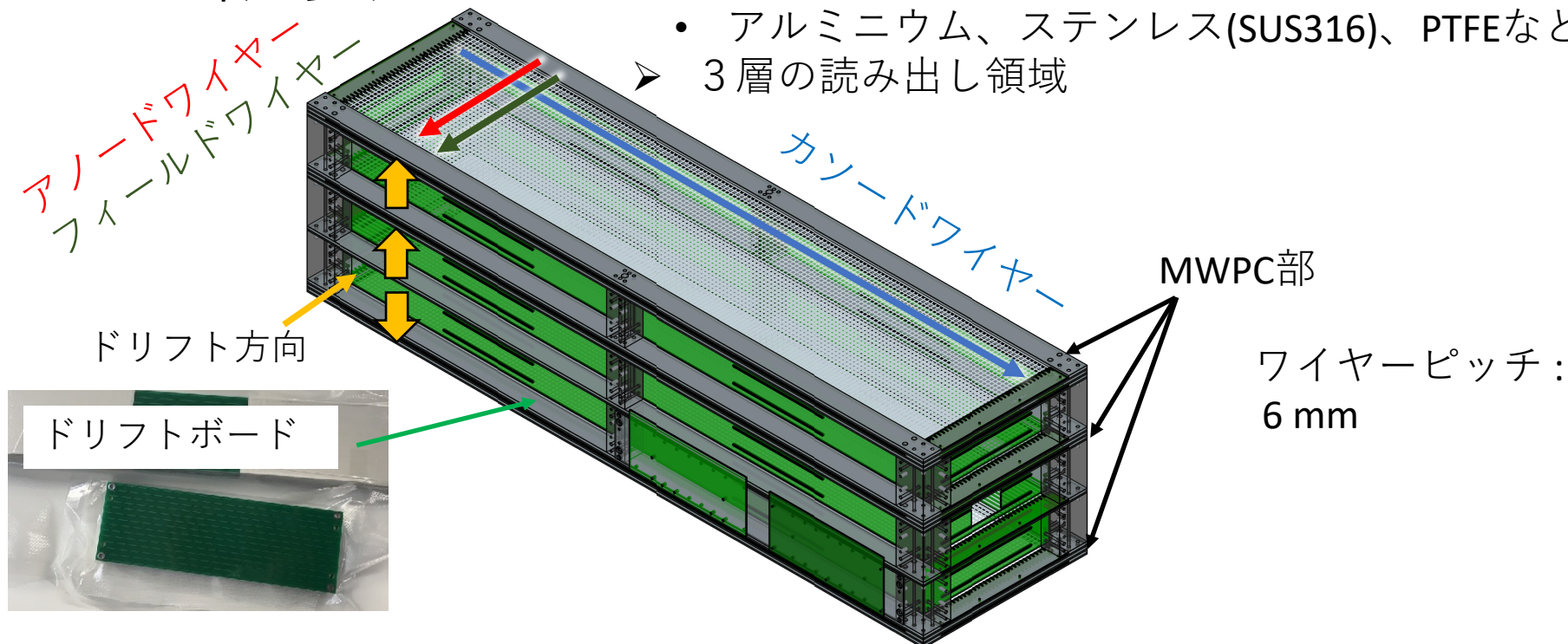
➤ LiNA実験として物理測定に向けて検出器開発中

*LiNA: Lifetime of Neutron Apparatus

磁場印加中で動作する多層型TPC

TPCの概要

- 磁場中で動作させるため、非磁性材料で構築
 - アルミニウム、ステンレス(SUS316)、PTFEなど
- 3層の読み出し領域



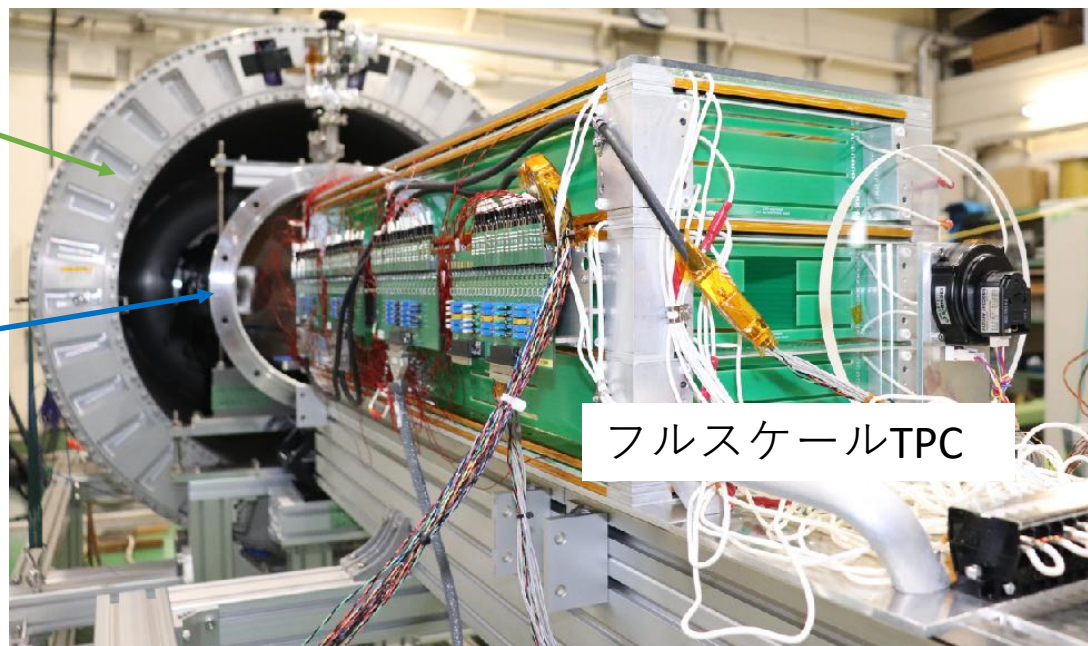
アノードワイヤー	240本 (80x3), Au coated W, 1600–1900 V(下・中層), 2600–3000 V(上層)
フィールドワイヤー	240本 (80x3), BeCu , 0 V(下・中層), 1000–1300 V(上層)
カソードワイヤー	210本 (35x6), BeCu , 0 V(下・中層), 1000–1300 V(上層)
ドリフト長, ドリフト電圧	7.6 cm/層, 1000–1300 V
動作ガス	He:CO ₂ =85kPa:15kPa
寸法(mm)	270 x 270 x 1020

磁場印加中で動作する多層型TPC 物理測定に向けた開発状況

- フルスケールのTPCを作製し、試験済み
 - 磁石との統合試験
 - 磁場中での動作可能性を確認
 - 無磁場環境と比べてパフォーマンスに大きな変化が無い事を確認
 - 線源を用いた擬似信号検出及び擬似バックグラウンド読み出し試験
 - MCによる見積もりと矛盾しない信号分布を検出
 - 期待されるバックグラウンド削減能力を実測
 - 無磁場環境でのバックグラウンド量の2.9% (@600 mT)

超伝導ソレノイド磁石

真空容器



磁場印加中で動作する多層型TPC 物理測定に向けた開発状況

➤ フルスケールのTPCを作製し、試験済み

- 実実験環境での動作試験
 - 下層と中層の読み出し領域を用いて試験
 - $^3\text{He}(n, p) ^3\text{H}$ 反応による信号を実測

➤ 未解決の課題

- 上層MWPCで放電が生じる
 - 下・中層よりも印加電圧が高い
- 放電箇所特定試験を実施(今年11月, KEK)
試験結果に基づき、MWPCを新規作製中
- 検出器校正システムの設置
 - 真空容器の寸法に合わせた設計を検討中

➡ これらの課題を解決し、物理測定可能な状態にまで2023年上半期中に準備を進める



J-PARC/MLF/BL05での
テストセットアップ

まとめ

- 自由中性子寿命測定は、測定手法によって有意に測定値が異なる「中性子寿命問題」を抱えている
- 新たな手法による測定により、中性子寿命問題の解決に迫る
 - 目標精度 : 1 s (0.1%)
- 先行研究で原理検証されたTPCを用いる電子計数法は原理的に計数における系統誤差が小さい
 - バックグラウンドの多さが課題であった
 - 2つのアプローチで低バックグラウンド環境での測定を目指す
 - PEEK フレーム製TPC
 - フレーム素材をPEEKとすることで、含有放射性物質を削減
 - 内壁にLiFを取り付けることで、散乱中性子起因バックグラウンドを削減
 - 現在実験中であり、あと~100日程度のデータ取得で統計精度1 sを達成
 - 磁場印加中で動作する多層型TPC
 - 内壁へのLiF取り付けに加え、磁場を印加することで信号事象とバックグラウンド事象を効率的に分離
 - 非磁性材料でTPCを構築
 - MWPCでの放電対策や検出器校正システムの導入を行い、2023年上半期中に物理測定が可能な状態にまで準備予定

 2種の検出器で独立な測定を行うことで、相補的に結果の確度を高める

バックアップ

自由中性子寿命

➤ SMの検証

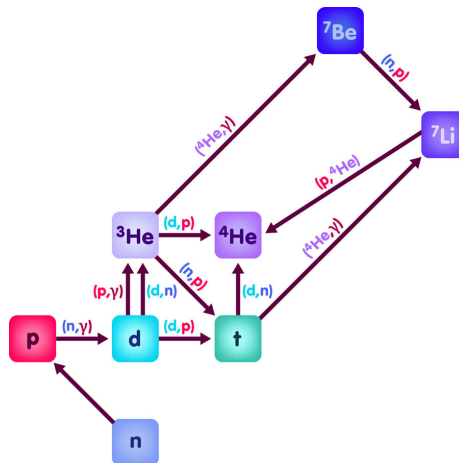
- Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) 行列の V_{ud} 項は以下のように計算される:
 - 中性子寿命 (τ_n)
 - Axis/vector coupling constant
$$\lambda \equiv G_A/G_V$$

$$|V_{ud}|^2 = \frac{(4905.7 \pm 1.7) \text{ sec}}{\tau_n(1 + 3\lambda^2)}$$

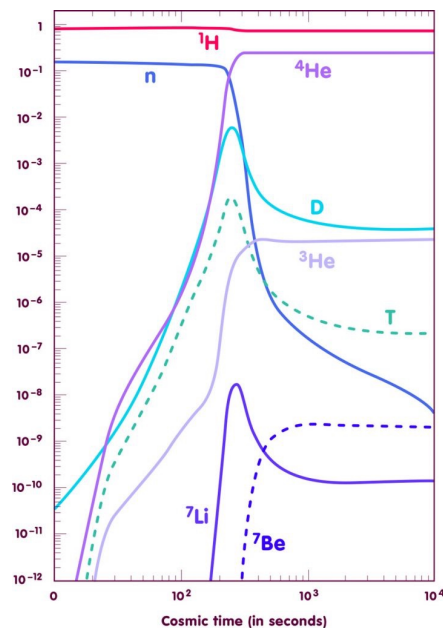
→ CKM行列のユニタリ性を検証

➤ ビッグバン元素合成 (BBN) の インプットパラメータ

- 初期宇宙の軽元素組成は以下のパラメータから見積もることができる:
 - Baryon-to-photon ratio
 - 反応断面積
 - 中性子寿命



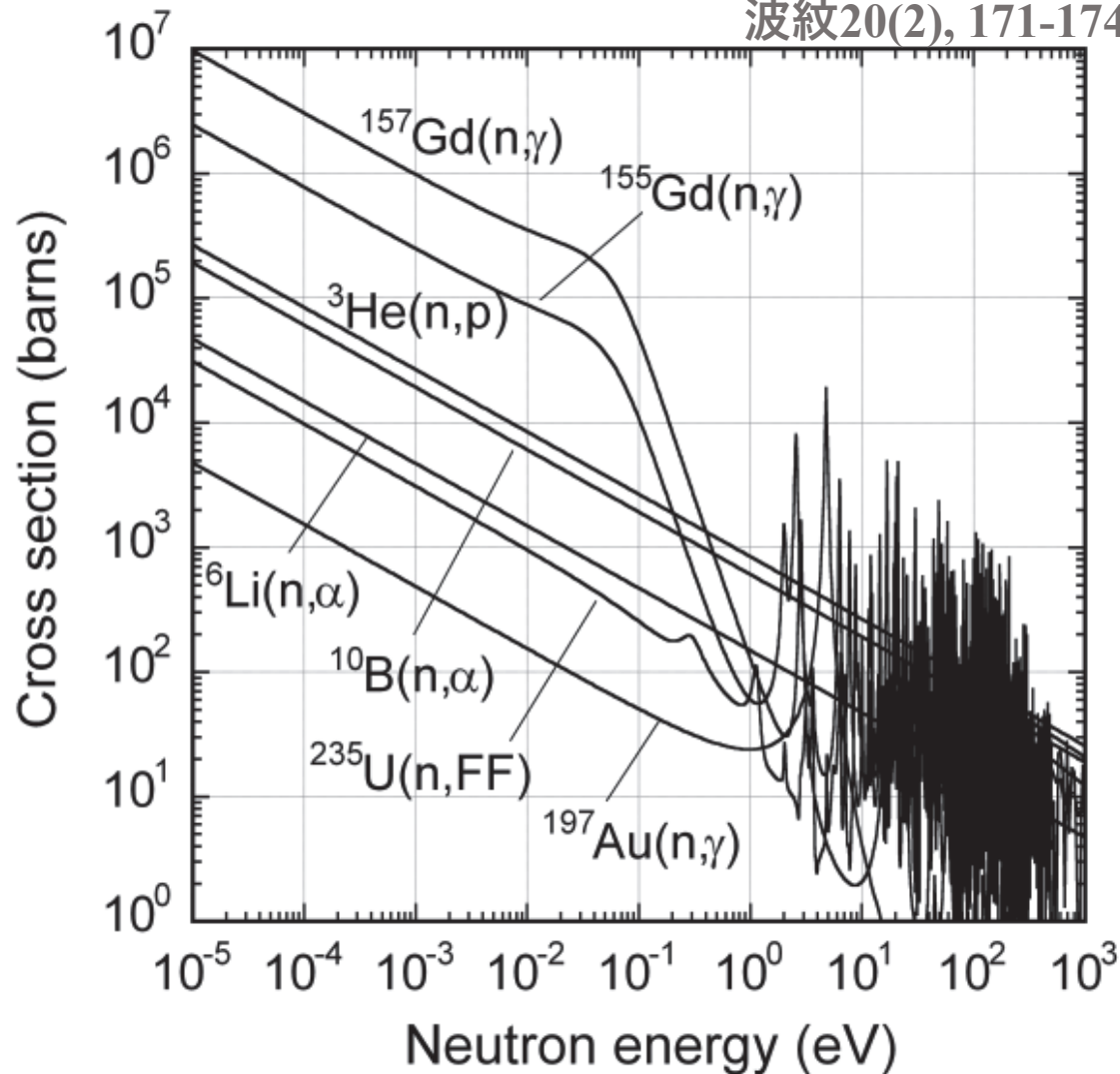
https://www.einstein-online.info/en/spotlight/bbn_phys/



➤ **素粒子物理や宇宙物理における非常に重要なパラメータ**

中性子捕獲断面積

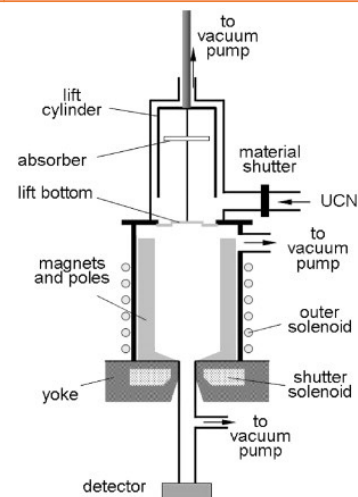
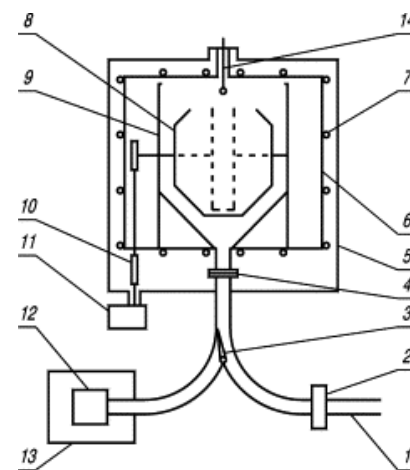
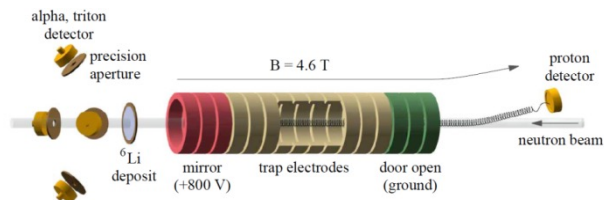
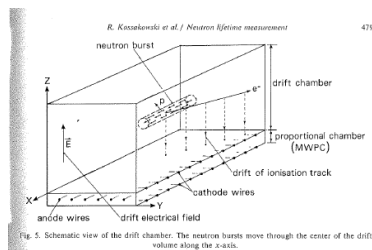
波紋20(2), 171-174, 2010-05



- $^3\text{He}(n,p)$ 反応の断面積は広い範囲で共鳴を持たず、 $1/v$ 則に従う

代表的な中性子寿命測定例

手法	Beam	Penning trap	Gravitational trap	Magnetic trap
中性子源	原子炉	原子炉	原子炉	原子炉
エネルギー	冷中性子	冷中性子	超冷中性子	超冷中性子
測定粒子	電子	陽子	中性子	中性子
メリット	flux monitor	low background	small correction	no wall loss
デメリット	high background	flux monitor	wall effect	depolarization
結果	$878 \pm 27 \pm 14 \text{ s}$ (1989)	$886.6 \pm 1.2 \pm 3.2 \text{ s}$ (2005)	$878.5 \pm 0.7 \pm 0.3 \text{ s}$ (2008)	$878 \pm 1.9 \text{ s}$ (2009)

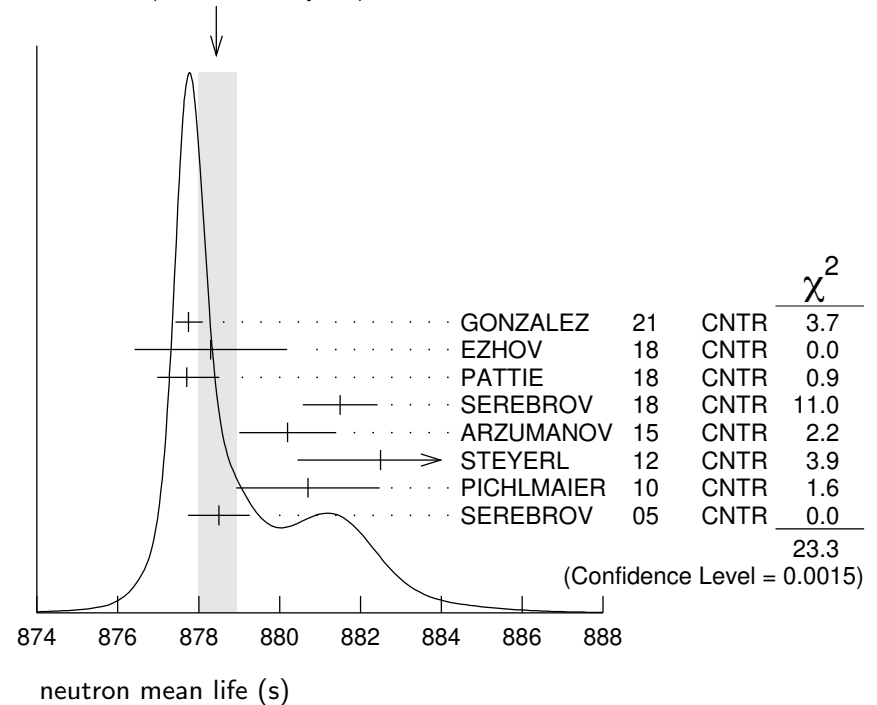


中性子寿命測定値

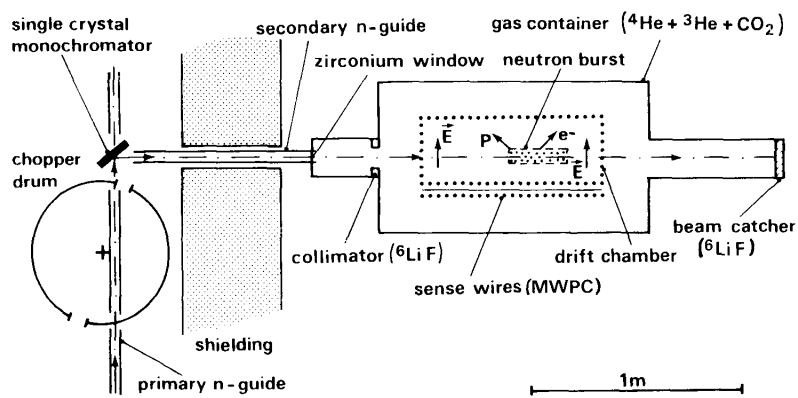
PDG 2022

VALUE (s)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
878.4 ± 0.5 OUR AVERAGE	Error includes scale factor of 1.8. See the ideogram below. [879.4 ± 0.6 s OUR 2021 AVERAGE Scale factor = 1.6]		
877.75 ± 0.28 ^{+0.22} _{-0.16}	GONZALEZ	21	CNTR UCN asym. magnetic trap
878.3 ± 1.6 ± 1.0	EZHOV	18	CNTR UCN magneto-gravit. trap
877.7 ± 0.7 ^{+0.4} _{-0.2}	¹ PATTIE	18	CNTR UCN asym. magnetic trap
881.5 ± 0.7 ± 0.6	SEREBROV	18	CNTR UCN gravitational trap
880.2 ± 1.2	² ARZUMANOV	15	CNTR UCN double bottle
882.5 ± 1.4 ± 1.5	³ STEYERL	12	CNTR UCN material bottle
880.7 ± 1.3 ± 1.2	PICHLMAIER	10	CNTR UCN material bottle
878.5 ± 0.7 ± 0.3	SEREBROV	05	CNTR UCN gravitational trap
887 ± 14 ⁺⁷ ₋₃	⁴ WILSON	21	CNTR space-based <i>n</i> rate
887.7 ± 1.2 ± 1.9	⁵ YUE	13	CNTR In-beam <i>n</i> , trapped <i>p</i>
881.6 ± 0.8 ± 1.9	⁶ ARZUMANOV	12	CNTR See ARZUMANOV 15
886.3 ± 1.2 ± 3.2	NICO	05	CNTR See YUE 13
886.8 ± 1.2 ± 3.2	DEWEY	03	CNTR See NICO 05
885.4 ± 0.9 ± 0.4	ARZUMANOV	00	CNTR See ARZUMANOV 12
889.2 ± 3.0 ± 3.8	BYRNE	96	CNTR Penning trap
882.6 ± 2.7	⁷ MAMPE	93	CNTR UCN material bottle
888.4 ± 3.1 ± 1.1	⁸ NESVIZHEV...	92	CNTR UCN material bottle
888.4 ± 2.9	ALFIMENKOV	90	CNTR See NESVIZHEVSKII 92
893.6 ± 3.8 ± 3.7	BYRNE	90	CNTR See BYRNE 96
878 ± 27 ± 14	KOSSAKOW...	89	TPC Pulsed beam
887.6 ± 3.0	MAMPE	89	CNTR See STEYERL 12
877 ± 10	PAUL	89	CNTR Magnetic storage ring
876 ± 10 ± 19	LAST	88	SPEC Pulsed beam
891 ± 9	SPIVAK	88	CNTR Beam
903 ± 13	KOSVINTSEV	86	CNTR UCN material bottle
937 ± 18	⁹ BYRNE	80	CNTR
875 ± 95	KOSVINTSEV	80	CNTR
881 ± 8	BONDAREN...	78	See SPIVAK 88
918 ± 14	CHRISTENSEN72	CNTR	

WEIGHTED AVERAGE
878.4±0.5 (Error scaled by 1.8)



電子計数法を用いた先行研究における誤差

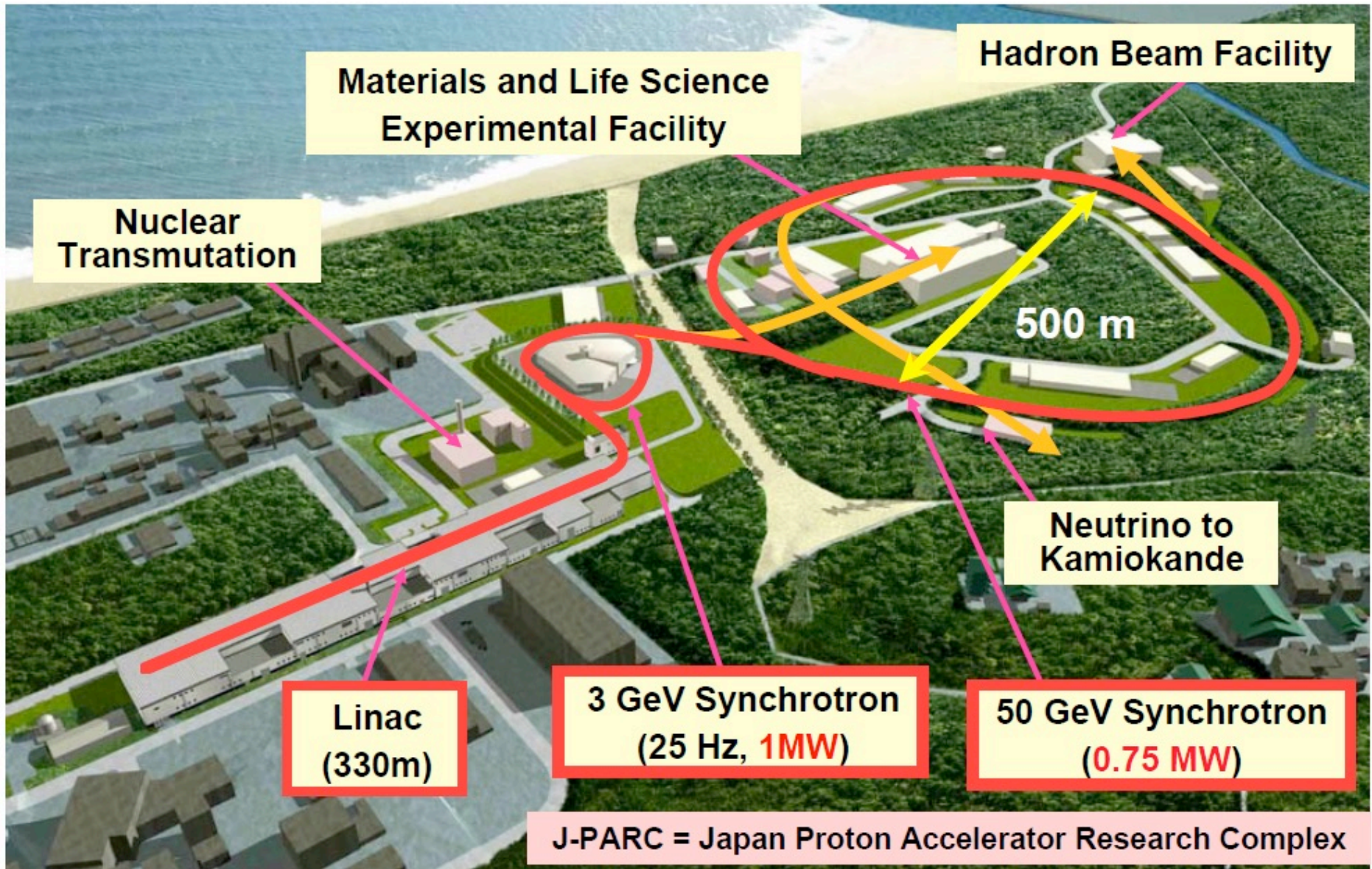


Kossakowski *et. al.*,
Nuclear Instruments and Methods in
Physics Research A 284, 120 (1989)

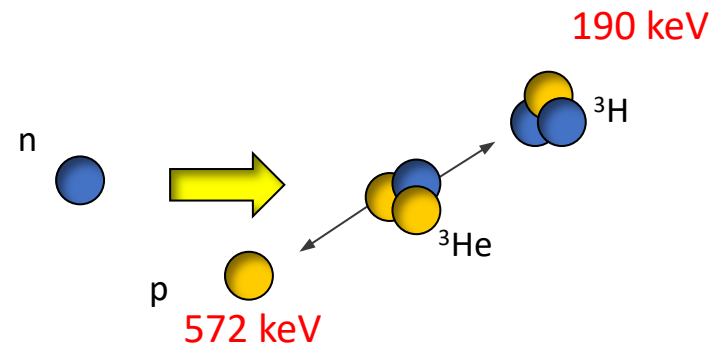
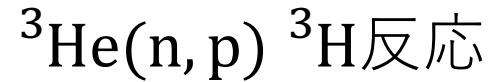
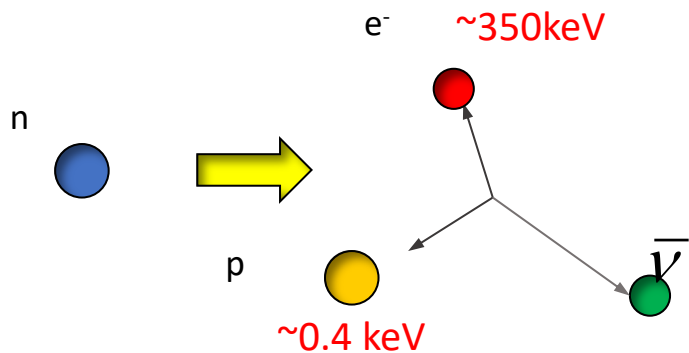
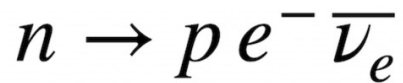
- 中性子ビームバンチの成形
 - 回転ドラムによるバンチ化
 - 単結晶でのBragg反射による単色化

中性子の崩壊頻度 (S_β)	0.1 cps
中性子の ^3He 吸収頻度 (S_n)	1.8 cps
環境バックグラウンド (B_e)	80 cps
ビーム起因バックグラウンド (B_b)	20 cps
中性子崩壊に対する検出効率 (ϵ_β)	87.2%
中性子の ^3He 吸収に対する検出効率 (ϵ_n)	99.4%
統計誤差 (34hours)	3.1%
ϵ_β の補正に伴う誤差	1.1%
ϵ_n の補正に伴う誤差	0.6%
B_b の引き算に伴う誤差	0.9%
Result	$878 \pm 27 \pm 14$ s

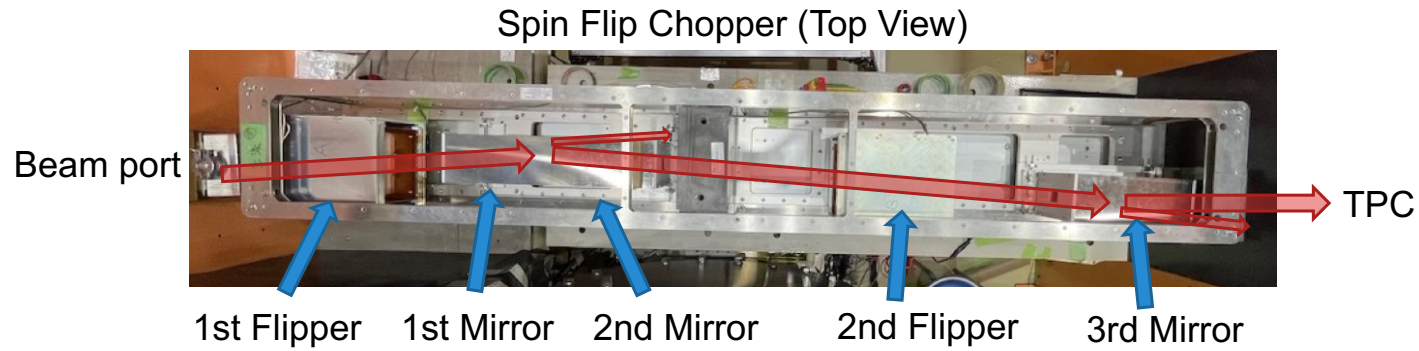
J-PARC



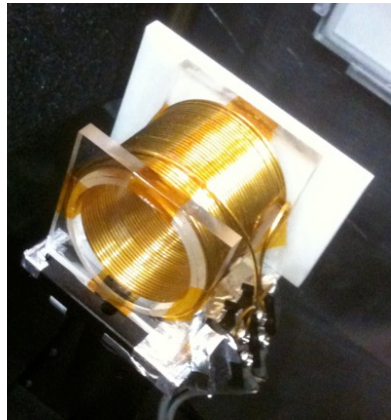
中性子ベータ崩壊と ^3He 中性子吸収反応



スピントリッパーと磁気スーパーミラー



ガイド磁場 B_y と振動磁場 $B_z \sin(\omega t)$



サイズ	70x50 mm ²
RF周波数 ω	29 kHz
ソレノイド 磁場 B_z	0.3 mT
ガイド磁場 B_y	1 mT

磁性体と非磁性体の多層膜構造

磁性体	Fe
非磁性体	SiGe ₃
磁場	35 mT
サイズ	200x100 mm ²
枚数	8+8+10枚
臨界角	5 Qc



$$P = \frac{B_z^2}{B_z^2 + \left(B_y - \frac{\hbar}{2|\mu_n|}\omega\right)^2} \sin^2 \left(\sqrt{B_z^2 + \left(B_y - \frac{\hbar}{2|\mu_n|}\omega\right)^2} t \right)$$

1.5° の角度におくと1300m/s以下の中性子を反射

G10等の含有放射性物質と γ 線スペクトル

[cps/0.5keV]

0.001

0.0005

0

0

1000

2000

Energy [keV]

G10の γ 線スペクトル

0.001
0.0008
0.0006
0.0004
0.0002
0
-0.0002
-0.0004

0

200

400

600

800

1000

1200

1400

1600

1800

2000

Energy (keV)

PEEKの γ 線スペクトル

Isotope	^{212}Pb	^{214}Pb	^{228}Ac	^{214}Pb	^{208}Tl	^{214}Bi	^{212}Bi	^{208}Tl	^{228}Ac	^{40}K	^{214}Bi	Total
E γ [keV]	239	295	338	352	583	609	727	861	911	1461	1765	
PEEK	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	<0.001
PPS	0.0016	---	---	---	---	(0.0028)	0.0080	---	---	0.0068	---	0.016
PS	---	---	---	---	---	---	0.0080	---	---	---	---	0.008
Alumina	---	---	---	---	---	(0.0026)	---	---	0.0020	---	---	0.002
G10	0.0480	0.0272	0.0424	0.0257	0.0135	0.0201	0.0480	0.0142	0.0412	0.022	0.0267	0.27

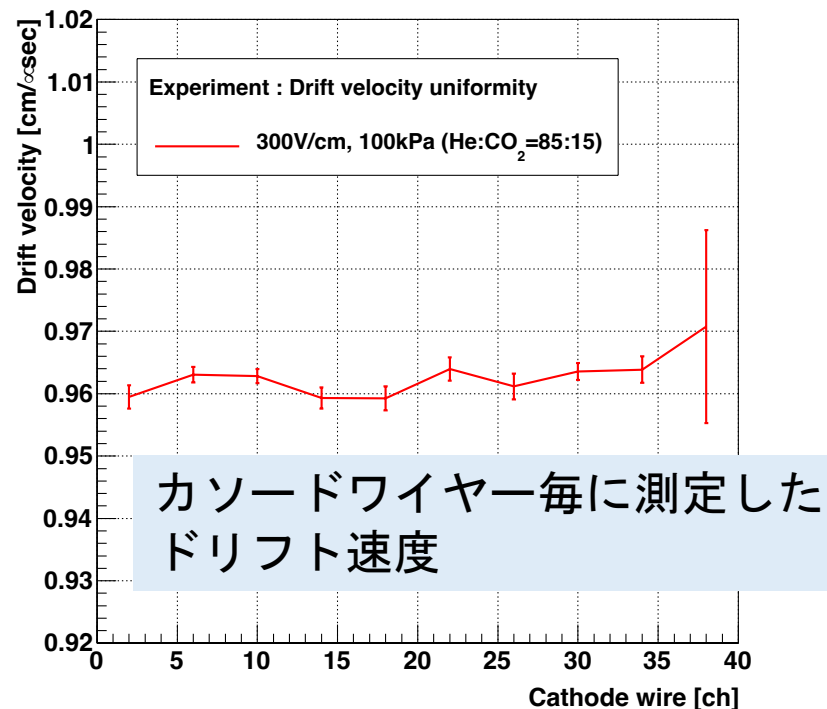
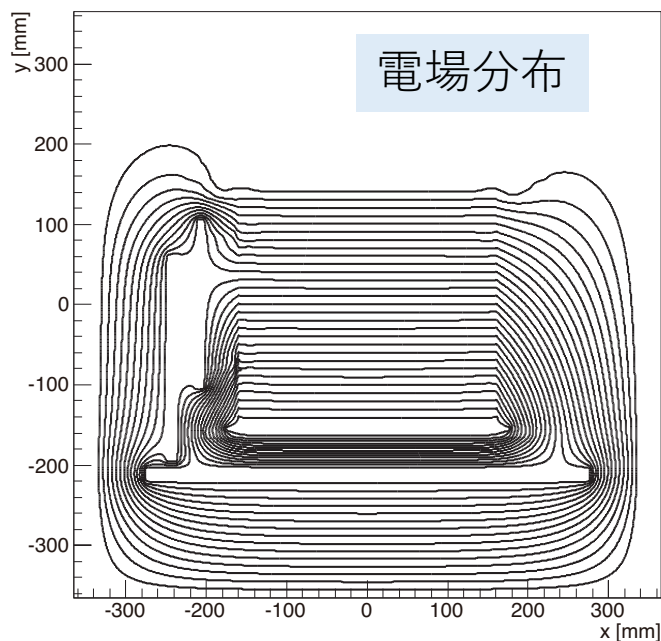
G10及びPEEKの物性と材料費

	密度 [g/cc]	弾性率 [GPa]	融点 [°C]	吸水率 [%]	体積抵抗 [Ω・m]	cost [千円/kg]
PEEK	1.3	3.6	334	0.14	10^{14}	45
G10	1.8	20	250	0.10	10^{11}	3.3

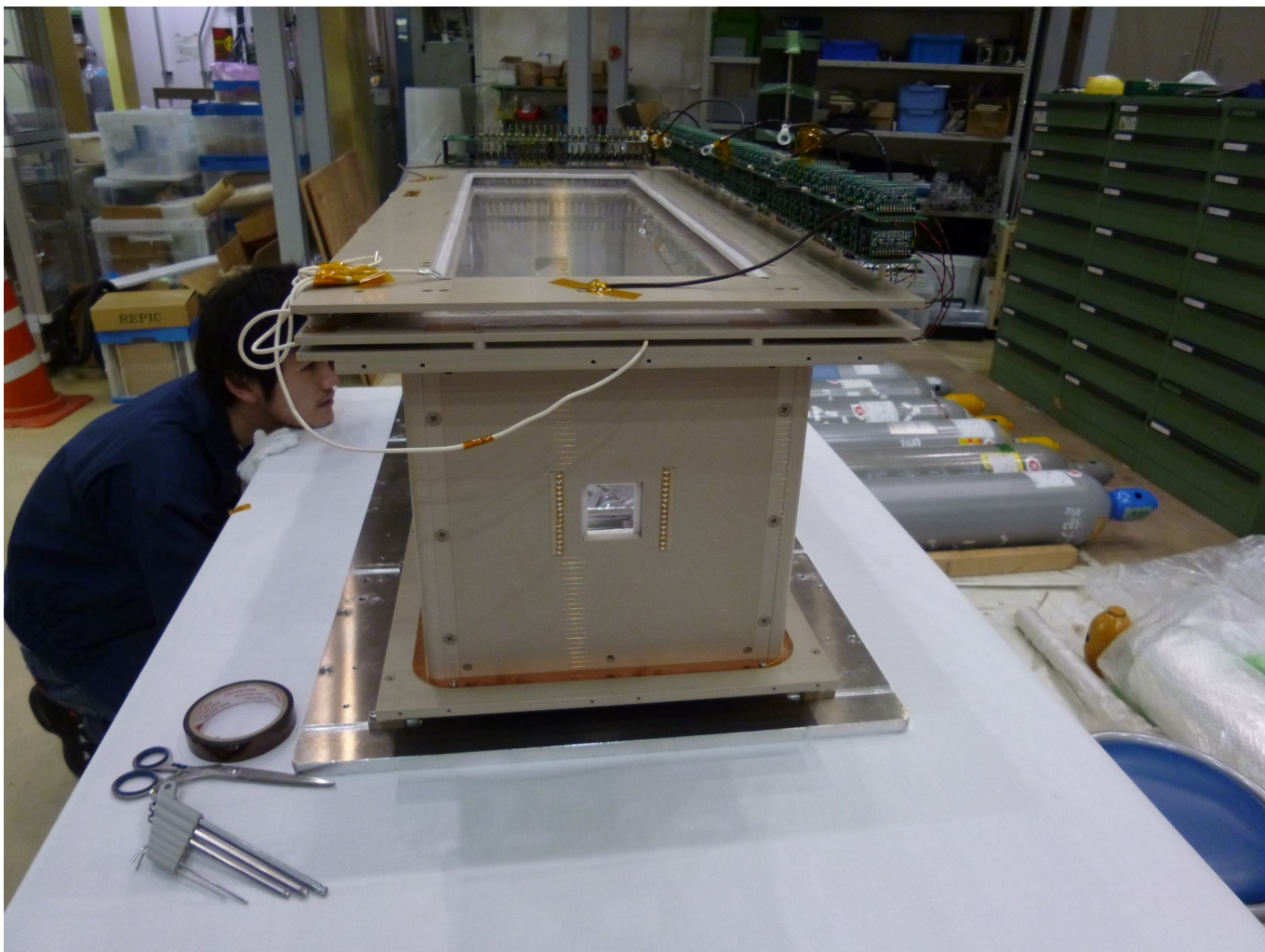
PEEKフレーム製TPC

LiF板インストールによるドリフト電場への影響

- 誘電体（誘電率 $\epsilon=3.0$ ）が電極の内側に
- 電場計算に基づいて電極を配置
- ドリフト速度のばらつきは1%以下



PEEKフレーム製TPC ドリフト配線



- AuメッキBuCu, 5mmピッチ
- 窓部分上流側 15本、下流側 18本抜き

PEEKフレーム製TPC 中性子崩壊電子の検出

➤検出効率

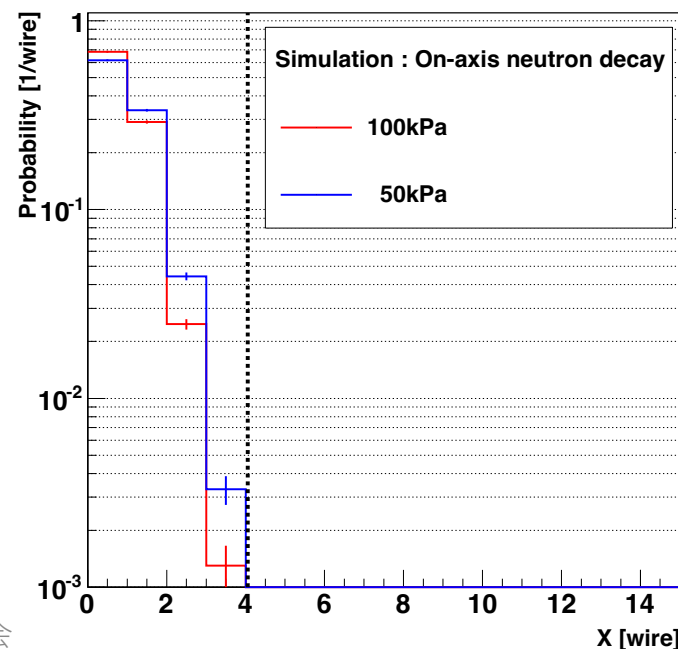
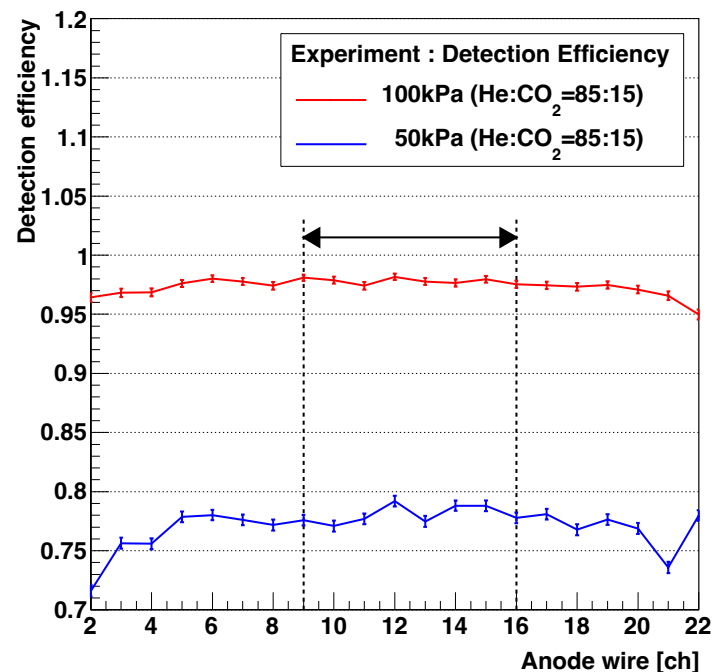
- 宇宙線により評価
- アノードワイヤーに直交する宇宙線に対して
 - 100kPa : 97%
 - 50kPa : 77%
- 閾値: 200 eVに相当



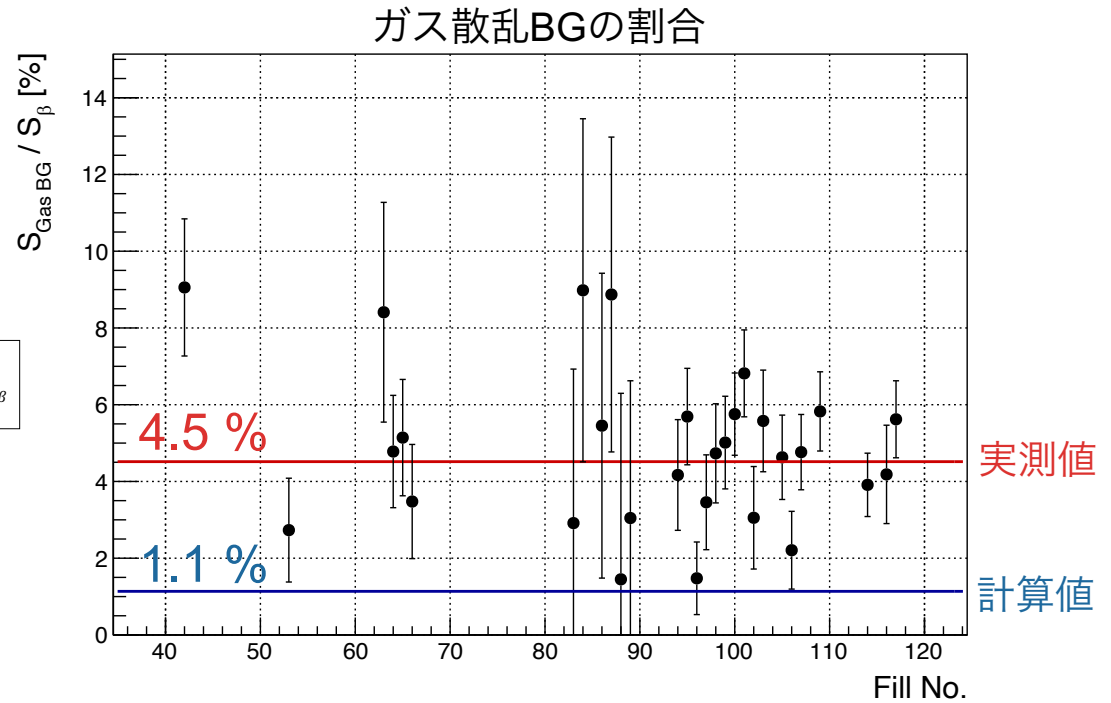
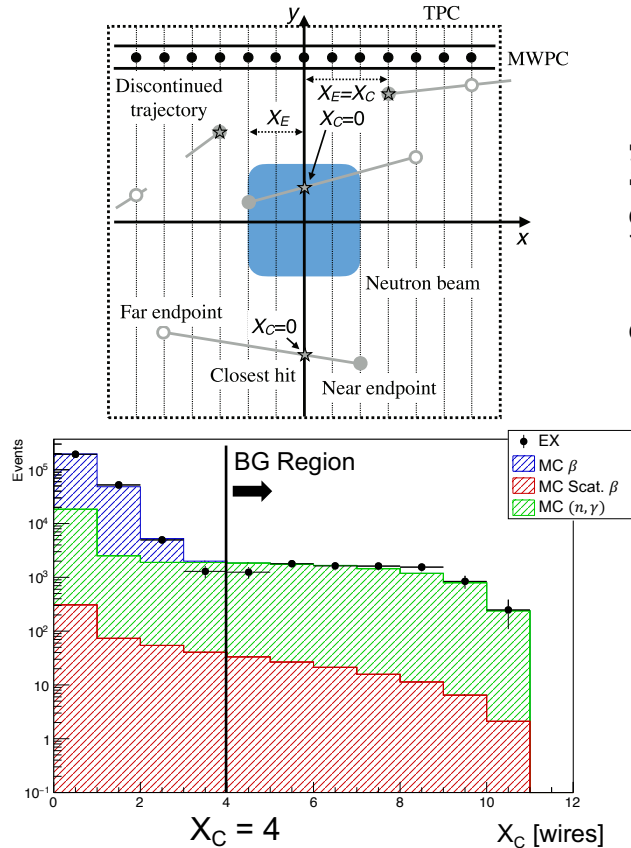
中性子崩壊からの電子
(0~782 keV) に適用

- ## ➤ ヒットしたワイヤーとビーム軸の最近接距離を評価

→ 99.9%以上の電子がビーム軸から4wire以内にヒットを残す



PEEKフレーム製TPC 起源未特定バックグラウンド



$$\langle \text{Signal } \beta \rangle_{\text{signal region}} = \langle \text{EX } \beta \rangle_{\text{signal region}} - \langle \text{Scat. } \beta \rangle - \kappa \cdot \langle \text{EX fake } \beta_{\text{from (n, } \gamma \text{)}} \rangle_{\text{BG region}}$$

➤ $S_{\text{Gas BG}}/S_{\beta}$ には、実験とMCとの間に大きな乖離が存在する

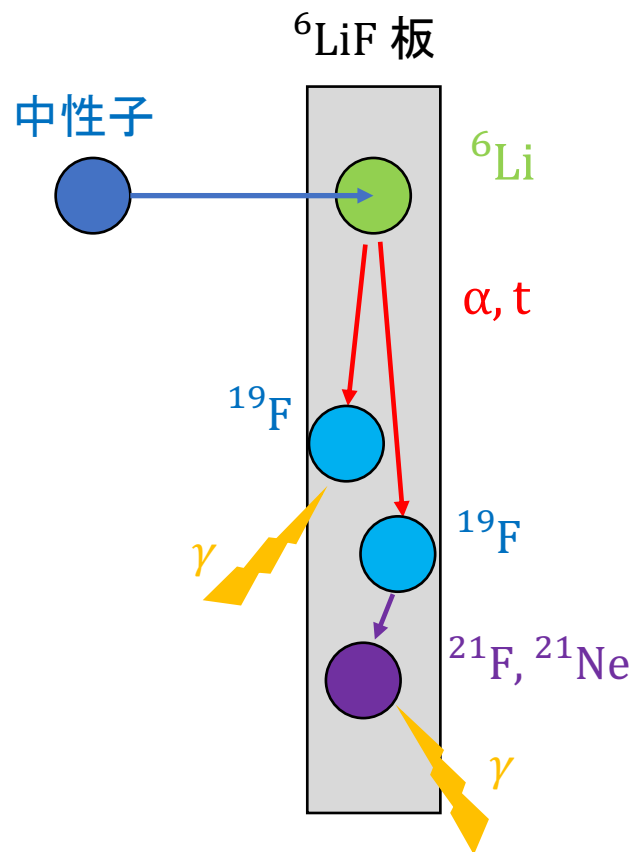
- 実験値はMCの~4倍程度

→ MCにおいて未考慮な背景事象の存在を示唆

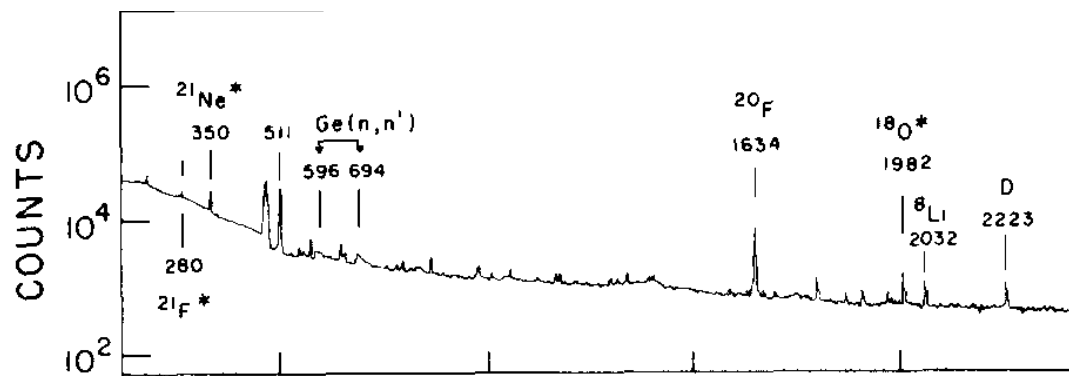
- この乖離のため、 κ の見積もりに大きな系統誤差が計上されてしまっている

→ 最終的な寿命測定値に与える不確かさ: $+2/-14$ s

PEEKフレーム製TPC 起源未特定背景事象の調査



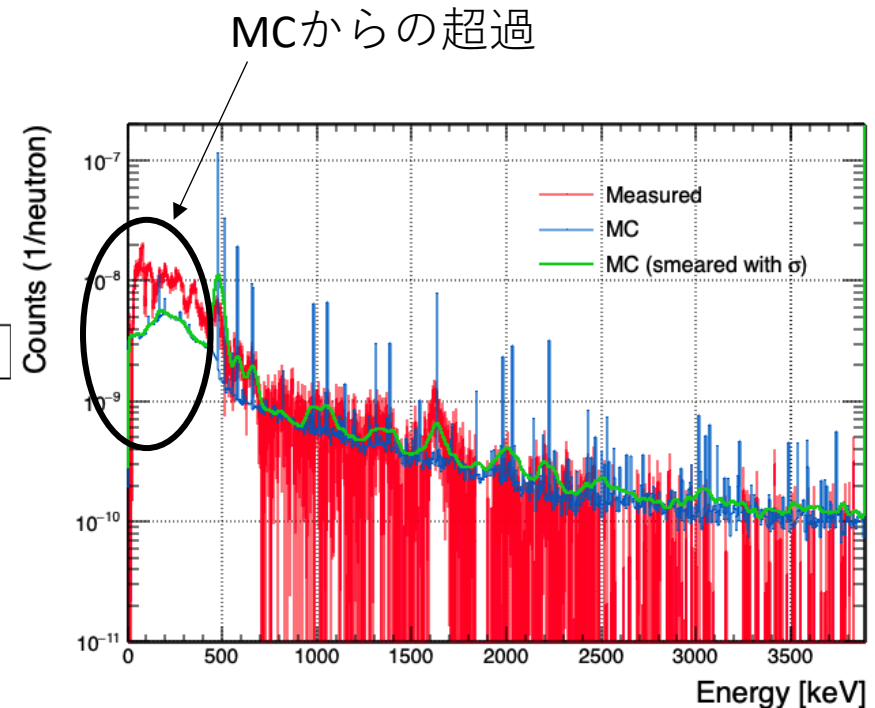
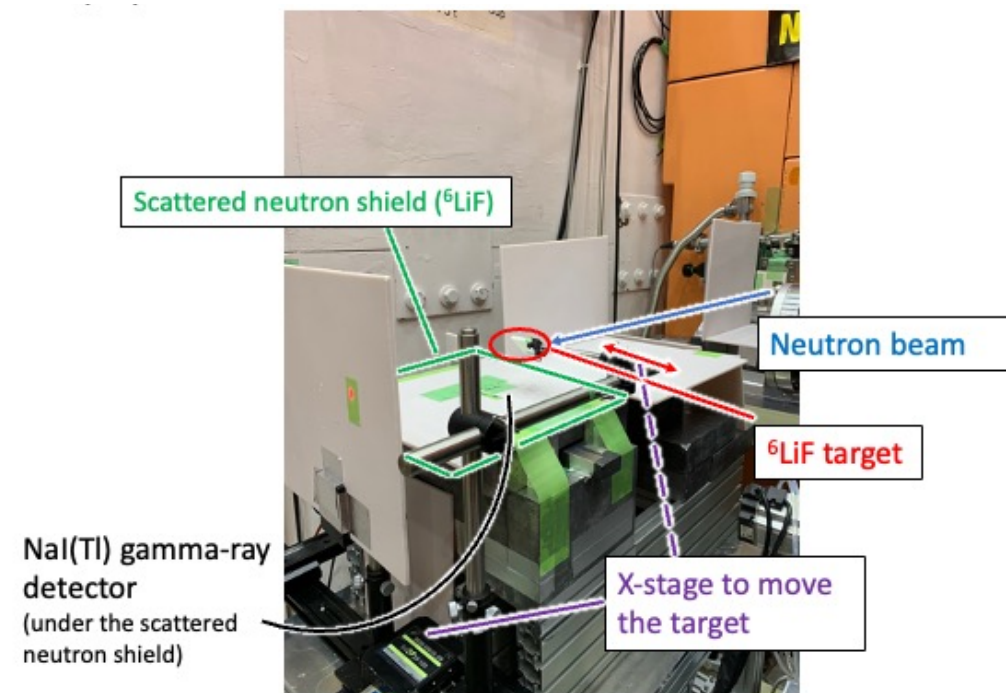
M.A. Lone et al., Nuclear Instruments and Methods **174** (1980) 521-529



反応	ガンマ線エネルギー [keV]
$^{19}\text{F}(t, t)^{19}\text{F}^*$	110
$^{19}\text{F}(\alpha, \alpha)^{19}\text{F}^*$	197
$^{19}\text{F}(t, p)^{21}\text{F}^*$	280
$^{19}\text{F}(t, n)^{21}\text{Ne}^*$	350

- 先行研究において実際に、LiFに中性子を照射した場合の(n, γ)反応以外による比較的低エネルギーなガンマ線発生は報告されている
→ 本実験に用いているLiFのサンプルについて同様の結果が得られるか検証

PEEKフレーム製TPC 起源未特定背景事象の調査



- J-PARC/BL05においてLiFへの中性子照射実験を行い、NaI検出器でガンマ線スペクトルを測定した

PEEKフレーム製TPC 現在までの測定

➤ 100 kPラン

JFY	# of gas fill	Beam power [kW]	DAQ time [hours]
2014	1	300	35
2015	1	500	16
2016	4	200	229
2017	14	150, 300, 400	689
2018	6	400, 500	299
2019	3	500	169
2021	1	700	18
2022	2	800	93

初期結果
統計精度
~10 s

(Prog. Theor. Exp. Phys.
2020, 123C02 (2020))

統計精度
~2.7 s

➤ 50 kPaラン

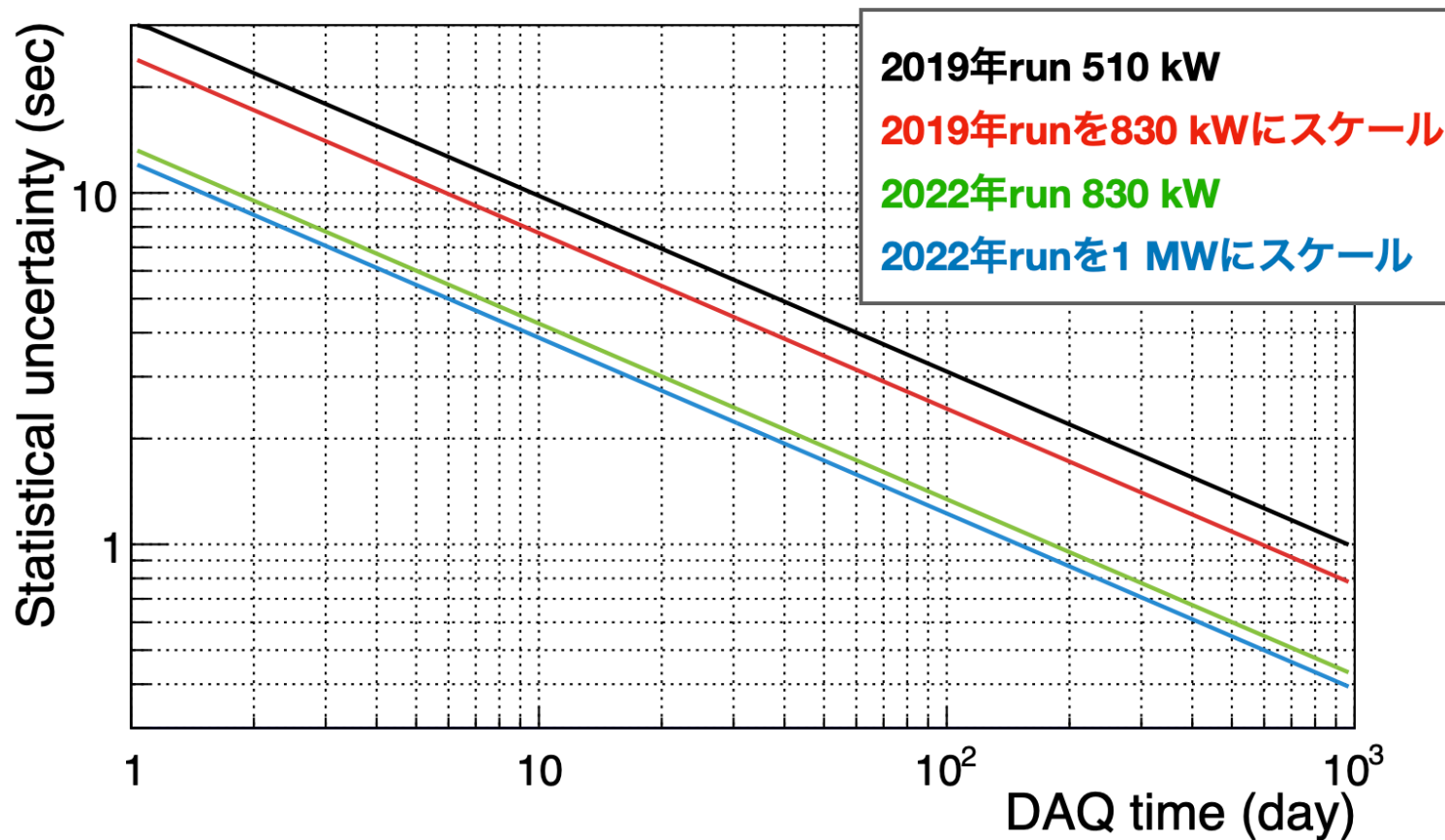
JFY	# of gas fill	Beam power [kW]	DAQ time [hours]
2017	3	150, 300	135
2018	3	400, 500	189
2021	2	600, 700	87
2022	2	800	90

統計精度
~2.0 s

統計精度
~3.0 s

あと~100日程度のデータ取得で、統計精度1秒を達成できると見込んでいる

PEEKフレーム製TPC 統計誤差の見積もり

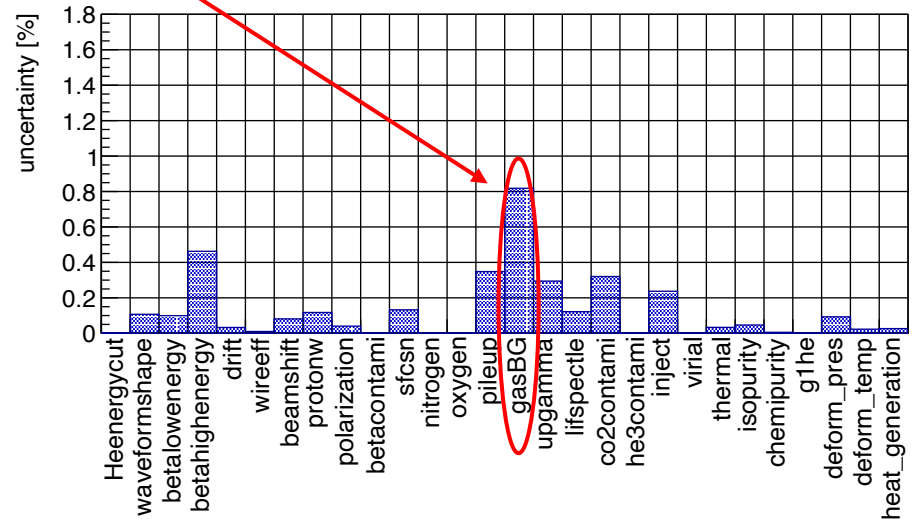
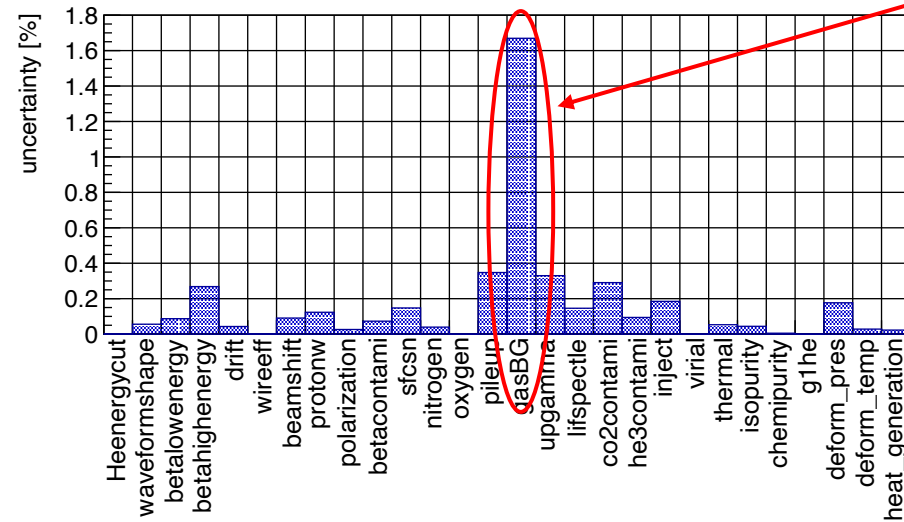


PEEKフレーム製TPC 系統誤差

ガス散乱中性子起因バックグラウンドによる
系統誤差

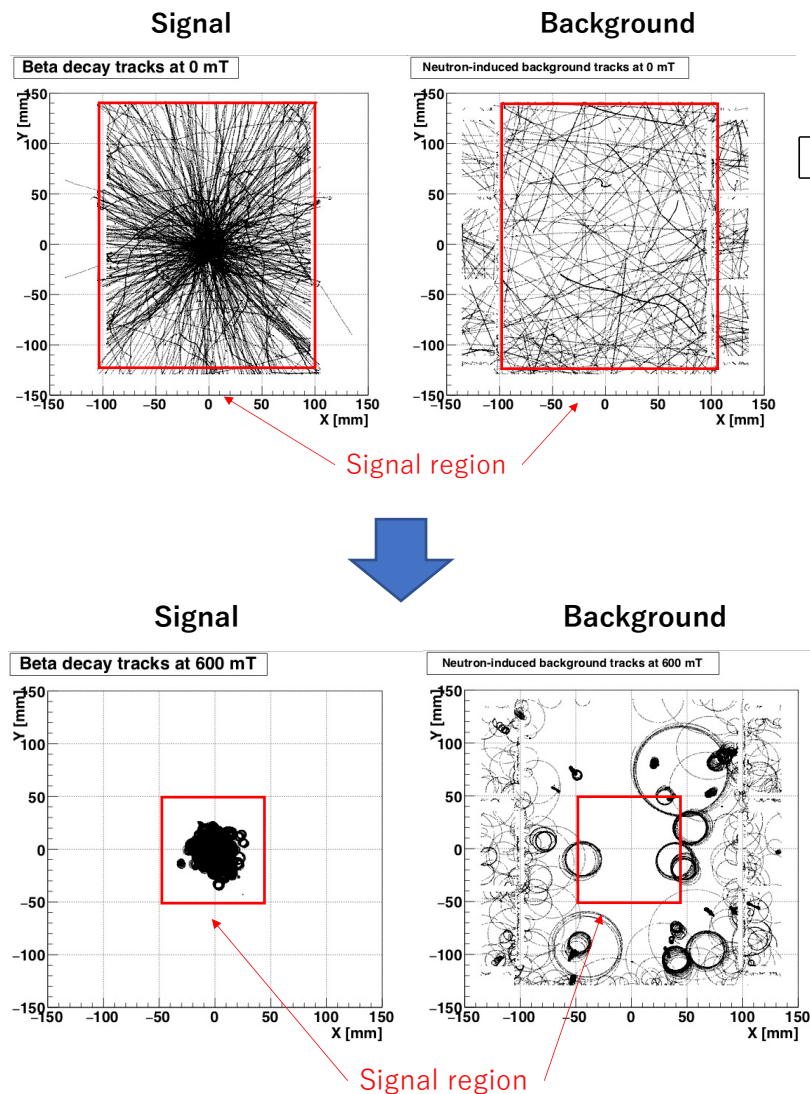
100 kPa

50 kPa

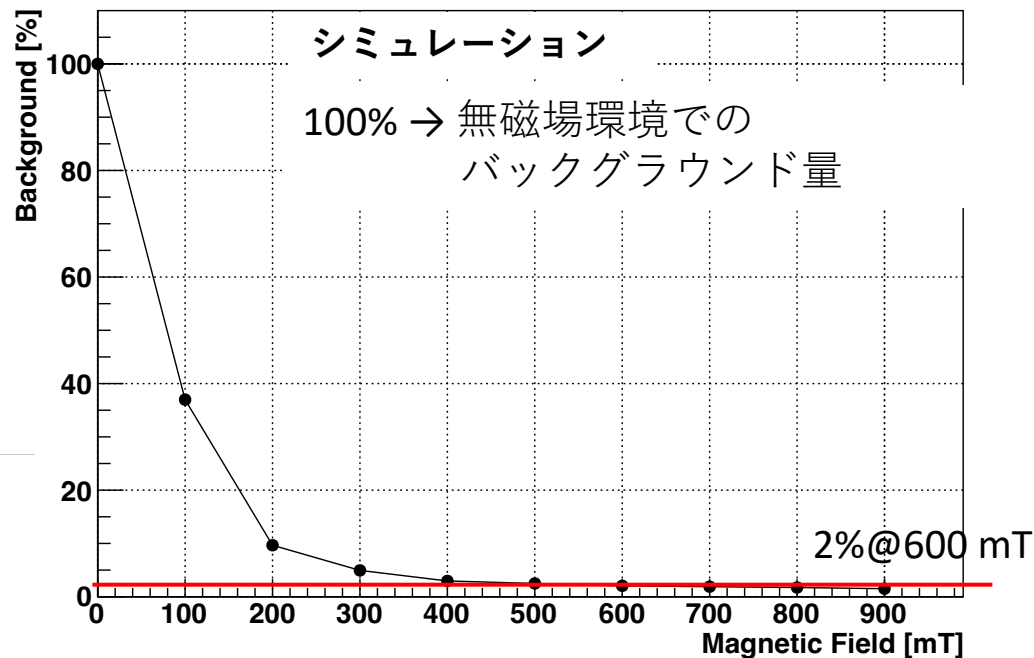


- ガス散乱起因バックグラウンドが主要な系統誤差要因
 - 中性子寿命に与える不定性: $+2/-14$ s
- 1 s (0.1%)以上の不定性を与える他の系統誤差についても、MCシミュレーションや解析方法の再評価などにより改善を試みている
e.g.) パイルアップ、検出効率

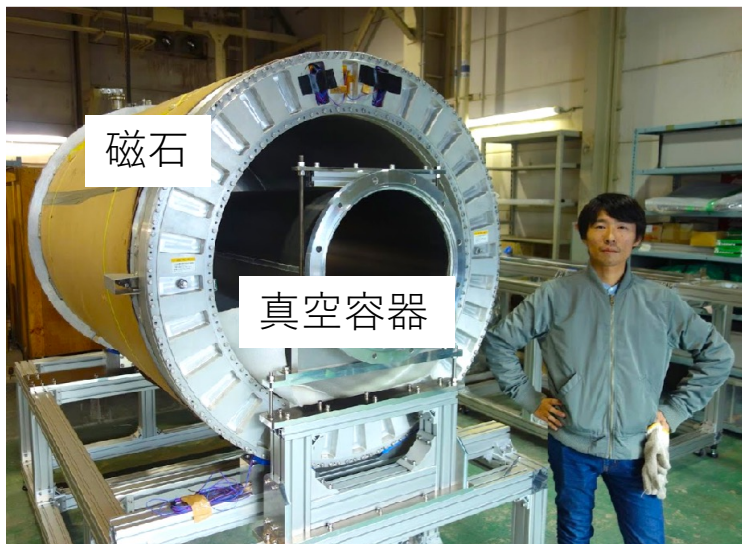
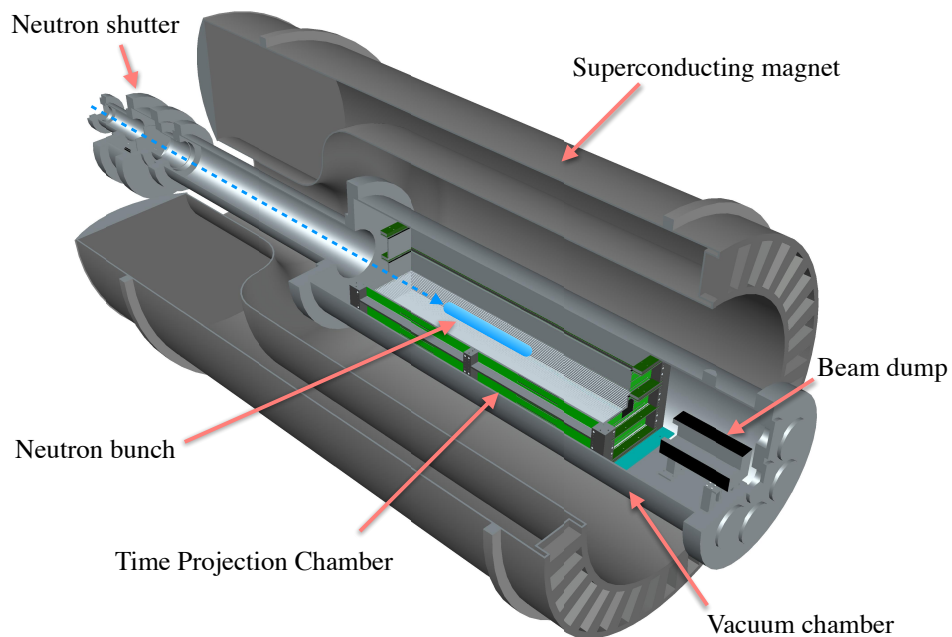
磁場印加中で動作する多層型TPC バックグラウンド削減量の見積もり



Background in signal region

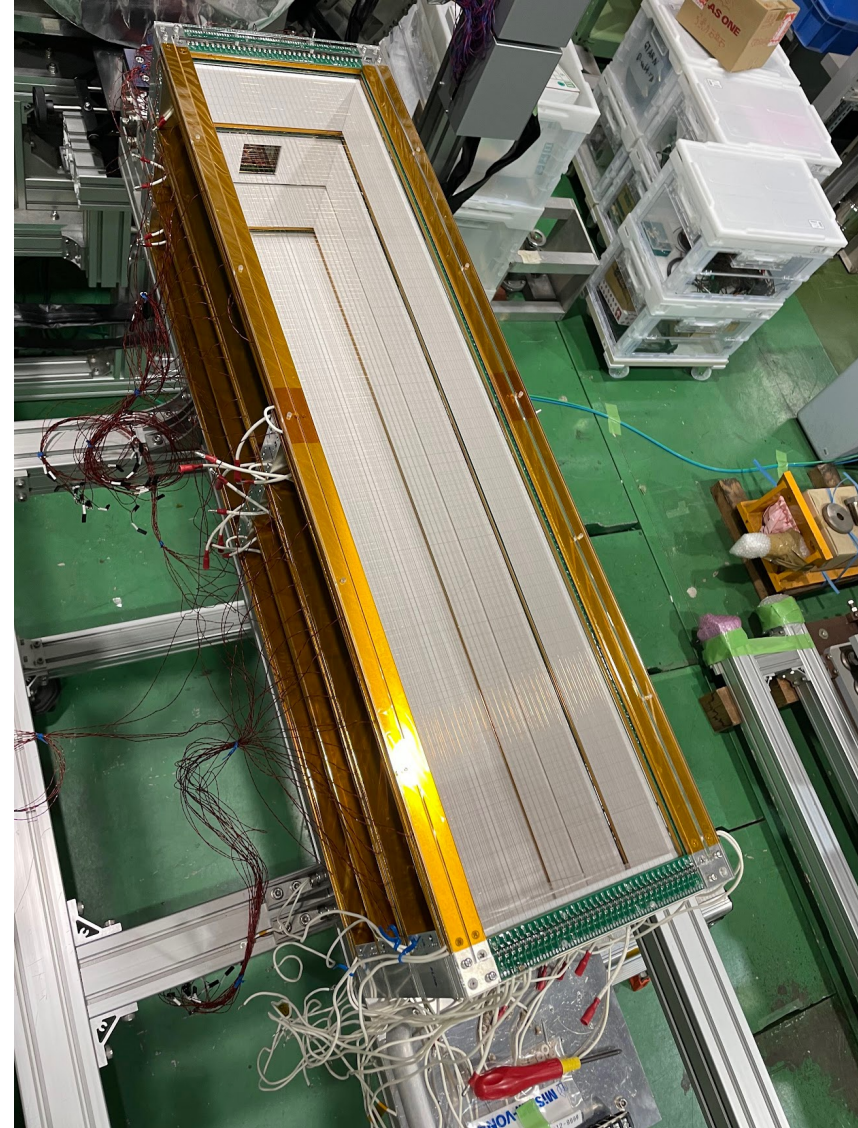
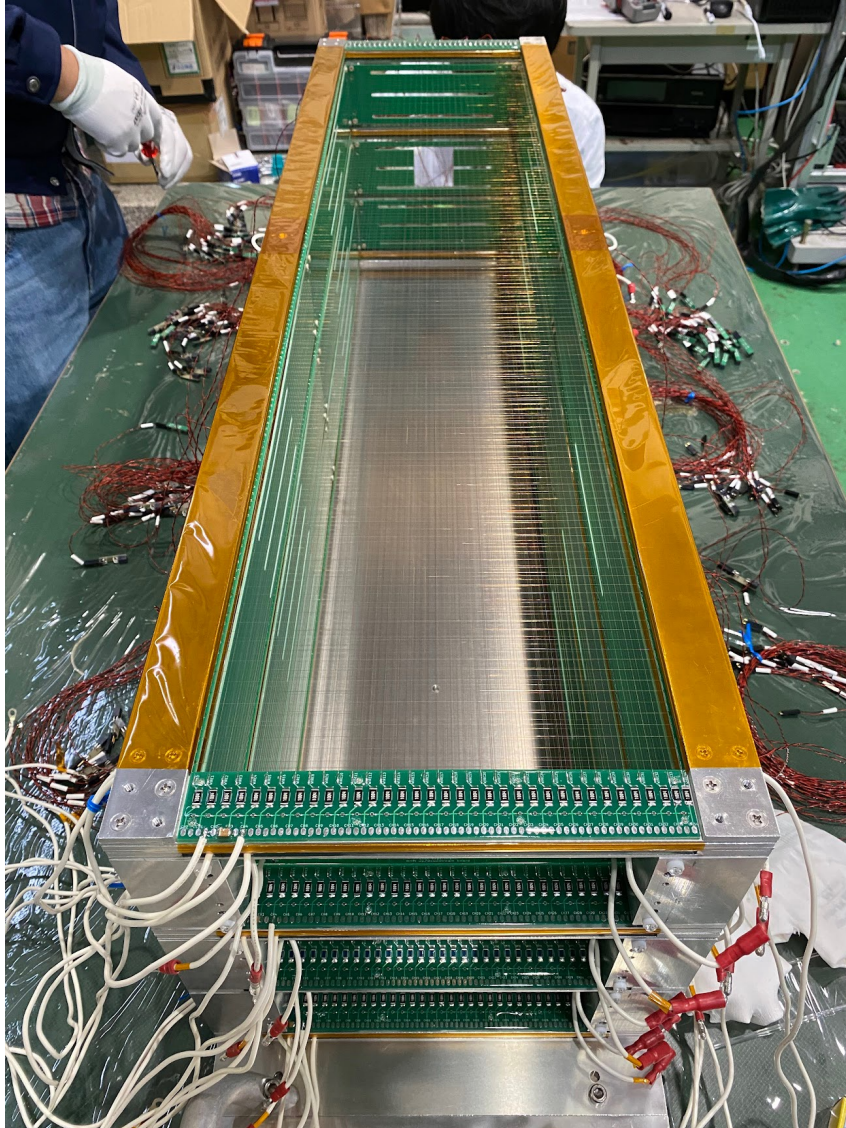


磁場印加中で動作する多層型TPC ソレノイド磁石



- 超伝導ソレノイド磁石
 - BESS実験用のスペアを利用
 - ソレノイドコイル諸元
 - 920 mT @ 580 A
 - $\Phi 1000$ mm x 1300 mm
 - Superconducting wire: NbTi:Cu:Al

磁場印加中で動作する多層型TPC LiFの取り付け

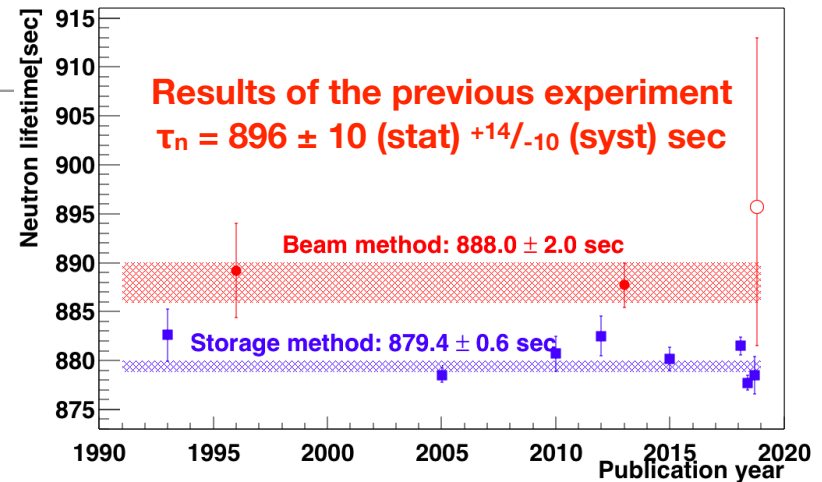


Measurement results

Large uncertainty in correction

$$\tau_n = \frac{1}{\rho \sigma v} \left(\frac{S_{\text{He}}/\epsilon_{\text{He}}}{S_{\beta}/\epsilon_{\beta}} \right)$$

$\downarrow$ Signal number $\downarrow$ Efficiency
 $\uparrow$ ^3He density $\uparrow$ ^3He cross section $\times$ neutron velocity



	Value	Correction	Uncertainty	Note
ρ	$(2.08 \pm 0.01) \times 10^{19} \text{ \#/m}^3$	0	0.5%	Can be improved by the method of introducing ^3He gas
σv	$5333 \pm 7 \text{ barn} \times 2200 \text{ m/s}$	0	0.13%	Alternate measurement required
S_{He}	$202993 \pm 480 \text{ event}$	$2672 \pm 351 \text{ event}$	0.3%	Statistical accuracy dominates
S_{β}	$8868 \pm 151 \text{ event}$	$463 \pm 154 \text{ event}$	2.6%	Background event contamination 5.2%
ϵ_{He}	100 - 0.014%	$0 + 0.014\%$	0.014%	Enough accuracy
ϵ_{β}	$94.5 \pm 1.0\%$	$+5.5 \pm 1.0\%$	1.0%	Efficiency correction 5.5%

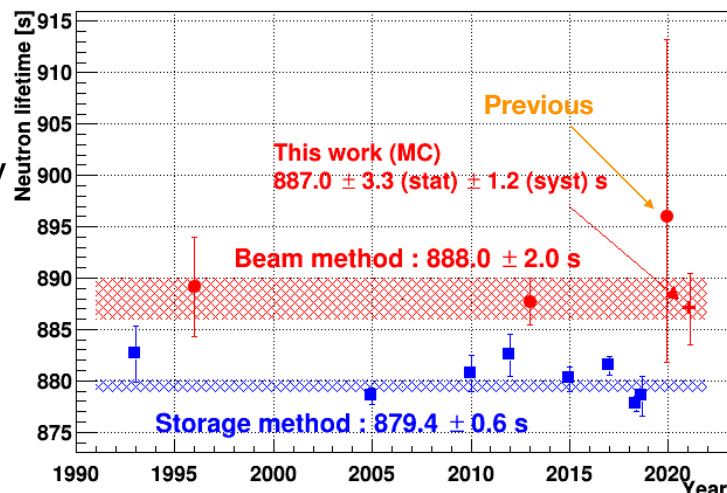
N.Sumii, "The LiNA experiment: Development of multi-layered time projection chamber",
 VCI2022 - The 16th Vienna Conference on Instrumentation, Feb 2022

Estimation of accuracy

Decrease in indeterminacy as correctio

$$\tau_n = \frac{1}{\rho \sigma v} \left(\frac{S_{\text{He}}/\epsilon_{\text{He}}}{S_{\beta}/\epsilon_{\beta}} \right)$$

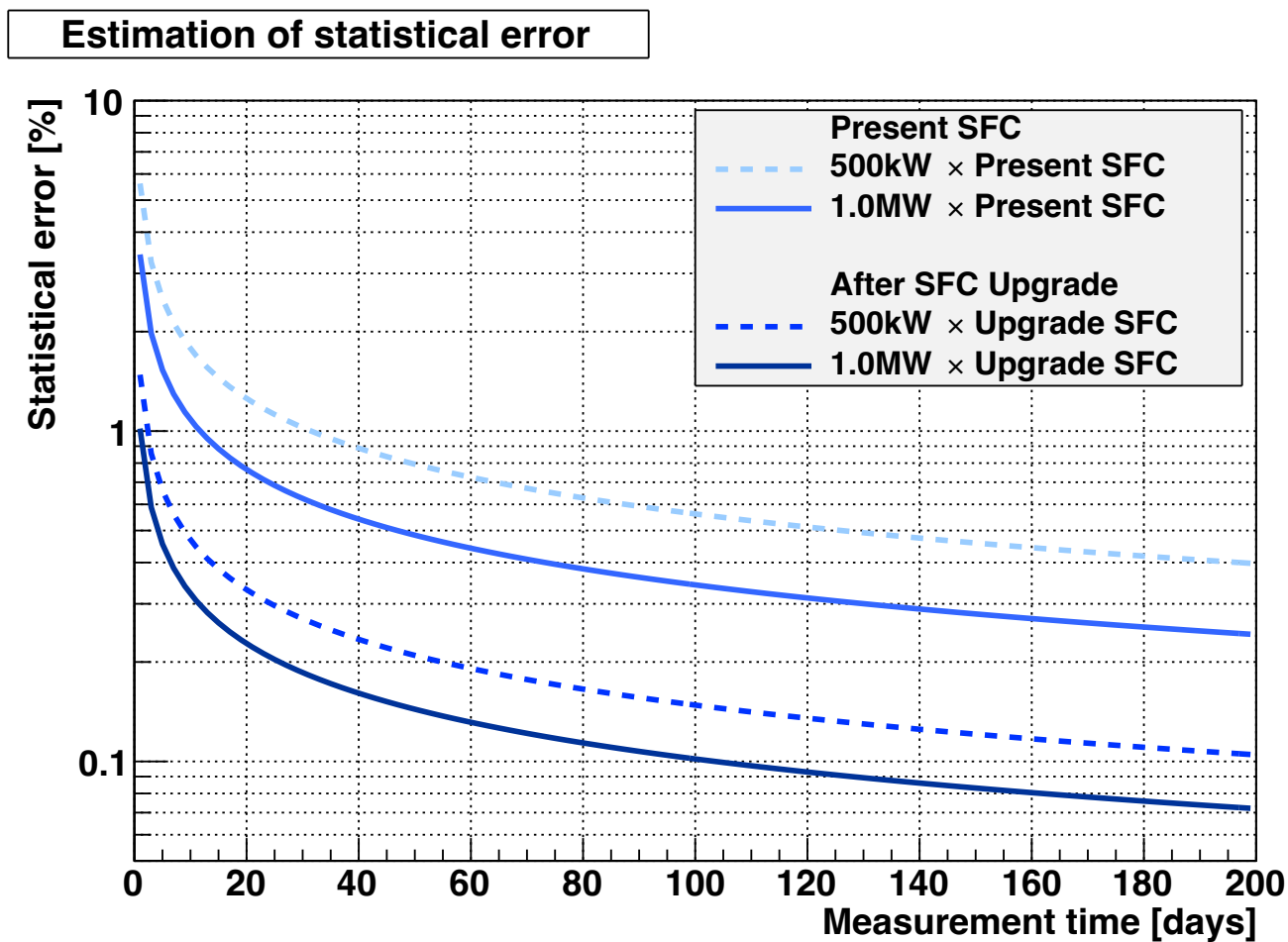
$\downarrow$ Signal number $\downarrow$ Efficiency
 $\uparrow$ ^3He density $\uparrow$ ^3He cross section $\times$ neutron velocity



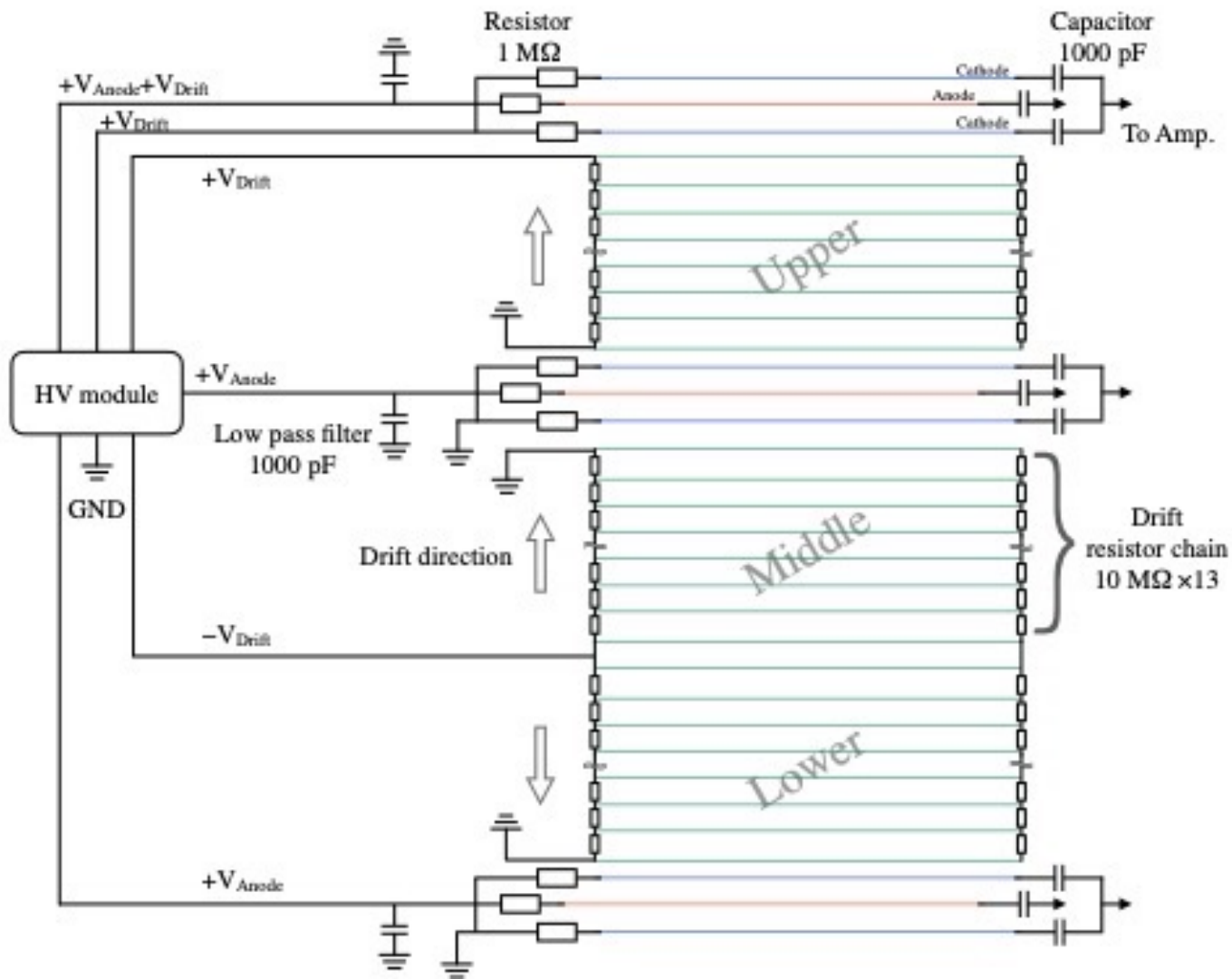
	Value	Correction	Uncertainty	Note
ρ	$(2.3927 \pm 0.002) \times 10^{19} \text{ \#/m}^3$	0	0.1%	Can be improved by the method of introducing ^3He
σv	$5333 \pm 7 \text{ barn} \times 2200 \text{ m/s}$	0	0.13%	Alternate measurement required
S_{He}	$1915609 \pm 1384 \text{ event}$	$9578 \pm 575 \text{ event}$	0.3%	Statistical accuracy dominates
S_{β}	$76611 \pm 276 \text{ event}$	$163 \pm 12 \text{ event}$	0.4%	Correction 5.2% → 0.21%
ϵ_{He}	100 - 0.01%	0 + 0.01%	0.01%	Enough accuracy
ϵ_{β}	$99.90 \pm 0.01\%$	$+0.10 \pm 0.01\%$	0.01%	Correction 5.5% → 0.10%

N.Sumii, “The LiNA experiment: Development of multi-layered time projection chamber”,
 VCI2022 - The 16th Vienna Conference on Instrumentation, Feb 2022

磁場印加中で動作する多層型TPC 統計誤差の見積もり



磁場印加中で動作する多層型TPC ドリフト電圧系の概要



バックグラウンド抑制策のまとめ

バックグラウンド源	対策前	対策後
TPCの含む放射性物質	30 cps	0.1 cps
環境 γ 線	70 cps	0.8 cps
宇宙線	55 cps	0.5 cps
SFC	13 cps	0.5 cps
BL05上流、BL04	8 cps	
TPC内での散乱中性子	2 cps	対策前の ~2%以下

低放射性物質→ PEEK TPC
磁場によるバックグラウンドの
高効率な分離→ LiNA TPC

散乱中性子対策： ^6Li 板

SFC遮蔽：鉛

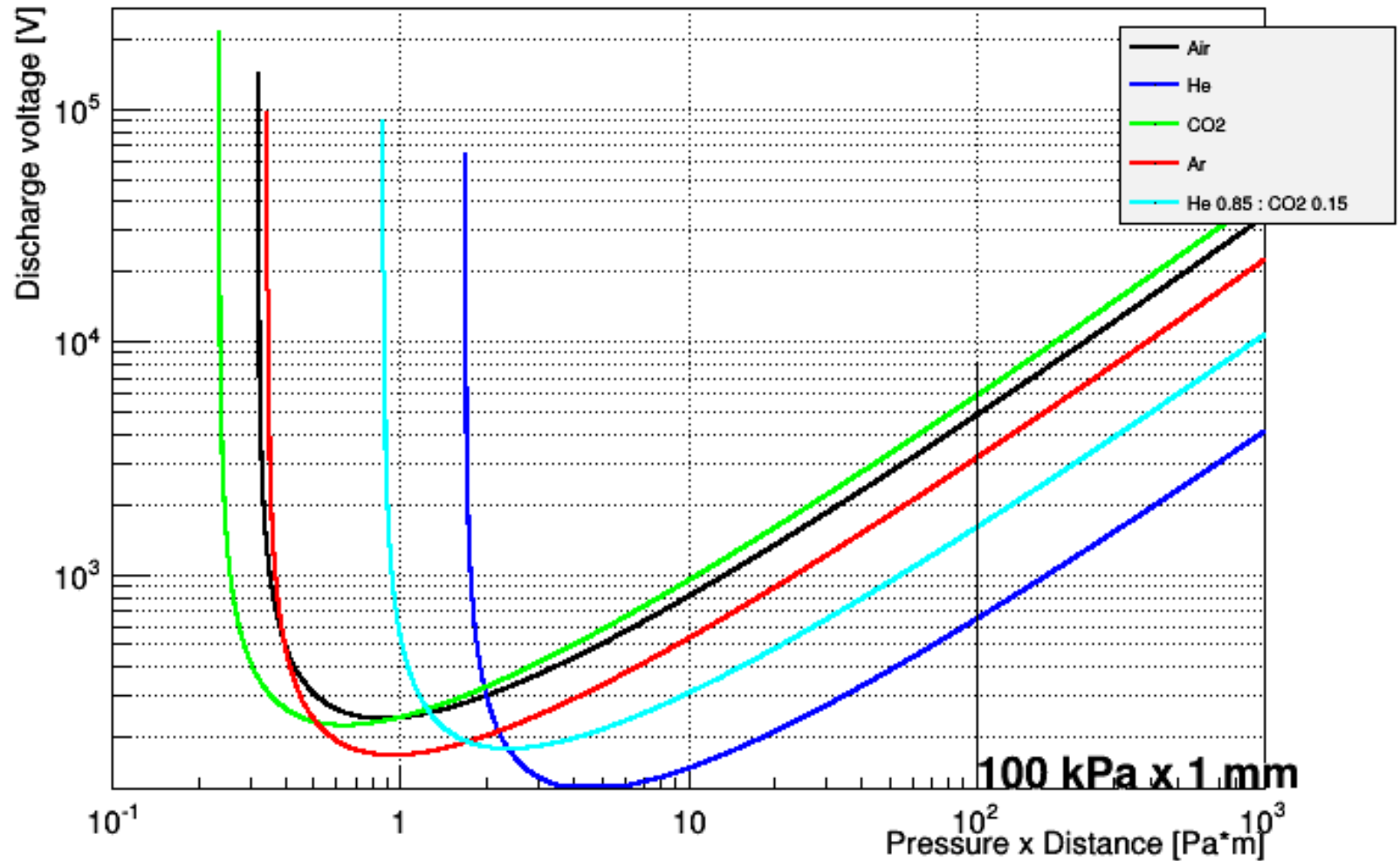
環境 γ 線遮蔽：
鉛

BL05上流、BL04遮蔽：鉄

宇宙線 veto：シンチレーター

並行平板間での火花放電開始電圧

Pachen's Law



*Distance → 並行平板間距離