

*New detector system
for the precise neutron lifetime measurement
using pulsed cold neutron beams*

パルス化された冷中性子ビームを
用いた中性子寿命精密測定のための
新しい検出器システムの開発

東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻 山下研究室

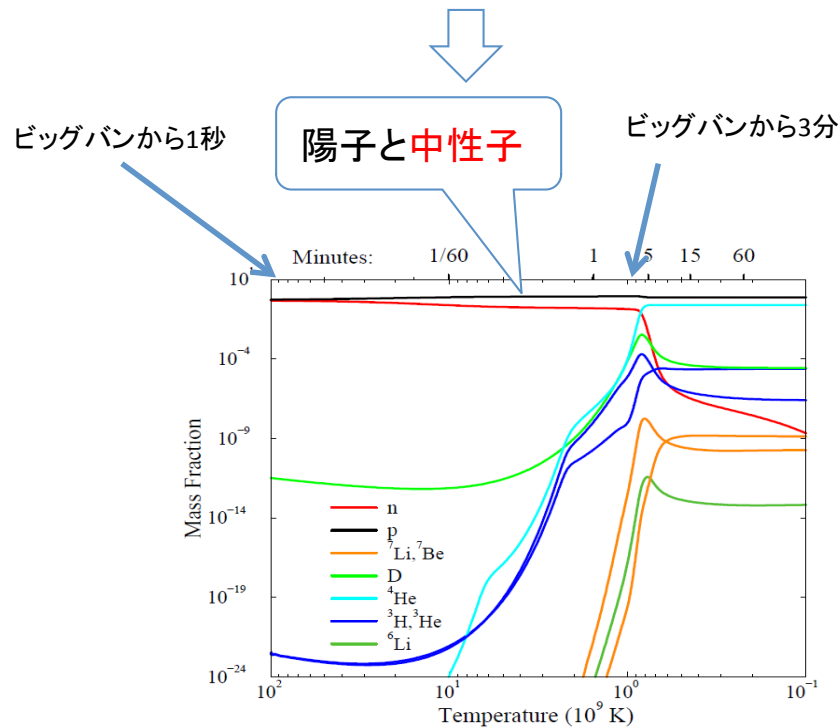
音野 瑛俊

Motivation

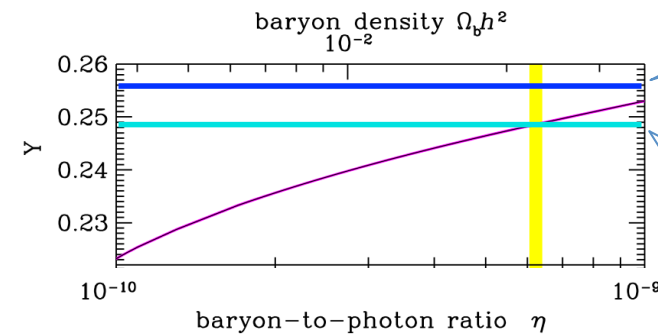
- ビッグバン元素合成理論：宇宙初期の軽元素の比率を予言

中性子寿命： $\tau_n = 885.7 \pm 0.8$
(PDG, 2010)

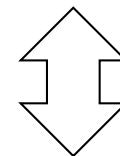
バリオン密度： $\eta_{10} = 6.23 \pm 0.17$
(WMAP, 2008)



He/H



観測値： $\text{He}/\text{H} = 0.2565 \pm 0.0010 \pm 0.0050$
(Izotov, 2010)

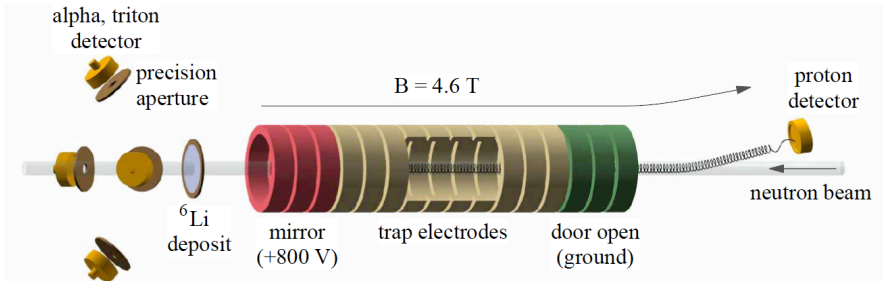
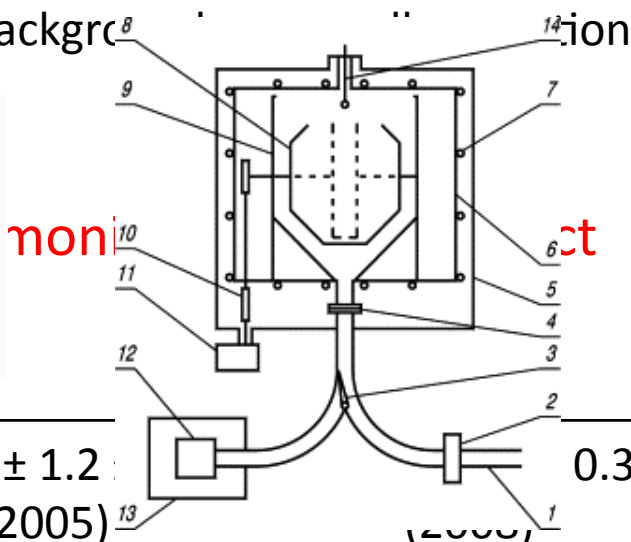
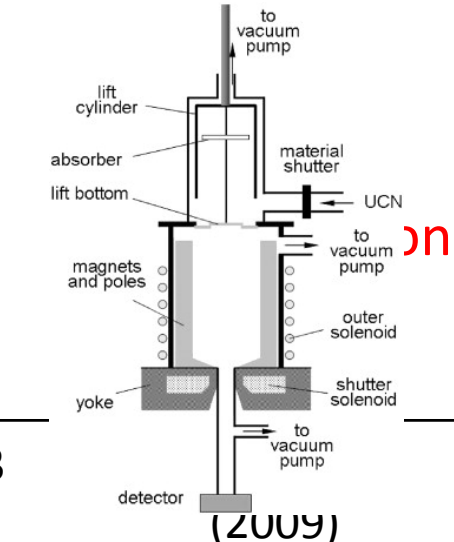


2 σ の差

予言値： $\text{He}/\text{H} = 0.2486 \pm 0.0002$

中性子寿命測定の精度向上を通じて従来のビッグバン元素合成理論を超える
物理に迫ることができる

中性子寿命測定の実況

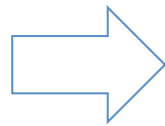
手法	Beam	Penning trap	Gravitational trap	Magnetic trap
中性子源	原子炉	原子炉	原子炉	原子炉
エネルギー	冷中性子	冷中性子	超冷中性子	超冷中性子
測定粒子	電子	陽子	中性子	中性子
メリット				
結果	878 ± 27 ± 14 (1989)	886.6 ± 1.2 (2005)	0.3 (2000)	0.3 (2009)

本研究の目標： これらの誤差の要因を克服する手法を開発し、 **$O(0.1\%)$** の精度を目指す

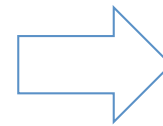
新しい実験手法

初めての**加速器**を用いた中性子寿命測定実験

パルス中性子源
(J-PARC)

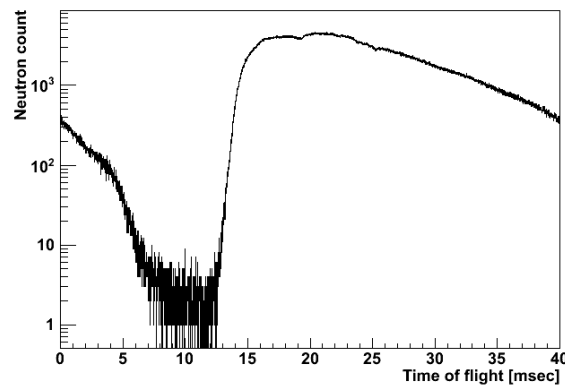


RFで制御する
Spin Flip Chopper

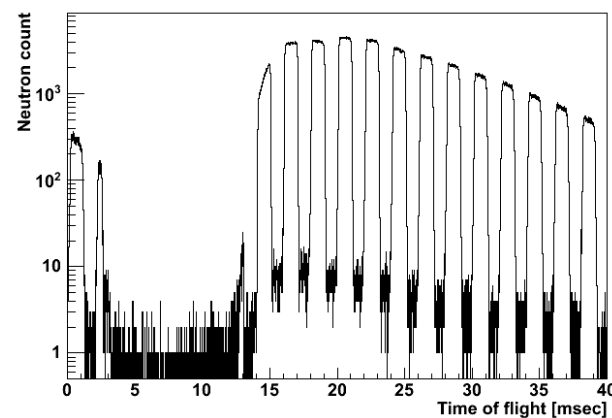


低バックグラウンド
高検出効率
Time Projection Chamber

500～2000m/sの分布を持ち、
速度に応じて実験エリアへの
到達時間が異なる

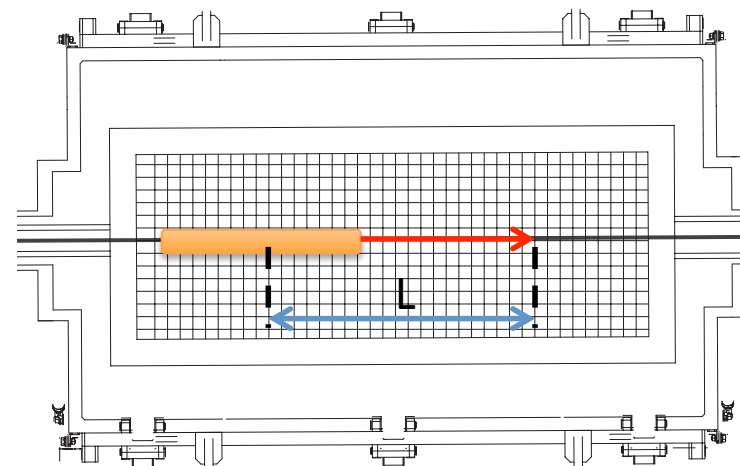


等速の中性子バンチに整形する



測定原理 (kossakowski, 1989)

- 冷中性子がTPCで飛行中に崩壊して発生する電子(0~782keV)を直接計数
 - N : 中性子の数
 - L : Fiducial volume
- TPCより短く、速度の揃った中性子バンチ
- ガスに少量の ^3He を加え、封じきって実験
- 崩壊に伴う電子(S_β)と ^3He の中性子吸収反応(S_n)を同時計測



τ_n : 中性子寿命
 v : 中性子の速度
 ϵ_e : 電子の検出効率

$$S_\beta = \epsilon_e N \frac{L}{\tau_n v}$$

ϵ_n : ^3He 吸収反応の検出効率
 ρ : ^3He の密度
 σ : ^3He の中性子吸収断面積

$$S_n = \epsilon_n N \rho \sigma L$$

$$\tau_n = \frac{1}{\rho \sigma_0 v_0} \left(\frac{S_n / \epsilon_n}{S_\beta / \epsilon_\beta} \right)$$

Lはキャンセル
 $\sigma v = \sigma_0 v_0$

2200m/sの中性子に対する吸収断面積

Flux monitor、wall loss、depolarization起因の誤差を排除

本研究のための新しいアプローチ

加速器(パルス中性子源)の使用

- Spin Flip Chopperを開発
- 等速の中性子バンチに整形

低バックグラウンド環境化

- TPC素材を吟味し、PEEK材の選定
- ^6Li 板(誘電体)をTPC内部に設置
- 自然放射線、中性子起因放射線の遮蔽

シグナル抽出アルゴリズムの開発

- ガス圧の変更やビームのON/OFFを駆使
- data drivenでバックグラウンドを引き算

TPCの高検出効率化

- 低ノイズアンプ
- 高いエネルギー分解能
- ガス圧の変更にも対応

$$\tau_n = \frac{1}{\rho\sigma_0 v_0} \left(\frac{S_n/\epsilon_n}{S_\beta/\epsilon_\beta} \right)$$

ビームパワー	220 kW	1MW
中性子崩壊レート	0.1 cps	0.4 cps
統計誤差(150日)	0.8%	0.2%
シグナル抽出に伴う誤差	<0.1%	<0.1%
検出効率の補正に伴う誤差	0.1%	0.1%
今後、改善する必要がある系統誤差		

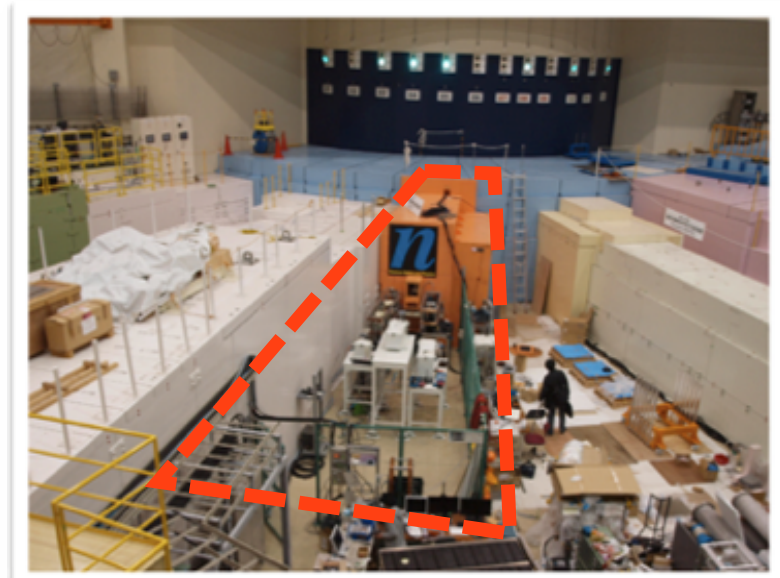
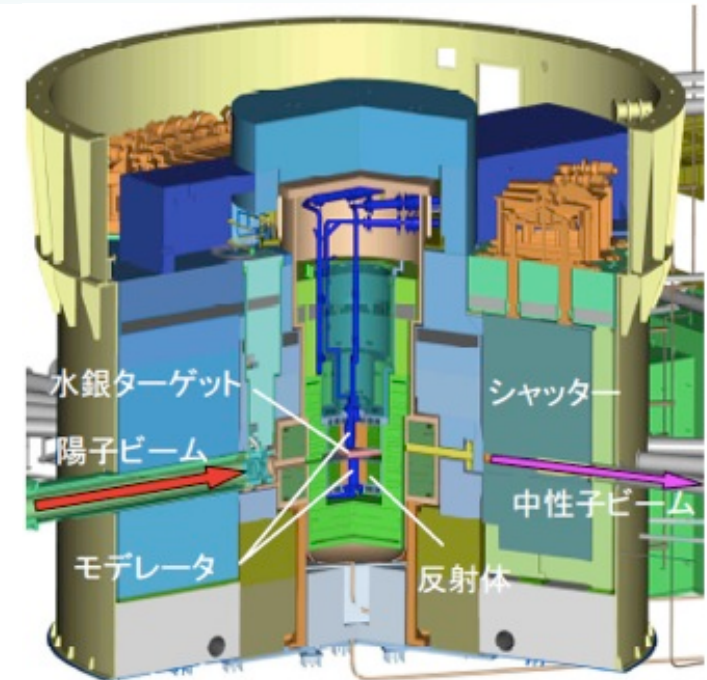
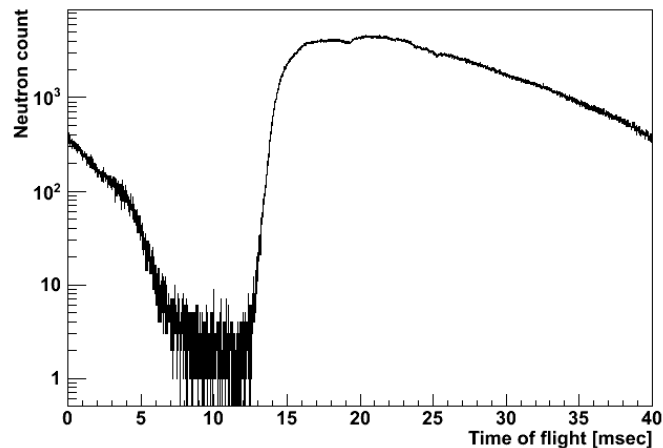
- ^3He の密度決定 0.5%
- ^3He の吸収断面積 0.13%
- 温度の一様性 0.2%
- 窒素のアウトガスの寄与 0.5%

J-PARC、物質生命科学実験施設

BL05、偏極ビームブランチ

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	8.6×10^6 /s/cm ²
偏極率	95%
エネルギー → ビームエリアでは10m以上に広がり 減衰 of flightを用いて速度選択ができる。	1 ~ 20 meV

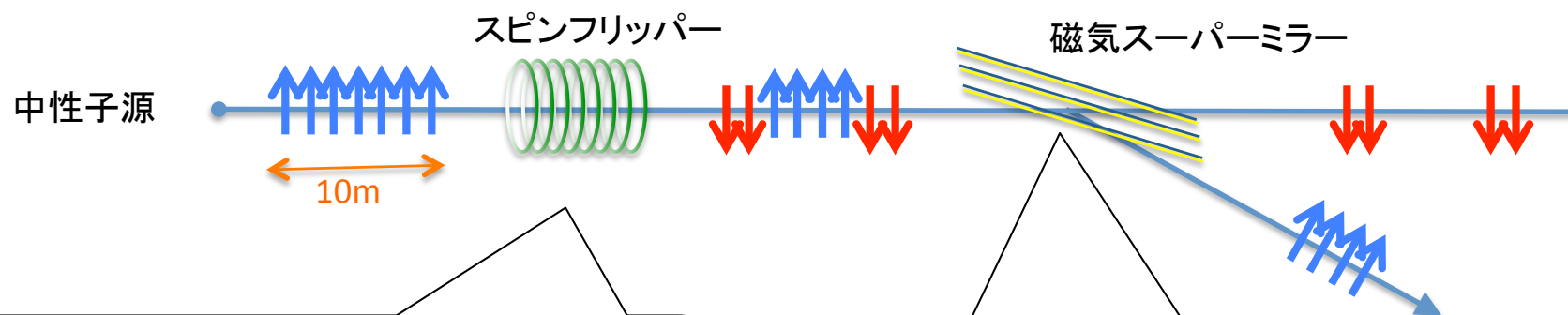
速)



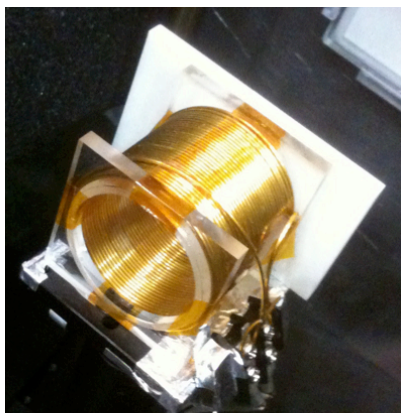
Spin flip chopper

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



ガイド磁場 B_y と振動磁場 $B_z \sin(\omega t)$



直径	50 mm
長さ	40 mm
RF周波数 ω	29 kHz

$$P = \frac{B_z^2}{B_z^2 + (B_y - \frac{\hbar}{2|\mu_n|}\omega)^2} \sin^2 \left(\sqrt{B_z^2 + \left(B_y - \frac{\hbar}{2|\mu_n|}\omega\right)^2} t \right)_{1T}$$

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
長さ	140 mm
高さ	35 mm



1.5°の角度におくと1300m/s以下の中性子を反射

偏極率が100%では無いこと等が原因で一部の⁵枚の下向きスピンも⁸枚反射され、コントラストを劣化する

SFC performance

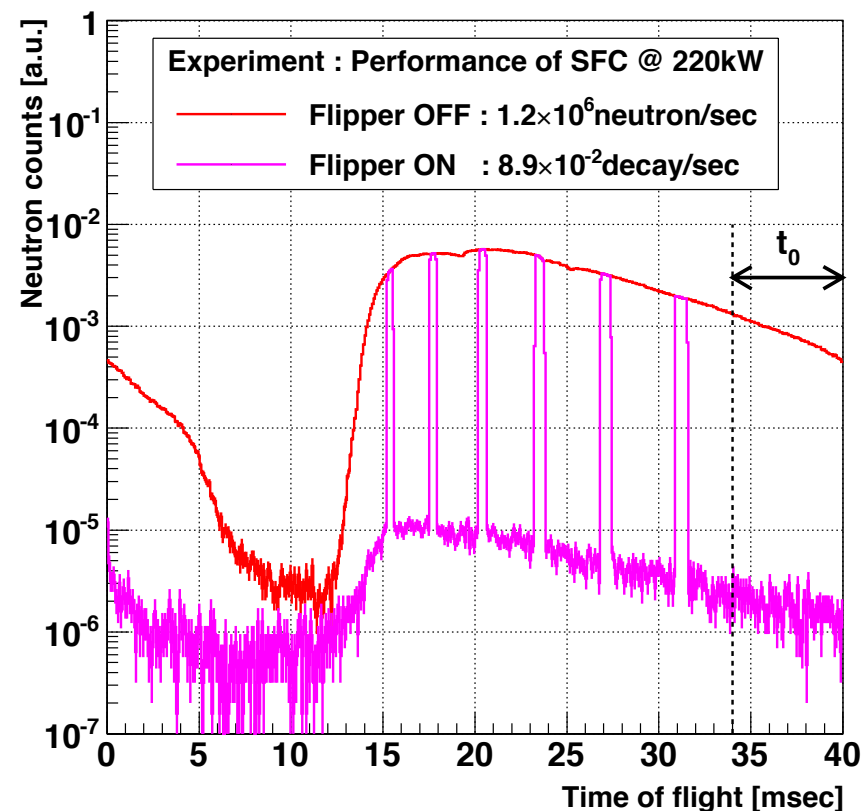
フリッパー2個、ミラー3個を使用

– フリッパーon/offのコントラストを向上

ビームサイズ	2 cm x 2 cm
最小バンチ長	15 cm
立ち上がり	5 cm
フラックス (flipper on)	1.2×10^6 neutron/sec
フラックス (flipper off)	0.3×10^4 neutron/sec

コントラスト	400
(右図) フラックス	1.7×10^5 neutron/sec

(右図) Fidelity	0.1 decay/sec
(右図) Fidelity	2.8 ms / beam cycle

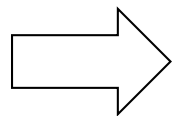
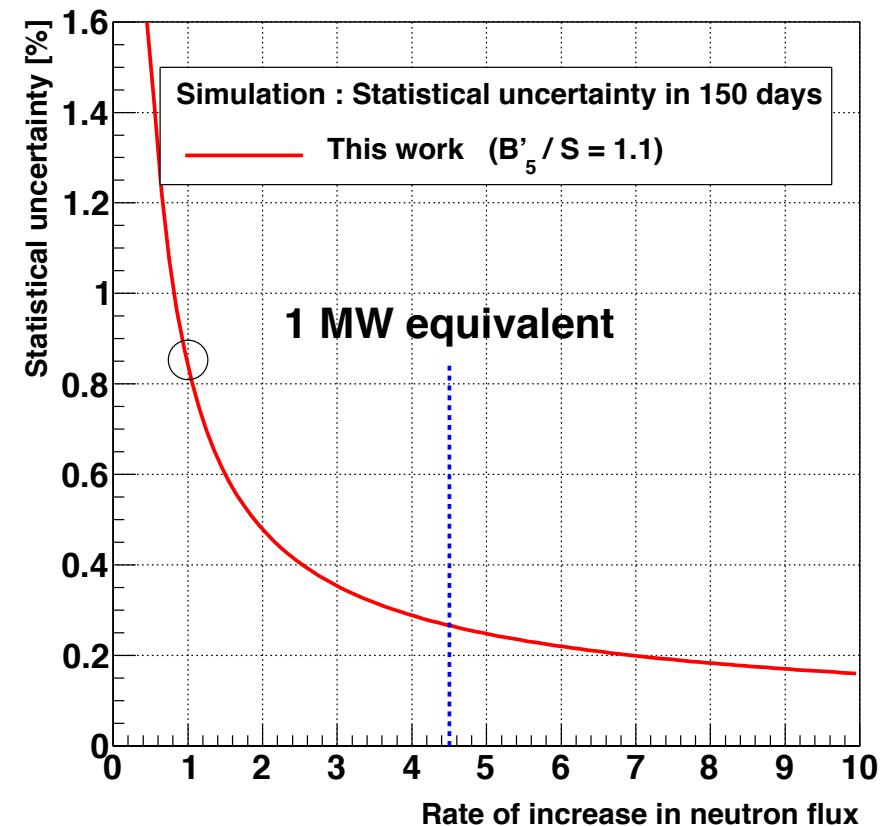


2350

中性子ビームのまとめと展望

現在220kWで0.1 cpsの中性子崩壊レート
低バックグラウンド環境下で150日の測定で0.8%の統計精度

- J-PARCのビームパワー
 - デザインは1MWに対して1/5の強度
- 偏極ビームブランチ
 - シミュレーションの1/3程度の輸送効率
- Spin flip chopper
 - ミラーサイズのために1/10のみを反射
 - SFC上流で10 cm x 4 cm
 - SFC下流で2 cm x 2 cm



約150倍まで中性子フラックスが増える可能性がある

4.5倍(1MW相当)では150日の測定で0.2%の統計精度に到達

本研究のための新しいアプローチ

加速器(パルス中性子源)の使用

- Spin Flip Chopperを開発
- 等速の中性子バンチに整形

低バックグラウンド環境化

- TPC素材を吟味し、PEEK材の選定
- ^6Li 板(誘電体)をTPC内部に設置
- 自然放射線、中性子起因放射線の遮蔽

シグナル抽出アルゴリズムの開発

- ガス圧の変更やビームのON/OFFを駆使
- data drivenでバックグラウンドを引き算

TPCの高検出効率化

- 低ノイズアンプ
- 高いエネルギー分解能
- ガス圧の変更にも対応

$$\tau_n = \frac{1}{\rho\sigma_0 v_0} \left(\frac{S_n/\epsilon_n}{S_\beta/\epsilon_\beta} \right)$$

ビームパワー	220 kW	1MW
中性子崩壊レート	0.1 cps	0.4 cps
統計誤差(150日)	0.8%	0.2%
シグナル抽出に伴う誤差	<0.1%	<0.1%
検出効率の補正に伴う誤差	0.1%	0.1%
今後、改善する必要がある系統誤差		

- ^3He の密度決定 0.5%
- ^3He の吸収断面積 0.13%
- 温度の一様性 0.2%
- 窒素のアウトガスの寄与 0.5%

中性子崩壊のバックグラウンドの抑制

低バックグラウンド環境化のまとめ

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	
SFC遮蔽：鉛		
TPC内での散乱中性子	2 cps	0.003 cps

中性子崩壊レート(0.1cps)を時間的に
一様な環境バックグラウンドと比較する
ためにはduty factorを考慮して

$$0.1\text{cps} \times 40\text{ms} / 2.8\text{ms} = 1.4\text{ cps}$$

TPCの含む放射性物質：PEEK

散乱中性子： ^6Li 板

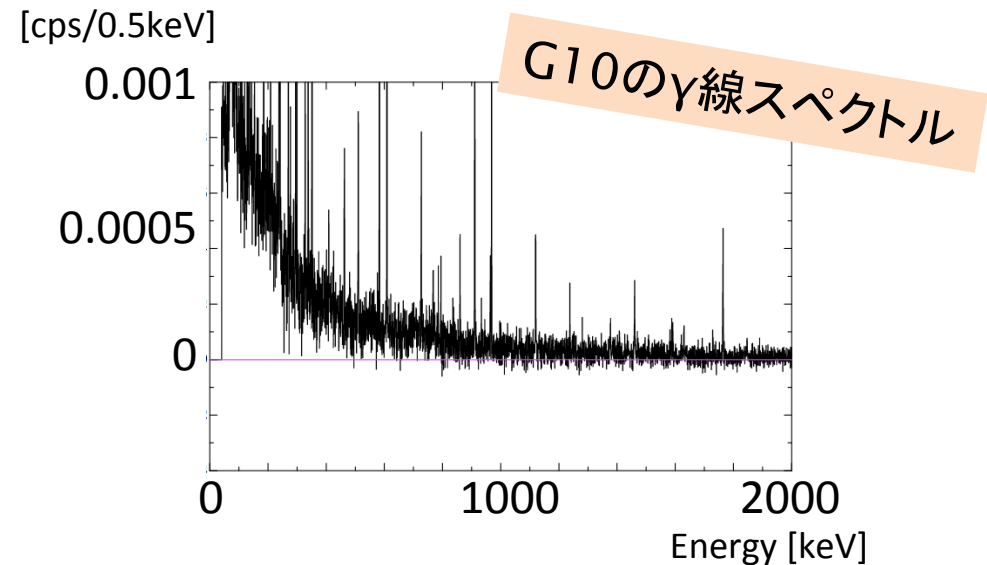
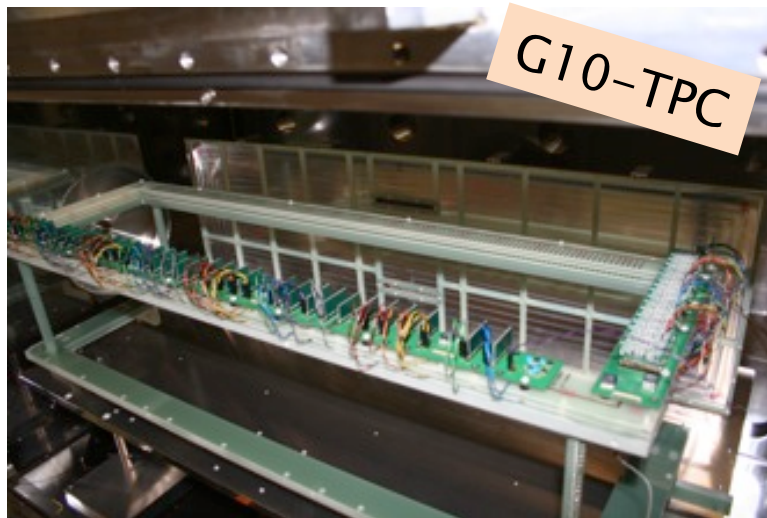
環境γ線遮蔽：鉛

BL05上流、BL04遮蔽：鉄

宇宙線 veto：シンチレーター

TPCが含む放射性物質起因のBG抑制

- 以前 G10 を使用して TPC を作成
 - 30 cpsのバックグラウンド
 - ガラス起因の放射性物質をGe検出器で検出(~ 0.3 Bq/cc)
 - $\rightarrow 1$ cpsは0.01 Bq/cc に相当



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	---	¹³ 0.016

TPCが含む放射性物質起因のBG抑制

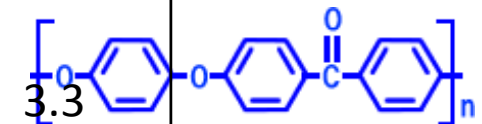
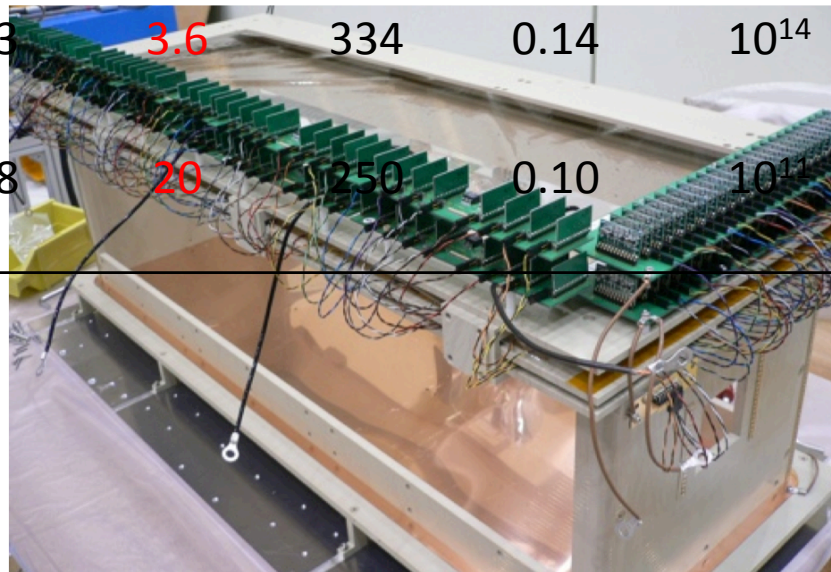
- **PEEK** (ポリ エーテル エーテル ケトン) : **ガスチェンバーでは初めて導入**

最大の特徴 : C、H、Oから化学的に合成 → Ge検出器の感度以下

長所 : 溶接が可能のため1m級の構造物を100 μ m以下の精度で作成可能

短所 : 弾性が強くないためワイヤーを張る際にプリテンションが必要

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



TPCガスでの散乱中性子起因のBG抑制

散乱中性子の吸収と**即発γ線**が主なガス起因バックグラウンド

- ほとんどの核子は即発γ線を伴う吸収
 - $n+Z \rightarrow Z'+\gamma+\gamma+\dots$
- ^3He 、 ^6Li は即発γ線を伴わない吸収
 - $n+Z \rightarrow Z'+Z''$

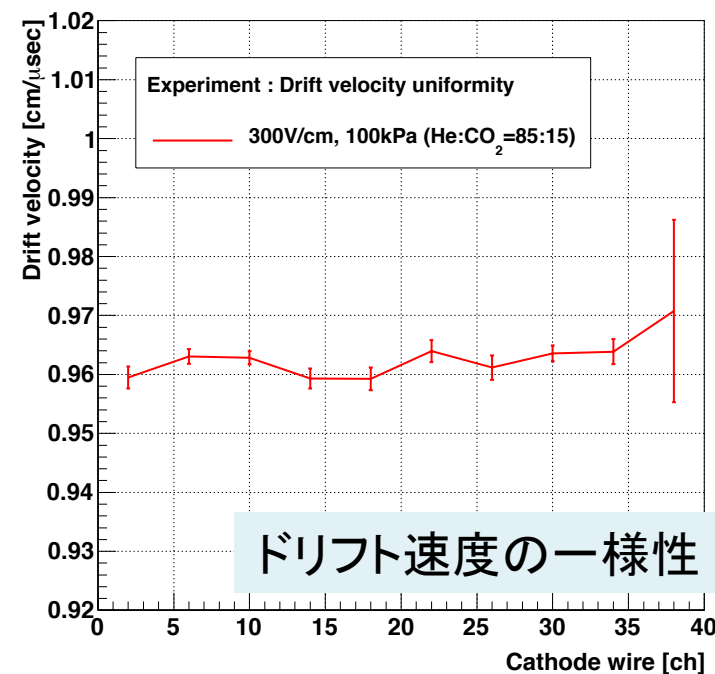
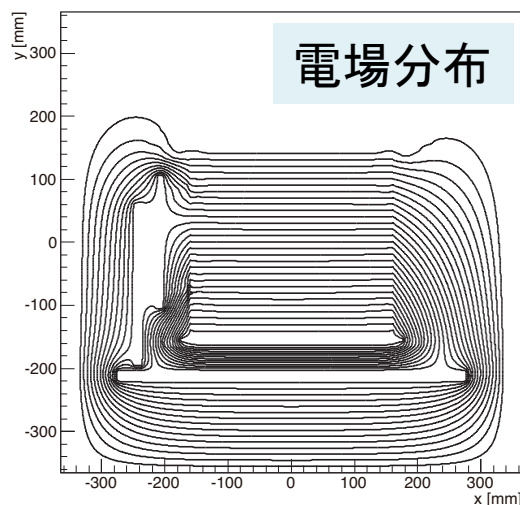
➡ ^6Li を95%まで濃縮した粉末LiFをテフロンと混ぜて焼結
(LiF : テフロン=30wt% : 70wt%)

➡ ^6Li 板をTPC内壁を100%覆うように設置

- 誘電体($\epsilon=3.0$)が電極の内側にある設計
- 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**に抑えた



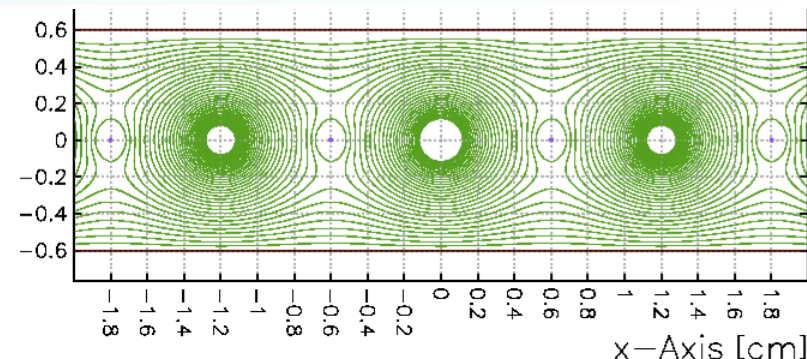
$^6\text{Li} + \text{neutron} \rightarrow \alpha + ^3\text{H}$
吸収長は500μm



ワイヤー / プリアンプ

• MWPC部

- 6mm間隔の3層構造
- プリテンションをかけてワイヤー張り



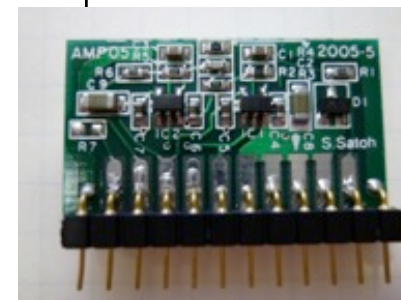
	本数	ワイヤー径	ピッチ	方向	電圧	アンプ
cathode	160	50 μ m	6mm	ビームに垂直	0V	High gain
anode/field	24/24	20 μ m/50 μ m	6mm	ビームに平行	1720V/0V	High gain/Low gain
High gainアンプ cathode	160	50 μ m	6mm	ビームに垂直	0V	Low gain

• 2段の反転増幅回路の積分アンプ

- High gainアンプ
 - 変換係数 : 1.6 V/pC
 - 時定数 : 2.4 μ sec
 - ノイズレベル : 1.3 mV_{RMS}
 - 消費電力 : 500 mW/ch
 - 閾値 : 200 eV

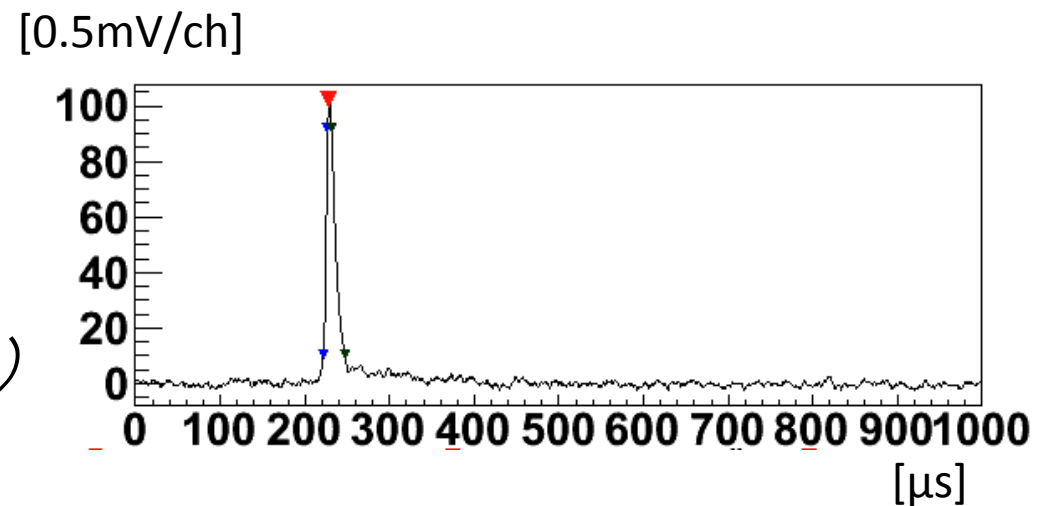
– Low gainアンプ

- High gainアンプの上流で抵抗を用いて分流



Trigger / DAQ

- *Trigger*条件
 - 24本のアノードワイヤーのいずれかに200eV以上のヒット
- *Copper-Lite system*
 - Mother board (copper-lite)にDaughter card (finesse)を4枚載せて使用
 - Board 毎にTCP/IP(1Gbps)で読み出し
 - 200cpsまでDAQ可能
- *65MHz 12bit FADC(8ch)*
 - 全128chの波形を記録
 - Clock : 10MHz
 - Dynamic range : 100 μ sec
 - Data size /ch : 2kbyte
 - self triggerをかけられように改良
- *1GHz Multi-hit TDC(32ch)*
 - Time of flightを記録
 - 分周回路を実装し、1MHzで動作



低バックグラウンド環境の実現

- 鉛遮蔽及び宇宙線Veto

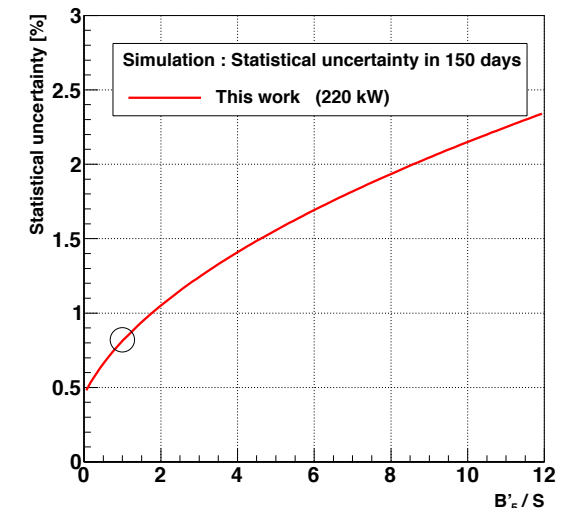
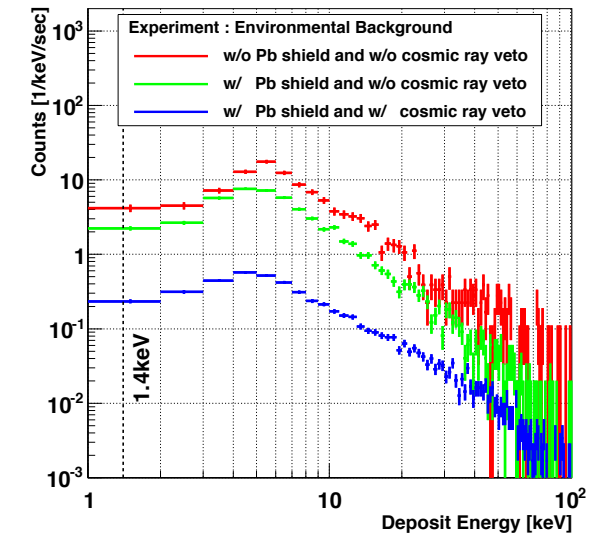


- Cut

- Energy cut : 1.4keV以上のenergy deposit
- Fiducial cut : Beam regionにhitがある

	全計数 [cps]	Energy cut後 [cps]	Fiducial cut [cps]
遮蔽なし	123.7	100.1	30.7
+鉛遮蔽	58.4	44.2	13.9
+宇宙線環境Veto	7.7	0.8 cps	1.1 cps
宇宙線		0.5 cps	
TPCの放射性物質		0.1 cps	

Energy cut



B/S ~ 1を達成

本研究のための新しいアプローチ

加速器(パルス中性子源)の使用

- Spin Flip Chopperを開発
- 等速の中性子バンチに整形

低バックグラウンド環境化

- TPC素材を吟味し、PEEK材の選定
- ^6Li 板(誘電体)をTPC内部に設置
- 自然放射線、中性子起因放射線の遮蔽

シグナル抽出アルゴリズムの開発

- ガス圧の変更やビームのON/OFFを駆使
- data drivenでバックグラウンドを引き算

TPCの高検出効率化

- 低ノイズアンプ
- 高いエネルギー分解能
- ガス圧の変更にも対応

$$\tau_n = \frac{1}{\rho\sigma_0 v_0} \left(\frac{S_n/\epsilon_n}{S_\beta/\epsilon_\beta} \right)$$

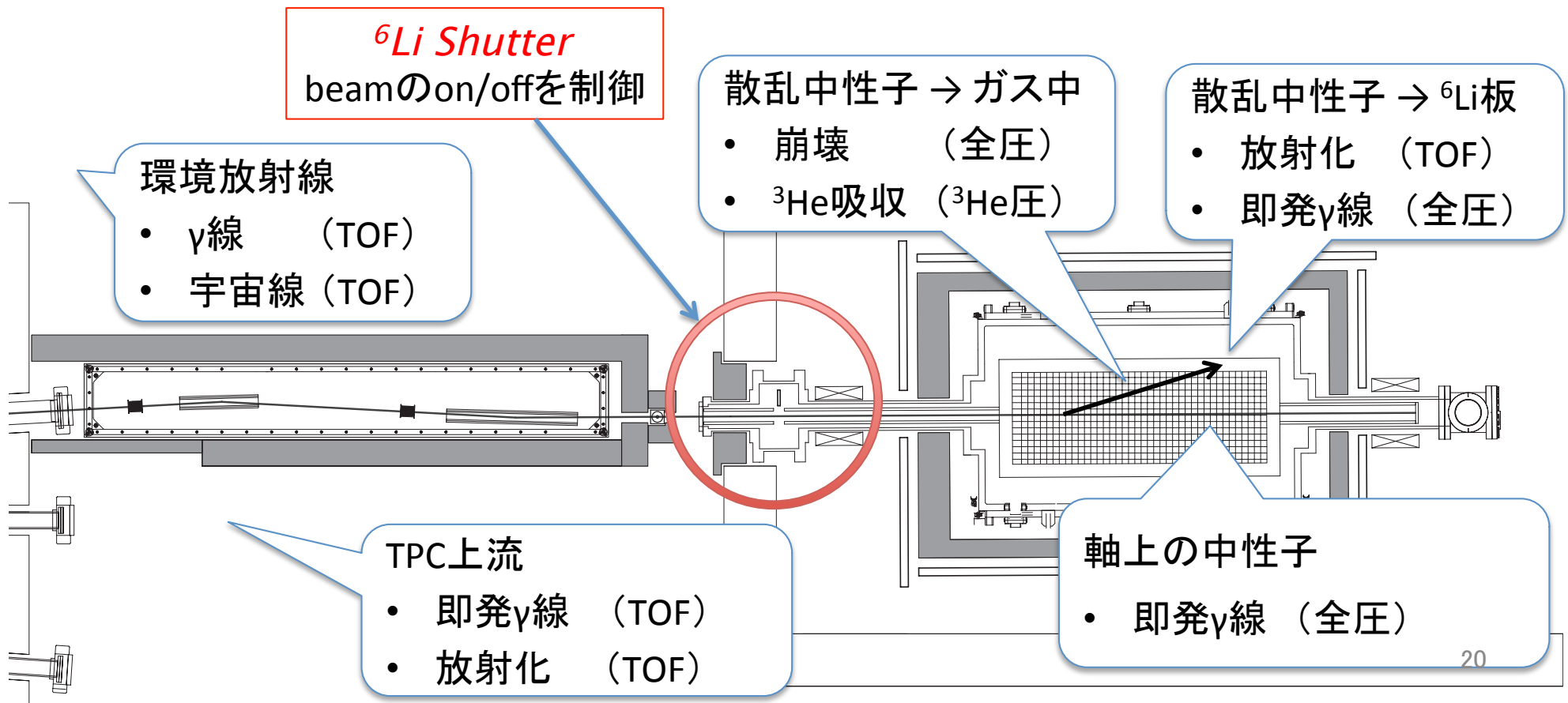
ビームパワー	220 kW	1MW
中性子崩壊レート	0.1 cps	0.4 cps
統計誤差(150日)	0.8%	0.2%
シグナル抽出に伴う誤差	<0.1%	<0.1%
検出効率の補正に伴う誤差	0.1%	0.1%
今後、改善する必要がある系統誤差		

- ^3He の密度決定 0.5%
- ^3He の吸収断面積 0.13%
- 温度の一様性 0.2%
- 窒素のアウトガスの寄与 0.5%

中性子崩壊シグナル抽出のアプローチ

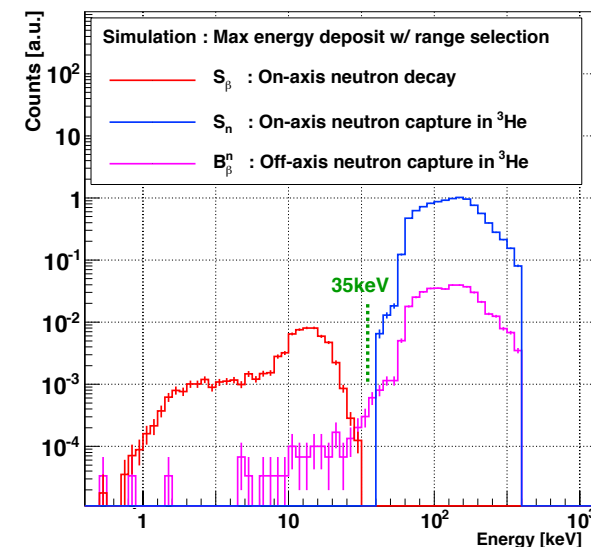
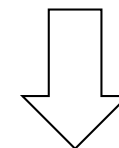
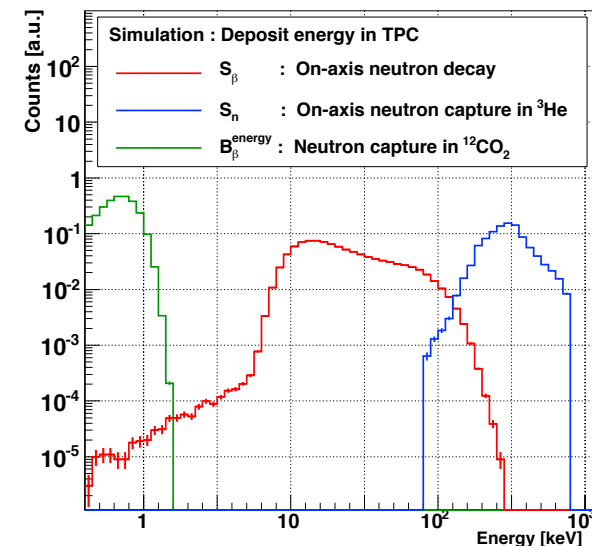
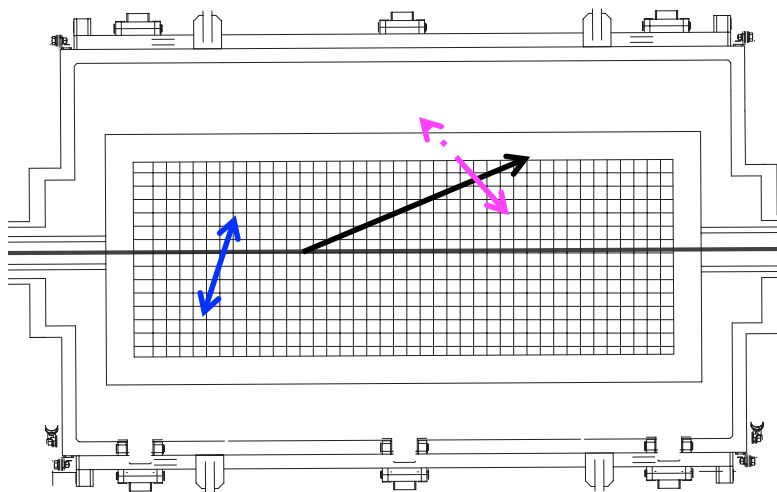
以下のバックグラウンドを*data driven*で引き算を可能にするアルゴリズムを開発した

- ^3He 吸収反応(762keV)との分離
- ^3He 圧を変更した測定を用いた散乱中性子の ^3He 吸収反応の分離
- TOFスペクトルと ^6Li shutterを利用したバックグラウンドの分離
- 全圧を変更した測定を用いたバックグラウンドの分離



^3He 吸収反応の分離

- ^3He 吸収反応は dE/dx が大きい
 - 増倍時に空間電荷効果で出力が762keVから抑制(青)
 - 中性子崩壊のエネルギースペクトルと重なる
- 飛程によるセレクション (^3He 吸収反応の飛程は5cm)
 - 10cm以上の飛程を持つイベントを除去
- dE/dx を利用して分離
 - 最大エネルギーを落としたワイヤーの出力を評価
 - 35 keVの閾値で分離が可能
- ガス散乱した中性子の ^3He 吸収反応(ピンク色)
 - ^3He のガス圧を変化させた測定との比較で除去可能



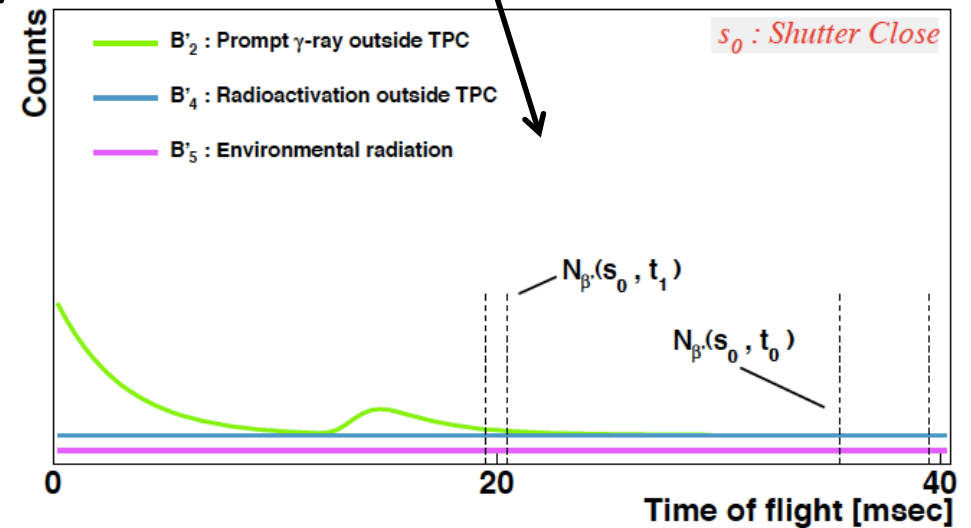
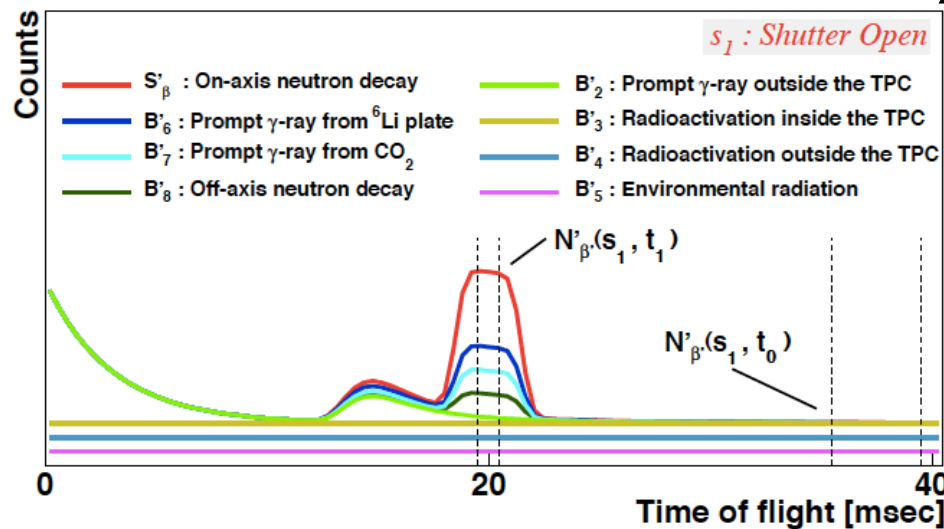
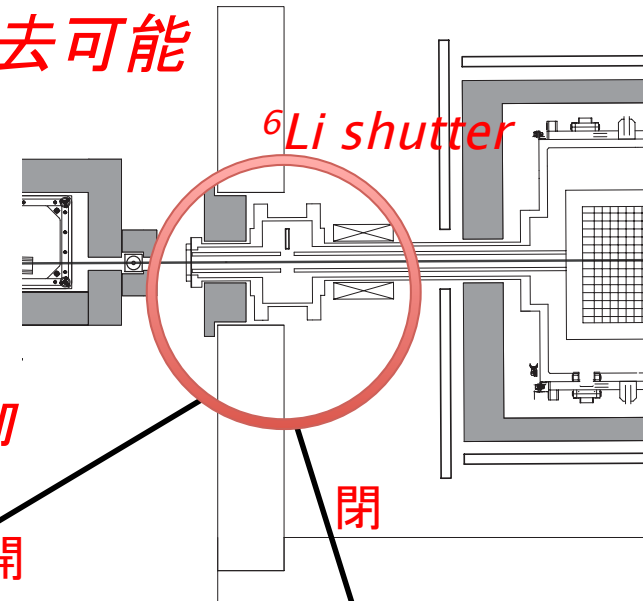
TOFとshutterを用いたBGの分離

- 時間的に一定なバックグラウンドが除去可能

- TPC内の放射化
- TPC外の放射化
- 環境放射線

- ^6Li shutterでビームのOn/Offを制御

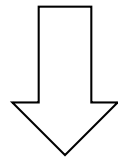
- TPC外の即発 γ 線が除去可能



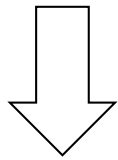
TPC内ガスに起因するバックグラウンドが残る

TPC内ガスに起因するBGの分離

- ① 中性子のガス吸収 → 即発γ線
- ② ガス散乱中性子 → 飛行中に崩壊
- ③ ガス散乱中性子 → ^6Li 板で吸収 → 即発γ線



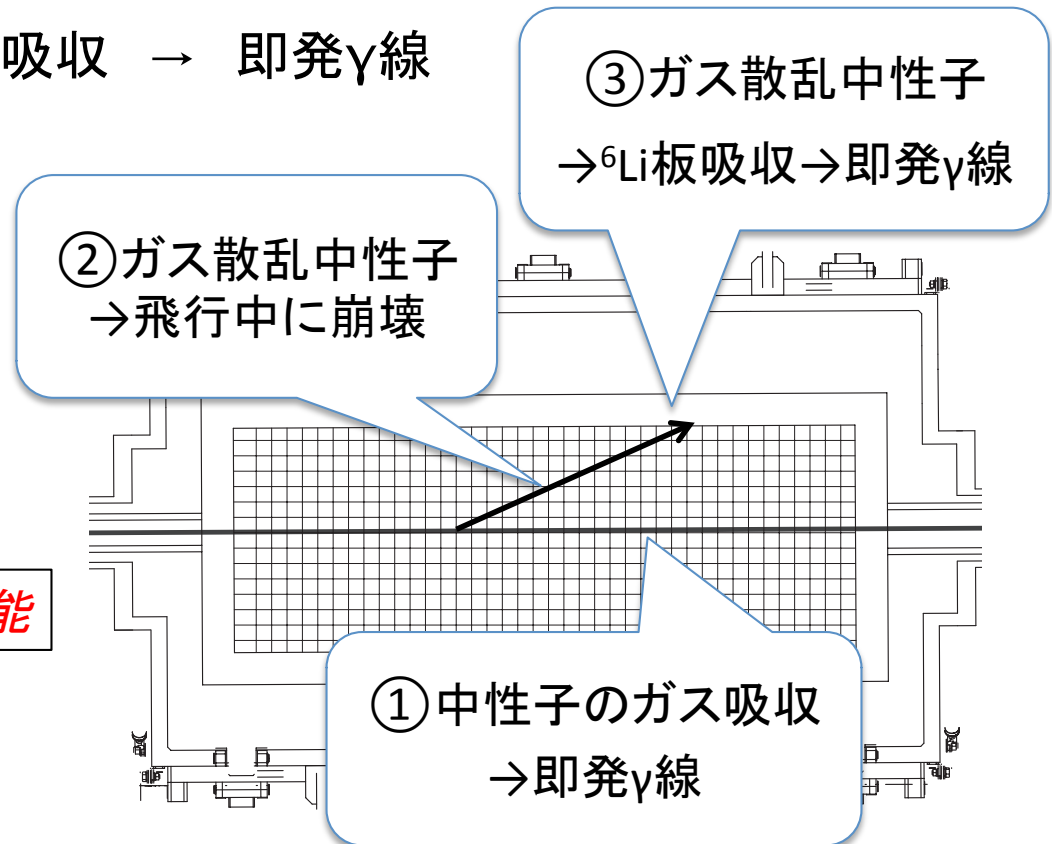
これらのBGの量はガス圧に比例



ガス圧を変更した測定を用いて除去可能

$$\begin{aligned} N_{50\text{kPa}} &= S + B_{\text{gas}} \\ N_{100\text{kPa}} &= S + 2 \times B_{\text{gas}} \end{aligned}$$

$$\rightarrow S = 2 \times N_{50\text{kPa}} - N_{100\text{kPa}}$$



以上のプロセスで全バックグラウンドをdata drivenで引き算が可能となる

本研究のための新しいアプローチ

加速器(パルス中性子源)の使用

- Spin Flip Chopperを開発
- 等速の中性子バンチに整形

低バックグラウンド環境化

- TPC素材を吟味し、PEEK材の選定
- ^6Li 板(誘電体)をTPC内部に設置
- 自然放射線、中性子起因放射線の遮蔽

シグナル抽出アルゴリズムの開発

- ガス圧の変更やビームのON/OFFを駆使
- data drivenでバックグラウンドを引き算

TPCの高検出効率化

- 低ノイズアンプ
- 高いエネルギー分解能
- ガス圧の変更にも対応

$$\tau_n = \frac{1}{\rho\sigma_0 v_0} \left(\frac{S_n/\epsilon_n}{S_\beta/\epsilon_\beta} \right)$$

ビームパワー	220 kW	1MW
中性子崩壊レート	0.1 cps	0.4 cps
統計誤差(150日)	0.8%	0.2%
シグナル抽出に伴う誤差	<0.1%	<0.1%
検出効率の補正に伴う誤差	0.1%	0.1%
今後、改善する必要がある系統誤差		

- ^3He の密度決定 0.5%
- ^3He の吸収断面積 0.13%
- 温度の一様性 0.2%
- 窒素のアウトガスの寄与 0.5%

中性子崩壊の検出効率

高検出効率を実現することで、検出効率の補正に伴う系統誤差を抑える

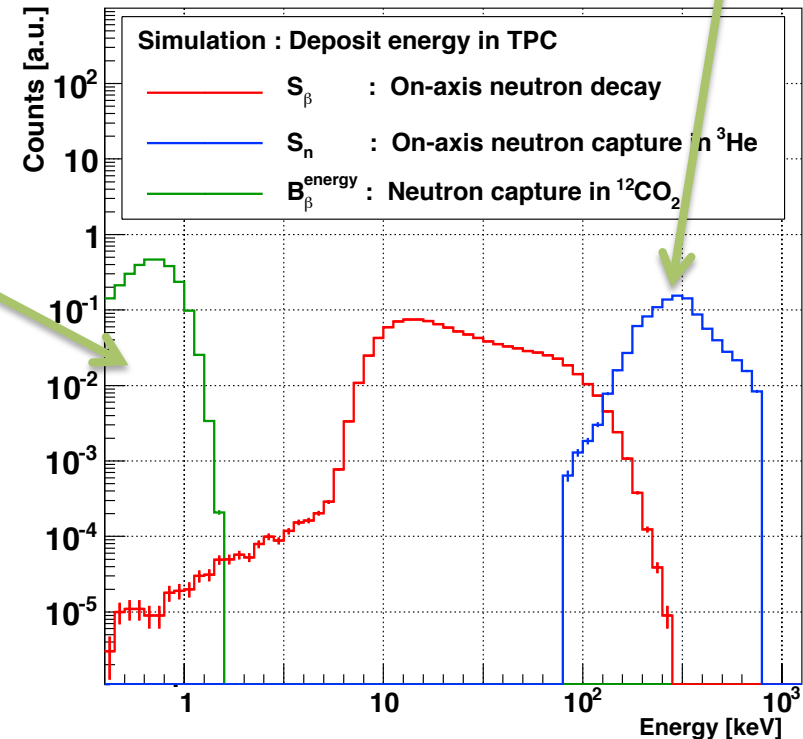
→ 50kPa、100kPaでの以下のパフォーマンスを評価した

- 中性子崩壊からの電子(0~782keV)に対する検出効率
- CO₂吸収反応との分離

除去済み

CO₂吸収反応 (1 keV)

- ¹²Cの中性子吸収は中性子崩壊の2.5倍
- 放射される即発γ線は最大で5.0MeV
- ¹²Cの反跳エネルギーは1.0keV



中性子崩壊からの電子の検出

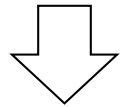
- 宇宙線を用いてワイヤーごとの検出効率を評価

- アノードワイヤーに直交する宇宙線に対して

100kPa : 97%

50kPa : 77%

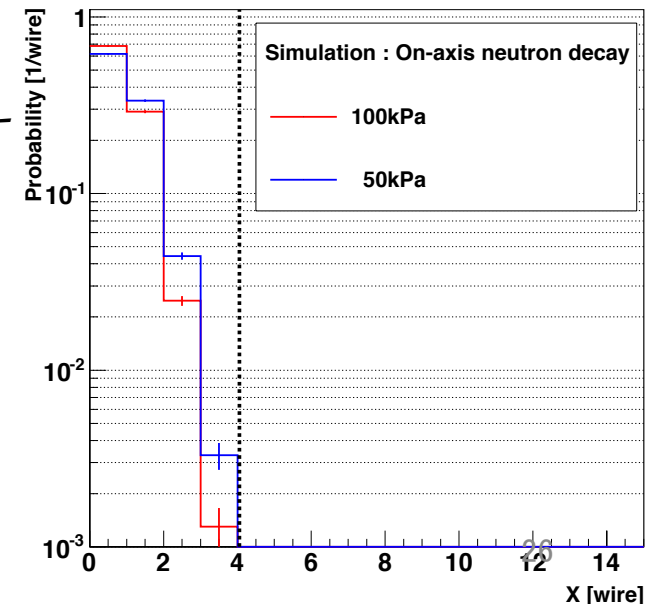
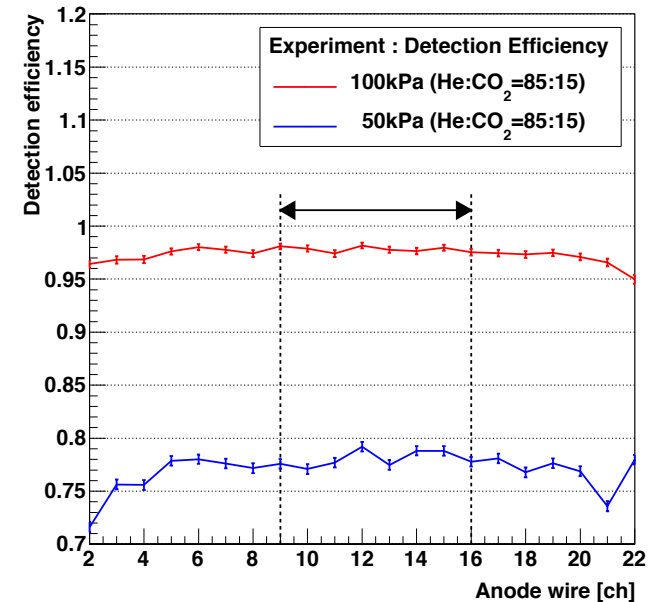
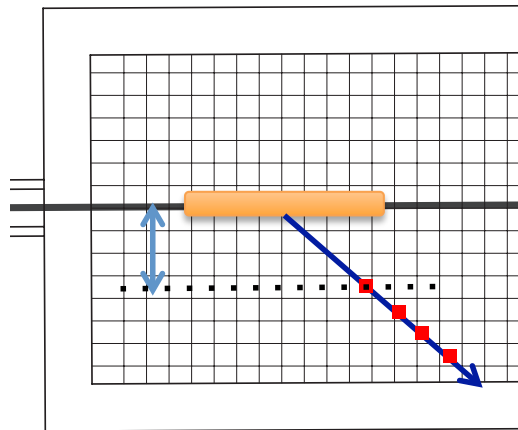
→ MCとの比較から閾値は200eVに相当



- 中性子崩壊からの電子 (0~782 keV) に適用

- ビーム軸で等方に発生
- 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



CO₂吸収反応との分離

- エネルギー分解能に寄与するパラメーターと実測値

パラメーター	実測
イオン化時の再結合	12 %
ドリフト中の減衰(150mm)	4 % (4 days)

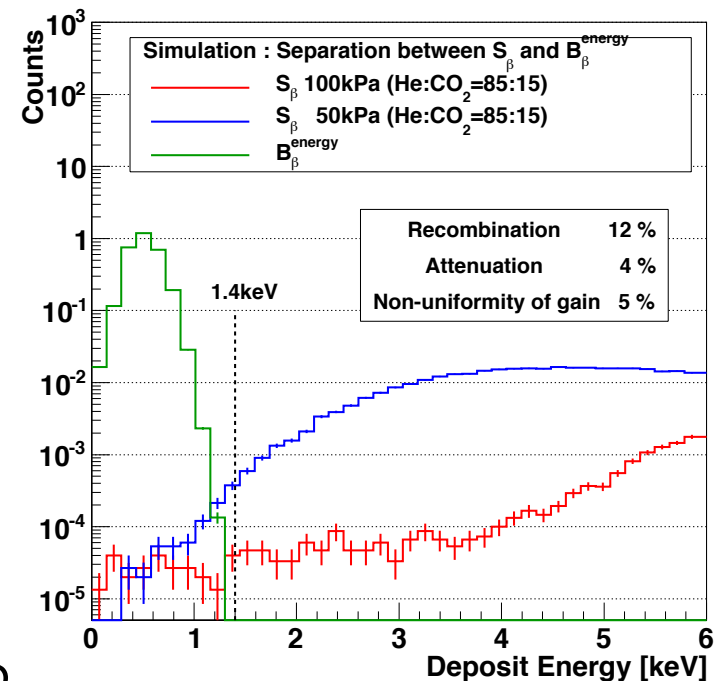
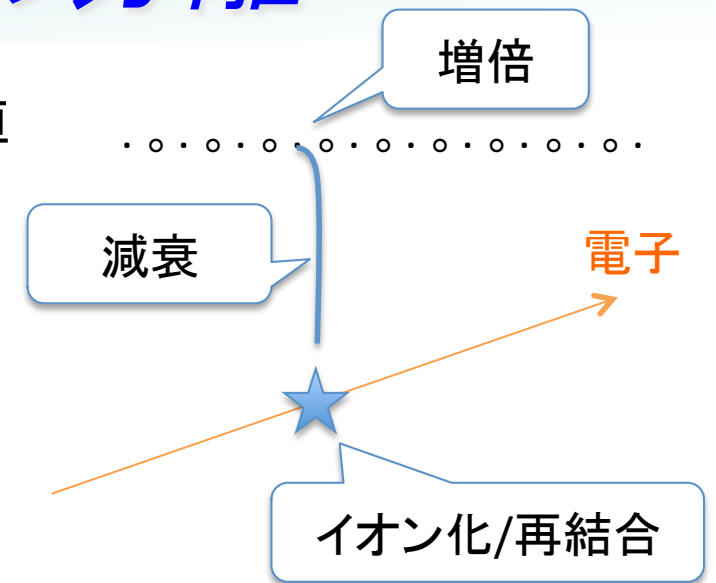
- ¹²C増倍の非一様性 5 %

圧力	1.4 keV 以下の中性子崩壊
50 kPa	0.061(6) %
100 kPa	0.026(4) %

→ ガス起因バックグラウンドの引き算

$$N = 2 \times N_{50kPa} - N_{100kPa}$$

に伴って伝搬したUncertaintyは0.13%となる



その他の系統誤差

- ^3He の分圧 $\sim 0.5\%$
 - 質量分析計を用いて $^3\text{He}/^4\text{He}$ を求める
 - Referenceガスの精度で決定(水銀柱を用いて作成)
 - 現在使用中の0.01%の精度の大気圧計を用いてReferenceガスを再作成
- ^3He の吸収断面積@2200m/s $\sim 0.13\%$
 - 速度の決定精度がdominant
 - 速度分解能は0.035%を持つBL08/MLFを使用
- 温度の非一様性 $\sim 0.1\%$
 - $P = \rho(x)RT(x)$
 - アンプの発熱に起因し、省電力ASICアンプを開発中
- 窒素のアウトガス $\sim 0.5\%$
 - 窒素の中性子吸収 $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ が ^3He 吸収反応のバックグラウンド
 - アウトガス要因を探すことによって根治が可能

まとめ

- ビッグバン元素合成理論において、中性子寿命は重要な役割を果たす

中性子寿命

バリオン密度

ビッグバン
元素合成理論

宇宙初期の軽元素の
比率を予言

He/Hについて 2σ の差

遠方天体を用いた観測値

中性子寿命測定の精度向上を通じて従来のビッグバン元素合成理論を超える
物理に迫ることができる

加速器を用いた新たな中性子寿命測定実験を考案し、
 $0(0.1\%)$ の精度を目指す

- 検出器として動作ガスに少量の ^3He を加えて封じきったTime Projection Chamberを使用
- TPCより短く、速度の揃った中性子バンチを生成
- 冷中性子がTPC内を飛行中に崩壊して発生する電子($0\sim 782\text{keV}$)を直接計数
- ^3He の中性子吸収反応を同時計測し、中性子フラックスをモニター

まとめ

$$\tau_n = \frac{1}{\rho\sigma_0 v_0} \left(\frac{S_n/\epsilon_n}{S_\beta/\epsilon_\beta} \right)$$

- 本研究では以下の4つの取り組みを通じ、粒子検出に伴う誤差をO(0.1%)に抑えた。

中性子バンチ化手法の開発

- パルス中性子源のTOF情報を最大限利用
- Spin Flip Chopperによる効率的なバンチ化
→ 0.1 decay /s の中性子崩壊レート

低バックグラウンド環境の実現

- 放射性物質の混入に留意した、PEEK材の選定
- 散乱中性子を吸収するための⁶Li板の設置
→ シグナルノイズ比~1を実現

解析アルゴリズムの確立

- ガス圧の変更やビームのON/OFFを駆使
- data drivenでのバックグラウンドの除去
→ 除去に伴う誤差を0.1%以下に抑えた

高検出効率TPCの開発

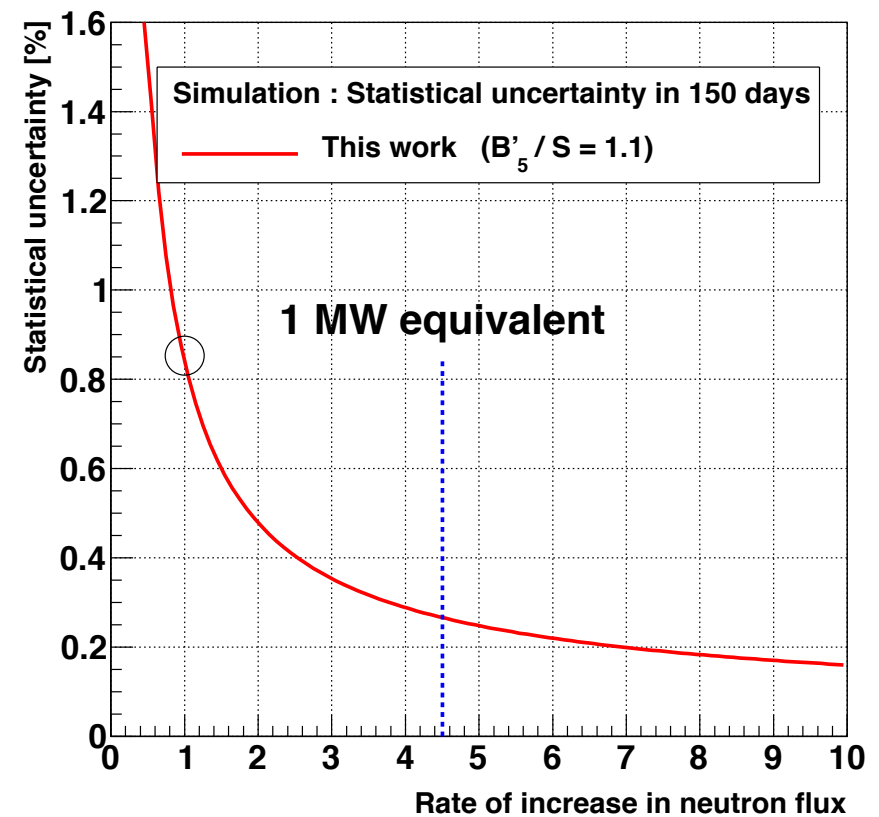
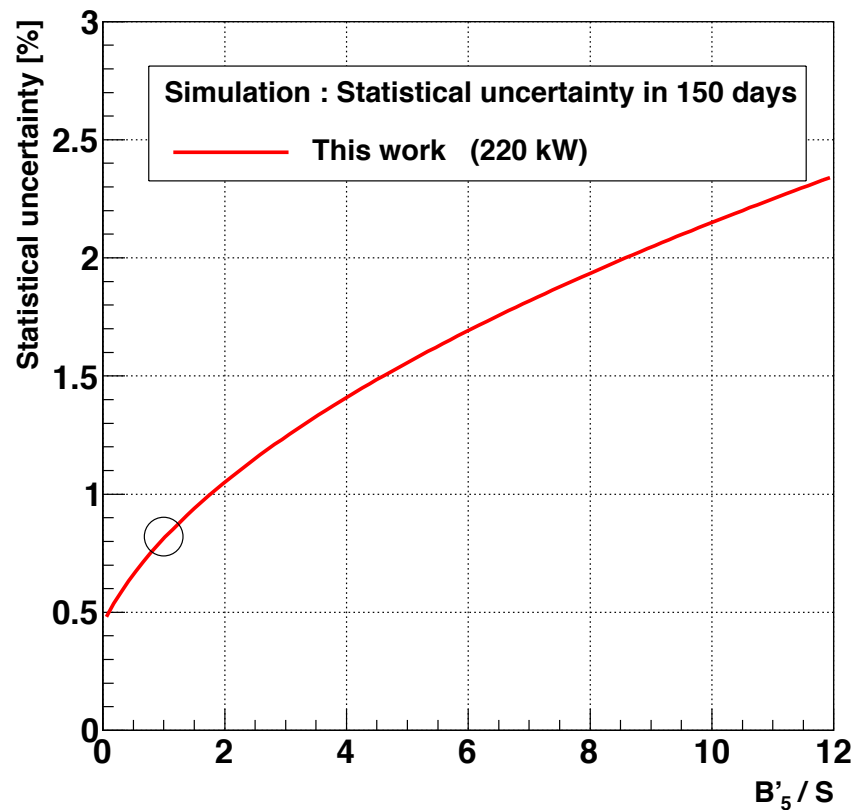
- 低いノイズレベルのアンプの作成
- 50~100kPaで99.9%以上の検出効率を実現
→ 補正に伴う誤差を0.13%に抑えた

**³Heの密度、中性子吸収断面積、温度の非一様性、窒素のアウトガスによる
系統誤差の低減を通じて、O(0.1%)の寿命決定が可能となる**

Backup

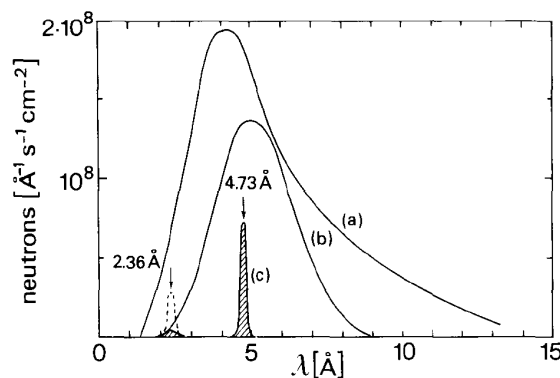
到達精度

- 作成したTPCを用いた150日の測定 ($B_e/S_\beta \sim 1$)
 - 220kWで0.8%の統計精度
 - 中性子フラックスが1 MW相当まで増強できると0.2%の統計精度

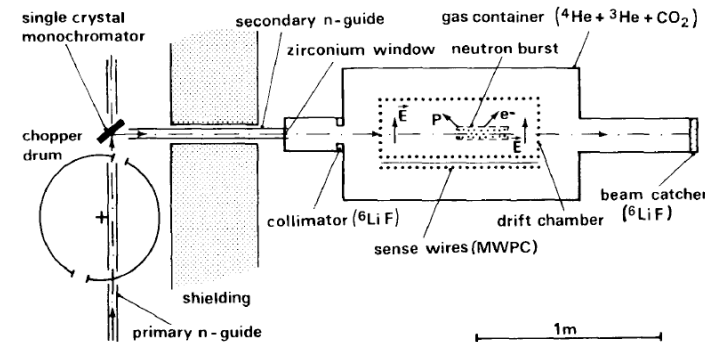


Kossakowski, 1989

- 原子炉からの直流中性子を使用
 - 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



- 課題
 - 低統計
 - 高バックグラウンド
 - 低検出効率
 - 単純なシグナル抽出



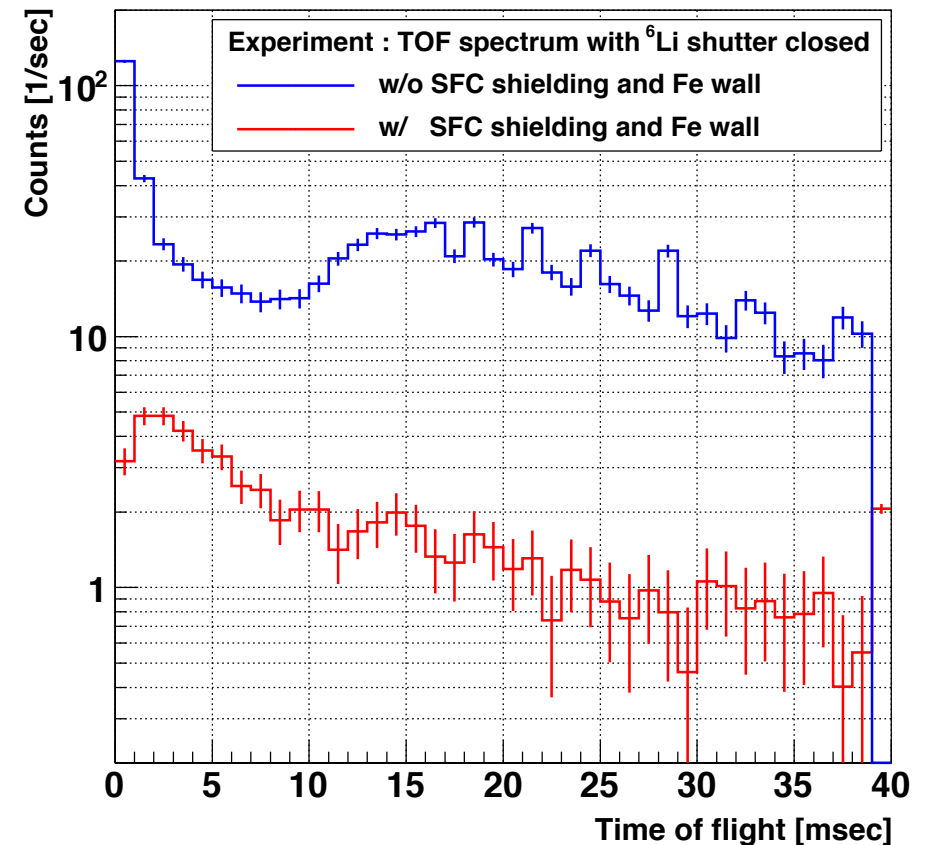
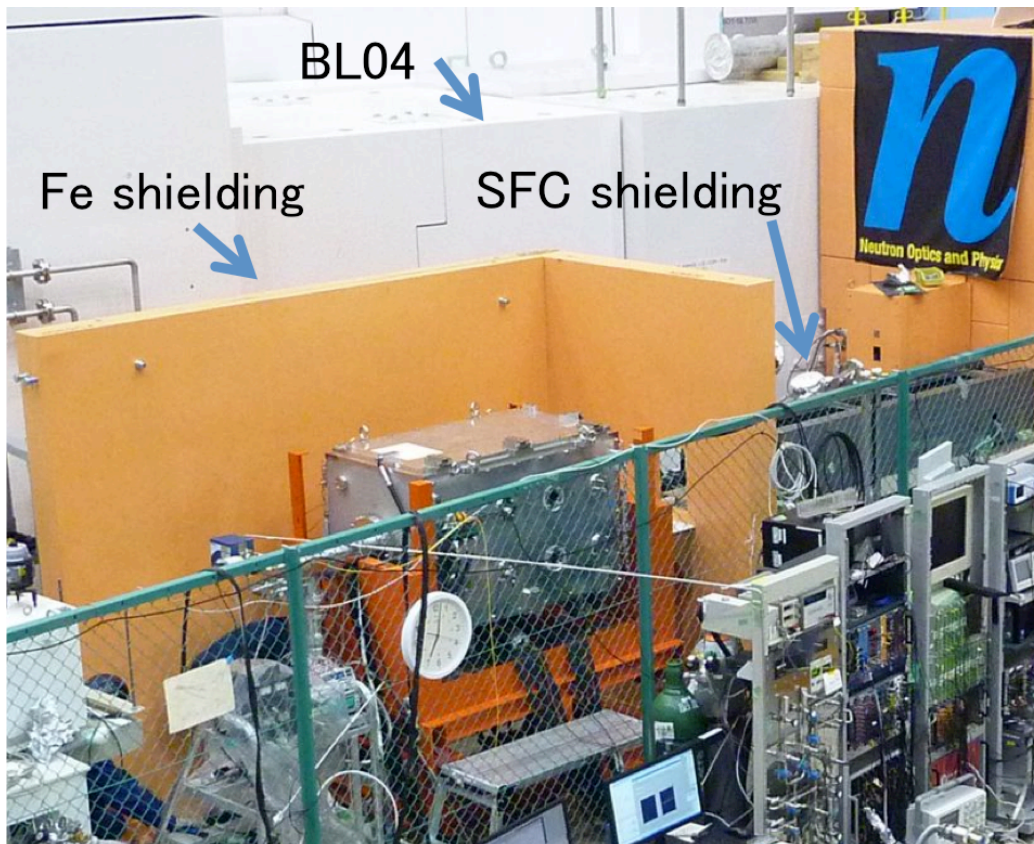
中性子の崩壊頻度 (S_β)	0.1 cps
中性子の ^3He 吸収頻度 (S_n)	1.8 cps
環境バックグラウンド (B_e)	80 cps
ビーム起因バックグラウンド (B_b)	20 cps
中性子崩壊に対する検出効率 (ε_β)	87.2%
中性子の ^3He 吸収に対する (ε_n)	99.4%
統計誤差 (34hours)	3.1%

duty factor
を考慮する
と2cps相当

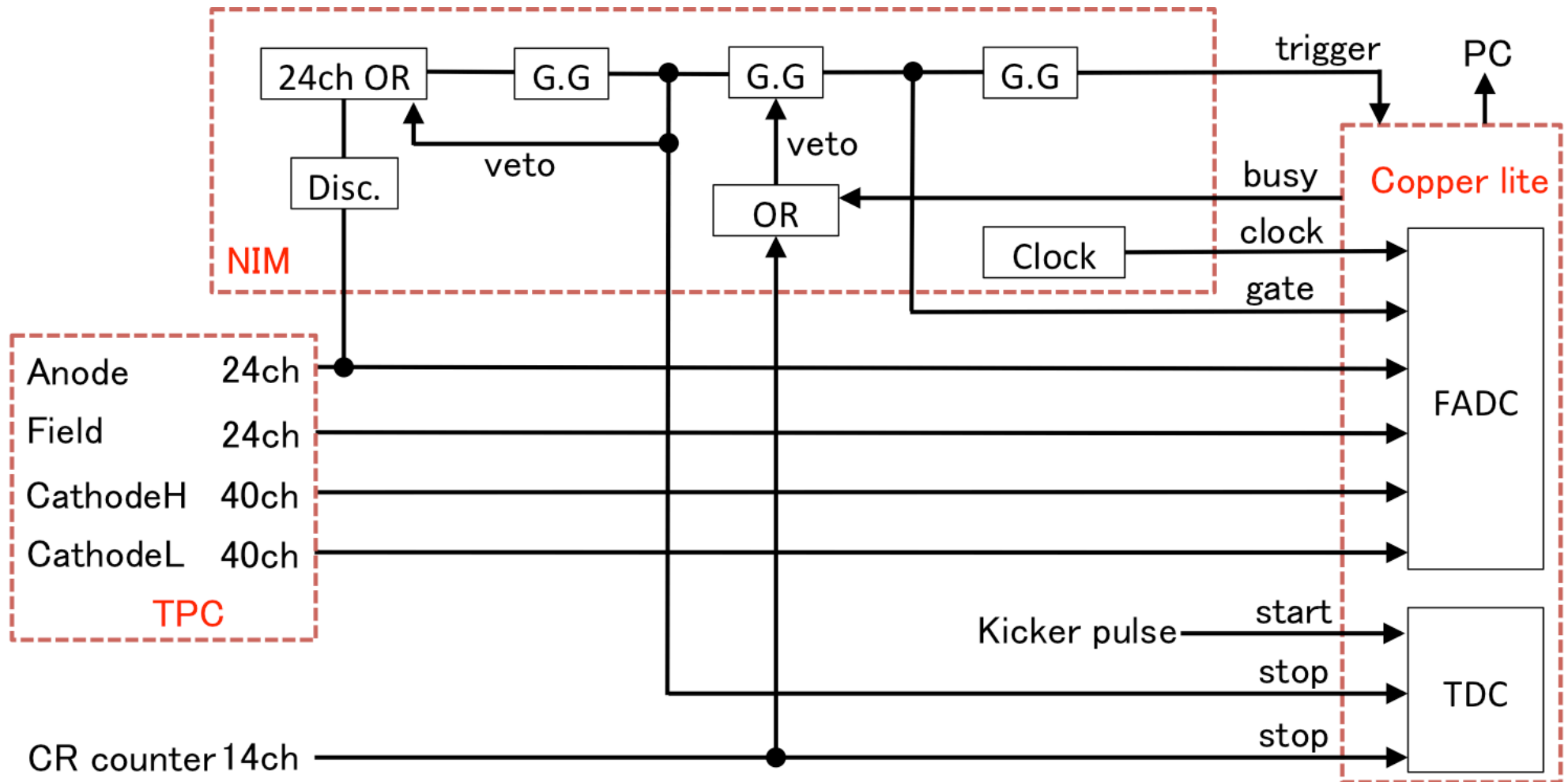
本研究：全く新しいアプローチによって上記の課題を克服する

TPC上流での中性子起因のBG抑制

- SFC遮蔽およびBL04遮蔽
 - 2cps まで減少
 - 環境放射線と同様のシグナルセレクション
 - B/S ~ 0.25



トリガー



中性子崩壊と ^{12}C 吸収反応の分離

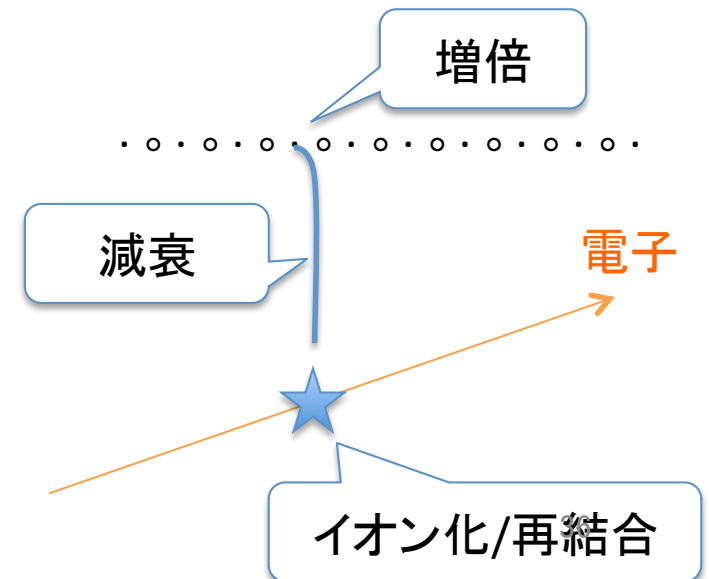
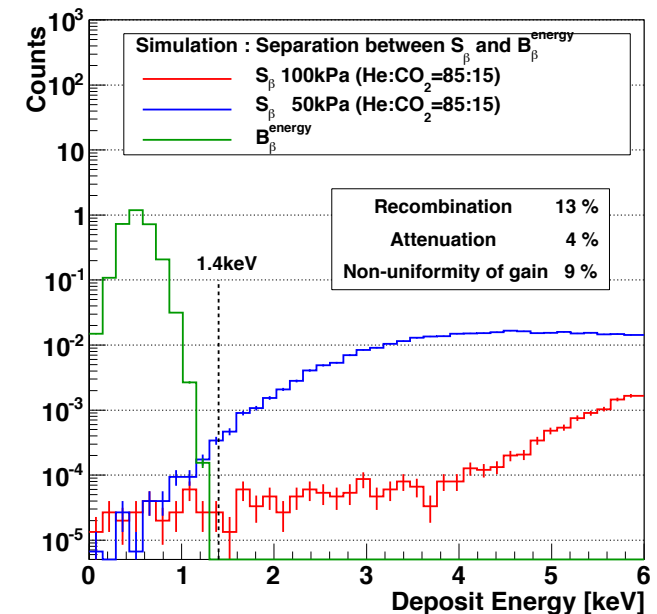
- 減圧による寄与

- 飛程が伸びる
- TPCを抜ける電子が落とすエネルギーが減る

$$\text{Output} \propto \frac{E}{W} \times (1 - R) \times \{1 - A(y)\} \times G$$

- エネルギー分解能に寄与するパラメーター

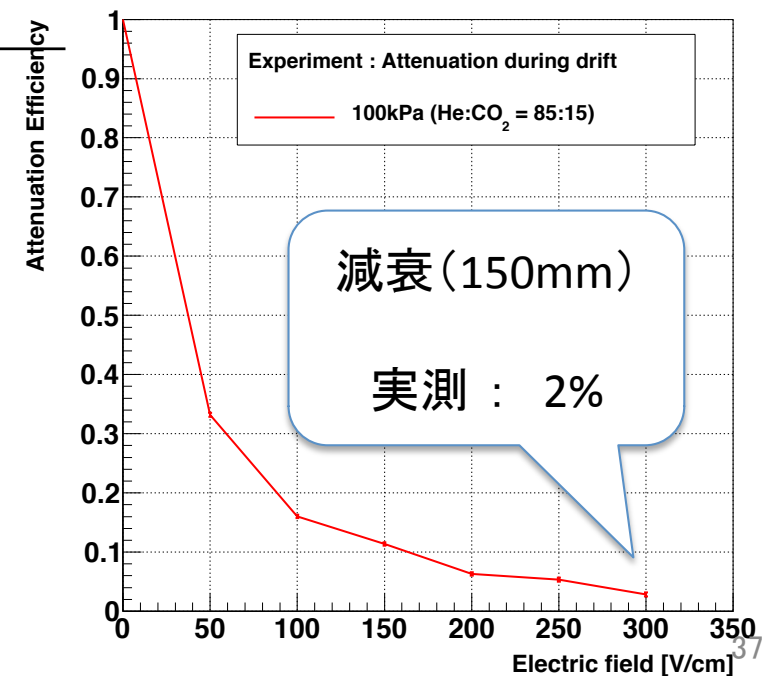
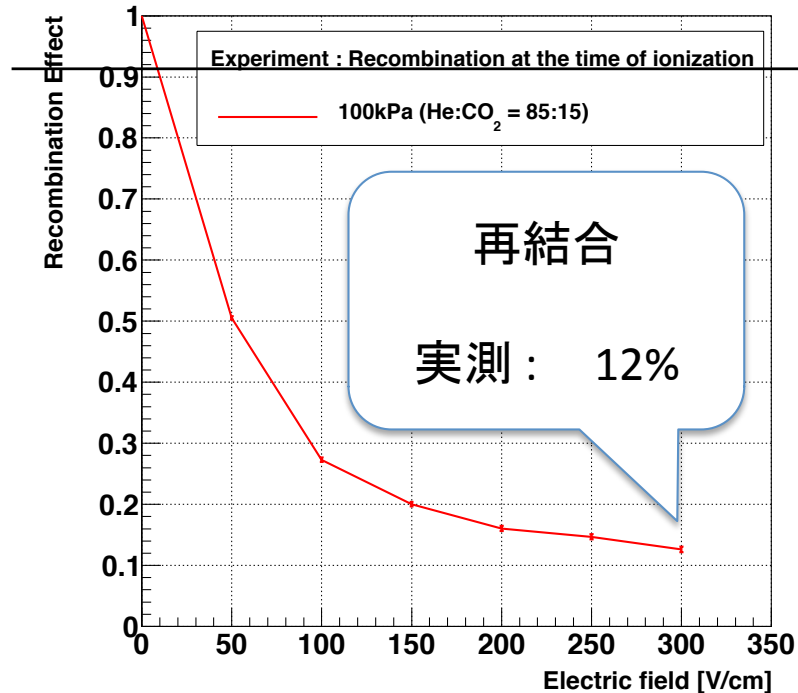
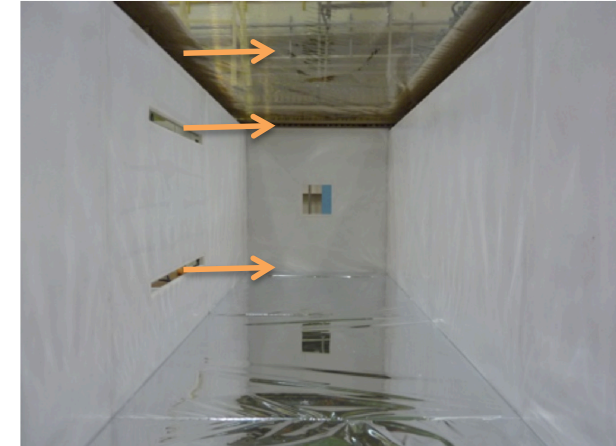
- イオン化時の再結合
- ドリフト中の減衰
- 増倍の非一様性



中性子崩壊と ^{12}C 吸収反応の分離

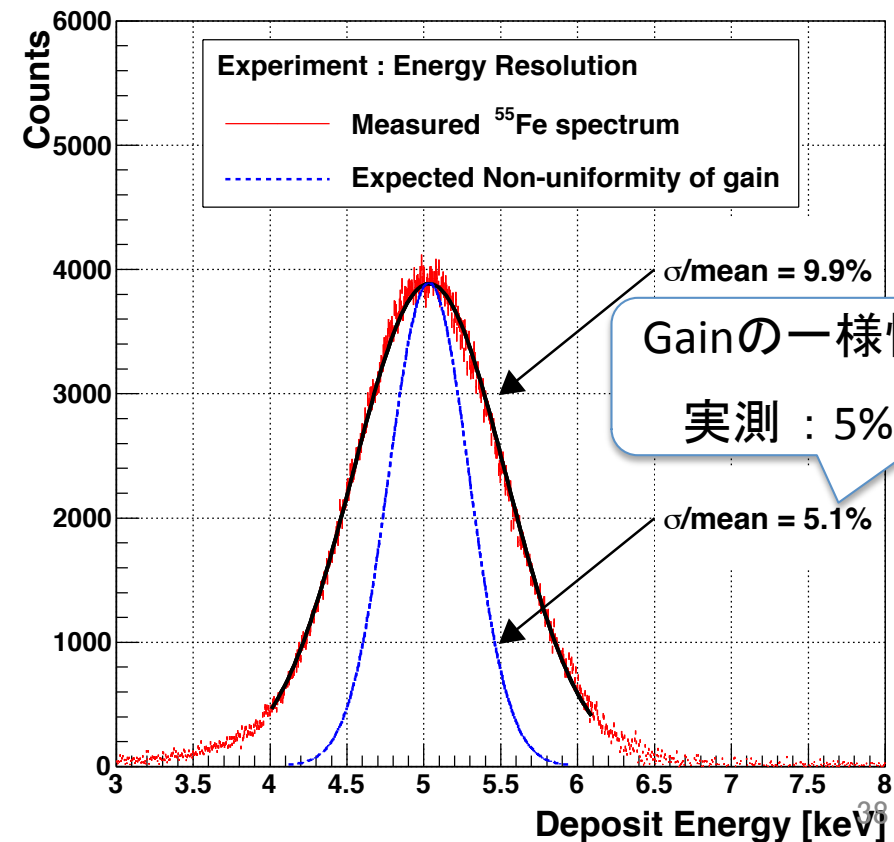
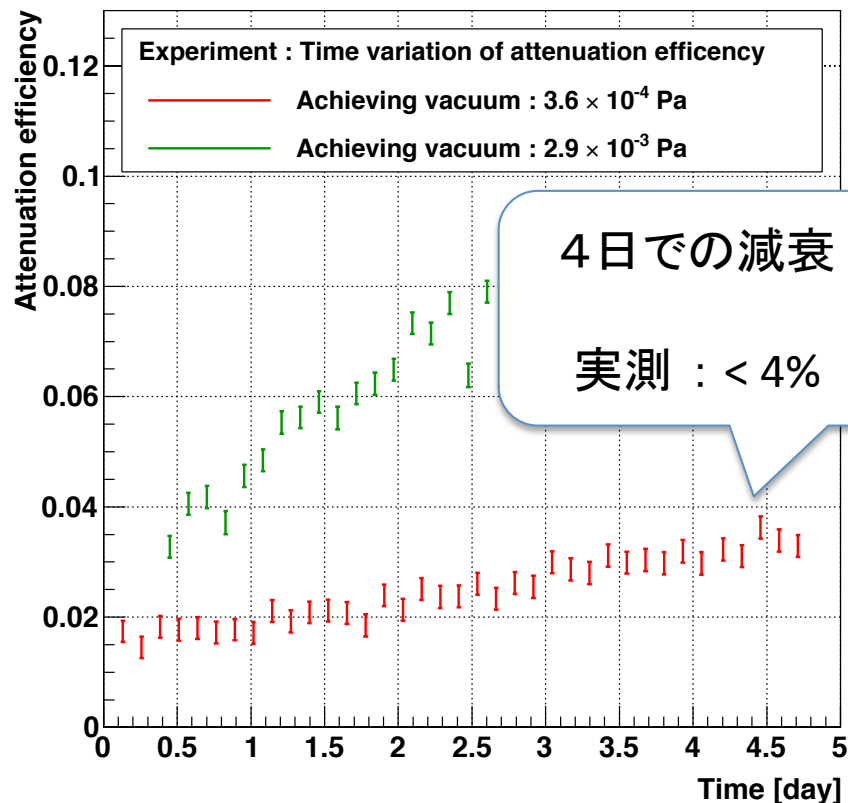
- X線源(5.9keV)を3箇所置いて評価

	再結合	減衰
MWPC部	なし	0 mm
Drift部(上)	あり	75 mm
Drift部(下)	あり	225 mm



中性子崩壊と ^{12}C 吸収反応の分離

- 減衰の時間変化
 - 封じきりに伴うアウトガスによる劣化を評価
- Gainの一様性
 - 5.9 keVに対する応答から、再結合、減衰の寄与を引いて評価



^3He 吸収反応の分離

- 飛程 (^3He 吸収反応の飛程は5cm)
 - 10cm以上の飛程を持つイベントを除去
- dE/dx
 - ワイヤーごとの出力で最大エネルギー
 - 35 keVの閾値で99.9%以上の ^3He 吸収反応が選択

