

Rn背景事象低減のための 液体キセノン密閉容器の開発

藤川皓生(名大理)、風間慎吾(名大ISEE,KMI)、
小林雅俊(名大KMI)、伊藤好孝(東大ICRR)、
宮田瑠太(名大理)、石丸歩夢(名大理)

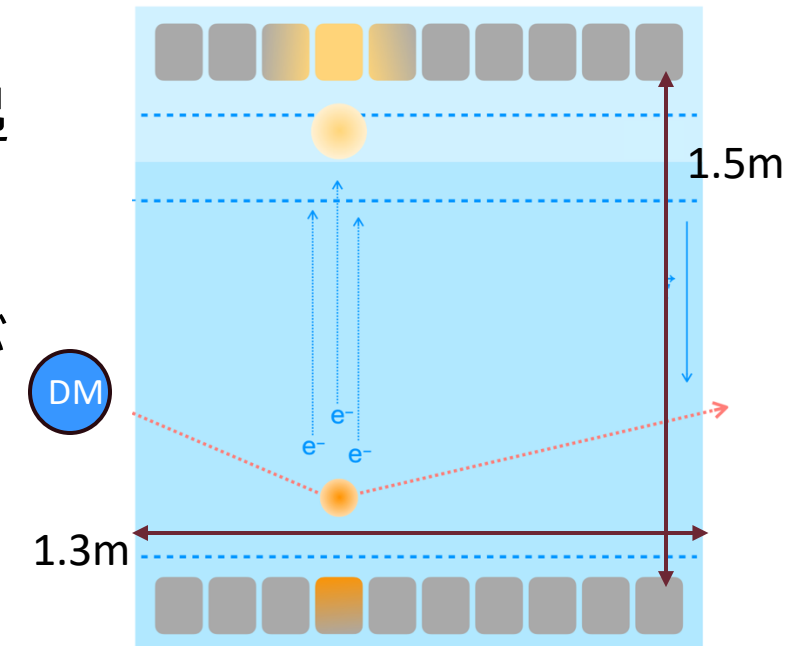
➤ 研究動機

➤ 常温ガスキセノン下でのRn遮蔽能力試験

➤ 液体キセノン下でのRn遮蔽能力試験に向けての取り組み

暗黒物質直接探索

- 暗黒物質：重力に基づく様々な観測から存在しなければ説明できない事象が報告されているが、性質が分からない未発見の物質
 - 暗黒物質の候補の質量は $10^{-55} \sim 10^{40}$ gと非常に幅広い。
 - 有力な候補の一つが弱く相互作用するGeV ~ TeV程度の質量を持つ素粒子 (WIMPs)
- 直接探索：暗黒物質が極稀に標的原子核と弾性散乱を起こし、発生する光と電子を観測する手法
- XENONnT実験：液体キセノンを用いた実験が暗黒物質と核子との散乱断面積に対して世界で最も厳しい制限を与えている



XLZD実験

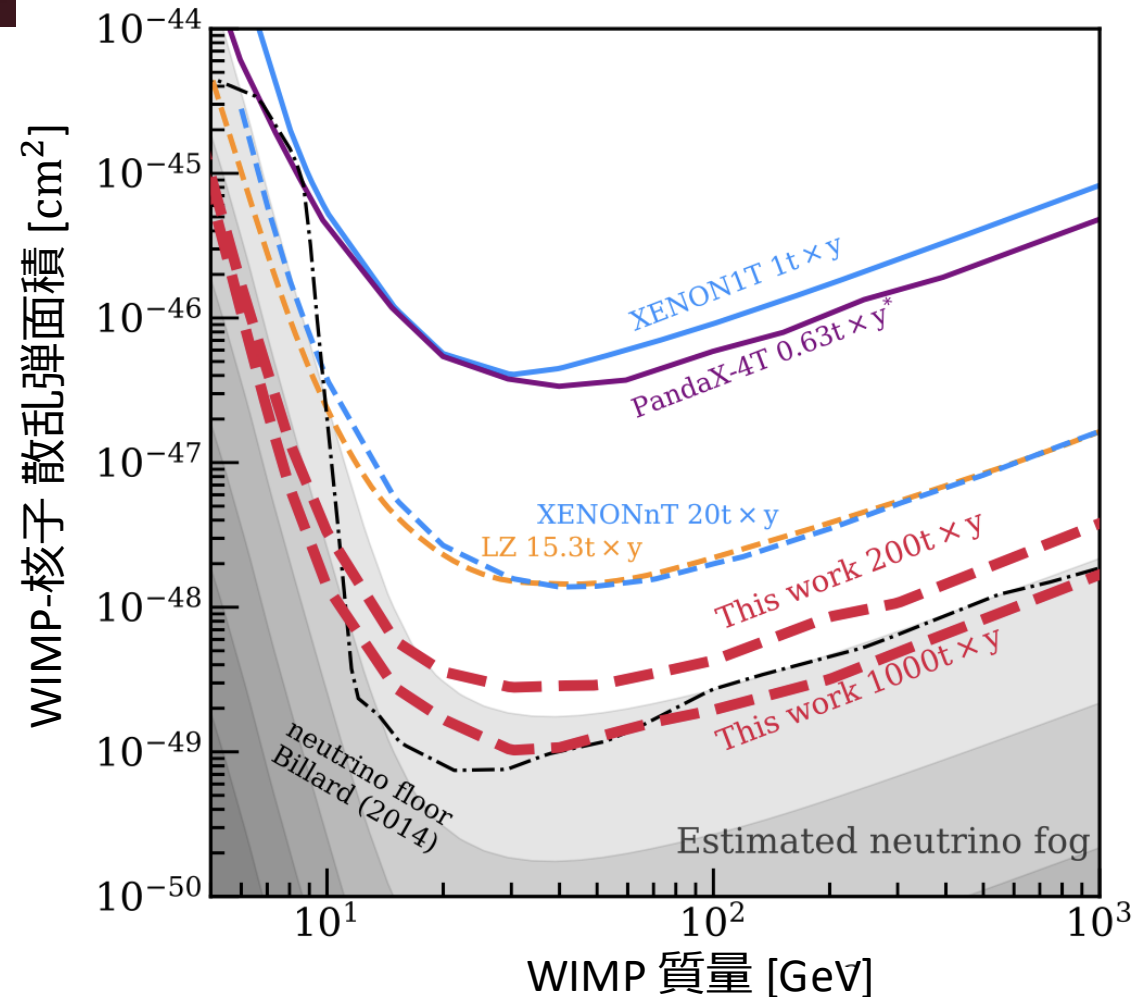
➤ XLZD実験：暗黒物質探索の将来実験

- WIMPsに対する目標散乱弾面積 $\sim 10^{-49} \text{cm}^2$
- 太陽・大気ニュートリノの信号が背景事象として支配的となる領域までを探索予定

	XENONnT実験	XLZD実験
観測年	2020-現在	2030代-
Xe総質量[トン]	8.5	50
WIMPs感度[cm^2]	$\sim 10^{-48}$	$\sim 10^{-49}$

➤ 背景事象：放射性物質の崩壊によって出る信号

- ^{222}Rn の娘核 ^{214}Pb の β 崩壊が支配的
- ^{222}Rn は検出器部材表面から常時湧き出す



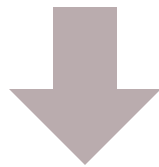
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 50 (2023) 013001

背景事象の低減

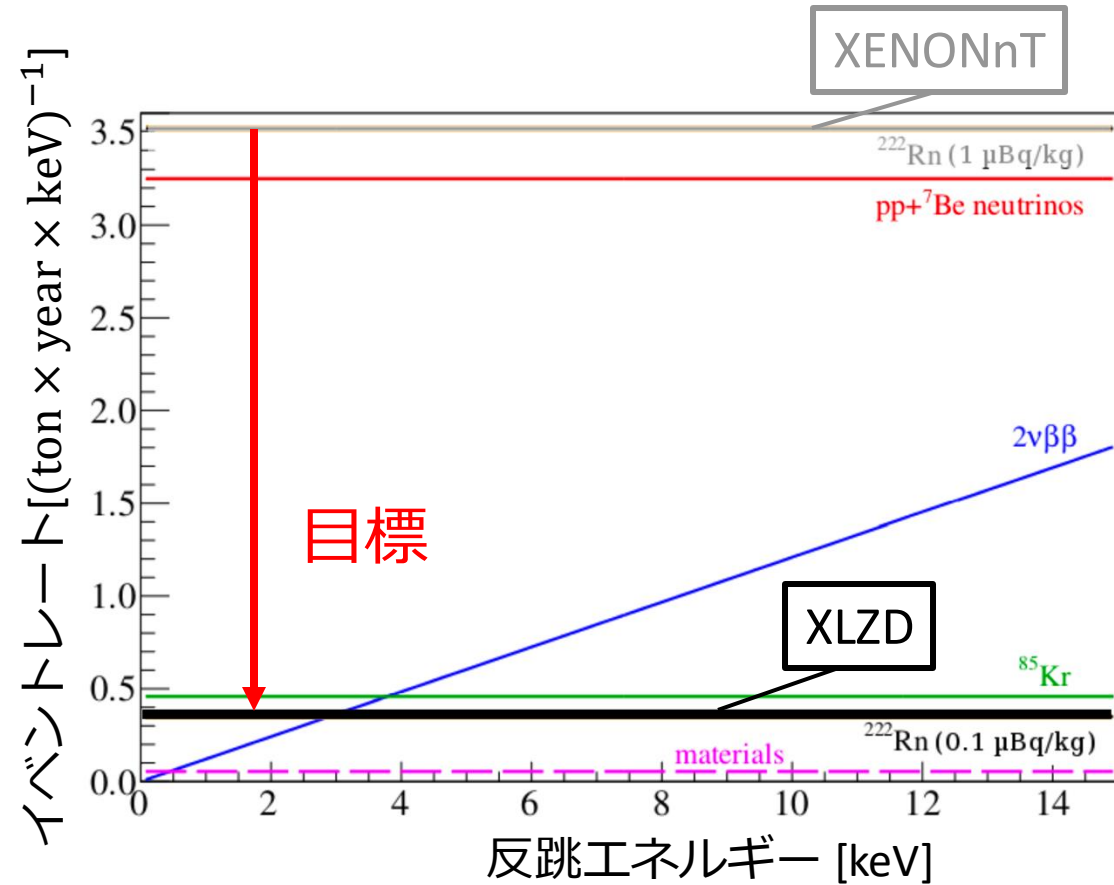
- XLZD実験では太陽・大気ニュートリノが主要な背景事象となる領域を目標とする
 - ^{222}Rn の目標崩壊頻度はXENONnT実験の**10%**である

	XENONnT実験	XLZD実験
Rn崩壊頻度の目標値[$\mu\text{Bq/kg}$]	1	0.1

- 検出器内の容積を大きくすることで検出器表面の増加分より、キセノンの体積が増えるため ^{222}Rn の崩壊頻度を低減することができる
- しかし、それだけではXLZD実験の目標崩壊頻度には到達しない

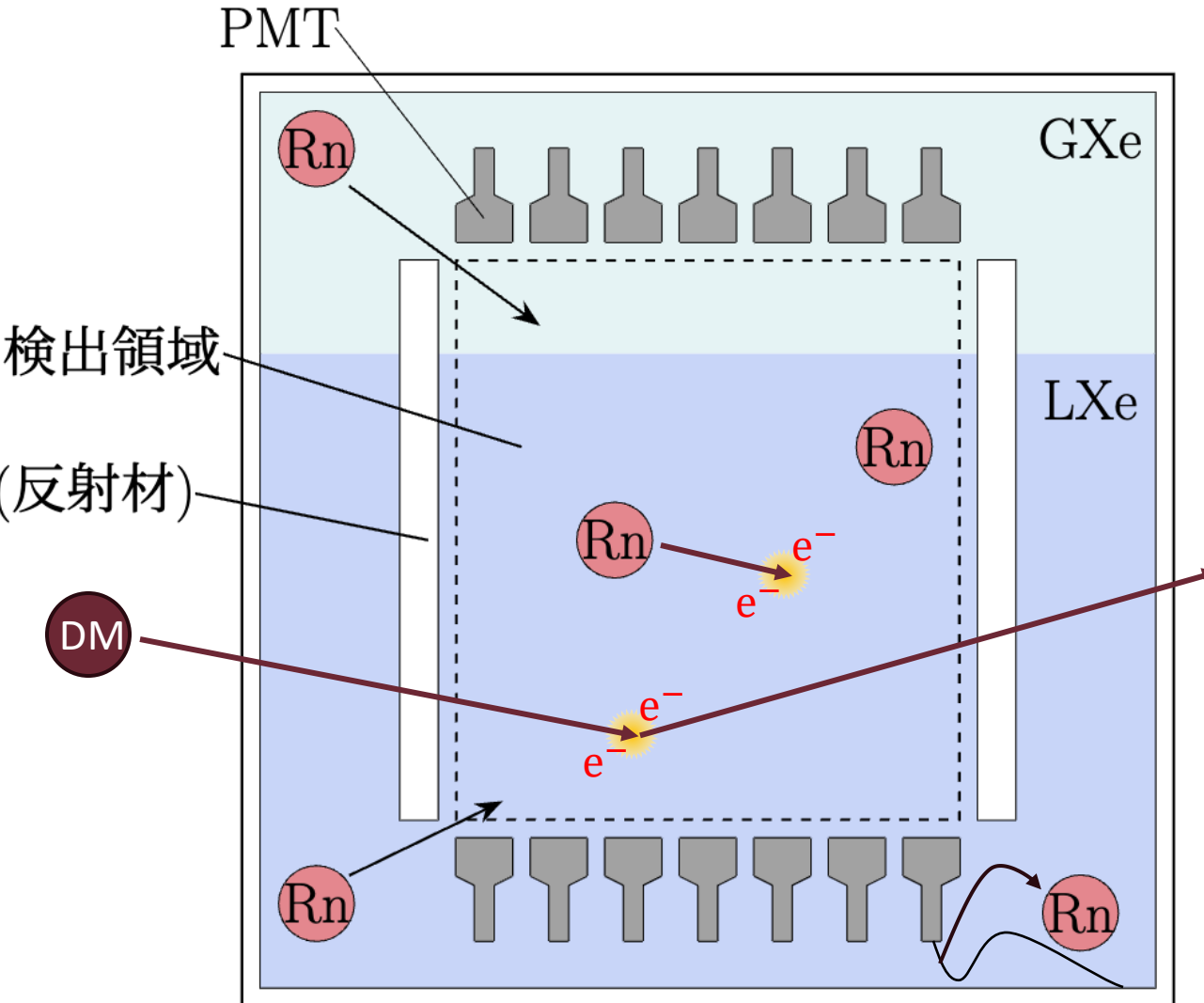


- 新たな ^{222}Rn 背景事象を低減する手法が必要である



現行検出器

- 1. ^{222}Rn が、検出器部材表面や、PMTのケーブルなどから常時アウトガスのように湧き出す。
- 2. PMTや反射材の隙間から検出領域内に ^{222}Rn が混入する
- 3. 検出領域内で ^{222}Rn が崩壊し、背景事象を起こす

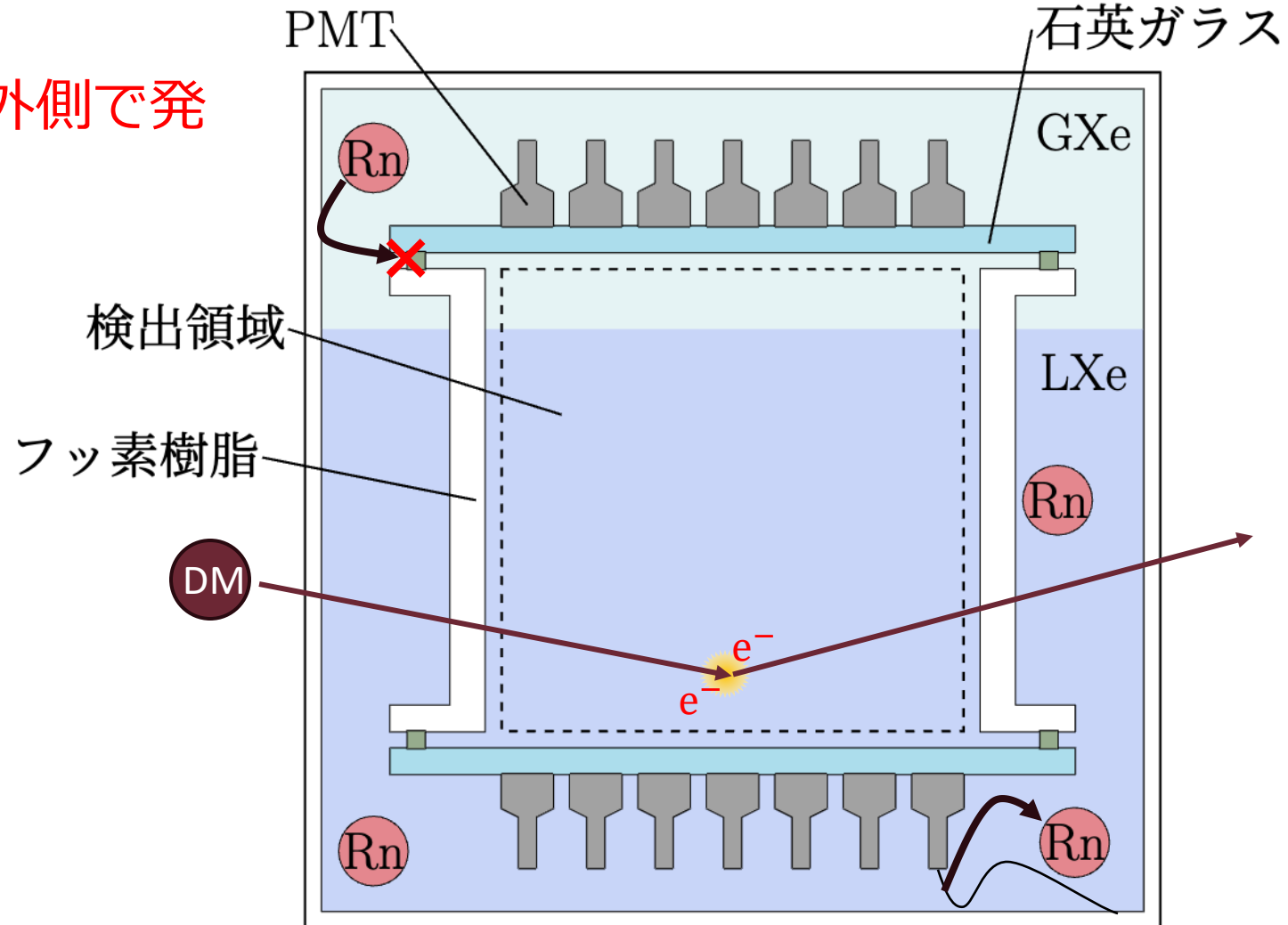


密閉型検出器

➤ 検出領域を密閉することで、容器外側で発生した ^{222}Rn の侵入を防止

➤ 密閉型検出器の満たすべき条件

- 密閉容器の ^{222}Rn の湧き出しが少ないこと
- PMTに接する窓面は、シンチレーション光($\lambda = 175\text{nm}$)を透過すること

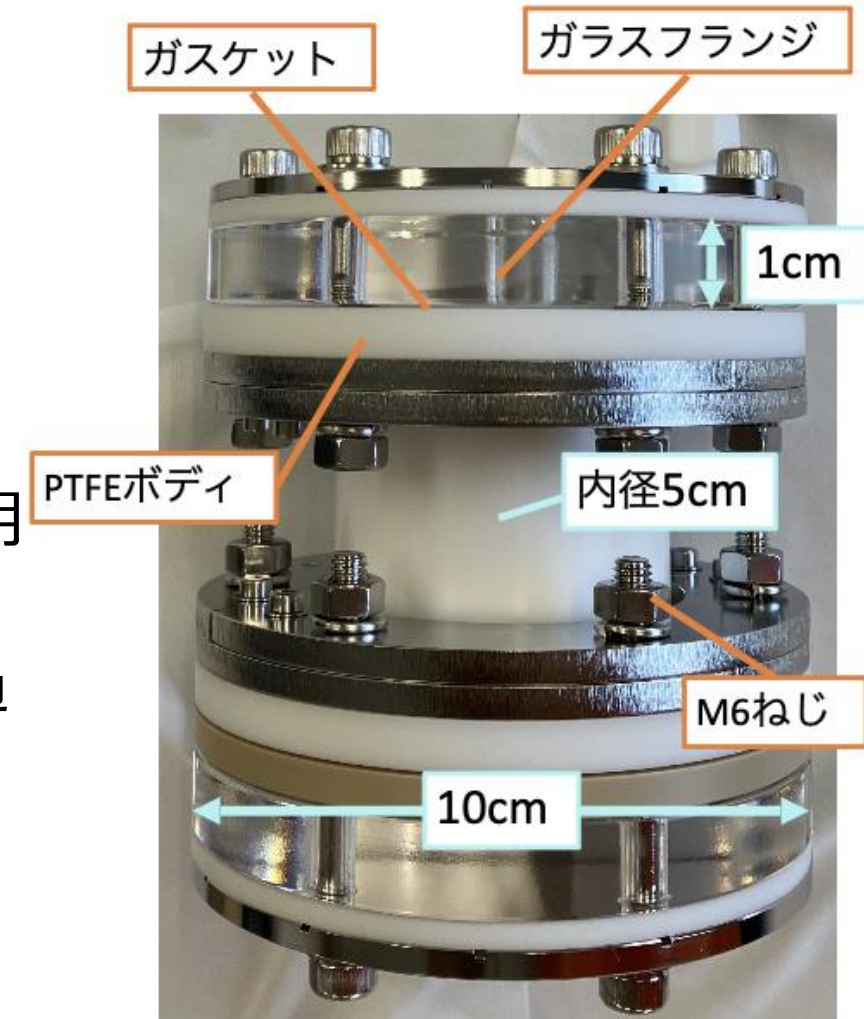


小型密閉容器

密閉型検出器のプロトタイプとして名古屋グループは小型密閉容器を開発した

➤密閉容器

- 検出領域の体積は約0.1L(XLZD実験の2万分の1)
- ボディをフッ素樹脂(PTFE)、窓面を石英ガラスを使用
- フッ素樹脂、石英ガラス共に低放射性物質
- 約1cmの石英ガラスは波長175nmの光を80%程度透過する
- 石英ガラスとPTFEボディをフランジの間にシール材を挟み、真空容器の要領で密閉



- 研究動機
- 常温ガスキセノン下でのRn遮蔽能力試験
- 液体キセノン下でのRn遮蔽能力試験に向けての取り組み

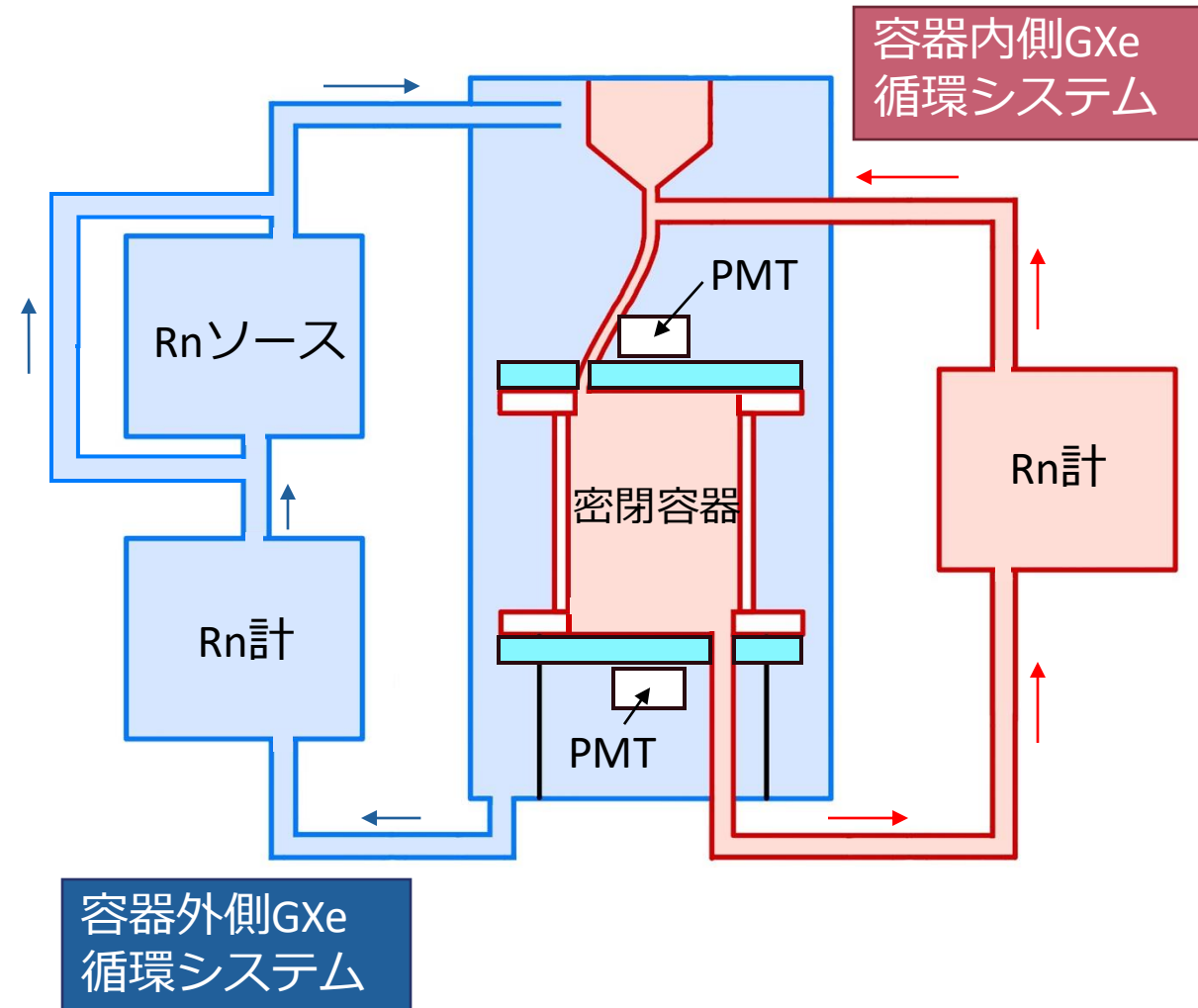
常温GXeを用いたRn遮蔽能力試験(概要)

- 密閉容器外側と内側のRn崩壊頻度を測定し、密閉容器のRn遮蔽能力を評価する
- 外側にRnソースを設置することで、密閉容器外側のRn濃度を上昇させる
 - 有限のリークが僅かでもあれば、外側から内側へわずかにRnが漏れ密閉容器内側に流入する
- 密閉容器の内側と外側にそれぞれに循環経路を配置

➤ 外側のRn濃度
Rn計で測定

➤ 内側のRn濃度
• Rn計で測定
• PMTで測定

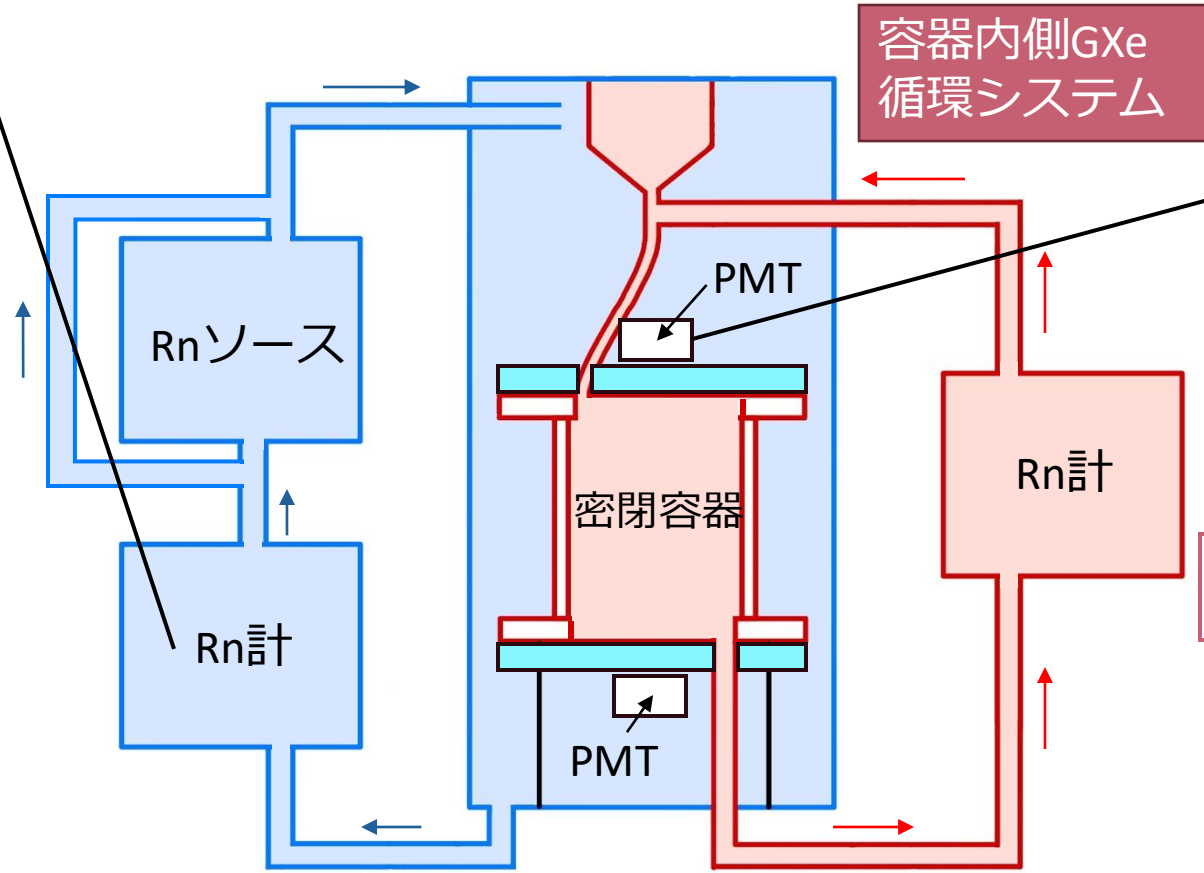
本発表ではRn計のみのデータを扱う



常温GXeを用いたRn遮蔽能力試験(測定系)

Rn計

- Rnの娘核であるイオン下されたPoを測定する
- Rn計内に電場をかけてPoをフォトダイオードに吸着させPoの崩壊によって生じる α 線を測定



容器外側Gxe循環システム

容器内側Gxe循環システム

内側外側をそれぞれ独立で純化装置、ポンプ用いて常時循環させる

PMT

- 上面に4本、下面に1本設置
- Rnの崩壊による光をPMTを用いて測定



密閉容器

下側 PMT

常温GXeを用いたRn遮蔽能力試験(測定系)

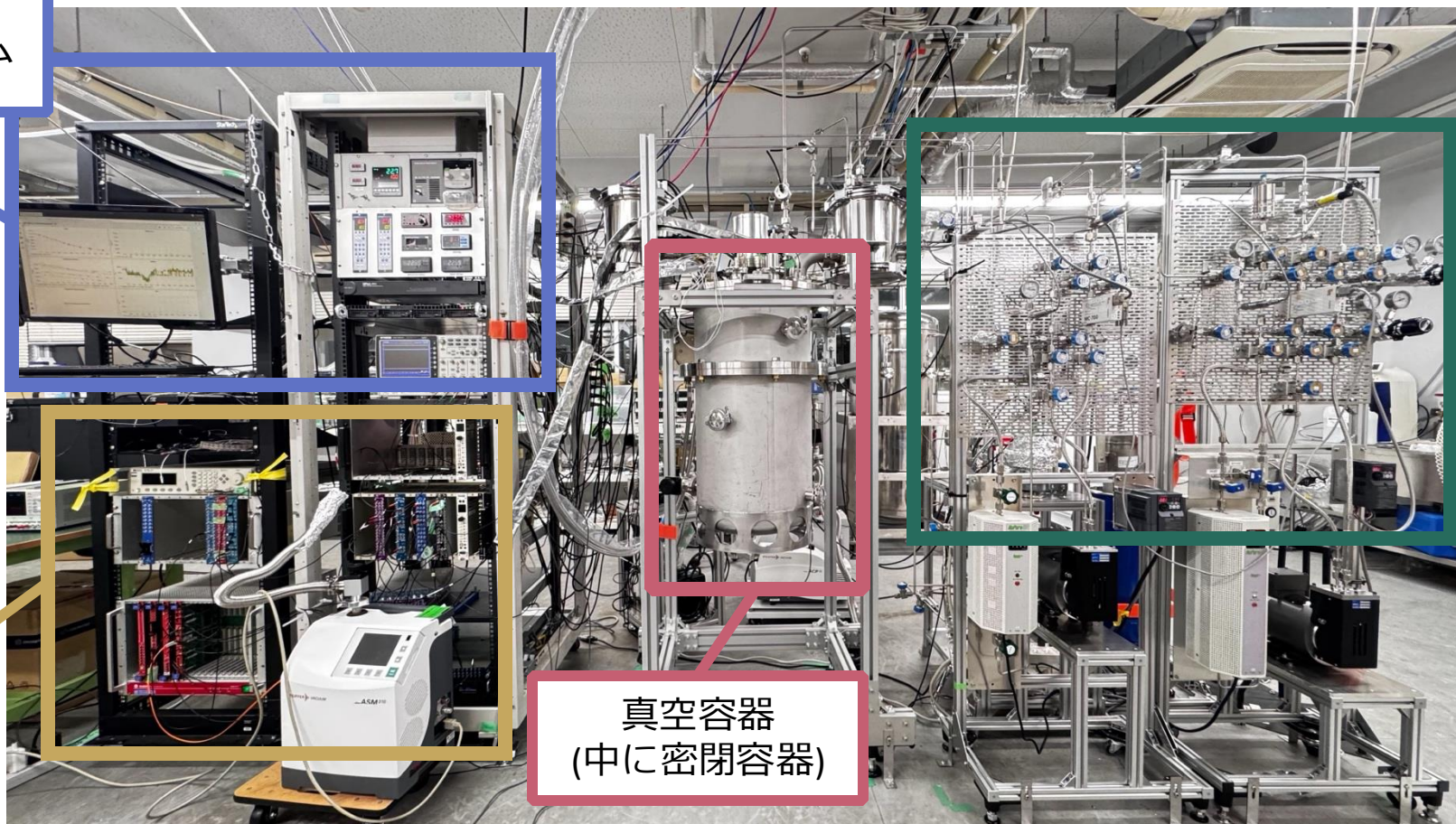
11/18

モニタリングシステム

循環系
(ポンプ、純化装置、
流量計など)

データ取得回路

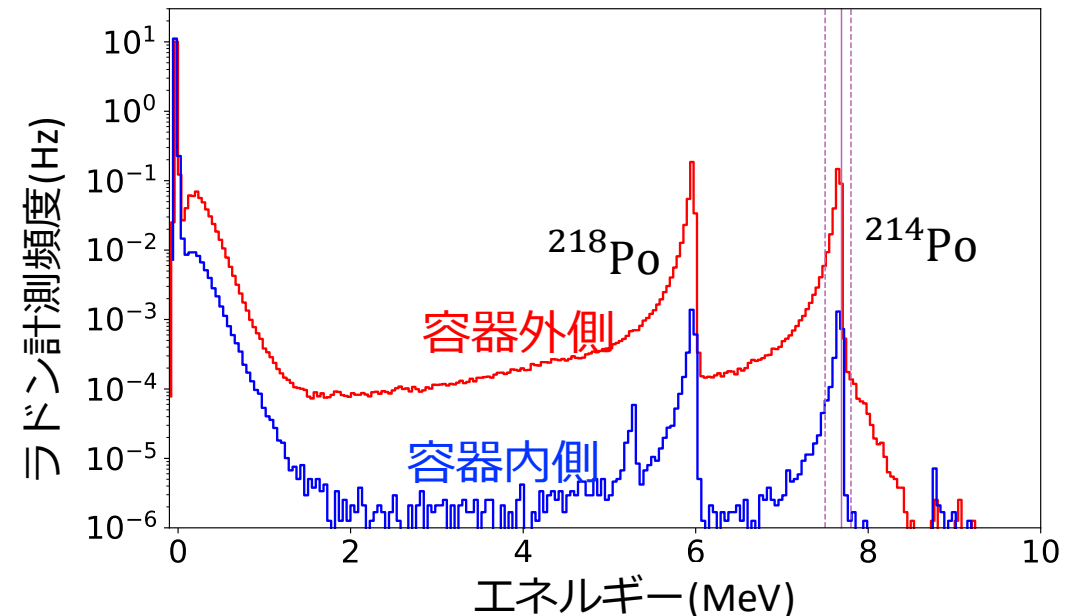
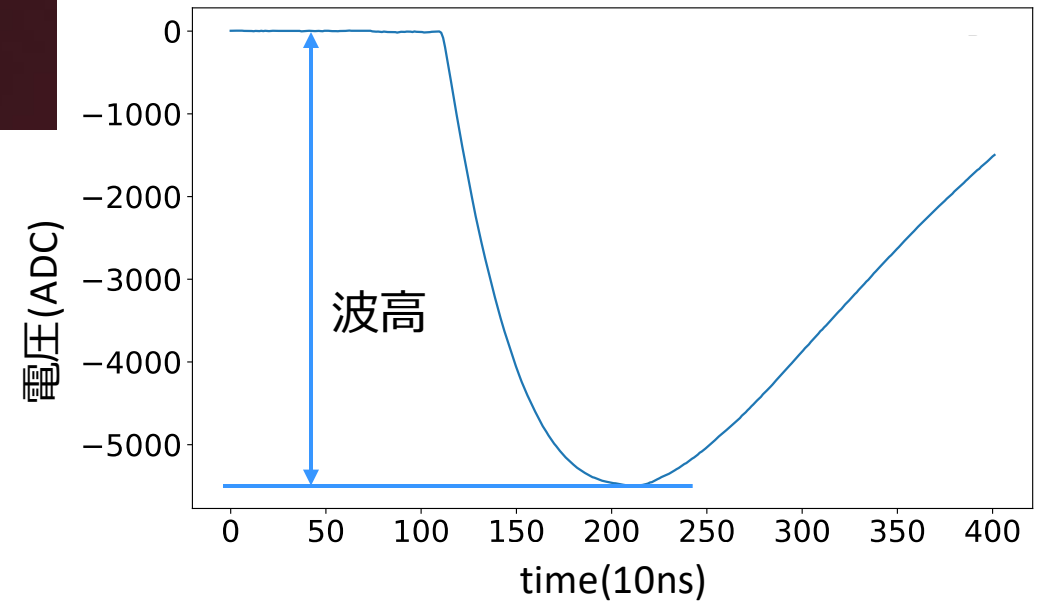
真空容器
(中に密閉容器)



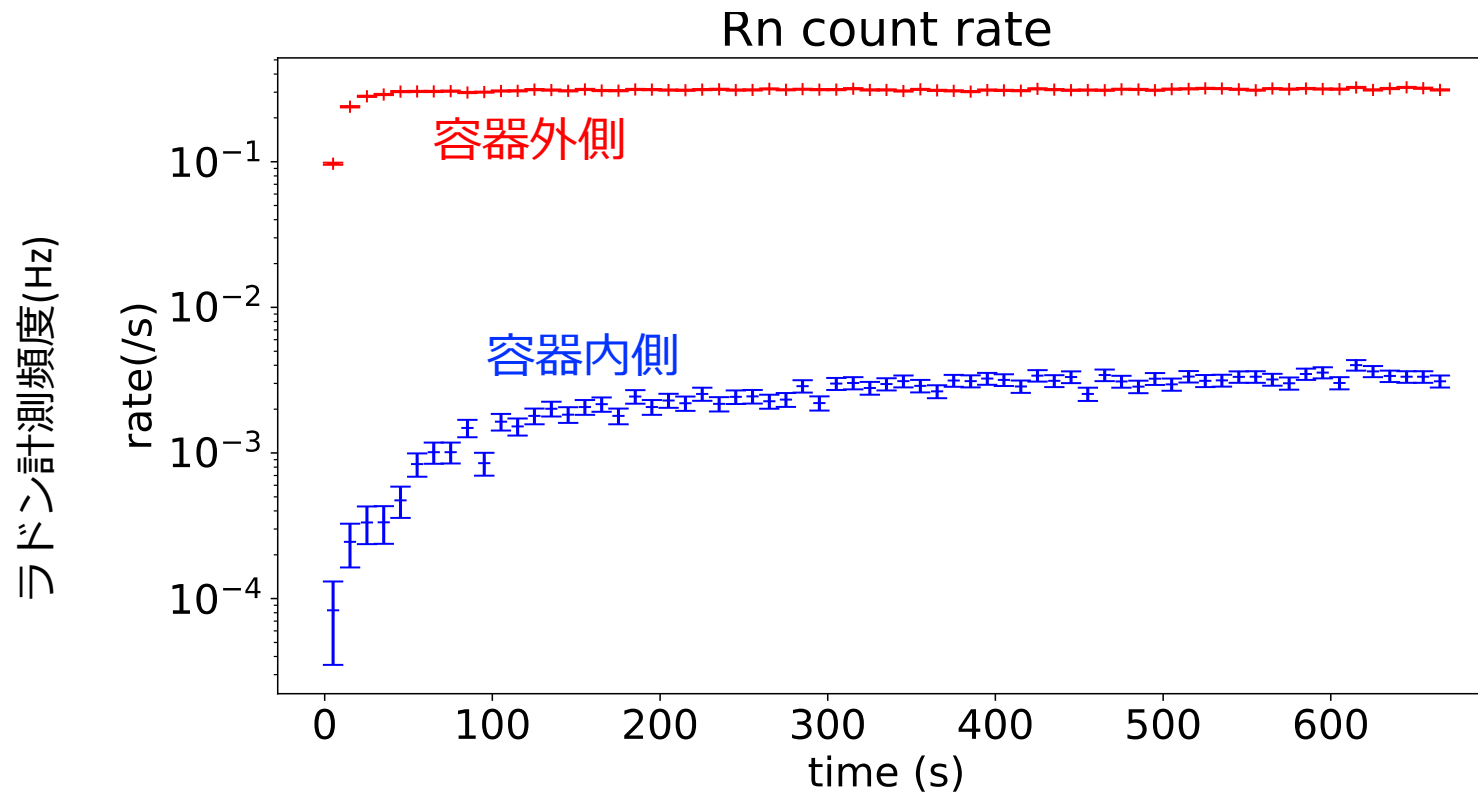
Rnの崩壊頻度の測定結果

➤ Rnソースを解放してから～630hの測定を行った

1. Rn計で読み取った波形の波高値 \propto エネルギー
2. Rnの娘核である ^{214}Po の崩壊のピーク部分を積分し、イベント数を計測する
3. 外側と内側のイベント数の時間推移を計測する



Rnの崩壊頻度の測定結果

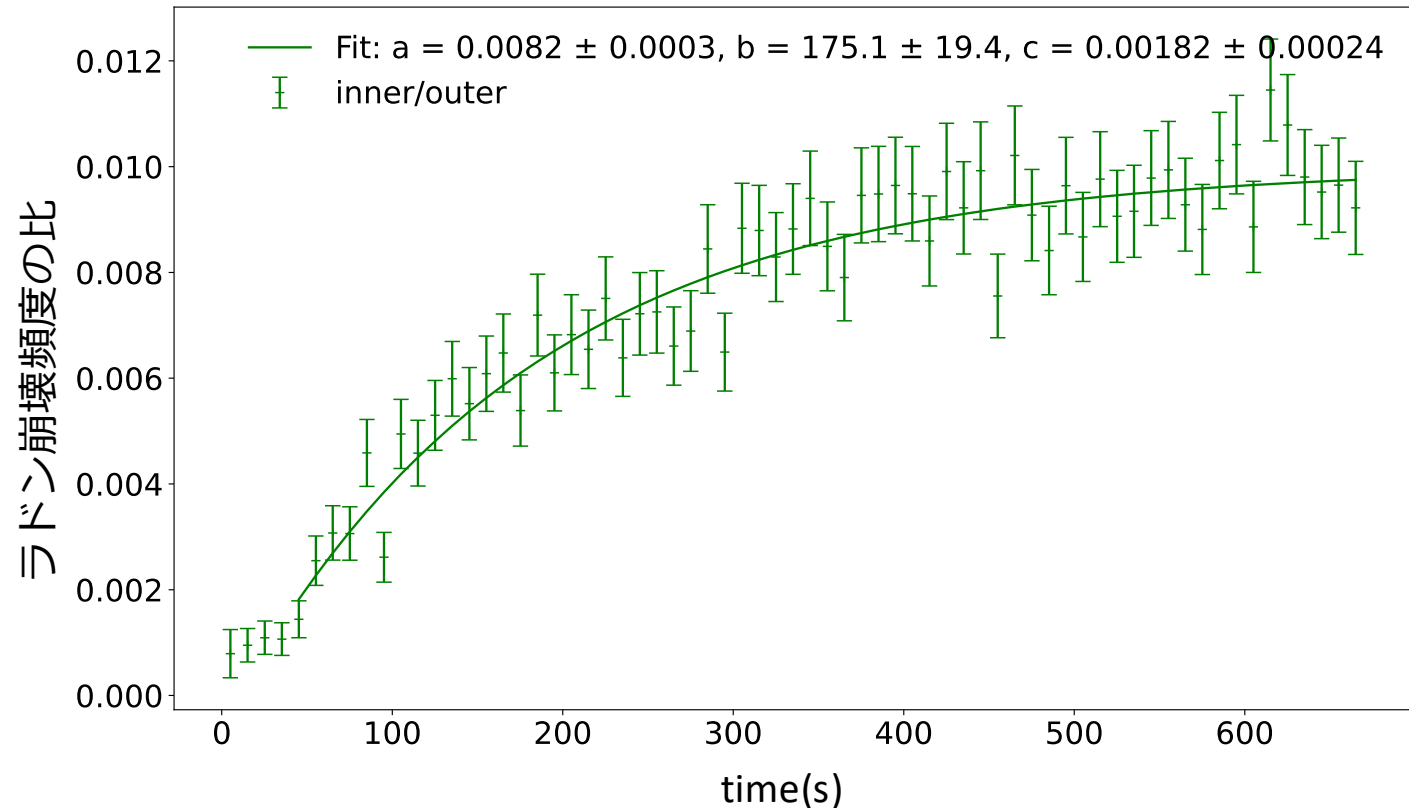


- 外側はRnソース解放後40時間後には測定頻度が一定となる
- 内側の計測頻度は外側の計測頻度と比べて少なく、約1%程度であり、遮蔽できていることがわかる

Rnの崩壊頻度の時間推移

- Rn濃度比 C は、 $1 - \exp(-t)$ で変化する。
- 外側Rn計が一定となる40時間以降のデータ用い、以下の式でフィッティングを行った

$$R = a \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{b}\right) \right] + c$$
- $t = \infty$ で崩壊頻度比は $(1.0 \pm 0.04) \times 10^{-2}$ となった
- 崩壊頻度の比が100分の1以下を達成した



本実験から予測されるXLZD実験でのRn遮蔽能力

▶大型化によるリークレートの増加

- ・リークの主な要因がシール材であると仮定する
→リークレートはシール材の長さに比例

	リークレート	Rn湧き出し量	XLZD実験
大型化による変化	200倍	3倍	2×10^6 倍
要因	シール材の長さの増加	検出器部材の増加	
Rn遮蔽能力	反比例	反比例	比例

▶XLZD実験での密閉容器内側のRn崩壊頻度は最大で $4 \times 10^{-3} \mu\text{Bq}/\text{kg}$

→XLZD実験の目標値である、 $1 \times 10^{-1} \mu\text{Bq}/\text{kg}$ を達成

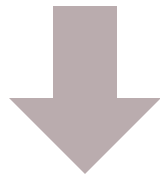
➤研究動機

➤常温ガスキセノン下でのRn遮蔽能力試験

➤液体キセノン下でのRn遮蔽能力試験に向けての取り組み

液体キセノン試験

- ガスキセノン下での遮蔽能力試験から、小型密閉容器は崩壊頻度の比が1/100以下となることが分かった。
- XLZD実験は液体キセノンを用いた暗黒物質探索である
- 液体キセノンは-95℃であるため、検出器部材が熱収縮により密閉性が悪化し、遮蔽能力が低下する可能性がある



- 液体キセノン下での遮蔽能力の測定を行う

液体キセノン試験

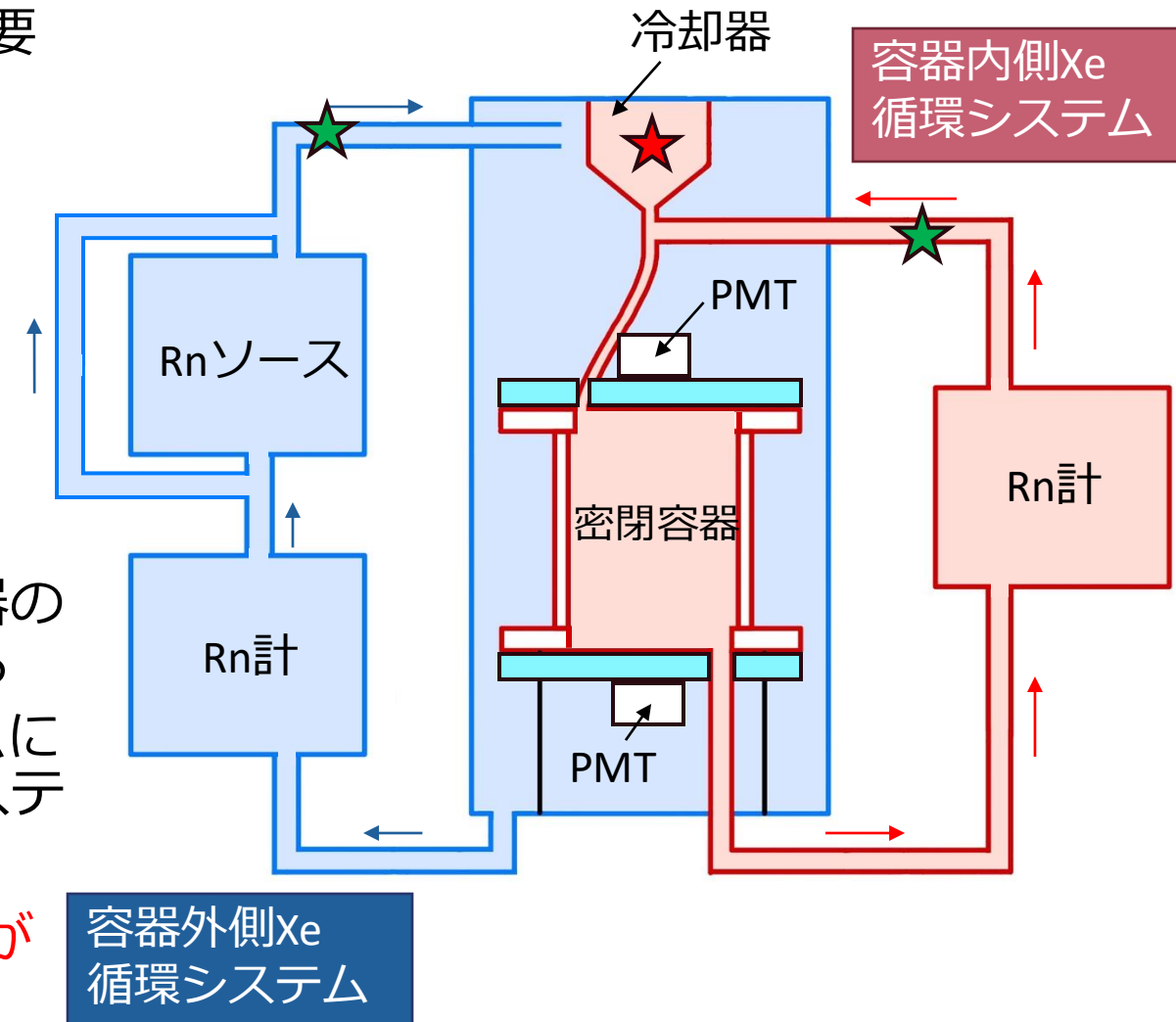
- ▶ 液体キセノンは -95°C で液化するため常に冷却が必要
- ▶ 気化すると体積は500倍となる
- 約700Lの液体キセノンを使用するため危険

圧力や温度をモニターする必要がある

▶ 作成したシステム

- 圧力が上昇した時アラートをSMSに送信
- ★ 循環システム内の圧力が上昇すると、冷却器の周りに液体窒素を導入することで圧力を下げる
- ★ 500Lの容積の真空タンクを接続循環システムに接続。圧力が上昇すると自動的に弁が開くシステムを構築

長期的に無人環境下での液体キセノンを用いた試験が可能

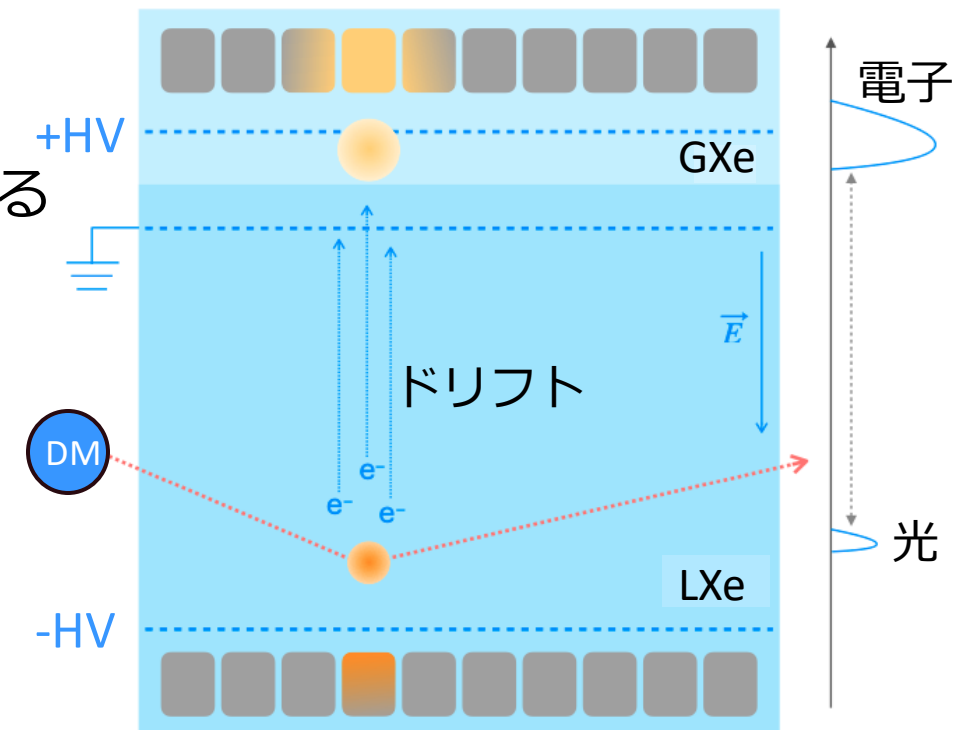


まとめ

- 暗黒物質の将来実験であるXLZD実験では、Rn由来の背景事象を低減する必要がある
- 小型密閉容器を用いてガスキセノン下でRn遮蔽能力試験を行ったところ、容器外と内との濃度比が $(8.2 \pm 0.3) \times 10^{-3}$ となった
- XLZD実験での目標崩壊頻度を達成した
- 現在、液体キセノン下でのRn遮蔽能力試験を行なっている

今後の展望

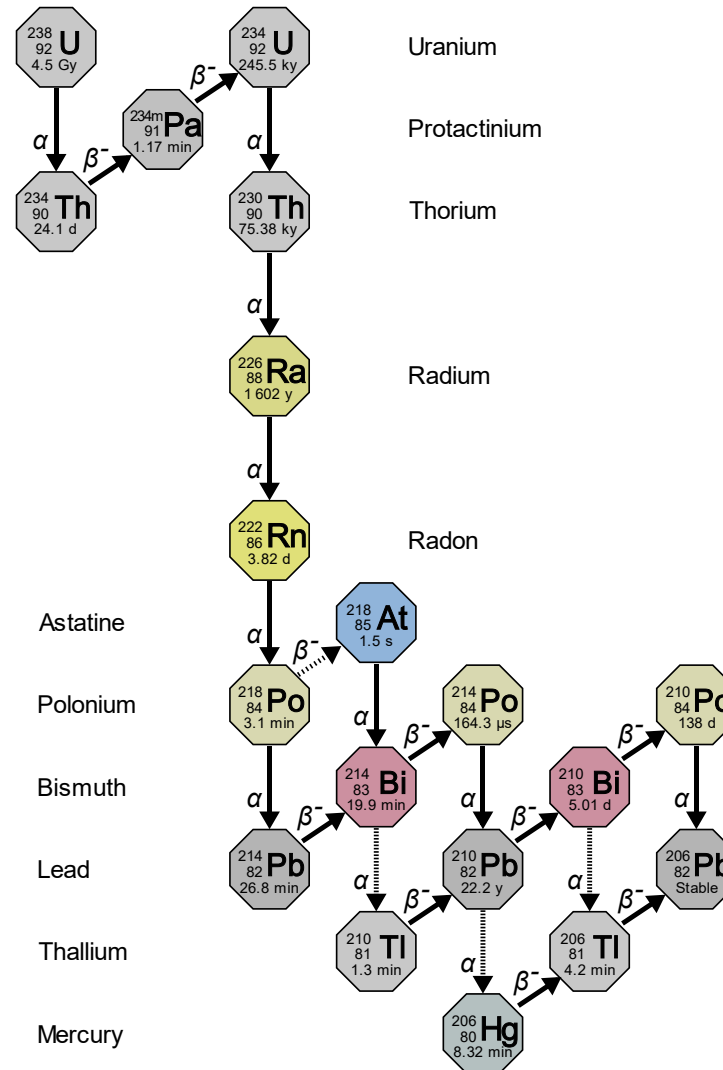
- 現在の小型密閉容器では光と電子の信号のうち電子を観測することができない
→ 密閉容器内に電場形成が必要
- 電圧印加をするに当たり液面を数mmで管理が必要となる
→ 液面管理方法の検討



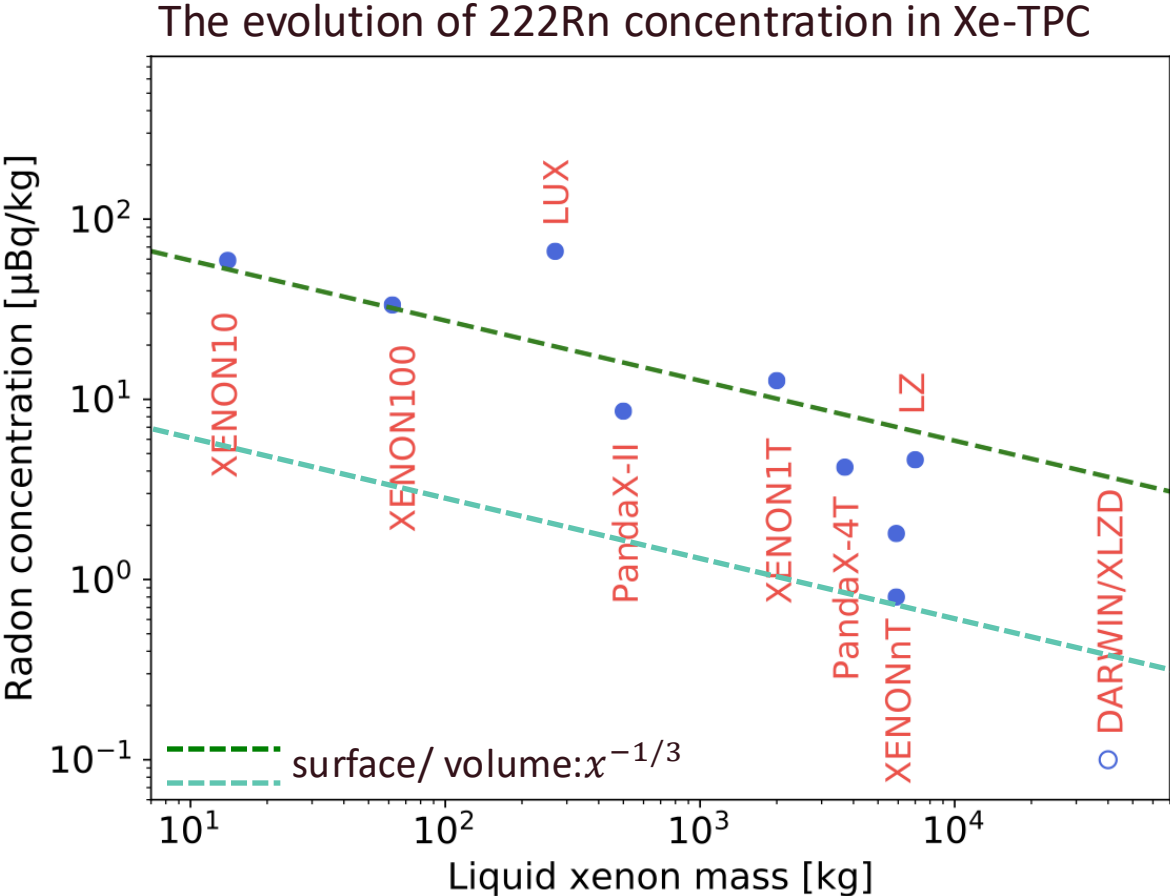
A complex industrial laboratory setup featuring multiple stainless steel tanks and vessels mounted on a metal frame. The system is interconnected with a dense network of pipes, valves, and electrical conduits. In the foreground, a large vertical cylindrical tank is prominent. To its right, a control panel with a digital display shows the number '23'. Further back, another control panel is labeled 'MC 700'. The background is filled with more tanks and a wall of electrical components, including numerous blue-handled valves and gauges. The overall scene is dimly lit, with a dark overlay on the right side.

Back Up

ウラン系列



これまでの液体キセノン実験のRn濃度



Nucl. Phys. B 1003 (2024) 116473/ Laura Baudis

Rn濃度比の算出方法

➤ Rnソースを解放し、外側循環にRnを拡散させ、外側循環と内側循環のRn濃度を測定

◆ Rn濃度の時間推移

$$\frac{dC_{in}}{dt} = -\frac{C_{in}}{\tau_{Rn}} + f \frac{C_{out}}{V_{in}}$$

内側Rn濃度の時間変化
内側Rnの崩壊
外側Rnのリーク

この微分方程式を解くと、

$$\frac{C_{in}}{C_{out}} \approx \frac{f\tau}{V_{in}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{Rn}}\right) \right]$$

$t = \infty$ でRnの崩壊数とリーク数が釣り合いRn濃度比が一定となる

$$\frac{C_{in}}{C_{out}} \approx \frac{f\tau}{V_{in}}$$

