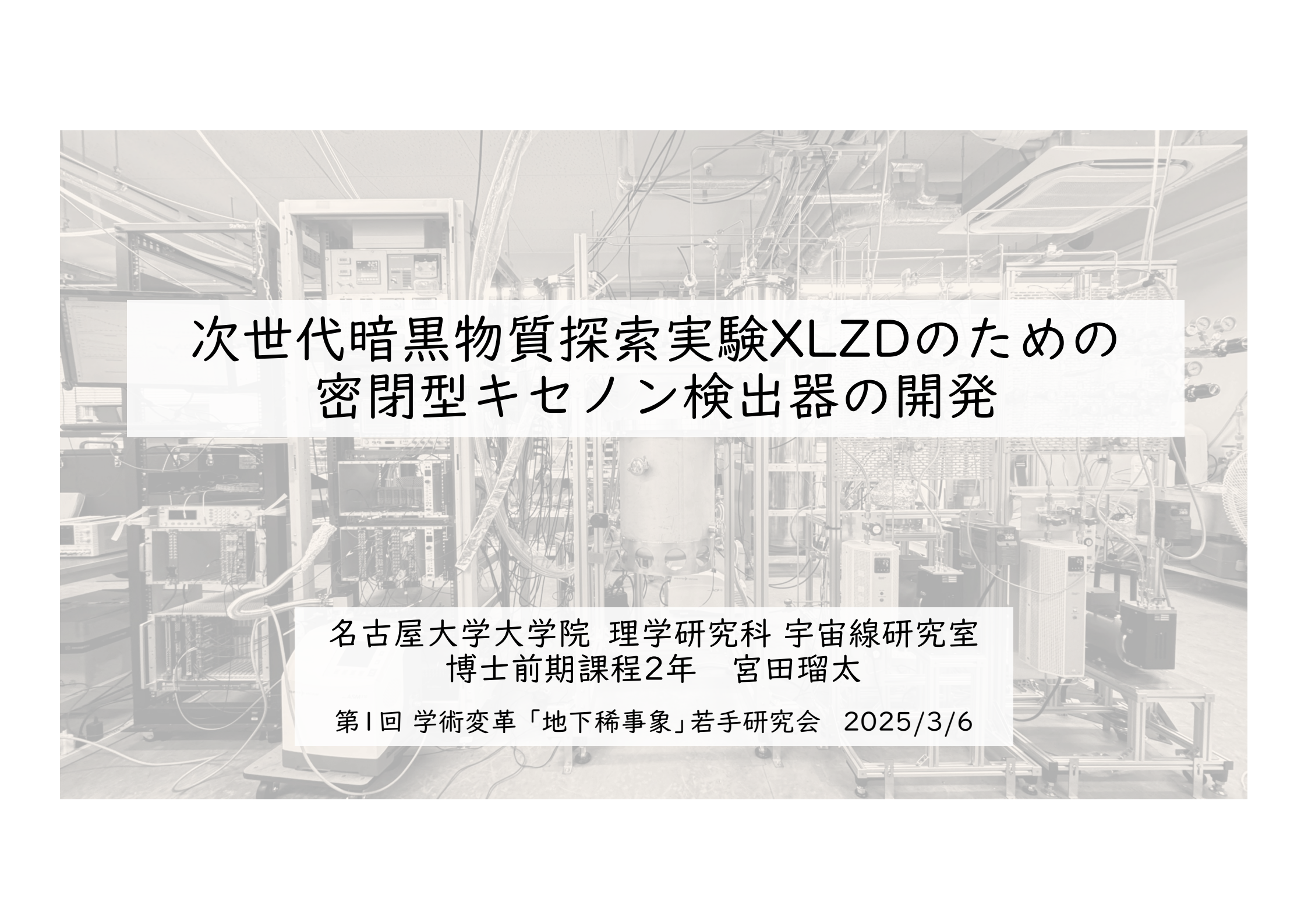


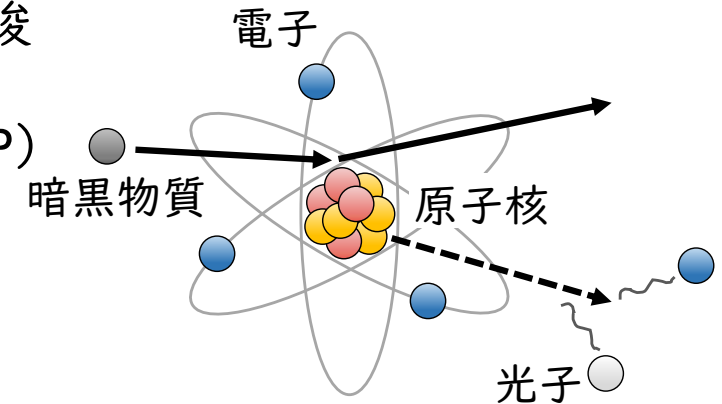


次世代暗黒物質探索実験XLZDのための 密閉型キセノン検出器の開発

名古屋大学大学院 理学研究科 宇宙線研究室
博士前期課程2年 宮田瑠太

第1回 学術変革「地下稀事象」若手研究会 2025/3/6

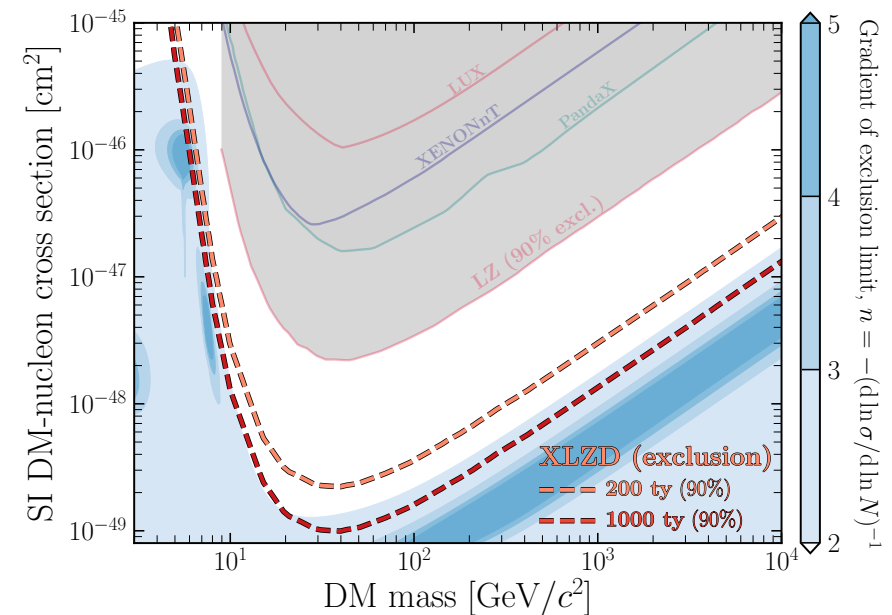
- ◆暗黒物質：重力に基づく様々な観測により間接的に示唆されている物質
GeV~TeV/c²スケールの重い素粒子 (WIMP) が有力
直接探索実験ではキセノンを標的とした実験が散乱断面積を最も厳しく制限 (ex. XENONnT実験)



◆XLZD実験：

次世代の暗黒物質直接探索実験
XENONnT実験の7~10倍のキセノンを用いて有力な暗黒物質モデル(ウィーノ粒子等)を検証

	直径×高さ	液体キセノン量
XENONnT	1.3 m × 1.5 m	8.6 トン
XLZD (暫定)	3 m × 3 m	60~80 トン



The XLZD Design Book: Towards the Next-Generation Liquid Xenon Observatory for Dark Matter and Neutrino Physics/ XLZD Collaboration

◆ラドン背景事象：

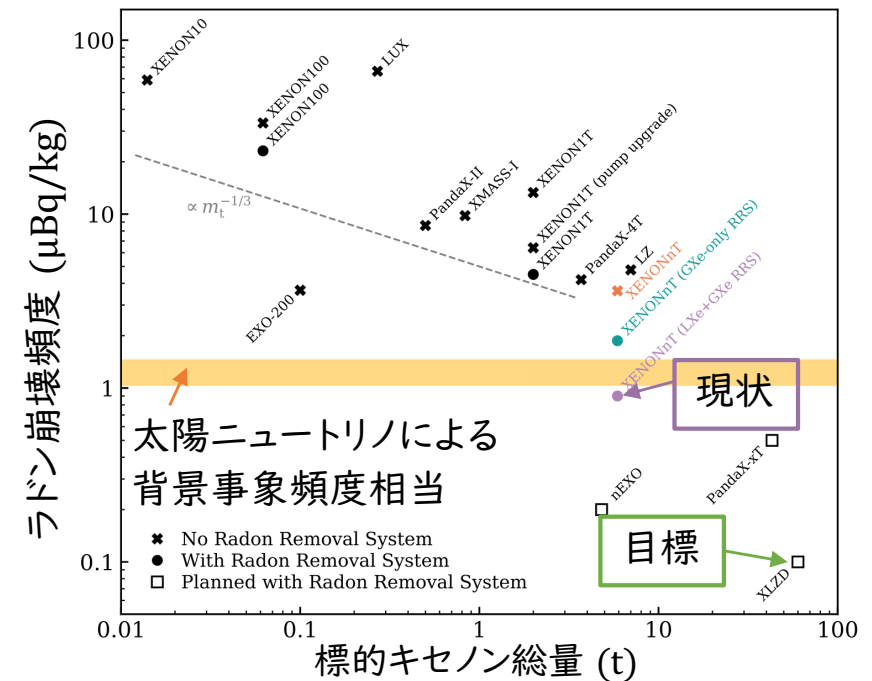
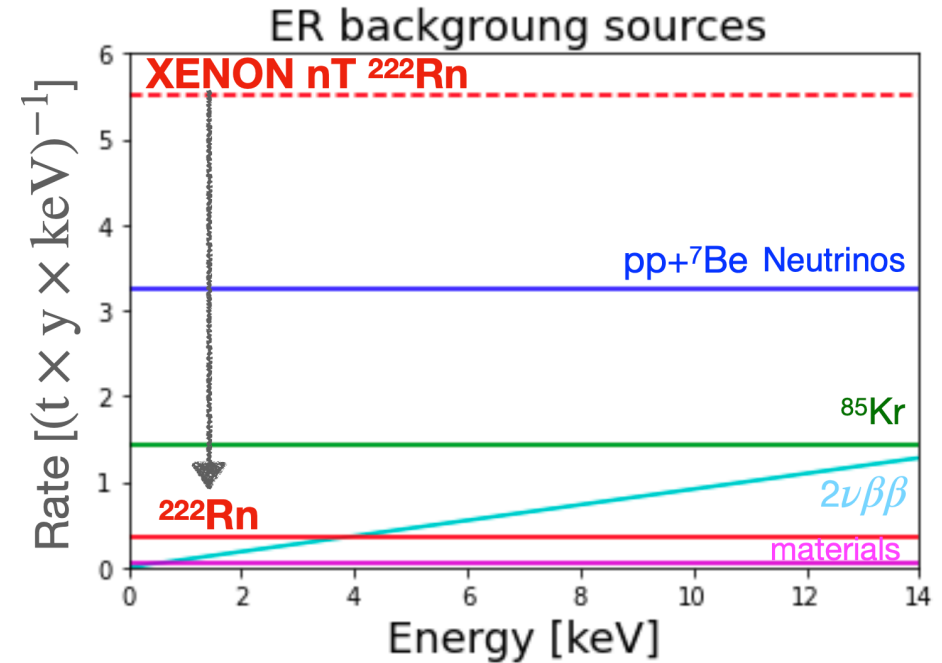
放射性ラドン（寿命 5.4 day）の娘核の β 崩壊

XENONnT実験における主要な背景事象
ラドンは検出器部材表面から湧き出す

◆ラドン崩壊頻度：

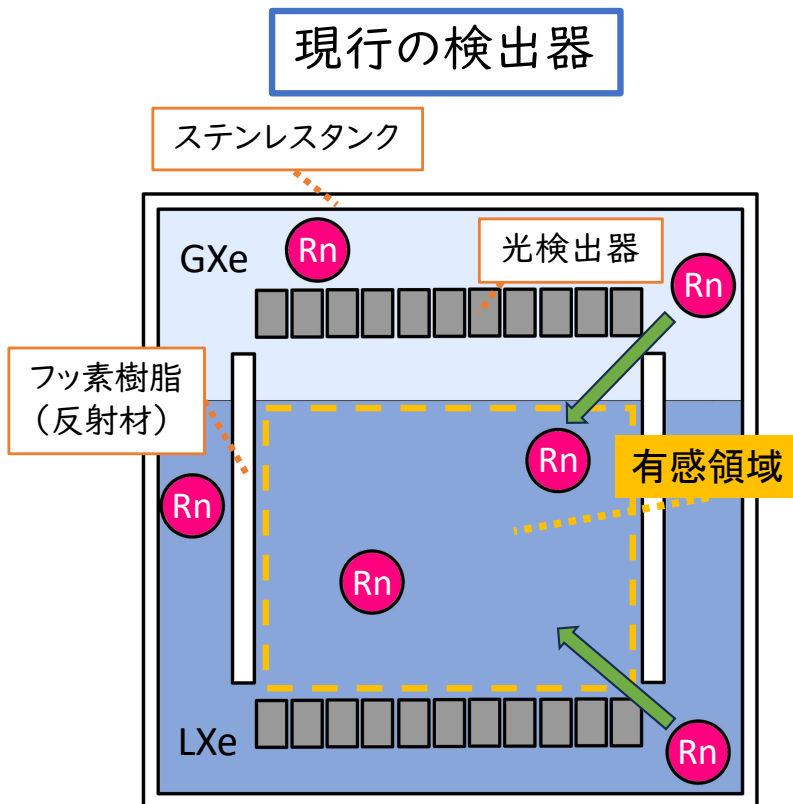
キセノン1kg当たりのラドンの崩壊数
XLZDではXENONnTの1/10以下の
ラドン崩壊頻度にする必要がある

	ラドン崩壊頻度
XENONnT	0.9 $\mu\text{Bq/kg}$
XLZD (目標値)	< 0.1 $\mu\text{Bq/kg}$



ラドンの主な発生源：液体キセノンを貯めておくタンク内の部材
(ex. 光検出器の信号ケーブル、ステンレスタンク内壁)

現行の検出器：検出器部材から湧き出したラドンが、光検出器や反射材の隙間から有感領域に侵入

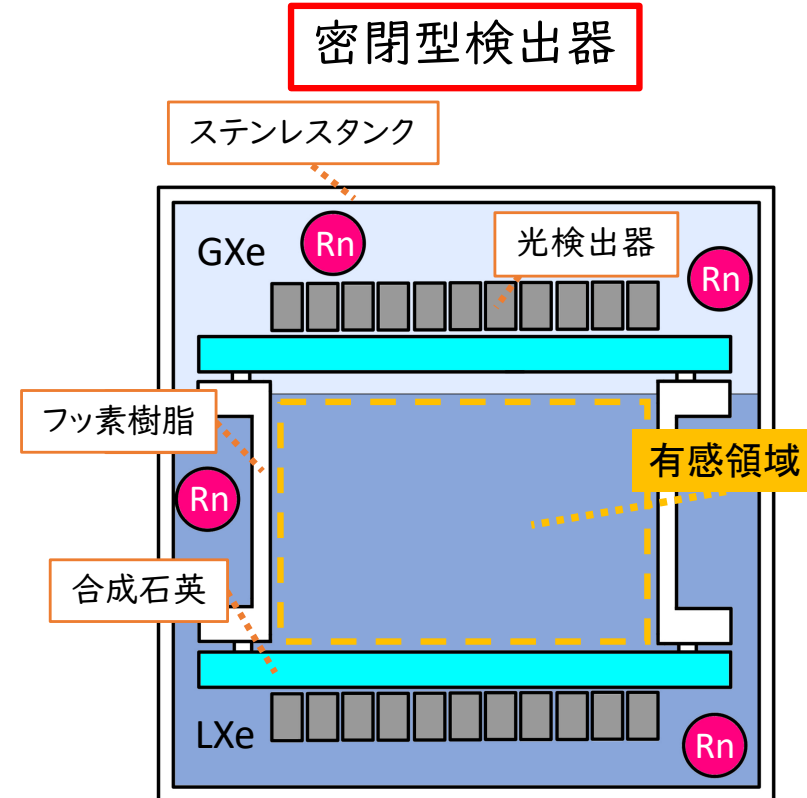
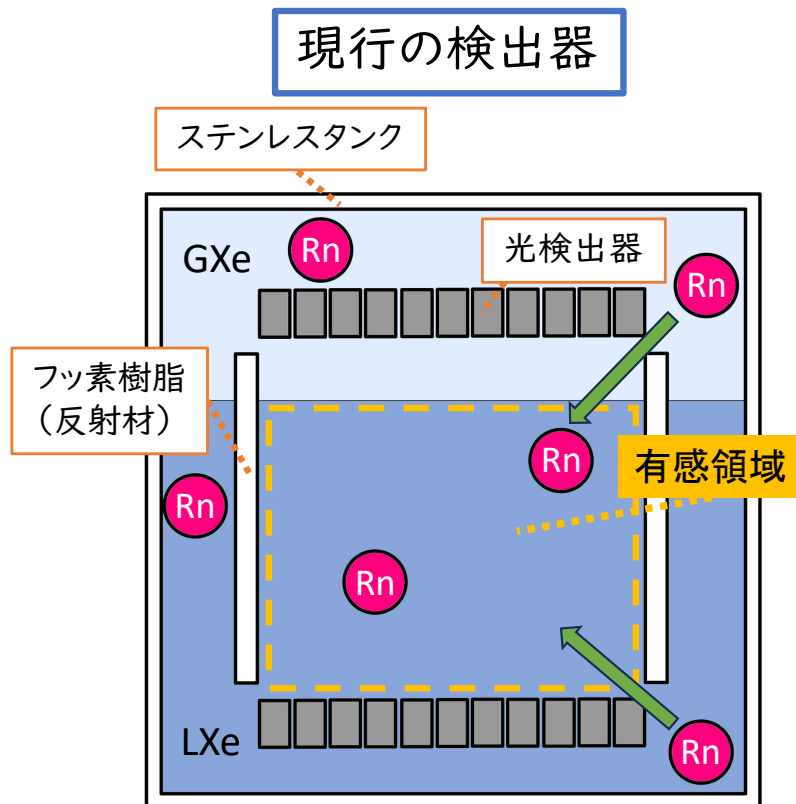


ラドンの主な発生源：液体キセノンを貯めておくタンク内の部材
(ex. 光検出器の信号ケーブル、ステンレスタンク内壁)

現行の検出器：検出器部材から湧き出したラドンが、光検出器や反射材の隙間から有感領域に侵入



密閉型検出器：有感領域を容器で密閉し、容器外側で湧き出したラドンの侵入を防止



ラドンの主な発生源：液体キセノンを貯めておくタンク内の部材
(ex. 光検出器の信号ケーブル、ステンレスタンク内壁)

密閉型キセノン検出器が満たすべき条件

- ・ラドンの湧き出しが少ない素材であること
- ・キセノンの発光($\lambda = 175 \text{ nm}$)を透過すること
- ・容器本体は不導体であること(電場形成のため)

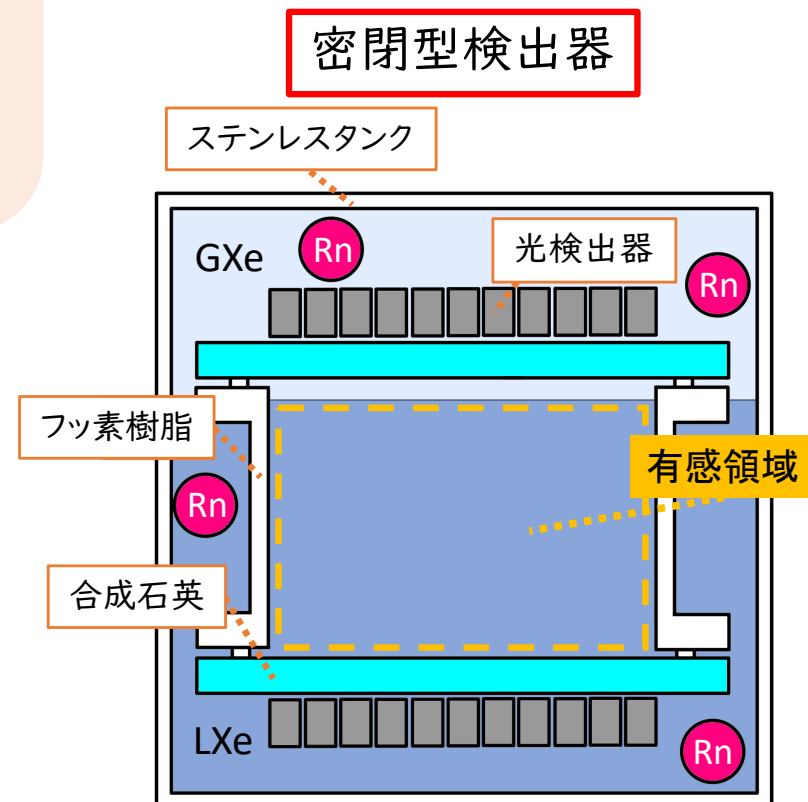


合成石英とフッ素樹脂 (PTFE) を選定

- ・放射性物質
→ 合成石英、フッ素樹脂ともに低放射能
- ・キセノンの発光の透過率
→ 石英厚さ1.2cmで80%以上

このような部材を使用した真空容器並の密閉性を有する容器は開発されていない

密閉型検出器：有感領域を容器で密閉し、容器外側で湧き出したラドンの侵入を防止



◆本研究の目的：XLZD実験において、有感領域でのラドン崩壊頻度を要求値（現行実験の1/10）以下にできる密閉容器の開発及び性能評価

◆本研究のロードマップ：

①密閉容器の開発

合成石英とフッ素樹脂を用いた、0.1Lサイズの小型密閉容器を開発

②真空密閉性評価

真空密閉性とラドン遮蔽能力は相関
真空密閉性評価によって密閉容器のパラメータを最適化

③ガスキセノン中でのラドン遮蔽能力評価

ガスキセノン中にラドンを導入してラドン遮蔽能力を測定

④XLZDでのラドン遮蔽能力推定

XLZDサイズ（約10000L）に大型化したときのリークレートを推定しXLZDの要求を満たすか評価

⑤液体キセノン中でのラドン遮蔽能力評価

液体キセノン中にラドンを導入してラドン遮蔽能力を測定

◆本研究の目的：XLZD実験において、有感領域でのラドン崩壊頻度を要求値（現行実験の1/10）以下にできる密閉容器の開発及び性能評価

◆本研究のロードマップ：

本発表

①密閉容器の開発

合成石英とフッ素樹脂を用いた、0.1Lサイズの小型密閉容器を開発

②真空密閉性評価

真空密閉性とラドン遮蔽能力は相関
真空密閉性評価によって密閉容器のパラメータを最適化

③ガスキセノン中での
ラドン遮蔽能力評価

ガスキセノン中にラドンを導入してラドン遮蔽能力を測定

④XLZDでの
ラドン遮蔽能力推定

XLZDサイズ（約10000L）に大型化したときのリークレートを推定しXLZDの要求を満たすか評価

⑤液体キセノン中での
ラドン遮蔽能力評価

液体キセノン中にラドンを導入してラドン遮蔽能力を測定

◆ 密閉手法

合成石英とフッ素樹脂の間に柔らかいシール材を挟み、ネジで締め付けて密閉

私が開発した密閉容器

合成石英

フッ素樹脂

ステンレス
座金

◆ 容器開発のポイント

密閉性のためには強く締めたいが、
締めすぎると石英の破損の可能性



シール材の幅を細くすることで、
低い締め付け力で高い圧力を実現

容積
0.1L

5cm

延伸フッ素樹脂
シール材

◆ 密閉手法

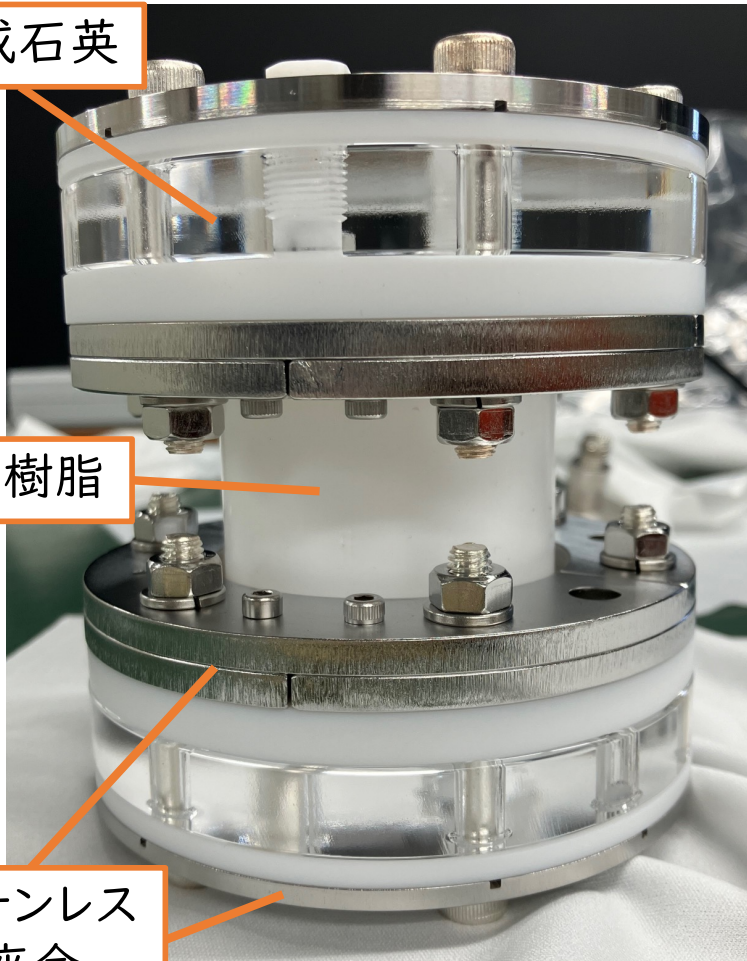
合成石英とフッ素樹脂の間に柔らかいシール材を挟み、ネジで締め付けて密閉

私が開発した密閉容器

合成石英

フッ素樹脂

ステンレス
座金



◆ 容器開発のポイント

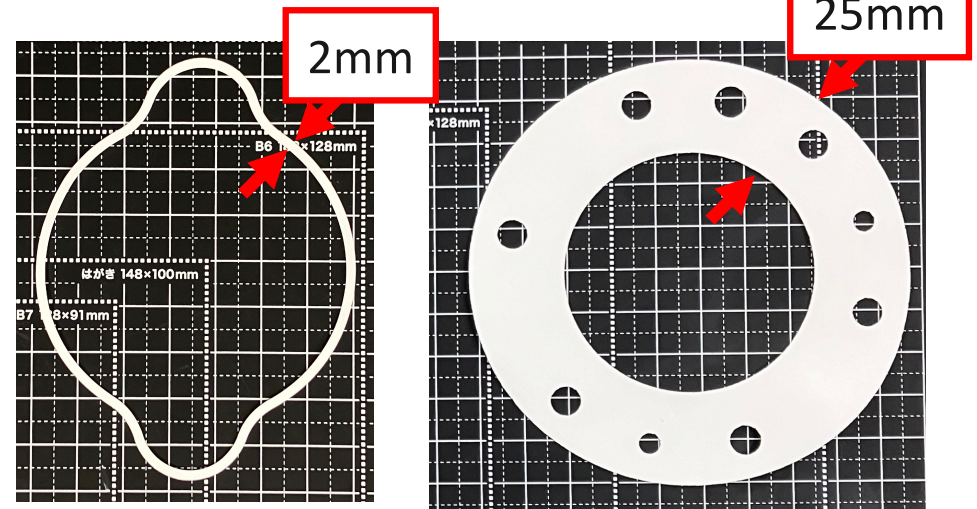
密閉性のためには強く締めたいが、締めすぎると石英の破損の可能性



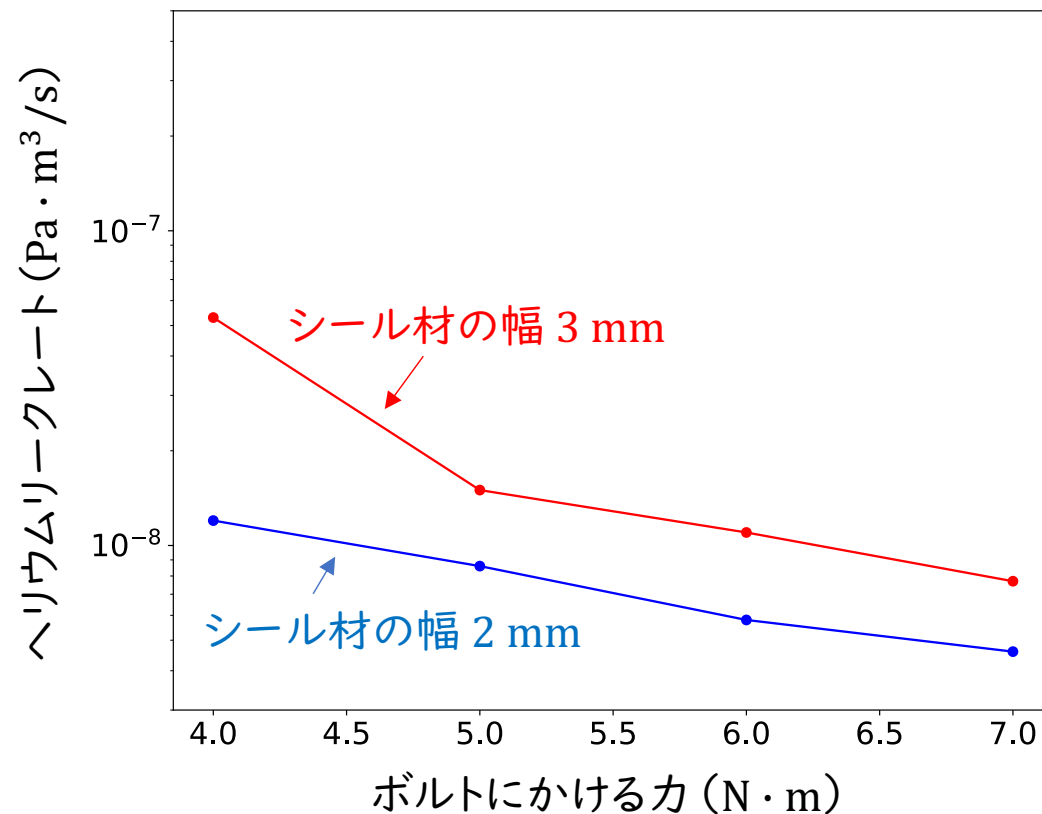
シール材の幅を細くすることで、低い締め付け力で高い圧力を実現

開発したシール材

従来品

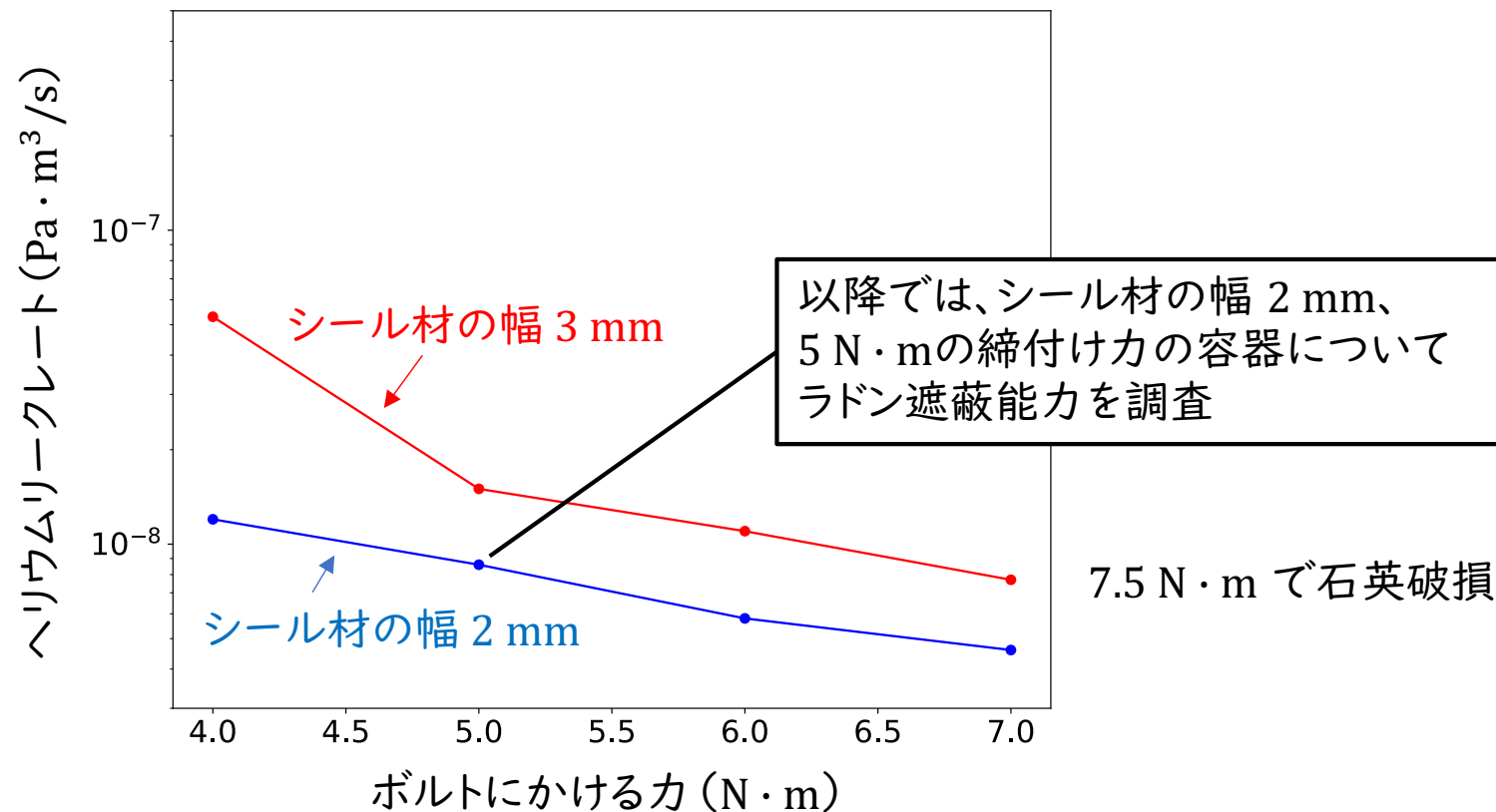


- ◆ 目的：密閉容器のパラメータ（シール材の幅、ボルトにかける力）の最適化
- ◆ 手法：密閉容器を真空にした時の、大気中からのヘリウムのリークレートを測定
密閉性が良いほど、リークレートは小さい
- ◆ 結果：ボルトにかける力を大きくすると、ヘリウムリークレートは減少
シール材の幅を狭くすると、ヘリウムリークレートは減少
ボルトに $7.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ の力をかけたところで石英破損



7.5 $\text{N} \cdot \text{m}$ で石英破損

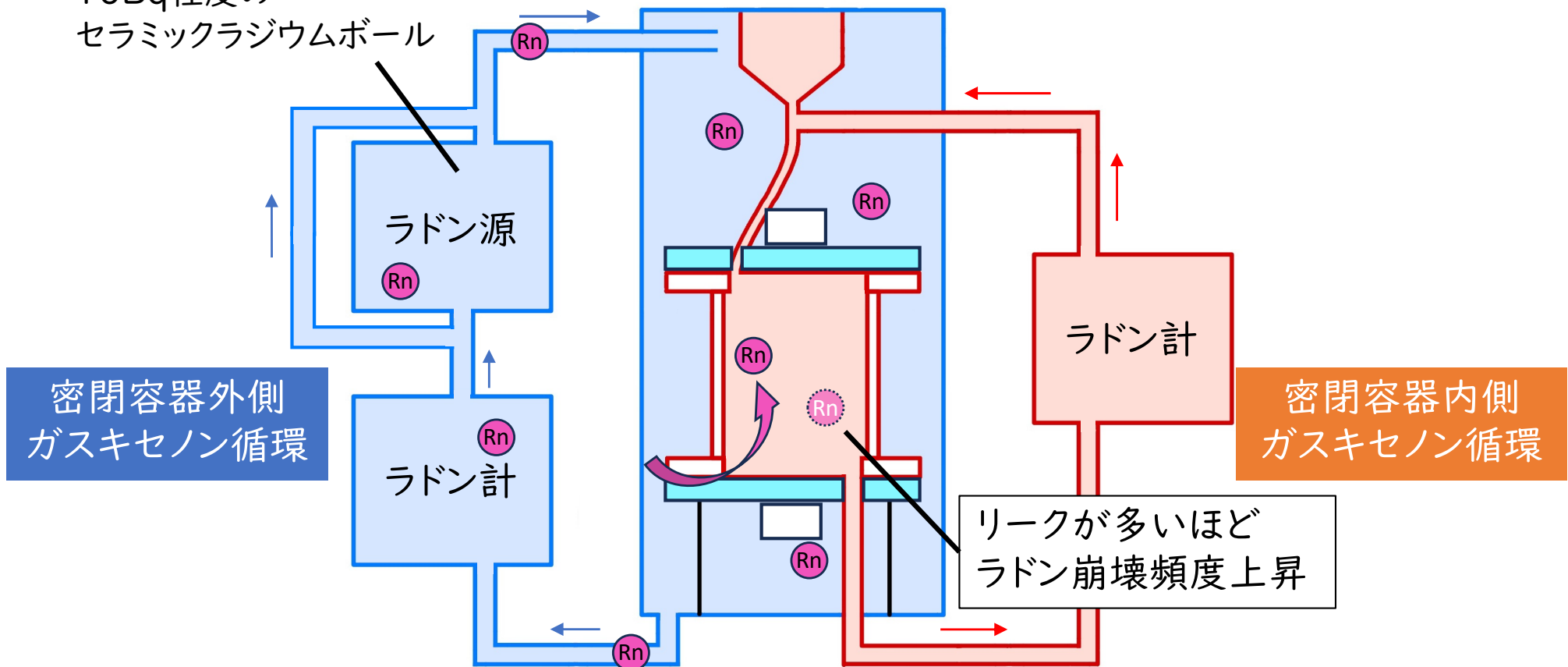
- ◆ 目的：密閉容器のパラメータ（シール材の幅、ボルトにかける力）の最適化
- ◆ 手法：密閉容器を真空にした時の、大気中からのヘリウムのリークレートを測定
密閉性が良いほど、リークレートは小さい
- ◆ 結果：ボルトにかける力を大きくすると、ヘリウムリークレートは減少
シール材の幅を狭くすると、ヘリウムリークレートは減少
ボルトに $7.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ の力をかけたところで石英破損



- ◆ ラドン遮蔽能力：容器外側のラドン崩壊頻度を高くした時の内側の崩壊頻度の変化で評価
ラドン遮蔽能力が高いほど外側に対する内側の崩壊頻度が低くなる

- 密閉容器外側のラドン崩壊頻度を高くする
 - 密閉容器内外のラドン崩壊頻度を別々に測定する
- } この2つが可能な測定系を構築

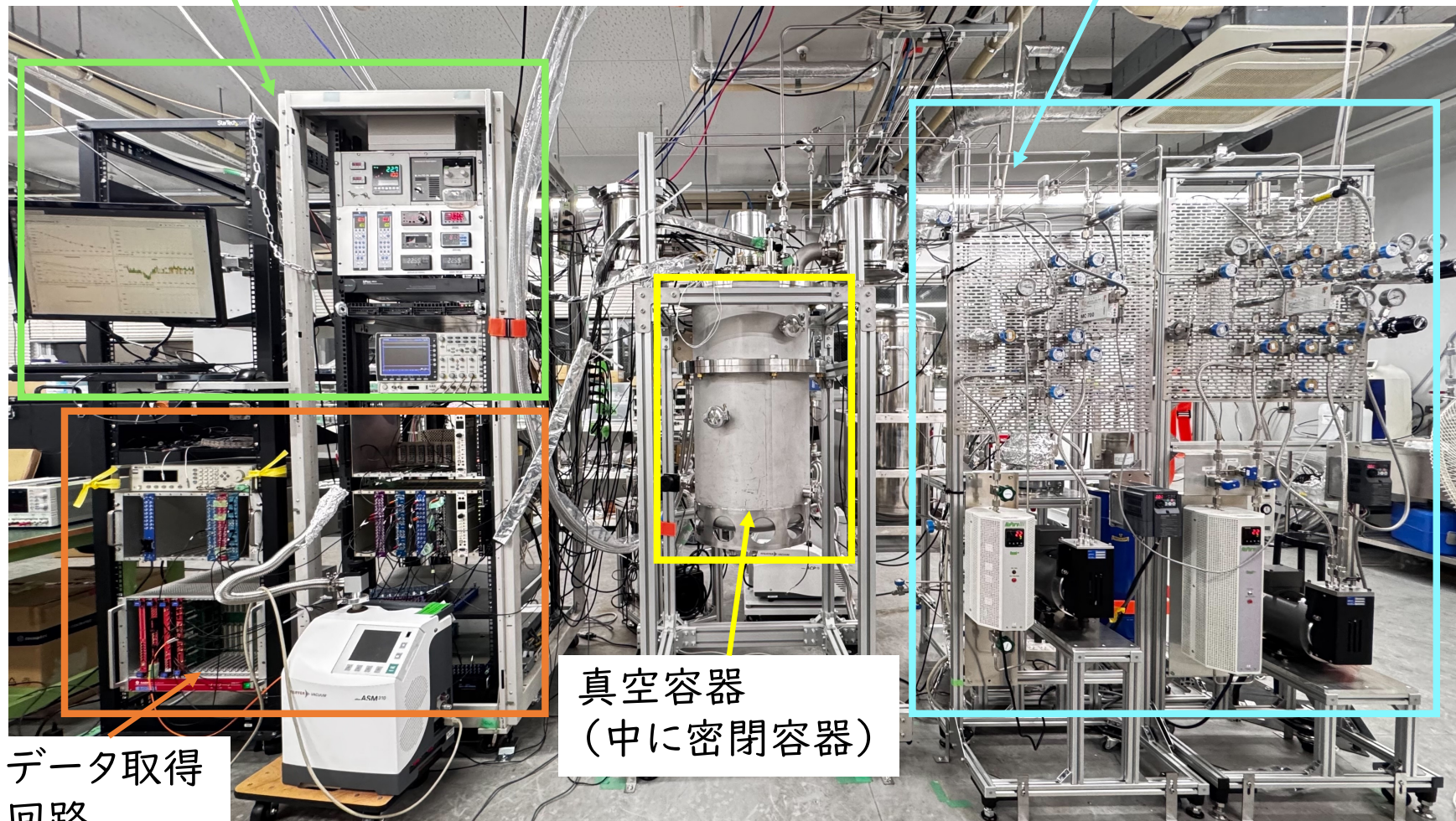
10Bq程度の
セラミックラジウムボール



循環系とモニタリングシステム、データ取得回路を構築

圧力・露点等のモニタリングシステム
→ラドン計の検出効率の安定性等を監視

循環系
(ポンプ・純化装置・露点計等)



ラドン遮蔽能力が大きければ、ラドンのリークレートが小さい
→ 体積リークレート f が指標 (ラドンの質量リークレートをラドンの密度で割った値)

◆ ラドン崩壊頻度の時間推移

内側のラドンの総数は、崩壊によって減少し、
リークによって増加する

$$V_{in}\tau \frac{dR_{in}}{dt} = -V_{in}R_{in} + f\tau R_{out}$$

内側のラドン総数の
時間変化

内側のラドンの
崩壊

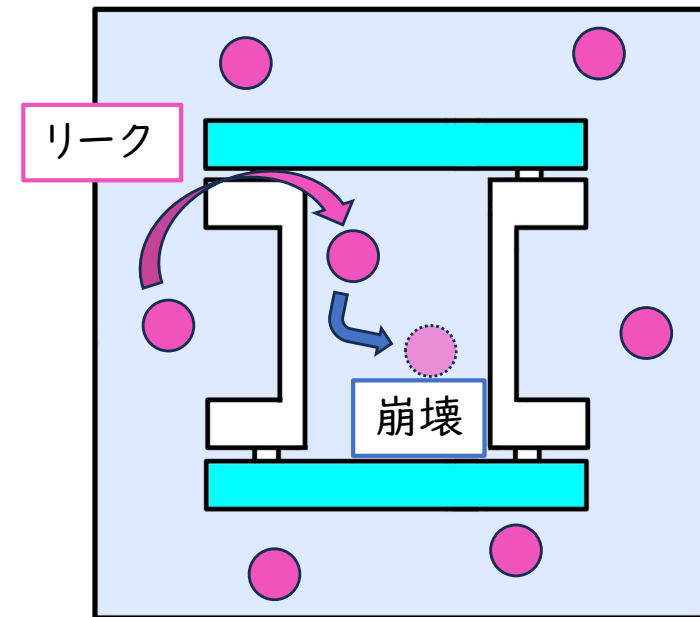
ラドンの
リーク

$$\Leftrightarrow \frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{f\tau}{V_{in}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\}$$

$t = \infty$ でラドンの崩壊数とリーク数が釣り合い、
ラドン崩壊頻度の比は一定になる

$$\frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{f\tau}{V_{in}}$$

ラドン崩壊頻度の比を求めれば、リークレートがわかる



ラドンの寿命 : $\tau = 132 \text{ h}$
内側ラドン崩壊頻度 : R_{in}
外側ラドン崩壊頻度 : R_{out}
体積リークレート : f

ラドン源を開けてから約670時間の
密閉容器内外のラドン崩壊頻度を測定

外側の計測数に比べて内側の計測数が
少なく、ラドンを遮蔽できている

◆ ラドン崩壊頻度の比

$$\frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{f\tau}{V_{in}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\}$$

外側のラドン崩壊頻度が一定になった
約40h後からのデータに対して、
崩壊頻度の比を上式のフィッティング

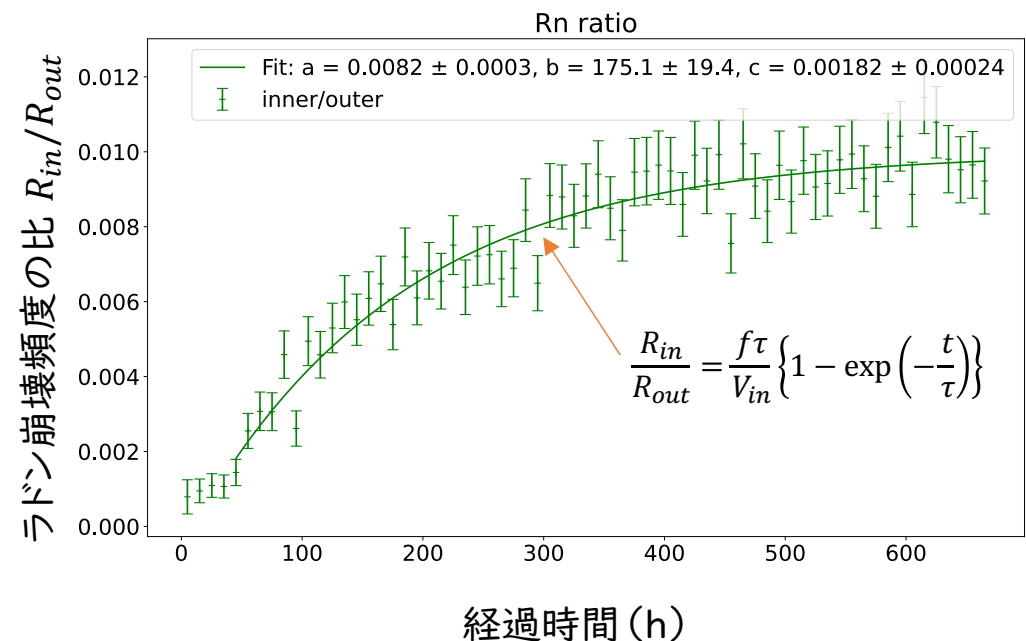
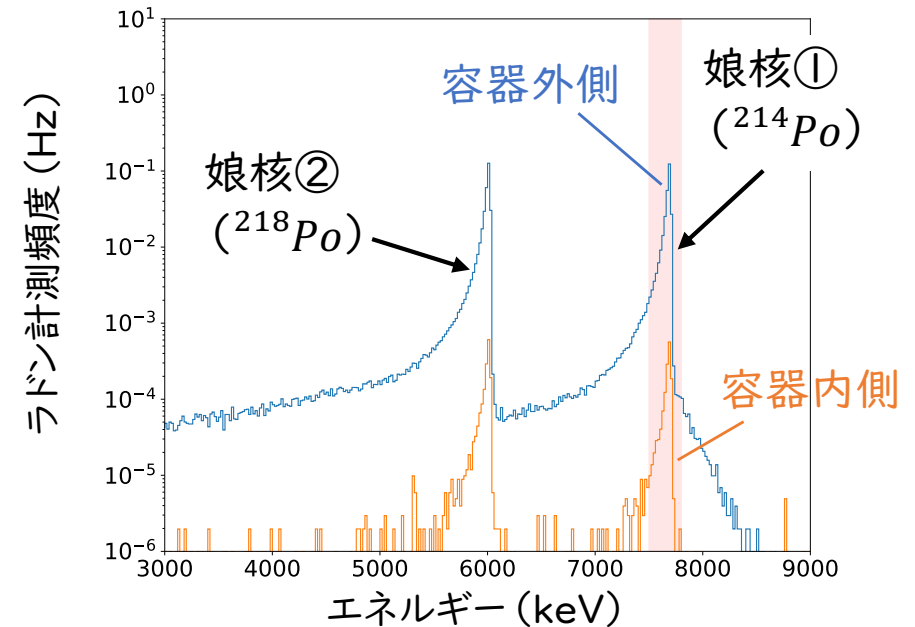
$$\tau = 136 \pm 51 \text{ h (5.7 day)}$$

$$f = (3.43 \pm 0.53) \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$$



$t = \infty$ でのラドン濃度比 $(9.1 \pm 1.5) \times 10^{-3}$

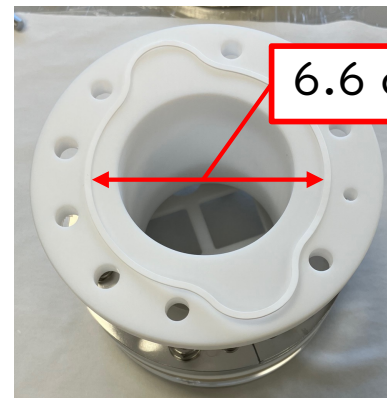
→ 内外の濃度比 1/100以下を達成



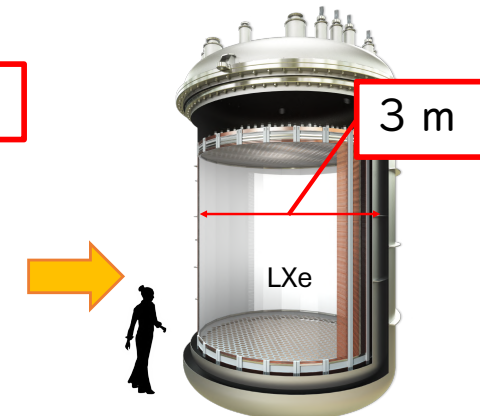
◆ 大型化によるリークレートの増加

リークレート $\propto$ シール材の長さ
 $\rightarrow$ リークレートは最大200倍

XLZDサイズでのラドン遮蔽能力
 を推定する必要がある



小型密閉容器



XLZD実験

◆ XLZDでのラドン崩壊頻度の推定

	リークレート	ラドンの湧き出し量	容器内側の体積
大型化による影響	200 倍	3 倍	2×10^6 倍
要因	シール材の長さ増加	検出器部材の増加	-
容器内側のラドン崩壊頻度	比例	比例	反比例

検出器部材近傍でのラドンの局在化を考慮しても、XLZDでの密閉容器内側のラドン崩壊頻度は最大で $8.2 \times 10^{-3} \mu\text{Bq/kg}$ (cf. 目標値 $1 \times 10^{-1} \mu\text{Bq/kg}$)

$\rightarrow$ 現行実験の 1/100 以下のラドン崩壊頻度を達成可能

まとめ

- ◆ 次世代暗黒物質探索実験XLZDでは、現行の実験と比べてラドン崩壊頻度を1/10以下にする必要
- ◆ キセノン検出器を密閉型にすることで、部材から出るラドンの流入を防ぐ手法を提案
- ◆ 合成石英とフッ素樹脂を用いた密閉容器を作成、性能評価を実施
- ◆ ラドン遮蔽能力評価のためのキセノン循環システムを構築
- ◆ 密閉容器内外のラドン崩壊頻度の比1/100以下を達成
- ◆ 容器の大型化を考慮しても、要求値 $1 \times 10^{-1} \mu\text{Bq/kg}$ の1/10以下のラドン崩壊頻度を達成可能

今後の展望

- ◆ 部材の熱収縮によって密閉性の悪化が起こる可能性もあるので、本研究で構築した循環系を用いて、液体キセノン下でのラドン遮蔽能力評価試験を行う
- ◆ 密閉容器を大型化(~1 L)し、リークレートの増加率の推定が正しいかを調査