

硫酸ガドリニウム水中ラドン



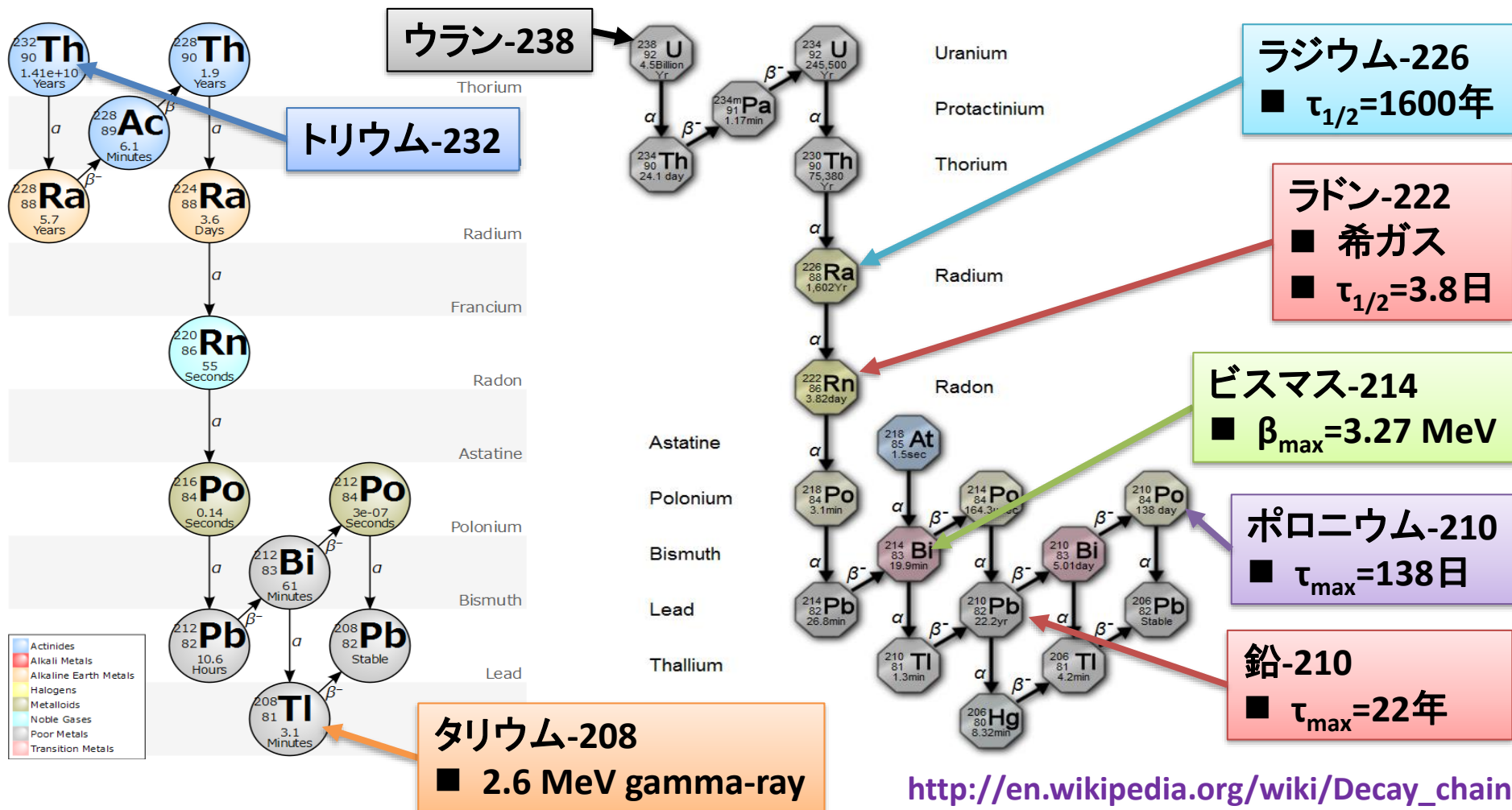
神戸大学 理学研究科 竹内康雄

- SK-IVでのラドンバックグラウンド
- 地下宇宙での硫酸Gd水中ラドン研究
 - 高感度分析手法の確立
 - リアルタイムRn測定の高感度化
 - 中空糸膜モジュールの開発

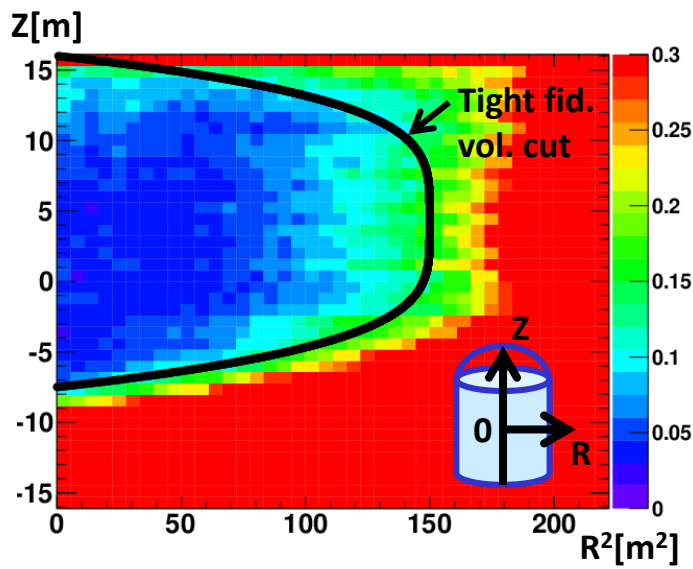
トリウム系列、ウラン系列

■ 身の回り: $1 \sim 10 \text{ ppm}(10^{-6})$

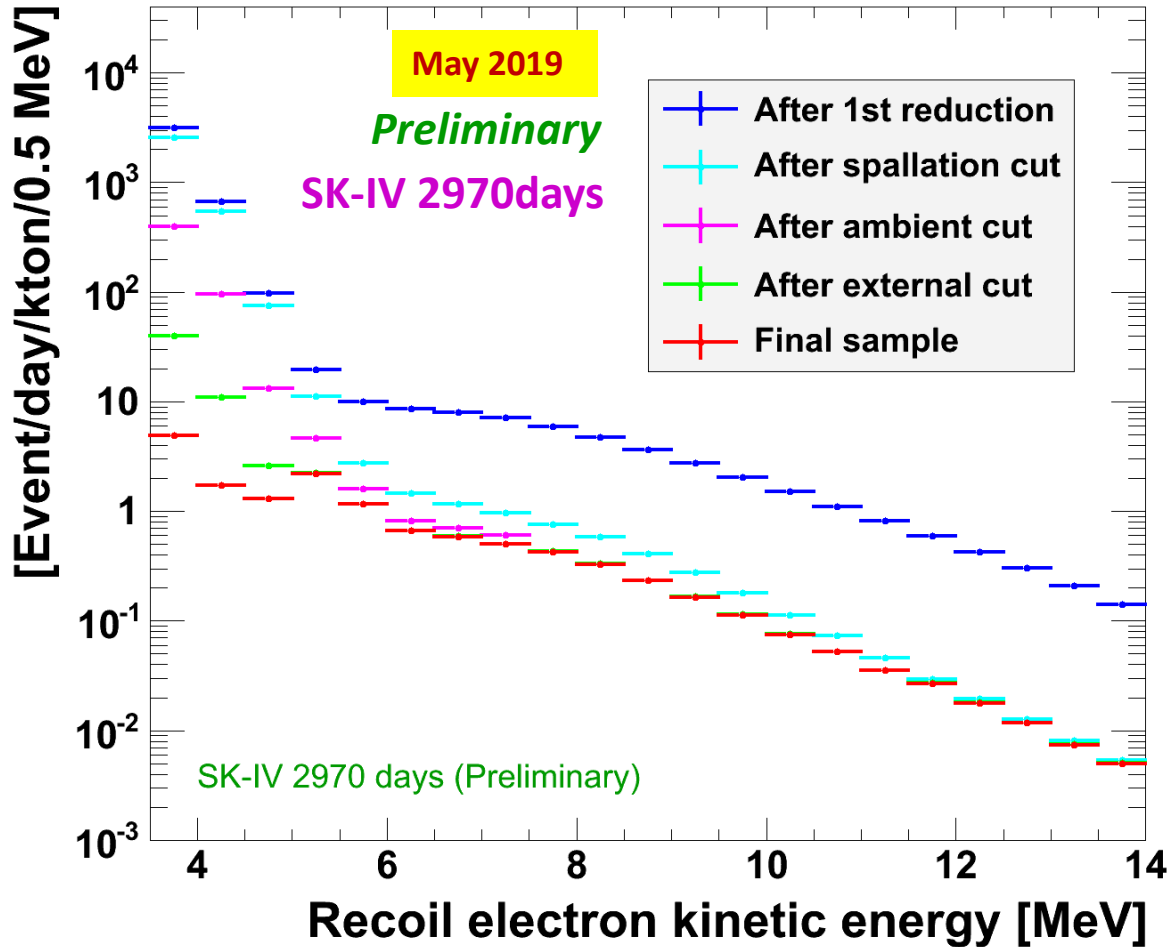
→ 実験装置: $\text{ppb}(10^{-9})$, $\text{ppt}(10^{-12})$, $\text{ppq}(10^{-15})$,,,



SK-IV solar ν解析のバックグラウンド



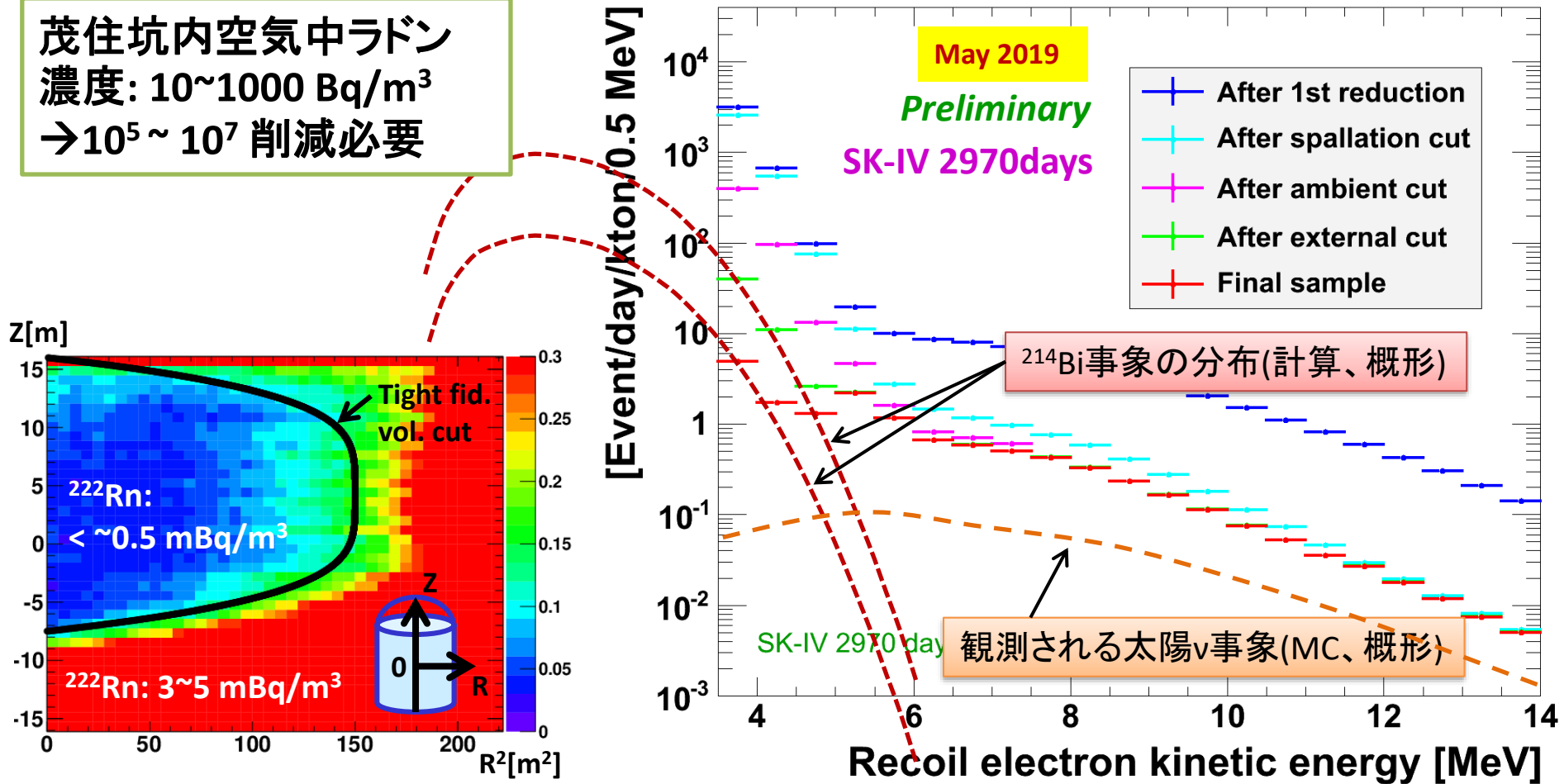
SK-IV: 3.5 - 4.0 MeV ($E_{e,kinetic}$)
 After external cut, 2645 days (preliminary)
 Color : Events/day/bin low→high



SK-IV solar ν解析のバックグラウンド

■ SK-Gdでの目標: $^{222}\text{Rn} < 0.5 \text{ mBq/m}^3$ [water] $\rightarrow$ $^{226}\text{Ra} < 0.5 \text{ mBq/kg}$ [$\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$]

茂住坑内空气中ラドン
濃度: $10 \sim 1000 \text{ Bq/m}^3$
 $\rightarrow 10^5 \sim 10^7$ 削減必要



SK-IV: 3.5 - 4.0 MeV ($E_{e,\text{kinetic}}$)
After external cut, 2645 days (preliminary)
Color : Events/day/bin low $\rightarrow$ high

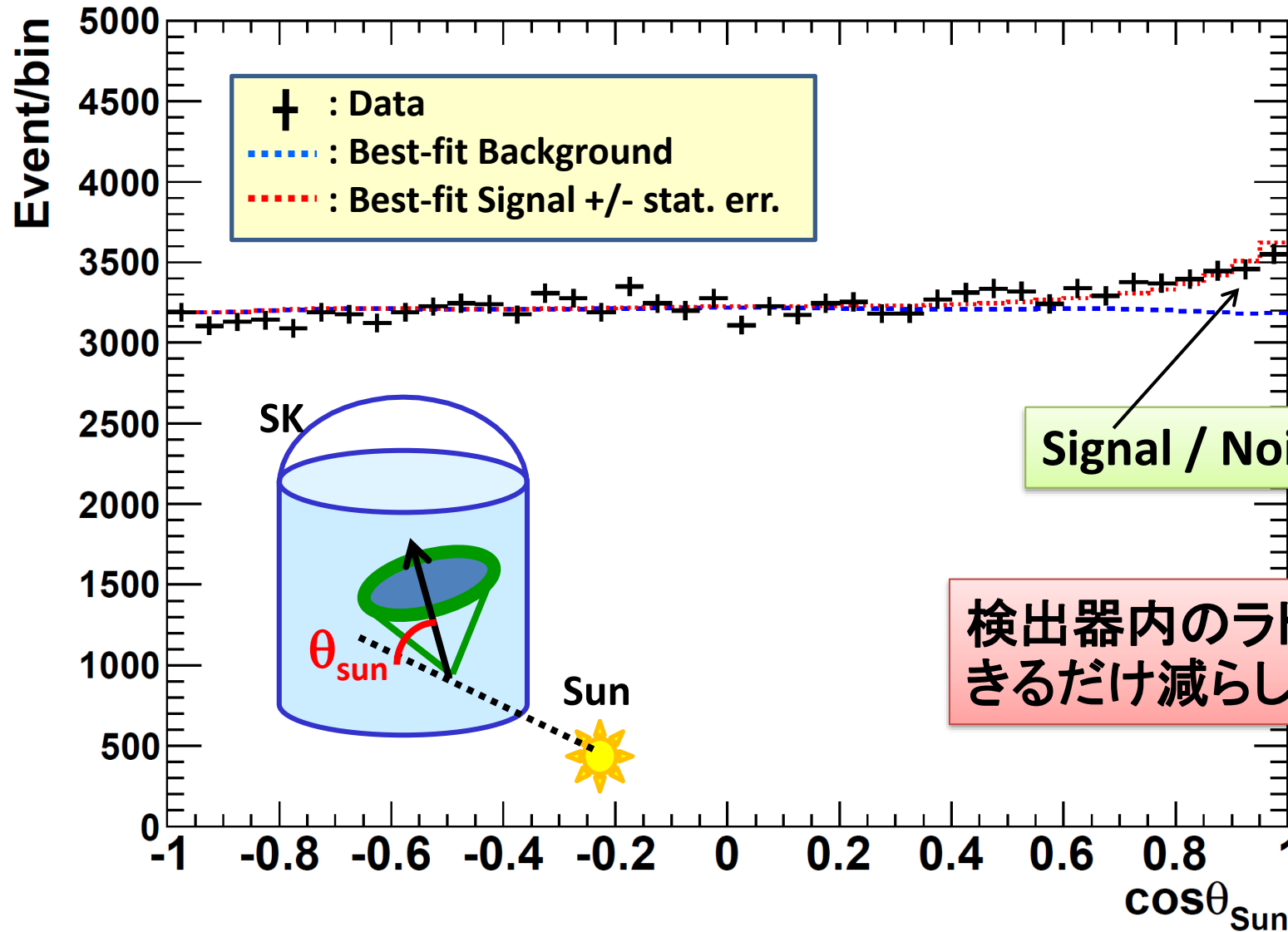
SK-IV solar neutrino signal

May 2019

Preliminary

SK-IV 2970days

SK-IV 3.5-4.0 MeV(kinetic), Final sample



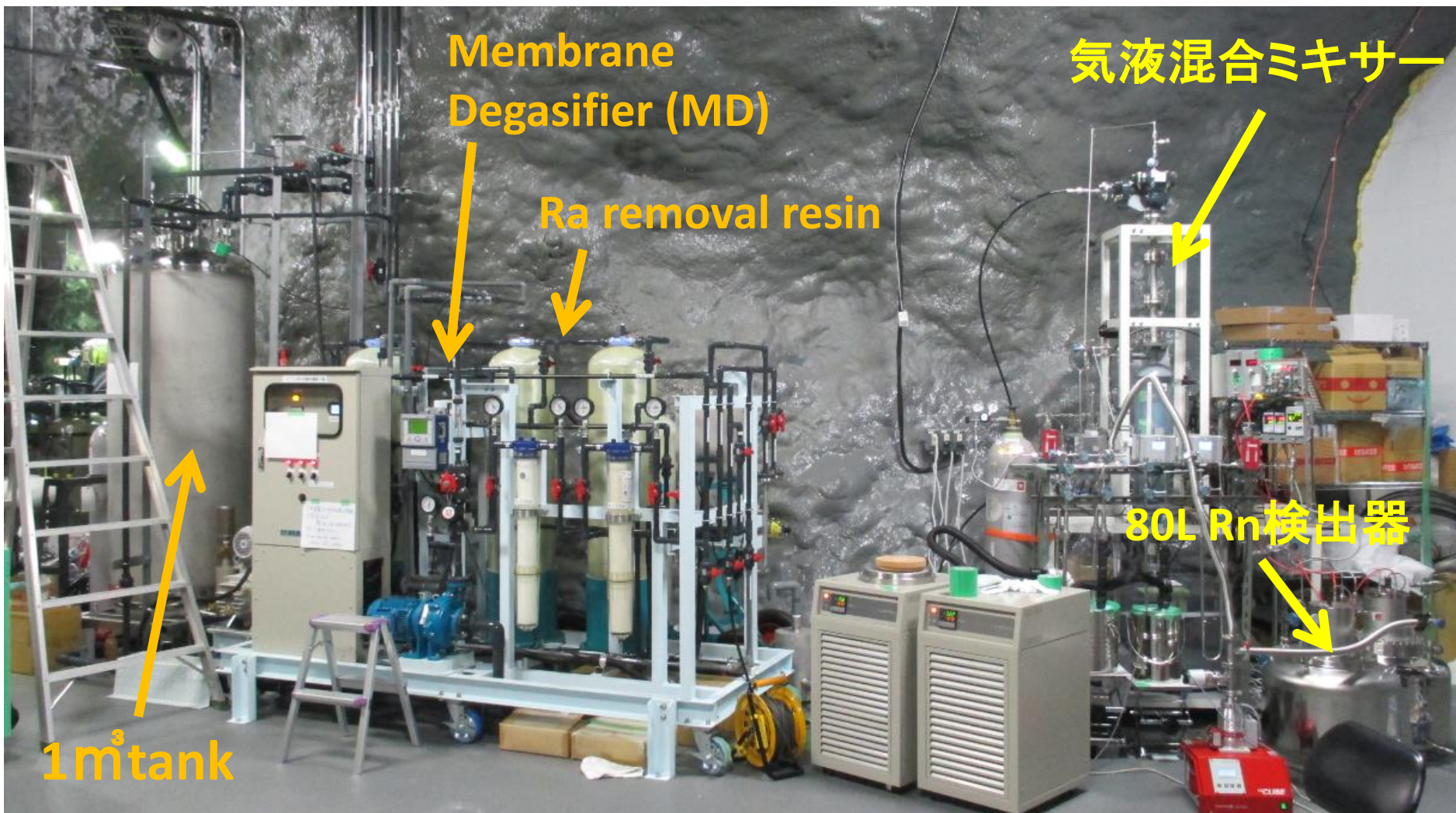
Signal / Noise = ~1.5%

検出器内のラドンをできるだけ減らしたい！

地下宇宙での硫酸Gd水中ラドン研究

- 硫酸Gd水溶液中でのラドン分析・除去技術の開発に取り組む
- C01&D01で進める
- 高感度分析手法の確立 (D01:池田(ICRR))
 - ラドンを濃縮して測定。
 - 感度は良いが手間がかかる。連続測定不可能。
- リアルタイムRn測定の高感度化 (D01:竹田(ICRR))
 - 手間がかからず連続測定可能。感度はそこそこ。
- 中空糸膜モジュールの開発 (C01:竹内(神戸))
 - 耐久性試験、安価な装置の開発。

Current setup@ LAB-E



Gd水中ラドン除去の試験装置

Gd水中ラドン測定装置
(濃縮、高感度)

高感度分析手法の確立

現状:

■ 濃縮水中ラドン測定の実状

■ 濃縮工程

- 測定液体と純空気を効率よく接触させ、液中ラドンを空気に取り込み、空気中ラドンを冷却活性炭に吸着。

■ 脱離工程

- 冷却活性炭を加熱し、吸着させたラドンを80Lラドン検出器に導入。

■ 再生工程

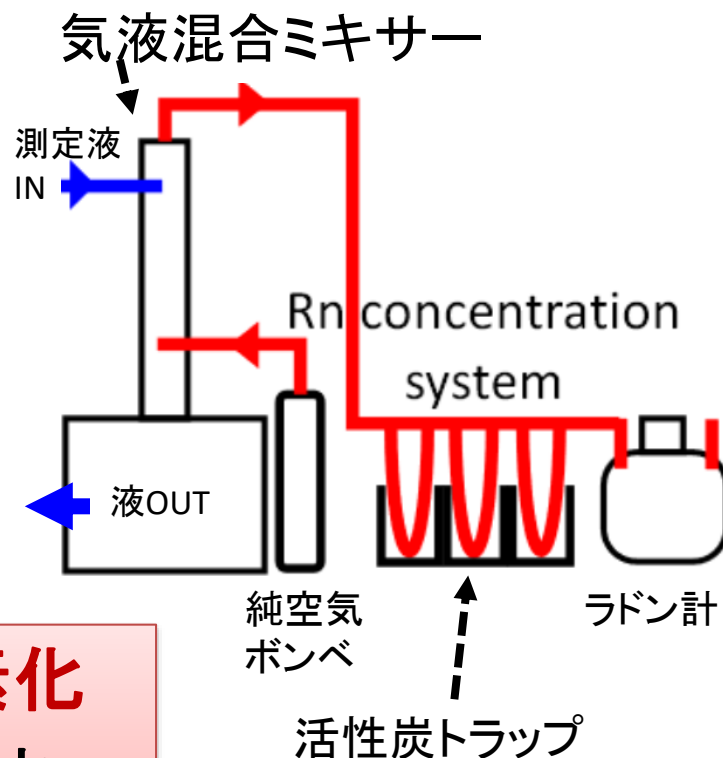
- 測定前後で、活性炭等をベーキング。

■ 工程の切り替えが現在手作業

- 人手が必要。月に一回程度の測定

D01: 池田(ICRR), 岡本(ICRR),
Pronost(ICRR)
for C01

感度 = $\sim 0.1 \text{ mBq/m}^3$



本研究:

■ 操作を自動化し、系統的かつ簡素化

- 全く同一の手順。誤差の要因を減らす。
- 週一回程度の測定を目指す。

リアルタイムRn測定の高感度化

現状:

D01: 竹田(ICRR)、C01: 竹内(神戸)

- LAB-C、LAB-Aで「70Lラドン検出器+中空糸膜モジュール」を使用中
- 純水中Rnの検出効率: 3.0 ± 0.4 (count/day)/(mBq/m³)
- 検出器のBGレベル: 23 ± 1 count/day → ~ 8 mBq/m³の²²²Rn相当
- XMASSシールド水モニター: ○、SKからの返水: ○、SKへの給水: ✕
- 現行の中空糸膜モジュールで、一部の部材の硫酸Gdとの相性があまりよくない → 業者さんから代替部品の提案 → 硫酸Gd水耐性ok

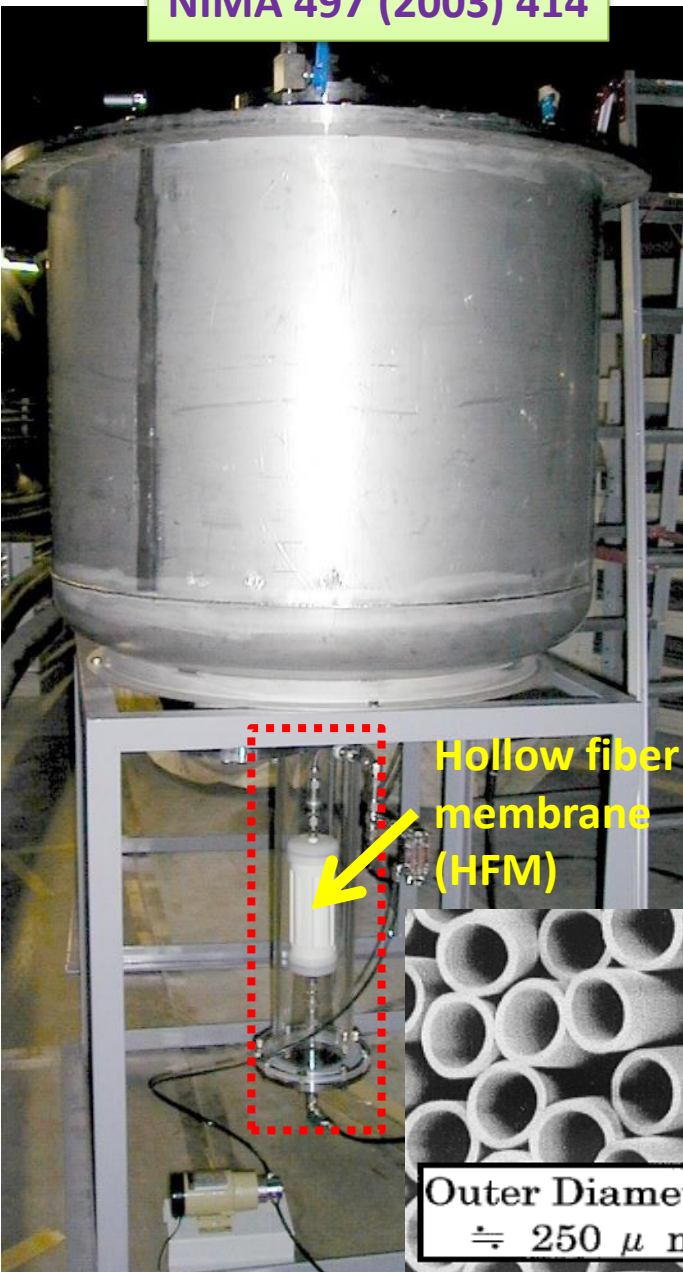


本研究:

- 「80Lラドン検出器+中空糸膜モジュール」を開発する
 - 硫酸Gd水対応の中空糸膜モジュールの試作・試験
 - ハウジングのステンレス化: バイトンOリング → メタルシール
 - 電場シミュレーションを用いた形状の最適化
 - Gd水中ラドンの検出効率の較正試験
- 目標感度: ~ 0.5 mBq/m³のGd水中²²²Rn (~ 1.5 count/day相当)
- 応用: SK-Gdへの給水モニター、XENONnT nVeto中Rnモニター

700L water

NIMA 497 (2003) 414

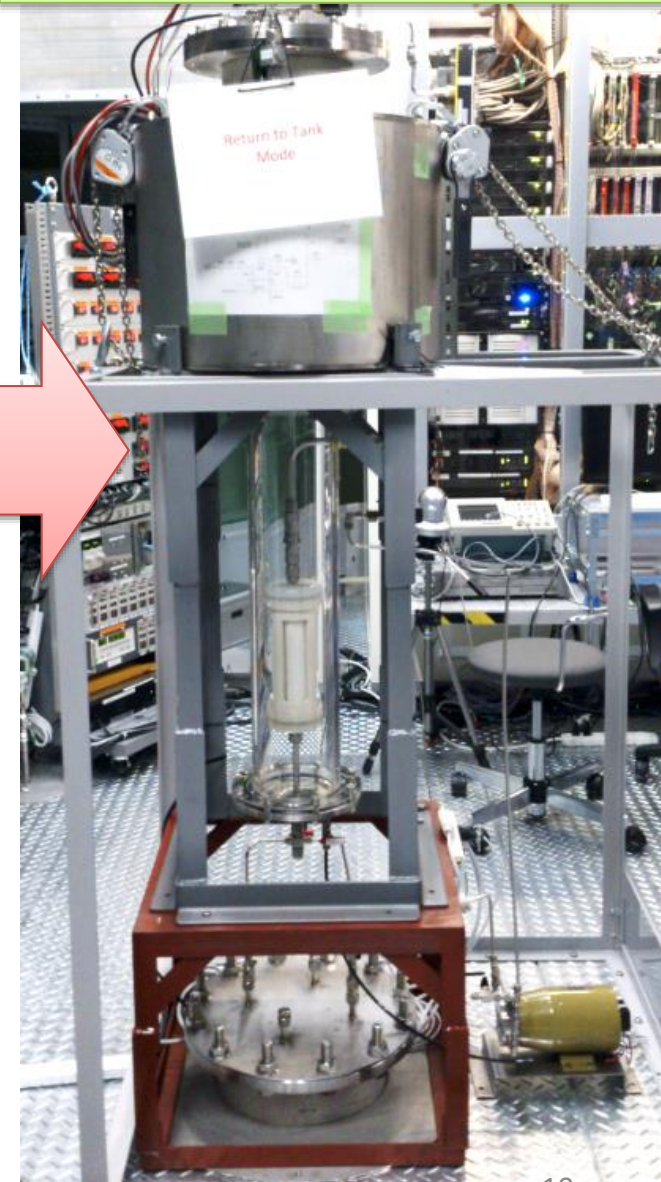


70L water

NIM A421 (1999) 334



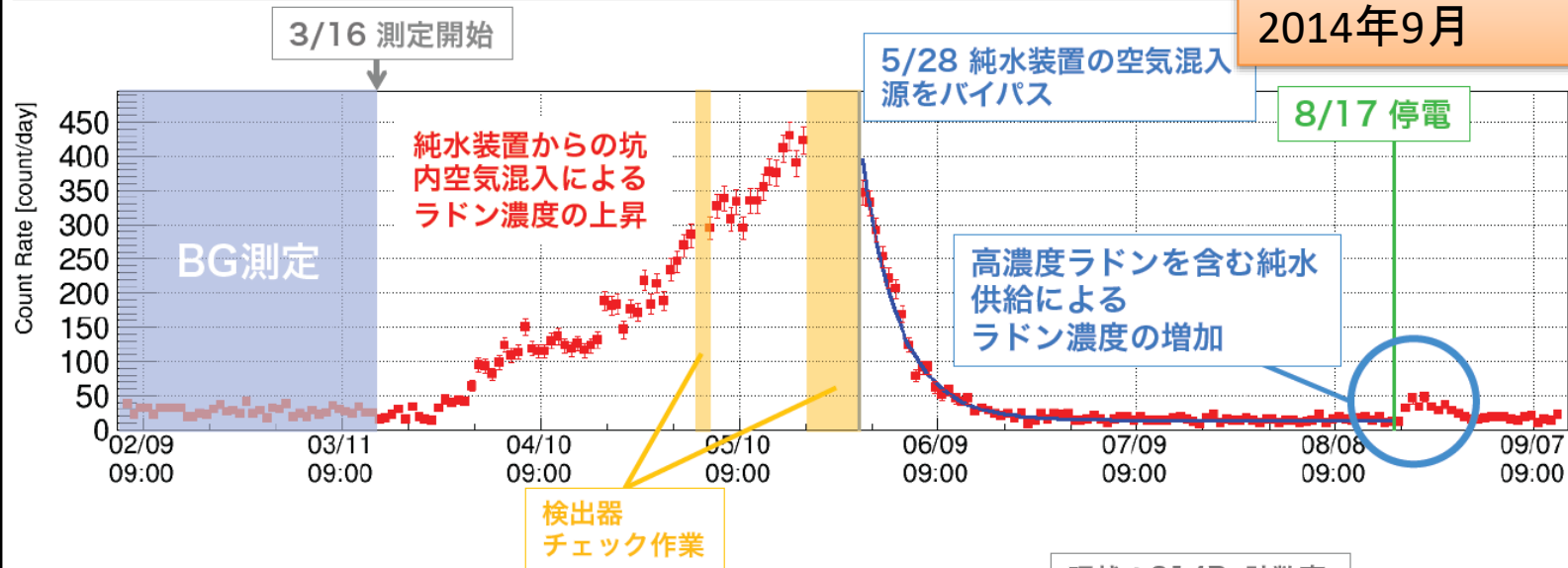
**HFM + 70L water
in LAB-C & LAB-A**



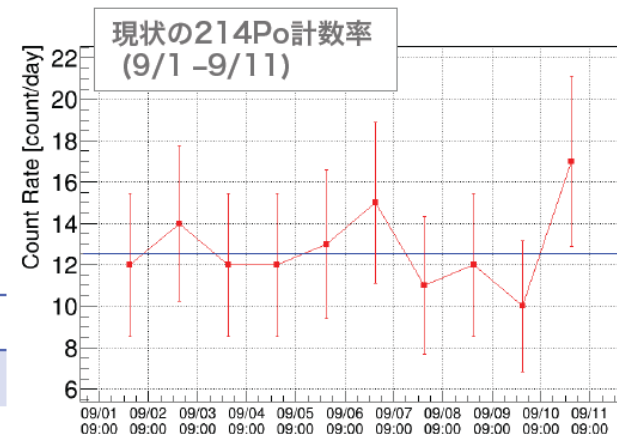
HFM + 70L waterの応用@XMASS

測定結果： ^{214}Po の計数率の時間変動

大西@日本物理学会
2014年9月



- 純水装置からの坑内空気混入によるラドン濃度の上昇を発見することができた
- 現在、タンク中純水の ^{214}Po の計数率は安定
- 定常状態では、液相中のラドン濃度が気相中のBGレベルより低くなっていて、気相→液相へのラドンの溶解込みが発生していると考えられる

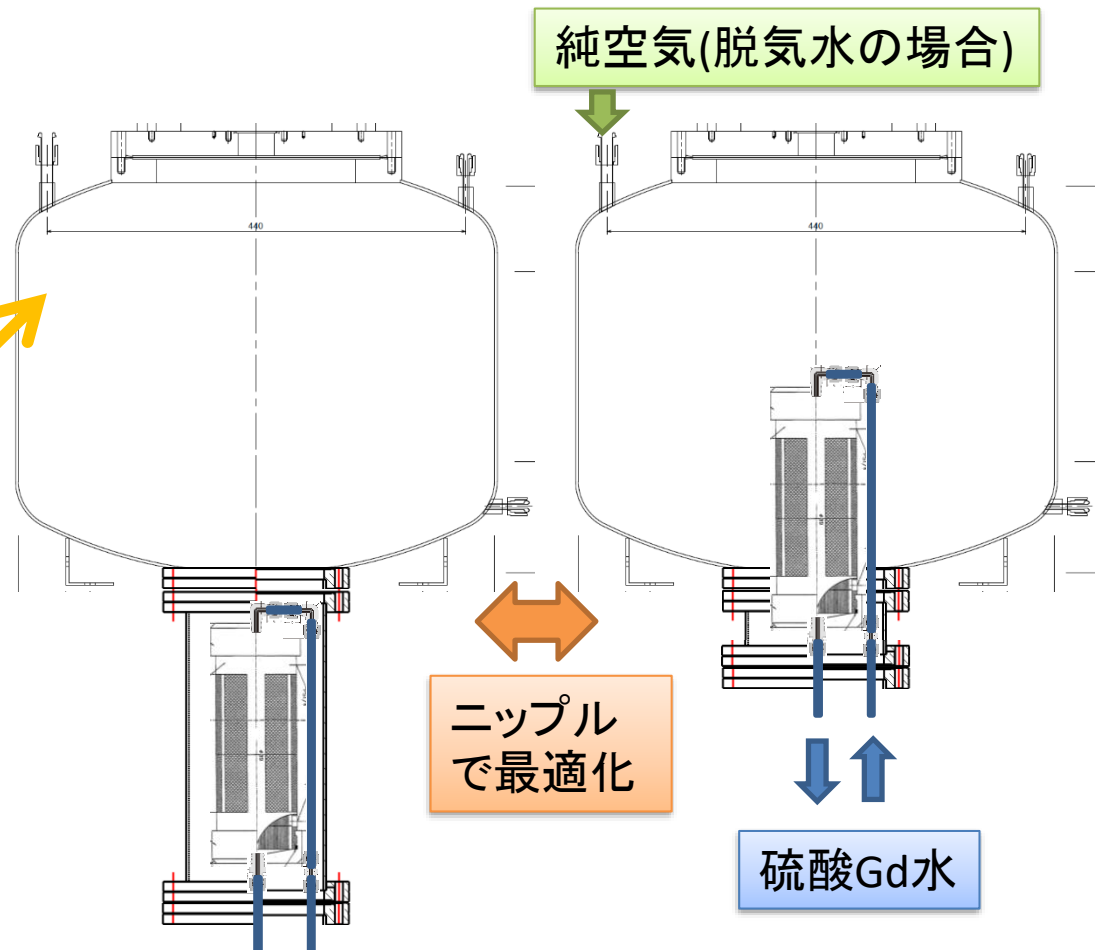


^{214}Po の計数率 [count/day]	
現状の測定 (9/1-9/11)	12.5 +/- 1.1
測定期間中の最大値 (5/19)	429 +/- 21
バックグラウンド測定	23 +/- 1

^{222}Rn : $\sim 8 \text{ mBq/m}^3$

80L検出器+中空糸膜モジュール(案)

- 80L検出器の下部にICFフランジを追加する(D01)
- ICFフランジと電解研磨ステンレス管でハウジングを作る(C01)
- ニップルの長さでモジュールの位置を調整



XENONnT nVeto中のRn濃度モニター

現状:

D01: 竹田(ICRR) for B01

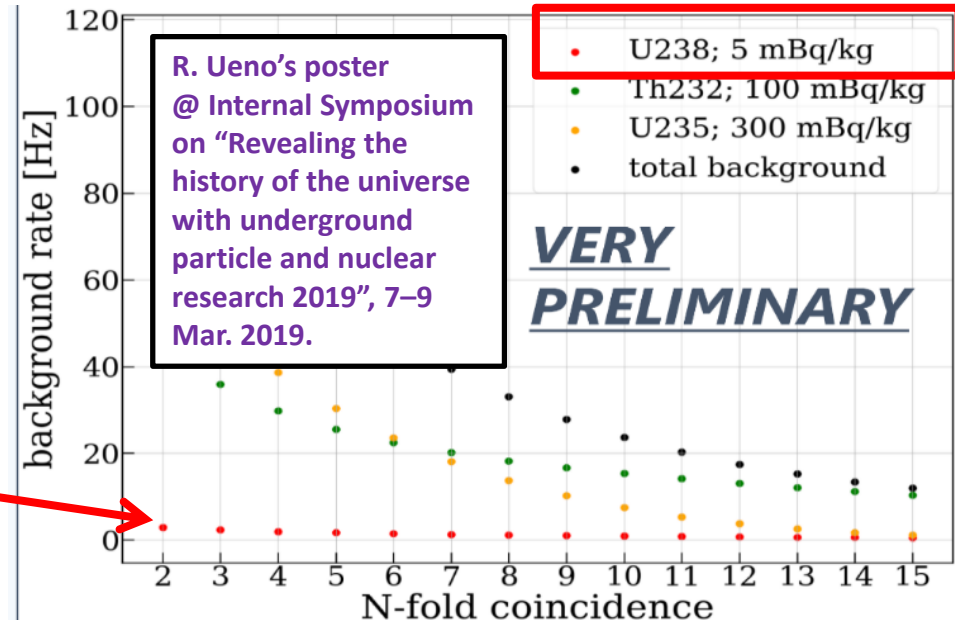
- nVeto: XENONnT に設置される水Gdチェレンコフ型の中性子veto カウンター
- $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ パウダー中の不純物 ^{238}U 5 mBq/kg が nVeto に与える BG は、~数 Hz → nVeto の要求を満たす (右下図)。
- ^{228}U 5 mBq/kg は、~10 mBq/m³ (0.2% Gd 水溶液) に対応するので、放射平衡を仮定すると、 ^{222}Rn を < 10 mBq/m³ の感度でモニターしたい。
- 「70L ラドン検出器+中空糸膜モジュール」でもぎりぎり要求を満たすが、safety factor も考慮して Rn 濃度のモニター感度を < 1 mBq/m³ にしたい。

本研究:

- 「80L ラドン検出器+中空糸膜モジュール」を応用する

“Typical RI in $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ powder”
M. Ikeda's talk @ Neutrino2018

source	Activity
^{238}U	5 mBq/kg
^{232}Th	100 mBq/kg
^{235}U	300 mBq/kg



中空糸膜モジュールの開発

先行研究: 地下素核C01、地下素核D01、等

- 現行の6インチ中空糸膜モジュールの脱気性能試験を行い、0.2%硫酸Gd溶液に対し、期待通りRn除去を行うことを確認した。
- 既製品の一部の部材が、硫酸Gdとの相性があまりよくない事が判明した。
 - 相性の良い部材を用いた6インチモジュールの試作をした

本研究:

- 既製品の長期耐久性の試験
 - 試作した6インチモジュールの試験
 - 大型10インチモジュールでの開発
- SK-Gdで使う膜脱気装置を提案したい

C01: 竹内(神戸)
D01: 池田(ICRR)
for C01

6インチ
モジュール

10インチ
モジュール



SKで使用中
(60モジュール)

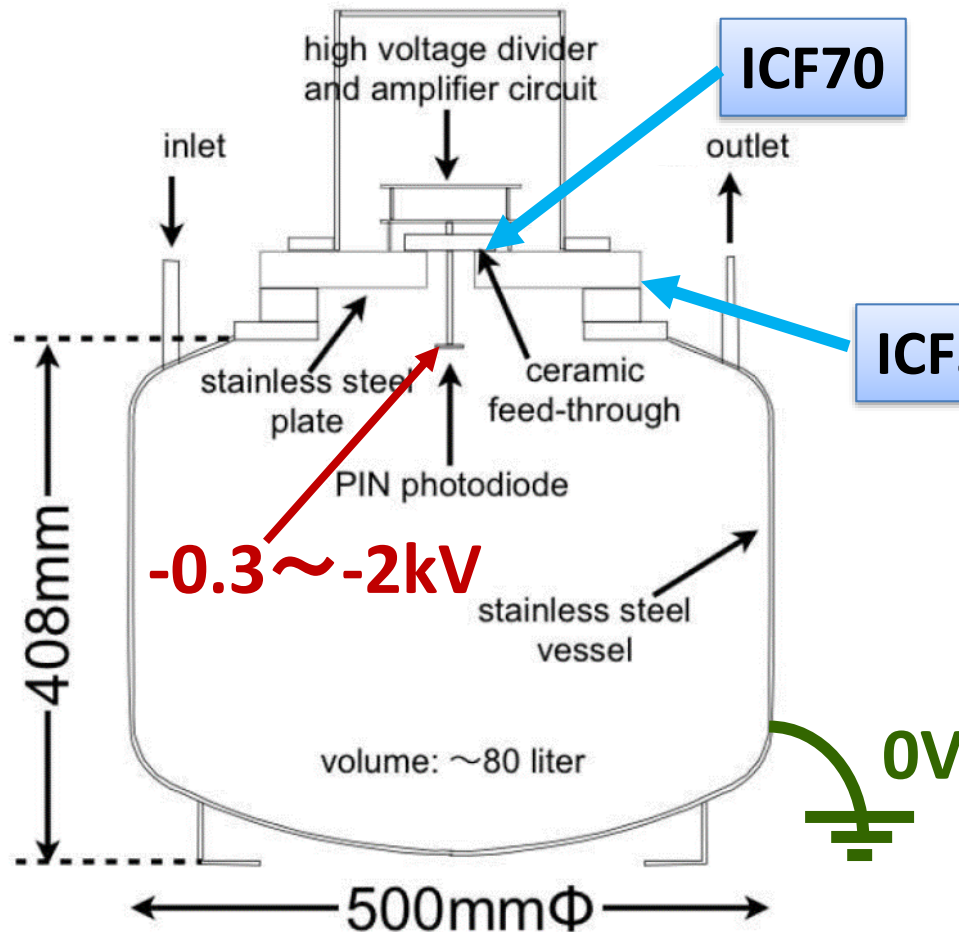
まとめ

- 地下宇宙での硫酸Gd水中ラドン関係の研究トピック
 - 高感度分析手法の確立
 - 濃縮して高い感度でのRn測定を**自動化**。
 - 分析は、~1回/週を目指す。
 - 感度 = $\sim 0.1 \text{ mBq/m}^3$
 - リアルタイムRn測定の高感度化
 - 中空糸膜モジュールの硫酸Gd対応、**BGレベルの低減**
 - 分析はリアルタイム。応用先はSK-Gd(C01)、nVeto(B01)
 - 感度 = $\sim 0.5 \text{ mBq/m}^3$
 - 中空糸膜モジュールの開発
 - 6 inch モジュール(既製品、試作品)の各種試験
 - 10 inch モジュールの開発
 - **SK-Gdで使える膜脱気装置を提案**
- C01とD01で連携して取り組む

80Lラドン検出器

- J. of Phys. Conf. Series 469 (2013) 012007
- PTEP 2015, 033H01
- NIMA 867, 108 (2017)

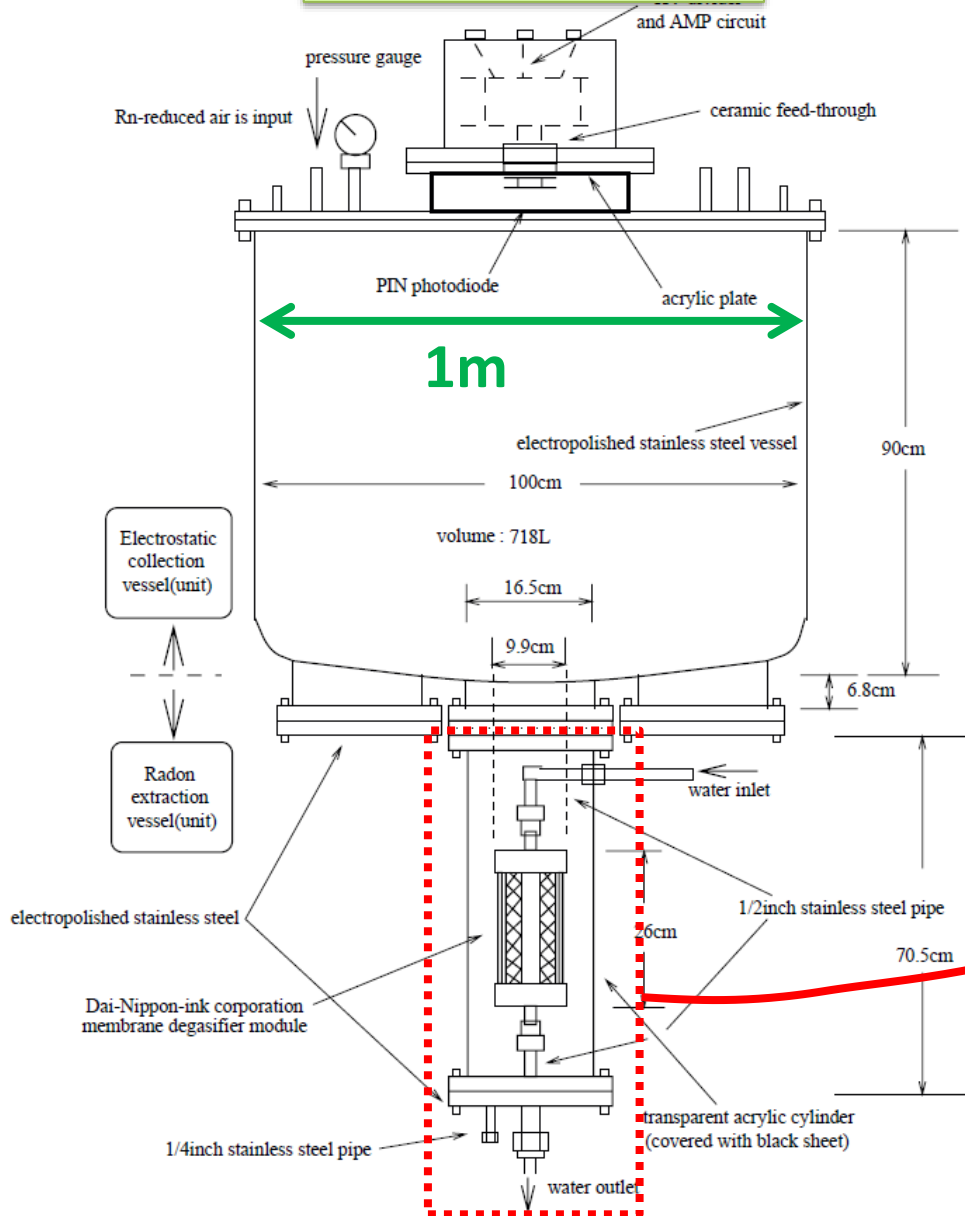
Method = **PIN photodiode** + **Electrostatic collection**



- 帯電したラドン娘核をフォトダイオード表面に静電場により捕集する
- フォトダイオード表面での α 崩壊のエネルギーを測定し、カウントする

700L water

NIMA 497 (2003) 414



70L water

NIM A421 (1999) 334

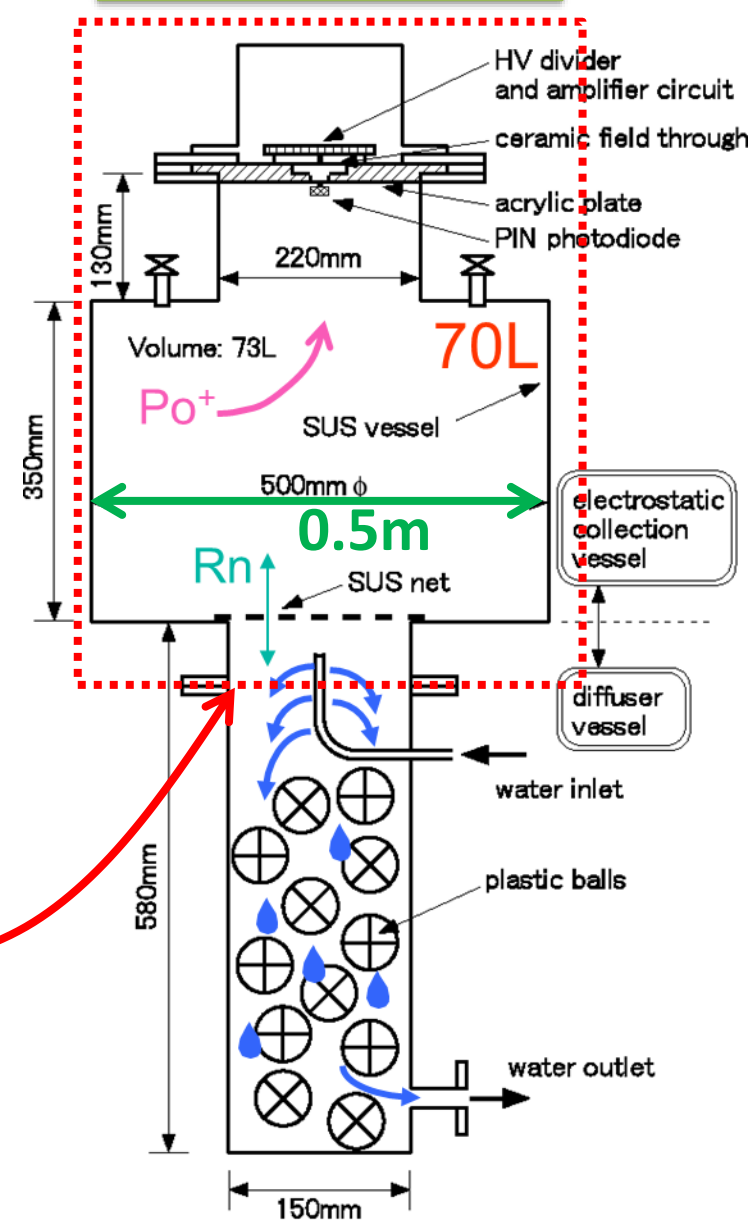


Fig. 1. A schematic view of the super-high sensitivity full radon detector for water.

Onishi's thesis

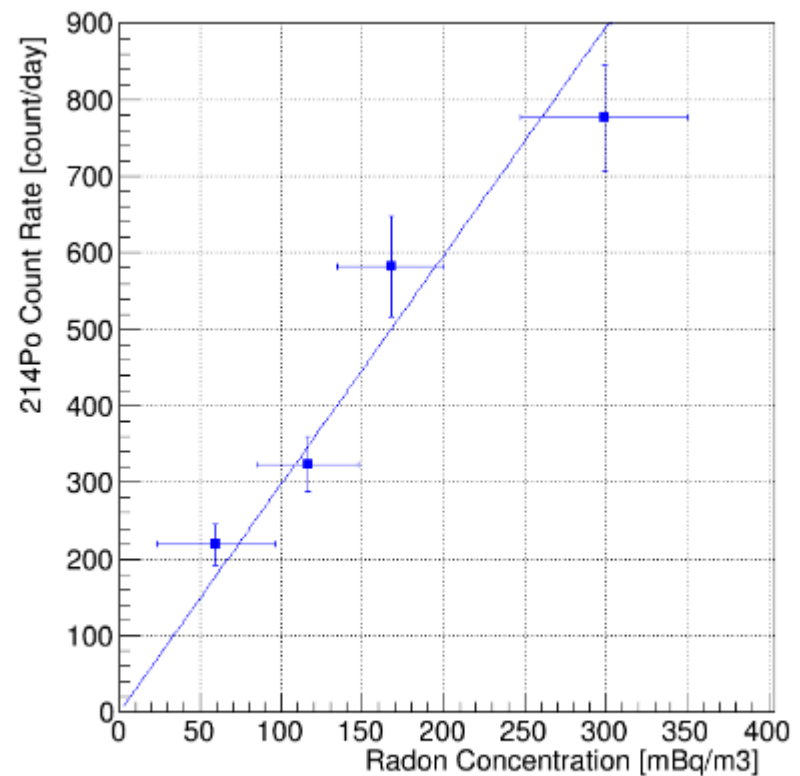
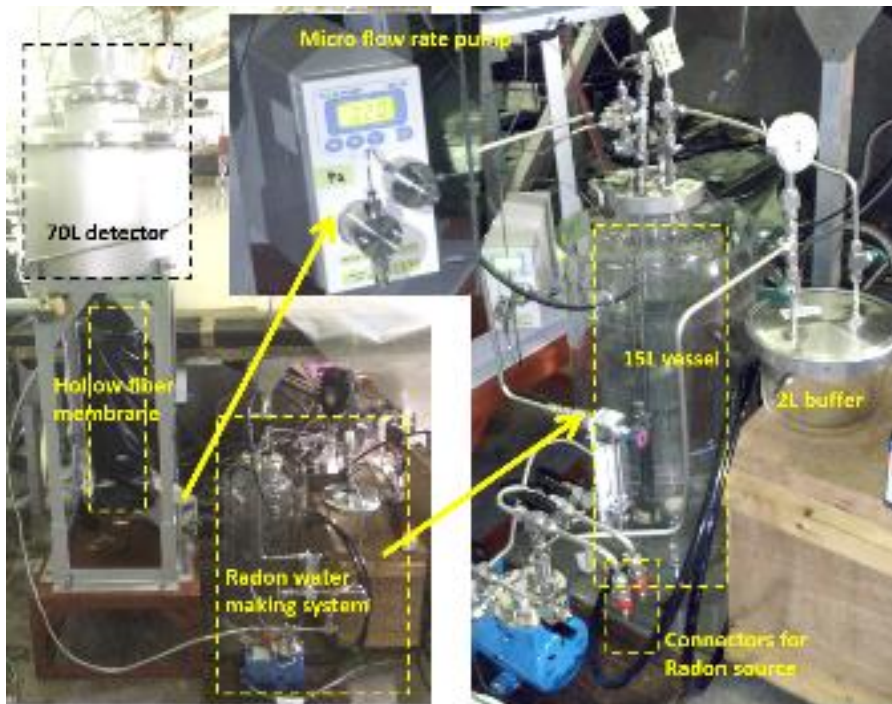


図 5.9 純水中ラドン濃度とインプット水バックグラウンドを考慮した ^{214}Po 計数率 ($R_0 - R_i$) の関係

#	R_0 [count/day]	$R_0 - R_i$ [count/day]	CF [(count/day)/(mBq/m ³)]
0	225.1±27.3	219.2±27.3	3.7±2.3
1	330.3±36.5	324.4±36.5	2.8±0.8
2	588.6±65.8	582.7±65.8	3.5±0.8
3	782.4±70.0	776.5±70.0	2.6±0.5
各測定における平均			3.0±0.4