

改良されたラドン検出器の 性能評価について

2017年 10月16日

第2回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会

東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

中畑研究室 修士課程1年 岡本 幸平

中畑雅行、田阪茂樹、関谷洋之、
池田一得、中野佑樹、Guillaume Pronost

自己紹介

- 岡本 幸平(Kohei Okamoto)
- 東京大学 宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設
中畑研究室 修士課程1年
- 研究内容
 - Rn検出器の改良
 - 太陽フレアニュートリノの解析
- 趣味:日本酒、野球

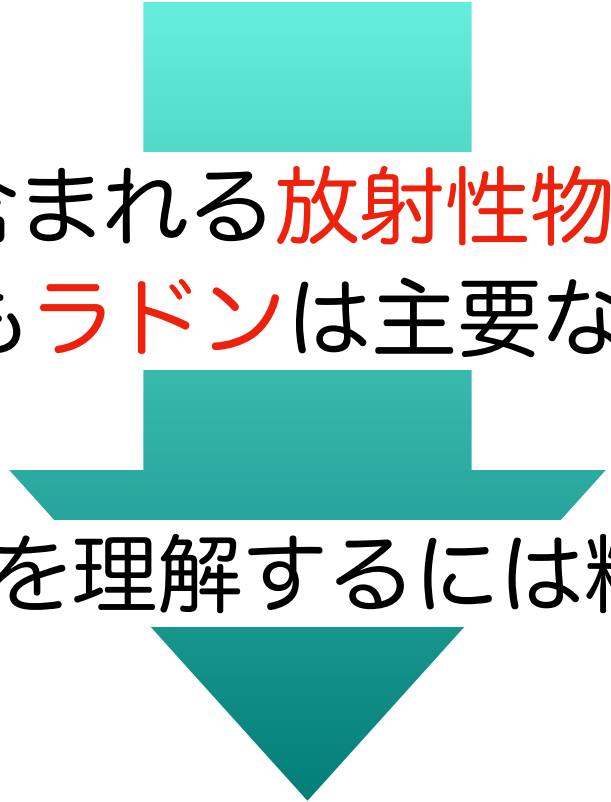


発表の内容

- 研究の背景と目的 (p4~p7)
 - なぜラドンなのか
 - ラドンの検出法とラドン検出器
- 検出器の較正実験 (p8~p9)
- 結果と考察 (p10~p15)
- 今後の予定 (p16)
- まとめ (p17)

研究の背景と目的

最先端のダークマター探索やニュートリノ実験は宇宙線由来のバックグラウンド(BG)を低減するため、**地下で実験を行う**

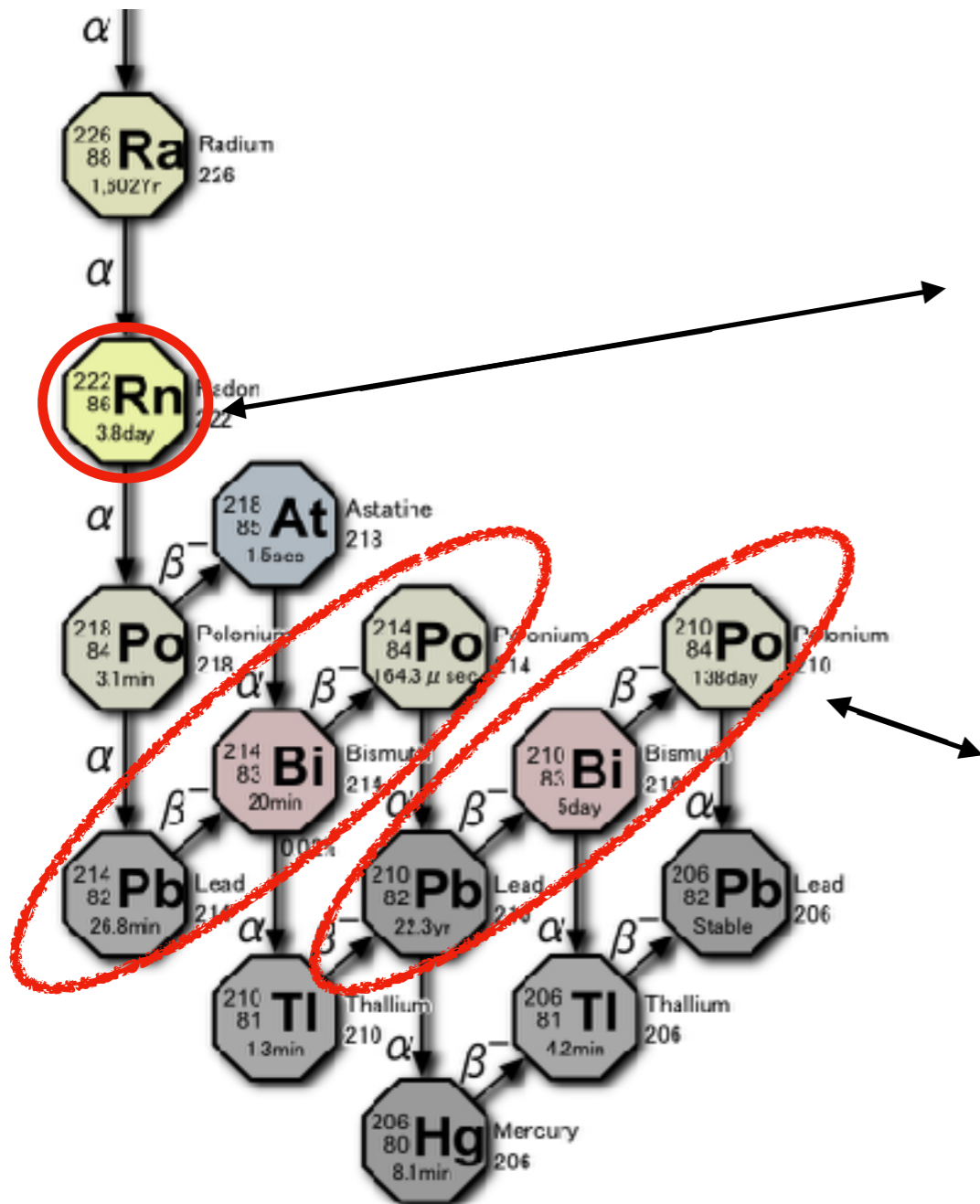


検出器や環境(地中)に含まれる**放射性物質**が最後まで残るBG源
中でも**ラドン**は主要なBG源

ラドン由来のBGを理解するには精密な測定が必要

より**精度の高い**(感度の良い)ラドン検出器を開発する

なぜラドン(^{222}Rn)なのか



性質

- ウラン系列で生成される核種
- 放射性元素かつ希ガス
- 半減期 3.824日

バックグラウンドになる理由

Rnの娘核種から出る放射線

例: ^{214}Bi からの β 線(Q値 3.27 MeV)

例: ^{210}Bi からの β 線(Q値 1.16 MeV)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain\(4n%2B2,_Uranium_series\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain(4n%2B2,_Uranium_series).PNG)

^{210}Pb γ 線
(0.047 MeV)

^{210}Bi β 線
(Q値:1.16 MeV)

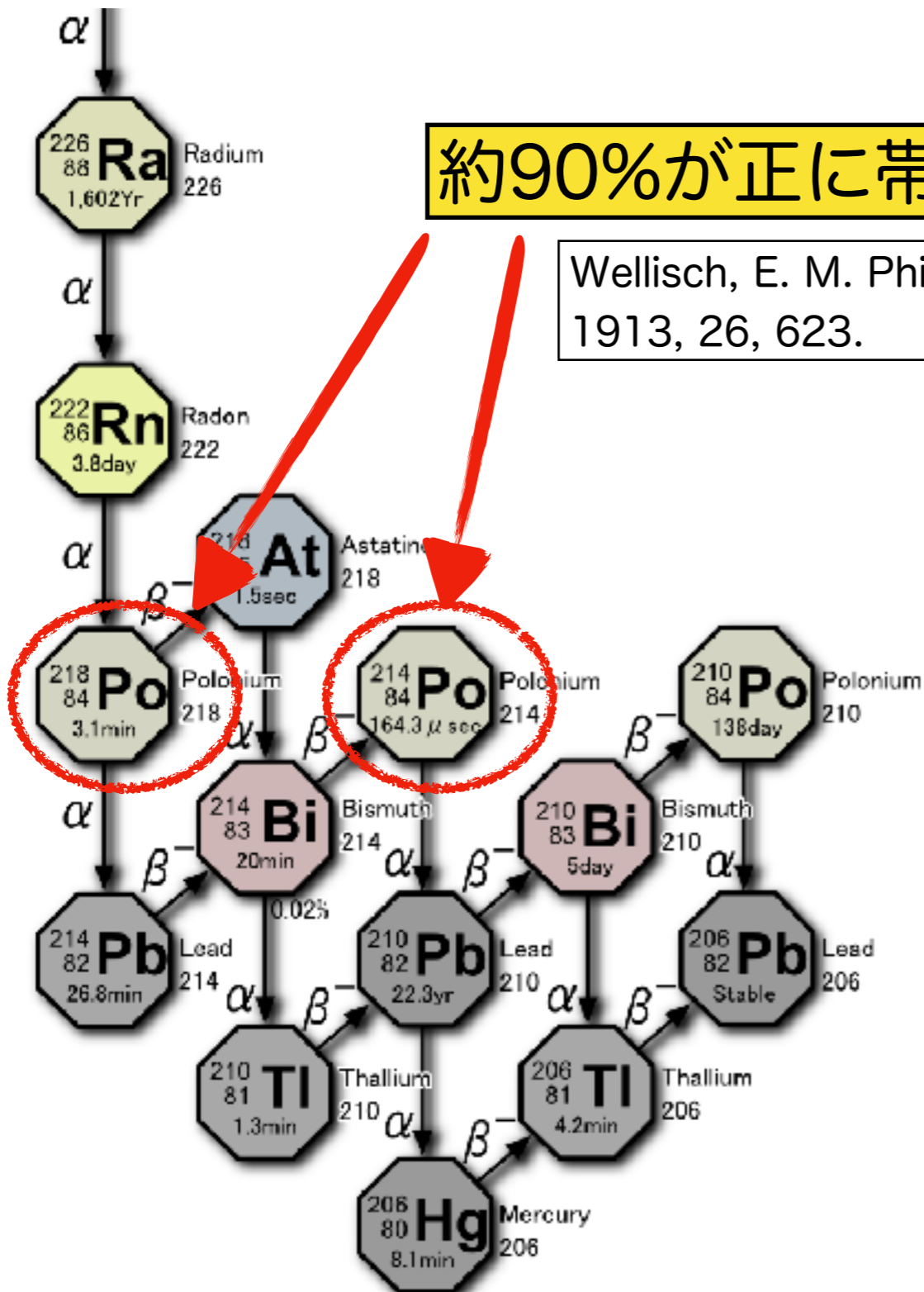
^{214}Bi β 線
(Q値:3.27 MeV)

Dark Matter
1~50 keV

Double Beta Decay
1~4 MeV

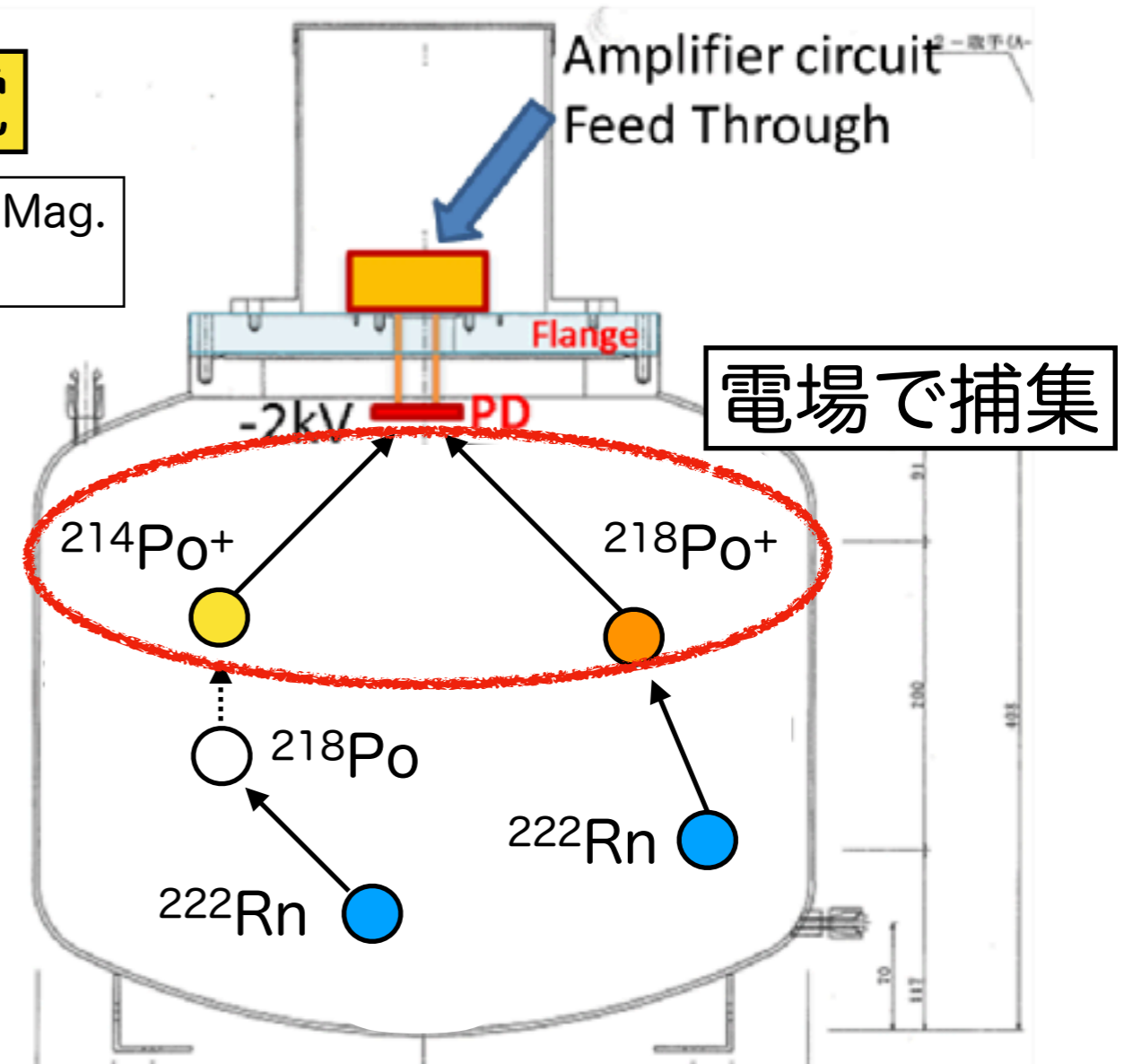
Solar Neutrino
1~15 MeV

ラドンの検出法(静電捕集法)



約90%が正に帯電

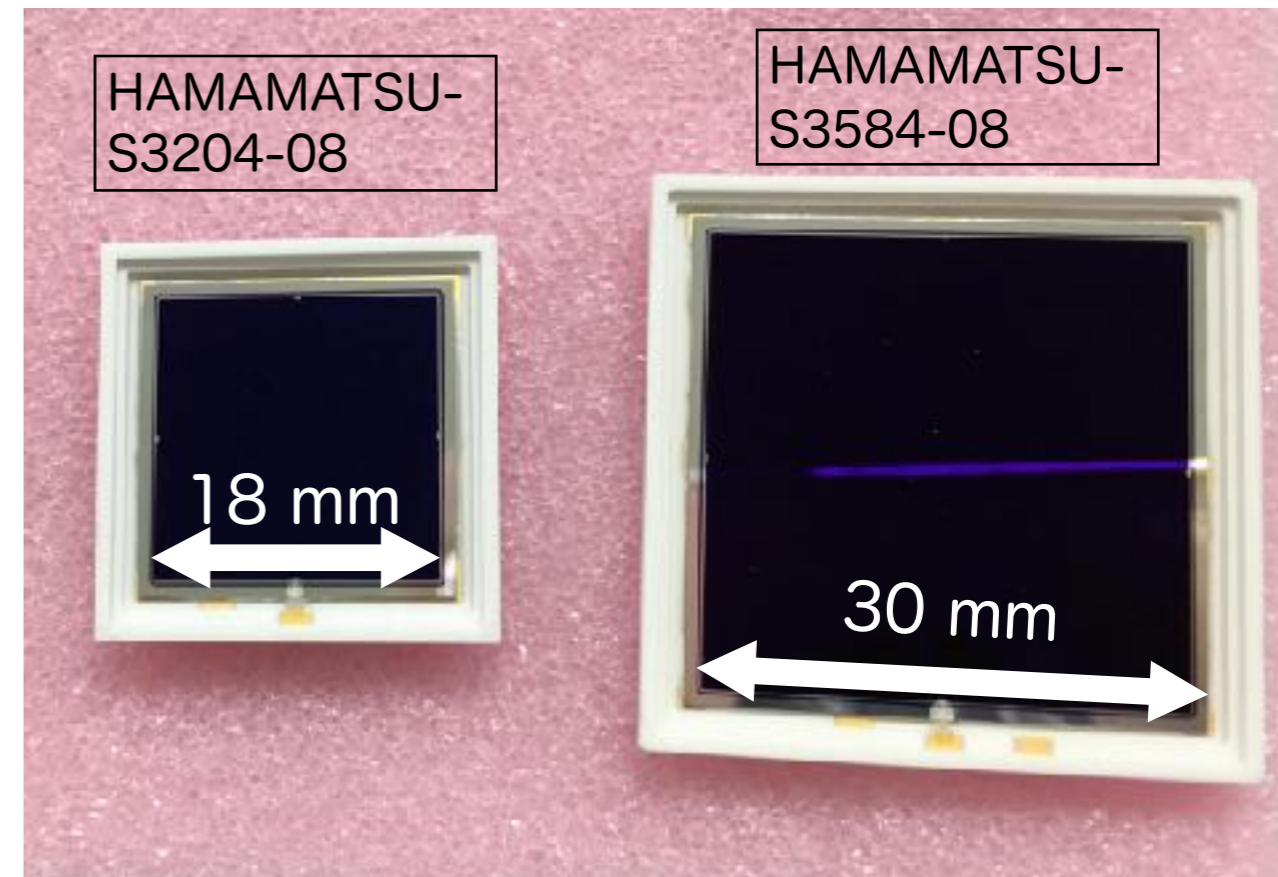
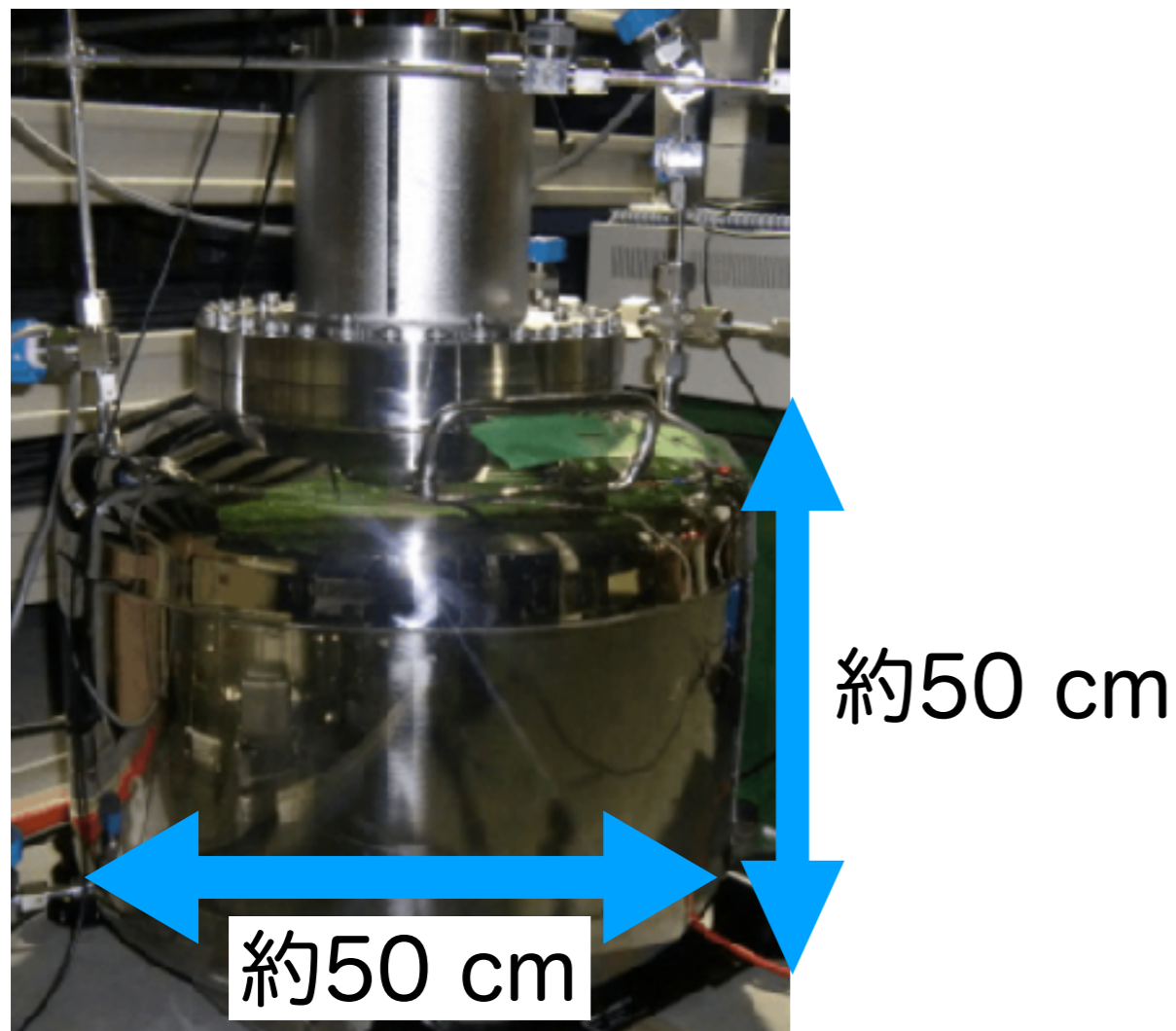
Wellisch, E. M. Philos. Mag. 1913, 26, 623.



より捕集されやすい
214Poから出るα線を見る

80 Lラドン検出器

- 100日程度の長期測定をすれば0.1 mBq/m³の精度でラドンの濃度を測定できる。
Y.Nakano et al, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 867 (2017) 108–114
- Rn娘核種の収集効率をさらに向上させるために、既存のものよりも大きなPINフォトダイオードをラドン検出器に導入した。(右下図)
- 本講演ではその較正実験による性能評価と既存の検出器との比較を報告する。

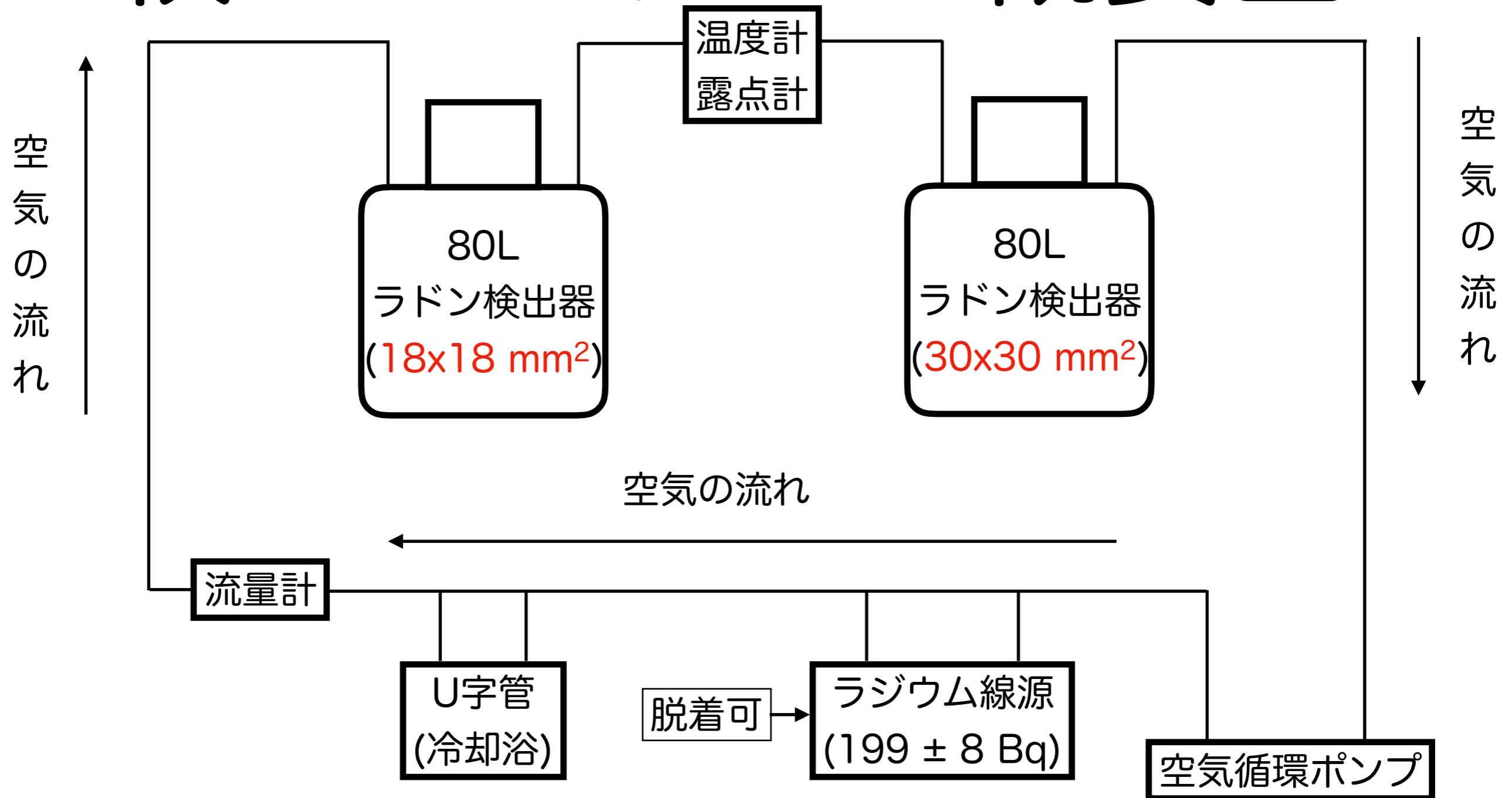


研究の内容

- ^{214}Po の信号の確認
- 検出器自体＋較正システムのBGレートの評価
- ^{214}Po の収集効率の評価、比較
- 収集効率のHV依存性の評価、比較

日付(2017年)	内容
8月1日～8月19日	較正システムの配管を組み上げた。
8月19日～9月18日	ラドン検出器のバックグラウンドを測定した。
9月19日～9月27日	ラドン検出器の較正実験を開始した。
9月28日～	ラドン検出器のHV依存性の違いを見ている。

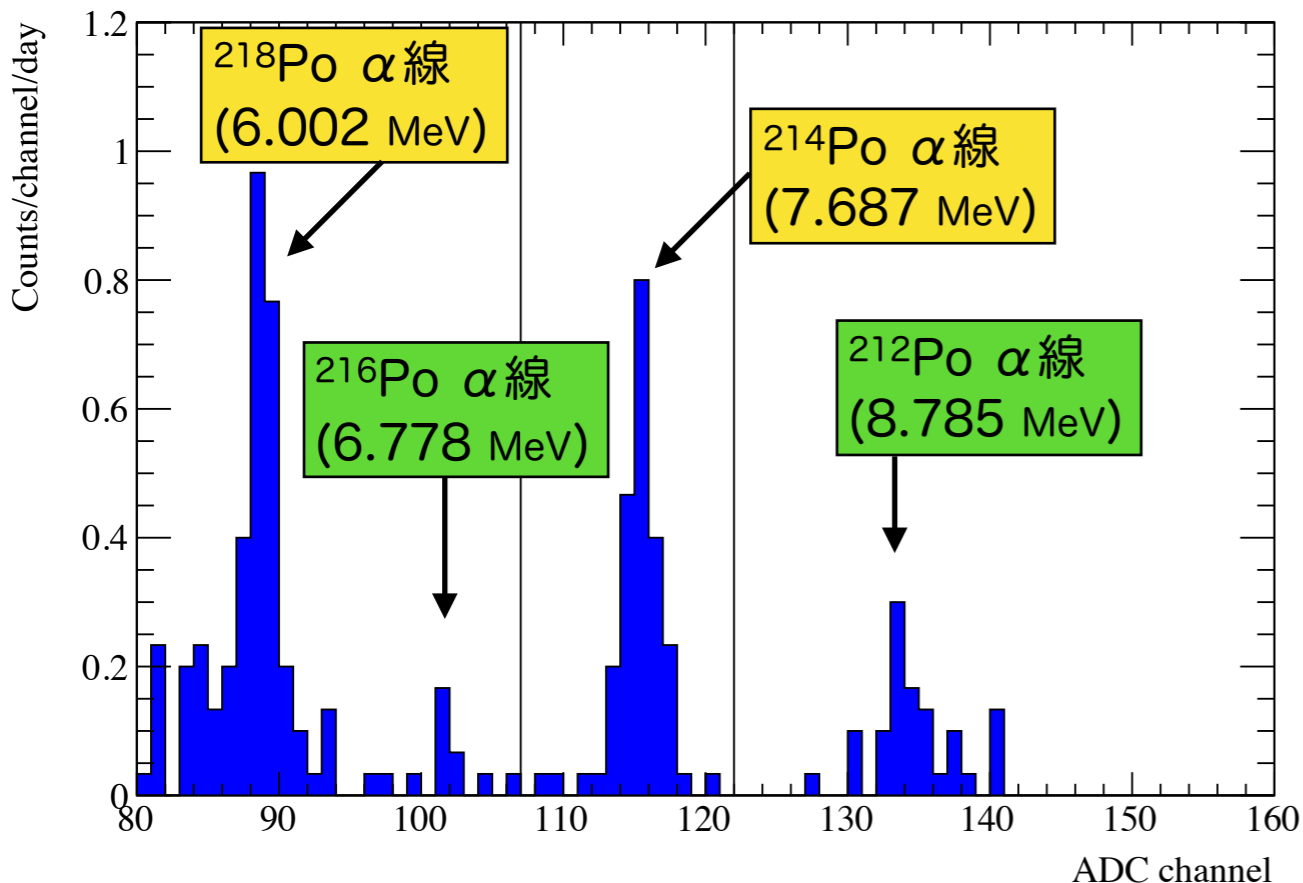
校正システムの概要図



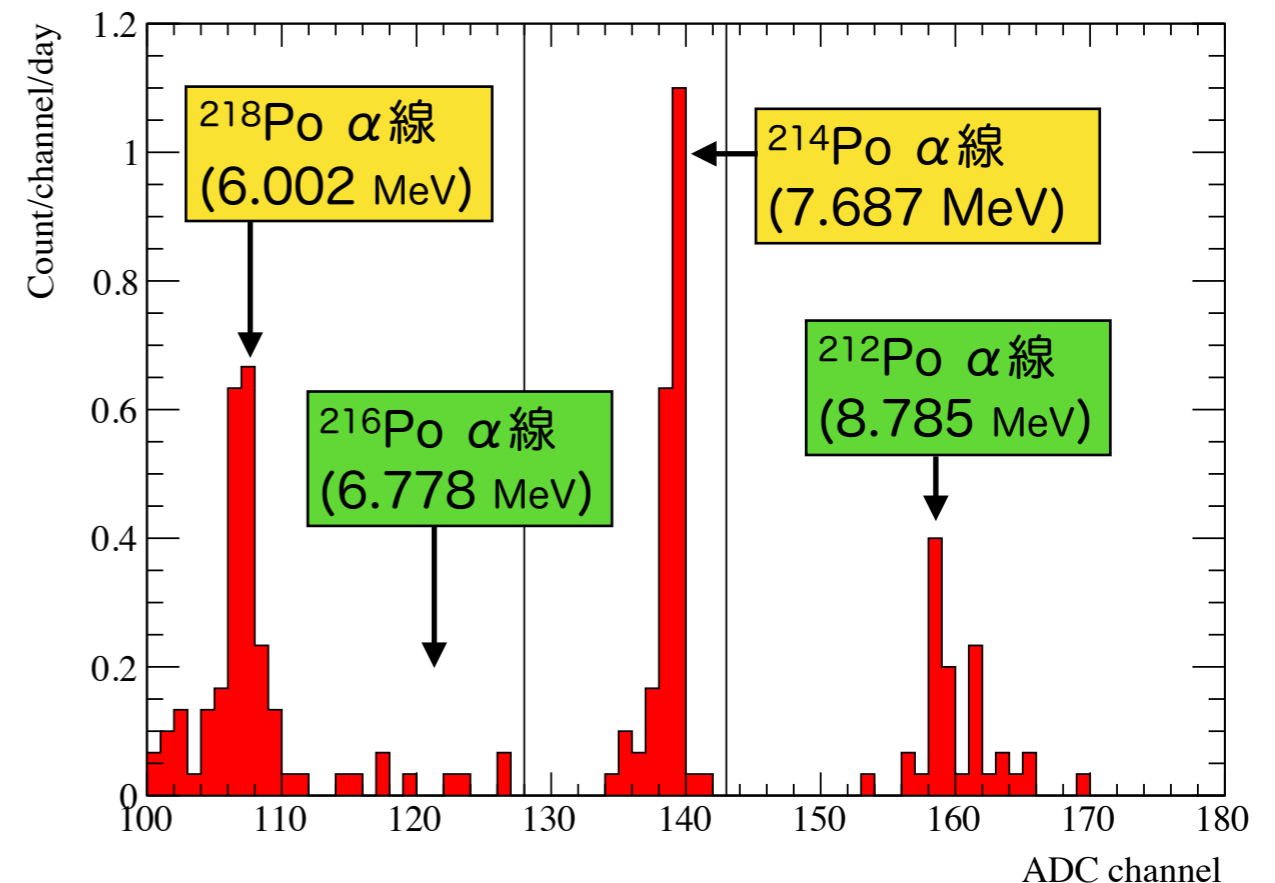
- U字管は冷却浴に入っており、湿気をなくす働きがある。
室温 $25.0 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ に対して露点は $-68.7 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ であった。
- 流量は流量計でコントロールし、 0.6 L/min にした。

校正システムのBG測定

- ラドン検出器の校正実験を行う前に、ラドン検出器自体+校正システムのバックグラウンドを測定した。
- ラドン検出器に純空気を大気圧(101 kPa)と同程度になるまで入れて、HV(-2 kV)をかけた。
- ^{214}Po のシグナル領域はこの後に行った校正実験のシグナルを見て決めた。

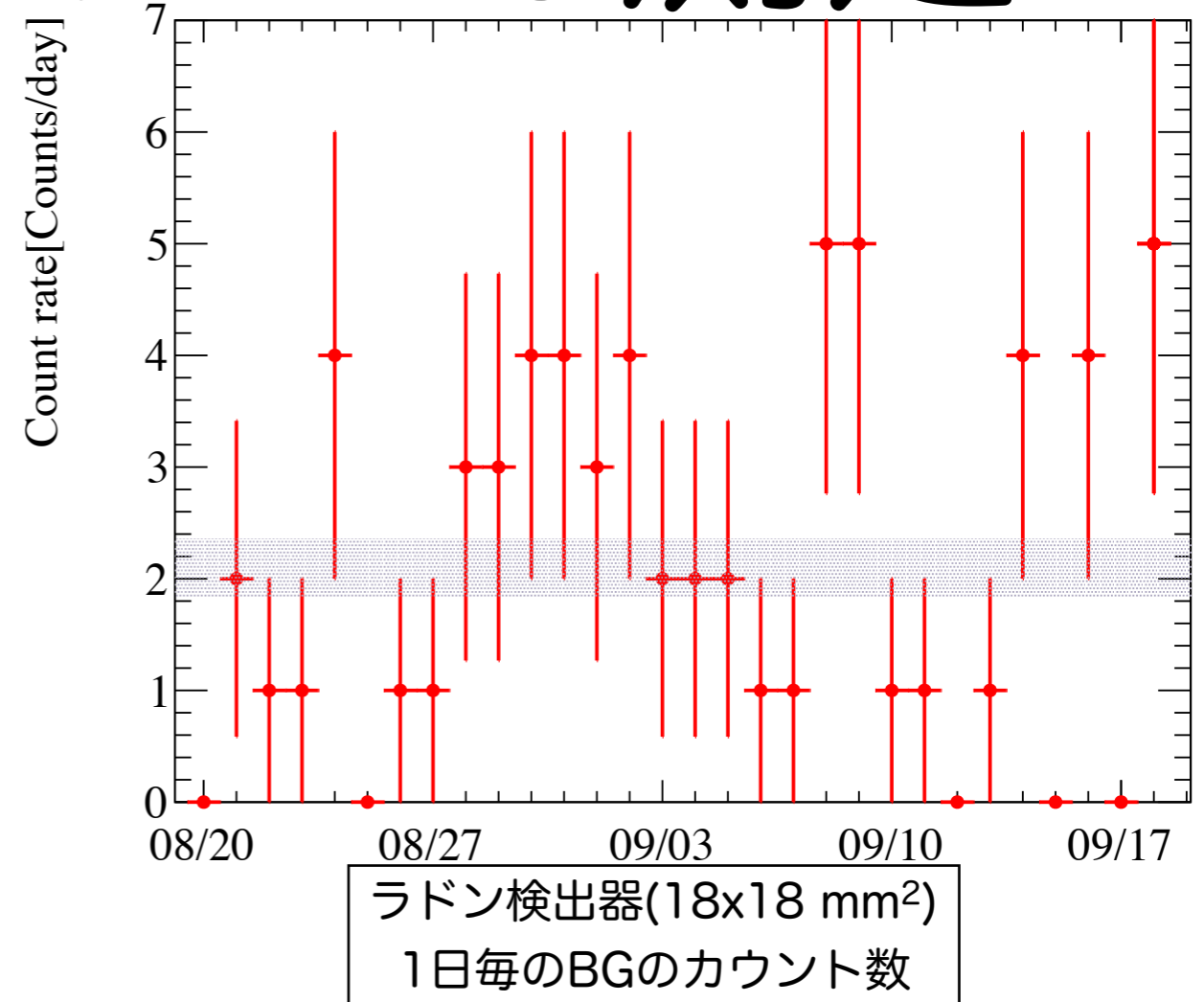
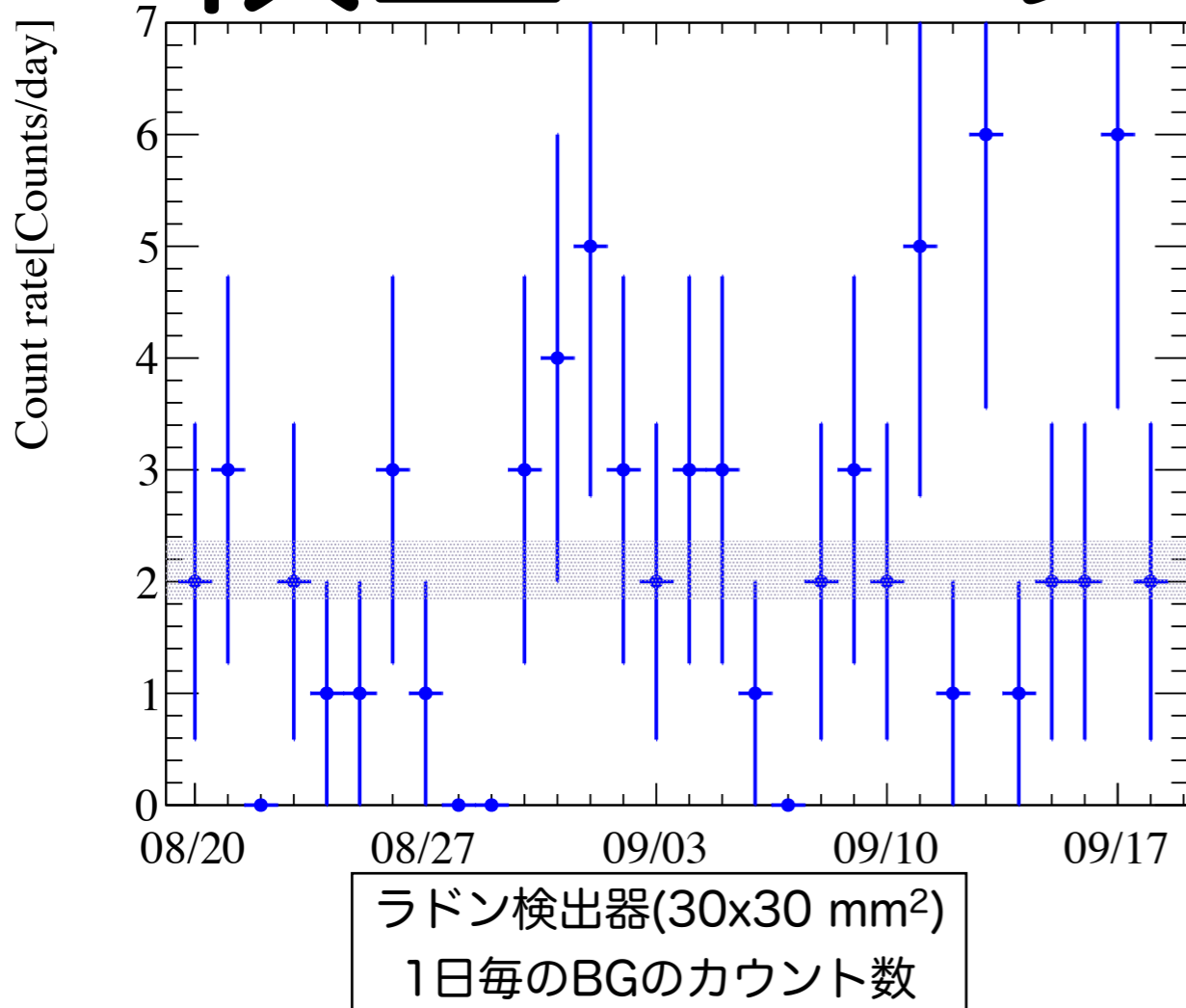


ラドン計(30x30 mm²)のBG



ラドン計(18x18 mm²)のBG

較正システムのBG測定

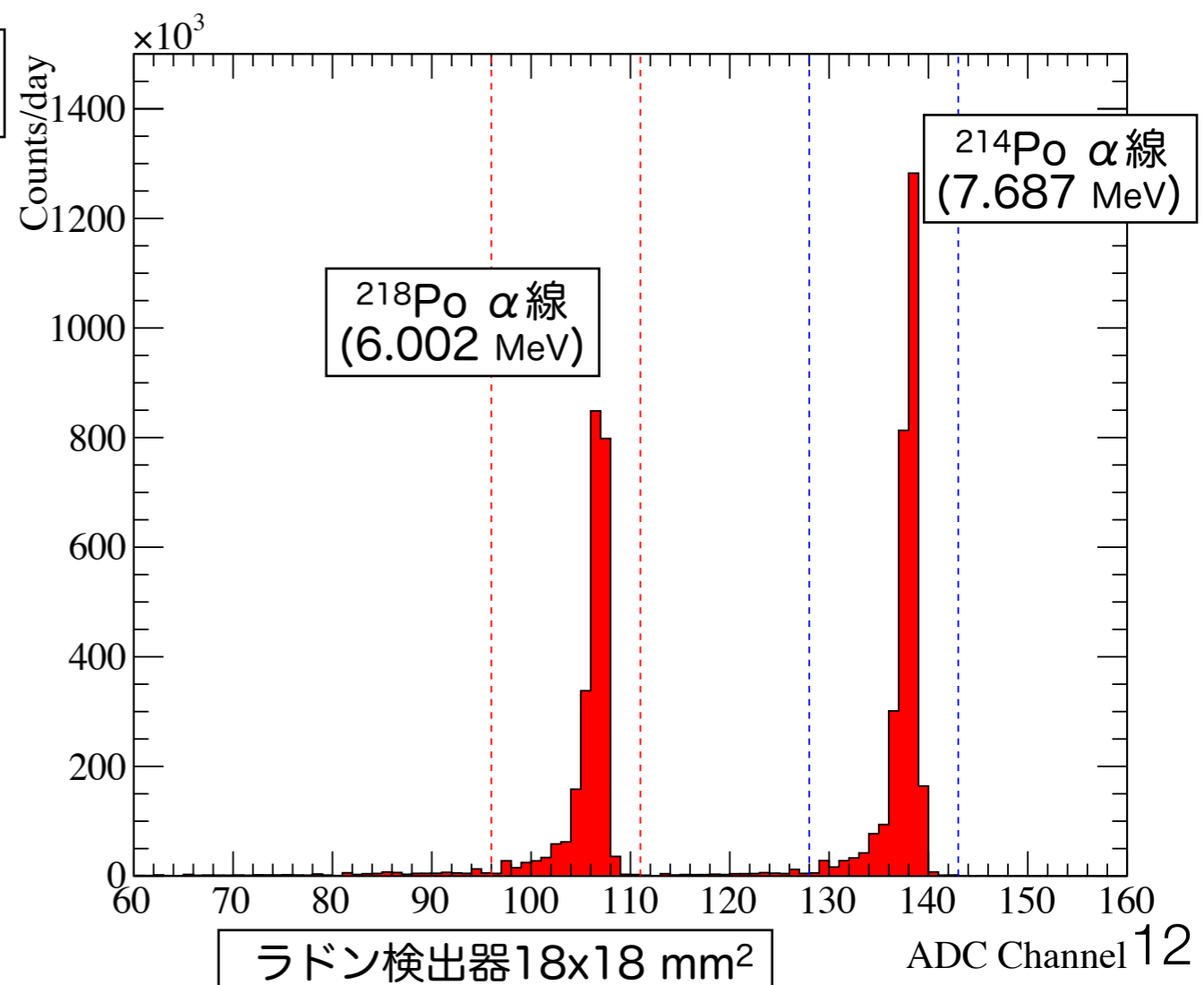
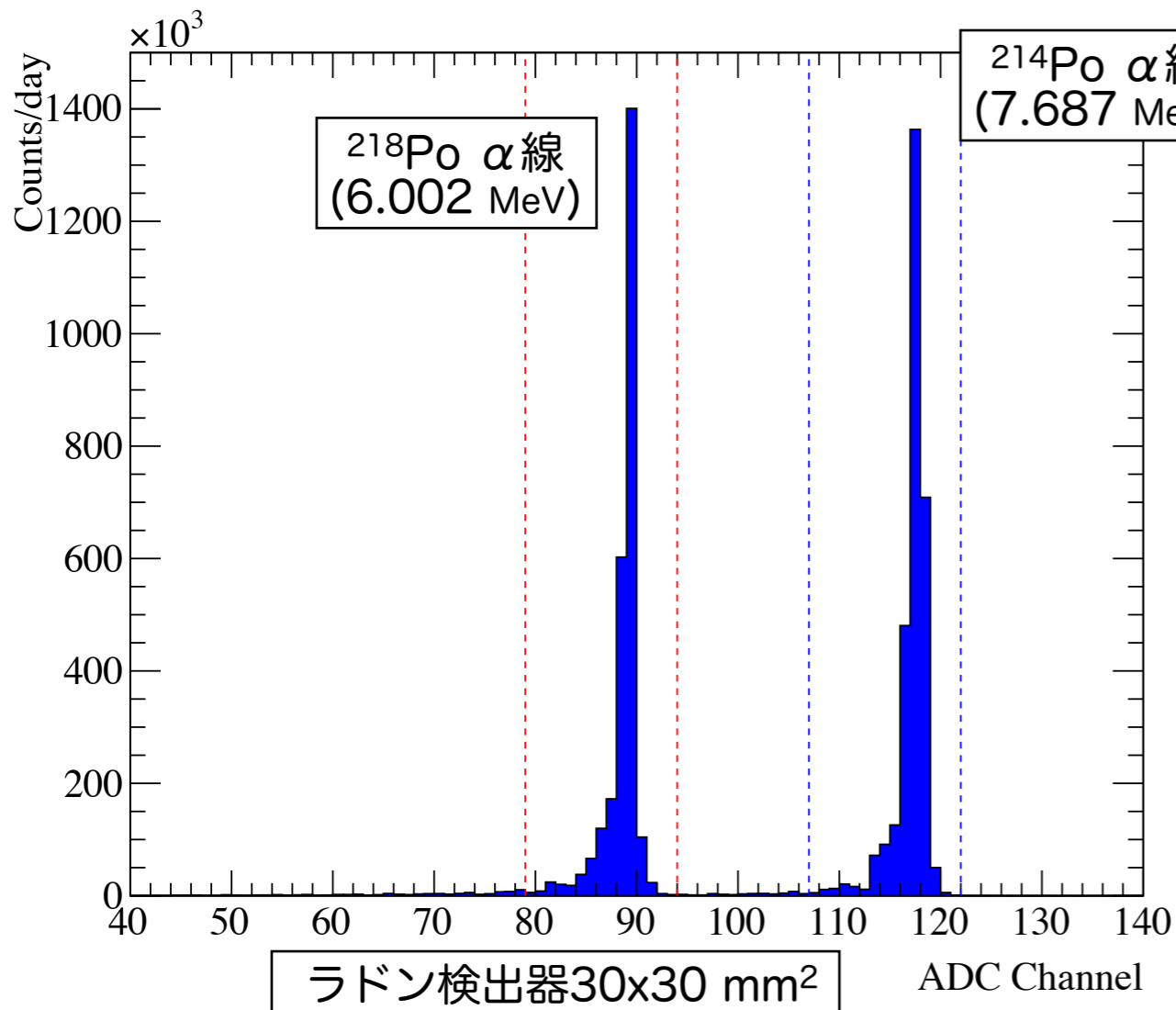
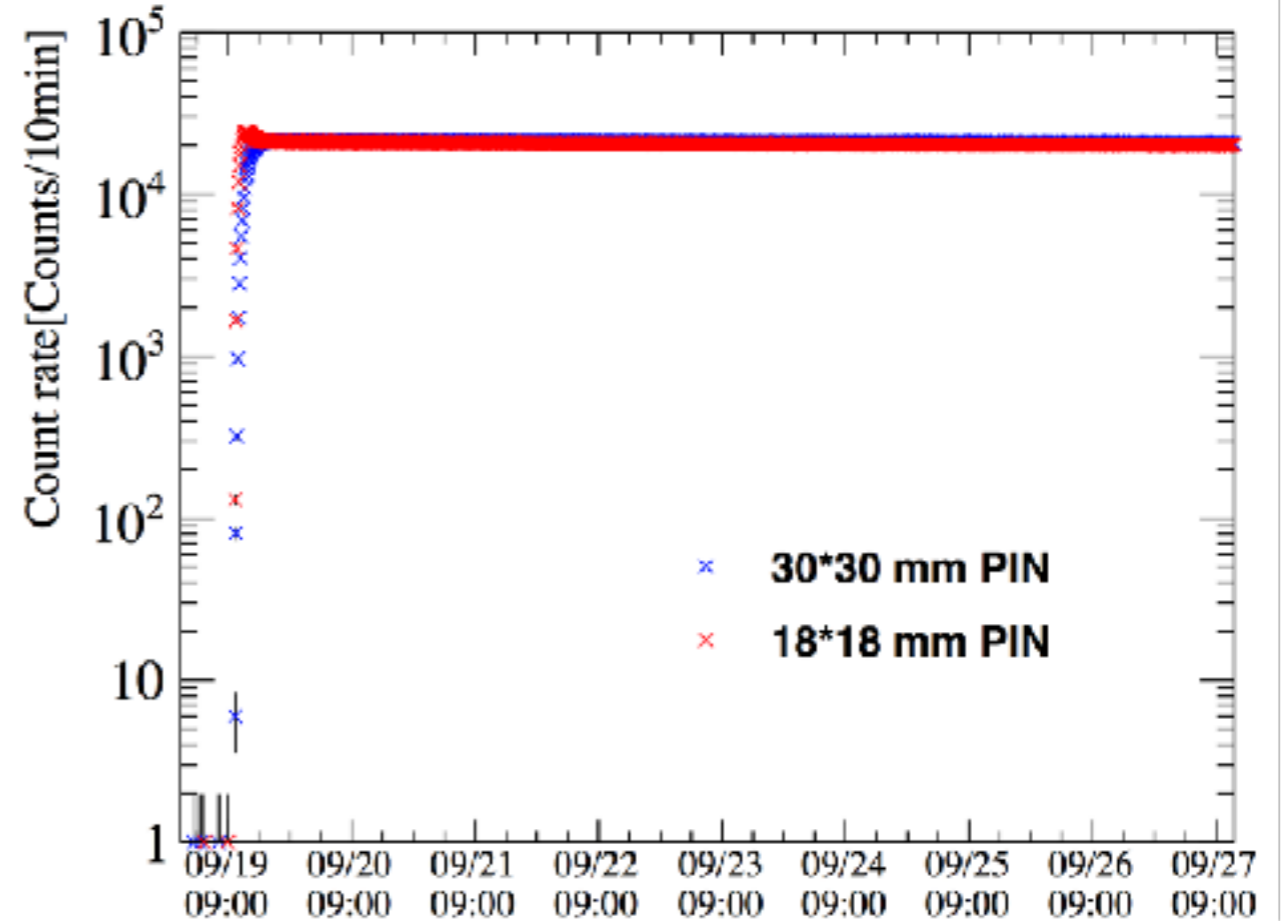


- 8月20日~9月18日までの30日間BGランを行い、上図のようにカウントレートが得られた。
- 較正実験で得られた較正係数(後述)とBGのカウントレートを用いて、較正システムのBGは以下のように求まった。

ラドン検出器	BGカウントレート	BG(濃度)
ラドン検出器(30x30 mm ²) 循環BG	2.22 ± 0.27 Counts/day	0.92 ± 0.11 mBq/m ³
ラドン検出器(18x18 mm ²) 循環BG	2.10 ± 0.26 Counts/day	0.91 ± 0.11 mBq/m ³
先行研究(18x18 mm ²) 封じ切りBG	0.74 ± 0.07 Counts/day	0.33 ± 0.07 mBq/m ³

校正実験

- ^{226}Ra 線源を取り付け
ラドン検出器内を放射平衡
にした。(9/19 am 10:00)
- 得られたシグナルから、
 ^{214}Po のChannelを決めた。
(ピーク-10 から+5まで)



校正実験の結果(校正係数)

- 校正係数: 1日分のカウントレートからラドン濃度を定める係数
(濃度が一定の場合、**Rn娘核種の収集効率と正の相関**がある。)

- 定義:
$$\text{校正係数CF} = \frac{\text{1日あたりのカウント数 [Counts/day]}}{\text{ラドン濃度 [mBq/m}^3\text{]}}$$

- 検出器内の濃度(一定): $1243 \pm 50 \text{ Bq/m}^3$

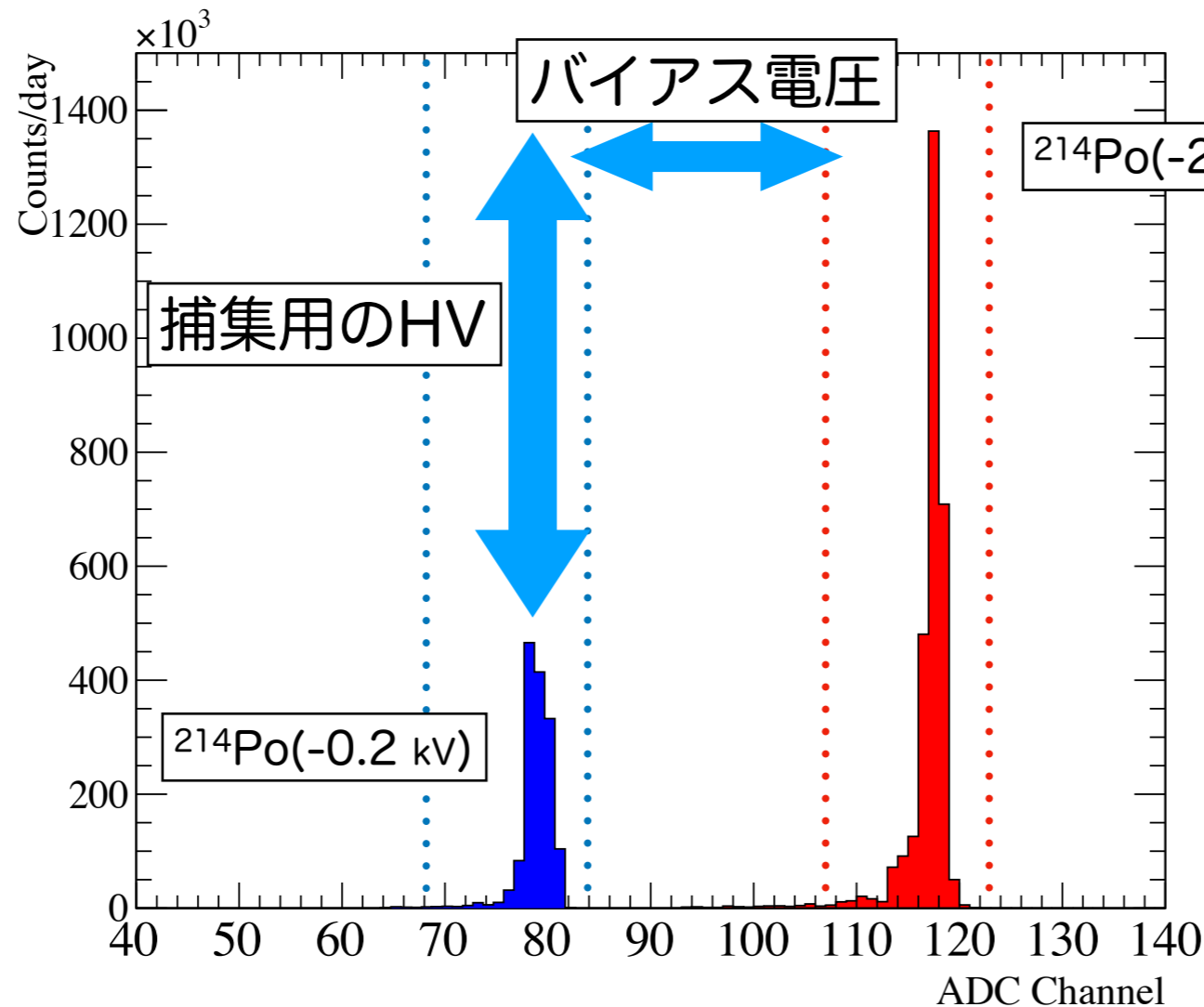
- 絶対湿度(一定): $0.0046 \pm 0.0001 \text{ g/m}^3$

- 校正係数は以下のようになった。

ラドン検出器	校正係数
ラドン検出器(30x30 mm ²)	2.40 ± 0.09 (Counts/day)/(mBq/m ³)
ラドン検出器(18x18 mm ²)	2.32 ± 0.09 (Counts/day)/(mBq/m ³)
校正係数の比較	誤差の範囲で一致

較正係数のHV依存性

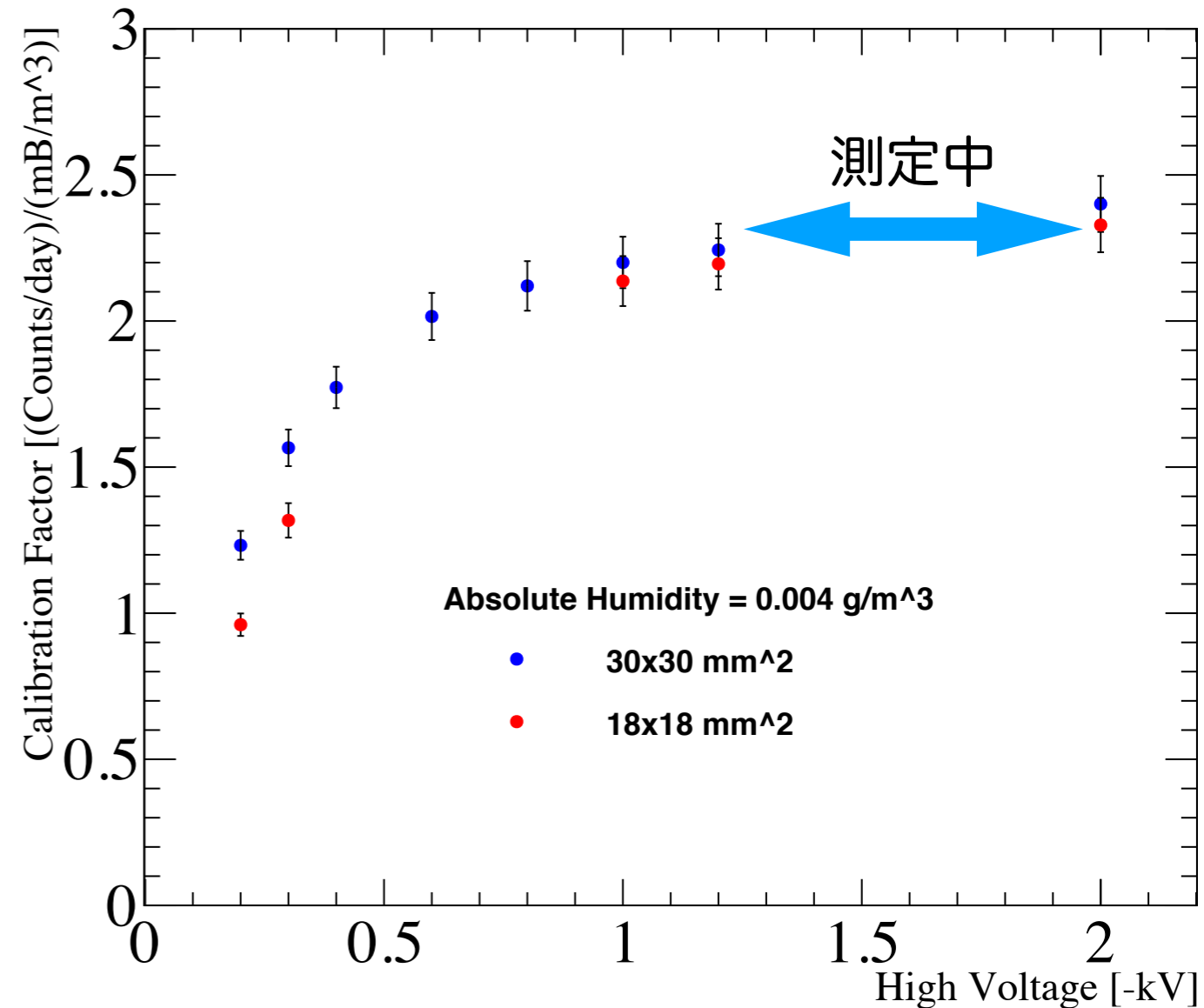
- ラドン検出器に印加するHVを変更し、検出器のHV依存性を評価した。



- 電圧を下げるとラドン検出器内の電場が小さくなり、Rn娘核種の**収集効率が下がる**。
- ラドン検出器の電場を作るための高電圧とPINフォトダイオードにかかるバイアス電圧を同じ回路の中で分割している。**(HV分割回路)**
したがってHVを変えるとバイアス電圧も変化し、**シグナルの領域がずれる**。

校正係数のHV依存性

- 校正係数を-2 kVの時と同様に、各HVについて計算した。
- HVが低い時には、PINフォトダイオードの面積の、電場の大きさに対する比が大きくなるので、校正係数の差が大きくなる。
- -0.2 kVの時にはおよそ**20%の改善**が見られた。



校正係数のHV依存性

ラドン検出器(30x30 mm):青

ラドン検出器(18x18 mm):赤

今後の予定

- 較正係数のHV依存性について残りの点を取る。
- 較正係数の湿度依存性、流量依存性についても実施する。
- HV分割回路を改良し2 kV以上のHVをかけられるようにして、Rn娘核種の収集効率の改善を図る。
- 春の物理学会にて結果を報告します。

まとめ

- 大きいPINフォトダイオードを、既存のラドン検出器に導入した。そして、その較正実験並びに性能評価を行なった。
- 較正システム全体のBGは以下のようになった。

ラドン検出器	BGカウントレート	BG(濃度)
ラドン検出器(30x30 mm ²) 循環BG	2.22 ± 0.27 Counts/day	0.92 ± 0.11 mBq/m ³
ラドン検出器(18x18 mm ²) 循環BG	2.10 ± 0.26 Counts/day	0.91 ± 0.11 mBq/m ³
先行研究(18x18 mm ²) 封じ切りBG	0.74 ± 0.07 Counts/day	0.33 ± 0.07 mBq/m ³

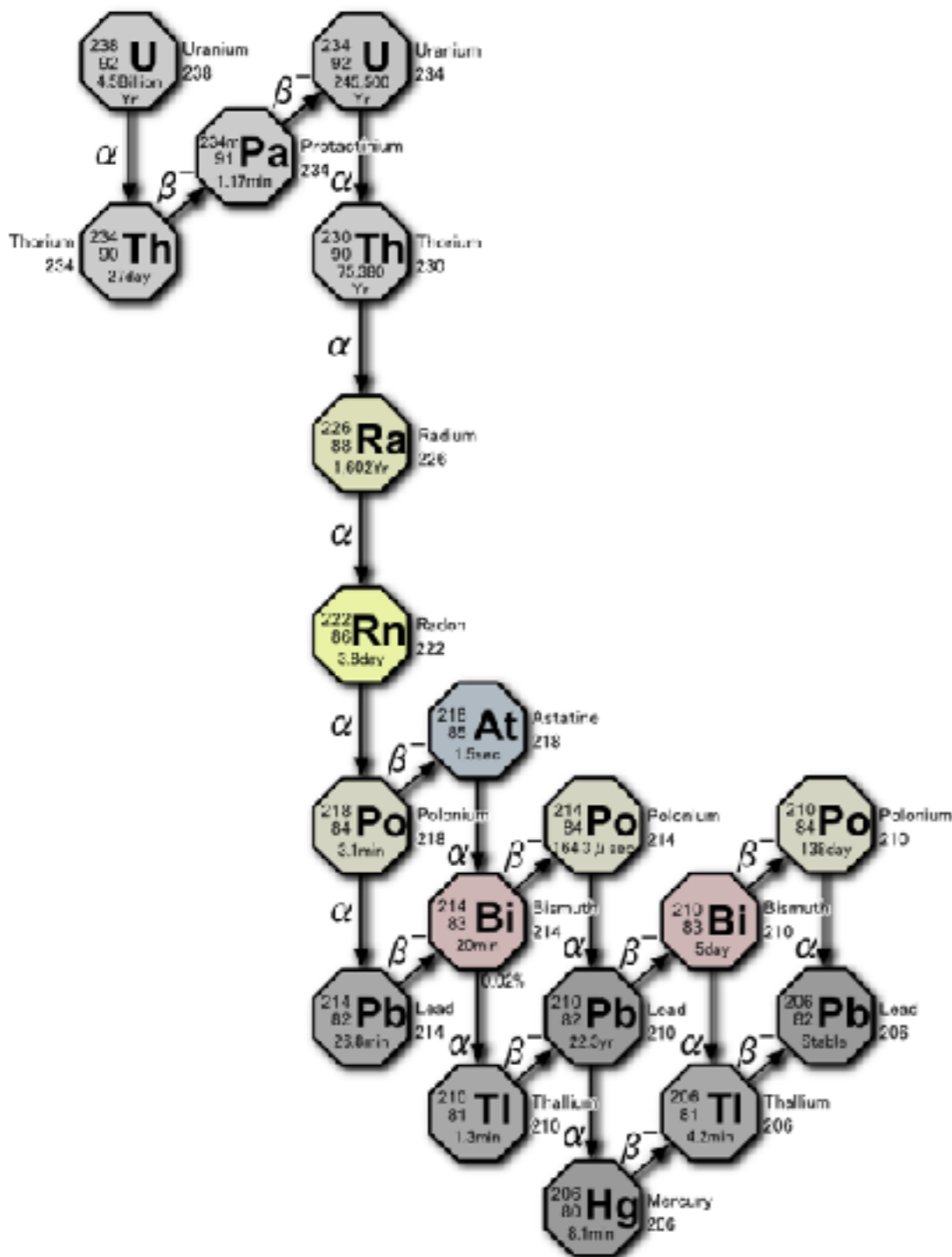
- ²²⁶Ra線源を用いた較正実験から、較正係数(HV -2 kV)を得た。

ラドン検出器	較正係数
新ラドン検出器(30x30 mm ²)	2.40 ± 0.09 (Counts/day)/(mBq/m ³)
旧ラドン検出器(18x18 mm ²)	2.32 ± 0.09 (Counts/day)/(mBq/m ³)
較正係数の比較	誤差の範囲で一致

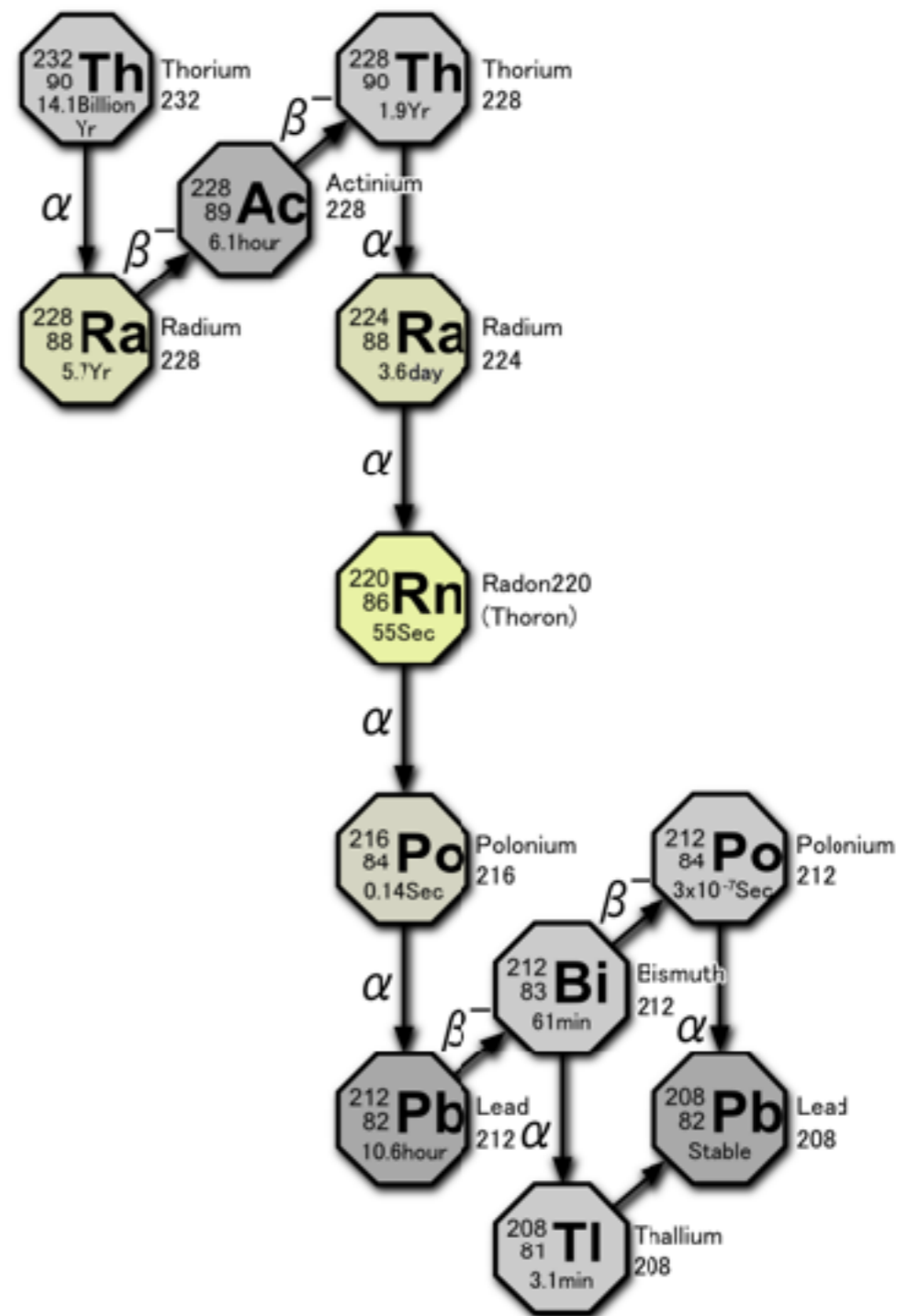
- HV依存性については現在測定中。低いHVでは較正係数が改善されている。

Back up

ウラン系列、トリウム系列崩壊図



ウラン系列崩壊図

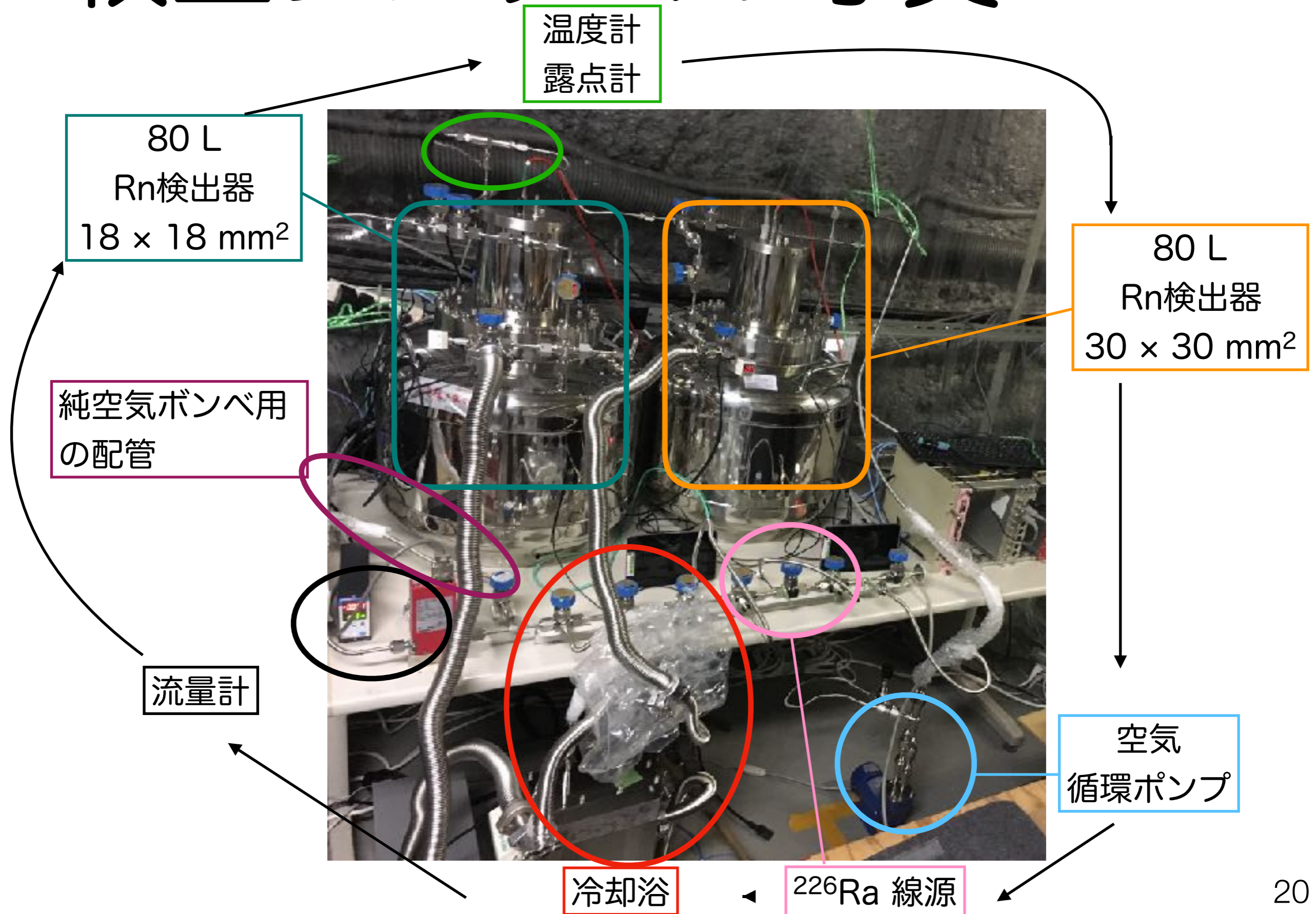


トリウム系列崩壊図

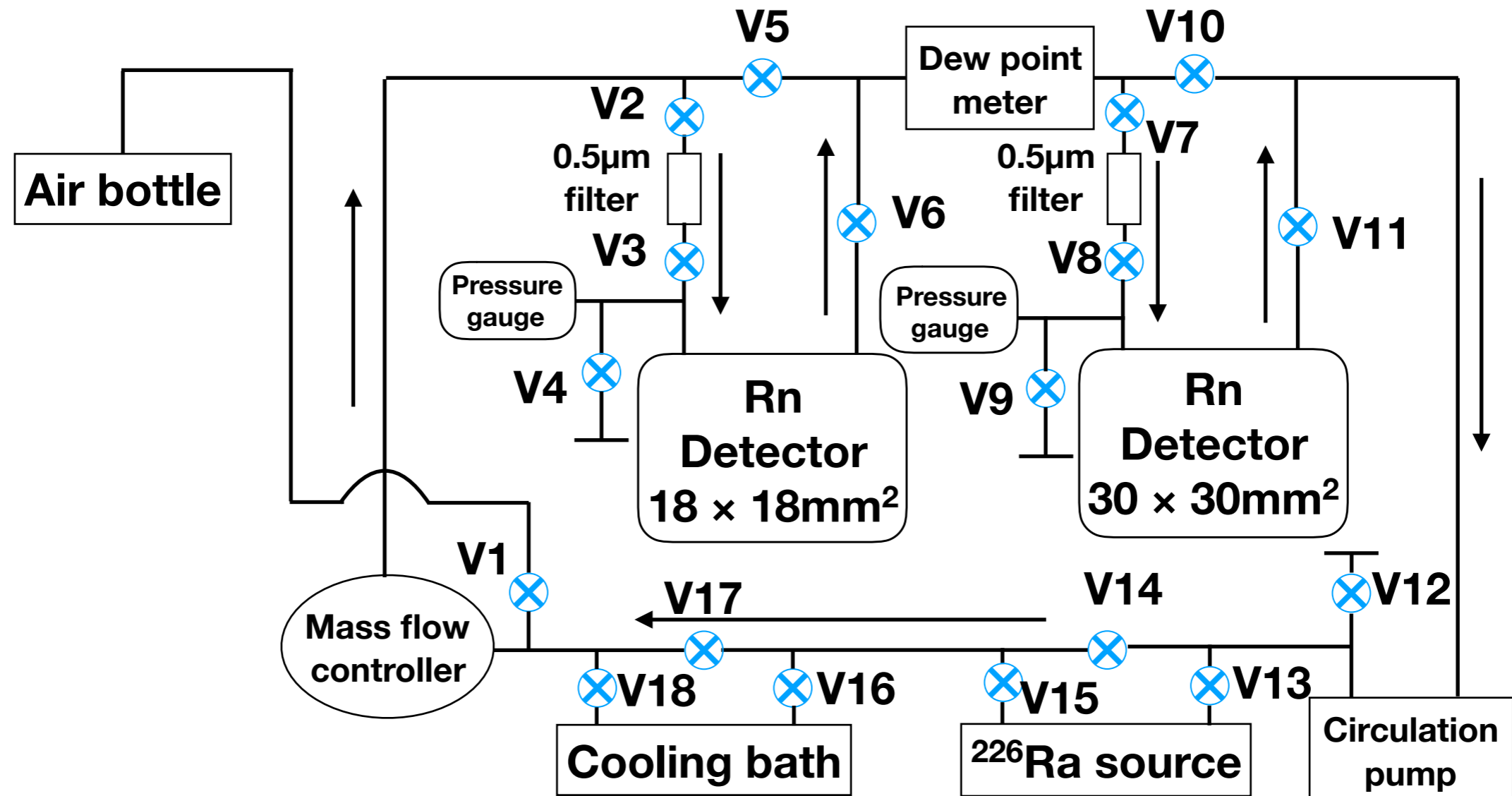
左:[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain\(4n%2B2,_Uranium_series\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain(4n%2B2,_Uranium_series).PNG)

右:[https://ja.wikipedia.org/wiki/トリウム燃料サイクル#/media/File:Decay_chain\(4n,Thorium_series\).PNG](https://ja.wikipedia.org/wiki/トリウム燃料サイクル#/media/File:Decay_chain(4n,Thorium_series).PNG)

校正システムの写真



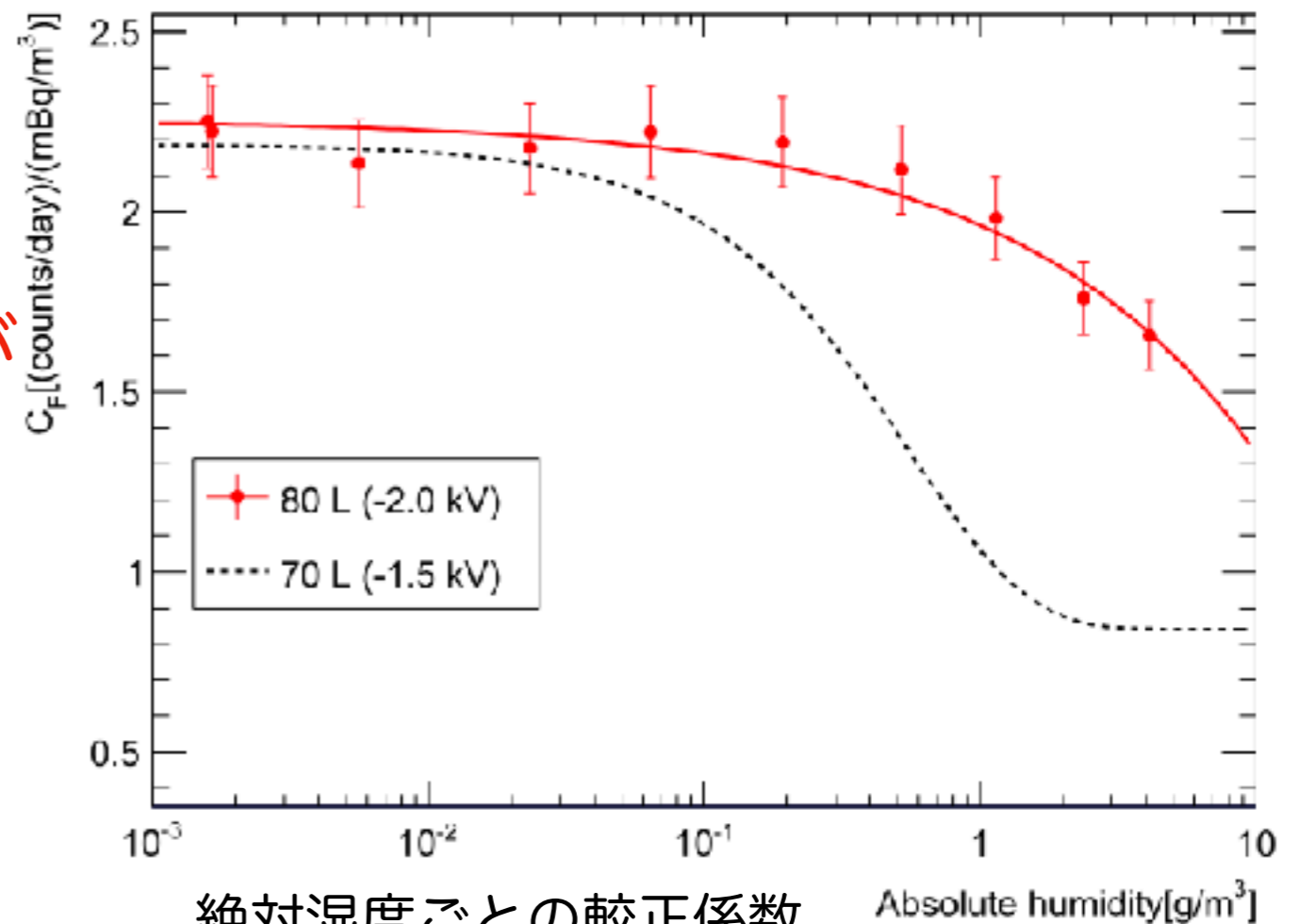
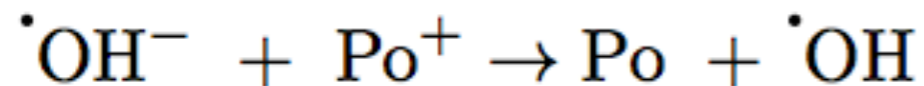
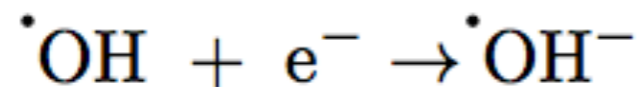
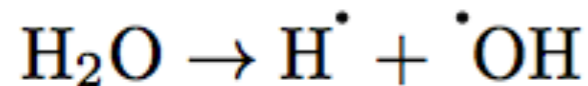
校正システムの詳細な概要図



較正係数の湿度依存性

- 電荷を帯びたRn娘核種の一部が空気中のH₂Oによって中性化。中性化された核種は電場で捕集されず、検出されない。したがって、**検出効率は湿度が大きいほど悪くなる。**

- 中性化のメカニズム



絶対湿度ごとの較正係数
湿度の高いところでは、較正係数は減少している。

Kai-Dee Chu et al.

Environ. Sci. Technol.,

Vol. 22, No. 6, 1988 711

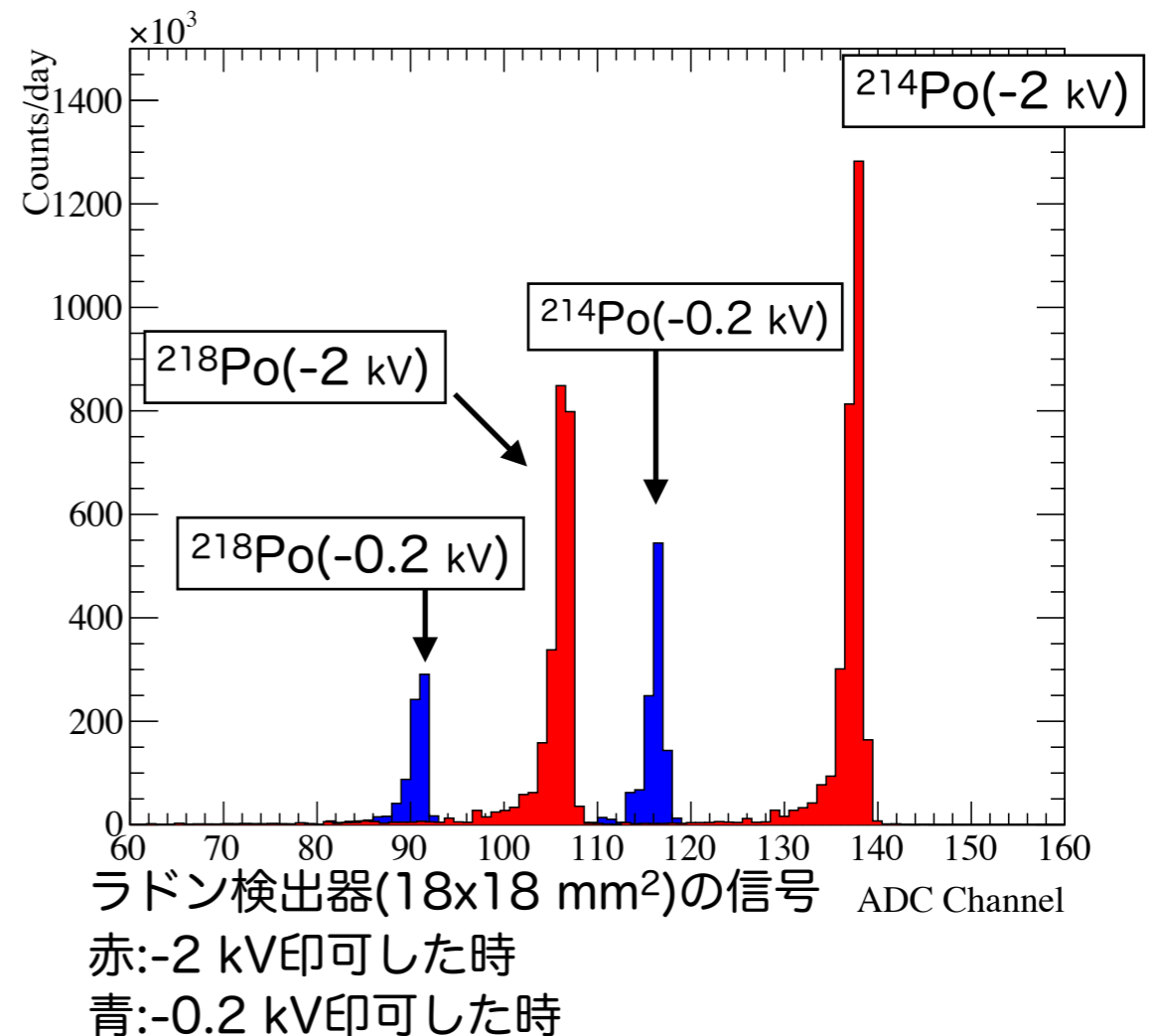
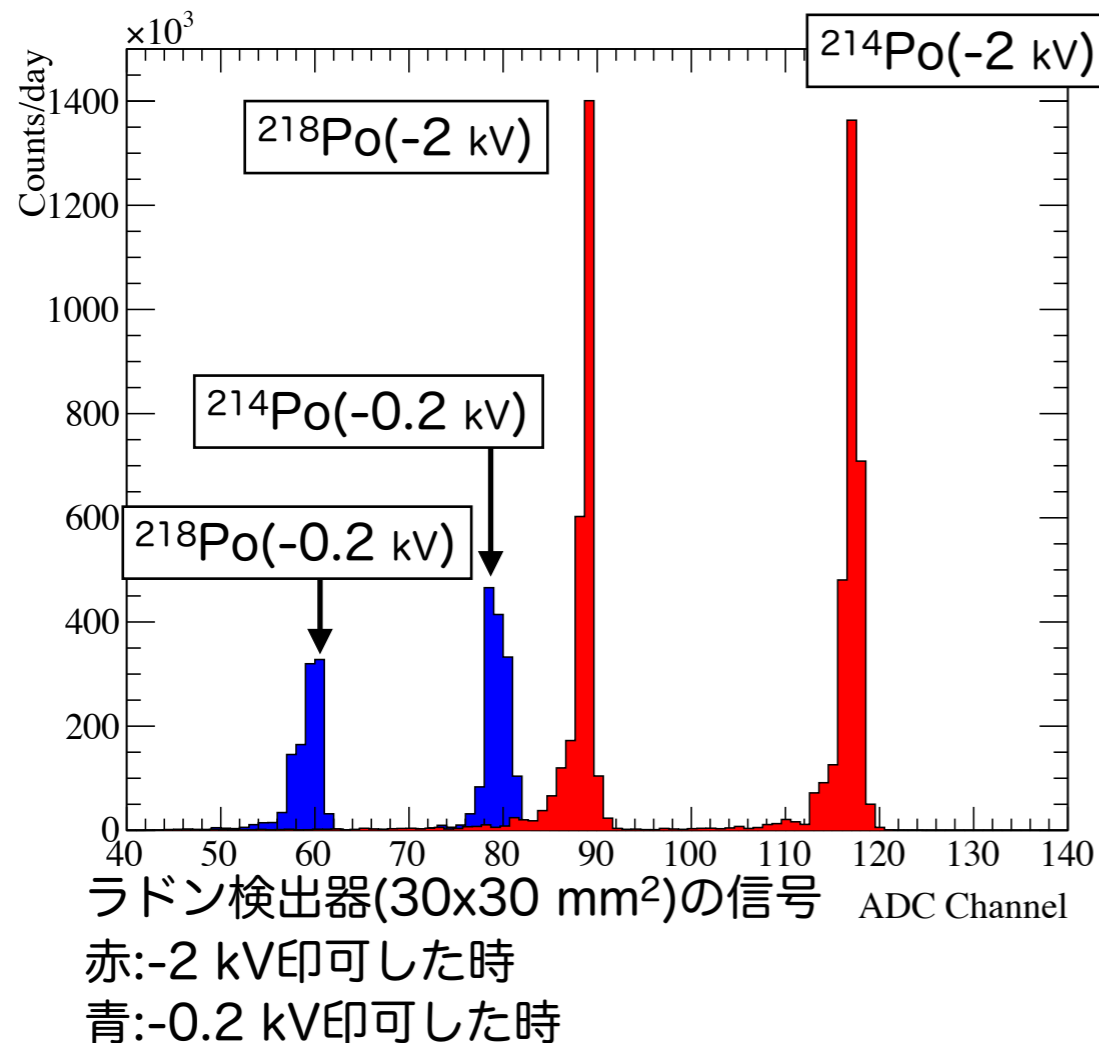
Y.Nakano et al, Nuclear Inst. and
Methods in Physics Research,
A 867 (2017) 108–114

先行研究とのBGの差について

- 先行研究(Y.Nakano et al. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 867 (2017) 108–114)では、BG測定をラドン計1台を閉じて行なった。(封じ切りBG)
- 一方で今回の較正実験では、2台のラドン計に同じ空気を流すために、空気を循環させてBG測定を行なった。(循環BG)
- したがって、今回のBGは較正システム全体のBGであり、先行研究において測定されたものと差が生じた。

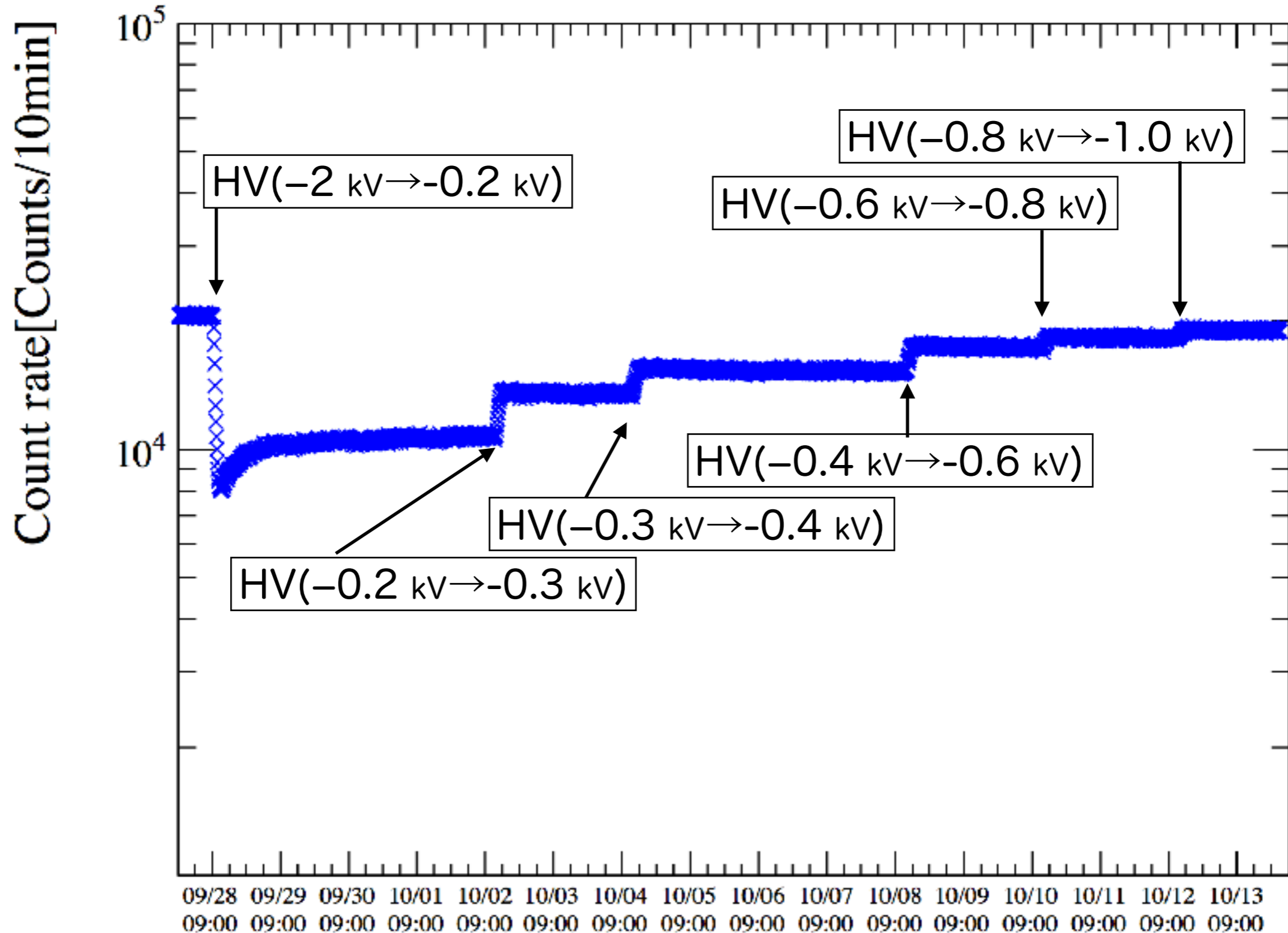
較正係数のHV依存性(^{218}Po 有り)

- ラドン検出器に印可するHVを変更し、検出器のHV依存性を評価した。



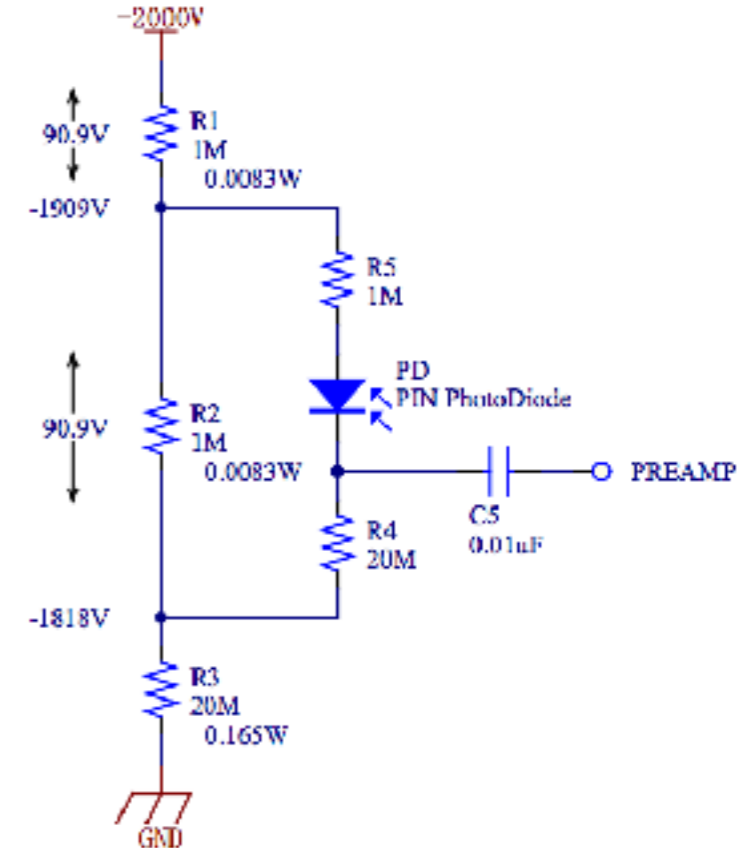
- 電圧を下げるとラドン検出器内の電場が小さくなり、Rn娘核種の**収集効率**が**下がる**。
- ラドン検出器の電場を作るための高電圧とPINフォトダイオードにかかるバイアス電圧を同じ回路の中で分割している。**(HV分割回路)**
したがってHVを変えるとバイアス電圧も変化し、**シグナルの領域がずれる**。

カウンtrateの安定性



HV分割回路

- ラドン検出器内で電場を作るためのHVと、PINフォトダイオードにかけるバイアス電圧を分割している。
- HVを大きくするとバイアス電圧も大きくなる。
PINフォトダイオードにかけられる最大のバイアス電圧は100V。



回路図の一部



HV分割回路の写真 26