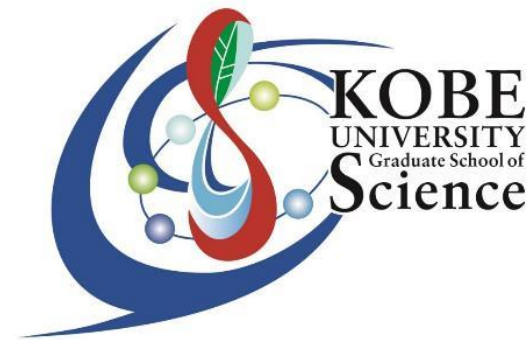




新学術「地下宇宙」若手研究会

Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics



活性炭繊維を用いた Rn除去空気供給装置の開発

神戸大学 大学院理学研究科 物理学専攻 粒子物理学研究室

修士1年 高木 優祐

(Supported by JSPS KAKENHI



Grant Number 19H05807)

目次

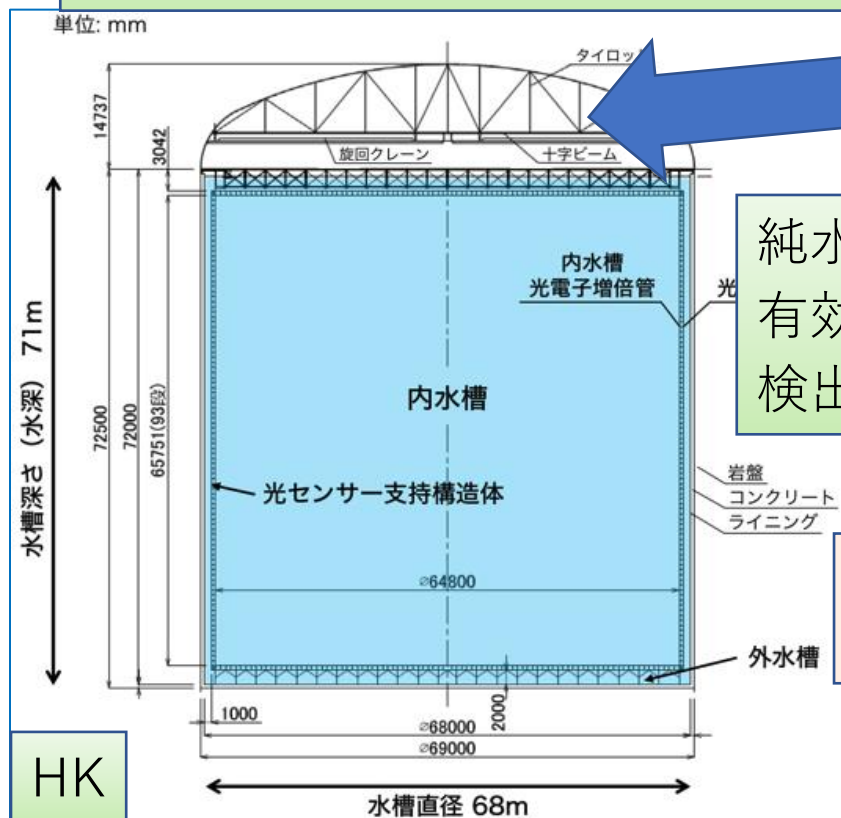
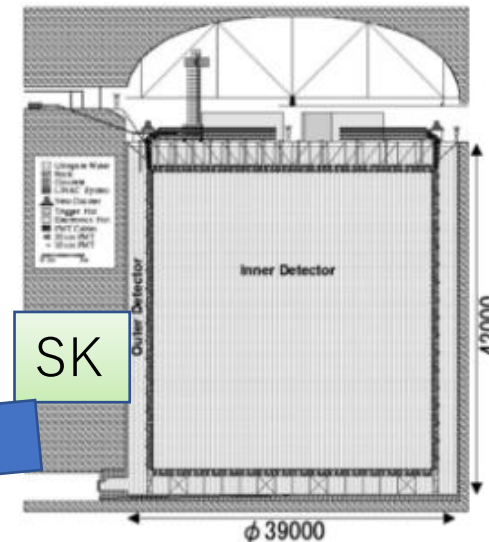
- 研究の背景・目的
 - 活性炭繊維(ACF)とは
- 実験のセットアップ
- 測定結果
- 今後の展望
- まとめ

目次

- 研究の背景・目的
 - 活性炭繊維(ACF)とは
- 実験のセットアップ
- 測定結果
- 今後の展望
- まとめ

ハイパーカミオカンデ(HK)

約260ktの超純水を内包する水チェレンコフ検出器
スーパーカミオカンデ(SK)の後継機
2027年観測開始予定



純水の質量比およそ5倍
有効質量比およそ8倍
検出器(光電子増倍管)内側に~40000

主な研究対象
陽子崩壊の探索
超新星 ν の観測
太陽 ν の高精度観測など

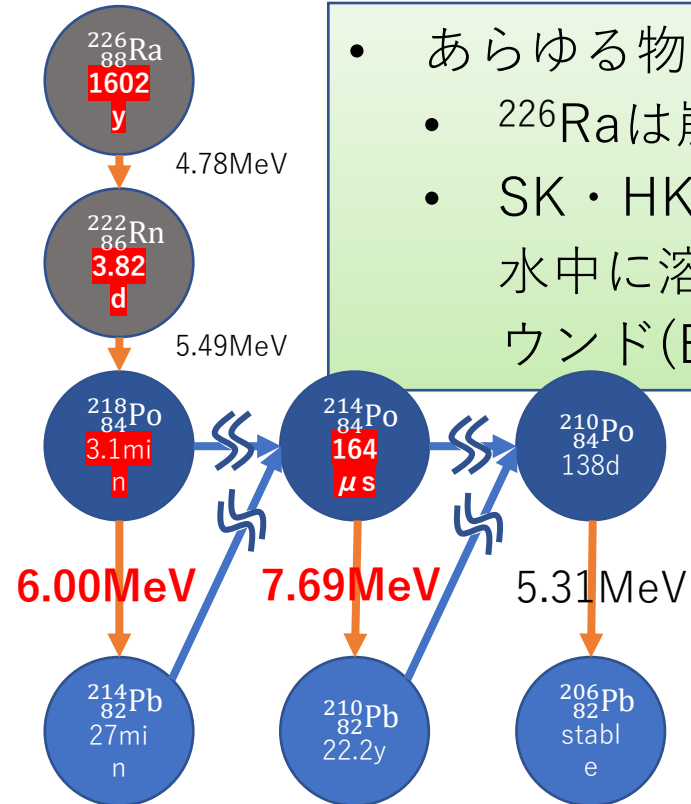
ニュートリノの質量階層性やCP破れなど、まだ明らかになっていない
これらの研究は大統一理論や宇宙の成り立ちなどの検証につながる

<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/about/outline/>

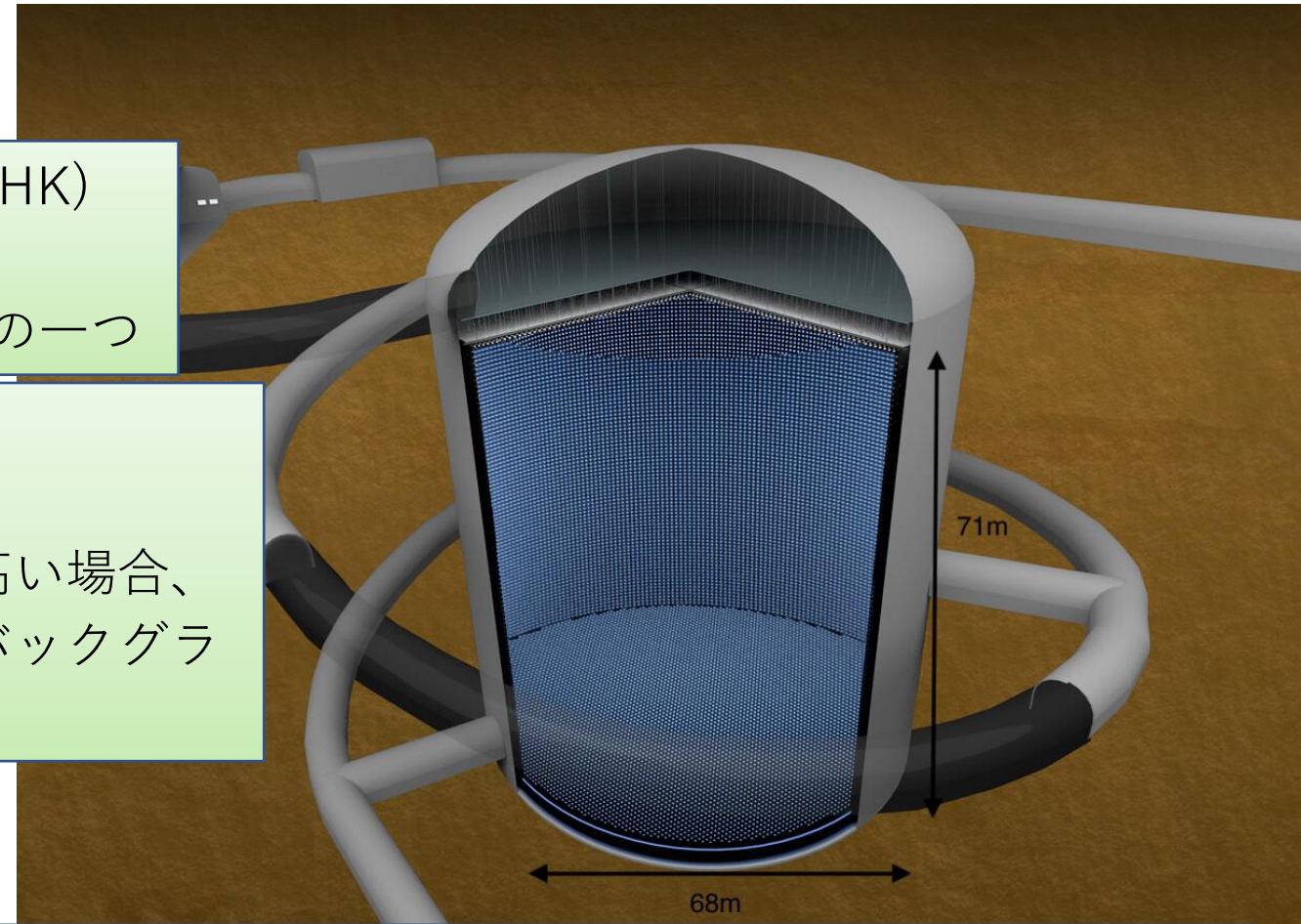
研究の背景

- 2027年実験開始予定のハイパーカミオカンデ(HK)
- 水チェレンコフ検出器
- 太陽ニュートリノの高精度観測が研究目的の一つ

- あらゆる物質に ^{226}Ra が含まれる
- ^{226}Ra は崩壊し ^{222}Rn ガスを放出
- SK・HKの空気層のRn濃度が高い場合、水中に溶けだし高精度観測のバックグラウンド(BG)源に



- 1mBq/m³程度以下の**Rn除去空気の供給が必要**
- スーパーカミオカンデ(SK)では同程度の濃度を出せる装置を使用
- 他に同等の能力を持っている装置で実績のあるものはない



研究の目的

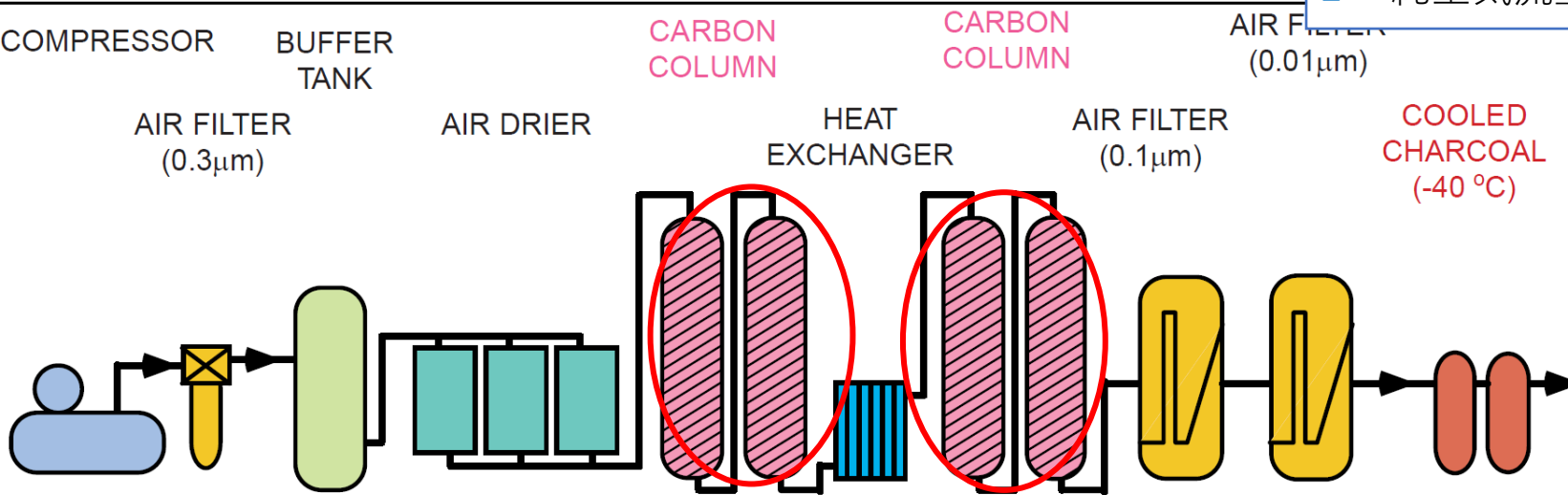
- 1mBq/m³程度以下の**Rn除去空気の供給が必要**
 - スーパーカミオカンデ(SK)では同程度の濃度を出せる装置を使用(下図)
 - 他に同等の能力を持っている装置で実績のあるものはない

HKはSKの装置の5倍程度のスケールが必要
SKの装置をそのまま大きくすると予算的にも占有領域的にも厳しい

SKの純空気供給装置のステータス

- 常温活性炭体積：約 8 m³
- 冷却活性炭：約 50 L @ -60°C
- 純空気流量：約 18 Nm³/時

× 5 !



S. Fukuda et al. /Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 501 (2003) 418-462

- 2024年(予定)のHKの純水装置建築開始に向け安価・小型化する改良が求められる
- 粒状活性炭をACFに変えることに目を付け効果の検証中
- 改良後の装置でRn濃度を**1/1000にするのが目標**

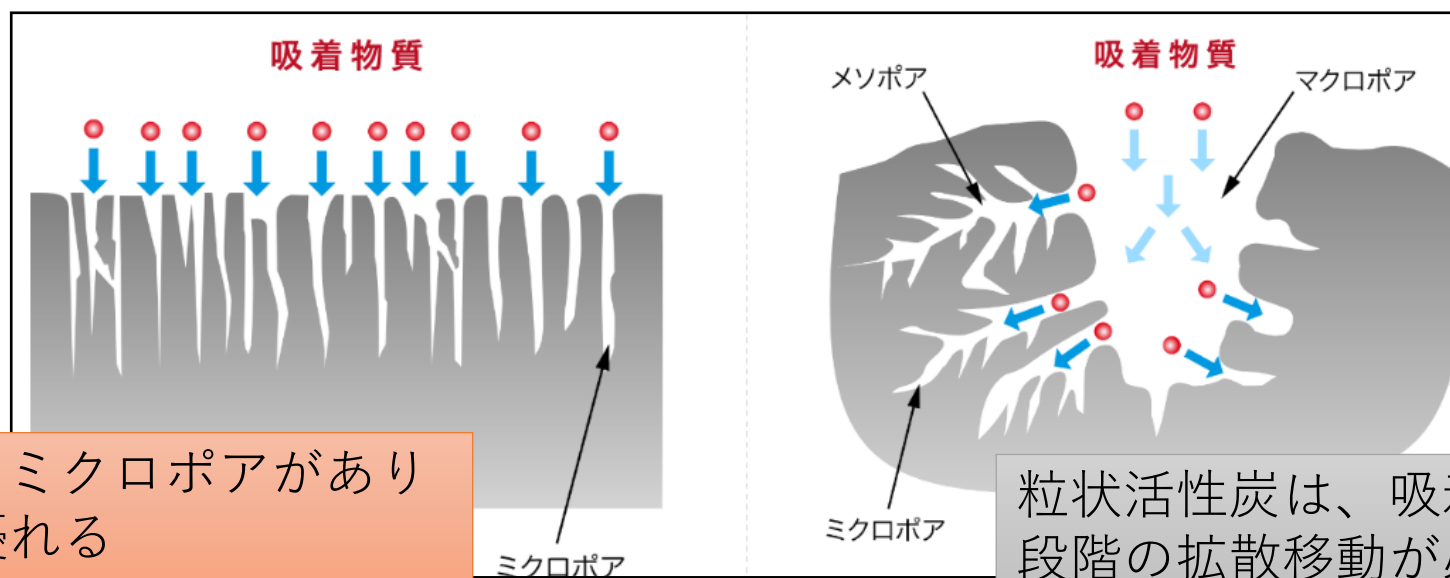
活性炭繊維(ACF)とは

Unitika Ltd. <https://www.unitika.co.jp/acf/about/>



Activated Carbon Fibers(活性炭繊維)の略
質量比で大きな表面積を持つ吸着剤
従来の粒状活性炭などに比べ吸着速度に優れる
放射性不純物をほとんど含んでいない
放射性物質除去性能を持つことが判明
Rn除去空気供給装置の小型化の可能性

ACFは表面にミクロポアがあり
吸着速度に優れる



粒状活性炭は、吸着に多
段階の拡散移動が必要

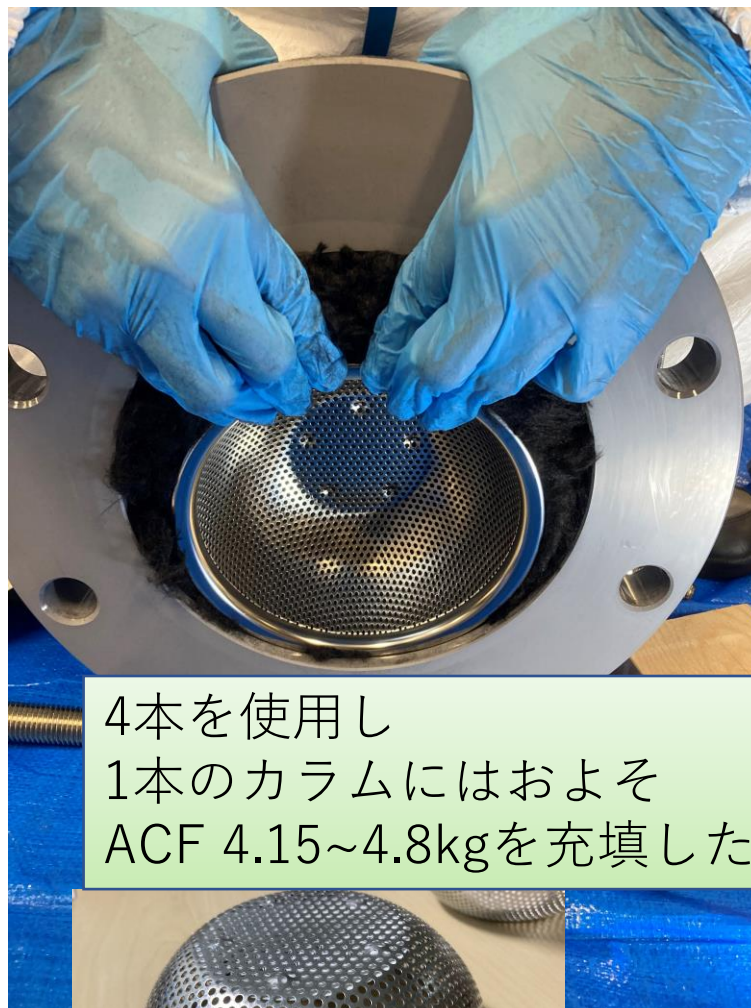
- 研究の背景・目的
 - 活性炭繊維(ACF)とは
- 実験のセットアップ
- 測定結果
- 今後の展望
- まとめ

PVCカラム



Asahi 超純PVC
200A,2m
約63L

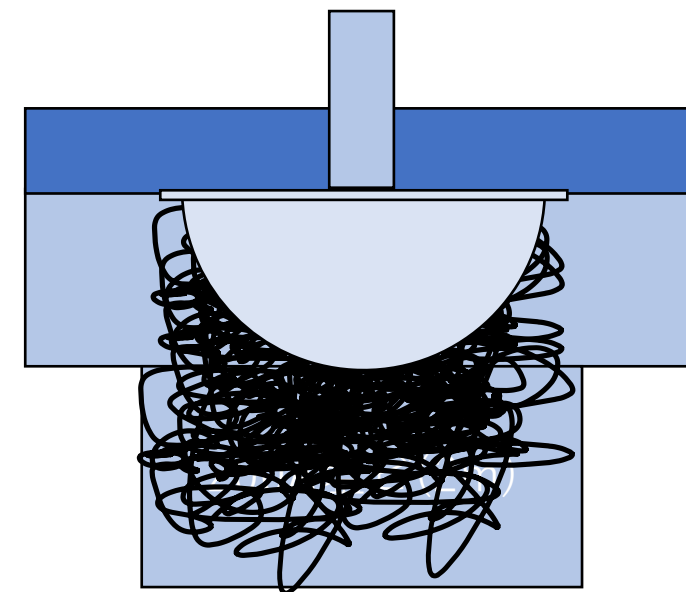
内面電解研磨
ステンレスフランジ
200A,5k 両側



4本を使用し
1本のカラムにはおよそ
ACF 4.15~4.8kgを充填した



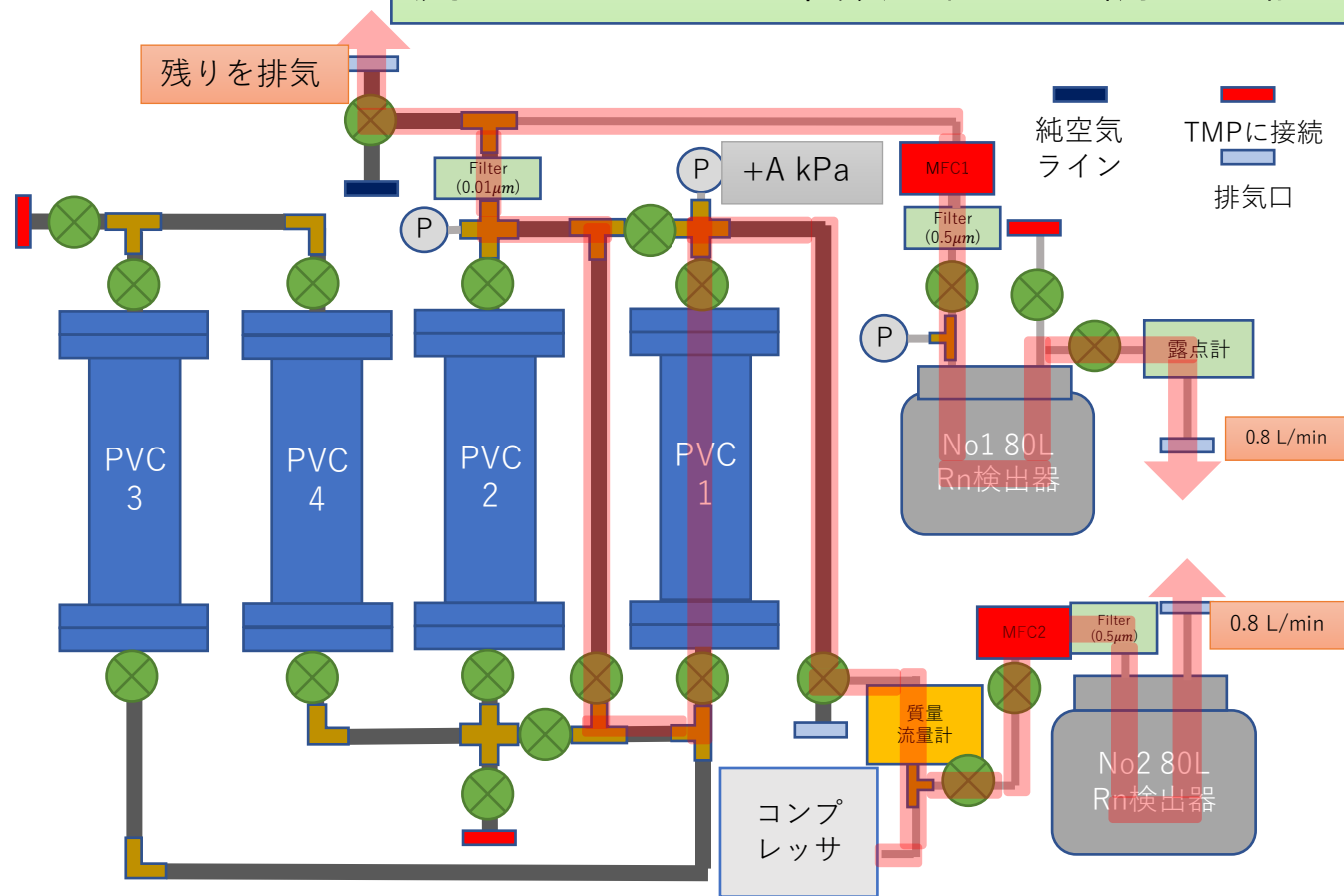
- PVCカラム内にACFを詰め込む
→両端にACF漏れを防ぐステンレスボウルで蓋をする
→フランジを閉める
- ACFに吸着した水分を除くために真空引きしてから使う



セットアップ(1本)

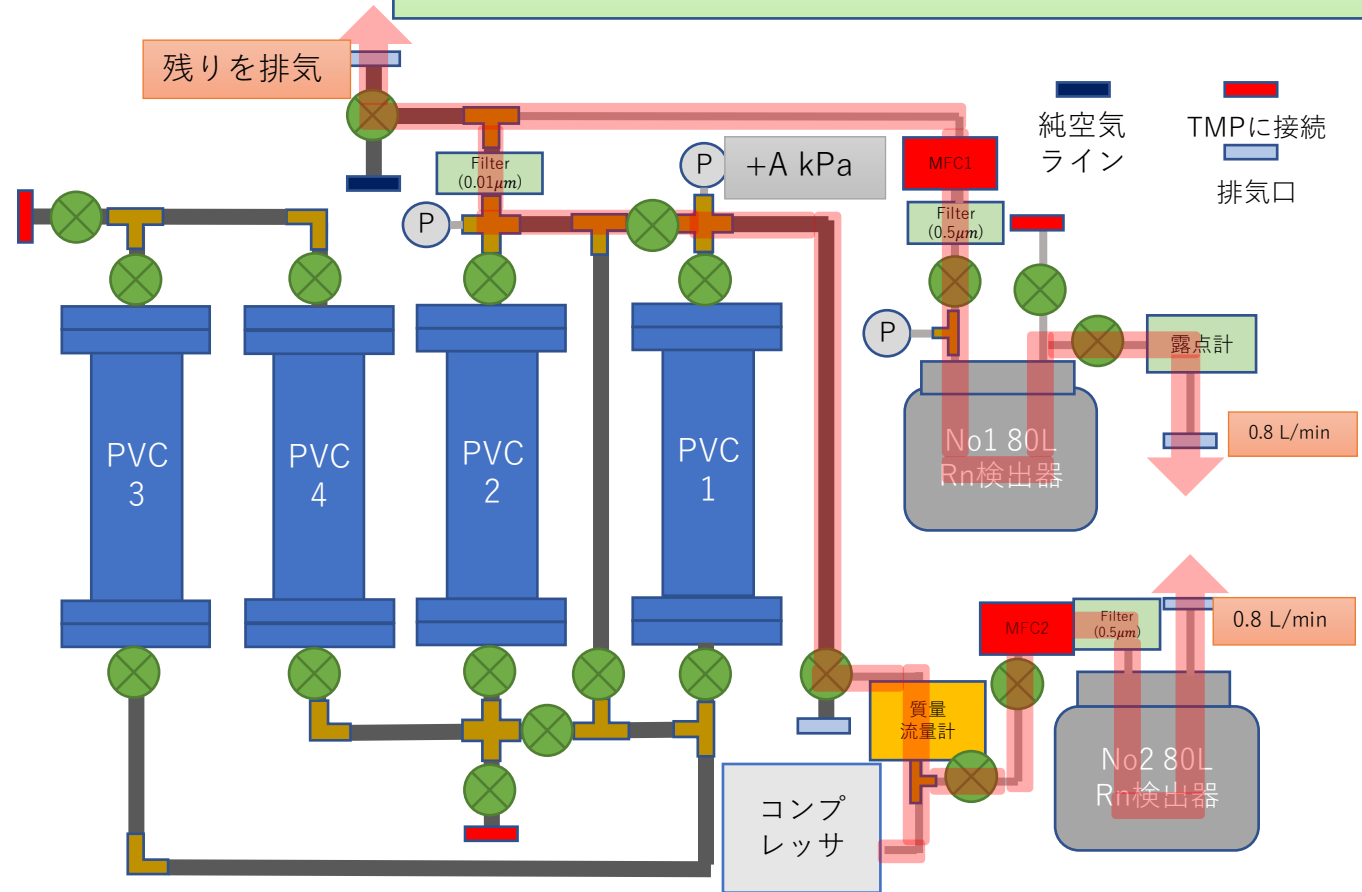


出入り口にRn検出器・露点計を設置
除湿した空気をコンプレッサから供給
露点補正後計数を比較する
流量・カラムの本数・内圧を調整可能



セットアップ(bypass)

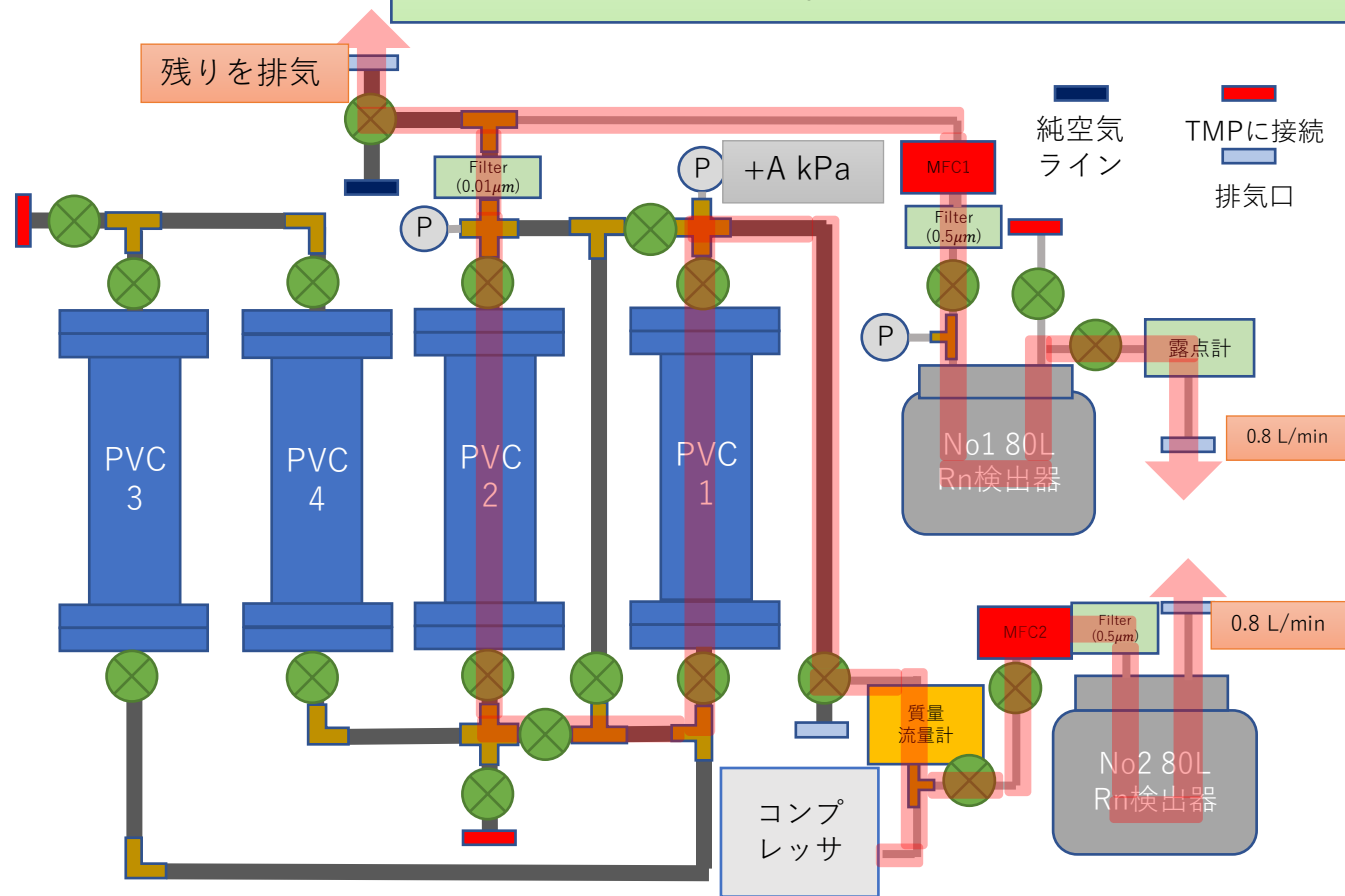
出入り口にRn検出器・露点計を設置
除湿した空気をコンプレッサから供給
露点補正後計数を比較する
流量・カラムの本数・内圧を調整可能



セットアップ(2本)



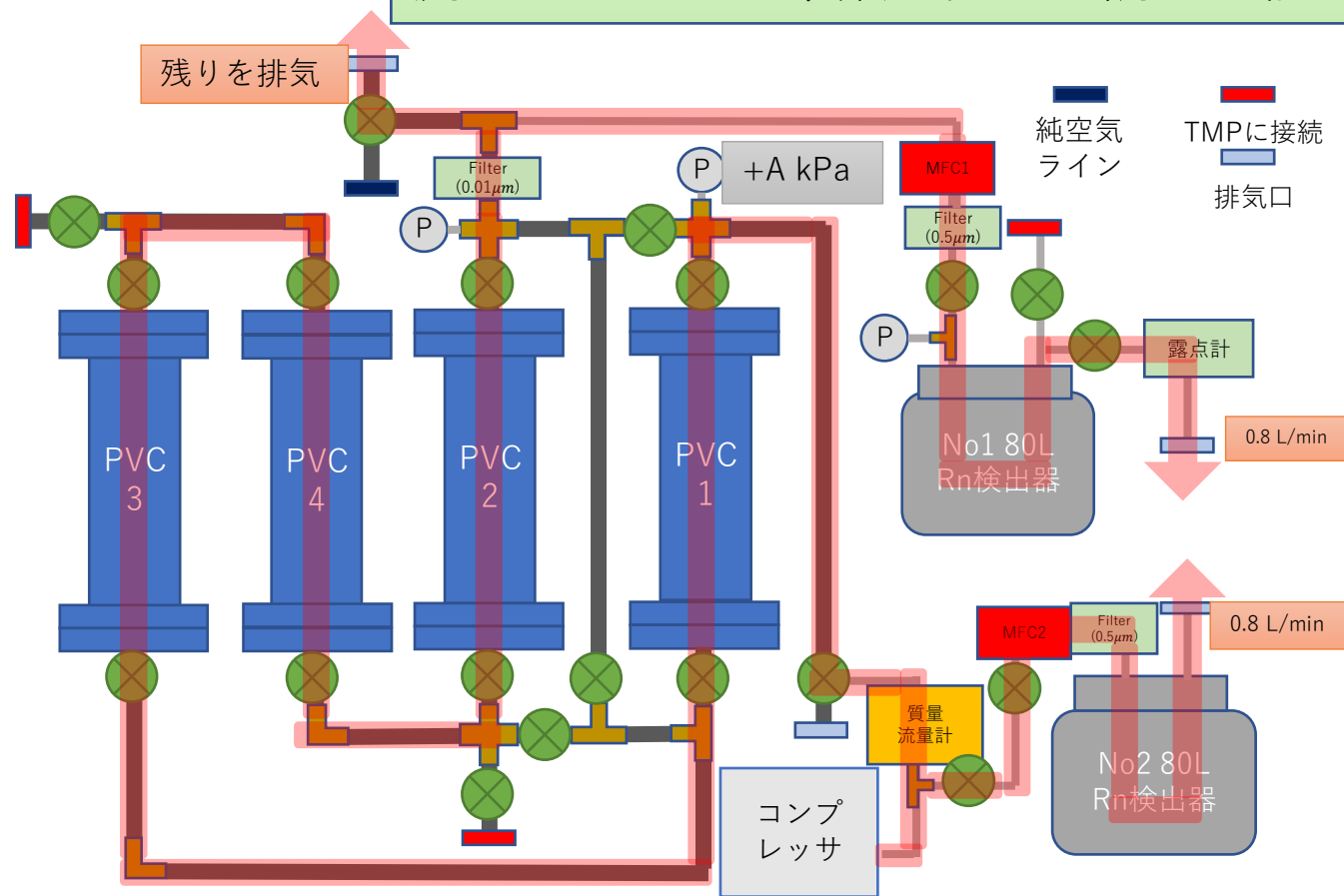
出入り口にRn検出器・露点計を設置
除湿した空気をコンプレッサから供給
露点補正後計数を比較する
流量・カラムの本数・内圧を調整可能



セットアップ(4本)



出入り口にRn検出器・露点計を設置
除湿した空気をコンプレッサから供給
露点補正後計数を比較する
流量・カラムの本数・内圧を調整可能



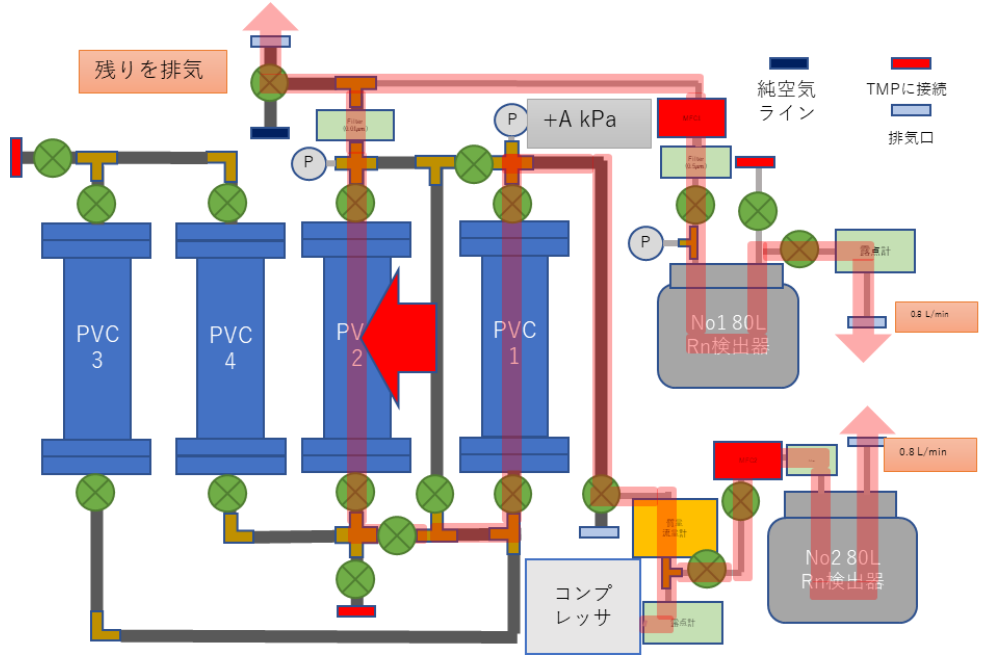
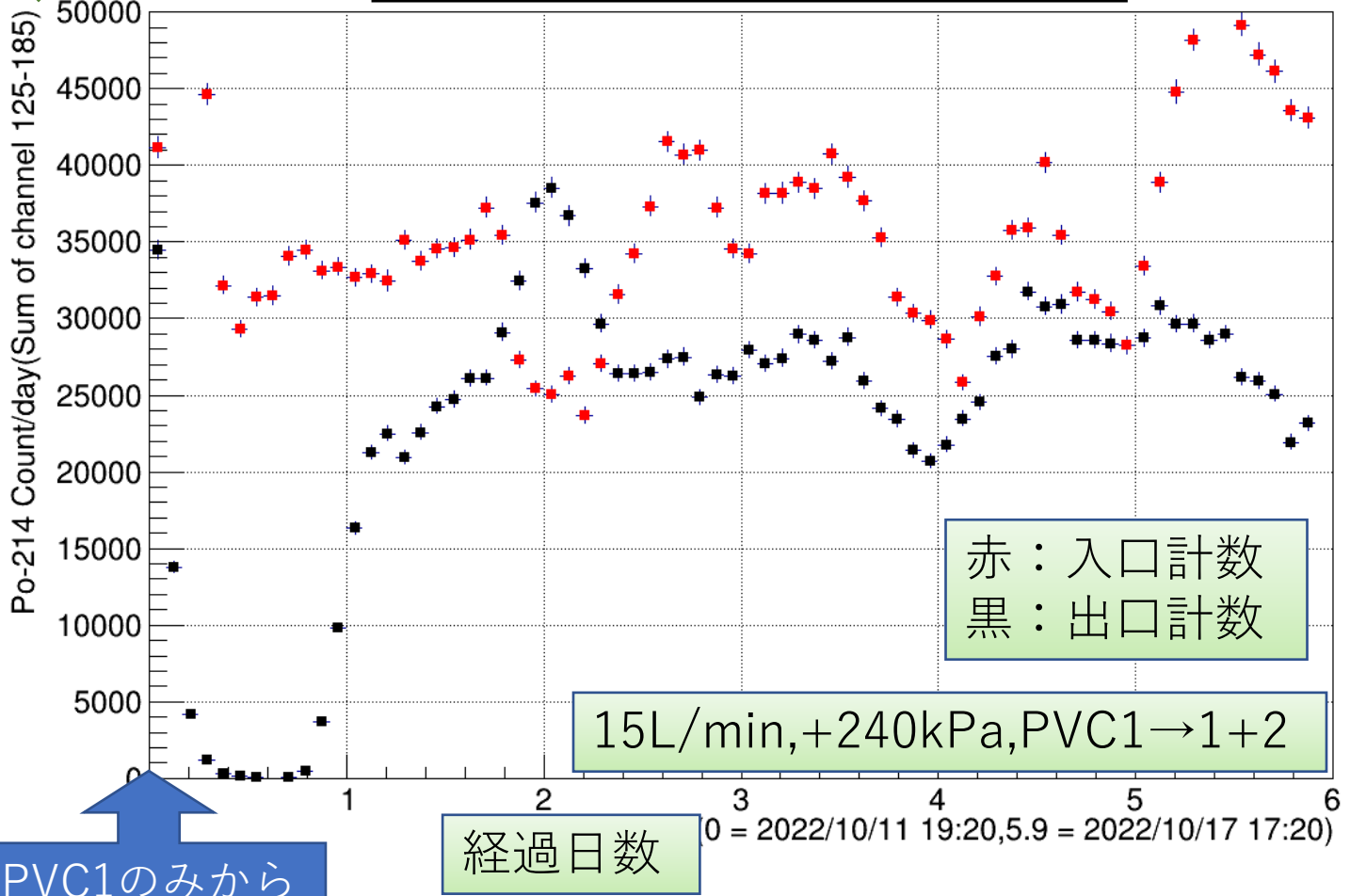
- 研究の背景・目的
 - 活性炭繊維(ACF)とは
- 実験のセットアップ
- 測定結果
- 今後の展望
- まとめ

測定結果例

- 入口と出口の計数率のピークが揃っていない
- 真空引き直後のACFを通すと一時的に計数が激減

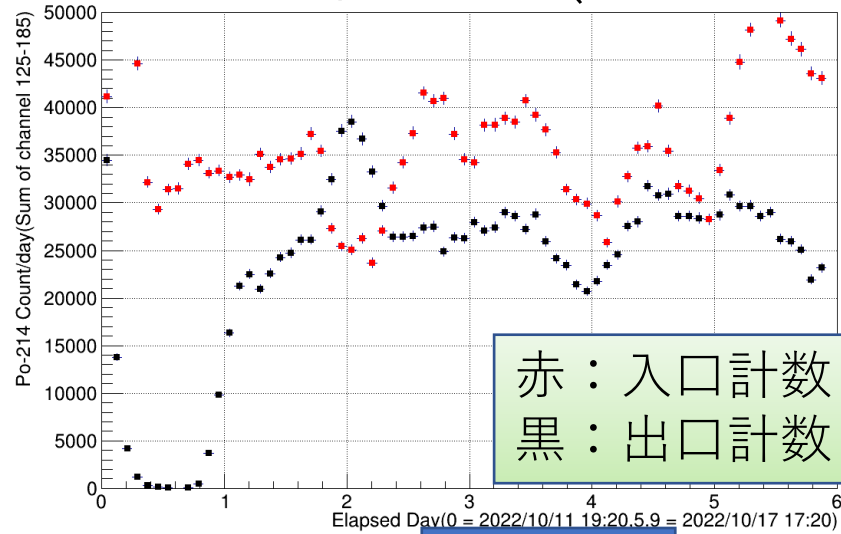
Rnの娘核である²¹⁴Poの計数率

²¹⁴Poの計数率の時間変化



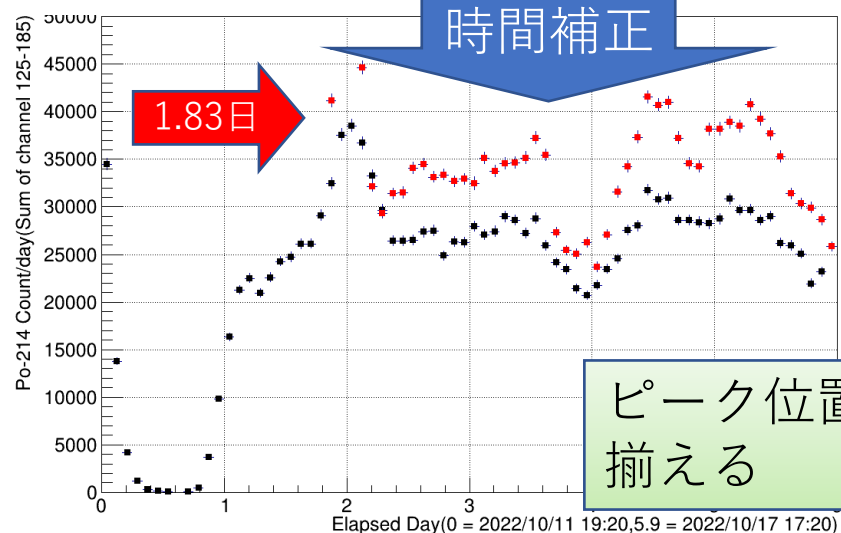
PVC1のみから
PVC1+2に変更

測定結果(遅延と解析について)



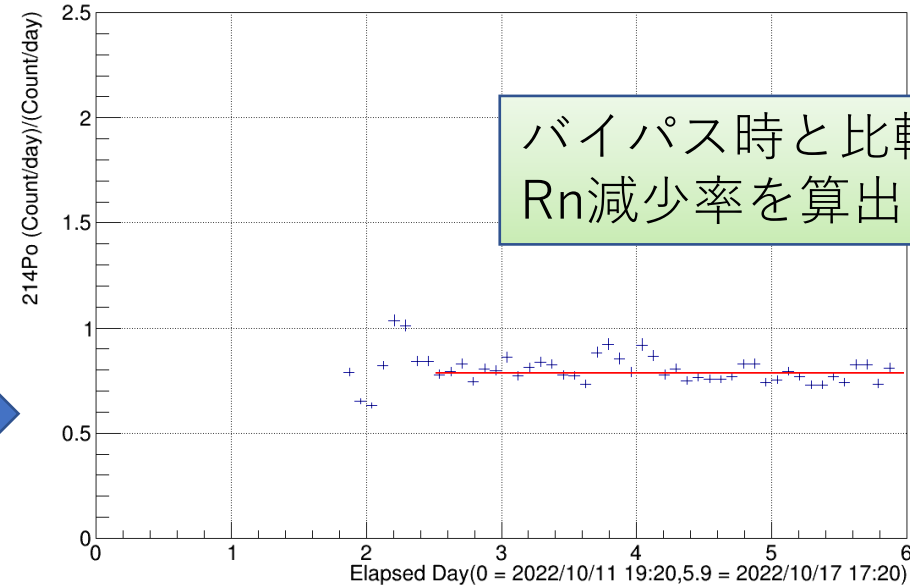
赤：入口計数
黒：出口計数

• 入口と出口の計数率のピークが揃っていない



ピーク位置を揃える

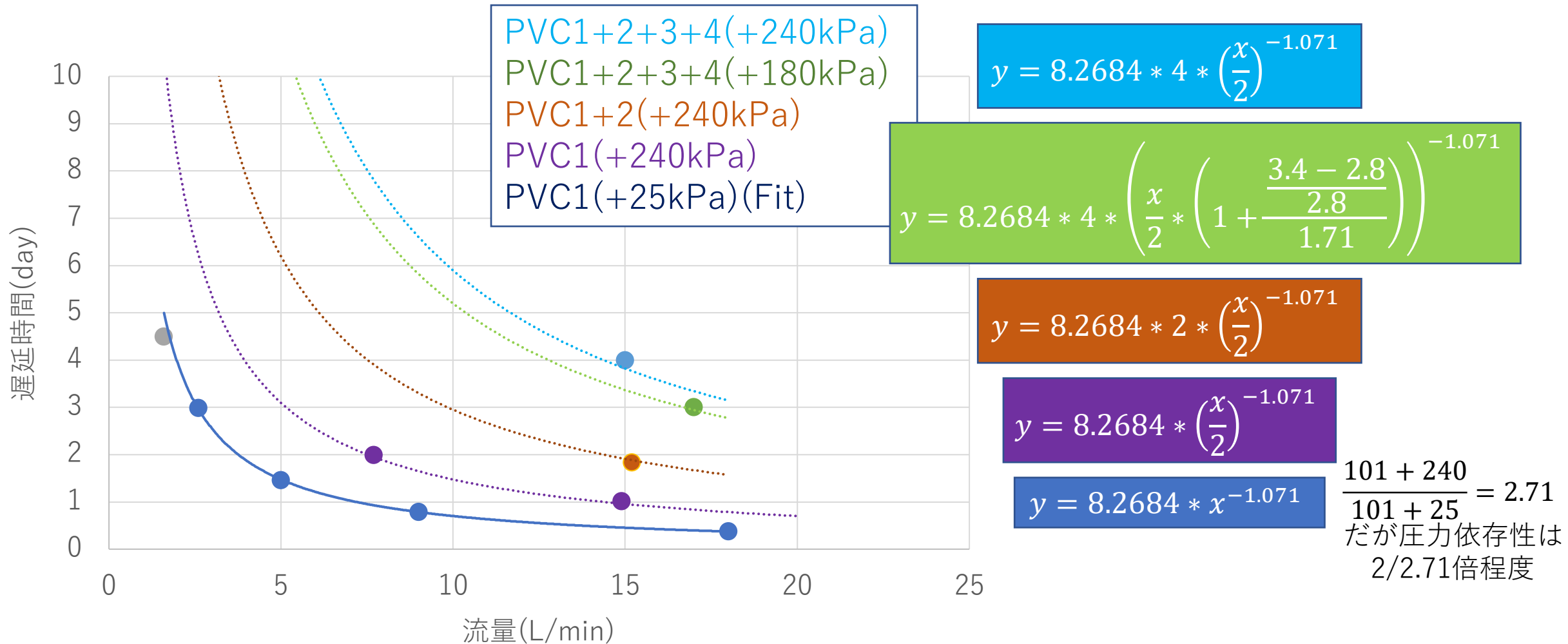
黒(出口)/
赤(入口)



バイパス時と比較し
Rn減少率を算出

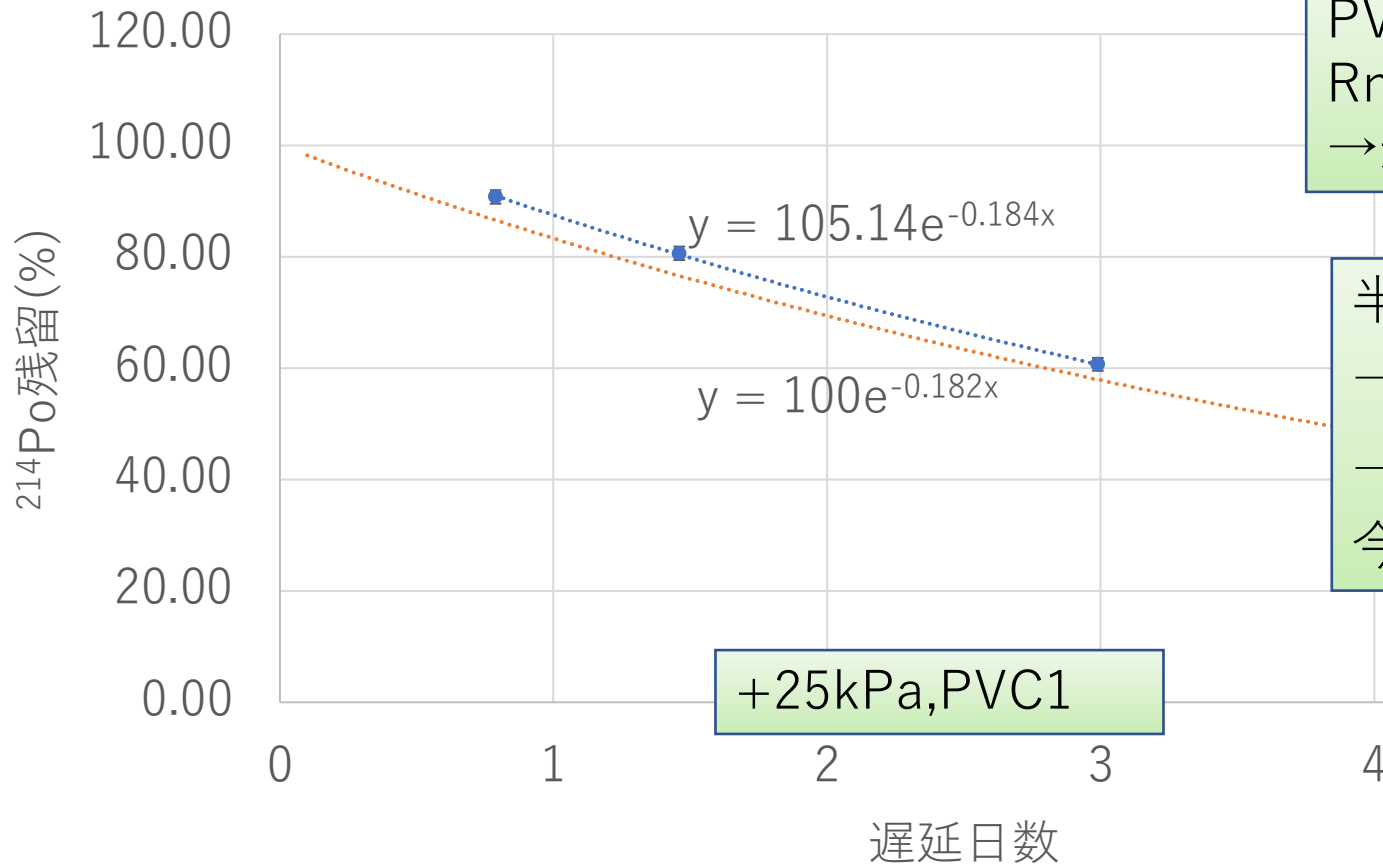
PVC内で遅延があることが確認された

遅延の流量・圧力依存性について



遅延とRn減少の関係

遅延と ^{214}Po の減少率のグラフ



PVC内で遅延があることが確認された
Rnの半減期(3.8日)分の遅延で半減するはず
→遅延が長いほどRnが減るはず

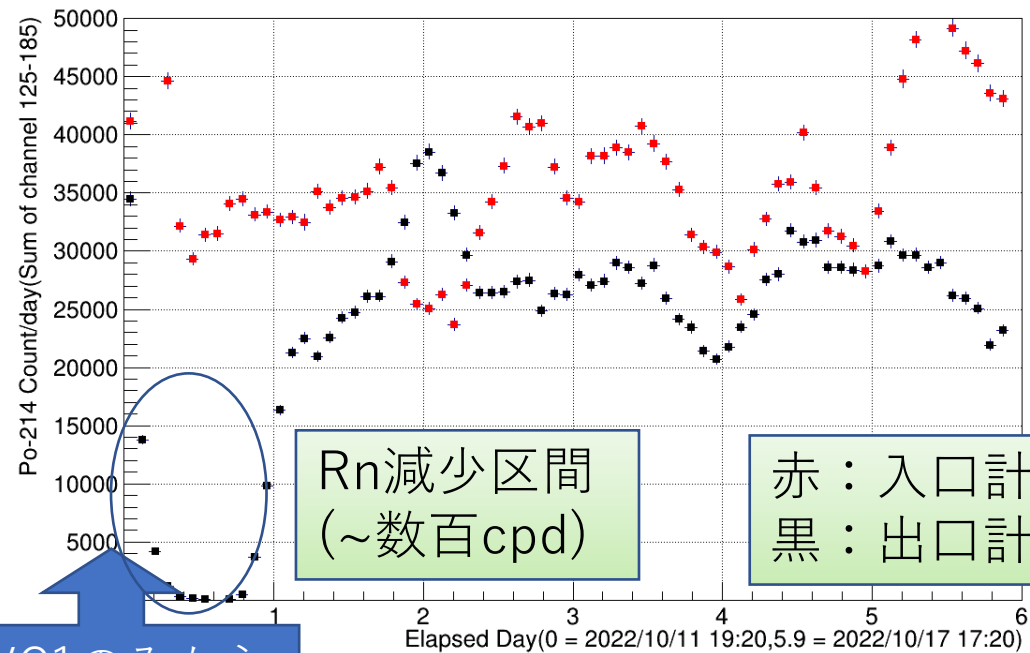
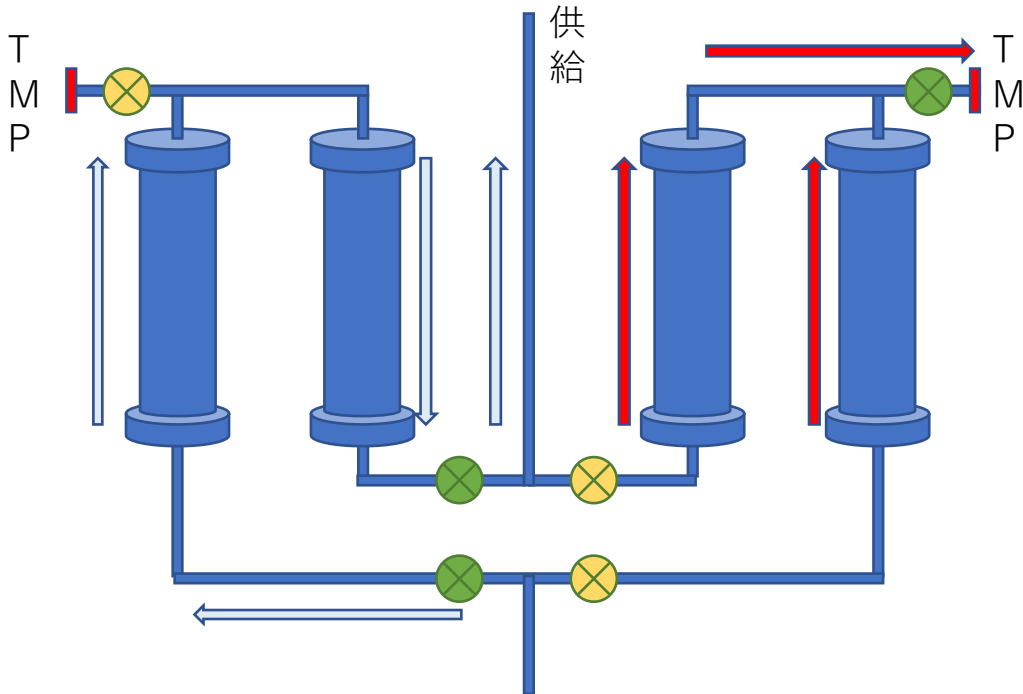
半減期3.8日
→ 時定数は $\frac{3.8}{\ln 2} \cong \frac{1}{0.1824}$
→ Excelでの近似曲線では $\frac{1}{0.184}$
今後横軸誤差も含めて評価を進める

遅延日数を考えると
1/1000に達するまで38日の遅延が必要→難しい

今後の展望

- 真空引き直後のACFを通すと一時的に計数が激減

Rn除去に2組のPVCを交互に使用し、もう一方を真空引きすることで継続的に高品質なRn除去空気を送り出せる？



Rn減少区間
(~数百cpd)

赤: 入口計数
黒: 出口計数

PVC1のみから
PVC1+2に変更

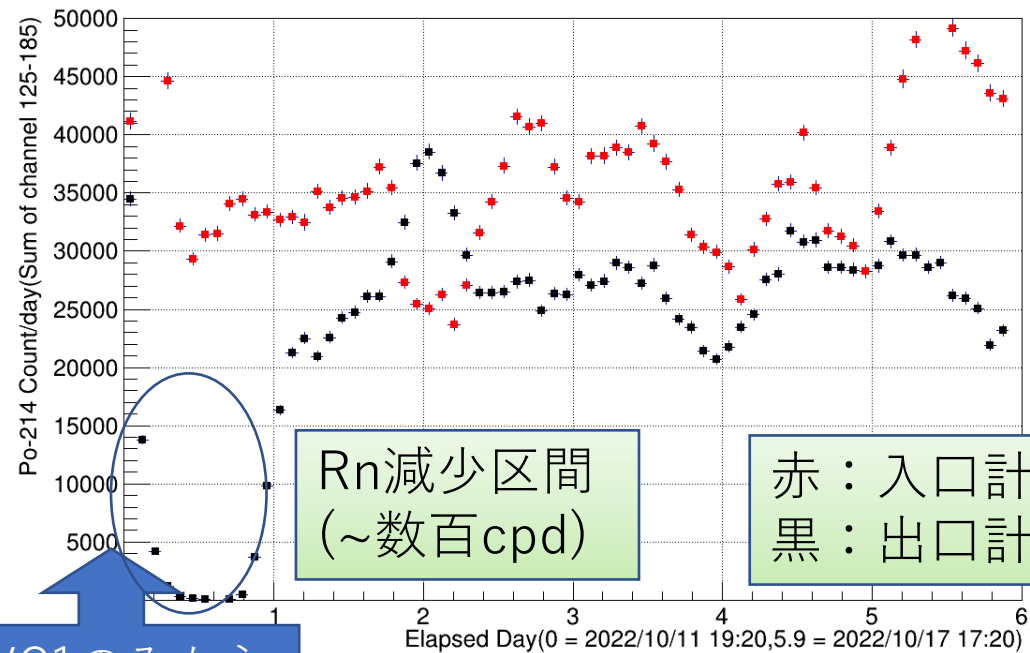
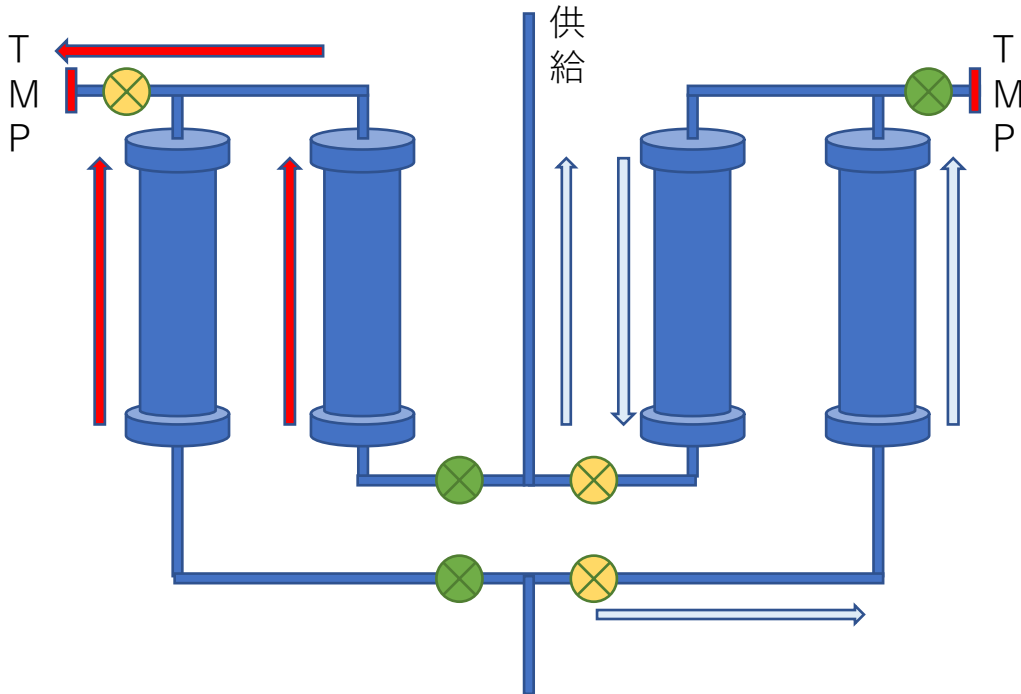
気温や湿度など環境の問題の可能性もある
→実際に使用する神岡に持って行って検証する
→実際の除湿装置を使って検証中

同じ条件で粒状活性炭を試験する
→そもそもSKで発揮されていた能力がこちらで再現できるか

今後の展望

- 真空引き直後のACFを通すと一時的に計数が激減

Rn除去に2組のPVCを交互に使用し、もう一方を真空引きすることで継続的に高品質なRn除去空気を送り出せる？



PVC1のみから
PVC1+2に変更

気温や湿度など環境の問題の可能性もある
→実際に使用する神岡に持って行って検証する
→実際の除湿装置を使って検証中

同じ条件で粒状活性炭を試験する
→そもそもSKで発揮されていた能力がこちらで再現できるか

まとめ

- 2027年に観測開始予定のハイパーカミオカンデ
 - 高精度測定の本底(BG)を減らすために $1\text{mBq}/\text{m}^3$ 程度以下のRn除去空気の供給が必要
 - SKの装置(×5)を改良して小型・安価で作りたい
 - 粒状活性炭の代わりにACFを使えないか検証(目標1/1000)

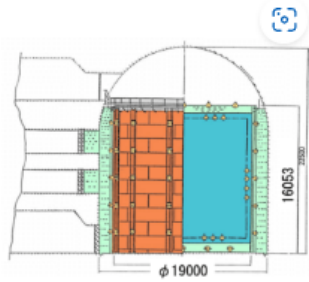
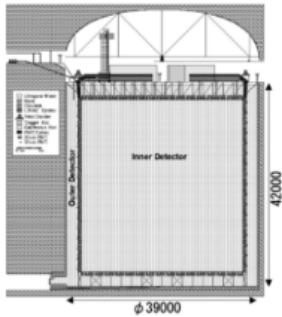
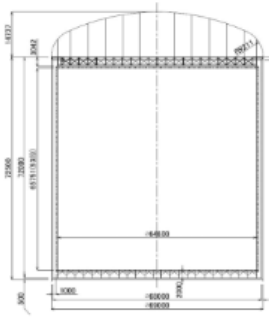


- ACF検証用の装置を組んで計測を行った
 - RnがACFを通過するための遅延を確認した
 - 遅延と流量・圧力・PVCカラムの本数などの関係を確認した
 - 遅延とRn減少の関係を確認した
 - 2024年の建設開始に向け引き続き検証を行っていく

BACK
UP

BU

- [ハイパーカミオカンデ概要 | ハイパーカミオカンデ \(u-tokyo.ac.jp\)](https://www.u-tokyo.ac.jp)

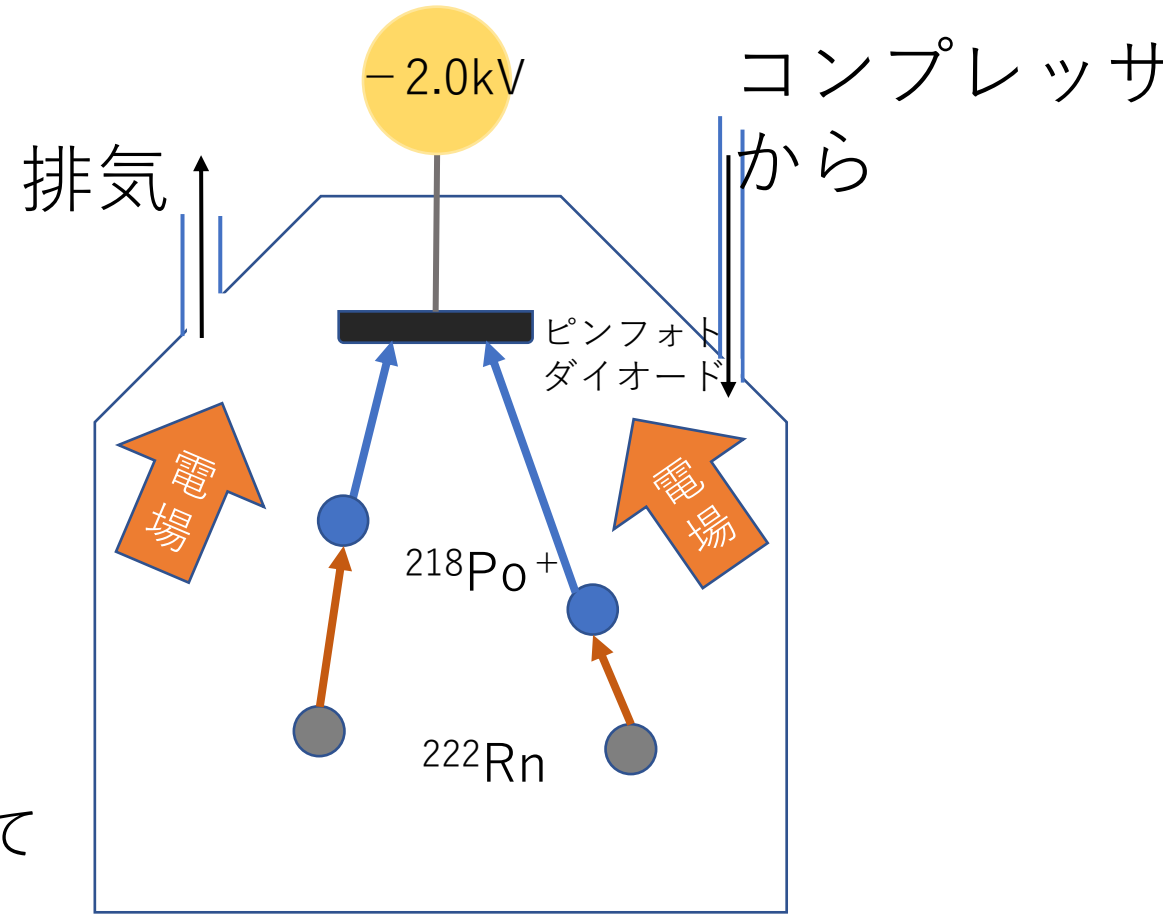
<p>カミオカンデ 1983～1996年</p> 	<p>スーパーカミオカンデ 1996年～現在</p> 	<p>ハイパーカミオカンデ 2027年観測開始を目指す</p> 
大きさ		
19m直径 x 16m高さ	39m直径 x 42m高さ	68m直径 x 71m高さ
純水質量(うち有効質量)		
4,500トン※ (680～1,040トン) <small>※タンク(内層および上下外層)内の純水質量は3,000トン</small>	50,000トン (22,500トン)	260,000トン (190,000トン)
光電子増倍管		
50cm直径/948個	50cm直径/11,146個	50cm直径/40,000個相当
主な成果・期待される成果		
超新星爆発からのニュートリノの世界初観測および太陽ニュートリノの観測による、ニュートリノ天文学の創生	ニュートリノが質量を持つことを示す、ニュートリノ振動の発見	<ol style="list-style-type: none"> ニュートリノと反ニュートリノの振動の違い (CP対称性の破れ)の発見と精密測定による宇宙の物質の起源の解明 ニュートリノ天文学のさらなる発展 陽子崩壊の発見による「素粒子の統一」と「電磁力・弱い力・強い力の統一」の証明

Rn検出器について

Poは陽イオン化しやすいため、電場を作ると一か所に集めやすい。(静電捕集)

捕集したPoが α 崩壊する時のエネルギーをピンフォトダイオードで計測することで、どの原子がどれだけ崩壊したかを調べられる。

今回の実験では、真空引き後に純空気を大気圧程度まで流し込み、ピンフォトダイオードに-2.0kVの電圧をかけて測定を行った。



Rn計の模式図

データを表にまとめたBU入れておく

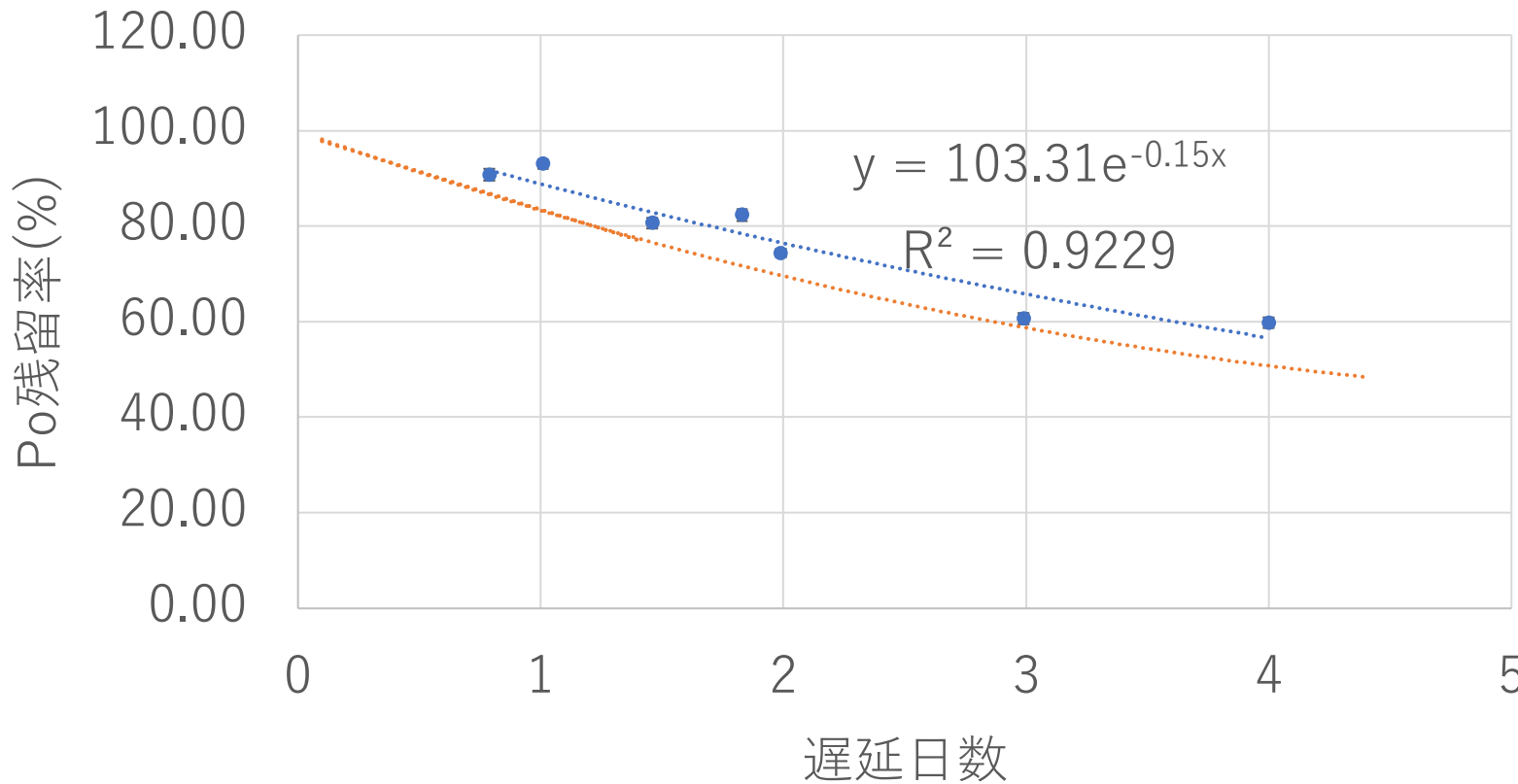
条件	流量X/min	圧力	遅延(日)	Rn残理論値(%)	残Rn(Po214)(%)	残Rn(Po218)(%)
バイパス	18L	1.25気圧	0	100.00	100 ± 0	100 ± 0
PVC1	18L	1.25気圧	0.375	93.43	86.13 ± 1.21	78.89 ± 1.27
PVC1	9L	1.25気圧	0.7887	86.68	90.79 ± 1.16	83.94 ± 1.22
PVC1	5L	1.25気圧	1.46	76.75	80.64 ± 1.14	74.71 ± 1.19
PVC1	2.6L	1.25気圧	2.99	58.16	60.67 ± 0.82	55.48 ± 0.85
PVC1	7.7L	3.5気圧	1.99	69.71	74.35 ± 0.96	71.15 ± 1.04
PVC1	14.9L	3.5気圧	1.01	83.27	93.05 ± 1.26	89.8 ± 1.38
PVC1+2	15.2L	3.5気圧	1.83	71.77	82.38 ± 1.09	
PVC1~4	15L	3.4気圧	4	48.43	59.76 ± 0.8	

ACFの放射性物質含有量

	Method	Weight [g]	Duration [day]	Uranium series [mBq/kg]	T se [r
A-10	HPGe	6.65	12.4	< 352	
A-15	HPGe	160.0	10.1	< 11.9	
A-20	HPGe	267.4	11.6	< 5.5	
A-25	HPGe	8.4	14.9	< 269	
Shirasagi G _{2X} 4/6 [25]	HPGe	95.0	7.0	67 ± 15	
Shirasagi G _{2X} 4/6 [34]	PC	—	—	62 ± 4	
Blücher 100050 [34]	PC	—	—	2.6 ± 0.3	

遅延とRn減少の関係(他の点も追加)

遅延とPo214の減少率のグラフ

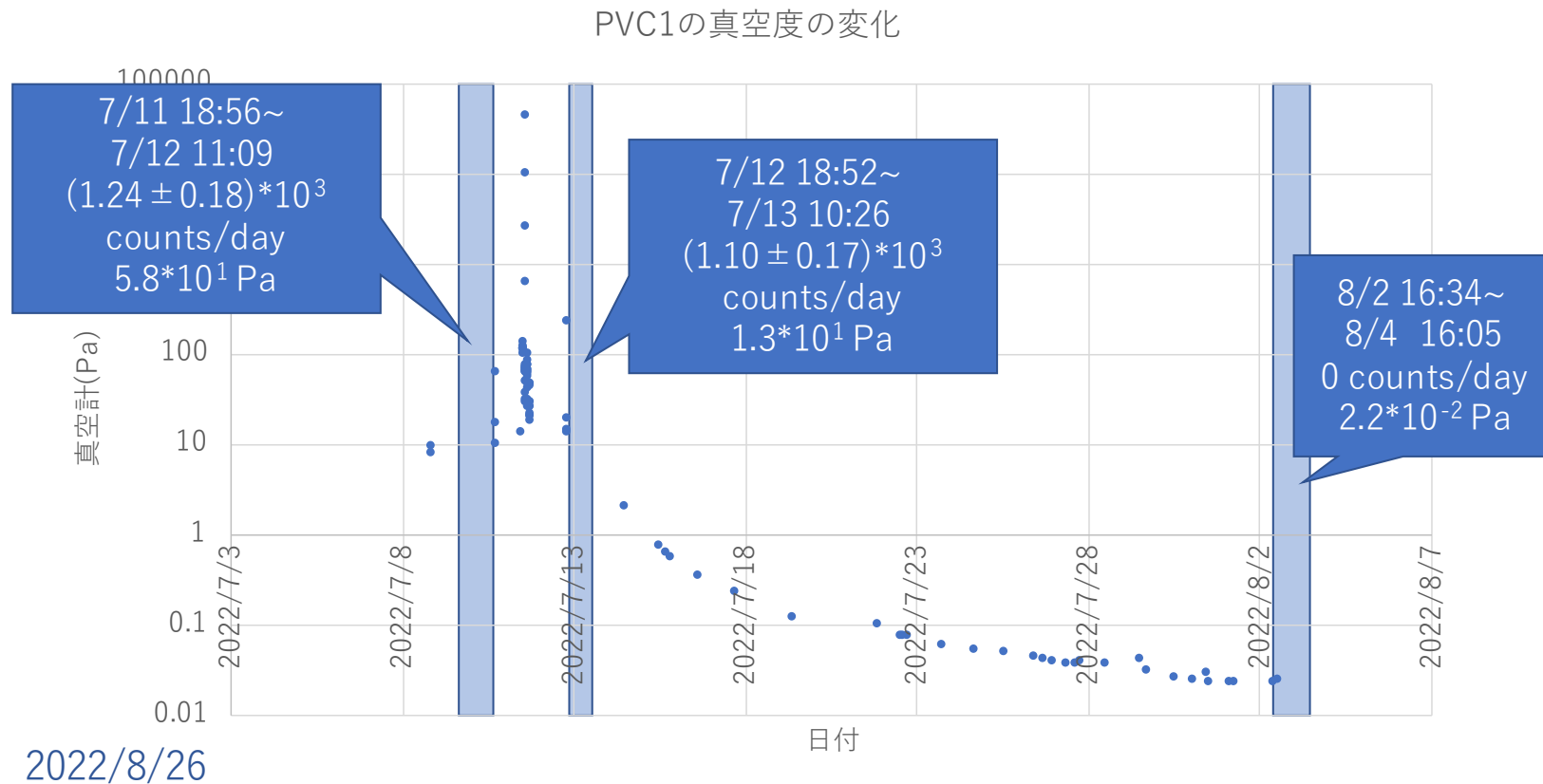


+25kPa,PVC1以外の条件の点も入れたグラフ
相関は単純ではない模様
正確な相関を知るためにはもう少しデータ点が欲しい?

遅延日数を考えると
1/1000に達するまで38日の遅延が必要→とてもじゃないが難しい

BU・真空度とカウント数の関係

ACFの真空度の変化



BU・真空度とカウント数の関係

PVC1,3の圧力変化(経過・比較)

