

スーパーカミオカンデにおける ラドン濃度測定技術の開発

2015年8月24日(月)

KEK 測定器開発室セミナー



東京大学 宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設
博士3年 中野 佑樹



内容

- 自己紹介
- SKにおけるラドン濃度測定
 - SKにおける太陽ニュートリノ観測とバックグラウンド
 - これまでの研究と問題点
- 高感度ラドン検出器の開発
 - ラドン検出器の特徴(構造や検出手法など)
 - 検出器のキャリブレーション
- 高感度ラドン検出器の応用
 - 空気層のラドン濃度モニタリングシステムの開発
 - 純水中のラドン濃度測定技術の開発
- 今後の展望
- まとめ

自己紹介

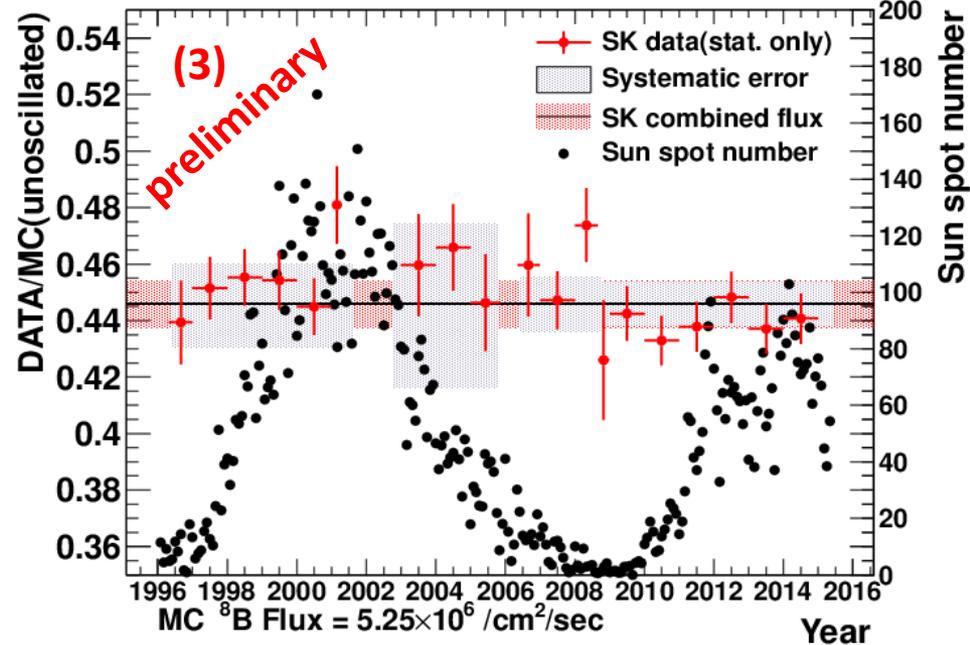
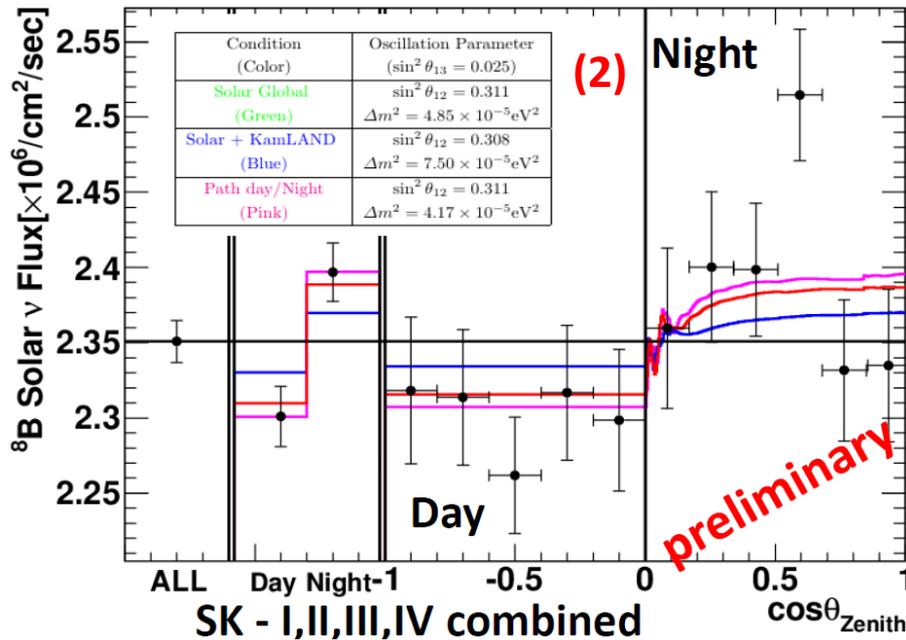
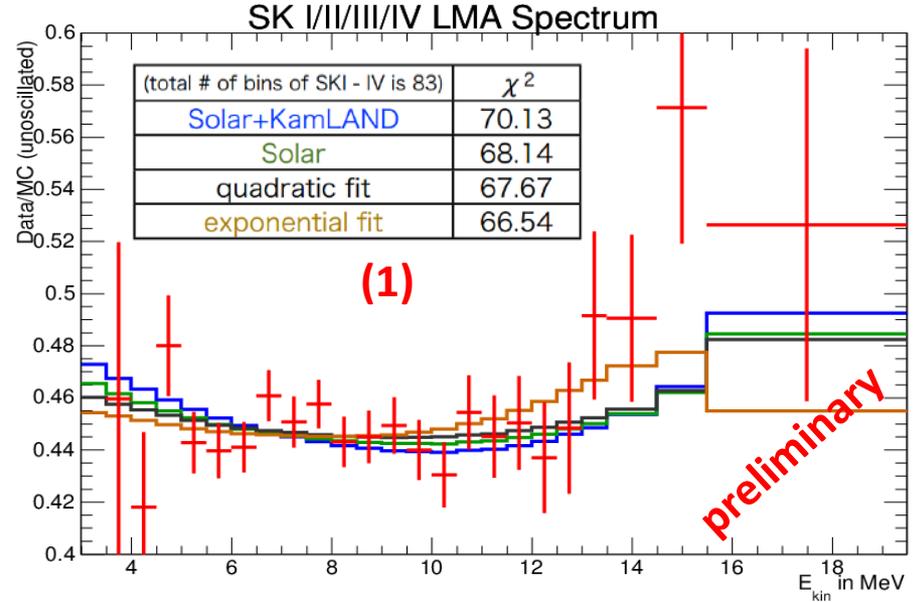
- 中野 佑樹(Nakano Yuuki)
- 東京都出身 1988年(昭和63年)生まれ
- 埼玉大学(4年時の指導教官 佐藤丈先生)
- 東大大学院(指導教官 中畑雅行先生)
 - 修士時代
 - ラドン検出器の開発
 - 超新星爆発由来のニュートリノ探索
 - 博士時代
 - ラドン関係を継続
 - 太陽ニュートリノに関する研究
 - SNO Labに留学(DEAP実験)

SK太陽ニュートリノ観測の現状

◆最近の成果

SK I-IVの約4500日のデータ

- (1) Energy Spectrumの精密測定
- (2) 太陽ニュートリノFluxの昼夜変動
- (3) ニュートリノと太陽活動の相関がない



SK太陽ニュートリノ観測の今後

◆MSW効果の検証

ニュートリノが物質内部を伝搬するとき、物質により振動確率が変わる。

~ 6 MeV以下では生存確率が増加
→ エネルギースペクトラムの歪み
(遷移領域の観測)

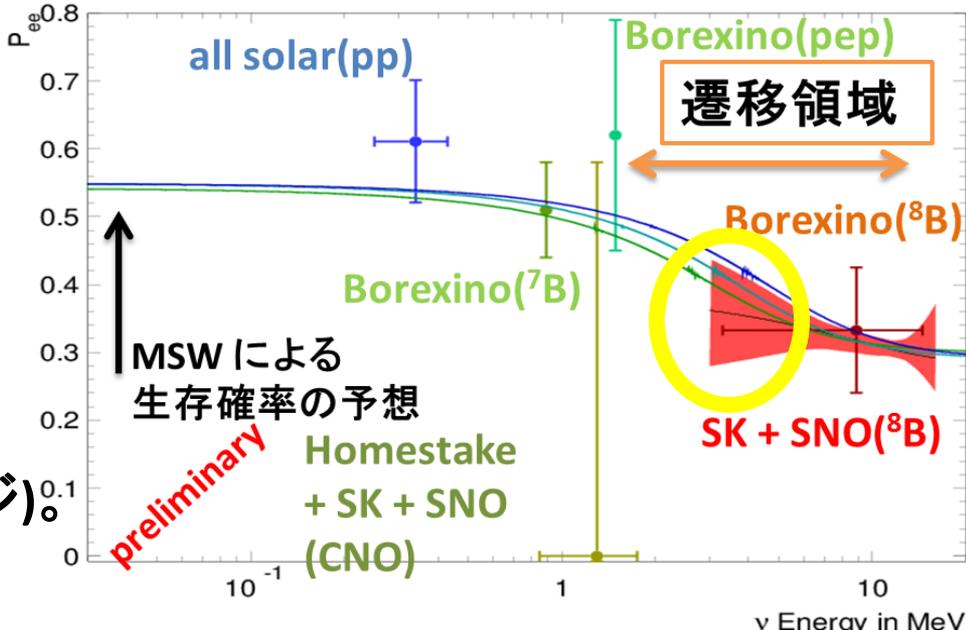
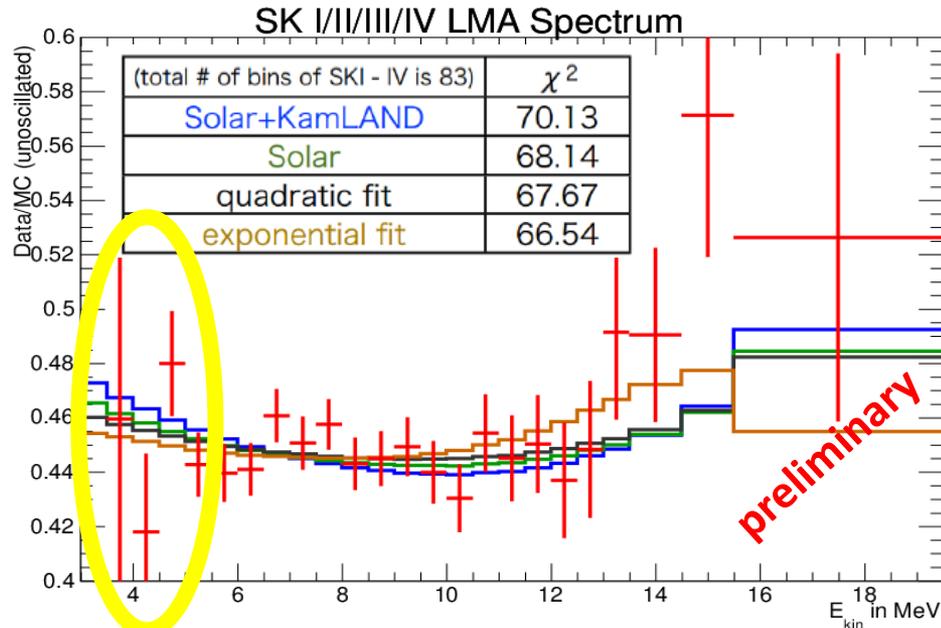
低エネルギー領域の観測が重要

◆低エネルギー領域の観測

(主に)RnによるBG eventにより、低エネルギー領域の観測は制限

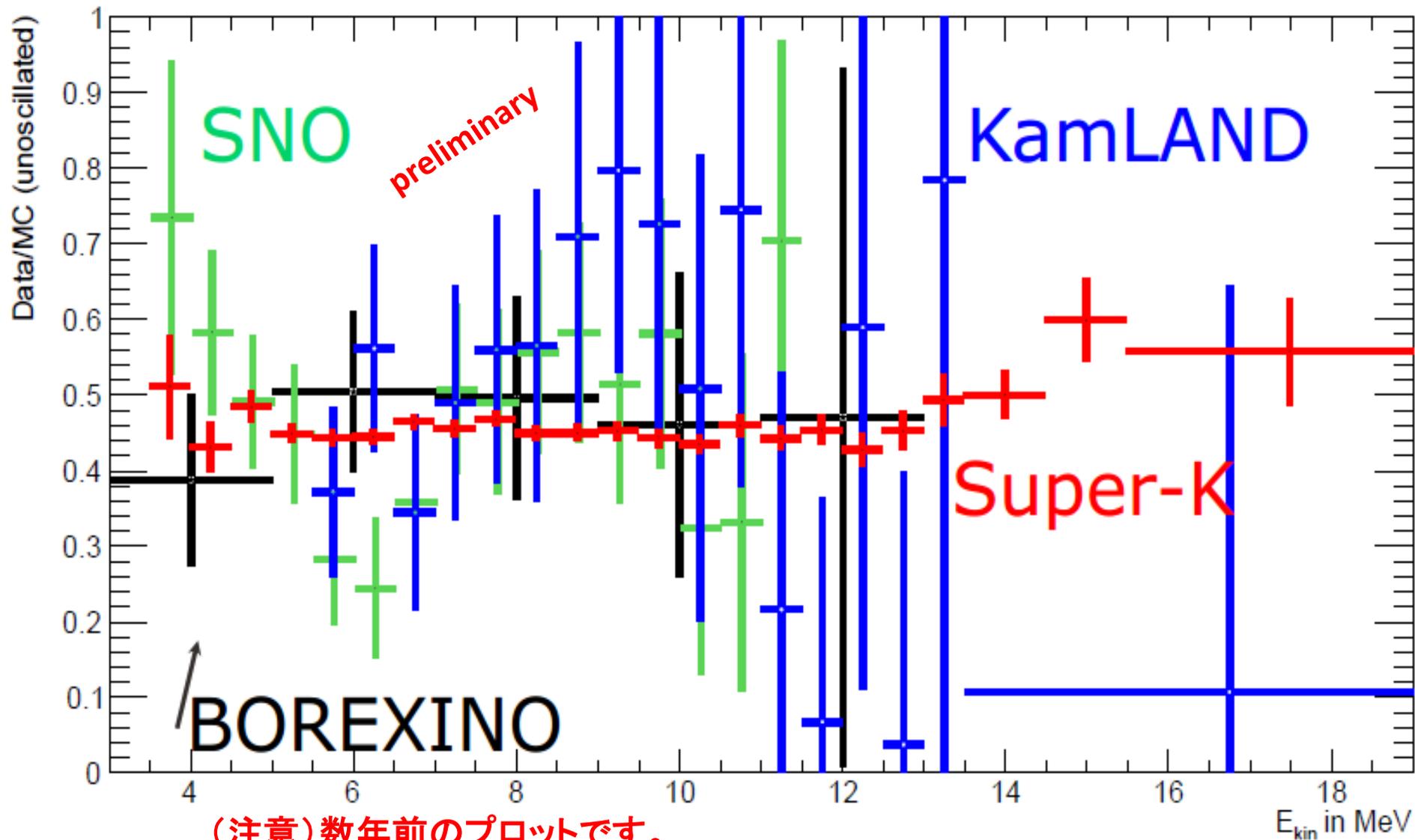
- (1) Trigger rateを抑える
- (2) 保存するデータ量を少なくする

SKのFiducial Volume(22.5 kton)のうち、キレイな領域を使用している(次次ページ)。
→統計的な誤差がdominant



Compare with other experiments results

^8B Elastic Scattering Data



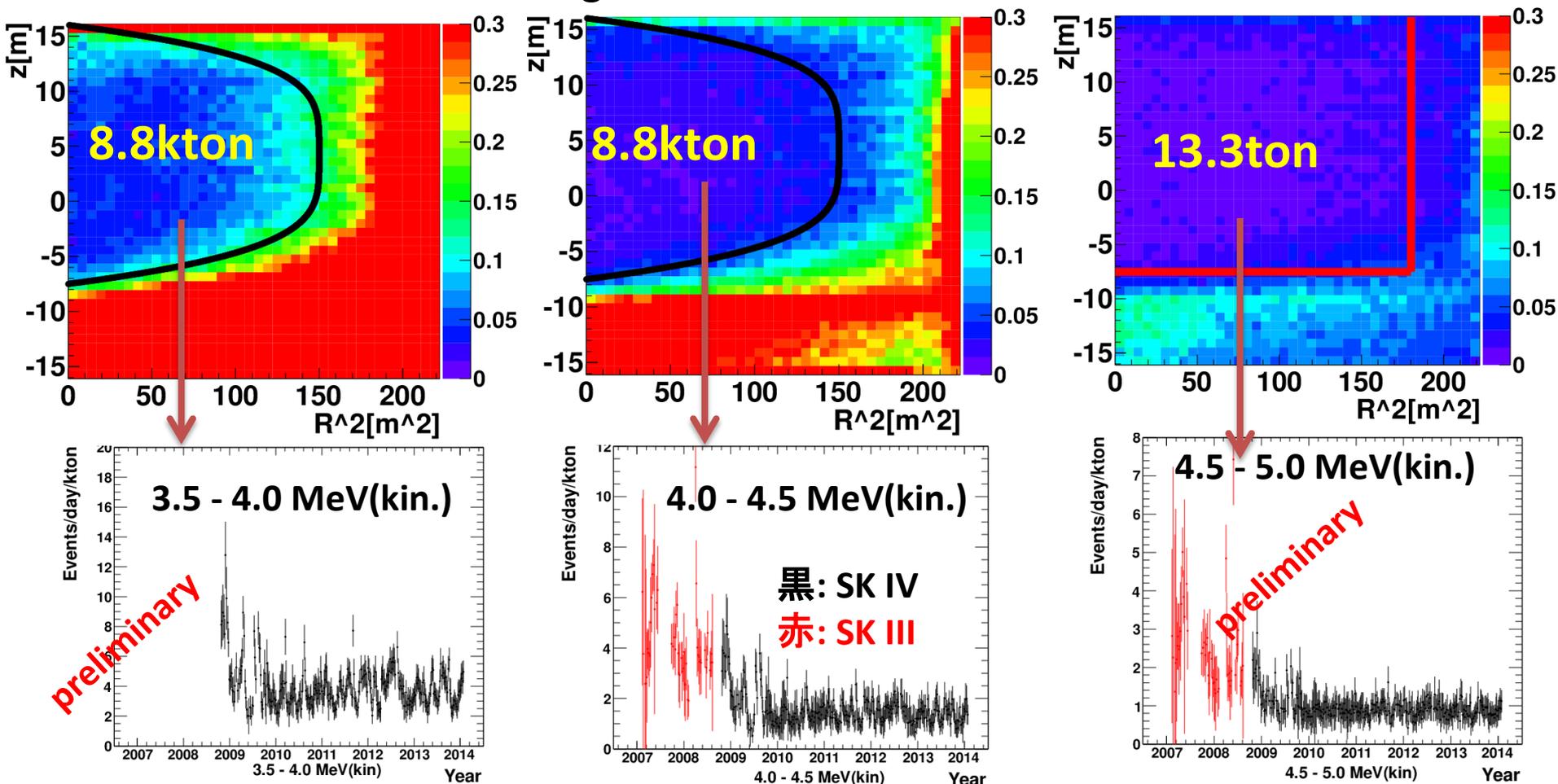
RnによるBG eventを減らす努力

検出器の底部、及び壁側では明らかにBG eventが多い。

→底部は水循環による対流、壁側はPMTやFRPによるRnのemanation。

SK-IVでは「キレイな領域(Tight Fiducial Volume)」を選んで解析に使用。

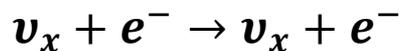
→さらなるBGの低減により、Tight FVを拡大して、イベント数を稼ぎたい。



バックグラウンドの低減の歴史

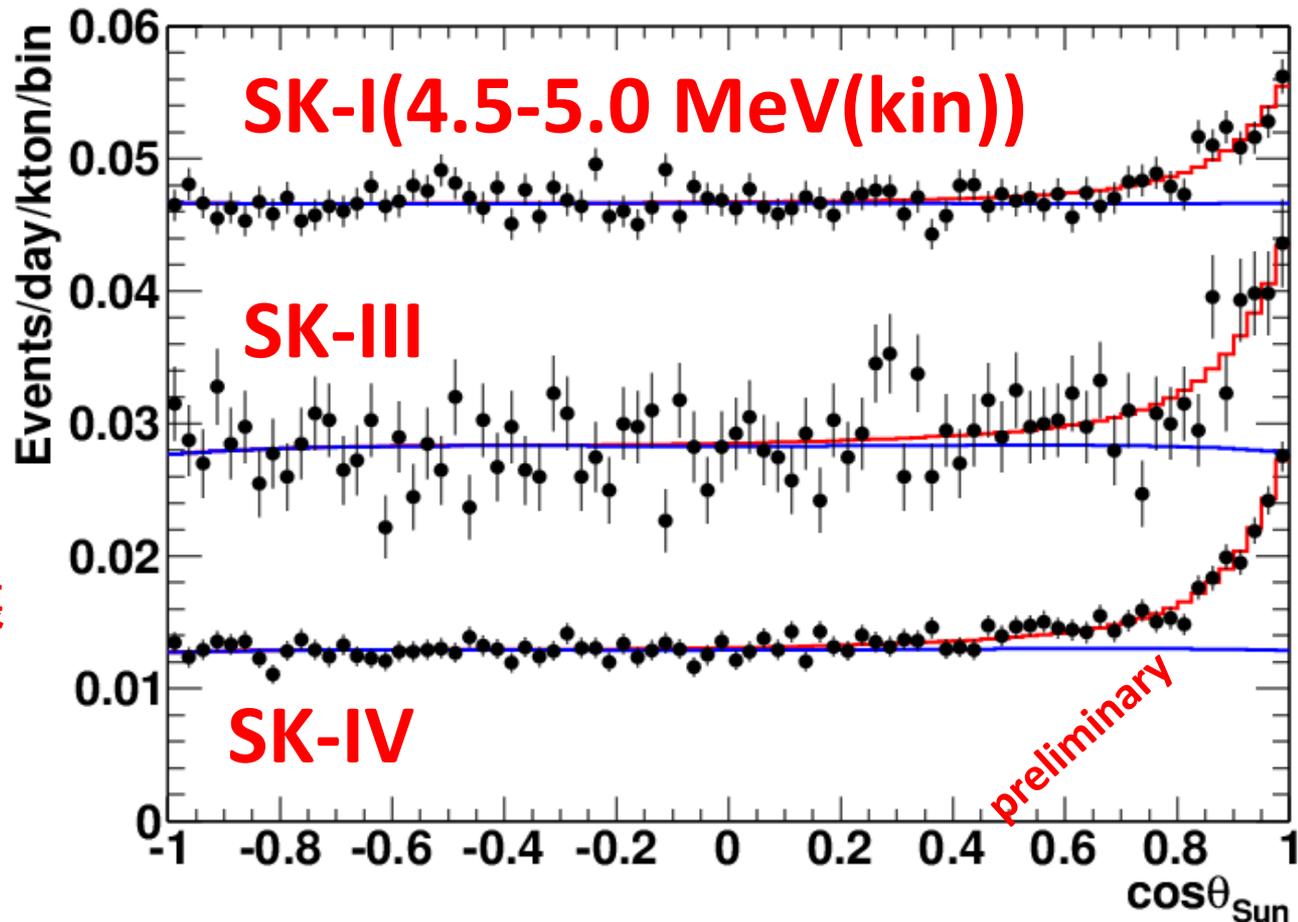
◆SKでの太陽ν観測

電子との弾性散乱



太陽方向にピーク
それ以外の方向
→バックグラウンド

Rnの娘核種 ^{214}Bi のβ崩壊
($Q = 3.27 \text{ MeV}$)



解析閾値周辺

◆SK-IVでの成果

これまでの解析閾値

SK-I : 4.5 MeV

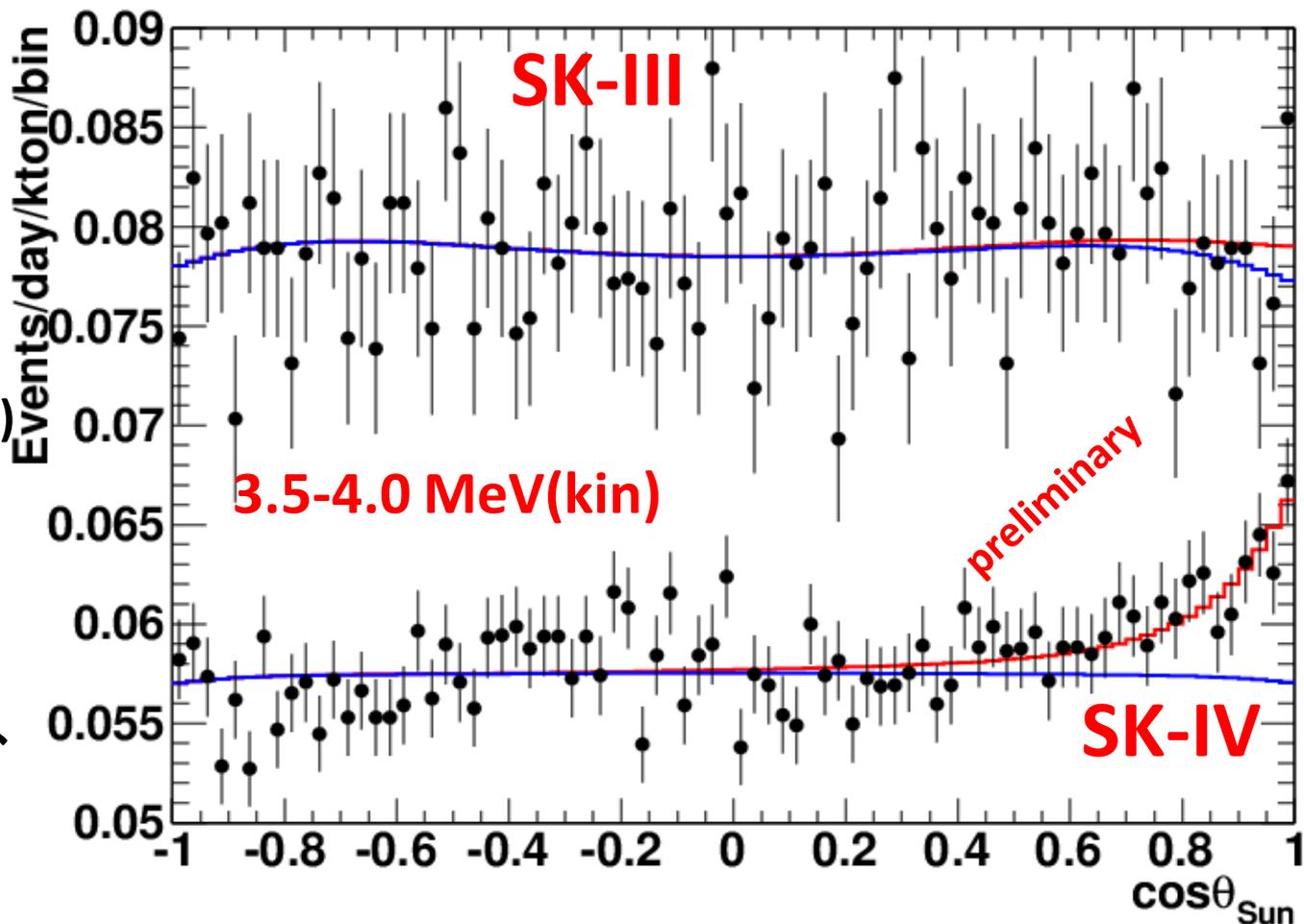
SK-III : 4.0 MeV

SK-IV : **3.5 MeV**

(recoil e kinetic energy)

測定開始時と比べて、
1 MeV分だけ下げた。

MSW効果観測に向け、
さらに下げたい。



これまでのRnに関する先行研究

◆Rn injection によるラドン濃度の推定

Rnを溶かした水を作り、SKに流す。
ラドン濃度とイベント数の超過分を比較した。

Y.Takeuchi et al., PRL B452(1999) 418-422

場所[m]	ラドン濃度[mBq/m ³]
0.0 < z < +10.0	< 1.4 (1σ)
z < - 6.0	3.0
z < - 11.0	5.0

◆Rn検出器を用いた直接測定

SKの純水を脱気。
脱気後の空気の
ラドン濃度を測定。

1 mBq/m³のオーダーを
直接測定できなかった。

新しい手法の開発

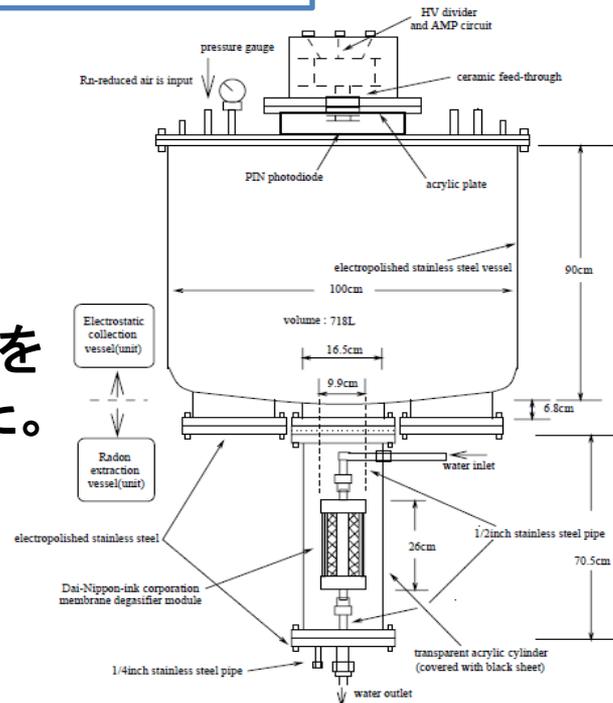


Fig. 1. A schematic view of the super-high sensitivity full radon detector for water.

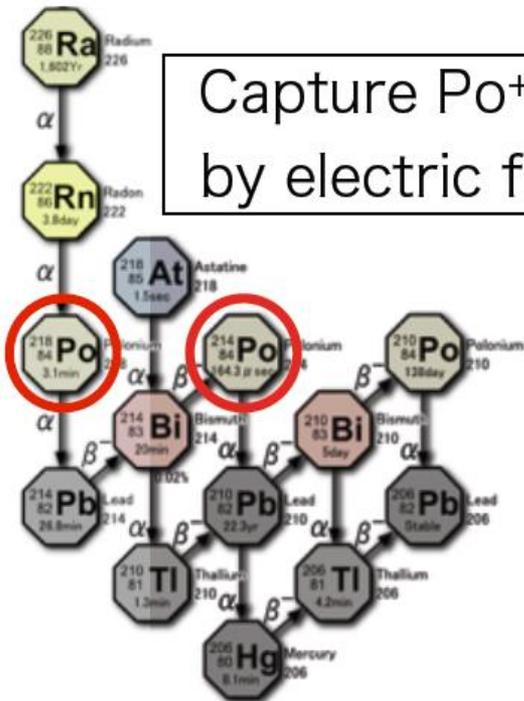
水の種類 ラドン濃度[mBq/m³]

送水 < 3.2 (1σ)

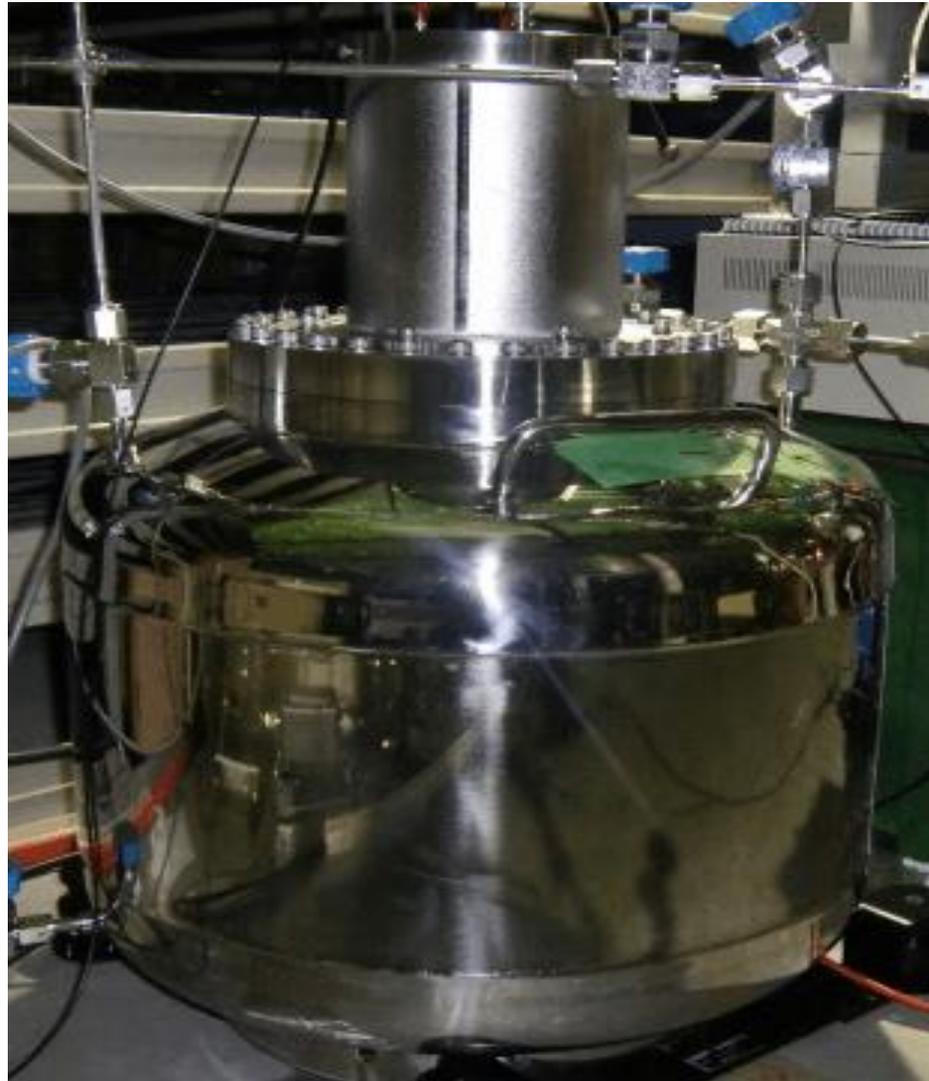
返水 < 5.0 (1σ)

タンク内部 < 5.7 (1σ)

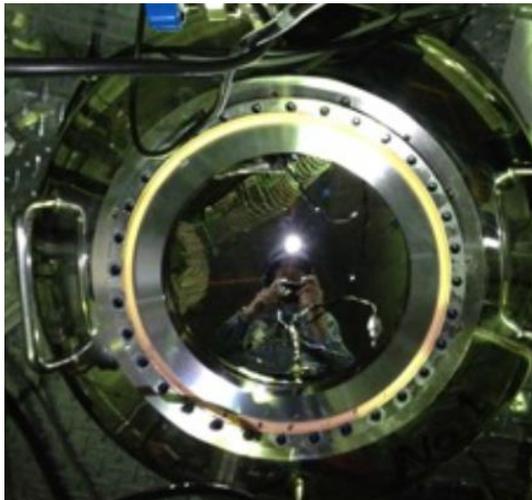
高感度ラドン検出器の開発



Capture Po^+ ion
by electric field.



40.8 cm



50.0 cm

高感度ラドン検出器

◆検出原理—静電捕集法—

-ラドン娘核種 ^{218}Po の90%が正に帯電



-検出器上部にPIN photo diode(PD)

PDのp層に -2.0 kVを印加

→帯電した娘核種をPDに捕集。

- ^{214}Po 崩壊時に放出される

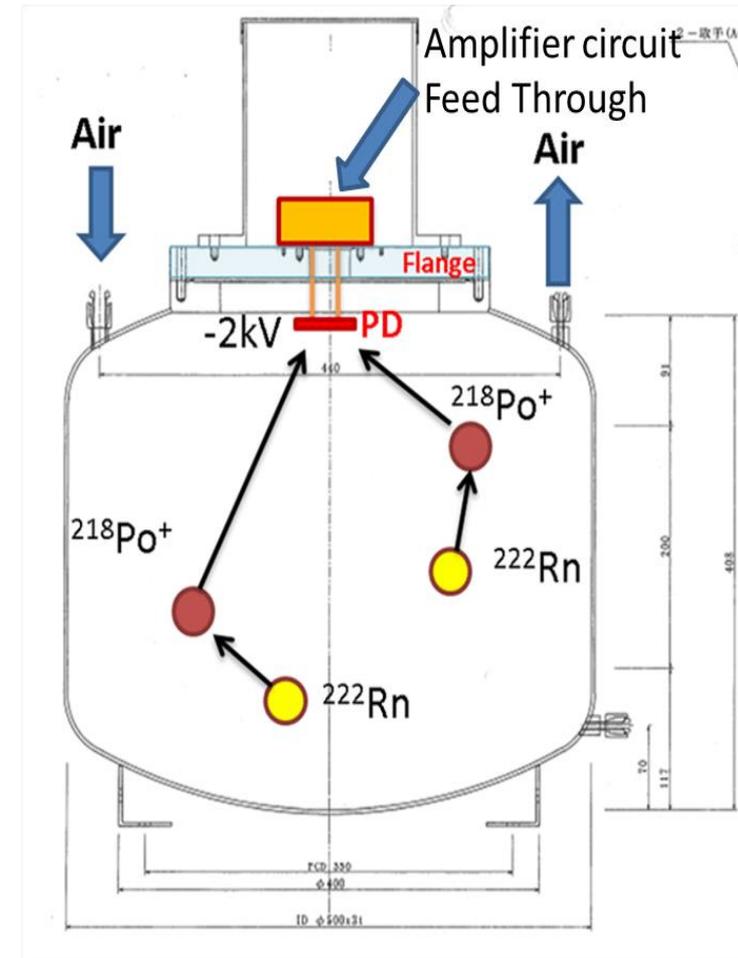
α 線(7.69MeV)をPDで検出し、数える。

◆校正係数

^{214}Po の α 線の検出数とラドン濃度を関係づける因子、として定義

$$\text{校正係数 } CF [\text{CPD}/(\text{mBq}/\text{m}^3)] = \frac{\text{1日当たりの}^{214}\text{Poの}\alpha\text{線の検出数} [\text{CPD}]}{\text{ラドン濃度} [\text{mBq}/\text{m}^3]}$$

→この検出器ではsub mBq/m³のオーダーまで測定できる。



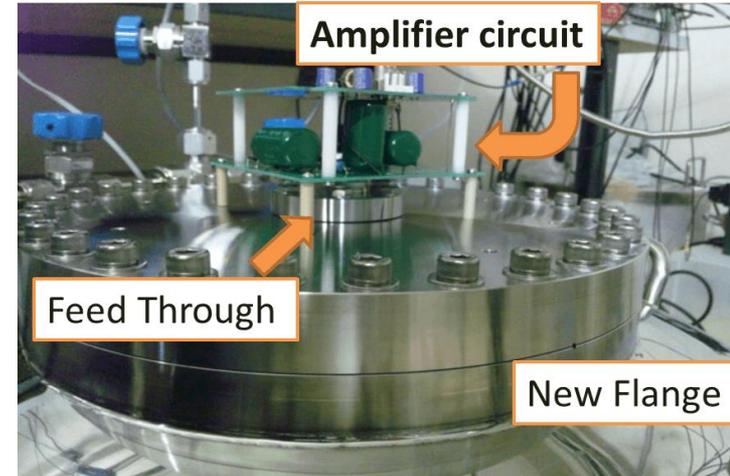
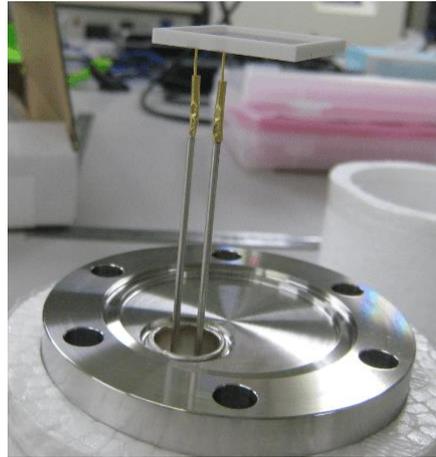
PDと電圧分割回路/プリアンプモジュール

◆PIN Photo Diode(PD)

浜松製 : S 3204-09

受光面 : 18 mm × 18 mm

バイアス電圧 : 100 Vまで

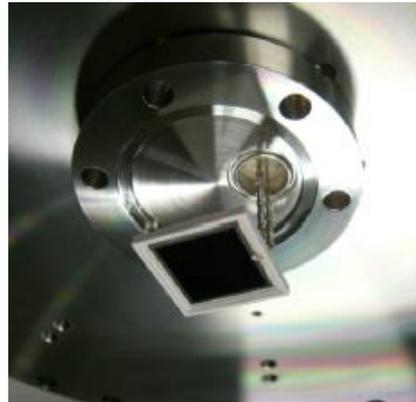


◆電圧分割回路

HVを2つに分割

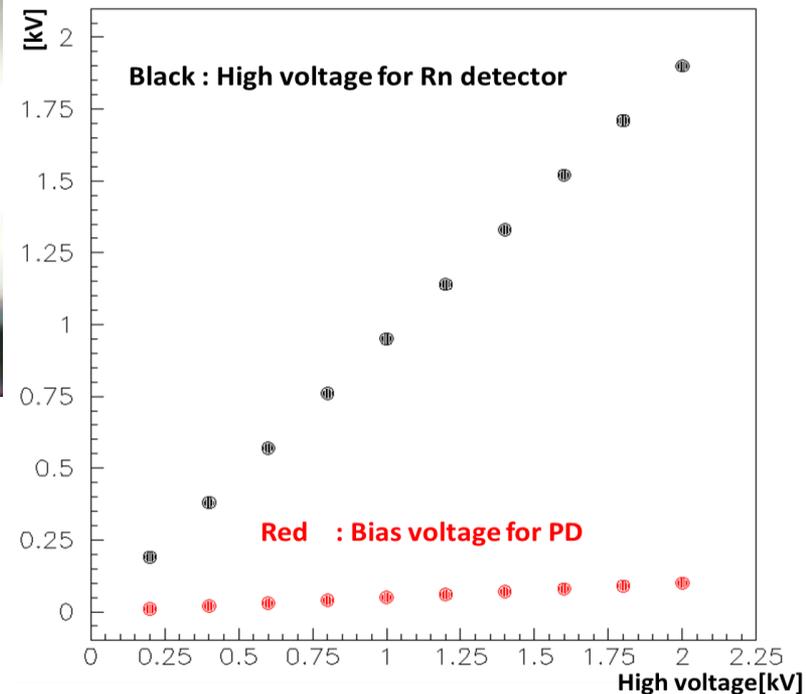
(1)PD用の逆バイアス電圧

(2)ラドン検出器用の高電圧



Y.Takeuchi et al.

NIM A 497 (2003) 414-428

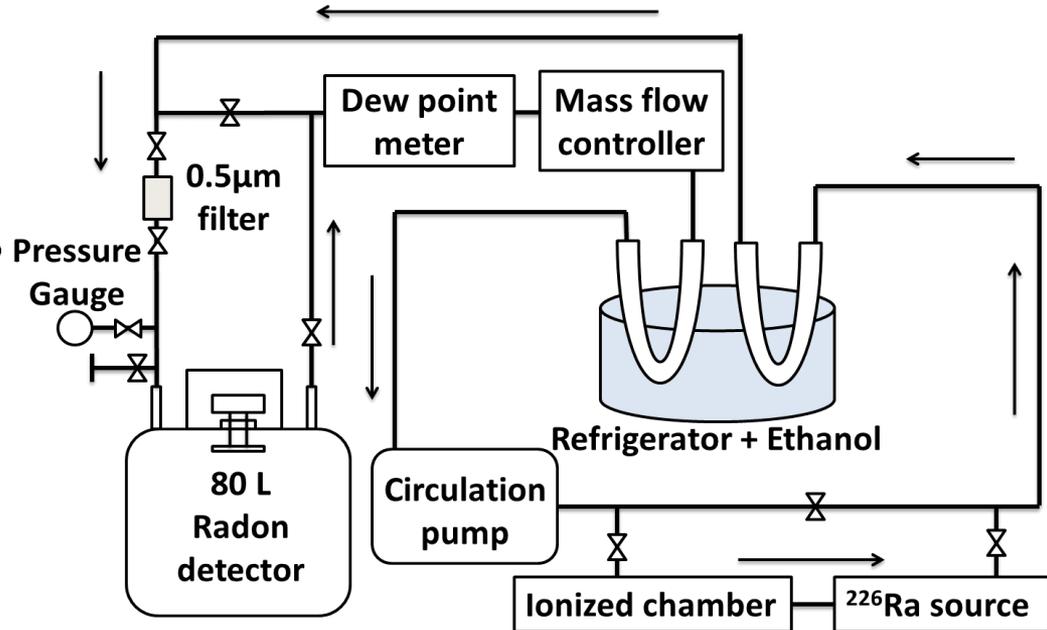


検出器のキャリブレーション

◆実験のセットアップ

ラジウムソースを系に接続。
空気ポンプで循環、放射平衡。

ラドン検出器でカウント数
電離箱でラドン濃度を測定



◆キャリブレーション

(1) 電圧依存性

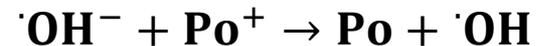
印加電圧によって、収集効率は変化。

(2) 絶対湿度依存性

90%の ^{218}Po は帯電

→空気中の水分によって Po^+ が中和
検出が出来なくなる。

Poの中性化のプロセス



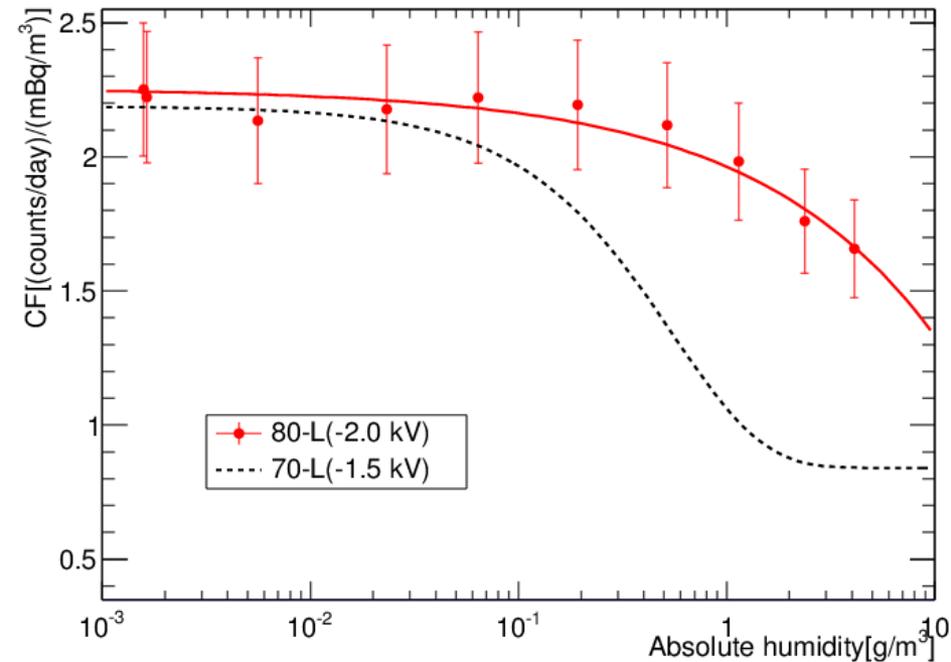
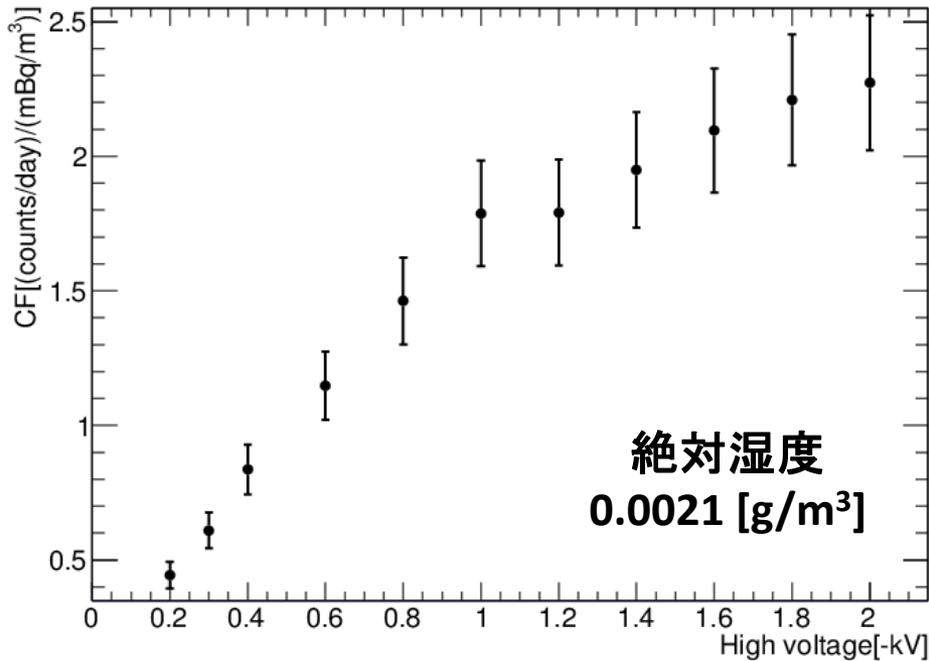
Kai-Dee Chu et al.

Environ. Sci. Technol., Vol. 22,
No. 6, 1988 711

キャリブレーション

◆測定結果

- 電圧依存性
 - 印加電圧を上げると、収集効率が增加→回路の関係で-2.0 kV
- 絶対湿度依存性
 - ラドン検出器内部の水分が増えると、収集効率が減少



スペクトルとバックグラウンド

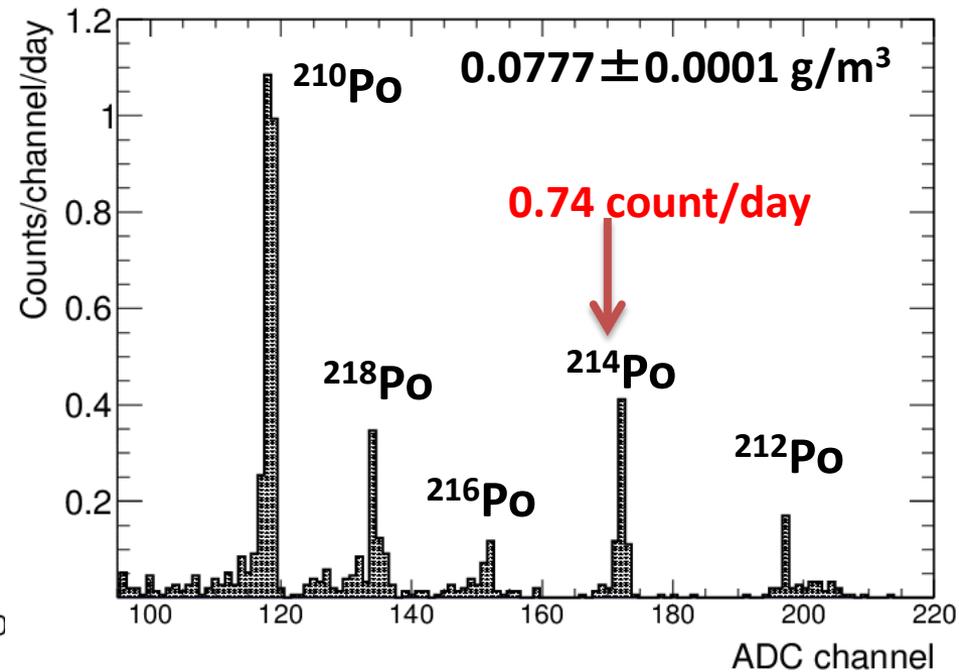
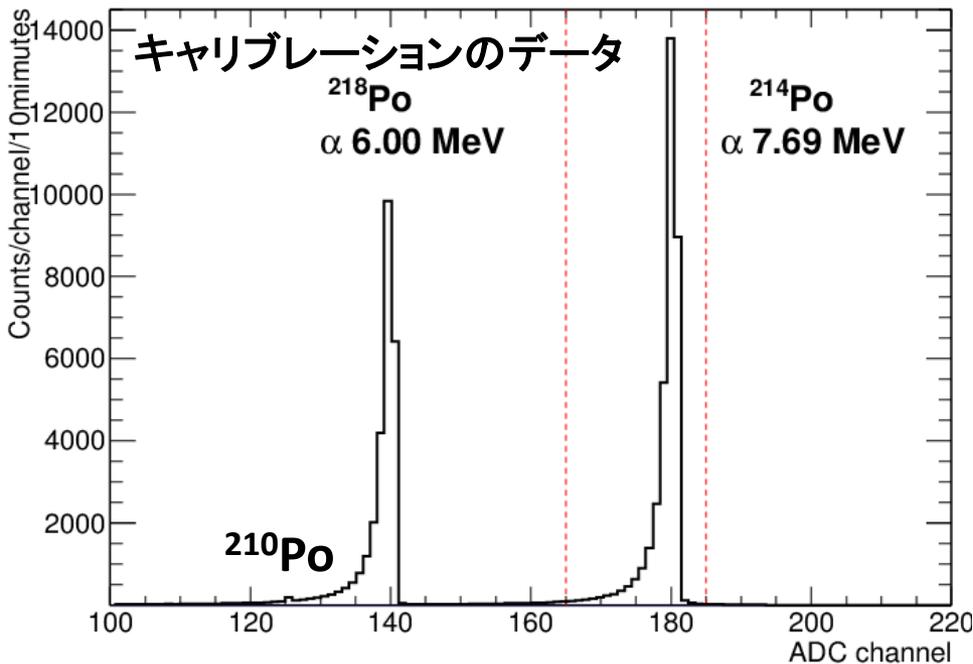
• 典型的なスペクトル

- ^{214}Po と ^{218}Po のエネルギー領域にピークが見える。
- ^{218}Po の近くに ^{216}Po があるので、他とかぶらない ^{214}Po を使う。

• バックグラウンド

- 156日間、ラドン検出器を封じ切って測定した。
- 0.74 ± 0.07 count/day $\rightarrow 0.34 \pm 0.05$ mBq/m³

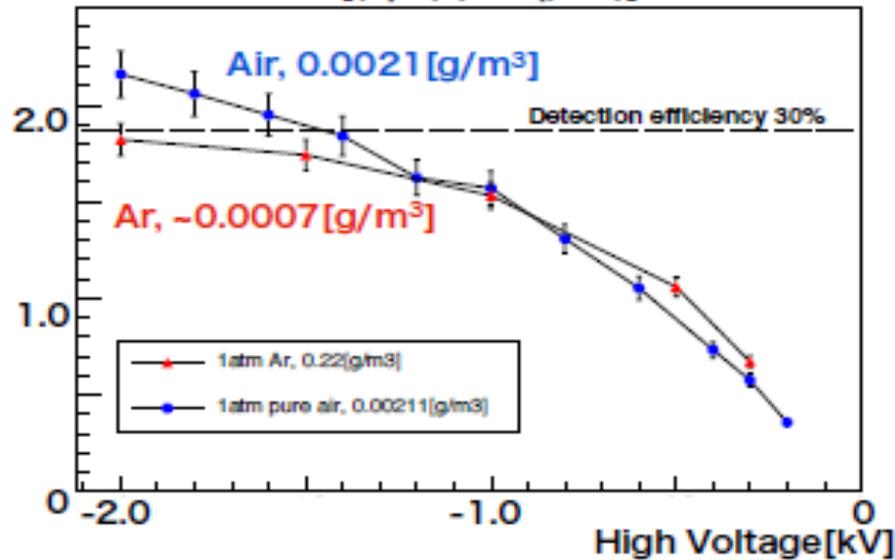
cf) 過去の70 L (-1.5 kV)
2.4 ± 1.3 count/day



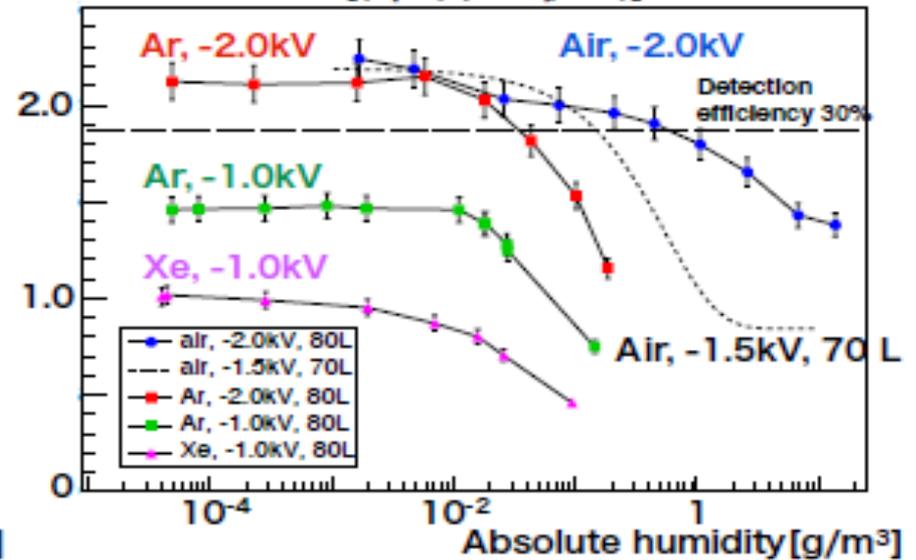
他のガスへの応用

HV & Humidity dependence

Calibration Factor [(cpd)/(mBq/m³)]



Calibration Factor [(cpd)/(mBq/m³)]



- ✓ With higher voltage supplied, higher CF is obtained.
- ✓ Could not supply higher voltage than -2.0kV, because of sparks.

- ✓ ~70% Po⁺ ion is collected in low humidity.
 - Half of α-ray emitted from Po⁺ at diode surface is directed to diode.
 - Signal region covers 90% of ²¹⁴Po signal.

空気層のラドン濃度測定

気液平衡による水面のラドン濃度の見積もり

◆気液平衡

空気層と水面は、ラドンガスを交換していると考えられる。

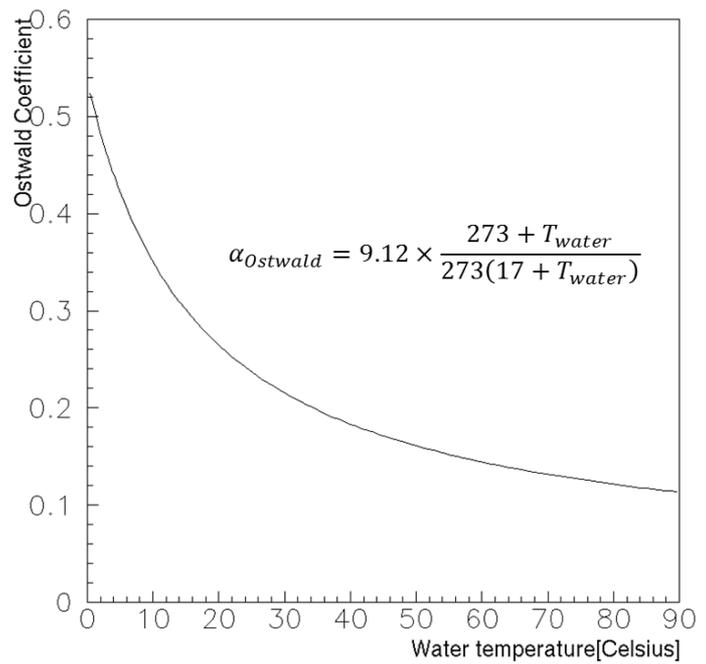
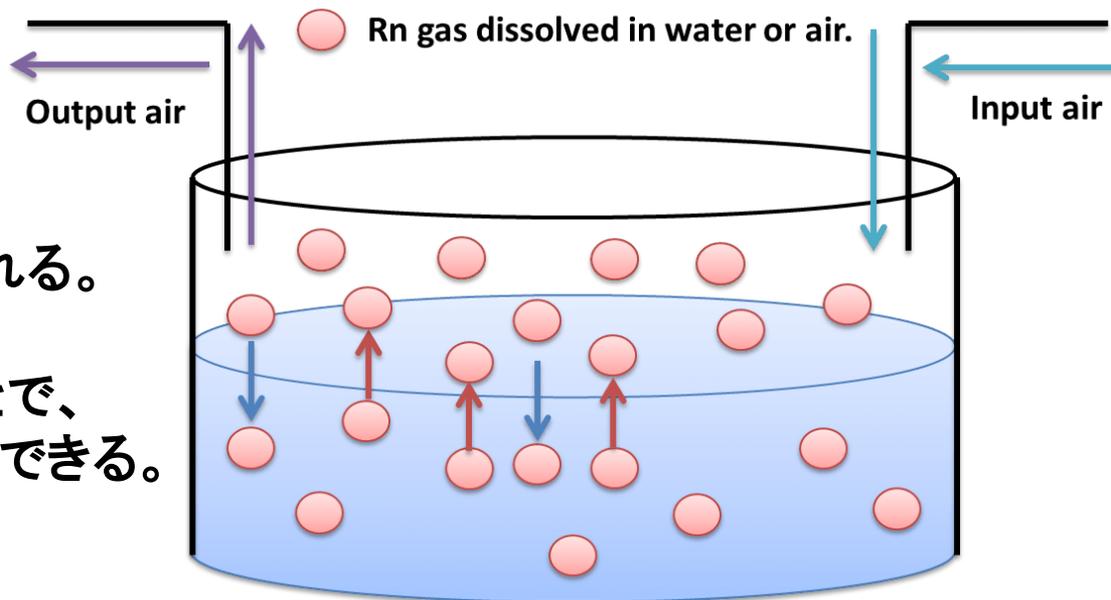
空気層のラドン濃度を測定することで、水面のラドン濃度を見積もることができる。

◆オストワルド係数

気相におけるラドン濃度に対する液相におけるラドン濃度の比は、水面の温度に依存する。

$$\alpha_{Ostwald} = \frac{\text{液相におけるラドン濃度}}{\text{気相におけるラドン濃度}}$$

$$= 9.12 \times \frac{273 + T_{\text{water}}}{273(17 + T_{\text{water}})}$$

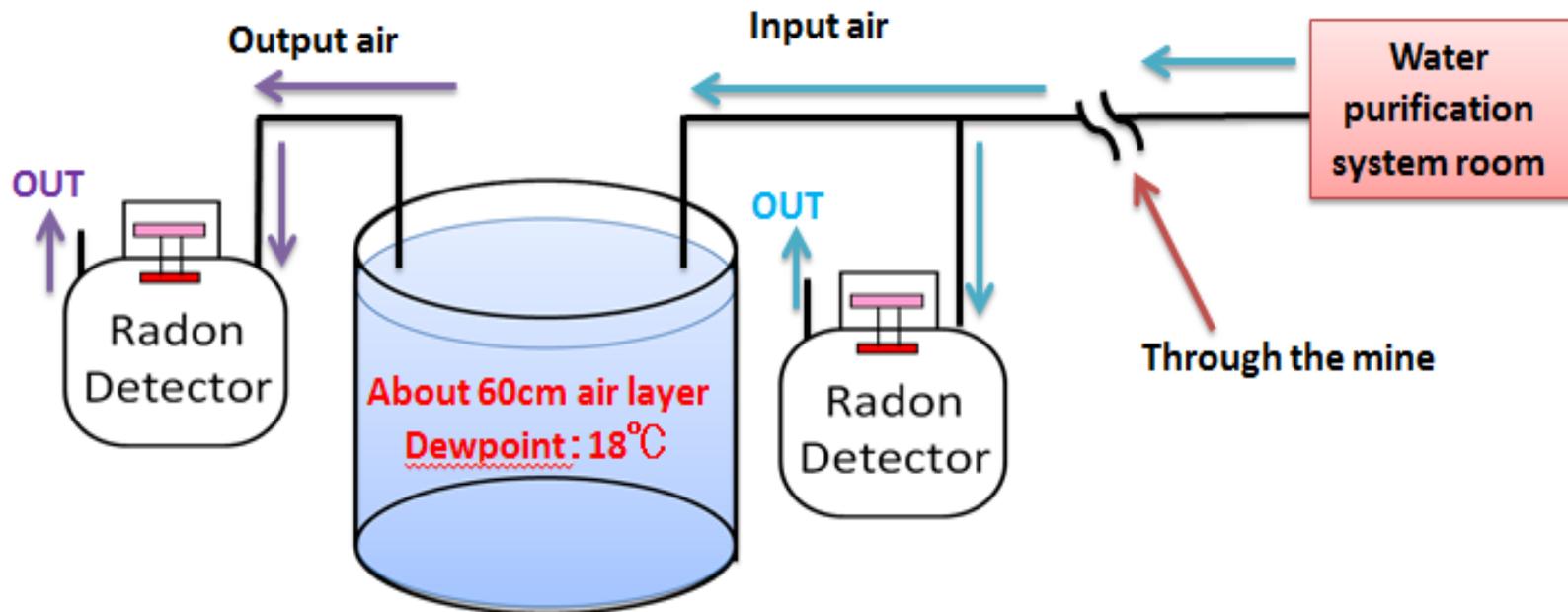


空気層のラドン濃度測定

◆空気層のラドン濃度測定

- SK検出器は水面と検出器の蓋の間に**60cm**の空気層がある。
- 空気層にはラドンを極力除去した空気を入れている(外圧に比べて+0.3kPa)。

- (1)SK検出器に送り込む直前の空気(Input air)
- (2)空気層から出てくる空気(Output air)

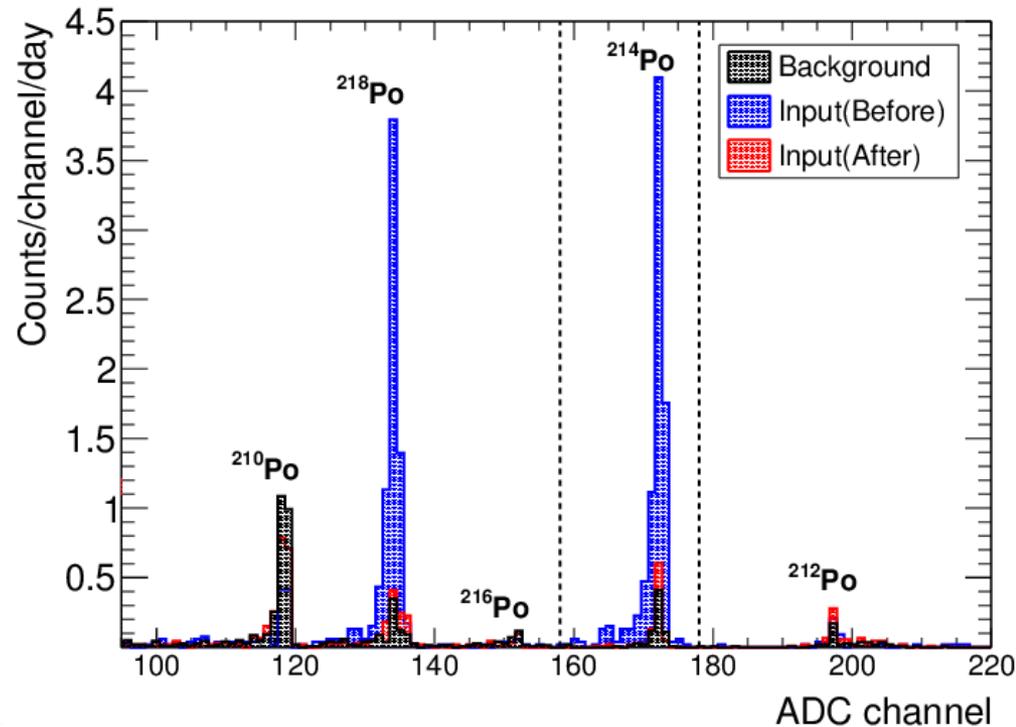
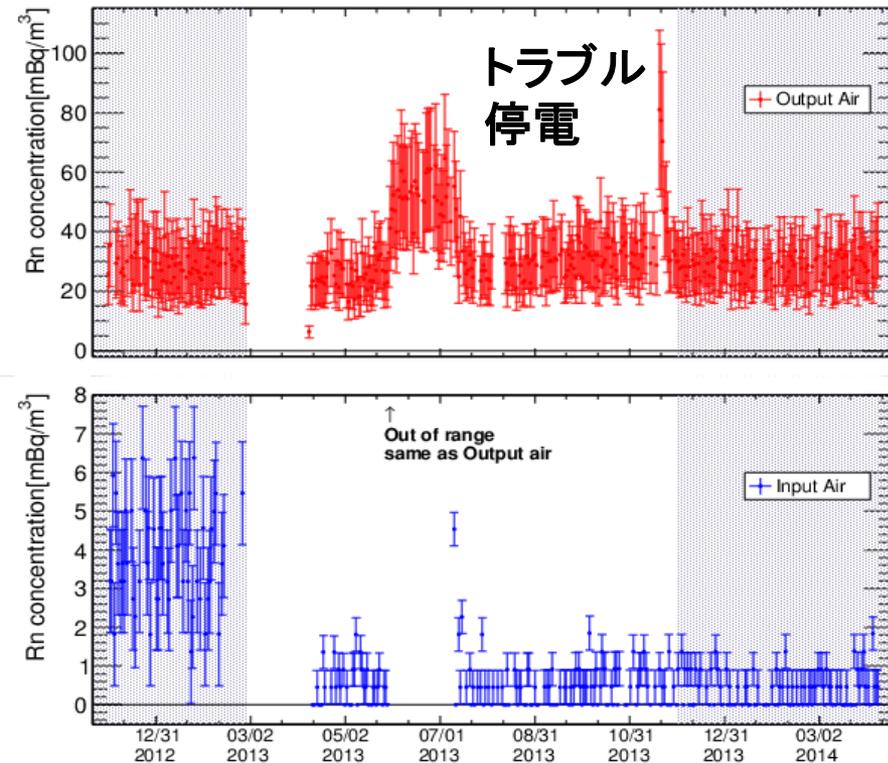


空気層のラドン濃度測定結果

- 2012年12月1日から2014年4月9日
 - 最初の90日
 - 後半の131日
- SKに供給している空気
 - 冷却活性炭トラップに通すことでRnを吸着
 - 2013年3月に -40°C から -60°C に改良
 - 供給する空気中のラドン濃度が減少
 - 空気層中のラドン濃度は変化せず

	改良前 [mBq/m ³]	改良後 [mBq/m ³]
Output air	28.9 ± 3.2	28.8 ± 3.2
Input air	3.5 ± 0.4	0.07 ± 0.06

水面のラドン濃度の見積もり
8.9 ± 1.0 mBq/m³



ここまでのまとめ

- SKでの太陽ニュートリノ観測
 - ^{214}Bi が主要なBG、減らしたい。
- ラドン検出器開発
 - 新しく高感度なラドン検出器を開発、性能評価。
 - 較正係数の電圧依存性、絶対湿度依存性
 - 検出器のバックグラウンド
- 空気層の測定
 - SKに供給している空気中のラドン濃度のモニタリング
 - Input : $3.5 \pm 0.4 \rightarrow 0.07 \pm 0.06 \text{ mBq/m}^3$
 - Output : $28.9 \pm 3.2 \rightarrow 28.8 \pm 3.2 \text{ mBq/m}^3$

純水中のラドン濃度測定

水のサンプリング



脱気



冷却濃縮
加熱脱離



測定



新しい測定手法

◆純水から空気へ

純水中のラドン濃度を液体の状態では測定できない。
従来通り、純水からラドンを脱気することにした。
新しい気液混合器(ミキサー)の開発を行った。

◆活性炭による濃縮

SKの純水中のラドン濃度は非常に低濃度
→濃縮する必要がある。
→濃縮後にラドンを回収する必要がある。

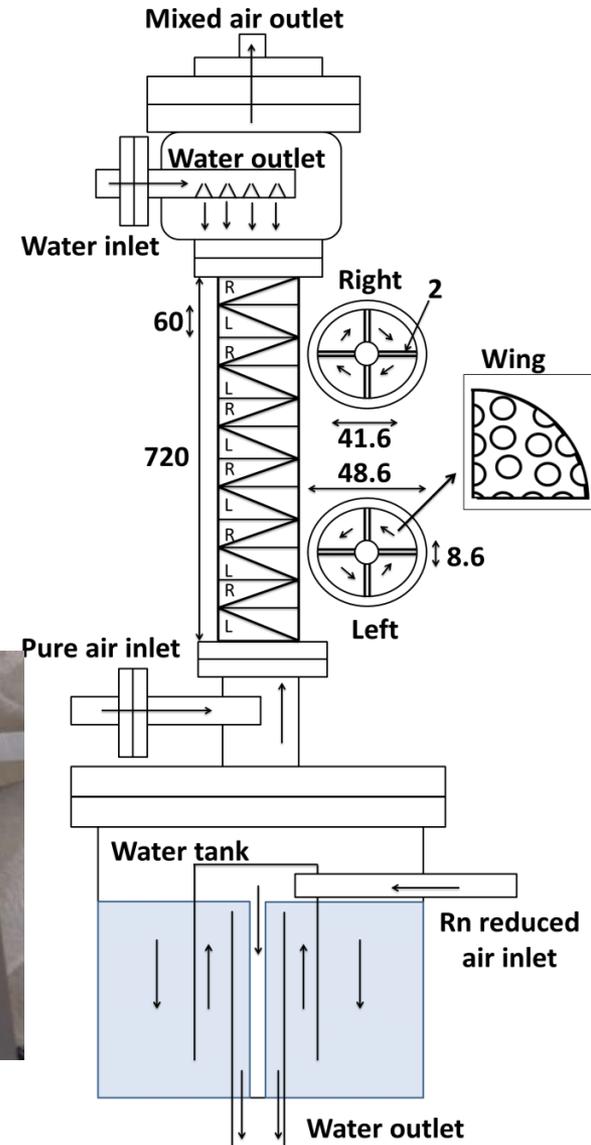
活性炭は
-60°C以下で約99%の
ラドンを吸着できる

+120°C以上で約99%の
ラドンを脱離できる。

M.Shimo et al.,
Journal of the Atomic Energy Society of Japan.
Vol 25 (1983) 562-570



カルゴンカーボンジャパン
ダイソーブG4-8



ラドン脱気ミキサー

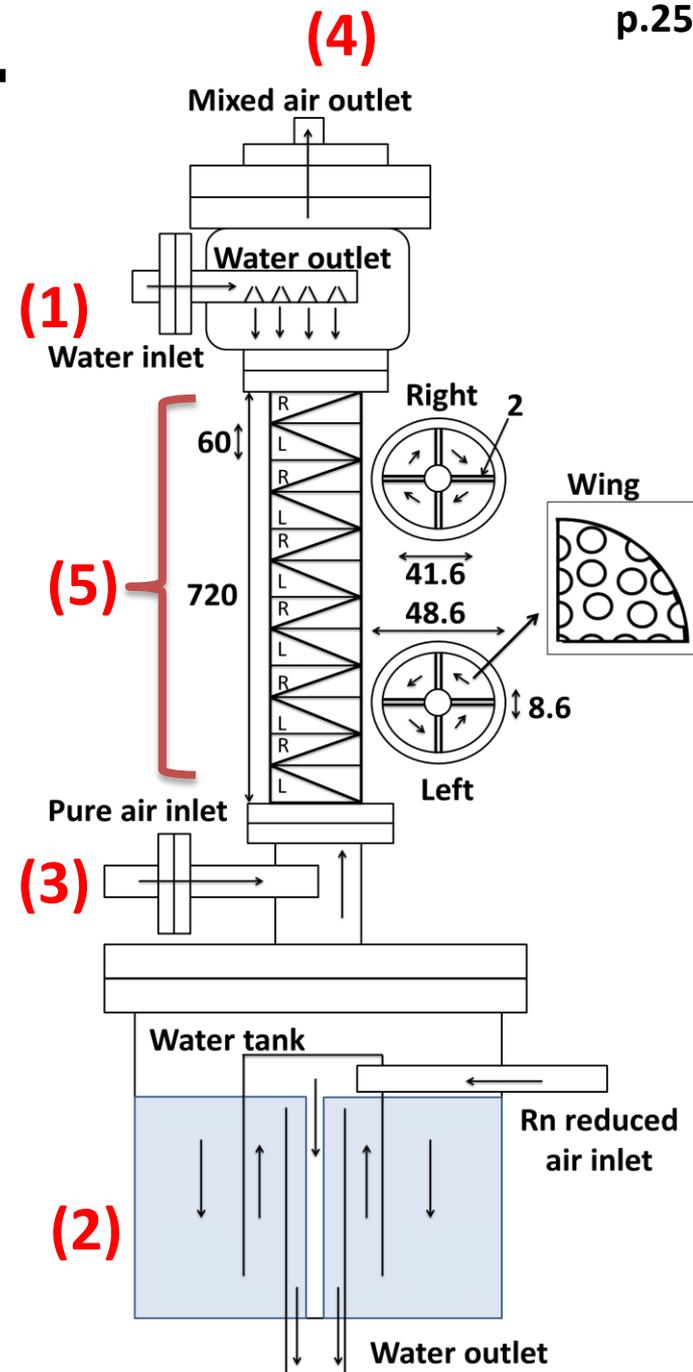
◆ミキサーの構造

- (1) 上部にサンプルした水の吸水口
- (2) 下部に脱気後の水の排水口と水タンク
- (3) 混合に使用する純空気の入り口
- (4) 脱気後の混合空気の排出口
- (5) 配管の内部に4枚の羽(ここで脱気)

◆ミキサーの機能

上部から純水を自由落下
羽と衝突させて、純水からラドンを脱気
下部から上昇する空気にラドンを移す

混合空気のラドン濃度を測定することで、
純水のラドン濃度を求めることができる



新しいミキサーの開発

◆改良点

- (1)ミキサーの内部を**電解研磨**
- (2)EDPMガスケット→**ICF 無酸素銅ガスケット**
- (3)直径を拡大20A→40A (流量2L/min→**4L/min**)
- (4)ミキサーを長くした
- (5)ミキサーの内部の羽を増やした(4羽×12段)



カミオカンデ用(電解研磨)



岐阜大キャリブレーション用
(電解研磨していない)

#800の粗さで
電解研磨

表面粗度
0.1 μ m以下



脱気効率のキャリブレーション

◆脱気効率の定義

C:各ラドン濃度
 F空気:空気量(2L/min)
 F水:水量(4L/min)

(A)水道水 (B)外気 (C)排水 (D)混合空気

$$C_{\text{水道水}} F_{\text{水}} \Delta t + C_{\text{外気}} F_{\text{空気}} \Delta t = C_{\text{排水}} F_{\text{水}} \Delta t + C_{\text{混合空気}} F_{\text{空気}} \Delta t$$

$$1 = \frac{C_{\text{排水}}}{C_{\text{水道水}}} + \frac{C_{\text{混合空気}}}{C_{\text{水道水}}} \times \frac{F_{\text{空気}}}{F_{\text{水}}}$$

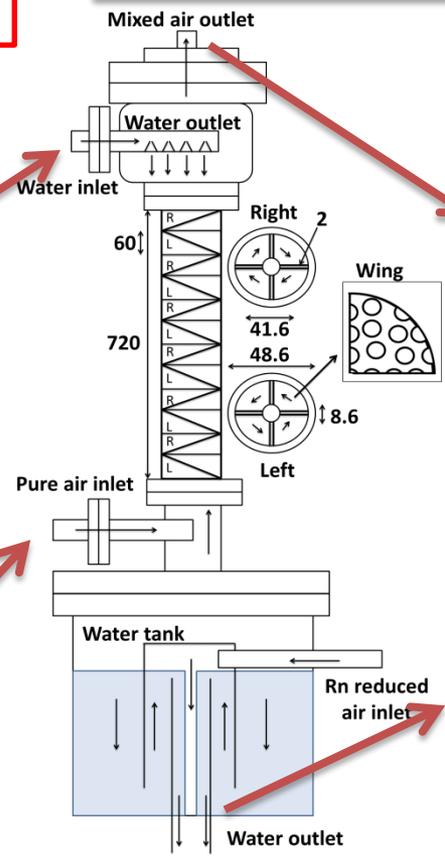
(D)混合空気と(A)水道水の割合
 →脱気効率(流量比で規格化)

(B)外気は低濃度
 なので無視すると

(A)岐阜大の水道水のサンプリング
 液体シンチレーター法による濃度測定



(B)岐阜大の外気
 高感度ラドン検出器を用いて
 濃度測定

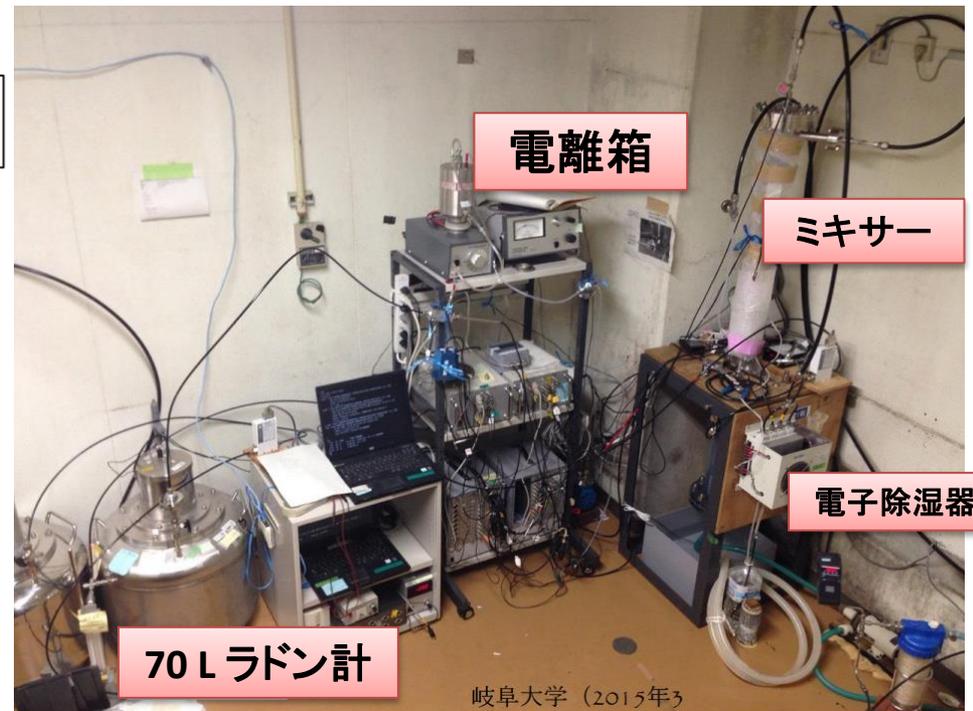
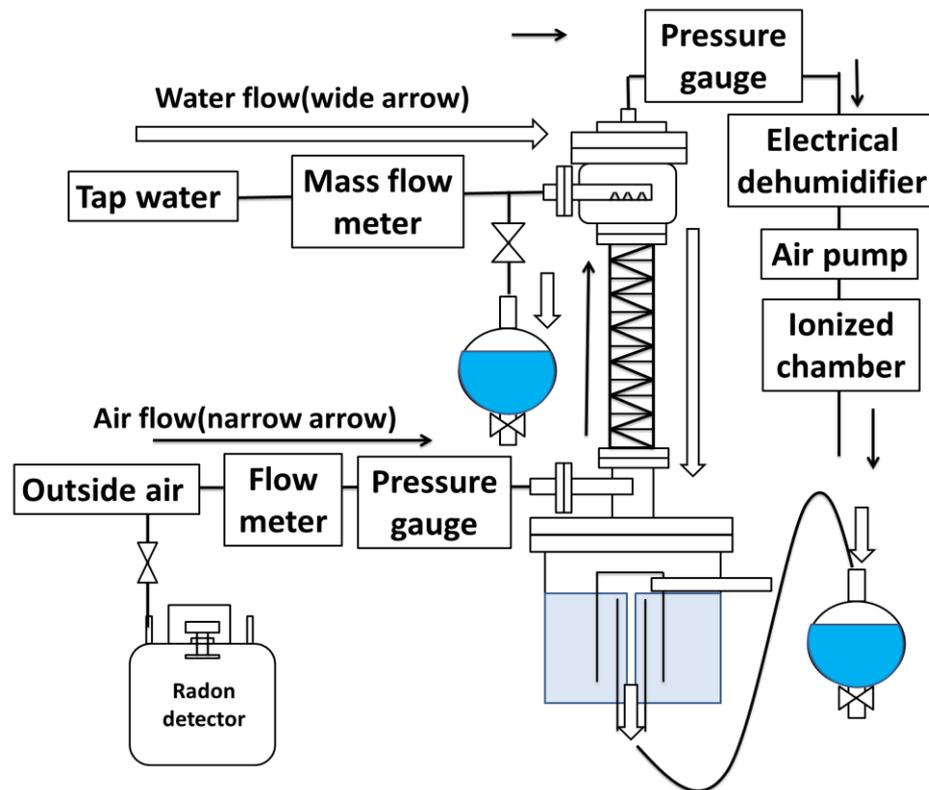


(D)混合空気
 電離箱を用いて
 濃度測定

(C)排水
 濃度測定(液シン)

実際のセットアップ

- 液体シンチレーターでの測定
 - 岐阜大学の柳戸施設を利用
 - 岐阜大学 教育学部の協力の下、ミキサーのキャリブレーション実験を行った。



新しいミキサーのラドンの脱気効率

◆実験結果

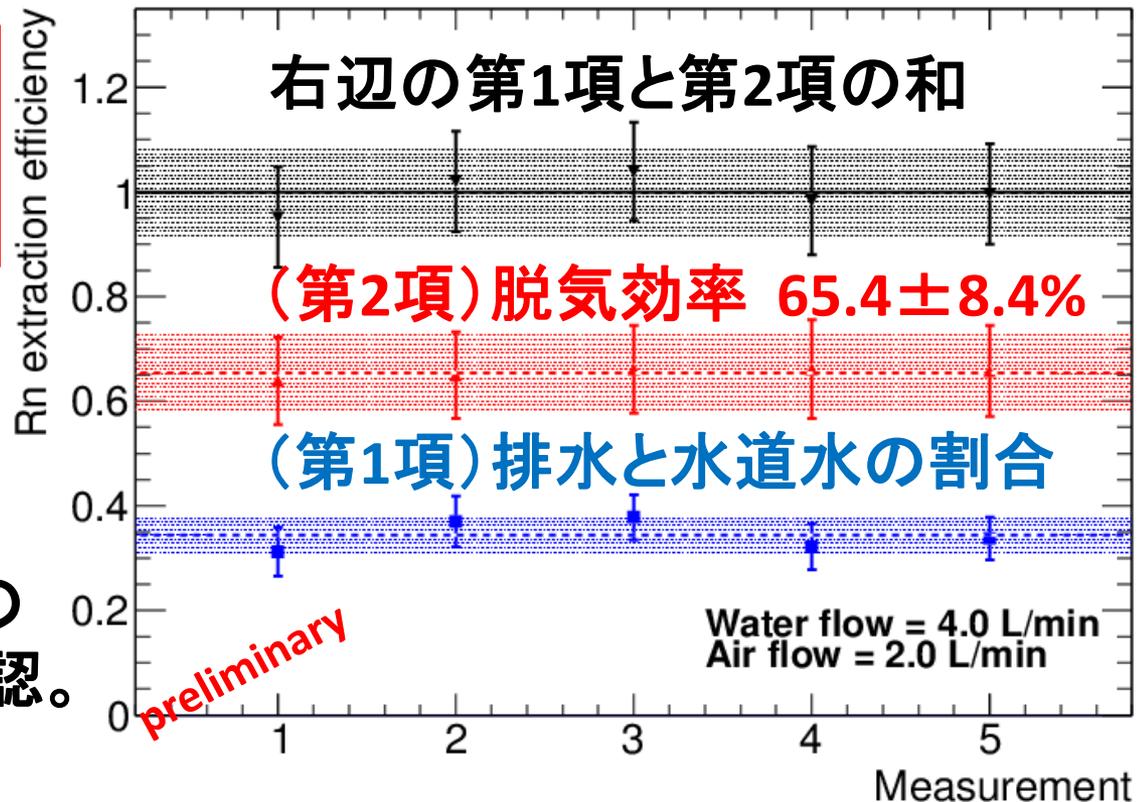
脱気効率を求める実験を5回行った。

(空気の流量、水の流量はそれぞれ、2L/minと4L/minに固定)

$$1 = \frac{C_{排水}}{C_{水道水}} + \frac{C_{混合空気}}{C_{水道水}} \times \frac{F_{空気}}{F_{水}}$$

脱気効率は **65.4 ± 8.4 %**

同時に
第1項、第2項の和が誤差の
範囲で「1」になることを確認。



ラドン濃度測定(濃縮過程)

◆純水のサンプリング

純水循環装置から
送水と排水(4.0 L/min)

タンク内部から
中心(z=+0.4 m)
底部(z= -12 m)
水面(水面から20cm)

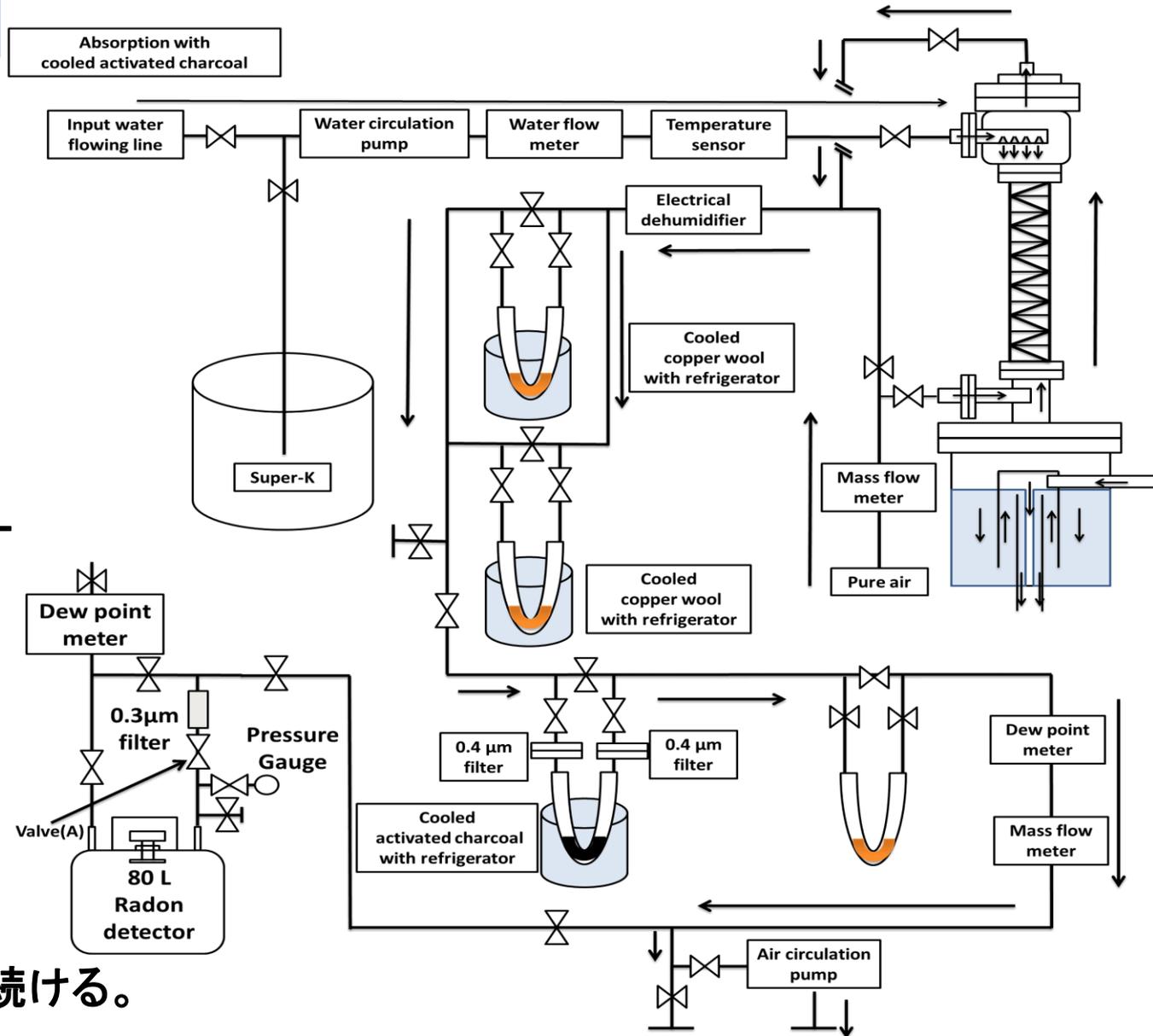
→流量と水温をモニター

◆気液混合器

純空気2.0 L/min
流量と圧力をモニター

◆活性炭による濃縮

ミキサーから出てきた
混合空気を
活性炭に継続して流し続ける。



ラドン濃度測定(脱離過程)

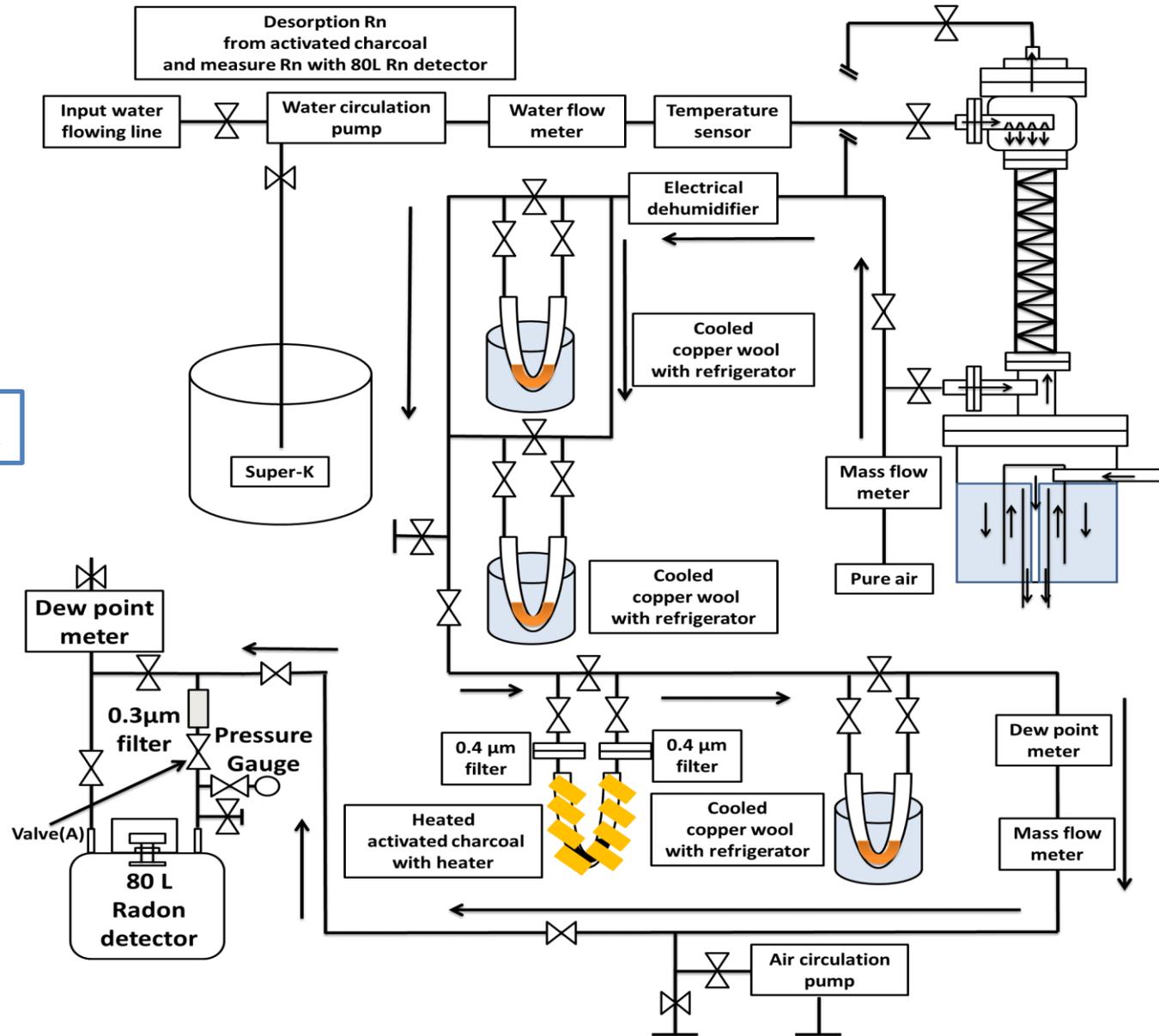
◆活性炭の加熱

200°Cで加熱
加熱している間、
純空気を流し続ける。
(ミキサーはバイパス)

◆ラドン検出器に充填

真空状態のラドン計に
1.0 L/minで流す。
約80分で1気圧。

高電圧をかけて放置。



ラドン検出器によるラドン濃度測定

◆ラドン濃度測定の手法

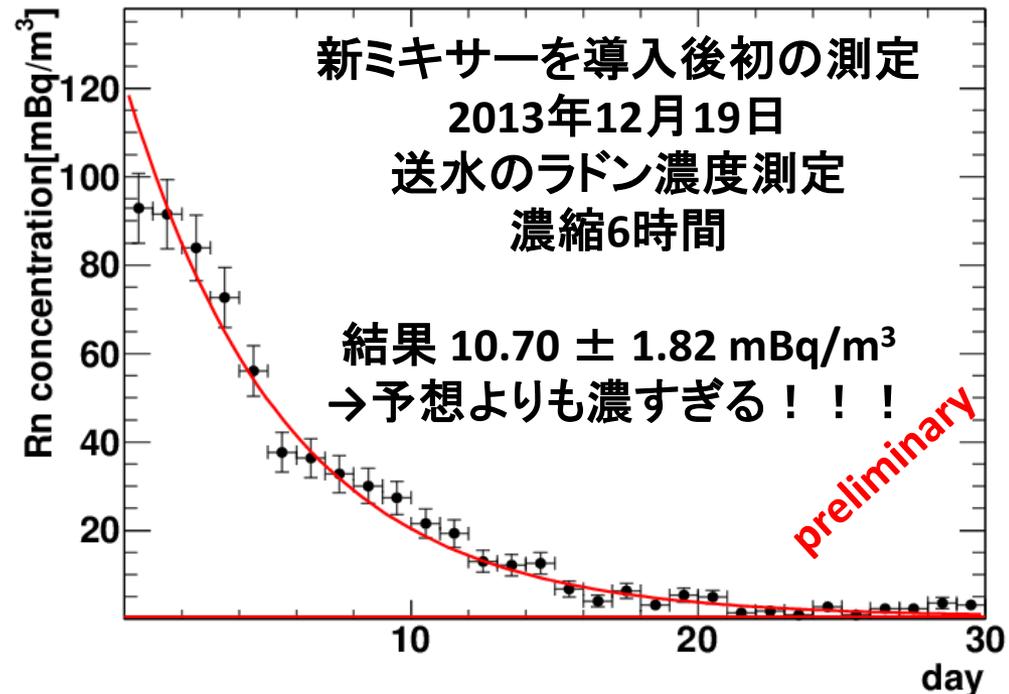
◎ラドン検出器を封じ切り、ラドンの崩壊をみる(20日以上)。

◎ χ^2 -fitを用いることで、ラドン濃度測定データからラドンの崩壊曲線を求める。

$$C(t) = C(0)e^{-(\ln 2.0/3.82)t} + C_{BG}$$

◎活性炭から脱離した後の空気のラドン濃度を求めることができる。

◎サンプルした純水の量、混合に使用した純空気の量、ミキサーの混合効率から純水のラドン濃度が算出できる。



膜脱気装置の問題

- 膜脱気装置は純水中から、約86%程度のラドンを取り除く
 - 1 moduleでは確認済み
 - しかし、システム全体では未確認
- 膜脱気装置に使用されているEPDMガスケット由来のラドンが純水に溶けているのでは？
 - 膜脱気システムだけで約120枚使用
 - 接続場所でのリーク??
- 実際に調査（空気への放出）
 - **1.82 ± 0.03 mBq/枚**
 - ラドンを放出していることを確認。



膜脱気装置の影響

◆膜脱気装置による影響

膜脱気装置が
純水中のRnを減らしているのか？
→膜脱気装置をバイパスした。

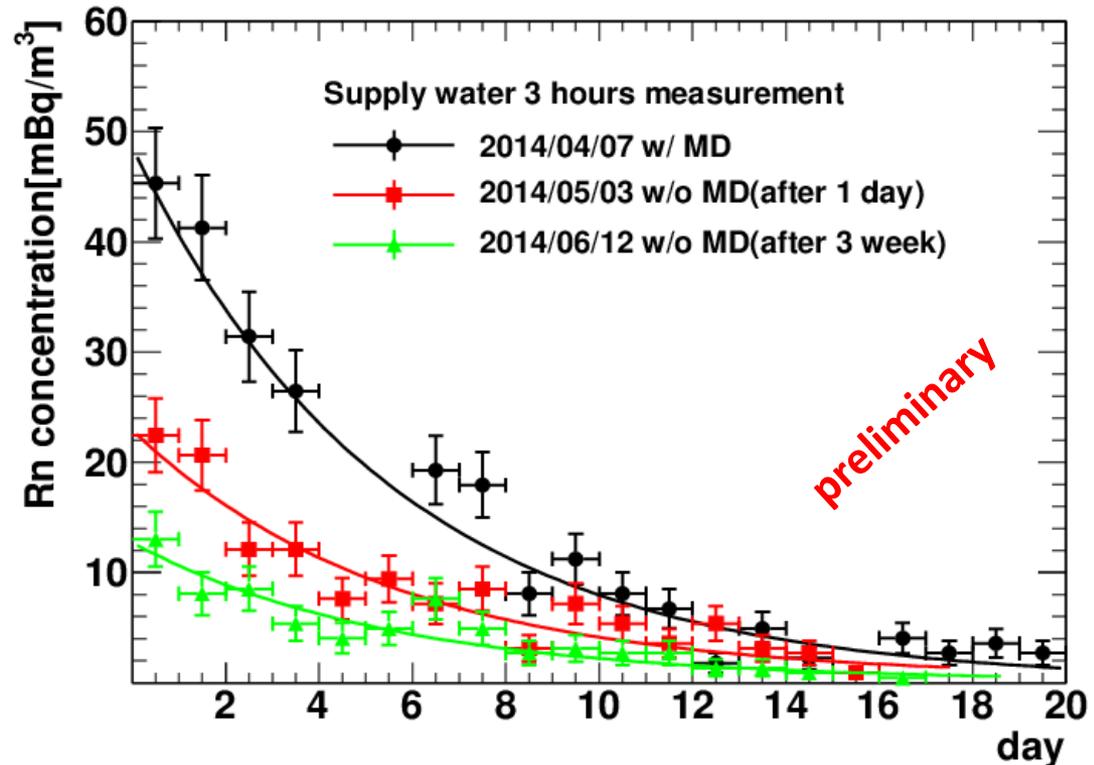
条件	ラドン濃度[mBq/m ³]
膜脱気有	8.34 ± 1.45
バイパス1日後	3.87 ± 0.77
3週間後	1.94 ± 0.41

◆ラドンはどこから来ているか

膜脱気装置をバイパスすると、純水中のラドン濃度が低下した。
膜脱気装置にラドンの由来がある。

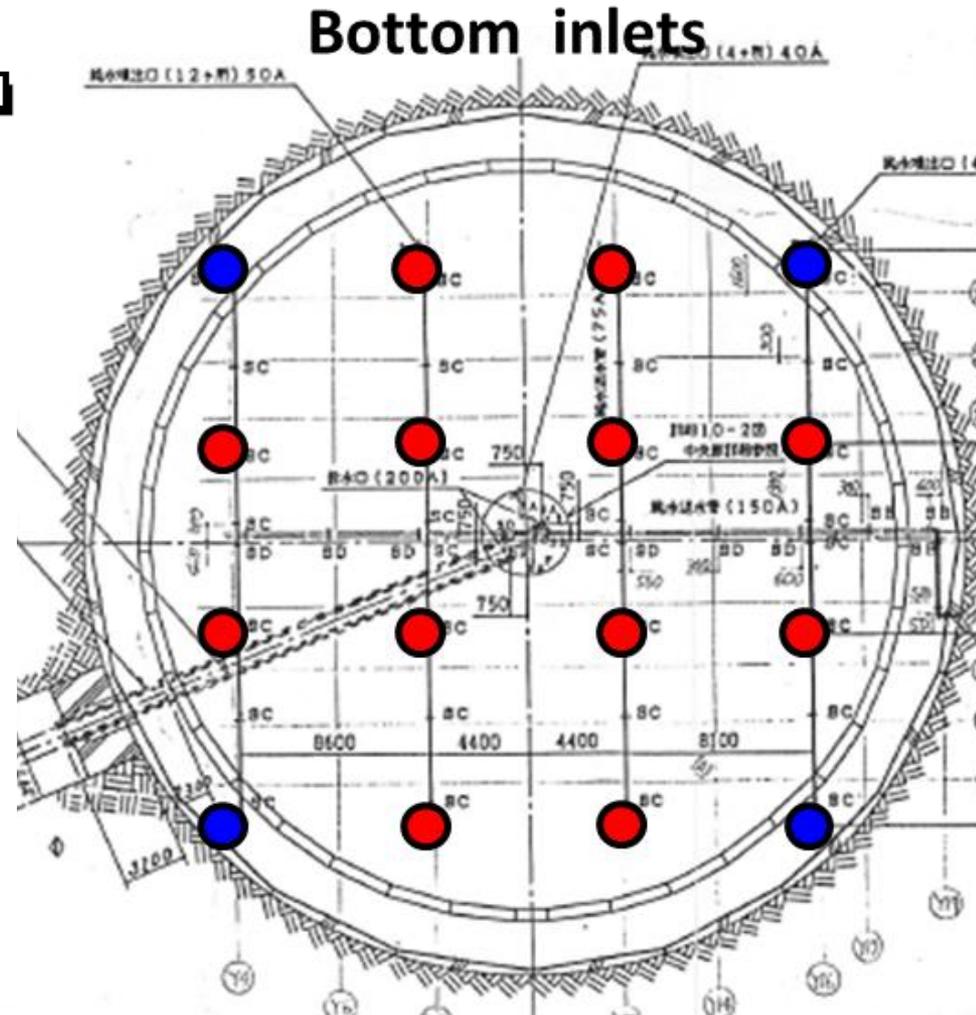
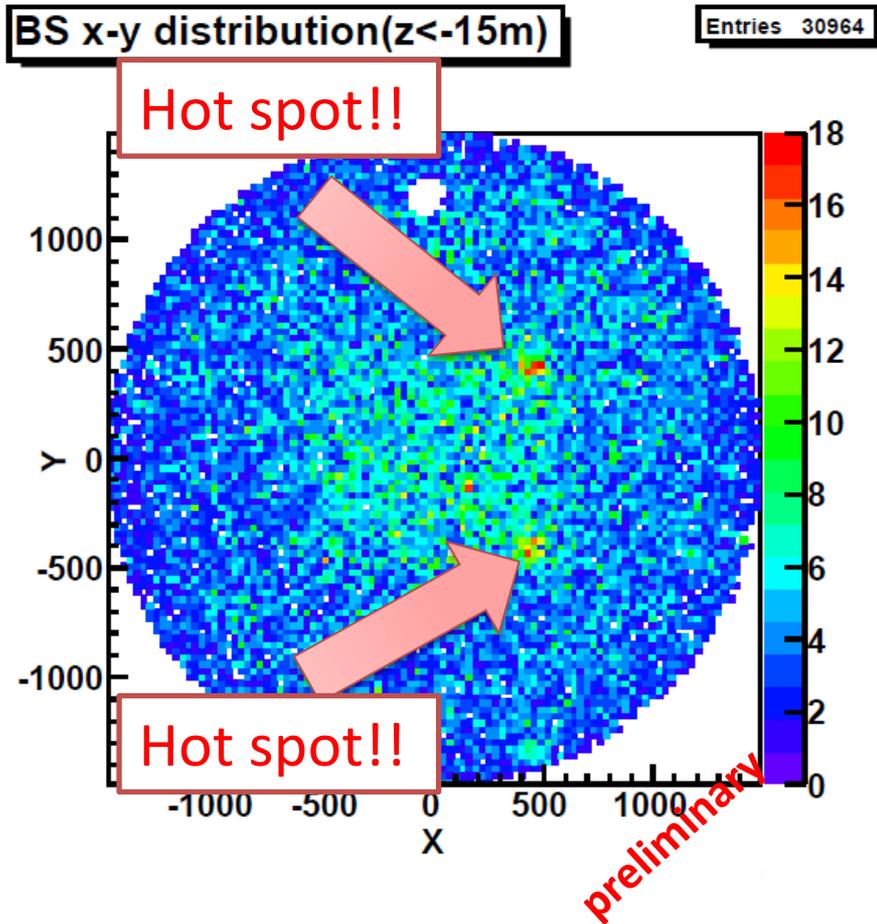
候補

- (1)疑っていたEPDMガスケット
- (2)配管周りのリーク



送水起源のラドン

送水のラドン濃度が高いので、内水槽の底部 $z < -15$ mのイベント数を見てみた。
「送水の排出口」にlow energy eventが多い。

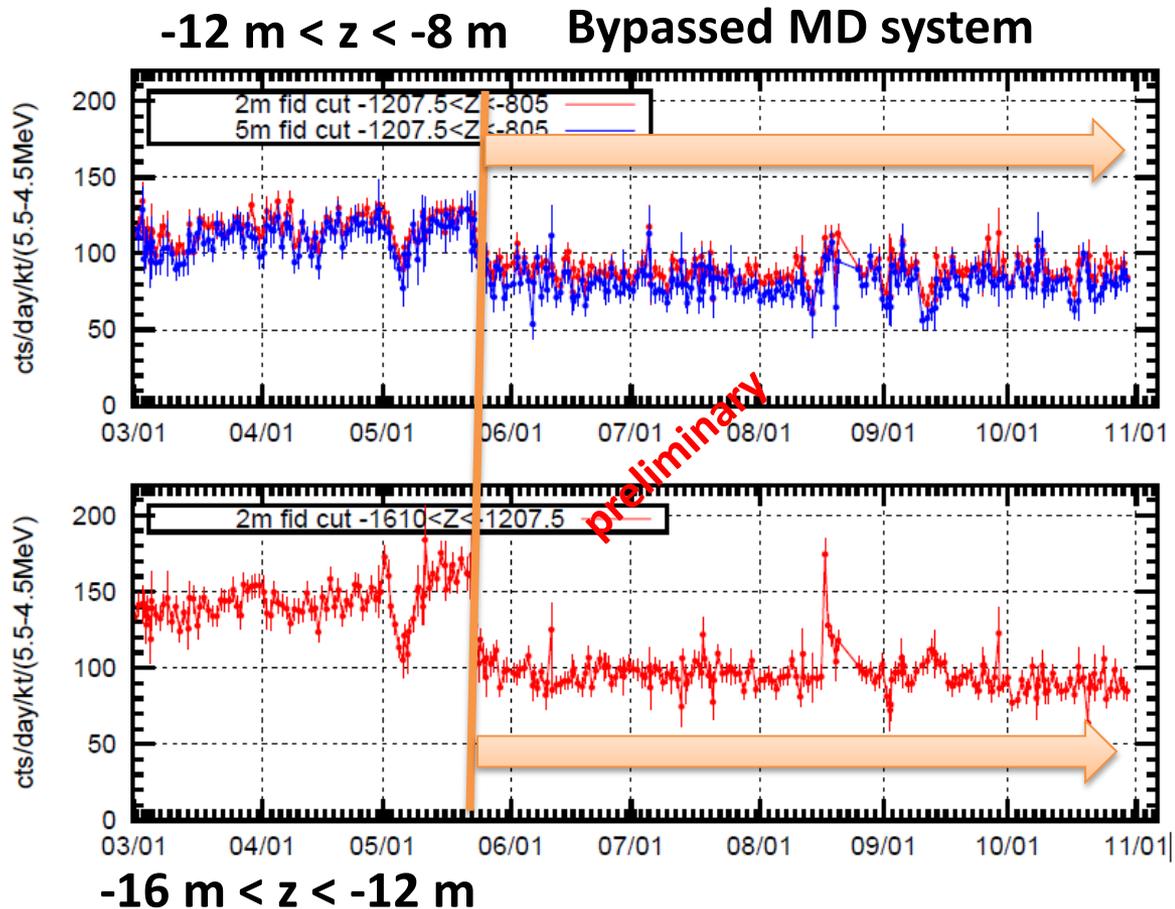


底部のイベントレイトの変化

2014年5月22日に
膜脱気装置をバイパス
(現在も継続中)

その後、
底部のイベントレイトが
減少し、現在安定。

膜脱気装置由来の
ラドンが純水に
溶け込んでいる。

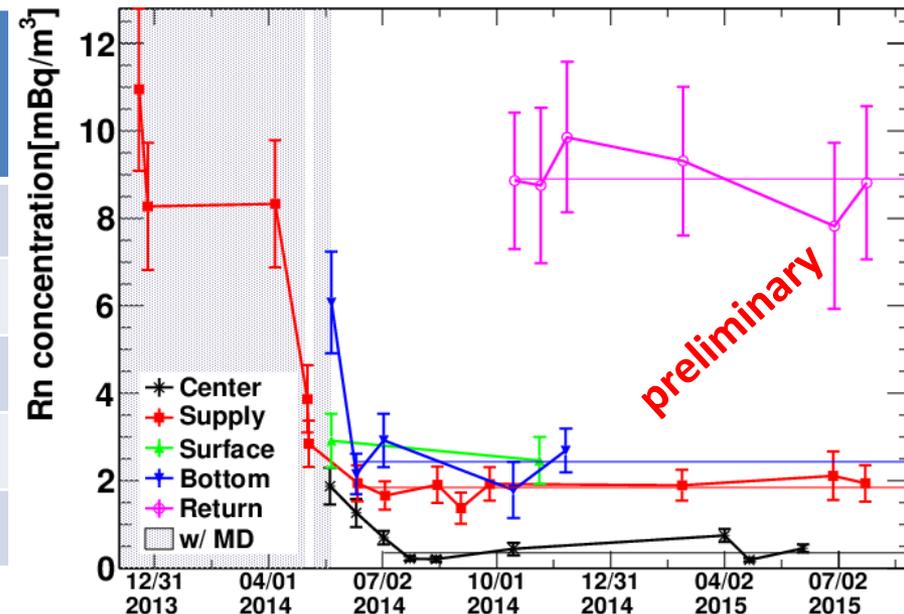


純水中のラドン濃度の時期変動と安定性

◆タンク内部の純水の測定結果

測定手法を確立したので、1年かけて継続的に純水中のラドン濃度を測定した。膜脱気装置をバイパスした前後で、明らかにラドン濃度の変化が見える。純水循環システムによってラドン濃度は安定している。

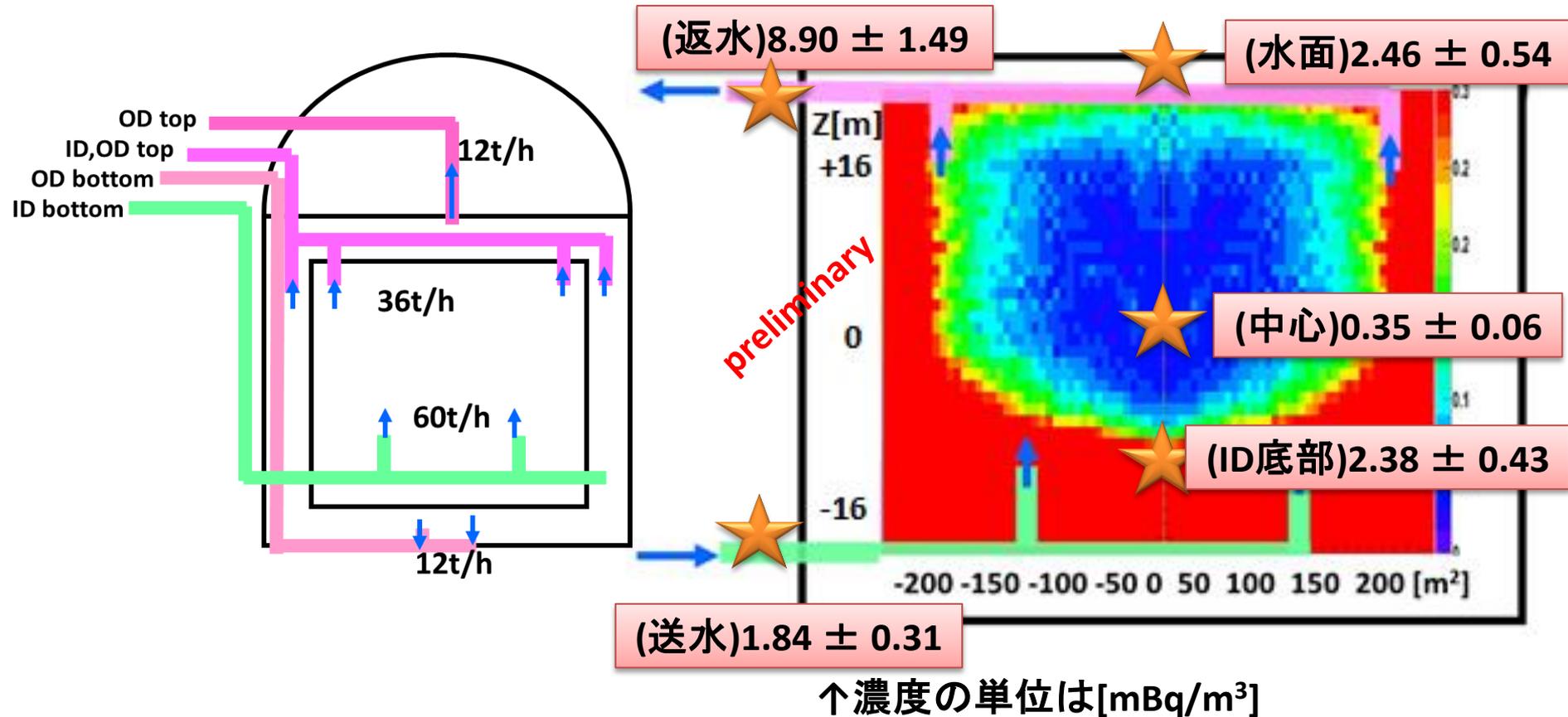
場所	バイパス前 ラドン濃度 [mBq/m ³]	バイパス後 ラドン濃度 [mBq/m ³]
送水	9.19 ± 1.52	1.84 ± 0.31
中心	1.88 ± 0.42	0.35 ± 0.06
底部	6.08 ± 1.16	2.38 ± 0.43
水面	2.91 ± 0.62	2.46 ± 0.54
返水	----	8.90 ± 1.49



中心部分は0.1 mBq/m³のオーダー。

純水中のラドン濃度を0.1 mBq/m³のレベルで測定できる手法を初めて確立した。

測定結果の比較



タンク内部のラドンソースがある。
 純水中のラドンは底部から上部へ移動する間に崩壊している。
 イベントレイトの高い領域にラドンが多くある。

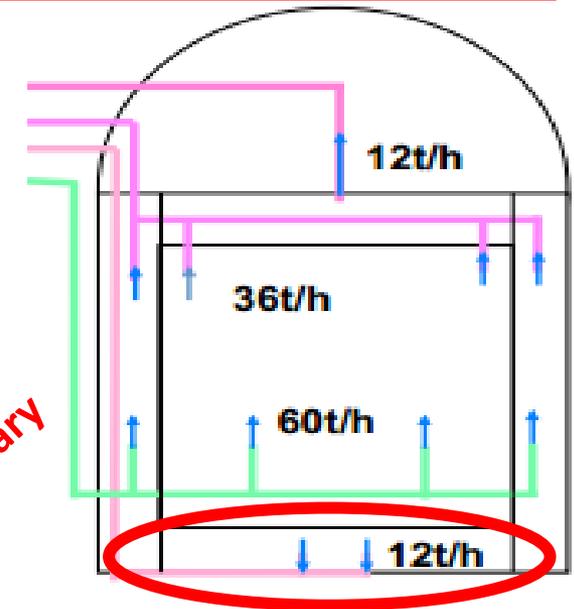
測定できないタンク底部のラドン濃度

◆ラドン濃度の見積もり

サンプリング用のチューブが届かないので、外水槽の底部は見積もりのみ可能。
返水は以下の純水を混ぜたもの。

$$C_{\text{Return}}F_{\text{Return}} = C_{\text{Supply}}F_{\text{Supply}} + C_{\text{OD,Barrel}}F_{\text{OD,Barrel}} + C_{\text{Center}}F_{\text{Center}} + C_{\text{OD,Bottom}}F_{\text{OD,Bottom}}$$

場所	循環の流量[ton/h]	ラドン濃度[mBq/m ³]
水面	12	2.46 ± 0.54
外水槽 側面 (水面から4 m)	18	3.56 ± 0.64
中心	18	0.35 ± 0.06
外水槽 底部	12	??
返水	60	8.90 ± 1.49



最終的に見積もられた外水槽 底部のラドン濃度は、
36.22 ± 6.18 mBq/m³になった。

やはり、タンク内部にラドンのソースがあることは明らか。

SKで最もラドン濃度が濃いと予想される領域でも、数十mBq/m³程度。

測定システムの妥当性とBGの評価(1)

◆測定システムの評価

ラドン検出器で得られる崩壊曲線の $C(t)$
 → 濃縮時間に比例して大きくなる(はず)

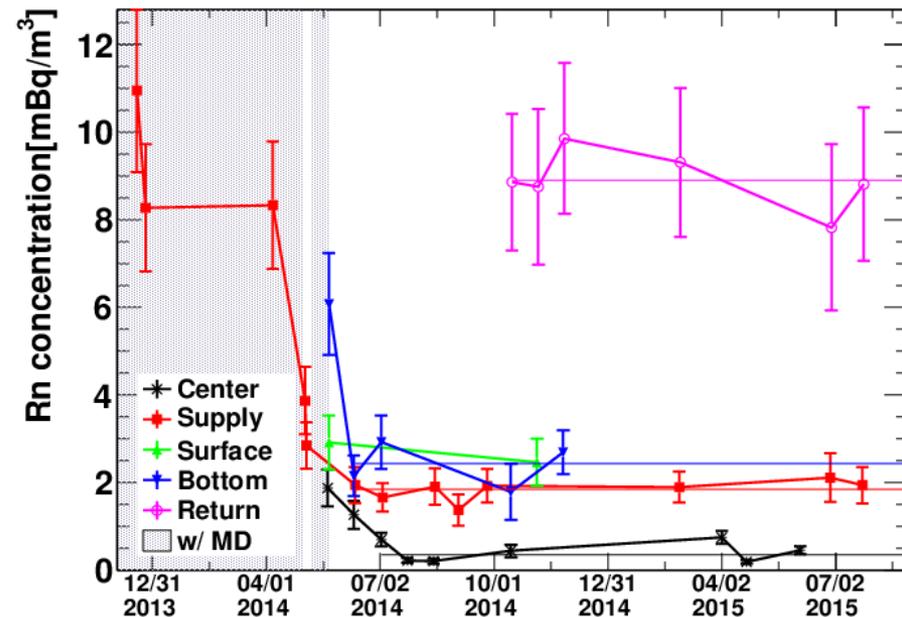
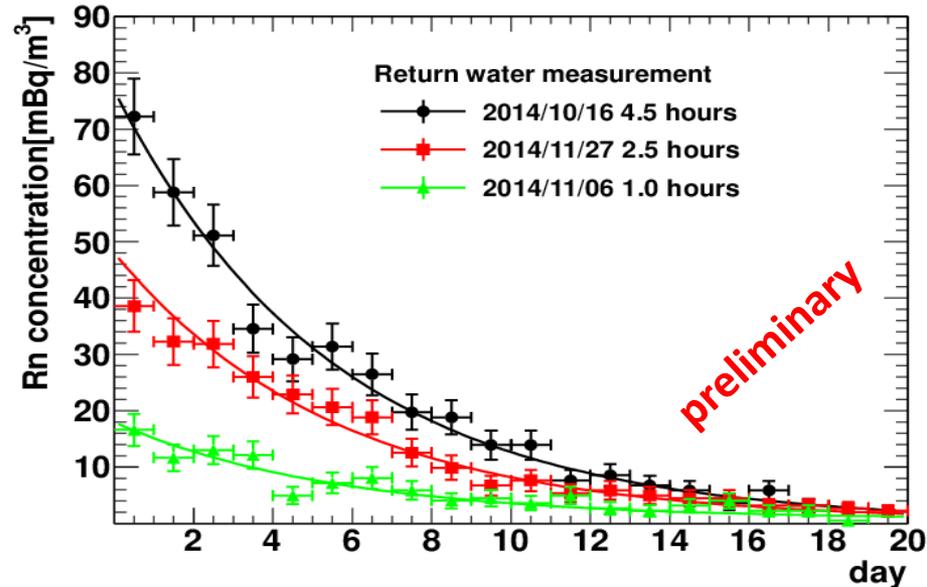
$$C(t) = C(0)e^{-(\ln 2.0/3.82)t} + C_{BG}$$

返水測定の場合、濃縮時間とともに増加。
 (水4.0 L/min、空気 2.0L/min の条件)

SKでサンプリングできる純水は、
 膜脱気装置をバイパス後、一定。

濃縮時間を変えて、
 濃度一定の純水をサンプリングする。

横軸を時間(流した空気の総量)
 縦軸を $C(t)$ の図を作成し、
 測定システムの妥当性を評価(次ページ)。



測定システムの妥当性とBGの評価(2)

◆測定システムの妥当性

予想通り比例している。

$$S \times \frac{1}{\text{mixer efficiency}} \times \frac{\text{air flow}}{\text{water flow}} \times \frac{80}{1000} \times \frac{1}{0.99} \times \frac{1}{0.99}$$

傾き(ここではS)情報を用いてラドン濃度を算出
→ これまでの方法と誤差の範囲で一致。

◆システムのBGの評価

水を流さないで、
空気を直接活性炭に流す。

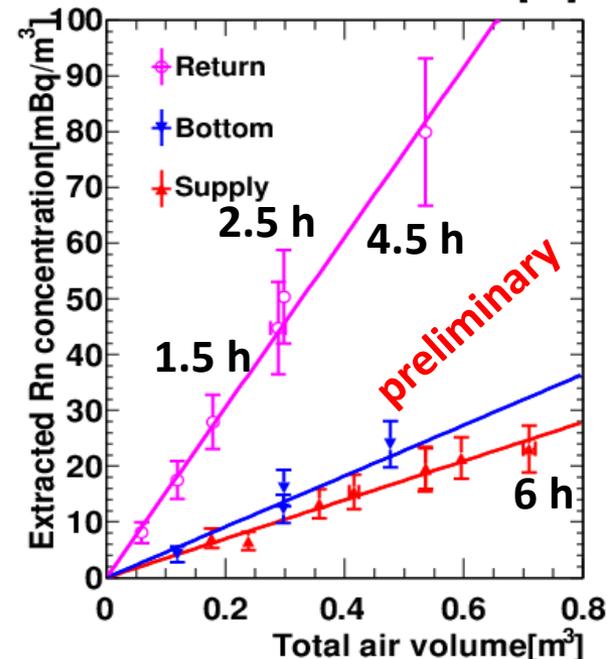
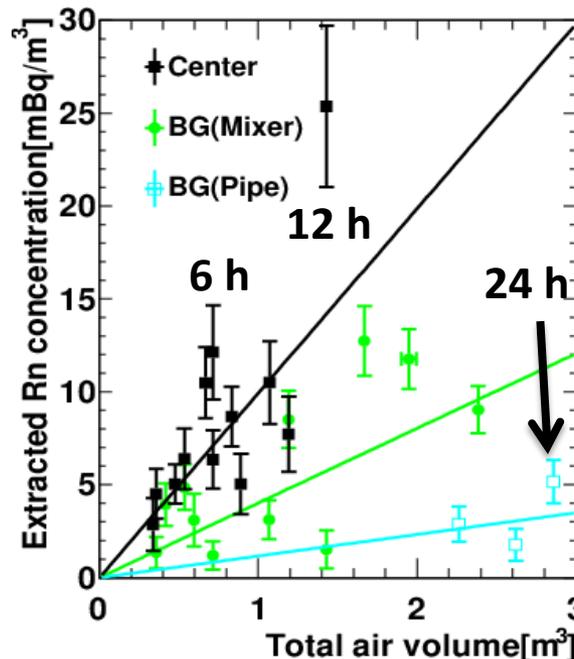
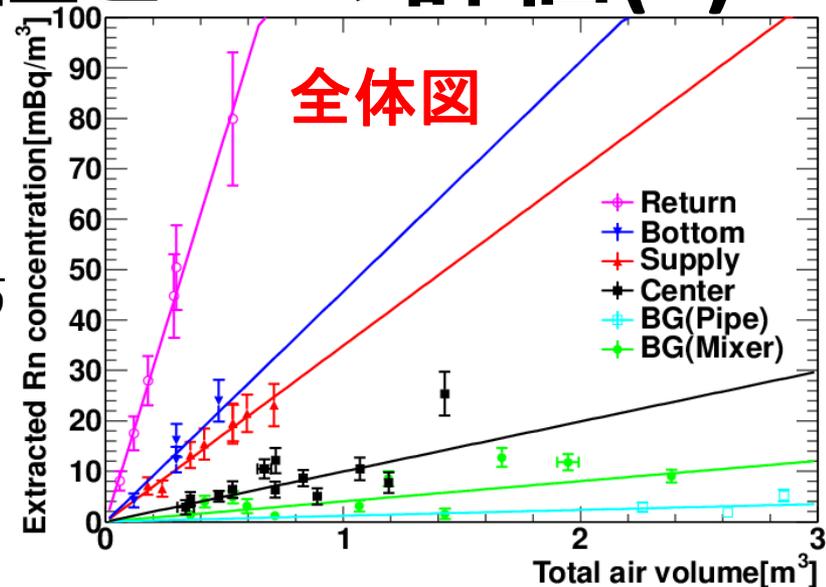
システムのBGの候補

- (1) 純空気のラドン濃度
- (2) 活性炭からのemanation
- (3) 配管からのemanation

空気だけを流して測定

こちらにも比例してるように見える

Rn計 80 L
活性炭の吸着脱離
効率 99 %



今後の研究(私の次の世代?)

◆位置依存性

今回の測定は、タンク内部から純水をサンプリングする場所を固定した。

- 数 m 間隔で z 方向に変えていく測定
- x-y 平面でサンプリングする場所を変えていく測定

◆ラドンをどう減らしていくか

メインのラドンソースはSKの構造体起源(主にPMT)。

しかし、タンク内部の構造体由来のラドンは取り除くのが難しい。

送水起源のラドンを減らすとタンク内部のラドンを減らすことは確認済み。

→膜脱気装置の復活で約 1 mBq/m^3 のレベルから、 0.1 mBq/m^3 以下を目指す。

◆太陽ニュートリノのバックグラウンドイベント

検出器の純水のラドン濃度はわかった。

太陽ニュートリノ解析にどれくらい寄与があるのか。

ラドンのバックグラウンドがメインだと想定しているが、

他のバックグラウンド源の存在が明らかになるかもしれない。

まとめ

- 純水中のラドン濃度を0.1 mBq/m³のレベルで測定できる技術を確立した。
- タンク内部のラドン濃度を知ることができた。
 - 送水 1.84 ± 0.31 mBq/m³
 - 中心 0.35 ± 0.06 mBq/m³
- ラドン源がタンク内部にあることを示した。
- 今後、純水中のラドン濃度を低減する手法の開発研究に取り組んでいきたい。

Back

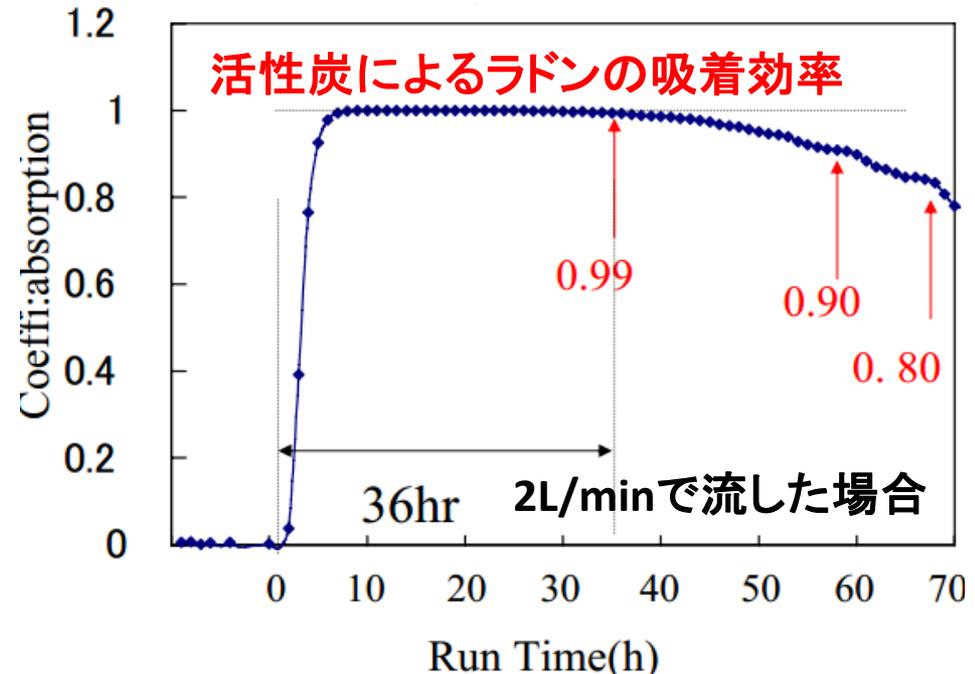
up

活性炭の吸着効率、脱離効率

純水中のラドン濃度は数mBq/m³のオーダーなので非常に薄く、高感度ラドン計の検出限界に近い。そのため、活性炭にラドンを吸着することで濃縮する。

○吸着効率(右上図)

活性炭**13.5g**を1/2inch U字管に入れ、U字管を**-90℃**で冷却。ここに混合気体を通すと、ラドンが活性炭に**吸着(濃縮)**される。吸収の効率は2L/minの流量で、**36時間まで99%**を保つ。(濃縮は最大で約50倍)



○脱離効率(右下表)

冷却した活性炭を加熱することで、活性炭に吸着して濃縮されていたラドンが**脱離(放出)**される。

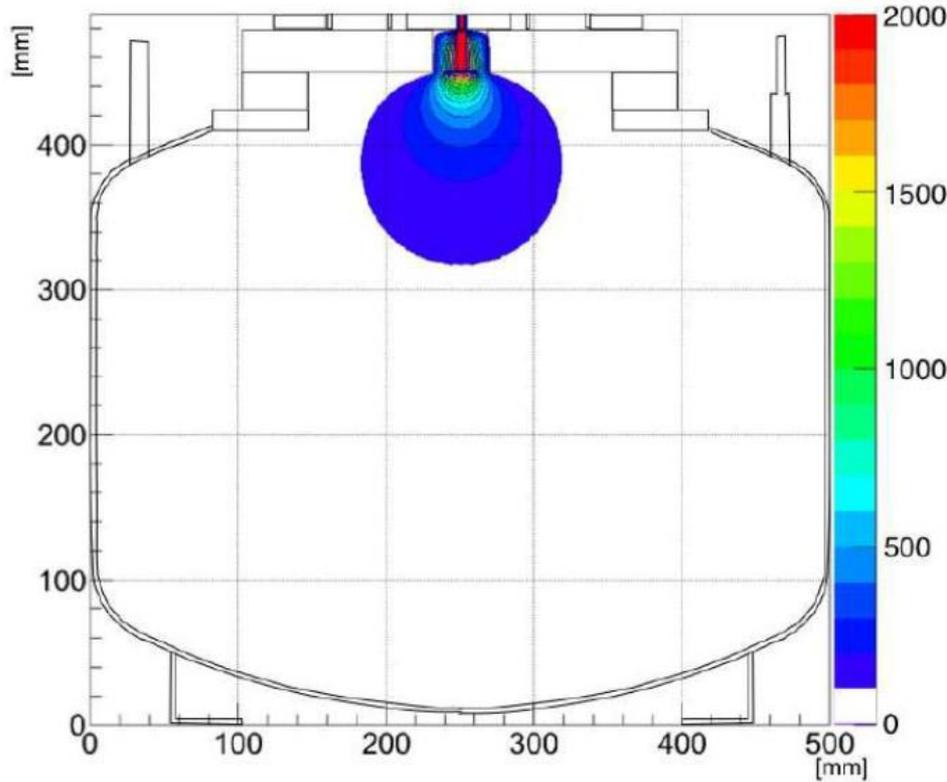
→ヒーターを用いて、**250℃**で**4時間加熱**

この脱離後の空気中のラドン濃度を高感度ラドン計で測定する。

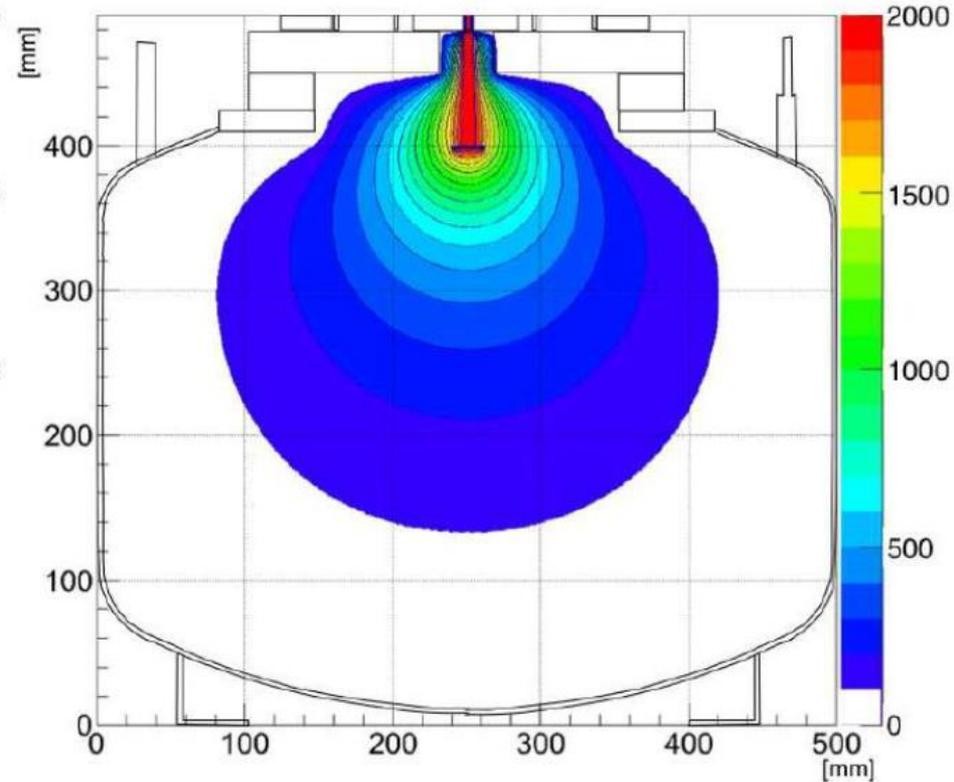
加熱温度[℃]	脱離効率
20	0.58
100	0.92
250	0.99

PDの位置と形成される電場

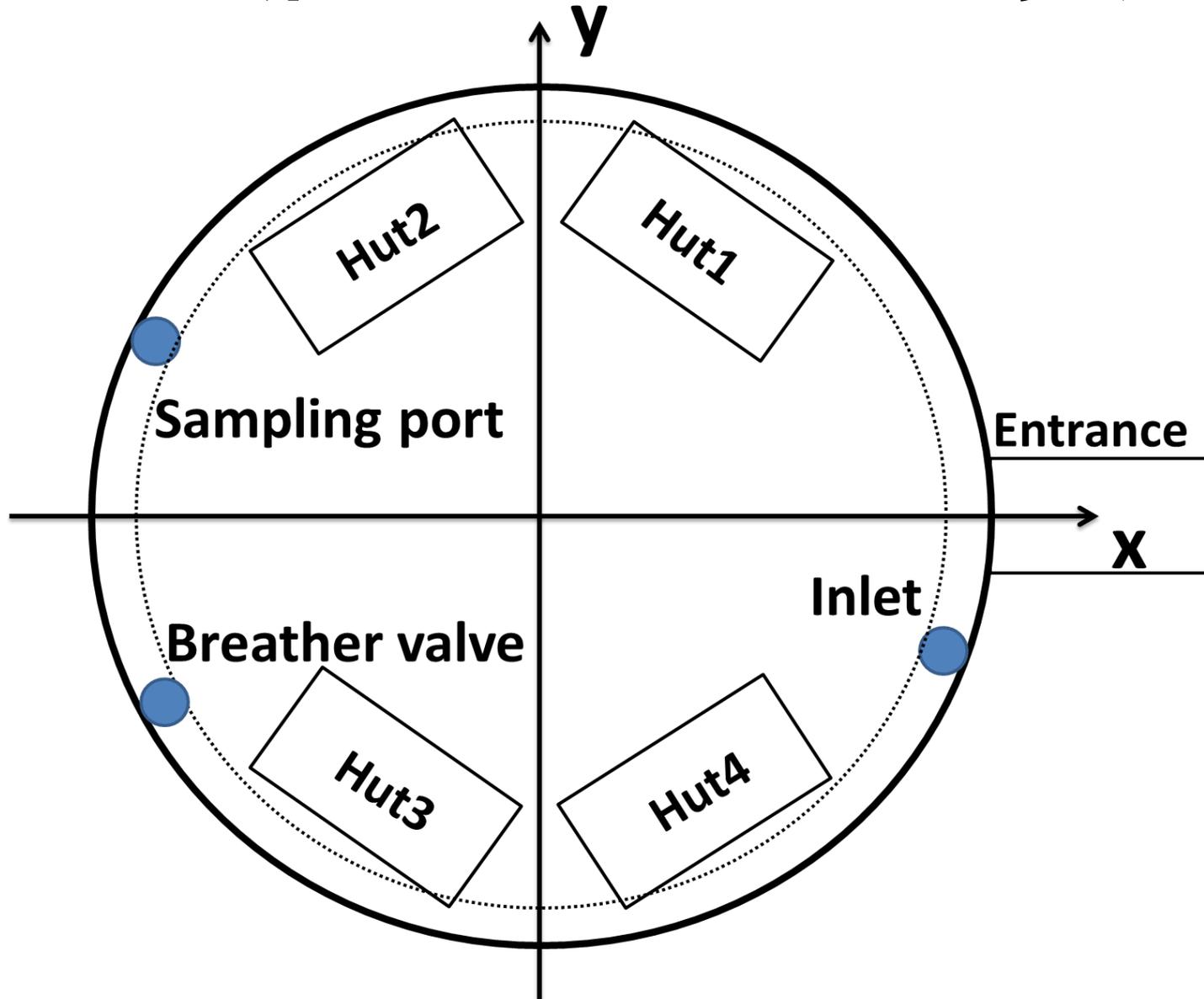
フィードスルーに直接接続した場合



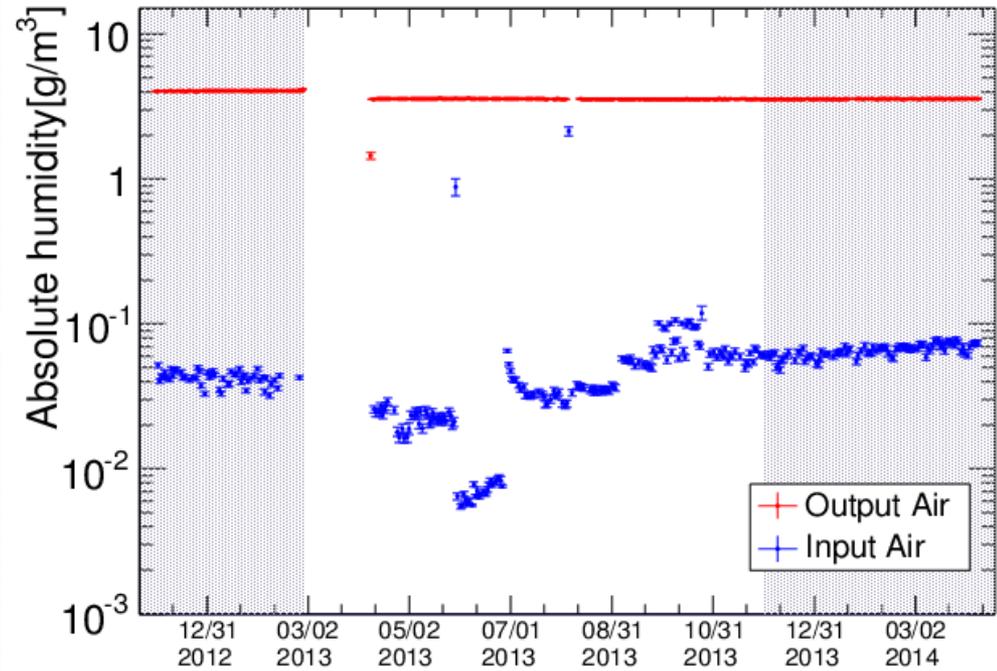
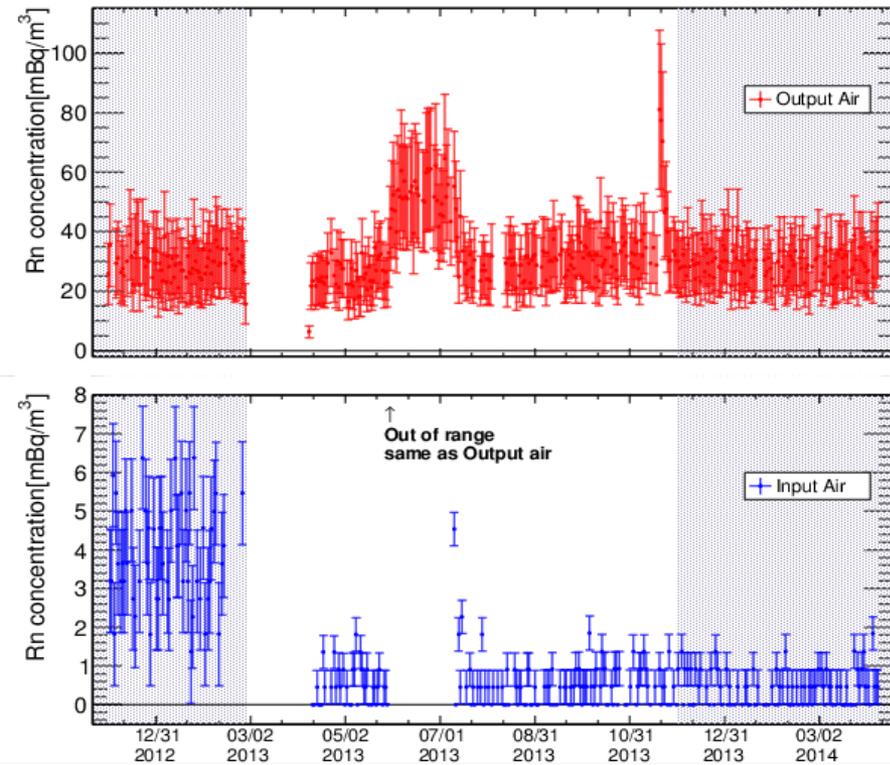
フィードスルーから5cmの位置にある場合



空気層サンプリングの場所



測定期間中の絶対湿度



最適な純水装置の運転(RO3の有無)

◆RO3の役割

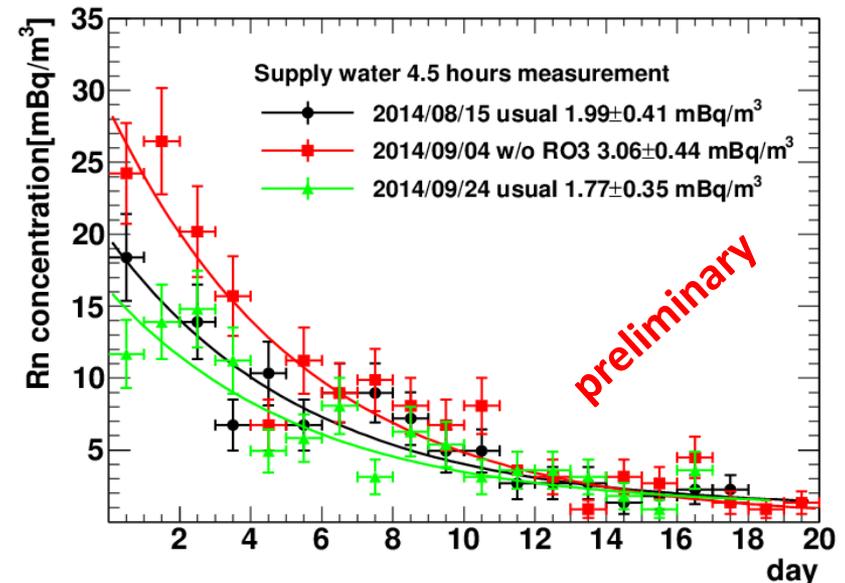
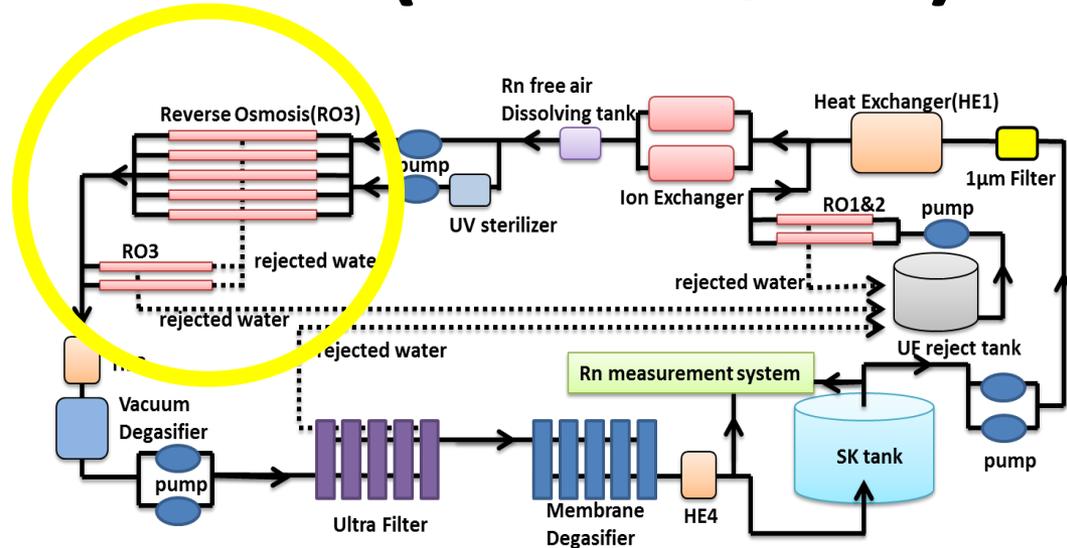
Reverse Osmosis(逆浸透膜)
純水中の1000分子程度の重さの
不純物を取り除く。

純水装置の最初のステップ

◆RO3による影響

通常の状態と、RO3をバイパスした状態の
2パターンで測定をおこなった。

結果、バイパス時、ラドン濃度が上昇した。
純水中のラドン濃度を減らすという意味で
は、RO3を通す運転が最適。



純水中のラドン濃度測定における 気液混合過程

○気液混合によるラドンの移動

サンプルした純水と純空気を混合する。 F_a, C_a

気液平衡を考える。

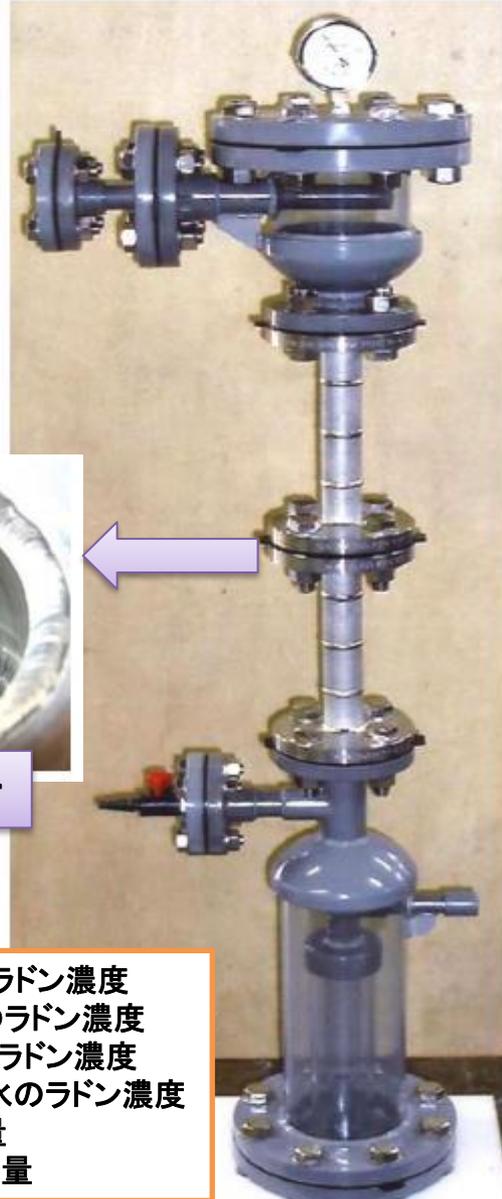
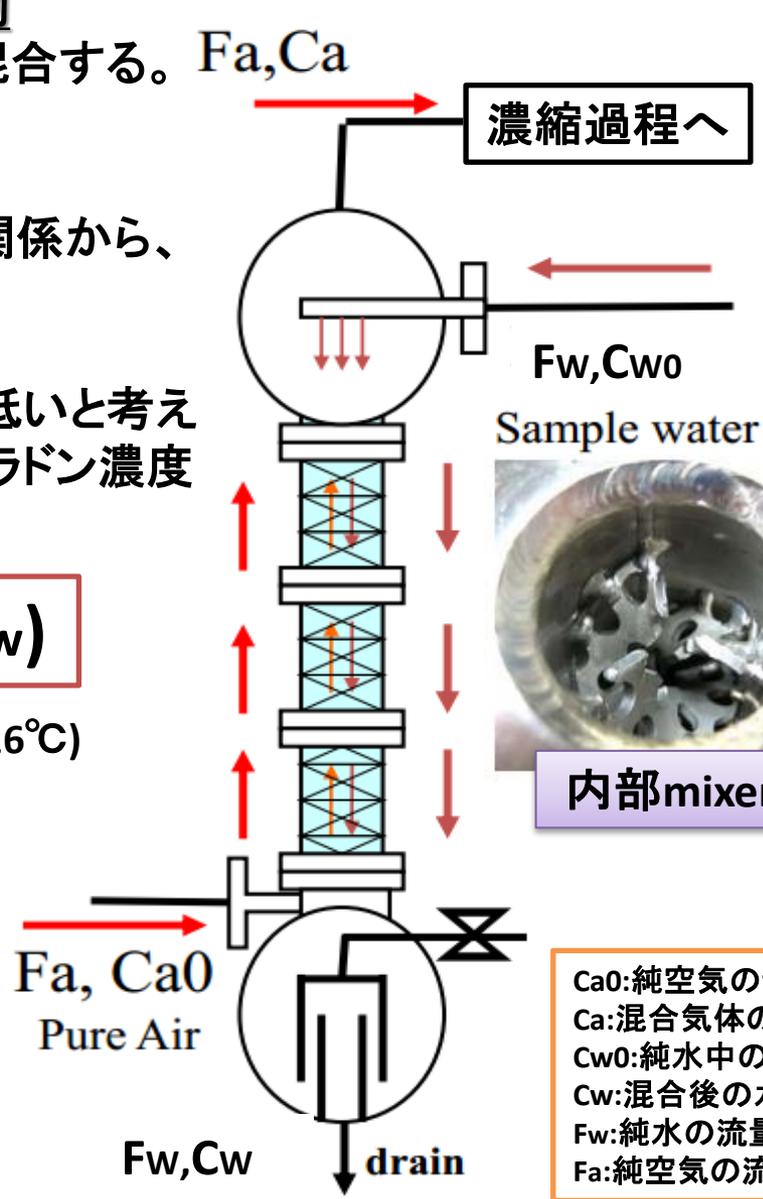
InputとOutputのラドン濃度の関係から、
 $F_a C_{a0} + F_w C_{w0} = F_a C_a + F_w C_w$

純空気のラドン濃度が非常に低いと考えると($C_{a0} \sim 0$)、混合前の純水のラドン濃度は、

$$C_{w0} = C_a (\alpha + F_a / F_w)$$

溶解度: $\alpha = C_w / C_a \sim 0.30$ (水温 $\sim 16^\circ\text{C}$)

混合後の空気のラドン濃度 (C_a) および、純水と純空気の流量 (F_a, F_w) を測定すれば、混合前の純水のラドン濃度 (C_{w0}) を見積もることができる。



- C_{a0} : 純空気のラドン濃度
- C_a : 混合気体のラドン濃度
- C_{w0} : 純水中のラドン濃度
- C_w : 混合後の水のラドン濃度
- F_w : 純水の流量
- F_a : 純空気の流量

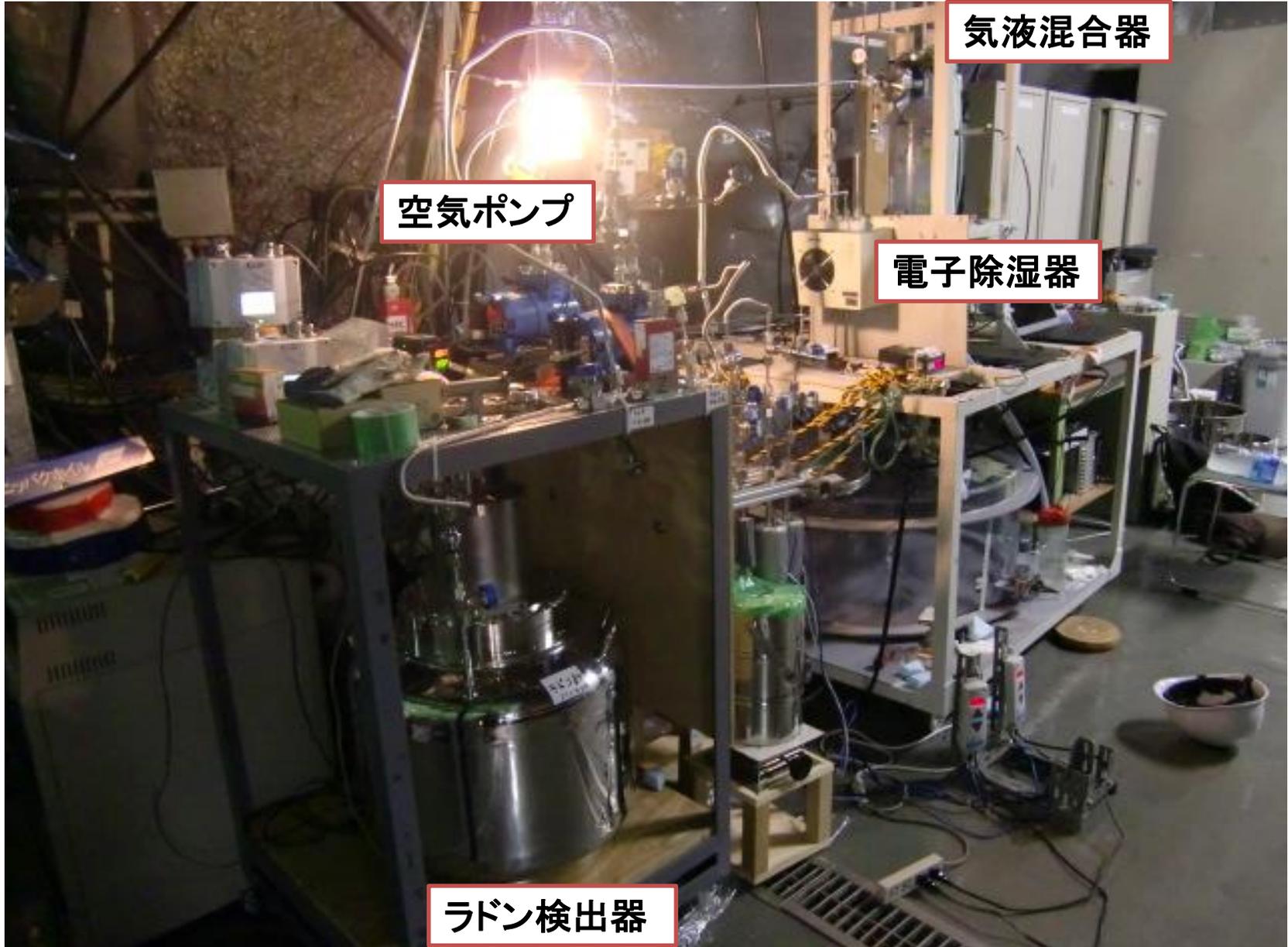
実際の測定系

気液混合器

空気ポンプ

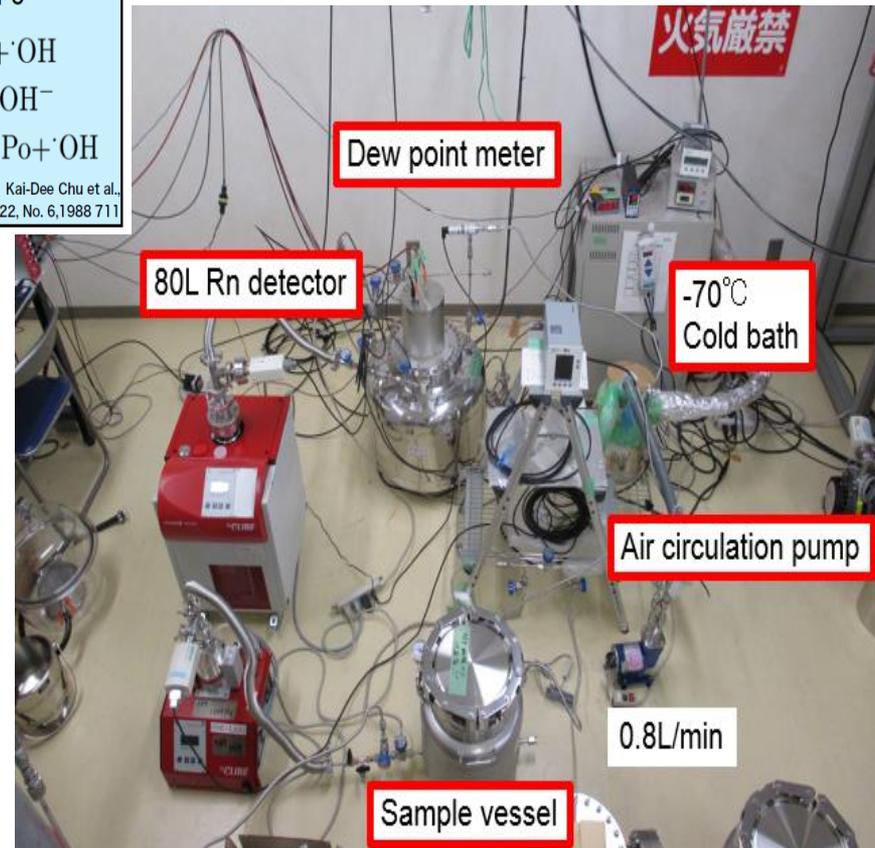
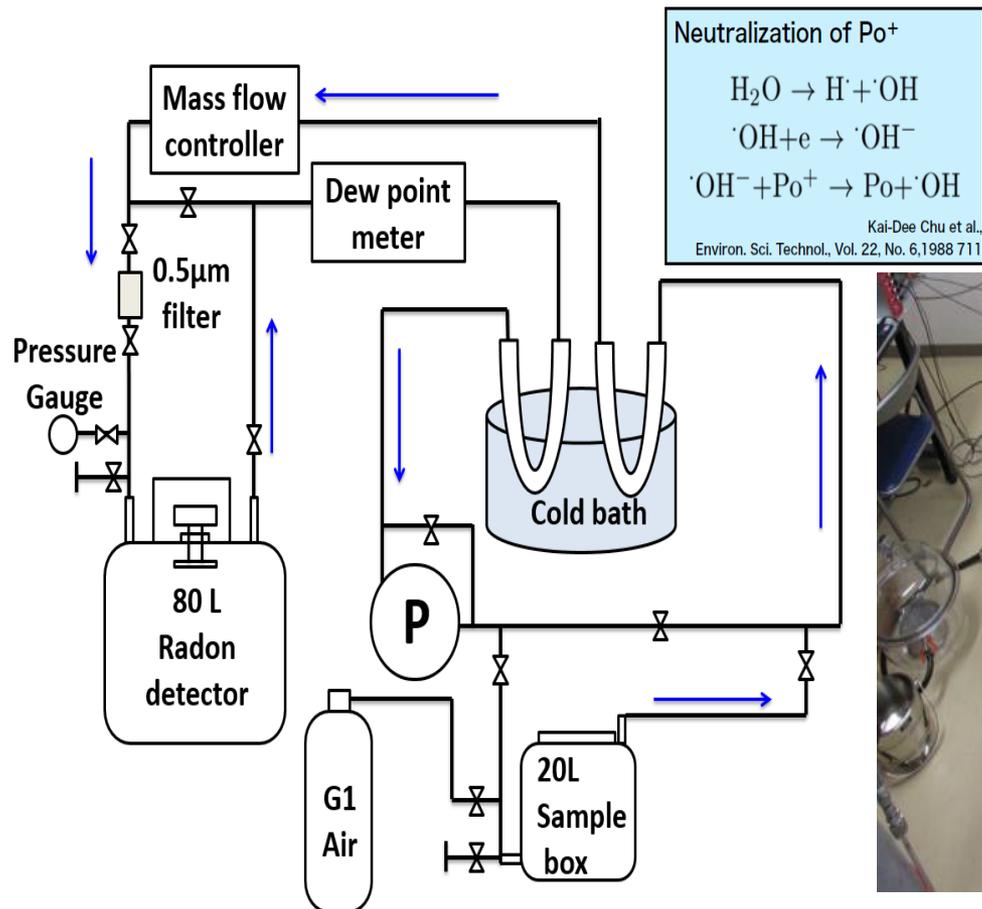
電子除湿器

ラドン検出器



Rn emanation measurement setup

- Water system plumbing materials are tested in air.



Rn emanation from rubber gaskets

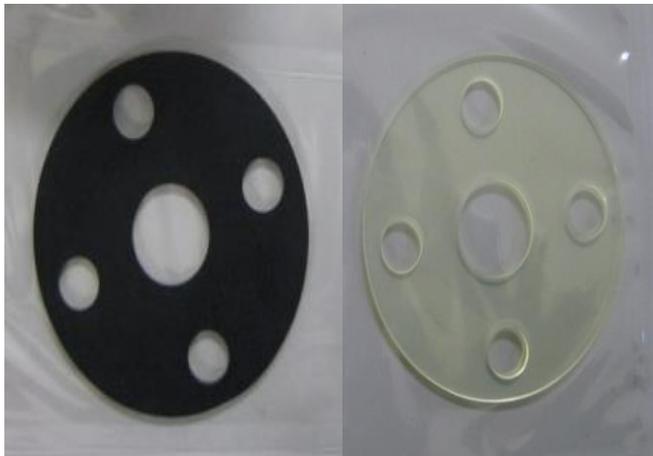
- EPDM rubber gaskets are used in SK.



rubbers	Rn emanation /1 gasket	Rn emanation / m ²
EPDM	1.82 ±0.03 mBq	0.809 ±0.013 Bq
Butyl	3.58 ±0.04 mBq	1.59 ±0.02 Bq
Urethane	0.013 ±0.004 mBq	5.8 ±1.8 mBq

Butyl

Urethane



- N.B. This is NOT the emanation to water.
- EPDM is Rn rich! Urethane is good.
- The gaskets must be replaced.

2つの解析手法の比較

場所	バイパス後 解析手法1 [mBq/m ³]	バイパス後 解析手法2 [mBq/m ³]
送水	1.84 ± 0.31	1.89 ± 0.34
中心	0.35 ± 0.06	0.33 ± 0.06
底部	2.38 ± 0.43	2.49 ± 0.49
水面	2.46 ± 0.54	-
返水	8.90 ± 1.49	9.08 ± 1.64

手法1: サンプルングした純水の総量、混合に使用した純空気の総量を考慮

手法2: 傾きから算出

純空気内の不純物

(株)北酸から購入
G1 純空気

CO<0.1ppm

THC<0.1ppm

SO₂<0.01ppm

CO₂<0.1ppm

NO_x<0.01ppm

ラドンによるバックグラウンド

○バックグラウンドの候補—ラドン(Rn)—
ラドン娘核種 ^{214}Bi の β 崩壊($Q=3.27\text{MeV}$)
太陽ニュートリノ観測の低エネルギー領域で、
主要なバックグラウンドとなる。

○ラドンによる影響
SK検出器の純水中にラドンを入れ、
イベント頻度との関係を見た。
→イベント頻度に超過が見られる。

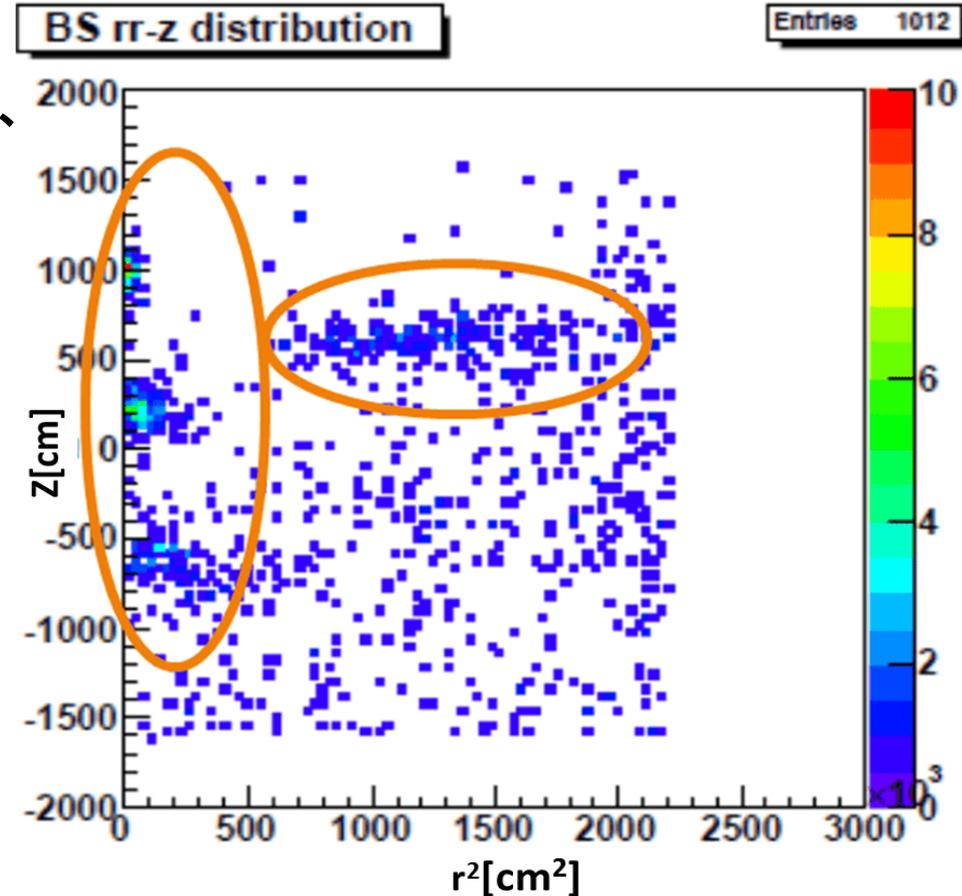
$$10\text{counts/day/kton}=0.27\text{mBq/m}^3$$

(SK-III,有効体積内部,4.5-5.5MeV領域)

○SK-IVでは...
エレクトロニクスが異なるので、
上記の関係は使えない。
現在、有効体積内では、

$$4\text{ events/day/kton 程度}(4.5\text{-}5.5\text{MeV領域})$$

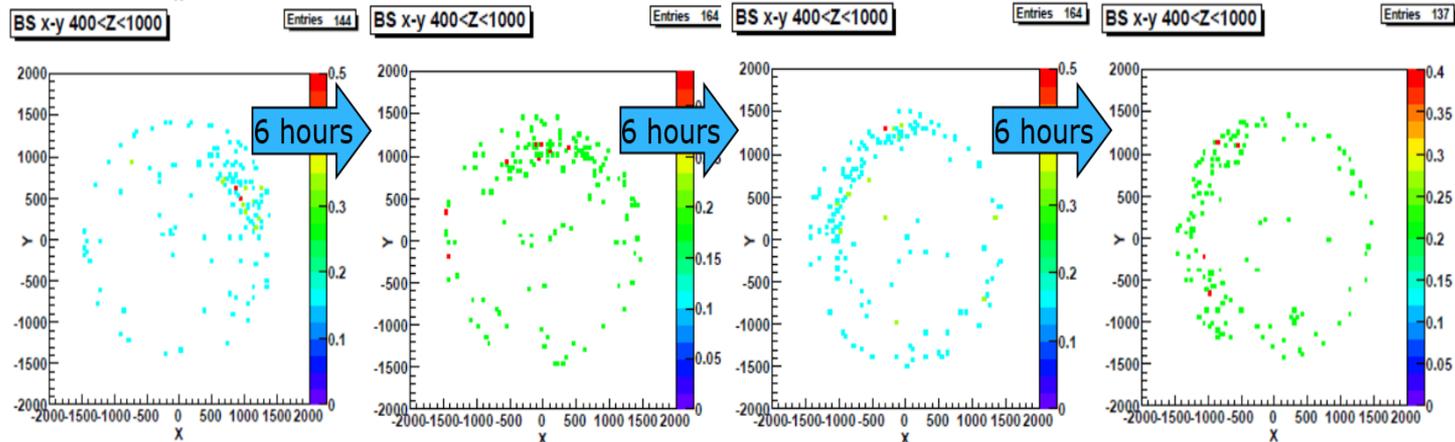
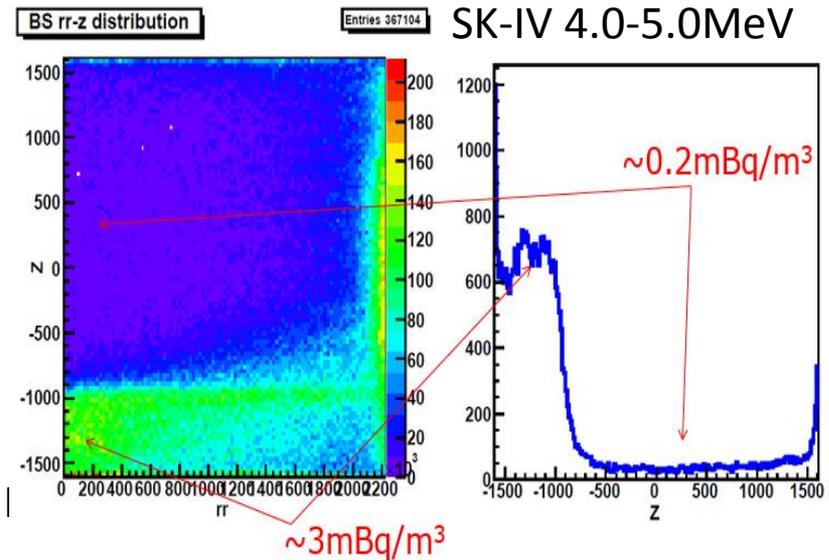
仮に、上記の関係が成り立つとすれば、
有効体積内部のラドン濃度は $\sim 0.1\text{mBq/m}^3$



How about Rn?

- SK-IV Rn concentration estimated from event rate $\sim 0.2 \text{ mBq/m}^3$
- Assuming all BG is Rn

C.f. Calibration was conducted in 2007 (SK-III) 9.2 Bq Rn was injected. Rotational flow!



- Direct Rn measurement was necessitated!
 - Water Rn detector with sub-mBa/m³ sensitivity must have been developed!