

# スーパーカミオカンデにおける ラドン濃度測定

東京大学大学院

宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

修士2年 中野 佑樹

2013年2月19日(火)

@19th ICEPP Symposium



# 発表内容

- スーパーカミオカンデ
- 高感度ラドン検出器
- 空気層のラドン濃度測定
- 純水中のラドン濃度測定
- まとめと今後

# Super Kamiokande collaboration

C. Regis,<sup>6</sup> K. Abe,<sup>1</sup> Y. Hayato,<sup>1,28</sup> K. Iyogi,<sup>1</sup> J. Kameda,<sup>1</sup> Y. Koshio,<sup>1</sup> Ll. Marti,<sup>1</sup> M. Miura,<sup>1</sup> S. Moriyama,<sup>1,28</sup>  
M. Nakahata,<sup>1,28</sup> S. Nakayama,<sup>1</sup> Y. Obayashi,<sup>1</sup> H. Sekiya,<sup>1</sup> M. Shiozawa,<sup>1,28</sup> Y. Suzuki,<sup>1,28</sup> A. Takeda,<sup>1</sup> Y. Takenaga,<sup>1</sup>  
K. Ueno,<sup>1</sup> T. Yokozawa,<sup>1</sup> H. Kaji,<sup>2</sup> T. Kajita,<sup>2,28</sup> K. Kaneyuki,<sup>2,28,\*</sup> K. P. Lee,<sup>2</sup> K. Okumura,<sup>2</sup> T. McLachlan,<sup>2</sup> L. Labarga,<sup>3</sup>  
E. Kearns,<sup>4,28</sup> J. L. Raaf,<sup>4</sup> J. L. Stone,<sup>4,28</sup> L. R. Sulak,<sup>4</sup> M. Goldhaber,<sup>5,\*</sup> K. Bays,<sup>6</sup> G. Carminati,<sup>6</sup> W. R. Kropp,<sup>6</sup> S. Mine,<sup>6</sup>  
A. Renshaw,<sup>6</sup> M. B. Smy,<sup>6,28</sup> H. W. Sobel,<sup>6,28</sup> K. S. Ganezer,<sup>7</sup> J. Hill,<sup>7</sup> W. E. Keig,<sup>7</sup> J. S. Jang,<sup>8,†</sup> J. Y. Kim,<sup>8</sup> I. T. Lim,<sup>8</sup>  
J. B. Albert,<sup>9</sup> K. Scholberg,<sup>9,28</sup> C. W. Walter,<sup>9,28</sup> R. A. Wendell,<sup>9</sup> T. Wongjirad,<sup>9</sup> T. Ishizuka,<sup>10</sup> S. Tasaka,<sup>11</sup> J. G. Learned,<sup>12</sup>  
S. Matsuno,<sup>12</sup> S. N. Smith,<sup>12</sup> T. Hasegawa,<sup>13</sup> T. Ishida,<sup>13</sup> T. Ishii,<sup>13</sup> T. Kobayashi,<sup>13</sup> T. Nakadaira,<sup>13</sup> K. Nakamura,<sup>13,28</sup>  
K. Nishikawa,<sup>13</sup> Y. Oyama,<sup>13</sup> K. Sakashita,<sup>13</sup> T. Sekiguchi,<sup>13</sup> T. Tsukamoto,<sup>13</sup> A. T. Suzuki,<sup>14</sup> Y. Takeuchi,<sup>14,28</sup> K. Ieki,<sup>15</sup>  
M. Ikeda,<sup>15</sup> H. Kubo,<sup>15</sup> A. Minamino,<sup>15</sup> A. Murakami,<sup>15</sup> T. Nakaya,<sup>15,28</sup> Y. Fukuda,<sup>16</sup> K. Choi,<sup>17</sup> Y. Itow,<sup>17,18</sup> G. Mitsuka,<sup>17</sup>  
M. Miyake,<sup>17</sup> P. Mijakowski,<sup>19</sup> J. Hignight,<sup>20</sup> J. Imber,<sup>20</sup> C. K. Jung,<sup>20</sup> I. Taylor,<sup>20</sup> C. Yanagisawa,<sup>20</sup> H. Ishino,<sup>21</sup>  
A. Kibayashi,<sup>21</sup> T. Mori,<sup>21</sup> M. Sakuda,<sup>21</sup> J. Takeuchi,<sup>21</sup> Y. Kuno,<sup>22</sup> S. B. Kim,<sup>23</sup> H. Okazawa,<sup>24</sup> Y. Choi,<sup>25</sup> K. Nishijima,<sup>26</sup>  
M. Koshiba,<sup>27</sup> Y. Totsuka,<sup>27,\*</sup> M. Yokoyama,<sup>27,28</sup> K. Martens,<sup>28</sup> M. R. Vagins,<sup>28,6</sup> S. Chen,<sup>29</sup> H. Sui,<sup>29</sup> Z. Yang,<sup>29</sup>  
H. Zhang,<sup>29</sup> K. Connolly,<sup>30</sup> M. Dziomba,<sup>30</sup> and R. J. Wilkes<sup>30</sup>

1 Kamioka Observatory, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan  
2 RCCN, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan  
3 University Autonoma Madrid, Spain  
4 Boston University, USA  
5 Brookhaven National Laboratory, USA  
6 University of California, Irvine, USA  
7 California State University, Dominguez Hills, USA  
8 Chonnam National University, Korea  
9 Duke University, USA  
10 Junior College, Fukuoka Inst. of Tech., Japan  
11 Gifu University, Japan  
12 University of Hawaii, USA  
13 KEK, Japan  
14 Kobe University, Japan  
15 Kyoto University, Japan  
16 Miyagi University of Education, Japan  
17 STE, Nagoya University, Japan  
18 KMI, Nagoya University, Japan

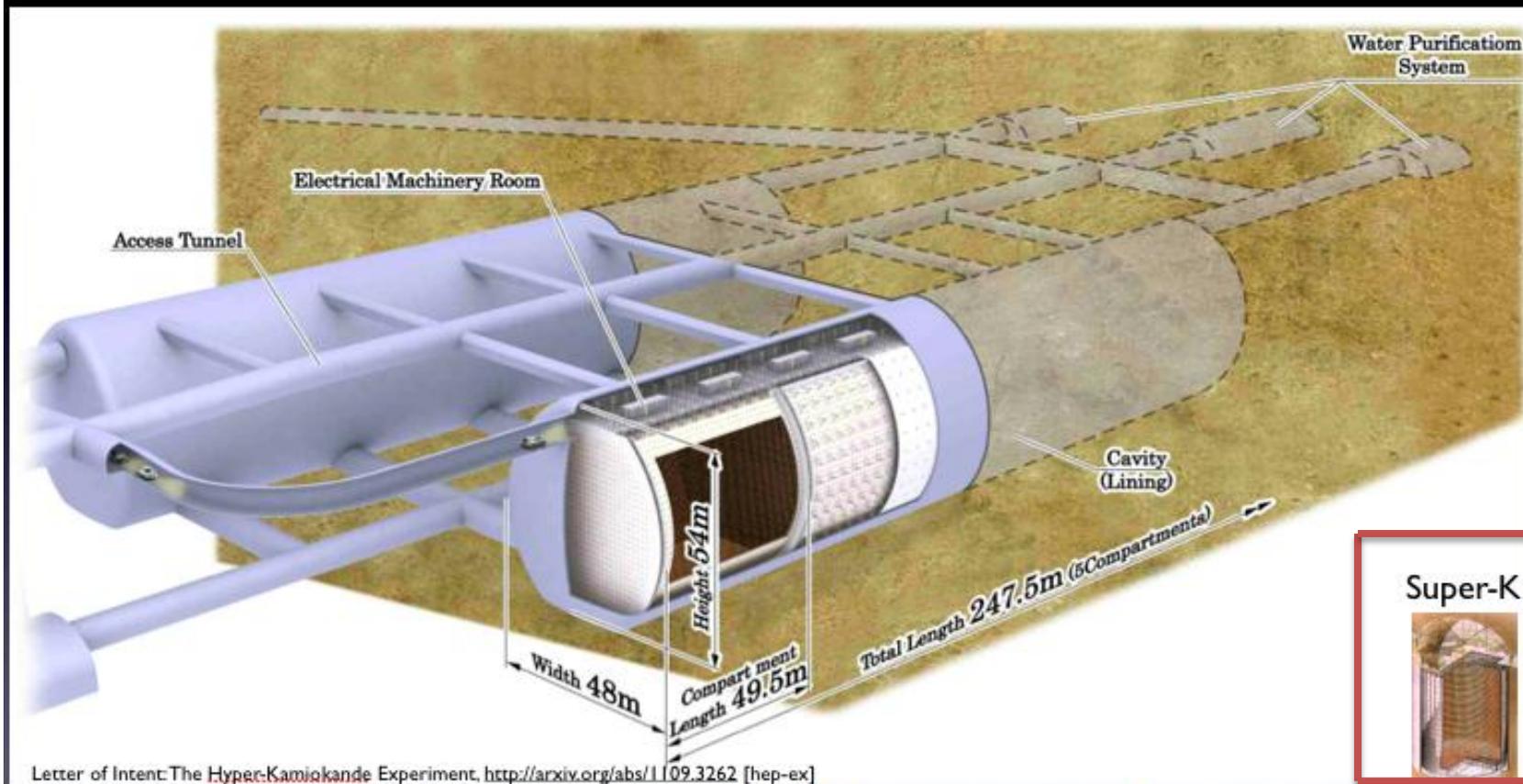
19 National Center for Nuclear Research, Poland  
20 SUNY, Stony Brook, USA  
21 Okayama University, Japan  
22 Osaka University, Japan  
23 Seoul National University, Korea  
24 Shizuoka University of Welfare, Japan  
25 Sungkyunkwan University, Korea  
26 Tokai University, Japan  
27 University of Tokyo, Japan  
28 Kavli IPMU, Univ. of Tokyo, Japan  
29 Tsinghua University, China  
30 University of Washington, USA



**~110 collaborators  
30 institutions, 6 countries**

**From PRD86,  
012006 (2012)**

# Hyper-Kamiokande計画 進行中



これくらいのがほしい！ 体積0.99Mt (Super-K×20)

# スーパーカミオカンデ検出器

## ◆検出器の特徴

○水チェレンコフ型検出器  
 全50ktonの超純水  
 リングパターンから、  
 荷電粒子の方向がわかる。

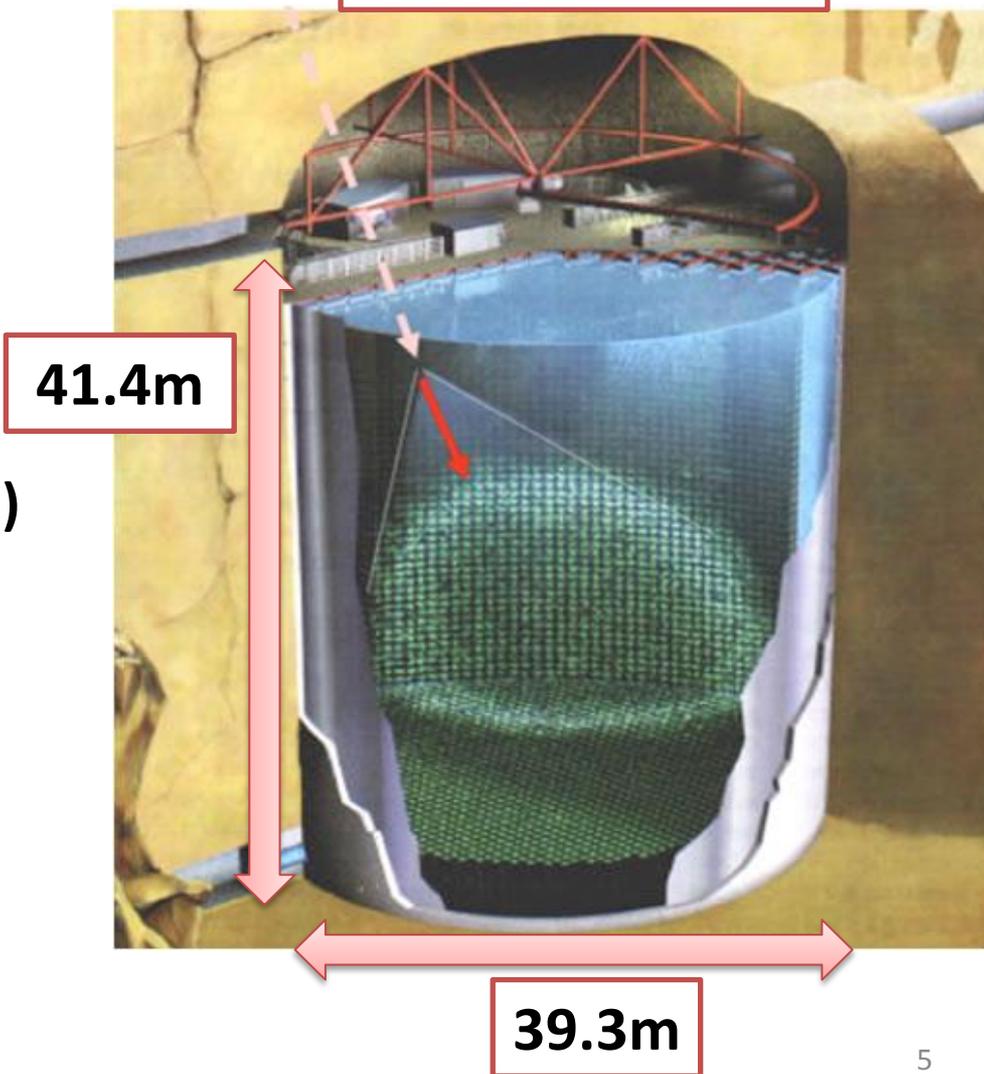
## ○検出器の構造

- (1)内検出器 20-inch PMT  
 →有効体積22.5 kton (壁から2 m)
- (2)外検出器 8-inch PMT

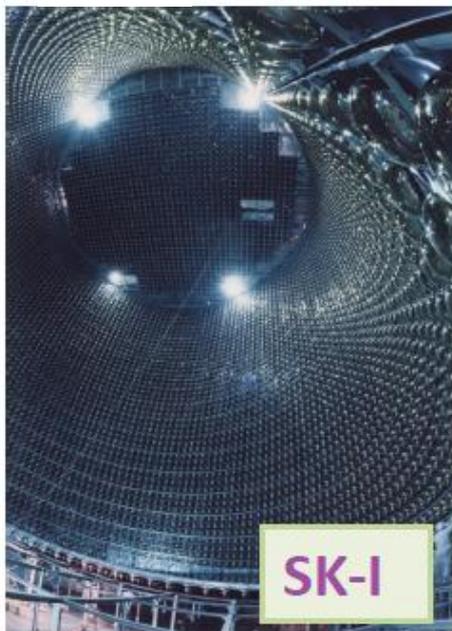
## ◆研究対象

- ニュートリノ振動実験 (T2K)
- 大気ニュートリノ
- 陽子崩壊
- 超新星ニュートリノ (< 100MeV)
- 太陽ニュートリノ (< 20MeV)**

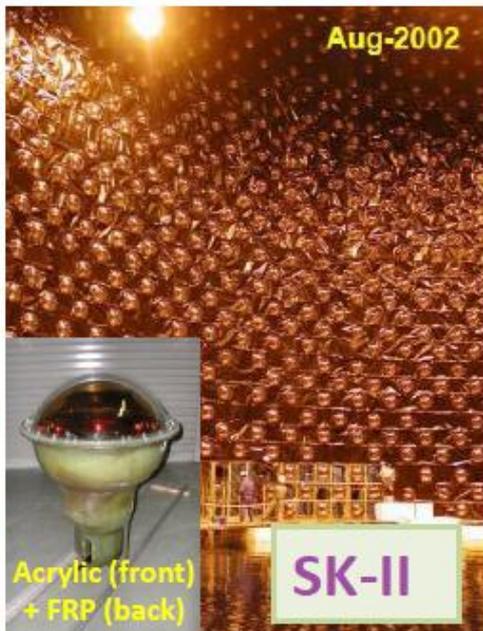
山頂から1000m



# スーパーカミオカンデの歴史

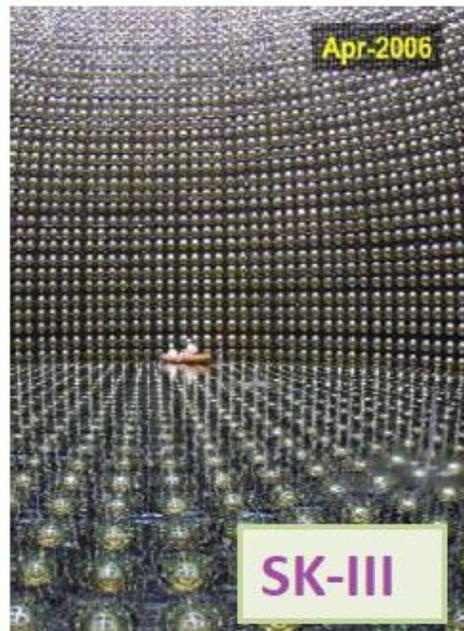


SK-I



Acrylic (front)  
+ FRP (back)

SK-II



SK-III



SK-IV

QBEE

1996/4 ~2001/7

◆PMT(ID)

11146 PMTs

40% photo coverage

2002/10 ~2005/10

(※)With Acrylic + FRP

5182 PMTs

19% photo coverage

2006/7 ~2008/8

(※)Recovered

11129 PMTs

40% photo coverage

2008/9 ~ **Running**

(※)New electronics

11129 PMTs

40% photo coverage

◆Total Energy threshold

5.0 MeV

7.0 MeV

4.5 MeV

Current

4.5 MeV

Target

< **4.0 MeV**

# 太陽ニュートリノ観測

## ◆太陽ニュートリノと物質効果

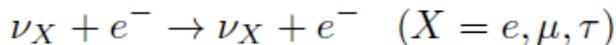
太陽の核融合反応で生成される電子ニュートリノ  
 →太陽ニュートリノ(pp, hep, pep,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ , CNO)

6MeV以上のニュートリノは、  
 太陽内部で物質効果の影響を受ける  
 →ニュートリノ振動を起こしやすくなる。

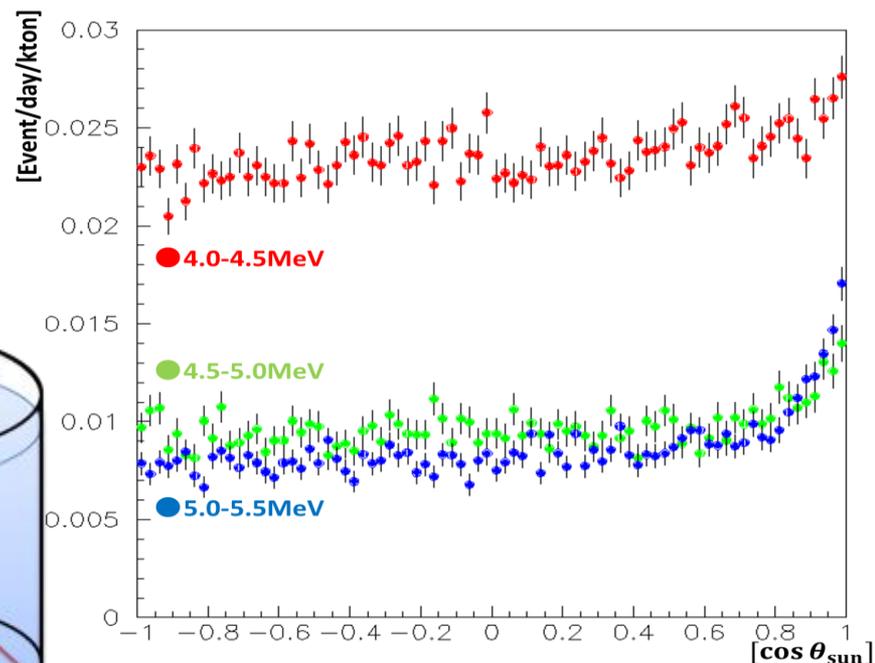
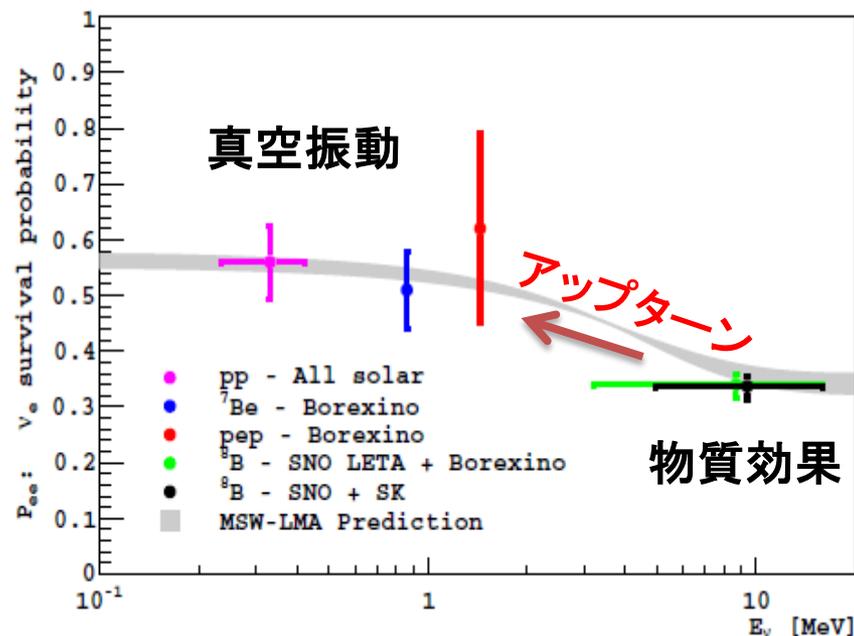
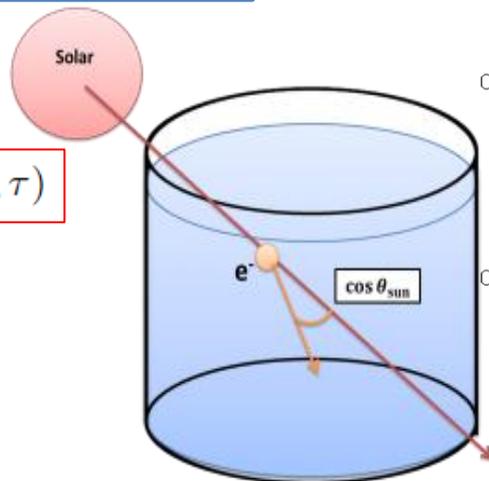
生存確率が遷移する領域(アップターン)  
 →未だ直接観測は行われていない。

## ◆SKにおける太陽ニュートリノ観測

ニュートリノと電子の弾性散乱



ニュートリノが  
 飛来した方向がわかる。



# 低エネルギー領域におけるバックグラウンド

## ◆バックグラウンドの候補

$^{222}\text{Rn}$ の娘核種 $^{214}\text{Bi}$ の $\beta$ 崩壊( $Q=3.27\text{MeV}$ )

→SKのエネルギー分解能により、7MeV程度までバックグラウンドになる。  
太陽ニュートリノ観測の主要なバックグラウンド

## ◆ラドンの起源の解明とラドン濃度測定

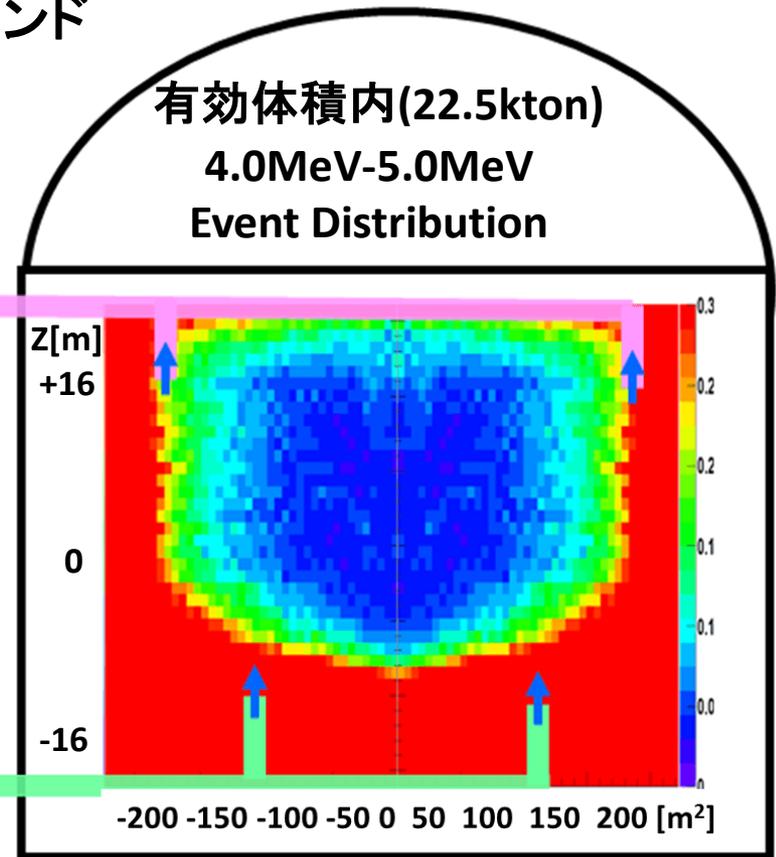
検出器の**底部**や**側面**に  
イベントの超過が見られる。  
これらのバックグラウンドが、  
純水起源であるかを確認するために、  
純水中のラドン濃度を測定する。

- (1)底部から流す送水
- (2)底面、側面など
- (3)z方向における依存性

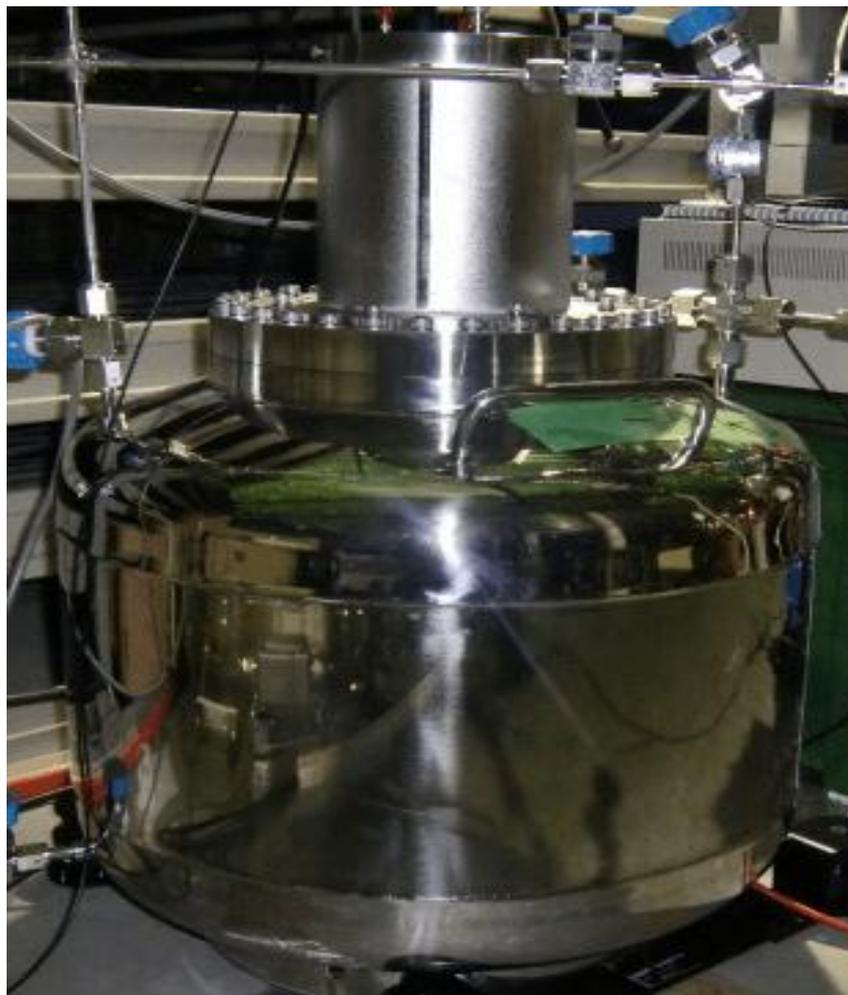
(現段階)ラドン濃度測定  
→ラドン(バックグラウンド)の起源解明  
→ラドンの低減

Return to  
Water system

Purified  
Water supply



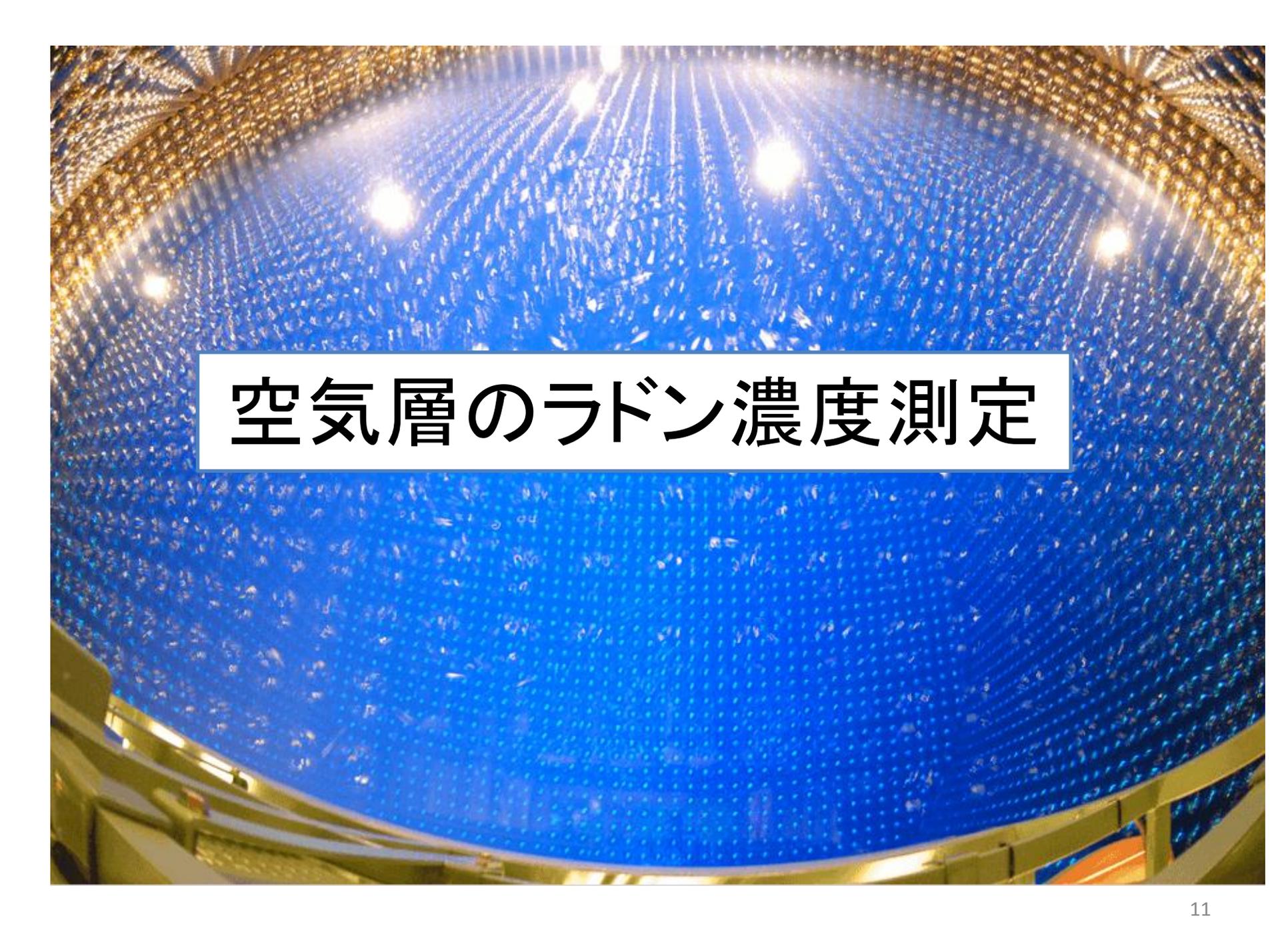
# 高感度ラドン検出器



40.8cm

50.0cm





# 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

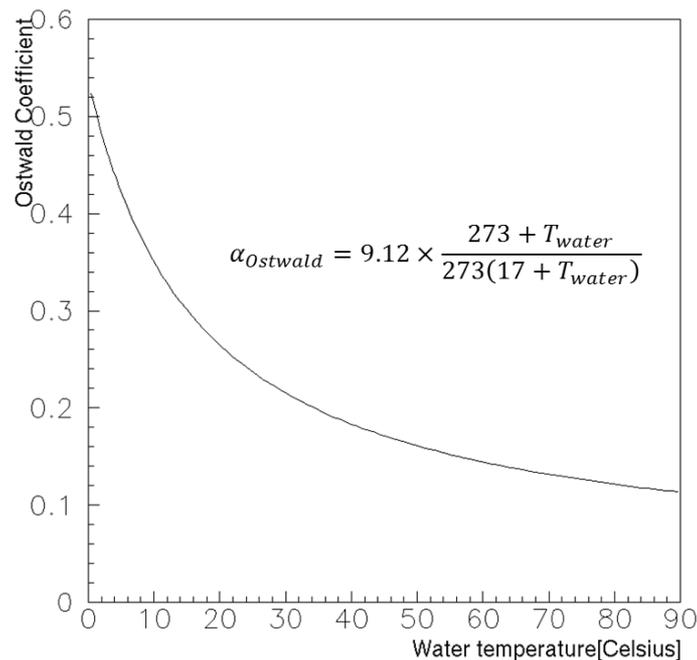
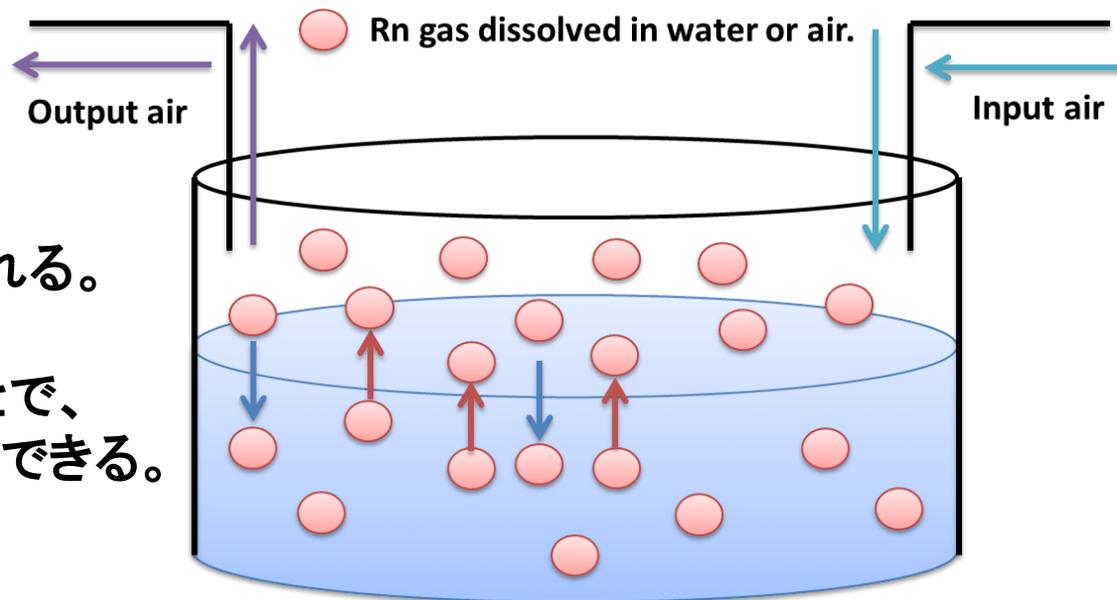
空気層と水面は、ラドンガスを交換していると考えられる。

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。

$$\begin{aligned}\alpha_{Ostwald} &= \frac{\text{液相におけるラドン濃度}}{\text{気相におけるラドン濃度}} \\ &= 9.12 \times \frac{273 + T_{\text{water}}}{273(17 + T_{\text{water}})}\end{aligned}$$

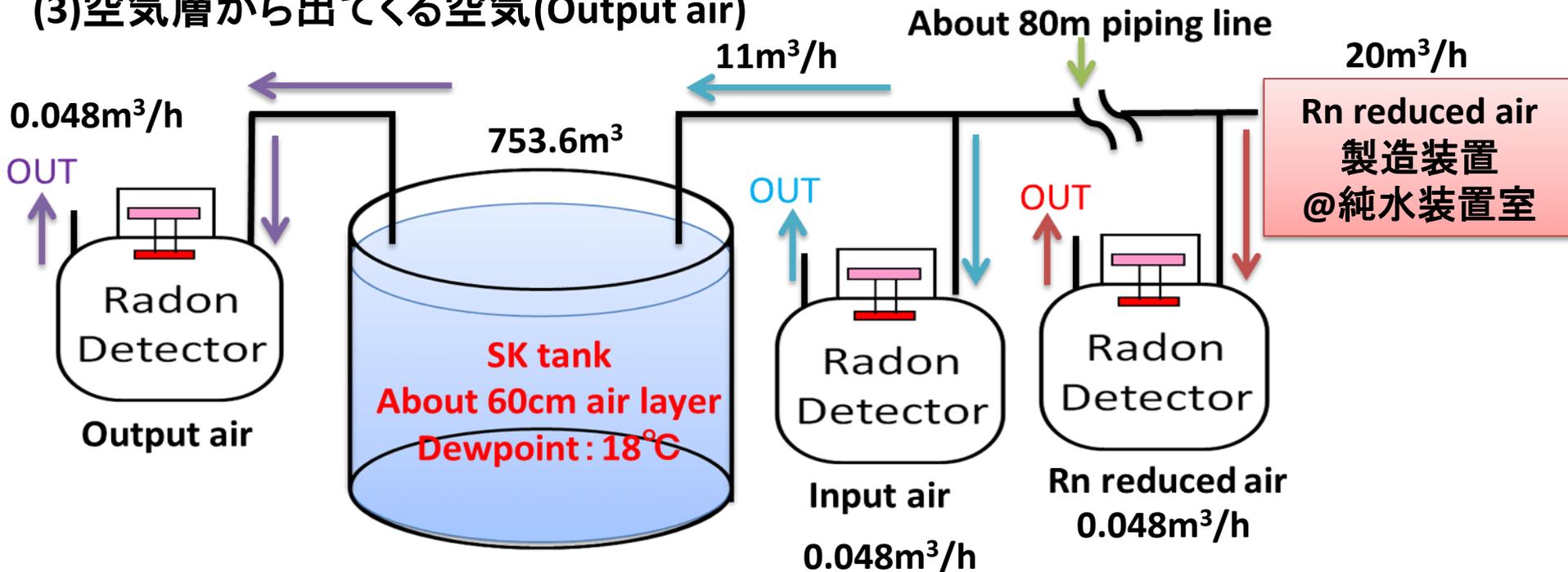


# 空気層のラドン濃度測定

## ◆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)純水装置室で製造されるラドンを極力除去した空気(Rn reduced air)
- (2)SK検出器に送り込む直前の空気(Input air)
- (3)空気層から出てくる空気(Output air)



# 空気層のラドン濃度測定の結果

## ◆測定期間

2012年11月17日から  
2013年2月5日まで、81日間

## ◆測定結果

Rn reduced airのラドン濃度

$$C_{\text{reduced}} = 3.7 \pm 0.2 \text{ mBq/m}^3$$

Input airのラドン濃度

$$C_{\text{in}} = 3.5 \pm 0.2 \text{ mBq/m}^3$$

Output airのラドン濃度

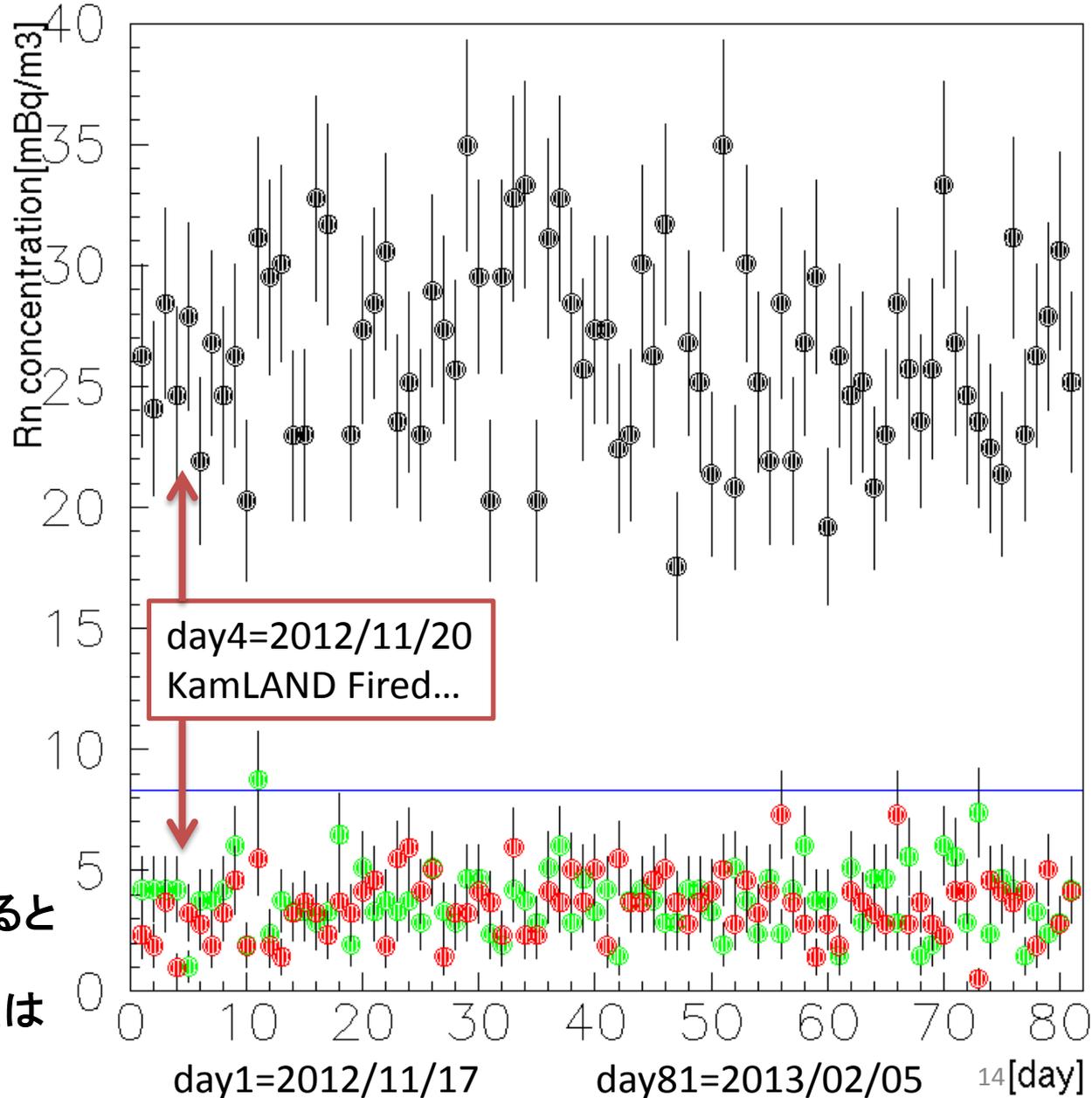
$$C_{\text{out}} = 26.7 \pm 0.5 \text{ mBq/m}^3$$

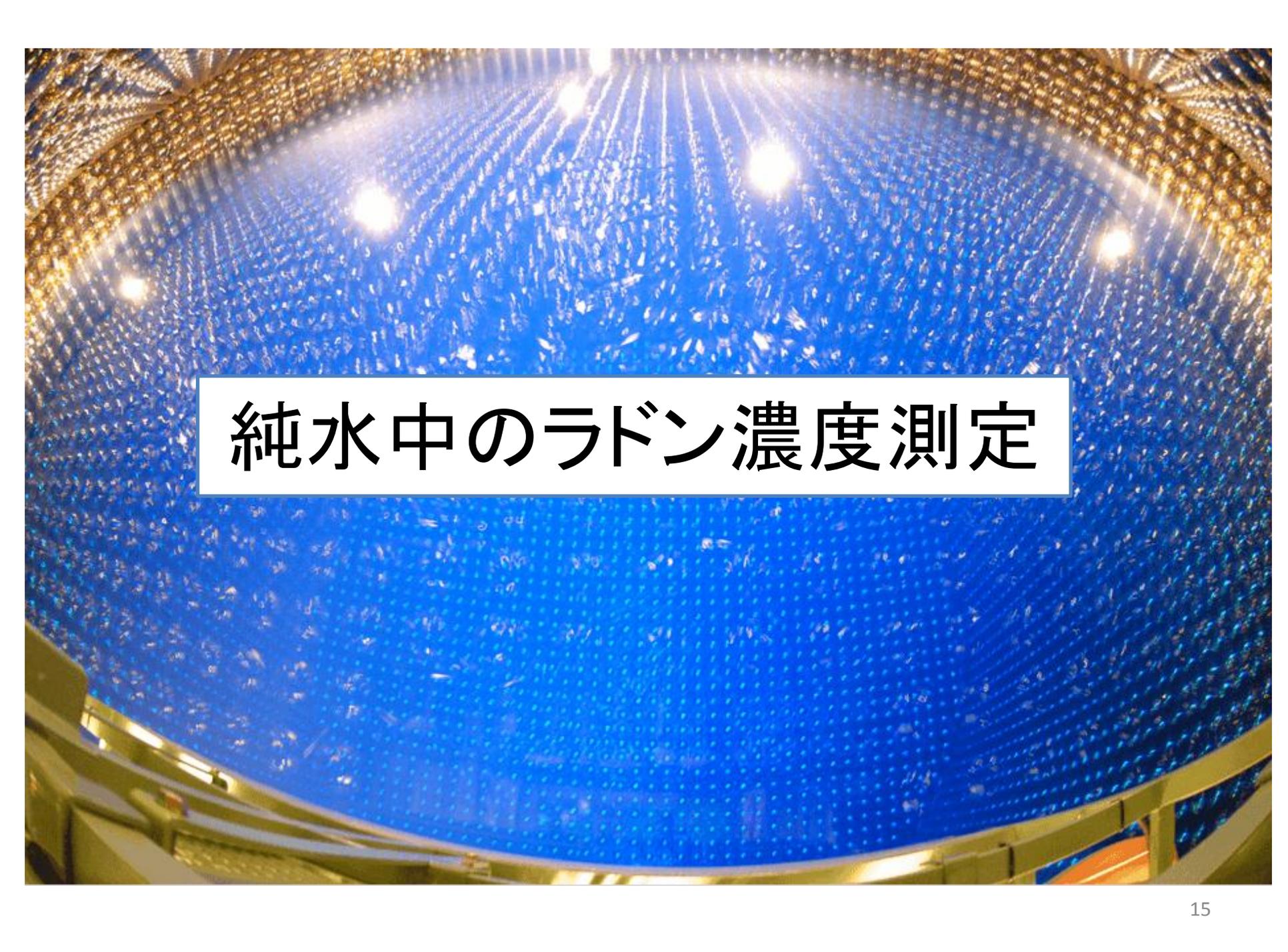
- (1) 検出器の内部に  
ラドンの湧き出しがある。
- (2) 坑道を通る配管から  
ラドンの流入はない。

水面からラドンが放出されていると  
考える。

気液平衡から水面のラドン濃度は

$$C_{\text{water}} = 8.3 \pm 0.1 \text{ mBq/m}^3$$





# 純水中のラドン濃度測定

# 純水中のラドン濃度測定

## ◆測定方法の概略

(1)純水中のラドンを空気に移動させる。

→気液混合装置

(2)極低濃度なのでラドンを濃縮する。

また、濃縮したラドンを脱離させる。

→活性炭を使用

(3)ラドン検出器を用いて、  
ラドン濃度を測定する。

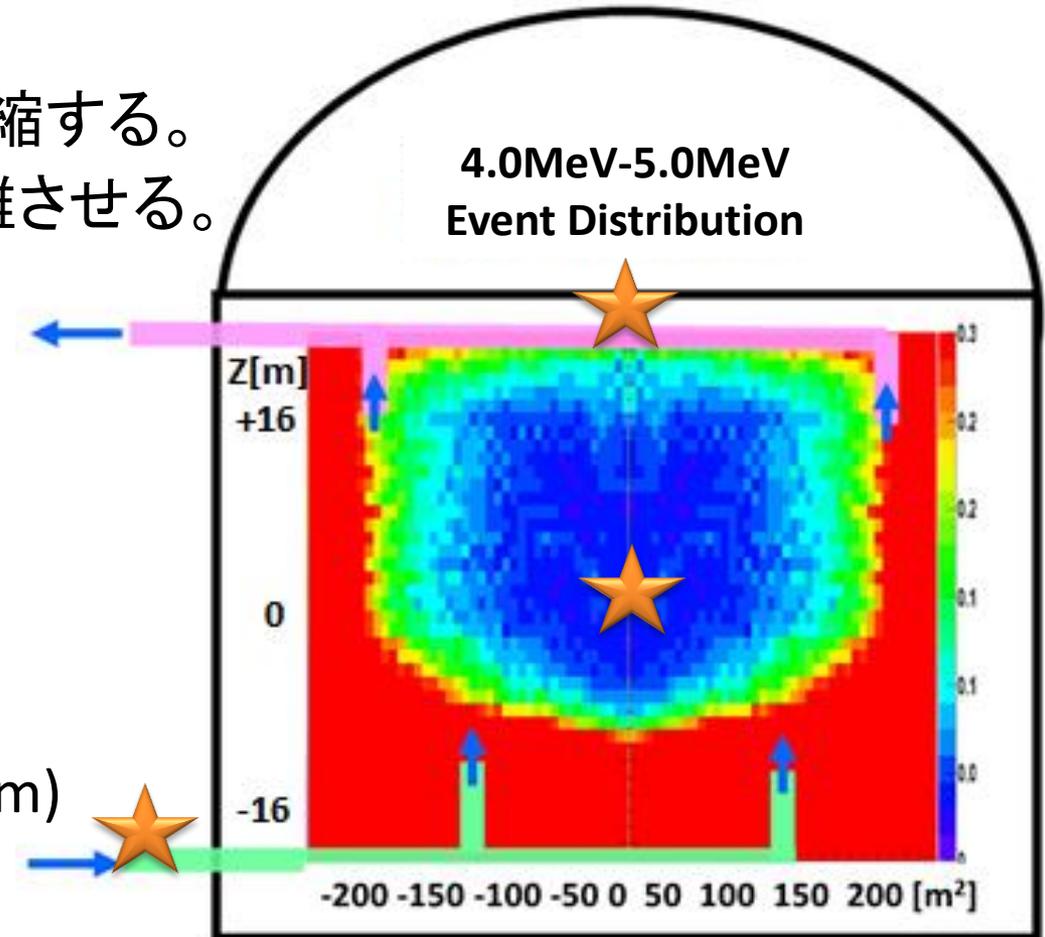
## ◆測定した場所

(1)検出器の中心 (  $Z = +0.4\text{m}$  )

(2)水面 (  $Z = +20.4\text{m}$ , 深さ $0.2\text{m}$  )

(3)送水(2回)

(4)バックグラウンド



# 気液混合装置

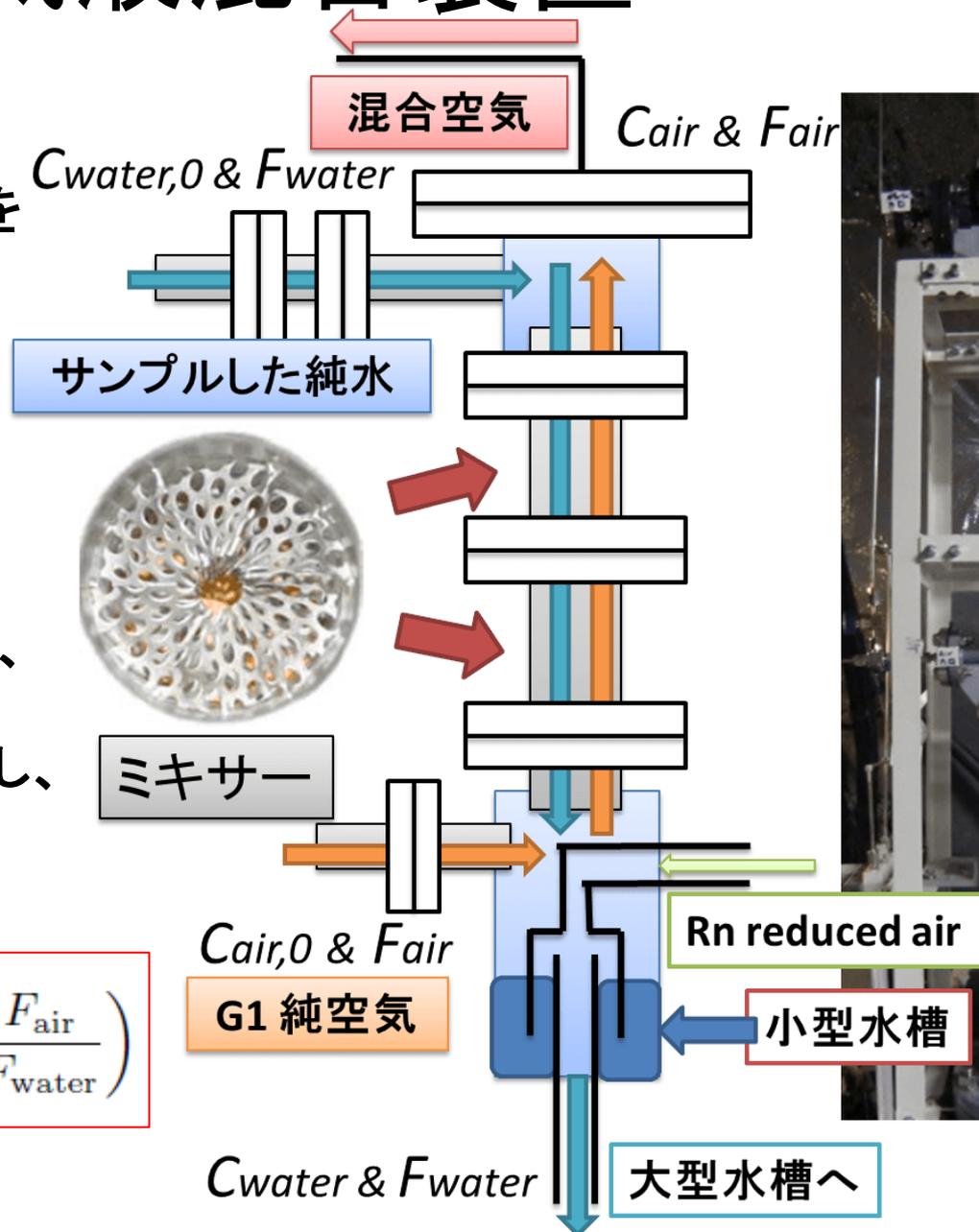
## ◆気液混合過程

サンプルした純水と純空気を混合し、純水に溶け込んだラドンを純空気へ移す。

## ◆気液混合装置

サンプルした水を上部から自由落下させる。  
 このとき、ミキサーを用いて、純水を霧状にする。  
 一方、下部から純空気を流し、霧状の純水と混合する。

$$C_{\text{water},0} = C_{\text{air}} \left( \alpha_{\text{Ostwald}} + \frac{F_{\text{air}}}{F_{\text{water}}} \right)$$



# 活性炭の吸着効率・脱離効率

## ◆吸着効率

-60°C以下の温度では、ラドンの吸着効率は**ほぼ100%**

## ◆脱離効率

200°C以上の加熱を5分以上行くと、  
吸着されたラドンは**ほぼ100%**脱離される。

## ◆冷却と加熱の方法

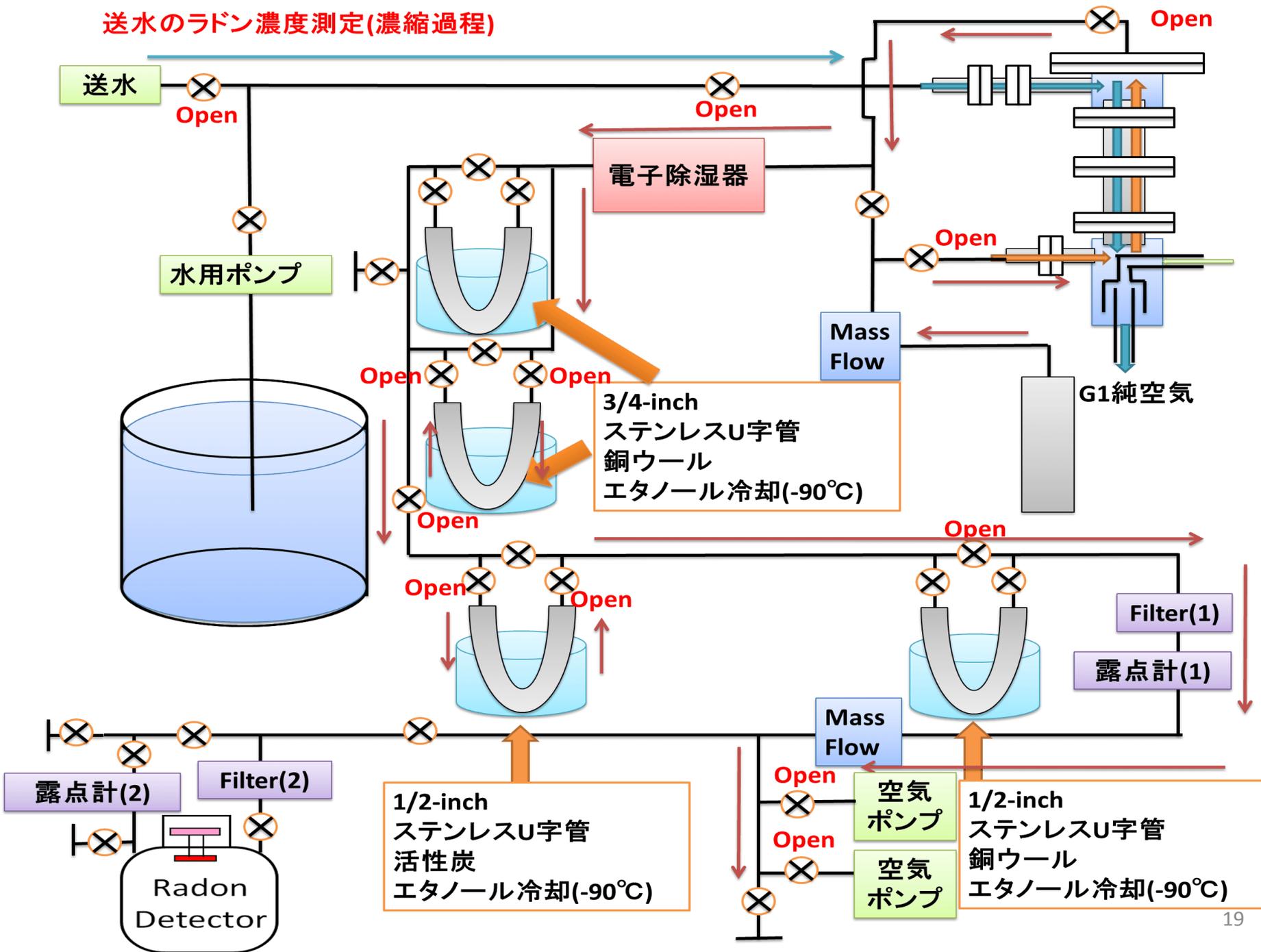
½-inchのU字管に活性炭を入れた。

(冷却)エタノール＋冷却器

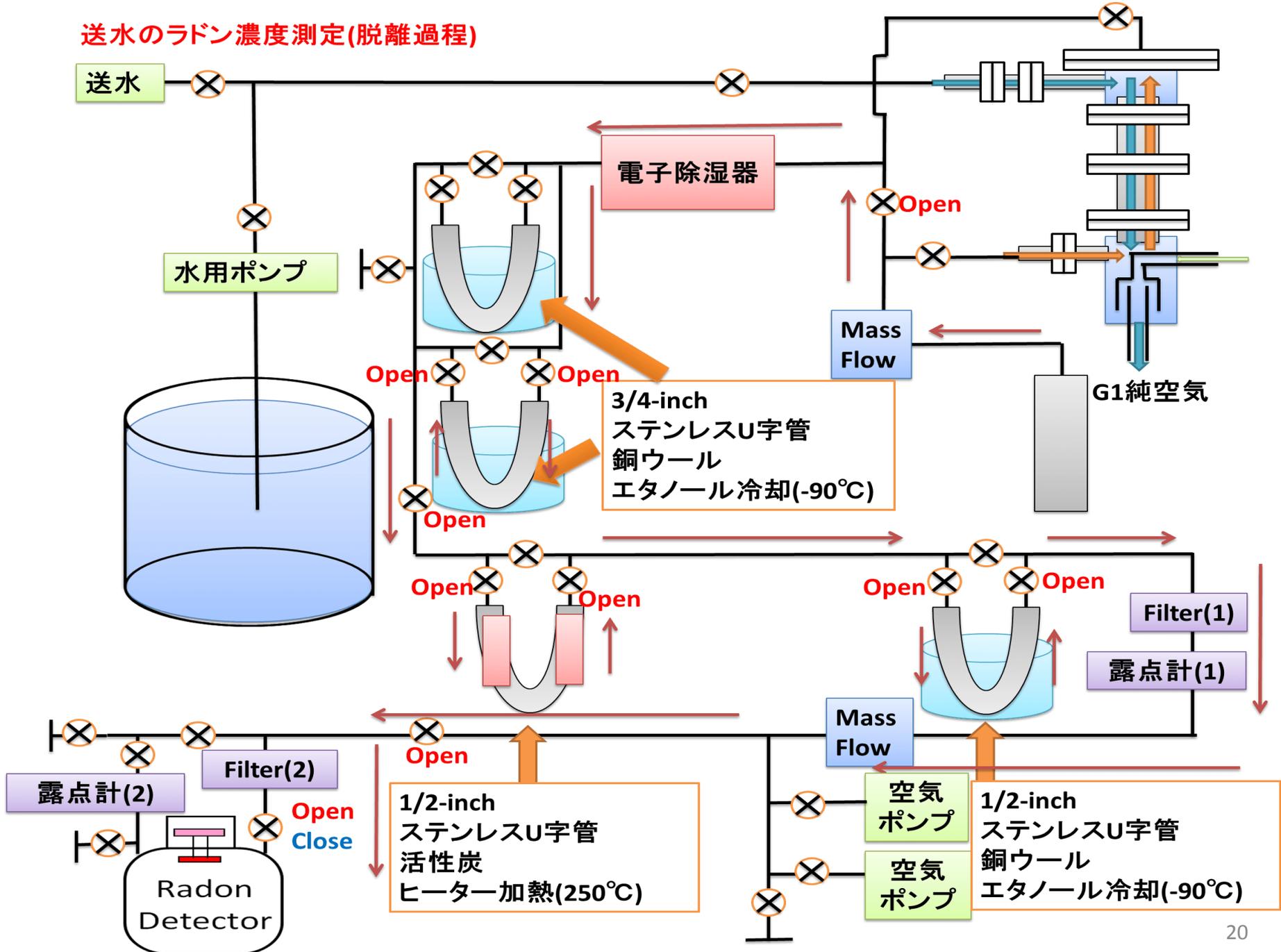
(加熱)マントルヒーター



# 送水のラドン濃度測定(濃縮過程)



送水のラドン濃度測定(脱離過程)



# ラドン濃度測定

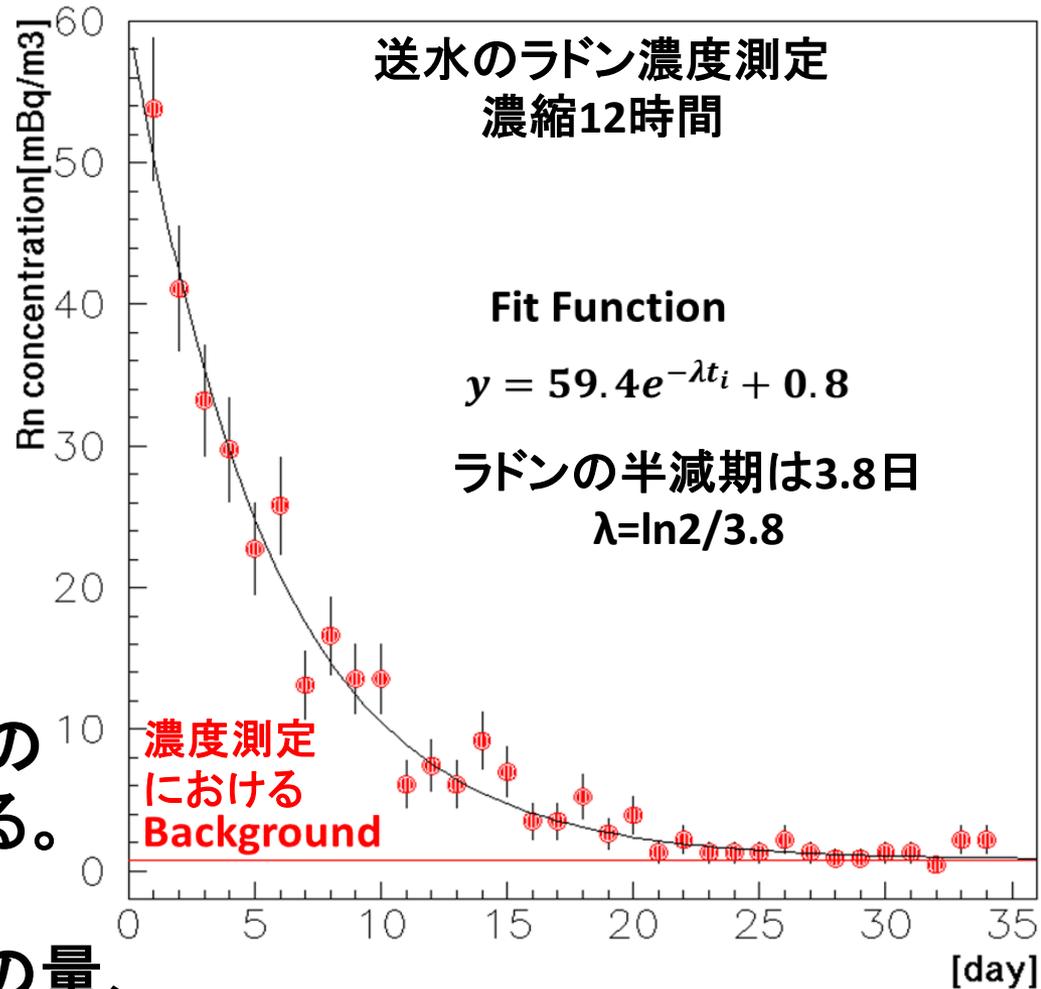
## ◆ラドン濃度測定の手法

ラドン検出器を封じ切り、  
ラドン崩壊をみる(20日以上)。

$\chi^2$ -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。

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。

混合に使用した純水と純空気の量、  
混合時の水温、濃縮時間等から  
純水のラドン濃度が算出できる。



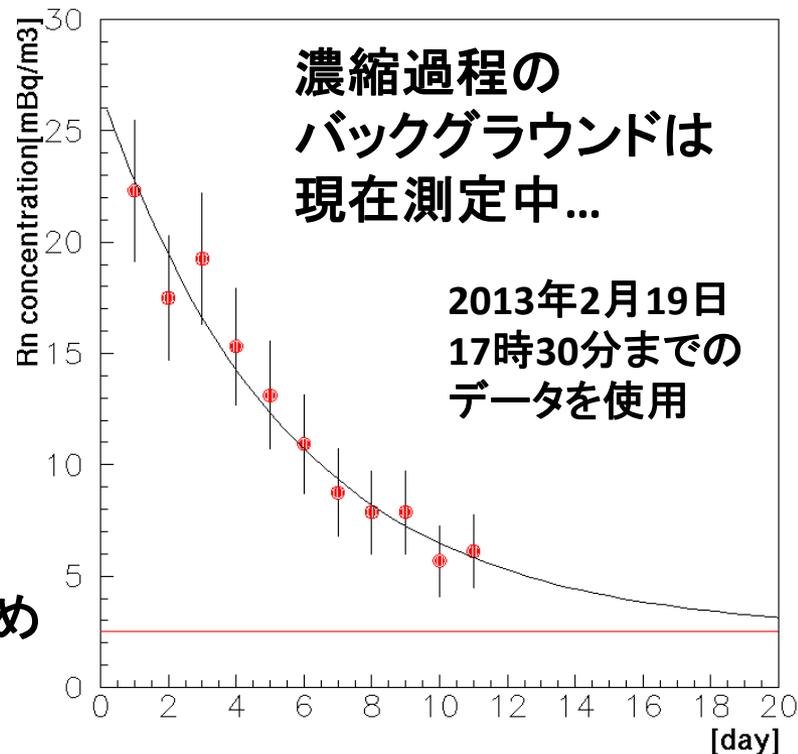
# ラドン濃度測定結果

## ◆濃縮過程におけるバックグラウンド測定

気液混合装置に純水を流さずに、  
同様の測定を行った。  
濃縮過程におけるバックグラウンドは、  
BG =  $2.7 \pm 0.5$  mBq/m<sup>3</sup>程度

今回の測定結果の誤差が大きいのは、  
濃縮過程のバックグラウンドの誤差が大きいため

## ◆測定結果



サンプル純水	空気の流量 [L/min]	純水の流量 [L/min]	水温 [°C]	濃縮時間 [h]	測定結果 [mBq/m <sup>3</sup> ]
検出器中心	1.8	1.9	16.0	12	1.0±0.6
水面	2.0	1.8	16.1	6	5.3±0.9
送水(1回目)	1.7	1.6	15.3	12	2.4±0.6
送水(2回目)	1.7	1.6	14.9	6	3.7±0.8
バックグラウンド	1.7	-		6	2.7±0.5

# 測定結果の考察

## ◆送水と検出器の中心

送水のラドン濃度よりも、  
検出器中心における純水中のラドン濃度の方が低い。  
→純水が循環している間に、ラドンが崩壊している。

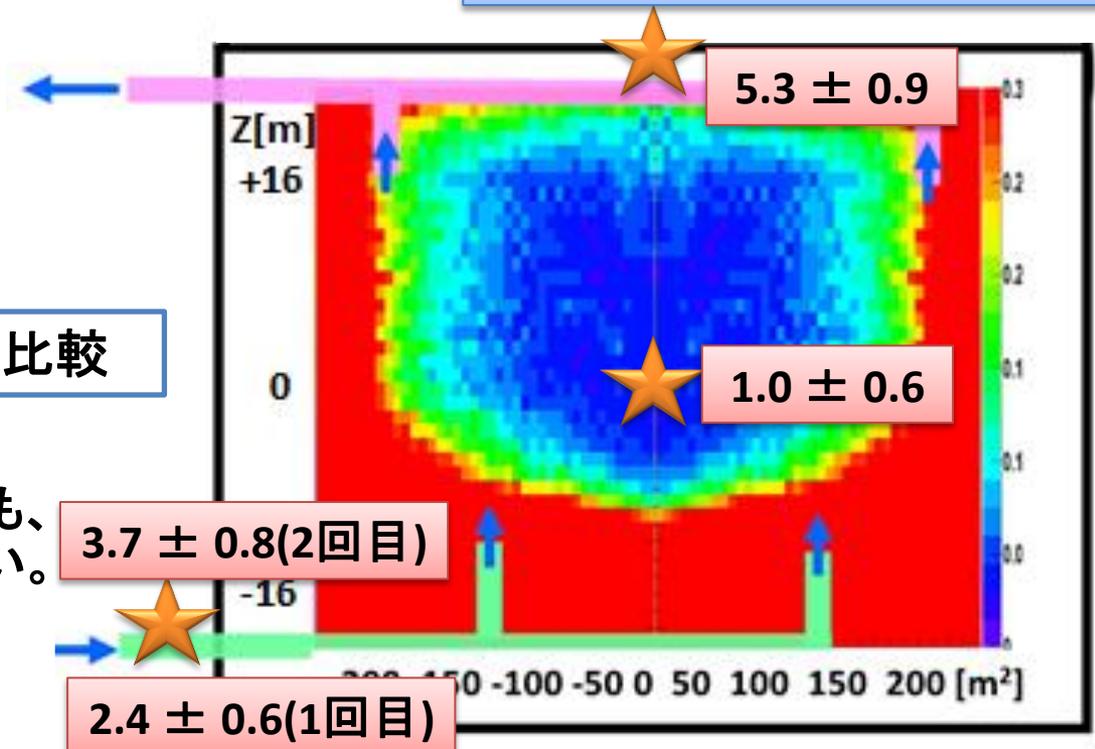
## ◆送水と水面

送水のラドン濃度よりも、  
水面における純水中のラドン濃度の方が低い。  
→検出器の内部に  
ラドンの湧き出しがある

## ◆空気層のラドン濃度測定との比較

空気層のラドン濃度測定から  
見積もられた水面のラドン濃度よりも、  
実際の水面のラドン濃度の方が低い。  
→検出器の構造体から  
ラドンの湧き出しがある

空気層のラドン濃度測定で  
見積もられた水面のラドン濃度  
 $8.3 \pm 0.1 \text{ mBq/m}^3$



↑濃度の単位は[mBq/m<sup>3</sup>]

# まとめと今後

## ◆太陽ニュートリノ観測におけるバックグラウンド

$^{222}\text{Rn}$ の娘核種 $^{214}\text{Bi}$ の $\beta$ 崩壊( $Q=3.27\text{MeV}$ )

→ラドン濃度測定により、ラドンの起源を解明する。

その後、バックグラウンドを減らすために、ラドンそのものを減らしたい。

今回、高感度ラドン検出器を用いて、SK検出器におけるラドン濃度を測定した。

## ◆空気層のラドン濃度測定

Input airとOutput airのラドン濃度を測定した。

$C_{\text{In}} = 3.5 \pm 0.2 \text{ mBq/m}^3$ ,  $C_{\text{Out}} = 26.7 \pm 0.5 \text{ mBq/m}^3$

SK検出器の内部にラドンの湧き出しがあることがわかった。

水面の純水のラドン濃度を見積もった→  $8.3 \pm 0.1 \text{ mBq/m}^3$

## ◆純水中のラドン濃度測定

気液混合装置と活性炭を用いて、純水中のラドン濃度を測定する手法を確立した。

実際に純水中のラドン濃度を測定し、数 $\text{mBq/m}^3$ のオーダーであることがわかった。

今後、純水中のラドン濃度測定を継続し、バックグラウンドの理解をすすめる。

また、ラドンの低減に向けた研究を行う。

**BACK UP**

# 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 $^{214}\text{Bi}$ の $\beta$ 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。

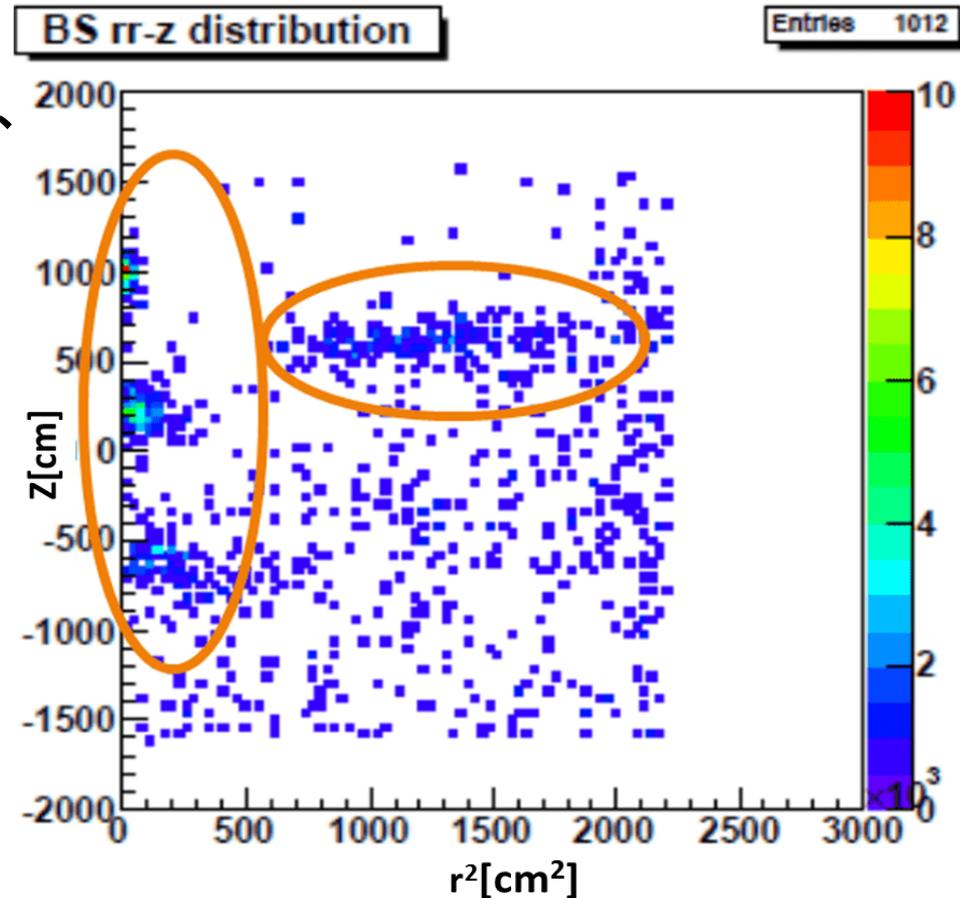
$$10\text{counts/day/kton}=0.27\text{mBq/m}^3$$

(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、

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

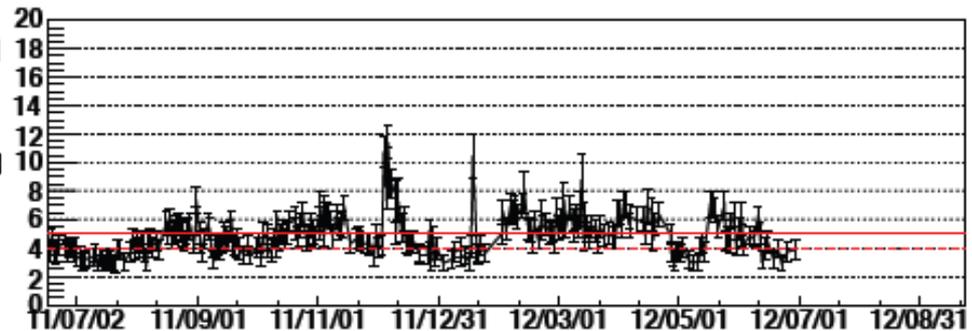
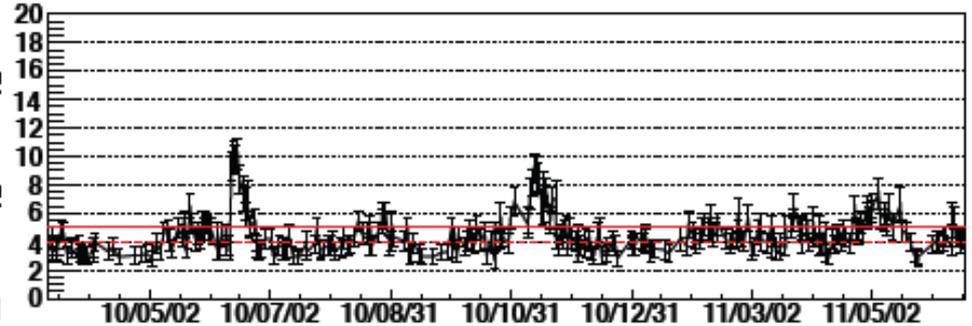
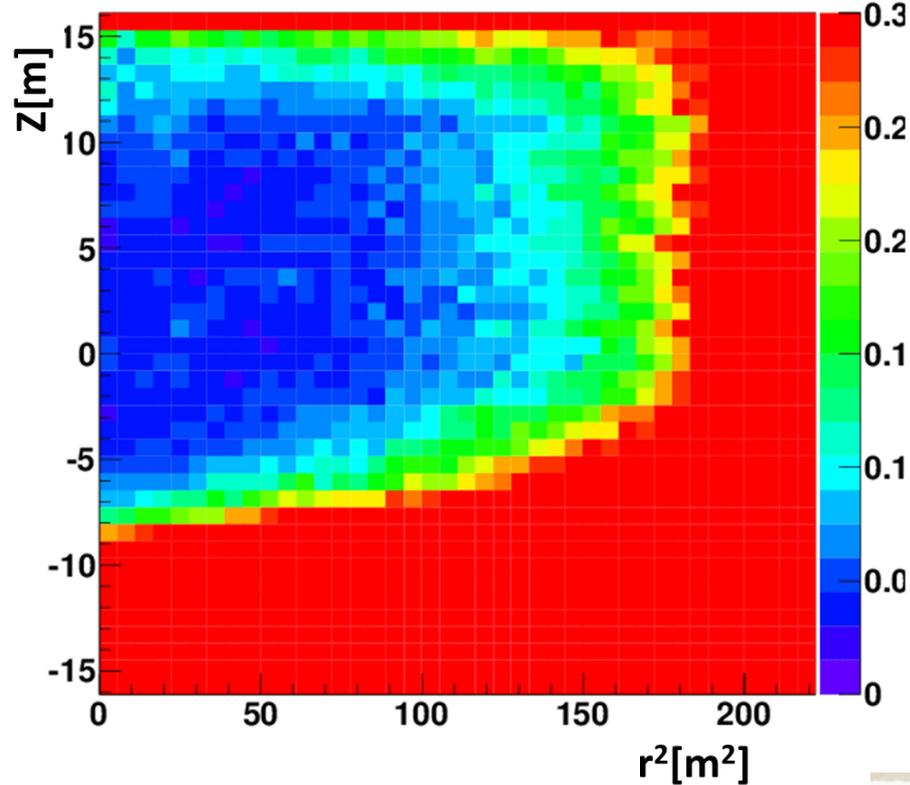
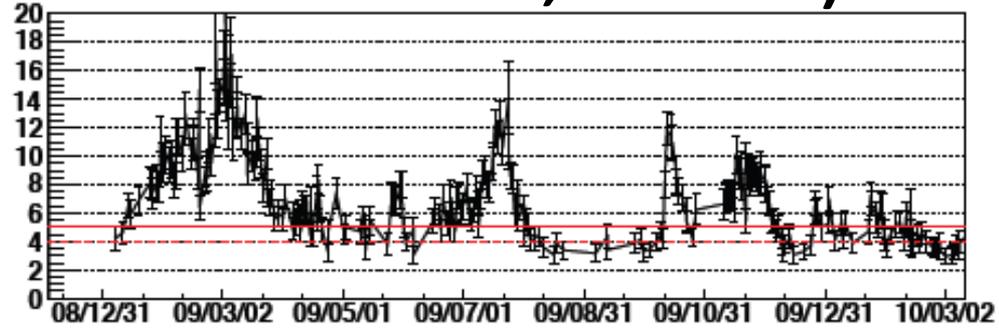
仮に、上記の関係が成り立つとすれば、  
有効体積内部のラドン濃度は  $\sim 0.1\text{mBq/m}^3$



# 有効体積内におけるEvent rateの位置依存性(4.0MeV-4.5MeV, SK-IV)

Event rateの時期変動  
Event/kton/day

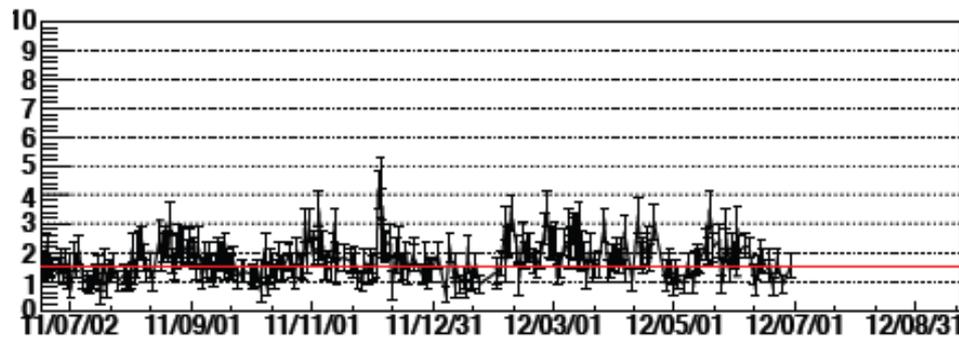
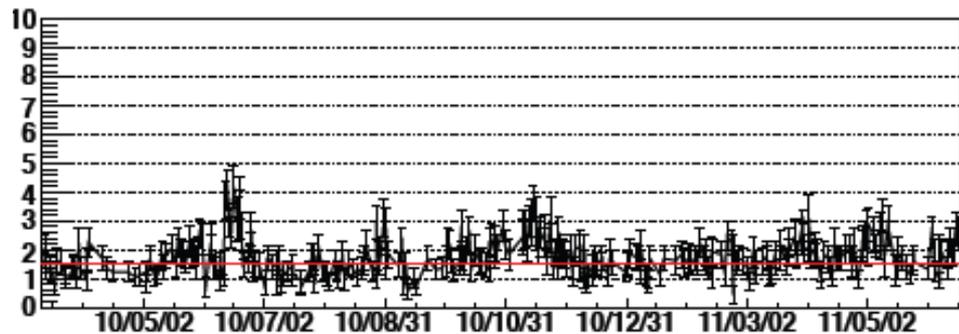
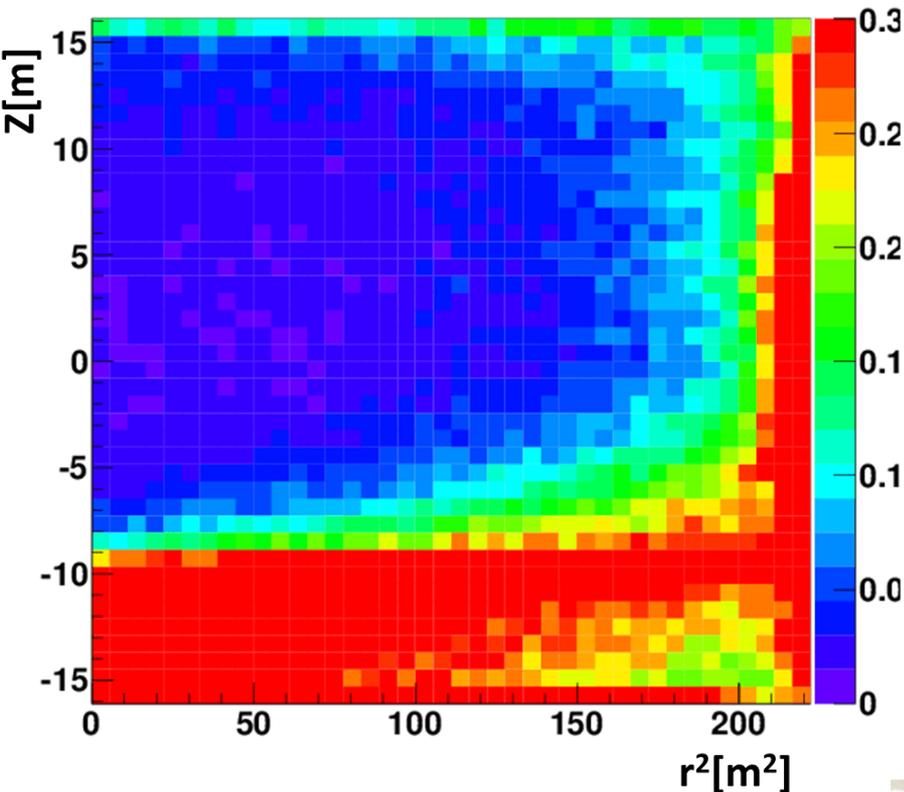
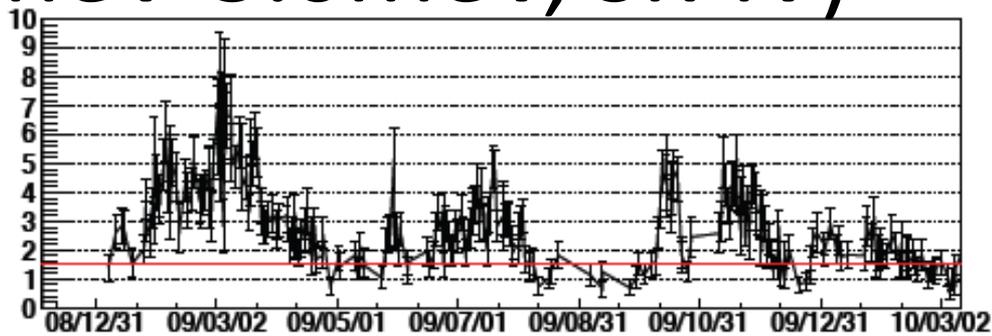
Event rateの位置依存性



# 有効体積内におけるEvent rateの位置依存性(4.5MeV-5.0MeV, SK-IV)

Event rateの時期変動  
Event/kton/day

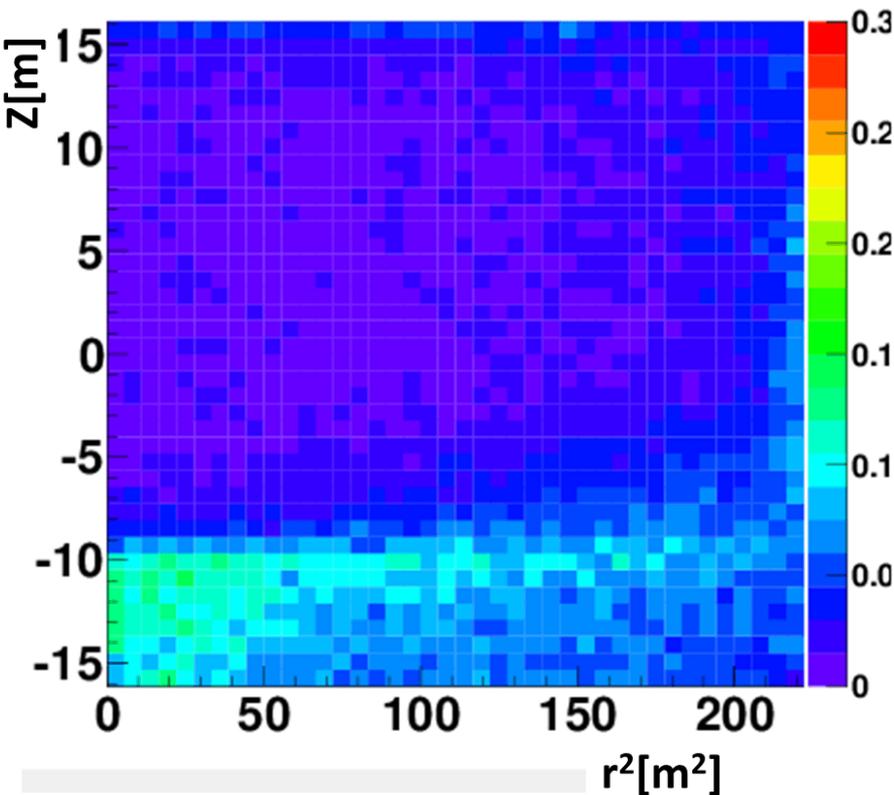
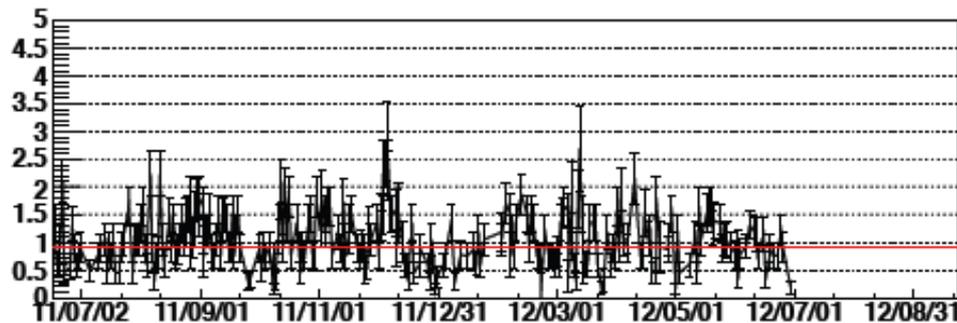
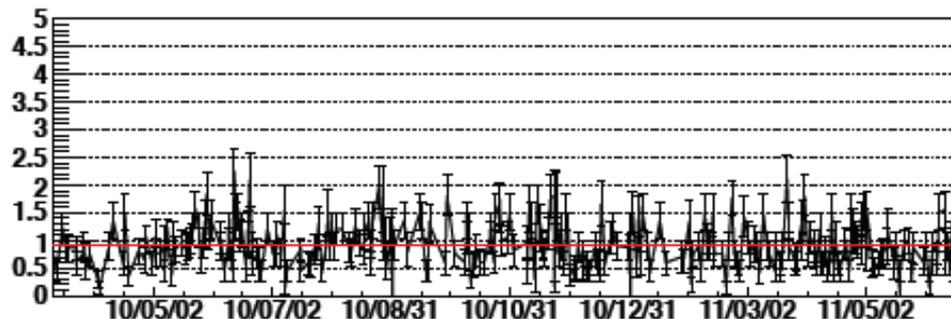
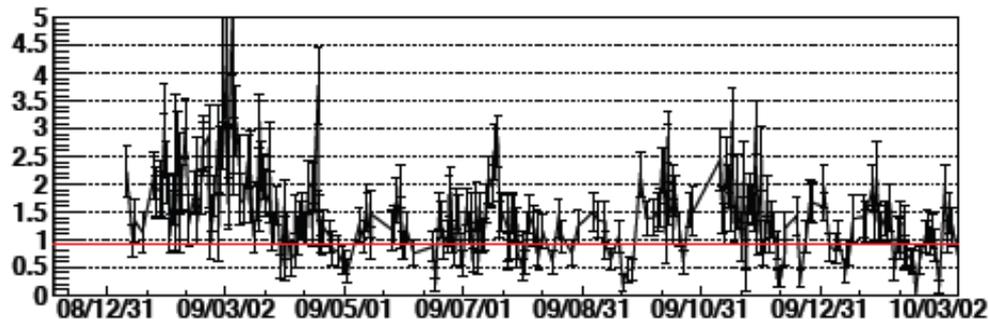
Event rateの位置依存性



# 有効体積内におけるEvent rateの位置依存性(5.0MeV-5.5MeV, SK-IV)

Event rateの時期変動  
Event/kton/day

Event rateの位置依存性



# 較正係数

## ○較正係数

検出された崩壊数とラドン濃度を関係づける因子—検出効率—

$^{214}\text{Po}$ が崩壊時に放出する $\alpha$ 線(7.68MeV)を用いる。

(1) $^{218}\text{Po}$ (6.00MeV)と $^{210}\text{Po}$ (5.30MeV)に比べてノイズが少なく、区別しやすい。

(2) $^{214}\text{Po}$ は崩壊するまでの娘核種が正に帯電しやすい( $^{218}\text{Po}^+$ 、 $^{214}\text{Pb}^+$ 、 $^{214}\text{Bi}^+$ )ので、よりPDに集められている確率が高い。

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

## ○較正係数の特徴

### (1)電圧依存性

-ラドン娘核種の捕集効率の変化

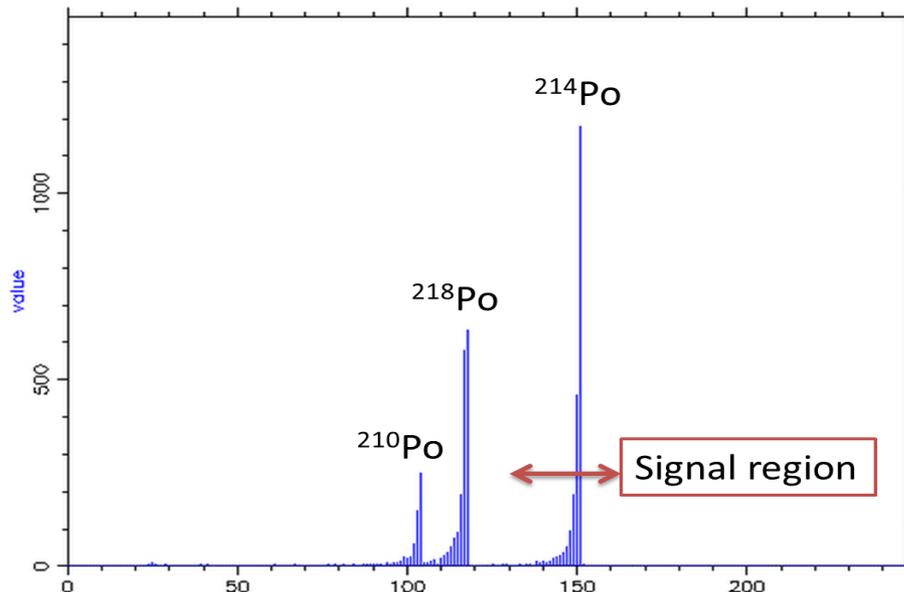
-PDの応答の変化

### (2)絶対湿度依存性

-水分による中和

較正係数は絶対湿度の1/2乗に依存

$$CF = a - b\sqrt{AH}$$

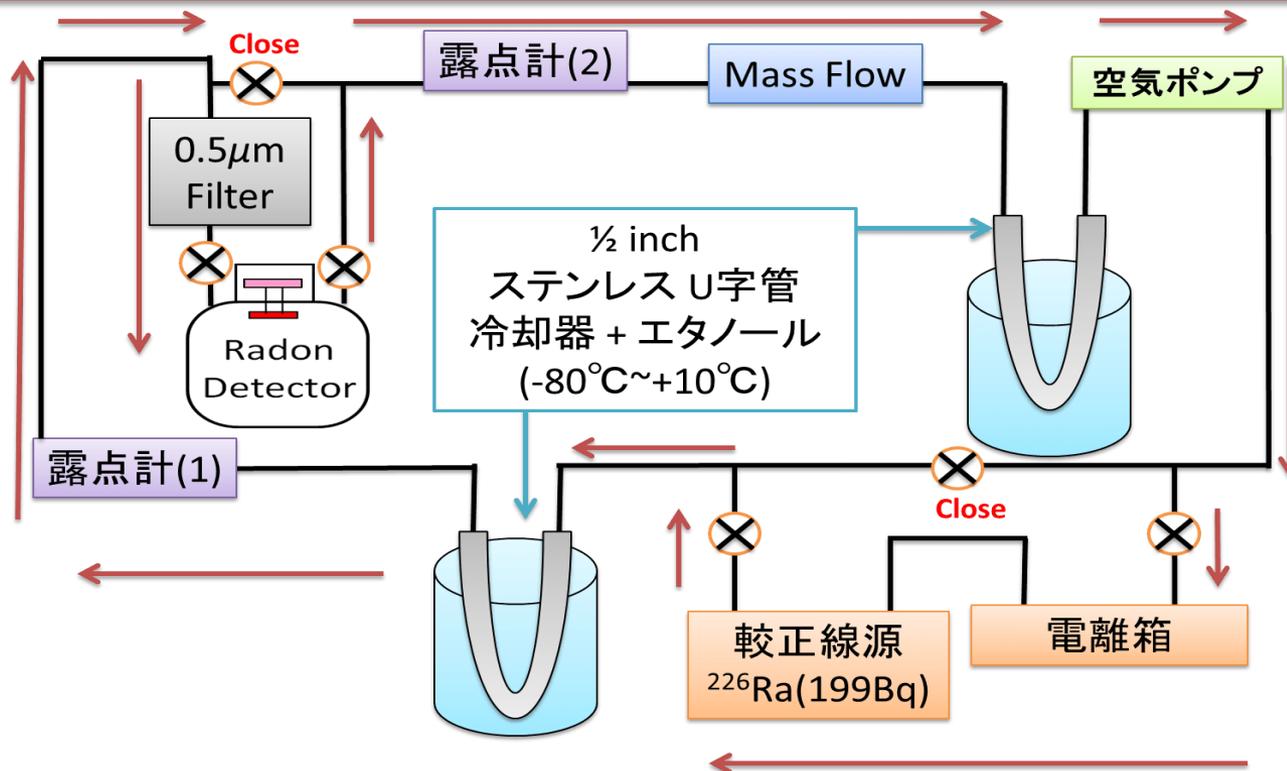


# ラドン検出器の校正実験

## ○校正実験の測定系

- ラドンソース→199Bqの<sup>226</sup>Raソース(内部を放射平衡にする)
- ラドン濃度測定→電離箱
- 測定系内部の露点管理→U字管をエタノールに浸し、冷却器で冷却

$$\text{校正係数 } CF [\text{CPD}/(\text{mBq}/\text{m}^3)] = \frac{\alpha \text{線の検出頻度} [\text{CPD}]}{\text{電離箱で測定されたラドン濃度} [\text{mBq}/\text{m}^3]}$$



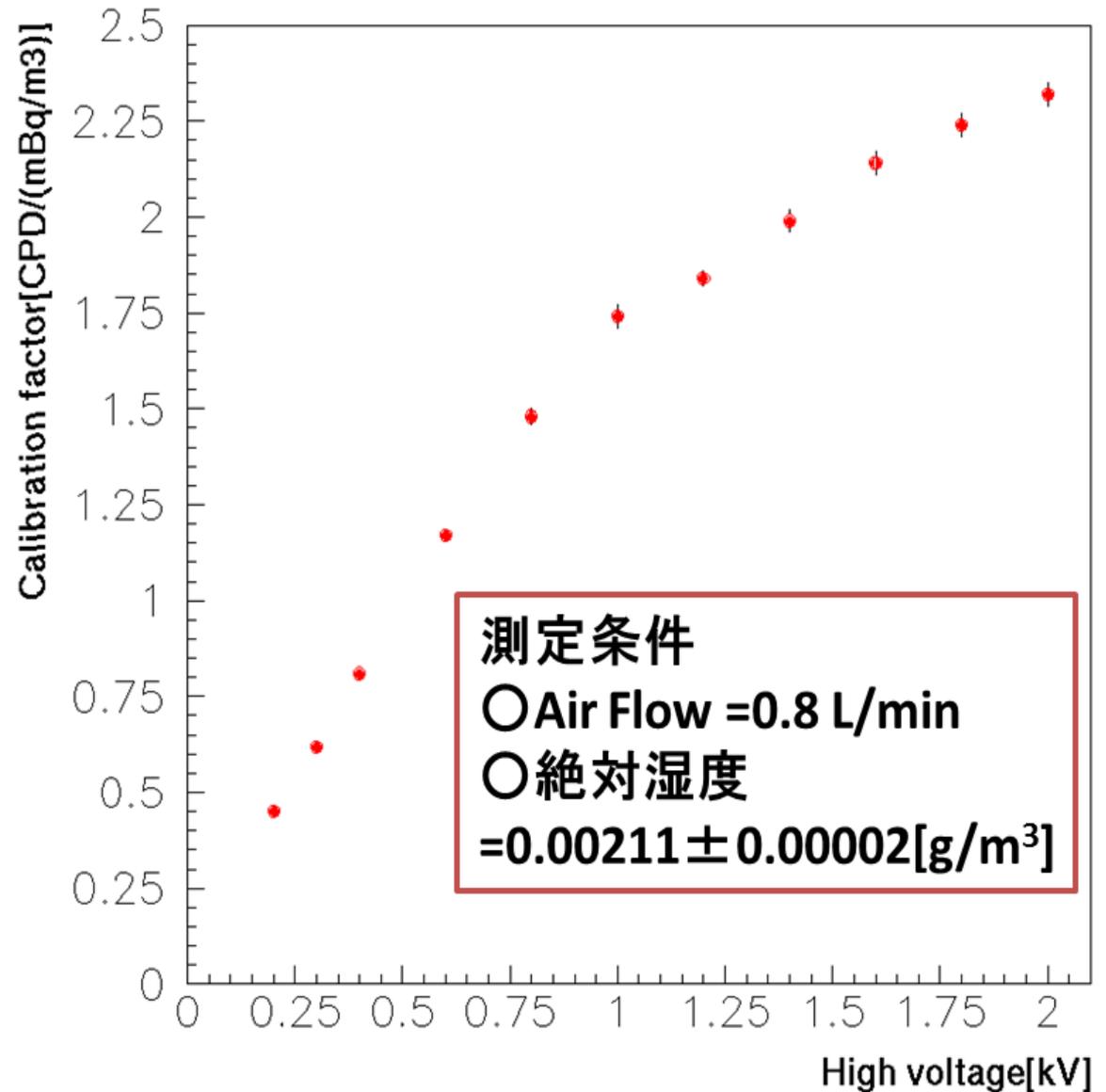
# 較正係数の電圧依存性

## ○測定方法

- (1)冷却器の設定温度は-70°C
- (2)電圧を-2000Vに設定する
- (3)7時間ほど経過したら、  
設定電圧を200Vずつ上げる
- (4)設定電圧を変更した  
直前3時間のデータを用いる

## ○測定結果

電圧依存性を確認できた。  
設定電圧→-2000V



# 較正係数の絶対湿度依存性

## ○測定方法

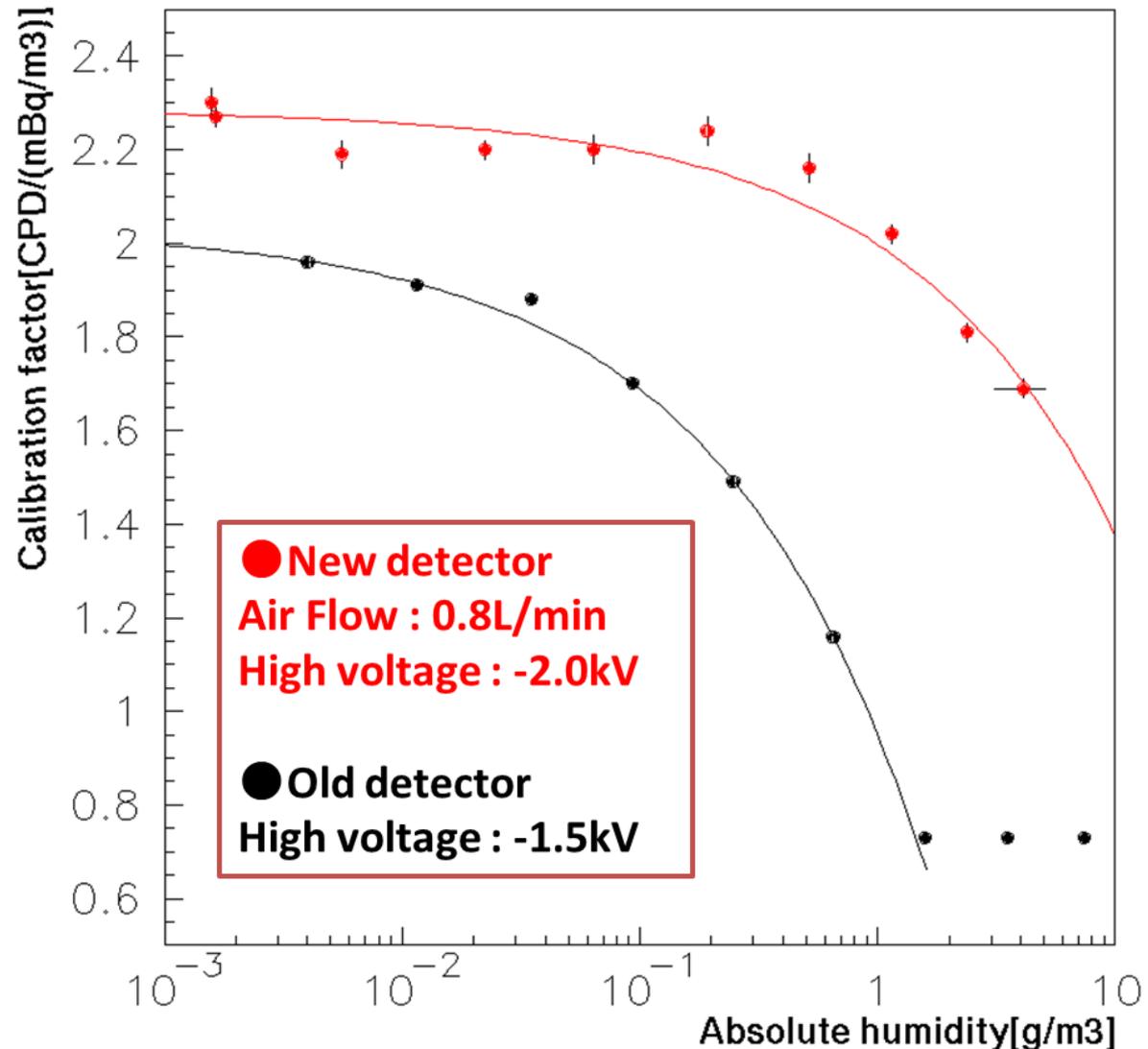
- (1)電圧を-2000Vに設定する
- (2)冷却器の設定温度は-80°C
- (3)24時間ほど経過したら、  
設定温度を10°Cずつ上げる
- (4)設定温度を変更した  
直前3時間のデータを用いる

## ○測定結果

湿度依存性を確認できた。

$$CF = 2.3 - 0.3\sqrt{AH}$$

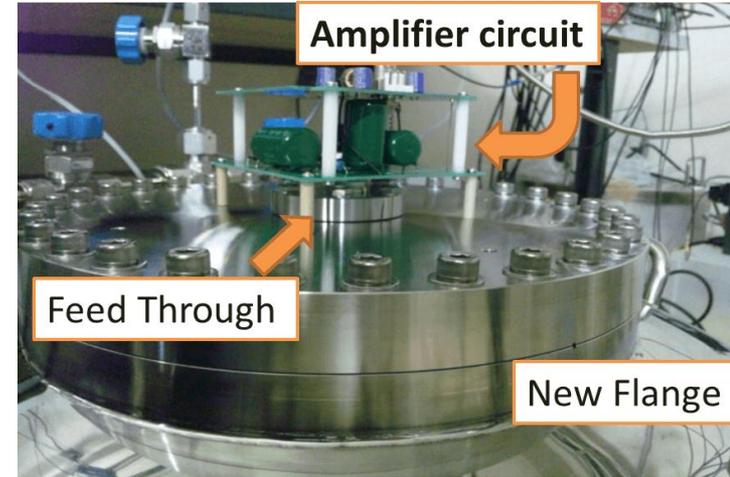
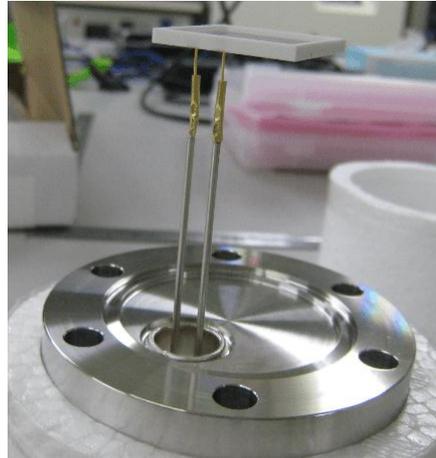
過去の検出器と比べて、  
高感度になった。



# PDと電圧分割回路/プリアンプモジュール

## ○PIN Photo Diode(PD)

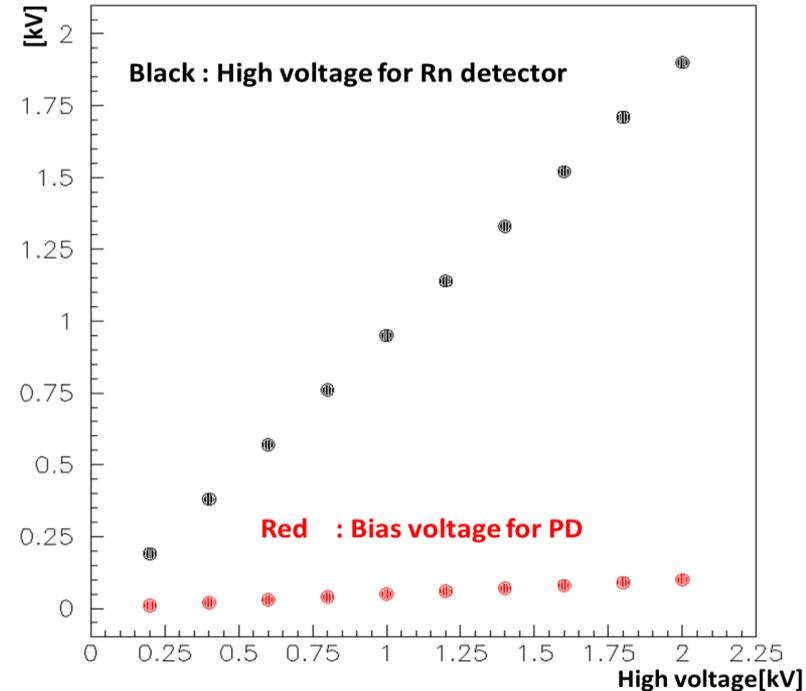
- 浜松ホトニクス製 S3204-09
- 受光面:16mm×16mm
- バイアス電圧は最大で100Vまで
- Feed Throughに取り付ける



## ○電圧分割回路

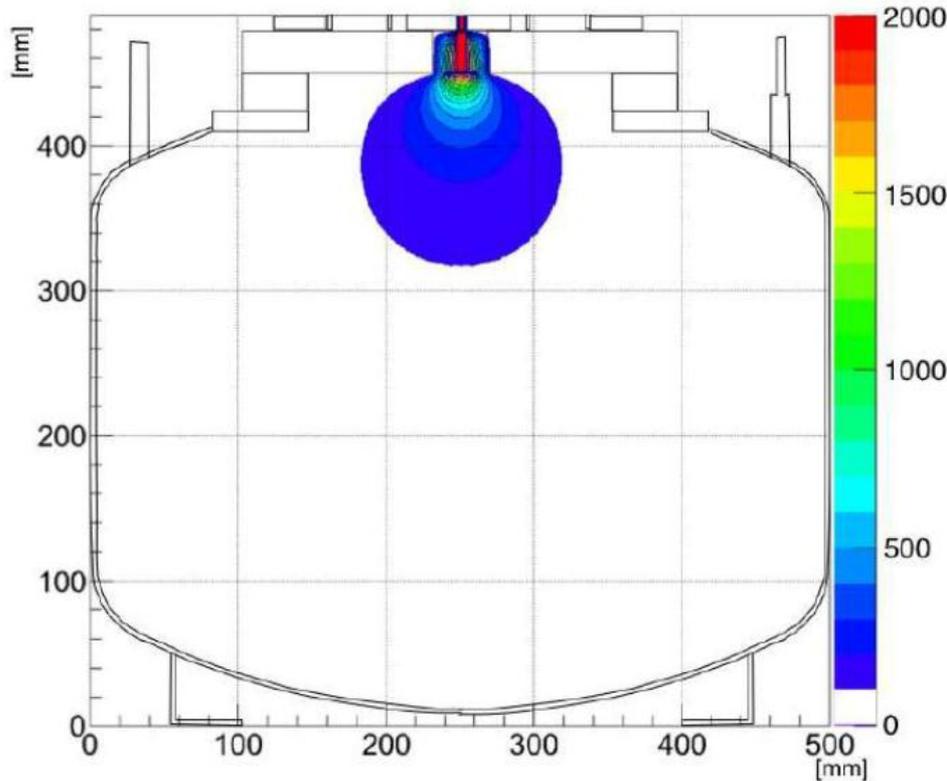
高圧電源装置によって印加される電圧を2つに分割

- (1)PD用の逆バイアス電圧
- (2)ラドン検出器用の高電圧

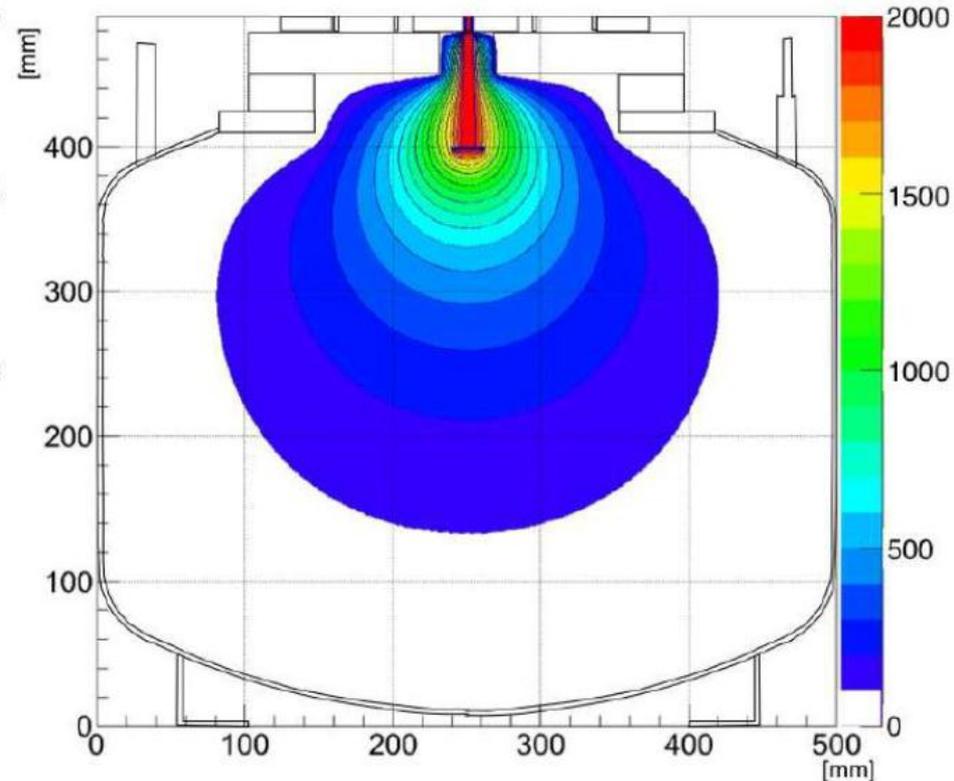


# PDの位置と形成される電場

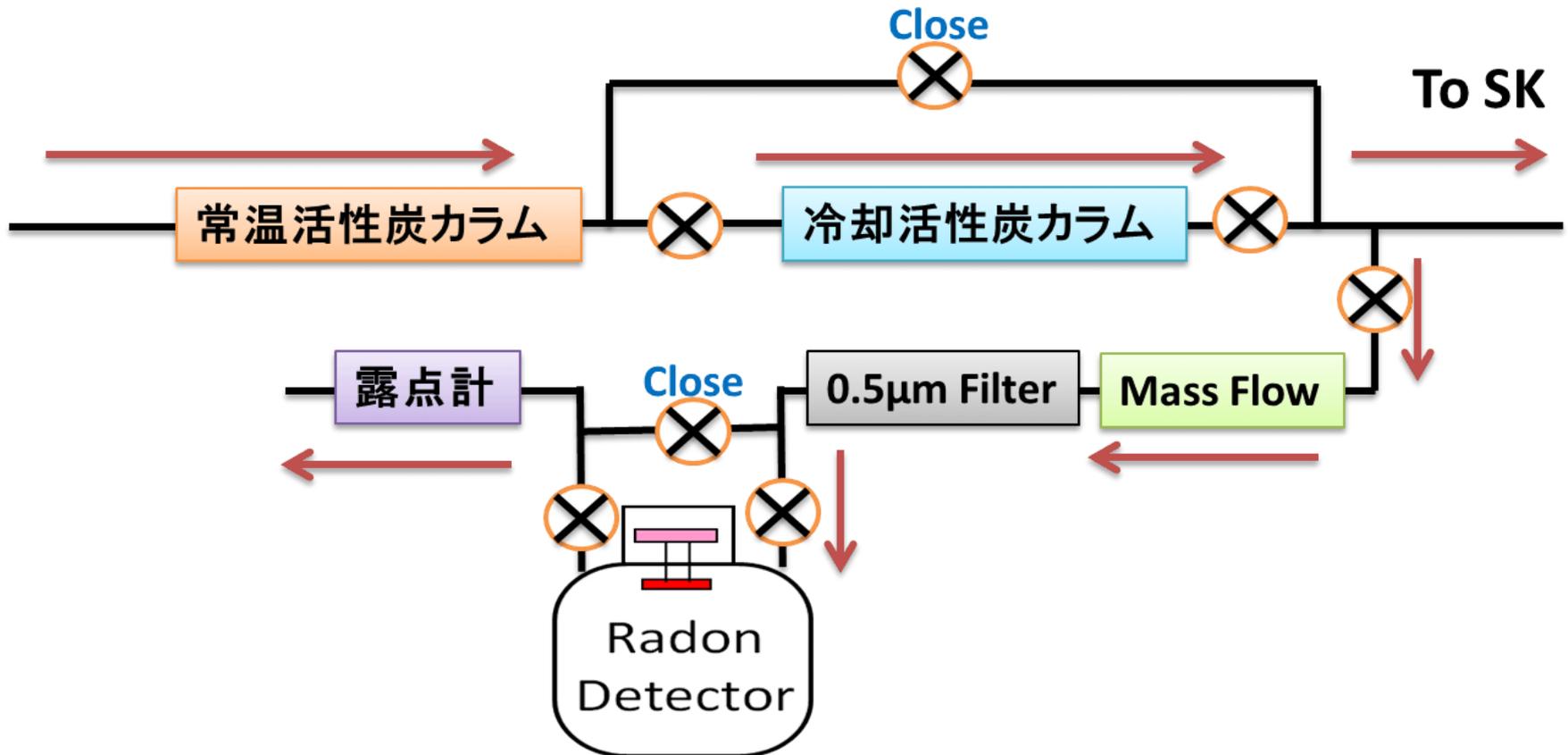
フィードスルーに直接接続した場合



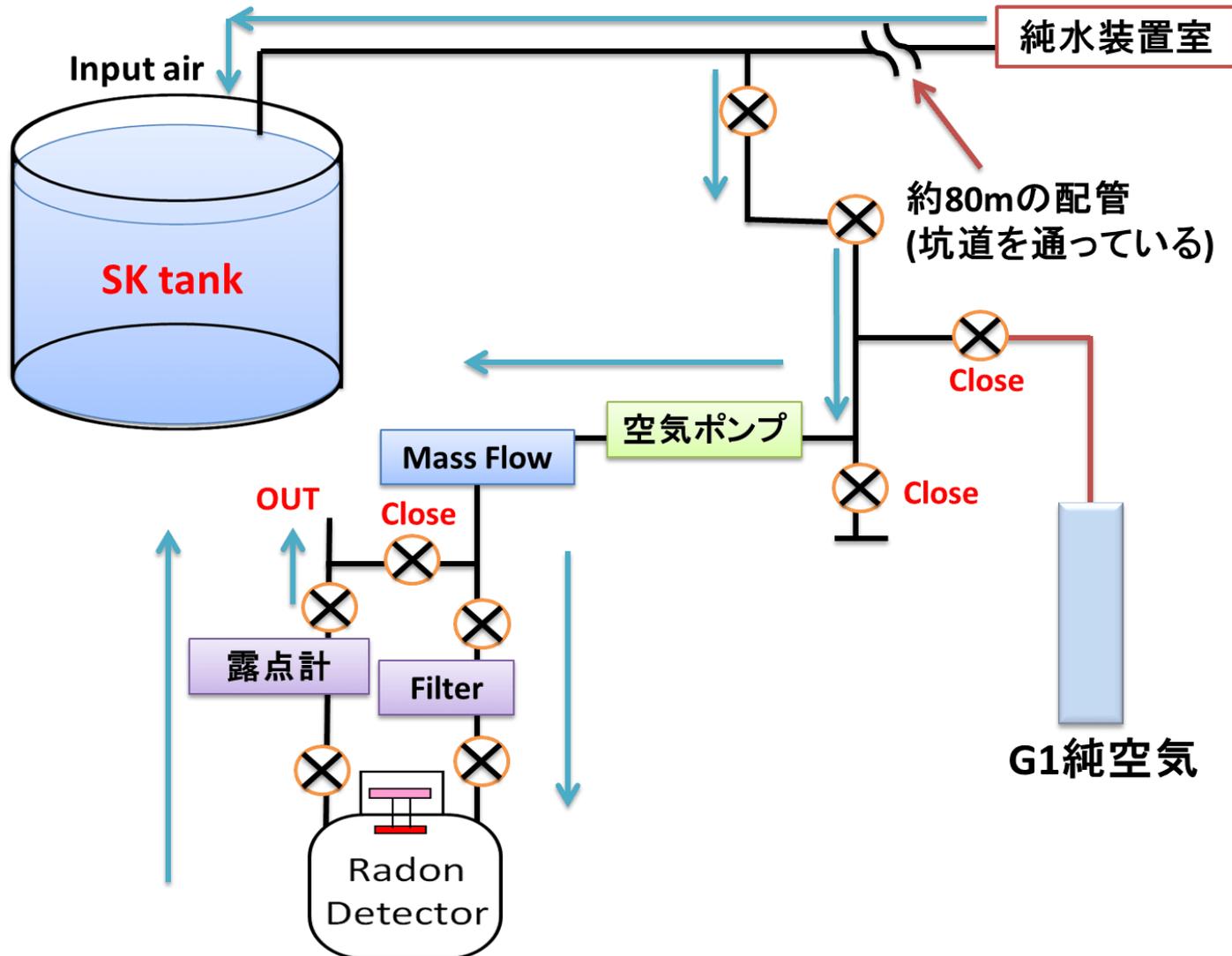
フィードスルーから5cmの位置にある場合



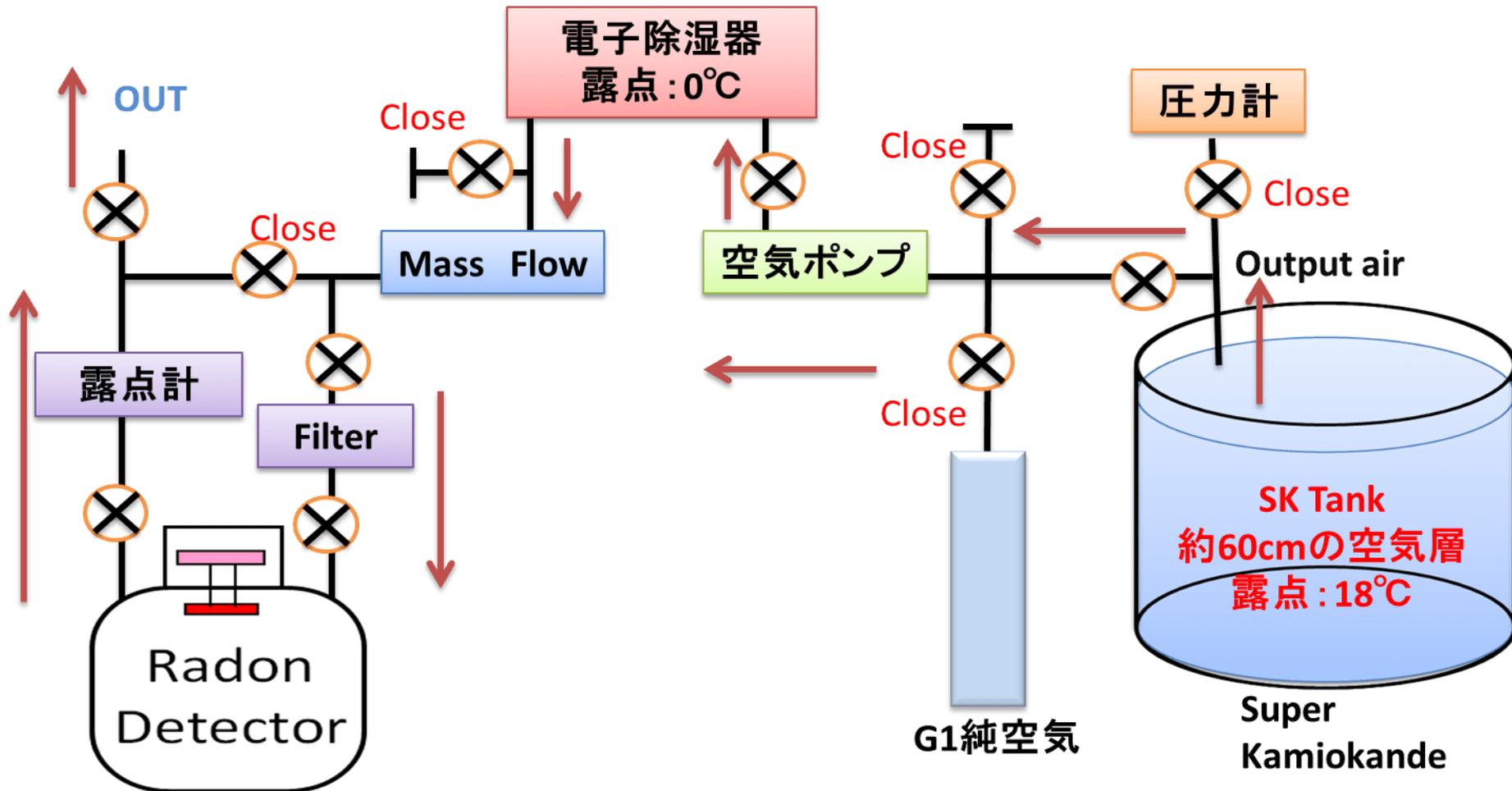
# Rn reduced airのラドン濃度測定系



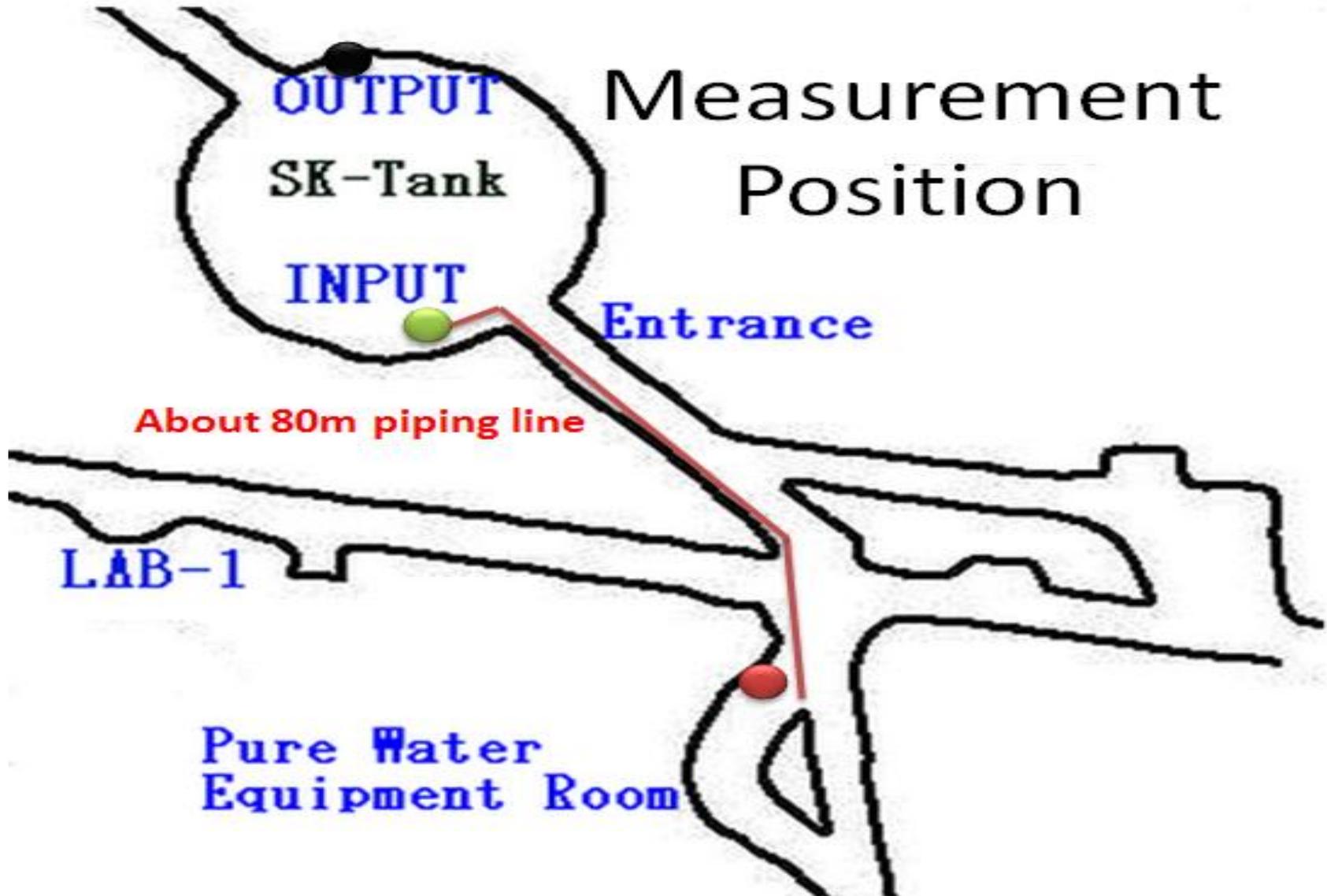
# Input airのラドン濃度測定系



# Output airのラドン濃度測定系



# 測定系の位置関係



# Period I における測定結果

○測定期間

2012年7月16日から

2012年9月19日まで、66日間

○測定結果

Input airのラドン濃度

$$C_{In} = 4.5 \pm 0.4 \text{ mBq/m}^3$$

Output airのラドン濃度

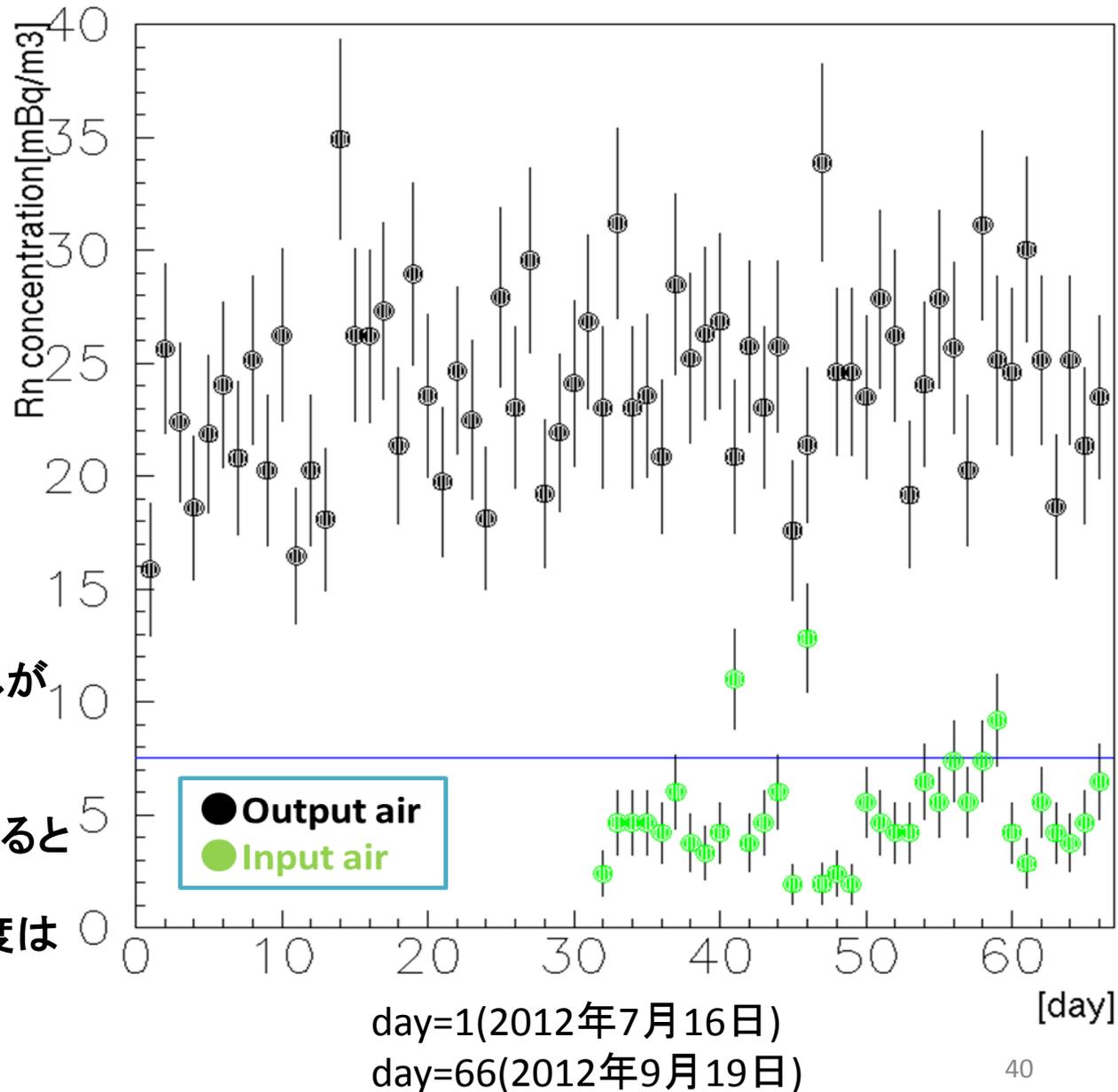
$$C_{Out} = 23.4 \pm 0.5 \text{ mBq/m}^3$$

検出器内部にラドンの湧き出しがあることが分かった。

水面からラドンが放出されていると考える。

気液平衡から水面のラドン濃度は

$$7.5 \pm 0.2 \text{ mBq/m}^3$$



# Period II における測定結果

## ○測定期間

2012年9月20日から

2012年11月16日まで、58日間

## (a) day=3~25

純水製造装置の改修により、  
2日間停止。その後、冷却活性炭を  
通さない空気を入れた。

## (b) day=26~31

冷却活性炭を通した。冷却器が故障。

## (c) day=32~60

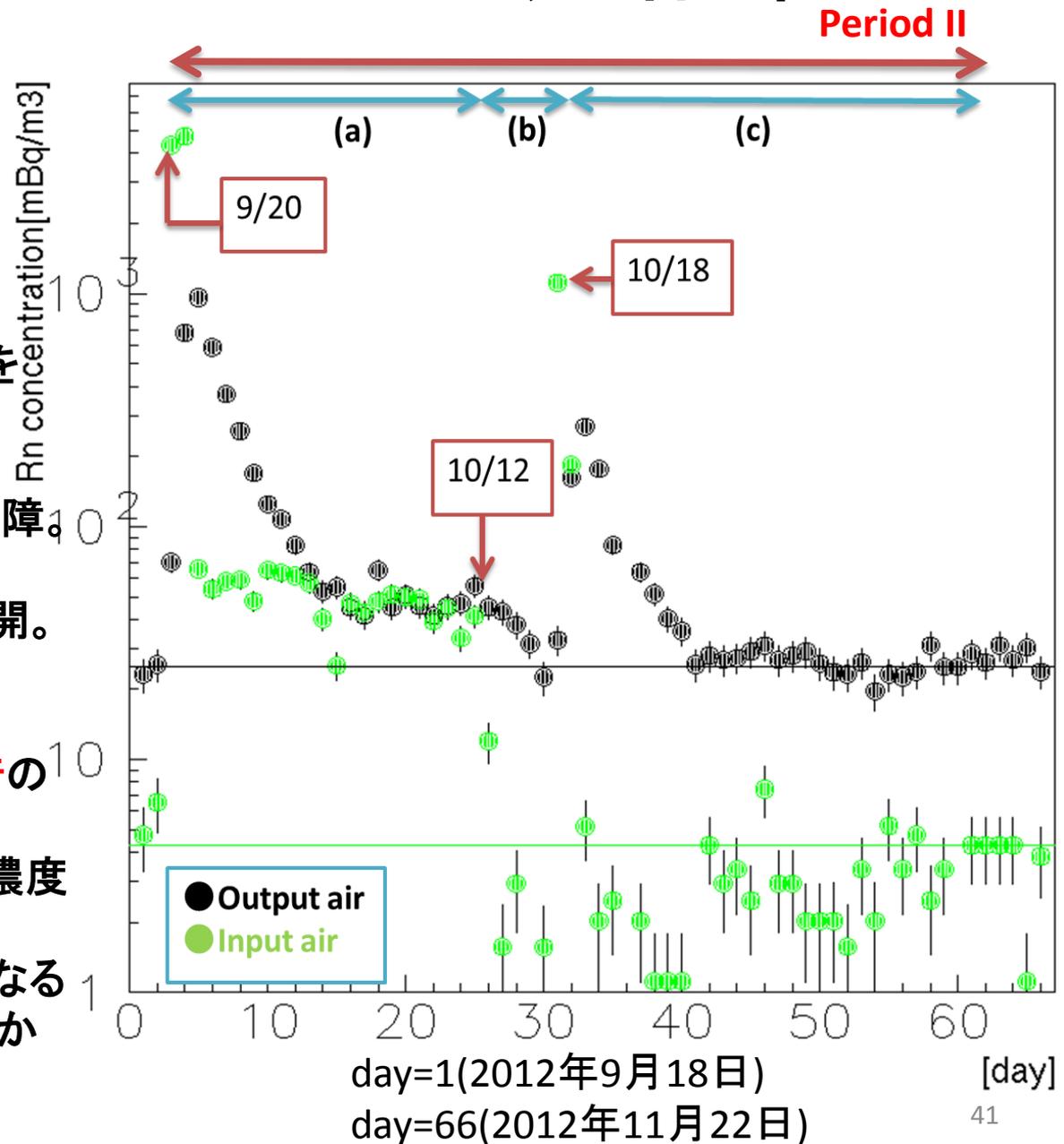
1度運転を止め、正常な状態で再開。

## ○測定結果

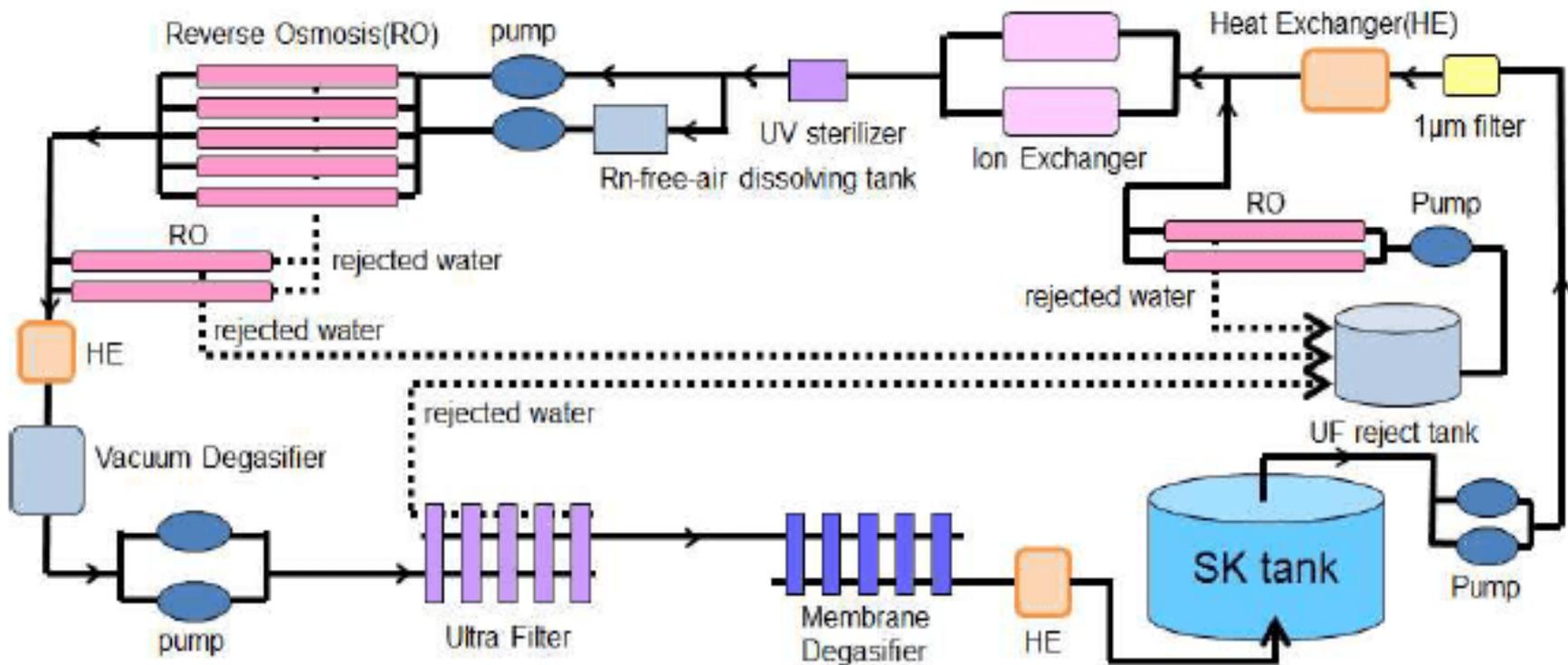
(1)活性炭を通さない場合、**約10倍**の  
濃度の空気が送り込まれる。

(2)運転を再開すると、Input airの濃度  
は**すぐに**元の水準に戻る。

(3)一方、空気層の濃度が1度高くなると、  
元の水準に戻るまで**約10日**かかる。



# 純水裝置



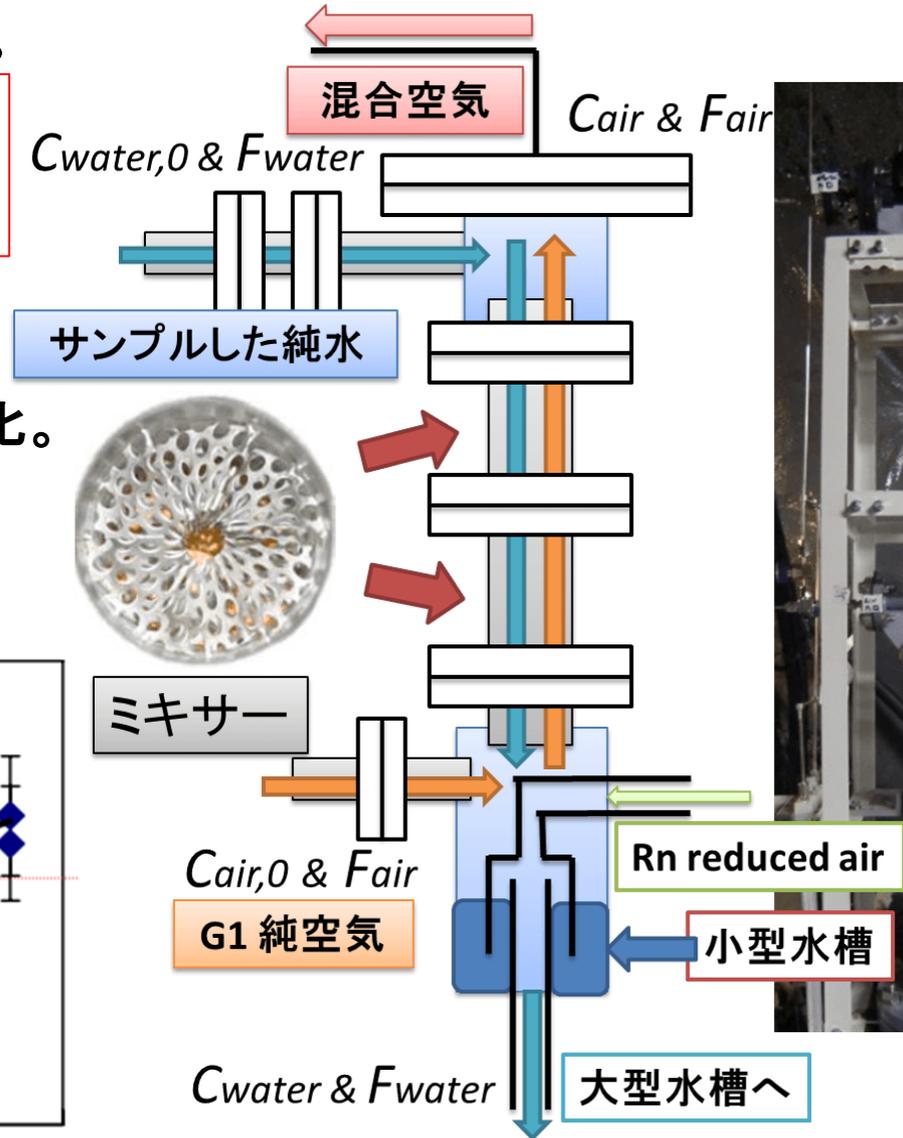
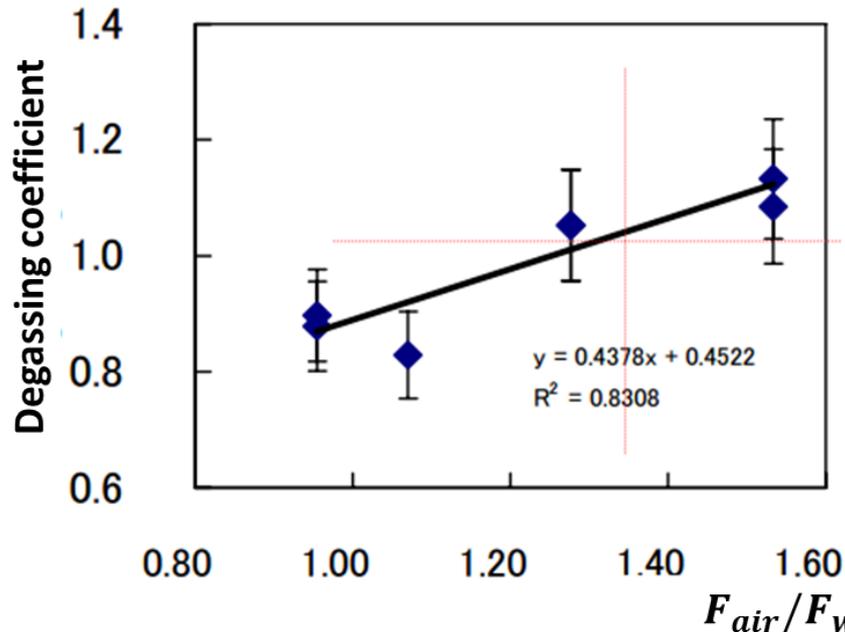
# 気液混合装置の効率

理想的には、以下の式で計算できる。

$$C_{\text{water},0} = C_{\text{air}} \left( \alpha_{\text{Ostwald}} + \frac{F_{\text{air}}}{F_{\text{water}}} \right)$$

今回使用した気液混合装置は、  
純水と純空気の流量の比に  
依存して、気液混合の効率が変化。

$$F_{\text{degas}} = 0.4378 \left( \frac{F_{\text{air}}}{F_{\text{water}}} \right) + 0.4522$$



# 具体的な解析手法

## ◆吸着中のラドンの崩壊

ラドンの半減期は3.8日なので、6時間の濃縮時間は半減期の5%程度になる。濃縮開始から測定開始までの時間を  $t_c$  として、崩壊分を補正する。

$$F_2 = \frac{1}{e^{-\lambda t_c}}$$

## ◆濃縮率

活性炭から脱離した後の空気中のラドン濃度 [ $\text{mBq}/\text{m}^3$ ] は、濃縮過程で使用した純空気の総量  $V$  [ $\text{m}^3$ ] 分の放射能 [ $\text{mBq}$ ] を持っている。

ラドン検出器の体積は約80 L。

以下の補正因子を用いて、気液混合時の混合空気のラドン濃度を算出する。

$$F_1 = \frac{V}{80}$$

## ◆最終的な式

$$C_{\text{water},0} = \frac{C_{\text{air}}}{F_{\text{degas}}} \left( \alpha_{\text{Ostwald}} + \frac{F_{\text{air}}}{F_{\text{water}}} \right) = \frac{F_1 F_2}{F_{\text{abs}} F_{\text{deg}} F_{\text{degas}}} \left( \alpha_{\text{Ostwald}} + \frac{F_{\text{air}}}{F_{\text{water}}} \right) C_{\text{degas}}$$

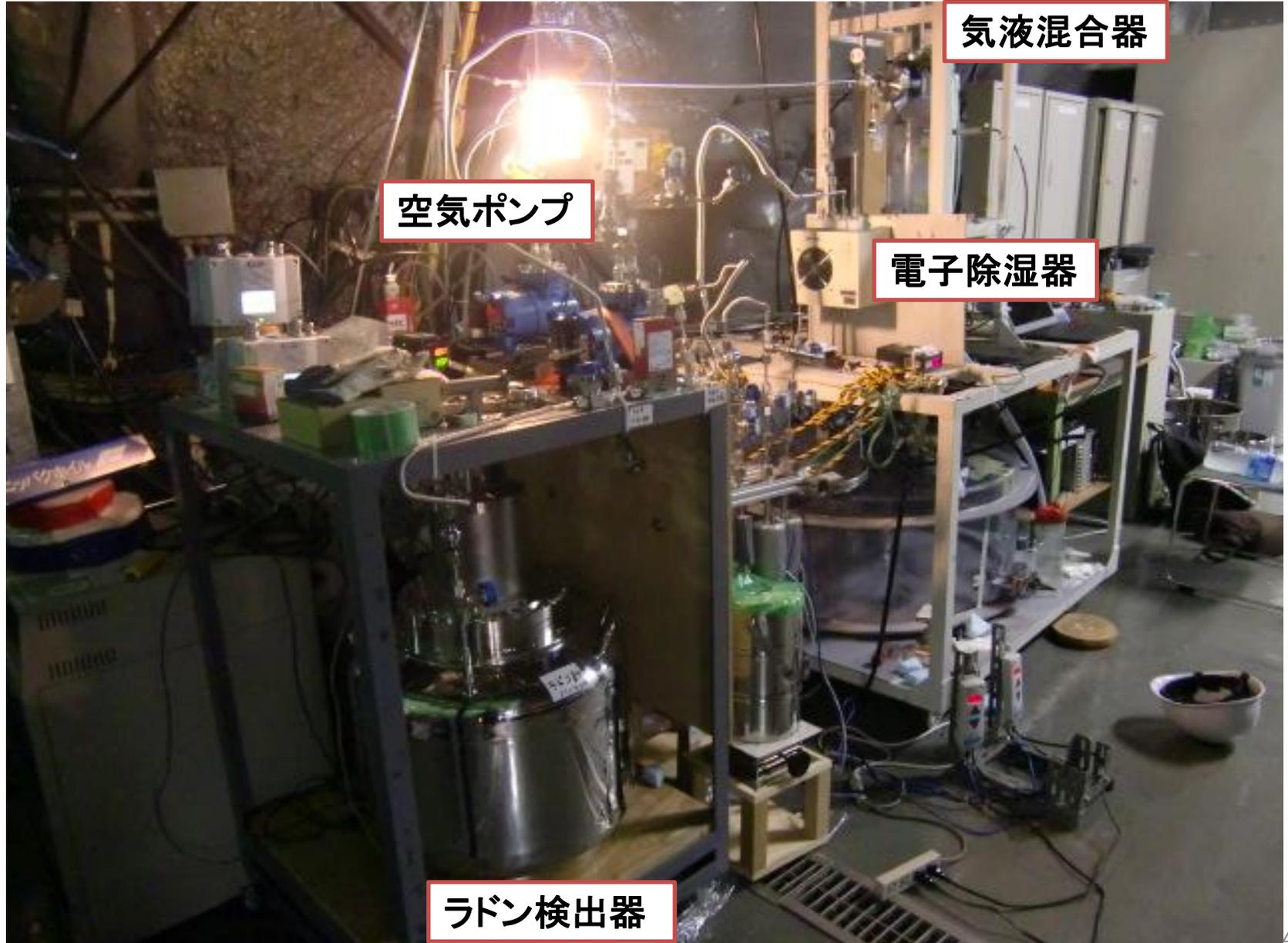
# 実際の測定系

気液混合器

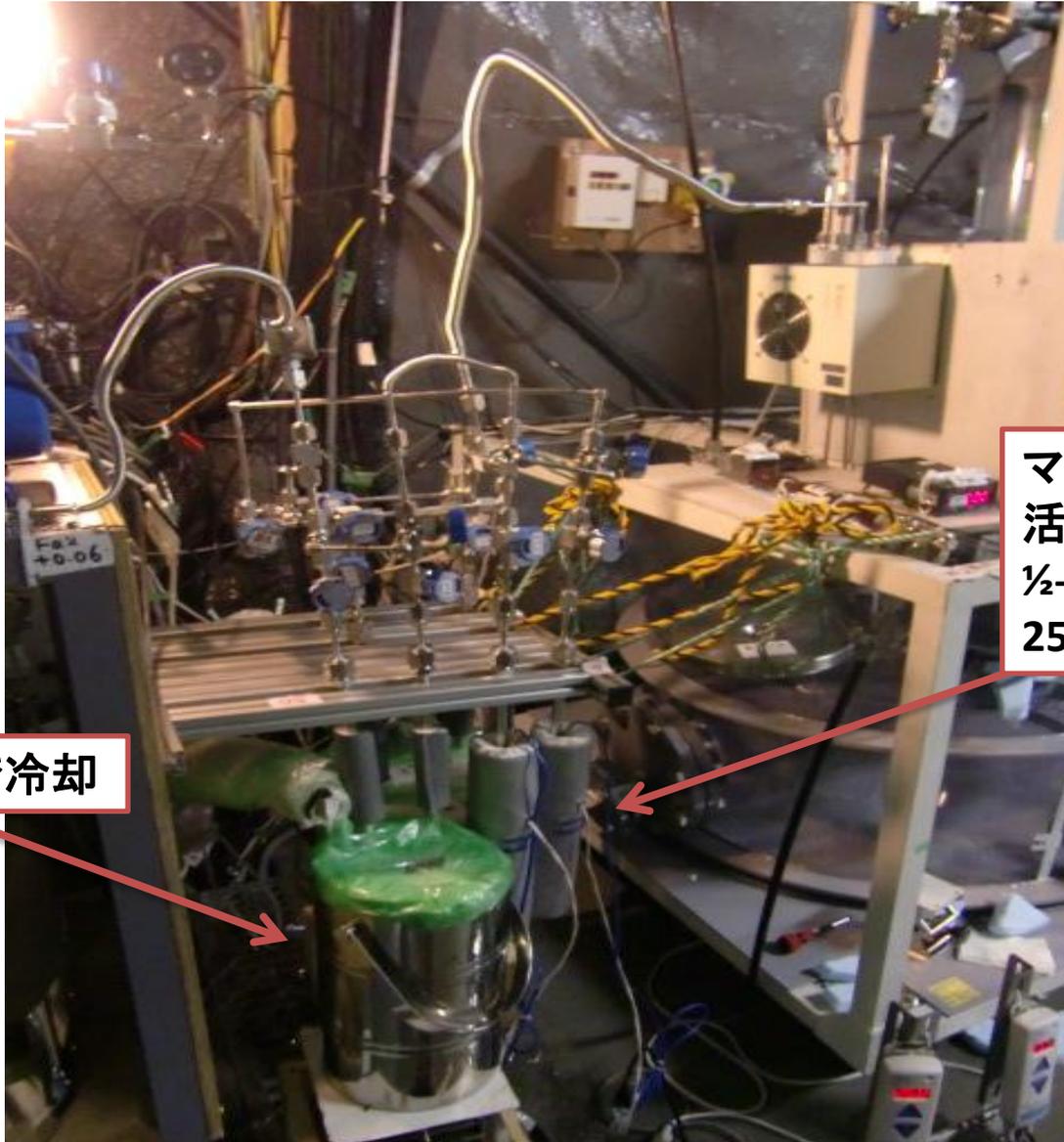
空気ポンプ

電子除湿器

ラドン検出器



# 加熱しているとき



マントルヒーターを  
活性炭の入った  
½-inchのU字管に巻く  
250°Cで加熱

エタノールで冷却