



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

Measurement of radon concentration in super-Kamiokande's buffer gas

Y. Nakano^{a,*}, H. Sekiya^{b,c}, S. Tasaka^b, Y. Takeuchi^{a,c}, R.A. Wendell^{d,c}, M. Matsubara^e, M. Nakahata^{b,c}^a Department of Physics, Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan^b Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, Gifu 506-1205, Japan^c Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), The University of Tokyo Institutes for Advanced Study, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan^d Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan^e Information and Multimedia Center, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan

ARTICLE INFO

Keywords:

Radon
Super-Kamiokande
Solar neutrino
Electrostatic collection

ABSTRACT

To precisely measure radon concentrations in purified air supplied to the Super-Kamiokande detector as a buffer gas, we have developed a highly sensitive radon detector with an intrinsic background as low as 0.33 ± 0.07 mBq/m³. In this article, we discuss the construction and calibration of this detector as well as results of its application to the measurement and monitoring of the buffer gas layer above Super-Kamiokande. In March 2013, the chilled activated charcoal system used to remove radon in the input buffer gas was upgraded. After this improvement, a dramatic reduction in the radon concentration of the supply gas down to 0.08 ± 0.07 mBq/m³. Additionally, the Rn concentration of the in-situ buffer gas has been measured 28.8 ± 1.7 mBq/m³ using the new radon detector. Based on these measurements we have determined that the dominant source of Rn in the buffer gas arises from contamination from the Super-Kamiokande tank itself.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

Measurement of radon concentration in super-Kamiokande's buffer gas

スーパーカミオカンデのバッファー気体におけるラドン濃度測定

Abstract: 概要

スーパーカミオカンデ検出器にバッファー気体として清潔にした(purify)空気のラドン濃度を精密に測定するために、 0.33 ± 0.07 Bq/m³と同じくらい低い固有の(intrinsic)背景雑音を持つラドンに高い感度を持つ検出器を開発した。この論文では、スーパーカミオカンデの上のバッファー気体の測定と監視のための機能の結果と同等な、この検出器の建造(construction)と較正を議論する。2013年3月、バッファー気体内部にラドンを除去するために使用した冷却(chilled)活性炭(activate charcoal)システムをアップグレードした。改善した後、提供したガスのラドン濃度の劇的な減少(reduction)は 0.08 ± 0.07 Bq/m³に低下した。加えて、本来の場所のバッファー気体のラドン濃度は新しいラドン検出器を使用して 28.8 ± 1.7 Bq/m³が測定された。これらの測定に基づいて、スーパーカミオカンデのタンク自身からの汚染からバッファー気体のラドンの支配的な源が発生すると決定できた。

1. Introduction: 導入

スーパーカミオカンデ(Super-K)は50,000 tの超純水と荷電粒子がこの検出器体積を横切った(traverse)ことによって生成する光を観測する11,129本の20インチ直径の光電子増倍管を含んだ水チェレンコフ検出器である[1, 2]。大気、太陽内部(solar interior)、そして宇宙で生成されたニュートリノの相互作用を研究するために、日本の岐阜の地下1,000 m(水換算2,700 m)に検出器は置かれた(situate)。この深さで宇宙線背景雑音は大きく抑制されていることで、Super-Kは検出器の水の電子と弾性的に散乱する⁸B太陽ニュートリノ($E_\nu \leq 15$ MeV)によって生成された反跳電子を観測することができる。これらの反跳するでんしは親ニュートリノの方向を保存するとして、これらの測定は”太陽ニュートリノ問題”に解決としてニュートリノ振動を立証する決定的な役割を演じた[3]。太陽ニュートリノの我々の理解はそれから劇的な改善をする間[4, 5]、ニュートリノ振動の太陽質量の効果によって引き起こされた(induce)エネルギースペクトラムの歪みの予言(predict)、これをMikheyev-Smirnov-Wolfensteinメカニズム(MSW)[6, 7]という、はまだ完全に確認してない。低エネルギーでWSMの予言によって現在のデータはよく記述されているが(ここでつまり、

高エネルギーも同様に真空振動が支配されている^[8-15]、(ここで質量効果が支配されている^[16-24])、これら2つのエネルギーの状態(regime)の間の遷移領域で電子ニュートリノの生存(survival)確率の形状はまだ決定されていない。現在(at present)、いくつかの代わりとなる(alternative)模型が提案されている。ステライル・ニュートリノ^[25, 26]、質量が変化する(vary)ニュートリノ^[27]、そして非標準模型相互作用^[28, 29]。全て現在の実験データを説明するが、遷移領域で違った予言を与える。これらと標準も MSW の間の違いのため、中間のエネルギー領域で精密な太陽ニュートリノ測定が必要である。

同時に、Super-K の地下の場所は主な鉱山の空気、水道、そして周りの岩の放射性元素によって生成する同様のエネルギーの背景雑音へ問題(subject)を作る。E≤6 MeV の運動エネルギー領域の主な背景雑音の一つはラドン(²²²Rn)によって生成される電子事象である。これらの背景雑音は検出器の水を連続的に(continuously)循環(circulate)と浄化する(purify)ことによって、そしてバッファー気体としてタンク水と検出器と定義したスチール構造の上の間の浄化した気体の層を設ける(supply)ことによって部分的に鎮め(抑制)した(mitigate)^[1]。これらのシステム^[2]と Super-K のフロントエンド回路の両方の最近の改善は電子運動エネルギー3.5 MeV のエネルギー閾値の解析^[19]で結果を出したが、MSW スペクトラム歪みの観測のために閾値はさらに下げなければいけない。現在、この閾値は解析で4-6 MeV エネルギー領域にあると評価された Rn の数 Bq/m³ によって制限される^[31, 32]。閾値減少はこの濃度を0.1 mBq/m³ 未満に削減することが要求され、そして潜在的なラドン線源の慎重な解析が動機付けられている。この論文では、精密測定のために設計された新しい検出器を使用して検出器のバッファー気体層の Rn 濃度の研究を議論する。

この論文は以下でまとめられる。第2章では新しい80 L Rn 検出器の設計とこのデータ収集システムを記述する。加えて、検出原理と典型的なパルスハイトスペクトラムが議論される。第3章は、開発された較正セットアップと較正結果を示す。第4章は本質的な(intrinsic)背景雑音レベルが手短かに(briefly)議論される。第5章は、バッファー気体と同じように改善された Super-K の Rn を削減した空気システムのラドン濃度を測定するためのラドン監視システムが記述される。そして、2012年12月1日から2014年4月9日の取得した測定の結果を提供する。最後に、第6章でこの研究をまとめ、この将来の見通し展望(prospect)が議論される。

2. Ultra sensitive 80 L Rn detector : ウルトラ高感度 80 L Rn 検出器

Super-K で前回の Rn 測定は70 L^[33]と700 L^[34]のサイズの検出器を使用していたと同時に、これらの測定許容量の制限は現在の研究^[35]で80 L 検出器の開発を導いた。前回と同じように(Like its predecessors)、検出器体積に充填しているサンプル空気の Rn 濃度は Rn 崩壊生成、つまり ²¹⁰Po (5.30 MeV), ²¹⁴Po (7.69 MeV), そして ²¹⁸Po (6.00 MeV) を静電的に捕集(trap)することによって測定し、そして PIN フォトダイオードを使って、これらのそのあとの α 崩壊を観測する。3つの娘核たちの最大の α 線のエネルギーと正殿収集の高い効率のどちらもで、この研究では ²¹⁴Po を1次信号として使用する。サンプルの Rn 濃度はこの娘核の観測された α 崩壊の数に比例する。

2.1. Structure of the new radon detector : 新ラドン検出器の構造

検出器はベッセルの上の突起(フランジ*)(flange)に貫通接続で取り付けられた(mount)セラミックに接続された PIN フォトダイオードを持つ 80 L ステンレス鉄の真空ベッセルで成している。フォトダイオードは5 cm まで貫通接続の下から埋め合わされている。高電圧ドライバーと増幅の電気回路構成(circuitry)はこの突起(フランジ)の頂上に(atop)置かれて(rest)、そして貫通接続の外部終端に接続されている。この構造で、PIN フォトダイオードの p 層は-1.9 kV のバイアスがかかっている(のちにセクション 3.3 で記述する)。ベッセルはグラウンドに保持されていると同時に、図1は検出器の構造を示す。

これらの前の検出器の構造で使用された素材によってこうむった(suffered)測定限界は、新しい検出器の設計において大きく乗り越えた(overcome)。例えば(for instance)、ガスケットに使用される Viton® の O-リングは金属ガスケットの現在の設計に置き換えた。なぜなら Viton® は Rn を発すると知られているから。同様に、最初の設計で使用したアクリルのふちは、10 kPa から 1.0×10^{-5} Pa のベッセルの真空の限界を下げるために金属ガスケット(CF フランジ)のナイフエッジのフランジに置き換えた。検出器自体に固有の背景雑音をさらに削減するために、ステンレス・ベッセルの内部表面は目の荒さが0.9 ミクロンで電気研磨されている。前の700 L 検出器の性能向上のために有利で、この大きい表面を電気摩擦することと100 cm の CF フランジでのフィットはコストと労力(labor)がどちらも集中する(intensive)。この原因で、提供するワークは小型の70 L 検出器にこれら改善(upgrade)の能力(capability)を証明するために動めた。

現在の設計では、PIN フォトダイオードは18 mm × 18 mmの次元をもつ Hamamatsu-S3204-09 にアップグレードされ、これはフォトダイオードに叩く (strike) α 線のエネルギー損失を減らすために PIN-photodiode の窓は取り除かれた。高電圧の貫通接続からの Rn 放出は加えて高純度のアルミニウム (Al_2O_3) にこのセラミックを切り替えることによって減らした。

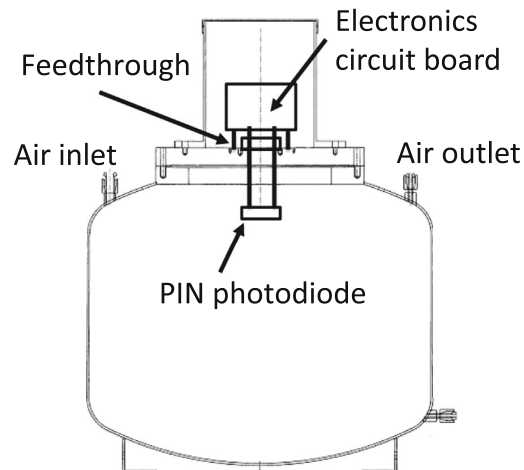


図 1. 80 L Rn 検出器の構造

#フランジとは円筒形あるいは部材からはみ出すように出っ張った部分の総称。同じような形態ではあるがまったく異なる用途のものがいろいろあり、それぞれの分野で「フランジ」と呼ばれる。それぞれの分野の「フランジ」は相互にほとんど関連性はないが、つばのような形状をしている点では一致する。

2.2. Electronics circuit and data acquisition system: 電気回路とデータ収集システム

80 L Rn 検出器の読み出し回路は先ほどの(earlier)検出器[34]に使用されていたものと同じである。しかし、前の電荷に感度のある前置増幅器(preamplifier), Clear Pulse CS513-1, は CS515-1 モデルに置き換えた。Clear-pulse 社で動作した時に新しいデータ収集システムを開発した。これは Rn 検出器からの信号を記録するだけでなく、サンプル空気の流れや、露点 (dew point)、温度などの Rn 検出器の効率に与えるいくつかの環境パラメータも監視した。データロガー(data logger)*の CP 80278 は1つの CPU ボード (CP1233)と2つの整形増幅ボード (CP 4485)、2つの波高(pulse height)解析(analyzer)ボード (CP1234)、そして2つのアナログ-デジタル変換器(ADC)ボード (CP 1235)から成している。

*データロガーとはセンサにより計測・収集した各種データを保存する装置のこと。記録計、データレコーダーとも呼ばれる。

2.3. Radon spectrum and event selection

図 2 に純空気(4章を参照(c.f.))でバックグラウンド run からの積分された波高スペクトラムの実施を示す。 ^{222}Rn と ^{220}Rn の娘のいずれかからの起源のスペクトラムの5つのピークがある。ここで、 ^{210}Po 、 ^{214}Po 、 ^{218}Po は ^{222}Rn の崩壊生成(核)と同時に、 ^{212}Po と ^{216}Po は ^{220}Rn の崩壊生成核である。 ^{214}Po 信号(7.69 MeV)より下に示された測定で ^{222}Rn 濃度を計算するために使用した。なぜなら、このピーク値に近いエネルギーの α 線線源がないから；つまり、類似したものが ^{216}Po からの 6.78 MeV の α 線である。加えて、 ^{214}Po は ^{218}Po より収集効率が低いことが知られているから [33-35]。

波高スペクトラムにおいて ^{214}Po 信号領域は次の判断基準(criteria)を使用して決定した。PIN フォトダイオードの分解能によって ^{216}Po の事象によるコンタミ(汚染、混入、入り込み, contamination)を防ぐために、信号領域の下限境界は ^{216}Po 信号のピーク位置の上 5 ADC チャンネルとして定義された。 ^{214}Po の信号の高いエネルギーの損失は上限を使って防ぐ、 ^{214}Po ピーク位置の上 5 ADC チャンネルを選んで。これらのカットは ^{216}Po スペクトラムのテイルからの最小のバックグラウンドで信号の 100%に近い選択効率を与える。しかし、 ^{214}Po 信号をより蓄積するために選択基準を改訂した。論文からの汚染は以下で議論された他の系統誤差を比較して、不確かな測定の線源が無視できると示す。前の公刊[35]で信号領域を定義

している ADC チャンネルのレンジが他の基準を使用して決定され、そして 90%のみの ^{214}Po 検出効率の結果を出した。図 2 に示したスペクトラムにおいて、 ^{214}Po α 崩壊の信号領域は 158-178 ADC チャンネルをとった。これはエネルギー 7.03–7.92 MeV に相当する。

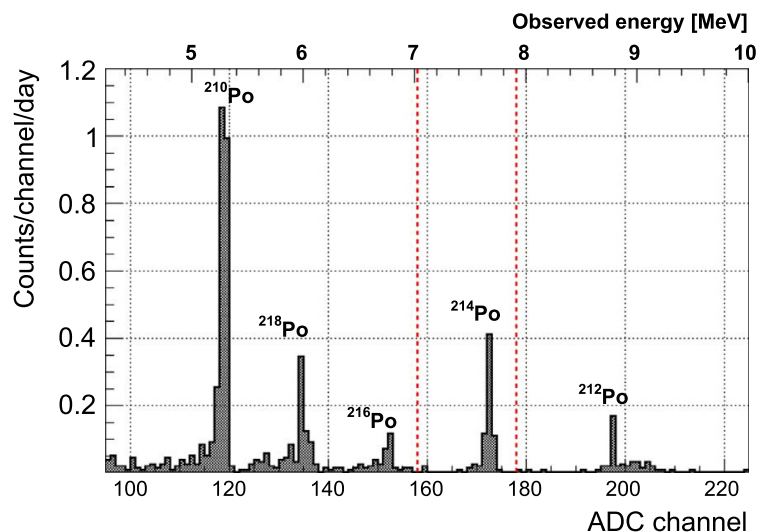


図 2. ^{222}Rn と ^{220}Rn 娘核の典型的なエネルギースペクトラム。ADC チャンネル 158-178 の領域は赤破線によって示され、実際の検出器における ^{222}Rn 濃度を計算するために使用された ^{214}Po 信号領域として定義されている。(図の色の解釈は web 版を参照せよ。)

3. Detector calibration

3.1. Calibration factor

観測された ^{214}Po のカウント頻度から ^{222}Rn 濃度を計算するために、80 L Rn 検出器は較正されなければいけない。較正係数(C_F)は次で定義される：

$$C_F[(\text{counts/day})/(\text{mBq/m}^3)] = \frac{\text{measured } ^{214}\text{Po signal rate}}{^{222}\text{Rn concentration}}$$

ここで、この分子(numerator)は単位 counts/day で PIN フォトダイオードによって測定された ^{214}Po 信号頻度と同時に、分母(denominator)は単位 mBq/m³ で決定された ^{222}Rn 濃度である。 C_F は次の測定のコアになり、そしてその最初の値は以下で記述するとしてよく測定された放射能の Rn 線源を使って較正される。

3.2. Calibration setup for 80 L Rn detector

神岡観測所で構築された較正システムは図 3 に示す。この較正システムを使用して、 C_F の高電圧と湿度(humidity)の依存性の両方が測定された(文献^[35]も見よ)。

このシステムは 80L Rn 検出器、標的空気における露点温度(dew point)コントロールするための冷却浴槽、空気循環ポンプ、露点温度メーター(VAISALA, DMT340)、質量流量コントローラー(HORIBA, STEC) リファレンス・ラドンモニター(ionization chamber, SAPHYMO Alpha GYARD PQ2000)、そして ^{222}Rn 線源(PYLON RNG.)で構成されている。較正の間ずっと、199 Bq \pm 4%の放射能を持つ ^{226}Ra は全体の(entire)システム範囲内(within)で放射平衡を維持する(maintain)ために使用された。システムの露点温度をコントロールするために熱交換として 2つの 0.5 インチのステンレス U 字パイプが使用された。これらは冷却装置(refrigerator)(THOMAS, TRL-107SLC.)によって与えられた温度制御を持つエタノール浴槽の中に置かれた。全体のシステムを通る空気の温度と露点温度は露点温度メーターによって監視される。配管から ^{222}Rn の放射(emanation)を抑制するために、システムで使用された全てのパイプは電気研磨されたステンレス製の鉄(SUS EP tube)で作られた。すべての接続は空気漏れと環境空気からの汚染を防ぐために VCR®ガスケットを使用した。商業的に入手できる G1 グレードの高純度の空気(不純物の混入は 0.1 ppm 未満)が封入空気自身の較正において、 ^{222}Rn バックグラウンドを最小するために使用された。封入空気はマス・フローコントローラによって 1 気圧で 0.8 L/min の流量頻度に制御されて連続的に循環される。システムのポンプはこの流量頻度での空気循環だけが許容量であると言及されるはず。

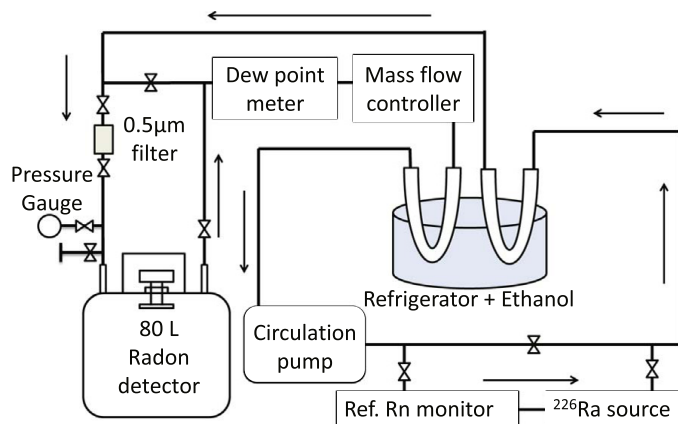


図3. 較正システムの概略ダイアグラム。矢印は空気の流れの方向を示す。

3.3. High-voltage dependence of the calibration factor : 較正係数の HV 依存

高圧電圧供給によって PIN フォトダイオードとステンレス製鉄のベッセル間に電場が形成されるに従って、静電捕集の効率は供給電圧に直接依存する。それに応じて (accordingly)、検出器の較正は様々な供給電圧でこの依存性のテストを行った (conduct)。最初に、全体システムはリファレンス Rn モニターと ^{226}Ra 線源を除いて 1.0×10^{-5} Pa に排気して落とした。次に、このシステムは G1 グレードの純空気を 1 気圧に満たされ、そして ^{226}Ra の前と後ろのバルブが開かれ、そして空気循環が開始された。最後に閉じたシステムが放射平衡に達した後、Rn 濃度をリファレンス Rn モニターによって測定し、そして 80 L Rn 検出器での ^{214}Po のカウント数を C_F の決定のために比較した。供給された高電圧はこの較正の間、-0.2 から -2.0 kV へ変更された。図4に適用した C_F の高電圧依存性を示す。較正の間、露点温度は 0.0021 g/m^3 に測定された値で維持された (maintain)。

C_F は -2.0 kV で飽和してないが、この電圧を他の較正と測定のために選んだ。なぜなら、適用できる最大の電圧だから。しかし、回路のこうであるドライバーも PIN フォトダイオードに反対のバイアスを与えている [34]、これは供給された高電圧の増加に従い増加する。バイアス電圧は供給電圧 -2.0 kV で、-0.1 kV (フォトダイオード耐久の限界) である。この設定は従って検出器の電場の生成において -1.9 kV 与えられている。

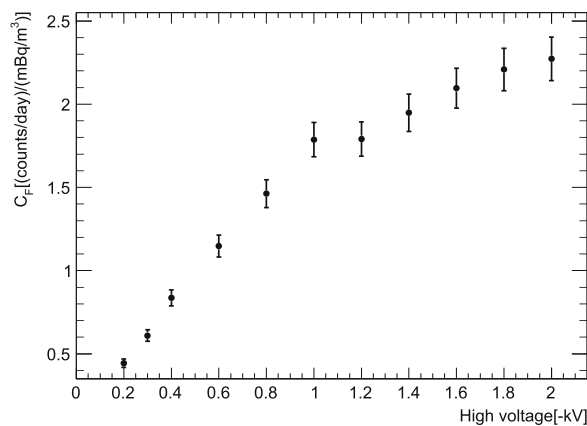


図4. 純空気の静電捕集法の C_F の高電圧依存性。これらのデータは絶対湿度 0.0021 g/m^3 で得られた。棒は統計・系統誤差の両方を示す。

3.4. Humidity dependence of the calibration factor : 校正係数の湿度依存性

プラスに帯電した ^{222}Rn の娘核は空気中の水分によって捕獲され中和されるため、Rn 検出器の検出効率は湿度にも依存する^[36]。したがって、 C_F の湿度依存性を決定するための校正測定は同じセットアップを使って、そして HV 依存性校正のために使用したセットをしながら行なった。放射平衡にこのシステムが達した後、露点温度は全体システムを通して絶対湿度を変える (vary) ために冷蔵庫 (refrigerator) によって制御された。図 5 に空気における 80 L Rn 検出器の C_F の湿度依存性を示す。これは予想して (expect) より高い絶対湿度での減少がみられる。前回の 70 L 検出器の CF は 1.5 g/m^3 以上で一定になるとわかっていたと同時に、現在の検出器はこの値以上でも湿度依存性を実証した (あった)。前の設計に関して、現在の検出器の 10^{-1} g/m^3 以上の湿度でおおきい C_F は、高い真空のその CF フランジが与えた結果である。データは経験上の関数^[37] $C_F = 2.25 - 0.29\sqrt{A_H}$ によって最もよく説明できるとわかった、ここで A_H は絶対湿度である。

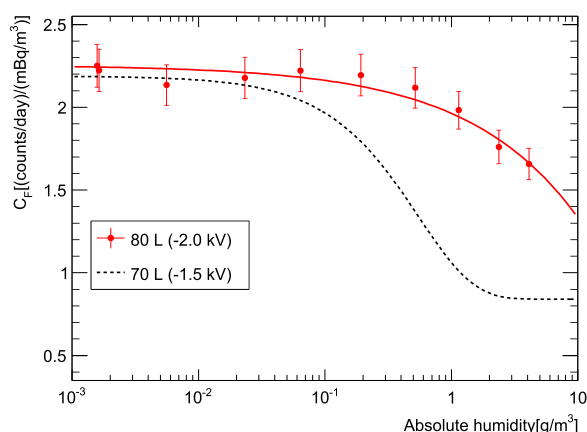


図 5. C_F の湿度依存性 (赤)。80 L Rn 検出器の構成データは -2.0 kV でとった。エラーバーは統計と系統誤差。赤実線はベストフィット関数を示す。黒破線は古い結果を示し、これは -1.5 kV での 70 L Rn 検出器によって得られた^[33]。(色彩は web 版を参照せよ)

3.5. Uncertainty budget for the detector calibration : 検出器校正における不確定の見積もり

系統的な不確定性のいくつかの源は C_F の校正で現れる。リファレンス・モニターは $\pm 5\%$ の不確定性を持つ。製造元の説明書 (manufacturer's document) によると、Alpha GUARD 計算の不確定性は $\pm 3\%$ 。しかし、この不確定性の確認のために、Alpha GUARD モニターと $\pm 5\%$ 以内を一致する (agree) ために見たことによって、その測定で線源の放射平衡での測定システムの予想された Rn 濃度と比較した。結果として、この値は提供する解析においてリファレンス・モニターの不確定性を使用した。加えて、露点温度メータは $\pm 2\%$ の不確定性を持ち、校正するセットアップの合計体積の見積もりから不確定に増加する、例えば (for instance)、フレキシブル・ケーブルの体積の不確定性、これは $\pm 2\%$ をとる。これらの不確定性に基づいて、合計の系統的な不確定性はそれぞれの C_F 測定において $\pm 5.7\%$ をとった。この校正における不確定性は表 1 にまとめている。

Table 1
Summary of systematic uncertainties.

Source	Measured value	Assigned standard uncertainty
Reference Rn monitor	2.2 kBq/m^3	$\pm 0.1 \text{ kBq/m}^3$
Dew point meter	$-75 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm (2 \sim 3) \text{ }^\circ\text{C}$
Estimation of the whole volume	85 L	$\pm 2 \text{ L}$
Subtracting background	0.33 mBq/m^3	$\pm 0.07 \text{ mBq/m}^3$

4. Intrinsic background level : 本質的なバックグラウンド・レベル

これらの較正の後、80 L Rn 検出器自身への本質的な(intrinsic)バックグラウンド・レベルを評価した。データは Rn 線源を置かないで 156 日間以上とった。この期間(time period)、平均絶対湿度は 0.078 g/m³ で、 0.74 ± 0.07 counts/day (統計的不確定のみ)が観測され、これは ²¹⁴Po の崩壊に相当している :

$$C_{\text{detector,BG}} = 0.33 \pm 0.07 \text{ mBq/m}^3.$$

この本質的なバックグラウンド・レベルは前の 70 L 検出器(2.4 ± 1.3 counts/day)^[33]より低く、ファクター 3 まで(低い)。検出器の検出限界の特徴は $L_c = 1.64 \times \sigma_{BG} / C_F$ [mBq/m³]として見積もられ、これは 0.54 mBq/m³ で結論付けられた、1 日の測定で。測定からのエネルギースペクトラムは図 2 に示され、後の章でさらに議論される。

5. Measurement of the Rn concentration in the Super-K buffer gas layer

: super-K のガス層における Rn 濃度の測定

5.1. Introduction

Super-K タンク内において、地震の間にこの水の動きからタンク密閉(seal)の崩壊・故障を防ぐために、水の表面とタンクのトップの間にバッファーガスがある^[1]。バッファーガスの層の高さは 60 cm で、この全体の体積は 753.6 m³である。

Rn を減らした空気システム[34]は super-K バッファー気体に対する純化した空気を供給して、検出器座標(x, y)=(+18.382 m, -4.242 m)の注入口(inlet)からタンクにそれを注入している。このシステムはガス流量頻度 11 m³/h で、バッファーガスの圧力を 1 気圧に関して+0.3 kPa で維持している(maintain)。Super-K タンクのトップは実験ホールのドームに露出(expose)されているから、ここで Rn 濃度は 40-100 Bq/m³、だからこの仕方(manner)においてバッファーガスの連続的なバージ・一掃・清める(purge)はバッファー層の中への Rn 放射を抑制するために必要である。

5.2. Rn-reduced air system improvements : Rn を減らした空気システムの改善

Super-K の Rn を減らした空気システムは原料(throughput)の空気からの Rn を取り除くために冷却活性炭の 50L を使用している。-60 度あたりの温度いかに優位に活性炭の Rn トラッピング効率が增加することが知られているので^[39]、このシステムは 2013 年 3 月に前の設計においてこの閾値の下へ-40 度から下の冷却力で下げるため^[34]にアップグレードされた。それをするためにこのシステムの冷却材は 3 MNOVECTM 7100 に変え、この冷蔵庫はアップグレードされた。

5.3. The monitoring system

図 6 にバッファーガスの Rn 濃度の測定に使用したアップグレードした測定システムを示す。このシステムを使用して、活性炭冷却システムのアップグレード前と後の両方のラドン濃度が測定された。2 つの 80 L Rn 検出器は Super-K タンクのトップに設置され、一つはタンクに供給された気体(入力空気)の Rn 濃度を測定し、そして他方はバッファー層からのサンプル気体(出力気体)を測定した。出力気体はサンプリングポート(x, y)=(-14.494 m, +12.019 m)から検査された(sample)。これはバッファーガス注入口から約 23 m 離れている。入力と出力のどちらの空気もマスフローコントローラーによって 0.8 L/分にセットした流量で循環ポンプを使用して検査した。

出力気体の絶対湿度は 5 g/m³以上なので、 C_F 較正の間に測定していない点で、熱電性除湿機(KELK DH-209C)が図 6 に示すが、湿度を減らすために Rn 検出器の直前に導入された。除湿機が導入した後の絶対湿度は約 3.5 g/m³であった。

5.4. Results

2012 年 12 月 1 日にバッファーガスの Rn 濃度のモニターを開始した。図 7 に結果はまとめられ、これは検査された気体の絶対湿度、同じ期間の間は図 8 に示す。断続する問題によるデータのギャップは、研究室の広域な停電(power failure)、ネットワーク接続問題、データ収集の問題を含む。2013 年 5/31 から 6/11 の期間の間、Rn を減らした空気システムの自動式バルブの失敗が冷却された活性炭システムのアクシデンタルに迂回した(bypassing)バッファーガスが結果として生じた(resulted)。これは次々に(in tern)この期間入力と出力の空気どちらも Rn 濃度が生じ増加する。2013 年 9/16 に、落雷(thunder storm)の結果

停電が生じた。そして、活性炭が4時間以上における冷却への問題(subject)はなかった。システム実行を再び始めた(resume)後、入力気体の絶対湿度は前よりも高いが、幸運にも(fortunately)、Rn濃度は変わらなかった。加えて、2013年11月9日に、研究室広域の停電(outage)計画がRn削減した空気の循環システムの電力をカットした。システムを再開した時、バッファー層に純化されていない空気が偶然(accidentally)供給され、数日間増加するために出力気体にRn濃度が生じた。

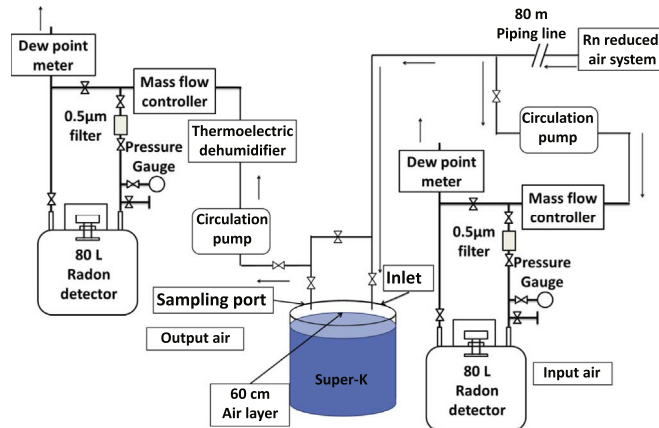


図6. Super-K バッファーガスのためのRn濃度測定モニターの概略図

90日の期間以上、Rn削減した空気システムに完全されたRn濃度の入力と出力はそれぞれ、

$$C_{\text{Input,before}} = 3.5 \pm 0.3 \text{ mBq/m}^3 \text{ and}$$

$$C_{\text{Output,before}} = 28.9 \pm 1.7 \text{ mBq/m}^3,$$

と測定された。これらの値は $C_{\text{detector,BG}}$ を引いた後に与えられている。出力空気のRn濃度は改善の前と後のどちらも入力空気より同等かそれ以上であることを言及すべき、これはバッファーガス層がRnに汚染されていることを確認する。つまり、super-Kタンク内にRn源が存在する。このソースの起源は識別できていないが、最も有望な候補は検出器の構造物から放射されるものである。

2013年12月1日から2014年4月9日のデータはRn削減空気システムの改善後のRn濃度の評価に使用された。この期間の間、Rn削減空気システムの制御とデータ収集は安定だった。システム改善後の131日とった測定の結果は

$$C_{\text{Input,after}} = 0.08 \pm 0.07 \text{ mBq/m}^3 \text{ and}$$

$$C_{\text{Output,after}} = 28.8 \pm 1.7 \text{ mBq/m}^3,$$

であった、これもBGを差っ引いている。入力空気の測定におけるエネルギースペクトラムは図9に示す。供給されたバッファーガスのRn娘核が空気システムアップグレードに従いファクター4(4倍)まで削減することを見ることができる。したがって、新しい-60度冷却された活性炭はRn削減に効果的に働き、そして生成ガスは十分Rnフリーになった。一方、改善後の出力ガスのRn濃度は変わっていない。このSuper-Kタンクからの汚染の兆候はバッファーガスのRnのソースの支配的だ。

BGスペクトラムの ^{210}Po のカウントレートが他の測定より大きいことを言及すべき、なぜなら、最後に実施したから。この増加は ^{222}Rn から正に帯電した ^{210}Pb に崩壊連鎖が検出器の測定履歴を超えてPINフォトダイオードの表面に蓄積されたためらしい。これは22年の半減期で崩壊し、観測された ^{210}Po を生成する、増加したカウント頻度は従って ^{222}Rn 娘核が一旦収集されて、フォトダイオードに残っていることが示唆される。

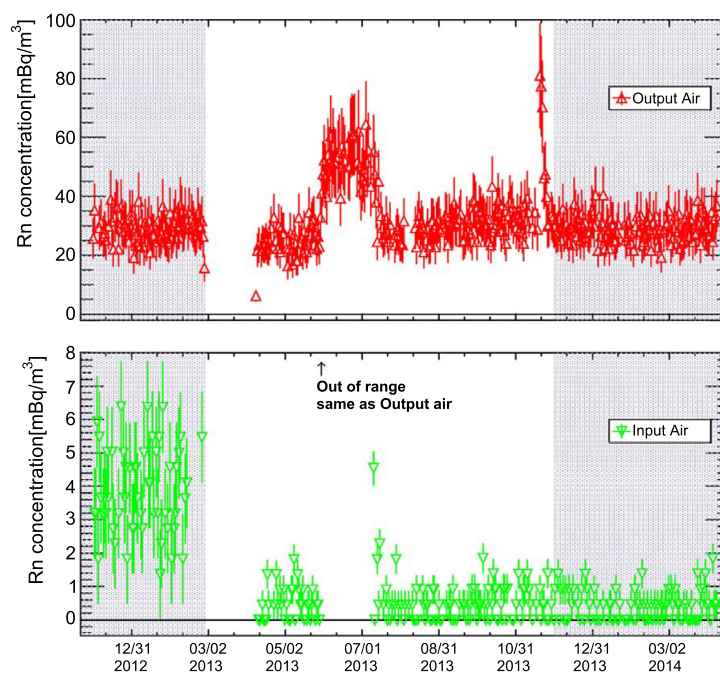


図7. Super-K 検出器のバッファーガス層の入力(ライト緑)、出力(赤)のRn濃度。データセットは2012年12月1日から2014年4月9日。影領域からのデータはRn削減空気システムの改良前と後の濃度解析のために使用した。エラーバーは統計・系統誤差どちらも示している(色彩のためにはweb版を参照して)。

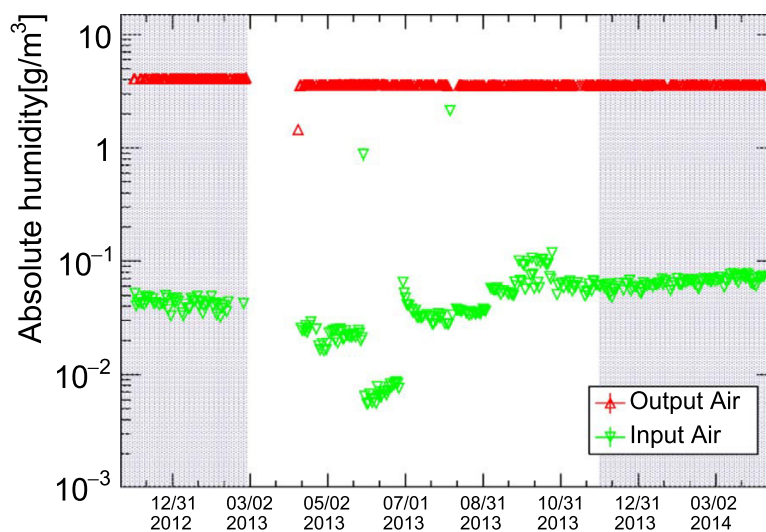


図8. 2012年12月1日から2014年4月9日の入力(ライト緑)、出力(赤)の絶対湿度。影領域からのデータはRn削減空気システムの改良前と後の濃度解析のために使用した(色彩はweb版を参照せよ)。

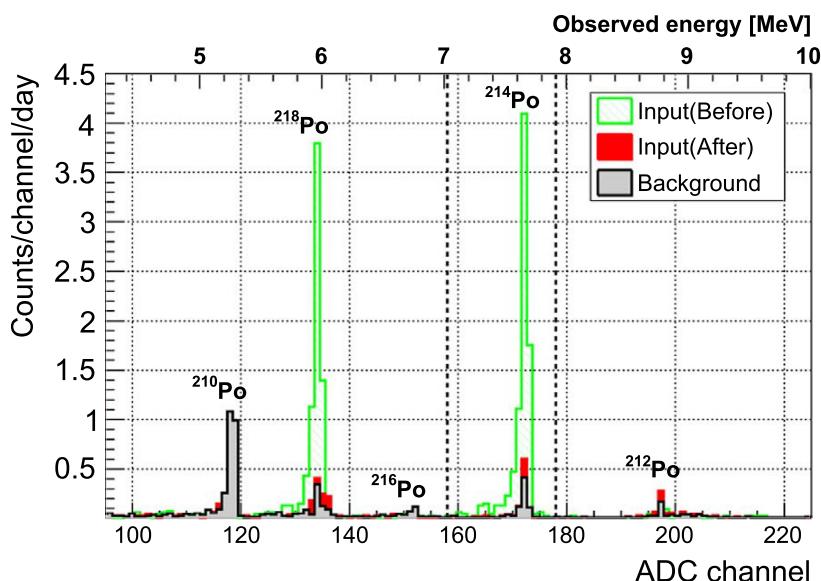


図9. 一つの80 L Rn 検出器を使用した測定スペクトラム。グレー・スペクトラムはバックグラウンド、それと同等にライトグリーン（赤）は入力空気の測定で空気システムの改善前（後）に相当する。この検出器における ^{214}Po 信号領域はADCチャンネル158から178の間のカウントとして定義された。エネルギーにして7.03-7.92 MeVに対応する。セクション2.3の手順記述に基づく（色彩はweb版を参照せよ）。

6. Conclusion and future prospects

Super-Kで使用されたバッファーガスのRn濃度を測定するために、80 L Rn 検出器を改良し、純空気を使用して神岡環境で校正した。検出器の典型的な校正因子は 0.002 g/m^3 で $2.25 \pm 0.13 \text{ CPD}/(\text{mBq/m}^3)$ と 4.1 g/m^3 で $1.66 \pm 0.14 \text{ CPD}/(\text{mBq/m}^3)$ だ。前の設計と比較して現在の検出器は外部に低い本質的なバックグラウンドを持ち、 $0.33 \pm 0.07 \text{ mBq/m}^3$ と測定された。この検出器を使用して、Super-KタンクのバッファーガスのRn濃度は精密に測定された。Rn削減した空気システムへ改良したことに従って、供給するバッファーガスのRn濃度は $0.08 \pm 0.07 \text{ mBq/m}^3$ に減らせた。しかし、バッファーガス層自身の濃度は $28.8 \pm 1.7 \text{ mBq/m}^3$ と測定されて、これはSuper-Kタンクのトップ領域にRn源が存在することを示唆する。

次のステップとして、Super-KのRn濃度を純化した水の測定を開始した、Rn娘核から起因する背景事象を太陽ニュートリノ解析への貢献を評価するために。この目的のために、新しい80 L 検出器に基づいたシステムと純水（レベル $\sim 0.1 \text{ mBq/m}^3$ ）のRn濃度の測定許容を開発した^[32]。システム設計とSuper-Kタンク水の測定の詳細はそのあとの(subsequent)公表で報告する予定だ。80 L Rn 検出器を使用した他のいくつかの応用は進行中で(ongoing)、いくつかの希ガスのRn濃度測定と検出器素材スクリーニングにおける個体素材からのRn放射測定を含んでいる^[40]。

Reference

- [1] Y.Fukuda, et al., Nucl. Instr. Meth. A 501 (2003) 418–462.
- [2] K. Abe, et al., Nucl. Instr. Meth. A 737 (2014) 253–272.
- [3] J.N. Bahcall, Nucl. Instr. Meth. 110 (1973) 381–384.
- [4] J.Hosaka, et al., Phys. Rev. D 73 (2006) 112001.
- [5] Q.R. Ahmad, et al., Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 071301.
- [6] S.P. Mikheyev, A.Y. Smirnov, Sov. J. Nucl. Phys. 42 (1985) 913–917.

- [7] L. Wolfenstein, Phys. Rev. D 17 (1978) 2369.
- [8] B.T. Cleveland, et al., Astrophys. J. 496 (1998) 505–526.
- [9] J.N. Abdurashitov, et al., Phys. Rev. C 80 (2009) 015807.
- [10] M. Altmann, et al., Phys. Lett. B 616 (2005) 174–190.
- [11] G. Bellini, et al., Phys. Rev. D. 82 (2010) 033006.
- [12] G. Bellini, et al., Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 051302.
- [13] G. Bellini, et al., Phys. Rev. D 89 (2014) 112007.
- [14] G. Bellini, et al., Nature 512 (2014) 383–386.
- [15] A. Gando, et al., Phys. Rev. C 92 (2015) 055808.
- [16] J. Hosaka, et al., Phys. Rev. D 73 (2006) 112001.
- [17] J.P. Cravens, et al., Phys. Rev. D 78 (2008) 032002.
- [18] K. Abe, et al., Phys. Rev. D 83 (2011) 052010.
- [19] K. Abe, et al., Phys. Rev. D 94 (2016) 052010.
- [20] Q.R. Ahmad, et al., Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 071301.
- [21] Q.R. Ahmad, et al., Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 011301.
- [22] B. Aharmim, et al., Phys. Rev. C. 72 (2005) 055502.
- [23] B. Aharmim, et al., Phys. Rev. C. 87 (2013) 015502.
- [24] S. Abe, et al., Phys. Rev. C 84 (2011) 035804.
- [25] P. C. de Holanda, A. Yu, Smirnov, Phys. Rev. D 69 (2004) 113002.
- [26] P.C. de Holanda, A. Yu, Smirnov, Phys. Rev. D 83 (2011) 113011.
- [27] V. Barger, Patrick Huber, Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 211802.
- [28] A. Friedland, et al., Phys. Lett. B 594 (2004) 347–354.
- [29] O.G. Miranda, et al., J. High. Energy Phys. 10 (2006) 008.
- [30] S. Yamada, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 57 (2010) 428–432.
- [31] Y. Takeuchi, et al., Phys. Lett. B 452 (1999) 418–424.
- [32] Y. Nakano, (Ph.D. thesis), University of Tokyo (2016).
- [33] Y. Takeuchi, et al., Nucl. Instr. Meth. A 421 (1999) 334–341.
- [34] C. Mitsuda, et al., Nucl. Instr. Meth. A 497 (2003) 414–428.
- [35] K. Hosokawa, et al., Progress. Theor. Exp. Phys. 033H01.
- [36] T. Iida, et al., Health Phys. 54 (1998) 139–148.
- [37] K.D. Chu, P.K. Hopke, Environ. Sci. Technol. 22 (1988) 711–717.
- [38] Genitron Instruments GmbH, FACTORY CALIBRATION AT GENITRON INSTRUMENTS FACILITIES (Calibration Procedure of the AlphaGUARD Radon Monitor) Version: 03/2006.
- [39] M. Shimo, et al., J. At. Energy Soc. Jpn. 25 (1983) 562–570.
- [40] H. Sekiya, in: Proceedings of the Fifth Low Radioactivity Techniques Workshop (LRT 2015), Seattle, WA, USA, 2015. (AIP Conference Proceedings 1672 (2015) 080001, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4927996>).