

修 士 学 位 論 文

ハイパーカミオカンデに向けた
シート状高密度ポリエチレンの水中ラドン透過率測定

2019年2月1日

専攻名 物理学専攻
学籍番号 178S121S
氏名 宮辺裕樹

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

スーパーカミオカンデ (SK) 実験は、現在太陽ニュートリノ観測に関して統計量が世界最大である水チェレンコフ実験であり、1991年に建設が始まり、1996年より観測を開始した。SKの総体積は50 kton、有効体積は22.5 ktonである。

1960年代よりいくつもの実験で、観測された太陽ニュートリノのフラックスが、標準太陽模型により予想される量よりも少ないという結果が得られた。これを太陽ニュートリノ問題と呼び、長年解決されなかった。

SK実験による太陽ニュートリノ観測の結果と、SNO (Sudbury Neutrino Observatory) 実験による太陽ニュートリノ観測の結果を比較することで、ニュートリノ振動と呼ばれる現象を証明した。これらの功績により、2015年にノーベル物理学賞が授与された。

現在、SKではニュートリノ振動パラメータである、ニュートリノ混合角 θ_{12} 、ニュートリノの質量の二乗差 Δm_{21}^2 の測定のために、太陽ニュートリノ観測を行っている。また、これらのニュートリノ振動パラメータの精密測定にはより多くのデータが必要になる。そこで現在SKの約8倍の有効体積をもつハイパーカミオカンデ (HK) 実験が計画されている。

HK実験は、次世代の超大型水チェレンコフ実験計画である。HKは2020年の建設開始、2027年の測定開始が計画されており、現在建設に向けた基礎研究が進んでいる。HK検出器は岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下650 mに位置する予定である。HKの総体積は258 kton、HKの有効体積は187 ktonである。

SK/HKでの太陽ニュートリノ観測では、放射性ラドン ^{222}Rn がバックグラウンドとなる。SK検出器では検出器はステンレス製であり、周辺環境からの ^{222}Rn の侵入は抑えられていたが、HKの外検出器はコンクリート製であり、コンクリートとOD内部の間には水の透過を防ぐために、高密度ポリエチレン (HDPE) と呼ばれる合成樹脂素材が用いられる予定である。合成樹脂による ^{222}Rn の遮蔽は完璧ではなく、ガスが空気中でHDPEシートを透過する現象が観測され、ラドン透過率が測定されている。しかし、実際に使用するHDPEシートのラドン透過率は不明なため、現在は他のHDPEの空気中でのラドン透過率測定実験の結果から推測した値を用い、HK検出器のデザインがなされているが、先行研究でのHDPEの空気中ラドン透過率は、製品によるばらつきがあるため、実際に使用する製品による水中でのラドン透過率測定が必要である。

本論文では、まず原理実証のためにHDPEの空気中でのラドン透過率を測定し、次に水中でのラドン透過率を実験的に評価した。空気中/水中でのラドン透過率測定実験を行うために、シート状素材のラドン透過率測定用セルを開発し、実際に測定に用いた。また水中のラドン濃度を測定するために、液相に存在する ^{222}Rn を気相に移すための中空糸膜という装置を、ラドン検出器と組み合わせて測定を行った。空気中でのラドン透過率測定を行った先行研究では、HDPEのラドン透過率は $(0.37 \sim 1.9) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ という結果が報告されているが、本研究ではHKに使用される予定のHDPEの水中ラドン透過率として、 $(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ という結果が得られた。

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	ニュートリノ研究の現状	3
2.1	ニュートリノの性質	3
2.2	ニュートリノ振動	4
2.3	太陽ニュートリノ	6
2.4	振動パラメーター	11
2.5	ニュートリノ実験の今後の展望	12
第 3 章	SK/HK 検出器	13
3.1	スーパーカミオカンデ検出器	13
3.1.1	内検出器・外検出器	13
3.2	ハイパーカミオカンデ検出器	14
3.2.1	検出器の構造	14
3.2.2	SK/HK における低エネルギー領域のバックグラウンド	18
3.2.3	環境中ラドンの遮蔽	18
第 4 章	ラドン透過率測定装置の開発	19
4.1	実験原理	19
4.1.1	^{222}Rn	19
4.1.2	ラドン透過率測定の手法	20
4.2	実験装置	22
4.2.1	ラドン検出器	22
4.2.2	検出原理	25
4.3	ラドン検出器の較正	27
4.4	ラドン透過率測定用セル	28
第 5 章	空気中でのラドン透過率測定	31
5.1	セットアップ	31
5.2	1 L ラドン検出器の較正	33
5.2.1	測定の手順	34
5.2.2	較正係数の測定	34
5.3	HDPE の測定	38
5.3.1	測定の手順	39

5.3.2	測定結果	40
第 6 章	水中でのラドン透過率測定	55
6.1	セットアップ	55
6.2	ラドン水の濃度の測定 (Run1)	57
6.2.1	Run1 の測定の手順	57
6.2.2	Run1 の測定結果	58
6.3	バックグラウンドレベルの測定 (BG Run)	61
6.3.1	BG Run の測定の手順	61
6.3.2	BG Run の測定結果	61
6.4	HDPE シートの水中ラドン透過率測定 (Run2)	61
6.4.1	Run2 の測定の手順	62
6.4.2	Run2 の測定結果	62
第 7 章	議論・結論	65
7.1	HDPE シートの水中ラドン透過率測定結果の評価	65
7.1.1	ラドン透過率の系統誤差の評価	65
7.1.2	系統誤差を考慮した空気中と水中での測定結果の比較	67
7.2	HK 検出器内のラドン濃度の見積り	68
7.3	結論	70
参考文献		73
謝辞		77

目次

2.1	標準模型における素粒子	3
2.2	太陽核融合反応 pp-chain	8
2.3	太陽核融合反応 CNO cycle	9
2.4	標準太陽模型による地球で観測される太陽ニュートリノフラックスの予想	10
3.1	SK 検出器の概略図	13
3.2	SK 検出器の断面図	14
3.3	20 inchPMT の断面図	15
3.4	HK 検出器の実験概要図	15
3.5	SK 検出器と HK 検出器の大きさの比較	16
3.6	HK 検出器の断面図	17
4.1	ウラン崩壊系列	20
4.2	実験原理の概略図	21
4.3	空気中/水中ラドン透過率測定の様式図	21
4.4	80 L ラドン検出器の写真と断面図	23
4.5	1 L ラドン検出器の写真と断面図	23
4.6	70 L ラドン検出器と中空糸膜モジュールの写真と断面図	24
4.7	中空糸膜	25
4.8	エネルギースペクトル	26
4.9	Raspberry Pi の写真	27
4.10	ラドン透過率測定用セル	28
4.11	ラドン透過率測定用セル内部の様式図	29
5.1	空気中でのラドン透過率測定実験装置の写真	32
5.2	ドーナツ型の HDPE	32
5.3	円形, 正方形の HDPE	33
5.4	空気中でのラドン透過率測定実験の配管図	33
5.5	密閉型の 1 L ラドン検出器の断面図	36
5.6	開放型の 1 L ラドン検出器の断面図	36
5.7	CF Run の 1L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル	37
5.8	CF Run の測定結果	38
5.9	Run1-3 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル	42
5.10	Run1-3 の測定結果	43

5.11	Run4 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル	45
5.12	Run4 の測定結果	46
5.13	Run5 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル	48
5.14	Run5 の測定結果	49
5.15	Run6 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル	51
5.16	Run6 の測定結果	52
6.1	ラジウムセラミックボール線源	56
6.2	水中でのラドン透過率測定実験の配管図	57
6.3	気温に対する Ostwald 係数	59
6.4	Run1 のエネルギースペクトル	60
6.5	Run1 の測定結果	60
6.6	Run1 のエネルギースペクトル	63
6.7	Run2 の測定結果	63
7.1	水中 Run1 の測定結果と $\pm 30\%$ の不定性の範囲	66
7.2	Run5' の測定結果	67
7.3	先行研究と本研究における HDPE の空気中/水中ラドン透過率測定結果の比較 (本文参照)	68
7.4	HK と坑内の ^{222}Rn のやり取り	69
7.5	HK の ID・OD の ^{222}Rn のやり取り	70

表目次

2.1	レプトンの種類	4
2.2	クォークの種類	4
3.1	先行研究の HDPE の空気中ラドン透過率測定の結果	18
5.1	CF Run の測定時間	34
5.2	Run の測定時間	40
5.3	Run1-3 の測定の詳細と結果	41
5.4	Run4 の測定の詳細と結果	44
5.5	Run5 の測定の詳細と結果	47
5.6	Run6 の測定の詳細と結果	50
5.7	先行研究と本研究の空気中のラドン透過率測定結果の比較	53
6.1	Run1 の各部分の水の体積	59
6.2	Run2 の各部分の水の体積	59
6.3	Run1 の測定の詳細と結果	59
6.4	BG Run の測定の詳細と結果	61
6.5	Run2 の測定の詳細と結果	62
6.6	水中ラドン透過率測定的时间	64
7.1	Run5 と Run5' の測定結果の比較	65
7.2	本研究における HDPE の空気中/水中ラドン透過率測定結果と先行研究の HDPE の空気中ラドン透過率測定の結果	68

第 1 章

序論

ニュートリノは電荷を持たないスピン $\frac{1}{2}$ の素粒子であり、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの 3 種類、及びそれらの反粒子が存在する。素粒子物理学において、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の 3 つの基本的な相互作用を記述するための理論である標準模型においてニュートリノの質量はゼロでとされているが、1998 年にスーパーカミオカンデ (SK) 実験と SNO 実験によりニュートリノ振動と呼ばれる現象の証拠が発見され、ニュートリノの質量がゼロではないと考えられている。

現在 SK では、ニュートリノ研究の課題のひとつである、ニュートリノ混合角 θ_{12} 、ニュートリノの質量二乗差 Δm_{21}^2 の測定のために、太陽ニュートリノの観測を行っている。SK 実験は現在太陽ニュートリノ観測に関して統計量が世界最大である水チェレンコフ実験であり、ニュートリノの性質解明のため精密な測定が進行中である。

しかし、より精密な観測のためにはより多くのデータが必要になり、現在次世代の超大型ニュートリノ検出器である、ハイパーカミオカンデ (HK) 実験が計画されている。

HK 実験は、2020 年の建設開始、2027 年の観測開始を予定している、次世代のニュートリノ観測実験計画である。HK 検出器は SK の約 8 倍の有効体積を持ち、光の検出効率が SK の約 2 倍になる予定である。HK の目的は、CP 対称性の破れの観測、ニュートリノの質量階層の決定、太陽・大気ニュートリノなどの観測によるニュートリノ振動パラメータの精密測定、超新星ニュートリノなどの宇宙ニュートリノの観測、陽子崩壊探索である。

太陽ニュートリノ観測では、放射性同位体であるラドン-222 (^{222}Rn) がバックグラウンドとなる。SK 実験では検出器はステンレス製であり、周辺環境からの ^{222}Rn の侵入は抑えられていたが、HK 実験の外検出器と岩盤の間には、高密度ポリエチレン (HDPE) と呼ばれる合成樹脂素材が用いられる予定である。一般に合成樹脂による気体の遮蔽は完璧ではなく、 ^{222}Rn ガスが空気中で HDPE シートを透過する現象が観測され、ラドン透過率が測定されている。しかし、実際に使用する HDPE シートのラドン透過率は不明なため、現在は他の HDPE の空気中でのラドン透過率測定実験の結果から推測した値を用い、HK 検出器のデザインがなされているが、先行研究での HDPE の空気中ラドン透過率は、製品によるばらつきがあるため、実際に使用する製品による水中でのラドン透過率測定が必要である。

本研究の目的は、実際に使用される予定の HDPE シートの水中でのラドン透過率を実験的に評価し、HK 検出器のデザイン精度を高めることである。

本論文はまずニュートリノ研究の現状を紹介し、SK 実験、HK 実験について説明する。次に本研究に用いた、実験原理、実験装置の開発について説明し、空気中及び水中でのシート状 HDPE のラドン透過率測定について述べる。最後に得られた結果について議論し、結論を述べる。

第 2 章

ニュートリノ研究の現状

本章ではニュートリノの性質、標準的なニュートリノ振動理論、太陽ニュートリノ観測の現状と結果について説明する。

2.1 ニュートリノの性質

この節では素粒子標準模型、標準模型でのニュートリノの性質について説明する [1][2]。

素粒子標準模型とは、素粒子物理学において、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の 3 つの基本的な相互作用を記述する理論である。標準模型の素粒子には、物質を構成するフェルミ粒子、相互作用を媒介するゲージ粒子、ヒッグス粒子がある (図 2.1)。フェルミ粒子は電磁相互作用、弱い相互作用が関与するレプトン (表 2.1) と、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用が関与するクォーク (表 2.2) に大別される。

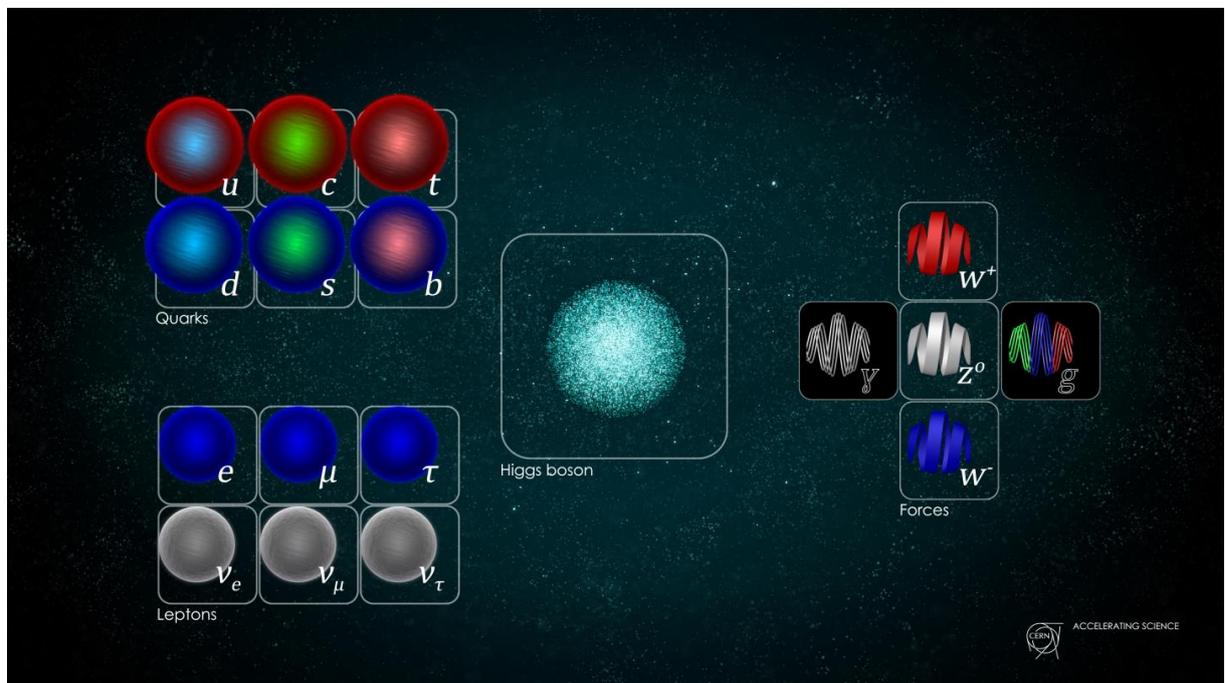


図 2.1 標準模型における素粒子 [3]

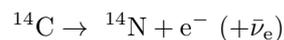
表 2.1 レプトンの種類 [4]

		質量	電荷 (単位: 素電荷 e)
電子	e^-	0.5110 [MeV]	-1
電子ニュートリノ	ν_e	< 2 [eV]	0
ミュー粒子	μ^-	105.7 [MeV]	-1
ミューニュートリノ	ν_μ	< 0.19 [MeV]	0
タウ粒子	τ^-	1.777 [GeV]	-1
タウニュートリノ	ν_τ	< 18.2 [MeV]	0

表 2.2 クォークの種類 [4]

		質量	電荷 (単位: 素電荷 e)
アップ (up)	u	$2.2^{+0.5}_{-0.4}$ [MeV]	2/3
ダウン (down)	d	$4.7^{+0.5}_{-0.3}$ [MeV]	-1/3
チャーム (charmed)	c	$1.275^{+0.025}_{-0.035}$ [GeV]	2/3
ストレンジ (strange)	s	95^{+9}_{-3} [MeV]	-1/3
トップ (top)	t	173.0 ± 0.4 [GeV]	2/3
ボトム (bottom)	b	$4.18^{+0.04}_{-0.03}$ [GeV]	-1/3

レプトンには電荷 $-e$ を持つ電子 e^- 、ミュー粒子 μ^- 、タウ粒子 τ^- 、及びこれらの 3 種類の荷電レプトンに対応する、電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ の 3 種類とそれらの反粒子が存在する。ニュートリノは ^{14}C のベータ崩壊



において、電子がエネルギー保存を満たすように 2 体崩壊するとき期待される単一エネルギースペクトルではなく、連続スペクトルになることから 1930 年に Pauli により存在が予想された。

実験的には、1956 年に Reines と Cowan により原子炉起源の反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ が、1962 年に Lederman、Schwartz、Steinberger らによってミューニュートリノ ν_μ が、1997 年から丹羽らにより開始された DONUT 実験によってタウニュートリノ ν_τ が発見された。

素粒子物理学の標準模型ではニュートリノは以下の性質を持つとされている。

- ・ 3 種類の荷電レプトンに対応する 3 種類のニュートリノが存在し、レプトン数は世代 (e, ν_e) 、 (μ, ν_μ) 、 (τ, ν_τ) ごとに保存する。
- ・ ニュートリノの質量は厳密にゼロで、左巻き (反ニュートリノは右巻き) である。
- ・ ニュートリノと反ニュートリノは区別できる別のものである。

しかし太陽ニュートリノの観測等から、ニュートリノ振動と呼ばれる現象の証拠が発見された。

2.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動は、ニュートリノが有限の質量をもつときに起こる現象である。本節では標準的なニュートリノ振動について述べる [5]。

ニュートリノ (ν_e, ν_μ, ν_τ) は荷電レプトン (e, μ, τ) に対応する状態で定義され、これを Flavor 固有状態 ($\nu_\alpha, \alpha = e, \mu, \tau$) といい、質量固有状態 ($\nu_j, j = 1, 2, 3$: 世代) の重ね合わせで表される。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_j U_{\alpha j} |\nu_j\rangle \quad (2.1)$$

ここで $U_{\alpha j}$ は PMNS 行列 (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata Matrix) と呼ばれ、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ が、質量固有状態 i, j 間のニュートリノ混合角を θ_{ij} として式 2.2 のように書ける。

$$U_{\alpha j} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & -s_{12}c_{13} & s_{13} \\ s_{12}c_{23} + c_{12}s_{23}s_{13} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13} & -s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13} & c_{12}s_{23} + s_{12}c_{23}s_{13} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

ある質量固有状態 j の運動量を p 、質量を m_j として、 ν_j のエネルギー E_j を式 2.3 のように表す。

$$E_j = \sqrt{p^2 + m_j^2} \quad (2.3)$$

Flavor 固有状態の時間発展は式 2.4 のように書ける。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_j U_{\alpha j} |\nu_j\rangle e^{-iE_j t} \quad (2.4)$$

ニュートリノは常に相対論的であるので、式 2.3 は式 2.5 のように近似できる。

$$E_j \simeq p + \frac{m_j^2}{2p} \quad (2.5)$$

ここからは 2 Flavor 間のディラックニュートリノ振動の概要を説明する、つまり

$$\nu_\alpha = \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, U = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix}, \nu_\alpha = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

であるとき、 ν_e, ν_μ は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= -\sin \theta_{12} |\nu_1\rangle + \cos \theta_{12} |\nu_2\rangle \end{aligned} \quad (2.7)$$

時刻 $t = 0$ で ν_e であったものが、時刻 $t = t$ で ν_μ となる確率は以下ようになる、ここで $L (= ct)$ (c は光速) はニュートリノの進んだ距離である。

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = |\langle \nu_\mu | \nu_e \rangle|^2 \quad (2.8)$$

$$= \left| \sin \theta_{12} \cos \theta_{12} (1 - e^{-i(E_1 - E_2)t}) \right|^2 \quad (2.9)$$

$$= \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m^2}{4E} L \quad (2.10)$$

$$\Delta m_{21}^2 = |m_2^2 - m_1^2|$$

振動パラメーター $\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$ は実験により決定する必要がある。

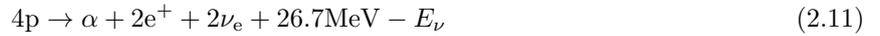
またニュートリノ実験に関して、以下のような未解決問題がある。

- ・ CP 対称性を破る位相角 δ_{CP} の値 (ゼロか有限値か)。
- ・ ニュートリノの質量階層構造 (順階層か逆階層か)。
- ・ ニュートリノはマヨラナ粒子であるか。
- ・ ステライルニュートリノは存在するか。
- ・ ニュートリノの質量の絶対値。

これらの問題を解決するために様々なニュートリノ観測実験が進行中・計画中である。

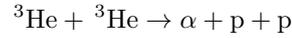
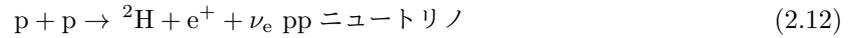
2.3 太陽ニュートリノ

本節では $\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$ の決定に重要なデータを与えている太陽ニュートリノ観測について説明する。太陽には標準太陽模型 (Standard Solar Model, SSM) という模型があり、SSM によると太陽内部での核融合反応は以下のように書ける。

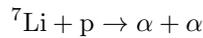
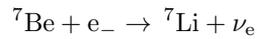


恒星内部におけるニュートリノ生成には、pp-chain (図 2.2) と CNO cycle (図 2.3) と呼ばれる過程がある。

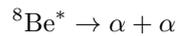
pp-I



pp-I (${}^7\text{Be}$ ニュートリノ)



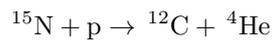
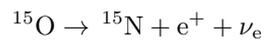
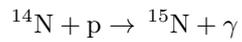
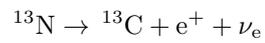
pp-III (${}^8\text{B}$ ニュートリノ)



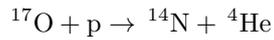
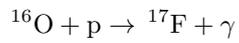
hep ニュートリノ



CNO cycle1

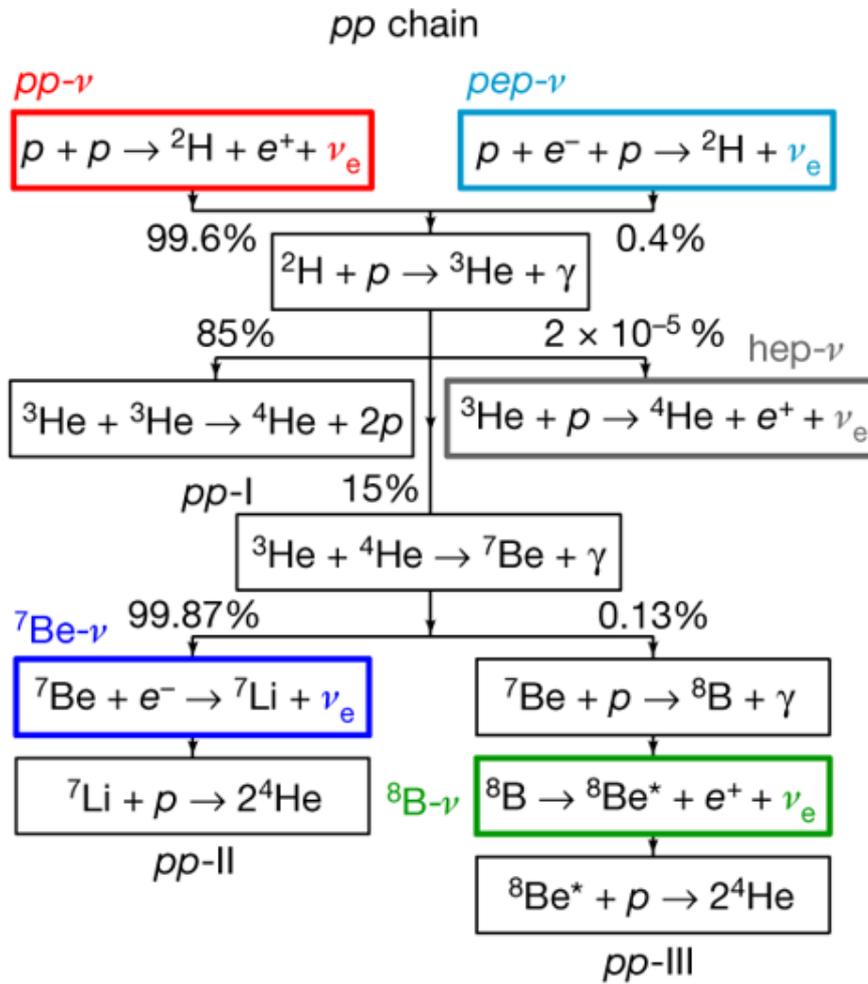


CNO cycle2



恒星中心の温度が $T \sim 1.8 \times 10^7$ K を超えると、CNO cycle が pp-chain よりも主要な核融合反応になるが、太陽中心の温度は $T \sim 1.5 \times 10^7$ K であるので、pp-chain が主要な核融合反応であり、pp-chain によって放出されるニュートリノは全体の 98.5% 程度である。

また標準太陽模型による地球で観測される太陽ニュートリノのフラックスの予想は図 2.4 に示す。

図 2.2 太陽核融合反応 *pp-chain*[6]

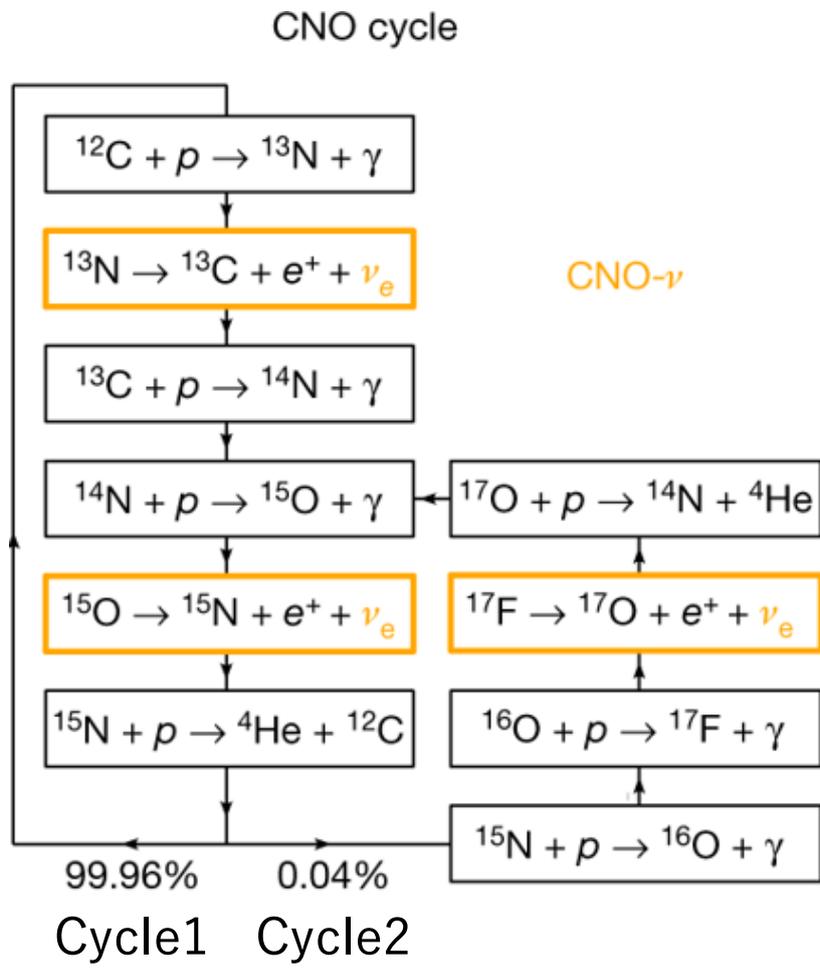


図 2.3 太陽核融合反応 CNO cycle[6]

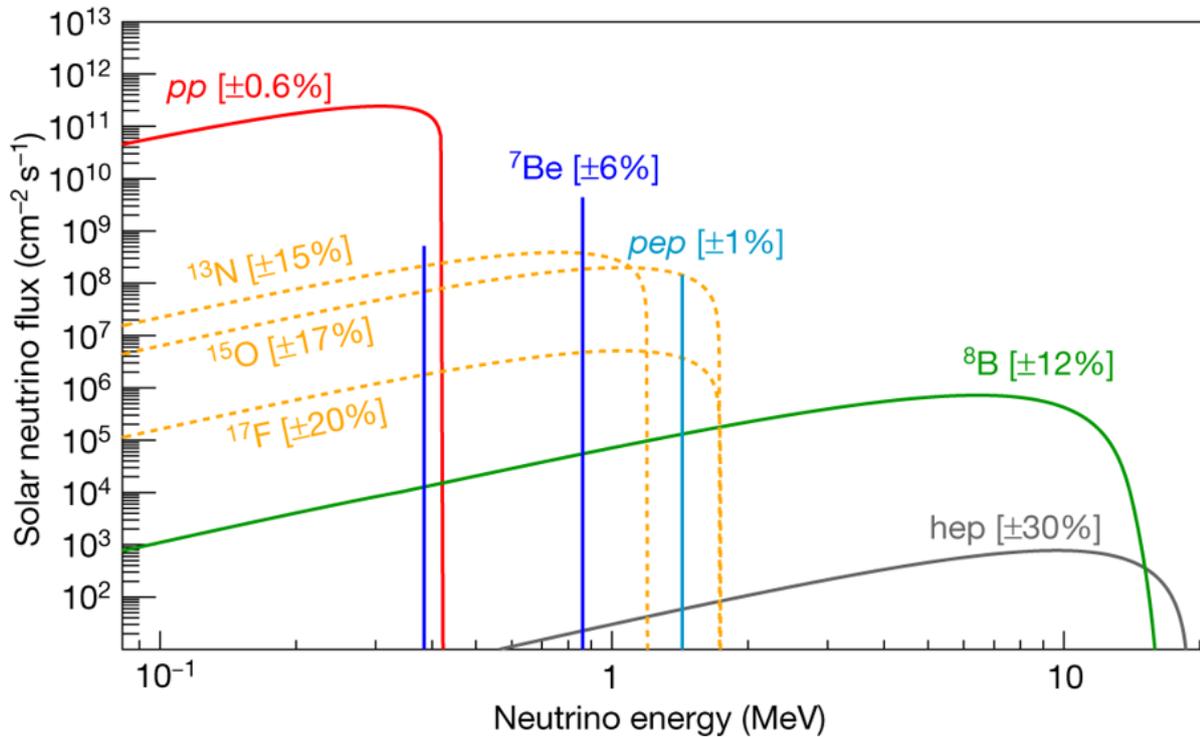


図 2.4 標準太陽模型による地球で観測される太陽ニュートリノフラックスの予想 [6]

ここで過去に行われた、または現在行われている太陽ニュートリノ観測実験とその結果を紹介する。

- ・ Homestake (1970-1993) [7][8]
 ターゲットは ^{37}Cl であり、体積は C_2Cl_4 が 615 ton である。
 $\nu_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + ^{37}\text{Ar}$ の反応により ν_e を検出する。
 エネルギーしきい値は 0.814 MeV であり、主な観測対象は $^7\text{Be} \nu$, $^8\text{B} \nu$ である。
 初の太陽ニュートリノ観測を行った。
 SSM で予想される ^{37}Cl に対する電子ニュートリノの反応頻度は $7.6_{-1.1}^{+1.3}$ SNU (Solar Neutrino Unit, 10^{-36} captures per atom per second) [9] であり、1970 年から 1993 年の観測結果の平均は 2.52 ± 0.23 となった。
- ・ Kamiokande II/III (1987-1995) [10]
 水チェレンコフ検出器であり、総体積は 4500 ton である。
 $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ の反応によりすべての Flavor のニュートリノ (ν_x , $x = e, \mu, \tau$) を検出するが、散乱断面積は Flavor により異なる。
 解析のエネルギーしきい値は 7 MeV であり、主な観測対象は $^8\text{B} \nu$ である。
 初めてニュートリノが太陽方向から来ることを確認した。
 Kamiokande II/III を合わせた $^8\text{B} \nu$ の観測結果は $(2.80 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.33(\text{syst})) \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ となった。これは SSM で予想される値の 49% から 64% に対応する。
- ・ SAGE (1990-2001) [11], GALLEX (1991-1997) /GNO (1998-2003) [12][13]
 ターゲットは ^{71}Ga であり、最終的な体積は 50 ton (SAGE)、100 ton (GALLEX) である。

$\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow e^- + {}^{71}\text{Ge}$ の反応により ν_e を検出する。

エネルギーしきい値は 0.233 MeV であり、pp ν に感度があることが特徴である。その低いエネルギーしきい値により、初の pp ν の観測を行った。

SSM で予想される ${}^{71}\text{Ga}$ に対する電子ニュートリノの反応頻度は 128_{-7}^{+9} SNU[9] であり、観測結果は、 $70.8_{-5.2}^{+5.3}(\text{stat})_{-3.2}^{+3.7}(\text{syst})$ SNU (SAGE)、 $77.5 \pm 6.2(\text{stat.})_{-4.7}^{+4.3}(\text{syst.})$ SNU (GALLEX) だった。

- Super-Kamiokande (1996-) [14]

水チェレンコフ検出器であり、総体積は 50000 ton である。

$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ の反応により ν_x , $x = e, \mu, \tau$ を検出する。

解析のエネルギーしきい値は 3.5 MeV であり、Kamiokande 実験と同様に主な観測対象は ${}^8\text{B} \nu$ である。

初めてニュートリノ強度の時間変動とエネルギースペクトルの観測を行った。

${}^8\text{B} \nu$ の観測結果は $(2.44 \pm 0.05(\text{stat})_{-0.07}^{+0.09}(\text{syst})) \times 10^6 \text{ cm}^2\text{sec}^{-1}$ となり、SSM で予想される値との比は $0.474_{-0.009}^{+0.010}{}_{-0.014}^{+0.017}$ となった [15]。

現在もニュートリノ強度の昼夜変動とエネルギースペクトルの精密観測を行っている。

- SNO (1999-2006) [16]

ターゲットは重水素 (d) であり、体積は 1000 ton である。

弾性散乱 (ES) $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$

荷電カレント反応 (CC) $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$

中性カレント反応 (NC) $\nu_x + d \rightarrow \nu_x + n + p$ の反応によりすべての Flavor のニュートリノ (ν_x , $x = e, \mu, \tau$) を検出する。

NC 反応では、重水素に対するニュートリノの散乱断面積が Flavor によらないので、標準的なニュートリノ振動 (Flavor 間の振動) をした場合でも太陽ニュートリノフラックスの観測ができる。

${}^8\text{B} \nu$ のフラックスの観測結果は ES : $(2.39 \pm 0.34(\text{stat})_{-0.14}^{+0.16}(\text{syst})) \times 10^6 \text{ cm}^2\text{sec}^{-1}$ 、CC : $(1.75 \pm 0.07(\text{stat})_{-0.11}^{+0.12}(\text{syst})) \times 10^6 \text{ cm}^2\text{sec}^{-1}$ [17]、NC : $(5.09_{-0.43}^{+0.44}(\text{stat})_{-0.43}^{+0.46}(\text{syst})) \times 10^6 \text{ cm}^2\text{sec}^{-1}$ となった。

- Borexino (2007-2016) [6]

液体シンチレータ検出器であり、液体シンチレータの総体積は 266 ton である。

$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ の反応により ν_x , $x = e, \mu, \tau$ を検出する。

解析のエネルギーしきい値は 0.19 MeV であり、初の pp ニュートリノ、 ${}^7\text{Be}$ ニュートリノのリアルタイム観測を行った。

ニュートリノ振動を仮定した SSM で予想される電子ニュートリノのフラックスと一致した。

これらの実験による、SSM で予想されるニュートリノフラックスと比べ、観測結果が有意に少ない現象は、太陽ニュートリノ問題と呼ばれ、長年未解決であったが、2001 年頃、SK での ${}^8\text{B} \nu$ (ES) の測定結果と SNO での ${}^8\text{B} \nu$ (CC) の測定結果を比較することで、太陽ニュートリノ振動の証拠が発見された。この功績によりノーベル物理学賞が授与された。以上の結果より、現在では太陽ニュートリノ振動が存在するのは確実と考えられており、現在ニュートリノ振動のパラメータの精密測定が行われている。

2.4 振動パラメーター

現在の SK によるニュートリノ振動パラメータの最新結果は以下の通りである [18]。

$$\begin{aligned}\sin^2 \theta_{12} &= 0.310 \pm 0.014 \\ \Delta m_{21}^2 &= (4.82_{-0.60}^{+1.20}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2\end{aligned}\tag{2.21}$$

また液体シンチレータを用いた反ニュートリノ検出器である KamLAND 実験のニュートリノ振動パラメータの測定結果は以下の通りである [19]。

$$\begin{aligned}\sin^2 \theta_{12} &= 0.36_{-0.07}^{+0.09}(\text{stat})_{-0.6}^{+0.09}(\text{syst}) \\ \Delta m_{21}^2 &= (7.58_{-0.13}^{+0.14}(\text{stat})_{-0.15}^{+0.15}(\text{syst})) \times 10^{-5} \text{ eV}^2\end{aligned}\tag{2.22}$$

Δm_{21}^2 の測定結果は、SK と KamLAND 間で異なっているという現状である。この観測結果の差が正しいとすると、新しい物理につながる可能性があるため、より精密に調べるためにより多くの観測データが必要である。

2.5 ニュートリノ実験の今後の展望

振動パラメータの精密な測定には今以上に多くの統計量が必要になる。日本では次世代の水チェレンコフ実験として、SK の約 8 倍の有効体積をもつ HK 実験が計画されている [20]。HK 実験は 2020 年に検出器の建設開始が決定し、現在は建設に向けた基礎研究が進行中である。HK 実験については第 3 章で詳しく述べる。

第3章

SK/HK 検出器

本章では、現在ニュートリノ観測を行っているスーパーカミオカンデ（SK）実験、及び2027年に実験開始が計画されている次世代のニュートリノ観測実験であるハイパーカミオカンデ（HK）実験について説明する。

3.1 スーパーカミオカンデ検出器

この節ではニュートリノ観測実験装置であるスーパーカミオカンデ検出器について説明する。SK 実験は現在太陽ニュートリノ観測に関して統計量が世界最大である水チェレンコフ実験であり、現在ニュートリノの性質解明のため精密な測定が進行中である。SK は1991年に建設が始まり、1996年より観測を開始した。検出器は岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下1000 mに位置している。

3.1.1 内検出器・外検出器

SK 検出器は直径39.3 m、高さ41.4 mの円筒形の検出器である（図3.1）。SK 検出器は内検出器（ID）と外検出器（OD）の2層構造になっており（図3.2）、内部は50 ktonの超純水で満たされており、有効体積は22.5 ktonである。IDは直径33.8 m、高さ36.2 mの円筒形で、ODは上面に2.6 m、下面に2.75 mの厚さを持ち、IDとODの間は光を通さないように仕切られている。

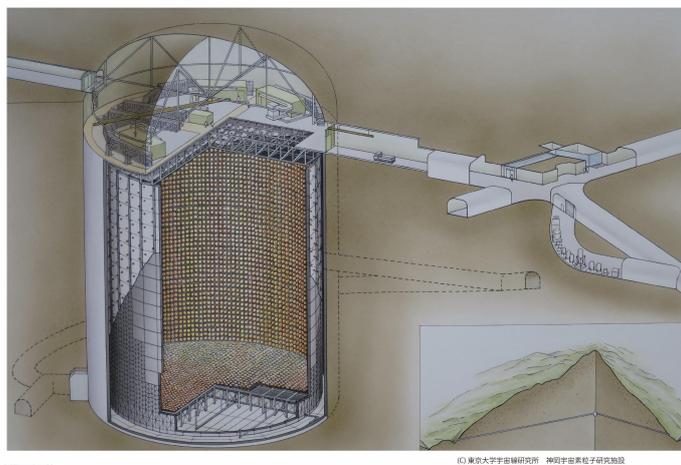


図 3.1 SK 検出器の概略図 [21]

IDには20 inch光電子増倍管（Photomultiplier Tube, PMT）が約11000本、ODには8 inch PMTが計1885本

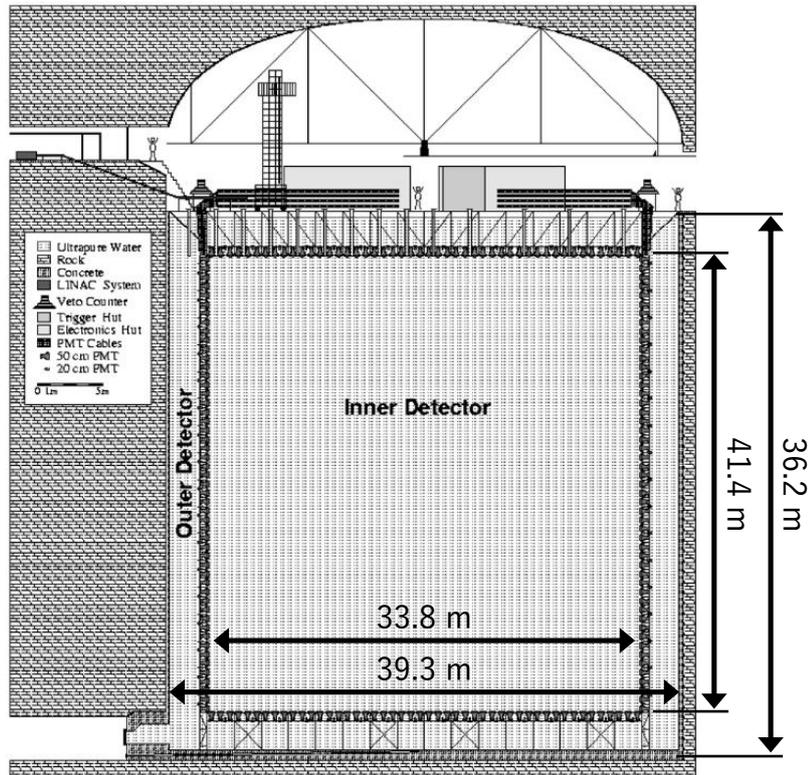


図 3.2 SK 検出器の断面図 [21]

取り付けられている。20 inch PMT の断面図を図 3.3 に示す。ID の内壁面に取り付けられた PMT は、70 cm 間隔で設置されており、ID の表面積に対して 40% を覆っている。

OD の目的は主に、宇宙線ミュオンや岩盤などの外部からのガンマ線を遮蔽・判別することである。

タンク上部にはエレクトロニクスハットと呼ばれる、PMT の信号から情報を取り出すための電子回路や、PMT にかける高電圧電源などが設置された部屋がある。

3.2 ハイパーカミオカンデ検出器

3.2.1 検出器の構造

この節では次世代の超大型水チェレンコフ実験装置であるハイパーカミオカンデ検出器について説明する。HK は 2020 年の建設開始、2027 年の実験開始が計画されており、現在建設に向けた基礎研究が進んでいる。検出器は岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下 650 m に位置する予定である [20]。

HK の目的は図 3.4 に示したように、大気・太陽ニュートリノ、J-PARC からのニュートリノビームの観測によるニュートリノ振動パラメータの測定、CP 対称性の破れの観測、ニュートリノの質量階層の決定、超新星ニュートリノの探索、陽子探索崩壊などである。

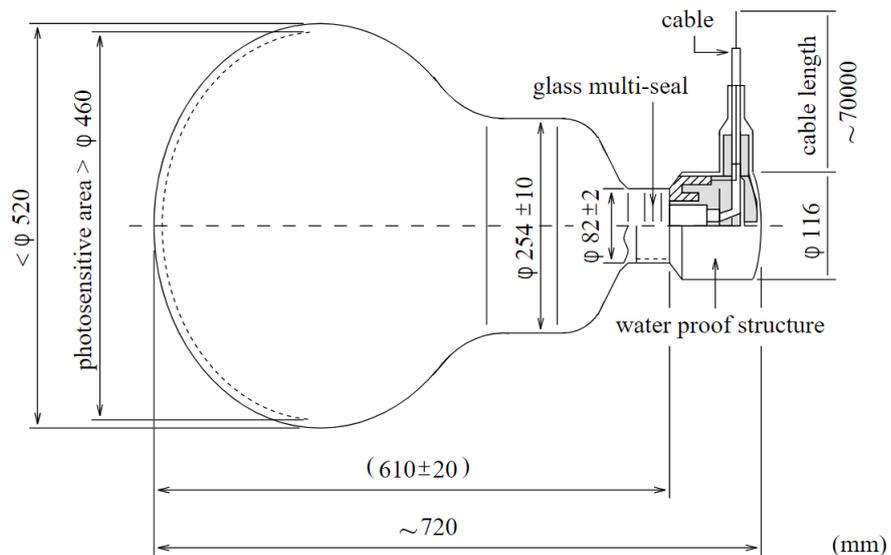


図 3.3 20 inchPMT の断面図 [21]

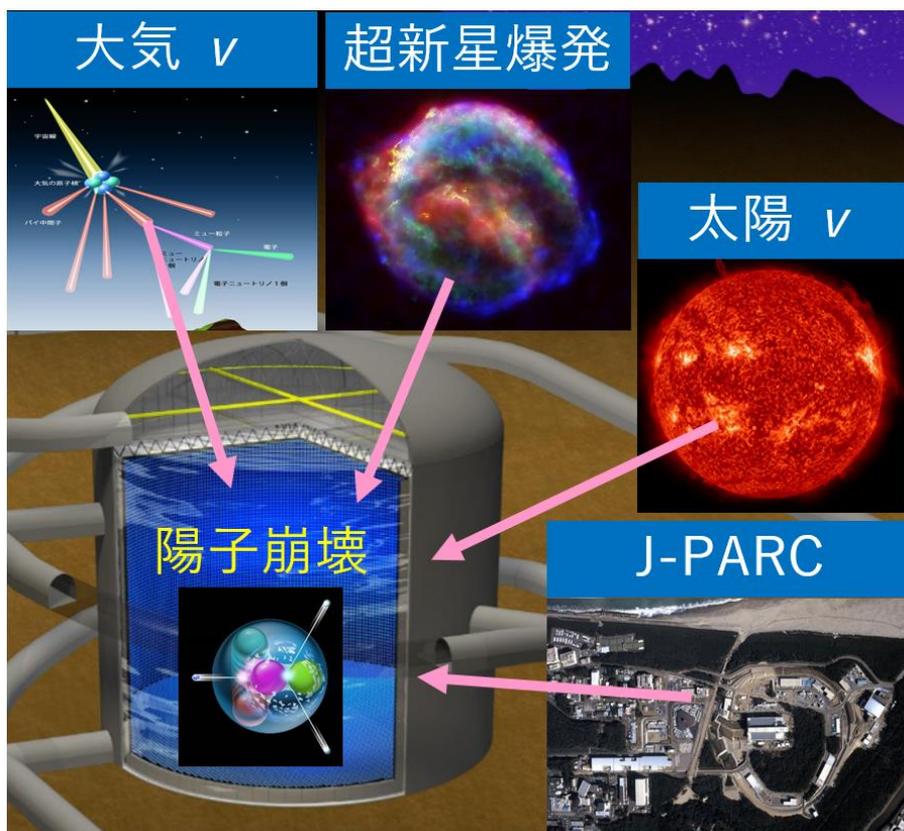


図 3.4 HK 検出器の実験概要図 [22][23][24][25][26]

現時点での計画では、HK 検出器は直径 74.0 m、高さ 61.0 m の円筒形の検出器である (図 3.6)。HK 検出器は内検出器 (ID) と外検出器 (OD) の 2 層構造になっており (図 3.6)、内部は 260 kton の超純水で満たされ、有

効体積はSKの約8倍の187 ktonである(図3.5)。IDは直径70.8 m、高さ54.8 mの円筒形で、ODは上面に2.4 m、下面に2.0 mの厚さを持つ。

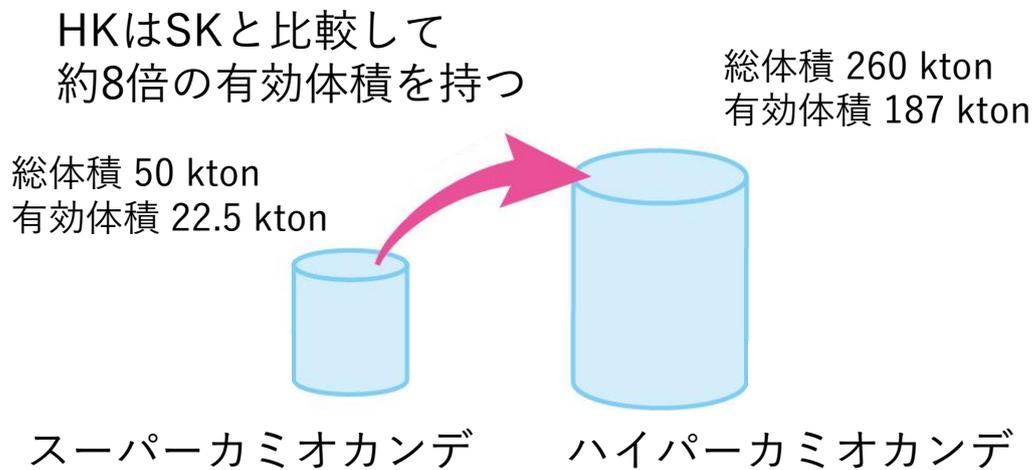


図3.5 SK 検出器と HK 検出器の大きさの比較 [23]

検出器断面図

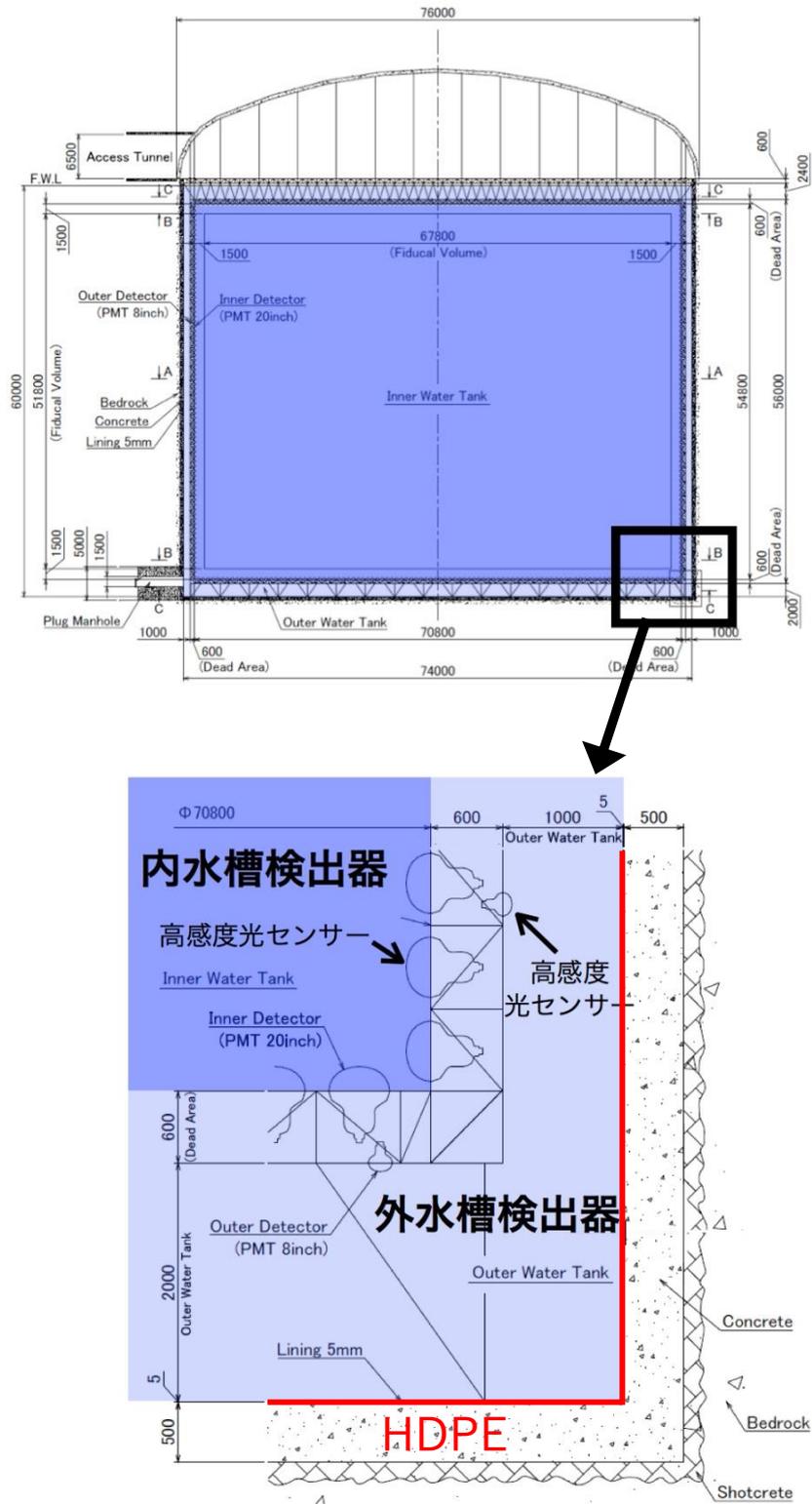


図 3.6 HK 検出器の断面図 [23]

ID には 20 inch 超高感度光電子増倍管が約 40000 本、OD には 8 inch PMT が約 6700 本取り付けられる。20 inch PMT は HK 用に新たに開発されたものを使用する予定であり、ニュートリノ反応や陽子崩壊から発生する非常に微弱なチェレンコフ光を正確に測定することができる。

以上のように HK 検出器は非常に巨大で高感度・高性能な検出器であり、HK では様々な物理観測を同時に行うことができ、世界初の発見及び世界最高精度での結果を得ることを目標としている。

3.2.2 SK/HK における低エネルギー領域のバックグラウンド

SK での ^8B 太陽ニュートリノ観測において、ニュートリノのエネルギーは図 2.4 より数 MeV 程度である。このエネルギー領域の主要なバックグラウンドは、宇宙線ミューオンによる核破砕生成物と、水中で崩壊した ^{222}Rn の放射性娘核種である。 ^{222}Rn の放射性娘核種である ^{214}Bi は、崩壊する際に Q 値が 3.27 MeV のベータ線を放出する。このベータ線の量が太陽ニュートリノ-電子間の弾性散乱反応で使用されるエネルギーしきい値に制限をかけている。HK では水中ラドン濃度は SK と同程度 (2 mBq/m^3) にすることが望ましい。現段階では HK PMT からのラドン放射量は測定されていないが、SK PMT からのラドン放射量と同程度と仮定して、HK 検出器内部のラドン濃度は 1.6 mBq/m^3 と見積もられている [20]。

3.2.3 環境中ラドンの遮蔽

SK 検出器では検出器はステンレス製であり、周辺環境からの ^{222}Rn の侵入は抑えられていたが、HK 検出器では費用面・施工面等の理由から、OD はコンクリート製で、コンクリートと OD 内部の間には水の透過を防ぐために、GSE Environmental 社製の Studliner という高密度ポリエチレン (HDPE, 密度 $0.94 \text{ [g/cm}^3\text{]})$ と呼ばれる合成樹脂素材が用いられる予定である。一般に合成樹脂による気体の遮蔽は完璧ではなく、 ^{222}Rn ガスが空気中で HDPE シートを透過する現象が観測され、ラドン透過率が測定されている。しかし、実際に使用する HDPE シートのラドン透過率は不明なため、他の HDPE のラドン透過率測定実験の結果から推測した値を用い、HK 検出器のデザインがなされている。ここで、先行研究による空気中でのラドン透過率測定の結果を表 3.1 に示す。先行研究では製品によるばらつきがあり、HK に使用する HDPE のラドン透過率は実際の製品を試験する必要がある。また、先行研究はいずれも空気中での測定であるが、HDPE が HK で使用される環境は水中であるため、水中でのラドン透過率測定が必要である。

本研究では HDPE の水中ラドン透過率を実験的に評価し、HK 内部のラドン濃度を見積もる。

表 3.1 先行研究の HDPE の空気中ラドン透過率測定の結果

	ラドン透過率 ($\times 10^{-7} \text{ [cm}^2\text{/sec]})$
先行研究 [27]	1.1 0.46
先行研究 [28]	0.58
先行研究 [29]	1.9
先行研究 [30]	0.37 0.71

第4章

ラドン透過率測定装置の開発

本研究では水中でのラドン透過率を測定するために、シート状素材をはさみ、その両側に気体・液体を循環させるような装置が必要であるので、ラドン透過率測定用セルという装置を開発した。また、水中のラドン濃度を測定するために、中空糸膜と呼ばれる、液相中のラドンを気相に移すための装置と、ラドン検出器を組み合わせ測定を行った。

本章では太陽ニュートリノ観測のバックグラウンドとなる放射性核種であるラドン (^{222}Rn) について説明し、実験原理・実験装置について述べる。

4.1 実験原理

4.1.1 ^{222}Rn

ラドン (^{222}Rn) は原子番号 86 の放射性希ガス元素 (化学的に不活性) であり、標準状態では単原子分子の気体として存在する。 ^{222}Rn はウラン系列 (図 4.1) に属し、半減期は 3.82 日であるが、ひとつ上流の核種である ^{226}Ra の半減期が 1600 年と非常に長い。ウラン (^{238}U) は土壌等の天然に存在する放射性核種であるため、常に岩盤から ^{222}Rn が放出されており、大気中のラドン濃度は地上で $1 \sim 10 \text{ Bq/m}^3$ 、神岡鉱山内では 1000 Bq/m^3 を超える [31]。

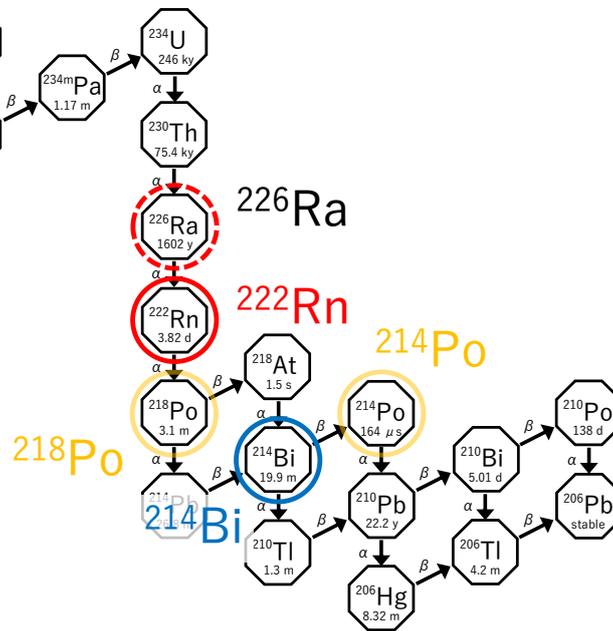


図 4.1 ウラン崩壊系列

4.1.2 ラドン透過率測定の手法

本節ではラドン透過率を測定するための手法の概要を説明する。

図 4.2 に空気中・水中でのラドン透過率測定実験の模式図を示した。本研究ではシート状素材をラドン透過率測定用セルにはさみ、片側にはラドン線源から出る ^{222}Rn を含んだ高ラドン濃度の空気または水を循環させ、反対側に純空気または純水を循環させる。このようにすることで、ラドンは高濃度側から低濃度側へシート状素材を透過して、低濃度側の純空気・純水に溶け込む。シート状素材の透過前後のラドン濃度の比によりラドン透過率が計算できるので、両側のラドン濃度をラドン検出器により測定する。実際には図 4.3 のように装置を並べ測定を行った。

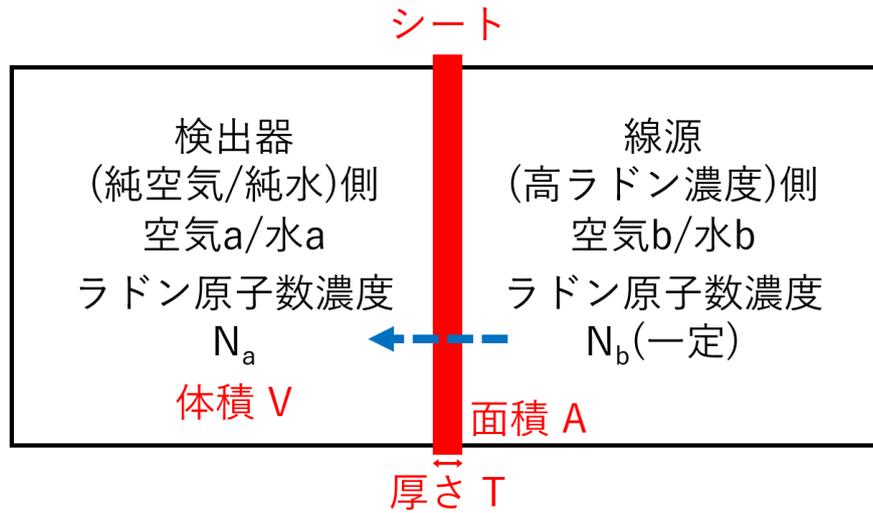


図 4.2 実験原理の概略図

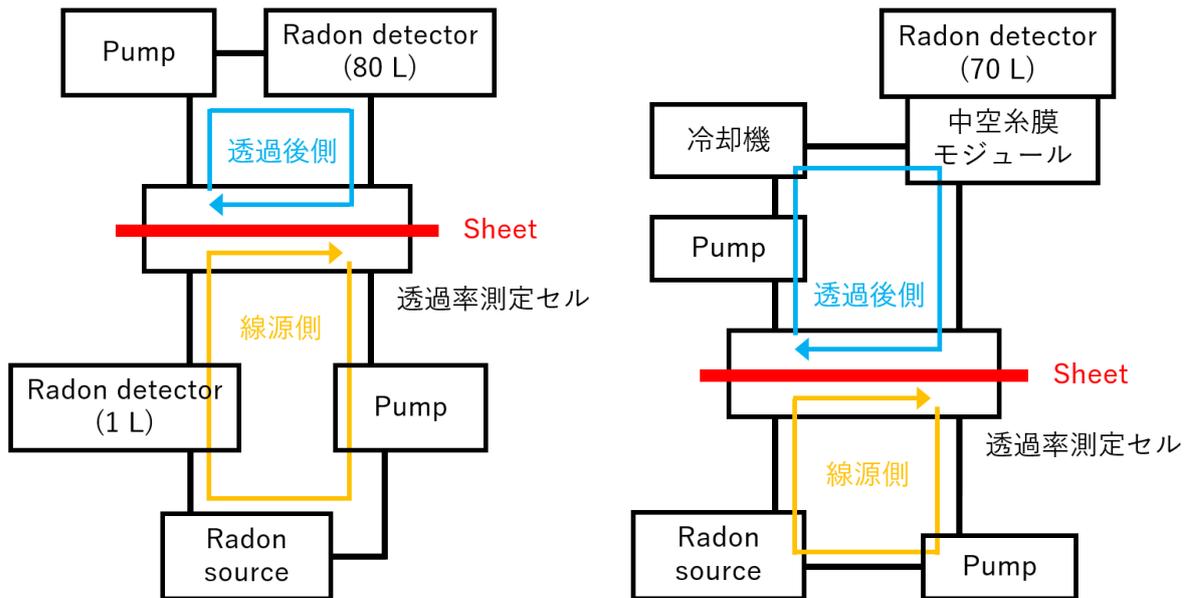


図 4.3 空気中/水中ラドン透過率測定の様式図

本研究では、数種類の素材の空気中でのラドン透過率を測定した先行研究 [32] で用いられた評価式を用いる。図 4.2 に示すように、透過前側の単位体積あたりのラドン原子数を N_b [$/\text{cm}^3$]、透過後側の単位体積あたりのラドン原子数を N_a [$/\text{cm}^3$]、シートの表面積を A [cm^2]、シートの厚さを T [cm]、透過後側の体積を V [cm^3]、ラドン透過率を k [cm^2/sec]、ラドンの崩壊定数を τ_{Rn} [sec] とすると、透過後のラドン原子数濃度は式 4.1 のようになる。

$$\frac{dN_a}{dt} = \frac{Ak}{TV} N_b - \frac{Ak}{TV} N_a - \frac{N_a}{\tau_{\text{Rn}}} \tag{4.1}$$

ここで式 4.1 左辺は透過後側のラドンの増加量、右辺第一項は単位時間あたりの透過前側から透過後側に透過してくるラドン原子数、右辺第二項は単位時間あたりの透過後側から透過前側に透過していくラドン原子数、右辺第三項は単位時間あたりに透過後側で崩壊するラドン原子数である。

この微分方程式を解くと式 4.2 のようになる。

$$\frac{N_a}{N_b} = \frac{\tau_{Rn}}{\tau_{Rn} + \tau_{ema}} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{1}{\tau_{ema}} + \frac{1}{\tau_{Rn}} \right) t \right\} \right] \quad (4.2)$$

$$\tau_{ema} = \frac{TV}{Ak}$$

ここで $t \rightarrow \infty$ の放射平衡のとき、式 4.2 の右辺第 2 項が 0 となるので、式 4.2 は式 4.3 のようになる。

$$\frac{N_a}{N_b} = \frac{\tau_{Rn}}{\tau_{Rn} + \tau_{ema}} \quad (4.3)$$

ラドンの放射能（ラドン濃度 n [Bq/m³]）は単位体積あたりのラドン原子数 N [/cm³] に比例し、ある一定の係数 c を用いて $n = cN$ と書ける。つまり透過前側のラドン濃度は $n_b = cN_b$ 、透過後側のラドン濃度は $n_a = cN_a$ と書け、式 4.4 のようになる。

$$\frac{N_a \text{ [/cm}^3\text{]}}{N_b \text{ [/cm}^3\text{]}} = \frac{n_a/c}{n_b/c} = \frac{n_a \text{ [Bq/m}^3\text{]}}{n_b \text{ [Bq/m}^3\text{]}} \quad (4.4)$$

以上より透過前と透過後のラドン濃度を測定することにより、ラドン透過率 k が式 4.5 のように求まる。

$$\frac{1}{k} = \frac{A}{TV} \tau_{Rn} \left(\frac{n_b}{n_a} - 1 \right) \text{ [/(cm}^2\text{/sec)]} \quad (4.5)$$

4.2 実験装置

本節では、第 4.1.2 節で示したような測定を行うため、本研究で用いた装置の説明をする。

4.2.1 ラドン検出器

スーパーカミオカンデでの低エネルギー領域のニュートリノを解析する際にバックグラウンドとなる、²²²Rn 濃度を測定するために、80 L ラドン検出器（図 4.4）、1 L ラドン検出器（図 4.5）、70 L ラドン検出器、中空糸膜モジュール（図 4.6,4.7）を使用する。また 80 L、1 L、70 L ラドン検出器の断面図を示す。すべての型のラドン検出器はステンレス (SUS304) 製の検出器である。検出器の内部はバックグラウンドを低減するために、電解研磨が施されている。検出器内部の上部には半導体検出器 (PIN Photo Diode, PD) が取り付けられている。検出部は、PD、フィードスルー、プリアンプ/電子回路からなり、上部に収納されている。

本研究では、空気中でのラドン透過率測定のために、ラドン濃度が低い透過後側に感度が良い 80 L ラドン検出器、透過前側にはラドン濃度を高くするために体積が小さい 1 L ラドン検出器を用い、水中でのラドン透過率測定のために既設の 70 L ラドン検出器、中空糸膜モジュールを用いた。

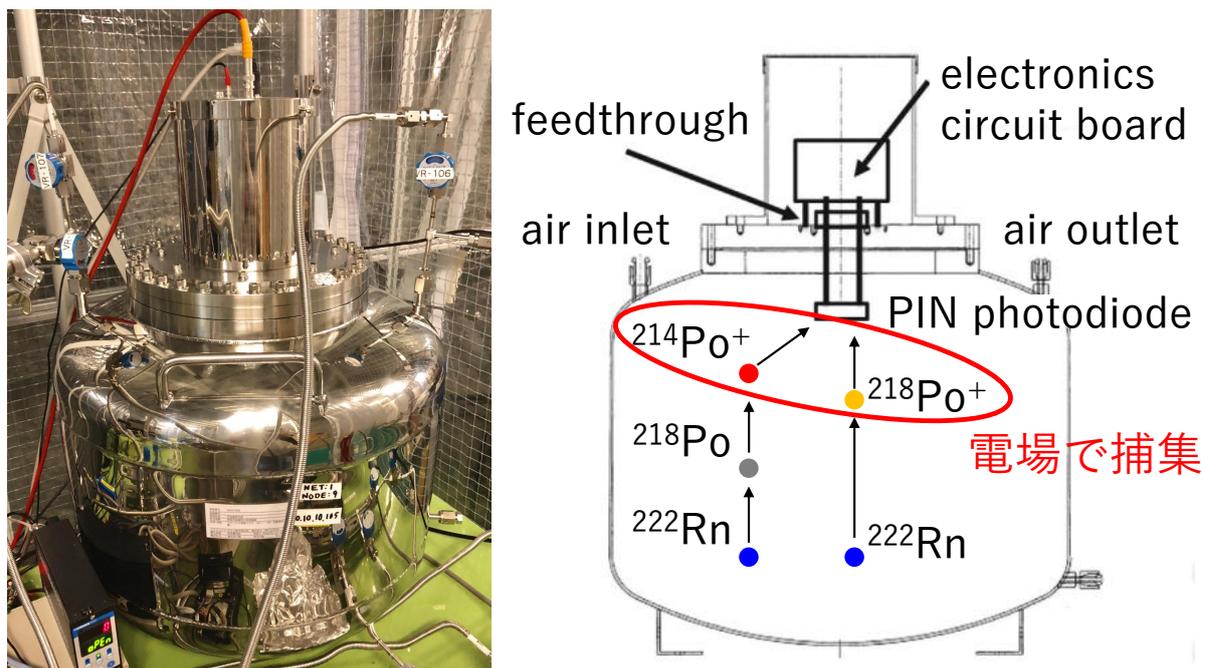


図 4.4 80 L ラドン検出器の写真/断面図と静電捕集法の原理

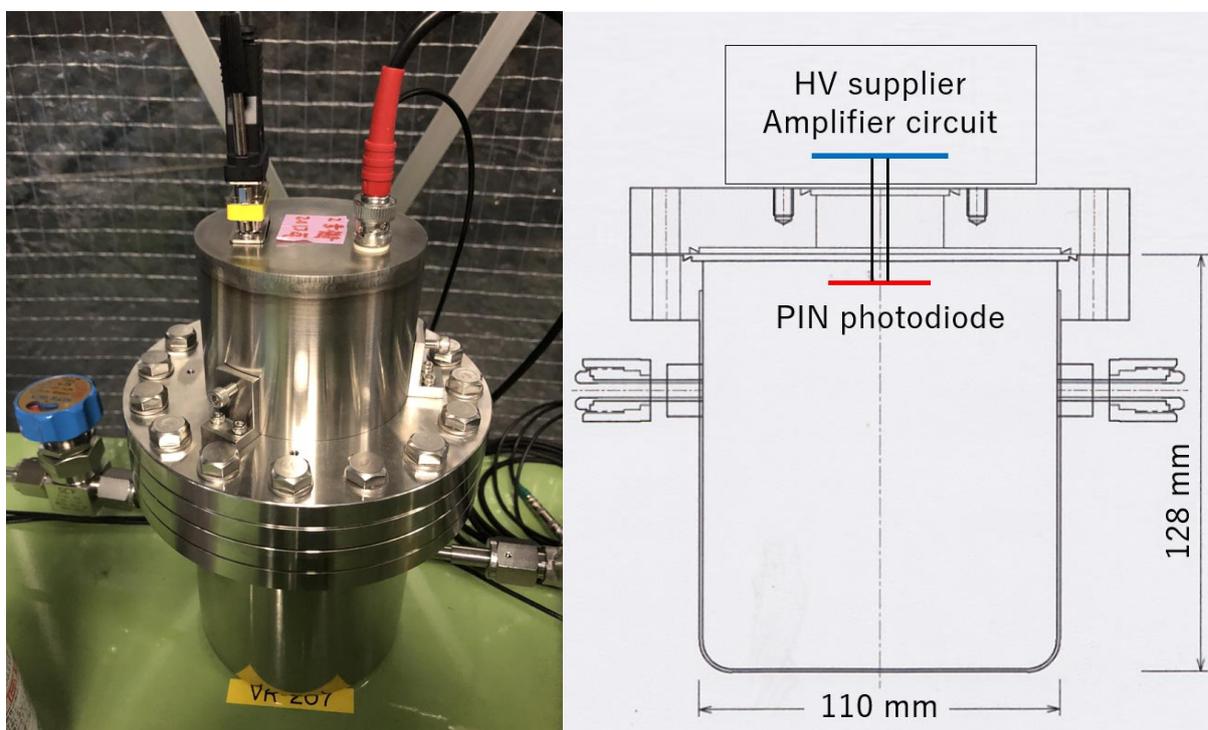


図 4.5 1 L ラドン検出器の写真/断面図

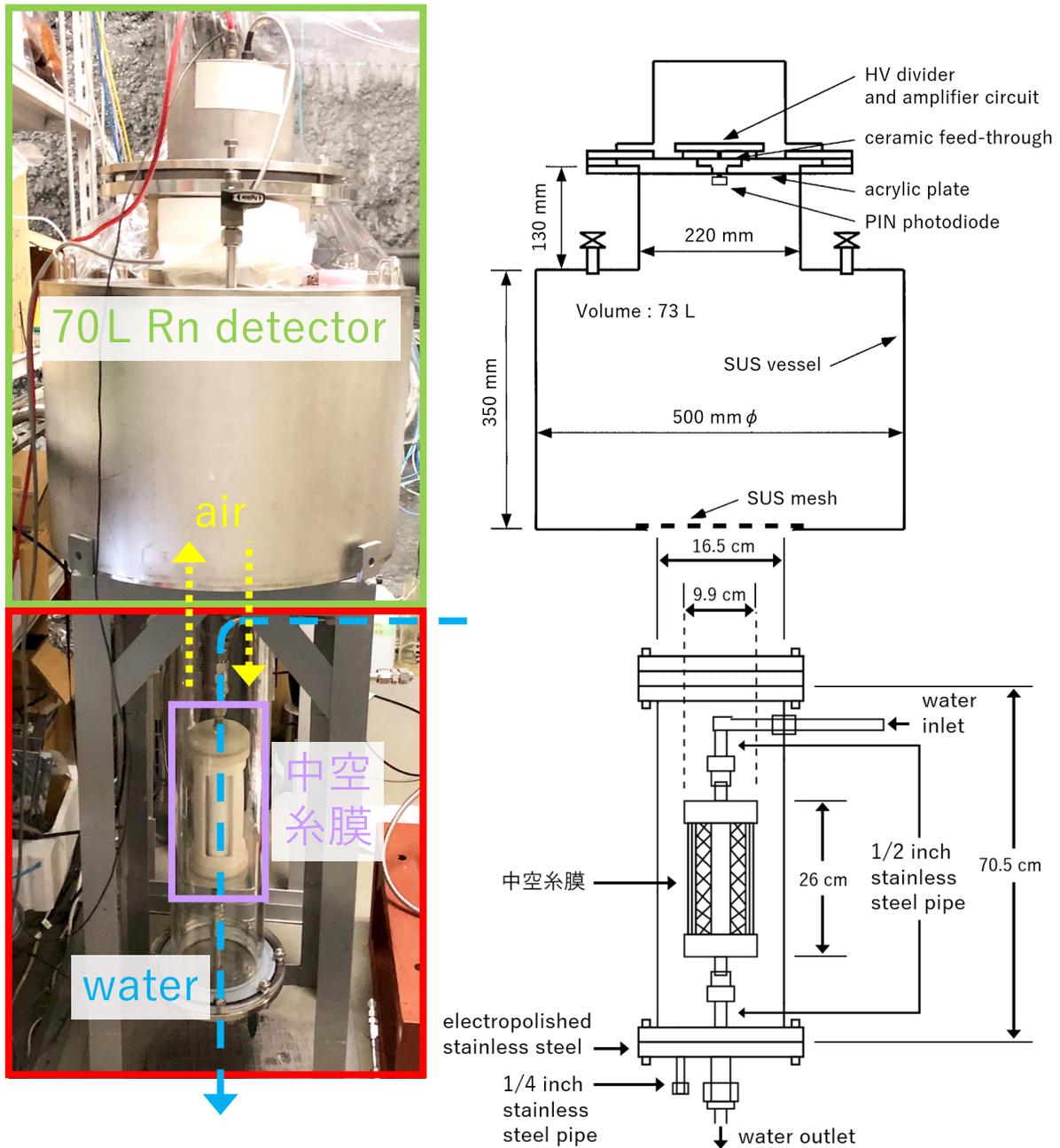


図 4.6 70 L ラドン検出器と中空糸膜モジュールの写真/断面図 [33]

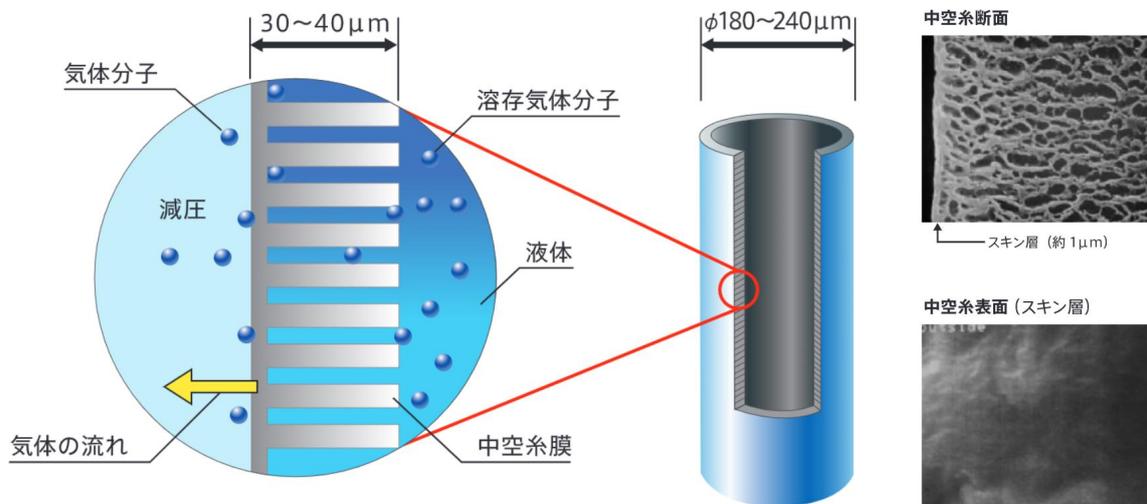


図 4.7 中空糸膜の模式図と表面写真 [34]

水中でのラドン透過率測定には、70 L 高感度ラドン検出器と、液相のラドンを気相に移すための中空糸膜 (DIC 株式会社製 SEPAREL PFX-009) というモジュールを組み合わせて用いた。図 4.7 に中空糸膜の構造の模式図と表面写真を示す。図 4.7 に示すように、中空糸膜とは、気体のみを透過させ液体を透過させない特徴を持つ細い糸状の分離膜である。

中空糸膜内部にラドンを含む純水を流し、気液平衡により中空糸膜外部の気相に放出されたラドンガスを、70 L ラドン検出器で静電捕集 (第 4.2.2 節で説明する) して純水中のラドン濃度を測定する。

4.2.2 検出原理

図 4.1 にあるラドンの壊変娘核種のうち、ポロニウム (^{218}Po , ^{214}Po) などはその多くが正に帯電している [35]。本研究で用いるラドン検出器では、静電捕集法という手法でその娘核種を検出している。図 4.4 に静電捕集法の簡単な原理図を示す。具体的な方法は、検出器上部にある PD にマイナスの高電圧を印加、ステンレス容器を GND として、検出器内部に電場を形成し、帯電したラドンの壊変娘核種を PD に集める。その後、崩壊したラドンの壊変娘核種の放出する α 線のエネルギーを PD で測定し、ADC 領域を決めてからラドンの壊変娘核種の崩壊数を測定する。図 4.8 にラドン検出器で得られる典型的なエネルギースペクトルを示す。図 4.8 では、 ^{218}Po の 6.003 MeV の α 崩壊ピークと、 ^{214}Po の 7.689 MeV の α 崩壊ピークとが見られる。ここで、我々はより捕集しやすい下流側の ^{214}Po の計数を用いる。図 4.8 のように、 ^{214}Po のシグナル領域を決め、計数を測定する。

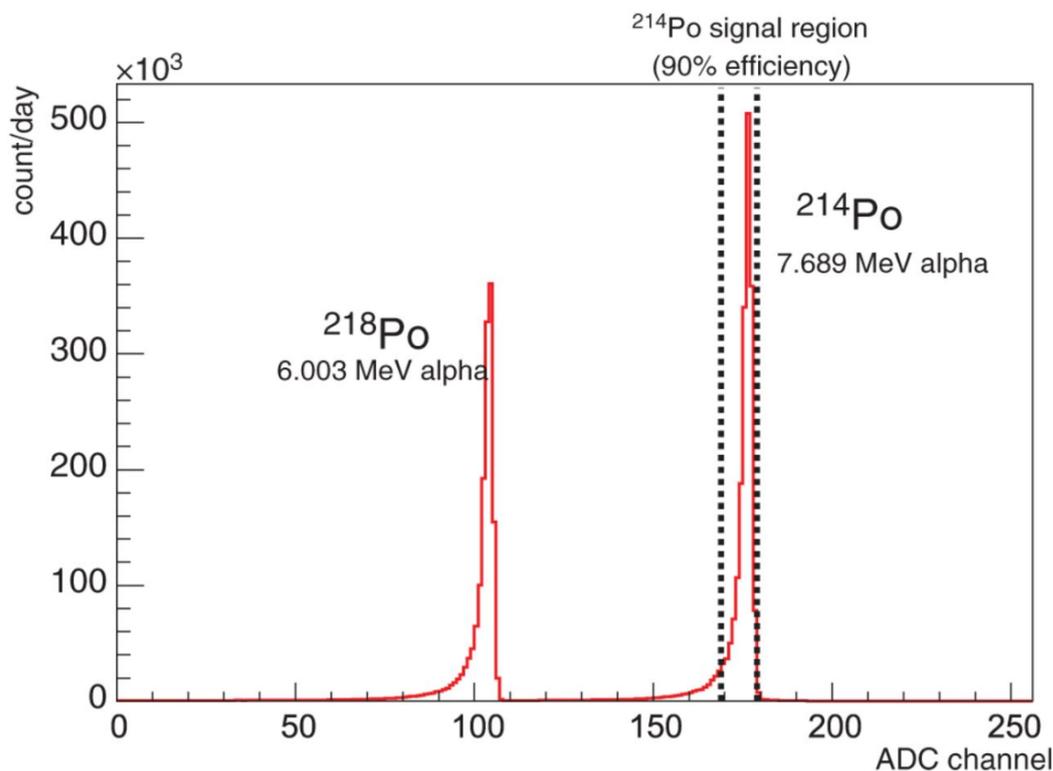


図 4.8 エネルギースペクトル [36]

PIN Photo Diode

ラドン検出器の上部に取り付けられている PD は、1 L ラドン検出器には受光面が $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ の浜松ホトニクス社製の S3590-09 [37] が、80 L ラドン検出器には受光面が $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ である、浜松ホトニクス社製の S3204-09 が用いられている。

PD を用いる理由は、以下のような特徴を持つためである。

- ・ 小型、軽量
- ・ 入射粒子のエネルギーに対する高い分解能
- ・ 広範囲のエネルギーに対する優れた線形性
- ・ 低ノイズ
- ・ 長寿命

データ収集システム

ラドン透過率測定のデータ取得には、ARM プロセッサを搭載したシングルボードコンピュータである Raspberry Pi (図 4.9)、高圧電源、増幅回路、アナログ-デジタル変換回路を用いる [37]。 α 粒子が入射することで生じる PD からの電荷は、プリアンプ回路により電圧パルスに変換される。その後オペアンプにより整形され、電氣的に正の信号に反転され、増幅される。信号は Raspberry Pi 用に開発されたアナログ-デジタル変換回路に送られ、その後 Raspberry Pi に送られる。



図 4.9 Raspberry Pi の写真 [38]

4.3 ラドン検出器の較正

較正係数 (Calibration Factor, CF) とは、1 日あたりの ^{214}Po の崩壊による α 線の計数とラドン濃度の関係を結ぶ因子であり、その関係は以下の式 4.6 ように書ける。

$$\text{ラドン濃度} [\text{Bq/m}^3] = \frac{1 \text{ 日あたりの } ^{214}\text{Po} \text{ の計数} [\text{count/day}]}{CF [(\text{count/day})/(\text{Bq/m}^3)]} \quad (4.6)$$

本研究ではラドン検出器を用いて、 ^{214}Po の計数を測定する。80 L ラドン検出器の較正係数を $CF_{80\text{L}}$ 、1 L ラドン検出器の較正係数を $CF_{1\text{L}}$ として、透過前側の 1 日あたりの ^{214}Po の計数を p_b [count/day]、透過後側の 1 日あたりの ^{214}Po の計数を p_a [count/day] とすると、透過前側のラドン濃度 n_b [Bq/m³]、透過後側のラドン濃度 n_a [Bq/m³] は次のようになる。

$$n_b = \frac{p_b}{CF_{1\text{L}}}, \quad n_a = \frac{p_a}{CF_{80\text{L}}} \quad (4.7)$$

式 4.7 を式 4.5 に代入することによりラドン透過率が求まる。

また較正係数には湿度依存性がある [36]。これは検出器内部に水蒸気が含まれると、正に帯電している ^{214}Po や ^{214}Pb が電氣的に中和され、検出効率が落ちるためである。

80 L ラドン検出器の較正係数 $CF_{80\text{L}}$ は、絶対湿度 (Absolute Humidity, AH [g/m³]) を用いて式 4.8 のように書ける [39][36]。

$$CF_{80\text{L}} = (2.25 - 0.29\sqrt{AH}) \times 10^3 [(\text{count/day})/(\text{Bq/m}^3)] \quad (4.8)$$

水蒸気を理想気体とみなして近似すると、絶対湿度 AH [g/m³] は、気温を T [°C]、水蒸気圧を e [hPa] として、

$$AH [\text{g/m}^3] = \frac{e}{T + 273.15} \times 216.7 \text{ g/m}^3 \quad (4.9)$$

となる。また、相対湿度 (Relative Humidity, RH) は気温 T [°C] における飽和水蒸気圧を $e_s(T)$ [hPa] として、

$$RH [\%] = \frac{e}{e_s(T)} \times 100\% \quad (4.10)$$

のように表され、飽和水蒸気圧 $e_s(T)$ [hPa] は、Tetens の近似式 [40]、

$$e_s(T) = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T}{T+237.3}} \quad (4.11)$$

のように表される [41]。

本研究で用いた 1 L ラドン検出器は密閉型であり、これまで正確な較正が行われていなかった。そこで本研究では、同じ実験システム内の 1 L ラドン検出器と 80 L ラドン検出器を正確に較正するために、較正実験 (5.2 節) を行い、密閉型 1 L ラドン検出器の較正係数 (CF_{1L}) を初めて測定した。

また水中でのラドン透過率測定に用いた 70 L ラドン検出器の較正は、[42] で行われており、ラドンを含んだ純水のラドン濃度と ^{214}Po の計数率の比を測定することによって、70 L ラドン検出器の較正係数を求めた。較正実験により

$$CF_{\text{water}} [(count/day)/(Bq/m^3)] = \frac{^{214}\text{Po Count Rate [count/day]}}{^{214}\text{Rn Concentration [Bq/m^3]}} \quad (4.12)$$

$$CF_{\text{water}} [(count/day)/(Bq/m^3)] = (3.0 \pm 0.4) \times 10^3 (count/day)/(Bq/m^3) \quad (4.13)$$

という較正係数を得た。

4.4 ラドン透過率測定用セル

シート状の HDPE のラドン透過率を測定するために、ラドン透過率測定用セルを新たに開発し、実験を行った。ラドン透過率測定用セルは市販されている、株式会社東洋精機製作所製ガス分析装置の測定用セルを、本研究用に改造して用いた。材質は SUS304 であり、内部はバックグラウンド低減のために電解研磨を施し、気密性を高めるため、VCR 継手をセルに溶接した。図 4.10 にラドン透過率測定用セルの写真、図 4.11 にセル内部の模式図を示す。測定原理はセルにシート状素材 (本研究では HDPE) を挟み、片側に高濃度ラドンの空気/水を循環させ (透過前側)、もう片側には純空気/純水を循環させ (透過後側)、透過前後のラドン濃度を測定することで、シート状素材のラドン透過率を計算する。

予備実験では、透過後側ラドンバックグラウンドは $2.86 \times 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$ となった。透過前側ラドン濃度を $n_b = 10^5 \text{ Bq/m}^3$ と仮定すると、これはラドン透過率においては $\frac{k}{T} = 1.2 \times 10^{-9} (\text{cm}^2/\text{sec})/\text{cm}$ に相当する。

また、このラドン透過率測定用セルの水への応用は本研究が初めてである。

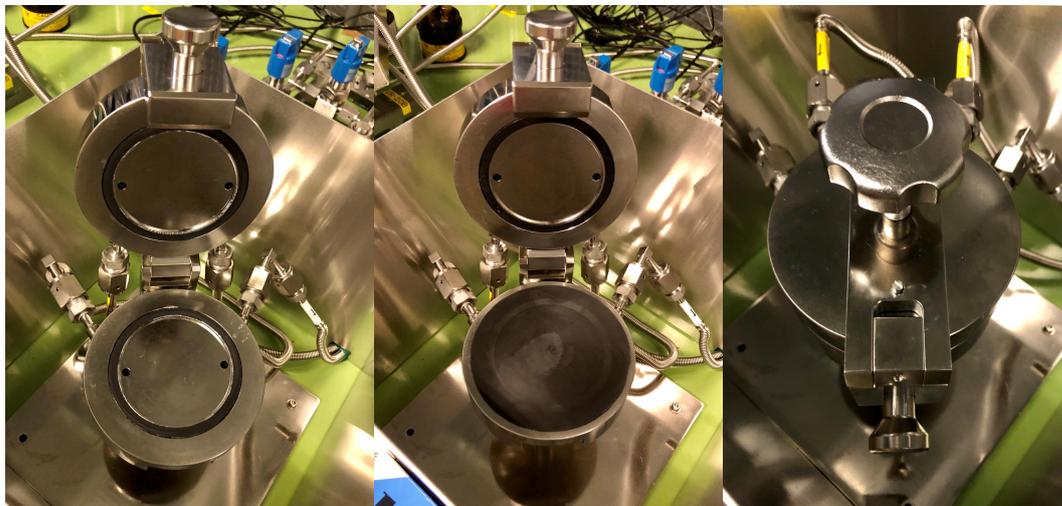


図 4.10 ラドン透過率測定用セル

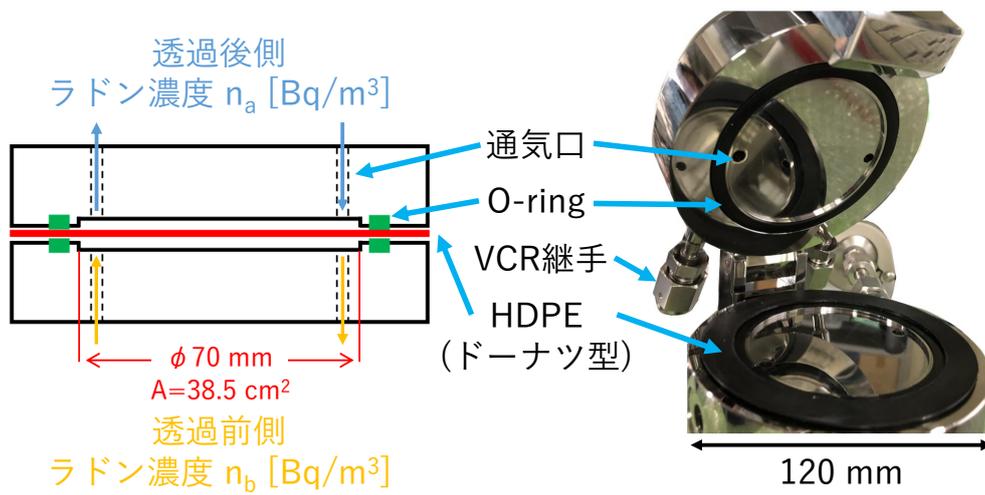


図 4.11 ラドン透過率測定用セル内部の模式図

第 5 章

空気中でのラドン透過率測定

まず本研究では、1 L ラドン検出器の校正係数 CF_{1L} を測定し、その後ラドン透過率 (式 4.1) を先行研究と比較するために、0.50 mm、0.96 mm、2.0 mm の円形、正方形の形の異なる HDPE サンプルの空気中でのラドン透過率を測定した。

5.1 セットアップ

実験には 1 L ラドン検出器、80 L ラドン検出器、ラドン透過率測定用セル、ラジウム線源、G1 純空気、露点計、流量計、気圧計、フィルター、ポンプを用いる。図 5.1 に空気中でのラドン透過率測定実験システムの写真を示す。ラジウム線源には PYLON RNC(^{226}Ra , 0.417 kBq) を用い、ラドン透過率測定用セルには、5.2 節の校正実験の際は、1 L ラドン検出器、80 L ラドン検出器に同じ空気を循環させるために、ドーナツ型の HDPE(図 5.2) をはさみ、内部の空気が十分混ざるようにした。また HDPE のラドン透過率測定の際には 3 種類の厚さの円形または正方形の HDPE (図 5.3) を挟む。HK では GSE Environmental 社製のシートを採用予定である。円形の HDPE は実際に HK に使用される予定の厚さ 5 mm の HDPE シート製品を削ったものである。正方形の HDPE は厚みの薄い同じメーカーの製品である。配管図は図 5.4 の通りである。各装置等にある表記は VR がバルブ、FLT がフィルター、PL が圧力計、MFM が流量計、DEW が露点計、PPA が空気を循環させるためのポンプである。3 桁の数字の 100 番台は 1 L ラドン検出器側のものであり、200 番台は 80 L ラドン検出器側のものである。

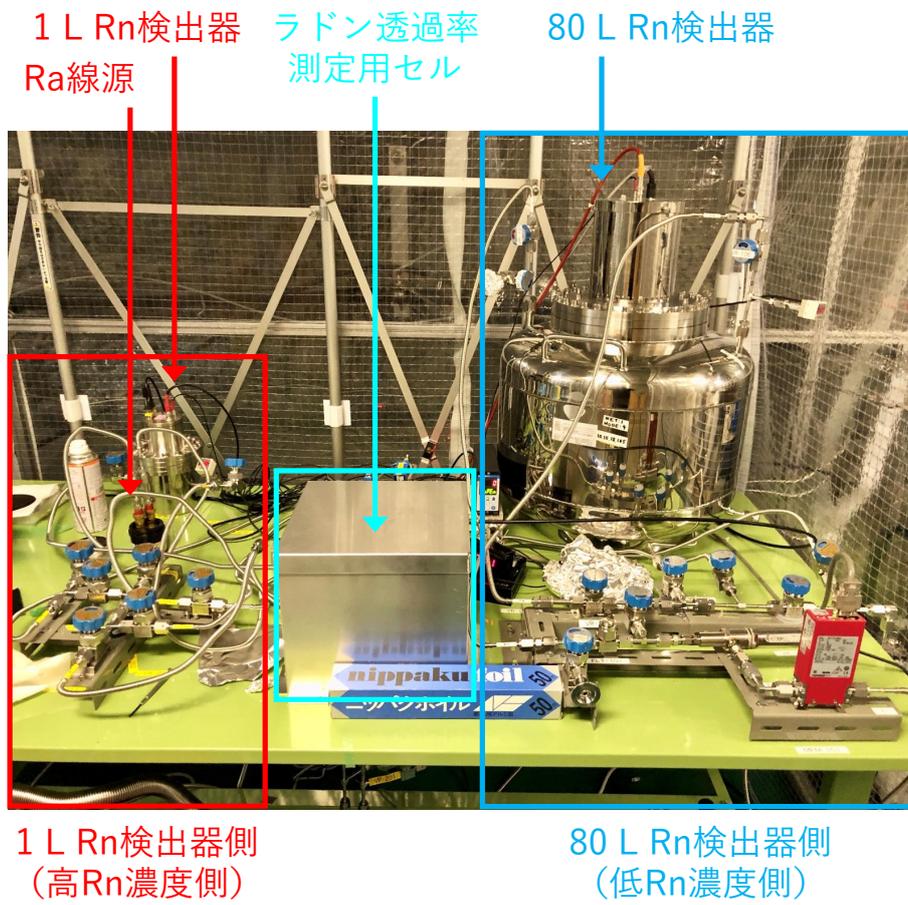


図 5.1 空気中でのラドン透過率測定実験装置の写真

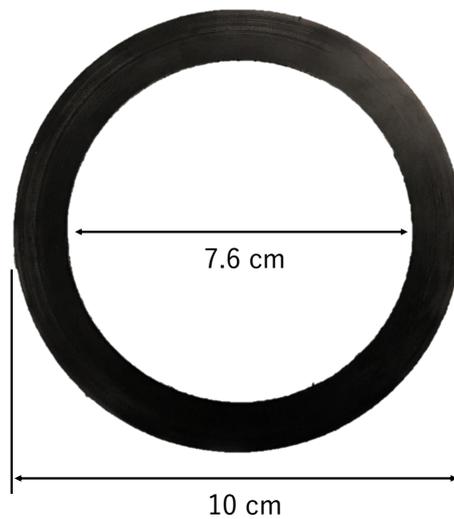


図 5.2 ドーナツ型の HDPE

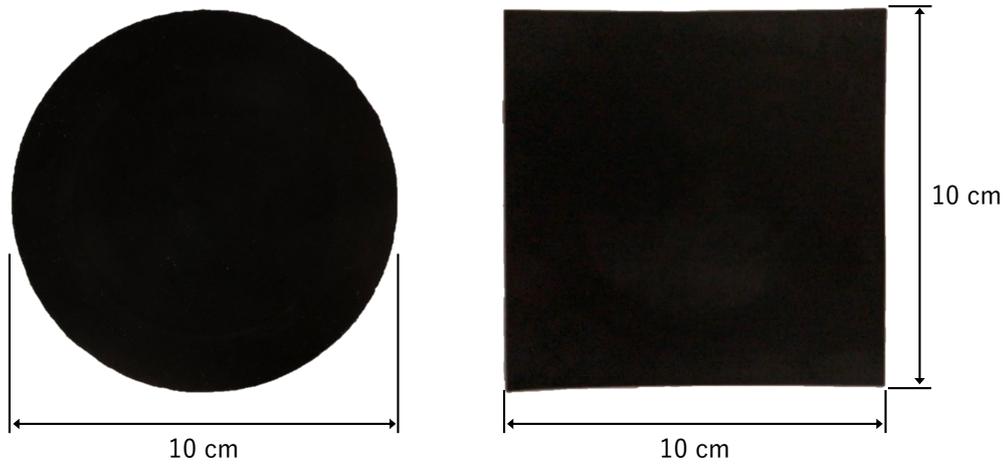


図 5.3 円形, 正方形の HDPE

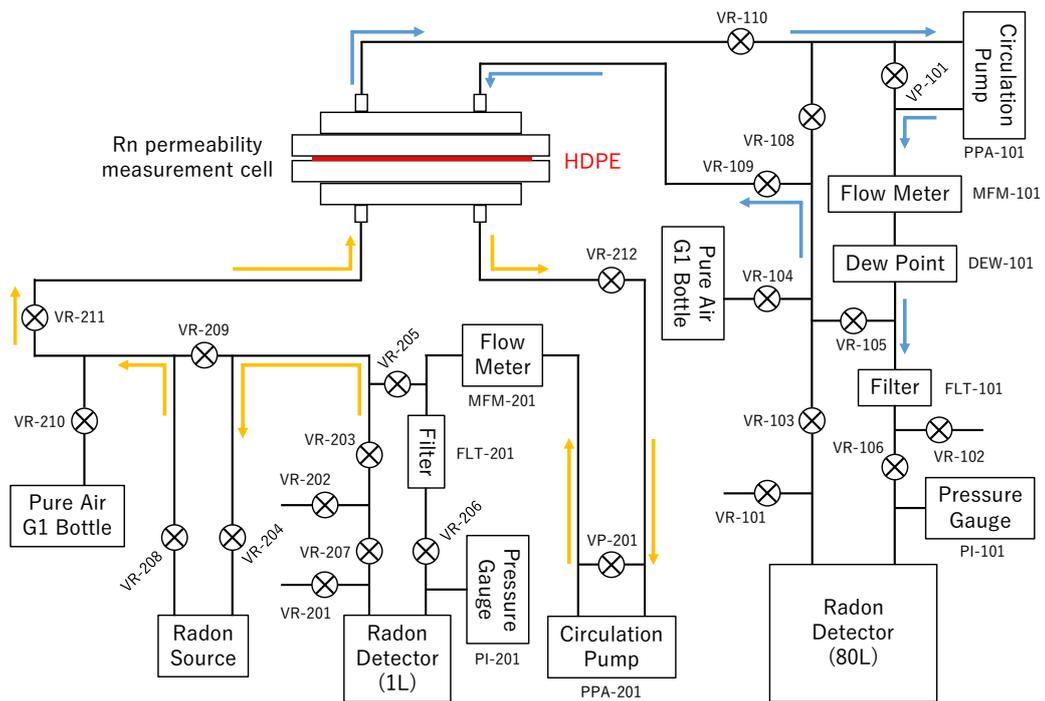


図 5.4 空気中でのラドン透過率測定実験の配管図

5.2 1 L ラドン検出器の較正

1 L ラドン検出器と 80 L ラドン検出器の較正を行うために、ラドン透過率測定用セルに厚さ 0.96 mm のドーナツ型の HDPE を挟み、同じラドン濃度の空気を流し、1 L ラドン検出器と 80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数を比

較し、1 L ラドン検出器の較正係数 CF_{1L} を求める測定 (CF Run1,2) を行う。また較正係数は絶対湿度に依存するので、検出器内の温度・湿度も測定する。

測定はラドン線源をつなぎ一定のラドン濃度を測定、比較するための CF Run1 と、ラドン線源を切り離しラドンの崩壊曲線を比較するための CF Run2 を行う。測定期間は以下の表 5.1 にまとめる。

表 5.1 CF Run の測定時間

	CF Run1	CF Run2
測定開始時刻	2018/11/5 15:00	2018/11/6 16:00
測定終了時刻	2018/11/6 16:00	2018/11/7 11:00
測定時間	25 hours	19 hours

5.2.1 測定の手順

この節では実際に行った測定の手順を示す。

・CF Run1

- 1-1. すべてのバルブを閉じる。
- 1-2. ラドン透過率測定用セルの O-Ring に真空グリス (信越シリコーン 高真空シール用 HIVAC-G) を塗り、間に 0.96 mm のドーナツ型の HDPE を挟む。
- 1-3. VR-104、VR-106、VR-109、VR-110 を開け、その他のバルブを閉じ、VR-104 の配管から G1 純空気を入れ、VR-101 の配管から排気することで、80 L ラドン検出器側の系をパージする。
- 1-4. VR-103、VR-104、VR-106、VR-107、VR-109 を開け、その他のバルブを閉じ、G1 純空気を入れ 1 L ラドン検出器側と 80 L ラドン検出器側の圧力のバランスをとる。PI-101 : 0.002 MPa、PI-201 : 0.002 MPa。
- 1-5. VR-103、VR-106、VR-109、VR-110、を開け、その他のバルブを閉じ、ポンプ PPA-101 を ON にし、80 L ラドン検出器側の循環を開始する。
- 1-6. VR-203、VR-204、VR-206、VR-207、VR-208、VR-211、VR-212、を開け、その他のバルブを閉じ、ポンプ PPA-201 を ON にし、1 L ラドン検出器側の循環を開始する。
- 1-7. 1 L ラドン検出器に -120 V、80 L ラドン検出器に -2000 V の高電圧をかけ、測定を開始する。

・CF Run2

- 2-1. VR-209 を開け、VR-204、VR-208 を閉じ、測定系からラジウム線源を切り離して測定を開始する。
- 2-2. 測定を終了で、ポンプ PPA-101、PPA-201 を OFF にし循環を停止させる。

5.2.2 較正係数の測定

CF Run1,2 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトルを図 5.7 に、CF Run1,2 の温度、相対湿度、1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化を図 5.8 に示す。CF Run2 で 1 L ラドン検出器と 80 L ラドン検出器にラドンの崩壊曲線が等しく見られたので、どちらの検出器もサチレーション状態ではなく、正しい係数を測定できたと判断される。よってラドン透過率の計算には CF Run1 の計数率が一定の部分を用いる。

Fitting 関数は $p_0(const.)$ であり、Fitting 範囲は 2018/11/5 19:00 から 2018/11/6 14:00 である。

測定結果より 1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数は式 5.1 のようになる。

$$p_{0_{1L}} = (3.99 \pm 0.01 (stat.)) \times 10^3 \text{ [count/hour]} \quad (5.1)$$

80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数は式 5.2 のようになる。

$$p_{0_{80L}} = (4.16 \pm 0.01 (stat.)) \times 10^5 \text{ [count/hour]} \quad (5.2)$$

温度 T [°C]、相対湿度 RH は、測定期間中の典型的な値として、 $T = 21 \pm 2 (syst.)$ °C、 $RH = 14 \pm 2 (syst.)\%$ を仮定した。式 4.9 4.10 4.11 より、絶対湿度は式 5.3 となる。

$$AH = 2.6 \pm 0.3 (syst.) \text{ [g/m}^3\text{]} \quad (5.3)$$

よって式 4.8 は、5.4 となる。

$$CF_{80L} = (1.8 \pm 0.1) \times 10^3 \text{ [(count/day)/(Bq/m}^3\text{)]} \quad (5.4)$$

1 L ラドン検出器と 80 L ラドン検出器には同じラドン濃度の空気を流しているので、

$$\frac{p_{0_{1L}} \text{ [count/hour]} \times 24 \text{ [hour/day]}}{CF_{1L} \text{ [(count/day)/(Bq/m}^3\text{)]}} = \frac{p_{0_{80L}} \text{ [count/hour]} \times 24 \text{ [hour/day]}}{CF_{80L} \text{ [(count/day)/(Bq/m}^3\text{)]}} \quad (5.5)$$

が成り立ち、 CF_{1L} は式 5.6 となる。

$$CF_{1L} = \frac{p_{0_{1L}}}{p_{0_{80L}}} \times CF_{80L} \quad (5.6)$$

$$= (16.8 \pm 0.7) \text{ [(count/day)/(Bq/m}^3\text{)]} \quad (5.7)$$

式 5.6 より透過前後のラドン濃度の比は式 5.8 となる。

$$\begin{aligned} \frac{n_a}{n_b} &= \frac{p_{80L}/CF_{80L}}{p_{1L}/CF_{1L}} \\ &= \frac{p_{80L}/CF_{80L}}{p_{1L}/\left(\frac{p_{0_{1L}}}{p_{0_{80L}}} \times CF_{80L}\right)} \\ &= \frac{p_{80L}/p_{0_{80L}}}{p_{1L}/p_{0_{1L}}} \end{aligned} \quad (5.8)$$

よって、温度 T と相対湿度 RH は、透過前後のラドン濃度の比に影響せず、つまりラドン透過率に影響はない。

本研究で使用した密閉型の 1 L ラドン検出器とは異なる開放型の 1 L ラドン検出器の較正係数についての論文 [37] によると、1 L ラドン検出器の較正係数 CF'_{1L} は

$$CF'_{1L} = (12.86 \pm 0.40) - (1.66 \pm 0.19)\sqrt{AH} \text{ [(count/day)/(Bq/m}^3\text{)]} \quad (5.9)$$

のように書ける。式 4.9 より

$$CF'_{1L} = (8.54 \pm 0.64) \text{ [(count/day)/(Bq/m}^3\text{)]} \quad (5.10)$$

となる。式 5.7、5.10 を比較すると、較正係数が大きく違っている。これは本研究に使用した 1 L ラドン検出器は密閉型 (図 5.5) であるのに対し、論文 [37] で使用された 1 L ラドン検出器は開放型 (図 5.6) であることが要因である。

本研究では校正係数には式 5.7 の値を用いる。

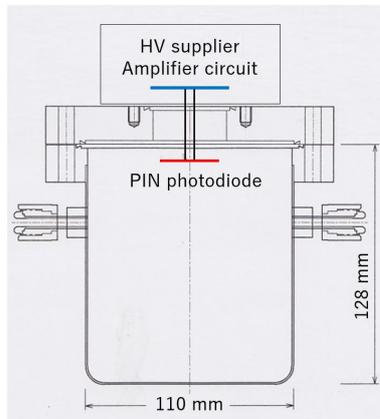


図 5.5 密閉型の 1 L ラドン検出器の断面図。ガスの出入りは VCR コネクタ経由のみであり、循環が可能である。

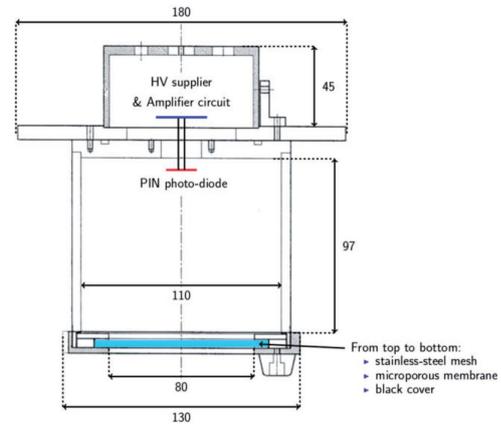


図 5.6 開放型の 1 L ラドン検出器の断面図 [37]。ガスの出入りは下部のメンブレン経由であり、自然のガスの出入りのみである。

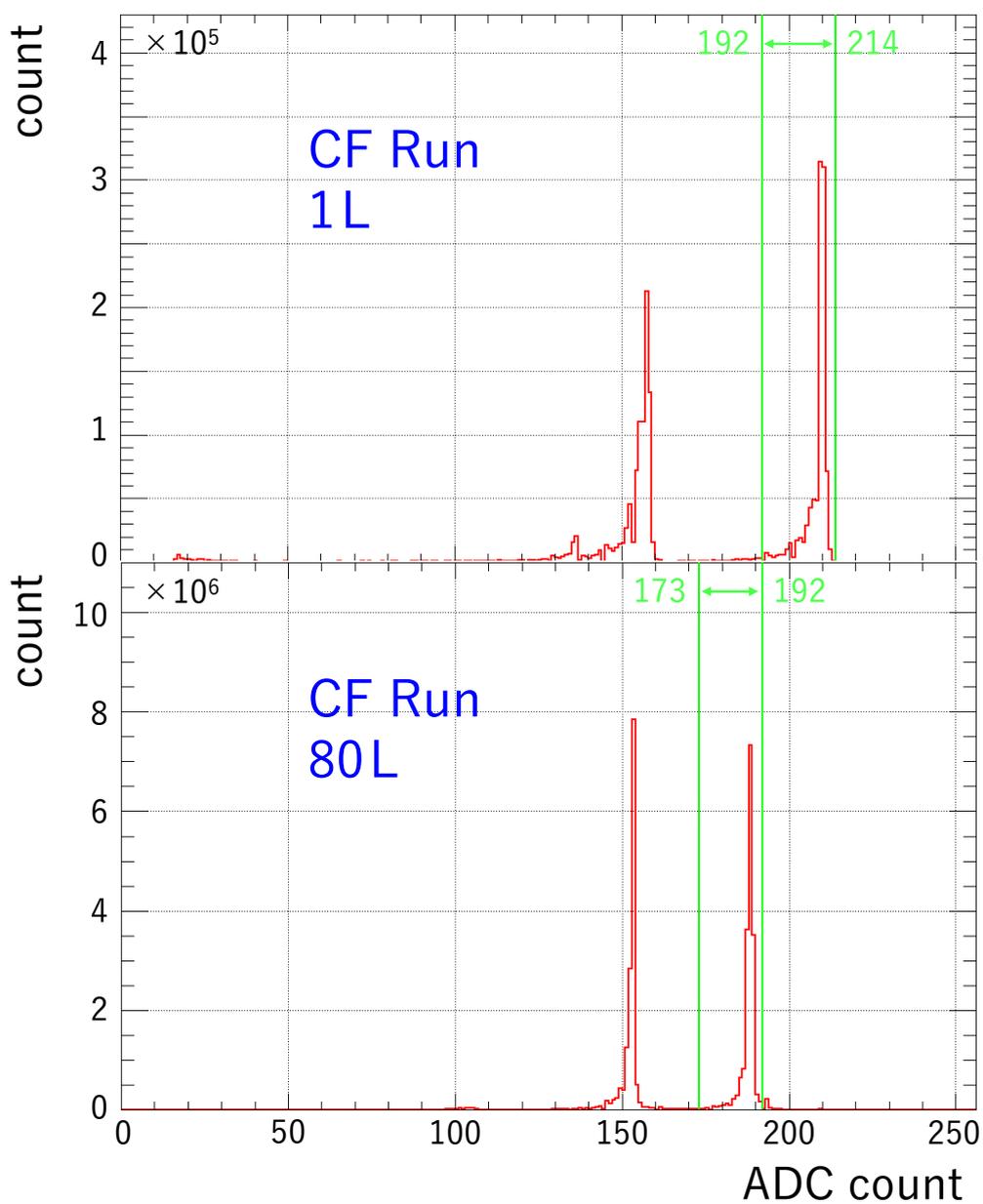


図 5.7 CF Run の 1L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル。黄緑の線は解析に使用した ^{214}Po のエネルギーの範囲を示す。

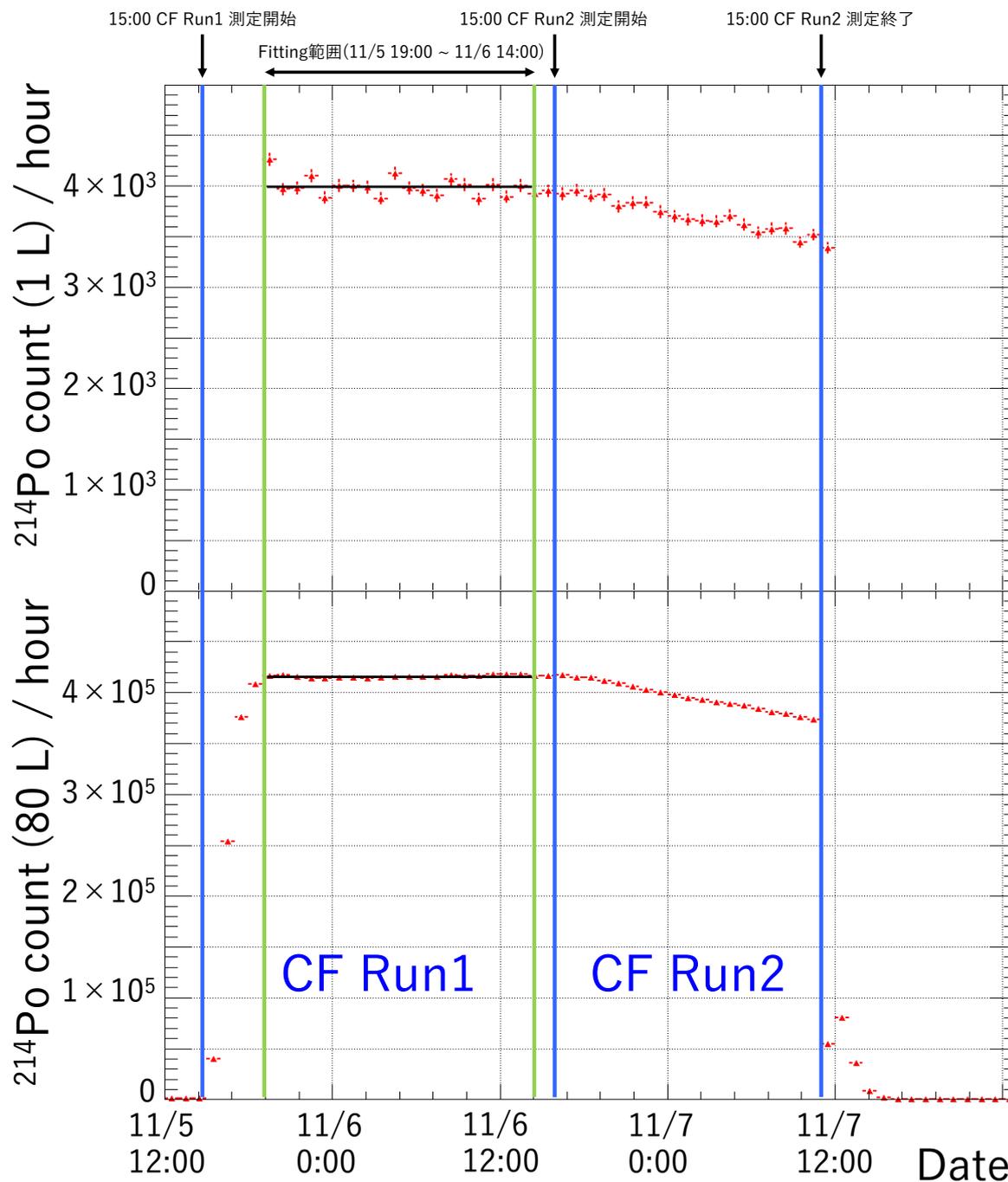


図 5.8 CF Run の測定結果 (1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化。)

5.3 HDPE の測定

本研究では 0.50 mm (円形、正方形)、0.96 mm (円形)、2.0 mm (正方形) の 3 種類の厚さの HDPE の空気中でのラドン透過率を測定する。測定は 6 回 (Run1-6) 行い、それぞれの測定について 4.2.2 の手法でラドン透過率を求める。

5.3.1 測定の手順

この節では実際に行った測定の手順を示す。

・Run1 – 3

- 1-1. すべてのバルブを閉じる。
- 1-2. [サンプルのセット] ラドン透過率測定用セルの O-Ring に真空グリスを塗り、間に 0.50 mm (円形) の HDPE を挟む。
- 1-3. [80 L 側のパージ] VR-104、VR-106、VR-109、VR-110 を開け、その他のバルブを閉じ、VR-104 の配管から G1 純空気を入れ、VR-101 の配管から排気することで、80 L ラドン検出器側の系を 10 分間パージする。
- 1-4. [80 L 側の真空引き] 80 L ラドン検出器の高電圧を OFF にし、VR-101、VR-103、VR-105、VR-108 を開け、その他のバルブを閉じ、VR-101 の配管から配管・検出器内の圧力が 10^{-2} Pa に達するまで真空引きをする。1-3,4 を 2 回繰り返す。
- 1-5. [圧力バランスの調整] VR-103、VR-104、VR-106、VR-107、VR-109 を開け、その他のバルブを閉じ、G1 純空気を入れ 1 L ラドン検出器側と 80 L ラドン検出器側の圧力のバランスをとる。PI-101 : 0.002 MPa、PI-201 : 0.002 MPa。
- 1-6. [80 L 側循環開始] VR-103、VR-106、VR-107、VR-109、を開け、その他のバルブを閉じ、ポンプ PPA-101 を ON にし、80 L ラドン検出器側の循環を開始する。
- 1-7. [1 L 側循環開始] VR-203、VR-204、VR-206、VR-207、VR-208、VR-211、VR-212、を開け、その他のバルブを閉じ、ポンプ PPA-201 を ON にし、1 L ラドン検出器側の循環を開始する。
- 1-8. [測定開始] 1 L ラドン検出器に -120 V、80 L ラドン検出器に -2000 V の高電圧をかけ、測定を開始する。

・Run4

- 4-1. 80 L ラドン検出器の高電圧を OFF にし、すべてのバルブを閉じる。
- 4-2. [サンプルのセット] ラドン透過率測定用セルの O-Ring にグリスを塗り直し、0.96 mm (円形) の HDPE を挟む。
- 4-3. [80 L 側のパージ] 1-3 と同様の手順でパージを行う。
- 4-4. [80 L 側の真空引き] 1-4 と同様の手順で配管・検出器内の圧力が 1 Pa に達するまで真空引きをする。
- 4-5. [圧力バランスの調整] PI-101 : 0.002 MPa、PI-201 : 0.002 MPa
- 4-6. [80 L 側循環開始]
- 4-7. [1 L 側循環開始]
- 4-8. [測定開始] 1 L ラドン検出器に -120 V、80 L ラドン検出器に -2000 V の高電圧をかけ、 ^{214}Po のカウントが安定するまで測定を行う。

・Run5

サンプルを 2.0 mm (正方形) の HDPE に交換し、Run 4 と同様の手順で ^{214}Po のカウントが安定するまで測定を行う。

・Run6

サンプルを 0.50 mm (正方形) の HDPE に交換し、Run 4 と同様の手順で ^{214}Po のカウントが安定するまで測

定を行う。

5.3.2 測定結果

Run1-3,6 は厚さ 0.50 mm の HDPE、Run4 は厚さ 0.96 mm の HDPE、Run5 は厚さ 2.0 mm の HDPE の空気中ラドン透過率測定である。測定の詳細は以下の表 5.2 に示す。

表 5.2 Run の測定時間

	Run1	Run2	Run3
HDPE の厚さ	0.50 mm (円形)	0.50 mm (円形)	0.50 mm (円形)
測定開始時刻	2017/12/26 14:00	12/27 12:20	12/29 0:40
測定終了時刻	2017/12/27 11:40	12/28 10:50	12/30 0:30
測定時間	21.7 hours	22.5 hours	23.2 hours

	Run4	Run5	Run6
HDPE の厚さ	0.96 mm (円形)	2.00 mm (正方形)	0.50 mm (正方形)
測定開始時刻	2018/5/4 14:00	09/27 19:00	11/7 12:00
測定終了時刻	2018/6/8 15:00	11/05 15:00	12/6 15:00
測定時間	35 days	38 days	29 days

Run1-3

Run1-3 では 0.50 mm (円形) の HDPE のラドン透過率を測定する。Run1-3 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトルを図 5.9 に、Run1-3 の温度、相対湿度、1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化を図 5.10 に示す。

1 L ラドン検出器の計数には p_b (*const.*) 80 L ラドン検出器の計数には

$$p_{\text{BG}} \times \left\{ 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\} + p_a \times \left\{ 1 - 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\}$$

の Fitting 関数で t_0 から t_1 までの範囲を Fit した。各 Run の Fitting 範囲と結果、計算したラドン濃度、式 4.2、式 4.3 から計算したラドン透過率を表 5.3 に示す。ただし測定開始から 80 L ラドン検出器側の ^{214}Po の計数が増加し始めるまでに時間がかかることがわかったため、Fitting 範囲を調整した。例えば Run1 では測定時間は 2017/12/26 14:00 から 2017/12/27 11:40 までであるが、Fitting 範囲は 2017/12/26 21:00 から 2017/12/27 11:00 までとした。

表 5.3 Run1-3 の測定の詳細と結果

		Run1	Run2	Run3
HDPE の厚さ		0.50 mm (円形)	0.50 mm (円形)	0.50 mm (円形)
t_0	(Date)	26.875	27.625	29.125
t_1	(Date)	27.458	28.417	30.000
p_b	[count/hour]	$(7.99 \pm 0.5) \times 10^4$	$(7.21 \pm 0.3) \times 10^4$	$(5.82 \pm 0.2) \times 10^4$
n_b	[Bq/m ³]	$(1.14 \pm 0.08) \times 10^5$	$(1.03 \pm 0.06) \times 10^5$	$(8.34 \pm 0.44) \times 10^4$
p_{BG}	[count/hour]	35.63 ± 5.65	164.1 ± 4.6	359.2 ± 5.6
p_a	[count/hour]	4392 ± 132	4504 ± 71	4714 ± 74
n_a	[Bq/m ³]	58.6 ± 3.7	60.1 ± 3.4	62.9 ± 3.4
k	[cm ² /sec]	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{-7}$

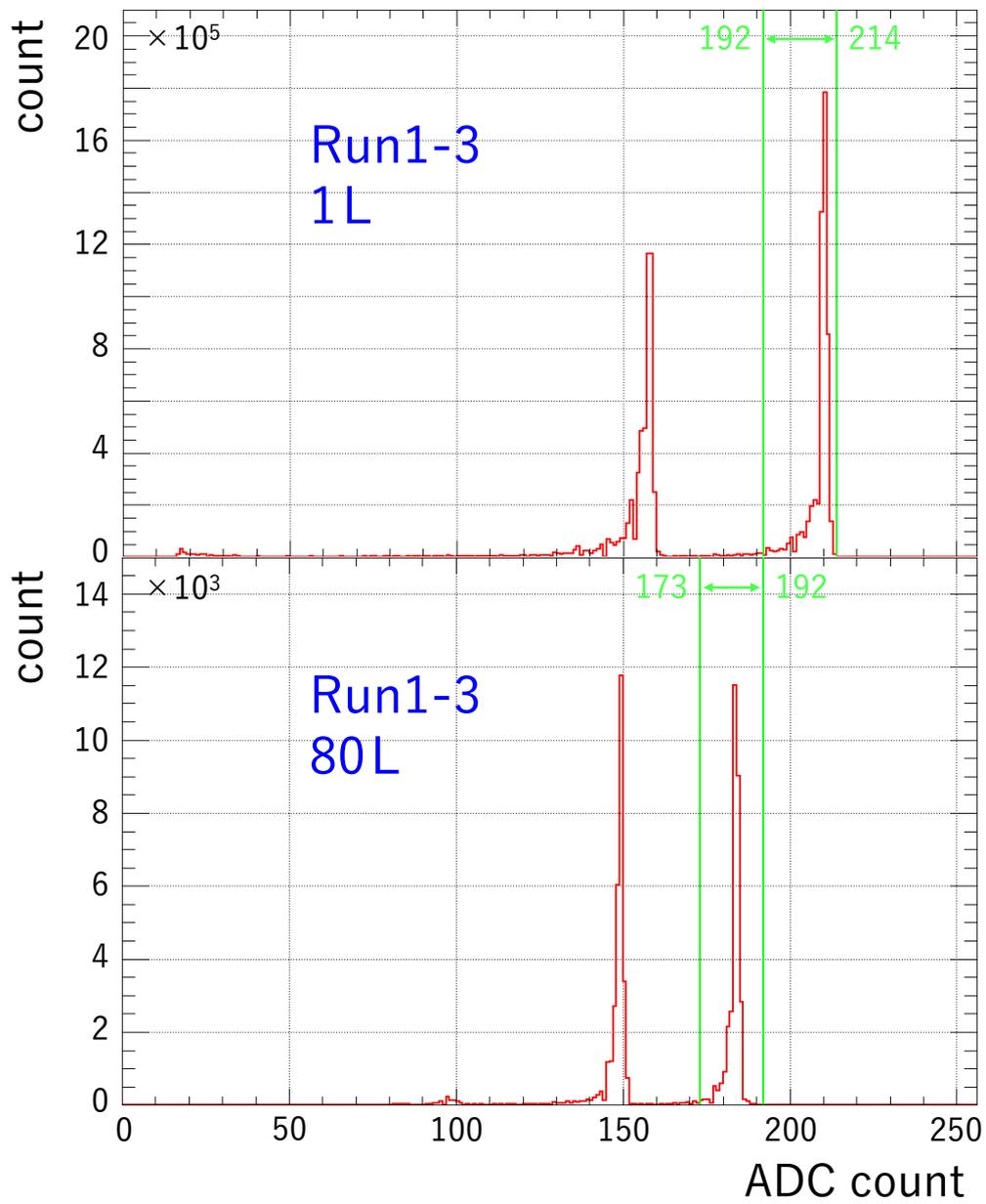


図 5.9 Run1-3 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル。黄緑の線は解析に使用した ^{214}Po のエネルギーの範囲を示す。

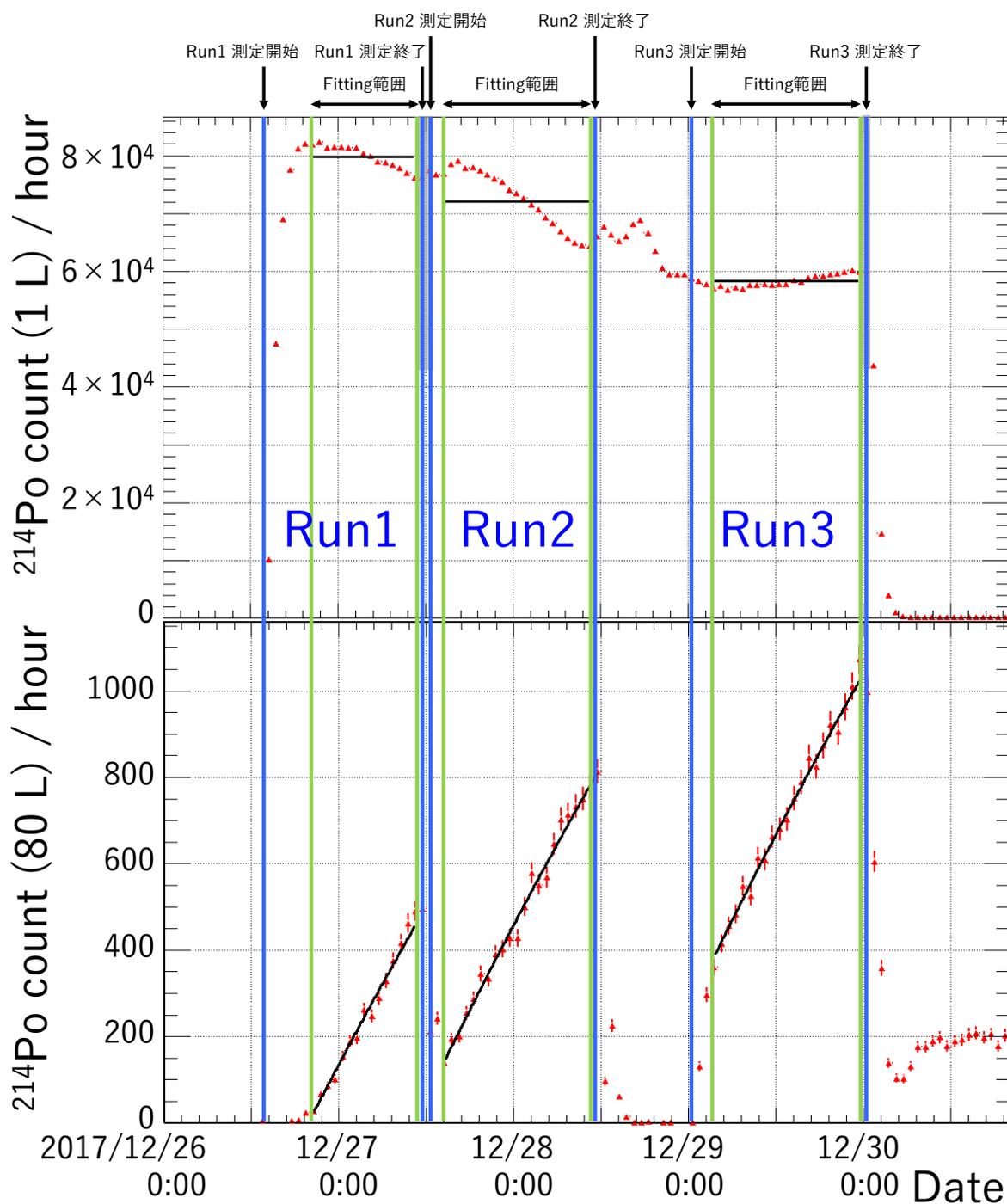


図 5.10 Run1-3 の測定結果 (1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化。)

Run4

Run4 では 0.96 mm (円形) の HDPE のラドン透過率を測定する。Run4 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトルを図 5.11 に、Run4 の温度、相対湿度、1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化を図 5.12 に示す。

Run 4 ではラドン透過率を精度良く測定するために、 ^{214}Po の計数が安定するまで測定を続けたので、1 L ラドン検出器の計数には p_b (*const.*) 80 L ラドン検出器の計数には p_a (*const.*) の Fitting 関数で t_0 から t_1 までの範囲を Fit した。ここで図 5.12 の点線は、

$$p_{\text{BG}} \times \left\{ 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\} + p_a \times \left\{ 1 - 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\}$$

の式により、Run4 開始 (t_0) から終了 (t_1) までの時間の範囲での Fit 結果を表す。点線の Fit がデータと離れてしまっている要因としては、 n_b が一定ではないことが考えられ、この Fit 結果は解析には用いない。Run4 の Fitting 範囲と各パラメータは表 5.4 に示す。Run4 においても Fitting 範囲を調整し、 ^{214}Po の計数が安定した 2018/5/30 0:00 から 2018/6/9 0:00 までとした。

表 5.4 Run4 の測定の詳細と結果

Run4		
HDPE の厚さ		0.96 mm (円形)
t_0	(Date)	2018/5/30 0:00
t_1	(Date)	2018/6/9 0:00
p_b	[count/day]	$(1.85 \pm 0.01) \times 10^6$
n_b	[Bq/m ³]	$(1.10 \pm 0.01) \times 10^5$
p_a	[count/day]	$(6.21 \pm 0.01) \times 10^4$
n_a	[Bq/m ³]	34.5 ± 0.1
k	[cm ² /sec]	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^{-7}$

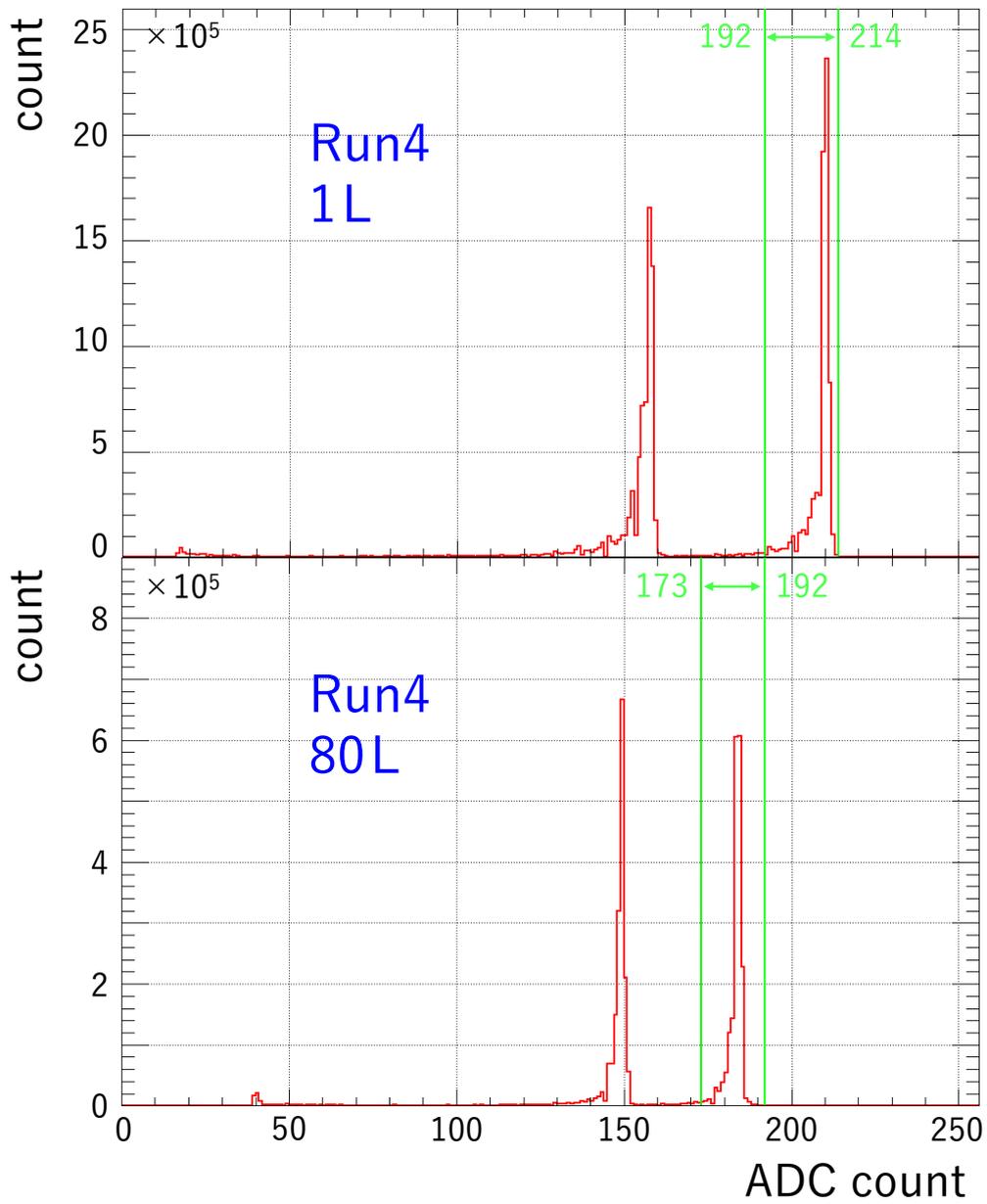


図 5.11 Run4 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル。黄緑の線は解析に使用した ^{214}Po のエネルギーの範囲を示す。

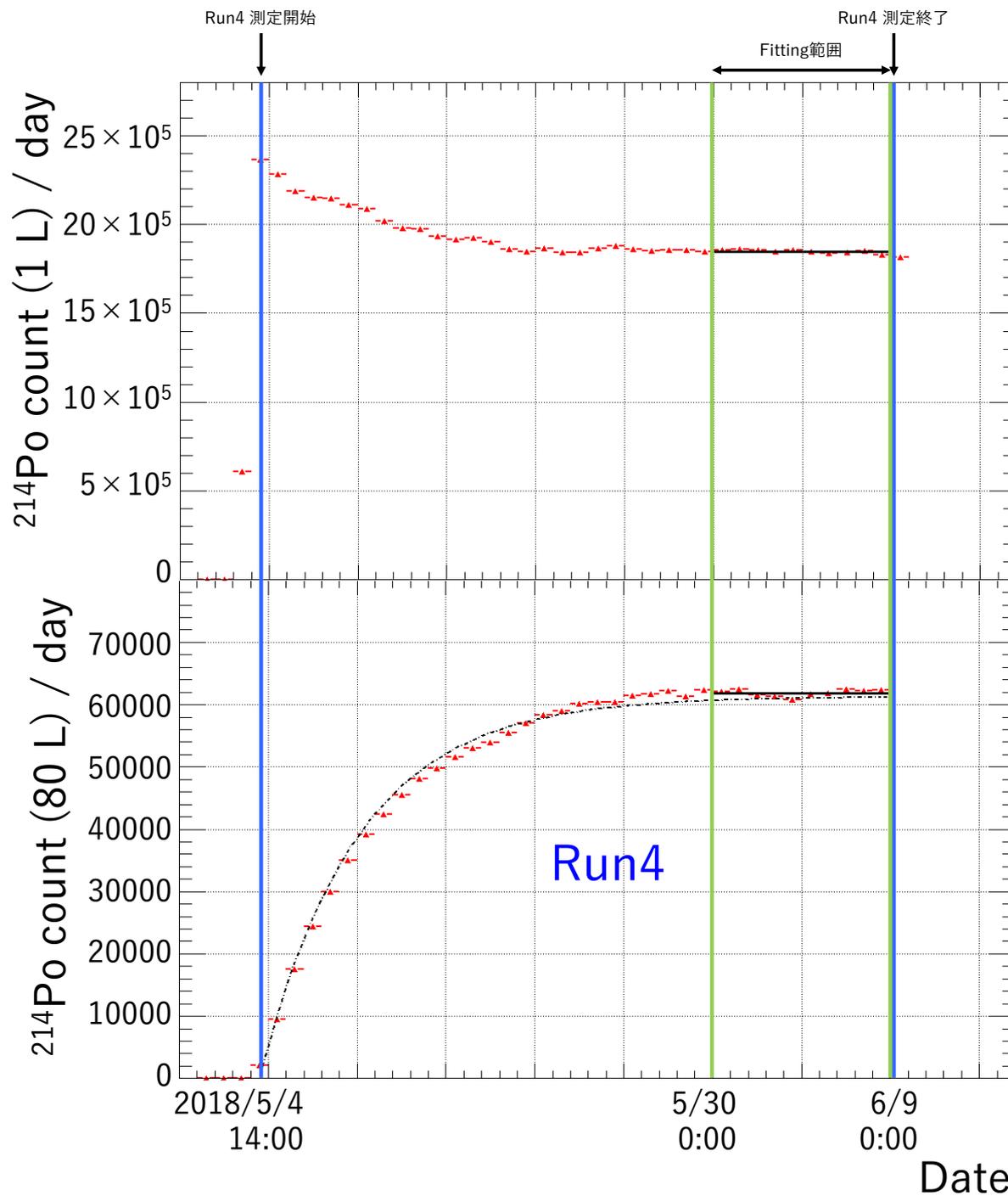


図 5.12 Run4 の測定結果 (1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化。)

Run5

Run5 では 2.0 mm (正方形) の HDPE のラドン透過率を測定する。Run5 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトルを図 5.13 に、Run5 の温度、相対湿度、1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化を図 5.14 に示す。

Run5 ではラドン透過率を精度良く測定するために、 ^{214}Po の計数が安定するまで測定を続けたので、1 L ラドン検出器の計数には p_b (*const.*)/, 80 L ラドン検出器の計数には p_a (*const.*) の Fitting 関数で t_0 から t_1 までの範囲を Fit した。ここで図 5.14 の点線は、

$$p_{\text{BG}} \times \left\{ 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\} + p_a \times \left\{ 1 - 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\}$$

の式により、Run5 開始 (t_0) から終了 (t_1) までの時間の範囲での Fit 結果を表す。この Fit 結果は解析には用いない。Run5 の Fitting 範囲と各パラメータは表 5.5 に示す。Run5 においても Fitting 範囲を調整し、 ^{214}Po の計数が安定した 2018/10/22 0:00 から 2018/11/5 0:00 までとした。

表 5.5 Run5 の測定の詳細と結果

		Run5
HDPE の厚さ		2.0 mm
t_0	(Date)	2018/10/22 0:00
t_1	(Date)	2018/11/5 0:00
p_b	[count/day]	$(1.21 \pm 0.01) \times 10^6$
n_b	[Bq/m ³]	$(7.19 \pm 0.28) \times 10^4$
p_a	[count/day]	$(2.166 \pm 0.004) \times 10^4$
n_a	[Bq/m ³]	12.0 ± 0.7
k	[cm ² /sec]	$(1.4 \pm 0.1) \times 10^{-7}$

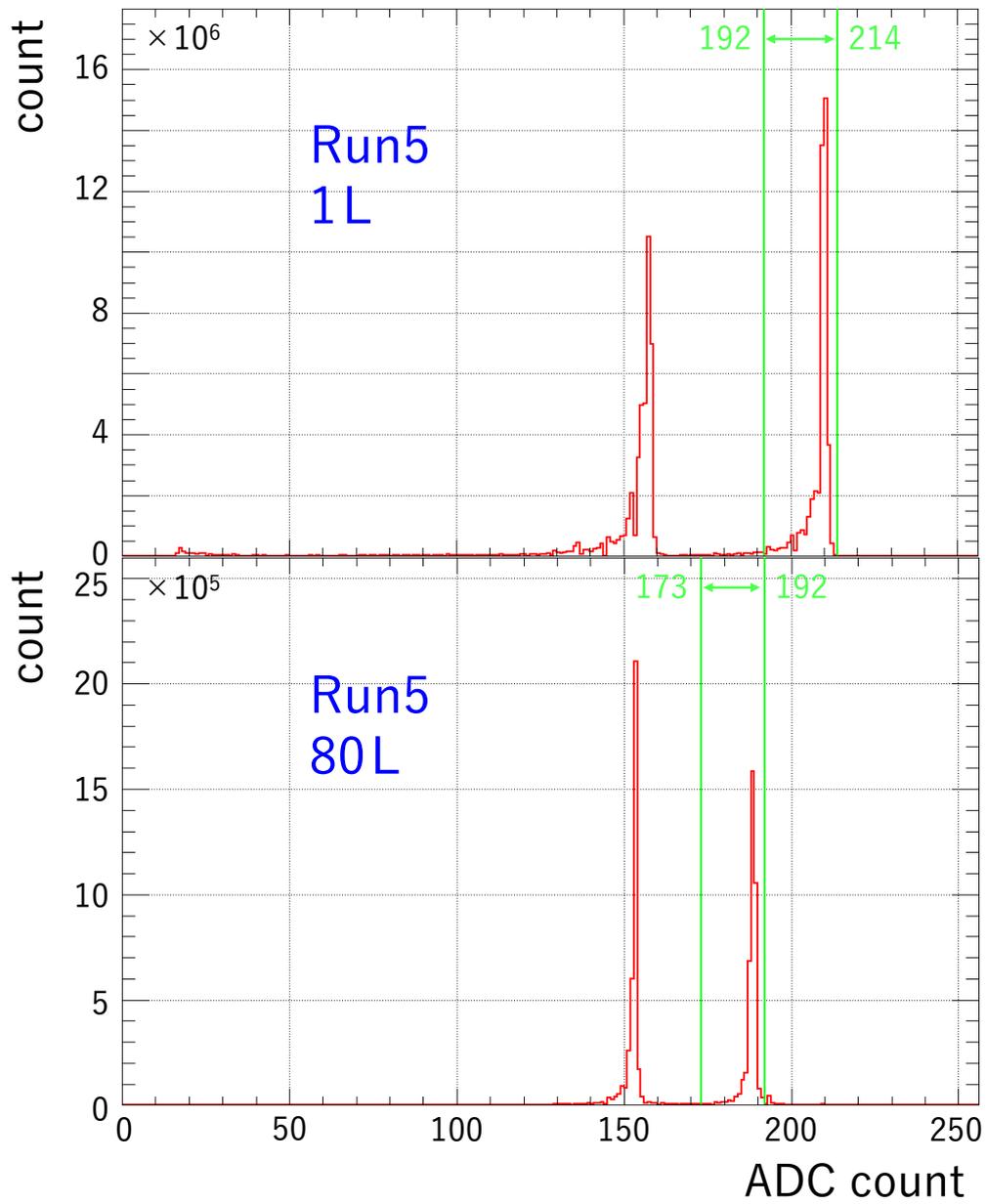


図 5.13 Run5 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル。黄緑の線は解析に使用した ^{214}Po のエネルギーの範囲を示す。

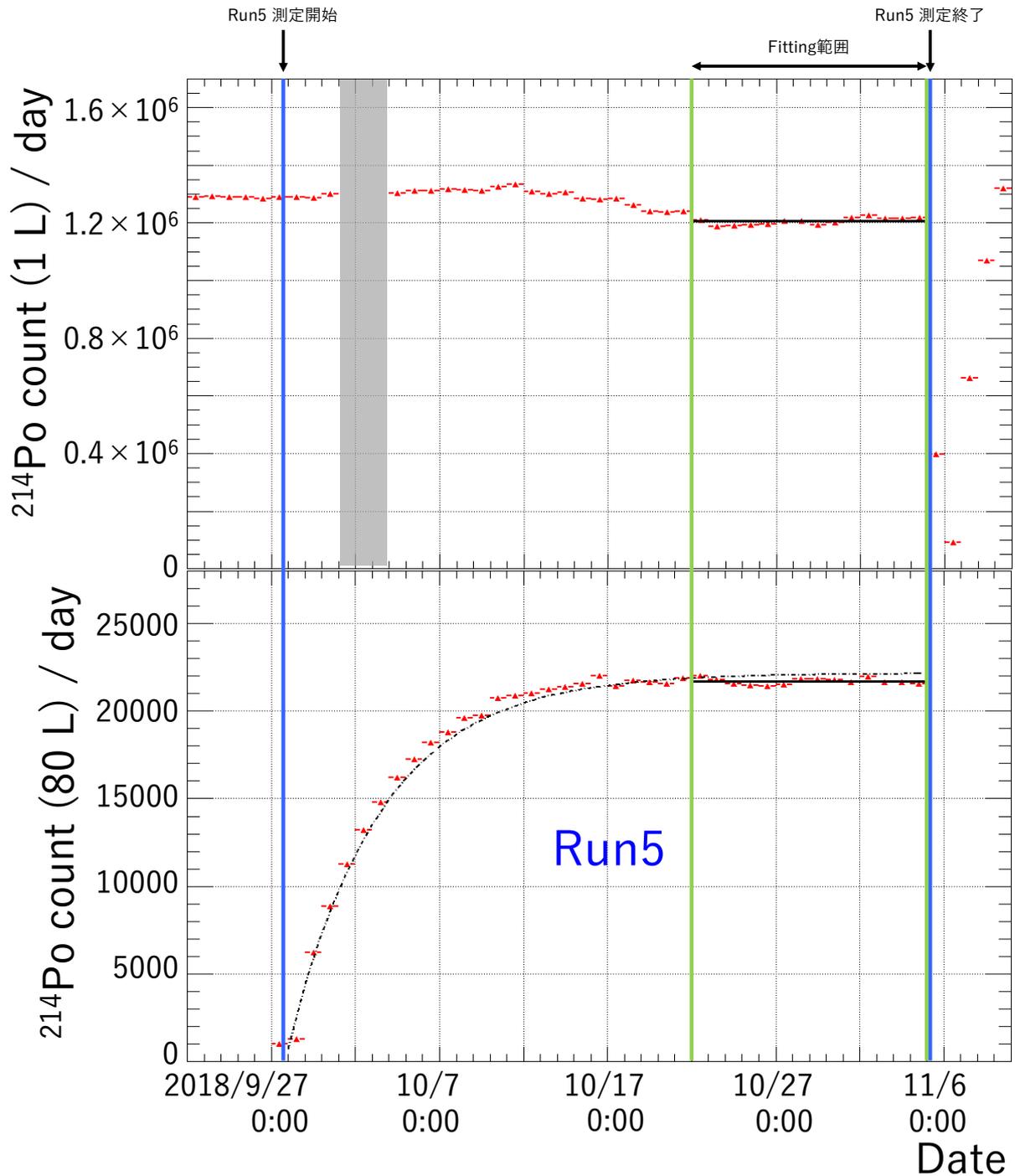


図 5.14 Run5 の測定結果 (1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化。)

Run6

Run6 では 0.50 mm (正方形) の HDPE のラドン透過率を測定する。Run6 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトルを図 5.15 に、Run6 の温度、相対湿度、1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化を図 5.16 に示す。

Run6 では ^{214}Po の計数が安定する前に測定を終了したので、1 L ラドン検出器の計数には p_b (*const.*)、80 L ラドン検出器の計数には

$$p_{a1} + p_{a2} \times \left\{ 1 - 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\}$$

の Fitting 関数で t_0 から t_1 までの範囲を Fit した。また実際の透過後側のラドン濃度には $p_a = p_{a1} + p_{a2}$ を使用した。Run6 の Fitting 範囲と各パラメータは表 5.6 に示す。Run6 においても Fitting 範囲を調整し、2018/11/26 0:00 から 2018/12/6 0:00 までとした。

表 5.6 Run6 の測定の詳細と結果

		Run6
HDPE の厚さ		0.50 mm
t_0	(Date)	2018/11/26 0:00
t_1	(Date)	2018/12/6 0:00
p_b	[count/day]	$(2.05 \pm 0.01) \times 10^6$
n_b	[Bq/m ³]	$(1.24 \pm 0.01) \times 10^5$
p_{a1}	[count/day]	$(1.43 \pm 0.01) \times 10^5$
p_{a2}	[count/day]	$(2.20 \pm 0.05) \times 10^4$
p_a	[count/day]	$(1.65 \pm 0.01) \times 10^4$
n_a	[Bq/m ³]	91.8 ± 0.2
k	[cm ² /sec]	$(1.6 \pm 0.1) \times 10^{-7}$

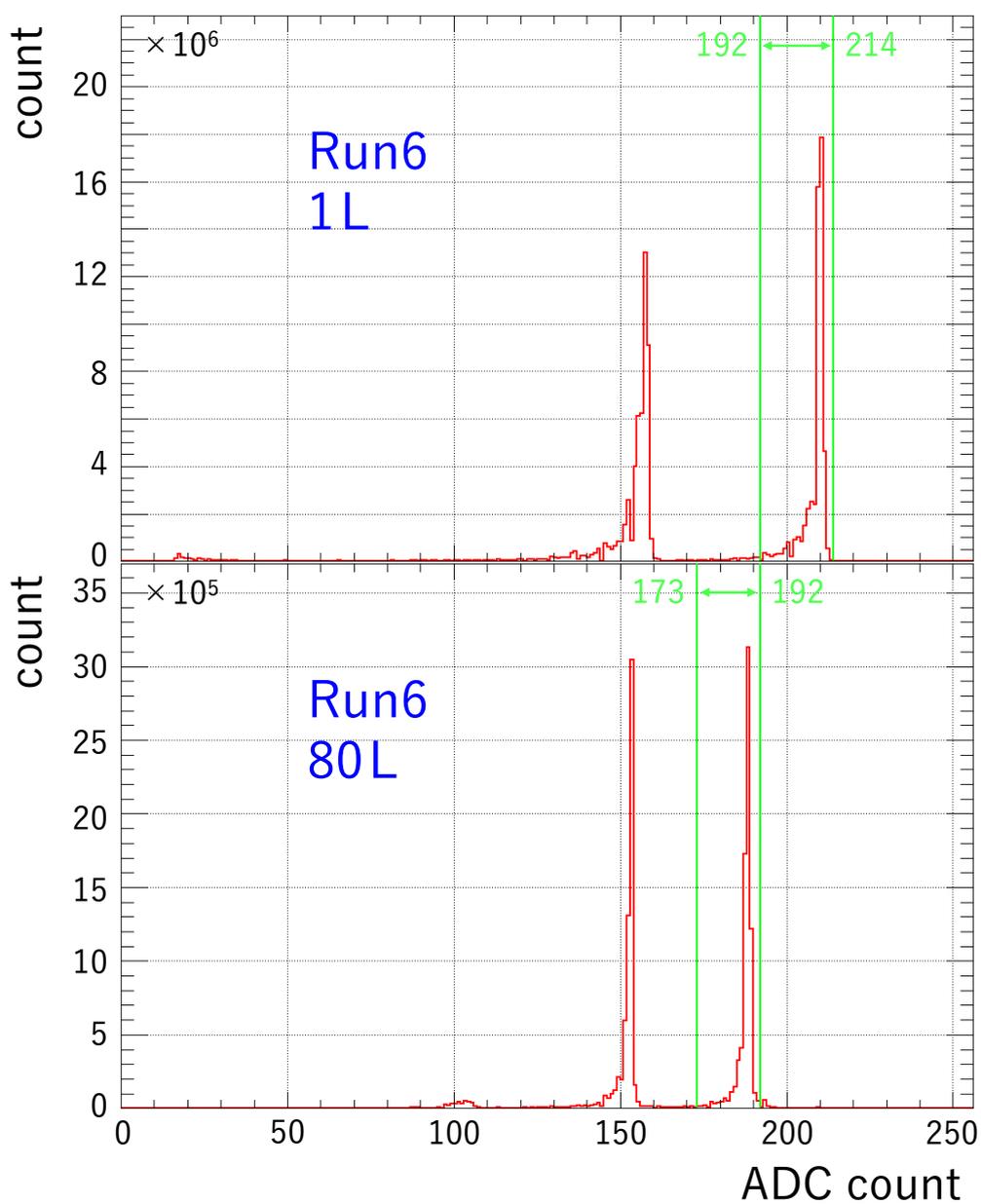


図 5.15 Run6 の 1 L/80 L ラドン検出器のエネルギースペクトル。黄緑の線は解析に使用した ^{214}Po のエネルギーの範囲を示す。

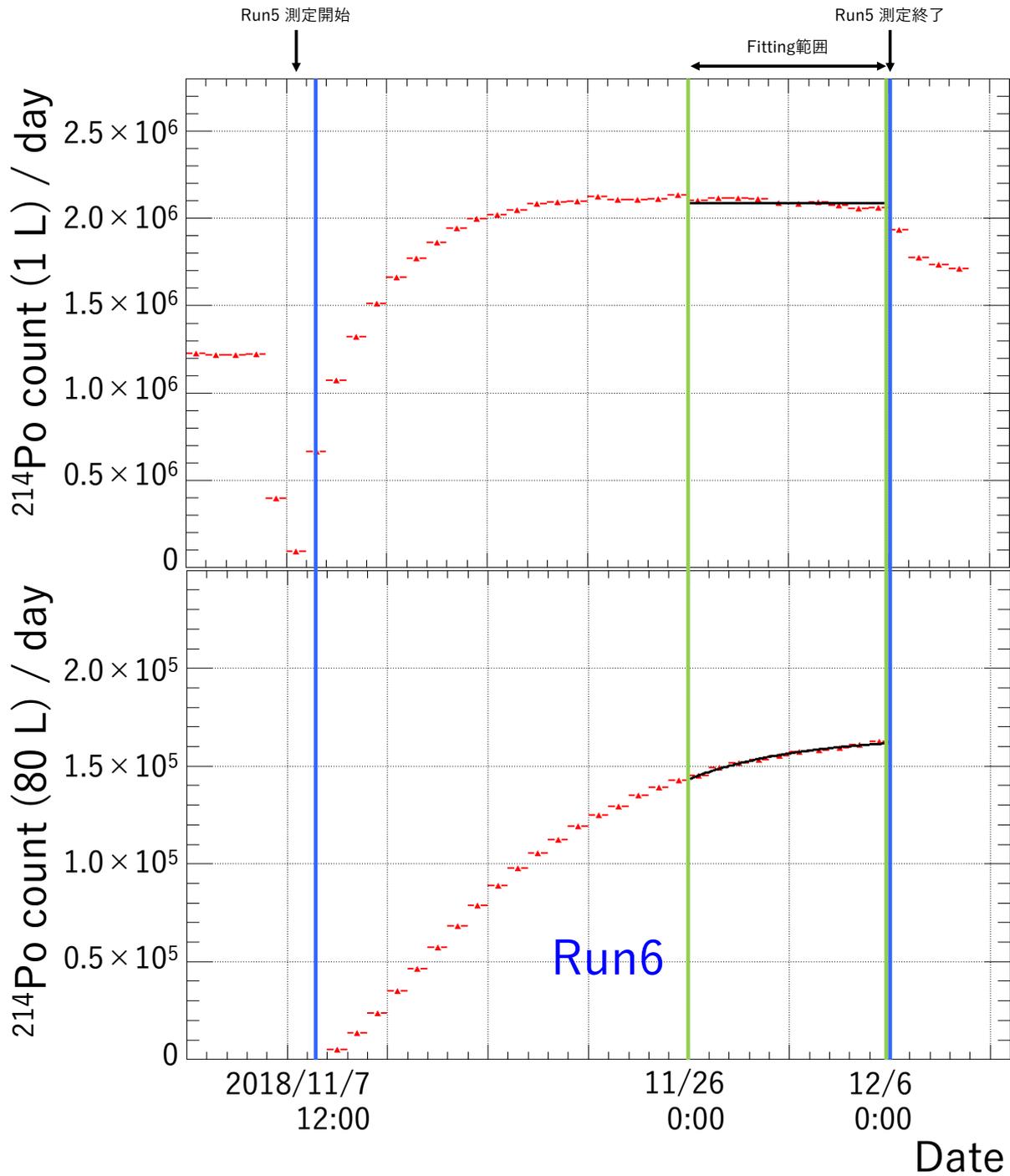


図 5.16 Run6 の測定結果 (1 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数、80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化。)

空気中のラドン透過率測定の結果のまとめを表 5.7 に示す。
 系統誤差の評価と先行研究との比較は第 7 章で議論する。

表 5.7 先行研究と本研究の空気中のラドン透過率測定結果の比較

	ラドン透過率 ($\times 10^{-7}$ [cm ² /sec])
先行研究 [27]	1.1
	0.46
先行研究 [28]	0.58
先行研究 [29]	1.9
先行研究 [30]	0.37
	0.71
Run1 0.50 mm (円形)	1.1 \pm 0.1
Run2 0.50 mm (円形)	1.2 \pm 0.1
Run3 0.50 mm (円形)	1.5 \pm 0.1
Run4 0.96 mm (円形)	1.3 \pm 0.1
Run5 2.0 mm (正方形)	1.4 \pm 0.1
Run6 0.50 mm (正方形)	1.6 \pm 0.1

第6章

水中でのラドン透過率測定

HDPE のラドン透過率測定は先行研究で行われてきた。しかし実際に HDPE が HK で使用されるのは水中であるが、水中でのラドン透過率の測定はおこなわれていない。本研究では 0.50 mm (円形) の HDPE の水中でのラドン透過率の測定を試みた。

6.1 セットアップ

実験には 70 L ラドン検出器、中空糸膜モジュール、ラドン透過率測定用セル、ラジウム線源、冷却器、純水、流量計、流量コントローラ、気圧計、フィルター、ポンプを用いる。ラジウム線源にはラジウムセラミックボール (図 6.1) を使い、ラドン透過率測定用セルには、0.50 mm (円形) の HDPE を挟み測定する。配管図は図 6.2 の通りである。各装置等にある表記は VW がバルブ、PG が圧力計、FW が流量計、PPW が純水を循環させるためのポンプである。本研究では 3 つの測定を行った。

1 Run1

本研究でラジウムセラミックボールを用い生成したラドン水の濃度を測定する。測定セルに 0.96 mm のドーナツ型の HDPE を使用し、ラドン線源により作ったラドン水が直接中空糸膜モジュールを循環するようにした上で、70 L ラドン検出器によりラドン濃度を測定する。ただしこの Run1 では水と空気の体積が実際のラドン透過率測定 (Run2) のセットアップと異なるので、Run2 でのラドン線源側のラドン濃度の見積もりを行った。

2 BG Run

測定セルに 0.50 mm (円形) の HDPE を挟み、セルの両側に純水を満たし、透過後側の純水を循環させた状態でのバックグラウンドレベルを測定する。

3 Run2

透過前 (ラドン線源) 側はラドン水を、透過後側は純水を循環させ、BG Run で測定したバックグラウンドからの増加量を測定し、ラドン透過率を求めた。



図 6.1 ラジウムセラミックボール線源

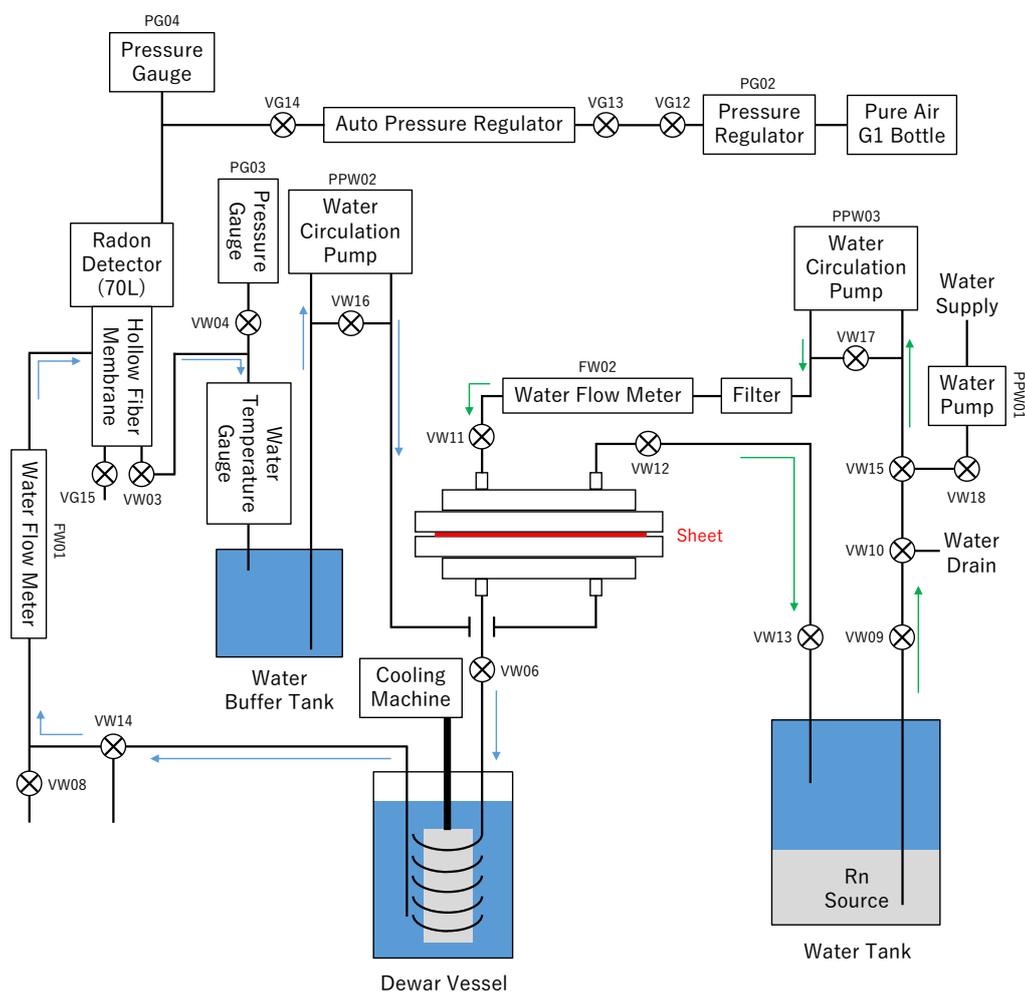


図 6.2 水中でのラドン透過率測定実験の配管図。赤い部分がシート状素材

6.2 ラドン水の濃度の測定 (Run1)

ラドン透過率測定用セルには 0.96 mm のドーナツ型の HDPE を挟み、100% 透過させ、70 L ラドン検出器により透過前側のラドン水の濃度を測定する。配管図は図 6.2 の通りである。

6.2.1 Run1 の測定の手順

- 1-1. すべてのバルブを閉じ、ポンプも OFF にする。
- 1-2. ラドン透過率測定用セルの O-Ring には 0.96 mm のドーナツ型 HDPE を挟む。
- 1-3. Water Tank にラジウムセラミックボール線源を入れる。
- 1-4. VW09、VW11、VW12、VW13、VW18 を開け、VW10、VW15 を図 6.2 の右向きにし、その他のバルブを閉じ、VW18 の配管から純水を入れることでラジウムセラミックボール線源が入った Water Tank に水を貯める。
- 1-5. VW03、VW04、VW06、VW08 を開け、VW14 を図 6.2 の下向きにし、その他のバルブを閉じ、VW08 の配管から純水を入れ、VW14 の配管から排水することでパージする。

1-6. VG12, VG13, VG14, VG15 を開け、70 L ラドン検出器に G1 純空気を入れ、VG15 の配管から排気することでパージする。

1-7. Dewar Vessel に水を入れ、冷却器を ON にし、冷却を開始する。

1-8. VW03, VW04, VW06 を開け、VW14 を図 6.2 の左向きにし、その他のバルブを閉じ、ポンプ PPW02 を ON にし、70 L ラドン検出器側の循環を開始する。

1-9. VW09, VW10, VW11, VW12, VW13, VW15 を開け、その他のバルブを閉じ、ポンプ PPW01 を ON にし、線源側の循環を開始する。

1-10. 70 L ラドン検出器に -1500 V の高電圧をかけ、測定を開始する。

1-11. ポンプ PPW02 を OFF にし循環を停止させ、測定を終了する。

6.2.2 Run1 の測定結果

Run1 では 0.96 mm のドーナツ型の HDPE を挟み、ラドン線源により作ったラドン水濃度を測定した。Run1 の 70 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化を図 6.5 に示す。

70 L ラドン検出器の計数には p_0 (*const.*) の Fitting 関数で t_0 から t_1 までの範囲を Fit した。Run1 の Fitting 範囲と各パラメータは表 6.3 に示す。ただし測定開始から ^{214}Po の計数が増加し始めるまでに時間がかかることがわかったため、Fitting 範囲を調整した。ここで Run1 と Run2 では線源側の水の体積と空気の体積が異なるため、それぞれの体積を計算し、以下のように p_0 から求めた n_0 を n_b に換算した。Run1 の水の体積を $V_{1,\text{water}}$ 、空気の体積を $V_{1,\text{air}}$ 、Run2 の水の体積を $V_{2,\text{water}}$ とする。各測定の体積は表 6.1、6.2 に示す。 $V_{1,\text{water}} = 0.0088$ m³、 $V_{1,\text{air}} = 0.075$ m³、 $V_{2,\text{water}} = 0.0070$ m³ である。気液平衡状態の気相・液相間のラドン濃度比 (Ostwald 係数、 L) は気温 T °C のとき

$$L(T) = \frac{\text{Rn Concentration in Water}}{\text{Rn Concentration in Air}} \quad (6.1)$$

$$= \exp(-82.0146 + 126.823/(T/100) + 34.7934 \ln(T/100)) \quad (6.2)$$

となる [43] (図 6.3)。水温は冷却器の設定温度 $T = 10$ °C として Ostwald 係数は $L = 0.3350144$ となる。

$$\begin{aligned} n_0 [\text{Bq/m}^3] &= \frac{p_0 [\text{count}/12 \text{ hour}] \times 24 \text{ hour/day}}{CF_{\text{water}} [(\text{count}/\text{day})/(\text{Bq/m}^3)]} \\ &= \frac{(9.07 \pm 0.02) \times 10^3 \times 2}{(3.0 \pm 0.4) \times 10^3} \text{ Bq/m}^3 \\ &= 6.04 \pm 0.40 \text{ Bq/m}^3 \end{aligned} \quad (6.3)$$

となり Run2 の測定時のラドン濃度 n_b は式 6.4 となる。

$$\begin{aligned} n_b [\text{Bq/m}^3] \times V_{2,\text{water}} [\text{m}^3] &= n_0 [\text{Bq/m}^3] \times \left(V_{1,\text{water}} + \frac{V_{1,\text{air}}}{L} \right) [\text{m}^3] \\ n_b \times 0.0070 &= (6.04 \pm 0.40) \text{ Bq/m}^3 \times \left(0.0088 + \frac{0.75}{0.335} \right) \\ n_b &= (2.04 \pm 0.14) \times 10^2 \text{ Bq/m}^3 \end{aligned} \quad (6.4)$$

表 6.1 Run1 の各部分の水の体積

体積 [m^3]	水	空気
Water Tank	0.0070	0
Water Buffer Tank	0.00080	0.00020
Rn detector(70 L)	0	0.070
中空糸膜モジュール	0.0010	0.0045
計	0.0088 ($V_{1,water}$)	0.075 ($V_{1,air}$)

表 6.2 Run2 の各部分の水の体積

体積 [m^3]	水	空気
Water Tank	0.0070	0
Water Buffer Tank	-	-
Rn detector(70 L)	-	-
中空糸膜モジュール	-	-
計	0.0070 ($V_{2,water}$)	0

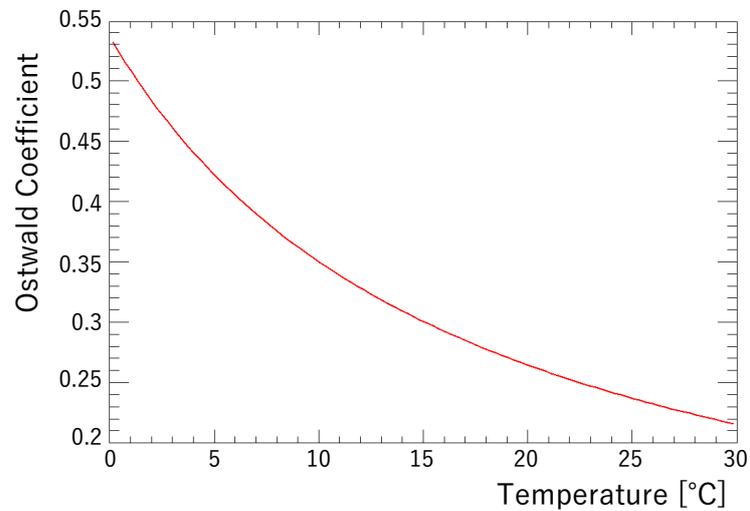


図 6.3 気温に対する Ostwald 係数

表 6.3 Run1 の測定の詳細と結果

Run1		
t_0	(Date)	2018/7/1 0:00
t_1	(Date)	7/12 0:00
p_0	[count/12 hour]	$(9.07 \pm 0.02) \times 10^3$
n_0	[Bq/ m^3]	6.04 ± 0.40
n_b	[Bq/ m^3]	$(2.04 \pm 0.14) \times 10^2$

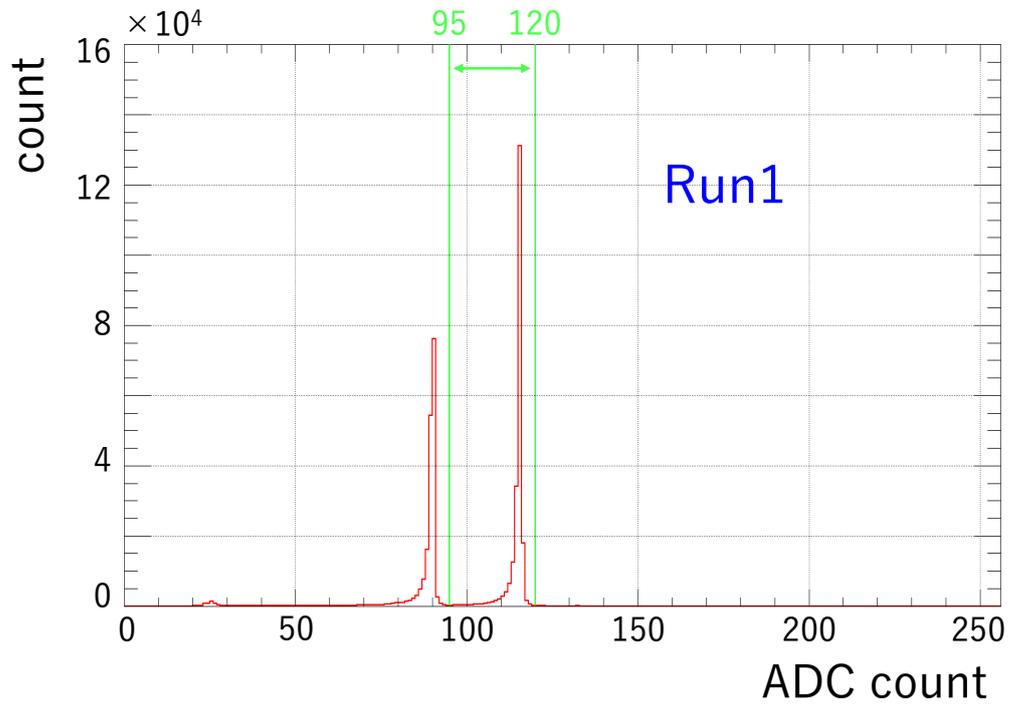


図 6.4 Run1 のエネルギースペクトル。黄緑の線は解析に使用した ^{214}Po のエネルギーの範囲を示す。

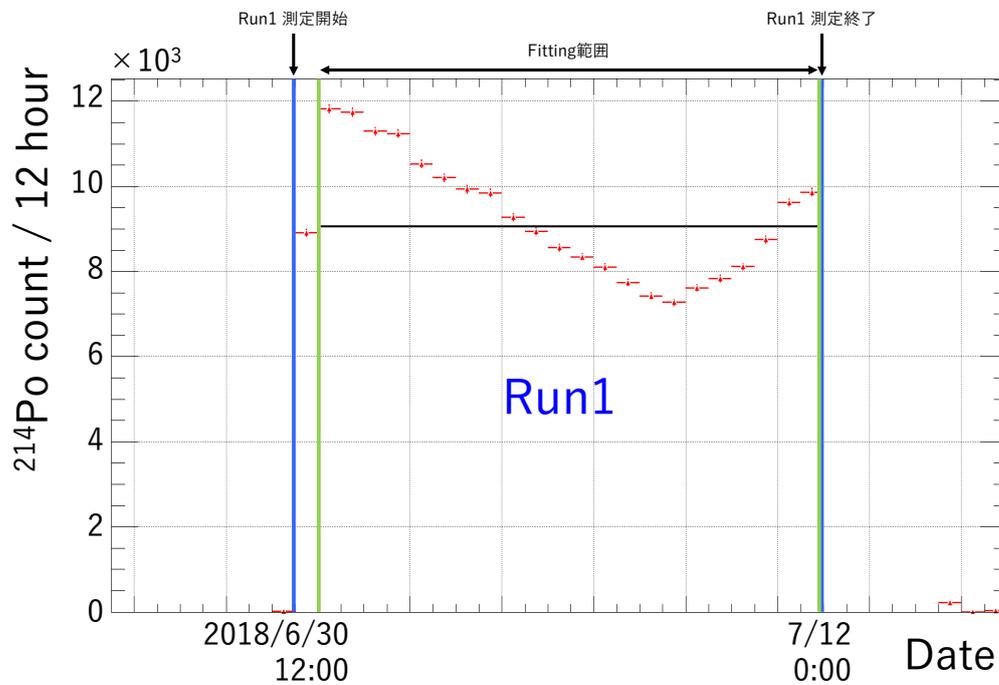


図 6.5 Run1 の測定結果 (^{214}Po の計数の時間変化)

6.3 バックグラウンドレベルの測定 (BG Run)

ラドン透過率測定用セルには図 5.3 の 0.50 mm (円形) の HDPE を挟み、セルの両側に純水を満たし、透過後側の水のみを循環させ、70 L ラドン検出器によりバックグラウンドレベルを測定した。

6.3.1 BG Run の測定の手順

BG-1. すべてのバルブを閉じる。

BG-2. ラドン透過率測定用セルの O-Ring にグリスを塗り、間に 0.50 mm の HDPE (円形) を挟む。

BG-3. VW03、VW04、VW06、VW08 を開け、VW14 を図 6.2 の下向きにし、その他のバルブを閉じ、VW08 の配管から純水を入れることで Water Buffer Tank に水を貯める。

BG-4. 0-3. の状態で VW08 の配管から純水を入れ続け、VW14 の配管から排水することでパージする。

BG-5. VG12、VG13、VG14、VG15 を開け、70 L ラドン検出器に G1 純空気を入れ、VG15 の配管から排気することでパージする。

BG-6. Dewar Vessel に水を入れ、冷却器を ON にし、冷却を開始する。

BG-7. VW03、VW04、VW06 を開け、VW14 を図 6.2 の左向きにし、その他のバルブを閉じ、ポンプ PPW02 を ON にし、70 L ラドン検出器側の循環を開始する。

BG-8. 70 L ラドン検出器に -1500 V の高電圧をかけ、測定を開始する。

BG-9. ポンプ PPW02 を OFF にし循環を停止させ、測定を終了する。

6.3.2 BG Run の測定結果

BG Run ではラドン透過率測定用セルには、0.50 mm (円形) の HDPE を挟み、セルの両側に純水を満たし、透過後側の水のみを循環させ、70 L ラドン検出器によりバックグラウンドレベルを測定した。

BG Run の 70 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化を図 6.7 の BG Run に示す。

70 L ラドン検出器の計数には $p_{\text{BG}} (\text{const.})$ の Fitting 関数で t_0 から t_1 までの範囲を Fit した。BG Run の Fitting 範囲と各パラメータは表 6.4 に示す。

表 6.4 BG Run の測定の詳細と結果

BG Run		
t_0	(Date)	2018/10/27 0:00
t_1	(Date)	11/5 12:00
p_{BG}	[count/12hour]	20.5 ± 1.0

6.4 HDPE シートの水中ラドン透過率測定 (Run2)

ラドン透過率測定用セルには 0.50 mm (円形) の HDPE を挟み、透過前 (ラドン線源) 側はラドン水を、透過後側は純水を循環させ、BG Run で測定したバックグラウンドからの増加量を測定し、HDPE の水中でのラドン透過率を測定した。

6.4.1 Run2 の測定の手順

- 2-1. すべてのバルブを閉じ、ポンプも OFF にする。
- 2-2. ラドン透過率測定用セルの O-Ring には 0.50 mm の HDPE (円形) を挟む。
- 2-3. 1-4 から 1-11 と同様の手順で測定を行う。

6.4.2 Run2 の測定結果

Run2 では 0.50 mm (円形) の HDPE のラドン透過率を測定した。Run2 の 70 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化を図 6.7 の Run2 に示す。図 6.7 から明らかなように、 ^{214}Po の計数率が増加した。

70 L ラドン検出器の計数には

$$p_{\text{BG}} + p_{\text{a}} \times \left\{ 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\}$$

の Fitting 関数で t_0 から t_1 までの範囲を Fit した。Run2 の Fitting 範囲と各パラメータは表 6.5 に示す。ただし測定開始から ^{214}Po の計数が増加し始めるまでに時間がかかることがわかったため、Fitting 範囲を調整した。計数率の増加の割合も Fitting と大きな矛盾はなく、水中でのラドン透過を初めて測定できたと考えられる。

表 6.5 Run2 の測定の詳細と結果

Run2		
t_0	(Date)	2018/11/5 15:00
t_1	(Date)	11/23 12:00
p_{a}	[count/12hour]	38.4 ± 1.8
n_{a}	[Bq/m ³]	$(2.56 \pm 0.12) \times 10^{-2}$

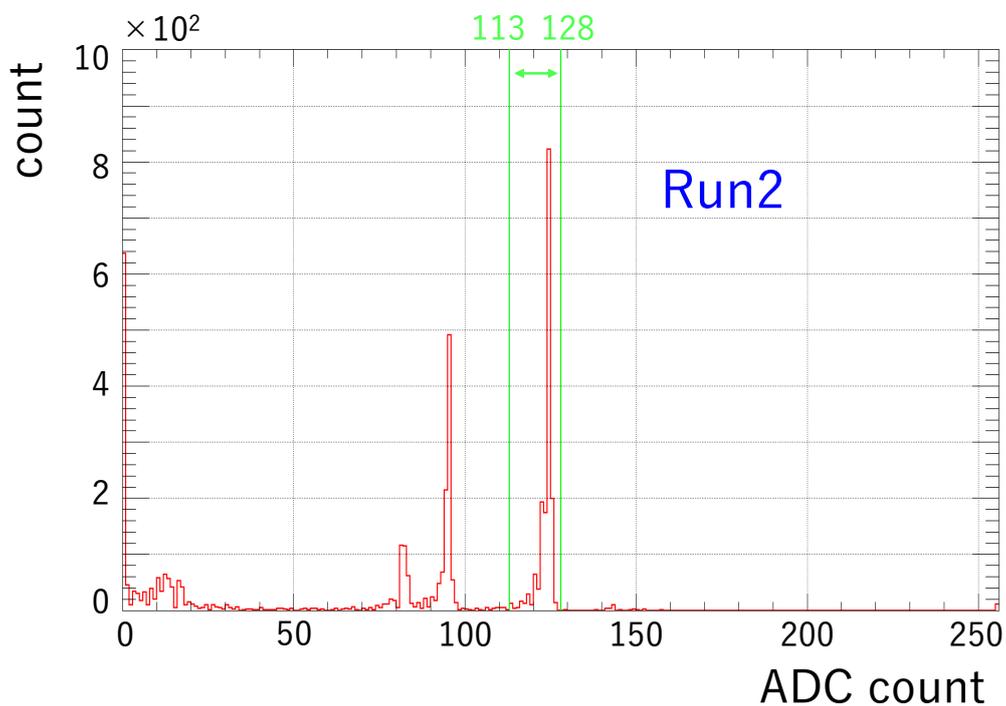
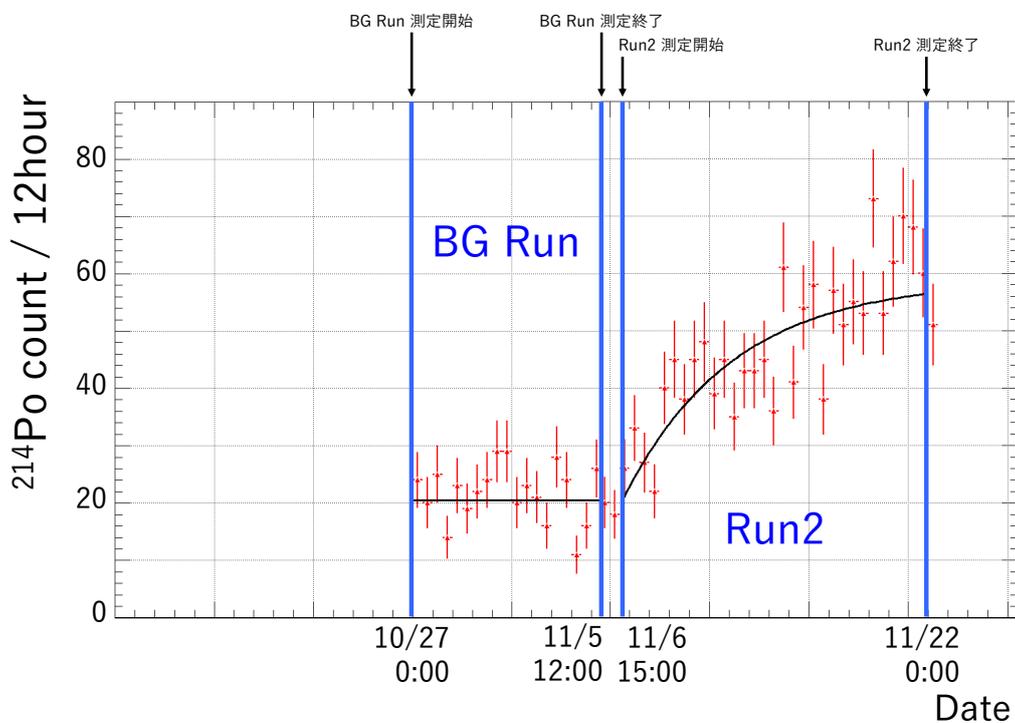


図 6.6 Run2 のエネルギースペクトル。

図 6.7 Run2 の測定結果 (70 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化)

測定の詳細は以下の表 6.6 にまとめる。

表 6.6 水中ラドン透過率測定的时间

	BG Run	Run1	Run2
HDPE の厚さ	0.50 mm (円形)	–	0.50 mm (円形)
測定開始時刻	2018/10/27 0:00	2018/6/30 12:00	2018/11/6 15:00
測定終了時刻	11/5 12:00	7/12 0:00	11/22 0:00
測定時間	9.5 days	11.5 days	15.4 days

以上より、水中ラドン透過率は

$$k = (1.2 \pm 0.1) \times 10^{-7} \text{ [cm}^2\text{/sec]} \quad (6.5)$$

となる。

系統誤差の評価と空気中と水中でのラドン透過率測定と比較は第7章で議論する。

第7章

議論・結論

本章では水中ラドン透過率測定の結果の評価として、系統誤差の評価、空気中と水中での測定結果の比較と先行研究との比較を行う。

7.1 HDPE シートの水中ラドン透過率測定結果の評価

7.1.1 ラドン透過率の系統誤差の評価

本節では、各物理量からラドン透過率を求める際の系統誤差の影響を考慮して、本研究における水中ラドン透過率の系統誤差を見積もる。系統誤差として以下のものが考えられる。

- ・ 80 L ラドン検出器の較正係数の誤差
[36] より、10% の不定性があるが、式 5.8 より CF_{80L} が分子分母で打ち消し合うので、ラドン透過率の測定には影響しない。
- ・ 水中ラドン透過率測定における n_b の不定性
図 7.1 に Run1 の結果と、 $\pm 30\%$ の不定性の範囲を示した。
- ・ Run1-3 の測定時間の短さからくる不定性

Run1-3 はともに 1 日間の測定しか行っていないため、不定性が大きいと考えられる。透過前側ラドン濃度が測定中比較的安定していた Run5 と比較する。まず Run5 の ^{214}Po の計数率を 1 時間ごとの bin にわけ、測定開始から 1 日範囲で Fit する (これを Run5' と定義する)。Run5' の 80 L ラドン検出器の計数に

$$p'_{BG} \times \left\{ 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\} + p'_a \times \left\{ 1 - 2^{-(x-t_0)/3.82} \right\}$$

の Fitting 関数で t_0 : 2018/9/27 16:00 から t_1 : 2018/9/28 16:00 までの範囲を Fit した。図 7.2 に Fit 結果を示す。Fit の結果は $p'_{BG} = (1.45 \pm 0.06) \times 10^2$ count/hour、 $p'_a = (1.01 \pm 0.06) \times 10^3$ count/hour となり、透過後側ラドン濃度は $n'_a = 13.4 \pm 0.8$ Bq/m³ となった。Run5' の Fit 結果、計算したラドン濃度と Run5 の結果との比較を表 7.1 に示す。以上より Fit 範囲による不定性は 10 ~ 15% 程度と見積もった。

表 7.1 Run5 と Run5' の測定結果の比較

	Run5	Run5'
HDPE の厚さ	2.0 mm (円形)	2.0 mm (円形)
p'_a [count/hour]	-	$(1.01 \pm 0.06) \times 10^3$
p_a [count/day]	$(2.17 \pm 0.01) \times 10^4$	$(2.42 \pm 0.14) \times 10^4$
n_a [Bq/m ³]	12.0 ± 0.7	13.8 ± 1.2

以上より本研究での最大の不定性は、 n_b の不定性見積りによるものと考えられる。よって本研究では水中ラドン透過率の系統誤差を 30% と見積もった。統計誤差・系統誤差を含めた得られた水中ラドン透過率は

$$k = 1.2 \pm 0.4 \text{ [cm}^2\text{/sec]} \quad (7.1)$$

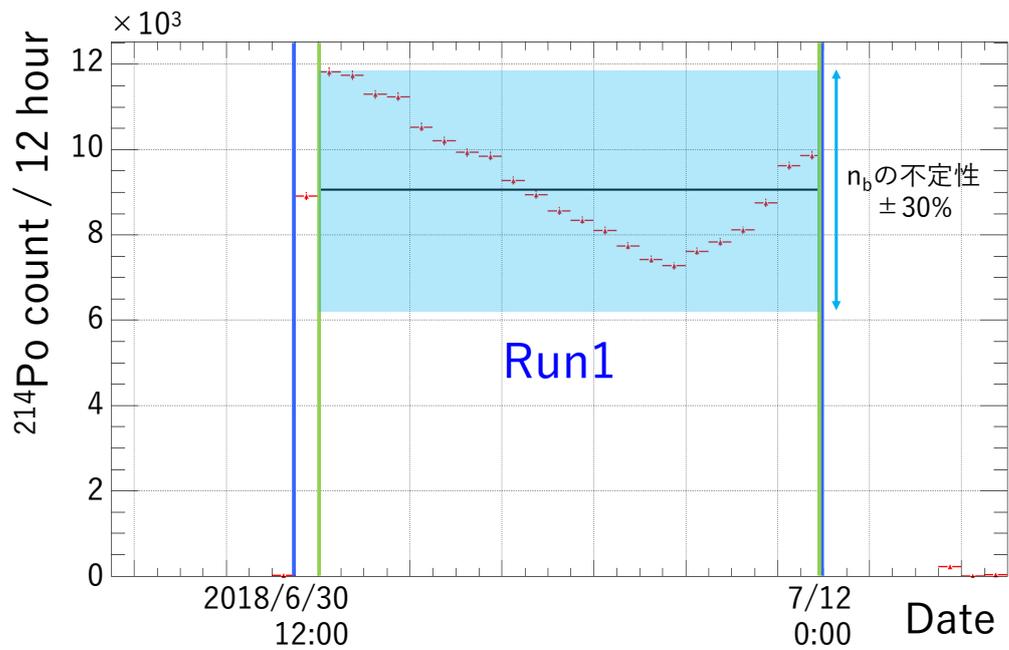


図 7.1 Run1 の測定結果と $\pm 30\%$ の不定性の範囲

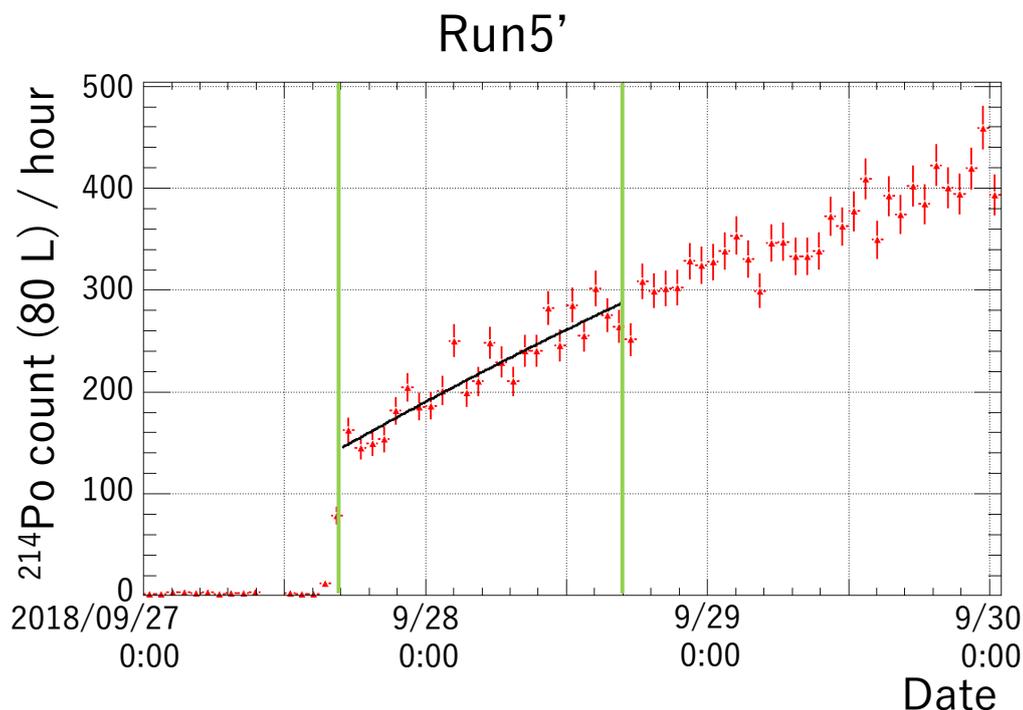


図 7.2 Run5' の測定結果 (80 L ラドン検出器の ^{214}Po の計数の時間変化。)

7.1.2 系統誤差を考慮した空気中と水中での測定結果の比較

本研究における HDPE の空気中/水中でのラドン透過率の結果と、先行研究の HDPE の空気中でのラドン透過率の結果を表 7.2 と図 7.3 に示す。図 7.3 は、表 7.2 と同じデータを同じ順番でプロットしたものである。

空気中でのラドン透過率測定の結果と水中でのラドン透過率測定結果を比較すると、30% の系統誤差を考慮すると誤差の範囲で一致している。このことから HDPE シートのラドン透過率は水中・空気中で同様の性質を示し、本研究ではばらつきは少ないと判断できる。よって今後は HDPE シートの空気中でのラドン透過率を測定することにより、水中でのラドン透過率を見積もることができると考えられる。また先行研究と比較すると、オーダーは同じであるがばらつきは大きいことがわかった。その原因としては製品の違いによる差や、ラドン透過率の見積もり方法の違いがあげられる。誤差の範囲で矛盾しないことがわかった。

以上のことより、実際に使用する素材のラドン透過率を測定することが重要であると確認できた。

	ラドン透過率 ($\times 10^{-7}$ [cm ² /sec])
先行研究 [27]	1.1
	0.46
先行研究 [28]	0.58
先行研究 [29]	1.9
先行研究 [30]	0.37
	0.71
Run1 0.50 mm (円形)	$1.1 \pm 0.1(stat.)$
Run2 0.50 mm (円形)	$1.2 \pm 0.1(stat.)$
Run3 0.50 mm (円形)	$1.5 \pm 0.1(stat.)$
Run4 0.96 mm (円形)	$1.3 \pm 0.1(stat.)$
Run5 2.0 mm (正方形)	$1.4 \pm 0.1(stat.)$
Run6 0.50 mm (正方形)	$1.6 \pm 0.1(stat.)$
水中 0.50 mm (円形)	$1.2 \pm 0.4(stat. + syst.)$

表 7.2 本研究における HDPE の空気中/水中ラドン透過率測定結果と先行研究の HDPE の空気中ラドン透過率測定の結果

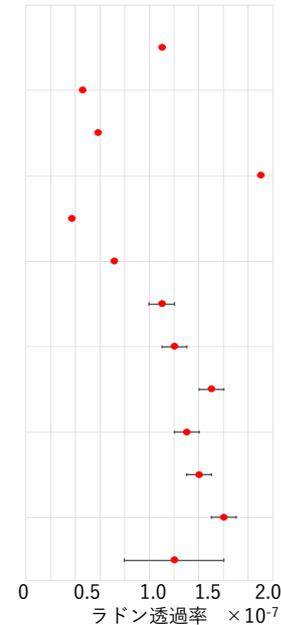


図 7.3 先行研究と本研究における HDPE の空気中/水中ラドン透過率測定結果の比較 (本文参照)

7.2 HK 検出器内のラドン濃度の見積り

SK の ID の現在の純水中のラドン濃度は 2 mBq/m^3 [20] である。また HK 検出器の建設予定地の坑内の水中のラドン濃度は $\sim 1000 \text{ Bq/m}^3$ であり、40000 本の HK PMT から放出されるラドンが 26 万トンの純水に一様に溶けたときのラドン濃度は $\sim 1.6 \text{ mBq/m}^3$ であると見積もられている [20]。

式 4.3 より OD の水中ラドン濃度 n_a は式 7.2 のように書ける。

$$n_a = \frac{\tau_{\text{Rn}}}{\tau_{\text{Rn}} + \frac{TV}{Ak}} \times n_b \quad (7.2)$$

ID の直径は 70.8 [m]、高さは 54.8 [m]、OD の直径は 74.0 [m]、高さは 60.0 [m]、ID の壁面の厚さは 0.60 [m] よって HK 内の純水の体積は $V_{\text{HK}} = 2.6 \times 10^5 \text{ [m}^3]$ 、ID の体積は $V_{\text{ID}} = 2.3 \times 10^5 \text{ [m}^3]$ 、OD の体積は $V_{\text{OD}} = 3.0 \times 10^4 \text{ [m}^3]$ 、使用される予定の HDPE の表面積は検出器上部を除いて $A = 1.8 \times 10^4 \text{ [m}^2]$ となり、厚さは $T = 5.0 \text{ [mm]}$ である。ラドン透過率は式 7.1 の値 $k = (1.2 \pm 0.4) \times 10^{-7} \text{ [cm}^2/\text{sec}]$ を用いる。ラドンの崩壊定数は $\tau_{\text{Rn}} = 4.8 \times 10^5 \text{ sec}$ である。まず HK の ID と OD が完全に水のやり取りをしていると場合、 $V = V_{\text{HK}}$ 、 $n_b = n_{\text{env}} = 1000 \text{ Bq/m}^3$ としてこれらを式 7.2 に代入すると HK 内の純水中のラドン濃度 n_{HK} は以下ようになる (図 7.4)。

$$n_{\text{HK}} = \frac{4.8 \times 10^5 \text{ sec}}{4.8 \times 10^5 \text{ sec} + \frac{0.50 [\text{cm}] \times 3.0 \times 10^4 [\text{m}^3]}{1.8 \times 10^4 [\text{m}^2] \times (1.2 \pm 0.4) \times 10^{-7} [\text{cm}^2/\text{sec}]}} \times n_{\text{env}} \quad (7.3)$$

$$= 80 \pm 27 \text{ mBq/m}^3$$

次に HK の ID と OD が少し水のやり取りをしている場合、 $V = V_{\text{OD}}$ としてこれらを式 7.2 に代入すると HK OD 内の純水中のラドン濃度 n_{OD} は以下ようになる。

$$n_{\text{OD}} = (6.9 \pm 2.3) \times 10^2 \text{ mBq/m}^3 \quad (7.4)$$

ここで、単位時間あたり ID と OD 間で X [m^3/sec] の水のやり取りをしていた場合、単位時間あたりの ID 内で崩壊するラドン量と ID から OD に出ていくラドン量の和が単位時間あたりに OD から ID に入ってくるラドン量と等しくなるので、式 7.5 が成り立つ。ID 内のラドン数濃度を N_{ID} / m^3 、OD 内のラドン数濃度を N_{OD} / m^3 、ID 内のラドン濃度を n_{ID} Bq/ m^3 とおいた。

$$N_{\text{ID}}X + n_{\text{ID}}V_{\text{ID}} = N_{\text{OD}}X \quad (7.5)$$

$$X = \frac{n_{\text{ID}}V_{\text{ID}}}{N_{\text{OD}} - N_{\text{ID}}} \quad (7.6)$$

今 ^{222}Rn の半減期は 3.82 日であるから、ラドン数濃度 N はラドン濃度 n を用いて以下のように書ける。

$$N \times \left\{ 1 - 2^{-\frac{1}{3.82 \times 86400}} \right\} = n \quad (7.7)$$

HK PMT から放出されるラドン濃度レベル ($\sim 1.6 \text{ mBq/m}^3$) に抑えるためには、 $n_{\text{ID}} = 1.6 \text{ mBq/m}^3$ として、 $N_{\text{ID}} = 7.62 \times 10^2 /\text{m}^3$ となる。また $n_{\text{OD}} = 700 \text{ mBq/m}^3$ として、 $N_{\text{OD}} = 3.33 \times 10^5 /\text{m}^3$ となる。

以上より単位時間あたりの ID と OD 間の水のやり取りで X [m^3/sec] は

$$X \simeq 1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec} \simeq 96 \text{ ton/day} \quad (7.8)$$

となる (図 7.5)。つまり水のやり取りを 96 ton/day 以下にすれば、OD から侵入してくるラドン量は HK PMT から放出されるレベルと同等になる。

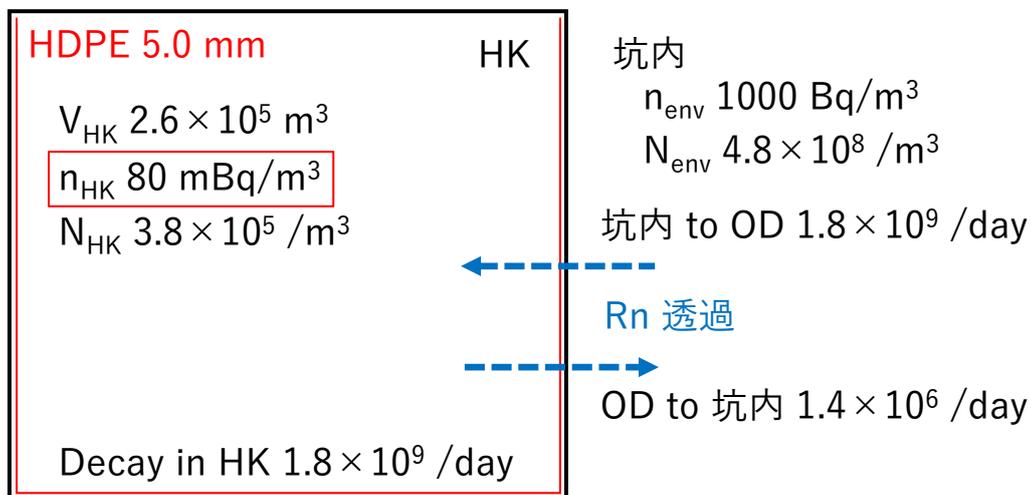
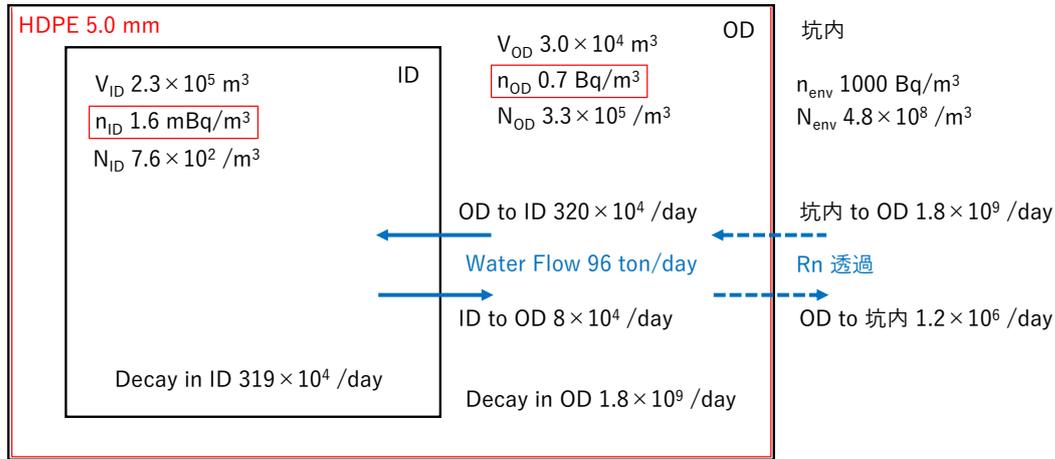


図 7.4 HK と坑内の ^{222}Rn のやり取り

図 7.5 HK の ID・OD の ²²²Rn のやり取り

7.3 結論

ハイパーカミオカンデ実験は、スーパーカミオカンデ実験の約 8 倍の 187 kton の有効体積をもつ、次世代の超大型水チェレンコフ実験計画である。HK 実験ではニュートリノ混合角 θ_{12} 、ニュートリノの質量の二乗差 Δm_{21}^2 の測定のために、太陽ニュートリノ観測を行う。HK での太陽ニュートリノ観測では、放射性ラドン ²²²Rn がバックグラウンドとなる。HK の外検出器はコンクリート製であり、コンクリートと OD 内部の間には水の透過を防ぐために、高密度ポリエチレン (HDPE) と呼ばれる合成樹脂素材が用いられる予定である。一般に合成樹脂による ²²²Rn の遮蔽は完璧ではなく、ガスが空気中で HDPE シートを透過する現象が観測され、ラドン透過率が測定されている。しかし、実際に使用する HDPE シートのラドン透過率は不明なため、現在は他の HDPE の空気中でのラドン透過率測定実験の結果から推測した値を用い、HK 検出器のデザインがなされているが、先行研究での HDPE の空気中ラドン透過率は、製品によるばらつきがあるため、実際に使用する製品による水中でのラドン透過率測定が必要である。

本論文では、空気中/水中でのラドン透過率測定実験を行うために、シート状素材のラドン透過率測定用セルを開発し、実際に測定に用いた。

まず先行研究との比較のため、HDPE の空気中でのラドン透過率を測定した。測定には 80 L ラドン検出器、1 L ラドン検出器、透過率測定用セルを用いた。先行研究では空気中のラドン透過率は 0.37 ~ 1.9 cm²/sec という結果が報告されていたが、本研究では 6 回の測定により 1.1 ~ 1.5 cm²/sec という結果が得られた。

次に HDPE の水中でのラドン透過率を初めて測定した。水中ラドン濃度を測定するために、液相に存在する ²²²Rn を気相に移すための中空糸膜という装置を、70 L ラドン検出器と組み合わせて測定を行った。ラドン線源にはラジウムセラミックボールを用いた。測定の結果、HK 検出器に実際に使用される予定の HDPE の水中ラドン透過率として、 $(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-7}$ cm²/sec という結果が得られた。また透過前側の水中ラドン濃度の不定性から本測定の系統誤差を 30% と見積もり、統計誤差と系統誤差を合わせ $(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-7}$ cm²/sec という結果が得られた。

また、得られた水中ラドン透過率を用い、1.)HK 検出器全体で水のやり取りをした場合と、2.)HK 検出器の ID と OD 間の仕切りを考慮した場合で、坑内環境から HK 検出器内部に透過してくるラドン濃度を見積もった。1.) では、HK 検出器内部のラドン濃度は 80 ± 27 mBq/m³ と見積もった。2.) では、HK に使用される PMT からの

ラドン放射レベル (1.6 mBq/m^3) に抑えるためには、ID と OD 間の水流を 96 ton/day 以下に抑えなければならないという見積もりが得られた。

参考文献

- [1] Derek A. Greenwood W. Noel Cottingham. 素粒子標準模型入門. 丸善出版, 2012. 樺沢宇紀 訳.
- [2] The T2K Collaboration. About Neutrinos. <http://t2k-experiment.org/neutrinos/>.
- [3] CERN. The Standard Model. <https://home.cern/science/physics/standard-model>.
- [4] Particle Data Group. Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D*, Vol. 98, p. 030001, Aug 2018.
- [5] Palash B. Pal Rabindra N. Mohapatra. *Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics Third Edition*. World Scientific Publishing, 2004.
- [6] Matteo Agostini, K Altenmüller, S Appel, Viktor Atroshchenko, Zara Bagdasarian, D Basilico, G Bellini, Jay Benziger, D Bick, G Bonfini, Diane Bravo, B Caccianiga, F Calaprice, A Caminata, S Caprioli, M Carlini, P Cavalcante, A Chepurinov, and K Choi. Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos. *Nature*, Vol. 562, pp. 505–510, 10 2018.
- [7] B.T. Cleveland, T Daily, R Davis, James Distel, K Lande, C.K. Lee, P Wildenhain, and J Ullman. Update on the measurement of the solar neutrino flux with the Homestake chlorine detector. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Vol. 38, pp. 47–53, 01 1995.
- [8] Bruce T. Cleveland, Timothy Daily, Jr. Raymond Davis, James R. Distel, Kenneth Lande, C. K. Lee, Paul S. Wildenhain, and Jack Ullman. Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector. *The Astrophysical Journal*, Vol. 496, No. 1, p. 505, 1998.
- [9] SOLAR NEUTRINOS. http://pdg.lbl.gov/2002/solarnu_s005313.pdf.
- [10] Y. Fukuda, T. Hayakawa, K. Inoue, K. Ishihara, H. Ishino, S. Joukou, T. Kajita, S. Kasuga, Y. Koshio, T. Kumita, K. Matsumoto, M. Nakahata, K. Nakamura, K. Okumura, A. Sakai, M. Shiozawa, J. Suzuki, Y. Suzuki, T. Tomoeda, Y. Totsuka, K. S. Hirata, K. Kihara, Y. Oyama, M. Koshiba, K. Nishijima, T. Horriuchi, K. Fujita, S. Hatakeyama, M. Koga, T. Maruyama, A. Suzuki, M. Mori, T. Kajimura, T. Suda, A. T. Suzuki, T. Ishizuka, K. Miyano, H. Okazawa, T. Hara, Y. Nagashima, M. Takita, T. Yamaguchi, Y. Hayato, K. Kaneyuki, T. Suzuki, Y. Takeuchi, T. Tanimori, S. Tasaka, E. Ichihara, S. Miyamoto, and K. Nishikawa. Solar Neutrino Data Covering Solar Cycle 22. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 77, pp. 1683–1686, Aug 1996.
- [11] SAGE Collaboration. Solar neutrino flux measurements by the Soviet-American gallium experiment (SAGE) for half the 22-year solar cycle. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Vol. 95, pp. 181–193, August 2002.
- [12] F. Kaether, W. Hampel, G. Heusser, J. Kiko, and T. Kirsten. Reanalysis of the GALLEX solar neutrino flux and source experiments. *Physics Letters B*, Vol. 685, pp. 47–54, February 2010.
- [13] W. Hampel, J. Handt, G. Heusser, J. Kiko, T. Kirsten, M. Laubenstein, E. Pernicka, W. Rau, M. Wojcik, Y. Zakharov, R.v. Ammon, K.H. Ebert, T. Fritsch, D. Heidt, E. Henrich, L. Stielglitz, F. Weirich, M. Balata, M. Sann, F.X. Hartmann, E. Bellotti, C. Cattadori, O. Cremonesi, N. Ferrari, E. Fiorini,

- L. Zanotti, M. Altmann, F.v. Feilitzsch, R. Mbauer, S. Wnninger, G. Berthomieu, E. Schatzman, I. Carmi, I. Dostrovsky, C. Bacci, P. Belli, R. Bernabei, S. d'Angelo, L. Paoluzi, M. Cribier, J. Rich, M. Spiro, C. Tao, D. Vignaud, J. Boger, R.L. Hahn, J.K. Rowley, R.W. Stoenner, and J. Weneser. GALLEX solar neutrino observations: results for GALLEX IV. *Physics Letters B*, Vol. 447, No. 1, pp. 127 – 133, 1999.
- [14] Super-Kamiokande Collaboration. Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-IV. *Phys. Rev. D*, Vol. 94, p. 052010, Sep 2016.
- [15] Y. Suzuki. Solar neutrino results from Super-Kamiokande. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Vol. 77, No. 1, pp. 35 – 42, 1999.
- [16] SNO Collaboration. Combined analysis of all three phases of solar neutrino data from the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. C*, Vol. 88, p. 025501, Aug 2013.
- [17] SNO Collaboration. Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ Interactions Produced by 8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 87, p. 071301, Jul 2001.
- [18] Motoyasu Ikeda. Superkamiokande (solar), June 2018.
- [19] The KamLAND Collaboration. Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 100, p. 221803, Jun 2008.
- [20] Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration. Hyper-Kamiokande Design Report. *arXiv e-prints*, p. arXiv:1805.04163, May 2018.
- [21] Super-Kamiokande Collaboration. The Super-Kamiokande detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 501, No. 2, pp. 418 – 462, 2003.
- [22] The Super-Kamiokande Collaboration. Super-Kamiokande.
- [23] Hyper-Kamiokande. <http://www.hyper-k.org/index.html>.
- [24] NASA Science SOLAR SYSTEM EXPLORATION. <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/overview/>.
- [25] Image of the Day Gallery. https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_219.html.
- [26] J-PARC. <http://j-parc.jp/Acc/ja/layout.html>.
- [27] A.H. Ashry, M. Abou-Leila, and A.M. Abdalla. Measurement of radon permeability through polyethylene membrane using scintillation detector. *Radiation Measurements*, Vol. 46, No. 1, pp. 149 – 152, 2011.
- [28] M. Jirnek and A. Froka. New technique for the determination of radon diffusion coefficient in radon-proof membranes. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 130, No. 1, pp. 22–25, 2008.
- [29] F Mamedov, P ermek, K Smolek, and I tekl. Measurement of radon diffusion through shielding foils for the SuperNEMO experiment. *Journal of Instrumentation*, Vol. 6, No. 01, p. C01068, 2011.
- [30] Wolfgang Rau. Measurement of radon diffusion in polyethylene based on alpha detection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 664, No. 1, pp. 65 – 70, 2012.
- [31] Y Takeuchi, K Okumura, T Kajita, Shigeki Tasaka, M Nemoto, Y Fukuda, H Okazawa, Takashi Hayakawa, K Ishihara, H Ishino, Y Itow, J Kameda, Shunsuke Kasuga, Katsuji Kobayashi, Y Kobayashi, Y Koshio, M Miura, M Nakahata, S Nakayama, and K.K Young. Measurement of radon concentrations at Super-Kamiokande. *Physics Letters*, Vol. 452, pp. 418–422, 01 1999.
- [32] T.V. Ramachandran, B.Y. Lalit, and U.C. Mishra. Measurement of radon permeability through some membranes. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear*

-
- Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 13, No. 1, pp. 81 – 84, 1987.
- [33] C Mitsuda, T Kajita, K Miyano, S Moriyama, M Nakahata, Y Takeuchi, and S Tasaka. Development of super-high sensitivity radon detector for the Super-Kamiokande detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 497, No. 2, pp. 414 – 428, 2003.
- [34] DIC CORPORATION. DIC の中空糸膜. http://www.dic-global.com/ja/products/membrane/hollow_fiber.html.
- [35] P. Kotrappa; S. K. Dua; P. C. Gupta; Y. S. Mayya. Electret - A New Tool for Measuring Concentrations of Radon and Thoron in Air. *Health Physics*, 1981.
- [36] K. Hosokawa, A. Murata, Y. Nakano, Y. Onishi, H. Sekiya, Y. Takeuchi, and S. Tasaka. Development of a high-sensitivity 80 L radon detector for purified gases. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Vol. 2015, No. 3, p. 033H01, 2015.
- [37] G Pronost, M Ikeda, T Nakamura, H Sekiya, and S Tasaka. Development of new radon monitoring systems in the Kamioka mine. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Vol. 2018, No. 9, p. 093H01, 2018.
- [38] RASPBERRY PI FOUNDATION. Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.org/>.
- [39] Y. Nakano, H. Sekiya, S. Tasaka, Y. Takeuchi, R.A. Wendell, M. Matsubara, and M. Nakahata. Measurement of radon concentration in super-Kamiokande' s buffer gas. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 867, pp. 108 – 114, 2017.
- [40] O. TETENS. Uber einige meteorologische begriffe. *Z. Geophys.*, Vol. 6, pp. 297–309, 1930.
- [41] 二宮洗三. 気象予報の物理学. オーム社, 1998.
- [42] Y. Ohnishi. 平成 27 年度 修士学位論文 XMASS 実験における純水中及び空気中ラドンバックグラウンドの研究. 2016.
- [43] H.L. Clever. *Solubility Data Series, Vol.2, Krypton, Xenon and Radon*. 1979.

謝辞

本研究を進めるにあたり、たくさんの方々にご協力をいただきましたので、ここに感謝の意を表します。

指導教員である竹内康雄先生には、修士課程の2年間で非常にお世話になりました。本研究を進めるにあたり、神岡での作業を手伝ってくださり、また疑問点等があれば解決のために力を尽くしてくださいました。研究会や学会での発表の機会をたくさんいただき、発表のたびに資料作成等熱心に指導してくださいました。私が学部生の頃には、実験のレポートを20時頃まで横で指導しながら書き上げるのを手伝ってくださったり、宇宙物理学講座でも、私の疑問や質問に丁寧に答えてくださり、とても楽しい講義でした。そのような竹内さんの人柄に惹かれ、粒子物理学研究室に入りました。研究室に入ってから、よく一緒にお酒を飲んだりしました。研究会のたびに竹内さんのおかげで楽しい（飲み会の）思い出になりました。私の生活リズムがおかしいので、竹内さんの予定と合わないこともありました。私のような不真面目で生活習慣がバグっている人間が、ここまで研究を進め修士論文を完成させることができたのは、竹内さんの真面目で研究に対して真摯であったことが大きいと思います。竹内さんのような真面目な人が指導教員で本当に良かったと感じています。竹内さんのおかげで非常に充実した大学院生活が送れました。心から感謝しています。

研究室の先生方にも大変お世話になりました。藏重久弥先生は、コロキウムや研究発表等でアドバイスやわからないことを教えていただき、素粒子物理学に関してとてもためになるお話を聞けました。またお酒に関しては、いいお店でいいお酒を飲む機会があり、毎回一緒にお酒が飲めてとても楽しかったです。研究室に住み込んでいた僕を追い出すこともなく、毎朝寝ている僕を起こすこともなく、見守っていてくださりありがとうございました。山崎祐司先生は、大学1年の力学の講義からお世話になりました。研究室で、私（と水越）が学生部屋にソファを買ったときに、少し怒られた記憶があります。すいませんでした。なんだかんだその後は、ソファに座って学生を指導している姿も見かけたので、許されたのかと安心しています。身内賢太郎先生は、学部4年の卒業研究のときに、仕事をしない僕を熱心に指導してください、感謝しています。研究室や研究会での飲み会でお酒を飲む機会も多く、楽しく話させていただきました。身内さんには尊敬すべき（真似はできない）ところが多く、感心していました。越智敦彦先生は、研究室で実験でお世話になりました。越智さんの2人目のポケモンGOのフレンドになり、一緒に深夜の大学構内を歩いたこともありました。デオキシスのEXレイドバトル行けずに残念でした。前田順平先生は、今年度はとても忙しそうでしたが、話す機会も多く毎日楽しませていただけていました。コロキウム等でも質問やアドバイスをたくさんいただきました。鈴木州先生は、私と研究室で同棲している先生ということで、夜中と一緒にお酒を飲んだりしました。また、朝のシャワーで会うこともありました。SKでは、神岡のドミトリーでご飯を食べたり、わからないことを教えてくれたりしました。川出健太郎先生は、基本的にCERNにいらっしやっただので、お会いする機会は少なかったですが、焼き肉に行ったり、前田さんをいじったりと、楽しませていただきました。中村輝石さんは、コロキウムや研究会で色々ご教授いただきました。今は引退してしまいましたが、アズールレーンの話もよくしました。伊藤博士さんは、研究を進めるにあたりアドバイスをいただくなど、とてもお世話になりました。また神岡に会いに行きます。秘書の吉田和美さんは、出張のたびに提出すべき書類を出していない私に催促のメールを送ってもらい、大変ご迷惑をおかけしました、ありがとうございました。

研究室の先輩や同期、後輩にもお世話になりました。長谷川誠さんは、SKの太陽ニュートリノや、LINACなど

の知識を教えてくださいました。木戸将吾さんは、CERNにおられることが多く、話す機会は少なかったですが、研究室旅行などイベントに参加して下さったときに楽しくお話をさせていただきました。橋本隆さんは、よく昼ごはんの後にゲームの話をしました。池田智法さんは、この修士論文を執筆している際に、M2の机でスマブラと一緒にプレイしてリラックスできました。竹田康亮さんは、私が学部1年の頃から知り合いなのですが、生活リズムバグ仲間として学生部屋と一緒に作業することが多かったです。石飛由介君は、喫煙メイツの一人として、よく一緒に喫煙タイムを満喫していました。また歴史メイツとして、一緒に列に並ぶことも多かったです。酒井貴義君は、学部生の頃から家で飲み会や勉強会をしてよくお喋りをしていました。杉本太郎君は、喫煙メイツ・歴史メイツとして一緒にいる時間が多かったです。またよくらあめんたろうでキムチ完食チャレンジをしました。歴史の大ラーメン(500g)を完食していて、驚きました。私もいずれ大ラーメンにチャレンジします。堀口楠日君は、M2のとき隣の席でよく僕が侵食していました、申し訳ありません。吉田登志輝君は、修士論文を書いている間のスマブラ楽しかったです。磯部裕太君は、私が一番お世話になった同期です。わからないことがあったときにはすぐに教えてもらい、いそやんの作業の進捗を奪っていました。SKのタンク補修シフトときには、全裸でいそやんの部屋で暴れるなどしました。一緒にご飯に行ったり、映画を観に行ったり、学生生活を楽しく過ごせました。石浦宏尚さんは、ガジュマルの改造など、研究室での電子工作で楽しませてもらいました。また神戸に会いに来ます。塩沢知晃君は、SKの後輩ということで、実験等でお世話になりました。先輩として至らない点は多々あったかとは思いますが、ありがとうございます。M1の網本圭輔君、上野龍一君、説田暉君、中村拓馬君、山下和輝君、B4の今井田奈波さん、塩見崇宏君、島田拓弥君、角源一郎君、瀧瀬優斗君、谷口浩平君、乃一雄也君、畠内康輔君、山本祥太郎君、吉田佳織さん、末田皓介君、研究室に住んでいるこんな先輩はきつかったかもしれません、ご迷惑をおかけしました。研究室の皆様にはご迷惑をおかけし続けていました、ありがとうございます。

大阪大学の水越慧太君は、神戸大学に来るたびに歴史に誘われ、おかげで私も太りました。お酒をのむ機会も多く楽しかったです。また飲みに行きましょう。井口条蒔さんは、大学を卒業した後も一緒にお酒を飲んでくれたりしてありがとうございます。京都大学の森正光さんは、4年の春のお花見で知り合いましたが、M1の夏に詳細は省きますが神岡で大変ご迷惑をおかけしました。

田阪茂樹先生は、ラドンの研究に関するアドバイスをたくさんいただき、学会等でもセッションを聞きに来てくださっていました。東北大学の細川佳志先生は、研究会や学会でのお酒の席でとてもお世話になりました。

東京大学宇宙線研究所の方々にも、大変お世話になりました。関谷洋之先生は、学会・研究会のスライドやポスターの校正をしていただきました。小林兼好先生は、Lab-Aでの測定の手伝いや理論に関するご相談に乗っていただき、大変助かりました。佐藤和史先生は、神岡で飲み会や麻雀をする機会が多く楽しませていただきました。矢野孝臣先生は、B4の頃から神戸大学でお世話になり、神岡でも研究のご指導いただきました。中野佑樹先生は、B4の研究室附属以前に特定されていて、それ以来研究やそれ以外のことでも感謝してもしきれないくらいお世話になりました。特に本研究を進めるにあたり、坑内作業やスライドのチェックなど、丁寧に、熱心にご指導いただきました。Guillaume Pronost-san, I am grateful to you for Information of Rn detector and it's DAQ. It was fun to drink together at Kamioka. 小林雅俊さん、阿久津良介さん、園田祐太郎さん、竹中彰さん、鈴木拓実さん、織井安里さん、大沢野までご飯に連れて行ってくれたり、飲み会でお酒を飲んでくれたり、麻雀をしてくれたり、ありがとうございます。

岡本幸平君は、同じラドンの研究をしていて、僕の質問や疑問にすぐに答えてくれ、研究を進めるにあたり、大変助かりました。また、神岡でご飯がない僕を車で連れて行ってくれたり、飲み会を開催してくれたりしてました。ありがとう。加藤伸行君は、神岡でご飯に行ったり麻雀できたり、毎回楽しかったです。また一緒にハイボールを飲む機会があればいいですね。Pedersen Juan William君は、オシロスコープを快く貸してくれたりし、助かりました。ご飯やお酒を飲む機会もあり楽しかったです。望月俊来君は、もちもちです。ありがとう。岡田健君は、神戸大学の学部の同期で、研究室内外と一緒に遊びました。おかけんに撮ってもらった私の写真が良すぎて家宝にしています。今泉秀一君は、後輩として神岡での飲み会の企画をしてくれて、私の神岡に行く楽しみを作ってくれて

いました。陳育勤君は、飲み会で一緒に話す機会も多く、楽しませてもらいました。

カグヤの子孫の、さっくん、くわいくん、いっちゃん、ちーくん、けっぴ、はしもん、ひっきー、やまちゃん、ぴおぴおには、学生生活で常に麻雀をしてくれたことに感謝しています。特にぴおぴお（pio_pio_11）君には、毎度毎度酒を飲んで家に帰れなくなった私を泊めてくれたり、飲み会や麻雀をする家を提供してくれたりと感謝感激雨あられです。

麻雀サークルのつじちゃんは、一緒にスマブラをしたり、お酒を飲んだり、ピザを食べたりと知り合ったのは学生生活の最後の方ですが、楽しかったです。水野さんは、一緒にお酒を飲んだり話していて元気が出ました。たらちさんは、毎回サークルの飲み会に来てくれてありがとうございました。倫理・道徳が欠如しているサークルの唯一の救いでした。

ラーメン荘 歴史を刻め 六甲道のトニさんは、私が学部生の頃から通っているラーメン屋で、いつも美味しいラーメンを提供していただきました。2019/2/1 現時点で約 200 杯のラーメンをいただきました、ありがとうございます。

最後に、これまでなんの不自由もなく大学院に通わせてくれ、研究を進められるような環境を提供してくれた両親に感謝します。

宮辺裕樹