

博士学位論文

身のまわりに存在する天然放射能を活用した
放射線教育のための教材開発

2022年1月

鳥取大学工学研究科 化学・生物応用工学専攻

中村麻利子

身のまわりに存在する天然放射能を活用した
放射線教育のための教材開発

2022年1月

中村麻利子

目 次

第一章	序章	1
第二章	天然放射能を活用した放射線教育用の実験法	4
2. 1	序	4
2. 2	実験	5
2. 3	結果と考察	9
2. 4	まとめ	18
2. 5	参考事例	19
第三章	霧箱の線源として活用できる温泉の所在マップ - 地域の自然の 恵みを放射線教育へ活かす -	21
3. 1	序	21
3. 2	実験	24
3. 3	結果と考察	32
3. 4	まとめ	40
3. 5	参考情報	41
第四章	ドールストーン (DOLL STONE) を活用した教材	42
4. 1	序	42
4. 2	実験	44
4. 3	結果と考察	48
4. 4	まとめ	62
第五章	結語	64
	参考文献	66
	発表論文リスト	70
	参考論文リスト	70
	謝辞	72

第一章 序章

地球が誕生した時から地球上には、天然放射性元素が存在しており、「放射線」あるいは「放射能」は、身近な存在である。しかし、初等・中等学校教育などで放射線・放射能について学ぶ機会は少なく、大学の理工系の学部においてさえも学生実験などで取り上げられることは多くない。したがって、放射能を実際に取り扱った経験を持つ人は少なく、放射線・放射能について曖昧な認識しか持っていないため、一般には「よくわからないが何となく怖いもの」というイメージを持っている人が多い。これは、放射線や放射能に対する正しい知識が国民に浸透していないことが原因であると考えられる。

この背景には、放射性同位元素（以降RIと略す）は、その取り扱いが法律で定められた施設に限られおり、一般の人々になじみがないこと、放射線の測定装置が高価（市販品は数十万円～数百万円）であり一般の人々が簡単に測定できるものではないこと等が挙げられる。これに対し、私たちの身のまわりに元々存在する天然放射能は、法律で定められた放射線管理区域内で取り扱う必要はなく、学校の通常の実験室や教室でさえも取り扱うことができる。

また、市販の小型ガイガー管（以後、GMと略す）を用いた放射線測定器の組立キット（秋月電子製 浜松D3372）を用いれば、高価で特別な装置を必要とせず、教員による演示実験だけでなく生徒や児童でも放射線測定実験が可能

ウラン系列		トリウム系列		アクチニウム系列		ネプツニウム系列	
核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
^{238}U	$4.47 \times 10^9\text{y}$	^{232}Th	$1.41 \times 10^{10}\text{y}$	^{235}U	$7.038 \times 10^8\text{y}$	^{237}Np	$2.14 \times 10^6\text{y}$
↓		↓		↓		↓	
^{234}Th	24.10d	^{228}Ra	5.76y	^{231}Th	25.52h	^{233}Pa	27.0d
↓		↓		↓		↓	
^{234}Pa	1.17m	^{228}Ac	6.13h	^{231}Pa	$3.28 \times 10^4\text{y}$	^{233}U	$1.592 \times 10^5\text{y}$
↓		↓		↓		↓	
^{234}U	$2.45 \times 10^5\text{y}$	^{228}Th	1.9131y	^{227}Ac	21.773y	^{228}Th	$7.3 \times 10^3\text{y}$
↓		↓		↓		↓	
^{230}Th	$7.54 \times 10^4\text{y}$	^{224}Ra	3.66d	^{227}Th	718.718d	^{225}Ra	14.8d
↓		↓		↓		↓	
^{226}Ra	$1.60 \times 10^3\text{y}$	^{220}Rn	55.6s	^{223}Ra	11.435d	^{225}Ac	10.0d
↓		↓		↓		↓	
^{222}Rn	3.82d	^{216}Po	0.15s	^{219}Rn	3.96s	^{221}Fr	4.8m
↓		↓		↓		↓	
^{218}Po	3.11m	^{212}Pb	10.64h	^{215}Po	1.78ms	^{217}At	32.3ms
↓		↓		↓		↓	
^{214}Pb	27m	^{212}Bi	60.60m	^{211}Pb	36.1m	^{213}Bi	45.6m
↓		↓		↓		↓	
^{214}Bi	19.9m	^{212}Po	$0.30 \mu\text{s}$	^{211}Bi	2.15m	^{213}Po	$4 \mu\text{s}$
↓		↓		↓		↓	
^{214}Po	$164 \mu\text{s}$	^{208}Pb	安定	^{207}Tl	4.77m	^{209}Pb	3.25h
↓				↓		↓	
^{210}Pb	22.3y			^{207}Pb	安定	^{209}Bi	$1.9 \times 10^{19}\text{y}$
↓							
^{210}Bi	5.01d						
↓							
^{210}Po	138.38d						
↓							
^{206}Pb	安定						

図 1-1 壊変系列を作る天然の放射性核種

となり、放射線教育の教材として役立つことができると考えられる。

地球が誕生した時、地球上には、天然放射性核種としてウラン系列、トリウム系列、アクチニウム系列、ネプツニウム系列による核種が存在していた（図1-1）。ただしネプツニウム系列は半減期が214万年と地球の歴史の中では比較的短いため、46億年を経た現在では天然に ^{237}Np 系列の核種は存在しない。 ^{238}U （ウラン系列）の子孫核種（ ^{238}U の崩壊によって生成した

核種)である ^{222}Rn は、空気、温泉水(あるいは鉱泉)や鉱物(や土)中にごく普通に含まれている。このような天然に存在する ^{222}Rn とその子孫核種を用いる実験は、管理区域内で行う必要はなく、学校の実験室や教室等で行うことができることは注目に値する。鳥取県には、ラジウム(ラドン)温泉として知られている三朝温泉や岡山県との県境には、過去にウランの採掘が行われていた人形峠があり、比較的高濃度な天然放射エネルギーがある。人形峠の土を利用するのであれば、管理区域内でなくても放射線に関する実験等^{1~4)}を行うことができる。この他にも、玉川温泉の湯の花⁵⁾(トリウム系列)、食品中に含まれている ^{40}K (普通のカリウム中に0.012%の割合で含まれている)⁶⁾等の天然放射能を活用した教材の開発に取り組んできた。

第二章 天然放射能を活用した放射線教育用の実験法

2. 1 序

三朝温泉は国内で最も強い放射能泉の一つであり、その温泉水中には図2-1に示したように ^{222}Rn とその子孫核種である ^{218}Po 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 、 ^{214}Po 等が含まれている。 ^{222}Rn 、 ^{218}Po 、 ^{214}Po は α 線を放出し、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi は β 線を放出する。さらにこれらの放射線と共に特性X線や γ 線の放出もある

核種	半減期	崩壊形式
^{222}Rn	3.82d	α
↓		
^{218}Po	3.11m	α
↓		
^{214}Pb	27m	β
↓		
^{214}Bi	19.9m	β
↓		
^{214}Po	164 μs	α

図 2-1 ラドン温泉水に含まれている放射性同位元素

るので、上記の核種を温泉水中から分離・測定することで、それぞれの放射線の特徴を実験を通して学ぶことができる^{7,8)}。

温泉水を用いた実験は、特殊な技術や装置を必要としないため大学の学生実験以外でも中学校や高等学校の化学部の実験テーマとしても適当である。ただし、温泉水に含まれている ^{222}Rn の半減期は3.8日であるので、実験を行う際にはできるだけ新鮮な温泉水を用いる必要がある。そのため複数回行わなければならない学生実験等の場合には、そのたびに新鮮な温泉水の採水が必要であり、実験の担当者にとっては負担となる。そこで、温

泉水に代わるものとして、人形峠の土を用いる実験を開発した^{1~4)}。人形峠では、昭和29年に通商産業省工業技術院地質調査所が国内のウラン探鉱を行った際、昭和30年11月にウラン鉱床の露頭が発見された。人形峠の土には、他の地域の土よりウランの含有量が多い。実験には、「人形峠ウラン鉱床露頭発見の碑」の近くで採取した土を用いた。この土を活用した放射化学実験は、化学系学科の学生実験として実施した。

これらの実験に適した放射能泉や人形峠の土の入手は地理的に限られるが、これらに代わって園芸用の肥料として市販されている過リン酸石灰を用いても同様の実験が可能である⁹⁾。(過リン酸石灰は、リン酸二水素カルシウムと硫酸カルシウム二水和物との混合物で、通常リン鉱石に硫酸を作用させて製造されている。原料のリン鉱石中に微量のウランが含まれている。)

放射線・放射能について学んだことがない教員や学生等にとっても放射能泉、人形峠の土や過リン酸石灰などに含まれている天然放射能を活用した実験であれば、不安をいなくことなく取り組むことができると考えられる。

2. 2 実験

2.2.1 ラドン温泉水を用いた実験

まず、三朝温泉の温泉水を用いて次の2通りの実験を行った。

実験A ^{214}Pb と ^{214}Bi の両方を沈殿物として温泉水中から分離し、 ^{214}B の放射能の経時変化を測定した。温泉水80 mLに硝酸を10 mL加え、共沈剤として硝酸ビスマス5水和物を100 mg加え、アンモニア水を加えてpH10以上にすると生じる沈殿物は $\text{Bi}(\text{OH})_3$ であるが、同沈殿物中には温泉水に極微量含まれている ^{214}Pb も ^{214}Bi とともに取り込まれていた。

実験B ^{214}Pb を液相に残し ^{214}Bi のみを沈殿物として分離し、その放射能の経時変化を測定した。温泉水80 mLに硝酸を10 mL加え、共沈剤として硝酸ビスマス5水和物100 mgを、保持担体として硝酸鉛100 mgを加え、これに水酸化ナトリウム8~9 gを加えることで Bi^{3+} イオンのみを $\text{Bi}(\text{OH})_3$ の沈殿として分離できる。

さらに、三朝温泉と同じように高濃度のラドン温泉として知られている増富温泉（山梨県）¹⁰⁾、恵那鉱泉（岐阜県）¹¹⁾、池田鉱泉（島根県）¹¹⁾がある。これらの温泉は、三朝温泉と異なりいわゆる冷泉（~22.5 °C）である。一般に温泉水の化学組成が温泉ごとに異なることを考えると、三朝温泉水を対象に開発した実験法が、その他の温泉水に対してそのまま適用できるとは限らない。そこで、これらの温泉水を対象に有効であるかどうかを検証する必要がある。そこで三朝温泉の温泉水で行った実験A、実験B

を行うとともに次の実験Cも行った。

実験C ^{214}Bi を液相に残し ^{214}Pb のみを沈殿物として分離し、沈殿物中で ^{214}Pb から生じる ^{214}Bi の放射能の経時変化を測定した。温泉水 160 mL に硝酸を 20 mL 加え、共沈剤として硝酸鉛 250 mg を、保持担体として硝酸ビスマス五水和物 100 mg を加える。これに硫酸ナトリウム 6.5 g を加えることで ^{214}Pb を硫酸塩の形で温泉水から分離できる。

2.2.2 人形峠の土を用いた実験

デシケータ (直径17 cm) に人形峠の土 (約2 kg) を入れておけば (図2-2)、デシケータ内では、図2-3に示した ^{238}U とその子孫核種が放射平衡に達する。 ^{238}U の半減期は約45億年のため、一度採取すればその土を使い続けることができ、土を入れ替える



図 2-2

核種	半減期	崩壊形式
^{238}U	$4.47 \times 10^9 \text{ y}$	α
^{234}Th	24.1 d	β
^{234}Pa	1.17 m	β
^{234}U	$2.45 \times 10^5 \text{ y}$	α
^{230}Th	$7.54 \times 10^4 \text{ y}$	α
^{226}Ra	$1.6 \times 10^3 \text{ y}$	α
^{222}Rn	3.82 d	α
^{218}Po	3.11 m	α
^{214}Pb	27 m	β
^{214}Bi	19.9 m	β
^{214}Po	164 μs	α

図 2-3 人形峠の土に含まれている放射性同位元素

必要はない。そして、デシケータの中に活性炭を入れておけば、気体である ^{222}Rn は活性炭に吸着され、吸着された ^{222}Rn が崩壊して活性炭上も約1週間程度で放射平衡に達する。硝酸水溶液（硝酸10 mL + 水30 mL）に硝酸ビスマス5水和物100 mgと ^{222}Rn を吸着した活性炭（1g）を入れてマグネチックスターラーで5分間攪拌し、活性炭上の ^{214}Pb や ^{214}Bi を液相に移した後に、ブフナーロートを用いて吸引ろ過して活性炭を取り除き、ろ液にアンモニア水（温泉水を用いた実験での実験Aの方法）あるいは炭酸ナトリウムを加えて ^{214}Pb と ^{214}Bi を沈殿物として取り出し、それらから放出される β 線を測定する。学生には、測定結果をもとに課題を与えた。

2.2.3 ラドン温泉水中の ^{222}Rn の霧箱の線源としての活用

温泉水中の ^{222}Rn は、気体のため温泉水を容器（洗浄ビン等）に入れて振ることで簡単に取り出すことができる。500 mLの洗浄ビン（ノズルを抜き取り、洗浄ビンの中に入っている部分は切り取っておく）に温泉水を350～400 mL入れ、洗浄ビンの口を手のひらでふさぎ30回強く振り、温泉水中の ^{222}Rn を空気の相に追い出す。洗浄ビンに短く切ったノズルを取り付け、空気の相（ ^{222}Rn を含んでいる）を霧箱に注入し、霧箱の線源として活用する。

2.2.4 温泉水（または人形峠の土）と活性炭を用いた実験（放射平衡と減衰の観察）

危険な薬品類を全く使用せず、小学生でも安全にできる実験法の開発にも取り組んだ。

霧箱の場合と同様の方法で温泉水中から ^{222}Rn を取りだし、写真2-1示したようにノズルの先



写真 2-1

に活性炭を入れた袋を取り付け、洗浄ビンの中

の ^{222}Rn を含んだ空気を活性炭に吹き付けて ^{222}Rn を吸着させる^{12, 13)}。

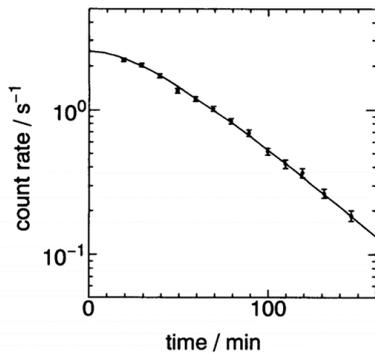
または、人形峠の土を洗浄ビンに入れて密閉しておき、人形峠の土から生まれた ^{222}Rn が洗浄ビン内の気相にたまっただけ、温泉水の時と同様に洗浄ビン内の ^{222}Rn を含んだ空気を活性炭に吹き付けて ^{222}Rn を吸着させる¹⁴⁾。

2. 3 結果と考察

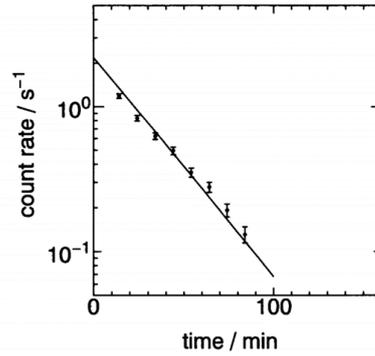
2.3.1 ラドン温泉水を用いた実験

三朝温泉の温泉水を用いて行った実験Aの測定結果を図2-4(A)に、実験Bの測定結果を図2-4(B)に示した。いずれも、縦軸は1分間当たりの計数率を、横軸は沈殿が生成してからの経過時間を示す。各データの誤差棒は測定値の統計的誤差を表している。

RIはすべてその固有の半減期に従って崩壊・減衰するが、図2-1に示したように親核種 (^{222}Rn) の半減期 (3.82 d) が子孫核種の ^{218}Po (3.11 m)、



(A) $^{214}\text{Pb} + ^{214}\text{Bi}$



(B) ^{214}Bi のみ

図 2-4 三朝温泉の温泉水での実験結果

^{214}Pb (27 m)、 ^{214}Bi (19.9 m) 等の半減期に比べ十分長い場合には、各子孫核種の放射能、すなわち単位時間あたりの崩壊数はすべて親核種のそれに等しくなる。つまり各核種の原子数は常に一定になり、このような状態を放射平衡と呼ぶ。

^{222}Rn と放射平衡にあった ^{214}Pb と ^{214}Bi を温泉水から分離すると、それぞれそれぞれの原子の数 (N_1 、 N_2) は時間の経過とともに以下の式に従って減少する。

$$dN_1/dt = -\lambda_1 N_1 \quad (1)$$

$$dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2)$$

ただし、 λ_1 、 λ_2 は ^{214}Pb 、 ^{214}Bi のそれぞれの崩壊定数 ($\ln 2$ を半減期で除したもの) を示している。分離直後 ($t = 0$) の N_1 、 N_2 をそれぞれ N_{10} 、 N_{20} と書けば、式(1)、(2)から時刻 t における ^{214}Pb と ^{214}Bi の原子数は次のように求め

られる。

$$N_1 = N_{10} \exp(-\lambda_1 t) \quad (3)$$

$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_{10} \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} + N_{20} \exp(-\lambda_2 t) \quad (4)$$

実験1では、分離直前まで ^{222}Rn - ^{214}Pb - ^{214}Bi 間で放射平衡が成立していたと

考えられるので、 $t = 0$ において

$$\lambda_1 N_{10} = \lambda_2 N_{20}$$

$$N_{20} = (\lambda_1 / \lambda_2) N_{10} \quad (5)$$

が成り立つ。図2-4(A)に示した減衰曲線は、式(5)を式(4)に代入して得た次式で計算したものである。

$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_{10} \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} + (\lambda_1 / \lambda_2) N_{10} \exp(-\lambda_2 t) \quad (6)$$

ただし、式中の N_{10} の値は式(6)による計算値と実測値の差が最も小さくなるように定めた。

実験Bの場合は、沈殿物中に ^{214}Pb が含まれていない。そこで図2-4(B)中の減衰曲線は式(4)に $N_{10} = 0$ を代入して得られる次式で計算できる。

$$N_2 = N_{20} \exp(-\lambda_2 t) \quad (7)$$

実験Aでは、沈殿物中に ^{214}Pb と ^{214}Bi が含まれているが、 ^{214}Pb から放出される β 線は測定できない。実験に用いた秋月電子製のガイガー管は管壁が厚

く、 ^{214}Pb から放出される β 線をカウントしない。そのため、沈殿物中に ^{214}Pb と ^{214}Bi が含まれている場合、 ^{214}Pb から放出される β 線は測定できないが、 ^{214}Pb から生じた ^{214}Bi から放出される β 線は測定される。これは、 ^{214}Pb から放出される β 線のエネルギーが低く（671 keV、728 keV）¹⁵⁾ガイガー管の側壁を通過して内部に進入できないためと考えられる。しかし、 ^{214}Pb から生まれた ^{214}Bi から放出される β 線は測定されるため図2-4(A)のように緩やかに減衰している。沈殿物中に ^{214}Bi のみである図2-4(B)では、 ^{214}Bi の半減期に従って減衰している様子が観察できる。

増富温泉の温泉水の結果を図2-5に、池田鉦泉の温泉水の結果を図2-6に、恵那鉦泉の温泉水の結果を図2-7に示した。

実験Cの場合は、分離直後の沈殿物中に ^{214}Bi が含まれていないため、式(4)に $N_{20}=0$ を代入して得られる次式で ^{214}Bi の生成・減衰を求めた。

$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_{10} \{ \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \} \quad (8)$$

さらに ^{214}Bi の放射能が最大となる時刻 t_{\max} を求めると $dN_2/dt=0$ より、

$$\begin{aligned} t_{\max} &= \ln(\lambda_1 / \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_1) \\ &= \ln(27/19.9) / (0.693/19.9 - 0.693/27) \\ &= 33 \text{ min} \end{aligned} \quad (9)$$

が得られる。これに対し測定結果（図2-5(C)、図2-6(C)、図2-7(C)）はい

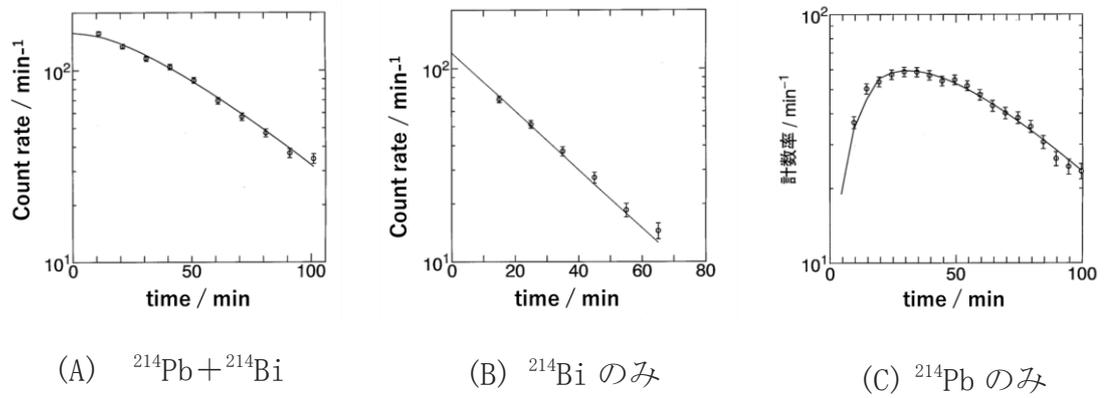


図 2-5 増富温泉の温泉水での実験結果

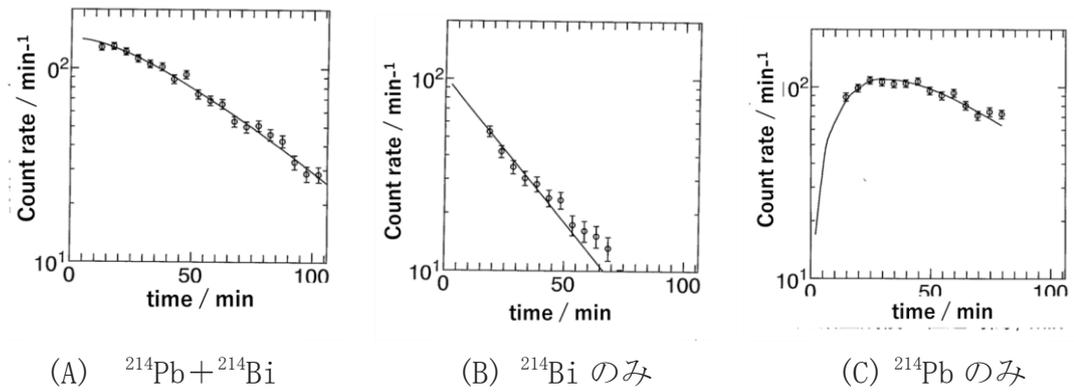


図 2-6 池田鉱泉の温泉水での実験結果

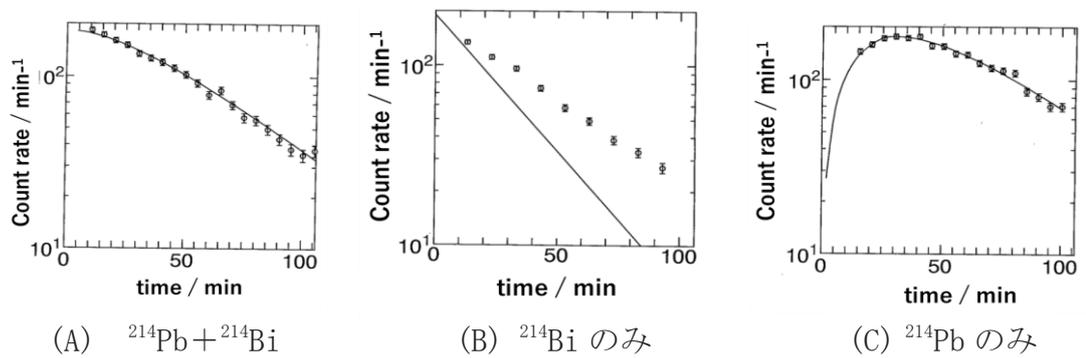


図 2-7 恵那鉱泉の温泉水での実験結果

ずれも最大値は $t = 30$ min に得られ、式(9)にて得られた結果と計数間隔(5 min)の範囲内で一致していることが分かる。

恵那鉱泉の実験B(図2-7(B))のみ計算値と実測値に大きな差がみられ、 ^{214}Bi の半減期(19.9分)より傾きが緩やかになっている。これは、沈殿物中に ^{214}Pb が多く取り込まれている可能性が考えられるため、まず温泉水から ^{214}Pb を沈殿物として取り除いた後に、 ^{214}Bi を沈殿物として取り出した。改良した実験法(実験B-2)と測定結果(図2-8)を次に示した。

実験B-2 温泉水80 mLに硝酸10 mLを加え、共沈剤として硝酸鉛 100 mg を、保持担体として硝酸ビスマス五水和物100 mgを加えた。これに硫酸ナトリウム6.5 gを加え、 ^{214}Pb を硫酸塩の形で沈殿として温泉水から取り除き、上澄み液にアンモニア水を加えて

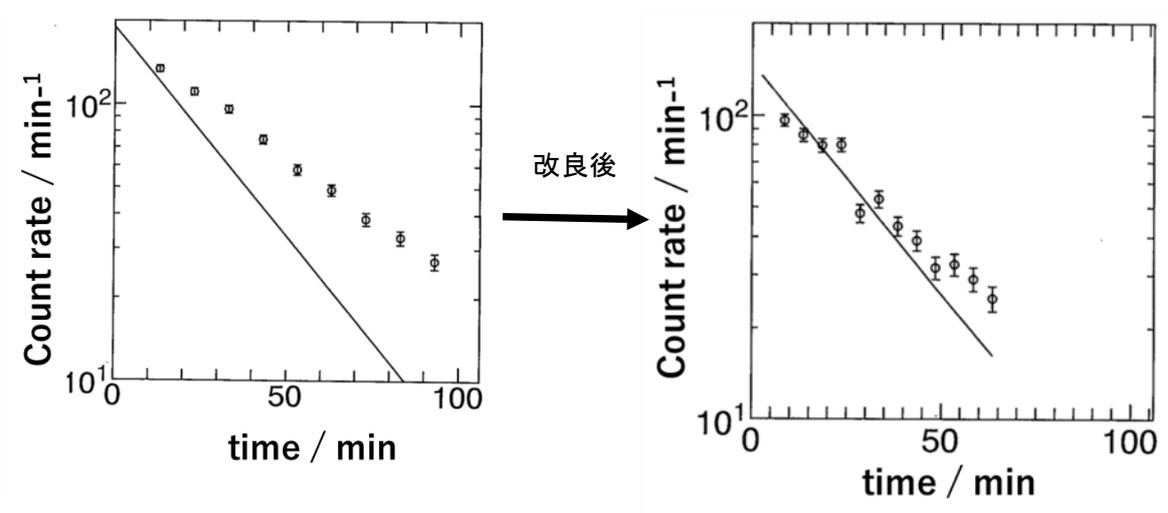


図 2-8 恵那鉱泉(B)の改良後の実験結果

^{214}Bi を水酸化物の沈殿物として取りだし、放射能の経時変化を測定した。

実験B-2では、温泉水中の ^{214}Pb を沈殿物として取り除いた後に、上澄み液中の ^{214}Bi を沈殿物として取り出したため、沈殿物中に ^{214}Pb が含まれず計算値と実測値がほぼ一致した。

2.3.2 人形峠の土を用いた実験

学生が行った測定結果の一例を図2-9に示した。本実験では、沈殿物中に ^{214}Pb と ^{214}Bi が含まれている。図中の黒い実線（計算値）は、沈殿物中に ^{214}Pb と ^{214}Bi が含まれている場合の減衰曲線を示したも

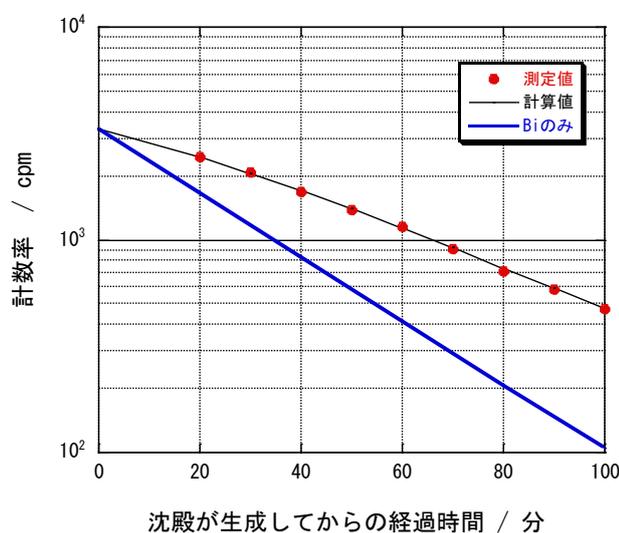


図 2-9 測定結果の一例

のである。測定値は、その減衰曲線と一致している。そして図中の青い実線は、沈殿物中に ^{214}Bi のみであった場合の減衰曲線を示す。実験操作自体は、小学生でも行えるものであるが、大学生には、このグラフから沈殿物中に含まれていた ^{214}Bi の量（モル数）を求めるなどの課題を与え、化学的な面からの理解にもつなげている。

2.3.3 ラドン温泉水中の ^{222}Rn の霧箱の線源としての活用

鉱石やキャンプ用のマントルを線源とした場合には、時間が経過すると線源がアルコールのために湿り α 線を遮るため、その飛跡を観察できなくなる。しかし、ラドンガスを用いると、湿ることなく長い時間観察することができる。また線源が気体であるため直接見ることができないため、何も無いところから飛跡があらわれる様子が観察できる。

2.3.4 温泉水（または人形峠の土）と活性炭を用いた実験（放射平衡と減衰の観察）

活性炭に温泉水又は人形峠の土から取り出した ^{222}Rn を吸着させた直後は、活性炭上にはその子孫核種である ^{214}Pb と ^{214}Bi は存在していないが、 ^{222}Rn の壊変により次第に ^{214}Pb と ^{214}Bi が生まれてくる。測定に用いたGM管は、 β 線は測定できるが α 線は測定できない。そのため図2-10に示したように測定を開始した直後は、ほとんどゼロに近いが次第に測定値が増加していく。しかし、活性炭上の ^{222}Rn （半減期3.8日）は、減衰していくため活性炭上では ^{222}Rn の壊変により生まれた子孫核種がやがて放射平衡（過渡平衡）に達する。その後、活性炭を電子レンジで加熱（500Wで20秒ずつ3回）し、活性炭上の ^{222}Rn を取り除けば活性炭上では、新しく ^{222}Rn の子孫核種である ^{214}Pb と ^{214}Bi が生まれてこないため ^{214}Pb と ^{214}Bi が減衰していく様子を観察することができる（図2-10）。

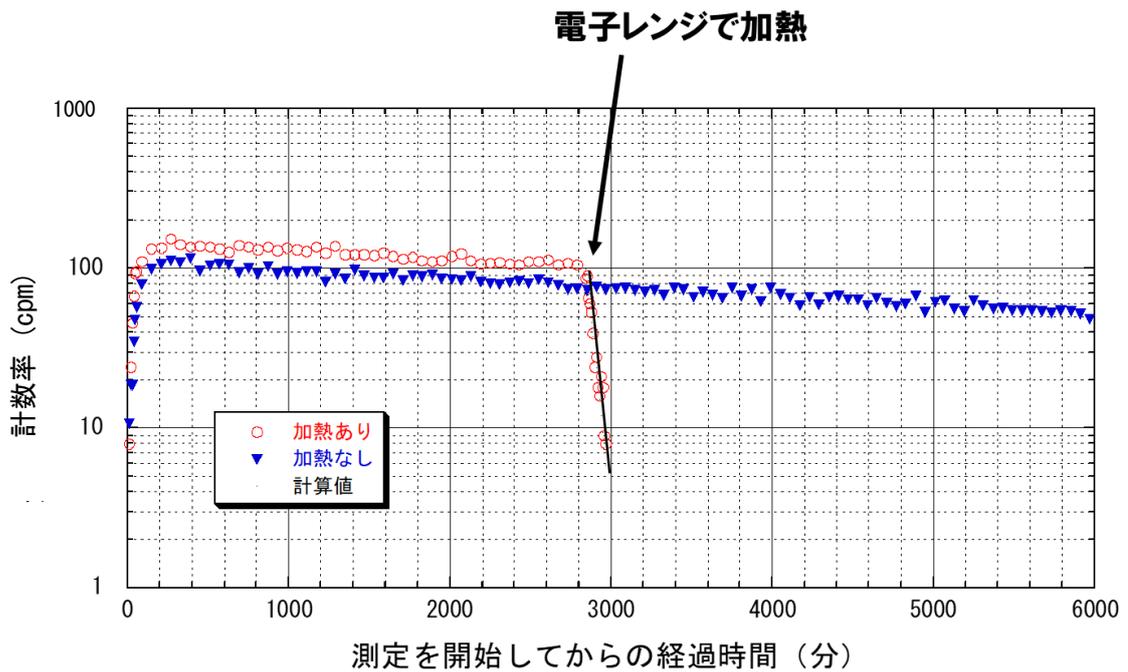


図 2-10 放射平衡・減衰の観察 (温泉水を用いた場合)

図中の▽印は、電子レンジで加熱しなかった場合の測定結果である。 ^{222}Rn の半減期に従って減衰している様子が観察できる。図中の実線は、活性炭上に ^{222}Rn が存在せず、 ^{214}Pb と ^{214}Bi のみであったと仮定した時の減衰曲線を示す。測定値は計算値と一致しているため電子レンジで加熱することにより、活性炭上の ^{222}Rn を取り除くことができたことが判る。

本実験は、実験室でなくても、小学校、中学校、高等学校の教室や温泉水が湧き出しているフィールドでも行える実験である。

2. 4 まとめ

特別な線源、技術や装置を使用せず、ラドン温泉水や人形峠の土など、身のまわりの自然界に存在しているRIを線源として用いた放射線・放射能の基礎的な事象を学ぶことができる実験や演習実験を開発した。

ラドン温泉水を用いた実験では、GMで容易に測定できる β 線を放出する ^{214}Pb 、 ^{214}Bi を放射化学的手法の一つである共沈法によって温泉水から分離し、得られた沈殿物の放射能を測ることで同核種の減衰の様子を観察することができる。共沈法では、共沈剤と保持担体として用いる薬品を変えることにより沈殿物として取り出す放射性核種を変えることができる。また、温泉水中の ^{222}Rn の放射能濃度を求めることもできる（文献8を参照）。

温泉水中の ^{222}Rn は気体であるため薬品を使用することなく簡単に取り出すことができ、取り出した ^{222}Rn を活性炭に吸着させて放射平衡や減衰を観察したり、霧箱の線源として活用することができる。

人形峠の土を用いた実験でも ^{222}Rn が気体であることを利用した。人形峠の土に含まれている ^{222}Rn の子孫核種である ^{214}Pb と ^{214}Bi を直接取り出すのは、土には不純物が多く困難である。しかし、 ^{222}Rn を活性炭に吸着させれば活性炭上では、 ^{222}Rn の壊変により子孫核種が生まれてきてやがて放射平衡に達する。放射平衡に達した後の活性炭から ^{214}Pb と ^{214}Bi を液相に移せば温泉

水の場合と同様に共沈法を用いて目的核種を沈殿物として取り出し減衰を観察することができる。

2. 5 参考事例

これらの実験や演示実験は、出張講義¹⁶⁾、教員を対象としたセミナーや実験教室などで実践してきた。身のまわりの天然放射能を活用した実験に、受講した子どもも大人も受講後には、放射線・放射能についてのイメージが変わったと感想述べる人が多かった。また、受講者の中には、受講した内容を自身が行っている放射線教育に生かして実践する人も現れている¹⁷⁾。日本学術振興会の事業である「ひらめき★ときめきサイエンス」においてもこれらの実験を盛り込んで平成20年度から28年度まで開催した¹⁸⁾。

また、静電気を利用して空気中に漂っているRIを風船の表面に集め、風船の空気を抜いた後に風船の表面を放射線測定器で測定し、空気中のRIの存在を実感できる演示実験も行っている。風船を利用した演示実験は、長崎で開催されたThe Third International Symposium on Radiation Education (ISRE 04, Nagasaki Brick Hall にて 2004年8月23～26日)に参加した折、ポスター発表の中に環境放射線を測定する方法として静電気を帯びた風船の表面に大気中を漂っているRIを集めているとの発表¹⁹⁾

があり、その発表を参考にし、講義等での演示実験用にアレンジしたものである。発表では、丸風船が使用されていたが、演示実験ではバルーンアート用の長い風船を使用している。膨らませた時に丸風船よりバルーンアート風船の方が表面積が広くなり、よりたくさんのRIを集めることができると考えた。そして空気を抜くことにより表面積が小さくなるので、風船に広がって付着していたRIが狭い範囲に集まることになり、測定器から発せられる測定音が高くなり、RIの存在を実感できるように工夫している。

第三章 霧箱の線源として活用できる温泉の所在マップ - 地域の自然の恵みを放射線教育へ活かす -

3. 1 序

放射性同位元素の取り扱いは法律で定められている施設に限られているため、初等・中等学校の児童・生徒はもちろんのこと、理工系の大学生さえ放射能を実際に取り扱った経験を持つ人は少ない²⁰⁾。そのため、放射線・放射能に関する知識が曖昧であり、体験不足のため、必ずしも放射線・放射能の正しい理解につながっていない現状がある^{21,22)}。筆者はこれまでラドン温泉として知られている三朝温泉、池田鉱泉、増富温泉、湯之島ラジウム鉱泉保養所ローソク温泉の温泉水を活用し、共沈法を用いて温泉水中の²¹⁴Pb や²¹⁴Bi を沈殿物として取り出し、放射能の減衰の観察や温泉水中から取り出したラドンガスを活性炭に吸着させて放射平衡・減衰を観察できる実験法を開発してきた^{7,8,10,11,12,13,23)}。それらの成果は、ひらめき★ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ - KAKENHI- (日本学術振興会) (平成 20~28 年度開催) や、小・中・高校への出張講義、市民公開講座や教員を対象としたセミナー等で実践してきた。出張講義の際には、クラスが多く、同じ講義を複数回行う場合には、著者の講義を参考にして、教員自身にも講義を担当してもらい、教員自身による放射線教育の実践な

ど、それらを活用した放射線教育の教材としての普及につとめた。最近ではセミナー等への参加者による放射線教育の取組についての報告も行われるようになってきている¹⁷⁾。

平成 20 年度告示の中学校学習指導要領の理科に放射線に関する内容が 30 年ぶりに導入され、平成 23 年度から中学校 3 年で実施（平成 24 年度完全実施）されるようになった。そのような矢先、平成 23 年 3 月に福島第一原子力発電所の事故が発生し、放射線教育の重要性がさらに増すこととなった。しかし放射線について学んだことがない教員や教えたことがない教員にとっては、学習指導に対する不安がさらに大きなものとなったと思われる。

福島県では、県独自の放射線教育を展開し、毎年小学校・中学校で授業実践を行っている。また、文部科学省では、放射線教育の更なる充実を図るために、全国の小学校・中学校・高等学校・特別支援学校等における放射線教育の実施状況調査を実施した²⁴⁾。調査は、令和元年 12 月 10 日から令和 2 年 1 月 24 日に行われた。「授業等で放射線に関する内容を扱ったことや扱う予定はありますか」の問いに対して、「はい」と答えたのは、小学校等 69%、中学校等 95%、高等学校等 80%であった。「放射線に関する内容を扱った（扱う予定の）教科等・学年（複数回答有）」の問いに対しては、小学校 1 学年から中学校 2 学年までは理科の占める割合が低く、中学校 3 学年から高等学校では理科の占める割合が高くなっ

ている。原子の構造や原子核などを学んでいない小学生・中学生にとっては、放射線・放射能を学ぶことは難易度が高い。そのため、放射線カルテットや放射線かるたなどのゲームを用いて学ぶなどの工夫がなされている^{25,26)}。一方、五感で感じることでできない放射線を視覚化できる霧箱は、教員にとっても子どもたちにとっても興味を持って取り組むことができる教材の一つとなり得る。霧箱の線源としては、鉍物やマントル（キャンプ用のランタンに用いられる）が使用されることが一般的である。また、身のまわりの天然放射能として空気中のほこりなども用いられている^{27~32)}。

このような実験者の身近なところに存在している天然放射能である空気中のほこりは、容易に掃除機で集めたり、静電気を利用して風船の表面に集めたりして霧箱の線源として利用できる。しかし、鉍物、マントルやほこりなどを線源として用いた場合には、霧箱の中に生じる過飽和状態のアルコール蒸気の中に置くこととなるので、線源の表面にアルコールが結露して次第に飛跡が見えにくくなる。しかし、温泉水から取り出したラドン線源として用いた場合には、ラドンそのものが気体であるためそのようなことがなく、長い間観察することが可能である。1時間以上観察することができることもあった。このような温泉水等を活用できれば、さらに多くの人々が利用しやすく、子どもたちも興味をもって取り組むことができ、放射線教育の普及にもつながるものと考えられる。私たち

の身のまわりに存在している天然放射能を用いるのであれば、法律で定められた放射線管理区域内で行う必要はなく、学校の通常の実験室や教室等でも簡単に行うことができる。

温泉は日本全国に存在するので、身近なものであるが、温泉水には必ずしも放射能が含まれているとは限らない。また、放射能泉と言われている温泉であっても霧箱の線源として適切なものかどうかは不明な点が多い。このような観点に基づく温泉の調査研究は全く知られていない。もし、地域の温泉や湧水等が活用できることがわかれば、地域の自然から学ぶことができる地域密着型の放射線教育になると考えられる。そこで、入手（実行）しやすい線源として活用可能な温泉のマップ作りを検討した。また、一部の温泉水や湧水を利用して、その放射線量の減衰を測定し、採水後における霧箱の線源として使用できる期間の目安も明らかにしたので報告する。

3. 2 実験

3.2.1 ^{222}Rn を含んだ全国の温泉水の収集

温泉は、昭和 23 年に制定された「温泉法」により、地中から湧出する温水、鉱水及び水蒸気その他のガス（炭化水素を主成分とする天然ガスを除く）で、別表に掲げる温度又は物質を有するものをいうと定義されている（表 3-1）。

温泉法の別表に温泉の定義として、温度（摂氏 25 度以上）と物質（物質名と含有量）が記載されている。ラドン(Rn)については 20×10^{-10} Ci=74 Bq 以上（5.5 マッヘ単位以上）と定められている。温泉の定義は、常水と区別する限界値でもあり鉱泉の定義である。鉱泉のうち、特に治療の目的に供し得るものを療養泉という。療養泉の定義には、温度（摂氏 25 度以上）と物質（物質名と含有量）が記載されている（表 3-2）。ラドン(Rn)については、 30×10^{-10} Ci (111 Bq 以上、

表3-1 温泉の定義

- 1.温度（温泉源から採取されるときの温度） 摂氏25度以上
- 2.物質（以下に掲げるもののうち、いずれか一つ）

物質名	含有量（1kg中）
溶存物質（ガス性のものを除く。）	総量1,000mg以上
遊離炭酸（CO ₂ ）（遊離二酸化炭素）	250 mg以上
リチウムイオン（Li ⁺ ）	1 mg以上
ストロンチウムイオン（Sr ²⁺ ）	10 mg以上
バリウムイオン（Ba ²⁺ ）	5 mg以上
フェロ又はフェリイオン（Fe ²⁺ 、Fe ³⁺ ）（総鉄イオン）	10mg以上
第一マンガンイオン（Mn ²⁺ ）（マンガン（II）イオン）	10mg以上
水素イオン（H ⁺ ）	1 mg以上
臭素イオン（Br ⁻ ）臭化物イオン）	5 mg以上
沃素イオン（I ⁻ ）（ヨウ化物イオン）	1 mg以上
ふっ素イオン（F ⁻ ）（フッ化物イオン）	2 mg以上
ヒドロヒ酸イオン（HA _S O ₄ ²⁻ ）（ヒ酸水素イオン）	1.3 mg以上
メタ亜ひ酸（HA _S O ₂ ）	1 mg以上
総硫黄（S）[HS ⁻ +S ₂ O ₃ ²⁻ +H ₂ Sに対応するもの]	1 mg以上
メタほう酸（HBO ₂ ）	5 mg以上
メタけい酸（H ₂ SiO ₃ ）	50 mg以上
重炭酸そうだ（NaHCO ₃ ）（炭酸水素ナトリウム）	340 mg以上
ラドン（Rn）	20×10^{-10} Ci=74 Bq以上 (5.5マッヘ単位以上)
ラジウム塩（Raとして）	1×10^{-8} mg以上

表3-2 療養泉の定義

1. 温度（温泉源から採取されるとき温度） 摂氏25度以上
2. 物質（以下に掲げるもののうち、いずれか一つ）

物質名	含有量（1kg中）
溶存物質（ガス性のものを除く。）	総量1,000mg以上
遊離二酸化炭素（CO ₂ ）	1,000mg以上
総鉄イオン（Fe ²⁺ +Fe ³⁺ ）	20mg以上
水素イオン（H ⁺ ）	1mg以上
よう化物イオン（Γ）	10mg以上
総硫黄（S）[HS ⁻ +S ₂ O ₃ ²⁻ +H ₂ Sに対応するもの]	2mg以上
ラドン（Rn）	30×10 ⁻¹⁰ Ci=111Bq以上 （8.25マツヘ単位以上）

表3-3 温泉の泉質名

	掲示用泉質名	泉 質 名
1	単純泉	単純泉 アルカリ性単純泉
2	塩化物泉	ナトリウム・マグネシウム - 塩化物泉 ナトリウム・カルシウム - 塩化物泉
3	炭酸水素塩泉	カルシウム（・マグネシウム） - 炭酸水素塩泉 ナトリウム - 炭酸水素塩泉
4	硫酸塩泉	硫酸塩泉 マグネシウム - 硫酸塩泉 ナトリウム - 硫酸塩泉 カルシウム（・マグネシウム） - 硫酸塩泉
5	二酸化炭素泉	単純二酸化炭素泉
6	含鉄泉	鉄泉 鉄（II） - 炭酸水素塩泉 鉄（II） - 硫酸塩泉
7	酸性泉	単純酸性泉
8	含よう素塩泉	含よう素 - ナトリウム - 塩化物泉
9	硫黄泉	硫黄泉 硫黄泉（硫化水素型）
10	放射能泉	単純弱放射能泉 単純放射能泉 含放射能 - ○ - ○ 泉 含弱放射能 - ○ - ○ 泉

または 8.25 マッヘ単位以上) と定められている(鉱泉分析法指針 平成 26 年改訂 環境省自然環境局 参照)。

療養泉は、鉱泉分析法指針に基づいて、主成分によって 10 種類の泉質に分類されている(表 3-3)。主成分によって決められているため放射能泉以外の温泉であっても ^{222}Rn が入っている温泉もある。

各都道府県に一ヶ所以上の温泉を見つけ、それらを活用することで地域に根ざした放射線教育となることを目指した。温泉水の収集に際して、まず各温泉施設等のホームページに記載されている泉質名が放射能泉と記載されているもの、放射能泉と記載されていないけれども ^{222}Rn の含有量が記載されている温泉や昔からラドンが含まれていると言われている温泉を検索した。群馬県や静岡県については、なかなか温泉を見つけることができなかったが、1916 年 9 月 9 日付官報 1234 号³³⁾で発表された「鳥取県をはじめとした 28 都道府県下における本邦温泉水中のラジウムエマナチオン^{注1)}含有量調査成績」に記載されていた湯宿温泉や修善寺温泉を参考にして、採水場所を検討した。また、花崗岩地質(花崗岩には、他の岩石よりもウラン、トリウム、カリウム等の放射性核種が比較的多く

注 1) 1901 年ラジウムから放出される放射性ガス成分が発見され、ラジウムから放出されるガスという意味で「ラジウムエマナチオン」または「エマン」と呼ばれていたが、1923 年の国際会議で「ラドン」という正式名称が与えられた。

含まれている場合がある) の地域にある温泉なども検討した。

採水の際には、源泉を管理している各温泉施設、旅館組合や観光課などに事前に教材として利用することを目的としていることを伝え了解をとるとともに源泉の採水の可否を問い合わせた。問い合わせの時点で、採水を断られた施設もあった。また、宿泊した際に、宿の温泉の資料にラドンの記載を見つけた時には、その場で温泉水の提供をお願いしたこともあった。採水は、源泉の取り出し口(できるだけ新鮮な温泉水が採水できるところ)で行った。取り出し口からの採水が不可能な場合は、源泉が直接湯船や貯蔵用のタンクに流れていて、常に新鮮な源泉が湯船やタンクに供給されている場合のみ湯船や貯蔵用のタンクから採水した。また、ラドンは加熱によっても気相に移動しやすいため、加熱される前の温泉水を採水した。温泉水は教材としての活用を考えていたので、誰が採水したものであっても活用できることが望ましいため、特別な器具や容器、また特別な方法で採水するのではなく、だれでも入手しやすいペットボトルに採水した温泉水で活用可能かどうかを判断することにした。ただし、温泉水中の ^{222}Rn は気体のため気相に移動しやすいので、採水したペットボトル内に気相が残らないように注意した。

また、 ^{222}Rn を含んだ温泉を見つけるのが困難な都道府県もあったため、湧水(自噴している地下水)にも ^{222}Rn が含まれている可能性があると考え、湧水の

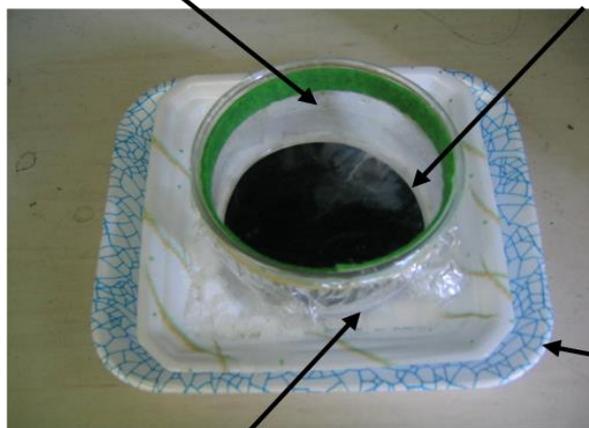
採水も行った。

3.2.2 霧箱の線源としての²²²Rnの活用

実験者自身が霧箱を作製し、放射線による飛跡の観察ができるようにするため、霧箱は入手しやすい材料で作製した。容器（アズワン 丸型V式容器（スチール製）外径82.5×高さ45.7 mm）の内側上部に手芸用のフェルトを1 cm幅に切ったものを両面テープで貼りつけ、底に黒い紙を敷き、フェルトと黒い紙にエタノールをしみこませた後、ラップでふたをし、輪ゴムでとめた。容器は、細かく砕いたドライアイスを入れた食品用発泡スチロール製トレーに入れて冷却した。このようにして作製した霧箱では、 α 線と β 線の飛跡を観察することができる（写真3-1）。

フェルトを両面テープではりつける

黒い紙を底に敷く



食品用トレー

容器をドライアイスで冷やす

写真3-1 手作り霧箱

3.2.2.1 温泉水から ^{222}Rn を取りだす方法

500 mL の洗浄ビン（ノズルは切断して短くしておく）に温泉水を 300 mL 入れて栓をし、強く 30 回程度振り、温泉水中の ^{222}Rn を気相に追い出した（写真 3-2）。次に短くしたノズルを素早く取り付け、洗浄ビンをゆっくり押しつぶして気相（ ^{222}Rn を含んだ空気）のみを霧箱の中に注入した（写真 3-3）。

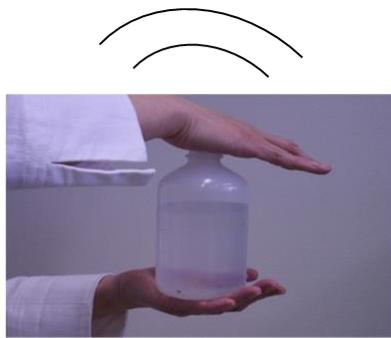


写真 3-2 ^{222}Rn の取りだし方



写真 3-3 ラドンガスの注入

3.2.2.2 霧箱の線源としての活用条件

採水した温泉水を用いて 3.2.2.1 の方法で霧箱実験を行った。温泉水は、輸送のため採水後数日（1～6 日）経過しているが、その時点で 1 分間に飛跡を 20 個以上観察できた温泉水を活用可と判断することとした（通常、水道水では 30 分間で 10 個程度）。教育現場での活用を考慮すると事前に採水しておき、数日後でも飛跡を観察できることが望ましいためである。

3.2.3 温泉水等に含まれる放射能の減衰

温泉水に含まれる放射能の大小を見積もることは、霧箱への利用に重要な指標となる。しかし、温泉水等から取り出した ^{222}Rn とその子孫核種から放出される α 線、 β 線は霧箱で飛跡を観察することができるが、温泉水等から放出される α 線や β 線を直接測定機器等で測定することは難しい。一方、 γ 線は α 線、 β 線とともに放出されており、この γ 線を測定することによって温泉水中の放射線量を見積もることができる（図 3-1）。そこで、採水した温泉水や湧水の一部について、霧箱実験を行うと同時に、ガンマーカウンター（2480 WIZARD²_{TM} Gamma Counter (PerkinElmer) 試料約 25 mL）での γ 線放射能測定も行った。飛跡を観察できた温泉水とともに比較のために飛跡を観察できなかった青麻神社の湧水（宮城県）も測定した。 blanks として蒸留水（飛跡は観察されない）も同時に測定した。 γ 線の測定は約一ヶ月間継続して行い、放射線量の減衰の様子を確認した。

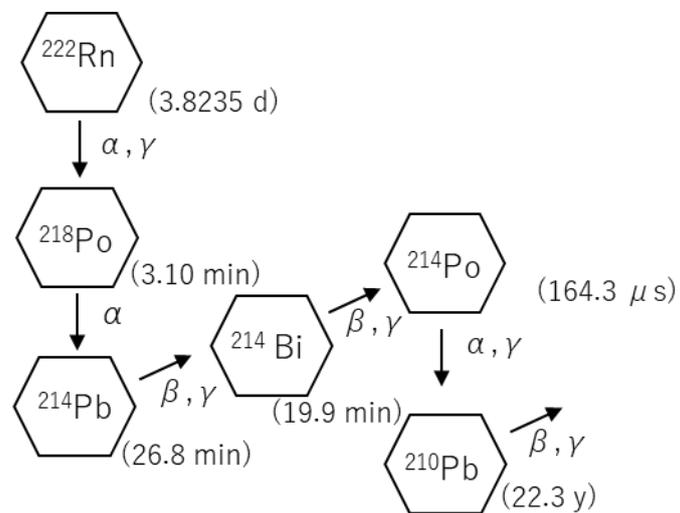


図3-1 ^{222}Rn の放射性壊変（半減期を括弧内に示す）

3. 3 結果と考察

本霧箱実験により 3.2.2.2 の条件を満たした温泉等を表 3-4 に、その所在地を図 3-2 に示した。採水後長い年月が経った施設もあるため、今回改めて連絡を取り論文への記載を得た施設等を記載した（令和 3 年 7 月現在、38 都道府県 62 温泉 12 湧水等）。近年、ラドンの含有量が減少した施設及び廃業のため源泉の採水が不可能な温泉は記載していない。表 3-4 中の泉質及びラドン(Rn)の含有量は、各々の施設のホームページで公表されていたデータ、又は施設からいただいた温泉分析書のデータを記載した。データを入手できなかった施設等については表示なしとした。採水後の日数は、採水日を 1 日とし、その翌日を 2 日とした。飛跡（ α 線および β 線を含む）の見え方は、1 分間に 20 個以上で○、1 分間に 100 個以上で◎とした（主に α 線をカウント）。実際に霧箱により観察した飛跡の例を写真 3-4 に示した。右は湯之島ラジウム鉱泉保養所ローソク温泉水（岐阜県）を、左は小渡温泉水（愛知県）を線源として用いたものである。

表 3-4 に示した温泉等は、採水後 1~6 日後に実験室で霧箱実験を行い、飛跡を観察できた温泉等である。採水してきたが残念ながら飛跡を観察できなかった温泉等もあったが、これらは表 3-4 から除外している。公表されている分析の結果ではラドンが含まれているはずであるが、泉温が高温になるとラドンの溶解度が小さくなるため（ラドンの溶解度は 50 °C で室温の 1/4 になる。）³⁴⁾、

表 3-4 霧箱の線源として活用可能な²²²Rnを含んだ温泉（令和3年7月現在）

	都道府県名	No.	温泉等の名称	採取場所	泉質	霧箱実験			Rn含有量 (温泉分析書より)
						採水日	採水後 の日数	飛跡の 見え方	
北海道	道央	1	二股温泉	二股ラジウム温泉旅館	ナトリウム・カルシウム-塩化物泉	2014/9/6	5	○	5.80 Bq/kg
東北	青森県	2	湧水	金吹沢ラジウム鉱泉	単純温泉	2018/12/9	5	○	6.54 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
		3		民宿 台湯（うてなゆ）		2019/9/25	2	○	表示なし
	秋田県	4	乳頭温泉郷	孫六温泉	単純温泉	2016/11/14	5	○	表示なし
	山形県	5	小野川温泉	小野川温泉組合管理の源泉	含硫黄ナトリウムカルシウム塩化物温泉(含ラジウム)	2014/12/22	4	○	表示なし
	福島県	6	片倉温泉	葉王館	単純弱放射能冷鉱泉	2016/11/16	3	◎	40.4 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
7		みちのく霊泉やわらぎの湯	みちのく霊泉やわらぎの湯	放射能泉	2019/12/7	4	◎	273.6 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg	
信越・北陸	新潟県	8	村杉温泉	*	単純放射能泉			○	表示なし
	長野県	9	天竜峡温泉	龍峡亭	単純弱放射能温泉	2014/7/19	4	○	表示なし
	福井県	10	虹岳島温泉	虹岳島荘	単純弱放射能冷鉱泉	2014/10/26	3	◎	36 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
	石川県	11	門前温泉	門前じんのびの湯	ナトリウム-塩化物・硫酸塩温泉	2015/8/1	4	◎	23.2 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
	富山県	12	神通峡岩稲温泉	**	ナトリウム-塩化物、炭酸水素塩泉	2019/3/20	3	○	表示なし
13		湧水	殿様清水		2019/3/20	3	○	表示なし	
14		湧水	熊王の水		2019/3/20	3	○	表示なし	
関東	栃木県	15	小砂温泉	ホテル美玉の湯	アルカリ性単純泉（天然ラドン含有）	2014/12/23	3	○	10.6 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
	山梨県	16	増富温泉	不老閣	含二酸化炭素・放射能-ナトリウム-塩化物冷鉱泉 他	2015/6/11	3	◎	表示なし
	群馬県	17	湯宿温泉	湯本館	ナトリウム・カルシウム-硫酸塩温泉	2018/3/23	5	◎	表示なし
	茨城県	18	中根の湯	はこや旅館		2018/3/21	6	○	表示なし
	埼玉県	19	名栗温泉	大松閣	低張性アルカリ性冷鉱泉	2018/6/9	4	○	表示なし
	東京都	20	湧水	實井神社		2018/12/11	3	○	表示なし
		21	湧水	真姿の水湧水群お鷹の道		2018/12/11	3	○	表示なし
		22	地下水	丸池の地下水		2018/12/13	2	◎	表示なし
神奈川県	23	湧水	大山阿夫利神社（御神水）		2018/12/10	4	○	表示なし	
東海	三重県	24	鈴鹿国定公園湯の山絵の温泉	希望荘	含弱放射能（ラドン） - ナトリウム・炭酸水素塩泉	2016/4/9	3	○	表示なし
		25	湯之島ラジウム鉱泉保養所ローソク温泉	湯之島ラジウム鉱泉保養所ローソク温泉	単純放射能泉	2019/4/21	3	◎	2,020 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
	愛知県	26	猿投温泉	ホテル金泉閣	ラドン泉・療養泉	2014/3/31	3	◎	76.8 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
		27	小渡温泉	梅屋旅館	放射能泉	2019/5/9	2	◎	表示なし
	静岡県	28	修善寺温泉	修善寺境内大師の湯、河原湯	アルカリ性単純温泉	2019/4/19	5	○	表示なし
近畿	滋賀県	29	南郷温泉	二葉屋	単純弱放射能冷鉱泉	2014/6/6	4	○	138.4 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
	京都府	30	北白川温泉	北白川天然ラジウム温泉	単純放射能冷鉱泉	2013/3/24	3	○	128.2 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
		31	湯の花温泉	亀岡市ひえ田野町共同源泉施設	単純弱放射能温泉	2016/3/25	3	○	46.0 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
		32	夜久野高原温泉	ほっこり館	単純温泉	2016/1/14	2	○	17.6 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
	大阪府	33	天見温泉	南天苑	単純弱放射能泉	2014/7/18	5	○	表示なし
		34	摂津峡花の里温泉	花の湯温泉 山水館	ラドン含・アルカリ単純泉	2017/12/4	2	○	4.63 × 10 ⁻¹⁰ Ci/kg
	兵庫県	35	松葉温泉	松葉温泉 滝の湯	単純弱放射能泉	2017/12/4	2	◎	表示なし
		36	有馬温泉	メーブル有馬	放射能泉（ラドン泉）	2014/7/17	6	○	表示なし
	奈良県	37	有馬温泉	炭酸泉源泉（公園内）	二酸化炭素泉	2014/7/17	6	○	表示なし
		38	野迫川温泉	ホテルのせ川	アルカリ性泉	2015/2/2	2	○	表示なし
	和歌山県	39	竜神小又川温泉	民宿 ささゆり	重曹泉（炭酸カルシウム、ラジウムを含む）	2017/4/10	2	○	表示なし

* 一時期宅配便で購入できた時期があり、その時に購入したもので、採水日時は不明

** 令和3年7月時点採水不可であるが今後復旧の予定

表 3-4 (つづき) 霧箱の線源として活用可能な ²²²Rn を含んだ温泉 (令和 3 年 7 月現在)

	都道府県名	No.	温泉等の名称	採取場所	泉質	霧箱実験			Rn含有量	
						採水日	採水後の 日数	飛跡の 見え方		
四国	愛媛県	40	鈍川温泉	鈍川温泉ホテル	アルカリ性単純泉	2013/3/10	3	○	表示なし	
		41	奥道後温泉	旧かんばの宿道後温泉	アルカリ性単純温泉	2014/8/22	6	○	6.6×10 ⁻¹⁰ Ci/kg	
	香川県	42	かざし温泉	かざし温泉	単純放射能冷鉱泉	2014/8/25	3	◎	表示なし	
		43	智光院温泉	智光院温泉源泉	単純弱放射能冷鉱泉	2014/8/25	3	○	表示なし	
高知県	44	あしずり温泉	足摺テルメ	単純弱放射能冷鉱泉	2014/8/6	3	○	表示なし		
中国	鳥取県	45	三朝温泉	河原風呂(露天風呂)、 足湯、飲泉	含放射能/ナトリウム・塩 化物泉	2019/11/13	2	◎	表示なし	
		46	鳥取ぼかぼか温泉	鳥取ぼかぼか温泉	含弱放射能-カルシウム・ ナトリウム-塩化物温泉	2015/2/16	1	◎	89×10 ⁻¹⁰ Ci/kg	
		47	吉岡温泉	新生館	単純泉	2015/12/22	1	○	表示なし	
		48	浜村温泉	貝殻節の里 旅風庵	ナトリウム・カルシウム- 硫酸塩・塩化物泉	2017/11/18	2	◎	19.0×10 ⁻¹⁰ Ci/kg	
	島根県	49	池田鉱泉	放泉閣	含放射能-ナトリウム-塩 化物泉	2018/11/26	2	◎	664×10 ⁻¹⁰ Ci/kg (3号泉)	
	岡山県	50	蒜山やつか温泉	快湯館	ラドン温泉	2011/1/21	2	○	表示なし	
		51	あわくら温泉	元湯	弱放射能冷鉱泉(ラジウム 泉)	2011/5/19	2	○	表示なし	
		52	かみさいばら温泉	国民宿舎いつき	アルカリ性単純温泉	2019/11/13	2	○	6.0×10 ⁻¹⁰ Ci/kg	
	広島県	53	宇品天然温泉	ほの湯	含弱放射能 ナトリウム・カル シウム塩化物強塩冷鉱泉	2014/5/18	3	◎	表示なし	
		54	湯来温泉	河鹿荘、足湯、湯元(露天風呂跡)	単純弱放射能泉	2014/5/18	3	◎	表示なし	
		55	湯の山温泉	湯の山温泉源泉	単純弱放射能冷鉱泉	2014/5/18	3	◎	表示なし	
		56	高宮温泉	たかみや湯の森	単純弱放射能冷鉱泉	2018/3/1	2	◎	44×10 ⁻¹⁰ Ci/kg	
		57	美土里温泉	神楽前門湯治村 岩戸屋	単純弱放射能泉	2017/3/25	5	◎	表示なし	
		58	かまがり浜温泉	県民の浜 やすらぎの館	含弱放射能-ナトリウム、カ ルシウム、塩化物冷鉱泉	2014/7/26	3	○	8.5マッヘ	
		59	尾道養老温泉	尾道養老温泉	単純弱放射能冷鉱泉	2015/7/1	3	◎	115×10 ⁻¹⁰ Ci/kg	
		60	倉橋温泉	天然温泉くらはし桂浜温泉館 (主浴槽)	ナトリウム-塩化物温泉 含弱放射能-ナトリウム-塩 化物冷鉱泉(露天風呂)	2019/7/5	4	◎	6.4×10 ⁻¹⁰ Ci/kg (主浴槽) 34×10 ⁻¹⁰ Ci/kg (露天風呂)	
		61	昭和温泉郷	湯楽里	含弱放射能泉-ナトリウム- 塩化物冷鉱泉	2019/7/5	4	◎	表示なし	
		62	湧水	真梨清水		2019/8/13	4	○	表示なし	
	63	湧水	霊泉寺田方斎神名水		2019/10/13	5	○	表示なし		
	64	湧水	出合清水		2019/10/15	3	○	表示なし		
	65	湧水	八王子よみがえりの水		2019/10/14	4	○	表示なし		
	66	湧水	三滝寺三滝名水		2019/10/15	3	○	表示なし		
	山口県	67	湯田温泉	湯田温泉旅館協同組合 源泉	アルカリ性単純温泉	2016/3/6	4	○	10.02×10 ⁻¹⁰ Ci/kg (19号泉)	
		68	そうづ峡温泉	元湯 憩いの家	含弱放射能-ナトリウム・炭 酸水素塩・塩化物冷鉱泉	2015/9/6	3	◎	32.3×10 ⁻¹⁰ Ci/kg	
	九州	福岡県	69	井川温泉	こうの湯温泉	単純放射能泉	2012/9/8	3	◎	120×10 ⁻¹⁰ Ci/kg
			70	熊井温泉	熊井温泉	単純放射能冷鉱泉(3号泉) 単純弱放射能冷鉱泉(5号泉)	2017/3/27	3	◎	287.0×10 ⁻¹⁰ Ci/kg 132.7×10 ⁻¹⁰ Ci/kg
71			かきした温泉	かきした温泉	放射能泉	2017/3/27	3	○	41.86マッヘ	
72			寺迫温泉	寺迫ラジウム温泉	単純放射能冷鉱泉	2017/3/28	2	○	表示なし	
熊本県		73	玉名温泉	ホテルしらさぎ	単純弱放射能温泉	2017/6/30	4	○	48.2×10 ⁻¹⁰ Ci/kg	
佐賀県		74	熊の川温泉	夢千鳥	単純弱放射能温泉	2012/11/12	4	◎	155×10 ⁻¹⁰ Ci/kg	

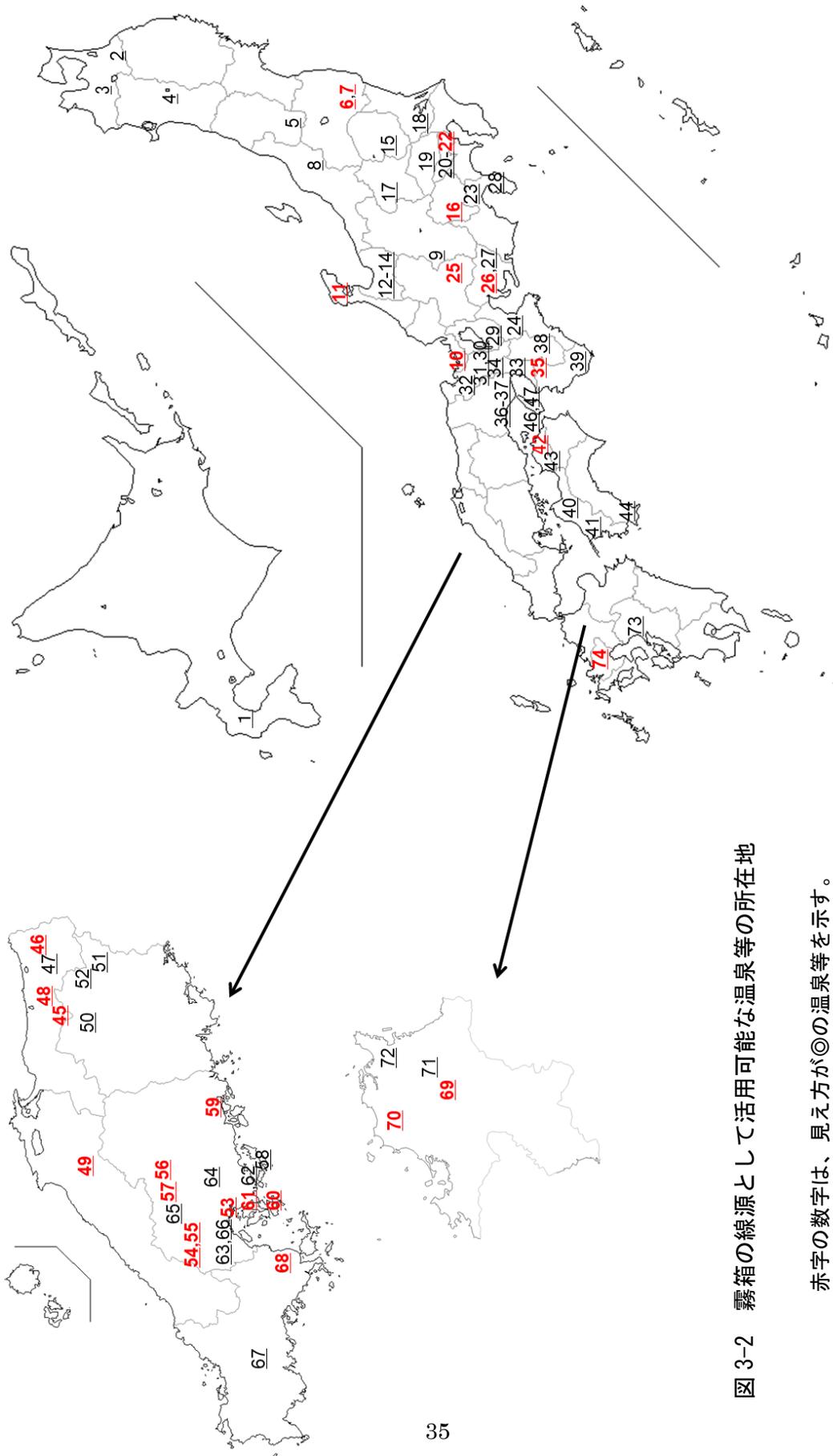
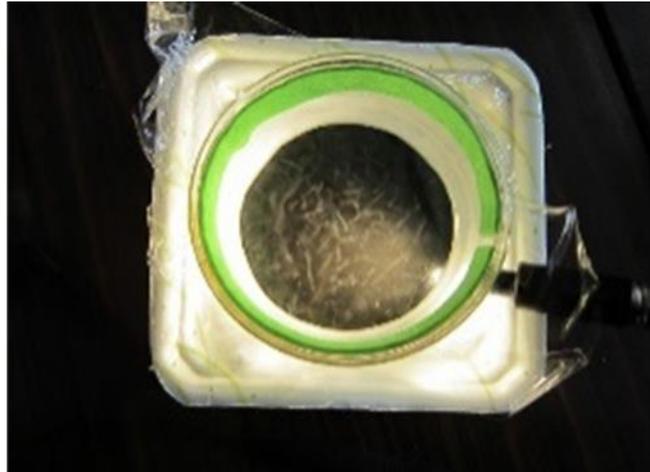


図 3-2 霧箱の線源として活用可能な温泉等の所在地

赤字の数字は、見え方が◎の温泉等を示す。



小渡温泉（愛知県）



湯之島ラジウム鉱泉保養所
ローソク温泉（岐阜県）

写真 3-4 アルファ線の飛跡例

採水時にラドンが空気中に逃げてしまったものと考えられる。

表中に示した飛跡の見え方は、実験室で実験を行った時のものである。公表されている Rn 含有量と飛跡の見え方を採水後 3 日で比較したところ、片倉温泉 (40.4×10^{-10} Ci/kg) の温泉が◎である反面、北白川温泉 (128.2×10^{-10} Ci/kg) や湯の花温泉 (46.0×10^{-10} Ci/kg) は○であり、飛跡の見え方と Rn 含有量との関係性は必ずしも見られなかった。温泉分析書の Rn 含有量は、鉱泉分析法指針に基づき測定されたものであり、採取の仕方、試料容器（ポリエチレン製、あるいは良質ガラス製の容器）や試料の輸送法等について細かく定められている。採水の際は、温泉水を容器の中に静かに流し込むべきであるが、採水口バルブを開けると温泉水が勢いよく流れ出しているところで採水することもあった。そのような時は温泉水中のラドンガスが衝撃により空気中に逃散してしまっ

いることも考えられる。また、採水した温泉水は、宅配便で送ることが多かったため、温泉水中のラドンガスの減少につながり（容器の中には気泡が残らないように注意したが、輸送中の振動のためラドンガスが気泡中や栓の隙間から逃散した可能性がある）、飛跡の見え方に影響しているとも考えられる。飛跡を観察できなかったものの中には、採水後もっと早い時期であれば飛跡の観察ができたものもあったかもしれない。しかし、教材などとして役立てるには、採水後数日経っていても飛跡の観察ができることが望ましいため、表 3-4 中からは除外した。西日本は、ラドンを含んだ温泉水や湧水が多くなっている。これは、著者の居住地に近いことと、ウラン等を比較的多く含んでいる花崗岩地質の地域が多いためであると考えられる。三朝温泉（鳥取県）では、いくつかの源泉が流れ込んでいる河原風呂（露天風呂）、足湯や飲泉など、また湯来温泉（広島県）では湯元（露天風呂跡）や足湯など温泉旅館以外でも採水したが、いずれの温泉水も活用可能であった。

霧箱の線源として、温泉水等がどの程度の期間の保存に耐えるかを調べるため、一部の温泉水や湧水の γ 線の測定し、実際の温泉水中に含まれる放射線量を測定した。その結果を表 3-5 に示す。また、これらの温泉水中の放射線量が経過日数毎にどのように減衰していくかを測定した結果を図 3-3 に示す。図 3-3 の横軸は採水してからの経過日数（日）、縦軸は一分間当たりの γ 線のカウント数

表3-5 温泉水等の γ 線測定結果

	経過日数	1分間当たりの カウント数(cpm)	飛跡の有無
三朝温泉（鳥取県）	0.94	1217 (373)	有
やわらぎの湯(福島県)	2.07	603 (337)	有
霊泉寺（広島県）	5.04	393 (332)	有
よみがえりの水（広島県）	4.25	381 (332)	有
三滝名水（広島県）	3.22	545 (332)	有
出合清水（広島県）	3.10	426 (332)	有
青麻神社（宮城県）	3.85	328 (337)	無

()内 蒸留水の測定値

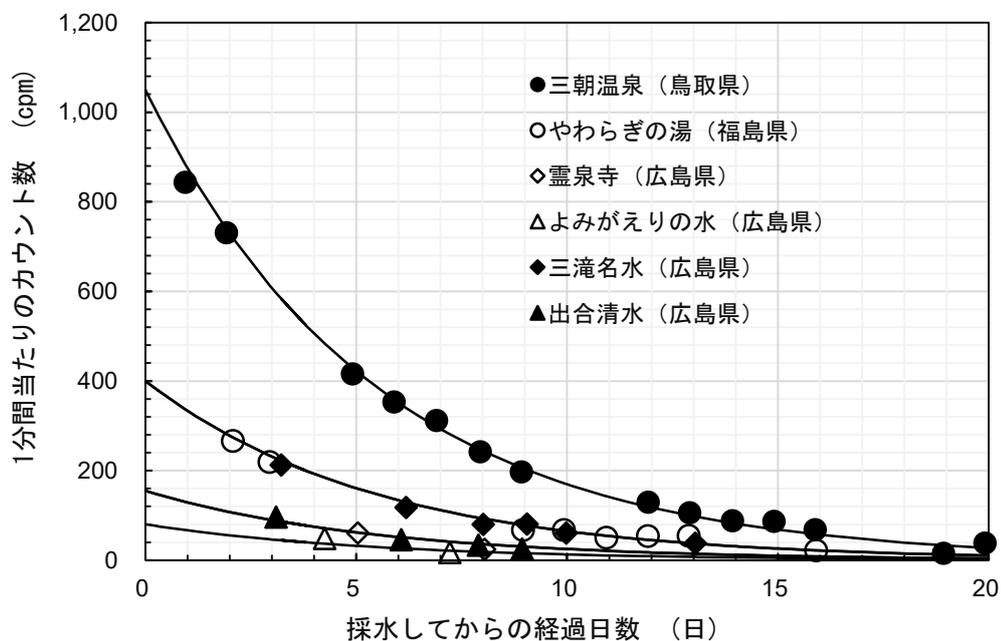


図3-3 温泉水等のガンマ線の減衰の様子

(cpm) を示す。蒸留水は霧箱の飛跡を観察することができないので各試料と同時に蒸留水の γ 線量を測定し、各測定結果からこの値をバックグラウンドとして差し引いている。飛跡を観察できなかった青麻神社（宮城県）の湧水の γ 線量は蒸留水の測定値とほぼ同じであった。それ以外の温泉水等は経過日数とともに γ 線量の減衰が見られた。ラドン含有量が多いとされる三朝温泉水は2週間に

が経過した時点でもなお、採水後 5 日以内の霊泉寺やよみがえりの水、出合清水等の湧水と同程度の γ 線量を有していた。

^{222}Rn を含む温泉水中には、図 3-1 に示したように ^{222}Rn と子孫核種が含まれている。 ^{222}Rn の半減期 (3.8 日) はその子孫核種の半減期に比べ十分に長いいため過渡平衡となり、温泉水中の γ 線量は ^{222}Rn の半減期に従って減衰することになる。そこで、それぞれの温泉水等について、 ^{222}Rn の半減期 (3.8 日) から式(1)で理論曲線を求め、その結果を図 3-3 中に実線で示した。

$$N_t = N_0 \exp(-\lambda_1 t) \quad (1)$$

ただし、 N_t は時刻 t における原子の数、 λ_1 は ^{222}Rn の壊変定数 ($0.693/(3.8 \times 24 \times 60 \times 60)$)、 $t = 0$ において $N_t = N_0$ とする。式(1)中の N_0 の値は式(1)による計算値と実測値の差が最も小さくなるように定めた。いずれの試料においても、理論曲線と実測値は非常に良く一致し、 ^{222}Rn の半減期に従って温泉水中の γ 線量が減衰していることを示唆する。霧箱の飛跡が見られる頻度と γ 線量から求めた温泉水中の放射線量の見積もりから、ラドン含有量が多いとされる三朝温泉水 (表 3-4 中の飛跡の見え方が◎) は、採水後 3 週間程度経過しても霧箱の線源として利用できることや、やわらぎの湯や三滝名水など表 3-4 中の飛跡の見え方が○であっても、採水後 10 日程度は霧箱の線源として利用可能であることが判った。

3. 4 まとめ

泉質が放射能泉として分類されていない温泉であっても霧箱の線源として利用できる温泉が全国各地に多くあることが分かった。また、湧水の中にも霧箱に利用できるものがあった。特に、ラドン温泉がほとんどないと思われる東京でも湧水を活用すれば多くの人に身近な自然を活用した放射線教育を行うことができる。各都道府県に一ヶ所以上の温泉を見つけるという目標は達成できなかったが、検索は続けているところである。表 3-4 に示した温泉は、ほんの一部である。各自がその地域に住んでいるからこそ得られる情報をもとにその地域の温泉や湧水を探索すれば、さらに多くの温泉等を見つけ、教材として活用できると思われる。

放射線は、何かわけのわからない怖いものと思われがちであるが、全国各地に存在する温泉水を利用して学ぶことにより、放射線は決して特別なものではなく身近なものであるということが実感できる。

さらに地域の温泉水であれば子どもたちは一層興味をもって実験に取り組むことができ、教員にとっても特別な資格も実験室も不要であり、準備しやすく取り扱いやすい線源になる。

3. 5 参考情報

これまで中学校等の教員に情報を提供し放射線教育への活用を提案したり、採水で訪れた際には、温泉施設の方々に三朝温泉の温泉水から取り出したラドンガスを線源とした霧箱の動画の視聴やその施設で採水したばかりの新鮮な温泉水を用いて霧箱実験を行い、放射線についての知識を深めてもらったりしてきた。学校と地域の連携・協働が推進されるようになり、子どもたちが地域の施設等を訪れることもある。そのような時に施設の方が霧箱実験を行えば、地域の資源を活用した放射線教育となりうる。

第四章 ドールストーン (DOLL STONE) ^{注2)}を活用した教材

4. 1 序

天然放射能を用いることにより、学校の教室や実験室などで行うことができる教材の開発を行い、鳥取県の自然を生かし、三朝温泉の温泉水や人形峠の土を活用してきた。三朝温泉の温泉水や人形峠の土には図 4-1 に示した RI が含まれている。これらのうち ^{222}Rn は気体のため取り出しやすく、取り出した ^{222}Rn を活性炭に吸着させれば他の RI と分離することができる。ま

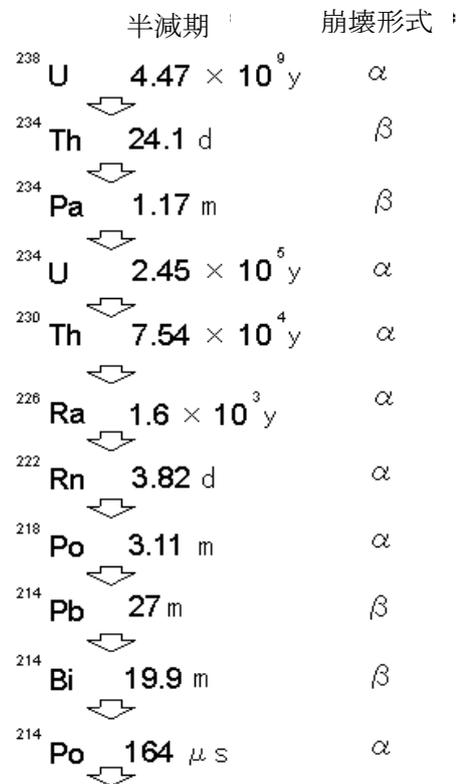


図 4-1 ウラン系列に含まれている放射性同位元素

た、半減期は 3.8 日と短く、放射平衡や壊変などの現象を観察するのに適している。 ^{222}Rn からは α 線が放出されている。 α 線の測定は難しいが、その子孫核

注 2) 平成 17 年度先端原子力関連技術成果展開事業により、JAEA (旧 独立行政法人日本原子力研究開発機構) と人形峠原子力産業株式会社が共同開発した商品。岡山県人形峠周辺で採取した微量の天然ウランを含む岩石及び土砂を原料としたテラコッタ (イタリア語で素焼きのタイル) である。天然のウランが 0.05%前後含まれており、本商品より 1 枚当たり 1~2 ベクレルのラドンが発生する。100mm×100 mm×13 mm (厚さ) 商品紹介より

種である ^{214}Pb と ^{214}Bi から放出されている β 線を測定することで、指数関数的に起こる壊変の様子を観察することができる。霧箱による飛跡の観察は、子どもたちや一般の人たちにとって放射線を視覚的にとらえることができる教材であり、本実験は、放射能が減衰していく様子や壊変して子孫核種が生まれてくる様子をグラフを通してイメージできるが、指数や関数を学んでいる高校生や大学生などにとっては、その知識を生かせば放射能が指数関数的に減ることを理解する教材として最適である。また、より多くの人が活用できる教材となるように、三朝温泉の温泉水や人形峠の土に代わるものとして、近年、販売されるようになった人形峠周辺で採取した微量の天然ウランを含む岩石及び土砂を原料としたドールストーン(DOLL STONE)を線源として、活性炭素繊維を用いたヨウ素ガスサンプリングフィルタ(WAC サンプリングフィルタ)^{注3)}(以後、フィルタという)を用いることで同様の実験を行うことができれば、土や活性炭を用いるより扱いやすい教材となると考え、それらを用いた実験方法の検討を行った。

注3) WAC : Wakaida Activated Carbon fiber filter、放射性ヨウ素ガス捕集用 株式会社 ワカйда・エンジニアリング 特許番号：第 4549388 号 ヨウ化メチルを 99.999%以上捕集。ろ材に活性炭素繊維を用いたヨウ素ガスサンプリングフィルタであり、化学繊維製ニットを活性炭化して製作しているため、炭塵が発生せず、柔軟性がある。この特性を生かし本フィルタを容易に丸めてチューブ状の試験管やバイアル瓶内に詰め、ウェル型ガンマカウンターで測定することができる。自己吸収率が低く、比較的精度の高い測定が可能である。商品紹介より

4. 2 実験

活性炭やフィルタに吸着された ^{222}Rn は、壊変して図 3-1 に示した子孫核種になる。 α/β 線用シンチレーションサーベイメータ (TCS-1362 HITACHI ALOKA) を用いて ^{222}Rn の子孫核種である ^{214}Pb と ^{214}Bi から放出される β 線を測定することにより、活性炭とフィルタへの ^{222}Rn の吸着量の比較を行った。

実験 1

人形峠の土 (2 kg) を入れたデシケータ (径 17 cm) の中にフィルタと活性炭を入れて放置し (図 4-2)、フィルタと活性炭に吸着された ^{222}Rn とその子孫核種が放射平衡に達した後に取り出して、各々の表面から放出される β 線量を測定し、比較した。フィルタと活性炭を測定する際、測定器がフィルタ等に付着して

いる RI で汚染されないためと吸着されている ^{222}Rn が気相に逃げてしまわないために必ずフィルタや活性炭はクリーンガスバリア袋 (アズワン 120 mm × 150 mm) に入れてポリシーラー (卓上) で密封した後に測定を行った。

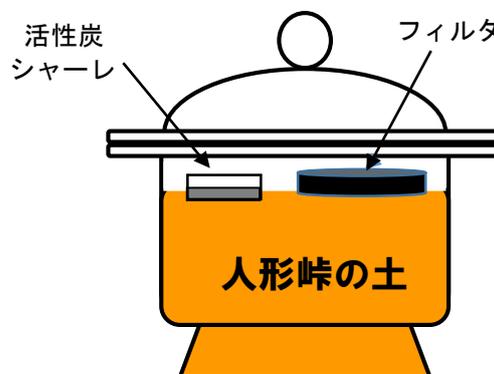


図 4-2

実験 2

実験 1 の結果において、測定開始直後に急激な減衰がみられた。その原因は

吸着した ^{222}Rn が崩壊して生まれた ^{214}Pb と ^{214}Bi ではなく、デシケータ内の気相に存在していた ^{222}Rn が崩壊して生まれた ^{214}Pb と ^{214}Bi が活性炭やフィルタ上に堆積したためではないかと考えた。その確認のためデシケータ内に ^{222}Rn を吸着しない 5 cm 角に切ったメモ用紙（紙）とポリエチレンを 2 週間放置した後、その表面から放出される β 線量を測定した。

実験 3

次に、ドールストーンから生まれた ^{222}Rn の活性炭への吸着を調べるため、Ziploc (M サイズ、縦 17.7 cm × 横 20 cm) にドールストーン 1 枚と活性炭 1.0 g（お茶パックに入れる）を入れて密封し、19 日後、34 日目、64 日目に ^{222}Rn を吸着した活性炭を取りだし、活性炭上から放出される β 線量を測定し、比較した。

実験 4

ドールストーン 1 枚と 2 枚の場合のフィルタへの吸着量を比較するため、ドールストーン 1 枚とフィルタを入れて密封した Ziploc とドールストーン 2 枚とフィルタを入れて密封した Ziploc を 1 ヶ月放置した後、それぞれのフィルタを取りだし、フィルタ上から放出される β 線量を測定して比較した。

実験 5

ドールストーン 2 枚の間にフィルタを挟むことによりフィルタ表面への堆積が少なくなるのではないかと考え、ドールストーン 2 枚の間にフィルタを挟ん

だ状態で Ziploc に密封した (42 日間)。

実験 6

ドールストーン の数量を増やせば、フィルタへの吸着量が増えるのではないかと考え、タッパー (5.9 L、23.5 cm×31 cm×10 cm) 内にドールストーン 6 枚とフィルタ 6 枚を入れて (写真 4-1) ^{222}Rn を吸着したフィルタを 14 日後、28 日後と 56 日後に 2 枚ずつ取り出して、表面から放出される β 線量を測定した。



写真 4-1

実験 7

タッパー内にフィルタを立てることによりフィルタ表面への堆積量が減るのではないかと考え、フィルタを立てて入れて置き (写真 4-2)、2 ヶ月後に



写真 4-2

^{222}Rn を吸着したフィルタを取り出して β 線量を測定した。

実験 8

フィルタ上から親核種である ^{222}Rn を取り除く方法を検討した。 ^{222}Rn を取り除くことにより、フィルタ上では新しく ^{214}Pb と ^{214}Bi が生まれてこないため ^{214}Pb と ^{214}Bi の半減期に従って減衰していく様子を観察できる。

まず、活性炭を用いた際に有効であった電子レンジでの加熱を、放射平衡に達して ^{222}Rn の半減期に従って減衰しているフィルタで行った。しかし、異臭が発生したため、十分加熱することができなかった。

実験 9

小鍋を用いて ^{222}Rn を吸着させたフィルタを加熱した (写真 4-3)。小鍋の表面が 200~230 °C になった後、鍋に ^{222}Rn を吸着させたフィルタを入れて、3 分間加熱した。均等に熱が当たるように時々裏返した。フィルタの表面の温度は約 100 °C であった。



写真 4-3



活性炭の場合

実験 10

従来から行っていた活性炭に ^{222}Rn を吹き付け活性炭上に ^{214}Pb と ^{214}Bi が生まれて放射平衡に達する様子を測定した後に ^{222}Rn を取り除いて減衰を観察する実験をフィルタでも行えるか検討した^{12~14)}。活性炭を用いた場合は、写真 4-4 (活性炭の場合) のように袋に詰めた活性炭に ^{222}Rn を含んだ空気を吹く付けていたが、フィ



フィルタの場合

写真 4-4

ルタの場合は、写真 4-4（フィルタの場合）のように試験管に丸めて入れたフィルタに ^{222}Rn を含んだ空気を吹き付けた。

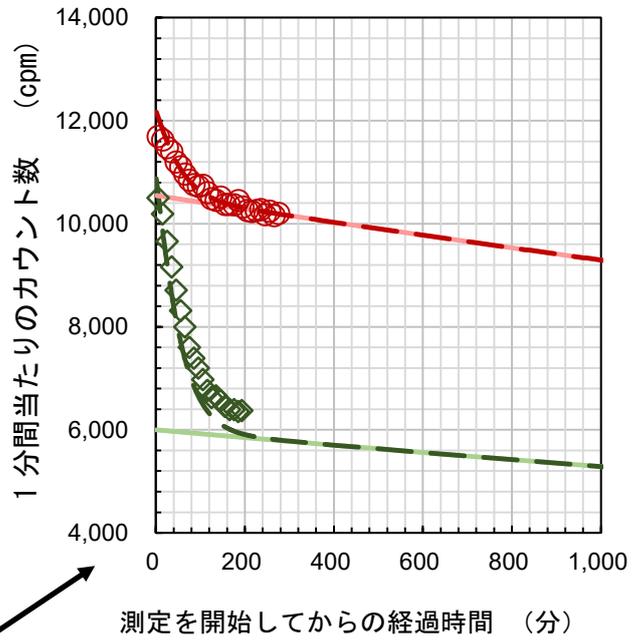
4. 3 結果と考察

実験 1

測定結果を図 4-3 に示した。◇印はフィルタから、○印は活性炭から放出される β 線の測定値を示す。デシケータ内は、人形峠の土にわずかに含まれている ^{238}U の放射性壊変によって放射平衡に達している。デシケータから取り出したフィルタ及び活性炭上では、吸着された ^{222}Rn と図 3-1 に示したその子孫核種の間では過度平衡となっており、 ^{222}Rn の半減期（3.8 日）に従って減衰しているはずである。実線は、式(1)で求めた。

$$N_t = N_{t_0} \exp(-\lambda_1 t) \quad (1)$$

ただし、 λ_1 は ^{222}Rn の壊変定数 ($\ln 2$ を半減期（秒）で割ったもの)、 N_t は時刻 t における ^{222}Rn の原子の数を表す。 $t = 0$ において $N_t = N_{t_0}$ とする。 N_{t_0} は、式(1)による計算値と実測値の差が最も小さくなるように定めた。全体としては、式(1)で求めた計算値に従って減衰しているが、測定開始直後に急激な減衰がみられた。その原因としてフィルタや活性炭に吸着された ^{222}Rn が壊変して生まれた子孫核種以外のものが存在しているのではないかと考えた。デシケー



(一部拡大)

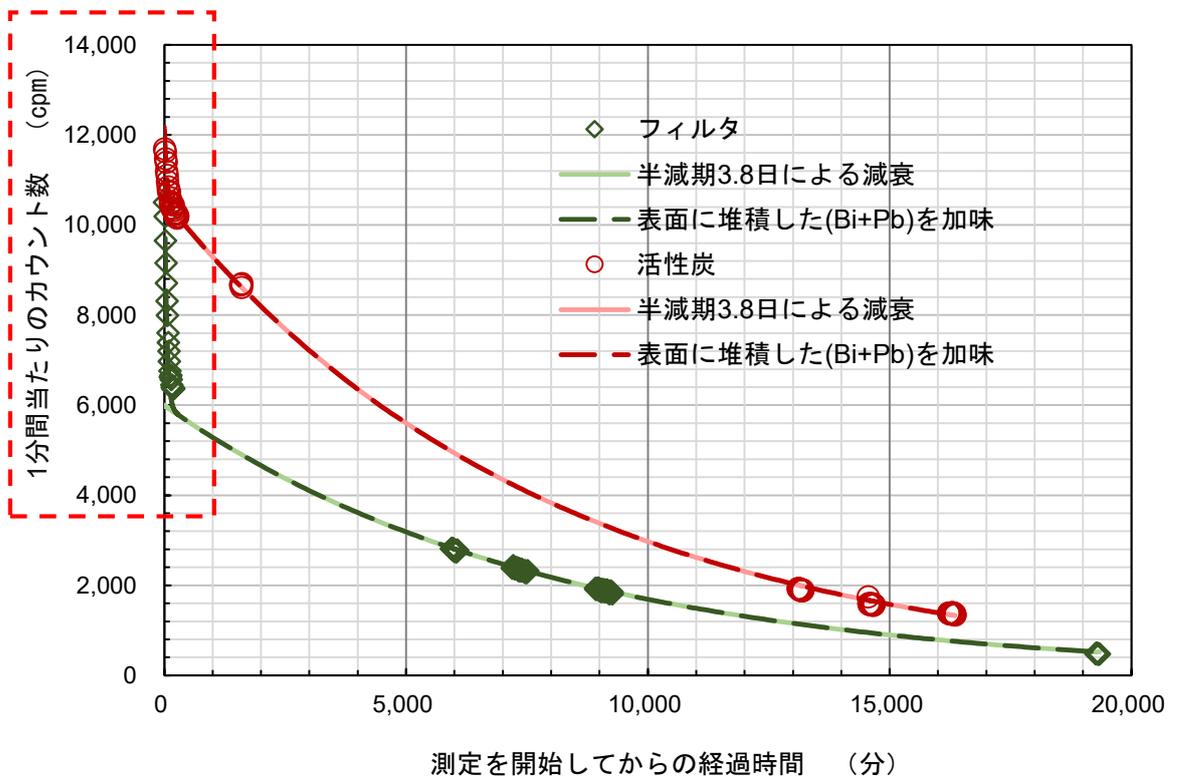


図4-3 フィルタと活性炭から放出されるβ線量の比較

タ内では、フィルタや活性炭上はもちろんのこと気相の部分でも ^{222}Rn とその子孫核種の間で放射平衡となっている。その子孫核種である ^{214}Pb と ^{214}Bi がフィルタや活性炭の表面に落下して堆積したのではないかと考えた。そこで、フィルタや活性炭をデシケータから取り出した後、表面に堆積した ^{214}Pb と ^{214}Bi がどのように減衰していくのかを計算式から求めた。デシケータ内では、堆積していた ^{214}Pb と ^{214}Bi は空間に存在している ^{222}Rn と放射平衡にあったが、フィルタや活性炭をデシケータから取り出すと新しく生まれてこないため堆積していた ^{214}Pb と ^{214}Bi はその半減期に従って減衰していくことになる。 ^{214}Pb と ^{214}Bi の原子数をそれぞれ N_2 、 N_3 で表すとそれらは時間の経過とともに以下の式に従って変化する。

$$dN_2/dt = -\lambda_2 N_2 \quad (2)$$

$$dN_3/dt = -\lambda_3 N_3 \quad (3)$$

ただし、 λ_2 、 λ_3 は ^{214}Pb 、 ^{214}Bi のそれぞれの壊変定数を示している。分離直後 ($t = 0$) の N_2 、 N_3 を N_{20} 、 N_{30} と書けば、式(2)、(3)から時刻 t における ^{214}Pb と ^{214}Bi の原子の数は次のように求められる。

$$N_2 = N_{20} \exp(-\lambda_2 t) \quad (4)$$

$$N_3 = \{ \lambda_2 / (\lambda_3 - \lambda_2) \} N_{20} \{ \exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_3 t) \} + N_{30} \exp(-\lambda_3 t) \quad (5)$$

ただし、デシケータから取り出す直前まで ^{222}Rn - ^{214}Pb - ^{214}Bi 間で放射平衡が成立

していたと考えられるので $t = 0$ において

$$\lambda_2 N_{20} = \lambda_3 N_{30} \quad (6)$$

$$N_{30} = (\lambda_2 / \lambda_3) N_{20} \quad (7)$$

が成り立つ。式(7)を式(5)に代入して次式を得た。

$$N_3 = \{ \lambda_2 / (\lambda_3 - \lambda_2) \} N_{20} \{ \exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_3 t) \} \\ + (\lambda_2 / \lambda_3) N_{20} \exp(-\lambda_3 t) \quad (8)$$

$$N_2 + N_3 = N_{20} \exp(-\lambda_2 t) + \{ \lambda_2 / (\lambda_3 - \lambda_2) \} N_{20} \{ \exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_3 t) \} \\ + (\lambda_2 / \lambda_3) N_{20} \exp(-\lambda_3 t) \quad (9)$$

活性炭上やフィルタ上に堆積していたと考えられる ^{214}Pb と ^{214}Bi の減衰は、式(9)で表すことができる。そこで、式(1)と式(9)を組み合わせた。

$$N_1 + N_2 + N_3 = N_{10} \exp(-\lambda_1 t) + N_{20} \exp(-\lambda_2 t) + \{ \lambda_2 / (\lambda_3 - \lambda_2) \} N_{20} \\ \{ \exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_3 t) \} + (\lambda_2 / \lambda_3) N_{20} \exp(-\lambda_3 t) \quad (10)$$

式(10)から求めた計算値を破線として図4-3に追加した。図4-3の拡大した部分に示した測定値と式(10)から求めた計算値がほぼ一致していることが分かる。ただし、式中の N_{10} 及び N_{20} は計算値と実測値の差が最も小さくなるように定めた。堆積したと考えている ^{214}Pb と ^{214}Bi は吸着した ^{222}Rn の影響を受けず、 ^{214}Pb と ^{214}Bi の半減期にしたがって減衰していることから空間に漂っていたものが堆積したものと考えられる。活性炭よりフィルタの方が落差が大きくなっている

のは、活性炭は直径 3 cm 程度のシャーレに入れていたが、フィルタの直径は 6 cm のためその表面の大きさの差によるものと考えられる。

実験 2

活性炭やフィルタの表面にデシケータの空間に漂っていた ^{214}Pb と ^{214}Bi が実際のどの程度堆積するかを確認するため ^{222}Rn を吸着しないメモ用紙（紙）とポリエチレンをデシケータの中に入れておいた後、表面から放出される β 線量を測定した。結果を図 4-4 に示した。○印はメモ用紙、△印はポリエチレンを示す。いずれの測定値も実線で示した式(9)で求めた計算値と一致した。これらは、300 分経過すると限りなくゼロに近い値となった。

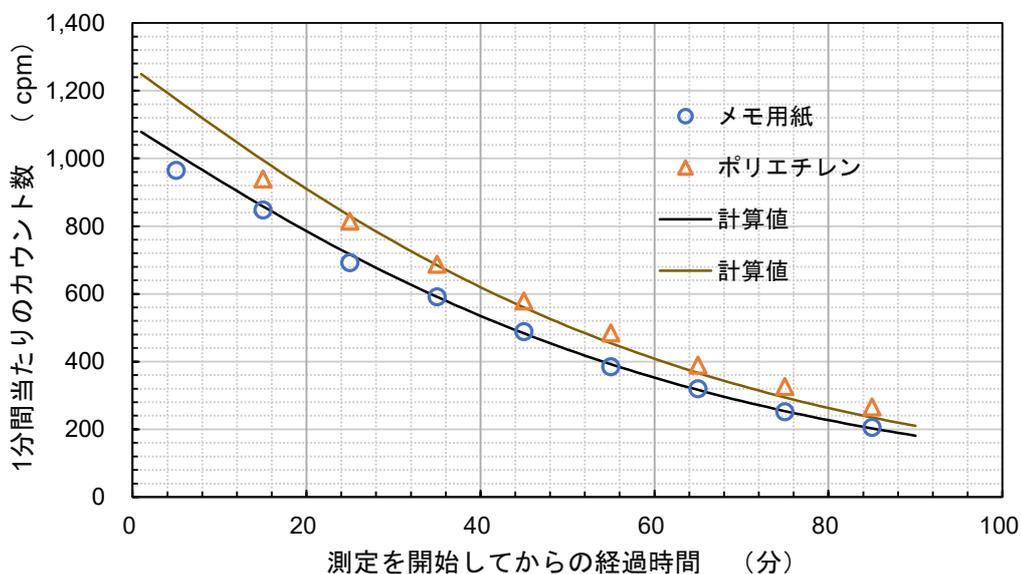


図4-4 デシケータ内に放置したメモ用紙とポリエチレン上に堆積した ^{214}Bi と ^{214}Pb の減衰曲線

実験 3

ドールストーン 1 枚とお茶パックに入れた活性炭約 1.0g をそれぞれ Ziploc (17.7 cm×20 cm)に入れて密封した。19 日後、34 日後と 64 日後に活性炭を取り出し、放射線量を測定した。結果を図 4-5 に示した。34 日後と 64 日後ではほとんど差がみられなかった。Ziploc にドールストーン 1 枚を入れた場合、一ヶ月で放射平衡に達するもの考えられる。デシケータの場合には活性炭はシャーレに入れていたが、本実験ではお茶パックに入れた後に Ziploc に入れた。測定の際には、お茶パックから取り出し、クリーンガスバリア袋に入れてシーラーを用いて密封した後測定した。活性炭はお茶パックに入れることにより活性炭表

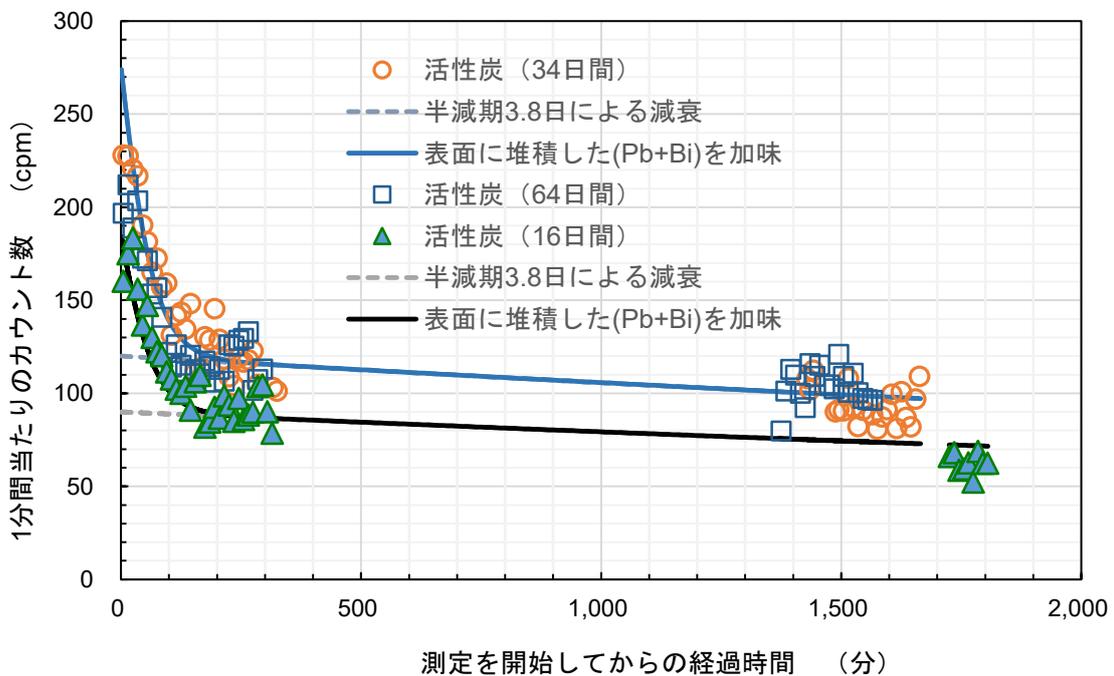


図4-5 密封期間による²²²Rnの吸着量の比較
(ドールストーン1枚)

面への空間中の ^{214}Pb と ^{214}Bi の堆積を防げることができるのではないかと期待したが、 ^{214}Pb と ^{214}Bi の堆積のためと思われる最初の急激な減少がみられたため堆積は防げなかったと思われる。

実験 4

Ziploc にドールストーン 1 枚とフィルタ 1 枚を入れて密封し、34 日目に取り出して測定した結果を図 4-6 に、ドールストーン 2 枚とフィルタ 1 枚を入れて密封し、33 日後に取り出して測定した結果を図 4-7 に示した。ドールストーンを 2 枚にすることにより吸着量が大幅に増えた。

実験 1 で人形峠の土を用いて活性炭とフィルタでの吸着量を比較した際は、明らかに活性炭の方が吸着量が多かったが、実験 3 と 4 の結果を比較したところフィルタの方が活性炭より吸着量が多くなっている。これは、実験 3 では、活性炭をお茶パックに入れたために十分に吸着ができなかった上にお茶パックから取り出し、クリーンガスバリア袋に詰め替える際にロスが生じたのではないかと考えられる。

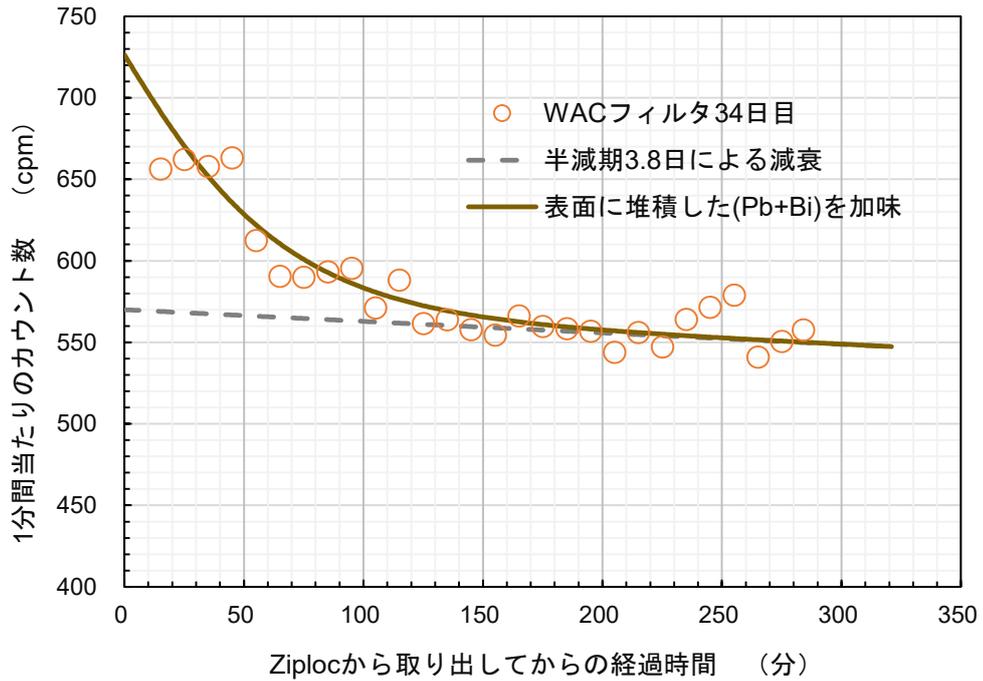


図4-6 ドールストーン1枚を用いた場合にフィルタから放出されるβ線量

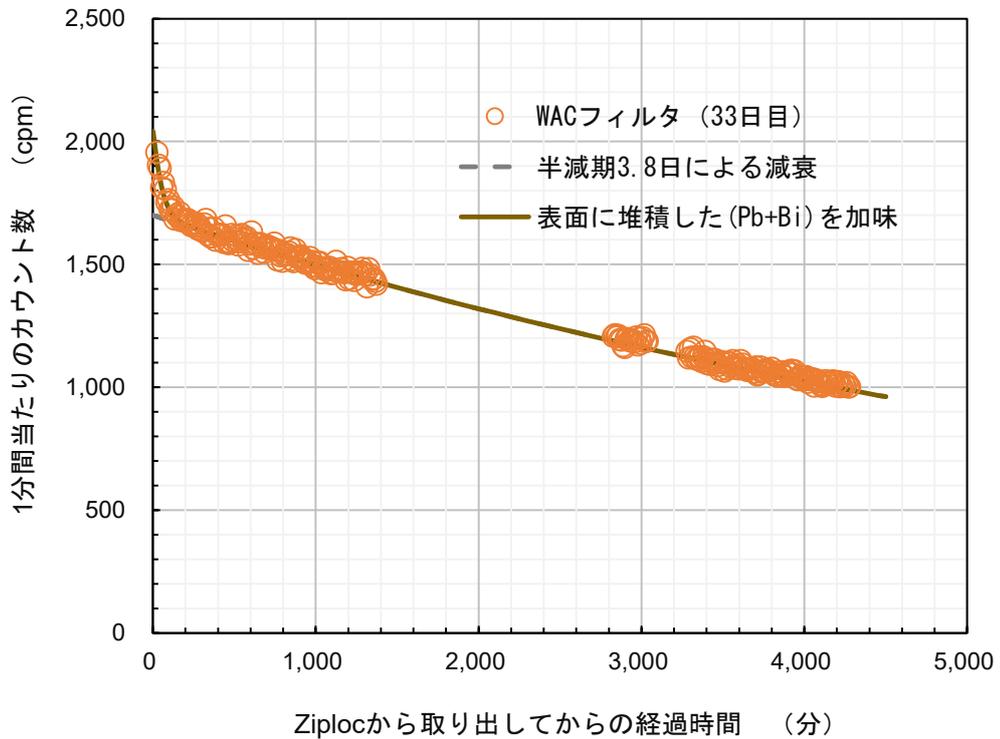


図4-7 ドールストーン2枚を用いた場合にフィルタから放出されるβ線量

実験 5

ドールストーン 2 枚の間にフィルタを挟んで、Ziploc に 42 日間入れた後、取り出して測定した結果を図 4-8 に示した。実験 4 の方法でドールストーンを 2 枚用いた時より吸着量は増えていた。ドールストーンで挟んでいても、フィルタ表面への ^{214}Pb と ^{214}Bi の堆積を防ぐことはできなかったようである。

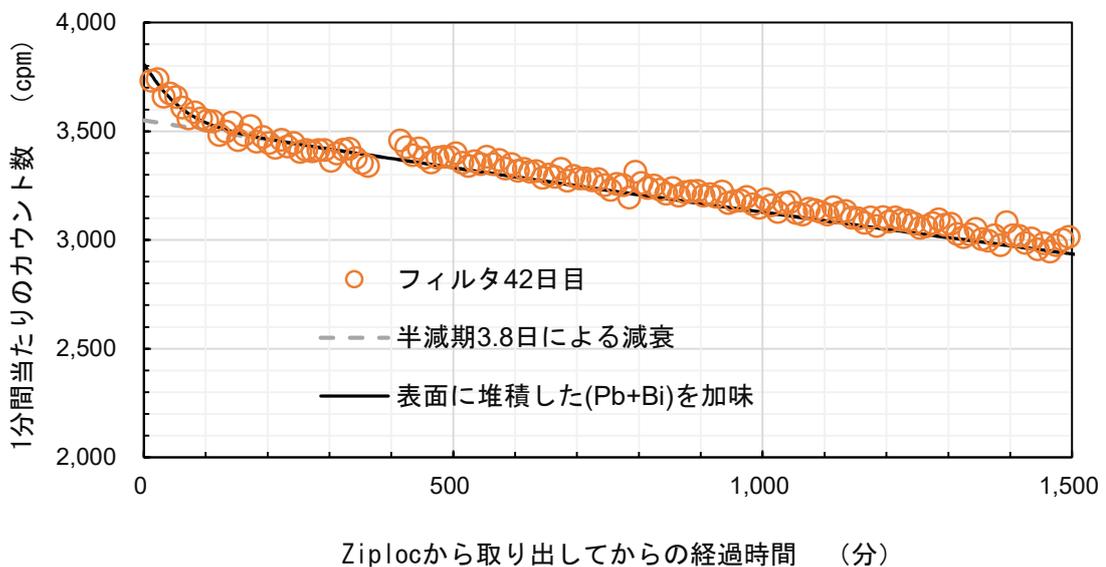


図4-8 ドールストーン 2 枚の間に挟んだ場合にフィルタから放出されるβ線量

実験 6

タッパー内のフィルタは 14 日後、28 日後と 56 日後に 2 枚ずつ取り出してβ線量を測定した。図 4-9 に 56 日後に取りだしたフィルタの測定結果を示した。実験 4 (Ziploc 内にドールストーン 2 枚を入れた場合、図 4-7) の結果と実験 6 の結果を比較したところ実験 4 に比べ実験 6 では、ドールストーンを 3

倍用いているのに切片の値は約 1.8 倍程度であった（ドールストーン 2 枚の場合 1,700 cpm、ドールストーン 6 枚の場合 3,000 cpm）。実験 4 では、ドールストーン 2 枚を Ziploc (M サイズ、縦 17.7 cm×横 20 cm) に入れ、実験 6 ではドールストーン 6 枚をタッパー (7,285 cm³) に入れていた。この原因は、ドールストーンの数によるのではなく、入れておく容器等の単位容積当たりの放射能濃度によるものと考えられる。

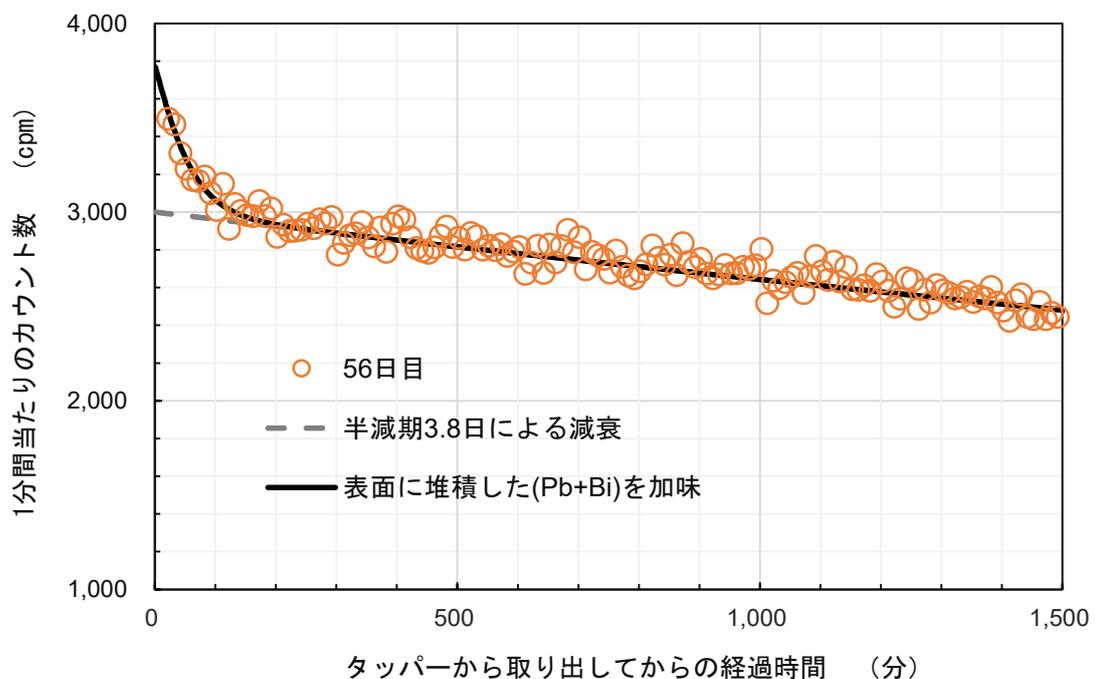


図4-9 ドールストーン6枚を用いた場合にフィルタから放出されるβ線量

実験7

実験7の実験結果を図4-10に示した。フィルタを立てる（写真4-2）ことで ^{214}Pb と ^{214}Bi の堆積を防げるかと期待したが、防げなかった。

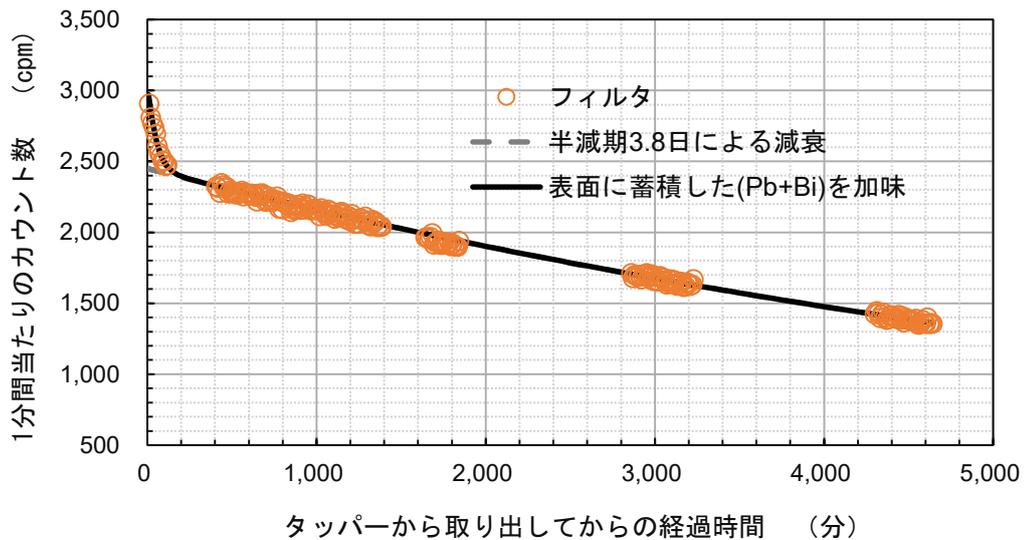


図4-10 タッパー内にフィルタを立てた場合の
フィルタから放出される β 線量

実験1～7の実験結果の比較

実験1～7の実験結果を表4-1にまとめた。

活性炭及びフィルタに吸着されていると思われる ^{222}Rn の量を各実験結果のグラフY軸の切片の値によって比較した。実験1（図4-3）で人形峠の土を線源として用いた場合は、粉碎活性炭の方が、フィルタより吸着量が多かった。しかし、実験3（図4-5）及び4（図4-6）の結果より、線源とし

てドールストーン1枚をZiplocに入れた場合は、フィルタの方が吸着量が
 多くなった。これは、粉碎活性炭をお茶用のパックに入れていたため、²²²Rnを
 吸着した粉碎活性炭をお茶パックから取り出し、クリーンガスバリア袋に入
 れる際、²²²Rnを吸着した活性炭がお茶パックに付着したためすべてを回収
 できなかったことが原因と考えられる。

また、実験4（図4-6及び図4-7）では、フィルタ1枚よりも2枚の方が吸着
 量は大幅に多くなった。さらに、実験5（図4-8）では、2枚のドールストー
 ンの間にフィルタを挟んだところ、図4-7の結果よりさらに吸着量は多く
 になった。これは、ドールストーンとフィルタの接触面が多くなったことに

表4-1 実験1～7の実験結果の比較

	図No.	容器等	線源	吸着させるもの	経過期間	切片の値* (cpm)
実験1	図4-3	デシケータ	人形峠の土(2kg)	粉碎活性炭(1g) (シャーレに入れる)		10,400
				フィルタ1枚		6,000
実験2	図4-4	デシケータ	人形峠の土(2kg)	メモ用紙		1,080
				ポリエチレン		1,240
実験3	図4-5	Ziploc	ドールストーン1枚	粉碎活性炭(1g) (お茶パックに入れる)	16日	90
					34日	120
					64日	120
実験4	図4-6	Ziploc	ドールストーン1枚	フィルタ	1ヶ月	570
	図4-7		ドールストーン2枚			1,700
実験5	図4-8	Ziploc	ドールストーン2枚 の間に挟む	フィルタ	42日	3,550
実験6	図4-9	タッパー	ドールストーン6枚	フィルタ	56日	3,000
実験7	図4-10	タッパー	ドールストーン6枚	フィルタ (立てる)	2ヶ月	2,450

*半減期3.8日による減衰曲線による縦軸の切片の値

より吸着量が増えたものと考えられる。

実験8

表面に堆積した ^{214}Pb と ^{214}Bi の影響がほとんどなくなった頃にフィルタを電子レンジで加熱した（500 W、10秒間を2回）。その結果を図4-11に示した。加熱中異臭が発生したためその時点で、加熱を中止した（20秒）。異臭の原因は、フィルタの作製に化学反応剤や不織布^{注2)}が使用されているためと思われる。図4-11から電子レンジによる加熱により ^{222}Rn が取り除かれていることが分かるが、測定結果は計算値よりも緩やかであった。これは、 ^{222}Rn の除去が不十分であったため、フィルタ上に ^{222}Rn が残ってしまい、その後も ^{214}Pb と ^{214}Bi が生まれているためと考えられる。

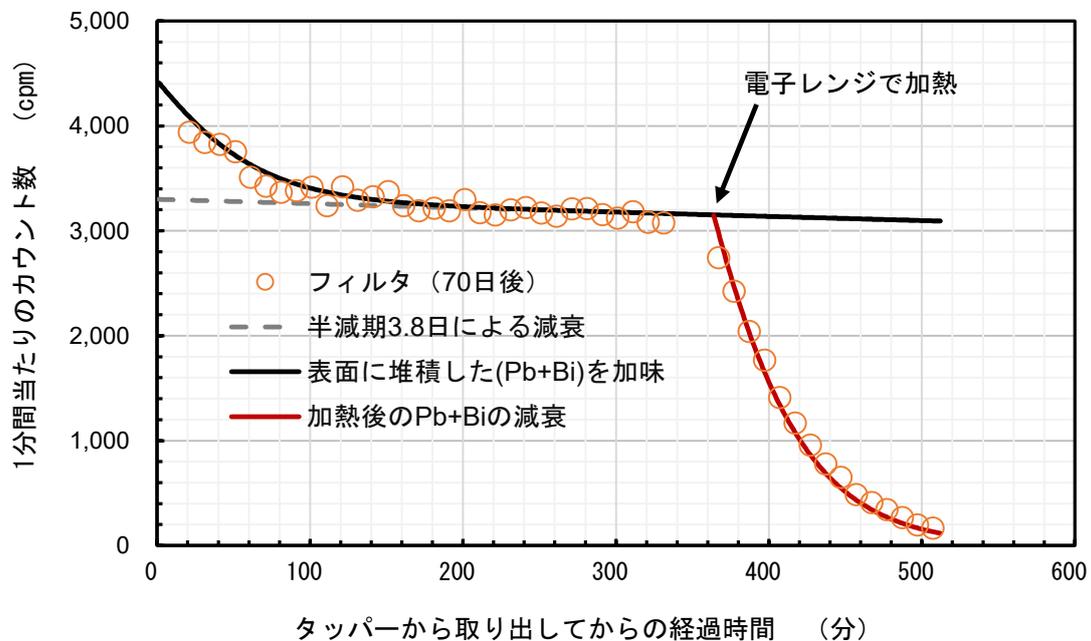


図4-11 電子レンジでの加熱による ^{222}Rn 除去効果

実験9

フィルタを用いた場合は、電子レンジでの加熱は不適當であることが分かったので、小鍋を用いて加熱を行った。その結果を図4-12に示した。使用した小鍋は、スイッチがなく、プラグをコンセントに差し込むことで加熱が始まり、温度調整はできない。鍋の表面が200～230℃になった後に、フィルタを鍋に入れて加熱した。フィルタの表面温度を測ったところ100℃であった。時々裏返し、両面に熱が加わるようにしながら、3分間加熱した。結果は、計算値とほぼ一致しているため ^{222}Rn の除去は、十分に行えたと考えられる。

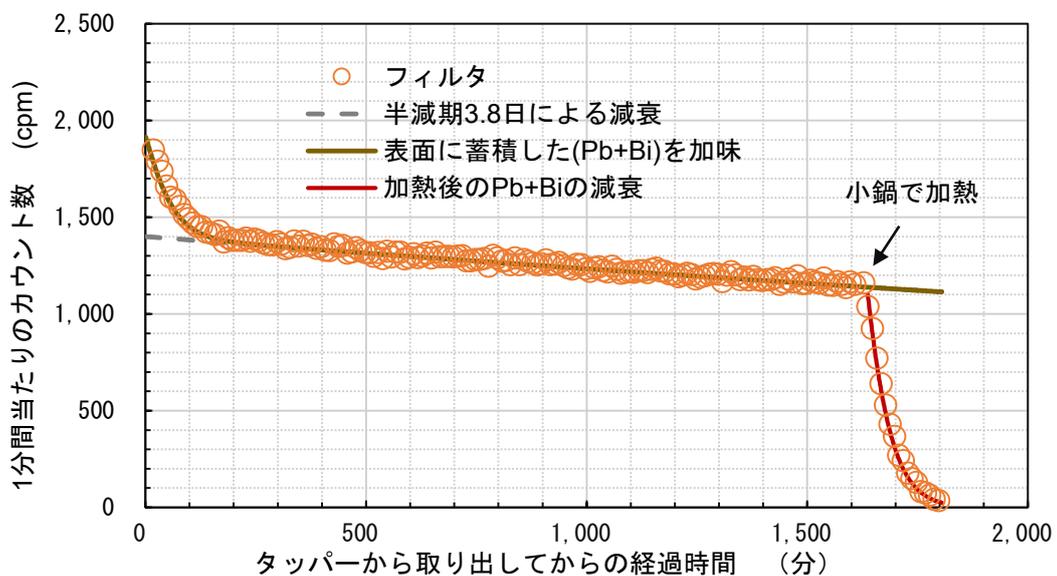


図4-12 小鍋での加熱による ^{222}Rn 除去の効果

実験10

実験結果を図4-13に示した。 ^{222}Rn から生まれた ^{214}Pb と ^{214}Bi が放射平衡に達する様子が観察できた。また、小鍋を用いて加熱すれば ^{222}Rn を取り除くことができ、以前、活性炭を用いて行った実験と同様の結果を得ることができた。

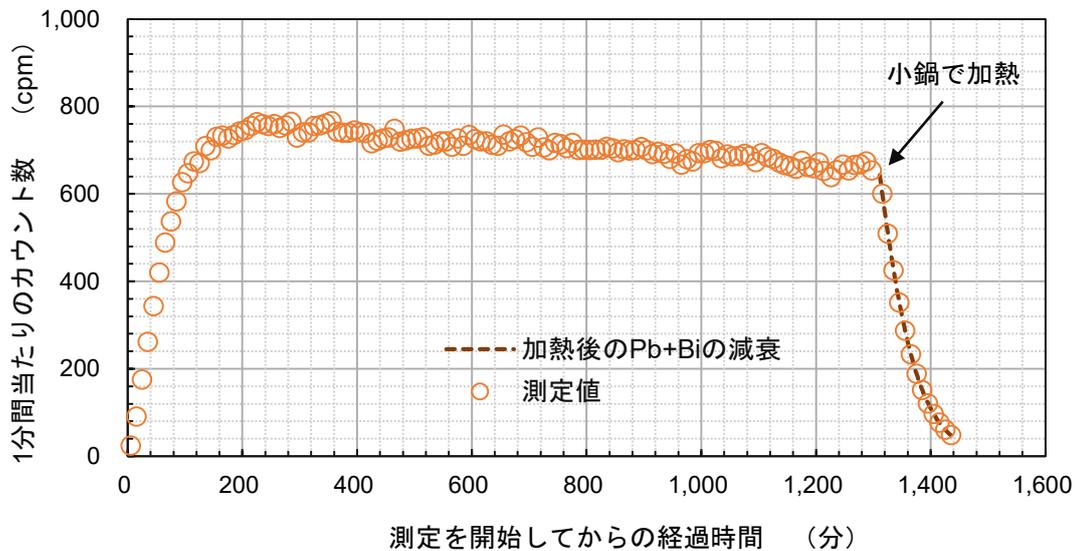


図4-13 放射平衡と減衰の観察

4. 4 まとめ

人形峠の土やドールストーンとともにフィルタや活性炭を密閉しておくと、 ^{222}Rn を吸着するとともにその容器内の気相に存在している ^{214}Pb と ^{214}Bi がその表面に落ちてしまい堆積する現象を発見した。実験2で用いた紙やポリエチレンなどのように ^{222}Rn を吸着しない材質のものを用いればその表面に ^{214}Pb と ^{214}Bi を集めることができる。これらの半減期は、27分と19.9分のため授業時間

内に減衰の現象を観察できる教材となりうる。

従来、人形峠の土と活性炭を用いて行っていた実験をドールストーンとフィルタを用いても行えることが分かった。一枚のドールストーンから放出されている線量は少ないが、複数のドールストーンを用いたり、密封することにより観察可能な量の ^{222}Rn をフィルタ上に集めることができることが分かった。フィルタは活性炭と違い、炭塵が発生せず、柔軟性があるため扱いやすく、温泉水を採取し、その場所ですぐ温泉水から取り出した ^{222}Rn をフィルタに吸着させることも容易である。

第五章 結語

筆者が初めて放射線の実験にかかわったのは、三朝温泉の温泉水を用いた共沈法による実験であった。当時、鳥取県の中学校では、社会科見学で広島を訪れ、原爆資料館などを見学するため放射線・放射能について事前学習をしていた。しかし、適当な教材がなく、インターネットを利用することが多く、放射線・放射能についての知識を学ぶのではなく、原爆に関する資料の学習が多かったように思われる。そこで、三朝温泉の温泉水を用いて放射線・放射能について学ぶことができなかと考え、温泉水から取り出した ^{222}Rn を線源とした霧箱実験と ^{222}Rn を活性炭に吸着させて放射線を測る実験を開発した。その後、学習指導要領の改訂により学校教育で放射線・放射能について取り上げることになり、それまで放射線・放射能について学んだことがない教員にとっては、大きな負担となった。さらに、福島原発事故が起こり、ますますどう扱ってよいのか不安に思う教員も多かったものと思われる。筆者自身も、研究を始めた当初は、放射線・放射能とは「わけのわからないもの」「怖いもの」という認識であった。しかし、三朝温泉の温泉水を扱った実験であったため、興味をもって取り組んでいくことができた。私たちの生活にとって放射線・放射能は、切り離せないものになっている。それらについて判断が必要になったとき、正し

い知識を持っていないと正しい判断はできない。まずは、身のまわりの自然界に存在している天然放射能から学ぶのであれば苦手意識も薄れるのではないかと期待している。

参考文献

- 1) 鎌田正弘, 江坂享男, 中村麻利子 : 化学と教育, Vol.44, No.5, pp.339-340, 1996.
- 2) M.Nakamura, M.Kamata, T.Esaka : proceedings of International Symposium on Radiation Education (ISRE 98), pp.245-251, 1999.
- 3) 中村麻利子, 鎌田正裕, 江坂享男 : 放射線教育 (放射線教育フォーラム), Vol.3, No.1, pp.12-19, 1999.
- 4) M.Nakamura, M.Kamata, T.Esaka : proceedings of the Third International Symposium on Radiation Education (ISRE 04), pp.570-577, 2004.
- 5) 鎌田正裕, 中村麻利子, 星野洋子, 江坂享男 : 化学と教育, Vol.47, No.1, pp.46-49, 1999.
- 6) 中村麻利子 : 鳥取大学工学部技術部報告, 第1集, pp.65-69, 2002.
- 7) 鎌田正裕, 中村麻利子, 江坂享男 : 化学と教育, Vol.42, No.4, pp.286-291, 1994.
- 8) 鎌田正裕, 中村麻利子, 江坂享男 : 化学と教育, Vol.42, No.7, pp.500-503, 1994.
- 9) 鎌田正裕, 江坂享男 : 化学と教育, Vol.43, No.9, pp.588-591, 1995.

- 10) 鎌田正裕, 中村麻利子, 江坂享男 : 化学と教育, Vol. 45, No. 1, pp. 33-36, 1997.
- 11) M. Kamata, M. Nakamura, T. Esaka : proceedings of International Symposium on Radiation Education (ISRE 98), pp. 238-244, 1999.
- 12) 中村麻利子, 江坂享男 : 化学と教育, Vol. 48, No. 8, pp. 538-539, 2000.
- 13) 鎌田正裕, 渡部千春 : 化学と教育, Vol. 48, No. 8, pp. 524-527, 2000.
- 14) M. Nakamura, M. Kamata, T. Esaka : Proceedings of the Third International Symposium on Radiation Education (ISRE 04), pp. 447-454, 2004.
- 15) アイソトープ協会, 「アイソトープ手帳 11 版」, 丸善株式会社, 2011.
- 16) M. Nakamura, M. Kita : Sixth NICE Conference Network Inter-Asian Chemistry Educators (NICE2015), ABSTRACT, P-28, p. 56, 2015.
- 17) 矢田猛士, 片岡千修, 松本一郎 : 学校教育実践研究, 第 1 巻, pp. 143-146, 2018.
- 18) 中村麻利子, 北 実, 南条真佐人 : 日本保健物理学会第 50 回研究発表会 日本放射線安全管理学会第 16 回学術大会 合同大会 要旨集 (web 上) 2017.
- 19) G. Vastagh : Proceedings of the Third International Symposium on Radiation Education (ISRE 04), pp. 535-536, 2004.

- 20) 清原洋一：日本原子力学会誌, Vol. 56, No. 12, pp. 754-755, 2014.
- 21) 古田悦子：Isotope, 2014年5月号, No. 721, pp. 40-43, 2014.
- 22) 小野英喜：立命館高等教育研究, 第12号, pp. 101-116, 2012.
- 23) 中村麻利子：日本放射線安全管理学会誌, 10巻, 1号, pp. 49-52, 2011.
- 24) 文部科学省：放射線教育の実施状況調査の結果について, 2020.
https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/mext_00175.html (accessed 2021. 08. 29)
- 25) 西田敬子：Isotope News, 1月号, No. 729, pp. 47-50, 2015.
- 26) 堀口逸子：厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）分担研究報告書, 33-35, 2015. Retrieved from <https://www.niph.go.jp/soshiki/09seikatsu/EMA/radiation/2014comm/doc/report/horiguchi.pdf> (accessed 2021. 09. 01).
- 27) 油井多丸：Isotope, No. 624, pp. 31-34, 2006.
- 28) 飯本武志（監修）：「「見てみよう！やってみよう！放射線実験」日本科学技術振興財団, 4. 放射線教育支援サイト」 Retrieved from https://www.radi-edu.jp/radi/wp-content/uploads/2014/01/experiment1_senario.pdf (accessed 2021. 10. 11)
- 29) 戸田一郎：Isotope, No. 625, pp. 23-27, 2006.

- 30) 富島修司：福井県教育研究所紀要，117号，pp.125-138，2012.
- 31) 渡辺賢寿，松原静郎：日本理科教育学会研究紀要，第31卷，第3号，
pp.71-78，1991.
- 32) 柚木朋也，伊藤雄一，浜田康司：理科教育学研究，Vol.57，No.2，
pp.155-168，2016.
- 33) 「官報.1916年09月09日」 Retrieved from <https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/2953345> (accessed 2021.04.01)
- 34) 堀内公子，村上悠紀雄：温泉科学，28卷，2号，pp.39-52，1977.

[発表論文リスト]

霧箱の線源として活用できる温泉の所在マップ - 地域の自然の恵みを放射線教育へ活かす - , 中村麻利子, 南条真佐人 : 理科教育学研究, 62 巻, 3 号, 2022.

[参考論文リスト]

1. 鎌田正裕, 中村麻利子, 江坂享男 : “天然放射性同位元素を用いた放射化学実験法(I) - 温泉水に含まれる ^{214}Bi の放射能測定 -”, 化学と教育, Vol. 42, No. 4, pp. 286-291, 1994.
2. 鎌田正裕, 中村麻利子, 江坂享男 : “天然放射性同位元素を用いた放射化学実験法(II) - 温泉水に含まれる ^{214}Bi の放射能測定 -”, 化学と教育, Vol. 42, No. 7, pp. 500-503, 1994.
3. 鎌田正裕, 中村麻利子, 江坂享男 : “天然放射性同位元素を用いた放射化学実験法(III) - 簡易 γ 線測定器「はかるくん」を用いた温泉水の放射能測定 -”, 化学と教育, Vol. 43, No. 5, pp. 321-324, 1995.
4. 鎌田正裕, 江坂享男, 中村麻利子 : “天然放射能を教材とした学生実験の実施

例”，化学と教育，Vol. 44，No. 5，pp. 339-340，1996.

5. 鎌田正裕，中村麻利子，江坂享男：“天然放射性同位元素を用いた放射化学実験法（VI）—増富温泉の泉水中に含まれる²¹⁴Bi及び²¹⁴Pbの放射能測定—”，化学と教育，Vol. 45，No. 1，pp. 33-36，1997.
6. 鎌田正裕，中村麻利子，星野洋子，江坂享男：“天然放射性同位元素を用いた放射化学実験法（VII）—玉川温泉の湯の花に含まれるRa，Thを用いた放射化学実験—”，化学と教育，Vol. 47，No. 1，pp. 46-49，1999.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、鳥取大学工学部教授 南条真佐人先生には指導教官として本研究の実施の機会を与えていただき、終始暖かく見守りご指導を賜りました。ここに深く感謝いたします。

東京学芸大学教授 鎌田正裕先生にはそれまで無縁であった放射線との長い付き合いのきっかけと研究への数多くの助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。研究を進めるうちに放射線教育にもかかわるようになり、その縁で多くの方との出会いにもつながりました。

本研究にかかわるようになった当初は、江坂研究室の皆様にご助けいただき無事研究を進めることができました。特に故鳥取大学工学部名誉教授 江坂享男先生には温かく見守っていただき、いろいろと助けていただきました。ここに心から感謝いたします。

鳥取地区放射線施設助教 北 実 先生には放射線測定に関してご助言、ご指導をいただくとともに、出張講義、セミナー、実験教室などではご助力いただきとても心強く思っておりました。ここに心から感謝いたします。

令和4年1月