

加賀藩文化遺産と低レベル放射線測定 —放射能的純度と化学的純度—

井上 睦夫*

1. はじめに

広島、長崎への原子力爆弾投下や大気圏内核実験（例えば、第五福竜丸事件）、1986年チェルノブイリ原子力発電所事故などで、日本人は放射能の危険性を植え付けられた。さらに2011年福島第一原子力発電所事故（以降、福島原発事故）は、記憶に新しい。それゆえ、放射能に関わる極端な事件や事故、およびその危険性に注目した報告は世の中にはあふれている。それに対し、人の健康に影響を与えない「低レベル」の放射能（本稿では、環境レベルまたはそれ以下とする）は、注目されることはない。それにもかかわらず一部の研究者が多大な労力を費やして低レベル放射能を測定するのは、「低レベル」放射能が、環境中の物質動態を探る化学トレーサーとして、学術的に非常に重要なためである。本稿では、金沢城の鉛瓦や尾小屋鉱山跡トンネル（石川県小松市）などの「加賀藩遺産」、戦艦「陸奥」の鉄、さらには天然鉱物の重晶石などの過去の遺産に注目し、世間のイメージとは逆の「低いレベルの放射能」の視点から、当施設独自の γ 線測定システムを解説する。

2. 低バックグラウンド γ 線測定法

放射線測定法の一つである γ 線法は、 α 線法、 β 線法に比較し、非破壊試料の適用も可能な簡便な測定法で、放射性セシウムに代表される放射能モニタリングにも頻繁に利用されてきた。さらなる微弱 γ 線の検出を目指すには、多量の試料からの目的核種の分離・濃集の他、 γ 線バックグラウンドレベルの低減が必要となる。これには、妨害放射線を避けるための地下測定室の利用、および

検出器の特殊な遮蔽材の使用が、効果的とされる。

2.1. 尾小屋地下測定室

γ 線測定の妨害因子となる宇宙線の寄与の低減には、地下測定室の有効性が知られる¹⁾。明治初期に江戸時代の加賀藩家老、横山家13代の横山隆平氏が経営に乗り出した尾小屋鉱山（現石川県小松市）は、1950年代半ばに最盛期を迎えた後、1971年に閉山された²⁾。金沢大学の低レベル放射能実験施設（Low Level Radioactivity Laboratory; LLRL）は、この鉱山跡に残る長さ546mのトンネルの最も土被りの厚い地点（直上厚135m、水深換算は270m）に、低バックグラウンド γ 線測定に特化する尾小屋地下測定室を設置、1995年初旬に本格的な稼働を始めた（図1a, b）³⁾。通常の地下測定室では、周辺岩盤由来のウラン系列核種のラドン（²²²Rn）ガスが、 γ 線バックグラウンドの上昇を引き起こす。外気との自然換気率が高い尾小屋トンネルでは、²²²Rnガスなどによる空間線量は、他の地下測定室の1桁以上低いとされる。

2.2. 検出器の遮蔽

2.2.1. 金沢城鉛

γ 線測定では、ゲルマニウム検出部分を周囲の妨害放射線より高密度物質で遮蔽する必要がある。鉛は最も一般的な検出器の遮蔽材であるが、現在の鉛にはウラン系列の²¹⁰Pb（半減期22.3年）が多く含まれ、それが γ 線バックグラウンドレベルの上昇を引き起こす。一方、鉛の精錬後（すなわちウラン系列親核種からの分離以降）、²¹⁰Pbは半

*金沢大学環日本海域環境センター准教授・低レベル放射能実験施設



図 1

- a) 石川県小松市の尾小屋地下測定室トンネル入口
- b) トンネル内部（安全のため一部補強）
- c) ~2mm 厚の鉛板（木枠に張り付け屋根瓦として使用）（上）と再鋳形された遮蔽用鉛ブロック（下）
- d) 戦艦「陸奥」から切り出した鉄の遮蔽材と「陸奥」模型（講演用）
- e) 地下測定室で厳重に遮蔽されたゲルマニウム検出器（右下は検出部分）
- f) 重晶石（小松市尾小屋町産）

減期 22.3 年で放射壊変を続ける。鉛からの ^{210}Pb の化学分離は不可能であり、放射壊変の進んだ古い鉛に頼るしかない。

白く趣きのある美観構築のため、過剰鉛の転用、戦時に備えての銃弾材料、などその使用目的には諸説あるが、金沢城では日本で唯一、江戸時代前半より大部分の建物に鉛瓦が引き継がれてきた(図 1c)⁴⁾。幸運にも金沢大学の旧城内キャンパス敷地内に保管されていた金沢城建物の解体時に生じた廃棄用鉛の一部が、 γ 線測定用の遮蔽材として金沢大学に譲渡された。江戸時代に精錬された金沢城の鉛瓦には、 ^{210}Pb 由来の γ 線は一切カウントされない⁵⁾。これら金沢城鉛は、ゲルマニウム検出部分の形状に合わせ鋳形し直され、尾小屋地下測定室を中心に、非常に有効な遮蔽材として利用されている。なお、ヨーロッパの地下測定室では、ローマ時代の沈没船から引き揚げられた鉛も使用される⁶⁾。

2.2.2. 戦艦「陸奥」鉄

鉄も鉛同様、ゲルマニウム検出器の遮蔽材として利用される。戦後の鉄には製鉄所の溶鋳炉の耐火煉瓦の壁に埋め込まれた ^{60}Co (半減期 5.27 年) が妨害核種として含まれる。鉄の遮蔽材としては、戦艦「陸奥」から切り出した鉄材が有名である(図 1d)。戦艦「陸奥」は 1921 年竣工されるも、原因不明の爆発により山口県周防大島沖に沈没した。1970-1971 年には、艦体の一部が引き揚げられた。金沢大学は、この ^{60}Co を含まない陸奥の鉄材ブロック 23 個、計 1.9 トンを、遮蔽材用に 73 万円で購入した⁷⁾。なお当施設では、戦前に精製された水力発電所で利用された鉄材も、遮蔽材として利用している。 ^{60}Co は ^{210}Pb よりも半減期が短く、引き揚げ当時に比べ ^{60}Co 汚染も限定的になったが、遮蔽材としての「陸奥鉄神話」は、いまだに残る。尾小屋地下測定室に設置の検出器は、金沢城鉛、陸奥鉄などで嚴重に遮蔽されている(図 1e)。

2.3. 化学処理

2.3.1. 天然鉱物「重晶石」

海洋化学の分野において、ラジウム同位体は、海水循環研究の古典的なトレーサーとして利用されてきた。環境試料の低レベル放射性核種の γ 線測定には、目的核種の濃集(多量の試料からの分離)が不可欠である。海水中に溶存するラジウム同位体(特に、 ^{226}Ra , ^{228}Ra)の回収には、バリウムイオンの添加による BaSO_4 共沈法が有効である。一方、バリウムとラジウムの化学的特徴の類似性から、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, BaCl_2 などバリウムの化学試薬には、高純度試薬であっても、顕著なラジウム汚染が確認された⁵⁾。化学試薬の複雑な化学分離によるラジウム分離⁸⁾の他、結晶化(親核種との分離)の後、長時間が経過した重晶石(BaSO_4)の使用が有効であった(図 1f)。現在当研究室では、工場で使われるような袋に入った化学的純度の低い重晶石の粉末を使用している。価格が化学試薬の 1/100 程度(5000 円/kg)にすぎない重晶石の ^{226}Ra 含有レベルが 1/100 程度と、非常におもしろい。

^{210}Pb も、有効な物質動態の化学トレーサーとして利用される。海水、陸水試料などからの ^{210}Pb の回収にも、鉛キャリアーを使用した PbSO_4 共沈法が適用される。一方で、鉛の化学試薬も ^{210}Pb 含有の影響から逃れることはできない⁵⁾。当施設では先述の金沢城鉛を、 ^{210}Pb を含まない鉛キャリアーとして使用している。このように、たとえ高価な超高純度試薬であっても、目的核種の汚染の確認なしでは誤解を招く結果になることもあるなど、化学処理には独自のセンスが必要である。

2.3.2. 古い化学試薬

海水中の低レベル放射性セシウムの測定にも、多量海水からの濃集・分離が必要となる。これには海水試料にセシウムキャリア(CsCl)およびセシウムを選択的に吸着するリンモリブデン酸アンモニウム(AMP)試薬を加え、AMP/Cs 沈殿

を回収する分離法が、一般的である。ただ福島原発事故以降の数年間、AMP、CsCl 試薬に ^{137}Cs 、 ^{134}Cs の微弱な（通常の γ 線測定では問題ない程度の）汚染が確認されることもあった。原発事故により放出された放射性セシウムの試薬原料への、または製造過程での混入が考えられた。それゆえ、微弱放射性セシウムの分離には、原発事故前に製造された試薬、または特注品や海外製の試薬の使用が必要であった。当施設では、経済性も考慮し、原発事故後数期間は事故前に製造された AMP、CsCl 試薬を他研究機関より譲り受け使用した。

3. 加賀藩遺産を利用して

尾小屋地下測定室と一般的な地上レベルの平板型ゲルマニウム検出器の γ 線バックグラウンドスペクトルを、図 2 に比較した。放射性核種濃度は、各核種固有のエネルギー値の γ 線ピーク強度から定量されるが、 γ 線バックグラウンドの低減により、ベースラインに埋もれていた微弱ピークが確認できるようになる。地下測定室の利用、遮蔽材の吟味、 ^{222}Rn ガス寄与の低減などを反映し、尾小屋地下測定室でのトータルカウント数（50-1500 keV）は、0.62 cpm（1 分当たりのカウント数；counts per minute）と、地上レベルで通常遮蔽のなされた検出器（77.5 cpm）の 0.8% にすぎない。尾小屋地下測定室には、現在 8 台のゲルマニウム検出器が稼働中である。

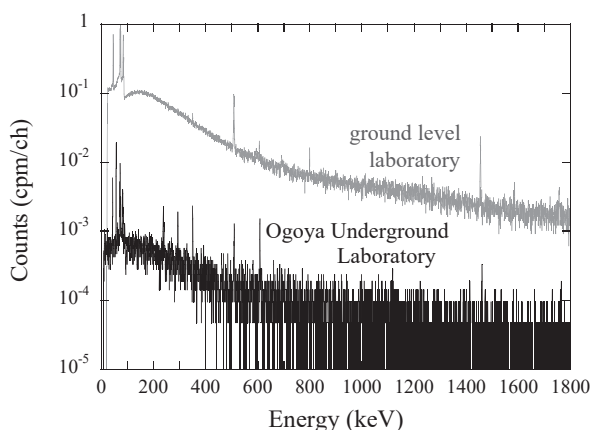


図 2 尾小屋地下測定室と地上レベルのゲルマニウム検出器の γ 線バックグラウンドスペクトル（0.5 keV/ch）の比較

著者らが「低レベル放射能」をテーマに講演する際には、金沢城鉛、陸奥鉄、重晶石などの実物を持参する。放射能的純度は、化学的純度とは全く別物である。金沢城鉛瓦の純度は、97% 以上という良質の鉛であったが⁹⁾、現在の鉛ほどの純度ではない。戦艦「陸奥」鉄も大正時代の技術で精製された。しかしこれら素材は、放射能的純度が高く、唯一無二の遮蔽材となった。測定機器の技術進歩が著しい現在において、加賀藩遺産や当時の帝国海軍の象徴との時を超えためぐりあいによる低バックグラウンド γ 線測定法の確立は、参加者の方々の関心を集める。どれくらい時間を遡るのかは、親核種との分離後の対象核種の半減期（少なくとも半減期の数倍；金沢城鉛、重晶石）、またはその汚染にさらされた以前（戦艦「陸奥」鉄、AMP 試薬）と、核種により異なる。環境放射能の影響を防ぐためのこれら遺産は、「放射能は、常に危険」という一般認識を覆す教育素材としても利用される。

低バックグラウンド γ 線測定法の適用は、放射能汚染評価に加え、低レベル放射性核種をトレーサーに利用した海洋化学研究に重要な知見をもたらしてきた。例えば、その短い半減期（2.06 年）を反映し、福島原発事故以降、海水中の ^{134}Cs は、事故由来に限定される。海洋への供給時期と場所が明らかな ^{134}Cs は、海水循環の重要なトレーサーであるが、低レベルゆえ、低バックグラウンド γ 線測定法の適用が不可欠であった。本手法で得られた ^{134}Cs 濃度の時空間分布は、 ^{134}Cs の循環のみならず、海水循環の解析に重要な知見をもたらした。これら海洋放射能研究への適用は、他の文献に詳しい^{10,11)}。

参考文献

- 1) 小村和久 (2006) 地下測定室紹介と超低レベル放射能測定による最近の成果. *Radioisotopes* 55, 293-306.
- 2) 廣田いずみ (2025) 尾小屋鉱山資料館 横山家寄贈新資料の紹介 (2). 小松市博物館研究

- 紀要 59, 1-20.
- 3) Inoue, M., Ochiai, S. (2023) Low-background γ -spectrometry in Ogoya Underground Laboratory, Ishikawa, Japan. Field Work and Laboratory Experiments in Integrated Environmental Sciences. Chapter 9, pp 137-149. Springer.
 - 4) 井上睦夫 (2023) 金沢城鉛瓦と低バックグラウンド γ 線測定. 日本海域研究 54, 61-68.
 - 5) Inoue, M., Komura, K. (2007) Determination of radionuclides in chemical reagents by low-background γ -spectrometry and application of the coprecipitation method to seawater samples. Radioisotopes 56, 77-82.
 - 6) Nosengo, N. (2010) Roman ingots to shield particle detector. Nature, <https://doi.org/10.1038/news.2010.186>.
 - 7) 北國新聞 (1972) 戦艦「陸奥」の鉄材 金大で第二の奉公 こんどは平和利用として. 1972年3月11日朝刊.
 - 8) Yamamoto, M., Komura, K., Ueno, K. (1989) Determination of low-level ^{226}Ra in environmental water samples by alpha-ray spectrometry. Radiochim. Acta 46, 137-142.
 - 9) 小澤一弘・堀木真美子 (2014) 鉛瓦小稿—金沢城の鉛瓦—. 愛知県埋蔵文化財センター研究紀要, 15, 1-12.
 - 10) 井上睦夫 (2022) 日本海における ^{134}Cs の供給と循環. 月刊海洋 54, 511-517.
 - 11) 熊本雄一郎 (2025) 微量溶存放射性セシウム測定による北太平洋のモード水の追跡. 月刊海洋 57, 11-22.