



講座 トリチウム実験入門

4. いざ実験，トリチウム汚染安全対策と廃棄物の後片付け！

4. Experiments, Safety Measures for Tritium Contamination and Clean-Up Wastes!

大塚 哲平, 原 正憲¹⁾

OTSUKA Teppei and HARA Masanori¹⁾

近畿大学 理工学部, ¹⁾ 富山大学学術研究部理学系

(原稿受付: 2020年7月6日)

トリチウム実験を行う際の実験室への入室から、測定の実際、実験中の安全対策および個人被ばく防護のための装具の着用、実験後の後片付けについて紹介する。

Keywords:

safety, personal protection equipment, smear, contamination

4.1 実験室内のトリチウム汚染対策

これまで述べてきたように、トリチウムには水素同位体という側面と、非密封の放射性同位元素 (RI) としての側面がある。このため、トリチウムを安全に利用するには、両者の特性を理解したうえでの対策が必要である。RI施設の管理区域内への立ち入りに関しての所定の教育訓練やガラスパッチの装着、密封線源の安全取扱いについてはここでは割愛する。

非密封のRIであるため、トリチウムを利用する実験室は強制換気されていること、部屋内が負圧になっているのでドアが開けにくいことは前章で述べた。いよいよ、実験室に入室するわけであるが、**図1**に示したように、非密封のRIを取り扱う実験施設または実験室では、それまで履いてきた履物 (靴またはスリッパ) を履き替える必要がある。この際、履き替える場所はスノコや踏み台などで一段高くなっていたり、白いポリエチレンろ紙が敷いてあったりするが、この部分を履物で踏んだり、履物を置いたりしては

ならない。この領域は、非密封RIの付着の連鎖を断ち切る境界だからである。非密封RIには水溶液状のものが存在し、トリチウムの場合は水溶液の状態で存在するものが多い。水溶液をこぼしたり、飛散させたりして、床にトリチウムが付着してしまうことがある。これを1次汚染と呼ぼう。もし、履物で床に付着したトリチウムを踏んでしまうと、2次汚染として履物の接地側表面にトリチウムが移動することがある。トリチウムを初めとする非密封RI取扱領域と他の実験室・廊下には、履物で踏んではならない境界領域を設けることで、表面接触により非密封RIの移動の連鎖が起こることを防ぐことができる。これを疎かにすると、一般の管理区域で使用している履物や、廊下、さらには汚染検査室などを3次、4次汚染を招いてしまうことになる。

さて、非密封RI取扱い実験室に入室すると、実験机は通常、白いポリエチレン製ろ紙で覆われている (**図1** (b))。さらに、トリチウムに限らず、液体状RIを用いる実験では、金属やプラスチック製のバットやトレイを覆うようにポリエチレンろ紙を敷き詰めて、その上でピーカー器具類や装置を用いることにしている。これは、液体状RIをこぼしたとしても汚染の拡大を防ぐためのものであり、液体がろ紙上に落ちて裏側への透過を防ぎ、ろ紙を取り替えることで、バットやトレイのRI汚染を防ぐためのものである。ポリエチレンろ紙は定期的に、また実験中には適宜、取り替えられなければならない。

4.2 トリチウムの測定の実際

トリチウムを用いる実験とその被ばく管理において重要なのがトリチウムをどのようにして測定するかである [1]。放射線の測定では、放射線が検出器内へ入射する必要がある。しかし、トリチウムの β 線の飛程は短いため、通常の

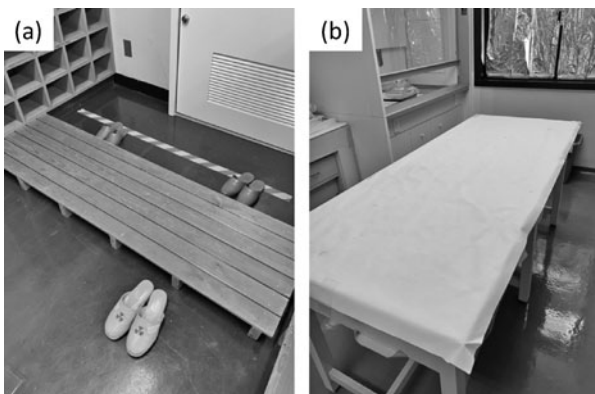


図1 (a)非密封RI線源利用実験室の入り口, (b)ポリエチレンろ紙で覆われた実験台 於: 近畿大学 RI 実験室。

放射線検出器の窓材すら透過できない。そこで、トリチウム測定用の特別な検出器、特別な測定方法が利用される[2]。以下、概略を述べる。

気体状の試料に対して、広く測定に用いられているのが通気型の電離箱である。電離箱に接続されたサンプリングポンプにより、試料ガスを吸引し、連続的に電離箱内へ流通させる。電離箱内で発生したトリチウムのβ線による電離が電流として検出される。併せて、連続的に試料ガスが流通されることから、試料ガス中のトリチウム濃度の経時変化が測定できる。このような特徴から、広くトリチウム測定用のルームモニターとしてガス通気型の電離箱は利用されている。試料ガスを導入できる比例計数管を利用して気体中のトリチウムの測定ができるが、比例計数管を作動させるためのPRガス（アルゴンとメタンの混合ガス）が必要である。図2に示したような可搬型の表面サーベイメータは、固体表面から外部へエスケープできたβ線を検出器表面に貼られた薄膜を通して比例計数管で測定することができる。主にトリチウムによる表面汚染の検査に利用されている。トリチウムのβ線の飛程は空気中で数mmであり、測定中は検出器を測定対象ぎりぎりまで近づけるため、検出器の薄膜を破損しないように注意する必要がある。

液体状のトリチウムの測定には、液体シンチレーションカウンタ(LSC)が使用される[3]。図3に示すように、液体状のトリチウム試料を液体シンチレータと混和させ測定試料(カクテル)として用いる。液体シンチレータは放射

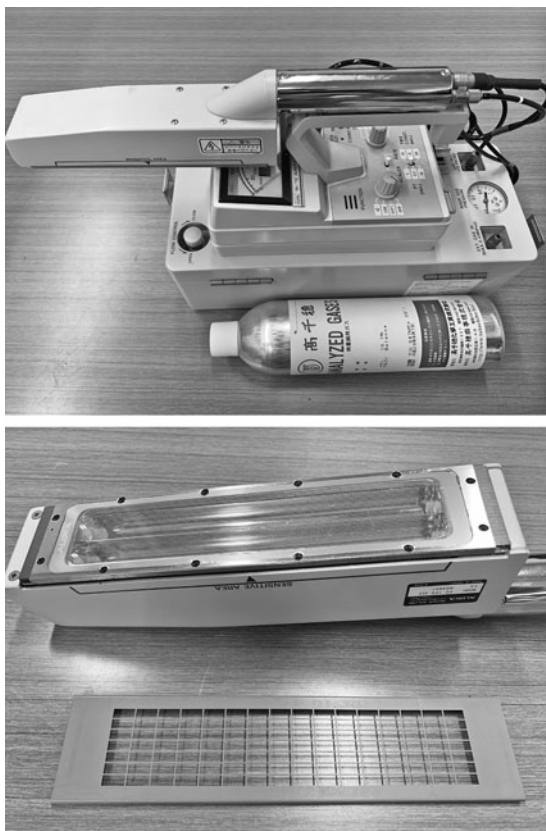


図2 トリチウム用表面サーベイメータ (TPS-303, 日立アロカ社製)。

線が当たると発光する。液体同士を混ぜ均一な測定試料とするため、トリチウムのβ線のように低エネルギーであっても発光を得ることができる。この測定試料を液体シンチレーションカウンタに入れ、2本の光電子増倍管によって発光回数を同時計数することで、試料中のトリチウムの放射能を計測する。LSCの検出限界は、汎用のLSCでも数十Bq/Lの試料を測定できるほど高感度である。一方、高濃度のトリチウムの測定には向かない。測定試料中の放射能を1kBq程度にするのが最も効率的な測定となる。

イメージングプレート(IP)法では、トリチウムを含んだ試料をIPに塗布された輝放射性蛍光体(BaFX:Eu(X=Cl⁻, Br⁻, I⁻))表面に密着させ、トリチウムのβ線によって蛍光体中の電子を励起状態にすることで、β線のエネルギー付与を記録する。その後、リーダー装置のレーザー照射によって蛍光体中の励起電子を再励起し、その電子が基底状態に戻る際の蛍光強度を読み出す[4]。これにより、mmオーダーの試料表面領域について分解能20~50μmで2次元のトリチウムβ線強度分布を測定することができる。標準線源と比較すれば、表面近傍に存在するトリチウムの放射能が定量できる。ただし、材料表面にトリチウムが偏在することもあるので、表面汚染と内部汚染の違いには十分に注意する必要がある(図4)[5]。

比較的高濃度のトリチウムが固体内に存在する場合、β線で誘起されるX線を利用する方法(BIXS法)により、β線の飛程より深部に存在するトリチウムを検出できる[6]。ただし、市販の装置はなく利用者がX線検出器の選定と試料台の製作を行う必要がある。

現時点において、非破壊で固体試料内部のトリチウムの放射能を定量する方法はない。破壊的方法になるが、試料を燃焼させるあるいは加熱することにより試料中のトリチ

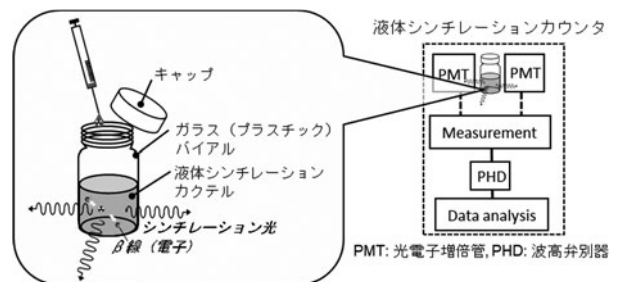


図3 液体試料および液体シンチレーションカウンタの概念図。

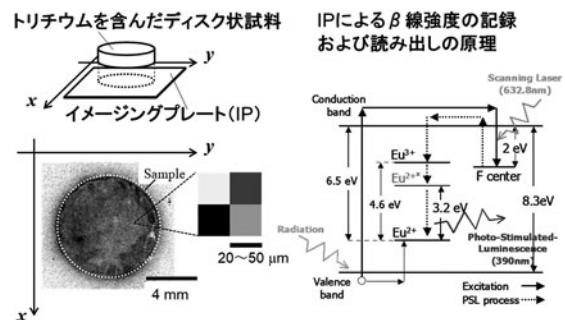


図4 イメージングプレート法およびIPによるβ線強度の記録および読み出しの原理の概念図。

ウムを取り出す方法がある。取り出されたトリチウムは、触媒で酸化しトリチウム水とし、これを捕集してLSCにより放射能を求める。また、金属試料中のトリチウム測定では、試料を酸で溶解し、その酸中のトリチウムをLSCで測定する方法も利用されている。

トリチウムの β 線の運動エネルギーは小さいため、その測定には試料、実験目的に合わせた手法を選択、あるいは開発する必要がある。

4.3 実験者のトリチウム汚染対策

非密封RIを取り扱う実験者は、個人防護装備(Personal Protection Equipment, PPE)を身につけなければならない。密封・非密封RI線源にかかわらず、RI施設では黄衣や白衣などのラボコートを着衣しているはずである。非密封RI線源を取り扱う際には、使い捨ての塩化ビニルプラスチック製またはラテックス・ニトリルゴム製の手袋をつける。これらの手袋を直に素身につけると、夏場などは汗で不快になったり、手が荒れたりすることがあるので、シームレスの極薄いインナー手袋を装着すると良い。医療・手術の細かい作業に用いるための手袋類が販売されている。液体状RIである場合は、ラボコートの上から使い捨ての防水加工されたエプロンを着用し、目の防護のために眼鏡やゴーグルを使用する(図5)。これらのPPEは、実験作業中に数時間に1回の頻度で取り替えられなければならない。非密封RI取扱い実験室は、個人や研究室で専有していることは少なく、生物・医療・工学・理学分野のさまざまな研究者が共用で利用していることが多い。このため、自分がやったわけではなくても、工具・実験器具や壁・床にRIが付着している可能性があると考えたほうが良い。もったいないからといって、長時間PPEを使用していると思わぬRI汚染を引き起こす場合があるので注意が必要である。また、手袋を装着した状態で、顔や肌露出部を触ると、皮膚へのRI付着による外部被ばくや経口でのRI取り込みによる内部被ばくの原因になり得るので注意しなければならない。

手袋やエプロンを取り外す時は、外部に向いていた表面を裏返しにすることにより、RIが付着した可能性がある表



図5 個人防護装備(PPE)の一例、ゴーグル、ポリエチレン製手袋、ゴム手袋、綿インナー手袋および防水加工エプロン。

面が露出しないようにすることが肝要である。自分だけでなく他者への影響を考えてのことである。のちに述べるように、RI実験室で発生した廃棄物は可燃、難燃および不燃等に分類されなければならない。時には、間違っして混入している廃棄物を廃棄作業員が分別を行う場合があるであろう。この際に、外部のRI汚染表面が露出していると作業員の外部被ばくにつながる可能性があるからである。

4.4 トリチウム利用実験中の汚染対策

RIを含む試料を安全に取扱うためには、試料との距離を保ち、短時間の作業とし、放射線を遮蔽することが重要である。トリチウムを含む試料の場合、放射線の遮蔽については手袋1枚で十分である。ただし、トリチウム特有の現象として、トリチウムと軽水素との同位体交換反応に気をつける必要がある。試料中のトリチウムは、化学的には軽水素と同じように振る舞うので、試料周辺の大気中の水蒸気(水分子)中の軽水素や、試料を乗せている紙やプラスチック容器などの有機物中の軽水素とも容易に同位体交換反応を起こす。また、金属内部に溶解させたトリチウム(T)は、軽水素(H)と再結合して水素ガス(HT)として放出されることもある。これらによるトリチウム汚染は、上述の適切な換気と、PPEの装着によって防止することができる。

実験終了後には、汚染検査を実施する。トリチウム汚染を調べるために最も確実なのはスミヤ測定を行うことである。スミヤ測定では、図6(a)、(b)に示したような紙で検査対象物の表面を拭き取って(スミヤして)、いわば積極的にろ紙にトリチウムを移動させる。ろ紙の形状は杓子型、三矢型、蝶型があり、写真は杓子型のものである。床の汚染検査では、複数箇所の地点で30 cm²をまんべんなく拭き取る。次に、液体シンチレーション溶液中にろ紙を浸漬して、トリチウムから発せられた β 線をLSCにより測定する。

トリチウム汚染が見つかった場合は、まず速やかに周辺を隔離して実験を終了し、周辺で実験している研究者に呼びかけて、実験室から退出するべきである。この際、慌てないで、非密封RI取扱領域で使用した手袋、エプロン、履物を廃棄してから、自身の外部汚染がないかを確認したうえで、退出する。つぎに、施設の職員に通報し、適切に汚

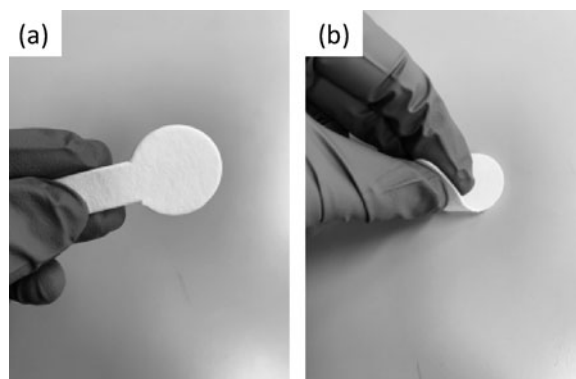


図6 (a)杓子型スミヤろ紙、(b)表面のスミヤ検査の様子。

染の除去（除染）をしてもらうことになる。むやみに自分だけで何とかしようとせず、トリチウム汚染を拡大させないことが重要である。米国アイダホ国立研究所のRad Worker 資格の講習ではSWIMS（泳ぐ）という語呂合わせで、Stop work activities, Worn others, Isolate the area, Minimize exposure, Secure ventilation と説明されている。すなわち、作業を止める、周囲に注意喚起する、汚染区域に人が立ち入らないように隔離する、被ばくを最小限にする、換気・排気を確実にするというものである。

4.5 実験終了後の後片付け

実験終了後には、トリチウム汚染物を固体廃棄物（可燃物、難燃物、不燃物、非圧縮性不燃物）および液体廃棄物（無機液体、有機液体）に分別して廃棄する。トリチウム利用実験でよく用いられるPPEや実験器具の廃棄物分類を表1に示した。実験室には表1に準じた廃棄容器（ゴミ箱）が設置されているはずなので、廃棄物は混在することがないように、分別して廃棄されなければならない。

なお、第2章で述べたように、これら固体廃棄物の表面に付着したトリチウムは水状の化学形であることが多く、廃棄前の保管時に蒸発したり、他に移動したりすることがあるので、廃棄前の管理が重要である。また、トリチウムは金属やセラミックス内に原子状で格子間に溶解したり、他元素と化合物を形成したりする。これら材料内部に取り込まれたトリチウムがどのように外部環境に放出されてくるのかという問題は重要であり、さまざまな材料について研究が進められてきている。このような材料中のトリチウム挙動に関する研究は、実験室レベルだけでなく、原子力発電炉や将来の核融合発電炉における使用済み材料の保管・廃棄・処分の問題として極めて重要である。次章以降で実験研究への取り組みの一端を紹介する。

無機液体はpH2~12に調整した酸やアルカリ溶液であり、有機液体は各種液体シンチレーションカクテル（溶液）に限られる。液体廃棄物中の放射能が規定制限値範囲以内

であることを確認し、液体廃棄物用容器入り口周辺を入念にポリエチレンろ紙によって養生したあとに、漏斗を利用して容器内に流し込む。なお、トリチウムだけを利用していけば、液中放射能は ≤ 2 kBq/mL でなければならない（表2）。

トリチウムを含む固体廃棄物および液体廃棄物において、放射能や1 cm 距離における線量当量率の制限値があり、集荷費用が定められている。ただし、廃棄物にトリチウム以外の核種が含まれている場合は制限値が変化する。詳しくは、日本アイソトープ協会の“RI 廃棄物の集荷について”[7]が参考になる。また、自身で判別がつかない場合には、施設職員に尋ねていただきたい。

参考文献

- [1] 原 正憲 他：日本原子力学会誌 61, 41 (2019).
- [2] M. Hara *et al.*, (T. Tanabe Ed.), *Tritium: Fuel of fusion reactors* (2017, Springer).
- [3] 石河寛昭：最新液体シンチレーション測定法（南山堂1992）。
- [4] 宮原諄二：RADIOISOTOPES 47, 143 (1998).
- [5] T. Otsuka and T. Tanabe, *Mater. Trans.* 58, 1364 (2017).
- [6] M. Matsuyama *et al.*, In-situ measurement of high level tritium by bremsstrahlung counting method", *Toyama Daigaku Suiso Doitai Kino Kenkyu Senta Kenkyu Hokoku* 51, (1994).
- [7] https://www.jriais.or.jp/waste/pdf/haikibutsu_shuka2018.pdf

表2 トリチウムを含んだ液体廃棄物の分類。

無機液体	有機液体
*pHを2~12以内に調整すること 放射能 ≤ 2 kBq/mL（トリチウム）	*液体シンチレーションカクテル（溶液）のみ 放射能 ≤ 2 kBq/mL（他核種も含む）

表1 トリチウムを含んだ固体廃棄物の分類。

可燃物	難燃物	不燃物	非圧縮製不燃物
布類	プラスチック製品	金属・塩ビ製品	トリチウムを含んだコンクリート、土壌、建築廃材、陶器・機械機器、活性炭など
インナー綿手袋、実験衣、ガーゼなど	プラスチック製バイアル、チップ、キャップ、注射器（金属製針は別）など	金属製ハサミ、ピンセット、アルミホイルなど 注射針 *別途ポリ容器に収納し、針と明記すること 塩ビ製スリッパ、ホースなど	*いずれもトリチウム以外の核種が含まれている場合は施設職員に相談すること
紙類・木片類	ゴム・ポリ製品	ガラス製品	
紙ワイプ、タオル、ろ紙など	ゴム・ポリ製手袋、エプロン、容器など *手袋は裏返した状態にすること	ガラス製フラスコ、ビーカーなど	
敷きわら・床敷		シリコン・テフロン製品	
動物使用実験で利用されたもの *糞尿が分離できない場合は、動物として別分類とすること		テフロン製ビーカー、ピンセット、ホースなど シリコン製ホース、継手 など	

トリチウムのみを含む固体廃棄物の放射能 ≤ 40 MBq