P-12

第24回 日本放射線安全管理学会学術大会 2025年12月16日 @ 京都大学本部時計台

小型飛沫除去装置のフィルター径による飛沫除去性能変化

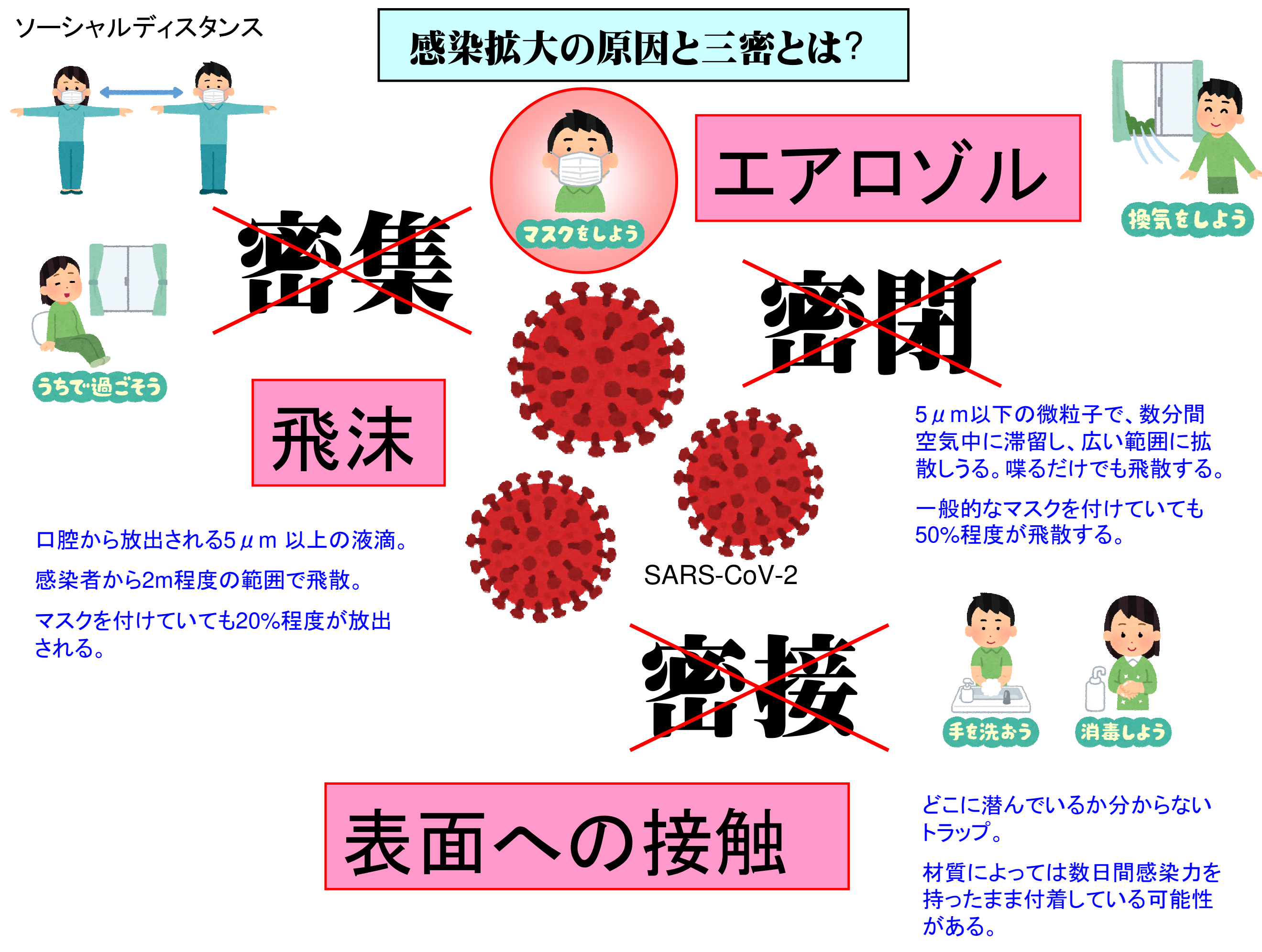
○秋吉 優史 大阪公立大学 工学研究科、放射線研究センター、大阪国際感染症研究センター兼担
E-Mail: akiyoshi-masafumi@omu.ac.jp
https://www.omu.ac.jp/eng/akiyoshi/

感染症に対する工学的対策はコロナ禍収束後も依然として重要なテーマであり、サブミクロンのエアロゾルについては捕集は行わない割り切りをした上で飛沫（医学的には口腔から放出される 5μm 以上の液滴を指す）に特化した捕集を行う小型飛沫除去装置の開発を行ってきた [1),2)] 。エアロゾル、飛沫の挙動は非密封の放射線安全管理を行う上でも重要である。試薬などをピペッターで取扱う際は周辺に目に見えない飛沫が飛び散っている可能性があり、発生源の近くでの捕集が望ましい。また、放射線教育の分野では大気中のラドン娘核種を捕集して半減期 40 分程度の線源とすることがよく行われているが、ダストモニターを流用して強力なファンと目の細かいフィルターを用いて長時間捕集しても大して集まらない一方で、ベンコットなどの目の粗いガーゼを掃除機の先に取り付け 10 分程度捕集することで広窓 GM により 20,000 cpm を超える強力な線源を得ることが出来るため、経験的に高性能なフィルターを使えば良いという物ではないことが知られている。

フィルターメッシュと対象とする粒子の挙動はザルで砂を漉すような場合と異なり、さえぎりやブラウン運動などの挙動によって説明され単純ではない。実際に、0.5×2 mm 程度の大きな穴が多数空いた不織布フィルターによって 5-25 μm の飛沫は 99.9% 以上が除去されるという実験結果が得られている [1)]。本研究では、0.6 ×0.6×1.5 m のクリーンブース中で噴霧器（超音波式の加湿器）による水道水の噴霧を行い液滴の濃度をパーティクルカウンター （AERO Trak APC 9303-01, TSI 社）を用いて評価し、噴霧機とパーティクルカウンターの間に設置した小型飛沫除去装置に装着したメッシュ径の異なる #18/19, #14, #10.5 の 3 種類のフィルターによる空中を飛ぶ飛沫の除去率と、ダクト中に設置したファン-フィルターを挟んだ上流側と下流側の粒子径を同時計測し、単純にフィルターに対する透過率を求めた。その結果、空中を飛ぶ飛沫（5-25 μm）の除去率と透過率は綺麗にトレードオフの関係となっていることが明らかとなった。

しかしながら実際にどの程度の量がフィルターに捕集されて系から排除されたのかは定量的評価が出来ておらず、^{90}Y などの短半減期 RI を噴霧して定量的に評価を行うことが望ましいが非密封 RI の噴霧は放射線安全管理上のハードルが高いため、トリウムを含有するマントルピースなどの自然放射性物質から放出される ^{220}Rn からの ^{212}Pb（半減期 10.6 h）/ ^{212}Bi（半減期 1.01 h）を活用する方法が考えられる。50 枚のマントルピースを使用して不織布フィルターでの捕集を試みたが余り放射能濃度が上がらなかったため、より効果的な補修方法の検討を行った。マントルピースは化学的に分離したトリウム（^{232}Th は半減期 140 億年）を使用しているため、娘核種と放射平衡になっていると考えられるジルコンサンドを使用した実験を試みたが、ほとんど放射性核種を捕集することが出来なかった。なお、マントルピースを用いて捕集したフィルターに含まれる核種の崩壊挙動を評価したが、単純減衰ではなく一旦上昇が見られ、^{220}Rn 娘核種の崩壊系列では説明が出来なかった。

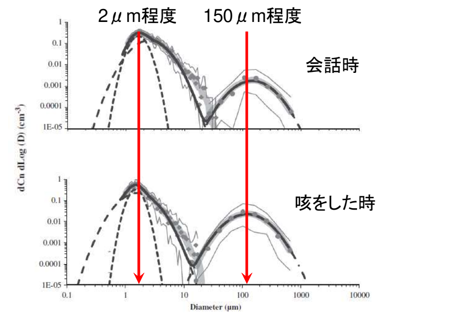
1) 秋吉優史, 綿野哲, 落合剛, 光触媒式小型空気清浄機による飛沫除去挙動の評価, エアロゾル研究, 36 (2021) 263-272.
2) 秋吉 優史, 松浦 法雄, 綿野 哲, 対面する人と人の間に設置する小型飛沫除去装置の提案, エアロゾル研究, 39 (2024) 207-213.



飛沫とエアロゾル

医学的には口腔から放出される5μm以上の液滴を飛沫と呼び、それ以下の物をエアロゾルと呼ぶが、5μmを境に急に物性が変化するわけではなく、落下速度などは連続的に変化する。

しかし、口腔から出る液滴の粒径が示す2つのピーク、2μm程度と150μm程度では明らかに物性は異なり、同一の扱いとすることには無理がある。



G.R. Jhonson et al., Modality of human expired aerosol size distributions, J. Aerosol Science, 42(2011)839-851.

様々な報道に於いて飛沫による感染リスクを軽視する意見が出ている。マスクやパーティションなどの対策をした上で残るリスクがエアロゾルというのは賛同できるが、そう言った前提条件無しに軽視することは市民に誤ったメッセージを送ることになる。また、マスクをしていても一定の割合で飛沫は漏出し、吸い込む側は隙間からほぼフリーパスで吸入される。また、飛沫が乾燥して出来る飛沫核がエアロゾルとなる場合や、落下した飛沫が接触感染や飲食物に付いた場合経口感染のリスクとなる可能性も無視できない。

なお、液滴の体積を考えると、100万個のウイルスが口腔から放出されたとしてエアロゾルとして滞空するウイルスは100個程度という見積が成されている(*)。

(*) 野村 俊之 , 新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の感染経路に関する微粒子工学的検討, 日本接着学会誌, 57(2021)427-431.

・屋外での飲食（BBQなど）

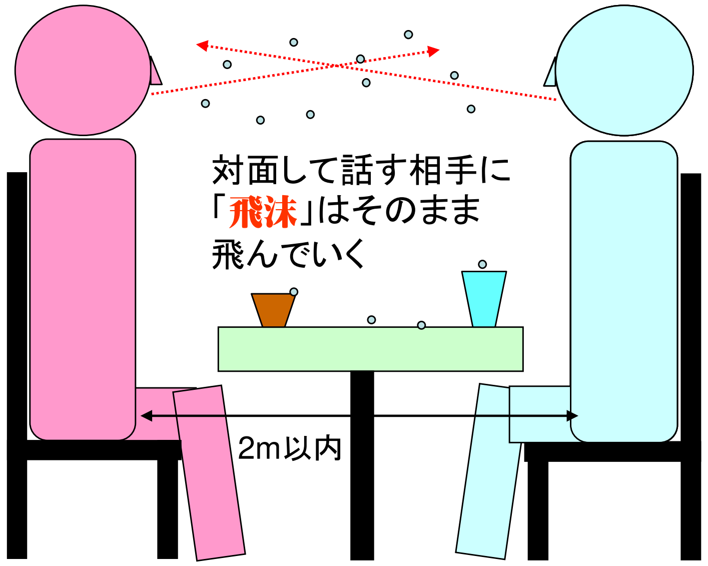
・屋外のスポーツ観戦

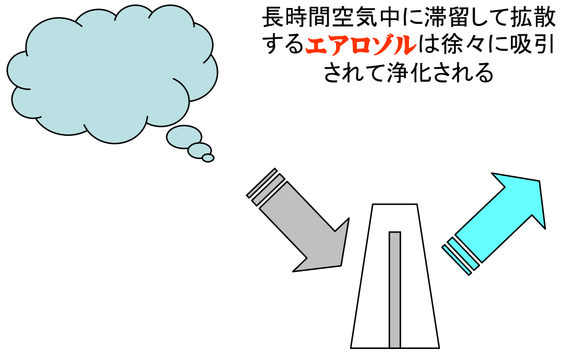
でのクラスターの発生は、マスクをしていない状況ではいかに換気がよくても飛沫感染のリスクが存在することを示唆してる。

気流、マスクの有無、会話のトーンなど、様々な状況で支配的となるリスクは変わり、対策も変える必要がある。

へやのかたすみ
飛沫の飛程より遠くに空気清浄機を設置しても
飛沫除去には何の意味も無い!

直接相手の呼吸器に入らなかった飛沫も、乾燥して飛沫核になるとエアロゾルとして滞留し、また落下したものも乾燥して接触感染の原因となる。

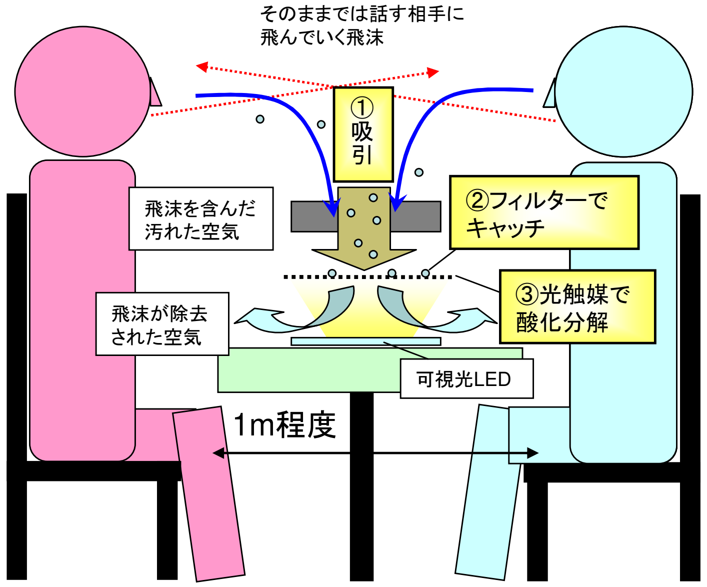




従来からある
空気清浄機

大型で騒音も大きく

人と人の間には設置できない



① 吸引

発生源と対象者の間にひかりクリーナーを設置した場合、口の高さ程度を飛ぶ5μm以上の飛沫を1/100程度にまで吸引除去

② フィルターでキャッチ

吸引した5μm以上の飛沫については、ほぼ完全にフィルターでキャッチ

③ 光触媒で酸化分解

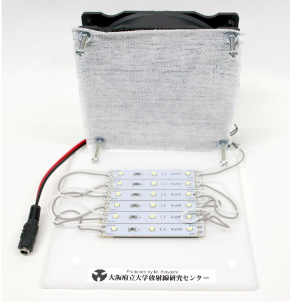
紫外線を放出せず安全な高輝度可視光LEDと、可視光応答光触媒を使用した無機材質ベースの高性能フィルターにより、高い酸化分解力を実現。フィルターではキャッチできないエアロゾル中のウイルスについても不活化できることを確認。

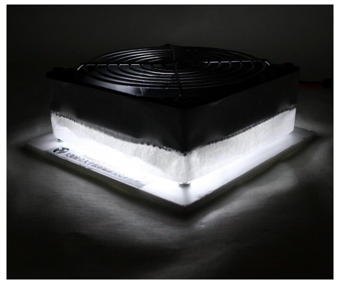
サブミクロンのエアロゾルをキャッチしようとするとHEPAフィルターなどの高性能フィルターが必要で、十分な吸引を行うためには高出力のファンが必要となり、騒音のため人のそばには置けない。

サブミクロンのエアロゾルは
キャッチしないという割り切り

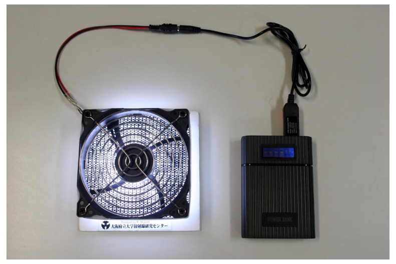
⇒ 飛沫除去に特化した小型飛沫除去装置
というコンセプトを実現

可視光応答光触媒を用いた超低価格な小型空気清浄機「ひかりクリーナー」





和紙による漏れ光の遮光

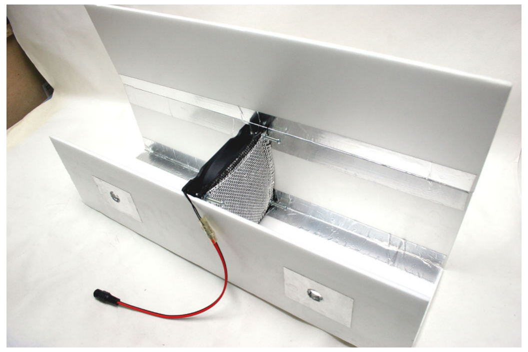


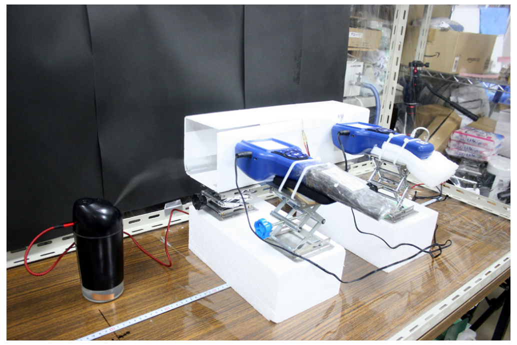
12cm角、高さ5cm、ファンの騒音19dB、消費電力5W以下で、モバイルバッテリーでの駆動も可能

可視光応答の光触媒を使用しているため、漏れ光を完全に遮蔽する必要が無く、簡易な構造での動作が可能。当初開発した標準型はPC 用のパーツなどを組み合わせて、極めて安価で製作が可能。価格が安価であれば、その分多数台でのネットワーク構築が可能となる。中学生程度でも工作可能で、半田付けなどの危険な作業も不要。光触媒フィルターは、不織布と市販されている東芝「ルネキャット」スプレーにより製造が可能で、より強力なファンを使用すれば性能向上も可能。

これまでに700台程度を市民に提供し、実際に使用してもらっている。

フィルターメッシュ径の違いによるフィルター透過率の変化



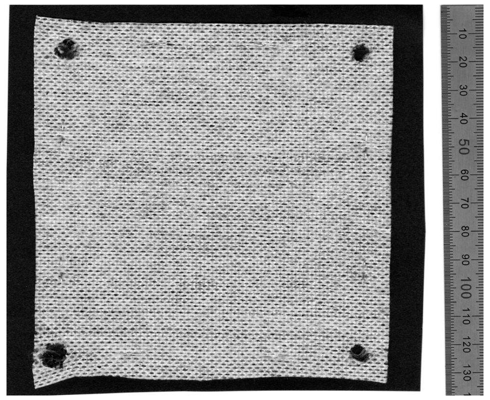


フィルターを装着した12cm角 1200rpm のファンをスチレンボードで製作したダクト中に設置し、上流側と下流側で噴霧機により導入された液滴濃度を測定した。上流側と下流側の液滴濃度の比から、透過率を評価した。

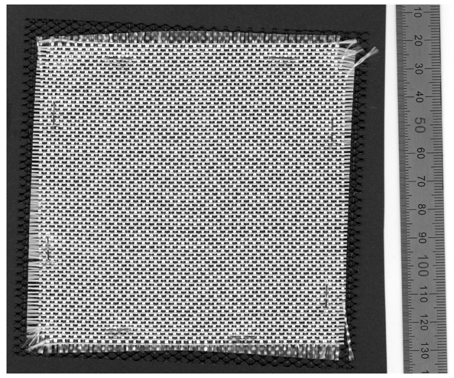
液滴径は5-25 μ mおよび1-5 μ mの分粒に対して評価した(0.3-1 μ m のサブミクロンの分粒も評価したがフィルターで全くキャッチされなかった)。

フィルターは、モノタロウ不織布ワイパー、グラスファイバーメッシュ #18/19、#14、#10.5 および #10.5 のメッシュを二枚重ねにした物で、いずれもダイソーのすべり止めシートを担持材として使用し、ステンレスステープラーで8カ所止めることで保持している。

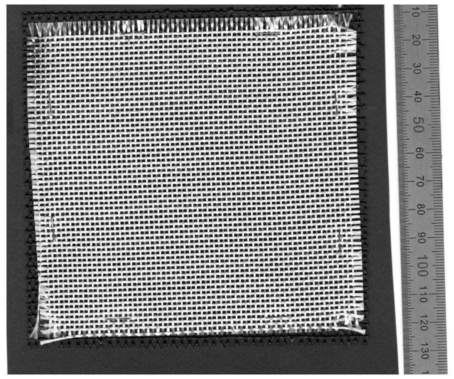
フィルターメッシュ径の違いによるフィルター透過率の変化



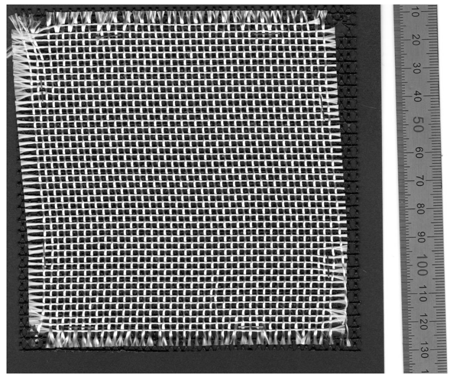
モノタロウ不織布ワイパー



グラスファイバーメッシュ #18/19

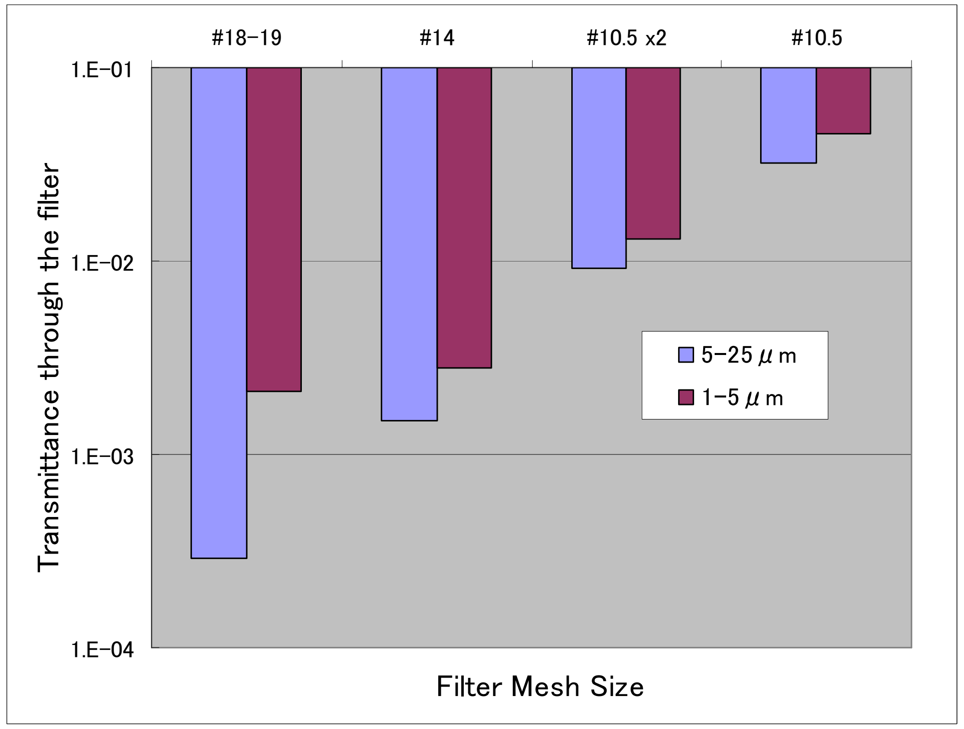


#14

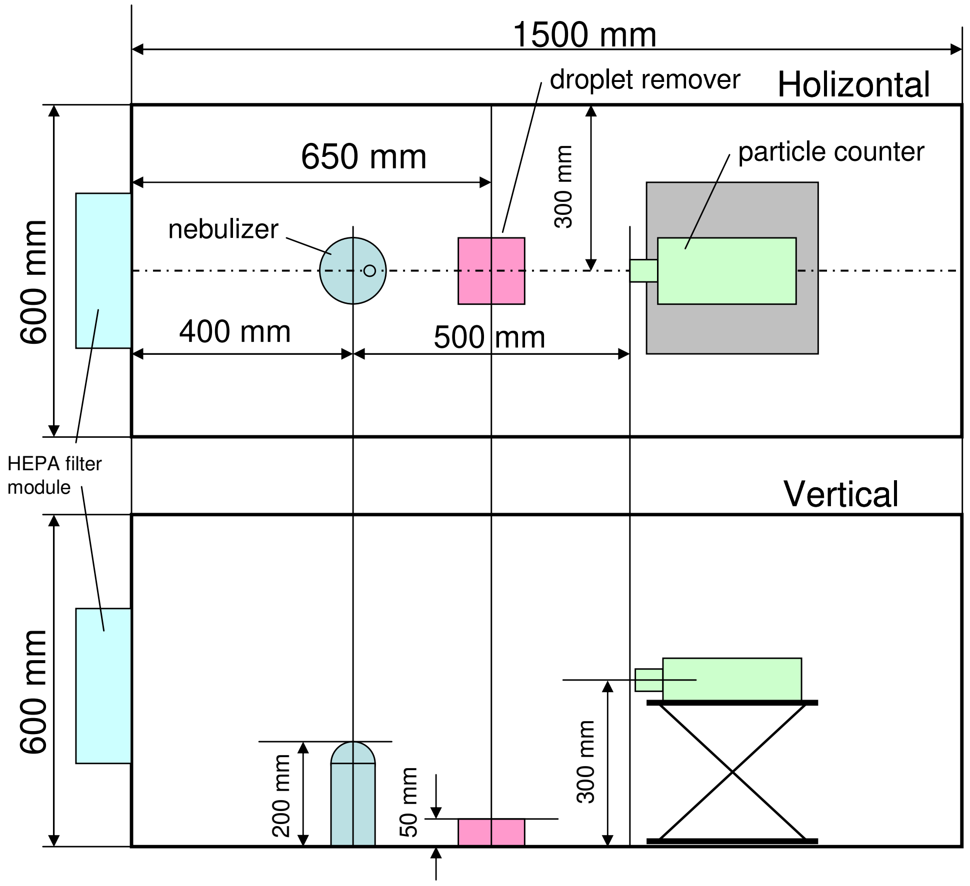


#10.5

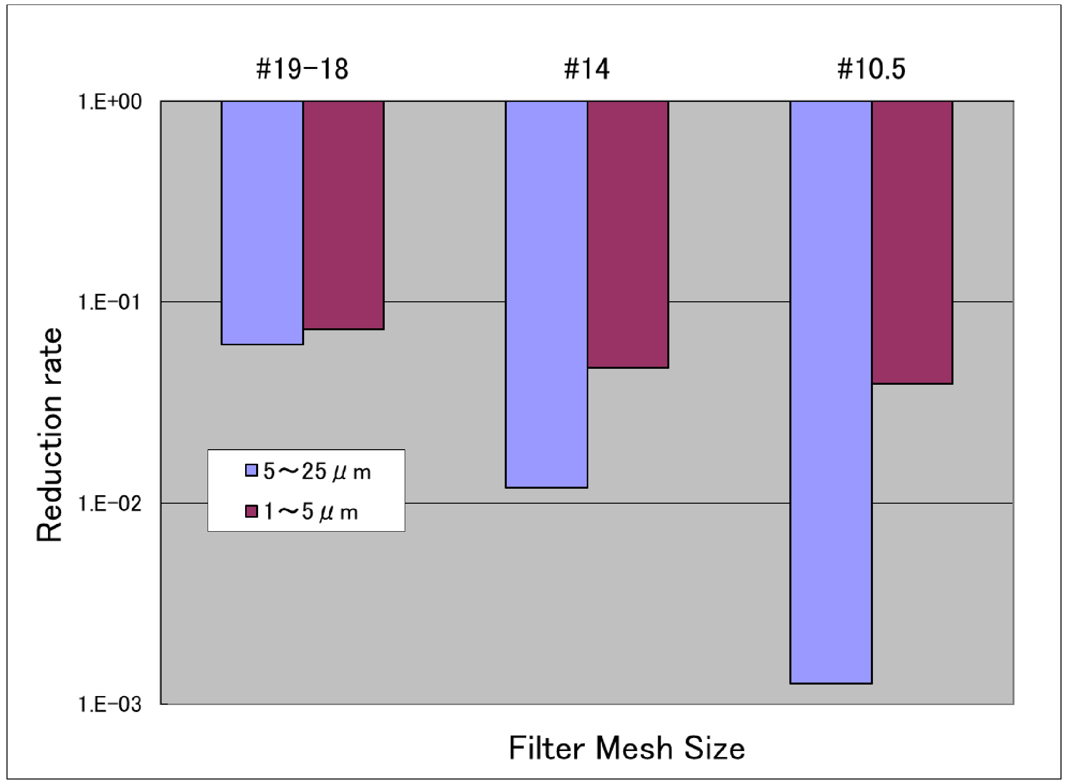
フィルターメッシュ径の違いによるフィルター透過率の変化



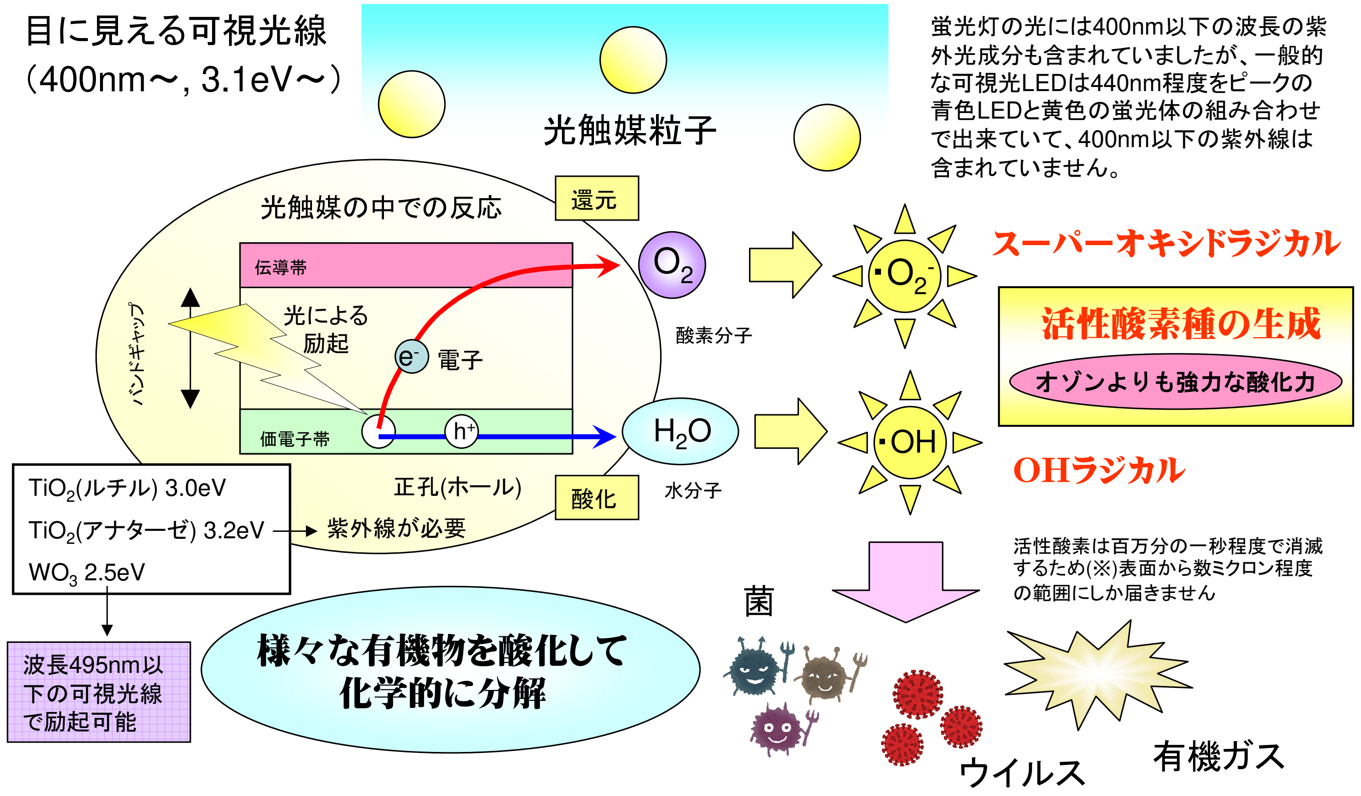
フィルターメッシュ径の違いによる飛沫除去性能の変化



フィルターメッシュ径の違いによる飛沫除去性能の変化



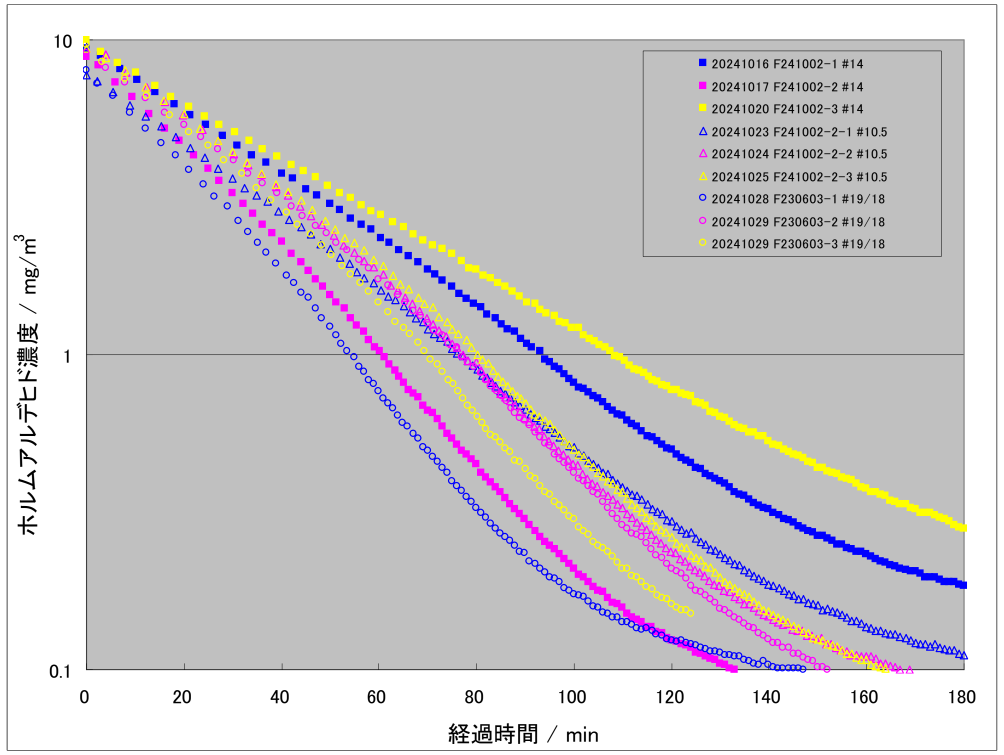
光触媒とは



最終的には水と二酸化炭素にまで分解される(完全分解)。

※ 一瞬で大量の有機物を分解するわけではありません

フィルターメッシュ径の違いによる有機ガス分解性能の変化



反応速度定数 / min

(40-100 minの直線区間でフィッティング)

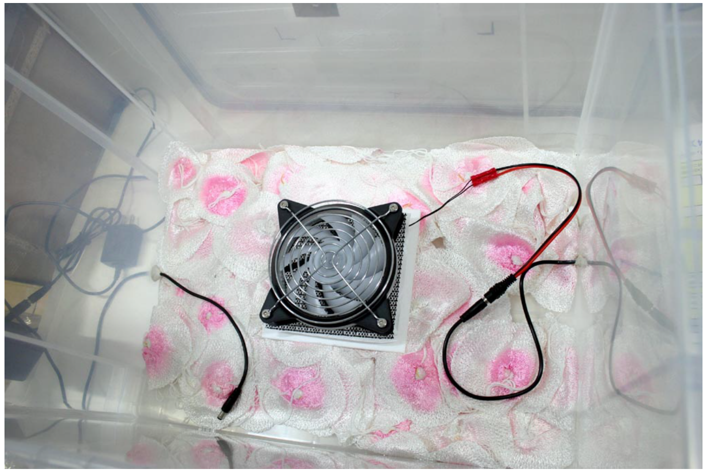
#14
0.0290 ± 0.0104

#10.5
0.0321 ± 0.0025

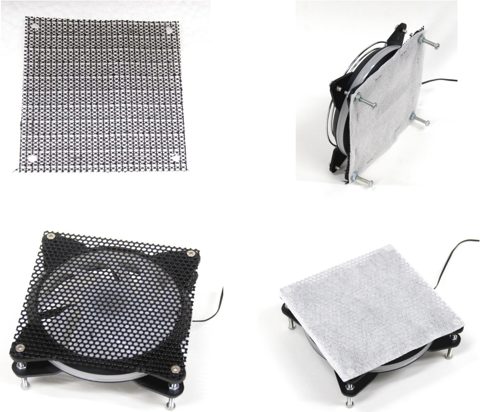
#19/18
0.0381 ± 0.0034

フィルターメッシュ径の違いで有機ガスの分解速度に大きな違いは見られなかった。

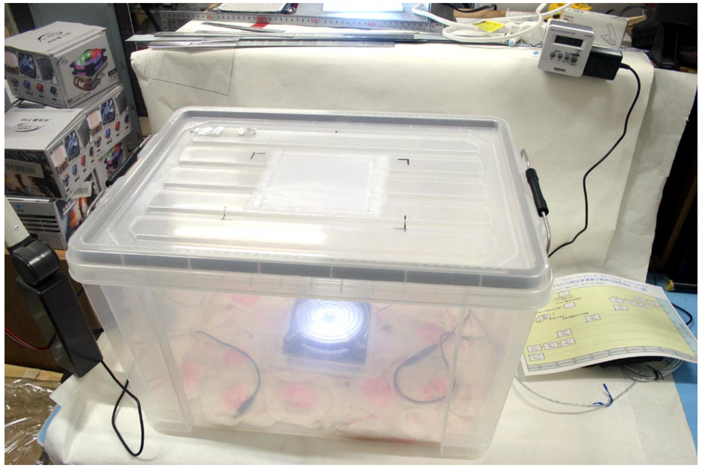
38L サイズのアクリルデシケーターを使用して、有機ガスの一種であるホルムアルデヒド(HCHO)濃度の変化をホルムアルデメータ htV-m を使用して測定した。



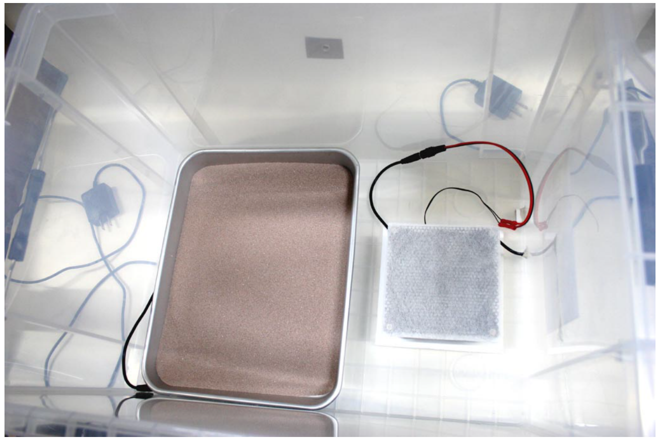
45L 密閉コンテナ中にトリウム含有マントルピースと、吸引用ファンユニット（12cm 角 1200rpm）を設置した状態。
（図中のファンユニットはフィルターを下面に取り付けている。）
ファンユニット下面には直接トリウム粉塵を巻き上げてしまわないように14cm角のスチレンボードを下に敷いている。



左上: ファンの下面で捕集を行う際にフィルターを保持するために使用したすべり止めメッシュ各辺2カ所ずつステープラーでフィルターを固定している。
右上: ファン下面にフィルターを装着した様子
左下: ファン上面にフィルターを設置して捕集を行う際にΦ2 パンチングメッシュをファン上面に装着した様子。
右下: パンチングメッシュ上面にフィルターを載せて捕集を行う状態。ファンは上面側から下面側へ風を送る状態になっている。

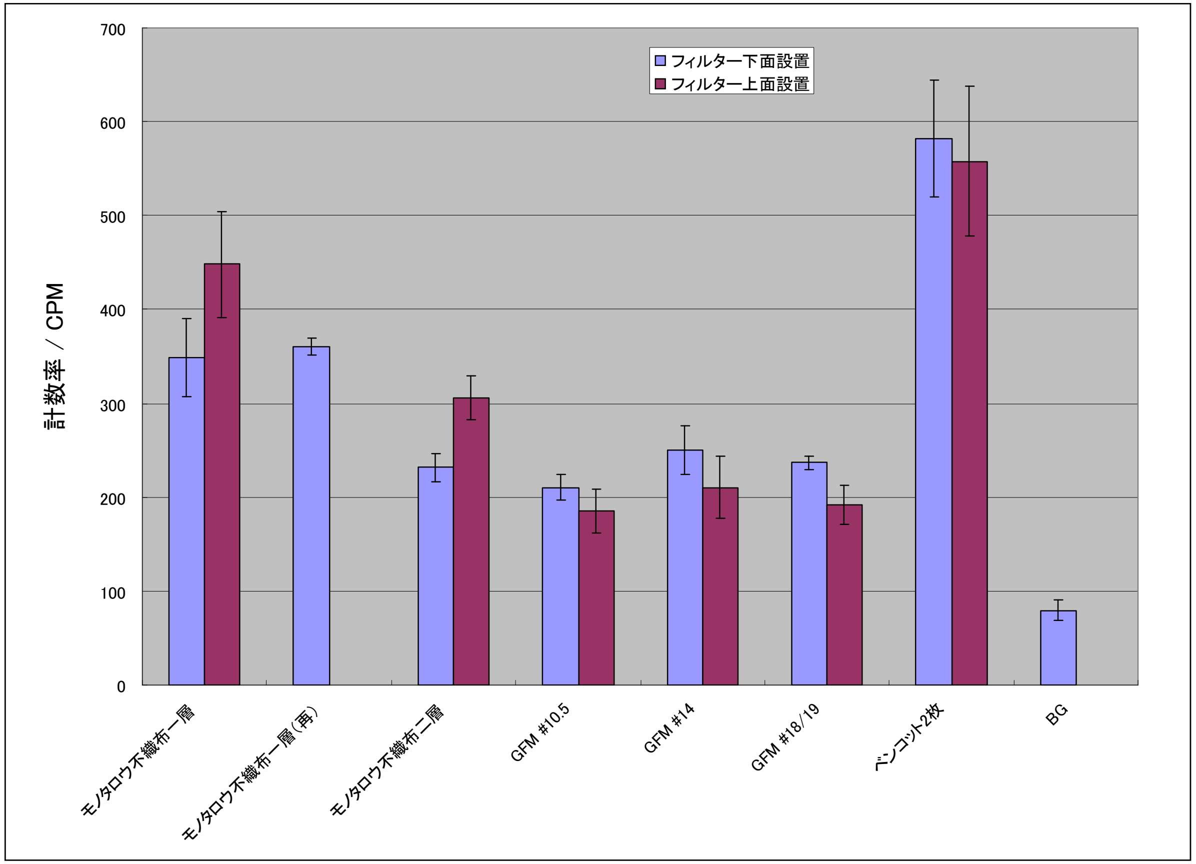


45L 密閉コンテナ中で Rn-220 娘核種を捕集している様子。
タイマーユニットにより一定時間の捕集を行っている。
捕集後直ちに Inspector USB GMサーベイメーターによりフィルターを四つ折りにした状態で、スケーラーモードによる 3分間の測定を 3回行った（各回で測定面を変えている）。測定時はバックスキャッタリングの影響を避けるために 2 cm 厚の発泡スチロール板の上で実施している。
一枚のフィルターの吸引が終了後、直ちに次のフィルターをファンユニットに取り付けて捕集を実施して、1条件で 3枚のフィルターの測定を行った。



比較的多くのトリウムを含む、ジルコンサンド 3 kg を用いて Rn-220 娘核種の捕集を試みている様子。設置後一週間程度経ってから捕集実験を実施しているが、30分間 ベンコット 2枚での捕集を試みたが BG レベル（実際には BG 以下の計数値）であった。

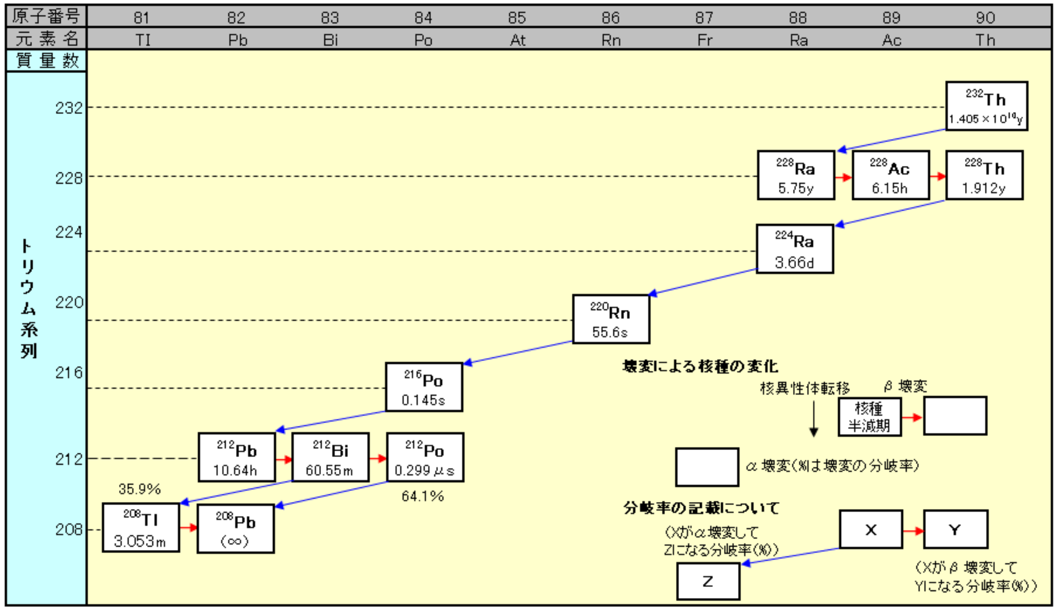
使用したランタンマントルピースとInspector USB GM サーベイメーター。
マントルピースは2枚重ね合わせた状態でベタ付けで約10,000 CPM（アロカ TGS-113）、0.3 μSv/h（アロカ TCS-172）。国内でスポーツ用品店などで販売されているマントルピースはほとんどの物がトリウム以外の希土類を用いた物に置き換えられているが、独自ルートでトリウム含有の製品の調達を行っている。
Inspector USB はΦ45 mm のパンケーキ型 GM 管を用いたサーベイメーターで、USB で PC と接続してのリアルタイムで連続的に計数率を記録、表示可能で、単体でもスケーラーモードでの測定が可能。現在は Ranger というシートボタンを用いた製品に換わっている。以前は8万円程度で入手できたが、円安などのため現在は 15万円程度する。



フィルターの違いおよびファンの上面側/下面側にフィルターを設置した際の、捕集された Rn-220 娘核種からの放射線量の違い。ファンの上面/下面へのフィルター設置は、吸引(Pull)/吹きつけ(Push)の違いに相当する。
モノタロウ 不織布は 0.5×2 mm 程度の大きな開口部を持っているが、二枚重ねることによりほぼ塞がれるため、圧損がかなり大きくなり捕集効率が下がっている。GFM(グラスファイバーメッシュ)は飛沫の捕集効率は十分であるが、空気中の埃のような担体が無く微細なエアロゾルとして浮遊している Rn-220 娘核種を捕集するには目が粗すぎて不十分であったと考えられる。
ベンコットは以前から「みんなのくらしと放射線展」での工作教室で霧箱用の線源捕集のために使用しており、高い捕集効率を示すことが経験的に分かっていたが、改めて他のフィルターと比べて高い捕集効率を示すことが明らかとなった。静電的な効果が影響している可能性もある。
ファンの上面/下面設置の違いについては、誤差の範囲でほぼ同等となった。小型飛沫除去装置として使用する場合には LED 光を当てる関係で下面設置が望ましく、Rn-220 娘核種捕集という観点ではより簡便にフィルター交換が可能な上面設置が望ましく、どちらの用途でも適した設置方法を選択すれば良いことになる。

30分間の吸引を繰り返すことによりチャンバー内の Rn-220 娘核種が枯渇してしまうことが懸念されたが、3回 30分の吸引を繰り返しても減少する傾向は見られず、モノタロウ不織布 1層での測定を最初に実施した後に不織布2層、GFM 3種類の測定、計15回の捕集を行った後に再度モノタロウ不織布1層で捕集を行ったが、最初に捕集を行った際とほぼ同一の値が得られている。Rn-220 自体は 半減期 55.6 s, その娘の Po-216 は半減期 0.145 s で、さらにその娘の Pb-212 で半減期 10.64 h となり、これが捕集されることでチャンバー内の放射能濃度が下がっても、Rn-220 は 親の Ra-224 の半減期が 3.66 d であるため放射平衡となっており、チャンバー内の放射能濃度はほぼ一定に保たれていると考えられる。

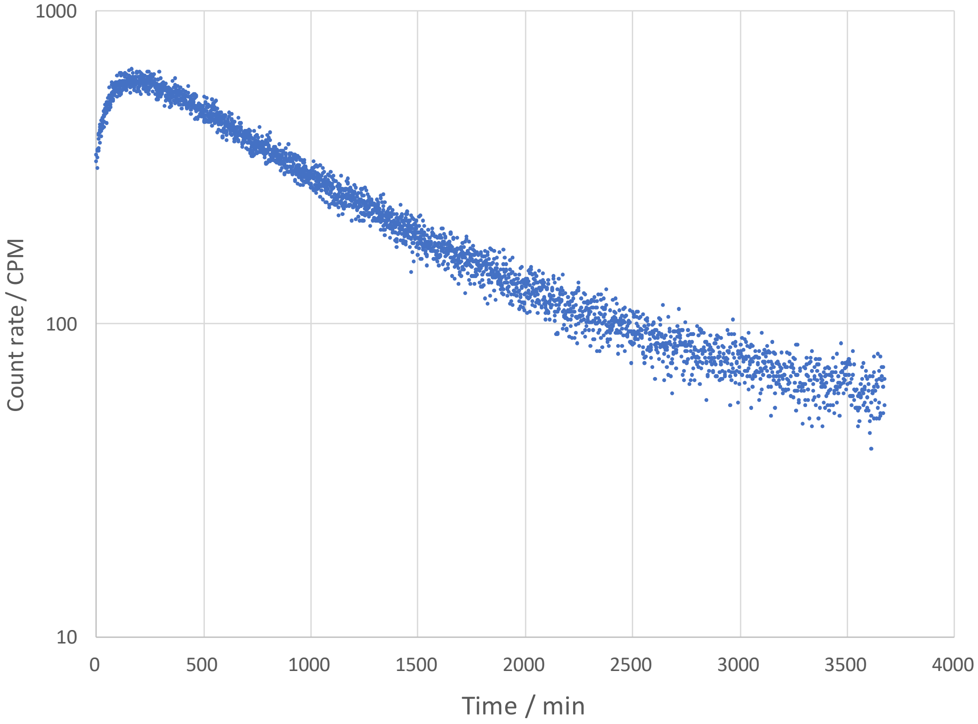
44 h 程度ベンコット2枚重ね(上面設置)で連続捕集を行い、29446 ± 1295 CPM のフィルターを得た(数え落としが懸念されるため、4つ折りでの測定では無くフラットに広げて測定したが、8751 ± 743 CPM と余り大きな差は無かった)。このフィルターから Pb-212/Bi-212 の抽出を試みた。
クエン酸 2 g を 60 ml の熱湯で溶かし、上記のベンコット試料を浸して超音波洗浄 5分で抽出を実施した。ベンコット試料を取り出した後に Φ90 mm ディスポシャーレに移して、シャーレの上からInspector で測定し、1754 ± 51 CPM という測定値を得た。検出器は Φ45 mm で面積 1/4、2π 測定なので検出効率 1/8 とすると、234 ± 7 Bq/ml 程度ということになる。予備実験で不織布を用いて一日程度捕集した場合の倍以上の濃度になったが、実空間での飛沫捕集率を評価するためにはさらにもう一桁程度濃度向上が望ましい。親の Th-232 の量にほぼ比例すると考えられるため、チャンバーに入れるマントルピースの量を10倍にすることで達成可能と考えられる。

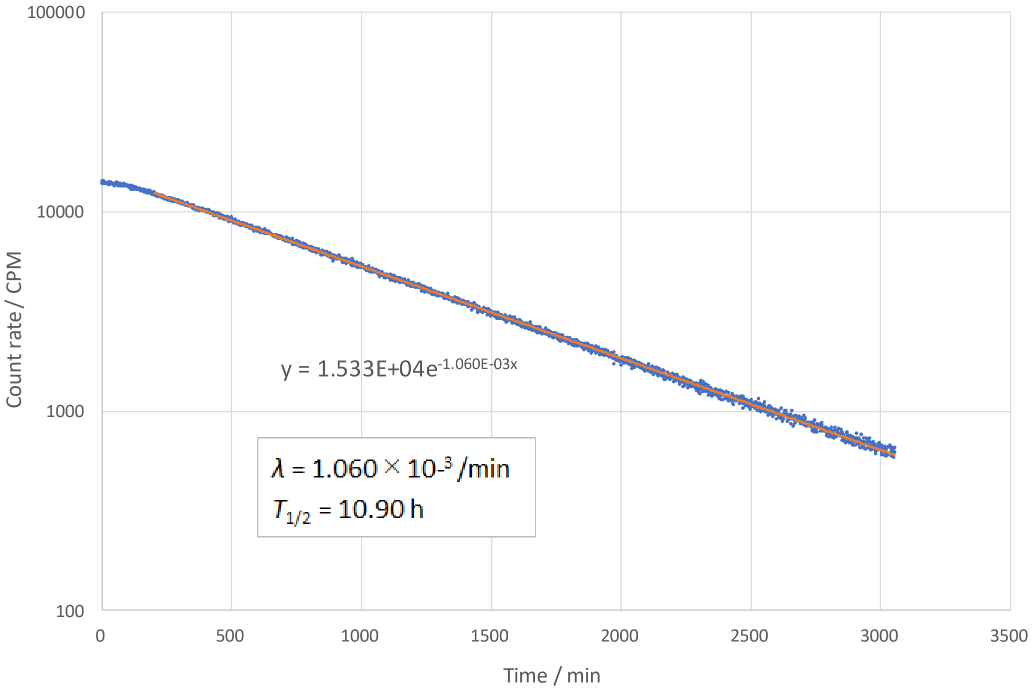


半減期の記号;s(秒), ms(10^{-3}秒), μs(10^{-6}秒), m(分), h(時), d(日), y(年)

図1-3　天然放射性核種の壊変系列図(トリウム系列)(3/4)

［出典］国立天文台(編):理科年表 2010年版、丸善(2009年10月)、p.468-469

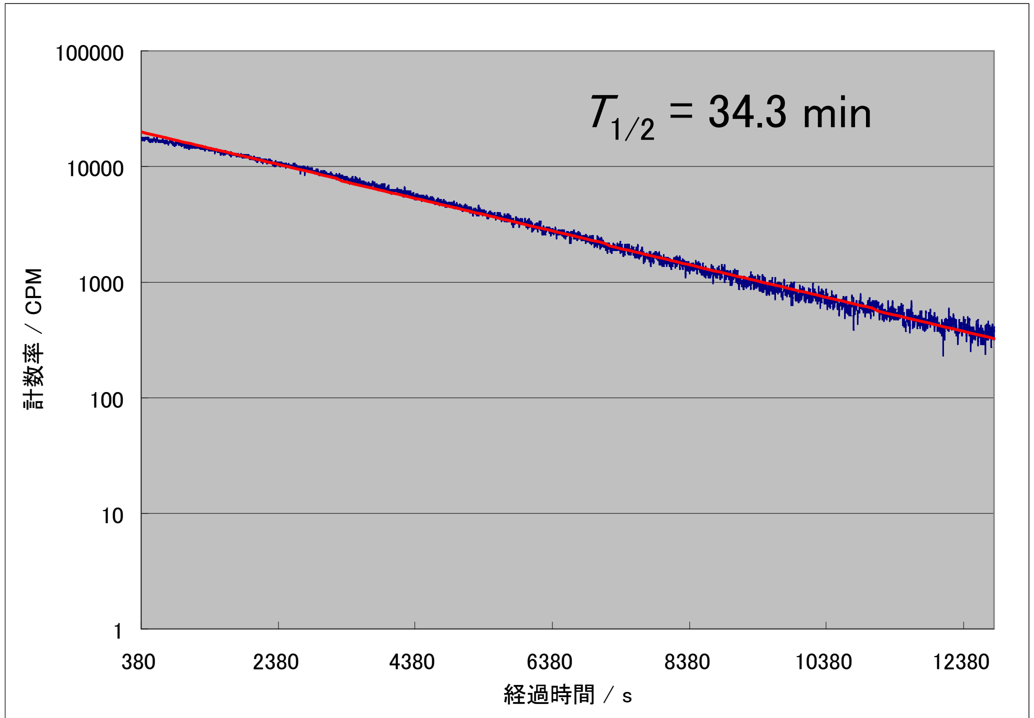




左上: トリウム系列の崩壊系列図。Rn-220 は半減期 55.6 s であり、すぐに崩壊して Pb-212(半減期 10.64 h)と Bi-212(半減期 1.01 h) が主な娘核種としてチャンバー内を浮遊していると考えられる。

右上: モノタロウ不織布1枚でファン下面で 30分捕集を行った後の計測値の経時変化。200分程度まで明確に計数値の増加が見られる。トリウム系列にはこのような挙動を示す核種は見られない。

左下: ベンコット2枚重ねをファン上面に設置し、16時間捕集を続けた後の計測値の経時変化。明確な計数値の上昇は見られないが、やはり 200分程度までそれ以降の減衰挙動とは異なる傾きを示している。200分以降のフィッティングでは、半減期は 10.9時間と求まり、ほぼ Pb-212 の半減期と等しくなった。



掃除機により捕集した空気中のラドン娘核種の崩壊挙動

ベンコットは以前から空気中の Rn-222 娘核種の捕集に用いており、高い捕集効率が知られていた。捕集場所の条件が良ければ、家庭用の掃除機の吸い口にベンコット(4つ折りのまま)を輪ゴムで縛り10分程度の吸引で、数万 CPM (インスペクターでの測定)を示す試料を作成可能。(半減期40分弱であるため、余り長時間吸引しても飽和してしまい意味は無い)
京都大学原子核工学専攻在籍時に学生実験でRI管理区域管理用の目の細かいろ紙を用いたエアサンプラーを使用して同様の捕集実験を行っていたが、爆音を立てて1時間程度捕集しても、60 Bq 程度しか捕集できなかったのと対照的である。
トータルの補修料は、捕集効率×流量となるため、余りにも目の細かいフィルターでは流量が小さくなり効率が低くなる。また、空気中の Rn-222 娘核種は空気中の粗大な埃に静電気により吸着しているため、余り細かなフィルターで無くても十分に捕集が可能。