

講座

トリチウム実験入門

How to Start Tritium Experiments

1. どんなどころに使われているの? トリチウム利用の現状と将来

1. Engineering and Scientific Applications of Tritium –Present and Future–

波多野雄治

HATANO Yuji

富山大学学術研究部理学系

(原稿受付: 2019年10月18日)

トリチウムは、将来の核融合炉の燃料として期待されるだけでなく、既に長寿命で安定した光源および電源において活用されており、またニュートリノの質量決定や中性子過剰核の生成、負ミュオン顕微鏡の構築など物理学の最先端分野で決定的な役割を果たしている。本章では工業的应用と最先端科学研究における活用の両面から、トリチウム利用の現状と将来展望について述べる。

Keywords:

tritium, radioluminescence, nuclear battery, neutron-rich nucleus, muon microscope

1.1 はじめに

本章ではトリチウム (^3H または T) が工業的に、また科学技術の発展のために、どのように役に立っているのかを紹介する。トリチウムという言葉自体はここ数年で国民の間に浸透したが、残念ながら福島第一原子力発電所汚染水問題によるものであり、負の側面のみが強調されている。しかしトリチウムは、核融合炉の燃料として将来世代にエネルギーを供給するのみならず、他の様々な面でも人類の発展に貢献する潜在能力を持っている。そのような活躍の一端に触れ、「トリチウムの研究をはじめよう」と思っただけだったら幸いである。なお、核融合・原子力関連のトリチウム技術については、既に本誌に多くの記事が掲載されているので、そちらをご覧ください。参考のため、2001年以降に掲載された講座と小特集を参考文献[1-5]に記載した。

表1にトリチウムの放射性同位元素としての特徴を示す。トリチウムは放射線としては極めて低エネルギーの β 線のみを放出する核種である。



$\bar{\nu}$ は反ニュートリノである。壊変で発生するエネルギーは β 線と反ニュートリノに分け与えられるので、 β 線は連続エネルギースペクトルを取り、その平均エネルギーは

5.7 keV, 最大エネルギー 18.6 keV である。この β 線の飛程(到達距離)は空気中で約6 mm, 水中で約6 μm と短く、食品用ラップフィルムなどで十分に遮へいできる。したがって、トリチウムがガラスや金属製の容器内に閉じ込められている限りは、放射線被ばくが生じることはない。そのため、比較的民生利用がしやすい放射性同位元素と言える。万が一トリチウムが漏洩して人体へ付着した場合も、 β 線は皮膚表面を覆う角層で遮へいされるため外部被ばく(体外被ばく)は問題とならず、吸入等で体内に取り込んだ場合の内部被ばくのみが問題となる。取り込まれたトリチウムは尿などとして排出され、体内のトリチウム濃度の半減期は水の状態(HTO)で約10日、有機物に結合した状態で約40日である[2]。すなわち、生物学的半減期は、物理学的半減期(12.3年)と比べてかなり短い。

表1 放射性同位体としてのトリチウム(T)の特徴。

β 線の最大エネルギー	18.6 keV
β 線の平均エネルギー	5.7 keV
空気中の飛程	約6 mm
水中での飛程	約6 μm
水中での平均到達距離	約500 nm
物理学的半減期	12.3年
生物学的半減期	トリチウム水 HTO: 約10日 有機物に結合した T: 約40日

本章ではまず、工業的応用例として放射線ルミネッセンスとトリチウム電池について紹介する。また、科学の最先端でのトリチウム利用の例として、中性子過剰核物理の研究、ニュートリノの質量の決定、負ミュオン顕微鏡の開発について述べる。

1.2 放射線ルミネッセンス

放射線のエネルギーで蛍光材を発光させると、外部電源を必要としない長寿命な光源が得られる。そこで、停電時でも確実に認識される必要がある建物や航空機内の避難誘導灯、暗所での長時間作業に使用される腕時計の針や文字盤などにトリチウム光源が使用されてきた。腕時計の例を図1 [6]に示す。光源の構造はいたって単純で、蛍光材を内壁に塗布したガラス管内にトリチウムガスを封入するだけである。表1に示すようにトリチウムの物理学的半減期は12.3年なので、放っておいても十年単位で光り続けるため、交換頻度が低くてすみ信頼性も高い。避難誘導灯における北米の基準は、一標識当たり925 GBq (25 Ci) のようである[7, 8]。また、トリチウムを用いた時計(図1)にはT25やT100等の表示が記載されていることがあるが、これらは25または100 mCi (925 MBq または 3.7 GBq) を示している[9]。インターネットで"tritium sign"や"tritium watch"で検索すれば、多くの市販品の広告や、関係機関からの廃棄手続きの案内などがヒットするので、一度試して欲しい。なお、トリチウムを使用した商品を購入する際は、含有量が法律で規制される値未満であることを、信頼できる販売店にて十分に確認する必要がある。

1.3 トリチウム電池

放射性同位元素を用いた電池は、充電しなくても長期間安定して発電できる電源として宇宙開発等で利用されてきた。従来は放射線のエネルギーで発生する熱をゼーベック素子で電力に変換する方式が用いられていたが、小型化が困難なため、放射線を半導体に入射させ、そのエネルギーを直接電力に変換する方式が開発された[10]。先述のように β 線の飛程が極端に短いトリチウムは、小型長寿命電池



図1 トリチウムによる放射線ルミネッセンスを利用した腕時計 (I, Autopilot, Swiss Military Watch Commander model with tritium-illuminated face, <https://en.wikipedia.org/wiki/Radioluminescence#/media/File:Tritium-watch.jpg>).

のエネルギー源としてうってつけである。

トリチウムを用いた電池は既にくつかのメーカーより市販されているようだが、ここでは仕様等が広く公開されている City Labs 社の製品を紹介する(図2 [11])。同社は20年以上交換不要な電池としてトリチウム電池を販売している。また、化学反応を伴わないので、 $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ という広い温度範囲で使用できるのも魅力である。

City Labs 社の製品の初期トリチウム含有量は、2 Ci (74 GBq) 未満または 100 Ci (3.7 TBq) 以下であり、後者における出力が0.125 mWである。3.7 TBqのトリチウムが放出するエネルギーが3.4 mWなので、エネルギー効率は3.7%と見積もられる。一方で、ある研究によるとスマートフォンは待機中でも68.6 mWを消費するとのことである[12]。この値と比べても、トリチウム電池で得られる出力は決して大きなものではない。低電力の長期間安定供給が求められるような用途や、化学電池では耐えられない過酷な条件での使用が想定される。例えば、コンピュータの電源を切った状態でも暗号化キーを長期間安全に保持する用途などが提案されている[11]。自動車や航空機、ロケット、人工衛星、橋梁やトンネルなど、高い安全性と長期信頼性が求められる乗り物やインフラ設備において、異常を感知するセンサーなどにも利用できるであろう。

今後、身体機能を補助するための小型インプラント装置や健康管理・治療のために体内で動作するナノロボットなどが発達するであろう。一般的に、装置が小さくなれば消費電力は減少する。将来、体内で働く超小型装置がトリチウムで駆動される時代が来るかもしれない。

1.4 中性子過剰核の物理

原子核物理を習った方は、核子1個あたりの結合エネルギーが質量数に対してプロットされたグラフをもとに、原子核は ^{56}Fe が一番安定であり、それより軽い水素などは核融合し、重いウランなどは核分裂する、と教わったことと思う。ならば、Feより重い元素は、どのようにして形成されたのだろうか? ビッグバンで形成された原子核の質量数は、最大でも7 (Li) までだったそうである[13]。恒星中の核融合反応で形成されるのはFeまでで、それより重い元素は、全く別のルートを通して合成される[13]。

その別ルートの一つが、中性子吸収に伴う中性子過剰核の形成と、その後の β 壊変である。 β 壊変では、原子核中の中性子が陽子に変換するために、原子番号が1つ増える。



図2 トリチウム電池の例 (City Labs 社[11])。



ここで Z は原子番号, A は質量数で, X と Y は元素記号を表している. この反応で生成された Y がさらに中性子を吸収して中性子過剰核となり, 再度 β 壊変すると, 原子番号は $Z+2$ に増え, さらに反応が繰り返されると, どんどん高原子番号の元素が生成されていく. このような過程が赤色巨星の中や, 超新星爆発ならびに中性子星同士の合体等の間に生じ, 重たい元素ができたと考えられているが [13], 詳細はわかっていない.

このように重元素生成の過程で重要な役割を担う中性子過剰核の特性を詳細に調べるには, 中性子過剰核を実験室で生成する必要がある. その手段の一つが, 中性子数:陽子数が 2:1 という著しい中性子過剰状態にあるトリチウムとの核反応である. 例えば, Wimmer ら [14] は ${}^{30}\text{Mg}$ のビームを, 公称濃度 $[T]/[Ti]=1.5$ までトリチウムを添加したチタン標的に照射し, ${}^{32}\text{Mg}$ を生成すると共に, エネルギー状態の分析に成功している. マグネシウムの天然同位体は ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{25}\text{Mg}$, ${}^{26}\text{Mg}$ なので, これらと比較し ${}^{32}\text{Mg}$ がいかに中性子過剰の状態にあるかがわかる. 今後, このようなトリチウム標的の利用により中性子過剰核の物理が詳細に理解され, 重元素生成の謎が解けることが期待される.

究極の中性子過剰核として, 中性子のみから構成される原子核の探索も行われている. Kisamori ら [15] は, 理化学研究所仁科加速器研究センターの RI ビームファクトリーにて ${}^8\text{He}$ ビームを液体 ${}^4\text{He}$ 標的に照射し, 4 個の中性子のみからなる原子核の共鳴状態「テトラ中性子共鳴」の候補を発見した. この成果は中性子星の構造解明などにつながるとして注目されている. 一方, 東北大学, 理化学研究所仁科加速器研究センターを中心とするグループは, ${}^3\text{H}({}^3\text{H}, {}^3\text{He}){}^3\text{n}$ 反応により三中性子状態が形成される可能性があると考え, トリチウムを高濃度に含有するチタン標的にトリチウムビームを照射する実験の準備を進めている [16, 17]. 新たな多中性子系の発見が期待される. これらの分野の発展に貢献すべく, 著者が管理・運営に携わっている富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センターでは東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センターおよび東北大学大学院理学研究科との共同研究のもと, 理化学研究所 RI ビームファクトリーで使用可能なトリチウム含有チタン薄膜標的の開発に取り組んでいる.

1.5 ニュートリノの質量の決定

ニュートリノに質量があることはノーベル物理学賞に輝いた梶田らの研究 [18] によりわかっているが, それが何 kg なのかを決定するには至っていない. ドイツのカールスルーエ工大では, トリチウムの β 壊変を利用してニュートリノの質量を決めるための KArlsruhe TRitium Neutrino (KATRIN) experiment (以下, KATRIN 実験) が進められている [19]. トリチウムの壊変は式 (1) で表される. 最大エネルギーは 18.6 keV と上述したが, より高精度に最大エネルギーを求めることでニュートリノの質量を決定しようとしている. 図 3 にその原理を示す. β 壊変で生じたエ

ネルギーの一部がニュートリノの質量に転換されていれば, その分, β 線の最大エネルギーが減少するという原理に基づいている.

詳細は [19] に譲るが, T_2 ガスの状態のトリチウムから放出された β 線を超伝導マグネットで差動排気された真空チャンバー内を輸送し, 巨大なエネルギー分析器へと誘導する. 既に T_2 ガスを用いた実験が開始されており, ニュートリノの質量が少なくとも 1.1 eV 以下であることがわかった [19]. 今後, より測定精度が向上し, ニュートリノの質量が決定されることが期待される. 富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センターはカールスルーエ工大と学術協定を締結し, KATRIN 装置内のトリチウム分圧測定技術の開発に協力している.

1.6 走査負ミュオン顕微鏡

本節のテーマはミュオン触媒核融合を応用することで従来の負ミュオンビームの収束性を飛躍的に高めた「走査負ミュオン顕微鏡」である. ミュオンは素粒子の一種であり, ± 1 の電荷と約 $2 \mu\text{s}$ の寿命を持つ. その質量は電子の約 200 倍であり, 負電荷のミュオン (負ミュオン) は物質中で「重い電子」のように振る舞う [20]. ミュオンが原子核を取り巻く「ミュオン原子」におけるミュオンの軌道半径は電子の約 $1/200$, 束縛エネルギーは約 200 倍となる. 束縛エネルギーが電子の 200 倍ということは, エネルギーが高い準位から低い準位へミュオンが遷移する際に放出される特性 X 線のエネルギーも電子と比べ 200 倍高いことを意味する. ミュオンを物質に照射し, 放出されるミュオン由来の特性 X 線のエネルギー分布を計測すれば, 元素分析に用いることができる. 電子線や X 線を用いた従来の元素分析手法と比較すると, その分析感度は数桁以上と圧倒的に高い. これはミュオンが原子に捕獲される時, 必ず 1 個以上の特性 X 線光子を放出すること, また同じ原子であれば 200 倍高いエネルギーの X 線を出すことによる. 特性 X 線が高エネルギーなため, 電子励起では計測が難しい軽元素からの X 線や, 試料深部で発生したのもでも十分に検出できる. エネルギーの高いミュオンを用いれば, 物質中かなりの深さまで注入でき, その深さもミュオンのエネルギーで調整できる. 大強度陽子加速器施設 J-PARC のミュオンビームラインでは, 炭素の場合 6 cm 程度の深さまで注

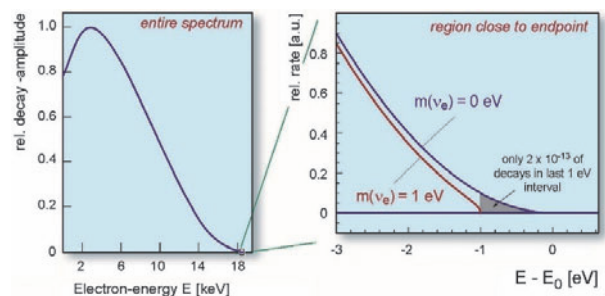


図 3 トリチウムからの β 線のエネルギー分布とエンドポイントの拡大図 [19]. 2 本の線はニュートリノの質量をエネルギー換算で 0 eV および 1.0 eV としたときのスペクトルである.

<https://www.katrin.kit.edu/79.php#gallery-2>

入できる。即ち、空気中や容器内に置いた試料内部の非破壊元素分析が可能である。J-PARC ではミュオンのこのような特性を活かし、「はやぶさ2」が小惑星から持ち帰る試料の組成を、地球上物質によるコンタミを防ぐための容器に入れたまま分析することなどを計画している[20]。

このように優れた特性を有するミュオンビームであるが、現時点では、まだ収束性に改善の余地がある。三宅ら[21]はこの課題の克服ため、ミュオン触媒 DT 核融合反応を用いることを提案している[21]。

ミュオン触媒 DT 核融合反応は、水素同位体と結合したミュオンが引き起こす特異な現象である。重水素 (D) とトリチウムよりなる核融合燃料中にミュオンが入射すると、ミュオンを伴う重水素原子とトリチウム原子が分子を構成し、電子を伴う通常の DT 分子と比べて原子核同士の距離が極端に近くなり、核融合が起こる。ミュオンから見ると核融合反応により D と T は消失し、残ったミュオンは他の D, T を捕らえ、再びミュオン分子を生成、核融合反応を誘発し続ける。この一連の反応はミュオン触媒核融合と呼ばれる。ミュオン触媒 DT 核融合反応が生じると、高エネルギーの中性子 (14 MeV) とヘリウム原子核 (3.5 MeV) が生成される。このとき、反応前に重水素原子およびトリチウム原子内に束縛されていた負ミュオンが、数 keV 程度の比較的揃った運動エネルギーを持って遊離する。この単一エネルギーに近い低速負ミュオンを再加速することで、集束性が高いビームが得られる[21]。

負ミュオンを収束させ、試料上を走査し、特性 X 線のエネルギーを分析すれば、試料上の元素分布が極めて高い感度で画像化される。また、エネルギーを変化させることにより、深さ方向の分解能も得られ、試料内の 3 次元的な元素分布が取得される。これが走査負ミュオン顕微鏡の原理である。試料の元素組成分布も分析できる顕微鏡として、電子顕微鏡 (走査電子顕微鏡や走査透過電子顕微鏡) が広く利用されているが、走査負ミュオン顕微鏡はリチウムを含む軽元素から重い元素まで圧倒的に高い感度を持っており、軽元素より構成される生物系試料などの電子線照射に弱い試料であっても非破壊的に分析できる。さらに、ミュオン特性 X 線分析の特徴として、元素のみならず同位体組成比や元素のおかれた化学結合の状態までもが分析でき、走査負ミュオン顕微鏡はそれらの情報を 3 次元的に可視化する。

このようにトリチウムは、負ミュオンを用いた微小部の非破壊元素分析技術実現の立役者としても期待されている。

1.7 まとめ

以上のようにトリチウムは、将来の核融合炉の燃料として期待されるだけでなく、既に長寿命で安定した光源および電源において活用されており、またニュートリノの質量決定や中性子過剰核の生成、負ミュオン顕微鏡の構築など物理学の最先端分野で決定的な役割を果たしている。もし読者の中からトリチウムを用いた新たな研究テーマの提案があれば、望外の喜びである。著者はトリチウム実験室

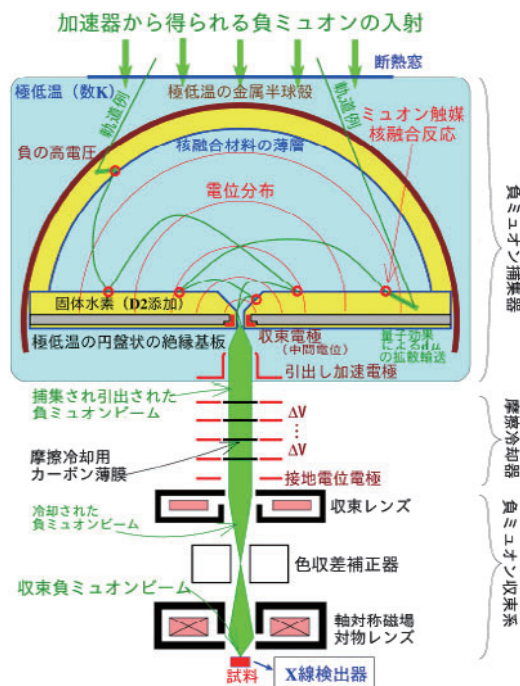


図4 トリチウムと重水素のミュオン触媒核融合で生成される低速ミュオンを用いたミュオン顕微鏡の概念図。
https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/planned-research/c02/index.html

を管理・運営する立場にあるが、安全の確保に努めつつ、今後は一層多様な研究ニーズに対応できるよう体制・設備を整えていきたいと考えている。

謝辞

本章を執筆するにあたり、高エネルギー加速器研究機構の三宅康博 博士、河村成肇 博士、東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センターの今井伸明 博士のご助言をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] 山本一良 他：プラズマ・核融合学会誌 92, 14 (2016).
- [2] 田内 広 他：プラズマ・核融合学会誌 88, 119 (2012).
- [3] 奥野健二 他：プラズマ・核融合学会誌 85, 2 (2009).
- [4] 百島則幸 他：プラズマ・核融合学会誌 85, 421 (2009).
- [5] 西 正孝：プラズマ・核融合学会誌 78, 1294 (2002).
- [6] I. Autopilot, Swiss Military Watch Commander model with tritium-illuminated face, <https://en.wikipedia.org/wiki/Radioluminescence#/media/File:Tritium-watch.jpg>
- [7] New Jersey Department of Environmental Protection, https://www.state.nj.us/dep/rpp/rms/agreedown/tritium_exit.pdf
- [8] Government of Canada, <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2000-207/page-3.html>
- [9] <https://www.nitewatches.com/us/blog/t100-vs-t25.html>
- [10] M.A. Prelas *et al.*, Prog. Nucl. Energy, 75, 117 (2014).
- [11] <https://citylabs.net/>
- [12] A. Carroll and G. Heiser, An analysis of power consumption in a smartphone, Proceedings of the 2010 USENIX

- conference, 21, 2010, https://www.usenix.org/legacy/event/atc10/tech/full_papers/Carroll.pdf
- [13] 小浦寛之：化学と教育 65, 108 (2017).
- [14] K. Wimmer *et al.*, Phys. Rev. Lett. 105, 252501 (2010).
- [15] K. Kisamori *et al.*, Phys. Rev. Lett. 116, 052501 (2016).
- [16] 酒井大輔 他：日本物理学会第73回年次大会概要集, 23 pPSA-7, 2018.
- [17] 宇津城雄大 他：日本物理学会2019年秋季大会概要集, 19pS31-8, 2019.
- [18] <http://www-rccn.icrr.u-tokyo.ac.jp/kajita/ILLUME-32-Kajita-reduced.pdf>
- [19] <https://www.katrin.kit.edu/>
- [20] 寺田健太郎：Isotope News 730, 2 (2015).
- [21] https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_Quantum-Beam/planned-research/c02/index.html



は た の ゆ う じ
波 多 野 雄 治

組織の変更で富山大学学術研究部理学領域所属になりましたが、これまでと同様に研究推進機構水素同位体科学研究センターで材料中の水素同位体挙動、トリチウム計測、放射線効果等に関する教育・研究に従事しています。センターの一般共同研究の枠組みで、新たなトリチウム利用等に関する共同研究を実施しています。ご興味のある方は、ホームページをご覧ください。

http://www.hrc.u-toyama.ac.jp/jp/joint_research/