

MEASUREMENT OF RADIOACTIVITY OF LINAC COOLING WATER AT NIHON UNIVERSITY

Manabu Inagaki^{1,A)}, Isamu Sato^{A)}, Ken Hayakawa^{B)}, Toshinari Tanaka^{B)}, Yasushi Hayakawa^{B)},
Takeshi Sakai^{A)}, Kyoko Nogami^{B)}, Ken'ichiro Ishiwata^{2,C)}, Keisuke Nakao^{C)}

^{A)} Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University,

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501

^{B)} Institute of Quantum Science, Nihon University,

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501

^{C)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University,

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501

Abstract

Radioactivity of the cooling water circulating the 125-MeV linac in operation has been measured at LEBRA in Nihon University in terms of positron annihilation γ -rays resulted from β^+ decays of ^{15}O nuclei. The dose equivalent at 10 cm from the surface of the reservoir tank in the precise water temperature controller has been deduced to be higher than the limit allowed by the radiation hazard protection law. Currently the controller is placed in the accelerator room, which is not good taking account of radiation damage and daily maintenance. However, the result suggests that a necessary measure must be taken to lower the dose when the controller is moved to the modulator room.

日大リニアック冷却水の放射化測定

1. はじめに

電子加速器では加速エネルギーが約10 MeV以上になると放射化の問題が生じる。電子リニアックの場合、電子衝撃で発生する制動放射線が原因となり、加速管などが放射化する。また空気や冷却水の放射化が起き、 ^{15}O 、 ^{13}N 、 ^{11}C 原子核などの短寿命核種が生成される^[1]。

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では、125 MeVの電子リニアックを利用して、ユーザー実験に自由電子レーザー(FEL)やパラメトリックX線放射(PXR)を提供している^[2]。LEBRAでは、精密温調装置を用いて加速管冷却水の温度を 30 ± 0.1 °Cに保つよう制御している。現在、精密温調装置は常時立ち入ることができない放射線管理区域の本体室にあるので、この装置を隣接する常時立ち入ることができる放射線管理区域のモジュレーター室に移動させ、精密温調装置のメンテナンスを容易にすることを検討している。また冷却装置が水漏れを起こした場合に近くにあるGun Terminalへの影響、冷却装置のコントロール回路が放射線によって劣化する恐れ、冷却装置前の通路の確保といった設置場所の問題がこれにより解決できる。冷却水の放射化の量によってはそのままでは移動することは不可能だが、対策を施すことによって可能になると考えられる。このためには、LEBRAにおける冷却水の放射化を測定す

る必要がある。LEBRAの加速管冷却水は、イオン交換樹脂とフィルターを介しているため高純度である。そこで冷却水中には不純物が無いものと考え、 ^{16}O 原子核の光核反応のみを考えた。光核反応の種類としては、 (γ, n) 、 (γ, p) 、 $(\gamma, 2n)$ 、 (γ, np) 、 (γ, d) 、 (γ, t) 、 $(\gamma, 2p)$ 、 $(\gamma, ^3\text{He})$ 、 (γ, α) などがある。この各光核反応により生成される放射性核種は、 ^{14}C 、 ^{15}C 、 ^{13}N 、 ^{14}O 、 ^{15}O 原子核であり、 γ 線放射が問題となるものは β^+ 崩壊する ^{13}N 、 ^{14}O 、 ^{15}O 原子核である。このうち ^{13}N と ^{14}O 原子核は、生成のしきい値がそれぞれ25 MeVと28.9 MeVである^[3]。また ^{15}O 原子核は、 (γ, n) 反応により生成され、しきい値は15.7 MeVである^[3]。しきい値と反応断面積の考察から ^{13}N や ^{14}O 原子核よりも ^{15}O 原子核が多く生成されると考えられる。このため本研究では、冷却水中に生成された ^{15}O 原子核の崩壊量を測定して検討を行った。

2. 放射線測定の原理と測定結果

2.1 測定の原理

^{15}O 原子核は99.9 % β^+ 崩壊により半減期122 秒で ^{15}N 原子核の基底状態へ崩壊する。したがって、 ^{15}N 原子核の励起状態から基底状態への遷移 γ 線は存在しない。また、残りの0.1 %はEC (軌道電子捕獲)でやはり基底状態へ崩壊する。 ^{15}O 原子核の β^+ 崩壊に

¹ E-mail: inagaki@lebra.nihon-u.ac.jp

² 現在の所属：日本大学文理学部

より発生した β^+ 粒子は、物質中でエネルギーを失い静止状態になると電子とともに対消滅を起こし、その際に、互いに反対の方向に0.511 MeVの対消滅 γ 線を放射する^[4]。そこで本研究では、精密温調装置のリザーバータンクの冷却水の一部を本体室に隣接するモジュレーター室までシンフレックスチューブを用いて運び、図1のように半径約17.5 cmの輪を18巻して循環させている冷却水中からの対消滅 γ 線を高純度Ge検出器を用いて計測することにした。冷却水流量はバルブの調整で10 ℓ/minに設定した。

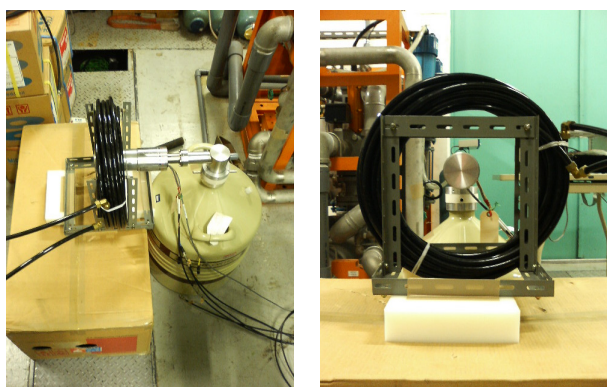


図1 冷却水中の対消滅 γ 線を測定する高純度Ge検出器。

2.2 高純度Ge検出器の検出効率の測定

^{15}O 原子核の崩壊量を測定するために、実際に計測を行った幾何学的条件において、使用した検出器の0.511 MeV γ 線に対する検出効率の導出が必要となる。ここでの検出効率は、原子核の崩壊に伴い発生する γ 線の総量に対する検出器に入射し光電ピークとして計数された γ 線の数の比である。各放射性核種からの様々なエネルギーの γ 線に対する検出効率を γ 線量が既知のMix線源を用い、線源と検出器間の距離17.5 cmの位置に設置し求めた結果、0.511 MeV γ 線の検出効率は、 $1.68 \pm 0.02 \times 10^{-3}$ となった。

2.3 冷却水中の ^{15}O 原子核崩壊の検出

冷却水中に存在する ^{15}O 原子核の崩壊が、正確に測定できているかを0.511 MeV γ 線量の減衰曲線を測定して確認を行った結果を図2に示す。

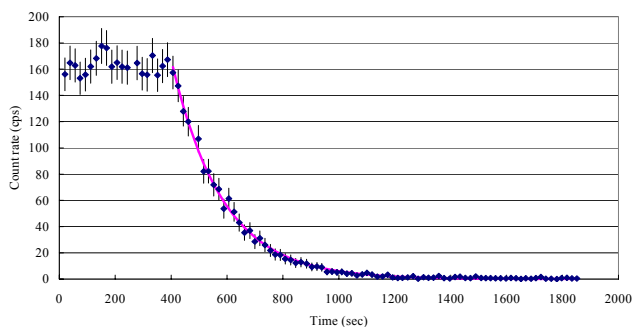


図2 0.511 MeV γ 線量。

図2は電子線を100 MeVまで加速している状態からビームを止め、 γ 線エネルギー0.511 MeVの光電ピークスpekトル周辺のカウント数を計測した減衰曲線である。 t を測定の経過時間、 y をその時間におけるCount rateとすると、この曲線は $y = Ae^{-\lambda t}$ で近似でき、このとき $A = 1.53 \pm 0.06 \times 10^3$ (cps)、 $\lambda = 5.53 \pm 0.25 \times 10^{-3}$ となった。近似曲線とその誤差については、最小二乗法を適用した。この近似曲線から半減期 T は $T = 125 \pm 5.7$ 秒となった。 ^{15}O 原子核の半減期は122秒であるから、測定された半減期とほぼ一致している。すなわち、加速管冷却水中から検出された0.511 MeV γ 線は冷却水の放射化によって生じた ^{15}O 原子核の β^+ 崩壊に伴う対消滅 γ 線と同定できる。

2.4 各電子線エネルギーに対する計数率の測定結果

冷却水中に存在する ^{15}O 原子核の生成量と崩壊数が平衡状態になったときの計数率と、各電子線エネルギー(60,70,80,90,100 MeV)との相関を調べた。ただし同実験を2回、別日程で行ったので①、②と区別する。加速管出口における各電子線エネルギーでのビームパワーを図3、図4に示す。ここでビームパワーとは、ピークビーム電流と電子線エネルギーとの積である。このときのビームパルス幅は20 μs 、繰り返し2 Hzであった。

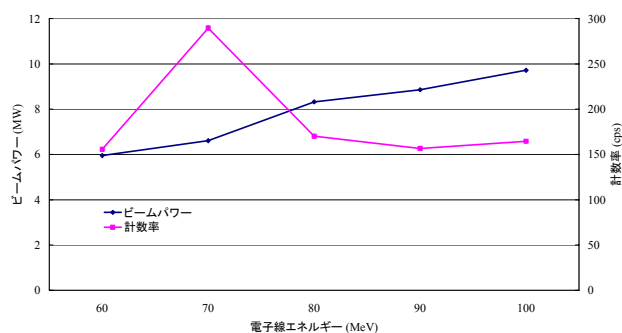


図3 各電子線エネルギーにおけるビームパワーと0.511 MeV γ 線光電ピークの計数率。

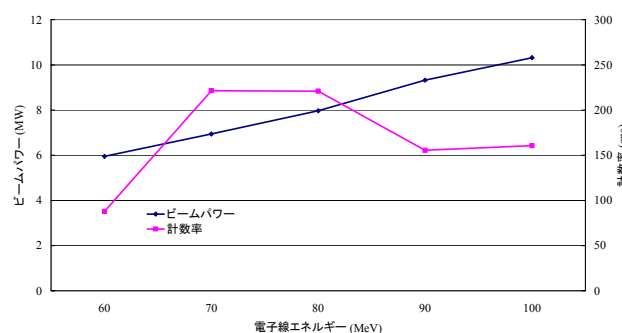


図4 各電子線エネルギーにおけるビームパワーと0.511 MeV γ 線光電ピークの計数率。

加速管出口における電流値は電子線エネルギーに依存せず、ほぼ同じ値であるから、ビームパワーは電

子線エネルギーにほぼ比例して増加していることがわかる。また各電子線エネルギーで¹⁵O原子核の生成率を計測し、生成量と崩壊数の平衡時における計数率は図3、図4および表1のように得られた。

表1 各電子線エネルギーにおける0.511 MeV γ 線光電ピークの計数率。

エネルギー	計数率 (cps) ①	計数率 (cps) ②
60 MeV	155.6 $\pm$ 1.7	87.9 $\pm$ 1.3
70 MeV	289.5 $\pm$ 2.4	221.5 $\pm$ 2.0
80 MeV	170.2 $\pm$ 1.8	220.9 $\pm$ 2.0
90 MeV	156.7 $\pm$ 1.7	155.5 $\pm$ 1.6
100 MeV	164.5 $\pm$ 1.7	160.6 $\pm$ 1.7

電子線エネルギーが高ければ γ 線エネルギー0.511 MeVの光電ピークスペクトルのカウント数も多いと推測していたが、図3、図4および表1からわかるようにその推測とは異なった結果が得られた。このような¹⁵O原子核生成量の違いは、加速器運転における電子ビーム調整の仕方の違いによる損失ビームの電流およびエネルギーの違いが反映していると考えられる。

3. 議論

計測した計数率を元に冷却水のタンク全体で発生する0.511 MeV γ 線による実効線量を推定し、精密温調装置の移動が可能であることを表1より一番高い計数率の値289.5 cpsを使って議論する。¹⁵O原子核は、1回の崩壊で逆方向に2個の光子を放出するので正しい崩壊数 A_t (Bq)は検出した計数率の1/2となる。対消滅 γ 線はチューブ内の冷却水中で減衰するため、その外に出ない γ 線があることを考慮する必要がある。チューブは同心状に巻かれ、検出器がその中心にあることから、チューブ1巻当りから検出器に向かう γ 線量を一定(A_s)とすると、 i 巻目のチューブからの γ 線が通過する水中の距離を t_i として i 巻目からの γ 線量は $A_{is} = A_s e^{-\mu t_i}$ と近似できるので、チューブ全体では $A'_s = A_s \sum e^{-\mu t_i}$ となる。従って、 $A_s = A'_s / \sum e^{-\mu t_i}$ となる。 A'_s は測定から求められるので、この減衰の補正により A_s が求まる。次に単位 cm^3 当りの放射能 A_c (Bq/ cm^3)に換算し、タンクの体積を掛けるとタンク全体の放射能 A_R (Bq)になる。対消滅 γ 線はタンク内の冷却水中で減衰する。タンクを N ブロックに分割し、1ブロック当りの放射能 $A_b = A_R/N$ (MBq)を算出する。次に各ブロックの水中での γ 線の飛行距離 l を考慮した放射能は $A_b' = A_b \times B \times e^{-\mu l}$ (MBq)となる。ここで B はコンプトン散乱によってエネルギーの低くなった散乱線の一部が入射 γ 線に加わるための補正係数(ビルドアップ係数)である。これから各ブロックの放射能 A_b' を実効線量 I_b に換算する。ただし実効線量率定数 Γ を0.144 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)とした。よって各ブロックの中心からタンクの中心軸上でタンク側面から任意の距離を R と

すると、 $I_b = 0.144 \times A_b' / R^2$ ($\mu\text{Sv/h}$)となり各ブロックに対して実効線量が求められたので、全てのブロックについて和をとりタンク全体の実効線量は、 $I = \sum I_b$ ($\mu\text{Sv/h}$)と求まる。以上の計算を行うと、タンクからの距離10 cmの位置でのタンク全体の γ 線の実効線量は $I = 5.07 \pm 0.03$ ($\mu\text{Sv/h}$)となる。法令的制限から、週40時間の加速器運転で実効線量が1 (mSv/週)以下でないと、本体室から出すことができない。LEBRAでは許可申請において、電子線のパルス繰り返し数を12.5 Hzで申請しているが、測定では繰り返し数2 Hzで行った。このため実効線量の値に、繰り返し数6.25倍と週40時間を掛け、実効線量の値を換算すると、 $I = 1.27$ (mSv/週)となった。以上のことから精密温調装置を本体室からモジュレーター室に移動することは、対策なしでは不可能である。1つの対策としては、タンクの容量を大きくすれば冷却水中での減衰を利用して減少させることができると考えられる。

4. まとめ

冷却水中に存在する¹⁵O原子核の計数率は電子線エネルギーに比例しないことがわかった。精密温調装置のタンク全体の¹⁵O原子核の実効線量は、今回の実験ではタンクからの距離10 cmで最大1.27 (mSv/週)と見積もられた。このため精密温調装置を本体室からモジュレーター室に移動するためには、何らかの対策が必要であることがわかった。遮蔽方法の対策として、一つ目は、リザーバータンクの容量を大きくすれば冷却水中での減衰を利用して減少させることができると考えられる。二つ目は、リザーバータンク全体をアクリルで被い、その周りを6 mm程度の鉛シートで被うと、対消滅 γ 線が1/eに減衰されると考えられる。

参考文献

- [1] URL : <http://www.rada.or.jp/>
- [2] 佐藤勇, “日本大学電子線利用研究施設の現状”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 30-August 1, 2003, Tokai, Japan, p.1
- [3] URL : <http://iaecand.iaea.org/>
- [4] 木村逸郎 他著, “放射線計測ハンドブック”, 日刊工業新聞社, 1982, p.1