

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目

PET 用サイクロトロンにおける放射化物の評価と安全管理に関する研究

氏名

望月 真吾

論文内容の要旨

序論

現在 PET (positron emission tomography) 検査で主に用いられる [^{18}F]-FDG は ^{18}O (p,n) ^{18}F 反応を利用するのが主流である。このような医療用小型サイクロトロンを用いた PET 薬剤製造では、ターゲットフォイル、ターゲットベッセル及びその付随する部品が陽子や中性子に照射されることにより放射化し、放射性副生成物が生ずる問題がある。放射性副生成物はサイクロトロンの加速粒子、加速エネルギー、部品の材質等により異なる。一方、医療用小型サイクロトロンを設置している施設では、加速エネルギーが 9 MeV 程度のものから 18 MeV 程度と幅がある。しかし、放射性副生成物の生成および生成物による被ばくを異なるタイプのサイクロトロンで比較、測定評価した報告は見あたらない。本研究では、加速エネルギー、加速粒子、材質の異なる 4 種類のサイクロトロンについて、放射性副生成物の生成および生成物による被ばくを測定評価し、それぞれの特徴と相違、および被ばく管理と廃棄物管理における問題点を明らかにした。

材料及び方法

研究対象としたサイクロトロンは 4 種類である。現在 PET 用サイクロトロンの主流は陰イオン加速型であり、 ^{18}F 以外の陽電子放出核種も利用する施設では加速エネルギー 18 MeV (陽子) のものが、[^{18}F]-FDG のみを利用する施設では 10 MeV (陽子) 程度のものが多く使われている。そこで、前者の代表として住友重機械工業製の CYPRIS HM-18 を、後者の代表として IBA 製の Cyclone 10/5 を対象とした。また、従来の陽イオン加速型として、住友重機械工業製の CYPRIS 370、日本製鋼所製の BC2211 を加えた。なお、BC2211 では、 ^{20}Ne (d, α) ^{18}F 反応による [^{18}F] F_2 を利用して [^{18}F]-FDG を合成している。

測定試料は、次の 4 カテゴリーである。(1)サイクロトロンのターゲットフォイル等交換部品、(2)[^{18}F]-FDG 合成装置とマテリアル、(3)[^{18}F]-FDG 溶液、[^{18}O] H_2O 、(4)ODP (oil diffusion pump) オイル等液体廃棄物。

各試料に含まれる γ 線放出核種を同定し、その放射能を測定・評価するため高分解能 γ 線スペクトロメトリによる分析を行った。測定には、HPGe (high purity germanium) 検出器 (GMX-25190-P, EG&G ORTEC) を用いた。 γ 線検出効率は、AEA Technology 社製

の混合標準線源 (No. 104581 GE 354)、アマーシャム社製標準線源 (FB587、FB588、FB589、FB591、FB594、OL899) 及び自家製の ^{133}Ba 、 ^{152}Eu を用いて決定した。

液体試料の ODP オイル、ロータリーポンプオイル、サイクロトロン 2 次冷却水、 ^{18}F -FDG 溶液及び ^{18}O - H_2O については、 γ 線スペクトロメトリに加え、液体シンチレーションカウンタ (LSC-1000 及び LSC-6100, Aloka) による β 線測定を行った。

放射性廃棄物管理の観点から、各試料に含まれる放射エネルギーと IAEA BSS (IAEA Basic Safety Standard) で定められた国際免除レベルとの比較を行った。

また、ターゲットフォイル等交換部品は装置の保守点検係員により定期的に交換される。これらの係員の外部被ばくによる線量は、放射性核種分析結果から 1 cm 線量当量 $\text{H}^*(10)$ (μSv) により評価した。

結果及び考察

CYPRIS HM-18 では、放射性副生成物として 17 核種がターゲットフォイル (Havar® フォイル、Al フォイル) に、4 核種が ^{18}O - H_2O 中に、4 核種が合成装置のカラムに検出された。しかしながら、 ^{18}F -FDG 溶液中にはごく微量 (最大で検出下限値 $0.2 \text{ Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$ の 2 倍) の ^3H を除き放射性副生成物は検出されなかった。Cyclone 10/5 では、11 核種がターゲットフォイル (Havar® フォイル、Ti 真空フォイル) に、16 核種が Striping フォイルに、1 核種が ODP オイル中に検出された。CYPRIS 370 では、5 核種がターゲットベッセルに、3 核種が ^{18}O - H_2O 中に、3 核種が合成装置のカラムに検出された。BC2211 では、14 核種がターゲットフォイル (Al フォイル) に、2 核種が交換部品に検出された。 ^{18}F -FDG 溶液中にはごく微量の ^3H ($3 \text{ Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$) を除き放射性副生成物は検出されなかった。

加速エネルギーが 10 MeV と 18 MeV とで Havar® フォイル中の放射性副生成物を比較すると、8 核種 (^{52}Mn 、 ^{54}Mn 、 ^{56}Co 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 $^{95\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{183}Re 、 ^{184}Re) は共通して検出されたが、4 核種 (^{48}V 、 ^{51}Cr 、 ^{60}Co 、 ^{96}Tc) はエネルギーの高い 18 MeV のみで検出された。これら 4 核種は中性子との相互作用により生じると考えられる核種である。特に半減期の長い ^{60}Co と生成量の多い ^{48}V とが 10 MeV の陽子を照射した Havar® フォイルで検出されなかったことは、加速エネルギーが 10 MeV のサイクロトロンの方が、18 MeV の装置よりも、放射性廃棄物の管理の観点から有利と考えられる。

結論

放射性副生成物がターゲットフォイル等のサイクロトロン交換部品中に検出された。これらの放射性副生成物はターゲットの ^{18}O - H_2O を通して薬剤合成装置に混入していたが、多くは ^{18}F トラップカラムで捕獲され、 ^{18}F -FDG 溶液中には、有意な放射性副生成物の混入は確認されなかった。被ばく管理の点からは次の点が明らかとなった。① ^{18}F -FDG 投与による被検者の放射性副生成物による被ばくリスクはない。② サイクロトロンの管理、及び ^{18}F -FDG 薬剤合成従事者の放射性副生成物による被ばく線量は法令で定められた年線量限度よりもはるかに小さい。③ 照射後に回収される ^{18}O - H_2O 中には最大で $180 \text{ kBq}/\text{cm}^3$ 程度の ^3H が含まれており、再利用するための蒸留操作において作業室内に飛散させないように注意する必要がある。④ 放射性廃棄物管理において、半減期の長いコバルトの同位体に注意が必要である。⑤ 放射性廃棄物の管理の観点から、加速エネルギーが 10 MeV のサイクロトロンの方が 18 MeV の装置よりも有利である。