

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25861096

研究課題名(和文) PET用小型サイクロトロンにおける合理的な放射化物管理及び処理方法の評価

研究課題名(英文) Management of induced radioactivity in a PET cyclotron

研究代表者

堀次 元気 (Horitsugi, Genki)

大阪大学・医学(系)研究科(研究院)・特任研究員(常勤)

研究者番号：70646231

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：PET核種製造用サイクロトロンにおいてPET4核種(C-11、N-13、O-15、F-18)製造時のサイクロトロン室内の熱中性子束を測定した。F-18製造中の自己遮蔽体外側における熱中性子束は $4.67 \times 10^2$  /cm<sup>2</sup>/sであった。通常の運転条件下では、F-18製造時が最も熱中性子束が高く、C-11、N-13、O-15、F-18製造時のターゲット近傍での熱中性子束はそれぞれ $3.76 \times 10^6$ 、 $2.41 \times 10^6$ 、 $2.29 \times 10^6$ 、 $3.18 \times 10^6$  /cm<sup>2</sup>/sであった。C-11、N-13、O-15製造時の熱中性子束はF-18と比べると十分に小さいことが分かった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to measure the thermal neutron flux in the cyclotron room during producing positron emitters (C-11, N-13, O-15 and F-18) and to evaluate the activation level of the concrete in the cyclotron room. The gold foil activation method was used for measurement of the thermal neutron flux.

As the result, the thermal neutron flux outside the self-shield during the production of F-18 was  $4.67 \times 10^2$  /cm<sup>2</sup>/s. Thermal neutron fluxes near target during C-11, N-13, O-15 and F-18 production were  $3.76 \times 10^6$ ,  $2.41 \times 10^6$ ,  $2.29 \times 10^6$  and  $3.18 \times 10^6$  /cm<sup>2</sup>/s, respectively. Under normal operating conditions, thermal neutron flux during producing of F-18 was the highest. Thermal neutron fluxes during C-11, N-13 and O-15 production were sufficiently low as compared with that during F-18 production.

研究分野：医歯薬学

キーワード：サイクロトロン 中性子 放射化

## 様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

平成 24 年 4 月 1 日に改正放射線障害防止法が施行されたことにより、放射化物が本格的に法規制の対象となった。医療の現場で放射化物が発生するのは主にリニアックと Positron Emission Tomography (PET) 核種製造用サイクロトロンであり、サイクロトロンでは放射化に寄与する中性子の発生量が多い。装置の廃棄、更新時には建屋のコンクリート、本体など多くの放射化物が発生するため、その処理が問題となる。これらの放射性廃棄物の処理には大きな費用が発生し、それは放射性廃棄物量に比例して増大する。放射化物を合理的に処理するためには、事前に発生量を把握するとともに、放射化物となる対象範囲を的確に判断する必要がある。中性子の発生量を把握しておくことで放射化物の発生量やその放射化レベル、対象範囲を推計することが可能である。

これまでの報告では、 $^{18}\text{F}$  製造時における自己遮蔽型サイクロトロンの室内における熱中性子束は約  $10^2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、非自己遮蔽型のものでは約  $10^5\text{-}10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であることが分かっている。しかし、 $^{18}\text{F}$  だけではなく  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  など他の核種も製造されていることを考慮すると、 $^{18}\text{F}$  以外の PET 核種製造時における中性子発生量を把握し、放射化物の安全管理のためのデータを取得することは非常に重要である。しかしながら、 $^{18}\text{F}$  以外の PET 核種製造時の中性子発生量についての報告はまだ少ない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、PET 核種製造用サイクロトロンにおいて PET 核種製造時に発生する中性子量を測定、評価することにより合理的な放射化物管理、処理に有用な情報を得ることである。

- (1) サイクロトロン運転時の室内の熱中性子束分布の測定を行う。
- (2) 製造 PET 核種別 ( $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ ) の中性子発生量を比較する。
- (3) 非自己遮蔽型サイクロトロン室内における熱中性子束分布の測定を行う。
- (4) 放射化を計算により評価する。

### 3. 研究の方法

(1) サイクロトロン運転時の室内の熱中性子束分布の測定  
中性子フルエンス分布の測定に金箔放射化法を用いた。放射化検出器 (金箔及びカドミウム箔) (図 1) を自己遮蔽型サイクロトロン (CYPRIS HM-12S、住友重機械工業、加速エネルギー: proton-12MeV、deuteron-6MeV、最大ビーム電流  $100 \mu\text{A}$ ) の室内の床、壁などに配置し (図 2)  $^{18}\text{F}$  製造時におけるサイクロトロン運転中の熱中性子束の測定を行う。High Purity-Germanium (HP-Ge) 半導体検出器を用いて金箔の放射能を測定し、計算によ

り熱中性子束を求める。その後、イメージングプレート及びイメージスキャナを用いて全金箔の放射能を測定し (図 3)、相対的に室内の熱中性子束分布を把握する。

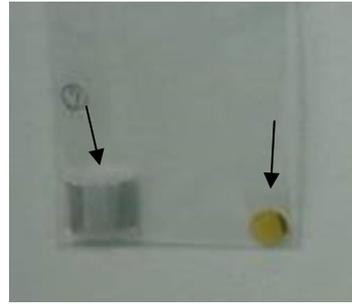


図 1.放射化検出器の設置 (右:カドミウム箔で覆った金箔、左:金箔)

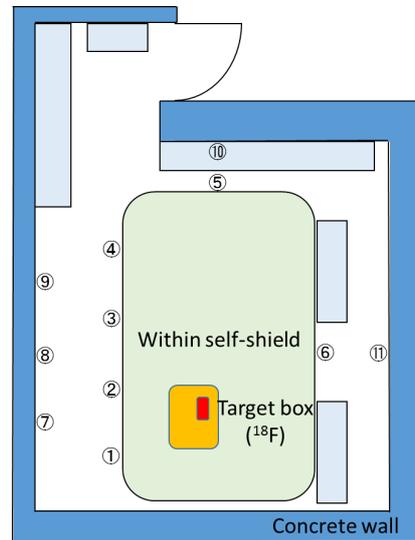


図 2.サイクロトロン室における放射化検出器の設置位置

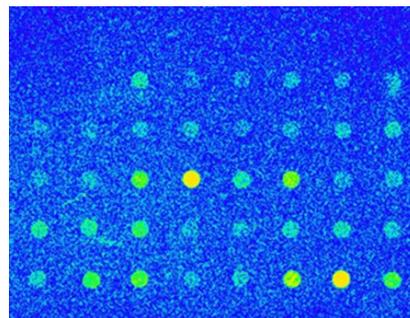


図 3.イメージングプレートを用いた金箔

(2) 製造 PET 核種別の室内における中性子束分布の把握  
PET4 核種 ( $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ ) 製造時に自己遮蔽型サイクロトロンのターゲット近傍に放射化検出器を設置し、サイクロトロン運転後に CdZnTe 半導体検出器を用いて金箔の放射能を測定した (図 4)。CdZnTe 半導体検出器のエネルギー校正には標準線源 ( $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ ) を用いて行い、計数効率の算出にはモンテカルロシミュレーションコードである粒子・重イオン輸送計算コード

( Particle and Heavy Ion Transport code System : PHITS ) を用いた ( 図 5 )



図 4 . CdZnTe 半導体検出器による測定

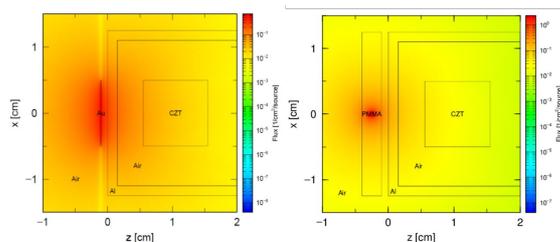


図 5 . PHITS による計数効率算出 ( 左 : 金箔、右 : 標準線源 )

( 3 ) 非自己遮蔽型サイクロトロンにおいても  $^{18}\text{F}$  製造時に室内壁に放射化検出器を設置し、( 2 ) と同様に熱中性子束を測定した。

( 4 ) 放射化の計算による評価測定により得られた熱中性子束から放射化を計算により評価した。

#### 4 . 研究成果

( 1 )  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  反応による  $^{18}\text{F}$  製造時の自己遮蔽型サイクロトロン運転中の室内における熱中性子束の測定を行った。その結果、自己遮蔽体の外側における熱中性子束は平均で  $8.10 \times 10^1 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、最大で  $4.67 \times 10^2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であった。また、 $^{18}\text{F}$  以外の核種製造時には自己遮蔽体の外側において検出されなかった。

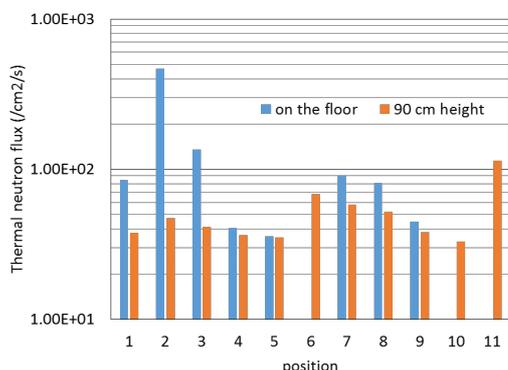


図 6 . 自己遮蔽型サイクロトロンにおける  $^{18}\text{F}$  製造中の自己遮蔽体外側の熱中性子束

( 2 ) PET4 核種 ( $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ ) 製造時に自己遮蔽型サイクロトロンのターゲット近傍における熱中性子束を求めた。その結果、 $^{18}\text{F}$  製造時が最も熱中性子束が大きく、 $3.18 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であった。 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  製造時の

熱中性子束を  $^{18}\text{F}$  製造時と比較した場合、その比はそれぞれ 0.118、0.076、0.072 であった。 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  製造時には、 $^{18}\text{F}$  製造時と比較して熱中性子の発生量が十分に小さいことが分かった。

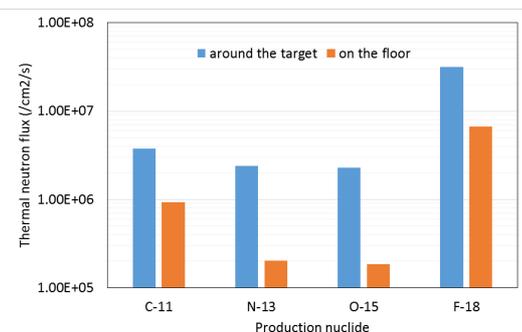


図 7 . 製造 PET 核種別のターゲット近傍における熱中性子束

$^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  の製造時には  $^{18}\text{F}$  を製造したと仮定して熱中性子を見積もると、製造量が大きいか場合には熱中性子を過大評価することとなる。その結果、放射性廃棄物量が増大する可能性がある。 $^{18}\text{F}$  以外の核種を製造する場合には、得られた比を用いて放射化を計算することにより適切に放射性廃棄物を扱うことが可能となり得る。

( 3 ) また、 $^{18}\text{F}$  製造時の非自己遮蔽型サイクロトロンにおける室内の熱中性子束分布を測定した。熱中性子束は平均で  $1.15 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、最大で  $1.09 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であった。

( 4 ) 測定結果の最大値を用いて、運転期間を 30 年間、1 日当たりの運転時間を 1 時間としサイクロトロン室内壁コンクリートの放射化を推計した結果、クリアランスレベルの約 4 倍程度であることがわかった。

The purpose of this study was to measure the thermal neutron flux in the cyclotron room during producing positron emitters ( $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  and  $^{18}\text{F}$ ) and to evaluate the activation level of the concrete in the cyclotron room. The gold foil activation method was used for measurement of the thermal neutron flux.

As the result, the thermal neutron flux outside the self-shield during the production of  $^{18}\text{F}$  was  $4.67 \times 10^2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Thermal neutron fluxes near target during  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  and  $^{18}\text{F}$  production were  $3.76 \times 10^6$ ,  $2.41 \times 10^6$ ,  $2.29 \times 10^6$  and  $3.18 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , respectively. Under normal operating conditions, thermal neutron flux during producing of  $^{18}\text{F}$  was the highest. Thermal neutron fluxes during  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$  and  $^{15}\text{O}$  production were sufficiently low as compared with that during  $^{18}\text{F}$  production.

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

1. 堀次元気、金井泰和、池田隼人、渡部直史、磯橋佳也子、加藤弘樹、下瀬川恵久、畑澤順、PET 核種製造用サイクロトロンにおける熱中性子束の評価 (Evaluation of Thermal Neutron Flux in Medical Cyclotron) 日本放射線技術学会近畿部会第 58 回学術大会 2015 年 1 月 25 日、神戸

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀次 元気 (HORITSUGI, Genki)  
大阪大学・医学系研究科・特任研究員(常勤)  
研究者番号：7 0 6 4 6 2 3 1

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：