

学術交流委員会報告

PET核種製造用サイクロトロン利用に伴う放射化物の管理について

Technical requirements of radiation safety management for induced radioactivity in the medical compact cyclotron in Japan

関係法令等検討小委員会

堀次元気* 大阪大学大学院医学系研究科

渡邊 浩** 独立行政法人労働者健康福祉機構横浜労災病院

藤淵俊王* 九州大学大学院医学研究院保健学部門

山口一郎* 国立保健医療科学院

杉本勝也 福井大学医学部附属病院

木田哲生* 滋賀医科大学医学部附属病院

平木仁史* 帝京大学医学部附属溝口病院

大山正哉* 独立行政法人国立病院機構千葉東病院

前原善昭* 聖マリアンナ医科大学病院

能登公也* 金沢大学医学部附属病院

**委員長

*委員

Summary

The law concerning prevention from radiation hazards due to radioisotopes, etc. was revised on April 1, 2012 in Japan. The induced radioactivity generated unintentionally by accelerators has been regulated as with the waste contaminated by radioactive substances since then. In 2011 and 2012, various investigations of the induced radioactivity were carried out by the Nuclear Safety Technology Center (NUSTEC). As a result, it was revealed that it is not necessary to treat the components outside the self-shield medical compact cyclotron as radioactive waste by calculation and measurement for a cyclotron with a self-shield.

In this report, we have proposed a method of managing the induced radioactivity generated unintentionally by medical cyclotrons based on researches reported by the NUSTEC. It is still in the process of establishing safety regulations for radioactive waste of the cyclotron facilitated by the cooperation of related stakeholders. It is necessary to provide the opportunity to exchange opinions by strengthening relationships with various stakeholders from now on.

1. はじめに

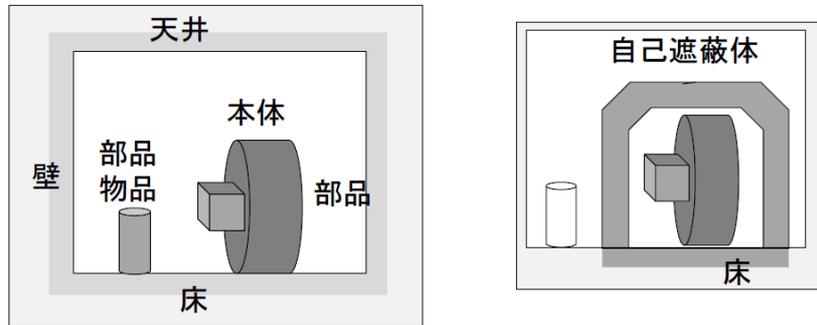
平成24年4月1日に放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律(以

下、放射線障害防止法)が改正され、放射化物が法規制の対象であることが明確にされた。これまでは、平成10年10月30日付科学技術庁原子力安全局放射線安全課長通知「放射線発生装置使用施設における放射化物の取扱いについて」¹⁾に基づき安全管理が要請されていたが、改正放射線障害防止法では基本的に放射性同位元素によって汚染された物と同様の規制を受けることとなった。また、これに伴って前述の通知は廃止された。医療機関における主な対象装置としては、放射線治療装置(医療用リニアックやマイクロトロン)とPositron Emission Tomography:PET核種製造用サイクロトロン(PET用サイクロトロン)、粒子線治療装置が挙げられる。

原子力安全技術センターは、文部科学省の科学技術試験研究委託事業の中でPET用サイクロトロンに関する放射化の調査を行った。平成23年度は「放射化物安全規制に係る調査作業委員会」²⁾、平成24年度は「放射線発生装置から発生した放射線によって汚染された物の安全規制のための運用基準に関する調査」³⁾である。平成23年度の調査の中で、自己遮蔽型のPET用サイクロトロンの場合、自己遮蔽体の外側では放射線管理の対象とすべき放射化がないことが測定や計算により示されており、この結果が平成24年3月付文部科学省科学技術・学術政策局原子力安全課放射線規制室事務連絡「放射性同位元素等による放射線障害防止に関する法律の一部を改正する法律並びに関係政令、省令及び告示の施行について」⁴⁾にも盛り込まれている。関連学会等の協力のもと、平成24年度の調査では、自己遮蔽型および非自己遮蔽型のPET用サイクロトロンにおいて、今後の廃止措置等に伴い発生する放射性廃棄物管理のための知見の蓄積を目的として調査が行われた。また、関連学会の有識者らによる内部委員会では、比較的高レベルに放射化した物品の管理方法や、放射化物管理の在り方に関して検討が行われた。本報告書では、事務連絡および平成24年度の委託事業報告書の内容を紹介しつつ、PET用サイクロトロンの使用に伴って発生した放射化物の取扱いについてまとめる。このようにPET用サイクロトロンの放射化物の安全規制は、本学会を含む関係者が協力し合い構築しているところであり、今後、より広い範囲の利害関係者との関係強化と意見交換する機会を多く設けることが求められる。

2. 管理対象となる放射化物

事務連絡に放射化物の範囲の評価について、その考え方が示されている。また、PET用サイクロトロンにおける放射化物の範囲を図に示す(Fig.1)。ただし、非自己遮蔽型PET用サイクロトロンの建屋(コンクリート)は放射性廃棄物として扱う必要があるか検討中である。



* 非自己遮蔽型サイクロトロン⁵⁾の建屋(コンクリート)の放射化について検討中である

Fig.1 PET用サイクロトロンにおける放射化物の範囲

- ① 放射化物については、放射線発生装置から取り外した時点からその管理が必要となる。
- ② 放射線発生装置に組み込まれている場合又は放射線発生装置を使用するための目的で用いている場合は放射化物としての管理は不要である。
- ③ 放射線発生装置から取り外し、再度装置に組み込んだ場合も放射化物としての管理は不要である。
- ④ 自己遮蔽体の内側（遮蔽体や床材を含む）は放射化物としての管理が必要である。
- ⑤ 自己遮蔽体の外側の建屋および周辺設備等は放射化物としての管理は不要である。
- ⑥ 上記以外の放射線発生装置および周辺設備等は原則として放射化物として管理する必要がある。

ただし、信頼できる実測データ、計算結果等により放射化物として取り扱う必要がないと確認できたものは管理対象から外すことが可能である。しかしながら、放射化物として取り扱うか否かの判断は、放射性汚染物の確認制度の導入に伴って告示として規定された放射能濃度およびその考え方を参考としなければならない。

放射化物の日常的な管理において放射化物か否かの判断は非常に難しい。しかしながら、放射化物か否かの判断、放射化物の核種・数量の推定を簡便な方法で行うことが可能であれば、放射化物の日常管理に非常に大きな助けとなる。上巻⁵⁾はサーベイメータを用いて核種・数量の推定が可能か否かを検討しており、バックグラウンドレベル計測の場所による変動なども考慮するとその考え方を参考にできる。

3. PET用サイクロトロンにおける放射化の特徴

PET用サイクロトロンでは，加速粒子（陽子等）による放射化と，ターゲットでの核反応で発生する中性子による放射化を考慮する必要がある．加速粒子を取り出す部分であるフォイルストリップやデフレクタ，また，加速粒子を衝突させるターゲットボックスなどにおいては加速粒子による放射化が主となる．最も多く利用されている加速粒子は陽子であり，加速エネルギーは20 MeV以下である．金属元素が照射された場合の核反応は（p, n）反応などと考えられる．平成24年度委託調査で材料別の生成核種とその核反応の例（Table 1）が報告されている．一方で，その他の装置部品や本体周辺部品においては中性子による放射化が主となる．加速粒子（陽子）による放射化の評価事例が平成24年度委託事業において報告されており，以下に紹介する．

Table 1 材料別の生成核種とその核反応の例

材料	核反応	生成核種	半減期 (日)	1cm 線量当量率定数 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{MBq}^{-1}$)
鉄、ステンレス、 アルミ合金	$^{56}\text{Fe} (\text{p}, \text{n}) ^{56}\text{Co}$	^{56}Co	77.23	0.311
ハーバーフォイル	$^{58}\text{Ni} (\text{p}, \text{pn})$ $^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{57}\text{Co}$	^{57}Co	271.7	0.0206
	$^{58}\text{Ni} (\text{n}, \text{p}) ^{58}\text{Co}$	^{58}Co	70.86	0.154
銅、真鍮	$^{65}\text{Cu} (\text{p}, \text{n}) ^{65}\text{Zn}$	^{65}Zn	244.1	0.0849
チタン	$^{48}\text{Ti} (\text{p}, \text{n}) ^{48}\text{V}$	^{48}V	15.97	0.432
銀	$^{109}\text{Ag} (\text{p}, \text{n}) ^{109}\text{Cd}$	^{109}Cd	461.4	0.0297

① ハーバーフォイルの評価事例

ハーバーフォイルは陽子線をターゲット物質と区画するためのもので直接陽子線が照射される部品であり，高レベルに放射化することが知られている．基本的な組成はCo 40%，Cr 20%，Fe 19%，Ni 13%，Mn 2%，W 3%，Mo 2%である．GE社製PETtrace（加速エネルギー16.5 MeV）におけるGe半導体検出器を用いたハーバーフォイルの生成核種の評価について文献報告が示されている⁶⁾（Table2）．

Table 2 放射化したハーバーフォイルの核種分析結果（文献 6 より引用）

生成核種	半減期	試料 1 :kBq	試料 3 :kBq	試料 4 :kBq	試料 5 :kBq
^{54}Mn	312.1 d	32	98.8	450.2	1342.1
^{56}Co	77.3 d	0.3	6.4	116.3	5858.4
^{57}Co	271.8 d	153	499.2	2326.2	8120.3
^{58}Co	70.88 d	0.5	8.5	184.9	12384.3
^{183}Re	70 d	-	-	1.7	138.4
使用時間 (秒)		不明	169,080	215,280	287,640

② 陽子線が直接照射される部品の放射化評価事例

陽子線が直接照射される部品は比較的高レベルに放射化しており，IBA社製Cyclone 18/9において，どのような核種が生成しているかGe半導体検出器による核種分析を行った事例報告が示されている⁷⁾ (Table3)．また，ハーバーフォイルおよびチタン製ウィンドウの経時変的な核種の変化や線量率も示されている．ハーバーフォイルでは，照射停止後1年間は ^{58}Co が支配的であるが，1年をこえると ^{57}Co が支配的となってくる (Fig.2)．チタン製ウィンドウでは，照射後は ^{48}V が支配的であるが，約4ヶ月をこえると ^{46}Sc が支配的となっている (Fig.3)．また， ^{48}V の減衰に伴い線量率も小さくなっている (Fig.4)．

放射化物管理においては，経時変的な核種の変化が起こるため評価するタイミングによって主たる核種が変わることに留意する必要がある．

Table 3 PET 用サイクロトロン装置の高線量率部品の高線量率部品の生成核種 (文献 7 より引用)

同位体	半減期 (日)	放射能 (kBq)			
		Havar Foil	Titanium Window	Stripper	
				Screw	Fork
^{22}Na	950.09	<MDA*	<MDA*	<MDA*	<MDA*
^{46}Sc	83.83	<MDA*	7.00E+02	<MDA*	<MDA*
^{48}V	15.976	63	5.20E+04	<MDA*	<MDA*
^{51}Cr	27.704	1.20E+05	<MDA*	1.1	<MDA*
^{54}Mn	312.2	2.40E+03	0.3	1.4	0.34
^{56}Co	77.7	2.50E+04	31	1.80E+02	4.6
^{57}Co	271.77	1.90E+05	0.5	4	0.0065
^{58}Co	70.916	2.10E+05	<MDA*	1.3	<MDA*
^{65}Zn	244.01	<MDA*	1	2	0.09

*MDA : Minimum detectable activity for the pertinent measurement geometry

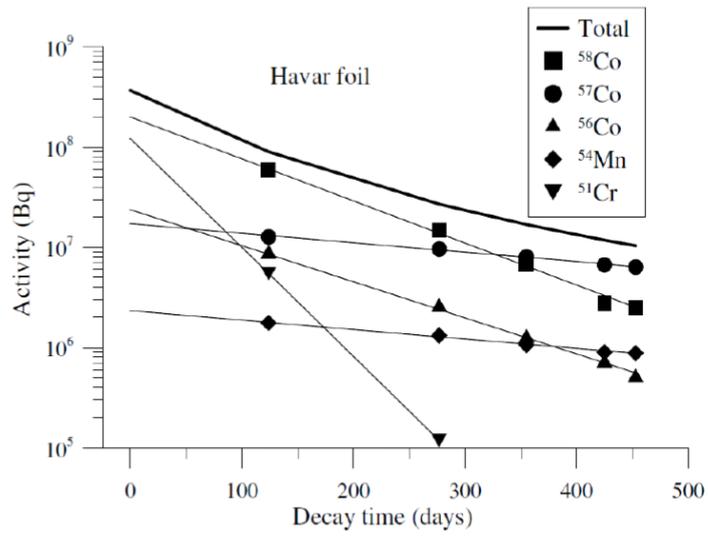


Fig.2 放射化したハーバーフォイルの生成核種(文献7より引用)

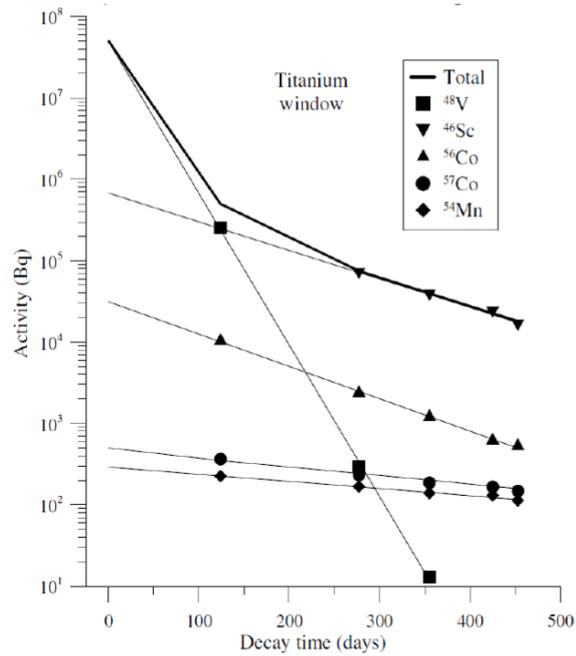


Fig.3 放射化したチタン製ウィンドウの生成核種(文献7より引用)

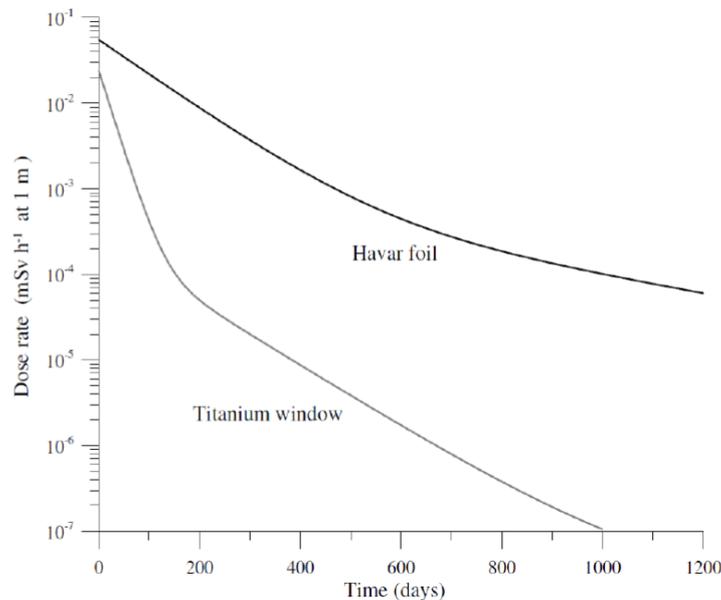


Fig.4 ターゲットボックスにおける線量寄与度の高い構成部品(文献7より引用)

4. コンクリートの放射化

非自己遮蔽型PET用サイクロトロンでは装置本体以外にも、使用室の床、壁、天井のコンクリートおよび装置周辺に設置された物品が有意に高く放射化する可能性があり、廃止措置に伴う放射性廃棄物量が増大する可能性がある。放射化の範囲とその程度についてさらなる評価が必要であったため、委託調査においては、コンクリートの深さ方向の放射化分布について測定・検討が行われた。また、自己遮蔽型PET用サイクロトロンについても遮蔽体の設置されている床の放射化の評価が行われた。冷却期間を運転停止後1年間と想定した上で評価が行われた。その結果、次のように報告されている。

- ① ターゲット近傍のコンクリートは、全体として放射化の程度が大きくなる傾向にあり、深さ30 cm程度では、ほとんど放射化は確認できなくなる。
- ② 運転停止後1年後には放射化のレベルが半減することから、運転停止後1年間以上の冷却期間を設けることは有効である。
- ③ 深さ方向の放射化のピークは約5～10 cm付近であり、冷却期間を1年と想定した場合、表面から10～15 cm程度より深い位置では放射能濃度がクリアランスレベルを下回る可能性がある。
- ④ トリチウム分析結果では、放射能濃度は他の核種に比べて高いが、クリアランスレベルが100 Bq/gと高いので無視できるような値である。

また、榎本らによってコンクリートコアの放射化分析評価と同時に金箔とTLDを用いた中性子の空間分布評価および計算による評価が行われた。中性子の空間分

布については次のように報告されている³⁾。

- ① ターゲットボックス内の熱中性子フルエンス率は $10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ のレベル、ボックス外では $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ のレベルであった。
- ② 垂直方向の分布では、ターゲットボックスの近傍は高くなったが他において差は見られなかった。
- ③ TLDで求めた値と金箔の測定結果はほぼ一致した。

計算による評価では、年間運転時間300時間、運転中の中性子フルエンス率 $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、コンクリートの組成元素の割合は標準的であると仮定して、コンクリート中に生成する主な放射性同位元素の濃度を10年および20年運転と20年運転後1年冷却した場合について計算されている (Table 4)。その結果、10年後の値はほぼコンクリートコアの分析結果と同様の傾向を示した。今回の評価では、20年間運転後さらに数年冷却した場合に ^{152}Eu が代表核種となるとされている。ただし、コンクリートの組成が標準的なものと異なる場合は違う結果となるかもしれない。また、非自己遮蔽型の場合、廃止措置の際に放射性廃棄物として扱うべきなのか明確な評価はまだなされていない。限りある資源の有効活用と合理的な廃棄物管理のあり方を十分に議論し、再利用や再生などコンクリートの合理的な処分を行うことが求められる。

Table 4 10年運転直後、20年運転直後及び20年運転1年冷却の場合の生成放射能計算

生成核種	CL (Bq/g)	半減期 (y)	濃度 (ppm)	標的核/原子量	標的核同位体比	中性子捕獲断面積 (b)	10年運転直後 (Bq/g)	20年運転直後 (Bq/g)	20年運転後1年冷却 (Bq/g)	D/C
^{60}Co	0.1	5.27	5	$^{59}\text{Co}/58.93$	1	37.18	0.048	0.060	0.042	0.417
^{152}Eu	0.1	13.54	1	$^{151}\text{Eu}/150.91$	0.4781	5900	0.153	0.245	0.146	1.457
^{134}Cs	0.1	2.06	10	$^{133}\text{Cs}/132.9$	1	29.6	0.044	0.046	0.032	0.317
^{46}Sc	0.1	0.23	10	$^{45}\text{Sc}/44.96$	1	27.2	0.125	0.125	0.006	0.061
^3H	100	12.32	10	$^6\text{Li}/6.941$	0.0759	940	0.912	1.431	0.862	0.009

5. 中性子による放射化 (金属等)

中性子による金属の放射化については、放射化物の核種と数量の考え方は事務連絡の医療用リニアックの例が参考となる可能性がある。また、平成23年度の委

託調査では、梶本らによりPET用サイクロトロン室内で生じる放射化について調査する目的で、9種類の金属箔を1ヶ月間サイクロトロン室内に設置し中性子によって生成する放射性核種の種類と生成量が測定された。その結果をもとに、10年後に観測される主要核種と生成割合を予想し、10年間の照射終了後3日、1年後の状況について報告されている（Table 5）。表の換算値は各評価時点における ^{60}Co の存在量で規格化した値である。また、ハーバーフォイルはターゲットに装着されたものでなく加速粒子による放射化ではないためこの結果と異なる。

Table 5 金属試験箱による放射化測定分析結果

金属材料	核種	10年運転終了後 3日の時点に換算	終了後 1年の時点に換算
鉄	^{59}Fe	7.3	0.03
	^{60}Co	1	1
	^{54}Mn	2.8	1.4
真鍮	^{64}Cu	0.35	0
	^{65}Zn	1	1
アルミニウム	ND	—	—
ジュラルミン	^{65}Zn	—	—
SUS 304	^{51}Cr	2.4	0.0003
	^{60}Co	1	1
	^{58}Co	0.04	0.001
	^{59}Fe	0.05	0.0002
	^{54}Mn	0.027	0.014
	^{187}W	0.005	0
	^{99}Mo	0.0008	0
SUS 316	^{51}Cr	2.4	0.0003
	^{60}Co	1	1
	^{58}Co	0.05	0.002
	^{59}Fe	0.05	0.0002
	^{54}Mn	0.022	0.011
	^{187}W	0.006	0
	^{99}Mo	0.017	0
Co	^{60}Co	1	1
W	^{187}W	3.5	0
	^{60}Co	1	1
ハーバーフォイル	^{60}Co	1	1
	^{51}Cr	0.014	0

Table は各評価時点における ^{60}Co の存在量で規格化した値である

6. 有害物質を含む放射化物

放射性廃棄物の保管廃棄は日本アイソトープ協会（以下、RI協会）にしか委託できないが、RI協会では有害物質はその対象外となっている。

(ア)ホウ素の同位体である ^{10}B は大きな熱中性子吸収断面積を持つため、PET用サイクロトロンにおいて発生した中性子を遮蔽するために遮蔽材として用いられることがある。例えば、自己遮蔽体のコンクリートや水、建屋のコ

ンクリートに用いられている。しかしながら、ホウ素は化学物質排出把握管理促進法、水質汚濁防止法、土壌汚染対策法など、様々な法律において有害物質として法規制の対象となっている。ホウ素の化学系によっては、ホウ素を含有した物品や構造体は、放射化することにより複合汚染となる。(イ)遮蔽のために鉛（鉛ブロックや鉛板など）を使用している場合があるが、これらの鉛および鉛含有製品については事前に相談し集荷を行っている。可能な限り汚染部分のみを分離する、非圧縮性不燃物の重量は容器重量を含め50 kgまでとする、などの集荷要領が定められている。

7. 放射化物保管設備について

今回の法改正で、使用施設の設備として放射化物保管設備が新たに規定された。放射化物保管設備は、放射化した放射線発生装置構成機器又は遮蔽体として再び当該装置に組み込むものならびに再使用・再利用するものを保管する設備であり、①放射化物を保管しない場合、②放射化物を保管廃棄設備で保管廃棄する場合、③放射化物を放射線発生装置と一体として使用する場合、これらの場合は設ける必要はない。施設基準は、①外部と区画された構造、②扉、ふた等外部と通ずる部分の施錠、③耐火性の構造で、貯蔵容器の基準に適合する容器を備える、④大型の機器等で容器に入れることが困難な場合は汚染の広がりを防止するための措置を講じる、とされている。また、放射化物保管設備には標識を付する必要がある（Fig.5）。放射化物保管設備に付する標識は、①放射能標識の上部に「放射化物保管設備」、下部に「許可なくして立入りを禁ず」の文字、②放射能標識の大きさは半径十センチメートル以上、③放射化物保管設備の外部に通ずる部分又はその付近に付ける必要がある。放射化物保管設備に備える容器の標識については、①放射能標識の上部に「放射化物」の文字、②放射能標識の大きさは半径2.5センチメートル以上、③容器の表面に付ける必要がある。



Fig.5 放射化物保管設備及び容器に付する標識

設置場所は、使用施設内であれば基本的にどこに設置しても問題はないが、自己遮蔽体の有無により設置場所を考慮する必要がある。自己遮蔽型PET用サイクロトロンの場合、サイクロトロン室内に設置することが可能である。しかしながら、非自己遮蔽型PET用サイクロトロンの場合では、サイクロトロン室内に放射化物保管設備を設置するとそれ自体が放射化してしまうため、可能であればサイクロトロン室外に設置することを推奨する。ただ、サイクロトロン室から離れた場所で設置した場合には、放射化物を移動させる距離が長くなり、それに伴って従事者の被ばく線量が増える。サイクロトロンでは線量率の高い放射化物を保管する可能性もあるため、合理的な管理方法を十分に検討した上で設置場所を決定することを推奨する。非自己遮蔽型の場合、サイクロトロン室の近くに電源関係設備のための機械室が設置されていることが多いため、その機械室に設置することも案の一つとして検討可能である（Fig.6）。ここで留意しなければならないことは、機械室は使用施設として許可を受けていない場合があり、この場合には放射線発生装置の様式第一中別紙様式ハの使用施設に機械室を追加する変更許可申請が必要である。

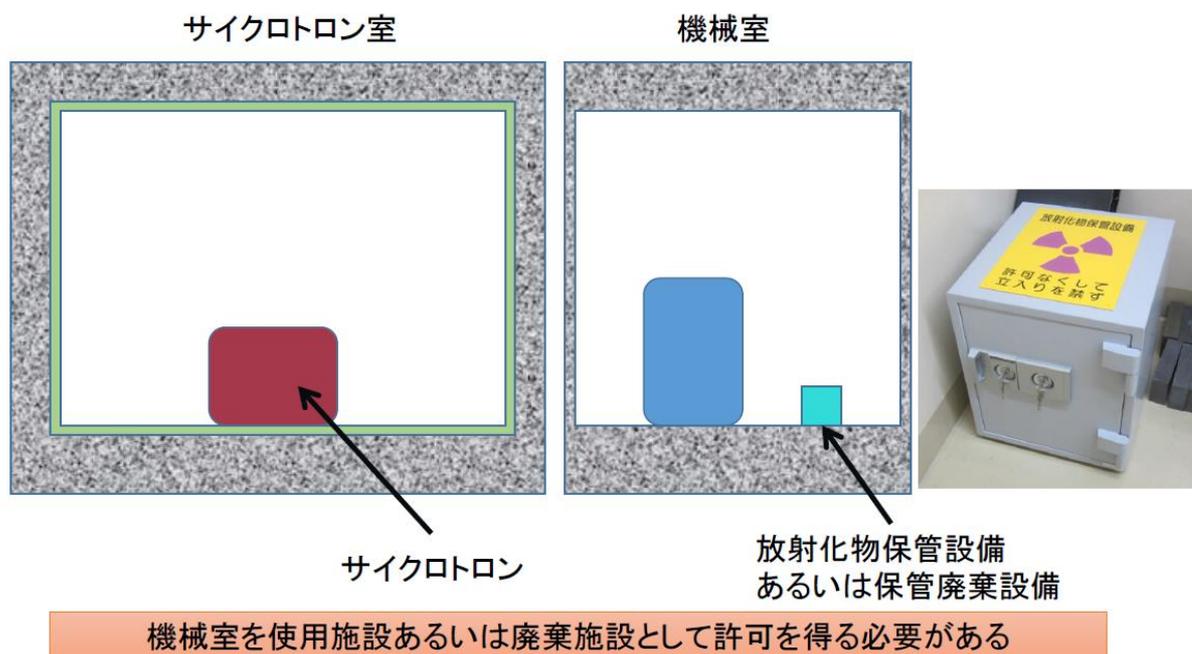


Fig.6 機械室に設備を設置した例

8. 保管廃棄設備

放射化物を廃棄するためには、速やかにRI協会へ委託廃棄を行う方法と、保管廃棄設備で保管廃棄を行った後、RI協会に委託廃棄を行う方法がある。放射化物の流れについてFig.7に示す。サイクロトン保有施設では、放射線障害防止法で許可を受けた非密封放射性同位元素対象の保管廃棄設備を有しているため、後者を選択する施設が多いと思われる。放射化物をこの設備において保管廃棄するためには放射線発生装置に係る様式で放射化物を保管廃棄する旨を追記し、変更許可申請を行う必要があると思われる。高レベルの放射化物は前述したように、保管廃棄した段階ではドラム缶の表面における1センチメートル線量当量率がRI協会の集荷の線量基準を満たさない場合がある。この場合は基準を満たすまで保管廃棄設備内で保管を行う必要がある。線量が十分に下がった時点で集荷依頼を行い、集荷時の核種と数量の再評価を行うようにする。また、これらの部品を保管廃棄する場合には、適切な遮蔽を施し、線量が法律で規定された値を超えないように管理しなければならない。Fig.8に自己遮蔽型PET用サイクロトン室内に設備を設置した事例を示す。室内は放射化が無視できるため、非自己遮蔽型に比べ室内に設備を設置することが容易である。

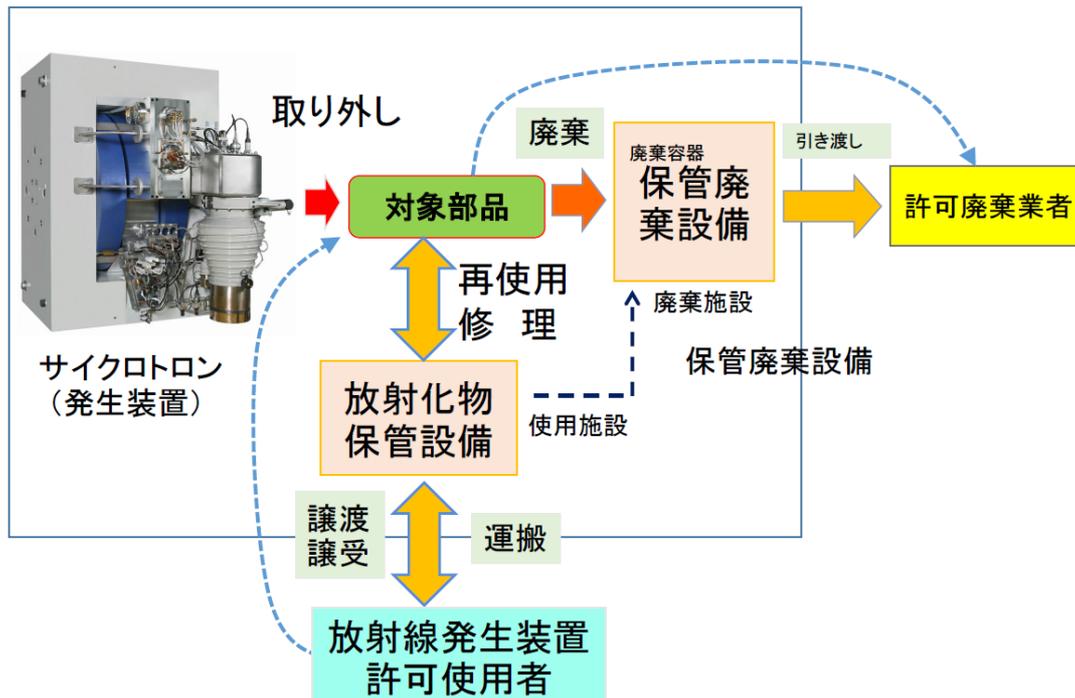


Fig.7 放射化物の流れ



Fig.8 自己遮蔽型サイクロトロン室内に設備を設置した例

9. 保管・保管廃棄容器

PET用サイクロトロンでは中性子による放射化だけでなく、加速粒子による放射化物が発生する。特にターゲットフォイル等は、本体装置を構成する他の部品に比べてより放射化している可能性がある。これらの高いレベルに放射化した部品を保管および保管廃棄する場合には保管容器や保管廃棄容器の遮蔽が必要になる場合がある。これらの放射化物は小型の容器に入れ、容器を鉛ブロック等で遮

蔽し管理する方法が委託調査報告で提案されている。容器の事例を図に示す（Fig.9上段）。一辺が約10 cmのステンレス製容器であり，小型のため少ない鉛ブロックで遮蔽することが可能である。Fig.9下段には容器の保管例を示す。



Fig.9 放射化物を入れる容器の例(上段)とその保管例(下段)

10. 記帳・記録について

放射化物を取り扱う際には基本的に放射性同位元素によって汚染された物と同様に記帳の義務が発生する。これまでの放射化物管理との大きな違いは，放射化物の核種・数量の記帳が必要となった点である。放射化物の核種・数量を記帳する際には，部品等の組成を考慮し，主要な核種・数量を記帳する（Fig.10）。放射化物の保管に関する記録において，核種は放射性同位元素等の種類ではなく，放射化物の種類であることに留意されたい。記帳様式の例として，原子力安全技術センターから記帳・記録のガイド（2012）⁸⁾が発行されているが，これを参考にする場合も，法令を確認しそれぞれの施設に合わせた記帳様式を備えることが良いと思われる。この際に医療用リニアックに準じて放射化物の材質から核種を推定し，容量の小さな物は点線源として50 cm以上離れた点の線量率から1センチメートル線量当量率定数を用いて数量を算出し，また，20 cm³以上の大きな物については，事務連絡に示された「医療用直線加速装置の放射化物の記帳のための換算について」を用いて数量の概算を行い，これらについて記帳することを提案している。高レベルの放射化物は線量が十分に下がった時点で集荷依頼を行い，集荷時の核種と数量の再評価を行うようにする。

放射化物の保管の記録			
管理番号 2012-2			
放射線取扱主任者		Ⓜ	
管理責任者		Ⓜ	
平成24年度			
名称	ターゲットフォイル	放射化物の種類	V-48
換算日時	平成24年9月10日 15時	数量・個数	55kBq×1個
材質	チタン合金	Lot番号	T-0015
放射化物発生時の状況等		サイクロトロン(CY-HM12)の部品交換	
保管開始年月日	平成24年9月10日	保管終了年月日	平成24年10月1日
保管の場所	サイクロトロン機械室 放射化物保管設備	保管の方法	放射化物をビニールに封入し、専用の容器(No.3)内に保管。
保管に従事する者の氏名	中央放射線部 放射線技師長 ####		
その他	#####病院において再利用する。手続きが完了するまで保管する。		
(保存期間 閉鎖後5年)			

放射化物の廃棄(保管廃棄)の記録			
管理番号 2012-8			
放射線取扱主任者		Ⓜ	
管理責任者		Ⓜ	
平成24年度			
名称	ターゲットフォイル	放射性同位元素等の種類	V-48
換算日時	平成24年9月10日 14時	数量・個数	1,967kBq×1個
材質	チタン合金	Lot番号	T-0015
放射化物発生時の状況等		サイクロトロン(CY-HM12)の部品交換	
廃棄の年月日	平成24年9月10日	廃棄の場所	保管廃棄設備
容器 No.	VC-1056	廃棄の方法	耐火性の容器に金属系非圧縮性不燃物として入れて保管廃棄室にて保管廃棄、のち許可廃棄業者に引き渡し。
廃棄に従事する者の氏名	中央放射線部 放射線技師長 ####		
その他	当該放射化物は、日本アイソトープ協会(許可廃棄業者:廃棄〇〇号)に引き渡すまで保管廃棄する。		
引渡し年月日		平成24年9月30日	
(保存期間 閉鎖後5年)			

Fig.10 放射化物の保管、保管廃棄の記録例

11. 数量の推定について

平成24年度の委託調査報告書では、数量の推定方法について提案がなされている。中性子による放射化物の場合は事務連絡にある医療用リニアックの例を参考にできる。また、加速粒子による放射化物や事務連絡に記載されていない核種の数量評価については、部品のサイズがそれほど大きくない(20 cm³以下)場合は点線源と見なし、適切な距離(50 cm以上離れた点)における1 cm線量当量率を測定し、測定値と測定距離の関係から1 cm線量当量率定数を用いて当該核種の数量を推定する方法が妥当と考えられる。

放射エネルギー (MBq) = 1 cm線量当量率 (μSv・h⁻¹) × 測定距離² (m²) / 1 cm線量当量率定数 (μSv・m²・MBq⁻¹・h⁻¹)

例えば、主要核種が⁵⁷Coと推測され、50 cmの距離における1 cm線量当量率が10 μSv/hである場合は、10×0.5²/0.0206=121 MBqとなる。

加速粒子による放射化物は高い放射化を示す物があり、線量率が高すぎるために対象物に検出器を密着させて測定することができない、また、放射線安全管理の観点から従事者の被ばくに注意しなければならないため適切な距離において測定する。20 cm³以上の大きさの物は、換算表から放射能の概量を求める。

12. 比較的高レベルに放射化した物品の管理について

高レベルに放射化した部品の取扱いについて留意しなければならないことがある。まず、一つ目は、部品の種類やサイクロトロンの使用状況によっては“mSv/h”

オーダーの線量率の場合があることである。そのため、保管や保管廃棄等、取扱いに際しては従事者の被ばくに十分注意しなければならない。各施設の実情に応じて合理的な管理方法を十分に検討してほしい。次に、これらの部品を保管廃棄する場合には、線量が法律で規定された値を超えないように管理しなければならないことである。常時立ち入る場所（1 mSv/週）、管理区域境界（1.3 mSv/3月）および事業所境界（250 μSv/3月）以下とするため、また、放射線業務従事者の線量を線量限度以下にする必要がある。そのため、鉛ブロックを使用する等、適切な遮蔽が必要であると思われる。保管廃棄の際にドラム缶を容器として使用した場合、遮蔽に鉛ブロックを使用すると非常に多くの個数が必要となる。よって、小さな放射化物を管理する場合は、Fig.9に示した小型の耐火性構造の容器を使うことで鉛等での遮蔽を合理的に行うことができる。また、委託廃棄の際にも注意が必要である。RI協会に委託廃棄する際には、ドラム缶の表面における1センチメートル線量当量率が500 μSv/h以下としなければならないため、必要に応じて放射能が減衰し線量率が基準以下となるまでは施設内にて一定期間保管する必要がある。

サイクロトロンに再度組み込む（再使用）可能性のある高線量率部品を一時的に取り外す場合は、サイクロトロン室内等の線量管理が適切に行える場所に置き、必要に応じて遮蔽等を施して再使用まで管理する。再度組み込むまでは取り外した日時、部品名称、従事した者の氏名等を簡易記録しておくことが望ましい。可能であれば核種、数量を記録しておくことが望ましいが、精密な測定は従事者の被ばく線量を高める危険性があるため簡易測定、あるいは既に報告された文献データを参考に方法を工夫することが合理的である。線量が十分減衰した後に放射線測定を行えば良い。放射化物保管設備に保管する場合ならびに保管廃棄設備に保管廃棄する場合も同様である。放射化した部品と従事者等の線量管理を両立して合理的な管理を行うことが重要である。再度組み込む可能性が無くなり、放射性廃棄物とする場合は、その時点から保管廃棄設備に保管廃棄し保管廃棄の記録を行う。

13. 変更許可申請および予防規程の改訂

平成24年の放射線障害防止法改正に伴い、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則」の手續様式で放射線発生装置に係る様式が変更となった（旧様式：様式第一中別紙様式ニ→新様式：様式第一中別紙様式ハ）。主な変更点は、使用施設の項目に放射化物保管設備に係る項目が追加されたことおよび廃棄設備に係る項目が追加されたことである。これまでの様式には放射線発生装置の運転に伴って発生する放射化物のことについて記載する項目がなかったが、今回の改正で追加された。放射化物が発生する施設においては、これらの

項目を追加した上で変更許可申請を行うことを推奨する。医療法で許可を受けた保管廃棄設備に放射化物を保管廃棄する場合、また、密封されていない放射性同位元素に係る様式（様式第一中別紙様式イ）で許可された保管廃棄設備に放射化物を保管廃棄する場合は、放射線発生装置に係る様式による許可を受ける必要があると考えられる。放射化物を保管する場合は、放射化物保管設備については①構造および材料、②外部との区画状況、③閉鎖のための設備又は器具、④標識を付ける箇所、⑤放射化物保管容器についての項目を追加する必要がある。また、保管廃棄する場合には、廃棄施設の位置、廃棄の方法、主要構造部等、遮蔽壁その他の遮蔽物、廃棄設備、保管廃棄設備（前述①～④および保管廃棄容器） 出入口および管理区域について追加する必要がある。

予防規程の改訂に関しては、本学会の2012年8月の学術交流委員会報告「法改正に伴う放射線障害予防規程の改訂における留意点などについて～平成24年4月1日施行の改正放射線障害防止法に関して～」⁹⁾が参考となる。2013年4月をもって文部科学省から原子力規制委員会に業務移管しており、これまで文部科学大臣に届け出る内容だったものは原子力規制委員会に届け出ることになったため、予防規程の内容も同様に改訂する必要があることに留意していただきたい。

なお、事業所（医療機関）の保有する放射性同位元素・放射線発生装置あるいは放射線管理の考え方等に具体的な管理手法を記した予防規程は自ずと医療機関ごとに異なる。したがって、今回の改正の内容をよく理解して各医療機関の状況に合った予防規程に改訂することが必要である。

14. Q&A

Q.1 事業所内で保管廃棄した放射化物を再使用することは可能か？

A.1 保管廃棄した（ドラム缶等に入れた）放射化物は二度と使用できない。ドラム缶に一度入れたものを取り出すことはできない。再使用したい場合には、放射化物保管設備を設けて保管する必要がある。

Q.2 貯蔵室内の貯蔵箱を放射化物保管設備としても良いか？

A.2 放射化物保管設備は使用施設であり、貯蔵施設の中に使用施設を設けることは基本的にはできないと考えられる。

Q.3 建屋シールドのサイクロトロンをもつ医療機関だが、使用室内のものはすべて放射化しているとみなす必要があるか？

A.3 原則全てのものが放射化しているとみなされる。ただし信頼できる実測データ、計算結果等により放射化物として取り扱う必要がないと確認でき事務連絡などで明示されたものは管理対象から外すことが可能である。しかしながら、放射化物として取り扱うかどうかの判断は、クリアランス制度の導入に伴って告示として規定された放射能濃度およびその考え方を参考としなければならない。

Q.4 放射線発生装置のターゲット等の放射化物は、装置から取り外した後、非密封線源としての扱いは必要ないか？

A.4 放射化物は、密封線源と同様の扱いをする。ただし、表面汚染が発生している場合には、非密封放射性同位元素と同様の管理を行う。

Q.5 放射化物を保管又は保管廃棄する際に、必ず保管設備又は保管廃棄設備を設置しなければならないのか？RI検査室の保管廃棄設備（室）を使用して良いか？

A.5 それぞれの放射線発生装置ごとに、保管廃棄設備の変更許可申請を行うことで、障防法で許可された非密封RIの保管廃棄設備を使用してよい。ただし、速やかに廃棄する場合は保管廃棄設備を設けなくてもよい。保管する場合は放射化物保管設備を設ける必要がある。

Q.6 放射線障害予防規程の改訂はどのような場合に必要で、どういったことを変更する必要があるか？

A.6 各施設において放射化物の取扱いを運用することのできる規程にする必要がある。放射性同位元素等（放射化物を含む）の受入れ、払出し、保管、運搬、又は廃棄に関することについて定めることになっている（法律施行規則第21条参照）。

Q.7 放射化物が発生する場合は必ず変更許可申請が必要か？

A.7 速やかに許可廃棄業者等に引き渡す場合には、保管廃棄設備は設けなくてもよい。障防法で許可された非密封RIの保管廃棄設備に放射化物を保管廃棄する場合は変更許可申請が必要である。

15. まとめ

PET用サイクロトロンにおける放射化物の管理について事例を含め紹介した。ただし、この報告は平成25年12月時点での小委員会の見解であり、今後新たなデータや考え方が出されれば変わる可能性もあることを予め承知願いたい。また、施設によって状況や管理方法が異なるため、それぞれの施設における主任者が医療機関の管理者と十分に協議した上で責任をもって管理することが望まれる。

なお、立ち入り検査において法令違反と判断された場合には原子力規制委員会に報告がなされ、その結果がホームページ等において公表される。また、本稿では具体的に示さなかったが、放射化物保管設備と保管廃棄設備の違いについては放射線治療装置の学会標準¹⁰⁾を参照いただきたい。

謝辞

本報告を作成するにあたり、ご指導、ご助言いただきました先端医療センターの千田道雄先生、佐々木将博先生、高エネルギー加速器研究機構の榎本和義先生ならびにサイクロトロン放射線管理に携わっている皆様に深謝いたします。また、資料のご

提供ならびに現場のご意見を仲介いただきました日本核医学技術学会放射線管理・防護に関する調査検討委員会の皆様に深謝いたします。

参考文献

- 1) 平成 10 年 10 月 30 日付科学技術庁原子力安全局放射線安全課長通知「放射線発生装置使用施設における放射化物の取扱いについて」
- 2) 原子力安全技術センター. 平成 23 年度 放射線発生装置から発生した放射線によって汚染された物の安全規制に向けた運用基準の整備に関する調査. 平成 24 年 3 月
- 3) 原子力安全技術センター. 平成 24 年度 放射線発生装置から発生した放射線によって汚染された物の安全規制のための運用基準に関する調査. 平成 25 年 3 月
- 4) 平成 24 年 3 月付文部科学省科学技術・学術政策局原子力安全課放射線規制室事務連絡「放射性同位元素等による放射線障害防止に関する法律の一部を改正する法律並びに関係政令、省令及び告示の施行について」
- 5) 上叢義朋. 放射化と表面線量率の関連. 日本放射線安全管理学会誌. 12 (1), 36-40.2013
- 6) Vivek Manickam, Richard R. Brey, Peter A. Jenkins, et al. Measurements of Activation Products Associated with Havar Foils from a GE PET trace Medical Cyclotron Using High Resolution Gamma Spectroscopy. The Radiation Safety Journal 2009; 96(1 Suppl): s37~s42.
- 7) Pietro Guarino, Salvatore Rizzo, Elio Tomarchio. Measurement of activity of the predominant gamma-emitting radionuclides in activated components of a medical cyclotron plant. 12th International Congress of International Radiation Association(IRPA 12), Buenos Aires Argentina Oct 2008
- 8) 原子力安全技術センター 記帳・記録のガイド 2012. 双文社, 東京, 2012
- 9) 「法改正に伴う放射線障害予防規程の改訂における留意点などについて～平成 24 年 4 月 1 日施行の改正放射線障害防止法に関して～」
- 10) クリアランスおよび放射化物に関する医療関係学会等団体合同ワーキンググループ. 放射線治療装置における放射化物の管理に関する学会標準ドラフト 平成 24 年 7 月 10 日版