

これに対しては、管理区域からの排水を、放射能濃度の確認なしに一般放流しているとの情報が周辺住民や下水処理場等に伝わると、計算上は問題なくても不安をおおるために、パブリックアクセプタンス上は濃度を委託測定などにより確認して放流しているとすべきという意見が現場からあった。

また、管理区域外となる加速器のクーリングタワーの循環水の扱いに関して、JIRAのPET施設のQ&Aでは、

-----  
Q42. 加速器のクーリングタワーの循環水配管は管理区域になるのか？

A42. 管理区域内に設置する必要はありません。また、循環している水についても密閉系であるため一般放流してかまいませんが、放射化していないか確認してください。

-----  
とされており<sup>1</sup>、JIRAでは測定することが基本との考え方を採用している。

しかし、クーリングタワーの循環水配管から発生する排液は、そもそも、管理区域外で発生する排液である。冷却塔の冷却水は、熱交換器によりサイクロトロンを直接冷却している冷却水とは分離されており、放射化の恐れはない。従って、放射線防護上は、循環水配管内のトリチウムの事後評価は不要であると考えられる。

他方、医療機関からは、

<sup>1</sup>[http://www.jira-net.or.jp/commission/hyoujunka/04\\_information/pdf/pet\\_qa.pdf](http://www.jira-net.or.jp/commission/hyoujunka/04_information/pdf/pet_qa.pdf)

・医療用加速器の冷却水受け皿は、事故が起きた場合を想定して、自主的に作っている。国で何らかのガイドラインを定めるべきではないか。

・冷却水は閉ループということもあり、特に管理指針は無い。そもそも、建設関係でも医療機関での放射化の管理指針は全く無く国で何らかのガイドラインを定めるべきではないか。

との意見が寄せられた。

しかし、重粒子線治療施設に関して医療法改正を目指している厚生労働科学研究辻井班リポートではその必要性について言及はない。また、医療現場では、設計時に、施設を何十年か運用した後の放射化量を計算して、IAEA SAFETY GUIDE RS-G-1.7と比較しており、自主基準も整備されている。

このため、ここまでの対策を講じるかどうかは、医療機関と周辺自治体、周辺機関との調整で決定すればよいと考えられる。

## 2. ターゲット水の放射化

ターゲット水からは V-48, Co-57, Zr-97 などが検出されることが知られている。ターゲット水にこれらの放射化物が混入する機序は、加速器製造メーカーによると、よくわかっていないとされるが、ターゲットへの照射では、ターゲットフォイルを陽子が通過し、ターゲットフォイルに含まれる Ti との  $Ti(p, xn)$  反応で V-48 が生成され、その際のリコイル散乱などで V-48 が選択的に出てくる可能性があると考えられる。また、ターゲット水付近は高温高压になって

いるため、ターゲット水を格納している金属表面の物質はスパッタリングされやすい状態になっている。即ち、激しい分子運動レベルでのスパッタリングにより V-48 などが選択的にターゲット水中に放出されると考えられるとの説明が加速器製造メーカーからなされたが、チタンの溶解度を考えるとこの寄与は限定的かもしれない。また、Co-57 は、チタン合金の Ni-58 由来 (Ni-58 (n, np) や Ni-58 (n, 2n) Ni-57 → Co-57)、Zr-97 はチタン合金の Zr-96 由来 (Zr-96 (n,  $\gamma$ ) Zr-97) が考えられることから、3 気圧程度のターゲット水が陽子の照射により高温になり気泡が生じ、陽子がターゲット水を透過しターゲット水の容器壁に入射することも考えられる。V-48 の生成濃度を 18MeV のサイクロトロン施設から試料提供を受け計測したところ、運転終了から数時間経過後の換算値で 10kBq/g であった。ターゲット水の量は約 2g なので、生成量は 100kBq を超えない。また、減衰を考慮すると 5 回分の照射済みターゲット水が一事業所に同時に存在することはあり得ない。従って、この V-48 は放射性物質として扱う必要はない。また、トリチウムの生成量も規制免除レベルを超えない。

ただし、加速器メーカーでは、ターゲット水は放射化物で適切な処理が必要としており、ターゲット水の取り扱いを十分注意するよう、各医療機関に要請しており、各医療機関では、それに従った管理が行われている実情にある。このため、過度にならず適切な管理がなされるように指針を策定

する必要があると考えられた。

なお、ターゲット水中の V-48 は、ターゲット水の性状をモニタリングする指標となりうるかもしれない。例えば、通常の照射でのレベルより回収水内の不純物 (V-48 など) が多かった場合は、ターゲット内に充填する水の量が少ないあるいは、ターゲット水が沸騰しているなどの現象が想定できると考えられる。このため、来年度は、さらにデータを蓄積することにしたい。

### 3. 合成された FDG 中の不純核種

合成され検定後の FDG やそれを扱った、分注装置やチューブシリンジ類を、放射線障害防止法の規程に基づき非放射性廃棄物として扱われている例があるが、少数例にとどまっている。FDG 合成では、ターゲット回収水は直接反応器には導入されず、カラムで陰イオンをトラップさせたあと、別の容器に回収される。このため、ターゲットで生成された不純物は金属イオンも含めほとんどが除去される。F-回収水のカラム除去は、日本国内にある FDG 合成装置は全て QMA というカラムを使用してターゲット回収水の不純物核種が除去されている。このカラムを用いて約 98% の放射性異核種は除去できると考えられる。しかし、合成装置メーカーでは、FDG 製剤に不純物核種の混入には責任は持てないとしている。このため、適切な方法により抽出した 3 ロット以上のサンプルに対し、Ge 半導体検出器、液体シンチレータでの測定をおこない、基準値以下であることを確認するなど、何らか

の基準値を明示することが、制度定着に望ましいと考えられる。今年度の計測では、合成された FDG 中の不純核種の存在は確認されなかった。FDG 中に含まれる放射化物の実情を明らかにすることが廃棄物のよりよい規制整備に望まれる。このため、今後、国内の測定データをまとめたい。

## C2.5 空気中に生成される放射化核種による放射線の線量の評価

### (1)安全評価の対象者

- ・ 加速器施設の作業従事者や一般職員
- ・ 加速器を設置している施設に隣接している公衆

### (2)Ar-41 の生成量評価

加速器使用に伴う空気の放射化で考慮すべき核種は、市販の放射線管理マニュアルに記載がある<sup>6</sup>。生成される核種は、

N-14(n,2n)N-13

O-16(n,2n)O-15

O-16(n,p)N-16

Ar-40(n,α)S-37

Ar-40(n,p)Cl-40

Ar-40 (n,γ) Ar-41

である。医療用小型加速器の場合に、この中で線量に最も寄与するのは、アルゴンの放射化である。空気中のアルゴンは (n, γ) 反応により放射性の Ar-41 となる。空気を容器に密封するだけで小型サイクロトロンターゲット付近では Ar-41 が検出される。加速器室のエリアモニタを解析すると、Ar-41 生成量を推計することができる。

Ar-41 の空気中濃度限度は、作業環境と

一般環境のそれぞれに対し定められている。作業環境で  $1 \times 10^{-1}$  Bq/cm<sup>3</sup> であり、一般環境では  $5 \times 10^{-4}$  Bq/cm<sup>3</sup> である。

作業環境の Ar-41 は作業従事者の内部被ばくに関係し、それを一般環境に排気することにより一般職員や公衆が曝露する。

医療用小型加速器の使用に伴って発生する Ar-41 の濃度を測定し、濃度限度との比較を行っている発表<sup>7, 8</sup>を検討した。ターゲット付近では、 $0.62 \times 10^{-1}$  Bq/cm<sup>3</sup> であったとされる。これでも、作業環境の濃度は下回っているが、排気の基準に比べると 120 倍程度になっている。また、ターゲット側面から 1 m 離れた場所では、室内濃度限度に対しては 0.07 であるが排気の基準に比べると 14 倍程度になっている。小型サイクロトロン運転室内では排気濃度限度の 10 倍程度の Ar-41 が検出されることがある。しかし、排気中の濃度は十分に濃度限度を下回る。また、アルゴンを 400mmHg 封入した容器を用いるとあらゆる加速器で空気中の Ar-41 が検出できるとされている。ただし、治療用リニアックでは 1Gy 中、中性子による線量は、ビーム中心で 2.5mSv、照射野の端から 20cm で 0.55mSv、50cm で 0.37mSv、50cm で 0.22mSv とわずかであり、ビーム中心で中性子数は  $4.7E+05/cm^2$  に過ぎず、空気の放射化は無視しうる。なお、この文献では、この論文ではフィルターで Ar-41 が除去できるように記載されているが、それは妥当ではないと思われる。

一方、空気の放射化による空中放射能濃

度は、次式により導ける<sup>9</sup>。

$$R = \lambda / (\lambda + \alpha) * N \Phi \sigma [ 1 - \exp \{ - (\lambda + \alpha) t \} ]$$

R : 空中放射能濃度 ( Bq/cm<sup>3</sup> )

$\lambda$  : 崩壊定数 ( min<sup>-1</sup> )

$\alpha$  : 室内空気排出率 ( min<sup>-1</sup> )

N : 原子密度 ( atoms cm<sup>-3</sup> )

$\Phi$  : 中性子束密度 ( n cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> )

$\sigma$  : 反応断面積 ( cm<sup>2</sup> atom<sup>-1</sup> )

室内空気排出率は換気要因で決定される。濃度を低下させるには換気が有効である。上述の資料では排気の方法のひとつとして、連続強制排気が挙げられている。

例えば1時間に10回空気を入れ換えるとすると、濃度は1/10に低下させることができると考えられる。

また排気をする前にクローズドの状態で加速器の運転後に Ar-41 を減衰させた後、排気をする方法も記述されている。

例えば、午前8時に運転が終わった場合には、翌日の午前5時には、濃度は $3 \times 10^{-4}$ 程度に減衰している。

さらに、Ar-41 の濃度の不均一さも考慮に入れることができるかもしれない。

下の図では中性子の空間分布が示されている<sup>3</sup>。このように中性子の線量はターゲットボックスとの位置関係が大きく異なる。

いずれの方法でも空気中および大気中の濃度限度を超えないように管理方法をあらかじめ決めておく必要がある。

排気された Ar-41 の公衆への影響は、集団被ばく線量を計算することにより評価できる。

集団被ばく線量は、大気拡散モデルなどを用い、空気中の濃度を求め、それを個人の線量に換算し、それに曝露人口を掛けることで計算できる。

大型加速器施設に比べると、医療用ペビーサイクロトロンから環境に放出される Ar-41 の寄与が小さいことが理解できる。もっとも、大型加速器施設から排出される Ar-41 は厳格に制御されており、公衆のリスクを過度に上昇させることは全くないとは言うまでもない。

空気中には放射化物以外にもオゾンや二酸化窒素が生成される。これまで、電子加速器でのオゾンや窒素酸化物生成の管理に関しては、30MeV以下の電子線であれば特別な配慮は不要とされてきた<sup>10</sup>。ここで、改めて生成されるオゾン濃度を推計してみる。加速器でのオゾン生成のG値(単位電離エネルギー(100[eV])あたりの生成量)は、7.4-10.3molecule/100eV<sup>11</sup>、6 molecule/100 eV<sup>12</sup>とされている。装置の線量率は、治療用加速器のビーム内を2.8Gy/minとし、照射時間は、全国の医療機関の使用承認時間の中央値104時間/3月であることから、1日照射時間を96minとすると、その空気カーマは、268.8Gyになる。空気の密度は、

<sup>3</sup>藤淵 俊王, 山口 一郎, 田中 真司, 渡辺 浩, 加藤 英幸. 医用小型サイクロトロンの運転に伴う放射物生成. 第6回JRSMS,2007

1.2kg/m<sup>3</sup> であるので、G value を 8 molecule/100 eV とすると、生成オゾン濃度は、1.3E+23 molecule/m<sup>3</sup> であることから、加速器運転中のオゾン生成率は 52 μl/m<sup>3</sup>/min になる。運転時間比を 0.2 とすると、平均のオゾン生成率は 10 μl/m<sup>3</sup>/min になる。ここで、換気回数を 10 回/1 時間とし、オゾンの分解時間を 5 時間とすると、オゾン除去（拡散+分解）実効時間は約 6 分となることから、ビーム内のオゾン濃度の定常値は 60ppm となる。室内全体を考えると、ビーム外の生成量は 3 桁以上低いため、0.1ppm は超えないと考えられる。

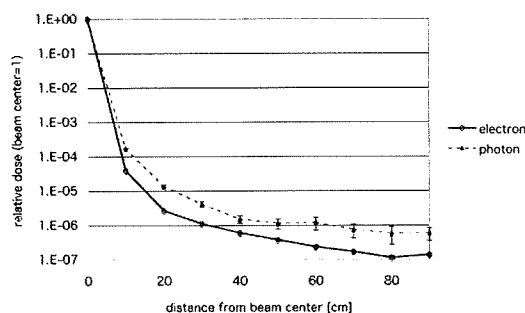


図. ビーム中心からの距離と相対的なオゾン濃度

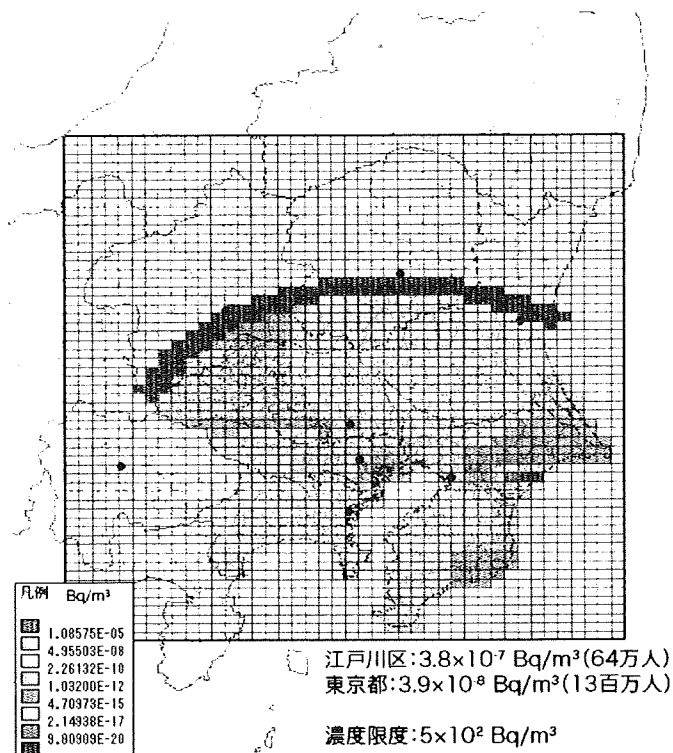


図 1. 江戸川区内の医療機関にサイクロトロンが運転していると仮定した場合の空气中濃度分布

出典：生活環境放射線（国民線量の算定），原子力安全研究協会，P.139(1992)

表 1. 江戸川区内の医療機関にサイクロトロンが運転していると仮定した場合の集団被ばく線量の推計例

	濃度 pSv/y	集団線量 Sv・人/y
江戸川区	7.3E-01	4.6E-07
東京都	7.6E-02	9.8E-07

表 2. 加速器施設の評価例

加速器施設	主要加速器	集団実効線量 人・Sv/年
東北大学原子核理学研究施設	電子リニアック	$3.5 \times 10^{-3}$
高エネルギー物理学研究所	電子リニアック	$9.6 \times 10^{-3}$
東京大学原子核研究所	サイクロトロン	$6.4 \times 10^{-3}$

## C2.6 サイクロトロン室のコンクリート壁中の放射化核種

室内の壁の深さ 2cm までと 2-4cm までの深さのコンクリートを採取し、放射核種を計測した。ビームターゲット延長線から 50cm 程度はなれた場所での表面から 2cm までの深さの試料では、Co-60、Eu-152 とともに 0.1Bq/g 程度で、仁科記念サイクロトロンセンターのデータと同程度であった。濃度基準では、RS-G-1.7 のクリアランスレベルを 2 倍程度上回ることになる。コンクリートコア抜き試料から計測された核種は、Eu-152、Co-60、Cs-134、Sc-46、Zn-65（主として熱中性子反応により生成した核種）、Mn-54、Na-22（高速中性子により生成した核種）、K-40（天然起源核種）である。また、ウラン・トリウム系列も研修された。すべての測定点で放射能値が最も高かったのは天然起源核種である K-40 で 0.3～0.4Bq/g であり、人工起源核種では Eu-152 と Co-60 が支配的であった。速中性子に起因する Mn-54 はターゲットやディフレクター付近から採取した試料で確認された。図に A-C 壁面と床面 E の典型的な測定値を基に IAEA のクリアランス値（上述した核種はすべて 0.1 : IAEA RS-G-1.7 より）から算出した  $\Sigma Di/Ci$  を示す。この図から A 面においては表面から 30cm 程度まで、B 及び E 面においては 20cm まで、そして C 面においては 10cm 程度まではクリアランスレベルを超えていることがわかる。

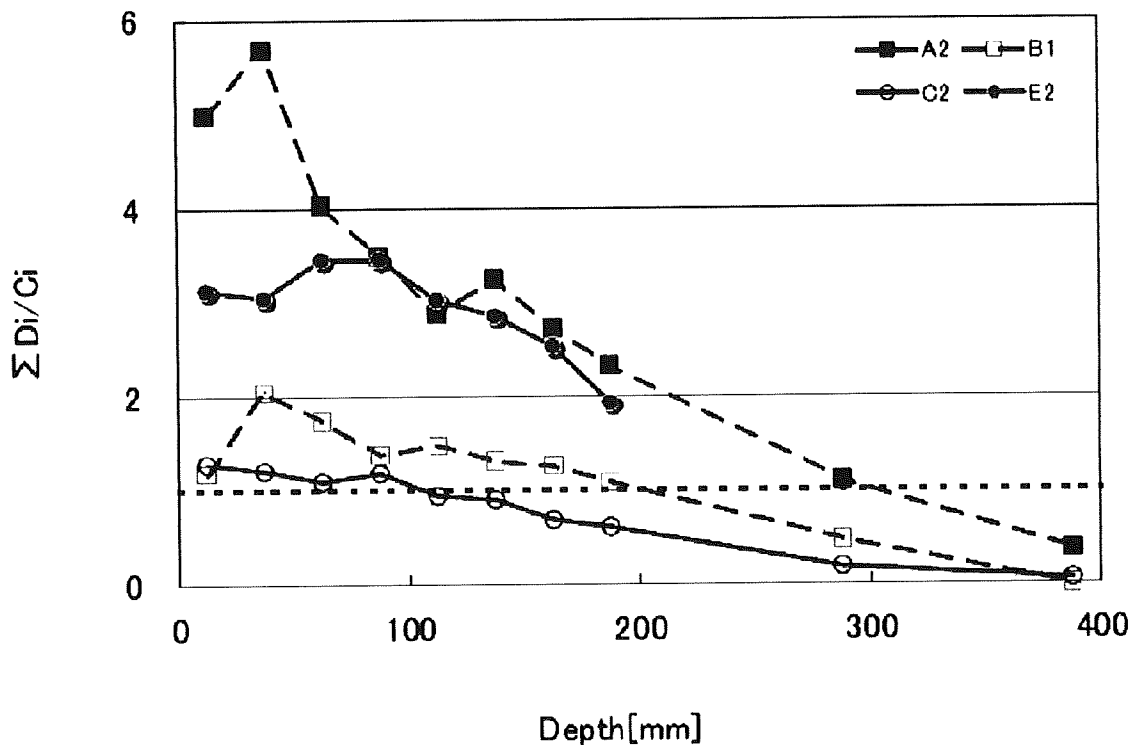
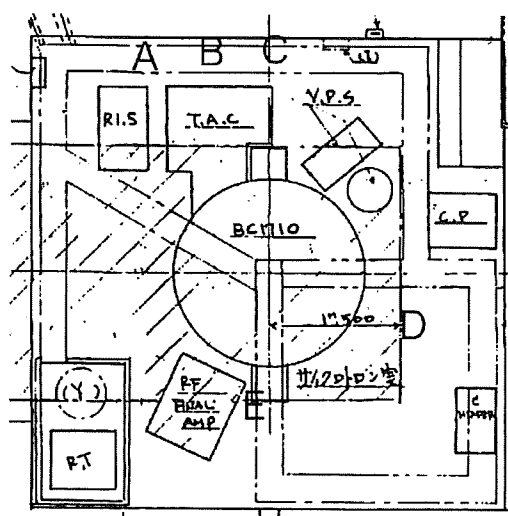


図. サイクロトロン室のコア抜き試料の放射能濃度

表. 使用室のコンクリート壁（ビームターゲット延長線から 50cm 程度はなれた場所）の放射化物の放射能濃度

放射化核種	放射能 (Bq/g)	S.D. (Bq/g)
Sc- 46	1.13E-02	1.23E-03
Sc- 46	1.06E-02	1.52E-03
Mn-54	4.56E-03	8.67E-04
Co- 60	1.02E-01	2.24E-03
Co- 60	1.02E-01	2.30E-03
Zn-65	6.65E-03	1.74E-03
Cs-134	1.30E-02	1.07E-03
Eu-152	9.39E-02	6.30E-03
Eu-152	9.08E-02	3.61E-03
Eu-152	7.46E-02	8.17E-03
Eu-152	8.40E-02	8.93E-03
Eu-152	9.81E-02	9.74E-03
Eu-152	8.29E-02	1.02E-02
【自然核種】		
K - 40	2.97E-01	1.77E-02





A. コンクリート中に生成された放射化核種、深さ 0-2cm [Bq/g]

	A	B	C	D	E
Na- 22	<3E-03	2.E-02	<8E-03	<2E-02	<8E-03
Sc- 46	1.E-02	3.E-02	1.E-02	<2E-02	<1E-02
Mn- 54	9.E-03	4.E-02	6.E-03	<1E-02	<7E-03
Co- 60	7.E-02	2.E-01	1.E-01	7.E-02	6.E-02
Cs-134	2.E-02	2.E-02	2.E-02	<1E-02	<7E-03
Eu-152	8.E-02	3.E-01	1.E-01	<1E-01	5.E-02
自然核種					
K - 40	5.E-01	6.E-01	4.E-01	4.E-01	6.E-01

B. コンクリート中に生成された放射化核種、深さ 2-4cm [Bq/g]

	A	B	C	D	E
Na- 22	<1E-02	<2E-02	<8E-03	<2E-02	<1E-01
Sc- 46	<2E-02	<4E-02	1.E-02	<2E-02	<1E-01
Mn- 54	<9E-03	4.E-02	<8E-03	<1E-02	<9E-03
Co- 60	9.E-02	2.E-01	1.E-01	7.E-02	7.E-02
Cs-134	2.E-02	4.E-02	<7E-03	2.E-02	<8E-03
Eu-152	1.E-01	3.E-01	2.E-01	<8E-02	<1E-01
自然核種					
K - 40	3.E-01	4.E-01	3.E-01	2.E-01	6.E-01

濃度が比較的高いのは、ターゲットボックスに近い B であった。

K の濃度は、表面の方がやや高いことが疑われた(0-2cm: 0.48[Bq/g], 2-4cm: 0.38[Bq/g], P=0.046)。

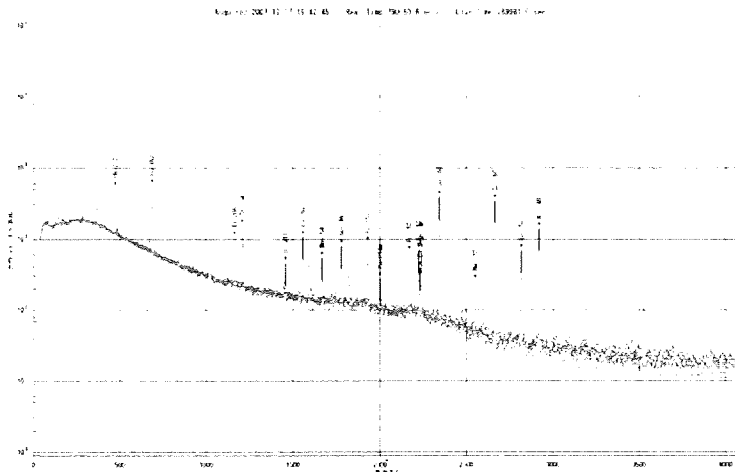


図. サイクロトロン室のコンクリート壁表面試料のガンマ線スペクトル

(壁中の Co-60 からの線量率)

壁中の Co-60 からの線量率を、EGS5 を用いて計算した。計算の条件は、Co-60 の放射能濃度を 0.1Bq/g で均一、コンクリートの大きさを  $3 \times 3 \times 0.1\text{m}$  とし、空間線量率を計算した。

その結果、コンクリートから

- ・ 30cm で 17nGy/h
- ・ 表面で 25nGy/h

となった。

### C. 3 医療機関対象調査

調査結果は別に示す。

### D. 考察

医療用サイクロトロンではターゲットの核反応で比較的多くの中性子が生成される。その反応は F-18 の生成では、主として、 $O-18(p,n)F-18$  である。この反応を用い一日の F-18 の生成量が 100GBq である場合、中性子の生成量は一日  $10^{15}$  個程度になる。

そのため核反応による装置や周囲の放射化への対応が課題となる。合理的な管理を行うには、サイクロトロン室内の中性子束を把握し、放射化する可能性の高い箇所とその放射化の程度をあらかじめ予測しておくのが有益であると考えられる。そこで、医療機関でも実現可能と考えられる方法として、食塩を用いた  $^{23}\text{Na}$  の放射化法で熱中子を計測することが現実的かどうか検討し

た。

中性子束分布の測定により、放射化物の発生しやすい箇所や発生量を予測することができ、効率的な放射化物管理が行えると考えられる。

PET 製剤製造用サイクロترون室から採取したコンクリート試料を測定し、8 核種が確認された。放射能濃度では天然起源の K-40 がもっとも高く、人工起源核種では Eu-152, Co-60 が支配的であること、高速中性子に起因する Mn-54 も確認されたこと、表面から 10cm~30cm でクリアランスレベルを超えること、などがあきらかになった。

#### D. 1 ターゲットで生成される放射化物

ターゲット集合体で生成されていた  $\gamma$  線放出核種が同定された。これらの程度は低く、そもそも放射化物として扱う必要があるかどうかの検討も求められると考えられた。いずれにしても、放射化物として、廃棄する際には、その性状の把握が求められるが、本研究をもとに、書類の記入例を作成するとよいのではないかと考えられた。

その他に放射化されるものとして、フォイルストリップ、ターゲットが考えられた。これらは定期点検の都度交換を行って、交換後の部品はサイクロترون室内などで保管されている現状にある。また、ロータリーポンプの油が放射化する可能性が高いとされるため、その管理方法を定めておく必要がある。課題として

は、放射化物の保管の基準づくりのことも考えると、部品の種類や保管時期別によるどの程度の遮蔽が必要かの基準を示しておくとのよいのではないかと考えられた。

#### D. 2 水の放射化

核融合科学研究所での冷却水中でのトリチウムの生成は年間 10Bq（濃度は  $1 \times 10^{-4}$  (Bq/l)）で、下水への排出に伴う環境影響評価もなされている<sup>4</sup>。

PET 用のベビーサイクロترونを年間 10,000 秒程度運転すると、それと同程度の生成量となりえるので、ターゲット水中の不純物などに由来した放射化物が生成されるなど想定外のことがおきない限りは、これと同様に評価でき、問題がないことを示すことができる。

医療用加速器の冷却水受け皿は、粒子線治療装置では、事故が起きた場合を想定して、自主的に作っている。ただし、標準化はされていない。また、厚生労働科学研究辻井班リポートではその必要性は言及されていない。

一方、冷却水は閉ループということもあり、特に管理指針は見あたらなかったが、設計時には、施設を何十年か運用した後の放射化量を計算して、IAEA SAFETY GUIDE RS-G-1.7 と比較していた。このように包括的に安全評価がなされており、医療機関の小型サイクロترونの冷却水の扱いで放射化を考慮した設備を設ける

<sup>4</sup> [http://safety-info.nifs.ac.jp/safe/safe\\_03.html](http://safety-info.nifs.ac.jp/safe/safe_03.html)

必要はないと考えられた。

### D.3 オイルの放射化

九州大学からは、ロータリポンプからの放射化物が排出されるとの報告がなされていた。しかし、現在の加速器では、排気トラップが備わっており、そのような放出は想定外とできる。

### D.4 サイクロトロン室内外での中性子モニタリング

#### (1)食塩を試料とした放射化法の利点と欠点

食塩を用いることにより安価で大量点の中性子束測定を行えることが確認できた。中性子の測定法としては、他にホウ酸リチウム( ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ : LBO)を蛍光体とした熱ルミネッセンス線量計 (Thermoluminescence Dosimeter: TLD) や環境測定用線量計 (CR-39) が挙げられる。しかし LBO はガンマ線にも感度を持つため複数の素子を組み合わせる必要があり操作が煩雑で、また中性子用の素子は高価でまた測定する頻度が少ないため医療機関では普及してない。CR-39 では繰り返し測定を行えずコストが高くなることと、高線量の測定を行えない、測定結果がでるまで1カ月程度の時間を要する、という問題点が挙げられる。一方、放射化法の利点として、エックス線やガンマ線の影響を受けることなく中性子の測定を行うことが可能、素子の再利用が可能のため低コストでの測定が行える、ということが挙げられる。食塩は放射化断面積が金に比べ小さく、ま

た半減期も短いため、照射後時間が経過するほど精度は低下するが、照射数時間後に取り出すと  ${}^{38}\text{Cl}$  の影響なく計測できることが確認できた。スペクトロメータに関して、多くの PET 施設で所持されている NaI スペクトロメータでも Ge 半導体スペクトロメータに比べエネルギー分解能は落ちるが、相対測定であれば十分検証可能であることがわかった。ただし、スペクトロメータで1つずつ測定を行う場合には、1つの試料を測定する間に他の試料の放射能が減衰してしまうために、測定できる数は限られる。放射化した金箔に計測用高感度イメージングプレートを置き、オートラジオグラフィにより放射能比を測定する方法が報告されており<sup>13</sup>、そのようなシステムを使用できる施設では効率よく計測を行えると考えられる。

#### (2)サイクロトロン室内の光子および中性子分布

サイクロトロン運転中の中性子束の分布が光子の分布と異なったのは、ターゲットボックスの中性子と光子のシールド構造が異なるためと考えられる。また非運転時の光子線分布が中性子分布に非常に近似していたことから、光子線の発生の多くは中性子による装置や床などの放射化物質によると類推され、中性子の遮蔽を考えた加速器のデザインが施設の放射化対策に重要で、中性子の高いところは、中性子用の遮蔽材を追加することにより発生線量を低減させることができると考えられる。また今回の

測定結果より、ターゲット付近の物質は高度に放射化しており、サイクロトロン室内の作業時にも付近にいることにより被曝が増大することが予想される。

### (3)放射化への対策

非運転時の光子分布から、床のコンクリートも放射化されていることが確認できた。コンクリートの放射化対策として、低放射化コンクリートが開発されており<sup>14</sup>、それを使用している施設もある。サイクロトロンのエネルギーや自己遮蔽シールドの有無による放射化の程度の違いや、コストパフォーマンスの観点から、一概にその素材を採用するか判断は難しい。しかし、サイクロトロン施設の廃棄まで含めた費用の試算や放射線安全管理上の立場からも検討する必要がある、そのためにも、中性子のデータは必要となってくる。施設ごとにサイクロトロン室の大きさやレイアウトは異なるため、各施設で中性子分布を把握しておくことは有用である。

### (4) 室外での中性子束測定の必要性

JIRA の PET 施設の Q&A では、電源機械室は、サイクロトロン室に隣接し、放射線作業従事者が常時滞在するため、 $\gamma$ 線エリアモニタだけでなく、中性子線エリアモニタも設置するように記述されている (Q43. 管理区域のモニタリングはどうするの?)<sup>5</sup>。

<sup>5</sup>[http://www.jira-net.or.jp/commission/hyoujunka/04\\_information/pdf/pet\\_qa.pdf](http://www.jira-net.or.jp/commission/hyoujunka/04_information/pdf/pet_qa.pdf)

## D.5 計算評価の課題

放射化物生成量の評価では、照射履歴の設定が重要であり、ビーム時間を正確に把握することが求められる。ビーム時間を十分に把握しておかないと計算評価より実測の方が大きな値になることもありえる<sup>15</sup>。

また、計算評価ではターゲットなどの組成情報が必要である。放射性医薬品に由来した汚染物の処理の合理化では、原料の品質管理による廃棄物処理の合理化が検討されている。すなわち、日本放射性医薬品協会のわたしたちのビジョン (2005 年 10 月) では、原料ラジオアイソトープの品質基準を工夫することも、廃棄の合理化に資するとされている<sup>16</sup>。この考え方も取り入れクリアランス制度の利用にあたり事業所の負担軽減を図るのも一つの方策であると考えられる。

## D.6 汚染の有無の評価

現場からは、汚染の有無を 3 シグマで判定基準としているとの意見が寄せられた。3 シグマを有意水準にするということは、観測値が正規分布とするとし、かつ、サンプルに有意な放射能がないとして、1,000 回サンプリング繰り返した場合に、誤って有意な放射能があると判定するサンプルを 1 つ程度に抑えられるということを意味する。従って、この判断基準では、汚染がないにもかかわらず汚染有りとして誤って判定するエラーは制御できる (タイプ I エラーの制御)。しかし、このような管理基準で重要なのは、汚染を見逃さないエラーの制御である (タ

イプ2エラーの制御)。

このように、誤ってノイズをピークと見誤る確率を制御しようとする思想は、この測定には適切でない。

#### D.7 医療用の電子直線加速装置やマイクロンでの放射化物の扱い

文部科学省の検討会中間報告書では、電子直線加速器の標的は、「クリアランスの対象とはならない」とされている。医療機関では、これらのごくわずかな放射化物についても、部品の交換などの作業時に十分に配慮されている。このような放射化物をクリアランスせず放射性廃棄物として扱うか、あるいは、放射性廃棄物としての規制をそもそも適用させないようにすべきかどうか課題になると思われる。

少量の放射化物は、これまでのクリアランス制度には馴染まない。このような少量の放射化物の合理的な扱いをどのように可能とするかが課題である<sup>17</sup>。

#### D.8 規制の整備の基本的な方針

低エネルギー領域の加速器から生成される放射化物の放射線管理の規制整備は、まず、クリアランスについて十分整理する必要がある。

一方、原子力分野では、既に原子力安全委員会からクリアランスレベルが提示され、炉規法が改正され、新しい規制に沿った既申請例がある<sup>18</sup>。

比較的エネルギーが低い領域の加速器を用いる医療では、放射化物の課題は相対的

には意義が小さいために、どのような種類の放射化物が生成するかについても十分な知見が得られていない現状にある。

そこで、医療機関に保管されているターゲットを計測し、放射化核種を同定した。

放射化物の扱いが課題になるのは、主として、廃棄の際である。このため、法令整備が課題とされている。廃棄物の扱いはクリアランスの議論とも密接に関係する。クリアランスの議論では検認のあり方が論点の一つである。従って、課題を解決するには、医療機関での持ち出し時の測定の方策を決める必要がある。また、持ち出し時の測定だけでなく、事前の計算評価、あるいは持ち出し後の第三者評価のあり方も課題になる。文部科学省の検討会ではWGの中間報告がまとめられ、一定の方向性が示された。今後、放射化物の管理の解決法として、よい管理が実施されている医療機関での現行の管理ルールを一般化して法令に取り入れていくことが現実的であると考えられる。

交換放置後に検出される核種は長半減期が主体で、減衰保管による放射能の低減は効率的ではないと考えられた。

ターゲットの組成がわかるとあらかじめ生成核種が予想できるはずである。しかし、ターゲットやその周辺の情報は、高度な企業秘密であるために、それを利用するのは現実的でなく、何らかの工夫が必要であると考えられた。企業秘密の保持は健全な競争に必要であり、安全性確保との関係で解決を模索するしかないと思われる。このような課題は、エックス線CTでの患者線量

評価のためのフィルタやコリメータの情報の利用と同様の問題をはらんでいる。

ターゲットの放射化核種は Ge 半導体検出器を用いると少なくとも $\gamma$ 線放出核種は容易に検出できると考えられる。Ge 半導体検出器は、環境放射能測定のために、各自治体にあり、文部科学省の予算で稼働している。予算面での折り合いがつけばリソースとして活用できるかもしれない。

#### D.9 放射化生成物低減化やサイクロトロン解体廃棄物の処理の工夫

サイクロトロンの運転では目的の生成物と同様の中性子が発生するため、放射化物の発生は不可避である。ただし、室内でも放射化の程度はさまざまなレベルに分別され、また部屋の大きさやコンクリートの種類、サイクロトロンの機種などにも依存する。室内のものを全て放射化物として処理を行うのは、多量の放射性廃棄物が発生することとなり、経済的にも大きな負担となる。このため、その程度に応じた管理方法を定めるのが肝要である。

サイクロトロンでは、表面付近のコンクリートではIAEA RS-G-1.7の濃度基準の倍程度になりえる。このため、その対策が求められる。このうち事前評価の質を上げる方法としては、サイクロトロン室内の熱中性子束を日常放射線管理でモニタリングすることが考えられることから、医療機関に備えられている機器で実施可能な測定法を確認した。また、事後評価としては濃度評価対象範囲を深さ方向に広げ濃度を合理的

に評価することも考えられるが、関係業界や公衆の受容を図るために手順を踏む必要がある。より現実的な対応策としては、クリアランスレベルを超える前に表層の壁を取り替えることや加速器施設などでの建築資材の需要があることから、マテリアルリサイクルすることが考えられる。さらに望ましい対応としては、より放射化しうる深さ20cm程度までを区画して建設しておき、解体時に、区画そのままリユースできるようにすることが考えられる。

一方、施設の設計で自己遮へい体を考慮することは、扉や壁を薄くし、部屋のサイズを小さくすることに寄与でき、また、通常業務や臨時業務に従事する作業員の被ばくを小さくすることに役立つ。しかし、自己遮へい体が高度に放射化し、運転終了直後の周囲の線量率を上げること、再利用や廃棄時に比較的放射能濃度が高い物品を扱う必要が生じるため、その最適化が課題であると考えられた。

一方、低放射化コンクリートが開発され、利用できるようになっている<sup>19</sup>。このような素材を活用すべきかどうかも課題であると考えられた。

現時点では、平成10年に出された「放射線発生装置使用施設における放射化物の取扱いに係るガイドライン」を参考にして各医療機関では対応することになる。

文部科学省の通知では、使用室等から持ち出す際に、それが放射化物かどうかを判定することとし、判定の基準は、表面密度と表面から10cmの線量率で与えている。装

置内部の冷却水中にトリチウムが生成されるなど内部にベータ線やアルファ線放射核種が存在していても、この定義では、放射化物に該当しないことがあるが、管理上、適切に扱う必要があることは言うまでもない。放射化物の扱いが課題になるのは、主として、廃棄の際である。このため、法令整備が課題とされている。この課題は、廃棄物の扱いはクリアランスの議論とも密接に関係する。クリアランスの議論では検認のあり方が論点の一つである。従って、課題を解決するには、医療機関での持ち出し時の測定の方策を決める必要がある。また、持ち出し時の測定だけでなく、事前の計算評価、あるいは持ち出し後の第三者評価のあり方も課題になる。文部科学省の放射線安全規制検討会では第二次中間報告書がまとめ、一定の方向性が示された。検討会WGでの検討では、医療関係の電子直線加速器やマイクロトロンでは発生する放射化物そのものがほとんど発生しないか、発生しても少量でクリアランスの対象には馴染まないという整理がなされている。

確かに、医療関係は、電子直線加速器での空気の放射化（GSIは毎時7回の換気を求めるガイドラインに従っている）や放射化シエルの扱いは、そのリスクが小さいことから、あまり重要な課題ではないと思われる。ただし、現場できちんと対応され放射線防護上の問題がないだけでなく現行の規定と現状の齟齬はないことの説明は必要となろう。

一方、医療用の加速器は台数が多く、適

切な指針がないために、混乱を防止するには、今後の対応が求められる。医療でもサイクロトロン廃止については現場での経験が集約されつつあり<sup>20212223</sup>、サイクロトロンの導入時には、廃止時までを考えた全体計画が検討されている。また、経営への影響は病院の納入時にきちんと評価されているとともに、経営破綻時にも破産管財人が対応する仕組みが整えられ万全が期されている。しかし、投資家向け資料には、「5. 影響の大きな不確定要素」に「(1) サイクロトロンの廃棄費用」として、「PET検診センターを最終的に廃業するか、新しいサイクロトロンを購入して事業を継続する場合、いずれの場合にも既設のサイクロトロンを廃棄することとなる。この場合に、十分な格納空間があれば、センター内等自己施設内に廃棄サイクロトロンを保管することも可能である。空間が足りない場合等には機械本体とそれを取り囲む遮蔽コンクリートをバラバラにして減容後、ドラム缶に詰めて岩手県滝沢村に送り委託処分することとなる。」との記述があり、問題のそのものは認識されていると伺われた<sup>24</sup>。

ただし、「廃棄サイクロトロンを保管することも可能」とあるのは物理的にはそうだが、放射線防護上は推奨されない。また、少なくとも保管廃棄設備の要件を満たす必要がある。「遮蔽コンクリートをバラバラ」にすると「減容」されるが、日本アイソトープ協会では減容した廃棄物は引き取らないので、この表現では、引き取りルールとの齟齬が生じるために少なくとも用語の見



直しが必要である。また、滝沢村とは協定があり、特定の核種で汚染したもののしか搬入できないため、記述が誤っている。滝沢村にある施設では減容し保管しているだけであり、廃棄物処分をしているわけではない。

このようにこの課題の把握の仕方が必ずしも適切ではなく、ステークホルダー間の意見のとりまとめのためには、まず、課題を正しく認識することが必要であると考えられた。

また、ボラスは治療のたびに製作されるため、治療を続けている限り半永久的に増え続けるとの意見も寄せられた。このため、現場に混乱をもたらさないような医療機関向けのガイドライン整備を進めるべきであると考えられた。また、放射化物の管理の解決法としては、よい管理が実施されている医療機関での現行の管理ルールをオーソライズし一般化することが現実的であると考えられた。

以下の①から⑦の小佐古の整理が、課題解決に役立つと考えられる<sup>25</sup>。

①クリアランス対象物：議論の主題は大量な解体廃棄物、運転廃棄物が対象。病院、研究所等における中規模な施設におけるクリアランスの考え方をどのようにするのか。  
②免除の概念との区分け：クリアランスは大量量に対して考えているが、小物量に対して定義される免除との区分けをどうするか。環境放出された放射性物質が公衆に到達しうるパスの多様性や極端例の可能性からクリアランスでは濃度は低く設定せざる

を得ない。これに対して小物量ベースのモデルにより決められた免除レベルは同一核種であってもインベントリーが小さく、緩めの設定となる。同じく規制対象から外れるのに別の数値を運用せざるを得ないが医療の特性を考えた整理が必要か否か。

③放射性核種の評価単位や濃度分布の偏在：クリアランスにおいて大量量を扱うとなると、評価単位や偏在の検討が必要になる。

④放射性核種の代表的な組成、放射化分布（この件では関係なし）、2次汚染等の扱い：過去履歴、計算評価、サンプリング測定などの組み合わせにより、クリアランスされるものの実像を把握する（実態をよく考慮して考える）。

⑤「放射性廃棄物でない廃棄物」と「放射性廃棄物として扱う必要がないもの」の区分けと運用：両者は時として連続的に続いている場合も多い。その扱いをどうするか。

⑥クリアランスされたものの扱い：医療法からクリアランスされても、廃棄物規制法関係の整備がなされていなければ受け取りができないことになる。法律から法律にわたる際の接続性にも十分な配慮が必要である。また、産業廃棄物管理票（マニフェスト）制度による追跡可能性（トレーサビリティ）などの検討も必要となろう。

⑦クリアランスの社会的受容性：クリアランスの意義は、安全性の確認を前提とし、適切かつ合理的な再使用、再生利用、適正処分を行い、資源の有効利用と環境への負荷低減を図り、21世紀の循環型社会形成

促進を目指すわが国の方針にのっとり、クリアランス制度により、放射性物質として扱う必要のない物を適切かつ合理的に処理・処分することは、国民経済にとっても好ましいものである。これらの趣旨の理解促進を図り、クリアランスの社会的受容を図る。

このように放射線障害防止法でのクリアランス制度の位置づけの整理のためになされている検討に沿って医療でも対応するのがよいのではないかと考えられた。

#### D. 10 その他の課題

標的がヒトであるのも医療の特徴である。患者を放射線源として考えなくてもよいことや放射化物による線量も放射線治療では織り込み済みなことや照射直後の照射室に従事者は入室しないこととされているが患者の安全確保上は問題ないことなどの整理が混乱の防止に資するのではないかと考えられた。

また、持ち出しの基準としての表面汚染密度限度は、放射化物の管理には馴染まないと考えられるため、指標そのものの見直しも必要ではないかと考えられた。

一方、医療では高額医療機器のリース利用が導入されつつある。まだ、事例は存在しないが、放射化する医療機器のリースのあり方についても、今後、情勢を見つつ整理する必要があることも考えられた。さらに、医療機関で利用したサイクロトロンを海外に輸出することが想定されるのであれば、そのための規制整備も課題となる。

医療機関対象の調査では、放射化物への対応や遮へい計算で医療現場の戸惑いがあることが伺われた。このため、遮へい計算で理解が十分に行き渡っていないと考えられる箇所の解説資料を作成した。

#### D. 11 まとめと今後の課題

数年前から急激にサイクロトロン設置施設が増加し、その更新に伴う装置の廃棄事例が今後増加すると考えられる。そのため、医療用サイクロトロンの更新や廃棄に伴う手続きのガイドラインを作成し、安全かつ現場での混乱を防ぐような対応が医療現場では必要になる。また、10MV を超える加速器施設での対応のあり方を明らかにするためのデータの収集も必要である。

ガイドライン作成のためにも、まずは現状の把握をおこなうための測定が必要であるが、放射化の程度を測定する方法を確立させ、各医療現場で把握することにより、円滑な処理や対策が可能と考えられる。より詳細な放射化状況の把握と、各施設における放射化物の測定方法の確立が今後の検討課題である。また、放射化した壁のリユースやマテリアルリサイクルを可能とするようなルール整備が合理的な管理に資すると考えられた。

医療機関対象の調査で、放射化物への対応や遮へい計算で医療現場の戸惑いがあることが判明した。このため、遮へい計算で理解が十分に行き渡っていないと考えられる箇所の解説資料を作成した。鉄とコンクリートの複合遮蔽で、鉄の中性子透過と壁

での捕獲 $\gamma$ 線の発生を考慮し、安全係数を見込むことが「放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2007」で記述されている。加速電圧 10MV 以上、鉄板が 40cm、あるいは、外側のコンクリート 75cm 未満の場合に、この影響は無視できない。既に稼働している施設では、施設検査、定期検査での透過率の実測値が計算値を超えていないことが確認できればよいとされているが、新設の施設に対しても、十分に安全を担保しつつ、かつ、過大なコスト増にならないようなしゃへいの最適化の検討が求められよう。

一方、ルールは、科学的な根拠のみで形成されるものではなく、社会的な合意に基づく。このため、大多数の社会構成住民が主観的に受け入れられないリスクは、例えばその大きさがわずかであっても、受け入れられず、結果としてルール整備がなされなかったり、制度の運営に支障をきたすことになる。その最たる例が放射性廃棄物の処分である。社会的な合意形成がなされるように関係者を巻き込むとともに、理解と信頼が得られるようにメッセージを発信することが重要な課題である。

#### E. 結論

10MV の医療用加速器使用室の壁際の熱中性子束密度は  $1 \times 10^8$  [ $\text{cm}^{-2} \text{day}^{-1}$ ] 以下とわずかであり、壁のコンクリートの放射化は、放射線防護上、考慮不要であると考えられた。

サイクロtron施設では、中性子量がその

千倍程度になる。濃度評価はどの程度の容量を見込むかで大きく異なるが、公衆や関係者への受容を考えると、施設解体時等には、その施設に応じた対応が求められると考えられた。そこで、建屋の放射化に対する現実的で医療機関に過度な負担を与えない解決策を提案した。以上の検討に基づき、医療機関での加速器運転に伴う放射化物に対する放射線防護のためのルール整備の基本的な考え方を整理した。

#### F. 研究発表

I. Yamaguchi, H. Terada, M. N. Takahashi and H. Sugiyama. Qualitative Activation Analysis on Target Assembly of Medical Accelerators. MTA12: 2007 Sep. 16-21:p.109, Hachioji. Japan.

山口一郎、藤淵俊王、田中真司、渡辺浩、池田昌隆. 医療用電子線形加速器の運転に伴う放射化物生成. 日本放射線安全管理学会・第6回学術大会: 2007. 12. 5-7: 仙台. 同要旨集. 2007;72.

山口一郎, 木村健一, 田中真司, 他. 最大加速電圧が 10MV の診療用高エネルギー放射線発生装置使用室内の熱中性子束計測, 日本放射線安全管理学会雑誌 2008;7(1), 42-49

山口一郎, 田中真司, 木田哲生, 長岡宏明, 藤淵俊王, 渡辺浩. 放射線治療用加速器の事前放射線安全評価とビーム使用の実態に関する全国調査. 日本保健物理学会第43回研究発表会. 大阪. 2009. 6. 3-4, 日本保健物理学会

Toshioh Fujibuchi<sup>1</sup>, Ichiro Yamaguchi, Hiroshi Watanabe, Ken-ichi Kimura, Shinji Tanaka, Tetsuo Kida and Hiroaki Nagaoka. Nationwide survey on the operational status of medical compact cyclotrons in Japan. Radiological Physics and Technology. 2(2), 2009. 126-132  
DOI 10.1007/s12194-009-0054-5

Toshioh Fujibuchi<sup>1</sup>, Ichiro Yamaguchi, Tetsuharu Kasahara, Takashi Iimori, Yoshitada Masuda, Ken-ichi Kimura, Hiroshi Watanabe, Tomonori Isobe and Takeji Sakae. Measurement of thermal neutron fluence distribution with use of <sup>23</sup>Na radioactivation around a medical compact cyclotron. Radiological Physics and Technology 2(2), 2009. 159-165  
DOI 10.1007/s12194-009-0060-7

Ichiro Yamaguchi, Shinji Tanaka, Toshioh Fujibuchi, Tetsuo Kida, Hiroaki Nagaoka and Hiroshi Watanabe. Nationwide survey on the operational status of electron accelerators for radiation therapy in Japan.

Radiological Physics and Technology. 2010. 10. 1007/s12194-010-0083-0

G. 知的所有権の取得状況  
なし

謝辞

本研究の実施にあたり、ご協力いただいた各医療機関の関係者に厚く御礼申し上げます。

また、本研究では、下記の方々に技術的な助言を得ました。感謝申し上げます。

大竹英則 群馬大学医学附属病院放射線部

木村健一 株式会社フジタ 技術センター

高橋康幸 群馬県立県民健康科学大学 診療放射線学部

野中 英生 住友重機械工業株式会社 量子機器事業部 設計部 PETG

保科正夫 群馬県立県民健康科学大学 診療放射線学部

松村 茂 東京ニュークリアサービス(株)

また、本研究は、文部科学省の原子力利用安全対策等委託費による委託業務として高エネルギー加速器研究機構が実施している「小規模放射線発生装置使用施設における放射化状況に関する調査」と連携して検討を進めた。関係者のご助言、ご協力に感謝したい。