

図 2. PET 検査介助職員の被ばく線量シミュレーション (距離による違い)

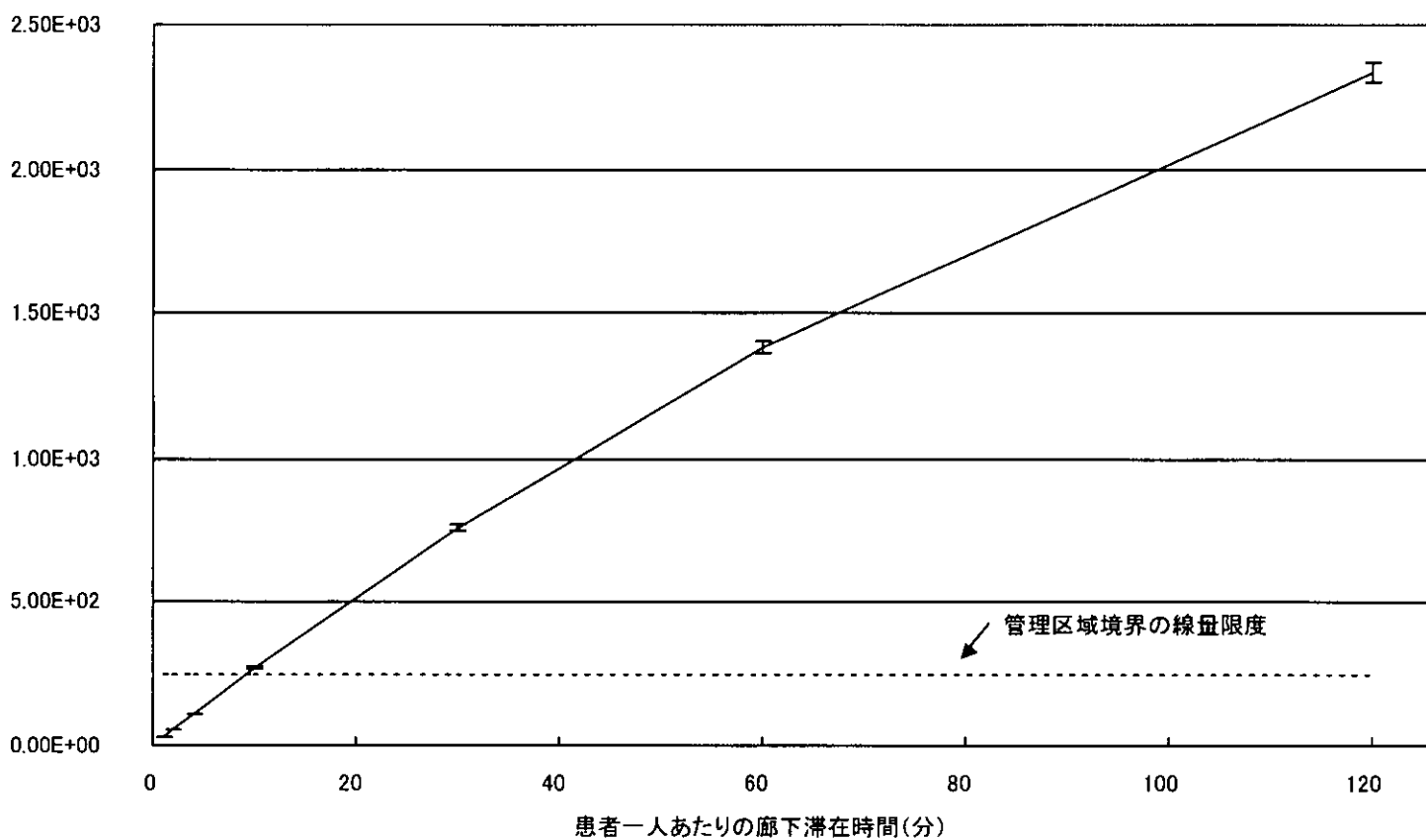


図 3. 受付台で勤務している医療機関職員の被ばくシミュレーション（患者の廊下滞在時間による違い）

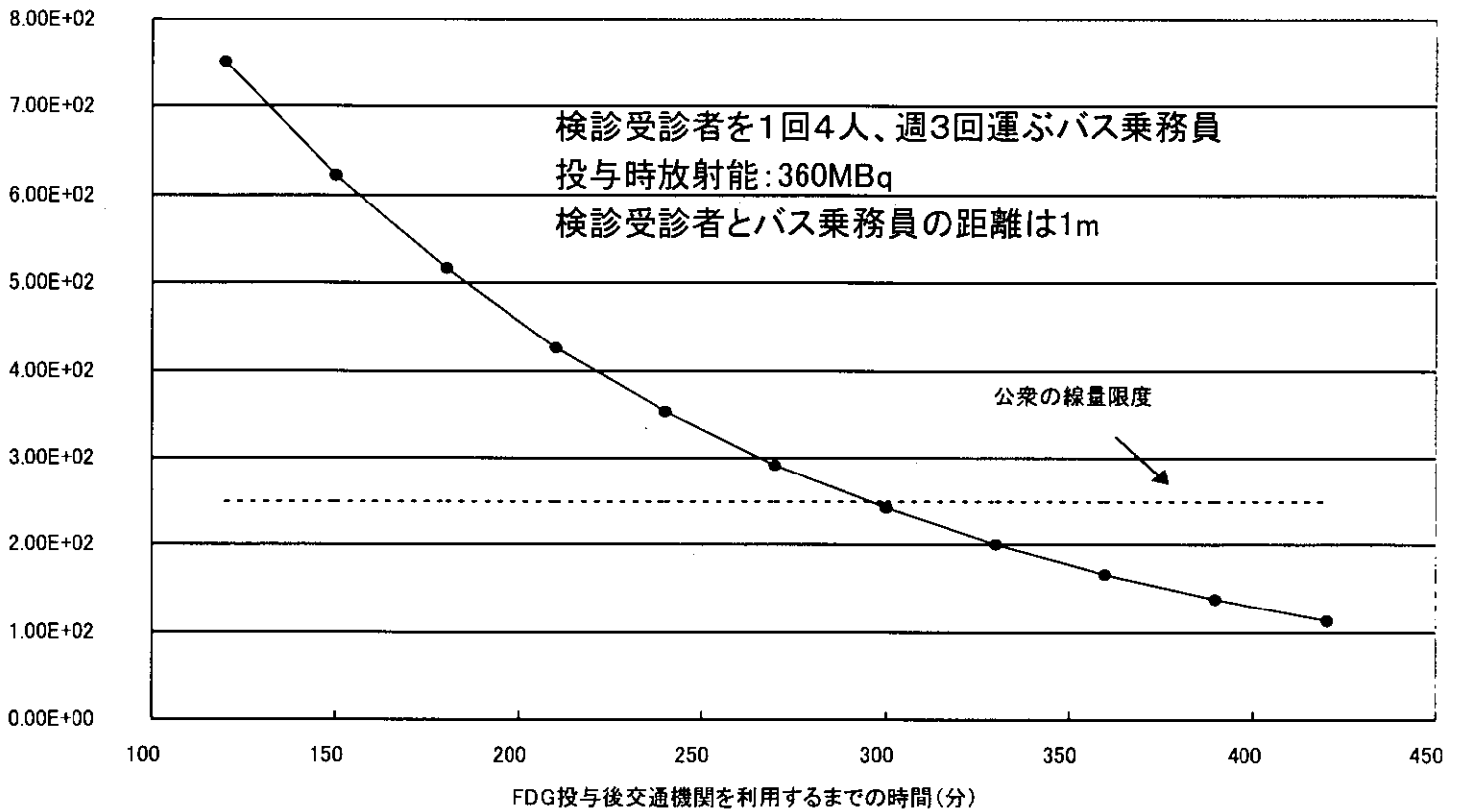


図4. PET 検診受診者を乗せたバスを運転する労働者の被ばくシミュレーション (検診受診者のバス乗り込み時間による違い)

D 考察

1. PET 使用施設の被ばくの現状

(1) S1 は PET 操作室内のカメラコンソール前のぞき窓前面に設置されたことから、カメラ上で検査を受けている線源 ^{18}F 及び $^{68}\text{Ge}+^{68}\text{Ga}$ からの漏えい線量を測定している。待合いホールにおける待機患者からの線量も考えられるが、有意な放射線は検出されなかった。したがって、PET 操作室内 (人が常時立ち入る場所) の漏えい線量は、 1 mSv/W を越えないことが確認された。

一方、平均存在数量 230 MBq 、週 40 時間、のぞき窓の鉛当量 0.2 cm 、線源から線量評価点までの距離を 5 m とし計算すると、この場所における漏えい線量は $40.5\text{ }\mu\text{ Sv/W}$ になる。

(2) S2 は PET 使用施設の管理区域の境界、PET カメラの直近位である。線源としての主なものは、カメラ上で検査を受けている患者及び $^{68}\text{Ge}+^{68}\text{Ga}$ である。測定の結果、有意な放射線は検出されなかった。したがって、管理区域の境界の漏えい線量である 1.3 mSv/3M を越えないことが確認された。

平均存在数量 230 MBq 、週 40 時間、コンクリート 20 cm 、距離 3 m で計算すると、 $410\text{ }\mu\text{ Sv/3M}$ になる。

廊下に面した受付台で勤務している医療機関職員および検診受診者が検診後に利用する交通機関の乗務員および乗り合わせた公衆の被ばく線量を推定した。消滅光子のエネルギーは高く、鉛で防ぐのは必ずしも効率的とは言えない。薄い鉛のエプロンを用いると、実効線量がほとんど変わらない反面、エプロン直下の皮膚の被ばく線量が増大するため、防護エプロンは着用すべきではない。また、エレベータ内だと壁からの散乱がそれなりに寄与するので線量限度に近い状況では、その考慮が必要なことも考えられる。また、特殊な状況として0-15 使用時などには患者の呼気等から空気中に核種が拡散することも考えられるので、その評価が必要なこともあると考えられる。また、製剤のデリバリや廃棄（貯留タンク内の核種からの外部被ばくは推計済）に伴う作業員の被ばく線量の推計も必要であると考えられる。

一方、F-18 を投与された患者が移動する廊下の線量は、管理区域境界の線量限度を十分に下回るために、投与後に撮像のために一旦管理区域から出ることは、外部被ばくの観点からは、放射線防護上特段問題にならないことが確認された。

ただし、検診受診者が同じ交通機関を利用すると、交通機関の労働者や一般客の線量が、一般公衆の線量限度を超える可能性がある。この場合、検診後、適切な時間減衰を待ったり、排尿したりすることで、これらの被ばく線量は小さくすることができる。このような PET 検査の特性を考慮した検診受診者への放射線防護上の注意の例を示す。ばらばらに交通機関を利用するなどの注意を払うことにより、公共交通機関の乗務員やその利用者の線量は、線量限度以下とすることができる。

5. 患者同士の被ばくについて

PET 検査は、静注後約1 時間程度の待機安静時間が必要である。そのために、待機安静時間が他の患者と重複する可能性が考えられ、患者同士お互いに被ばくをするおそれがある。この待機安静時間における患者同士の放射線被ばくを避けるためには、1) 待機安静時の患者同士を可能な限り離す構造設備とすること。2) 患者間にはしゃへい体を設けること。3) 患者同士の私語を禁止すること。3) 可能な限り飲水をさせること。(最大2リットル程度とし、その理由としては、①患者の被ばく線量低減、②体内バックグラウンドの低減、③生物学的半減期が大きくなり公衆被ばくの低減、が考えられる。) が必要である。

E 結論

^{18}F は β^+ 崩壊（壊変割合 93.46%）により 633keV のエネルギーを持つ陽電子を放出するために、その消滅光子（エネルギー0.511MeV）により、外部被ばくを与える。その実効線量率定数は、 $0.140 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ と通常核医学検査に使用される核種と比し高い。しかし、半減期が 109.8 分であることから、放射線防護の三原則を遵守し、この報告書に示したような放射線防護上の注意事項を守れば、介助が必要な重症患者や検診等での多人数を診療する場合であっても、放射線防護上、安全に使用できる。また、PET 製剤の配送も同様に、安全に実施できる。

一方、製薬会社から医療機関へ PET 製剤が配送されるという事態を想定すると、使用施設は、PET カメラ室、カメラ操作室、処置室、準備室、静注後待機室をそれぞれ単独構造にする必要がある。PET 検診において1 人 185MBq 使用とするならば、2m 四方の各室の画壁の外側は、コンクリート厚 15cm で $2.6 \mu\text{Sv/h}$ となり、施設を

改修しなくても医療機関職員への被ばく線量を十分小さくできる。

PET 診療において従事者の被ばく線量を左右するのは、使用時の注意である。放射線従事者は、自身や同僚の被ばく線量を最小限にするために、極力、静注後の被験者との無用な接触を避ける。また、トイレ等の案内、検査についての説明等は、線源となる前に行い、静注後は、監視モニター、インターホンを使用してカメラ室に誘導するなどの被ばく防止措置をとる。必要な注意を払うと PET 診療に従事する際の被ばくは、十分に線量限度内とすることができる。しかしながら、わずかな被ばくをおそれるあまり患者を不安に陥れるような接遇をすべきではない。

PET 検査室内に、操作コンソールを設ける場合には、被験者からの被ばくを防止するために、
の遮へいが必要である。

患者同士の被ばくについては、待機安静時にはお互いの距離を保つこと、私語を交わさないことなどをあらかじめ説明し、患者の理解を得る必要がある。十分な理解が得られれば、患者同士の被ばくは少なくすることができる。

1. 別添

- (1) 別紙 1
- (2) 別紙 2
- (3) 別紙 3
- (4) 別紙 4
- (5) 別図 1
- (6) 別図 2
- (7) 別図 3

2. 資料

PET 製剤を投与された患者からの実効線量率計算結果報告書

東芝電力放射線テクノサービス株式会社

3. 参考資料

- (1) 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2000
原子力安全技術センター
- (2) 医療被ばくガイドライン
日本放射線技師会
- (3) 国立がんセンター東病院 PET 施設しゃへい計算書
- (4) 医療放射線防護関係法令集 アイソトープ法令集Ⅱ
日本アイソトープ協会
- (5) クリニカル PET 時代の放射線技師の役割
日本核医学会関東甲信越地方会
東京女子医科大学病院 総合外来センター 金谷 信一

平成15年度厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）
診療用放射線の防護規制に関する緊急特別研究（H15-特別-022）

分担研究報告書

「医療機関における放射性医薬品管理の規制のあり方に関する研究」

「陽電子断層撮影検査における医療従事者等の安全確保のための基礎的検討」

分担研究者	小林 一三	国立国際医療センター放射線診療部
研究協力者	渡辺 浩	横浜労災病院
	塚田 勝	国立がんセンター中央病院
	佐藤 敬	国立がんセンター東病院
	小高 喜久雄	国立埼玉病院
	諸澄 邦彦	埼玉県立がんセンター
	池淵 秀治	日本アイソトープ協会

研究要旨

【研究目的】

^{18}F -FDG 製剤が製薬会社から医療機関へ配送されることなどを想定し、使用時等における平均存在数量を時系列的に評価した上で、PET 診療に従事する放射線診療従事者等の被ばく線量を実測値およびシミュレーション計算により明らかにし、その防護のあり方を提示する。

【研究方法】

1. A 病院において、医師、診療放射線技師に電子線量計ドーズキューブ（DOSE³（以下、DC という。）及び電子ポケット線量計（EPDTM）（以下、PD という。）を同時装着し、PET 業務開始より終了時までの被ばく線量を実測し、同時に作業時間を記録した。
2. PET 使用施設内の待合いホールにおいて、静注後の患者が PET 検査時間までに待機する間に、他の患者又は介助者に与える被ばく線量を DC 及び PD によって測定した。
3. DC 及び PD を PET 使用施設内外に設置し、放射線の量を測定した。
4. PET 使用施設内での線源位置を、時刻を考慮した仮定とし、光子及び電子のモンテカルロ法による輸送コードである EGS4 (Electron Gamma Shower Version 4) および 3次元の計算が可能なガンマ線遮蔽計算コードである点減衰核積分法：QAD-CGGP2R⁽¹⁾を用いシミュレーション計算により PET 検査の利用が拡大した場合の 1) 車椅子を利用する患者がエレベータにより移動した場合に介助する医療従事者の被ばく線量、2) 患者が廊下を移動した場合に廊下に面した受付台で勤務している医療機関職員、3) PET 検診の受診者が検査後に公共交通機関を利用した場合の交通機関勤務者および乗り合わせた一般公衆の被ばく線量、4) 空気中に飛散した放射性核種からの従事者の被ばく、5) 貯留槽からの被ばく線量、6) 遮蔽体の効果、7) 患者周囲の線量率を計算した。

【結果および考察】

- 1) 車椅子を利用する患者がエレベータにより移動した場合に介助する医療従事者の被ばく線量は線量限度を超える可能性がある。このため、患者を介助する職員にはローテーションなどにより被ばくを分散することや介助を工夫するなどの対策が必要である。
- 2) 患者が廊下を移動した場合に廊下に面した受付台で勤務している医療機関職員の被ばく線量は線量限度を超えない。また、廊下における線量は、管理区域境界の線量限度を下回るために、投与後に撮像のために一旦管理区域から出るとは、特定の場所に数十分以上滞在することがないのであれば放射線防護上特段問題にならない。
- 3) PET 検査の受診者が検査後に公共交通機関を利用した場合の交通機関勤務者および乗り合わせた一般公衆の被ばく線量は、適切な患者の行動制限などを伴わない場合には、一般公衆の線量限度を超える可能性が否定できない。しかし、検査後、適切な時間減衰を持つことや積極的な飲水と交通機関利用前の排尿などにより、これらの被ばく線量は小さくすることができる。
- 4) 空気中に飛散した 0-15 等の従事者等への被ばくは無視しうると考えられた。このため、日常的な管理で空気中濃度を測定する意義は小さいと考えられた。
- 5) 貯留槽からの被ばく線量は適切な距離を保つことで線量限度を下回る。
- 6) 消滅光子のエネルギーは比較的高く、鉛で防ぐのは必ずしも効率的とはいえない。薄い鉛のエプロンを用いると、実効線量がほとんど変わらない反面、エプロン直下の皮膚の被ばく線量が増大するため、防護エプロンは着用すべきではない。また、エレベータ内部では壁からの散乱がそれなりに寄与するので線量限度に近い状況では、その考慮が必要であると考えられた。

以上に示すような方法を講じると、医療従事者、介助者、他の患者、一般公衆の線量は線量限度を下回ることが確認された。PET 診療を行う医療機関では、このような放射線防護上の措置を講じるべきである。

A 研究目的

陽電子断層撮影検査：PET(Positron emission tomography)は、微小癌細胞の検出や機能診断など患者の臨床診断に有効であるとされており、わが国においても検査実施機関が増える傾向にある。また、今後、製薬会社による ^{18}F -FDG 製剤の製造および医療機関への配送が計画されており、益々増加するものと思われる。しかしながら、臨床で用いる ^{18}F の放射能は比較的大きく、 ^{18}F が比較的高い実効線量率定数を持ち、さらに、消滅光子の遮蔽が容易ではないことから、陽電子断層撮影検査の適応の拡大や利用の増大において、放射線防護面でも十分な検討が必要である。しかし、これまで、わが国ではPET検査の従事する放射線診療従事者および患者を介助する医療機関職員等についての放射線防護ガイドラインやPET検査における管理区域から退出した患者の行為基準などの整備が必ずしも充分ではない状況にある。本研究は、 ^{18}F -FDG 製剤が製薬会社から医療機関へ配送されることを想定し、使用時等における平均存在数量を時系列的に評価した上で、PET診療に従事する放射線診療従事者等の被ばく線量を実測値およびシミュレーション計算により明らかにし、その防護のあり方を提示するものである。

B 研究方法

1. A 病院において、医師、診療放射線技師に電子線量計ドーズキューブ (DOSE³ (以下、DC という。)) 及び電子ポケット線量計 (EPDTM) (以下、PD という。) を同時装着し、PET 業務開始より終了時までの被ばく線量を実測し、同時に作業時間を記録した。

2. PET 使用施設内の待合いホールにおいて、静注後の患者が PET 検査時間までに待機する間に、他の患者又は介助者に与える被ばく線量を DC 及び PD によって測定した。

3. DC 及び PD を PET 使用施設内及び施設外の任意の場所に設置し、放射線の量を測定した。

4. PET 使用施設内の任意の時点での線源位置を仮定し、モンテカルロ法を用いたシミュレーション計算により PET 製剤のデリバリ等に伴う PET 検査の利用が拡大した場合の医療機関職員等の被ばく線量を計算した。また、空気中に飛散した放射性核種からの被ばくや貯留槽からの被ばく線量も計算した。

(用いた計算コード)

計算においては、光子及び電子のモンテカルロ法による輸送コードである EGS4 (Electron Gamma Shower Version 4) および 3 次元の計算が可能なガンマ線遮蔽計算コードである点減衰核積分法：QAD-CGGP2R (1)) を用いた。

(計算の対象)

計算の対象は、1) 車椅子を利用する患者がエレベータにより移動した場合に介助する医療従事者の被ばく線量、2) 患者が廊下を移動した場合の廊下内の空間線量、3) PET 検診の受診者が検査後に公共交通機関を利用した場合の交通機関勤務者および乗り合わせた一般公衆の被ばく線量とした。

(計算の設定)

患者は高さ 50cm、幅 30cm、奥行き 30cm の水で構成された直方体とし、床から高さ 50cm の車椅子内に位置し、そこに F-18 が均一に分布しているとした。

1) 車椅子を利用する患者がエレベータにより移動した場合に介助する医療従事者の被ばく線量、介助者は、患者から 0cm、50cm、100cm の距離でそれぞれ 5 分間滞在するとした。

また、エレベータの大きさは 150×250×245cm とし、それぞれの面は鉄とした。また患者等の周囲には空気があるものとした。

2) 患者が廊下を移動した場合の廊下内の空間線量

受付台で勤務している医療機関職員の被ばくを推計するために、患者は 10m の廊下を同じ速度で移動するとした。受付台で勤務している医療機関職員は、患者に付き添わず、

廊下の端に座っており、距離 50cm で患者とすれ違うとした。床面および壁や天井はコンクリートとした。また廊下の長さは 10m で各面はコンクリートとした。

3) PET 検診の受診者が検査後に公共交通機関を利用した場合の交通機関勤務者および乗り合わせた一般公衆の被ばく線量 1 回の検診受診者数は最大でも 20 名を超えることはないと考えられることから、現実的な設定として 4 人とした。検診受診者への投与量は 360MBq。路線バスに乗り込むのは、投与後 2 時間半後、バスに乗る時間は 40 分、他の一般客と検診受診者との距離は 20cm、バス乗務員と検診受診者との距離は 1m とし

た。なお、検診ツアーは毎日実施されているが、ツアーコンダクターはいないことから、バスの乗務員は週3回検診受診者が利用する路線バスに乗務し、他の特定の一般客は、週1回偶然検診受診者の集団と乗り合わせるものとした。また、電車を利用する検診受診者は4名とし、同様に、偶然その電車に乗り合わせ、患者の近くに40分間滞在するものとした。

4) 空気中に飛散したF-18からの被ばく線量

一辺が3mのコンクリートで囲まれた部屋を仮定し、そこで使われるF-18の飛散率が0.1%であるとして、空気中のF-18から従事者が被ばくする線量を計算した。計算コードはEGS4 (Electron Gamma Shower Version 4) を用いた。計算の条件は、一回の最大使用数量400MBq、1日の最大患者数20人、患者滞在時間2時間とした。

5) 貯留槽に混入したF-18からの被ばく線量

EGS4 (Electron Gamma Shower Version 4) を用いて計算した。ジオメトリ条件は、貯留槽を放射性核種が均一に分布した水を蓄えた直方体とした。貯留槽の大きさは、1辺の長さを1mから3mに変化させた。貯留槽の壁は鉄として、その厚みを、0cmから1cmに変化させた。線量評価点は、貯留槽の表面から1m刻みで5mまで変化させた。貯留槽周囲の空気は20℃で大気圧とした。発生させた陽電子数は10の6乗とした。計算結果の変動係数は0.01から0.11で必要な精度が得られたと考えられた。なお、3月間の線量を計算するために、一人あたりの患者投与放射能は400MBqとし、一日あたりの患者数を10人とした。この設定では、一日あたり4GBqのF-18を使用することになる。また、混入率は1%とした。

6) 遮蔽体の効果

EGS4 (Electron Gamma Shower Version 4) を用いて計算した。遮蔽体としては鉛防護衣および鉛ガラスを用いた。それぞれの厚みを変えて、透過率を求めた。また、部屋のサイズも変えて散乱線の寄与も確認した。

7) 患者周囲の線量率

QAD-CGGP2Rを用いPET製剤を投与された患者さん(線源)からの実効線量率を計算した。計算の条件は、遮蔽なしで患者さんの周囲に距離を変えて滞在した場合の他に、コンクリートや含鉛防護衣の遮蔽効果も計算した。さらに、従事者がある病院をモデルとして、病院内で医療従事者等が滞在しうる場所を線量評価点に設定し、線源の存在場所毎に線量率を求めた。

C 調査及び研究結果

1. PET業務を行う、医師、診療放射線技師の被ばく線量について

(1) 医師

① PET業務において、医師が線源と接触する主な機会は患者への静注時である。通常自動注入機を使用するので、患者側に確保された血管ラインと注入機側のラインの接続、静注終了時の注射針抜去が主なものである。しかしながら注射針抜去は患者が線源となっていること、患者から非常に近い距離(0.5m)に滞在すること、から滞在時間が長い場合には被ばく線量が増加する。

② 別紙1は、当該施設の作業時間、作業内容等の調査結果である。その結果、線源に

近接する時間は、5分20秒程度であることが分かった。その他、被ばく対象線源として待合いホールにいる静注後の待機患者も考えられる。

③ 測定結果

測定時間	静注時の平均数量	直接的な線源接触時間 (距離0.5m)	DC	PD
8時間	267MBq	6分	2 μ Sv	1 μ Sv

(2) 放射線技師

① PET業務において放射線技師が線源に近づく機会は、PET装置に患者を誘導し、検査するだけでなく、投与時の自動注入機への線源セット、注射時の介助、注入の確認、線源となった患者への対応などがある。また、静注後の待機患者からの被ばくも考えられる。

② 別紙2は、当該施設の放射線技師の作業時間、作業内容、その時々々の線源の位置を示した結果表である。

③ 測定結果

測定時間	被ばくを受ける平均数量	直接的な線源接触時間 (距離0.5m)	DC	PD
8時間	230MBq	58分	21 μ Sv	11 μ Sv

2. PET施設内の待合いホールにおける待機患者からの被ばく

① 静注後の待機患者からの被ばくを一般患者または介助者が受けることを想定し、別図1に示す位置、B1、B2、B3に測定器を移動させて設置した。ソファ1個の幅は60cmである。なお、患者動線についても別図1に記入した。

② 別紙3は、測定結果表である。

③ 測定結果

測定時間	待機の平均数量	DC	PD
3時間50分	268MBq	17 μ Sv	12 μ Sv

3. 場所の測定について

PET使用施設内の人が常時立ち入る場所及び管理区域境界の漏えい線量を測定することは、放射線診療従事者等の被ばく線量推定や作業環境管理において重要である。そのため高線量率が予測される場所、管理区域境界となる外壁とエレベータ内に測定器を設置した。別図2に設置場所を示す。

① PET操作室内のカメラコンソール前のぞき窓面(S1)にDC及びPDを設置し検査時の漏えい線量を測定した。

② PET使用施設の外壁で管理区域の境界となる場所(S2)に同様に設置し、漏えい

線量を測定した。

③ 待合いホールの患者待機用ソファ後方の壁面 (S3)、(S4)、(S5) に同様に設置し、PET 検査終了時まで測定した。

④ 別紙 4 は、③の測定結果から、距離－線量を算出した結果である。

⑤ PET 使用施設内エレベータ内 (S6) に同様に設置し、PET 検査終了時まで測定した。

⑥ PET-CT 室患者出入り口前 (S7) に同様に設置し、PET 検査終了時まで測定した。

⑦ 測定結果

測定場所	測定時間	平均存在数量	DC	PD	
S1	8 時間	2 3 0 MBq	1 μ Sv	0 μ Sv	人が常時立ち入る場所
S2	"	"	0 μ Sv	0 μ Sv	管理区域境界
S3	"	"	2 7 μ Sv	1 5 μ Sv	人が常時立ち入る場所
S4	"	"	1 6 8 μ Sv	9 6 μ Sv	
S5	"	"	1 0 1 μ Sv	5 0 μ Sv	
S6	"	"	1 μ Sv	0 μ Sv	管理区域境界
S7	"	"	9 μ Sv	4 μ Sv	人が常時立ち入る場所

4. PET 検査室内、線源より 2 m の位置 (C1、C2、C3) に DC を設置し検査時の空間線量を測定した。

①別図 3 に設置場所を示す。

C2、C3 については患者の体部 (腹部) 中心から 2 m の距離とし、患者－線量計は一定であるが、C1 については、患者の頭部より 2 m とした。頭部は図のように可動範囲を持つので 2 m の距離一定にはならず、正確な測定が困難であった。しかしながら、従事者が検査室内に居ることを想定するならば、頭部中心が妥当と思われる。

②別紙 5 は、測定結果表である。

検査数 7 件の平均存在数量 1 6 5 MBq である。

検査時間 4 時間 1 8 分

③測定結果

測定場所	測定時間	検査時間	平均存在数量	DC
C1	9 時間	4 時間 1 8 分	1 6 5 MBq	5 μ Sv
C2	"	"	"	1 1 μ Sv
C3	"	"	"	1 2 μ Sv

5. モンテカルロ法を用いたシミュレーション計算による PET 製剤のデリバリ等に伴う PET 検査の利用が拡大した場合の医療機関職員等の被ばく線量

1) 車椅子を利用する患者がエレベータにより移動した場合に介助する医療従事者の被ばく線量

図 1 に放射線の飛跡図を示す。陽電子を 100 個飛ばしているのに、100Bq 投与し 1 秒間観察した場合になる。図 2 に示すように、患者との距離 1m では、この設定で従事する場合には公衆の線量限度を担保するために、遮蔽体として鉛の厚みが 9mm 程度必要となった。

2) 患者が廊下を移動した場合の廊下内の空間線量。

図 4 は廊下を移動する患者から放出される消滅光子の飛跡である。10m の廊下を 1 分間歩く場合でも、介護者等の被ばくは 3 月間で $30\mu\text{Sv}$ にすぎないので、病院職員や近隣住民等への理解は容易に得られるものと考えられる。ただし、10 分かけて移動する場合であると、居住区域の線量限度を超える。さらに、1 時間廊下に滞在する場合には、3 月間で年間の線量限度を超える。

3) PET 検査の受診者が検査後に公共交通機関を利用した場合の交通機関勤務者および乗り合わせた一般公衆の被ばく線量

(バス乗務員)

3ヶ月間の被ばく線量は $470\mu\text{Sv}$ となり、公衆被ばく限度を超える。バスに乗り乗務員に近づく人を毎回 2 人に制限すると、公衆被ばく限度を超えない。あるいは、バスに乗るまでの時間を 4 時間 30 分にすると、公衆被ばく限度を超えない。

(一般のバス乗客)

3 月間の被ばく線量は、 $820\mu\text{Sv}$ となり、公衆被ばく限度を超える。検診受診者から 1m の距離を取ると $160\mu\text{Sv}$ となり、公衆被ばく限度を超えない。あるいは、バスに乗るまでの時間を 5 時間とし、他の客との距離を 30cm にすると、 $240\mu\text{Sv}$ となり公衆被ばく限度を超えない。

(電車の客)

3 月間にたまたま 4 回、検診受診者と乗り合わせるとすると、検診受診者との距離が 20cm の場合、3ヶ月間の被ばく線量は $250\mu\text{Sv}$ となり、公衆被ばく限度を超える可能性がある。

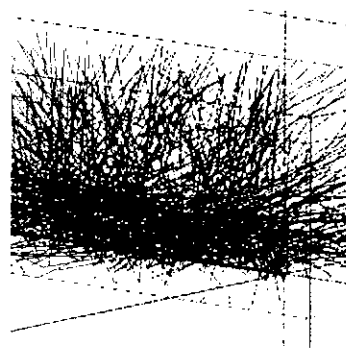
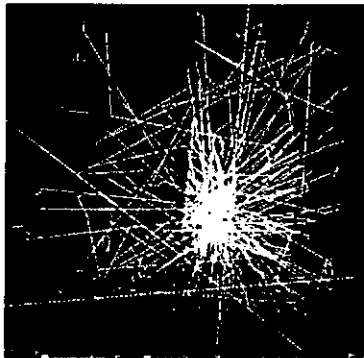


図 1. PET 検査介助職員の被ばく線量シミュレーションおよび廊下を移動する患者から放出される消滅光子の飛跡

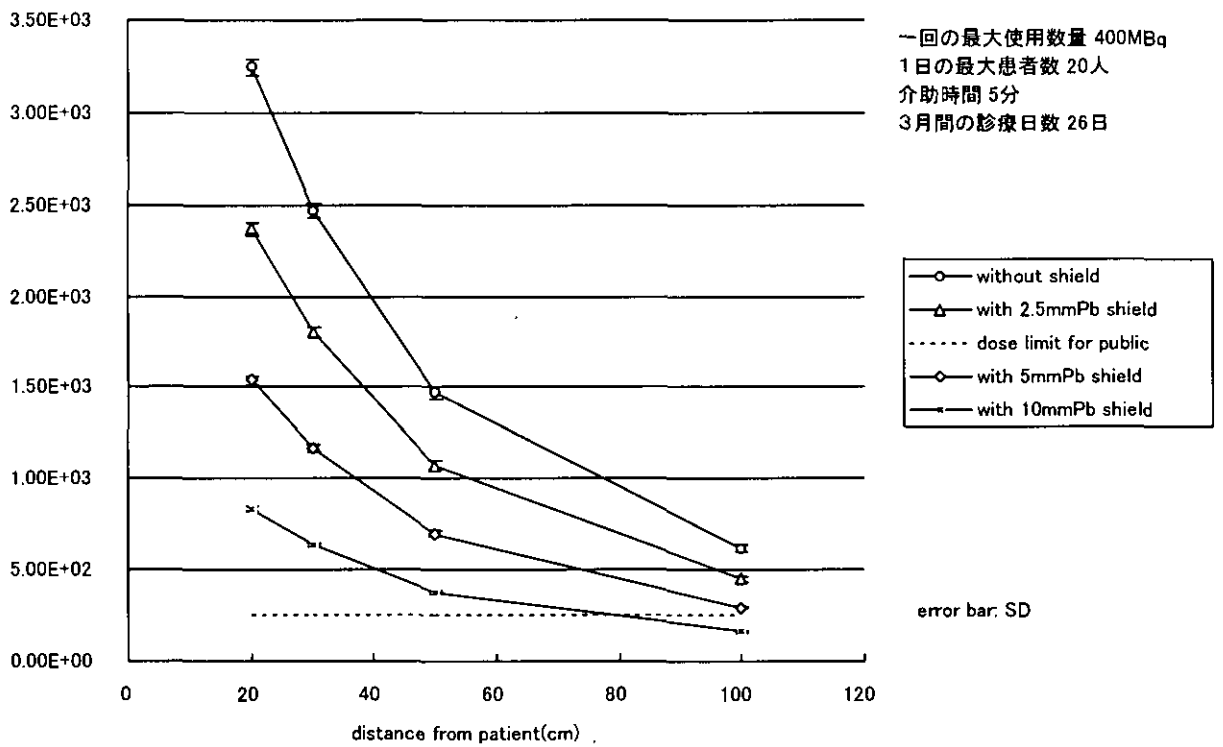


図2. PET検査介助職員の被ばく線量シミュレーション（距離による違い）

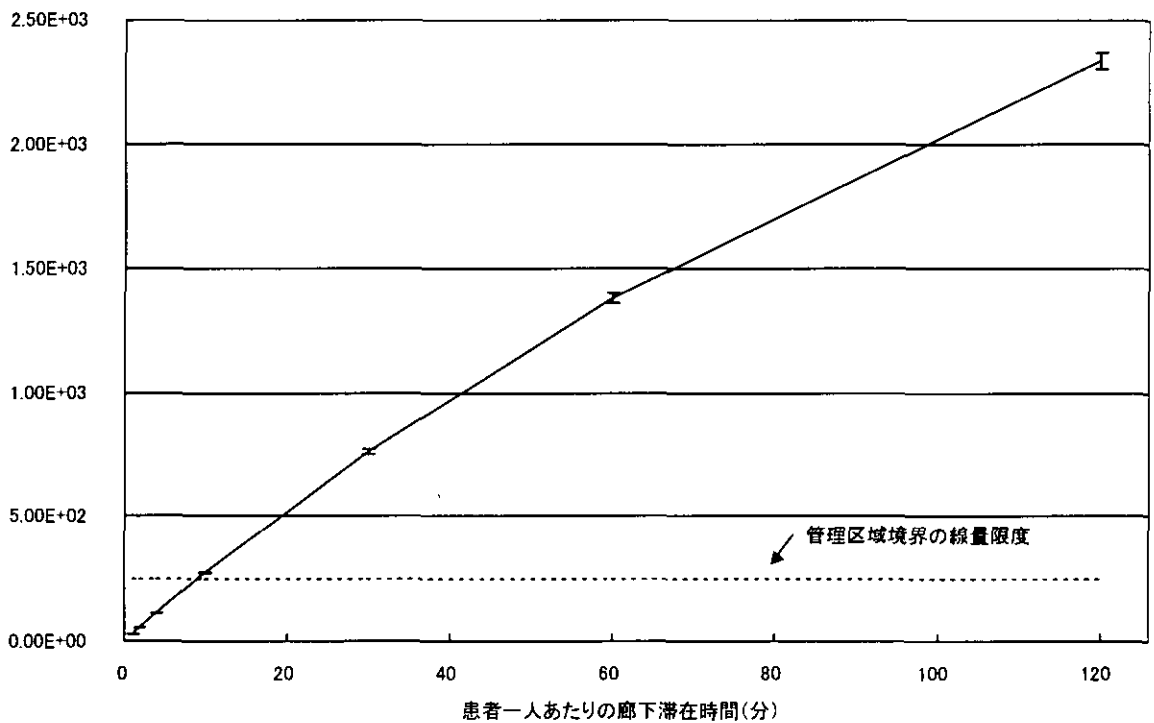


図3. 受付台で勤務している医療機関職員の被ばくシミュレーション（患者の廊下滞在時間による違い）

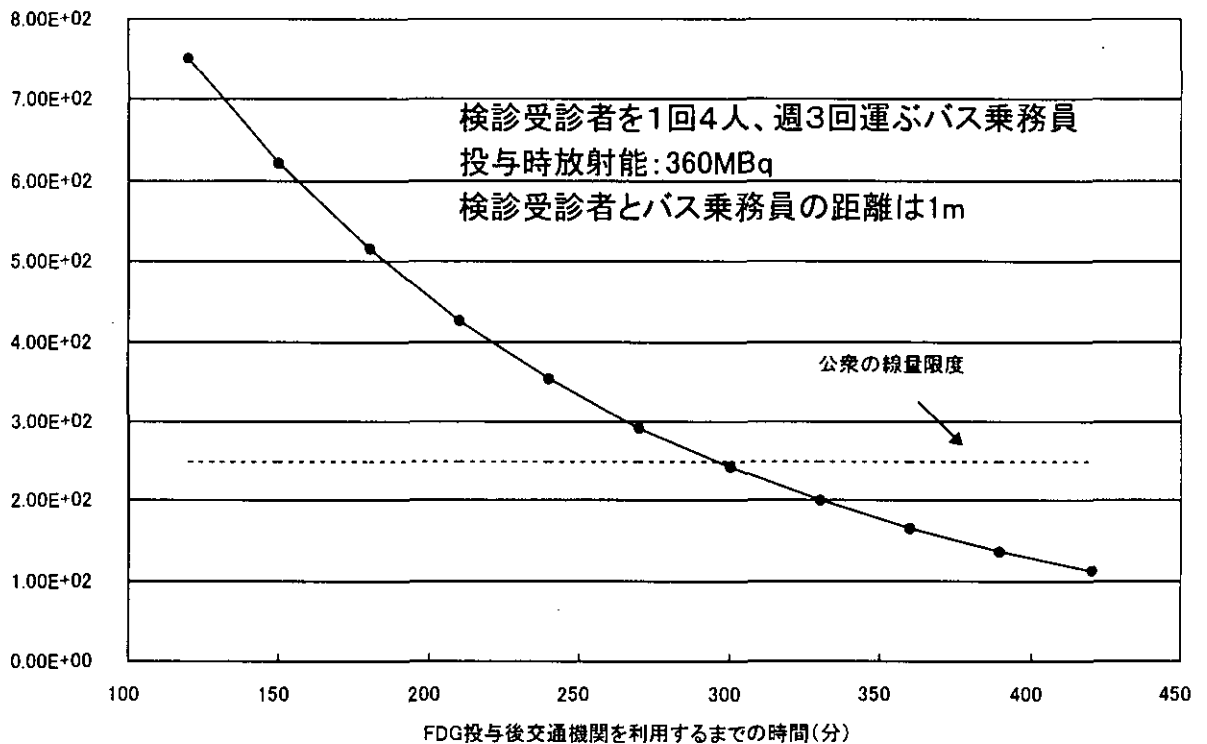


図4. PET 検診受診者を乗せたバスを運転する労働者の被ばくシミュレーション (検診受診者のバス乗り込み時間による違い)

4) 空気中に飛散した F-18 からの被ばく線量

3月間の全患者の体内の総崩壊数は、 2.10×10^{15} であり、飛散率を 0.001 とすると、そのうち空気中で崩壊するものは、 2.10×10^{12} であった。また、空気中に存在する核種から、1崩壊あたりの従事者被ばく線量は、 $5.5 \times 10^{-13} \pm 5.2 \times 10^{-14} \text{ Gy incident}$ であった。

このため、吸入による取り込みを考慮しても、空気中に存在する核種からの従事者の被ばく線量は、 $85 \pm 8.2 \mu \text{ Sv}$ であり、ほとんど無視しうることが確認できた。

5) 貯留槽に混入した F-18 からの被ばく線量

貯留槽のサイズと線量評価点までの距離ごとの線量を表に示す。また、貯留槽内の総崩壊数から被ばく線量への換算係数を表に示す。また、タンクの壁厚と透過率の関係を表に示す。最大見積もりでは、一日あたりにタンク内に流入する F-18 は、 400 MBq となり、3月の間にタンク内で崩壊する F-18 の原子数は、 2.5×10^{13} と推定された。貯留槽のサイズと線量評価点までの距離ごとの3月間の線量を表に示す。いかなる条件でも、 $1.3 \text{ mSv}/3$ 月間を超えることはなかった。また、タンクから 2 m を離れると敷地境界の線量限度も確保できることが確認された。

6) 遮蔽体の効果

結果を図に示す。

- 7) 患者周囲の線量率
結果を別添資料に示す。

D 考察

1. PET 使用施設の被ばくの現状

- (1) S1はPET操作室内のカメラコンソール前のぞき窓前面に設置されたことから、カメラ上で検査を受けている線源 ^{18}F 及び $^{68}\text{Ge}+^{68}\text{Ga}$ からの漏えい線量を測定している。待合いホールにおける待機患者からの線量も考えられるが、有意な放射線は検出されなかった。したがって、PET操作室内（人が常時立ち入る場所）の漏えい線量は、 1mSv/W を越えないことが確認された。

一方、平均存在数量 230MBq 、週40時間、のぞき窓の鉛当量 0.2cm 、線源から線量評価点までの距離を 5m とし計算すると、この場所における漏えい線量は $40.5\mu\text{Sv/W}$ になる。 100MBq 換算では $17.6\mu\text{Sv/W}$ になる。

- (2) S2はPET使用施設の管理区域の境界、PETカメラの直近位である。線源としての主なものは、カメラ上で検査を受けている患者及び $^{68}\text{Ge}+^{68}\text{Ga}$ である。測定の結果、有意な放射線は検出されなかった。したがって、管理区域の境界の漏えい線量である 1.3mSv/3M を越えないことが確認された。

平均存在数量 230MBq 、週40時間、コンクリート 20cm 、距離 3m で計算すると、 $410\mu\text{Sv/3M}$ になる。 100MBq 換算では $179\mu\text{Sv/W}$ になる。

- (3) S6はPET使用施設への出入り口と使用されているエレベータ内に設置した。エレベータが使用施設内で開扉している時間は5秒程度である。測定結果はバックグラウンドであった。したがって、管理区域の境界の漏えい線量である 1.3mSv/3M を越えないことが確認された。

- (4) S3、S4、S5、S7は人が常時立ち入る場所である待合いホールに設置した。最も線量が高かった場所はS4で、その線量は $170\mu\text{Sv}$ であった。測定時間が8時間であることから、1時間あたりの線量は $20\mu\text{Sv/h}$ で1週間あたりでは $110\mu\text{Sv/W}$ となり、 1mSv/W を越えないことが確認された。

- (5) S3、S4、S5の測定値から線量と距離の関係を検討した。(別紙4)その結果、 $370\text{MBq}\cdot\text{h}$ に換算した 1m の距離の線量は、 $18.8\mu\text{Sv/h}$ であった。 100MBq 換算では $5.08\mu\text{Sv/h}$ になる。

2. 放射線診療従事者等の被ばく線量測定結果

- (1) 医師の被ばく線量は8時間の放射線診療の従事で $2\mu\text{Sv}$ であった。線量率に換算すると $0.25\mu\text{Sv/h}$ であることから1年間の被ばく線量は $520\mu\text{Sv}$ /年程度となり、医療法24条の立入検査時に求められる 5mSv /年以上を越えないことが確認された。

- (2) 放射線技師の被ばく線量は8時間の放射線診療の従事で $21\mu\text{Sv}$ であった。線量率に換算すると $2.6\mu\text{Sv/h}$ であることから、週40時間実働する場合には、1年間の被ばく線量は 5.5mSv /年となり、 5mSv /年を越える可能性があるものと考えられた。しかし放射線診療従事者の線量限度である5年間で 100mSv には至らないものと考えられた。 100MBq 換算では、 2.4mSv /年となる。

- (3) 介護者等が待合いホールに滞在した場合を想定し、測定器を、B1、B2、B3に移動して測定した。測定結果は、3時間50分介護者が滞在したとして、 $17\ \mu\text{Sv}$ であった。線量率に換算すると、 $4.4\ \mu\text{Sv/h}$ となり、通常の検査で1時間早く待合いホール到着し、検査終了まで2時間を要したとしても、そこでの滞在時の被ばく線量は $13\ \mu\text{Sv}$ となり、公衆の線量限度である $1\ \text{mSv/年}$ を越えないことが確認された。
- (4) 平均存在数量 230MBq の被験者からの被ばく線量を実測した結果、被験者から $1\ \text{m}$ の距離で、 $16\ \mu\text{Sv/h}$ であった。計算上では、 $29\ \mu\text{Sv/h} \cdot 370\text{MBq}$ である。仮に、介護者が被験者から $1\ \text{m}$ の距離で8時間帯同していたと仮定すると、8時間の平均存在数量は 72MBq であることから、平均線量率は、 $10\ \mu\text{Sv/h}$ となる。このため、8時間の積算線量は $81\ \mu\text{Sv}$ となり、一般公衆の線量限度 $250\ \mu\text{Sv/3}$ 月を越えない。
3. PET室内2mの位置での空間線量測定結果
- (1) 平均存在数量 165MBq の被験者からの空間線量は最大値 $1.4\ \mu\text{Sv/h}$ となり、PET検査室内に操作コンソールを設けた場合、 $4.3\ \text{h/日}$ として $30.1\ \mu\text{Sv/w}$ の結果になる。 100MBq 換算では $18.3\ \mu\text{Sv/w}$ である。
4. PET室内に操作室を設けた場合の放射線技師の被ばく線量
- (1) 2.(2)の設定では、操作室はPET室外に設けている。3.(1)のように、操作コンソールをPET検査室内に設けることを想定した場合、注射の介助等を行う放射線技師がPETの操作を行うものと想定すると、注射の介助等で被ばくする線量にPET操作時の線量を加算する必要がある。
- (2) 注射の介助等の被ばく線量を 100MBq 換算すると、 $2.4\ \text{mSv/年}$ 、PET室内2mの位置での線量を同様に 100MBq 換算すると、 $0.96\ \text{mSv/年}$ になる。平均存在数量を今回の測定のように 230MBq とした場合、 $7.72\ \text{mSv/年}$ となり、年間 $5\ \text{mSv}$ を越える結果となる。注射等の介助は、線源である患者に接触する時間を少なくすることにより、被ばく線量を小さくすることが可能であるが、操作コンソールを検査室内に設けた場合の被ばくを避けることは非常に難しい。
- (3) PET装置の操作コンソールは、別室に設けることが望ましいが、PET室内に設置する場合には、被験者より2m以上の距離を取る必要がある。
5. PET製剤のデリバリ等に伴うPET検査の利用が拡大した場合の医療機関職員等の被ばく線量PET製剤を投与された患者がPET撮像装置に移動する間に介助する医療機関職員や廊下に面した受付台で勤務している医療機関職員および検診受診者が検診後に利用する交通機関の乗務員および乗り合わせた公衆の被ばく線量を推定した。消滅光子のエネルギーは高く、鉛で防ぐのは必ずしも効率的とは言えない。薄い鉛のエプロンを用いると、実効線量がほとんど変わらない反面、エプロン直下の皮膚の被ばく線量が増大するため、防護エプロンは着用すべきではない。また、エレベータ内だと壁からの散乱がそれなりに寄与するので線量限度に近い状況では、その考慮が必要なことも考えられる。また、特殊な状況として0-15使用時などには患者の呼気等から空気中に核種が拡散することも考えられるので、その評価が必要なこともあると考えられる。また、製剤のデリバリや廃棄（貯留タンク内の核種からの外部被ばくは推計

済)に伴う作業者の被ばく線量の推計も必要であると考えられる。

一方、F-18を投与された患者が移動する廊下の線量は、管理区域境界の線量限度を十分に下回るために、投与後に撮像のために一旦管理区域から出るとは、外部被ばくの観点からは、放射線防護上特段問題にならないことが確認された。

ただし、検診受診者が同じ交通機関を利用すると、交通機関の労働者や一般客の線量が、一般公衆の線量限度を超える可能性がある。この場合、検診後、適切な時間減衰を待ったり、排尿したりすることで、これらの被ばく線量は小さくすることができる。このようなPET検査の特性を考慮した検診受診者への放射線防護上の注意の例を示す。ばらばらに交通機関を利用するなどの注意を払うことにより、公共交通機関の乗務員やその利用者の線量は、線量限度以下とすることができる。

6. 患者同士の被ばくについて

PET検査は、静注後約1時間程度の待機安静時間が必要である。そのために、待機安静時間が他の患者と重複する可能性が考えられ、患者同士お互いに被ばくをするおそれがある。この待機安静時間における患者同士の放射線被ばくを避けるためには、1)待機安静時の患者同士を可能な限り離す構造設備とすること。2)患者間にはしゃへい体を設けること。3)患者同士の私語を禁止すること。3)可能な限り飲水をさせること。(最大2リットル程度とし、その理由としては、①患者の被ばく線量低減、②体内バックグランドの低減、③生物学的半減期が大きくなり公衆被ばくの低減、が考えられる。)などが必要である。

E 結論

^{18}F は $\beta+$ 崩壊(壊変割合93.46%)により633keVのエネルギーを持つ陽電子を放出するために、その消滅光子(エネルギー0.511MeV)により、外部被ばくを与える。その実効線量率定数は、 $0.140\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ と通常核医学検査に使用される核種と比し高い。しかし、半減期が109.8分であることから、放射線防護の三原則を遵守し、この報告書に示したような放射線防護上の注意事項を守れば、介助が必要な重症患者や検診等での多人数を診療する場合であっても、放射線防護上、安全に使用できる。また、PET製剤の配送も同様に、安全に実施できる。

一方、製薬会社から医療機関へPET製剤が配送されるという事態を想定すると、使用施設は、PETカメラ室、カメラ操作室、処置室、準備室、静注後待機室をそれぞれ単独構造にする必要がある。PET検診において1人185MBq使用とするならば、2m四方の各室の画壁の外側は、コンクリート厚15cmで $2.6\mu\text{Sv/h}$ となり、施設を改修しなくても医療機関職員への被ばく線量を十分小さくできる。

PET診療において従事者の被ばく線量を左右するのは、使用時の注意である。放射線従事者は、自身や同僚の被ばく線量を最小限にするために、極力、静注後の被験者との無用な接触を避ける。また、トイレ等の案内、検査についての説明等は、線源となる前に行い、静注後は、監視モニター、インターホンを使用してカメラ室に誘導するなど被ばく防止措置をとる。必要な注意を払うとPET診療に従事する際の被ばくは、十分に線量限度内とすることができる。しかしながら、わずかな被ばくをおそれるあまり患者を不安に陥れるような接遇をすべきではない。

PET 検査室内に、操作コンソールを設けた場合、被験者からの被ばくを防止するために、2 m以上の距離を取る必要がある。

患者同士の被ばくについては、待機安静時にはお互いの距離を保つこと、私語を交わさないことなどをあらかじめ説明し、患者の理解を得る必要がある。十分な理解が得られれば、患者同士の被ばくは少なくすることができる。

謝辞

線量計測に協力頂いた患者の方々や医療施設の職員、千代田テクノル株式会社に感謝申し上げます。また、線量計算にご協力頂いた東芝電力放射線テクノサービス社の唐澤秀明技術第二部部长に感謝申し上げます。

F. 健康危険情報 なし

G. 研究発表

1. 論文発表

Yamaguchi I., Ohba H. Monte Carlo Calculation of External Dose Rate around a Radionuclide Reservoir Tank Using EGS4. Radiation Safety Management 2003, 2 (1), 29-32.

2. 学会発表

Yamaguchi I. The Monte Carlo Method for Calculating the External Dose Rate around a Radionuclide Reservoir Tank in a nuclear medicine facility. Proceedings of the Tenth EGS4 Users' Meeting in Japan. Tsukuba: KEK Proceedings 2003-15, 2003, 120-127

山口 一郎、成田 浩人. PET 検査において患者を介助する医療従事者の被ばく線量推計. 日本保健物理学会第 38 回研究発表会; 2004. 4. 22-23; 神戸 (予定)、日本保健物理学会第 38 回研究発表会講演要旨集. (神戸: 日本保健物理学会; 2004)

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得 なし

2. 実用新案登録 なし

3. その他 特記事項

1. 別添

(1) 別紙 1

(2) 別紙 2

(3) 別紙 3

(4) 別紙 4

(5) 別紙 5

(6) 別図 1

- (7) 別図2
- (8) 別図3
- (9) QAD を用いた PET における患者周囲の線量計算結果

2. 資料

PET 製剤を投与された患者からの実効線量率計算結果報告書
東芝電力放射線テクノサービス株式会社

3. 参考資料

- (1) 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル2000
原子力安全技術センター
- (2) 医療被ばくガイドライン
日本放射線技師会
- (3) 国立がんセンター東病院PET施設しゃへい計算書
- (4) 医療放射線防護関係法令集 アイソトープ法令集Ⅱ
日本アイソトープ協会
- (5) クリニカル PET 時代の放射線技師の役割
日本核医学会関東甲信越地方会
東京女子医科大学病院 総合外来センター 金谷 信一