

Applied Radiation and Isotopes 64 (2006) 979-988 RA-226 G. Melvillea
、/C3、SAU Fan Liub、B.J. Allena Acentre の光子誘導変換による癌療法の AC-
225 の生産の理論モデル腫瘍学、セントジョージキャンサーケアセンター、 그레이セント
コガラ、NSW、オーストラリア、NSW、シドニー、ニューサウスウェールズ州シドニー、
オーストラリアは 2006 年 1 月 18 日に受賞しました。2006 年 5 月 1 日改訂フォームで
受信。2006 年 5 月 4 日に受け入れられた抽象ラジウム針は、癌治療としてかつて腫瘍に
移植されていたラジウム針が時代遅れであり、半減期は 1600 年であるため、放射性廃棄
物の問題を構成しています。医療線形アクセラレータ (LINAC) からの高エネルギー光子
を使用して RA-226 を爆撃して RA-225 を生成することにより、ラジウムの還元を小規模
でのラジウムの減少を調査しています。癌の「標的アルファ療法」で使用するための BI-
213 を生産する発電機。このホワイトペーパーでは、18 mV のリナック電子エネルギーで
のブレストラリング光子スペクトルが RA-226 の対応する光核断面で畳み込まれている
正確な理論モデルを使用して、LINAC で AC-225 を生成する可能性を検証します。その後
、総統合収量を取得でき、コンピューターシミュレーションと比較できます。この研究で
は、18 mV で、RA-226 での光核反応が LINAC で AC-225 の低い活性を生成できること
を示しています。ただし、実用的な量の AC-225 と RA-226 の有用な削減には、高電流、
パルス長、および周波数を備えた高出力リナックが必要です。R2006 Elsevier Ltd.
All Rights Reserved。キーワード：医療線形アクセラレータ (LINAC) ; アクチニウ
ム-225; ラジウム-226; ラジウム-225; bismuth-213; ターゲットを絞ったアルファ療法
; がん治療 1.はじめに 1.1。Actinium-225 AC-225 は、Bi-213 を生成するために減
衰する 10 日間の半減期を備えたアルファ放出ラジオアイソトープです。いずれかの AC-
225 ORBI-213 は、無線免疫療法のエージェントとして使用できます。アルファ粒子エ
ミッターは、単一癌細胞およびマイクロメタステーゼの致死照射の最も強力な源であり、
それらの密にイオン化する放射線のためです。軟部組織の短距離は数細胞直径のみに制限
されているため、無線免疫療法アプリケーションにかなりの関心を持つアルファ粒子があ
ります。アルファ粒子は、組織内の高い線形エネルギー伝達 (LET) を持っています。高
い let 放射線は、低 let ベータ放射よりも短い範囲ではるかに多くの生物学的ダメージ
を誘導するため、細胞毒性はるかに多くなります。非常に小さな容量でこのような高エ
ネルギーの送達により、アルファ粒子は、微小転移性疾患や白血病やその他の血液媒介疾
患などの単一癌細胞を標的とするのに特に適しています。Bi-213 放射性同位体は、その
独特の核特性のために特に興味深いものです。これには、46 マンの短い生命と高エネ
ルギー (8.4 MEV) アルファ粒子エミッションが含まれます。AC-225/Bi-213 (Actinium
Pharmaceuticals、2005) のジェネレーターシステムからの可用性により、この放射性
同位体は、医療使用に特に適しています。がん試験は、シドニーのセントジョージ病院の

がん治療センターで実施されています。ここでは、Bi-213 を使用した対象標識療法 (TAT) (Allen et al.、2004) プログラムは、分離を選択的に殺すことにより、マイクロメタスターゼの成長を阻害する可能性を提供します。がん細胞の血管新生前クラスター。TAT では、放射性同位体はモノクローナル抗体またはタンパク質に結合しており、出版局のがんのがんの受容体に付着している Their 分子サブユニット

www.elsevier.com/locate/apradiso 0969-8043/\$ - フロントマターR2006

Elsevier Ltd.すべての権利を参照してください予約済み。doi:

10.1016/j.apradiso.2006.05.002/c3corresting 著者。Tel. : +61 2

94871619.電子メールアドレス: gmelvill@bigpond.net.au (G. Melville)。

細胞は、放射線ががんを攻撃することを可能にしながら、周囲の組織への潜在的にマイナスの影響を最小限に抑えます。1.2。ウラン-233 減衰鎖がん治療の可能性を保持している Bi-213 同位体は、U-233 から始まる複雑なプロセスを通じて生成されます (図 1)。このプロセスの重要な中間体は、Th-229 および Ac-225 です。Ac-225 は現在、ORNL で U-233 から抽出された Th-229 から導出されています (Boll et al.、2005)。Ac-225 を生成する方法はいくつかあります。現在最も実用的な方法は、Th-229 の崩壊からこれらの同位体を導き出すことです。これは、U-233 の崩壊によって生成されます。Ac-225 は、医療施設に出荷されている製品です。Bi-213 は病院の Ac-225 から分離され、ターゲティング剤と組み合わせられています。1.3。生産方法 Ac-225 は、アクセラレータまたは反応器を使用して、または分離技術を使用して生産できます。方法には、u-233 の崩壊によってそれを取得するのではなく、直接生産することが含まれます。Ac-225 に減少する Ra-225 を生産します。Ac-225 を直接生産します。これらの各方法は、Bi-213 generator で使用するための Ac-225 の供給を 7 つに供給しますが、それらはすべて、追加の化学処理および/または分離ステップを必要とし、まだ決定されていないため、生産コストを増やす可能性があります。225 (Koch et al.、1999) は:

/c15232th (n; g, 2b) 233u: この方法では、Th-232 を熱中性子で砲撃して U-233 を生成し、U-233 減衰鎖を追跡します。図 1 に示すように、Ac-225。/C15226RA (3 N; 2B) 229th: この方法では、3neutron キャプチャイベントの後に Th-229 を生成するためにラジウムを熱中性子で爆撃し、Ac-225 に減少します。/C15226RA (P; 2N) 225AC: この方法では、サイクロトロンからのプロトンは Ac-225 を生成し、ピーク断面は 16 MEV プロトンエネルギーで約 540 MB です。(プライベートコミュニケーション: G Dracoulis, Australian National University) 標準的な融合蒸発コードを使用しています。) 226ra (P; 3N) 224AC 反応は、より高いエネルギーで急速に引き継ぎます。/c15226ra (n; 2n, b) 225ac: 中性子爆撃ラジウムが Ac-225 を生成します。/c15226ra (g; n) 225ra: この反応は Ra-225 を生成し、その後ベータ崩壊を通じて Ac-225 に減衰します。上記の多くの反応には、熱エネルギーでの中性子爆撃が含まれま

す。中性子を必要とする産業用アプリケーションの場合、ユーザーは、核反応網、放射性同位体、アクセラレータベースの高エネルギー中性子源の3つの主要なソースを選択します。核医師は、中性子の最大かつ最も普及している源です。このペーパーでは、医療用リナックが放射線療法のインホスピタルに日常的に使用されているため、光核反応経路を調査します。1.4。光核生産リナックは、放射線療法治療の主力です。彼らは、クライストロンまたはマグネトロン生成された電波周波分野によって加速されたメガボルト電子ビームを提供します。グリッドされた電子銃からの電子のビームは、アソレノイドによって直径2 mm未満のビームに焦点を合わせて、厚さのタンタルまたはタングステン標的と生産性のある標的放射を獲得します。このペーパーの理論モデルは、Varianの2100c MV Clinacに基づいていますが、エネルギー範囲が調整されると、任意のLINACと非常に似ています。ゼロエネルギーからゼロエネルギーからターゲットにヒットする最大エネルギーまで生成されたブレストラリングフォtonsのこれらは、この場合は18 meVです。今日の最も一般的なアプローチは、スペクトルを計算するためのUse Monte Carlo Methods (Anesjo、1989)です。核反応は $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{226}\text{Ac} + ^4\text{He}$ です。(1) 反応(1)中性子が排出されるように、ブレストラリング光子でラジウム核を刺激することを伴います。出版物の審判図1. U-233 減衰チェーン (Korea Atomic Energy Research Institute、2005)。g。メルビルら。/応用放射と同位体 64 (2006) 979-988 980

6.4 MeVの反応しきい値は、LINACで簡単に達成できます。反応は本質的に電磁的であり、実質的に瞬時になります。これは、照射後、 ^{225}Ra は最大の収量になり、時間の経過とともにゆっくりと崩壊し、半減期は14.9日であり、ベータ排出により ^{225}Ac を生成し、次の崩壊により生成されます。(2) 2.理論2.1。ブレストラリング生産リナック内の電氣的に加熱された優先(カソード)は、ドリフトチューブ間に適用される高電圧パルスの適用により、 ^{225}Ac 面からタングステンターゲットへの導波路によって加速される電子を生成します。ドリフトチューブを吸い込んだ場合、それらはフィールドからシールドされ、一定の速度で漂流します。彼らが次のギャップに到着すると、ラジオフェークフィールドは次のドリフトチューブに到達するまで電圧を加速します。これは、粒子がターゲットに出るまで、各ギャップでますます多くのエネルギーを拾い上げて続きます。交互のフィールドが使用されており、フィールドが粒子を交互に加速および減速させるため、ドリフトチューブが必要です。ドリフトチューブは、フィールドが減速する時間の長さのために粒子を保護します。リナック光子またはブレストラリング放射 (Bueche、1969) は、高エネルギー電子が原子核の近くを通過する陽極材料に浸透すると発生します。電子は、速度の変化を引き起こすタングステン原子の核クーロンフィールドによって初期経路から偏りになります。エネルギーは、「ブレーキング放射」またはブレスストールと呼ばれる電磁放射の形で失われます。爆撃電子が異なる衝撃半径で核に近づくため、

光子放射を生成するエネルギー変換は異なります。したがって、電子が核フィールドによって単に誘導されるだけである場合、最大（全体のエネルギー全体が光子放射に変換される）から最大のエネルギー光子放出へのブレストラリングエネルギーの広がりがあります。さまざまなターゲットの電子砲撃によって角度が生成された角度の強度の強度の変動を示す極ダイアグラム（Nordell et al.、1984）を図2に示します。曲線Aは、薄いアルミホイルと曲線BとC、10および20 MeV電子を砲撃する34 keV電子を示しており、薄い0.05 cmのタングステルテットを砲撃しています。曲線Dは、16枚のタングステンターゲットを備えた断熱X線チューブの典型的な強度分布であり、ビームは電子ビームに直角に採取され、90 kV pで吸収されます。砲撃電子のエネルギーが増加すると、曲線Aの2つのローブが前方に先端に進み、非常に高いエネルギーで、すべての放射が前方向に分布します。Mohan et al.（1985）CLINAC-20からの15 MeV光子の角度分布は非常に狭く、ターゲットの中心軸の2°に含まれるすべての光子の99.9%を超えることがわかりました。2100Cのクリニクウィルには、同様の光子角分布があります。これは、AT100 cm（SSD）を意味します。光子ビームの大部分は、断面が7 cm未満の領域に含まれることを意味します。もちろん、これは彼らの旅に人の干渉がないと仮定しています。ただし、実際には、LINAC コリメーターと膨張フィルタリングのために光子を検討する必要があります。article in Press 図2. 加速された電荷からのブレストララン排出。メルビルら。/応用放射と同位体 64（2006）979-988 981

この研究は、18 MV 2100C Clinacに基づいています。このように、光子エネルギーの範囲（bremsstrahlung）は、約6 meVの平均エネルギーと1.25 meVのピークフルクスを備えた態で歪んだガウス曲線です。光子の強度は低いエネルギーで高くなりますが、より高いエネルギーではすぐに先細りになります。これについては後で詳しく説明します。核反応によって生成される収量（ γ ）のfor a -225を計算する最も正確な方法（1）は、個々の収量をすべてのブレスエネルギーに比べて $\gamma(e) \gamma(e) \gamma_{ze2e1y\delta e\beta de}$ 、（3）ここで $e1s6.4$ MeVでの反応閾値（光核実験センターデータ（CDFE）、2005） $a n d e2$ は、リナックの最大電子エネルギー、つまり18 MeV。この統合を実行するには、エネルギーの関数としてのBremsstrah-Lung光子と光子反応断面積の数を、最初に脳卒中のエネルギー範囲で計算する必要があります。2.2. 反応断面反応断面（Wehr and Richards、1974） i は $s4n r n 1$ 、（4）ここで、断面積（納屋）、単位面積あたりの単位時間あたりの入射粒子の数が $s i s (c m^2)$ で定義されています。、および $N r$ 核ごとの単位時間あたりの反応の数。断面はエネルギーの関数であり、以下の式、 $e q$ ）。この式は、粒子共鳴の形成のための断面を説明し、他の2つの粒子状態を相互に媒介します： $s \delta e \beta 4 \delta g = 2 \beta 2 \delta e / c 0 e r p 2 \beta 2 \beta 2 \beta 2 e e r / c 18 / c 19 E R 4 13.45 M E V$ （巨大双極子共鳴（GDR）エネルギー）（Berman、1976）、 $E t t h e 6.4 M e v$ （反応閾値エネルギー）（CDFE、2005）、 $G T h e 3.97 M E V$ （共鳴時のFWHM）（Berman、1976）、および

エネルギー (E c) と呼ばれる特定のエネルギーの上で、ブレムストラルの効率を考慮する必要があります。この重要なエネルギーは、この研究の 18 mV エネルギーをはるかに下回っている ECE600/ZMEV48.1MEV : ECE600/ZMEV48.1MEV : ceCalculated (Frauenfelder and Henley, 1991) を使用できます。低エネルギーでの電子エネルギー (EB、EV) でのブレムストラリング生産の効率は、 $Z^4 \text{keV}^{-1}$ から計算できます。ターゲット ($Z=74$) (Dowsett et al.、2001)。低エネルギーでのブレムストラリング収量は、入射電子のエネルギーが増加するにつれて直線的に増加します (Frauenfelder and Henley, 1991) が、低い電子エネルギーでは一般に 5% 未満です (125 kV /C241 %)。1 MEV では、収量は 8% になる可能性があります (Dowsett et al.、2001)。エネルギー範囲全体にわたって、勇敢な工フェジー性を正確に表現する表現はありません。中程度のエネルギーでは、一般的な近似式 (Emilio, 1975) : $Z/C25EBZ 750$ WHERE EBIS MEV の電子エネルギー : (9) これは式に似ています。 (8) しかし、約 12 MEV でエネルギーで 100% 以上増加します。18 MEV でのブレムストラリングクロン効率を見つけるために、3 つの方法が特定されています : /c15 高エネルギー近似式 (Meyer- Hof, 1967) : $z/c256/c210/c04zeblP6/c210/c04 zebwhere mev : (10)$ フォーミュラは、効率が 100% 未満のままであり、18 MEV で 44.4% の効率を与えることを保証します。/c15 水中の測定された脳腹部の効率 (最良のライン) 図 4 (Emilio, 1975)。Z 2 とほぼ同じ異なる数字 Zvaries の要素における Bremsstrahlung の効率 (Meyerhof, 1967)。したがって、タングステンの効率は約 49% AT18 MEV です。/C15 表 2 (Spring, 1960) 以下では、タングステンの測定値と理論的値を少数に示します。それは、エネルギーがほぼ 2 倍になると、効率がほとんど密接にかかることを示しています。これにより、約 52% の 18 MEV で外挿効率を得られます。高エネルギー近似式 (1 番目の方法) は、他の 2 つの方法として Bremsstrahlungef の効率を決定する上で最も正確です。このモデルでは、図 5 の光子スペクトルを正常化するために、保守的な 40% のブレムストラリング効率を使用しています。これは、0~18 MEV の Linacfrom によって生成される光子の総数が 6.5 /C210 13 に等しいことを意味します。

3.3. Linac Photon Spectrum 光子スペクトルを構築して、光子の総数とその強度を知って構築できます。図 5 のこれらは、Varian Corporation の光電流データを使用して最大 18 MEV までの光子エネルギーの関数として光子の数を与え、これらのエネルギーでの反応断面を使用してこれらのエネルギーのそれぞれで RA-225 収量を計算することを可能にします。。Photoneutron eq. (1) 6.4 MEV のしきい値エネルギーを有する RA-225 を生み出すことができる光子の総数は 1.61 /C210 13.press の article 表 1 18 mV varian Clinac 2100c 電子エネルギー (max) 418meV のパラメーター (+3%) ピークパルス電流 /C2436 MA 周波数 4180Hz パルス長 43.5m24ms 平均電流 426mag。メルビルら。/応用放射と同位体 64 (2006) 979-988 983

一 (MEV) 効率 (%)) 18 MEV ~ 7% 図 4. 水中の電子ブレストラリング効果。メルビルら。/応用放射と同位体 64 (2006) 979-988 984

出版局の記事 0100200300400500600 01 0 1 5 2 0 エネルギー (MEV) 断面 (MB)
5 図 6. 光核断面 (MB) 対光子エネルギー (MEV)。
0.00E+002.00E+084.00E+086.00E+088.00E+081.00E+091.20E+091.40E+091.6
0E+091.80E+09 01 0 1 5 2 0 光子エネルギー (MEV) NO. RA-225 原子/秒。5 図
7. 1 秒あたりの原子と光子エネルギー (MEV)。ピークフラックス (1.25 MEV) 平均エ
ネルギー (~6 MEV) リナック光子光子スペクトル
05E+111E+121.5E+122E+122.5E+122.5E+123E+123.5E+12 01 0 1 5 2 0 光子
エネルギー (MEV) 光子数/s。5 図 5. 光子数/s 対光子エネルギー (MEV) .g。メルビ
ルら。/適用放射と同位体 64 (2006) 979-988 985

そして、電圧が電子エネルギーを決定し、電子エネルギーと電流は反比例しているため、両方が特定の出力と一緒に増加することはできません。4. 議論総量は、エネルギー範囲 6.4 MEV 218 MEV を超える個々の収量を合計することで計算されているため、平均値が使用されていないため、計算は非常に正確です。このモデルは、パルス長が 4 ms の最大電流で動作する LINAC に基づいています。実際には、LINAC は 3.5 ~ 4 ミリ秒で脈動し、収量をさらに 12.5% 減らすことができます。ここでの重要な仮定は、RA-226 がビーム内のすべての光子と相互作用することです。したがって、ラジウム源の配置は非常に重要です。図 9 に示されている RA 原子/cm²A と相互作用する光子/cm²/s の観点から、光子流量の計算が行われるようになりました。この計算では、²²⁶Ra ラジウム針はタングステンターゲットから 49.2 cm の距離に配置されます。²²⁶Ra photon flux は、ビーム幅内で均等に分布しています。9.3 cm² の面積が 49.2 cm の距離である 6.5/C21013 インチの総光子数は、7/C21012photons/cm²/s の光子流量を与えます。ただし、目的の光核反応が実際に存在する可能性があるしきい値エネルギーを超える光子の数を考慮すると、上記の光子流量は 1.7/C210 12photons/cm²/s に減少します。低電流と低電流との組み合わせの低い収量は、低電流と周波数に起因します。収穫量を増やして、価値のある量の RA-225 と娘の放射性核種を生成できるようにするには、多くの要因を考慮する必要があります。これらは次のとおりです。²²⁶Ra 最大電流、²²⁶Ra はパルス長を獲得し、²²⁶Ra はパルス周波数を増加させ、²²⁶Ra 照射時間、²²⁶Ra はより多くのラジウムを照射します。収量を最大化するために GDR に到達するには、高エネルギーリナックが必要です。照射時間は、リナックにあまり緊張することなく、10 (1 ~ 10 時間) 以上の攻撃者によって増加する可能性があります。特に、RA-226 ができるだけ多くの RA-226 をターゲット領域に梱包することは非常に重要です。RA-225/AC-225 を RA-226 から分離する効率的な方法を使用するなどの他の要因は、小さな収量を考慮する際に重要です。RA-226 の合理的な量を取得する 1 つの方法は、かつて癌を処理するために使用されていたラ

ンは、少量の RA-226 がシミュレーションで照射された 15 MEV バリオン (最大エネルギー : 15 MEV) でこのグラフを生成しました。それは、一時的な平衡が 18 日後に発生し、理想的な理論的結果と比較することを示しています (親放射性核種の半減期が娘の放射性核種の半減期よりもはるかに長い理想的な状況を前提としています) 。。 C ++ コンピューターシミュレーションプログラムは、18 MEV バリオンを使用して 1 cm³ of RA-226 (5 g) を 1 時間照射すると、1.25 の RA-225 の収量が得られると予測しています。AC-225 は 0.554 MCI で、430 時間または 18 日後に発生します。これらの C ++ 収量の結果は、同じ条件で 1.45 MCI/H OFRA-225 が生成されたこの理論論文の他の結果と非常に一致しています。以前に考えられていたが、C ++ の結果は TH-232 断面データを構築しており、BI-209 データが使用された場所とは 16% しか異なっていた。これらのシミュレーションにおけるエラーの最大の原因は、実際のプレムストラリング効率にあります。RA-226 および TH-232 ARE は核を変形させましたが、BI-209 から球状の断面データを使用しても、LINAC エネルギーでの結果は大幅に (20% 未満) 変化していません。5. 結論この理論的アプローチに基づいて、RA-225 の非常に低い活動 (MCI) は、一般的な高エネルギー LINAC によって生成される可能性があります。2 つの異なるシミュレーションは、異なる核からの断面データを使用する場合の結果を示します。5 g の RA-226 を 1 時間照射する 18 mV のリナックは、1~2 MCI の RA-225 を生成します。シミュレーションは、特定のレベルを超えて LINAC エネルギーを増加させるだけでは、図 10 のプレスでの降伏が増加しないことも示しています。Photoneutron 製品 (RA-225) は、バリオン (15 MEV) を使用した照射後に最大になり、ゆっくりと減衰する間、ゆっくりと減衰し、ゆっくりと減衰する 430 時間で最大になります。メルビルら。/ 応用放射と同位体 64 (2006) 979-988 987

全体的な LINAC パワーが増加しない限り。核核反応は非効率的ですが、より長い照射時間を使用してラジウムターゲットをプライム位置に配置し、質量 RA-226 ターゲットを持つことにより、収量を大きく増加させることができます。積み重ねて、多数のラジウム針がこれを行う可能性があります。さらに、貴重な AC-225 がターゲットから抽出された後、残留 RA-226 が継続的なプロセス (RA/AC ジェネレーター) で再び照射できることを考慮すると、プロジェクトは時代遅れの放射性科目をゆっくりと減らし、AC-225 を生成することもできます。謝辞オーストラリアの Varian Corporation の Ole Hagen 氏に、2100C CLINAC とシドニーのニューサウスウェールズ大学のオレグ・スシコフ教授に関する情報を提供してくれたことに感謝します。参考文献 Actinium Pharmaceuticals、2005 年。オンライン : <http://www.actiniumpharmaceuticals.com/> ahnesjo, A., 1989。光子用量計算。医薬品。Phys. 18, 377.allen, B.J., Raja, C., Rizvi, S., Li, Y., Tsui, W., Zhang, D., Song, E., Fa Qu, C., Kearsley, J., Graham, P., Thompson, J., 2004。がんの標的アルファ療法。

Phys. 医薬品. Biol. 49, 3703-3712. Allyn and Bacon, 1966. 核物理学の基礎、Boston. Berman, B., 1976. ローレンス・リバモア研究所[64HA2]. Boll, R.A., Malkemus, D., Mirzadeh, S., 2005. Appl. radiat. isot. 62 (5), 667-679 (Epub 2005 1 月 28 日). Bueche, F., 1969. 科学者とエンジニアのための物理学の紹介. McGraw-Hill Co., ニューヨーク. 光核実験センターデータ (CDFE), 2005 年。モスクワ. ref. (T, ヤング, 72). オンライン : <http://cdfe.sinp.msu.ru/index.en.html> dimitar, K., 1998. Bremsstrahlung で生成されたいくつかの異性体収率比の研究. Appl. radiat. ISOT. 49 (8), 989-995。Dowsett, D.J., Kenny, P.A., Johnston, R.E., 2001. 診断イメージングの物理学. オックスフォード大学出版局, オックスフォード. Emilio, S., 1975. 核と粒子、第 2 版. 議会図書館のカタログ. Frauenfelder, H., Henley, E., 1991. 亜原子プロセス, 第 2 版. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, ニュージャージー州. Koch, L., et al., 1999. がん療法における AC-225 の生産と BI-213 娘の適用. Czechoslovak J. Phys. 49 (Suppl. S1), 817-822. Korea Atomic Energy Research Institute, 2005 年. オンライン : <http://atom.kaeri.re.kr/cgi-bin/readgam> meyerhof, W., 1967. 核物理学の要素. ニューヨーク州マクグローヒル. Mohan, R., et al., 1985. 医療線形加速器からの光子のエネルギーと角度分布. 医薬品. Phys. 12, 592. Nordell, B., et al., 1984. Bremsstrah-Lung 標的からの角の分布と収量 (放射線療法の場合). Phys. 医薬品. Biol. 29, 797-810. Spring, K.H., 1960. 光子と電子. Methuen & Co. Ltd., ロンドン. Vicente, R., Sordi, G.M., 2004. HiromotoG. Health Phys. 86 (5), 497-504. Wehr, M., Richards, J., 1974. 原子の物理学. Addison-Wesley Inc., リーディング, マサチューセッツ州. ウィリアムズ, W.S.C., 1991 年. 核および粒子物理学. オックスフォードサイエンス出版物, オックスフォード. / 応用放射と同位体 64 (2006) 979-988 988