



JAEA-Research

2007-011



JP0750049

放射線感受性の高い基底細胞を考慮した膀胱簡易モデルにおける ベータ線放出核種のエネルギー付与解析

Evaluation of Energy Deposition to the Urinary Bladder Wall
Considering Radiosensitive Basal Cells by Beta-ray Emitters

渡部 陽子 木名瀬 栄 斎藤 公明

Yoko WATANABE, Sakae KINASE and Kimiaki SAITO

原子力基礎工学研究部門
放射線影響解析研究グループ

Radiation Effect Analysis Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

JAEA-Research

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

放射線感受性の高い基底細胞を考慮した膀胱簡易モデルにおける
ベータ線放出核種のエネルギー付与解析

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門環境・放射線工学ユニット
渡部 陽子、木名瀬 栄、斎藤 公明

(2007年1月17日受理)

本報告書は、放射線診断による吸収線量が他の臓器よりも高くなる傾向にある膀胱の線量評価について述べるものである。より適切な線量評価を行うために、膀胱の放射線感受性の高い細胞である基底細胞を考慮した膀胱簡易モデルを構築し、光子、電子に対する基底細胞や膀胱壁全体の比吸収割合(SAF)をモンテカルロシミュレーションにより評価した。また、評価した SAF を用いてベータ線放出核種 36 核種における単位放射能あたりの標的組織の平均吸収線量(S 値)を求めた。その結果、より信頼性の高い膀胱の線量評価を行う上で、標的組織として基底細胞の深さを決定することやベータ線スペクトルなどの放射線エネルギー情報を考慮することが極めて重要であることが分かった。

Evaluation of Energy Deposition to the Urinary Bladder Wall
Considering Radiosensitive Basal Cells by Beta-ray Emitters

Yoko WATANABE, Sakae KINASE and Kimiaki SAITO

Division of Environment and Radiation Sciences
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 17, 2007)

The present report describes the dose evaluation of the urinary bladder since its absorbed dose from radiopharmaceuticals tends to be higher than other organs. For an accurate dose evaluation, a simple bladder model considering radiosensitive basal cells was used to calculate SAF (specific absorbed fractions) for the basal cells and the whole bladder wall from mono energetic photon and electron sources using Monte Carlo simulation. Furthermore, S values (the mean absorbed doses for the target organ per unit cumulated activity in the source organ) were evaluated for 36 beta-ray emitters. Consequently, considering basal cells and beta particle spectra in the evaluation of absorbed dose for the urinary bladder are very important for an accurate evaluation.

Keywords: Basal Cells, Urinary Bladder, Absorbed Dose, SAF, Beta-ray, Monte Carlo Simulation, S value

目次

1. 序論.....	1
2. 方法.....	1
2.1 膀胱の放射線感受性の高い細胞	1
2.2 膀胱簡易モデル	1
2.3 モンテカルロ法.....	2
2.4 SAF の評価.....	3
2.5 S 値の評価	3
3. 結果と考察.....	4
3.1 SAF の評価	4
3.2 S 値の評価	5
4. 結論.....	5
参考文献	7

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Methods	1
2.1 The urinary bladder and its radiosensitive cells	1
2.2 A simple bladder model.....	1
2.3 Monte Carlo simulation and SAF evaluation	2
2.4 SAF evaluation.....	3
2.5 S value evaluation.....	3
3. Results and Discussion.....	4
3.1 SAF evaluation	4
3.2 S value evaluation	5
4. Conclusions.....	5
References.....	7

This is a blank page.

1. 序論

経口や吸入あるいは投与などの経路により、体内に取り込まれた放射性核種の一部は、尿中に排泄される。特に、放射線診断に用いられる放射性医薬品は、尿中に排泄されやすいように設計されているため、膀胱の吸収線量が高くなる傾向にある¹⁾。そのため、放射線防護や放射線診断の立場から、膀胱の線量評価を行うことは重要である。一般に、内部被ばくによる膀胱などの線量評価には、単位質量あたりの吸収割合(SAF, specific absorbed fraction)が用いられている。米国核医学内部被ばく線量委員会(MIRD)^{2,3)}や国際放射線防護委員会(ICRP)⁴⁻⁷⁾では、膀胱内容物に均一に分布した線源から放出される、光子、電子に対する膀胱の SAF を整備している。光子に対する SAF は、標的組織を膀胱壁全体とし、モンテカルロシミュレーションにより評価されてきた。電子に対する SAF は、線源から放出された電子の 2 分の 1 が粘膜層に吸収されるという仮定に基づいた簡易計算により、定数として求められてきた⁴⁻⁷⁾。また、MIRD 委員会では、SAF に放射性核種の核データを考慮することで得られる、単位放射能あたりの標的組織の平均吸収線量(S 値)を整備してきた。

近年、Kinase ら⁸⁾は、(陽)電子放出核種からの膀胱の S 値をボクセルファントムを用いて評価した。その結果、ICRP⁵⁾が提示していた電子に対する簡易評価手法では、S 値を過大評価してしまう可能性があることを示した。また、Thomas ら²⁾や Bolster ら⁹⁾は、膀胱の伸縮性を考慮したモデルを用いて放射性医薬品に対する膀胱の S 値を評価した。しかし、いずれの先行研究も膀胱の放射線感受性の高い細胞を直接考慮した線量評価手法ではなく、膀胱の平均線量評価手法の開発にとどまった。放射線防護の観点から、放射線影響推定などに直接反映できる信頼性の高い膀胱の線量評価手法を確立するためには、放射線感受性の高い細胞を対象にすることが重要である。

本研究では、未分化の細胞である基底細胞を考慮した膀胱簡易モデルを作成し¹⁰⁾、10 keV から 4 MeV のエネルギー範囲で、光子、電子に対する基底細胞および膀胱壁全体の SAF をモンテカルロ計算により評価した。また、“原子力や医療分野などで研究に使用されている、もしくは放出されるベータ線が危険であるベータ線放出核種”として、ICRU Report 56¹¹⁾にスペクトルデータが明示されている核種について、本研究で評価した SAF を用いて S 値を求めた。

2. 方法

2.1 膀胱の放射線感受性の高い細胞

膀胱は自在に伸縮する壁を持つ袋状の臓器であり、内側表面は膀胱が縮んだときには厚く、伸展したときには薄くなる移行上皮という特殊な上皮で覆われている¹²⁾。Figure 1 に示すように、移行上皮は内側から、傘細胞(umbrella cells)、中間細胞(Intermediate cells)、基底細胞(basal cells)の 3 種の明確に区分された細胞層からなる。内側表面の傘細胞の直径は、膀胱の伸縮度合により 50-120 μm の間で変化する。また、中間細胞の直径は 20 μm、基底細胞では 5-10 μm である¹³⁾。基底細胞の深さは膀胱の伸縮度合いにより異なるが、内側表面から 70-140 μm の深さに存在する。基底細胞は未分化の細胞であることから放射線感受性の高い組織として考えられるため、本研究では膀胱の線量評価において基底細胞に着目した。

2.2 膀胱簡易モデル

内部被ばくの線量評価を行う目的で、Snyder ら³⁾は 22 臓器からなる MIRD 5 型ファントムを構築した。その臓器形状は人体データに基づくものであるが、矛盾の無い範囲で簡略化し、簡単

な数式で表現した。初期の MIRD 5 型ファントムの膀胱モデルは、膀胱壁と内容物が一体である 3 次元回転楕円体で表現されていたが²⁾、その後の修正¹⁴⁾で膀胱壁と内容物を分けて表現された。

本研究では、放射線感受性の高い細胞への線量評価を行うために、この膀胱壁と内容物を分けて表現されたモデル¹⁴⁾に基底細胞を考慮した膀胱簡易モデル¹⁰⁾を構築した (Fig.2)。膀胱簡易モデルの基底細胞をモデル化するため、基底細胞の厚さを 10 μm と仮定し、膀胱の内側表面から 600 μm までを 10 μm 厚の多重層構造とした。膀胱壁内側を 60 層の多重層構造にすることにより層ごとの沈着エネルギーを評価できるため、膀胱の伸縮により基底細胞の深さが変化した場合の線量評価も可能となる。また、今後の組織学研究の進歩により、基底細胞の深さが本研究で仮定したものとは異なると示された場合にも対応できる。

なお、膀胱簡易モデルは、半無限大の軟組織中に位置するものとし、膀胱壁の組成は Table 1 に示すように ICRP Publ. 89¹⁵⁾で定義されたものと同様にした。また、厚さ 2,520 μm の膀胱壁の質量にも、ICRP¹⁵⁾の成人男性の値である 0.050 kg を用いた。

2.3 モンテカルロ法

確率的な事象を含む問題の解を、乱数を使用して求める手法を、総称してモンテカルロ法という。モンテカルロ法は、放射線防護の分野において放射線遮蔽計算や被ばく線量計算で放射線の輸送問題を解く場合に用いられる。放射線輸送計算では、物質中の物理現象を確率的にとらえ、乱数を発生させることで確率過程を記述する確率変数を導く¹⁶⁾。モンテカルロ法を用いた放射線輸送計算コードの代表的なものとして、光子および電子を扱う EGS4¹⁷⁾と、中性子、光子および電子を扱う MCNP がある。本研究では、より電子の扱いに優れた EGS4 の汎用ユーザーコード(UCGEN)コード¹⁸⁾を用いた。

電磁カスケードモンテカルロ計算コードである EGS4 は、任意の 3 次元体系における、電子、陽電子および光子の挙動を忠実にシミュレートすることができる¹⁷⁾。EGS4 で利用される物質データは EGS4 の一部である PEGS4 で作成され、原子番号 1 から 100 の任意の元素およびそれらで構成された化合物や混合物中での電子、陽電子、光子の輸送計算が可能である。荷電粒子の場合、数 10 keV から数 1,000 GeV まで、光子の場合 1 keV から数 1,000 GeV までのエネルギー範囲で適用できる。EGS4 コードシステムでは、以下の物理過程が考慮されている。ただし、光核反応やオージェ電子については考慮されていない。

荷電粒子の物理過程

- － 制動輻射(低エネルギーでの Elwert 補正を含まない)
- － 飛行時および停止時の陽電子消滅
- － モリエール多重散乱
- － モラー散乱(電子、電子)とバーバラ散乱(陽電子、電子)
- － 荷電粒子の連続エネルギー損失

光子の物理過程

- － 光電効果
- － コンプトン散乱
- － 電子、陽電子対生成
- － 弹性(レーリー)散乱(選択可能)

UCGEN には、PEGS4 の光子断面積データとして従来の Storm&Israel¹⁹のデータに PHOTX²⁰が追加され、さらに ICRU Report 37²¹の制動 X 線生成断面積が導入されている¹⁸。

EGS4 では、幾何学的形状の構造や線源の指定などをユーザー自身がユーザーズルーチンとして作成する必要があるが、UCGEN では、これらを入力データのみで処理できる。複雑な 3 次元形状は、12 個の基本形状(body)と幾何学体系記述法の一つである MARS²²⁾の CG(Combinatorial Geometry) 形式により表現できるため、人体および臓器等の形状をより容易に表記することができる。線源には、点線源、面線源、体積線源などの 5 種類を取扱うことができ、また、検出器には、点検出器評価法、面交差評価法、エネルギー沈着評価法などの 5 種類のプログラムが組み込まれている¹⁸⁾。エネルギー沈着評価法において、電子では①衝突間による連続エネルギー損失を距離で積分することにより沈着エネルギーを求め、また、②衝突によりカットオフエネルギー以下になった電子(および陽電子)はその位置にエネルギー沈着をするという仮定の下に評価している。光子では、①反応により電子をたたき出した時に失った電子の結合エネルギーを光子による沈着エネルギーとし、また、②反応によりカットオフエネルギー以下になった場合は全エネルギーが沈着すると仮定し評価している。

本研究では、膀胱内容物を単色光子または電子が均一に分布する体積線源とし、標的組織への沈着エネルギーを評価した。光子や電子のエネルギー範囲は、データの汎用性を持たせるために 10 keV から 4 MeV とした。標的組織は、膀胱壁の内側から 10 μm 刻みの 60 層および膀胱全体とした。しかし、ここでは基底細胞の SAF として、膀胱移行上皮が最も伸展した場合である 70-80 μm 層と収縮した場合である 140-150 μm 層の 2 層について議論する。計算ヒストリーナンバーは、基本的に沈着エネルギーの相対標準偏差が 5% 未満になるようにしたが、標的組織が基底細胞の場合の 100 keV 以下の電子においては十分な統計精度は得られなかった。今回、最も誤差が大きな場合の 140-150 μm 基底細胞では、相対標準偏差は 60% 以下であった。

2.4 SAF の評価

SAF (Φ_i)は、線源から放出されたある放射線(i)のエネルギーが標的組織に吸収された割合(吸収割合、 ϕ_i)を標的組織の質量(m)で除することで求められる(Eq.1)

本研究では、UCGEN で評価した光子または電子の基底細胞および膀胱壁全体への沈着エネルギーと、膀胱内容物から放出されたエネルギーから吸収割合を求め、その吸収割合を標的組織の質量で除することで SAF を求めた。

2.5 S 値の評価

S値は、Eq.2に示すように SAFを用いて求めることができる。

ここで、 n は 1 壊変当たりに放出される粒子数、 E_i は粒子当たりの平均エネルギーである。S 値は、その放射性核種が放出する様々な放射線を考慮した単位放射能あたりの平均吸収線量であり、放射性核種ごとに与えられる。

本研究では、モンテカルロ計算から算定した光子および電子 SAE を用いて、“原子力や医療分

野などの研究に使用されている、または放出されるベータ線が危険であるベータ線放出核種¹¹⁾に対する標的組織の S 値を求めた。ベータ線のスペクトルの関数を f_i とし、Eq.3 に示すようにスペクトルを考慮して S 値を評価した。

$$S = \sum_0^{E_{\max}} f_i(E_i) \Phi_i n E_i \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (\text{Eq.3})$$

ベータ線スペクトルには、ICRU Report 56¹¹⁾に明示されているスペクトルデータを用いた。Table 2 に、ベータ線の最大および平均エネルギーを示す。ベータ線の放出割合は、一部の核種を除いて 100%と仮定した。光子や内部転換電子については DECDC²³⁾の核データを使用し、放出割合が 1%以上のものについて評価した(Table 3、4)。

3. 結果と考察

3.1 SAF の評価

本研究で評価した光子 SAF を Figure 3 に示す。図に示されるように、70-80 μm および 140-150 μm の基底細胞 SAF、膀胱壁 SAF いずれも、20 または 30 keV までは光子エネルギーとともに大きくなり、それ以上の光子エネルギーでは急激に低下した。基底細胞の SAF は、光子エネルギーが 10 keV から 30 keV の範囲で膀胱壁の SAF に比べて非常に高い値を示した。特に 10 keV での差は最大であり、70-80 μm 基底細胞 SAF は膀胱壁 SAF の約 3 倍であった。これは、10 から 20 keV の低エネルギーの光子は透過性ではなく²⁴⁾、主として膀胱の内側表面付近にエネルギー一付与するためである。このように、光子に対する基底細胞の SAF は、特に低エネルギー領域において膀胱壁の SAF より大きな値を示すため、放射線感受性の高い基底細胞を標的組織とした評価が必要である。また、参考として ICRP⁴⁻⁷⁾の光子 SAF を同図に示す。ICRP では、本研究と同様に、光子に対する膀胱壁の SAF を 3 次元回転楕円体形状の膀胱簡易モデルを用いて、モンテカルロ法により評価した。本研究の膀胱壁の SAF は、ICRP の SAF と 100 keV 以下のエネルギー領域で多少の差を生じたものの、全体的によく一致した。このことから、本研究の手法の妥当性が検証できたと考える。これら二つの SAF の 100 keV 以下の領域で生じた差は、膀胱壁の質量として異なる値を使用していること（本研究では 0.050 kg、ICRP では 0.048 kg）や、使用した計算コードおよび断面積データが異なることに起因すると考える。

電子 SAF の評価において、ICRP⁴⁻⁷⁾では標的組織を粘膜層とし、放出された電子の 2 分の 1 が標的組織に吸収されるという仮定に基づいて、SAF を定数として与えてきた。しかし、本研究においてモンテカルロ法により評価した結果、電子 SAF はエネルギーにより変化する値であり、一定値でないことを確認した。Figure 4 に、ICRP および本研究で評価した電子 SAF を示す。70-80 μm および 140-150 μm の基底細胞 SAF、膀胱壁 SAF はいずれも、光子エネルギーとともに大きくなつた。特に、基底細胞の SAF は、70-80 μm では 50 keV、140-150 μm では 100 keV を超えると急激に増加した。これは、軟組織中の電子の飛程から説明できる。Figure 5 に、電子のエネルギーと軟組織中の電子の CSDA(continuous slowing down approximation)飛程の関係を示す。軟組織中の電子の飛程は 70 keV で約 80 μm 、100 keV で約 150 μm であり、これらのエネルギーを超えると電子が標的組織に直接エネルギー付与する。そのため、70-80 μm の基底細胞では 50 keV、140-150 μm では 100 keV 以上のエネルギーにおいて、SAF が大きくなるのである。一方、これらのエネルギー以下では、基底細胞の SAF は ICRP の SAF よりも大幅に低い値を示し

た。これは、これまで ICRP が低エネルギーべータ線による線量を過大評価してきたことを示唆している。以上から、電子 SAF 評価においても、放射線感受性の高い細胞を標的組織とした評価や、モンテカルロ法によるエネルギー付与計算が必要である。

3.2 S 値の評価

Table 5 に、本研究で評価した 36 放射性核種の S 値と ICRP における膀胱壁の S 値を、ベータ線の平均エネルギーの低い順に示した。ICRP の電子寄与分の S 値は、全体的に本研究で求めた S 値と比べて大きな値を示した。これは、前述のように、ICRP の電子 SAF は、特に低エネルギー領域で過大評価されているため、その SAF を用いて評価される S 値も大きな値を示したものと考える。例えば、平均エネルギーが 50 keV 以下のベータ線を放出する ^{106}Ru 、 ^{35}S 、 ^{14}C などの核種では、電子が直接標的組織まで届かないため、本研究で求めた S 値は非常に小さな値を示した。しかし、このようなベータ線平均エネルギーの低い核種でも、ICRP では電子の 2 分の 1 吸収仮定を用いるため、結果的に S 値は過大評価されるのである。一方、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ や ^{90}Y のような平均エネルギーが 800 keV 以上のベータ線を放出する核種の飛程は 3 mm 以上と膀胱壁厚よりも長いため、ベータ線の一部は標的組織にほとんどエネルギー付与せず透過してしまう。Figure 6 に ^{143}Pr 、 ^{89}Sr 、 ^{91}Y 、 ^{32}P 、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 、 ^{90}Y の 6 核種を平均エネルギーの低い順に並べ、S 値を標的組織の質量が重い順にプロットした。本研究で求めた膀胱壁および 70-80 μm 、140-150 μm の基底細胞の S 値は、標的組織の質量が重いほど小さくなつた。また、同じ標的組織の S 値を核種ごとに比較すると、ベータ線の平均エネルギーが低いほど S 値は小さくなる傾向にあることが分かつた。このように、標的組織の質量やベータ線の平均エネルギーは S 値に直接影響を与えるパラメータであることが分かつた。ICRP の S 値は、標的組織が同じ場合、ベータ線の平均エネルギーが高いほど大きな値を示すが、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ の方が ^{90}Y よりもベータ線の平均エネルギーが低いにも関わらず、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ の S 値は ^{90}Y よりも高い値を示した。これは、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ の S 値には、ベータ線からの寄与分の他に内部転換電子からの寄与分が加算されたためである。

ICRP では、ベータ線のスペクトルデータを直接用いずに S 値を評価しているため、ベータ線の平均エネルギーが高いほど S 値は大きくなる傾向を示した。しかし、本研究においては、ベータ線スペクトルを考慮した評価を行ったため、必ずしも S 値は平均エネルギーに比例した値を示さなかつた。例えば、 $^{144}\text{Ce-Pr}$ と ^{24}Na では、ベータ線の平均エネルギーはそれぞれ 550 keV、551 keV とほぼ同じであるが、ベータ線が寄与する S 値は ^{24}Na の方が低かつた。また、 ^{89}Sr は、 $^{144}\text{Ce-Pr}$ よりもベータ線の平均エネルギーは低いが、S 値は同程度の値を示した。これは、Figure 7 に示すように、スペクトルデータが大きく異なるためである。このように、ベータ線の平均エネルギーから単純に S 値を評価できない場合もあることが分かつた。したがつて、ベータ線放出核種からの線量をより正確に評価するには、ベータ線スペクトルを考慮することが重要であると考える。

4. 結論

基底細胞を考慮した膀胱簡易モデルを構築し、光子、電子に対する基底細胞および膀胱壁全体の SAF を評価した。また、評価した SAF を用いて 36 放射性核種に対する標的組織の S 値を求めた。その結果、光子に対する基底細胞の SAF は、10 から 30 keV のエネルギー範囲で膀胱壁 SAF より極めて高い値を示した。電子 SAF は、これまで与えられてきた一定値ではなく、エネ

ルギーにより変化する値であることを確認した。また、電子が直接標的組織にエネルギー付与するか否かが、電子 SAF の評価に大きな影響を与えることが分かった。このように、より正確な膀胱の線量評価には、基底細胞の位置を考慮することが重要である。さらに、より現実に近い線量評価を行うには、ベータ線スペクトルを考慮した評価が必要であることが分かった。

参考文献

- 1) ICRP: "Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals", ICRP Publ. 53, Pergamon Press, Oxford (1987).
- 2) S. R Thomas, M. G. Stabin, C-T. Chen, and R. C. Samaratunga : "A Dynamic Urinary Bladder Model for Radiation Dose Calculations", MIRD Pamphlet No.14, J. Nucl. Med., 40(4), 102 (1999).
- 3) W. S. Snyder, M. R. Ford, G. G. Warner, and H. L. Jr. Fisher: "Estimates of Absorbed Fractions for Monoenergetic Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom", MIRD Pamphlet No.5, J. Nucl. Med., Suppl. 3, 10, 5 (1969).
- 4) ICRP: "Report of the Task Group on Reference Man", ICRP Publ. 23, Pergamon Press, Oxford (1975).
- 5) ICRP: "Limits for Intakes of Radionuclides by Workers", ICRP Publ. 30, Pergamon Press, Oxford (1979).
- 6) ICRP: "Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers", ICRP Publ. 68, Pergamon Press, Oxford (1995).
- 7) M. Christy and K. F. Eckerman: "Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. VII. Adult Male", ORNL, TM-8381/V7, 29 (1987).
- 8) S. Kinase, M. Zankl, J. Funabiki, H. Noguchi and K. Saito: "Evaluation of S Values for Beta-ray Emitters within the Urinary Bladder", J. Nucl. Sci. Technol., Suppl.4, 136 (2004).
- 9) A. A. Bolster and T. E. Hilditch : "The Radiation Dose to the Urinary Bladder in Radio-Iodine Therapy", Phys. Med. Biol., 41, 1993 (1996).
- 10) Y. Watanabe, S. Kinase and K. Saito: "Evaluation of Absorbed Doses for Photon and Electron to the Urinary Bladder Wall Considering Radiosensitive Cells", Radioisotopes, 55, 719 (2006).
- 11) ICRU: "Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection", ICRU Report 56, Bethesda, MD (1997).
- 12) 坂井建雄, 河原克雅: “人体の正常構造と機能 V 腎・泌尿器”, 日本医事新報社, 東京 (2005).
- 13) S. A. Lewis: "Everything You Wanted to Know about the Bladder Epithelium but were Afraid to Ask," Am. J. Physiol. Renal. Physiol., 278, F867 (2000).
- 14) W. S. Snyder, M. R. Ford and G. G. Warner: "Estimates of Specific Absorbed Fractions for Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom", MIRD Pamphlet 5 Revised, The Society of Nuclear Medicine, New York (1978).
- 15) ICRP: "Basic Anatomical and Physical Data for Use in Radiological Protection: Reference Values", ICRP Publ. 89, Pergamon Press, Oxford (2002).
- 16) H. Hirayama and Y. Namito: "Lecture note of Radiation Transport Calculation Including Electrons by Monte Carlo Method", KEK Internal 2000-20 (2001).
- 17) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers: "The EGS4 Code System", SLAC 265 (1985).

- 18) 野尻一郎, 岩井敏, 佐藤理, 高木俊治, 澤村貞史, 深作泰宏: “EGS4汎用ユーザーズコード UCGEN の開発”, 動燃技報, 102, 59 (1997).
- 19) RSIC: “DLC-015/STORM-ISRAEL Evaluated Photon Interaction Library” (contributed by Los Alamos Scientific Laboratory) (1971).
- 20) RSIC: “DLC-136/PHOTX Photon Interaction Cross Section Library” (contributed by National Institute of Standards and Technology) (1989).
- 21) ICRU: “Stopping Powers for Electrons and Positrons”, ICRU Report 37, Bethesda, MD. (1984).
- 22) J. T. West and M. B. Emmett: MARS “A Multiple Array System using Combinatorial Geometry”, NUREG/CR-0200 3Sec. M9 (1989).
- 23) A. Endo, Y. Yamaguchi and K. Eckerman: “Nuclear Decay Data for Dosimetry Calculation Revised Data of ICRP Publ. 38”, JAERI 1347 (2005).
- 24) R. Loevinger, T. F. Budinger and E. E. Watson: “MIRD Primer for Absorbed Dose Calculations”, The Society of Nuclear Medicine, New York (1991).

Table 1. Elemental composition of the urinary bladder model¹⁵⁾

Elemental Composition (% by mass)									
H	C	N	O	Na	P	S	Cl	K	
10.5	9.6	2.6	76.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	

Table 2. Maximum and mean energies of beta-rays^{11, 23)}

Nuclides	E _{max}	E _{mean}	Nuclides	E _{max}	E _{mean}
¹⁴ C	0.156	0.048	¹⁰⁶ Ru	0.039	0.010
²⁴ Na	1.390	0.551	¹⁰⁶ Rh	3.540	1.433
³² P	1.710	0.691	¹²⁴ Sb	2.302	0.354
³⁵ S	0.167	0.047	¹³¹ I	0.807	0.175
⁵² Mn	0.575	0.242	¹³⁴ Cs	0.657	0.143
⁵⁶ Mn	2.849	0.812	¹³⁷ Cs	1.175	0.155
⁵⁸ Co	0.474	0.201	¹⁴⁰ Ba	1.004	0.273
⁵⁹ Fe	0.466	0.113	¹⁴⁰ La	2.165	0.519
⁶⁰ Co	0.318	0.093	¹⁴¹ Ce	0.581	0.141
⁶² Cu	2.927	1.314	¹⁴³ Ce	1.404	0.398
⁸⁹ Sr	1.492	0.577	¹⁴³ Pr	0.935	0.310
⁹⁰ Sr	0.546	0.192	¹⁴⁴ Ce-Pr	2.996	0.550
⁹⁰ Y	2.281	0.925	¹⁴⁷ Pm	0.225	0.060
⁹¹ Y	1.546	0.597	¹⁷⁰ Tm	0.968	0.309
⁹⁵ Zr	0.887	0.110	¹⁹⁸ Au	0.961	0.306
⁹⁵ Nb	0.160	0.042	²⁰⁴ Tl	0.763	0.227
⁹⁹ Mo	1.214	0.381	²¹⁰ Bi	1.161	0.304
¹⁰³ Ru	0.766	0.057	^{234m} Pa	2.273	0.821

Table 3. Photon energies and intensities (>0.01) of radionuclides^{23)(1/2)}

Nuclides	Energy (MeV)	Intensity	Nuclides	Energy (MeV)	Intensity
²⁴ Na	1.3686	1.00	⁹⁹ Mo	0.0183	0.01
	2.7540	1.00		0.0184	0.02
⁵² Mn	0.0054	0.05		0.0406	0.01
	0.0054	0.11		0.1405	0.05
	0.0059	0.01		0.1811	0.06
	0.0059	0.01		0.3664	0.01
	0.5110	0.59		0.7395	0.12
	0.7442	0.90		0.7779	0.04
	0.8482	0.03		¹⁰³ Ru	0.4971
	0.9355	0.95			0.6103
	1.2463	0.04		¹⁰⁶ Rh	0.5119
	1.3337	0.05			0.6219
	1.4341	1.00			1.0504
⁵⁶ Mn	0.8468	0.99	¹²⁴ Sb	0.6027	0.98
	1.8107	0.27		0.6459	0.07
	2.1131	0.14		0.7093	0.01
⁵⁸ Co	0.0064	0.08		0.7138	0.02
	0.0064	0.16		0.7228	0.11
	0.0071	0.01		0.9682	0.02
	0.0071	0.02		1.0451	0.02
	0.5110	0.30		1.3255	0.02
	0.8108	0.99		1.3552	0.01
⁵⁹ Fe	0.1427	0.01		1.3682	0.03
	0.1923	0.03		1.4366	0.01
	1.0993	0.57		2.0909	0.06
	1.2916	0.43	¹³¹ I	0.0295	0.01
⁶⁰ Co	1.1732	1.00		0.0298	0.03
	1.3325	1.00		0.0802	0.03
⁶² Cu	0.5110	1.96		0.2843	0.06
⁹⁵ Zr	0.7242	0.44		0.3645	0.82
	0.7567	0.54		0.6370	0.07
⁹⁵ Nb	0.7658	1.00		0.7229	0.02

Table 3. Photon energies and intensities (>0.01) of radionuclides^{23)(2/2)}

Nuclides	Energy (MeV)	Intensity	Nuclides	Energy (MeV)	Intensity
¹³⁴ Cs	0.4754	0.01	¹⁴¹ Ce	0.0360	0.09
	0.5632	0.08		0.0407	0.01
	0.5693	0.15		0.0407	0.02
	0.6047	0.98		0.0418	0.01
	0.7959	0.86		0.1454	0.48
	0.8020	0.09		0.0050	0.04
	1.1680	0.02		0.0055	0.02
	1.3652	0.03		0.0059	0.01
¹⁴⁰ Ba	0.0047	0.03	¹⁴³ Ce	0.0356	0.18
	0.0050	0.03		0.0360	0.32
	0.0051	0.02		0.0407	0.03
	0.0051	0.03		0.0407	0.06
	0.0054	0.01		0.0418	0.03
	0.0061	0.01		0.0574	0.12
	0.0138	0.01		0.2316	0.02
	0.0300	0.14		0.2933	0.43
	0.0330	0.01		0.3506	0.03
	0.0334	0.01		0.4904	0.02
	0.1627	0.06		0.7219	0.05
	0.3048	0.04		0.8805	0.01
	0.4237	0.03	¹⁴⁴ Ce	0.0050	0.01
	0.4376	0.02		0.0356	0.02
	0.5373	0.24		0.0360	0.04
¹⁴⁰ La	0.0347	0.01	¹⁴⁴ Pr	0.0407	0.01
	0.3288	0.20		0.0801	0.01
	0.4325	0.03		0.1335	0.11
	0.4870	0.46		0.6965	0.01
	0.7516	0.04	¹⁷⁰ Tm	0.0074	0.01
	0.8158	0.23		0.0084	0.01
	0.8678	0.06		0.0524	0.02
	0.9196	0.03		0.0843	0.02
¹⁴⁰ La	0.9252	0.07	¹⁹⁸ Au	0.0689	0.01
	1.5962	0.95		0.0708	0.01
	0.0050	0.01		0.4118	0.96
¹⁴¹ Ce	0.0055	0.01	²⁰⁴ Tl	0.6759	0.01
	0.0356	0.05		0.0708	0.01

Table 4. Energies and intensities (>0.01) for Internal conversion electrons of radionuclides²³⁾

Nuclides	Intensity	Energy (MeV)	Nuclides	Intensity	Energy (MeV)
¹⁴⁰ Ba	0.47	0.008	¹⁷⁰ Tm	0.02	0.082
	0.05	0.008		0.01	0.084
	0.11	0.013	¹⁹⁸ Au	0.03	0.329
	0.55	0.024	^{234m} Pa	0.33	0.022
	0.05	0.024		0.29	0.026
	0.13	0.029		0.17	0.039
	0.03	0.030		0.07	0.043
	0.01	0.124		0.07	0.049
¹⁴¹ Ce	0.19	0.103		0.06	0.070
	0.02	0.139		0.27	0.079
	0.00	0.139		0.18	0.083
	0.01	0.144		0.13	0.095
¹⁴³ Ce	0.65	0.015		0.05	0.100
	0.08	0.051		0.04	0.111
	0.01	0.051		0.10	0.112
	0.02	0.056		0.06	0.132
	0.02	0.251		0.03	0.136
¹⁴⁴ Ce	0.01	0.027		0.03	0.148
	0.03	0.038		0.02	0.178
	0.00	0.073		0.02	0.205
	0.05	0.092		0.01	0.254
	0.01	0.127		0.02	0.454
¹⁷⁰ Tm	0.04	0.023		0.01	0.617
	0.05	0.074		0.00	0.689
	0.04	0.075			

Table 5. S values to the bladder wall and basal cells. Intensities are regarded as 100% except for ^{52}Mn (29.7%), ^{58}Co (14.9%), ^{62}Cu (97.8%) and ^{204}Tl (97.1%) (1/3)

Nuclides	Radiation	Bladder Wall	Svalue $\mu\text{Gy}/\text{MBq}\cdot\text{s}$		
			70–80 μm	140–150 μm	ICRP
^{106}Ru	β^-	0.000	0.000	0.000	0.003
	β^+	0.001	0.005	0.003	0.011
^{58}Co	Photon	0.036	0.040	0.039	0.037
	Total*	0.037	0.045	0.042	0.048
^{95}Nb	β^-	0.000	0.000	0.000	0.015
	Photon	0.029	0.031	0.031	0.029
^{35}S	Total*	0.029	0.031	0.031	0.044
	β^-	0.000	0.001	0.000	0.017
^{14}C	β^-	0.000	0.001	0.000	0.018
	β^+	0.000	0.002	0.001	0.021
^{103}Ru	Photon	0.020	0.021	0.021	0.019
	Total*	0.020	0.023	0.022	0.040
^{147}Pm	β^-	0.000	0.002	0.001	0.022
	β^+	0.002	0.014	0.009	0.026
^{52}Mn	Photon	0.122	0.131	0.130	0.125
	Total*	0.124	0.145	0.139	0.151
^{60}Co	β^-	0.001	0.008	0.007	0.034
	Photon	0.086	0.092	0.091	0.088
^{95}Zr	Total*	0.087	0.100	0.098	0.122
	β^-	0.001	0.013	0.007	0.040
^{59}Fe	Photon	0.028	0.030	0.030	0.028
	Total*	0.029	0.043	0.037	0.068
^{141}Ce	β^-	0.001	0.013	0.008	0.041
	ICE**	0.000	0.001	0.000	0.009
	Photon	0.004	0.004	0.004	0.004
	Total*	0.006	0.025	0.016	0.064

*Total represents a sum of S values from all radiations of a certain radionuclide.

**ICE stands for Internal Conversion Electron.

Table 5. S values to the bladder wall and basal cells. Intensities are regarded as 100% except for ^{52}Mn (29.7%), ^{58}Co (14.9%), ^{62}Cu (97.8%) and ^{204}Tl (97.1%) (2/3)

Nuclides	Radiation	Bladder Wall	S value $\mu\text{Gy}/\text{MBq}\cdot\text{s}$		
			70–80 μm	140–150 μm	ICRP
^{134}Cs	β^-	0.004	0.025	0.018	0.052
	Photon	0.059	0.064	0.063	0.059
	Total*	0.063	0.089	0.081	0.111
^{137}Cs	β^-	0.003	0.024	0.016	0.056
^{131}I	β^-	0.004	0.030	0.017	0.064
	ICE**	0.000	0.002	0.001	0.003
	Photon	0.015	0.017	0.017	0.015
^{90}Sr	Total*	0.019	0.049	0.035	0.082
	β^-	0.004	0.034	0.023	0.070
	Photon	0.007	0.045	0.034	0.082
^{204}Tl	β^-	0.000	0.000	0.000	0.000
	Total*	0.007	0.045	0.034	0.082
	Photon	0.000	0.001	0.000	0.010
^{140}Ba	β^-	0.012	0.061	0.048	0.099
	ICE**	0.008	0.009	0.008	0.008
	Photon	0.020	0.071	0.056	0.117
^{210}Bi	β^-	0.015	0.070	0.057	0.110
^{198}Au	β^-	0.014	0.070	0.056	0.111
	ICE**	0.000	0.002	0.001	0.006
	Photon	0.016	0.018	0.017	0.016
^{170}Tm	Total*	0.030	0.090	0.074	0.133
	β^-	0.014	0.071	0.057	0.112
	ICE**	0.000	0.000	0.000	0.037
^{143}Pr	Photon	0.000	0.000	0.000	0.000
	Total*	0.014	0.071	0.057	0.149
	β^-	0.014	0.071	0.057	0.112
^{124}Sb	β^-	0.033	0.091	0.079	0.128
	Photon	0.037	0.040	0.039	0.037
	Total*	0.070	0.131	0.118	0.165
^{99}Mo	β^-	0.024	0.095	0.080	0.138
	Photon	0.006	0.006	0.006	0.006
	Total*	0.030	0.101	0.086	0.144

*Total represents a sum of S values from all radiations of a certain radionuclide.

**ICE stands for Internal Conversion Electron.

Table 5. S values to the bladder wall and basal cells. Intensities are regarded as 100% except for ^{52}Mn (29.7%), ^{58}Co (14.9%), ^{62}Cu (97.8%) and ^{204}Tl (97.1%) (3/3)

Nuclides	Radiation	Bladder Wall	S value $\mu\text{Gy}/\text{MBq}\cdot\text{s}$	70–80 μm	140–150 μm	ICRP
^{143}Ce	β^-	0.025		0.100	0.084	0.144
	ICE**	0.000		0.003	0.001	0.010
	Photon	0.011		0.013	0.013	0.011
	Total*	0.036		0.116	0.098	0.165
^{140}La	β^-	0.043		0.140	0.122	0.188
	Photon	0.073		0.079	0.077	0.076
	Total*	0.116		0.219	0.199	0.264
$^{144}\text{Ce-Pr}$	β^-	0.082		0.160	0.148	0.199
	ICE**	0.001		0.003	0.003	0.009
	Photon	0.001		0.001	0.001	0.001
	Total*	0.084		0.164	0.152	0.209
^{24}Na	β^-	0.044		0.150	0.130	0.200
	Photon	0.118		0.126	0.125	0.123
	Total*	0.162		0.276	0.255	0.323
^{89}Sr	β^-	0.052		0.160	0.141	0.209
^{91}Y	β^-	0.055		0.166	0.147	0.216
^{32}P	β^-	0.070		0.197	0.176	0.250
^{56}Mn	β^-	0.112		0.237	0.218	0.294
	Photon	0.055		0.059	0.058	0.056
	Total*	0.167		0.296	0.276	0.350
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	β^-	0.102		0.241	0.220	0.298
	ICE**	0.001		0.007	0.004	0.051
	Total*	0.103		0.248	0.224	0.349
^{90}Y	β^-	0.125		0.257	0.253	0.335
^{62}Cu	β^+	0.208		0.393	0.369	0.467
	Photon	0.040		0.043	0.042	0.040
	Total*	0.248		0.436	0.411	0.507
^{106}Rh	β^-	0.241		0.430	0.408	0.519
	Photon	0.007		0.008	0.008	0.007
	Total*	0.248		0.438	0.416	0.527

*Total represents a sum of S values from all radiations of a certain radionuclide.

**ICE stands for Internal Conversion Electron.

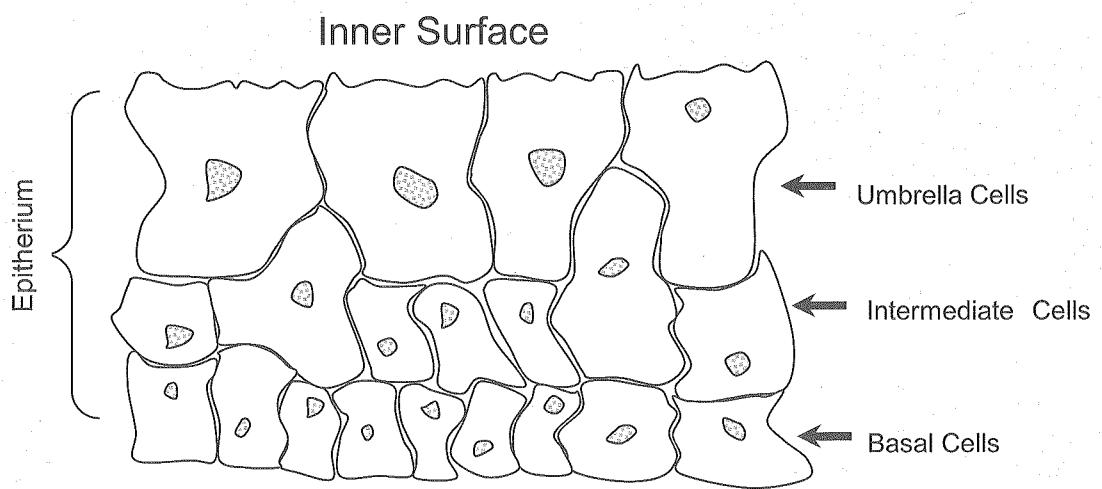


Figure 1. A schematic of unstretched urinary bladder epithelium.

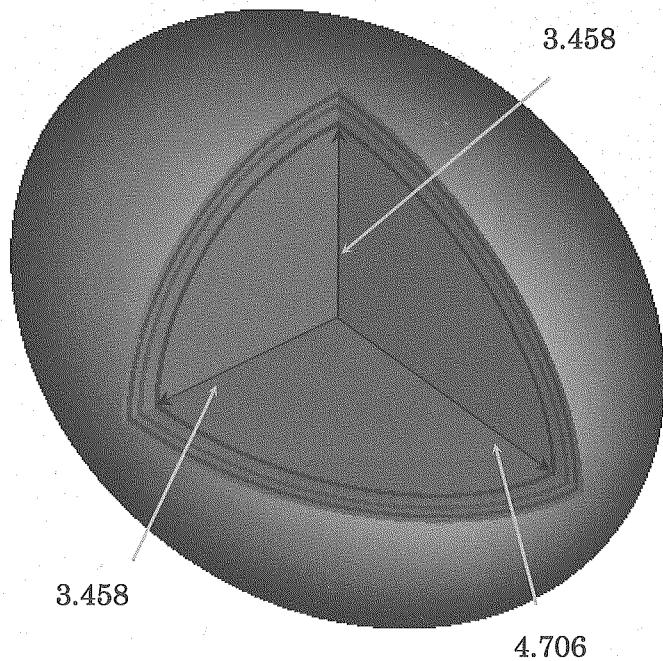


Figure 2. A simple bladder model with basal cells. unit: cm

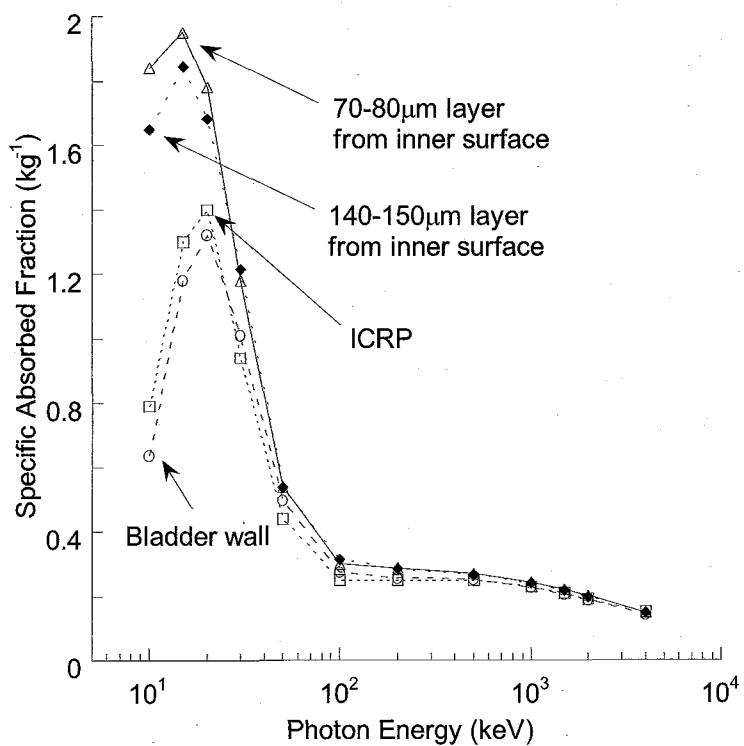


Figure 3. Specific absorbed fraction of monoenergetic photon sources with bladder contents as the source and the bladder wall or basal cells as the target.

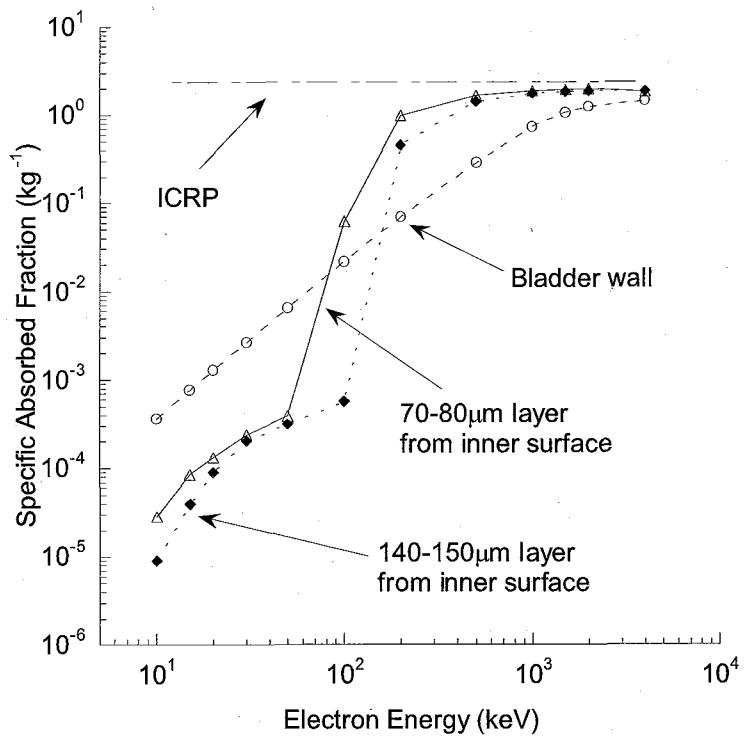


Figure 4. Specific absorbed fraction of monoenergetic electron sources with bladder contents as the source and the bladder wall or basal cells as the target.

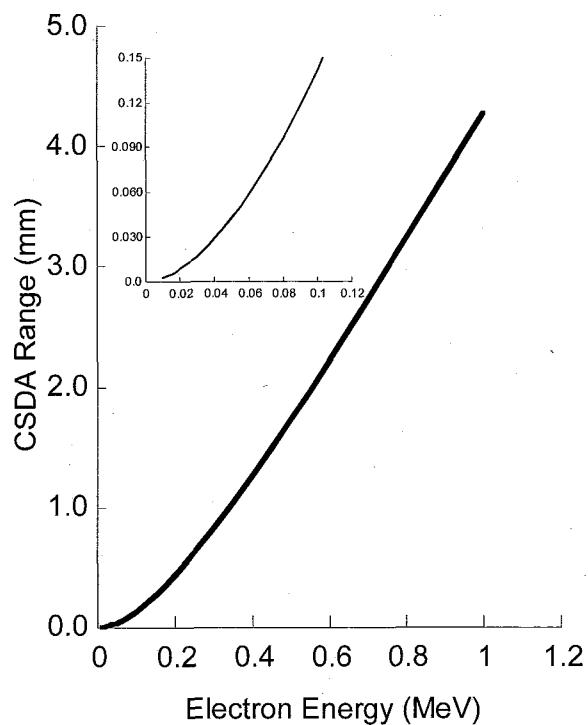


Figure 5. Electron csda range in the soft tissue as a function of electron energy^{23).}

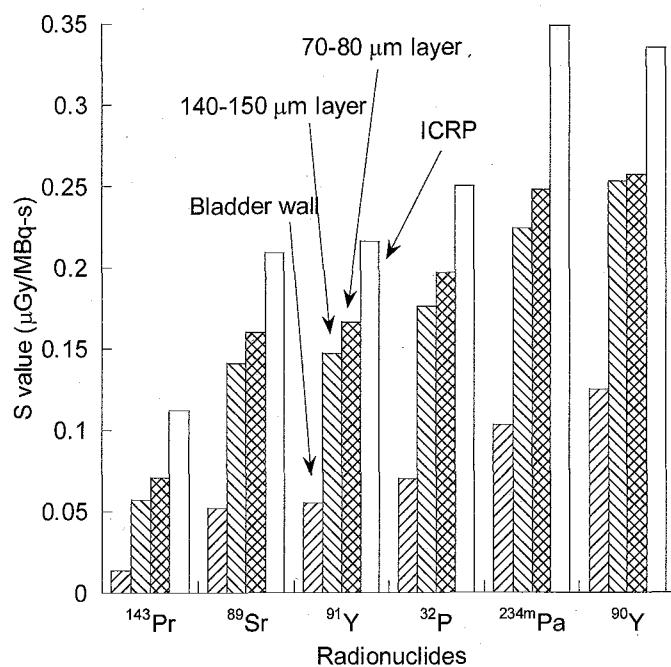


Figure 6. S values for radionuclides distributed in the bladder contents.

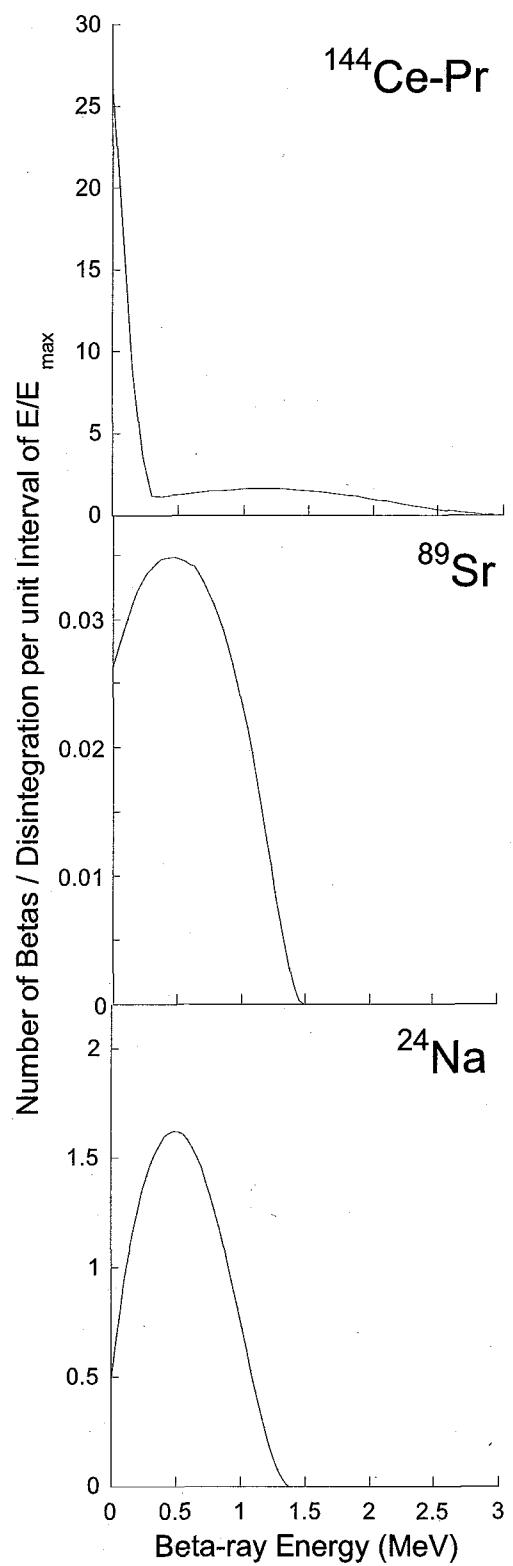


Figure 7. Comparison of beta particle spectra¹¹⁾ ($^{144}\text{Ce-Pr}$, ^{24}Na , ^{89}Sr).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	記号
面積	平方メートル	m ²
立体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率(数の)	1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	m ² ·m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg·s ⁻²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N·m
工率、放熱	ワット	J	m ² ·kg·s ⁻²
電荷、電気量	クーロン	C	J/s
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シemens	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	K
光度	ルメ	lm	cd·sr ^(c)
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg
ギガ一分率、カーマ			m ² ·s ⁻²
線量当量、周辺線量当量			
方向性線量当量、個	シーベルト	Sv	J/kg
人線量当量、組織線量当量			m ² ·s ⁻²

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用的な場合には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	m ⁻¹ ·kg·s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	m ² ·kg·s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	N/m ²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ⁻¹ ·s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ⁻¹ ·s ⁻² =s ⁻²
熱流密度、放熱照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg·s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ·kg·s ⁻² ·K ⁻¹
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
質量エンタルピー	モル毎ケルビン	J/kg	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m·K)	m·kg·s ⁻³ ·K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m·kg·s ⁻³ ·A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ·s·A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ·s·A
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	m ⁻³ ·kg ⁻¹ ·s ⁴ ·A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ·kg ⁻¹ ·s ⁻² ·A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ·kg·s ⁻² ·mol ⁻¹
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケル	J/(mol·K)	m ² ·kg·s ⁻² ·K ⁻¹ ·mol ⁻¹
モル熱容量	ビン		
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ·s·A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ·s ⁻³
放射強度	ワット毎スチラジアン	W/sr	m ⁴ ·m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ⁻³ =m ² ·kg ⁻¹ ·s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎スチラジアン	W/(m ² ·sr)	m ² ·m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ⁻³ =kg ⁻¹ ·s ⁻³

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ³ m ²
ヘルツ	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイニ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn·s/cm ² =0.1Pa·s
ストップス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホル	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1X unit=1.002×10 ¹⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキ	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W·m ⁻² ·Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	ト	1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
標準大気圧	Torr	1 Torr=(101.325/760) Pa
カロリ	cal	1 atm=101.325 Pa
ミクロン	μ	1 μ=1pm=10 ⁻⁶ m