

JAERI-M
83-156

ICRP Publication 30 に基づく
内部被曝線量の検討

1983年9月

松永 武・笠井 篤

日 本 原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

ICRP Publication 30 に基づく内部被曝線量の検討

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

松 永 武・笠 井 篤

(1983年9月5日受理)

ICRP Publication 30 に基づく内部被曝線量計算コードを用いて、放射性エアロゾルの空気動学的放射能中央径、放射性核種の有効半減期、放射線の種類等による預託線量当量の変化を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

吸入摂取においては、胃腸管を除く器官の単位摂取放射能あたりの預託線量当量は一般に放射能中央径が小さいほど大きい。肺実質領域、肺リンパ系領域における壊変が呼吸器系の預託線量当量へ大きく寄与している。特に後者の寄与が大きい。胃腸管の預託線量当量は、放射能中央径が大きくなるとともに一般に漸増する。

経口摂取においては、預託線量当量は吸入摂取に比較して胃腸管を除き一般に小さい。胃腸管における変換総数（放射性壊変の積分値）は吸入摂取の場合よりもつねに大きい。預託線量当量は必ずしも大きくない。その理由は、 γ 線を放出する呼吸器系内放射核種による胃腸管の照射寄与が大きい場合があるためである。

A Study of Internal Exposure Based on
the ICRP Publication 30

Takeshi MATSUNAGA and Atsushi KASAI

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 5, 1983)

A computer program to calculate an internal exposure has been developed. It is based on the ICRP Publication 30. The influences on the committed dose equivalent by the factors such as an activity median aerodynamic diameter (AMAD) of a radioactive aerosol, a chemical state of a radionuclide, its decay constant, and its radiations have been investigated using the program. The following properties have been clear.

In the case of inhalation, the committed dose equivalent in organs except for the gastrointestinal tract (the GI tract) per unit activity intake mostly increases as the AMAD gets smaller. The transformations in the pulmonary parenchyma and especially those in the pulmonary lymphatic system have a great contribution to the committed dose equivalent in the respiratory tract. In general that in the GI tract increases slowly with the AMAD getting larger.

In the case of ingestion, the committed dose equivalent in organs except for the GI tract is mostly smaller than that in the case of inhalation. Although the number of the transformations in the GI tract is always larger than that in inhalation, the committed dose equivalent is not necessarily greater than that in inhalation for a gamma ray emitter. The reason is that the exposure of the GI tract to gamma rays from the radionuclides in the respiratory tract is often dominant for the GI tract.

Keywords : Computer Program, Internal Exposure, ICRP, Committed Dose Equivalent,
Ingestion, Inhalation, Activity Median Aerodynamic Diameter, Chemical State,
Decay Constant, Radiations

目 次

1. はじめに.....	1
2. 線量算定法.....	1
2.1 概 要.....	1
2.2 代謝モデル.....	2
3. 計算コード.....	3
3.1 機 能.....	3
3.2 フローチャート.....	4
3.3 出力例.....	4
4. 内部被曝線量の検討.....	5
4.1 模擬核種による検討.....	5
4.2 実核種による検討.....	8
5. 結 言.....	9
参考文献.....	10

CONTENTS

1.	Introduction	1
2.	Model in the ICRP Publication 30	1
2.1	General Description	1
2.2	Metabolic Model	2
3.	Computer Program	3
3.1	Functions	3
3.2	Calculation Flow	4
3.3	Examples	4
4.	Investigation on Internal Exposure	5
4.1	Investigation for Model Nuclides	5
4.2	Investigation for Real Nuclides	8
5.	Conclusion	9
	References	10

List of Tables

- Table 1 Output example 1 : Nuclear data and metabolic data used
- Table 2 Output example 2 : Number of nuclear transformations in source organs
- Table 3 Output example 3 : Translocating activities to the body fluids for each radionuclide in the decay chain
- Table 4 Output example 4 : Specific effective energies for each radionuclide in the decay chain
- Table 5 Output example 5 : Committed dose equivalent respective for each target organ and for each radionuclide in the decay chain
- Table 6 Output example 6 : Committed dose equivalent for each radionuclide in the decay chain
- Table 7 Output example 7 : Committed dose equivalent
- Table 8 Output example 8 : Weighted Committed dose equivalent before adjusted to the 10 % rule
- Table 9 Output example 9 : Weighted committed dose equivalent adjusted to the 10 % rule
- Table 10 Nuclear and metabolic data of the model nuclides
- Table 11 Committed dose equivalent due to the model nuclide Gamma 1
- Table 12 Committed dose equivalent due to the ingestion of the model nuclide Gamma 2
- Table 13 Committed dose equivalent due to the ingestion of the model nuclide Gamma 3
- Table 14 Committed dose equivalent due to the ingestion of the model nuclide Alpha
- Table 15 Committed dose equivalent due to the ingestion of Be-7
- Table 16 Committed dose equivalent due to the ingestion of oxides or halides of Co-60
- Table 17 Committed dose equivalent due to the ingestion of all other compounds of Co-60
- Table 18 Committed dose equivalent due to the ingestion of oxides of Pu-239
- Table 19 Committed dose equivalent due to the ingestion of all other compounds of Pu-239

List of Figures

- Fig. 1 Mathematical models to describe the kinetics of radionuclides used in the ICRP Publication 30
- Fig. 2 Generic flow chart of the computer program, INTEX.
- Fig. 3 Graphic output examples
- Fig. 4 Some results in the case of inhalation of the model nuclide Gamma 1 (inhalation class Y)
- Fig. 5 Some results in the case of inhalation of the model nuclide Gamma 2 (inhalation class Y)
- Fig. 6 Some results in the case of inhalation of the model nuclide Gamma 2 (inhalation class W)
- Fig. 7 Some results in the case of inhalation of the model nuclide Gamma 3 (inhalation class Y)
- Fig. 8 Some results in the case of inhalation of the model nuclide Alpha (inhalation class Y)
- Fig. 9 Some results in the case of inhalation of Be-7 (inhalation class Y)
- Fig.10 Some results in the case of inhalation of Be-7 (inhalation class W)
- Fig.11 Some results in the case of inhalation of Co-60 (inhalation class Y)
- Fig.12 Some results in the case of inhalation of Co-60 (inhalation class W)
- Fig.13 Some results in the case of inhalation of Pu-239 (inhalation class Y)
- Fig.14 Some results in the case of inhalation of Pu-239 (inhalation class W)

1. はじめに

放射性核種の摂取にともなう内部被曝線量の評価は、放射線管理の面でも、そして環境安全研究の面でも非常に重要である。その評価には、通例、数学的代謝モデルが用いられている。

国際放射線防護委員会 (The International Commission of Radiological Protection ; ICRP) は、作業者についての、新たな内部被曝線量算定法を発表した (ICRP Publication 30⁽¹⁾ 以下 Pub. 30 と記す)。これは、線量限度に関する新しい概念を示した同委員会の勧告、Publication 26⁽²⁾ に基づく内部被曝線量の算出方法とそれに必要な数値を示している。

ICRP は、Pub. 30 の適用の対象を作業者に限っている。しかしながら、種々の面で年齢依存性等を考慮することにより、公衆の内部被曝線量の算定法として、Pub. 30 を基本にすることができると考えられる。実際、Pub. 26, Pub. 30 に表われた臓器別線量、預託線量当量の概念は、現在すでに広く行きわたっている。

筆者らは、次の2つの目的をもって、Pub. 30 に示された線量算定法の計算コードを作成した。

- (i) Pub. 30 に示された線量算定法の特徴の理解。
- (ii) Pub. 30 を基本とした、公衆の内部被曝線量評価コードの開発。

Pub. 30 に示された基本的な計算コード化がここに終了した (ただし、ヨウ素の摂取、アルカリ土類の摂取、サブマージョンによる被曝を除く)。以下に本コードの機能、内容と本コードを用いた被曝線量の特徴の検討の結果を述べる。

2. 線量算定法

Pub. 30 に示される線量算定法を簡単に述べる。詳細については、Pub. 30 とその解説⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ を参照されたい。

2.1 概要

線量算定法の概要を以下に述べる。

- (i) 摂取された放射性核種は、体液および体内諸器官を経て排泄される。核種に応じた代謝モデルに従い、体液、体内諸器官に滞留する放射性核種の、摂取後 50 年間にわたる放射性壊変の総数 (変換総数という) が求められる。
- (ii) 体内諸器官に対して、放射線を放出する器官 (線源器官)、放射線エネルギーを吸収する器官 (標的器官) の概念が適用される。 α 線、 β 線、核分裂片等非透過性の放射線の場合、放射線エネルギーは線源器官内で完全に吸収されると仮定される。つまり、線源器官

1. はじめに

放射性核種の摂取にともなう内部被曝線量の評価は、放射線管理の面でも、そして環境安全研究の面でも非常に重要である。その評価には、通例、数学的代謝モデルが用いられている。

国際放射線防護委員会 (The International Commission of Radiological Protection ; ICRP) は、作業者についての、新たな内部被曝線量算定法を発表した (ICRP Publication 30⁽¹⁾ 以下 Pub. 30 と記す)。これは、線量限度に関する新しい概念を示した同委員会の勧告、Publication 26⁽²⁾ に基づく内部被曝線量の算出方法とそれに必要な数値を示している。

ICRP は、Pub. 30 の適用の対象を作業者に限っている。しかしながら、種々の面で年齢依存性等を考慮することにより、公衆の内部被曝線量の算定法として、Pub. 30 を基本にすることができると考えられる。実際、Pub. 26, Pub. 30 に表われた臓器別線量、預託線量当量の概念は、現在すでに広く行きわたっている。

筆者らは、次の2つの目的をもって、Pub. 30 に示された線量算定法の計算コードを作成した。

- (i) Pub. 30 に示された線量算定法の特徴の理解。
- (ii) Pub. 30 を基本とした、公衆の内部被曝線量評価コードの開発。

Pub. 30 に示された基本的な計算コード化がここに終了した (ただし、ヨウ素の摂取、アルカリ土類の摂取、サブマージョンによる被曝を除く)。以下に本コードの機能、内容と本コードを用いた被曝線量の特徴の検討の結果を述べる。

2. 線量算定法

Pub. 30 に示される線量算定法を簡単に述べる。詳細については、Pub. 30 とその解説⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ を参照されたい。

2.1 概要

線量算定法の概要を以下に述べる。

- (i) 摂取された放射性核種は、体液および体内諸器官を経て排泄される。核種に応じた代謝モデルに従い、体液、体内諸器官に滞留する放射性核種の、摂取後 50 年間にわたる放射性壊変の総数 (変換総数という) が求められる。
- (ii) 体内諸器官に対して、放射線を放出する器官 (線源器官)、放射線エネルギーを吸収する器官 (標的器官) の概念が適用される。 α 線、 β 線、核分裂片等非透過性の放射線の場合、放射線エネルギーは線源器官内で完全に吸収されると仮定される。つまり、線源器官

だけが標的器官となる。透過性放射線（光子）の場合には、線源器官以外の器官にも到達してエネルギーを与えると仮定される。つまり、線源器官を含むすべての器官が標的器官となる。これら標的器官、線源器官の個々の組合せについて、1壊変あたり標的器官に付与されるエネルギー（比実効エネルギー；Specific Effective Energy (SEE)) が計算される。SEEは、放出放射線ごとに計算される。

(iii) 変換総数と比吸収割合から、各標的器官における、すべての線源器官からの、摂取後50年間にわたる放射線エネルギー付与量（預託線量当量；Committed Dose Equivalent）が求められる。

(iv) 預託線量当量が同一でも、発癌のリスクは器官ごとに異なる。そこで、預託線量当量に、単位線量あたりの発癌のリスク（リスク係数）を規格化した荷重係数を乗じたもの（荷重預託線量当量；Weighted Committed Dose Equivalent）が算出される。

以上のようにして、預託線量当量、荷重預託線量当量が算出される。

2.2 代謝モデル

2.2.1 呼吸器系モデル

Pub. 30 で用いられる呼吸器系モデルをFig. 1(a)に示す。このモデルは、放射性核種を吸入摂取した場合に用いられる。呼吸器系は、鼻咽頭（N-P）領域、気管-気管支（T-B）領域、肺実質（P）領域、そして肺リンパ節（L）領域の4領域に分けられる。それぞれがさらに、代謝機能上2つないし4つの部分に分けられる。N-P、T-B、Pは外気道に接しており、吸入された放射性核種の粒径・化学形に応じて、各領域への沈着割合、そこからの除去半減期が定められる。

2.2.2 胃腸管モデル

胃腸管モデルをFig. 1(b)に示す。胃腸管は4つに区分される。体液への移行は小腸でのみ、なされる。その移行割合は元素ごとに定まる。例外的ないくつかの元素（Cs, K等）では、胃に到達した全放射能が胃から体液に移行すると仮定される。

2.2.3 器官モデル

呼吸器系、胃腸管を除く器官における代謝モデルをFig. 1(c)に示す。各器官は、一般に、除去半減期の異なる複数の（数学的な）区分（組織コンパートメント）から成る。除去半減期、コンパートメント数は、器官ごと、元素ごとに定まる。

2.2.4 骨モデル

骨の場合の標的器官は、骨表面近くの細胞ならびに赤色骨髄である。骨に属する線源器官は、皮質骨と梁骨である。線源器官への分布の様式は、骨表面分布、骨体積均等分布の2つの型に分けられる。分布様式は核種ごとに定められる。

3. 計 算 コ ー ド

本計算コードをINTEX (Internal Exposuve)と呼ぶ。以下に、その機能、概要フローチャートを説明する。

3.1 機 能

INTEXは、前章で述べた Pub. 30 に示された方法により単位放射能摂取時の荷重預託線量当量を算出する。荷重預託線量当量の算出に用いられる中間的諸量も出力される。計算の実行は計算機端末を介しての会話型処理による。以下に、入力事項、出力事項を示す。

入力事項

- (i) 核 種
- (ii) 摂取形態
- (iii) 性 別
- (iv) 化学形
- (v) 空気動学的放射能中央径 (吸入摂取の場合)
- (vi) 出力に関する指定 (出力事項, 出力場所)

出力事項

- (i) 核データ
- (ii) 代謝データ
- (iii) 比実効エネルギー
- (iv) 各線源器官における変換総数
- (v) 体液へ移行する放射能
- (vi) 各標的器官における預託線量当量 (核種別, 線源器官別)*
- (vii) 各標的器官における預託線量当量 (核種別)*
- (viii) 各標的器官における預託線量当量*
- (ix) 各標的器官における荷重預託線量当量

核データならびに代謝に関するデータは磁気ディスク上に予め用意されている。

ICRPは、Watsonら⁽⁶⁾が Publication 30 のために開発した計算コードを用いて、単位放射能摂取時の荷重預託線量当量を算出し、公刊している。そこには、上記出力事項の iii), iv), vii), ix) が示されている。INTEXは、ICRPコードに準ずるものであるが、中間的諸量をより詳しく出力できるようになっている。また、iii)の比吸収割合は、線源器官別、標的器官別に出力される。iii), iv)についてはグラフ出力も行える。

* 3.3節参照

3.2 フローチャート

前述の通り、諸量の計算は Pub. 30 に基づいている。具体的な計算式については Pub. 30 にゆずる。Fig. 2 に示す INTEX の概要フローチャートにしたがって計算手順を説明する。

- ① 計算対象の核種、摂取形態、性別を入力する。性別を入力するのは次の理由による。
Pub. 30 の補遺に核種ごとに預託線量当量、荷重預託線量当量が示されている。そこでは、両性について計算された生殖線量のうち、大きな方の値が性別なしに単に生殖腺 (Gonads) 線量として示されている。本コードでは、性別ごとの生殖腺線量が知ることのできるように配慮している。乳房 (Breast)** に関する取扱いは Pub. 30 のままである。
- ② 摂取核種そしてその娘核種 (存在する場合) の核データが読み込まれる。
- ③ 摂取核種の代謝データが読み込まれる。娘核種の代謝は親核種と同一と仮定される。
- ④ 摂取核種の化学形を入力する。
- ⑤ 吸入摂取の場合、呼吸器系に関する⑥～⑧のステップを実行する。経口摂取の場合、これらのステップを実行しない。
- ⑥ 吸入摂取する放射性エアロゾルの空気力学的放射能中央径を入力する。
- ⑦ Pub. 30 の該当図から作成した呼吸器系各領域への沈着割合の数表が読み込まれる。⑥の放射能中央径について、同表を用いた比例内挿計算により沈着割合が求められる。
- ⑧ 化学形と代謝データから吸入のクラスが定められる。吸入のクラスに応じた呼吸器系各コンパートメントへの移行割合、除去半減期が読み込まれる。
- ⑨ 胃腸管壁、内容物質量および胃腸管滞留時間が読み込まれる。
- ⑩ 摂取形態、代謝モデルおよび性別に基づき線源器官と標的器官が定められる。
- ⑪ ICRP Publication 23 に示される光子の比吸収割合の表が読み込まれる。これには、10 keV から 4 MeV までに 12 種のエネルギーに対して比吸収割合が与えられている。摂取核種あるいは娘核種が光子放射体の場合にその光子エネルギーについて、同表を用いた比例内挿計算が行われる。
- ⑫ 吸入摂取の場合、⑬のステップを実行する。経口摂取の場合、このステップを実行しない。
- ⑬ 呼吸器系における変換総数が計算される。変換総数の計算には、すべての器官について Pub. 30 の付録に示されている近似式が用いられる。
- ⑭ 胃腸管における変換総数が計算される。
- ⑮ 通過コンパートメント (体液) および「その他の組織」* における変換総数が計算される。
- ⑯ 無機質骨を除く沈着器官における変換総数が計算される。
- ⑰ (無機質骨が沈着器官の場合) 無機質骨における変換総数が計算される。
- ⑱ ⑩で定められた標的器官、線源器官の組合せについて個々の放射線ごとに比実効エネルギー

* Pub. 30 では、呼吸器系 (吸入摂取の場合のみ)、胃腸管、沈着器官以外の組織は「その他の組織」(Other Tissue) と呼ばれ、1つの線源器官として扱われる。

** 後出の出力例の中では Muscle として示されている。

ギーが計算される。

- ⑱ ⑬～⑰で求められた変換総数と⑳で求められた比実効エネルギーから預託線量当量が計算される。
- ㉑ ⑲で求められた預託線量当量と Pub. 30 に示されている荷重係数から荷重預託線量当量が計算される。
- ㉒ 計算条件、計算結果の中でユーザーの指定した事項が出力される。

3.3 出力例

出力例を Table 1～Table 9 および Fig. 3 に示す。放射能中央径 $1.0\ \mu\text{m}$ の Be-7 の酸化物を吸入摂取した場合を例にとっている。

Table 2 には、各線源器官における変換総数が示されている。U, US はそれぞれ通過コンパートメントの変換総数の寄与を含む値、含まない値である。預託線量当量の計算において比実効エネルギーと組み合わせられる値は U である。吸入摂取の場合には呼吸器系各領域の変換総数も示される。ただし、N-P 領域の変換総数は預託線量当量に寄与しないと仮定されるので省いてある。

Table 5～Table 7 には預託線量当量が示されている。ただし、Table 5 には線源器官別、核種別（放射性娘核種が存在する場合）の値 (HS) が、Table 6 には線源器官について和をとった値 (HL) が、Table 7 には核種についても和をとった値がそれぞれ示されている。

Fig. 3 は、Table 2～Table 7 の数値をグラフ出力としたものである。比実効エネルギー (SEE, Table 4) と預託線量当量 (HS, Table 5) については、グラフ横軸を標的器官とした場合 (Fig. 3 (a), (d)) と線源器官 (Fig. 3 (b), (e)) とした場合のグラフが描かれる。

4. 内部被曝線量の検討

ICRP Pub. 30 のモデルに基づく内部被曝線量の特性を検討した。特性を系統的に知るために、模擬核種を設定して検討した。Be-7 等の実際の核種についても計算を行った。

4.1 模擬核種による検討

一般に、変換総数等は物理的半減期と生物学的半減期のどちらにも依存する。Pub. 30 では呼吸器系、胃腸管における生物学的半減期には一定の値が与えられている*。したがって、呼吸器系、胃腸管では両半減期のうち物理的半減期だけが変数となる。

通過コンパートメント以後に位置する器官では、核種（元素）に依存して生物学的半減期は定まる。つまり、両半減期が変数である。しかしながら、両者は変換総数等に対して同種の影

* 吸入のクラス、化学形ごとに一部異なる。

ギーが計算される。

- ⑬ ⑬～⑰で求められた変換総数と⑱で求められた比実効エネルギーから預託線量当量が計算される。
- ⑭ ⑱で求められた預託線量当量と Pub. 30 に示されている荷重係数から荷重預託線量当量が計算される。
- ⑮ 計算条件、計算結果の中でユーザーの指定した事項が出力される。

3.3 出力例

出力例を Table 1～Table 9 および Fig. 3 に示す。放射能中央径 $1.0\ \mu\text{m}$ の Be-7 の酸化物を吸入摂取した場合を例にとっている。

Table 2 には、各線源器官における変換総数が示されている。U, US はそれぞれ通過コンパートメントの変換総数の寄与を含む値、含まない値である。預託線量当量の計算において比実効エネルギーと組み合わせられる値は U である。吸入摂取の場合には呼吸器系各領域の変換総数も示される。ただし、N-P 領域の変換総数は預託線量当量に寄与しないと仮定されるので省いてある。

Table 5～Table 7 には預託線量当量が示されている。ただし、Table 5 には線源器官別、核種別（放射性娘核種が存在する場合）の値 (HS) が、Table 6 には線源器官について和をとった値 (HL) が、Table 7 には核種についても和をとった値がそれぞれ示されている。

Fig. 3 は、Table 2～Table 7 の数値をグラフ出力としたものである。比実効エネルギー (SEE, Table 4) と預託線量当量 (HS, Table 5) については、グラフ横軸を標的器官とした場合 (Fig. 3 (a), (d)) と線源器官 (Fig. 3 (b), (e)) とした場合のグラフが描かれる。

4. 内部被曝線量の検討

ICRP Pub. 30 のモデルに基づく内部被曝線量の特性を検討した。特性を系統的に知るために、模擬核種を設定して検討した。Be-7 等の実際の核種についても計算を行った。

4.1 模擬核種による検討

一般に、変換総数等は物理的半減期と生物学的半減期のどちらにも依存する。Pub. 30 では呼吸器系、胃腸管における生物学的半減期には一定の値が与えられている*。したがって、呼吸器系、胃腸管では両半減期のうち物理的半減期だけが変数となる。

通過コンパートメント以後に位置する器官では、核種（元素）に依存して生物学的半減期は定まる。つまり、両半減期が変数である。しかしながら、両者は変換総数等に対して同種の影

* 吸入のクラス、化学形ごとに一部異なる。

響を与えるものである。

以上をふまえ、模擬核種による検討では、両半減期のうち物理的半減期だけを変化させた。また、以下で述べる物理的半減期の影響は、本検討での変化範囲（100日～100年）で成り立つことである。たとえば、胃腸管での核種の滞留時間は、1時間～1日と短く、物理的半減期を100日以上で変化させてもその変換総数は一定であるが、物理的半減期が数日以下では、変換総数は異なってくる。

設定した模擬核種の特性をTable 10に示す。沈着器官を肝臓に設定した。吸入摂取の場合の計算結果をFig. 4～Fig. 8に示す。経口摂取の場合の計算結果（預託線量当量のみ）をTable 11～Table 14に示す。以下に、これらの図表の検討結果を一括して述べる。

4.1.1 変換総数

(i) 吸入摂取

呼吸器系の変換総数は空気動学的放射能中央径（以外、放射能中央径）の増大とともに減少し、物理的半減期の増大とともに増加する。Fig. 4, Fig. 5, Fig. 7の各(b)図から明らかのように、この増加に対しては肺リンパ系、肺実質領域の変換総数の寄与が大きい。とりわけ、肺実質領域での増加は顕著である。一方、気管－気管支領域の変換総数は物理的半減期に全んど依存しない。呼吸器系各領域の変換総数の物理的半減期依存性のこのような相異は、各領域における除去半減期の違いによる。

胃腸管の変換総数は、物理的半減期に全んど依存しない。これは、前述の通り、検討範囲の物理的半減期が、胃腸管での生物学的滞留時間に比べ十分長いためである。胃腸管の変換総数は放射能中央径の増大ともなって漸増する。これは、放射能中央径が大きい場合、えん下機能の高い鼻道領域への沈着割合が高いためである。そして、このことは、体液移行放射能の胃腸管経由分にも反映している（(ii)を参照）。

通過コンパートメント以後に位置する器官、組織（ここでは肝臓、肝臓を除く全身）では、物理的半減期が短い場合は、放射能中央径の増大とともに、それらの変換総数は胃腸管同様漸増する。物理的半減期が長くなるとともに、それらの変換総数は大きく増加する。その増加量は、放射能中央径の小さなほど大きい。このため、物理的半減期が長くなると、変換総数の放射能中央径依存性は変化する。検討例（Table 6(a)）のように場合によっては、* 放射能中央径の増大とともに、変換総数は減少するようになる（(iii)参照）。

(i) 経口摂取

胃腸管における変換総数は、物理的半減期に全んど依存しない。通過コンパートメント以後に位置する器官、組織では、物理的半減期の増大とともに変換総数は増加する。これらの事は、吸入摂取の場合と同様である。注意すべき点は、呼吸器系が通過コンパートメント以後に位置する点である。

吸入摂取の場合の変換総数と経口摂取の場合のそれらとの大小関係は、核種の特性に大

* 除去半減期が十分長い場合

きく依存するため、一般的な比較はできない。

経口摂取の場合の諸量に放射能中央径依存性はもちろん存在しない。

(ii) 体液移行放射能

(イ) 吸入摂取

体液に移行する放射能は呼吸器系経由分と胃腸管経由分とに分けられる。物理的半減期の短い場合、呼吸器系経由分は、放射能中央径の増大とともに増加する。物理的半減期の増大ともなっても増加し、その増加は放射能中央径が小さいほど大きい。このため、物理的半減期の長い場合には放射能中央径の増大とともに、呼吸器系経由分の体液移行放射能は減少する。

一方、胃腸管経由分は、物理的半減期に全んど依存しない。そして、放射能中央径の増大とともに漸増する。胃腸管経由分は、えん下量に比例するため、(i)で述べたえん下量の特徴がそのまま反映する。

呼吸器系経由分と胃腸管経由分との大小関係は、核種の特性に大きく依存するため一般的な比較はできない。

(ロ) 経口摂取

摂取量にある定数をかけた量が移行放射能となる。この定数は、物理的半減期が数時間以下とならない限り、血液へのとり込み割合に全んど等しい。

(iii) 預託線量当量

預託線量当量は、基本的に、変換総数と比実効エネルギーとの積であるので、その特性はこの両者の特性に依存している。

(イ) 吸入摂取

物理的半減期が増大するとともに、預託線量当量は胃腸管を除き全般に増加する。光子放射体の摂取の場合には放射能中央径依存性も変化する（呼吸器系、胃腸管を除く）。たとえば、生殖腺では、物理的半減期が短い場合には放射能中央径の増大とともに預託線量当量は増加するが、物理的半減期が長くなると逆の傾向となる。これは、物理的半減期が短い場合は、生殖腺に対して胃腸管内容物からの線量寄与が大きく、半減期が長い場合は、呼吸器系、沈着器官（肝臓）からの線量寄与が大きいためである。

物理的半減期が長くなると、総じて、呼吸器系、沈着器官からの線量寄与が大となる。このため、呼吸器系の変換総数のプロフィールに準じた預託線量のプロフィールとなる。

α 線放出核種の場合は、他器官からの照射はないとされるので、変換総数の特性が預託線量当量の特性にそのまま反映する。ただし、全身の体液からの寄与が加わる。設定例では、肝臓、呼吸器系を除き、この寄与が各器官の自己照射の寄与より大となっている。

(ロ) 経口摂取

光子放出核種の経口摂取の場合には吸入摂取に比較して胃腸管を除き一般に小さい。そのおもな理由は呼吸器系からの照射寄与が大幅に低下するためである。また、胃腸管においては変換総数は吸入摂取の場合よりもつねに大きい、預託線量当量は必ずしも大きくない。この理由も呼吸器系からの照射線量寄与に帰する。つまり、吸入摂取の場合で胃腸管の変換総数が小さな場合でも、体内で接近して位置する胃腸管（特に胃壁）に対する呼

吸器系の寄与が大きいのである。この点に関してはすでに矢部⁽⁵⁾が指摘をしている。

α 線放出核種の経口摂取の場合も、吸入摂取のときに比較して、預託線量当量は小さくなる。これは、光子放出核種の場合のような呼吸器系からの照射寄与の低下のためではなく、呼吸器経由の体液移行放射能の減少のためである。つまり、吸入摂取の場合に、呼吸器系は線源器官と体液移行放射能の供給器官の二面を備えている。経口摂取の場合にはそのどちらかが失われ、預託線量当量が、光子放出核種、 α 線放出核種どちらの摂取についても小さくなるのである。

β 線放出核種の摂取の場合の特性は、 α 線放出核種と定性的には同一である。しかし、 α 線と β 線とでは線質係数が異なるため、預託線量当量の値そのものは大きく異なる。

4.2 実核種による検討

前節での模擬核種での模擬核種を用いた検討結果をふまえ、ここでは Be-7, Co-60, Pu-239* の3つの核種について内部被曝線量を検討する。吸入摂取の場合の計算結果を Table 15～Table 19 に、経口摂取の場合の計算結果を Fig. 9～Fig. 14 に示す。

4.2.1 Be-7

Be-7 は、物理的半減期が 53.3 日の γ 線放出核種であり、4.1 の模擬核種 GAMMA 1 に近い核種である。

物理的半減期が比較的に短いため、吸入摂取の場合、預託線量当量における呼吸器系の寄与はそれほど大きくない。胃腸管内容物における変換総数が大きいため、生殖腺線量が相対的に高いことが一つの特徴である。また、呼吸器系に近い胃壁では、呼吸器系からの照射寄与が大きくなっている。

吸入のクラスが Y (酸化物, ハロゲン化物, 硝酸化物) から W (その他の化合物) となると、呼吸器系から除去され体液へ移行する放射能が格段に増加する。このため、Be-7 の沈着器官である無機質骨における変換総数も増加する。クラス Y に比べクラス W では、呼吸器系の預託線量当量はやや減少し、他の諸器官の預託線量当量は全般に増加する。胃壁においては減少する。

4.2.2 Co-60

Co-60 も、Be-7 と同様に γ 線放出核種である物理的半減期がより長いために、吸入摂取の場合、預託線量当量における呼吸器系の寄与は、Be-7 よりも大きい。また、呼吸器系肺実質領域の変換総数がより大となっていることは、模擬核種で調べた通りである。Co-60 は肝臓肝臓を沈着器官とするため、肝臓での変換総数、預託線量当量が大きくなっている。

* U-235 以下の Pu-239 の娘核種の線量寄与は、Pu-239 に比較して非常に小さく、ここでの計算では無視している。

4.2.3 Pu-239

Pu-239は、長半減期であること、 α 放出核種であること、血液へのとり込み割合が小さいことに核種としての特徴がある。沈着器官は、肝臓、無機質骨、生殖腺である。吸入摂取の場合に、呼吸器系、肝臓、骨表面、赤色骨髄の変換総数、預託線量当量が非常に大きいことが特徴である。生殖腺においても、この2つの量はかなり大きい。これは、それらが沈着器官であること、核種の物理的半減期が長いこと、 α 放出核種であることに起因する。体液への移行放射能は呼吸器系経由分が支配的である。

吸入のクラスがYからWになると、呼吸器系の線量が低下する。これは、呼吸器系（特に肺実質領域）からの核種の除去が速くなるためである。

預託線量当量の放射能中央径依存性は、クラスYでは大きく、クラスW（呼吸器系を除く）では小さい。これは、体液移行放射能の放射能中央径依存性が、 α 放出核種核種であるがために、そのまま線量特性に反映しているのである。

経口摂取の場合、Pu-239においては、血液へのとり込み割合が化学形により1桁異なる。このため、預託線量当量も化学形により1桁異なっている。預託線量当量を吸入摂取の場合と比較すると、呼吸器系における大幅な低下は当然であるが、肝臓、骨表面等においても大きく低下している。これは、吸入摂取の場合に大きな比重を占めていた呼吸器系経由の移行放射能が、経口摂取の場合には存在しないためである。

5. 結 言

ICRP Publication 30に基づく内部被曝線量算定のための計算コードを開発した。この計算コードを用い内部被曝線量の特性を検討した。明らかとなった興味ある特性をいくつか列記する。

吸入摂取

- (i) 核種の物理的半減期が短い場合、呼吸器系の変換総数の大部分を肺リンパ系領域の変換総数が占める。物理的半減期の長い場合、肺リンパ系領域と肺実質領域の変換総数が大部分を占める。
- (ii) 胃腸管を経由して体液へ移行する放射能は、物理的半減期、吸入のクラスに全んど依存しない。呼吸器系を経由する移行放射能は、物理的半減期が長いほど増加する。その増加の程度は放射能中央径が小さいほど大きい。
- (iii) γ 線放出核種の場合、物理的半減期が長いほど、呼吸器系から各標的器官への線量寄与は値、割合とも大となる。
- (iv) 吸入のクラスがYからWになると、呼吸器系の預託線量当量は減少する。通過コンパートメント以後に位置する器官の預託線量当量は、 α 線放出核種の場合に増加し、 γ 線放出核種の場合に減少する。預託線量当量の放射能中央径依存性はクラスWよりYの方が高い。

経口摂取

- (v) 吸入摂取に比較し、預託線量当量は一般に減少する。物理的半減期が長いほど、血液へ

4.2.3 Pu-239

Pu-239は、長半減期であること、 α 放出核種であること、血液へのとり込み割合が小さいことに核種としての特徴がある。沈着器官は、肝臓、無機質骨、生殖腺である。吸入摂取の場合に、呼吸器系、肝臓、骨表面、赤色骨髄の変換総数、預託線量当量が非常に大きいことが特徴である。生殖腺においても、この2つの量はかなり大きい。これは、それらが沈着器官であること、核種の物理的半減期が長いこと、 α 放出核種であることに起因する。体液への移行放射能は呼吸器系経由分が支配的である。

吸入のクラスがYからWになると、呼吸器系の線量が低下する。これは、呼吸器系（特に肺実質領域）からの核種の除去が速くなるためである。

預託線量当量の放射能中央径依存性は、クラスYでは大きく、クラスW（呼吸器系を除く）では小さい。これは、体液移行放射能の放射能中央径依存性が、 α 放出核種核種であるがために、そのまま線量特性に反映しているのである。

経口摂取の場合、Pu-239においては、血液へのとり込み割合が化学形により1桁異なる。このため、預託線量当量も化学形により1桁異なっている。預託線量当量を吸入摂取の場合と比較すると、呼吸器系における大幅な低下は当然であるが、肝臓、骨表面等においても大きく低下している。これは、吸入摂取の場合に大きな比重を占めていた呼吸器系経由の移行放射能が、経口摂取の場合には存在しないためである。

5. 結 言

ICRP Publication 30に基づく内部被曝線量算定のための計算コードを開発した。この計算コードを用い内部被曝線量の特性を検討した。明らかとなった興味ある特性をいくつか列記する。

吸入摂取

- (i) 核種の物理的半減期が短い場合、呼吸器系の変換総数の大部分を肺リンパ系領域の変換総数が占める。物理的半減期の長い場合、肺リンパ系領域と肺実質領域の変換総数が大部分を占める。
- (ii) 胃腸管を経由して体液へ移行する放射能は、物理的半減期、吸入のクラスに全んど依存しない。呼吸器系を経由する移行放射能は、物理的半減期が長いほど増加する。その増加の程度は放射能中央径が小さいほど大きい。
- (iii) γ 線放出核種の場合、物理的半減期が長いほど、呼吸器系から各標的器官への線量寄与は値、割合とも大となる。
- (iv) 吸入のクラスがYからWになると、呼吸器系の預託線量当量は減少する。通過コンパートメント以後に位置する器官の預託線量当量は、 α 線放出核種の場合に増加し、 γ 線放出核種の場合に減少する。預託線量当量の放射能中央径依存性はクラスWよりYの方が高い。

経口摂取

- (v) 吸入摂取に比較し、預託線量当量は一般に減少する。物理的半減期が長いほど、血液へ

のとり込み割合が小さいほど減少の程度は大きい。小腸壁、大腸壁の預託線量当量は、経口摂取の場合の方が高い。

さて、Pub. 30 を公衆へ適用するには、特に次の点を考慮する必要がある。

- ① 年齢・性別 代謝データは勿論のこと、光子の比呼吸エネルギー等体格に関する因子についても年齢・性別による相異が考慮されなければならない。また、荷重預託線量当量に関しては、リスク係数の年齢・性別依存性も考える必要がある。
- ② 放射性核種の摂取様式 一回摂取とみなせる短期的な摂取（例、原子力施設事故時における放射性エアロゾルの吸入摂取）と長期的な摂取（例、放射性汚染した地下水の飲用、灌漑利用を通じての摂取）の2つの様式への対応が必要である。摂取後50年間という固定した期間の預託線量当量を求める Pub. 30 の手法は後者の場合には適当でない。また、前者の場合にも50年間という年数は検討の余地がある。

これらの問題には、基礎データの蓄積に帰するものも多いが、今後手法の開発という面ですらに検討を続け、より広い範囲に適用できる計算コードを作成していく計画である。

参 考 文 献

1. ICRP Publication 30, Part 1 ; Limits of Intakes of Radionuclide by Workers, Pergamon Press, Oxford (1979).
2. ICRP Publication 26 ; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Pergamon Press, Oxford (1977).
3. 藤田 稔 ; ICRP Publication 30 「作業員による放射性核種の摂取の限度」, 保健物理, 15, 173 (1980).
4. 安斎育郎 ; ICRP Publication 30 で用いられているMIRD法について, 保健物理, 15, 185 (1980).
5. 矢部 明 ; ICRPの新しい内部被曝算定法, 保健物理, 15, 195 (1980).
6. Watson, S. B. and M. R. Ford ; A User's Manual to the ICRP Code-A Series of Computer Program to perform Dosimetric Calculations for the ICRP Committee 2 Report, ORNL/TM-6980 (1980).

のとり込み割合が小さいほど減少の程度は大きい。小腸壁、大腸壁の預託線量当量は、経口摂取の場合の方が高い。

さて、Pub. 30 を公衆へ適用するには、特に次の点を考慮する必要がある。

- ① 年齢・性別 代謝データは勿論のこと、光子の比呼吸エネルギー等体格に関する因子についても年齢・性別による相異が考慮されなければならない。また、荷重預託線量当量に関しては、リスク係数の年齢・性別依存性も考える必要がある。
- ② 放射性核種の摂取様式 一回摂取とみなせる短期的な摂取（例、原子力施設事故時における放射性エアロゾルの吸入摂取）と長期的な摂取（例、放射性汚染した地下水の飲用、灌漑利用を通じての摂取）の2つの様式への対応が必要である。摂取後50年間という固定した期間の預託線量当量を求める Pub. 30 の手法は後者の場合には適当でない。また、前者の場合にも50年間という年数は検討の余地がある。

これらの問題には、基礎データの蓄積に帰するものも多いが、今後手法の開発という面ですらに検討を続け、より広い範囲に適用できる計算コードを作成していく計画である。

参 考 文 献

1. ICRP Publication 30, Part 1 ; Limits of Intakes of Radionuclide by Workers, Pergamon Press, Oxford (1979).
2. ICRP Publication 26 ; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Pergamon Press, Oxford (1977).
3. 藤田 稔 ; ICRP Publication 30 「作業者による放射性核種の摂取の限度」, 保健物理, 15, 173 (1980).
4. 安齋育郎 ; ICRP Publication 30 で用いられているMIRD法について, 保健物理, 15, 185 (1980).
5. 矢部 明 ; ICRPの新しい内部被曝算定法, 保健物理, 15, 195 (1980).
6. Watson, S. B. and M. R. Ford ; A User's Manual to the ICRP Code-A Series of Computer Program to perform Dosimetric Calculations for the ICRP Committee 2 Report, ORNL/TM-6980 (1980).

Table 1 Output example 1 : Nuclear and metabolic data used

*** NUCLEAR DATA ***

BE-7 HALF LIFE : 0.53300E+02 D

	RADIATION	ENERGY (MEV)	EMISSION RATIO
1	GAMMA	0.47760	0.10300

*** DISTRIBUTION IN BONE ***

BE-7 --- UNIFORM DISTRIBUTION THROUGHOUT THE VOLUME
 OF MINERAL BONE

*** METABOLIC MODEL ***

=== BERYLLIUM ===

= CHEMICAL PARAMETERS =

CHEMICAL STATE	INHALATION CLASS	UPTAKE FRACTION TO BLOOD
OXIDES, HALIDES, NITRATES	Y	0.50E-02
ALL OTHER COMPOUNDS	W	0.50E-02

= KINETIC MODEL =

FRACTION	COMPARTMENT -- SUBFRACTION	CLEARLANCE HALF LIFE
	TRANSFER COMPARTMENT	0.25E+00 D
0.40E+00	M.BONE -- 0.40E+00	0.15E+04 D
0.20E+00	T.BODY -- 0.16E+00	0.15E+02 D
	-- 0.40E-01	0.15E+04 D

Table 2 Output example 2 : Number of nuclear transformations in source organs

--- 8E-7 ---

===== U VALUES =====
(TRANSFORMATIONS/BQ)

SOURCES	U	US
LUNGS	9.40E+05	9.40E+05
ST CONT	1.73E+03	1.73E+03
SI CONT	6.87E+03	6.87E+03
ULI CONT	2.28E+04	2.28E+04
LLI CONT	4.04E+04	4.04E+04
C BONE	1.55E+04	1.55E+04
T BONE	3.87E+03	3.87E+03
T BODY	4.21E+03	3.91E+03
(OTHER TISSUE)		

U : INCLUDING TRANSER COMPARTMENT CONTRIBUTION
 US: EXCEPT FOR THAT CONTRIBUTION

=== NUMBER OF NUCLEAR TRANSFORMATIONS IN LUNGS ===
(TRANSFORMATIONS/BQ)

T-B	L	P
4.65E+03	9.13E+05	2.29E+04

Table 3 Output example 3: Translocating activities to the body fluids for each radionuclide in the decay chain

--- 8E-7 ---

===== FY VALUE =====
(BQ/BQ)

FY : 7.57E-03

=== FY COMPONENT ===

FROM RESPIRATORY TRACT :	5.17E-03
FROM GI TRACT :	2.40E-03

Table 4 Output example 4 : Specific effective energies for each radionuclide in the decay chain

--- BE-7 ---

==== SEE VALUES =====
(MEV/GRAM/TRANSFORMATION)

SOURCES

TARGETS	LUNGS	ST CONT	SI CONT	ULI CONT	LLI CONT	C BONE	T BONE	T BODY
OVARIES	2.57E-08	8.30E-08	1.50E-06	2.15E-06	2.73E-06	1.80E-07	1.80E-07	2.90E-07
MUSCLE	2.27E-07	2.39E-07	2.63E-07	2.51E-07	2.88E-07	1.88E-07	1.88E-07	2.44E-07
R MARROW	2.17E-07	1.81E-07	4.33E-07	3.76E-07	5.37E-07	5.25E-07	5.25E-07	2.83E-07
LUNGS	2.46E-06	3.13E-07	5.61E-08	5.69E-08	1.70E-08	1.67E-07	1.67E-07	2.62E-07
THYROID	2.00E-07	2.55E-08	6.59E-09	7.07E-09	2.97E-09	1.88E-07	1.88E-07	2.41E-07
B SURF	1.72E-07	1.04E-07	1.35E-07	1.25E-07	1.80E-07	5.89E-07	5.89E-07	2.56E-07
SI WALL	3.12E-07	8.80E-06	5.76E-07	6.13E-07	3.07E-07	9.96E-08	9.96E-08	3.04E-07
SI WALL	4.62E-08	4.47E-07	5.26E-06	2.77E-06	1.52E-06	1.36E-07	1.36E-07	3.36E-07
ULI WALL	6.32E-08	5.61E-07	3.87E-06	7.23E-06	7.15E-07	1.19E-07	1.19E-07	3.30E-07
LLI WALL	1.37E-08	2.15E-07	1.15E-06	5.08E-07	8.70E-06	1.62E-07	1.62E-07	3.33E-07
KIDNEYS	1.76E-07	5.61E-07	5.36E-07	4.60E-07	1.42E-07	1.54E-07	1.54E-07	2.98E-07
LIVER	4.05E-07	3.45E-07	3.07E-07	4.19E-07	5.79E-08	1.20E-07	1.20E-07	2.94E-07
PANCREAS	4.71E-07	2.97E-06	3.53E-07	3.10E-07	1.27E-07	1.56E-07	1.56E-07	2.99E-07
SKIN	1.14E-07	9.90E-08	8.93E-08	9.34E-08	9.93E-08	1.46E-07	1.46E-07	1.51E-07
SPLEEN	3.63E-07	1.61E-06	2.67E-07	2.10E-07	1.58E-07	1.41E-07	1.41E-07	3.03E-07
THYMUS	6.26E-07	3.88E-08	2.33E-08	2.56E-08	9.66E-09	1.26E-07	1.26E-07	2.69E-07
UTERUS	1.63E-08	1.51E-07	1.48E-06	7.58E-07	9.62E-07	9.79E-08	9.79E-08	2.99E-07
ADRENALS	4.15E-07	3.63E-07	2.15E-07	1.69E-07	8.28E-08	2.83E-07	2.83E-07	3.85E-07
BLD WALL	1.23E-08	7.48E-08	5.71E-07	3.25E-07	9.69E-07	1.10E-07	1.10E-07	3.07E-07

Table 5 Output example 5 : Committed dose equivalent respective for each target organ and for each radionuclide in the decay chain

--- BE-7 ---

==== HS VALUES =====
(SV/BQ)

TARGETS	SOURCES									
	LUNGS	ST CONT	SI CONT	ULI CONT	LLI CONT	C BONE	T BONE	T BODY		
OVARIES	3.86E-12	2.30E-14	1.65E-12	7.82E-12	1.77E-11	4.45E-13	1.11E-13	1.95E-13		
MUSCLE	3.42E-11	6.61E-14	2.89E-13	9.15E-13	1.86E-12	4.64E-13	1.16E-13	1.64E-13		
R MARROW	3.27E-11	5.02E-14	4.76E-13	1.37E-12	3.47E-12	1.30E-12	3.25E-13	1.90E-13		
LUNGS	3.71E-10	8.68E-14	6.17E-14	2.07E-13	1.10E-13	4.12E-13	1.03E-13	1.77E-13		
THYROID	3.01E-11	7.07E-15	7.24E-15	2.57E-14	1.92E-14	4.65E-13	1.16E-13	1.62E-13		
B SURF	2.59E-11	2.89E-14	1.49E-13	4.55E-13	1.16E-12	1.46E-12	3.64E-13	1.72E-13		
SI WALL	4.69E-11	2.44E-12	6.34E-13	2.23E-12	1.98E-12	2.46E-13	6.16E-14	2.05E-13		
SI WALL	6.95E-12	1.24E-13	5.79E-12	1.01E-11	9.83E-12	3.37E-13	8.42E-14	2.26E-13		
ULI WALL	9.51E-12	1.55E-13	4.25E-12	2.63E-11	4.63E-12	2.95E-13	7.36E-14	2.23E-13		
LLI WALL	2.07E-12	5.96E-14	1.26E-12	1.85E-12	5.62E-11	4.00E-13	9.99E-14	2.24E-13		
KIDNEYS	2.65E-11	1.55E-13	5.89E-13	1.68E-12	9.19E-13	3.81E-13	9.53E-14	2.01E-13		
LIVER	6.09E-11	9.56E-14	3.37E-13	1.52E-12	3.75E-13	2.97E-13	7.41E-14	1.98E-13		
PANCREAS	7.09E-11	8.24E-13	3.88E-13	1.13E-12	8.19E-13	3.86E-13	9.64E-14	2.01E-13		
SKIN	1.72E-11	2.74E-14	9.82E-14	3.40E-13	6.43E-13	3.62E-13	9.04E-14	1.02E-13		
SPLEEN	5.46E-11	4.47E-13	2.93E-13	7.65E-13	1.02E-12	3.48E-13	8.69E-14	2.04E-13		
THYMUS	9.41E-11	1.08E-14	2.57E-14	9.31E-14	6.25E-14	3.12E-13	7.81E-14	1.81E-13		
UTERUS	2.45E-12	4.19E-14	1.63E-12	2.76E-12	6.22E-12	2.42E-13	6.06E-14	2.02E-13		
ADRENALS	6.24E-11	1.00E-13	2.37E-13	6.15E-13	5.35E-13	7.00E-13	1.75E-13	2.60E-13		
BLD WALL	1.85E-12	2.07E-14	6.28E-13	1.18E-12	6.27E-12	2.72E-13	6.80E-14	2.07E-13		

Table 6 Output example 6: Committed dose equivalent for each radionuclide in the decay chain

```

---- BE-7 ----
===== HL VALUES =====
(SV/BQ)

TARGETS      HL
OVARIES      3.18E-11
MUSCLE       3.81E-11
R MARROW     3.99E-11
LUNGS        3.72E-10
THYROID      3.09E-11
B SURF       2.97E-11
ST WALL      5.47E-11
SI WALL      3.34E-11
ULI WALL     4.55E-11
LLI WALL     6.22E-11
KIDNEYS      3.05E-11
LIVER        6.38E-11
PANCREAS     7.47E-11
SKIN         1.88E-11
SPLEEN       5.77E-11
THYMUS       9.49E-11
UTERUS       1.36E-11
ADRENALS     6.50E-11
BLD WALL     1.05E-11
    
```

Table 7 Output example 7: Committed dose equivalent

```

NUCLIDE : BE-7
INTAKE  : INHALATION
STATE   : OXIDES, HALIDES, NITRATES
CLASS   : Y
AMAD    : 1.00 (MICRON)
SEX     : FEMALE

===== COMMITTED DOSE EQUIVALENT =====
(SV/BQ)

OVARIES      3.2E-11
MUSCLE       3.8E-11
R MARROW     4.0E-11
LUNGS        3.7E-10
THYROID      3.1E-11
B SURF       3.0E-11
ST WALL      5.5E-11
SI WALL      3.3E-11
ULI WALL     4.5E-11
LLI WALL     6.2E-11
KIDNEYS      3.0E-11
LIVER        6.4E-11
PANCREAS     7.5E-11
SKIN         1.9E-11
SPLEEN       5.8E-11
THYMUS       9.5E-11
UTERUS       1.4E-11
ADRENALS     6.5E-11
BLD WALL     1.0E-11
    
```

Table 8 Output example 8: Weighted committed dose equivalent before adjusted to the 10 % rule. All target organs are included.

NUCLIDE : BE-7
 INTAKE : INHALATION
 STATE : OXIDES,HALIDES,NITRATES
 CLASS : Y
 AMAD : 1.00 (MICRON)
 SEX : FEMALE

=== WEIGHTED COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===

	(SV/BQ)	WEIGHT
OVARIES	7.9E-12	(2.50E-01)
MUSCLE	5.7E-12	(1.50E-01)
R MARROW	4.8E-12	(1.20E-01)
LUNGS	4.5E-11	(1.20E-01)
THYROID	9.3E-13	(3.00E-02)
B SURF	8.9E-13	(3.00E-02)
ST WALL	3.3E-12	(6.00E-02)
SI WALL	2.0E-12	(6.00E-02)
ULI WALL	2.7E-12	(6.00E-02)
LLI WALL	3.7E-12	(6.00E-02)
KIDNEYS	1.8E-12	(6.00E-02)
LIVER	3.8E-12	(6.00E-02)
PANCREAS	4.5E-12	(6.00E-02)
SKIN	1.1E-12	(6.00E-02)
SPLEEN	3.5E-12	(6.00E-02)
THYMUS	5.7E-12	(6.00E-02)
UTERUS	8.2E-13	(6.00E-02)
ADRENALS	3.9E-12	(6.00E-02)
BLD WALL	6.3E-13	(6.00E-02)

Table 9 Output example 9: Weighted committed dose equivalent adjusted to the 10 % rule. The target organs those weighted committed dose are larger than 10 % of the maximum one are included.

NUCLIDE : BE-7
 INTAKE : INHALATION
 STATE : OXIDES,HALIDES,NITRATES
 CLASS : Y
 AMAD : 1.00 (MICRON)
 SEX : FEMALE

=== WEIGHTED COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===
 (WITH 10 % RULE)

	(SV/BQ)
LUNGS	4.5E-11
OVARIES	7.9E-12
MUSCLE	5.7E-12
THYMUS	5.7E-12
R MARROW	4.8E-12
PANCREAS	4.5E-12

Table 10 Nuclear and metabolic data of the model nuclides.

Model nuclide	Half life	Radiation	Energy	Uptake to blood (f_1)	Distribution and retention			Inhalation class
					Organ	Fraction	Biological half life	
Gamma1	10 days	γ ray	1 Mev	0.01	liver total body	0.1. 0.2	500 days 500 days	Y
Gamma2	100 days	γ ray		-	same as above	-		Y,W
Gamma3	100 years	γ ray		-	same as above	-		Y
Alpha	100 years	α ray		-	same as above	-		Y

Table 11 Committed dose equivalent due to the ingestion of the model nuclide Gamma 1

NUCLIDE : GAMMA1
 INTAKE : INGESTION
 STATE : OXIDES,HALIDES,NITRATES
 SEX : MALE

=== COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===
 (SV/BQ)

TESTES	8.0E-11
MUSCLE	1.2E-10
R MARROW	1.9E-10
LUNGS	2.6E-11
THYROID	5.7E-12
B SURF	6.5E-11
ST WALL	2.7E-10
SI WALL	9.3E-10
ULI WALL	1.3E-09
LLI WALL	2.1E-09
KIDNEYS	1.4E-10
LIVER	1.1E-10
PANCREAS	1.3E-10
SKIN	4.6E-11
SPLEEN	1.1E-10
THYMUS	1.2E-11
ADRENALS	6.8E-11
BLD WALL	2.7E-10

Table 12 Committed dose equivalent due to the ingestion of the model nuclide Gamma 2

NUCLIDE : GAMMA2
 INTAKE : INGESTION
 STATE : OXIDES,HALIDES,NITRATES
 SEX : MALE

=== COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===
 (SV/BQ)

TESTES	1.1E-10
MUSCLE	1.5E-10
R MARROW	2.2E-10
LUNGS	5.2E-11
THYROID	2.3E-11
B SURF	8.7E-11
ST WALL	3.1E-10
SI WALL	1.0E-09
ULI WALL	1.4E-09
LLI WALL	2.3E-09
KIDNEYS	1.8E-10
LIVER	2.4E-10
PANCREAS	1.7E-10
SKIN	6.2E-11
SPLEEN	1.4E-10
THYMUS	2.9E-11
ADRENALS	1.1E-10
BLD WALL	3.1E-10

Table 13 Committed dose equivalent due to the ingestion of the model nuclide Gamma 3

NUCLIDE : GAMMA3
 INTAKE : INGESTION
 STATE : OXIDES,HALIDES,NITRATES
 SEX : MALE

=== COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===

(SV/BQ)

TESTES	2.1E-10
MUSCLE	2.6E-10
R MARROW	3.3E-10
LUNGS	1.9E-10
THYROID	1.2E-10
B SURF	1.8E-10
ST WALL	4.5E-10
SI WALL	1.2E-09
ULI WALL	1.6E-09
LLI WALL	2.5E-09
KIDNEYS	3.7E-10
LIVER	9.7E-10
PANCREAS	3.6E-10
SKIN	1.3E-10
SPLEEN	2.6E-10
THYMUS	1.2E-10
ADRENALS	3.3E-10
BLD WALL	4.3E-10

Table 14 Committed dose equivalent due to the ingestion of the model nuclide Alpha

NUCLIDE : ALPHA
 INTAKE : INGESTION
 STATE : OXIDES,HALIDES,NITRATES
 SEX : MALE

=== COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===

(SV/BQ)

TESTES	5.8E-09
MUSCLE	5.8E-09
R MARROW	5.8E-09
LUNGS	5.8E-09
THYROID	5.8E-09
B SURF	5.8E-09
ST WALL	6.0E-09
SI WALL	6.4E-09
ULI WALL	9.2E-09
LLI WALL	1.6E-08
KIDNEYS	5.8E-09
LIVER	1.1E-07
PANCREAS	5.8E-09
SKIN	5.8E-09
SPLEEN	5.8E-09
THYMUS	5.8E-09
ADRENALS	5.8E-09
BLD WALL	5.8E-09

Table 15 Committed dose equivalent due to the ingestion of Be-7.

NUCLIDE : BE-7
 INTAKE : INGESTION
 STATE : OXIDES, HALIDES, NITRATES
 SEX : FEMALE

=== COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===

(SV/BQ)

OVARIES	5.7E-11
MUSCLE	7.0E-12
R MARROW	1.2E-11
LUNGS	1.4E-12
THYROID	6.1E-13
B SURF	5.0E-12
ST WALL	1.5E-11
SI WALL	5.4E-11
ULI WALL	7.4E-11
LLI WALL	1.2E-10
KIDNEYS	7.4E-12
LIVER	5.2E-12
PANCREAS	7.0E-12
SKIN	2.7E-12
SPLEEN	5.7E-12
THYMUS	7.8E-13
UTERUS	2.2E-11
ADRENALS	3.8E-12
BLD WALL	1.7E-11

Table 16 Committed dose equivalent due to the ingestion of oxides of hydroxides of Co-60

NUCLIDE : CO-60
 INTAKE : INGESTION
 STATE : OXIDES, HYDROXIDES
 SEX : MALE

=== COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===

(SV/BQ)

TESTES	1.1E-09
MUSCLE	1.1E-09
R MARROW	1.3E-09
LUNGS	8.7E-10
THYROID	7.9E-10
B SURF	9.4E-10
ST WALL	1.6E-09
SI WALL	3.6E-09
ULI WALL	5.8E-09
LLI WALL	1.1E-08
KIDNEYS	1.4E-09
LIVER	2.3E-09
PANCREAS	1.3E-09
SKIN	6.9E-10
SPLEEN	1.2E-09
THYMUS	9.0E-10
ADRENALS	1.6E-09
BLD WALL	1.8E-09

Table 17 Committed dose equivalent due to the ingestion of all other compounds of Co-60

NUCLIDE : CO-60
 INTAKE : INGESTION
 STATE : NITRATES, HALIDES
 SEX : MALE

=== COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===

(SV/BQ)

TESTES	5.4E-09
MUSCLE	5.1E-09
R MARROW	5.5E-09
LUNGS	4.9E-09
THYROID	4.7E-09
B SURF	4.8E-09
ST WALL	5.8E-09
SI WALL	8.2E-09
ULI WALL	9.6E-09
LLI WALL	1.3E-08
KIDNEYS	6.4E-09
LIVER	1.3E-08
PANCREAS	6.2E-09
SKIN	3.5E-09
SPLEEN	5.6E-09
THYMUS	5.3E-09
ADRENALS	8.7E-09
BLD WALL	6.6E-09

Table 18 Committed dose equivalent due to the ingestion of oxides of Pu-239

NUCLIDE : PU-239
 INTAKE : INGESTION
 STATE : OXIDES
 SEX : MALE

=== COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===

(SV/BQ)

TESTES	2.6E-09
MUSCLE	7.3E-14
R MARROW	1.6E-08
LUNGS	7.3E-14
THYROID	7.3E-14
B SURF	2.1E-07
ST WALL	1.2E-09
SI WALL	3.0E-09
ULI WALL	1.8E-08
LLI WALL	5.3E-08
KIDNEYS	7.3E-14
LIVER	4.3E-08
PANCREAS	7.3E-14
SKIN	7.3E-14
SPLEEN	7.3E-14
THYMUS	7.3E-14
ADRENALS	7.3E-14
BLD WALL	7.3E-14

Table 19 Committed dose equivalent due to the ingestion of all other compounds of Pu-239

NUCLIDE : PU-239
 INTAKE : INGESTION
 STATE : ALL OTHER COMPOUNDS
 SEX : MALE

=== COMMITTED DOSE EQUIVALENT ===
 (SV/BQ)

TESTES	2.6E-08
MUSCLE	7.3E-13
R MARROW	1.6E-07
LUNGS	7.3E-13
THYROID	7.3E-13
B SURF	2.1E-06
ST WALL	1.2E-09
SI WALL	3.0E-09
ULI WALL	1.8E-08
LLI WALL	5.3E-08
KIDNEYS	7.3E-13
LIVER	4.3E-07
PANCREAS	7.3E-13
SKIN	7.3E-13
SPLEEN	7.3E-13
THYMUS	7.3E-13
ADRENALS	7.3E-13
BLD WALL	7.3E-13

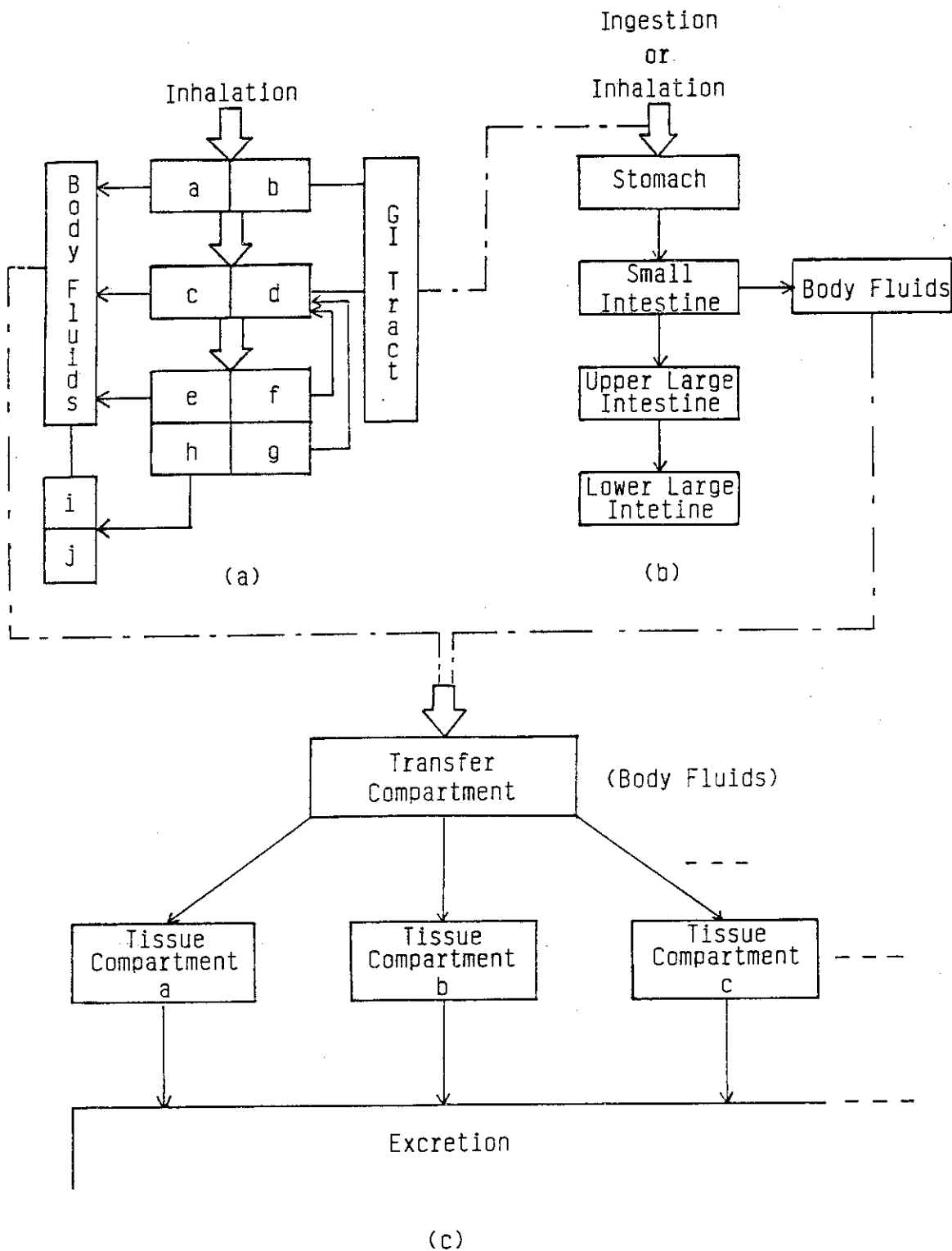


Fig. 1 Mathematical models to describe the kinetics of radionuclides used in the ICRP Publication 30; (a) Model of clearance from respiratory system, (b) Model of the kinetics in the gastrointestinal tract, (c) Model of the kinetics in the body except for the respiratory system and gastrointestinal tract.

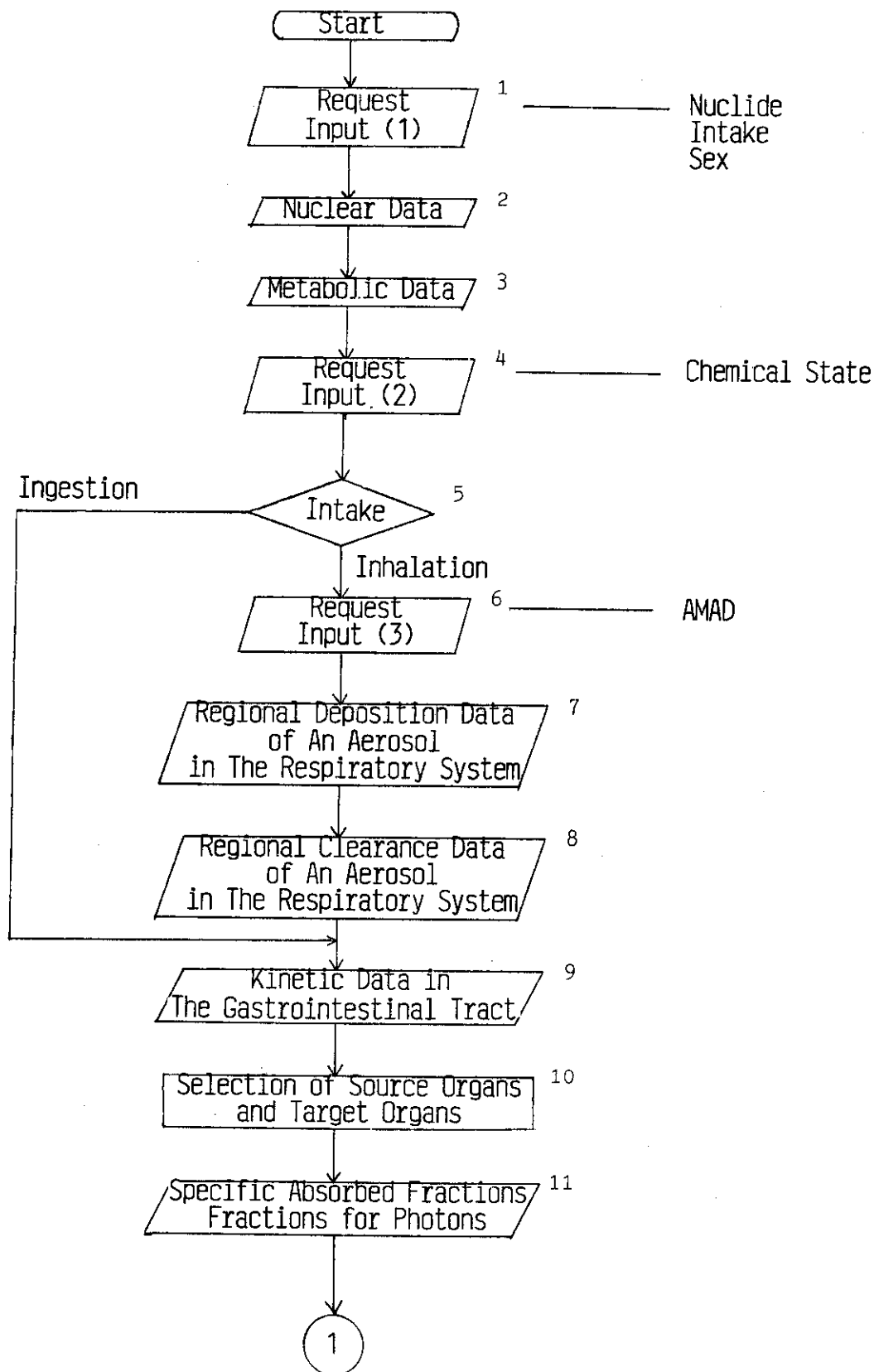


Fig. 2 Generic flow chart of the computer program INTEX.

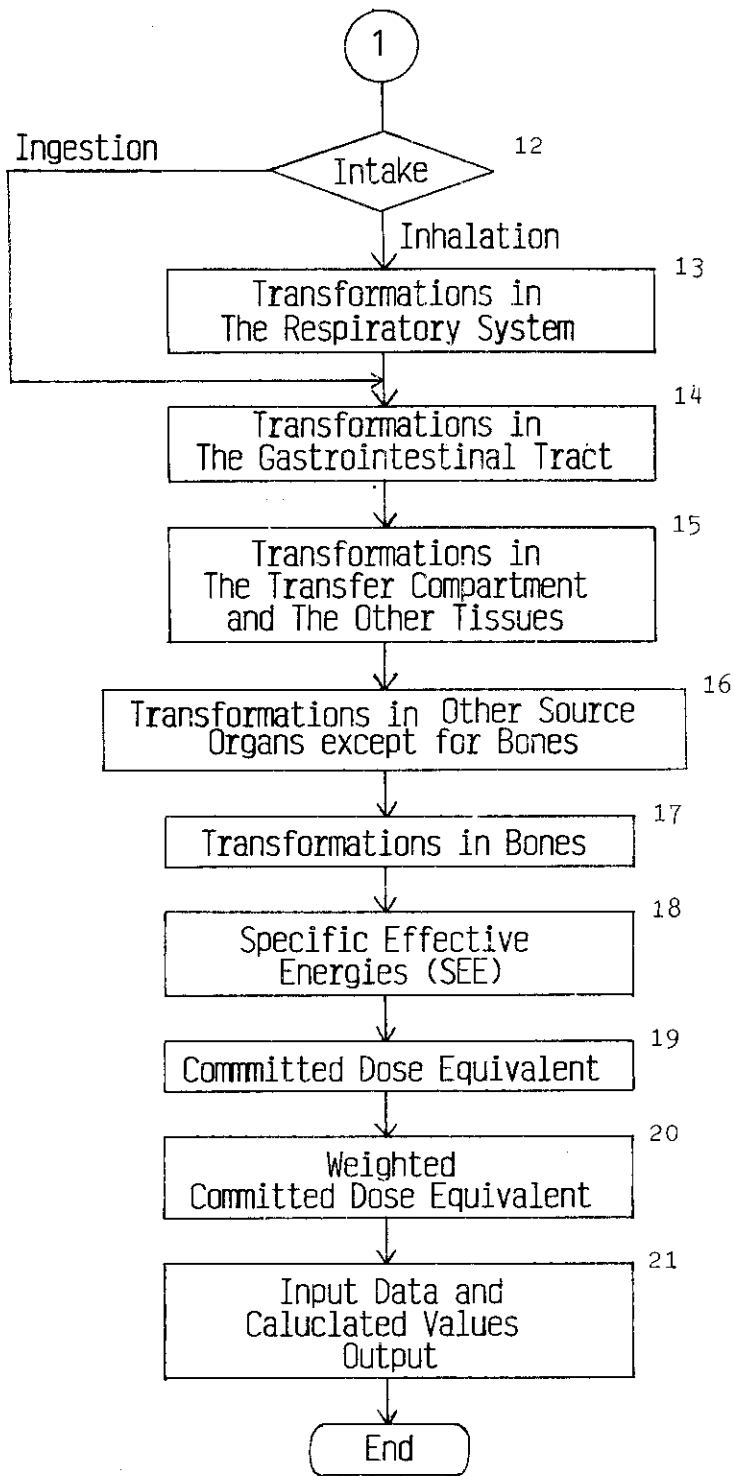


Fig. 2 (Continued)

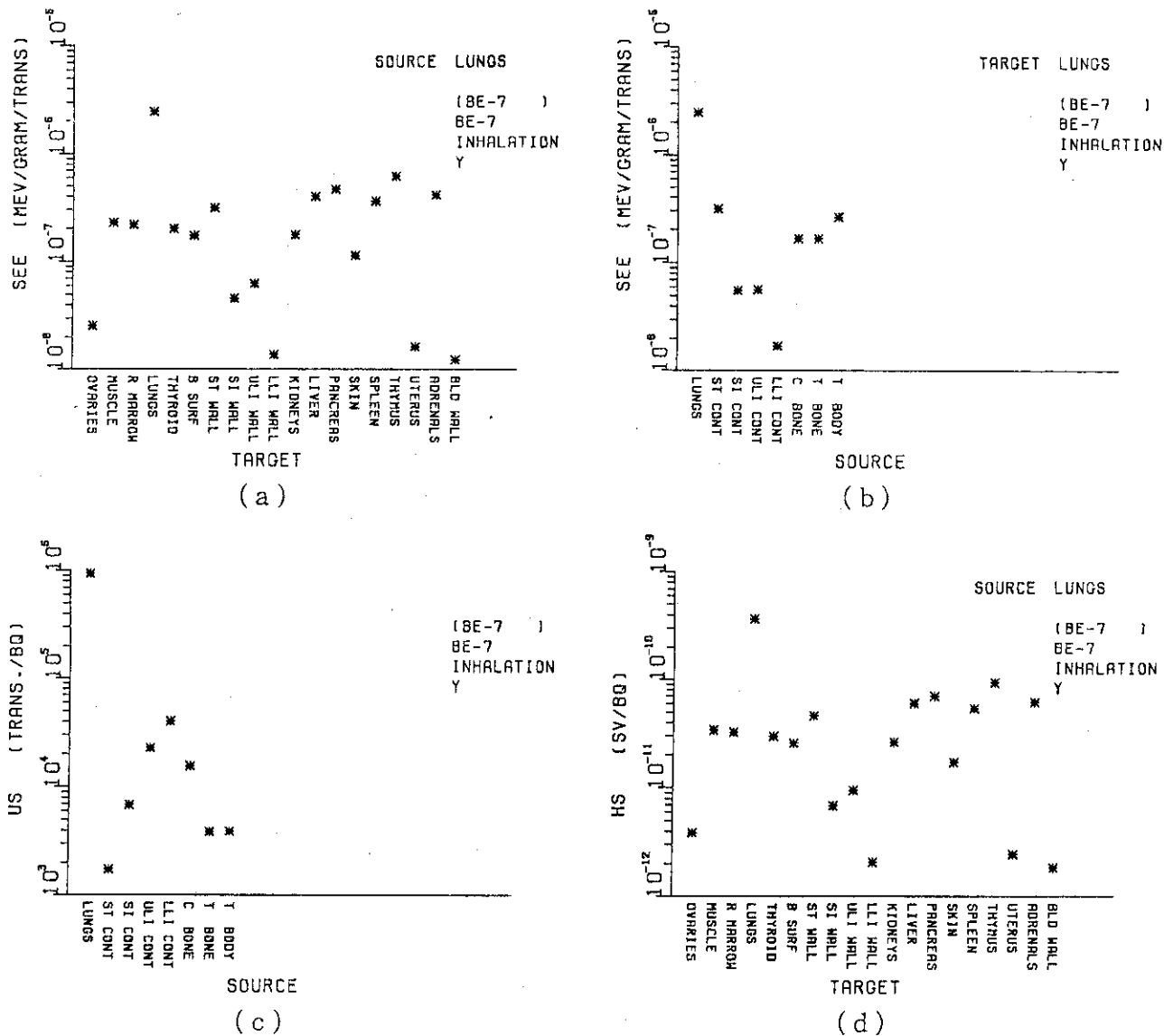


Fig. 3 Graphic output examples; (a) Specific Effective energies for each source organ, (b) Specific effective energies for each target organ, (c) Number of nuclear transformations in source organs, (d) Committed dose equivalent for each source organ, (e) Committed dose equivalent for each target organ, (f) Committed dose equivalent, (g) Committed dose equivalent, (a)-(f) for each radionuclide in the decay chain.

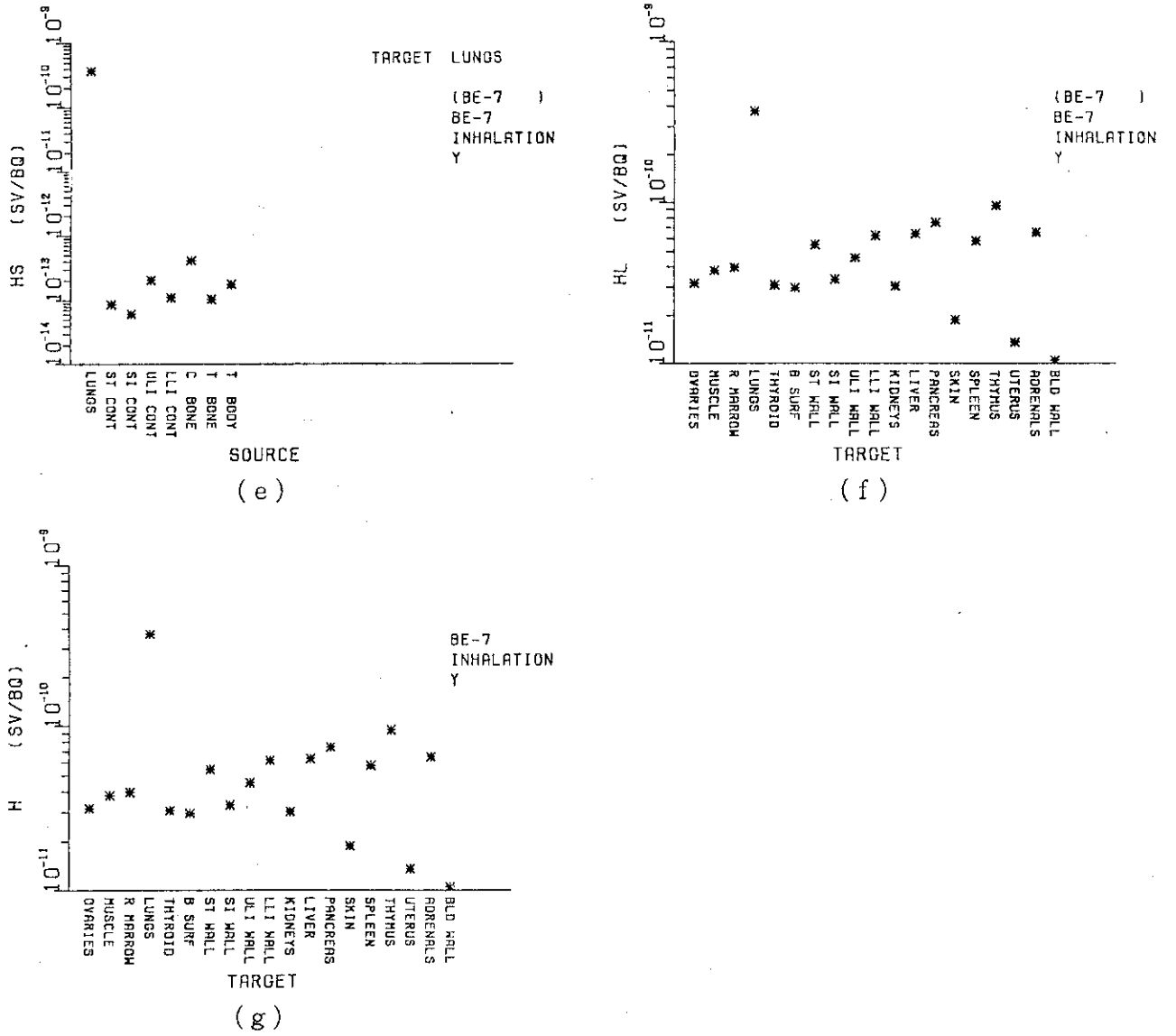


Fig. 3 (Continued)

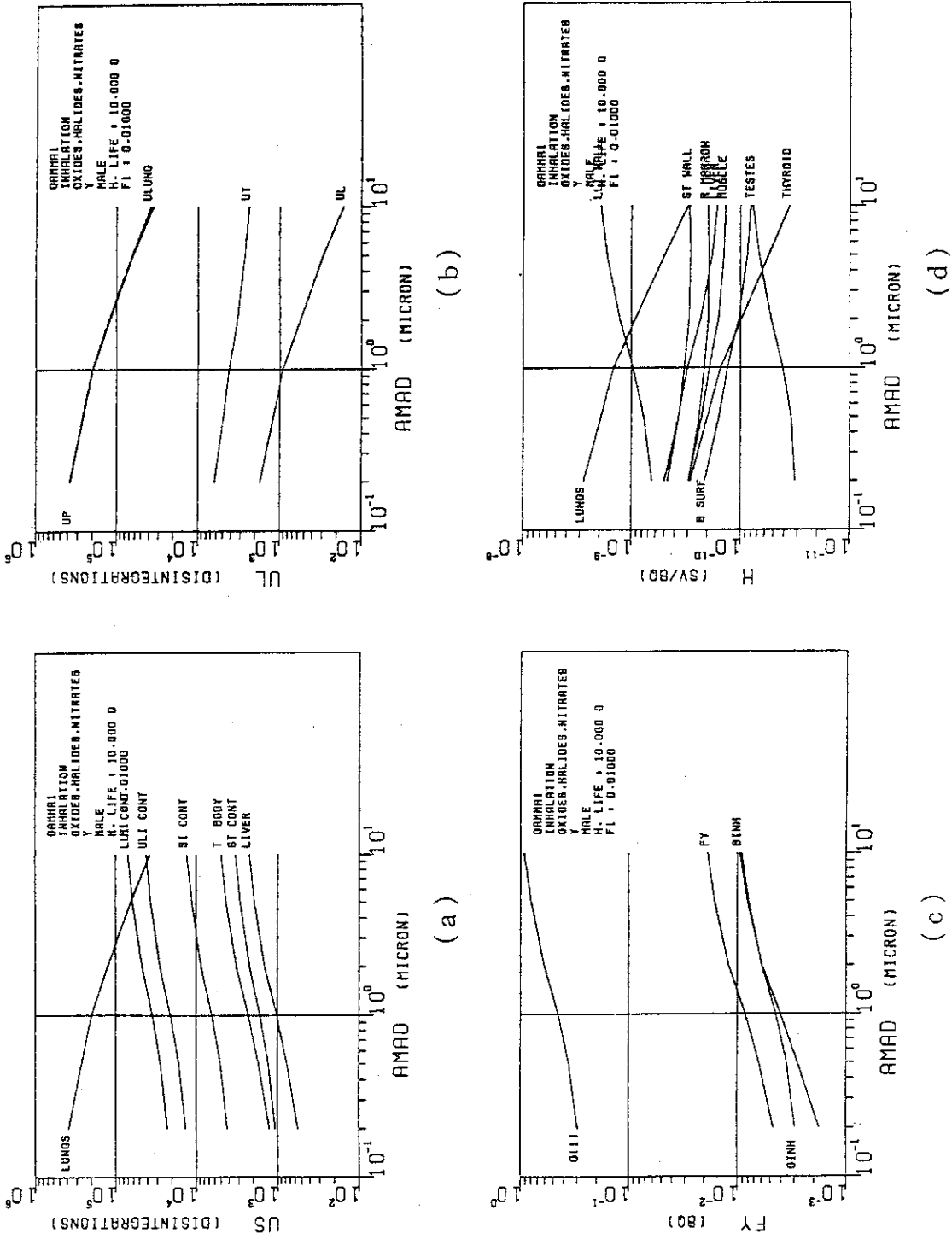


Fig. 4 Results in inhalation of the model nuclide Gammaal (inhalation class Y);
 (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent

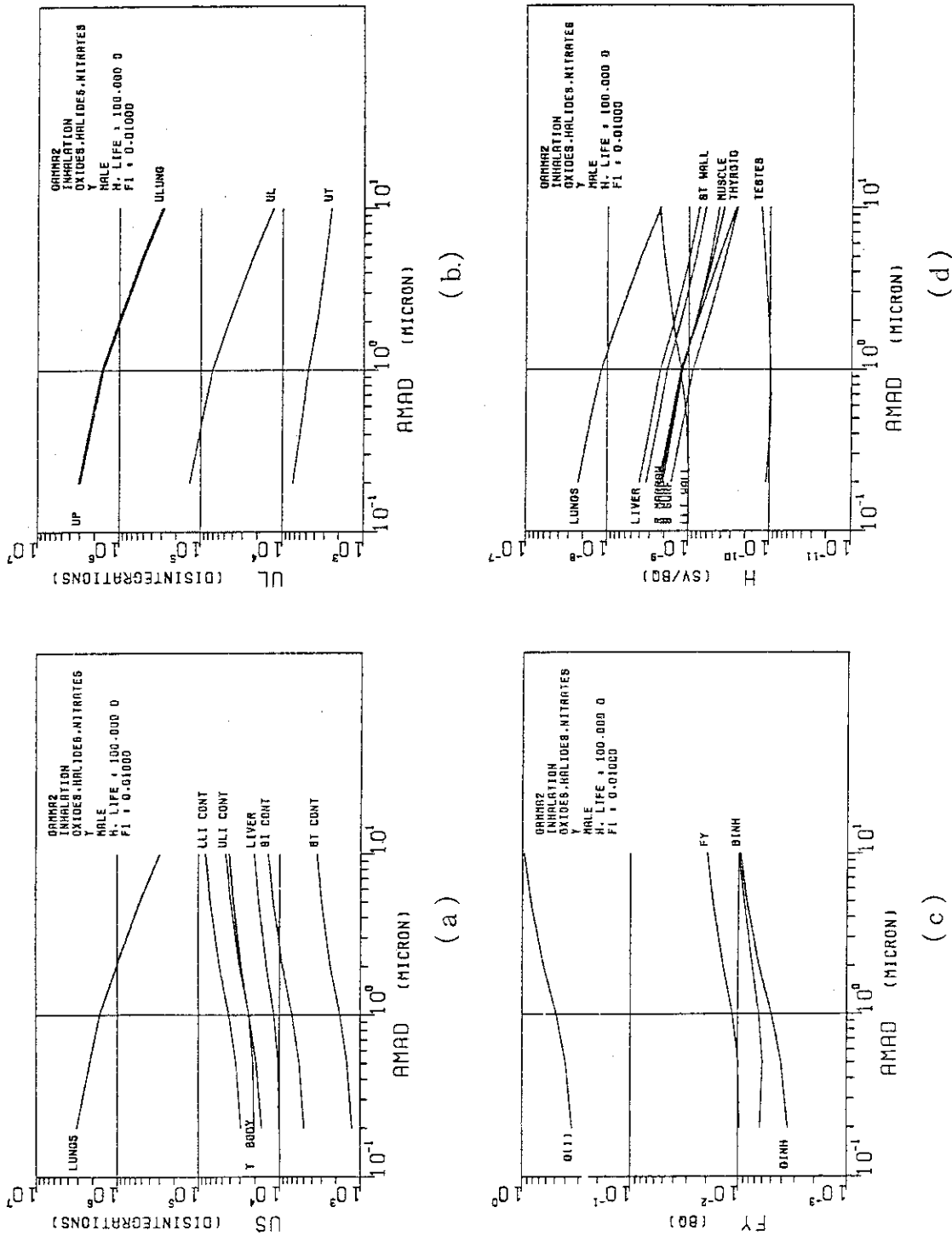


Fig. 5 Results in inhalation of the model nuclide Gamma2 (inhalation class Y);
 (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent

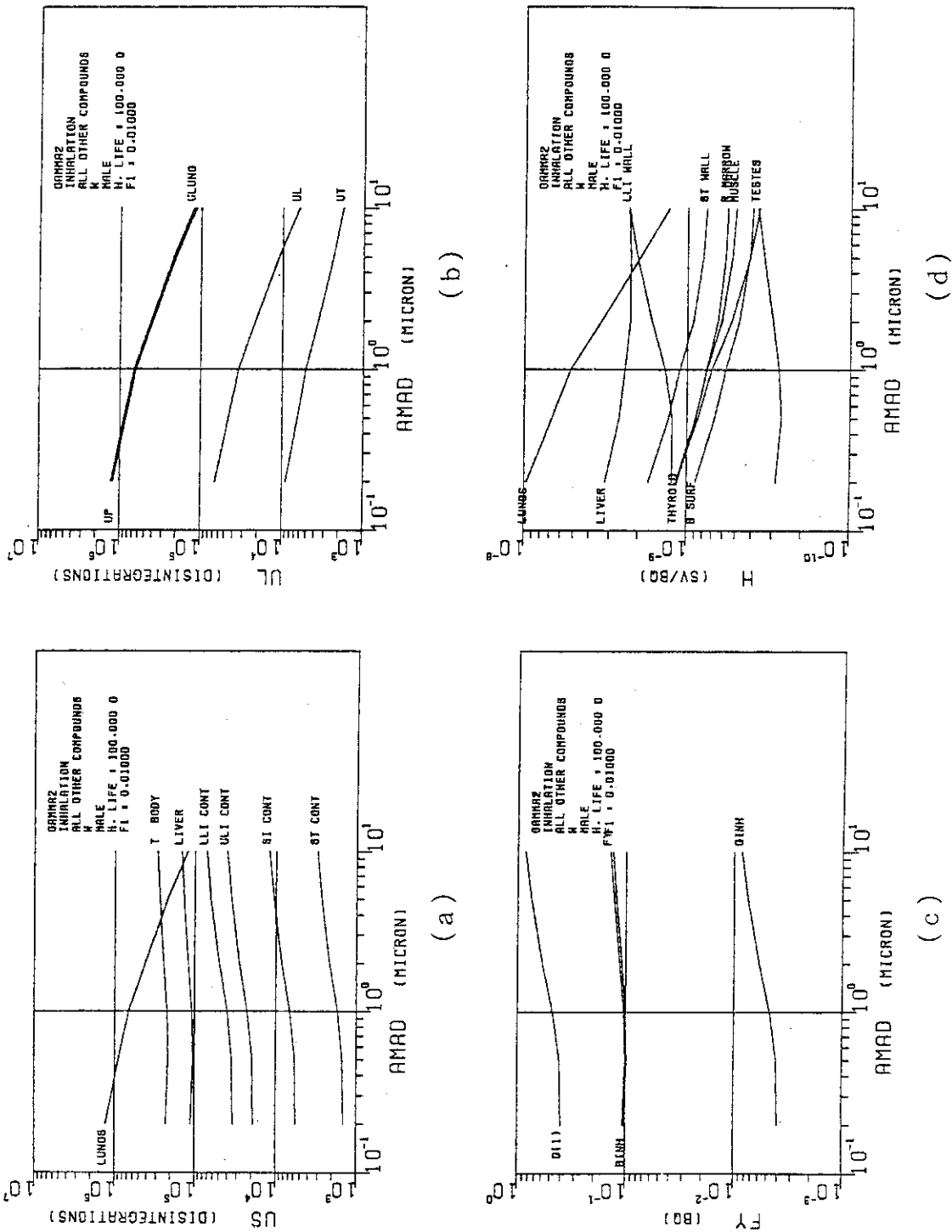


Fig. 6 Results in inhalation of the model nuclide Gamma2 (inhalation class W); (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent.

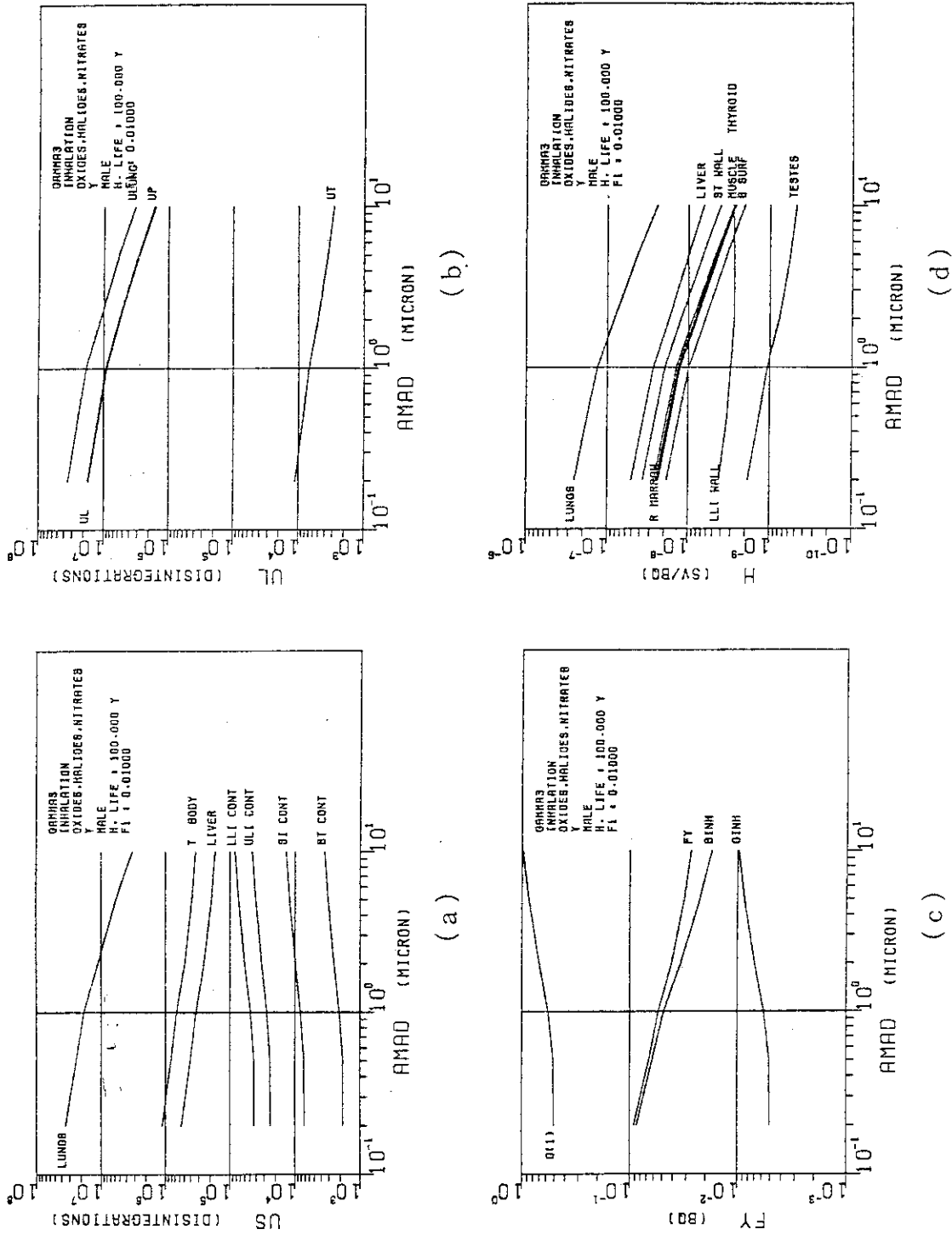


Fig. 7 Results in inhalation of the model nuclide Gamma3 (inhalation class Y);
 (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent.

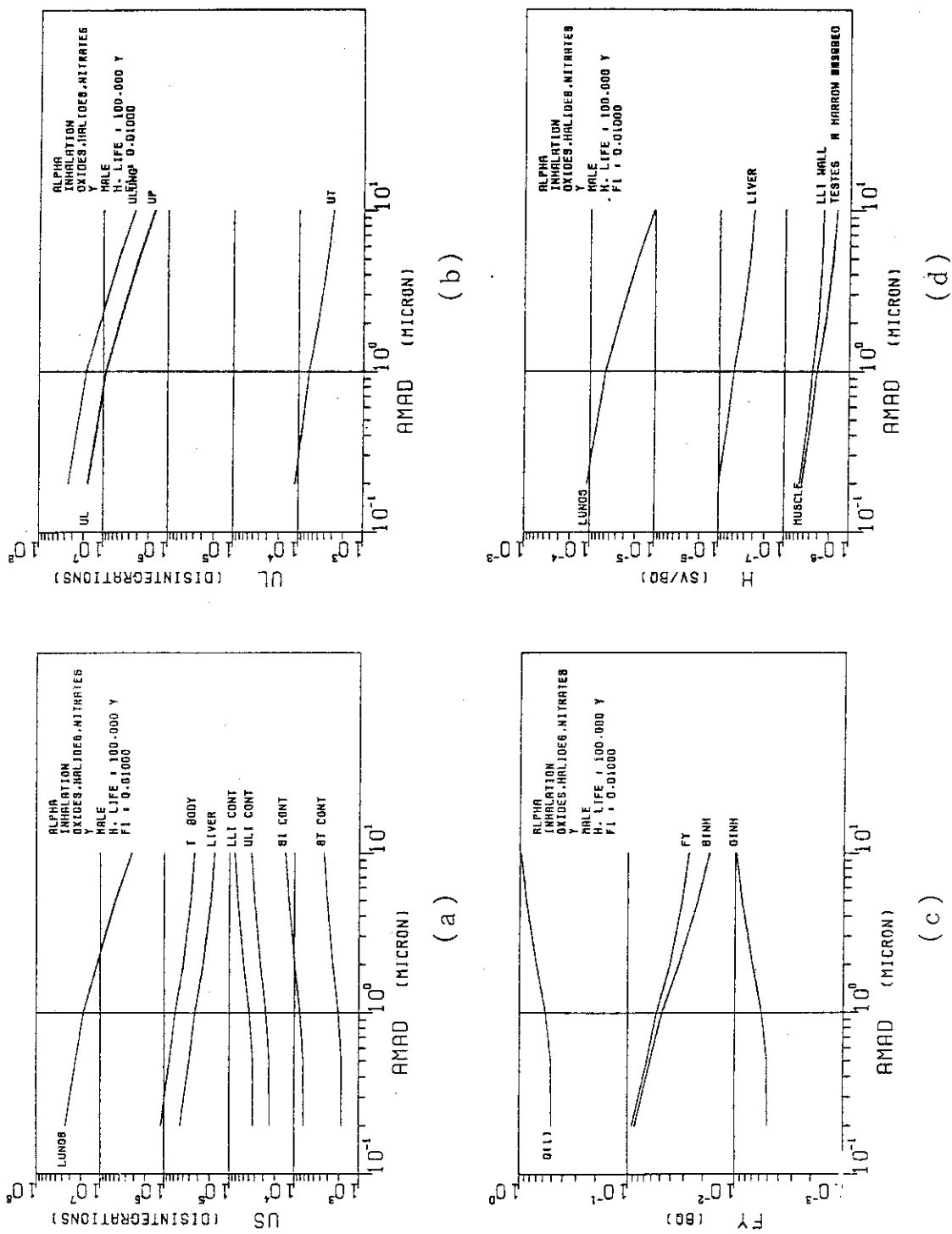


Fig. 8 Results in inhalation of the model nuclide Alpha (inhalation class Y);
 (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent.

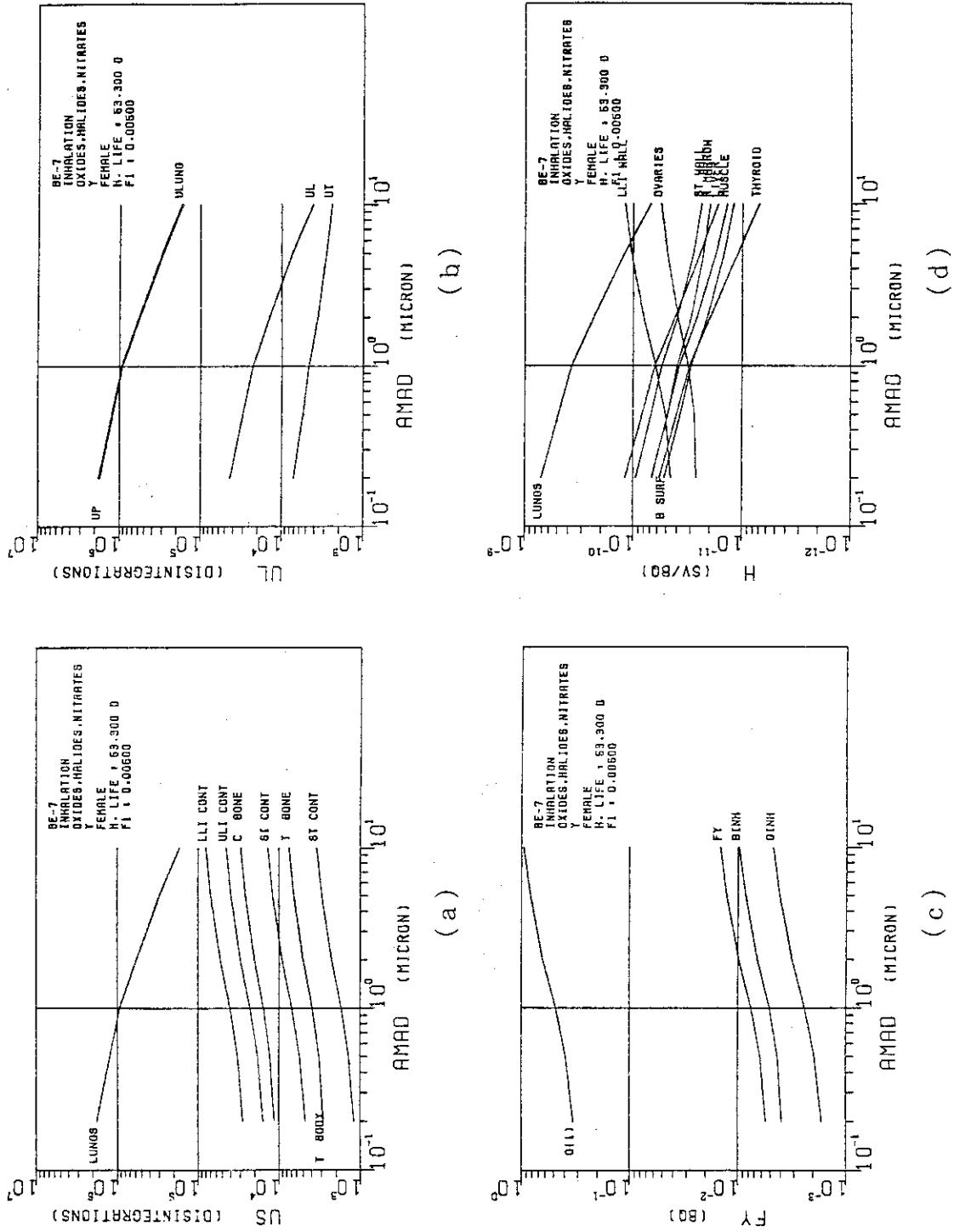


Fig. 9 Results in inhalation of Be-7 (inhalation class Y);
 (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent.

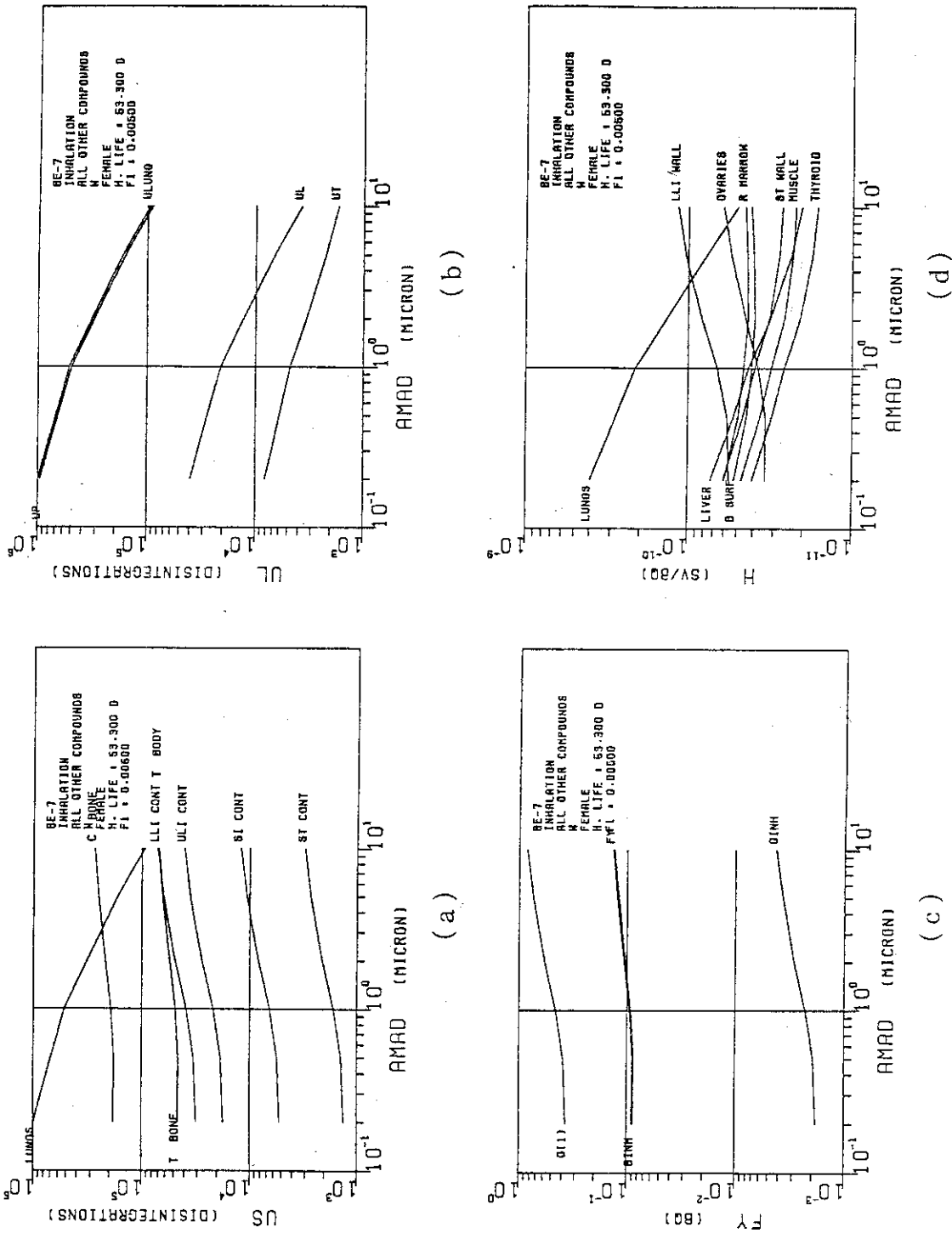


Fig. 10 Results in inhalation of Be-7 (inhalation class W);
 (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent.

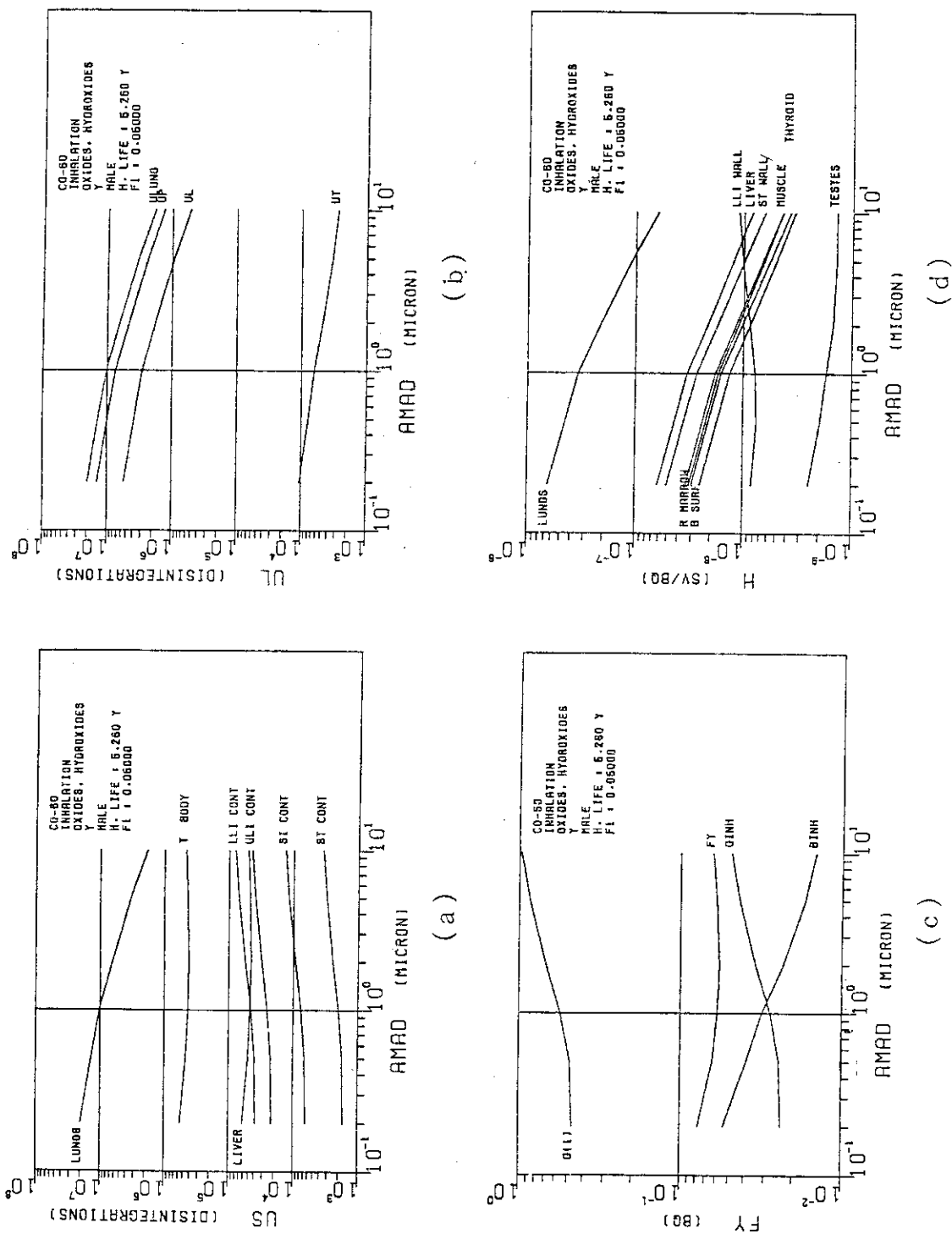


Fig. 11 Results in inhalation of Co-60 (inhalation class Y);
 (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent.

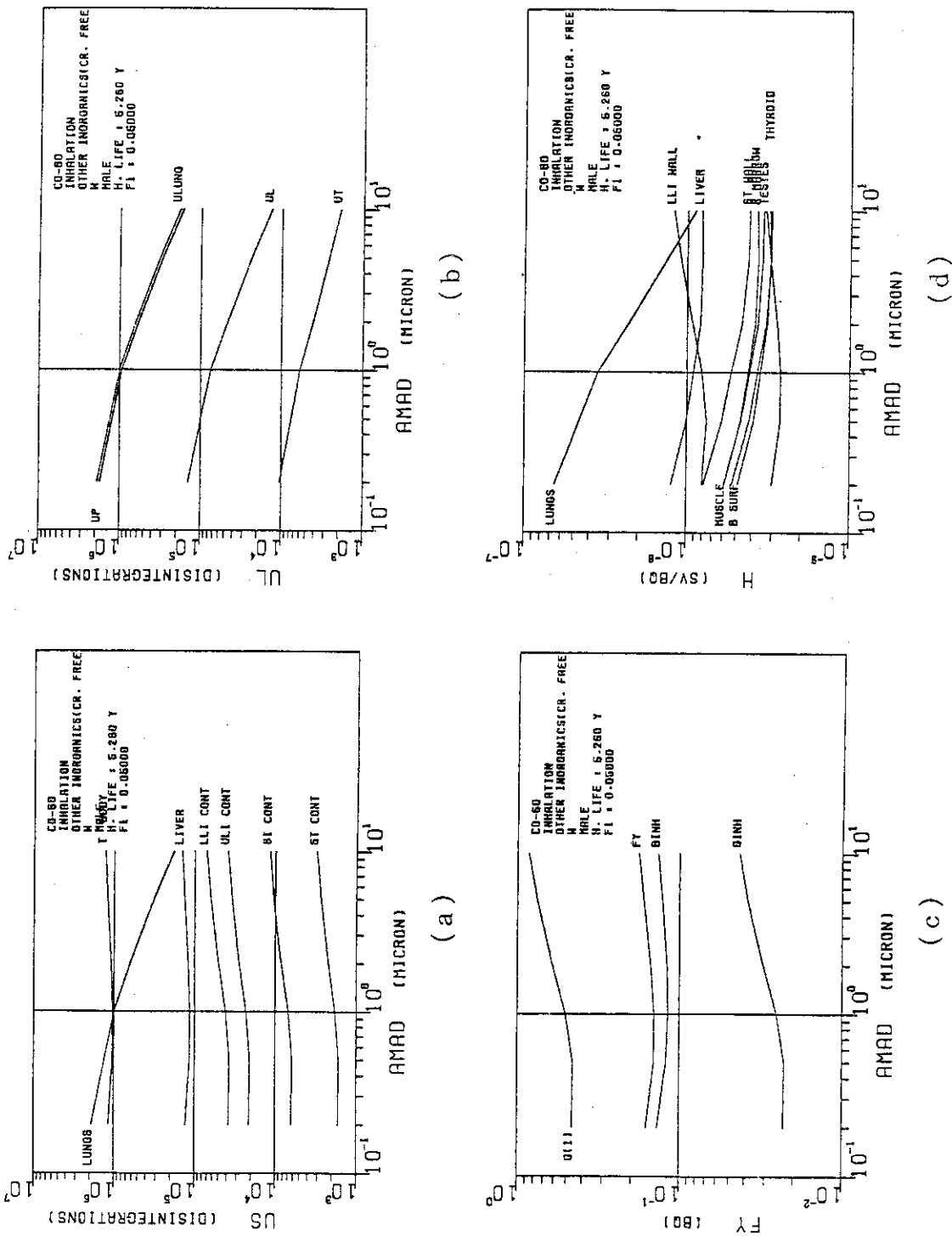


Fig. 12 Results in inhalation of Co-60 (inhalation class W);
 (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent.

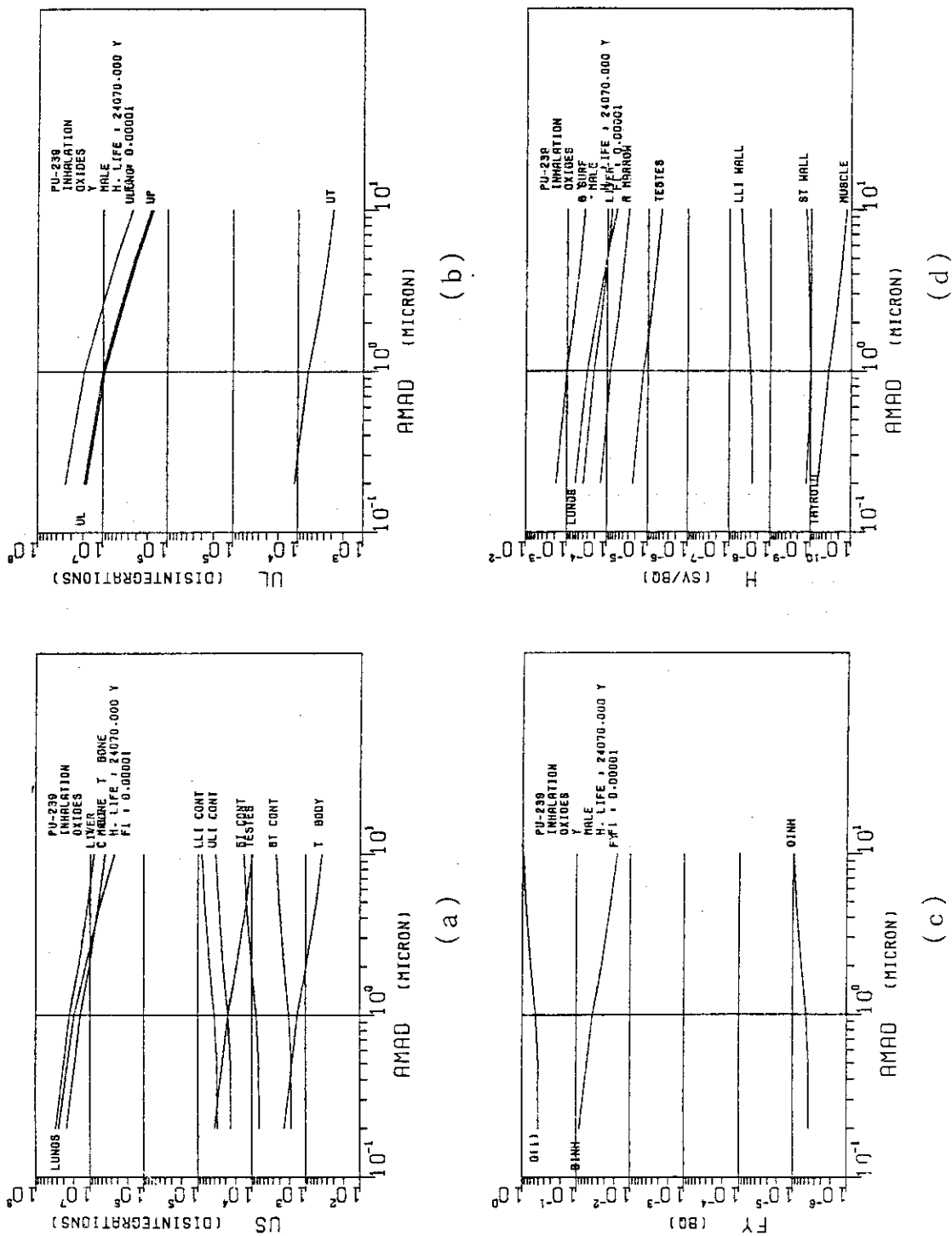


Fig. 13 Results in inhalation of Pu-239 (inhalation class Y); (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent.

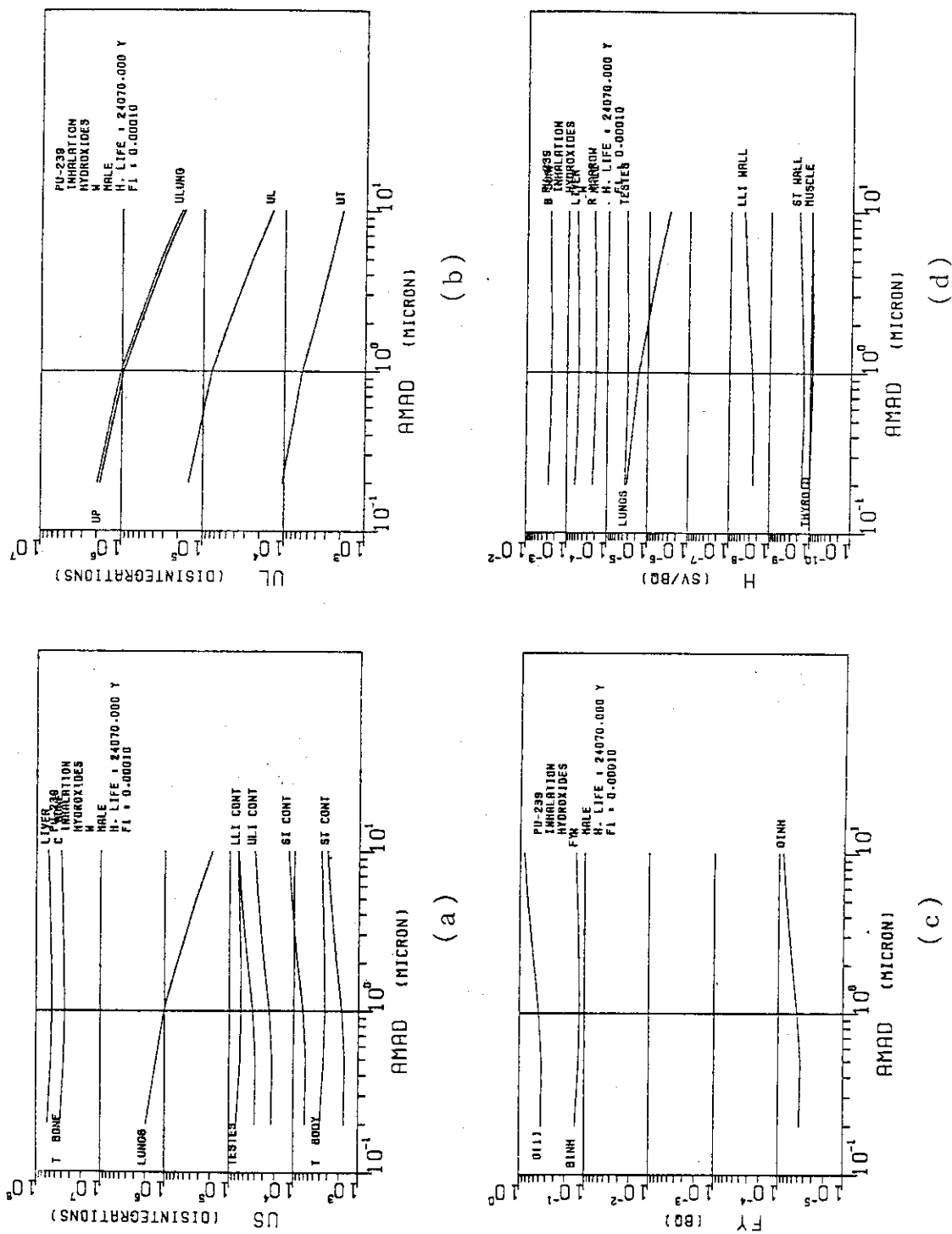


Fig. 14 Results in inhalation of Pu-239 (inhalation class W);
 (a) Number of nuclear transformations, (b) Number of partial nuclear transformations in the respiratory system, (c) Translocating activities to the body fluids, (d) Committed dose equivalent.