



JAEA-Data/Code

2006-015



JP0650465

# 中性子外部照射に対する年齢別臓器吸収線量・ 実効線量換算係数

Age-dependent Conversion Coefficients for Organ Doses  
and Effective Doses for External Neutron Irradiation

西崎 千博\* 遠藤 章 高橋 史明

Chihiro NISHIZAKI\*, Akira ENDO and Fumiaki TAKAHASHI

原子力基礎工学研究部門  
放射線防護研究グループ

Research Group for Radiation Protection  
Nuclear Science and Engineering Directorate

June 2006

日本原子力研究開発機構

JAEA-  
Data/Code

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

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

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report is issued by Japan Atomic Energy Agency irregularly.

Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel.81 29 282 6387, Fax.81 29 282 5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

## 中性子外部照射に対する年齢別臓器吸収線量・実効線量換算係数

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

西崎 千博\*, 遠藤 章, 高橋 史明

(2006年4月14日受理)

体外からの中性子照射に対する公衆の線量評価に用いるために、公衆を代表する6種類の年齢群(成人、15歳、10歳、5歳、1歳及び新生児)について、計算シミュレーション手法を用い、人体各臓器の吸収線量、実効線量を与える換算係数を計算した。6年齢群の体格を表現した数式人体ファントム及びモンテカルロ放射線輸送コードを用いて、熱エネルギーから20 MeVまでの20種類のエネルギーの中性子に対し、前方照射及び回転照射において、21種類の臓器の吸収線量を計算した。計算された吸収線量に基づき、ICRP 1990年勧告で定義された実効線量を算定し、単位フルエンスあたりの臓器吸収線量、実効線量を与える換算係数として整備した。得られた換算係数は、核燃料施設、加速器施設等の周辺公衆に対する線量評価に利用できる。

Age-dependent Conversion Coefficients for Organ Doses and Effective Doses  
for External Neutron Irradiation

Chihiro NISHIZAKI\*, Akira ENDO and Fumiaki TAKAHASHI

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

(Received April 14, 2006)

To utilize dose assessment of the public for external neutron irradiation, conversion coefficients of absorbed doses of organs and effective doses were calculated using the numerical simulation technique for six different ages (adult, 15, 10, 5 and 1 years and newborn), which represent the member of the public. Calculations were performed using six age-specific anthropomorphic phantoms and a Monte Carlo radiation transport code for two irradiation geometries, anterior-posterior and rotational geometries, for 20 incident energies from thermal to 20 MeV. Effective doses defined by the 1990 Recommendation of ICRP were calculated from the absorbed doses in 21 organs. The calculated results were tabulated in the form of absorbed doses and effective doses per unit neutron fluence. The calculated conversion coefficients are used for dose assessment of the public around nuclear facilities and accelerator facilities.

Keywords: Dose Conversion Coefficient, External Exposure, Neutron, Member of the Public,  
Age-dependent Dose, Effective Dose, Organ Dose.

---

\* Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

## 目 次

1 序 論 . . . . .	1
2 計 算 . . . . .	2
2.1 数式人体ファントム . . . . .	2
2.2 計算コード, 断面積データ, カーマ係数 . . . . .	5
2.3 照射条件 . . . . .	5
2.4 実効線量の計算 . . . . .	6
3 結果及び考察 . . . . .	8
3.1 成人に対する臓器吸収線量及び実効線量の比較 . . . . .	8
3.2 年齢別実効線量の比較 . . . . .	13
3.3 年齢別臓器吸収線量及び実効線量換算係数 . . . . .	16
3.4 実効線量のエネルギー依存性 . . . . .	49
3.5 実効線量へ寄与する相互作用の年齢依存性 . . . . .	51
4 結 論 . . . . .	53
謝 辞 . . . . .	53
参考文献 . . . . .	54

## Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Calculation</b>	<b>2</b>
2.1	Mathematical Anthropomorphic Phantoms	2
2.2	Computer Code, Cross Section Data and Kerma Coefficients	5
2.3	Irradiation Geometry	5
2.4	Calculation of Effective Dose	6
<b>3</b>	<b>Results and Discussion</b>	<b>8</b>
3.1	Comparison of Organ Doses and Effective Doses for Adult	8
3.2	Comparison of Age-dependent Effective Doses	13
3.3	Age-dependent Conversion Coefficients for Organ Doses and Effective Doses	16
3.4	Energy Dependence of Effective Doses	49
3.5	Age Dependence of Interactions Contribute to Effective Doses	51
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>53</b>
<b>Acknowledgments</b>		<b>53</b>
<b>References</b>		<b>54</b>

## 1 序 論

ウラン資源を有効利用するための核燃料サイクル技術の確立、加速器等の放射線利用の推進を図るために、放射線作業者及び公衆に対し、信頼性の高い線量評価法を確立し安全を確保する必要がある。プルトニウム、マイナーアクチノイド燃料を利用する燃料サイクルでは、使用済み燃料の中間貯蔵、再処理、燃料加工の一連の過程において、自発核分裂核種から発生する中性子や $\gamma$ 線に対する被ばく防護が必要である<sup>1)</sup>。加速器利用においては、特に治療及び診断に用いられる医療用加速器が、小型化等の高性能化に伴い医療機関への普及が進んでいる。そのため、公衆の居住地域近傍に加速器が設置される場合には、施設から発生する中性子等に対する周辺住民の線量評価が必要となる<sup>2)</sup>。

放射線防護において人体の被ばくを表す量として、国際放射線防護委員会 ICRP (International Commission on Radiological Protection) により定義された人体臓器・組織の吸収線量(以下、臓器吸収線量とする)及び等価線量、実効線量の“防護量”が用いられている<sup>3)</sup>。これらの防護量を評価するために、体内の放射性核種の摂取量、フルエンス等の放射線場を特徴づける量と臓器吸収線量、実効線量とを関連づける換算係数が重要な役割を果たしている。公衆に対する線量評価においては、線量評価に影響する年齢等の要因を考慮する必要がある。そのため、体内に摂取した放射性核種による内部被ばくに対しては、放射性核種の体内動態等の年齢依存性を考慮し、成人、15歳、10歳、5歳、1歳及び新生児の6種類の年齢群に対する線量係数が、ICRP により評価され提供されている<sup>4-9)</sup>。これに対し、体外の線源による外部被ばくについては、主に成人に対する換算係数が評価され<sup>10,11)</sup>、年齢を考慮した換算係数は、代表的な被ばく形態に対して計算され成人に対する値との比較がなされている。たとえば、中性子外部被ばくに対し、山口<sup>12)</sup>は6種類の年齢群について実効線量の年齢依存性を解析した。また Chou ら<sup>13)</sup>は、様々な中性子照射条件において実効線量を計算した。

以上のように、これまで中性子による外部被ばくに対して、実効線量の年齢依存性が解析されてはいるが、山口<sup>12)</sup>の計算では、実効線量評価の基になる臓器吸収線量は、当時の計算機能力の制約から、いくつかの臓器において10%を超えるやや大きな不確かさがある。また、Chou ら<sup>13)</sup>は実効線量のみを与え、臓器線量を評価するためのデータは提供していない。そのため、中性子に対する公衆の線量評価において、内部被ばく評価で考慮されている年齢群との整合を持った臓器吸収線量、実効線量に関する換算係数が必要である。

本研究では、公衆に対する線量評価データを提供することを目的とし、内部被ばく線量評価で対象とされている6種類の年齢群について、最新の放射線輸送計算コード、断面積データ等を用い、中性子による外部被ばくに対する臓器吸収線量、実効線量の換算係数を評価した。

## 2 計 算

### 2.1 数式人体ファントム

公衆を代表する年齢群に対する臓器吸収線量の計算は、成人、15歳、10歳、5歳、1歳及び新生児の体格を表現したMIRD型数式人体ファントム(以下、MIRD型ファントムとする)を用いて行った。図2.1にファントムの概観、図2.2にファントム内部の各臓器・組織の位置を示す。このファントムは、1960年代後半に米国核医学会内部放射線量(MIRD: Medical Internal Radiation Dose)委員会が内部被ばく線量計算用に開発したもので、一次または二次方程式で記述される幾何形状の組み合わせにより、人体及び内部の臓器形状を表現している。本研究で用いたファントムは、Snyderら<sup>14,15)</sup>により開発されたモデルに基づき、Cristyが年齢群別に設計し<sup>16)</sup>、改良したものである<sup>17)</sup>。このモデルは雌雄同体で、乳房と両性の生殖腺、すなわち睾丸及び卵巣を有している。数式で表現されたファントムを、ソフトウェアBodyBuilder<sup>18)</sup>を用いて、2.2節で述べる放射線輸送計算コードの入力形式に従ったデータに変換し、さらに以下に述べる改良を加えた。MIRD型ファントムは、本来内部被ばく計算用に開発されたため、体外からの照射に対して、甲状腺の線量を適切に評価できないことが指摘されている<sup>19)</sup>。そこで、甲状腺の線量を正確に評価するために、山口のモデル<sup>20)</sup>を参考に、ファントムの顔面下部を削り取り新たに首を設けるとともに、甲状腺の位置を変更した(図2.3)。

各臓器・組織の元素組成及び密度は、軟組織、骨組織、肺組織で近似し、成人から1歳児まで、新生児のそれぞれに対し、表2.1に示すデータを適用した<sup>21)</sup>。すなわち、骨、肺には、それぞれの元素組成及び密度を、それ以外の臓器・組織には、軟組織の元素組成及び密度を適用した。

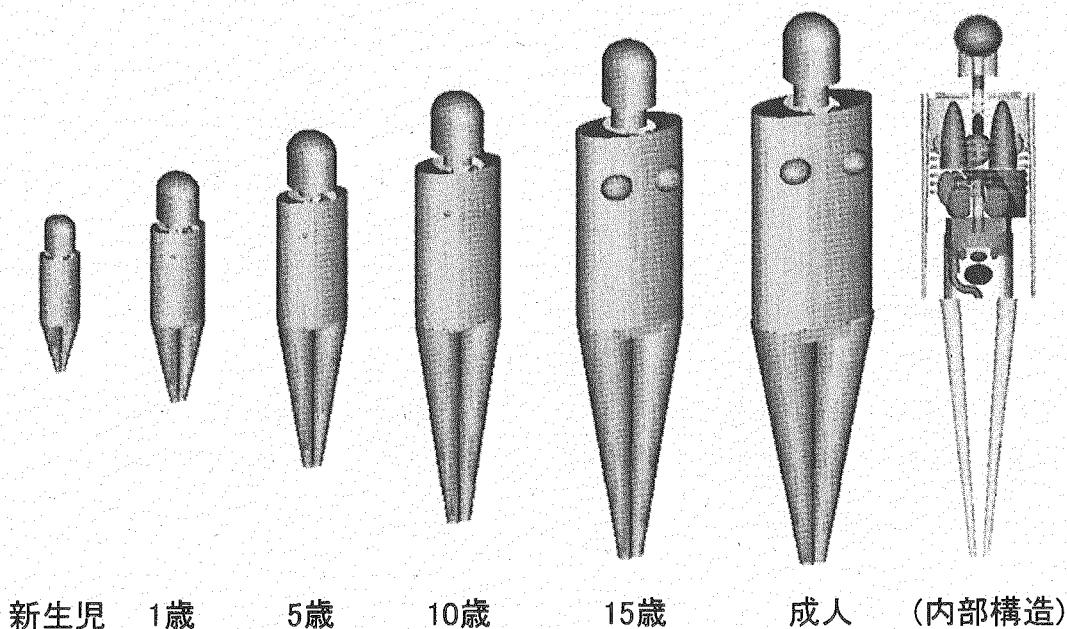


図2.1 計算に用いたMIRD型数式人体ファントム

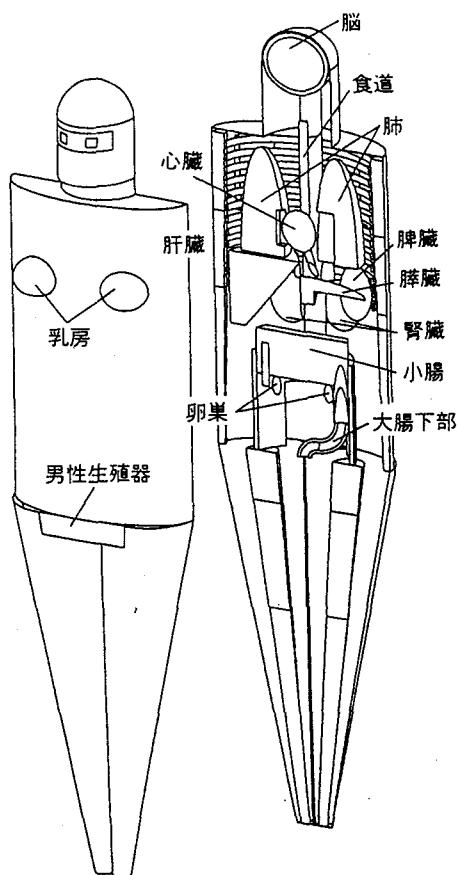


図 2.2 MIRD 型ファントムの臓器・組織

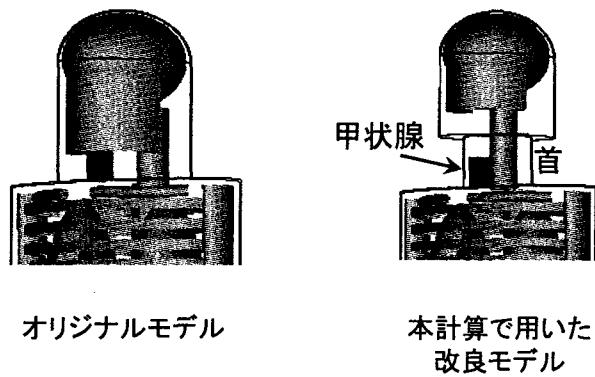


図 2.3 首及び甲状腺のモデル

表 2.1 ファントムの各組織の元素組成及び密度

元素	新生児を除くファントム			新生児のファントム		
	重量パーセント			重量パーセント		
	軟組織	骨組織	肺組織	軟組織	骨組織	肺組織
H	10.454	7.337	10.134	10.625	7.995	10.134
C	22.663	25.475	10.238	14.964	9.708	10.238
N	2.490	3.057	2.866	1.681	2.712	2.866
O	63.525	47.893	75.752	71.830	66.811	75.752
F	0	0.025	0	0	0	0
Na	0.112	0.326	0.184	0.075	0.314	0.184
Mg	0.013	0.112	0.007	0.019	0.143	0.007
Si	0.030	0.002	0.006	0	0	0.006
P	0.134	5.095	0.080	0.179	3.712	0.080
S	0.204	0.173	0.225	0.240	0.314	0.225
Cl	0.133	0.143	0.266	0.079	0.140	0.266
K	0.208	0.153	0.194	0.301	0.148	0.194
Ca	0.024	10.190	0.009	0.003	7.995	0.009
Fe	0.005	0.008	0.037	0.004	0.008	0.037
Zn	0.003	0.005	0.001	0	0	0.001
Rb	0.001	0.002	0.001	0	0	0.001
Sr	0	0.003	0	0	0	0
Zr	0.001	0	0	0	0	0
Pb	0	0.001	0	0	0	0
密度 ( $\text{g cm}^{-3}$ )	1.04	1.4	0.296	1.04	1.22	0.296

## 2.2 計算コード, 断面積データ, カーマ係数

MIRD型ファントム中における中性子及び $\gamma$ 線の輸送, 各臓器におけるエネルギー付与は, 汎用連続エネルギーモンテカルロ放射線輸送計算コード MCNP-4C2<sup>22)</sup>を用いて計算した。輸送計算断面積データは, 中性子に対しては日本の最新の評価済み核データライブラリ JENDL-3.3<sup>23)</sup>から MCNP-4C 用に編集された FSXLIB-J33<sup>24)</sup>を用いた。熱中性子束の計算精度は, 人体中の H(n,  $\gamma$ )D 反応,  $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$  反応によるエネルギー付与に影響するため, 热中性子散乱に大きく寄与する人体組織中の水素に対しては, 300 K の水の熱中性子散乱則データ ( $S(\alpha, \beta)$  データ) を適用した。 $\gamma$ 線の輸送計算には, 光子用断面積データ MCPLIB02<sup>25)</sup>を用いた。

中性子と人体構成元素との原子核との反応によって生成される荷電粒子に基づく吸収線量は, 核反応で発生した荷電粒子がそれらの発生点で全てのエネルギーを物質に付与すると仮定するカーマ近似を適用し計算した。臓器の平均吸収線量の計算では対象となる領域が大きいため, 20 MeV 以下の中性子に対しては, カーマ近似が適応できることが示されている<sup>3)</sup>。本計算では, 入射中性子エネルギー(以下, 入射エネルギーとする)の上限値が 20 MeV であることから, この条件を満たしている。これにより, 中性子の核反応によって生成される荷電粒子の挙動を全て追跡することなく, 吸収線量を短時間で精度良く計算できる。中性子に対するカーマ係数は, 軟組織, 肺組織及び赤色骨髄については, 国際放射線単位測定委員会 ICRU (International Commission on Radiological Units and Measurements) Report 46<sup>26)</sup>のデータ, 骨組織については Caswell らのデータ<sup>27)</sup>から編集された骨平均のカーマ係数<sup>28)</sup>を適用した。これらを臓器毎の中性子フルエンスに乘じ, 吸収線量を得た。

光子に対しては, MCNP コードのエネルギー付与計算機能を用いて, 各臓器におけるエネルギー付与を計算した。そのため, 骨中に分布し単独の臓器領域として区分できない赤色骨髄についてのみ, ICRU Report 46<sup>26)</sup>の赤色骨髄に対する質量減弱係数に基づき, カーマ近似を適用し吸収線量を計算した。Drexler ら<sup>29)</sup>は, 光子外部照射に対する赤色骨髄の線量について, 光子との相互作用により発生した二次電子を輸送した場合の結果とカーマ近似の結果とを比較している。それによると両者は, 入射光子 3 MeV の場合に 5 %, 6 MeV の場合に 10 %以内で一致する。本計算条件で人体中で発生する主要な $\gamma$ 線は, H(n,  $\gamma$ )D 反応による 2.2 MeV の $\gamma$ 線である<sup>10)</sup>ため, これより赤色骨髄の線量は, カーマ近似を用いて適切に評価できると判断した。

光子外部照射におけるカーマ近似の適用限界については, 斎藤ら<sup>30)</sup>がより詳細に検討している。人体深部にある臓器に対しては, 10 MeVまでの光子について, カーマ近似により吸収線量が適切に求められる。しかし, 人体表面にある皮膚では, 光子エネルギーが 500 keV を超えると, 二次電子の飛程が長くなり荷電粒子平衡が成立しなくなる。その結果, 例えば 2 MeV の光子入射の場合, カーマ近似は皮膚の吸収線量を約 30 %過大評価する。

## 2.3 照射条件

ファントムの照射は, 真空中に置かれたファントムに対し, 図 2.4 に示す前方-後方(AP: Anterior-posterior) 照射, 回転(ROT: Rotational) 照射のふたつの条件について行った。AP は, 中性子がア

ントムの長軸と直角の方向からファントムの前面に入射する条件である。一方、ROTは、中性子の平行ビームがファントムの長軸に直角の方向から入射し、この長軸の周りに一様な速度でファントムを回転させる条件である。ROT照射は放射線場の中でランダムに動く人が照射される状況と見なされるため、環境中における公衆の被ばく形態を模擬している。

ファントムへの入射エネルギーは、Nabelssi ら<sup>31)</sup>、山口<sup>12)</sup>の条件を参考に、熱エネルギーから20 MeV の間で 20 点を選定した。計算に用いる中性子のヒストリー数は、山口<sup>12)</sup>、Chou ら<sup>13)</sup>の計算よりも小さな不確かさの計算値を得るために、各臓器の吸収線量の相対誤差が 3 %以下となるように設定した。

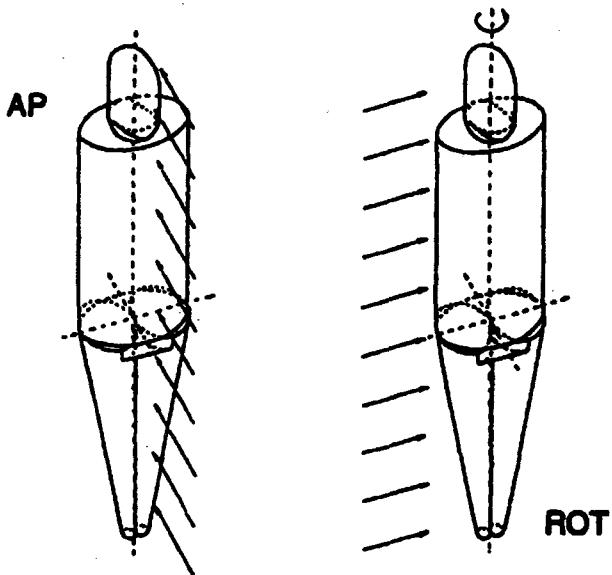


図 2.4 中性子の照射条件<sup>10)</sup> AP: 前方-後方照射, ROT: 回転照射

## 2.4 実効線量の計算

以上の手順で計算された各臓器の吸収線量から、ICRP 1990 年勧告<sup>3)</sup>の定義に基づき、等価線量、実効線量を計算した。等価線量  $H_T$  ( $\text{J kg}^{-1}$ , Sv) は、次式により評価される。

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.1)$$

ここで、 $w_R$  は放射線荷重係数で放射線の種類やエネルギーによる生物学的效果の違いを補正するための係数、 $D_{T,R}$  (Gy) は計算シミュレーションで得た放射線  $R$  による臓器  $T$  における平均吸収線量である。本計算では、中性子エネルギー  $E_n$  (MeV) の関数として次式<sup>3)</sup> で定義される  $w_R$  を用いた。

$$w_R = 5 + 17 \exp \left[ \frac{-(\ln(2E_n))^2}{6} \right] \quad (2.2)$$

各臓器の等価線量  $H_T$  に基づき、実効線量  $E$  (Sv) は次式で計算される。

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (2.3)$$

ここで、 $w_T$  は組織荷重係数で、放射線被ばくによるがん、遺伝的影響の誘発に関する生物効果比の値を代表するように、全身が均等に照射された場合の人体の全損害 (Detriment) に対するその臓器の損害割合として算定された値である。ICRP 1990 年勧告で定義された  $w_T$  を表 2.2 に示す。

表 2.2 各臓器・組織に対する組織荷重係数

臓器または組織	組織荷重係数 $w_T$
生殖線	0.20
骨髄(赤色), 結腸, 肺, 胃	0.12
膀胱, 乳房, 肝臓, 食道, 甲状腺	0.05
皮膚, 骨表面	0.01
残りの臓器・組織*	0.05

\* 残りの臓器・組織は次の通りである: 副腎, 脳, 大腸上部, 小腸, 肝臓, 筋肉, 脾臓, 脾臓, 胸腺及び子宮。

本計算では、等価線量及び実効線量の算定において、以下の条件を考慮した。

1. 実効線量を算定するために、ICRP 1990 年勧告では、表 2.2 に示した 12 の特定の臓器・組織と、10 の臓器・組織からなる“残りの臓器・組織”を規定した。その後 ICRP は、Publ. 69<sup>6)</sup>において、10 の残りの臓器のうち、大腸上部は特定の臓器・組織に区分されている結腸に含まれているとし、残りの臓器から除外した。本計算では、この新たな臓器区分に従い大腸上部は結腸に含ませ、残りの 9 つの臓器の吸収線量を算術平均し、“残りの臓器・組織”的吸収線量を求めた。
2. 本計算で用いた MIRD 型ファントムは雌雄同体で、乳房と両性の生殖腺(睾丸及び卵巣)を有している。等価線量の算定において、生殖腺の吸収線量は、睾丸または卵巣の吸収線量の大きな値を用いた。
3. 特定臓器に含まれる骨表面の吸収線量は、ICRP Publ. 74<sup>10)</sup> で検討されているように、骨の平均吸収線量で代用した。

最終的な結果は、ICRP Publ. 74, ICRU Report 57 と同様に、単位中性子フルエンスあたりの各臓器の吸収線量  $D_T$  ( $\text{Gy cm}^2$ )、実効線量  $E$  ( $\text{Sv cm}^2$ ) とし、これらを表及びグラフで与えた。

### 3 結果及び考察

#### 3.1 成人に対する臓器吸収線量及び実効線量の比較

本節では、これまでに報告されている計算結果との比較により、本計算方法及び結果の妥当性について検討した。

図 3.1 – 3.3 に、成人に対する AP 照射において、3 つの代表的な臓器の吸収線量、図 3.4 に実効線量について、本計算値と ICRP Publ. 74<sup>10)</sup> の評価値との比較を示す。ICRP Publ. 74 の値は、独立した 7 つのグループにより、異なる計算コード、物理データを用いて計算された値を基に評価されたものである。対象としたエネルギー範囲全体において、臓器吸収線量、実効線量のいずれにおいても、本計算値と ICRP Publ. 74 の値は良い一致を示している。

図 3.5 – 3.7 には、成人に対する ROT 照射において、AP 照射と同様に代表的な 3 つの臓器の吸収線量、図 3.8 に実効線量を比較した結果を示す。ROT 照射においても、本計算値は ICRP Publ. 74<sup>10)</sup> と良い一致を示している。

以上の結果から、本方法によって、成人の AP 及び ROT 照射に対して、臓器吸収線量及び実効線量が適切に計算されていると判断できる。

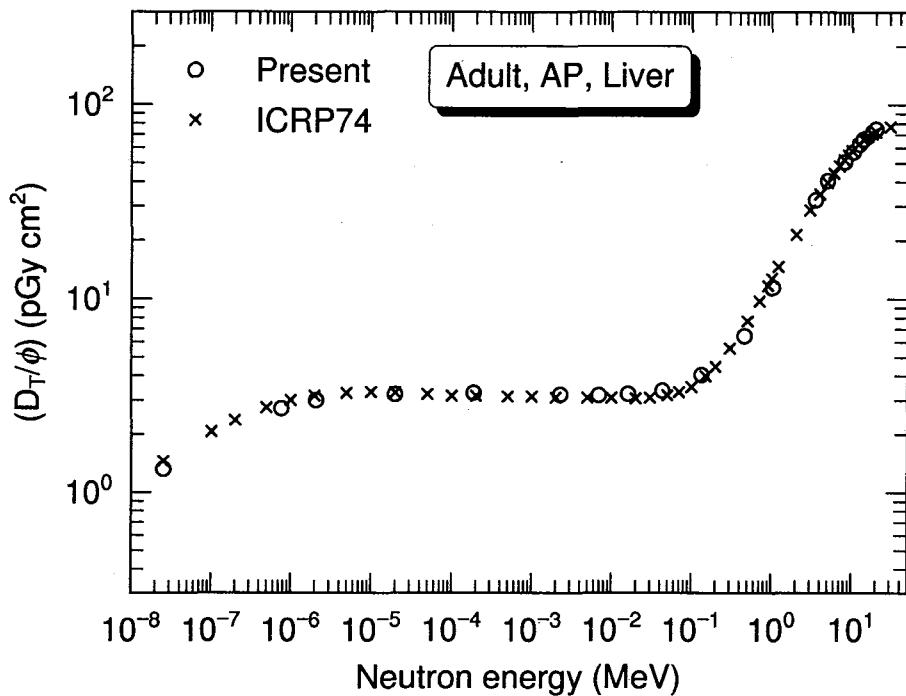


図 3.1 成人の AP 照射における肝臓の吸収線量の比較

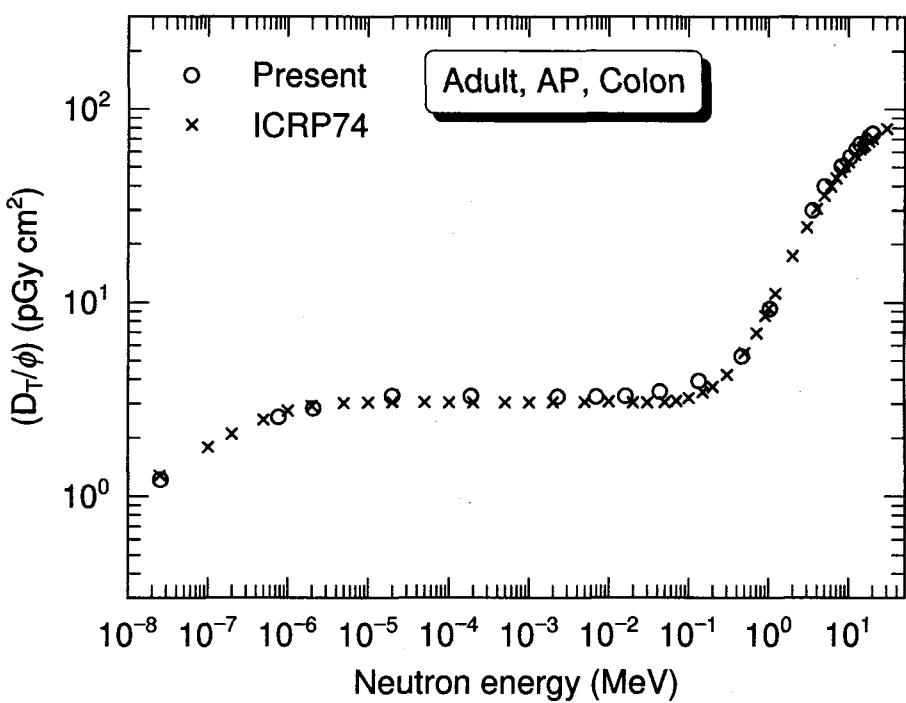


図 3.2 成人の AP 照射における結腸の吸収線量の比較

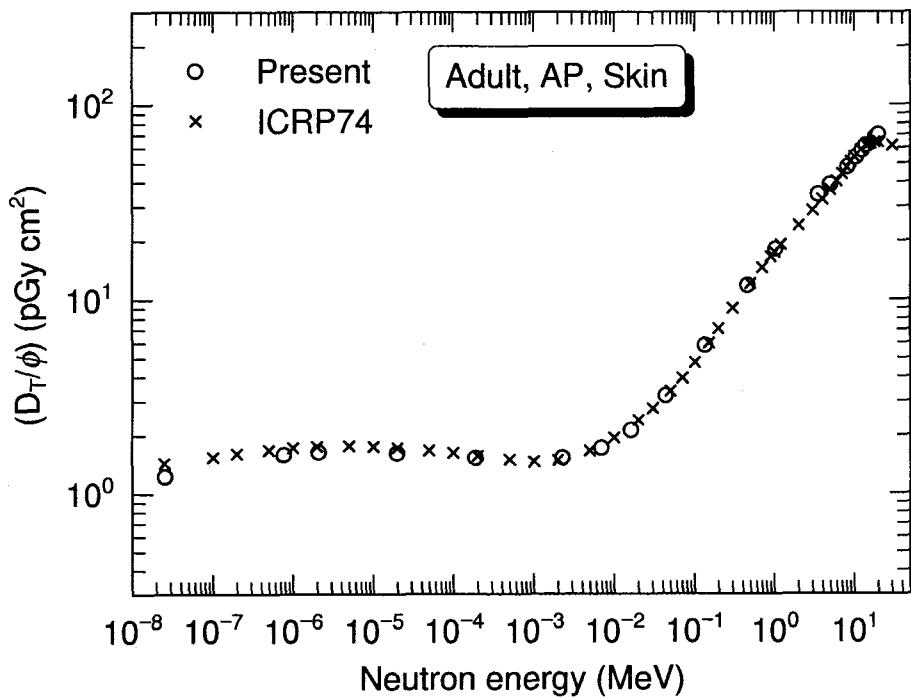


図 3.3 成人の AP 照射における皮膚の吸収線量の比較

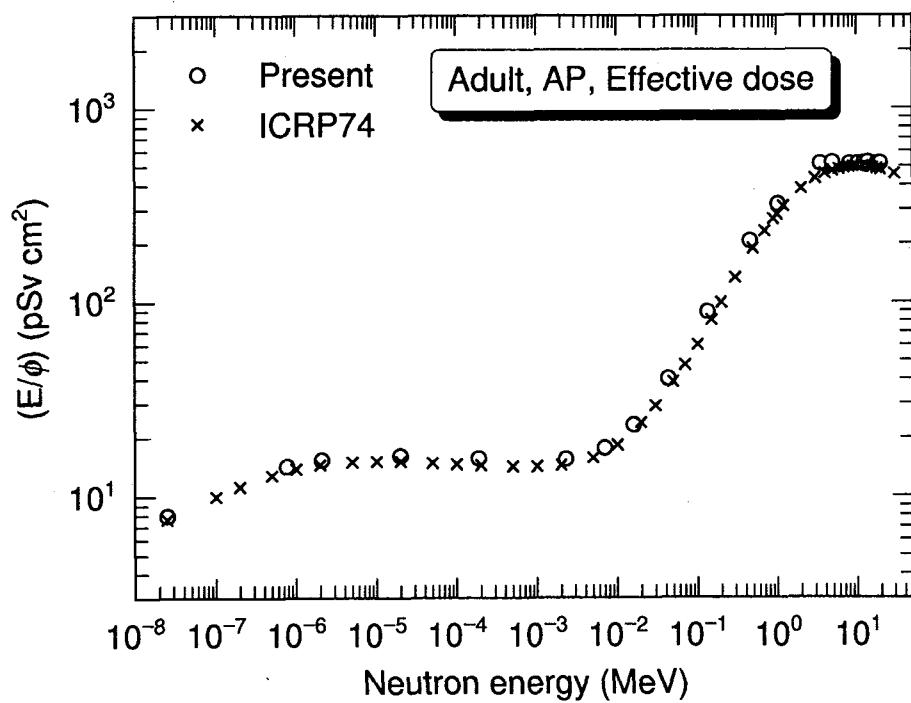


図 3.4 成人の AP 照射における実効線量の比較

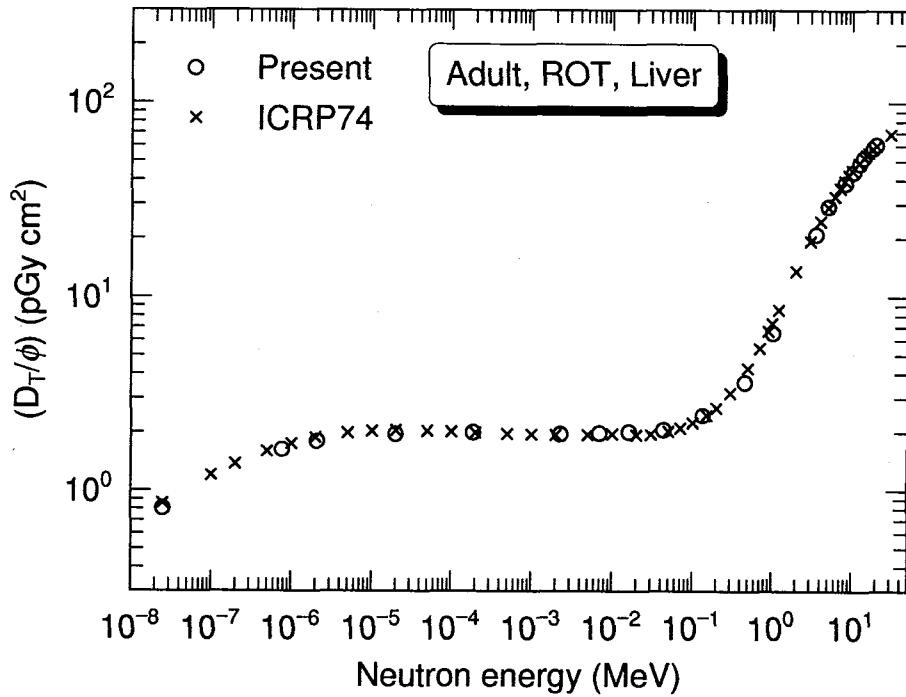


図 3.5 成人の ROT 照射における肝臓の吸収線量の比較

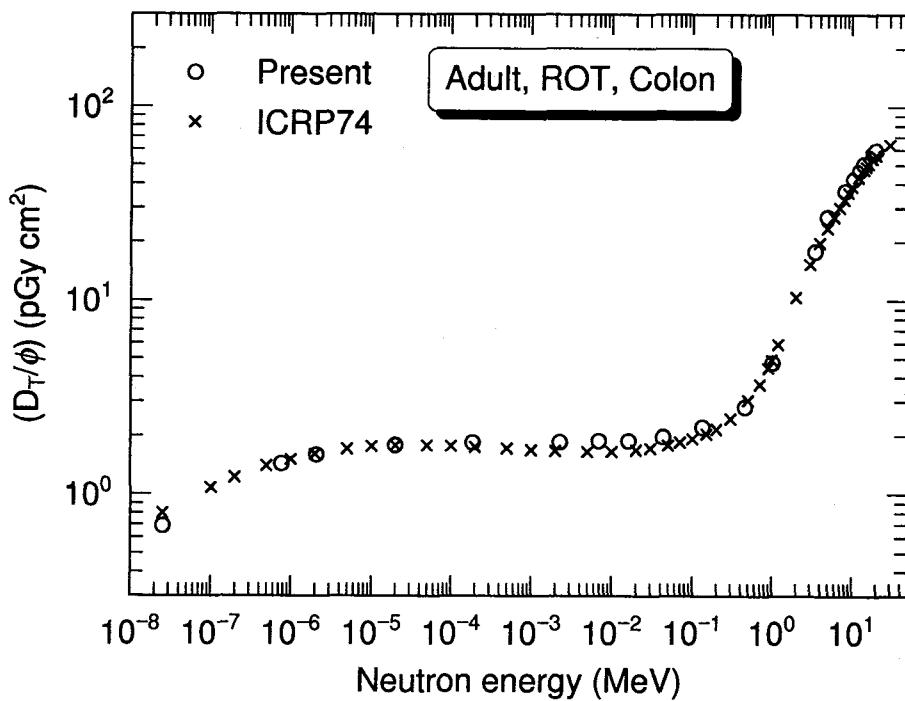


図 3.6 成人の ROT 照射における結腸の吸収線量の比較

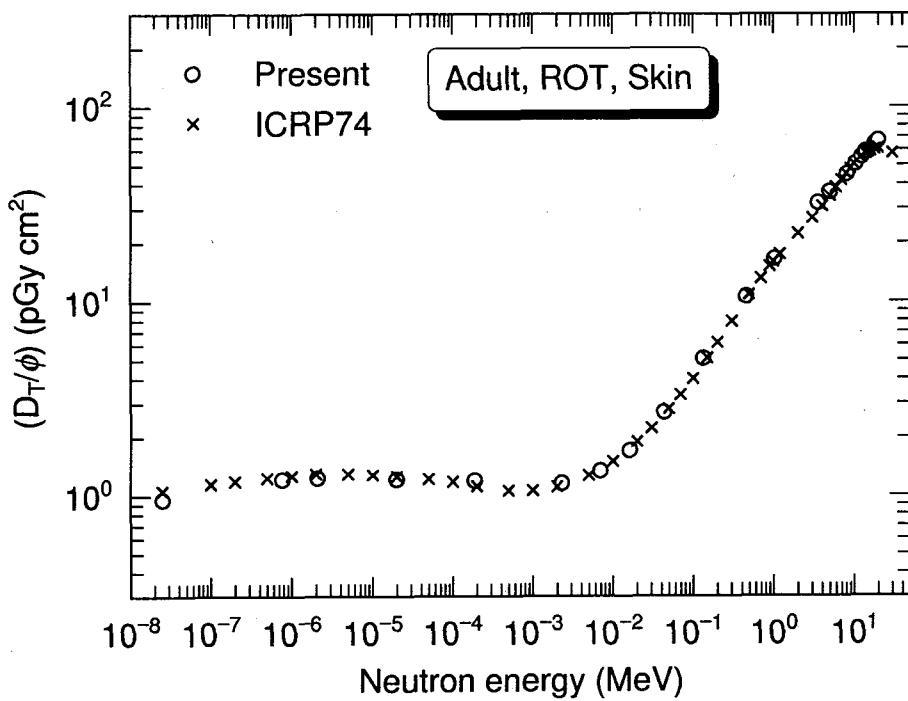


図 3.7 成人の ROT 照射における皮膚の吸収線量の比較

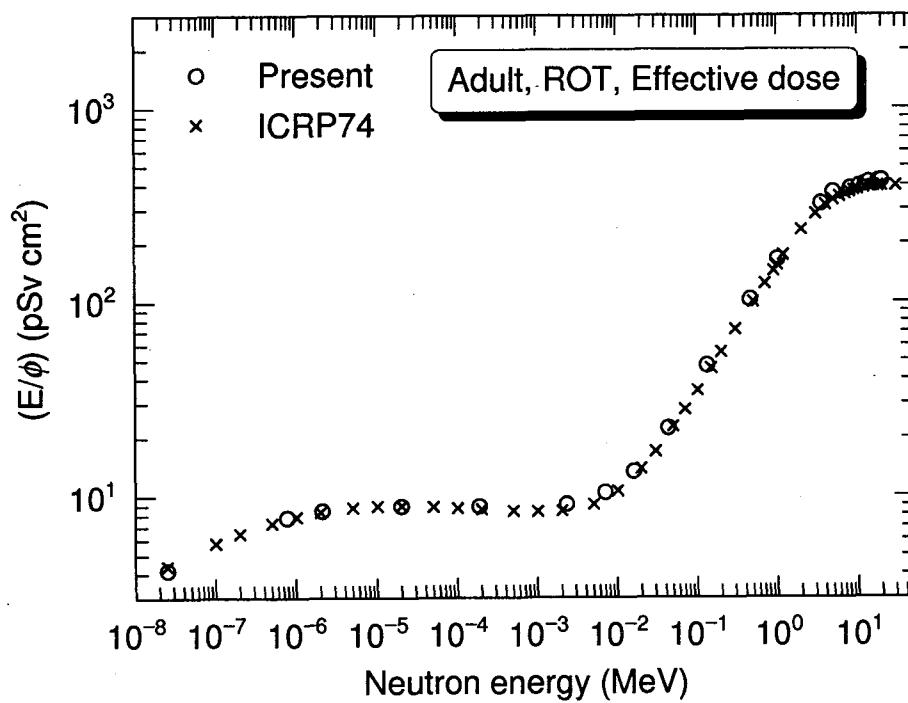


図 3.8 成人の ROT 照射における実効線量の比較

### 3.2 年齢別実効線量の比較

図 3.9 – 3.12 に、AP 照射における代表的な年齢群に対する実効線量について、本計算値を、これまでに報告されている山口<sup>12)</sup>、Chou ら<sup>13)</sup>の計算値とあわせて示す。それぞれの計算値を比較・分析した結果を以下に示す。

1. 成人に対する本計算値と山口の結果とを比較すると、 $10^{-6}$  MeV ~  $10^{-2}$  MeVにおいては、本計算値が最大で約 20 %大きい。それより高いエネルギー領域では、両計算値の違いは数 %まで小さくなる。一方、熱エネルギーでは、本計算値は山口の値に比べて 40 %も小さい。両計算結果の違いは、他の年齢群においても同様の傾向が見られるが、年齢が小さくなるに従い、 $10^{-6}$  MeV ~  $10^{-2}$  MeVにおける差がより顕著になる。
2. 本計算と Chou ら<sup>13)</sup>の結果は、いずれの年齢群、エネルギー領域においても、約 10 %の範囲内で一致している。

本計算と山口の計算では、ファントムを構成する臓器・組織の元素組成及び密度、放射線輸送計算コードに違いがある。山口の計算では Snyder ら<sup>32)</sup>が評価した成人に対する元素組成及び密度を全ての年齢群に適用している。このデータは、本計算で用いた成人に対するデータ<sup>21)</sup>と比較し、密度が骨組織で 6 %大きく、軟組織では逆に 6 %小さい。また、本計算で用いた新生児のデータと比べると、骨組織の密度は 22 %も大きい。さらに、元素組成に関して、山口の計算では原子番号 30 (Zn) 以上の微量元素は考慮していない。一方、放射線輸送計算コードについては、山口の計算では MORSE-CG<sup>33)</sup>が用いられた。MORSE-CG は、散乱などによる放射線のエネルギー変化を、ある幅を持ったグループからグループへの移動という方法で計算する。これに対し、本研究で用いた MCNP はエネルギーの変化を正確に扱う。このように、MORSE と MCNP では、エネルギーサンプリング法に違いがあるものの、人体を構成する主要元素(水素、炭素、酸素、窒素)では  $10^{-6}$  MeV ~  $10^{-2}$  MeVにおいて共鳴吸収はないため、その影響は小さいと推定される。従って、本計算と山口の計算値の差は、主にファントムを構成する臓器・組織の元素組成及び密度の違いに起因すると考えられる。なお、熱エネルギーにおける違いは、山口の計算では、水素の化学結合の影響を考慮しなかったためである<sup>10)</sup>。

本計算と Chou らの計算では、輸送計算断面積データ、組織荷重係数の取り扱いに違いがある。Chou らの計算では、断面積データを明示していないが、輸送計算に用いた MCNP-4B2<sup>34)</sup>に付随するものであれば、ENDF/B-VI を用いたと考えられる。本計算で用いた JENDL と比較すると、たとえば、核分裂中性子の外部照射に対し、JENDL-3.2<sup>35)</sup>と ENDF/B-VI を用いた吸収線量は、2 ~ 3 %の範囲内で一致する<sup>36)</sup>。組織荷重係数については、赤色骨髄、骨表面にそれぞれ、0.12、0.01 が割り振られているが、Chou らはそれらを合算し 0.13 とし、これを骨に適用している。しかし、骨表面の組織荷重係数は 0.01 と小さいため、この取り扱いの違いにより計算結果に大きな差は生じない。これらの理由から、本計算と Chou らの結果は、良い一致を示したと考えられる。

以上の分析結果をまとめると、本計算手法により、各年齢に対する臓器吸収線量及び実効線量は適切に計算されていると判断できる。

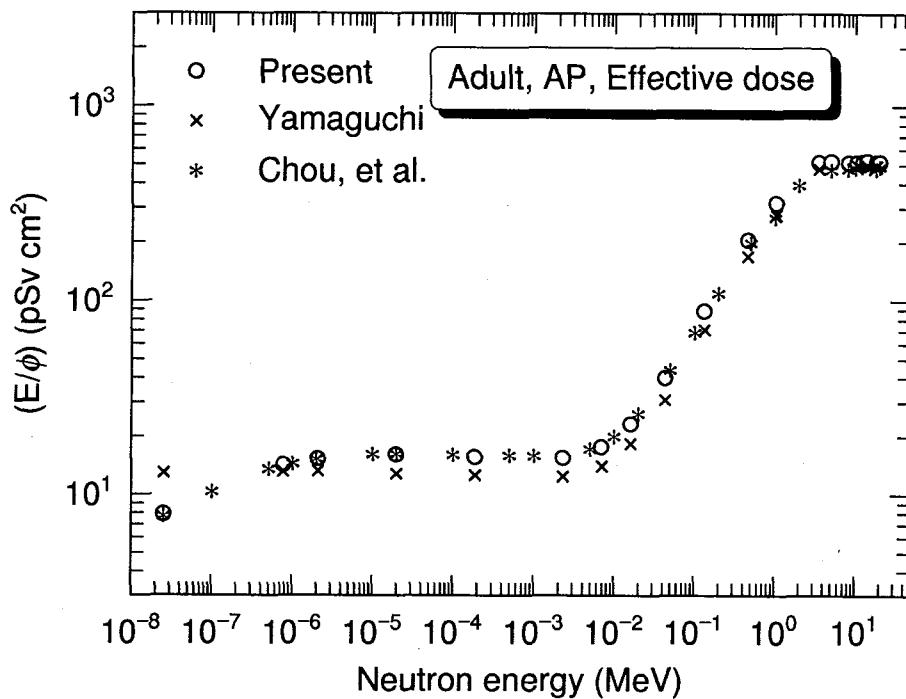


図 3.9 AP 照射における実効線量の比較: 成人

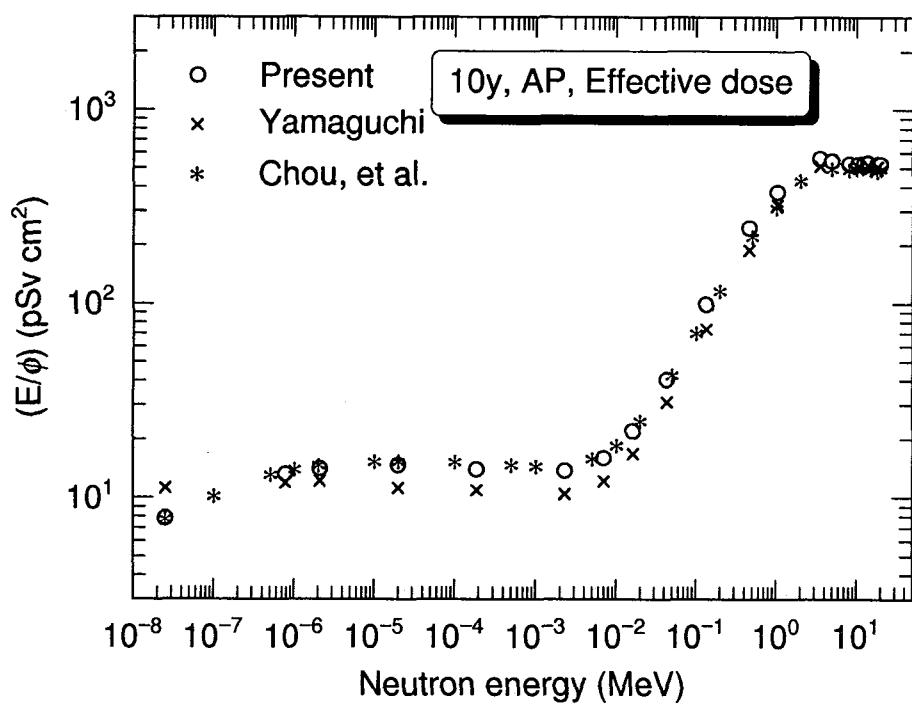


図 3.10 AP 照射における実効線量の比較: 10 歳

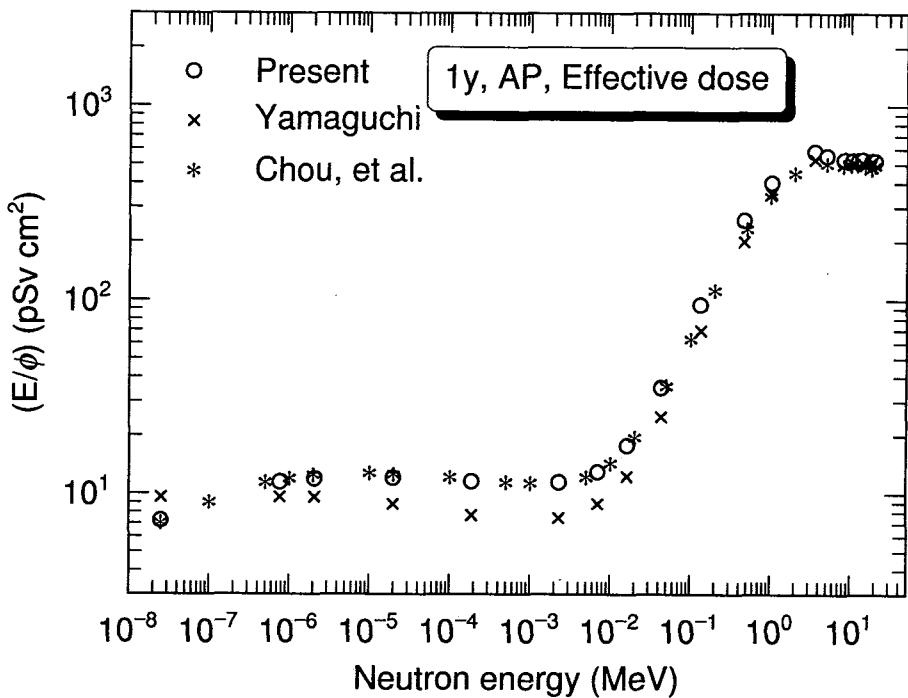


図 3.11 AP 照射における実効線量の比較: 1 歳

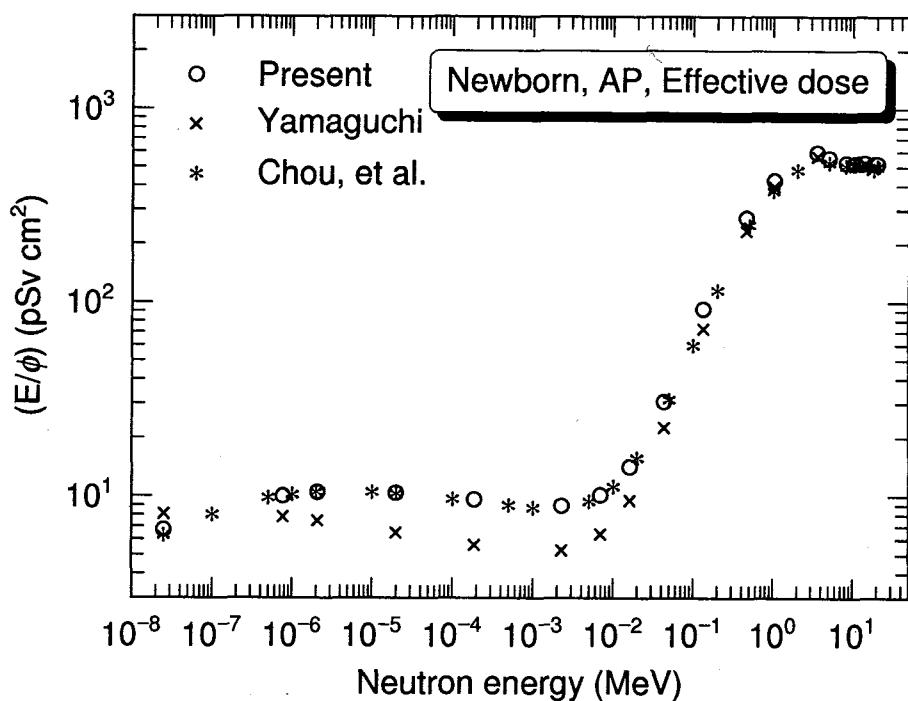


図 3.12 AP 照射における実効線量の比較: 新生児

### 3.3 年齢別臓器吸収線量及び実効線量換算係数

AP 及び ROT 照射における各臓器の吸収線量、実効線量を 6 年齢群に対し計算した結果を示す。計算結果は、単位フルエンスあたりの各臓器の吸収線量  $D_T/\phi$  (Gy cm<sup>2</sup>)、実効線量  $E/\phi$  (Sv cm<sup>2</sup>) で、次の表及びグラフで与えた。

- 表 3.1 – 表 3.15: AP 照射におけるフルエンスあたりの各臓器の吸収線量
- 図 3.13 – 図 3.27: AP 照射におけるフルエンスあたりの各臓器の吸収線量
- 表 3.16: AP 照射におけるフルエンスあたりの実効線量
- 図 3.28: AP 照射におけるフルエンスあたりの実効線量
- 表 3.17 – 表 3.31: ROT 照射におけるフルエンスあたりの各臓器の吸収線量
- 図 3.29 – 図 3.43: ROT 照射におけるフルエンスあたりの各臓器の吸収線量
- 表 3.32: ROT 照射におけるフルエンスあたりの実効線量
- 図 3.44: ROT 照射におけるフルエンスあたりの実効線量

表 3.8、図 3.20、表 3.24 及び図 3.36 の“生殖腺の吸収線量”は、卵巣と睾丸の吸収線量を算術平均したものである。

表3.1 AP 照射におけるフルエンスあたりの膀胱の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	1.71	1.69	1.78	1.80	1.70	1.61
$7.70 \times 10^{-7}$	3.54	3.46	3.55	3.46	3.16	2.73
$2.09 \times 10^{-6}$	3.89	3.78	3.83	3.69	3.38	2.85
$1.99 \times 10^{-5}$	4.22	4.09	4.11	3.88	3.43	2.75
$1.88 \times 10^{-4}$	4.21	4.08	4.01	3.78	3.22	2.47
$2.29 \times 10^{-3}$	4.13	4.07	3.90	3.61	2.97	2.17
$6.97 \times 10^{-3}$	4.16	4.05	3.83	3.52	2.89	2.13
$1.62 \times 10^{-2}$	4.11	4.05	3.89	3.55	2.96	2.18
$4.34 \times 10^{-2}$	4.38	4.26	4.13	3.84	3.25	2.65
$1.34 \times 10^{-1}$	5.37	5.17	5.24	5.08	4.72	4.66
$4.60 \times 10^{-1}$	8.50	8.48	9.45	9.94	10.3	11.7
$1.03 \times 10^0$	14.7	14.8	16.4	17.4	18.3	20.2
$3.54 \times 10^0$	39.1	38.7	40.9	41.7	42.1	43.4
$5.00 \times 10^0$	46.2	46.2	47.1	47.4	46.9	47.0
$8.20 \times 10^0$	57.0	56.3	56.9	56.8	56.1	55.8
$1.05 \times 10^1$	63.8	62.7	63.1	62.9	62.2	61.6
$1.25 \times 10^1$	69.1	68.7	68.3	68.1	67.1	66.6
$1.40 \times 10^1$	72.8	71.7	71.9	71.5	70.3	69.9
$1.83 \times 10^1$	78.3	77.7	77.7	77.1	76.1	75.5
$2.00 \times 10^1$	80.7	80.0	79.8	79.3	77.9	77.6

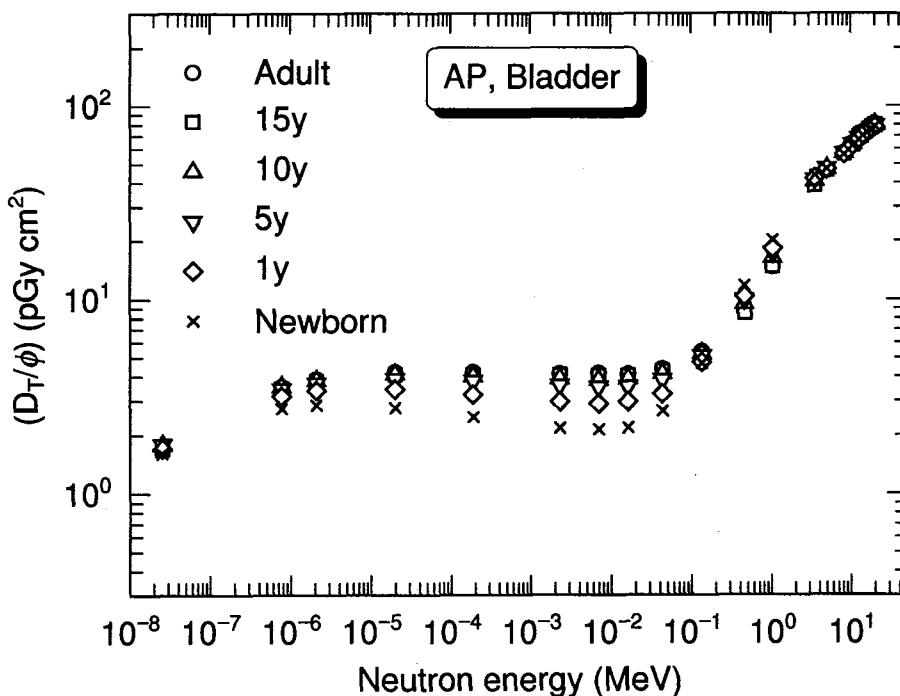


図 3.13 AP 照射におけるフルエンスあたりの膀胱の吸収線量

表 3.2 AP 照射におけるフルエンスあたりの赤色骨髓の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.95	0.95	1.00	0.96	0.88	0.81
$7.70 \times 10^{-7}$	1.81	1.79	1.82	1.70	1.49	1.28
$2.09 \times 10^{-6}$	1.97	1.94	1.95	1.80	1.57	1.32
$1.99 \times 10^{-5}$	2.11	2.07	2.03	1.84	1.57	1.27
$1.88 \times 10^{-4}$	2.09	2.04	1.97	1.74	1.46	1.13
$2.29 \times 10^{-3}$	2.05	1.97	1.87	1.63	1.35	1.02
$6.97 \times 10^{-3}$	2.05	1.97	1.87	1.63	1.35	1.05
$1.62 \times 10^{-2}$	2.09	2.02	1.92	1.70	1.45	1.18
$4.34 \times 10^{-2}$	2.28	2.21	2.17	2.01	1.81	1.67
$1.34 \times 10^{-1}$	3.00	2.98	3.16	3.18	3.17	3.38
$4.60 \times 10^{-1}$	5.30	5.53	6.44	6.98	7.43	8.45
$1.03 \times 10^0$	9.49	10.1	11.8	12.7	13.5	15.1
$3.54 \times 10^0$	27.5	28.6	31.5	32.7	33.7	36.3
$5.00 \times 10^0$	35.5	36.3	38.4	39.2	39.9	41.6
$8.20 \times 10^0$	45.1	45.7	47.7	48.3	48.8	50.3
$1.05 \times 10^1$	50.8	51.4	53.3	53.8	54.3	55.6
$1.25 \times 10^1$	55.9	56.5	58.3	58.8	59.2	60.6
$1.40 \times 10^1$	59.6	60.1	61.9	62.4	62.8	64.2
$1.83 \times 10^1$	66.9	67.4	69.2	69.6	70.1	71.5
$2.00 \times 10^1$	69.3	69.7	71.5	71.9	72.3	73.7

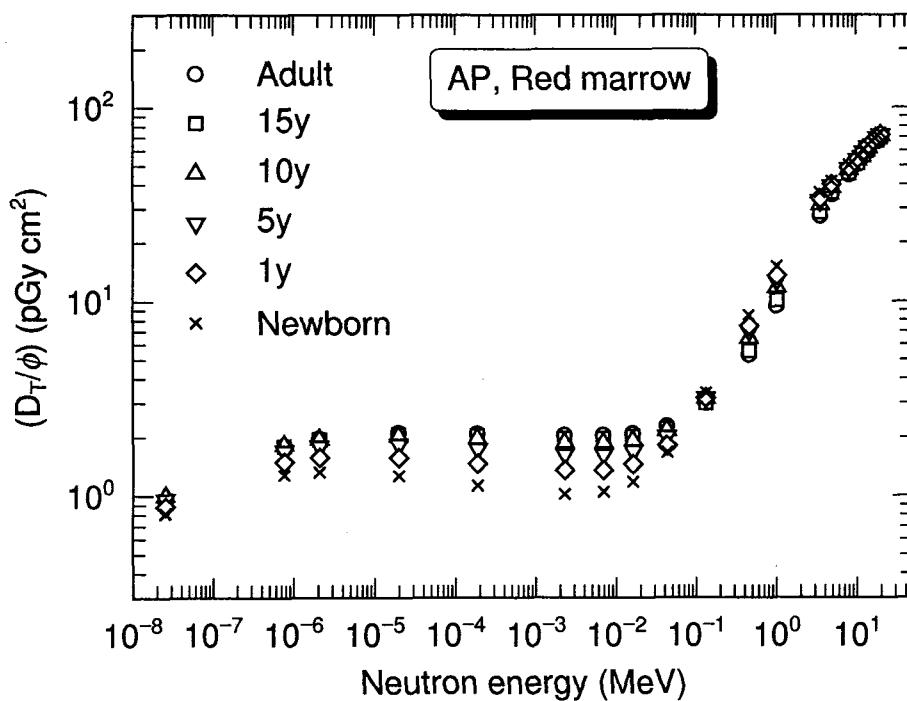


図 3.14 AP 照射におけるフルエンスあたりの赤色骨髓の吸収線量

表 3.3 AP 照射におけるフルエンスあたりの骨の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.93	0.92	0.97	0.93	0.85	0.79
$7.70 \times 10^{-7}$	1.76	1.74	1.76	1.65	1.44	1.24
$2.09 \times 10^{-6}$	1.91	1.89	1.90	1.74	1.52	1.28
$1.99 \times 10^{-5}$	2.05	2.01	1.97	1.78	1.52	1.23
$1.88 \times 10^{-4}$	2.04	1.98	1.91	1.69	1.41	1.10
$2.29 \times 10^{-3}$	1.99	1.91	1.81	1.57	1.29	0.98
$6.97 \times 10^{-3}$	1.99	1.91	1.80	1.56	1.28	0.98
$1.62 \times 10^{-2}$	2.01	1.94	1.83	1.60	1.34	1.06
$4.34 \times 10^{-2}$	2.16	2.07	2.00	1.81	1.59	1.39
$1.34 \times 10^{-1}$	2.69	2.63	2.70	2.63	2.53	2.57
$4.60 \times 10^{-1}$	4.32	4.45	5.01	5.31	5.54	6.16
$1.03 \times 10^0$	7.29	7.65	8.76	9.35	9.83	10.9
$3.54 \times 10^0$	20.1	20.8	22.8	23.6	24.3	26.0
$5.00 \times 10^0$	26.2	26.7	28.2	28.7	29.1	30.4
$8.20 \times 10^0$	33.8	34.2	35.6	36.0	36.3	37.3
$1.05 \times 10^1$	38.6	39.0	40.3	40.7	41.0	42.0
$1.25 \times 10^1$	42.8	43.2	44.5	44.9	45.1	46.2
$1.40 \times 10^1$	45.8	46.2	47.5	47.8	48.1	49.1
$1.83 \times 10^1$	50.9	51.3	52.6	52.9	53.2	54.3
$2.00 \times 10^1$	52.5	52.8	54.1	54.4	54.7	55.7

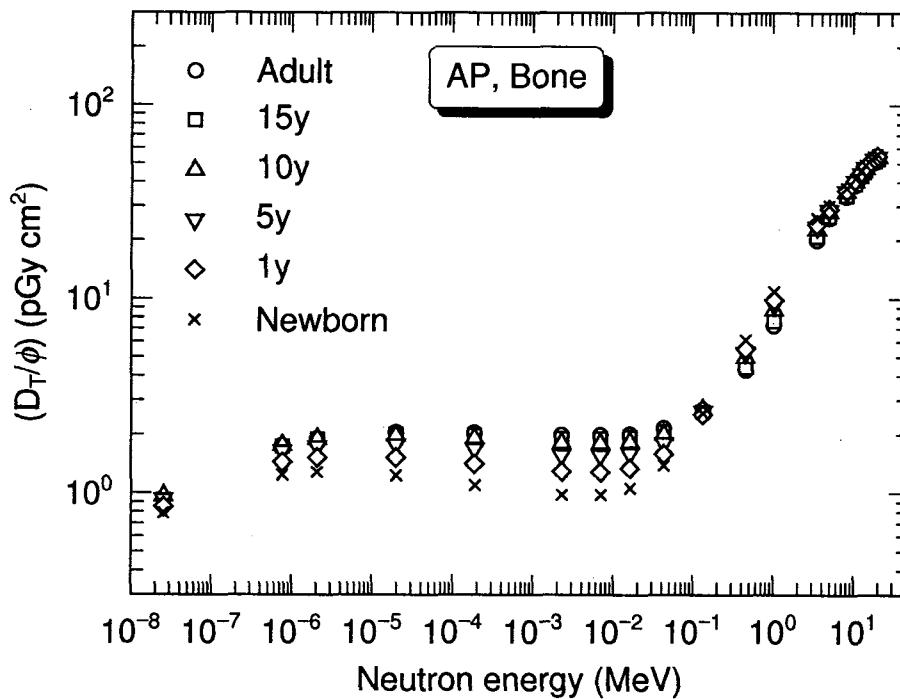


図 3.15 AP 照射におけるフルエンスあたりの骨の吸収線量

表 3.4 AP 照射におけるフルエンスあたりの女性乳房の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	2.03	1.92	2.06	1.87	1.76	1.59
$7.70 \times 10^{-7}$	2.99	2.79	2.32	1.98	1.78	1.46
$2.09 \times 10^{-6}$	3.02	2.85	2.25	2.07	1.69	1.40
$1.99 \times 10^{-5}$	2.79	2.77	2.05	1.86	1.48	1.21
$1.88 \times 10^{-4}$	2.67	2.52	1.88	1.60	1.34	1.01
$2.29 \times 10^{-3}$	2.44	2.34	1.90	1.58	1.38	1.05
$6.97 \times 10^{-3}$	2.53	2.40	2.13	1.94	1.72	1.42
$1.62 \times 10^{-2}$	2.74	2.62	2.78	2.62	2.45	2.16
$4.34 \times 10^{-2}$	3.62	3.52	4.56	4.46	4.32	4.14
$1.34 \times 10^{-1}$	6.47	6.39	9.03	9.03	8.92	8.89
$4.60 \times 10^{-1}$	14.8	14.6	19.5	19.4	19.2	19.2
$1.03 \times 10^0$	24.2	23.9	30.1	29.9	29.6	29.8
$3.54 \times 10^0$	47.1	46.7	50.4	50.1	49.9	48.7
$5.00 \times 10^0$	49.6	49.1	50.7	50.4	50.1	49.4
$8.20 \times 10^0$	58.7	58.1	59.8	59.3	58.6	58.0
$1.05 \times 10^1$	65.2	64.5	66.7	65.7	65.0	63.9
$1.25 \times 10^1$	69.7	69.1	71.3	69.9	69.5	68.7
$1.40 \times 10^1$	72.8	72.3	74.6	73.1	72.5	72.0
$1.83 \times 10^1$	78.5	78.1	79.6	79.1	78.0	77.4
$2.00 \times 10^1$	80.5	80.2	81.6	81.2	80.2	79.4

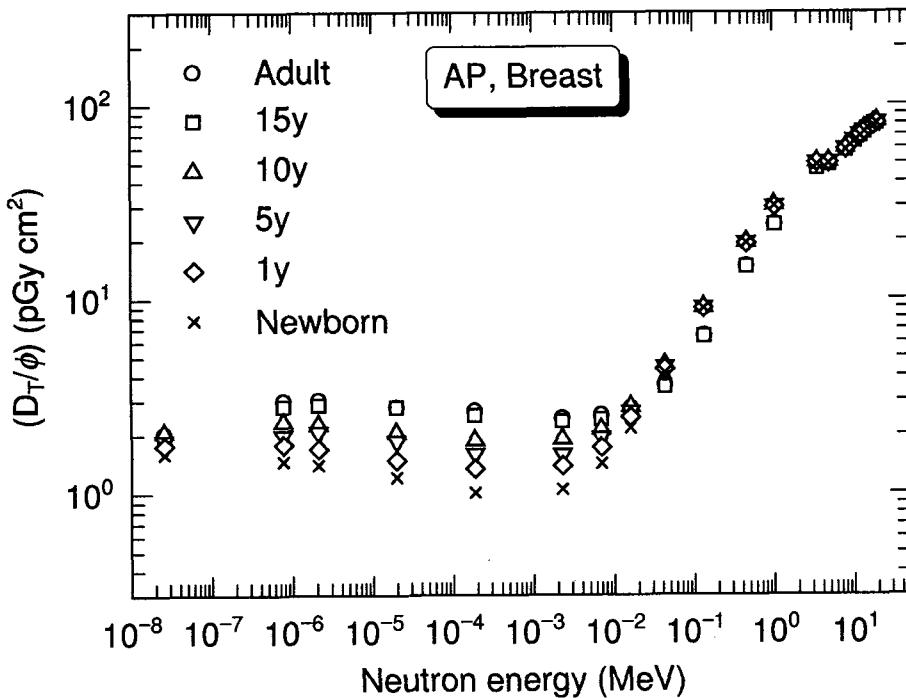


図 3.16 AP 照射におけるフルエンスあたりの女性乳房の吸収線量

表 3.5 AP 照射におけるフルエンスあたりの結腸の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	1.22	1.19	1.27	1.29	1.23	1.23
$7.70 \times 10^{-7}$	2.56	2.49	2.65	2.64	2.54	2.41
$2.09 \times 10^{-6}$	2.84	2.77	2.92	2.91	2.74	2.56
$1.99 \times 10^{-5}$	3.29	3.09	3.24	3.20	2.95	2.60
$1.88 \times 10^{-4}$	3.28	3.17	3.28	3.20	2.88	2.42
$2.29 \times 10^{-3}$	3.26	3.18	3.24	3.11	2.75	2.17
$6.97 \times 10^{-3}$	3.26	3.18	3.24	3.08	2.68	2.08
$1.62 \times 10^{-2}$	3.29	3.22	3.25	3.10	2.67	2.07
$4.34 \times 10^{-2}$	3.47	3.33	3.37	3.19	2.76	2.24
$1.34 \times 10^{-1}$	3.93	3.82	3.89	3.75	3.46	3.35
$4.60 \times 10^{-1}$	5.28	5.19	5.88	6.23	6.67	8.11
$1.03 \times 10^0$	9.31	9.41	11.0	12.0	13.1	15.6
$3.54 \times 10^0$	30.1	30.4	33.4	34.9	36.3	39.1
$5.00 \times 10^0$	40.0	40.0	42.0	42.8	43.3	44.5
$8.20 \times 10^0$	50.8	50.5	52.2	52.6	52.7	53.4
$1.05 \times 10^1$	56.9	56.7	58.2	58.6	58.5	59.0
$1.25 \times 10^1$	62.5	62.2	63.7	63.8	63.6	64.1
$1.40 \times 10^1$	66.3	66.0	67.3	67.4	67.1	67.5
$1.83 \times 10^1$	72.6	72.4	73.4	73.4	73.0	73.5
$2.00 \times 10^1$	75.0	74.8	75.7	75.7	75.2	75.6

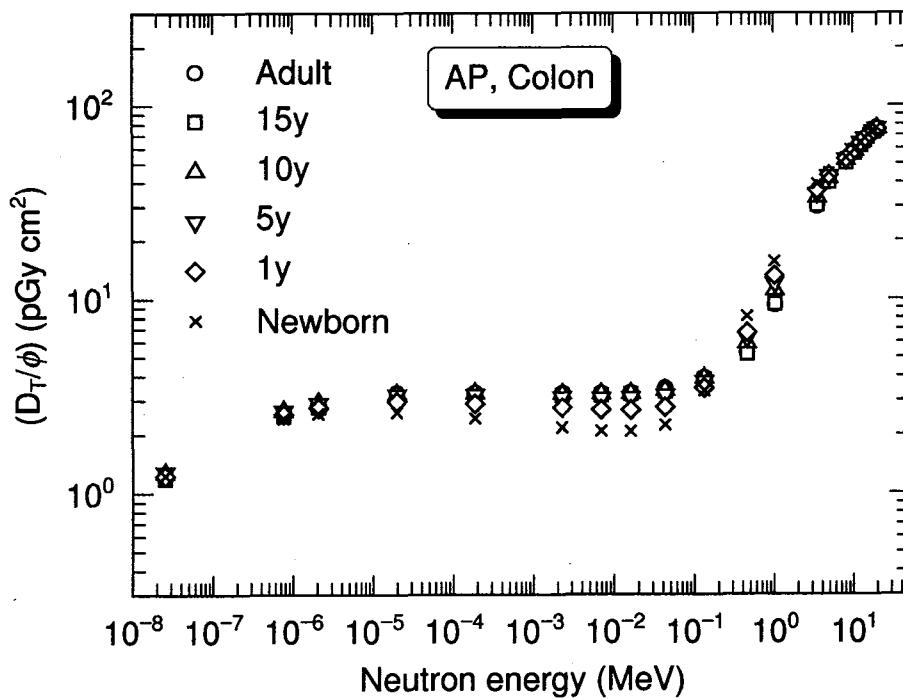


図 3.17 AP 照射におけるフルエンスあたりの結腸の吸収線量

表 3.6 AP 照射におけるフルエンスあたりの女性生殖腺(卵巣)の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.96	0.91	1.05	1.01	1.03	1.04
$7.70 \times 10^{-7}$	1.95	1.93	2.18	2.19	2.07	2.12
$2.09 \times 10^{-6}$	2.22	2.13	2.32	2.40	2.33	2.27
$1.99 \times 10^{-5}$	2.54	2.52	2.60	2.71	2.52	2.38
$1.88 \times 10^{-4}$	2.76	2.66	2.68	2.84	2.51	2.33
$2.29 \times 10^{-3}$	2.64	2.55	2.69	2.69	2.62	2.14
$6.97 \times 10^{-3}$	2.62	2.59	2.77	2.76	2.59	2.11
$1.62 \times 10^{-2}$	2.61	2.71	2.89	2.75	2.58	2.07
$4.34 \times 10^{-2}$	2.86	2.87	2.87	2.87	2.69	2.08
$1.34 \times 10^{-1}$	3.34	3.14	3.38	3.24	2.91	2.64
$4.60 \times 10^{-1}$	3.90	3.77	4.08	4.38	4.57	5.69
$1.03 \times 10^0$	6.41	6.38	7.65	8.61	9.71	12.2
$3.54 \times 10^0$	23.4	24.0	27.6	29.4	31.8	35.3
$5.00 \times 10^0$	34.3	34.9	37.4	38.9	40.1	42.2
$8.20 \times 10^0$	45.7	45.4	48.0	48.8	49.5	51.3
$1.05 \times 10^1$	53.0	51.5	53.9	55.0	55.7	56.7
$1.25 \times 10^1$	58.1	57.5	59.7	60.6	60.5	61.8
$1.40 \times 10^1$	62.6	61.2	63.8	64.4	64.1	65.3
$1.83 \times 10^1$	68.3	68.1	69.6	70.5	70.2	71.1
$2.00 \times 10^1$	71.2	70.6	72.7	72.8	72.7	73.1

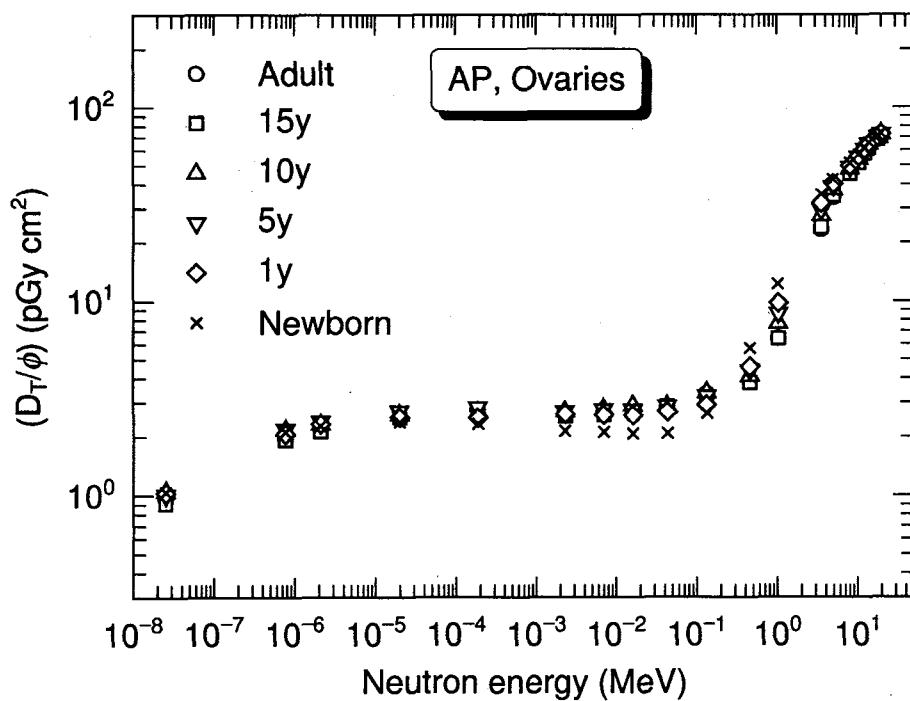


図 3.18 AP 照射におけるフルエンスあたりの女性生殖腺(卵巣)の吸収線量

表 3.7 AP 照射におけるフルエンスあたりの男性生殖腺(睾丸)の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	2.68	2.66	2.42	2.46	2.22	1.94
$7.70 \times 10^{-7}$	4.25	3.96	3.29	3.18	2.62	2.14
$2.09 \times 10^{-6}$	4.43	4.04	3.39	3.12	2.58	2.10
$1.99 \times 10^{-5}$	4.55	3.98	3.46	2.89	2.47	1.81
$1.88 \times 10^{-4}$	4.10	3.75	2.96	2.80	2.21	1.56
$2.29 \times 10^{-3}$	3.77	3.51	2.80	2.66	2.06	1.43
$6.97 \times 10^{-3}$	3.83	3.58	3.06	2.91	2.35	1.76
$1.62 \times 10^{-2}$	4.09	3.91	3.73	3.36	2.99	2.45
$4.34 \times 10^{-2}$	5.03	5.11	5.27	5.14	4.76	4.29
$1.34 \times 10^{-1}$	8.23	8.79	9.90	9.71	9.42	9.07
$4.60 \times 10^{-1}$	17.8	19.1	21.5	21.5	21.2	21.2
$1.03 \times 10^0$	27.4	29.2	31.8	31.8	31.5	31.4
$3.54 \times 10^0$	52.3	53.8	55.0	54.9	54.4	52.8
$5.00 \times 10^0$	53.5	54.9	54.4	54.9	54.1	52.8
$8.20 \times 10^0$	64.0	64.2	63.5	63.5	62.8	61.1
$1.05 \times 10^1$	71.2	70.8	69.9	69.5	68.9	67.1
$1.25 \times 10^1$	75.3	76.4	75.3	74.4	73.5	71.4
$1.40 \times 10^1$	78.6	79.1	78.4	77.9	76.9	75.1
$1.83 \times 10^1$	83.6	84.4	84.2	83.7	82.5	81.0
$2.00 \times 10^1$	85.7	86.3	85.9	85.8	84.6	83.2

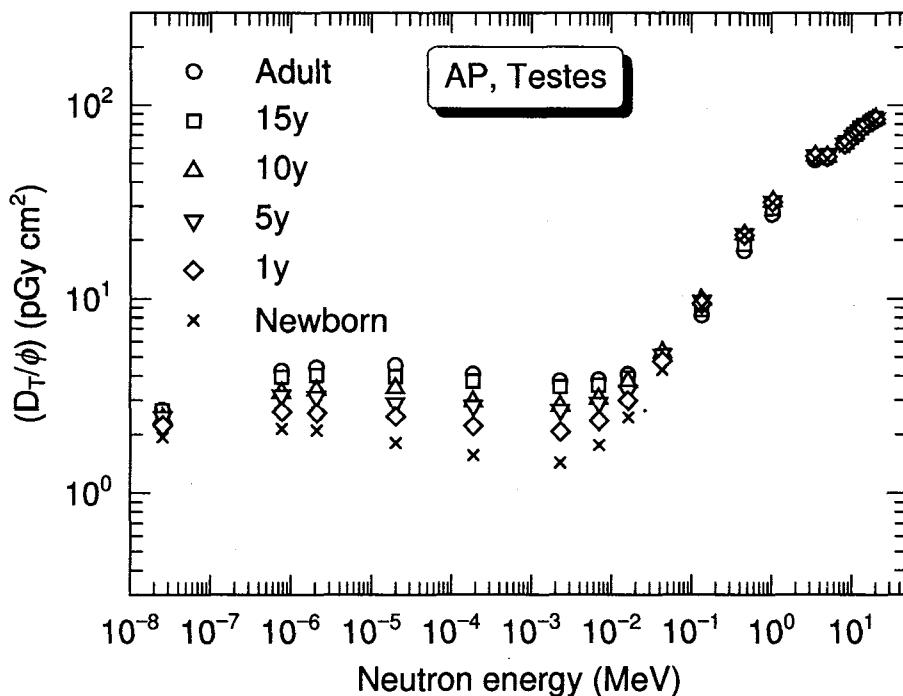


図 3.19 AP 照射におけるフルエンスあたりの男性生殖腺(睾丸)の吸収線量

表 3.8 AP 照射におけるフルエンスあたりの生殖腺の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	1.82	1.78	1.73	1.73	1.62	1.49
$7.70 \times 10^{-7}$	3.10	2.95	2.73	2.69	2.35	2.13
$2.09 \times 10^{-6}$	3.32	3.08	2.86	2.76	2.45	2.19
$1.99 \times 10^{-5}$	3.55	3.25	3.03	2.80	2.49	2.10
$1.88 \times 10^{-4}$	3.43	3.20	2.82	2.82	2.36	1.95
$2.29 \times 10^{-3}$	3.21	3.03	2.74	2.68	2.34	1.79
$6.97 \times 10^{-3}$	3.22	3.09	2.91	2.83	2.47	1.93
$1.62 \times 10^{-2}$	3.35	3.31	3.31	3.05	2.78	2.26
$4.34 \times 10^{-2}$	3.95	3.99	4.07	4.00	3.73	3.19
$1.34 \times 10^{-1}$	5.78	5.96	6.64	6.48	6.17	5.86
$4.60 \times 10^{-1}$	10.8	11.5	12.8	13.0	12.9	13.4
$1.03 \times 10^0$	16.9	17.8	19.7	20.2	20.6	21.8
$3.54 \times 10^0$	37.8	38.9	41.3	42.2	43.1	44.1
$5.00 \times 10^0$	43.9	44.9	45.9	46.9	47.1	47.5
$8.20 \times 10^0$	54.8	54.8	55.8	56.2	56.2	56.2
$1.05 \times 10^1$	62.1	61.2	61.9	62.2	62.3	61.9
$1.25 \times 10^1$	66.7	67.0	67.5	67.5	67.0	66.6
$1.40 \times 10^1$	70.6	70.2	71.1	71.1	70.5	70.2
$1.83 \times 10^1$	75.9	76.2	76.9	77.1	76.3	76.0
$2.00 \times 10^1$	78.5	78.5	79.3	79.3	78.6	78.1

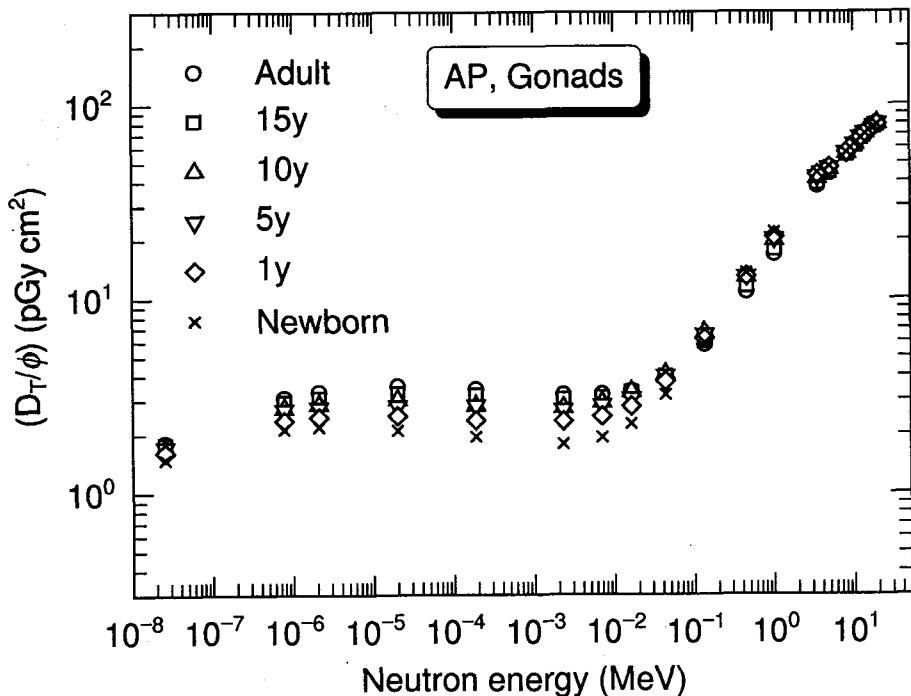


図 3.20 AP 照射におけるフルエンスあたりの生殖腺の吸収線量

表 3.9 AP 照射におけるフルエンスあたりの肝臓の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	1.32	1.28	1.37	1.41	1.36	1.34
$7.70 \times 10^{-7}$	2.72	2.62	2.78	2.76	2.58	2.33
$2.09 \times 10^{-6}$	3.00	2.88	3.01	2.99	2.74	2.42
$1.99 \times 10^{-5}$	3.22	3.13	3.21	3.12	2.82	2.37
$1.88 \times 10^{-4}$	3.28	3.12	3.15	3.03	2.67	2.13
$2.29 \times 10^{-3}$	3.21	3.07	3.06	2.88	2.48	1.90
$6.97 \times 10^{-3}$	3.19	3.02	3.02	2.82	2.44	1.87
$1.62 \times 10^{-2}$	3.24	3.06	3.05	2.85	2.46	1.95
$4.34 \times 10^{-2}$	3.37	3.19	3.21	3.09	2.74	2.40
$1.34 \times 10^{-1}$	4.06	3.89	4.09	4.17	4.06	4.23
$4.60 \times 10^{-1}$	6.46	6.40	7.41	8.26	8.92	10.6
$1.03 \times 10^0$	11.4	11.5	13.3	14.8	16.1	18.4
$3.54 \times 10^0$	32.4	32.7	35.3	37.4	38.8	41.2
$5.00 \times 10^0$	40.6	40.9	42.6	43.9	44.6	45.7
$8.20 \times 10^0$	50.9	50.9	52.4	53.4	53.6	54.4
$1.05 \times 10^1$	57.2	57.1	58.4	59.3	59.6	60.3
$1.25 \times 10^1$	62.8	62.6	63.7	64.4	64.5	65.2
$1.40 \times 10^1$	66.5	66.1	67.3	67.9	68.0	68.6
$1.83 \times 10^1$	72.6	72.5	73.2	74.0	74.0	74.5
$2.00 \times 10^1$	75.0	74.8	75.5	76.2	76.2	76.7

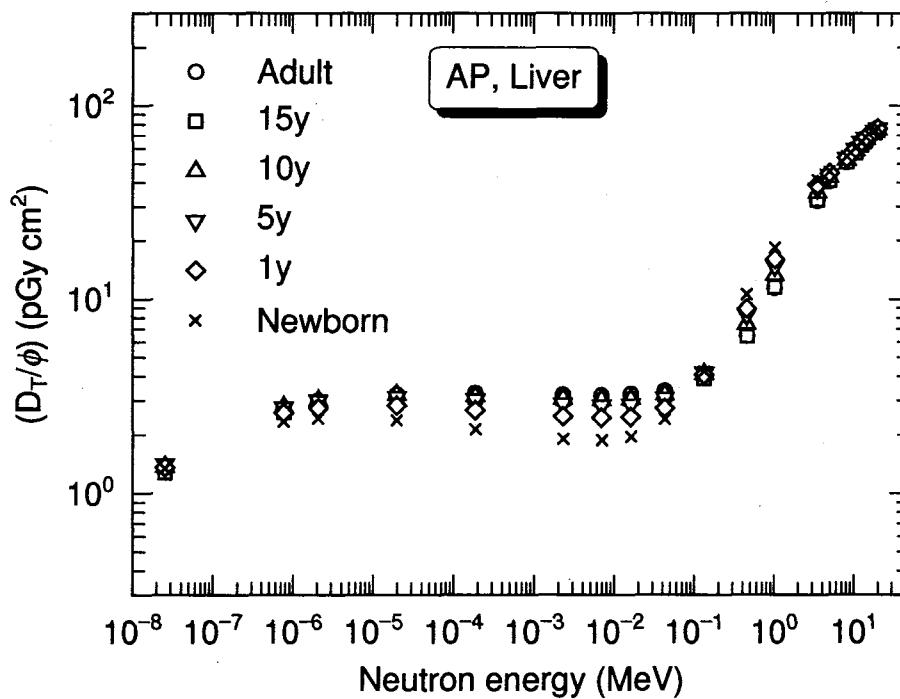


図 3.21 AP 照射におけるフルエンスあたりの肝臓の吸収線量

表 3.10 AP 照射におけるフルエンスあたりの肺の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.99	0.91	1.01	0.98	0.91	0.87
$7.70 \times 10^{-7}$	1.96	1.82	2.00	1.91	1.74	1.57
$2.09 \times 10^{-6}$	2.15	2.01	2.17	2.07	1.86	1.64
$1.99 \times 10^{-5}$	2.20	2.19	2.30	2.15	1.91	1.61
$1.88 \times 10^{-4}$	2.36	2.21	2.27	2.08	1.82	1.46
$2.29 \times 10^{-3}$	2.32	2.18	2.18	1.97	1.68	1.30
$6.97 \times 10^{-3}$	2.31	2.17	2.15	1.95	1.66	1.30
$1.62 \times 10^{-2}$	2.34	2.19	2.19	1.98	1.70	1.37
$4.34 \times 10^{-2}$	2.43	2.29	2.37	2.20	1.97	1.76
$1.34 \times 10^{-1}$	2.99	2.76	3.27	3.24	3.20	3.42
$4.60 \times 10^{-1}$	4.91	4.43	6.58	7.05	7.54	8.85
$1.03 \times 10^0$	9.58	8.77	12.9	13.9	14.8	16.7
$3.54 \times 10^0$	29.8	28.4	35.1	36.1	37.0	39.0
$5.00 \times 10^0$	39.3	37.9	43.3	43.7	44.1	44.9
$8.20 \times 10^0$	49.3	47.7	52.7	52.9	53.0	53.3
$1.05 \times 10^1$	55.2	53.7	58.6	58.7	58.7	59.0
$1.25 \times 10^1$	60.3	58.7	63.6	63.6	63.5	63.5
$1.40 \times 10^1$	64.1	62.4	67.3	67.3	67.1	67.1
$1.83 \times 10^1$	69.7	68.1	72.9	72.7	72.4	72.3
$2.00 \times 10^1$	71.9	70.3	75.0	74.8	74.5	74.3

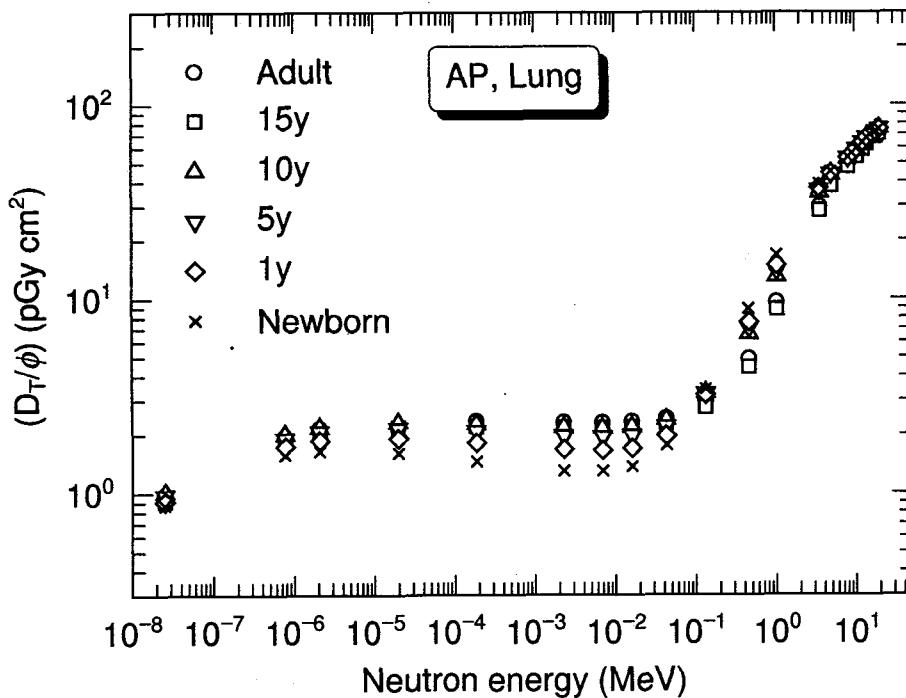


図 3.22 AP 照射におけるフルエンスあたりの肺の吸収線量

表 3.11 AP 照射におけるフルエンスあたりの食道の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.76	0.73	0.82	0.87	0.85	0.84
$7.70 \times 10^{-7}$	1.55	1.51	1.75	1.83	1.79	1.73
$2.09 \times 10^{-6}$	1.75	1.69	1.93	2.06	2.02	1.91
$1.99 \times 10^{-5}$	1.94	1.88	2.21	2.26	2.21	1.98
$1.88 \times 10^{-4}$	1.99	1.95	2.30	2.34	2.20	1.89
$2.29 \times 10^{-3}$	2.05	2.01	2.31	2.29	2.16	1.73
$6.97 \times 10^{-3}$	2.07	2.05	2.32	2.31	2.11	1.67
$1.62 \times 10^{-2}$	2.11	2.08	2.38	2.31	2.11	1.63
$4.34 \times 10^{-2}$	2.29	2.21	2.46	2.38	2.14	1.62
$1.34 \times 10^{-1}$	2.54	2.43	2.71	2.62	2.32	1.96
$4.60 \times 10^{-1}$	2.94	2.94	3.24	3.41	3.53	4.17
$1.03 \times 10^0$	4.49	4.61	5.52	6.38	7.43	9.37
$3.54 \times 10^0$	18.2	18.6	21.6	24.1	26.5	30.4
$5.00 \times 10^0$	28.4	28.9	31.5	33.5	35.4	38.1
$8.20 \times 10^0$	39.0	39.3	41.6	43.4	44.7	47.2
$1.05 \times 10^1$	45.0	45.6	47.3	49.0	50.2	52.7
$1.25 \times 10^1$	49.8	50.3	52.1	53.8	54.9	57.5
$1.40 \times 10^1$	53.9	54.3	56.0	57.2	58.6	61.0
$1.83 \times 10^1$	60.5	60.3	62.3	63.8	64.9	67.2
$2.00 \times 10^1$	63.2	62.8	64.5	66.0	67.3	69.5

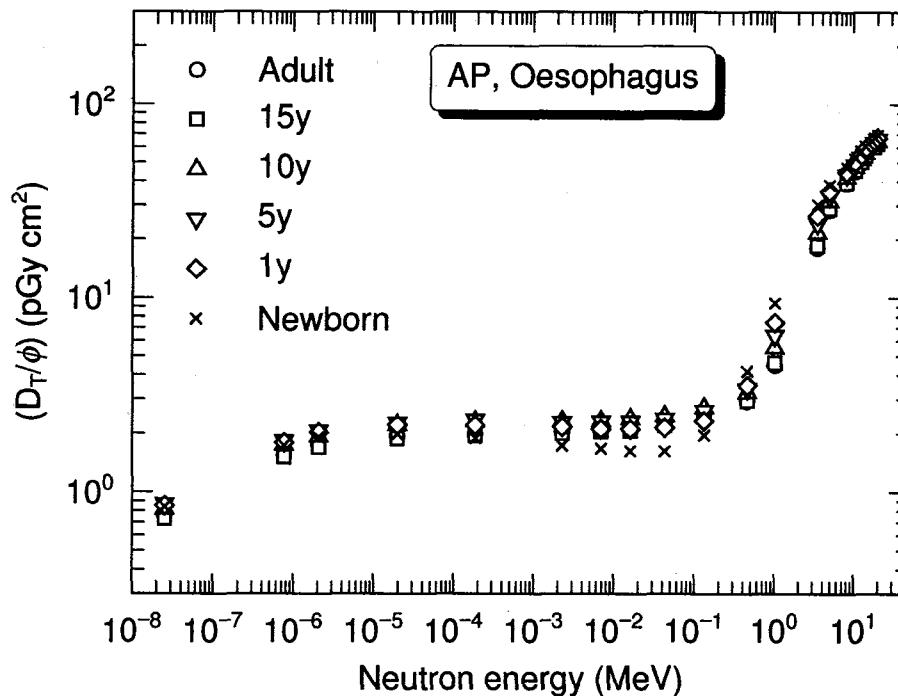


図 3.23 AP 照射におけるフルエンスあたりの食道の吸収線量

表 3.12 AP 照射におけるフルエンスあたりの“残りの臓器・組織”の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	1.01	0.97	1.02	1.02	0.99	0.96
$7.70 \times 10^{-7}$	2.01	1.94	2.04	1.99	1.89	1.75
$2.09 \times 10^{-6}$	2.22	2.11	2.21	2.16	2.02	1.86
$1.99 \times 10^{-5}$	2.54	2.30	2.40	2.31	2.14	1.90
$1.88 \times 10^{-4}$	2.41	2.32	2.37	2.30	2.07	1.77
$2.29 \times 10^{-3}$	2.38	2.28	2.35	2.23	2.00	1.62
$6.97 \times 10^{-3}$	2.38	2.28	2.35	2.23	1.98	1.59
$1.62 \times 10^{-2}$	2.45	2.33	2.39	2.26	2.01	1.63
$4.34 \times 10^{-2}$	2.57	2.49	2.57	2.46	2.21	1.88
$1.34 \times 10^{-1}$	3.19	3.10	3.26	3.18	2.99	2.91
$4.60 \times 10^{-1}$	4.89	4.89	5.36	5.57	5.82	6.74
$1.03 \times 10^0$	8.18	8.23	9.29	9.92	10.8	12.8
$3.54 \times 10^0$	24.5	24.8	27.3	28.7	30.4	33.8
$5.00 \times 10^0$	33.4	33.5	35.8	36.9	38.1	40.4
$8.20 \times 10^0$	43.7	43.5	45.5	46.4	47.3	49.2
$1.05 \times 10^1$	49.7	49.4	51.3	52.2	52.9	54.8
$1.25 \times 10^1$	54.7	54.4	56.4	57.1	57.8	59.6
$1.40 \times 10^1$	58.5	58.3	60.1	60.6	61.4	63.1
$1.83 \times 10^1$	64.9	64.7	66.3	66.9	67.5	69.2
$2.00 \times 10^1$	67.3	67.0	68.6	69.1	69.7	71.4

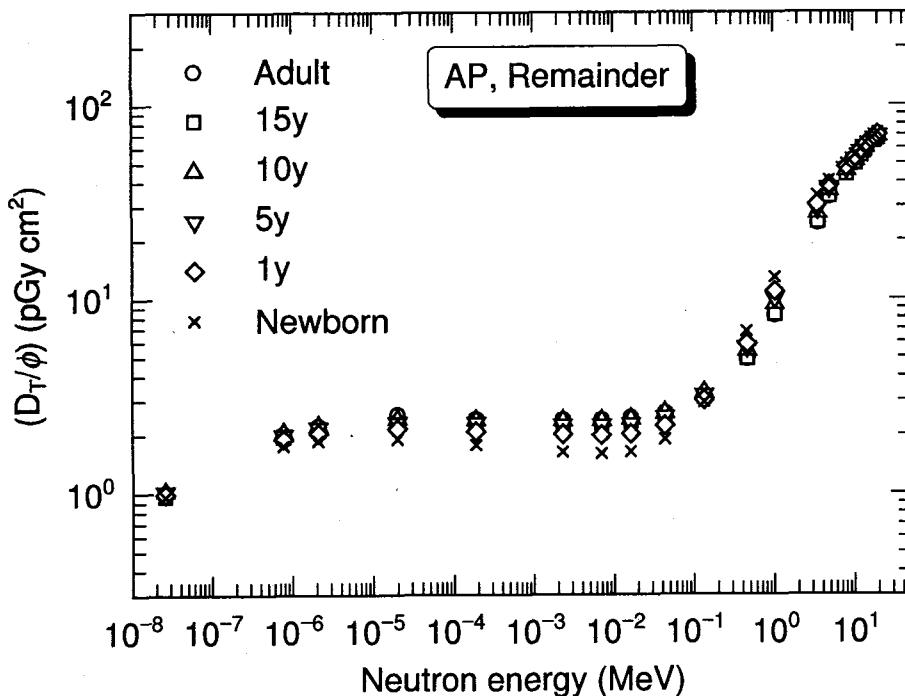


図 3.24 AP 照射におけるフルエンスあたりの“残りの臓器・組織”の吸収線量

表 3.13 AP 照射におけるフルエンスあたりの皮膚の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	1.23	1.19	1.13	1.06	0.95	0.82
$7.70 \times 10^{-7}$	1.59	1.51	1.41	1.29	1.10	0.89
$2.09 \times 10^{-6}$	1.64	1.55	1.44	1.30	1.10	0.88
$1.99 \times 10^{-5}$	1.62	1.53	1.41	1.26	1.05	0.80
$1.88 \times 10^{-4}$	1.53	1.44	1.31	1.15	0.95	0.71
$2.29 \times 10^{-3}$	1.53	1.44	1.31	1.15	0.95	0.72
$6.97 \times 10^{-3}$	1.72	1.63	1.51	1.36	1.16	0.94
$1.62 \times 10^{-2}$	2.12	2.03	1.93	1.79	1.60	1.39
$4.34 \times 10^{-2}$	3.19	3.12	3.06	2.92	2.75	2.57
$1.34 \times 10^{-1}$	5.80	5.77	5.77	5.68	5.55	5.45
$4.60 \times 10^{-1}$	11.8	11.9	12.0	12.0	12.0	12.1
$1.03 \times 10^0$	18.1	18.3	18.8	19.0	19.2	19.5
$3.54 \times 10^0$	34.5	35.2	36.3	36.9	37.3	38.1
$5.00 \times 10^0$	38.9	39.5	40.7	41.3	41.7	42.5
$8.20 \times 10^0$	47.8	48.3	49.5	49.9	50.3	50.8
$1.05 \times 10^1$	53.7	54.2	55.3	55.7	56.0	56.5
$1.25 \times 10^1$	58.3	58.9	60.0	60.4	60.5	61.0
$1.40 \times 10^1$	61.8	62.3	63.5	63.9	64.1	64.6
$1.83 \times 10^1$	67.9	68.4	69.7	70.0	70.3	70.8
$2.00 \times 10^1$	70.1	70.6	71.8	72.2	72.4	72.9

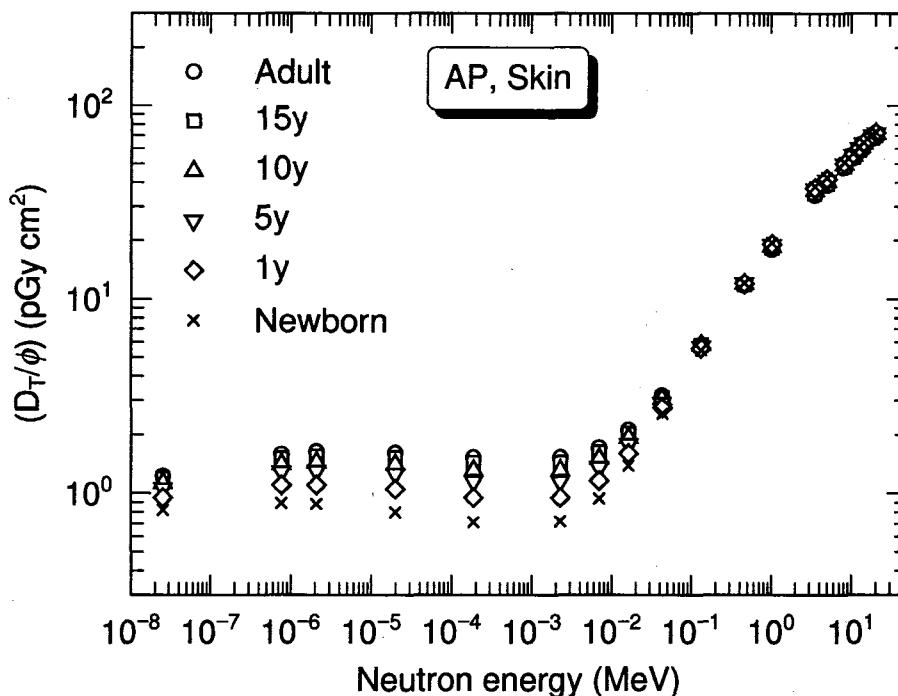


図 3.25 AP 照射におけるフルエンスあたりの皮膚の吸収線量

表 3.14 AP 照射におけるフルエンスあたりの胃の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	1.67	1.63	1.72	1.69	1.61	1.54
$7.70 \times 10^{-7}$	3.42	3.30	3.40	3.30	3.05	2.70
$2.09 \times 10^{-6}$	3.76	3.66	3.68	3.56	3.22	2.80
$1.99 \times 10^{-5}$	4.07	3.92	3.90	3.68	3.27	2.72
$1.88 \times 10^{-4}$	4.03	3.88	3.79	3.54	3.05	2.44
$2.29 \times 10^{-3}$	3.96	3.78	3.66	3.31	2.83	2.14
$6.97 \times 10^{-3}$	3.96	3.74	3.57	3.26	2.76	2.12
$1.62 \times 10^{-2}$	3.96	3.75	3.59	3.32	2.82	2.17
$4.34 \times 10^{-2}$	4.16	3.96	3.92	3.63	3.17	2.66
$1.34 \times 10^{-1}$	5.08	4.92	5.19	5.08	4.85	4.77
$4.60 \times 10^{-1}$	8.45	8.44	9.88	10.5	10.9	12.1
$1.03 \times 10^0$	14.9	15.1	17.4	18.4	19.2	20.7
$3.54 \times 10^0$	39.5	39.3	41.9	42.8	43.5	44.4
$5.00 \times 10^0$	46.9	46.4	47.7	48.1	48.0	47.9
$8.20 \times 10^0$	57.6	56.7	57.4	57.5	57.1	56.7
$1.05 \times 10^1$	63.7	63.1	63.5	63.7	62.9	62.5
$1.25 \times 10^1$	69.2	68.4	69.0	69.0	67.9	67.3
$1.40 \times 10^1$	72.6	72.0	72.4	72.3	71.3	70.7
$1.83 \times 10^1$	78.6	78.0	78.2	78.1	77.4	76.7
$2.00 \times 10^1$	80.9	80.4	80.4	80.4	79.5	78.7

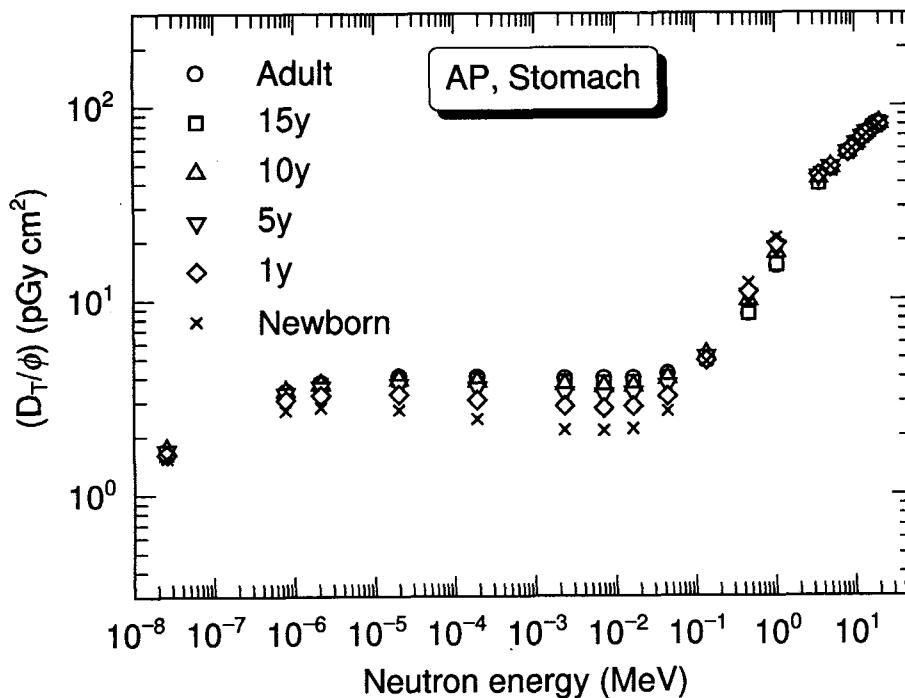


図 3.26 AP 照射におけるフルエンスあたりの胃の吸収線量

表 3.15 AP 照射におけるフルエンスあたりの甲状腺の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	2.22	2.28	2.20	2.26	2.04	1.81
$7.70 \times 10^{-7}$	3.27	3.21	2.98	2.76	2.62	2.22
$2.09 \times 10^{-6}$	3.37	3.20	2.99	2.70	2.56	2.26
$1.99 \times 10^{-5}$	3.04	3.03	2.80	2.60	2.42	2.01
$1.88 \times 10^{-4}$	2.78	2.74	2.53	2.36	2.22	1.76
$2.29 \times 10^{-3}$	2.63	2.45	2.37	2.24	2.09	1.63
$6.97 \times 10^{-3}$	2.75	2.72	2.54	2.41	2.35	1.83
$1.62 \times 10^{-2}$	2.99	3.05	3.06	3.06	2.97	2.35
$4.34 \times 10^{-2}$	4.26	4.50	4.49	4.76	4.85	3.93
$1.34 \times 10^{-1}$	7.96	8.49	8.77	9.39	9.60	8.24
$4.60 \times 10^{-1}$	18.6	19.5	20.5	21.5	22.0	19.6
$1.03 \times 10^0$	28.7	29.9	31.0	32.6	32.9	29.7
$3.54 \times 10^0$	53.5	55.4	56.1	57.9	57.6	52.9
$5.00 \times 10^0$	55.4	56.3	57.0	58.3	57.6	53.7
$8.20 \times 10^0$	64.5	65.3	65.9	67.5	66.4	62.1
$1.05 \times 10^1$	71.5	72.2	71.9	73.4	73.0	68.4
$1.25 \times 10^1$	77.4	77.3	77.4	79.0	78.5	73.6
$1.40 \times 10^1$	80.7	80.8	80.9	82.2	81.4	77.0
$1.83 \times 10^1$	86.2	86.7	86.4	88.3	87.1	82.7
$2.00 \times 10^1$	88.1	89.2	88.6	90.3	89.0	84.7

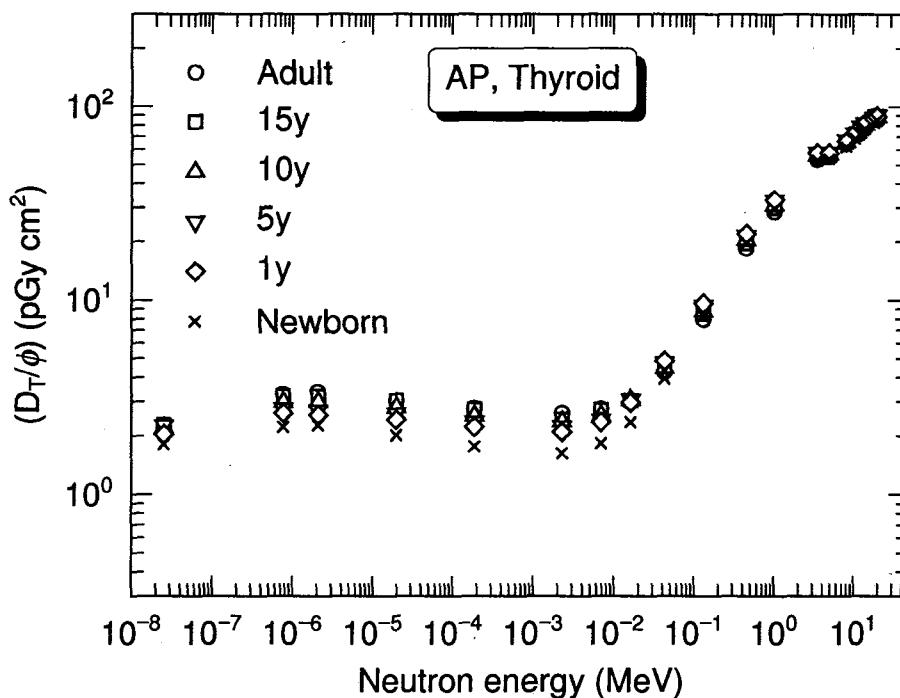


図 3.27 AP 照射におけるフルエンスあたりの甲状腺の吸収線量

表 3.16 AP 照射におけるフルエンスあたりの実効線量  $E/\phi$  (pSv cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	7.95	7.79	7.84	7.81	7.26	6.73
$7.70 \times 10^{-7}$	14.3	13.7	13.2	12.8	11.5	10.1
$2.09 \times 10^{-6}$	15.3	14.6	14.1	13.4	11.9	10.5
$1.99 \times 10^{-5}$	16.2	15.2	14.7	13.6	12.1	10.5
$1.88 \times 10^{-4}$	15.7	14.9	14.0	13.2	11.6	9.66
$2.29 \times 10^{-3}$	15.5	14.8	13.9	12.9	11.5	8.97
$6.97 \times 10^{-3}$	17.7	16.9	16.0	14.9	13.0	10.2
$1.62 \times 10^{-2}$	23.3	22.3	22.0	20.3	17.8	14.2
$4.34 \times 10^{-2}$	40.2	39.4	40.6	38.9	35.4	30.8
$1.34 \times 10^{-1}$	88.8	89.6	99.0	98.1	95.0	92.7
$4.60 \times 10^{-1}$	206	212	246	255	259	275
$1.03 \times 10^0$	319	328	376	391	404	428
$3.54 \times 10^0$	517	522	562	575	585	598
$5.00 \times 10^0$	522	525	546	554	556	559
$8.20 \times 10^0$	516	513	527	531	530	529
$1.05 \times 10^1$	517	515	525	528	526	525
$1.25 \times 10^1$	521	521	530	531	528	526
$1.40 \times 10^1$	526	524	534	534	532	530
$1.83 \times 10^1$	519	518	526	527	524	523
$2.00 \times 10^1$	519	518	525	526	523	522

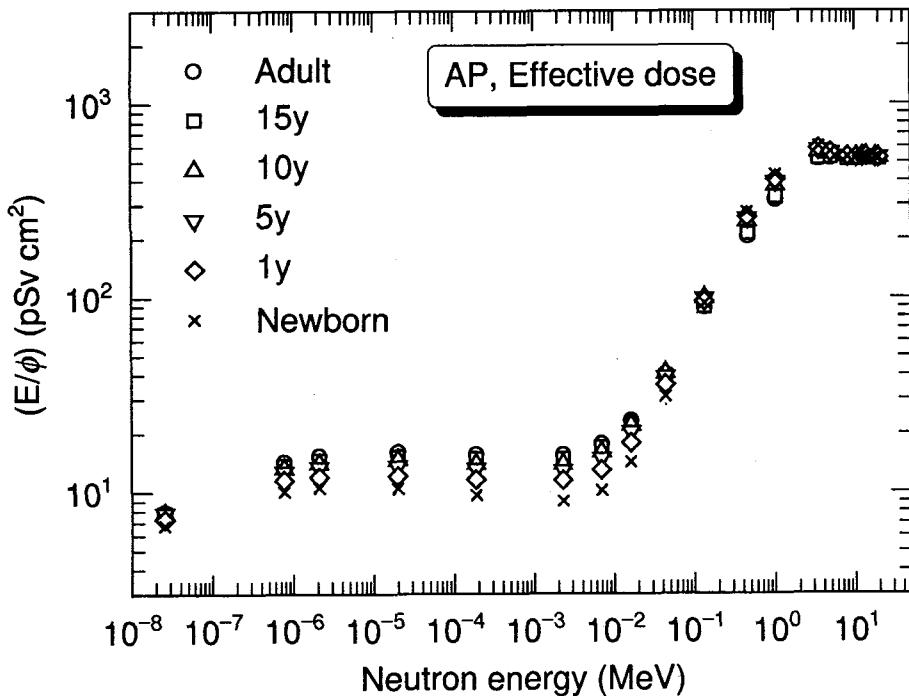


図 3.28 AP 照射におけるフルエンスあたりの実効線量

表 3.17 ROT 照射におけるフルエンスあたりの膀胱の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.75	0.76	0.83	0.85	0.84	0.85
$7.70 \times 10^{-7}$	1.53	1.54	1.63	1.66	1.61	1.59
$2.09 \times 10^{-6}$	1.65	1.65	1.78	1.81	1.77	1.67
$1.99 \times 10^{-5}$	1.80	1.85	1.92	1.95	1.89	1.72
$1.88 \times 10^{-4}$	1.83	1.84	1.96	1.97	1.85	1.59
$2.29 \times 10^{-3}$	1.82	1.83	1.90	1.88	1.75	1.47
$6.97 \times 10^{-3}$	1.84	1.85	1.92	1.87	1.73	1.42
$1.62 \times 10^{-2}$	1.86	1.86	1.93	1.89	1.76	1.43
$4.34 \times 10^{-2}$	1.96	1.95	2.05	1.99	1.84	1.58
$1.34 \times 10^{-1}$	2.27	2.28	2.46	2.49	2.41	2.38
$4.60 \times 10^{-1}$	3.28	3.38	3.86	4.20	4.61	5.64
$1.03 \times 10^0$	5.55	5.84	6.89	7.83	9.06	11.4
$3.54 \times 10^0$	18.4	19.3	22.5	25.0	27.9	32.1
$5.00 \times 10^0$	27.0	28.1	31.3	33.5	36.2	39.0
$8.20 \times 10^0$	36.3	37.8	41.0	42.8	45.2	48.0
$1.05 \times 10^1$	42.3	43.2	46.8	48.6	50.8	53.3
$1.25 \times 10^1$	46.9	47.7	51.6	53.2	55.4	58.1
$1.40 \times 10^1$	50.5	51.6	55.4	56.8	59.0	61.7
$1.83 \times 10^1$	56.9	58.2	61.3	63.3	65.3	67.9
$2.00 \times 10^1$	59.3	60.6	63.6	65.6	67.5	70.0

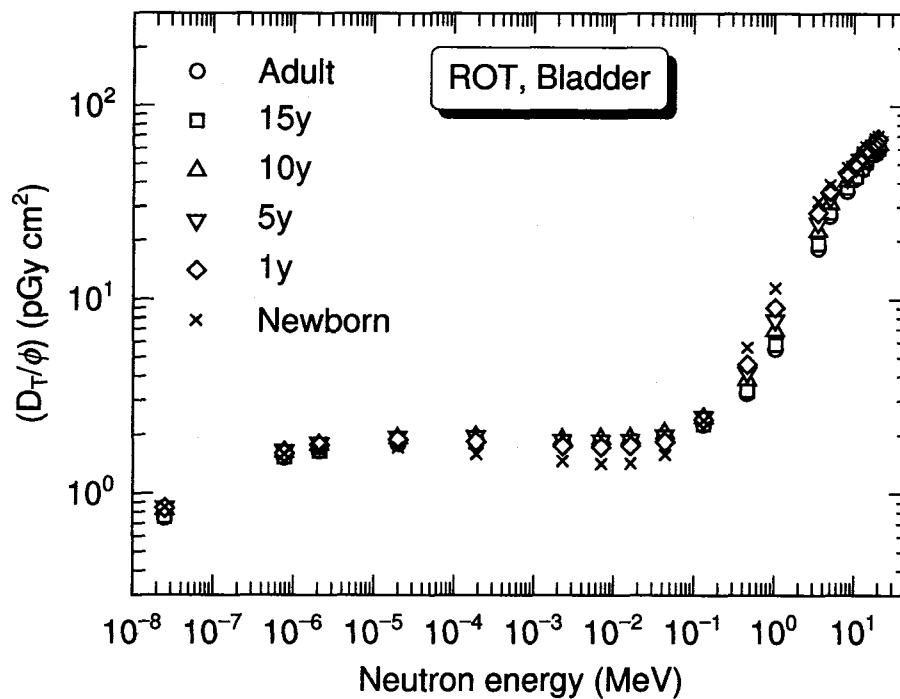


図 3.29 ROT 照射におけるフルエンスあたりの膀胱の吸収線量

表 3.18 ROT 照射におけるフルエンスあたりの赤色骨髓の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.88	0.90	0.93	0.93	0.91	0.88
$7.70 \times 10^{-7}$	1.66	1.67	1.66	1.60	1.50	1.32
$2.09 \times 10^{-6}$	1.79	1.80	1.77	1.69	1.56	1.34
$1.99 \times 10^{-5}$	1.88	1.89	1.83	1.71	1.54	1.26
$1.88 \times 10^{-4}$	1.86	1.84	1.76	1.60	1.42	1.11
$2.29 \times 10^{-3}$	1.80	1.77	1.66	1.49	1.30	1.00
$6.97 \times 10^{-3}$	1.80	1.77	1.66	1.50	1.32	1.04
$1.62 \times 10^{-2}$	1.85	1.83	1.72	1.58	1.43	1.20
$4.34 \times 10^{-2}$	2.04	2.04	2.00	1.92	1.85	1.76
$1.34 \times 10^{-1}$	2.82	2.88	3.02	3.13	3.32	3.61
$4.60 \times 10^{-1}$	5.25	5.58	6.36	7.02	7.82	9.03
$1.03 \times 10^0$	9.37	10.0	11.5	12.6	14.0	15.9
$3.54 \times 10^0$	26.3	27.7	30.3	32.0	34.0	36.9
$5.00 \times 10^0$	33.7	34.8	37.1	38.3	39.8	41.8
$8.20 \times 10^0$	42.9	44.0	46.2	47.3	48.7	50.5
$1.05 \times 10^1$	48.4	49.6	51.7	52.9	54.2	55.9
$1.25 \times 10^1$	53.1	54.4	56.5	57.7	59.0	60.8
$1.40 \times 10^1$	56.7	58.0	60.1	61.3	62.6	64.3
$1.83 \times 10^1$	63.9	65.1	67.3	68.5	69.9	71.7
$2.00 \times 10^1$	66.2	67.4	69.6	70.8	72.2	73.9

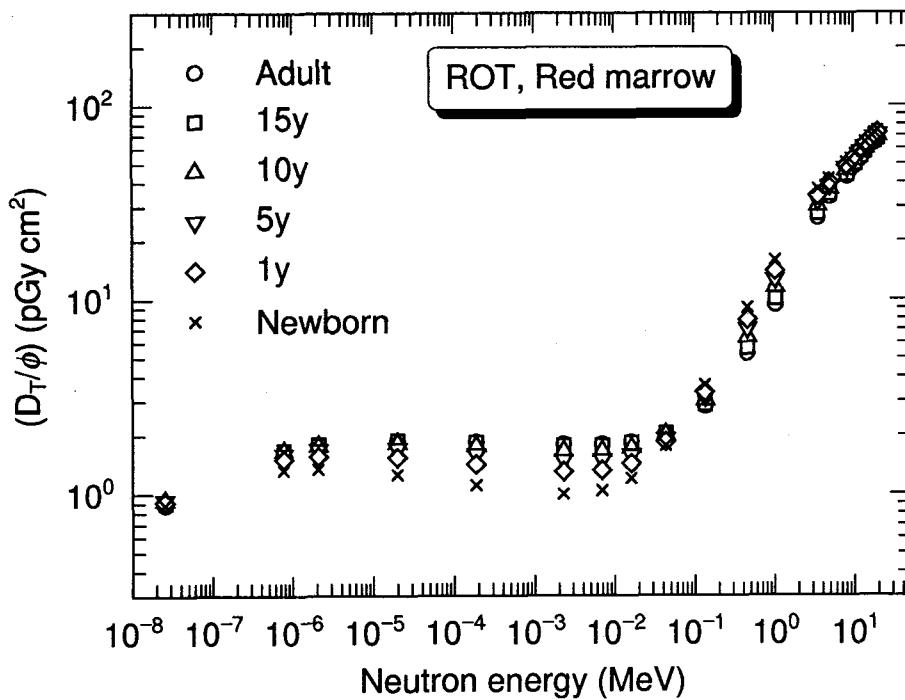


図 3.30 ROT 照射におけるフルエンスあたりの赤色骨髓の吸収線量

表 3.19 ROT 照射におけるフルエンスあたりの骨の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.86	0.88	0.90	0.90	0.88	0.85
$7.70 \times 10^{-7}$	1.61	1.62	1.61	1.55	1.44	1.27
$2.09 \times 10^{-6}$	1.74	1.75	1.72	1.63	1.50	1.30
$1.99 \times 10^{-5}$	1.83	1.83	1.78	1.65	1.49	1.22
$1.88 \times 10^{-4}$	1.81	1.79	1.70	1.55	1.37	1.08
$2.29 \times 10^{-3}$	1.74	1.71	1.60	1.44	1.25	0.95
$6.97 \times 10^{-3}$	1.74	1.71	1.59	1.43	1.24	0.96
$1.62 \times 10^{-2}$	1.77	1.74	1.63	1.48	1.31	1.06
$4.34 \times 10^{-2}$	1.91	1.89	1.82	1.70	1.91	1.44
$1.34 \times 10^{-1}$	2.47	2.50	2.54	2.55	2.61	2.72
$4.60 \times 10^{-1}$	4.20	4.41	4.89	5.29	5.80	6.57
$1.03 \times 10^0$	7.12	7.56	8.53	9.26	10.1	11.4
$3.54 \times 10^0$	19.2	20.1	21.9	23.1	24.4	26.5
$5.00 \times 10^0$	24.8	25.6	27.2	28.1	29.1	30.6
$8.20 \times 10^0$	32.1	32.9	34.4	35.3	36.2	37.5
$1.05 \times 10^1$	36.7	37.6	39.2	40.0	41.0	42.2
$1.25 \times 10^1$	40.7	41.6	43.2	44.0	45.0	46.3
$1.40 \times 10^1$	43.6	44.5	46.1	46.9	47.9	49.3
$1.83 \times 10^1$	48.7	49.5	51.2	52.1	53.1	54.5
$2.00 \times 10^1$	50.2	51.1	52.7	53.5	54.6	55.8

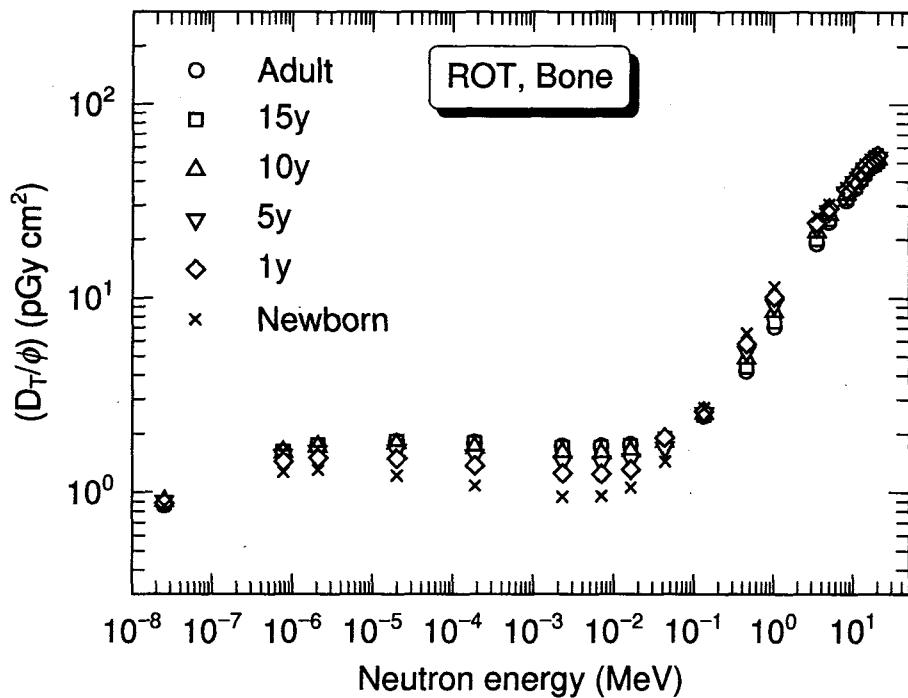


図 3.31 ROT 照射におけるフルエンスあたりの骨の吸収線量

表 3.20 ROT 照射におけるフルエンスあたりの女性乳房の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.92	0.90	0.94	0.89	0.86	0.73
$7.70 \times 10^{-7}$	1.41	1.39	1.12	1.09	1.01	0.86
$2.09 \times 10^{-6}$	1.47	1.42	1.14	1.07	1.02	0.81
$1.99 \times 10^{-5}$	1.43	1.41	1.12	1.13	0.99	0.81
$1.88 \times 10^{-4}$	1.32	1.31	1.07	0.96	0.87	0.73
$2.29 \times 10^{-3}$	1.26	1.22	1.05	1.01	0.87	0.79
$6.97 \times 10^{-3}$	1.27	1.25	1.20	1.18	1.08	0.93
$1.62 \times 10^{-2}$	1.40	1.36	1.54	1.55	1.48	1.36
$4.34 \times 10^{-2}$	1.79	1.83	2.53	2.50	2.44	2.44
$1.34 \times 10^{-1}$	3.21	3.23	4.96	5.04	5.03	5.26
$4.60 \times 10^{-1}$	7.32	7.37	10.6	10.9	10.9	11.5
$1.03 \times 10^0$	12.5	12.6	16.8	17.2	17.5	18.6
$3.54 \times 10^0$	28.3	28.5	33.3	34.3	35.0	37.9
$5.00 \times 10^0$	33.8	34.0	37.9	39.2	40.0	42.5
$8.20 \times 10^0$	42.3	42.9	46.2	47.6	48.8	50.9
$1.05 \times 10^1$	47.8	48.6	52.2	53.1	54.1	57.1
$1.25 \times 10^1$	52.0	53.0	56.7	58.0	58.9	61.7
$1.40 \times 10^1$	55.6	56.4	60.2	61.4	62.4	64.6
$1.83 \times 10^1$	61.9	62.5	66.5	67.7	68.2	71.1
$2.00 \times 10^1$	64.1	64.6	68.5	70.1	70.4	73.2

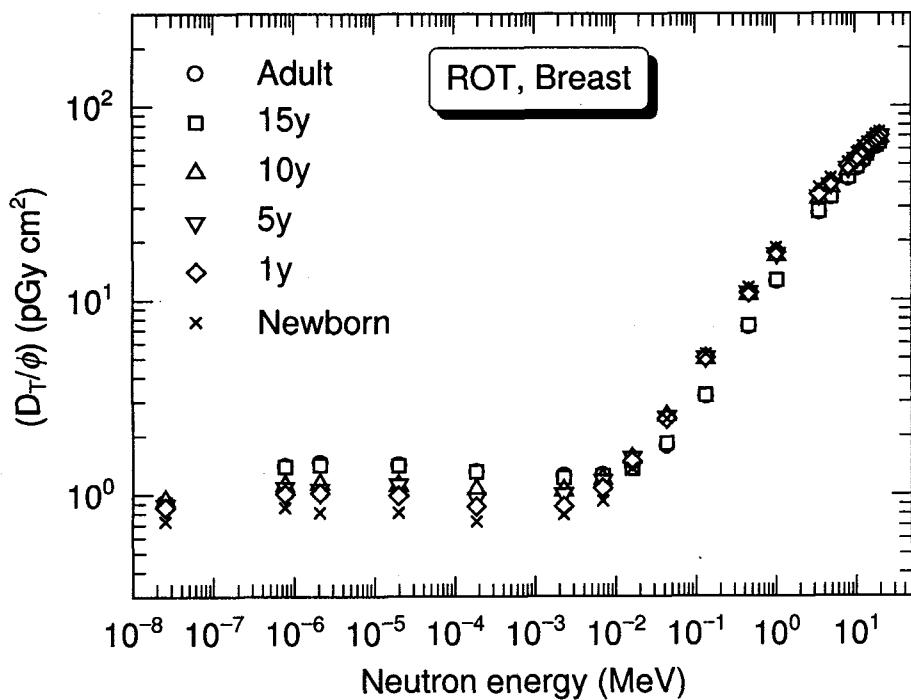


図 3.32 ROT 照射におけるフルエンスあたりの女性乳房の吸収線量

表 3.21 ROT 照射におけるフルエンスあたりの結腸の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.69	0.72	0.78	0.82	0.84	0.87
$7.70 \times 10^{-7}$	1.44	1.47	1.61	1.69	1.72	1.72
$2.09 \times 10^{-6}$	1.60	1.62	1.79	1.87	1.89	1.86
$1.99 \times 10^{-5}$	1.79	1.82	1.99	2.05	2.06	1.93
$1.88 \times 10^{-4}$	1.85	1.87	2.01	2.09	2.03	1.84
$2.29 \times 10^{-3}$	1.86	1.90	2.03	2.06	1.95	1.67
$6.97 \times 10^{-3}$	1.89	1.90	2.02	2.04	1.93	1.61
$1.62 \times 10^{-2}$	1.89	1.94	2.06	2.06	1.93	1.60
$4.34 \times 10^{-2}$	1.98	2.02	2.13	2.13	1.99	1.68
$1.34 \times 10^{-1}$	2.22	2.28	2.43	2.43	2.38	2.35
$4.60 \times 10^{-1}$	2.82	2.92	3.35	3.70	4.23	5.37
$1.03 \times 10^0$	4.76	5.06	6.22	7.19	8.67	11.2
$3.54 \times 10^0$	17.9	19.0	22.4	24.9	28.0	32.5
$5.00 \times 10^0$	27.1	28.3	31.6	33.9	36.5	39.6
$8.20 \times 10^0$	36.8	38.2	41.3	43.4	45.7	48.4
$1.05 \times 10^1$	42.5	43.8	47.1	49.2	51.4	54.0
$1.25 \times 10^1$	47.1	48.5	51.8	54.0	56.0	58.6
$1.40 \times 10^1$	50.8	52.5	55.5	57.6	59.7	62.2
$1.83 \times 10^1$	57.5	58.8	61.7	63.8	65.8	68.4
$2.00 \times 10^1$	59.7	61.1	64.0	66.1	68.1	70.5

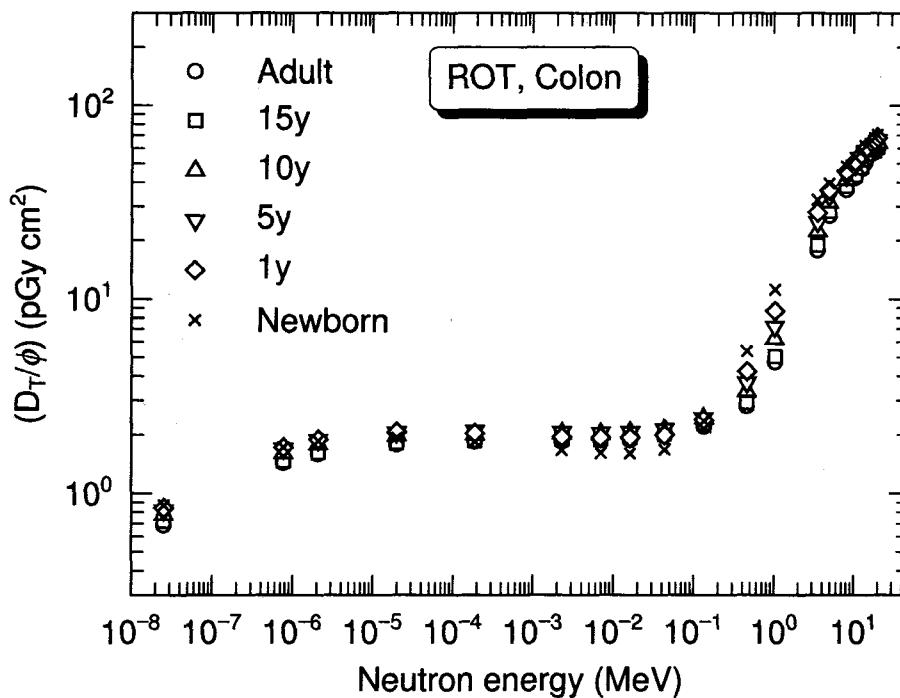


図 3.33 ROT 照射におけるフルエンスあたりの結腸の吸収線量

表 3.22 ROT 照射におけるフルエンスあたりの女性生殖腺(卵巣)の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.64	0.66	0.75	0.75	0.80	0.85
$7.70 \times 10^{-7}$	1.31	1.30	1.57	1.59	1.70	1.72
$2.09 \times 10^{-6}$	1.48	1.44	1.70	1.76	1.85	1.90
$1.99 \times 10^{-5}$	1.72	1.67	1.91	1.97	2.09	2.07
$1.88 \times 10^{-4}$	1.68	1.76	2.00	2.00	2.15	1.88
$2.29 \times 10^{-3}$	1.71	1.71	1.99	2.05	2.04	1.80
$6.97 \times 10^{-3}$	1.81	1.75	2.00	2.08	2.02	1.74
$1.62 \times 10^{-2}$	1.73	1.83	2.07	2.08	2.04	1.65
$4.34 \times 10^{-2}$	1.84	1.95	2.17	2.21	2.13	1.66
$1.34 \times 10^{-1}$	2.21	2.27	2.50	2.47	2.39	2.23
$4.60 \times 10^{-1}$	2.54	2.58	3.03	3.25	3.69	4.74
$1.03 \times 10^0$	3.97	4.34	5.39	6.36	7.87	10.4
$3.54 \times 10^0$	16.2	17.2	21.1	23.7	27.4	32.0
$5.00 \times 10^0$	25.8	27.4	31.0	33.1	36.4	39.5
$8.20 \times 10^0$	35.9	37.6	40.9	42.7	46.2	48.5
$1.05 \times 10^1$	42.2	43.0	46.9	48.5	51.6	54.1
$1.25 \times 10^1$	46.0	47.3	52.0	53.5	55.6	58.8
$1.40 \times 10^1$	50.1	51.7	55.5	57.1	59.3	62.3
$1.83 \times 10^1$	56.9	57.9	62.0	63.2	65.9	68.5
$2.00 \times 10^1$	58.1	60.5	64.0	65.1	68.6	70.6

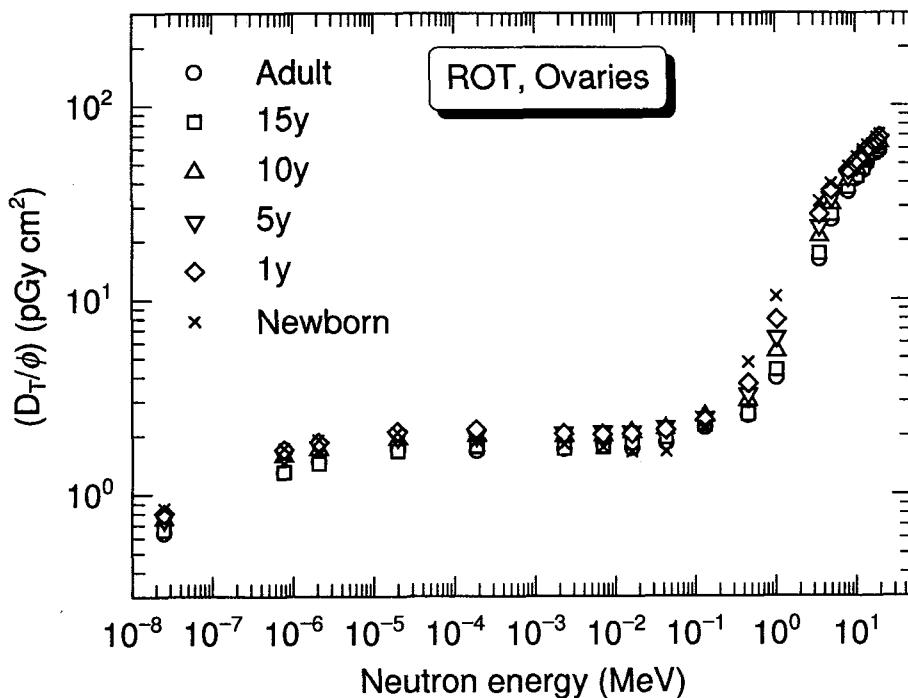


図 3.34 ROT 照射におけるフルエンスあたりの女性生殖腺(卵巣)の吸収線量

表 3.23 ROT 照射におけるフルエンスあたりの男性生殖腺(睾丸)の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.98	0.96	1.00	0.93	0.94	0.87
$7.70 \times 10^{-7}$	1.61	1.53	1.44	1.37	1.29	1.19
$2.09 \times 10^{-6}$	1.71	1.71	1.47	1.46	1.36	1.20
$1.99 \times 10^{-5}$	1.72	1.63	1.52	1.43	1.35	1.13
$1.88 \times 10^{-4}$	1.63	1.63	1.40	1.37	1.28	1.05
$2.29 \times 10^{-3}$	1.56	1.47	1.38	1.33	1.21	0.95
$6.97 \times 10^{-3}$	1.55	1.53	1.44	1.44	1.28	1.01
$1.62 \times 10^{-2}$	1.58	1.60	1.61	1.55	1.47	1.27
$4.34 \times 10^{-2}$	1.96	2.10	2.20	2.24	2.14	1.93
$1.34 \times 10^{-1}$	2.97	3.20	3.98	3.89	3.99	4.03
$4.60 \times 10^{-1}$	6.02	6.74	8.23	8.45	8.95	9.70
$1.03 \times 10^0$	9.91	11.3	13.6	13.7	15.3	17.0
$3.54 \times 10^0$	23.7	25.7	29.6	31.0	34.4	37.7
$5.00 \times 10^0$	29.1	31.9	35.6	37.1	40.6	43.1
$8.20 \times 10^0$	38.4	41.4	44.9	46.1	49.8	51.6
$1.05 \times 10^1$	44.1	47.6	51.2	52.0	55.4	57.4
$1.25 \times 10^1$	48.7	52.1	55.8	56.7	59.8	61.9
$1.40 \times 10^1$	52.2	55.9	59.5	60.2	63.3	65.3
$1.83 \times 10^1$	57.4	60.7	65.3	66.5	70.2	71.5
$2.00 \times 10^1$	59.5	63.4	67.4	68.6	72.5	74.0

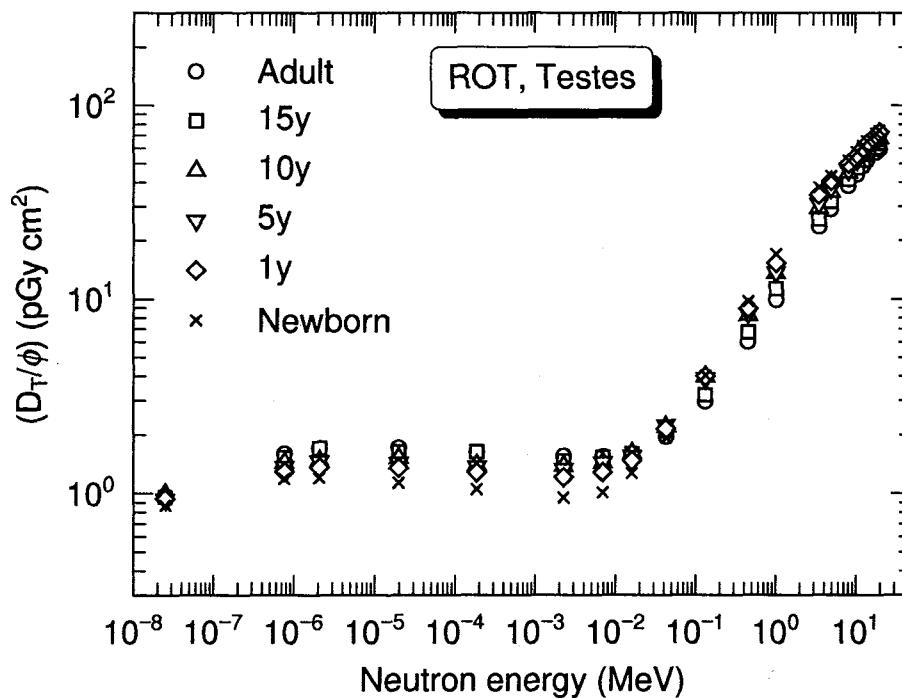


図 3.35 ROT 照射におけるフルエンスあたりの男性生殖腺(睾丸)の吸収線量

表 3.24 ROT 照射におけるフルエンスあたりの生殖腺の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.81	0.81	0.87	0.84	0.87	0.86
$7.70 \times 10^{-7}$	1.46	1.42	1.51	1.48	1.49	1.45
$2.09 \times 10^{-6}$	1.59	1.57	1.58	1.61	1.60	1.55
$1.99 \times 10^{-5}$	1.72	1.65	1.72	1.70	1.72	1.60
$1.88 \times 10^{-4}$	1.65	1.70	1.70	1.69	1.72	1.46
$2.29 \times 10^{-3}$	1.64	1.59	1.69	1.69	1.62	1.38
$6.97 \times 10^{-3}$	1.68	1.64	1.72	1.76	1.65	1.37
$1.62 \times 10^{-2}$	1.66	1.71	1.84	1.82	1.76	1.46
$4.34 \times 10^{-2}$	1.90	2.03	2.19	2.22	2.13	1.80
$1.34 \times 10^{-1}$	2.59	2.74	3.24	3.18	3.19	3.13
$4.60 \times 10^{-1}$	4.28	4.66	5.63	5.85	6.32	7.22
$1.03 \times 10^0$	6.94	7.81	9.47	10.0	11.6	13.7
$3.54 \times 10^0$	19.9	21.5	25.4	27.4	30.9	34.8
$5.00 \times 10^0$	27.5	29.6	33.3	35.1	38.5	41.3
$8.20 \times 10^0$	37.2	39.5	42.9	44.4	48.0	50.1
$1.05 \times 10^1$	43.2	45.3	49.1	50.2	53.5	55.8
$1.25 \times 10^1$	47.4	49.7	53.9	55.1	57.7	60.4
$1.40 \times 10^1$	51.1	53.8	57.5	58.7	61.3	63.8
$1.83 \times 10^1$	57.2	59.3	63.7	64.9	68.0	70.0
$2.00 \times 10^1$	58.8	62.0	65.7	66.8	70.5	72.3

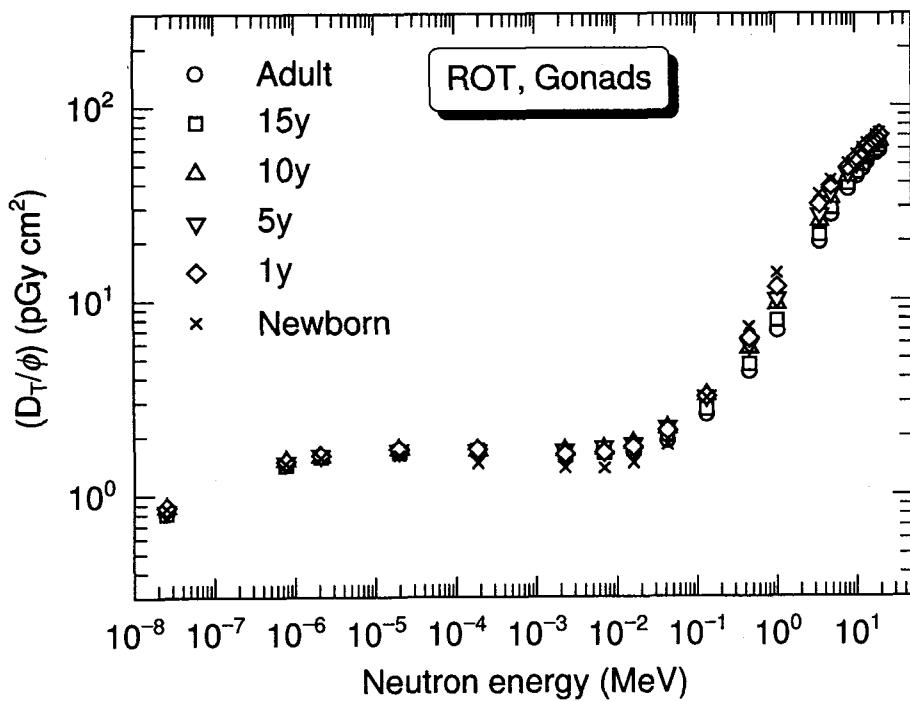


図 3.36 ROT 照射におけるフルエンスあたりの生殖腺の吸収線量

表 3.25 ROT 照射におけるフルエンスあたりの肝臓の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.81	0.80	0.86	0.88	0.90	0.90
$7.70 \times 10^{-7}$	1.63	1.64	1.74	1.76	1.73	1.65
$2.09 \times 10^{-6}$	1.80	1.81	1.90	1.91	1.87	1.75
$1.99 \times 10^{-5}$	1.96	1.99	2.06	2.05	1.97	1.76
$1.88 \times 10^{-4}$	2.00	1.99	2.04	2.01	1.89	1.62
$2.29 \times 10^{-3}$	1.96	1.96	1.98	1.93	1.78	1.46
$6.97 \times 10^{-3}$	1.98	1.96	1.97	1.90	1.75	1.42
$1.62 \times 10^{-2}$	2.01	1.98	1.97	1.91	1.76	1.46
$4.34 \times 10^{-2}$	2.06	2.07	2.09	2.04	1.92	1.70
$1.34 \times 10^{-1}$	2.45	2.45	2.56	2.63	2.66	2.79
$4.60 \times 10^{-1}$	3.63	3.77	4.37	4.88	5.58	6.79
$1.03 \times 10^0$	6.52	6.86	8.13	9.16	10.6	12.9
$3.54 \times 10^0$	21.1	22.0	24.8	27.0	29.8	33.6
$5.00 \times 10^0$	29.3	30.3	33.0	34.9	37.2	40.0
$8.20 \times 10^0$	38.7	39.8	42.4	44.1	46.3	48.8
$1.05 \times 10^1$	44.2	45.5	48.1	49.8	52.0	54.4
$1.25 \times 10^1$	48.9	50.1	52.7	54.4	56.7	59.0
$1.40 \times 10^1$	52.4	53.7	56.2	58.0	60.2	62.5
$1.83 \times 10^1$	58.7	59.8	62.4	64.3	66.4	68.6
$2.00 \times 10^1$	61.1	62.1	64.7	66.5	68.5	70.8

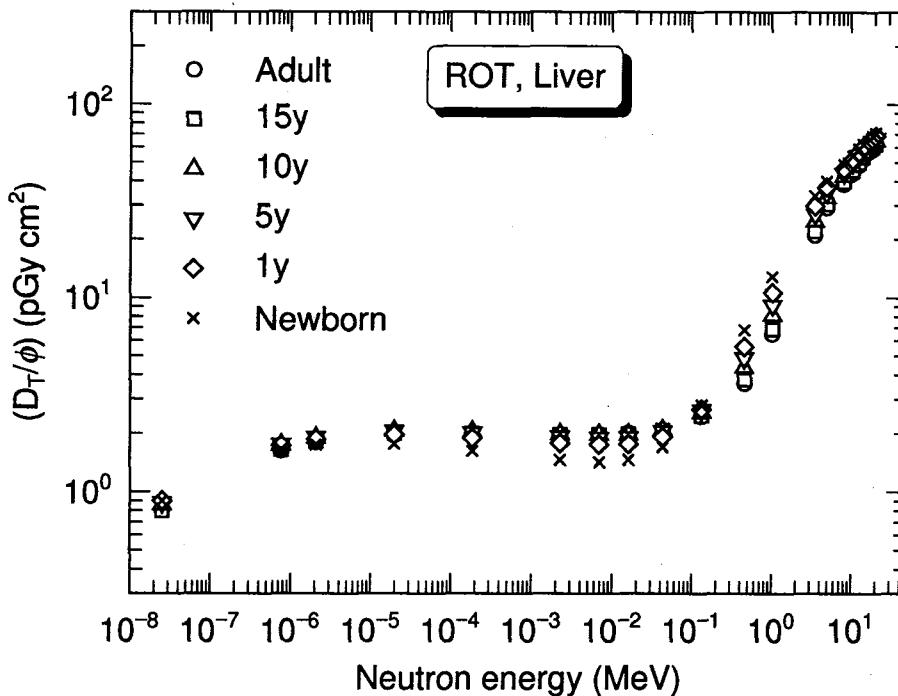


図 3.37 ROT 照射におけるフルエンスあたりの肝臓の吸収線量

表 3.26 ROT 照射におけるフルエンスあたりの肺の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.76	0.75	0.81	0.83	0.84	0.83
$7.70 \times 10^{-7}$	1.50	1.49	1.58	1.59	1.56	1.47
$2.09 \times 10^{-6}$	1.65	1.63	1.71	1.72	1.66	1.52
$1.99 \times 10^{-5}$	1.77	1.77	1.82	1.79	1.71	1.49
$1.88 \times 10^{-4}$	1.78	1.77	1.79	1.72	1.61	1.33
$2.29 \times 10^{-3}$	1.76	1.76	1.71	1.63	1.48	1.18
$6.97 \times 10^{-3}$	1.74	1.76	1.69	1.60	1.46	1.17
$1.62 \times 10^{-2}$	1.76	1.76	1.70	1.63	1.49	1.24
$4.34 \times 10^{-2}$	1.85	1.84	1.83	1.78	1.71	1.59
$1.34 \times 10^{-1}$	2.24	2.22	2.46	2.58	2.75	3.06
$4.60 \times 10^{-1}$	3.76	3.71	4.92	5.64	6.54	8.01
$1.03 \times 10^0$	7.42	7.37	9.73	11.1	12.7	15.0
$3.54 \times 10^0$	23.8	24.0	28.1	30.4	32.7	35.9
$5.00 \times 10^0$	32.6	32.9	36.4	38.4	40.2	42.1
$8.20 \times 10^0$	41.8	42.3	45.5	47.3	48.8	50.4
$1.05 \times 10^1$	47.5	48.0	51.3	53.1	54.5	56.2
$1.25 \times 10^1$	51.9	52.4	55.7	57.6	59.0	60.5
$1.40 \times 10^1$	55.6	56.1	59.4	61.2	62.6	64.1
$1.83 \times 10^1$	61.2	61.6	64.9	66.6	67.9	69.3
$2.00 \times 10^1$	63.3	63.8	67.0	68.6	70.0	71.3

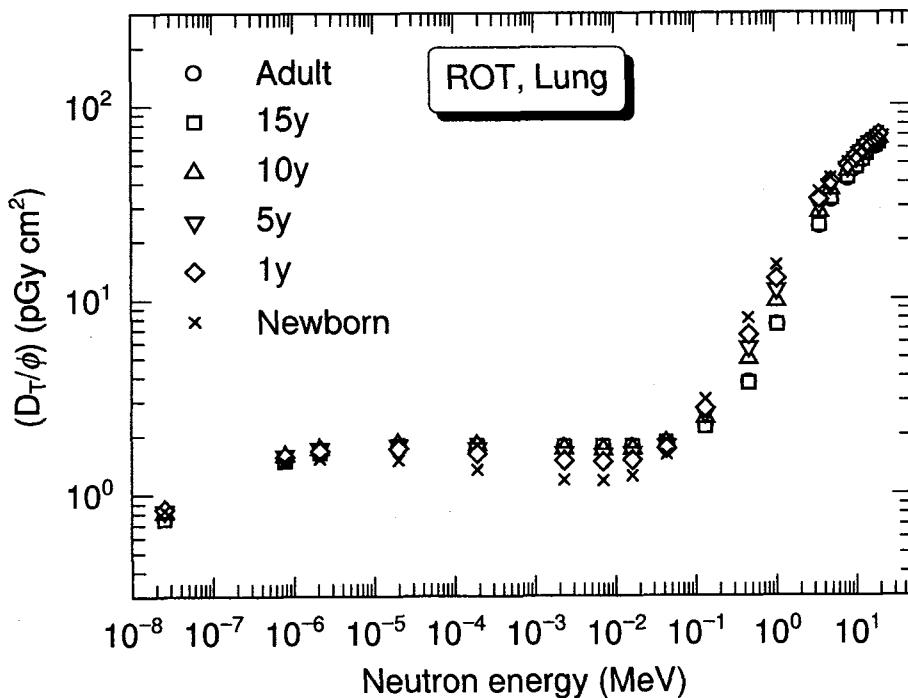


図 3.38 ROT 照射におけるフルエンスあたりの肺の吸収線量

表 3.27 ROT 照射におけるフルエンスあたりの食道の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.69	0.69	0.78	0.83	0.87	0.88
$7.70 \times 10^{-7}$	1.38	1.41	1.58	1.71	1.77	1.78
$2.09 \times 10^{-6}$	1.56	1.56	1.75	1.88	1.96	1.91
$1.99 \times 10^{-5}$	1.72	1.71	1.98	2.09	2.11	1.99
$1.88 \times 10^{-4}$	1.78	1.78	2.03	2.10	2.11	1.84
$2.29 \times 10^{-3}$	1.82	1.78	2.02	2.08	2.03	1.64
$6.97 \times 10^{-3}$	1.84	1.85	2.04	2.06	1.97	1.57
$1.62 \times 10^{-2}$	1.84	1.88	2.08	2.10	1.94	1.55
$4.34 \times 10^{-2}$	1.96	1.97	2.16	2.15	2.00	1.63
$1.34 \times 10^{-1}$	2.18	2.19	2.39	2.39	2.34	2.30
$4.60 \times 10^{-1}$	2.65	2.71	3.18	3.54	4.16	5.44
$1.03 \times 10^0$	4.31	4.45	5.89	7.14	8.84	11.6
$3.54 \times 10^0$	16.9	17.8	22.4	25.6	29.1	33.6
$5.00 \times 10^0$	26.5	27.5	32.0	34.7	37.4	40.6
$8.20 \times 10^0$	36.5	37.3	41.6	44.1	46.6	49.5
$1.05 \times 10^1$	41.9	43.3	47.4	49.9	52.5	54.8
$1.25 \times 10^1$	46.4	47.9	52.0	54.3	57.3	59.6
$1.40 \times 10^1$	50.1	51.8	55.8	58.1	60.9	63.2
$1.83 \times 10^1$	56.3	57.7	61.7	64.2	66.8	69.3
$2.00 \times 10^1$	58.8	59.9	64.1	66.5	68.9	71.5

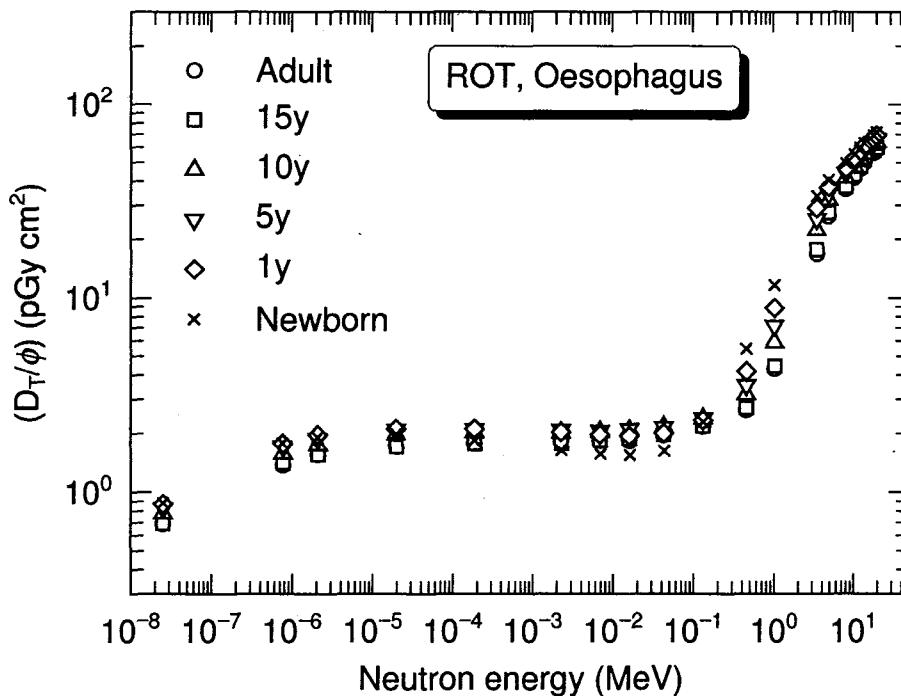


図 3.39 ROT 照射におけるフルエンスあたりの食道の吸収線量

表 3.28 ROT 照射におけるフルエンスあたりの“残りの臓器・組織”の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.76	0.76	0.81	0.84	0.85	0.87
$7.70 \times 10^{-7}$	1.50	1.52	1.61	1.64	1.63	1.59
$2.09 \times 10^{-6}$	1.66	1.67	1.75	1.78	1.79	1.69
$1.99 \times 10^{-5}$	1.80	1.80	1.90	1.91	1.88	1.71
$1.88 \times 10^{-4}$	1.82	1.82	1.88	1.89	1.82	1.60
$2.29 \times 10^{-3}$	1.80	1.80	1.85	1.83	1.73	1.44
$6.97 \times 10^{-3}$	1.80	1.80	1.86	1.83	1.71	1.42
$1.62 \times 10^{-2}$	1.83	1.84	1.88	1.85	1.75	1.45
$4.34 \times 10^{-2}$	1.93	1.96	2.01	1.99	1.91	1.68
$1.34 \times 10^{-1}$	2.36	2.39	2.54	2.59	2.63	2.70
$4.60 \times 10^{-1}$	3.64	3.79	4.30	4.69	5.28	6.45
$1.03 \times 10^0$	6.39	6.72	7.84	8.78	10.2	12.5
$3.54 \times 10^0$	20.0	21.4	24.4	26.6	29.4	33.4
$5.00 \times 10^0$	28.9	30.0	32.8	34.8	37.1	39.9
$8.20 \times 10^0$	38.5	39.6	42.2	44.1	46.2	48.7
$1.05 \times 10^1$	44.0	45.3	47.9	49.7	51.8	54.2
$1.25 \times 10^1$	48.7	50.0	52.6	54.5	56.5	58.8
$1.40 \times 10^1$	52.4	53.5	56.2	58.1	60.1	62.3
$1.83 \times 10^1$	58.6	59.8	62.5	64.3	66.3	68.6
$2.00 \times 10^1$	60.9	62.1	64.7	66.5	68.5	70.7

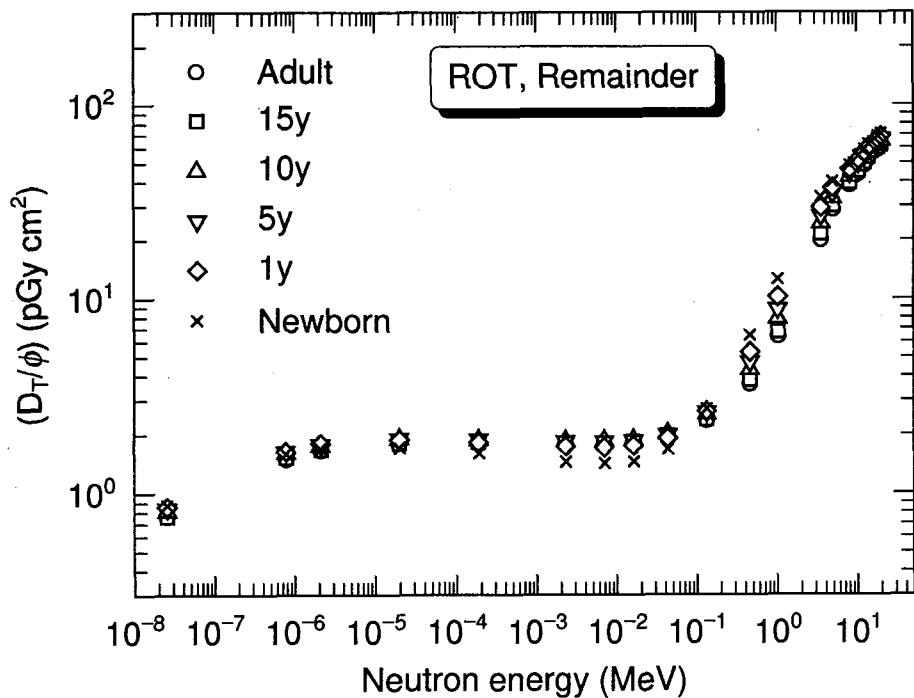


図 3.40 ROT 照射におけるフルエンスあたりの“残りの臓器・組織”の吸収線量

表 3.29 ROT 照射におけるフルエンスあたりの皮膚の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.96	0.95	0.92	0.88	0.83	0.76
$7.70 \times 10^{-7}$	1.22	1.18	1.11	1.05	0.95	0.81
$2.09 \times 10^{-6}$	1.24	1.21	1.13	1.06	0.95	0.80
$1.99 \times 10^{-5}$	1.22	1.18	1.10	1.01	0.90	0.73
$1.88 \times 10^{-4}$	1.20	1.11	1.03	0.93	0.82	0.65
$2.29 \times 10^{-3}$	1.16	1.12	1.04	0.95	0.83	0.67
$6.97 \times 10^{-3}$	1.34	1.30	1.23	1.14	1.03	0.89
$1.62 \times 10^{-2}$	1.71	1.68	1.62	1.54	1.45	1.33
$4.34 \times 10^{-2}$	2.69	2.68	2.67	2.61	2.56	2.50
$1.34 \times 10^{-1}$	5.10	5.12	5.20	5.20	5.24	5.33
$4.60 \times 10^{-1}$	10.6	10.7	10.9	11.1	11.4	11.8
$1.03 \times 10^0$	16.5	16.8	17.3	17.7	18.3	19.1
$3.54 \times 10^0$	32.0	32.7	34.0	34.9	36.0	37.5
$5.00 \times 10^0$	36.4	37.1	38.6	39.6	40.7	42.0
$8.20 \times 10^0$	45.0	45.7	47.2	48.1	49.2	50.3
$1.05 \times 10^1$	50.7	51.5	53.0	53.9	54.9	56.0
$1.25 \times 10^1$	55.1	55.9	57.4	58.4	59.4	60.4
$1.40 \times 10^1$	58.6	59.4	61.0	61.9	62.9	64.0
$1.83 \times 10^1$	64.7	65.6	67.1	68.1	69.1	70.3
$2.00 \times 10^1$	66.8	67.7	69.3	70.3	71.3	72.4

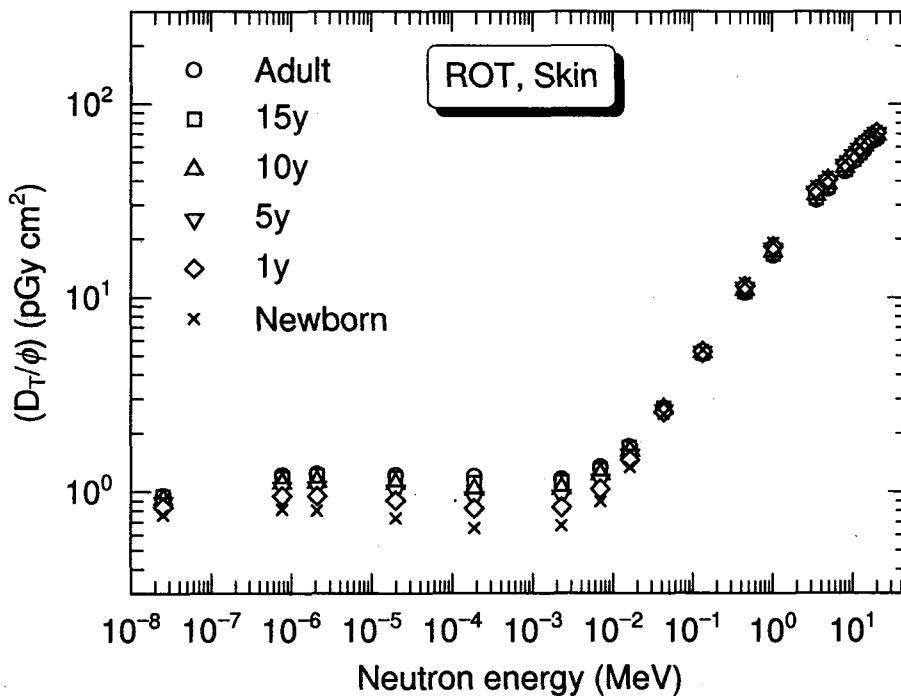


図 3.41 ROT 照射におけるフルエンスあたりの皮膚の吸収線量

表 3.30 ROT 照射におけるフルエンスあたりの胃の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	0.78	0.79	0.85	0.88	0.89	0.91
$7.70 \times 10^{-7}$	1.59	1.59	1.70	1.75	1.74	1.72
$2.09 \times 10^{-6}$	1.76	1.76	1.85	1.89	1.87	1.81
$1.99 \times 10^{-5}$	1.90	1.96	2.02	2.04	1.99	1.83
$1.88 \times 10^{-4}$	1.94	1.96	2.01	1.99	1.92	1.71
$2.29 \times 10^{-3}$	1.93	1.91	1.96	1.94	1.82	1.54
$6.97 \times 10^{-3}$	1.95	1.91	1.96	1.91	1.79	1.51
$1.62 \times 10^{-2}$	1.94	1.94	1.97	1.95	1.80	1.50
$4.34 \times 10^{-2}$	2.04	2.03	2.10	2.06	1.96	1.72
$1.34 \times 10^{-1}$	2.43	2.42	2.61	2.63	2.66	2.69
$4.60 \times 10^{-1}$	3.58	3.67	4.42	4.85	5.43	6.48
$1.03 \times 10^0$	6.24	6.55	8.03	9.00	10.4	12.5
$3.54 \times 10^0$	20.2	21.2	24.5	26.7	29.5	33.4
$5.00 \times 10^0$	28.6	29.8	32.8	34.8	37.2	40.1
$8.20 \times 10^0$	38.2	39.2	42.3	44.2	46.4	48.9
$1.05 \times 10^1$	43.9	45.0	47.9	49.8	52.0	54.5
$1.25 \times 10^1$	48.6	49.6	52.7	54.6	56.7	59.1
$1.40 \times 10^1$	52.1	53.3	56.2	58.1	60.2	62.6
$1.83 \times 10^1$	58.3	59.4	62.4	64.3	66.4	68.7
$2.00 \times 10^1$	60.6	61.8	64.6	66.6	68.7	71.0

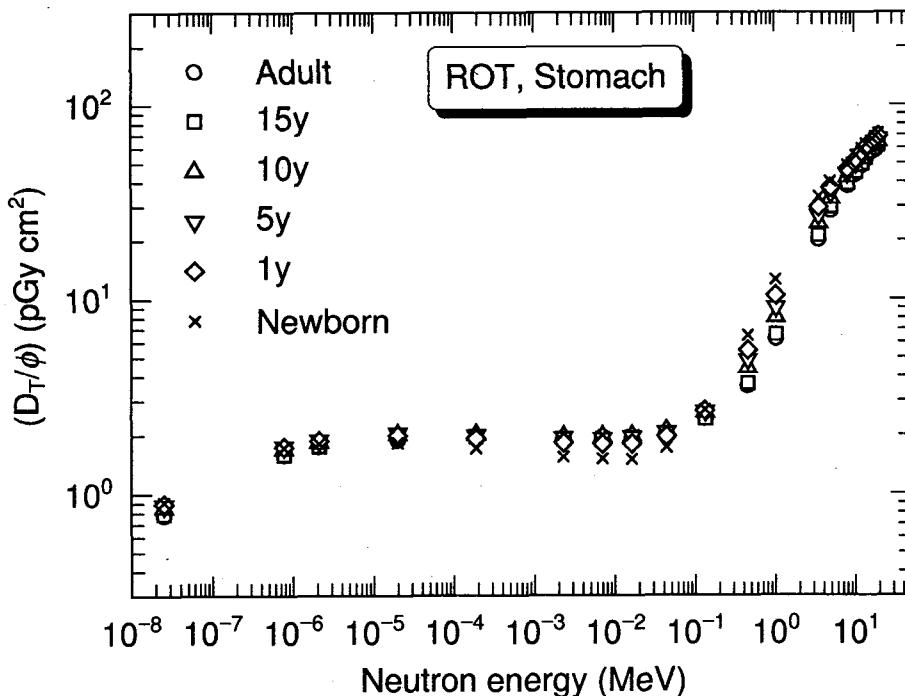


図 3.42 ROT 照射におけるフルエンスあたりの胃の吸収線量

表 3.31 ROT 照射におけるフルエンスあたりの甲状腺の吸収線量  $D_T/\phi$  (pGy cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15歳	10歳	5歳	1歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	1.07	1.13	1.13	1.15	1.11	1.04
$7.70 \times 10^{-7}$	1.81	1.75	1.76	1.70	1.70	1.53
$2.09 \times 10^{-6}$	1.89	1.78	1.82	1.78	1.72	1.61
$1.99 \times 10^{-5}$	1.83	1.76	1.80	1.77	1.67	1.56
$1.88 \times 10^{-4}$	1.72	1.69	1.70	1.67	1.55	1.38
$2.29 \times 10^{-3}$	1.70	1.58	1.57	1.55	1.51	1.26
$6.97 \times 10^{-3}$	1.70	1.65	1.67	1.66	1.65	1.33
$1.62 \times 10^{-2}$	1.77	1.73	1.86	1.92	1.86	1.60
$4.34 \times 10^{-2}$	2.24	2.22	2.44	2.60	2.71	2.32
$1.34 \times 10^{-1}$	3.89	4.07	4.51	4.89	5.05	4.68
$4.60 \times 10^{-1}$	8.69	9.35	10.4	11.2	11.7	11.5
$1.03 \times 10^0$	15.3	16.2	18.0	19.3	20.1	20.2
$3.54 \times 10^0$	37.9	38.1	41.1	43.5	44.3	44.2
$5.00 \times 10^0$	43.7	45.0	47.4	49.6	49.8	48.6
$8.20 \times 10^0$	54.3	55.7	57.3	59.0	59.3	57.5
$1.05 \times 10^1$	60.7	61.8	63.3	65.3	65.1	62.9
$1.25 \times 10^1$	66.8	67.0	68.7	70.5	70.1	68.0
$1.40 \times 10^1$	70.2	71.1	72.8	74.2	74.1	71.7
$1.83 \times 10^1$	76.4	77.6	79.4	81.3	81.0	78.0
$2.00 \times 10^1$	78.6	79.4	81.9	83.8	83.6	80.1

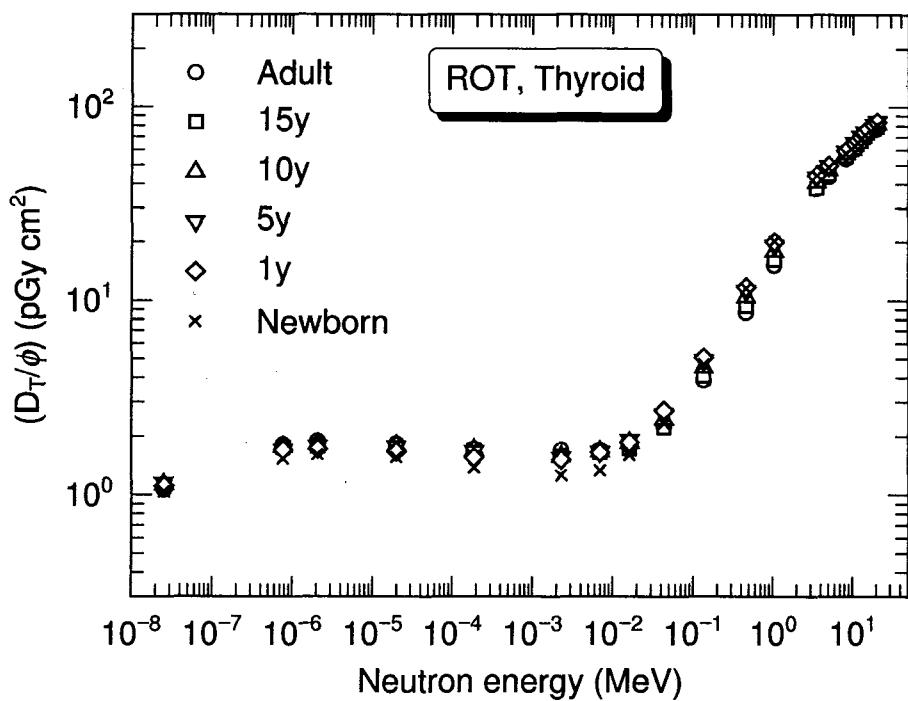


図 3.43 ROT 照射におけるフルエンスあたりの甲状腺の吸収線量

表 3.32 ROT 照射におけるフルエンスあたりの実効線量  $E/\phi$  (pSv cm<sup>2</sup>)

エネルギー (MeV)	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳	新生児
$2.53 \times 10^{-8}$	4.19	4.21	4.45	4.45	4.47	4.36
$7.70 \times 10^{-7}$	7.78	7.72	8.00	8.09	8.09	7.81
$2.09 \times 10^{-6}$	8.44	8.42	8.66	8.76	8.69	8.28
$1.99 \times 10^{-5}$	8.91	8.92	9.35	9.39	9.22	8.46
$1.88 \times 10^{-4}$	8.90	8.98	9.35	9.22	8.97	7.76
$2.29 \times 10^{-3}$	9.10	9.03	9.38	9.26	8.72	7.32
$6.97 \times 10^{-3}$	10.5	10.3	10.7	10.5	9.89	8.19
$1.62 \times 10^{-2}$	13.4	13.5	14.1	13.9	13.0	10.8
$4.34 \times 10^{-2}$	22.4	22.8	23.9	23.7	22.7	20.3
$1.34 \times 10^{-1}$	47.0	48.3	55.1	55.9	57.0	58.5
$4.60 \times 10^{-1}$	102	108	130	140	153	175
$1.03 \times 10^0$	166	177	214	232	260	301
$3.54 \times 10^0$	321	336	385	413	450	497
$5.00 \times 10^0$	367	383	421	444	471	499
$8.20 \times 10^0$	384	398	426	442	463	482
$1.05 \times 10^1$	393	407	433	447	464	481
$1.25 \times 10^1$	403	415	440	453	469	485
$1.40 \times 10^1$	413	426	449	461	476	490
$1.83 \times 10^1$	417	428	450	462	476	488
$2.00 \times 10^1$	420	431	452	463	477	489

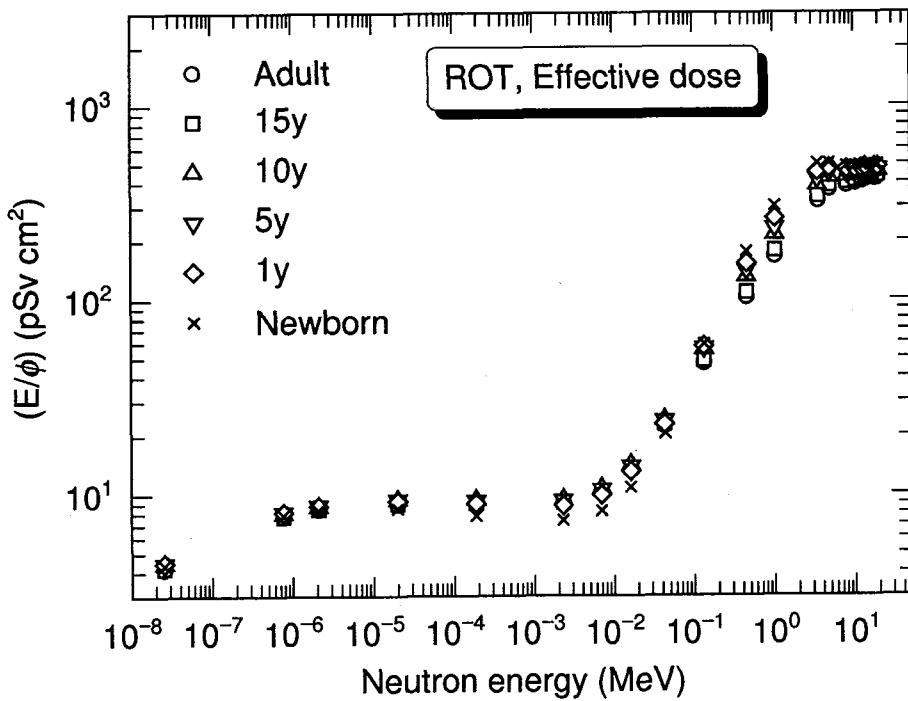


図 3.44 ROT 照射におけるフルエンスあたりの実効線量

### 3.4 実効線量のエネルギー依存性

図 3.45 に、成人の AP 照射における実効線量のエネルギー依存性、それに寄与する陽子及び重荷電粒子、 $\gamma$ 線の割合を示す。ここで陽子及び重荷電粒子による線量とは、中性子の核反応により生成される陽子及び重荷電粒子によるものである。人体は表 2.1 に示すように、主に水素、酸素、炭素及び窒素で構成されるが、その中でも水素は原子数割合で約 60 % を占める。すなわち、人体中では水素との相互作用が最も重要となり、これに酸素、炭素、窒素、その他の微量元素との相互作用が加わる。一方、 $\gamma$ 線による線量とは、中性子の捕獲反応、非弾性散乱によって発生する $\gamma$ 線のコンプトン散乱等で生成される電子によるものである。

実効線量は、入射エネルギーが熱エネルギーから  $10^{-3}$  MeV あたりまではほぼ一定で、その後、入射エネルギーとともに急激に増加する。この傾向は、図 3.28 及び図 3.44 に示すように、いずれの年齢群、照射条件においても同様である。この実効線量のエネルギー依存性は、各エネルギー領域で重要な相互作用に基づき、次のように分析できる。

1. 热エネルギーにおいては、 $H(n, \gamma)D$  反応で発生する 2.2 MeV の $\gamma$ 線、 $^{14}N(n, p)^{14}C$  反応で発生する陽子が人体へのエネルギー付与に寄与する。これらの反応断面積は、中性子エネルギーに逆比例して変化するが、中性子は人体内で減速されるため、入射エネルギーが  $10^{-3}$  MeV あたりまでは、これらの反応が $\gamma$ 線、陽子及び重荷電粒子による実効線量の主たるものとなる。
2. 入射エネルギーが約  $10^{-3}$  MeV を超えると、中性子と水素との弾性散乱で生じる反跳陽子がエネルギー付与に寄与し、これに基づく吸収線量は入射エネルギーに比例し増加する。さらに入射エネルギーが数 MeV を超えると、炭素、窒素、酸素等との非弾性散乱から発生する $\gamma$ 線、 $(n, D)$ 、 $(n, T)$ 、 $(n, \alpha)$  反応から生成される重荷電粒子もエネルギー付与に寄与する。

## エネルギー付与に寄与する主な相互作用

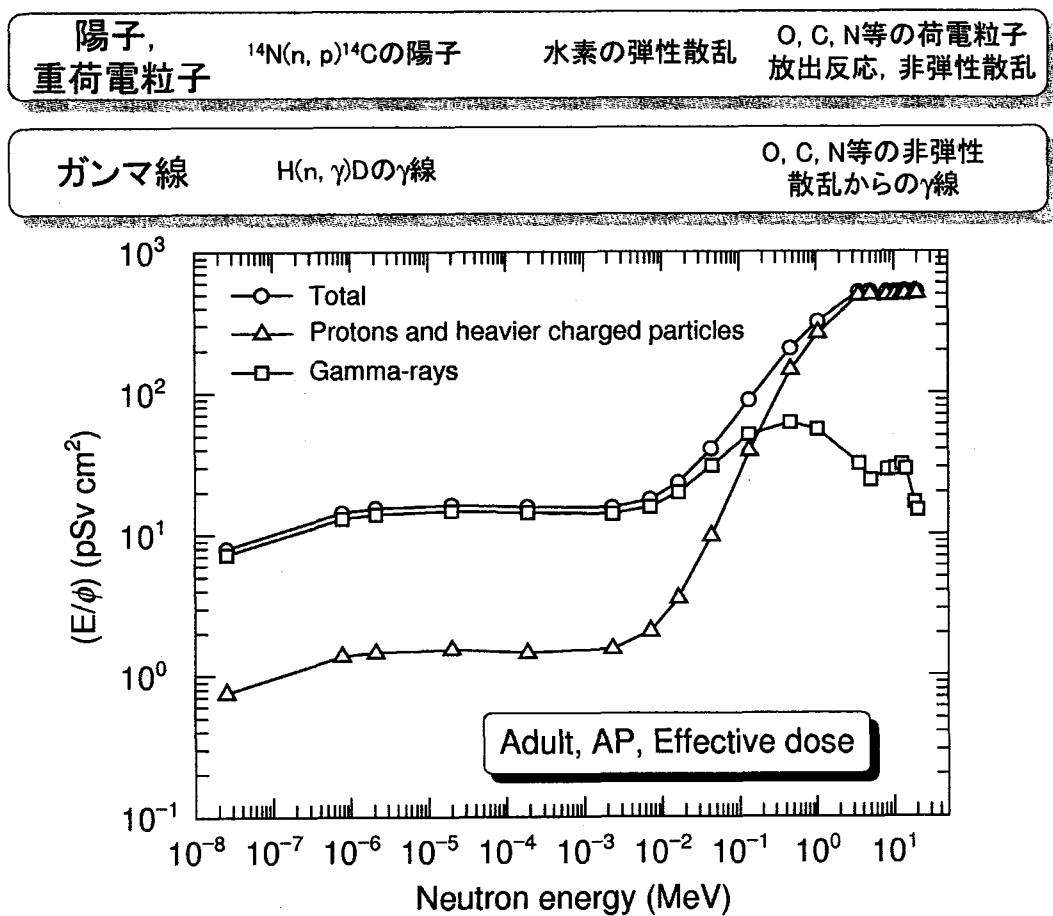


図 3.45 成人の AP 照射における実効線量のエネルギー依存性

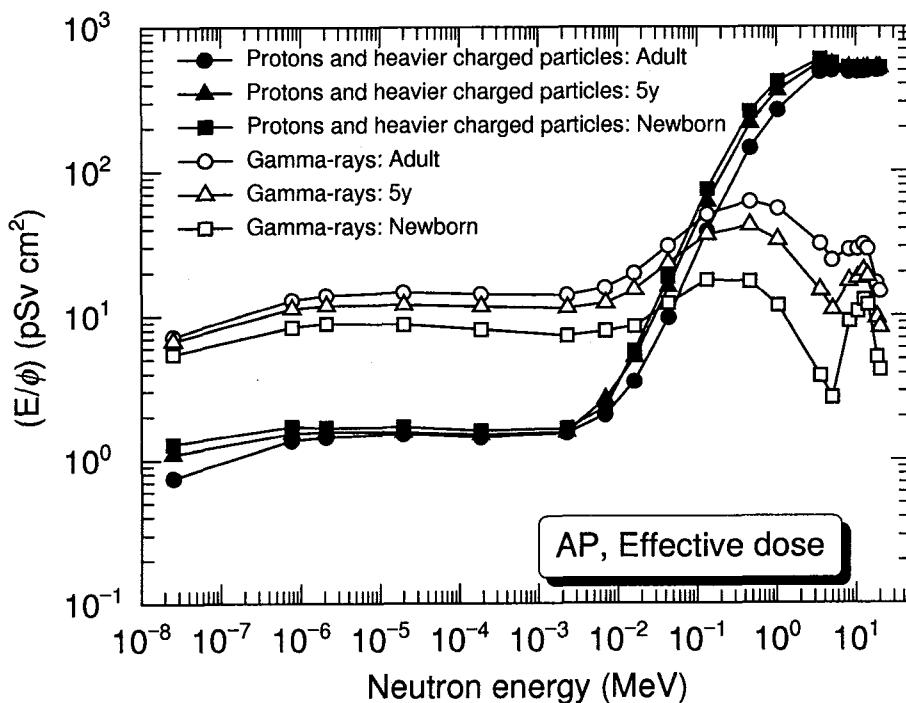
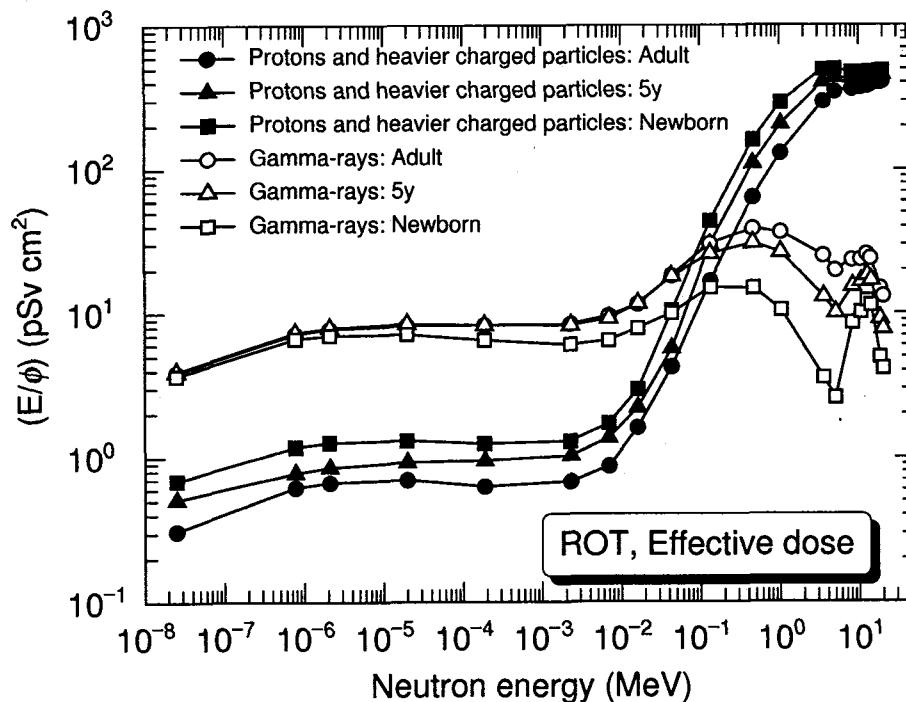
### 3.5 実効線量へ寄与する相互作用の年齢依存性

図 3.46 に、AP 照射における実効線量に対する陽子及び重荷電粒子、 $\gamma$ 線の寄与割合の年齢依存性を示す。入射エネルギーが低い領域(熱エネルギー  $\sim 10^{-3}$  MeV)では、 $\gamma$ 線による線量の寄与割合が大きく、陽子及び重荷電粒子に対する比( $\gamma$ 線/(陽子+重荷電粒子))は、年齢が大きいほど、すなわち体格が大きいほど高い。しかし、入射エネルギーが  $10^{-3}$  MeV を超えるあたりから、陽子及び重荷電粒子による線量が $\gamma$ 線による線量を上回る。その実効線量への寄与割合の年齢依存性は、低エネルギー側とは逆に、年齢が小さなほど高くなる。これについて、山口<sup>12)</sup>は次の解釈を与えた。

1. 体格が大きくなると軟組織層は厚くなり、人体に入射した中性子の減速の度合いがより大きくなるため、水素原子による中性子の捕獲反応( $H(n, \gamma)D$ )の確率が高くなる。また、この捕獲反応で発生する 2.2 MeV の $\gamma$ 線は、体格が大きくなるほど、体内でエネルギーを付与する確率が高くなる。以上のふたつの効果により、低い入射エネルギーの領域では、年齢の大きなファントムほど、実効線量への $\gamma$ 線の寄与割合が大きくなる。
2. 数 keV 以上では、中性子との反応から生成される陽子及び重荷電粒子が線量に寄与するため、体格が大きいほど身体による遮へい効果が働き、軟組織層が薄い小さな年齢群ほど線量が高くなる。

この年齢依存性をより詳細に明らかにするために、ROT 照射に対する分析を行った。図 3.47 に、ROT 照射における実効線量に対する陽子及び重荷電粒子、 $\gamma$ 線の寄与割合の年齢依存性を示す。年齢による陽子及び重荷電粒子に基づく線量の実効線量への寄与割合の変化は、AP 照射よりも顕著になり、対象としたエネルギー領域全てにおいて、新生児の線量は、5 歳、成人よりも大きい。これに対し、 $\gamma$ 線による線量の年齢依存は、AP 照射よりも小さい。ROT 照射の年齢依存性を AP 照射の結果とあわせると、次の解釈ができる。

1. ROT 照射においては、中性子はファントムの長軸に直角なあらゆる方向から入射する。そのため、背面方向から入射する中性子は、軟組織による遮へいにより、前面側に位置し実効線量に寄与する主要な臓器には到達しにくくなる。すなわち体格の違いによる人体の遮へい効果がより顕著になるため、陽子及び重荷電粒子による線量は、軟組織層の最も薄い新生児で高く、年齢が大きくなると小さくなる。
2. ROT 照射における $\gamma$ 線による線量の年齢依存性は、AP 照射よりも小さく、特に低エネルギー側では、違いは僅かである。すなわち、 $\gamma$ 線による線量は、体格に比例した $\gamma$ 線の体内でのエネルギー付与に加えて、 $\gamma$ 線の発生位置にも依存すると考えられる。体格が小さい場合、軟組織層が薄いため、相対的に中性子はファントムの深部にまで到達する。そのため、体格が大きい場合に比べて、ファントム内部に到達した中性子が相互作用の結果発生する $\gamma$ 線は、ファントム内部にある臓器にエネルギーを付与する確率が高くなる。ROT 照射における $\gamma$ 線による吸収線量は、山口が指摘した体格に比例した $\gamma$ 線のエネルギー付与確率と、中性子の深部への到達確率とのバランスにより、年齢依存性が小さくなる。

図 3.46 AP 照射における実効線量に対する陽子及び重荷電粒子,  $\gamma$ 線の寄与割合の年齢依存図 3.47 ROT 照射における実効線量に対する陽子及び重荷電粒子,  $\gamma$ 線の寄与割合の年齢依存

## 4 結 論

公衆の構成員を代表する6種類の年齢群のMIRD型ファントム及び中性子・光子輸送計算モンテカルロシミュレーションコードMCNPを用い、熱エネルギーから20 MeVの中性子外部照射に対する臓器吸収線量、実効線量を計算した。計算結果は、線量評価における利用に供するために、単位中性子フルエンスあたりの換算係数として表及びグラフにまとめた。これらの換算係数は、中性子を発生する原子力施設、放射線施設、医療用加速器施設等の設計や周辺公衆に対する線量評価に利用することができる。

## 謝 辞

本研究は、日本原子力研究所(原研)及び日本原子力研究開発機構(原子力機構)と茨城大学大学院理工学研究科との連携大学院制度の下で、原研及び原子力機構において実施した。筆頭著者(西崎)は、応用粒子線科学専攻基礎原子力科学講座(原研及び原子力機構連携講座)の学生研究生として、本研究の機会を与えて下さいました関係者の方々にお礼申し上げます。特に、原研保健物理部外部被ばく防護研究室、原子力機構原子力基礎工学研究部門環境・放射線工学ユニット放射線防護研究グループの皆様には、本研究を進めるにあたり、全面的なご支援を頂きました。また、原子力機構耐照射性原子力材料開発グループ平出哲也研究主幹、量子ビーム応用研究部門水本元治研究主席、元原研高野秀機氏には、基礎原子力科学講座において、2年間ご指導頂きました。ここにあらためて感謝の意を表します

## 参考文献

- 1) International Atomic Energy Agency. Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes, Supplement to TRS 318. IAEA Technical Reports Series No. 403 (2002).
- 2) National Council on Radiation Protection and Measurements. Neutron Contamination from Medical Electron Accelerators. NCRP Report No. 79 (1995).
- 3) International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP, **21**(1-3) (1991).
- 4) International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56, Ann. ICRP, **20**(2) (1989).
- 5) International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 67, Ann. ICRP, **23**(3 & 4) (1993).
- 6) International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 69, Ann. ICRP, **25**(1) (1995).
- 7) International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4. ICRP Publication 71, Ann. ICRP, **25**(3 & 4) (1996).
- 8) International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5. ICRP Publication 72, Ann. ICRP, **26**(1) (1996).
- 9) International Commission on Radiological Protection. Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother. ICRP Publication 88, Ann. ICRP, **31**(1-3) (2001).
- 10) International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74, Ann. ICRP, **26**(3) (1997).
- 11) International Commission on Radiation Units and Measurements. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRU Report 57 (1998).
- 12) Yamaguchi, Y. Age-dependent Effective Doses for Neutrons from Thermal to 18.3 MeV. Radiat. Prot. Dosim., **55**, 257-263 (1994).
- 13) Chou, D.P., Wang, J.N., Chen, I.J. and Chang, B.J. Age-dependent Protection Quantities for External Neutron Irradiation. Radiat. Prot. Dosim., **104**, 5-16 (2003).
- 14) Snyder, W.S., Ford, M.R., Warner, G.G. and Fisher, H.L. Estimates of Absorbed Fractions for Monoenergetic Photon Sources uniformly distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom. MIRD Pamphlet No.5, Revised. Society of Nuclear Medicine, New York (1969).
- 15) Snyder, W.S., Ford, M.R. and Warner, G.G. Estimates of Specific Absorbed Fractions for Monoenergetic Photon Sources uniformly distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom. MIRD Pamphlet No.5, Revised. Society of Nuclear Medicine, New York (1978).

- 16) Cristy, M. Mathematical Phantoms Representing Children of Various Ages for Use in Estimates of Internal Dose. ORNL/NUREG/TM-367 (1980).
- 17) Cristy, M. and Eckerman, K.F. Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources: I. Methods. ORNL/TM-8381/VI (1987).
- 18) Van Riper, K.A. BodyBuilder User's Guid. White Rock Science (1998).
- 19) Kerr, G.D. Organ Dose Estimates for the Japanese Atomic-bomb Survivors. *Health Phys.* **37**, 487–508 (1979).
- 20) 山口 恭弘. JEUNESSE: 年齢依存型人体模型を用いた光子外部被ばく線量計算コード. 保健物理, **27**, 305–312 (1992).
- 21) Eckerman, K.F., Cristy, M. and Ryman, J.C. The ORNL Mathematical Phantom Series. Oak Ridge National Laboratory Report (1996), available at <http://ordose.ornl.gov/html>.
- 22) Briesmeister, J.F. (Ed.) MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. LA-13709-M (2000).
- 23) Shibata, K., Kawano, T., Nakagawa, T., Iwamoto, O., Katakura, J., Fukahori, T., Chiba, S., Hasegawa, A., Murata, T., Matsunobu, H., Ohsawa, T., Nakajima, Y., Yoshida, T., Zukeran, A., Kawai, M., Baba, M., Ishikawa, M., Asami, T., Watanabe, T., Watanabe, Y., Igashira, M., Yamamuro, N., Kitazawa, H., Yamano, N. and Takano, H. Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 1125–1136 (2002).
- 24) Kosako, K., Yamano, N., Fukahori, T., Shibata, K. and Hasegawa, A. The Libraries FSXLIB and MATXSLIB based on JENDL-3.3. JAERI-Data/Code 2003-011 (2003).
- 25) Hughes, H.G. Information on the MCPLIB02 Photon Library. LANL Memorandum X-6:HGH-93-77 (1996).
- 26) International Commission on Radiation Units and Measurements. Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues. ICRU Report 46 (1992).
- 27) Caswell, R.S., Coyne, J.J. and Randolph, M.L. Kerma Factors for Neutron Energies below 30 MeV. *Rad. Res.*, **83**, 217–254(1980).
- 28) Roesch, W.C., Ed. US - Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki: Final Report. Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima (1987).
- 29) Drexler, G. Eckerl, H. and Zankl, M. On the Influence of the Exposure Model on Organ Doses. *Radiat. Prot. Dosim.*, **28**, 181–188 (1989).
- 30) Saito, K., Wittmann, A., Koga, S., Ida, Y., Kamei, K., Funabiki, J. and Zankl, M. Construction of a Cmputed Tomographic Phantom for a Japanese Male Adult and Dose Calculation System. *Radiat. Environ. Biophys.*, **40**, 69–76 (2001).
- 31) Nabelssi, B.K. and Hertel, N.E. Ambient Dose Equivalents, Effective Dose Equivalents, and Effective Doses for Neutrons from 10 to 20 MeV. *Radiat. Prot. Dosim.*, **48**, 153–168 (1993).

- 32) Snyder, W.S., Ford, M.R., Warner, G.G. and Watson, S.B. A Tabulation of Dose Equivalent per Microcurie-day for Source and Target Organs of an Adult for Various Radionuclides: Part 1. ORNL-5000 (1974).
- 33) Emmett, M.B. The MORSE Monte Carlo Radiation Transport Code System. ORNL-4972 (1975).
- 34) Briesmeister, J.F. (Ed.) MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. LA-12625-M (1997).
- 35) Nakagawa T., Shibata S., Chiba S., Fukahori T., Nakajima Y., Kikuchi Y., Kawano T., Kanda Y., Ohsawa T., Matsunobu H., Kawai M., Zukeran A., Watanabe T., Igarasi S., Kosako K. and Asami T. Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDEL-3.2, J. Nucl. Sci. Technol., **32**, 1259–1271 (1995).
- 36) 遠藤 章, 山口 恭弘, 石榑 信人. 東海村臨界事故における重度被ばく患者に対する線量分布の詳細解析 : 原研・放医研共同研究. JAERI-Research 2001-035 (2001).