



JP0150385

JAERI-Research  
2001-035



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

2001年5月

遠藤 章・山口 恭弘・石博 信人\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Research

2001-038

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

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

日本原子力研究所東海研究所保健物理部  
遠藤 章・山口 恭弘

放射線医学総合研究所内部被ばく・防護研究部  
石樽 信人

(2001年4月4日受理)

1999年9月30日午前10時35分頃、茨城県那珂郡東海村のウラン加工施設において、我が国初の臨界事故が発生した。この事故により、現場にいた3名の従業員が重度の放射線被ばくを受けた。このうち、沈殿槽と呼ばれる容器にウラン溶液を投入する作業を行っていた2名は、中性子と $\gamma$ 線が混在する核分裂線源近傍において、著しく不均等に被ばくした。これらのことが、この2名の臨床症状に深く関係していたと推定されている。したがって、2名の重度被ばく患者に対しては、臨床症状との対比のために、部位毎の中性子及び $\gamma$ 線による線量分布の情報が不可欠である。

以上の背景により、原研では放射線医学総合研究所(放医研)からの依頼に基づき、原研・放医研の共同研究として、被ばく時の位置、姿勢を模擬した計算シミュレーションを実施し、重度被ばく患者の線量分布を詳細に解析した。本報告書は、上記共同研究により得られた成果をまとめたものである。

Analysis of Dose Distributions for the Heavily Exposed Patients  
in the Criticality Accident at Tokai-mura:  
Joint Research Program between JAERI and NIRS

Akira ENDO, Yasuhiro YAMAGUCHI

Department of Health Physics  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

and

Nobuhito ISHIGURE

Division of Radiotoxicology and Protection  
National Institute of Radiological Sciences  
Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba-ken

(Received April 4, 2001)

At around 10:35 on 30 September 1999, a criticality accident occurred in a uranium processing plant in Tokai-mura, Ibaraki, Japan. Three workers on the spot were heavily exposed as a result of the accident. Two of them, who were pouring uranium solution into a tank, were heterogeneously exposed to neutrons and  $\gamma$  rays associated with the nuclear fission reaction. The exposure conditions influenced the clinical progress observed in the patients. It is therefore necessary to clarify dose distributions in the body by neutrons and  $\gamma$  rays for the understanding of the biological effects caused by heavy exposures to neutrons and  $\gamma$  rays.

By request from the National Institute of Radiological Science (NIRS), a detailed analysis of the dose distributions for the two patients was carried out using a numerical simulation technique as a joint research program between JAERI and NIRS. The present report describes the details of the simulation technique employed and results of the analysis: absorbed dose and  $^{24}\text{Na}$  specific activity in the whole body, skin dose distribution, depth dose distribution inside the trunk, and their neutron-to- $\gamma$  ratios.

Keywords: Criticality Accident, Tokai-mura, Heavily Exposed Patients, Dose Distribution, Neutron,  $\gamma$  Ray, Numerical Simulation, Biological Effect

## 目次

1	緒言	1
2	計算	1
2.1	計算コード・断面積データ	1
2.2	数学人体ファントム	2
2.3	線源条件及び計算体系の評価	2
2.3.1	漏洩中性子・ $\gamma$ 線スペクトルの計算	2
2.3.2	線源強度の評価	2
2.3.3	作業姿勢の推定	3
2.4	吸収線量及び $^{24}\text{Na}$ 比放射能の計算	4
2.4.1	全身平均の吸収線量、 $^{24}\text{Na}$ 比放射能	4
2.4.2	皮膚の吸収線量分布	4
2.4.3	胴体内の吸収線量分布	4
2.5	吸収線量、核種生成率等に対する各種パラメータの感度解析	5
3	結果及び解析	5
3.1	中性子及び $\gamma$ 線スペクトル	5
3.2	作業姿勢の調査及び患者データの分析に基づく姿勢の推定	6
3.3	吸収線量、 $^{24}\text{Na}$ 比放射能	6
3.4	全身皮膚における吸収線量分布	7
3.5	胴体内における吸収線量分布	8
3.6	各種パラメータの感度解析	8
3.6.1	沈殿槽に対するファントムの距離、角度等	8
3.6.2	断面積データ	10
4	結言	10
	謝辞	11
	参考文献	12

## Contents

1	Introduction . . . . .	1
2	Calculation . . . . .	1
2.1	Monte Carlo Simulation Code and Cross Section Data . . . . .	1
2.2	Mathematical Anthropomorphic Phantom . . . . .	2
2.3	Estimation of Source Condition and Calculation Geometry . . . . .	2
2.3.1	Calculation of Neutron and $\gamma$ -ray Spectra . . . . .	2
2.3.2	Estimation of Source Intensity . . . . .	2
2.3.3	Estimation of Postures of the Two Patients . . . . .	3
2.4	Calculation of Absorbed Dose and $^{24}\text{Na}$ Specific Activity . . . . .	4
2.4.1	Absorbed Dose and $^{24}\text{Na}$ Specific Activity in the Whole Body . . . . .	4
2.4.2	Absorbed Dose Distribution in Skin . . . . .	4
2.4.3	Absorbed Dose Distribution inside Trunk . . . . .	4
2.5	Sensitive Analysis of Parameters Influencing Absorbed Dose, etc . . . . .	5
3	Results and Analysis . . . . .	5
3.1	Neutron and $\gamma$ -ray Spectra . . . . .	5
3.2	Estimated Postures of the Patients from Behavior Simulation, etc . . . . .	6
3.3	Absorbed Dose and $^{24}\text{Na}$ Specific Activity . . . . .	6
3.4	Absorbed Dose Distribution in Skin . . . . .	7
3.5	Absorbed Dose Distribution inside Trunk . . . . .	8
3.6	Sensitive Analysis for Various Parameters . . . . .	8
3.6.1	Distance and Angle of Phantom for the Precipitation Tank . . . . .	8
3.6.2	Cross Section Data . . . . .	10
4	Conclusion . . . . .	10
	Acknowledgements . . . . .	11
	References . . . . .	12

## 1 緒言

1999年9月30日午前10時35分頃、茨城県那珂郡東海村のウラン加工施設 株式会社ジェー・シー・オー (JCO) 東海事業所の転換試験棟において、我が国初の臨界事故が発生した<sup>1)</sup>。この事故は、高速実験炉「常用」の燃料用として用いられる硝酸ウラニル溶液を、沈殿槽と呼ばれる容器へ制限量を超えて投入したことにより発生した。その結果、ウラン溶液を投入していた2名 (A氏及びB氏) 及び壁を隔てて隣室にいた1名 (C氏) の従業員が、重度の放射線被ばくを受けた。

被ばく事故後、3名は国立水戸病院を経て、放射線医学総合研究所 (放医研) へ転送された。放医研では、治療方針の策定に必要な線量を推定するために、臨床症状、染色体分析、リンパ球等の血液成分の分析、血液中  $^{24}\text{Na}$  の分析等に基づく線量推定が実施された<sup>2,3)</sup>。その結果、それぞれの被ばく線量は、A氏 16 - 20 GyEq<sup>†</sup>以上、B氏 6 - 10 GyEq、C氏 1 - 4.5 GyEq と推定された。このうち線量の高い2名については、造血肝細胞移植が必要との判断に至り、A氏は東京大学医学部付属病院へ、B氏は東京大学医科学研究所付属病院へそれぞれ転院し、集中治療を受けた。しかしながら、致死的な高線量被ばくにより、A氏は事故後83日後に、また、B氏は211日後にそれぞれ死亡した。

今回の事故では、臨界超過後、核分裂反応に伴う中性子及び即発 $\gamma$ 線並びに中性子の捕獲、散乱により発生する二次 $\gamma$ 線が大量に放出され、ウラン溶液を投入する作業を行っていた2名を直撃した。この2名に対する被ばく状況の特徴は、線質が異なり、また、体内での減衰率が異なる中性子と $\gamma$ 線との混合被ばくであったこと、さらには線源近傍で著しい不均等被ばくを受けたことである。これらのことが、A氏及びB氏の臨床症状に関係していたと推定されている。しかし、事故直後に実施された線量推定法から得られるのは、全身の平均的な線量であり、また、中性子と $\gamma$ 線の寄与の内訳を直接推定することはできない。今回の事故の経験を、今後の高線量被ばく時の緊急医療対策に活かすためには、A氏及びB氏について、臨床症状との対比に不可欠な線量分布に関する徹底的な解析が必要である。

以上の背景により、2名の重度被ばく患者の線量分布を明らかにするために、原研は放医研からの依頼に基づく共同研究<sup>‡</sup>により、事故時の位置、姿勢を模擬した計算シミュレーション手法による被ばく線量の詳細解析を実施した。本報告書は、上記共同研究により得られた成果をまとめたものである。

## 2 計算

### 2.1 計算コード・断面積データ

患者の線量計算には、米国 Los Alamos 国立研究所で開発された連続エネルギーモンテカルロコード MCNP-4B<sup>4)</sup> 及び MCNPX<sup>5)</sup> を用いた。MCNP-4B は、三次元で表した計算体系において、臨界反応により発生する中性子及び $\gamma$ 線の輸送過程を、モンテカルロ法を用いて計算することができるコードである。MCNPX は、MCNP-4B を基に改良されたコードであり、スコアリングメッシュ毎にエネルギー沈着を評価するタリー (エネルギー沈着メッシュタリー) を有している。2.4.3 項で述べる胴体内での吸収線量分布を計算するために、このエネルギー沈着メッシュタリーを利用した。

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-3.2<sup>6)</sup> から編集された FSXLIB-J3R2<sup>7)</sup> (以下、FSXLIB) を用いた。本計算では、3.3 節で述べるよう

<sup>†</sup>GyEq (Gray Equivalent : 生物学的 $\gamma$ 線相当線量)。急性効果に対する中性子の RBE (Relative Biological Effectiveness) を考慮した被ばく線量の指標として用いられ、同程度の急性効果の現れる $\gamma$ 線の吸収線量で表される。

<sup>‡</sup>共同研究契約「JCO 臨界事故における患者の被ばく線量の詳細解析」

に、計算で評価された線量を規格化するための指標として、患者から採取された血液の $^{24}\text{Na}$ の比放射能を用いている。 $^{24}\text{Na}$ は、体内の $^{23}\text{Na}$ の $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ 反応により生成されるため、この反応断面積が大きくなる熱中性子束の計算精度が重要になる。そこで、熱中性子散乱に大きく寄与する人体組織中の水、硝酸ウラニル溶液及び沈殿槽冷却水に対しては、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。また、光子に対する輸送計算断面積データは、MCPLIB02<sup>8)</sup>を用いた。

## 2.2 数学人体ファントム

人体の線量計算には、原研で開発された四肢可動型の数学人体ファントム<sup>9)</sup>を用いた。ファントムの概観を図1に示す。本ファントムは、直立姿勢のMIRD-5型数学人体ファントム<sup>10)</sup>(図1(a))を基に、四肢の各関節を屈折可能となるように改良したものである(図1(b))。人体組成は、元素組成及び密度の異なる3種類の組織(骨組織、肺組織、軟組織)で近似され、それぞれに対しMIRDパンフレットのデータ<sup>11)</sup>を適用した。ファントムの身長は170.4 cm、体重は73.8 kgである。本ファントムに関する詳細は、文献<sup>9)</sup>を参照されたい。

本数学人体ファントムは、Combinatorial Geometry (CG) と呼ばれる幾何形状指定方式により記述されている。これは、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、人体形状、臓器等の複雑な形状を表す方法である。一方、MCNPでは、種々の面の組み合わせにより計算体系を指定する。そのため、CGで記述された人体ファントムをMCNPの形状指定データに変換し、計算に用いた。

## 2.3 線源条件及び計算体系の評価

### 2.3.1 漏洩中性子・ $\gamma$ 線スペクトルの計算

線量計算に用いる線源条件を評価するために、沈殿槽のモデルを用いた臨界の固有値計算により、沈殿槽から漏洩する中性子及び $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを計算した。図2(a)に示す沈殿槽図面に基づき、ウラン溶液が投入された容器部分及び冷却水ジャケット部をモデル化した(図2(b))。上蓋から上部、沈殿槽を固定するアングル類、攪拌機先端部分は、計算モデルでは省略した。また、沈殿槽周辺はボイド(真空)とし、部屋の壁及び床は計算体系に含めていない。

沈殿槽内に、 $^{235}\text{U}$ 濃縮度18.8%、ウラン濃度 $370 \text{ gU L}^{-1}$ 、遊離硝酸濃度0.5規定の硝酸ウラニル溶液を、総ウラン量で16.6 kg分投入した(44.86 L相当)。ウラン溶液の仕様及び投入量は、作業手順書から推定された値<sup>12)</sup>である。この条件でKCODE法<sup>13)</sup>を用いて固有値計算を行い、核分裂反応により発生する中性子及び $\gamma$ 線、ウラン溶液等における中性子捕獲、散乱により発生する二次 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルを計算した。また、核分裂反応により生成される核分裂生成物(FP)からの $\gamma$ 線スペクトルに対しても評価を行った。FPからの $\gamma$ 線スペクトルは、ORIGEN2コード<sup>14)</sup>を用い、 $^{235}\text{U}$ 濃縮度19%、ウラン量16 kgのウラン溶液が、2.3.2項で推定した出力で照射された場合に生成されるFPが、溶液中で均一に分布していると仮定し計算した。

### 2.3.2 線源強度の評価

MCNPでは、固有値計算の結果得られる吸収線量、核種生成率等は、核分裂により発生する中性子1個当たりの量として計算される。そこで患者の被ばく線量の絶対値を評価するために、1核分裂当たりに発生する平均の核分裂中性子数 $\bar{\nu}$ に、被ばく時の核分裂数を乗じて発生中性子数を



評価した。

$\bar{\nu}$  は、固有値計算から次式により算出した。

$$\bar{\nu} = \frac{\int_r \int_E \nu \sum_f(E) \phi(r, E) dE dr}{\int_r \int_E \sum_f(E) \phi(r, E) dE dr} \quad (1)$$

ここで、 $\sum_f(E)$  は硝酸ウラニル溶液の巨視的核分裂断面積、 $\phi(r, E)$  は溶液中の位置  $r$ 、入射中性子エネルギー  $E$  での中性子束である。図 2(b) に示す沈殿槽のモデルを用いて、 $\bar{\nu}$  は 2.437 と評価された。

被ばく時の核分裂数は、以下の方法により評価した。事故調査に係る動特性解析<sup>1)</sup> から、沈殿槽内における臨界超過後の出力は、10 秒程度の周期で振動を繰り返し、その後緩やかに減少したと推定されている。現場で作業を行っていた患者は、臨界時のチェレンコフ光である「青い光」を見て異常を察知し、退避したと証言している。これより、被ばくは臨界超過後の最初の出力パルス(以後、第一パルスと呼ぶ)によりもたらされたとした。ここでの核分裂数を、原研那珂研究所のモニタリングポスト No.1 (MP1) の中性子モニタのデータに基づき評価した。

MP1 中性子モニタ 1 秒値データの解析から、第一パルスに相当する 1 秒間の計数値の割合とその標準偏差 ( $\sigma$ ) は、臨界が継続していた期間の全計数値の  $2.6 \pm 0.6\%$  である<sup>15)</sup>。総核分裂数は、沈殿槽内に残存していたウラン溶液の分析及び沈殿槽冷却用室外機ステンレスネットカバーの放射化量の解析に基づき、 $2.5 \times 10^{18}$  と評価されている<sup>1)</sup>。したがって、第一パルスにおける核分裂数は、

$$2.5 \times 10^{18} \times (0.026 \pm 0.006) = (6.5 \pm 1.5) \times 10^{16} \quad (2)$$

となる。これより、第一パルスにおける発生中性子数は、

$$(6.5 \pm 1.5) \times 10^{16} \times 2.437 = (1.58 \pm 0.37) \times 10^{17} \quad (3)$$

と評価される。

一方、三好ら<sup>12)</sup> による動特性解析コード AGNES2<sup>16)</sup> を用いた解析では、第一パルスの核分裂数は、事故時の条件を想定した添加反応度の範囲内で、ほぼ  $5 \times 10^{16}$  と評価されている。(2) 式で示した核分裂数は、この動特性解析による評価値とも矛盾するものではない。

### 2.3.3 作業姿勢の推定

2.2 節で述べた四肢可動型の数学人体ファントムを沈殿槽周辺に配置するために、2 名の患者の事故時の位置及び姿勢を以下の手順により推定した。

B 氏及び C 氏によって、作業時の A 氏及び B 氏の位置関係が図 3 のように証言されている。B 氏は、沈殿槽に向かって左側にある階段を上り、台の上に片足をかけ、ウラン溶液の入ったビーカーの取っ手を左手に持ち、右手で底を支えながら溶液を漏斗に流し込んでいた。A 氏は、B 氏から見て約  $45^\circ$  の方向で沈殿槽の横に立ち、沈殿槽上縁の孔に漏斗を挿し込み、手で漏斗を支えていた。この時、漏斗を両手、または片手で支えていたかは不明である。

上記の証言に基づき、JCO 敷地内に設置された事故現場(仮焼室)の模擬施設を用い、作業姿勢の調査を実施した。調査の様子を図 4 に示す。この施設は、仮焼室と同寸法で間仕切りがされており、同一形状の沈殿槽を配置し現場を再現したものである。この施設を用い、2 名の患者の体格に近い人物により、沈殿槽へ溶液を投入する作業姿勢の再現試験を行った。そして、患者の証言

と矛盾せず、かつ、作業を行うために無理がないと考えられる位置及び姿勢を推定し、その際の2名の位置、胴体及び手足の角度に関する計測を行った。

さらに、患者の皮膚症状の分析、骨中の $^{32}\text{P}$ 及び $^{45}\text{Ca}$ 比放射能<sup>17)</sup>に対する計算シミュレーションによる解析に基づき体幹部の角度の調整を行い、被ばく時の姿勢を確定した。

## 2.4 吸収線量及び $^{24}\text{Na}$ 比放射能の計算

### 2.4.1 全身平均の吸収線量、 $^{24}\text{Na}$ 比放射能

2.3.1及び2.3.2項で評価された線源条件並びに2.3.3項で推定された患者の位置及び姿勢に基づき、中性子及び $\gamma$ 線による全身平均での吸収線量を計算した。中性子による吸収線量は、飛跡長タリーを用いて、軟組織、肺組織及び骨組織毎に計算された中性子フルエンスに、国際放射線単位測定委員会(ICRU) Report 46<sup>18)</sup>のカーマ係数を乗じて求めた。本計算では、計算の効率化を図るため、骨は全身の骨をまとめて骨組織として定義し、詳細なモデル化は行っていない。そのため、骨組織に対しては、赤色骨髄(red marrow)に対するカーマ係数を用い、比較のために、皮質骨(cortical bone)のカーマ係数を用いた吸収線量も計算した。一方、 $\gamma$ 線による吸収線量は、エネルギー沈着タリーを用いて、各組織におけるエネルギー沈着を計算し求めた。また、患者の血液中の $^{24}\text{Na}$ 比放射能の実測値との比較を行うために、軟組織における中性子フルエンスから $^{24}\text{Na}$ の生成率を計算し、比放射能を求めた。

### 2.4.2 皮膚の吸収線量分布

皮膚の吸収線量は、直方体形状のファントムを用いた予備解析に基づき、線源に最も近いと推定されるA氏の胴体前面及び腕において、約5%の吸収線量の勾配が表現できるように皮膚領域の分割を行った。

皮膚は、表皮とその下の真皮から成る。表皮及び真皮の厚さは体の部位により異なるが、国際放射線防護委員会(ICRP) Publication 59<sup>19)</sup>では、それぞれの厚さの範囲について、表皮42-369 $\mu\text{m}$ 、真皮1-3mmとされている。これより、ここでは数学人体ファントム表面から2mmの深さを皮膚領域とし、これを、頭、胴体及び四肢の軸方向は5cm毎、周方向は、胴体及び頭部が22.5°間隔(16分割)、脚及び腕は45°間隔(8分割)で区分し、全身の皮膚を712領域に分割した。

中性子による吸収線量は、各皮膚領域内の中性子フルエンスに皮膚のカーマ係数<sup>18)</sup>を乗じて計算した。また、 $\gamma$ 線に対しては、エネルギー沈着タリーを用い、エネルギー沈着を計算し求めた。

### 2.4.3 胴体内の吸収線量分布

胴体内の中性子及び $\gamma$ 線による吸収線量の分布は、MCNPX<sup>5)</sup>のエネルギー沈着メッシュタリーを用い、以下の方法で計算した。図5に示すように、楕円柱で表されている数学人体ファントムの胴体部を包括する40cm×20cm×70cmの直方体領域を、1cm×1cm×2cmのメッシュタリーによって分割した。そして、各メッシュにおけるエネルギー沈着を計算し、これを質量で除することによりメッシュ毎の吸収線量を算出し、胴体内部での吸収線量分布を得た。各メッシュの質量は、レイ・トレーシング法によりメッシュ毎の軟組織、骨組織及び肺組織の体積を算出し求めた。

エネルギー沈着メッシュタリーは、全粒子によるエネルギー沈着を評価し、中性子、 $\gamma$ 線それぞれの寄与は求めることができない。そこで、まず、中性子及び $\gamma$ 線による全吸収線量分布を求

め、次いで、中性子のみによる吸収線量分布を求め、両者の差から $\gamma$ 線による分布を得た。

## 2.5 吸収線量、核種生成率等に対する各種パラメータの感度解析

本計算では、作業姿勢の再現試験等に基づき被ばく時の位置及び姿勢を推定し、線量計算を行っている。そのため、これらの条件が想定される範囲内で変動した場合に、計算結果への程度の影響を及ぼすかを示すことは重要である。そこで、吸収線量、 $^{24}\text{Na}$ 比放射能等に影響する以下の要因に対する感度解析を行った。① 沈殿槽に対するファントムの距離及び角度、② B氏が保持していたウラン溶液からの線量寄与、③ 空気層及び床による散乱等の影響、④ 輸送計算断面積データ、放射化断面積データ。

ファントムの距離及び角度に関する解析は、図6に示す軟組織組成の直方体ファントムを用いて行った。ファントムのサイズは、全身を包含する40 cm × 20 cm × 170 cmである。高さ170 cmのうち、頭部及び胴体部を合わせて90 cm、脚部80 cmとし、B氏に対応するファントムでは、脚部を水平にした。中性子、 $\gamma$ 線の吸収線量は、ファントム内でのフルエンスから、それぞれ軟組織に対する中性子カーマ係数、質量エネルギー吸収係数<sup>18)</sup>を用いて計算した。

B氏がウラン溶液を注いでいる最中に臨界に達したことから、ビーカーに残存していたウラン溶液の核分裂反応によるB氏胴体部の吸収線量への影響を評価した。事故後に回収されたビーカー中の硝酸ウラニル溶液は、溶液量290 mL、ウラン濃度630 gU L<sup>-1</sup>であった<sup>1)</sup>。この濃度は、事故から溶液の回収までの期間に蒸発によって濃縮されたものと考えられる。そこで、事故時は沈殿槽と同一の濃度(370 gU L<sup>-1</sup>)であったと仮定し、事故時にビーカー内に残っていたと推定される溶液量500 mLを球形状(等価球半径4.9 cm)で近似し、これをファントム前面に置いた場合の吸収線量を計算した。

空気及び床による吸収、散乱の影響を評価するために、沈殿槽周辺を空気層に、また、床を厚さ50 cm、密度2.2 g cm<sup>-3</sup>の普通コンクリートにした場合の吸収線量、 $^{24}\text{Na}$ 比放射能を計算した。

本計算では、中性子輸送計算断面積データにFSXLIB<sup>7)</sup>を用いた。これに対し、ENDF/B-VI断面積データ<sup>4)</sup>を用い、吸収線量に関する比較を行った。また、 $^{24}\text{Na}$ 、 $^{32}\text{P}$ 及び $^{45}\text{Ca}$ の生成率について、JENDL Activation Cross Section File 96<sup>20)</sup>(JACT96)、LLLDOS<sup>4)</sup>を用いた比較を行った。

## 3 結果及び解析

### 3.1 中性子及び $\gamma$ 線スペクトル

図7及び8に、固有値計算により計算された沈殿槽表面から漏洩する中性子及び $\gamma$ 線スペクトルを示す。中性子は、水溶液層による減速効果のため熱エネルギーまで連続した分布をしており、 $^{235}\text{U}$ の核分裂スペクトルと比べて柔らかなスペクトルになっている。また、 $\gamma$ 線は、0.3 MeVあたりになだらかなピークを持ち、核分裂 $\gamma$ 線のスペクトルに近い形をしている。水素の中性子捕獲反応により発生する2.2 MeVの $\gamma$ 線が顕著には見られないことから、核分裂 $\gamma$ 線の寄与が主であると考えられる。中性子及び $\gamma$ 線のいずれにおいても、沈殿槽の側面及び上面から漏洩するスペクトルの形状に大きな違いは認められない。

図9に、FPの崩壊により放出される $\gamma$ 線スペクトルを示す。FPに起因する $\gamma$ 線のフルエンスは、図8に示した核分裂 $\gamma$ 線及び二次 $\gamma$ 線に比べて約2桁も小さく、線量への寄与は無視できる程度であることが分かった。

### 3.2 作業姿勢の調査及び患者データの分析に基づく姿勢の推定

仮焼室模擬施設を用いた調査から、作業時の姿勢は次のように推定された。A氏については、漏斗を両手、または片手で支えていたかは不明であるが、漏斗を両手で支えていたと仮定すると、沈殿槽中心軸から体軸までは、腕の伸縮状態により、55 - 70 cmと計測された。沈殿槽に対する体幹部の角度は、沈殿槽を真正面に見た状態(0°)から、最大40°まで可能である。したがって、角度は、後に述べる皮膚障害の分析及び骨中生成核種の解析に基づき推定した。B氏については、沈殿槽左側の台に左足を乗せた場合、右足の位置は台から二番目のステップで、さらに、右脚付け根あたりを階段手すりに当てた状態が、体の安定を保つ自然な位置であると推定された(図4(e))。この状態でビーカーを持ち、沈殿槽上面の孔に挿入された漏斗に溶液を注ぐ動作を行うと、胴体下端中心は、沈殿槽中心軸から78 cm、沈殿槽上面から17 cmと計測された。また、上半身の角度は、沈殿槽上面に対し40° - 60°の範囲にあると推定された。

放医研が調査したA氏に関する皮膚障害マップによれば、右体側面の障害度の方が左体側面より重篤であり、右側の方が沈殿槽により近かった、即ち、沈殿槽に対し、右肩を前にして斜めに立っていたと推察された。このA氏の体幹部の角度については、放医研湯川ら<sup>17)</sup>が測定した骨中の<sup>32</sup>P及び<sup>45</sup>Ca比放射能に対する解析から、以下の通り推定された。骨試料は、全身で計12箇所から採取されている。この中で、沈殿槽に近く、かつ、体軸を中心に左右から試料が得られている前上腸骨棘及び第7肋骨前胸部の実測値を解析の対象とした。図10の計算体系で角度 $\theta$ を変え、骨試料が採取された部分における<sup>32</sup>P及び<sup>45</sup>Caの比放射能を計算した。計算結果を、実測値とともに表1及び2に示す。計算値の信頼性の指標となる相対標準偏差は、0.06以下である。

計算による比放射能には、沈殿槽からの距離及び第一パルスにおける核分裂数の不確かさ、ファントムの軟組織層の厚さ等が影響する。そのため、ここでは実測値及び計算値について、比放射能の左右の比を基に検討を行った。<sup>32</sup>P、<sup>45</sup>Caは、それぞれ骨中の<sup>31</sup>P、<sup>44</sup>Caの(n,  $\gamma$ )反応により生成される。どちらの反応も熱中性子領域において反応断面積が大きくなるため、計算による前上腸骨棘左右における比放射能の比は、<sup>32</sup>Pと<sup>45</sup>Caで、ほぼ同じ値である。これらを実測値と比較すると、実測値による比をほぼ満足する $\theta$ は、およそ15°となる。一方、第7肋骨前胸部の<sup>45</sup>Caからは、 $\theta$ はおよそ35°となる。これらの結果から、沈殿槽に対するA氏体幹部の角度 $\theta$ は、15° - 35°の範囲内にあると推定された。そこでここでは、15°と35°とのほぼ中間の値 $\theta = 25^\circ$ をとることにして計算を実施した。そしてこの角度の変化が、全身平均での吸収線量及びファントム表面での線量分布にどのように影響するかについても検討を行い、その結果を3.6.1項に記述した。

上述の分析に基づき設定された計算体系を、図11に示す。A氏は沈殿槽中心軸から体軸まで55 cm、沈殿層を正面に見る面から25°傾いた姿勢とした。B氏は、胴体下端中心が沈殿槽中心軸から78 cm、沈殿槽上面から17 cm、また、上半身の角度は沈殿槽上面に対し40°とした。以下、この体系における計算結果を示す。

### 3.3 吸収線量、<sup>24</sup>Na比放射能

表3に、A氏及びB氏について、各組織毎の平均吸収線量、軟組織における<sup>24</sup>Na比放射能の計算値を示す。各組織の吸収線量に対し、相対標準偏差は0.02以下である。骨組織における吸収線量は、皮質骨のカーマ係数を用いると、赤色骨髄のカーマ係数を用いた場合のおよそ40%になる。 $\gamma$ 線による吸収線量には、核分裂 $\gamma$ 線を主とした沈殿槽で発生する $\gamma$ 線と、人体に入射した中性子による二次 $\gamma$ 線に起因する成分がある。その内訳は、 $\gamma$ 線による全吸収線量のうち、約10%が人体内で発生する二次 $\gamma$ 線によるものであった。また、軟組織における<sup>24</sup>Na比放射能は、A氏、

B氏に対し、それぞれ  $11.57 \times 10^4 \text{ Bq g}^{-1}$ 、 $6.80 \times 10^4 \text{ Bq g}^{-1}$  と計算された。

表 3 の値を基に、全身平均での中性子及び  $\gamma$  線による吸収線量を表 4(a) に示す。この計算値を、表 4(b) に示す放医研による  $^{24}\text{Na}$  比放射能の実測値とそれに基づく吸収線量の推定値<sup>3)</sup> と比較し、両者の比を求めたものを表 4(c) に示す。放医研推定値における中性子による吸収線量は、人体に入射する中性子スペクトルを仮定し、単色中性子に対する各組織及び臓器の単位フルエンスあたりの吸収線量を与える換算係数(線量換算係数)を用いて評価されている。ここで用いられた線量換算係数は、ICRP Publication 74<sup>21)</sup> の値であり、これは人体に入射した中性子により発生する二次  $\gamma$  線からの吸収線量を含んでいる。そのため、表 4(c) の比を求める際、表 4(a) 中の人体内発生  $\gamma$  線による吸収線量は、中性子による吸収線量へ加算している。

表 4(c) に示すように、計算値と放医研推定値とを比較すると、いずれも計算値が大きく、その比は  $^{24}\text{Na}$  比放射能では A 氏 1.40 倍、B 氏 1.57 倍、吸収線量では最大 1.8 倍(A 氏の  $\gamma$  線による吸収線量)である。本計算では、被ばく時の位置及び姿勢、被ばく時間とその間の核分裂数を評価し、線量を計算している。これらのいずれの要因の不確かさも、表 4(a) に示した値に影響を及ぼす。位置及び姿勢は、患者の証言と併せて、再現試験等を基に妥当と判断される条件を設定した。しかし、これらが事故時の状況に対して、どの程度の隔たりがあるかを定量的に示すことは困難である。そこで、患者から直接採取された血液の  $^{24}\text{Na}$  比放射能を指標とし、計算値の規格化を行った。

第一パルスの半値幅は 0.1 秒のオーダー<sup>1)</sup> で極めて短く、この間の位置、姿勢の変化はほとんどなかったものと推定される。そのため、2名の患者それぞれに対し、人体に入射する中性子スペクトルは変わらないとすると、 $^{24}\text{Na}$  比放射能は吸収線量に比例する。したがって、 $^{24}\text{Na}$  比放射能は、実測値に影響する種々の要因に対して適切な補正が行われていれば、計算により評価された線量を規格化するための指標になる。ここでは、計算で得た  $^{24}\text{Na}$  比放射能に対する実測値の比を求め、これを補正係数  $f$  とし、A 氏、B 氏それぞれに対して求められた  $f_A = 0.712$ 、 $f_B = 0.637$  を用いて計算値の規格化を行った。結果を表 4(d) に示す。 $^{24}\text{Na}$  比放射能を指標に規格化された吸収線量を放医研推定値と比較すると、中性子については、赤色骨髄のカーマ係数を用いた値に対して、10 %放医研推定値が小さいものの、 $\gamma$  線については、ほぼ一致している。そこで、以下に述べる皮膚及び胴体内における吸収線量分布は、 $^{24}\text{Na}$  比放射能を基に規格化した値で示した。なお、患者血液の  $^{24}\text{Na}$  比放射能の測定法等の詳細については、放医研刊行の報告書<sup>3)</sup> に記述がなされている。

### 3.4 全身皮膚における吸収線量分布

図 12、13 に、A 氏、B 氏それぞれの皮膚吸収線量分布を示す。分布図は、中性子及び  $\gamma$  線による全吸収線量と、中性子、 $\gamma$  線毎の吸収線量で示した。球でモデル化した四肢の関節部では皮膚領域の分割を行っていないため、ここでの吸収線量は、各関節部皮膚の平均線量を表している。

A 氏は、体幹部右側を沈殿槽へ近づけて立っていたと推定されたため、沈殿槽内の硝酸ウラニル溶液層の高さ中央に相当する右腹部で線量が最も高く、そこでの吸収線量は 61.8 Gy (中性子 27.0 Gy、 $\gamma$  線 34.8 Gy) である。吸収線量は、この部分を中心に上下及び周方向で急激に減少しており、著しく不均等に被ばくしている状況が明らかとなった。線量分布及び中性子/ $\gamma$  線線量比の特徴を示すために、最大線量部を中心に、胴体の上下及び周方向における吸収線量分布を図 14 に示す。垂直方向での分布図(図 14(a)) から、胴体部に限っても、最大部の線量は、上下端に比べて約 2 倍も高い。しかしながら、全吸収線量に対する中性子及び  $\gamma$  線の寄与割合は、高さによらず一定で、約 40 %が中性子による線量である。これに対し、腹部中央から左右の周方向における分布(図 14(b))を見ると、吸収線量は胴体背面側で急激に減少し、背面側では右腹部の約 8 分の 1

まで減少している。また、背面側では、中性子吸収線量の割合が約 10 %にまで低下しており、ここでの線量は、主に  $\gamma$  線によりもたらされていることが明らかとなった。これは、水素、酸素、炭素等の軽元素で構成される人体内において、中性子は水素との相互作用により減速・吸収されるのに対し、 $\gamma$  線は減弱の度合いが緩やかなためである。

B 氏の皮膚線量は、ウラン溶液の入ったビーカー底面を支えていた右手先端部で最も高く、ここでは 24.4 Gy (中性子 12.4 Gy、 $\gamma$  線 12.0 Gy) である。体幹部は、沈殿槽に対してほぼ正面を向いており、また、A 氏に比べて沈殿槽との距離が離れているため、図 15 に示すように、胴体前面における線量分布及び中性子/ $\gamma$  線線量比は、ほぼ同様である。しかし、周方向の分布では、A 氏と同様に、胴体背面側において吸収線量は急激に減少し、中性子の線量寄与割合も 10 %程度まで低下している。

### 3.5 胴体内における吸収線量分布

図 16 に、A 氏を例に胴体内の吸収線量分布図の表示方法を示す。吸収線量は、x、y、z の各軸に対し垂直な面において、対象とする位置のメッシュ内の平均値を示している。メッシュサイズは、図 5 に示したように、x 及び y 軸では 1 cm、z 軸では 2 cm である。図中、ファントム外の領域は濃青で色分けされている。この表示法により、A 氏及び B 氏に対する胴体内の吸収線量分布を、図 17 - 19 及び図 20 - 22 に示す。分布図は、中性子及び  $\gamma$  線による全吸収線量、中性子、 $\gamma$  線毎の吸収線量について示した。座標軸の添字 1、2 は、それぞれ A 氏、B 氏に対応している。

上記の分布図を基に、吸収線量分布、中性子/ $\gamma$  線線量比の特徴を表す例を図 23、24 に示す。図 23(a) 及び (b) は、A 氏の胃腸管部に相当し、かつ、線量が最も高い  $z_1 = 26 - 28$  cm における分布である。胴体前面中央から  $y_1$  軸方向 (図 23(a)) では、沈殿槽からの中性子及び  $\gamma$  線が、この軸にほぼ平行に入射するため、それぞれの吸収線量は指数関数的に減少している。皮膚線量の分布でも述べたように、中性子は人体内の水素との相互作用により減速・吸収されるため、吸収線量の減衰の勾配は  $\gamma$  線に比べて大きい。そのため、胴体背面における中性子による吸収線量は、胴体前面と比べて約 1 桁も減少している。これに対し、同じ面における  $x_1$  軸に沿った分布 (図 23(b)) では、右腹部側に加え、胴体前面から入射する中性子及び  $\gamma$  線が混在するため、吸収線量の減衰は、 $y_1$  軸方向に比べて緩やかである。図 23(c) には、胸部 ( $z_1 = 48 - 50$  cm) 右肺を横切る  $y_1$  軸方向の分布を示す。肺組織の密度が軟組織と比べて小さいことを反映し、ここでの吸収線量の減衰の勾配は、腹部に比べて小さい。

図 24(a) 及び (b) に、B 氏胴体部で線量が最も高い  $z_2 = 28 - 30$  cm での分布を示す。 $y_2$  軸に沿った線量の減衰及び中性子の線量寄与割合の傾向は、A 氏の場合と同様である。しかし、 $x_2$  軸方向での分布は、沈殿槽中心部に近い左側でやや異なる傾向はあるものの、吸収線量、中性子/ $\gamma$  線線量比は、ほぼ一定である。これは、B 氏が線源に対して正面を向いており、体幹部が一様に照射されたためと考えられる。また、図 24(c) に示す左肺部 ( $z_2 = 48 - 50$  cm) における分布では、A 氏の場合と同様に、吸収線量の減衰の勾配は、腹部に比べて小さくなっている。

### 3.6 各種パラメータの感度解析

#### 3.6.1 沈殿槽に対するファントムの距離、角度等

##### 1) A 氏ファントムに関する距離、角度の影響

図 25 に示す A 氏に相当する直方体ファントムについて、 $\theta = 0^\circ$  とし、沈殿槽中心軸からファントム中心軸までの距離  $L_1$  に対する吸収線量、 $^{24}\text{Na}$  比放射能あたりの中性子吸収線量 (以後、換算

係数と呼ぶ)を図 26 に示す。吸収線量は、 $L_1$  が大きくなるにしたがい急激に減少する。例えば、 $L_1 = 60$  cm に対し、沈殿槽からさらに 10 cm 離れた  $L_1 = 70$  cm において、吸収線量は中性子、 $\gamma$  線ともに 20 %も減少する。A 氏の位置は、作業姿勢の再現試験から、 $L_1 = 55$  cm - 70 cm と推定され、計算では  $L_1 = 55$  cm とした。これに対し、 $L_1 = 70$  cm とした場合、図 26 から、吸収線量は約 30 %減少する。一方、換算係数は  $L_1$  によらず、ほぼ一定である。すなわち、 $^{24}\text{Na}$  比放射能は、中性子による吸収線量を評価するための適切な指標であると言える。

ファントム表面での線量分布を詳細に見るために、図 25 のファントムをさらに一辺 5 cm の立方体に分割し、沈殿槽側に面した各立方体における線量分布を計算した結果を図 27 に示す。図 27(a) は、左右中心線垂直方向における分布、図 27(b) は線量が最大となるファントム下端から 115 - 120 cm での水平方向における分布である。ファントム表面部における線量の勾配は、 $L_1$  が大きくなるにしたがい緩やかになる。 $L_1 = 60$  cm の場合、吸収線量は、線量が最大となる部位に対し、10 cm 離れた位置では約 10 %減少する。これに対し、 $L_1 = 70$  cm でも、上記の線量勾配はなお 5 %ある。したがって、沈殿槽からの距離により、線量が最大となる部位周辺における線量分布は変化するものの、想定される位置の変動範囲内においては、その度合いは比較的小さいと考えられる。

図 28 には、 $L_1 = 60$  cm におけるファントムの角度  $\theta$  に対する吸収線量、換算係数を示す。 $\theta$  が大きくなると、沈殿槽側から見たファントムへの入射面積が小さくなる一方、放射線の透過距離は長くなる。そのため、特にファントム左側での  $^{24}\text{Na}$  生成量が減少することから、換算係数は増加する。一例として、図 29 に  $L_1 = 60$  cm、 $\theta = 0^\circ$  及び  $40^\circ$  に対し、ファントム前面から背面に至る 5 cm ごとの  $^{24}\text{Na}$  比放射能の分布を示す。骨中生成核種に対する解析から、 $\theta$  は  $15^\circ - 35^\circ$  と推定されたが、図 28 から、換算係数は、 $\theta = 10^\circ$  の場合に対し、 $40^\circ$  においては 12 %増加する。また、図 30 に示すように、ファントム表面での線量分布も角度に依存して変化する。線量が最大となる立方体領域を含む垂直方向の分布(図 30(a))では、 $\theta$  が大きくなるとファントム右側部が沈殿槽に接近するため、最大線量が高くなり、線量勾配も増加する。水平方向でも左右の線量に変化し、角度により最も顕著な影響が見られる右端部では、 $\theta$  が  $10^\circ$  増加する毎に、吸収線量は 12 - 15 %増加する。したがって、 $\theta = 25^\circ$  で評価された胴体部の最大線量は、 $\theta$  が  $10^\circ$  増減すると、最大 15 %増減する。

## 2) B 氏ファントムに関する距離、角度の影響

図 31 に示す B 氏に相当する直方体ファントムについて、沈殿槽中心軸から胴体下端中心までの距離  $L_2$ 、沈殿槽上面に対する上半身部の角度  $\phi$  に対する吸収線量及び換算係数を、それぞれ図 32、33 に示す。作業姿勢の再現試験から、B 氏は階段手すりに右脚付け根部を接した状態で溶液を注いでいたと推定した。B 氏は、身長が約 180 cm であることを考慮すると、この位置からさらに最大で約 10 cm 沈殿槽から離れていた可能性も想定される。この場合、吸収線量は中性子、 $\gamma$  線のいずれも 14 %減少する。

B 氏の上半身の角度  $\phi$  は、再現試験から  $40^\circ - 60^\circ$  と推定され、計算では  $40^\circ$  とした。これに対し、 $\phi = 60^\circ$  とすると、吸収線量は上半身部では 24 %、ファントム全体では 11 %減少する。一方、換算係数は、 $L_2$  及び  $\phi$  に依存せず、ほぼ一定である。

## 3) ビーカー中のウラン溶液による影響

図 34 に、B 氏胴体部前面に硝酸ウラニル溶液を置いた場合の、ファントム表面における吸収線量分布を示す。ファントム表面での吸収線量は、ビーカー中のウラン溶液により減少することが分かった。すなわち、B 氏が保持していたウラン溶液は、沈殿槽からの中性子を吸収して核分裂

線源となり、胴体や顔面に線量を与えるよりも、沈殿槽からの中性子及び $\gamma$ 線に対する遮へいとして働いていたと判断される。

#### 4) 空気層、床の影響

沈殿槽周辺をボイド(真空)と空気層にした場合とを比較すると、吸収線量、 $^{24}\text{Na}$ 比放射能のいずれにおいても、相対標準偏差 0.01 以下で相互に一致した。これより、空気層による吸収の効果は無視できると判断される。

床面をコンクリートにすると、その散乱の影響により、ボイドの場合の値に対し、吸収線量、 $^{24}\text{Na}$ 比放射能ともに増加する。A 氏に相当するファントムに対し、 $L_1 = 60 \text{ cm}$ 、 $\theta = 30^\circ$ 、B 氏に相当するファントムに対し、 $L_2 = 78 \text{ cm}$ 、 $\phi = 40^\circ$  の条件において、吸収線量は両ファントムとも 3 %、 $^{24}\text{Na}$ 比放射能は A 氏、B 氏に相当するファントムで、それぞれ 12 %、9 %増加した。

### 3.6.2 断面積データ

断面積データに関する比較は、図 25 に示した体系で、 $L_1 = 60 \text{ cm}$ 、 $\theta = 30^\circ$  の条件で行った。中性子輸送計算断面積データとして ENDF/B-VI のデータを用いると、FSXLIB の場合に対し、中性子による吸収線量は 3 %増加したが、 $\gamma$ 線については 3 %減少した。また、MCNP-4B と MCNP-4C<sup>22)</sup> による比較では、同じ輸送計算断面積データを用いると、吸収線量についてコード間での有意な差は認められなかった。

表 5 に、 $^{24}\text{Na}$ 、 $^{32}\text{P}$  及び  $^{45}\text{Ca}$  生成率の比較を示す。いずれの反応についても、FSXLIB の値を基準とし、それに対する比で示した。 $^{24}\text{Na}$  については、3 種類のデータ間で大きな違いは見られない。一方、 $^{32}\text{P}$  及び  $^{45}\text{Ca}$  については、LLLDOS を用いた場合、FSXLIB の値に対し、 $^{32}\text{P}$  では 20 %大きく、 $^{45}\text{Ca}$  では 5 %小さい。しかし、 $^{32}\text{P}$  及び  $^{45}\text{Ca}$  に対する解析には、生成率の比を用いたため、上記の差異は解析結果へは影響しない。

## 4 結 言

東海村臨界事故の重度被ばく患者に対し、被ばく時の位置、姿勢を模擬した計算シミュレーションを実施し、中性子及び $\gamma$ 線による吸収線量分布の解析を行った。計算結果は、臨床症状との比較が容易にできるように、全身皮膚、胴体内における吸収線量分布をカラーマップを用いて表現した。また、位置、姿勢等が想定される範囲内で変動した場合に、それらの線量への影響についても解析を行った。これらの結果が、患者の症状との対比に利用され、中性子及び $\gamma$ 線による高線量被ばく時の人体影響の解明、さらにはその治療法など、学術面での研究の進歩のために活用されることを期待する。

なお、本評価値は、作業姿勢の再現試験、放医研より提供された患者試料の分析等から推定された姿勢に基づくものである。この結果を患者の症状と照会し、評価された線量と症状との関係に明らかな乖離があり、作業姿勢の再検討が必要と認められる場合には、それらを考慮した上で、線量は再評価されるものであると考えられる。



## 謝 辞

原研保健物理部 山本 克宗部長、放医研 河内 清光研究総務官(現在、原子力安全技術センター)には、本共同研究の方向性を適切にご指示頂くとともに、的確かつ有益な学術上の助言を頂いた。三菱総合研究所 佐藤 理氏には、計算シミュレーションに関する技術的支援を頂いた。放医研人間環境研究部 西村 義一氏、湯川 雅枝氏、渡辺 嘉人氏、第4研究グループ 武田 洋氏、宮本 霧子氏及び放射線障害医療部 平間 敏靖氏の方々から、被ばく時の姿勢推定のための骨中生成核種に関する測定データを提供頂いた。また、放射線障害医療部 明石 真言氏には、被ばく時の姿勢の推定に有益な助言を頂いた。Los Alamos 国立研究所 Laurie Waters 氏には、本目的のために MCNPX を提供頂いた。また、原研中性子科学研究センター 池田 裕二郎氏には、MCNPX の使用に関し、Waters 氏との仲介をして頂いた。放医研放射線科学研究部、障害医療部、医用重粒子物理・工学研究部の方々、原研保健物理部 津田 修一氏には、作業姿勢の再現試験に協力頂いた。原研燃料サイクル安全工学部 山本 俊弘氏からは、沈殿槽線源についての助言を頂いた。そして、原研東海研究所 田中 俊一副所長には、本共同研究を実施するにあたっての仲介の労をお取り頂いた。以上の方々に心よりお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会. ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告 (1999).
- 2) 河内 清光、藤元 憲三 編. ウラン加工工場臨界事故患者の線量推定 中間報告書. NIRS-M-138 (2000).
- 3) 放射線医学総合研究所. 東海村ウラン加工工場臨界事故に関する放医研報告書. NIRS-M-143 (2001).
- 4) Briesmeister, J.F. Ed. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. LA-12625-M (1997).
- 5) Waters, L.S. Ed. MCNPX User's Manual, Version 2.1.5. TPO-E83\_G-UG-X-00001, Rev. 0 (1999).
- 6) 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: JENDL-3.2, J. Nucl. Sci. Technol., **32**, 1259-1271 (1995).
- 7) Kosako, K., Maekawa, F., Oyama, Y., Uno, Y. and Maekawa, H. FSXLIB-J3R2: A Continuous Energy Cross Section Library for MCNP based on JENDL-3.2, JAERI-Data/Code 94-020 (1994).
- 8) Hughes, H.G. Information on the MCPLIB02 Photon Library. LANL Memorandum X-6:HGH-93-77 (1996)
- 9) 山口 恭弘. FANTOME-90: 四肢可動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**, 143-148 (1992).
- 10) Snyder, W.S., Ford, M.R., Warner, G.G. and Fisher, H.L.Jr. Estimates of Specific Absorbed Fractions for Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom. J. Nucl. Med., **10**, Supplement No.3 (1969).
- 11) Snyder, W.S., Ford, M.R. and Warner, G.G. Estimation of Specific Absorbed Fractions for Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs and Heterogeneous Phantom. NM/MIRD Pamphlet No. 5 (Revised). J. Nucl. Med., **19**, Supplement: 5-67 (1987).
- 12) 三好 慶典. 臨界事故初期バースト部の動特性解析. JAERI-Tech 2000-074, 184-185 (2000).
- 13) Harmon, C.D., Busch, R.D., Briesmeister, J.F. and Forster, R.A. Criticality Calculation with MCNP: A Primer. LA-12827-M (1994).
- 14) Croff, A.G. A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code. ORNL/TM-7175 (1980).
- 15) 原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会 第9回会合資料 第9-3号 (1999).
- 16) Nakajima, K. and Yanagisawa H. Development of a Kinetics Code, AGNES, for the Evaluation of Criticality Accidents in Solution Fuel Systems. Proc. Int. Seminar on Nuclear Criticality Safety (ISCS'87), 427-430 (1987).
- 17) 湯川 雅枝、西村 義一、渡辺 嘉人、金 熙善、武田 洋、宮本 霧子、府馬 正一、村松 康行、黒田 典子、石樽 信人、曾我 文宣、明石 眞言、平間 敏靖、上島 久正、光野 冬樹. 生体試料中 $\beta$ 放射性核種の測定. 第28回放医研環境セミナー, IV-3 (2000).

- 18) International Commission on Radiation Units and Measurements. Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues. ICRU Report 46 (1992).
- 19) International Commission on Radiological Protection. The Biological Basis for Dose Limitation in the Skin. ICRP Publication 59 (1992).
- 20) Nakajima, Y. and Japanese Nuclear Data Committee Activation-Cross-Section Data Working Group. Status of the JENDL Activation File. JAERI-Conf 96-008, 50 (1996).
- 21) International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRP Publication 74 (1996).
- 22) Briesmeister, J.F. Ed. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. LA-13709-M (2000).

表 1: A 氏前上腸骨棘における  $^{32}\text{P}$  及び  $^{45}\text{Ca}$  比放射能

	放医研実測値		計算値					
			$\theta = 20^\circ$		$\theta = 30^\circ$		$\theta = 40^\circ$	
	左	右	左	右	左	右	左	右
$^{32}\text{P}$ 比放射能 ( $\text{Bq mg}\cdot\text{P}^{-1}$ )	1.37	2.35	1.4	3.0	1.1	3.4	0.7	3.7
右/左 比放射能比	1.72		2.1		3.1		5.3	

	放医研実測値		計算値					
			$\theta = 20^\circ$		$\theta = 30^\circ$		$\theta = 40^\circ$	
	左	右	左	右	左	右	左	右
$^{45}\text{Ca}$ 比放射能 ( $\text{Bq g}\cdot\text{Ca}^{-1}$ )	9.63	16.31	10.2	22.3	8.1	26.0	5.5	27.6
右/左 比放射能比	1.69		2.2		3.2		5.0	

表 2: A 氏第 7 肋骨前胸部における  $^{45}\text{Ca}$  比放射能

	放医研実測値		計算値					
			$\theta = 20^\circ$		$\theta = 30^\circ$		$\theta = 40^\circ$	
	左	右	左	右	左	右	左	右
$^{45}\text{Ca}$ 比放射能 ( $\text{Bq g}\cdot\text{Ca}^{-1}$ )	7.28	18.21	10.6	19.1	8.3	19.2	6.4	20.0
右/左 比放射能比	2.50		1.8		2.3		3.1	

表 3: 各組織毎の平均吸収線量、<sup>24</sup>Na 比放射能

		吸収線量 (Gy)			<sup>24</sup> Na 比放射能 (10 <sup>4</sup> Bq g <sup>-1</sup> )
		中性子	γ 線		
			人体内発生 §	沈殿槽内発生	
A 氏					
軟組織		7.20	1.50	15.43	11.57
肺組織	左右平均	8.10	1.74	17.58	
	左	4.84	1.40	13.78	
	右	10.90	2.03	20.85	
骨組織		5.56 <sup>¶</sup> (2.16)**	1.01	12.14	
B 氏					
軟組織		4.21	0.91	7.04	6.80
肺組織	左右平均	4.54	0.94	7.18	
	左	4.38	0.98	7.21	
	右	4.68	0.90	7.15	
骨組織		3.73 <sup>¶</sup> (1.46)**	0.73	6.50	

§ 人体に入射した中性子による二次 γ 線からの線量。

¶ 赤色骨髄 (red marrow) のカーマ係数を用いた値。

\*\* 皮質骨 (cortical bone) のカーマ係数を用いた値。

表 4: 全身平均での吸収線量

## (a) 計算値

	吸収線量 (Gy)			$^{24}\text{Na}$ 比放射能 ( $10^4 \text{ Bq g}^{-1}$ )
	中性子	$\gamma$ 線		
		人体内発生 <sup>††</sup>	沈殿槽内発生	
A 氏	6.99 <sup>††</sup> (6.53)	1.43	15.01	11.57
B 氏	4.15 <sup>††</sup> (3.83)	0.89	6.97	6.80

<sup>††</sup> 放医研の推定値 (表 4(b)) と比較する際には、この吸収線量は中性子による吸収線量へ加算する。

<sup>††</sup> 骨組織に赤色骨髄のカーマ係数を用いた値。括弧 ( ) 内は、皮質骨のカーマ係数を用いた値。

(b) 放医研推定値<sup>3)</sup>

	吸収線量 (Gy)		$^{24}\text{Na}$ 比放射能 ( $10^4 \text{ Bq g}^{-1}$ )
	中性子	$\gamma$ 線	
A 氏	5.4	8.5 — 13	8.24
B 氏	2.9	4.5 — 6.9	4.33

## (c) 評価値の比 (a)/(b)

	吸収線量		$^{24}\text{Na}$ 比放射能
	中性子	$\gamma$ 線	
A 氏	1.6 (1.5)	1.2 — 1.8	1.40
B 氏	1.7 (1.6)	1.0 — 1.5	1.57

(d)  $^{24}\text{Na}$  比放射能を基に規格化した吸収線量

	吸収線量 (Gy)		
	中性子	$\gamma$ 線	
		人体内発生	沈殿槽内発生
A 氏	4.98 (4.65)	1.02	10.69
B 氏	2.64 (2.44)	0.57	4.44

表 5: 放射化断面積データの違いによる核種生成率の比較

	FSXLIB (基準値)	JACT96	LLLDOS
$^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$	1.00	1.00	1.01
$^{31}\text{P}(n, \gamma)^{32}\text{P}$	1.00	1.00	1.20
$^{44}\text{Ca}(n, \gamma)^{45}\text{Ca}$	1.00	—	0.95

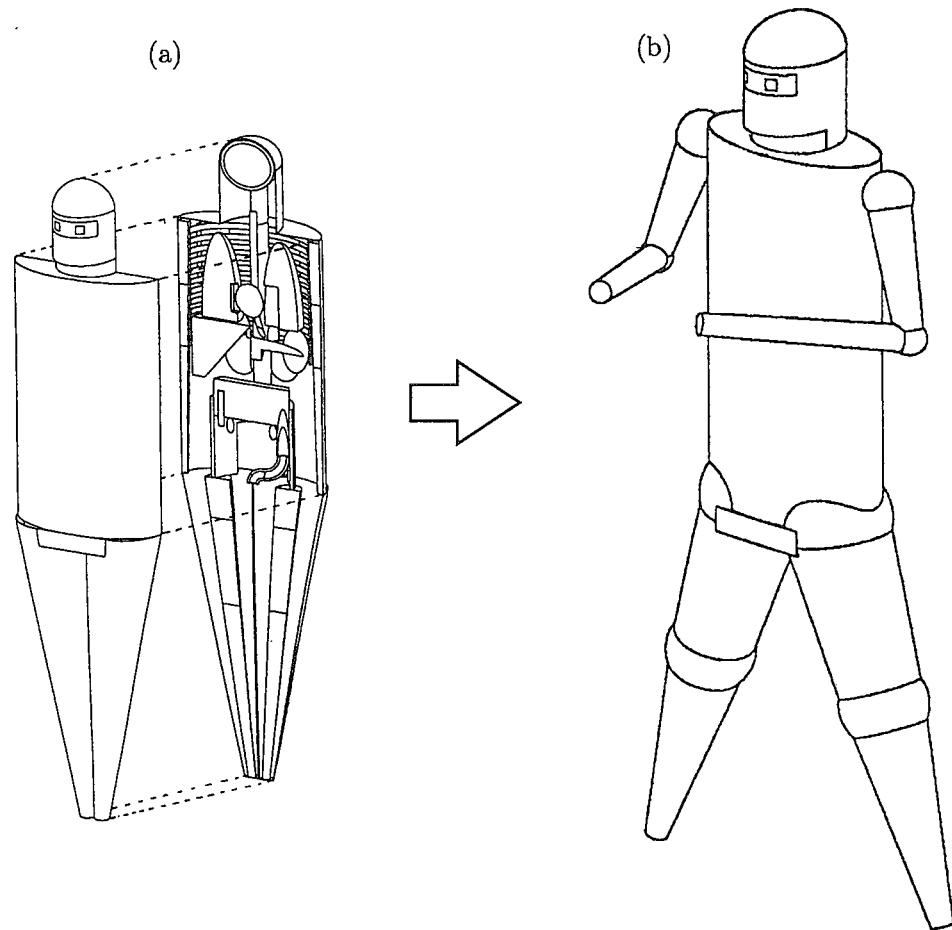


図 1: 計算シミュレーションに用いた数学人体ファントム。(a) MIRD 型ファントム、(b) 四肢可動型ファントム。



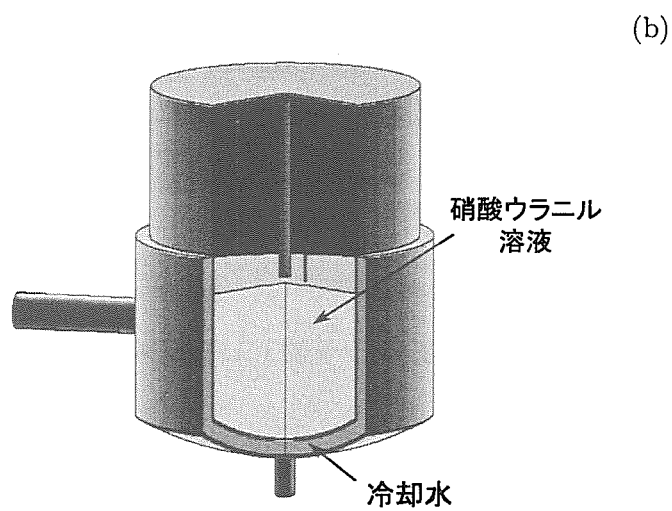
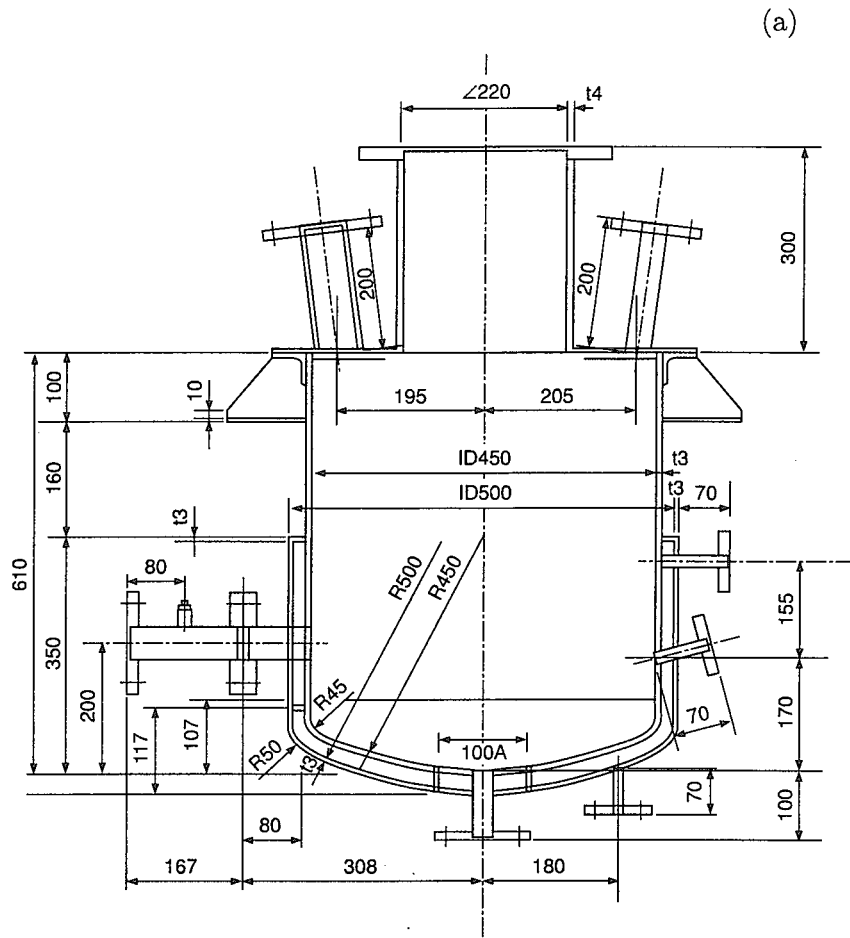


図 2: 沈殿槽モデル。(a) 沈殿槽図面 (単位 mm)、(b) 計算モデルの断面図。

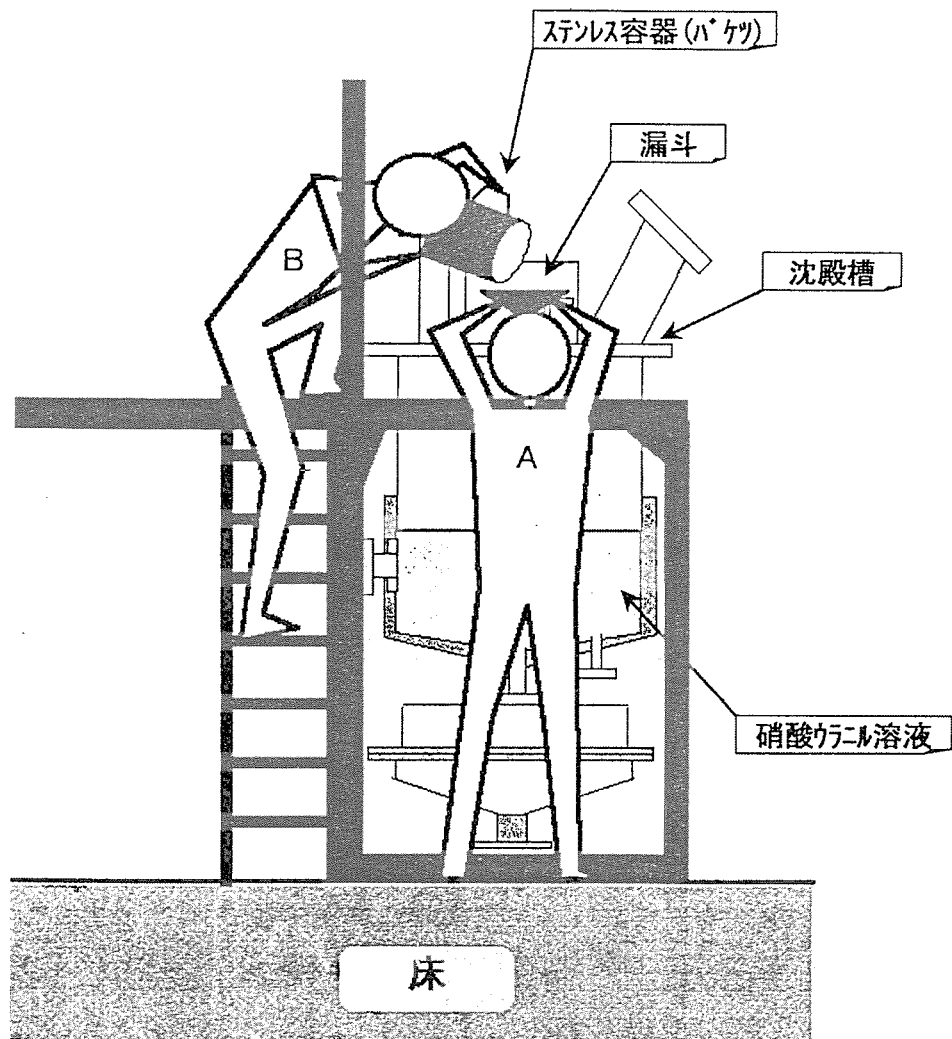


図 3: 患者の証言に基づく作業時の様子 (ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告書<sup>1)</sup> から引用)。

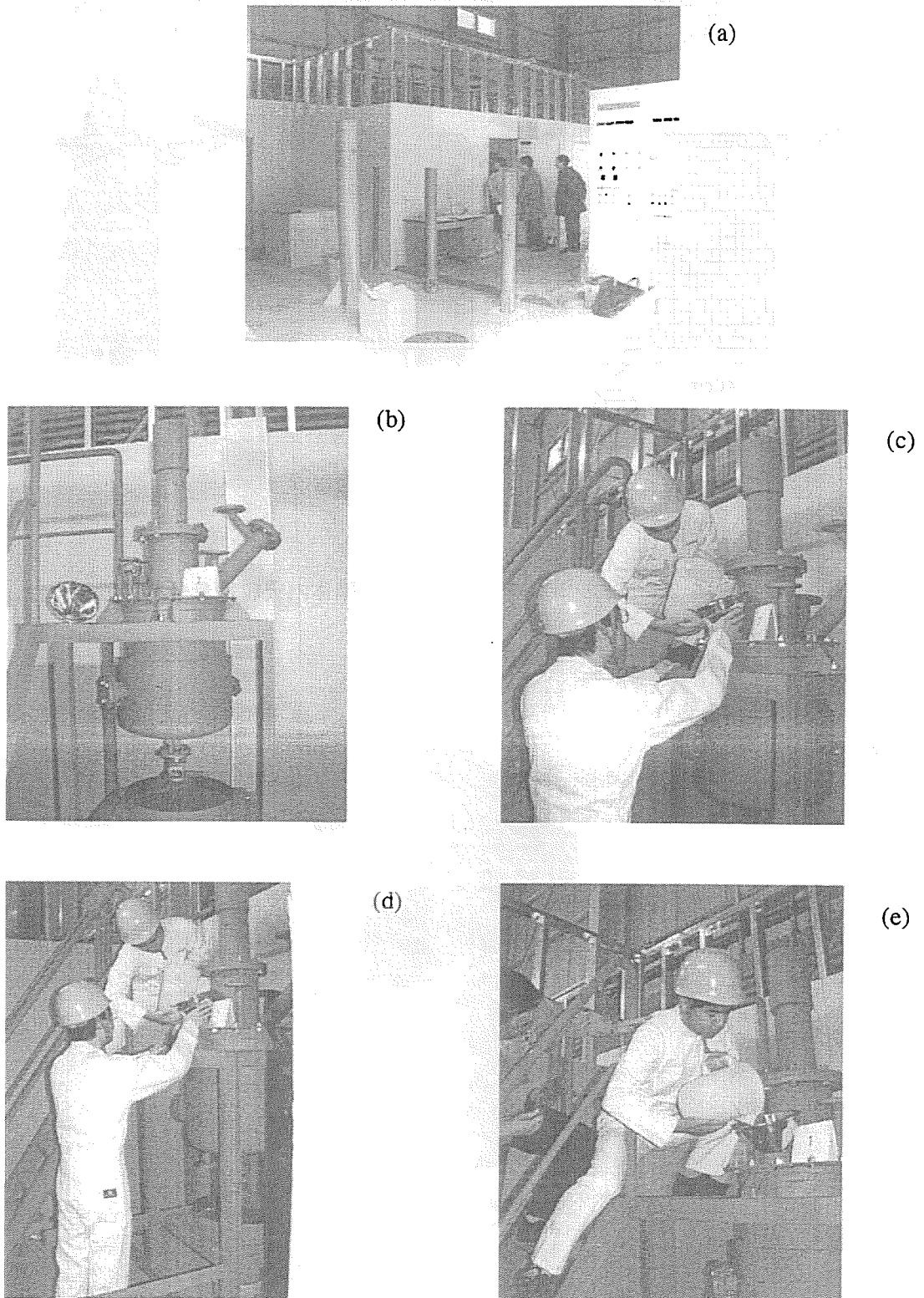


図 4: 仮焼室模擬施設における作業姿勢の調査。(a) 模擬施設の概観、(b) 沈殿槽予備品、(c)-(e) 作業姿勢の再現、計測作業。

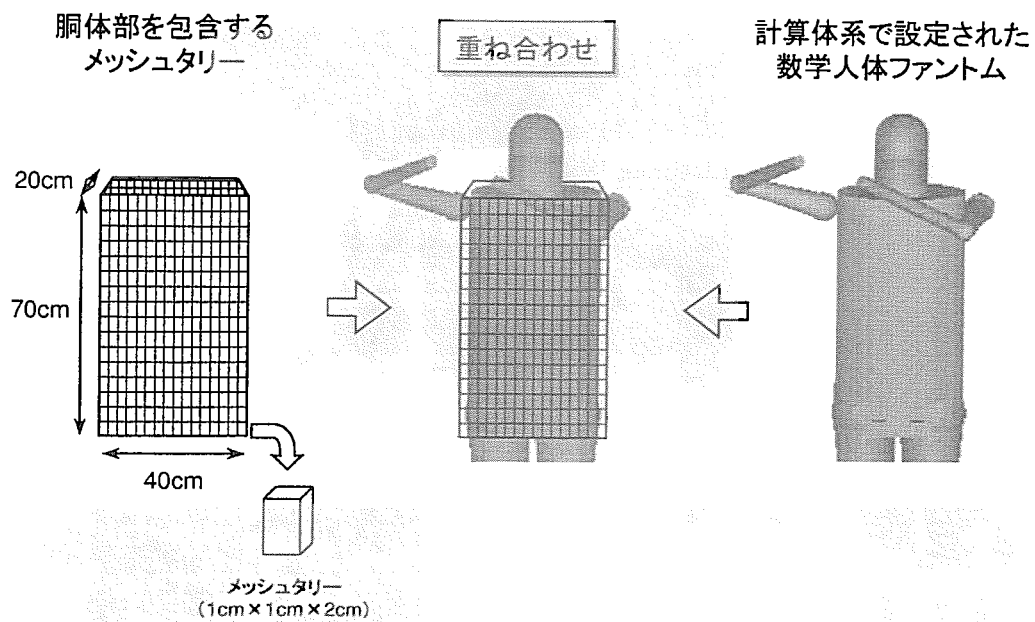


図 5: エネルギー沈着メッシュタリーを用いた胴体内吸収線量分布の計算方法。

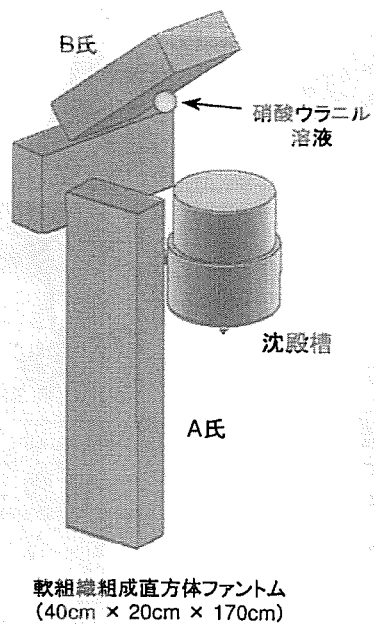


図 6: パラメータの感度解析に用いた直方体ファントム。

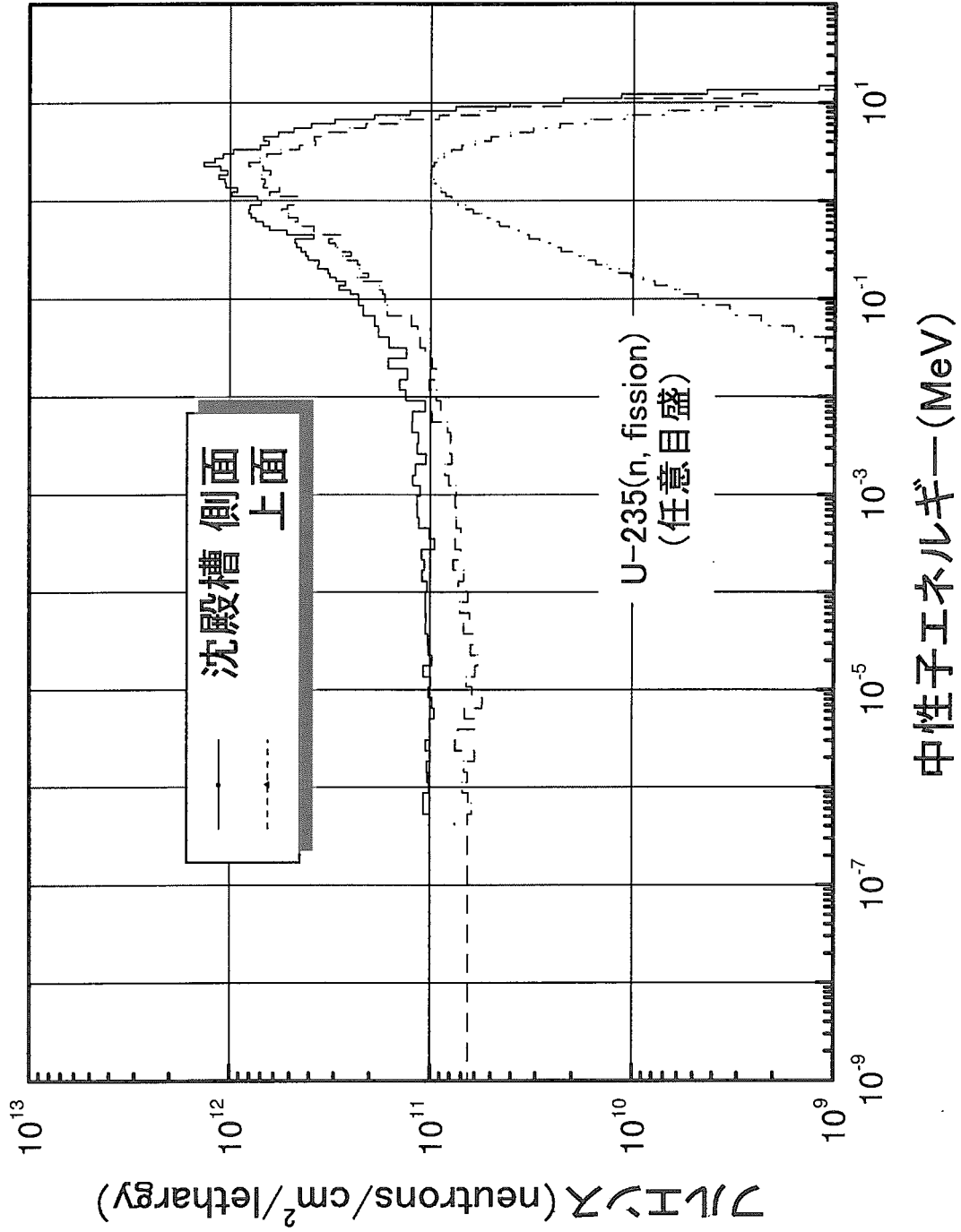


図 7: 沈殿槽表面から漏洩する中性子スペクトル。

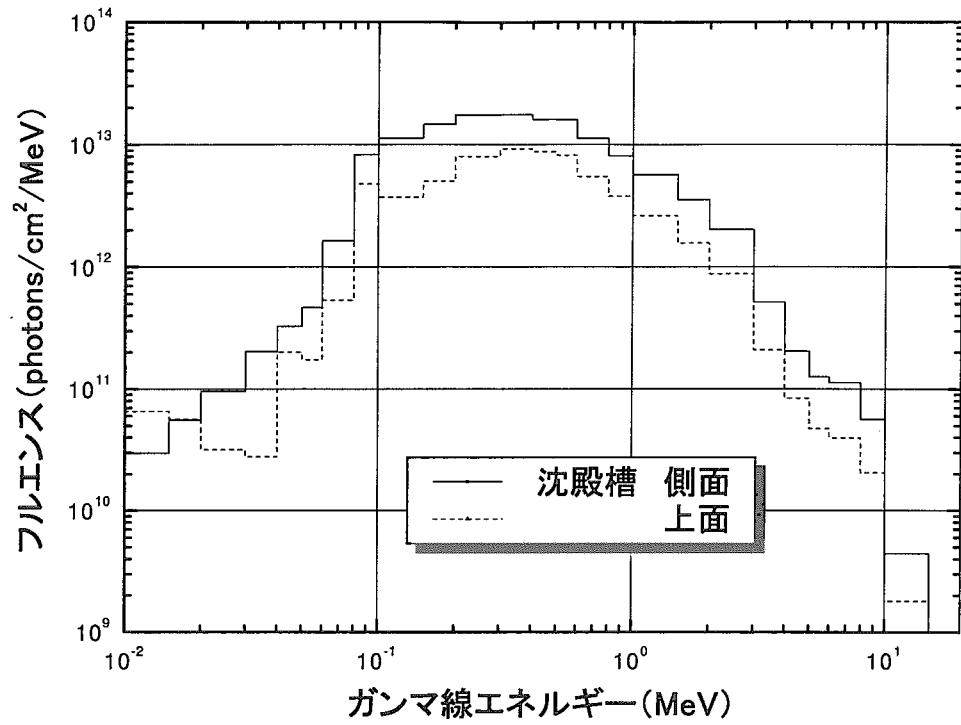


図 8: 沈殿槽表面から漏洩する核分裂 $\gamma$ 線及び二次 $\gamma$ 線スペクトル。

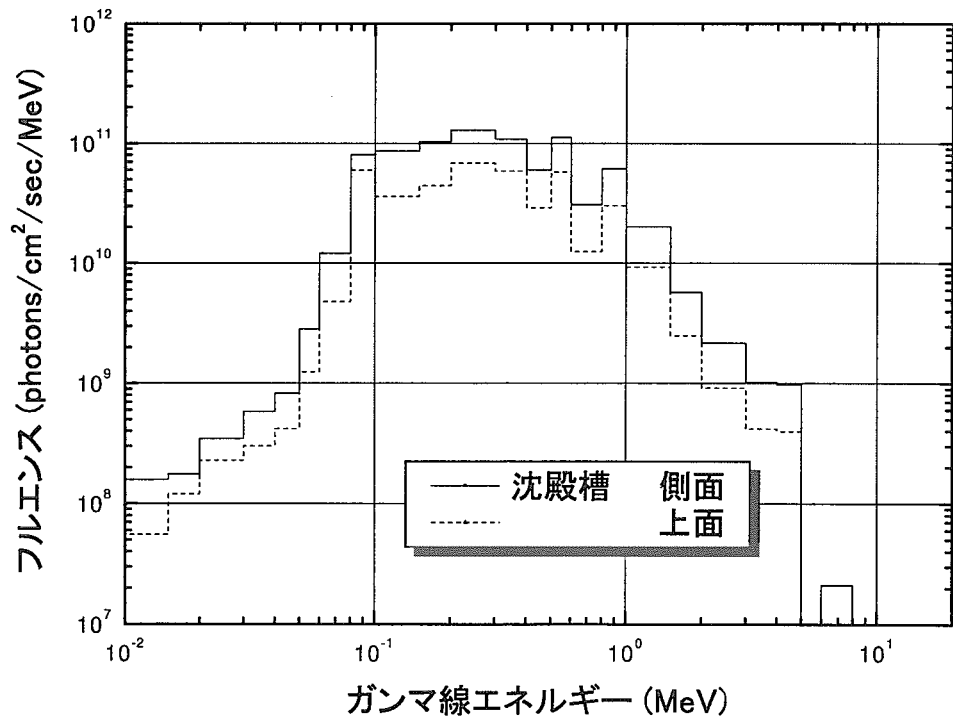


図 9: 沈殿槽表面から漏洩する核分裂生成物からの $\gamma$ 線スペクトル。

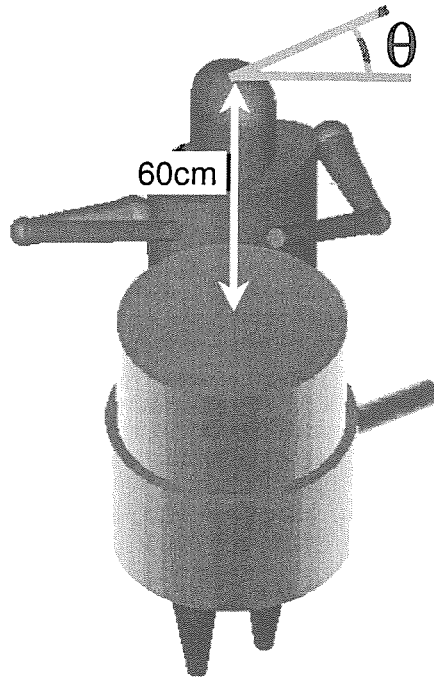


図 10: 骨中生成核種比放射能の計算体系。

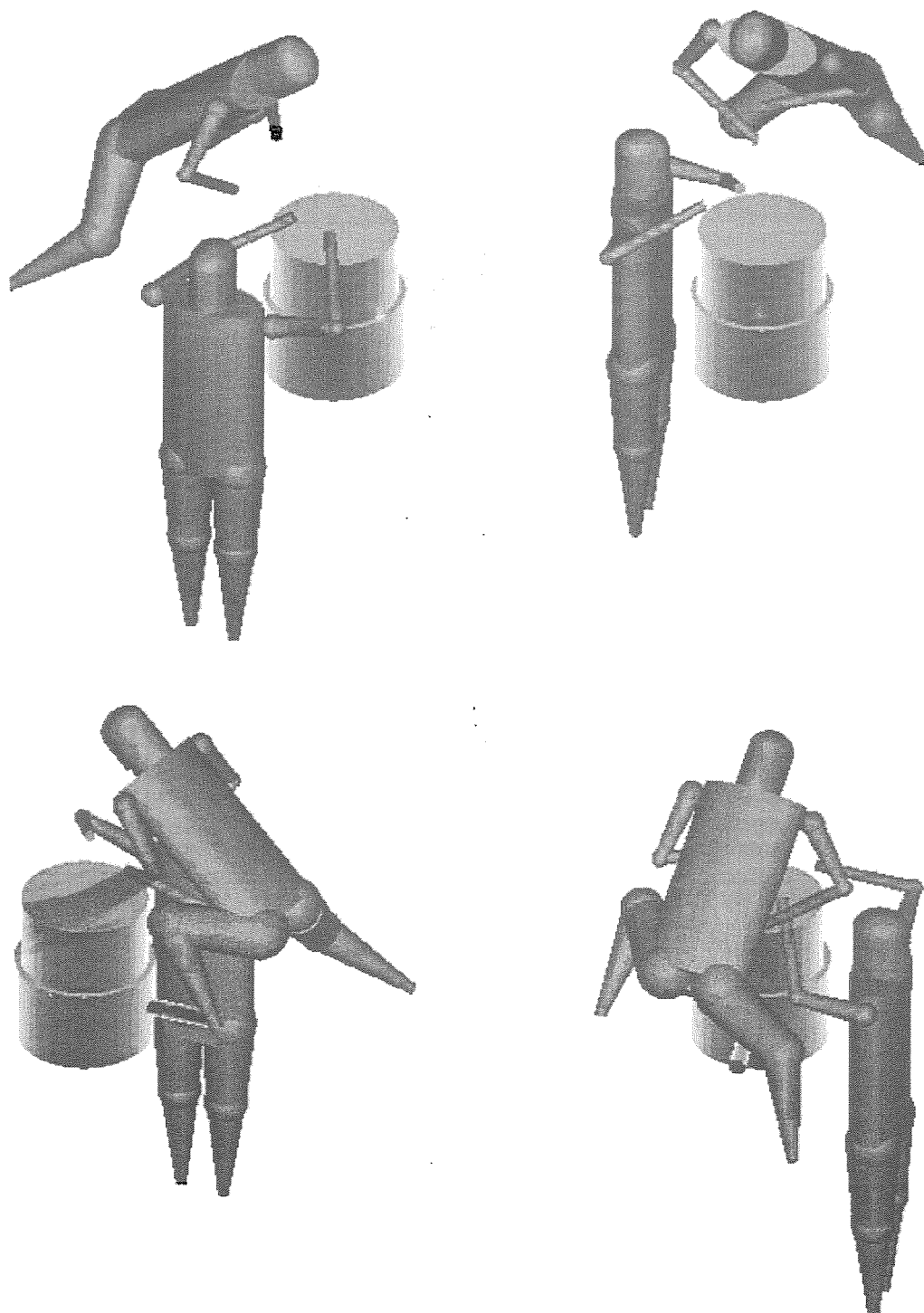


図 11: 線量計算のために設定された体系 - その 1。



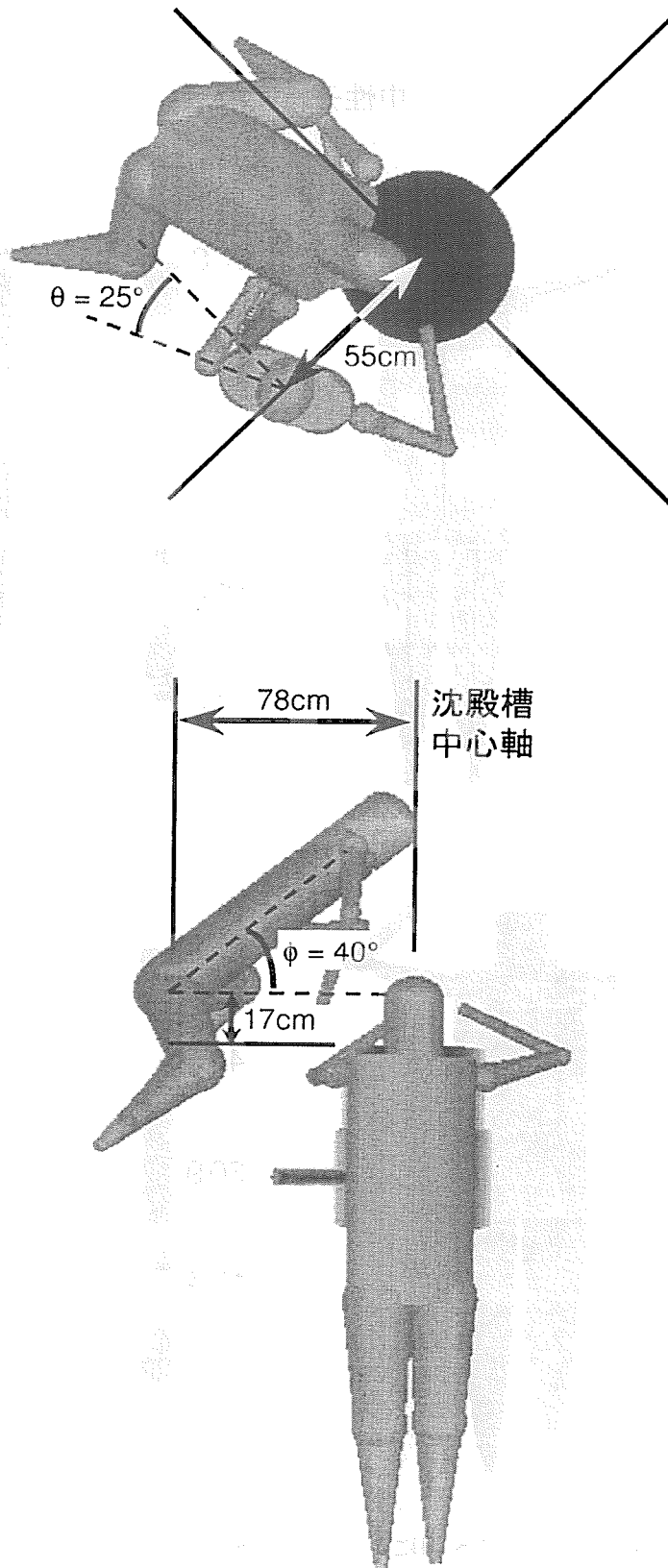


図 11: 線量計算のために設定された体系 -- その 2。

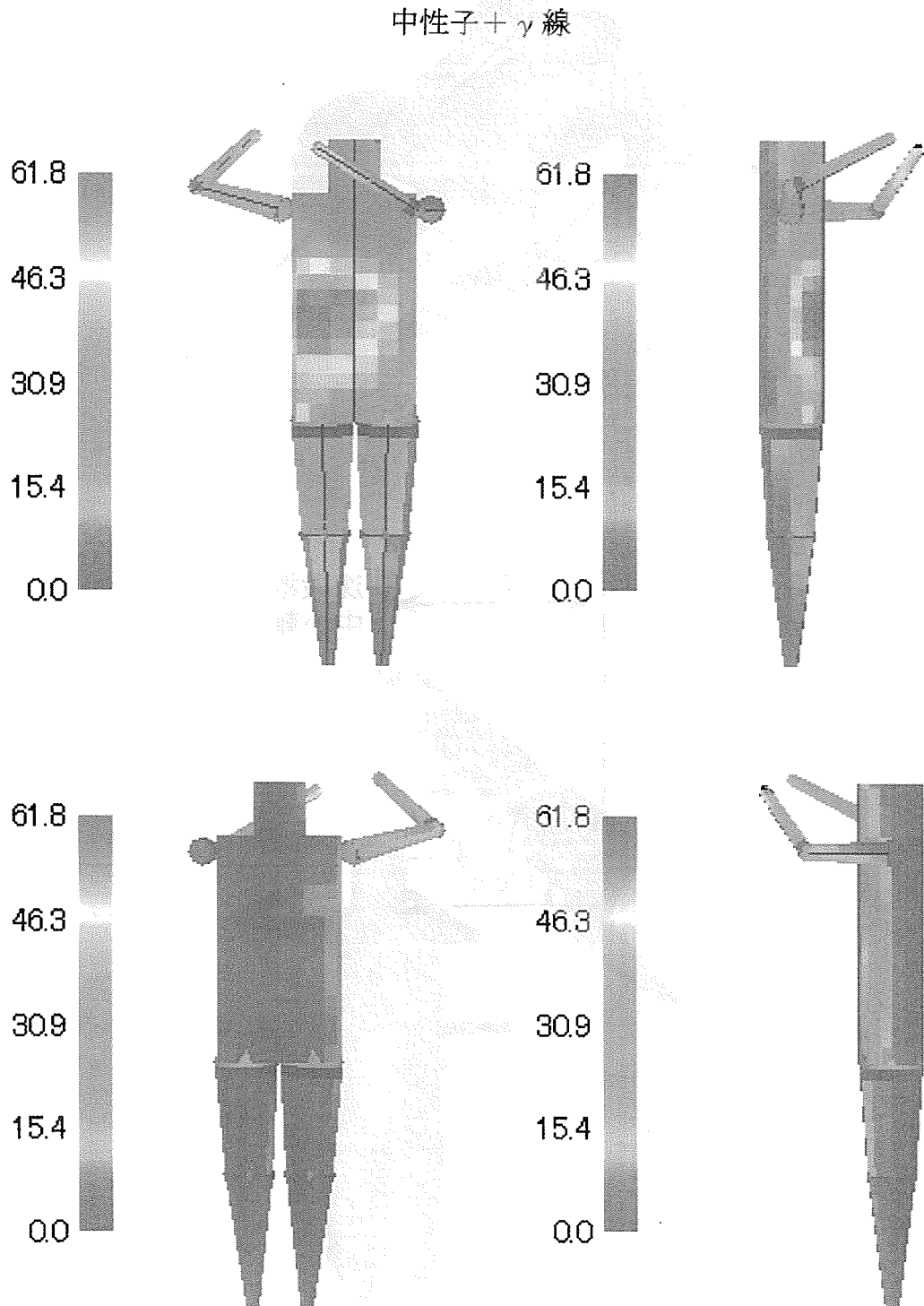


図 12: (a) 中性子及び $\gamma$ 線による A 氏の皮膚吸収線量分布 (単位 Gy)。

中性子

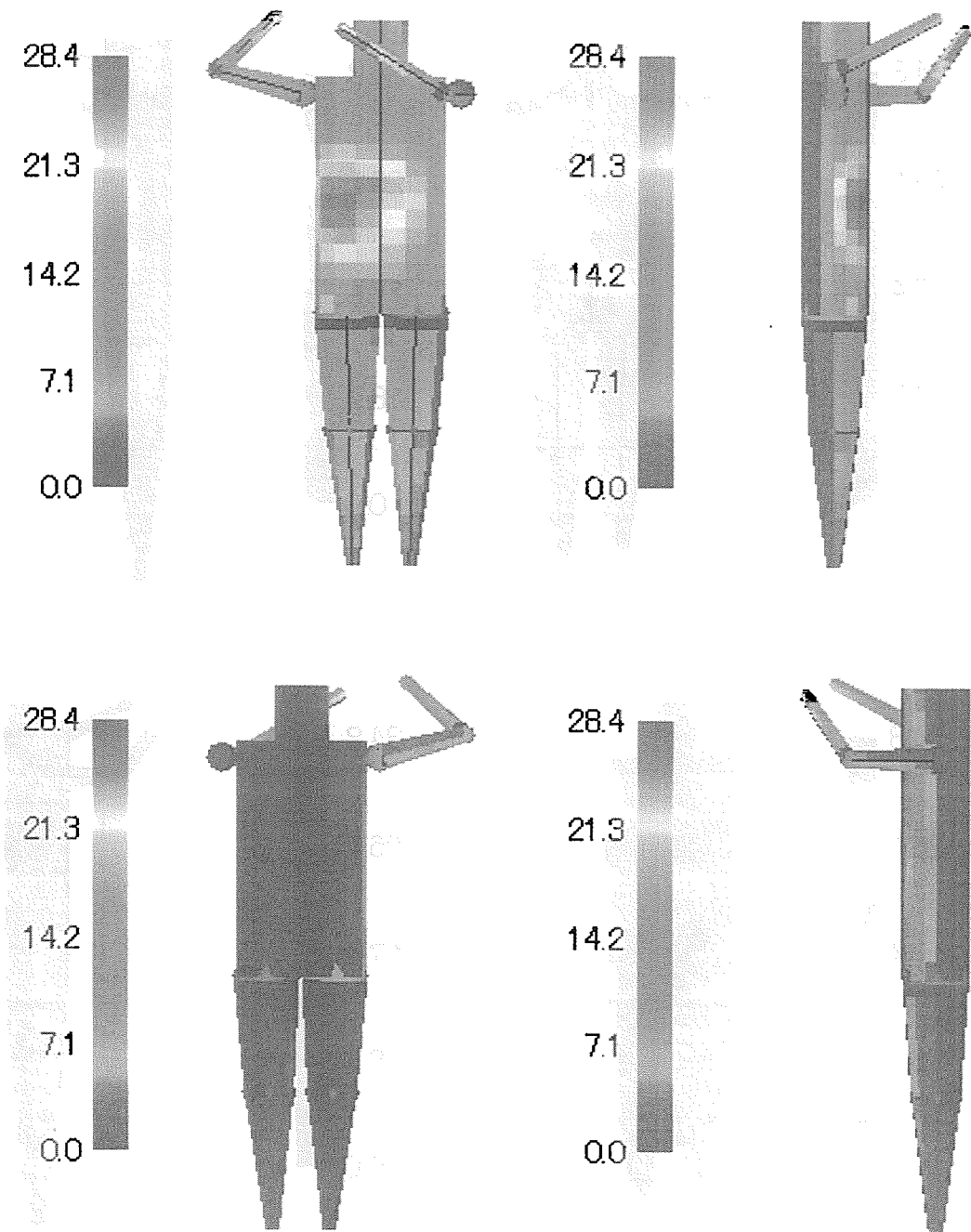


図 12: (b) 中性子による A 氏の皮膚吸収線量分布 (単位 Gy)。

$\gamma$ 線

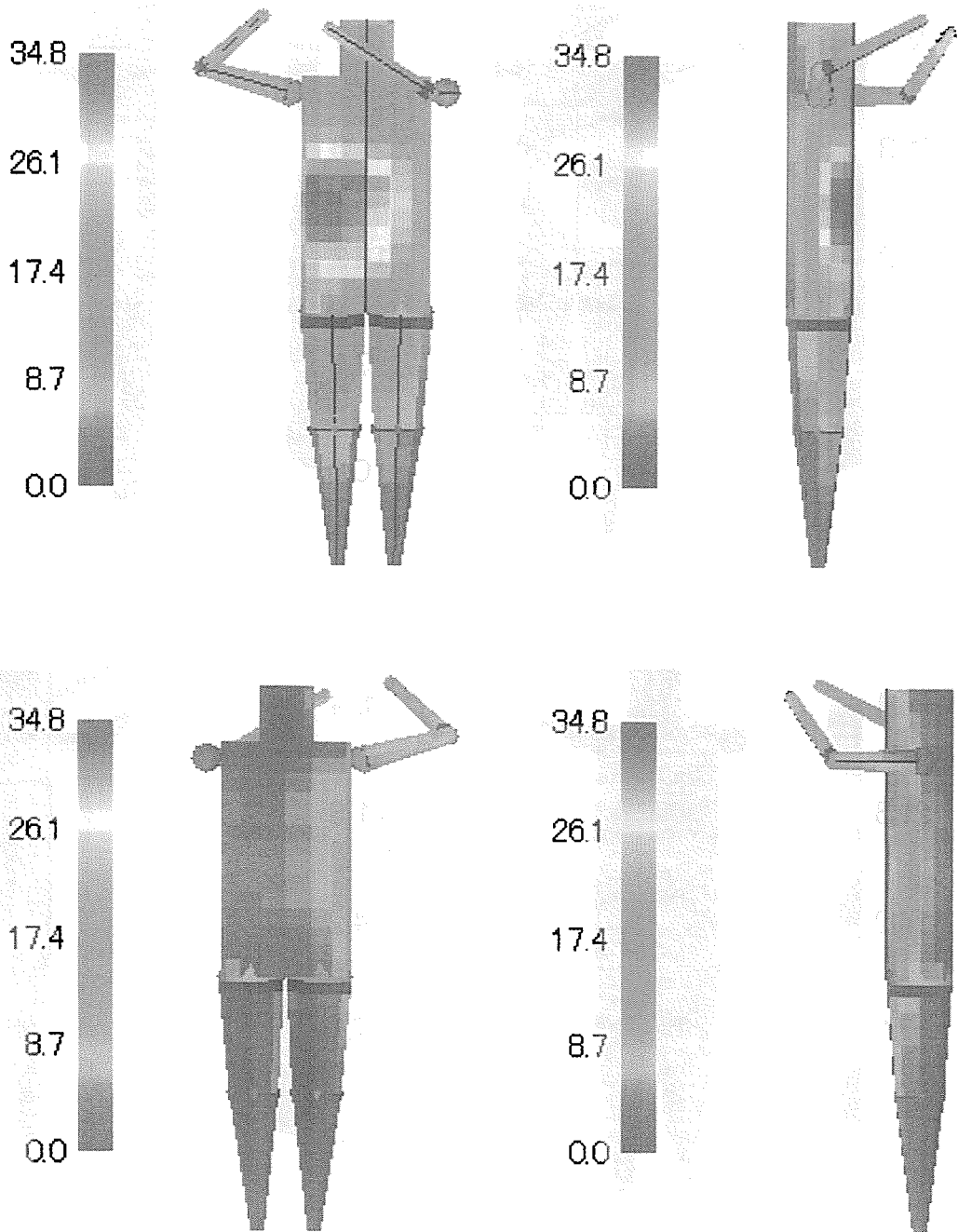


図 12: (c)  $\gamma$ 線による A 氏の皮膚吸収線量分布 (単位 Gy)。

中性子+ $\gamma$ 線

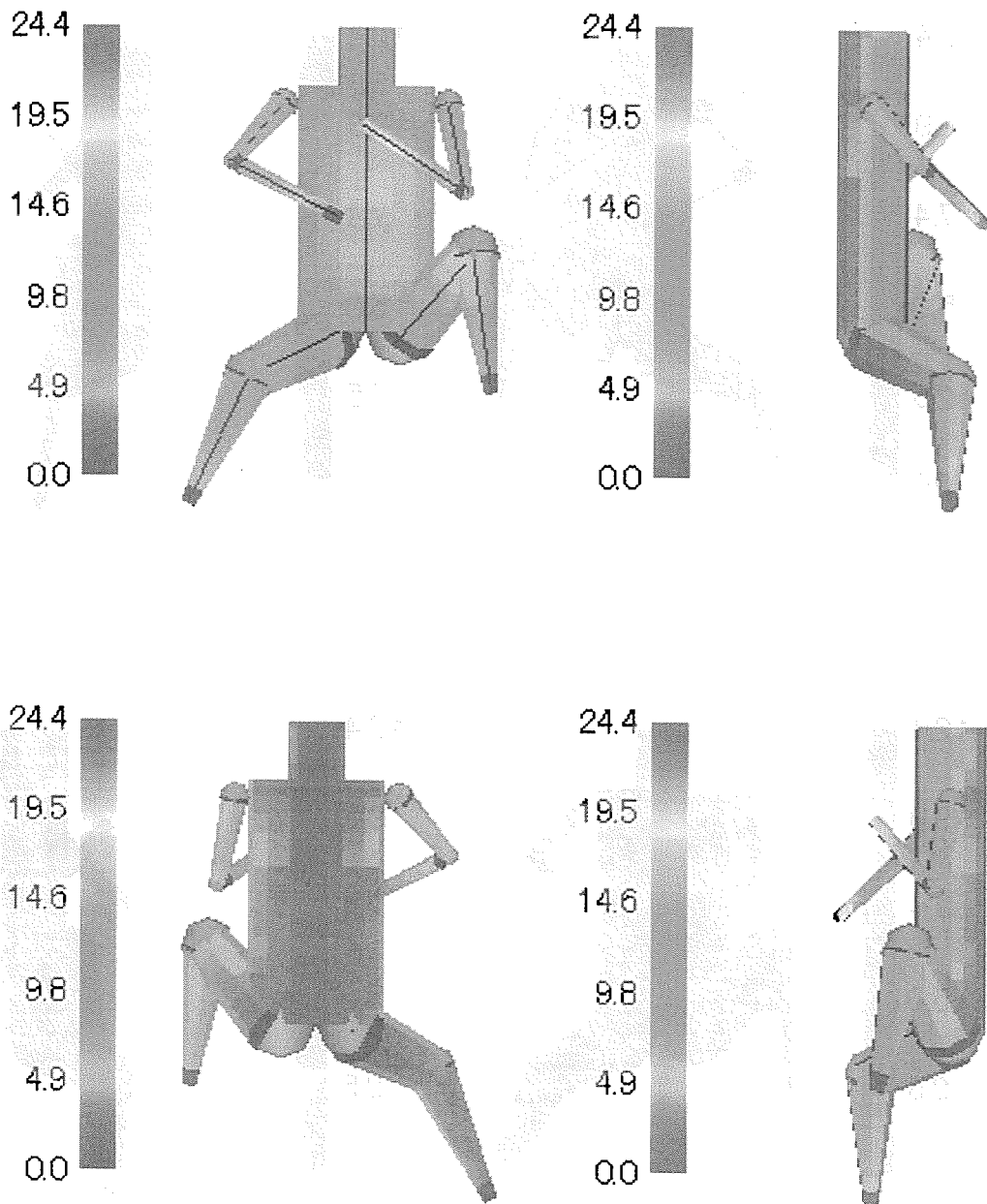


図 13: (a) 中性子及び $\gamma$ 線によるB氏の皮膚吸収線量分布 (単位 Gy)。

中性子

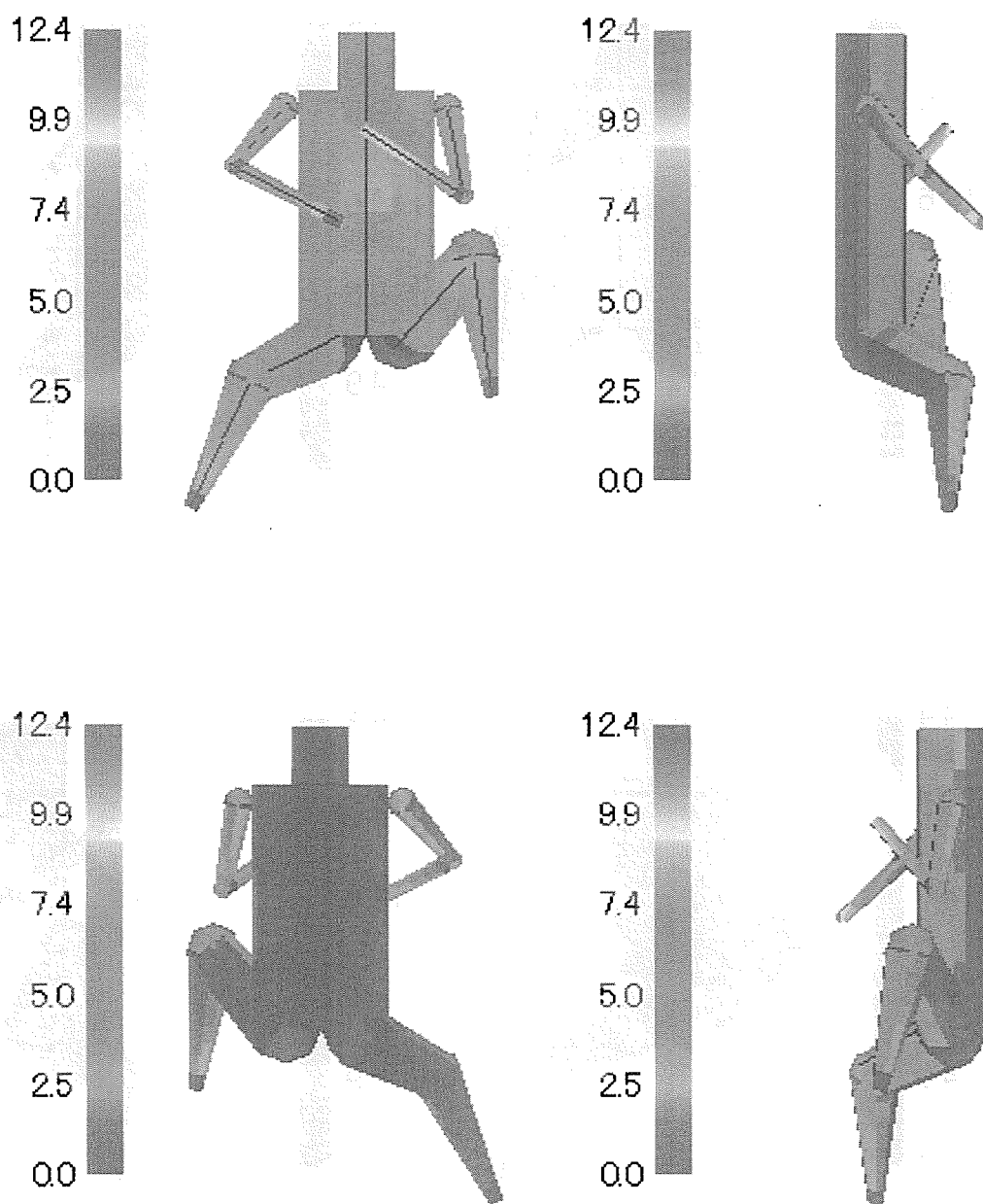


図 13: (b) 中性子による B 氏の皮膚吸収線量分布 (単位 Gy)。

$\gamma$ 線

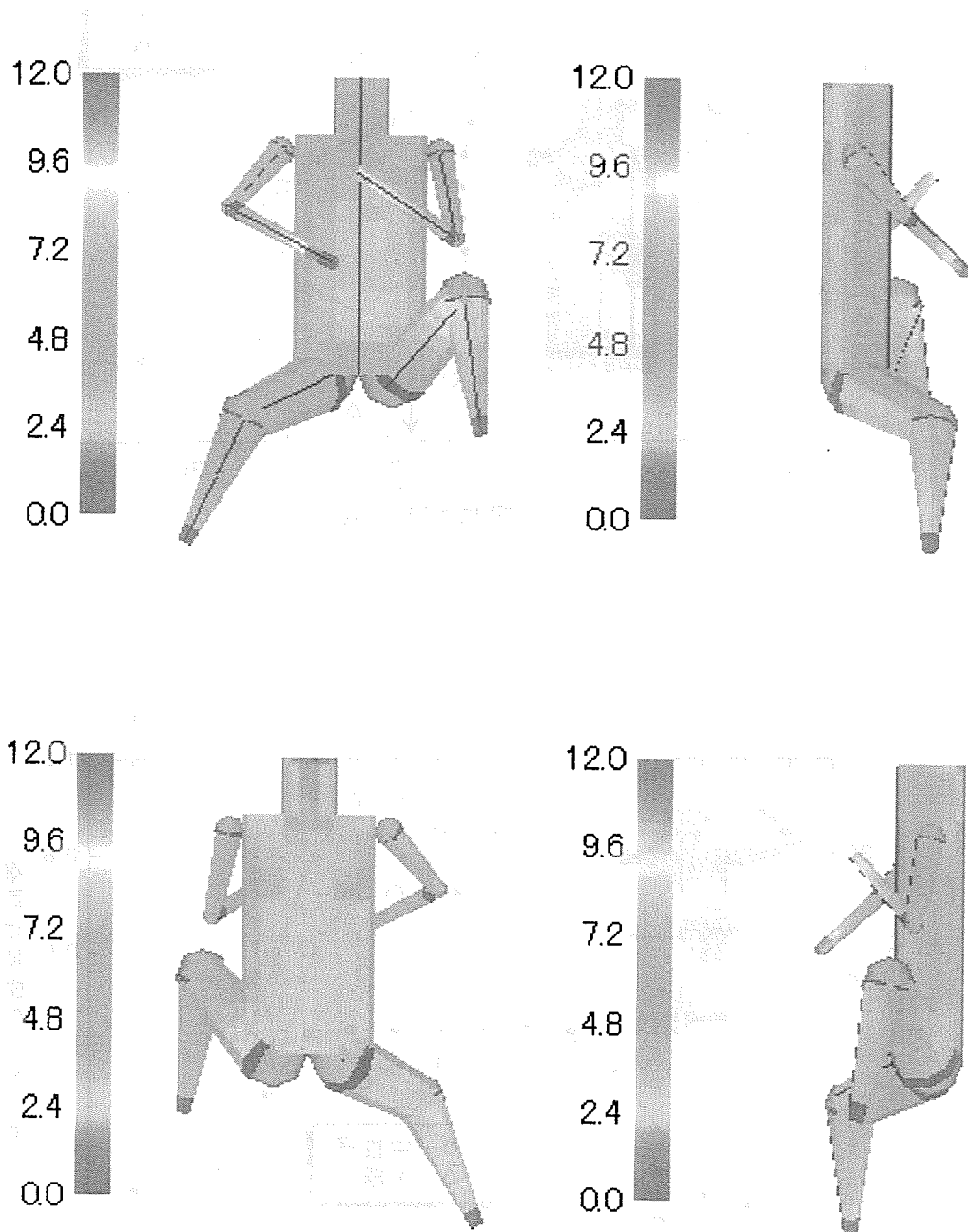


図 13: (c)  $\gamma$ 線による B 氏の皮膚吸収線量分布 (単位 Gy)。

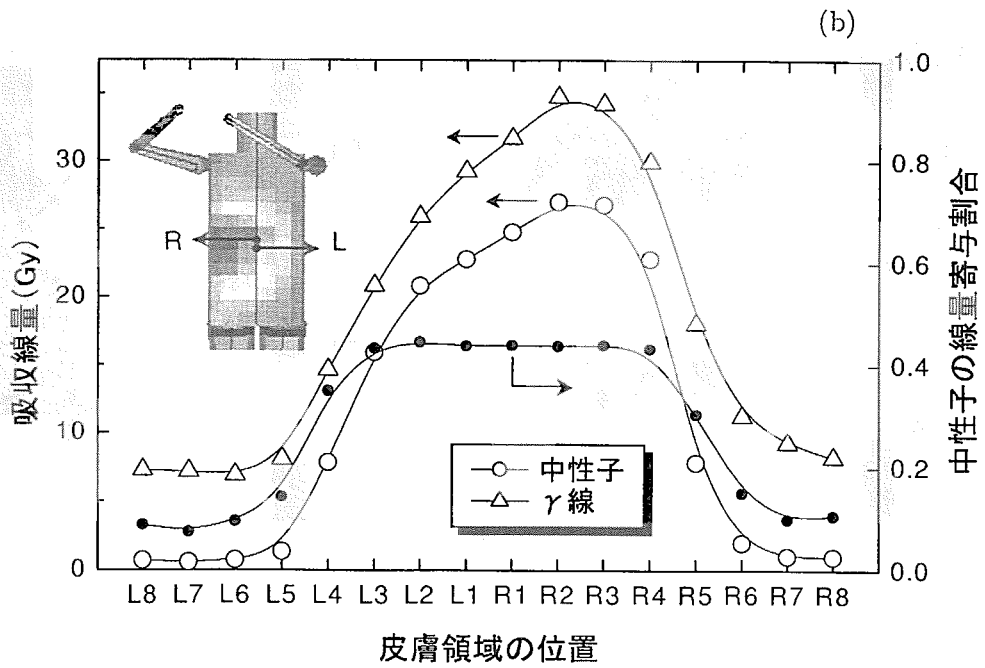
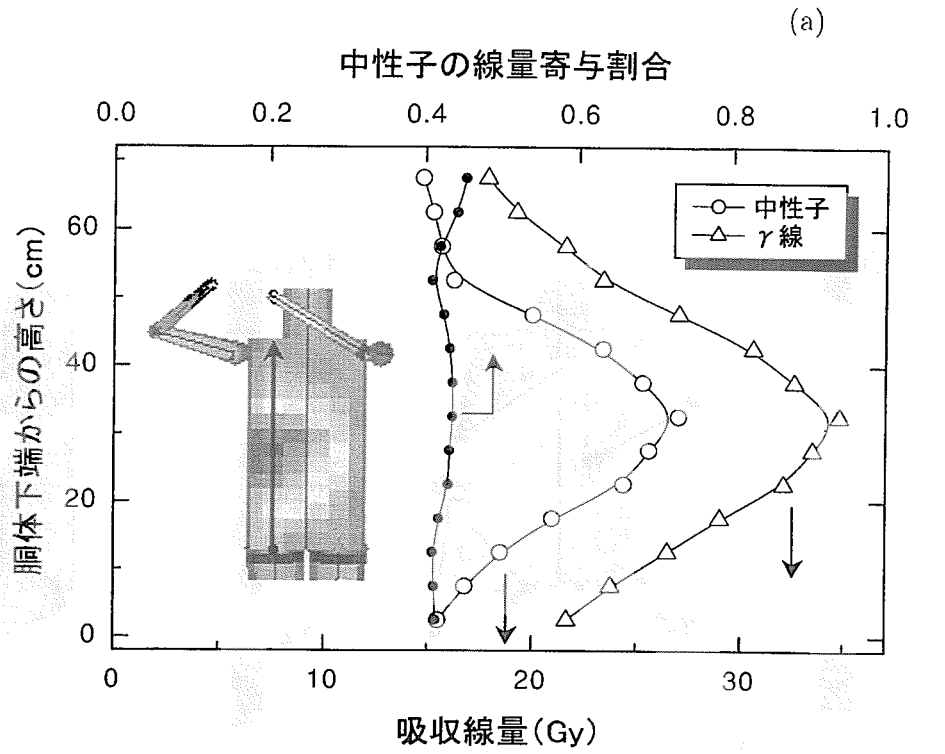


図 14: A 氏胸体部皮膚における吸収線量分布。(a) 垂直方向、(b) 周方向。



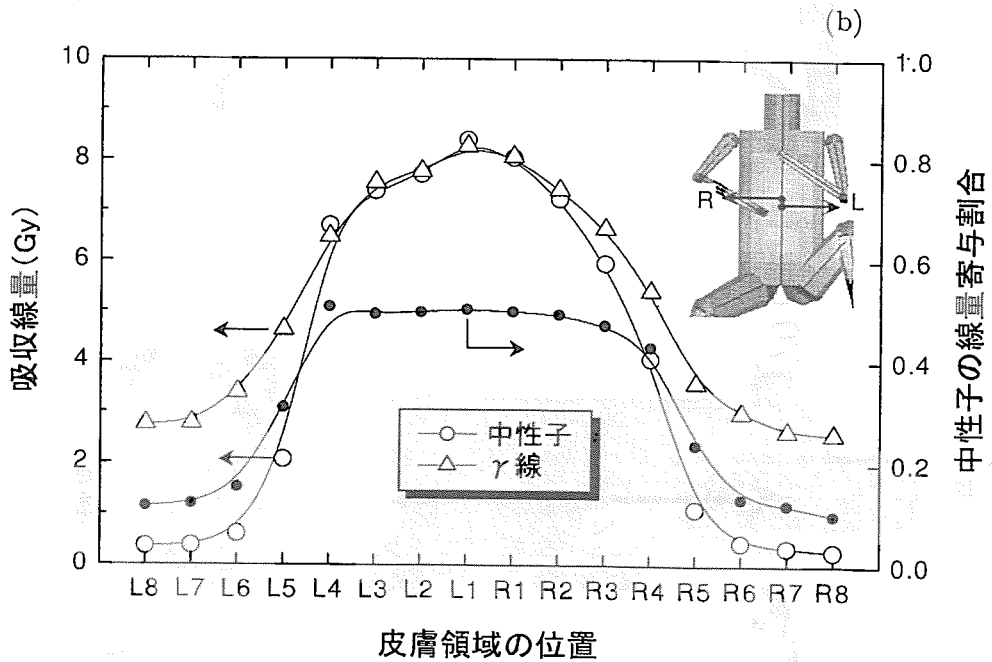
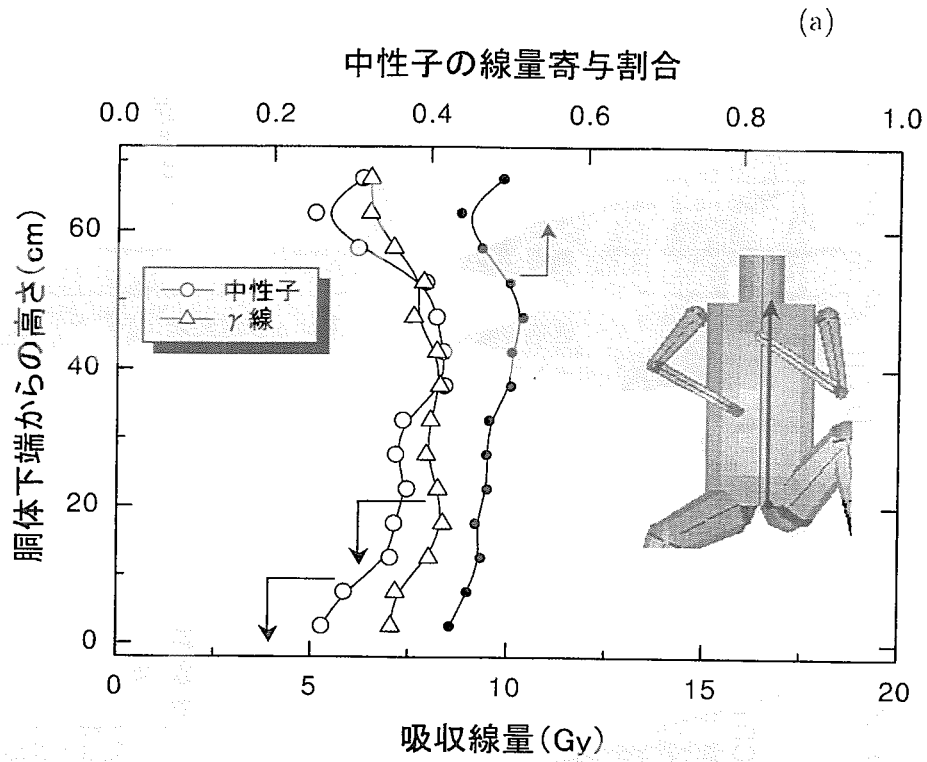


図 15: B 氏胴体部皮膚における吸収線量分布。(a) 垂直方向、(b) 周方向。

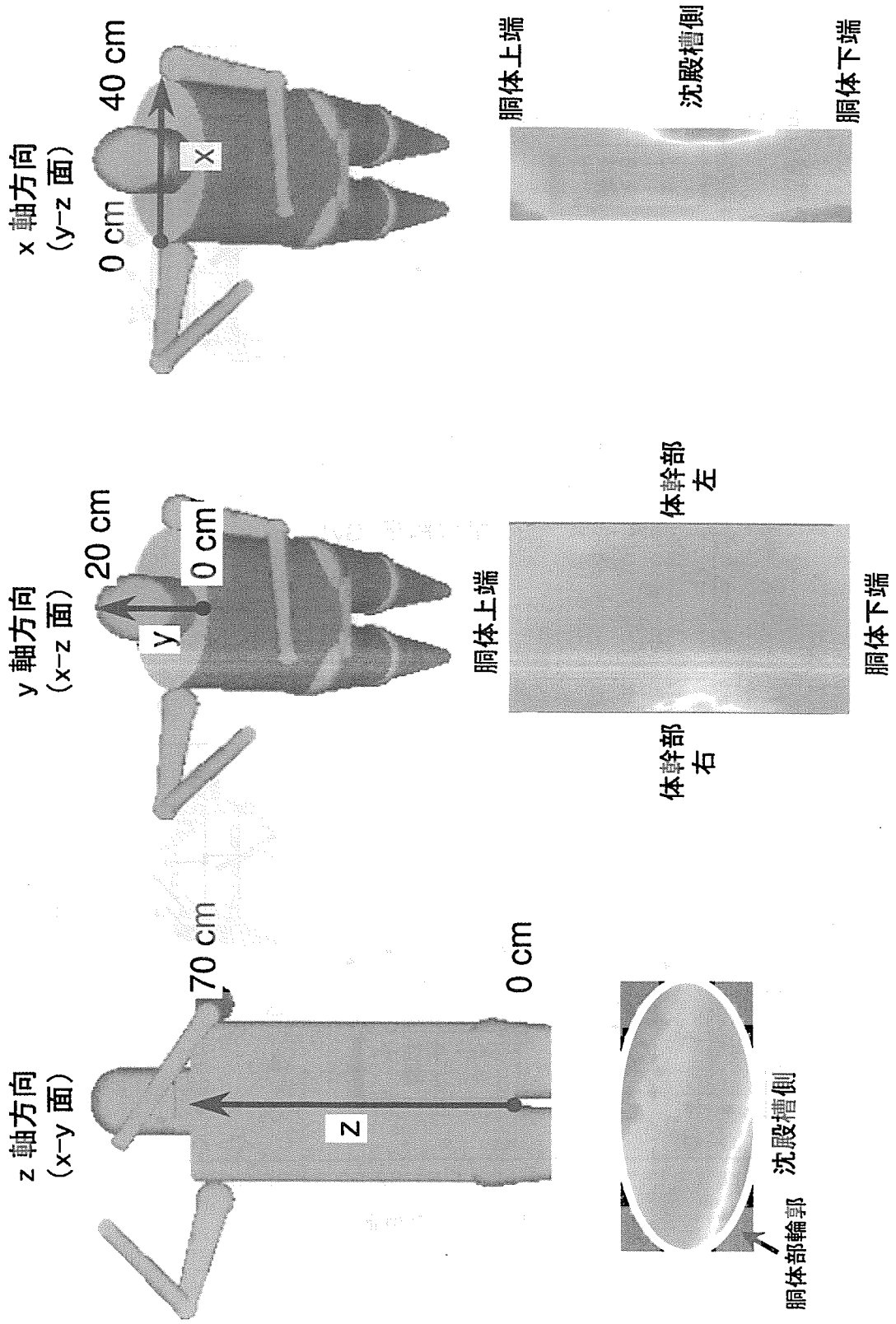


図 16: 胴体内吸収線量分布図の表示方法。

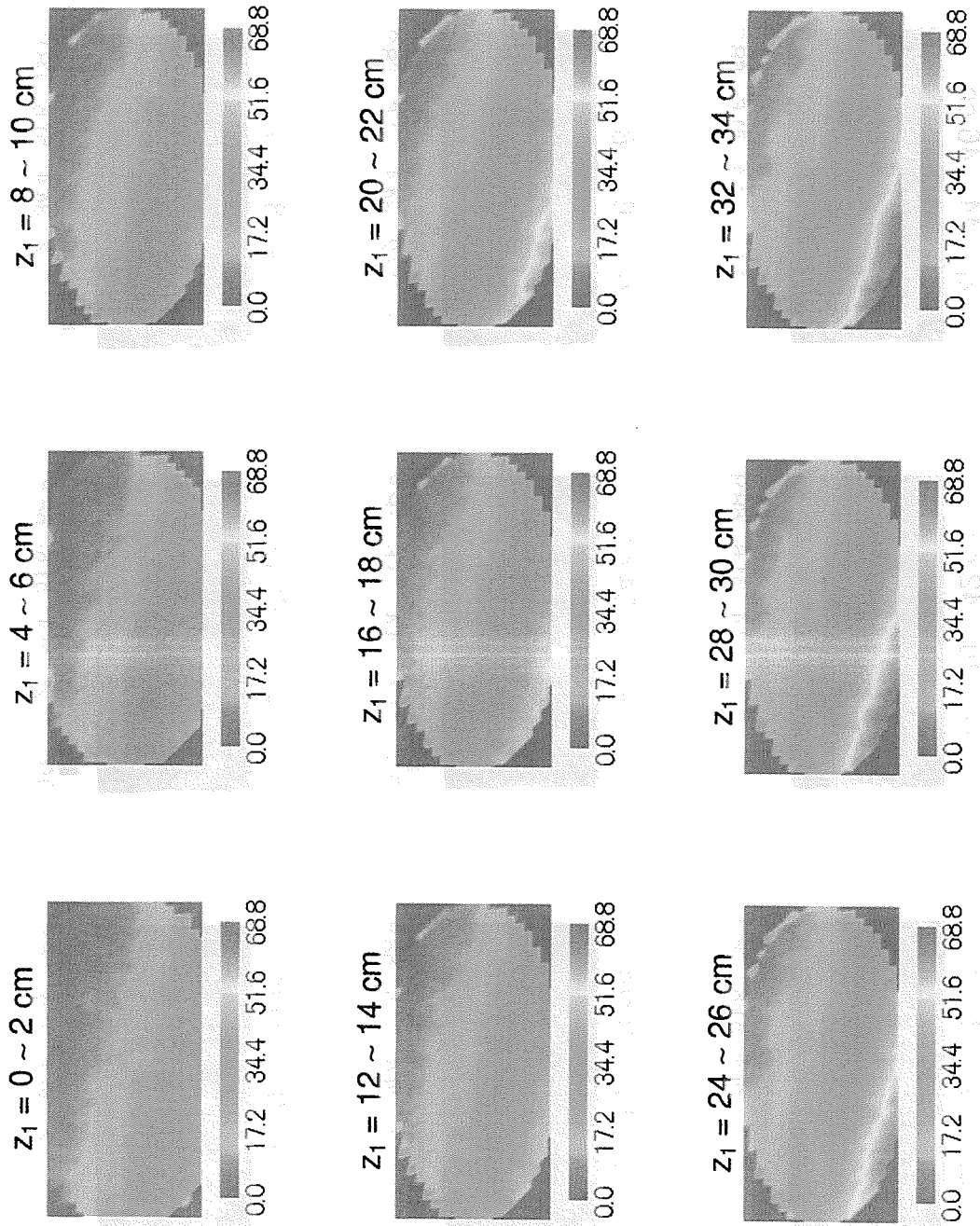


図 17: (a) A 氏胴体 x-y 面における全吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

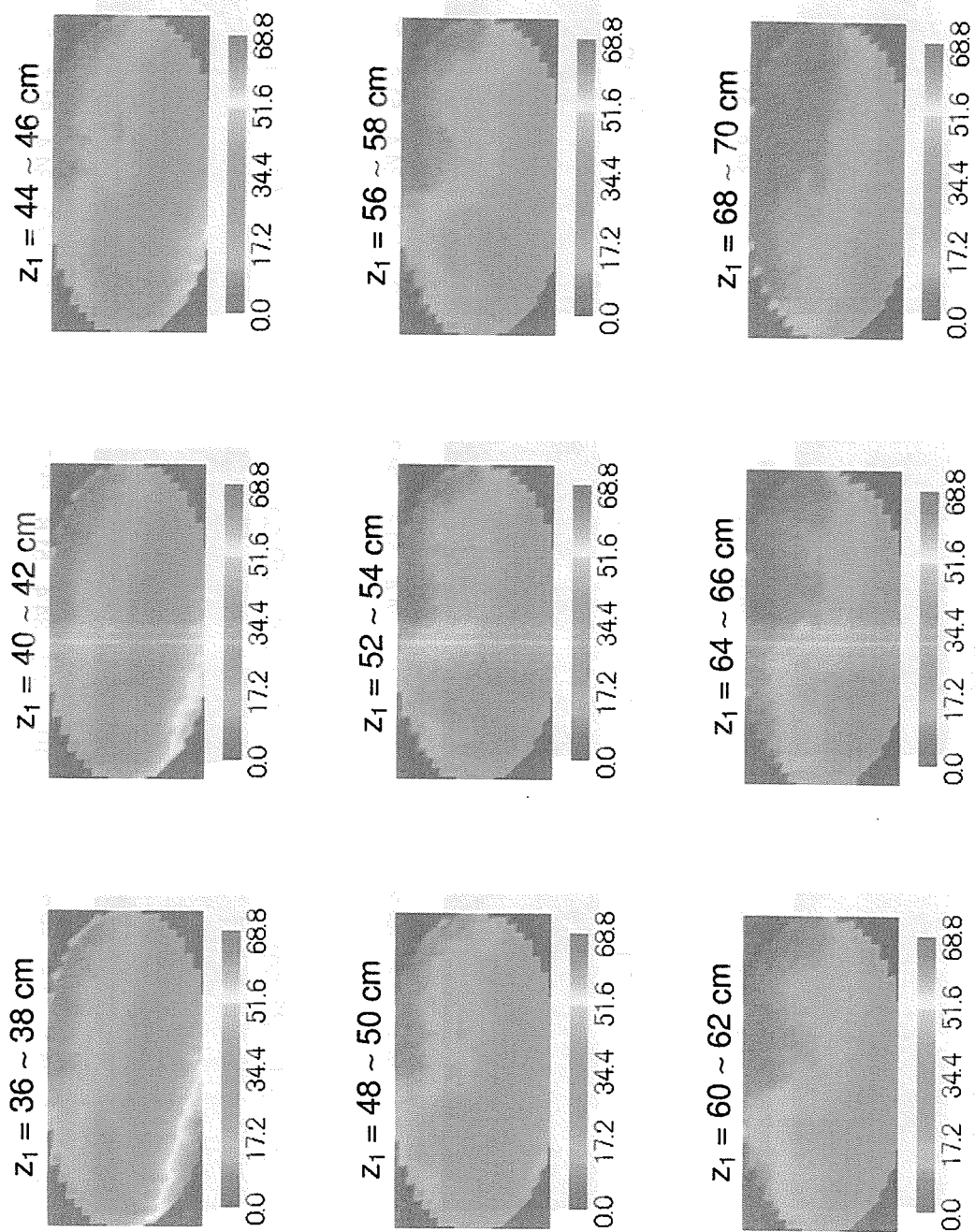


図 17: (b) A 氏胴体 x-y 面における全吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

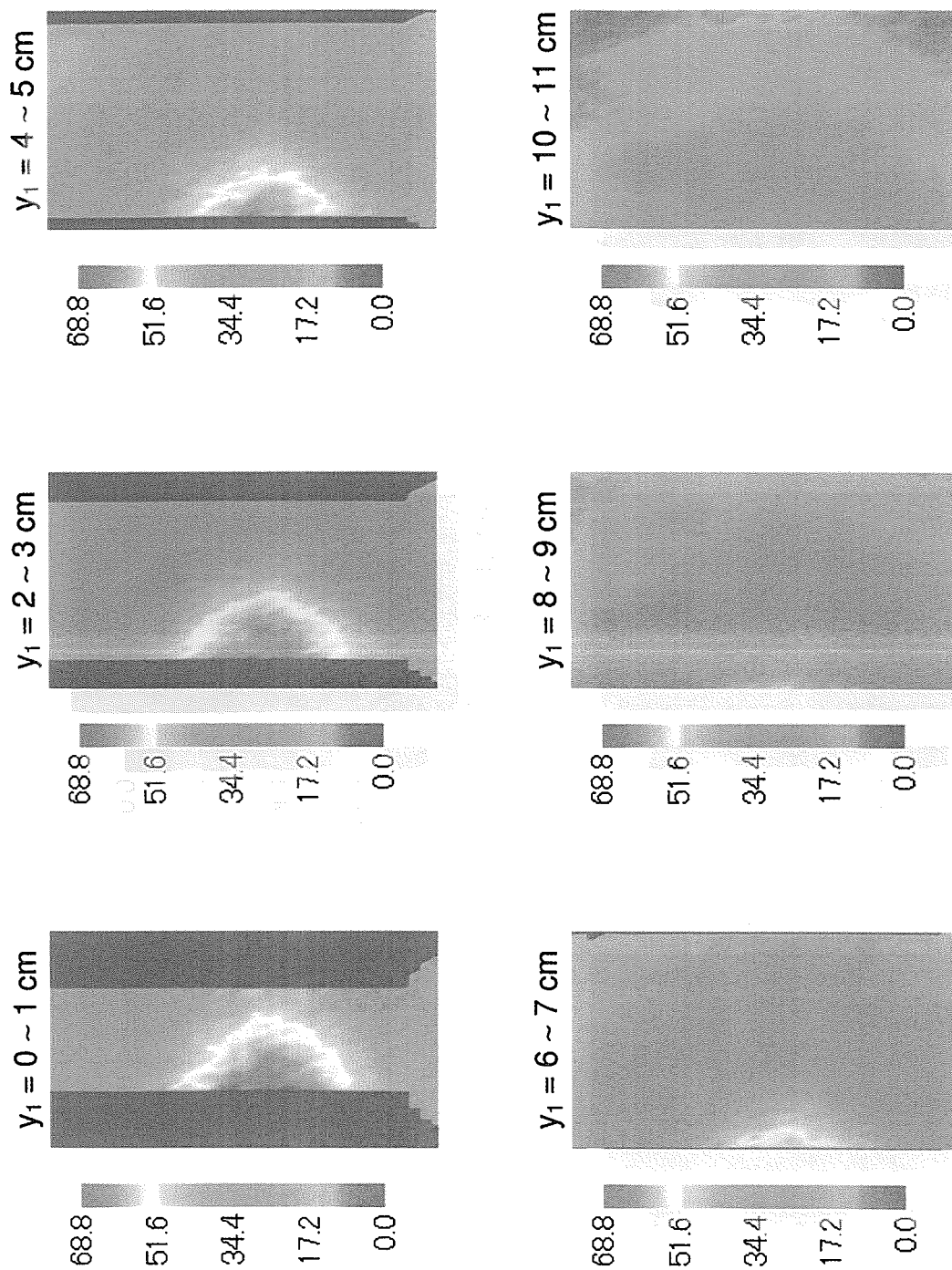


図 17: (c) A 氏胴体 x-z 面における全吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

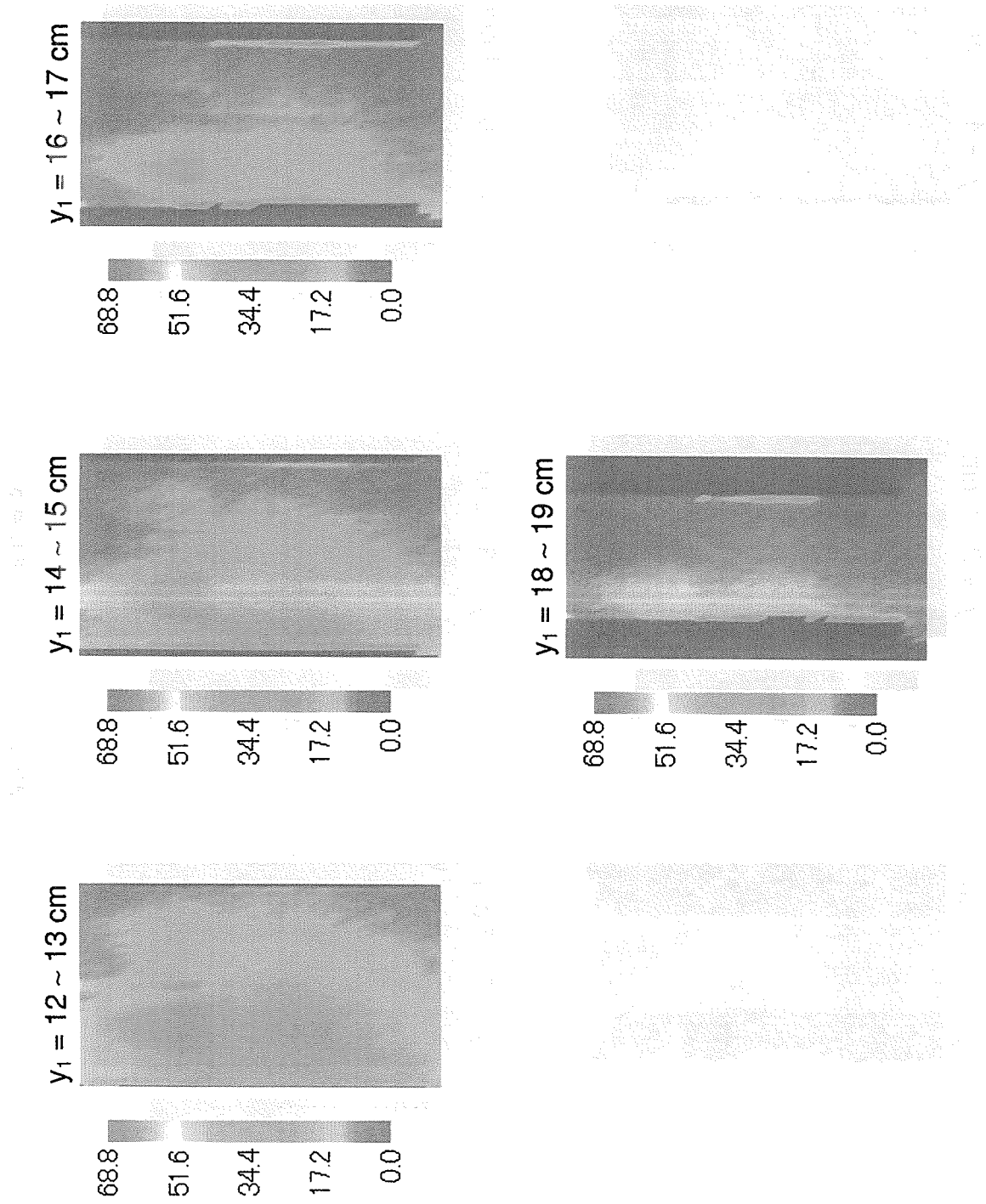


図 17: (d) A 氏胴体 x-z 面における全吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

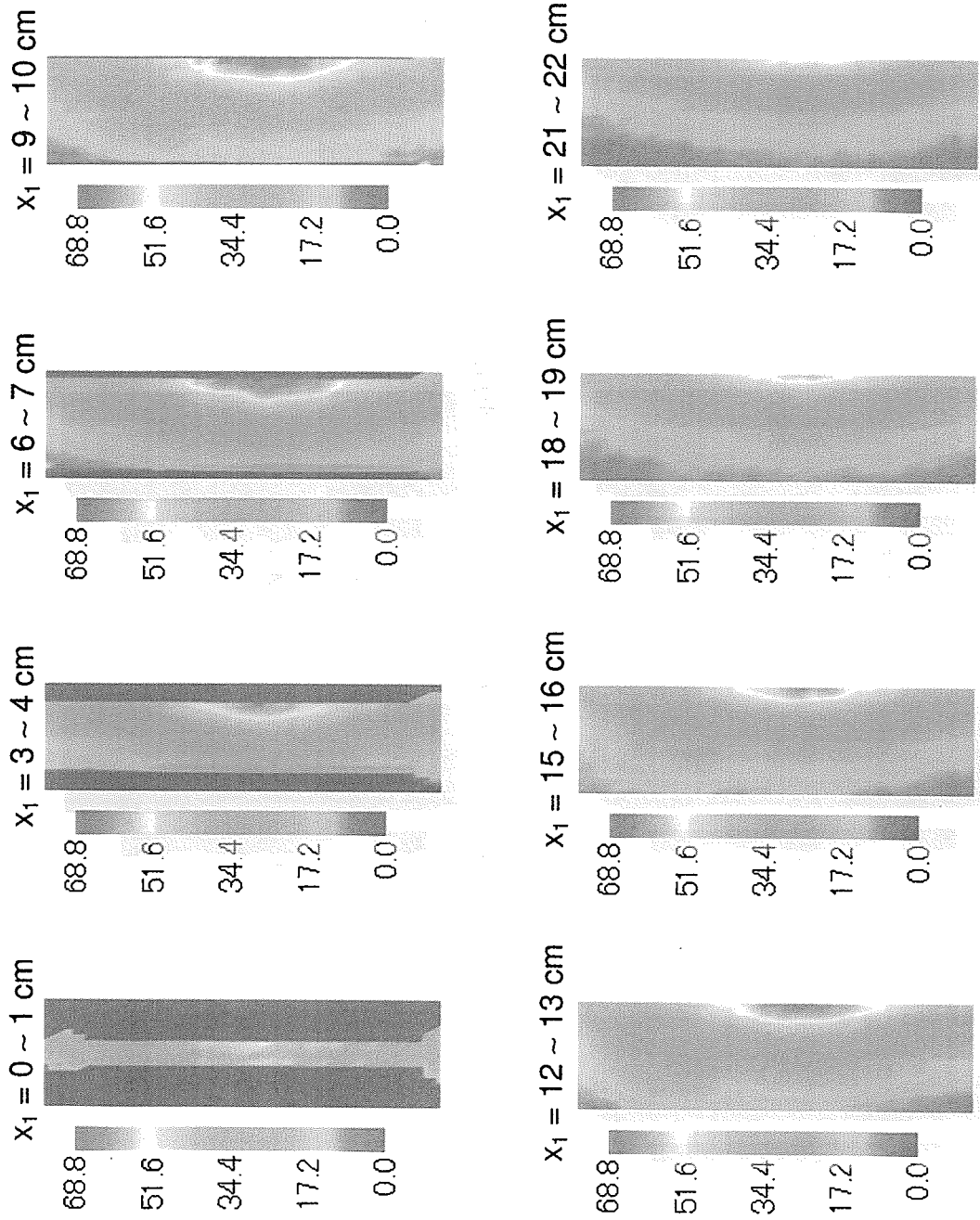


図 17: (e) A 氏胴体 y-z 面における全吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

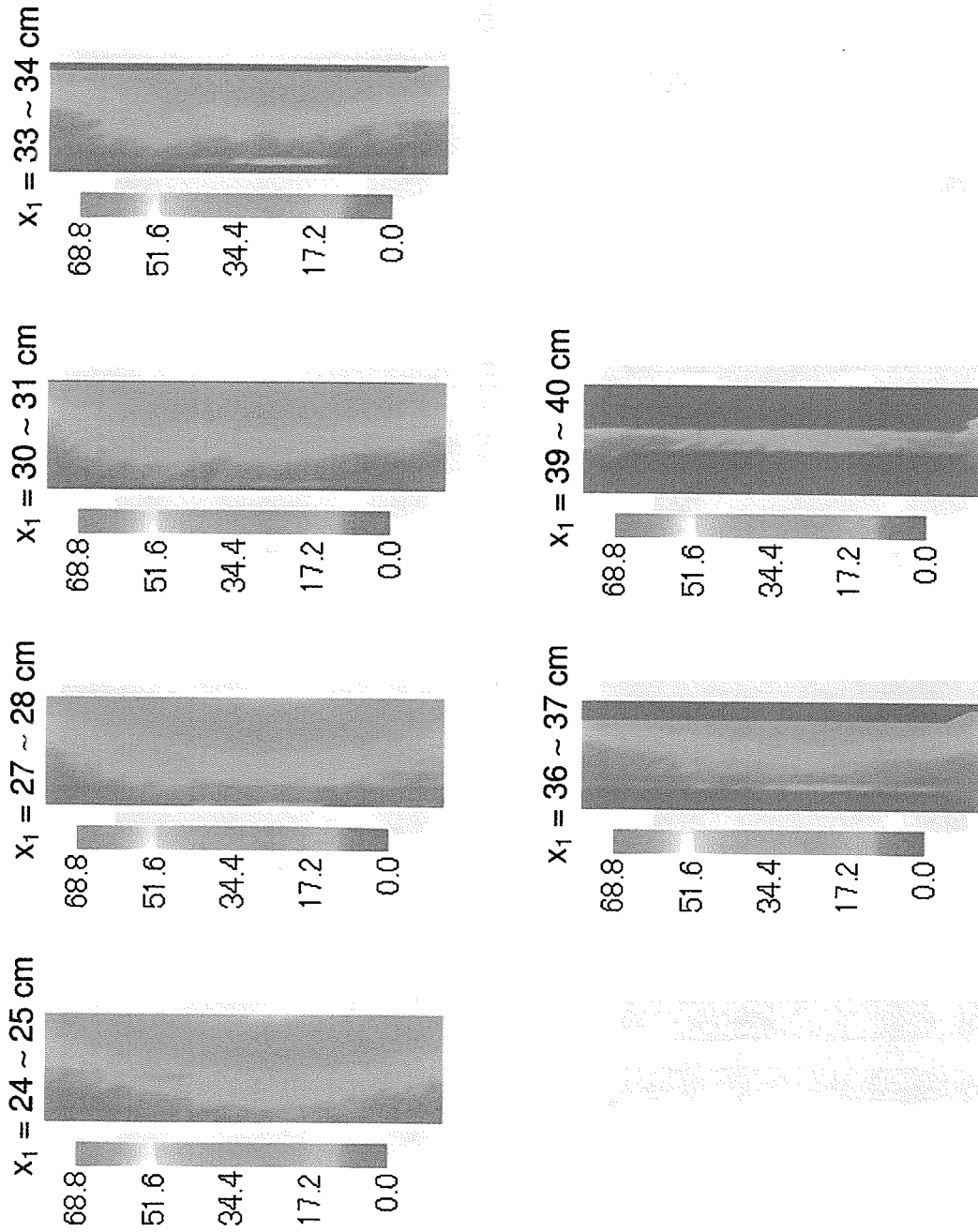


図 17: (f) A 氏胴体  $y-z$  面における全吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。



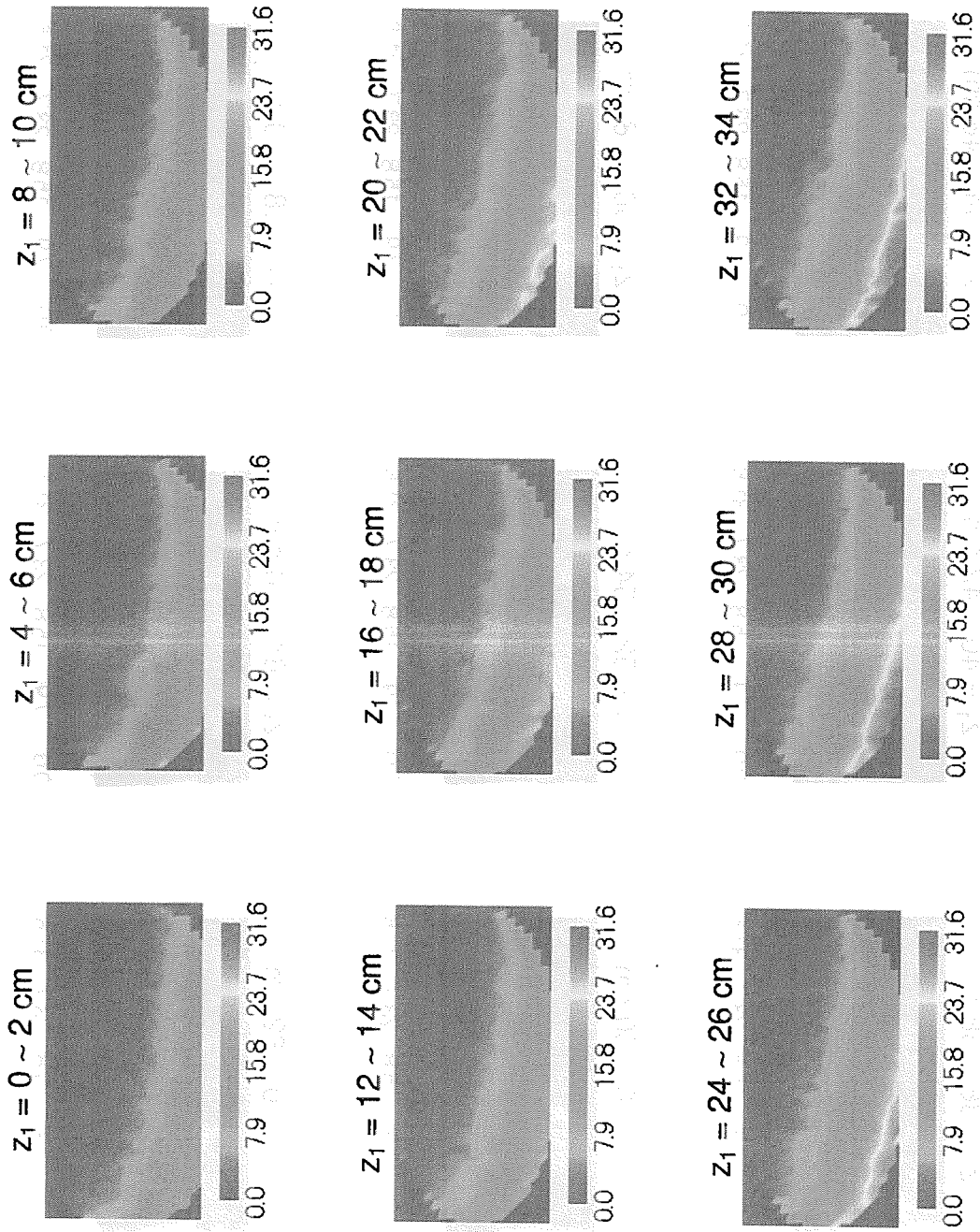


図 18: (a) A 氏胴体 x-y 面における中性子による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

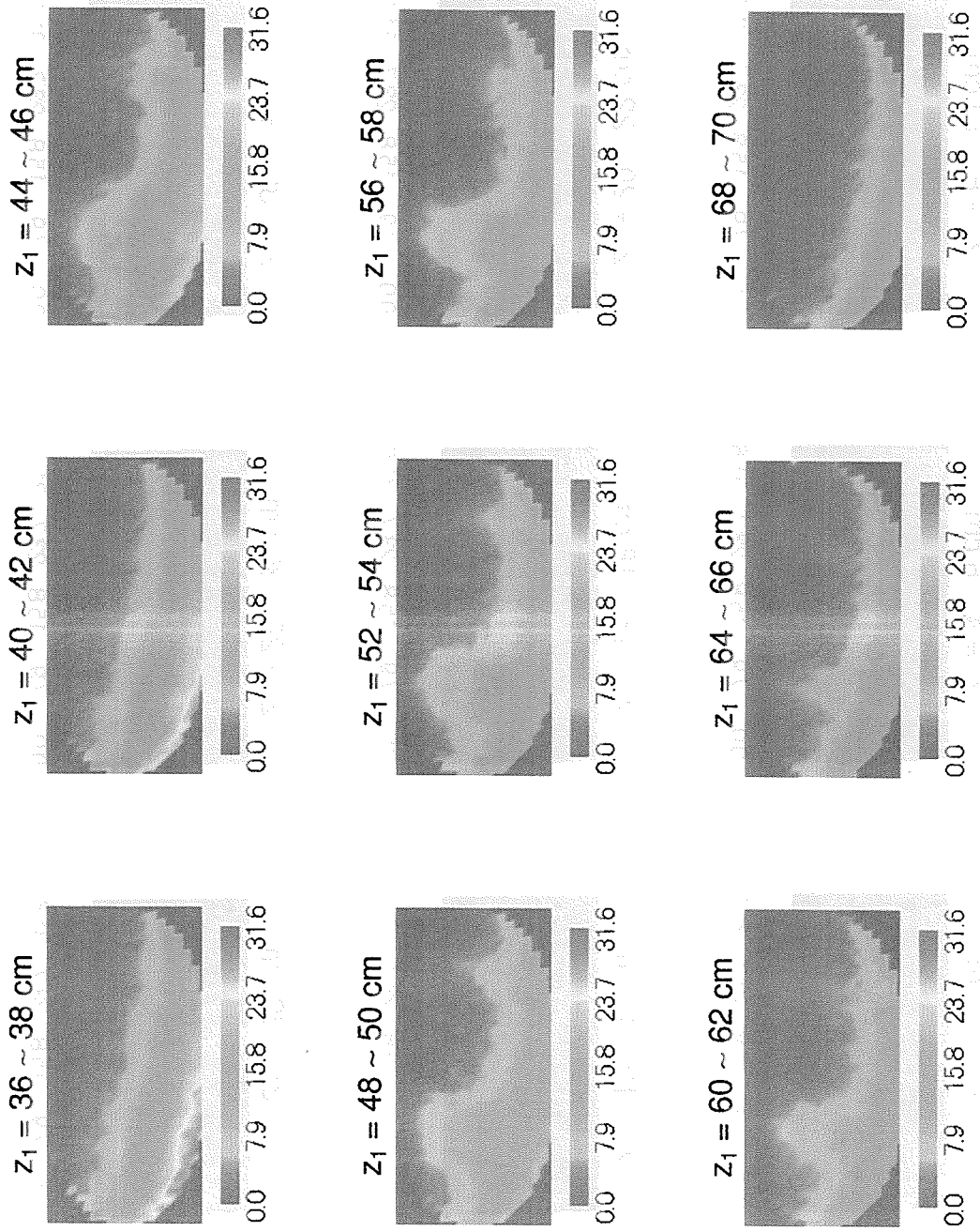


図 18: (b) A 氏胴体 x-y 面における中性子による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

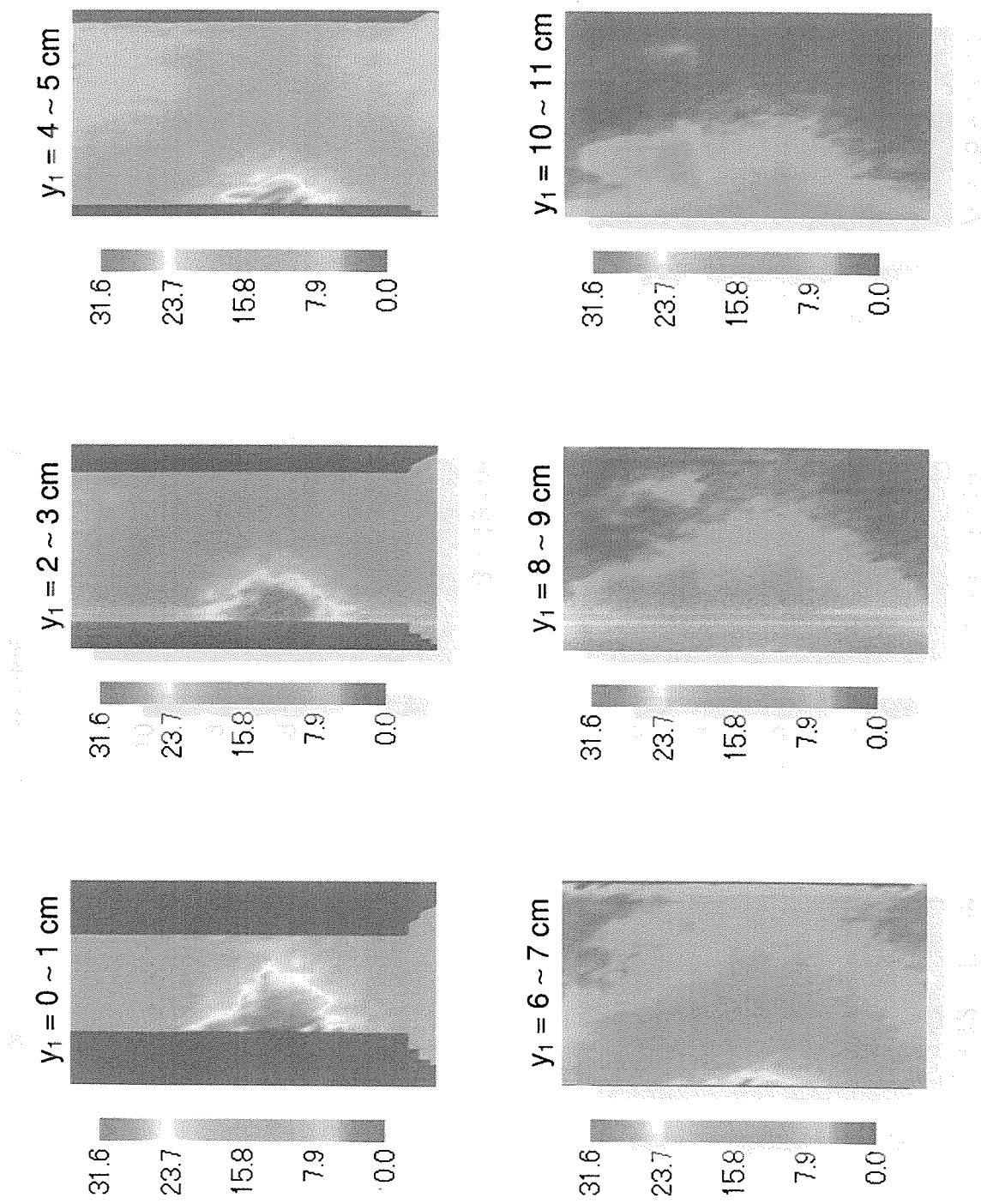


図 18: (c) A 氏胴体 x-z 面における中性子による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

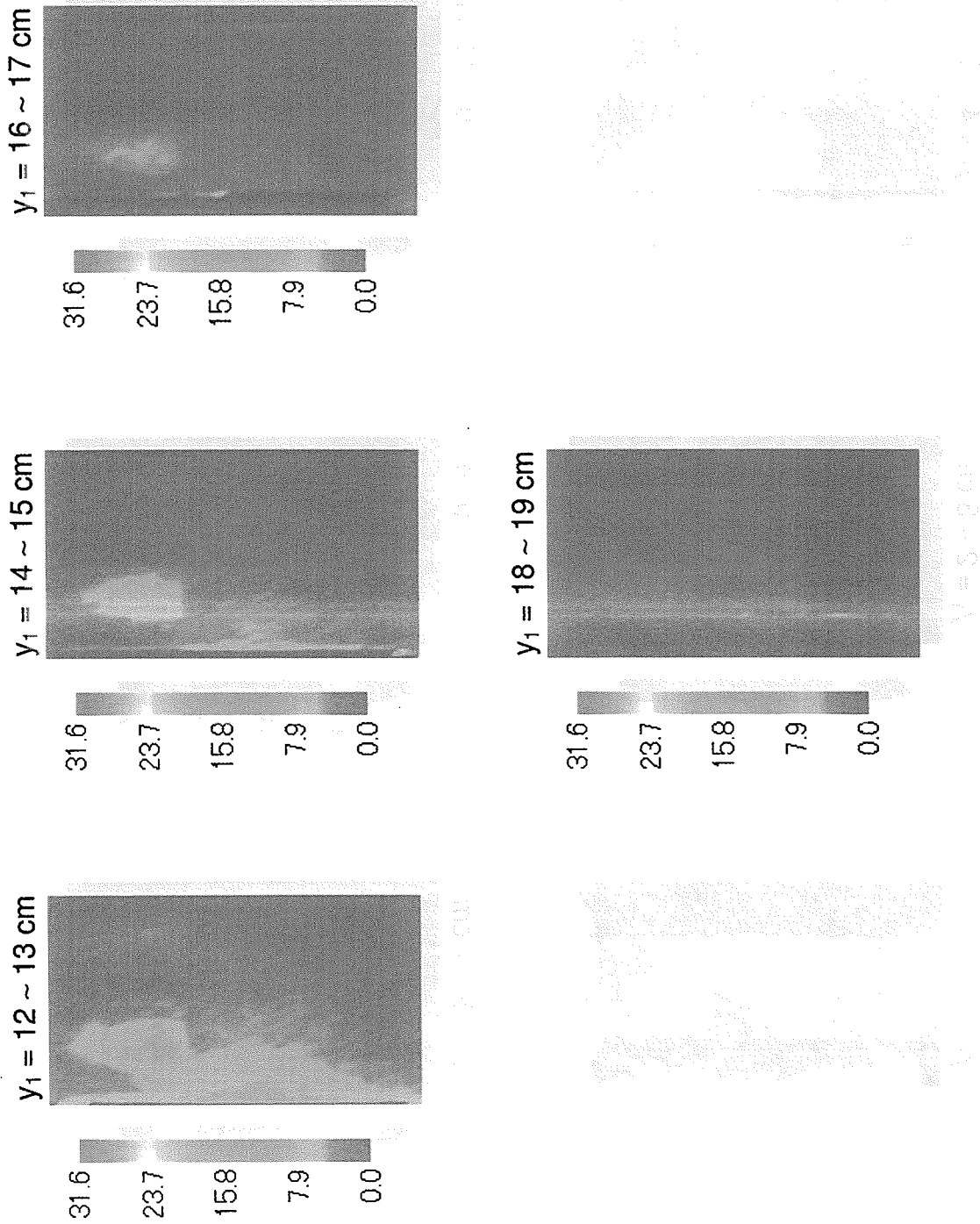


図 18: (d) A 氏胴体 x-z 面における中性子による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

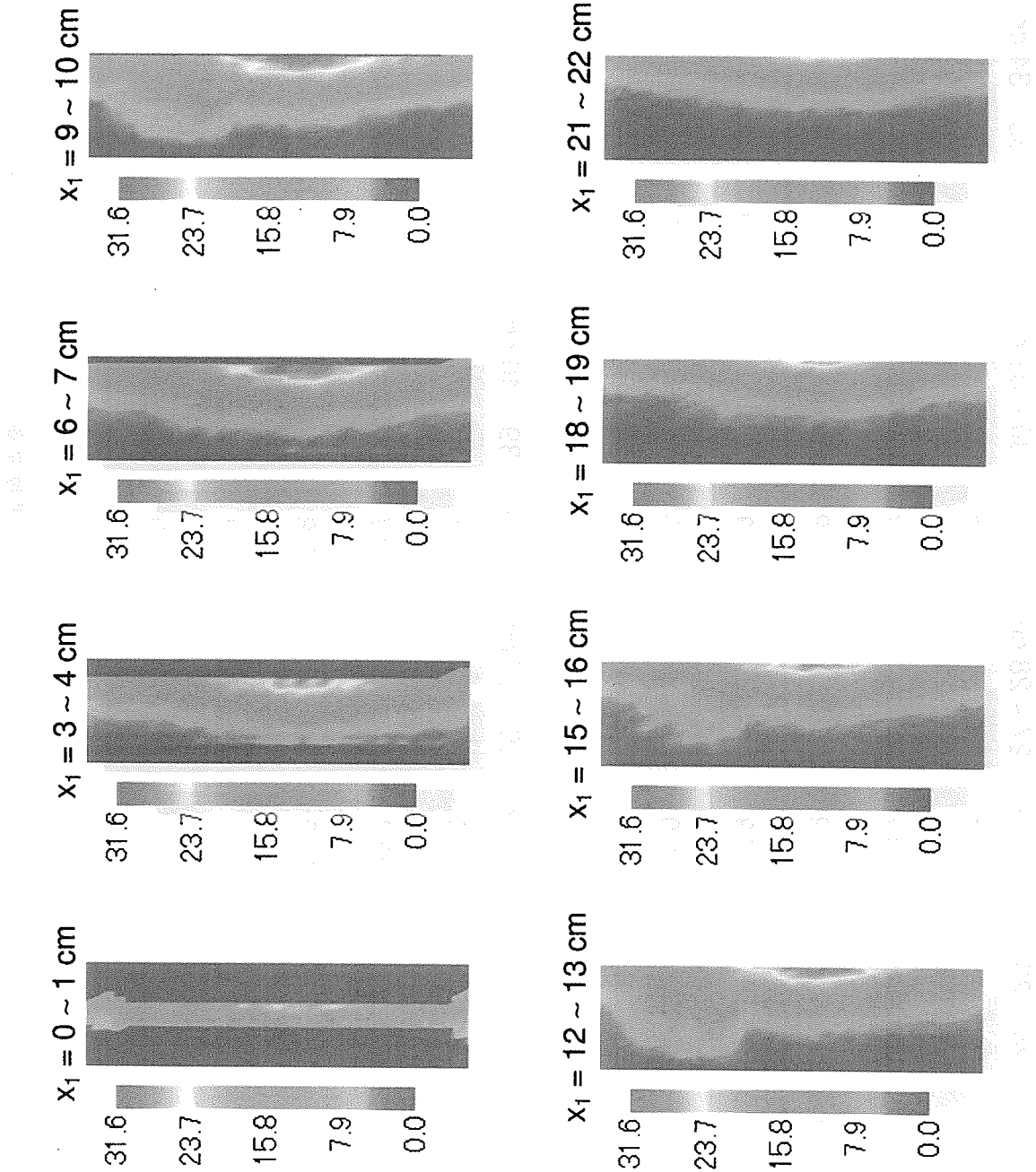


図 18: (e) A 氏胴体 y-z 面における中性子による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

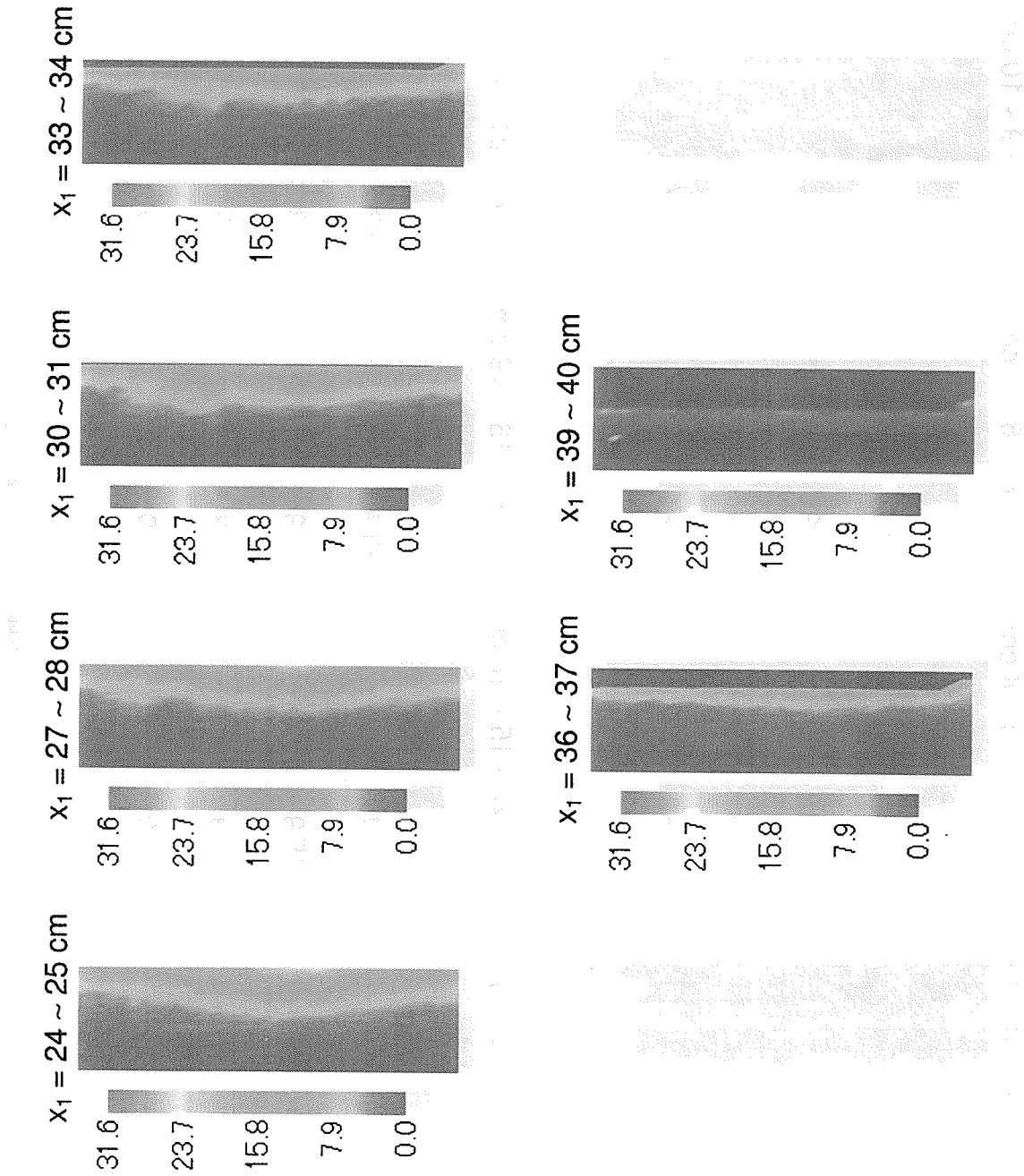


図 18: (f) A 氏胴体 y-z 面における中性子による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

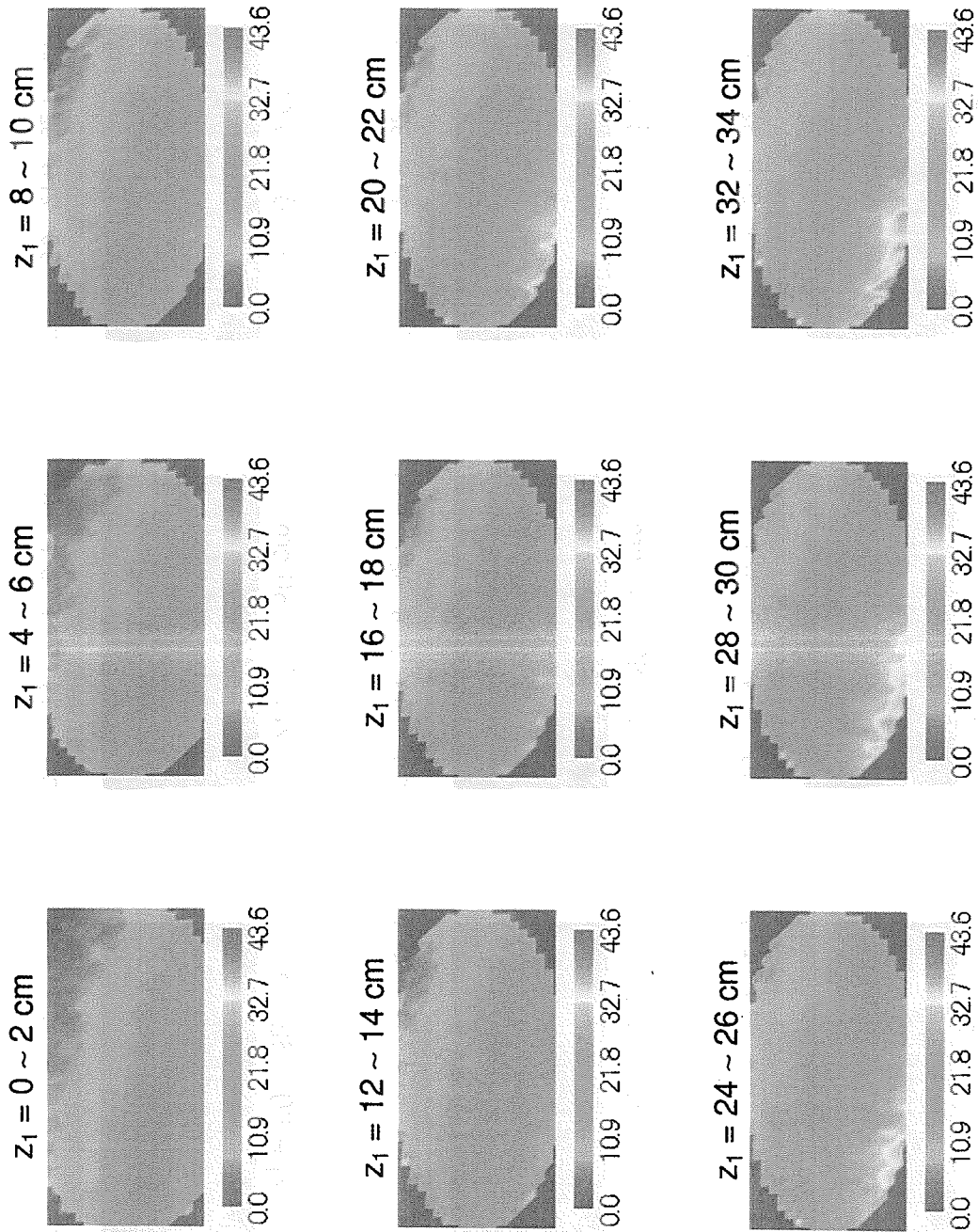


図 19: (a) A 氏胴体 x-y 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

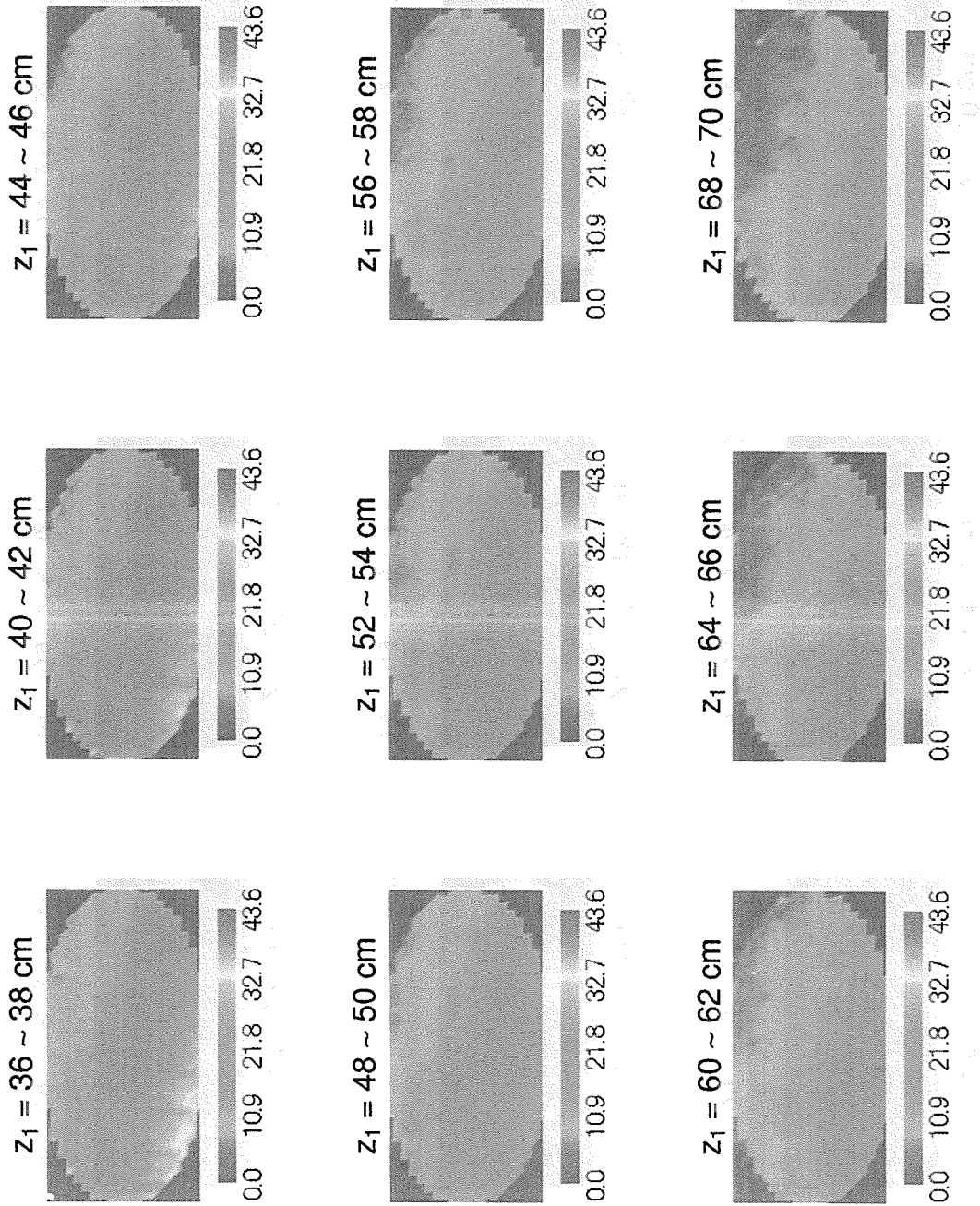


図 19: (b) A 氏胴体 x-y 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。



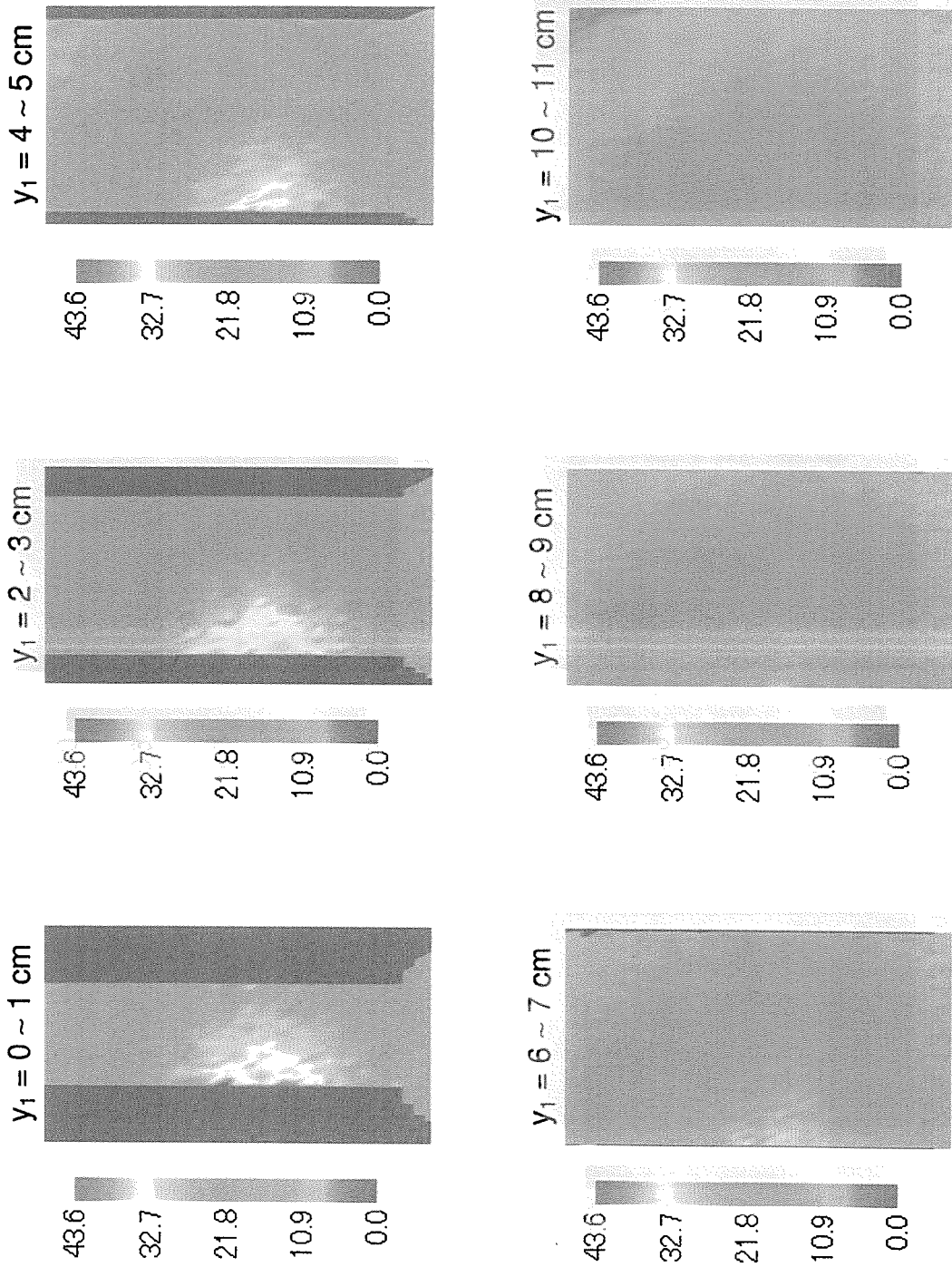


図 19: (c) A 氏胴体 x-z 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

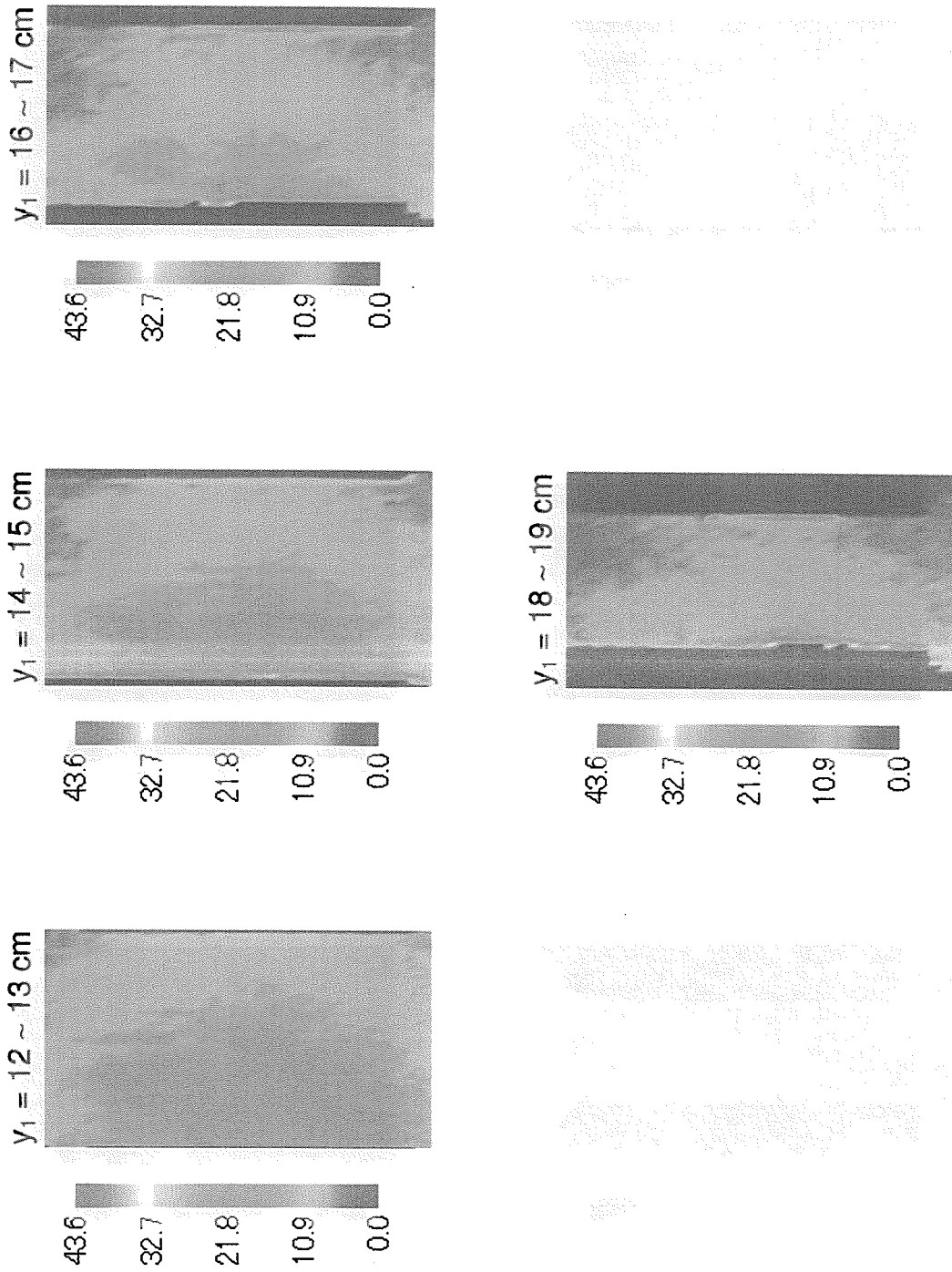


図 19: (d) A 氏胴体 x-z 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

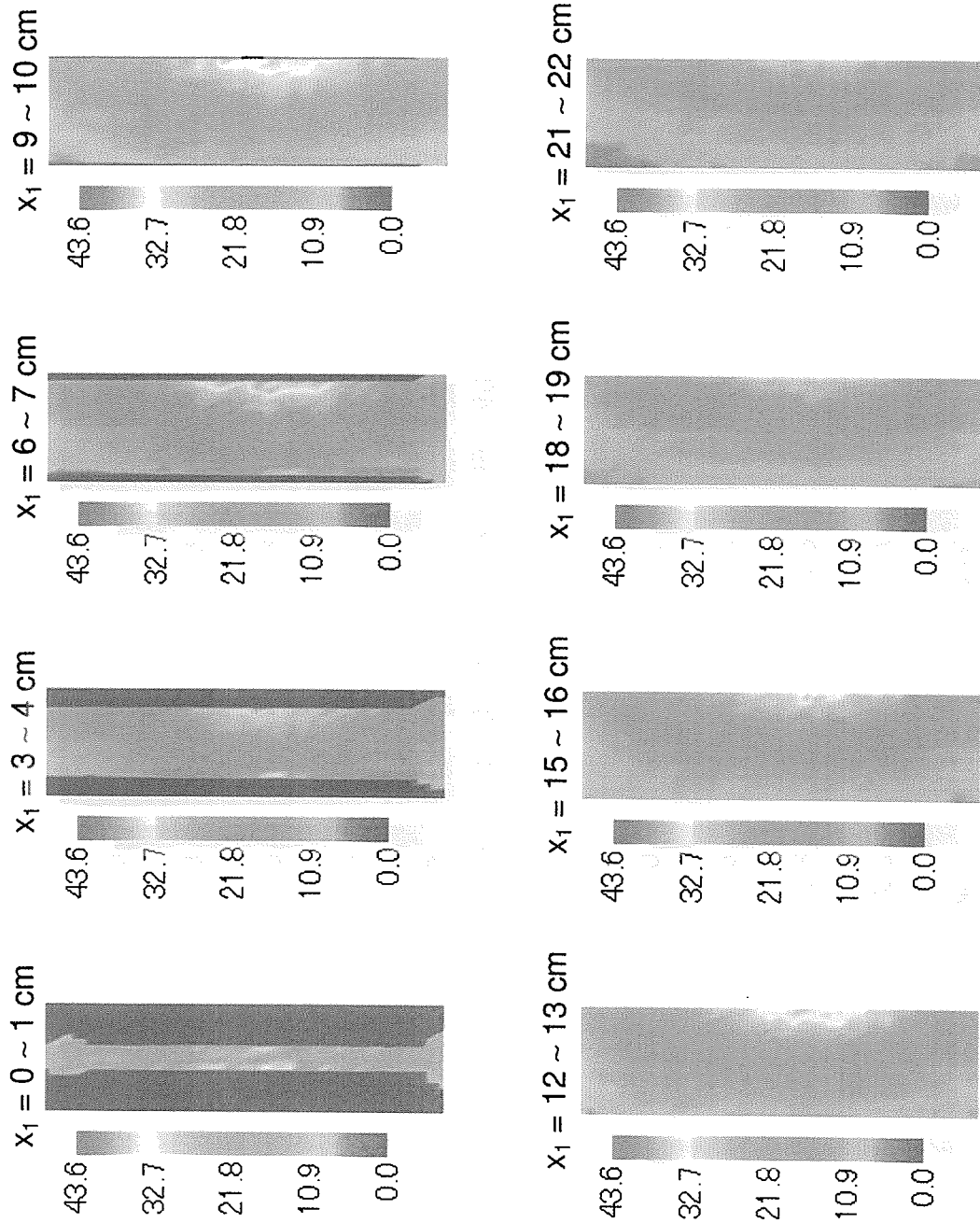


図 19: (e) A 氏胴体 y-z 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

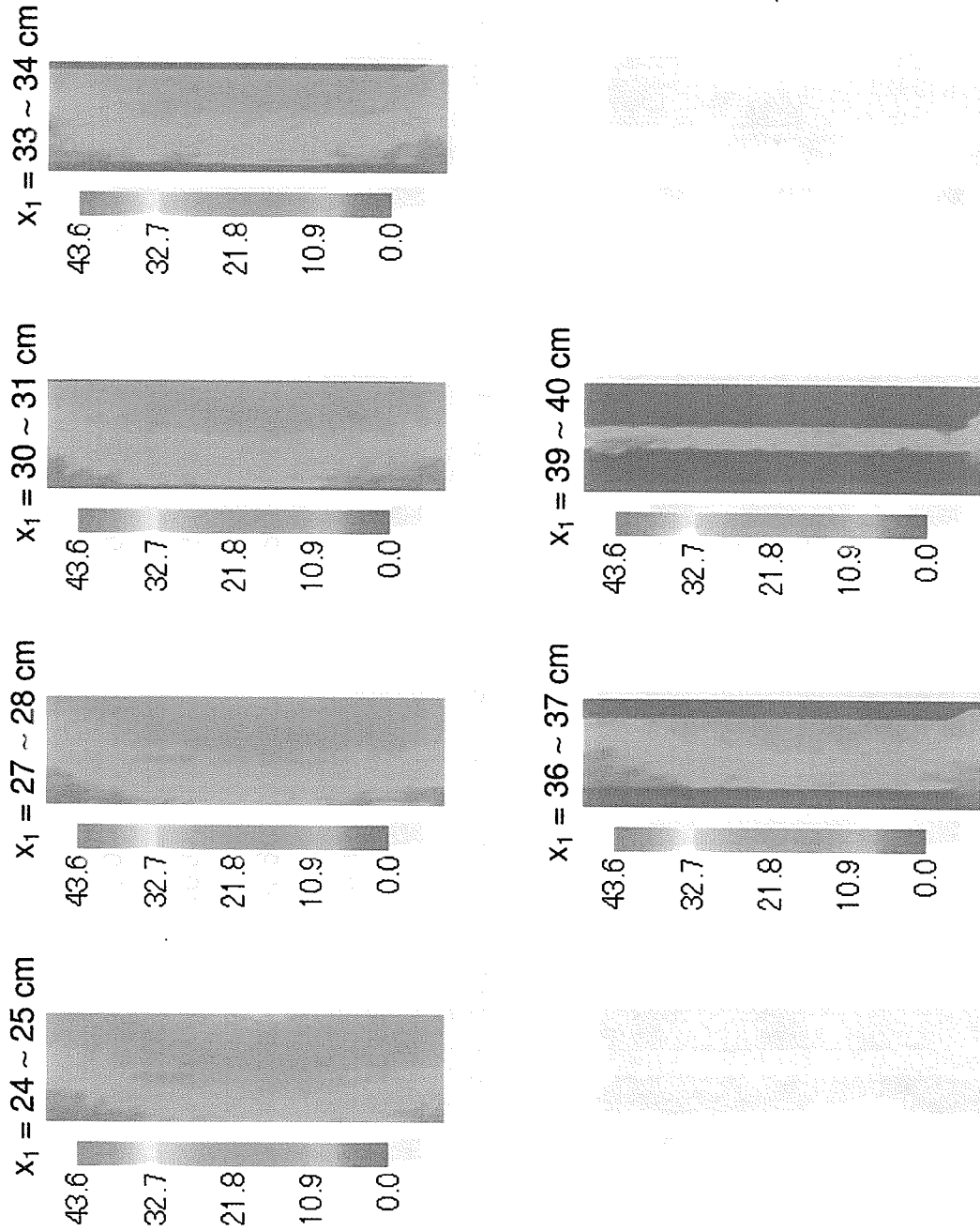


図 19: (f) A 氏胸体 y-z 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

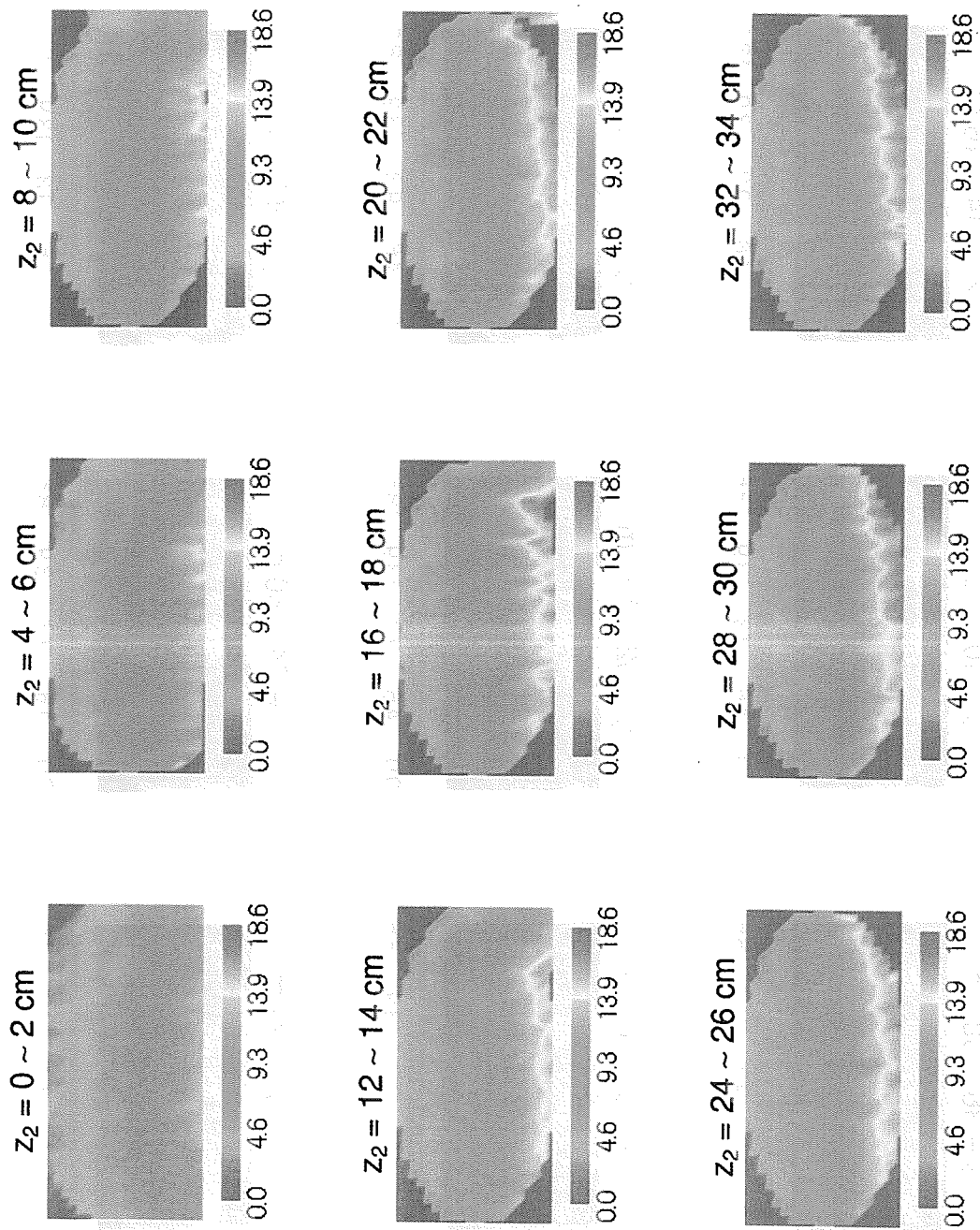


図 20: (a) B 氏胴体 x-y 面における全吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

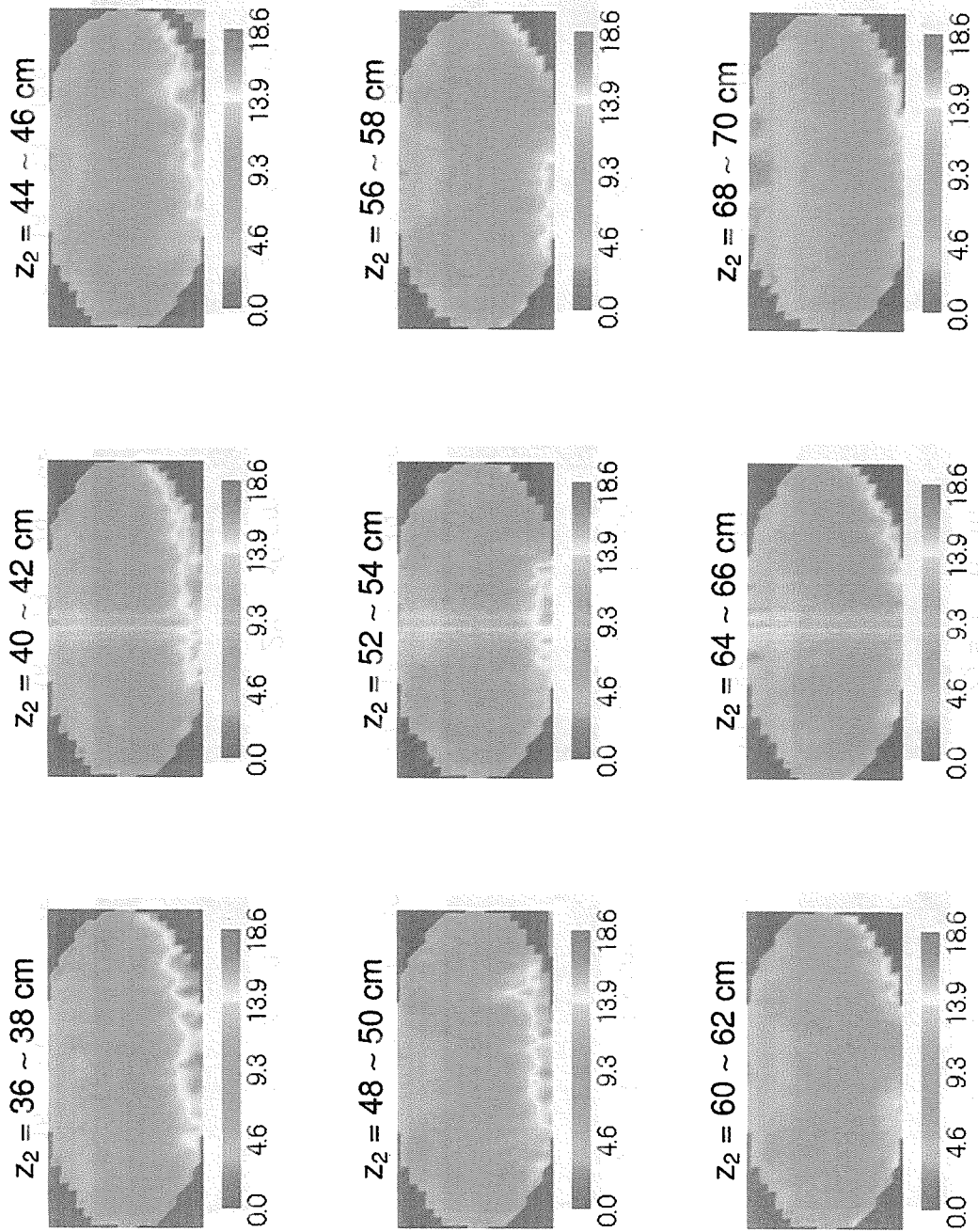


図 20: (b) B 氏胴体 x-y 面における全吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

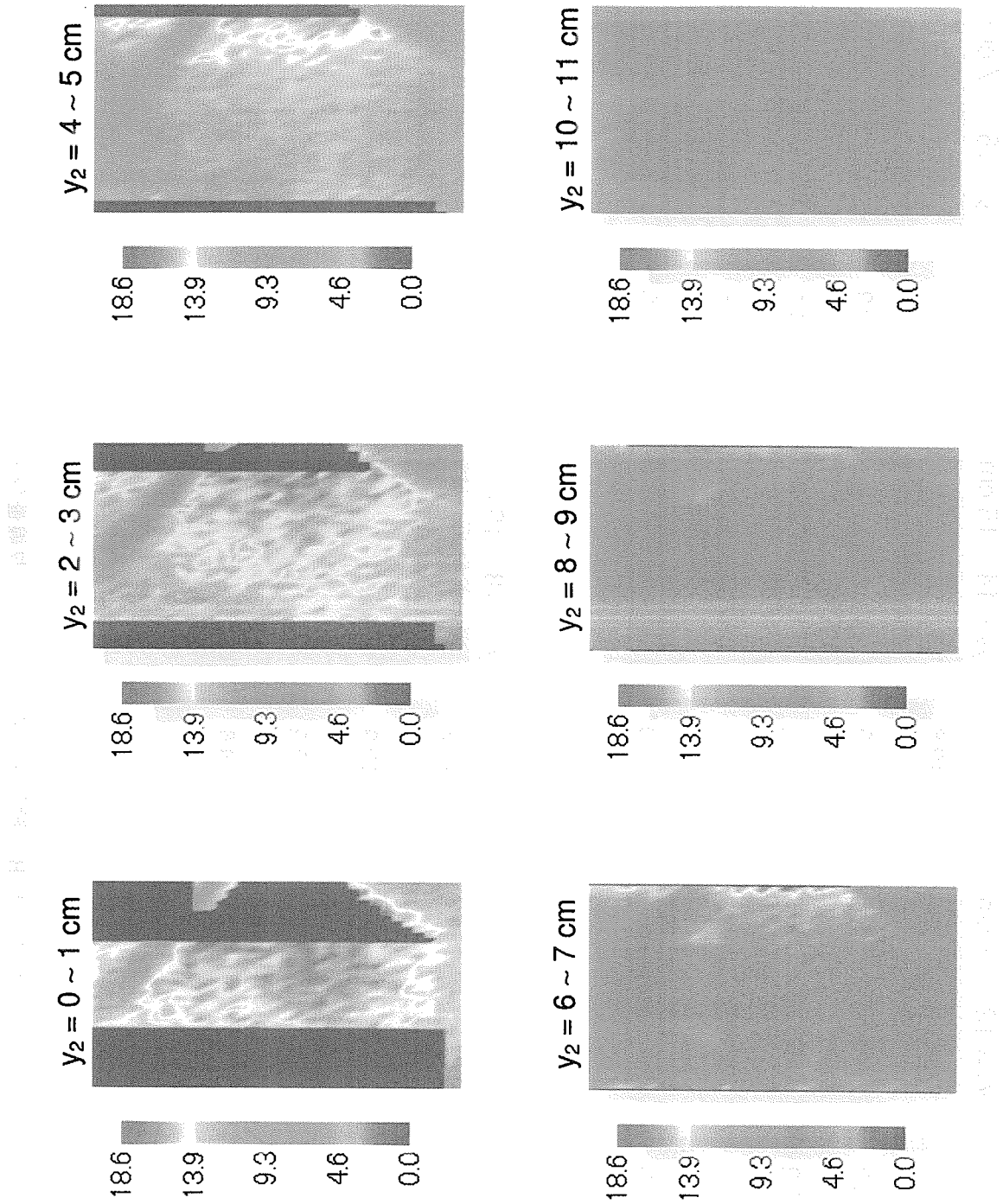


図 20: (c) B 氏胴体 x-z 面における全吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

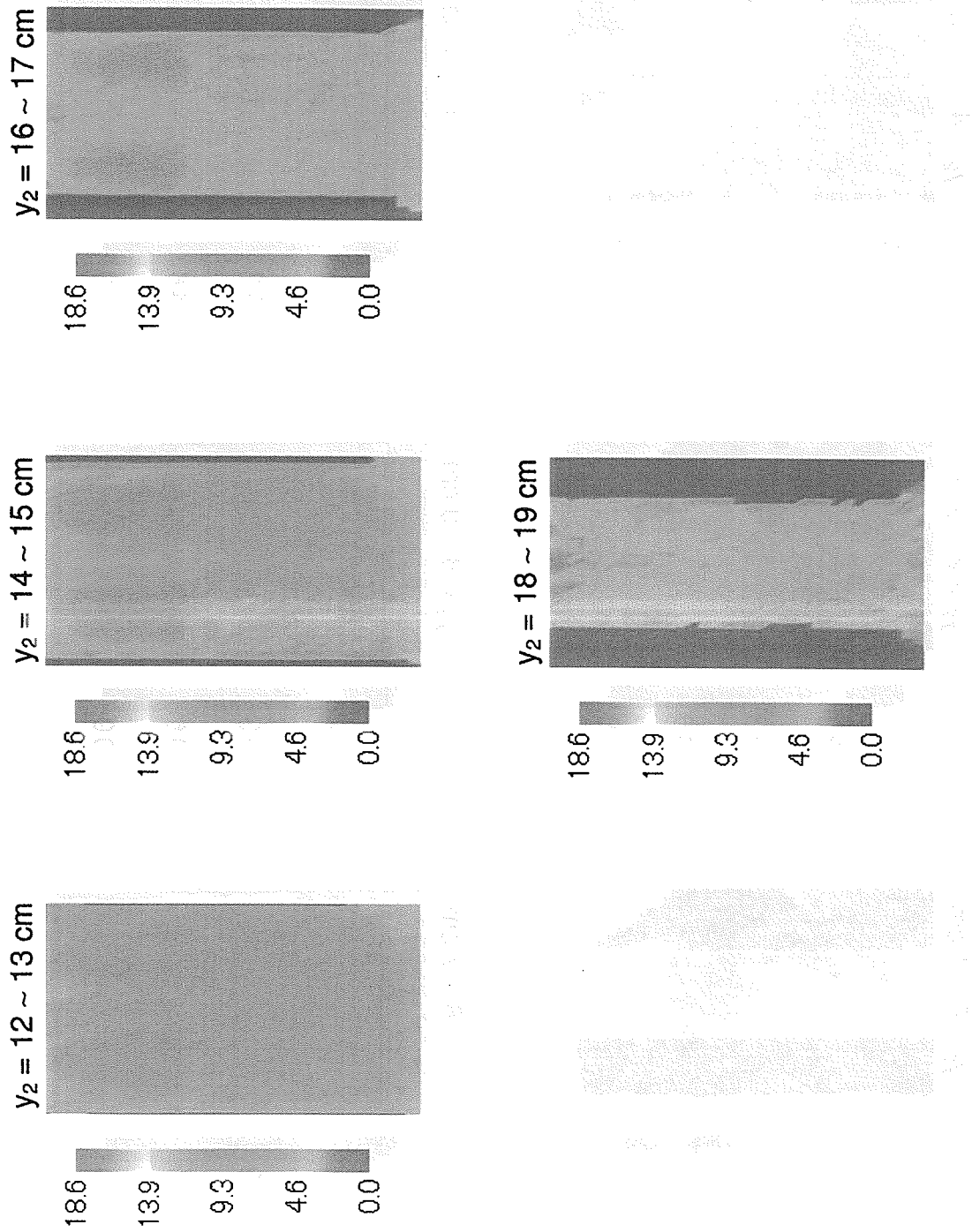


図 20: (d) B 氏胴体 x-z 面における全吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。



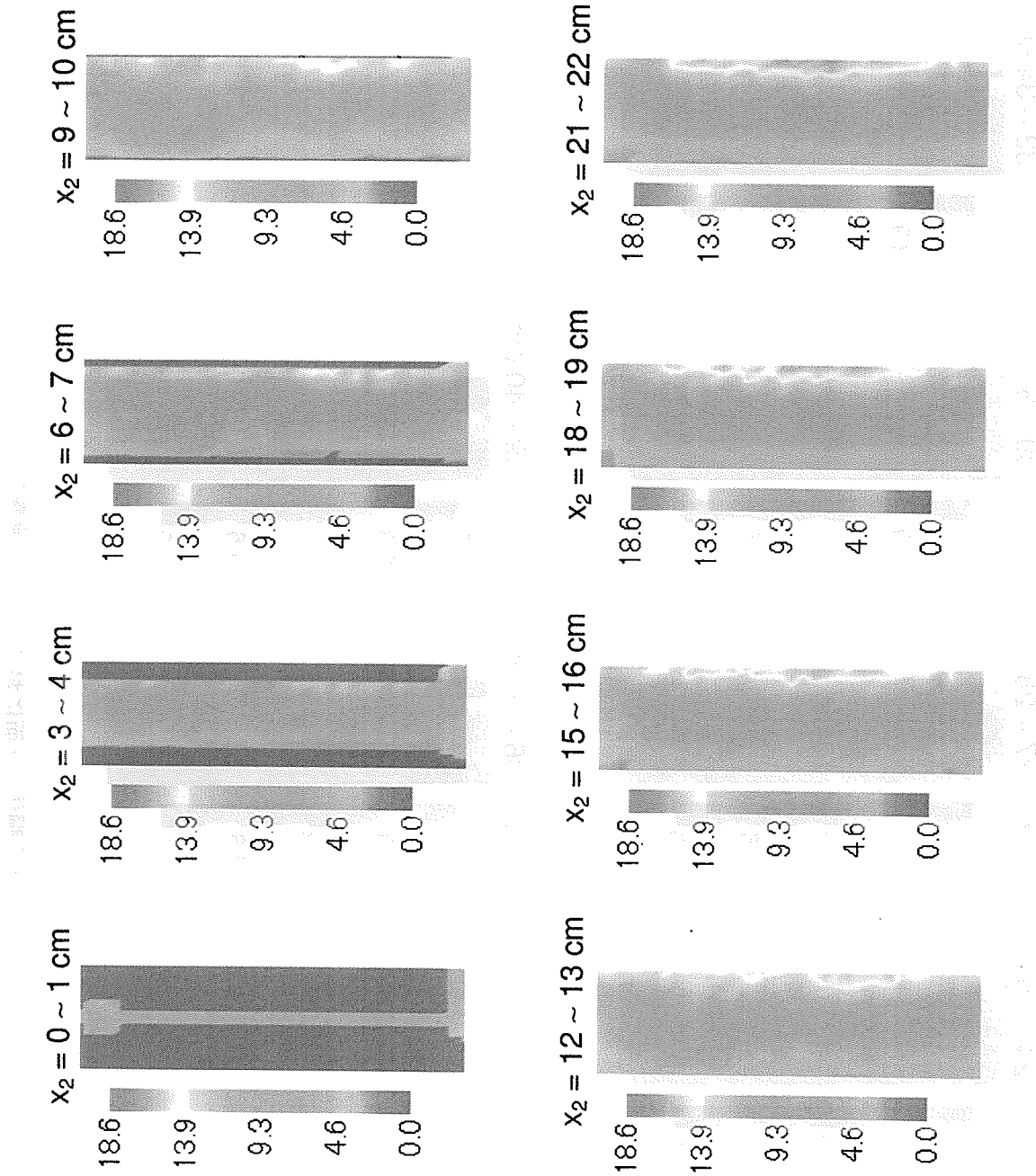


図 20: (e) B 氏胴体 y-z 面における全吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

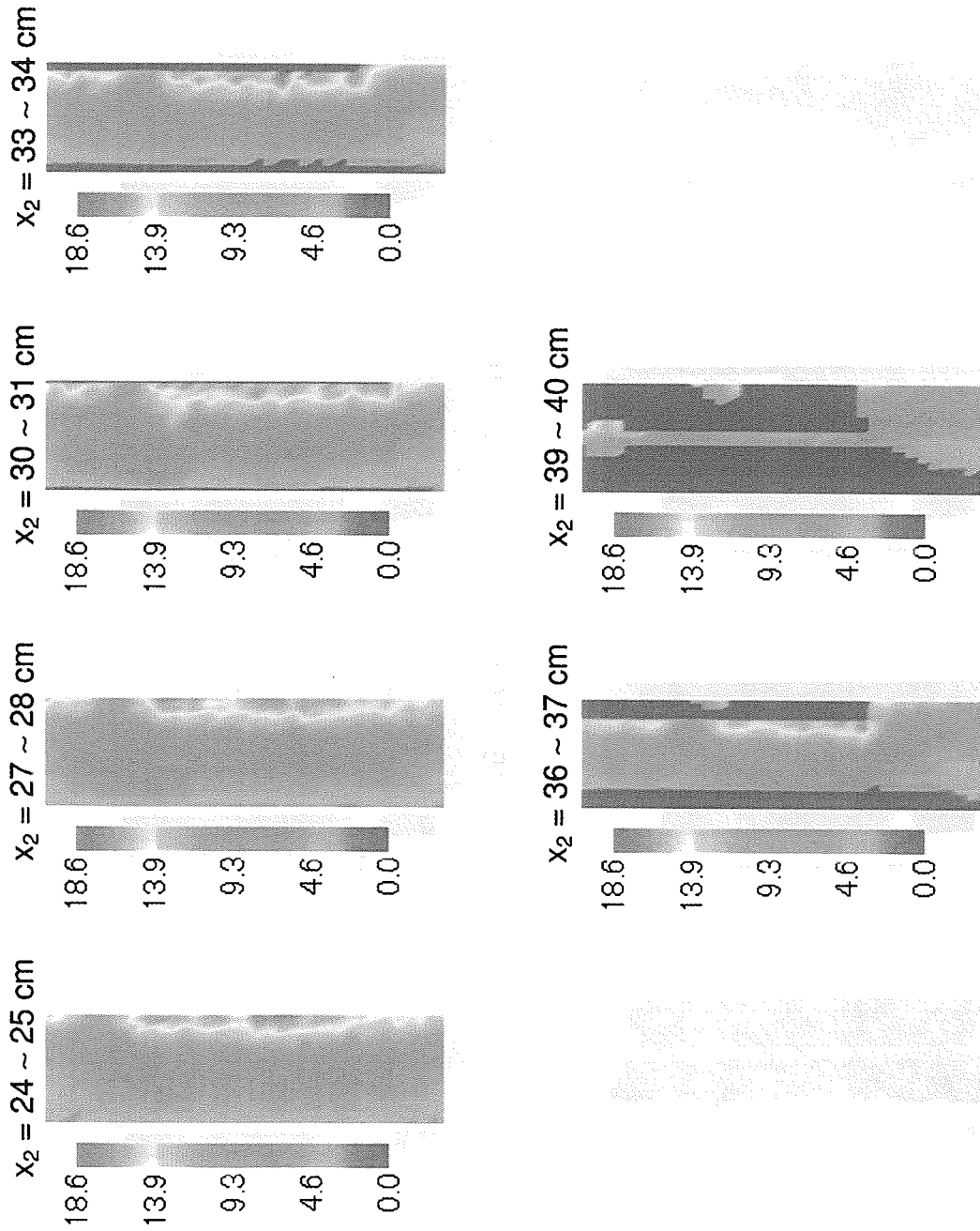


図 20: (f) B 氏胴体 y-z 面における全吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

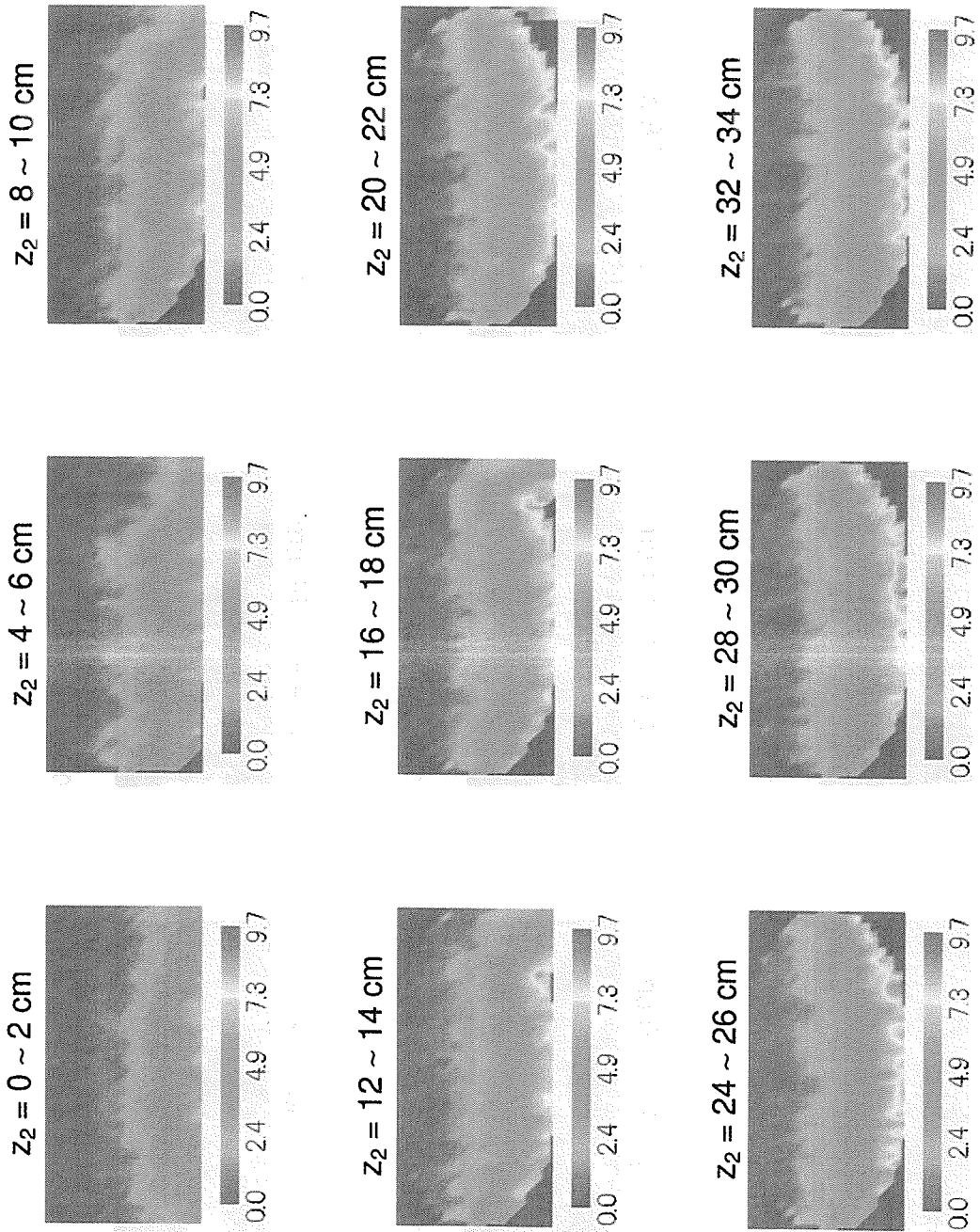


図 21: (a) B 氏胴体 x-y 面における中性子による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

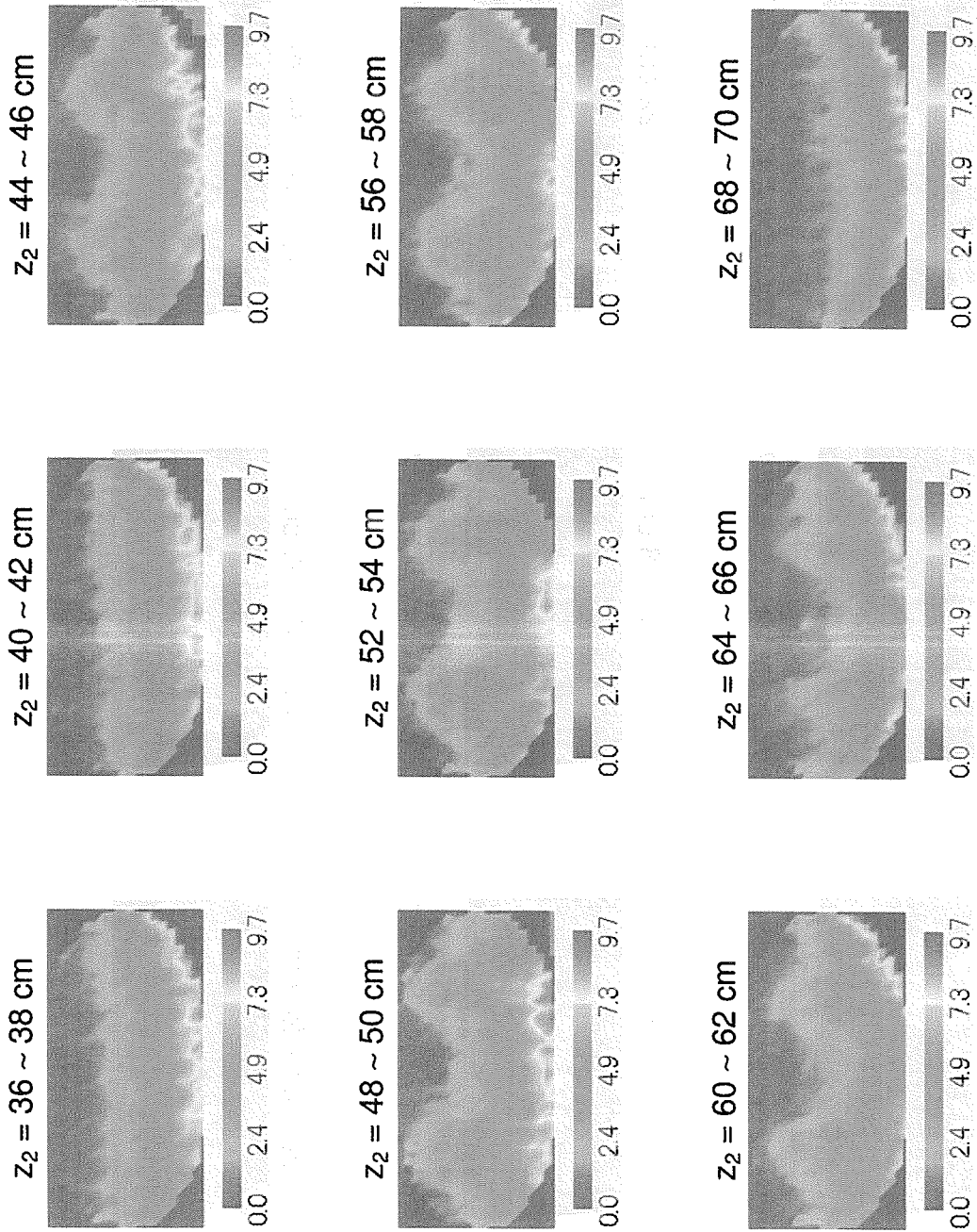


図 21: (b) B 氏胴体 x-y 面における中性子による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

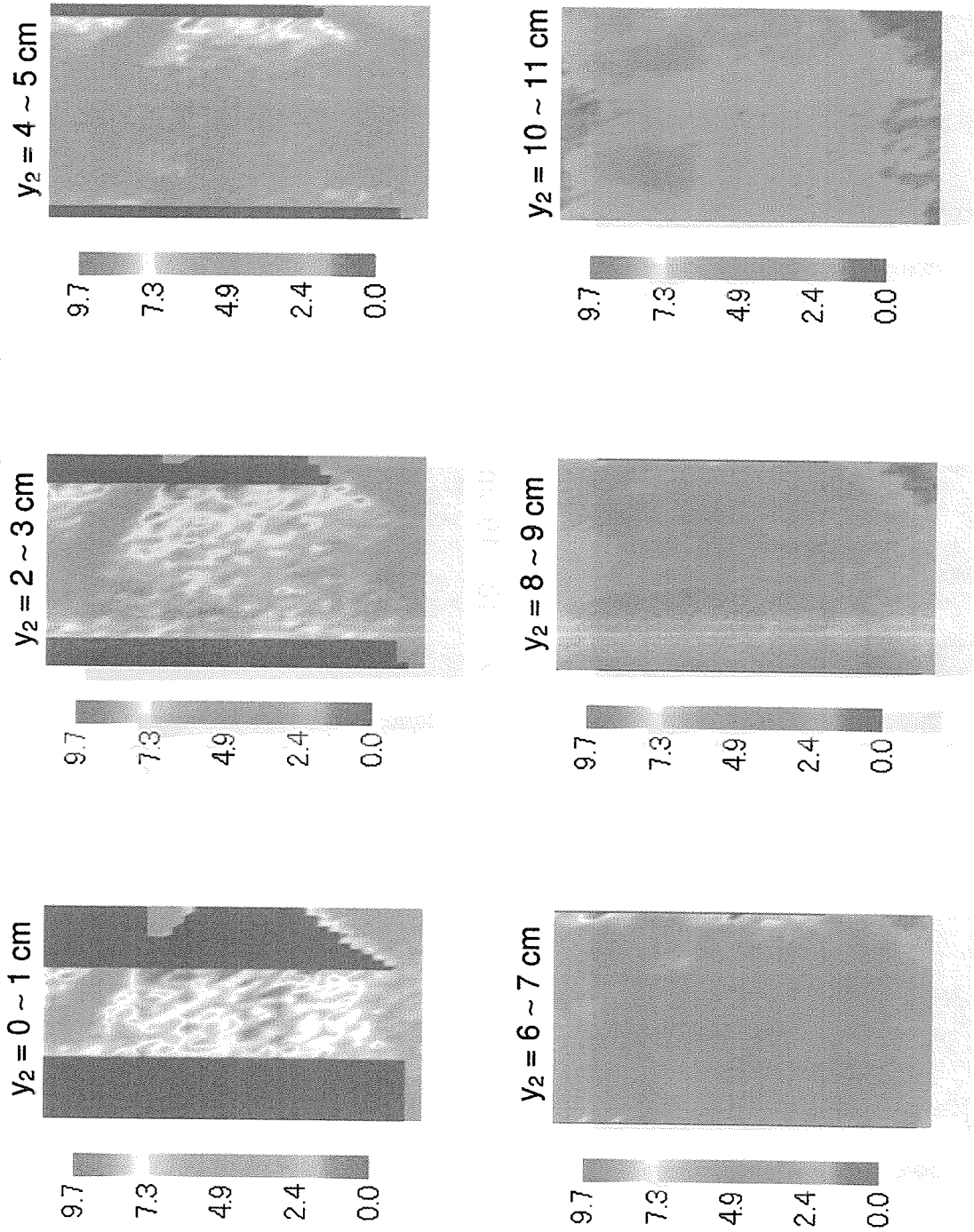


図 21: (c) B 氏胴体 x-z 面における中性子による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

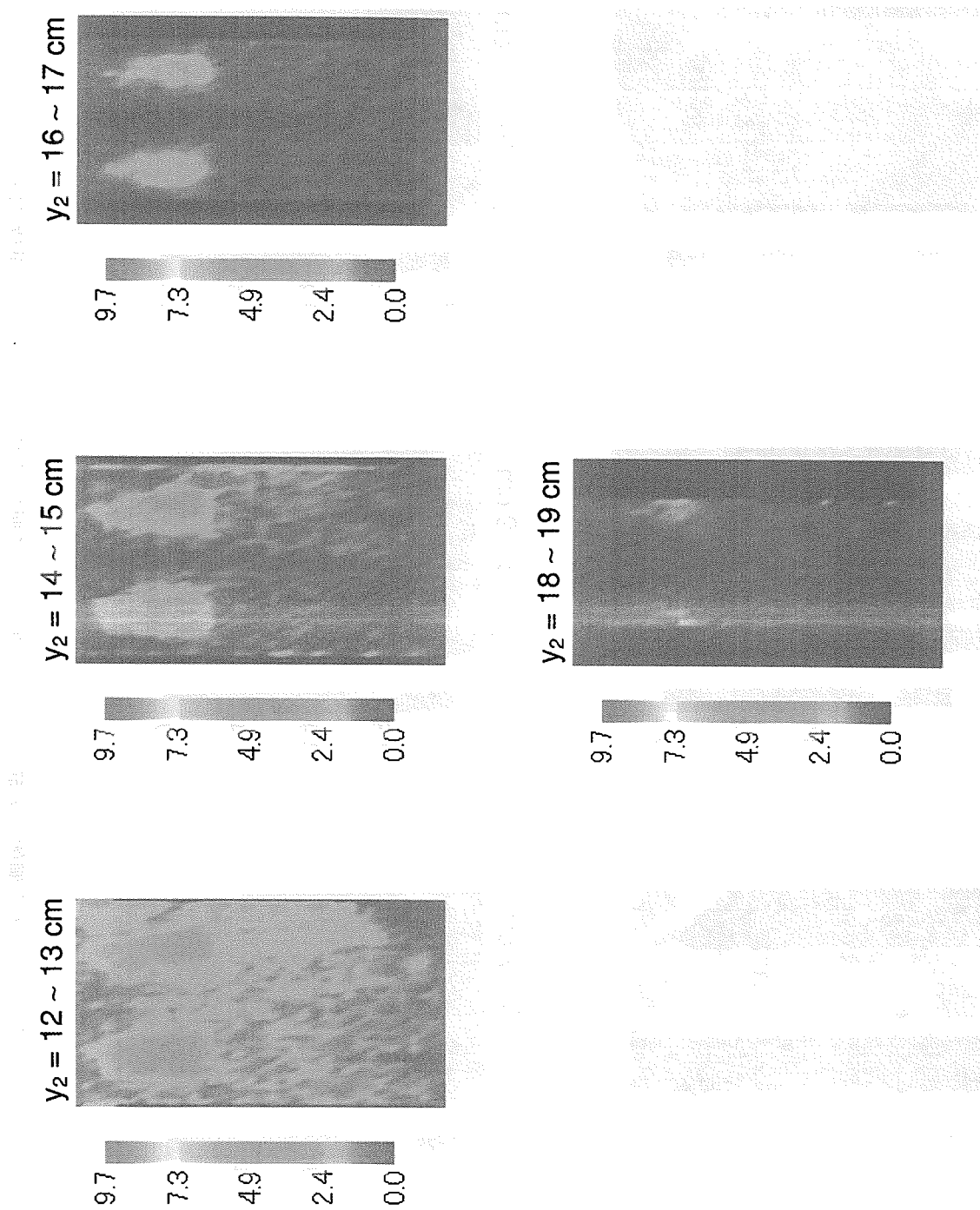


図 21: (d) B 氏胴体 x-z 面における中性子による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

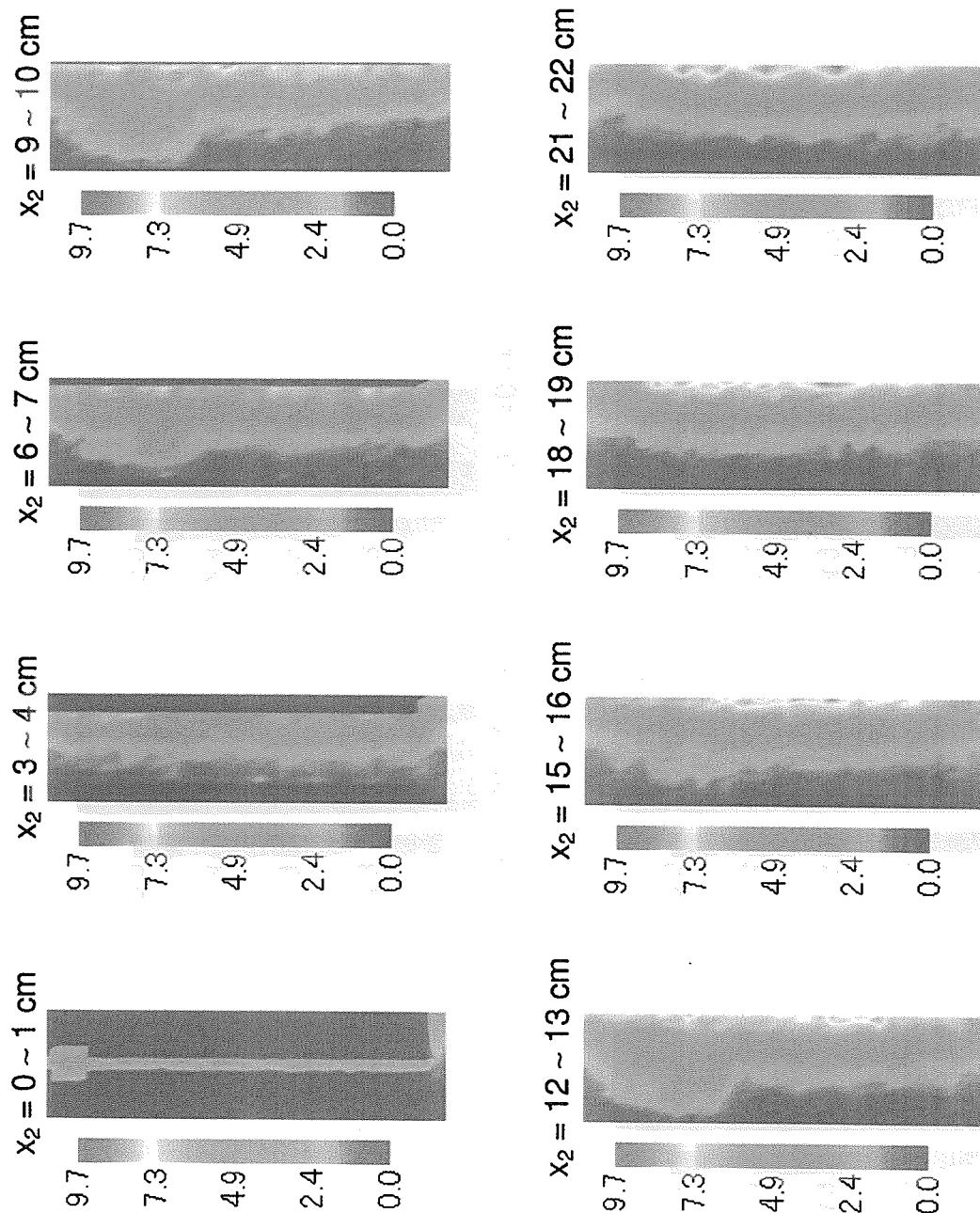


図 21: (e) B 氏胴体 y-z 面における中性子による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

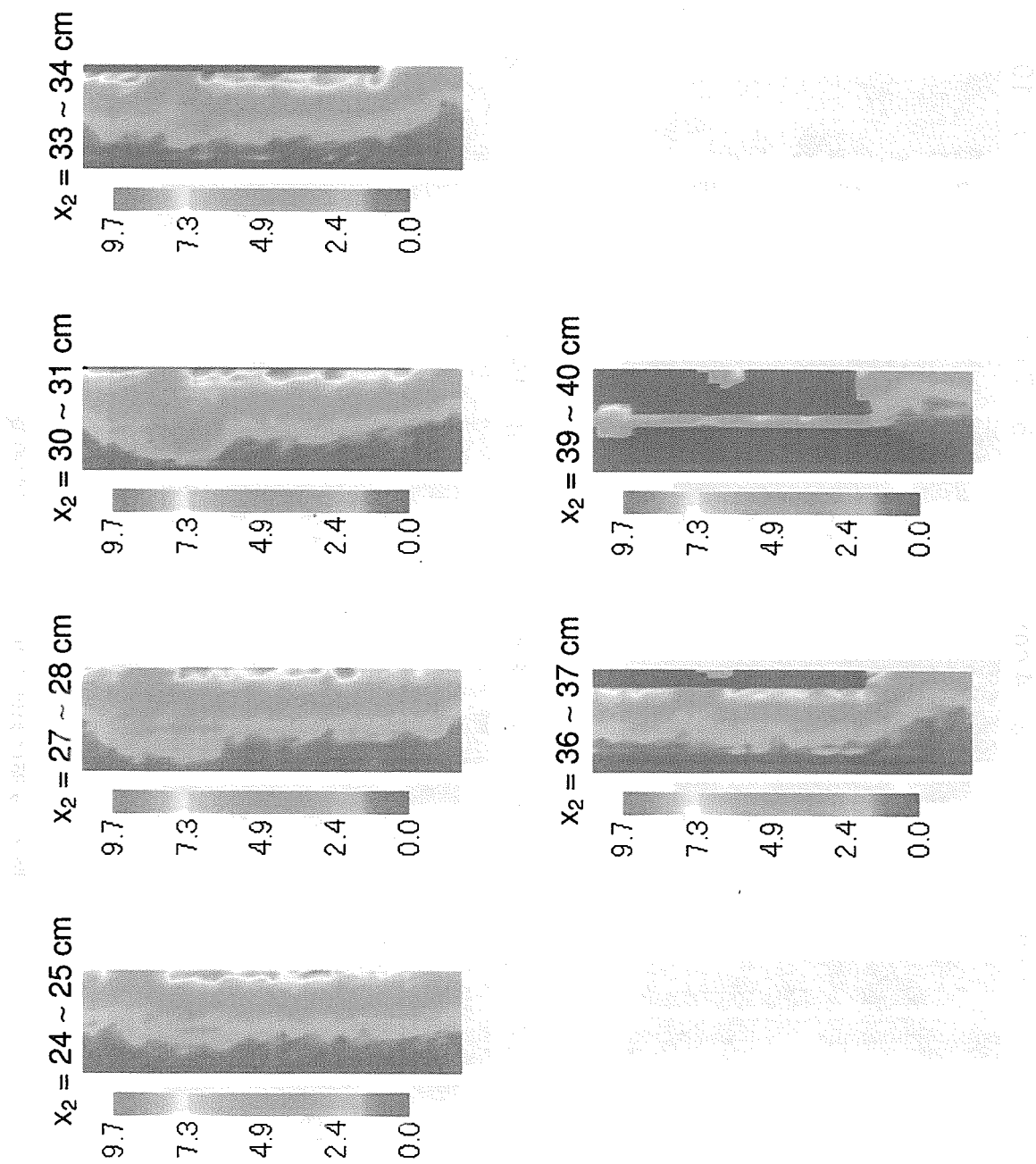


図 21: (f) B 氏胴体 y-z 面における中性子による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。



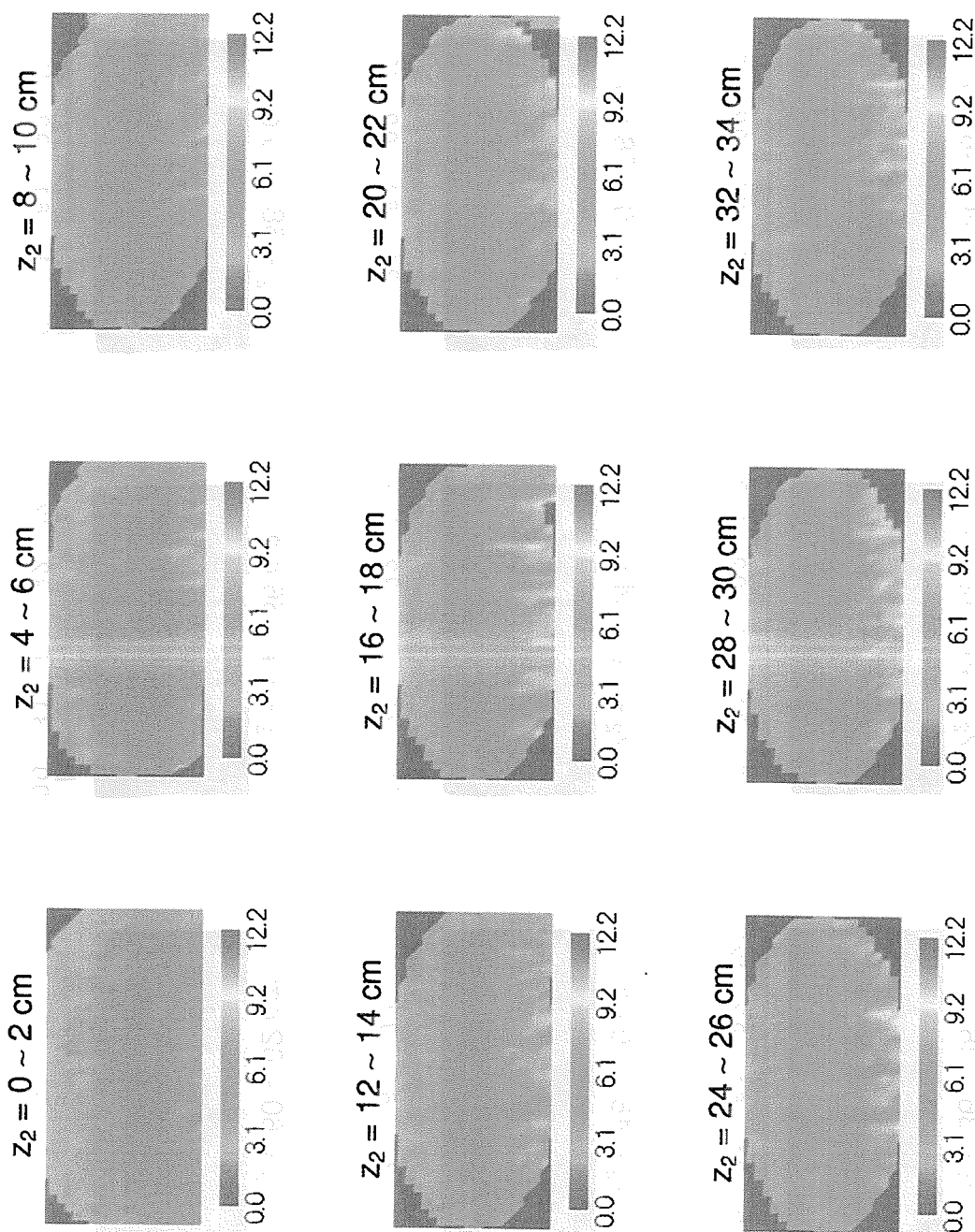


図 22: (a) B 氏胴体 x-y 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

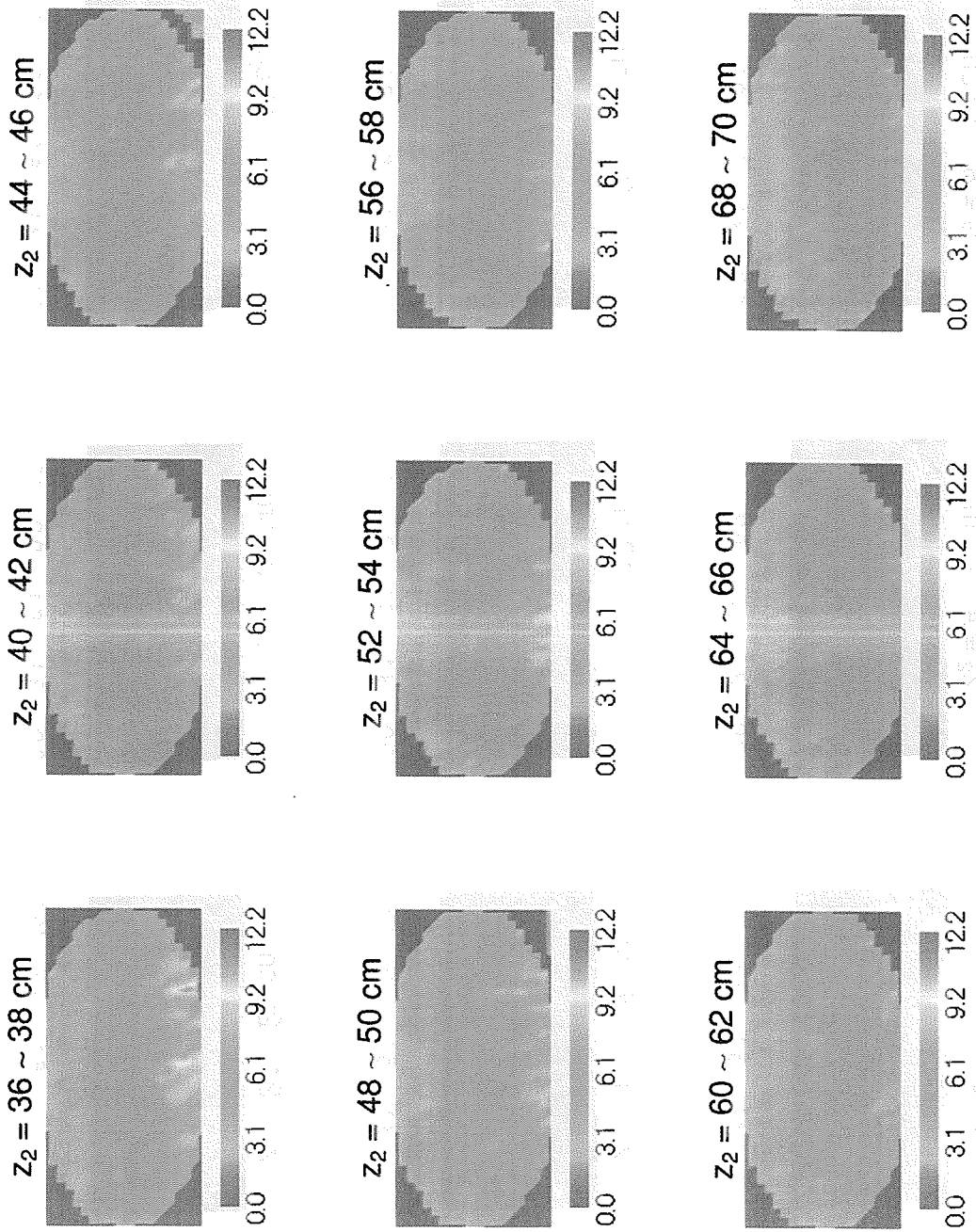


図 22: (b) B 氏胸体 x-y 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

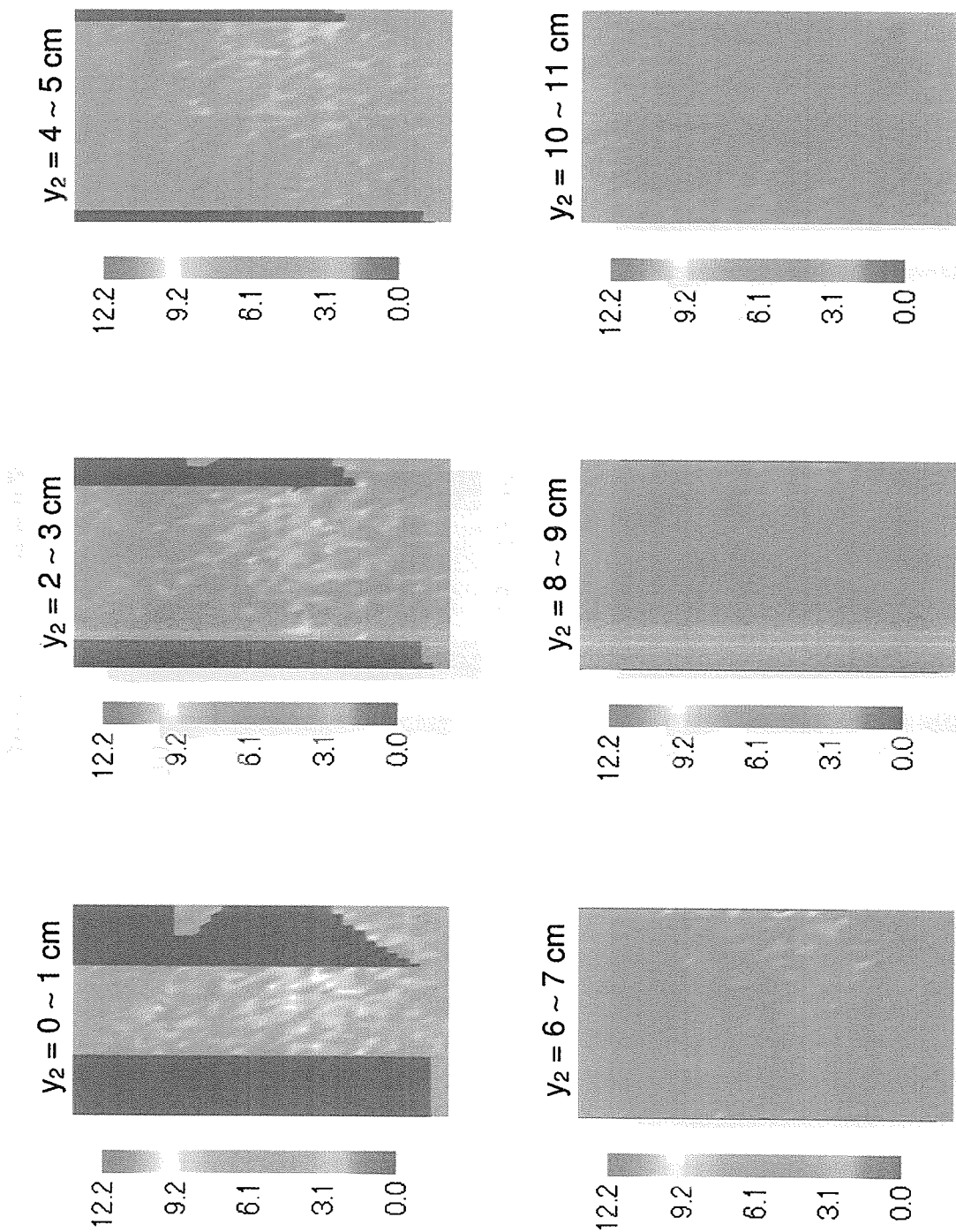


図 22: (c) B 氏胴体 x-z 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

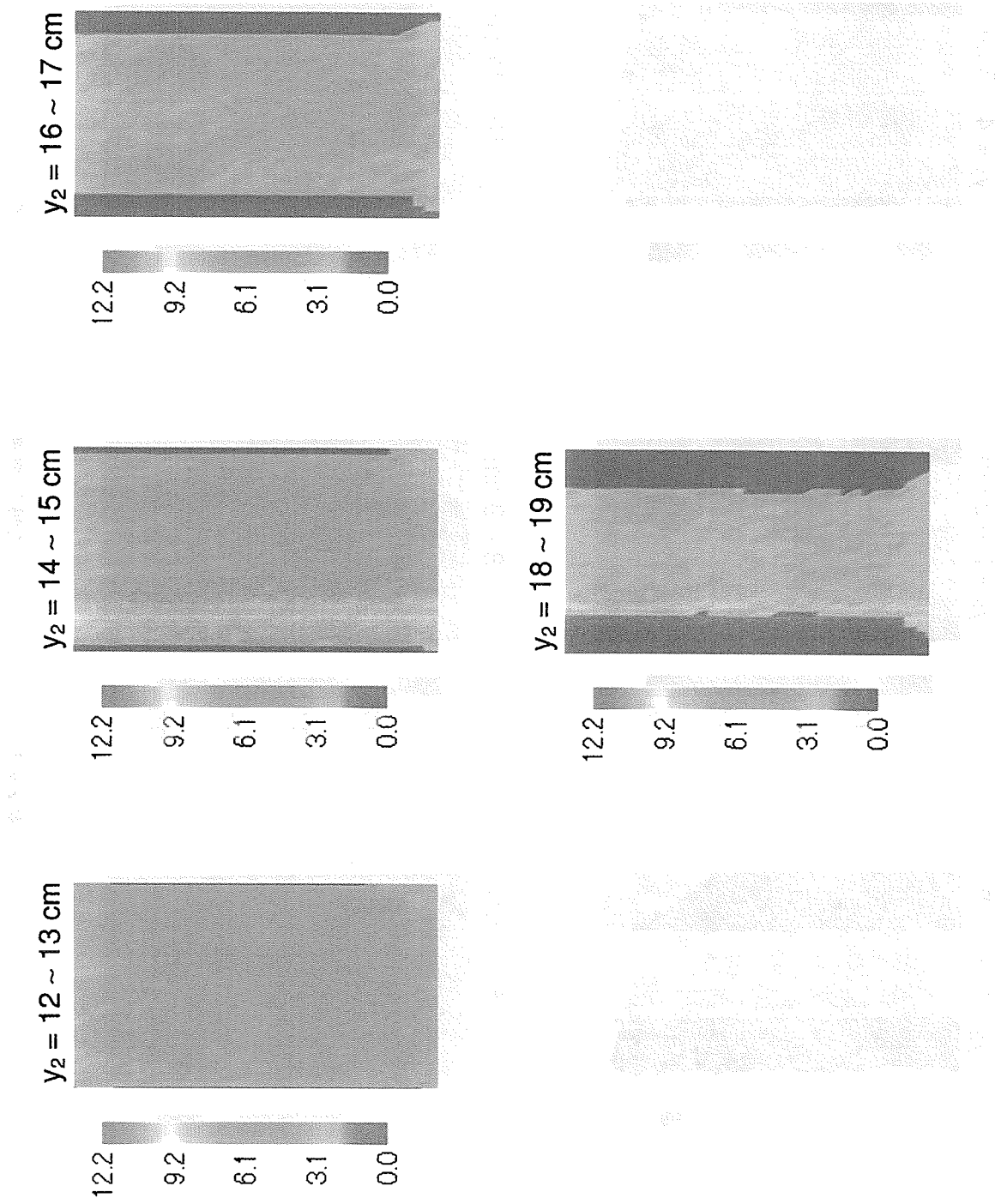


図 22: (d) B 氏胴体 x-z 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

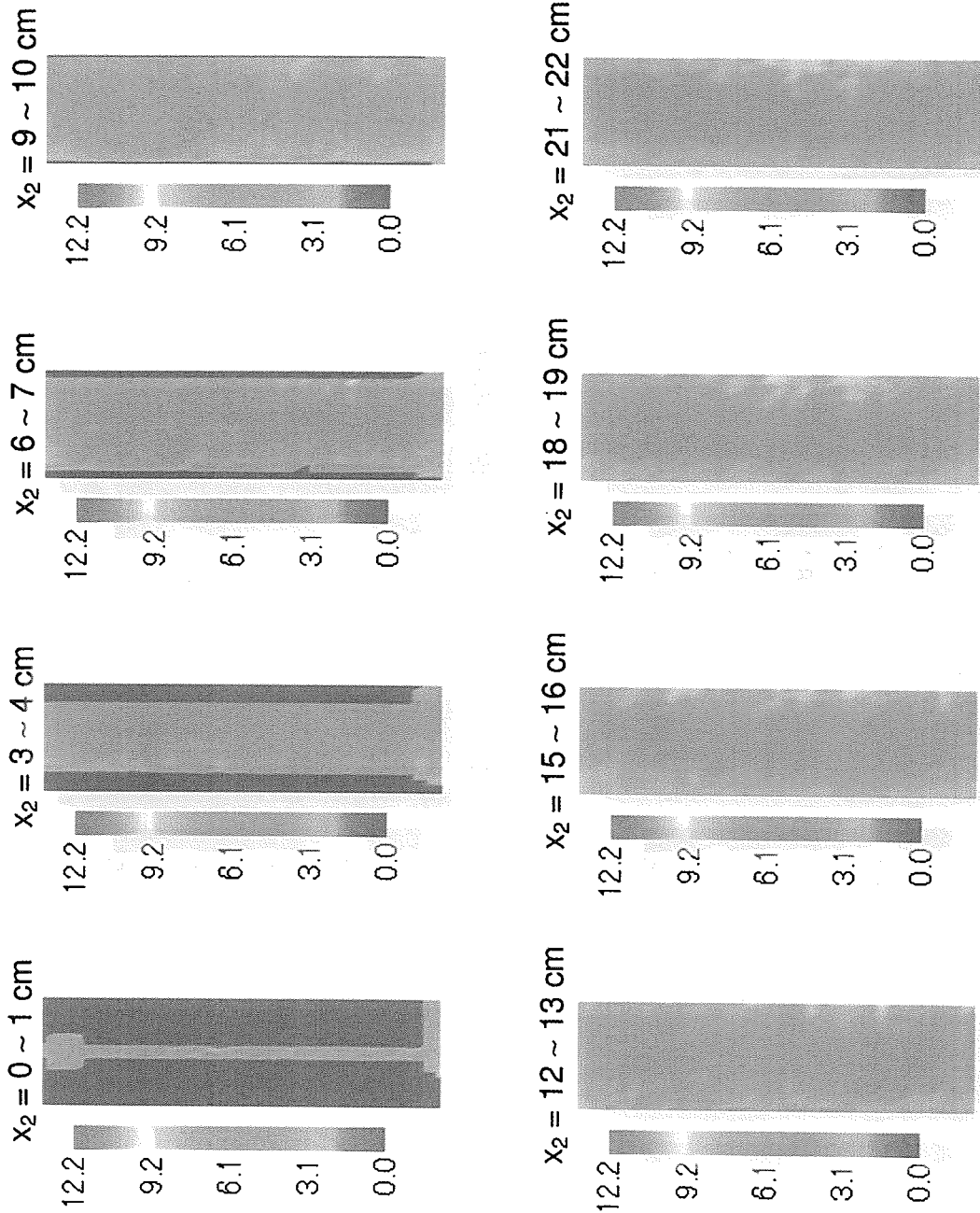


図 22: (e) B 氏胴体  $y$ - $z$  面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 1 (単位 Gy)。

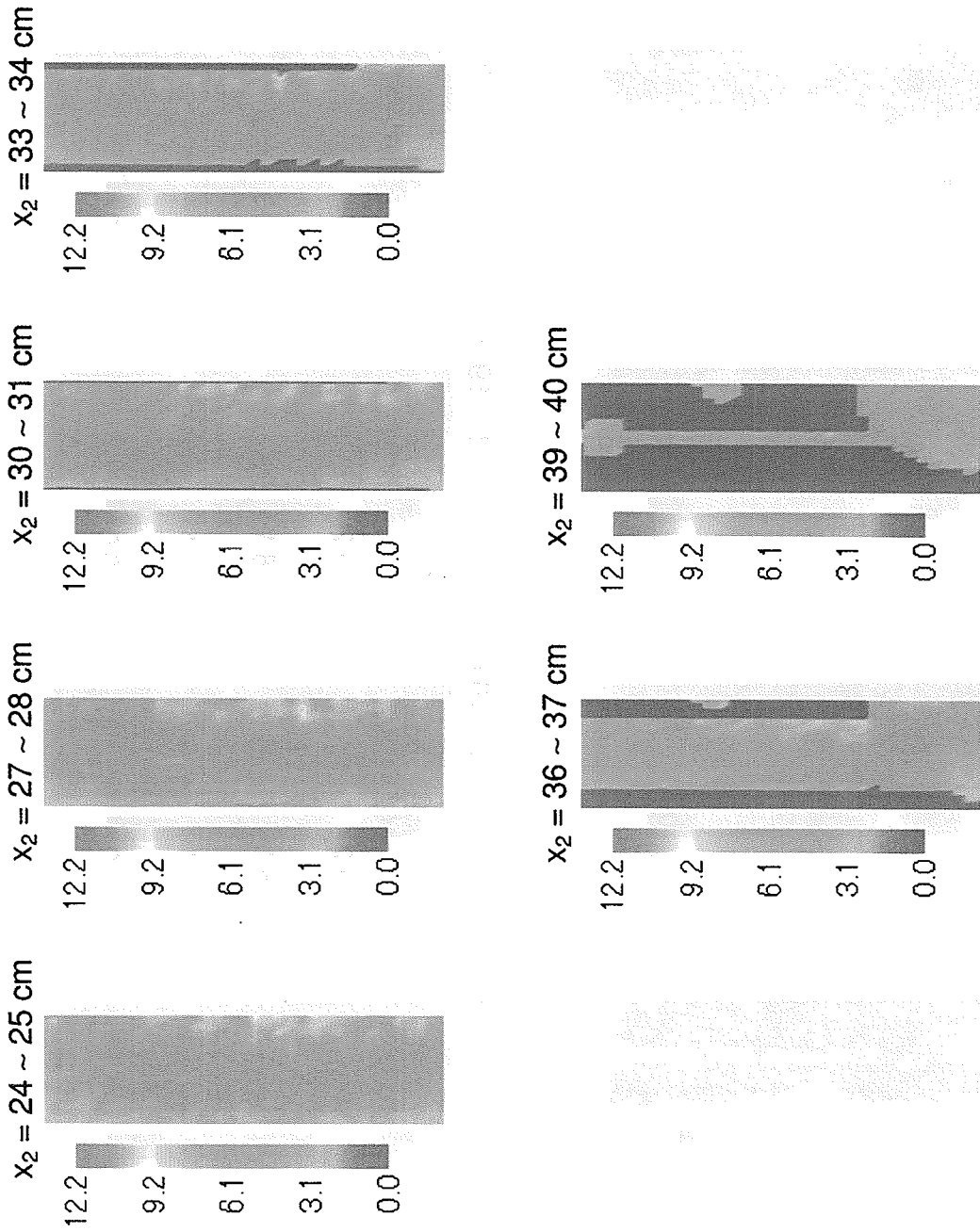


図 22: (f) B 氏胴体 y-z 面における  $\gamma$  線による吸収線量分布 - その 2 (単位 Gy)。

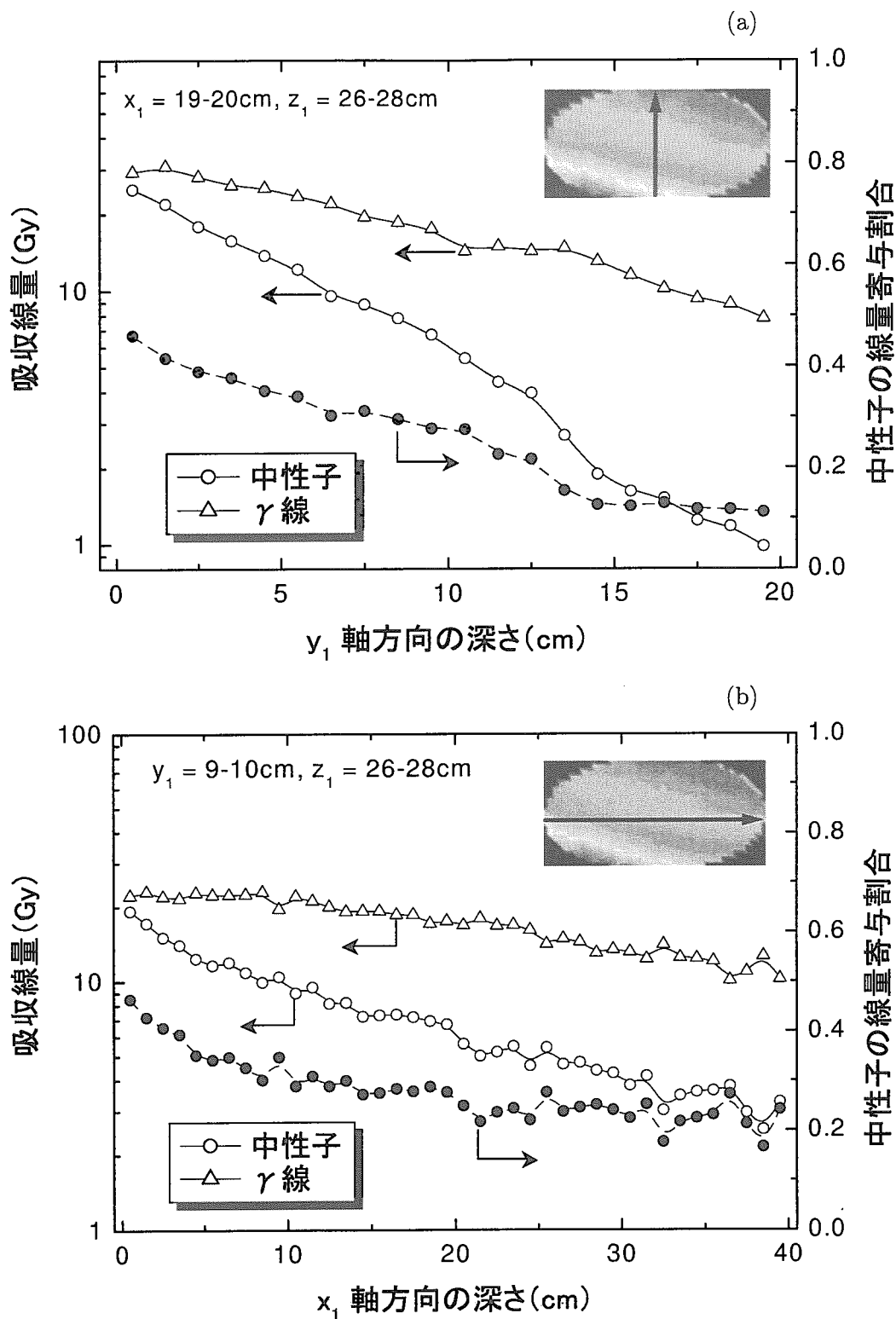


図 23: A 氏胴体内における吸収線量分布。(a) 腹部 ( $z_1 = 26 - 28 \text{ cm}$ ) における  $y_1$  軸方向の分布、(b) 腹部 ( $z_1 = 26 - 28 \text{ cm}$ ) における  $x_1$  軸方向の分布。

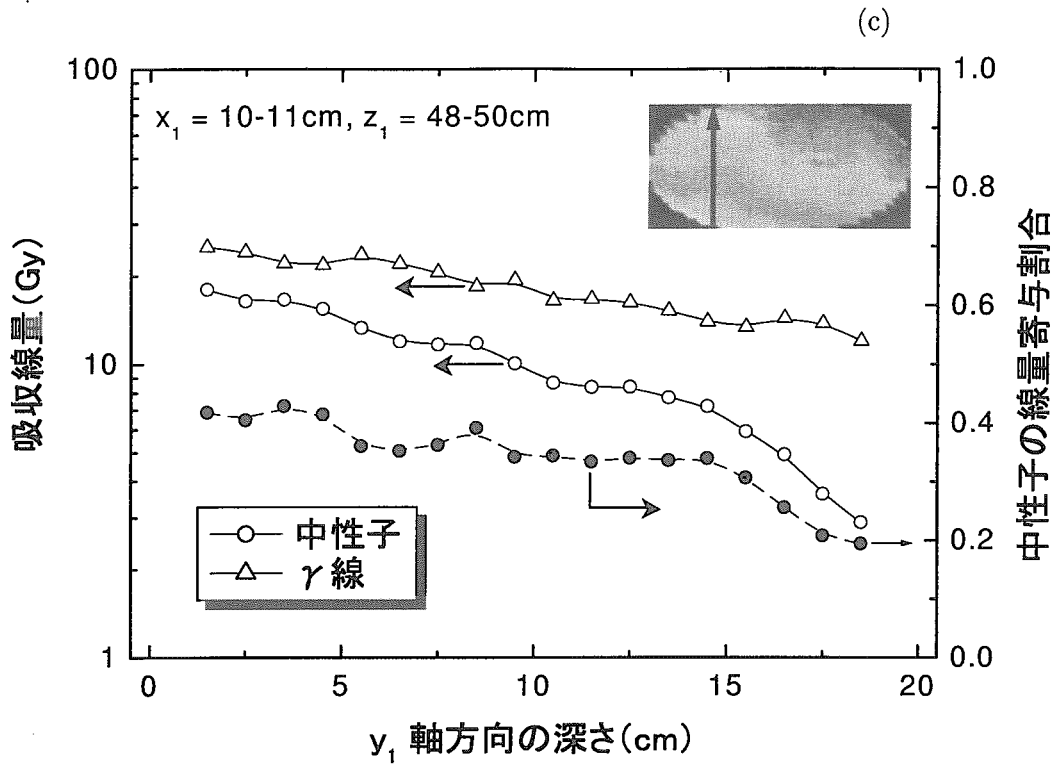


図 23: (c) 胸部 ( $z_1 = 48 - 50$  cm) における右肺を横切る  $y_1$  軸方向の分布。



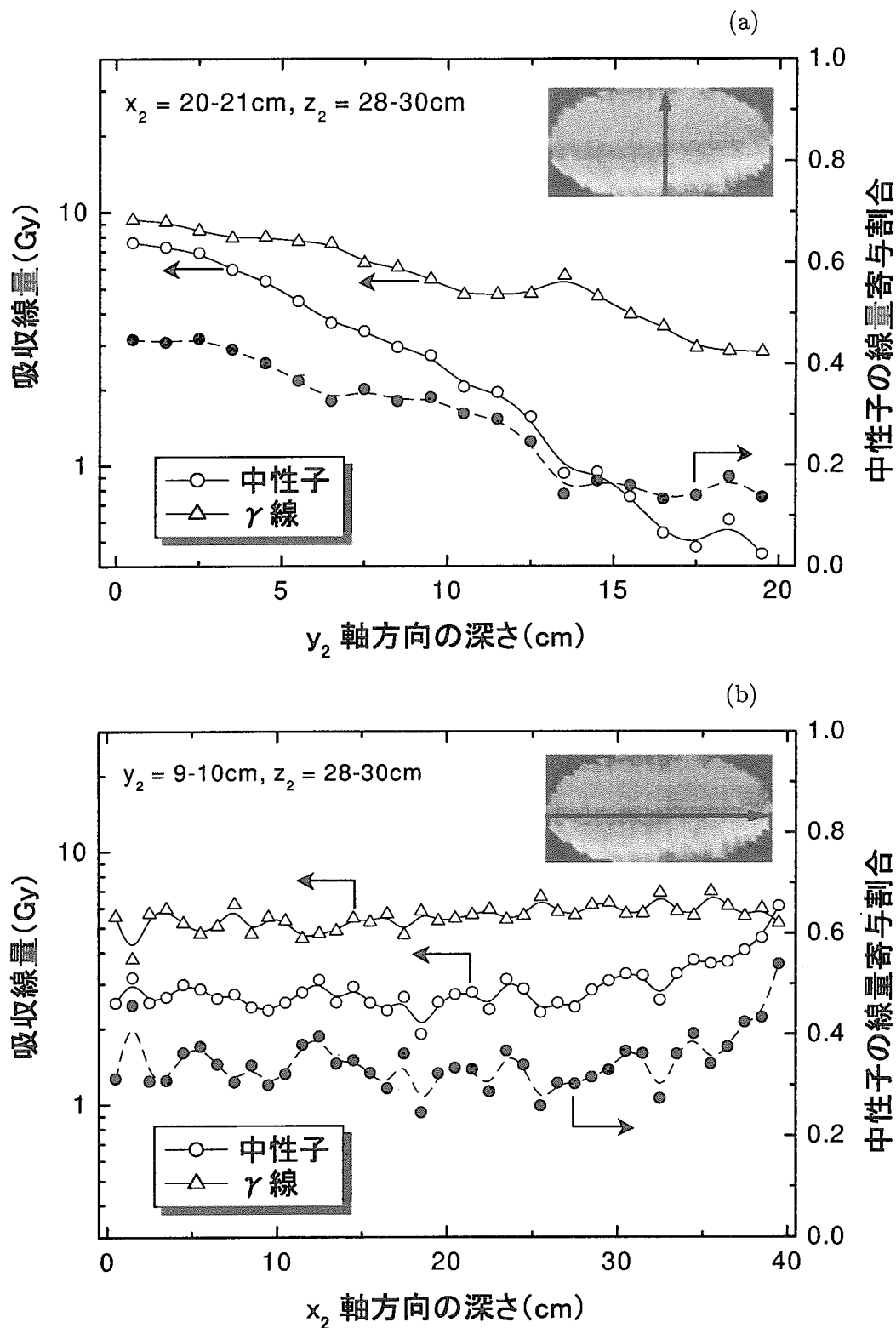


図 24: B 氏胴体内における吸収線量分布。(a) 腹部 ( $z_2 = 28 - 30\text{ cm}$ ) における  $y_2$  軸方向の分布、(b) 腹部 ( $z_2 = 28 - 30\text{ cm}$ ) における  $x_2$  軸方向の分布。

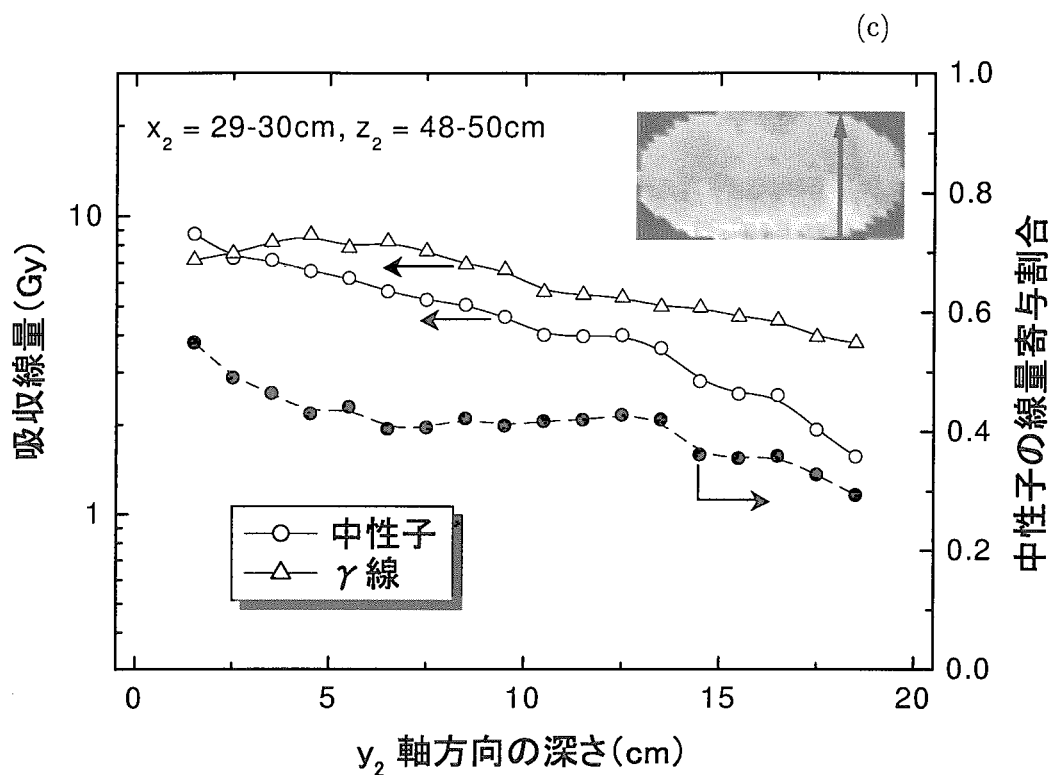


図 24: (c) 胸部 ( $z_2 = 48 - 50$  cm) における左肺を横切る  $y_2$  軸方向の分布。

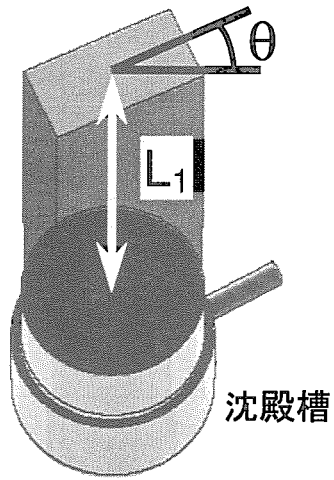


図 25: A 氏に相当するファントムに対する計算体系。

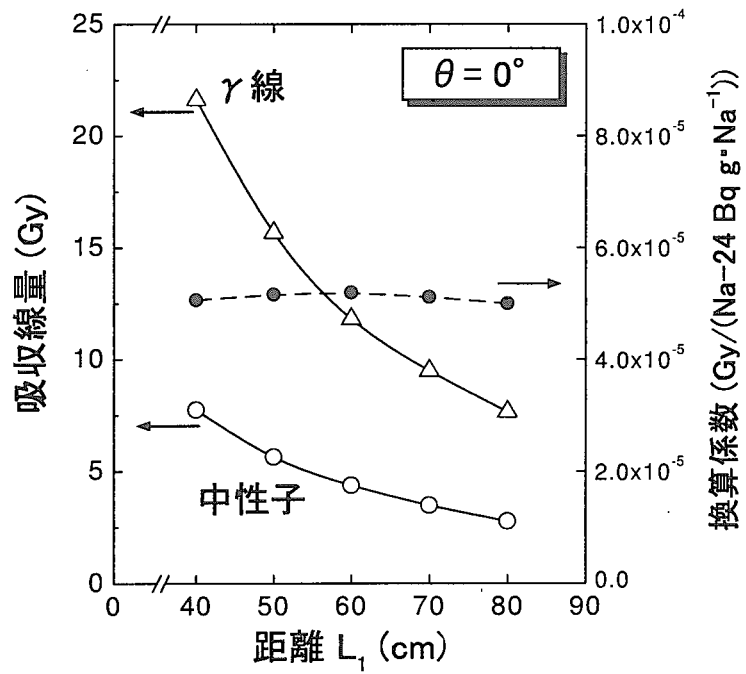


図 26: 距離  $L_1$  に対する吸収線量、換算係数の関係。

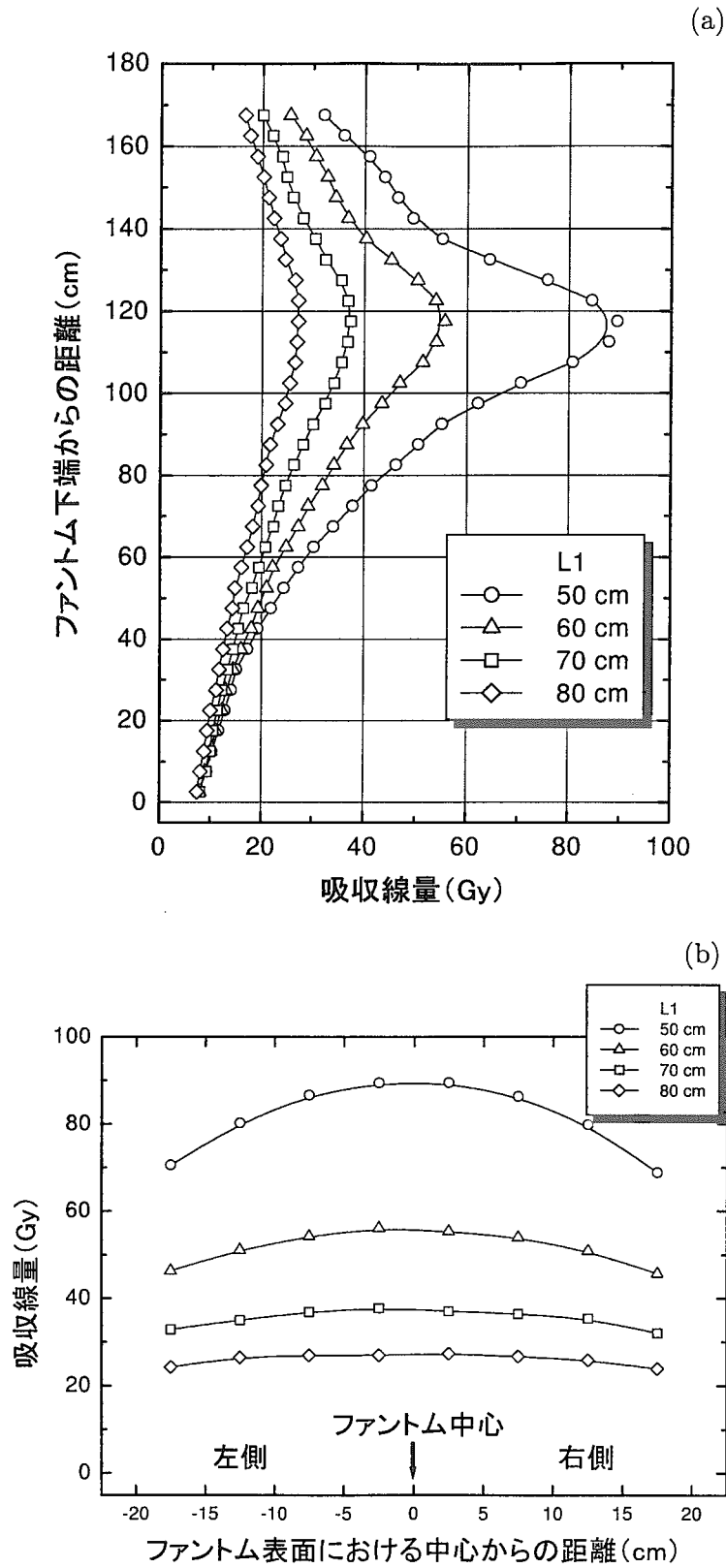


図 27: 距離  $L_1$  によるファントム表面での線量分布の変化。(a) 最大線量部 (表面中心線) の垂直方向分布、(b) 最大線量部の水平方向分布。

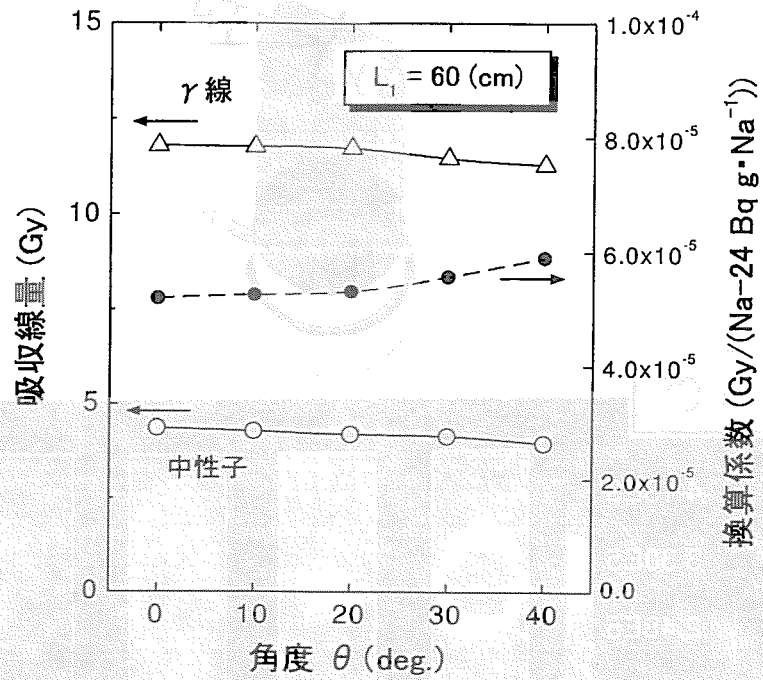


図 28: 角度  $\theta$  に対する吸収線量、換算係数の関係。

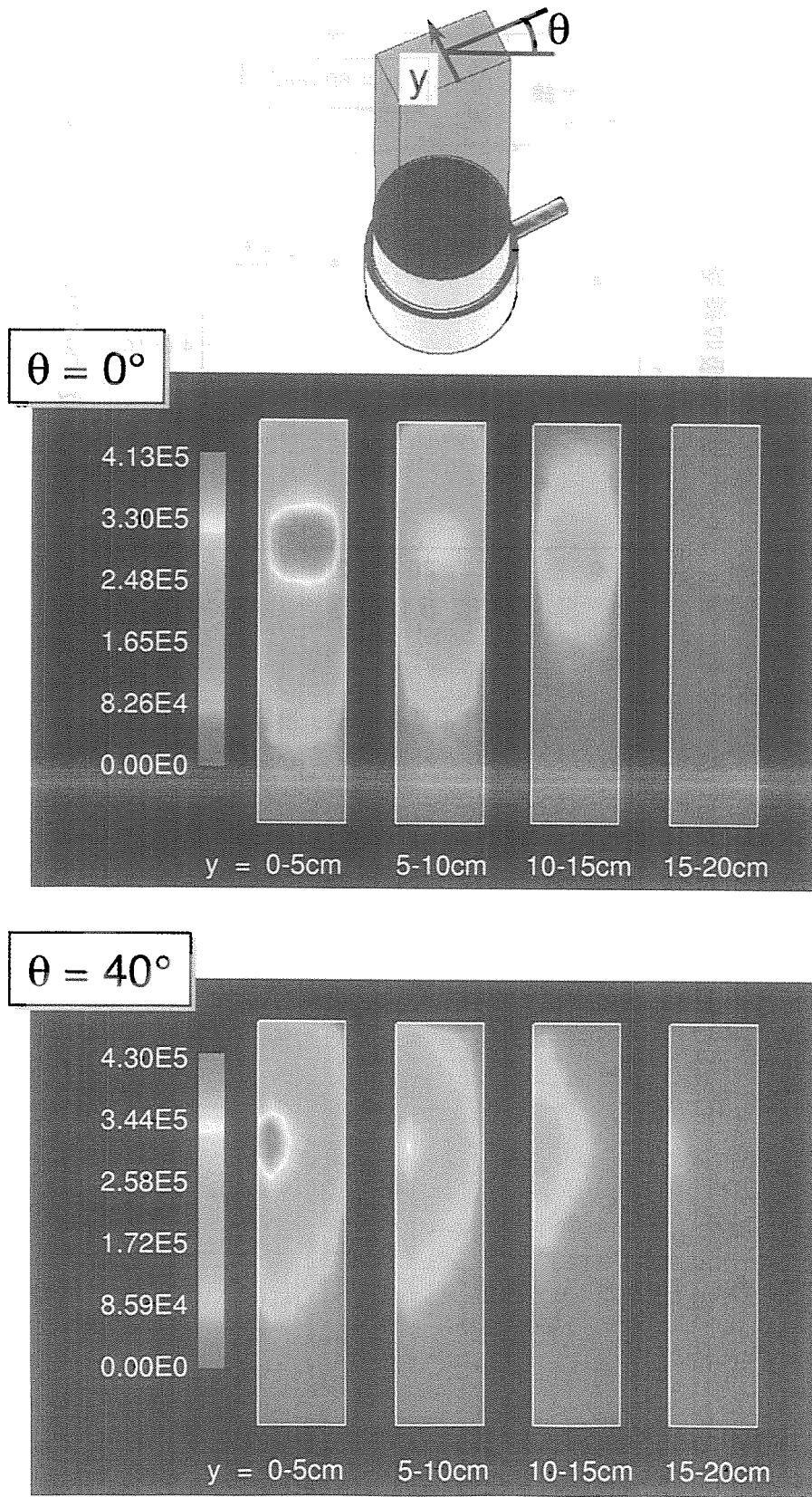


図 29: ファントム内における  $^{24}\text{Na}$  比放射能の分布 (単位 Bq g-Na $^{-1}$ )。

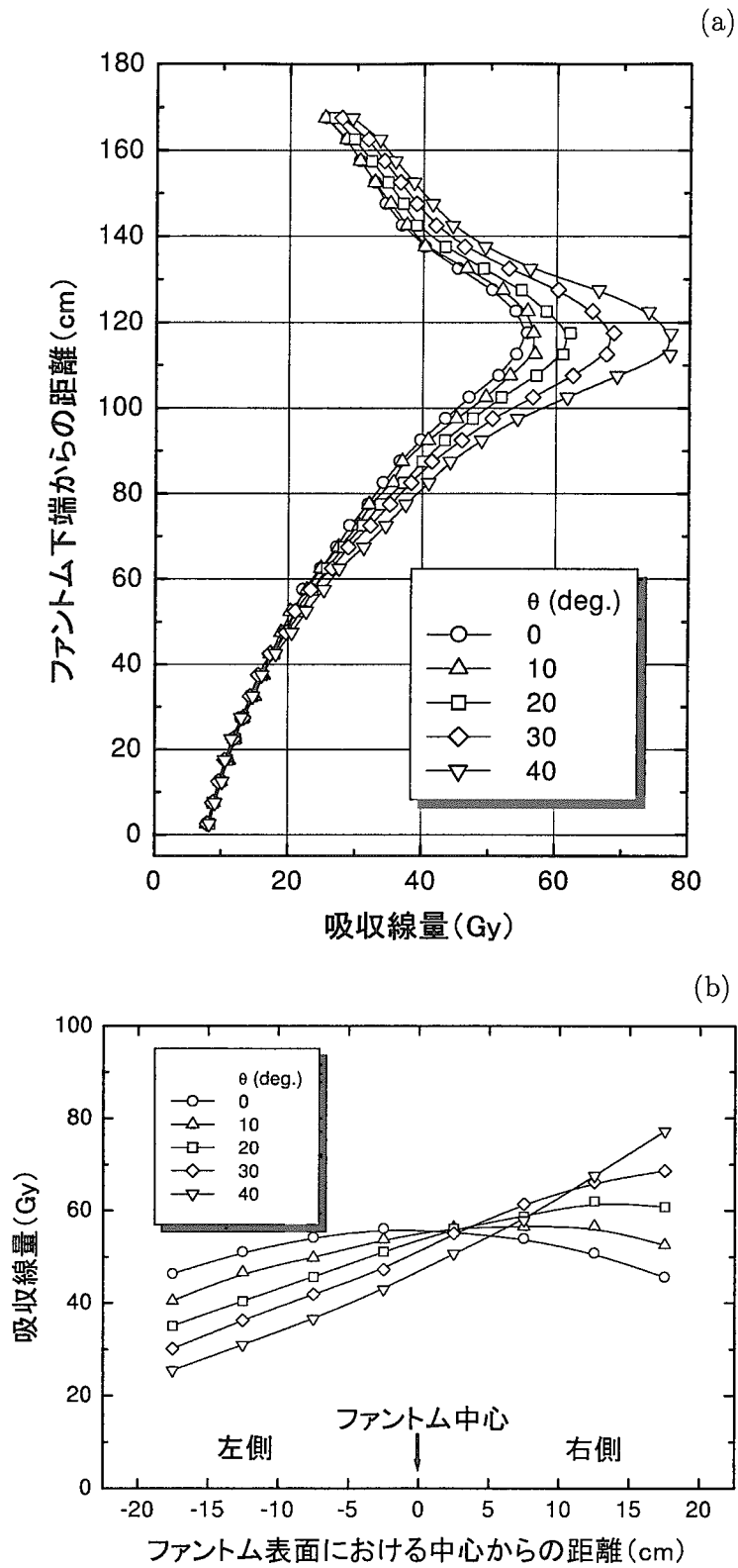


図 30: 角度 $\theta$ によるファントム表面での線量分布の変化。(a) 最大線量部の垂直方向分布、(b) 最大線量部の水平方向分布。

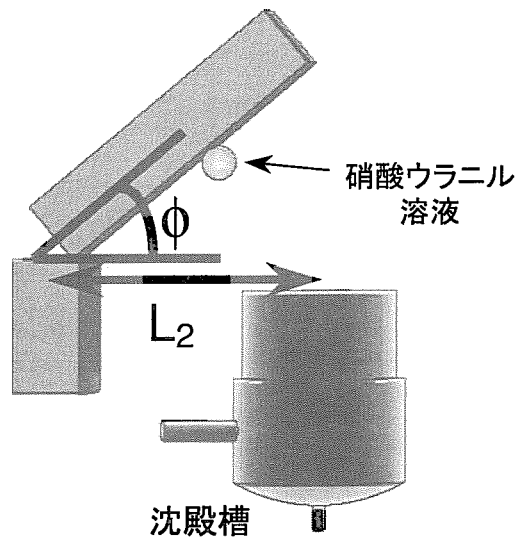


図 31: B 氏ファントムの解析の計算体系。

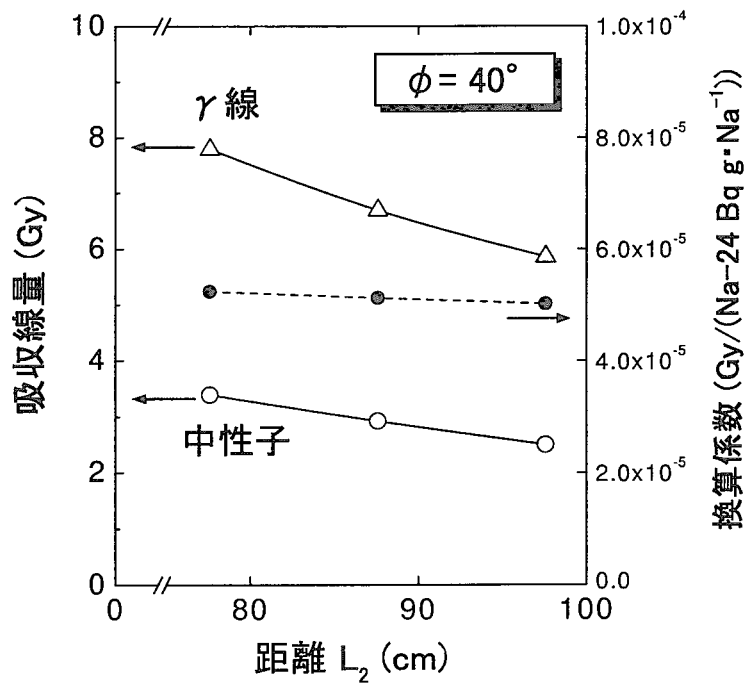


図 32: 距離  $L_2$  に対する吸収線量、換算係数の関係。



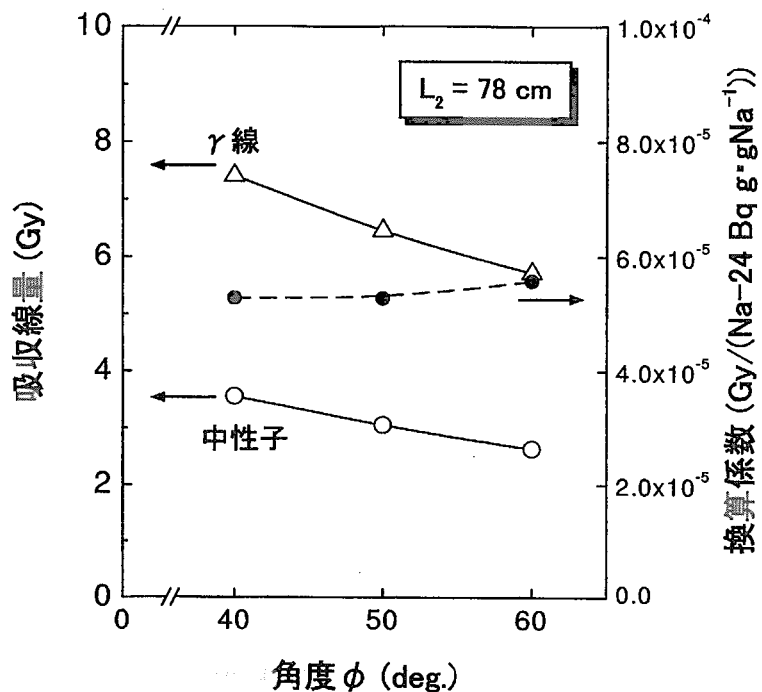


図 33: 角度  $\phi$  に対する上半身部ファントムにおける吸収線量、換算係数の関係。

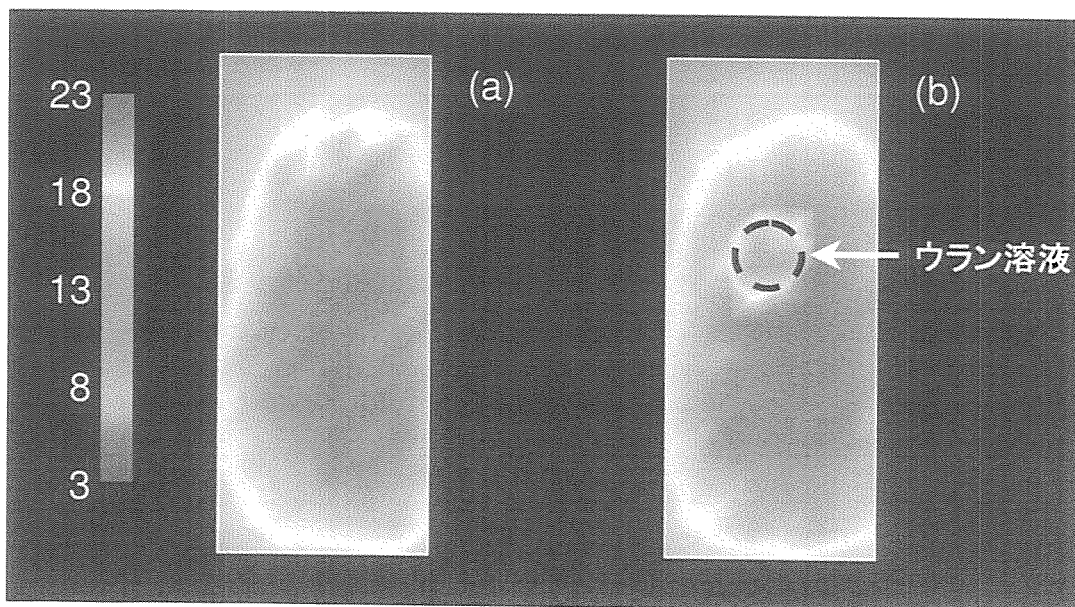
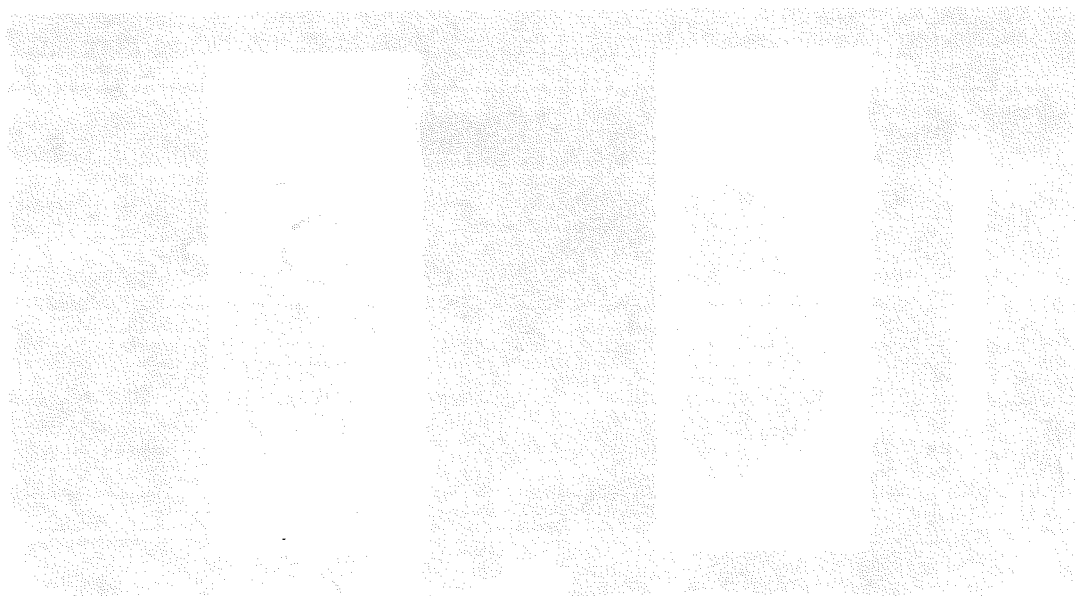


図 34: ビーカー中のウラン溶液による上半身部ファントム前面における吸収線量分布への影響 (単位 Gy)。

This is a blank page.



# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10<sup>-19</sup>J  
1 u=1.66054×10<sup>-27</sup>kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光強度	ルーメン	lm	cd·sr
照射量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バール	b
バール	bar
ガール	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10<sup>-10</sup>m  
1 b=100fm<sup>2</sup>=10<sup>-28</sup>m<sup>2</sup>  
1 bar=0.1MPa=10<sup>5</sup>Pa  
1 Gal=1cm/s<sup>2</sup>=10<sup>-2</sup>m/s<sup>2</sup>  
1 Ci=3.7×10<sup>10</sup>Bq  
1 R=2.58×10<sup>-4</sup>C/kg  
1 rad=1cGy=10<sup>-2</sup>Gy  
1 rem=1cSv=10<sup>-2</sup>Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが「通常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1		0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

粘度 1Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
1		10.1972	9.86923	7.50062×10 <sup>3</sup>	145.038
0.0980665		1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325		1.03323	1	760	14.6959
1.33322×10 <sup>-4</sup>		1.35951×10 <sup>-3</sup>	1.31579×10 <sup>-3</sup>	1	1.93368×10 <sup>-2</sup>
6.89476×10 <sup>-3</sup>		7.03070×10 <sup>-2</sup>	6.80460×10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
1		0.101972	2.77778×10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813×10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150×10 <sup>18</sup>
9.80665		1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>
3.6×10 <sup>6</sup>		3.67098×10 <sup>3</sup>	1	8.59999×10 <sup>6</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>
4.18605		0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>
1055.06		107.586	2.93072×10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>21</sup>
1.35582		0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>
1.60218×10 <sup>-19</sup>		1.63377×10 <sup>-20</sup>	4.45050×10 <sup>-26</sup>	3.82743×10 <sup>-20</sup>	1.51857×10 <sup>-22</sup>	1.18171×10 <sup>-19</sup>	1

1 cal= 4.18605J (計量法)  
= 4.184J (熱化学)  
= 4.1855J (15°C)  
= 4.1868J (国際蒸気仕事率 1 PS(仏馬力))  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499W

放射能	Bq	Ci
1		2.70270×10 <sup>-11</sup>
3.7×10 <sup>10</sup>		1

吸収線量	Gy	rad
1		100
0.01		1

照射線量	C/kg	R
1		3876
2.58×10 <sup>-4</sup>		1

線増当量	Sv	rem
1		100
0.01		1

1997 10 10

