

Volume 20 • Number 1 • 2020

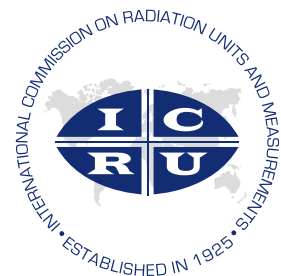
# Journal of the ICRU

**ICRU REPORT 95**

**Operational Quantities for External  
Radiation Exposure**

**外部放射線被ばくに対する実用量**

**ICRP**



[journals.sagepub.com/home/cru](http://journals.sagepub.com/home/cru)  
ISSN: 1473-6691

**INTERNATIONAL COMMISSION ON  
RADIATION UNITS AND  
MEASUREMENTS**

# 外部放射線被ばく に対する実用量

## ***Commission Membership***

V. Grégoire (Chair)  
T. R. Mackie (Vice Chair)  
M. E. Brandan (Secretary)  
J. M. Boone (Treasurer)  
S. Bentzen  
F. Bochud  
D. T. Burns  
E. Fantuzzi  
R. W. Howell  
D. Jaffray  
P. Olko  
N. Saito  
B. O'Sullivan  
T. Otto  
D. W. O. Rogers  
T. C. Yen

P. M. DeLuca (Honorary Chair)  
H.-G. Menzel (Honorary Chair)  
A. Wambersie (Honorary Chair)  
G. Whitmore (Emeritus Member)  
H. G. Paretzke (Emeritus Member)

### *Executive Secretary*

L. J. Atwell

### *Scientific Editor: Journal of the ICRU*

D. W. O. Rogers

### *Honorary Counsel*

W. R. Ney

**The Journal of the ICRU (CRU)** *The Journal of the ICRU* publishes reports on important and topical subjects within the field of radiation science and measurement. It is the successor to the series of reports published by or on behalf of the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) since 1927. The Commission continually reviews radiation science with the aim of identifying areas where the development of guidance and recommendations can make an important contribution. The journal consists of commissioned reports, and no submitted articles are accepted for publication.

**The Journal of the ICRU** (ISSN 1473-6691) (J889) is published annually in December by SAGE Publishing, 2455 Teller Road, Thousand Oaks, CA 91320. Send address changes to The Journal of the ICRU, c/o SAGE Publishing, 2455 Teller Road, Thousand Oaks, CA 91320.

Copyright © 2020 by International Commission on Radiation Units and Measurements. All rights reserved. No portion of the contents may be reproduced in any form without written permission from the publisher.

**Subscription Information:** All subscription inquiries, orders, back issues, claims, and renewals should be addressed to SAGE Publishing, 2455 Teller Road, Thousand Oaks, CA 91320; telephone: (800) 818-SAGE (7243) and (805) 499-0721; fax: (805) 375-1700; e-mail: [journals@sagepub.com](mailto:journals@sagepub.com); website: [journals.sagepub.com](http://www.sagepub.com). **Subscription Price:** Institutions: \$222; Individuals: \$192. For all customers outside the Americas, please visit <http://www.sagepub.co.uk/customerCare.nav> for information. **Claims:** Claims for undelivered or damaged copies must be made no later than six months following month of publication. The publisher will supply replacement issues when losses have been sustained in transit and when the reserve stock will permit.

**Copyright Permission:** To request permission for republishing, reproducing, or distributing material from this journal, please visit the desired article on the SAGE Journals website ([journals.sagepub.com](http://journals.sagepub.com)) and click "Permissions." For additional information, please see [www.sagepub.com/journals-permissions](http://www.sagepub.com/journals-permissions).

**Advertising and Reprints:** Current advertising rates and specifications may be obtained by contacting the advertising coordinator in the Thousand Oaks office at (805) 410-7772 or by sending an e-mail to [advertising@sagepub.com](mailto:advertising@sagepub.com). To order reprints, please e-mail [reprint@sagepub.com](mailto:reprint@sagepub.com). Acceptance of advertising in this journal in no way implies endorsement of the advertised product or service by SAGE, the journal's affiliated society(ies), or the journal editor(s). No endorsement is intended or implied. SAGE reserves the right to reject any advertising it deems as inappropriate for this journal.

**Change of Address:** Six weeks' advance notice must be given when notifying of change of address. Please send the old address label along with the new address to the SAGE office address above to ensure proper identification. Please specify the name of the journal.

**ICRU REPORT NO. 95**

**OPERATIONAL QUANTITIES FOR  
EXTERNAL RADIATION EXPOSURE**

**THE INTERNATIONAL COMMISSION ON  
RADIATION UNITS AND  
MEASUREMENTS  
Prepared Jointly with  
THE INTERNATIONAL COMMISSION ON  
RADIOLOGICAL PROTECTION  
December 2020**

# OPERATIONAL QUANTITIES FOR EXTERNAL RADIATION EXPOSURE

## *Report Committee*

- N.E. Hertel (Co-Chair), Georgia Institute of Technology, USA.  
D.T. Bartlett (Co-Chair), Abingdon, UK  
R. Behrens, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany  
J-M. Bordy, CEA, LIST, Laboratoire National Henri Becquerel (LNE-LNHB),  
Gif-sur-Yvette, France  
G. Dietze<sup>†</sup>, Braunschweig, Germany  
A. Endo, Japan Atomic Energy Agency, Japan  
G. Gualdrini, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo  
economico sostenibile (ENEA), Bologna, Italy (until 2015)  
T. Otto, European Organization for Nuclear Research (CERN), Geneva, Switzerland  
M. Pelliccioni, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Frascati, Italy

## *Consultants to the Report Committee*

- P. Ambrosi, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany (until 2014)  
J-F. Bottollier-Depois, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire,  
Fontenay-aux-Roses, France  
J. Daures, CEA, LIST, Laboratoire National Henri Becquerel (LNE-LNHB)  
Gif-sur-Yvette, Cedex France  
K.F. Eckerman, Oak Ridge, USA  
P. Ferrari, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo  
economico sostenibile (ENEA), Bologna, Italy  
M. Hiller, Stolberg, Germany  
B.R.L. Siebert, Braunschweig, Germany  
K.G. Veinot, Y-12 National Security Complex, Oak Ridge, USA

## *ICRU Sponsors*

- D.T. Burns, Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, France  
E. Fantuzzi, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo  
economico sostenibile (ENEA), Bologna, Italy  
H-G. Menzel, Heidelberg, Germany

<sup>†</sup>Deceased. Dr Dietze played an important role in the development of the recommendations of this Report. The Commission wishes to acknowledge the loss resulting from his untimely death on 25th January 2015.

# The International Commission on Radiation Units and Measurements

Journal of the ICRU  
2020, Vol. 20(1) 3–4  
©2020, The International Commission  
on Radiation Units & Measurements.  
All rights reserved.  
Article reuse guidelines:  
sagepub.com/journals-permissions  
DOI: 10.1177/1473669119xxxxxx  
journals.sagepub.com/home/cru



## Introduction

The International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), since its inception in 1925, has had as its principal objective the development of internationally acceptable recommendations regarding:

- (1) quantities and units of ionizing radiation and radioactivity,
- (2) procedures suitable for the measurement and application of these quantities in clinical radiology and radiobiology, and
- (3) physical data needed in the application of these procedures, the use of which tends to assure uniformity in reporting.

The Commission also considers and makes similar types of recommendations for the radiation protection field. In this connection, its work is performed in cooperation with the International Commission on Radiological Protection (ICRP).

## Policy

The ICRU endeavors to collect and evaluate the latest data and information pertinent to the problems of radiation measurement and dosimetry and to recommend the most acceptable numerical values for physical reference data and techniques for current use.

The Commission's recommendations are kept under continual review in order to keep abreast of the rapidly expanding uses of radiation.

The ICRU feels that it is the responsibility of national organizations to introduce their own detailed technical procedures for the development and maintenance of standards. However, it urges that all countries adhere as closely as possible to the internationally recommended basic concepts of radiation quantities and units.

The Commission maintains and develops a system of quantities and units and concepts (*e.g.*, for radiation therapy) and guidance for measurement procedures and techniques

having the widest possible range of applicability. Situations can arise from time to time for which an expedient solution of a current problem is required.

ICRU invites and welcomes constructive comments and suggestions regarding its recommendations and reports. These may be transmitted to the Chairman.

## Current Program

The Commission recognizes its obligation to provide guidance and recommendations in the areas of radiation therapy, radiation protection, and the compilation of data important to these fields, and to scientific research and industrial applications of radiation. Increasingly, the Commission is focusing on the problems of protection of the patient and evaluation of image quality in diagnostic radiology and radiation oncology. These activities do not diminish the ICRU's commitment to the provision of a rigorously defined set of quantities and units useful in a very broad range of scientific endeavors.

The Commission is currently engaged in the formulation of ICRU Reports treating the following subjects:

*Bioeffect Modeling and Biologically Equivalent Dose Concepts in Radiation Therapy*

*Dose Prescription, Reporting and Recording in Advanced Optimization Strategy: Application to Dose Painting and Robust Planning*

*Image Guided Radiation Therapy Using MRI-Linear Accelerators (MRGRT)*

*Quantitative Imaging for Assessment of Response in Oncology*  
*Stochastic Nature of Radiation Interactions: Microdosimetry*

*Treatment Planning for Radiopharmaceutical Therapy*

The Commission continually reviews progress in radiation science with the aim of identifying areas in which the development of guidance and recommendations can make an important contribution.

## ICRU's Relationship with Other Organizations

In addition to its close relationship with the ICRP, the ICRU has developed relationships with national and international agencies and organizations. In these relationships, the ICRU is looked to for primary guidance in matters relating to quantities, units, and measurements for ionizing radiation, and their applications in the radiological sciences. In 1960, through a special liaison agreement, the ICRU entered into the or a consultative status with the International Atomic Energy Agency (IAEA). The Commission has a formal relationship with the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), whereby the ICRU observers are invited to attend annual UNSCEAR meetings. The Commission and the International Organization for Standardization (ISO) informally exchange notifications of meetings, and the ICRU is formally designated for liaison with two of the ISO technical committees. The ICRU is a member of Consultative Committee for Units (CCU) – BIPM and Consultative Committee for Ionizing Radiation (CCRI(I) – BIPM and Observer to CCRI (II) and CCRI (III). The ICRU also enjoys a strong relationship with its sister organization, the National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). In essence, the ICRU and NCRP were founded concurrently by the same individuals. Presently, this long-standing relationship is formally acknowledged by a special liaison agreement. ICRU also exchanges reports with the following organizations:

Bureau International des Poids et Mesures  
European Commission  
International Electrotechnical Commission

International Organization for Medical Physics

International Radiation Protection Association

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

The Commission has found its relationship with all of these organizations fruitful and of substantial benefit to the ICRU program.

## Operating Funds

Financial support has been received from the following organizations:

American Association of Physicists in Medicine

International Atomic Energy Agency

International Radiation Protection Association

Radiological Society of North America

In addition to the direct monetary support provided by these organizations, many organizations provide indirect support for the Commission's program. This support is provided in many forms, including, among others, subsidies for (1) the time of individuals participating in ICRU activities, (2) travel costs involved in ICRU meetings, and (3) meeting facilities and services.

In recognition of the fact that its work is made possible by the generous support provided by all of the organizations supporting its program, the Commission expresses its deep appreciation.

Vincent Grégoire  
Chair, ICRU  
Centre Léon Bérard  
Lyon, France

# Report 95

## Operational Quantities for External Radiation Exposure

This translation was undertaken by the following colleagues.

Supervised by

Norio SAITO

Translated by

Tadahiro KUROSAWA

Editorial Board

The Japanese Translation Committee of ICRP Publications

Translation Project of ICRP Publications,

Nuclear Regulation Authority, Japan

working in close collaboration with Japanese ICRP & ICRU members.

---

◆ Committee members ◆

Michiaki KAI\*<sup>1)</sup> (Chair)

Michiya SASAKI (Vice-chair)

Keiji ODA

Nobuyuki KINOUCHI<sup>3)</sup>

Sachiko SAKODA<sup>1)</sup>

Hideki HANGAI<sup>4)</sup>

Hiroshi YASUDA

Gen SUZUKI (Vice-chair)

Kazuko OHNO

Isao KAWAGUCHI

Yoshihiko TANIMURA<sup>5)</sup>

Yasuhito SASAKI\*<sup>6)</sup>

Hisanori FUKUNAGA<sup>7)</sup>

◆ Supervisors ◆

Makoto HOSONO (ICRP, MC)

Ohtsura NIWA\* (ICRP, MC)

Yoshiya SHIMADA (ICRP, C1)<sup>2)</sup>

Yoshiharu YONEKURA\* (ICRP, C3)

Toshimitsu HOMMA\* (ICRP, C4)

Michiaki KAI\* (ICRP, MC)

Kotaro OZASA (ICRP, C1)

Tatsuhiko SATO (ICRP, C2)

Hiroko YOSHIDA (ICRP, C4)<sup>2)</sup>

Norio SAITO (ICRU)<sup>†</sup>

---

\* Former ICRP member, † Former ICRU member

<sup>1)</sup> From April 2021, <sup>2)</sup> From September 2021, <sup>3)</sup> Until March 2022, <sup>4)</sup> From April 2022 until March 2023, <sup>5)</sup> From April 2023, <sup>6)</sup> Until March 2025, <sup>7)</sup> From April 2025.



## 邦訳版への序

本書は、国際放射線単位測定委員会（ICRU）から、国際放射線防護委員会（ICRP）と共同で2020年12月に刊行された、外部放射線被ばくに対する実用量に関する報告書

Operational Quantities for External Radiation Exposure  
(Report 95. *Journal of the ICRU*, Vol.20, No.1 (2020))

をICRUの承諾のもとに翻訳したものである。

本書の翻訳は、産業技術総合研究所の黒澤 忠弘氏によって行われた。この翻訳稿をもとに、ICRP刊行物翻訳委員会において推敲を重ねるとともに、前ICRUの齋藤 則生氏に監修をいただいて、最終稿を決定した。原文の記述への疑問は原著関係者に直接確認して訂正し、また原文の意味を正しく伝えるために必要と思われた場合は、多少の加筆や修正、訳注を付した。

ICRU Report 95の翻訳をICRP翻訳委員会が行ったのは、ICRP刊行物と密接な関係があるからである。ICRUは、ICRPが勧告する放射線防護体系を実践可能なものにするために、これまでもICRPと共同で実用量の開発を行ってきた。ICRU Report 95は、実効線量などの防護量が測定できない量であることを踏まえ、ICRP2007年勧告以後、防護量に代わる新たな実用量をICRPと共に開発してきた。つまり、ICRU Report 95は、ICRUレポートではあるが、30年以上前に定義された実用量を改訂したICRPとの合同レポートである。

最近刊行されたICRP Publication 147「放射線防護における線量の使用」では、吸収線量、等価線量、実効線量など放射線防護で登場する線量についてより明確に解説する一方で、新しい考え方も導入された。その中で実用量も説明され、ICRU Report 95はICRP Publication 147を補完するレポートとして位置付けられている。

防護量や利用分野の変化は、ICRUが実用量を再検討する動機となっている。防護量の変化は、放射線防護の基礎となる放射線リスクの科学的な知見の発展によるものである。そのため、防護量の見直しによって、放射線加重係数や組織加重係数が改訂されてきた。一方、放射線防護は、加速器や宇宙といった高エネルギー放射線場で生じる粒子線を含んだ幅広い範囲のエネルギーをもった放射線を対象とするようになってきた。

線量は放射線防護を実践する上で基本となる量であることから、実用量に対する関心は高く、その議論は放射線機器の開発や校正の点から活発である。実用量は、放射線防護の実践の場において、放射線防護の目的に適う合理性があり、広く浸透させるための導入方法については、今後も引き続き議論されていくであろう。そのためにも、放射線規制関係者から現場の放射線管理を実践する担当者まで、実用量の理解が浸透するよう、本報告書がガイドラインとして活用されることを期待している。

本レポートの翻訳に際して翻訳委員会で検討した訳語がある。[Particle Radiance] の訳語は翻訳委員会で検討した結果、「粒子ラジアン」<sup>1</sup>とした。Radiance は、教科書などによっては「放射量」や「放射強度」と訳されている。ただし、この訳語が定着していないこと、[Particle Radiance] という用語は、「指定された方向を中心とした立体角  $d\Omega$  内を伝搬する粒子のフルエンス率」であると定義され、そこに登場する [Fluence] も訳語をあてずそのままを使用され定着した用語となっていることを考慮してあえて原語のままに訳した。今後、この用語が定着していくことを期待している。

なお、当翻訳事業において、すでに述べたように本邦訳版と関連性の強い ICRP Publication 147 Use of dose quantities in radiological protection（邦題：放射線防護における線量の使用）の邦訳版も令和 7 年度に公開予定である。併せて参考としてほしい。

本書の翻訳の進行と編集は、事務局の日本エヌ・ユー・エス株式会社が担当した。

当翻訳事業の成果は、すべて ICRP のウェブサイトにて PDF 版にて公開される。また、原子力規制委員会も、令和 2 年度から当翻訳事業で翻訳した ICRP の出版物を以下の URL で公開している ([https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku\\_04.html](https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku_04.html))。

この翻訳が、我が国の放射線防護に資することを、完成までの過程に携わったすべての方々とともに心より願うものである。

2026（令和 8）年 2 月

ICRP 刊行物翻訳委員会  
委員長 甲斐 倫明

原子力規制庁  
国内規制に係る国際放射線防護委員会刊行物の調査事業  
ICRP 刊行物翻訳委員会

委員長	甲斐 倫明 <sup>1)</sup>	(日本文理大学)
副委員長	鈴木 元	(保内郷メディカルクリニック)
	佐々木道也	((一財)電力中央研究所)
委員	大野 和子	(京都医療科学大学)
	小田 啓二	((一財)電子科学研究所)*
	川口 勇生	((国研)量子科学技術研究開発機構)
	木内 伸幸 <sup>3)</sup>	((国研)日本原子力研究開発機構)
	迫田 幸子 <sup>1)</sup>	(前(公社)日本アイソトープ協会)
	佐々木康人 <sup>6)</sup>	(前 湘南鎌倉総合病院 湘南先端医学研究所)
	谷村 嘉彦 <sup>5)</sup>	((国研)日本原子力研究開発機構)
	半谷 英樹 <sup>4)</sup>	((国研)日本原子力研究開発機構)
	福永 久典 <sup>7)</sup>	(北海道大学)
	保田 浩志	(広島大学原爆放射線医科学研究所)

\*本書の校閲担当

監修者

---

細野 眞	(ICRP 主委員会, 前 ICRP 第 3 専門委員会, 近畿大学)
甲斐 倫明	(前 ICRP 主委員会, 日本文理大学)
丹羽 太貫	(元 ICRP 主委員会, (公財)放射線影響研究所)
小笹晃太郎	(前 ICRP 第 1 専門委員会, 京都府立医科大学)
島田 義也 <sup>2)</sup>	(ICRP 第 1 専門委員会, (公財)環境科学技術研究所)
佐藤 達彦	(ICRP 第 2 専門委員会, (国研)日本原子力研究開発機構)
米倉 義晴	(元 ICRP 第 3 専門委員会, 浜松 PET 診断センター)
吉田 浩子 <sup>2)</sup>	(ICRP 第 4 専門委員会, 東北大学)
本間 俊充	(元 ICRP 第 4 専門委員会, 元日本原子力研究開発機構)
齋藤 則生	(前 ICRU 委員, (国研)産業技術総合研究所)

<sup>1)</sup> 2021 年 4 月から, <sup>2)</sup> 2021 年 9 月から, <sup>3)</sup> 2022 年 3 月まで, <sup>4)</sup> 2022 年 4 月から 2023 年 3 月まで, <sup>5)</sup> 2023 年 4 月から, <sup>6)</sup> 2025 年 3 月まで, <sup>7)</sup> 2025 年 4 月から



## 目 次

	頁
序 文 .....	ix
用語解説および基本量の定義 .....	xiii
抄 録 .....	xix
総 括 .....	xxi
1. はじめに .....	1
1.1 本報告書の発行の経緯と範囲 .....	1
1.2 報告書の概要 .....	3
2. ICRP Publication 103 の防護量と ICRU Report 39/51 の実用量 .....	5
2.1 防 護 量 .....	5
2.2 実用量の目的 .....	5
2.3 ICRU Report 39/51 の実用量 .....	6
2.4 ICRU Report 39/51 の実用量の限界 .....	7
3. 外部被ばくに対する実用量 .....	11
3.1 実用量の勧告の根拠 .....	11
3.2 周 辺 線 量 .....	12
3.3 周辺線量率 .....	12
3.4 方向性水晶体吸収線量 .....	12
3.5 方向性水晶体吸収線量率 .....	13
3.6 方向性局所皮膚吸収線量 .....	13
3.7 方向性局所皮膚吸収線量率 .....	14
3.8 個 人 線 量 .....	14
3.9 個人水晶体吸収線量 .....	15
3.10 個人局所皮膚吸収線量 .....	15
3.11 ま と め .....	16
4. 換 算 係 数 .....	19
4.1 緒 論 .....	19

4.2 全 般	19
4.3 換算係数の計算	19
4.3.1 周辺線量への換算係数の計算	20
4.3.2 個人線量への換算係数の計算	20
4.3.3 水晶体吸収線量への換算係数の計算	20
4.3.4 局所皮膚吸収線量への換算係数の計算	21
4.4 今回勧告の実用量と ICRU Report 39/51 の実用量の比較	21
4.4.1 総 論	21
4.4.2 周辺線量と個人線量	22
4.4.3 方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量	25
4.4.4 方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量	26
5. 今回勧告の実用量導入による実際の影響	29
5.1 緒 論	29
5.2 個人線量計とエリアモニタリング機器の設計	29
5.2.1 ICRU Report 39/51 の実用量に関し必要とされる個人線量計の応答特性	30
5.2.2 今回勧告の実用量に対する光子線量計とエリアモニタリング機器の応答特性	30
5.2.3 今回勧告の実用量に対する中性子個人線量計とエリアモニタリング機器の応答特性	31
5.2.4 個人線量計とエリアモニタリング機器の再設計に関する結論	32
5.3 個人線量計とエリアモニタリング機器の校正	33
5.3.1 校正手順の解説	33
5.3.2 個人線量計の校正ファントム	34
5.3.3 光子の校正に関する特別な規定	34
5.3.4 ICRU 球の役割	34
5.4 放射線防護の質に対する今回勧告の実用量の影響	35
5.5 今回勧告の実用量が線量記録に及ぼす影響	35
5.6 将来の変更の可能性	36
6. 結 論	37
付 属 書	39
付属書 A 換算係数の値	39
A.1 周 辺 線 量	39
A.2 個 人 線 量	46
A.3 方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量	57
A.4 方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量	64
A.5 荷電粒子平衡状態の放射線場における 50 MeV 未満のエネルギーの光子の実用量	89

A.6 空気カーマ .....	104
付属書 B 計算コードの説明 .....	105
B.1 PHITS .....	105
B.2 FLUKA .....	105
B.3 MCNP .....	106
B.4 EGSnrc .....	107
B.5 換算係数の計算における不確かさ .....	108
付属書 C 水晶体吸収線量の新しい換算係数 .....	108
C.1 方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量, 感受性の高い細胞の吸収線量 $d_{\text{lens sens}}$ .....	108
C.2 荷電粒子平衡状態の放射線場における 50 MeV 未満のエネルギーの光子 .....	117
参考文献 .....	121



## 序 文

### 外部放射線被ばくに対する実用量

国際放射線防護委員会 (ICRP) は、職業的に被ばくする人々と公衆の線量限度および放射線防護の最適化のため防護量を勧告している (ICRP, 2007)。防護量は生体組織や空間の広い領域に対して定義されており、空間線量と個人線量を測定する機器の校正には適さない。そのため、防護量に代わる量、すなわち実用量が国際放射線単位測定委員会 (ICRU) によって定義されている。これらは1点で定義される量である。

歴史的に、吸収線量指標と線量当量指標は、外部放射線への被ばくに対する実用量として ICRU Report 19 (1971a) で勧告されていた。ICRU Report 20 (1971b) では、MADE (照射された人体における最大線量当量, maximum dose equivalent in an irradiated body) の使用が検討されている。実用量のさらなる発展として、ICRU Report 39 (1985) と Report 43 (1988) にて、周辺線量当量、方向性線量当量、および個人 (individual) 線量当量が実用量として定義された。ICRU Report 51 (1993) では、個人モニタリングの関係量が一部変更され、個人 (individual) 線量当量が個人 (personal) 線量当量に変更された。これらの量の適用に関する情報は、光子と電子に関しては ICRU Report 43 (1988) と Report 47 (1992)、中性子に関しては Report 66 (2001) で示された。放射計測量と線量計測量\*からのこれらの量への換算係数の値は、ICRU Report 43 と 47、ICRP と共同で ICRU Report 57 (1998) と ICRP Publication 74 (1996) において公表された。

ICRP は、Publication 103 (ICRP, 2007) において、ICRP Publication 60 (1990) で導入された実効線量を含む防護量が見直された。これら改訂された防護量への物理量から

の換算係数は、ICRP Publication 116 (2010) で公表されている。そこでは、宇宙放射線や粒子加速器でのみ生じるものを含む様々な種類の放射線、また、場合によっては最大 200 GeV に達するエネルギー範囲に対する換算係数が発表された。ICRP Publication 116 では、ICRU Report 39 と 51 で導入された実用量が防護量から大きく乖離している光子と中性子のエネルギー範囲を特定した。

ICRU Report 39 と 51 の実用量は、核燃料サイクル (ウラン加工, 原子力発電所, および核廃棄物の貯蔵と再処理) で生じる光子 (50 keV ~ 3 MeV) と中性子 (熱中性子—20 MeV) のエネルギー範囲に対する防護量の容認できる推定値を示したものである。その他の放射性核種の利用分野についても、これらの実用量を用いることで十分にカバーされていた。しかし、過去 20 年間で、医療および研究、ならびに商業飛行において、電離放射線に被ばくする作業者の数が増加しており、既存の実用量を用いて測定されるよりも低エネルギーまたは高エネルギーの放射線に被ばくしている。これらの作業者の職業被ばくの放射線防護には、防護量の適切な推定値となる実用量が必要である。

このような防護量や利用分野の変化は、ICRU が実用量を再検討する動機となった。本 ICRU 報告書は、防護量の定義と同じファントムに基づいて実用量を定義することで、定義上、防護量の良い推定値となる新しい手法を勧告する。本報告書は新たな量を紹介するとともに、高エネルギー放射線場でのみ生じる粒子を初めて含めた、幅広い範囲の粒子とエネルギーに対する換算係数を提供する。

\*訳注) いくつかの訳があるが、radiometric quantities は「放射計測量」、dosimetric quantities は「線量計測量」とした。

Nolan E. Hertel  
David T. Bartlett



## Günther Dietze 博士（1937年～2015年）に捧ぐ



Günther Dietze 博士は 2015 年 1 月 25 日に逝去した。

Dietze 博士は、Report 85a「電離放射線に関する基本量および単位」を最近発行した国際放射線単位測定委員会（ICRU）の基本量・単位委員会委員であり、Report 47「外部光子および電子放射線からの線量の測定」と Report 57「外部放射線に対する放射線防護に使用するための換算係

数」を作成した。彼は本報告書の作成に大いに貢献した。

彼は、ドイツのブラウンシュヴァイクにあるドイツ連邦物理工学研究所（Physikalisch-Technische Bundesanstalt）において、放射能、医療用放射線の線量計測、放射線防護における線量計測、ならびに中性子計測を担当する電離放射線部の部長を務めた。中性子線量計測に強い関心を持ち、検出器とスペクトル計測器に関する多くの論文を発表した。ドイツ放射線防護委員会の委員であった Dietze 博士は、後に委員長となり、さらに EURATOM 条約第 31 条に基づいて設立された専門家グループの委員となった。Dietze 博士は EURADOS の初代理事会理事の一人であり、1991 年から 2001 年に議長を務めた。

Dietze 博士は、多くの国内および国際委員会に所属すると共に、ICRP の第 2 専門委員会の委員として、ICRP Publication 103「国際放射線防護委員会の 2007 年勧告」をはじめとするいくつかの刊行物を作成したタスクグループと専門委員会に大いに貢献した。また、Publication 123「Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space（宇宙における宇宙飛行士の放射線被ばく評価）」を作成した専門委員会の委員長を務めた。専門誌 Radiation Protection Dosimetry では編集顧問でもあった。

Dietze 博士を失ったことは、線量計測のコミュニティにとって大きな損失である。



## 用語解説および基本量の定義

見出し語は五十音順で配列。

原著の配列順による見出し語訳は本項末尾を参照。

### ICRP および ICRU の成人の人体形状標準コンピュータファントム [ICRP and ICRU Adult Anthropomorphic Reference Computational Phantoms]

ICRP および ICRU の人体形状標準コンピュータファントムは、ICRP Publication 110 (2009) で説明されている人体モデルであり、その解剖学的生理学的特性は ICRP Publication 89 (2002) に定義されている。男性と女性の 2 種類の成人の標準ファントムが定義されている。ICRP Publication 110 のモデルは CT 画像に基づく直方体のボクセルの配列で表されている。その解剖学的構造は小さな 3 次元の体積素子で示され、体積素子は男性ファントムでは高さ 8.0 mm, 断面 2.137 mm × 2.137 mm, 女性ファントムでは高さ 4.84 mm, 断面 1.775 mm × 1.775 mm である。これらのボクセルの集合体は、推奨される組成や密度とともに人体の臓器や組織を規定するために使用され、ICRP Publication 110 (2009) に明記されている。

### ICRU 球 [ICRU Sphere]

ICRU 球 (ICRU, 1980) は、ICRU 4 元素組織から成る直径 300 mm の球である。

### ICRU 4 元素 (軟) 組織 [ICRU 4-Element (Soft) Tissue]

ICRU 4 元素 (軟) 組織 (ICRU, 1980) は密度が  $1 \text{ g cm}^{-3}$  で、酸素 76.2 %, 炭素 11.1 %, 水素 10.1 % および窒素 2.6 % という質量組成であり、この組織に

ついてその他の特性に関する仕様はない。

### カーマ [Kerma]

非荷電粒子に対するカーマ  $K$  (ICRU, 2011) は、 $dE_{p, \text{tr}}$  を  $dm$  で除した量であり、ここで、 $dE_{p, \text{tr}}$  は、物質の質量  $dm$  に対する非荷電粒子の入射によって  $dm$  の中で生成されたすべての荷電粒子の初期運動エネルギーの合計の平均値である。

$$K = \frac{dE_{p, \text{tr}}}{dm}$$

カーマの単位は  $\text{J kg}^{-1}$  である。カーマの単位の固有の名称は、グレイ (Gy) で、 $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$  である。カーマは物質への最初のエネルギー付与に関連する量であるが、吸収線量の近似値として使用されることがある。荷電粒子平衡が成立し、放射損失が無視でき、非荷電粒子のエネルギーが生成された荷電粒子の結合エネルギーより大きい場合には、カーマの数値は吸収線量の数値に近づく。

放射損失が無視できない場合、衝突カーマと呼ばれるカーマ関連量が吸収線量の近似として長い間使用されてきた (Attix, 1979a; 1979b)。衝突カーマ  $K_{\text{col}}$  は、生成された荷電粒子による放射損失を含まず、特定の物質における非荷電粒子のエネルギー  $E_p$  のフルエンス  $\Phi$  を用いて次式で表される。

$$K_{\text{col}} = \Phi E_p \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} = \Phi E_p \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} (1 - g) = K(1 - g)$$

ここで、 $\mu_{\text{en}}/\rho$  は質量エネルギー吸収係数、 $\mu_{\text{tr}}/\rho$  はエネルギー  $E_p$  の非荷電粒子に対する物質の質量エネルギー転移係数、 $g$  はその物質内の放射過程で喪失したであろう生成された荷電粒子の総運動エネルギーの割合である。

線量計測の計算では、衝突カーマ  $K_{\text{col}}$  は、エネルギーに関連する非荷電粒子フルエンスの分布  $\Phi_{E_p}$  で表すことができる。

$$\begin{aligned} K_{\text{col}} &= \int \Phi_{E_p} E_p \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} dE_p = \int \Phi_{E_p} E_p \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} (1-g) dE_p \\ &= K(1-\bar{g}) \end{aligned}$$

ここで、 $\bar{g}$  は、電子エネルギーについて、カーマ分布で平均された  $g$  の平均値である。

カーマ率  $\dot{K}$  は  $dK$  を  $dt$  で除した量であり、ここで、 $dK$  は時間間隔  $dt$  におけるカーマの増分であり、すなわち次式で表される。

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt}$$

カーマ率の単位は  $\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$  である。カーマ率の単位の固有の名称は、グレイ毎秒 ( $\text{Gy s}^{-1}$ ) である。

### 荷電粒子平衡 [Charged-Particle Equilibrium]

荷電粒子の最大飛程の範囲内において、粒子エネルギーに対する荷電粒子の分布が一定である場合、ある1点で荷電粒子平衡が成り立つ。荷電粒子平衡の条件下では、対象とする点における衝突カーマの値は吸収線量の値に等しい。

### 換算係数 [Conversion Coefficients]

防護量または実用量は、放射線場を記述する物理量に換算係数を乗じることによって計算される。換算係数という用語は外部被ばくの状態で使用され、内部線量評価では、線量と放射エネルギーの比は線量係数と呼ばれる。

外部被ばくでは、放射計測量であるフルエンスおよび線量計測量である空気カーマから、防護量または実用量を計算するために換算係数が与えられる。

### 機器の応答 [Response of an Instrument]

機器の応答  $R$  は、次の通り比として定義される。

$$R = \frac{G}{C}$$

ここで、 $G$  は個人線量計またはエリアモニタリング機器によって測定された量の表示値であり、 $C$  はその量の取決め真値である。

基準応答  $R_{r,0}$  は、基準条件下で基準放射線の試験を行う点において機器が測定した量の表示値と、その量の取決め真値との比と定義される。

基準応答の逆数が校正定数  $N_{r,0}$  である。

$$r = \frac{R}{R_{r,0}}$$

相対応答  $r$  は測定器  $R$  の応答と基準応答  $R_{r,0}$  との比である。

### 吸収線量 [Absorbed Dose]

吸収線量  $D$  (ICRU, 2011) は、 $d\bar{\epsilon}$  を  $dm$  で除した量であり、ここで、 $d\bar{\epsilon}$  は電離放射線によって質量  $dm$  の物質に付与される平均エネルギーである。したがって次式で表される。

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

吸収線量の単位は  $\text{J kg}^{-1}$  である。吸収線量の単位の固有の名称はグレイ ( $\text{Gy}$ ) である。

### 吸収線量率 [Absorbed Dose Rate]

吸収線量率  $\dot{D}$  (ICRU, 2011) は、 $dD$  を  $dt$  で除した量であり、ここで、 $dD$  は時間間隔  $dt$  における吸収線量

の増分である。

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

吸収線量率の単位は  $\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$  である。吸収線量率の単位の固有の名称は、グレイ毎秒 ( $\text{Gy s}^{-1}$ ) である。

### 実効線量 [Effective Dose]

実効線量  $E$  は、人体のすべての指定された臓器および組織における吸収線量の重み付けされた和 (ICRP, 2007) であり、次式で表される。

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

ここで、 $w_T$  は確率的影響による放射線損害 (デトリメント) 全体に対する個々の組織および臓器の寄与を表すために選ばれた、性について平均化された組織加重係数である。線量の総和は、確率的影響の誘発に感受性があると考えられる臓器および組織に対して実施する。 $D_{T,R}$  は臓器等価線量の項に定義される通りである。

実効線量の定義において使用される組織加重係数  $w_T$  は、全体的な確率的デトリメント、主にがん死亡率に対する個々の臓器および組織の寄与を表す丸められた値である。組織加重係数は疫学的研究 (ICRP, 2007) から得られた相対的なデトリメントの年齢、性別、集団で平均された値に基づいている。実効線量の単位は  $\text{J kg}^{-1}$  である。実効線量の単位の固有の名称は、シーベルト (Sv) である。

### 臓器等価線量 [Organ Equivalent Dose]

防護量である臓器等価線量は、指定された臓器または組織  $T$  の体積中の放射線の種類  $R$  による平均吸収線量  $D_{T,R}$  に基づき定義されている。 $R$  は、人体に入射する、もしくは人体内に存在する放射性核種によって放出される放射線の種類およびエネルギーを表す。次

いで、臓器または組織の防護量である臓器等価線量  $H_T$  は、以下によって定義される。

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

ここで、 $w_R$  は、放射線  $R$  の放射線加重係数である。関与するすべての種類の放射線が合計される。臓器等価線量の単位は  $\text{J kg}^{-1}$  で、固有の名称はシーベルト (Sv) である。

### 臓器または組織内の平均吸収線量 [Mean Absorbed Dose in an Organ or Tissue]

臓器または組織  $T$  内の平均吸収線量は  $D_T$  (ICRP, 2007) であり、以下により定義される。

$$D_T = 1/m_T \int D dm$$

ここで、 $m_T$  は臓器または組織の質量であり、 $D$  は質量要素  $dm$  の吸収線量である。この積分は臓器または組織全体にわたりに行う。平均吸収線量の単位はジュール毎キログラム ( $\text{J kg}^{-1}$ ) であり、その固有の名称はグレイ (Gy) である。

局所の皮膚と眼の水晶体は実効線量への寄与が小さいか全くない2つの臓器および組織であるが、しきい線量より上で起こる確定的影響または組織反応を予防するために注意を払わなければならない。

### 付与エネルギー [Energy Imparted]

ある体積中の物質の付与エネルギー  $\epsilon$  (ICRU, 2011) は、その体積中に存在する全エネルギー沈着量の合計であり、次式で表される。

$$\epsilon = \sum_i \epsilon_i$$

ここで、その体積中の全エネルギー沈着  $\epsilon_i$  が合計される。付与エネルギー  $\epsilon$  の単位は J である。この量  $\epsilon$  は eV で表すこともできる。

付与エネルギー  $\varepsilon$  は確率量である。合計されるエネルギー沈着は、1つまたはそれ以上のエネルギー沈着事象に属することができ、例えば、1つまたはいくつかの独立した粒子軌跡に属する可能性がある。エネルギー沈着事象という用語は、関連する粒子による物質へのエネルギーの付与を意味する。例えば、陽子とその二次電子、電子-陽電子対、または核反応における一次粒子および二次粒子などである。

ある体積における物質の付与エネルギーは、それが単一のエネルギー沈着事象によるものである場合は、そのエネルギー沈着事象に関連する体積内におけるエネルギー沈着の合計に等しい。ある体積内の物質の付与エネルギーが、いくつかのエネルギー沈着事象によるものである場合は、各エネルギー沈着事象によって体積内の物質に付与された個々のエネルギーの合計に等しい。

ある体積の物質に付与された放射エネルギー  $\bar{\varepsilon}$  は、体積に入るすべての荷電粒子および非荷電離粒子の平均放射エネルギー  $R_{in}$  から、体積から出ていくすべての荷電粒子と非荷電粒子の平均放射エネルギー  $R_{out}$  を差し引いたものに、その体積において生じた原子核および素粒子の静止エネルギー変化量の平均総和  $\sum Q$  を加えたものに等しい ( $Q > 0$ : 静止エネルギーの減少;  $Q < 0$ : 静止エネルギーの増大)。したがって、次式で表される。

$$\bar{\varepsilon} = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

## フルエンス [Fluence]

フルエンス  $\Phi$  (ICRU, 2011) は、 $dN$  を  $da$  で除した商であり、ここでの  $dN$  は断面積の  $da$  の球に入射する粒子の数である。すなわち、

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

フルエンスの単位は  $m^{-2}$  である。

線量計測の計算では、フルエンスは粒子軌道の長さに関連付けて表されることが多い。フルエンス  $\Phi$  は次式で表される (Papiez and Battista, 1994 とその参考文献)。

$$\Phi = dl/dV$$

ここで、 $dl$  は体積  $dV$  内の粒子軌道の長さの合計である。

エネルギーに対するフルエンスの分布  $\Phi_{E_p}$  は、次式で表される。

$$\Phi_{E_p} = \frac{d\Phi}{dE_p}$$

ここで、 $d\Phi$  は  $E_p$  と  $E_p + dE_p$  の間のエネルギー区間における粒子のフルエンスである。フルエンスのエネルギー分布の単位は  $m^{-2} \cdot J^{-1}$  である。

一定の状況においては微小立体角  $d\Omega$  を含む量が必要とされる。フルエンスの二重微分を完全に表すと  $\Phi_{E_p, \Omega}(E_p, \Omega)$  となり、 $\Omega$  は粒子の進む方向である。

## フルエンス率 [Fluence Rate]

フルエンス率  $\dot{\Phi}$  (ICRU, 2011) は、 $d\Phi$  を  $dt$  で除した量であり、ここで  $d\Phi$  は時間間隔  $dt$  における粒子フルエンスの増分である。すなわち、

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt}$$

フルエンス率の単位は  $m^{-2} s^{-1}$  である。

## 粒子エネルギー [Particle Energy]

本報告書では、実効線量  $E$  と区別するため、粒子エネルギーと光子エネルギーの量を  $E_p$  と表す。ここで粒子エネルギーは運動エネルギーを示す。

## 粒子ラジアン [Particle Radiance]

粒子ラジアン  $\dot{\Phi}_{\Omega}$  (ICRU, 2011) は,  $d\dot{\Phi}$  を  $d\Omega$  で除した量であり, ここで,  $d\dot{\Phi}$  は, 指定された方向を中心とした立体角  $d\Omega$  内を伝播する粒子のフルエンス率である。すなわち,

$$\dot{\Phi}_{\Omega} = \frac{d\dot{\Phi}}{d\Omega}$$

粒子ラジアンスの単位は  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$  である。粒子エネルギーの放射量分布は, 次式で表される。

$$\dot{\Phi}_{\Omega, E_p} = \frac{d\dot{\Phi}_{\Omega}}{dE_p}$$

ここで,  $d\dot{\Phi}_{\Omega}$  は  $E_p$  と  $E_p + dE_p$  の間のエネルギーの粒子の粒子放射量である。ここで,  $d\dot{\Phi}_{\Omega}$  は  $E_p$  と  $E_p + dE_p$  の間のエネルギーの粒子の粒子放射量である。 $\dot{\Phi}_{E_p, \Omega}$  は, 放射線輸送の理論では, 角度束または位相束と呼ばれることもある。

この状況において重要度が低い側面 (たとえば偏光) を除き, ある粒子タイプの放射線場は, 完全に粒子エネルギーに関連する粒子放射量  $\dot{\Phi}_{\Omega, E_p}$  の分布により定められる。これは, ある方向に伝播する粒子の数, エネルギー, 局所密度, および到達率はその分布により定義されるためである。この量は, エネルギーに関連したラジアンスの分布とともに, 放射線計測における基本として考えることができる。

## 用語解説の見出し語

〈原著配列順〉

Particle Energy	粒子エネルギー	Response of an Instrument	機器の応答
Charged-Particle Equilibrium	荷電粒子平衡	Kerma	カーマ
ICRU 4-Element (Soft) Tissue	ICRU 4 元素 (軟) 組織	Energy Imparted	付与エネルギー
ICRU Sphere	ICRU 球	Absorbed Dose	吸収線量
ICRP and ICRU Adult Anthropomorphic Reference	ICRP および ICRU の成人の	Absorbed Dose Rate	吸収線量率
Computational Phantoms	人体形状標準コンピュータファントム	Mean Absorbed Dose in an Organ or Tissue	臓器または組織内の平均吸収線量
Fluence	フルエンス	Organ Equivalent Dose	臓器等価線量
Fluence Rate	フルエンス率	Effective Dose	実効線量
Particle Radiance	粒子ラジアン	Conversion Coefficients	換算係数



## 抄 録

外部被ばくに対する放射線防護のための測定可能な実用量は、その性質上、測定不可能な防護量を補完するものである。実用量は、測定または計算によって放射線場の予測のおよび遡及的評価に使用される。個人線量計とエリアモニタリング機器は、実用量を示すように設計されており、実用量に関連付けられる放射線標準場で日常的に校正されている。

国際放射線単位測定委員会 (ICRU) Report 39 (1985), Report 43 (1988) および Report 51 (1993) における個人線量当量および周辺線量当量という実用量の定義は、70 keV から 3 MeV までのエネルギー範囲の光子について、国際放射線防護委員会 (ICRP) の防護量である実効線量 (2007) の容認できる推定値を与えるものである。これより低い、または高い光子エネルギーでは、ICRU Report 39/51 で定義された実用量は、それぞれ、防護量の著しい過大評価、または過小評価を示している。さらに、実用量

への換算係数は、光子、電子、中性子という限られた粒子についてしか与えられていない。

本報告書では、これまでよりも防護量をより良く推定できる実用量の新しい定義を勧告する。広いエネルギー範囲の光子、電子、中性子、陽子、ミュー粒子\*<sup>1</sup>、パイ中間子\*<sup>2</sup> およびヘリウムイオンに対して、放射線場を記述する物理量——フルエンス、および光子については空気カーマ——からの換算係数を与える。本報告書は、機器の製造者および開発者がこれらの勧告に準拠した正確な測定値を提供できるよう、線量計と機器の更新に取り組むことを勧告する。また、本報告書は、国際機関と国の当局が次のことを認識すべきであることも勧告する。測定における防護量とより整合性の高い実用量の体系を実現するにあたっては、実施のコストと実現による便益とのバランスをとるため、段階的で慎重な時間をかけた適用が必要であろう。

\*訳注 1) ミュオンとも呼ばれる。

2) パイオンとも呼ばれる。



## 総 括

現在の世界各国における放射線防護規制は、ICRP Publication 26 (1977)における、電離放射線に対する人の被ばくにおける正当化、線量限度、最適化の3つの基本原則に基づいている。線量限度と最適化の原則を実践するためには、被ばく線量を定量的に測定することが必要である。このため、1978年にICRPは、防護量を実効線量当量  $H_E$  と定義した。ICRP Publication 60 (1991)では、 $H_E$  は実効線量  $E$  に置き換えられた。 $E$  は、 $H_E$  と同様に全身被ばくの指標であり、被ばく限度の設定や、放射線により誘発される確率的影響の制御に最適化の原則を実装する上で定量的な指針として国際的に使用されている。

全身への実効線量は以下のように定義される。

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (1)$$

すべての入射放射線の種類  $R$  に関し、人体の特定された組織と臓器  $T$  の平均吸収線量  $D_{T,R}$  はそれぞれ放射線加重係数  $w_R$  によって重み付けされる。これを組織または臓器  $T$  に対する等価線量と呼ぶ。実効線量  $E$  は、確率的損害（デトリメント）の合計に対する臓器と組織の相対的寄与を考慮するために組織加重係数を用いて重み付けされた等価線量の平均である（すなわち、全  $w_T < 1$  であり、 $\sum w_T = 1$ ）。

外部放射線の被ばくによる実効線量は、放射線場を特徴づける量、通常は粒子フルエンス、光子については空気カーマに関連付けられている。放射線場の量を実効線量に関連付ける換算係数  $h$  は、入射放射線場の8つの標準とする幾何学的方向（ICRP, 2010）について、数学的な人体形状標準ファントム（ICRP, 2009）で式（1）を数値的に評価することにより算出されている。

防護量としての実効線量は、1つの点で定義されるので

はなく、臓器と全身の平均線量として定義される。したがって、直接測定することができない。国際放射線単位測定委員会（ICRU）は、防護量を補完する外部被ばくの実効線量の推定値として、線量当量に基づく（測定可能な）実用量を定義した（ICRU Report 39 (1985), ICRU Report 51 (1993)）。線量当量は吸収線量と線質係数の積として定義される。

$$H = \int_{-\infty}^{\infty} Q(L) D_L(d) dL \quad (2)$$

吸収線量  $D$  は、身体またはファントムにおいて表面から指定された深さ  $d$  にある点で評価される。全身モニタリングでは  $d$  は 10 mm が選択される。線質係数  $Q$  は、相互作用点における粒子の線エネルギー付与（LETまたは  $L_{\infty}$ ）の関数である（ICRU, 1993）。

ICRU Report 39/51 の実用量の体系では、個人（個人線量当量）とエリア（方向性線量当量と周辺線量当量）の放射線モニタリングの量を区別している。個人線量当量  $H_p(d)$  は、「身体上の代表的な場所」の深さ  $d$  mm（通常 10 mm）で定義されるが、方向性線量当量と周辺線量当量  $H'(d)$  は、ICRU 4 元素組織で作られた直径 30 cm の ICRU 球における指定された深さで定義される（ICRU, 1993）。周辺線量当量は、すべての放射線場のベクトルを仮想的に拡張・整列させることにより放射線の入射方向による角度依存が生じないようにしている。

防護量と実用量は、その定義と放射線場の量からそれぞれの係数を計算するために使用されるファントムが異なる：

1. 実効線量と実用量の換算係数の計算は、従来から現在までファントムと放射線輸送コードを用いて行われている。臓器と組織への等価線量、すなわち実効

線量に対しては、人体形状ファントムが使用され、より近年ではICRP/ICRUの標準成人ファントム(ICRP, 2010)が使用されている。実用量への換算係数(放射線防護モニタの校正に使用)の計算には、幾何学的により単純なファントムが用いられる。すなわち、周辺線量当量にはICRU球、個人線量当量にはスラブファントム(300 mm × 300 mm × 150 mm)が使用されてきた。その幾何学的・構造的違いにより、実用量の測定から得られる実効線量の推定値の品質に限界が生じている。ICRU球は、実効線量の計算に用いられる人体形状ファントムとその解剖学的構造にほとんど似ていない。

2. 定義された深さ  $d$  の個人および周辺線量当量の1点における評価は、人体の幾何学的な解剖学的複雑さ、および、指定された臓器と組織の等価線量の重み付けされた平均値としての人体形状標準ファントムにおける  $E$  の換算係数の計算が反映されていない。
3. 線量当量の計算に使用される線質係数  $Q(L)$  は、等価線量と実効線量に使用される放射線加重係数  $w_R$  とともに、さまざまな種類の放射線の効果の違いを考慮するために使用される。しかしながら、それらは異なる考え方に基づいており、完全に同等ではない。
4. これまでに公表され、広く適用されてきた光子に関する実用量の換算係数は、カーマ近似で計算されてきた。この単純化された方法は、高いエネルギー光子に対して実用量による防護量の過大評価をもたらす。

定義(1)と(2)における違いが、ある種類の粒子とエネルギー範囲に対して実用量の測定値により実効線量を推定するには不十分とされる主な理由である。より一般的には、これらが、実効線量の換算係数と実用量の換算係数が異なる主な理由となっている。

本報告書は、外部放射線に対する実用量を、実効線量の推定値として用いる場合の欠点を克服する新しい定義を導入する。本報告書では、実用量を粒子フルエンスと換算係数の積として定義する(Endo, 2016)。これは次式で表さ

れる：

$$H = \Phi \cdot h_{\Phi} \quad (3)$$

実効線量の換算係数は、指定された入射方向についてICRP/ICRU成人標準ファントム(ICRP, 2009)で評価した実効線量の値をファントムがその空間にない場合の粒子フルエンスで除した値として計算され、換算係数は次式で表される：

$$h_E = E/\Phi \quad (4)$$

定義(3)および(4)は、実効線量の換算係数の値と実用量のそれに対応する値との数値的な整合性が良い。これは、防護量と実用量の算出に用いるファントムが今では同一であることが主な要因である。

個人線量  $H_p$  と呼ばれる各作業者の全身被ばくをモニタリングするための量は、粒子フルエンス  $\Phi$  と、エネルギーと角度に依存する換算係数  $h_p(E_p, \Omega)$  との積である。換算係数は、防護量の実効線量  $E$  と同じ人体形状ファントムを用いて計算される。換算係数は、個人線量計の角度依存性を評価できるように、身体表面のさまざまな入射角度に対して与えられる。当然ながら、同じ粒子エネルギーでは、 $H_p(E_p, 0^\circ)$  の値は  $E$  (AP) の値と等しい。

あるエリアにおける潜在的な実効線量を評価するための量(主に予測的に使われる)は、周辺線量  $H^*$  と呼ばれる。周辺線量は、粒子のあらゆるエネルギーにおいて、ICRP Publication 116 (2010)の人体形状ファントムへのさまざまな方向からの入射放射線に対する実効線量の最大値として定義される。さまざまな入射方向の中から最大値を選択することで、周辺線量の量は実効線量に近いが常に保守的な推定値となることを保証する。

放射線防護においては、確率の影響だけでなく、特に眼の水晶体や局所皮膚などの、より確定的な組織反応も制御する必要がある。それぞれについて、等価線量による個別の被ばく限度が設定されている。管理の実務において、眼の水晶体と局所皮膚の被ばくのモニタリングにも実用量が

使用されている。眼の水晶体の個人モニタリングには、実用量として個人線量当量  $H_p(3)$  が、局所皮膚には個人線量当量  $H_p(0.07)$  が使用されている。

眼の水晶体と局所皮膚の組織反応の制御に用いる実用量に関して、本報告書では、等価線量ではなく吸収線量に基づく量の方が、対象となる非確率的影響の制御にはより適切であることを提案する。実用量である個人水晶体吸収線量は、眼の等価線量への換算係数のこれまでの算出と同様に、眼の数学ファントムで定義される。個人局所皮膚吸収線量の定義は、体幹、腕、および指の単純化された数学ファントムに基づく。これらファントムは、量を定義するために使用されるとともに、換算係数ための明確な計算方法を提供している。

本報告書は、提案された量  $H^*$  および  $H_p$  への換算係数の値を、光子、電子、陽電子、中性子、アルファ粒子、正のミュー粒子／負のミュー粒子、ならびに正のパイ中間子／負のパイ中間子について広範囲で示している。本報告書で公表されているデータのエネルギー範囲は、ICRP Publication 116 で使用されているエネルギー範囲に対応し、実効線量の換算係数に関しては、最大 10 GeV までである。

確率的影響の制御のために提案された実用量の定義によって、換算係数のエネルギー依存性が変化している。そのため、線量計の校正定数の見直しが必要になる。たとえば、光子に対して ICRU Report 39/51 の実用量に基づき校正した個人線量計とサーベイメータは、70 keV 未満のエネルギーでは高すぎる感度を示す。50 keV から 3 MeV のよく利用されるエネルギー範囲では、単純な再校正で十分であろう。

本報告書は、外部被ばくに対する放射線防護における実用量の定義を大きく変更するものである。その結果、防護量と実用量の定義を整合させ、複雑で混乱を生じる可能性のある中間段階を省くことにより、放射線防護の実務で用いられる実用量の体系を単純化している。

本報告書の付属書に含まれている換算係数の広範囲にわたるリストは、広いエネルギー範囲を対象としており、今後の線量計測機器の設計や校正に確かな基礎を提供し、放射線場の予測的計算を可能にするであろう。これはまた、以前の刊行物に含まれていなかった種類の電離放射線について放射線防護を目的とするモニタリングの調和を図るのに役立つであろう。



# 1 はじめに

## 1.1 本報告書の発行の経緯と範囲

電離放射線による健康への影響の防護には、組織反応(確定的影響)の防止とがんや遺伝性影響のリスク(確率的影響)の制限が必要とされる。これらの必要性を満たすために、ICRP Publication 103 (2007)では、リスクに関連する線量計測量が定義されている。臓器等価線量は確定的影響を防止するための限度の設定に、実効線量は確率的影響に対する線量制限と防護の最適化に使用される。防護量は直接測定できないため、この目的のために定義された追加的な関連量の測定により評価される。外部放射線に対する職業上および環境における被ばくの制御のために、ICRUは測定と機器校正のための実用量を定義している。

ICRUにより定義されたReport 39 (1985)と51 (1993)における実用量は、1980年代と1990年代に最も重要なエネルギー範囲である光子、電子、中性子について、防護量の容認できる推定値を提供してきた。しかしながら、最近においては、現行の実用量では当該エネルギー範囲における防護量が大幅に過小評価または過大評価される、非常に高いエネルギーと非常に低いエネルギーの粒子についても考慮する必要性が高まってきた。ICRUと共著のICRP Publication 116 (2010)では、幅広い放射線の種類およびエネルギーについてフルエンスおよび空気カーマから防護量への換算係数を提供した。ICRP Publication 116では、ICRP 2007年勧告(Publication 103, 2007)に示された防護量の最新情報を適用して計算し、さらに、ICRUと共著のICRP Publication 110 (2009)で示された成人男性と成人女性の標準計算モデルの使用も導入した。このような経緯を経て、本報告書で実用量の計算手法の再評価や、単純化および拡張の提案を行っている。

ICRPの防護量(ICRP, 2007)の計算は3段階のプロセ

スからなり、まず身体の臓器・組織に対する平均吸収線量を算出し、次に臓器・組織に対する等価線量、そして実効線量を算出する。放射線の種類によって単位吸収線量あたりの健康影響を引き起こす効果が異なるため、第2段階で、吸収線量に放射線加重係数を乗じ臓器等価線量を算出することにより、その差を簡易的に調整する。臓器や組織によって、単位等価線量あたりの発がん感受性が異なるため、臓器や組織に対する等価線量に、確率的デトリメントに対する各臓器や組織の相対的デトリメントの値に基づく簡易的な調整値である組織加重係数を乗じ、臓器等価線量の加重平均値として実効線量を計算している。臓器等価線量は、眼および皮膚の局所被ばくの線量限度を設定するために使用される。実効線量は、線形しきい値なしの線量反応関係が仮定されている確率的影響に対する線量限度の設定と、防護の最適化のために使用される(ICRP, 2007)。

ICRUの実用量は、防護量の容認できる推定値を提供することを目的としている。ICRU Report 39 (1985), 43 (1988), 51 (1993)でICRUが勧告した外部放射線のモニタリングのための実用量は、個人モニタリング、および作業場と環境のエリアモニタリングの2つのグループに分けて導入された。被ばく状況を表すため、体内内の指定の深さまたは指定されたジオメトリ・深さのファントム内における線量当量が選択される。線量当量は、吸収線量と、相互作用点における粒子の線エネルギー付与の関数である線質係数との積として計算される。個人モニタリングの実効線量の尺度として使用される実用量は、人体における深さ10 mmの個人線量当量であり、作業場と環境に関しては、ICRU球における深さ10 mmの周辺線量当量である。眼の水晶体および局所皮膚に対する臓器等価線量の推定値として使用される実用量は、深さがそれぞれ3 mmと0.07 mmでの個人線量当量、ICRU球における同じ深さで

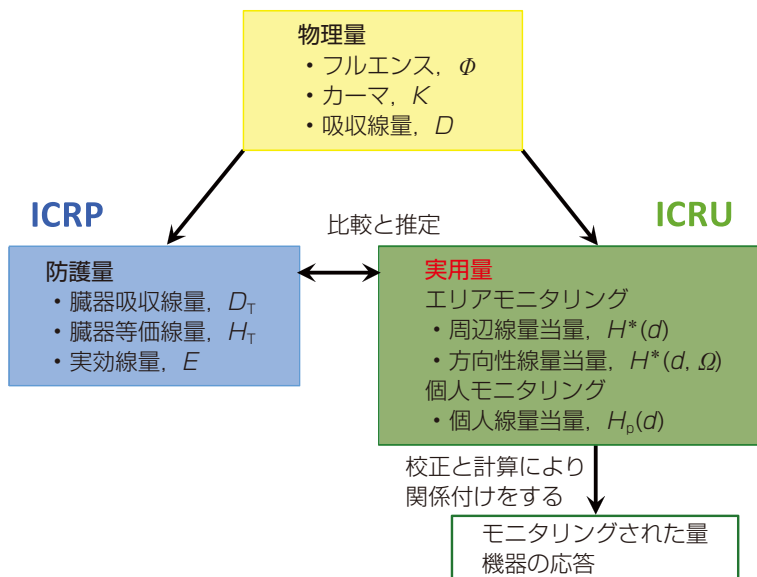


図 1.1 放射線防護に用いられる ICRP Publication 103 で定義された防護量と ICRU Report 39/51 の実用量との関係

の方向性線量当量である。

本報告書では、ICRU Report 39/51 の実用量の体系に代わり、ICRP/ICRU の人体標準ファントムを使用し、実用量と防護量の両方の計算の基礎として実用量がすべてのエネルギー範囲で防護量の尺度となることを保証できる、より単純な方式に置き換わることを勧告する。ICRP は現在、防護量の使用について再評価しており、臓器等価線量の計算に使用される放射線加重係数は確定的影響ではなく確率的影響に関係するため、組織反応（確定的影響）を防止するための線量限度は臓器等価線量ではなく吸収線量を用いることでより正確に設定されると提案している。この変更に合わせて、実効線量の尺度としての個人線量と周辺線量、および眼の水晶体と局所皮膚への局所吸収線量の尺度としての個人吸収線量と方向性吸収線量が勧告されている。ICRP Publication 116 (2010) は、10 GeV までのエネルギーの光子、中性子、電子、陽電子、陽子、負のミュー粒子と正のミュー粒子、200 GeV までのエネルギーの負のパイ中間子と正のパイ中間子、および  $100 \text{ GeV u}^{-1}$  までのエネルギーの  $\text{He}^{2+}$  イオンについて、フルエンスから実効線量への換算係数を提供している。本報告書では、上記と同じ粒子とエネルギーについて、フルエンスから実用量

の周辺線量と個人線量への換算係数を提供すると共に、光子、中性子、電子、陽電子、陽子については、エネルギーと角度への依存性を、ICRU Report 39/51 の方法論を用いて得られた値と比較検討した。ICRP Publication 116 と本報告書における新しい計算には、カーマ近似ではなく、完全な放射線輸送計算が用いられた。

本書で提案する実用量の変更は、線量計とモニタリング機器の設計や校正に影響を及ぼすが、必要な変更はある程度容易であるはずである。ICRP は次期主勧告を発表する際、防護量の変更だけを導入する予定であるが、最新の実用量を並行して導入することは適切であると思われる。勧告を安全基準や規制に取り入れるために要する時間を予想すると、準備には約 20 年かかる可能性がある。この期間は、線量計とエリアモニタリング機器の技術的寿命に比べてかなり長い。

図 1.1 は、ICRP Publication 103 に記載されている防護量と、ICRU Report 39/51 に記載されている実用量との関係を、図 1.2 は本報告書で勧告する実用量の関係を示している。防護量と実用量は、国家計量標準機関の一次標準によって得られる放射計測量と線量計測量に関連付けられる。

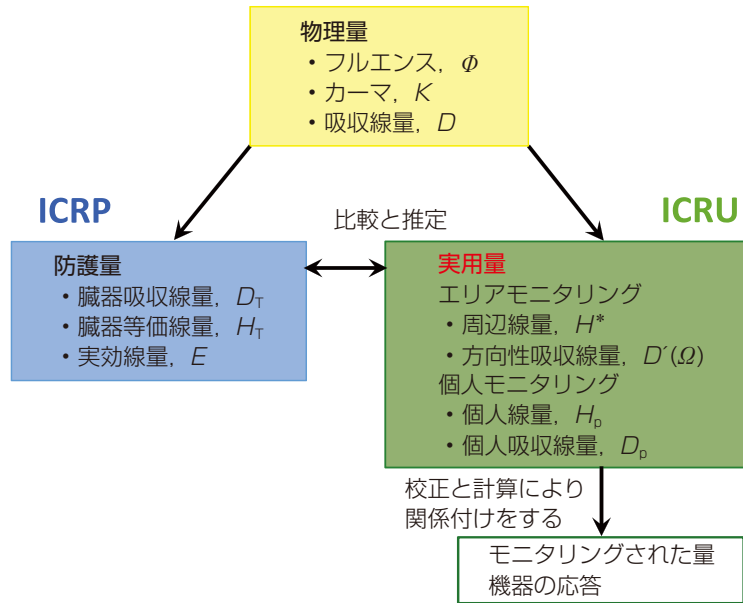


図 1.2 放射線防護に用いられる ICRP Publication 103 の防護量と本報告書で勧告する実用量との関係

## 1.2 本報告書の概要

防護量に対する測定可能な補完としての実用量の必要性を、第2章で説明する。ICRU Report 39/51における実用量の旧定義（実用量とは、ファントムにおける指定された深さでの吸収線量にLET依存の線質係数を乗じた評価に基づく）を概説し、これらの実用量の概念上の、また技術上の欠点を説明する。第3章では、本報告書で勧告する実用量の定義を示す。実用量は、外部放射線場を表す放射計測量と実用量を得るための換算係数との積に基づいており、これは、本報告書で説明した理由による今までの定義から考え方を変更するものである。第4章では、放射計測量から実用量への換算係数を紹介する。数値計算手法もここで説明する。ICRU Report 57 (1998) と ICRP Publication

74 (1996) で勧告されている実用量への換算係数および ICRU Report 39/51 に記されている実用量を、可能な限り比較して、その違いを明らかにする。第5章は、第4章での考察から得られた、本書で勧告する実用量の実施に伴う機器設計と校正の変更について扱う。第6章では、勧告する実用量から得られる改善に関する全般的な結論と、勧告する量が、高エネルギー光子、電子および中性子、他の種類の放射線場における防護の問題に対する解決策をどのように提供するかについて述べている。

付属書Aは、勧告する量の変換係数の表と図を掲載している。

付属書Bでは、計算に使用されたコンピュータプログラムについて説明する。

付属書Cは、眼の水晶体吸収線量の新しい換算係数を示す。



## 2 ICRP Publication 103の防護量とICRU Report 39/51の実用量

### 2.1 防護量

放射線防護には、電離放射線による人体の被ばくの定量化が必要である。このために、ICRPは、臓器または組織内の平均吸収線量 $D_T$ 、臓器／組織の等価線量 $H_T$ 、および実効線量 $E$ という防護量を定めている。防護量は、線量限度および最適化の原則の実施のために使用される。それらの最新の定義は、ICRP 2007年勧告（2007）において示されている。

ICRPの防護量である実効線量 $E$ は、放射線の確率的影響を制御するためのリスクに関連した唯一の量を与えると考えられ、被ばくした人の性別や個人のその他の性質に関係なく、同一条件で被ばくしたすべての人に有効である。放射性核種の摂取による内部被ばくも実効線量を用いて考慮される。

数百ミリグレイを超える吸収線量の値では、組織反応（確定的影響）が問題となり、いくつかの組織や臓器における吸収線量の評価が必要となる（Harrison *et al.*, 2016; ICRP, 2007; 2012）。ICRP（2007）では、眼の水晶体や局所皮膚の損傷を防ぐため、臓器等価線量について個別の線量限度を設定している。

ICRUと共同で発行されたICRP Publication 116（2010）では、これまでの共同刊行物（ICRP, 1996; ICRU, 1998）よりも広範囲の放射線の種類および粒子エネルギーについて、粒子フルエンスから防護量への換算係数を示している。ICRP Publication 116における防護量への換算係数は、従来の公表値に置き換えるものである。

### 2.2 実用量の目的

防護量は人体に関連付けられ、臓器と組織の平均として、

またその平均値の重み付けされた和として定義される。防護量は単一の点ではなく、より広い領域で定義されていることから、実際には測定できない。したがって、防護量は放射線被ばくの計測とモニタリングの量として直接使用することはできない。

ICRUは、本報告書において、さまざまな被ばく状況に対する防護量を補完する、一連の実用量を勧告している。実用量の役割は、予測的な管理措置の計画と最適化、ならびに法的規制の遵守に対する遡及的評価のため、防護量の容認できる推定値を提供することにある：

- 管理措置の計画と最適化における予測的使用：
  - 計画および現存被ばく状況における、周辺線量と周辺線量率、ならびに方向性水晶体吸収線量／吸収線量率および方向性局所皮膚吸収線量／吸収線量率の予測推定値を提供することによる。このような推定は、単純な計算から複雑なモンテカルロ放射線輸送計算の結果まで多岐にわたる。
  - 作業場または環境における周辺線量や方向性水晶体吸収線量と方向性局所皮膚吸収線量の測定に基づく評価のため。測定には、周辺線量率または方向性線量率で校正されたエリアモニタリング機器、あるいは実用量の周辺線量で校正された本目的のための個人線量計を用いる。
  - 被ばくした人々が受ける集団線量に関して、計画および現存被ばく状況における作業のスケジュールと手順を最適化するため。
- 従業員への放射線の影響を効果的に制御し、法規制を遵守しているかどうかを確認するための遡及的使用：
  - 個人被ばくを管理する実用量で校正された個人線量計を用いて、その人が受けた個人線量、個人水晶体吸収線量と個人局所皮膚吸収線量を測定するため。

- 自然および人工由来の環境中の放射線源からの公衆の放射線被ばくをモニタリングするため。利用例としては、エリアモニタリング機器を用いた原子力、医療、および他の施設の敷地境界での線量率モニタリングがある。

線量が線量拘束値を下回り、かつ線量限度を大きく下回る場合、評価と線量登録において、実用量の数値は日常的に防護量の数値に置き換えられる (ICRP, 2007)。線量が線量拘束値に近づく、または超える場合のみ、作業場、実用量から防護量への換算の不確かさ、実用量への換算係数に関する個人線量計の応答特性の不完全性を考慮し、防護量をより良く推定するためのより正確な情報が必要となる。

### 2.3 ICRU Report 39/51の実用量

ICRU Report 39/51の実用量は、ICRU Report 39 (1985) と 43 (1988) において導入され、Report 51 (1993) で改訂された。ICRU Report 43 と 47 (1988; 1992) で光子と電子に関し、ならびにICRU Report 66 (2001) で中性子に関し、機器の応答と校正手順に関する詳細な情報が記載されている。過去30年の間に、外部被ばくの測定に関わるICRUの実用量は、多くの国で放射線防護の指令や規制により導入・実施され、ほとんどの個人線量計とエリアモニタリング機器は、これらの実用量で校正されている。フルエンスからICRU Report 39/51の実用量への換算係数はICRU Report 57 (1998) とICRP Publication 74 (1996) に、10 GeVまでの中性子についてはICRU Report 66 (2001) において示されている。標準校正場の光子の空気カーマ、電子の組織吸収線量、および中性子フルエンスからの換算係数の値は、国際標準化機構 (ISO 8529-3:1998; 6980-3:2006; 4037-3:2019 を参照) およびICRU Report 66 (2001) において示されている。

ICRU Report 39/51の実用量の体系で、個人のモニタリング量、すなわち個人線量当量、および作業場または環境におけるモニタリング量、すなわち方向性線量当量と周辺線量当量を区別している。線量当量は、組織または臓器に

おける吸収線量と線質係数の積として定義される：

$$H = QD \quad (2.1)$$

吸収線量  $D$  は、体内またはファントム内で指定された深さ  $d$  で評価し、全身モニタリングでは 10 mm、眼の水晶体では 3 mm、局所皮膚では 0.07 mm である。さまざまな放射線の生物学的効果に対応する線質係数  $Q$  は、相互作用点での水中における線エネルギー付与 (LET または  $L_{\infty}$ ) の関数である。

個人線量当量  $H_p(d)$  は「身体上の代表的な場所」における指定された深さ  $d$  で定義され、方向性線量当量  $H'(d, \Omega)$  および周辺線量当量  $H^*(d)$  は、ICRU 球の深さ  $d$  で定義される。

方向性線量当量の定義は、測定機器が配置される評価領域において空間的に均一な放射線場の拡張を必要とした。周辺線量当量は、拡張し整列した放射線場が必要とされ、ここではある1点における放射線場はICRU球の表面に衝突する場へと拡張された。実際には、この定義により、測定器は等方的に均一な応答をすることが要求された。

表 2.1 は、実用量として定義された量の概要および実用量と防護量の関係を示している。

共同で公表したICRU/ICRP Report (ICRP, 1996; ICRU, 1998) における放射計測量および線量計測量から実用量への換算係数は、防護量の換算係数を算定するために使用したファントムとは異なるファントムで計算されている (表 2.2)。周辺線量当量  $H^*(10)$ 、方向性線量当量  $H'(3)$  と  $H'(0.07)$  にはICRU球を、個人線量当量  $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$ 、 $H_p(0.07)$  にはICRUの300 mm × 300 mm × 150 mmのスラブファントムを用いて計算した。最近では、眼の水晶体に対する個人線量当量  $H_p(3)$  の計算に直径200 mm、高さ200 mmの円柱ファントムが、局所皮膚に対する個人線量当量  $H_p(0.07)$  の計算に直径73 mm、高さ300 mmのピラー (柱状) ファントムと直径19 mm、高さ300 mmのロッド (棒状) ファントムが使用されている。

表 2.1 防護量 (ICRP, 2007) と ICRU Report 39/51 の実用量 (第 3 章で新しく関連量を勧告) との関係

	全 身	眼の水晶体	局所の皮膚
防 護 量	実効線量 $E$	水晶体等価線量 $H_{T\text{lens}}$	局所皮膚等価線量 $H_{T\text{local skin}}$
実 用 量			
エリアモニタリング	周辺線量当量 $H^*(10)$	方向性線量当量 $H'(3, \Omega)$	方向性線量当量 $H'(0.07, \Omega)$
個人モニタリング	個人線量当量 $H_p(10)$	個人線量当量 $H_p(3)$	個人線量当量 $H_p(0.07)$

表 2.2 放射線場の量 (フルエンス, 空気カーマ) から防護量 (ICRP, 2007) および ICRU Report 39/51 の実用量への換算係数を計算するために用いたファントム

	全 身	眼の水晶体	局所の皮膚
防 護 量	全身 ICRP/ICRU 成人標準ファントム (ICRP, 2009)	全身ファントムにおける眼のモデル (Behrens and Dietze, 2011)	100 mm × 100 mm × 100 mm 皮膚組織ファントム (ICRP, 2010)
実 用 量			
エリアモニタリング	ICRU 球, 直径 300 mm	ICRU 球, 直径 300 mm	ICRU 球, 直径 300 mm
個人モニタリング	スラブファントム 300 mm × 300 mm × 150 mm	円柱ファントム 直径 200 mm × 200 mm	スラブファントム 300 mm × 300 mm × 150 mm ピラーファントム 直径 73 mm × 300 mm ロッドファントム 直径 19 mm × 300 mm

注: 実用量に関する全てのファントムは, ICRU 4 元素組織から構成される。

## 2.4 ICRU Report 39/51 の実用量の限界

このように定義された実用量には, いくつかの不整合と限界があった。

- それぞれの定義の結果, 防護量と実用量との間に不整合が生じていた。
  - 周辺線量当量  $H^*(10)$  の定義に用いられた ICRU 球は, 防護量である実効線量  $E$  を定義するために使用される標準人体形状ファントムとまったく似ていない。
  - 個人線量当量  $H_p(d)$  は人体の深さ  $d$  で定義されているが, 換算係数はスラブ, 円柱, ロッドの単純な幾何学的体形で計算されている。
  - 実効線量  $E$  の定義と算出においては, 身体のさまざまな位置に臓器 (組織) がある人体の幾何学的な複雑さが明らかに考慮されているが, 1 点の深さ  $d = 10$  mm での個人および周辺線量当量の評価には

その複雑さが反映されていない。これにより, 中性子では, 1 MeV 未満の場合には  $E$  を過大評価, 10 MeV を超える場合には  $E$  を徐々に過小評価することとなった (ICRU, 1985)。

- 低い光子エネルギー ( $E_p < 70$  keV) では, 周辺線量当量と個人線量当量に対し 10 mm の深さ  $d$  を選択すると, 実効線量の大幅な過大評価につながった (図 2.1 参照)。その一方で, 実用量を表すためには低い光子エネルギーでは高い感度が必要とされるため, この範囲に対応できる個人線量計とエリアモニタリング機器を作製するのは困難であった。
- 1 MeV 未満の電子エネルギーの場合,  $H'(3)$  と  $H_p(3)$  の量は, 眼の水晶体の等価線量を過小評価することになり, これは眼の水晶体の放射線感受性が高い部分を考慮すると特に明らかであった。線量の過小評価は, 放射線の入射角が斜めでエネルギーが低いほど大きくなった (Behrens, 2012)。
- 線質係数  $Q(L)$  と放射線加重係数  $w_R$  は, 異なるタ

タイプの放射線に対して相対的な重み付けをするためのものであるが、これらの二つは一方は放射線効果の考え方、他方は放射線効果の測定という異なる考え方に基づいている。

このような不整合がある結果、ある範囲の粒子とエネルギーに関する防護量の推定が不十分となり、防護量と実用量の換算係数が全体的には乖離することとなった。

2. ICRP Publication 147\*は、防護量の使用について見直し、そして等価線量の計算に使用される放射線加重係数は組織反応ではなく確率的影響に関連付けられていることから、眼の水晶体と局所皮膚の損傷を防止するための限度は等価線量ではなく吸収線量で設定すべきであると提案した。対応する実用量もまた、吸収線量で定義されることになる。防護量と実用量については、必要に応じ、特定の健康影響に関係する吸収線量の生物学的効果比（RBE）の重み付けを適用することができる。

3. 光子に対する実用量の換算係数は、カーマ近似法（ICRP, 1996; ICRU, 1998）を用いて計算された。カーマ近似では、光子から標的に転換されたエネルギーは相互作用が起こった場所に沈着するとしている。この近似は、発生した電子によるエネルギーのさらなる移動を無視するが、これまで放射線防護の目的では十分と考えられてきたエネルギー範囲では容認できる結果となっている。カーマ近似の使用に起因する実用量と防護量との間の不整合は、以下の通りである：

- 高い光子エネルギー（ $d = 10 \text{ mm}$  で  $E_p > 3 \text{ MeV}$ ,  $d = 3 \text{ mm}$  で  $E_p > 740 \text{ keV}$ ,  $d = 0.07 \text{ mm}$  で  $E_p > 65 \text{ keV}$ ）では、カーマ近似法を用いて計算した場合、個人線量当量と周辺線量当量の値は、対応する防護量を過大評価していた。たとえば、65 keVを上回る場合の局所皮膚の実用量は、10 MeV光子の場合と比較して、90倍過剰に保守的であった（Veinot and Hertel, 2011）。

\* 訳注）原文では（公表予定）とされているが、2021年に刊行された。

- しかし、光子の個人線量当量  $H_p(10)$  と周辺線量当量  $H^*(10)$  を発生した電子の輸送を完全に考慮に入れて正しく計算すると、実効線量  $E$  を徐々に過小評価することとなった（図 2.1 参照）。

ICRU Report 57（1998）と ICRP Publication 74（1996）に記載されている実用量の換算係数は、限定されたエネルギー範囲の光子、中性子、電子のみを扱っている。換算係数の公表時に、高エネルギー放射線による計画被ばく状況と現存被ばく状況では粒子加速器の利用において重要であることは知られていたとともに、様々な種類の高エネルギー放射線による被ばくが起り得る飛行高度における放射線防護も関心事となっている（ICRP, 2016; ICRU, 2010）。現在、これらの分野において、設備と被ばくする人数は原子力分野を超えている。防護量の換算係数の最新版（ICRP, 2010）では、これを考慮し、より多くの種類の放射線とより広いエネルギー範囲について実効線量の換算係数を利用できるようにした。予測的または遡及的な使用において推定値が近くなるように、実用量の放射線の種類とエネルギーの範囲は防護量の放射線の種類とエネルギーの範囲と一致すべきである。ICRU Report 39, 43, 47, 51, 66（1985;

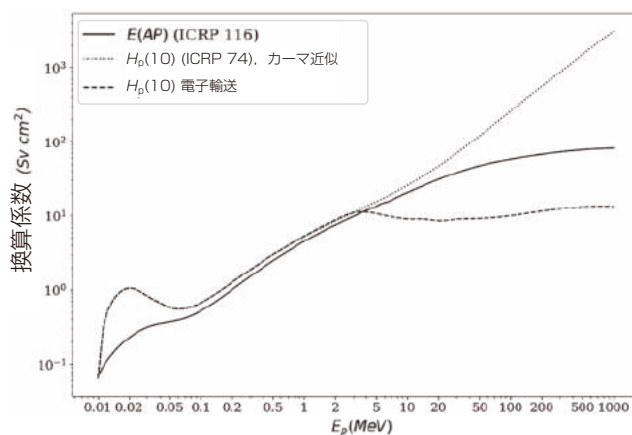


図 2.1 光子に関するフルエンスに対する線量換算係数の比較  
実線：前方照射（AP）における実効線量  $E$  の換算係数；  
点線：個人線量当量  $h_p(10)$  の換算係数（ICRP, 1996; ICRU, 1998）；  
破線：全電子を輸送して算出した個人線量当量  $h_p(10)$  の換算係数（今回の計算）。

注：3 MeV より低い光子エネルギーでは点線と破線が一致する。実用量による防護量の過大評価と過小評価は、それぞれ高い光子エネルギー範囲と低い光子エネルギー範囲で見られる。

1988; 1993; 2001) における ICRU Report 39/51 の実用量の定義に基づく放射線の種類とエネルギー範囲を単純に拡張することは、上述の実用量と防護量との間の不一致、およ

び他の種類の放射線に対するさらなる検討のため、適切なアプローチとは考えることはできない。



### 3 外部被ばくに対する実用量

#### 3.1 実用量の勧告の根拠

実用量を定義する放射線の種類とエネルギー範囲の両方を拡大し、同時に拡大した範囲の防護量への良い近似を維持する必要性に取組むためには、実用量の定義の考え方を変える必要がある。本報告書では、実用量を、空間内または人体表面上のある点における放射計測量または線量計測量と、防護量の値に関連付ける換算係数との積として再定義することを勧告する (Bartlett and Dietze, 2010; Endo, 2016)。この手法については、以前から検討されてきた (たとえば, Burlin, 1981; Burlin and Wheatley, 1971; Burlin *et al.*, 1979; Commission of the European Communities, 1983; ICRP Publication 15, 1969; ICRP Publication 21, 1973; Jahr *et al.*, 1981; NCRP Report 38, 1971; Sidwell *et al.*, 1969; Siebert and Bartlett, 1995<sup>1</sup>)。国際的に合意されたファントムへの換算係数が存在する場合、このような量を実際に用いることができる。ICRP と ICRU は現在、ICRP Publication 110 (2009) において ICRP/ICRU 成人標準ファントムをすでに定義している。これらのファントムは、防護量への換算係数の基準値を定義するために使用され、実用量の定義にも使用できる。勧告する実用量は、防護量と実用量の体系を単純化し、利用者の放射線防護量の理解を助けるものである。

ここでは一般的な手順を定め、以下の節でさまざまな実用量を紹介する。勧告する実用量は、粒子フルエンスまたは空気カーマと換算係数の積として定義される。エネルギー  $E_p$  を持つ放射線の種類  $R$  のフルエンス  $\Phi$  の単色エネルギー粒子は、以下のように表される。

$$H_R = h_R(E_p) \cdot \Phi_R \quad (3.1)$$

ここで、 $H_R$  は放射線の種類  $R$  の一般的な実用量である。放射線場における実用量の値は、放射線場の量、この場合はフルエンス  $\Phi$  に換算係数  $h_R$  を乗じることによって得られる。一般的な場合では、放射線場は多方向性であり、エネルギー分布があるので、この式は、フルエンスのエネルギー分布と方向分布で積分される。

$$H_R(\Omega) = \int h_R(E_p, \Omega) \Phi_R(E_p, \Omega) dE_p \quad (3.2)$$

指定方向からの入射については、換算係数  $h_R$  は、ICRP/ICRU の全身の成人標準ファントムとその他の専用ファントムで評価した線量の値をファントムが無い場合の粒子フルエンスで除した値として計算される。

$$h_R(E_p, \Omega) = \frac{H_R(E_p, \Omega)}{\Phi_R(E_p, \Omega)} \quad (3.3)$$

この定義の結果は以下の通りである：

- 図 1.2 に示した放射線防護量と実用量の体系は類似したものとなる。
- 実用量の換算係数は、局所皮膚の吸収線量を除いて、防護量と同じファントムで計算される。人体形状の全身ファントムと眼の水晶体のファントムは、ICRP Publication 110 と 116 (2009; 2010) で記述されている。
- 実用量は定義上、防護量に密接に関連付けられている。粒子エネルギーと入射角度の一定の組合せでは、実用量と防護量の数値が一致する。
- この定義は、防護量と実用量に同一のファントム、加重係数、および計算モデルを使用することで、量の一貫性を確保し、指定された放射線の種類、エネルギー、

<sup>1</sup> Siebert, B. R. L., and Bartlett, D. J. (1995). 8th Symposium Neutron Dosimetry, Paris. *Personal communication* (Braunschweig, Germany)

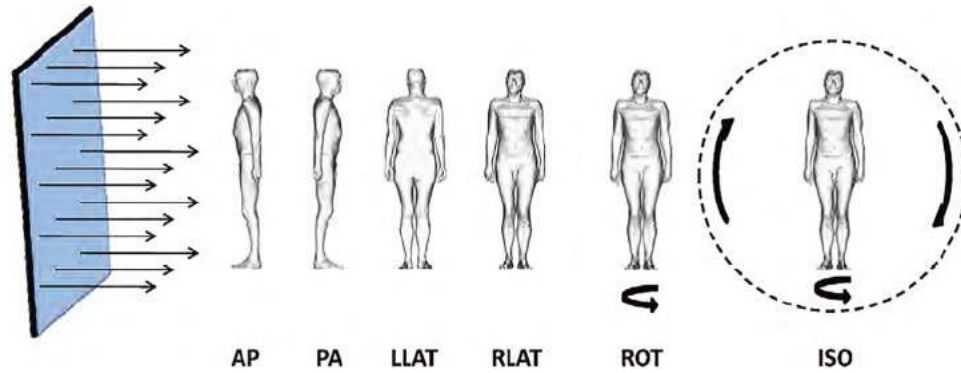


図 3.1 ICRP Publication 116 で考慮した理想化されたジオメトリの略図

注 AP = 前方照射；PA = 後方照射；LLAT = 左からの側方照射；RLAT = 右からの側方照射；ROT = 回転照射；ISO = 等方照射

および入射方向に対する防護量と実用量の数値の良い近似を実現している。これまでと同様に、光子に対する換算係数を、フルエンスではなく空気カーマでも定義することができる。

### 3.2 周辺線量

放射線場のある 1 点における周辺線量  $H^*$  は、その点の粒子フルエンス  $\Phi$  と、粒子フルエンスと様々な照射条件での実効線量の最大値  $E_{\max}$  を関連付ける換算係数  $h^*$  との積である。

運動エネルギー  $E_p$  を持つ放射線の種類  $i$  について、光子と中性子については、前方 - 後方 (AP)、後方 - 前方 (PA)、左側方 (LLAT)、右側方 (RLAT)、回転 (ROT)、等方 (ISO)、上半球等方 (SS-ISO)、下半球等方 (IS-ISO) の放射線場、電子、陽子、ミュー粒子、パイ中間子については AP、PA、ISO、SS-ISO、IS-ISO の放射線場、そして  $\text{He}^{2+}$  イオンについては AP、PA、ISO の放射線場で、広い均一な平行ビームを ICRP/ICRU の成人標準ファントムに照射し (図 3.1)、換算係数  $h_i^*(E_p) = E_{\max,i}(E_p) / \Phi_i(E_p)$  が計算される。(ICRP, 2009)。

放射線の種類  $i$  の分布は以下のようになる。

$$H_i^* = \int h_i^*(E_p) \left[ \frac{d\Phi_i(E_p)}{dE_p} \right] dE_p \quad (3.4)$$

ここで、 $d\Phi_i(E_p)/dE_p$  は、運動エネルギーが  $E_p$  周辺の区間  $dE_p$  の範囲にある粒子フルエンスである。寄与するすべての放射線の種類の総和は以下となる。

$$H^* = \sum H_i^* \quad (3.5)$$

周辺線量の単位は  $\text{J kg}^{-1}$  である。周辺線量の単位の固有の名称は、シーベルト (Sv) である。

### 3.3 周辺線量率

周辺線量率  $\dot{H}^*$  は、 $dH^*$  を  $dt$  で除した量であり、ここで、 $dH^*$  は、時間間隔  $dt$  における周辺線量の増分である。

$$\dot{H}^* = \frac{dH^*}{dt} \quad (3.6)$$

周辺線量率の単位は  $\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$  である。周辺線量率の単位の固有の名称は、シーベルト毎秒 ( $\text{Sv s}^{-1}$ ) である。

### 3.4 方向性水晶体吸収線量

指定された入射方向  $\Omega$  を持つ放射場内のある 1 点における方向性水晶体吸収線量  $D'_{\text{lens}}(\Omega)$  は、その点における粒子フルエンス  $\Phi(\Omega)$  と、粒子フルエンスと水晶体吸収線量の値を関連付ける換算係数  $d'_{\text{lens}}(\Omega)$  との積である。

運動エネルギー  $E_p$  を持つ放射線の種類  $i$  に対して、方

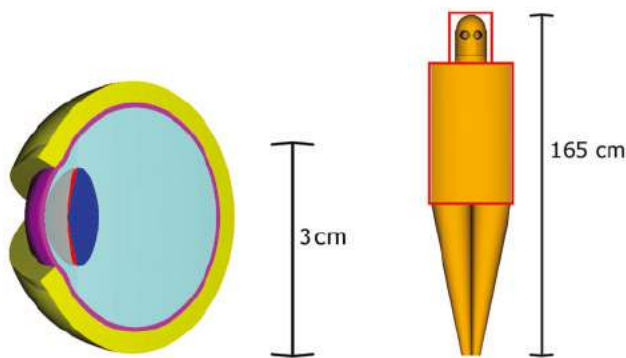


図 3.2. 眼のファントムの詳細図（左：水晶体の放射線感受性の高い領域（赤色）と残りの領域（濃い青色）；材料および構造の詳細については、Behrens, 2017a を参照のこと）および計算に使用された 2 つの眼を含むファントムの全体像（右）。広い均一な平行ビームが頭部と体幹部（右側の赤い枠）に照射される。

向  $\Omega$  から入射する放射線場の広い均一平行ビームによる眼球モデルと全身の被ばくについて、換算係数

$d'_{\text{lens}, i}(E_p, \Omega) = D'_{\text{lens}, i}(E_p, \Omega) / \Phi_i(E_p, \Omega)$  が計算される (Behrens and Dietze, 2011; ICRP, 2010)。方向  $\Omega$  に対して、右眼または左眼の吸収線量の最大値が採用される (図 3.2)。

放射線の種類  $i$  のエネルギー分布は以下ようになる。

$$D'_{\text{lens}, i}(\Omega) = \int d'_{\text{lens}, i}(E_p, \Omega) \left[ \frac{d\Phi_i(E_p, \Omega)}{dE_p} \right] dE_p \quad (3.7)$$

ここで、 $d\Phi_i(E_p, \Omega)/dE_p$  は、入射方向が  $\Omega$  で、運動エネルギーが  $E_p$  周辺の区間  $dE_p$  の範囲にある粒子フルエンスである。入射方向  $\Omega$  で寄与するすべての放射線の種類  $i$  の総和は以下となる。

$$D'_{\text{lens}}(\Omega) = \sum D'_{\text{lens}, i}(\Omega) \quad (3.8)$$

方向性水晶体吸収線量の単位は、 $\text{J kg}^{-1}$  である。方向性水晶体吸収線量の単位の固有の名称は、グレイ (Gy) である。

入射方向  $\Omega$  の指定には、入射方向を表す座標の基準系が必要となる。エリアモニタリングの量に関わる基準系は、実用量を求める放射線場に関連付けられる。特に単一方向場の場合では、入射方向は入射方向  $\Omega_0$  との間の角度  $\varphi$ ,

すなわち、数式眼球モデルの前方 - 後方 (AP) と関連付けられる。 $\varphi = 0^\circ$  の場合、この指定方向を用いた測定における対象点の  $D'_{\text{lens}}(\Omega)$  の値は  $D'_{\text{lens}}$  と記述する。

### 3.5 方向性水晶体吸収線量率

方向性水晶体吸収線量率  $\dot{D}'_{\text{lens}}(\Omega)$  は、 $dD'_{\text{lens}}(\Omega)$  を  $dt$  で除した量である。ここで、 $dD'_{\text{lens}}(\Omega)$  は、時間間隔  $dt$  における方向性水晶体吸収線量の増分で、次式になる。

$$\dot{D}'_{\text{lens}}(\Omega) = \frac{dD'_{\text{lens}}(\Omega)}{dt} \quad (3.9)$$

方向性水晶体吸収線量率の単位は  $\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ 、方向性水晶体吸収線量率の単位の固有の名称は、グレイ毎秒 ( $\text{Gy s}^{-1}$ ) である。

### 3.6 方向性局所皮膚吸収線量

指定された入射方向  $\Omega$  を持つ放射線場内の 1 点における方向性局所皮膚吸収線量  $D'_{\text{local skin}, i}(\Omega)$  は、その点における粒子フルエンス  $\Phi$  と、そのフルエンスと局所皮膚の吸収線量の値を関連付ける換算係数  $d'_{\text{local skin}}(\Omega)$  との積である。

運動エネルギー  $E_p$  を持つ放射線の種類  $i$  に対して、方向  $\Omega$  から入射する放射線場の広い均一平行ビームによる被ばくについて、換算係数

$d'_{\text{local skin}, i}(E_p, \Omega) = D'_{\text{local skin}, i}(E_p, \Omega) / \Phi(E_p, \Omega)$  が計算される。換算係数は、指定されたファントムである、前方表面が密度  $1.09 \text{ g cm}^{-3}$  の厚さ  $2 \text{ mm}$  の皮膚の層で覆われた、ICRU 4 元素組織の  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 148 \text{ mm}$  のスラブ ( $\rho = 1.0 \text{ g cm}^{-3}$ ) (ICRP, 2009) の被ばくについて計算される。この組織組成は ICRP Publication 89 (2002) で示されている。吸収線量は、深さ  $50 \mu\text{m}$  と  $100 \mu\text{m}$  の間で表面に垂直な軸を持ち、前面中心から  $1 \text{ cm}^2$  の断面積の直円柱の体積で平均化される (図 3.3)。

放射線の種類  $i$  のエネルギー分布は以下ようになる。

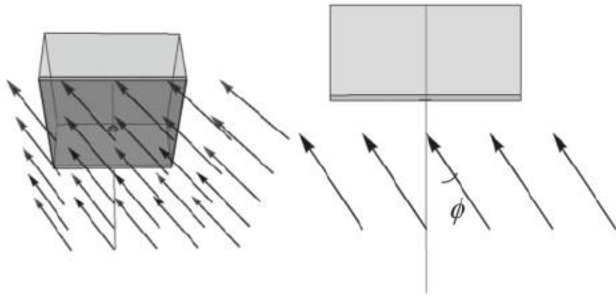


図 3.3 スラブファントムのジオメトリ

注 左：等角図。右：上から見た図。皮膚層の厚みと円形のターゲットボリウムの直径を大きくし、見やすくしている。

$$D'_{\text{local skin}, i}(\Omega) = \int d'_{\text{local skin}, i}(E_p, \Omega) \left[ \frac{d\Phi_i(E_p, \Omega)}{dE_p} \right] dE_p \quad (3.10)$$

ここで、 $d\Phi_i(E_p, \Omega)/dE_p$  は、運動エネルギーが  $E_p$  周辺の区間  $dE_p$  の範囲にある粒子フルエンスである。入射方向  $\Omega$  のとき寄与するすべての放射線の種類の総和は以下となる。

$$D'_{\text{local skin}}(\Omega) = \sum D'_{\text{local skin}, i}(\Omega) \quad (3.11)$$

入射方向  $\Omega$  の指定には、入射方向を表す座標の基準系が必要である。エアモニタリングの量に関わる基準系は、実用量を求める放射線場に関連付けられる。特に単一方向場の場合、その方向は、スラブファントムの前表面に照射した時の入射方向  $\Omega_0$  と当該入射方向の間の角度  $\varphi$  に関係付けられる。 $\varphi = 0^\circ$ 、すなわち垂直入射の場合、この指定方向を用いた測定における対象点の  $D'_{\text{local skin}}(\Omega)$  の値は  $D'_{\text{local skin}}$  と記述する。方向性局所皮膚吸収線量の単位は、 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$  である。方向性局所皮膚吸収線量の単位の固有の名称はグレイ (Gy) である。

### 3.7 方向性局所皮膚吸収線量率

方向性局所皮膚吸収線量率  $D'_{\text{local skin}}(\Omega)$  は、 $dD'_{\text{local skin}}(\Omega)$  を  $dt$  で除した量であり、 $D'_{\text{local skin}}(\Omega)$  は時間間隔  $dt$  にお

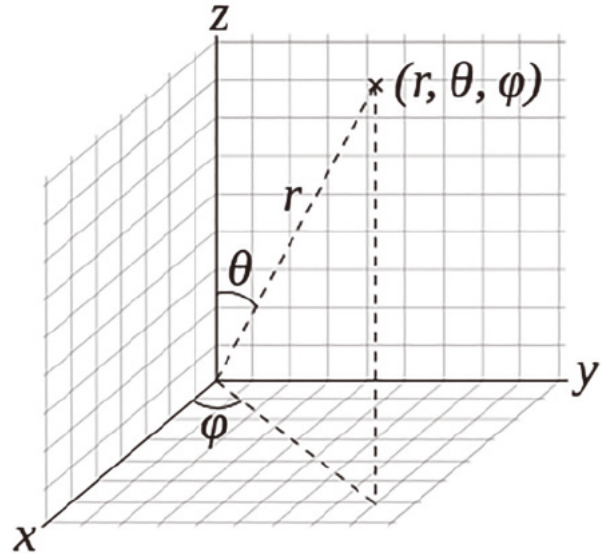


図 3.4 個人線量の座標系の概略図

ける方向性局所皮膚吸収線量の増分である：

$$\dot{D}'_{\text{local skin}}(\Omega) = \frac{dD'_{\text{local skin}}(\Omega)}{dt} \quad (3.12)$$

方向性局所皮膚吸収線量率の単位は  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  である。局所皮膚の方向性吸収線量率の単位の固有の名称は、グレイ毎秒 ( $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ ) である。

### 3.8 個人線量

身体上のある 1 点における個人線量  $H_p$  は、当該点に入射する粒子フルエンス  $\Phi$  と、粒子フルエンスを実効線量  $E$  の値に関連付ける換算係数  $h_p$  との積である。

運動エネルギー  $E_p$  を持つ放射線の種類  $i$  と入射方向  $\Omega$  について、ICRP/ICRU の成人標準ファントムの全身に対する広い均一平行ビームおよび回転と等方照射場の入射 (ICRP, 2009) で換算係数  $h_{p, i}(E_p, \Omega) = E_i(E_p, \Omega)/\Phi_i(E_p, \Omega)$  が計算される。

身体を中心点を中心とした右手直交座標系を採用し、 $X$  軸が後方から前方、 $Y$  軸が右から左、 $Z$  軸をつま先から頭としている。照射方向角度  $\Omega$  は、成分  $\theta$  と  $\varphi$  で定義され、 $\theta$  は  $Z$  軸に対する角度 (頭部で  $\theta$  はゼロに等しい)、 $\varphi$  は

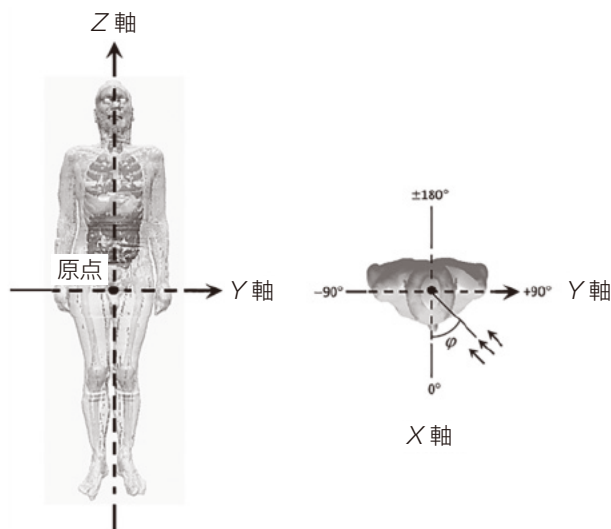


図 3.5 個人線量の座標系の原点は、人体の中央点に位置する

XY面上への投影（正の $\phi$ は左を指す；図 3.4）である。

$0^\circ$ ,  $180^\circ$ , ROT, ISO, IS-ISO, SS-ISO 以外の $\Omega$ について、換算係数は、左右から入射する放射線の平均値として実効線量の換算係数となる（図 3.5 参照）。

放射線の種類 $i$ の分布は以下ようになる。

$$H_{p,i} = \iint h_{p,i}(E_p, \Omega) \left[ \frac{d^2 \Phi_i(E_p, \Omega)}{dE_p d\Omega} \right] dE_p d\Omega \quad (3.13)$$

ここで、 $d^2 \Phi_i(E_p, \Omega)/dE_p d\Omega$ は、その点で、運動エネルギーが $E_p$ 周辺の区間 $dE_p$ の範囲で、入射方向が $\Omega$ 周辺の区間 $d\Omega$ の範囲にある粒子フルエンスである。寄与するすべての放射線の種類の総和は以下となる。

$$H_p = \sum H_{p,i} \quad (3.14)$$

個人線量の単位は $J kg^{-1}$ である。個人線量の単位の固有の名称は、シーベルト (Sv) である。

### 3.9 個人水晶体吸収線量

頭部または身体上のある点における個人水晶体吸収線量 $D_{p lens}$ は、当該点に入射する粒子フルエンス $\Phi$ と、その粒子フルエンスに眼の水晶体における吸収線量の値を関連付ける換算係数 $d_{p lens}$ の積である。

運動エネルギー $E_p$ を持つ入射方向 $\Omega$ の放射線の種類 $i$ について、全身-眼球モデルに入射する広い均一平行ビームの換算係数 $d_{p lens, i}(E_p, \Omega) = D_{p lens, i}(E_p, \Omega)/\Phi_i(E_p, \Omega)$ が計算される (Behrens and Dietze, 2011)。ある $\Omega$ での換算係数は、右眼または左眼の水晶体の吸収線量の最大値である（図 3.2 参照）。

放射線の種類 $i$ の分布は以下ようになる。

$$D_{p lens, i} = \iint d_{p lens, i}(E_p, \Omega) \left[ \frac{d^2 \Phi_i(E_p, \Omega)}{dE_p d\Omega} \right] dE_p d\Omega \quad (3.15)$$

ここで、 $d^2 \Phi_i(E_p, \Omega)/dE_p d\Omega$ は、その点で、運動エネルギーが $E_p$ 周辺の区間 $dE_p$ の範囲で、入射方向が $\Omega$ 周辺の区間 $d\Omega$ の範囲にある粒子フルエンスである。寄与するすべての放射線の種類 $i$ の総和は以下となる。

$$D_{p lens} = \sum D_{p lens, i} \quad (3.16)$$

個人水晶体吸収線量の単位は、 $J kg^{-1}$ である。個人水晶体吸収線量の単位の固有の名称はグレイ (Gy) である。

$H_p$ の量と同じ右手直交座標系が身体に対し採用される。これは、ICRP Publication 116 (2010) の Behrens-Dietze モデルの計算に使用されたものとは異なるが、数値の結果に影響はない。

### 3.10 個人局所皮膚吸収線量

個人局所皮膚吸収線量 $D_{p local skin}$ は、身体または四肢への粒子フルエンス入射 $\Phi$ と、粒子フルエンスに局所皮膚吸収線量を関連付ける換算係数 $d_{p local skin}$ の積である。

運動エネルギー $E_p$ を持つ入射方向 $\Omega$ の放射線の種類 $i$ について、指定されたファントムの広い均一平行ビームの換算係数 $d_{p local skin, i}(E_p, \Omega) = D_{p local skin, i}(E_p, \Omega)/\Phi_i(E_p, \Omega)$ が計算される。以下に示す寸法の各ファントムは、ICRP Publication 89 (2002) に記された元素構成を持つ、厚さ 2 mm、密度  $1.09 g cm^{-3}$  の皮膚の層で覆われている (ICRP, 2009)。局所皮膚に用いる指定のファントムは以下の通りである。

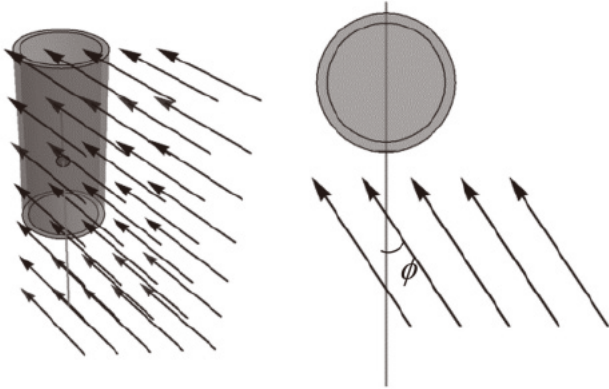


図 3.6 円柱ファントムのジオメトリー（縮尺通りではない）  
注 左：等角図。右：上から見た図。皮膚層の厚みと円形のターゲットボリュームの直径を大きくし、見やすくしている。

- **体幹部**：300 mm × 300 mm × 148 mm の ICRU 4 元素組織 ( $\rho = 1.0 \text{ g cm}^{-3}$ ) のスラブに、前面の表面が厚さ 2 mm の皮膚の層で覆われているスラブファントム。吸収線量は、深さ 50  $\mu\text{m}$  と 100  $\mu\text{m}$  の間で表面に垂直な軸を持ち、前面中心から 1  $\text{cm}^2$  の断面積の直円柱の体積で平均する（図 3.3）。
- **四肢**：直径 69 mm、長さ 300 mm の ICRU 4 元素組織（この場合の密度は  $1.11 \text{ g cm}^{-3}$ ）に、円筒面が厚さ 2 mm の皮膚の層で覆われているピラーファントム。吸収線量は、円柱の長さ半分の位置で、半径に垂直な面積 1  $\text{cm}^2$  の円で半径 36.4 mm から 36.45 mm の間の体積で平均する（図 3.6 参照）。
- **指**：直径 15 mm、長さ 300 mm の ICRU 4 元素組織（この場合の密度は  $1.11 \text{ g cm}^{-3}$ ）に、円筒面が厚さ 2 mm の皮膚の層で覆われているロッドファントム。吸収線量は、円柱の長さ半分の位置で、半径に垂直な面積 1  $\text{cm}^2$  の円で半径 9.4 mm から 9.45 mm の間の体積で

平均する（図 3.6 参照）。

スラブファントムの場合、 $\theta$  は面法線に対する入射角度であり、 $\phi$  は方位角である。円筒形状の場合、入射角  $\theta$ 、 $\phi$  の角度は、評価する円筒の軸線に対する角度となる。

放射線の種類  $i$  の分布は以下の式で示される。

$$D_{p \text{ local skin}, i} = \iint d_{p \text{ local skin}, i}(E_p, \Omega) \left[ \frac{d^2 \Phi_i(E_p, \Omega)}{dE_p d\Omega} \right] dE_p d\Omega \quad (3.17)$$

ここで、 $d^2 \Phi_i(E_p, \Omega)/dE_p d\Omega$  は、運動エネルギーが  $E_p$  周辺の区間  $dE_p$  の範囲で、入射方向が  $\Omega$  周辺の区間  $d\Omega$  の範囲にある粒子フルエンスである。寄与するすべての放射線の種類  $i$  の総和は以下となる。

$$D_{p \text{ local skin}} = \sum D_{p \text{ local skin}, i} \quad (3.18)$$

個人局所皮膚吸収線量の単位は  $\text{J kg}^{-1}$  である。個人局所皮膚吸収線量の単位の固有の名称はグレイ (Gy) である。

### 3.11 まとめ

防護量と勧告する実用量との関係を表 3.1 に示す。勧告する実用量の変換係数の算出に使用されたコンピュータファントムを表 3.2 に示す。

表 3.1 防護量と今回勧告する実用量の関係

	全 身	眼の水晶体	局所の皮膚
防 護 量	実 効 線 量 $E$	水晶体等価線量 $H_{T \text{ lens}}$	局所皮膚等価線量 $H_{T \text{ local skin}}$
実 用 量			
エリアモニタリング	周 辺 線 量 $H^*$	方向性水晶体吸収線量 $D'_{\text{lens}}(\Omega)$	方向性局所皮膚吸収線量 $D'_{\text{local skin}}(\Omega)$
個人モニタリング	個 人 線 量 $H_p$	個人水晶体吸収線量 $D_{p \text{ lens}}$	個人局所皮膚吸収線量 $D_{p \text{ local skin}}$

表 3.2 放射線場の量（フルエンス，空気カーマ）から防護量および今回勧告する実用量への換算係数を計算するために採用したファントム

	全 身	眼の水晶体	局所の皮膚
防 護 量	全身 ICRP/ICRU 成人標準ファントム (ICRP, 2009)	全身ファントムに埋め込まれた眼のモデル (Behrens and Dietze, 2011)	100 mm × 100 mm × 100 mm の皮膚組織ファントム (ICRP, 2010)
実 用 量			
エリアモニタリング	全身 ICRP/ICRU 成人標準ファントム	全身ファントムに埋め込まれた眼のモデル	スラブファントム <sup>a</sup> 300 mm × 300 mm × 148 mm の ICRU 4 元素組織で、その前方表面は厚さ 2 mm の皮膚で覆われている。
個人モニタリング	全身 ICRP/ICRU 成人標準ファントム	全身ファントムに埋め込まれた眼のモデル	スラブファントム <sup>a</sup> 300 mm × 300 mm × 148 mm の ICRU 4 元素組織で、その前方表面は厚さ 2 mm の皮膚で覆われている。 ピラーファントム <sup>a</sup> 直径 69 mm × 300 mm の ICRU 4 元素組織で、その円筒状の表面は厚さ 2 mm の ICRP 皮膚で覆われている。 ロッドファントム 直径 15 mm × 300 mm の ICRU 4 元素組織で、その円筒状の表面は厚さ 2 mm の ICRP 皮膚で覆われている。

<sup>a</sup> ファントムの表面の中心，ICRP 皮膚の円柱の 1 cm<sup>2</sup> の断面積，表面に垂直な軸で 50 μm ~ 100 μm の深さの領域での吸収線量。



## 4 換算係数

### 4.1 緒 論

換算係数は、防護量と実用量を、放射線場を特徴付ける放射計測量と線量計測量に結びつけるものである。実際には、外部放射線に対する防護において通常使用すなわち計算される量は、ある放射線の種類の粒子フルエンス  $\Phi$  である。光子放射線の場合では、自由空気中の空気カーマ  $K_{\text{air}}$  も使用される。

したがって、実効線量  $E$  は適切な換算係数により、放射線の種類ごとのフルエンスに関連付けることができる。ICRP Publication 116 (2010) で国際的に合意された防護量の換算係数は、職業被ばくの放射線防護に一般的に使用できるようにまとめられている。線量換算係数は職業被ばくを想定して、ファントムを真空中で広く均一な平行ビームで全身照射した場合について計算されたもので、前方-後方 (AP)、後方-前方 (PA)、左側方 (LLAT)、右側方 (RLAT)、回転 (ROT)、等方 (ISO)、上半球半等方 (SS-ISO)、下半球半等方 (IS-ISO) の各放射線場のジオメトリーがある。実効線量への換算係数は、このような理想的な被ばくジオメトリーに対してのみ利用可能である。

### 4.2 全 般

本報告書の2つの目的は、ICRU Report 39/51 の実用量の限界を克服する外部放射線防護のための一般的な実用量の定義を導入すること、ならびに放射線の特徴付ける物理量から実用量の計算を可能にする具体的な換算係数 (付属書 A と C) を刊行することである。

ICRU Report 39 (1985) における実用量の勧告から ICRU Report 43 と 47 (1988; 1992) における換算係数の刊行までに数年が経過し、光子、中性子、および電子に対す

る特定の換算係数の ICRU と ICRP による共同刊行 (ICRP, 1996; ICRU, 1998) まで 10 年以上が経過した。ICRP と ICRU 共同の報告書委員会は、査読付き専門誌や「灰色文献 (一般に、研究機関の内部刊行物や私信)」で刊行された多くの換算係数に基づき基準値を勧告した。これらの係数は、複数の数値コードを用いて異なるジオメトリーとファントムで計算されたが、統計的不確かさの範囲内でそれぞれの結果は一致した。ICRU と ICRP が刊行した報告書には、さまざまな情報源からの (比較可能な) 値を平均化・平滑化して評価した換算係数の勧告値が含まれている。

本報告書委員会は、それとは異なる状況に直面した。実用量の勧告と換算係数の基準値の刊行が同時に行われることである。本報告書委員会の委員とコンサルタントが計算に着手した。この作業は、以下の見解によって単純化された：

- 放射計測量と線量計測量から個人線量と周辺線量への換算係数の数値は、定義上、指定された粒子エネルギーと入射角度において実効線量への換算係数と等しくなるため、整合性を確認できるという意味を持つ。
- 現在、いくつかの十分に文書化された汎用的なモンテカルロ法による放射線輸送コードが、このような計算に利用可能である (付属書 B 参照)。コードは、数十年にわたる開発と妥当性確認の結果であり、正しいインプットパラメータをコードの制約内で適切に入力し使用した場合、これらのコードは最先端の線量計測技術となる。

### 4.3 換算係数の計算

放射計測量と線量計測量から実用量への換算係数は、モンテカルロ放射線輸送コードを用いて計算される。採用さ

れたコードの特徴を付属書 B に簡潔に記述する。これらの放射線輸送コードでは、ファントムと放射線場の特性(粒子エネルギーと入射角度)を正確に指定することができる。吸収線量はファントムの指定領域において記録され、適宜、放射線加重係数および組織加重係数によって重み付けされる。第 3 章で定義されたそれぞれの実用量の計算、すなわち放射計測量または線量計測量からの換算係数の計算は、技術的に完全に実現可能である。一般に、計算の基礎となる放射計測量はフルエンスであるが、50 MeV 未満の光子エネルギーに対しては、空気カーマからの換算係数も与えられている。ファントムは真空中で広い均一な平行ビームにより照射され、場合によっては回転と等方の場においても照射される。

入射方向  $\Omega$  の指定には、 $\Omega$  が表される座標の基準系が必要である。方向性吸収線量のエリアモニタリング機器の応答に関しては、基準系は機器が照射される放射線場と関係付けることができる。個人線量や眼の水晶体、局所皮膚の吸収線量を測定する個人線量計については、この基準系は身体、頭部と眼、および四肢に関係付けられる。

報告されたすべての計算は、発生した粒子の完全な輸送で実施されたものである。量と線種によっては、高エネルギーではファントムが評価される領域の放射線場は平衡状態にない。通常、光子を測定する個人線量計とエリアモニタリング機器は、荷電粒子平衡が存在する状態で校正される。このために、光子への換算係数をカーマ近似で追加的に算出し、荷電粒子平衡状態に近い数値結果を得ている。

付属書 A に関連量、放射線の種類、エネルギー、および入射角度別に得られた換算係数を示す。

#### 4.3.1 周辺線量への換算係数の計算

ICRP Publication 116 (2009) と図 3.1 に示されているように、粒子フルエンスから周辺線量への換算係数  $h^*$  の値は、各照射ジオメトリーにおける広い均一な平行ビーム入射による ICRP/ICRU の成人標準ファントムの全身の被ばく、ならびに回転および等方場の実効線量  $E$  への換算係数の 8 つのビームジオメトリーの最大値として計算されている。

#### 4.3.2 個人線量への換算係数の計算

粒子フルエンスから個人線量への換算係数  $h_p(\varphi)$  の値は、ICRP/ICRU 成人標準ファントムが全身被ばくした場について計算されている (ICRP, 2009)。

本報告書で示した換算係数は、広い均一な平行ビームについて、 $0^\circ$  (AP) から  $90^\circ$  まで  $15^\circ$  ごとの角度  $\varphi$  (図 3.5 参照) で、左右照射の平均をとった値である。 $180^\circ$ 、回転、等方、上半球等方、下半球等方のジオメトリーでは、それぞれの照射に対する値となる。

付属書 A.2 の換算係数は、ICRP Publication 116 (2010) に掲載されているものと Endo (2017)<sup>1</sup> による計算結果をまとめたものである。角度  $\varphi = 0^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $+90^\circ$  および  $-90^\circ$  の個人線量  $h_p(\varphi)$  への換算係数は、それぞれ、照射ジオメトリー AP、PA、LLAT および RLAT における実効線量への換算係数と同じ数値である。ICRP Publication 116 から入手できない入射ジオメトリーの換算係数は、Endo (2017)<sup>1</sup> の計算から引用した。ICRP Publication 116 の数値と Endo による計算の数値の整合性は検討し、検証されている (Endo, 2017)。本報告書の計算結果と ICRP Publication 116 (2010) の計算結果との差は、光子と陽子では 2% 以下、電子、陽電子、ミュー粒子、パイ中間子、ヘリウムイオンでは 5% 以下、中性子ではほとんどのエネルギーで 5% 以下、いくつかのエネルギーで 10% 以下であった。

#### 4.3.3 水晶体吸収線量への換算係数の計算

放射線の種類、エネルギー、および入射の方向または角度が同じ場合、粒子フルエンスから方向性水晶体吸収線量  $d_{\text{lens}}$  への換算係数とフルエンスから個人水晶体吸収線量  $d_{\text{p lens}}$  への換算係数の数値は同じであり、付属書 A.3 では記号  $d_{\text{lens}}$  を使用する。

図 3.2 に示すように、角度  $\varphi$  ( $0^\circ$  (AP) から  $\pm 90^\circ$  まで  $15^\circ$  ごと) で入射する広い均一な平行ビームに対して、特定の照射ジオメトリーにおける数式眼球モデル (Behrens and Dietze, 2011) の全身被ばくに関する水晶体吸収線量への換算係数が示されている。右または左からの側方照射、

<sup>1</sup> Endo, A. (2016). *Personal communication*. (Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, Japan)

および回転ジオメトリーに対して、吸収線量の最大値を採用している。回転ジオメトリーの結果は、5°ごとに計算されている。

#### 4.3.4 局所皮膚吸収線量への換算係数の計算

放射線の種類、エネルギー、および入射の方向または角度が同じ場合、粒子フルエンスから方向性局所皮膚吸収線量  $d'_{\text{local skin}}$  への換算係数と、指定のファントムに対するフルエンスから個人局所皮膚吸収線量  $d_{\text{p local skin}}$  への換算係数の数値は同一である。付属書 A.4 では記号  $d_{\text{local skin}}$  を使用する。

スラブファントムに垂直に入射するアルファ粒子を除き、すべての粒子について、以下の照射ジオメトリーの換算係数  $d'_{\text{local skin}}$  が計算されている：

- 体幹部の被ばく：スラブの前側表面が ICRP Publication 89 (2002) に記されている元素組成の厚さ 2 mm の皮膚で覆われている、ICRU 4 元素組織で構成される 300 mm × 300 mm × 148 mm ( $\rho = 1.0 \text{ g cm}^{-3}$ ) のスラブファントムの前側表面の中心。吸収線量は、深さ 50  $\mu\text{m}$  と 100  $\mu\text{m}$  の間で表面に垂直な軸を持ち、前面中心から 1  $\text{cm}^2$  の断面積の体積で平均した値であり、0° (AP) から 75° まで 15° ごとの角度  $\varphi$  の入射に対して与えられている (図 3.3 参照)。
- 四肢の被ばく：直径 69 mm、長さ 300 mm の ICRU 4 元素組織 (この場合の密度は 1.11  $\text{g cm}^{-3}$ ) に、円筒面が 2 mm の皮膚の層で覆われているピラーファントム。吸収線量は、円柱の長さ半分の位置で、半径に垂直な面積 1  $\text{cm}^2$  の円で半径 36.4 mm から 36.45 mm の間の体積で平均した値であり、0° から 180° まで 15° ごとの角度  $\varphi$  の入射に対して与えられている (図 3.6 参照)。
- 指の被ばく：直径 15 mm、長さ 300 mm の ICRU 4 元素組織 (この場合の密度は 1.11  $\text{g cm}^{-3}$ ) に、円筒面が 2 mm の皮膚の層で覆われているロッドファントム。吸収線量は、円柱の長さ半分の位置で、半径に垂直な面積 1  $\text{cm}^2$  の円で半径 9.4 mm から 9.45 mm の間の体積で平均した値であり、0° から 180° まで 15° ごと

の角度  $\varphi$ 、ならびに回転照射に対して与えられている (図 3.6 参照)。

表 A.4.5 と図 A.4.5 に示したアルファ粒子の換算係数は、ICRU 4 元素組織密度が 1.0  $\text{g cm}^{-3}$  で 2 mm の皮膚層を持たない、100 mm × 100 mm × 100 mm のファントムの、前側表面の中央部にある深さ 50  $\mu\text{m}$  と 100  $\mu\text{m}$  の間の断面積 10  $\text{mm}^2$  の直円柱の体積について計算された。

## 4.4 今回勧告の実用量と ICRU Report 39/51 の実用量の比較

### 4.4.1 総論

本節では、指定した照射ジオメトリーにおいて勧告する換算係数と ICRU Report 39/51 の換算係数との間のエネルギー依存性の違いを分析する。それらの違いは、変更点や実際に実用量を適用する上で追加作業が必要となる部分を明確にする。

ICRU Report 57 (1998) と ICRP Publication 74 (1996) では、カーマ近似法を用いて光子の  $H^*(10)$  と  $H_p(10)$ ,  $H'(0.07)$  と  $H_p(0.07)$  の換算係数が計算されていることはすでに述べた。ICRU と ICRP は、これらの値を使用する際には注意が必要であることを注記している。3 MeV, 740 keV, および 65 keV のエネルギーの電子の組織における飛程は、それぞれ 10 mm, 3 mm, および 0.07 mm である。電子のエネルギーがそれより高くなると、ICRU 球または真空中の身体への照射について  $H^*(10)$  と  $H_p(10)$ ,  $H'(3)$  と  $H_p(3)$ ,  $H'(0.07)$  と  $H_p(0.07)$  のそれぞれの計算において荷電粒子平衡の条件が満たされなくなる (Daures *et al.*, 2011; Dimbylow and Francis, 1983; 1984; Ferrari and Pelliccioni, 1994; 1995)。ICRP Publication 116 (2010) では、すべての粒子に対するフルエンスから防護量への換算係数の値は、放射線場におけるすべての粒子の輸送を用いて計算されている。ICRP Publication 116 (2010) の図に含まれている過去の実用量である周辺線量当量への換算係数の値もまた、発生した粒子のすべての輸送を用いて計算されている。

また、これまでに定義された実用量への換算係数は利用

表 4.1 第 4 章および付属書のグラフで換算係数に使用されている記号

記号	物理的特性	換算係数の名称
$h^*$	$H^* / \Phi$	フルエンスに対する周辺線量
$h^*(10)$	$H^*(10) / \Phi$	フルエンスに対する周辺線量当量
$h_p(\varphi)$	$H_p(\varphi) / \Phi$	フルエンスに対する個人線量
$h_p(10, \varphi)$	$H_p(10, \varphi) / \Phi$	フルエンスに対する深さ 10 mm での個人線量当量
$d'_{\text{lens}}(\varphi)$	$D'_{\text{lens}}(\varphi) / \Phi$	フルエンスに対する方向性水晶体吸収線量
$h'(3, \varphi)$	$H'(3, \varphi) / \Phi$	フルエンスに対する深さ 3 mm の方向性線量当量
$d_{p \text{ lens}}(\varphi)$	$D_{p \text{ lens}}(\varphi) / \Phi$	フルエンスに対する個人水晶体吸収線量
$h_p(3, \varphi)$	$H_p(3, \varphi) / \Phi$	フルエンスに対する深さ 3 mm の個人線量当量
$d'_{\text{local skin}}(\varphi)$	$D'_{\text{local skin}}(\varphi) / \Phi$	フルエンスに対する方向性局所皮膚吸収線量
$h'(0.07, \varphi)$	$H'(0.07, \varphi) / \Phi$	フルエンスに対する深さ 0.07 mm の方向性線量当量
$d'_{\text{local skin}}(\varphi)$	$D_{p \text{ local skin}}(\varphi) / \Phi$	フルエンスに対する個人局所皮膚吸収線量
$h_p(0.07, \varphi)$	$H_p(0.07, \varphi) / \Phi$	フルエンスに対する深さ 0.07 mm の個人線量当量

ICRU Report 39/15 の実用量の名称は斜字で示す。

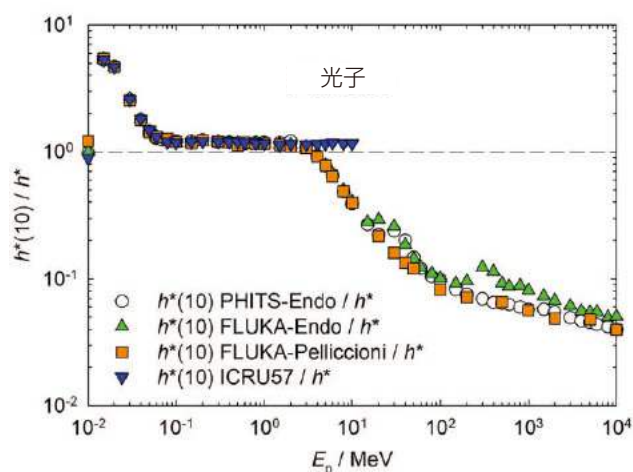


図 4.1 光子におけるフルエンスから深さ 10 mm の周辺線量当量への換算係数  $h^*(10)$  と勧告値  $h^*$  との比による比較

注 Endo による PHITS と FLUKA を用いた結果<sup>2</sup>, Pelliccioni による FLUKA を用いた結果 (2000), カーマ近似を用いた ICRU Report 57 (1998) の計算結果など, 様々なコードを用いた  $h^*(10)$  の計算結果を示した。

できないことがあり, そのため比較が示されていないことがある。水晶体吸収線量の換算係数の比較には, 円筒状ファントムの  $H_p(3)$  の値が使用される。

以下において, ICRU Report 39/51 の定義に従う換算係数の数値と, ここで勧告する値との比をグラフによって比較する。本報告書の第 4 章と付属書で使用した記号は, 表

<sup>2</sup> Endo, A. (2016). *Personal communication* (Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, Japan)

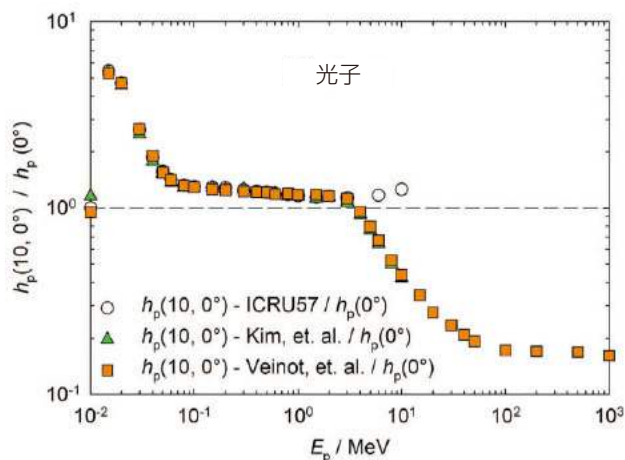


図 4.2 光子におけるフルエンスから深さ 10 mm の個人線量当量への換算係数  $h_p(10, 0^\circ)$  と勧告値  $h_p(0^\circ)$  との比による比較

注 Kim and Kim (1999), Veinot and Hertel (2011), カーマ近似法を用いた ICRU Report 57 (1998) など, 様々なコードを用いた  $h_p(10, 0^\circ)$  の計算結果を示した。

4.1 に定義されている。

#### 4.4.2 周辺線量と個人線量

周辺線量と個人線量の数値は, 入射のエネルギーと角度が等しい場合には, 実効線量の値と数値的に同一である。したがって, ICRU Report 39/51 の値とここで勧告する実用量の比較は, 防護量との比較となる。周辺線量への換算

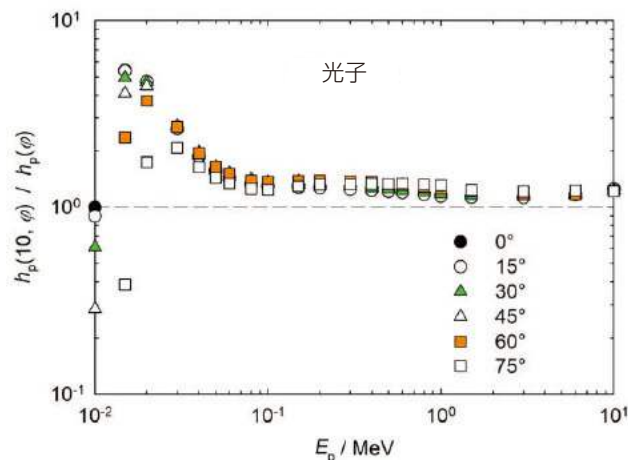


図 4.3 カーマ近似法を用いた ICRU Report 57 (1998) から引用した、光子におけるフルエンスから深さ 10 mm の個人線量当量への換算係数  $h_p(10, \varphi)$  (Endo, 2017) と勧告値  $h_p(\varphi)$  との比による比較  $h_p(\varphi)$  の推奨値に対する比として示した。

係数の数値は付属書 A.1 に、個人線量への換算係数の数値は付属書 A.2 に示す。

図 4.1 から図 4.3 に ICRU Report 39/51 の周辺線量当量と個人線量当量を示しているが、光子について 70 keV 未満のエネルギーで実効線量が過大評価となっていることが分かる。実効線量はファントム全体の加重平均であるのに対して、個人線量当量と周辺線量当量は深さ 10 mm であるが、70 keV 未満のエネルギーでは光子はあまり深部まで透過しない。エネルギー分布のもう一方の端では、3 MeV を超えるエネルギーで、これらの量による光子の実効線量が徐々に過小評価となることが見て取れる (Pelliccioni, 1998; 2000)。その理由は、深さ 10 mm ではビルドアップはほんの一部であるが、人体形状ファントムではそれより深い部分でさらにビルドアップが生じている。線量当量評価のための組織内深さ 10 mm は、ICRU Report 39 (1985) において、体内の臓器や組織における最大線量当量をほぼ表すように選択されたものであるが、100 keV から 3 MeV の間では、周辺線量当量や個人線量当量は実効線量を過大評価する結果となった。3 MeV から 10 MeV では、ICRP Publication 74 (1996) と ICRU Report 57 (1998) における周辺線量当量と個人線量当量の換算係数の計算にカーマ近似を使用したため、光子と電子の寄与の総和とし

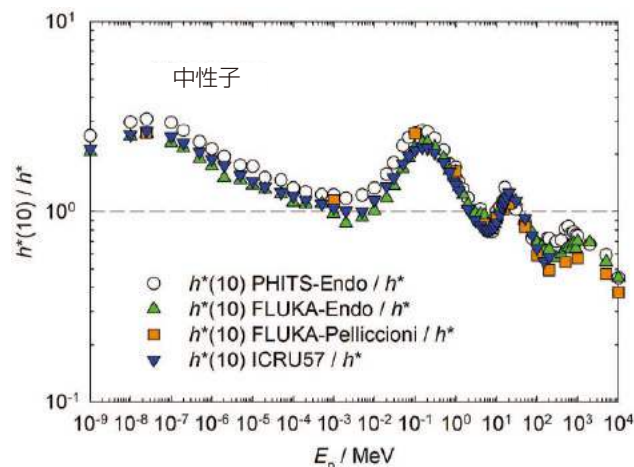


図 4.4 中性子におけるフルエンスから深さ 10 mm の周辺線量当量への換算係数  $h^*(10)$  と勧告値  $h^*$  との比による比較

注 Endo<sup>3</sup> による PHITS と FLUKA を用いた結果、Pelliccioni による FLUKA を用いた結果 (2000)、ICRU Report 57 (1998) の計算結果など、様々なコードを用いた  $h^*(10)$  の計算結果を示した。

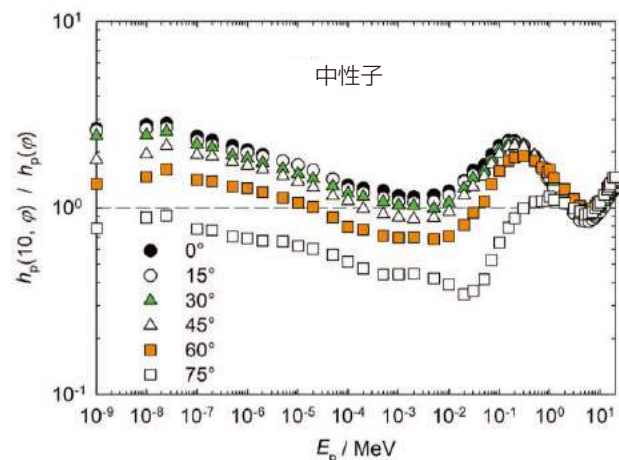


図 4.5 中性子におけるフルエンスから深さ 10 mm の個人線量当量への換算係数 (ICRU Report 57 (1998))  $h_p(10, \varphi)$  (Endo, 2017) と勧告値  $h^*$  との比による比較

て実効線量と事実上数値が一致した。これは、実効線量計算に関連する深さ 10 mm の線量値が、人為的に完全にビルドアップされたことによる。

図 4.4 と図 4.5 は、球または身体における深さ 10 mm

<sup>3</sup> Endo, A. (2016). *Personal communication* (Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, Japan).

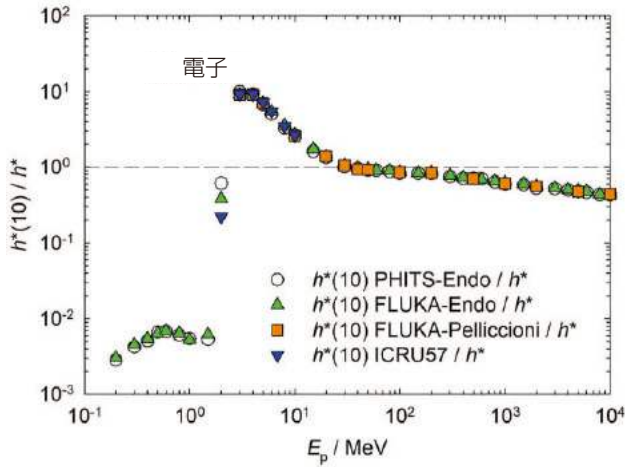


図 4.6 電子におけるフルエンスから深さ 10 mm の周辺線量当量への換算係数  $h^*(10)$  と勧告値  $h^*$  との比による比較

注 Endo<sup>3</sup>による PHITS と FLUKA を用いた結果, Pelliccioni (2000) による FLUKA を用いた結果, ICRU Report 57 (1998) の計算結果など, 様々なコードを用いた  $h^*(10)$  の計算結果を示した。

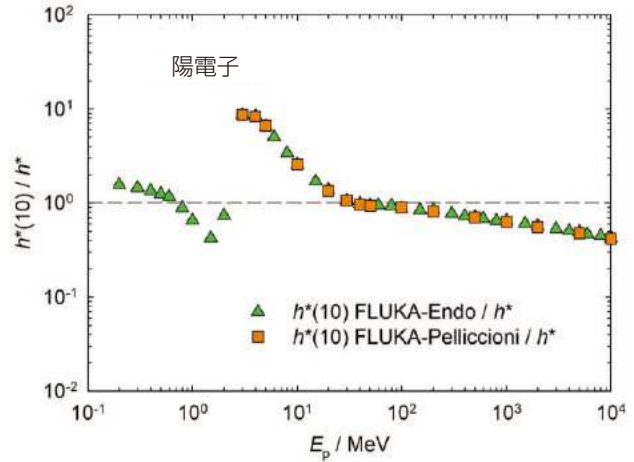


図 4.8 陽電子におけるフルエンスから深さ 10 mm の周辺線量当量への換算係数  $h^*(10)$  と勧告値  $h^*$  との比による比較

注 Endo<sup>4</sup>による FLUKA を用いた結果や Pelliccioni (2000) による FLUKA を用いた結果など, コードを用いた  $h^*(10)$  の計算結果を示した。

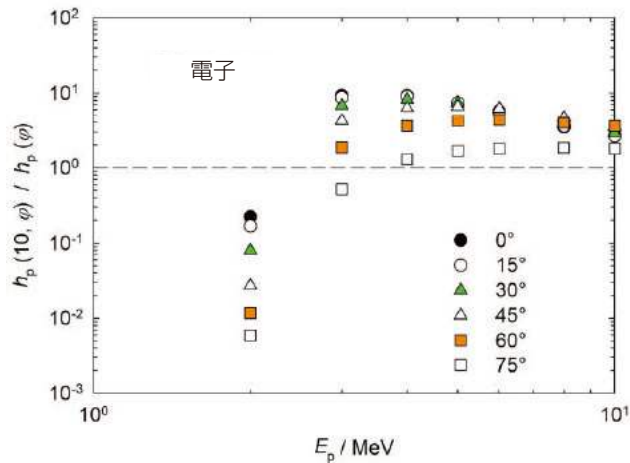


図 4.7 Grosswendt and Chartier (1994) と ICRU Report 57 (1998) より, 電子におけるフルエンスから深さ 10 mm の個人線量当量への換算係数  $h_p(10, \varphi)$  と, 勧告値  $h_p(\varphi)$  (Endo, 2017) との比による比較

が, 中性子の実効線量の推定には最適ではないことを示している (ICRU, 1985)。40 MeV を上回るエネルギーを持つ中性子について, ICRU Report 39/51 の実用量  $H^*(10)$  による実効線量は, エネルギーとともに過小評価の度合いが増える。これは, この中性子エネルギーより高いエネルギーでは, 組織内の深さ 10 mm における吸収線量のビルド

アップが不完全であることを反映している。その他の変更点は, 線質係数の代わりに周辺線量と個人線量の放射線加重係数を使用したことと, ICRU 球の深さ 10 mm から人体形状ファントムに変更したことである。

図 4.6 から図 4.8 は, 電子と陽電子について, ICRU Report 39/51 の実用量  $H^*(10)$  と  $H_p(10)$  により, 3 MeV から 30 MeV の間の実効線量が過大評価されることを示している。2 MeV 未満の電子エネルギーでは,  $H^*(10)$  と  $H_p(10)$  による実効線量の著しい過小評価は, 電子の飛程が  $r < 10$  mm と限られていることにより説明される。本書で勧告する実用量  $H^*$  は, 実効線量への寄与が組織加重係数  $w_T = 0.01$  で示される, 皮膚へのデトリメントを考えた量である。陽電子については, 深さ 10 mm で生じた消滅光子により沈着する吸収線量は, 一次粒子の飛程が限られていることにより相殺される。

図 4.9 は,  $E_p < 80$  MeV の陽子の周辺線量当量  $H^*(10)$  が, 周辺線量  $H^*$  を過大評価していることを示している。その理由は, 組織内の深さ 10 mm に沈着したエネルギーが,  $H^*$  と  $H_p$  の基となった臓器のエネルギー沈着の加重

<sup>4</sup> Endo, A. (2016). *Personal communication* (Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, Japan).

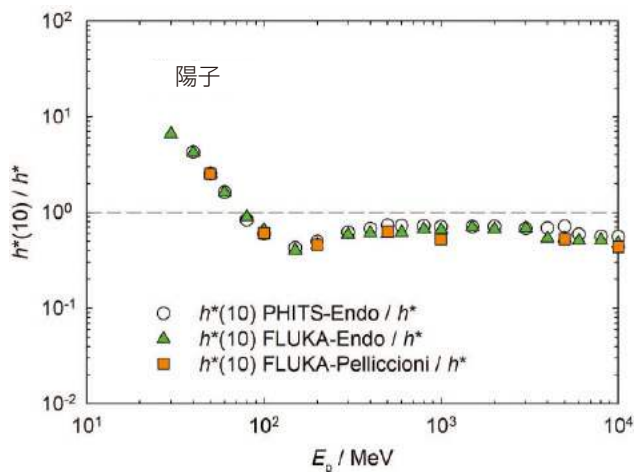


図 4.9 陽子におけるフルエンスから深さ 10 mm の周辺線量当量への換算係数  $h^*(10)$  と勧告値  $h^*$  との比による比較

注 Endo<sup>4</sup> による PHITS と FLUKA を用いた結果や Pelliccioni (2000) による FLUKA を用いた結果など、様々なコードを用いた  $h^*(10)$  の計算結果を示した。

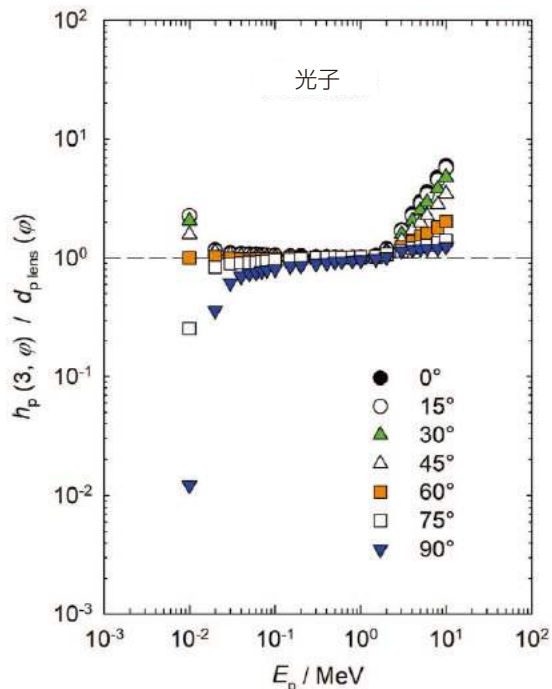


図 4.11 光子におけるフルエンスから深さ 3 mm の個人線量当量への換算係数  $h_p(3, \varphi)$  (Behrens, 2017a) と勧告値  $d'_{p \text{ lens}}(\varphi)$  との比による比較

注 様々なコードを用いた  $h_p(3, \varphi)$  の計算結果を示した (Daures *et al.*, 2011; Gualdrini *et al.*, 2011)。  $h_p(3, \varphi)$  のデータは 10 keV ~ 10 MeV の範囲となっている。

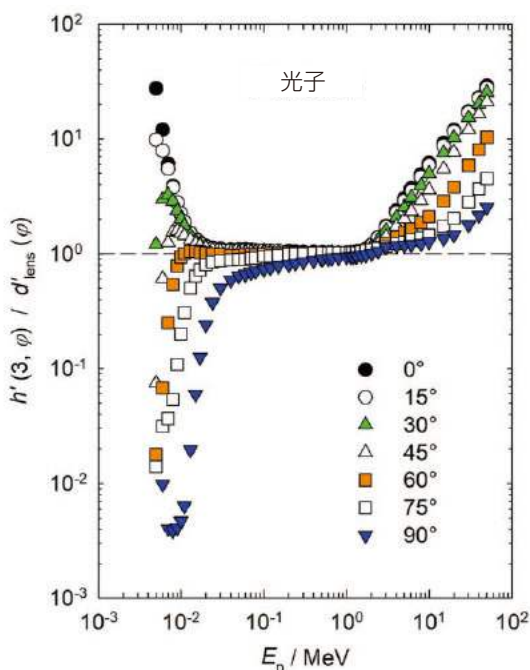


図 4.10 光子におけるカーマ近似によるフルエンスから深さ 3 mm の方向性線量当量への換算係数  $h'(3, \varphi)$  (Behrens, 2017b) と勧告値  $d'_{\text{lens}}(\varphi)$  との比による比較

平均を上回っているためである。約 100 MeV を超える高エネルギーでは、換算係数は中性子の場合と同じ傾向を示している。

#### 4.4.3 方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量

フルエンス、粒子の種類、エネルギーおよび入射の方向が同じ場合、粒子フルエンスから方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量への換算係数の数値は同じである。以下の図において、ICRU Report 39/51 に定義されている  $H'(3)$  と  $H_p(3)$  の換算係数の数値と、粒子フルエンスから  $d'_{\text{lens}}(\varphi)$  と  $d'_{p \text{ lens}}(\varphi)$  への換算係数の今回報告値とを、光子と電子のエネルギーの関数として比較する。

図 4.10 と図 4.11 は、ICRU Report 39/51 の実用量  $h'(3, \varphi)$  と  $h_p(3, \varphi)$  は、20 keV から 2 MeV のエネルギー区間の光子の防護量に良い近似 (数値的に  $d'_{\text{lens}}$  と  $d_{p \text{ lens}}$  に近い) を与えることを示している。光子エネルギーが高くなると、眼の水晶体に対する線量が徐々に過大評価されるが、これは以前からカーマ近似が用いられていたためである。低エネルギーでは、防護量の過大評価と過小評価は光子の入射角度に大きく依存する。

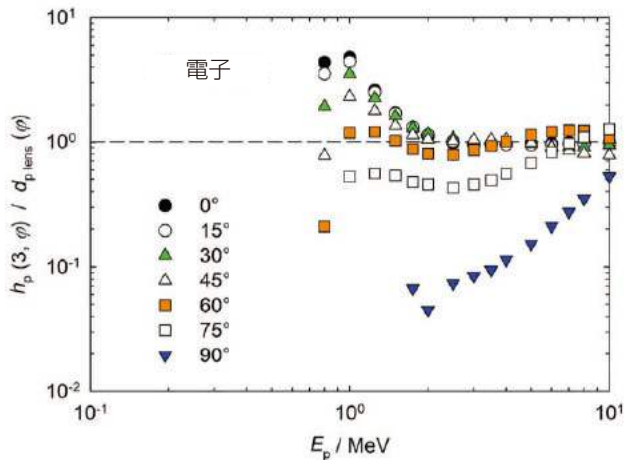


図 4.12 電子におけるフルエンスから深さ 3 mm の個人線量当量への換算係数 (Ferrari and Gualdrini, 2012)  $h_p(3, \varphi)$  (Behrens, 2017a) と勧告値  $d_{lens}(\varphi)$  (いずれかの眼の水晶体全体の最大値) との比による比較

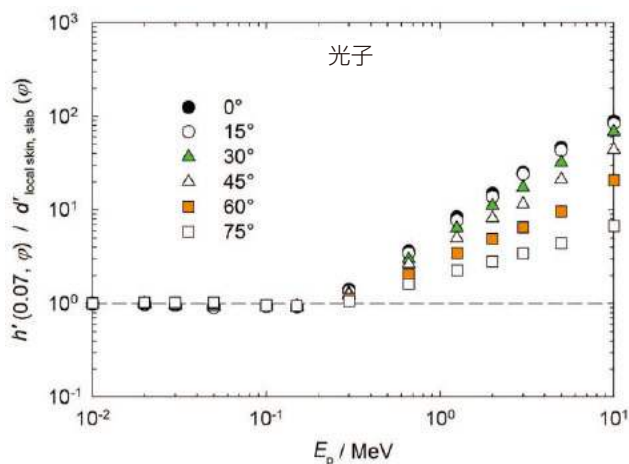


図 4.13 光子におけるフルエンスから深さ 0.07 mm の方向性線量当量への換算係数  $h'(0.07, \varphi)$  と勧告値  $d'_{local skin, slab}(\varphi)$ <sup>5</sup> との比による比較

注  $h'(0.07, \varphi)$  の計算は、カーマ近似を用いた ICRU Report 57 (1998) から引用した。

ICRU Report 39/51 の実用量  $h_p(3, \varphi)$  は、約 1 MeV のエネルギーを持つ電子の垂直入射について、眼の水晶体の防護量を過大評価している。図 4.12 に示すように、2 MeV から 10 MeV の範囲では、ICRU Report 39/51 実用量は、60° 以下の入射角度について妥当な推定値を示した。

<sup>5</sup> Dauers, J. (2017). *Personal communication* (Gif-sur-Yvette, Cedex France).

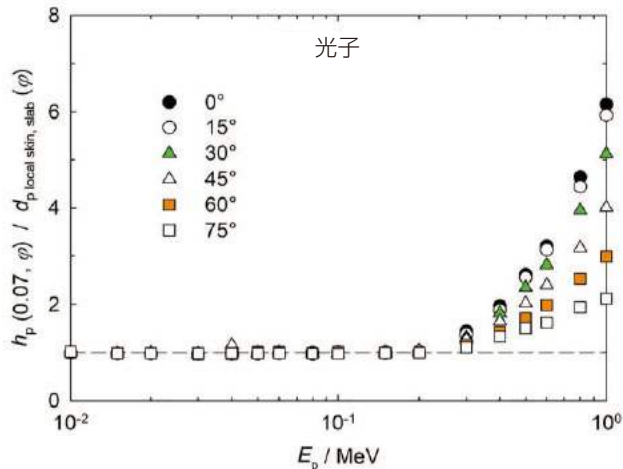


図 4.14 光子におけるフルエンスから深さ 0.07 mm の個人線量当量への換算係数  $h_p(0.07, \varphi)$  と勧告値  $d_{p local skin, slab}(\varphi)$ <sup>6</sup> との比による比較

注  $d_{p local skin, slab}(\varphi)$  の計算は、カーマ近似を用いた ICRU Report 57 (1998) から引用した。

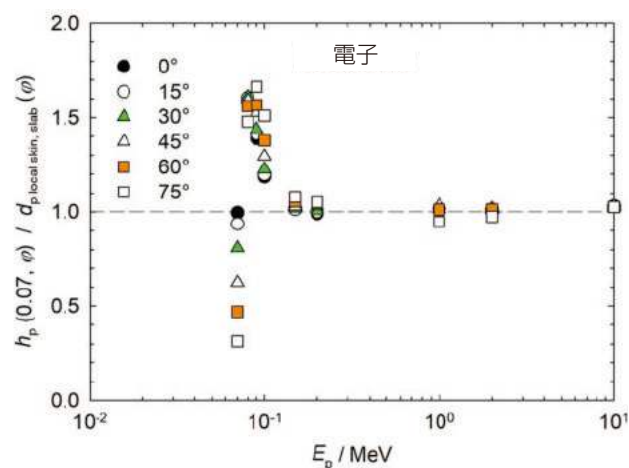


図 4.15 電子におけるフルエンスから深さ 0.07 mm の個人線量当量への換算係数  $h_p(0.07, \varphi)$  と勧告値  $d_{p local skin, slab}(\varphi)$ <sup>6</sup> との比による比較

注  $h_p(0.07, \varphi)$  の計算は、ICRU Report 57 (1998) から引用した。

#### 4.4.4 方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量

フルエンス、粒子の種類、エネルギー、方向および指定のファントムが同じ場合、粒子フルエンスからスラブファントムの局所皮膚における方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量への換算係数の数値は同じである。

<sup>6</sup> Dauers, J. (2017). *Personal communication* (Gif-sur-Yvette, Cedex France)

図 4.13 から図 4.15 において、 $H'(0.07)$  と  $H_p(0.07)$  に関する ICRU Report 39/51 の定義の数値と、粒子フルエンスから  $d'_{\text{local skin slab}}(\varphi)$  と  $d_{\text{p local skin slab}}(\varphi)$  への換算係数の勧告値との比較が示されている。

200 keV 以上では、 $H'(0.07, \Phi)$  と  $H_p(0.07)$  に関して

ICRU Report 57 (1998) と ICRP Publication 74 (1996) に記されている換算係数の値を得るためにカーマ近似を使用すると、局所皮膚吸収線量が過大評価され、10 MeV の光子エネルギーでは 90 倍にもなった (Veinot and Hertel, 2011)。



## 5 今回勧告の実用量導入による実際の影響

### 5.1 緒 論

外部放射線に対する防護に実用量を導入する理由の1つは、防護量が、空間的に広がりのある領域で定義されているために測定できないことである。実用量は、以下の3つの基準を満たさなければならない。

- 1点で定義される。
- 関連する防護量に容認できる正確さで推定値を与える。
- 機器（個人線量計、エリアモニタリング機器）で信頼性のある測定ができる。

最初の2つの要件は、本報告書の勧告量の定義によって満たされる。最後の基準は些細なものであるように思われるが、適切な機器が利用可能であることが要件となる。外部放射線に対する本報告書で勧告する実用量の導入は、放射線防護の実務に対し影響を及ぼすであろう。

勧告するフルエンスから線量、および、カーマから線量への換算係数のエネルギーと角度依存性をICRU Report 35/51のそれらと比較した結果を4.4節に示した。ICRU Report 39/51の実用量のエネルギーと角度依存性を正確に再現する感度を有する個人線量計とエリアモニタリング機器は、勧告された実用量に必要とされる応答に対して、一定の比率の相対的な応答を有するであろう。したがって、全般として、限定されたエネルギー範囲を除いて、それら機器は本報告書で勧告した実用量を正確に評価するには適していない。

本章では、今回勧告の量を正しく評価するための、放射線防護の機器と校正において予測される変更について概述する。モンテカルロ法による予測的な放射線防護のための評価では、勧告される換算係数をモンテカルロ計算コードに組み込めば、困難はないものと思われる。

### 5.2 個人線量計とエリアモニタリング機器の設計

線量または線量率の評価に適した個人線量計は、1つ以上の受感部（「検出器」）に基づいており、物理的効果を用いてある粒子の種類とエネルギーの電離放射線から再現可能な信号を発生させる。放射線場（ほとんどの場合、粒子フルエンス）を表す放射計測量または線量計測量に対する線量計の応答特性におけるエネルギーと角度の依存性は、同じ放射線場の量に対する実用量のエネルギーと角度の依存性と同様になる。

限定された範囲を超えるエネルギーと角度、ならびに複数の粒子の種類に対しては、これらの要件を満たす（または現在の知識を用いて設計できる）個人線量計はない。適切な個人線量計とエリアモニタリング機器の開発はそれ自体が科学であり、数十年にわたって新しい量または修正された量の定義に適応してきた。放射線防護に関し主要な光子モニタリング手段である電離箱とガイガー・ミュラーカウンタは100年近くの歴史を持つ。写真フィルムは、Becquerelによる放射能の発見につながった検出器であるが、近代的な代替手法により個人線量測定として使われなくなったのは最近である。最初のレムカウンタはAnderssonとBraun（1963）によって記述され、その改良版は今でも中性子の実用量の計測に最も使われている機器である。ICRU Report 39/51の実用量の公表以前に市販されていた上記の古典的な放射線計測器は、エネルギーと角度の依存性を正確に模していなかった。しかし、このような限界があるにもかかわらず、これらの計測器によって、線量と線量率の有益な評価が経験豊富な放射線防護の専門家に提供されてきた。

### 5.2.1 ICRU Report 39/51 の実用量に関し必要とされる個人線量計の応答特性

ICRU Report 39/51 の実用量は 1980 年代に策定され、1990 年代に多くの国の放射線防護の法令に取り入れられている。実用量の測定に関して法的拘束力のある性能要件は、さまざまな測定状況と線量計の種類に関する国際規格に記載されている [国際電気標準会議 (IEC) 60846, 2009; IEC 61526, 2010; IEC 62387, 2012; IEC 61005, 2014]。

このような規格は、製造者や専門家との協議と協力をもって策定され、技術の現状を反映する。光子で最も広く使用されている個人線量計の種類は、80 keV から 1.25 MeV までのエネルギー範囲で入射角度が  $60^\circ$  以下の量  $H_p(10, \varphi)$  に対する応答が 0.71 から 1.67 の間である場合、IEC 62387 (2012) 基準の要件を満たす。 $H_p(3, \varphi)$  と  $H_p(0.07, \varphi)$  に対しても、同様の要件が線量計に規定されている。これらは、最低限の要件であり、製造者は、より厳しい相対応答特性を有し、より広い範囲のエネルギーと角度に対応できる線量計を提供している場合もある。多くの線量計システムは、80 keV 以下の光子エネルギーに対して容認できる相対的応答を有するが、1.25 MeV より高い平均エネルギーまで測定能力を拡張できるものはほとんどない。

中性子の場合、物理的な検出器はより高価であり、市場も小さいため、結果として規格では線量計が十分な応答特性を示すエネルギーや角度の範囲を狭くすることが許容されている [国際標準化機構 (ISO) 21909-1:2015]。

以下の 2 節では、広く使用されている数種類の線量計とエアロモニタリング機器に対する勧告した実用量の導入による影響を説明する。これらは例示であり、利用可能な機器についての概説ではない。将来的には、研究者と製造者が協同して、現在の線量計やエアロモニタリング機器の改造や、勧告した実用量に必要な測定能力を満たすように新たに開発することが期待される。

### 5.2.2 今回勧告の実用量に対する光子線量計とエアロモニタリング機器の応答特性

実用量を測定する線量計またはエアロモニタリング機器において、フルエンスまたは空気カーマに対する応答特性

のエネルギーと角度の依存性は、実用量のそれぞれの換算係数におけるエネルギーと角度の依存性をできるだけ厳密に反映していなければならない。線量計の応答は、線量計に表示された値  $G$  と、取り決め真値  $C$  の比である。

$$R = \frac{G}{C} \quad (5.1)$$

例えば実用量の新たな定義によるなど、取り決め真値  $C$  に変化が生じた場合、新たな応答  $R$  は、新旧の換算係数  $h_{\text{old}}$  と  $h$  をそれぞれ使うことにより、既知の古い応答  $R_{\text{old}} = G/C_{\text{old}}$  から計算できる。

$$R = \frac{G}{C_{\text{old}}} \frac{C_{\text{old}}}{C} = R_{\text{old}} \frac{C_{\text{old}}}{C} = R_{\text{old}} \frac{h_{\text{old}}}{h} \quad (5.2)$$

この式は、旧実用量と勧告実用量の照射方法が変わらない場合 (個人線量計では同じファントム, エリアモニタリング機器では自由空气中), 勧告した実用量に対して用いることができる。

例えば、ガイガー・ミュラーカウンタに基づくエアロモニタリング機器の応答は、「単位周辺線量当たりの計数」という機器定数、もしくは以下で示される。

$$R = \frac{N}{H^*} \quad (5.3)$$

これまでの周辺線量当量  $H^*(10)$  に対する線量計の応答が既知である場合、 $R$  は、以下のように計算することができる。

$$R = \frac{N}{H^*(10)} \frac{H^*(10)}{H^*} = R_{\text{old}} \frac{H^*(10)}{H^*} = R_{\text{old}} \frac{h^*(10)}{h^*} \quad (5.4)$$

そして、勧告した実用量に対する相対的な応答は、基準条件下での機器の応答に規格化することで、通常通りに決定できる。光子線量計とエアロモニタリング機器の場合、通常の基準条件は、 $0^\circ$  で入射する  $^{137}\text{Cs}$  の放射線 ( $E_p = 662 \text{ keV}$ ) である。

図 5.1 では、ガイガー・ミュラーのエアロモニタリン

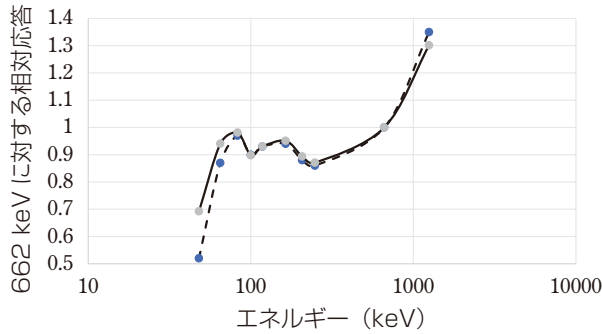


図 5.1 ガイガー・ミュラーカウンタを用いた市販のエリアモニタリング機器の周辺線量  $H^*$  (実線) および周辺線量当量  $H^*(10)$  (破線) の 662 keV に対する相対応答 (Otto, 2019 を変更して利用)

グ機器の周辺線量  $H^*$  および周辺線量当量  $H^*(10)$  の 662 keV 光子に対する相対応答を示す。これら 2 つの線量の比は、図 4.1 の  $h^*(10)/h^*$  の比に相当する。この頑丈な現場用機器には、鋳造アルミニウムの管に起因する 60 keV 未満の感度のカットオフがある。この機器については、662 keV のエネルギーでの周辺線量当たりの表示値に対する再校正以外は、勧告される新たな実用量の導入による変更は必要ないことが明らかである。

図 5.1 と同様の結果が、いくつかの電離箱機器について得られている (Otto, 2019) 一方、それ以外の電離箱は、70 keV 未満の光子における周辺線量  $H^*$  に対して過大応答を示す。 $H_p(10)$  のエネルギー応答をモデル化した現在承認されている線量計は、これら電離箱の 70 keV 未満の光子エネルギーの  $H^*(10)$  に対する過大応答と同じ応答を示すため、実効線量  $E$  が過大評価される。個人線量計は、医療分野における職業被ばくに対応するため、低エネルギー光子に対する感受性がなければならない。これらの低エネルギー範囲では、個人線量への換算係数が個人線量当量への換算係数よりも低いため (図 4.2 参照)、勧告した実用量の導入には低エネルギー光子のエネルギー応答の改良が必要となる。これは、検出器の素子の前面により多くの材料を導入し、主に低エネルギー光子を減衰させることによって達成できるかもしれないが、斜めに入射する光子に対する応答には注意が必要であり、検出器の変更が必要となるかもしれない。熱ルミネセンス線量計の検出器を用い

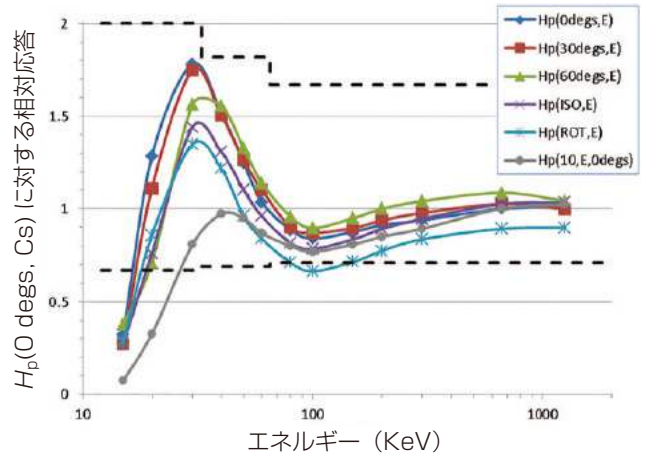


図 5.2 再設計された熱ルミネセンス線量計の  $H_p(0^\circ, Cs)$  に対する  $H_p(\varphi)$  の相対応答

注 また、再設計後の  $H_p(10, 0^\circ)/H_p(10, 0^\circ, Cs)$  の相対応答を示した (Eakins and Tanner, 2019)。

たパッシブ型個人線量計について、例を図 5.2 に示す。 $H_p$  の過大応答は、追加の遮蔽により大幅に補正できる (Eakins and Tanner, 2019)。図 5.2 中の破線は、IEC により勧告された個人線量当量の制限値を示している (IEC 62387:2012)。このような個人線量計は、 $H_p(\varphi)$  には適用できない可能性がある。

異なる厚さの減衰材料を前面に付けた 2 つ以上の検出器の応答に基づく個人線量計では、評価アルゴリズムの係数、多くの場合、異なる検出器の信号の線形の組み合わせを変更し、応答を新しい要件に適応させることができる。

### 5.2.3 今回勧告の実用量に対する中性子個人線量計とエリアモニタリング機器の応答特性

4.4.2 節と図 4.5 では、中性子に対する ICRU Report 39/51 の実用量  $H_p(10, \theta)$  と勧告した実用量  $H_p(\varphi)$  のフルエンスに対する応答の差について説明した。ポリアリルジグリコールカーボネート素材中に形成される飛跡のエッチングに基づく中性子個人線量計の  $H_p(\varphi)$  に対する応答を解析した (Tanner *et al.*, 2018)。この線量計は、放射線の垂直入射に対してより感度が高く、中性子の個人線量計測においてきわめて重要である信号対ノイズ比が改善することが判明している。しかし、 $H_p(\varphi)$  に対する線量計の応答

の角度依存性は、 $H_p(10, \theta)$  よりも悪い。その理由は、図 4.5 に示すように、 $H_p(\varphi)$  の角度への依存がより顕著であるためである。著者らによれば、線量計の再設計は技術的に可能とのことである。

19 の作業場の中性子場について測定あるいは計算された応答を換算することによる、中性子エリアモニタリング機器（レムカウンタ）の周辺線量応答が計算されている（Eakins *et al.*, 2018）。レムカウンタは、熱外中性子と高速中性子を減速し、その結果生じる熱中性子を検出することで機能する。これらの検出器のエネルギーと角度の応答は減速材の形状と材質に大きく依存する。調査した4つの計器は、100 keV 付近のエネルギー領域で最大 2.5 倍の応答のばらつきが見られた。中性子の放射線場は EVIDOS プロジェクト（Schuhmacher *et al.*, 2006）で研究され、核燃料サイクル施設の作業場を対象としている。

作業場の放射線場における周辺線量または周辺線量当量の参考値は、フルエンスのエネルギー分布を積分して算出される。

$$H = \int dE \frac{d\phi}{dE} h_{\phi}(E) \quad (5.5)$$

ここで、 $H$  は  $H^*$  または  $H^*(10)$  を表し、 $h_{\phi}(E)$  は対応する換算係数を表す。

現実的な作業場の放射線場の幅広いエネルギー分布について、調査に用いた4つのレムカウンタの相対応答の計算結果を図 5.3 に示す。レムカウンタは、周辺線量当量  $H^*(10)$  よりも周辺線量  $H^*$  に対してより高い相対応答を示している。これにより、勧告した実用量を参照した場合、放射線場の測定はより保守的になるであろう。

この過大評価は、2つの方法で補正することができる：

- 著者らは、1つのレムカウンタ用減速材の改良について検討し、低中性子エネルギーに対してより低い応答を得た。
- ここで検討した4つのレムカウンタのより簡単なもうひとつの補正方法は、 $H^*$  に対する機器の過大応答を補正することである。これらの作業場の放射線場における  $H^*(10)$  と  $H^*$  の平均比は 1.6、標準偏差は 0.25 で

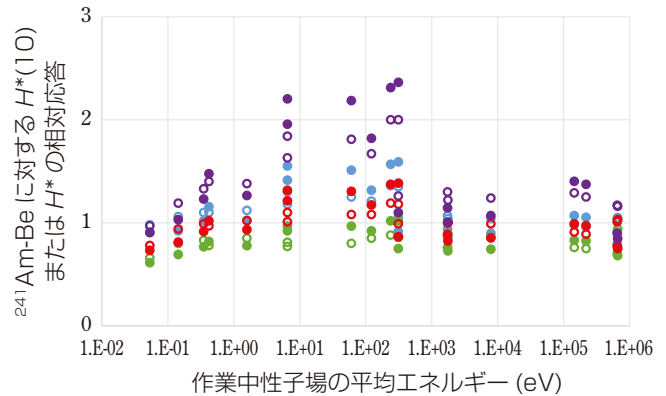


図 5.3 19 の作業場における中性子場について、4つのレムカウンタの  $^{241}\text{Am-Be}$  からの中性子に対する計算された相対応答（Eakins *et al.*, 2018 から入手）

注 白抜き記号（○）は、 $H^*(10)$  に対する相対応答を示し、白抜き以外の記号は  $H^*$  に対する相対応答を示した。各機器は、色で分けて示している。各作業場における中性子場の平均エネルギーは、その中性子場について計算された  $H^*(10)$  の換算係数で表した。

ある。係数  $c \approx 1/1.6$  を適用すると、19 の作業場の放射線場の  $H^*$  に対する相対応答の全体的な精度は、これらの作業場の放射線場の  $H^*(10)$  を評価する時の精度と同等となる。

## 5.2.4 個人線量計とエリアモニタリング機器の再設計に関する結論

前2節の例は、本書で勧告する実用量が法で定められた量になった後も、放射線防護用線量計の有用性が失われなことを示している。1990年から2010年頃にかけて実施された ICRU Report 39/51 の実用量の導入段階では、新しい線量計の設計のため、その多くが大学、研究機関、製造者の協力のもとで科学的および技術的な作業が開始された。この期間のうちに、機器応答を予測するためのモンテカルロ放射線輸送計算コードの使用は一般的となり、もはやその使用は少数の専門家に限定されるものではなくなった。これにより、勧告量に適した個人線量計とエリアモニタリング機器の設計が容易になった。現在では試作品を作る前に机上で線量計を数値的に設計することができるようになっており、これまでの導入時と比べて開発費用が大幅に削減している。

もう一つの費用要因は、旧式の線量計の交換である。こ

れは、数十万台もの線量計の在庫を持つ個人線量測定サービスにとって懸念事項である。しかし、本報告書の発行から国際的な要件（例えば、国際原子力機関や欧州連合による基本安全基準）への勧告量の導入、各国の国内法令への取り入れ、最終的には使用の義務化までにはかなりの年数が経過するであろう。線量計の商品寿命が20年<sup>1</sup>である場合、今回勧告した実用量が法的要件になった際には、最近導入された線量計はこの寿命に近づいているであろう。したがって、線量計の交換に必要な投資は、勧告した実用量のみに起因するものではなく、線量測定システムを更新する経済的必要性にも基づいている。しかしながら、経験上、特に現在設計され承認されている光子線量計は本報告書で勧告されている実用量を過大評価することが多いため、ICRU Report 39/51の実用量と本報告書で勧告されている実用量が実際の放射線防護において共存している間は、各国の規制当局は期間延長を認めるであろう。

本報告書は、国際および国内当局が、実用量の実施にかかる費用と予測的および遡及的測定における防護量のより良い推定という便益とのバランスを取るため、法的拘束力のある実用量を徐々にかつ慎重に施行していく必要性を認識するよう勧告する。

### 5.3 個人線量計とエリアモニタリング機器の校正

これらの機器の校正手順の大部分は変更されない。唯一の変更は、校正場の実用量の値を、本報告書で勧告した換算係数を用いて、フルエンスまたは空気中のカーマの測定量から計算することである。

#### 5.3.1 校正手順の解説

校正手順の詳細は以下の通りである。

1. 校正の時点で、校正場の空気中のフルエンス率または空気カーマ率は、一次または二次標準により、もしくは二次または一次標準サービスにより校正され

た仲介測定器を用いて決定される。二次標準または仲介測定器を使用する場合、この測定はファントムを使わず自由空気中で行われる。

2. 光子と中性子については、校正対象の個人線量計またはエリアモニタリング機器に適した実用量の線量率、すなわち $\dot{H}$ または $\dot{D}$ は、測定されたフルエンス率または自由空気中の空気カーマ率から、校正される個人線量計またはエリアモニタリング機器の粒子の種類、エネルギーおよび入射角度に基づく換算係数で算出される。単一エネルギーの放射線の換算係数は本報告書の付属書に記載されているが、エネルギー分布のある放射線については、エネルギー分布で積分して算出する必要がある。電子線源に関しては、校正対象の個人線量計またはエリアモニタリング機器に適した実用量の線量率、すなわち $\dot{H}$ または $\dot{D}$ は、測定する組織への吸収線量率（通常はポリメチルメタクリレート [PMMA] のファントムなど組織等価スラブファントムの深さ0.07 mmで外挿電離箱を用いた測定）と、ファントムの局所皮膚または眼の水晶体および入射角度のための補正係数を用いて算出される。
3. 個人線量計またはエリアモニタリング機器の基準点を校正点に設置する。個人線量計は、対応するファントム上に設置する（以下参照）。個人線量計の基準点と基準方向は、製造者によって記載されている。一般に、線量計の基準点は線量計の内部に設置される。顧客からの要望に応じて、基準点は別の位置、例えばファントムの前面中央に設定することができる（ISO 29661:2012/Amd:2015）。
4. 個人線量計またはエリアモニタリング機器を校正場で照射し、その表示値 $G$ を評価する。
5. 照射終了時に、校正定数は、以下の比によって決定される。

$$N = \frac{G}{H} \quad \text{または} \quad N = \frac{G}{D} \quad (5.6)$$

ここで、 $H$ と $D$ は、手順2で求めた実用量の線量率の

<sup>1</sup> マイクロエレクトロニクスの広い普及と早い技術の発展の周期により、システムの推定寿命はここに記した年数よりも更に短くなる可能性がある。

時間積分から求めた、実用量の取決め値である。

この作業は、線量計またはエリアモニタリング機器の種類、ならびに求められる校正の目的に応じて、さまざまな入射角や粒子エネルギー、あるいは粒子の種類を変えて、繰り返さなければならない場合がある。

### 5.3.2 個人線量計の校正ファントム

さまざまな実用量の個人線量計の校正に推奨されているファントムは、ICRU Report 39/51 の実用量のためのファントムと変わらない。

- 個人線量：幅 300 mm，高さ 300 mm，深さ 150 mm の外形寸法を有する PMMA 製の水で満たされた中空のスラブで，前面の壁厚が 2.5 mm，それ以外の壁厚が 10 mm (ISO 4037-3:2019)
- 個人水晶体吸収線量：外径 200 mm，高さ 200 mm，および厚さ 5 mm の壁および面を有する，PMMA 製の水で満たされた中空の円筒 (Daures *et al.*, 2011 ; Gualdrini *et al.*, 2011 ; Vanhavere *et al.*, 2012)
- 個人局所皮膚吸収線量：
  - 体幹部については，個人線量と同じ水で満たされたスラブファントム (ISO 4037-3:2019)
  - 四肢（手足）については，外径 73 mm，高さ 300 mm，および円筒壁の厚さ 2.5 mm，末端の面は 10 mm の厚さを有する，PMMA 製の水で満たされた中空のピラー (ISO 4037-3:2019)
  - 指は，直径 19 mm，長さ 300 mm の PMMA 製の固体のロッド (ISO 4037-3:2019)

ICRU と ICRP の代用組織で作製されたファントムに対する換算係数と，PMMA 製の水で満たしたファントムで得られた換算係数との違いは，放射線防護計測において達成可能な計測精度の範囲において無視できる程度であることは，さまざまな形で示されている（たとえば，ICRU Report 47 (1992) を参照）。水で満たされたスラブファントムは，全身被ばくにおける実効線量を評価するために個人線量計を着用する場所である，人間の体幹部を良く模擬している。

### 5.3.3 光子の校正に関する特別な規定

光子場におけるエリアモニタリング機器と個人線量計の校正の日常的な手順では，完全な荷電粒子平衡を近似した状態が適用されている。したがって，50 MeV までの光子エネルギーに対しては，荷電粒子平衡を近似するためにカーマ近似を用いて計算した追加の換算係数が提供されている（付属書 A.5 参照）。

光子線源とモニタリング機器または個人線量計，あるいはエリアモニタリング機器との間に十分な空気がない場合，光子エネルギーに応じた厚さの PMMA 製のビルドアップ板をモニタリング機器または個人線量計またはエリアモニタリング機器の前に配置することによって荷電粒子平衡が得られる。校正点での実用量の線量率の計算において，ビルドアップ板によるわずかな減衰を補正する必要がある (ISO 4037-3:2019)。この手順は，光子ビーム中の電子の混入を除去するとともに，荷電粒子平衡を作り出すため，使用する校正線源の設計およびコリメーションとは関係なく，再現性のある校正条件を保証する。荷電粒子平衡が得られない光子場においては，保守的な校正定数が得られるが，放射線場を支配する可能性がある混入電子のモニタリングが別途必要となる場合がある。

### 5.3.4 ICRU 球の役割

実用量の周辺線量当量  $H^*(10)$  と方向性線量当量  $H'(d, \theta)$  は，ICRU 4 元素組織からなる ICRU 球の深さ  $d$  で定義された。このファントムは，測定する深さにおける線量への後方散乱の寄与を与えるため，計算上導入されたものである。ICRU 4 元素組織を作製することは不可能であるため，標準機関ではその実用量を定義通りに完全に具現化することはできない。少なくとも 1 つの一次標準機関が，単一光子エネルギーにおける代替材料と真の ICRU 球との差を評価する計算を用いて，代替材料から作製した<sup>2</sup>「近似的 ICRU 球」を使用して実用量を実現した (Boutillon and Allisy-Roberts, 1996; Perroche and Boutillon, 1989)。しかし，放射線防護で使用されているエリアモニタリング機器

<sup>2</sup> これは，個人線量計校正用のスラブ，ロッド，ピラーファントムを製造するために日常的に行われている。

と個人線量計 (ISO 6980-3:2006; ISO 8529-3:1998; ISO 4037-3:2019) の校正については、粒子フルエンスと空気カーマから ICRU Report 39/51 の実用量への計算された換算係数が一般的に適用されている。これらの換算係数の有用性を勘案すると、委員会は ICRU 球を使用しなくとも、一次および二次標準機関から線量計製造者およびエンドユーザーに至る計量の連鎖を弱体化するものではないと考えている。

#### 5.4 放射線防護の質に対する今回勧告の実用量の影響

放射線防護は、正当化、線量限度および最適化の原則に基づいている。全身、眼の水晶体、局所皮膚および四肢の線量限度は、最低限の防護基準を保証するが、放射線作業者の雇用者は、遮蔽、時間制限、作業方法の改善、自動化などの技術を適用して、作業者の被ばく線量を合理的に達成可能な限り低く抑える最適化の義務を負っている。最適化の際には、周辺線量  $H^*$  で校正されたエリアモニタリング機器を使用して放射線場の評価が行われる。最適化のさまざまな選択肢を線量低減の観点から比較することで、放射線場における活動の望ましい方針が決定される。いくつかの放射線場では、周辺線量  $H^*$  は、これまでの周辺線量当量  $H^*(10)$  よりも、予想される実効線量をより正しく推定できるようになるだろう。

一例として、実効線量  $E$  が個人線量当量  $H_p(10)$  で置き換えられた際に、 $E$  を過大評価されるグループとして、低エネルギー X 線のみで働く人々のグループがある。ISO N シリーズの N-10 から N-40 までのエネルギー分布 (10 keV ~ 40 keV のエネルギー領域) では、個人線量当量  $H_p(10)$  の数値は実効線量  $E$  より 2.5 倍から 5 倍となる (図 4.2 と図 4.3 参照)。 $H_p(10)$  で評価された年間線量が法定限度に近づく場合、放射線防護の専門家は被ばく条件に関する知見から実効線量  $E$  を評価し、規制を遵守していることを実証することができる。今回勧告した個人線量  $H_p$  およびそれをより正確に測定するのに適した個人線量計を導入すれば、実効線量  $E$  の現在の過大評価は低減さ

れるであろう。IVR (画像下治療)\*に従事する外科医と看護師がこのようなグループを構成している。被ばくを正しく評価し、最適化することは、雇用主および医療施設の放射線防護専門家の義務である。彼らが手術室でより長い時間を割り当てられるかどうかは、放射線被ばく以外の複数の要因、例えば最大作業時間や労働安全衛生に左右される。雇用主および放射線防護専門家が誠実に最適化プロセスを実施し、従業員が承認され最適化された作業方法と制約を遵守する限り、実効線量を個人線量  $H_p$  で評価しても、これらの人々への放射線防護の質は損なわれないであろう。

個人線量を記録する場合、実効線量は一般的に個人線量  $H_p$  で代用される。年間線量が法定線量限度に近づくか、線量計の 1 ヶ月間の測定値が予想外に高くなる、または線量計が信頼し得る実効線量  $E$  の推定値を与えるのに技術的に適していないと放射線防護の専門家が判断した場合、当該専門家は、さらなる知識を用いて線量計の測定値を補正するか、または追加の知識のみに基づいて実効線量の値を決定する権利を有する。追加の知識とは、個人線量と実効線量の過大評価または過小評価を引き起こす可能性のある、放射線場の空間的分布、そのエネルギーおよび角度依存性、特定の身体部位の被ばくが顕著となる作業方法、線量計の応答に関する情報である。

#### 5.5 今回勧告の実用量が線量記録に及ぼす影響

第 4 章の換算係数の違いや前節の例からわかるように、ある放射線場における個人線量と個人線量当量、周辺線量と周辺線量当量の値は大きく異なる可能性がある。低エネルギーの X 線の例を上記に示した。同様に、 $^{137}\text{Cs}$  線源からの放射線を用いて個人線量  $H_p$  と周辺線量  $H^*$  で校正された個人線量計またはエリアモニタリング機器で計測すると、 $H_p(10)$  または  $H^*(10)$  の測定結果よりも 18% 低くなる。これは、勧告した実用量に対するフルエンスから線量への

\*訳注) 超音波、X 線透視、CT および PET-CT 等、画像情報をリアルタイムで参照しながらカテーテルを用いた血管内治療や経皮的治療を行う低侵襲性医療手技のことを指す。

換算係数が、ICRU Report 39/51 の実用量の換算係数よりも小さいことに基づいている。ただし、経験的には以下のことがわかっている。

- 換算係数のわずかな差は、実際の放射線場においては広い放射線エネルギーと角度の分布による平均化効果によって相殺される可能性が高い。
- 広い角度およびエネルギーにおける換算係数のエネルギー角度依存を正確に反映できる個人線量計はほとんどない。
- 職業被ばく線量の1ヶ月ごとの増分は、個人線量計の検出限界に近いことが多く、許容される測定の不確かさは大きくても2倍である。

これらの理由から、勧告した実用量を実務に取り入れた後に、放射線作業員の線量記録の数値に大きな変化が生じると予測するのは時期尚早である。

環境モニタリングにおいて線量記録の集計と提示は重要であるが、通常、環境中の放射線場における放射線のエネルギーと角度の分布は広いため、換算係数の変更により生じる修正が大きくなる可能性は低い。

## 5.6 将来の変更の可能性

勧告した実用量の数値は、模擬ファントムのモデル化や、実効線量  $E$ 、水晶体吸収線量  $D_{lens}$ 、局所皮膚吸収線量  $D_{local\ skin}$  のパラメータ化を含む決定方法に依存する。実効

線量  $E$  は、組織加重係数  $w_T$  と放射線加重係数  $w_R$  に依存する。ICRP によるこれらの係数の変更は、新たな科学的証拠を考慮した上でのみ決定される。例えば、陽子の加重係数は ICRP Publication 60 (1990) の  $w_R = 5$  から ICRP Publication 103 (2007) では  $w_R = 2$  に変更された。この変更は、民間の航空機乗務員で計算された実効線量の値に直接的な影響を及ぼした。放射線加重係数がさらに大きく変更される可能性は低い。

本報告書の提案は、ICRP の次期主勧告における変更で、眼の水晶体と局所皮膚への線量限度を等価線量ではなく吸収線量で設定し、それに対応する実用量も合わせて吸収線量で設定されることを想定している。

組織加重係数（その和は1に規格化される）を再調整しても、防護量のエネルギーおよび角度依存にもたらされる変更はわずかであろう。これらの変更は、個人線量計とエリアモニタリング機器の測定の不確かさよりも小さく、したがって実務上重要とはならないであろう。

本報告書で提案した変更は、防護量の変更と同様の期間で導入されると考えるのが妥当であると思われる。ICRP が次期主勧告を発行するときに防護量の変更を導入し、並行して更新された実用量の導入を行うことが適切であると思われる。安全基準および法令への勧告の取り入れに要する時間を想定すると、20年程度の準備期間が必要であろう。

## 6 結 論

ある1点での放射計測量または線量計測量の数値と防護量への換算係数に基づく実用量の定義の使用は、以前から検討されてきた。ICRPは標準コンピュータファントムにおいて実効線量を定義し、粒子フルエンスからこの量への換算係数を公表しているため、この方法は現在では容認できると考えられている。

実効線量は、被ばくの管理と最適化のための普遍的なりスク関連量である。外部被ばくおよび内部被ばく、すべての種類の電離放射線に適用される。一方で、実効線量は、放射線の種類および人体において、ある体積を占める臓器と組織の加重平均として定義されているため、測定できないことが欠点となる。指定された臓器、眼の水晶体、四肢および局所皮膚、電離放射線の確定的影響を受ける可能性のある標的組織の線量評価のために、さらなる防護量が導入されている。

実用量は、空間内のある1点で定義された電離放射線を決定する測定可能な量である。実用量に関する本報告書の勧告事項では、防護量、実効線量および眼の水晶体と局所皮膚吸収線量の値に直接関連付けられた、個人線量、個人水晶体吸収線量および個人局所皮膚吸収線量、周辺線量、方向性水晶体吸収線量および方向性局所皮膚吸収線量への換算係数について定義した。これは、実用量の数値が単純なファントムまたはICRU球内の一定の深さでの線量当量に基づいていたICRU Report 39/51から大きく変更された点であり、防護量のより良い推定値を示すことになる。防護量と実用量の体系は単純化され、使用者による放射線防護量に対する理解と整合性に役に立つものとなった。

70 keVから2 MeVのエネルギーの光子の周辺線量と個人線量の換算係数の数値は、ICRU Report 51に定義されたこれらの換算係数の約15%以内である。3 MeVから10 MeVでのこれらの量の換算係数も、完全な荷電粒子平

衡である条件では、ICRU Report 57 (1998) と ICRP Publication 74 (1996) のカーマ近似法で計算された値の18%以内である。これら光子エネルギーの範囲においてエリアモニタと個人線量計の校正に必要な変更は、機器の定数の変更のみである (ICRU Report 76, 2006)。荷電粒子平衡の条件下で日常的に使用する光子エリアモニタリング機器と個人線量計の校正のため、カーマ近似を用いて計算した換算係数も提示した。

ベータ線を用いる核医学においては、特に水晶体吸収線量の評価における精度の向上が関心事となり得る。

中性子については、周辺線量と個人線量の勧告量は、防護量の決定に対するICRU Report 39/51の値を大きく改善したものである。中性子フルエンスの減速に基づくエリアモニタリング機器については、現在容認されている精度の範囲内であれば、最初のうちは作業場に対する変更は必要ない。

勧告した実用量は、高いエネルギーを持つ光子、中性子、電子および他の粒子の放射線場における防護の問題への解決策を提供するものである。

少なくともいくつかのアプリケーションでは既存の機器の設計またはアルゴリズムの修正が必要とされるであろう。

- 70 keV未満のエネルギーの光子において、ICRU Report 39/51の定義に基づいたエリアモニタリング機器と個人線量計による実効線量の大幅な過大評価の補正。
- 光子と電子による水晶体吸収線量評価の改善。
- 荷電粒子平衡が成立しない場合の3 MeVから10 MeVのエネルギーの光子の周辺線量と個人線量の決定。しかし、これは検出器のシステムに依存するであろう。
- 粒子フルエンスから $H^*$ と $H_p$ への換算係数の変更により、 $H^*(10)$ と $H_p(10)$ と比較すると、熱領域から2 MeV未満の中性子エネルギー領域で低い値、およ

び 50 MeV 以上の中性子エネルギー領域で高い値となることに対応するために、エリアモニタリング機器と個人線量計の性能改善。

## 付 属 書

付属書 A は、フルエンスから実用量への勧告される換算係数を示す。光子については、空気中のカーマから実用量への換算係数が追加されている。付属書 A は以下の節に分かれている：

- A.1 周辺線量
- A.2 個人線量
- A.3 方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量
- A.4 方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量
- A.5 荷電粒子平衡状態の放射線場における 50 MeV 未満のエネルギーの光子の実用量
- A.6 空気カーマ

付属書 B は、換算係数を計算するための計算コードを記述し、その不確かさについて述べている。付属書 B は以下の節に分かれている：

- B.1 PHITS
- B.2 FLUKA
- B.3 MCNP
- B.4 EGSnrc
- B.5 換算係数の計算における不確かさ

付属書 C は、水晶体吸収線量の新しい換算係数を示す。

- C.1 方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量、感受性の高い細胞の吸収線量  $d_{\text{lens sens}}$
- C.2 荷電粒子平衡状態の放射線場における 50 MeV 未満のエネルギーの光子

ICRU Report 90 「電離放射線線量計測に関する重要データ：計量標準と適用 (Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications)」(ICRU, 2014) では、水中の荷電粒子の阻止能がわずかに変更されている。これにより本報告書で用いたモンテカルロ法での計算に顕著な差異が出ることは予想されない。

### 付属書 A 換算係数の値

#### A.1 周辺線量

表 A.1.1a から表 A.1.1O と図 A.1.1a から図 A.1.1O は、光子、中性子、電子、陽電子、陽子、10 GeV 未満の負のミュー粒子と正のミュー粒子、200 GeV 未満の負のパイ中間子と正のパイ中間子、ならびに 100 GeV  $u^{-1}$  未満の  $He^{2+}$  イオンに関して、粒子フルエンスから周辺線量への換算係数  $h^*$  の値を示す。換算係数は、実効線量の最大値  $E_{\text{max}}$  に粒子フルエンスを関連付けるもので、光子と中性子では AP, PA, LLAT, RLAT, ROT, ISO, SS-ISO, IS-ISO, 電子、陽電子、ミュー粒子、パイ中間子に関しては AP, PA, ISO, SS-ISO, IS-ISO, そして  $He^{2+}$  イオンに関しては AP, PA, ISO の照射ジオメトリーでの、広い均一な平行ビームによる ICRP/ICRU の成人標準ファントム (ICRP, 2009) の全身被ばくについて計算されている (ICRP, 2010)。これは表 A.1.O で示されており、照射ジオメトリーは 3.2 節で説明された通りである。表 A.1.1a から表 A.1.1O と図 A.1.1a から図 A.1.1O の換算係数は、ICRP Publication 116 (ICRP, 2010) と Endo<sup>1</sup> による計算を引用している。50 MeV 未満のエネルギーの光子に関しては、表 A.1.1b と図 A.1.1b に空気カーマからの換算係数を示している。光子フルエンスからの空気カーマへの換算係数は、本報告書の表 A.6 に示されている。

<sup>1</sup> Endo, A. (2016). *Personal communication* (Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, Japan).

表 A.1.0 周辺線量  $H^*$  への換算係数

表/図	粒子の種類	物 理 量	エネルギー範囲 (MeV)	最大化のための照射ジオメトリー
A.1.1a	光 子	フルエンス	5.0 E-03 ~ 1.0 E+04	AP, PA, LLAT, RLAT,
A.1.1b	光 子	空気カーマ	5.0 E-03 ~ 5.0 E+01	ROT, ISO,
A.1.2	中性子	フルエンス	1.0 E-09 ~ 1.0 E+04	SS-ISO, IS-ISO
A.1.3	電 子	フルエンス	1.0 E-02 ~ 1.0 E+04	
A.1.4	陽電子	フルエンス	1.0 E-02 ~ 1.0 E+04	
A.1.5	陽 子	フルエンス	1.0 E+00 ~ 1.0 E+04	AP, PA,
A.1.6	負のミュー粒子	フルエンス	1.0 E+00 ~ 1.0 E+04	ISO,
A.1.7	正のミュー粒子	フルエンス	1.0 E+00 ~ 1.0 E+04	SS-ISO, IS-ISO
A.1.8	負のパイ中間子	フルエンス	1.0 E+00 ~ 2.0 E+05	
A.1.9	正のパイ中間子	フルエンス	1.0 E+00 ~ 2.0 E+05	
A.1.10	He <sup>2+</sup> イオン	フルエンス	1.0 E+00 ~ 1.0 E+05 <sup>a</sup>	AP, PA, ISO

<sup>a</sup> MeV/u で表される He イオンのエネルギー

表 A.1.1a 光子フルエンスから周辺線量への換算係数  
(Endo<sup>2</sup>, ICRP, 2010)

$E_p$ /MeV	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$	$E_p$ /MeV	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
5.000E-03	1.34E-02	2.000E+00	7.48E+00
6.000E-03	1.66E-02	3.000E+00	9.75E+00
7.000E-03	2.25E-02	4.000E+00	1.17E+01
8.000E-03	3.35E-02	5.000E+00	1.34E+01
9.000E-03	4.90E-02	6.000E+00	1.50E+01
1.000E-02	6.85E-02	6.129E+00	1.52E+01
1.200E-02	1.05E-01	8.000E+00	1.86E+01
1.300E-02	1.22E-01	1.000E+01	2.21E+01
1.500E-02	1.56E-01	1.500E+01	3.04E+01
1.700E-02	1.81E-01	2.000E+01	3.82E+01
2.000E-02	2.25E-01	3.000E+01	5.13E+01
2.500E-02	2.75E-01	4.000E+01	6.18E+01
3.000E-02	3.12E-01	5.000E+01	7.23E+01
4.000E-02	3.50E-01	6.000E+01	8.21E+01
5.000E-02	3.69E-01	8.000E+01	9.81E+01
6.000E-02	3.89E-01	1.000E+02	1.10E+02
7.000E-02	4.11E-01	1.500E+02	1.30E+02
8.000E-02	4.43E-01	2.000E+02	1.44E+02
1.000E-01	5.18E-01	3.000E+02	1.61E+02
1.500E-01	7.47E-01	4.000E+02	1.73E+02
2.000E-01	1.00E+00	5.000E+02	1.81E+02
3.000E-01	1.51E+00	6.000E+02	1.87E+02
4.000E-01	2.00E+00	8.000E+02	1.96E+02
5.000E-01	2.47E+00	1.000E+03	2.06E+02
5.110E-01	2.52E+00	1.500E+03	2.13E+02
6.000E-01	2.91E+00	2.000E+03	2.36E+02
6.620E-01	3.17E+00	3.000E+03	2.53E+02
8.000E-01	3.73E+00	4.000E+03	2.67E+02
1.000E+00	4.49E+00	5.000E+03	2.77E+02
1.117E+00	4.90E+00	6.000E+03	2.85E+02
1.330E+00	5.60E+00	8.000E+03	2.99E+02
1.500E+00	6.12E+00	1.000E+04	3.07E+02

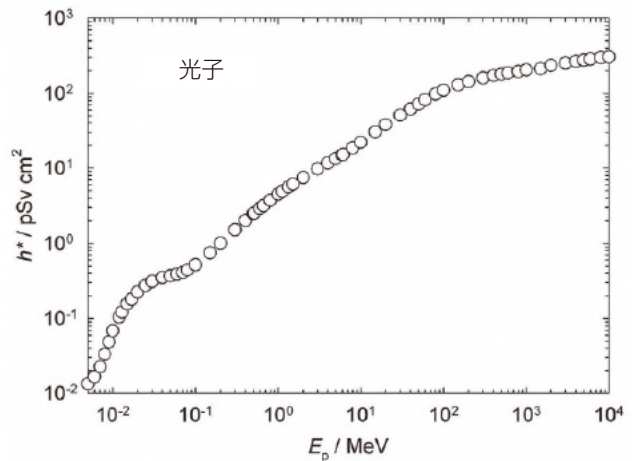


図 A.1.1a 光子フルエンスから周辺線量への換算係数  
(Endo<sup>2</sup>, ICRP, 2010)

<sup>2</sup> Endo, A. (2016). *Personal communication* (Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, Japan).

表 A.1.1b 光子空気カーマから周辺線量への換算係数 (Endo<sup>3</sup>, ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{Sv Gy}^{-1})$	$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{Sv Gy}^{-1})$
5.000E-03	4.37E-04	5.000E-01	1.04E+00
6.000E-03	7.81E-04	5.110E-01	1.04E+00
7.000E-03	1.45E-03	6.000E-01	1.02E+00
8.000E-03	2.84E-03	6.620E-01	1.02E+00
9.000E-03	5.31E-03	8.000E-01	1.01E+00
1.000E-02	9.26E-03	1.000E+00	1.00E+00
1.200E-02	2.09E-02	1.117E+00	1.00E+00
1.300E-02	2.88E-02	1.330E+00	1.00E+00
1.500E-02	4.99E-02	1.500E+00	9.96E-01
1.700E-02	7.58E-02	2.000E+00	9.90E-01
2.000E-02	1.34E-01	3.000E+00	9.77E-01
2.500E-02	2.60E-01	4.000E+00	9.64E-01
3.000E-02	4.32E-01	5.000E+00	9.45E-01
4.000E-02	8.16E-01	6.000E+00	9.28E-01
5.000E-02	1.14E+00	6.129E+00	9.25E-01
6.000E-02	1.35E+00	8.000E+00	9.24E-01
7.000E-02	1.43E+00	1.000E+01	9.16E-01
8.000E-02	1.44E+00	1.500E+01	8.82E-01
1.000E-01	1.39E+00	2.000E+01	8.42E-01
1.500E-01	1.25E+00	3.000E+01	7.48E-01
2.000E-01	1.17E+00	4.000E+01	6.62E-01
3.000E-01	1.09E+00	5.000E+01	6.07E-01
4.000E-01	1.06E+00		

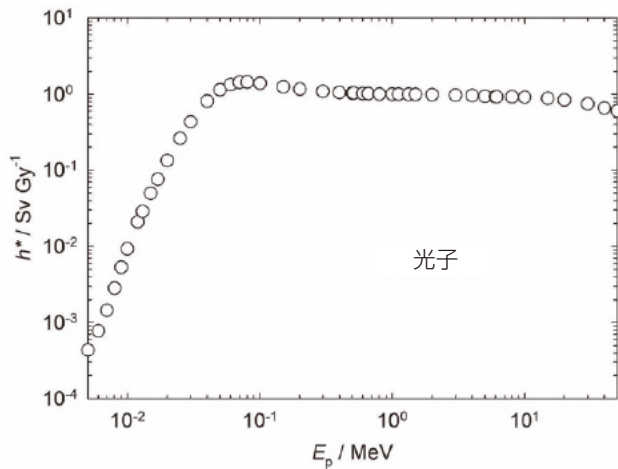


図 A.1.1b 光子空気カーマから周辺線量への換算係数 (Endo<sup>3</sup>, ICRP, 2010)

表 A.1.2 中性子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$	$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E-09	3.09E+00	3.00E+00	4.58E+02
1.00E-08	3.55E+00	4.00E+00	4.83E+02
2.50E-08	4.00E+00	5.00E+00	4.94E+02
1.00E-07	5.20E+00	6.00E+00	4.98E+02
2.00E-07	5.87E+00	7.00E+00	4.99E+02
5.00E-07	6.59E+00	8.00E+00	4.99E+02
1.00E-06	7.03E+00	9.00E+00	5.00E+02
2.00E-06	7.39E+00	1.00E+01	5.00E+02
5.00E-06	7.71E+00	1.20E+01	4.99E+02
1.00E-05	7.82E+00	1.40E+01	4.95E+02
2.00E-05	7.84E+00	1.50E+01	4.93E+02
5.00E-05	7.82E+00	1.60E+01	4.90E+02
1.00E-04	7.79E+00	1.80E+01	4.84E+02
2.00E-04	7.73E+00	2.00E+01	4.77E+02
5.00E-04	7.54E+00	2.10E+01	4.74E+02
1.00E-03	7.54E+00	3.00E+01	4.53E+02
2.00E-03	7.61E+00	5.00E+01	4.33E+02
5.00E-03	7.97E+00	7.50E+01	4.39E+02
1.00E-02	9.11E+00	1.00E+02	4.44E+02
2.00E-02	1.22E+01	1.30E+02	4.46E+02
3.00E-02	1.57E+01	1.50E+02	4.46E+02
5.00E-02	2.30E+01	1.80E+02	4.47E+02
7.00E-02	3.06E+01	2.00E+02	4.48E+02
1.00E-01	4.19E+01	3.00E+02	4.73E+02
1.50E-01	6.06E+01	4.00E+02	5.15E+02
2.00E-01	7.88E+01	5.00E+02	5.33E+02
3.00E-01	1.14E+02	6.00E+02	5.69E+02
5.00E-01	1.77E+02	7.00E+02	6.25E+02
7.00E-01	2.32E+02	8.00E+02	6.38E+02
9.00E-01	2.79E+02	9.00E+02	6.45E+02
1.00E+00	3.01E+02	1.00E+03	6.63E+02
1.20E+00	3.30E+02	2.00E+03	7.69E+02
1.50E+00	3.65E+02	5.00E+03	1.04E+03
2.00E+00	4.07E+02	1.00E+04	1.39E+03

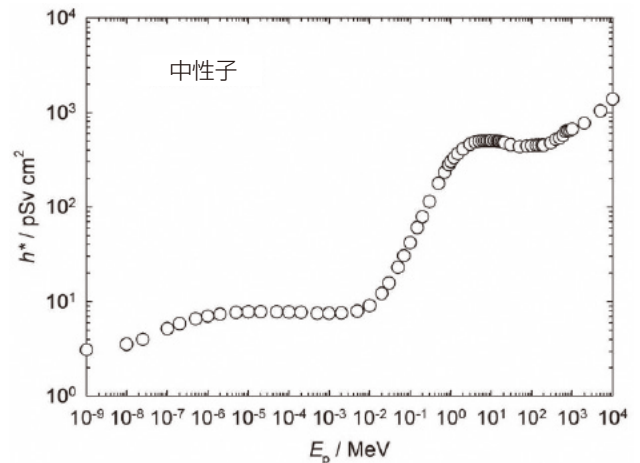


図 A.1.2 中性子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

<sup>3</sup> A. Endo, *Personal communication*, 2016 (Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, Japan).

表 A.1.3 電子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$	$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E-02	2.69E-02	1.50E+01	1.88E+02
1.50E-02	4.04E-02	2.00E+01	2.36E+02
2.00E-02	5.39E-02	3.00E+01	3.02E+02
3.00E-02	8.10E-02	4.00E+01	3.29E+02
4.00E-02	1.08E-01	5.00E+01	3.37E+02
5.00E-02	1.35E-01	6.00E+01	3.44E+02
6.00E-02	1.63E-01	8.00E+01	3.58E+02
8.00E-02	2.18E-01	1.00E+02	3.66E+02
1.00E-01	2.75E-01	1.50E+02	3.79E+02
1.50E-01	4.18E-01	2.00E+02	3.88E+02
2.00E-01	5.69E-01	3.00E+02	4.11E+02
3.00E-01	8.89E-01	4.00E+02	4.35E+02
4.00E-01	1.24E+00	5.00E+02	4.49E+02
5.00E-01	1.63E+00	6.00E+02	4.64E+02
6.00E-01	2.05E+00	8.00E+02	4.88E+02
8.00E-01	4.04E+00	1.00E+03	5.08E+02
1.00E+00	7.10E+00	1.50E+03	5.25E+02
1.50E+00	1.50E+01	2.00E+03	5.68E+02
2.00E+00	2.24E+01	3.00E+03	6.08E+02
3.00E+00	3.61E+01	4.00E+03	6.38E+02
4.00E+00	4.82E+01	5.00E+03	6.61E+02
5.00E+00	5.93E+01	6.00E+03	6.83E+02
6.00E+00	7.06E+01	8.00E+03	7.16E+02
8.00E+00	9.79E+01	1.00E+04	7.42E+02
1.00E+01	1.25E+02		

表 A.1.4 陽電子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$	$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E-02	3.28E+00	1.50E+01	1.84E+02
1.50E-02	3.29E+00	2.00E+01	2.29E+02
2.00E-02	3.30E+00	3.00E+01	2.94E+02
3.00E-02	3.33E+00	4.00E+01	3.20E+02
4.00E-02	3.36E+00	5.00E+01	3.27E+02
5.00E-02	3.39E+00	6.00E+01	3.34E+02
6.00E-02	3.42E+00	8.00E+01	3.49E+02
8.00E-02	3.47E+00	1.00E+02	3.57E+02
1.00E-01	3.53E+00	1.50E+02	3.71E+02
1.50E-01	3.67E+00	2.00E+02	3.83E+02
2.00E-01	3.84E+00	3.00E+02	4.12E+02
3.00E-01	4.16E+00	4.00E+02	4.35E+02
4.00E-01	4.52E+00	5.00E+02	4.49E+02
5.00E-01	4.90E+00	6.00E+02	4.62E+02
6.00E-01	5.36E+00	8.00E+02	4.85E+02
8.00E-01	7.41E+00	1.00E+03	5.05E+02
1.00E+00	1.05E+01	1.50E+03	5.22E+02
1.50E+00	1.83E+01	2.00E+03	5.66E+02
2.00E+00	2.57E+01	3.00E+03	6.04E+02
3.00E+00	3.91E+01	4.00E+03	6.33E+02
4.00E+00	5.10E+01	5.00E+03	6.59E+02
5.00E+00	6.17E+01	6.00E+03	6.83E+02
6.00E+00	7.29E+01	8.00E+03	7.16E+02
8.00E+00	9.90E+01	1.00E+04	7.46E+02
1.00E+01	1.26E+02		

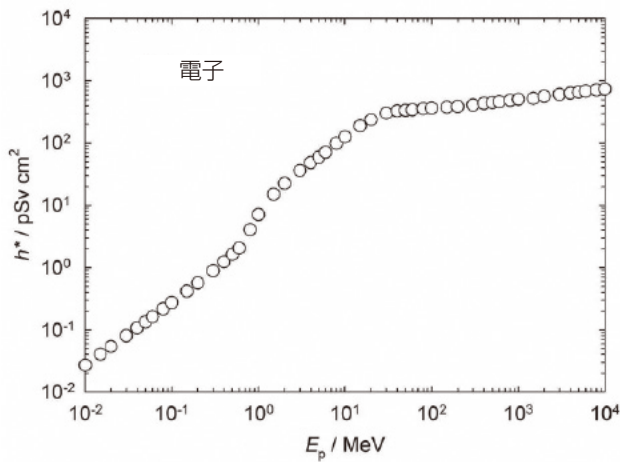


図 A.1.3 電子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

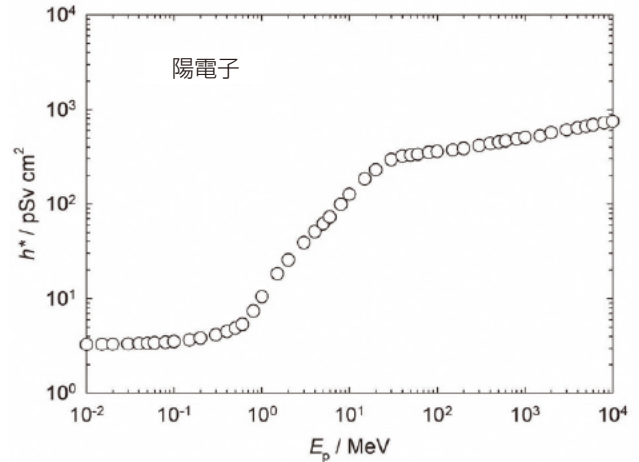


図 A.1.4 陽電子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

表 A.1.5 陽子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E+00	5.47E+00
1.50E+00	8.21E+00
2.00E+00	1.09E+01
3.00E+00	1.64E+01
4.00E+00	2.19E+01
5.00E+00	2.73E+01
6.00E+00	3.28E+01
8.00E+00	4.37E+01
1.00E+01	5.49E+01
1.50E+01	1.89E+02
2.00E+01	4.28E+02
3.00E+01	7.50E+02
4.00E+01	1.02E+03
5.00E+01	1.18E+03
6.00E+01	1.48E+03
8.00E+01	2.16E+03
1.00E+02	2.51E+03
1.50E+02	2.82E+03
2.00E+02	2.18E+03
3.00E+02	1.45E+03
4.00E+02	1.30E+03
5.00E+02	1.24E+03
6.00E+02	1.23E+03
8.00E+02	1.23E+03
1.00E+03	1.23E+03
1.50E+03	1.25E+03
2.00E+03	1.28E+03
3.00E+03	1.35E+03
4.00E+03	1.48E+03
5.00E+03	1.46E+03
6.00E+03	1.71E+03
8.00E+03	1.88E+03
1.00E+04	1.93E+03

表 A.1.6 負のミュー粒子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E+00	1.80E+02
1.50E+00	1.80E+02
2.00E+00	1.84E+02
3.00E+00	1.88E+02
4.00E+00	1.93E+02
5.00E+00	2.05E+02
6.00E+00	2.42E+02
8.00E+00	2.93E+02
1.00E+01	3.32E+02
1.50E+01	4.14E+02
2.00E+01	4.65E+02
3.00E+01	6.57E+02
4.00E+01	7.35E+02
5.00E+01	7.55E+02
6.00E+01	7.75E+02
8.00E+01	5.05E+02
1.00E+02	4.35E+02
1.50E+02	3.55E+02
2.00E+02	3.33E+02
3.00E+02	3.22E+02
4.00E+02	3.22E+02
5.00E+02	3.24E+02
6.00E+02	3.28E+02
8.00E+02	3.33E+02
1.00E+03	3.42E+02
1.50E+03	3.38E+02
2.00E+03	3.41E+02
3.00E+03	3.44E+02
4.00E+03	3.47E+02
5.00E+03	3.48E+02
6.00E+03	3.47E+02
8.00E+03	3.49E+02
1.00E+04	3.49E+02

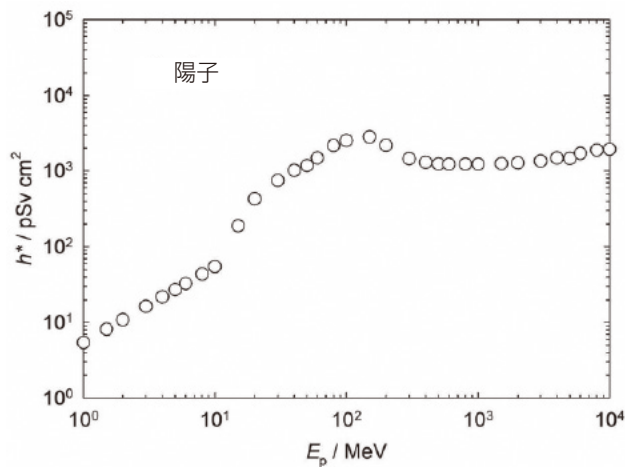


図 A.1.5 陽子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

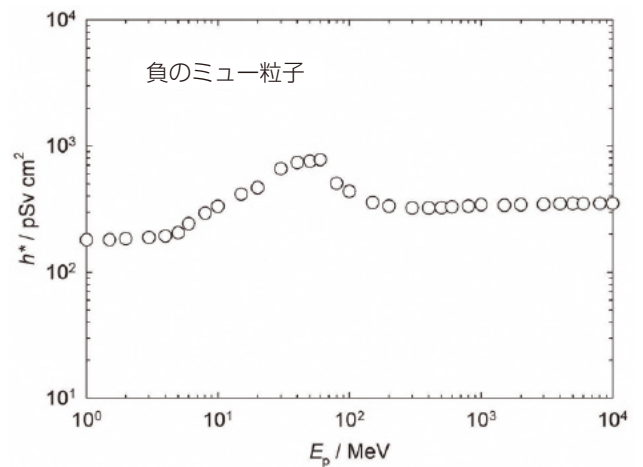


図 A.1.6 負のミュー粒子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

表 A.1.7 正のミュー粒子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E+00	1.94E+02
1.50E+00	1.96E+02
2.00E+00	1.98E+02
3.00E+00	2.02E+02
4.00E+00	2.07E+02
5.00E+00	2.16E+02
6.00E+00	2.51E+02
8.00E+00	3.00E+02
1.00E+01	3.40E+02
1.50E+01	4.25E+02
2.00E+01	4.81E+02
3.00E+01	6.74E+02
4.00E+01	7.51E+02
5.00E+01	7.68E+02
6.00E+01	7.87E+02
8.00E+01	5.10E+02
1.00E+02	4.37E+02
1.50E+02	3.54E+02
2.00E+02	3.33E+02
3.00E+02	3.20E+02
4.00E+02	3.21E+02
5.00E+02	3.23E+02
6.00E+02	3.25E+02
8.00E+02	3.30E+02
1.00E+03	3.34E+02
1.50E+03	3.39E+02
2.00E+03	3.41E+02
3.00E+03	3.44E+02
4.00E+03	3.47E+02
5.00E+03	3.48E+02
6.00E+03	3.47E+02
8.00E+03	3.49E+02
1.00E+04	3.49E+02

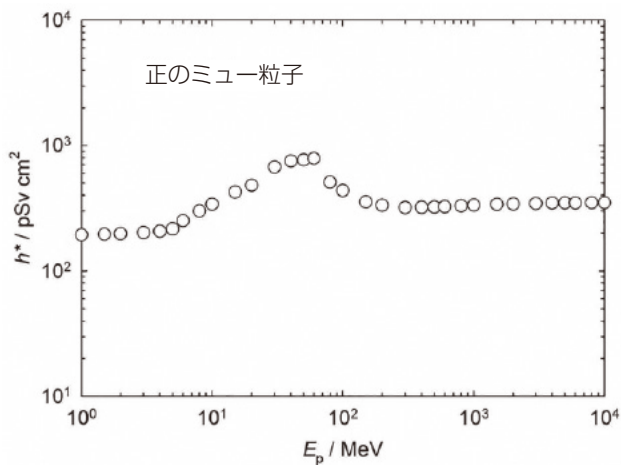


図 A.1.7 正のミュー粒子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

表 A.1.8 負のパイ中間子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$	$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E+00	4.06E+02	6.00E+02	9.17E+02
1.50E+00	4.22E+02	8.00E+02	9.76E+02
2.00E+00	4.33E+02	1.00E+03	1.02E+03
3.00E+00	4.58E+02	1.50E+03	1.08E+03
4.00E+00	4.91E+02	2.00E+03	1.12E+03
5.00E+00	5.28E+02	3.00E+03	1.13E+03
6.00E+00	6.73E+02	4.00E+03	1.17E+03
8.00E+00	9.65E+02	5.00E+03	1.23E+03
1.00E+01	1.09E+03	6.00E+03	1.26E+03
1.50E+01	1.25E+03	8.00E+03	1.39E+03
2.00E+01	1.28E+03	1.00E+04	1.46E+03
3.00E+01	1.77E+03	1.50E+04	1.60E+03
4.00E+01	1.92E+03	2.00E+04	1.70E+03
5.00E+01	1.93E+03	3.00E+04	1.86E+03
6.00E+01	1.99E+03	4.00E+04	1.99E+03
8.00E+01	1.31E+03	5.00E+04	2.11E+03
1.00E+02	1.03E+03	6.00E+04	2.21E+03
1.50E+02	9.27E+02	8.00E+04	2.42E+03
2.00E+02	9.02E+02	1.00E+05	2.60E+03
3.00E+02	8.48E+02	1.50E+05	2.98E+03
4.00E+02	8.50E+02	2.00E+05	3.14E+03
5.00E+02	8.80E+02		

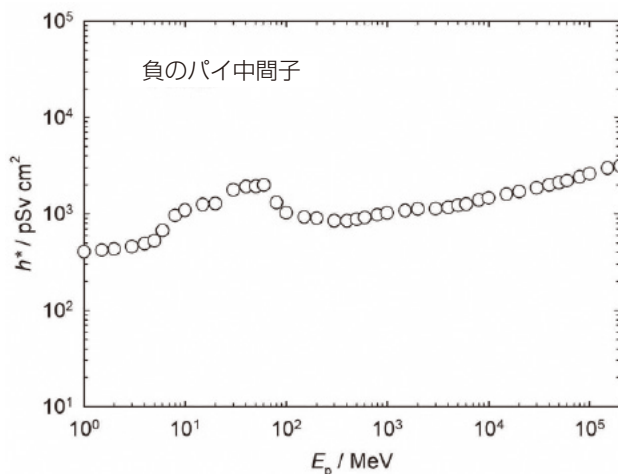


図 A.1.8 負のパイ中間子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

表 A.1.9 正のパイ中間子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$	$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E+00	3.14E+02	6.00E+02	9.80E+02
1.50E+00	3.24E+02	8.00E+02	1.04E+03
2.00E+00	3.40E+02	1.00E+03	1.09E+03
3.00E+00	3.79E+02	1.50E+03	1.16E+03
4.00E+00	4.29E+02	2.00E+03	1.19E+03
5.00E+00	4.89E+02	3.00E+03	1.18E+03
6.00E+00	5.40E+02	4.00E+03	1.21E+03
8.00E+00	7.17E+02	5.00E+03	1.27E+03
1.00E+01	8.19E+02	6.00E+03	1.29E+03
1.50E+01	1.00E+03	8.00E+03	1.39E+03
2.00E+01	1.10E+03	1.00E+04	1.46E+03
3.00E+01	1.52E+03	1.50E+04	1.60E+03
4.00E+01	1.75E+03	2.00E+04	1.69E+03
5.00E+01	1.83E+03	3.00E+04	1.86E+03
6.00E+01	1.82E+03	4.00E+04	1.97E+03
8.00E+01	1.38E+03	5.00E+04	2.09E+03
1.00E+02	1.13E+03	6.00E+04	2.20E+03
1.50E+02	1.22E+03	8.00E+04	2.38E+03
2.00E+02	1.25E+03	1.00E+05	2.53E+03
3.00E+02	1.10E+03	1.50E+05	2.90E+03
4.00E+02	9.98E+02	2.00E+05	3.24E+03
5.00E+02	9.70E+02		

表 A.1.10  $\text{He}^{2+}$  イオンフルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV u}^{-1}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E+00	2.19E+02
2.00E+00	4.38E+02
3.00E+00	6.57E+02
5.00E+00	1.09E+03
1.00E+01	2.19E+03
1.40E+01	4.61E+03
2.00E+01	1.72E+04
3.00E+01	3.01E+04
5.00E+01	4.75E+04
7.50E+01	8.05E+04
1.00E+02	1.01E+05
1.50E+02	1.10E+05
2.00E+02	7.29E+04
3.00E+02	5.33E+04
5.00E+02	4.49E+04
7.00E+02	4.60E+04
1.00E+03	4.47E+04
2.00E+03	4.80E+04
3.00E+03	5.01E+04
5.00E+03	5.17E+04
1.00E+04	6.26E+04
2.00E+04	7.10E+04
5.00E+04	9.67E+04
1.00E+05	1.24E+05

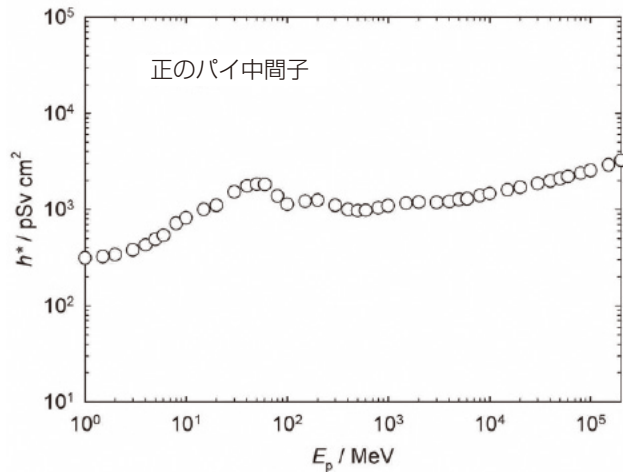


図 A.1.9 正のパイ中間子フルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

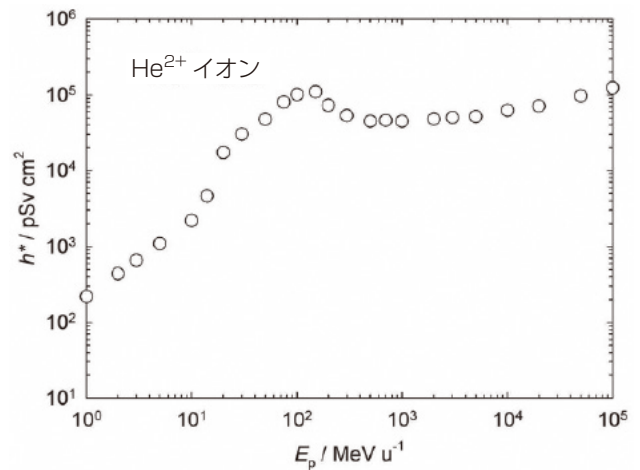


図 A.1.10  $\text{He}^{2+}$  イオンフルエンスから周辺線量への換算係数 (ICRP, 2010)

## A.2 個人線量

表 A.2.1a から表 A.2.10 と図 A.2.1a から図 A.2.10 は、1 GeV 未満のエネルギーの光子、中性子、電子、陽電子、陽子、負のミュー粒子、正のミュー粒子、負のパイ中間子、正のパイ中間子、ならびに  $1 \text{ GeV u}^{-1}$  未満の  $\text{He}^{2+}$  イオンに関して、粒子フルエンスから個人線量への換算係数の値を示す。粒子フルエンスから実効線量  $E$  へ関連付ける換算係数  $h_p(\varphi)$  は、左右の照射の平均値を取って  $0^\circ$  (A-P) から  $90^\circ$  まで  $15^\circ$  ごとの入射角度  $\varphi$ ,  $180^\circ$  回転, 等方, 上半球等方, 下半球等方で広い均一な平行ビームへの ICRP/ICRU の成人標準ファントム (ICRP, 2009) の全身被ばくについて計算されている。50 MeV 未満のエネルギーの光子に関し、表 A.2.1b と図 A.2.1b に表 A.2.0 で示した空気カーマからの換算係数を示す。

表 A.2.1a から表 A.2.10 および図 A.2.1a から図 A.2.10 の換算係数は、ICRP Publication 116 (ICRP, 2010) の換算係数と Endo<sup>4</sup> (2017) による計算から集約したものである。ICRP Publication 116 では、光子と中性子に関し

ては AP, PA, LLAT, RLAT, ROT, ISO, SS-ISO, IS-ISO, 電子, 陽電子, ミュー粒子, パイ中間子に関しては AP, PA, ISO, SS-ISO, IS-ISO で、そして  $\text{He}^{2+}$  イオンに関しては AP, PA, ISO の照射ジオメトリーについて基準点の放射線場の広い平行および等方ビームに関する換算係数が示されている。50 MeV 未満のエネルギーの光子に関しては、表 A.2.1b と図 A.2.1b に空気カーマからの換算係数を示す。

XY 面における  $h_p(\alpha)$  の入射の角度  $\varphi = 0^\circ, 180^\circ, +90^\circ$  および  $-90^\circ$  は、それぞれ、照射ジオメトリー AP, PA, LLAT および RLAT に対応し、ICRP Publication 116 のこれらの換算係数を表 A.2.1a/b から表 A.2.10 および図 A.2.1a/b から図 A.2.10 に引用している。ICRP Publication 116 から入手できない入射ジオメトリーの換算係数は、Endo<sup>4</sup> (2017) の計算から引用している。ICRP Publication 116 と Endo の計算による数値の整合性は調査し、検証されている (Endo, 2017)。

表 A.2.0 個人線量  $H_p$  への換算係数。角度範囲は  $0^\circ \sim 90^\circ, 180^\circ, \text{ROT}, \text{ISO}, \text{SS-ISO}, \text{IS-ISO}$

表/図	粒子の種類	物理量	エネルギー範囲 (MeV)
A.2.1a	光子	フルエンス	$5.0 \text{ E-03} \sim 1.0 \text{ E+03}$
A.2.1b	光子	空気カーマ	$5.0 \text{ E-03} \sim 5.0 \text{ E+01}$
A.2.2	中性子	フルエンス	$1.0 \text{ E-09} \sim 1.0 \text{ E+03}$
A.2.3	電子	フルエンス	$1.0 \text{ E-02} \sim 1.0 \text{ E+03}$
A.2.4	陽電子	フルエンス	$1.0 \text{ E-02} \sim 1.0 \text{ E+03}$
A.2.5	陽子	フルエンス	$1.0 \text{ E+00} \sim 1.0 \text{ E+03}$
A.2.6	負のミュー粒子	フルエンス	$1.0 \text{ E+00} \sim 1.0 \text{ E+03}$
A.2.7	正のミュー粒子	フルエンス	$1.0 \text{ E+00} \sim 1.0 \text{ E+03}$
A.2.8	負のパイ中間子	フルエンス	$1.0 \text{ E+00} \sim 1.0 \text{ E+03}$
A.2.9	正のパイ中間子	フルエンス	$1.0 \text{ E+00} \sim 1.0 \text{ E+03}$
A.2.10	$\text{He}^{2+}$ イオン	フルエンス	$1.0 \text{ E+00} \sim 1.0 \text{ E+03}^a$

<sup>a</sup> MeV/u で表される  $\text{He}^{2+}$  イオンのエネルギー。

<sup>4</sup> Endo, A. (2016). *Personal communication* (Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, Japan).

表 A.2.1a 光子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo<sup>4</sup>, 2017; ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{pSv cm}^2)$											
	0°	avg( $\pm 15^\circ$ )	avg( $\pm 30^\circ$ )	avg( $\pm 45^\circ$ )	avg( $\pm 60^\circ$ )	avg( $\pm 75^\circ$ )	avg( $\pm 90^\circ$ )	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
5.0E-03	1.34E-02	1.41E-02	1.39E-02	1.30E-02	1.16E-02	9.37E-03	6.87E-03	1.33E-02	1.15E-02	1.04E-02	1.05E-02	1.02E-02
6.0E-03	1.66E-02	1.79E-02	1.81E-02	1.71E-02	1.51E-02	1.19E-02	8.28E-03	1.59E-02	1.41E-02	1.28E-02	1.31E-02	1.25E-02
7.0E-03	2.25E-02	2.43E-02	2.42E-02	2.25E-02	1.97E-02	1.51E-02	9.88E-03	1.78E-02	1.74E-02	1.58E-02	1.61E-02	1.53E-02
8.0E-03	3.35E-02	3.48E-02	3.36E-02	3.03E-02	2.57E-02	1.93E-02	1.20E-02	1.87E-02	2.16E-02	1.94E-02	2.00E-02	1.87E-02
9.0E-03	4.90E-02	4.97E-02	4.62E-02	4.05E-02	3.35E-02	2.45E-02	1.48E-02	1.86E-02	2.73E-02	2.36E-02	2.45E-02	2.26E-02
1.0E-02	6.85E-02	6.71E-02	6.13E-02	5.26E-02	4.25E-02	3.06E-02	1.86E-02	1.84E-02	3.37E-02	2.88E-02	3.01E-02	2.75E-02
1.2E-02	1.05E-01	1.03E-01	9.38E-02	7.94E-02	6.24E-02	4.42E-02	2.67E-02	1.62E-02	4.70E-02	3.95E-02	4.06E-02	3.75E-02
1.3E-02	1.22E-01	1.20E-01	1.09E-01	9.30E-02	7.26E-02	5.09E-02	3.10E-02	1.56E-02	5.32E-02	4.49E-02	4.58E-02	4.26E-02
1.5E-02	1.56E-01	1.50E-01	1.39E-01	1.19E-01	9.28E-02	6.40E-02	4.03E-02	1.55E-02	6.65E-02	5.60E-02	5.77E-02	5.43E-02
1.7E-02	1.81E-01	1.79E-01	1.66E-01	1.44E-01	1.13E-01	7.72E-02	4.78E-02	1.75E-02	7.83E-02	6.50E-02	6.54E-02	6.32E-02
2.0E-02	2.25E-01	2.19E-01	2.05E-01	1.78E-01	1.42E-01	9.77E-02	6.14E-02	2.61E-02	9.88E-02	8.13E-02	8.22E-02	8.02E-02
2.5E-02	2.75E-01	2.71E-01	2.55E-01	2.26E-01	1.83E-01	1.29E-01	7.87E-02	5.64E-02	1.30E-01	1.04E-01	1.05E-01	1.01E-01
3.0E-02	3.12E-01	3.07E-01	2.89E-01	2.55E-01	2.09E-01	1.52E-01	9.88E-02	9.46E-02	1.59E-01	1.27E-01	1.29E-01	1.25E-01
4.0E-02	3.50E-01	3.40E-01	3.24E-01	2.90E-01	2.42E-01	1.84E-01	1.26E-01	1.63E-01	1.99E-01	1.58E-01	1.62E-01	1.54E-01
5.0E-02	3.69E-01	3.59E-01	3.44E-01	3.07E-01	2.64E-01	2.00E-01	1.45E-01	2.09E-01	2.26E-01	1.80E-01	1.84E-01	1.76E-01
6.0E-02	3.89E-01	3.82E-01	3.64E-01	3.26E-01	2.81E-01	2.19E-01	1.62E-01	2.43E-01	2.48E-01	1.98E-01	2.04E-01	1.94E-01
7.0E-02	4.11E-01	4.06E-01	3.87E-01	3.48E-01	3.00E-01	2.38E-01	1.78E-01	2.73E-01	2.73E-01	2.18E-01	2.23E-01	2.09E-01
8.0E-02	4.43E-01	4.36E-01	4.18E-01	3.75E-01	3.30E-01	2.63E-01	1.97E-01	3.02E-01	2.97E-01	2.38E-01	2.46E-01	2.32E-01
1.0E-01	5.18E-01	5.12E-01	4.85E-01	4.50E-01	3.95E-01	3.18E-01	2.40E-01	3.63E-01	3.56E-01	2.86E-01	2.95E-01	2.79E-01
1.5E-01	7.47E-01	7.45E-01	7.10E-01	6.55E-01	5.84E-01	4.87E-01	3.69E-01	5.43E-01	5.29E-01	4.29E-01	4.45E-01	4.13E-01
2.0E-01	1.00E+00	9.95E-01	9.54E-01	8.88E-01	8.01E-01	6.73E-01	5.18E-01	7.45E-01	7.22E-01	5.89E-01	6.10E-01	5.68E-01
3.0E-01	1.51E+00	1.50E+00	1.45E+00	1.36E+00	1.24E+00	1.07E+00	8.39E-01	1.16E+00	1.12E+00	9.32E-01	9.64E-01	9.00E-01
4.0E-01	2.00E+00	1.98E+00	1.94E+00	1.82E+00	1.68E+00	1.45E+00	1.18E+00	1.58E+00	1.53E+00	1.28E+00	1.32E+00	1.24E+00
5.0E-01	2.47E+00	2.44E+00	2.39E+00	2.27E+00	2.12E+00	1.84E+00	1.51E+00	1.99E+00	1.92E+00	1.63E+00	1.67E+00	1.59E+00
6.0E-01	2.91E+00	2.89E+00	2.85E+00	2.69E+00	2.52E+00	2.21E+00	1.84E+00	2.39E+00	2.31E+00	1.97E+00	2.02E+00	1.92E+00
8.0E-01	3.73E+00	3.73E+00	3.65E+00	3.52E+00	3.30E+00	2.93E+00	2.49E+00	3.14E+00	3.04E+00	2.62E+00	2.70E+00	2.54E+00
1.0E+00	4.49E+00	4.50E+00	4.41E+00	4.26E+00	4.03E+00	3.57E+00	3.12E+00	3.84E+00	3.73E+00	3.25E+00	3.32E+00	3.18E+00
1.5E+00	6.12E+00	6.11E+00	6.04E+00	5.86E+00	5.60E+00	5.16E+00	4.55E+00	5.41E+00	5.24E+00	4.67E+00	4.74E+00	4.58E+00
2.0E+00	7.48E+00	7.49E+00	7.41E+00	7.20E+00	6.93E+00	6.48E+00	5.81E+00	6.77E+00	6.56E+00	5.91E+00	6.03E+00	5.77E+00
3.0E+00	9.75E+00	9.81E+00	9.65E+00	9.53E+00	9.33E+00	8.69E+00	8.03E+00	9.13E+00	8.85E+00	8.08E+00	8.22E+00	7.94E+00
4.0E+00	1.17E+01	1.17E+01	1.16E+01	1.15E+01	1.13E+01	1.06E+01	1.00E+01	1.12E+01	1.09E+01	1.00E+01	1.02E+01	9.80E+00
5.0E+00	1.34E+01	1.34E+01	1.33E+01	1.32E+01	1.32E+01	1.25E+01	1.18E+01	1.32E+01	1.27E+01	1.18E+01	1.20E+01	1.16E+01
6.0E+00	1.50E+01	1.51E+01	1.49E+01	1.49E+01	1.48E+01	1.42E+01	1.35E+01	1.50E+01	1.44E+01	1.35E+01	1.37E+01	1.33E+01
8.0E+00	1.78E+01	1.80E+01	1.79E+01	1.79E+01	1.80E+01	1.73E+01	1.68E+01	1.86E+01	1.76E+01	1.66E+01	1.69E+01	1.63E+01
1.0E+01	2.05E+01	2.06E+01	2.05E+01	2.06E+01	2.09E+01	2.04E+01	1.99E+01	2.21E+01	2.07E+01	1.97E+01	1.99E+01	1.93E+01
1.5E+01	2.61E+01	2.64E+01	2.64E+01	2.67E+01	2.73E+01	2.72E+01	2.72E+01	3.04E+01	2.77E+01	2.68E+01	2.68E+01	2.62E+01
2.0E+01	3.08E+01	3.10E+01	3.13E+01	3.19E+01	3.29E+01	3.37E+01	3.44E+01	3.82E+01	3.44E+01	3.38E+01	3.39E+01	3.37E+01
3.0E+01	3.79E+01	3.82E+01	3.87E+01	4.03E+01	4.26E+01	4.49E+01	4.77E+01	5.13E+01	4.60E+01	4.61E+01	4.61E+01	4.61E+01
4.0E+01	4.32E+01	4.31E+01	4.46E+01	4.68E+01	5.08E+01	5.54E+01	6.01E+01	6.18E+01	5.60E+01	5.69E+01	5.66E+01	5.72E+01
5.0E+01	4.71E+01	4.70E+01	4.86E+01	5.21E+01	5.71E+01	6.37E+01	7.10E+01	7.01E+01	6.43E+01	6.61E+01	6.58E+01	6.66E+01
6.0E+01	5.01E+01	5.13E+01	5.35E+01	5.75E+01	6.38E+01	7.23E+01	8.04E+01	7.65E+01	7.11E+01	7.41E+01	7.35E+01	7.47E+01
8.0E+01	5.45E+01	5.57E+01	5.84E+01	6.33E+01	7.16E+01	8.28E+01	9.55E+01	8.62E+01	8.18E+01	8.71E+01	8.55E+01	8.89E+01
1.0E+02	5.78E+01	5.93E+01	6.20E+01	6.77E+01	7.72E+01	9.03E+01	1.07E+02	9.27E+01	8.95E+01	9.75E+01	9.61E+01	9.89E+01
1.5E+02	6.32E+01	6.46E+01	6.75E+01	7.52E+01	8.67E+01	1.03E+02	1.26E+02	1.03E+02	1.02E+02	1.16E+02	1.15E+02	1.18E+02
2.0E+02	6.72E+01	6.82E+01	7.17E+01	7.97E+01	9.31E+01	1.11E+02	1.39E+02	1.10E+02	1.10E+02	1.29E+02	1.25E+02	1.35E+02
3.0E+02	7.23E+01	7.40E+01	7.69E+01	8.64E+01	1.01E+02	1.21E+02	1.55E+02	1.18E+02	1.21E+02	1.47E+02	1.40E+02	1.54E+02
4.0E+02	7.54E+01	7.81E+01	8.13E+01	9.11E+01	1.07E+02	1.29E+02	1.66E+02	1.23E+02	1.28E+02	1.59E+02	1.50E+02	1.68E+02
5.0E+02	7.74E+01	7.86E+01	8.27E+01	9.26E+01	1.10E+02	1.33E+02	1.74E+02	1.27E+02	1.32E+02	1.67E+02	1.58E+02	1.78E+02
6.0E+02	7.87E+01	8.01E+01	8.41E+01	9.44E+01	1.12E+02	1.37E+02	1.79E+02	1.30E+02	1.36E+02	1.74E+02	1.65E+02	1.83E+02
8.0E+02	8.04E+01	8.22E+01	8.62E+01	9.70E+01	1.16E+02	1.42E+02	1.87E+02	1.34E+02	1.41E+02	1.85E+02	1.74E+02	1.96E+02
1.0E+03	8.16E+01	8.35E+01	8.79E+01	9.95E+01	1.18E+02	1.46E+02	1.93E+02	1.37E+02	1.45E+02	1.93E+02	1.80E+02	2.06E+02

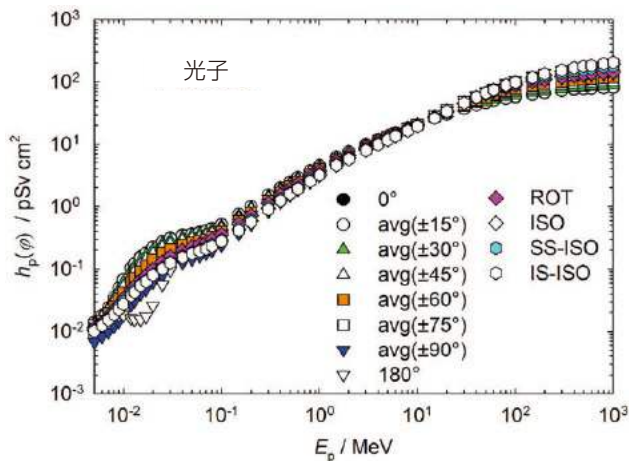


図 A.2.1a 光子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo<sup>5</sup>, 2017; ICRP, 2010)

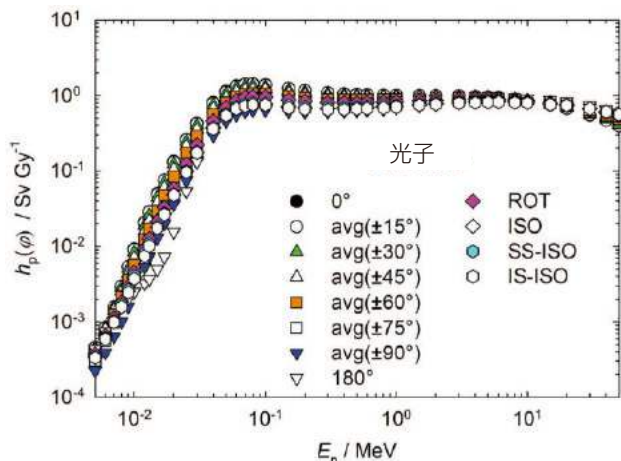


図 A.2.1b 光子空気カーマから個人線量への換算係数 (Endo<sup>5</sup>, 2017; ICRP, 2010)

表 A.2.1b 光子空気カーマから個人線量への換算係数 (Endo<sup>5</sup>, 2017; ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	avg(±15°)	avg(±30°)	avg(±45°)	avg(±60°)	avg(±75°)	avg(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
5.0E-03	4.36E-04	4.58E-04	4.55E-04	4.23E-04	3.77E-04	3.06E-04	2.24E-04	4.35E-04	3.74E-04	3.39E-04	3.42E-04	3.33E-04
6.0E-03	7.80E-04	8.41E-04	8.51E-04	8.04E-04	7.12E-04	5.60E-04	3.90E-04	7.47E-04	6.62E-04	6.05E-04	6.15E-04	5.90E-04
7.0E-03	1.45E-03	1.57E-03	1.56E-03	1.45E-03	1.27E-03	9.74E-04	6.37E-04	1.15E-03	1.12E-03	1.02E-03	1.04E-03	9.89E-04
8.0E-03	2.84E-03	2.96E-03	2.85E-03	2.57E-03	2.18E-03	1.64E-03	1.02E-03	1.59E-03	1.84E-03	1.64E-03	1.69E-03	1.58E-03
9.0E-03	5.31E-03	5.39E-03	5.01E-03	4.39E-03	3.63E-03	2.66E-03	1.60E-03	2.02E-03	2.96E-03	2.56E-03	2.66E-03	2.45E-03
1.0E-02	9.26E-03	9.07E-03	8.28E-03	7.10E-03	5.74E-03	4.13E-03	2.51E-03	2.49E-03	4.55E-03	3.89E-03	4.07E-03	3.72E-03
1.2E-02	2.09E-02	2.05E-02	1.87E-02	1.58E-02	1.24E-02	8.80E-03	5.31E-03	3.23E-03	9.36E-03	7.87E-03	8.09E-03	7.47E-03
1.3E-02	2.87E-02	2.83E-02	2.58E-02	2.19E-02	1.71E-02	1.20E-02	7.32E-03	3.67E-03	1.26E-02	1.06E-02	1.08E-02	1.01E-02
1.5E-02	4.99E-02	4.81E-02	4.44E-02	3.80E-02	2.97E-02	2.05E-02	1.29E-02	4.96E-03	2.13E-02	1.79E-02	1.85E-02	1.74E-02
1.7E-02	7.56E-02	7.49E-02	6.97E-02	6.02E-02	4.74E-02	3.23E-02	2.00E-02	7.31E-03	3.28E-02	2.72E-02	2.74E-02	2.64E-02
2.0E-02	1.34E-01	1.30E-01	1.22E-01	1.06E-01	8.45E-02	5.80E-02	3.64E-02	1.55E-02	5.87E-02	4.83E-02	4.88E-02	4.76E-02
2.5E-02	2.60E-01	2.56E-01	2.41E-01	2.14E-01	1.73E-01	1.22E-01	7.45E-02	5.34E-02	1.23E-01	9.81E-02	9.92E-02	9.57E-02
3.0E-02	4.32E-01	4.25E-01	4.01E-01	3.54E-01	2.89E-01	2.10E-01	1.37E-01	1.31E-01	2.20E-01	1.76E-01	1.79E-01	1.73E-01
4.0E-02	8.16E-01	7.92E-01	7.55E-01	6.75E-01	5.65E-01	4.28E-01	2.93E-01	3.80E-01	4.64E-01	3.68E-01	3.78E-01	3.59E-01
5.0E-02	1.14E+00	1.11E+00	1.07E+00	9.50E-01	8.18E-01	6.18E-01	4.49E-01	6.47E-01	7.00E-01	5.57E-01	5.70E-01	5.45E-01
6.0E-02	1.35E+00	1.32E+00	1.26E+00	1.13E+00	9.72E-01	7.59E-01	5.59E-01	8.41E-01	8.58E-01	6.85E-01	7.06E-01	6.72E-01
7.0E-02	1.43E+00	1.41E+00	1.34E+00	1.21E+00	1.04E+00	8.27E-01	6.18E-01	9.49E-01	9.49E-01	7.57E-01	7.74E-01	7.27E-01
8.0E-02	1.44E+00	1.42E+00	1.36E+00	1.22E+00	1.07E+00	8.56E-01	6.42E-01	9.85E-01	9.68E-01	7.76E-01	8.02E-01	7.56E-01
1.0E-01	1.39E+00	1.38E+00	1.30E+00	1.21E+00	1.06E+00	8.57E-01	6.45E-01	9.77E-01	9.59E-01	7.70E-01	7.94E-01	7.51E-01
1.5E-01	1.25E+00	1.24E+00	1.18E+00	1.09E+00	9.75E-01	8.13E-01	6.15E-01	9.06E-01	8.83E-01	7.16E-01	7.42E-01	6.89E-01
2.0E-01	1.17E+00	1.16E+00	1.11E+00	1.04E+00	9.35E-01	7.86E-01	6.04E-01	8.70E-01	8.43E-01	6.88E-01	7.12E-01	6.63E-01
3.0E-01	1.09E+00	1.09E+00	1.05E+00	9.87E-01	8.96E-01	7.71E-01	6.06E-01	8.39E-01	8.10E-01	6.74E-01	6.97E-01	6.51E-01
4.0E-01	1.06E+00	1.05E+00	1.02E+00	9.62E-01	8.87E-01	7.65E-01	6.21E-01	8.35E-01	8.09E-01	6.77E-01	6.98E-01	6.55E-01
5.0E-01	1.04E+00	1.03E+00	1.01E+00	9.53E-01	8.90E-01	7.74E-01	6.35E-01	8.36E-01	8.07E-01	6.85E-01	7.02E-01	6.68E-01
6.0E-01	1.02E+00	1.02E+00	1.00E+00	9.47E-01	8.86E-01	7.77E-01	6.47E-01	8.40E-01	8.12E-01	6.93E-01	7.10E-01	6.75E-01
8.0E-01	1.01E+00	1.01E+00	9.85E-01	9.51E-01	8.92E-01	7.91E-01	6.71E-01	8.48E-01	8.21E-01	7.08E-01	7.29E-01	6.86E-01
1.0E+00	1.00E+00	1.00E+00	9.84E-01	9.50E-01	8.98E-01	7.97E-01	6.95E-01	8.57E-01	8.32E-01	7.25E-01	7.41E-01	7.10E-01
1.5E+00	9.96E-01	9.94E-01	9.82E-01	9.53E-01	9.11E-01	8.40E-01	7.39E-01	8.80E-01	8.52E-01	7.60E-01	7.71E-01	7.46E-01
2.0E+00	9.90E-01	9.91E-01	9.80E-01	9.53E-01	9.17E-01	8.57E-01	7.69E-01	8.96E-01	8.68E-01	7.82E-01	7.98E-01	7.64E-01

(続く)

<sup>5</sup> Endo, A. (2016). *Personal communication* (Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, Japan).

表 A.2.1b (続き)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	avg( $\pm 15^\circ$ )	avg( $\pm 30^\circ$ )	avg( $\pm 45^\circ$ )	avg( $\pm 60^\circ$ )	avg( $\pm 75^\circ$ )	avg( $\pm 90^\circ$ )	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
3.0E+00	9.77E-01	9.83E-01	9.67E-01	9.55E-01	9.35E-01	8.71E-01	8.05E-01	9.15E-01	8.87E-01	8.10E-01	8.24E-01	7.96E-01
4.0E+00	9.64E-01	9.64E-01	9.55E-01	9.51E-01	9.31E-01	8.76E-01	8.25E-01	9.23E-01	8.98E-01	8.24E-01	8.40E-01	8.07E-01
5.0E+00	9.45E-01	9.43E-01	9.40E-01	9.34E-01	9.32E-01	8.80E-01	8.32E-01	9.31E-01	8.96E-01	8.32E-01	8.46E-01	8.18E-01
6.0E+00	9.28E-01	9.32E-01	9.22E-01	9.18E-01	9.16E-01	8.75E-01	8.35E-01	9.28E-01	8.91E-01	8.35E-01	8.47E-01	8.23E-01
8.0E+00	8.84E-01	8.92E-01	8.90E-01	8.90E-01	8.93E-01	8.61E-01	8.32E-01	9.24E-01	8.74E-01	8.25E-01	8.40E-01	8.10E-01
1.0E+01	8.50E-01	8.54E-01	8.51E-01	8.54E-01	8.65E-01	8.46E-01	8.23E-01	9.16E-01	8.58E-01	8.16E-01	8.25E-01	8.00E-01
1.5E+01	7.57E-01	7.66E-01	7.65E-01	7.74E-01	7.92E-01	7.90E-01	7.89E-01	8.82E-01	8.04E-01	7.78E-01	7.77E-01	7.59E-01
2.0E+01	6.79E-01	6.83E-01	6.90E-01	7.04E-01	7.26E-01	7.44E-01	7.57E-01	8.42E-01	7.58E-01	7.45E-01	7.47E-01	7.43E-01
3.0E+01	5.53E-01	5.57E-01	5.64E-01	5.88E-01	6.20E-01	6.54E-01	6.95E-01	7.48E-01	6.71E-01	6.72E-01	6.72E-01	6.72E-01
4.0E+01	4.63E-01	4.62E-01	4.78E-01	5.02E-01	5.45E-01	5.94E-01	6.44E-01	6.62E-01	6.00E-01	6.10E-01	6.07E-01	6.13E-01
5.0E+01	3.95E-01	3.95E-01	4.08E-01	4.37E-01	4.79E-01	5.35E-01	5.96E-01	5.88E-01	5.39E-01	5.55E-01	5.52E-01	5.59E-01

表 A.2.2 中性子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{pSv cm}^2)$											
	0°	avg( $\pm 15^\circ$ )	avg( $\pm 30^\circ$ )	avg( $\pm 45^\circ$ )	avg( $\pm 60^\circ$ )	avg( $\pm 75^\circ$ )	avg( $\pm 90^\circ$ )	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E-09	3.09E+00	2.93E+00	2.67E+00	2.25E+00	1.86E+00	1.38E+00	9.67E-01	1.85E+00	1.70E+00	1.29E+00	1.35E+00	1.23E+00
1.0E-08	3.55E+00	3.48E+00	3.14E+00	2.67E+00	2.18E+00	1.60E+00	1.06E+00	2.11E+00	2.03E+00	1.56E+00	1.58E+00	1.54E+00
2.5E-08	4.00E+00	3.89E+00	3.48E+00	2.97E+00	2.41E+00	1.79E+00	1.22E+00	2.44E+00	2.31E+00	1.76E+00	1.76E+00	1.76E+00
1.0E-07	5.20E+00	5.06E+00	4.62E+00	3.93E+00	3.16E+00	2.35E+00	1.56E+00	3.25E+00	2.98E+00	2.26E+00	2.33E+00	2.19E+00
2.0E-07	5.87E+00	5.73E+00	5.20E+00	4.45E+00	3.58E+00	2.61E+00	1.79E+00	3.72E+00	3.36E+00	2.54E+00	2.61E+00	2.47E+00
5.0E-07	6.59E+00	6.65E+00	6.00E+00	5.14E+00	4.16E+00	3.05E+00	2.04E+00	4.33E+00	3.86E+00	2.92E+00	2.99E+00	2.85E+00
1.0E-06	7.03E+00	7.01E+00	6.34E+00	5.51E+00	4.34E+00	3.26E+00	2.21E+00	4.73E+00	4.17E+00	3.15E+00	3.25E+00	3.05E+00
2.0E-06	7.39E+00	7.37E+00	6.70E+00	5.69E+00	4.59E+00	3.41E+00	2.32E+00	5.02E+00	4.40E+00	3.32E+00	3.37E+00	3.27E+00
5.0E-06	7.71E+00	7.69E+00	6.95E+00	5.95E+00	4.83E+00	3.53E+00	2.43E+00	5.30E+00	4.59E+00	3.47E+00	3.56E+00	3.38E+00
1.0E-05	7.82E+00	7.81E+00	7.06E+00	6.02E+00	4.87E+00	3.65E+00	2.45E+00	5.44E+00	4.68E+00	3.52E+00	3.62E+00	3.42E+00
2.0E-05	7.84E+00	7.83E+00	7.09E+00	6.04E+00	4.87E+00	3.64E+00	2.47E+00	5.51E+00	4.72E+00	3.54E+00	3.60E+00	3.48E+00
5.0E-05	7.82E+00	7.81E+00	7.06E+00	6.09E+00	4.87E+00	3.61E+00	2.45E+00	5.55E+00	4.73E+00	3.55E+00	3.65E+00	3.45E+00
1.0E-04	7.79E+00	7.71E+00	7.06E+00	6.00E+00	4.90E+00	3.63E+00	2.44E+00	5.57E+00	4.72E+00	3.54E+00	3.64E+00	3.44E+00
2.0E-04	7.73E+00	7.75E+00	7.01E+00	6.04E+00	4.85E+00	3.63E+00	2.45E+00	5.59E+00	4.67E+00	3.52E+00	3.64E+00	3.40E+00
5.0E-04	7.54E+00	7.59E+00	7.00E+00	5.96E+00	4.78E+00	3.56E+00	2.42E+00	5.60E+00	4.60E+00	3.47E+00	3.67E+00	3.27E+00
1.0E-03	7.54E+00	7.56E+00	6.91E+00	5.89E+00	4.80E+00	3.51E+00	2.41E+00	5.60E+00	4.58E+00	3.46E+00	3.64E+00	3.28E+00
2.0E-03	7.61E+00	7.61E+00	6.94E+00	5.98E+00	4.76E+00	3.54E+00	2.40E+00	5.62E+00	4.61E+00	3.48E+00	3.64E+00	3.32E+00
5.0E-03	7.97E+00	8.03E+00	7.33E+00	6.23E+00	5.03E+00	3.76E+00	2.54E+00	5.95E+00	4.86E+00	3.66E+00	3.88E+00	3.44E+00
1.0E-02	9.11E+00	9.21E+00	8.41E+00	7.21E+00	5.83E+00	4.30E+00	2.90E+00	6.81E+00	5.57E+00	4.19E+00	4.38E+00	4.00E+00
2.0E-02	1.22E+01	1.23E+01	1.13E+01	9.68E+00	7.78E+00	5.78E+00	3.91E+00	8.93E+00	7.41E+00	5.61E+00	5.80E+00	5.42E+00
3.0E-02	1.57E+01	1.59E+01	1.45E+01	1.26E+01	1.00E+01	7.43E+00	5.01E+00	1.12E+01	9.46E+00	7.18E+00	7.66E+00	6.70E+00
5.0E-02	2.30E+01	2.33E+01	2.14E+01	1.83E+01	1.48E+01	1.09E+01	7.35E+00	1.57E+01	1.37E+01	1.04E+01	1.10E+01	9.80E+00
7.0E-02	3.06E+01	3.10E+01	2.84E+01	2.43E+01	1.97E+01	1.45E+01	9.73E+00	2.00E+01	1.80E+01	1.37E+01	1.47E+01	1.27E+01
1.0E-01	4.19E+01	4.25E+01	3.90E+01	3.36E+01	2.70E+01	1.99E+01	1.34E+01	2.59E+01	2.43E+01	1.86E+01	1.94E+01	1.78E+01
1.5E-01	6.06E+01	6.10E+01	5.63E+01	4.86E+01	3.92E+01	2.89E+01	1.94E+01	3.49E+01	3.47E+01	2.66E+01	2.77E+01	2.55E+01
2.0E-01	7.88E+01	7.93E+01	7.35E+01	6.38E+01	5.16E+01	3.81E+01	2.53E+01	4.31E+01	4.47E+01	3.44E+01	3.57E+01	3.31E+01
3.0E-01	1.14E+02	1.13E+02	1.05E+02	9.24E+01	7.50E+01	5.55E+01	3.70E+01	5.81E+01	6.38E+01	4.94E+01	5.11E+01	4.77E+01
5.0E-01	1.77E+02	1.79E+02	1.67E+02	1.48E+02	1.21E+02	8.90E+01	5.91E+01	8.59E+01	9.91E+01	7.71E+01	7.97E+01	7.45E+01
7.0E-01	2.32E+02	2.34E+02	2.20E+02	1.96E+02	1.62E+02	1.20E+02	7.91E+01	1.12E+02	1.31E+02	1.02E+02	1.08E+02	9.60E+01
9.0E-01	2.79E+02	2.81E+02	2.65E+02	2.36E+02	1.96E+02	1.48E+02	9.72E+01	1.36E+02	1.60E+02	1.26E+02	1.30E+02	1.22E+02
1.0E+00	3.01E+02	2.88E+02	2.72E+02	2.42E+02	1.99E+02	1.48E+02	1.06E+02	1.48E+02	1.74E+02	1.37E+02	1.31E+02	1.43E+02
1.2E+00	3.30E+02	3.31E+02	3.15E+02	2.82E+02	2.35E+02	1.79E+02	1.20E+02	1.67E+02	1.93E+02	1.53E+02	1.57E+02	1.49E+02
1.5E+00	3.65E+02	3.69E+02	3.50E+02	3.18E+02	2.70E+02	2.08E+02	1.39E+02	1.95E+02	2.19E+02	1.74E+02	1.83E+02	1.65E+02

(続く)

表 A.2.2 (続き)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{pSv cm}^2)$											
	$0^\circ$	avg( $\pm 15^\circ$ )	avg( $\pm 30^\circ$ )	avg( $\pm 45^\circ$ )	avg( $\pm 60^\circ$ )	avg( $\pm 75^\circ$ )	avg( $\pm 90^\circ$ )	$180^\circ$	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
2.0E+00	4.07E+02	4.11E+02	3.92E+02	3.57E+02	3.10E+02	2.43E+02	1.66E+02	2.35E+02	2.54E+02	2.03E+02	2.13E+02	1.93E+02
3.0E+00	4.58E+02	4.57E+02	4.39E+02	4.07E+02	3.58E+02	2.93E+02	2.07E+02	2.92E+02	3.01E+02	2.44E+02	2.58E+02	2.30E+02
4.0E+00	4.83E+02	4.90E+02	4.74E+02	4.39E+02	3.88E+02	3.18E+02	2.35E+02	3.30E+02	3.31E+02	2.71E+02	2.81E+02	2.61E+02
5.0E+00	4.94E+02	4.92E+02	4.78E+02	4.52E+02	4.05E+02	3.43E+02	2.55E+02	3.54E+02	3.51E+02	2.90E+02	3.05E+02	2.75E+02
6.0E+00	4.98E+02	4.99E+02	4.85E+02	4.59E+02	4.15E+02	3.54E+02	2.70E+02	3.71E+02	3.65E+02	3.03E+02	3.15E+02	2.91E+02
7.0E+00	4.99E+02	4.95E+02	4.82E+02	4.58E+02	4.18E+02	3.68E+02	2.81E+02	3.83E+02	3.74E+02	3.13E+02	3.28E+02	2.98E+02
8.0E+00	4.99E+02	4.93E+02	4.81E+02	4.56E+02	4.20E+02	3.66E+02	2.90E+02	3.92E+02	3.81E+02	3.21E+02	3.29E+02	3.13E+02
9.0E+00	5.00E+02	4.93E+02	4.82E+02	4.59E+02	4.22E+02	3.72E+02	2.97E+02	3.98E+02	3.86E+02	3.27E+02	3.32E+02	3.22E+02
1.0E+01	5.00E+02	5.04E+02	4.90E+02	4.68E+02	4.32E+02	3.81E+02	3.03E+02	4.04E+02	3.90E+02	3.32E+02	3.40E+02	3.24E+02
1.2E+01	4.99E+02	5.08E+02	4.95E+02	4.73E+02	4.37E+02	3.85E+02	3.13E+02	4.12E+02	3.95E+02	3.39E+02	3.49E+02	3.29E+02
1.4E+01	4.95E+02	4.95E+02	4.87E+02	4.68E+02	4.34E+02	3.93E+02	3.22E+02	4.17E+02	3.98E+02	3.44E+02	3.56E+02	3.32E+02
1.5E+01	4.93E+02	4.93E+02	4.84E+02	4.67E+02	4.36E+02	3.91E+02	3.25E+02	4.19E+02	3.98E+02	3.46E+02	3.59E+02	3.33E+02
1.6E+01	4.90E+02	4.87E+02	4.79E+02	4.62E+02	4.30E+02	3.92E+02	3.28E+02	4.20E+02	3.99E+02	3.47E+02	3.62E+02	3.32E+02
1.8E+01	4.84E+02	4.64E+02	4.62E+02	4.44E+02	4.18E+02	3.83E+02	3.33E+02	4.22E+02	3.99E+02	3.50E+02	3.65E+02	3.35E+02
2.0E+01	4.77E+02	4.62E+02	4.61E+02	4.45E+02	4.22E+02	3.84E+02	3.38E+02	4.23E+02	3.98E+02	3.52E+02	3.73E+02	3.31E+02
2.1E+01	4.74E+02	4.09E+02	4.04E+02	3.97E+02	3.85E+02	3.59E+02	3.39E+02	4.23E+02	3.98E+02	3.53E+02	3.35E+02	3.71E+02
3.0E+01	4.53E+02	4.27E+02	4.23E+02	4.19E+02	4.05E+02	3.88E+02	3.53E+02	4.22E+02	3.95E+02	3.58E+02	3.66E+02	3.50E+02
5.0E+01	4.33E+02	4.01E+02	4.00E+02	4.00E+02	3.92E+02	3.85E+02	3.75E+02	4.28E+02	3.95E+02	3.71E+02	3.46E+02	3.96E+02
7.5E+01	4.20E+02	4.11E+02	4.12E+02	4.09E+02	4.08E+02	4.04E+02	3.96E+02	4.39E+02	4.02E+02	3.87E+02	3.53E+02	4.21E+02
1.0E+02	4.02E+02	4.14E+02	4.18E+02	4.20E+02	4.25E+02	4.24E+02	4.07E+02	4.44E+02	4.06E+02	3.97E+02	3.73E+02	4.21E+02
1.3E+02	3.82E+02	4.23E+02	4.30E+02	4.39E+02	4.46E+02	4.49E+02	4.15E+02	4.46E+02	4.11E+02	4.07E+02	4.12E+02	4.02E+02
1.5E+02	3.73E+02	4.19E+02	4.23E+02	4.40E+02	4.47E+02	4.57E+02	4.19E+02	4.46E+02	4.14E+02	4.12E+02	4.09E+02	4.15E+02
1.8E+02	3.63E+02	4.05E+02	4.09E+02	4.31E+02	4.45E+02	4.59E+02	4.25E+02	4.47E+02	4.18E+02	4.21E+02	4.22E+02	4.20E+02
2.0E+02	3.59E+02	4.04E+02	4.09E+02	4.30E+02	4.49E+02	4.67E+02	4.28E+02	4.48E+02	4.22E+02	4.26E+02	4.33E+02	4.19E+02
3.0E+02	3.63E+02	3.80E+02	3.89E+02	4.06E+02	4.27E+02	4.47E+02	4.46E+02	4.64E+02	4.43E+02	4.55E+02	4.37E+02	4.73E+02
4.0E+02	3.89E+02	3.98E+02	4.07E+02	4.25E+02	4.41E+02	4.61E+02	4.78E+02	4.96E+02	4.72E+02	4.88E+02	4.61E+02	5.15E+02
5.0E+02	4.22E+02	4.38E+02	4.49E+02	4.65E+02	4.85E+02	5.08E+02	5.17E+02	5.33E+02	5.03E+02	5.21E+02	5.09E+02	5.33E+02
6.0E+02	4.57E+02	4.72E+02	4.83E+02	5.03E+02	5.24E+02	5.46E+02	5.55E+02	5.69E+02	5.32E+02	5.53E+02	5.66E+02	5.40E+02
7.0E+02	4.86E+02	4.94E+02	5.06E+02	5.23E+02	5.43E+02	5.69E+02	5.88E+02	5.99E+02	5.58E+02	5.80E+02	6.25E+02	5.35E+02
8.0E+02	5.08E+02	5.10E+02	5.22E+02	5.42E+02	5.64E+02	5.90E+02	6.12E+02	6.23E+02	5.80E+02	6.04E+02	6.38E+02	5.70E+02
9.0E+02	5.24E+02	5.20E+02	5.33E+02	5.54E+02	5.75E+02	6.01E+02	6.30E+02	6.40E+02	5.98E+02	6.24E+02	6.45E+02	6.03E+02
1.0E+03	5.37E+02	5.28E+02	5.40E+02	5.63E+02	5.84E+02	6.12E+02	6.43E+02	6.54E+02	6.14E+02	6.42E+02	6.63E+02	6.21E+02

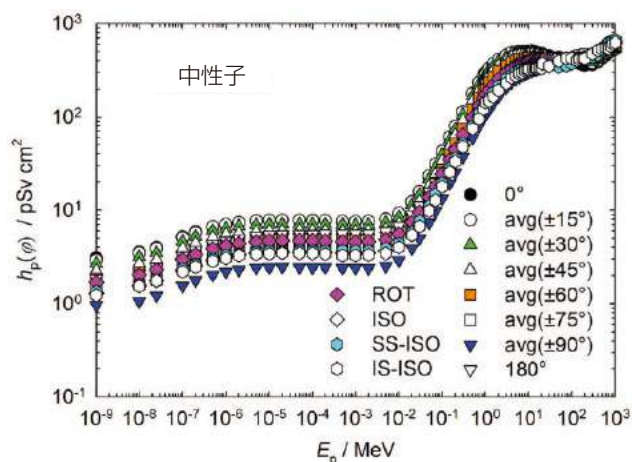


図 A.2.2 中性子フルエンスから個人線量への換算係数  
(Endo, 2017; ICRP, 2010)

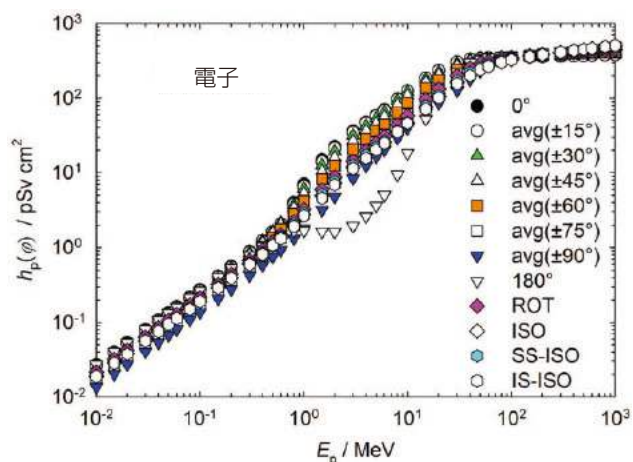


図 A.2.3 電子フルエンスから個人線量への換算係数  
(Endo, 2017; ICRP, 2010)

表 A.2.3 電子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{pSv cm}^2)$											
	0°	avg( $\pm 15^\circ$ )	avg( $\pm 30^\circ$ )	avg( $\pm 45^\circ$ )	avg( $\pm 60^\circ$ )	avg( $\pm 75^\circ$ )	avg( $\pm 90^\circ$ )	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E-02	2.69E-02	2.60E-02	2.44E-02	2.20E-02	1.98E-02	1.67E-02	1.35E-02	2.68E-02	2.13E-02	1.88E-02	1.89E-02	1.87E-02
1.5E-02	4.04E-02	3.88E-02	3.64E-02	3.28E-02	2.94E-02	2.49E-02	2.02E-02	4.02E-02	3.17E-02	2.83E-02	2.84E-02	2.82E-02
2.0E-02	5.39E-02	5.17E-02	4.85E-02	4.37E-02	3.92E-02	3.32E-02	2.70E-02	5.35E-02	4.22E-02	3.77E-02	3.78E-02	3.76E-02
3.0E-02	8.10E-02	7.76E-02	7.29E-02	6.57E-02	5.88E-02	4.99E-02	4.05E-02	8.01E-02	6.34E-02	5.67E-02	5.70E-02	5.64E-02
4.0E-02	1.08E-01	1.04E-01	9.75E-02	8.80E-02	7.89E-02	6.68E-02	5.41E-02	1.07E-01	8.48E-02	7.58E-02	7.59E-02	7.57E-02
5.0E-02	1.35E-01	1.30E-01	1.22E-01	1.10E-01	9.87E-02	8.37E-02	6.76E-02	1.33E-01	1.06E-01	9.48E-02	9.50E-02	9.46E-02
6.0E-02	1.63E-01	1.56E-01	1.47E-01	1.33E-01	1.19E-01	1.01E-01	8.12E-02	1.60E-01	1.27E-01	1.14E-01	1.15E-01	1.13E-01
8.0E-02	2.18E-01	2.10E-01	1.98E-01	1.79E-01	1.60E-01	1.35E-01	1.09E-01	2.13E-01	1.70E-01	1.52E-01	1.54E-01	1.50E-01
1.0E-01	2.75E-01	2.63E-01	2.49E-01	2.25E-01	2.02E-01	1.70E-01	1.36E-01	2.67E-01	2.13E-01	1.91E-01	1.92E-01	1.90E-01
1.5E-01	4.18E-01	4.02E-01	3.85E-01	3.50E-01	3.12E-01	2.60E-01	2.06E-01	3.99E-01	3.23E-01	2.91E-01	2.94E-01	2.88E-01
2.0E-01	5.69E-01	5.48E-01	5.29E-01	4.85E-01	4.32E-01	3.56E-01	2.78E-01	5.30E-01	4.37E-01	3.93E-01	3.96E-01	3.90E-01
3.0E-01	8.89E-01	8.65E-01	8.50E-01	7.92E-01	6.99E-01	5.63E-01	4.26E-01	7.87E-01	6.73E-01	6.06E-01	6.16E-01	5.96E-01
4.0E-01	1.24E+00	1.22E+00	1.22E+00	1.15E+00	1.01E+00	7.98E-01	5.81E-01	1.04E+00	9.21E-01	8.32E-01	8.51E-01	8.13E-01
5.0E-01	1.63E+00	1.60E+00	1.65E+00	1.56E+00	1.36E+00	1.06E+00	7.48E-01	1.28E+00	1.19E+00	1.08E+00	1.09E+00	1.07E+00
6.0E-01	2.05E+00	2.06E+00	2.13E+00	2.03E+00	1.77E+00	1.35E+00	9.19E-01	1.50E+00	1.48E+00	1.35E+00	1.38E+00	1.32E+00
8.0E-01	4.04E+00	3.79E+00	3.70E+00	3.36E+00	2.82E+00	2.06E+00	1.33E+00	1.68E+00	2.23E+00	1.97E+00	2.03E+00	1.91E+00
1.0E+00	7.10E+00	6.55E+00	6.07E+00	5.25E+00	4.20E+00	2.94E+00	1.81E+00	1.68E+00	3.23E+00	2.76E+00	2.86E+00	2.66E+00
1.5E+00	1.50E+01	1.40E+01	1.26E+01	1.05E+01	8.16E+00	5.50E+00	3.16E+00	1.62E+00	5.93E+00	4.96E+00	5.10E+00	4.57E+00
2.0E+00	2.24E+01	2.13E+01	1.92E+01	1.60E+01	1.23E+01	8.27E+00	4.76E+00	1.62E+00	8.73E+00	7.24E+00	7.59E+00	6.89E+00
3.0E+00	3.61E+01	3.45E+01	3.12E+01	2.63E+01	2.06E+01	1.40E+01	8.44E+00	1.95E+00	1.42E+01	1.19E+01	1.25E+01	1.13E+01
4.0E+00	4.82E+01	4.69E+01	4.27E+01	3.64E+01	2.85E+01	1.98E+01	1.23E+01	2.62E+00	1.96E+01	1.64E+01	1.72E+01	1.56E+01
5.0E+00	5.93E+01	5.82E+01	5.39E+01	4.65E+01	3.66E+01	2.54E+01	1.63E+01	3.63E+00	2.50E+01	2.10E+01	2.18E+01	2.02E+01
6.0E+00	7.06E+01	6.94E+01	6.54E+01	5.68E+01	4.50E+01	3.16E+01	2.03E+01	5.04E+00	3.07E+01	2.55E+01	2.62E+01	2.48E+01
8.0E+00	9.79E+01	9.70E+01	9.27E+01	8.14E+01	6.46E+01	4.50E+01	2.92E+01	9.46E+00	4.43E+01	3.55E+01	3.59E+01	3.51E+01
1.0E+01	1.25E+02	1.26E+02	1.21E+02	1.09E+02	8.71E+01	6.08E+01	3.96E+01	1.83E+01	5.87E+01	4.67E+01	4.74E+01	4.60E+01
1.5E+01	1.88E+02	1.87E+02	1.80E+02	1.65E+02	1.36E+02	9.95E+01	6.40E+01	5.31E+01	9.63E+01	7.69E+01	7.85E+01	7.18E+01
2.0E+01	2.36E+02	2.35E+02	2.25E+02	2.07E+02	1.76E+02	1.32E+02	8.62E+01	1.04E+02	1.34E+02	1.06E+02	1.10E+02	1.02E+02
3.0E+01	3.02E+02	3.05E+02	2.90E+02	2.72E+02	2.39E+02	1.89E+02	1.27E+02	2.20E+02	2.03E+02	1.64E+02	1.71E+02	1.57E+02
4.0E+01	3.29E+02	3.31E+02	3.25E+02	3.11E+02	2.87E+02	2.46E+02	1.78E+02	2.97E+02	2.56E+02	2.12E+02	2.21E+02	2.01E+02
5.0E+01	3.37E+02	3.40E+02	3.38E+02	3.33E+02	3.18E+02	2.90E+02	2.32E+02	3.31E+02	2.90E+02	2.49E+02	2.57E+02	2.41E+02
6.0E+01	3.41E+02	3.45E+02	3.42E+02	3.41E+02	3.33E+02	3.17E+02	2.71E+02	3.44E+02	3.12E+02	2.75E+02	2.82E+02	2.68E+02
8.0E+01	3.46E+02	3.49E+02	3.49E+02	3.50E+02	3.48E+02	3.45E+02	3.16E+02	3.58E+02	3.37E+02	3.09E+02	3.16E+02	3.02E+02
1.0E+02	3.49E+02	3.52E+02	3.53E+02	3.55E+02	3.55E+02	3.56E+02	3.40E+02	3.66E+02	3.51E+02	3.31E+02	3.37E+02	3.25E+02
1.5E+02	3.55E+02	3.58E+02	3.59E+02	3.63E+02	3.67E+02	3.75E+02	3.70E+02	3.79E+02	3.70E+02	3.63E+02	3.66E+02	3.60E+02
2.0E+02	3.59E+02	3.61E+02	3.62E+02	3.67E+02	3.76E+02	3.85E+02	3.92E+02	3.88E+02	3.84E+02	3.83E+02	3.84E+02	3.82E+02
3.0E+02	3.65E+02	3.67E+02	3.68E+02	3.75E+02	3.86E+02	4.01E+02	4.20E+02	3.99E+02	3.98E+02	4.10E+02	4.09E+02	4.11E+02
4.0E+02	3.69E+02	3.70E+02	3.73E+02	3.81E+02	3.92E+02	4.12E+02	4.37E+02	4.08E+02	4.08E+02	4.30E+02	4.25E+02	4.35E+02
5.0E+02	3.72E+02	3.73E+02	3.75E+02	3.85E+02	4.00E+02	4.19E+02	4.50E+02	4.14E+02	4.16E+02	4.45E+02	4.41E+02	4.49E+02
6.0E+02	3.75E+02	3.78E+02	3.79E+02	3.89E+02	4.06E+02	4.26E+02	4.60E+02	4.19E+02	4.24E+02	4.57E+02	4.50E+02	4.64E+02
8.0E+02	3.79E+02	3.79E+02	3.84E+02	3.94E+02	4.09E+02	4.37E+02	4.78E+02	4.28E+02	4.37E+02	4.78E+02	4.68E+02	4.88E+02
1.0E+03	3.82E+02	3.83E+02	3.86E+02	4.00E+02	4.18E+02	4.45E+02	4.94E+02	4.34E+02	4.47E+02	4.95E+02	4.82E+02	5.08E+02

表 A.2.4 陽電子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{pSv cm}^2)$											
	$0^\circ$	avg( $\pm 15^\circ$ )	avg( $\pm 30^\circ$ )	avg( $\pm 45^\circ$ )	avg( $\pm 60^\circ$ )	avg( $\pm 75^\circ$ )	avg( $\pm 90^\circ$ )	$180^\circ$	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E-02	3.28E+00	3.11E+00	2.81E+00	2.37E+00	1.92E+00	1.43E+00	9.99E-01	1.62E+00	1.77E+00	1.39E+00	1.45E+00	1.33E+00
1.5E-02	3.29E+00	3.00E+00	2.70E+00	2.28E+00	1.85E+00	1.38E+00	9.68E-01	1.64E+00	1.71E+00	1.40E+00	1.47E+00	1.33E+00
2.0E-02	3.30E+00	2.98E+00	2.67E+00	2.24E+00	1.82E+00	1.36E+00	9.68E-01	1.65E+00	1.70E+00	1.41E+00	1.46E+00	1.36E+00
3.0E-02	3.33E+00	2.98E+00	2.66E+00	2.24E+00	1.81E+00	1.37E+00	9.71E-01	1.68E+00	1.70E+00	1.43E+00	1.49E+00	1.37E+00
4.0E-02	3.36E+00	3.06E+00	2.74E+00	2.32E+00	1.87E+00	1.42E+00	1.00E+00	1.71E+00	1.75E+00	1.45E+00	1.50E+00	1.40E+00
5.0E-02	3.39E+00	3.07E+00	2.77E+00	2.32E+00	1.87E+00	1.42E+00	1.01E+00	1.73E+00	1.77E+00	1.47E+00	1.52E+00	1.42E+00
6.0E-02	3.42E+00	3.09E+00	2.78E+00	2.34E+00	1.90E+00	1.44E+00	1.03E+00	1.76E+00	1.78E+00	1.49E+00	1.57E+00	1.41E+00
8.0E-02	3.47E+00	3.13E+00	2.81E+00	2.37E+00	1.93E+00	1.46E+00	1.05E+00	1.82E+00	1.82E+00	1.53E+00	1.60E+00	1.46E+00
1.0E-01	3.53E+00	3.18E+00	2.86E+00	2.40E+00	1.97E+00	1.50E+00	1.07E+00	1.87E+00	1.86E+00	1.57E+00	1.63E+00	1.51E+00
1.5E-01	3.67E+00	3.32E+00	2.99E+00	2.53E+00	2.07E+00	1.59E+00	1.14E+00	2.01E+00	1.97E+00	1.67E+00	1.72E+00	1.62E+00
2.0E-01	3.84E+00	3.46E+00	3.13E+00	2.66E+00	2.20E+00	1.68E+00	1.21E+00	2.14E+00	2.07E+00	1.77E+00	1.81E+00	1.73E+00
3.0E-01	4.16E+00	3.79E+00	3.47E+00	2.98E+00	2.47E+00	1.89E+00	1.35E+00	2.40E+00	2.32E+00	1.98E+00	2.05E+00	1.91E+00
4.0E-01	4.52E+00	4.13E+00	3.84E+00	3.37E+00	2.79E+00	2.13E+00	1.50E+00	2.65E+00	2.57E+00	2.21E+00	2.28E+00	2.14E+00
5.0E-01	4.90E+00	4.54E+00	4.29E+00	3.79E+00	3.15E+00	2.39E+00	1.66E+00	2.90E+00	2.84E+00	2.45E+00	2.54E+00	2.36E+00
6.0E-01	5.36E+00	5.00E+00	4.77E+00	4.28E+00	3.57E+00	2.69E+00	1.84E+00	3.12E+00	3.13E+00	2.72E+00	2.82E+00	2.62E+00
8.0E-01	7.41E+00	6.80E+00	6.41E+00	5.65E+00	4.66E+00	3.41E+00	2.24E+00	3.32E+00	3.90E+00	3.38E+00	3.51E+00	3.25E+00
1.0E+00	1.05E+01	9.61E+00	8.83E+00	7.58E+00	6.07E+00	4.33E+00	2.73E+00	3.37E+00	4.94E+00	4.20E+00	4.39E+00	4.01E+00
1.5E+00	1.83E+01	1.71E+01	1.54E+01	1.30E+01	1.01E+01	6.92E+00	4.15E+00	3.44E+00	7.66E+00	6.42E+00	6.50E+00	5.87E+00
2.0E+00	2.57E+01	2.42E+01	2.18E+01	1.83E+01	1.42E+01	9.75E+00	5.79E+00	3.59E+00	1.05E+01	8.70E+00	9.13E+00	8.27E+00
3.0E+00	3.91E+01	3.72E+01	3.37E+01	2.84E+01	2.22E+01	1.55E+01	9.45E+00	4.19E+00	1.59E+01	1.33E+01	1.39E+01	1.27E+01
4.0E+00	5.10E+01	4.92E+01	4.50E+01	3.83E+01	3.01E+01	2.12E+01	1.33E+01	5.11E+00	2.13E+01	1.80E+01	1.88E+01	1.72E+01
5.0E+00	6.17E+01	6.01E+01	5.57E+01	4.79E+01	3.80E+01	2.68E+01	1.72E+01	6.31E+00	2.66E+01	2.24E+01	2.33E+01	2.15E+01
6.0E+00	7.29E+01	7.12E+01	6.71E+01	5.84E+01	4.63E+01	3.28E+01	2.13E+01	8.03E+00	3.23E+01	2.69E+01	2.77E+01	2.61E+01
8.0E+00	9.90E+01	9.75E+01	9.32E+01	8.18E+01	6.56E+01	4.58E+01	3.01E+01	1.40E+01	4.61E+01	3.67E+01	3.77E+01	3.57E+01
1.0E+01	1.26E+02	1.24E+02	1.19E+02	1.08E+02	8.65E+01	6.13E+01	3.95E+01	2.36E+01	5.95E+01	4.76E+01	4.89E+01	4.63E+01
1.5E+01	1.84E+02	1.83E+02	1.75E+02	1.59E+02	1.33E+02	9.68E+01	6.37E+01	5.90E+01	9.55E+01	7.55E+01	7.72E+01	7.17E+01
2.0E+01	2.29E+02	2.25E+02	2.16E+02	1.99E+02	1.72E+02	1.28E+02	8.47E+01	1.11E+02	1.30E+02	1.04E+02	1.08E+02	1.00E+02
3.0E+01	2.94E+02	2.89E+02	2.78E+02	2.58E+02	2.28E+02	1.82E+02	1.24E+02	2.21E+02	1.95E+02	1.62E+02	1.65E+02	1.59E+02
4.0E+01	3.20E+02	3.14E+02	3.08E+02	2.95E+02	2.73E+02	2.38E+02	1.72E+02	2.91E+02	2.42E+02	2.09E+02	2.10E+02	2.08E+02
5.0E+01	3.27E+02	3.22E+02	3.20E+02	3.12E+02	3.00E+02	2.75E+02	2.19E+02	3.21E+02	2.76E+02	2.43E+02	2.44E+02	2.42E+02
6.0E+01	3.33E+02	3.26E+02	3.27E+02	3.22E+02	3.16E+02	3.01E+02	2.58E+02	3.34E+02	2.96E+02	2.68E+02	2.67E+02	2.69E+02
8.0E+01	3.39E+02	3.35E+02	3.35E+02	3.34E+02	3.31E+02	3.27E+02	2.98E+02	3.49E+02	3.20E+02	3.02E+02	3.00E+02	3.04E+02
1.0E+02	3.42E+02	3.38E+02	3.40E+02	3.39E+02	3.39E+02	3.40E+02	3.24E+02	3.57E+02	3.34E+02	3.23E+02	3.19E+02	3.27E+02
1.5E+02	3.49E+02	3.47E+02	3.48E+02	3.50E+02	3.54E+02	3.59E+02	3.59E+02	3.71E+02	3.55E+02	3.56E+02	3.49E+02	3.46E+02
2.0E+02	3.54E+02	3.52E+02	3.54E+02	3.58E+02	3.63E+02	3.73E+02	3.79E+02	3.81E+02	3.68E+02	3.77E+02	3.71E+02	3.83E+02
3.0E+02	3.62E+02	3.59E+02	3.61E+02	3.67E+02	3.78E+02	3.90E+02	4.06E+02	3.93E+02	3.85E+02	4.05E+02	3.98E+02	4.12E+02
4.0E+02	3.66E+02	3.64E+02	3.66E+02	3.74E+02	3.86E+02	4.02E+02	4.26E+02	4.02E+02	3.99E+02	4.25E+02	4.15E+02	4.35E+02
5.0E+02	3.69E+02	3.68E+02	3.72E+02	3.81E+02	3.92E+02	4.13E+02	4.39E+02	4.09E+02	4.08E+02	4.40E+02	4.31E+02	4.49E+02
6.0E+02	3.72E+02	3.71E+02	3.75E+02	3.84E+02	3.99E+02	4.20E+02	4.53E+02	4.15E+02	4.18E+02	4.53E+02	4.44E+02	4.62E+02
8.0E+02	3.76E+02	3.76E+02	3.79E+02	3.90E+02	4.08E+02	4.30E+02	4.72E+02	4.24E+02	4.32E+02	4.74E+02	4.63E+02	4.85E+02
1.0E+03	3.79E+02	3.80E+02	3.83E+02	3.95E+02	4.14E+02	4.41E+02	4.89E+02	4.30E+02	4.36E+02	4.91E+02	4.77E+02	5.05E+02

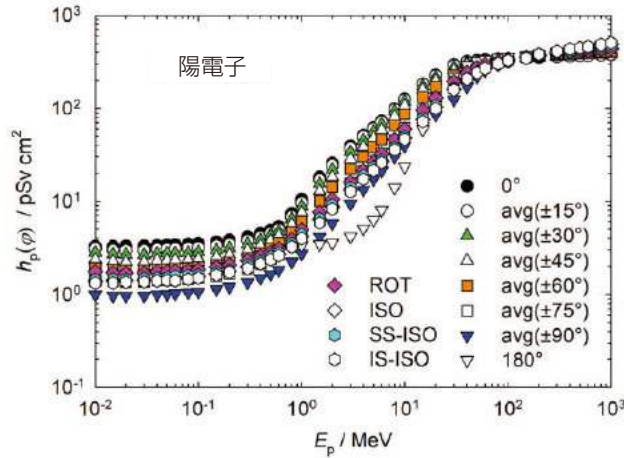


図 A.2.4 陽電子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

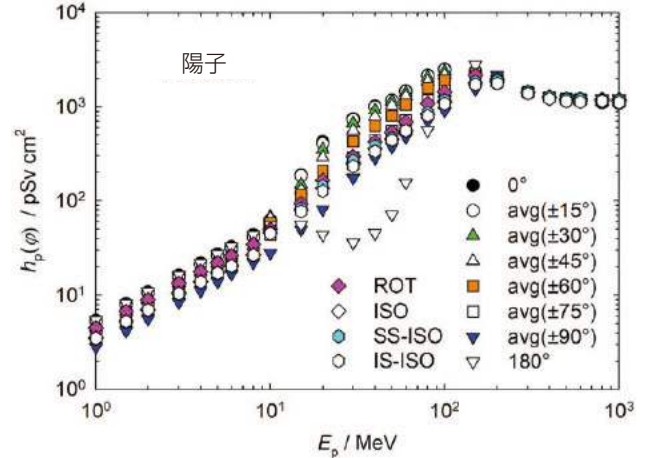


図 A.2.5 陽子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

表 A.2.5 陽子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

$E_p / \text{MeV}$	$h_p(\varphi) / (\text{pSv cm}^2)$											
	$0^\circ$	avg( $\pm 15^\circ$ )	avg( $\pm 30^\circ$ )	avg( $\pm 45^\circ$ )	avg( $\pm 60^\circ$ )	avg( $\pm 75^\circ$ )	avg( $\pm 90^\circ$ )	$180^\circ$	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E+00	5.46E+00	5.30E+00	5.01E+00	4.53E+00	4.07E+00	3.44E+00	2.81E+00	5.47E+00	4.50E+00	3.52E+00	3.44E+00	3.51E+00
1.5E+00	8.20E+00	7.94E+00	7.50E+00	6.78E+00	6.09E+00	5.15E+00	4.21E+00	8.21E+00	6.75E+00	5.28E+00	5.16E+00	5.26E+00
2.0E+00	1.09E+01	1.06E+01	9.97E+00	9.01E+00	8.10E+00	6.86E+00	5.62E+00	1.09E+01	8.98E+00	7.02E+00	6.86E+00	7.00E+00
3.0E+00	1.64E+01	1.58E+01	1.49E+01	1.34E+01	1.21E+01	1.02E+01	8.42E+00	1.64E+01	1.34E+01	1.05E+01	1.03E+01	1.05E+01
4.0E+00	2.19E+01	2.10E+01	1.97E+01	1.77E+01	1.60E+01	1.36E+01	1.12E+01	2.19E+01	1.78E+01	1.39E+01	1.36E+01	1.39E+01
5.0E+00	2.73E+01	2.61E+01	2.44E+01	2.19E+01	1.98E+01	1.69E+01	1.40E+01	2.73E+01	2.21E+01	1.73E+01	1.69E+01	1.72E+01
6.0E+00	3.28E+01	3.11E+01	2.90E+01	2.60E+01	2.34E+01	2.01E+01	1.68E+01	3.28E+01	2.63E+01	2.05E+01	2.01E+01	2.05E+01
8.0E+00	4.37E+01	4.09E+01	3.76E+01	3.36E+01	3.03E+01	2.63E+01	2.24E+01	4.37E+01	3.45E+01	2.68E+01	2.62E+01	2.67E+01
1.0E+01	5.49E+01	6.28E+01	6.75E+01	6.54E+01	5.78E+01	4.39E+01	2.81E+01	5.46E+01	5.01E+01	4.58E+01	4.66E+01	4.50E+01
1.5E+01	1.89E+02	1.85E+02	1.49E+02	1.30E+02	1.15E+02	8.59E+01	4.98E+01	5.61E+01	9.37E+01	8.01E+01	8.31E+01	7.71E+01
2.0E+01	4.28E+02	4.04E+02	3.52E+02	2.90E+02	2.06E+02	1.45E+02	8.08E+01	4.36E+01	1.65E+02	1.36E+02	1.45E+02	1.27E+02
3.0E+01	7.50E+02	7.26E+02	6.60E+02	5.59E+02	4.28E+02	2.92E+02	1.76E+02	3.61E+01	2.96E+02	2.49E+02	2.66E+02	2.32E+02
4.0E+01	1.02E+03	1.00E+03	9.19E+02	7.80E+02	6.19E+02	4.38E+02	2.84E+02	4.55E+01	4.22E+02	3.58E+02	3.81E+02	3.35E+02
5.0E+01	1.18E+03	1.18E+03	1.15E+03	1.04E+03	7.97E+02	5.50E+02	3.76E+02	7.15E+01	5.32E+02	4.51E+02	4.62E+02	4.40E+02
6.0E+01	1.48E+03	1.46E+03	1.41E+03	1.30E+03	1.05E+03	7.18E+02	4.74E+02	1.56E+02	6.87E+02	5.51E+02	5.47E+02	5.55E+02
8.0E+01	2.16E+03	2.14E+03	2.04E+03	1.86E+03	1.58E+03	1.19E+03	7.01E+02	5.60E+02	1.09E+03	8.37E+02	8.71E+02	8.03E+02
1.0E+02	2.51E+03	2.48E+03	2.36E+03	2.17E+03	1.90E+03	1.46E+03	9.06E+02	1.19E+03	1.44E+03	1.13E+03	1.18E+03	1.08E+03
1.5E+02	2.38E+03	2.40E+03	2.41E+03	2.44E+03	2.30E+03	2.10E+03	1.55E+03	2.82E+03	2.16E+03	1.79E+03	1.85E+03	1.73E+03
2.0E+02	1.77E+03	1.79E+03	1.81E+03	1.84E+03	1.91E+03	2.01E+03	2.17E+03	1.93E+03	1.96E+03	1.84E+03	1.90E+03	1.78E+03
3.0E+02	1.38E+03	1.39E+03	1.40E+03	1.41E+03	1.43E+03	1.44E+03	1.45E+03	1.45E+03	1.44E+03	1.42E+03	1.45E+03	1.39E+03
4.0E+02	1.23E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.26E+03	1.28E+03	1.28E+03	1.28E+03	1.30E+03	1.28E+03	1.25E+03	1.28E+03	1.22E+03
5.0E+02	1.15E+03	1.19E+03	1.19E+03	1.21E+03	1.22E+03	1.22E+03	1.21E+03	1.24E+03	1.22E+03	1.18E+03	1.21E+03	1.15E+03
6.0E+02	1.16E+03	1.16E+03	1.17E+03	1.18E+03	1.20E+03	1.20E+03	1.20E+03	1.23E+03	1.22E+03	1.17E+03	1.21E+03	1.13E+03
8.0E+02	1.11E+03	1.13E+03	1.14E+03	1.15E+03	1.17E+03	1.17E+03	1.20E+03	1.23E+03	1.20E+03	1.17E+03	1.18E+03	1.16E+03
1.0E+03	1.09E+03	1.11E+03	1.12E+03	1.14E+03	1.15E+03	1.16E+03	1.19E+03	1.23E+03	1.19E+03	1.15E+03	1.18E+03	1.12E+03

表 A.2.6 負のミュー粒子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

$E_p$ /MeV	$h_p(\varphi)$ /(pSv cm <sup>2</sup> )											
	0°	avg(±15°)	avg(±30°)	avg(±45°)	avg(±60°)	avg(±75°)	avg(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E+00	1.80E+02	1.77E+02	1.62E+02	1.40E+02	1.14E+02	8.32E+01	5.33E+01	7.52E+01	9.75E+01	7.87E+01	8.18E+01	7.56E+01
1.5E+00	1.80E+02	1.80E+02	1.64E+02	1.41E+02	1.15E+02	8.39E+01	5.42E+01	7.68E+01	9.93E+01	7.95E+01	8.28E+01	7.62E+01
2.0E+00	1.84E+02	1.82E+02	1.68E+02	1.43E+02	1.16E+02	8.58E+01	5.46E+01	7.83E+01	1.00E+02	8.09E+01	8.39E+01	7.79E+01
3.0E+00	1.88E+02	1.87E+02	1.70E+02	1.48E+02	1.21E+02	8.85E+01	5.69E+01	8.14E+01	1.04E+02	8.37E+01	8.70E+01	8.04E+01
4.0E+00	1.93E+02	1.93E+02	1.77E+02	1.55E+02	1.26E+02	9.23E+01	5.89E+01	8.48E+01	1.07E+02	8.71E+01	9.06E+01	8.36E+01
5.0E+00	2.05E+02	2.04E+02	1.86E+02	1.64E+02	1.34E+02	9.76E+01	6.14E+01	8.77E+01	1.12E+02	9.15E+01	9.51E+01	8.79E+01
6.0E+00	2.42E+02	2.36E+02	2.11E+02	1.77E+02	1.43E+02	1.04E+02	6.61E+01	8.67E+01	1.22E+02	9.81E+01	1.03E+02	9.32E+01
8.0E+00	2.93E+02	2.82E+02	2.56E+02	2.16E+02	1.69E+02	1.21E+02	7.46E+01	8.68E+01	1.41E+02	1.13E+02	1.18E+02	1.08E+02
1.0E+01	3.32E+02	3.22E+02	2.95E+02	2.48E+02	1.97E+02	1.41E+02	8.79E+01	8.86E+01	1.58E+02	1.27E+02	1.33E+02	1.21E+02
1.5E+01	4.14E+02	4.07E+02	3.73E+02	3.21E+02	2.58E+02	1.85E+02	1.21E+02	1.00E+02	2.00E+02	1.61E+02	1.68E+02	1.54E+02
2.0E+01	4.65E+02	4.65E+02	4.45E+02	3.98E+02	3.18E+02	2.26E+02	1.52E+02	1.22E+02	2.41E+02	1.91E+02	1.97E+02	1.85E+02
3.0E+01	6.57E+02	6.54E+02	6.20E+02	5.64E+02	4.78E+02	3.53E+02	2.25E+02	2.51E+02	3.57E+02	2.75E+02	2.83E+02	2.67E+02
4.0E+01	7.35E+02	7.29E+02	6.95E+02	6.41E+02	5.63E+02	4.40E+02	2.91E+02	4.57E+02	4.62E+02	3.63E+02	3.77E+02	3.49E+02
5.0E+01	7.55E+02	7.59E+02	7.08E+02	6.58E+02	5.91E+02	4.94E+02	3.40E+02	7.03E+02	5.56E+02	4.46E+02	4.64E+02	4.28E+02
6.0E+01	6.28E+02	6.38E+02	6.57E+02	6.69E+02	6.09E+02	5.71E+02	4.29E+02	7.75E+02	5.98E+02	4.96E+02	5.15E+02	4.77E+02
8.0E+01	4.31E+02	4.36E+02	4.49E+02	4.79E+02	5.27E+02	5.89E+02	6.19E+02	4.85E+02	5.29E+02	4.98E+02	5.05E+02	4.91E+02
1.0E+02	3.82E+02	3.89E+02	3.90E+02	3.97E+02	4.06E+02	4.26E+02	4.80E+02	4.02E+02	4.27E+02	4.32E+02	4.35E+02	4.29E+02
1.5E+02	3.40E+02	3.48E+02	3.48E+02	3.51E+02	3.50E+02	3.50E+02	3.61E+02	3.45E+02	3.52E+02	3.54E+02	3.53E+02	3.55E+02
2.0E+02	3.26E+02	3.36E+02	3.37E+02	3.41E+02	3.41E+02	3.37E+02	3.45E+02	3.29E+02	3.39E+02	3.32E+02	3.31E+02	3.33E+02
3.0E+02	3.19E+02	3.33E+02	3.34E+02	3.38E+02	3.37E+02	3.32E+02	3.39E+02	3.21E+02	3.33E+02	3.21E+02	3.20E+02	3.22E+02
4.0E+02	3.20E+02	3.35E+02	3.37E+02	3.40E+02	3.40E+02	3.35E+02	3.41E+02	3.21E+02	3.36E+02	3.21E+02	3.20E+02	3.22E+02
5.0E+02	3.21E+02	3.39E+02	3.41E+02	3.45E+02	3.44E+02	3.39E+02	3.46E+02	3.24E+02	3.41E+02	3.23E+02	3.22E+02	3.24E+02
6.0E+02	3.25E+02	3.43E+02	3.44E+02	3.48E+02	3.47E+02	3.41E+02	3.48E+02	3.26E+02	3.43E+02	3.26E+02	3.24E+02	3.28E+02
8.0E+02	3.27E+02	3.45E+02	3.47E+02	3.51E+02	3.50E+02	3.45E+02	3.52E+02	3.32E+02	3.47E+02	3.31E+02	3.29E+02	3.33E+02
1.0E+03	3.33E+02	3.50E+02	3.52E+02	3.55E+02	3.54E+02	3.49E+02	3.56E+02	3.37E+02	3.51E+02	3.37E+02	3.32E+02	3.42E+02

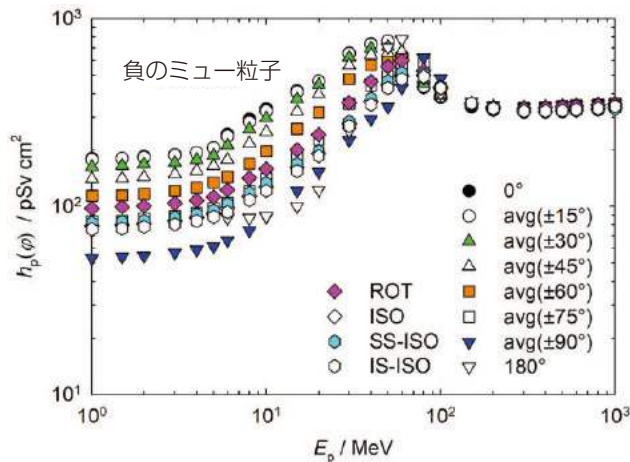


図 A.2.6 負のミュー粒子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

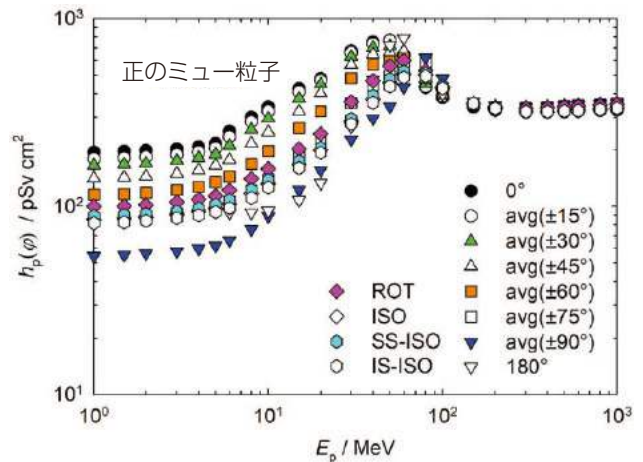


図 A.2.7 正のミュー粒子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

表 A.2.7 正のミュオン粒子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{pSv cm}^2)$											
	0°	avg(±15°)	avg(±30°)	avg(±45°)	avg(±60°)	avg(±75°)	avg(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E+00	1.94E+02	1.79E+02	1.65E+02	1.41E+02	1.15E+02	8.50E+01	5.45E+01	8.26E+01	1.00E+02	8.52E+01	8.89E+01	8.15E+01
1.5E+00	1.96E+02	1.81E+02	1.67E+02	1.43E+02	1.16E+02	8.51E+01	5.53E+01	8.41E+01	1.01E+02	8.62E+01	9.00E+01	8.24E+01
2.0E+00	1.98E+02	1.83E+02	1.69E+02	1.44E+02	1.18E+02	8.64E+01	5.63E+01	8.57E+01	1.02E+02	8.75E+01	9.12E+01	8.38E+01
3.0E+00	2.02E+02	1.89E+02	1.75E+02	1.49E+02	1.23E+02	8.97E+01	5.78E+01	8.89E+01	1.05E+02	9.03E+01	9.40E+01	8.66E+01
4.0E+00	2.07E+02	1.94E+02	1.81E+02	1.56E+02	1.27E+02	9.37E+01	5.97E+01	9.21E+01	1.09E+02	9.36E+01	9.74E+01	8.98E+01
5.0E+00	2.16E+02	2.04E+02	1.89E+02	1.65E+02	1.35E+02	9.90E+01	6.20E+01	9.43E+01	1.14E+02	9.77E+01	1.02E+02	9.34E+01
6.0E+00	2.51E+02	2.34E+02	2.10E+02	1.77E+02	1.44E+02	1.06E+02	6.61E+01	9.25E+01	1.22E+02	1.03E+02	1.08E+02	9.80E+01
8.0E+00	3.00E+02	2.83E+02	2.55E+02	2.16E+02	1.68E+02	1.22E+02	7.57E+01	9.28E+01	1.40E+02	1.17E+02	1.23E+02	1.11E+02
1.0E+01	3.40E+02	3.22E+02	2.94E+02	2.48E+02	1.97E+02	1.40E+02	8.86E+01	9.48E+01	1.58E+02	1.32E+02	1.38E+02	1.26E+02
1.5E+01	4.25E+02	4.07E+02	3.76E+02	3.21E+02	2.60E+02	1.88E+02	1.23E+02	1.08E+02	2.02E+02	1.67E+02	1.74E+02	1.60E+02
2.0E+01	4.81E+02	4.68E+02	4.48E+02	4.02E+02	3.21E+02	2.27E+02	1.55E+02	1.33E+02	2.43E+02	1.99E+02	2.05E+02	1.93E+02
3.0E+01	6.74E+02	6.60E+02	6.26E+02	5.68E+02	4.82E+02	3.56E+02	2.27E+02	2.65E+02	3.61E+02	2.84E+02	2.93E+02	2.75E+02
4.0E+01	7.51E+02	7.34E+02	6.99E+02	6.46E+02	5.68E+02	4.42E+02	2.94E+02	4.73E+02	4.67E+02	3.73E+02	3.89E+02	3.57E+02
5.0E+01	7.68E+02	7.64E+02	7.14E+02	6.63E+02	5.94E+02	4.95E+02	3.42E+02	7.21E+02	5.59E+02	4.56E+02	4.76E+02	4.36E+02
6.0E+01	6.35E+02	6.42E+02	6.59E+02	6.72E+02	6.13E+02	5.75E+02	4.32E+02	7.87E+02	5.99E+02	5.06E+02	5.25E+02	4.87E+02
8.0E+01	4.31E+02	4.37E+02	4.49E+02	4.79E+02	5.26E+02	5.91E+02	6.20E+02	4.83E+02	5.29E+02	5.02E+02	5.10E+02	4.94E+02
1.0E+02	3.81E+02	3.89E+02	3.90E+02	3.97E+02	4.06E+02	4.27E+02	4.79E+02	3.99E+02	4.27E+02	4.32E+02	4.37E+02	4.27E+02
1.5E+02	3.39E+02	3.48E+02	3.48E+02	3.51E+02	3.50E+02	3.50E+02	3.61E+02	3.45E+02	3.52E+02	3.54E+02	3.54E+02	3.54E+02
2.0E+02	3.26E+02	3.35E+02	3.37E+02	3.41E+02	3.41E+02	3.37E+02	3.45E+02	3.28E+02	3.39E+02	3.32E+02	3.31E+02	3.33E+02
3.0E+02	3.18E+02	3.33E+02	3.34E+02	3.38E+02	3.37E+02	3.32E+02	3.38E+02	3.20E+02	3.33E+02	3.20E+02	3.20E+02	3.20E+02
4.0E+02	3.19E+02	3.35E+02	3.37E+02	3.40E+02	3.39E+02	3.34E+02	3.41E+02	3.21E+02	3.36E+02	3.20E+02	3.20E+02	3.20E+02
5.0E+02	3.20E+02	3.39E+02	3.41E+02	3.45E+02	3.44E+02	3.39E+02	3.46E+02	3.23E+02	3.41E+02	3.22E+02	3.22E+02	3.22E+02
6.0E+02	3.22E+02	3.43E+02	3.44E+02	3.48E+02	3.46E+02	3.41E+02	3.48E+02	3.25E+02	3.43E+02	3.24E+02	3.24E+02	3.24E+02
8.0E+02	3.25E+02	3.45E+02	3.47E+02	3.51E+02	3.50E+02	3.45E+02	3.52E+02	3.30E+02	3.46E+02	3.29E+02	3.29E+02	3.29E+02
1.0E+03	3.27E+02	3.50E+02	3.51E+02	3.55E+02	3.54E+02	3.49E+02	3.56E+02	3.33E+02	3.51E+02	3.33E+02	3.32E+02	3.34E+02

表 A.2.8 負のパイ中間子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{pSv cm}^2)$											
	0°	avg(±15°)	avg(±30°)	avg(±45°)	avg(±60°)	avg(±75°)	avg(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E+00	4.06E+02	3.99E+02	3.73E+02	3.27E+02	2.81E+02	2.25E+02	1.70E+02	1.94E+02	2.45E+02	1.76E+02	1.91E+02	1.61E+02
1.5E+00	4.22E+02	4.19E+02	3.91E+02	3.42E+02	2.92E+02	2.31E+02	1.70E+02	2.01E+02	2.53E+02	1.89E+02	2.06E+02	1.72E+02
2.0E+00	4.33E+02	4.36E+02	4.09E+02	3.57E+02	3.03E+02	2.37E+02	1.73E+02	2.10E+02	2.61E+02	1.98E+02	2.17E+02	1.79E+02
3.0E+00	4.58E+02	4.69E+02	4.44E+02	3.88E+02	3.28E+02	2.53E+02	1.78E+02	2.25E+02	2.80E+02	2.15E+02	2.37E+02	1.93E+02
4.0E+00	4.91E+02	5.12E+02	4.84E+02	4.26E+02	3.60E+02	2.72E+02	1.85E+02	2.33E+02	3.00E+02	2.32E+02	2.55E+02	2.09E+02
5.0E+00	5.28E+02	5.66E+02	5.41E+02	4.77E+02	3.98E+02	2.96E+02	1.92E+02	2.37E+02	3.27E+02	2.51E+02	2.70E+02	2.32E+02
6.0E+00	6.73E+02	6.90E+02	6.26E+02	5.32E+02	4.40E+02	3.26E+02	2.03E+02	2.08E+02	3.59E+02	2.71E+02	3.02E+02	2.40E+02
8.0E+00	9.65E+02	9.79E+02	8.81E+02	7.26E+02	5.32E+02	3.95E+02	2.37E+02	1.81E+02	4.37E+02	3.17E+02	3.52E+02	2.82E+02
1.0E+01	1.09E+03	1.08E+03	1.00E+03	8.20E+02	6.46E+02	4.59E+02	2.80E+02	1.78E+02	4.88E+02	3.61E+02	3.96E+02	3.26E+02
1.5E+01	1.25E+03	1.25E+03	1.15E+03	9.85E+02	8.07E+02	5.86E+02	3.71E+02	1.97E+02	5.81E+02	4.39E+02	4.70E+02	4.08E+02
2.0E+01	1.28E+03	1.33E+03	1.31E+03	1.17E+03	9.13E+02	6.43E+02	4.56E+02	2.44E+02	6.62E+02	5.08E+02	5.31E+02	4.85E+02
3.0E+01	1.77E+03	1.83E+03	1.75E+03	1.57E+03	1.33E+03	9.32E+02	5.82E+02	5.47E+02	9.51E+02	6.76E+02	6.98E+02	6.54E+02
4.0E+01	1.92E+03	1.92E+03	1.84E+03	1.69E+03	1.48E+03	1.16E+03	7.53E+02	1.02E+03	1.18E+03	8.68E+02	9.01E+02	8.35E+02
5.0E+01	1.93E+03	1.93E+03	1.77E+03	1.63E+03	1.47E+03	1.22E+03	8.20E+02	1.70E+03	1.36E+03	1.02E+03	1.07E+03	9.70E+02
6.0E+01	1.68E+03	1.71E+03	1.79E+03	1.61E+03	1.50E+03	1.33E+03	9.36E+02	1.99E+03	1.47E+03	1.15E+03	1.21E+03	1.09E+03
8.0E+01	1.14E+03	1.17E+03	1.21E+03	1.26E+03	1.41E+03	1.43E+03	1.41E+03	1.31E+03	1.36E+03	1.15E+03	1.19E+03	1.11E+03
1.0E+02	9.95E+02	1.03E+03	1.03E+03	1.03E+03	1.04E+03	1.08E+03	1.19E+03	9.91E+02	1.08E+03	1.03E+03	1.03E+03	1.03E+03
1.5E+02	9.27E+02	9.50E+02	9.48E+02	9.45E+02	9.25E+02	9.12E+02	8.75E+02	8.89E+02	9.22E+02	8.57E+02	8.45E+02	8.69E+02
2.0E+02	9.02E+02	9.01E+02	8.98E+02	9.01E+02	8.89E+02	8.70E+02	8.41E+02	8.71E+02	8.71E+02	8.15E+02	8.28E+02	8.02E+02
3.0E+02	8.48E+02	8.63E+02	8.65E+02	8.72E+02	8.60E+02	8.54E+02	8.24E+02	8.43E+02	8.57E+02	7.94E+02	8.06E+02	7.82E+02
4.0E+02	8.44E+02	8.62E+02	8.62E+02	8.66E+02	8.52E+02	8.48E+02	8.26E+02	8.50E+02	8.43E+02	8.07E+02	8.02E+02	8.12E+02
5.0E+02	8.69E+02	8.82E+02	8.86E+02	8.87E+02	8.70E+02	8.67E+02	8.45E+02	8.80E+02	8.63E+02	8.38E+02	8.37E+02	8.39E+02
6.0E+02	9.01E+02	8.96E+02	8.84E+02	8.95E+02	8.93E+02	8.79E+02	8.62E+02	9.17E+02	8.83E+02	8.75E+02	8.90E+02	8.60E+02
8.0E+02	9.47E+02	9.31E+02	9.26E+02	9.39E+02	9.27E+02	9.24E+02	8.99E+02	9.76E+02	9.18E+02	9.35E+02	9.37E+02	9.33E+02
1.0E+03	9.77E+02	9.43E+02	9.38E+02	9.57E+02	9.44E+02	9.39E+02	9.22E+02	1.02E+03	9.38E+02	9.79E+02	9.78E+02	9.80E+02

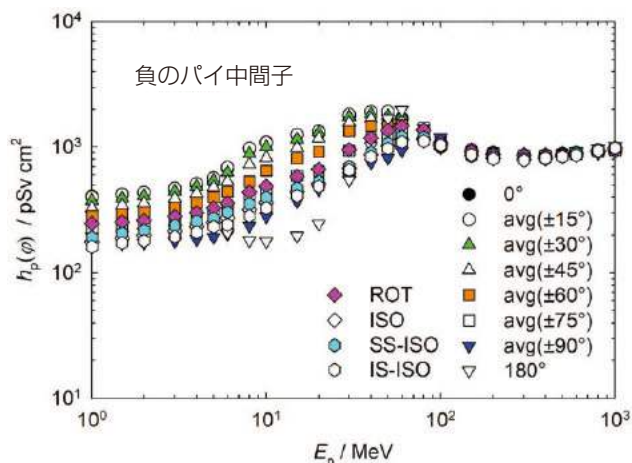


図 A.2.8 負のパイ中間子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

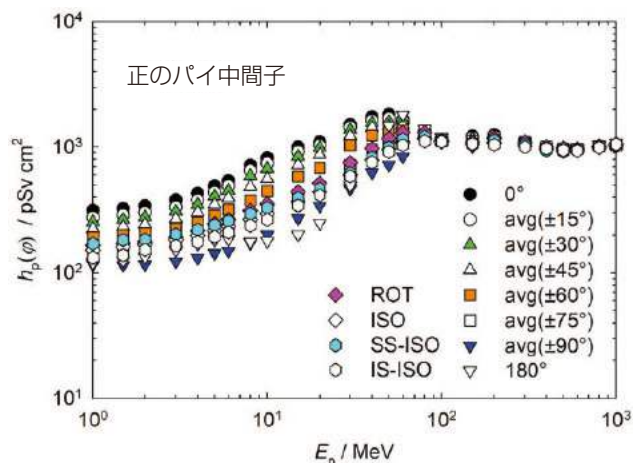


図 A.2.9 正のパイ中間子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

表 A.2.9 正のパイ中間子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\phi)/(\text{pSv cm}^2)$											
	0°	avg(±15°)	avg(±30°)	avg(±45°)	avg(±60°)	avg(±75°)	avg(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E+00	3.14E+02	2.75E+02	2.53E+02	2.23E+02	1.92E+02	1.53E+02	1.16E+02	1.21E+02	1.65E+02	1.51E+02	1.70E+02	1.32E+02
1.5E+00	3.24E+02	2.87E+02	2.64E+02	2.32E+02	1.99E+02	1.56E+02	1.15E+02	1.25E+02	1.71E+02	1.60E+02	1.82E+02	1.38E+02
2.0E+00	3.40E+02	3.01E+02	2.77E+02	2.42E+02	2.06E+02	1.58E+02	1.16E+02	1.33E+02	1.76E+02	1.68E+02	1.84E+02	1.52E+02
3.0E+00	3.79E+02	3.33E+02	3.06E+02	2.67E+02	2.24E+02	1.72E+02	1.23E+02	1.51E+02	1.91E+02	1.83E+02	2.02E+02	1.64E+02
4.0E+00	4.29E+02	3.78E+02	3.48E+02	3.02E+02	2.50E+02	1.90E+02	1.31E+02	1.70E+02	2.16E+02	1.98E+02	2.20E+02	1.76E+02
5.0E+00	4.89E+02	4.36E+02	4.05E+02	3.48E+02	2.85E+02	2.13E+02	1.44E+02	1.83E+02	2.45E+02	2.16E+02	2.39E+02	1.93E+02
6.0E+00	5.40E+02	4.92E+02	4.49E+02	3.94E+02	3.17E+02	2.31E+02	1.49E+02	1.85E+02	2.64E+02	2.33E+02	2.57E+02	2.09E+02
8.0E+00	7.17E+02	6.50E+02	5.87E+02	4.84E+02	3.77E+02	2.72E+02	1.72E+02	1.77E+02	3.11E+02	2.65E+02	2.93E+02	2.37E+02
1.0E+01	8.19E+02	7.43E+02	6.71E+02	5.59E+02	4.46E+02	3.17E+02	2.01E+02	1.79E+02	3.52E+02	2.96E+02	3.28E+02	2.64E+02
1.5E+01	1.00E+03	9.14E+02	8.38E+02	7.17E+02	5.80E+02	4.18E+02	2.71E+02	2.01E+02	4.38E+02	3.67E+02	3.93E+02	3.41E+02
2.0E+01	1.10E+03	1.03E+03	9.91E+02	8.71E+02	6.82E+02	4.89E+02	3.38E+02	2.47E+02	5.17E+02	4.39E+02	4.66E+02	4.12E+02
3.0E+01	1.52E+03	1.44E+03	1.36E+03	1.22E+03	1.03E+03	7.23E+02	4.65E+02	4.94E+02	7.49E+02	6.02E+02	6.21E+02	5.83E+02
4.0E+01	1.75E+03	1.64E+03	1.56E+03	1.43E+03	1.23E+03	9.59E+02	6.27E+02	9.06E+02	9.77E+02	7.87E+02	8.20E+02	7.54E+02
5.0E+01	1.83E+03	1.71E+03	1.59E+03	1.47E+03	1.31E+03	1.07E+03	7.21E+02	1.48E+03	1.17E+03	9.53E+02	9.93E+02	9.13E+02
6.0E+01	1.66E+03	1.62E+03	1.64E+03	1.49E+03	1.37E+03	1.18E+03	8.38E+02	1.82E+03	1.30E+03	1.09E+03	1.15E+03	1.03E+03
8.0E+01	1.22E+03	1.21E+03	1.24E+03	1.28E+03	1.36E+03	1.35E+03	1.28E+03	1.38E+03	1.30E+03	1.16E+03	1.21E+03	1.11E+03
1.0E+02	1.13E+03	1.11E+03	1.10E+03	1.10E+03	1.11E+03	1.14E+03	1.20E+03	1.12E+03	1.12E+03	1.10E+03	1.10E+03	1.10E+03
1.5E+02	1.22E+03	1.19E+03	1.18E+03	1.16E+03	1.12E+03	1.08E+03	1.01E+03	1.15E+03	1.09E+03	1.05E+03	1.04E+03	1.06E+03
2.0E+02	1.25E+03	1.22E+03	1.22E+03	1.22E+03	1.19E+03	1.15E+03	1.09E+03	1.23E+03	1.18E+03	1.08E+03	1.12E+03	1.04E+03
3.0E+02	1.07E+03	1.08E+03	1.09E+03	1.09E+03	1.09E+03	1.10E+03	1.07E+03	1.10E+03	1.09E+03	1.02E+03	1.04E+03	1.00E+03
4.0E+02	9.69E+02	9.91E+02	9.98E+02	1.00E+03	1.00E+03	1.01E+03	9.87E+02	9.98E+02	1.00E+03	9.53E+02	9.36E+02	9.70E+02
5.0E+02	9.43E+02	9.73E+02	9.69E+02	9.81E+02	9.73E+02	9.72E+02	9.53E+02	9.70E+02	9.75E+02	9.30E+02	9.19E+02	9.41E+02
6.0E+02	9.52E+02	9.58E+02	9.58E+02	9.65E+02	9.65E+02	9.62E+02	9.48E+02	9.80E+02	9.62E+02	9.38E+02	9.44E+02	9.32E+02
8.0E+02	9.99E+02	1.00E+03	1.01E+03	1.02E+03	1.01E+03	1.01E+03	9.96E+02	1.04E+03	1.00E+03	9.93E+02	9.97E+02	9.89E+02
1.0E+03	1.04E+03	1.02E+03	1.03E+03	1.04E+03	1.03E+03	1.03E+03	1.02E+03	1.09E+03	1.03E+03	1.05E+03	1.05E+03	1.05E+03

表 A.2.10 He<sup>2+</sup> イオンフルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

$E_p / \text{MeV u}^{-1}$	$h_p(\varphi) / (\text{pSv cm}^2)$											
	0°	avg(±15°)	avg(±30°)	avg(±45°)	avg(±60°)	avg(±75°)	avg(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E+00	2.19E+02	2.12E+02	2.00E+02	1.81E+02	1.63E+02	1.37E+02	1.10E+02	2.19E+02	1.76E+02	1.41E+02	1.38E+02	1.40E+02
2.0E+00	4.38E+02	4.23E+02	3.99E+02	3.60E+02	3.24E+02	2.74E+02	2.20E+02	4.38E+02	3.52E+02	2.81E+02	2.75E+02	2.80E+02
3.0E+00	6.56E+02	6.32E+02	5.95E+02	5.37E+02	4.83E+02	4.10E+02	3.30E+02	6.57E+02	5.26E+02	4.19E+02	4.10E+02	4.18E+02
5.0E+00	1.09E+03	1.04E+03	9.75E+02	8.77E+02	7.90E+02	6.75E+02	5.50E+02	1.09E+03	8.66E+02	6.89E+02	6.74E+02	6.87E+02
1.0E+01	2.19E+03	2.51E+03	2.70E+03	2.61E+03	2.31E+03	1.75E+03	1.10E+03	2.19E+03	1.97E+03	1.82E+03	1.86E+03	1.73E+03
1.4E+01	4.61E+03	4.95E+03	4.74E+03	4.58E+03	4.03E+03	2.94E+03	1.61E+03	2.56E+03	3.09E+03	2.81E+03	2.95E+03	2.64E+03
2.0E+01	1.72E+04	1.61E+04	1.41E+04	1.16E+04	8.24E+03	5.78E+03	3.19E+03	1.74E+03	6.56E+03	5.46E+03	5.73E+03	5.02E+03
3.0E+01	3.01E+04	2.89E+04	2.63E+04	2.23E+04	1.70E+04	1.16E+04	7.00E+03	1.44E+03	1.18E+04	9.86E+03	1.04E+04	9.15E+03
5.0E+01	4.75E+04	4.70E+04	4.58E+04	4.13E+04	3.17E+04	2.20E+04	1.51E+04	2.88E+03	2.15E+04	1.78E+04	1.86E+04	1.71E+04
7.5E+01	8.05E+04	7.91E+04	7.59E+04	6.90E+04	5.87E+04	4.19E+04	2.50E+04	1.75E+04	3.94E+04	3.00E+04	3.11E+04	2.91E+04
1.0E+02	1.01E+05	9.66E+04	9.18E+04	8.46E+04	7.39E+04	5.69E+04	3.58E+04	4.84E+04	5.64E+04	4.55E+04	4.62E+04	4.23E+04
1.5E+02	9.25E+04	9.16E+04	9.18E+04	9.29E+04	8.78E+04	8.00E+04	6.01E+04	1.10E+05	8.26E+04	6.95E+04	7.21E+04	6.61E+04
2.0E+02	6.74E+04	6.79E+04	6.86E+04	7.01E+04	7.25E+04	7.52E+04	8.22E+04	7.29E+04	7.36E+04	7.01E+04	7.20E+04	6.90E+04
3.0E+02	5.14E+04	5.13E+04	5.14E+04	5.19E+04	5.23E+04	5.22E+04	5.29E+04	5.33E+04	5.22E+04	5.25E+04	5.33E+04	5.22E+04
5.0E+02	4.27E+04	4.23E+04	4.22E+04	4.26E+04	4.27E+04	4.24E+04	4.23E+04	4.49E+04	4.23E+04	4.27E+04	4.27E+04	4.20E+04
7.0E+02	4.11E+04	3.98E+04	3.98E+04	4.01E+04	4.05E+04	4.04E+04	4.04E+04	4.60E+04	4.03E+04	4.19E+04	4.04E+04	4.03E+04
1.0E+03	4.00E+04	3.84E+04	3.82E+04	3.90E+04	3.93E+04	3.93E+04	3.91E+04	4.47E+04	3.92E+04	4.09E+04	3.89E+04	3.94E+04

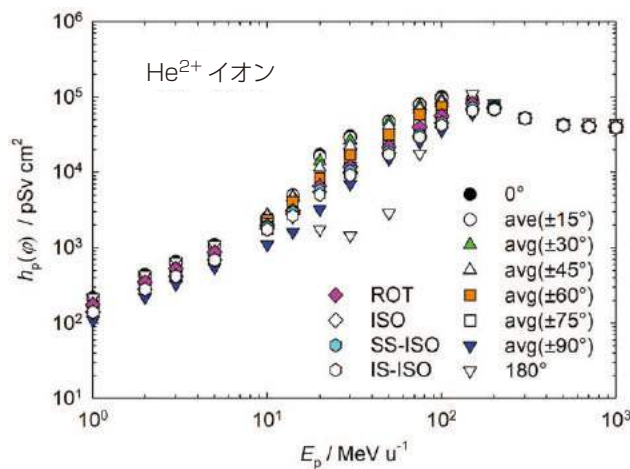


図 A.2.10 He<sup>2+</sup> イオンフルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017; ICRP, 2010)

### A.3 方向性水晶吸収線量と個人水晶体吸収線量

粒子フルエンスから方向性水晶体吸収線量  $d'_{\text{lens}}$  への換算係数の数値とフルエンスから個人水晶体吸収線量  $d_{\text{p lens}}$  への換算係数の数値は同じであり、後出の図表では  $d_{\text{lens}}$  という記号を使用している。ここに示した換算係数は、眼球モデルを組み込んだ全身被ばく (Behrens and Dietze,

2011) において、広い均一な平行ビームの水平面への 0° (A-P) から 90° まで 15° ごとの角度  $\varphi$  での入射、ならびに回転照射について計算されている。中性子の換算係数は、頸頭部の被ばくについて、180° の角度  $\varphi$  を含め計算されている。左右の水晶体吸収線量の最大値は、左または右から入射した放射線に対する吸収線量の大きい方を採用している。各角度について最も被ばくした眼の水晶体の値を選択しているため、回転照射での計算値はすべての角度  $\varphi$  での結果を積分して得られた値と一致しない。光子 (荷電粒子平衡の有無にかかわらず)、電子および陽電子に対する最大値として計算された換算係数と回転照射の換算係数の比は 1.0 から 1.3 の間であり、最大値の結果を用いることにより 30% 以内で一致している。

表 A.3.1a から表 A.3.4 および 図 A.3.1a から 図 A.3.4 は、50 MeV までのエネルギーの光子、中性子、電子、陽電子について、粒子フルエンスからの換算係数の数値を示している。表 A.3.1b と 図 A.3.1b は、表 A.3.0 に示すように、光子の空気カーマからの換算係数である。

表 A.3.0 0° ~ 90° の角度範囲, 中性子では 180° 照射も含む, および回転照射に対する, 左右の照射における眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数  $d_{\text{lens}}$ 

表/図	粒子の種類	物 理 量	エネルギー範囲 (MeV)
A.3.1a	光 子	フルエンス	5.0 E-03 ~ 5.0 E+01
A.3.1b	光 子	空気カーマ	5.0 E-03 ~ 5.0 E+01
A.3.2	中性子	フルエンス	1.0 E-09 ~ 5.0 E+01
A.3.3	電 子	フルエンス	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01
A.3.4	陽電子	フルエンス	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01

表 A.3.1a 左右の照射に対する光子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.005	8.61E-06	1.63E-05	3.47E-05	3.29E-05	1.35E-05	1.66E-06	6.90E-08	8.85E-06
0.006	2.00E-03	2.44E-03	2.97E-03	2.85E-03	1.48E-03	4.08E-04	4.26E-05	8.75E-04
0.007	3.74E-02	3.56E-02	3.67E-02	3.38E-02	2.02E-02	7.75E-03	1.75E-03	1.24E-02
0.008	1.85E-01	1.72E-01	1.63E-01	1.50E-01	9.81E-02	4.70E-02	1.47E-02	5.81E-02
0.009	4.75E-01	4.41E-01	4.13E-01	3.77E-01	2.66E-01	1.50E-01	5.89E-02	1.50E-01
0.01	8.33E-01	7.78E-01	7.30E-01	6.72E-01	5.07E-01	3.20E-01	1.52E-01	2.74E-01
0.011	1.15E+00	1.10E+00	1.04E+00	9.66E-01	7.72E-01	5.35E-01	2.89E-01	3.98E-01
0.013	1.54E+00	1.52E+00	1.46E+00	1.35E+00	1.19E+00	9.32E-01	5.98E-01	5.80E-01
0.015	1.63E+00	1.63E+00	1.58E+00	1.49E+00	1.37E+00	1.16E+00	8.31E-01	6.57E-01
0.017	1.55E+00	1.57E+00	1.54E+00	1.46E+00	1.39E+00	1.23E+00	9.53E-01	6.66E-01
0.02	1.35E+00	1.37E+00	1.36E+00	1.30E+00	1.27E+00	1.16E+00	9.65E-01	6.19E-01
0.024	1.09E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.07E+00	1.06E+00	9.98E-01	8.69E-01	5.35E-01
0.03	8.12E-01	8.35E-01	8.34E-01	8.13E-01	8.13E-01	7.80E-01	6.99E-01	4.34E-01
0.04	5.80E-01	5.93E-01	6.01E-01	5.89E-01	5.92E-01	5.69E-01	5.29E-01	3.36E-01
0.05	4.83E-01	4.94E-01	5.04E-01	4.96E-01	4.95E-01	4.76E-01	4.47E-01	2.95E-01
0.06	4.50E-01	4.59E-01	4.67E-01	4.64E-01	4.61E-01	4.50E-01	4.28E-01	2.85E-01
0.07	4.55E-01	4.63E-01	4.67E-01	4.63E-01	4.61E-01	4.53E-01	4.33E-01	2.94E-01
0.08	4.82E-01	4.83E-01	4.89E-01	4.85E-01	4.90E-01	4.79E-01	4.58E-01	3.15E-01
0.1	5.59E-01	5.62E-01	5.69E-01	5.71E-01	5.70E-01	5.57E-01	5.41E-01	3.76E-01
0.12	6.63E-01	6.66E-01	6.72E-01	6.73E-01	6.71E-01	6.63E-01	6.43E-01	4.52E-01
0.15	8.38E-01	8.40E-01	8.46E-01	8.45E-01	8.45E-01	8.36E-01	8.11E-01	5.80E-01
0.2	1.13E+00	1.15E+00	1.16E+00	1.17E+00	1.15E+00	1.14E+00	1.13E+00	8.10E-01
0.24	1.38E+00	1.38E+00	1.41E+00	1.42E+00	1.39E+00	1.38E+00	1.37E+00	1.00E+00
0.3	1.74E+00	1.75E+00	1.77E+00	1.80E+00	1.75E+00	1.75E+00	1.73E+00	1.28E+00
0.4	2.29E+00	2.32E+00	2.34E+00	2.38E+00	2.35E+00	2.31E+00	2.32E+00	1.75E+00
0.5	2.83E+00	2.84E+00	2.89E+00	2.93E+00	2.90E+00	2.84E+00	2.83E+00	2.22E+00
0.511	2.88E+00	2.88E+00	2.97E+00	3.01E+00	2.98E+00	2.89E+00	2.89E+00	2.26E+00
0.6	3.34E+00	3.36E+00	3.40E+00	3.46E+00	3.41E+00	3.36E+00	3.35E+00	2.64E+00
0.662	3.63E+00	3.65E+00	3.66E+00	3.77E+00	3.70E+00	3.65E+00	3.64E+00	2.90E+00
0.8	4.26E+00	4.28E+00	4.33E+00	4.39E+00	4.37E+00	4.28E+00	4.27E+00	3.46E+00
1	5.06E+00	5.09E+00	5.14E+00	5.27E+00	5.21E+00	5.08E+00	5.12E+00	4.20E+00
1.117	5.50E+00	5.55E+00	5.56E+00	5.65E+00	5.64E+00	5.56E+00	5.57E+00	4.63E+00
1.2	5.83E+00	5.84E+00	5.86E+00	5.98E+00	5.95E+00	5.82E+00	5.92E+00	4.87E+00
1.3	6.07E+00	6.14E+00	6.16E+00	6.35E+00	6.30E+00	6.15E+00	6.20E+00	5.18E+00
1.33	6.16E+00	6.26E+00	6.26E+00	6.40E+00	6.45E+00	6.29E+00	6.29E+00	5.25E+00
1.5	6.59E+00	6.63E+00	6.71E+00	6.88E+00	6.91E+00	6.74E+00	6.83E+00	5.76E+00
1.7	6.92E+00	6.93E+00	7.08E+00	7.25E+00	7.40E+00	7.23E+00	7.37E+00	6.20E+00
2	7.04E+00	7.16E+00	7.29E+00	7.66E+00	7.92E+00	7.88E+00	8.05E+00	6.75E+00

(続く)

表 A.3.1a (続き)

$E_p / \text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi) / (\text{pGy cm}^2)$							ROT
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$	
2.4	6.84E+00	6.93E+00	7.24E+00	7.84E+00	8.47E+00	8.64E+00	8.74E+00	7.32E+00
3	6.35E+00	6.49E+00	6.92E+00	7.87E+00	8.99E+00	9.61E+00	9.32E+00	7.86E+00
4	5.62E+00	5.85E+00	6.43E+00	7.67E+00	9.64E+00	1.09E+01	1.10E+01	8.63E+00
5	5.13E+00	5.35E+00	6.08E+00	7.68E+00	1.01E+01	1.22E+01	1.26E+01	9.35E+00
6	4.82E+00	5.05E+00	5.87E+00	7.60E+00	1.07E+01	1.34E+01	1.40E+01	9.99E+00
6.129	4.79E+00	5.06E+00	5.76E+00	7.62E+00	1.08E+01	1.34E+01	1.43E+01	1.01E+01
8	4.42E+00	4.67E+00	5.52E+00	7.47E+00	1.16E+01	1.56E+01	1.71E+01	1.14E+01
10	4.17E+00	4.38E+00	5.19E+00	7.16E+00	1.22E+01	1.76E+01	1.95E+01	1.27E+01
15	3.97E+00	4.16E+00	4.78E+00	6.58E+00	1.25E+01	2.08E+01	2.57E+01	1.58E+01
20	3.94E+00	4.08E+00	4.60E+00	6.15E+00	1.24E+01	2.29E+01	3.09E+01	1.89E+01
30	4.01E+00	4.12E+00	4.58E+00	5.84E+00	1.19E+01	2.46E+01	3.79E+01	2.45E+01
40	4.09E+00	4.18E+00	4.68E+00	5.69E+00	1.17E+01	2.55E+01	4.22E+01	2.95E+01
50	4.16E+00	4.32E+00	4.71E+00	5.70E+00	1.16E+01	2.64E+01	4.53E+01	3.36E+01

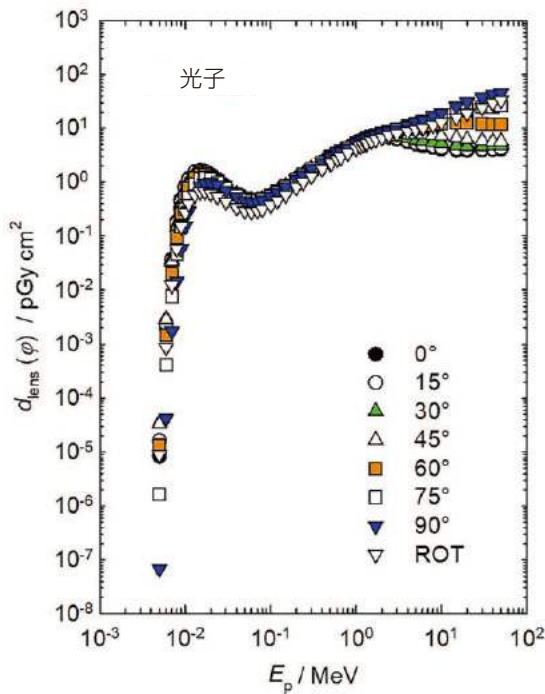


図 A.3.1a 左右の照射に対する光子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

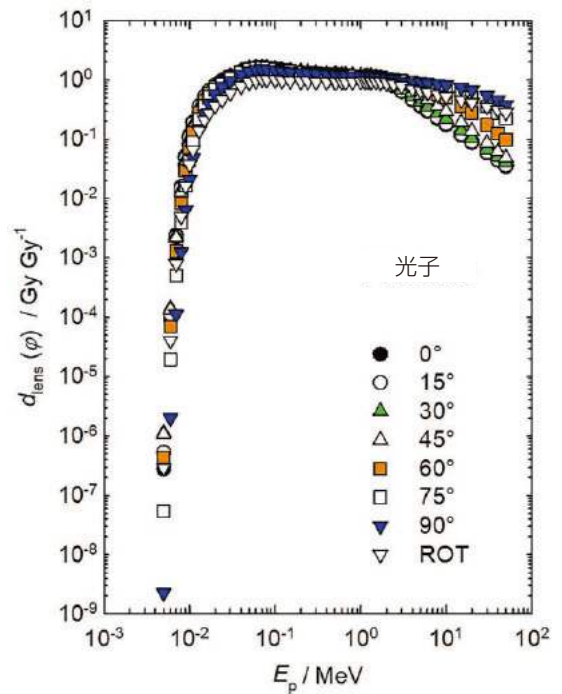


図 A.3.1b 左右の照射に対する光子空気カーマから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

表 A.3.1b 左右の照射に対する光子空気カーマから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{Gy Gy}^{-1})$							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.005	2.81E-07	5.30E-07	1.13E-06	1.07E-06	4.39E-07	5.42E-08	2.25E-09	2.89E-07
0.006	9.41E-05	1.15E-04	1.40E-04	1.34E-04	6.97E-05	1.92E-05	2.01E-06	4.12E-05
0.007	2.41E-03	2.29E-03	2.37E-03	2.18E-03	1.30E-03	5.00E-04	1.13E-04	7.99E-04
0.008	1.57E-02	1.46E-02	1.38E-02	1.27E-02	8.32E-03	3.98E-03	1.24E-03	4.92E-03
0.009	5.15E-02	4.78E-02	4.47E-02	4.09E-02	2.89E-02	1.63E-02	6.39E-03	1.63E-02
0.01	1.13E-01	1.05E-01	9.87E-02	9.09E-02	6.85E-02	4.33E-02	2.06E-02	3.70E-02
0.011	1.91E-01	1.82E-01	1.72E-01	1.60E-01	1.28E-01	8.86E-02	4.78E-02	6.59E-02
0.013	3.63E-01	3.59E-01	3.44E-01	3.20E-01	2.82E-01	2.20E-01	1.41E-01	1.37E-01
0.015	5.20E-01	5.21E-01	5.07E-01	4.76E-01	4.40E-01	3.72E-01	2.66E-01	2.10E-01
0.017	6.49E-01	6.58E-01	6.43E-01	6.11E-01	5.82E-01	5.15E-01	3.99E-01	2.79E-01
0.02	7.99E-01	8.15E-01	8.07E-01	7.71E-01	7.55E-01	6.91E-01	5.73E-01	3.68E-01
0.024	9.47E-01	9.64E-01	9.67E-01	9.29E-01	9.21E-01	8.67E-01	7.56E-01	4.66E-01
0.03	1.12E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.13E+00	1.13E+00	1.08E+00	9.69E-01	6.02E-01
0.04	1.35E+00	1.38E+00	1.40E+00	1.37E+00	1.38E+00	1.33E+00	1.23E+00	7.85E-01
0.05	1.50E+00	1.53E+00	1.56E+00	1.54E+00	1.53E+00	1.48E+00	1.38E+00	9.12E-01
0.06	1.56E+00	1.59E+00	1.62E+00	1.61E+00	1.60E+00	1.56E+00	1.48E+00	9.86E-01
0.07	1.58E+00	1.61E+00	1.62E+00	1.61E+00	1.60E+00	1.58E+00	1.51E+00	1.02E+00
0.08	1.57E+00	1.58E+00	1.59E+00	1.58E+00	1.60E+00	1.56E+00	1.49E+00	1.03E+00
0.1	1.51E+00	1.51E+00	1.53E+00	1.54E+00	1.54E+00	1.50E+00	1.46E+00	1.01E+00
0.12	1.44E+00	1.45E+00	1.46E+00	1.46E+00	1.46E+00	1.44E+00	1.40E+00	9.81E-01
0.15	1.40E+00	1.40E+00	1.41E+00	1.41E+00	1.41E+00	1.39E+00	1.35E+00	9.67E-01
0.2	1.32E+00	1.34E+00	1.36E+00	1.37E+00	1.34E+00	1.33E+00	1.32E+00	9.45E-01
0.24	1.30E+00	1.30E+00	1.32E+00	1.33E+00	1.31E+00	1.30E+00	1.29E+00	9.44E-01
0.3	1.26E+00	1.26E+00	1.28E+00	1.31E+00	1.27E+00	1.26E+00	1.25E+00	9.28E-01
0.4	1.21E+00	1.23E+00	1.24E+00	1.26E+00	1.24E+00	1.22E+00	1.23E+00	9.27E-01
0.5	1.19E+00	1.19E+00	1.21E+00	1.23E+00	1.22E+00	1.19E+00	1.19E+00	9.31E-01
0.511	1.18E+00	1.18E+00	1.22E+00	1.24E+00	1.23E+00	1.19E+00	1.19E+00	9.28E-01
0.6	1.18E+00	1.18E+00	1.20E+00	1.22E+00	1.20E+00	1.18E+00	1.18E+00	9.28E-01
0.662	1.17E+00	1.17E+00	1.18E+00	1.21E+00	1.19E+00	1.17E+00	1.17E+00	9.31E-01
0.8	1.15E+00	1.16E+00	1.17E+00	1.19E+00	1.18E+00	1.15E+00	1.15E+00	9.35E-01
1	1.13E+00	1.13E+00	1.15E+00	1.18E+00	1.16E+00	1.13E+00	1.14E+00	9.36E-01
1.117	1.13E+00	1.14E+00	1.14E+00	1.16E+00	1.15E+00	1.14E+00	1.14E+00	9.48E-01
1.2	1.13E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.16E+00	1.15E+00	1.13E+00	1.15E+00	9.42E-01
1.3	1.10E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.16E+00	1.15E+00	1.12E+00	1.13E+00	9.43E-01
1.33	1.10E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.12E+00	1.12E+00	9.39E-01
1.5	1.07E+00	1.08E+00	1.09E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.10E+00	1.11E+00	9.37E-01
1.7	1.03E+00	1.03E+00	1.05E+00	1.08E+00	1.10E+00	1.08E+00	1.10E+00	9.22E-01
2	9.32E-01	9.48E-01	9.64E-01	1.01E+00	1.05E+00	1.04E+00	1.07E+00	8.93E-01
2.4	7.99E-01	8.10E-01	8.46E-01	9.16E-01	9.89E-01	1.01E+00	1.02E+00	8.54E-01
3	6.36E-01	6.51E-01	6.93E-01	7.89E-01	9.02E-01	9.63E-01	9.35E-01	7.88E-01
4	4.63E-01	4.82E-01	5.29E-01	6.32E-01	7.94E-01	9.01E-01	9.04E-01	7.11E-01
5	3.62E-01	3.77E-01	4.29E-01	5.41E-01	7.15E-01	8.61E-01	8.89E-01	6.60E-01
6	2.98E-01	3.12E-01	3.63E-01	4.70E-01	6.62E-01	8.30E-01	8.68E-01	6.18E-01
6.129	2.92E-01	3.08E-01	3.50E-01	4.63E-01	6.55E-01	8.13E-01	8.69E-01	6.15E-01
8	2.20E-01	2.32E-01	2.74E-01	3.71E-01	5.74E-01	7.73E-01	8.47E-01	5.67E-01
10	1.73E-01	1.81E-01	2.15E-01	2.97E-01	5.06E-01	7.28E-01	8.07E-01	5.26E-01
15	1.15E-01	1.21E-01	1.39E-01	1.91E-01	3.62E-01	6.04E-01	7.47E-01	4.59E-01
20	8.69E-02	9.00E-02	1.01E-01	1.35E-01	2.74E-01	5.04E-01	6.81E-01	4.17E-01
30	5.84E-02	6.00E-02	6.68E-02	8.51E-02	1.74E-01	3.59E-01	5.53E-01	3.57E-01
40	4.39E-02	4.48E-02	5.01E-02	6.10E-02	1.26E-01	2.73E-01	4.52E-01	3.16E-01
50	3.49E-02	3.62E-02	3.95E-02	4.79E-02	9.77E-02	2.21E-01	3.80E-01	2.82E-01

表 A.3.2 左右の照射に対する中性子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数<sup>6</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$								
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
1.00E-09	2.31E+00	2.38E+00	2.49E+00	2.31E+00	2.04E+00	1.64E+00	1.17E+00	1.19E-01	4.73E-01
1.00E-08	2.75E+00	2.83E+00	2.89E+00	2.72E+00	2.49E+00	1.97E+00	1.47E+00	1.39E-01	5.67E-01
2.50E-08	2.73E+00	2.90E+00	3.02E+00	2.87E+00	2.57E+00	2.10E+00	1.57E+00	1.62E-01	6.06E-01
1.00E-07	2.79E+00	2.94E+00	3.07E+00	3.14E+00	2.76E+00	2.38E+00	1.86E+00	2.07E-01	6.70E-01
2.00E-07	2.76E+00	3.06E+00	3.22E+00	2.99E+00	2.80E+00	2.46E+00	1.95E+00	2.45E-01	6.99E-01
5.00E-07	2.78E+00	3.03E+00	3.06E+00	3.02E+00	2.83E+00	2.46E+00	2.07E+00	2.77E-01	7.09E-01
1.00E-06	2.80E+00	2.87E+00	3.14E+00	2.99E+00	2.78E+00	2.50E+00	2.04E+00	3.18E-01	7.22E-01
2.00E-06	2.73E+00	2.75E+00	2.88E+00	2.83E+00	2.76E+00	2.43E+00	2.06E+00	3.32E-01	7.39E-01
5.00E-06	2.62E+00	2.72E+00	2.87E+00	2.87E+00	2.66E+00	2.42E+00	2.01E+00	3.54E-01	7.22E-01
1.00E-05	2.57E+00	2.68E+00	2.67E+00	2.77E+00	2.57E+00	2.35E+00	1.94E+00	3.54E-01	6.98E-01
2.00E-05	2.39E+00	2.51E+00	2.67E+00	2.46E+00	2.48E+00	2.20E+00	1.84E+00	3.68E-01	6.90E-01
5.00E-05	2.20E+00	2.50E+00	2.40E+00	2.48E+00	2.26E+00	2.09E+00	1.82E+00	3.53E-01	6.61E-01
1.00E-04	2.20E+00	2.22E+00	2.29E+00	2.34E+00	2.18E+00	2.00E+00	1.75E+00	3.71E-01	6.41E-01
2.00E-04	2.02E+00	2.17E+00	2.28E+00	2.26E+00	2.09E+00	1.92E+00	1.66E+00	3.88E-01	6.07E-01
5.00E-04	1.93E+00	2.04E+00	2.14E+00	2.12E+00	2.00E+00	1.88E+00	1.59E+00	3.73E-01	5.97E-01
1.00E-03	1.97E+00	1.91E+00	2.00E+00	2.08E+00	1.94E+00	1.81E+00	1.60E+00	3.77E-01	5.76E-01
2.00E-03	1.91E+00	2.03E+00	2.09E+00	2.12E+00	1.85E+00	1.80E+00	1.58E+00	3.52E-01	5.81E-01
5.00E-03	1.99E+00	2.17E+00	2.25E+00	2.07E+00	2.12E+00	1.88E+00	1.62E+00	3.62E-01	6.12E-01
1.00E-02	2.39E+00	2.52E+00	2.47E+00	2.41E+00	2.35E+00	2.13E+00	1.87E+00	3.62E-01	6.85E-01
2.00E-02	3.04E+00	3.11E+00	3.05E+00	3.03E+00	2.93E+00	2.70E+00	2.33E+00	3.52E-01	8.07E-01
3.00E-02	3.69E+00	3.73E+00	3.71E+00	3.66E+00	3.54E+00	3.31E+00	2.80E+00	4.01E-01	9.62E-01
5.00E-02	4.94E+00	4.88E+00	4.82E+00	4.60E+00	4.60E+00	4.32E+00	3.79E+00	3.86E-01	1.24E+00
7.00E-02	5.99E+00	5.93E+00	5.95E+00	5.64E+00	5.71E+00	5.37E+00	4.77E+00	4.05E-01	1.55E+00
1.00E-01	7.29E+00	7.42E+00	7.35E+00	7.02E+00	7.19E+00	6.65E+00	5.89E+00	4.23E-01	1.84E+00
1.50E-01	9.41E+00	9.43E+00	9.29E+00	9.05E+00	9.00E+00	8.60E+00	7.76E+00	4.45E-01	2.37E+00
2.00E-01	1.11E+01	1.12E+01	1.10E+01	1.08E+01	1.07E+01	1.03E+01	9.39E+00	4.45E-01	2.80E+00
3.00E-01	1.39E+01	1.43E+01	1.39E+01	1.36E+01	1.37E+01	1.33E+01	1.23E+01	4.88E-01	3.66E+00
5.00E-01	1.83E+01	1.89E+01	1.85E+01	1.78E+01	1.84E+01	1.78E+01	1.70E+01	5.63E-01	4.99E+00
7.00E-01	2.14E+01	2.19E+01	2.16E+01	2.08E+01	2.11E+01	2.09E+01	1.98E+01	6.69E-01	6.07E+00
9.00E-01	2.48E+01	2.53E+01	2.49E+01	2.42E+01	2.37E+01	2.42E+01	2.30E+01	8.41E-01	7.05E+00
1.00E+00	2.96E+01	3.01E+01	2.95E+01	3.01E+01	2.87E+01	2.82E+01	2.66E+01	6.48E-01	7.85E+00
1.20E+00	2.84E+01	2.89E+01	2.88E+01	2.69E+01	2.75E+01	2.77E+01	2.70E+01	1.09E+00	8.42E+00
1.50E+00	3.07E+01	3.11E+01	3.11E+01	2.95E+01	3.06E+01	2.98E+01	2.97E+01	1.64E+00	9.42E+00
2.00E+00	3.48E+01	3.44E+01	3.43E+01	3.54E+01	3.37E+01	3.35E+01	3.32E+01	2.76E+00	1.11E+01
3.00E+00	4.02E+01	4.01E+01	3.97E+01	4.08E+01	3.90E+01	3.91E+01	3.89E+01	5.53E+00	1.40E+01
4.00E+00	4.78E+01	4.70E+01	4.79E+01	4.86E+01	4.61E+01	4.59E+01	4.72E+01	7.34E+00	1.64E+01
5.00E+00	5.00E+01	4.93E+01	4.96E+01	5.07E+01	4.85E+01	4.72E+01	4.83E+01	1.09E+01	1.83E+01
6.00E+00	5.40E+01	5.38E+01	5.41E+01	5.42E+01	5.27E+01	5.17E+01	5.25E+01	1.29E+01	1.99E+01
7.00E+00	5.37E+01	5.32E+01	5.34E+01	5.38E+01	5.27E+01	5.18E+01	5.27E+01	1.65E+01	2.10E+01
8.00E+00	5.68E+01	5.61E+01	5.74E+01	5.62E+01	5.58E+01	5.51E+01	5.56E+01	1.79E+01	2.21E+01
9.00E+00	6.06E+01	5.95E+01	6.00E+01	6.02E+01	5.92E+01	5.82E+01	5.89E+01	1.94E+01	2.33E+01
1.00E+01	6.31E+01	6.31E+01	6.49E+01	6.44E+01	6.19E+01	6.14E+01	6.15E+01	2.15E+01	2.51E+01
1.20E+01	7.00E+01	6.89E+01	7.03E+01	7.01E+01	6.71E+01	6.72E+01	6.88E+01	2.42E+01	2.74E+01
1.40E+01	7.09E+01	7.11E+01	7.18E+01	7.17E+01	6.83E+01	6.95E+01	7.04E+01	2.81E+01	2.88E+01
1.50E+01	7.46E+01	7.38E+01	7.54E+01	7.47E+01	7.22E+01	7.20E+01	7.36E+01	3.01E+01	3.00E+01
1.60E+01	7.44E+01	7.52E+01	7.50E+01	7.54E+01	7.29E+01	7.21E+01	7.33E+01	3.22E+01	3.06E+01
1.80E+01	7.45E+01	7.47E+01	7.37E+01	7.51E+01	7.26E+01	7.19E+01	7.51E+01	3.55E+01	3.16E+01
2.00E+01	7.56E+01	7.37E+01	7.74E+01	7.60E+01	7.29E+01	7.35E+01	7.61E+01	3.87E+01	3.24E+01
3.00E+01	7.01E+01	7.05E+01	7.44E+01	7.97E+01	6.71E+01	7.43E+01	7.91E+01	4.88E+01	3.43E+01
5.00E+01	5.57E+01	5.82E+01	6.19E+01	7.13E+01	7.09E+01	7.66E+01	7.97E+01	6.61E+01	3.50E+01

<sup>6</sup> K. G. Veinot *et al.* (2020). *Personal communication* (Y-12 National Security Complex, Oak Ridge, Tennessee).

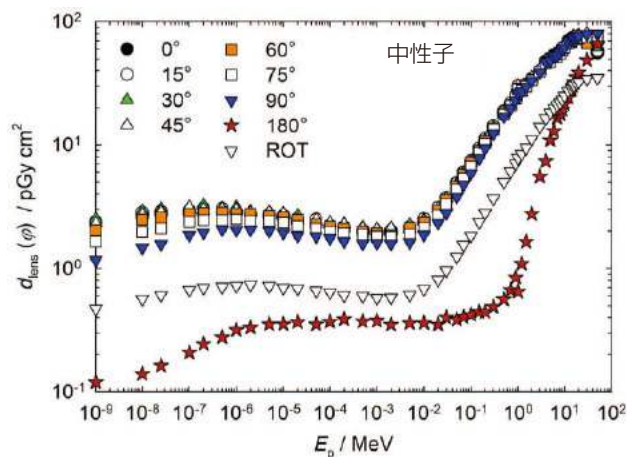


図 A.3.2 左右の照射に対する中性子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数<sup>7</sup>

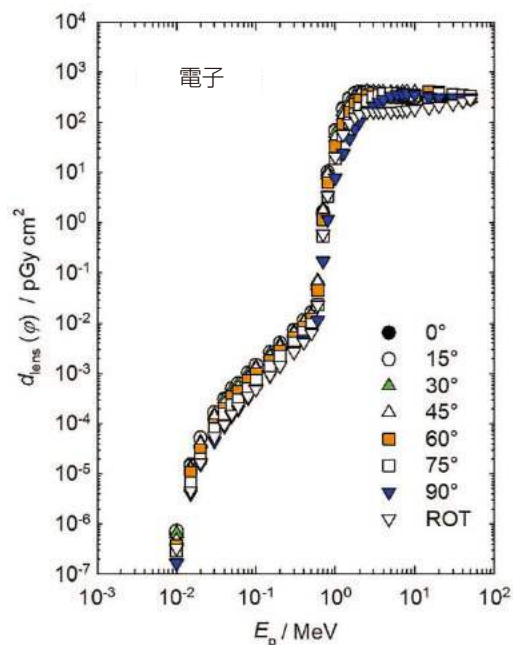


図 A.3.3 左右の照射に対する電子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

表 A.3.3 左右の照射に対する電子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$	ROT
0.01	6.50E-07	7.33E-07	6.46E-07	4.68E-07	3.82E-07	2.91E-07	1.67E-07	3.32E-07
0.015	1.55E-05	1.47E-05	1.37E-05	1.20E-05	1.10E-05	6.71E-06	3.99E-06	4.60E-06
0.02	5.26E-05	5.21E-05	4.29E-05	4.00E-05	3.07E-05	2.01E-05	1.56E-05	1.69E-05
0.03	1.62E-04	1.69E-04	1.52E-04	1.37E-04	9.59E-05	7.96E-05	4.59E-05	5.49E-05
0.04	3.16E-04	3.04E-04	3.07E-04	2.53E-04	1.99E-04	1.55E-04	8.87E-05	9.57E-05
0.05	4.90E-04	5.09E-04	4.76E-04	3.94E-04	3.45E-04	2.36E-04	1.44E-04	1.56E-04
0.06	6.27E-04	6.42E-04	6.12E-04	5.17E-04	4.43E-04	3.05E-04	1.93E-04	2.19E-04
0.08	1.03E-03	1.05E-03	9.82E-04	8.34E-04	7.25E-04	5.15E-04	3.28E-04	3.51E-04
0.1	1.43E-03	1.47E-03	1.34E-03	1.26E-03	1.01E-03	7.44E-04	4.96E-04	4.84E-04
0.15	2.60E-03	2.66E-03	2.48E-03	2.14E-03	1.79E-03	1.37E-03	9.10E-04	9.40E-04
0.2	3.87E-03	4.05E-03	3.76E-03	3.39E-03	2.81E-03	2.18E-03	1.43E-03	1.44E-03
0.3	7.36E-03	7.18E-03	6.86E-03	6.29E-03	5.15E-03	4.07E-03	2.84E-03	2.63E-03
0.4	1.14E-02	1.15E-02	1.08E-02	1.02E-02	8.49E-03	6.68E-03	4.73E-03	4.19E-03
0.5	1.65E-02	1.63E-02	1.56E-02	1.44E-02	1.22E-02	9.69E-03	6.87E-03	6.38E-03
0.6	4.71E-02	5.68E-02	6.98E-02	6.62E-02	4.51E-02	2.34E-02	1.16E-02	2.29E-02
0.7	1.46E+00	1.65E+00	1.88E+00	1.73E+00	1.17E+00	5.49E-01	1.73E-01	5.98E-01
0.8	1.00E+01	1.03E+01	1.04E+01	9.08E+00	6.28E+00	3.28E+00	1.18E+00	3.45E+00
1	6.95E+01	6.74E+01	6.02E+01	4.86E+01	3.36E+01	1.89E+01	7.80E+00	2.08E+01
1.25	1.92E+02	1.85E+02	1.64E+02	1.32E+02	9.15E+01	5.38E+01	2.43E+01	5.71E+01
1.5	3.08E+02	2.99E+02	2.69E+02	2.23E+02	1.61E+02	9.82E+01	4.72E+01	9.53E+01
1.75	3.85E+02	3.78E+02	3.50E+02	3.02E+02	2.28E+02	1.46E+02	7.39E+01	1.26E+02
2	4.16E+02	4.12E+02	3.95E+02	3.58E+02	2.83E+02	1.93E+02	1.03E+02	1.45E+02

(続く)

<sup>7</sup> K. G. Veinot et al. (2020). *Personal communication* (Y-12 National Security Complex, Oak Ridge, Tennessee).

表 A.3.3 (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
2.5	4.08E+02	4.12E+02	4.13E+02	4.04E+02	3.52E+02	2.70E+02	1.62E+02	1.61E+02
3	3.78E+02	3.87E+02	3.99E+02	4.11E+02	3.82E+02	3.21E+02	2.11E+02	1.64E+02
3.5	3.54E+02	3.66E+02	3.82E+02	4.05E+02	3.91E+02	3.52E+02	2.54E+02	1.64E+02
4	3.39E+02	3.51E+02	3.69E+02	3.99E+02	3.87E+02	3.70E+02	2.86E+02	1.64E+02
5	3.23E+02	3.35E+02	3.54E+02	3.92E+02	3.68E+02	3.81E+02	3.33E+02	1.65E+02
6	3.15E+02	3.28E+02	3.49E+02	3.94E+02	3.49E+02	3.76E+02	3.61E+02	1.68E+02
7	3.10E+02	3.22E+02	3.46E+02	4.01E+02	3.37E+02	3.64E+02	3.75E+02	1.72E+02
8	3.07E+02	3.18E+02	3.41E+02	4.06E+02	3.28E+02	3.53E+02	3.76E+02	1.77E+02
10	3.04E+02	3.12E+02	3.30E+02	4.03E+02	3.44E+02	3.36E+02	3.61E+02	1.85E+02
15	3.01E+02	3.06E+02	3.09E+02	3.53E+02	4.15E+02	3.15E+02	3.25E+02	2.01E+02
20	3.01E+02	3.03E+02	3.05E+02	3.23E+02	4.03E+02	3.76E+02	3.12E+02	2.12E+02
30	3.03E+02	3.04E+02	3.06E+02	3.12E+02	3.67E+02	3.67E+02	3.09E+02	2.36E+02
40	3.03E+02	3.07E+02	3.03E+02	3.13E+02	3.47E+02	3.46E+02	3.13E+02	2.64E+02
50	3.00E+02	3.01E+02	3.06E+02	3.10E+02	3.41E+02	3.32E+02	3.13E+02	2.90E+02

表 A.3.4 左右の照射に対する陽電子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.001	6.79E+00	7.16E+00	7.32E+00	6.78E+00	5.84E+00	4.70E+00	3.40E+00	2.83E+00
0.002	6.47E+00	6.82E+00	6.92E+00	6.44E+00	5.51E+00	4.37E+00	3.11E+00	2.65E+00
0.003	6.32E+00	6.68E+00	6.79E+00	6.30E+00	5.38E+00	4.26E+00	3.01E+00	2.59E+00
0.004	6.29E+00	6.65E+00	6.78E+00	6.27E+00	5.37E+00	4.21E+00	2.95E+00	2.59E+00
0.005	6.30E+00	6.62E+00	6.75E+00	6.27E+00	5.33E+00	4.18E+00	2.94E+00	2.55E+00
0.006	6.26E+00	6.61E+00	6.71E+00	6.25E+00	5.24E+00	4.17E+00	2.88E+00	2.52E+00
0.007	6.27E+00	6.67E+00	6.70E+00	6.23E+00	5.28E+00	4.15E+00	2.91E+00	2.52E+00
0.008	6.26E+00	6.66E+00	6.65E+00	6.23E+00	5.31E+00	4.14E+00	2.93E+00	2.52E+00
0.009	6.25E+00	6.65E+00	6.71E+00	6.23E+00	5.30E+00	4.16E+00	2.89E+00	2.54E+00
0.01	6.26E+00	6.63E+00	6.71E+00	6.18E+00	5.33E+00	4.18E+00	2.86E+00	2.52E+00
0.013	6.25E+00	6.65E+00	6.67E+00	6.23E+00	5.26E+00	4.12E+00	2.89E+00	2.51E+00
0.015	6.24E+00	6.66E+00	6.65E+00	6.19E+00	5.31E+00	4.13E+00	2.89E+00	2.52E+00
0.017	6.23E+00	6.59E+00	6.71E+00	6.20E+00	5.30E+00	4.12E+00	2.91E+00	2.50E+00
0.02	6.23E+00	6.58E+00	6.69E+00	6.18E+00	5.28E+00	4.15E+00	2.92E+00	2.52E+00
0.024	6.27E+00	6.64E+00	6.70E+00	6.21E+00	5.30E+00	4.16E+00	2.88E+00	2.51E+00
0.03	6.26E+00	6.59E+00	6.66E+00	6.19E+00	5.26E+00	4.10E+00	2.88E+00	2.51E+00
0.04	6.26E+00	6.55E+00	6.73E+00	6.19E+00	5.28E+00	4.14E+00	2.85E+00	2.50E+00
0.05	6.29E+00	6.62E+00	6.66E+00	6.22E+00	5.31E+00	4.12E+00	2.89E+00	2.53E+00
0.06	6.26E+00	6.58E+00	6.68E+00	6.28E+00	5.28E+00	4.14E+00	2.88E+00	2.51E+00
0.07	6.29E+00	6.66E+00	6.75E+00	6.18E+00	5.31E+00	4.20E+00	2.91E+00	2.53E+00
0.08	6.26E+00	6.64E+00	6.73E+00	6.26E+00	5.31E+00	4.15E+00	2.91E+00	2.53E+00
0.1	6.30E+00	6.66E+00	6.70E+00	6.27E+00	5.36E+00	4.13E+00	2.90E+00	2.51E+00
0.15	6.36E+00	6.68E+00	6.79E+00	6.28E+00	5.35E+00	4.15E+00	2.93E+00	2.56E+00
0.2	6.43E+00	6.78E+00	6.85E+00	6.43E+00	5.46E+00	4.24E+00	2.94E+00	2.58E+00
0.3	6.56E+00	6.93E+00	7.02E+00	6.46E+00	5.48E+00	4.34E+00	2.98E+00	2.67E+00
0.4	6.76E+00	7.11E+00	7.16E+00	6.57E+00	5.62E+00	4.41E+00	3.07E+00	2.72E+00
0.5	6.98E+00	7.36E+00	7.42E+00	6.75E+00	5.82E+00	4.45E+00	3.16E+00	2.80E+00
0.6	7.31E+00	7.60E+00	7.67E+00	7.04E+00	5.95E+00	4.67E+00	3.25E+00	2.91E+00

(続く)

表 A.3.4 (続き)

$E_p$ /MeV	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)$ /(pGy cm <sup>2</sup> )							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.7	9.18E+00	9.70E+00	9.91E+00	9.15E+00	7.40E+00	5.37E+00	3.51E+00	3.68E+00
0.8	1.89E+01	1.94E+01	1.96E+01	1.73E+01	1.31E+01	8.52E+00	4.68E+00	6.87E+00
1	8.22E+01	8.02E+01	7.23E+01	5.91E+01	4.20E+01	2.51E+01	1.20E+01	2.53E+01
1.25	2.05E+02	1.99E+02	1.76E+02	1.44E+02	1.03E+02	6.13E+01	2.90E+01	6.24E+01
1.5	3.17E+02	3.07E+02	2.78E+02	2.32E+02	1.70E+02	1.05E+02	5.25E+01	9.91E+01
1.75	3.84E+02	3.77E+02	3.51E+02	3.07E+02	2.35E+02	1.52E+02	7.86E+01	1.27E+02
2	4.06E+02	4.03E+02	3.87E+02	3.53E+02	2.88E+02	1.98E+02	1.08E+02	1.44E+02
2.5	3.88E+02	3.94E+02	3.97E+02	3.89E+02	3.49E+02	2.66E+02	1.65E+02	1.57E+02
3	3.59E+02	3.69E+02	3.78E+02	3.96E+02	3.69E+02	3.12E+02	2.12E+02	1.59E+02
3.5	3.38E+02	3.47E+02	3.65E+02	3.85E+02	3.73E+02	3.40E+02	2.48E+02	1.57E+02
4	3.22E+02	3.36E+02	3.53E+02	3.81E+02	3.68E+02	3.55E+02	2.78E+02	1.58E+02
5	3.10E+02	3.22E+02	3.42E+02	3.74E+02	3.49E+02	3.65E+02	3.23E+02	1.60E+02
6	3.05E+02	3.17E+02	3.38E+02	3.80E+02	3.36E+02	3.60E+02	3.48E+02	1.63E+02
7	3.00E+02	3.12E+02	3.34E+02	3.84E+02	3.25E+02	3.46E+02	3.59E+02	1.67E+02
8	2.99E+02	3.06E+02	3.32E+02	3.91E+02	3.16E+02	3.38E+02	3.61E+02	1.70E+02
10	2.96E+02	3.02E+02	3.23E+02	3.88E+02	3.33E+02	3.23E+02	3.44E+02	1.80E+02
15	2.97E+02	3.01E+02	3.06E+02	3.40E+02	3.94E+02	3.09E+02	3.17E+02	1.94E+02
20	2.98E+02	2.99E+02	3.01E+02	3.16E+02	3.86E+02	3.58E+02	3.05E+02	2.07E+02
30	2.99E+02	2.99E+02	3.00E+02	3.07E+02	3.53E+02	3.47E+02	3.03E+02	2.31E+02
40	2.99E+02	3.03E+02	3.03E+02	3.03E+02	3.40E+02	3.30E+02	3.01E+02	2.60E+02
50	3.02E+02	3.00E+02	3.03E+02	3.02E+02	3.31E+02	3.23E+02	3.03E+02	2.83E+02

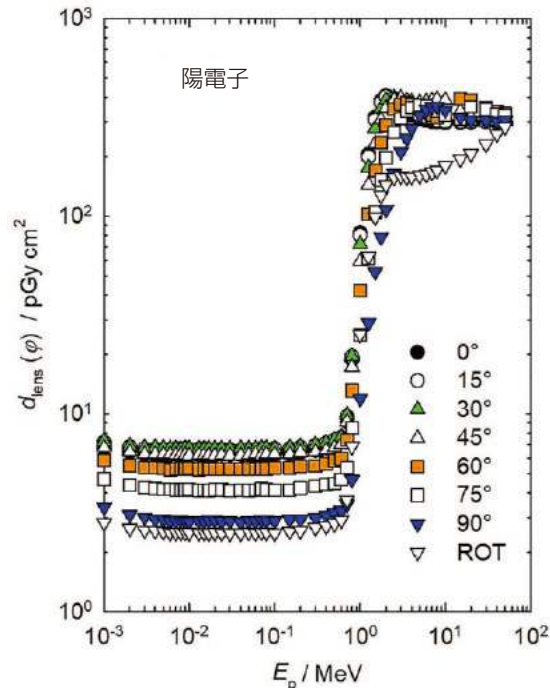


図 A.3.4 左右の照射に対する陽電子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

#### A.4 方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量

スラブファントムへの照射において、粒子フルエンスから方向性局所皮膚吸収線量  $d'_{\text{local skin}}$  への換算係数の数値と、フルエンスから個人局所皮膚吸収線量  $d_{\text{p local skin}}$  への換算係数の数値は同じである。以下の表ではスラブファントムについて記号  $d_{\text{local skin}}$  を使用する。表 A.4.0 に示されているとおり、表 A.4.1.1a, 表 A.4.1.2a, 表 A.4.1.3a, 表 A.4.4, 表 A.4.5 と 図 A.4.1.1a, 図 A.4.1.2a, 図 A.4.1.3a, 図 A.4.4, 図 A.4.5 では、50 MeV までのエネルギーの光子、中性子、電子、陽電子および 10 MeV までのエネルギーのアルファ粒子について、粒子フルエンスからの換算係数を示し、表 A.4.1.1b, 表 A.4.1.2b, 表 A.4.1.3b と 図 A.4.1.1b, 図 A.4.1.2b, 図 A.4.1.3b では、光子に対する空気カーマからの換算係数を示す。換算係数は、特定の方向に入射する広い均一な平行ビームと回転場を想定して、指定のファントムへの照射に関し、粒子フルエンスから計算される局所皮膚吸収線量の値を関連付けるものである。換算係数は以下のように

計算される。

- 体幹部：スラブの前側表面が ICRP Publication 89 (2002) に記されている元素組成の厚さ 2 mm の皮膚で覆われている、ICRU 4 元素組織で構成される 300 mm × 300 mm × 148 mm ( $\rho = 1.0 \text{ g cm}^{-3}$ ) のスラブファントムの前側表面の中心。吸収線量は、 $0^\circ$  (AP) から  $75^\circ$  まで  $15^\circ$  ごとの角度  $\varphi$  の入射に対して、深さ  $50 \mu\text{m}$  と  $100 \mu\text{m}$  の間で表面に垂直な軸を持ち、前面中心から  $1 \text{ cm}^2$  の断面積の直円柱の体積で平均する。
- 四肢：直径 69 mm、長さ 300 mm の ICRU 4 元素組織 (この場合の密度は  $1.11 \text{ g cm}^{-3}$ ) に、円筒面が 2 mm の皮膚の層で覆われているピラーファントム。吸収線量は、 $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $15^\circ$  ごとの角度  $\varphi$  の入射に対して、円柱の長さ半分の位置で、半径に垂直な面積  $1 \text{ cm}^2$  の円で半径 36.4 mm から 36.45 mm の間の体積

で平均する。

- 指：直径 15 mm、長さ 300 mm の ICRU 4 元素組織 (この場合の密度は  $1.11 \text{ g cm}^{-3}$ ) に、円筒面が 2 mm の皮膚の層で覆われているロッドファントム。吸収線量は、 $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $15^\circ$  ごとの角度  $\varphi$ 、ならびに回転照射に対して、円柱の長さ半分の位置で、半径に垂直な面積  $1 \text{ cm}^2$  の円で半径 9.4 mm から 9.45 mm の間の体積で平均する。

表 A.4.5 と図 A.4.5 に示したアルファ粒子の換算係数は、密度が  $1 \text{ g cm}^{-3}$  の ICRU 4 元素組織で構成される 2 mm の皮膚層を持たない  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  のファントムの前表面の中央部分の深さ  $50 \mu\text{m}$  から  $100 \mu\text{m}$  の間、断面積  $1 \text{ cm}^2$  の直円柱の体積について計算されている (ICRP, 2010)。

表 A.4.0 局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数,  $d'_{\text{local skin}}$  および  $d_{\text{p local skin}}$

表/図	粒子の種類	ファントム	物理量	エネルギー範囲 (MeV)	角度範囲
A.4.1.1a	光子	スラブ	フルエンス	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 75^\circ$
A.4.1.1b	光子	スラブ	空気カーマ	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 75^\circ$
A.4.1.2a	光子	ピラー	フルエンス	2.0 E-03 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.1.2b	光子	ピラー	空気カーマ	2.0 E-03 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.1.3a	光子	ロッド	フルエンス	2.0 E-03 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.1.3b	光子	ロッド	空気カーマ	2.0 E-03 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.2.1	中性子	スラブ	フルエンス	1.0 E-09 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 75^\circ$
A.4.2.2	中性子	ピラー	フルエンス	1.0 E-09 ~ 2.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.2.3	中性子	ロッド	フルエンス	1.0 E-09 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.3.1	電子	スラブ	フルエンス	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 75^\circ$
A.4.3.2	電子	ピラー	フルエンス	5.0 E-02 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.3.3	電子	ロッド	フルエンス	5.0 E-02 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.4.1	陽電子	スラブ	フルエンス	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 75^\circ$
A.4.4.2	陽電子	ピラー	フルエンス	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.4.3	陽電子	ロッド	フルエンス	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01	$0^\circ \sim 180^\circ$ , ROT
A.4.5	He <sup>2+</sup> イオン	スラブ	フルエンス	6.6 E+00 ~ 1.0 E+01	$0^\circ$

表 A.4.1.1a 光子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>8</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$					
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$
0.01	7.20E+00	7.17E+00	7.14E+00	7.04E+00	6.89E+00	6.38E+00
0.015	3.22E+00	3.20E+00	3.19E+00	3.17E+00	3.14E+00	3.04E+00
0.02	1.85E+00	1.83E+00	1.81E+00	1.80E+00	1.79E+00	1.73E+00
0.03	9.35E-01	9.24E-01	9.18E-01	9.05E-01	8.89E-01	8.24E-01

(続く)

<sup>8</sup> J. Daures, J. Gouriou, and J.-M. Bordy (2017). *Personal communication* (Laboratoire National Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette, Cedex France).

表 A.4.1.1a (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$					
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$
0.04	6.36E-01	6.47E-01	6.30E-01	6.25E-01	6.00E-01	5.45E-01
0.05	5.43E-01	5.46E-01	5.23E-01	5.26E-01	4.81E-01	4.49E-01
0.06	5.10E-01	5.06E-01	4.91E-01	4.85E-01	4.51E-01	4.25E-01
0.07	5.20E-01	5.14E-01	5.04E-01	4.87E-01	4.74E-01	4.48E-01
0.08	5.50E-01	5.31E-01	5.39E-01	5.24E-01	4.99E-01	4.63E-01
0.1	6.17E-01	6.09E-01	6.16E-01	6.21E-01	5.81E-01	5.63E-01
0.15	9.21E-01	9.04E-01	9.27E-01	8.95E-01	8.88E-01	8.66E-01
0.2	1.20E+00	1.21E+00	1.24E+00	1.19E+00	1.23E+00	1.20E+00
0.3	1.28E+00	1.34E+00	1.41E+00	1.46E+00	1.62E+00	1.69E+00
0.4	1.23E+00	1.29E+00	1.34E+00	1.49E+00	1.75E+00	1.87E+00
0.5	1.13E+00	1.16E+00	1.27E+00	1.49E+00	1.80E+00	2.07E+00
0.6	1.08E+00	1.11E+00	1.24E+00	1.47E+00	1.82E+00	2.25E+00
0.662	1.03E+00	1.08E+00	1.25E+00	1.41E+00	1.82E+00	2.26E+00
0.8	9.46E-01	9.89E-01	1.12E+00	1.41E+00	1.81E+00	2.40E+00
1	8.52E-01	8.87E-01	1.03E+00	1.33E+00	1.82E+00	2.62E+00
1.25	7.35E-01	7.98E-01	9.72E-01	1.23E+00	1.77E+00	2.65E+00
1.5	6.59E-01	7.06E-01	9.05E-01	1.23E+00	1.80E+00	2.78E+00
2	5.74E-01	6.23E-01	7.74E-01	1.05E+00	1.74E+00	2.98E+00
3	4.46E-01	4.66E-01	6.48E-01	9.71E-01	1.71E+00	3.17E+00
5	3.34E-01	3.57E-01	4.85E-01	7.33E-01	1.59E+00	3.44E+00
10	2.88E-01	3.05E-01	3.77E-01	5.88E-01	1.23E+00	3.72E+00
15	2.67E-01	2.80E-01	3.33E-01	5.02E-01	1.14E+00	3.78E+00
20	2.59E-01	2.58E-01	3.00E-01	4.96E-01	1.12E+00	3.93E+00
30	2.43E-01	2.38E-01	3.03E-01	4.16E-01	9.71E-01	4.14E+00
50	2.13E-01	2.01E-01	2.82E-01	3.86E-01	8.26E-01	3.78E+00

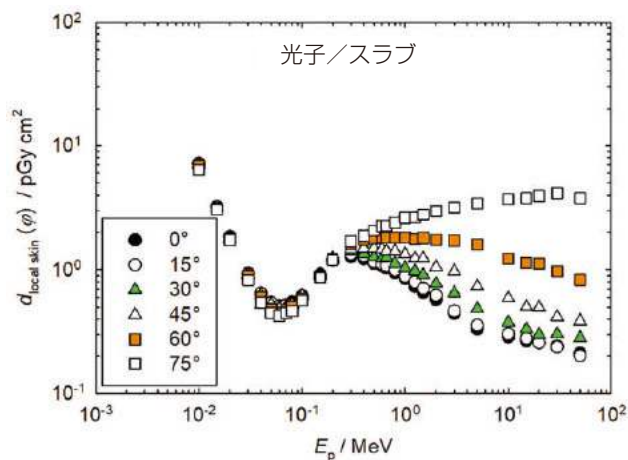


図 A.4.1.1a 光子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>9</sup>

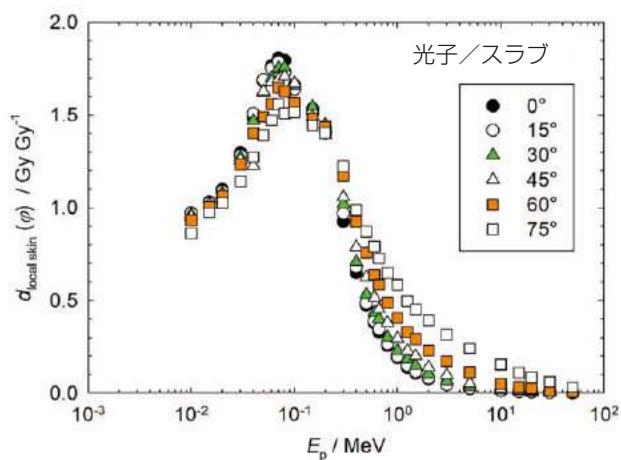


図 A.4.1.1b 光子空気カーマからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>9</sup>

<sup>9</sup> J. Daures, J. Gouriou, and J.-M. Bordy (2017). *Personal communication* (Laboratoire National Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette, Cedex France).

表 A.4.1.1b 光子空気カーマからスラブファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>10</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{local skin}}(\varphi)/(\text{Gy Gy}^{-1})$					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
0.01	9.73E-01	9.69E-01	9.65E-01	9.51E-01	9.31E-01	8.62E-01
0.015	1.03E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.01E+00	1.00E+00	9.73E-01
0.02	1.10E+00	1.09E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.06E+00	1.03E+00
0.03	1.30E+00	1.28E+00	1.27E+00	1.25E+00	1.23E+00	1.14E+00
0.04	1.48E+00	1.51E+00	1.47E+00	1.46E+00	1.40E+00	1.27E+00
0.05	1.68E+00	1.69E+00	1.62E+00	1.63E+00	1.49E+00	1.39E+00
0.06	1.77E+00	1.75E+00	1.70E+00	1.68E+00	1.56E+00	1.47E+00
0.07	1.81E+00	1.79E+00	1.75E+00	1.69E+00	1.65E+00	1.56E+00
0.08	1.79E+00	1.73E+00	1.76E+00	1.71E+00	1.63E+00	1.51E+00
0.1	1.66E+00	1.64E+00	1.66E+00	1.67E+00	1.56E+00	1.52E+00
0.15	1.54E+00	1.51E+00	1.55E+00	1.49E+00	1.48E+00	1.44E+00
0.2	1.40E+00	1.41E+00	1.45E+00	1.39E+00	1.44E+00	1.40E+00
0.3	9.26E-01	9.69E-01	1.02E+00	1.06E+00	1.17E+00	1.22E+00
0.4	6.50E-01	6.82E-01	7.08E-01	7.88E-01	9.25E-01	9.88E-01
0.5	4.75E-01	4.88E-01	5.34E-01	6.26E-01	7.57E-01	8.70E-01
0.6	3.80E-01	3.90E-01	4.36E-01	5.17E-01	6.40E-01	7.91E-01
0.662	3.31E-01	3.47E-01	4.02E-01	4.53E-01	5.85E-01	7.26E-01
0.8	2.56E-01	2.67E-01	3.03E-01	3.81E-01	4.89E-01	6.48E-01
1	1.90E-01	1.98E-01	2.30E-01	2.97E-01	4.06E-01	5.85E-01
1.25	1.38E-01	1.50E-01	1.82E-01	2.31E-01	3.32E-01	4.97E-01
1.5	1.07E-01	1.15E-01	1.47E-01	2.00E-01	2.93E-01	4.52E-01
2	7.60E-02	8.24E-02	1.02E-01	1.39E-01	2.30E-01	3.94E-01
3	4.47E-02	4.67E-02	6.49E-02	9.73E-02	1.71E-01	3.18E-01
5	2.36E-02	2.52E-02	3.42E-02	5.17E-02	1.12E-01	2.43E-01
10	1.19E-02	1.26E-02	1.56E-02	2.44E-02	5.10E-02	1.54E-01
15	7.75E-03	8.13E-03	9.66E-03	1.46E-02	3.31E-02	1.10E-01
20	5.71E-03	5.69E-03	6.61E-03	1.09E-02	2.47E-02	8.66E-02
30	3.54E-03	3.47E-03	4.42E-03	6.07E-03	1.42E-02	6.04E-02
50	1.79E-03	1.69E-03	2.37E-03	3.24E-03	6.93E-03	3.17E-02

表 A.4.1.2a 光子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>11</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{p local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.002	2.94E+00	2.59E+00	1.67E+00	6.73E-01	1.10E-01	2.05E-03	3.28E-05
0.003	2.08E+01	1.98E+01	1.69E+01	1.20E+01	5.71E+00	8.73E-01	2.53E-03
0.004	2.62E+01	2.57E+01	2.38E+01	2.04E+01	1.43E+01	5.20E+00	9.54E-02
0.005	2.27E+01	2.24E+01	2.16E+01	1.99E+01	1.65E+01	9.14E+00	5.56E-01
0.007	1.40E+01	1.40E+01	1.37E+01	1.33E+01	1.24E+01	9.81E+00	1.83E+00
0.01	7.20E+00	7.22E+00	7.17E+00	7.14E+00	6.94E+00	6.37E+00	2.44E+00
0.015	3.22E+00	3.22E+00	3.22E+00	3.20E+00	3.18E+00	3.08E+00	2.00E+00
0.02	1.85E+00	1.84E+00	1.85E+00	1.83E+00	1.81E+00	1.77E+00	1.41E+00
0.03	8.97E-01	9.00E-01	9.04E-01	8.90E-01	8.86E-01	8.68E-01	7.72E-01
0.05	4.64E-01	4.67E-01	4.55E-01	4.63E-01	4.54E-01	4.50E-01	4.23E-01
0.07	4.19E-01	4.20E-01	4.17E-01	4.13E-01	4.13E-01	4.10E-01	3.90E-01
0.1	5.11E-01	5.11E-01	5.14E-01	5.09E-01	5.11E-01	5.13E-01	4.93E-01

(続く)

<sup>10</sup> J. Daures, J. Gouriou, and J.-M. Bordy (2017). *Personal communication* (Laboratoire National Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette, Cedex France).<sup>11</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.1.2a (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.15	7.77E-01	7.79E-01	7.73E-01	7.73E-01	7.83E-01	7.95E-01	7.74E-01
0.2	1.03E+00	1.04E+00	1.05E+00	1.06E+00	1.08E+00	1.11E+00	1.07E+00
0.3	1.11E+00	1.13E+00	1.19E+00	1.28E+00	1.42E+00	1.54E+00	1.58E+00
0.5	9.41E-01	9.72E-01	1.09E+00	1.28E+00	1.57E+00	1.90E+00	2.17E+00
0.662	8.19E-01	8.59E-01	9.85E-01	1.23E+00	1.58E+00	2.04E+00	2.47E+00
0.7	8.05E-01	8.37E-01	9.75E-01	1.21E+00	1.60E+00	2.08E+00	2.54E+00
1	6.63E-01	7.08E-01	8.32E-01	1.09E+00	1.60E+00	2.26E+00	2.98E+00
1.25	5.74E-01	6.08E-01	7.57E-01	1.10E+00	1.60E+00	2.35E+00	3.29E+00
1.5	5.33E-01	5.72E-01	7.29E-01	9.77E-01	1.56E+00	2.45E+00	3.53E+00
2	4.40E-01	4.63E-01	6.05E-01	9.11E-01	1.49E+00	2.57E+00	3.99E+00
3	3.24E-01	3.56E-01	4.96E-01	7.63E-01	1.37E+00	2.62E+00	4.69E+00
5	2.51E-01	2.76E-01	3.65E-01	5.63E-01	1.08E+00	2.48E+00	5.52E+00
7	2.03E-01	2.33E-01	2.92E-01	4.67E-01	8.95E-01	2.17E+00	6.06E+00
10	2.06E-01	1.94E-01	2.27E-01	3.74E-01	7.47E-01	1.81E+00	5.91E+00
15	1.81E-01	1.85E-01	2.11E-01	3.03E-01	5.35E-01	1.37E+00	5.44E+00
20	1.53E-01	1.54E-01	1.90E-01	2.47E-01	4.55E-01	1.15E+00	5.07E+00
30	1.49E-01	1.48E-01	1.58E-01	2.24E-01	3.73E-01	9.26E-01	4.67E+00
50	1.11E-01	1.11E-01	1.45E-01	1.76E-01	3.04E-01	7.51E-01	4.37E+00
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.002	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.43E-01
0.003	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.48E+00
0.004	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.55E+00
0.005	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.45E+00
0.007	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.01E+00
0.01	4.14E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.41E+00
0.015	1.94E-01	1.07E-02	8.54E-04	1.52E-04	8.87E-05	3.80E-05	1.64E+00
0.02	4.41E-01	1.15E-01	3.88E-02	1.63E-02	1.05E-02	8.05E-03	1.01E+00
0.03	4.62E-01	2.65E-01	1.68E-01	1.24E-01	9.98E-02	9.86E-02	5.70E-01
0.05	3.24E-01	2.31E-01	1.86E-01	1.59E-01	1.43E-01	1.34E-01	3.38E-01
0.07	3.07E-01	2.40E-01	1.98E-01	1.67E-01	1.51E-01	1.49E-01	3.18E-01
0.1	3.99E-01	3.16E-01	2.63E-01	2.26E-01	2.17E-01	2.10E-01	4.03E-01
0.15	6.35E-01	5.25E-01	4.42E-01	3.99E-01	3.65E-01	3.56E-01	6.34E-01
0.2	9.12E-01	7.57E-01	6.46E-01	5.86E-01	5.39E-01	5.28E-01	8.87E-01
0.3	1.42E+00	1.21E+00	1.08E+00	9.82E-01	9.45E-01	9.33E-01	1.23E+00
0.5	2.12E+00	1.98E+00	1.85E+00	1.74E+00	1.68E+00	1.65E+00	1.64E+00
0.662	2.55E+00	2.48E+00	2.36E+00	2.28E+00	2.22E+00	2.18E+00	1.88E+00
0.7	2.66E+00	2.57E+00	2.46E+00	2.38E+00	2.32E+00	2.32E+00	1.93E+00
1	3.34E+00	3.36E+00	3.28E+00	3.24E+00	3.18E+00	3.19E+00	2.32E+00
1.25	3.75E+00	3.95E+00	3.93E+00	3.91E+00	3.92E+00	3.88E+00	2.62E+00
1.5	4.22E+00	4.48E+00	4.50E+00	4.47E+00	4.43E+00	4.49E+00	2.87E+00
2	4.97E+00	5.47E+00	5.63E+00	5.60E+00	5.62E+00	5.69E+00	3.37E+00
3	6.38E+00	7.19E+00	7.62E+00	7.67E+00	7.62E+00	7.67E+00	4.23E+00
5	8.92E+00	1.04E+01	1.11E+01	1.13E+01	1.14E+01	1.14E+01	5.77E+00
7	1.07E+01	1.33E+01	1.43E+01	1.47E+01	1.49E+01	1.49E+01	7.14E+00
10	1.28E+01	1.71E+01	1.90E+01	1.97E+01	2.00E+01	2.02E+01	9.01E+00
15	1.44E+01	2.18E+01	2.61E+01	2.79E+01	2.84E+01	2.86E+01	1.18E+01
20	1.50E+01	2.43E+01	3.06E+01	3.41E+01	3.57E+01	3.60E+01	1.38E+01
30	1.58E+01	2.71E+01	3.58E+01	4.13E+01	4.44E+01	4.53E+01	1.61E+01
50	1.70E+01	3.07E+01	4.16E+01	4.93E+01	5.37E+01	5.53E+01	1.88E+01

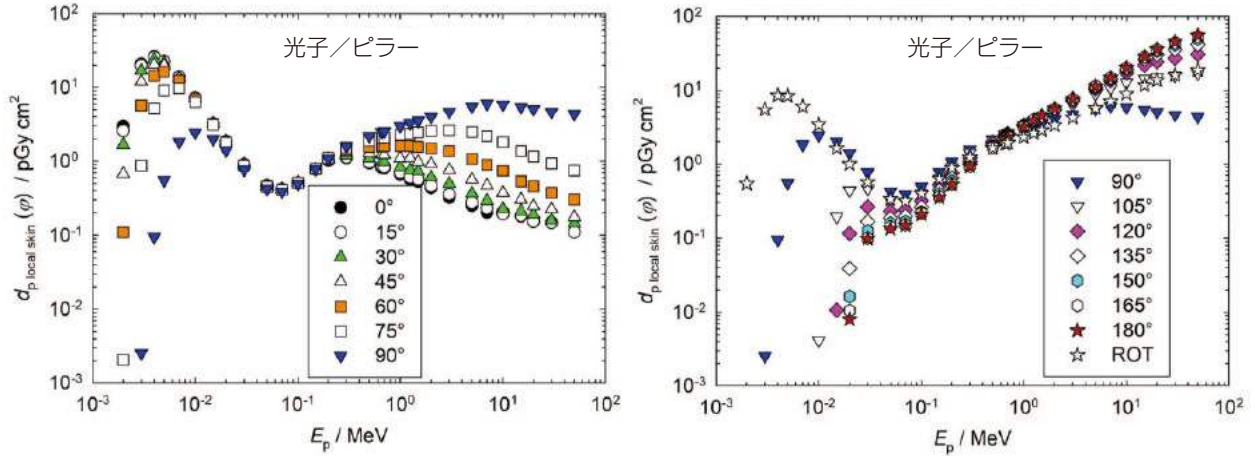


図 A.4.1.2a 光子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>12</sup>

表 A.4.1.2b 光子空気カーマからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>12</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{Gy Gy}^{-1})$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.002	1.80E-02	1.58E-02	1.02E-02	4.11E-03	6.70E-04	1.25E-05	2.00E-07
0.003	2.76E-01	2.64E-01	2.24E-01	1.59E-01	7.59E-02	1.16E-02	3.36E-05
0.004	5.50E-01	5.39E-01	5.01E-01	4.28E-01	3.01E-01	1.09E-01	2.00E-03
0.005	7.40E-01	7.31E-01	7.04E-01	6.48E-01	5.38E-01	2.98E-01	1.81E-02
0.007	9.04E-01	9.01E-01	8.87E-01	8.60E-01	8.02E-01	6.33E-01	1.18E-01
0.01	9.74E-01	9.75E-01	9.69E-01	9.65E-01	9.38E-01	8.61E-01	3.30E-01
0.015	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.02E+00	1.02E+00	9.86E-01	6.39E-01
0.02	1.10E+00	1.09E+00	1.10E+00	1.09E+00	1.07E+00	1.05E+00	8.35E-01
0.03	1.24E+00	1.25E+00	1.25E+00	1.23E+00	1.23E+00	1.20E+00	1.07E+00
0.05	1.44E+00	1.45E+00	1.41E+00	1.43E+00	1.41E+00	1.39E+00	1.31E+00
0.07	1.46E+00	1.46E+00	1.45E+00	1.43E+00	1.44E+00	1.43E+00	1.35E+00
0.1	1.37E+00	1.38E+00	1.38E+00	1.37E+00	1.37E+00	1.38E+00	1.33E+00
0.15	1.30E+00	1.30E+00	1.29E+00	1.29E+00	1.31E+00	1.33E+00	1.29E+00
0.2	1.20E+00	1.22E+00	1.23E+00	1.24E+00	1.26E+00	1.29E+00	1.25E+00
0.3	8.01E-01	8.14E-01	8.62E-01	9.27E-01	1.02E+00	1.11E+00	1.14E+00
0.5	3.96E-01	4.08E-01	4.57E-01	5.38E-01	6.58E-01	7.97E-01	9.11E-01
0.662	2.63E-01	2.76E-01	3.16E-01	3.97E-01	5.06E-01	6.56E-01	7.94E-01
0.7	2.46E-01	2.55E-01	2.98E-01	3.71E-01	4.88E-01	6.36E-01	7.75E-01
1	1.48E-01	1.58E-01	1.86E-01	2.43E-01	3.57E-01	5.04E-01	6.65E-01
1.25	1.08E-01	1.14E-01	1.42E-01	2.06E-01	3.00E-01	4.41E-01	6.17E-01
1.5	8.68E-02	9.30E-02	1.19E-01	1.59E-01	2.54E-01	3.99E-01	5.74E-01
2	5.82E-02	6.13E-02	8.01E-02	1.21E-01	1.97E-01	3.40E-01	5.28E-01
3	3.25E-02	3.57E-02	4.97E-02	7.65E-02	1.38E-01	2.62E-01	4.70E-01
5	1.77E-02	1.94E-02	2.57E-02	3.97E-02	7.60E-02	1.75E-01	3.90E-01
7	1.11E-02	1.28E-02	1.61E-02	2.57E-02	4.92E-02	1.20E-01	3.33E-01
10	8.54E-03	8.05E-03	9.39E-03	1.55E-02	3.09E-02	7.50E-02	2.45E-01
15	5.25E-03	5.36E-03	6.13E-03	8.80E-03	1.55E-02	3.98E-02	1.58E-01
20	3.37E-03	3.40E-03	4.20E-03	5.45E-03	1.00E-02	2.54E-02	1.12E-01
30	2.17E-03	2.16E-03	2.31E-03	3.27E-03	5.44E-03	1.35E-02	6.81E-02
50	9.33E-04	9.27E-04	1.22E-03	1.48E-03	2.55E-03	6.30E-03	3.67E-02

(続く)

<sup>12</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.1.2b (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{Gy Gy}^{-1})$						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.002	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.32E-03
0.003	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.27E-02
0.004	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.80E-01
0.005	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.76E-01
0.007	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.88E-01
0.01	5.60E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.61E-01
0.015	6.21E-02	3.41E-03	2.73E-04	4.87E-05	2.84E-05	1.22E-05	5.26E-01
0.02	2.62E-01	6.85E-02	2.31E-02	9.66E-03	6.24E-03	4.78E-03	5.97E-01
0.03	6.40E-01	3.67E-01	2.33E-01	1.72E-01	1.38E-01	1.37E-01	7.90E-01
0.05	1.00E+00	7.15E-01	5.75E-01	4.92E-01	4.44E-01	4.16E-01	1.05E+00
0.07	1.07E+00	8.36E-01	6.87E-01	5.79E-01	5.26E-01	5.19E-01	1.10E+00
0.1	1.07E+00	8.51E-01	7.08E-01	6.09E-01	5.85E-01	5.65E-01	1.08E+00
0.15	1.06E+00	8.75E-01	7.37E-01	6.65E-01	6.08E-01	5.93E-01	1.06E+00
0.2	1.07E+00	8.84E-01	7.54E-01	6.84E-01	6.29E-01	6.16E-01	1.04E+00
0.3	1.03E+00	8.76E-01	7.82E-01	7.10E-01	6.84E-01	6.75E-01	8.91E-01
0.5	8.92E-01	8.32E-01	7.77E-01	7.33E-01	7.06E-01	6.93E-01	6.88E-01
0.662	8.20E-01	7.95E-01	7.58E-01	7.34E-01	7.14E-01	7.02E-01	6.04E-01
0.7	8.13E-01	7.85E-01	7.52E-01	7.27E-01	7.10E-01	7.08E-01	5.91E-01
1	7.45E-01	7.50E-01	7.32E-01	7.23E-01	7.10E-01	7.12E-01	5.18E-01
1.25	7.03E-01	7.41E-01	7.37E-01	7.33E-01	7.35E-01	7.28E-01	4.91E-01
1.5	6.87E-01	7.28E-01	7.32E-01	7.27E-01	7.21E-01	7.31E-01	4.67E-01
2	6.58E-01	7.23E-01	7.45E-01	7.42E-01	7.44E-01	7.52E-01	4.45E-01
3	6.39E-01	7.21E-01	7.64E-01	7.69E-01	7.64E-01	7.69E-01	4.24E-01
5	6.29E-01	7.33E-01	7.80E-01	7.97E-01	8.03E-01	8.04E-01	4.07E-01
7	5.89E-01	7.33E-01	7.89E-01	8.08E-01	8.19E-01	8.21E-01	3.92E-01
10	5.30E-01	7.10E-01	7.88E-01	8.18E-01	8.30E-01	8.37E-01	3.74E-01
15	4.19E-01	6.33E-01	7.57E-01	8.10E-01	8.25E-01	8.29E-01	3.41E-01
20	3.31E-01	5.35E-01	6.75E-01	7.52E-01	7.87E-01	7.94E-01	3.03E-01
30	2.31E-01	3.95E-01	5.22E-01	6.02E-01	6.47E-01	6.61E-01	2.35E-01
50	1.43E-01	2.57E-01	3.49E-01	4.13E-01	4.51E-01	4.64E-01	1.58E-01

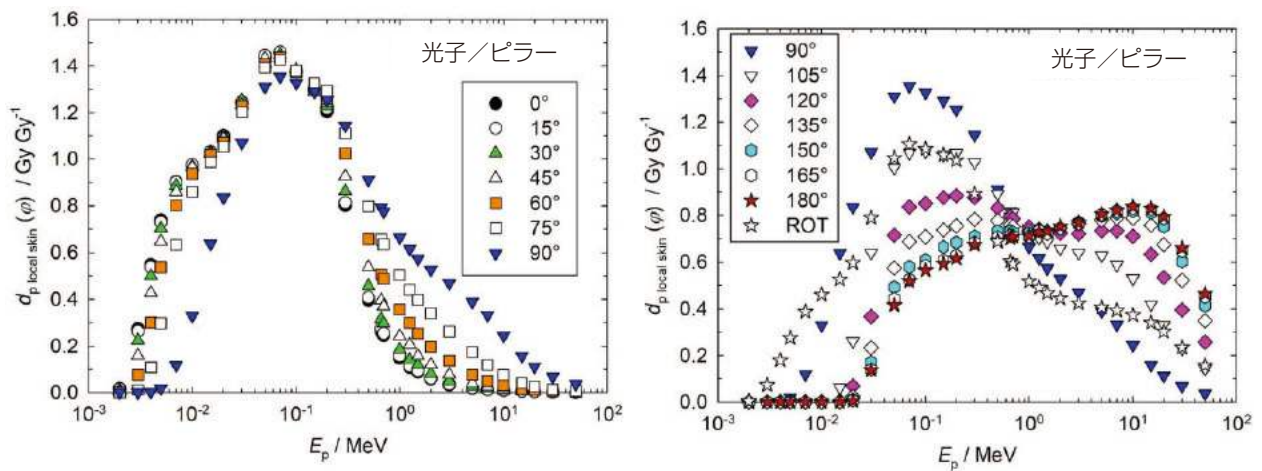
図 A.4.1.2b 光子空気カーマからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>13</sup><sup>13</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.1.3a 光子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>14</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.002	2.54E+00	2.28E+00	1.63E+00	9.08E-01	3.62E-01	8.54E-02	0.00E+00
0.003	1.97E+01	1.87E+01	1.58E+01	1.14E+01	6.66E+00	2.91E+00	7.39E-01
0.004	2.56E+01	2.49E+01	2.29E+01	1.90E+01	1.32E+01	7.36E+00	2.84E+00
0.005	2.24E+01	2.21E+01	2.10E+01	1.88E+01	1.45E+01	9.19E+00	4.35E+00
0.007	1.39E+01	1.38E+01	1.36E+01	1.30E+01	1.14E+01	8.19E+00	4.71E+00
0.01	7.22E+00	7.21E+00	7.17E+00	7.06E+00	6.68E+00	5.44E+00	3.65E+00
0.015	3.23E+00	3.22E+00	3.21E+00	3.18E+00	3.11E+00	2.83E+00	2.29E+00
0.02	1.80E+00	1.80E+00	1.80E+00	1.79E+00	1.77E+00	1.69E+00	1.50E+00
0.03	8.14E-01	8.14E-01	8.13E-01	8.09E-01	8.03E-01	7.84E-01	7.41E-01
0.05	3.83E-01	3.82E-01	3.81E-01	3.79E-01	3.77E-01	3.71E-01	3.58E-01
0.06	3.43E-01	3.43E-01	3.43E-01	3.42E-01	3.41E-01	3.37E-01	3.26E-01
0.07	3.44E-01	3.44E-01	3.44E-01	3.44E-01	3.43E-01	3.39E-01	3.29E-01
0.1	4.36E-01	4.36E-01	4.36E-01	4.36E-01	4.36E-01	4.33E-01	4.24E-01
0.15	6.93E-01	6.93E-01	6.94E-01	6.96E-01	6.97E-01	6.93E-01	6.79E-01
0.2	9.51E-01	9.53E-01	9.57E-01	9.64E-01	9.73E-01	9.74E-01	9.59E-01
0.3	1.02E+00	1.04E+00	1.10E+00	1.18E+00	1.28E+00	1.37E+00	1.42E+00
0.5	8.71E-01	9.05E-01	1.01E+00	1.19E+00	1.44E+00	1.70E+00	1.94E+00
0.662	7.67E-01	8.08E-01	9.36E-01	1.16E+00	1.48E+00	1.86E+00	2.22E+00
0.7	7.49E-01	7.90E-01	9.19E-01	1.15E+00	1.48E+00	1.88E+00	2.27E+00
1	6.19E-01	6.65E-01	8.10E-01	1.08E+00	1.51E+00	2.06E+00	2.65E+00
1.25	5.34E-01	5.79E-01	7.28E-01	1.02E+00	1.50E+00	2.16E+00	2.90E+00
1.5	4.72E-01	5.16E-01	6.63E-01	9.64E-01	1.48E+00	2.23E+00	3.09E+00
2	3.89E-01	4.28E-01	5.62E-01	8.55E-01	1.41E+00	2.29E+00	3.39E+00
3	2.92E-01	3.20E-01	4.27E-01	6.74E-01	1.21E+00	2.22E+00	3.65E+00
5	2.04E-01	2.23E-01	2.90E-01	4.56E-01	8.71E-01	1.82E+00	3.45E+00
10	1.33E-01	1.43E-01	1.79E-01	2.70E-01	5.29E-01	1.27E+00	2.75E+00
15	1.09E-01	1.17E-01	1.44E-01	2.13E-01	4.23E-01	1.10E+00	2.53E+00
20	9.85E-02	1.05E-01	1.28E-01	1.87E-01	3.73E-01	1.02E+00	2.45E+00
30	8.76E-02	9.32E-02	1.13E-01	1.62E-01	3.28E-01	9.65E-01	2.43E+00
50	8.12E-02	8.56E-02	1.02E-01	1.46E-01	3.00E-01	9.53E-01	2.51E+00
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.002	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01
0.003	4.71E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.51E+00
0.004	4.55E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.62E+00
0.005	1.08E+00	1.93E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.52E+00
0.007	1.77E+00	1.70E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.13E+00
0.01	1.85E+00	5.05E-01	5.54E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.60E+00
0.015	1.61E+00	9.41E-01	4.97E-01	2.91E-01	2.06E-01	1.84E-01	1.93E+00
0.02	1.24E+00	9.50E-01	7.16E-01	5.72E-01	4.97E-01	4.73E-01	1.29E+00
0.03	6.77E-01	6.02E-01	5.34E-01	4.86E-01	4.58E-01	4.49E-01	6.79E-01
0.05	3.39E-01	3.16E-01	2.95E-01	2.79E-01	2.69E-01	2.66E-01	3.39E-01
0.06	3.09E-01	2.89E-01	2.72E-01	2.59E-01	2.51E-01	2.48E-01	3.09E-01
0.07	3.14E-01	2.96E-01	2.78E-01	2.65E-01	2.57E-01	2.55E-01	3.13E-01
0.1	4.08E-01	3.89E-01	3.70E-01	3.56E-01	3.47E-01	3.44E-01	4.05E-01
0.15	6.57E-01	6.30E-01	6.05E-01	5.85E-01	5.71E-01	5.66E-01	6.53E-01
0.2	9.33E-01	8.95E-01	8.61E-01	8.39E-01	8.27E-01	8.25E-01	9.19E-01

(続く)

<sup>14</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.1.3a (続き)

$E_p / \text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi) / (\text{pGy cm}^2)$						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.3	1.44E+00	1.43E+00	1.40E+00	1.37E+00	1.35E+00	1.34E+00	1.30E+00
0.5	2.11E+00	2.20E+00	2.24E+00	2.25E+00	2.24E+00	2.24E+00	1.73E+00
0.662	2.50E+00	2.69E+00	2.79E+00	2.83E+00	2.85E+00	2.85E+00	1.99E+00
0.7	2.59E+00	2.79E+00	2.91E+00	2.96E+00	2.98E+00	2.99E+00	2.05E+00
1	3.17E+00	3.54E+00	3.77E+00	3.89E+00	3.95E+00	3.97E+00	2.45E+00
1.25	3.57E+00	4.08E+00	4.39E+00	4.57E+00	4.65E+00	4.68E+00	2.73E+00
1.5	3.92E+00	4.56E+00	4.97E+00	5.19E+00	5.30E+00	5.33E+00	2.98E+00
2	4.50E+00	5.41E+00	6.00E+00	6.33E+00	6.49E+00	6.53E+00	3.43E+00
3	5.27E+00	6.71E+00	7.73E+00	8.31E+00	8.59E+00	8.67E+00	4.13E+00
5	5.60E+00	7.86E+00	9.76E+00	1.11E+01	1.18E+01	1.20E+01	4.94E+00
10	4.93E+00	7.50E+00	9.93E+00	1.18E+01	1.30E+01	1.34E+01	4.92E+00
15	4.72E+00	7.37E+00	9.92E+00	1.19E+01	1.32E+01	1.36E+01	4.88E+00
20	4.68E+00	7.41E+00	1.01E+01	1.22E+01	1.35E+01	1.40E+01	4.93E+00
30	4.76E+00	7.67E+00	1.05E+01	1.28E+01	1.43E+01	1.48E+01	5.13E+00
50	5.02E+00	8.20E+00	1.14E+01	1.39E+01	1.55E+01	1.61E+01	5.51E+00

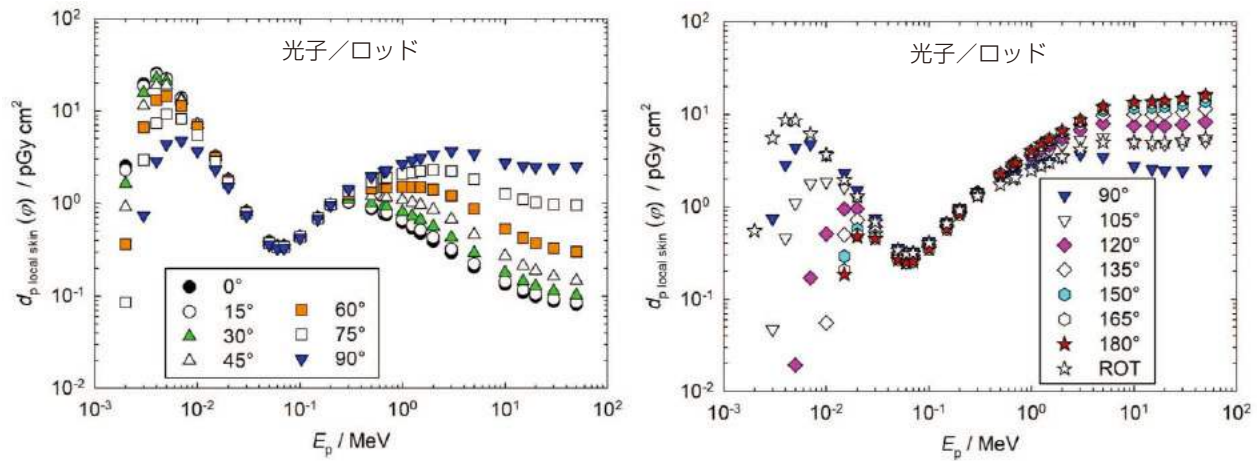
図 A.4.1.3a 光子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>15</sup><sup>15</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.1.3b 光子空気カーマからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>16</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{Gy Gy}^{-1})$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.002	1.55E-02	1.39E-02	9.96E-03	5.55E-03	2.21E-03	5.22E-04	0.00E+00
0.003	2.62E-01	2.48E-01	2.10E-01	1.51E-01	8.84E-02	3.86E-02	9.81E-03
0.004	5.38E-01	5.23E-01	4.81E-01	3.99E-01	2.77E-01	1.55E-01	5.96E-02
0.005	7.31E-01	7.21E-01	6.85E-01	6.13E-01	4.73E-01	3.00E-01	1.42E-01
0.007	8.97E-01	8.90E-01	8.77E-01	8.39E-01	7.35E-01	5.28E-01	3.04E-01
0.01	9.76E-01	9.74E-01	9.69E-01	9.54E-01	9.03E-01	7.35E-01	4.93E-01
0.015	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.02E+00	9.95E-01	9.06E-01	7.33E-01
0.02	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.00E+00	8.91E-01
0.03	1.13E+00	1.13E+00	1.13E+00	1.12E+00	1.11E+00	1.09E+00	1.03E+00
0.05	1.19E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.15E+00	1.11E+00
0.06	1.19E+00	1.19E+00	1.19E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.17E+00	1.13E+00
0.07	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00	1.20E+00	1.19E+00	1.18E+00	1.14E+00
0.1	1.17E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.14E+00
0.15	1.16E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.13E+00
0.2	1.11E+00	1.11E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.14E+00	1.12E+00
0.3	7.38E-01	7.52E-01	7.95E-01	8.53E-01	9.26E-01	9.91E-01	1.03E+00
0.5	3.66E-01	3.80E-01	4.25E-01	5.00E-01	6.05E-01	7.15E-01	8.15E-01
0.662	2.46E-01	2.60E-01	3.01E-01	3.73E-01	4.76E-01	5.98E-01	7.13E-01
0.7	2.29E-01	2.41E-01	2.81E-01	3.51E-01	4.52E-01	5.74E-01	6.93E-01
1	1.05E-01	1.15E-01	1.48E-01	2.15E-01	3.30E-01	4.98E-01	6.90E-01
1.25	1.00E-01	1.09E-01	1.37E-01	1.91E-01	2.81E-01	4.05E-01	5.44E-01
1.5	1.01E-01	1.08E-01	1.32E-01	1.76E-01	2.46E-01	3.35E-01	4.31E-01
2	5.15E-02	5.66E-02	7.44E-02	1.13E-01	1.87E-01	3.03E-01	4.49E-01
3	2.93E-02	3.21E-02	4.28E-02	6.76E-02	1.21E-01	2.23E-01	3.66E-01
5	1.44E-02	1.57E-02	2.05E-02	3.22E-02	6.14E-02	1.28E-01	2.43E-01
10	5.51E-03	5.93E-03	7.42E-03	1.12E-02	2.19E-02	5.26E-02	1.14E-01
15	3.16E-03	3.40E-03	4.18E-03	6.18E-03	1.23E-02	3.19E-02	7.34E-02
20	2.17E-03	2.31E-03	2.82E-03	4.12E-03	8.22E-03	2.25E-02	5.40E-02
30	1.28E-03	1.36E-03	1.65E-03	2.36E-03	4.78E-03	1.41E-02	3.54E-02
50	6.81E-04	7.18E-04	8.56E-04	1.22E-03	2.52E-03	7.99E-03	2.11E-02
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.002	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.33E-03
0.003	6.25E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.32E-02
0.004	9.55E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.81E-01
0.005	3.52E-02	6.30E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.78E-01
0.007	1.14E-01	1.10E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.95E-01
0.01	2.50E-01	6.82E-02	7.49E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.86E-01
0.015	5.15E-01	3.01E-01	1.59E-01	9.31E-02	6.59E-02	5.89E-02	6.18E-01
0.02	7.36E-01	5.64E-01	4.25E-01	3.40E-01	2.95E-01	2.81E-01	7.66E-01
0.03	9.38E-01	8.34E-01	7.40E-01	6.73E-01	6.35E-01	6.22E-01	9.41E-01
0.05	1.05E+00	9.79E-01	9.14E-01	8.64E-01	8.33E-01	8.24E-01	1.05E+00
0.06	1.07E+00	1.00E+00	9.42E-01	8.97E-01	8.69E-01	8.58E-01	1.07E+00
0.07	1.09E+00	1.03E+00	9.66E-01	9.21E-01	8.93E-01	8.86E-01	1.09E+00
0.1	1.10E+00	1.05E+00	9.96E-01	9.59E-01	9.34E-01	9.26E-01	1.09E+00
0.15	1.10E+00	1.05E+00	1.01E+00	9.76E-01	9.53E-01	9.44E-01	1.09E+00
0.2	1.09E+00	1.04E+00	1.01E+00	9.79E-01	9.65E-01	9.63E-01	1.07E+00
0.3	1.04E+00	1.03E+00	1.01E+00	9.91E-01	9.76E-01	9.69E-01	9.40E-01
0.5	8.87E-01	9.25E-01	9.42E-01	9.46E-01	9.42E-01	9.42E-01	7.27E-01
0.662	8.03E-01	8.64E-01	8.97E-01	9.09E-01	9.16E-01	9.16E-01	6.39E-01

(続く)

<sup>16</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.1.3b (続き)

$E_p / \text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi) / (\text{Gy Gy}^{-1})$						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.7	7.91E-01	8.52E-01	8.89E-01	9.04E-01	9.10E-01	9.13E-01	6.26E-01
1	8.75E-01	1.02E+00	1.11E+00	1.16E+00	1.18E+00	1.19E+00	6.65E-01
1.25	6.70E-01	7.65E-01	8.23E-01	8.57E-01	8.72E-01	8.78E-01	5.12E-01
1.5	5.16E-01	5.76E-01	6.13E-01	6.33E-01	6.43E-01	6.46E-01	3.99E-01
2	5.95E-01	7.16E-01	7.94E-01	8.38E-01	8.59E-01	8.64E-01	4.54E-01
3	5.28E-01	6.73E-01	7.75E-01	8.33E-01	8.61E-01	8.69E-01	4.14E-01
5	3.95E-01	5.54E-01	6.88E-01	7.83E-01	8.32E-01	8.46E-01	3.48E-01
10	2.04E-01	3.11E-01	4.12E-01	4.89E-01	5.39E-01	5.55E-01	2.04E-01
15	1.37E-01	2.14E-01	2.88E-01	3.45E-01	3.83E-01	3.95E-01	1.42E-01
20	1.03E-01	1.63E-01	2.23E-01	2.69E-01	2.98E-01	3.09E-01	1.09E-01
30	6.94E-02	1.12E-01	1.53E-01	1.87E-01	2.08E-01	2.16E-01	7.48E-02
50	4.21E-02	6.88E-02	9.56E-02	1.17E-01	1.30E-01	1.35E-01	4.62E-02

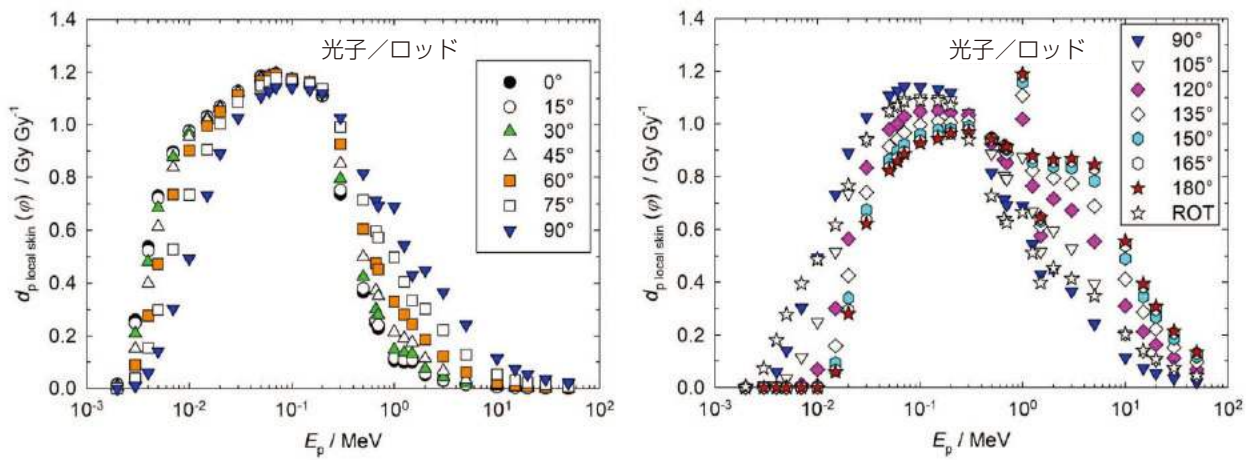


図 A.4.1.3b 光子空気カーマからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>17</sup>

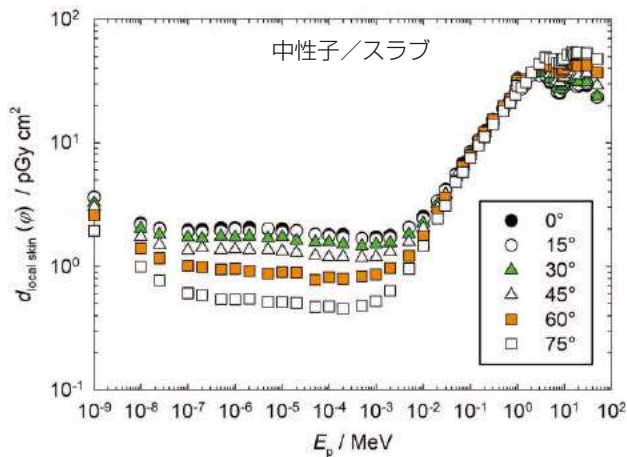


図 A.4.2.1 中性子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数 (Veinot et al., 2020)

<sup>17</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.2.1 中性子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数 (Veinot *et al.*, 2020)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/\text{pGy cm}^2$					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
1.00E-09	3.63E+00	3.59E+00	3.25E+00	3.02E+00	2.60E+00	1.94E+00
1.00E-08	2.22E+00	2.17E+00	2.02E+00	1.73E+00	1.40E+00	1.00E+00
2.50E-08	2.03E+00	1.99E+00	1.81E+00	1.50E+00	1.16E+00	7.71E-01
1.00E-07	1.96E+00	1.89E+00	1.72E+00	1.35E+00	1.01E+00	6.07E-01
2.00E-07	1.98E+00	1.88E+00	1.68E+00	1.41E+00	9.90E-01	5.88E-01
5.00E-07	2.04E+00	1.92E+00	1.75E+00	1.36E+00	9.48E-01	5.42E-01
1.00E-06	2.05E+00	1.98E+00	1.72E+00	1.37E+00	9.55E-01	5.39E-01
2.00E-06	2.06E+00	1.91E+00	1.75E+00	1.36E+00	9.23E-01	5.45E-01
5.00E-06	1.98E+00	2.01E+00	1.69E+00	1.36E+00	8.73E-01	5.15E-01
1.00E-05	2.01E+00	1.88E+00	1.73E+00	1.33E+00	8.99E-01	5.15E-01
2.00E-05	1.94E+00	1.93E+00	1.62E+00	1.29E+00	8.91E-01	5.06E-01
5.00E-05	1.82E+00	1.81E+00	1.56E+00	1.22E+00	7.80E-01	4.71E-01
1.00E-04	1.80E+00	1.76E+00	1.57E+00	1.19E+00	8.22E-01	4.73E-01
2.00E-04	1.81E+00	1.70E+00	1.51E+00	1.19E+00	7.94E-01	4.54E-01
5.00E-04	1.69E+00	1.67E+00	1.46E+00	1.18E+00	8.31E-01	4.83E-01
1.00E-03	1.73E+00	1.65E+00	1.52E+00	1.19E+00	8.56E-01	5.25E-01
2.00E-03	1.78E+00	1.70E+00	1.55E+00	1.31E+00	9.66E-01	6.38E-01
5.00E-03	2.07E+00	2.05E+00	1.82E+00	1.58E+00	1.22E+00	9.58E-01
1.00E-02	2.54E+00	2.42E+00	2.23E+00	2.03E+00	1.76E+00	1.47E+00
2.00E-02	3.32E+00	3.38E+00	3.20E+00	2.96E+00	2.75E+00	2.42E+00
3.00E-02	4.18E+00	4.12E+00	3.83E+00	3.76E+00	3.61E+00	3.09E+00
5.00E-02	5.59E+00	5.49E+00	5.32E+00	5.35E+00	4.98E+00	4.79E+00
7.00E-02	6.84E+00	6.46E+00	6.65E+00	6.47E+00	6.43E+00	5.78E+00
1.00E-01	8.42E+00	8.36E+00	8.37E+00	7.87E+00	7.94E+00	7.49E+00
1.50E-01	1.06E+01	1.06E+01	1.05E+01	1.01E+01	1.02E+01	9.48E+00
2.00E-01	1.24E+01	1.22E+01	1.21E+01	1.18E+01	1.21E+01	1.11E+01
3.00E-01	1.54E+01	1.53E+01	1.53E+01	1.49E+01	1.55E+01	1.40E+01
5.00E-01	1.89E+01	1.92E+01	1.95E+01	1.95E+01	1.98E+01	1.82E+01
7.00E-01	2.21E+01	2.26E+01	2.27E+01	2.22E+01	2.27E+01	2.13E+01
9.00E-01	2.61E+01	2.60E+01	2.60E+01	2.60E+01	2.62E+01	2.45E+01
1.00E+00	3.19E+01	3.30E+01	3.33E+01	3.16E+01	3.19E+01	2.91E+01
1.20E+00	2.95E+01	2.73E+01	2.96E+01	2.93E+01	3.02E+01	2.80E+01
1.50E+00	3.15E+01	2.96E+01	3.18E+01	3.16E+01	3.27E+01	3.09E+01
2.00E+00	3.51E+01	3.52E+01	3.59E+01	3.64E+01	3.68E+01	3.70E+01
3.00E+00	3.57E+01	3.51E+01	3.74E+01	3.93E+01	4.19E+01	4.34E+01
4.00E+00	3.43E+01	3.53E+01	3.68E+01	4.04E+01	4.62E+01	4.93E+01
5.00E+00	3.08E+01	3.16E+01	3.26E+01	3.62E+01	4.20E+01	4.75E+01
6.00E+00	3.03E+01	3.15E+01	3.27E+01	3.65E+01	4.17E+01	4.77E+01
7.00E+00	2.59E+01	2.62E+01	2.78E+01	3.18E+01	3.71E+01	4.44E+01
8.00E+00	2.51E+01	2.59E+01	2.72E+01	3.09E+01	3.69E+01	4.46E+01
9.00E+00	2.75E+01	2.77E+01	2.88E+01	3.32E+01	3.86E+01	4.67E+01
1.00E+01	2.86E+01	2.87E+01	3.01E+01	3.40E+01	3.99E+01	4.80E+01
1.20E+01	3.09E+01	3.19E+01	3.40E+01	3.75E+01	4.30E+01	5.17E+01
1.40E+01	3.05E+01	3.01E+01	3.23E+01	3.63E+01	4.30E+01	5.14E+01
1.50E+01	3.21E+01	3.18E+01	3.37E+01	3.80E+01	4.41E+01	5.45E+01
1.60E+01	3.08E+01	3.19E+01	3.29E+01	3.78E+01	4.32E+01	5.20E+01
1.80E+01	2.98E+01	2.89E+01	3.10E+01	3.55E+01	4.21E+01	5.31E+01
2.00E+01	2.88E+01	2.96E+01	3.11E+01	3.53E+01	4.17E+01	5.37E+01
3.00E+01	2.91E+01	3.03E+01	3.07E+01	3.67E+01	4.25E+01	5.33E+01
5.00E+01	2.33E+01	2.34E+01	2.38E+01	2.92E+01	3.69E+01	4.76E+01

表 A.4.2.2 中性子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数 (Veinot *et al.*, 2020)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_p \text{ local skin } (\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1.00E-09	3.14E+00	3.10E+00	2.97E+00	2.83E+00	2.52E+00	2.02E+00	7.31E-01
1.00E-08	1.77E+00	1.72E+00	1.67E+00	1.52E+00	1.34E+00	1.09E+00	5.71E-01
2.50E-08	1.44E+00	1.43E+00	1.35E+00	1.24E+00	1.12E+00	9.15E-01	5.48E-01
1.00E-07	1.18E+00	1.18E+00	1.10E+00	1.06E+00	9.44E-01	7.79E-01	5.71E-01
2.00E-07	1.09E+00	1.08E+00	1.05E+00	9.80E-01	8.91E-01	7.72E-01	6.18E-01
5.00E-07	9.87E-01	1.01E+00	9.43E-01	8.85E-01	8.62E-01	7.55E-01	6.14E-01
1.00E-06	9.36E-01	9.21E-01	8.71E-01	8.59E-01	8.10E-01	6.95E-01	6.19E-01
2.00E-06	8.41E-01	8.17E-01	8.26E-01	8.01E-01	7.45E-01	7.07E-01	5.98E-01
5.00E-06	7.95E-01	7.97E-01	7.60E-01	7.33E-01	6.88E-01	6.43E-01	5.69E-01
1.00E-05	7.34E-01	7.17E-01	7.44E-01	7.06E-01	6.69E-01	6.17E-01	5.22E-01
2.00E-05	6.98E-01	6.84E-01	6.89E-01	6.39E-01	6.05E-01	5.67E-01	5.11E-01
5.00E-05	6.31E-01	6.01E-01	6.06E-01	5.81E-01	5.70E-01	5.25E-01	4.97E-01
1.00E-04	5.65E-01	5.44E-01	5.77E-01	5.68E-01	5.20E-01	4.88E-01	4.55E-01
2.00E-04	5.35E-01	5.31E-01	5.38E-01	5.12E-01	4.93E-01	4.93E-01	4.50E-01
5.00E-04	5.25E-01	5.37E-01	5.28E-01	5.14E-01	5.04E-01	4.75E-01	4.44E-01
1.00E-03	5.50E-01	5.65E-01	5.53E-01	5.22E-01	5.14E-01	5.12E-01	4.42E-01
2.00E-03	6.08E-01	6.05E-01	6.24E-01	6.20E-01	6.08E-01	5.90E-01	5.17E-01
5.00E-03	8.93E-01	8.78E-01	8.97E-01	8.87E-01	9.02E-01	9.03E-01	7.14E-01
1.00E-02	1.35E+00	1.34E+00	1.34E+00	1.37E+00	1.40E+00	1.39E+00	1.06E+00
2.00E-02	2.23E+00	2.24E+00	2.25E+00	2.28E+00	2.33E+00	2.36E+00	1.78E+00
3.00E-02	3.04E+00	3.03E+00	3.07E+00	3.10E+00	3.20E+00	3.22E+00	2.43E+00
5.00E-02	4.46E+00	4.44E+00	4.47E+00	4.56E+00	4.67E+00	4.76E+00	3.65E+00
7.00E-02	5.65E+00	5.65E+00	5.70E+00	5.80E+00	5.94E+00	6.05E+00	4.69E+00
1.00E-01	7.18E+00	7.17E+00	7.23E+00	7.36E+00	7.56E+00	7.70E+00	6.09E+00
1.50E-01	9.27E+00	9.28E+00	9.35E+00	9.49E+00	9.74E+00	9.94E+00	8.17E+00
2.00E-01	1.10E+01	1.10E+01	1.11E+01	1.12E+01	1.15E+01	1.18E+01	9.92E+00
3.00E-01	1.40E+01	1.40E+01	1.40E+01	1.42E+01	1.45E+01	1.48E+01	1.28E+01
5.00E-01	1.74E+01	1.74E+01	1.76E+01	1.81E+01	1.87E+01	1.94E+01	1.75E+01
7.00E-01	2.06E+01	2.06E+01	2.08E+01	2.12E+01	2.18E+01	2.24E+01	2.07E+01
9.00E-01	2.41E+01	2.41E+01	2.43E+01	2.46E+01	2.52E+01	2.58E+01	2.39E+01
1.00E+00	3.05E+01	3.05E+01	3.03E+01	3.02E+01	3.04E+01	3.07E+01	2.74E+01
1.20E+00	2.77E+01	2.77E+01	2.78E+01	2.80E+01	2.85E+01	2.92E+01	2.75E+01
1.50E+00	2.96E+01	2.96E+01	2.97E+01	3.00E+01	3.07E+01	3.16E+01	3.02E+01
2.00E+00	3.32E+01	3.26E+01	3.25E+01	3.34E+01	3.41E+01	3.45E+01	3.47E+01
3.00E+00	3.24E+01	3.34E+01	3.29E+01	3.70E+01	3.78E+01	4.00E+01	4.02E+01
4.00E+00	3.15E+01	3.14E+01	3.27E+01	3.62E+01	4.14E+01	4.58E+01	4.78E+01
5.00E+00	2.79E+01	2.80E+01	2.94E+01	3.28E+01	3.69E+01	4.29E+01	4.85E+01
6.00E+00	2.71E+01	2.70E+01	2.82E+01	3.15E+01	3.58E+01	4.31E+01	4.85E+01
7.00E+00	2.20E+01	2.30E+01	2.34E+01	2.76E+01	3.33E+01	4.03E+01	4.65E+01
8.00E+00	2.16E+01	2.19E+01	2.40E+01	2.73E+01	3.15E+01	4.11E+01	4.63E+01
9.00E+00	2.33E+01	2.35E+01	2.43E+01	2.80E+01	3.36E+01	4.03E+01	4.87E+01
1.00E+01	2.42E+01	2.43E+01	2.59E+01	2.99E+01	3.45E+01	4.31E+01	4.99E+01
1.20E+01	2.62E+01	2.70E+01	2.77E+01	3.18E+01	3.67E+01	4.63E+01	5.46E+01
1.40E+01	2.55E+01	2.53E+01	2.74E+01	3.06E+01	3.44E+01	4.33E+01	5.21E+01
1.50E+01	2.71E+01	2.74E+01	2.87E+01	3.32E+01	3.77E+01	4.71E+01	5.58E+01
1.60E+01	2.66E+01	2.67E+01	2.83E+01	3.20E+01	3.76E+01	4.55E+01	5.42E+01
1.80E+01	2.57E+01	2.58E+01	2.68E+01	2.99E+01	3.43E+01	4.51E+01	5.47E+01
2.00E+01	2.54E+01	2.54E+01	2.69E+01	3.01E+01	3.53E+01	4.48E+01	5.28E+01
3.00E+01	2.74E+01	1.97E+01	2.71E+01	3.11E+01	3.69E+01	4.44E+01	5.38E+01
5.00E+01	2.00E+01	1.60E+01	2.24E+01	2.50E+01	3.07E+01	3.84E+01	4.88E+01

(続く)

表 A.4.2.2 (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
1.00E-09	2.13E-01	1.78E-01	1.52E-01	1.45E-01	1.40E-01	1.42E-01	1.39E+00
1.00E-08	2.47E-01	2.07E-01	1.87E-01	1.67E-01	1.72E-01	1.60E-01	8.22E-01
2.50E-08	2.77E-01	2.39E-01	2.11E-01	1.91E-01	1.91E-01	1.80E-01	7.10E-01
1.00E-07	3.75E-01	3.10E-01	2.86E-01	2.68E-01	2.54E-01	2.59E-01	6.55E-01
2.00E-07	4.12E-01	3.55E-01	3.24E-01	2.93E-01	2.87E-01	2.82E-01	6.46E-01
5.00E-07	4.77E-01	4.04E-01	3.79E-01	3.57E-01	3.45E-01	3.25E-01	6.41E-01
1.00E-06	4.99E-01	4.28E-01	3.91E-01	3.76E-01	3.62E-01	3.53E-01	6.23E-01
2.00E-06	4.98E-01	4.44E-01	3.94E-01	3.94E-01	3.77E-01	3.59E-01	6.00E-01
5.00E-06	5.01E-01	4.44E-01	4.25E-01	3.99E-01	3.73E-01	3.72E-01	5.75E-01
1.00E-05	4.88E-01	4.26E-01	4.18E-01	4.02E-01	3.78E-01	3.77E-01	5.54E-01
2.00E-05	4.63E-01	4.27E-01	4.00E-01	3.94E-01	3.70E-01	3.55E-01	5.22E-01
5.00E-05	4.28E-01	4.06E-01	3.91E-01	3.86E-01	3.47E-01	3.57E-01	4.86E-01
1.00E-04	4.28E-01	3.92E-01	3.67E-01	3.63E-01	3.40E-01	3.43E-01	4.58E-01
2.00E-04	4.07E-01	3.70E-01	3.50E-01	3.51E-01	3.30E-01	3.22E-01	4.37E-01
5.00E-04	3.94E-01	3.53E-01	3.43E-01	3.20E-01	3.29E-01	3.25E-01	4.30E-01
1.00E-03	3.69E-01	3.30E-01	3.15E-01	3.09E-01	2.98E-01	3.04E-01	4.30E-01
2.00E-03	3.39E-01	3.22E-01	3.05E-01	3.00E-01	2.92E-01	2.86E-01	4.65E-01
5.00E-03	3.81E-01	3.04E-01	2.95E-01	2.81E-01	2.64E-01	2.73E-01	6.06E-01
1.00E-02	4.33E-01	3.11E-01	2.90E-01	2.77E-01	2.61E-01	2.69E-01	8.56E-01
2.00E-02	5.80E-01	3.24E-01	2.71E-01	2.57E-01	2.62E-01	2.56E-01	1.35E+00
3.00E-02	7.50E-01	3.61E-01	2.83E-01	2.43E-01	2.50E-01	2.33E-01	1.80E+00
5.00E-02	1.11E+00	4.48E-01	3.00E-01	2.60E-01	2.54E-01	2.54E-01	2.61E+00
7.00E-02	1.52E+00	5.59E-01	3.49E-01	2.80E-01	2.57E-01	2.59E-01	3.31E+00
1.00E-01	2.12E+00	7.55E-01	4.33E-01	3.49E-01	2.90E-01	2.66E-01	4.23E+00
1.50E-01	3.09E+00	1.22E+00	6.34E-01	4.51E-01	3.63E-01	3.41E-01	5.54E+00
2.00E-01	4.09E+00	1.72E+00	9.21E-01	5.81E-01	4.90E-01	4.51E-01	6.68E+00
3.00E-01	5.98E+00	2.79E+00	1.54E+00	1.05E+00	8.03E-01	7.54E-01	8.65E+00
5.00E-01	9.36E+00	4.76E+00	2.93E+00	2.12E+00	1.71E+00	1.60E+00	1.16E+01
7.00E-01	1.23E+01	7.15E+00	4.94E+00	3.62E+00	3.03E+00	2.91E+00	1.42E+01
9.00E-01	1.51E+01	8.94E+00	6.42E+00	4.80E+00	4.12E+00	3.90E+00	1.68E+01
1.00E+00	1.54E+01	8.13E+00	5.11E+00	3.90E+00	3.32E+00	3.11E+00	1.93E+01
1.20E+00	1.84E+01	1.21E+01	9.05E+00	7.10E+00	6.05E+00	5.91E+00	1.99E+01
1.50E+00	2.15E+01	1.54E+01	1.18E+01	9.56E+00	8.39E+00	8.16E+00	2.23E+01
2.00E+00	2.66E+01	1.94E+01	1.54E+01	1.35E+01	1.22E+01	1.17E+01	2.59E+01
3.00E+00	3.12E+01	2.67E+01	2.26E+01	1.95E+01	1.83E+01	1.80E+01	3.04E+01
4.00E+00	3.77E+01	3.19E+01	2.73E+01	2.39E+01	2.26E+01	2.20E+01	3.38E+01
5.00E+00	4.10E+01	3.56E+01	3.11E+01	2.86E+01	2.68E+01	2.59E+01	3.40E+01
6.00E+00	4.34E+01	3.84E+01	3.30E+01	3.12E+01	2.89E+01	2.89E+01	3.47E+01
7.00E+00	4.52E+01	4.00E+01	3.68E+01	3.42E+01	3.23E+01	3.28E+01	3.42E+01
8.00E+00	4.82E+01	4.45E+01	3.98E+01	3.62E+01	3.48E+01	3.41E+01	3.53E+01
9.00E+00	4.76E+01	4.44E+01	4.13E+01	3.88E+01	3.66E+01	3.67E+01	3.64E+01
1.00E+01	5.16E+01	4.95E+01	4.37E+01	4.15E+01	3.96E+01	3.90E+01	3.88E+01
1.20E+01	5.48E+01	5.29E+01	4.97E+01	4.56E+01	4.44E+01	4.45E+01	4.22E+01
1.40E+01	5.44E+01	5.46E+01	5.17E+01	4.91E+01	4.68E+01	4.69E+01	4.21E+01
1.50E+01	5.89E+01	5.77E+01	5.38E+01	5.08E+01	4.95E+01	4.83E+01	4.49E+01
1.60E+01	5.74E+01	5.64E+01	5.49E+01	5.25E+01	5.24E+01	5.03E+01	4.47E+01
1.80E+01	5.72E+01	5.93E+01	5.68E+01	5.47E+01	5.27E+01	5.26E+01	4.47E+01
2.00E+01	5.83E+01	5.87E+01	5.95E+01	5.63E+01	5.48E+01	5.62E+01	4.53E+01
3.00E+01	5.85E+01	6.40E+01	6.53E+01	6.30E+01	6.32E+01	6.38E+01	4.76E+01
5.00E+01	5.97E+01	6.66E+01	7.19E+01	6.95E+01	7.25E+01	7.31E+01	4.73E+01

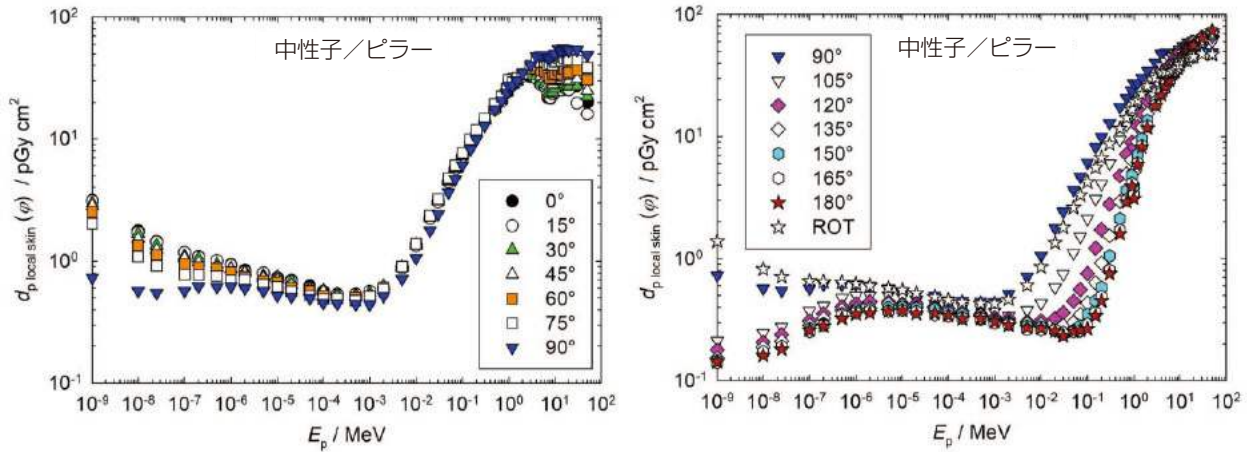


図 A.4.2.2 中性子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数 (Veinot *et al.*, 2020)

表 A.4.2.3 中性子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数 (Veinot *et al.*, 2020)

$E_p / \text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi) / (\text{pGy cm}^2)$						
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$
1.00E-09	2.66E+00	2.64E+00	2.58E+00	2.45E+00	2.12E+00	1.64E+00	1.07E+00
1.00E-08	1.22E+00	1.21E+00	1.18E+00	1.13E+00	1.05E+00	8.68E-01	6.42E-01
2.50E-08	8.56E-01	8.59E-01	8.45E-01	8.21E-01	7.51E-01	6.35E-01	5.25E-01
1.00E-07	4.95E-01	4.94E-01	4.85E-01	4.79E-01	4.61E-01	4.24E-01	3.68E-01
2.00E-07	3.80E-01	3.76E-01	3.76E-01	3.72E-01	3.68E-01	3.47E-01	3.12E-01
5.00E-07	2.55E-01	2.58E-01	2.61E-01	2.58E-01	2.58E-01	2.50E-01	2.31E-01
1.00E-06	1.95E-01	2.03E-01	2.01E-01	2.00E-01	2.04E-01	1.98E-01	1.85E-01
2.00E-06	1.44E-01	1.44E-01	1.46E-01	1.49E-01	1.50E-01	1.46E-01	1.41E-01
5.00E-06	1.03E-01	1.01E-01	1.05E-01	1.11E-01	1.16E-01	1.15E-01	1.11E-01
1.00E-05	8.05E-02	8.01E-02	8.09E-02	8.59E-02	8.89E-02	8.81E-02	8.69E-02
2.00E-05	6.64E-02	6.67E-02	6.86E-02	6.95E-02	7.06E-02	7.01E-02	6.99E-02
5.00E-05	5.28E-02	5.17E-02	5.36E-02	5.47E-02	5.74E-02	5.68E-02	5.57E-02
1.00E-04	4.71E-02	4.78E-02	4.81E-02	4.91E-02	4.95E-02	5.09E-02	4.94E-02
2.00E-04	5.03E-02	4.93E-02	5.02E-02	5.03E-02	5.34E-02	5.16E-02	4.84E-02
5.00E-04	7.24E-02	7.25E-02	7.33E-02	7.49E-02	6.85E-02	7.31E-02	6.12E-02
1.00E-03	1.21E-01	1.21E-01	1.22E-01	1.23E-01	1.19E-01	1.16E-01	1.02E-01
2.00E-03	2.20E-01	2.22E-01	2.24E-01	2.27E-01	2.23E-01	2.15E-01	1.88E-01
5.00E-03	5.21E-01	5.23E-01	5.26E-01	5.33E-01	5.31E-01	5.11E-01	4.48E-01
1.00E-02	9.99E-01	1.00E+00	1.01E+00	1.02E+00	1.02E+00	9.87E-01	8.69E-01
2.00E-02	1.89E+00	1.89E+00	1.90E+00	1.93E+00	1.93E+00	1.87E+00	1.66E+00
3.00E-02	2.69E+00	2.70E+00	2.72E+00	2.75E+00	2.76E+00	2.69E+00	2.39E+00
5.00E-02	4.11E+00	4.10E+00	4.12E+00	4.17E+00	4.19E+00	4.10E+00	3.67E+00
7.00E-02	5.30E+00	5.28E+00	5.32E+00	5.38E+00	5.42E+00	5.31E+00	4.79E+00
1.00E-01	6.77E+00	6.78E+00	6.82E+00	6.90E+00	6.96E+00	6.85E+00	6.26E+00
1.50E-01	8.80E+00	8.81E+00	8.86E+00	8.95E+00	9.06E+00	8.93E+00	8.25E+00
2.00E-01	1.06E+01	1.05E+01	1.05E+01	1.06E+01	1.07E+01	1.07E+01	9.88E+00
3.00E-01	1.33E+01	1.32E+01	1.33E+01	1.34E+01	1.34E+01	1.34E+01	1.25E+01

(続く)

表 A.4.2.3 (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
5.00E-01	1.66E+01	1.66E+01	1.67E+01	1.69E+01	1.72E+01	1.73E+01	1.66E+01
7.00E-01	1.96E+01	1.96E+01	1.97E+01	1.99E+01	2.01E+01	2.03E+01	1.95E+01
9.00E-01	2.26E+01	2.26E+01	2.27E+01	2.29E+01	2.31E+01	2.32E+01	2.23E+01
1.00E+00	2.77E+01	2.77E+01	2.76E+01	2.75E+01	2.74E+01	2.72E+01	2.57E+01
1.20E+00	2.59E+01	2.59E+01	2.60E+01	2.61E+01	2.61E+01	2.63E+01	2.54E+01
1.50E+00	2.80E+01	2.79E+01	2.81E+01	2.81E+01	2.81E+01	2.84E+01	2.77E+01
2.00E+00	3.12E+01	3.12E+01	3.12E+01	3.15E+01	3.17E+01	3.12E+01	3.06E+01
3.00E+00	3.12E+01	3.17E+01	3.25E+01	3.42E+01	3.58E+01	3.65E+01	3.66E+01
4.00E+00	2.97E+01	3.02E+01	3.15E+01	3.40E+01	3.69E+01	3.92E+01	4.17E+01
5.00E+00	2.59E+01	2.65E+01	2.82E+01	3.08E+01	3.45E+01	3.80E+01	4.16E+01
6.00E+00	2.37E+01	2.46E+01	2.61E+01	2.93E+01	3.30E+01	3.76E+01	4.14E+01
7.00E+00	2.07E+01	2.14E+01	2.30E+01	2.66E+01	3.10E+01	3.59E+01	4.15E+01
8.00E+00	2.03E+01	2.08E+01	2.24E+01	2.52E+01	3.01E+01	3.57E+01	4.08E+01
9.00E+00	2.13E+01	2.17E+01	2.32E+01	2.62E+01	3.12E+01	3.70E+01	4.30E+01
1.00E+01	2.17E+01	2.21E+01	2.42E+01	2.69E+01	3.17E+01	3.73E+01	4.40E+01
1.20E+01	2.47E+01	2.49E+01	2.69E+01	3.02E+01	3.47E+01	4.09E+01	4.72E+01
1.40E+01	2.40E+01	2.50E+01	2.57E+01	2.93E+01	3.44E+01	4.06E+01	4.77E+01
1.50E+01	2.57E+01	2.58E+01	2.69E+01	3.04E+01	3.52E+01	4.14E+01	4.70E+01
1.60E+01	2.53E+01	2.57E+01	2.74E+01	3.10E+01	3.56E+01	4.17E+01	4.83E+01
1.80E+01	2.47E+01	2.46E+01	2.59E+01	2.90E+01	3.31E+01	3.96E+01	4.63E+01
2.00E+01	2.45E+01	2.48E+01	2.56E+01	2.86E+01	3.38E+01	3.91E+01	4.65E+01
3.00E+01	2.61E+01	2.61E+01	2.73E+01	3.06E+01	3.33E+01	3.90E+01	4.56E+01
5.00E+01	2.02E+01	2.04E+01	2.22E+01	2.37E+01	2.79E+01	3.27E+01	3.91E+01
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
1.00E-09	6.44E-01	2.56E-01	1.51E-01	1.30E-01	1.30E-01	1.28E-01	1.27E+00
1.00E-08	4.38E-01	2.64E-01	1.80E-01	1.58E-01	1.46E-01	1.46E-01	6.63E-01
2.50E-08	3.78E-01	2.56E-01	1.91E-01	1.62E-01	1.53E-01	1.52E-01	5.08E-01
1.00E-07	2.96E-01	2.35E-01	1.94E-01	1.76E-01	1.62E-01	1.58E-01	3.41E-01
2.00E-07	2.65E-01	2.25E-01	1.94E-01	1.72E-01	1.66E-01	1.64E-01	2.88E-01
5.00E-07	2.06E-01	1.83E-01	1.62E-01	1.51E-01	1.47E-01	1.44E-01	2.14E-01
1.00E-06	1.71E-01	1.54E-01	1.36E-01	1.30E-01	1.27E-01	1.28E-01	1.72E-01
2.00E-06	1.29E-01	1.24E-01	1.17E-01	1.08E-01	1.05E-01	1.03E-01	1.33E-01
5.00E-06	1.06E-01	9.50E-02	9.12E-02	8.64E-02	8.57E-02	8.59E-02	1.03E-01
1.00E-05	8.49E-02	8.00E-02	7.61E-02	7.32E-02	7.03E-02	7.00E-02	8.13E-02
2.00E-05	6.78E-02	6.56E-02	6.24E-02	6.04E-02	5.85E-02	5.77E-02	6.71E-02
5.00E-05	5.38E-02	4.96E-02	4.70E-02	4.56E-02	4.62E-02	4.60E-02	5.25E-02
1.00E-04	4.65E-02	4.35E-02	3.95E-02	3.72E-02	3.74E-02	3.67E-02	4.63E-02
2.00E-04	4.44E-02	4.00E-02	3.50E-02	3.33E-02	3.01E-02	3.14E-02	4.25E-02
5.00E-04	5.79E-02	4.65E-02	3.66E-02	3.31E-02	3.00E-02	3.06E-02	5.59E-02
1.00E-03	8.47E-02	6.78E-02	4.65E-02	3.61E-02	3.28E-02	3.19E-02	8.70E-02
2.00E-03	1.54E-01	1.17E-01	8.00E-02	5.91E-02	5.16E-02	5.13E-02	1.57E-01
5.00E-03	3.66E-01	2.64E-01	1.88E-01	1.38E-01	1.19E-01	1.15E-01	3.72E-01
1.00E-02	7.10E-01	5.16E-01	3.66E-01	2.71E-01	2.35E-01	2.31E-01	7.20E-01
2.00E-02	1.35E+00	1.00E+00	7.20E-01	5.45E-01	4.81E-01	4.67E-01	1.37E+00
3.00E-02	1.98E+00	1.48E+00	1.08E+00	8.29E-01	7.33E-01	7.12E-01	1.98E+00
5.00E-02	3.08E+00	2.39E+00	1.74E+00	1.39E+00	1.25E+00	1.24E+00	3.07E+00
7.00E-02	4.09E+00	3.18E+00	2.42E+00	1.97E+00	1.80E+00	1.76E+00	4.04E+00
1.00E-01	5.43E+00	4.33E+00	3.38E+00	2.78E+00	2.61E+00	2.58E+00	5.32E+00
1.50E-01	7.16E+00	5.97E+00	4.81E+00	4.04E+00	3.84E+00	3.78E+00	7.08E+00

(続く)

表 A.4.2.3 (続き)

$E_p$ /MeV	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)$ /(pGy cm <sup>2</sup> )						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
2.00E-01	8.75E+00	7.35E+00	5.99E+00	5.18E+00	4.97E+00	4.89E+00	8.57E+00
3.00E-01	1.13E+01	9.75E+00	8.26E+00	7.17E+00	7.03E+00	6.89E+00	1.11E+01
5.00E-01	1.54E+01	1.37E+01	1.20E+01	1.07E+01	1.05E+01	1.04E+01	1.47E+01
7.00E-01	1.82E+01	1.66E+01	1.48E+01	1.34E+01	1.33E+01	1.30E+01	1.76E+01
9.00E-01	2.08E+01	1.90E+01	1.71E+01	1.56E+01	1.55E+01	1.53E+01	2.03E+01
1.00E+00	2.34E+01	2.07E+01	1.80E+01	1.64E+01	1.57E+01	1.55E+01	2.32E+01
1.20E+00	2.39E+01	2.20E+01	2.02E+01	1.93E+01	1.86E+01	1.85E+01	2.35E+01
1.50E+00	2.63E+01	2.46E+01	2.31E+01	2.21E+01	2.21E+01	2.18E+01	2.60E+01
2.00E+00	2.89E+01	2.76E+01	2.61E+01	2.53E+01	2.53E+01	2.54E+01	2.91E+01
3.00E+00	3.50E+01	3.38E+01	3.26E+01	3.16E+01	3.11E+01	3.11E+01	3.35E+01
4.00E+00	4.13E+01	4.01E+01	3.90E+01	3.74E+01	3.65E+01	3.58E+01	3.67E+01
5.00E+00	4.18E+01	4.19E+01	4.13E+01	3.98E+01	3.98E+01	3.98E+01	3.64E+01
6.00E+00	4.40E+01	4.42E+01	4.35E+01	4.21E+01	4.24E+01	4.15E+01	3.68E+01
7.00E+00	4.43E+01	4.53E+01	4.52E+01	4.41E+01	4.48E+01	4.46E+01	3.63E+01
8.00E+00	4.53E+01	4.74E+01	4.75E+01	4.71E+01	4.67E+01	4.62E+01	3.69E+01
9.00E+00	4.85E+01	5.09E+01	5.22E+01	5.01E+01	5.02E+01	4.88E+01	3.91E+01
1.00E+01	4.88E+01	5.18E+01	5.34E+01	5.24E+01	5.27E+01	5.27E+01	4.02E+01
1.20E+01	5.28E+01	5.68E+01	5.81E+01	5.73E+01	5.49E+01	5.53E+01	4.37E+01
1.40E+01	5.29E+01	5.75E+01	6.14E+01	6.02E+01	6.06E+01	5.91E+01	4.48E+01
1.50E+01	5.31E+01	5.90E+01	6.18E+01	6.29E+01	6.29E+01	6.11E+01	4.58E+01
1.60E+01	5.40E+01	5.93E+01	6.16E+01	6.28E+01	6.35E+01	6.32E+01	4.63E+01
1.80E+01	5.28E+01	5.73E+01	6.13E+01	6.30E+01	6.38E+01	6.39E+01	4.51E+01
2.00E+01	5.33E+01	5.87E+01	6.26E+01	6.39E+01	6.64E+01	6.45E+01	4.57E+01
3.00E+01	5.35E+01	6.05E+01	6.48E+01	7.04E+01	6.57E+01	7.08E+01	4.70E+01
5.00E+01	4.67E+01	5.42E+01	6.19E+01	6.79E+01	7.07E+01	7.39E+01	4.28E+01

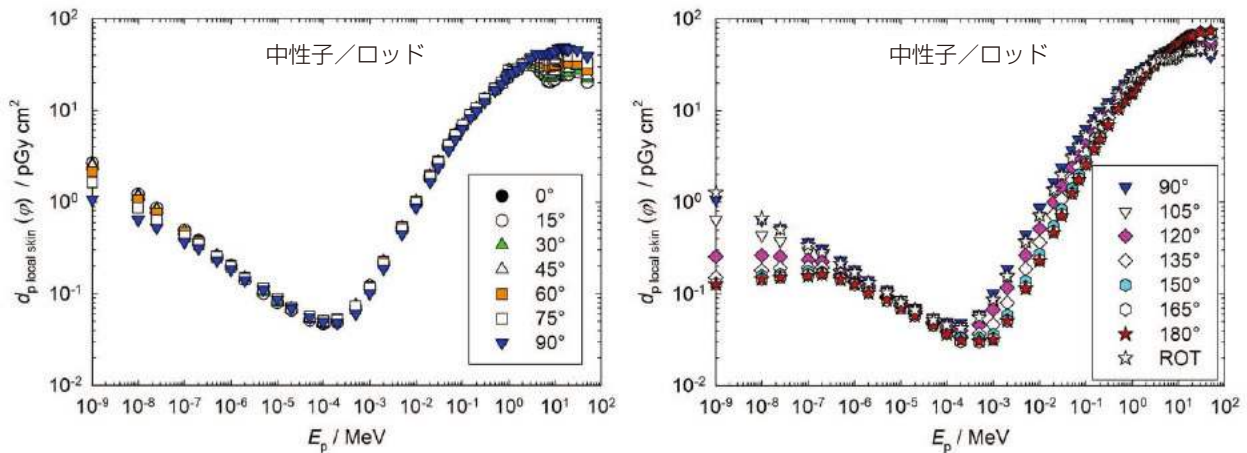


図 A.4.2.3 中性子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数 (Veinot *et al.*, 2020)

表 A.4.3.1 電子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>18</sup>

$E_p / \text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{local skin}}(\varphi) / (\text{pGy cm}^2)$					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
0.01	1.18E-03	1.24E-03	1.25E-03	9.98E-04	5.93E-04	2.30E-04
0.02	4.21E-03	4.27E-03	4.39E-03	2.92E-03	2.05E-03	9.30E-04
0.05	1.62E-02	1.97E-02	1.41E-02	1.25E-02	7.51E-03	3.77E-03
0.06	1.39E+01	1.16E+01	6.29E+00	2.13E+00	5.02E-01	8.94E-02
0.07	2.22E+02	1.92E+02	1.26E+02	6.01E+01	1.93E+01	3.52E+00
0.08	6.63E+02	5.94E+02	4.23E+02	2.31E+02	8.93E+01	2.00E+01
0.09	1.10E+03	1.00E+03	7.53E+02	4.45E+02	1.96E+02	5.05E+01
0.1	1.40E+03	1.30E+03	1.03E+03	6.53E+02	3.11E+02	8.91E+01
0.11	1.51E+03	1.42E+03	1.17E+03	7.91E+02	4.07E+02	1.25E+02
0.12	1.49E+03	1.42E+03	1.22E+03	8.67E+02	4.73E+02	1.56E+02
0.15	1.21E+03	1.20E+03	1.14E+03	9.22E+02	5.67E+02	2.05E+02
0.2	8.43E+02	8.73E+02	9.29E+02	8.67E+02	6.00E+02	2.34E+02
0.3	5.44E+02	5.67E+02	6.40E+02	7.23E+02	6.20E+02	2.64E+02
0.5	3.86E+02	3.98E+02	4.38E+02	5.15E+02	5.91E+02	3.20E+02
1	3.07E+02	3.12E+02	3.34E+02	3.70E+02	4.53E+02	4.31E+02
2	2.78E+02	2.82E+02	2.94E+02	3.19E+02	3.69E+02	4.74E+02
5	2.69E+02	2.69E+02	2.75E+02	2.89E+02	3.26E+02	3.96E+02
10	2.67E+02	2.70E+02	2.73E+02	2.80E+02	3.02E+02	3.61E+02
20	2.71E+02	2.71E+02	2.74E+02	2.78E+02	2.91E+02	3.39E+02
30	2.72E+02	2.74E+02	2.76E+02	2.78E+02	2.86E+02	3.25E+02
50	2.73E+02	2.75E+02	2.77E+02	2.78E+02	2.85E+02	3.11E+02

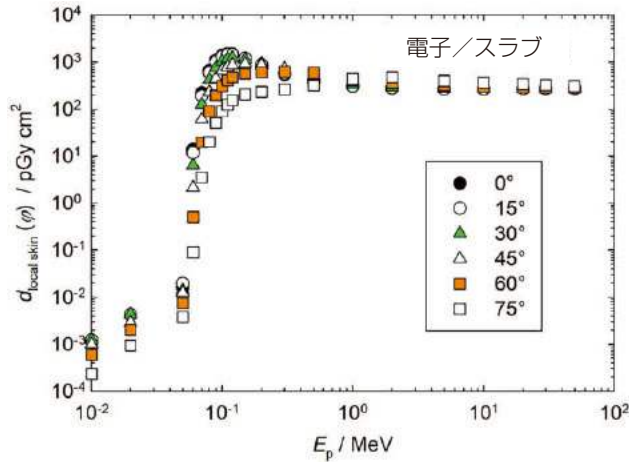


図 A.4.3.1 電子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>18</sup>

<sup>18</sup> J. Daures, J. Gouriou, and J.-M. Bordy (2017). *Personal communication* (Laboratoire National Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette, Cedex France).

表 A.4.3.2 電子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>19</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.05	1.90E-02	2.00E-02	1.62E-02	1.17E-02	7.53E-03	3.42E-03	3.52E-04
0.055	7.57E-01	6.18E-01	3.19E-01	1.03E-01	2.72E-02	7.17E-03	7.04E-04
0.06	2.20E+01	1.85E+01	1.06E+01	4.11E+00	1.08E+00	1.71E-01	7.78E-03
0.065	1.12E+02	9.64E+01	6.14E+01	2.80E+01	8.82E+00	1.70E+00	8.78E-02
0.07	2.75E+02	2.42E+02	1.64E+02	8.31E+01	2.96E+01	6.61E+00	3.79E-01
0.075	4.84E+02	4.33E+02	3.05E+02	1.65E+02	6.46E+01	1.57E+01	9.96E-01
0.08	7.11E+02	6.42E+02	4.67E+02	2.66E+02	1.11E+02	2.96E+01	1.98E+00
0.085	9.39E+02	8.55E+02	6.38E+02	3.78E+02	1.66E+02	4.67E+01	3.33E+00
0.09	1.14E+03	1.05E+03	8.00E+02	4.90E+02	2.25E+02	6.62E+01	4.91E+00
0.1	1.38E+03	1.29E+03	1.04E+03	6.78E+02	3.37E+02	1.08E+02	8.48E+00
0.11	1.44E+03	1.37E+03	1.14E+03	7.93E+02	4.22E+02	1.45E+02	1.21E+01
0.12	1.41E+03	1.35E+03	1.16E+03	8.50E+02	4.78E+02	1.73E+02	1.49E+01
0.15	1.16E+03	1.15E+03	1.09E+03	8.85E+02	5.53E+02	2.19E+02	2.02E+01
0.2	8.20E+02	8.47E+02	8.88E+02	8.33E+02	5.90E+02	2.51E+02	2.38E+01
0.3	5.81E+02	6.03E+02	6.67E+02	7.10E+02	5.82E+02	2.68E+02	2.62E+01
0.5	4.12E+02	4.25E+02	4.66E+02	5.41E+02	5.56E+02	3.11E+02	3.20E+01
1	3.20E+02	3.27E+02	3.49E+02	3.94E+02	4.73E+02	3.88E+02	5.06E+01
2	2.86E+02	2.89E+02	3.02E+02	3.30E+02	3.91E+02	4.51E+02	9.82E+01
5	2.73E+02	2.75E+02	2.79E+02	2.90E+02	3.22E+02	4.40E+02	2.78E+02
10	2.72E+02	2.73E+02	2.75E+02	2.79E+02	2.89E+02	3.40E+02	4.33E+02
20	2.72E+02	2.73E+02	2.74E+02	2.77E+02	2.81E+02	2.93E+02	3.49E+02
50	2.72E+02	2.72E+02	2.74E+02	2.76E+02	2.79E+02	2.85E+02	3.01E+02
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.73E-03
0.055	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.21E-01
0.06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.79E+00
0.065	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.10E+01
0.07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.53E+01
0.075	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.02E+02
0.08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.56E+02
0.085	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.13E+02
0.09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.67E+02
0.1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.46E+02
0.11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.83E+02
0.12	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.94E+02
0.15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.75E+02
0.2	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.20E+02
0.3	3.50E-04	1.00E-04	1.39E-04	2.04E-04	3.09E-04	9.97E-04	2.62E+02
0.5	1.86E-03	3.49E-04	2.67E-04	1.13E-04	2.53E-04	1.22E-03	2.11E+02
1	6.52E-03	4.89E-03	2.85E-03	2.04E-03	5.05E-03	1.58E-03	1.78E+02
2	2.13E-01	3.03E-02	1.79E-02	1.72E-02	1.43E-02	1.58E-02	1.67E+02
5	2.44E+01	1.04E+00	2.23E-01	2.36E-01	2.41E-01	2.21E-01	1.71E+02
10	2.03E+02	7.43E+01	1.60E+01	2.29E+00	9.93E-01	1.08E+00	1.94E+02
20	3.23E+02	3.09E+02	2.82E+02	2.45E+02	2.14E+02	2.01E+02	2.80E+02
50	3.06E+02	3.15E+02	3.21E+02	3.24E+02	3.25E+02	3.24E+02	2.98E+02

<sup>19</sup> T. Otto (2020). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

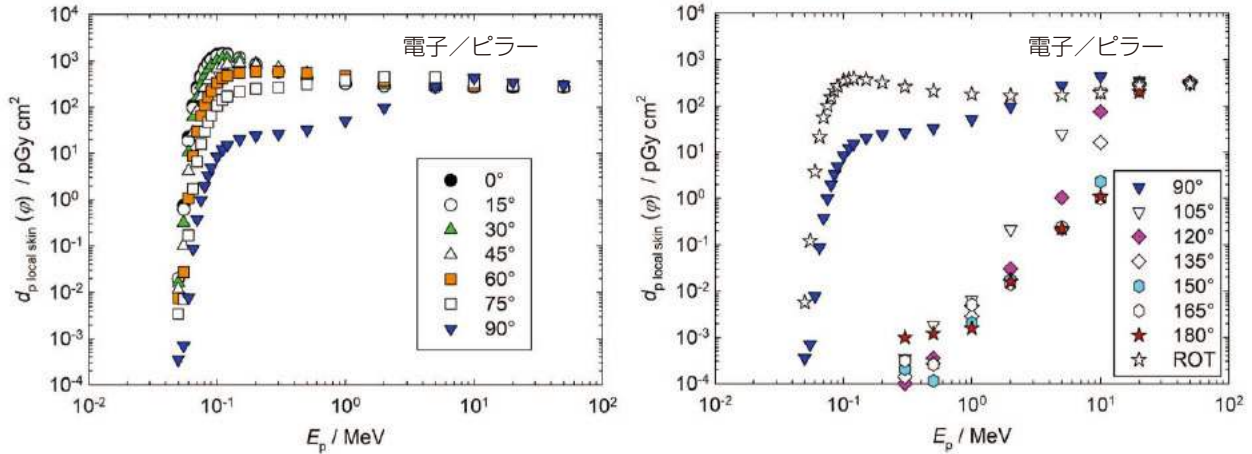


図 A.4.3.2 電子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>20</sup>

表 A.4.3.3 電子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>20</sup>

$E_p / \text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi) / (\text{pGy cm}^2)$							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.05	1.90E-02	1.83E-02	1.63E-02	1.29E-02	8.66E-03	4.65E-03	1.86E-03	
0.055	7.84E-01	6.88E-01	4.54E-01	2.19E-01	7.71E-02	2.07E-02	4.15E-03	
0.06	1.93E+01	1.71E+01	1.18E+01	6.19E+00	2.38E+00	6.52E-01	1.19E-01	
0.065	9.66E+01	8.67E+01	6.24E+01	3.53E+01	1.54E+01	4.87E+00	1.04E+00	
0.07	2.39E+02	2.17E+02	1.61E+02	9.64E+01	4.53E+01	1.59E+01	3.82E+00	
0.075	4.26E+02	3.89E+02	2.95E+02	1.84E+02	9.14E+01	3.46E+01	9.02E+00	
0.08	6.33E+02	5.82E+02	4.49E+02	2.88E+02	1.49E+02	5.93E+01	1.65E+01	
0.085	8.44E+02	7.80E+02	6.12E+02	4.02E+02	2.15E+02	8.88E+01	2.58E+01	
0.09	1.04E+03	9.63E+02	7.65E+02	5.13E+02	2.82E+02	1.20E+02	3.63E+01	
0.1	1.29E+03	1.21E+03	9.86E+02	6.90E+02	3.99E+02	1.81E+02	5.84E+01	
0.11	1.37E+03	1.29E+03	1.08E+03	7.89E+02	4.78E+02	2.28E+02	7.73E+01	
0.12	1.35E+03	1.29E+03	1.11E+03	8.32E+02	5.22E+02	2.59E+02	9.16E+01	
0.15	1.14E+03	1.11E+03	1.01E+03	8.24E+02	5.61E+02	3.02E+02	1.15E+02	
0.2	8.34E+02	8.38E+02	8.23E+02	7.30E+02	5.42E+02	3.16E+02	1.30E+02	
0.3	5.62E+02	5.80E+02	6.14E+02	6.00E+02	4.92E+02	3.19E+02	1.45E+02	
0.5	4.02E+02	4.15E+02	4.53E+02	4.82E+02	4.34E+02	3.13E+02	1.66E+02	
1	3.14E+02	3.20E+02	3.44E+02	3.87E+02	3.90E+02	3.17E+02	2.02E+02	
2	2.82E+02	2.85E+02	2.95E+02	3.28E+02	3.68E+02	3.44E+02	2.66E+02	
5	2.71E+02	2.71E+02	2.74E+02	2.81E+02	3.05E+02	3.30E+02	3.41E+02	
10	2.71E+02	2.72E+02	2.73E+02	2.76E+02	2.84E+02	2.93E+02	3.00E+02	
20	2.72E+02	2.73E+02	2.74E+02	2.76E+02	2.80E+02	2.86E+02	2.91E+02	
50	2.72E+02	2.72E+02	2.73E+02	2.75E+02	2.78E+02	2.82E+02	2.87E+02	
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT	
0.05	4.25E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.08E-03	
0.055	7.32E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.09E-04	1.55E-01	
0.06	1.24E-02	1.53E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.00E+00	
0.065	1.19E-01	1.28E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.12E+01	

(続く)

<sup>20</sup> T. Otto (2020). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.3.3 (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.07	4.81E-01	5.72E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.50E+01
0.075	1.25E+00	1.48E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.01E+02
0.08	2.41E+00	2.88E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.55E+02
0.085	4.01E+00	5.24E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.12E+02
0.09	5.80E+00	7.80E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.67E+02
0.1	9.96E+00	1.39E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.48E+02
0.11	1.39E+01	2.18E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.87E+02
0.12	1.72E+01	2.80E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.00E+02
0.15	2.31E+01	4.38E-01	1.69E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.77E+02
0.2	2.79E+01	6.57E-01	7.56E-04	4.15E-04	1.72E-04	2.15E-04	3.19E+02
0.3	3.42E+01	1.08E+00	4.41E-04	5.53E-04	6.36E-04	6.42E-04	2.55E+02
0.5	4.63E+01	2.32E+00	1.70E-03	1.13E-03	9.15E-04	9.53E-04	2.09E+02
1	7.85E+01	8.79E+00	1.38E-01	6.64E-03	6.25E-03	5.64E-03	1.84E+02
2	1.53E+02	4.72E+01	9.21E+00	1.14E+00	1.14E-01	8.30E-02	1.86E+02
5	3.32E+02	2.95E+02	2.53E+02	2.20E+02	1.97E+02	1.89E+02	2.77E+02
10	3.06E+02	3.06E+02	3.06E+02	3.07E+02	3.07E+02	3.08E+02	2.93E+02
20	2.97E+02	3.01E+02	3.05E+02	3.08E+02	3.10E+02	3.11E+02	2.91E+02
50	2.93E+02	2.99E+02	3.04E+02	3.09E+02	3.12E+02	3.13E+02	2.90E+02

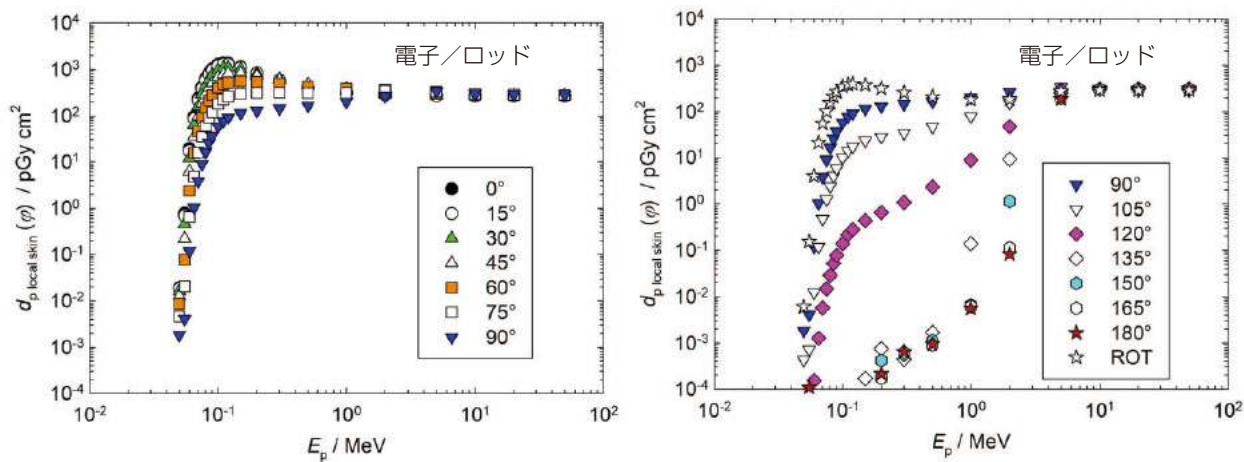


図 A.4.3.3 電子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>21</sup>

<sup>21</sup> T. Otto (2020). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.4.1 陽電子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>22</sup>

$E_p / \text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p \text{ local skin}}(\varphi) / (\text{pGy cm}^2)$					
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$
0.01	1.17E+01	1.11E+01	9.91E+00	7.59E+00	4.89E+00	2.02E+00
0.02	1.17E+01	1.11E+01	9.90E+00	7.55E+00	4.85E+00	2.02E+00
0.05	1.20E+01	1.11E+01	9.94E+00	7.70E+00	5.25E+00	1.91E+00
0.06	2.60E+01	2.35E+01	1.59E+01	9.71E+00	5.29E+00	2.03E+00
0.07	2.34E+02	2.04E+02	1.36E+02	6.79E+01	2.40E+01	5.53E+00
0.08	6.75E+02	6.04E+02	4.34E+02	2.39E+02	9.43E+01	2.21E+01
0.09	1.11E+03	1.01E+03	7.63E+02	4.53E+02	2.00E+02	5.24E+01
0.1	1.41E+03	1.31E+03	1.04E+03	6.60E+02	3.16E+02	9.12E+01
0.11	1.52E+03	1.43E+03	1.18E+03	7.99E+02	4.12E+02	1.28E+02
0.12	1.50E+03	1.44E+03	1.23E+03	8.75E+02	4.79E+02	1.58E+02
0.15	1.23E+03	1.22E+03	1.15E+03	9.31E+02	5.72E+02	2.08E+02
0.2	8.54E+02	8.83E+02	9.38E+02	8.73E+02	6.04E+02	2.36E+02
0.3	5.55E+02	5.77E+02	6.51E+02	7.31E+02	6.24E+02	2.66E+02
0.5	3.96E+02	4.07E+02	4.46E+02	5.20E+02	5.97E+02	3.22E+02
1	3.15E+02	3.20E+02	3.42E+02	3.77E+02	4.58E+02	4.33E+02
2	2.85E+02	2.88E+02	3.00E+02	3.23E+02	3.73E+02	4.76E+02
5	2.73E+02	2.73E+02	2.80E+02	2.93E+02	3.29E+02	3.97E+02
10	2.71E+02	2.74E+02	2.74E+02	2.82E+02	3.05E+02	3.63E+02
20	2.72E+02	2.73E+02	2.75E+02	2.80E+02	2.92E+02	3.39E+02
30	2.72E+02	2.75E+02	2.77E+02	2.78E+02	2.86E+02	3.27E+02
50	2.73E+02	2.75E+02	2.76E+02	2.78E+02	2.86E+02	3.10E+02

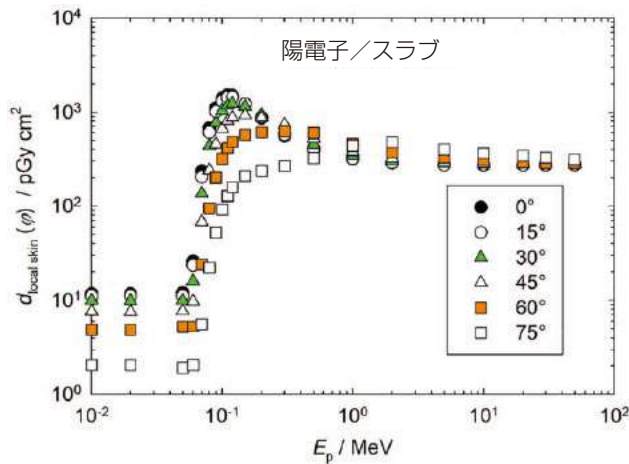


図 A.4.4.1 陽電子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>22</sup>

<sup>22</sup> J. Daures, J. Gouriou, and J.-M. Bordy (2017). *Personal communication* (Laboratoire National Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette, Cedex France).

表 A.4.4.2 陽電子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>23</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.005	1.01E+01	9.90E+00	9.04E+00	7.13E+00	5.21E+00	3.16E+00	1.36E+00
0.01	1.05E+01	1.01E+01	8.97E+00	7.18E+00	5.28E+00	3.08E+00	1.51E+00
0.02	1.06E+01	1.04E+01	9.26E+00	7.61E+00	5.40E+00	3.07E+00	1.55E+00
0.04	1.06E+01	1.06E+01	9.31E+00	7.21E+00	5.14E+00	3.28E+00	1.26E+00
0.05	1.09E+01	1.08E+01	9.50E+00	7.39E+00	5.22E+00	2.93E+00	1.38E+00
0.06	2.81E+01	2.48E+01	1.75E+01	1.05E+01	6.23E+00	3.00E+00	1.32E+00
0.065	1.06E+02	9.28E+01	6.08E+01	3.06E+01	1.24E+01	4.46E+00	1.33E+00
0.07	2.58E+02	2.27E+02	1.55E+02	8.02E+01	3.06E+01	8.43E+00	1.58E+00
0.075	4.60E+02	4.11E+02	2.90E+02	1.57E+02	6.28E+01	1.68E+01	2.31E+00
0.08	6.84E+02	6.17E+02	4.48E+02	2.54E+02	1.07E+02	2.95E+01	3.18E+00
0.085	9.12E+02	8.30E+02	6.17E+02	3.63E+02	1.60E+02	4.57E+01	4.32E+00
0.09	1.12E+03	1.03E+03	7.82E+02	4.77E+02	2.18E+02	6.47E+01	5.91E+00
0.1	1.39E+03	1.30E+03	1.03E+03	6.73E+02	3.32E+02	1.06E+02	9.34E+00
0.11	1.46E+03	1.39E+03	1.15E+03	7.96E+02	4.20E+02	1.43E+02	1.29E+01
0.12	1.43E+03	1.38E+03	1.18E+03	8.60E+02	4.80E+02	1.73E+02	1.60E+01
0.15	1.19E+03	1.18E+03	1.11E+03	9.03E+02	5.63E+02	2.23E+02	2.16E+01
0.2	8.38E+02	8.62E+02	9.03E+02	8.46E+02	5.99E+02	2.55E+02	2.54E+01
0.3	5.88E+02	6.11E+02	6.72E+02	7.15E+02	5.85E+02	2.70E+02	2.72E+01
0.5	4.14E+02	4.27E+02	4.67E+02	5.39E+02	5.54E+02	3.09E+02	3.30E+01
1	3.21E+02	3.27E+02	3.48E+02	3.91E+02	4.66E+02	3.84E+02	5.11E+01
2	2.87E+02	2.90E+02	3.01E+02	3.27E+02	3.85E+02	4.46E+02	9.92E+01
5	2.74E+02	2.75E+02	2.79E+02	2.89E+02	3.18E+02	4.32E+02	2.76E+02
10	2.73E+02	2.73E+02	2.74E+02	2.78E+02	2.87E+02	3.34E+02	4.22E+02
20	2.72E+02	2.73E+02	2.74E+02	2.77E+02	2.80E+02	2.91E+02	3.44E+02
50	2.72E+02	2.73E+02	2.74E+02	2.76E+02	2.80E+02	2.84E+02	2.98E+02
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.005	9.83E-01	7.16E-01	5.98E-01	7.67E-01	5.72E-01	5.01E-01	3.73E+00
0.01	1.02E+00	7.38E-01	7.15E-01	5.01E-01	7.23E-01	6.69E-01	3.78E+00
0.02	9.96E-01	7.40E-01	6.96E-01	5.42E-01	5.97E-01	6.10E-01	3.87E+00
0.04	9.60E-01	9.00E-01	6.24E-01	5.70E-01	5.00E-01	6.01E-01	3.83E+00
0.05	9.49E-01	7.33E-01	6.46E-01	6.12E-01	6.05E-01	4.93E-01	3.87E+00
0.06	9.12E-01	6.29E-01	5.98E-01	5.89E-01	5.25E-01	4.68E-01	6.74E+00
0.065	8.38E-01	7.56E-01	5.79E-01	5.37E-01	6.27E-01	4.93E-01	2.16E+01
0.07	8.94E-01	6.30E-01	7.37E-01	6.09E-01	5.97E-01	6.44E-01	5.30E+01
0.075	8.36E-01	7.11E-01	7.94E-01	6.00E-01	5.93E-01	5.60E-01	9.79E+01
0.08	9.43E-01	7.59E-01	7.00E-01	6.17E-01	4.81E-01	5.36E-01	1.50E+02
0.085	9.28E-01	7.44E-01	5.48E-01	7.14E-01	7.06E-01	4.60E-01	2.07E+02
0.09	9.66E-01	6.23E-01	6.29E-01	6.47E-01	5.84E-01	6.09E-01	2.62E+02
0.1	8.78E-01	7.23E-01	6.49E-01	5.52E-01	4.86E-01	8.47E-01	3.46E+02
0.11	9.13E-01	7.50E-01	7.72E-01	5.38E-01	6.18E-01	5.89E-01	3.87E+02
0.12	8.18E-01	7.98E-01	7.32E-01	6.11E-01	5.65E-01	6.63E-01	4.01E+02
0.15	8.97E-01	7.43E-01	6.78E-01	6.67E-01	6.23E-01	5.30E-01	3.84E+02
0.2	7.66E-01	6.39E-01	6.34E-01	5.00E-01	6.27E-01	7.27E-01	3.26E+02
0.3	8.80E-01	7.39E-01	6.63E-01	6.58E-01	6.16E-01	5.42E-01	2.65E+02
0.5	1.07E+00	7.90E-01	5.95E-01	6.59E-01	5.30E-01	4.43E-01	2.12E+02
1	1.01E+00	9.46E-01	7.67E-01	7.17E-01	5.99E-01	6.85E-01	1.78E+02
2	1.34E+00	9.81E-01	8.88E-01	8.79E-01	7.67E-01	7.35E-01	1.66E+02
5	2.61E+01	2.71E+00	1.67E+00	1.53E+00	1.48E+00	1.64E+00	1.70E+02
10	1.99E+02	7.68E+01	1.93E+01	4.77E+00	3.23E+00	3.24E+00	1.92E+02
20	3.15E+02	3.00E+02	2.73E+02	2.39E+02	2.11E+02	1.99E+02	2.76E+02
50	2.99E+02	3.02E+02	3.05E+02	3.05E+02	3.04E+02	3.04E+02	2.91E+02

<sup>23</sup> T. Otto (2020). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

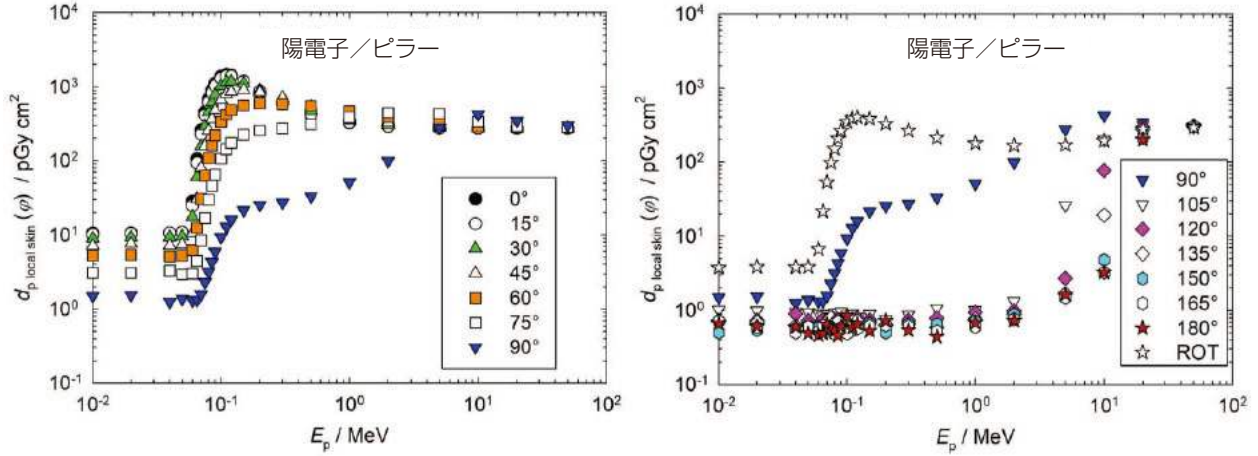


図 A.4.4.2 陽電子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>24</sup>

表 A.4.4.3 陽電子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>24</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.005	8.08E+00	7.79E+00	7.03E+00	5.88E+00	4.43E+00	3.07E+00	2.05E+00	
0.01	7.96E+00	7.76E+00	7.12E+00	6.00E+00	4.73E+00	3.41E+00	2.26E+00	
0.02	8.11E+00	7.95E+00	7.26E+00	6.12E+00	4.72E+00	3.25E+00	2.12E+00	
0.04	8.24E+00	8.05E+00	7.40E+00	6.26E+00	4.70E+00	3.16E+00	2.02E+00	
0.05	8.29E+00	7.94E+00	7.14E+00	5.91E+00	4.39E+00	3.12E+00	2.07E+00	
0.06	2.45E+01	2.24E+01	1.71E+01	1.12E+01	6.36E+00	3.47E+00	2.01E+00	
0.065	9.17E+01	8.28E+01	6.08E+01	3.62E+01	1.74E+01	7.10E+00	2.85E+00	
0.07	2.25E+02	2.04E+02	1.52E+02	9.24E+01	4.47E+01	1.70E+01	5.33E+00	
0.075	4.06E+02	3.70E+02	2.81E+02	1.76E+02	8.79E+01	3.42E+01	1.00E+01	
0.08	6.10E+02	5.60E+02	4.33E+02	2.77E+02	1.44E+02	5.82E+01	1.72E+01	
0.085	8.21E+02	7.58E+02	5.93E+02	3.89E+02	2.08E+02	8.66E+01	2.61E+01	
0.09	1.02E+03	9.47E+02	7.51E+02	5.02E+02	2.75E+02	1.18E+02	3.65E+01	
0.1	1.29E+03	1.21E+03	9.83E+02	6.85E+02	3.95E+02	1.79E+02	5.84E+01	
0.11	1.39E+03	1.31E+03	1.10E+03	7.95E+02	4.79E+02	2.28E+02	7.75E+01	
0.12	1.38E+03	1.31E+03	1.12E+03	8.43E+02	5.28E+02	2.61E+02	9.29E+01	
0.15	1.16E+03	1.14E+03	1.04E+03	8.39E+02	5.71E+02	3.06E+02	1.17E+02	
0.2	8.48E+02	8.53E+02	8.37E+02	7.43E+02	5.52E+02	3.23E+02	1.34E+02	
0.3	5.65E+02	5.83E+02	6.17E+02	6.03E+02	4.95E+02	3.21E+02	1.47E+02	
0.5	4.02E+02	4.15E+02	4.53E+02	4.81E+02	4.33E+02	3.13E+02	1.66E+02	
1	3.13E+02	3.19E+02	3.41E+02	3.83E+02	3.85E+02	3.13E+02	2.00E+02	
2	2.79E+02	2.82E+02	2.93E+02	3.24E+02	3.63E+02	3.40E+02	2.63E+02	
5	2.70E+02	2.71E+02	2.72E+02	2.78E+02	2.99E+02	3.21E+02	3.29E+02	
10	2.70E+02	2.71E+02	2.72E+02	2.74E+02	2.81E+02	2.88E+02	2.94E+02	
20	2.71E+02	2.71E+02	2.72E+02	2.74E+02	2.78E+02	2.83E+02	2.87E+02	
50	2.71E+02	2.72E+02	2.73E+02	2.75E+02	2.78E+02	2.82E+02	2.86E+02	
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT	
0.005	1.39E+00	1.13E+00	1.12E+00	1.06E+00	1.02E+00	1.06E+00	3.38E+00	
0.01	1.63E+00	1.26E+00	1.13E+00	1.24E+00	1.34E+00	1.36E+00	3.55E+00	
0.02	1.35E+00	1.07E+00	9.70E-01	9.49E-01	1.02E+00	1.00E+00	3.44E+00	

(続く)

<sup>24</sup> T. Otto (2020). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.4.3 (続き)

$E_p$ /MeV	入射角度 $\varphi$ における $d_{p \text{ local skin}}(\varphi)$ /(pGy cm <sup>2</sup> )						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.04	1.40E+00	1.16E+00	1.14E+00	1.01E+00	8.95E-01	9.26E-01	3.48E+00
0.05	1.50E+00	1.23E+00	9.94E-01	8.43E-01	7.36E-01	7.49E-01	3.36E+00
0.06	1.34E+00	1.14E+00	1.05E+00	9.70E-01	9.23E-01	9.19E-01	6.72E+00
0.065	1.55E+00	1.21E+00	1.13E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.15E+00	2.16E+01
0.07	1.78E+00	1.15E+00	1.04E+00	9.32E-01	9.12E-01	9.06E-01	5.29E+01
0.075	2.54E+00	1.17E+00	1.06E+00	9.74E-01	8.92E-01	9.17E-01	9.74E+01
0.08	3.56E+00	1.14E+00	1.08E+00	1.11E+00	1.10E+00	1.09E+00	1.50E+02
0.085	5.08E+00	1.12E+00	9.57E-01	9.43E-01	9.73E-01	9.89E-01	2.07E+02
0.09	6.81E+00	1.13E+00	1.02E+00	1.24E+00	1.56E+00	1.64E+00	2.63E+02
0.1	1.11E+01	1.28E+00	1.11E+00	9.82E-01	8.72E-01	9.71E-01	3.47E+02
0.11	1.47E+01	1.18E+00	8.52E-01	7.46E-01	6.90E-01	6.45E-01	3.92E+02
0.12	1.85E+01	1.73E+00	1.25E+00	1.11E+00	9.58E-01	9.71E-01	4.06E+02
0.15	2.44E+01	1.47E+00	1.10E+00	1.12E+00	1.16E+00	1.19E+00	3.85E+02
0.2	2.96E+01	1.68E+00	8.91E-01	8.88E-01	8.70E-01	8.25E-01	3.25E+02
0.3	3.57E+01	2.19E+00	1.05E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.14E+00	2.58E+02
0.5	4.77E+01	3.65E+00	1.27E+00	1.32E+00	1.27E+00	1.18E+00	2.10E+02
1	7.92E+01	1.05E+01	1.64E+00	1.32E+00	1.05E+00	9.01E-01	1.83E+02
2	1.53E+02	4.86E+01	1.10E+01	2.72E+00	1.50E+00	1.47E+00	1.85E+02
5	3.19E+02	2.83E+02	2.46E+02	2.15E+02	1.95E+02	1.87E+02	2.71E+02
10	2.96E+02	2.94E+02	2.90E+02	2.88E+02	2.87E+02	2.86E+02	2.84E+02
20	2.90E+02	2.92E+02	2.94E+02	2.96E+02	2.97E+02	2.97E+02	2.85E+02
50	2.90E+02	2.95E+02	2.99E+02	3.03E+02	3.05E+02	3.06E+02	2.87E+02

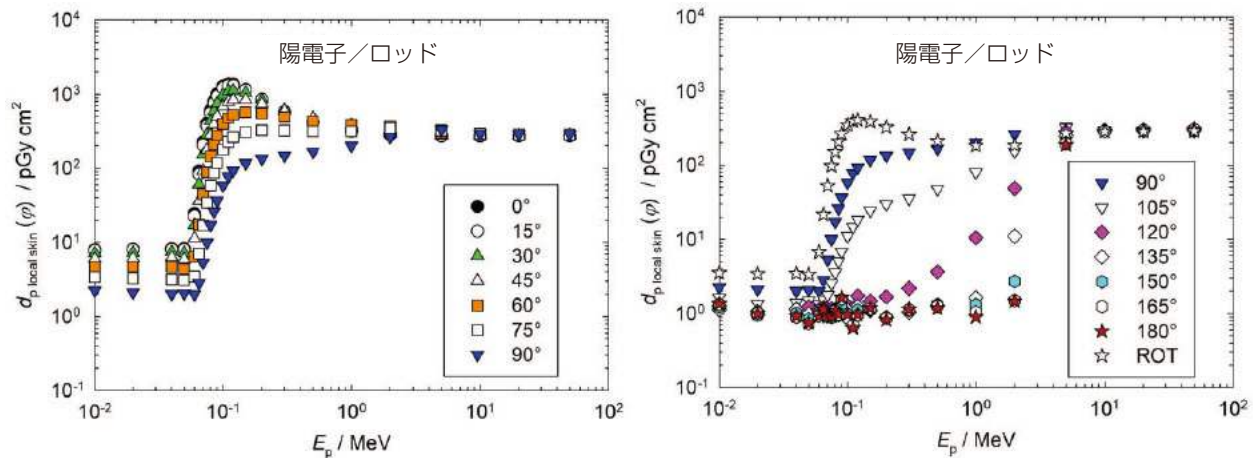


図 A.4.4.3 陽電子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>25</sup>

<sup>25</sup> T. Otto (2020). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.4.5 垂直に入射する (0°) アルファ粒子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚の方向性および個人吸収線量への換算係数 (ICRP, 2010)

$E_p$ /MeV	垂直入射 (0°) における $d_{local\ skin}$ /(pGy cm <sup>2</sup> )
6.5	1.11E+03
6.8	2.56E+04
7.0	4.20E+04
7.5	7.52E+04
8.0	1.03E+05
8.5	1.28E+05
9.0	1.50E+05
9.5	1.72E+05
10.0	1.80E+05

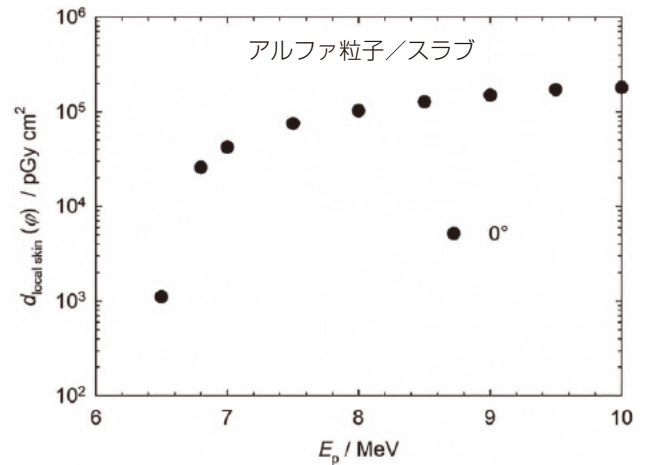


図 A.4.5 垂直に入射する (0°) アルファ粒子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚の方向性および個人吸収線量への換算係数 (ICRP, 2010)

A.5 荷電粒子平衡状態の放射線場における 50 MeV 未満のエネルギーの光子の実用量

周辺線量, 個人線量, 方向性水晶体吸収線量, 個人水晶体吸収線量, 方向性局所皮膚吸収線量, 個人局所皮膚吸収線量を測定するための光子放射線のエリアモニタリング機器と個人線量計の校正は, 試験を行う点において完全な荷電粒子平衡の状態にするため, 機器の前に十分な材料を置いて空気中で日常的に行われる (5.3 節参照)。ここで示す換算係数の計算には, 荷電粒子平衡が成立する場合の吸収線量を近似するためカーマ近似が用いられている。

全身に関するデータ: 表 A.5.1a と図 A.5.1a は光子フルエンスから周辺線量への換算係数, 表 A.5.1b と図 A.5.1b は空気カーマから周辺線量への換算係数, 表 A.5.2a と図 A.5.2a は光子フルエンスから個人線量への

換算係数, 表 A.5.2b と図 A.5.2b は空気カーマから個人線量への換算係数である。

眼の水晶体に関するデータ: 表 A.5.3a と図 A.5.3a は, 光子フルエンスから方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量への換算係数, 表 A.5.3b と図 A.5.3b は空気カーマから方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量への換算係数である (表 A.5.0 参照)。

局所皮膚に関するデータ: 表 A.5.4.1a, 表 A.5.4.2a, 表 A.5.4.3a および 図 A.5.4.1a, 図 A.5.4.2a, 図 A.5.4.3a は光子フルエンスから方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量への換算係数, 表 A.5.4.1b, 表 A.5.4.2b, 表 A.5.4.3b および 図 A.5.4.1b, 図 A.5.4.2b, 図 A.5.4.3b は空気カーマから方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量への換算係数である。

表 A.5.0 カーマ近似法で算出した光子の換算係数

表/図	物理量	実用量	ファントム	エネルギー範囲 (MeV)
A.5.1a A.5.1b	フルエンス 空気カーマ	周辺線量 $H^*$	ICRU/ICRP 人体模擬ファントム	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01
A.5.2a A.5.2b	フルエンス 空気カーマ	個人線量 $H_p$		
A.5.3a A.5.3b	フルエンス 空気カーマ	水晶体吸収線量 $d_{lens}$	眼のモデル (Behrens and Dietze, 2011)	5.0 E-03 ~ 5.0 E+01
A.5.4.1a A.5.4.1b	フルエンス 空気カーマ	局所皮膚吸収線量 $d_{skin}$	スラブ	1.0 E-02 ~ 5.0 E+01
A.5.4.2a A.5.4.2b	フルエンス 空気カーマ		ピラー	
A.5.4.3a A.5.4.3b	フルエンス 空気カーマ		ロッド	

表 A.5.1a カーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスから周辺線量への換算係数 (Endo, 2017)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{pSv cm}^2)$
1.00E-02	6.75E-02
1.50E-02	1.53E-01
2.00E-02	2.22E-01
3.00E-02	3.10E-01
4.00E-02	3.45E-01
5.00E-02	3.64E-01
6.00E-02	3.85E-01
7.00E-02	4.11E-01
8.00E-02	4.43E-01
1.00E-01	5.19E-01
1.50E-01	7.48E-01
2.00E-01	9.98E-01
3.00E-01	1.50E+00
4.00E-01	2.00E+00
5.00E-01	2.46E+00
6.00E-01	2.91E+00
8.00E-01	3.73E+00
1.00E+ 00	4.49E+00
1.50E+00	6.13E+00
2.00E+00	7.54E+00
3.00E+00	9.98E+00
4.00E+00	1.21E+01
5.00E+00	1.42E+01
6.00E+00	1.61E+01
8.00E+00	1.99E+01
1.00E+01	2.37E+01
1.50E+01	3.33E+01
2.00E+01	4.32E+01
3.00E+01	6.41E+01
4.00E+01	8.63E+01
5.00E+01	1.09E+02

表 A.5.1b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマから周辺線量への換算係数 (Endo, 2017)

$E_p/\text{MeV}$	$h^*/(\text{Sv Gy}^{-1})$
1.0E-02	9.12E-03
1.5E-02	4.89E-02
2.0E-02	1.32E-01
3.0E-02	4.30E-01
4.0E-02	8.05E-01
5.0E-02	1.13E+00
6.0E-02	1.33E+00
7.0E-02	1.43E+00
8.0E-02	1.44E+00
1.0E-01	1.40E+00
1.5E-01	1.25E+00
2.0E-01	1.16E+00
3.0E-01	1.09E+00
4.0E-01	1.06E+00
5.0E-01	1.04E+00
6.0E-01	1.02E+00
8.0E-01	1.01E+00
1.0E+ 00	1.00E+00
1.5E+00	9.98E-01
2.0E+00	9.97E-01
3.0E+00	1.00E+00
4.0E+00	1.00E+00
5.0E+00	1.00E+00
6.0E+00	9.97E-01
8.0E+00	9.89E-01
1.0E+01	9.82E-01
1.5E+01	9.65E-01
2.0E+01	9.52E-01
3.0E+01	9.34E-01
4.0E+01	9.25E-01
5.0E+01	9.17E-01

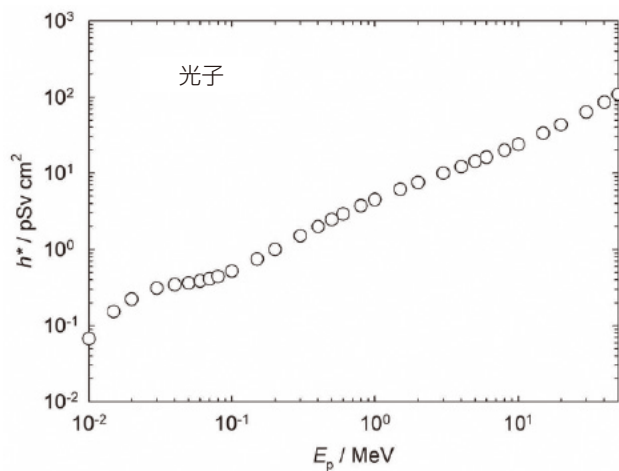


図 A.5.1a カーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスから周辺線量への換算係数 (Endo, 2017)

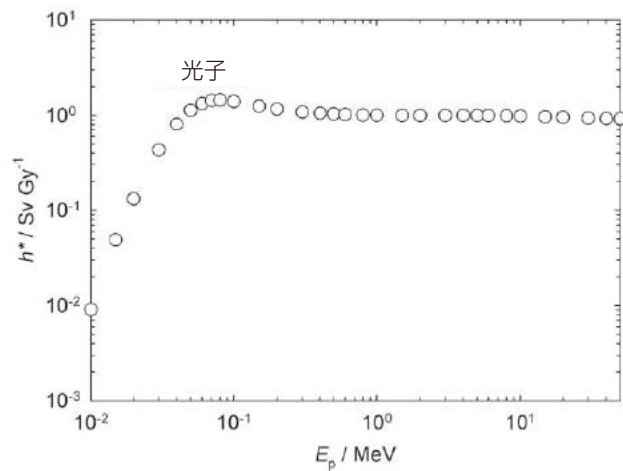


図 A.5.1b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマから周辺線量への換算係数 (Endo, 2017)

表 A.5.2a コーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017)

$E_p / \text{MeV}$	$h_p(\varphi) / (\text{pSv cm}^2)$											
	$0^\circ$	avg( $\pm 15^\circ$ )	avg( $\pm 30^\circ$ )	avg( $\pm 45^\circ$ )	avg( $\pm 60^\circ$ )	avg( $\pm 75^\circ$ )	avg( $\pm 90^\circ$ )	$180^\circ$	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E-02	6.75E-02	6.68E-02	6.13E-02	5.26E-02	4.24E-02	3.06E-02	1.83E-02	1.80E-02	3.31E-02	2.90E-02	2.94E-02	2.76E-02
1.5E-02	1.53E-01	1.50E-01	1.39E-01	1.19E-01	9.29E-02	6.41E-02	3.91E-02	1.53E-02	6.57E-02	5.45E-02	5.63E-02	5.33E-02
2.0E-02	2.22E-01	2.17E-01	2.03E-01	1.80E-01	1.42E-01	9.70E-02	5.96E-02	2.65E-02	9.97E-02	8.04E-02	8.00E-02	7.73E-02
3.0E-02	3.10E-01	3.05E-01	2.87E-01	2.55E-01	2.10E-01	1.52E-01	9.63E-02	9.61E-02	1.58E-01	1.24E-01	1.27E-01	1.22E-01
4.0E-02	3.45E-01	3.41E-01	3.22E-01	2.87E-01	2.41E-01	1.84E-01	1.23E-01	1.62E-01	1.97E-01	1.57E-01	1.60E-01	1.51E-01
5.0E-02	3.64E-01	3.60E-01	3.41E-01	3.07E-01	2.61E-01	2.03E-01	1.43E-01	2.07E-01	2.22E-01	1.78E-01	1.82E-01	1.72E-01
6.0E-02	3.85E-01	3.82E-01	3.62E-01	3.27E-01	2.81E-01	2.22E-01	1.59E-01	2.40E-01	2.44E-01	1.97E-01	2.01E-01	1.91E-01
7.0E-02	4.11E-01	4.07E-01	3.85E-01	3.51E-01	3.04E-01	2.42E-01	1.76E-01	2.71E-01	2.67E-01	2.16E-01	2.21E-01	2.11E-01
8.0E-02	4.43E-01	4.37E-01	4.16E-01	3.80E-01	3.30E-01	2.64E-01	1.94E-01	3.01E-01	2.95E-01	2.37E-01	2.43E-01	2.28E-01
1.0E-01	5.19E-01	5.12E-01	4.87E-01	4.50E-01	3.93E-01	3.19E-01	2.36E-01	3.61E-01	3.50E-01	2.85E-01	2.94E-01	2.76E-01
1.5E-01	7.48E-01	7.40E-01	7.11E-01	6.58E-01	5.82E-01	4.81E-01	3.65E-01	5.39E-01	5.21E-01	4.31E-01	4.44E-01	4.17E-01
2.0E-01	9.98E-01	9.91E-01	9.54E-01	8.91E-01	7.97E-01	6.68E-01	5.13E-01	7.35E-01	7.15E-01	5.94E-01	6.07E-01	5.72E-01
3.0E-01	1.50E+00	1.49E+00	1.45E+00	1.37E+00	1.24E+00	1.06E+00	8.33E-01	1.15E+00	1.11E+00	9.34E-01	9.64E-01	9.06E-01
4.0E-01	2.00E+00	1.98E+00	1.93E+00	1.83E+00	1.68E+00	1.46E+00	1.16E+00	1.57E+00	1.51E+00	1.28E+00	1.32E+00	1.25E+00
5.0E-01	2.46E+00	2.45E+00	2.39E+00	2.28E+00	2.10E+00	1.85E+00	1.50E+00	1.98E+00	1.90E+00	1.64E+00	1.68E+00	1.58E+00
6.0E-01	2.91E+00	2.89E+00	2.83E+00	2.71E+00	2.51E+00	2.23E+00	1.84E+00	2.37E+00	2.29E+00	1.98E+00	2.02E+00	1.91E+00
8.0E-01	3.73E+00	3.72E+00	3.65E+00	3.50E+00	3.29E+00	2.96E+00	2.48E+00	3.12E+00	3.01E+00	2.63E+00	2.69E+00	2.57E+00
1.0E+00	4.49E+00	4.47E+00	4.40E+00	4.24E+00	4.01E+00	3.64E+00	3.09E+00	3.82E+00	3.70E+00	3.25E+00	3.33E+00	3.18E+00
1.5E+00	6.13E+00	6.11E+00	6.03E+00	5.86E+00	5.60E+00	5.18E+00	4.52E+00	5.38E+00	5.22E+00	4.68E+00	4.77E+00	4.58E+00
2.0E+00	7.54E+00	7.52E+00	7.43E+00	7.26E+00	6.98E+00	6.52E+00	5.80E+00	6.75E+00	6.57E+00	5.95E+00	6.05E+00	5.83E+00
3.0E+00	9.98E+00	9.97E+00	9.86E+00	9.67E+00	9.36E+00	8.88E+00	8.05E+00	9.10E+00	8.90E+00	8.18E+00	8.32E+00	8.03E+00
4.0E+00	1.21E+01	1.21E+01	1.20E+01	1.18E+01	1.15E+01	1.09E+01	1.01E+01	1.12E+01	1.10E+01	1.02E+01	1.03E+01	1.00E+01
5.0E+00	1.42E+01	1.41E+01	1.40E+01	1.38E+01	1.34E+01	1.29E+01	1.20E+01	1.31E+01	1.29E+01	1.20E+01	1.22E+01	1.19E+01
6.0E+00	1.61E+01	1.61E+01	1.59E+01	1.57E+01	1.53E+01	1.47E+01	1.38E+01	1.50E+01	1.47E+01	1.38E+01	1.40E+01	1.36E+01
8.0E+00	1.99E+01	1.99E+01	1.97E+01	1.94E+01	1.90E+01	1.83E+01	1.72E+01	1.86E+01	1.83E+01	1.73E+01	1.75E+01	1.71E+01
1.0E+01	2.37E+01	2.36E+01	2.35E+01	2.31E+01	2.26E+01	2.19E+01	2.07E+01	2.22E+01	2.19E+01	2.07E+01	2.10E+01	2.05E+01
1.5E+01	3.33E+01	3.32E+01	3.30E+01	3.25E+01	3.18E+01	3.08E+01	2.93E+01	3.12E+01	3.09E+01	2.93E+01	2.96E+01	2.90E+01
2.0E+01	4.32E+01	4.31E+01	4.28E+01	4.22E+01	4.14E+01	4.01E+01	3.81E+01	4.05E+01	4.02E+01	3.82E+01	3.85E+01	3.77E+01
3.0E+01	6.41E+01	6.39E+01	6.35E+01	6.26E+01	6.13E+01	5.94E+01	5.65E+01	6.00E+01	5.96E+01	5.66E+01	5.72E+01	5.60E+01
4.0E+01	8.63E+01	8.61E+01	8.55E+01	8.42E+01	8.25E+01	7.99E+01	7.61E+01	8.08E+01	8.02E+01	7.62E+01	7.70E+01	7.54E+01
5.0E+01	1.09E+02	1.09E+02	1.08E+02	1.07E+02	1.05E+02	1.01E+02	9.63E+01	1.02E+02	1.02E+02	9.64E+01	9.75E+01	9.55E+01

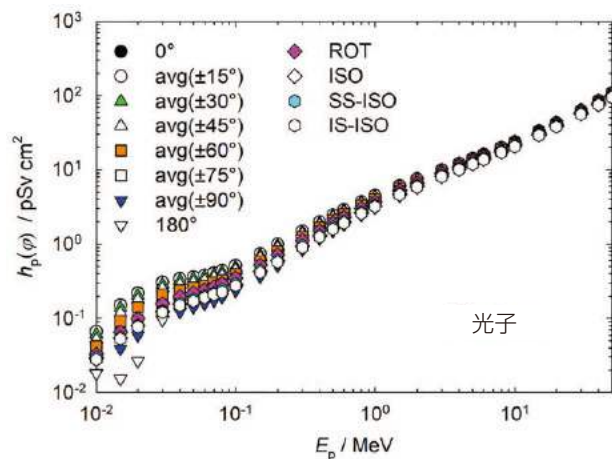


図 A.5.2a コーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスから個人線量への換算係数 (Endo, 2017)

表 A.5.2b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマから個人線量への換算係数 (Endo, 2017)

$E_p/\text{MeV}$	$h_p(\varphi)/(\text{Sv Gy}^{-1})$											
	0°	avg(±15°)	avg(±30°)	avg(±45°)	avg(±60°)	avg(±75°)	avg(±90°)	180°	ROT	ISO	SS-ISO	IS-ISO
1.0E-02	9.12E-03	9.03E-03	8.28E-03	7.11E-03	5.73E-03	4.14E-03	2.47E-03	2.44E-03	4.47E-03	3.91E-03	3.98E-03	3.73E-03
1.5E-02	4.89E-02	4.80E-02	4.43E-02	3.81E-02	2.97E-02	2.05E-02	1.25E-02	4.90E-03	2.10E-02	1.74E-02	1.80E-02	1.71E-02
2.0E-02	1.32E-01	1.29E-01	1.21E-01	1.07E-01	8.44E-02	5.76E-02	3.54E-02	1.57E-02	5.92E-02	4.77E-02	4.75E-02	4.59E-02
3.0E-02	4.30E-01	4.23E-01	3.98E-01	3.53E-01	2.91E-01	2.10E-01	1.33E-01	1.33E-01	2.19E-01	1.72E-01	1.76E-01	1.69E-01
4.0E-02	8.05E-01	7.95E-01	7.52E-01	6.69E-01	5.62E-01	4.30E-01	2.87E-01	3.79E-01	4.60E-01	3.65E-01	3.74E-01	3.51E-01
5.0E-02	1.13E+00	1.11E+00	1.06E+00	9.52E-01	8.10E-01	6.29E-01	4.42E-01	6.40E-01	6.87E-01	5.52E-01	5.65E-01	5.33E-01
6.0E-02	1.33E+00	1.32E+00	1.25E+00	1.13E+00	9.73E-01	7.67E-01	5.49E-01	8.30E-01	8.44E-01	6.82E-01	6.96E-01	6.62E-01
7.0E-02	1.43E+00	1.41E+00	1.34E+00	1.22E+00	1.06E+00	8.40E-01	6.10E-01	9.41E-01	9.28E-01	7.49E-01	7.70E-01	7.32E-01
8.0E-02	1.44E+00	1.43E+00	1.36E+00	1.24E+00	1.08E+00	8.60E-01	6.34E-01	9.83E-01	9.62E-01	7.74E-01	7.93E-01	7.45E-01
1.0E-01	1.40E+00	1.38E+00	1.31E+00	1.21E+00	1.06E+00	8.59E-01	6.36E-01	9.71E-01	9.42E-01	7.67E-01	7.90E-01	7.44E-01
1.5E-01	1.25E+00	1.23E+00	1.19E+00	1.10E+00	9.70E-01	8.03E-01	6.09E-01	8.99E-01	8.69E-01	7.19E-01	7.41E-01	6.95E-01
2.0E-01	1.16E+00	1.16E+00	1.11E+00	1.04E+00	9.30E-01	7.80E-01	5.99E-01	8.58E-01	8.34E-01	6.93E-01	7.08E-01	6.68E-01
3.0E-01	1.09E+00	1.08E+00	1.05E+00	9.88E-01	8.96E-01	7.66E-01	6.02E-01	8.34E-01	8.06E-01	6.75E-01	6.97E-01	6.55E-01
4.0E-01	1.06E+00	1.05E+00	1.02E+00	9.68E-01	8.87E-01	7.70E-01	6.15E-01	8.29E-01	7.99E-01	6.79E-01	6.98E-01	6.59E-01
5.0E-01	1.04E+00	1.03E+00	1.00E+00	9.57E-01	8.84E-01	7.77E-01	6.31E-01	8.32E-01	8.01E-01	6.88E-01	7.04E-01	6.64E-01
6.0E-01	1.02E+00	1.02E+00	9.95E-01	9.52E-01	8.83E-01	7.85E-01	6.46E-01	8.35E-01	8.04E-01	6.95E-01	7.10E-01	6.72E-01
8.0E-01	1.01E+00	1.01E+00	9.86E-01	9.47E-01	8.88E-01	8.00E-01	6.70E-01	8.44E-01	8.13E-01	7.10E-01	7.25E-01	6.94E-01
1.0E+00	1.00E+00	9.99E-01	9.83E-01	9.47E-01	8.95E-01	8.13E-01	6.90E-01	8.52E-01	8.25E-01	7.25E-01	7.42E-01	7.10E-01
1.5E+00	9.98E-01	9.94E-01	9.80E-01	9.53E-01	9.11E-01	8.43E-01	7.35E-01	8.76E-01	8.50E-01	7.61E-01	7.76E-01	7.46E-01
2.0E+00	9.97E-01	9.95E-01	9.84E-01	9.61E-01	9.24E-01	8.63E-01	7.67E-01	8.93E-01	8.69E-01	7.87E-01	8.01E-01	7.71E-01
3.0E+00	1.00E+00	9.99E-01	9.89E-01	9.69E-01	9.39E-01	8.90E-01	8.07E-01	9.12E-01	8.92E-01	8.20E-01	8.34E-01	8.05E-01
4.0E+00	1.00E+00	9.98E-01	9.90E-01	9.72E-01	9.44E-01	9.01E-01	8.30E-01	9.20E-01	9.03E-01	8.39E-01	8.51E-01	8.25E-01
5.0E+00	1.00E+00	9.97E-01	9.89E-01	9.72E-01	9.47E-01	9.08E-01	8.43E-01	9.24E-01	9.08E-01	8.50E-01	8.61E-01	8.37E-01
6.0E+00	9.97E-01	9.94E-01	9.86E-01	9.71E-01	9.47E-01	9.10E-01	8.51E-01	9.26E-01	9.11E-01	8.56E-01	8.66E-01	8.43E-01
8.0E+00	9.89E-01	9.87E-01	9.80E-01	9.66E-01	9.43E-01	9.10E-01	8.56E-01	9.24E-01	9.10E-01	8.61E-01	8.70E-01	8.48E-01
1.0E+01	9.82E-01	9.80E-01	9.73E-01	9.59E-01	9.38E-01	9.07E-01	8.57E-01	9.19E-01	9.07E-01	8.59E-01	8.68E-01	8.48E-01
1.5E+01	9.65E-01	9.63E-01	9.57E-01	9.43E-01	9.24E-01	8.95E-01	8.50E-01	9.06E-01	8.96E-01	8.51E-01	8.60E-01	8.42E-01
2.0E+01	9.52E-01	9.50E-01	9.44E-01	9.30E-01	9.12E-01	8.83E-01	8.40E-01	8.93E-01	8.85E-01	8.41E-01	8.50E-01	8.32E-01
3.0E+01	9.34E-01	9.32E-01	9.26E-01	9.13E-01	8.94E-01	8.66E-01	8.24E-01	8.75E-01	8.69E-01	8.25E-01	8.34E-01	8.16E-01
4.0E+01	9.25E-01	9.23E-01	9.16E-01	9.03E-01	8.84E-01	8.57E-01	8.16E-01	8.66E-01	8.60E-01	8.16E-01	8.26E-01	8.09E-01
5.0E+01	9.17E-01	9.15E-01	9.09E-01	8.95E-01	8.77E-01	8.49E-01	8.08E-01	8.58E-01	8.52E-01	8.09E-01	8.18E-01	8.01E-01

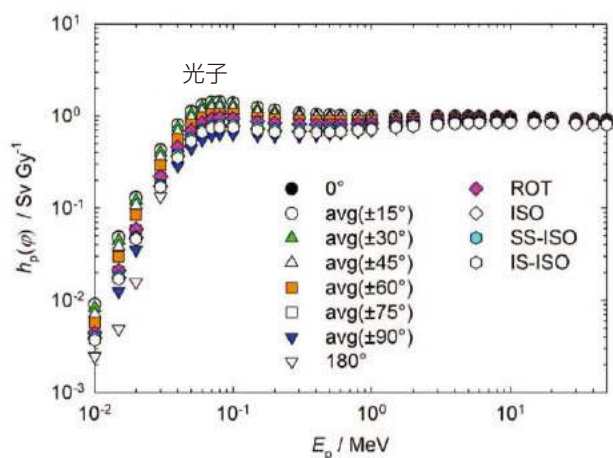


図 A.5.2b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマから個人線量への換算係数 (Endo, 2017)

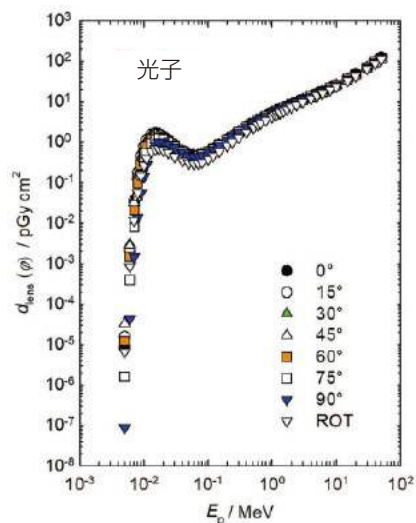


図 A.5.3a カーマ近似法を用いて算出した左右の照射に対する光子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

表 A.5.3a カーマ近似法を用いて算出した左右の照射に対する光子フルエンスから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.005	8.43E-06	1.56E-05	3.25E-05	3.23E-05	1.20E-05	1.59E-06	8.80E-08	6.67E-06
0.006	2.01E-03	2.34E-03	2.97E-03	2.76E-03	1.46E-03	3.83E-04	4.32E-05	8.42E-04
0.007	3.47E-02	3.55E-02	3.65E-02	3.19E-02	2.03E-02	7.95E-03	1.44E-03	1.15E-02
0.008	1.73E-01	1.72E-01	1.64E-01	1.41E-01	9.78E-02	4.72E-02	1.35E-02	5.45E-02
0.009	4.49E-01	4.40E-01	4.12E-01	3.56E-01	2.67E-01	1.51E-01	5.48E-02	1.44E-01
0.01	7.96E-01	7.78E-01	7.30E-01	6.44E-01	5.08E-01	3.22E-01	1.39E-01	2.63E-01
0.011	1.12E+00	1.10E+00	1.04E+00	9.34E-01	7.72E-01	5.36E-01	2.70E-01	3.87E-01
0.013	1.54E+00	1.52E+00	1.46E+00	1.35E+00	1.19E+00	9.34E-01	5.79E-01	5.75E-01
0.015	1.65E+00	1.63E+00	1.58E+00	1.50E+00	1.38E+00	1.16E+00	8.29E-01	6.60E-01
0.017	1.58E+00	1.57E+00	1.54E+00	1.48E+00	1.39E+00	1.23E+00	9.58E-01	6.73E-01
0.02	1.38E+00	1.38E+00	1.36E+00	1.32E+00	1.27E+00	1.17E+00	9.82E-01	6.28E-01
0.024	1.11E+00	1.12E+00	1.11E+00	1.09E+00	1.06E+00	9.99E-01	8.87E-01	5.46E-01
0.03	8.32E-01	8.36E-01	8.39E-01	8.32E-01	8.11E-01	7.78E-01	7.17E-01	4.41E-01
0.04	5.87E-01	5.95E-01	5.96E-01	5.96E-01	5.90E-01	5.71E-01	5.35E-01	3.40E-01
0.05	4.88E-01	4.90E-01	4.98E-01	4.99E-01	4.95E-01	4.79E-01	4.53E-01	2.98E-01
0.06	4.55E-01	4.56E-01	4.64E-01	4.67E-01	4.62E-01	4.46E-01	4.27E-01	2.86E-01
0.07	4.56E-01	4.62E-01	4.66E-01	4.67E-01	4.64E-01	4.52E-01	4.34E-01	2.95E-01
0.08	4.81E-01	4.87E-01	4.91E-01	4.90E-01	4.88E-01	4.78E-01	4.60E-01	3.15E-01
0.1	5.59E-01	5.62E-01	5.72E-01	5.71E-01	5.65E-01	5.59E-01	5.41E-01	3.77E-01
0.12	6.64E-01	6.67E-01	6.73E-01	6.74E-01	6.72E-01	6.66E-01	6.44E-01	4.52E-01
0.15	8.35E-01	8.39E-01	8.46E-01	8.50E-01	8.45E-01	8.39E-01	8.19E-01	5.81E-01
0.2	1.13E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.17E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.13E+00	8.17E-01
0.24	1.38E+00	1.39E+00	1.40E+00	1.41E+00	1.39E+00	1.38E+00	1.37E+00	1.00E+00
0.3	1.74E+00	1.74E+00	1.76E+00	1.79E+00	1.75E+00	1.75E+00	1.73E+00	1.29E+00
0.4	2.30E+00	2.34E+00	2.34E+00	2.37E+00	2.34E+00	2.32E+00	2.29E+00	1.75E+00
0.5	2.82E+00	2.85E+00	2.88E+00	2.93E+00	2.90E+00	2.84E+00	2.85E+00	2.21E+00
0.511	2.88E+00	2.90E+00	2.94E+00	2.99E+00	2.96E+00	2.90E+00	2.91E+00	2.25E+00
0.6	3.33E+00	3.35E+00	3.39E+00	3.45E+00	3.42E+00	3.35E+00	3.36E+00	2.64E+00
0.662	3.63E+00	3.65E+00	3.69E+00	3.77E+00	3.72E+00	3.65E+00	3.65E+00	2.91E+00
0.8	4.24E+00	4.28E+00	4.30E+00	4.39E+00	4.38E+00	4.28E+00	4.29E+00	3.46E+00
1	5.08E+00	5.10E+00	5.15E+00	5.25E+00	5.23E+00	5.13E+00	5.12E+00	4.21E+00
1.117	5.54E+00	5.57E+00	5.63E+00	5.69E+00	5.68E+00	5.55E+00	5.56E+00	4.63E+00
1.2	5.83E+00	5.91E+00	5.94E+00	5.99E+00	5.96E+00	5.89E+00	5.88E+00	4.92E+00
1.3	6.20E+00	6.21E+00	6.27E+00	6.37E+00	6.36E+00	6.22E+00	6.25E+00	5.24E+00
1.33	6.29E+00	6.31E+00	6.37E+00	6.46E+00	6.44E+00	6.34E+00	6.34E+00	5.36E+00
1.5	6.88E+00	6.90E+00	6.92E+00	7.04E+00	7.05E+00	6.86E+00	6.90E+00	5.86E+00
1.7	7.49E+00	7.53E+00	7.58E+00	7.67E+00	7.65E+00	7.49E+00	7.54E+00	6.48E+00
2	8.39E+00	8.39E+00	8.44E+00	8.56E+00	8.53E+00	8.41E+00	8.37E+00	7.25E+00
2.4	9.44E+00	9.49E+00	9.50E+00	9.63E+00	9.64E+00	9.48E+00	9.53E+00	8.33E+00
3	1.10E+01	1.10E+01	1.10E+01	1.11E+01	1.11E+01	1.10E+01	1.09E+01	9.77E+00
4	1.32E+01	1.32E+01	1.33E+01	1.33E+01	1.33E+01	1.32E+01	1.32E+01	1.19E+01
5	1.53E+01	1.53E+01	1.54E+01	1.54E+01	1.55E+01	1.53E+01	1.53E+01	1.39E+01
6	1.74E+01	1.74E+01	1.74E+01	1.75E+01	1.75E+01	1.74E+01	1.74E+01	1.59E+01
6.129	1.76E+01	1.77E+01	1.77E+01	1.78E+01	1.78E+01	1.76E+01	1.76E+01	1.61E+01
8	2.15E+01	2.14E+01	2.15E+01	2.15E+01	2.15E+01	2.14E+01	2.13E+01	1.94E+01
10	2.54E+01	2.54E+01	2.55E+01	2.54E+01	2.54E+01	2.53E+01	2.54E+01	2.35E+01
15	3.57E+01	3.58E+01	3.56E+01	3.56E+01	3.57E+01	3.55E+01	3.56E+01	3.28E+01
20	4.63E+01	4.66E+01	4.65E+01	4.66E+01	4.64E+01	4.63E+01	4.62E+01	4.30E+01
30	6.92E+01	6.91E+01	6.93E+01	6.91E+01	6.94E+01	6.91E+01	6.86E+01	6.39E+01
40	9.30E+01	9.35E+01	9.33E+01	9.28E+01	9.32E+01	9.32E+01	9.23E+01	8.63E+01
50	1.18E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.18E+02	1.18E+02	1.18E+02	1.18E+02	1.09E+02

表 A.5.3b カーマ近似法を用いて算出した左右の照射に対する光子空気カーマから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens}}(\varphi)/(\text{Gy Gy}^{-1})$							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.005	2.75E-07	5.10E-07	1.06E-06	1.05E-06	3.92E-07	5.20E-08	2.87E-09	2.18E-07
0.006	9.46E-05	1.10E-04	1.40E-04	1.30E-04	6.88E-05	1.80E-05	2.03E-06	3.96E-05
0.007	2.24E-03	2.29E-03	2.36E-03	2.06E-03	1.31E-03	5.13E-04	9.28E-05	7.45E-04
0.008	1.47E-02	1.46E-02	1.39E-02	1.19E-02	8.29E-03	4.00E-03	1.15E-03	4.62E-03
0.009	4.87E-02	4.77E-02	4.47E-02	3.86E-02	2.89E-02	1.64E-02	5.95E-03	1.56E-02
0.01	1.08E-01	1.05E-01	9.87E-02	8.71E-02	6.87E-02	4.35E-02	1.88E-02	3.56E-02
0.011	1.86E-01	1.83E-01	1.73E-01	1.55E-01	1.28E-01	8.87E-02	4.47E-02	6.41E-02
0.013	3.63E-01	3.58E-01	3.44E-01	3.19E-01	2.81E-01	2.20E-01	1.37E-01	1.36E-01
0.015	5.27E-01	5.21E-01	5.06E-01	4.81E-01	4.41E-01	3.72E-01	2.65E-01	2.11E-01
0.017	6.62E-01	6.57E-01	6.43E-01	6.21E-01	5.82E-01	5.13E-01	4.01E-01	2.82E-01
0.02	8.20E-01	8.17E-01	8.05E-01	7.84E-01	7.54E-01	6.92E-01	5.83E-01	3.73E-01
0.024	9.67E-01	9.70E-01	9.65E-01	9.50E-01	9.24E-01	8.69E-01	7.72E-01	4.75E-01
0.03	1.15E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.15E+00	1.12E+00	1.08E+00	9.94E-01	6.11E-01
0.04	1.37E+00	1.39E+00	1.39E+00	1.39E+00	1.38E+00	1.33E+00	1.25E+00	7.92E-01
0.05	1.51E+00	1.52E+00	1.54E+00	1.54E+00	1.53E+00	1.48E+00	1.40E+00	9.21E-01
0.06	1.57E+00	1.58E+00	1.61E+00	1.61E+00	1.60E+00	1.54E+00	1.48E+00	9.89E-01
0.07	1.58E+00	1.61E+00	1.62E+00	1.62E+00	1.61E+00	1.57E+00	1.51E+00	1.03E+00
0.08	1.57E+00	1.59E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.59E+00	1.56E+00	1.50E+00	1.03E+00
0.1	1.51E+00	1.51E+00	1.54E+00	1.54E+00	1.52E+00	1.50E+00	1.46E+00	1.01E+00
0.12	1.44E+00	1.45E+00	1.46E+00	1.46E+00	1.46E+00	1.45E+00	1.40E+00	9.82E-01
0.15	1.39E+00	1.40E+00	1.41E+00	1.42E+00	1.41E+00	1.40E+00	1.37E+00	9.69E-01
0.2	1.32E+00	1.33E+00	1.35E+00	1.36E+00	1.34E+00	1.34E+00	1.31E+00	9.54E-01
0.24	1.30E+00	1.31E+00	1.31E+00	1.33E+00	1.31E+00	1.30E+00	1.29E+00	9.41E-01
0.3	1.26E+00	1.26E+00	1.27E+00	1.29E+00	1.27E+00	1.26E+00	1.25E+00	9.34E-01
0.4	1.22E+00	1.23E+00	1.24E+00	1.25E+00	1.24E+00	1.23E+00	1.21E+00	9.27E-01
0.5	1.19E+00	1.20E+00	1.21E+00	1.23E+00	1.22E+00	1.19E+00	1.20E+00	9.29E-01
0.511	1.19E+00	1.19E+00	1.21E+00	1.23E+00	1.22E+00	1.19E+00	1.20E+00	9.27E-01
0.6	1.17E+00	1.18E+00	1.19E+00	1.21E+00	1.20E+00	1.18E+00	1.18E+00	9.29E-01
0.662	1.17E+00	1.17E+00	1.19E+00	1.21E+00	1.20E+00	1.17E+00	1.17E+00	9.35E-01
0.8	1.15E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.19E+00	1.18E+00	1.16E+00	1.16E+00	9.35E-01
1	1.13E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.14E+00	1.14E+00	9.39E-01
1.117	1.13E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.14E+00	1.14E+00	9.47E-01
1.2	1.13E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.16E+00	1.15E+00	1.14E+00	1.14E+00	9.52E-01
1.3	1.13E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.13E+00	1.14E+00	9.53E-01
1.33	1.12E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.13E+00	1.13E+00	9.57E-01
1.5	1.12E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.12E+00	1.12E+00	9.54E-01
1.7	1.11E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.14E+00	1.11E+00	1.12E+00	9.63E-01
2	1.11E+00	1.11E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.13E+00	1.11E+00	1.11E+00	9.60E-01
2.4	1.10E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.11E+00	1.11E+00	9.73E-01
3	1.10E+00	1.10E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.10E+00	1.09E+00	9.79E-01
4	1.09E+00	1.09E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.08E+00	1.08E+00	9.77E-01
5	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.08E+00	1.08E+00	9.80E-01
6	1.07E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.07E+00	1.08E+00	9.80E-01
6.129	1.07E+00	1.08E+00	1.07E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.07E+00	1.07E+00	9.79E-01
8	1.07E+00	1.06E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.06E+00	1.06E+00	9.66E-01
10	1.05E+00	1.05E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.05E+00	1.05E+00	1.05E+00	9.73E-01
15	1.04E+00	1.04E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.04E+00	1.03E+00	1.03E+00	9.52E-01
20	1.02E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00	9.48E-01
30	1.01E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.00E+00	9.32E-01
40	9.97E-01	1.00E+00	1.00E+00	9.94E-01	9.98E-01	9.99E-01	9.89E-01	9.26E-01
50	9.92E-01	9.99E-01	9.96E-01	9.93E-01	9.88E-01	9.91E-01	9.88E-01	9.18E-01

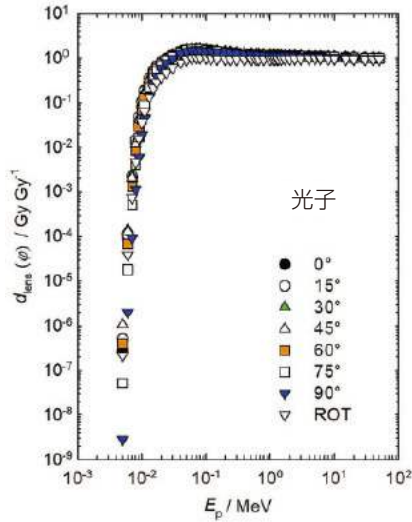


図 A.5.3b カーマ近似法を用いて算出した左右の照射に対する光子空気カーマから眼の水晶体全体の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

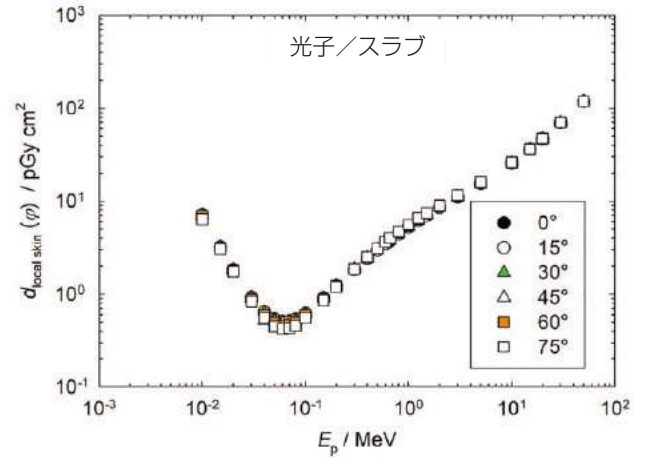


図 A.5.4.1a カーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>26</sup>

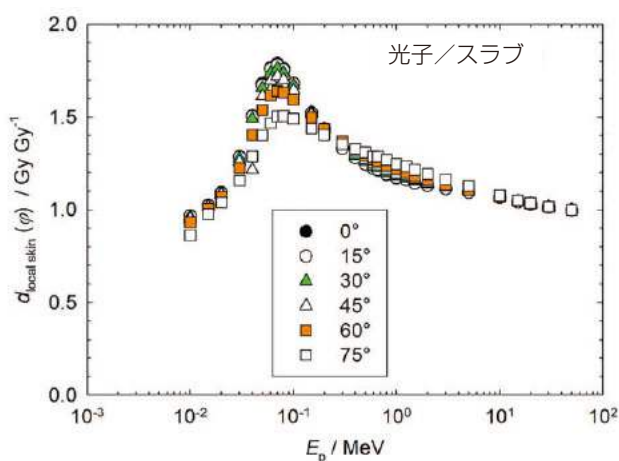
表 A.5.4.1a カーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>26</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$					
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$
0.01	7.16E+00	7.15E+00	7.13E+00	7.04E+00	6.89E+00	6.38E+00
0.015	3.20E+00	3.19E+00	3.19E+00	3.17E+00	3.14E+00	3.05E+00
0.02	1.84E+00	1.83E+00	1.83E+00	1.82E+00	1.80E+00	1.75E+00
0.03	9.28E-01	9.26E-01	9.21E-01	9.08E-01	8.83E-01	8.34E-01
0.04	6.47E-01	6.45E-01	6.40E-01	6.26E-01	6.01E-01	5.52E-01
0.05	5.43E-01	5.40E-01	5.35E-01	5.21E-01	4.97E-01	4.52E-01
0.06	5.10E-01	5.08E-01	5.02E-01	4.90E-01	4.67E-01	4.24E-01
0.07	5.15E-01	5.12E-01	5.07E-01	4.95E-01	4.72E-01	4.33E-01
0.08	5.40E-01	5.38E-01	5.33E-01	5.22E-01	5.01E-01	4.62E-01
0.1	6.25E-01	6.24E-01	6.21E-01	6.11E-01	5.92E-01	5.54E-01
0.15	9.14E-01	9.13E-01	9.15E-01	9.09E-01	8.97E-01	8.61E-01
0.2	1.23E+00	1.23E+00	1.23E+00	1.23E+00	1.23E+00	1.20E+00
0.3	1.84E+00	1.84E+00	1.86E+00	1.87E+00	1.89E+00	1.87E+00
0.4	2.42E+00	2.42E+00	2.44E+00	2.46E+00	2.50E+00	2.51E+00
0.5	2.96E+00	2.96E+00	2.99E+00	3.02E+00	3.07E+00	3.11E+00
0.6	3.47E+00	3.47E+00	3.50E+00	3.54E+00	3.61E+00	3.66E+00
0.662	3.77E+00	3.78E+00	3.81E+00	3.84E+00	3.92E+00	4.00E+00
0.8	4.40E+00	4.41E+00	4.44E+00	4.49E+00	4.58E+00	4.69E+00
1	5.24E+00	5.25E+00	5.29E+00	5.34E+00	5.45E+00	5.58E+00
1.25	6.18E+00	6.19E+00	6.23E+00	6.28E+00	6.40E+00	6.57E+00
1.5	7.03E+00	7.03E+00	7.08E+00	7.13E+00	7.26E+00	7.46E+00
2	8.55E+00	8.54E+00	8.59E+00	8.64E+00	8.79E+00	9.01E+00
3	1.11E+01	1.11E+01	1.12E+01	1.12E+01	1.13E+01	1.16E+01
5	1.55E+01	1.55E+01	1.56E+01	1.56E+01	1.57E+01	1.60E+01
10	2.57E+01	2.57E+01	2.57E+01	2.57E+01	2.58E+01	2.60E+01
15	3.60E+01	3.59E+01	3.60E+01	3.60E+01	3.61E+01	3.62E+01
20	4.67E+01	4.67E+01	4.68E+01	4.67E+01	4.69E+01	4.70E+01
30	6.96E+01	6.95E+01	6.97E+01	6.96E+01	6.97E+01	6.97E+01
50	1.19E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.19E+02

<sup>26</sup> J. Daures, J. Gouriou, and J. M. Bordy (2017). *Personal communication* (Laboratoire National Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette, Cedex France).

表 A.5.4.1b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>27</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{local skin}}(\varphi)/(\text{Gy Gy}^{-1})$					
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$
0.01	9.68E-01	9.66E-01	9.64E-01	9.51E-01	9.31E-01	8.62E-01
0.015	1.02E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.01E+00	1.00E+00	9.76E-01
0.02	1.09E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.08E+00	1.07E+00	1.04E+00
0.03	1.29E+00	1.28E+00	1.28E+00	1.26E+00	1.22E+00	1.16E+00
0.04	1.51E+00	1.50E+00	1.49E+00	1.46E+00	1.40E+00	1.29E+00
0.05	1.68E+00	1.67E+00	1.66E+00	1.61E+00	1.54E+00	1.40E+00
0.06	1.77E+00	1.76E+00	1.74E+00	1.70E+00	1.62E+00	1.47E+00
0.07	1.79E+00	1.78E+00	1.76E+00	1.72E+00	1.64E+00	1.50E+00
0.08	1.76E+00	1.75E+00	1.74E+00	1.70E+00	1.63E+00	1.51E+00
0.1	1.68E+00	1.68E+00	1.67E+00	1.65E+00	1.59E+00	1.49E+00
0.15	1.52E+00	1.52E+00	1.53E+00	1.52E+00	1.50E+00	1.44E+00
0.2	1.44E+00	1.44E+00	1.44E+00	1.44E+00	1.44E+00	1.40E+00
0.3	1.33E+00	1.33E+00	1.34E+00	1.35E+00	1.37E+00	1.35E+00
0.4	1.28E+00	1.28E+00	1.29E+00	1.30E+00	1.32E+00	1.33E+00
0.5	1.24E+00	1.24E+00	1.26E+00	1.27E+00	1.29E+00	1.31E+00
0.6	1.22E+00	1.22E+00	1.23E+00	1.24E+00	1.27E+00	1.29E+00
0.662	1.21E+00	1.21E+00	1.22E+00	1.23E+00	1.26E+00	1.29E+00
0.8	1.19E+00	1.19E+00	1.20E+00	1.21E+00	1.24E+00	1.27E+00
1	1.17E+00	1.17E+00	1.18E+00	1.19E+00	1.22E+00	1.25E+00
1.25	1.16E+00	1.16E+00	1.17E+00	1.18E+00	1.20E+00	1.23E+00
1.5	1.14E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.16E+00	1.18E+00	1.21E+00
2	1.13E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.14E+00	1.16E+00	1.19E+00
3	1.11E+00	1.11E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.16E+00
5	1.09E+00	1.09E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.11E+00	1.13E+00
10	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.08E+00
15	1.04E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.05E+00	1.05E+00
20	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.04E+00
30	1.01E+00	1.01E+00	1.02E+00	1.01E+00	1.02E+00	1.02E+00
50	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01

図 A.5.4.1b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマからスラブファントム上の局所皮膚における方向性および個人吸収線量への換算係数<sup>27</sup>

<sup>27</sup> J. Daires, J. Gouriou, and J. M. Bordy (2017). *Personal communication* (Laboratoire National Henri Becquerel, Gif-sur-Yvette, Cedex France).

表 A.5.4.2a カーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>28</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.002	2.95E+00	2.58E+00	1.67E+00	6.77E-01	1.09E-01	2.16E-03	2.33E-05
0.003	2.08E+01	1.99E+01	1.69E+01	1.20E+01	5.71E+00	8.70E-01	2.59E-03
0.004	2.62E+01	2.57E+01	2.39E+01	2.04E+01	1.43E+01	5.19E+00	9.66E-02
0.005	2.26E+01	2.24E+01	2.16E+01	1.98E+01	1.64E+01	9.14E+00	5.54E-01
0.007	1.40E+01	1.39E+01	1.38E+01	1.34E+01	1.24E+01	9.83E+00	1.84E+00
0.01	7.23E+00	7.20E+00	7.20E+00	7.12E+00	6.93E+00	6.37E+00	2.44E+00
0.015	3.22E+00	3.23E+00	3.22E+00	3.19E+00	3.17E+00	3.09E+00	1.99E+00
0.02	1.84E+00	1.85E+00	1.84E+00	1.84E+00	1.82E+00	1.78E+00	1.41E+00
0.03	9.07E-01	9.04E-01	8.99E-01	8.93E-01	8.79E-01	8.67E-01	7.70E-01
0.05	4.64E-01	4.71E-01	4.59E-01	4.68E-01	4.59E-01	4.59E-01	4.28E-01
0.07	4.22E-01	4.18E-01	4.19E-01	4.12E-01	4.13E-01	4.13E-01	3.89E-01
0.1	5.19E-01	5.14E-01	5.18E-01	5.14E-01	5.07E-01	5.12E-01	4.89E-01
0.15	7.87E-01	7.87E-01	7.86E-01	7.89E-01	7.89E-01	7.95E-01	7.69E-01
0.2	1.08E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.11E+00	1.07E+00
0.3	1.68E+00	1.67E+00	1.67E+00	1.68E+00	1.70E+00	1.72E+00	1.69E+00
0.5	2.78E+00	2.78E+00	2.77E+00	2.80E+00	2.82E+00	2.85E+00	2.85E+00
0.662	3.62E+00	3.57E+00	3.55E+00	3.61E+00	3.66E+00	3.65E+00	3.66E+00
0.7	3.77E+00	3.77E+00	3.75E+00	3.78E+00	3.85E+00	3.83E+00	3.85E+00
1	5.13E+00	5.03E+00	5.02E+00	5.06E+00	5.15E+00	5.21E+00	5.20E+00
1.25	6.00E+00	5.99E+00	5.97E+00	6.00E+00	6.07E+00	6.18E+00	6.14E+00
1.5	6.96E+00	6.86E+00	6.83E+00	6.92E+00	6.97E+00	6.98E+00	6.94E+00
2	8.38E+00	8.30E+00	8.31E+00	8.24E+00	8.36E+00	8.79E+00	8.34E+00
3	1.10E+01	1.11E+01	1.11E+01	1.09E+01	1.12E+01	1.12E+01	1.08E+01
5	1.58E+01	1.53E+01	1.51E+01	1.54E+01	1.56E+01	1.50E+01	1.55E+01
7	1.96E+01	1.94E+01	1.95E+01	1.96E+01	1.95E+01	1.93E+01	1.94E+01
10	2.56E+01	2.56E+01	2.58E+01	2.55E+01	2.51E+01	2.52E+01	2.54E+01
15	3.71E+01	3.55E+01	3.53E+01	3.65E+01	3.61E+01	3.65E+01	3.61E+01
20	4.85E+01	4.53E+01	4.67E+01	4.73E+01	4.64E+01	4.71E+01	4.71E+01
30	7.16E+01	6.92E+01	6.95E+01	7.08E+01	6.98E+01	6.95E+01	6.91E+01
50	1.20E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.22E+02	1.20E+02	1.19E+02	1.20E+02
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.002	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.43E-01
0.003	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.48E+00
0.004	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.56E+00
0.005	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.44E+00
0.007	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.01E+00
0.01	4.60E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.41E+00
0.015	1.94E-01	1.17E-02	8.12E-04	1.39E-04	2.81E-05	3.28E-05	1.64E+00
0.02	4.40E-01	1.17E-01	3.79E-02	1.71E-02	1.02E-02	7.85E-03	1.01E+00
0.03	4.61E-01	2.68E-01	1.67E-01	1.25E-01	1.02E-01	9.23E-02	5.70E-01
0.05	3.23E-01	2.35E-01	1.85E-01	1.49E-01	1.35E-01	1.41E-01	3.39E-01
0.07	3.11E-01	2.39E-01	1.96E-01	1.70E-01	1.52E-01	1.52E-01	3.18E-01
0.1	4.01E-01	3.20E-01	2.63E-01	2.35E-01	2.13E-01	2.12E-01	4.04E-01
0.15	6.47E-01	5.27E-01	4.51E-01	3.94E-01	3.67E-01	3.53E-01	6.39E-01
0.2	9.14E-01	7.48E-01	6.49E-01	5.83E-01	5.41E-01	5.37E-01	8.98E-01
0.3	1.46E+00	1.26E+00	1.12E+00	9.94E-01	9.48E-01	9.45E-01	1.43E+00
0.5	2.54E+00	2.23E+00	2.00E+00	1.88E+00	1.81E+00	1.74E+00	2.47E+00
0.662	3.33E+00	2.93E+00	2.68E+00	2.52E+00	2.45E+00	2.35E+00	3.22E+00
0.7	3.49E+00	3.11E+00	2.84E+00	2.67E+00	2.56E+00	2.51E+00	3.39E+00

(続く)

<sup>28</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.5.4.2a (続き)

$E_p$ /MeV	入射角度 $\varphi$ における $d_{p \text{ local skin}}(\varphi)$ /(pGy cm <sup>2</sup> )						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
1	4.72E+00	4.38E+00	3.93E+00	3.79E+00	3.74E+00	3.67E+00	4.64E+00
1.25	5.65E+00	5.29E+00	4.93E+00	4.71E+00	4.50E+00	4.45E+00	5.56E+00
1.5	6.53E+00	6.07E+00	5.71E+00	5.58E+00	5.36E+00	5.41E+00	6.41E+00
2	8.09E+00	7.43E+00	7.14E+00	6.83E+00	6.80E+00	6.66E+00	7.85E+00
3	1.07E+01	1.02E+01	9.51E+00	9.51E+00	9.05E+00	9.23E+00	1.04E+01
5	1.52E+01	1.46E+01	1.38E+01	1.34E+01	1.34E+01	1.34E+01	1.48E+01
7	1.87E+01	1.81E+01	1.74E+01	1.79E+01	1.70E+01	1.71E+01	1.87E+01
10	2.47E+01	2.44E+01	2.38E+01	2.28E+01	2.29E+01	2.27E+01	2.46E+01
15	3.49E+01	3.42E+01	3.32E+01	3.15E+01	3.27E+01	3.18E+01	3.48E+01
20	4.54E+01	4.47E+01	4.28E+01	4.26E+01	4.15E+01	4.19E+01	4.51E+01
30	6.64E+01	6.49E+01	6.50E+01	6.40E+01	6.41E+01	6.14E+01	6.73E+01
50	1.14E+02	1.12E+02	1.10E+02	1.06E+02	1.03E+02	1.03E+02	1.15E+02

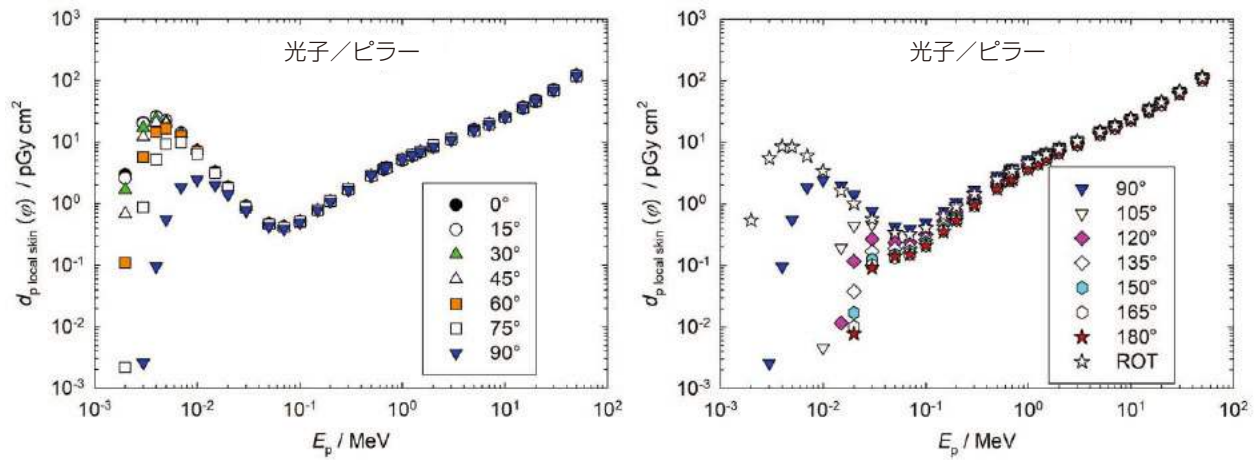


図 A.5.4.2a カーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>29</sup>

<sup>29</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.5.4.2b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>30</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{Gy Gy}^{-1})$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.002	1.80E-02	1.58E-02	1.02E-02	4.13E-03	6.67E-04	1.32E-05	1.42E-07
0.003	2.77E-01	2.64E-01	2.25E-01	1.59E-01	7.58E-02	1.15E-02	3.44E-05
0.004	5.51E-01	5.39E-01	5.01E-01	4.28E-01	3.01E-01	1.09E-01	2.03E-03
0.005	7.39E-01	7.31E-01	7.04E-01	6.47E-01	5.37E-01	2.98E-01	1.81E-02
0.007	9.02E-01	8.99E-01	8.88E-01	8.61E-01	8.02E-01	6.34E-01	1.19E-01
0.01	9.76E-01	9.73E-01	9.73E-01	9.62E-01	9.37E-01	8.61E-01	3.30E-01
0.015	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.02E+00	1.01E+00	9.90E-01	6.36E-01
0.02	1.09E+00	1.10E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.08E+00	1.06E+00	8.37E-01
0.03	1.26E+00	1.25E+00	1.25E+00	1.24E+00	1.22E+00	1.20E+00	1.07E+00
0.05	1.44E+00	1.46E+00	1.42E+00	1.45E+00	1.42E+00	1.42E+00	1.32E+00
0.07	1.47E+00	1.45E+00	1.45E+00	1.43E+00	1.43E+00	1.44E+00	1.35E+00
0.1	1.40E+00	1.38E+00	1.40E+00	1.38E+00	1.37E+00	1.38E+00	1.32E+00
0.15	1.31E+00	1.31E+00	1.31E+00	1.32E+00	1.32E+00	1.33E+00	1.28E+00
0.2	1.26E+00	1.27E+00	1.27E+00	1.27E+00	1.27E+00	1.29E+00	1.25E+00
0.3	1.21E+00	1.21E+00	1.21E+00	1.21E+00	1.23E+00	1.24E+00	1.22E+00
0.5	1.17E+00	1.17E+00	1.16E+00	1.18E+00	1.19E+00	1.20E+00	1.20E+00
0.662	1.16E+00	1.15E+00	1.14E+00	1.16E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.18E+00
0.7	1.15E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.16E+00	1.18E+00	1.17E+00	1.18E+00
1	1.14E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.15E+00	1.16E+00	1.16E+00
1.25	1.13E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.16E+00	1.15E+00
1.5	1.13E+00	1.12E+00	1.11E+00	1.13E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.13E+00
2	1.11E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.09E+00	1.11E+00	1.16E+00	1.10E+00
3	1.10E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.10E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.08E+00
5	1.12E+00	1.08E+00	1.07E+00	1.09E+00	1.10E+00	1.06E+00	1.09E+00
7	1.08E+00	1.06E+00	1.07E+00	1.08E+00	1.07E+00	1.06E+00	1.07E+00
10	1.06E+00	1.06E+00	1.07E+00	1.06E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.05E+00
15	1.08E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.06E+00	1.05E+00
20	1.07E+00	9.99E-01	1.03E+00	1.04E+00	1.02E+00	1.04E+00	1.04E+00
30	1.04E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.03E+00	1.02E+00	1.01E+00	1.01E+00
50	1.01E+00	1.00E+00	9.98E-01	1.03E+00	1.00E+00	9.95E-01	1.01E+00
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.002	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.32E-03
0.003	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.28E-02
0.004	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.80E-01
0.005	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.75E-01
0.007	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.88E-01
0.01	6.21E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.60E-01
0.015	6.21E-02	3.75E-03	2.60E-04	4.45E-05	8.99E-06	1.05E-05	5.25E-01
0.02	2.61E-01	6.97E-02	2.25E-02	1.02E-02	6.08E-03	4.66E-03	5.97E-01
0.03	6.39E-01	3.71E-01	2.32E-01	1.73E-01	1.41E-01	1.28E-01	7.89E-01
0.05	1.00E+00	7.27E-01	5.73E-01	4.60E-01	4.19E-01	4.37E-01	1.05E+00
0.07	1.08E+00	8.31E-01	6.82E-01	5.92E-01	5.28E-01	5.28E-01	1.11E+00
0.1	1.08E+00	8.63E-01	7.07E-01	6.32E-01	5.73E-01	5.71E-01	1.09E+00
0.15	1.08E+00	8.80E-01	7.53E-01	6.57E-01	6.12E-01	5.89E-01	1.07E+00
0.2	1.07E+00	8.73E-01	7.58E-01	6.81E-01	6.32E-01	6.27E-01	1.05E+00
0.3	1.05E+00	9.11E-01	8.11E-01	7.19E-01	6.86E-01	6.83E-01	1.04E+00
0.5	1.07E+00	9.38E-01	8.42E-01	7.89E-01	7.63E-01	7.33E-01	1.04E+00

(続く)

<sup>30</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.5.4.2b (続き)

$E_p$ /MeV	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)$ /(Gy Gy <sup>-1</sup> )						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.662	1.07E+00	9.41E-01	8.62E-01	8.09E-01	7.89E-01	7.55E-01	1.03E+00
0.7	1.07E+00	9.49E-01	8.68E-01	8.16E-01	7.83E-01	7.67E-01	1.03E+00
1	1.05E+00	9.78E-01	8.78E-01	8.45E-01	8.35E-01	8.18E-01	1.03E+00
1.25	1.06E+00	9.92E-01	9.25E-01	8.83E-01	8.44E-01	8.35E-01	1.04E+00
1.5	1.06E+00	9.87E-01	9.29E-01	9.08E-01	8.72E-01	8.80E-01	1.04E+00
2	1.07E+00	9.83E-01	9.45E-01	9.03E-01	8.99E-01	8.81E-01	1.04E+00
3	1.07E+00	1.02E+00	9.53E-01	9.53E-01	9.07E-01	9.25E-01	1.05E+00
5	1.07E+00	1.03E+00	9.76E-01	9.48E-01	9.46E-01	9.46E-01	1.04E+00
7	1.03E+00	9.96E-01	9.57E-01	9.81E-01	9.33E-01	9.42E-01	1.03E+00
10	1.02E+00	1.01E+00	9.85E-01	9.46E-01	9.47E-01	9.41E-01	1.02E+00
15	1.01E+00	9.94E-01	9.65E-01	9.13E-01	9.50E-01	9.24E-01	1.01E+00
20	1.00E+00	9.85E-01	9.44E-01	9.40E-01	9.15E-01	9.23E-01	9.95E-01
30	9.68E-01	9.46E-01	9.48E-01	9.33E-01	9.34E-01	8.95E-01	9.82E-01
50	9.58E-01	9.43E-01	9.19E-01	8.86E-01	8.65E-01	8.65E-01	9.62E-01

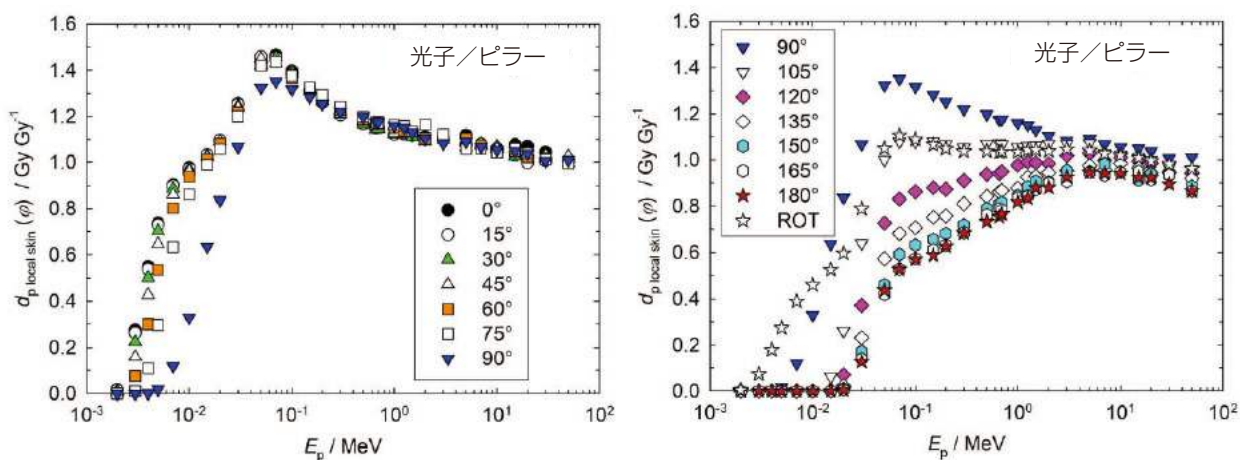


図 A.5.4.2b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマからピラーファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>31</sup>

<sup>31</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.5.4.3a カーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>32</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.002	2.54E+00	2.28E+00	1.63E+00	9.08E-01	3.63E-01	8.56E-02	0.00E+00
0.003	1.97E+01	1.87E+01	1.58E+01	1.14E+01	6.66E+00	2.91E+00	7.39E-01
0.004	2.56E+01	2.49E+01	2.29E+01	1.90E+01	1.32E+01	7.35E+00	2.84E+00
0.005	2.24E+01	2.21E+01	2.10E+01	1.88E+01	1.45E+01	9.19E+00	4.36E+00
0.007	1.39E+01	1.39E+01	1.36E+01	1.30E+01	1.14E+01	8.19E+00	4.71E+00
0.01	7.21E+00	7.20E+00	7.15E+00	7.04E+00	6.64E+00	5.39E+00	3.62E+00
0.015	3.21E+00	3.21E+00	3.20E+00	3.18E+00	3.12E+00	2.84E+00	2.30E+00
0.02	1.81E+00	1.81E+00	1.80E+00	1.79E+00	1.77E+00	1.69E+00	1.50E+00
0.03	8.16E-01	8.15E-01	8.13E-01	8.10E-01	8.04E-01	7.84E-01	7.42E-01
0.05	3.79E-01	3.80E-01	3.80E-01	3.81E-01	3.80E-01	3.74E-01	3.59E-01
0.06	3.42E-01	3.42E-01	3.42E-01	3.41E-01	3.40E-01	3.36E-01	3.25E-01
0.07	3.46E-01	3.44E-01	3.43E-01	3.42E-01	3.40E-01	3.37E-01	3.28E-01
0.1	4.43E-01	4.43E-01	4.43E-01	4.43E-01	4.42E-01	4.38E-01	4.26E-01
0.15	6.98E-01	6.98E-01	6.98E-01	6.99E-01	7.00E-01	6.98E-01	6.86E-01
0.2	9.90E-01	9.87E-01	9.87E-01	9.87E-01	9.88E-01	9.87E-01	9.71E-01
0.5	2.67E+00	2.67E+00	2.67E+00	2.67E+00	2.68E+00	2.68E+00	2.65E+00
0.662	3.49E+00	3.49E+00	3.49E+00	3.49E+00	3.49E+00	3.49E+00	3.46E+00
1	4.98E+00	4.97E+00	4.97E+00	4.98E+00	4.98E+00	4.98E+00	4.95E+00
1.25	5.93E+00	5.93E+00	5.94E+00	5.95E+00	5.96E+00	5.95E+00	5.92E+00
1.5	6.78E+00	6.79E+00	6.79E+00	6.80E+00	6.81E+00	6.80E+00	6.77E+00
2	8.31E+00	8.32E+00	8.32E+00	8.32E+00	8.34E+00	8.33E+00	8.30E+00
3	1.09E+01	1.09E+01	1.09E+01	1.09E+01	1.10E+01	1.09E+01	1.09E+01
5	1.53E+01	1.54E+01	1.54E+01	1.54E+01	1.54E+01	1.53E+01	1.53E+01
10	2.56E+01	2.56E+01	2.55E+01	2.55E+01	2.55E+01	2.55E+01	2.54E+01
20	4.68E+01	4.68E+01	4.68E+01	4.66E+01	4.65E+01	4.65E+01	4.65E+01
30	6.91E+01	6.92E+01	6.91E+01	6.91E+01	6.91E+01	6.90E+01	6.87E+01
50	1.19E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.18E+02
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.002	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.45E-01
0.003	4.70E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.51E+00
0.004	4.54E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.62E+00
0.005	1.09E+00	1.93E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.52E+00
0.007	1.77E+00	1.72E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.14E+00
0.01	1.83E+00	4.98E-01	5.45E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.59E+00
0.015	1.61E+00	9.40E-01	5.00E-01	2.93E-01	2.05E-01	1.80E-01	1.92E+00
0.02	1.24E+00	9.51E-01	7.19E-01	5.79E-01	5.05E-01	4.81E-01	1.29E+00
0.03	6.77E-01	6.02E-01	5.35E-01	4.87E-01	4.59E-01	4.50E-01	6.80E-01
0.05	3.38E-01	3.14E-01	2.93E-01	2.78E-01	2.70E-01	2.67E-01	3.39E-01
0.06	3.09E-01	2.90E-01	2.72E-01	2.60E-01	2.52E-01	2.50E-01	3.09E-01
0.07	3.14E-01	2.95E-01	2.78E-01	2.65E-01	2.57E-01	2.55E-01	3.12E-01
0.1	4.09E-01	3.88E-01	3.69E-01	3.54E-01	3.46E-01	3.43E-01	4.08E-01
0.15	6.66E-01	6.37E-01	6.08E-01	5.86E-01	5.73E-01	5.69E-01	6.57E-01
0.2	9.43E-01	9.06E-01	8.70E-01	8.45E-01	8.28E-01	8.23E-01	9.34E-01
0.5	2.60E+00	2.53E+00	2.47E+00	2.42E+00	2.39E+00	2.38E+00	2.58E+00
0.662	3.41E+00	3.33E+00	3.26E+00	3.20E+00	3.17E+00	3.16E+00	3.38E+00
1	4.88E+00	4.80E+00	4.72E+00	4.65E+00	4.59E+00	4.58E+00	4.85E+00
1.25	5.84E+00	5.75E+00	5.66E+00	5.59E+00	5.55E+00	5.54E+00	5.82E+00
1.5	6.70E+00	6.61E+00	6.52E+00	6.44E+00	6.39E+00	6.37E+00	6.67E+00
2	8.23E+00	8.12E+00	8.02E+00	7.95E+00	7.92E+00	7.92E+00	8.19E+00
3	1.08E+01	1.07E+01	1.06E+01	1.05E+01	1.05E+01	1.05E+01	1.08E+01
5	1.52E+01	1.51E+01	1.50E+01	1.49E+01	1.48E+01	1.48E+01	1.52E+01
10	2.53E+01	2.52E+01	2.50E+01	2.49E+01	2.48E+01	2.47E+01	2.53E+01
20	4.64E+01	4.61E+01	4.58E+01	4.56E+01	4.55E+01	4.54E+01	4.63E+01
30	6.85E+01	6.80E+01	6.76E+01	6.75E+01	6.74E+01	6.75E+01	6.85E+01
50	1.17E+02	1.16E+02	1.16E+02	1.15E+02	1.14E+02	1.15E+02	1.17E+02

<sup>32</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

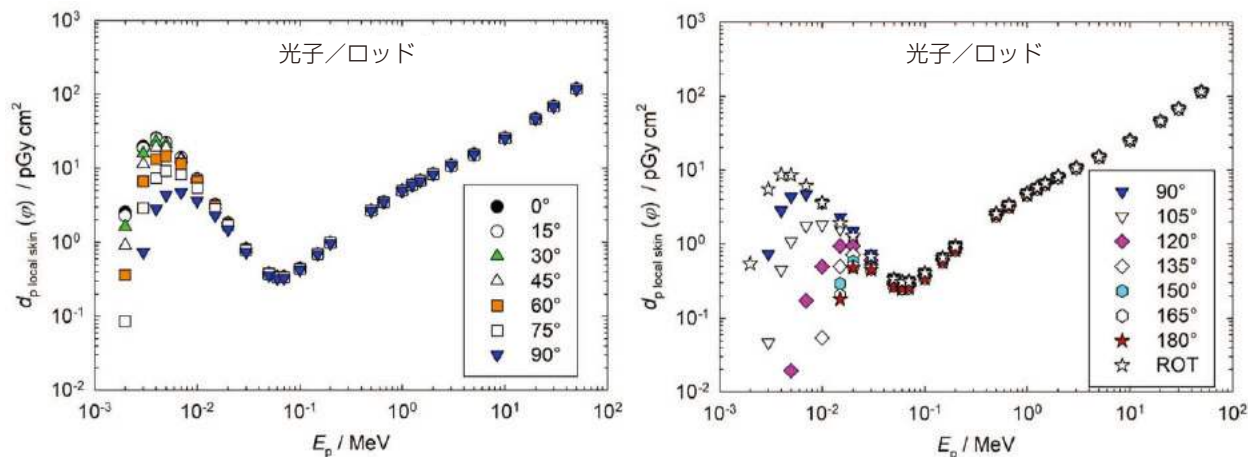


図 A.5.4.3a カーマ近似法を用いて算出した光子フルエンスからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>33</sup>

表 A.5.4.3b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>33</sup>

$E_p / \text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi) / (\text{Gy Gy}^{-1})$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.002	1.55E-02	1.39E-02	9.96E-03	5.55E-03	2.22E-03	5.23E-04	0.00E+00
0.003	2.62E-01	2.48E-01	2.10E-01	1.51E-01	8.84E-02	3.86E-02	9.81E-03
0.004	5.38E-01	5.23E-01	4.81E-01	3.99E-01	2.77E-01	1.54E-01	5.96E-02
0.005	7.31E-01	7.21E-01	6.85E-01	6.13E-01	4.73E-01	3.00E-01	1.42E-01
0.007	8.97E-01	8.97E-01	8.77E-01	8.39E-01	7.35E-01	5.28E-01	3.04E-01
0.01	9.74E-01	9.73E-01	9.66E-01	9.51E-01	8.97E-01	7.28E-01	4.89E-01
0.015	1.03E+00	1.03E+00	1.02E+00	1.02E+00	9.98E-01	9.09E-01	7.36E-01
0.02	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.00E+00	8.91E-01
0.03	1.13E+00	1.13E+00	1.13E+00	1.12E+00	1.11E+00	1.09E+00	1.03E+00
0.05	1.17E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.16E+00	1.11E+00
0.06	1.18E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.16E+00	1.12E+00
0.07	1.20E+00	1.20E+00	1.19E+00	1.19E+00	1.18E+00	1.17E+00	1.14E+00
0.1	1.19E+00	1.19E+00	1.19E+00	1.19E+00	1.19E+00	1.18E+00	1.15E+00
0.15	1.16E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.16E+00	1.14E+00
0.2	1.16E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.13E+00
0.5	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.13E+00	1.11E+00
0.662	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.11E+00
1	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.10E+00
1.25	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.11E+00
1.5	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.10E+00
2	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.10E+00
3	1.09E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.10E+00	1.09E+00	1.09E+00
5	1.08E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.09E+00	1.08E+00	1.08E+00
10	1.06E+00	1.06E+00	1.06E+00	1.06E+00	1.06E+00	1.06E+00	1.05E+00
20	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00
30	1.01E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.00E+00
50	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.90E-01

(続く)

<sup>33</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

表 A.5.4.3b (続き)

$E_p$ /MeV	入射角度 $\varphi$ における $d_{p, \text{local skin}}(\varphi)$ /(Gy Gy <sup>-1</sup> )						
	105°	120°	135°	150°	165°	180°	ROT
0.002	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.33E-03
0.003	6.24E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.32E-02
0.004	9.53E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.81E-01
0.005	3.56E-02	6.30E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.78E-01
0.007	1.14E-01	1.11E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.96E-01
0.01	2.47E-01	6.73E-02	7.36E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.85E-01
0.015	5.15E-01	3.01E-01	1.60E-01	9.38E-02	6.56E-02	5.76E-02	6.14E-01
0.02	7.36E-01	5.65E-01	4.27E-01	3.44E-01	3.00E-01	2.86E-01	7.66E-01
0.03	9.38E-01	8.34E-01	7.41E-01	6.75E-01	6.36E-01	6.24E-01	9.42E-01
0.05	1.05E+00	9.72E-01	9.07E-01	8.61E-01	8.36E-01	8.27E-01	1.05E+00
0.06	1.07E+00	1.00E+00	9.42E-01	9.00E-01	8.72E-01	8.65E-01	1.07E+00
0.07	1.09E+00	1.03E+00	9.66E-01	9.21E-01	8.93E-01	8.86E-01	1.08E+00
0.1	1.10E+00	1.04E+00	9.94E-01	9.53E-01	9.32E-01	9.24E-01	1.10E+00
0.15	1.11E+00	1.06E+00	1.01E+00	9.78E-01	9.56E-01	9.49E-01	1.10E+00
0.2	1.10E+00	1.06E+00	1.02E+00	9.86E-01	9.66E-01	9.61E-01	1.09E+00
0.5	1.09E+00	1.06E+00	1.04E+00	1.02E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.08E+00
0.662	1.10E+00	1.07E+00	1.05E+00	1.03E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.09E+00
1	1.09E+00	1.07E+00	1.05E+00	1.04E+00	1.02E+00	1.02E+00	1.08E+00
1.25	1.10E+00	1.08E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.09E+00
1.5	1.09E+00	1.08E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.09E+00
2	1.09E+00	1.07E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.05E+00	1.05E+00	1.08E+00
3	1.08E+00	1.07E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.05E+00	1.05E+00	1.08E+00
5	1.07E+00	1.06E+00	1.06E+00	1.05E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.07E+00
10	1.05E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.02E+00	1.05E+00
20	1.02E+00	1.02E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.02E+00
30	9.99E-01	9.91E-01	9.86E-01	9.84E-01	9.83E-01	9.84E-01	9.99E-01
50	9.82E-01	9.73E-01	9.73E-01	9.65E-01	9.56E-01	9.65E-01	9.82E-01

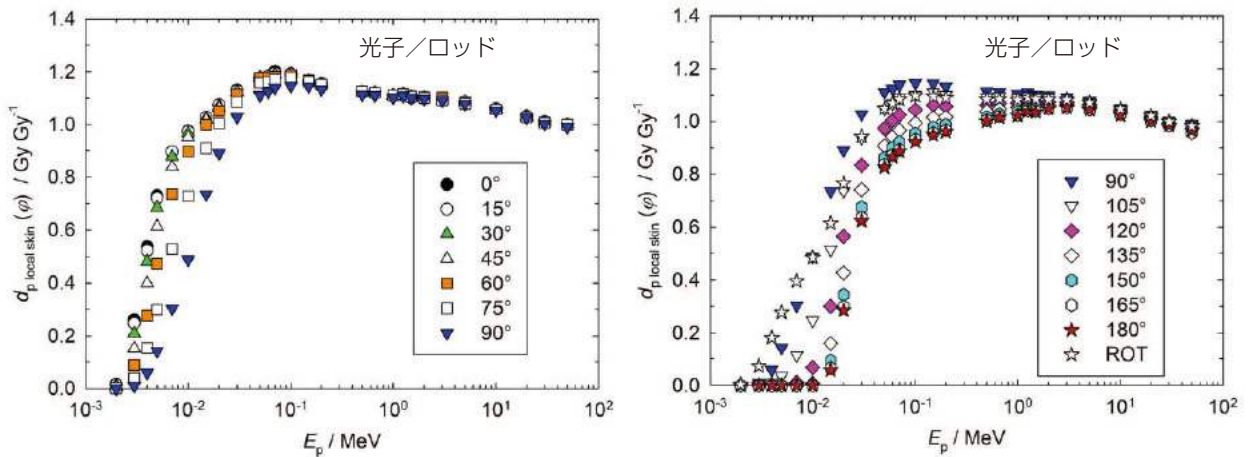


図 A.5.4.3b カーマ近似法を用いて算出した光子空気カーマからロッドファントム上の局所皮膚における個人吸収線量への換算係数<sup>34</sup>

<sup>34</sup> T. Otto (2017). *Personal communication* (CERN, Geneva, Switzerland).

## A.6 空気カーマ

2 keV から 50 MeV のエネルギーの光子フルエンスから空気カーマへの換算係数を表に示す。フルエンス当たりの線量から空気カーマ当たりの線量への換算には空気カーマ係数  $K_{\text{air}}/\Phi = (\mu_{\text{en}}/\rho) E_p(1-g)^{-1}$  を用いる。 $(\mu_{\text{en}}/\rho)$  の値

は Seltzer (1993), Hubbell と Seltzer (1995) の計算によるものを, Scofield の光電効果の断面積で再規格化したものである (ICRU, 2014)。 $g$  の値は Seltzer<sup>35</sup> によるものである。**太い斜体**で記された値は,  $(\mu_{\text{en}}/\rho)$  の値が入手できないため, 内挿によって得られた値である。

表 A.6 光子フルエンスから空気カーマへの換算係数

光子エネルギー $E$ (MeV)	空気カーマ係数 (pGy cm <sup>2</sup> )	光子エネルギー $E$ (MeV)	空気カーマ係数 (pGy cm <sup>2</sup> )
0.002	163.7	0.500	2.379
0.003	75.32	<b>0.511</b>	<b>2.431</b>
0.004	47.62	0.600	2.844
0.005	30.65	<b>0.662</b>	<b>3.112</b>
0.006	21.25	<b>0.700</b>	<b>3.275</b>
<b>0.007</b>	<b>15.50</b>	0.800	3.702
0.008	11.79	1.000	4.481
<b>0.009</b>	<b>9.221</b>	<b>1.117</b>	<b>4.884</b>
0.010	7.400	<b>1.200</b>	<b>5.165</b>
0.011	6.043	<b>1.250</b>	<b>5.332</b>
<b>0.012</b>	<b>5.022</b>	<b>1.300</b>	<b>5.498</b>
<b>0.013</b>	<b>4.236</b>	<b>1.330</b>	<b>5.596</b>
0.015	3.125	1.500	6.147
<b>0.017</b>	<b>2.388</b>	<b>1.700</b>	<b>6.725</b>
0.020	1.684	2.000	7.557
<b>0.024</b>	<b>1.150</b>	<b>2.400</b>	<b>8.563</b>
<b>0.025</b>	<b>1.056</b>	3.000	9.977
0.030	0.7217	4.000	12.14
0.040	0.4289	5.000	14.18
0.050	0.3229	6.000	16.17
0.060	0.2889	<b>6.129</b>	<b>16.44</b>
<b>0.070</b>	<b>0.2878</b>	<b>7.000</b>	<b>18.19</b>
0.080	0.3067	8.000	20.13
0.100	0.3714	10.000	24.13
<b>0.120</b>	<b>0.4606</b>	15.000	34.46
0.150	0.5994	20.000	45.36
0.200	0.8567	30.000	68.59
<b>0.240</b>	<b>1.062</b>	40.000	93.29
0.300	1.383	50.000	119.2
0.400	1.892		

注：太い斜体で書かれた値については、70 keV を除いて対数-対数補間が用いられた。70 keV では、値は最小となり、湾曲したエネルギー依存性となる。そのため、このエネルギーには自然 3 次スプラインが用いられた。

<sup>35</sup> S. Seltzer (2017). *Personal communication* (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland).

## 付属書 B 計算コードの説明

### B.1 PHITS

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code System) コードは、いくつかの核反応モデルと核データライブラリを使用して、任意の3次元ジオメトリーにおけるハドロン、レプトン、および重イオンの輸送と相互作用のシミュレーションをする多目的モンテカルロ計算コードである (Sato *et al.*, 2013)。本報告書では、PHITS バージョン 2.82 を使用した。周辺線量当量、周辺線量、および個人線量の計算に使用したモデルとパラメータを以下で説明する。

ハドロンと原子核によって誘発される核反応の動的段階のシミュレーションには概ね、核内カスケードモデル JAM (Nara *et al.*, 1999) /INCL4.6 (Boudard *et al.*, 2013) と量子分子動力学モデル JQMD (Niita *et al.*, 1995) を用いた。静的段階のシミュレーションには、蒸発・核分裂モデル GEM (Furhata, 2000) を用いた。

電子と陽電子を除く荷電粒子のエネルギー損失は、連続減速近似を用いた SPAR (Armstrong and Chandler, 1973) または ATIMA (Geissel *et al.*, 2013) コードを使って計算した。20 MeV 以下のエネルギーを持つ中性子の輸送は評価済の中性子データライブラリ ENDF/B-VI (Dunford, 1991) を用いてシミュレーションをした。低エネルギー中性子の散乱に関しては、水中の水素の  $S(\alpha, \beta)$  データを用いて、水素の化学結合の影響を考慮した。

PHITS に組み込まれた EGS5 コード (Hirayama *et al.*, 2005) のアルゴリズムを用いて、光子、電子、陽電子の輸送のシミュレーションを行った。光子の輸送は、初期運動エネルギーが 40 keV 未満の一次光子の場合 1 keV まで、それ以上の初期運動エネルギーの場合 5 keV まで行われる。初期運動エネルギーが 40 keV 未満の一次電子と陽電子の場合 5 keV まで、それ以上の初期運動エネルギーの電子と陽電子は概ね 10 keV の運動エネルギーになるまでそのヒストリーが追跡された。光核反応は、JQMD と GEM を用いて 1 GeV まで扱った。

周辺線量当量の計算には ICRU 球が用いられた。ICRU

球はその体積により拡張した単一エネルギーの水平ビームにより真空中で照射された。ICRU 球におけるエネルギー沈着は、主軸に沿って R-Z 円筒構で区切られた深さと半径の関数として計算した。 $H^*(10)/\Phi$  の値は、半径 5 mm、深さ 9 mm から 11 mm で平均化した。

周辺線量と個人線量の計算には ICRP 成人標準コンピュータファントム (ICRP, 2009) が用いられた。ファントムは、繰り返し構造と格子系のジオメトリーパッケージを用いて PHITS コードに入れた。単一エネルギーの広い平行ビームにさまざまな入射角度および等方向から真空中で被ばくしたファントムの全身照射について計算を行い、臓器と組織におけるエネルギー沈着を計算した。

計算を 10 回行い、平均の標準偏差を計算することで、統計的不確かさが推定された。換算係数は、すべての粒子のすべてのジオメトリーにおいて、約 1%、ほとんどの場合それ以下の統計的不確かさで求められた

### B.2 FLUKA

FLUKA は粒子・光子の輸送計算のための汎用モンテカルロプログラムであり (Böhlen *et al.*, 2014 ; Ferrari *et al.*, 2005), 重イオンを含む物質中の約 60 の異なる粒子の相互作用と伝播のシミュレーションができる。光核反応をシミュレーションすることができる。本報告書では FLUKA バージョン 2011 を使用した。ロッドおよびピラーファントムの光子、電子、および陽電子に対する換算係数を算出するため、以下では FLUKA 内のこれらの粒子による放射線輸送に絞って説明する。

荷電粒子の輸送は、Moliere のクーロン散乱理論に基づく多重散乱アルゴリズムを適用して記述される。このアルゴリズムには磁場での曲線の軌跡の正確な処理が含まれる。エネルギー損失は、Bethe-Bloch 理論に従い、制動放射、コンプトン、光電、対生成から決定した。電離のゆらぎは考慮されている。

計算は、光子と電子に対して以下を含む PRECISION デフォルト設定で実行した。

- レイリー散乱、コンプトン散乱に対する非弾性形状因子の補正、およびコンプトンプロファイルをアクティ

ベート

- 詳細な光電エッジ処理と蛍光光子をアクティブート
- 一次および二次荷電粒子の両方の最小許容エネルギーにおける多重散乱しきい値
- ハドロン／ミュー粒子および電磁放射線の両方に対して制限された電離ゆらぎ
- 1ステップ当たり5%の最大エネルギー損失

光子に対する換算係数は、さらなる修正はせず、PRECISION をデフォルトとして計算した。

数値ファントムを真空中に置き、平行ビームおよび回転場により、ファントムの幾何学的広がりを均質にカバーするように照射する。各粒子について、定義された有効容積中に沈着したエネルギーは3.10節に記載されている通り計算した。

計算領域（有効容積とそこから8 mm 以上離れた領域）では、非常に低い粒子の生成と輸送のしきい値を選択し、急峻な線量勾配を正確にモデル化した。光子は1 keV のエネルギーになるまで、電子は10 keV のエネルギーになるまで輸送された。

計算する体積外では、電子と光子に対してはより高い輸送と生成のしきい値が適用される。8 mm は、 $E_{\text{kin}} = 500 \text{ keV}$  の電子の飛程よりも長い。この値を、高い入射エネルギーでの電子と陽電子の生成と輸送におけるしきい値とした。光子は10 keV まで追跡した。

電子と陽電子については、内部チェックと他のコードとの比較により、領域境界で単一散乱を導入したことがより正確な結果をもたらしていることが示された。境界交差部分（真空とファントムの間、有効容積の境界、ICRP の皮膚とICRU の組織の間）では電子／陽電子輸送に使用されるMoliere の標準的な多重散乱アルゴリズムではなく、2つの単一散乱事象で置き換えた。単一散乱は、電子輸送の物理的特性を非常に正確にモデル化するものであるが、全体に適用するには計算時間がかかりすぎる。そのため、FLUKA マニュアル（オプションMULSOPT）では、敏感な領域で局所的に適用することを勧告している。さらに、二次電子生成中の原子内電子の影響の修正（技術的には、FUDGEM パラメータを $10^{-5}$ に設定）を計算領域ではオフ

にした。

すべての計算は、1%未満のモンテカルロ法における統計的不確かさで行われた。モンテカルロ法の不確かさは、10回の独立した計算結果の標準誤差から決定される。精度の達成水準は、電子のシミュレーションでは一般的に $10^7$ のヒストリー（ $10^6$ のヒストリーを10回分）、光子のシミュレーションには $10^8$ のヒストリーを必要とした。

### B.3 MCNP

粒子輸送コードであるMonte Carlo N-Particle (MCNP) は、37種類の異なる粒子の輸送に関する汎用的な3次元シミュレーションツールである。放射線防護および線量計測、放射線遮蔽、ラジオグラフィ、医学物理、核臨界安全、検出器の設計と解析、加速器ターゲット設計、核分裂および核融合原子炉設計、除染、および廃炉を含む多くの用途に適用することができる。本報告書で使用したリリースコードは、MCNPX バージョン2.7eとMCNP 6.2 (Werner *et al.*, 2017; 2018) であった。

中性子、陽子、電子、および光子は、表データの上限エネルギー以下ではこれらのデータを用いて輸送される。この上限エネルギーは、要求される核種と断面積のデータによって変化する。上限エネルギーを超えると、輸送と反応を記述するためにモデルの組み合わせを使用する。コードで利用可能なモデルについてのさらなる詳細は、Goorley *et al.* (2013) を参照されたい。

本報告書において実施したスラブファントムの方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量に関する換算係数の光子、電子および陽電子の計算は、MCNPX バージョン2.7eを使用した。計算ではバイアスは導入せず、より収束性を高めるためにタリーセルの重要度を高く設定した。電子輸送にはITPオプションを使用した。電子輸送のエネルギーカットオフ、光子輸送のエネルギーカットオフおよび電子のエネルギーステップ当たりのサブステップ数の影響についてはパラメータ設定の試験を行った。特に電子サブステップのパラメータについては、低エネルギーで時に重要となる結果のばらつきがあり、解釈が困難であった。したがって、すべてのエネルギー範囲にわたって一貫性を

保つために、これらのパラメータを同一に設定することを決定した。そのためコードで提供されているデフォルトのモデルパラメータ、すなわち 1 keV 未満の電子エネルギーのカットオフ（組織での 100 eV を除く）、1 keV 未満の光子エネルギーのカットオフ、および電子のエネルギーステップ当たりのサブステップの数を 3 とした。この MCNP バージョンで利用可能な最新の光子と電子ライブラリ、すなわち ENDF/B-VI. release 8 の光子に対応する 04p と 03e を使用した。

本報告書では、水晶体吸収線量と局所皮膚吸収線量の換算係数の中性子計算は MCNP 6.2 を用いて行い、点ごとの断面積を使った。今回の計算では、水の熱中性子散乱モデル  $S(\alpha, \beta)$  を用いて、皮膚と眼の水晶体の中性子線量を計算した。30 MeV と 50 MeV での計算には、150 MeV までの中性子断面積データがある場合はそれを用いた。シミュレーションに使用したいいくつかの同位体の中には、20 MeV までのデータしかない断面積を持つものがある。その場合、コードは必要に応じて、断面積ライブラリデータと物理モデルを組み合わせてシミュレーションで必要とされるエネルギー範囲に対応する。今回の計算で使用した中性子ライブラリデータは Conlin (2017) から引用し、最新の断面積データの評価をこの研究のために選択した。

光子については、このコードは、インコヒーレントおよびコヒーレント散乱、光電吸収後の蛍光 X 線の可能性、局所的な消滅放射を伴う対生成における吸収、および制動放射線を考慮している。陽電子、K 殻の特性 X 線、および制動放射線を含む電子輸送には、連続減速モデルが使用される。光核反応は、多数の核種のサブセットに利用可能である。

MCNP には、表面上の粒子の流れとフラックス（表面交差）、体積フラックス（飛跡長）、点または環状検出器領域、粒子加熱、核分裂加熱、エネルギーまたは電荷沈着の波高タリー、メッシュタリー、およびラジオグラフィ記録オプションなど多数の柔軟な記録オプションがある。今回中性子では、エネルギー沈着タリー (+f6) を使用して吸収線量を計算した。

## B.4 EGSnrc

本報告書で示した計算には、電子-ガンマ-シャワーコードシステムの EGSnrc バージョン v4-r2-4-0 (Kawrakow *et al.*, 2013) を使用した。このコードは、カナダ国立研究機構 (National Research Council of Canada, NRC) によって維持されており、EGS4 を拡張し改良したバージョンである (Nelson *et al.*, 1985)。1 keV から数百 GeV までの粒子の運動エネルギーについて、光子、電子および陽電子の輸送のシミュレーションが可能である。ただし物理的な拡張機能のうち、1 GeV 未満でしか有効にできないものもある。

光子の輸送では、Storm と Israel による EGSnrc 断面積を使用した。コンプトン散乱と K 殻、L 殻、M 殻からの光電子では、電子の結合エネルギーを考慮している。両方の場合において、結果として生じる蛍光やオージェ電子とコスター-クロニッチ電子が追跡される。10 MeV、20 MeV、および 50 MeV での MCNP を用いたシミュレーションで示された通り (Behrens, 2017a)、光核反応から臓器線量への寄与は 1% よりはるかに少ないことが判明したため、考慮されていない。本報告書では、光子エネルギーが 10 keV 未満に低下すると光子輸送は終了するが、初期運動エネルギーが 510 keV 未満の場合は、1 keV まで光子輸送を行った。

電子と陽電子の輸送の計算は、特定の選択されたエネルギーを超えて生成される粒子を輸送するクラス II 圧縮ヒストリー法 (Berger, 1963) によって実行した。制動放射の断面積は Bethe-Heitler によるもので、すなわち EGS4 (Nelson *et al.*, 1985) のものである。制動放射の角度のサンプリングは Koch と Motz (1959) に従った。電子の衝突電離はデフォルトの断面積でモデル化されている (Kawrakow, 2002)。サンプリングが電離に至らないとき、古典的な Møller または Bhabha の断面積を適用した。弾性散乱に対してはスピン効果を考慮した。対生成は EGS4 (Nelson *et al.*, 1985) と同様にシミュレーションされている。3 電子生成過程は、すべての粒子において考慮されない。本報告書では、電子の輸送ヒストリーは、その運動エネルギーが 10 keV 未満になると終了する。ただし初期運動エネルギーが 110 keV 未満の一次粒子については、輸送

ヒストリーが1 keVまで追跡される。外部照射の場合、500 keV未満の運動エネルギーを持つ電子が臓器に到達することはほとんどない。これらの臓器への線量は低く、その理由は、主にファントムに入射して最初の数ミリメートル以内で制動放射が発生するためである。カーマ近似法は、電子を全く追跡しない、すなわち、電子のカットオフエネルギーを一次粒子エネルギーの最大値に設定することにより実施された。

水晶体吸収線量のすべての換算係数を決定するために、EGSnrcが用いられた。

### B.5 換算係数の計算における不確かさ

水晶体吸収線量の換算係数の計算では、非統計的不確かさの合計は2.5% (40 keV未満で3.6%)と推定される (Behrens, 2017a)。これらは電子の衝突阻止能の不確かさが支配的である。低原子番号の媒体を移動させる12 MeV未満の電子について、ICRU Report 37 (ICRU, 1984)では、「100 keVを超えると、衝突阻止能の不確かさは1%から2%であると推定される」と述べられている。残りの非統計的不確かさの寄与は約1.5%と推定される。したがって、100 keVを超える阻止能に関する非統計的不確かさの合計は2.5%と推定される。40 keV未満の光子エネルギーでは、XCOM光子断面積で得られた値は、EGSnrcの標準的な光子断面積で得られた値から最大±9%の違いがある。したがって、このエネルギー領域では、3%の標準不確かさの追加的寄与が想定される。40 keV未満の残りの非統計的不確かさの寄与はモンテカルロ法の計算での全般的な経験から約2%と推定される。したがって、非統計的不確かさの合計は2.5% (40 keV未満では3.6%)と推定される。

周辺線量と個人線量の換算係数は、ICRP/ICRU成人標準ファントムと、人体内における放射線輸送をシミュレーションするモンテカルロコードを合わせて使用することで計算される。ファントムならびに臓器と組織の元素組成および密度は指定されているため、換算係数の非統計的不確かさはモンテカルロコードで使用する相互作用モデルと断面積データにより生じる。この問題はICRP Publication 116 (ICRP, 2010)で考察されている。臓器の吸収線量の

換算係数は、同じICRP/ICRU成人標準ファントムを用い、EGSnrc, FLUKA, GEANT4, MCNPX, およびPHITSのような異なるモンテカルロコードで、与えられた放射線と照射ジオメトリーについて計算されている。計算された臓器の吸収線量は、使用されたモンテカルロコードにかかわらず、すべての放射線について、概ね10%以内でよく一致していた。しかしながら、より高いエネルギーでは、異なる相互作用モデルや断面積データの適用に起因するとと思われる、計算コードの違いによる一定の差異が見られた。臓器吸収線量の違いの程度は、臓器の大きさ、体内の位置、粒子の種類およびエネルギー、ならびに照射ジオメトリーなどのいくつかのパラメータに依存する。例えば、20 MeV未満の中性子エネルギーでは、中性子照射下の女性ファントムの生殖腺の吸収線量は、中性子の輸送と核反応に評価済の断面積データを使用しており、PHITS, FLUKA, MCNPX, GEANT4間で非常によく一致した。対照的に、20 MeVから10 GeVでは、吸収線量の相対的な差異は10%から50%の間であることが分かった。この差異はそれぞれのコードにおいて使用される理論モデルと断面積データが異なることから生じている。実効線量は身体すべての特定された臓器と組織における吸収線量の重み付けした合計であるため、臓器吸収線量の換算係数の差異は、実効線量の換算係数に直接的には反映されない。本報告書で考察した放射線とエネルギー範囲では、異なるコードによって計算された実効線量に基づく周辺線量と個人線量の換算係数の全体的な差は10%未満であると推定される。

## 付属書 C 水晶体吸収線量の新しい換算係数

### C.1 方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量、感受性の高い細胞の吸収線量 $d_{\text{lens sens}}$

粒子フルエンスから方向性水晶体吸収線量  $d_{\text{lens max}}$  への換算係数の数値と、フルエンスから個人水晶体吸収線量  $d_{\text{p lens sens}}$  への換算係数の数値は同じであり、以下の表では記号  $d_{\text{lens sens}}$  を使用する。図 C.1.0 に記した計算体系図は、A.3 節で記載した眼の水晶体全体の吸収線量の値へ

の換算係数を計算するためではなく、水晶体前方の赤道部に主に位置する放射線に感受性の高い細胞の吸収線量の値への換算係数を計算するためであり、詳細は、ICRP Publication 116 (ICRP, 2010) を参照されたい。左右の水晶体の吸収線量の最大値は、左または右からの放射線入射についての値である。ここに示した換算係数は、眼球モデルの全身被ばく (Behrens and Dietze, 2011) に関して、広い均一な平行ビームの水平面へ、 $0^\circ$  (A-P) から  $90^\circ$  まで  $15^\circ$  ごとの角度  $\varphi$ , ならびに回転 (ROT) での入射について計算されている。中性子の換算係数は、頸頭部の被ばくのための計算であり、角度  $\varphi$  に  $180^\circ$  を含む。左右の水晶体の最大値として感受性の高い細胞の換算係数が計算されている。回転照射の値を得るために、感受性の高い細胞について左右の眼で大きい方の値をすべての角度  $\varphi$  で積分

して回転照射の値を求めると、回転照射の計算値と一致しない結果が得られる。粒子に関し、光子 (荷電粒子平衡の有無にかかわらず)、電子および陽電子においては、これらの値の比は 1.0 から 1.3 の間である。回転照射の結果ではなく、角度  $\varphi$  に対するより大きい方の値の積分をとることによる差異は常に 30% 未満となる。これらの換算係数を用いることについては、放射線防護と規制の観点から考慮がされなければならない。

表 C.1.1a から表 C.1.4 および 図 C.1.1a から 図 C.1.4 は、50 MeV 未満のエネルギーの光子、中性子、電子、陽電子について粒子フルエンスからの換算係数の数値を示す。表 C.1.1b と 図 C.1.1b は、表 C.1.0 に示すように空気カーマからの換算係数である。

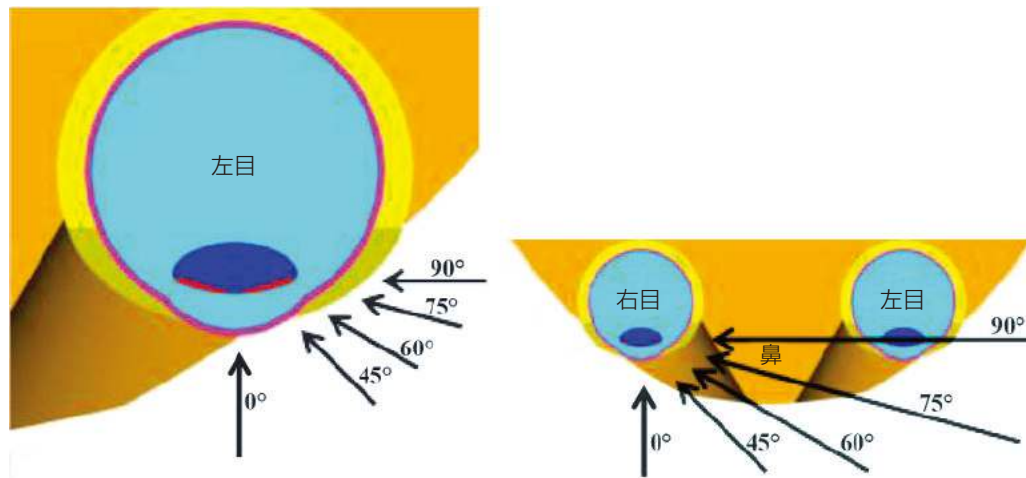


図 C.1.0 中央位置での、上から見た左眼の断面図 (左側) および両眼の断面図 (右側) 眼の水晶体の放射線感受性の高い領域 (赤色) および残りの領域 (暗青色) が確認できる。矢印は、広い平行ビームの入射方向の例を示す (Behrens, 2017a)。

表 C.1.0  $0^\circ \sim 90^\circ$  の角度範囲、中性子では  $180^\circ$  照射も含む、および回転照射に対する左右の照射における眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数  $d_{\text{lens sens}}$

表/図	粒子の種類	物理量	エネルギー範囲 (MeV)
C.1.1a	光子	フルエンス	$5.0 \text{ E-}03 \sim 5.0 \text{ E+}01$
C.1.1b	光子	空気カーマ	$5.0 \text{ E-}03 \sim 5.0 \text{ E+}01$
C.1.2	中性子	フルエンス	$1.0 \text{ E-}09 \sim 5.0 \text{ E+}01$
C.1.3	電子	フルエンス	$1.0 \text{ E-}02 \sim 5.0 \text{ E+}01$
C.1.4	陽電子	フルエンス	$1.0 \text{ E-}02 \sim 5.0 \text{ E+}01$

表 C.1.1a 左右の照射に対する光子フルエンスから眼の水晶体の感受性のある細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.005	4.17E-05	7.65E-05	1.54E-04	1.52E-04	6.90E-05	8.41E-06	3.34E-07	4.34E-05
0.006	7.75E-03	9.30E-03	1.06E-02	1.05E-02	5.87E-03	1.73E-03	1.70E-04	3.28E-03
0.007	1.13E-01	1.07E-01	1.05E-01	9.55E-02	6.16E-02	2.48E-02	5.50E-03	3.64E-02
0.008	4.46E-01	4.12E-01	3.77E-01	3.37E-01	2.37E-01	1.22E-01	3.95E-02	1.37E-01
0.009	9.37E-01	8.79E-01	8.00E-01	7.04E-01	5.20E-01	3.18E-01	1.30E-01	2.94E-01
0.01	1.42E+00	1.34E+00	1.23E+00	1.09E+00	8.49E-01	5.74E-01	2.82E-01	4.63E-01
0.011	1.75E+00	1.68E+00	1.57E+00	1.41E+00	1.15E+00	8.45E-01	4.68E-01	6.03E-01
0.013	2.01E+00	1.99E+00	1.89E+00	1.73E+00	1.54E+00	1.23E+00	8.09E-01	7.58E-01
0.015	1.94E+00	1.96E+00	1.89E+00	1.75E+00	1.62E+00	1.41E+00	1.01E+00	7.91E-01
0.017	1.76E+00	1.79E+00	1.74E+00	1.64E+00	1.55E+00	1.40E+00	1.09E+00	7.62E-01
0.02	1.45E+00	1.49E+00	1.48E+00	1.39E+00	1.36E+00	1.26E+00	1.03E+00	6.74E-01
0.024	1.14E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.12E+00	1.10E+00	1.04E+00	9.07E-01	5.61E-01
0.03	8.26E-01	8.54E-01	8.45E-01	8.17E-01	8.27E-01	8.02E-01	7.08E-01	4.48E-01
0.04	5.80E-01	5.96E-01	6.03E-01	5.87E-01	5.86E-01	5.74E-01	5.30E-01	3.39E-01
0.05	4.77E-01	4.92E-01	4.94E-01	4.92E-01	4.94E-01	4.78E-01	4.39E-01	2.95E-01
0.06	4.45E-01	4.63E-01	4.69E-01	4.63E-01	4.51E-01	4.50E-01	4.27E-01	2.83E-01
0.07	4.52E-01	4.60E-01	4.63E-01	4.60E-01	4.56E-01	4.48E-01	4.23E-01	2.91E-01
0.08	4.78E-01	4.78E-01	4.89E-01	4.84E-01	4.87E-01	4.80E-01	4.52E-01	3.15E-01
0.1	5.57E-01	5.62E-01	5.63E-01	5.72E-01	5.66E-01	5.49E-01	5.40E-01	3.77E-01
0.12	6.66E-01	6.70E-01	6.69E-01	6.79E-01	6.60E-01	6.61E-01	6.40E-01	4.52E-01
0.15	8.35E-01	8.42E-01	8.41E-01	8.45E-01	8.48E-01	8.38E-01	7.91E-01	5.77E-01
0.2	1.13E+00	1.14E+00	1.17E+00	1.16E+00	1.15E+00	1.14E+00	1.12E+00	8.10E-01
0.24	1.39E+00	1.40E+00	1.40E+00	1.40E+00	1.40E+00	1.38E+00	1.39E+00	1.01E+00
0.3	1.74E+00	1.75E+00	1.77E+00	1.83E+00	1.79E+00	1.74E+00	1.75E+00	1.27E+00
0.4	2.28E+00	2.31E+00	2.31E+00	2.37E+00	2.36E+00	2.32E+00	2.36E+00	1.74E+00
0.5	2.80E+00	2.83E+00	2.87E+00	2.89E+00	2.96E+00	2.83E+00	2.85E+00	2.20E+00
0.511	2.87E+00	2.90E+00	2.91E+00	3.02E+00	3.02E+00	2.83E+00	2.86E+00	2.25E+00
0.6	3.33E+00	3.32E+00	3.40E+00	3.44E+00	3.47E+00	3.35E+00	3.33E+00	2.62E+00
0.662	3.58E+00	3.65E+00	3.63E+00	3.75E+00	3.73E+00	3.59E+00	3.66E+00	2.90E+00
0.8	4.18E+00	4.22E+00	4.29E+00	4.31E+00	4.44E+00	4.27E+00	4.33E+00	3.48E+00
1	4.97E+00	4.97E+00	5.08E+00	5.27E+00	5.24E+00	5.14E+00	5.08E+00	4.19E+00
1.117	5.40E+00	5.41E+00	5.50E+00	5.49E+00	5.56E+00	5.58E+00	5.46E+00	4.56E+00
1.2	5.66E+00	5.66E+00	5.71E+00	5.76E+00	5.92E+00	5.82E+00	5.89E+00	4.84E+00
1.3	5.79E+00	5.85E+00	5.91E+00	6.08E+00	6.31E+00	6.06E+00	6.26E+00	5.10E+00
1.33	5.85E+00	5.92E+00	6.05E+00	6.04E+00	6.37E+00	6.18E+00	6.38E+00	5.15E+00
1.5	5.97E+00	6.04E+00	6.18E+00	6.48E+00	6.79E+00	6.56E+00	6.76E+00	5.57E+00
1.7	6.02E+00	6.09E+00	6.33E+00	6.62E+00	7.07E+00	6.98E+00	7.14E+00	5.93E+00
2	5.76E+00	5.95E+00	6.16E+00	6.76E+00	7.44E+00	7.55E+00	7.72E+00	6.35E+00
2.4	5.41E+00	5.48E+00	5.96E+00	6.72E+00	7.77E+00	8.27E+00	8.27E+00	6.84E+00
3	4.84E+00	5.00E+00	5.51E+00	6.67E+00	8.06E+00	9.05E+00	9.20E+00	7.23E+00
4	4.20E+00	4.45E+00	5.10E+00	6.44E+00	8.60E+00	1.03E+01	1.07E+01	7.94E+00
5	3.80E+00	4.05E+00	4.80E+00	6.42E+00	9.02E+00	1.15E+01	1.24E+01	8.63E+00
6	3.53E+00	3.80E+00	4.59E+00	6.30E+00	9.53E+00	1.28E+01	1.37E+01	9.28E+00
6.129	3.52E+00	3.79E+00	4.51E+00	6.32E+00	9.56E+00	1.27E+01	1.38E+01	9.35E+00
8	3.22E+00	3.46E+00	4.29E+00	6.12E+00	1.01E+01	1.48E+01	1.68E+01	1.07E+01
10	3.02E+00	3.24E+00	3.96E+00	5.85E+00	1.06E+01	1.65E+01	1.90E+01	1.18E+01
15	2.84E+00	3.02E+00	3.60E+00	5.18E+00	1.04E+01	1.93E+01	2.50E+01	1.50E+01
20	2.80E+00	2.95E+00	3.47E+00	4.83E+00	9.99E+00	2.10E+01	3.00E+01	1.80E+01
30	2.82E+00	2.92E+00	3.43E+00	4.60E+00	9.26E+00	2.23E+01	3.64E+01	2.33E+01
40	2.86E+00	2.98E+00	3.46E+00	4.43E+00	8.71E+00	2.30E+01	4.02E+01	2.82E+01
50	2.90E+00	3.08E+00	3.44E+00	4.41E+00	8.63E+00	2.39E+01	4.29E+01	3.22E+01

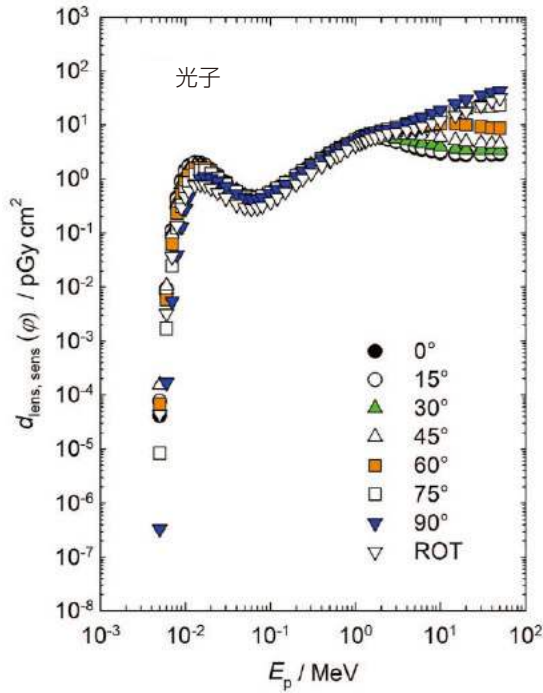


図 C.1.1a 左右の照射に対する光子フルエンスから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

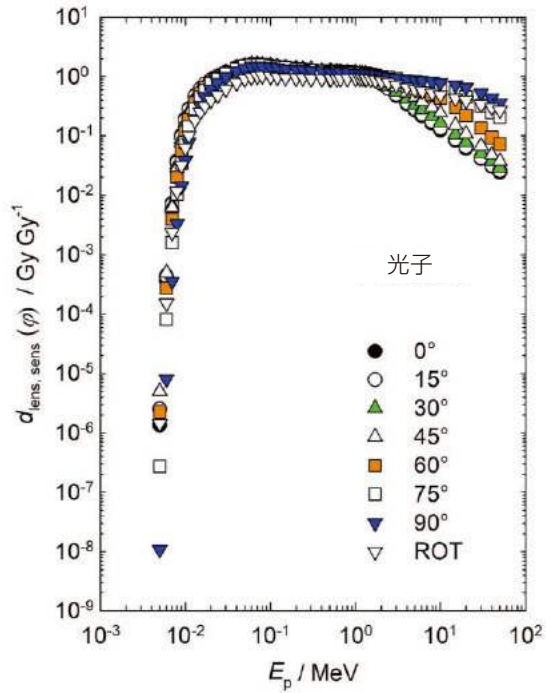


図 C.1.1b 左右の照射に対する光子空気カーマから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

表 C.1.1b 左右の照射に対する光子空気カーマから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p / \text{MeV}$	入射角度 $\phi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\phi) / (\text{Gy Gy}^{-1})$							
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$	ROT
0.005	1.36E-06	2.50E-06	5.01E-06	4.95E-06	2.25E-06	2.74E-07	1.09E-08	1.42E-06
0.006	3.65E-04	4.38E-04	4.98E-04	4.95E-04	2.76E-04	8.16E-05	7.99E-06	1.54E-04
0.007	7.27E-03	6.90E-03	6.78E-03	6.16E-03	3.97E-03	1.60E-03	3.55E-04	2.35E-03
0.008	3.78E-02	3.49E-02	3.20E-02	2.86E-02	2.01E-02	1.03E-02	3.35E-03	1.16E-02
0.009	1.02E-01	9.53E-02	8.68E-02	7.63E-02	5.63E-02	3.45E-02	1.41E-02	3.19E-02
0.01	1.91E-01	1.80E-01	1.66E-01	1.48E-01	1.15E-01	7.75E-02	3.82E-02	6.25E-02
0.011	2.89E-01	2.78E-01	2.59E-01	2.34E-01	1.90E-01	1.40E-01	7.74E-02	9.97E-02
0.013	4.74E-01	4.71E-01	4.47E-01	4.07E-01	3.62E-01	2.91E-01	1.91E-01	1.79E-01
0.015	6.21E-01	6.26E-01	6.05E-01	5.60E-01	5.19E-01	4.51E-01	3.24E-01	2.53E-01
0.017	7.36E-01	7.48E-01	7.30E-01	6.85E-01	6.51E-01	5.86E-01	4.56E-01	3.19E-01
0.02	8.63E-01	8.82E-01	8.78E-01	8.24E-01	8.09E-01	7.51E-01	6.14E-01	4.00E-01
0.024	9.94E-01	1.01E+00	1.01E+00	9.70E-01	9.59E-01	9.05E-01	7.89E-01	4.87E-01
0.03	1.14E+00	1.18E+00	1.17E+00	1.13E+00	1.15E+00	1.11E+00	9.81E-01	6.21E-01
0.04	1.35E+00	1.39E+00	1.41E+00	1.37E+00	1.37E+00	1.34E+00	1.24E+00	7.91E-01
0.05	1.48E+00	1.52E+00	1.53E+00	1.52E+00	1.53E+00	1.48E+00	1.36E+00	9.15E-01
0.06	1.54E+00	1.60E+00	1.62E+00	1.60E+00	1.56E+00	1.56E+00	1.48E+00	9.79E-01
0.07	1.57E+00	1.60E+00	1.61E+00	1.60E+00	1.58E+00	1.55E+00	1.47E+00	1.01E+00
0.08	1.56E+00	1.56E+00	1.59E+00	1.58E+00	1.59E+00	1.57E+00	1.47E+00	1.03E+00

(続く)

表 C.1.1b (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\varphi)/(\text{Gy Gy}^{-1})$							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.1	1.50E+00	1.51E+00	1.51E+00	1.54E+00	1.52E+00	1.48E+00	1.45E+00	1.01E+00
0.12	1.44E+00	1.46E+00	1.45E+00	1.47E+00	1.43E+00	1.44E+00	1.39E+00	9.82E-01
0.15	1.39E+00	1.40E+00	1.40E+00	1.41E+00	1.41E+00	1.40E+00	1.32E+00	9.62E-01
0.2	1.32E+00	1.34E+00	1.36E+00	1.35E+00	1.34E+00	1.33E+00	1.31E+00	9.46E-01
0.24	1.30E+00	1.32E+00	1.32E+00	1.32E+00	1.32E+00	1.30E+00	1.31E+00	9.54E-01
0.3	1.26E+00	1.27E+00	1.28E+00	1.33E+00	1.29E+00	1.26E+00	1.26E+00	9.22E-01
0.4	1.21E+00	1.22E+00	1.22E+00	1.25E+00	1.25E+00	1.22E+00	1.25E+00	9.20E-01
0.5	1.18E+00	1.19E+00	1.21E+00	1.22E+00	1.24E+00	1.19E+00	1.20E+00	9.26E-01
0.511	1.18E+00	1.19E+00	1.20E+00	1.24E+00	1.24E+00	1.17E+00	1.17E+00	9.25E-01
0.6	1.17E+00	1.17E+00	1.19E+00	1.21E+00	1.22E+00	1.18E+00	1.17E+00	9.23E-01
0.662	1.15E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.20E+00	1.20E+00	1.15E+00	1.18E+00	9.31E-01
0.8	1.13E+00	1.14E+00	1.16E+00	1.16E+00	1.20E+00	1.15E+00	1.17E+00	9.41E-01
1	1.11E+00	1.11E+00	1.13E+00	1.18E+00	1.17E+00	1.15E+00	1.13E+00	9.36E-01
1.117	1.10E+00	1.11E+00	1.13E+00	1.12E+00	1.14E+00	1.14E+00	1.12E+00	9.33E-01
1.2	1.09E+00	1.10E+00	1.11E+00	1.12E+00	1.15E+00	1.13E+00	1.14E+00	9.38E-01
1.3	1.05E+00	1.06E+00	1.07E+00	1.11E+00	1.15E+00	1.10E+00	1.14E+00	9.28E-01
1.33	1.05E+00	1.06E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.14E+00	1.10E+00	1.14E+00	9.21E-01
1.5	9.72E-01	9.83E-01	1.01E+00	1.05E+00	1.10E+00	1.07E+00	1.10E+00	9.07E-01
1.7	8.95E-01	9.05E-01	9.41E-01	9.85E-01	1.05E+00	1.04E+00	1.06E+00	8.81E-01
2	7.63E-01	7.87E-01	8.15E-01	8.95E-01	9.85E-01	9.99E-01	1.02E+00	8.40E-01
2.4	6.32E-01	6.40E-01	6.96E-01	7.85E-01	9.08E-01	9.66E-01	9.66E-01	7.98E-01
3	4.85E-01	5.01E-01	5.52E-01	6.68E-01	8.07E-01	9.07E-01	9.22E-01	7.24E-01
4	3.46E-01	3.67E-01	4.20E-01	5.31E-01	7.09E-01	8.48E-01	8.83E-01	6.54E-01
5	2.68E-01	2.85E-01	3.38E-01	4.53E-01	6.36E-01	8.12E-01	8.73E-01	6.08E-01
6	2.18E-01	2.35E-01	2.84E-01	3.90E-01	5.89E-01	7.93E-01	8.47E-01	5.74E-01
6.129	2.14E-01	2.30E-01	2.75E-01	3.84E-01	5.81E-01	7.71E-01	8.41E-01	5.69E-01
8	1.60E-01	1.72E-01	2.13E-01	3.04E-01	5.01E-01	7.35E-01	8.35E-01	5.31E-01
10	1.25E-01	1.34E-01	1.64E-01	2.43E-01	4.38E-01	6.83E-01	7.87E-01	4.91E-01
15	8.24E-02	8.76E-02	1.04E-01	1.50E-01	3.02E-01	5.60E-01	7.26E-01	4.34E-01
20	6.16E-02	6.51E-02	7.66E-02	1.06E-01	2.20E-01	4.62E-01	6.62E-01	3.97E-01
30	4.11E-02	4.26E-02	5.01E-02	6.70E-02	1.35E-01	3.25E-01	5.31E-01	3.40E-01
40	3.07E-02	3.19E-02	3.71E-02	4.75E-02	9.34E-02	2.47E-01	4.31E-01	3.02E-01
50	2.43E-02	2.59E-02	2.89E-02	3.70E-02	7.24E-02	2.01E-01	3.60E-01	2.70E-01

表 C.1.2 左右の照射に対する中性子フルエンスから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数<sup>36</sup>

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$								ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	
1.00E-09	2.57E+00	2.64E+00	2.60E+00	2.45E+00	2.20E+00	1.69E+00	1.20E+00	1.14E-01	5.16E-01
1.00E-08	2.86E+00	2.94E+00	3.04E+00	2.85E+00	2.53E+00	2.02E+00	1.44E+00	1.41E-01	5.90E-01
2.50E-08	2.70E+00	2.87E+00	3.14E+00	2.79E+00	2.48E+00	2.05E+00	1.56E+00	1.61E-01	6.00E-01
1.00E-07	2.71E+00	2.96E+00	2.85E+00	2.93E+00	2.65E+00	2.25E+00	1.77E+00	2.13E-01	6.29E-01
2.00E-07	2.73E+00	3.00E+00	3.15E+00	2.76E+00	2.70E+00	2.34E+00	1.83E+00	2.45E-01	6.63E-01
5.00E-07	2.73E+00	2.89E+00	2.94E+00	2.94E+00	2.62E+00	2.41E+00	1.99E+00	2.70E-01	6.80E-01
1.00E-06	2.73E+00	2.81E+00	2.90E+00	2.84E+00	2.59E+00	2.36E+00	1.97E+00	3.17E-01	6.85E-01

(続く)

<sup>36</sup> N. E. Hertel (2020). *Personal communication* (Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia).

表 C.1.2 (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$								
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	ROT
2.00E-06	2.71E+00	2.75E+00	2.67E+00	2.75E+00	2.59E+00	2.34E+00	2.02E+00	3.39E-01	7.11E-01
5.00E-06	2.45E+00	2.47E+00	2.66E+00	2.60E+00	2.44E+00	2.30E+00	1.87E+00	3.41E-01	6.94E-01
1.00E-05	2.37E+00	2.59E+00	2.48E+00	2.58E+00	2.33E+00	2.18E+00	1.85E+00	3.43E-01	6.61E-01
2.00E-05	2.26E+00	2.33E+00	2.55E+00	2.35E+00	2.34E+00	2.08E+00	1.75E+00	3.75E-01	6.52E-01
5.00E-05	2.15E+00	2.31E+00	2.19E+00	2.38E+00	2.19E+00	1.88E+00	1.69E+00	3.64E-01	6.43E-01
1.00E-04	2.03E+00	2.05E+00	2.16E+00	2.24E+00	2.08E+00	1.98E+00	1.60E+00	3.81E-01	6.15E-01
2.00E-04	1.91E+00	1.98E+00	2.18E+00	2.08E+00	2.00E+00	1.81E+00	1.53E+00	3.59E-01	5.84E-01
5.00E-04	1.90E+00	1.82E+00	2.07E+00	1.97E+00	1.92E+00	1.81E+00	1.53E+00	3.63E-01	5.78E-01
1.00E-03	1.90E+00	1.76E+00	1.95E+00	1.80E+00	1.85E+00	1.67E+00	1.45E+00	3.71E-01	5.41E-01
2.00E-03	1.85E+00	1.88E+00	1.95E+00	2.00E+00	1.73E+00	1.64E+00	1.51E+00	3.56E-01	5.56E-01
5.00E-03	1.96E+00	2.14E+00	2.12E+00	1.98E+00	2.04E+00	1.76E+00	1.64E+00	3.68E-01	6.05E-01
1.00E-02	2.40E+00	2.44E+00	2.46E+00	2.39E+00	2.34E+00	2.18E+00	1.83E+00	3.51E-01	6.67E-01
2.00E-02	3.04E+00	3.11E+00	3.09E+00	3.12E+00	2.96E+00	2.79E+00	2.42E+00	3.56E-01	8.29E-01
3.00E-02	3.71E+00	3.75E+00	3.78E+00	3.71E+00	3.58E+00	3.39E+00	2.91E+00	3.76E-01	9.71E-01
5.00E-02	4.98E+00	5.04E+00	4.93E+00	4.85E+00	4.76E+00	4.56E+00	3.92E+00	3.89E-01	1.25E+00
7.00E-02	6.20E+00	6.21E+00	6.07E+00	5.70E+00	5.86E+00	5.60E+00	4.93E+00	3.85E-01	1.55E+00
1.00E-01	7.50E+00	7.68E+00	7.47E+00	7.28E+00	7.42E+00	6.96E+00	6.20E+00	4.04E-01	1.90E+00
1.50E-01	9.99E+00	9.73E+00	9.52E+00	9.27E+00	9.19E+00	8.89E+00	8.13E+00	4.29E-01	2.41E+00
2.00E-01	1.14E+01	1.16E+01	1.13E+01	1.11E+01	1.09E+01	1.08E+01	9.78E+00	4.30E-01	2.98E+00
3.00E-01	1.41E+01	1.46E+01	1.43E+01	1.38E+01	1.38E+01	1.40E+01	1.26E+01	4.66E-01	3.65E+00
5.00E-01	1.87E+01	1.92E+01	1.90E+01	1.80E+01	1.86E+01	1.85E+01	1.72E+01	5.55E-01	5.07E+00
7.00E-01	2.15E+01	2.22E+01	2.20E+01	2.11E+01	2.12E+01	2.17E+01	2.07E+01	6.53E-01	5.98E+00
9.00E-01	2.48E+01	2.56E+01	2.54E+01	2.44E+01	2.38E+01	2.49E+01	2.36E+01	8.01E-01	7.02E+00
1.00E+00	3.06E+01	3.07E+01	3.01E+01	3.12E+01	2.88E+01	2.91E+01	2.69E+01	6.28E-01	7.95E+00
1.20E+00	2.88E+01	2.90E+01	2.91E+01	2.82E+01	2.81E+01	2.86E+01	2.73E+01	1.03E+00	8.53E+00
1.50E+00	3.09E+01	3.11E+01	3.12E+01	3.07E+01	3.06E+01	3.11E+01	2.94E+01	1.58E+00	9.28E+00
2.00E+00	3.50E+01	3.48E+01	3.39E+01	3.45E+01	3.45E+01	3.42E+01	3.36E+01	2.68E+00	1.09E+01
3.00E+00	4.06E+01	4.14E+01	3.96E+01	4.06E+01	3.97E+01	4.02E+01	3.88E+01	5.38E+00	1.38E+01
4.00E+00	4.81E+01	4.82E+01	4.91E+01	4.84E+01	4.82E+01	4.66E+01	4.68E+01	7.23E+00	1.62E+01
5.00E+00	5.17E+01	5.02E+01	4.88E+01	5.21E+01	5.16E+01	4.75E+01	4.87E+01	1.06E+01	1.82E+01
6.00E+00	5.51E+01	5.48E+01	5.56E+01	5.48E+01	5.47E+01	5.35E+01	5.36E+01	1.24E+01	2.03E+01
7.00E+00	5.62E+01	5.44E+01	5.44E+01	5.46E+01	5.60E+01	5.31E+01	5.34E+01	1.63E+01	2.13E+01
8.00E+00	5.80E+01	5.97E+01	5.85E+01	5.89E+01	5.74E+01	5.74E+01	5.56E+01	1.76E+01	2.25E+01
9.00E+00	6.27E+01	6.18E+01	6.18E+01	6.39E+01	6.23E+01	5.96E+01	5.87E+01	1.94E+01	2.38E+01
1.00E+01	6.59E+01	6.67E+01	6.68E+01	6.70E+01	6.51E+01	6.30E+01	6.24E+01	2.09E+01	2.49E+01
1.20E+01	7.38E+01	7.34E+01	7.39E+01	7.32E+01	7.08E+01	7.20E+01	6.64E+01	2.41E+01	2.80E+01
1.40E+01	7.40E+01	7.42E+01	7.46E+01	7.55E+01	7.10E+01	7.18E+01	7.04E+01	2.76E+01	3.01E+01
1.50E+01	7.81E+01	7.73E+01	8.06E+01	7.65E+01	7.49E+01	7.76E+01	7.38E+01	2.93E+01	3.19E+01
1.60E+01	7.73E+01	7.82E+01	7.65E+01	7.85E+01	7.71E+01	7.51E+01	7.15E+01	3.03E+01	3.12E+01
1.80E+01	7.73E+01	7.72E+01	7.73E+01	7.75E+01	8.00E+01	7.86E+01	7.53E+01	3.44E+01	3.14E+01
2.00E+01	7.48E+01	7.48E+01	7.77E+01	7.86E+01	7.59E+01	7.87E+01	7.38E+01	3.79E+01	3.26E+01
3.00E+01	6.43E+01	6.51E+01	6.95E+01	7.59E+01	6.85E+01	7.13E+01	7.54E+01	4.70E+01	3.41E+01
5.00E+01	5.07E+01	5.54E+01	5.93E+01	6.64E+01	6.77E+01	7.61E+01	7.80E+01	6.50E+01	3.42E+01

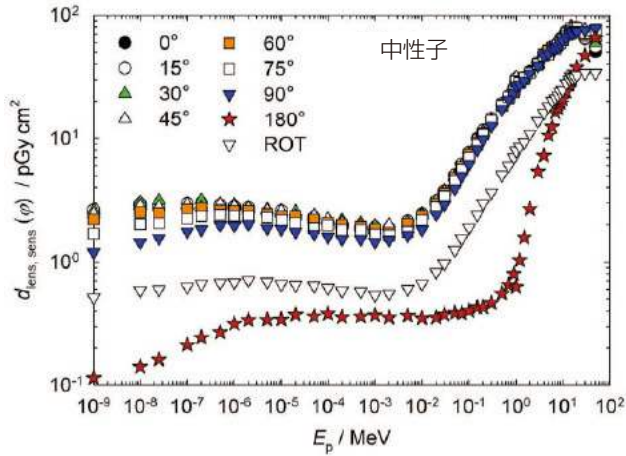


図 C.1.2 左右の照射に対する中性子フルエンスから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数<sup>37</sup>

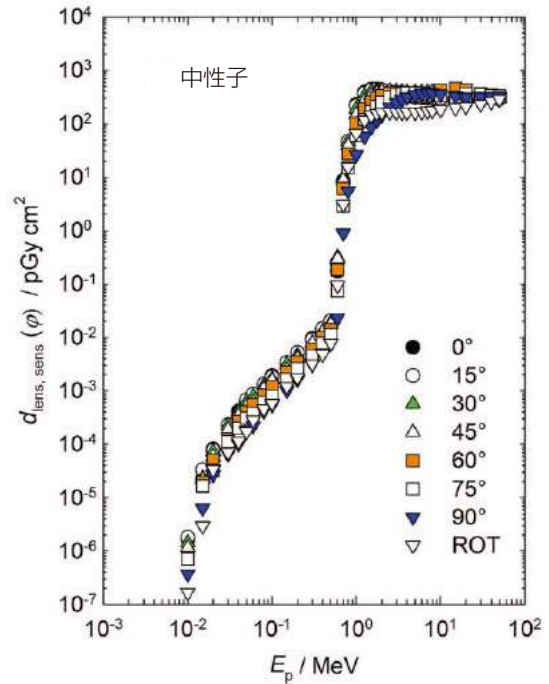


図 C.1.3 左右の照射に対する電子フルエンスから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

表 C.1.3 左右の照射に対する電子フルエンスから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\phi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\phi)/(\text{pGy cm}^2)$							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
0.01	1.68E-06	1.81E-06	1.43E-06	1.16E-06	7.55E-07	7.04E-07	3.74E-07	1.67E-07
0.015	2.26E-05	3.34E-05	2.34E-05	2.22E-05	1.96E-05	1.66E-05	6.43E-06	2.95E-06
0.02	8.15E-05	7.79E-05	7.25E-05	5.81E-05	4.99E-05	3.24E-05	2.73E-05	3.40E-05
0.03	2.23E-04	2.30E-04	2.25E-04	1.89E-04	1.26E-04	1.12E-04	6.60E-05	7.02E-05
0.04	4.16E-04	3.40E-04	4.04E-04	3.49E-04	2.71E-04	2.00E-04	1.02E-04	1.13E-04
0.05	6.07E-04	6.75E-04	6.16E-04	5.09E-04	4.08E-04	3.06E-04	1.86E-04	1.72E-04
0.06	8.47E-04	8.68E-04	7.80E-04	6.15E-04	5.57E-04	3.87E-04	2.24E-04	2.83E-04
0.08	1.31E-03	1.33E-03	1.23E-03	1.08E-03	8.32E-04	6.11E-04	4.21E-04	4.60E-04
0.1	1.92E-03	1.80E-03	1.66E-03	1.57E-03	1.20E-03	7.97E-04	5.48E-04	5.86E-04
0.15	3.24E-03	3.36E-03	3.11E-03	2.47E-03	2.23E-03	1.65E-03	1.02E-03	1.20E-03
0.2	5.04E-03	5.21E-03	4.60E-03	4.07E-03	3.47E-03	2.59E-03	1.64E-03	1.77E-03
0.3	9.58E-03	9.08E-03	7.91E-03	7.83E-03	6.02E-03	4.52E-03	3.11E-03	3.20E-03
0.4	1.41E-02	1.47E-02	1.29E-02	1.25E-02	1.00E-02	7.88E-03	5.09E-03	4.83E-03
0.5	2.06E-02	2.06E-02	1.91E-02	1.76E-02	1.41E-02	1.13E-02	7.66E-03	7.78E-03
0.6	1.75E-01	2.32E-01	3.17E-01	2.97E-01	1.86E-01	7.49E-02	2.32E-02	9.44E-02
0.7	7.56E+00	8.46E+00	9.60E+00	8.88E+00	6.08E+00	2.89E+00	8.98E-01	3.08E+00
0.8	4.62E+01	4.66E+01	4.57E+01	3.93E+01	2.77E+01	1.50E+01	5.51E+00	1.54E+01

(続く)

<sup>37</sup> N. E. Hertel (2020). *Personal communication* (Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia).

表 C.1.3 (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
1	2.29E+02	2.18E+02	1.89E+02	1.50E+02	1.04E+02	6.11E+01	2.66E+01	6.64E+01
1.25	3.87E+02	3.73E+02	3.29E+02	2.69E+02	1.92E+02	1.19E+02	5.77E+01	1.17E+02
1.5	4.42E+02	4.30E+02	3.94E+02	3.39E+02	2.57E+02	1.69E+02	8.67E+01	1.44E+02
1.75	4.45E+02	4.41E+02	4.17E+02	3.80E+02	3.06E+02	2.12E+02	1.16E+02	1.57E+02
2	4.30E+02	4.29E+02	4.19E+02	4.01E+02	3.39E+02	2.52E+02	1.46E+02	1.62E+02
2.5	3.87E+02	3.94E+02	4.00E+02	4.09E+02	3.75E+02	3.13E+02	2.02E+02	1.65E+02
3	3.55E+02	3.65E+02	3.78E+02	4.02E+02	3.85E+02	3.49E+02	2.46E+02	1.64E+02
3.5	3.35E+02	3.46E+02	3.62E+02	3.91E+02	3.82E+02	3.70E+02	2.85E+02	1.64E+02
4	3.23E+02	3.35E+02	3.53E+02	3.85E+02	3.72E+02	3.80E+02	3.14E+02	1.63E+02
5	3.11E+02	3.23E+02	3.42E+02	3.78E+02	3.51E+02	3.82E+02	3.50E+02	1.65E+02
6	3.04E+02	3.16E+02	3.38E+02	3.82E+02	3.33E+02	3.73E+02	3.69E+02	1.68E+02
7	3.00E+02	3.11E+02	3.34E+02	3.86E+02	3.23E+02	3.59E+02	3.75E+02	1.72E+02
8	2.97E+02	3.06E+02	3.27E+02	3.88E+02	3.56E+02	3.47E+02	3.72E+02	1.76E+02
10	2.95E+02	3.00E+02	3.16E+02	3.79E+02	4.20E+02	3.32E+02	3.57E+02	1.84E+02
15	2.90E+02	2.95E+02	2.98E+02	3.31E+02	4.60E+02	3.11E+02	3.29E+02	1.99E+02
20	2.91E+02	2.93E+02	2.95E+02	3.11E+02	4.28E+02	3.71E+02	3.15E+02	2.09E+02
30	2.92E+02	2.96E+02	2.96E+02	3.04E+02	3.71E+02	3.55E+02	3.20E+02	2.33E+02
40	2.93E+02	2.95E+02	2.96E+02	3.03E+02	3.45E+02	3.37E+02	3.20E+02	2.60E+02
50	2.90E+02	2.93E+02	2.97E+02	3.04E+02	3.31E+02	3.27E+02	3.21E+02	2.86E+02

表 C.1.4 左右の照射に対する陽電子フルエンスから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
0.001	7.43E+00	7.94E+00	7.89E+00	7.35E+00	6.13E+00	4.91E+00	3.47E+00	3.06E+00
0.002	7.17E+00	7.47E+00	7.43E+00	6.98E+00	5.88E+00	4.58E+00	3.21E+00	2.87E+00
0.003	6.99E+00	7.26E+00	7.39E+00	6.71E+00	5.61E+00	4.43E+00	3.05E+00	2.76E+00
0.004	6.88E+00	7.34E+00	7.28E+00	6.64E+00	5.70E+00	4.36E+00	3.01E+00	2.72E+00
0.005	7.02E+00	7.17E+00	7.29E+00	6.72E+00	5.67E+00	4.24E+00	3.07E+00	2.74E+00
0.006	6.97E+00	7.18E+00	7.33E+00	6.59E+00	5.54E+00	4.33E+00	2.91E+00	2.70E+00
0.007	6.85E+00	7.31E+00	7.22E+00	6.65E+00	5.58E+00	4.33E+00	2.98E+00	2.69E+00
0.008	6.92E+00	7.31E+00	7.21E+00	6.65E+00	5.51E+00	4.27E+00	2.95E+00	2.77E+00
0.009	6.84E+00	7.30E+00	7.14E+00	6.60E+00	5.57E+00	4.30E+00	2.94E+00	2.73E+00
0.01	6.87E+00	7.26E+00	7.18E+00	6.61E+00	5.52E+00	4.31E+00	2.94E+00	2.67E+00
0.013	6.78E+00	7.32E+00	7.20E+00	6.62E+00	5.53E+00	4.23E+00	2.98E+00	2.65E+00
0.015	6.88E+00	7.29E+00	7.08E+00	6.55E+00	5.65E+00	4.38E+00	2.92E+00	2.69E+00
0.017	6.96E+00	7.19E+00	7.23E+00	6.56E+00	5.55E+00	4.30E+00	2.94E+00	2.63E+00
0.02	6.79E+00	7.13E+00	7.17E+00	6.59E+00	5.49E+00	4.24E+00	3.01E+00	2.72E+00
0.024	6.93E+00	7.22E+00	7.28E+00	6.57E+00	5.59E+00	4.30E+00	2.92E+00	2.67E+00
0.03	6.95E+00	7.18E+00	7.27E+00	6.49E+00	5.59E+00	4.31E+00	2.94E+00	2.68E+00
0.04	6.94E+00	7.15E+00	7.26E+00	6.69E+00	5.62E+00	4.39E+00	2.91E+00	2.67E+00
0.05	6.87E+00	7.20E+00	7.20E+00	6.76E+00	5.55E+00	4.29E+00	2.92E+00	2.77E+00
0.06	6.91E+00	7.04E+00	7.28E+00	6.74E+00	5.61E+00	4.31E+00	3.00E+00	2.71E+00
0.07	6.99E+00	7.17E+00	7.35E+00	6.48E+00	5.52E+00	4.33E+00	2.96E+00	2.68E+00
0.08	6.96E+00	7.20E+00	7.21E+00	6.80E+00	5.61E+00	4.38E+00	3.01E+00	2.71E+00
0.1	6.97E+00	7.43E+00	7.26E+00	6.71E+00	5.57E+00	4.25E+00	3.00E+00	2.73E+00
0.15	6.94E+00	7.30E+00	7.30E+00	6.68E+00	5.63E+00	4.23E+00	2.98E+00	2.79E+00
0.2	7.13E+00	7.42E+00	7.60E+00	6.93E+00	5.76E+00	4.43E+00	2.99E+00	2.75E+00

(続く)

表 C.1.4 (続き)

$E_p$ /MeV	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\varphi)$ /(pGy cm <sup>2</sup> )							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
0.3	7.29E+00	7.61E+00	7.66E+00	6.97E+00	5.80E+00	4.50E+00	3.12E+00	2.90E+00
0.4	7.60E+00	7.97E+00	7.71E+00	7.12E+00	5.88E+00	4.70E+00	3.16E+00	2.96E+00
0.5	7.91E+00	8.35E+00	8.11E+00	7.36E+00	6.23E+00	4.70E+00	3.24E+00	3.02E+00
0.6	8.44E+00	8.70E+00	8.86E+00	8.11E+00	6.67E+00	4.98E+00	3.39E+00	3.26E+00
0.7	1.71E+01	1.84E+01	1.95E+01	1.80E+01	1.34E+01	8.33E+00	4.46E+00	6.91E+00
0.8	5.95E+01	5.97E+01	5.86E+01	5.03E+01	3.65E+01	2.15E+01	9.54E+00	2.02E+01
1	2.48E+02	2.37E+02	2.06E+02	1.64E+02	1.15E+02	6.88E+01	3.18E+01	7.28E+01
1.25	3.94E+02	3.79E+02	3.35E+02	2.77E+02	2.03E+02	1.27E+02	6.18E+01	1.21E+02
1.5	4.34E+02	4.24E+02	3.90E+02	3.41E+02	2.61E+02	1.72E+02	9.22E+01	1.45E+02
1.75	4.32E+02	4.24E+02	4.10E+02	3.72E+02	3.06E+02	2.13E+02	1.20E+02	1.54E+02
2	4.13E+02	4.13E+02	4.05E+02	3.87E+02	3.35E+02	2.50E+02	1.46E+02	1.58E+02
2.5	3.68E+02	3.76E+02	3.83E+02	3.92E+02	3.68E+02	3.04E+02	2.03E+02	1.59E+02
3	3.41E+02	3.50E+02	3.64E+02	3.87E+02	3.68E+02	3.37E+02	2.47E+02	1.61E+02
3.5	3.22E+02	3.31E+02	3.48E+02	3.77E+02	3.66E+02	3.53E+02	2.76E+02	1.59E+02
4	3.12E+02	3.24E+02	3.40E+02	3.71E+02	3.56E+02	3.69E+02	3.03E+02	1.58E+02
5	3.02E+02	3.13E+02	3.36E+02	3.63E+02	3.34E+02	3.70E+02	3.40E+02	1.60E+02
6	2.97E+02	3.08E+02	3.29E+02	3.68E+02	3.24E+02	3.57E+02	3.52E+02	1.63E+02
7	2.93E+02	3.04E+02	3.26E+02	3.72E+02	3.13E+02	3.39E+02	3.64E+02	1.69E+02
8	2.92E+02	2.96E+02	3.21E+02	3.76E+02	3.46E+02	3.35E+02	3.58E+02	1.71E+02
10	2.89E+02	2.94E+02	3.11E+02	3.68E+02	4.08E+02	3.23E+02	3.44E+02	1.80E+02
15	2.90E+02	2.91E+02	2.98E+02	3.22E+02	4.39E+02	3.10E+02	3.23E+02	1.94E+02
20	2.89E+02	2.91E+02	2.94E+02	3.06E+02	4.12E+02	3.55E+02	3.11E+02	2.06E+02
30	2.90E+02	2.91E+02	2.92E+02	2.98E+02	3.59E+02	3.37E+02	3.09E+02	2.29E+02
40	2.91E+02	2.94E+02	2.95E+02	2.98E+02	3.37E+02	3.24E+02	3.06E+02	2.57E+02
50	2.93E+02	2.91E+02	2.95E+02	2.95E+02	3.23E+02	3.23E+02	3.10E+02	2.78E+02

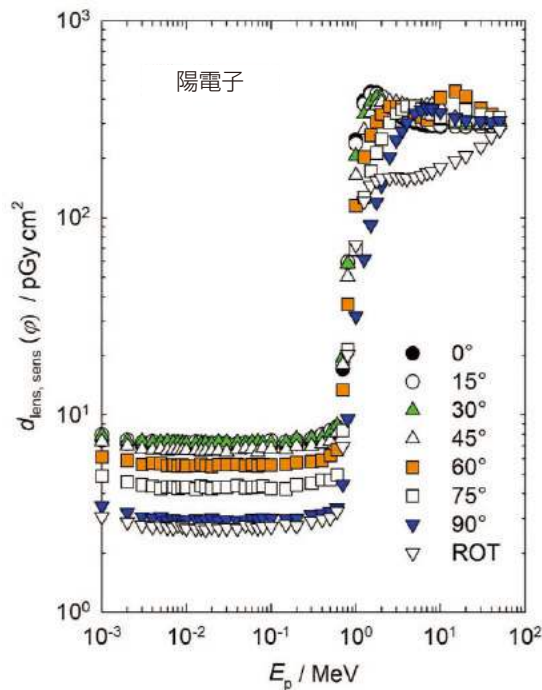


図 C.1.4 左右の照射に対する陽電子フルエンスから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

C.2 荷電粒子平衡状態の放射線場における 50 MeV 未満のエネルギーの光子

光子の周辺線量，方向性水晶体吸収線量と個人水晶体吸収線量，方向性局所皮膚吸収線量と個人局所皮膚吸収線量および個人線量を測定するエリアモニタリング機器と個人線量計は，荷電粒子平衡条件を完全に満たすために機器の前に十分な厚さの材料を置いて日常的に校正されている。

表 C.2.1a と図 C.2.1a は，荷電粒子平衡を近似するためのカーマ近似法を用い，50 MeV 未満の光子エネルギーについてこの手順のための光子フルエンスから方向性水晶体

吸収線量と個人水晶体吸収線量の換算係数の値を示している。表 C.2.1b と図 C.2.1b では空気カーマからの値を示している。ここに示した換算係数は，眼球モデルの全身被ばく (Behrens and Dietze, 2011) に関して，広い均一な平行ビームの水平面へ，0° (A-P) から 90° までの 15° ごとの角度  $\varphi$  ならびに回転 (ROT) での入射について計算されている。左右の水晶体の最大値として感受性の高い細胞の換算係数が計算されている。感受性の高い細胞について左右で大きい方の値をすべての角度  $\varphi$  で積分して回転照射の値を求めると，回転照射の計算値と一致しない結果が得られる。

表 C.2.1a カーマ近似法を用いて算出した，左右の照射に対する光子フルエンスから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p$ /MeV	入射角度 $\varphi$ における $d_{lens, sens}(\varphi)$ /(pGy cm <sup>2</sup> )							
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	ROT
0.005	4.10E-05	6.91E-05	1.48E-04	1.56E-04	5.95E-05	7.94E-06	4.11E-07	3.06E-05
0.006	7.94E-03	8.87E-03	1.06E-02	1.02E-02	5.73E-03	1.56E-03	1.74E-04	3.13E-03
0.007	1.07E-01	1.06E-01	1.05E-01	9.16E-02	6.22E-02	2.67E-02	4.67E-03	3.39E-02
0.008	4.25E-01	4.12E-01	3.79E-01	3.24E-01	2.35E-01	1.23E-01	3.65E-02	1.29E-01
0.009	9.03E-01	8.76E-01	7.97E-01	6.77E-01	5.21E-01	3.20E-01	1.22E-01	2.85E-01
0.01	1.38E+00	1.34E+00	1.23E+00	1.06E+00	8.58E-01	5.79E-01	2.63E-01	4.52E-01
0.011	1.73E+00	1.69E+00	1.57E+00	1.39E+00	1.15E+00	8.45E-01	4.43E-01	5.92E-01
0.013	2.02E+00	2.00E+00	1.90E+00	1.74E+00	1.53E+00	1.25E+00	7.87E-01	7.59E-01
0.015	1.98E+00	1.96E+00	1.89E+00	1.77E+00	1.63E+00	1.41E+00	1.02E+00	7.97E-01
0.017	1.80E+00	1.79E+00	1.74E+00	1.67E+00	1.55E+00	1.40E+00	1.11E+00	7.72E-01
0.02	1.49E+00	1.49E+00	1.47E+00	1.43E+00	1.35E+00	1.26E+00	1.07E+00	6.87E-01
0.024	1.16E+00	1.17E+00	1.15E+00	1.14E+00	1.11E+00	1.05E+00	9.27E-01	5.79E-01
0.03	8.53E-01	8.48E-01	8.50E-01	8.50E-01	8.24E-01	7.93E-01	7.28E-01	4.59E-01
0.04	5.89E-01	5.95E-01	5.97E-01	5.92E-01	5.87E-01	5.77E-01	5.30E-01	3.43E-01
0.05	4.89E-01	4.88E-01	4.94E-01	5.00E-01	4.97E-01	4.80E-01	4.46E-01	2.99E-01
0.06	4.51E-01	4.52E-01	4.61E-01	4.64E-01	4.59E-01	4.41E-01	4.28E-01	2.86E-01
0.07	4.55E-01	4.63E-01	4.61E-01	4.61E-01	4.59E-01	4.46E-01	4.31E-01	2.92E-01
0.08	4.81E-01	4.86E-01	4.84E-01	4.87E-01	4.77E-01	4.77E-01	4.60E-01	3.14E-01
0.1	5.58E-01	5.59E-01	5.68E-01	5.69E-01	5.62E-01	5.58E-01	5.42E-01	3.75E-01
0.12	6.62E-01	6.70E-01	6.68E-01	6.73E-01	6.62E-01	6.66E-01	6.42E-01	4.56E-01
0.15	8.35E-01	8.39E-01	8.48E-01	8.41E-01	8.44E-01	8.37E-01	8.07E-01	5.78E-01
0.2	1.14E+00	1.14E+00	1.16E+00	1.17E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.12E+00	8.08E-01
0.24	1.38E+00	1.40E+00	1.40E+00	1.39E+00	1.42E+00	1.40E+00	1.38E+00	9.96E-01
0.3	1.75E+00	1.76E+00	1.76E+00	1.78E+00	1.80E+00	1.76E+00	1.73E+00	1.30E+00
0.4	2.29E+00	2.37E+00	2.33E+00	2.37E+00	2.39E+00	2.34E+00	2.29E+00	1.75E+00
0.5	2.82E+00	2.82E+00	2.88E+00	2.93E+00	3.01E+00	2.86E+00	2.84E+00	2.23E+00
0.511	2.91E+00	2.91E+00	2.95E+00	3.00E+00	2.98E+00	2.90E+00	2.92E+00	2.26E+00
0.6	3.35E+00	3.37E+00	3.42E+00	3.48E+00	3.49E+00	3.39E+00	3.38E+00	2.64E+00
0.662	3.64E+00	3.65E+00	3.69E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.66E+00	3.65E+00	2.92E+00
0.8	4.24E+00	4.33E+00	4.31E+00	4.38E+00	4.41E+00	4.32E+00	4.31E+00	3.46E+00
1	5.09E+00	5.10E+00	5.12E+00	5.24E+00	5.31E+00	5.12E+00	5.09E+00	4.24E+00
1.117	5.58E+00	5.57E+00	5.71E+00	5.68E+00	5.74E+00	5.57E+00	5.54E+00	4.63E+00
1.2	5.81E+00	5.93E+00	5.93E+00	5.98E+00	6.03E+00	5.90E+00	5.85E+00	4.87E+00
1.3	6.23E+00	6.27E+00	6.29E+00	6.41E+00	6.43E+00	6.25E+00	6.26E+00	5.25E+00

(続く)

表 C.2.1a (続き)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							
	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$	ROT
1.33	6.32E+00	6.36E+00	6.35E+00	6.45E+00	6.51E+00	6.37E+00	6.35E+00	5.39E+00
1.5	6.89E+00	6.98E+00	6.91E+00	7.02E+00	7.10E+00	6.90E+00	6.89E+00	5.98E+00
1.7	7.47E+00	7.58E+00	7.59E+00	7.68E+00	7.78E+00	7.55E+00	7.53E+00	6.49E+00
2	8.39E+00	8.44E+00	8.47E+00	8.53E+00	8.62E+00	8.42E+00	8.35E+00	7.23E+00
2.4	9.41E+00	9.53E+00	9.52E+00	9.71E+00	9.72E+00	9.48E+00	9.60E+00	8.32E+00
3	1.10E+01	1.10E+01	1.11E+01	1.11E+01	1.12E+01	1.09E+01	1.09E+01	9.82E+00
4	1.32E+01	1.33E+01	1.34E+01	1.33E+01	1.34E+01	1.32E+01	1.32E+01	1.18E+01
5	1.54E+01	1.54E+01	1.55E+01	1.57E+01	1.56E+01	1.53E+01	1.55E+01	1.38E+01
6	1.74E+01	1.74E+01	1.75E+01	1.76E+01	1.75E+01	1.74E+01	1.75E+01	1.56E+01
6.129	1.76E+01	1.77E+01	1.77E+01	1.80E+01	1.81E+01	1.74E+01	1.76E+01	1.61E+01
8	2.15E+01	2.17E+01	2.14E+01	2.15E+01	2.16E+01	2.15E+01	2.16E+01	1.93E+01
10	2.54E+01	2.55E+01	2.57E+01	2.55E+01	2.55E+01	2.56E+01	2.56E+01	2.36E+01
15	3.59E+01	3.61E+01	3.57E+01	3.57E+01	3.59E+01	3.55E+01	3.52E+01	3.32E+01
20	4.61E+01	4.63E+01	4.69E+01	4.66E+01	4.67E+01	4.65E+01	4.64E+01	4.35E+01
30	6.96E+01	6.97E+01	6.96E+01	6.93E+01	6.87E+01	7.00E+01	6.86E+01	6.45E+01
40	9.40E+01	9.34E+01	9.35E+01	9.40E+01	9.49E+01	9.33E+01	9.21E+01	8.72E+01
50	1.19E+02	1.19E+02	1.20E+02	1.19E+02	1.19E+02	1.17E+02	1.17E+02	1.09E+02

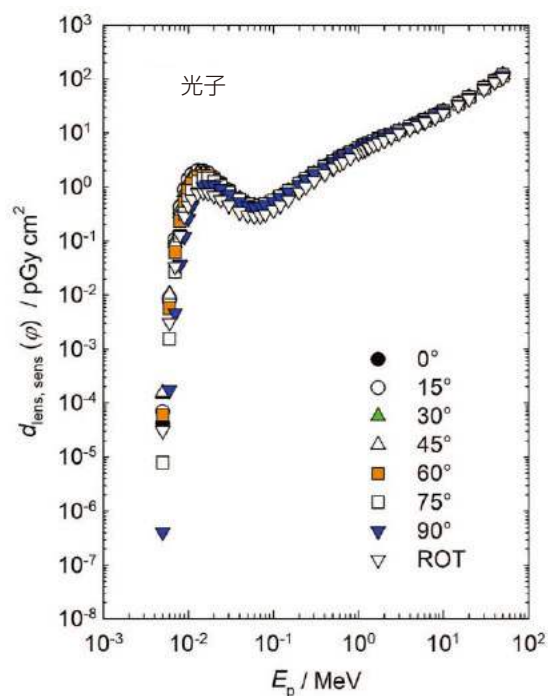


図 C.2.1a カーマ近似法を用いて算出した、左右の照射に対する光子フルエンスから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

表 C.2.1b カーマ近似法を用いて算出した、左右の照射に対する光子空気カーマから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

$E_p/\text{MeV}$	入射角度 $\varphi$ における $d_{\text{lens, sens}}(\varphi)/(\text{pGy cm}^2)$							ROT
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.005	1.34E-06	2.25E-06	4.84E-06	5.10E-06	1.94E-06	2.59E-07	1.34E-08	9.99E-07
0.006	3.74E-04	4.17E-04	4.99E-04	4.79E-04	2.69E-04	7.33E-05	8.21E-06	1.47E-04
0.007	6.88E-03	6.86E-03	6.75E-03	5.91E-03	4.01E-03	1.72E-03	3.01E-04	2.19E-03
0.008	3.61E-02	3.50E-02	3.21E-02	2.75E-02	1.99E-02	1.05E-02	3.09E-03	1.10E-02
0.009	9.80E-02	9.50E-02	8.65E-02	7.35E-02	5.65E-02	3.47E-02	1.33E-02	3.09E-02
0.01	1.86E-01	1.81E-01	1.66E-01	1.44E-01	1.16E-01	7.82E-02	3.55E-02	6.11E-02
0.011	2.86E-01	2.79E-01	2.59E-01	2.29E-01	1.91E-01	1.40E-01	7.32E-02	9.80E-02
0.013	4.78E-01	4.71E-01	4.48E-01	4.11E-01	3.61E-01	2.96E-01	1.86E-01	1.79E-01
0.015	6.33E-01	6.26E-01	6.03E-01	5.68E-01	5.22E-01	4.51E-01	3.25E-01	2.55E-01
0.017	7.56E-01	7.49E-01	7.29E-01	7.01E-01	6.49E-01	5.86E-01	4.63E-01	3.23E-01
0.02	8.87E-01	8.83E-01	8.74E-01	8.47E-01	8.03E-01	7.50E-01	6.36E-01	4.08E-01
0.024	1.01E+00	1.02E+00	1.00E+00	9.89E-01	9.61E-01	9.12E-01	8.06E-01	5.04E-01
0.03	1.18E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.18E+00	1.14E+00	1.10E+00	1.01E+00	6.35E-01
0.04	1.37E+00	1.39E+00	1.39E+00	1.38E+00	1.37E+00	1.34E+00	1.24E+00	7.99E-01
0.05	1.52E+00	1.51E+00	1.53E+00	1.55E+00	1.54E+00	1.49E+00	1.38E+00	9.27E-01
0.06	1.56E+00	1.57E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.59E+00	1.53E+00	1.48E+00	9.89E-01
0.07	1.58E+00	1.61E+00	1.60E+00	1.60E+00	1.59E+00	1.55E+00	1.50E+00	1.01E+00
0.08	1.57E+00	1.59E+00	1.58E+00	1.59E+00	1.55E+00	1.55E+00	1.50E+00	1.02E+00
0.1	1.50E+00	1.51E+00	1.53E+00	1.53E+00	1.51E+00	1.50E+00	1.46E+00	1.01E+00
0.12	1.44E+00	1.45E+00	1.45E+00	1.46E+00	1.44E+00	1.44E+00	1.39E+00	9.90E-01
0.15	1.39E+00	1.40E+00	1.42E+00	1.40E+00	1.41E+00	1.40E+00	1.35E+00	9.64E-01
0.2	1.33E+00	1.34E+00	1.35E+00	1.36E+00	1.34E+00	1.34E+00	1.31E+00	9.43E-01
0.24	1.30E+00	1.32E+00	1.32E+00	1.30E+00	1.34E+00	1.32E+00	1.30E+00	9.38E-01
0.3	1.27E+00	1.27E+00	1.27E+00	1.29E+00	1.30E+00	1.27E+00	1.25E+00	9.38E-01
0.4	1.21E+00	1.25E+00	1.23E+00	1.25E+00	1.26E+00	1.24E+00	1.21E+00	9.24E-01
0.5	1.18E+00	1.19E+00	1.21E+00	1.23E+00	1.26E+00	1.20E+00	1.19E+00	9.36E-01
0.511	1.20E+00	1.20E+00	1.21E+00	1.23E+00	1.22E+00	1.19E+00	1.20E+00	9.29E-01
0.6	1.18E+00	1.18E+00	1.20E+00	1.22E+00	1.23E+00	1.19E+00	1.19E+00	9.30E-01
0.662	1.17E+00	1.17E+00	1.19E+00	1.21E+00	1.22E+00	1.18E+00	1.17E+00	9.37E-01
0.8	1.15E+00	1.17E+00	1.16E+00	1.18E+00	1.19E+00	1.17E+00	1.16E+00	9.35E-01
1	1.14E+00	1.14E+00	1.14E+00	1.17E+00	1.18E+00	1.14E+00	1.14E+00	9.45E-01
1.117	1.14E+00	1.14E+00	1.17E+00	1.16E+00	1.18E+00	1.14E+00	1.13E+00	9.48E-01
1.2	1.13E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.16E+00	1.17E+00	1.14E+00	1.13E+00	9.43E-01
1.3	1.13E+00	1.14E+00	1.14E+00	1.17E+00	1.17E+00	1.14E+00	1.14E+00	9.55E-01
1.33	1.13E+00	1.14E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.16E+00	1.14E+00	1.13E+00	9.62E-01
1.5	1.12E+00	1.13E+00	1.12E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.12E+00	1.12E+00	9.72E-01
1.7	1.11E+00	1.13E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.16E+00	1.12E+00	1.12E+00	9.65E-01
2	1.11E+00	1.12E+00	1.12E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.11E+00	1.10E+00	9.56E-01
2.4	1.10E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.13E+00	1.14E+00	1.11E+00	1.12E+00	9.72E-01
3	1.10E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.13E+00	1.09E+00	1.09E+00	9.84E-01
4	1.09E+00	1.10E+00	1.11E+00	1.10E+00	1.10E+00	1.09E+00	1.09E+00	9.72E-01
5	1.09E+00	1.08E+00	1.09E+00	1.11E+00	1.10E+00	1.08E+00	1.09E+00	9.71E-01
6	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.09E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00	9.68E-01
6.129	1.07E+00	1.08E+00	1.07E+00	1.09E+00	1.10E+00	1.06E+00	1.07E+00	9.79E-01
8	1.07E+00	1.08E+00	1.06E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	1.07E+00	9.61E-01
10	1.05E+00	1.05E+00	1.07E+00	1.06E+00	1.06E+00	1.06E+00	1.06E+00	9.78E-01
15	1.04E+00	1.05E+00	1.03E+00	1.04E+00	1.04E+00	1.03E+00	1.02E+00	9.62E-01
20	1.02E+00	1.02E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.02E+00	9.58E-01
30	1.01E+00	1.02E+00	1.01E+00	1.01E+00	1.00E+00	1.02E+00	9.99E-01	9.41E-01
40	1.01E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.01E+00	1.02E+00	1.00E+00	9.87E-01	9.35E-01
50	9.95E-01	1.00E+00	1.01E+00	9.97E-01	9.95E-01	9.78E-01	9.81E-01	9.15E-01

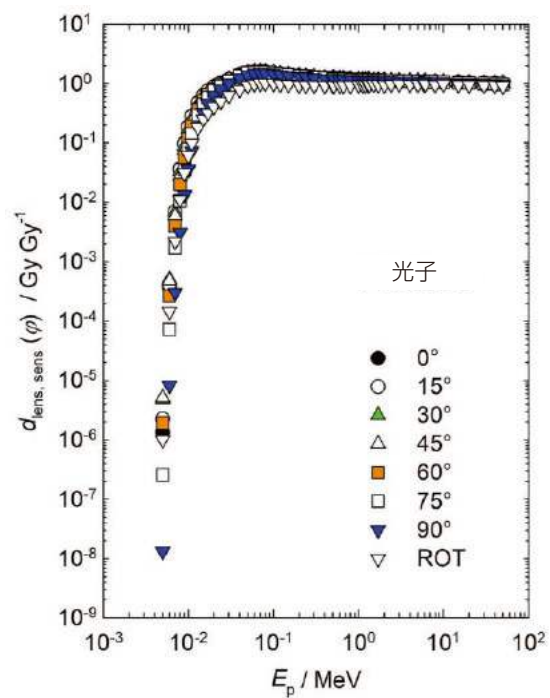


図 C.2.1b カーマ近似法を用いて算出した、左右の照射に対する光子空気カーマから眼の水晶体の感受性の高い細胞の最大吸収線量への換算係数 (Behrens, 2017a)

## 参考文献

- Anderson, I. O., and Braun, J. (1963). "A neutron rem counter with uniform sensitivity from 0.25 eV to 10 MeV," pp. 87–95 in *Neutron Dosimetry, Proceedings of the Symposium on Neutron Detection Dosimetry Standards 2 87* (Harwell, England).
- Armstrong, T. W., and Chandler, K. C. (1973). *SPAR, a FORTRAN Program for Computing Stopping Powers and Ranges for Muons, Charged Pions, Protons and Heavy Ions*, ORNL-4869 (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN).
- Attix, F. H. (1979a). "The partition of kerma to account for Bremsstrahlung," *Health. Phys.* 36, 347–354.
- Attix, F. H. (1979b). "Addendum to The partition of kerma to account for Bremsstrahlung," *Health. Phys.* 36, 536.
- Bartlett, D. T., and Dietze, G. (2010). ICRU Operational Quantities. *Radiat. Prot. Dosim.* 139, 475–476.
- Behrens, R. (2012). "On the operational quantity  $H_p(3)$  for eye lens dosimetry," *J. Radiol. Prot.* 32, 455–464.
- Behrens, R. (2017a). "Compilation of conversion coefficients for the dose to the lens of the eye," *Radiat. Prot. Dosim.* 174, 348–370.
- Behrens, R. (2017b). "Conversion coefficients for  $H(3;Q)$  for photons," *J. Radiol. Prot.* 37, 354–378.
- Behrens, R., and Dietze, G. (2011). "Dose conversion coefficients for photon exposure of the human eye lens," *Phys. Med. Biol.* 56, 415–437.
- Berger, M. J. (1963). "Monte carlo calculation of the penetration and diffusion of fast charged particles," pp. 135–215 in *Methods in Computational Physics*, Alder, B., Fernbach, S., and Rotenberg, M., Eds. (Academic Press, New York).
- Böhlen, T. T., Cerutti, F., Chin, M. P. W., et al (2014). "The FLUKA code: Developments and challenges for high energy and medical applications," *Nucl. Data Sheets.* 120, 211–214.
- Boudard, A., Cugnon, J., David, J. C., Leray, S., and Mancusi, D. (2013). "New potentialities of the Liege Intranuclear Cascade Model for reactions induced by nucleons and light charged particles," *Phys. Rev.* C87, 014606.
- Boutillon, M., and Allisy-Roberts, P. J. (1996). *Measurement of Air Kerma and Ambient Dose Equivalent in a  $^{137}\text{Cs}$  Beam*, Rapport BIPM-1996/07. <http://www.bipm.org/utis/common/pdf/rap-portBIPM/RapportBIPM-1996-07.pdf>.
- Burlin, T. E. (1981). "The relevance of fluence data to radiation protection," pp. 33–46 in *Radiation Protection Quantities for External Exposure*, Proceedings of European Seminar Braunschweig, 1980. (Harwood/CEC, Brussels and Luxembourg).
- Burlin, T. E., and Wheatley, B. M (1971). "A unified approach to dosimetry in radiological protection," *Phys. Med. Biol.* 16, 47–56.
- Burlin, T. E., Davies, M. L., and Wheatley, B. M. (1979). "Cavity ionisation theory applied to the design of a maximum permissible fluence instrument," *Phys. Med. Biol.* 24(1), 44–56.
- CEC (1983). Commission of the European Communities. *Operational Quantities for Use in External Radiation Protection Measurements. An Investigation of Concepts and Principles*, Radiological Protection-27, Report Eur 8346 EN (European Communities, Luxembourg).
- Conlin, J. L. Ed. (2017). *Listing of Available ACE Tables*, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-17-20709 (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico).
- Daures, J., Gouriou, J., and Bordy, J-M. (2011). "Monte Carlo determination of the conversion coefficients  $H_p(3)/K_a$  in a right cylinder phantom with PENELOPE code. Comparison with "MCNP" simulations," *Radiat. Prot. Dosim.* 144(1–4), 37–42.
- Dimbylow, P. J., and Francis, T. M. (1983). "The effect of photon scatter and consequent electron build-up in air on the calculation of dose equivalent quantities in the ICRU sphere for photon energies from 0.662 to 10 MeV," *Phys. Med. Biol.* 28, 817–828.
- Dimbylow, P. J., and Francis, T. M. (1984). "The calculation of dose equivalent quantities in the ICRU sphere for photon energies from 0.01 to 10 MeV," *Radiat. Prot. Dosim.* 9, 49–53.
- Dunford, C. L. (1991). "Evaluated nuclear data file, ENDF/B-VI," pp. 788–792 in *Proceedings of an International Conference on Nuclear Data for Science and Technology* (Jülich, Germany).
- Eakins, J. S., and Tanner, R. J. (2019). "The effects of a revised operational dose quantity on the response characteristics of a  $\beta/\gamma$  personal dosimeter," *J. Radiol. Prot.* 39, 399–421.
- Eakins, J. S., Tanner, R. J., and Hager, L. H. (2018). "The effect of a revised operational dose quantity on the response characteristics of neutron survey instruments," *J. Radiol. Prot.* 38, 688–701.
- Endo, A. (2016). "Operational quantities and new approach by ICRU," *Ann. ICRP.* 45 Supplement 1, 178–187.
- Endo, A. (2017). "Calculation of fluence-to-effective dose conversion coefficients for the operational quantity proposed by ICRU RC 26," *Radiat. Prot. Dosim.* 175, 378–387.
- Ferrari, F., and Gualdrini, G. (2012). *Eye Lens Dosimetry for*

- Electrons.  $H_p(3)$  Per Unit Fluence Conversion Coefficients for Electrons from 800 keV to 10 MeV Based on MCNPX Simulations on a Cylindrical Phantom.* ENEA Technical Report RT/2012/6/ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Rome).
- Ferrari, A., and Pelliccioni, M. (1994). "On the conversion coefficients from fluence to ambient dose equivalent," *Radiat. Prot. Dosim.* 51, 251–255.
- Ferrari, A., and Pelliccioni, M. (1995). "The effect of air on the dose equivalent at 10 mm depth in the ICRU sphere," *Radiat. Prot. Dosim.* 60, 243–247.
- Ferrari, A., Sala, P. R., Fassò, A., and Ranft, J. (2005). *FLUKA: A Multi-Particle Transport Code*, CERN-2005-10, INFN/ TC\_05/11, SLAC-R-773 (Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, CA).
- Furihata, S. (2000). "Statistical analysis of light fragment production from medium energy proton-induced reactions," *Nucl. Instrum. Meth.* B171, 251–258.
- Geissel, H., Scheidenberger, C., Malzacher, P., Kunzendorf, J., and Weick, H. (2013, March 4). *ATIMA* (GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt, Germany). <https://web-docs.gsi.de/~weick/atima/>.
- Goorley, J. T., James, M. R., Booth, T. E., *et al* (2013). *Initial MCNP6 Release Overview*, LA-UR-13-22934 (Los Alamos National Laboratories, Los Alamos, NM).
- Grosswendt, B., and Chartier, J.-L. (1994). *Fluence-to-Absorbed-Dose Conversion Coefficients and Angular-Dependence Factors for 4-Element ICRU Tissue, Water and PMMA Slab Phantoms Irradiated by Broad Electron Beams*, PTB-Dos-24 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany).
- Gualdrini, G., Mariotti, F., Wach, S., *et al* (2011). "A new cylindrical phantom for eye lens dosimetry development," *Radiat. Meas.* 46, 1231–1234.
- Harrison, J. D., Balonov, M., Martin, C. J., *et al* (2016). "Use of effective dose," *Ann. ICRP.* 45 Supplement 1, 215–224.
- Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A. F., Wilderman, S. J., and Nelson, W. R. (2005). *The EGS5 Code System*, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8 (High Energy Accelerator Research Organization, Japan).
- Hubbell, J. H., and Seltzer, S. M. (1995). *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest*, Report NISTIR 5632 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD).
- ICRU (1971a). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Radiation Protection Instrumentation and Its Application*, ICRU Report 20 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1971b). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Radiation Quantities and Units*, ICRU Report 19 (International Commission on Radiation Protection, Bethesda, MD).
- ICRU (1980). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Radiation Quantities and Units*, ICRU Report 33 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1984). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Stopping Powers for Electrons and Positrons*, ICRU Report 37 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1985). International Commission on Radiation Units and Measurement. *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*, ICRU Report 39 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1988). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources- Part 2*, ICRU Report 43 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1992). International Commission on Radiation Units and Measurement. *Measurements of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations*, ICRU Report 47 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1993). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*, ICRU Report 51 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (1998). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation*, ICRU Report 57 (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD).
- ICRU (2001). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Determination of Operational Dose Equivalent Quantities for Neutrons*, ICRU Report 66, J. ICRU 1(3) (Oxford University Press, Oxford).
- ICRU (2006). International Commission on Radiation Units and Measurements (2006). *Measurement Quality Assurance for Ionizing Radiation Dosimetry*, ICRU Report 76, J. ICRU 6(2) (Oxford University Press, Oxford).
- ICRU (2010). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Reference Data for the Validation of Doses from Cosmic-Radiation Exposure of Aircraft Crew*, ICRU Report 84, J. ICRU 10(2) (Oxford University Press, Oxford).
- ICRU (2011). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation*, ICRU Report 85a, J. ICRU 11(1a) (Oxford University Press, Oxford).
- ICRU (2014). International Commission on Radiation Units and Measurements. *Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications*, ICRU Report 95

- Report 90, J. ICRU 14(1) (Oxford University Press, Oxford).
- ICRP (1969). International Commission on Radiological Protection. *Protection against Ionizing Radiation from External Sources*, ICRP Publication 15 (Pergamon Press, Oxford).
- ICRP (1971). International Commission on Radiological Protection. *Protection against Ionizing Radiation from External Sources; Supplement to ICRP Publication 15*, ICRP Publication 21 (Pergamon Press, Oxford).
- ICRP (1991). International Commission on Radiological Protection. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60 (Pergamon Press, Oxford).
- ICRP (1996). International Commission on Radiological Protection. *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation*, ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26(3–4). (Elsevier Science, Oxford).
- ICRP (2002). International Commission on Radiological Protection. *Basic Anatomical and Physiological Data for use in Radiological Protection*, ICRP Publication 89, Ann. ICRP 32(3–4). (Elsevier Science, Oxford).
- ICRP (2007). International Commission on Radiological Protection. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2–4). (Elsevier Science, Oxford).
- ICRP (2009). International Commission on Radiological Protection. *Adult Reference Computational Phantoms*, ICRP Publication 110, Ann. ICRP 38(2). (Elsevier Science, Oxford).
- ICRP (2010). International Commission on Radiological Protection. *Conversion Coefficients for Radiological Protection for External Radiation Exposures*, ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2–5) (Elsevier Science, Oxford).
- ICRP (2012). International Commission on Radiological Protection. *ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs—Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context*, ICRP Publication 118, Ann. ICRP 41(1–2) (Elsevier Science, Oxford).
- ICRP (2016). International Commission on Radiological Protection. *Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation*, ICRP Publication 132, Ann. ICRP 45 (1) (Elsevier Science, Oxford).
- IEC (2009). International Electrotechnical Commission. *Radiation Protection Instrumentation—Ambient and/or Directional Dose Equivalent (Rate) Meters and/or Monitors for Beta, X and Gamma Radiation—Part 1: Portable Workplace and Environmental Meters and Monitors*, IEC 60846-1:2009 (International Electrotechnical Commission, Geneva).
- IEC (2010). International Electrotechnical Commission. *Radiation Protection Instrumentation - Measurement of Personal Dose Equivalents  $H_p(10)$  and  $H_p(0,07)$  for X, Gamma, Neutron and Beta Radiations—Direct Reading Personal Dose Equivalent Meters and Monitors*, IEC 61526 Ed.3 (International Electrotechnical Commission, Geneva).
- IEC (2012). International Electrotechnical Commission. *Radiation Protection Instrumentation—Passive Integrating Dosimetry Systems for Environmental and Personal Monitoring of Photon and Beta Radiation*, IEC 62387 (International Electrotechnical Commission, Geneva).
- IEC (2014). International Electrotechnical Commission. *Radiation Protection Instrumentation—Neutron Ambient Dose Equivalent (Rate) Meters*; IEC 61005 (International Electrotechnical Commission, Geneva).
- ISO (1998). International Organization for Standardization. *Reference Neutron Radiations -Part 3: Calibration of Area and Personal Dosimeters and Determination of Response as a Function of Energy and Angle of Incidence*, ISO 8529-3:1998 (International Organization for Standardization, Geneva).
- ISO (2006). International Organization for Standardization., *Nuclear Energy—Reference Beta—particle Radiation— Part 3: Calibration of Area and Personal Dosemeters and the Determination of Their Response as a Function of Beta Radiation Energy and Angle of Incidence*, ISO 6980-3:2006 (International Organization for Standardization, Geneva).
- ISO (2012). International Organization for Standardization. *Reference Radiation Fields for Radiation Protection — Definitions and Fundamental Concepts*, ISO 29661:2012 (International Organization of Standards, Geneva).
- ISO (2015). International Organization for Standardization. *Passive Neutron Dosimetry Systems—Part 1: Performance and Test Requirements for Personal Dosimetry*, ISO 21909-1:2015 (International Organization of Standards, Geneva)
- ISO (2019). International Organization for Standardization. *Radiological Protection—X and Gamma Reference Radiation for Calibrating Dosemeters and Doserate Meters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy — Part 3: Calibration of Area and Personal Dosemeters and the Measurement of Their Response as a Function of Energy and Angle of Incidence*, ISO 4037-3:2019 (International Organization for Standardization, Geneva).
- Jahr, R., Hollnagel, R. A., and Siebert, B. R. L. (1981). “A conceptual physical basis for monitoring external radiation,” *Radiat. Prot. Dosim.* 1, 299–304.
- Kawrakow, I. (2002). “Electron impact ionization cross sections for EGSnrc,” *Med. Phys.* 29, 1230.
- Kawrakow, I., Mainegra-Hing, E., Rogers, D. W. O., Tessier, F., and Walters, B. R. B. (2013). *The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*, PIRS Report 701 (National Research Council, Ottawa).
- Kim, J. O., and Kim, J. K. (1999). “Dose equivalent per unit fluence near the surface of the ICRU phantom by including the secondary electron transport for photons,”

- Radiat. Prot. Dosim.* 83(3), 211–219.
- Koch, H. W., and Motz, J. W. (1959). “Bremsstrahlung cross-section formulas and related data,” *Rev. Mod. Phys.* 31, 920–955.
- Nara, Y., Otuka, H., Ohnishi, A., Niita, K., and Chiba, S. (1999). “Relativistic nuclear collisions at 10 A GeV energies from p+Be to Au+Au with the hadronic cascade model,” *Phys. Rev.* C61, 024901.
- NCRP (1971). National Council on Radiation Protection and Measurements. *Protection Against Neutron Radiation*, NCRP Report No. 38 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD).
- Nelson, W. R., Hirayama, H., and Rogers, D. W. O. (1985). *The EGS4 Code System*. SLAC Report 265 (Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, CA).
- Niita, K., Chiba, S., Maruyama, T., *et al* (1995). “Analysis of the (N, Xn) reactions by quantum molecular dynamics plus statistical decay model,” *Phys. Rev.* C52, 2620–2635.
- Otto, T. (2019). “Response of Photon Dosimeters and Survey Instruments to New Operational Quantities, Proposed by ICRU RC 26,” *J. Instrum.* 14 P01010.
- Papiez, L., and Battista, J. J. (1994). “Radiance and particle fluence,” *Phys. Med. Biol.* 39, 1053–1062.
- Pelliccioni, M. (1998). “Fluence to dose equivalent conversion data and radiation weighting factors for high energy radiation,” *Radiat. Prot. Dosim.* 77, 159–170.
- Pelliccioni, M. (2000). “Overview of fluence-to-effective dose and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA Code,” *Radiat. Prot. Dosim.* 88, 279–297.
- Perroche, A.-M., and Boutillon, M. (1989). “Measurement of ambient dose equivalent and directional dose equivalent in a <sup>60</sup>Co beam,” *Radiat. Prot. Dosim.* 27, 139–148.
- Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., *et al* (2013). “Particle and heavy ion transport code system PHITS, version 2.52,” *J. Nucl. Sci. Technol.* 50, 913–923.
- Schuhmacher, H., Bartlett, D. T., Bolognese-Milsztajn, T., *et al* (2006). *Evaluation of Individual Dosimetry in Mixed Neutron and Photon Radiation Fields*, Report PTB-N-49 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany).
- Seltzer, S. M. (1993). “Calculation of photon mass energy-transfer and mass energy-absorption coefficients,” *Radiat. Res.* 136, 147–170.
- Sidwell, J. M., Burlin, T. E., and Wheatley, B. M. (1969). “Calculations of the absorbed dose in a phantom from photon fluence and some applications to radiological protection,” *Br. J. Radiol.* 42, 522–529.
- Tanner, R. J., Hager, L., and Eakins, J. (2018). “The response of the PHE neutron personal dosimeter in terms of the proposed ICRU personal dose equivalent,” *Radiat. Prot. Dosim.* 180(1–4), 17–20.
- Vanhavere, F., Carinou, E., Gualdrini, G., *et al* (2012). *ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff*, EURADOS Report 2012-02 (European Radiation Dosimetry Group, Neuherberg).
- Veinot, K. G., and Hertel, N. E. (2011). “Personal dose equivalent conversion coefficients for photons to 1 GeV,” *Radiat. Prot. Dosim.* 145(1), 28–35.
- Veinot, K. G., Hertel, N. E., Hiller, M. M., and Eckerman, K. F. (2020). “Neutron dose coefficients for the local skin,” *J. Radiol. Prot.* 20(2), 554–582.
- Werner, C. J., Ed. (2017). *MCNP User Manual Code Version 6.2*, LA-UR-17-2pp81 (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM).
- Werner, C. J., Bull, J. S., Solomon, C. J., *et al* (2018). *MCNP Release Notes*, LA-UR-18-20808 (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM).

1.Full attribution to the Issue: “ICRU REPORT 95: Operational Quantities for External Radiation Exposure”; Journal of the ICRU (20:1), copyright International Commission on Radiation Units & Measurements, published by permission of SAGE Publications, Inc.

2.Disclaimer: “While every effort has been made to ensure that the contents of this publication are factually correct, neither the authors nor the publisher accepts, and they hereby expressly exclude to the fullest extent permissible under applicable law, any and all liability arising from the contents published in this Issue, including, without limitation, from any errors, omissions, inaccuracies in original or following translation, or for any consequences arising therefrom. Nothing in this notice shall exclude liability which may not be excluded by law.”

1. 本出版物の著作権の帰属：「ICRU レポート 95：外部放射線被ばくに対する実用量」；Journal of the ICRU (20:1) の著作権は国際放射線単位測定委員会が所有し、SAGE Publications, Inc. の許可を得て発行されています。

2. 免責事項：原本出版物の内容が事実に基づき正確であることを確保するために最大限の努力がなされていますが、原文及び翻訳版の著者及び出版者は、本号に掲載した内容（原文または翻訳された文における誤り、脱落、不正確さ、あるいはそれに起因するあらゆる結果を含みますが、これらに限定されません）に起因する一切の責任を負わず、これにより、適用される法律で認められる最大限の範囲において明示的に責任が免除されます。本通知のいかなる内容も、法律により免除できない責任を免除するものではありません。

ICRU Report 95  
外部放射線被ばくに対する実用量

---

2026年3月3日 初版第1刷発行

監修 齋藤 則生

翻訳 黒澤 忠弘

編集 ICRP 刊行物翻訳委員会

発行 原子力規制委員会

連絡先 〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9  
六本木ファーストビル16F  
原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ  
放射線・廃棄物研究部門

電話 03-5114-2225 (部門代表)

翻訳公開URL [https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku\\_04.html](https://www.nra.go.jp/activity/kokusai/honyaku_04.html)

© Nuclear Regulation Authority, Japan, 2026

Printed in Japan

DTP 株式会社フォレスト

【非売品】



