

ICRP, ICRU における 防護量と実用量に関する 最新の検討状況

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター

遠藤 章

この課題に携わる契機

JAERI-Conf
95-007



「最近の外部被ばく線量評価法に関する
ワークショップ」報文集

1995年1月19日～20日，東海研究所，東海村

1995年3月

本日の内容

1. 背景

- 防護量 (Protection quantity) と実用量 (Operational quantity) について

2. ICRP における防護量換算係数の改訂

- 2007年勧告に対応した外部被ばく線量換算係数の整備

3. ICRU における実用量の検討と新たな提案

- ICRP の防護量換算係数の拡充を含む諸課題への対応

4. 現状と今後の予定

ICRP: International Commission on Radiological Protection
国際放射線防護委員会

ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements
国際放射線単位・測定委員会

1. 背景：防護量と実用量について

防護量：人体の被ばくの程度を定量化する量で、
臓器・組織の吸収線量を基に定義

- 臓器・組織の等価線量

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

- 実効線量

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

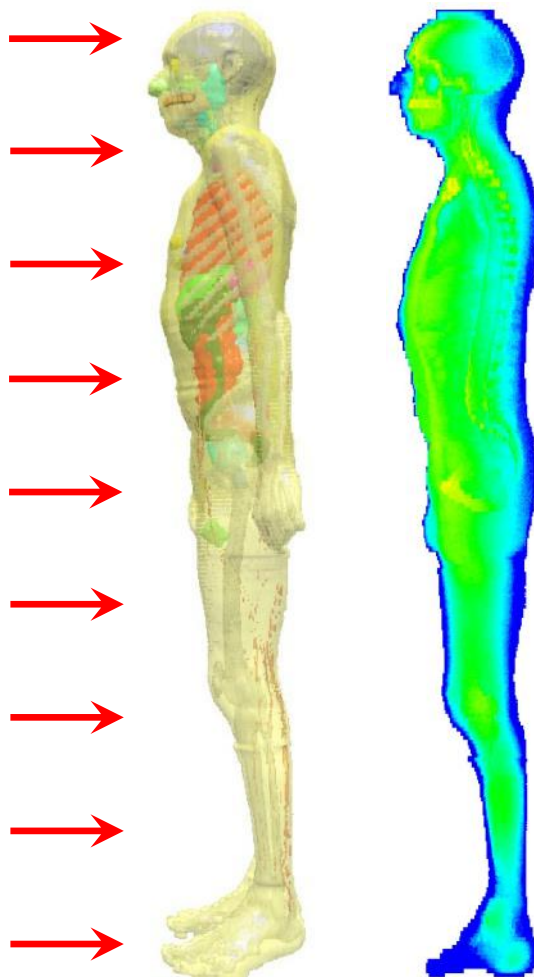
$D_{T,R}$ ：放射線 R による臓器・組織 T の平均吸収線量

w_R ：放射線加重係数

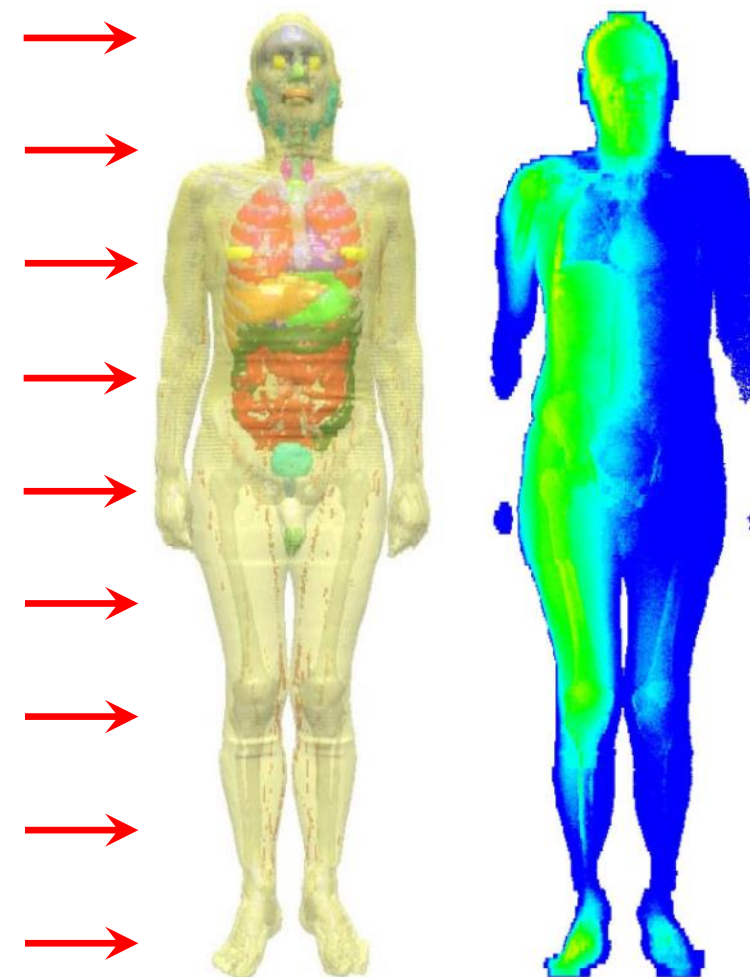
w_T ：組織加重係数

体内の吸収線量分布

前方-後方照射

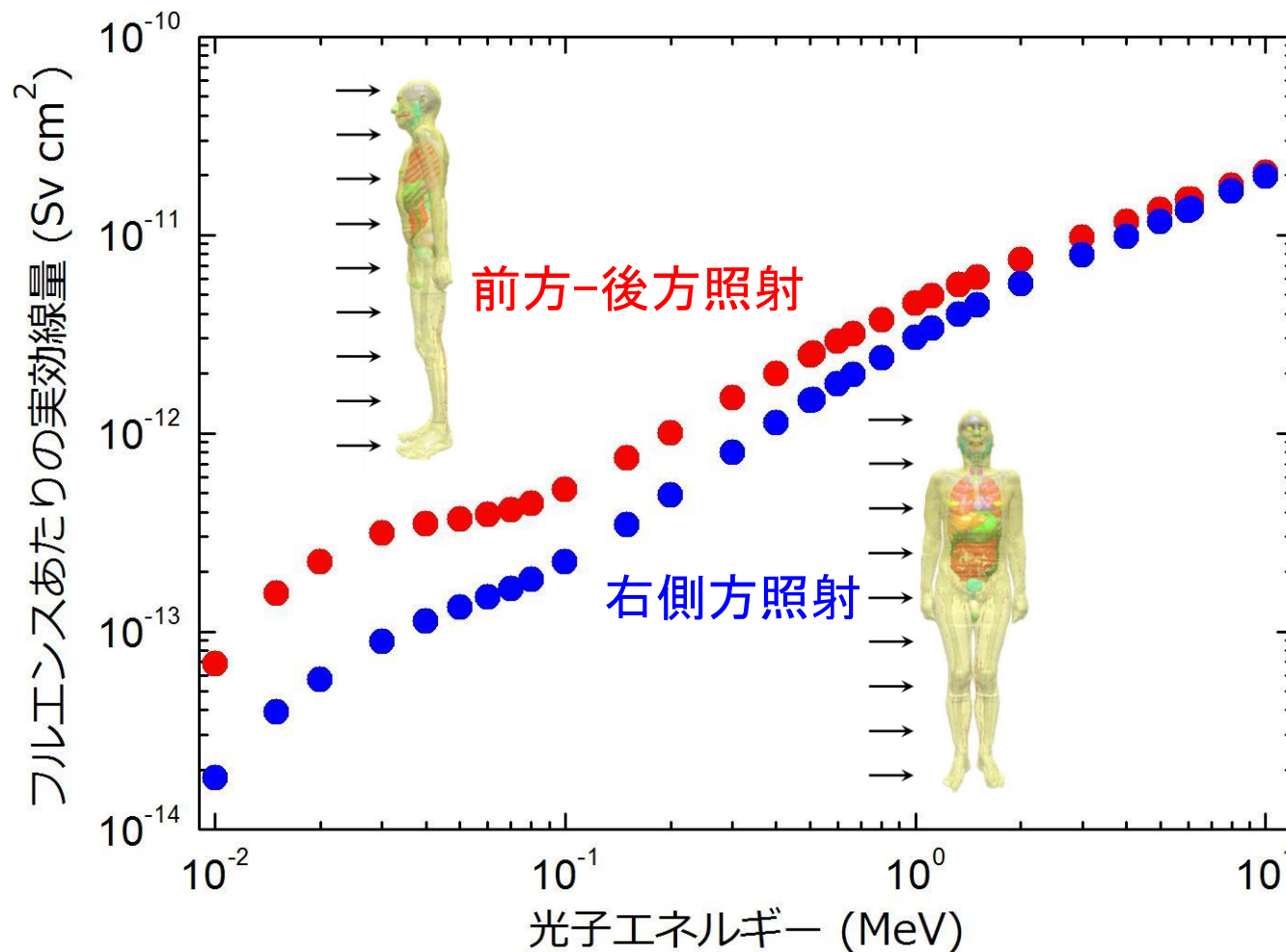


右側方照射



吸収線量
高い
低い

実効線量の特性

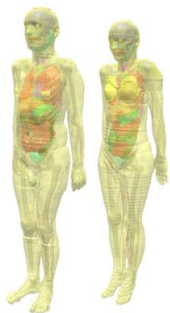


実効線量は、放射線のタイプ、エネルギー、入射方向に依存

⇒ 測定により評価するための量が必要: 実用量

放射線防護の線量評価・測定の体系

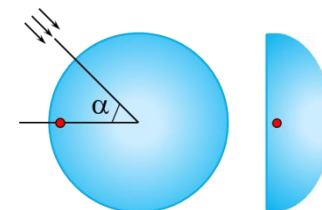
ICRP74/ICRU57より



人体ファントム, w_R, w_T
を用いて計算

物理量

- フルエンス: Φ
- カーマ: K
- 吸収線量: D



ICRU ファントム, $Q(L)$
を用いて計算

防護量 (ICRP)

- 臓器吸収線量: D_T
- 臓器等価線量: H_T
- 実効線量: E

比較

実用量 (ICRU)




- 周辺線量当量: $H^*(d)$
- 方向性線量当量: $H'(d, \Omega)$
- 個人線量当量: $H_p(d)$

校正と計算により
関係づけ

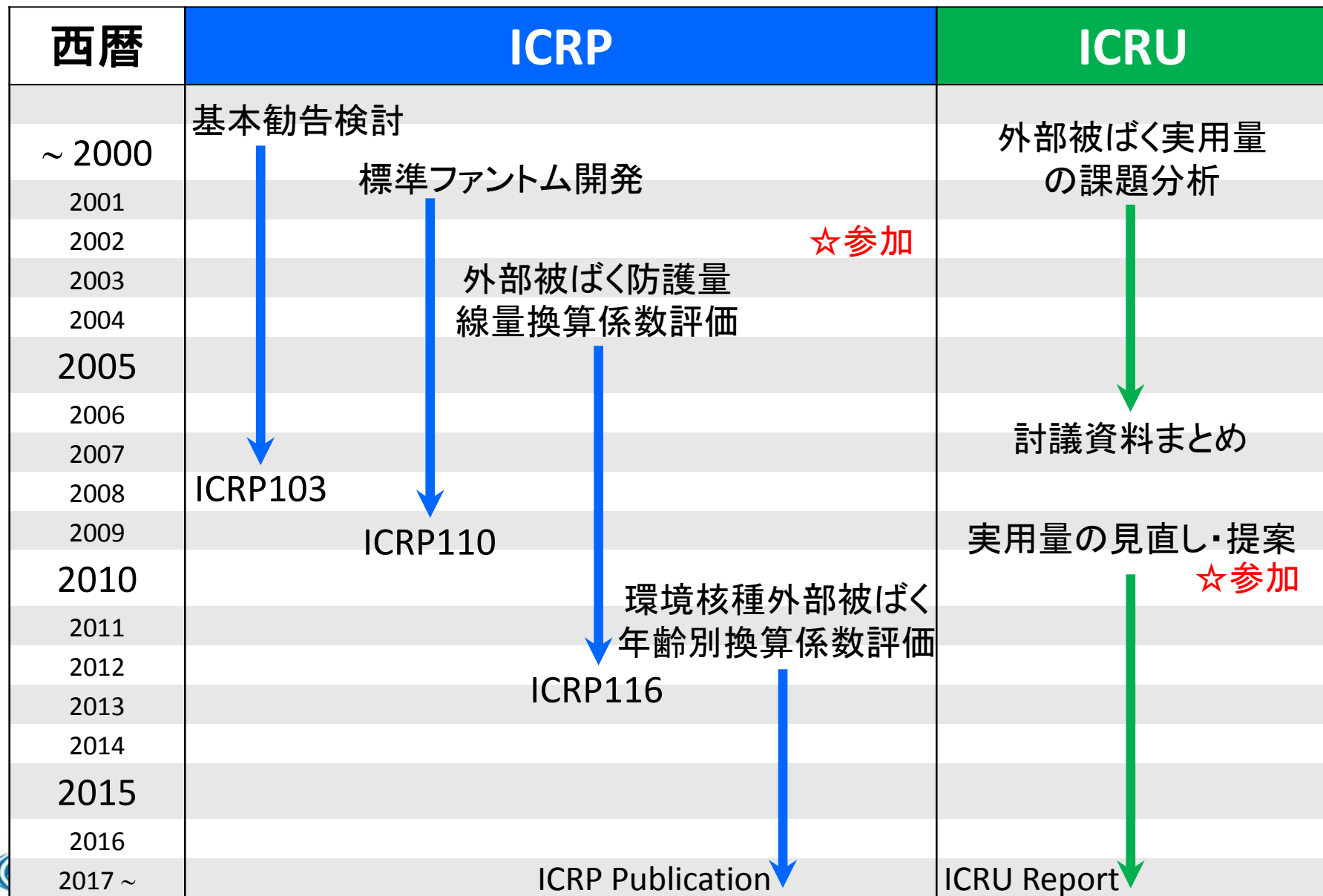
測定される量
測定器のレスポンス

- 放射線のタイプ、エネルギー範囲は十分か?
- 実用量は防護量の指標か? (実用量 \geq 防護量)
- 概念として分かりやすいか?

防護量と実用量の対応

防護量			
ICRP74 ⇒ ICRP116	実効線量 E	眼の水晶体の線量 H_{lens}	皮膚、末端部の線量 H_{skin}
			
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 $H_p(0.07)$
実用量			

ICRP・ICRU による検討の経緯 (外部被ばく)

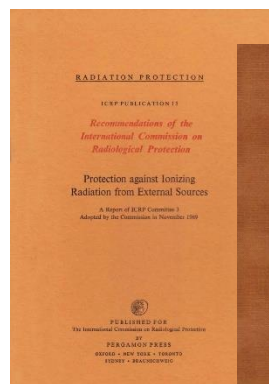


防護量・実用量に関する日本における議論

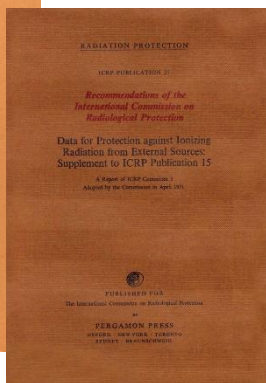
- 最近の外部被ばく線量評価法に関するワークショップ
 - 1995年 (原研), JAERI-Conf 95-007
- 第2回最近の外部被ばく線量評価法に関するワークショップ
 - 1996年 (原研), JAERI-Conf 96-011
- 第3回最近の外部被ばく線量測定・評価に関するワークショップ
 - 2002年 (原研), JAERI-Conf 2003-002
- 放射線防護に用いる線量概念の専門研究会
 - 日本保健物理学会の専門研究会 (2005～2007年)
 - 主査: 小田 啓二先生
 - 専門研究会報告書: ISSN 1881-7297 (2008年8月出版)
 - 学会誌「保健物理」にも連載講座として掲載 (2008～2009年)

2. ICRP における防護量換算係数の改訂

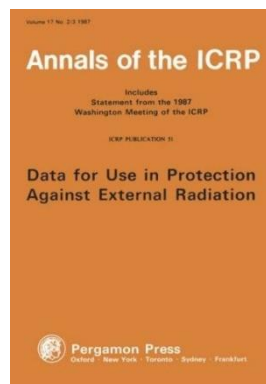
これまでの ICRP の外部被ばく線量換算係数データ集



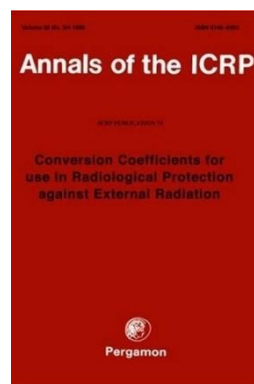
ICRP15
(1970)



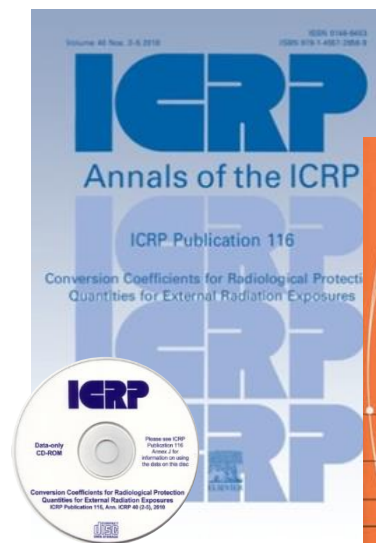
ICRP21
(1973)



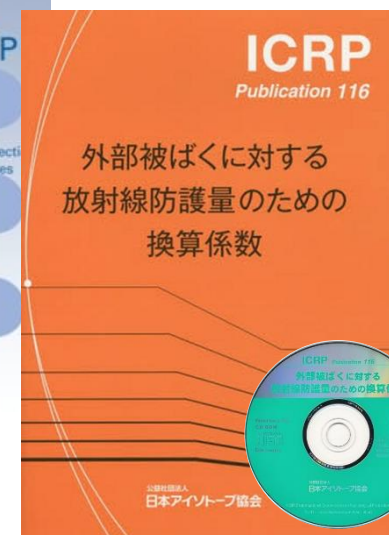
ICRP51
(1987)



ICRP74
(1996)



ICRP116
(2010)



2007年勧告における防護量に係る見直し

線量概念に 1990年勧告から大きな変更はないが、

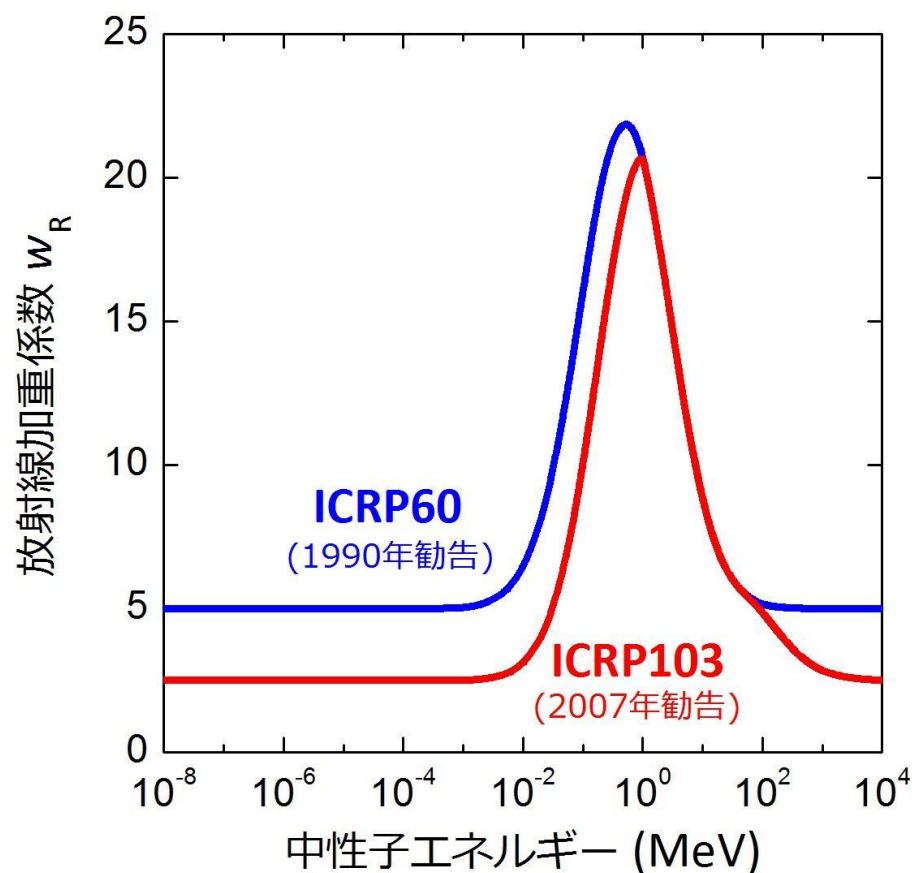
- 放射線加重係数 w_T の見直し
 - 中性子、陽子に変更。パイ中間子を追加
- 組織加重係数 w_R の見直し
 - 乳房、生殖腺、残りの組織の値の変更。唾液腺、脳等の追加
- 標準ファントムの導入
 - 人体の線量計算に用いる男女の標準ファントムを開発
- 実効線量の算定手順の変更
 - 男女の等価線量から、両性に適用する平均値を算定
- データの拡充
 - 放射線のタイプ・エネルギー範囲の拡張、水晶体データの追加

⇒ 上記の変更を反映した外部被ばく線量換算係数が必要

等価線量 H_T と放射線加重係数 w_R

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

放射線のタイプ	w_R	
	ICRP60	ICRP103
光子	1	1
電子, ミュー粒子	1	1
陽子	5	2
パイ中間子	—	2
アルファ粒子, 核分裂片, 重イオン	20	20
中性子	右図	



実効線量 E と組織加重係数 w_T

$$E = \sum_T w_T H_T$$

臓器・組織	w_T	
	ICRP60	ICRP103
赤色骨髄	0.12	0.12
結腸	0.12	0.12
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
乳房	0.05	0.12
生殖腺	0.20	0.08
膀胱	0.05	0.04
食道	0.05	0.04
肝臓	0.05	0.04
甲状腺	0.05	0.04
骨内膜 (骨表面)	0.01	0.01
皮膚	0.01	0.01
脳	—	0.01
唾液腺	—	0.01
残りの組織	0.05	0.12

成人の標準コンピュータファントム

従来、ICRP は特定のファントムを指定していなかった

⇒ ICRP74 は、MIRD*型を基本とした
様々なファントムによる計算値を利用



ICRP89 で標準となる解剖学的・生理学的データをまとめる



ICRP110 で **Voxel**型の成人の標準ファントム**を開発

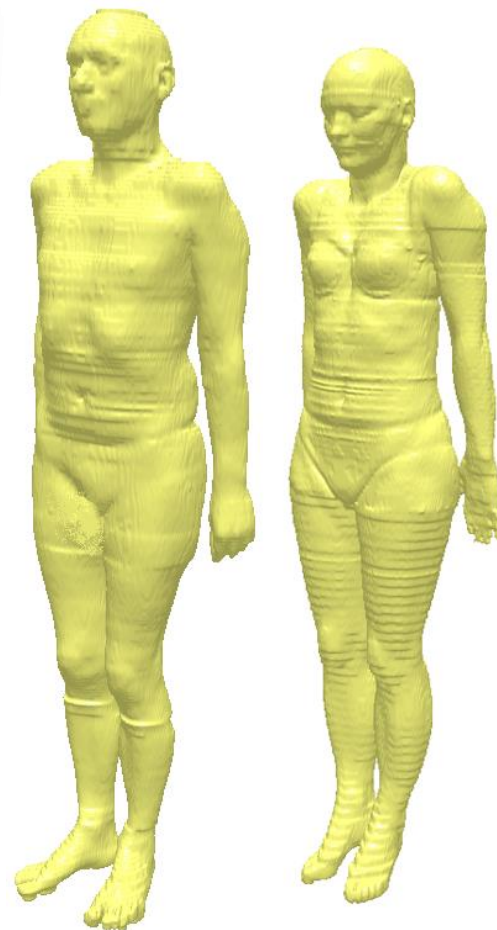
* MIRD: Medical Internal Radiation Dose

** Voxel: Volume pixel

MIRD 型



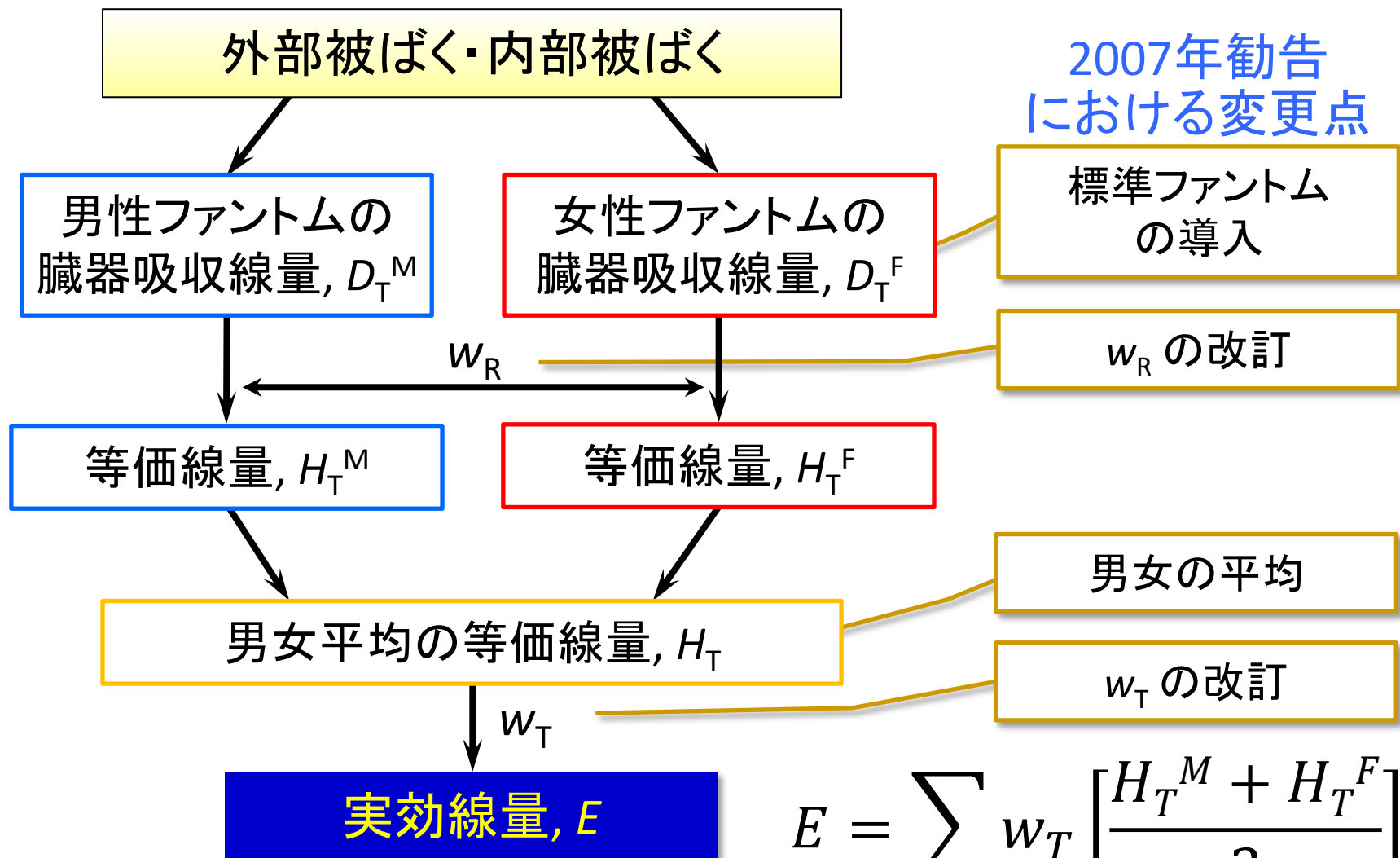
Voxel 型



男性ファントム
1.76 m
73.0 kg

女性ファントム
1.63 m
60.0 kg

実効線量の評価手順

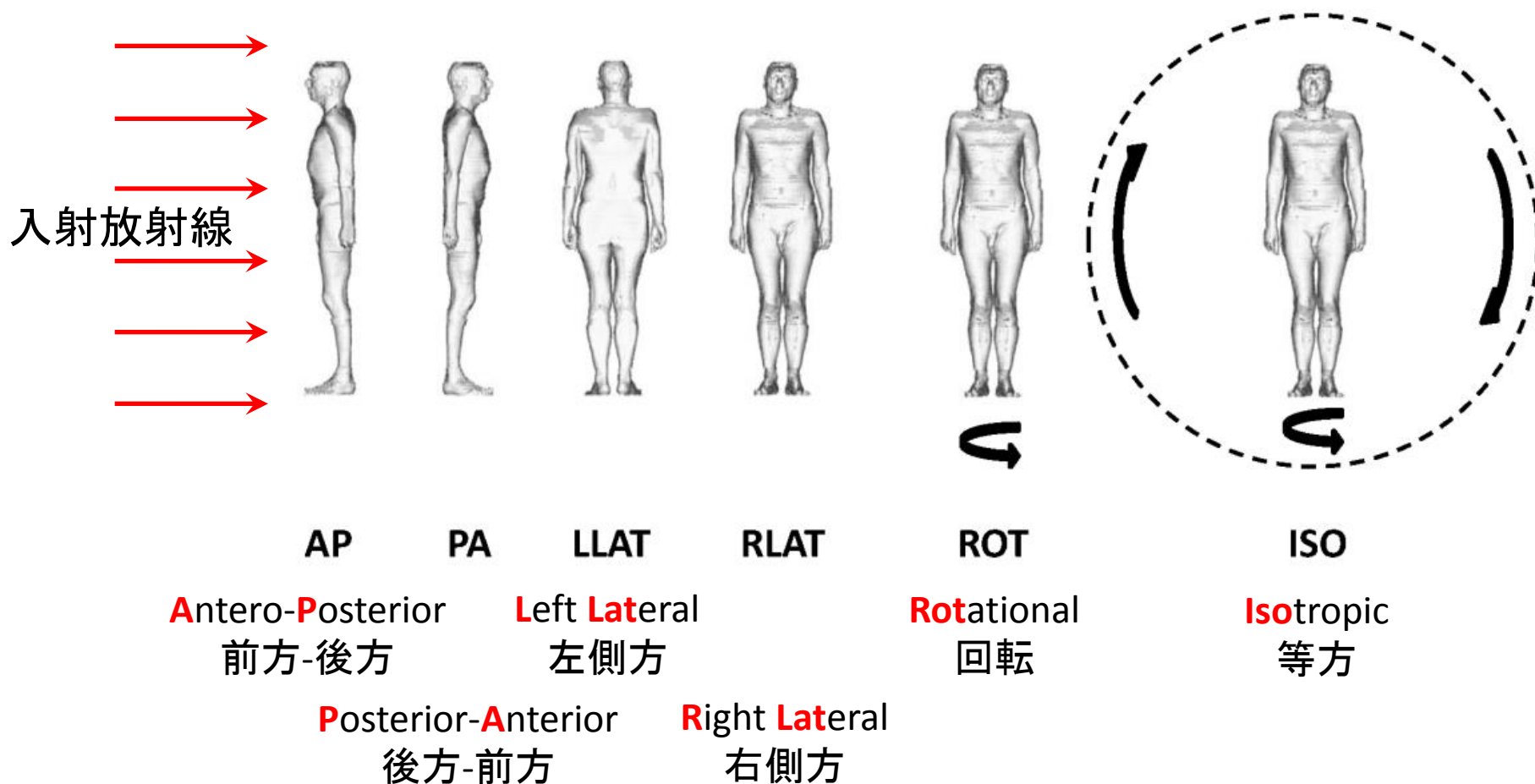


$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right]$$

計算に用いた放射線輸送計算コード

コード	開発グループ、特徴
EGSnrc	<ul style="list-style-type: none">• EGS4 をベースにカナダ NRC が開発• 電子/光子。医学物理分野で広く利用
FLUKA	<ul style="list-style-type: none">• CERN, イタリア INFN, 米国 SLAC 等が協力して開発• 全ての放射線。高エネルギー放射線計算に広く利用
PHITS	<ul style="list-style-type: none">• 日本 (JAEA, RIST, KEK 等) で開発• 全ての放射線。重イオン計算の先駆け
MCNPX	<ul style="list-style-type: none">• 米国 LANL が中心になり開発• 全ての放射線。連続エネルギー中性子計算に強み
GEANT4	<ul style="list-style-type: none">• 国際ネットワークの協力下で開発• 全ての放射線。利用者が必要なモデルを組み合わせ計算

照射条件



さらに高々度における宇宙線被ばくを模擬した
上半球等方照射 (SS-ISO) のデータも提供

線量換算係数の計算・評価の分担

放射線	エネルギー	Primary	Secondary	Spot check	評価者
光子	10keV-10GeV	EGS-HMGU	MCNPX-GTech	GEANT-HMGU	HMGU
中性子	1meV-10GeV	PHITS-JAEA	FLUKA-INFN	MCNPX-RPI GEANT-HMGU	JAEA
電子/陽電子	50keV-10GeV	MCNPX-GTech	EGS-HMGU	GEANT-HMGU	HMGU
陽子	1MeV-10GeV	PHITS-JAEA	FLUKA-INFN	MCNPX-JAEA GEANT-HMGU	JAEA
ミュー粒子 (±)	1MeV-10GeV	FLUKA-JAEA	MCNPX-GTech	GEANT-HMGU FLUKA-INFN	JAEA
パイ中間子 (±)	1MeV-200GeV	FLUKA-JAEA PHITS-JAEA			JAEA
He イオン	1MeV/u-100GeV/u	PHITS-JAEA	FLUKA-JAEA		JAEA

HMGU : Helmholtz Zentrum München

GTech : Georgia Institute of Technology

JAEA : Japan Atomic Energy Agency

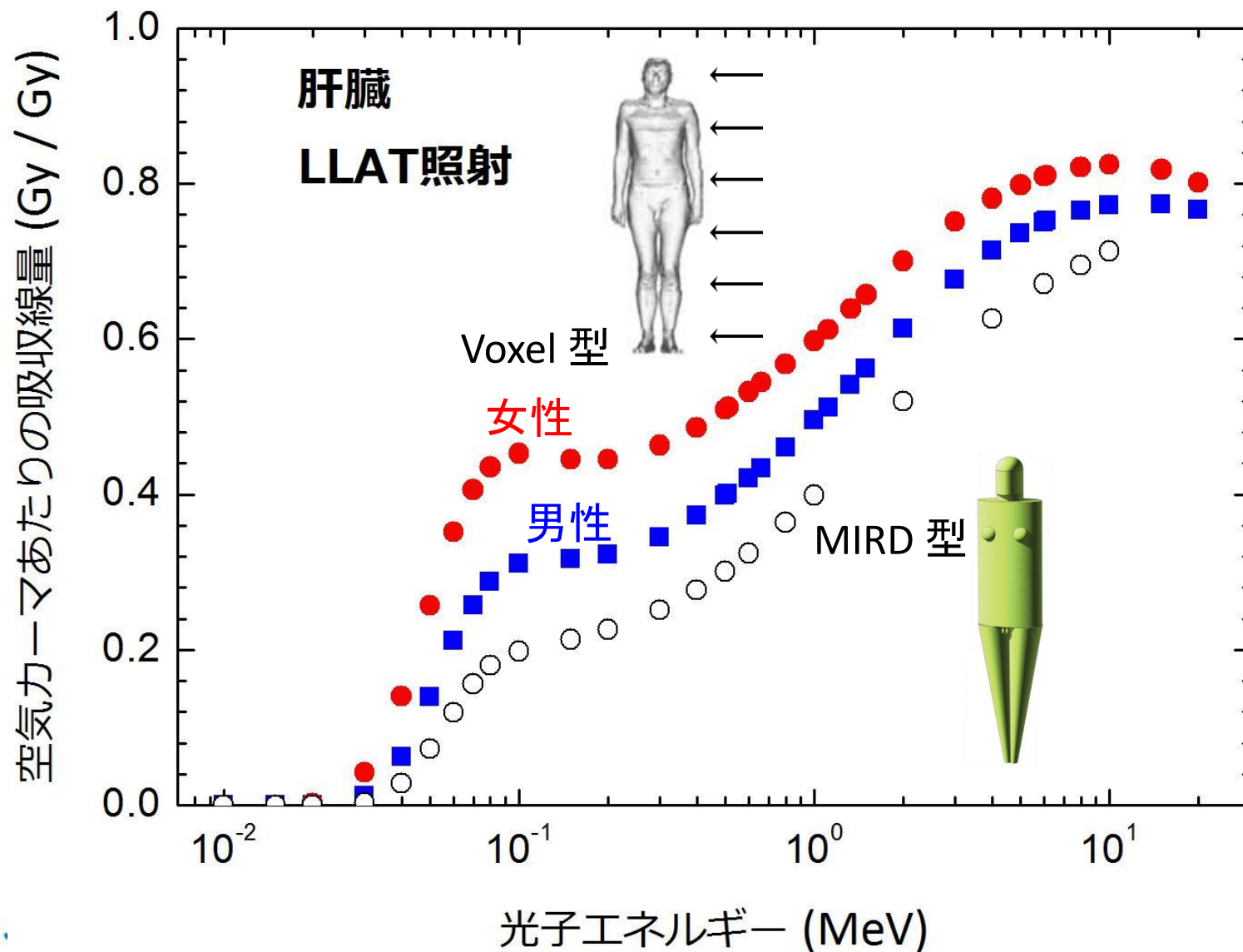
INFN : Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

RPI : Rensselaer Polytechnic Institute

ICRP74/ICRU57 と ICRP116 との比較

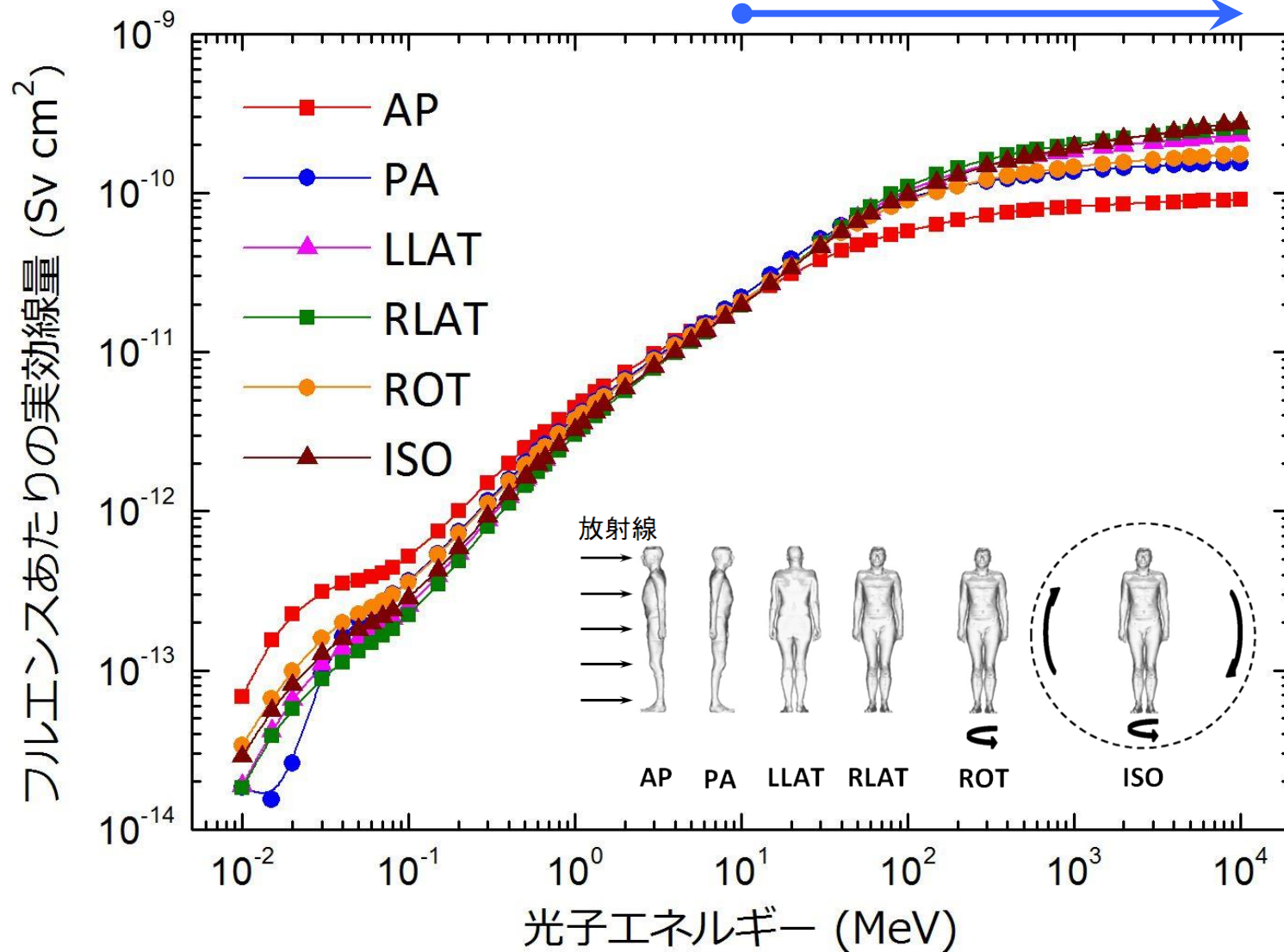
ICRP74/ICRU57	ICRP116
<ul style="list-style-type: none">● 光子: 10 keV – 10 MeV● 中性子: 0.001 eV – 180 MeV● 電子: 100 keV – 10 MeV● 上記放射線の実用量換算係数	<ul style="list-style-type: none">● 光子: 10 keV – 10 GeV● 中性子: 0.001 eV – 10 GeV● 電子/陽電子: 50 keV – 10 GeV● 陽子: 1 MeV – 10 GeV● ミュー粒子: 1 MeV – 10 GeV● パイ中間子: 1 MeV – 200 GeV● He イオン: 1 MeV/u – 100 GeV/u● 骨組織の線量応答関数● 目の水晶体の換算係数● 皮膚の換算係数● 上半球等方照射の換算係数● データを収録した CD-ROM, Excel
	※ 実用量の見直しはしていない

光子：男性と女性の比較

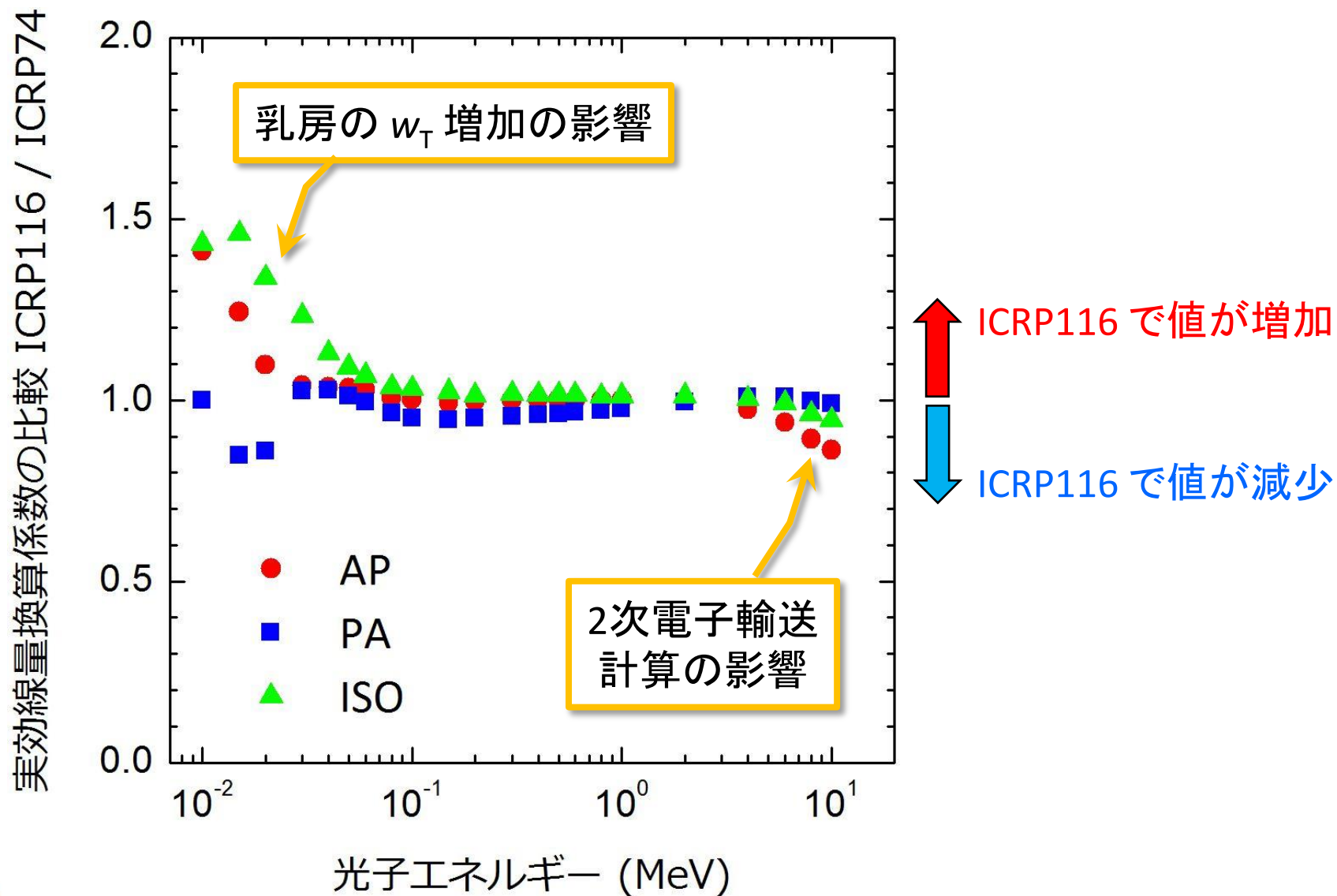


光子：実効線量換算係数

エネルギー範囲の拡張: 10MeV → 10GeV



光子: ICRP116 vs. ICRP74

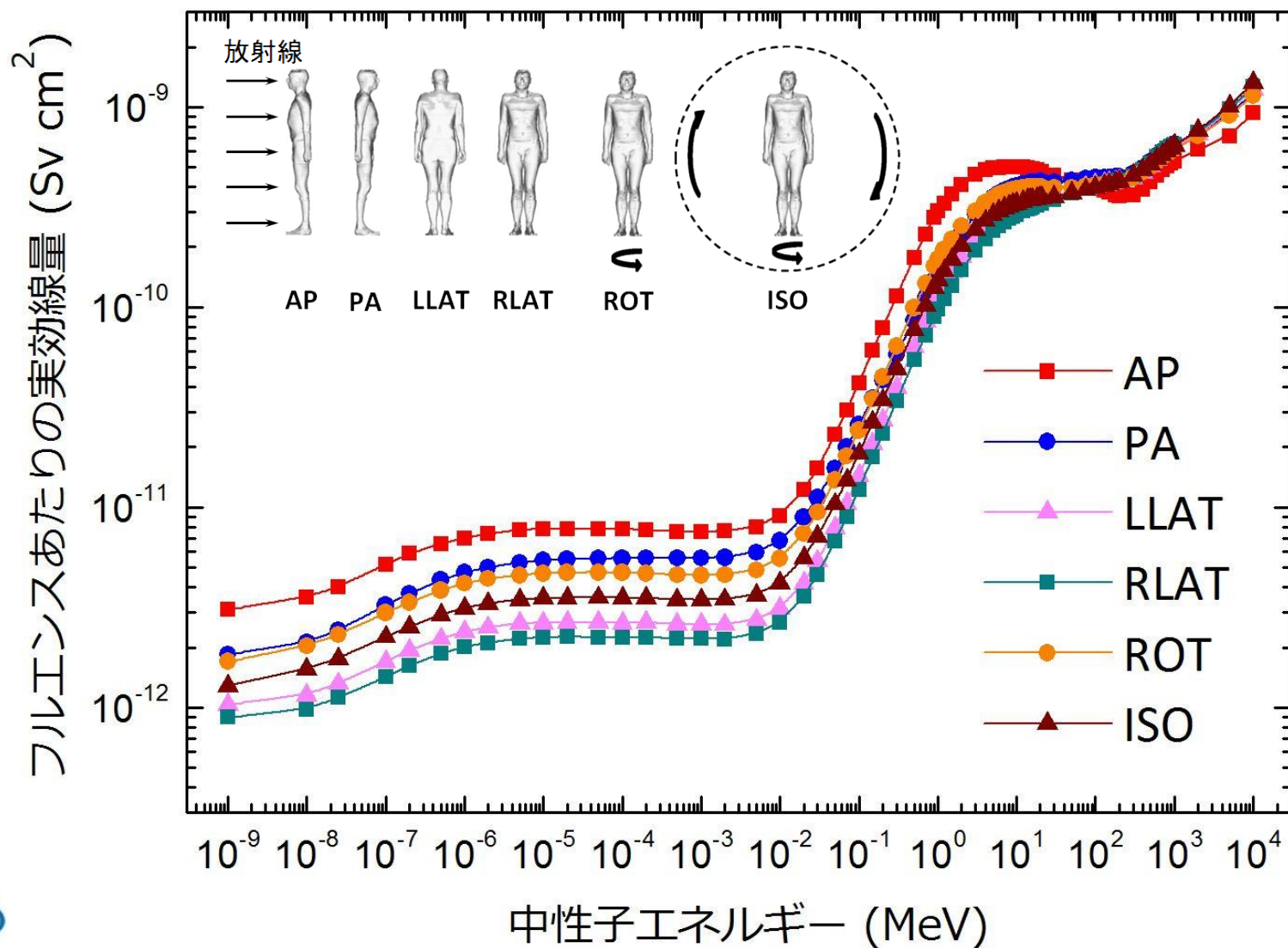


光子の実効線量換算係数のポイント

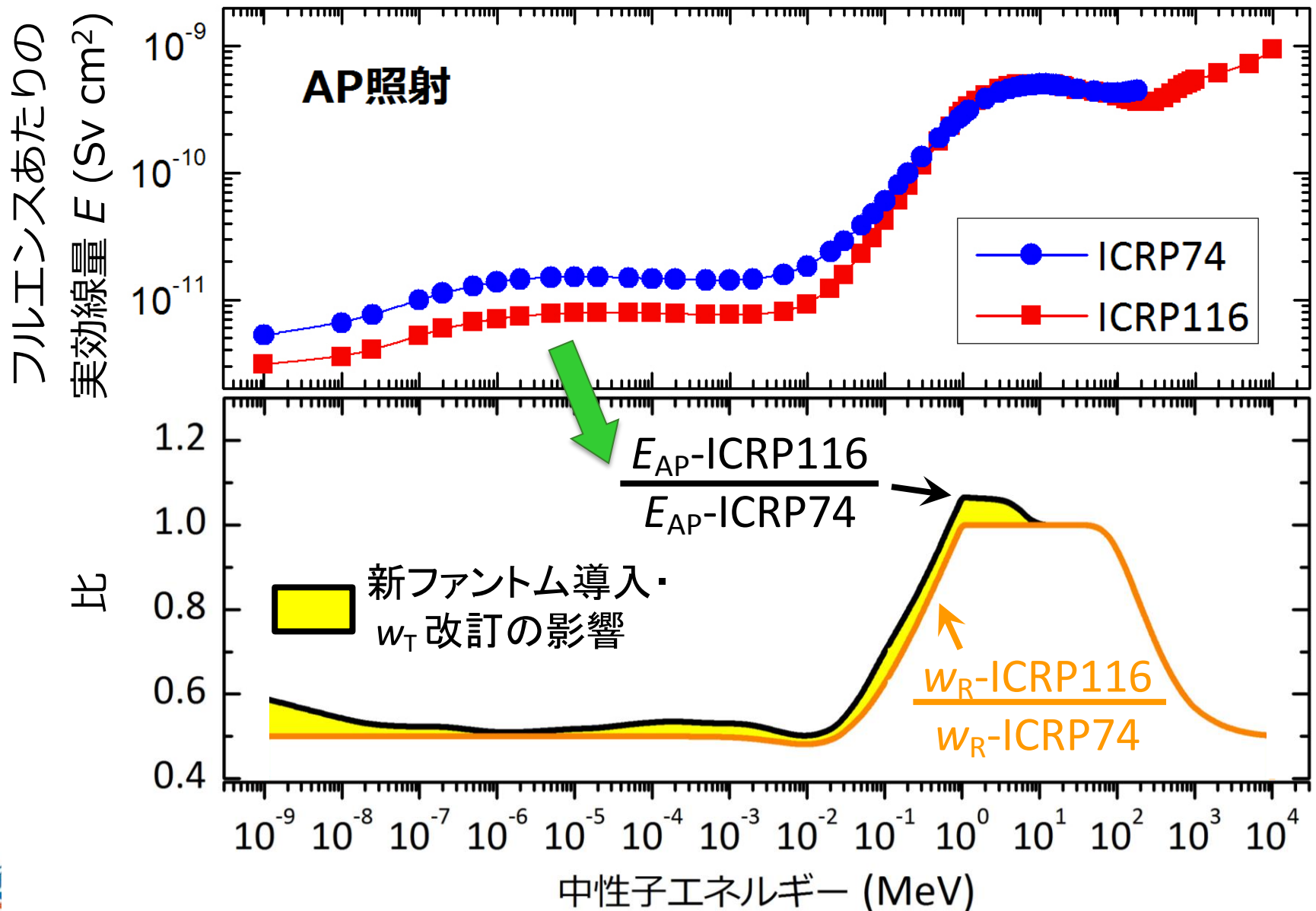
- 換算係数のエネルギー範囲を 10 MeV から 10 GeV まで拡張
 - 加速器施設、宇宙線等に存在する高エネルギー光子に対する評価が可能になった
- ICRP74 との違いは、標準ファントムの導入、組織加重係数 w_T の見直しに起因
 - 0.06 MeV 以下で顕著になり、最大 50% 程度
 - 0.06 MeV ～ 10 MeV では、違いは僅か

中性子：実効線量換算係数

エネルギー範囲の拡張：
180MeV → 10GeV



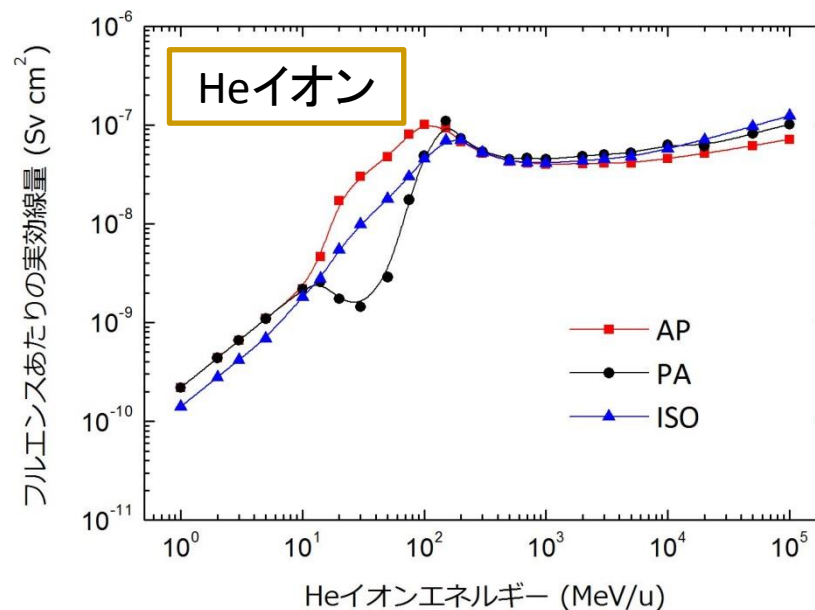
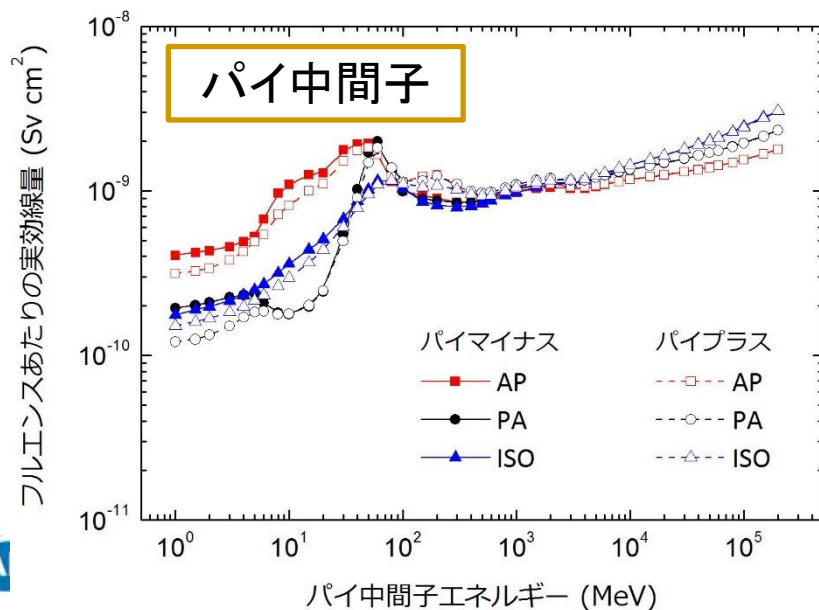
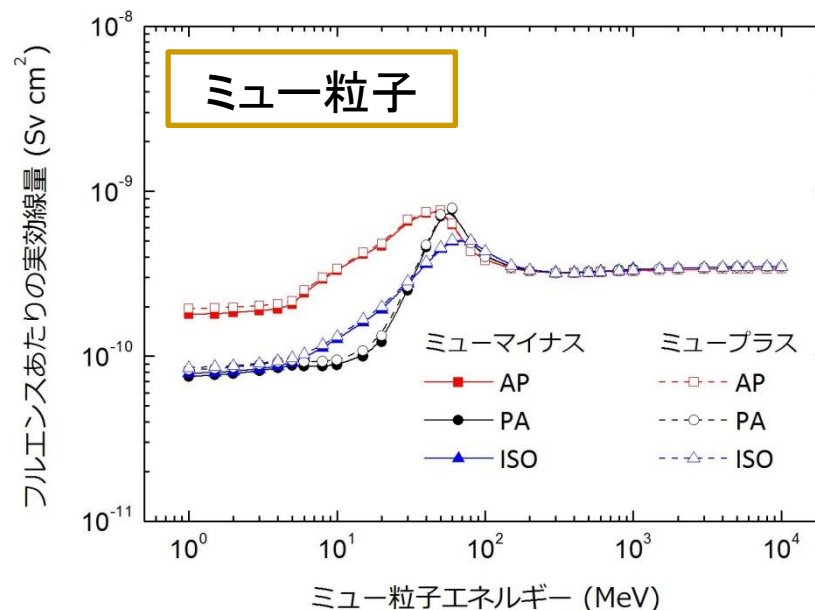
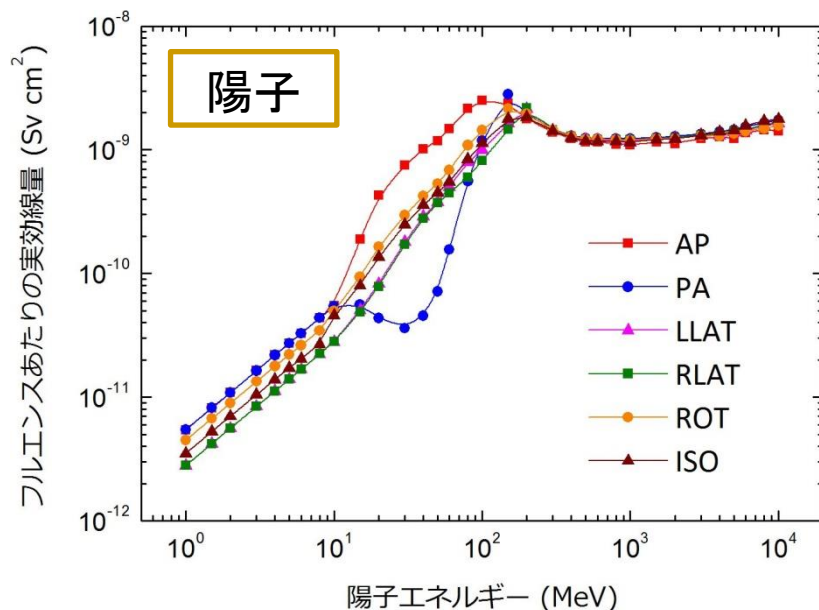
中性子: ICRP116 vs. ICRP74



中性子の実効線量換算係数のポイント

- 換算係数のエネルギー上限を 180 MeV から 10 GeV まで拡張
- 実効線量換算係数は、ICRP74 と比較して、1 MeV 以下で小さくなった
 - 主な原因は、放射線加重係数 w_R の見直し (p.12参照)
 - 標準ファントムの導入、組織加重係数 w_T の見直しの影響は、相対的に小さい

ICRP116 で新規に加わった放射線



3. ICRU における実用量の検討と新たな提案

$$\text{線量当量: } H = D \times Q$$

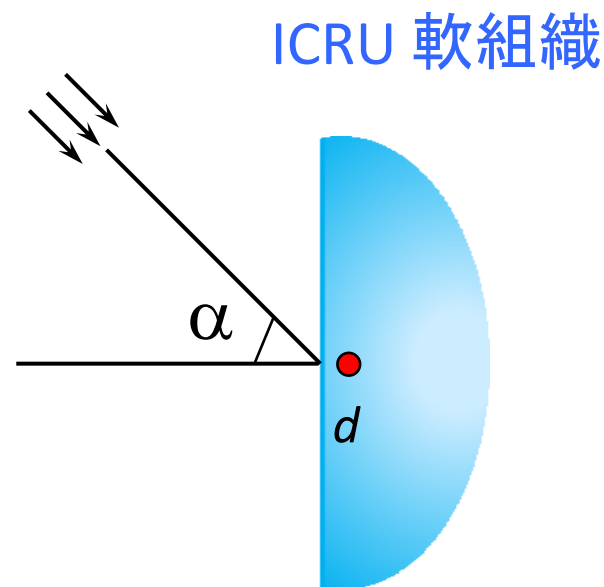
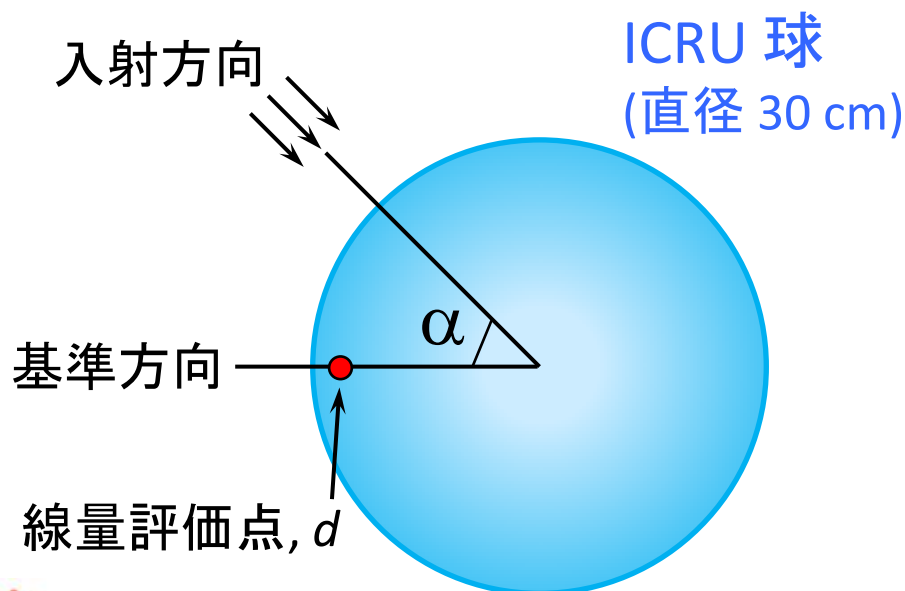
D : 組織中の吸収線量 Q : 線質係数

エリアモニタリング

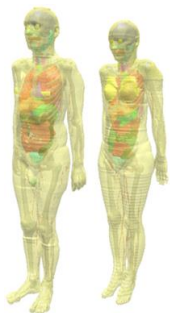
- 周辺線量当量, $H^*(d)$
- 方向性線量当量, $H'(d, \Omega)$

個人モニタリング

- 個人線量当量, $H_p(d)$



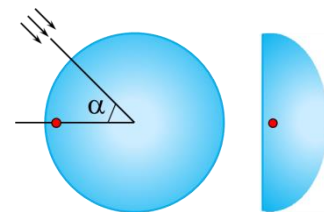
放射線防護の線量評価・測定の体系



人体ファントム, w_R, w_T
を用いて計算

物理量

- フルエンス: Φ
- カーマ: K
- 吸収線量: D



ICRU ファントム, $Q(L)$
を用いて計算

防護量 (ICRP)

- 臓器吸収線量: D_T
- 臓器等価線量: H_T
- 実効線量: E

比較

実用量 (ICRU)

- 周辺線量当量: $H^*(d)$
- 方向性線量当量: $H'(d, \Omega)$
- 個人線量当量: $H_p(d)$

ICRP116 で改訂

データ拡張にとどまらず、
課題解決も含め検討

校正と計算により
関係づけ

測定される量
測定器のレスポンス

ICRU がまとめた実用量の課題

“Considerations on the Operational Quantities for Monitoring External Radiation Exposure” (2006)

ポイント:

ICRU39 (1985), 43 (1988), 51 (1993), 57 (1998) で提案した実用量について

- ❑ 諸量の定義に用いる ICRU 組織等価物質は実在しないため、実用量そのものが実測により検証できない
- ❑ ICRP74/ICRU57 の換算係数は、一部適切に計算されていない
- ❑ ICRP74/ICRU57 で対象としている放射線、エネルギー範囲は、加速器、宇宙線等に存在する高エネルギー放射線には不十分
- ❑ 水晶体の測定に用いる $H_p(3)$ のリファレンスデータがない、等

ICRU レポート委員会 No.26 の設置

❑ ICRU Report Committee No. 26 (RC26) の目的

ICRU51, 57 に置き換わる**新たな実用量を提案する**

検討にあたっては、以下の点に留意する

- ❑ ICRP による防護量の定義の見直しと、換算係数の拡張を踏まえ、実用量の合理性を検討する
- ❑ 実用量と防護量の関係を整理する
- ❑ 新たな提案が、測定器の設計や校正など、線量測定の実務に及ぼす影響を分析する

新たな体系のための提案

改定案 1 : 現在の実用量を継続して使用する

→ 現状への影響を極力抑える

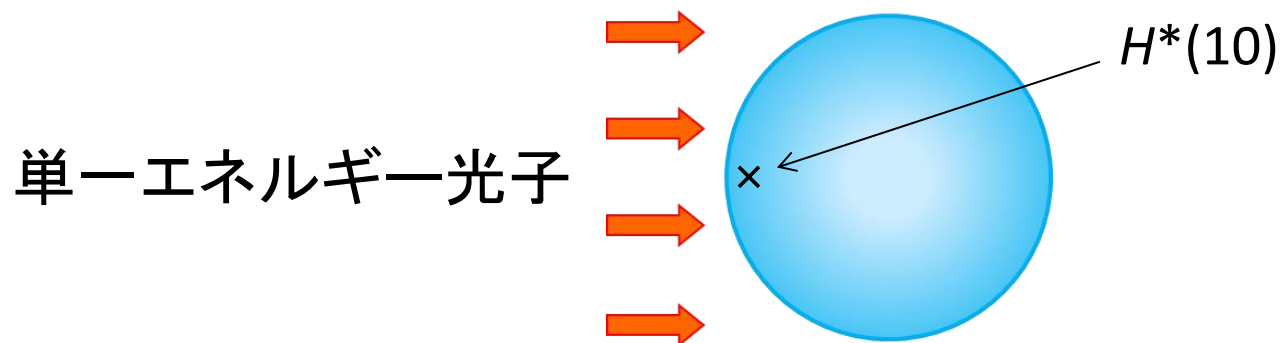
改定案 2 : 現在の実用量を継続して使用する。ただし、
周辺線量当量については、10 mm 深さに固定せず、
他の適切な深さの使用を検討する

→ 変更を一部にとどめ、影響を抑える

改定案 3 : 防護量を基に測定量を定める

→ 現状の考え方を見直し、問題解決を図る

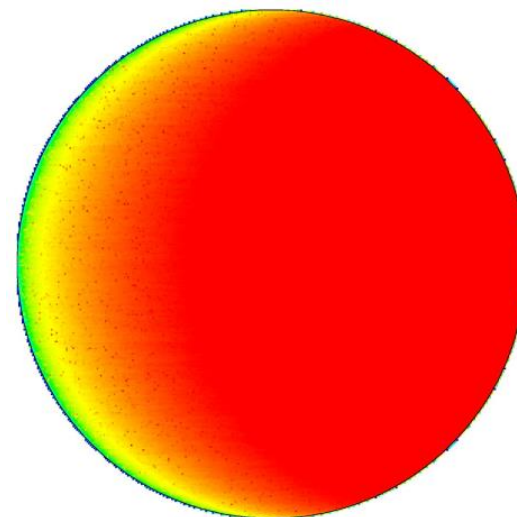
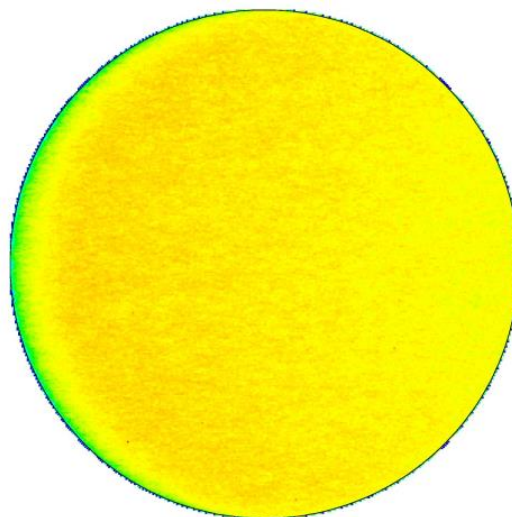
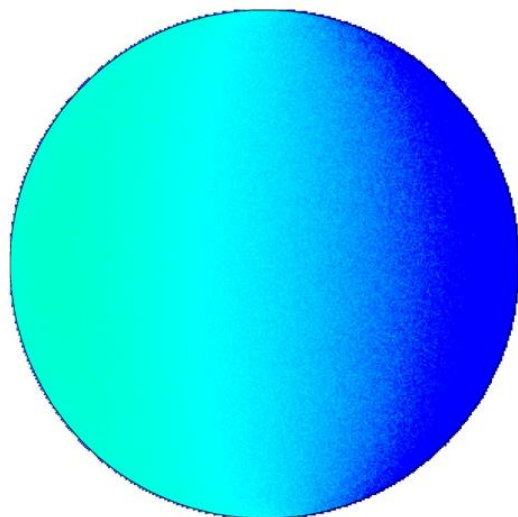
ICRU 球中の線量当量分布：光子の例



0.1 MeV

10 MeV

100 MeV



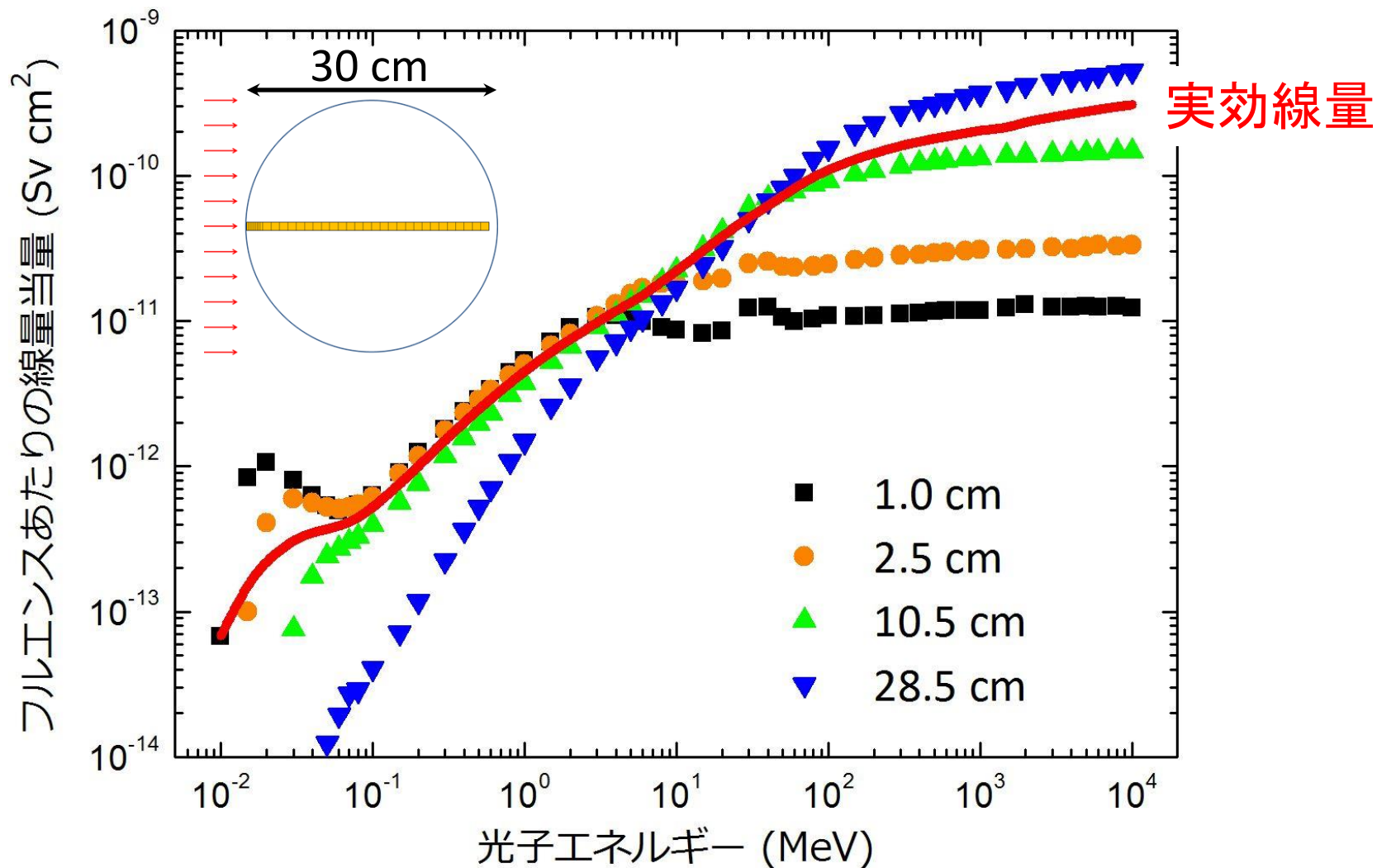
10^{-13}

10^{-12}

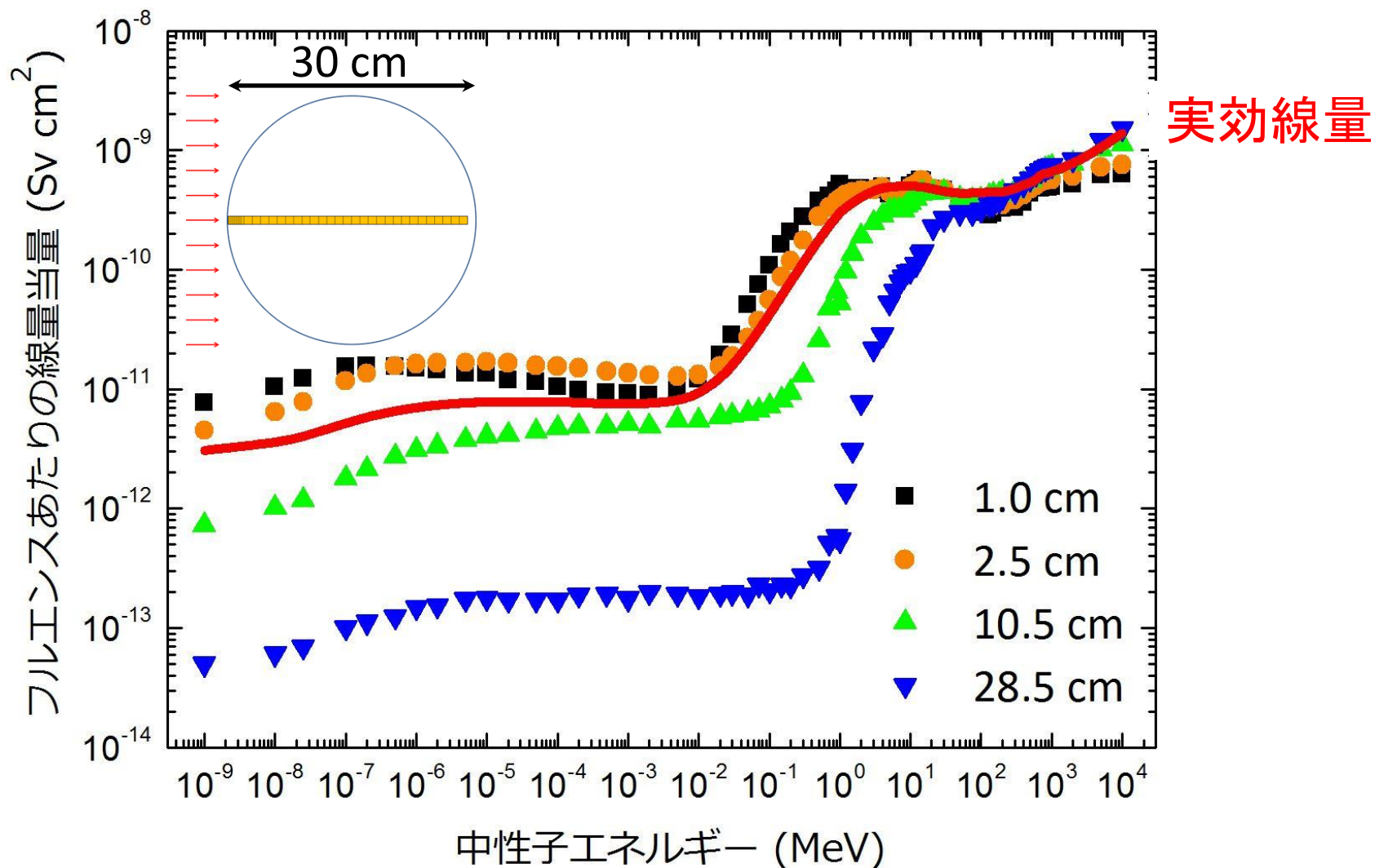
10^{-11}

$10^{-10} \text{ (Sv cm}^2\text{)}$

種々の深さにおける線量当量：光子



種々の深さにおける線量当量：中性子



ICRU 球中の線量当量では、様々なタイプの放射線について、幅広いエネルギーにわたり、実効線量を評価するのは困難

改定案 3 : 防護量を基に測定量を定める

放射線防護の線量計測は、防護量の管理が目的

□ 実効線量の管理 : 実効線量を基に測定量を定める

□ 目的量を指標とするため、考え方は分かりやすくなる

⇒ 実効線量換算係数のリファレンスデータ (ICRP116) が既にある

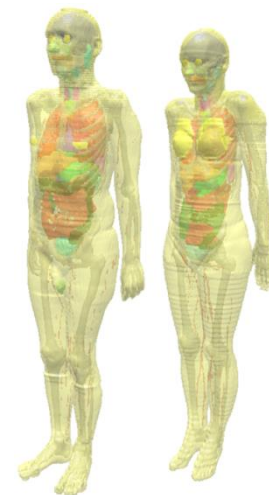
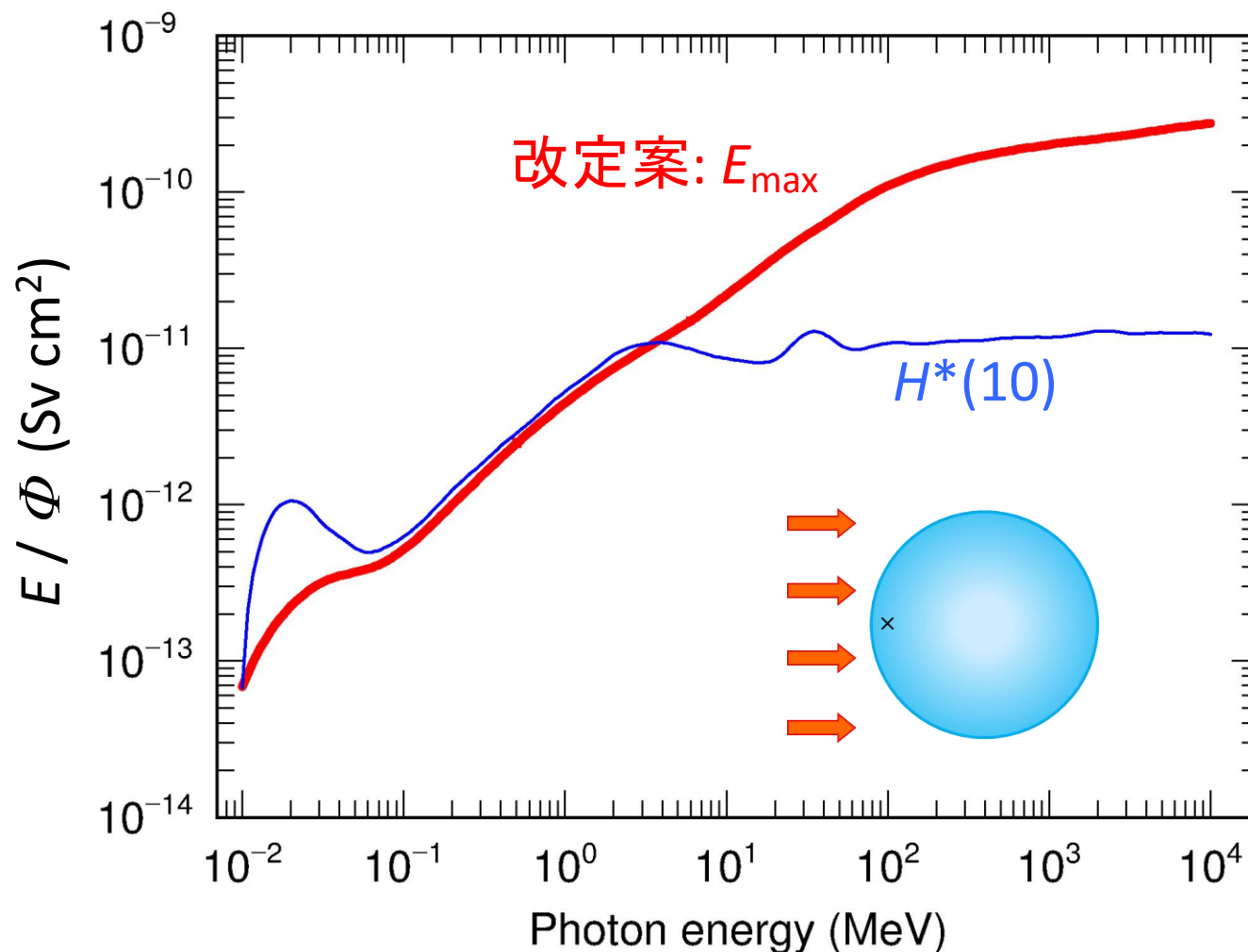
□ 確定的影響 (白内障、皮膚の急性障害) の防止 : 吸収線量を基に測定量を定める

□ 等価線量は吸収線量と放射線加重係数の積 : $H_T = D_T \times w_R$

⇒ 放射線加重係数は、確率的影響に対するもので、確定的影響には適さない

問題点 : 防護量の換算係数の改定の影響を受ける

改定案: エリアモニタリング-光子



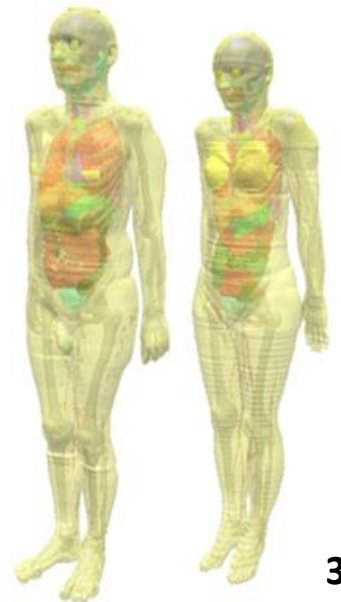
周辺線量当量 H^*

$$H^* = \int h_{E_{\max}}(E) \frac{d\Phi(E)}{dE} dE$$



$$h_{E_{\max}}(E) = E_{\max}(E) / \Phi(E)$$

ICRP 標準ファントムを用いて
計算された換算係数



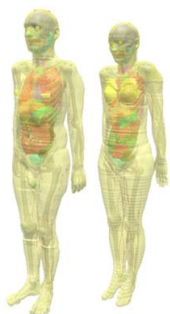
提案されたシステム

	現在の定義	改定案
エリア モニタリング	$H = Q \times \text{ICRU 球の深さ } d \text{ における吸収線量}$	実効線量 $H = \Phi \times \text{実効線量換算係数}$
個人 モニタリング	$H = Q \times \text{軟組織の深さ } d \text{ における吸収線量}$	水晶体 & 皮膚 $D = \Phi \times \text{水晶体・皮膚の吸収線量換算係数}$



ICRU 球や線質係数 Q を用いず、
防護量を基に測定量を定める

提案された線量体系のイメージ



人体ファントム, w_R , w_T
を用いて計算

物理量

- フルエンス: Φ
- カーマ: K
- 吸収線量: D

注: 講演者のイメージであり、
ICRP, ICRU の公式見解では
ありません

防護量 (ICRP)

- 臓器吸収線量: D_T
- 臓器等価線量: H_T
- 実効線量: E

実用量 (ICRU)

測定される量
測定器のレスポンス

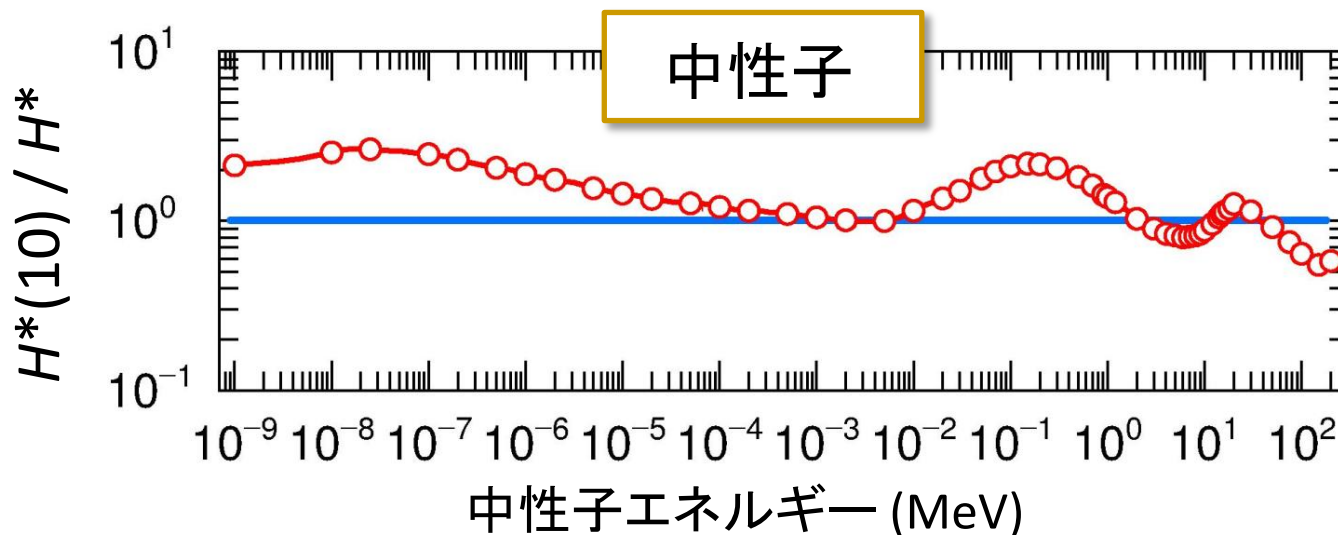
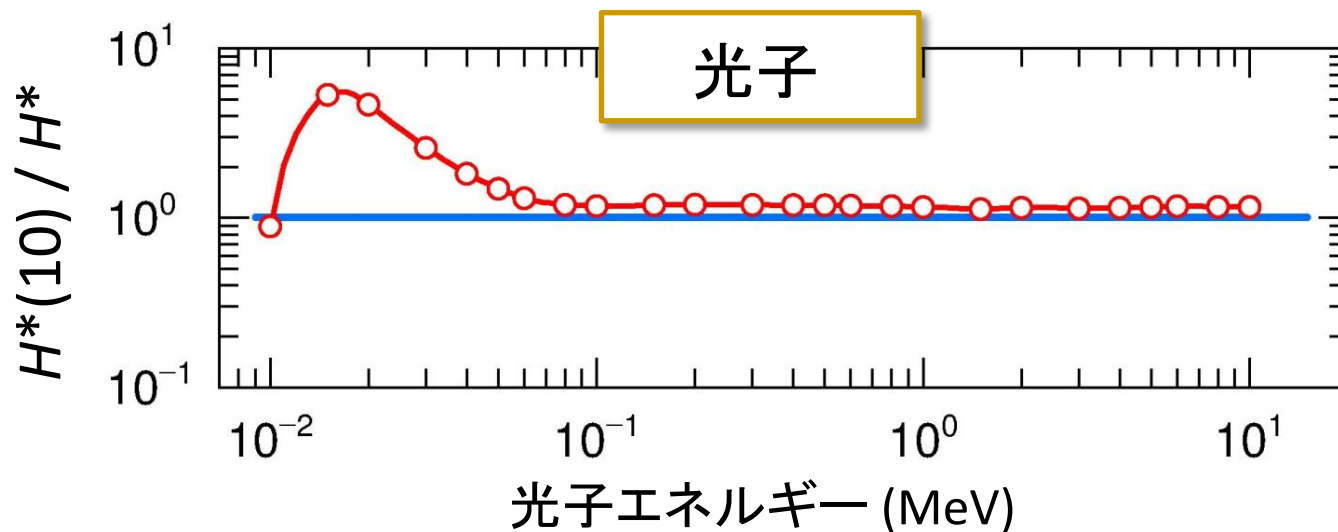
実用量の変更の影響

放射線防護の実務、法令・規制、モニタ・線量計の設計や校正へ及ぼす影響について、十分に分析する必要がある

モニタ・線量計の校正に関して

- 校正用ファントム: 変更なし
 - 水ファントム (PMMA容器)、PMMA ファントム
- 標準場: 変更なし
 - 光子: 空気カーマ; 中性子: フルエンス; 電子: 組織吸収線量
- 換算係数: 改定
 - 標準場の量から校正する量への換算係数を ICRU レポートで提供

換算係数の比: $H^*(10) / H^*$



実用量に関するまとめ

ICRU レポート委員会 26 は、外部被ばくに対する新たな実用量を提案

- ❑ 実効線量の管理に対しては、実効線量に基づき測定量を定める
- ❑ 白内障、皮膚の急性障害の防止に対しては、吸収線量に基づき測定量を定める

評価の対象である防護量に基づき、測定に用いる実用量を定めることで、評価と測定の体系を整理・単純化する

- ❑ 人体形状ファントム vs. ICRU 球、軟組織ファントム
- ❑ 放射線加重係数 vs. 線質係数

防護量と実用量の両方で用いる

4. 現状と今後の予定

現状

実用量に関する RC26 の提案をまとめた ICRU レポート案について、

- ❑ ICRP 第2専門委員会に提示し、意見聴取 (2016年1月)
- ❑ ICRU 年会で報告し、ICRU 委員の意見聴取 (2016年4月)
- ❑ 実用量換算係数の計算

上記を踏まえて、レポート案を更に改訂中

今後の予定

- ❑ 2016年12月 RC26 会合でレポート改定案確定。ICRU 委員に提出
- ❑ ICRU 委員の承認後、関連学会、機関等にレポート案を配布し、意見聴取予定
- ❑ 上記の意見を反映した後、ICRU/ICRP 共同レポートとして出版

日本の関係者の方々にも、いずれかのルートで情報が来ると
思われますので、様々な観点からご意見をお願いします

関連する資料

本発表は、下記の発表をまとめ、さらに最新情報を加えたものです

- A. Endo, N. Petoussi-Henss, M. Zankl, W. Bolch, K. Eckerman, N. Hertel, J. Hunt, M. Pelliccioni, H. Schlattl, H. Menzel
“Overview of the ICRP/ICRU adult reference computational phantoms and dose conversion coefficients for external idealised exposures”
12th International Symposium on Neutron and Ion Dosimetry (NEUDOS12), Aix en Provence (2013)
Radiat. Prot. Dosimetry, 161, 11-16 (2014)
- A. Endo
“The operational quantities and new approach by ICRU”
3rd International Symposium on the System of Radiological Protection, Seoul (2015)
Ann. ICRP 45 (1S), 178-187 (2016)
- 遠藤 章
“ICRP Publ. 116: Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures (外部被ばくに対する放射線防護量のための換算係数)”
日本保健物理学会シンポジウム 執筆者の解説による ICRP Publ. 勉強会, 東京大学 (2016)
- 遠藤 章
“線量測定のための実用量に関する ICRU の検討状況”
第23回放射線・放射能・中性子計測クラブ研究会, 産業技術総合研究所 (2016)