

# 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

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

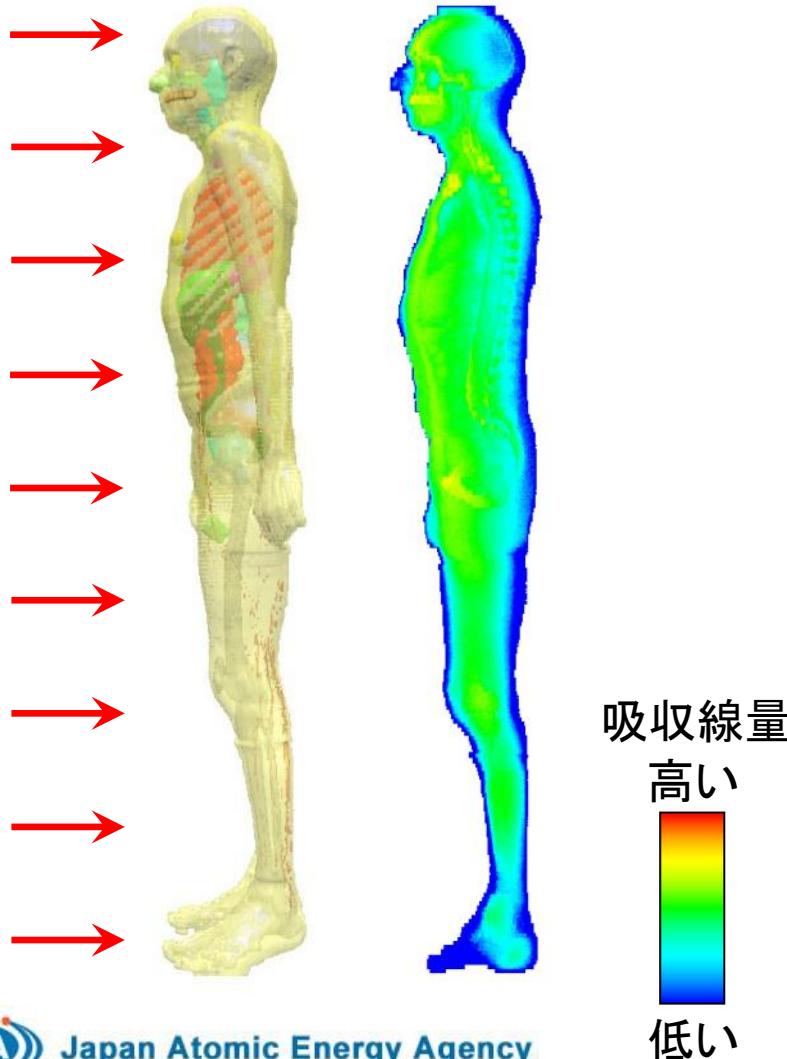
$D_{T,R}$ ：放射線  $R$  による臓器・組織  $T$  の平均吸収線量

$w_R$ ：放射線加重係数

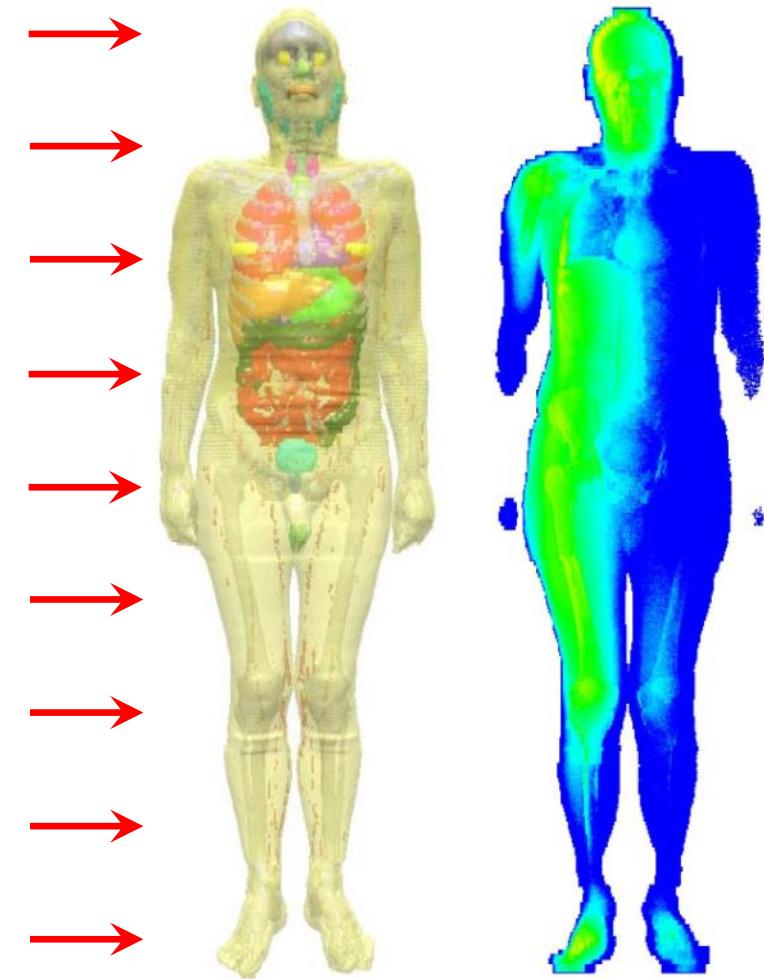
$w_T$ ：組織加重係数

# 体内の吸収線量分布

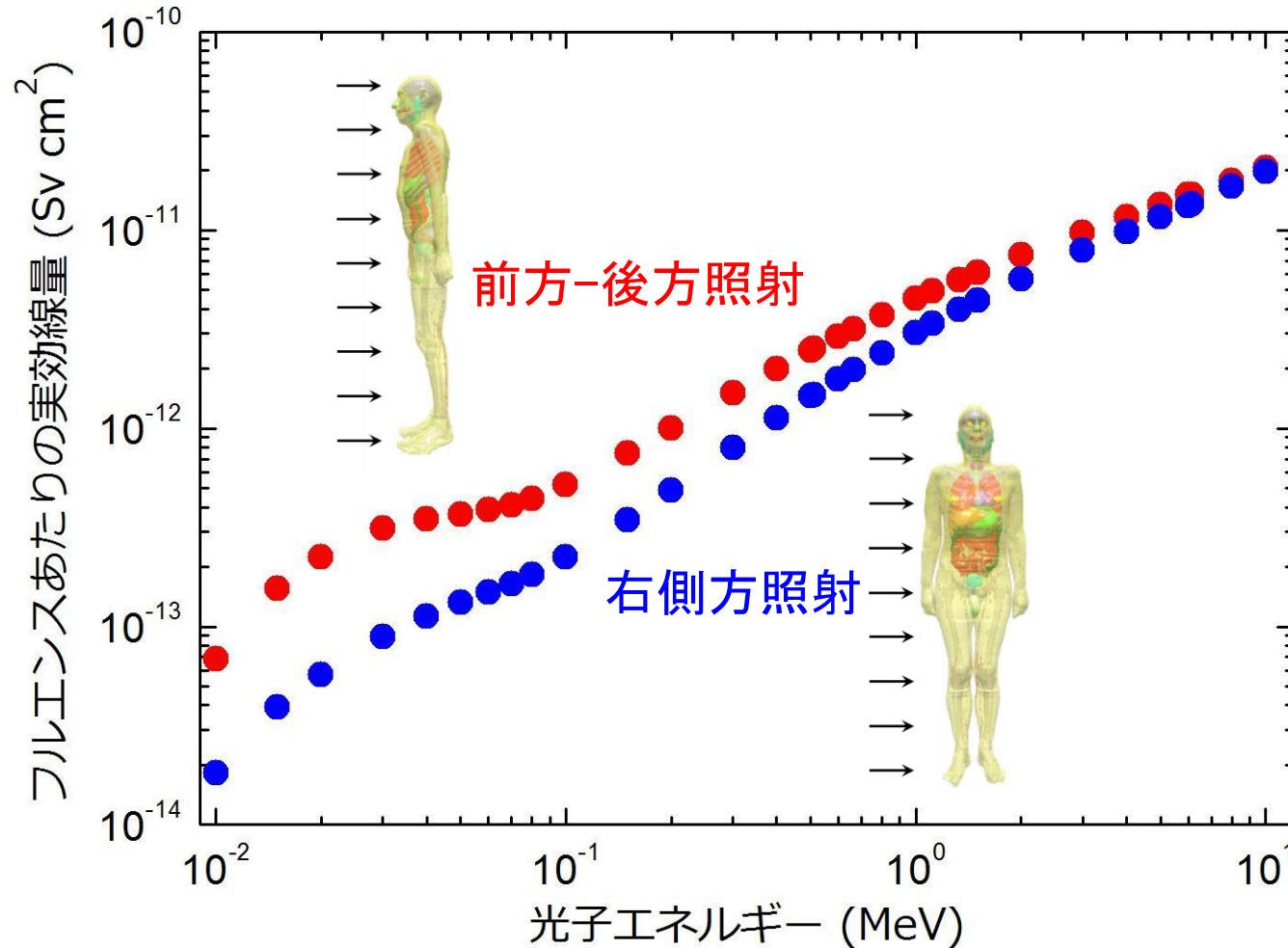
前方-後方照射



右側方照射



# 実効線量の特性

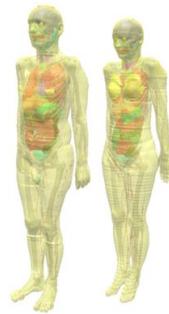


実効線量は、放射線のタイプ、エネルギー、入射方向に依存

→ 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

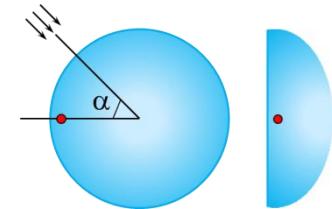
ICRP74/ICRU57より



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:  $\Phi$
- 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

- 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?

測定される量  
測定器のレスポンス

# 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 $H_{\text{lens}}$	皮膚、末端部の 線量 $H_{\text{skin}}$
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)

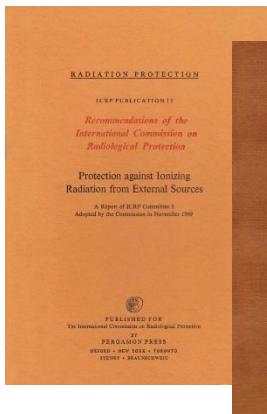
西暦	ICRP	ICRU
~ 2000	基本勧告検討	外部被ばく実用量の課題分析
2001	標準ファントム開発	
2002		☆参加
2003	外部被ばく防護量	
2004	線量換算係数評価	
2005		
2006		
2007		
2008	ICRP103	討議資料まとめ
2009	ICRP110	
2010	環境核種外部被ばく年齢別換算係数評価	実用量の見直し・提案 ☆参加
2011	ICRP116	
2012		
2013		
2014		
2015		
2016		
2017 ~	ICRP Publication	ICRU Report

# 防護量・実用量に関する日本における議論

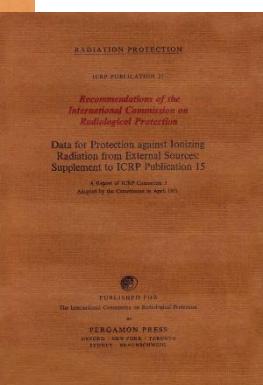
- 最近の外部被ばく線量評価法に関するワークショップ
  - 1995年 (原研), JAERI-Conf 95-007
- 第2回最近の外部被ばく線量評価法に関するワークショップ
  - 1996年 (原研), JAERI-Conf 96-011
- 第3回最近の外部被ばく線量測定・評価に関するワークショップ
  - 2002年 (原研), JAERI-Conf 2003-002
- 放射線防護に用いる線量概念の専門研究会
  - 日本保健物理学会の専門研究会 (2005～2007年)
    - 主査: 小田 啓二先生
    - 専門研究会報告書: ISSN 1881-7297 (2008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

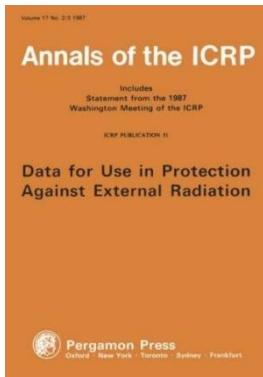
## これまでの ICRP の外部被ばく線量換算係数データ集



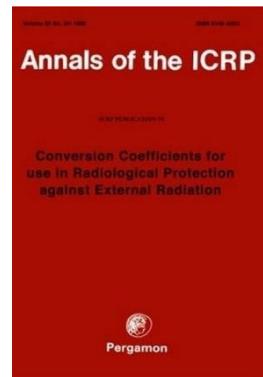
ICRP15  
(1970)



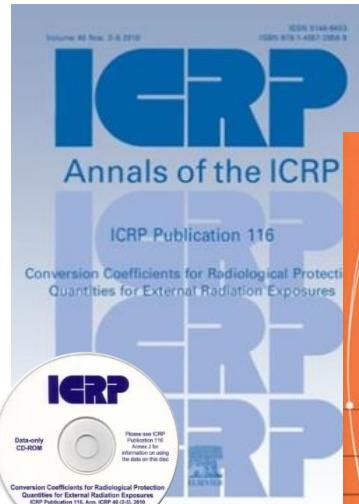
ICRP21  
(1973)



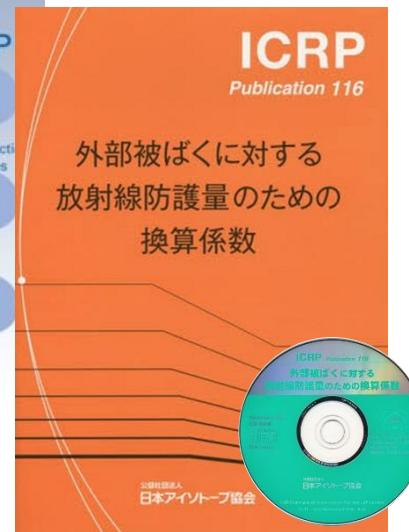
ICRP51  
(1987)



ICRP74  
(1996)



ICRP116  
(2010)



ICRP  
Publication 116

外部被ばくに対する  
放射線防護量のための  
換算係数

# 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、

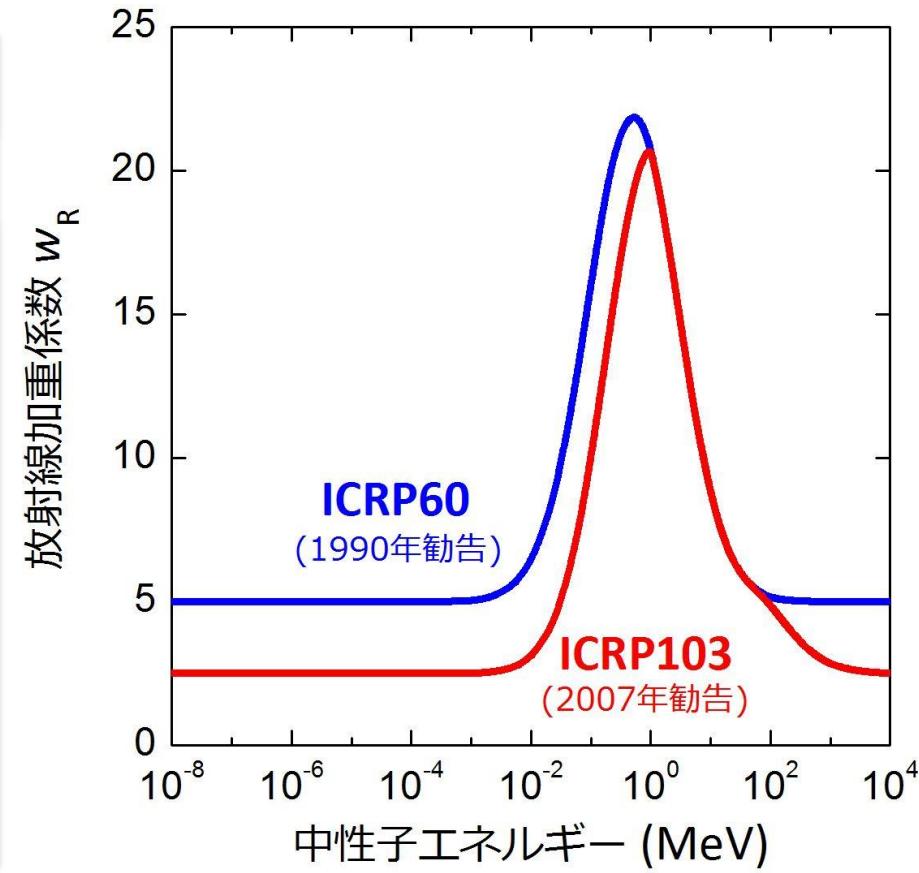
- 放射線加重係数  $w_T$  の見直し
  - 中性子、陽子は変更。パイ中間子を追加
- 組織加重係数  $w_R$  の見直し
  - 乳房、生殖腺、残りの組織の値の変更。唾液腺、脳等の追加
- 標準ファントムの導入
  - 人体の線量計算に用いる男女の標準ファントムを開発
- 実効線量の算定手順の変更
  - 男女の等価線量から、両性に適用する平均値を算定
- データの拡充
  - 放射線のタイプ・エネルギー範囲の拡張、水晶体データの追加

⇒ 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
赤色骨髓	0.12	0.12
結腸	0.12	0.12
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
乳房	0.05	<b>0.12</b>
生殖腺	0.20	<b>0.08</b>
膀胱	0.05	<b>0.04</b>
食道	0.05	<b>0.04</b>
肝臓	0.05	<b>0.04</b>
甲状腺	0.05	<b>0.04</b>
骨内膜(骨表面)	0.01	0.01
皮膚	0.01	0.01
脳	—	<b>0.01</b>
唾液腺	—	<b>0.01</b>
残りの組織	0.05	<b>0.12</b>

# 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

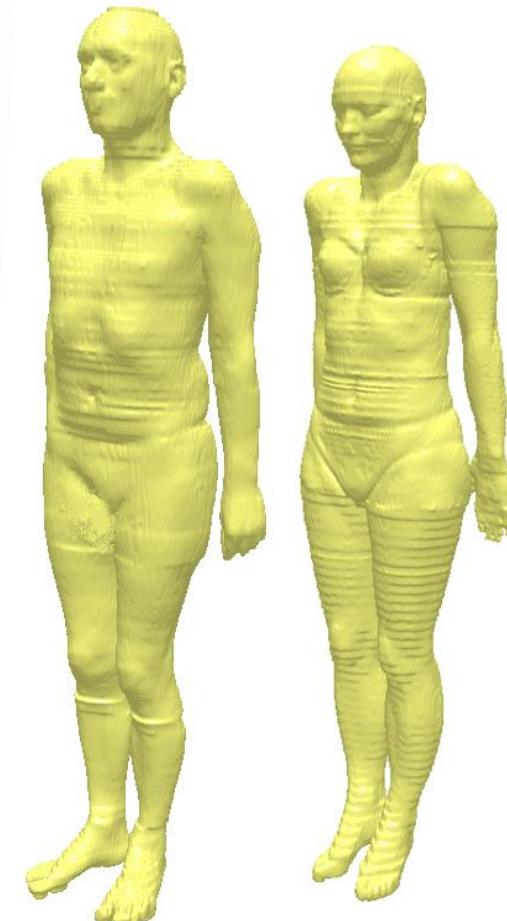


ICRP110 で [Voxel\\*\\*型の成人の標準ファントムを開発](#)

MIRD 型



Voxel 型



\* MIRD: Medical Internal Radiation Dose

\*\* Voxel: Volume pixel

男性ファントム 女性ファントム

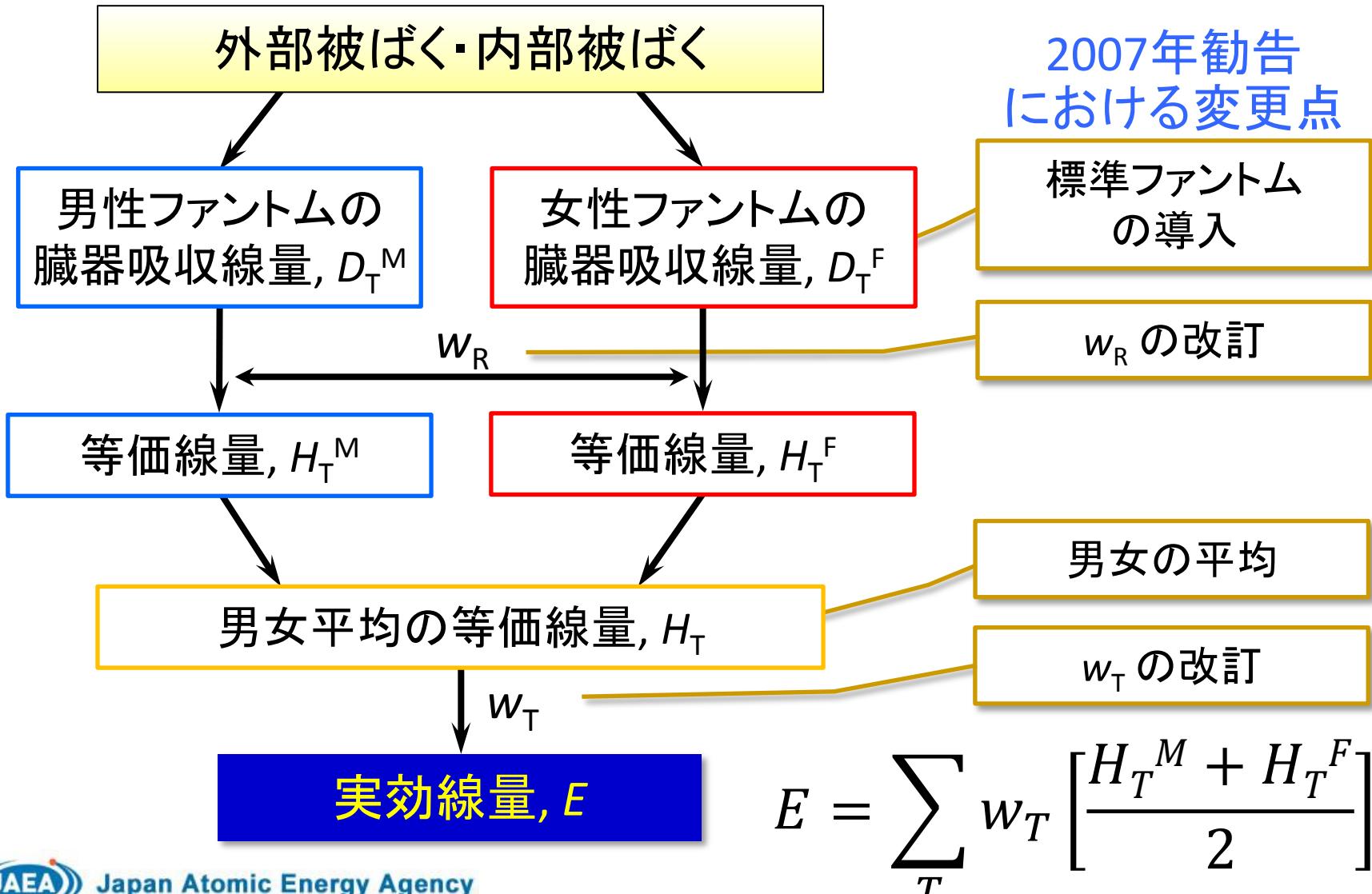
1.76 m

1.63 m

73.0 kg

60.0 kg

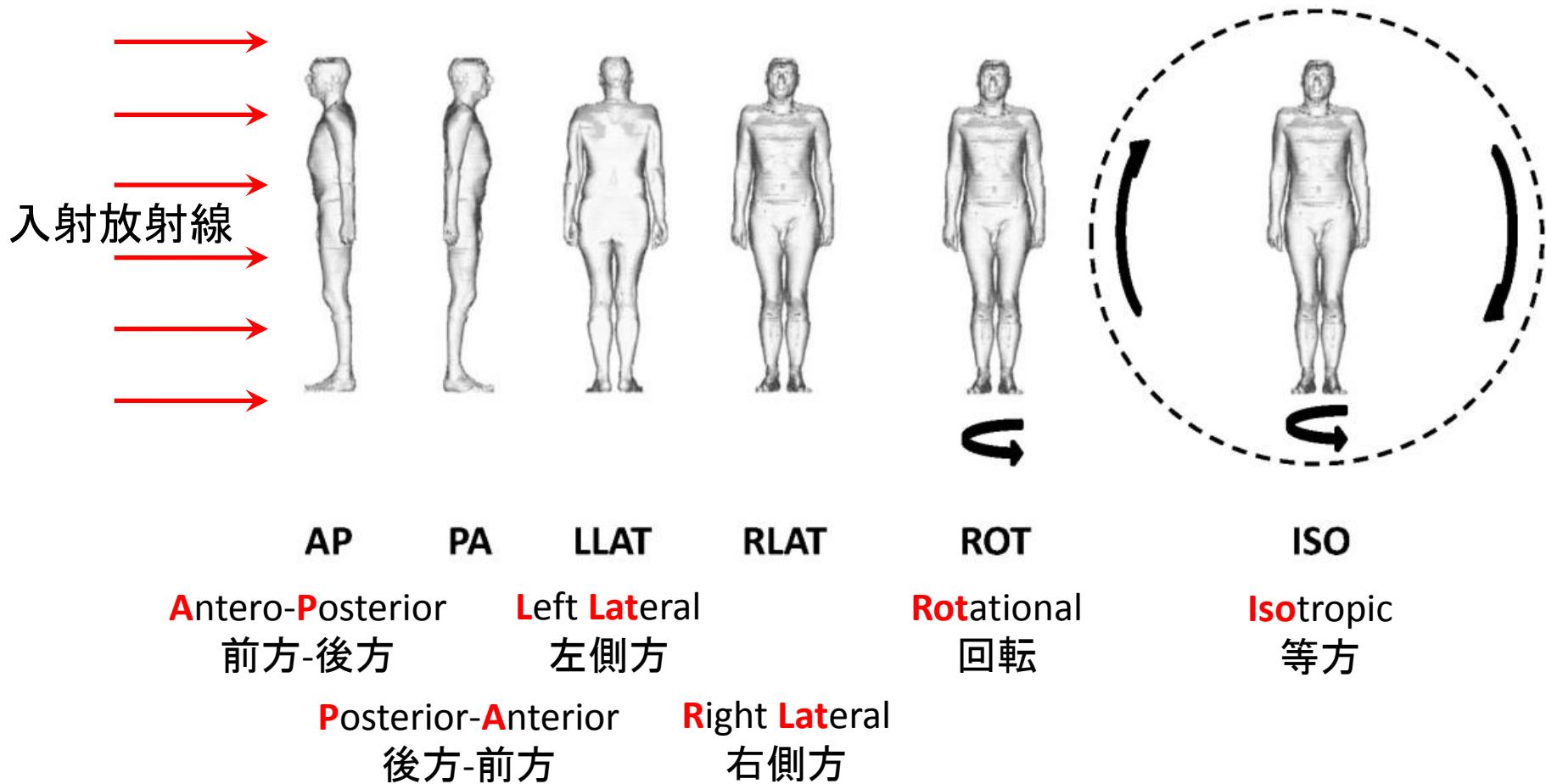
# 実効線量の評価手順



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

# 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



Japan Atomic Energy Agency

JAEA : Japan Atomic Energy Agency

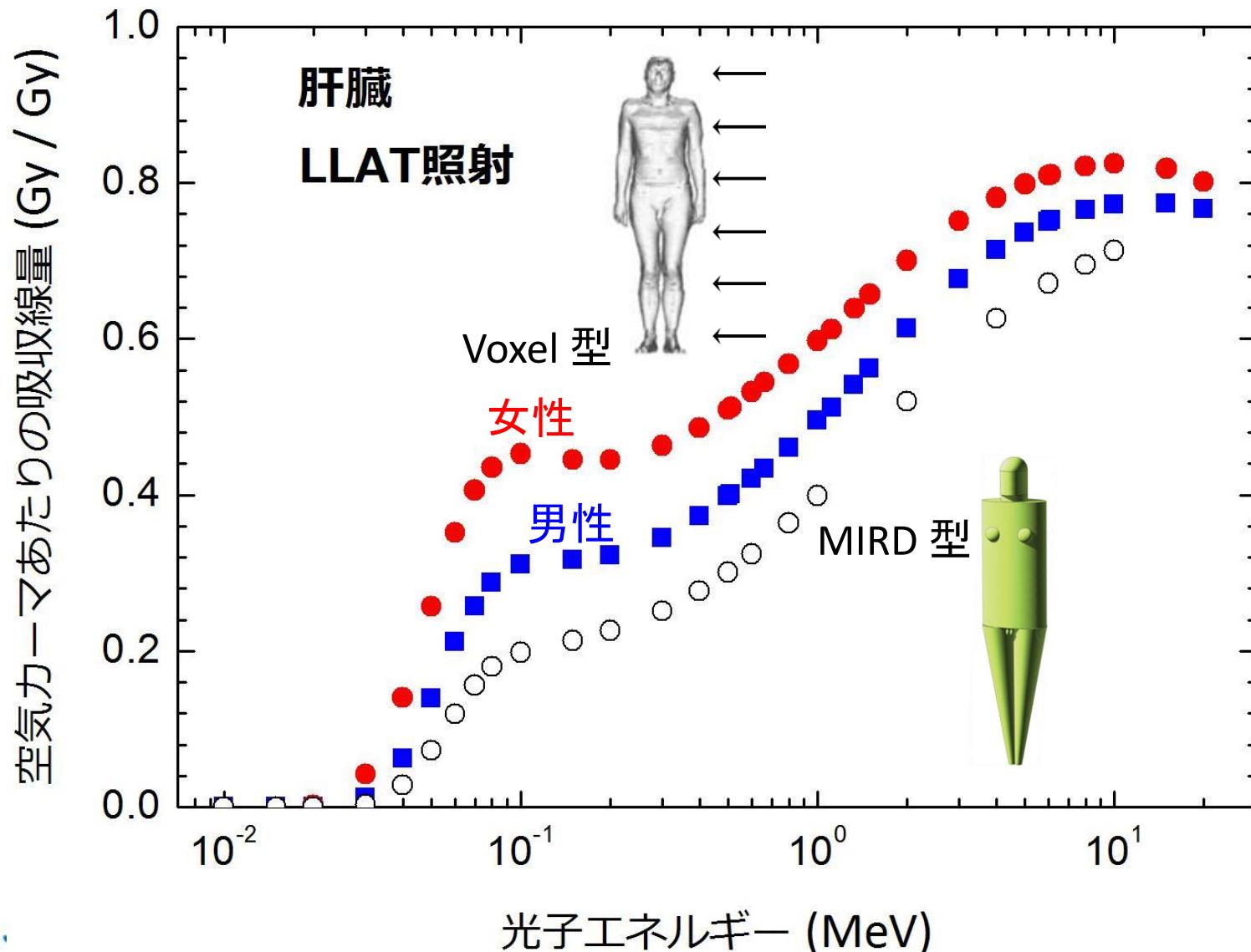
INFN : Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

RPI : Rensselaer Polytechnic Institute

# ICRP74/ICRU57 と ICRP116 との比較

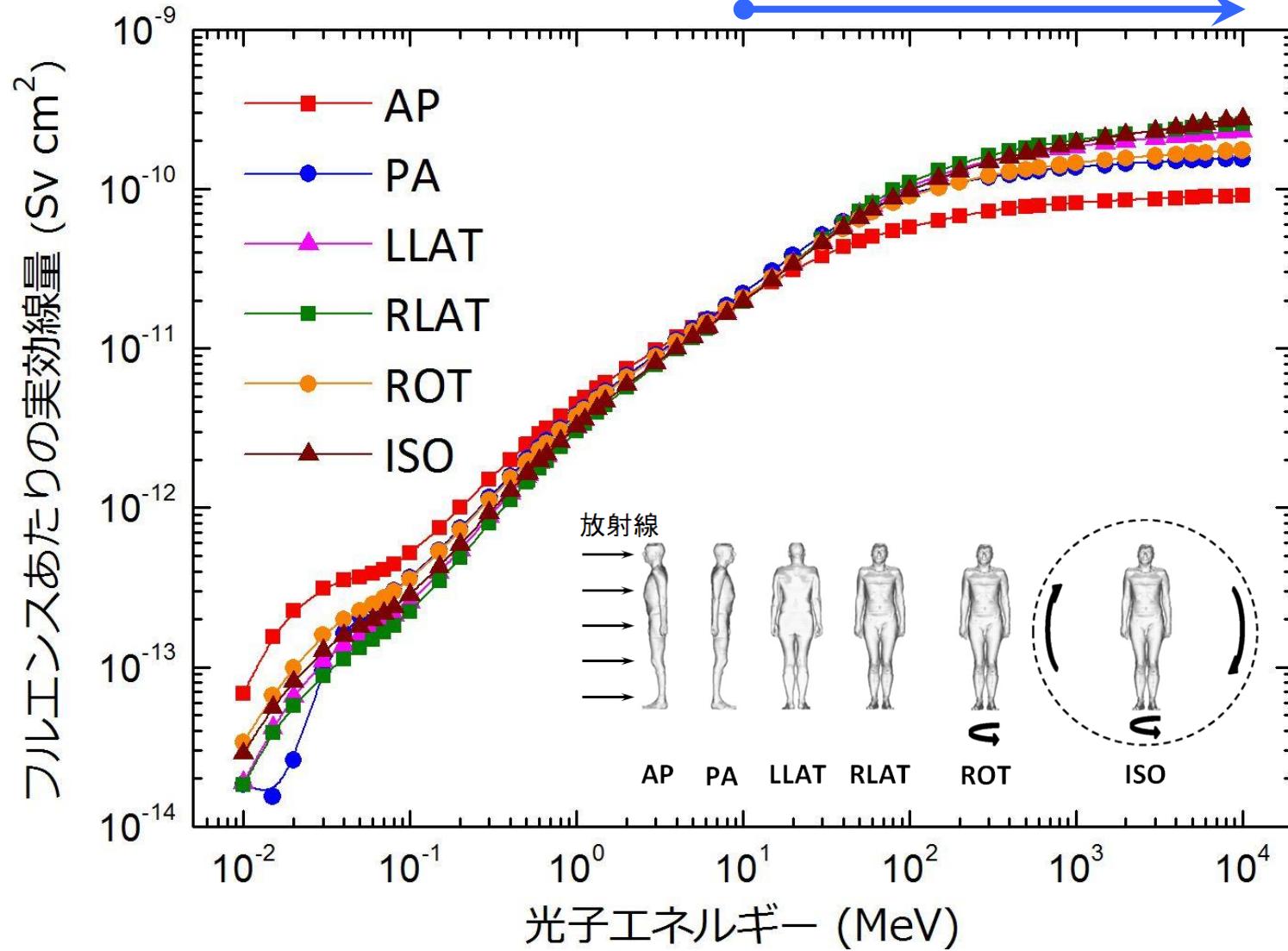
ICRP74/ICRU57	ICRP116
<ul style="list-style-type: none"><li>● 光子: 10 keV – 10 MeV</li><li>● 中性子: 0.001 eV – 180 MeV</li><li>● 電子: 100 keV – 10 MeV</li><li>● 上記放射線の実用量換算係数</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 光子: 10 keV – 10 GeV</li><li>● 中性子: 0.001 eV – 10 GeV</li><li>● 電子/陽電子: 50 keV –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

# 光子: 男性と女性の比較

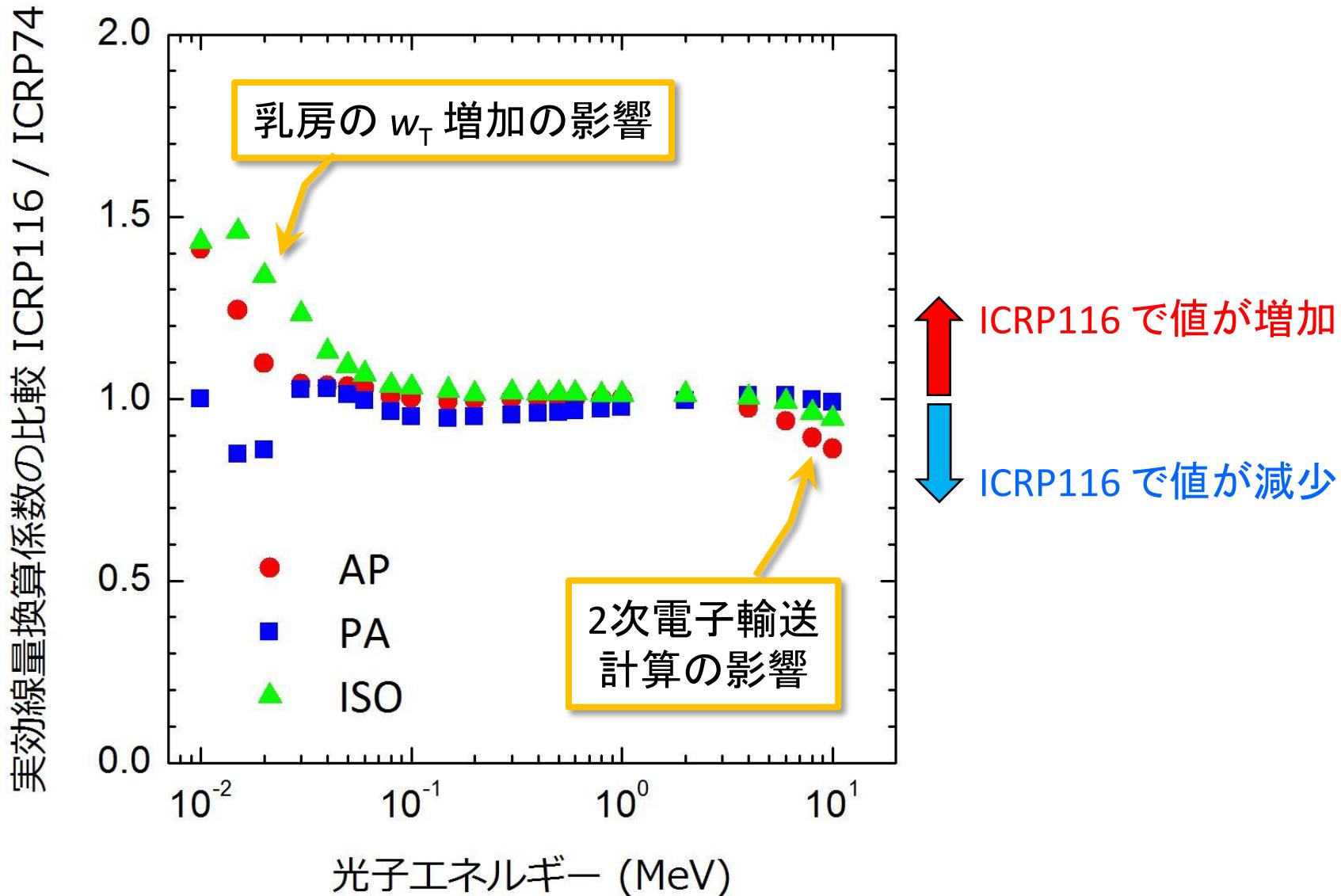


# 光子: 実効線量換算係数

エネルギー範囲の拡張: 10MeV → 10GeV



# 光子: ICRP116 vs. ICRP74

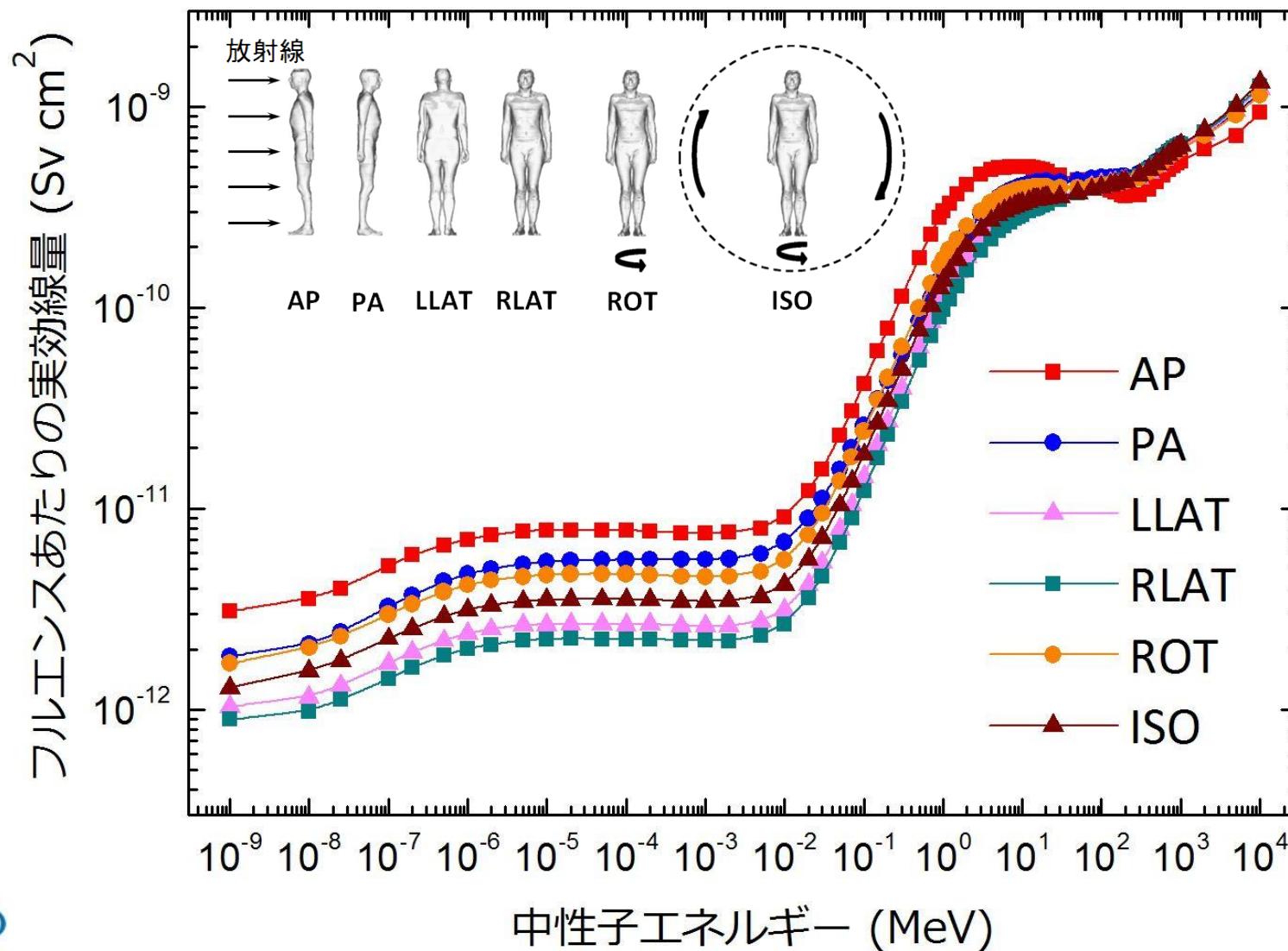


# 光子の実効線量換算係数のポイント

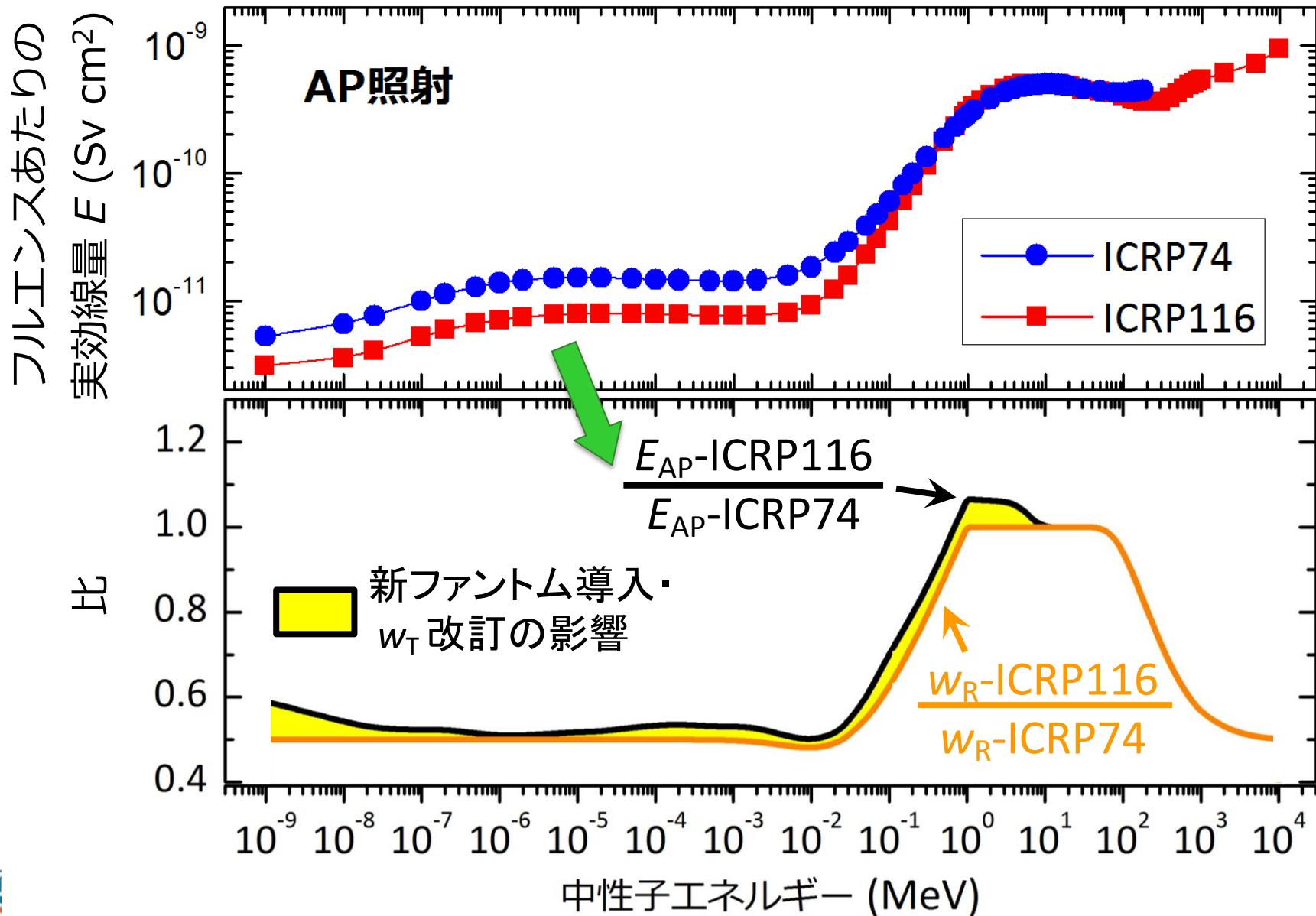
- 換算係数のエネルギー範囲を 10 MeV から 10 GeV まで拡張
- 加速器施設、宇宙線等に存在する高エネルギー光子に対する評価が可能になった
- ICRP74との違いは、標準ファントムの導入、組織加重係数  $w_T$  の見直しに起因
  - 0.06 MeV 以下で顕著になり、最大 50% 程度
  - 0.06 MeV ~ 10 MeV では、違いは僅か

# 中性子: 実効線量換算係数

## エネルギー範囲の拡張: 180MeV → 10GeV



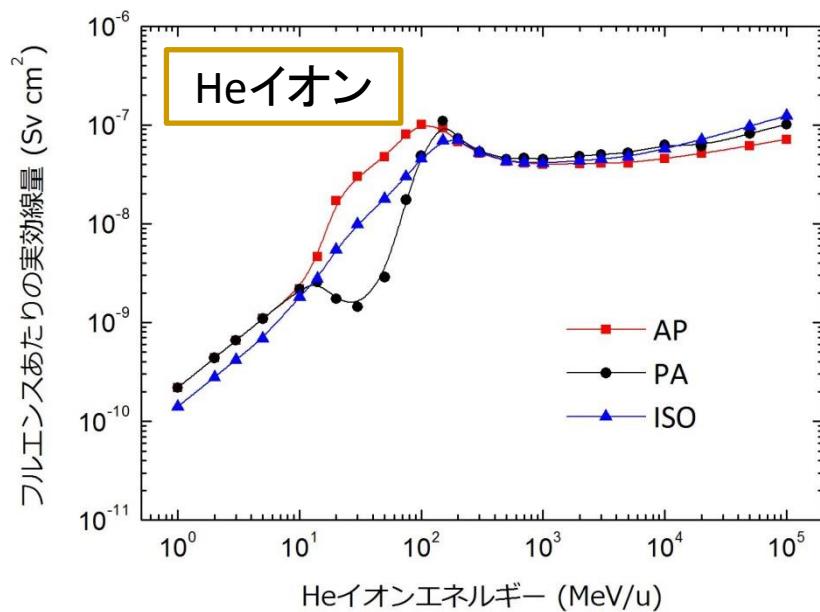
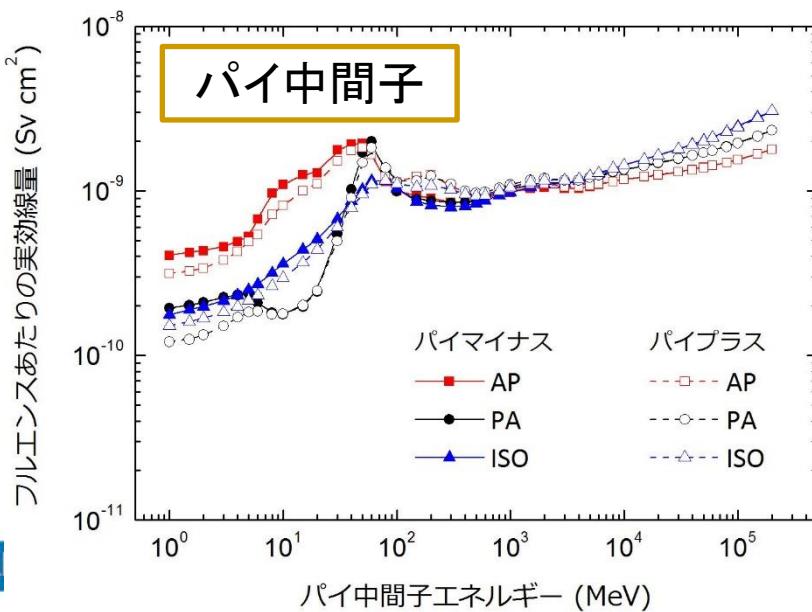
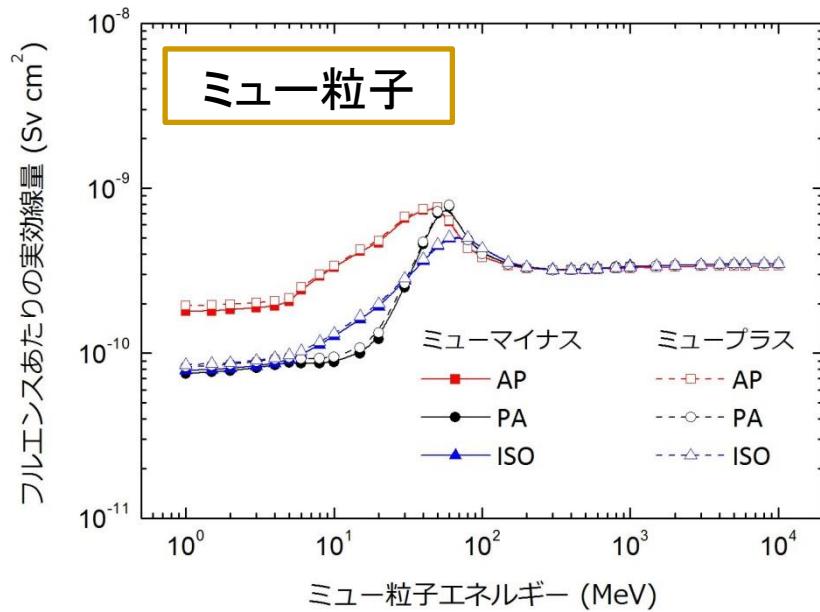
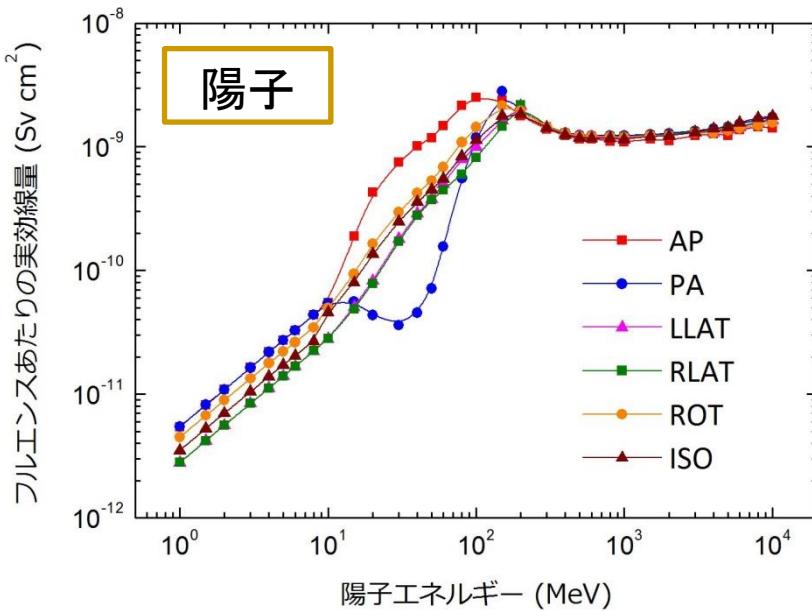
# 中性子: ICRP116 vs. ICRP74



# 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 以下で小さくなつた
  - 主な原因是、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



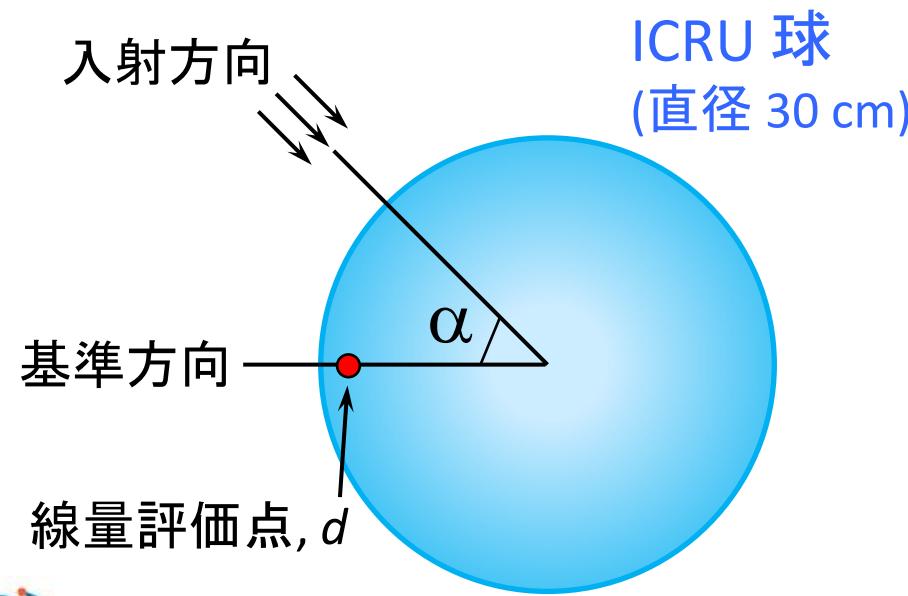
### 3. ICRU における実用量の検討と新たな提案

$$\text{線量当量: } H = D \times Q$$

$D$ : 組織中の吸収線量  $Q$ : 線質係数

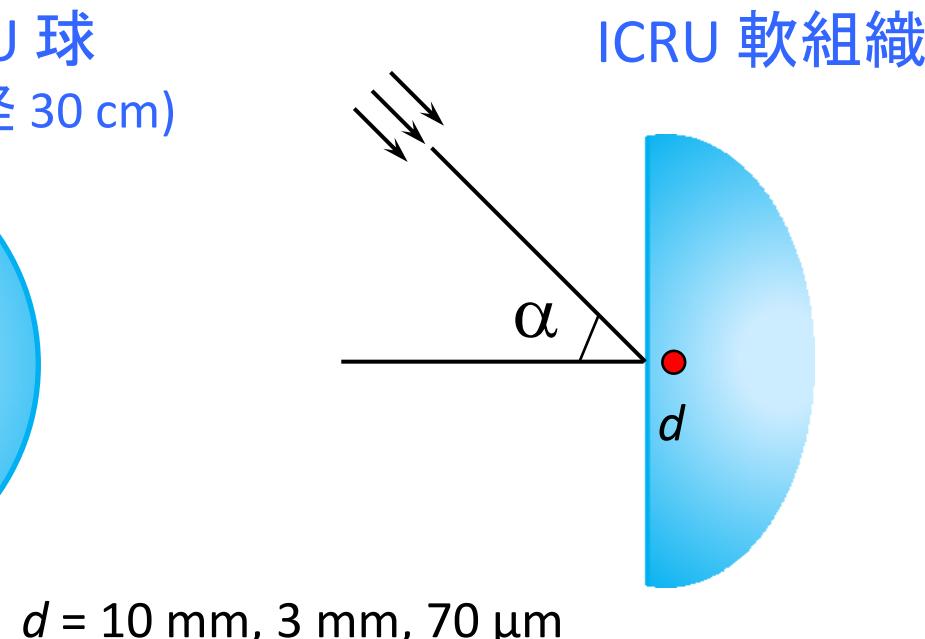
#### エリアモニタリング

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

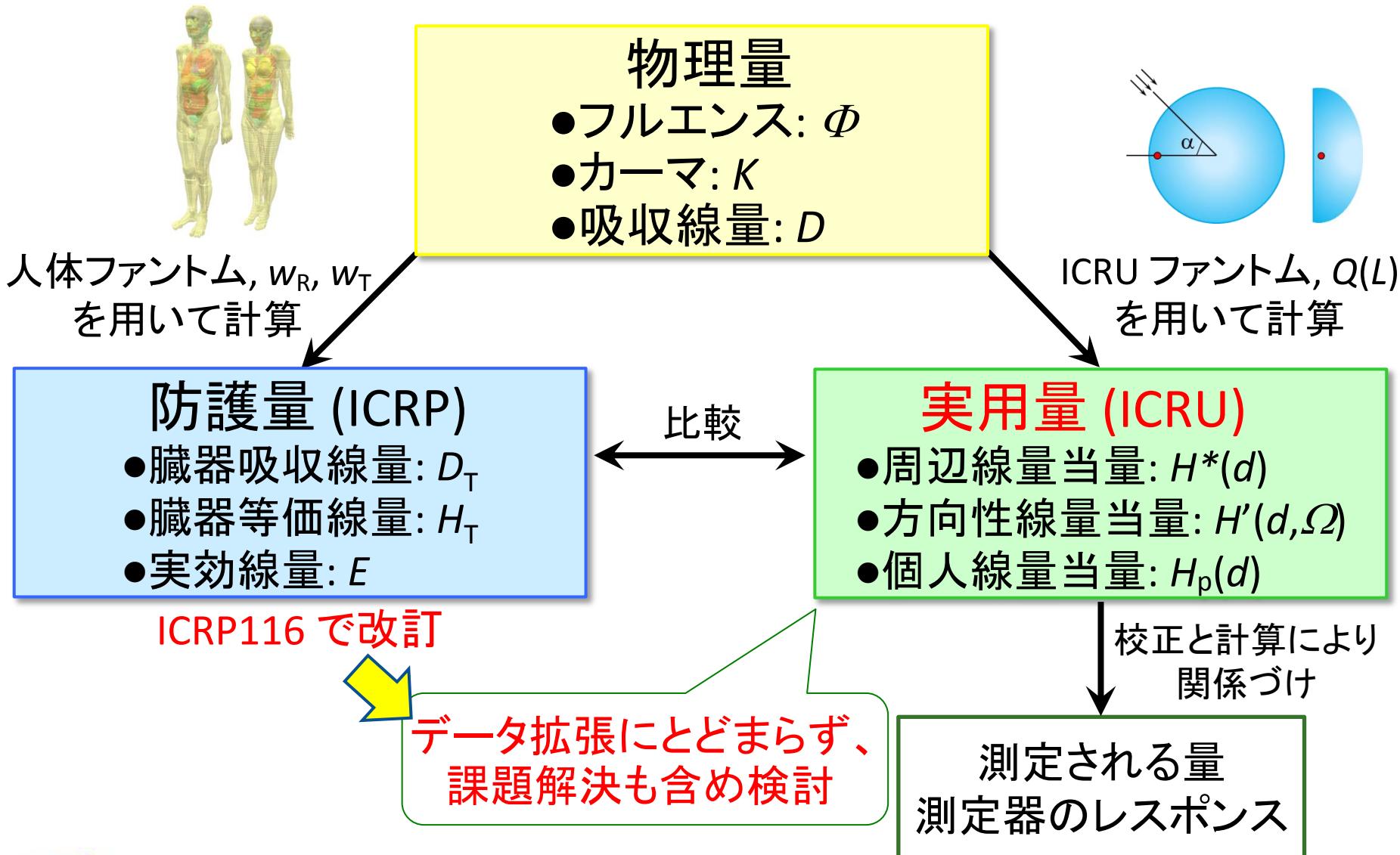


#### 個人モニタリング

- 個人線量当量,  $H_p(d)$



# 放射線防護の線量評価・測定の体系



# 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

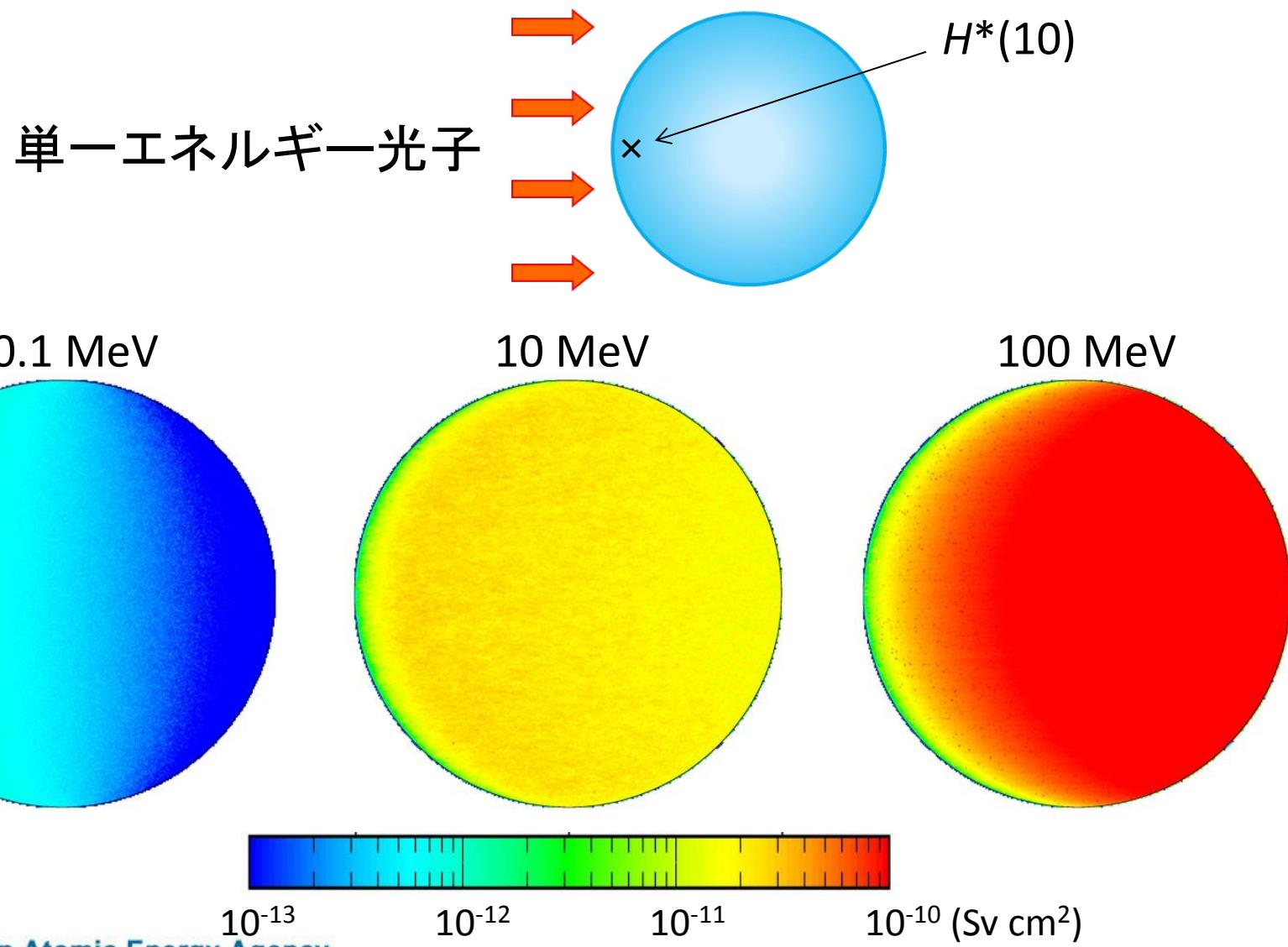
改定案 2 : 現在の実用量を継続して使用する。ただし、周辺線量当量については、10 mm 深さに固定せず、他の適切な深さの使用を検討する

→ 変更を一部にとどめ、影響を抑える

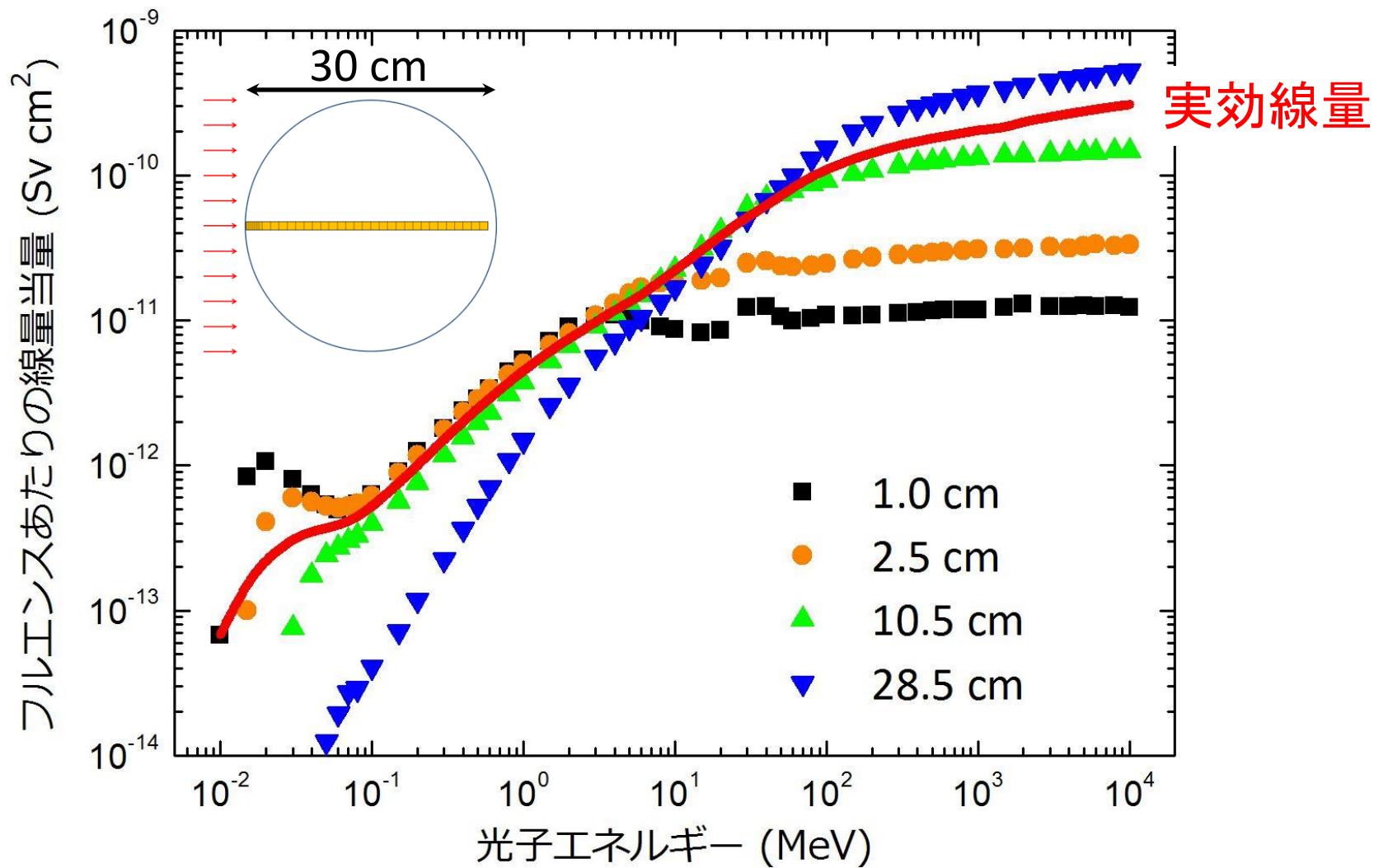
改定案 3 : 防護量を基に測定量を定める

→ 現状の考え方を見直し、問題解決を図る

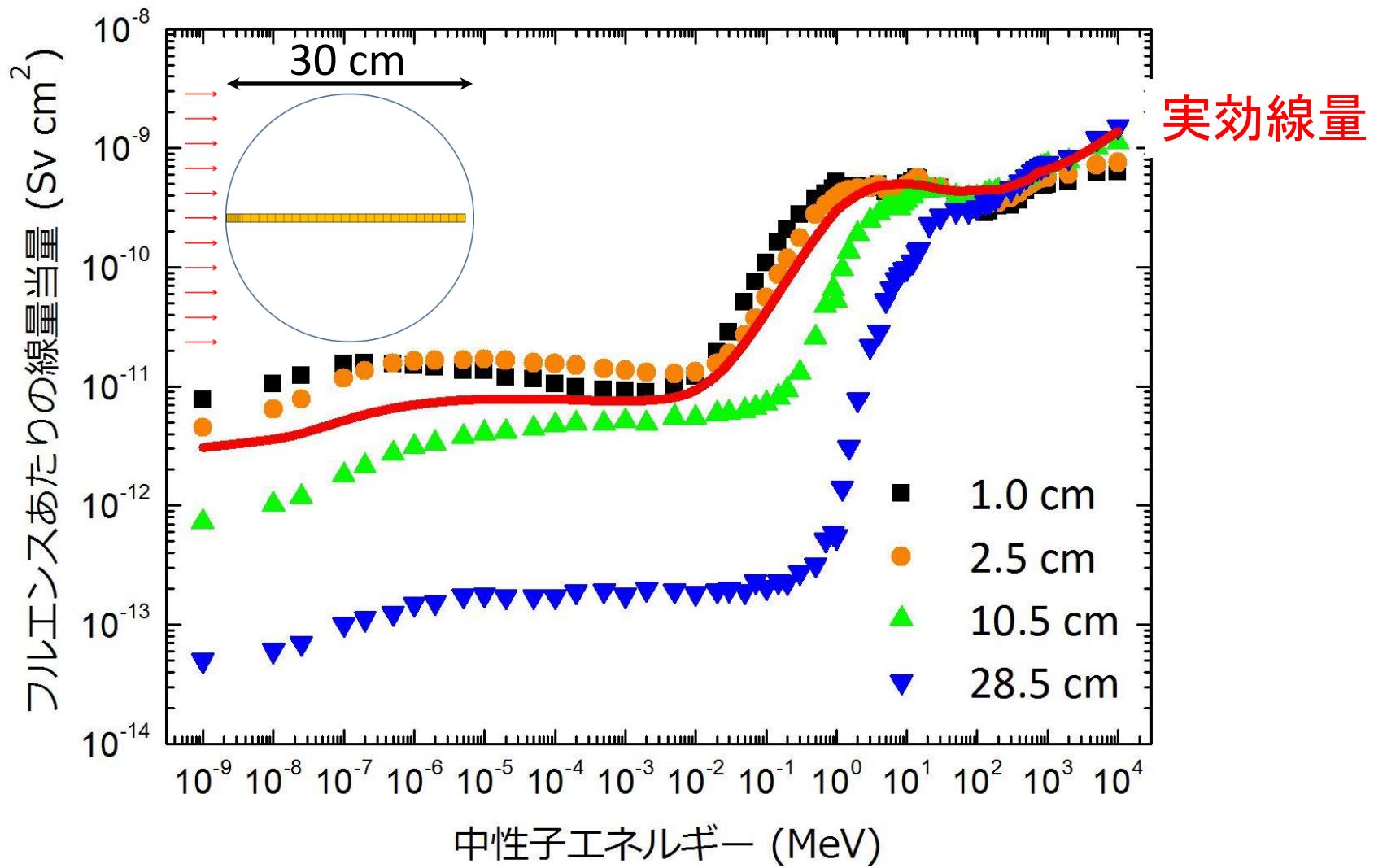
# ICRU 球中の線量当量分布: 光子の例



# 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

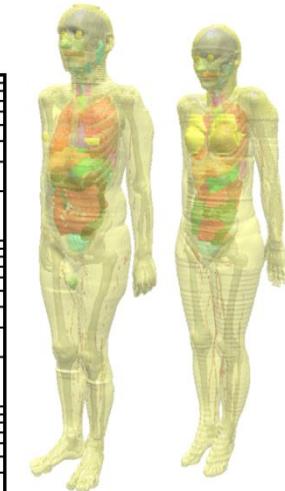
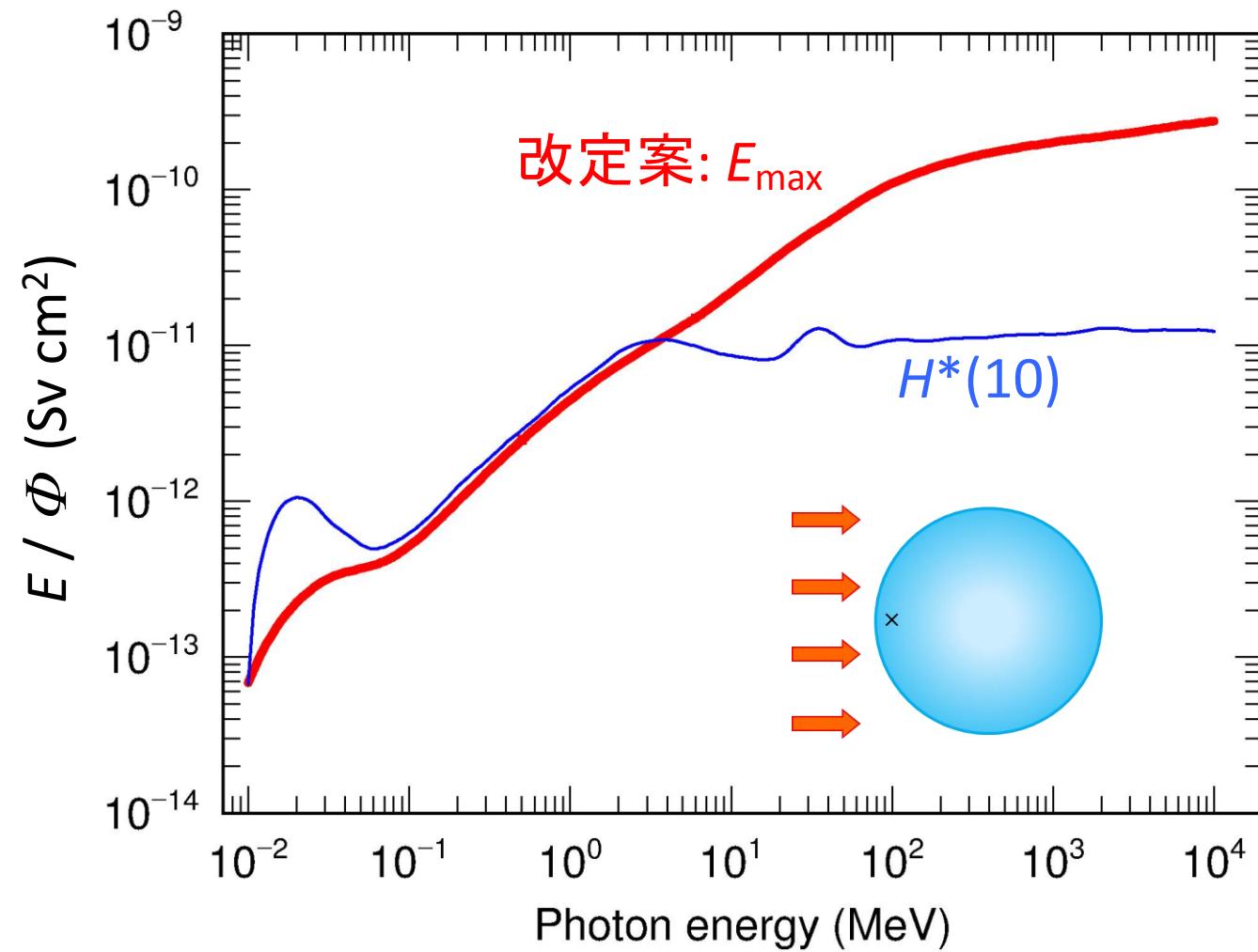
# 改定案 3 : 防護量を基に測定量を定める

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: 吸收線量を基に測定量を定める
- 等価線量は吸收線量と放射線加重係数の積:  $H_T = D_T \times \mathbf{w}_R$ 
  - ⇒ 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



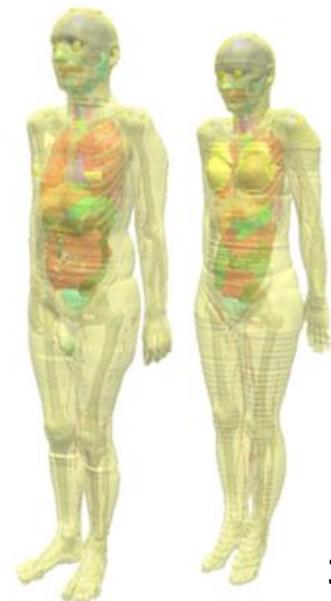
# 周辺線量当量 $H^*$

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



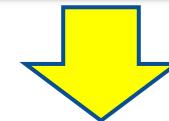
$$h_{E_{\max}}(E) = E_{\max}(E) / \Phi(E)$$

ICRP 標準ファントムを用いて  
計算された換算係数



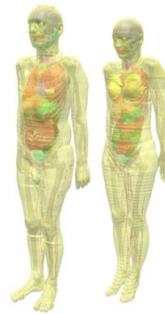
# 提案されたシステム

	現在の定義	改定案
エリア モニタリング	$H = Q \times \text{ICRU 球の深さ}$ $d$ 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	$H = Q \times \text{軟組織の深さ}$ $d$ 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:  $\Phi$
- 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

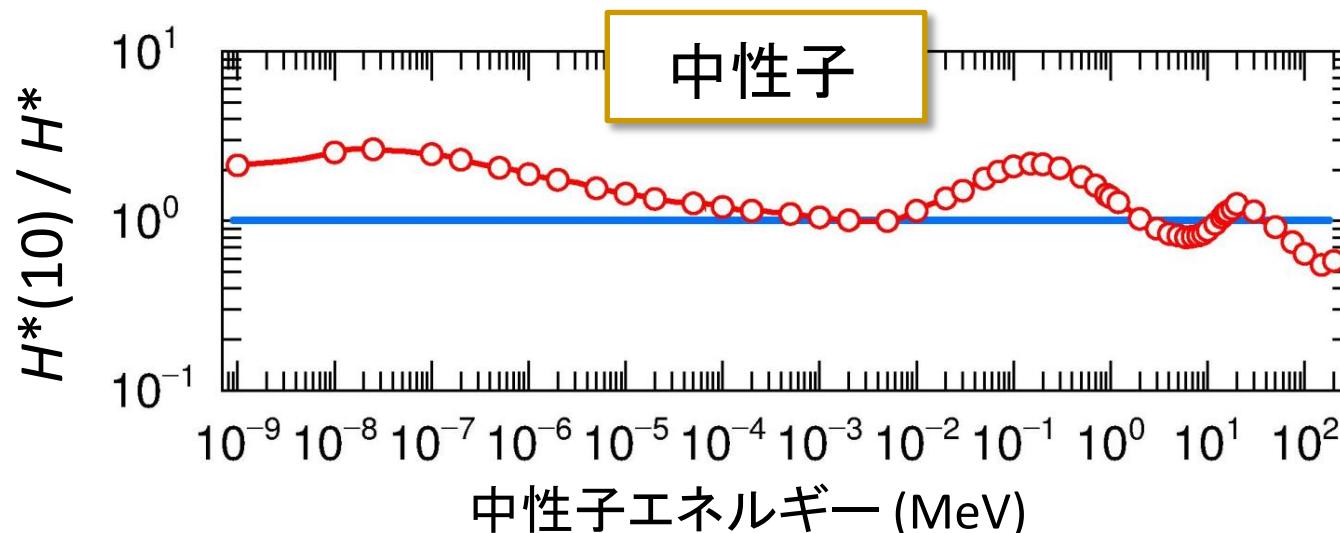
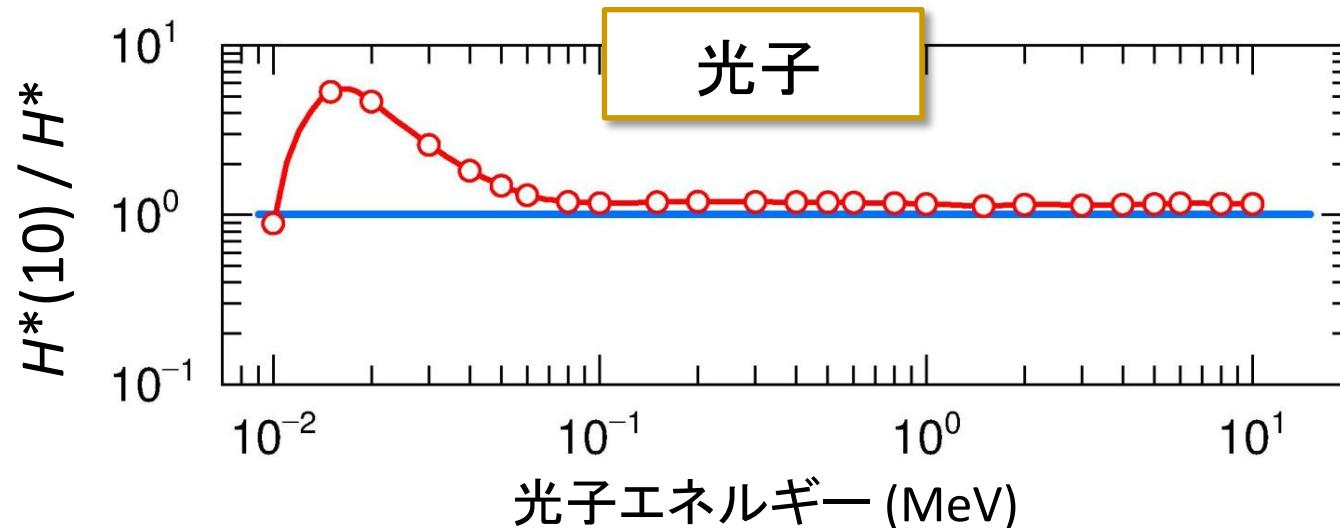
# 実用量の変更の影響

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・線量計の校正について

- 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: $H^*(10) / H^*$



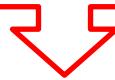
# 実用量に関するまとめ

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”  
12<sup>th</sup> 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”  
3<sup>rd</sup> 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)