

放射線防護で用いられる線量について

平成24年3月13日

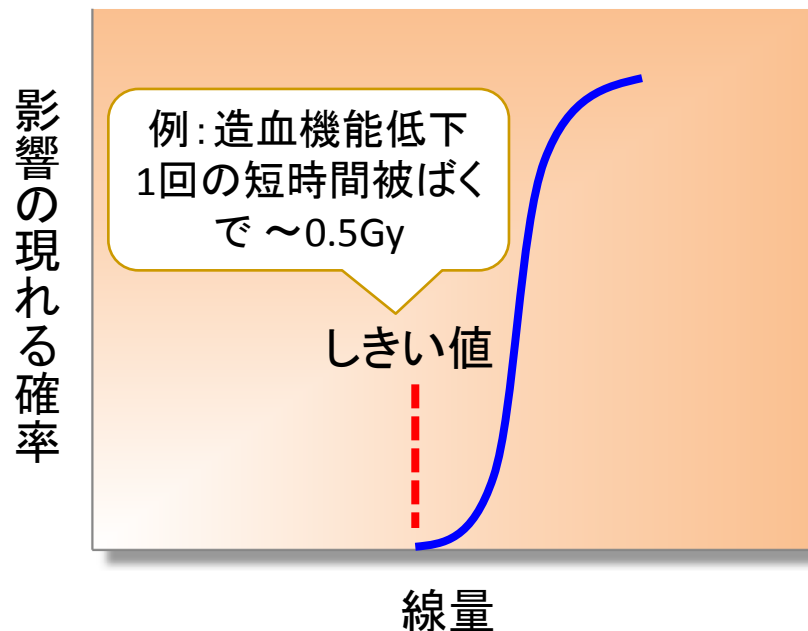
独立行政法人日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門
遠藤 章

報告内容

- 放射線防護における線量評価の目的
- 線量の測定・評価の体系
- 実効線量の概念と線量換算係数の役割
- 実効線量の評価と放射線モニタリングとの関係
- ICRP 2007年勧告における線量評価に関わる変更点
- 原子力機構における線量評価研究に関する取り組み
- まとめ・今後の展望

放射線防護の目的

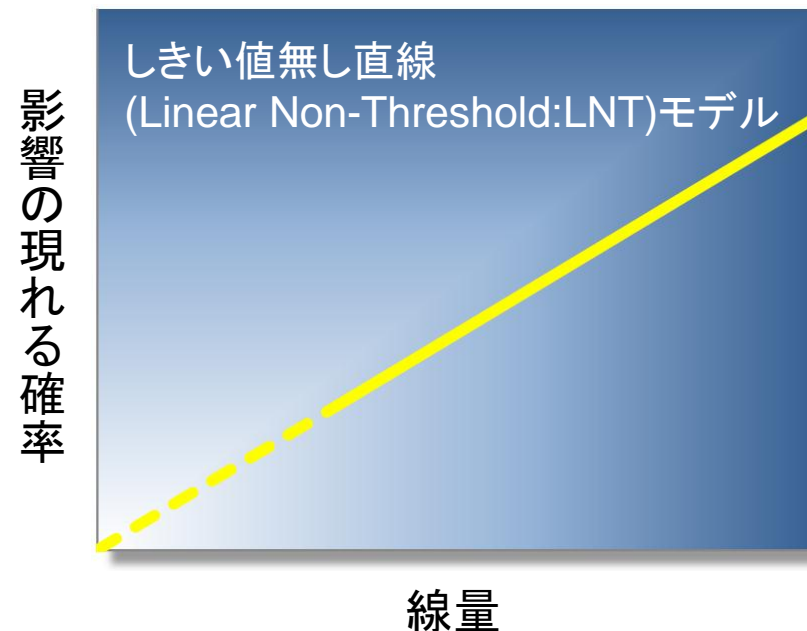
確定的影響 (脱毛、白内障など)



発生を防止

かつ

確率的影響 (がん、遺伝性影響など)



容認できるレベルに制限

放射線防護における線量評価

- 被ばくによる影響、リスクを評価
 - 確定的影響 (しきい値有り) ⇐ 発生を防止
 - 確率的影響 (しきい値無し?) ⇐ 容認できるレベルに制限
- 放射線の生物学的効果、臓器・組織の感受性の違いを考慮し、かつ、外部被ばくと内部被ばくの両方に対して、同じ尺度で評価可能な量であること
- 科学的知見とともに、評価上の約束事の設定が重要
 - 疫学研究、動物実験、分子生物学的研究等の成果が基礎
 - 低線量での確率的影響の線量-反応関係をLNTモデルで仮定
 - 幅広い年齢、性別、体格、放射線感受性等を踏まえた判断

線量測定・評価の体系

国際放射線防護委員会 (ICRP) が検討

防護量

身体において定義
されている線量

物理量

- 吸収線量: D
- フルエンス: Φ
- 放射能: A

国際放射線単位測定委員会 (ICRU) が検討

実用量

身体における線量の測定
と評価のための計測量

臓器・組織の等価線量 H_T

実効線量 E

外部被ばくに対して

- エリアモニタリングのための線量
- 個人モニタリングのための線量

内部被ばくに対して

- 摂取量を推定するために用いる空気中濃度、身体中濃度、食品中濃度等の測定

防護量の歴史的発展

1900年代初頭: 紅斑線量

- 皮膚に観察される最初の症状を指標。吸収線量で 5～6 Gy 相当
} (この間、省略)

ICRP 1964年勧告 (ICRP6): 線量当量 $DE = D(QF)(DF)$

- 吸収線量 D を、生物学的効果を反映した線質係数 QF 、線量分布係数 DF で加重した線量

ICRP 1977年勧告 (ICRP26): 実効線量当量 $H_E = \sum_T w_T H_T$

- 臓器の相対的感受性、線質を考慮した線量

ICRP 1990年勧告 (ICRP60): 実効線量 $E = \sum_T w_T H_T$

- 現在の放射線防護体系で使われている線量
- 1977年勧告からの進展は、考慮する臓器の追加及び加重係数の見直し、線質に対する加重係数の考え方の変更

ICRP 2007年勧告 (ICRP103): 実効線量 $E = \sum_T w_T H_T$

- 今後導入予定。1990年勧告の線量概念を踏襲。考慮する臓器の追加及び加重係数の見直し、線質に対する加重係数の見直し

実効線量: E (Sv)

確率的影響のリスクを評価するための量

- 被ばくによる全損害は線量に比例し (LNTモデル)、各臓器・組織の損害の合計で評価

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

放射線 R による
臓器 T の吸収線量

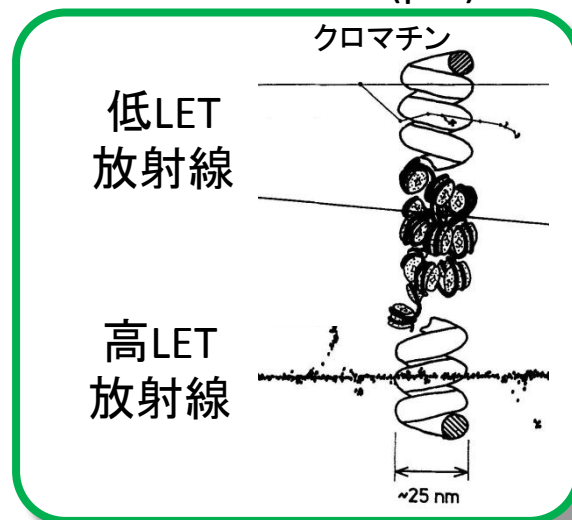
等価線量

組織加重係数 (p.9)

放射線加重係数 (p.8)

内部被ばくでは、摂取後、期間 τ に
わたる積算値: 預託等価線量

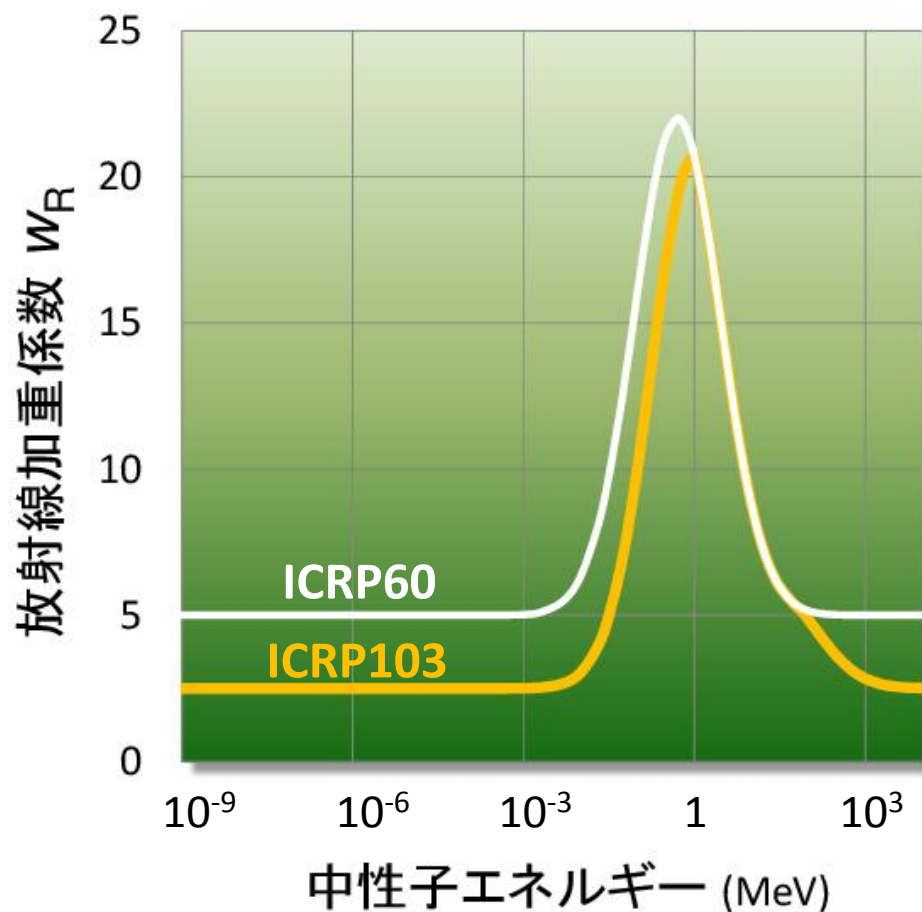
$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt$$



放射線加重係数: w_R

放射線の生物学的効果の違いを考慮するための係数

放射線の種類	1990年 勧告	2007年 勧告
光子	1	1
電子、 μ 粒子	1	1
陽子	5	2
荷電 π 粒子	—	2
α 粒子、核分裂 片、重原子核	20	20
中性子	右図参照	



組織加重係数: w_T

健康損害に対する組織・臓器の相対的寄与を考慮するための係数

組織・臓器	1990年 勧告	2007年 勧告
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
生殖線	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

残りの組織	1990年 勧告	2007年 勧告
副腎	○	○
脳	○	左表に移動
小腸	○	○
腎臓	○	○
筋肉	○	○
膵臓	○	○
脾臓	○	○
胸腺	○	○
ET領域	○	○
子宮	○	○(子宮頸部、女性)
胆嚢	—	○
心臓	—	○
リンパ節	—	○
口腔粘膜	—	○
前立腺	—	○(男性)

外部被ばくと内部被ばくの健康影響

- Cs-134, Cs-137, I-131の被ばくによる影響
 - ガンマ線による外部被ばくでも、ベータ線による内部被ばくと同様に、エネルギー付与は電子により生じる ⇒ 線量が同じであれば効果は同じ
- 内部被ばくにおける線量分布の影響
 - 微粒子状の“ホットパーティクル”近傍では、線量が極度に高くなる可能性がある ⇒ 細胞死に至れば、がん化のリスクは低下
- 内部被ばくにおけるベータ線等の取り扱い
 - 飛程の短い放射線に対しては、放射性核種と高感受性細胞の配置を考慮したモデルを適用 ⇒ 影響の標的となる領域の線量を計算

線量あたりのリスクは、ほぼ同等

⇒ 動物実験、人体の事故時被ばくの事例も、上記見解を支持

線量換算係数の役割

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

実効線量 E は

- ❑ 臓器・組織の吸収線量 ($D_{T,R}$) に基づくため実測できない
- ❑ 個々の被ばく状況に対して、その都度計算するのは困難

⇒ 計測可能な量 (フルエンス、空気カーマ、放射能) と実効線量を関連づける換算係数を用いて評価

線量換算係数 (線量係数)

解剖学、生理学、放射線物理等の知見に基づき算定される、計測可能な物理量と実効線量を関連づける係数

■ 外部被ばく: 線量換算係数

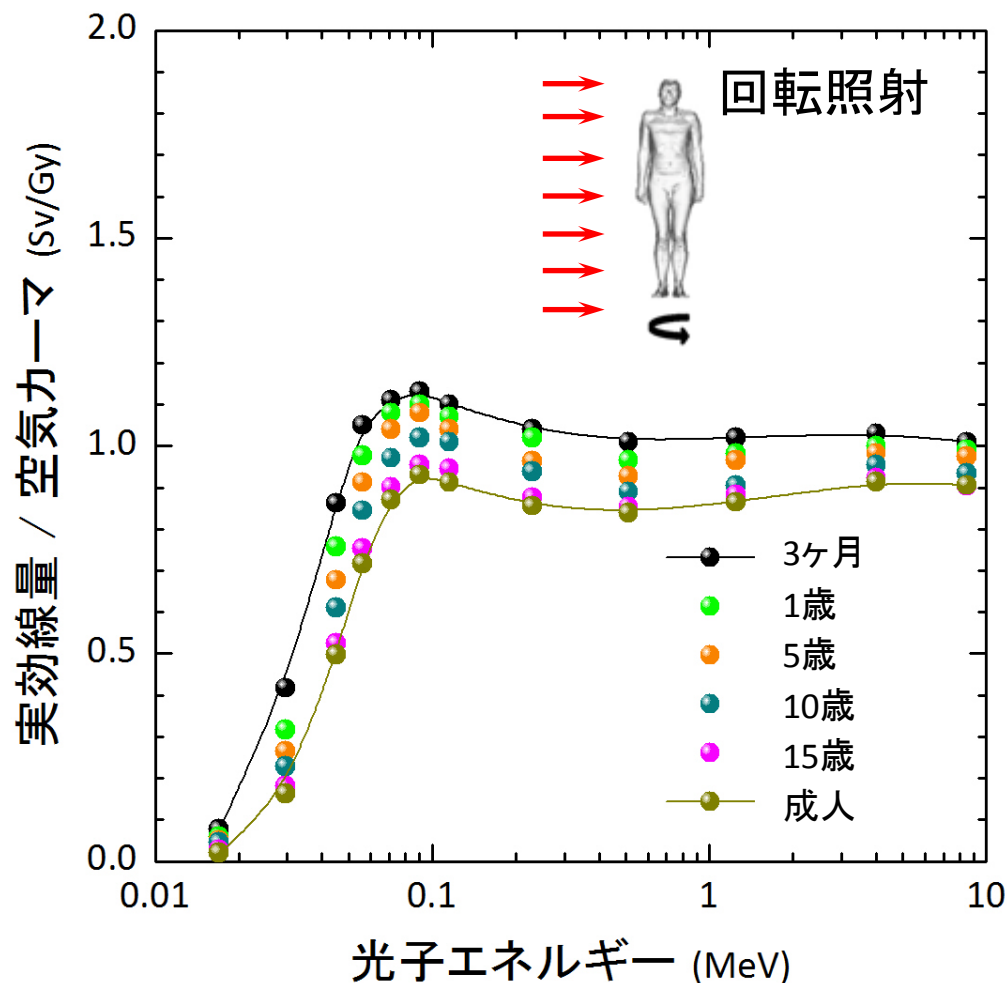
- ❑ フルエンス、空気カーマあたりの実効線量を与える係数: E/Φ (Sv cm²), E/Ka (Sv/Gy)

■ 内部被ばく: 線量係数

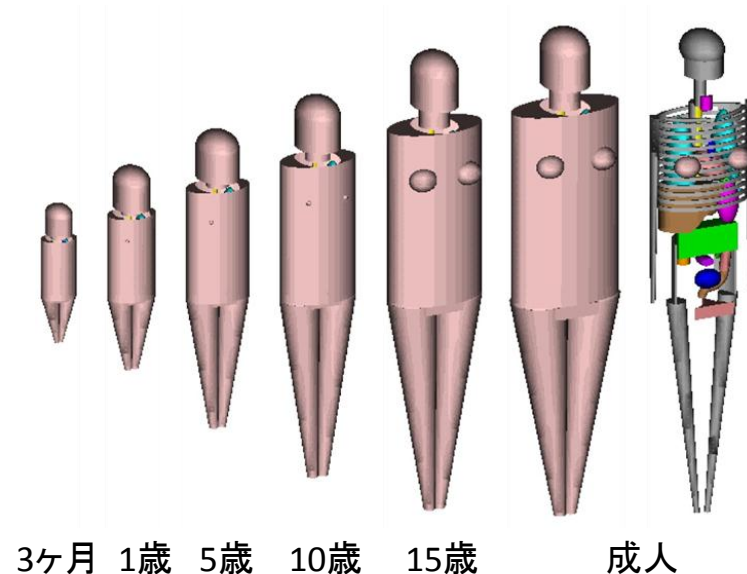
- ❑ 経口、吸入摂取した放射能あたりの預託実効線量を与える係数: $e(\tau_D)$ (Sv/Bq)

外部被ばくに対する線量換算係数：年齢依存

出典：Y. Yamaguchi. Radiat. Prot. Dosim., 55, 123 (1994).



年齢ごとの線量換算係数の
評価に用いられる人体モデル



代表的な年齢における実効線量

⇒ 実効線量は体格に依存する

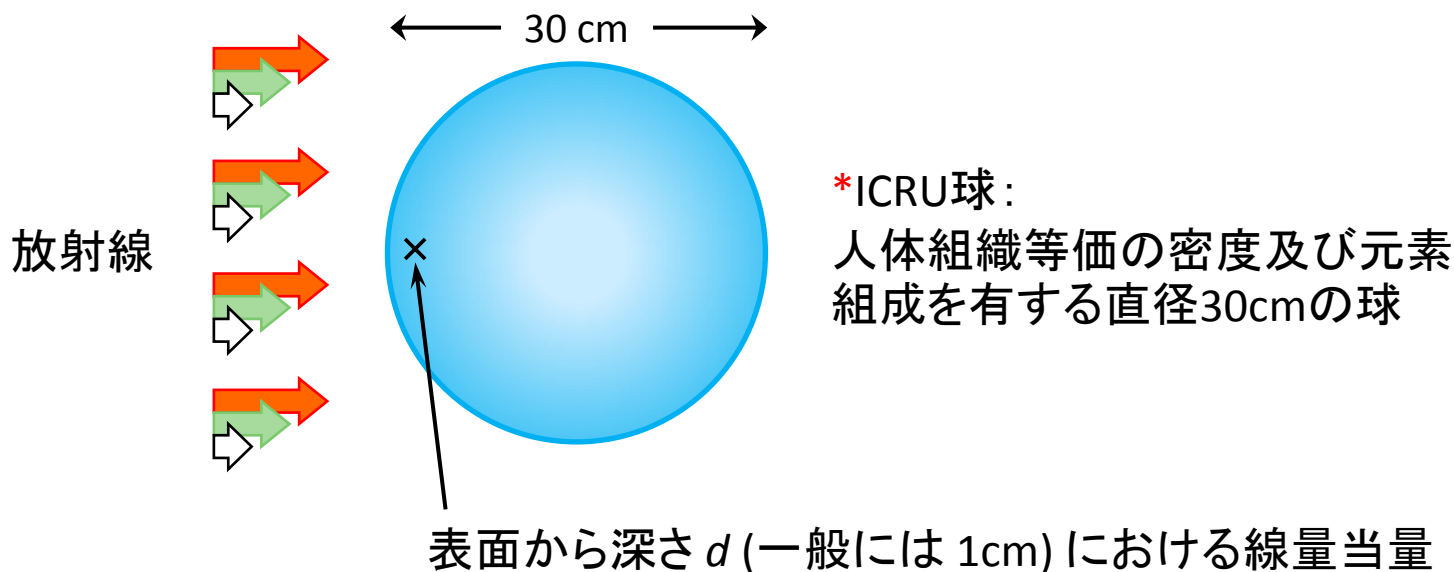
外部被ばくモニタリングに使われる実用量

- 放射線場のモニタリングに用いる量
 - 周辺線量当量 (下図参照)、方向性線量当量
- 個人のモニタリングに用いる量
 - 個人線量当量

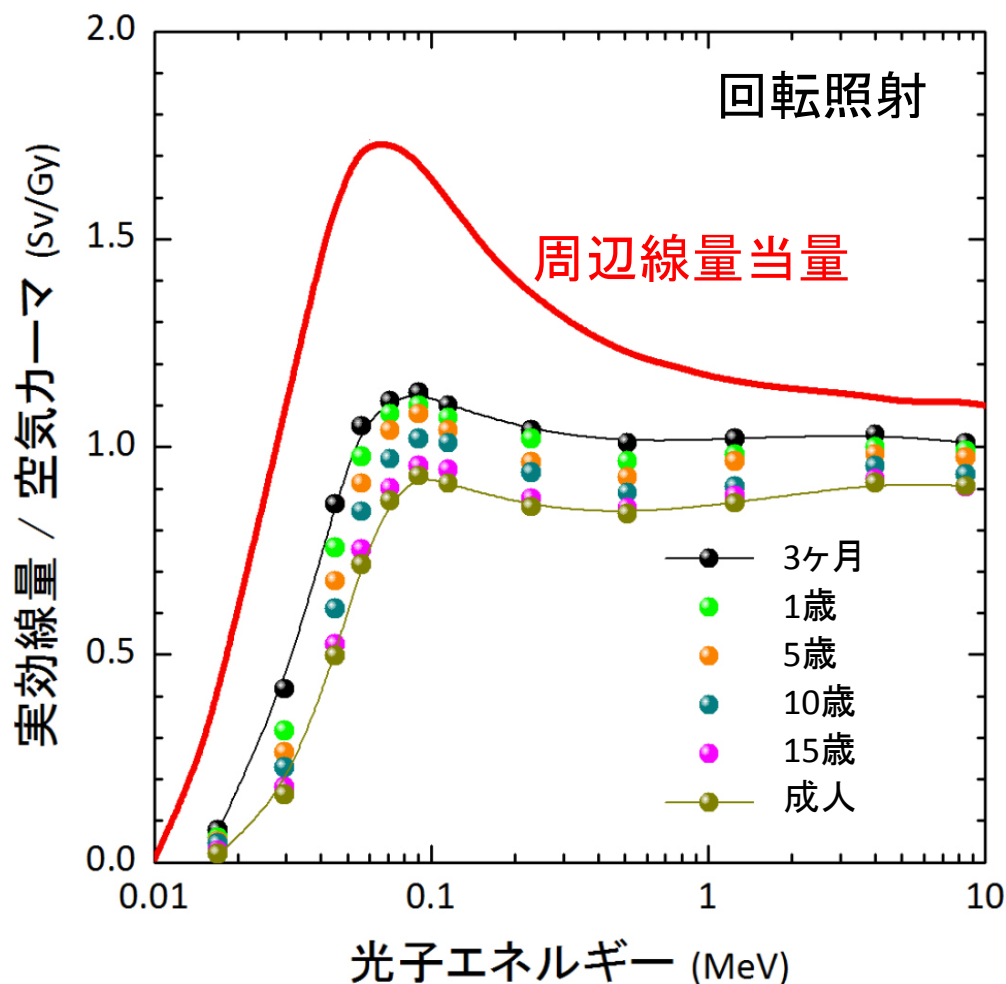
周辺線量当量 $H^*(d)$ (Sv):

対応する整列・拡張場により、ICRU球*内の整列場に対向する半径上の深さ d において生じる線量当量

⇒空間線量を測定するサーベイメータは、周辺線量当量を測定するように設計、校正されている



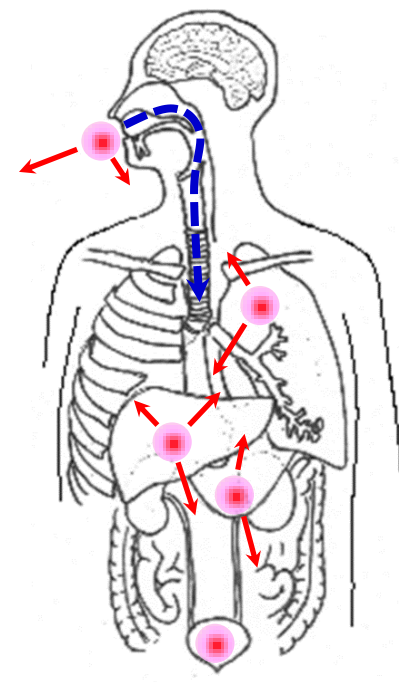
周辺線量当量と実効線量の関係



サーベイメータで測定される周辺線量当量は、様々な体格、あらゆる被ばく状況に対して、実効線量を過小に見積もることなく評価している

内部被ばくに対する線量係数の評価手順

1. 吸入あるいは経口摂取による放射性核種の体内への取り込みを評価
⇒ 呼吸気道モデル、消化管モデル
2. 取り込み後の時間経過に応じた放射性核種の体内での分布、蓄積、体外への排泄を計算
⇒ 組織系動態モデル
3. 体内に分布した放射性核種からの放射線による臓器・組織の吸収線量を計算
⇒ 人体モデル、放射線輸送計算技術、放射性核種データ
4. 放射線加重係数及び組織加重係数を適用し、単位放射能 (1Bq) の摂取に対する預託実効線量を計算



内部被ばく線量係数、摂取量評価に用いるデータ

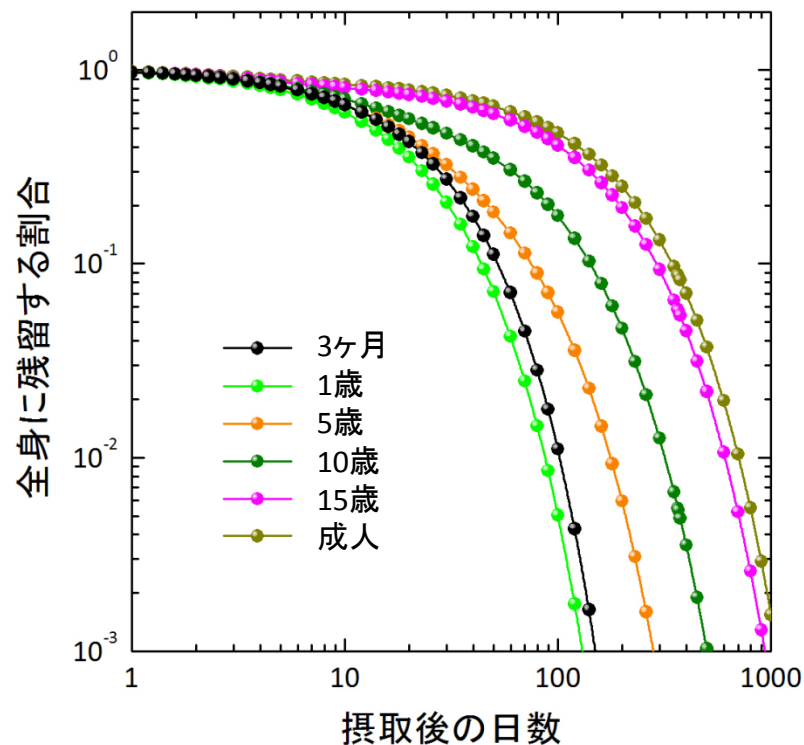
経口摂取に対する70歳までの
預託実効線量係数 (Sv/Bq)
(出典:ICRP72)

年齢	I-131	Cs-137
3ヶ月	1.8×10^{-7}	2.1×10^{-8}
1歳	1.8×10^{-7}	1.2×10^{-8}
5歳	1.0×10^{-7}	9.6×10^{-9}
10歳	5.2×10^{-8}	1.0×10^{-8}
15歳	3.4×10^{-8}	1.3×10^{-8}
成人	2.2×10^{-8}	1.3×10^{-8}



食品、飲料水中の放射能濃度から
摂取量、預託実効線量を評価

経口摂取したCs-137の全身残留割合
(DCALによる計算値)



ホールボディカウンタによる体内放射能の
測定値から、摂取量、預託実効線量を評価

ICRP 1990年勧告から2007年勧告における変更点

出典: ICRP103

- 放射線加重係数 (w_R) の見直し (p.8)
 - 線質係数の計算解析の進展、動物実験との整合
- 組織加重係数 (w_T) の見直し (p.9)
 - 広島・長崎原爆被ばく者疫学研究等の最新成果を反映
- リファレンスファントムの導入 (p.20)
 - 広範な解剖学的データの調査に基づく体格データの評価
 - 新しい画像技術を利用し人体を忠実に再現したモデルの導入
- 放射性核種データの更新、体内動態モデルの改訂
 - 放射性核種に対する最新の半減期、放射線データを採用
 - 放射性核種の体内挙動を、より詳細にモデル化

ICRPの構成: 2009-2013年

上段:委員長

下段:日本の委員

主委員会

C Cousins

丹羽大貫
(京大名誉)

C2の役割: 内部及び外部被ばく評価用換算係数の整備
ICRP 2007年基本勧告導入のための線量評価モデル、
リファレンスデータ、線量換算係数の整備が現在の主な課題

第1専門委員会 (C1) 放射線影響

W F Morgan

中村典
(放影研)

C2 線量

H Menzel

石樽信人(名大)
遠藤章(JAEA)

C3 医療防護

E Vanõ

米倉義晴
(放医研)

C4 勧告の適用

J Lochard

甲斐倫明
(大分看科大)
本間俊充(JAEA)

C5 環境防護

R J Pentreath

酒井一夫
(放医研)

C2 タスクグループ

- **DOCAL** (Dose Calculations)
- **INDOS** (Internal Dosimetry)
- Radiation Protection in Space
- The Use of Effective Dose

ICRPの線量評価法開発の全体像

 DOCAL
 INDOS

外部被ばく評価

成人は完成(ICRP110)。小児は開発中(p.20)

リファレンスファントム
(骨線量評価モデル)



放射線輸送コード(PHITS, MCNPX等)

外部被ばく線量換算係数



ICRP116

放射性核種データ



放射性核種線量換算係数
(福島事故を受けての新規タスク)



内部被ばく評価

ICRP66。一部改良中

呼吸気道モデル

ICRP100

消化管モデル

NCRP156を適用

創傷モデル

組織系動態モデル

開発中

残留率・排泄率



比吸収割合

評価中

ICRP107

放射性核種データ

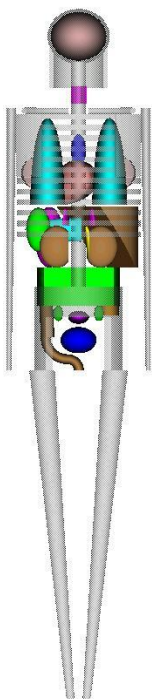


内部被ばく線量係数・
モニタリングデータ

公衆・作業者に対する線量評価用ファントム

1990年勧告

MIRD
ファントム

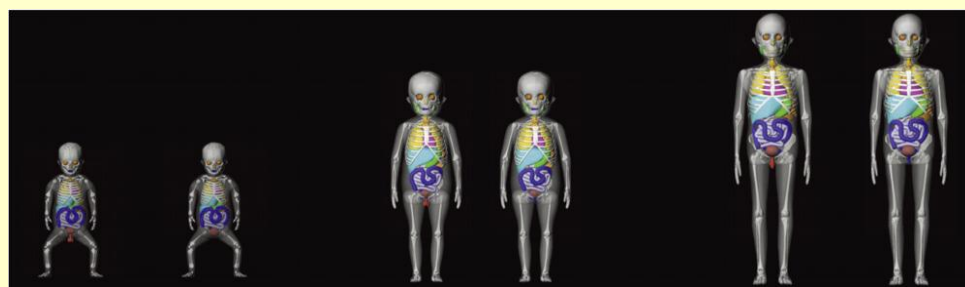


成人男女のボクセル
ファントム (ICRP110)



2007年勧告モデル

公衆に対する年齢別男女ファントム：開発中
(C. Lee, et al. Phys. Med. Biol., 55, 339 (2010))



新生児

1歳

5歳

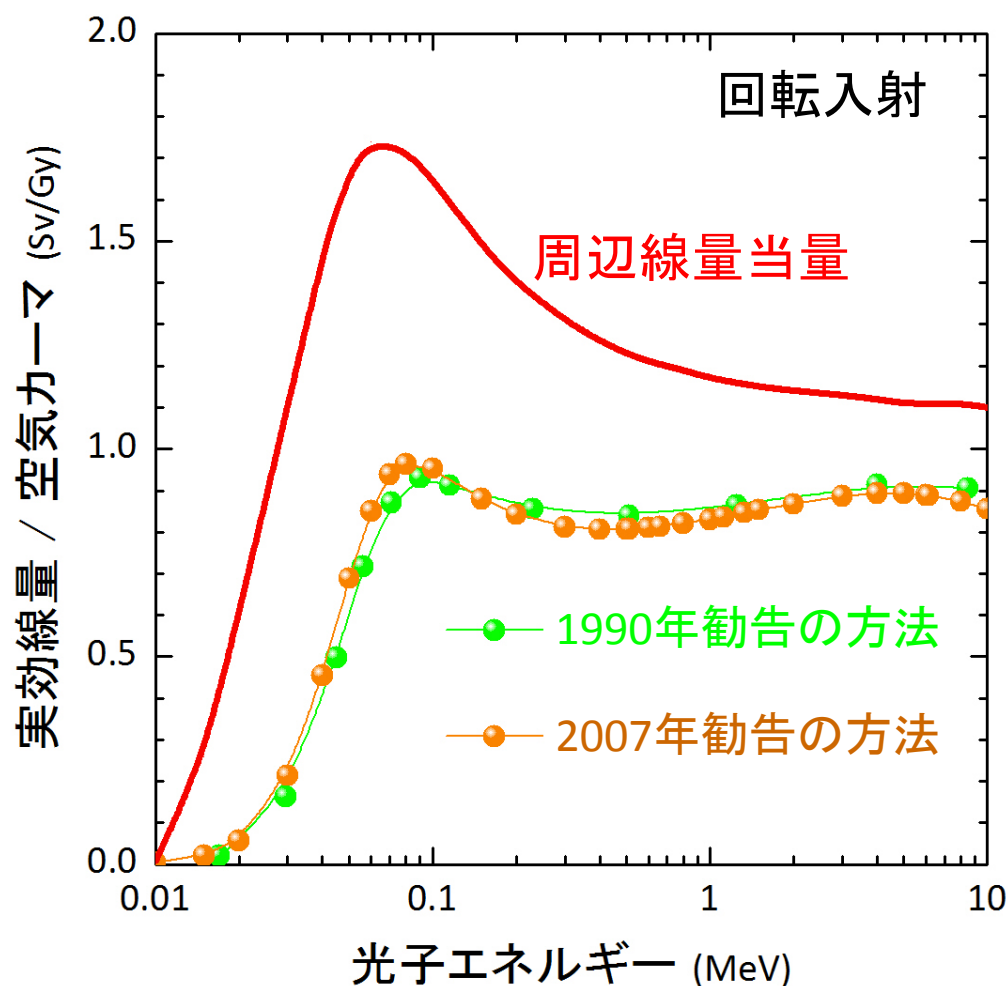


10歳

15歳

ICRP 2007年勧告の影響: 光子の実効線量

出典: ICRP74
& ICRP116



2007年勧告の方法に従い評価された実効線量は、
1990年勧告と大きくは変わらない

原子力機構における線量評価研究

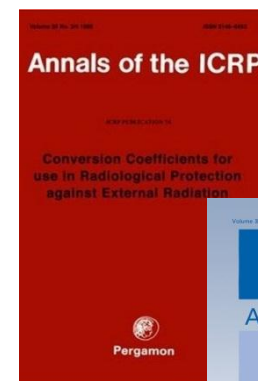
線量評価技術に関する研究、線量評価用データベースの開発

- ❑ 粒子・重イオン輸送計算コード“PHITS”の開発と線量評価への応用
- ❑ 日本人精密ボクセルファントムの開発と利用
- ❑ 放射性核種データベースの開発
- ❑ 外部被ばく・内部被ばく線量換算係数の評価
- ❑ 生物学的線量モデルの研究
- ❑ 除染効果評価システム (CDE) の開発・提供

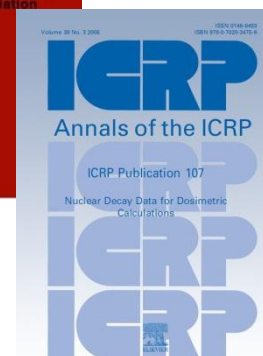


上記の研究成果をICRP、ICRU等の活動に反映 作成に協力した出版物

- ICRP Publication 74: 1990年勧告外部被ばく線量換算係数
- ICRP Publication 107: 線量計算用放射性核種データベース
- ICRP Publication 116: 2007年勧告外部被ばく線量換算係数



ICRP74

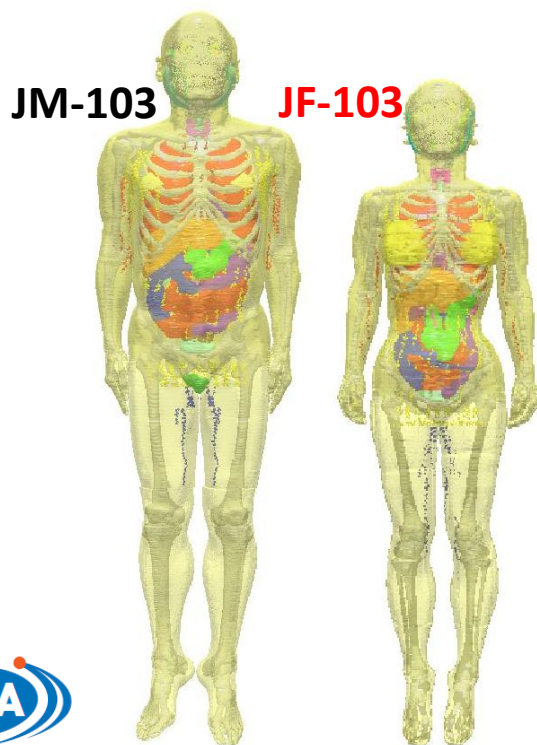


ICRP107

福島原発事故への対応を踏まえた今後の展開

リスク低減のために、長期にわたる被ばく線量の低減、モニタリング及び評価による安全確保が重要

- 線量換算係数は、測定値から防護量を評価する要となるデータ
 - ⇒ 被ばく状況に対応したデータの整備が必要
 - 公衆に対する評価のための年齢に応じた外部及び内部被ばく線量換算係数
 - 生活状況を反映した、きめ細かい評価に適用できる線量換算係数



日本人成人の精密ボクセルファントム

- 身長、体重、臓器質量を日本人平均値に調整
- ICRP 2007年勧告に対応したモデル



- 年齢に応じた体格のファントム、様々な被ばく状況を再現できる姿勢可変ファントムの作成
- PHITSコードと組み合わせた線量計算
- 環境中での被ばくを模擬した線量換算係数の評価、等

まとめ・今後の展望

放射線防護で用いられている線量体系

- 低線量被ばくによる人の健康リスクを、測定を通して評価するために、新たな科学的知見を取り入れながら、長年にわたり検討され構築されてきたものである
- 種々の放射線、放射性核種による外部被ばく、内部被ばく双方のリスク評価に適用できる

福島原発事故に対する今後の対応

- 外部被ばく、内部被ばくの両面から、公衆、とりわけ子供を的確に防護するためのモニタリング、線量評価の遂行する
- ICRP 2007年勧告の線量評価体系の取り入れに対する準備を着実に進展させる