

# 福島第一原子力発電所の事故に関連した線量評価へのegs5の応用

高エネルギー加速器研究機構

平山 英夫

第21回 egs研究会

# はじめに

- 東京電力福島第1原子力発電所の事故に関連した様々な計算を行う場合に必要な事
  - － 「線量」計算の場合
    - 評価対象となる「線量」について
    - 「線量計」により得られた測定値と比較する場合、計算で求めた「線量」と測定値が対応しているか
    - egs5による種々の計算方法
  - － 検出器の応答の比較の場合
    - 検出器の特性
    - egs5による検出器応答の計算
- egs5を有効に活用するために上記の課題について簡単に紹介する

# シーベルトが使われている「線量」

- 「防護量」と「実用量」のシーベルト
  - どのように定義されているか
  - どちらも物理量でないこと
    - 原理的な測定はできない
- 線量概念については、原子力学会誌の解説記事を参照
  - 「放射線防護に用いられる線量概念」2013年2月号
  - プレプリント( KEK Preprint 2012-44)をKEKの図書室・研究報告(<http://www-lib.kek.jp/top.html>)からダウンロードできる
- 以下では、上記の基になった日本原子力学会2012年春の年会での放射線工学部会企画セッション「福島第一原発事故対応に係る環境放射線測定」における、岩井・佐藤のスライドを活用して各種線量について簡単に紹介する

# 防護量と実用量の関係

## 測定対象

### 防護量

### 実用量

### 放射線測定器

場所の線量測定  
(エリアモニタリング)

実効線量

周辺線量当量

$H^*(10)$

サーベイメータ

(1cm線量当量)\*

等価線量  
(ex 皮膚)

方向性線量当量

$H'(0.07, 0^\circ)$

(70 $\mu$ m線量当量)\*

必要に応じて測定

個人の外部被ばく測定  
(個人モニタリング)

実効線量

個人線量当量

$H_p(10)$

個人線量計

(1cm線量当量)\*

等価線量  
(ex 皮膚)

個人線量当量

$H_p(0.07)$

(70 $\mu$ m線量当量)\*

(\* 障害防止法)

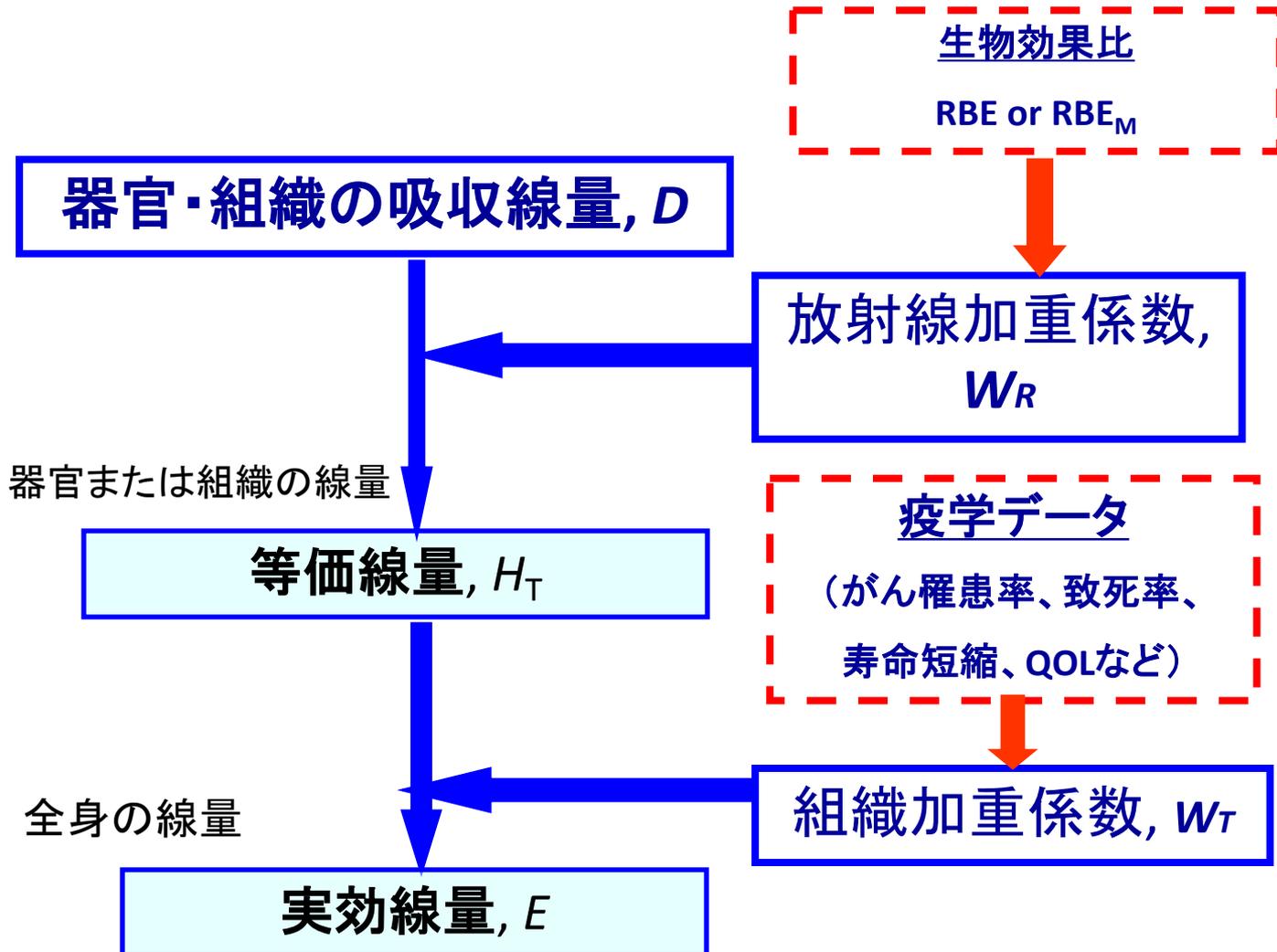
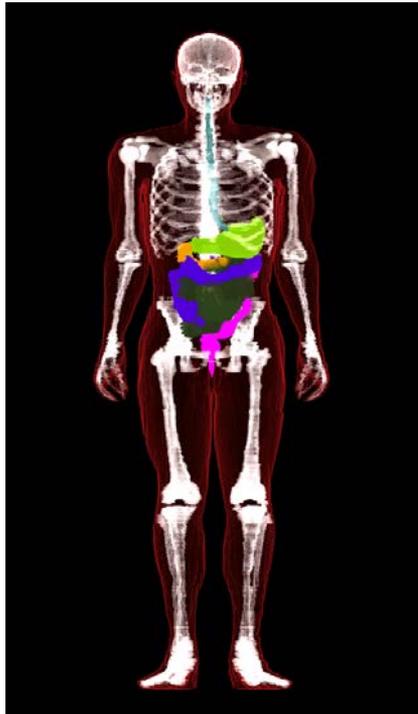
法令上規制  
される値

放射線測定器  
の校正量

実測値が規制  
値以内であれば問題ない

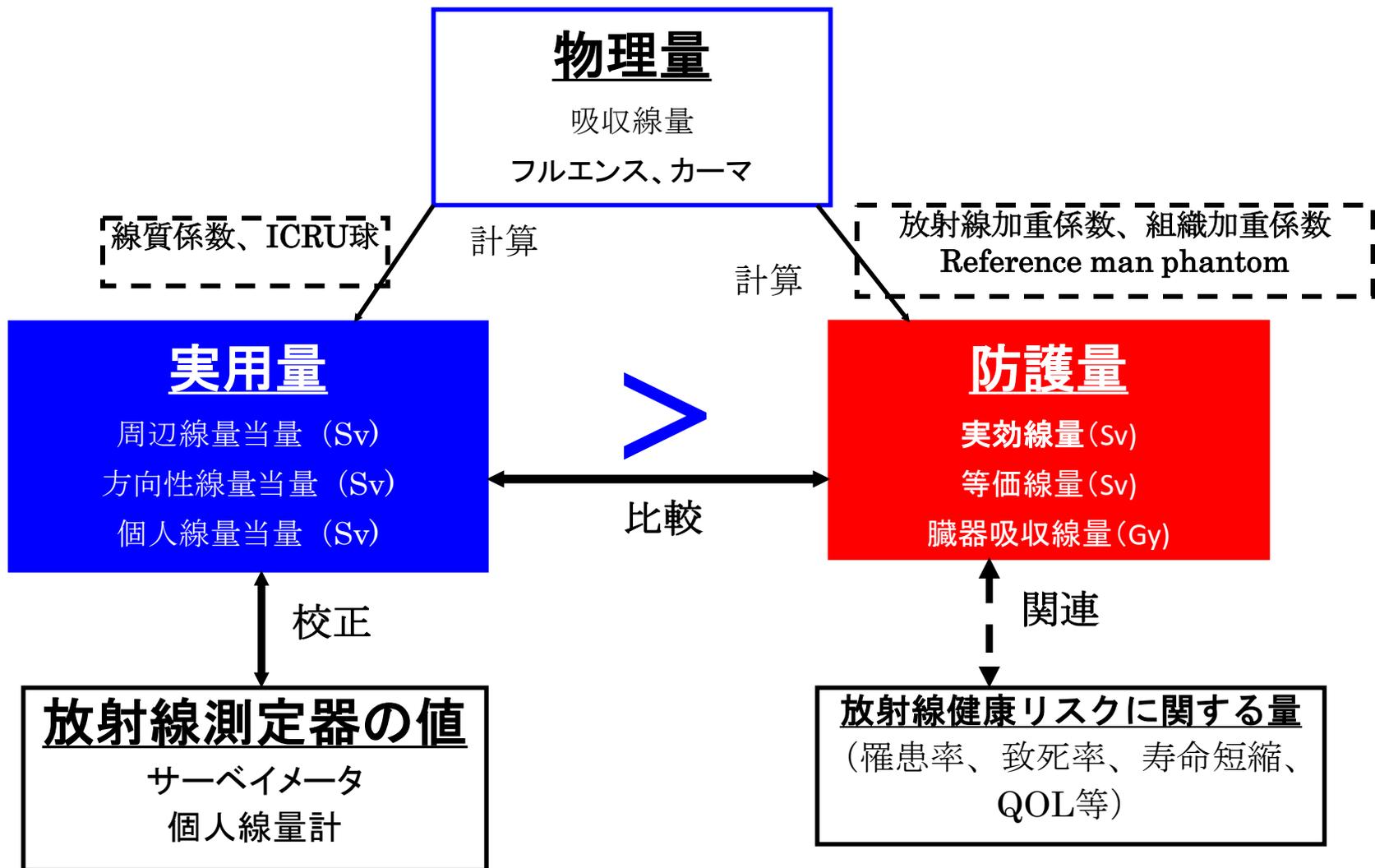
(岩井・佐藤のスライドより)

# 防護量の体系

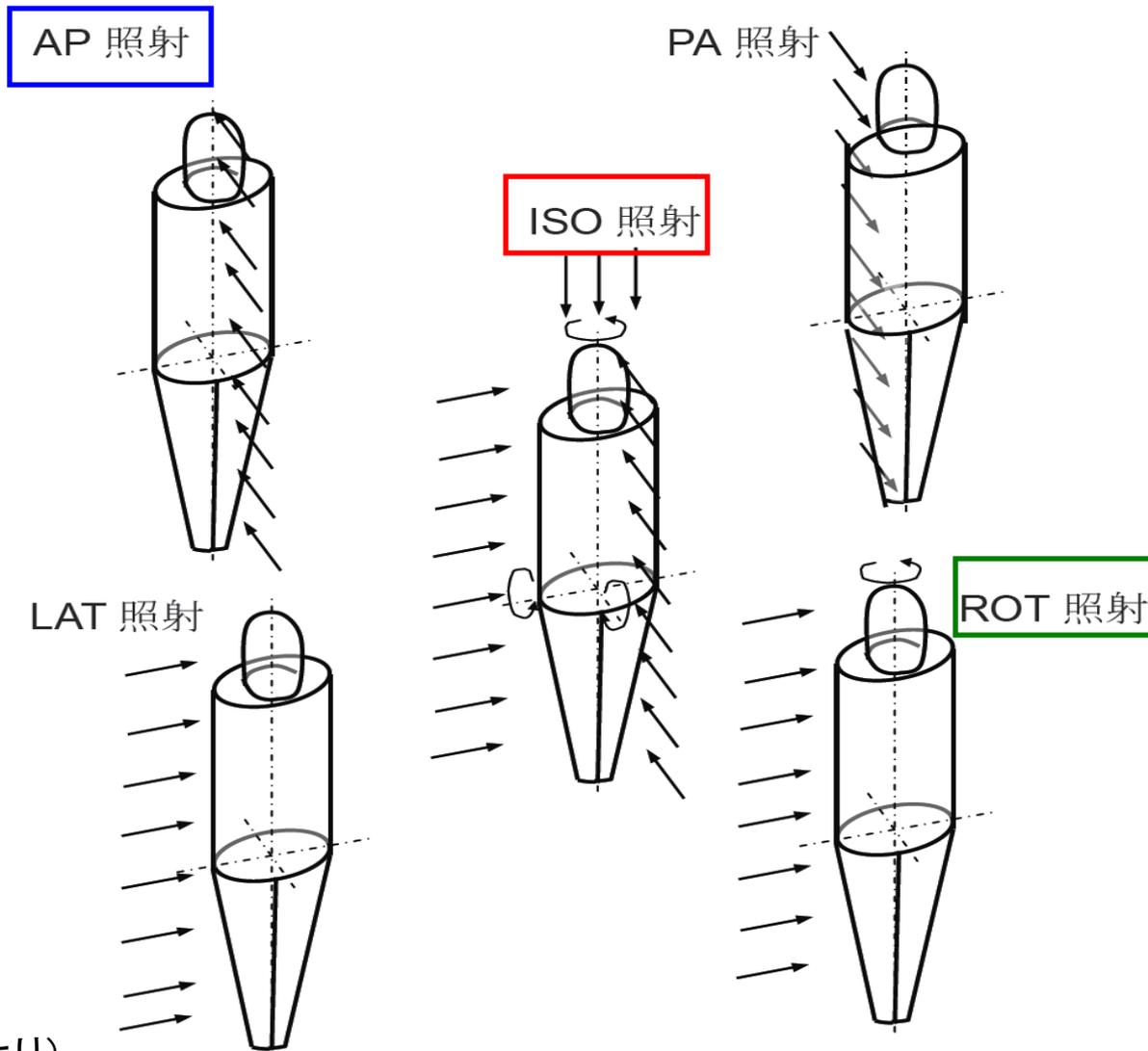


(岩井・佐藤のスライドより)

# 放射線防護に用いる線量概念



# 防護量の方向依存性の問題



(岩井・佐藤のスライドより)

# 実効線量

- 外部被ばくによる実効線量は、照射形状に依存する
  - 同じスペクトルの放射線場でも、線源の状況により、値が異なる
  - 「実効線量」を議論する場合には、線源の状況を認識して対応する必要がある
- 放射線障害防止法
  - 施設の遮蔽設計の「実効線量」は、「AP照射形状の実効線量」
  - 福島第1原子力発電所の事故に伴い、広く分布した線源による被ばくの場合は、「ROT照射形状」に近い被ばく

# 実用量

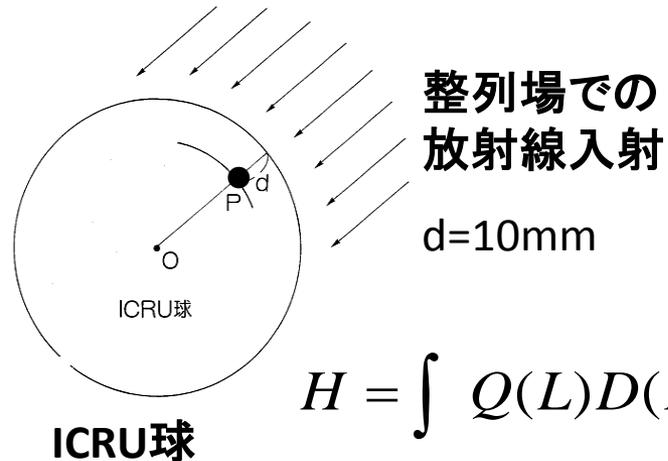
## 周辺線量当量 $H^*(10)$

- 1つの点で1つの値(入射方向に依存しない)
- $H^*(10) >$  実効線量 (AP, PA, ROT, ISO, LAT条件)

⇒ モニタリングに使用するサイベイメータの校正量

### ICRU球

直径30cmの球ファントム  
ICRUが定めた人体組織等価物質  
(O:76.2%, C11.1%, H1.01%, N2.6%)



$$H = \int Q(L)D(L)dL$$

$Q(L)$  : 線質係数

(岩井・佐藤のスライドより)

# 実用量

## 個人線量当量 $H_p(10)$

- 組織等価平板ファントム(30cm x 30cm x 15cm)に平行ビームの放射線が垂直に入射した時の深さ $d=10\text{mm}$ での線量当量

角度 $\alpha$ の放射線に対する個人線量当量は、 $H_p(10,\alpha)$  で表す。

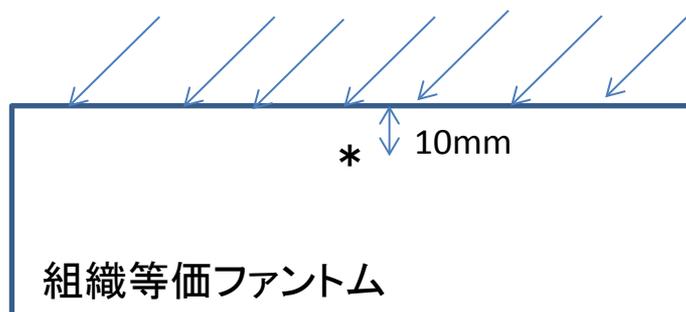
$$H_p(10)=H_p(10,0)$$

- $H_p(10) >$  実効線量 (AP,PA,ROT,ISO,LAT条件)

⇒ モニタリングに使用する個人線量計の校正量

校正は、平板ファントムに線量計を着用して行う

- 透過力の弱い放射線 ( $\beta$ 線や $\alpha$ 線)については、 $d$ として、 $70\mu\text{m}$ (皮膚)及び $3\text{mm}$ (目の水晶体)を使用する



# egs5による「線量」評価 (1)

- 「実効線量」の計算

- 定義どおりの計算は、評価すべき放射線場に、「人体形状ファントム」を置き、各臓器の吸収線量を計算
  - 等価線量を求め、それを使って「実効線量」を求める
  - 計算が複雑になり、計算時間がかかる
- 照射形状毎の「線束から実効線量への換算係数」を用いる
  - 換算係数があれば、各照射形状の実効線量を一つの計算で求めることができる
  - 光子スペクトルがあれば、計算時間は短い
- 実効線量は、実測との比較できる線量ではない
  - どの様に使うかを考える必要がある

# egs5による「線量」評価 (2)

- 「周辺線量当量」の計算

- 場の測定に用いられる「線量計」との比較

- 「線束一周辺線量当量」換算係数を用いることにより、理想的な「エネルギー・角度特性」を持つ「線量計」に対応した「周辺線量当量」を計算することができる

- 実際の「線量計」の精度確認に使用

- 「線量計」の応答を計算する場合

- 検出器の構造
- 検出器の応答から「線量」への換算方法が必要
- 線量計を制作するメーカー以外が行うことは難しい

- 線量計の制作を行う場合には、計算で評価することが重要

# 放射線測定器のエネルギー特性

エネルギー範囲	感 度	評価	適用する検出器の種類
60keV～1.5MeV	0.85～1.15	A	シンチレーション式(エネルギー補償あり)
60keV～1.5MeV	0.7～1.3	B	Si半導体検出器
60keV～1.5MeV	0.20～5.0	C	シンチレーション式(エネルギー補償なし)
60keV～1.5MeV	0.50～2.0	C	GM式
I-131,Cs-134, Cs-137が測定可能 200keV～1.25MeV	0.5～3.0	C	無補償型で、エネルギー範囲が狭いが、 福島第一原発事故で出た核種は測定で きる

最下段の適用検出器はJIS Z 4333:2006 には規定されていませんが、東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故で環境中に主に放出されたI-131,Cs-134,Cs-137 を選択的に測定する検出器として市販されているものを掲載

平成24年度我が国情報経済社会における基盤整備事業  
放射線測定機器の性能チェックシート  
一般社団法人 日本電気計測器工業会  
放射線測定機器の性能チェックシート作成委員会 より

# egs5による「線量」評価 (3)

- 「空気吸収線量」の計算
  - 空気吸収線量は、本来は物理量
  - あるボリューム内での電子による付与エネルギーで計算するのが、本来の計算
  - 空気の密度を考えると、極低エネルギーを除き、非常に効率の悪い計算
  - 荷電粒子平衡を前提にすれば、光子のエネルギー束 ( $E\phi, \text{MeV}/\text{cm}^2$ ) と質量エネルギー係数 ( $\mu(E)/\text{g}, \text{cm}^2/\text{g}$ ) の積から「近似的」に計算することができる
- 「空気吸収線量」の測定
  - 自由電子電離箱であれば定義どおりの、空気等価な壁を持つ電離箱であれば、ほぼ定義に近い空気吸収線量を測定できる
  - NaI等、電離箱以外の方法による空気吸収線量の測定は、「周辺線量当量」の場合のように「空気吸収線量」のエネルギー特性に近くなるように工夫した線量計
- 計算と測定を比較する場合には、どの様な手法による測定かということを知って行う必要がある

# egs5による「線量」評価 (4)

- 「個人線量計」の計算
  - ファントム前にある状態で計算することが必要
  - ユーザーが、検出器の特性を知ることは難しい
  - 検出器の構造が判っている場合には、実際の校正と同じように、ファントム前においた線量計に対するCs-137の0.662keV光子で、換算係数を決め、他のエネルギーでの「周辺線量当量」を計算する方法が考えられる
  - 線量計の評価方法が判っている場合には、計算結果(検出器の吸収線量等)に使用されている手法を適用して、実測値と比較することのできる

# 吸収線量の計算(1)

- 原理的な計算方法

- 吸収線量を求めたい領域(体積  $V\text{cm}^3$ , 密度  $\rho\text{g/cm}^3$ )において、付与エネルギー  $e_{\text{dep}}$  (MeV)をスコアする
- 平均の吸収エネルギー  $E_{\text{dep}}$  (MeV)を、吸収線量 (Gy)に変換する
  - $1\text{MeV}=1.602\text{E}-13\text{J}$ ,  $1\text{kg}=1000\text{g}$
  - $1\text{MeV/g}=1.602\text{E}-13(\text{J/MeV}) * 1000(\text{g/kg})=1.602\text{E}-10\text{ Gy}$
  - $D(\text{Gy})=E_{\text{dep}}(\text{MeV}) / (V(\text{cm}^3) * \rho(\text{g/cm}^3)) * 1.602\text{E}-10$

# 吸収線量の計算(2)

- 近似的な計算方法

- 質量エネルギー吸収係数  $\mu_{en}(E)/\rho(\text{cm}^2/\text{g})$  に光子エネルギー束 ( $E \cdot \phi(\text{MeV}/\text{cm}^2)$ ) を掛けて、g当たりの吸収エネルギー(MeV)を求める
- 光子のエネルギー束を求める方法
  - 領域中のエネルギー依存の光子飛程長( $tvstep(\text{cm})$ )を領域の体積で割る
  - 評価したい面を横切った時の光子数を、評価したい面積で割る
  - 体積又は面積で割る計算は、全てのヒストリー終了後、メインプログラムで行う
- (1)と同じ様にg当たりの吸収エネルギー  $E_{dep}(\text{MeV})/\text{g}$  を、吸収線量(Gy)に変換する

# 周辺線量当量及び実効線量

- 周辺線量当量及び実効線量は、物理量ではないので、換算係数を使って計算することになる
  - － 本来は、光子束からの換算係数が望ましいが、ICRPが空気カーマ当たりの換算係数の形でデータを提示している。
    - 空気カーマ当たりの換算係数を使用する場合には、空気カーマの計算が必要となる
    - 周辺線量当量と実効線量で違った光子束－空気カーマ換算係数を用いているのも問題
    - 計算に使用する場合は、ICRPのテーブルを使って、光子束から周辺線量又は実効線量への換算係数を求めて、それを基にする方が良い
    - 日本原子力学会の標準として、光子束からの換算係数が出されている

# エネルギー依存の換算係数

- 質量エネルギー吸収計数や周辺線量・実効線量への換算係数は、離散的なエネルギーに対して与えられている
- 計算に使用する場合には、任意のエネルギーに対する係数を求めるためには、エネルギー内挿が必要
  - ucphantomcgv.fにlog-log内挿で任意のエネルギーに対する係数を求めるfunctionがある

# 場のスペクトルの比較

- 物理量である光子スペクトルで、計算と実測値を比較することは、有用な事である
  - － 散乱線が多い広く分布した線源からの光子スペクトル測定は簡単ではない
  - － 波高分布の測定値からスペクトルを求めるには
    - 検出器への入射状況を固定した「レスポンス」
    - アンフォールディング
  - － 場のスペクトルを精度良く求めることができれば、計算で場のスペクトルを求めれば、直接比較することができる
    - 計算としては、検出器を考慮する必要がないので簡単
    - レスポンス、アンフォールディングの誤差の評価

# 波高分布の比較

- 検出器の波高分布での比較
  - 測定値をそのまま使用できるので測定に伴う誤差が小さい
  - アンフォールディングで用いる「レスポンス」を使って波高分布を出す「フォールディング」での比較は、アンフォールディングに伴う誤差を避けることができる
  - 線源の状況、検出器の情報を考慮して、波高分布を計算できれば、測定現場に対応した比較をすることが可能となる
    - 検出器の詳細な情報(構造、エネルギー分解能等)が必要になる
- 参考になる情報
  - <http://rcwww.kek.jp/research/shield/2004-44.html>
    - 計算と測定の間にあるもの — X線・ガンマ線検出器について

# まとめ

- 福島第1原子力発電所の事故に伴う放射線は、 $\beta$ 線及び $\gamma$ 線が中心であるので、egs5を活用することができる
- 測定値との比較における留意点
  - 空気吸収線量以外は、物理量でない
  - 「線量」について理解した上で、どの様な「量」を比較するのか、実測と対応した「線量」を計算しているかに気をつける必要がある
  - 「線量」の測定値は、手法により程度は異なるがかなりの誤差がある

# Egs5を用いた福島事故関連論文

- EGS5による地表に広く分布した $^{134}\text{Cs}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ の環境における個人線量の評価
  - RADIOISOTOPES, Vol.62, No.6, 335-345(2013)
  - KEK Preprint 2012-43
- モンテカルロコードegs5を用いた地表に広く分布した放射性物質による地表1mでのガンマ線スペクトルの評価
  - 日本原子力学会誌和文論文誌、Vol. 12. No.3, 223-230(2013)
  - KEK Preprint 2013-5
- LaBr<sub>3</sub> 検出器の波高分布測定値とegs5によるプルーム中放射性核種の検出器応答を用いたプルーム中放射性核種濃度の推定
  - 日本原子力学会誌和文論文誌、Vol. 12. No.4, 306-310(2013)
  - KEK Preprint 2013-39
- モニタリングポストでの波高分布の時系列変化とプルーム中放射性核種に対する検出器応答を用いたI-131濃度の推定
  - 日本原子力学会誌和文論文誌、Vol.13, No.3, p.119-126(2014)
  - KEK Preprint 2014-5
- 原子力学会和文論文誌は、J-stage で公開  
(<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/taesj/-char/ja>)
- KEK preprintは、KEK図書室・研究情報から公開 (<http://www-lib.kek.jp/lists/publistall.html>)