

佐藤達彦, 松谷 悠佑, 真辺 健太郎 (原子力機構)

NHKクローズアップ現代+ 2017年6月6日



2018/11/16 保物セミナー2018@大阪科学技術センター

## 不溶性セシウム粒子(Csボール)とは?

✓ 福島原発事故後に各地で発見された不溶性か つ高いセシウム比放射能を持つ微粒子



#### Csボールの特徴

- ✓ 化学的特性:水や硝酸に対して不溶
- ✓ 物理的特性:主成分はガラス, 粒径は大きいものだと数µm程度
- ✓ 放射能:高い比放射能(通常は数Bq/個, 大きいものだと数100Bq/個)
- ✓ 体内動態:血液や組織液に溶解することなく,確率的に粒子状のまま 移行する。場合によっては、同じ場所に長期滞留する可能性もある
- ✓ 従来の可溶性セシウム被ばくに対する線量評価手法が適用できない✓ 同じ被ばく線量でも放射線影響が異なる可能性がある

- 1. 線量評価の話
  - ✓ 現行法の問題点とSB法の開発
  - ✓ SB法を用いたCsボール被ばくの線量評価
  - ✓ まとめ
- 2. マイクロドジメトリの話
  - ✓ 吸収線量の定義の再確認
  - ✓ 様々なスケールに対する吸収線量の不均一性
  - ✓ 不均一性がCsボール被ばくに与える影響の検討
  - ✓ まとめ

# 内部被ばく線量評価法

## 臓器吸収線量, D<sub>T</sub>

体内動態モデルに基づく評価値

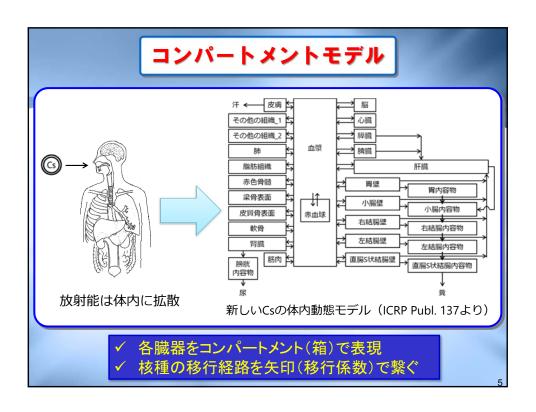
$$D_{\mathsf{T}} = \sum_{\mathsf{S}} N_{\mathsf{S}} \sum_{i} E_{\mathsf{R},i} Y_{\mathsf{R},i} \Phi \big( \mathsf{T} \leftarrow \mathsf{S}, E_{\mathsf{R},i} \big)$$

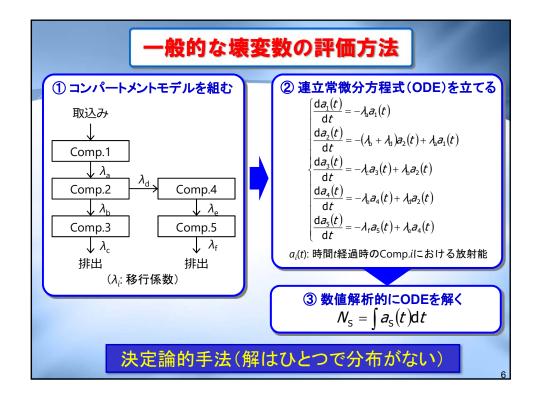
核種固有のデータ

人体モデルに固有のデータ

- ✓ N<sub>s</sub>: 線源領域 S における核種の総壊変数
- ✓ E<sub>R.i</sub>: 放射線の種類Rのi番目の放射線のエネルギー
- ✓ Y<sub>Ri</sub>: 放射線の種類Rのi番目の放射線の放出率
- ✓  $\phi$ (T←S,  $E_{R,i}$ ): Sから標的臓器Tへの比吸収割合(SAF)

線源領域(臓器)毎の総壊変数の評価が必要

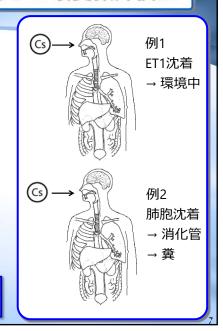




# Csボールの特徴を考慮した壊変数評価法

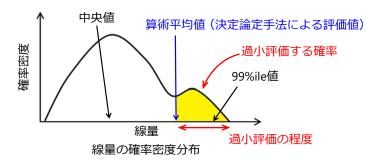
## Csボール被ばくの特徴

- ✓ 不溶性かつ取り込み数が少ない
- ✓ 移行経路が一つ一つ異なる
- ✓ 粒子間でのばらつきが大きく なる
- ✓ ODEを決定論的に解いただけ では大幅な過小評価 or 過大 評価となる可能性がある
- ✓ モンテカルロ法を用いて確率 論的に解いて各臓器線量の分 散を導出
- ✓ 確率論的体内動態法を開発
- ✓ SB(Stochastic Biokinetic)法と命名



# SB法で得られる結果

- ✓ 1回のSB法で得られる線量:1個の確率変数
- ✓ SB法を繰り返し実行:線量の確率密度分布、統計値



一般的な線量評価法を適用したときに過小評価となる確率・程度を定量化

- 1. 線量評価の話
  - ✓ 現行法の問題点とSB法の開発
  - ✓ SB法を用いたCsボール被ばくの線量評価
  - ✓ まとめ
- 2. マイクロドジメトリの話
  - ✓ 吸収線量の定義の再確認
  - ✓ 様々なスケールに対する吸収線量の不均一性
  - ✓ 不均一性がCsボール被ばくに与える影響の検討
  - ✓ まとめ

計算条件

## 評価対象&線量

• 評価対象: 成人男性に対する<mark>肺預託吸収線量</mark>

活動レベル:軽作業呼吸習慣: 鼻呼吸

### Csボールの特性

粒径: 2.0 μm
 密度: 2.0 g/cm<sup>-3</sup>
 形状係数: 1.0 (球状)

• 放射能: <sup>134</sup>Cs 0.5 Bq + <sup>137</sup>Cs 0.5 Bq (放射平衡の<sup>137m</sup>Baも含む)

#### Csボールの体内動態

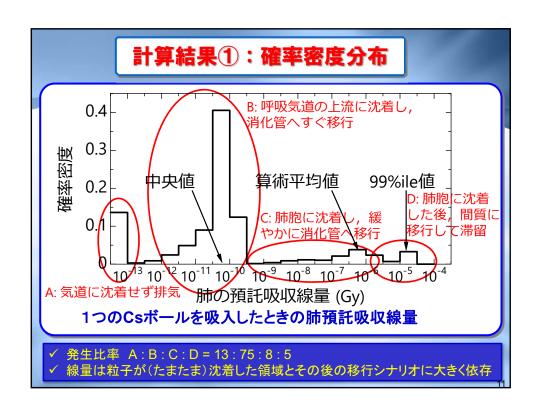
• 不溶性を考慮した保守的な動態モデル

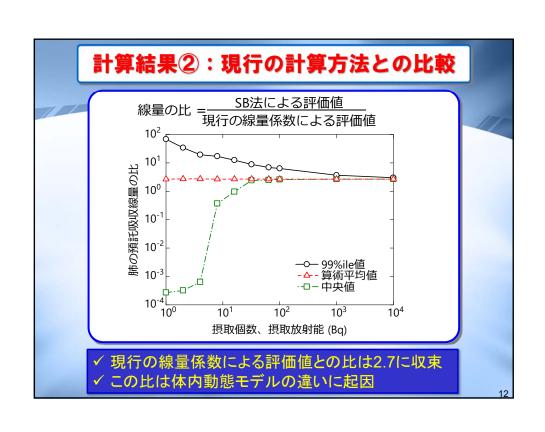
⇒ 呼吸気道・消化管から血液への移行なし、肺・肝臓等での滞留考慮 (ICRP66) (Geraets et al. 2012)

#### 線量評価データ

核崩壊データ:ICRP Pub. 107

• 比吸収割合データ: ICRP Pub. 133 (標準成人男性用データ)





- 1. 線量評価の話
  - ✓ 現行法の問題点とSB法の開発
  - ✓ SB法を用いたCsボール被ばくの線量評価
  - ✓ まとめ
- 2. マイクロドジメトリの話
  - ✓ 吸収線量の定義の再確認
  - ✓ 様々なスケールに対する吸収線量の不均一性
  - ✓ 不均一性がCsボール被ばくに与える影響の検討
  - ✓ まとめ

13

# まとめ

- 1. Csボールのような不溶性微粒子内部被ばくでは、平均値の みならずその分散も評価することが望ましい
- 2. 上記目的のため、確率論的体内動態法(SB法)を開発した
- 3. 摂取個数が少ない場合, 現行の計算手法では線量を大幅に 過小評価してしまう可能性がある
- 4. 摂取個数が増えれば、肺預託吸収線量のSB法/現行法の比 は2.7倍に収束する

#### 詳細は下記文献を参照

K. Manabe & M. Matsumoto, J. Nucl. Sci. Technol. (2018) DOI: 10.1080/00223131.2018.1523756

- 1. 線量評価の話
  - ✓ 現行法の問題点とSB法の開発
  - ✓ SB法を用いたCsボール被ばくの線量評価
  - ✓ まとめ
- 2. マイクロドジメトリの話
  - ✓ 吸収線量の定義の再確認
  - ✓ 様々なスケールに対する吸収線量の不均一性
  - ✓ 不均一性がCsボール被ばくに与える影響の検討
  - ✓ まとめ

# 吸収線量とは?

#### 定義

吸収線量(Gy) = ある領域における付与エネルギー(J) その領域の重さ(kg)

#### 質問

ある臓器(重さ1kg)で電離が1回(付与エネルギー13eV)起きたとき, その臓器の吸収線量のオーダーは?

- 1. aGy(1E-18) 2. pGy(1E-12)
- 3.  $\mu$ Gy(1E-6)

同じ電離があるDNA断片上(直径2nm, 長さ30nm)で起きたとき、 そのDNA断片の吸収線量のオーダーは?

- 1. mGy(1E-3) 2. Gy(1E0) 3. kGy(1E3)

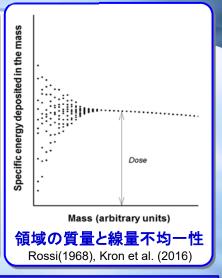


吸収線量は、対象とする領域の重さに極めて大きく依存する

# 吸収線量の不均一性

#### 質問

対象領域が小さくなると線量は? 小さくなる 変わらない 高くなる



様々なスケールの線量不均一性が被ばくリスクに与える影響を検討

# 発表内容

- 1. 線量評価の話
  - ✓ 現行法の問題点とSB法の開発
  - ✓ SB法を用いたCsボール被ばくの線量評価
  - ✓ まとめ
- 2. マイクロドジメトリの話
  - ✓ 吸収線量の定義の再確認
  - ✓ 様々なスケールに対する吸収線量の不均一性
  - ✓ 不均一性がCsボール被ばくに与える影響の検討
  - ✓ まとめ

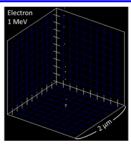
# DNAスケールでの線量不均一性

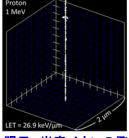
#### 不均一性が生じる要因

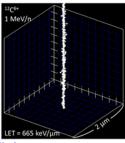
放射線の飛跡周辺の電離密度の違い(~LET)

#### 不均一性が与える影響

DNA損傷パターンが変化する(電離密度が高いほど複雑な損傷が発生)







電子,陽子,炭素イオンの飛跡構造\*

- ✓ 放射線加重係数(w<sub>R</sub>)や線質係数Q(L)として現在の放射線防護体系で考慮✓ 放射線の物理的特性のみで決まり、被ばく形態(内部or外部被ばく)には依存しない
  - \*RITRACKS (Plante et al. 2011)で計算&描画

10

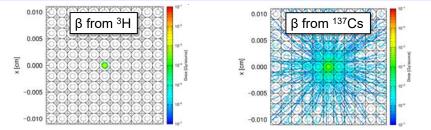
# 細胞内での線量不均一性

#### 不均一性が生じる要因

RIが細胞の特定部位に集積することにより, 放射線感受性の高い細胞部位(細胞核) の線量が全体の平均値と比べて変化する(内部被ばくのみで問題)

#### 不均一性が与える影響

- ✓ 細胞核に集積するRI(有機結合型トリチウムやDNAに結合しやすいAuger電子 放出核種)は,放射線影響が大きくなる(CERRIE 2004)
- ✓ <sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs, <sup>131</sup>Iは、放出するβ線のエネルギーが高いので、細胞核に集中して エネルギー付与することはない(<mark>最大でも1.04倍</mark>, Sato et al. 2013)



PHITSで計算した3Hと137Csから放出されたβ線による細胞レベルでの付与エネルギー空間分布

Csボールは細胞内に取り込まれないので、線量の細胞内不均一性はほとんどない

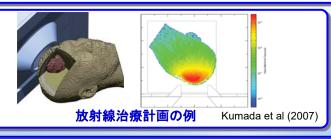
# 臓器内(細胞間)での線量不均一性

#### 不均一性が生じる要因

- ✓ 放射線治療でがん細胞に線量を集中させた場合(外部照射・RI内用療法)
- ✓ 表面汚染などで局所的に被ばくした場合

#### 不均一性が与える影響

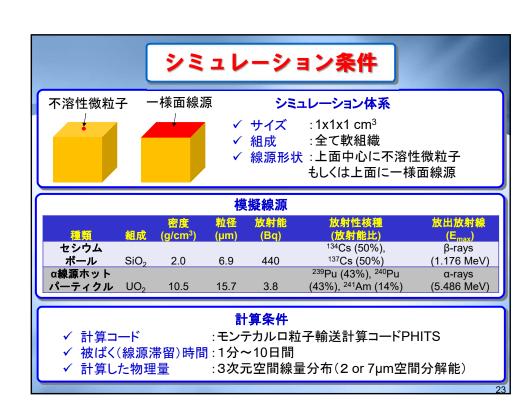
- ✓ 確定的影響は、個々の細胞応答の合計で表現できるため、均一被ばくと比べて影響の大きさは異なる(放射線治療)
- ✓ 確率的影響は、発生メカニズムは未解明だが、極めて少数の細胞の変異に起 因していると仮定すると、均一被ばくと比べてあまり変化はないと予想される
- ✓ ただし、バイスタンダー効果が変異の主因となる場合は、影響は異なる

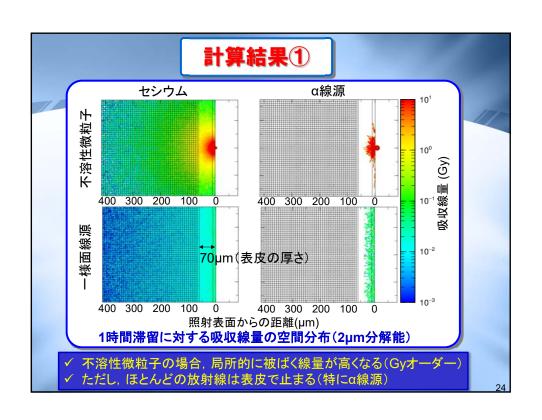


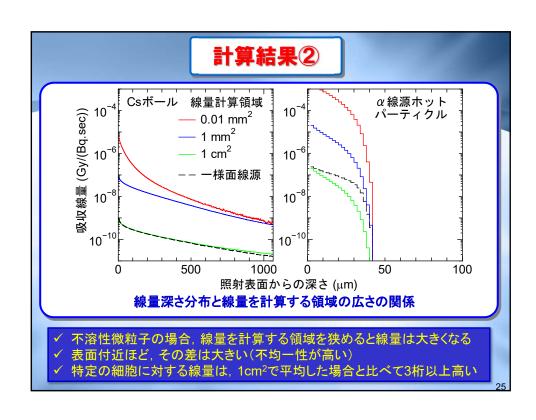
Csボールが特定の場所に長期滞在した場合、通常の内部被ばくよりも局所性が高くなる

## 発表内容

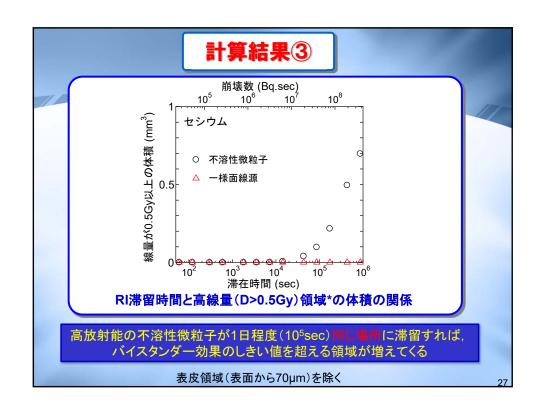
- 1. 線量評価の話
  - ✓ 現行法の問題点とSB法の開発
  - ✓ SB法を用いたCsボール被ばくの線量評価
  - ✓ まとめ
- 2. マイクロドジメトリの話
  - ✓ 吸収線量の定義の再確認
  - ✓ 様々なスケールに対する吸収線量の不均一性
  - ✓ 不均一性がCsボール被ばくに与える影響の検討
  - ✓ まとめ

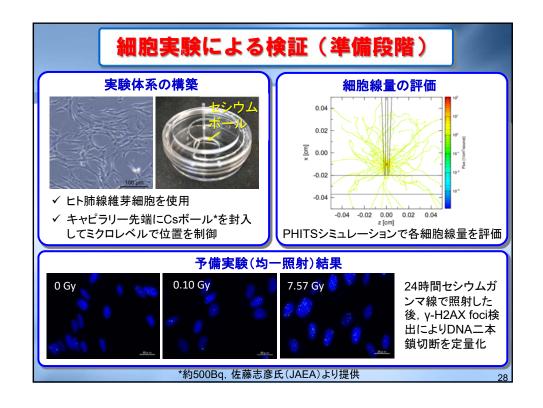






# 不均一線量による生物学的な効果 バイスタンダー効果 ✓ 照射細胞から非照射細胞にシグナルが伝達され放射線影響が現れる効果 ✓ DNA損傷、染色体異常、細胞致死などあらゆるエンドポイントで観察される ✓ シグナル発信細胞となるしきい値線量は数100mGy程度との報告が多い ★ 放射線 照射 正常細胞 ● シグナル発信細胞 ● シグナル受信細胞 ● 影響発現細胞 不均一照射の場合にバイスタンダー効果がより重要となる





- 1. 線量評価の話
  - ✓ 現行法の問題点とSB法の開発
  - ✓ SB法を用いたCsボール被ばくの線量評価
  - ✓ まとめ
- 2. マイクロドジメトリの話
  - ✓ 吸収線量の定義の再確認
  - ✓ 様々なスケールに対する吸収線量の不均一性
  - ✓ 不均一性がCsボール被ばくに与える影響の検討
  - ✓ まとめ

29

# まとめ

- 1. 不溶性微粒子による被ばくは,臓器内(細胞間)での線量 不均一性が他の被ばく形態と異なる(局所被ばくの可能性)
- 2. 線量不均一性の違いによる確率的影響リスクの違いは限定的と思われる
- 3. 確定的影響やバイスタンダー効果に対しては、従来の被ばくとは応答が異なる可能性がある
- 4. 今後, 細胞や動物実験を通して不溶性微粒子被ばくの放射線影響を解明していく必要がある