

放射線量を読み解き

人体への健康影響を理解する

長崎大学原爆後障害医療研究所 放射線生物・防護学分野

松田 尚樹

放射線被ばくのカテゴリー

計画被ばく

- 線源を意図的に導入し運用する状況
 - 職業被ばく
 - 医療被ばく

緊急被ばく

- 事故等により緊急の対策を必要とする状況
 - 原子力・放射線災害
 - 医療事故

現存被ばく

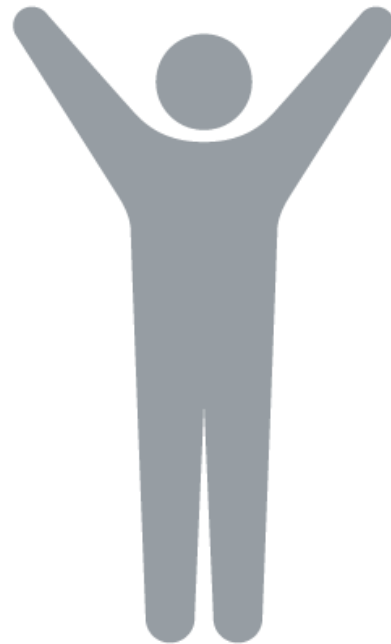
- 管理について決定をする時点で既に被ばくが存在している状況
 - 高自然放射線地域（人為的に高められた場所を含む）
 - 事故による放射能汚染地域

被ばくの経路

外部被ばく
(External exposure)

放射性物質からの被ばく
(radioactive materials)
(radioisotopes)

放射線発生装置からの被ばく
(radiation generators)



内部被ばく
(Internal exposure)

放射性物質の吸入
(inhalation)

放射性物質の経口摂取
(ingestion)

放射性物質の皮膚吸収
(percutaneous absorption)

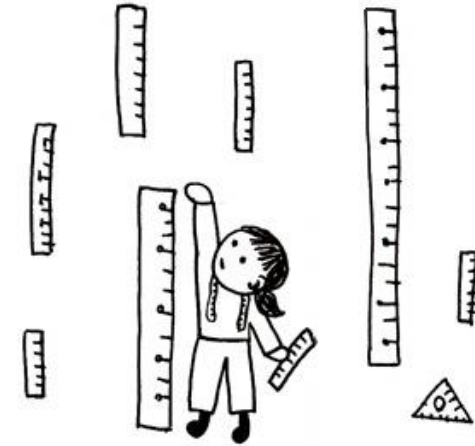
放射線被ばくによる健康リスクアセスメント



放射線の測定



被ばく線量評価



健康リスク推定

放射線の測定

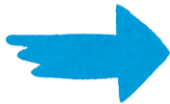
にも、いろいろあります

外部
被ばく

空間線量率



表面汚染



被ばく線量

外部
被ばく

空間線量率

ガンマ線

エックス線

中性子線

アルファ線

ベータ線

表面汚染

被ばく線量

ベータ線

ガンマ線

エックス線

外部
被ばく

空気吸収線量率

空間線量率

Sv/h

Gy/h

周辺線量当量率
1cm線量当量率

確定的影響

計数率

cpm

Bq
/cm²

表面汚染

吸収線量

被ばく線量

Sv

Gy

表面放射能密度

個人線量当量

実効線量

確率的影響

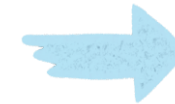
内部
被ばく

空气中放射能濃度

飲食物中放射能濃度



体内汚染



被ばく線量

内部
被ばく

空气中放射能濃度

Bq
/cm³

飲食物中放射能濃度

Bq
/kg

Bq
/L

Bq
/body

体内汚染

被ばく線量

Sv

預託実効線量

被ばく線量評価

を、やってみましょう

本日の例題

- ① 体外汚染患者のケアに伴う外部被ばくによる健康リスク
- ② 頭皮の汚染による将来の脱毛のリスクと洗髪を行なわなければならない時間リミット
- ③ ホールボディカウンタで体内放射能が検出された場合の健康リスク
- ④ 尿から放射能が検出された場合の健康リスク

体外汚染患者のケアに伴う外部被ばくによる健康リスク

- 搬送された患者の体表面からGMサーベイで100,000cpmの放射線が検出された。
- 汚染部位は10cm x 10cm程度であった。
- 汚染核種は ^{137}Cs であった。
- GMサーベイによる1,000cpm = 4Bq/cm²とする。
- **この患者から25cmの距離で3時間連続して処置を行った場合の外部被ばくによる健康リスクは？**

考え方

- 汚染部位の放射能 (Bq) を算出する
- 汚染部位の放射能[MBq]から1mの位置における実効線量率[$\mu\text{Sv/h}$]を算出する

実効線量率定数 (Cs-137) $0.0779 [(\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{MBq} \cdot \text{h})]$

- 汚染部位から25cmの距離の実効線量率に換算する
- 3時間の積算実効線量を求める

計算結果

- 汚染部位の放射能

$$100,000\text{cpm} = 400\text{Bq}/\text{cm}^2$$

$$400[\text{Bq}/\text{cm}^2] \times 10[\text{cm}] \times 10[\text{cm}] = 400,000[\text{Bq}] = 0.4[\text{MBq}]$$

- 1mの位置における実効線量率

$$0.0779[(\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{MBq} \cdot \text{h})] \times 0.4[\text{MBq}] = 0.0316[\mu\text{Sv}/\text{h}]$$

計算結果

- 25cmの位置における実効線量率

$$0.0316[\mu\text{Sv/h}] \times 4 = 0.126[\mu\text{Sv/h}]$$

- 3時間の積算実効線量

$$0.126[\mu\text{Sv/h}] \times 3 = \mathbf{0.378[\mu\text{Sv}]}$$

リスクアセスメント

- 3時間処置を行って実効線量が約0.4 μ Sv
 - いかなる確定的影響のしきい線量も超えない。
 - 年間の自然放射線による被ばく線量を大きく下回り、確率的影響を考えるレベルではない。
 - 一般公衆の年間実効線量限度（1mSv）を超えない。
- 健康リスクは考えなくて良い。

解説

- 100,000cpmはGMサーベイが測定できる上限値。
- 福島原発事故後は住民の緊急被ばくスクリーニングの基準として一時的に用いられた。
- IAEAの「放射線緊急事態の初期対応者へのマニュアル」によれば、10cm離れた場合は $1\mu\text{Sv/h}$ 。
- 産業技術総合研究所の「表面汚染の検査に多く用いられる大面積端窓型GM計数管の表示値と表面汚染密度の関係」によれば、5cm離れた場合は $3.3\mu\text{Sv/h}$ 。

解説

- 住民の除染の基準である13,000cpm (OIL-4) は、I-131による小児の甲状腺線量が100mSvに達する場合の空气中放射能濃度から推定された体表汚染量で、術者の外部被ばくの基準ではない。
- 以下の被ばく線量も同様の考え方で評価できる。
 - ホットスポットなど線源が限局している場所での外部被ばく
 - I-131を服用した直後の患者から受ける外部被ばく

頭皮の汚染による脱毛のリスクと除染のタイムリミット

- 原子力発電所事故後の放射性物質のフォールアウトを含む雨で頭髪が濡れてしまった。
- GMサーベイメータでは頭部に10,000cpmの汚染が検出された。
- 原子炉から放出された放射性核種の割合は次のように推定されている。

I-131	80%
Cs-134	10%
Cs-137	10%

- **脱毛のリスクはどの程度か？ 　いつまでに洗髪をしなければならないか？**

考え方

- GMサーベイによる計測値[cpm]から頭表面の放射能濃度[Bq/cm²]を算出する。

$$1,000\text{cpm} = 4\text{Bq/cm}^2$$

- 頭表面の放射能濃度から頭皮の吸収線量率[nGy/h]を推定する。

I-131	1.319 [(nGy/h)/(Bq/cm ²)]
-------	---------------------------------------

Cs-134	1.000
--------	-------

Cs-137	1.432
--------	-------

- 何日後に頭皮の吸収線量が脱毛のしきい線量を超えるか判断する。

しきい線量	4Gy
-------	-----

計算結果 (1)

- 頭表面の放射能濃度[Bq/cm²]

$$10,000\text{cpm} = 40\text{Bq/cm}^2$$

$$\text{I-131} \quad 40 \times 0.8 = 32$$

$$\text{Cs-134} \quad 40 \times 0.1 = 4$$

$$\text{Cs-137} \quad 40 \times 0.1 = 4$$

- 頭皮の吸収線量率[nGy/h]

$$\text{I-131} \quad 32 \times 1.319 = 42.2$$

$$\text{Cs-134} \quad 4 \times 1.000 = 4.0$$

$$\text{Cs-137} \quad 4 \times 1.432 = 5.7$$

計算結果（2）

- 頭皮の吸収線量率[nGy/h]

合算 51.9 nGy/h

1.3 μ Gy/日

0.45mGy/年

リスクアセスメント

- 1日で頭皮の吸収線量が $1.3\mu\text{Gy}$
 - 脱毛のしきい線量をはるかに超えない。
 - 1週間放置してもしきい線量は超えない。
 - 直ちに洗髪をする必要はない。日常生活通りで差し支えない。

解説

- 汚染による体表面の被ばく線量は、皮膚吸収線量を用いる。
- 体表汚染による被ばくは、特にSr-90用の高エネルギーのベータ線を放出する核種の場合、重要となる。I-131、Cs-134、Cs-137ともにベータ線とガンマ線を放出するが、ベータ線エネルギーは高くないため、本演習では低い値となった。
- GMサーベーターの最大読み値となる100,000cpmであっても、今回の3核種では皮膚吸収線量を懸念する必要はない。
- しかし汚染の拡大を防止すること、内部被ばくを防止すること、不要な被ばくを避けることのため、除染を行うべきである。

ホールボディカウンタによる健康リスク評価

- ホールボディカウンタ検査で体内放射能が検出された。

Cs-134 200,000Bq/body

Cs-137 200,000Bq/body

- 汚染した野菜を1週間前に食べたようだ。

- **内部被ばく線量は？**

考え方（1）

- 摂取1週間後の体内残留率を用いて、摂取時の放射能を逆算する。

Cs-134	3ヶ月	1歳	5歳	10歳	15歳	成人
1日後	0.977	0.972	0.975	0.976	0.976	0.979
1週間後	0.752	0.707	0.745	0.773	0.836	0.863
1ヵ月後	0.272	0.203	0.317	0.459	0.674	0.721
1年後	<0.001	<0.001	<0.001	0.003	0.041	0.064

Cs-137	3ヶ月	1歳	5歳	10歳	15歳	成人
1日後	0.977	0.973	0.976	0.977	0.977	0.980
1週間後	0.756	0.711	0.749	0.778	0.841	0.869
1ヵ月後	0.279	0.208	0.325	0.470	0.692	0.740
1年後	<0.001	<0.001	<0.001	0.004	0.056	0.088

考え方（2）

- 経口摂取の内部被ばく線量換算係数（Sv/Bq）を用いて預託実効線量を計算する。

Cs-134	3ヶ月	1歳	5歳	10歳	15歳	成人
預託実効線量係数	2.6×10^{-8}	1.6×10^{-8}	1.3×10^{-8}	1.4×10^{-8}	1.9×10^{-8}	1.9×10^{-8}

Cs-137	3ヶ月	1歳	5歳	10歳	15歳	成人
預託実効線量係数	2.1×10^{-8}	1.2×10^{-8}	9.7×10^{-9}	1.0×10^{-8}	1.3×10^{-8}	1.3×10^{-8}

計算結果

- 成人の場合

$$\text{摂取した放射能 (Cs-137)} = 200,000[\text{Bq}] / 0.869 = 230,150 \text{ Bq}$$

核種	測定値 (Bq/body)	1週間後の体内残留率	摂取した放射能(Bq)	預託実効線量 係数(Sv/Bq)	預託実効線量 (mSv)
Cs-134	200,000	0.863	231,750	1.9×10^{-8}	4.4
Cs-137	200,000	0.869	230,150	1.3×10^{-8}	3.0

リスクアセスメント

- 預託実効線量がCs-134、Cs-137合算で7.4mSv
 - 一般公衆の実効線量限度（1mSv/年）を超える。
 - いかなる確定的影響のしきい線量も超えない。
 - 発がんリスクの有意な上昇が見られる線量域ではない。
- 不要な被ばくを避ける観点から、残った野菜の摂取は避けるべき。
- 体外に排泄されていることを確認する意味で、一定期間後に再検査をしても良い。
- 乳幼児の場合も大きくは変わらない。

解説

- ホールボディカウンタで検出された体内放射能は、検査日における値であり、放射性核種の半減期と体外への排泄によって、摂取時よりも減少している。
- そのため、年齢別、各種別に示されている日本人の体内残留率により摂取量を逆算する必要がある。摂取日と検査日の間隔が短い方がより正確な値が得られる。
- 体内残留率は放射線医学総合研究所から「内部被ばく線量算定支援グラフデータベース」として公開されている。
<http://www.nirs.qst.go.jp/rd/db/index.html>
- 継続摂取していた場合には、継続開始日に総量を摂取したと仮定すれば保守的な値が得られる。

尿のバイオアッセイによる健康リスク評価

- 尿から放射能が検出された。

Cs-134	100Bq/L
Cs-137	100Bq/L
- 汚染した野菜を1週間前に食べたようだ。
- 1日当たりの尿量は1.5Lとする。
- **内部被ばく線量は？**

考え方（1）

- 摂取1週間後の尿への排泄率を用いて、摂取時の体内の放射能を推定する。

Cs-134	3ヶ月	1歳	5歳	10歳	15歳	成人
1日後	1.84×10^{-2}	2.26×10^{-2}	1.99×10^{-2}	1.90×10^{-2}	1.87×10^{-2}	1.58×10^{-2}
1週間後	2.62×10^{-2}	3.04×10^{-2}	2.57×10^{-2}	2.08×10^{-2}	9.77×10^{-3}	7.73×10^{-3}
1ヵ月後	9.49×10^{-3}	8.74×10^{-3}	7.90×10^{-3}	5.86×10^{-3}	4.02×10^{-3}	3.64×10^{-3}
1年後	4.76×10^{-9}	1.54×10^{-10}	2.19×10^{-6}	4.83×10^{-5}	3.33×10^{-4}	4.42×10^{-4}

Cs-137	3ヶ月	1歳	5歳	10歳	15歳	成人
1日後	1.84×10^{-2}	2.26×10^{-2}	1.99×10^{-2}	1.90×10^{-2}	1.87×10^{-2}	1.58×10^{-2}
1週間後	2.64×10^{-2}	3.06×10^{-2}	2.59×10^{-2}	2.09×10^{-2}	9.83×10^{-3}	7.78×10^{-3}
1ヵ月後	9.74×10^{-3}	8.97×10^{-3}	8.11×10^{-3}	6.01×10^{-3}	4.13×10^{-3}	3.73×10^{-3}
1年後	4.76×10^{-9}	1.54×10^{-10}	2.19×10^{-6}	4.83×10^{-5}	3.33×10^{-4}	4.42×10^{-4}

考え方（2）

- 経口摂取の内部被ばく線量換算係数（Sv/Bq）を用いて預託実効線量を計算する。

Cs-134	3ヶ月	1歳	5歳	10歳	15歳	成人
預託実効線量係数	2.6×10^{-8}	1.6×10^{-8}	1.3×10^{-8}	1.4×10^{-8}	1.9×10^{-8}	1.9×10^{-8}

Cs-137	3ヶ月	1歳	5歳	10歳	15歳	成人
預託実効線量係数	2.1×10^{-8}	1.2×10^{-8}	9.7×10^{-9}	1.0×10^{-8}	1.3×10^{-8}	1.4×10^{-8}

計算結果

- 成人の場合

$$\text{摂取時の体内放射能 (Cs-137)} = 100[\text{Bq}] \times 1.5 / (7.78 \times 10^{-3}) = 19,280\text{Bq}$$

核種	測定値 (Bq/L)	1日の尿に含まれる放射能(Bq)	摂取1週間後の尿への排泄率	摂取時の体内放射能 (Bq/body)	預託実効線量係数 (Sv/Bq)	預託実効線量(mSv)
Cs-134	100	150	7.73×10^{-3}	19,400	1.9×10^{-8}	0.37
Cs-137	100	150	7.78×10^{-3}	19,280	1.4×10^{-8}	0.27

リスクアセスメント

- 預託実効線量がCs-134、Cs-137合算で0.64mSv
 - 一般公衆の実効線量限度（1mSv/年）を超えない。
 - 特に生活様式を変える必要はないが、不要な被ばくを避ける観点から、流通している飲食物を摂るようにする。
 - 一定期間経過後にも同程度が検出される場合には、汚染飲食物の継続摂取を疑う。
 - 乳幼児の場合にも大きくは変わらない。

解説

- 尿のバイオアッセイは、ホールボディカウンタによる測定よりも比較的簡便かつ多検体に対応できることから、初期のスクリーニングには有効な手段である。
- 汚染飲食物の摂取日と、尿サンプル採取日の間隔が短い方が、より正確な値が得られる。
- 尿への排泄率は、放射線医学総合研究所から「内部被ばく線量算定支援グラフデータベース」として公開されている。
<http://www.nirs.qst.go.jp/rd/db/index.html>
- 継続摂取していた場合には、継続開始日に総量を摂取したと仮定すれば保守的な値が得られる。

健康リスク推定

にも、いろいろあります

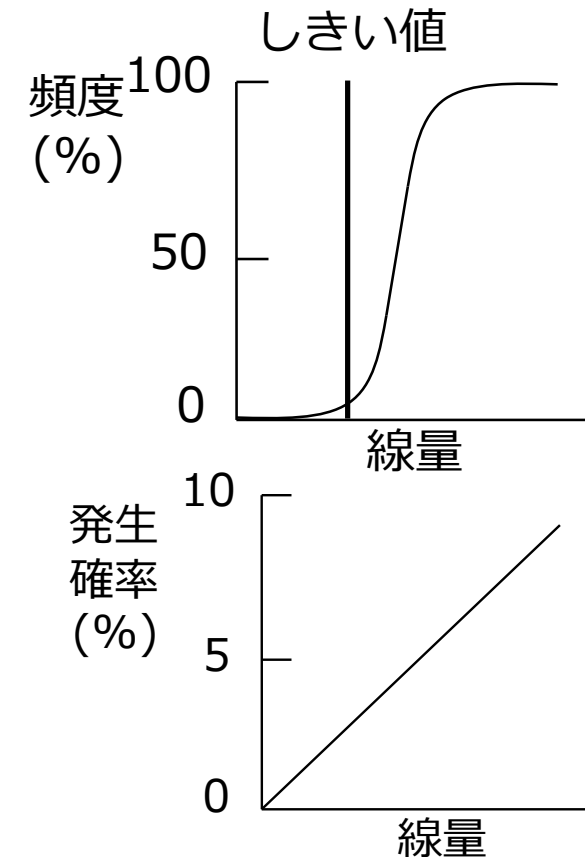
確定的影響と確率的影響

□ 確定的影響

- しきい値を越えて被ばくした場合に現れる

□ 確率的影響

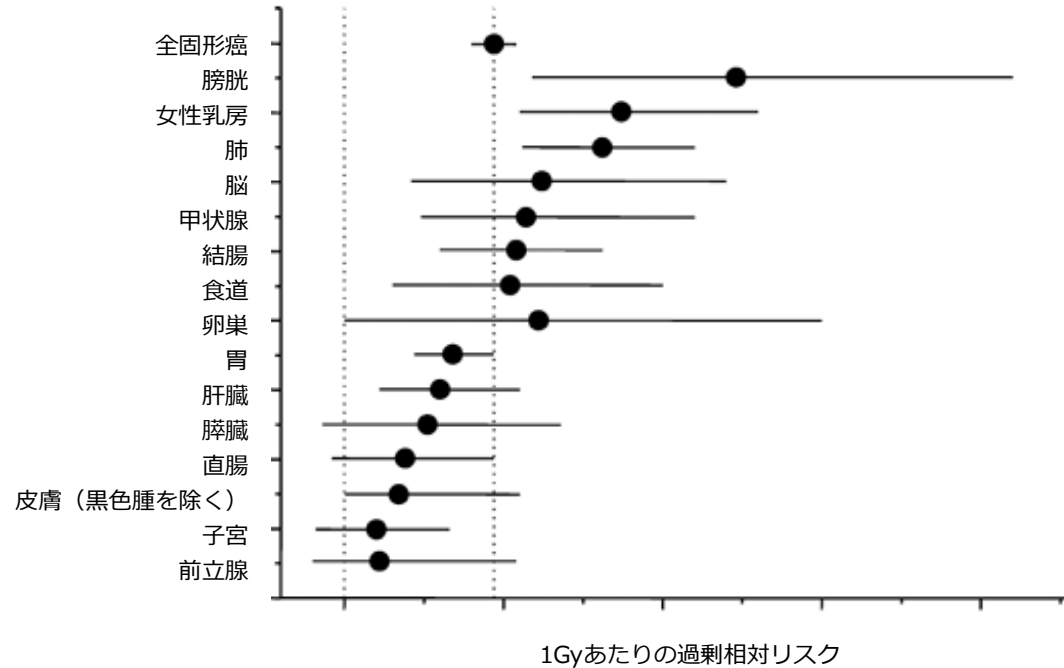
- しきい値が存在せず、線量の増加とともに影響の発生確率が増加する
- がん
- 遺伝的影響



確定的影響のしきい値

組織	症状	しきい値 (Gy)
骨髓	白血球減少	0.5
	赤血球・血小板減少	2 - 6
不妊	男性	3.5 - 6
	女性	2.5 - 7
眼	白内障	5
胎児	奇形	0.1
皮膚	紅斑	2
	脱毛・充血・腫脹	3 - 19
	潰瘍・壊死	>30

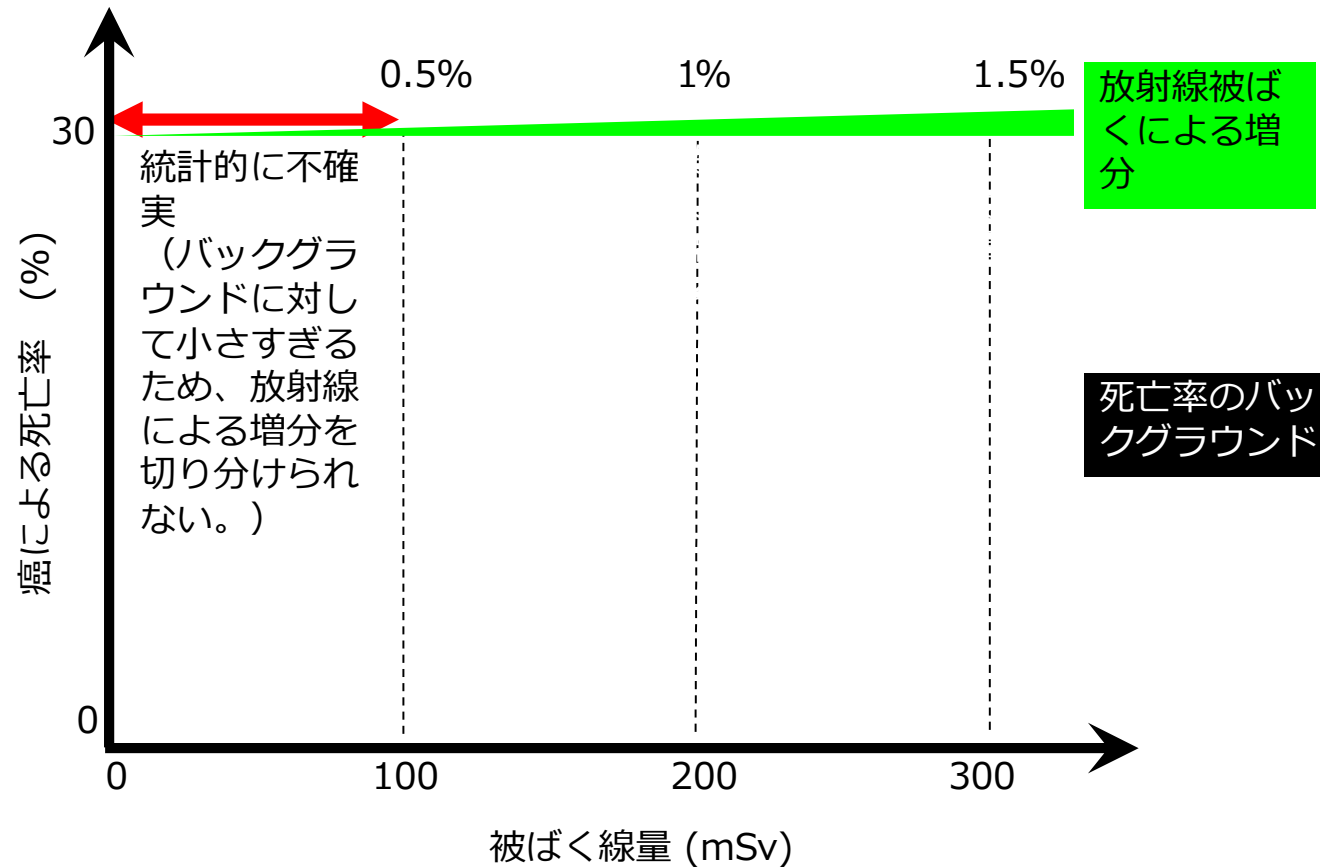
確率的影響 - 原爆被爆者の発がんリスク



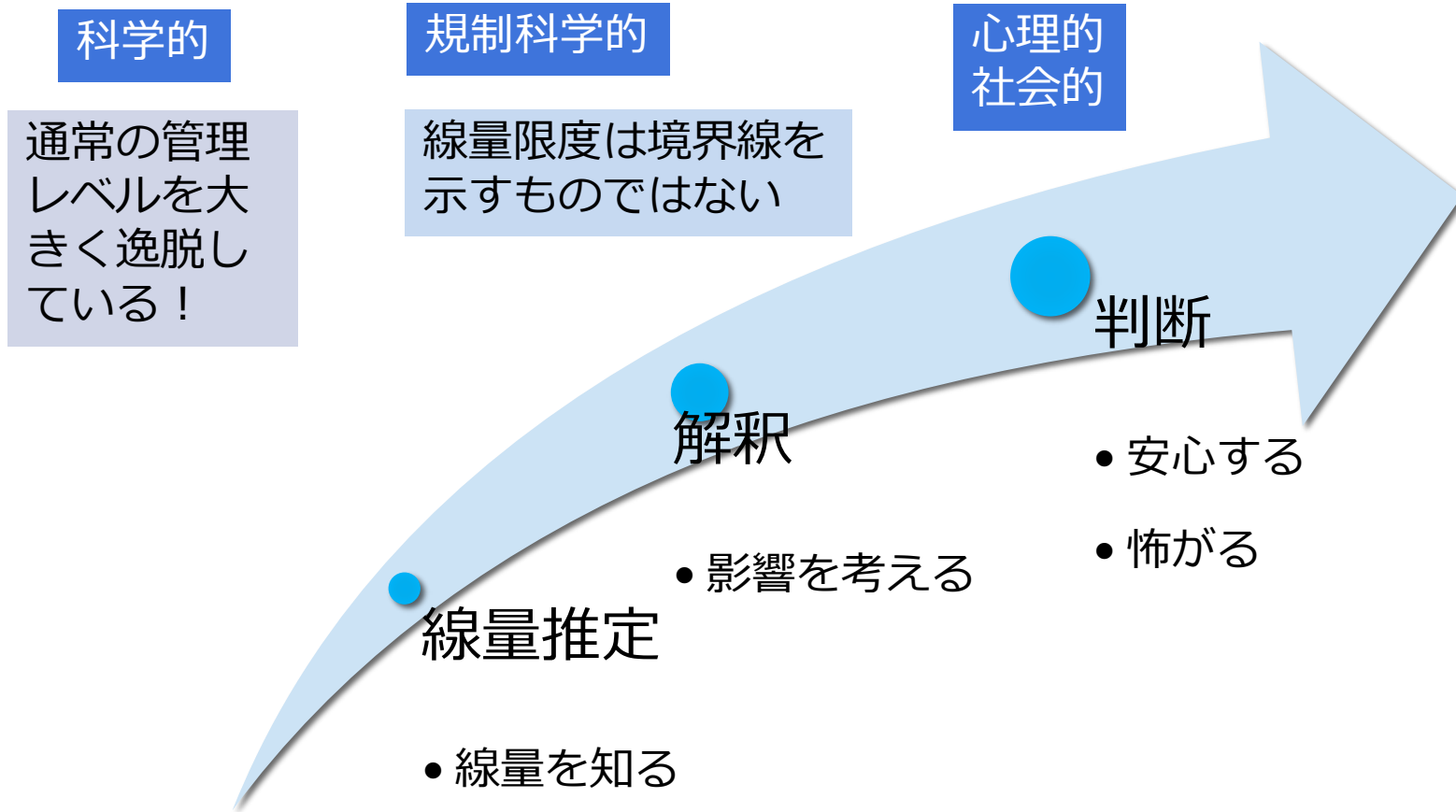
被爆時年齢30歳（男女平均）の人が、70歳に達した時の1 Gy当たりの部位別癌発生率が、被ばくしなかった時と比べて何パーセント高かったかを示す。横線はバラツキの範囲（バラついていても全体の90%はこの範囲に入る）を示す。

(Preston DL et al., Radiat Res 168, 1-64, 2007より改変)

確率的影響 - 低線量の影響



リスクアセスメントからリスクコミュニケーションへ



線量のオーダー 相場観

