

● このスライドの著作権は、原則として著作者に帰属します。著作権法上認められた場合を除き、その利用には原則として著作者の許諾が必要です。

As a general rule, the copyright of the slides belongs to the author. In principle, the author's authorization is required for their use, except in cases recognized by the copyright law.

低線量被ばくによる健康リスクに関する 疫学研究から得られた教訓

ローリエ・ドミニク フランス原子力安全・放射線防護機関(ASNR)

“Build Back Better, Together”

**2026 Fukushima Medical University International Symposium
on the Fukushima Health Management Survey**

Fukushima City, Thursday, March 12, 2026



**FUKUSHIMA
MEDICAL
UNIVERSITY**



コンテンツ

- 放射線疫学
- がん
- がん以外の疾病
- まとめ

電離放射線被ばくの影響

確定的影響（細胞的な組織反応）

- 重篤度は線量に依存
- 高線量（ > 500 mGy）
- 急性的及び特異的な影響
- しきい値モデル（基準を超えると罹患）
（皮膚の紅斑、火傷、血液成分の改変…）

症例報告/症例集積

確率的影響

- 確率は線量に依存
- 低中線量
- 遅発的及び非特異的影響
- しきい値なしモデル
（がん罹患、遺伝的影響など…）

疫学

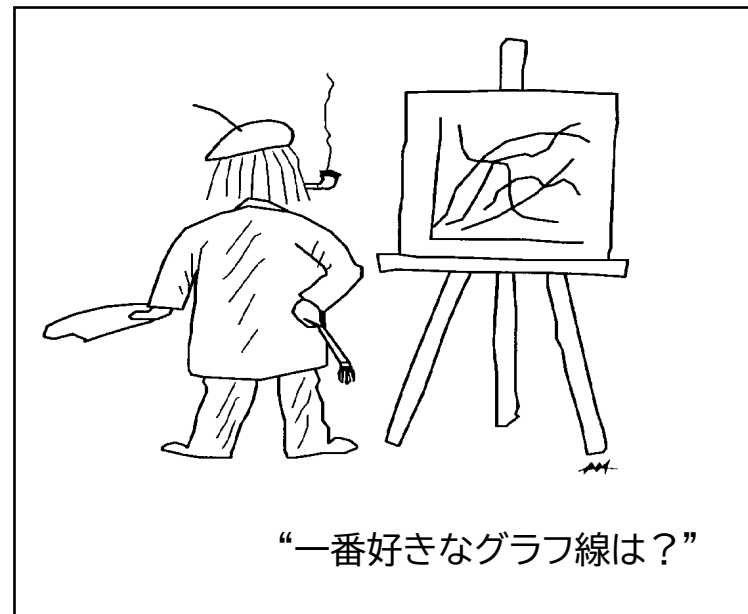
放射線被ばくにおける疫学の目的

放射線によって引き起こされる影響を
明らかにすること

放射線被ばくと影響の発現との時間的
関係を明確にすること

放射線量とリスクの関係を定量化する
こと

放射線量/リスクの关系到影響を及ぼす
修飾要因を明らかにすること



放射線量レベルの区分

線量レベル用語	低エネルギー量放射線の吸収線量の範囲	概要
高線量 (High)	1 Gy以上	重大な放射線事故や事象、又は放射線治療後の典型的な個人線量 (全身又は体の一部)
中線量 (Moderate)	約100 mGyから 1 Gy	チヨルノービリ原発事故後の復旧作業員約10万人の個人線量 (Annex D [U14])
低線量 (Low)	約10 mGyから 100 mGy	全身のCTスキャンを複数回受けたことによる個人線量
極低線量 (Very low)	約10 mGy以下	従来型の放射線撮影 (CTやフルオロスコープ以外) による個人線量

自然放射線源からの通常のバックグラウンド被ばくによる総線量に加えて、個人の全身または特定の臓器・組織が受ける総吸収線量のレベル(おおよその範囲)。これらの放射線線量レベルは、線量が単位・時間当たりどの程度で与えられたか(線量率)については考慮していない。

[UNSCEAR 2012, Annex A, p23, tab 1]

電離放射線の疫学研究史

- 1950 放射線研究者 (1900-30)
- 1950 ラジウム・ダイアル・ペインターズ-時計の文字盤や針に発光するラジウム塗料を筆で塗る作業(1910-30)
- 1950 非悪性疾患(がん以外の病気)に対する医療被ばく、診断用被ばく(1920-40)
- 1950 広島-長崎 原爆生存者“寿命調査(LSS)” (1945)
- 1960 鉱山作業(ウラニウム) (1940-90)
- 1970 核兵器による大気圏内放射性物質の降下物に被ばくした人口集団(1950-60)
- 1970 原子力・核作業従事者 (1950-)
- 1980 自然界のバックグラウンド放射線による被ばく人口集団
- 1990 チョルノービリ原発事故による被ばく人口集団 (1986)
- 2000 CT検査による小児被ばく (1985)
- 2011 福島第一原発事故による被ばく人口集団 (2011)



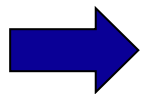
コンテンツ

- 放射線疫学
- **がん**
- がん以外の疾病
- まとめ

広島－長崎 原爆生存者の研究

寿命コホート調査 (LSS)

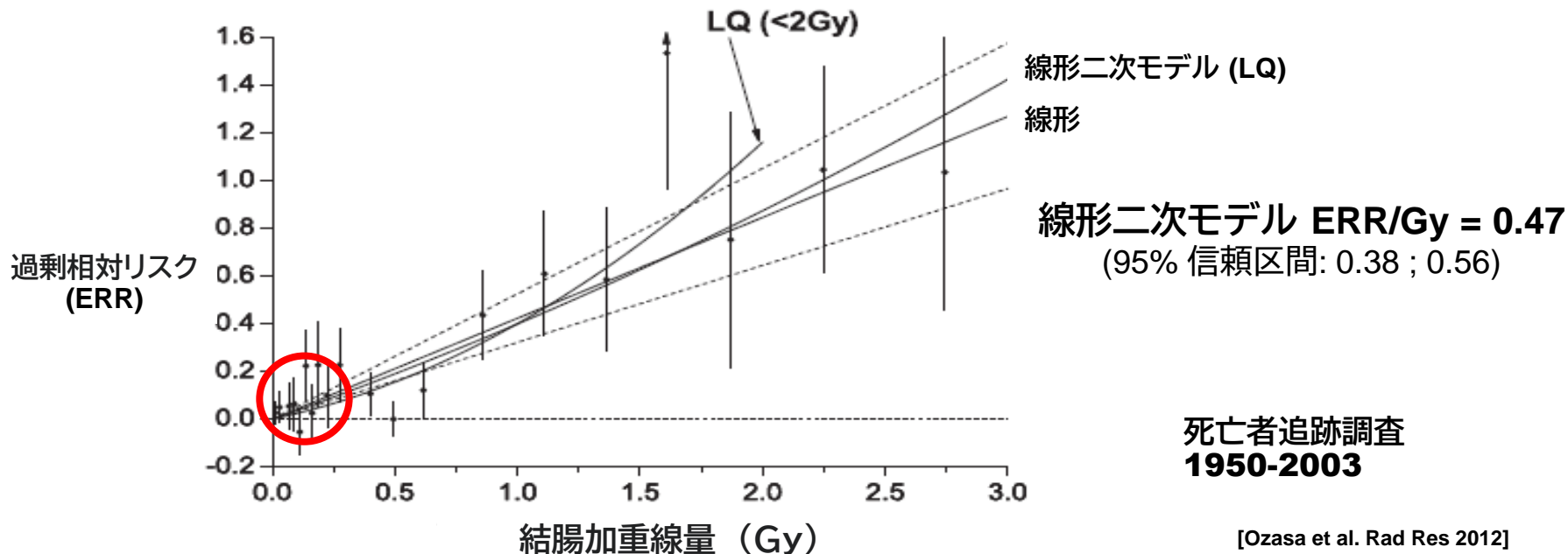
- 1950年時点の生存者120,000人が対象
- 86,611人の線量を再推計
- 高線量率での外部照射 (ガンマ線 + 中性子線)
- 80%が線量100 mGy 以下
- 男女両方 - 全年齢層 (子宮内胎児も含む)
- 死亡者追跡調査 -1950年～2009年
- 罹患者追跡調査 -1958年～2009年



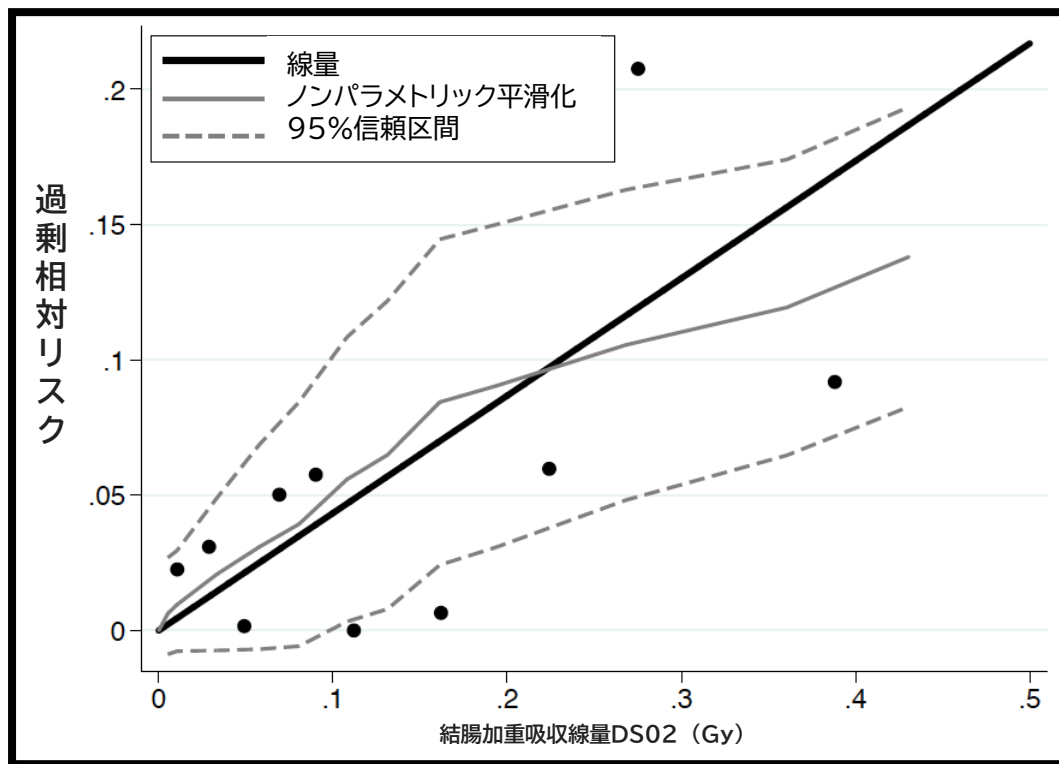
放射線に起因するがん
線量－リスク関係の推定
被ばくからリスクが増加するまでの潜伏時間
加齢による影響

寿命調査：固形がんの線量－リスク関係

固形がん

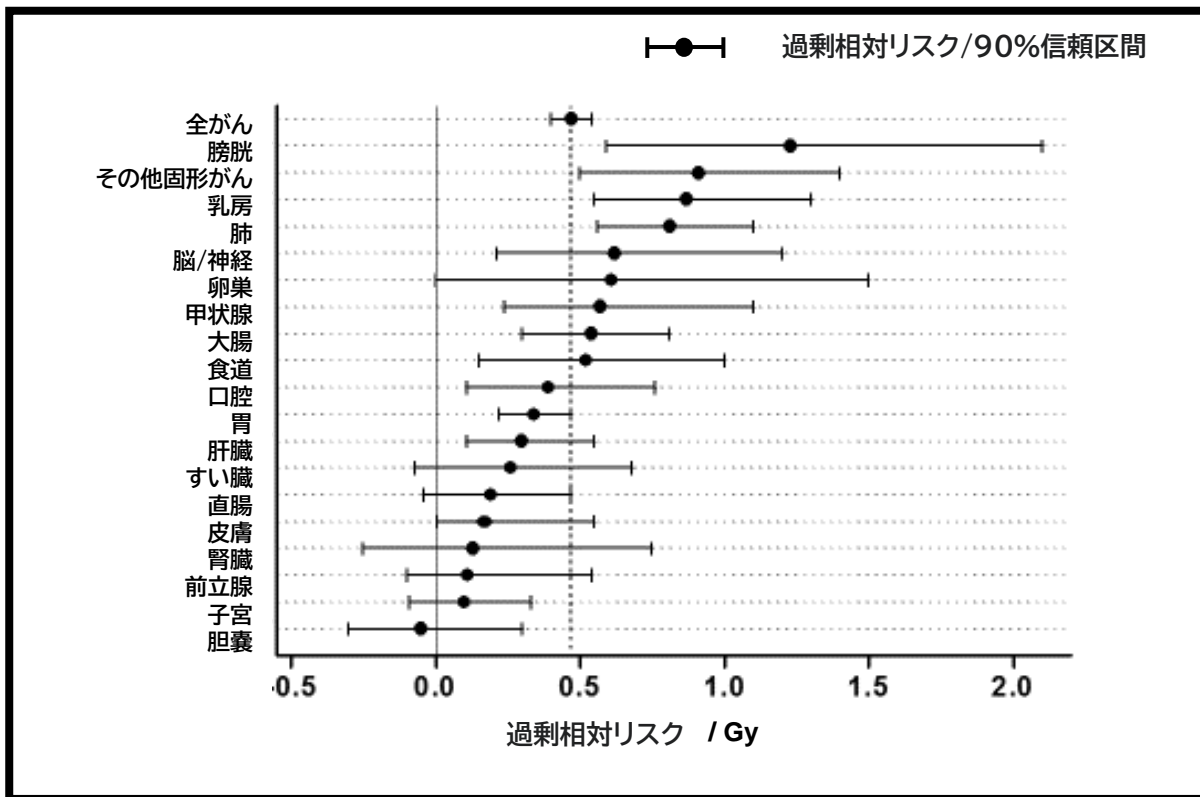


寿命調査：固形がんの線量－リスク関係



[NCRP Commentary No. 27, 2018]

原爆生存者における部位別固形がん罹患の過剰相対リスク



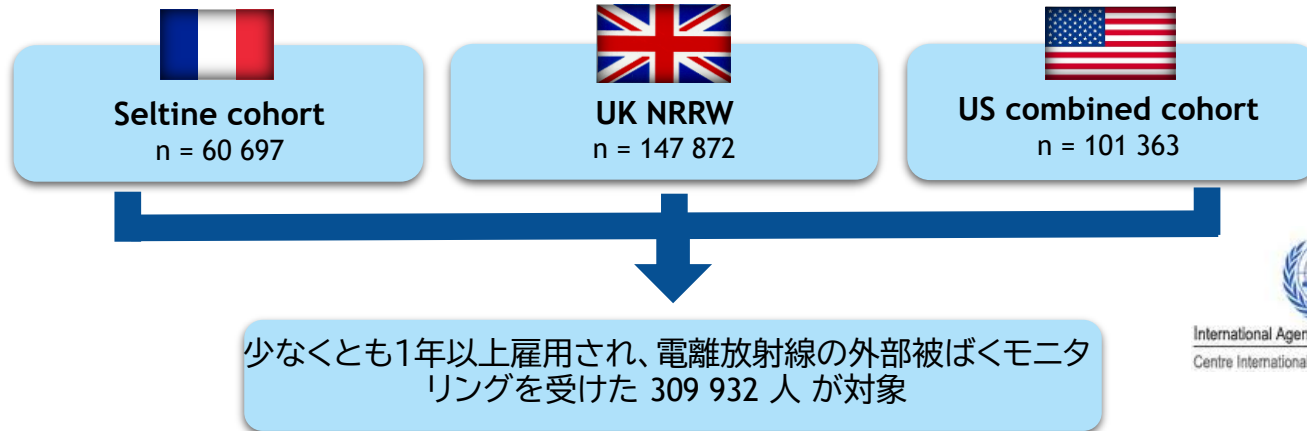
罹患者追跡調査
1958-1998

[Preston et al. Rad Res 2007]

寿命調査：結果まとめ

- 原爆後70年を経てもなお、新たな調査結果がある
- 数多くの特定のがん部位: 白血病、乳がん、肺がん、甲状腺がん、結腸がん…などでは、放射線起因のリスクが実証されている
- 固形がんと白血病のリスクは 線量により増加
- 被ばくした年齢が高いほど、白血病や多くの固形がんの過剰相対リスクは低くなる。(特に女性の乳がんでは思春期が影響を受けやすい時期と考えられている。)
- 被ばくしてから病気が現れるまでの時間(潜伏期間)は、白血病では数年、固形がんでは数十年とされている。
- がんに関して線量のしきい値の存在を支持する根拠は認められない。
- 線量とリスクの関係は、がん罹患、死亡、性別、がんの種類によって違いがある。

原子力・核作業従事者調査 (INWORKS) : 調査人口

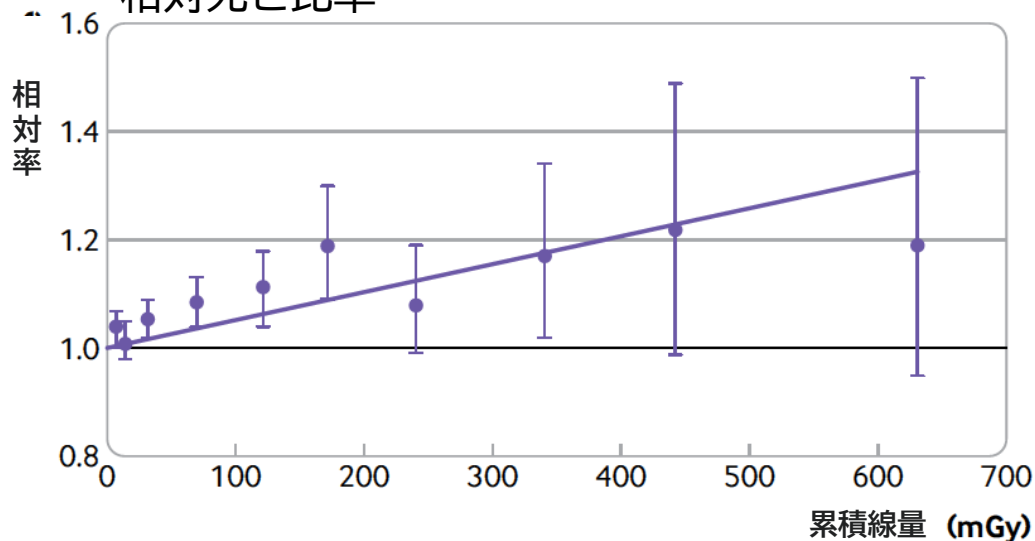


International Agency for Research on Cancer
Centre International de Recherche sur le Cancer

平均雇用期間 (年)	15
最終観察時点の平均年齢 (年)	66
追跡調査の平均期間 (年)	34
総観察人年 (百万)	10.7
平均累積全身線量 (Hp10, mSv, 被ばく)	20
死者数	103 553
固形がん	28 089
白血病 (慢性リンパ性白血病を除く)	771

原子力・核作業従事者調査 (INWORKS) : 固形がんの線量－リスク関係

カテゴリー別固形がんの結腸累積線量による
相対死亡率



固形がんの線量－リスク関係

ERR/Gy = 0.52 (90%CI: 0.27; 0.77)

- 線量の範囲が<100 mGyに限定された場合でも、相関関係は依然として有意にある
- 雇用期間により調整
- 線量リスク関係の下降曲線の兆候

バーは90%信頼区間を示し、紫色の線は、線量に伴う固形がん死亡の過剰相対率 (ERR)の変化に当てはめた線形モデルを示す(10年ラグを考慮)。

* 層別因子: 国、年齢、性別、出生コホート、社会経済的状況、雇用期間、中性子線モ
ニタリングの有無。

[Richardson et al. BMJ 2023]

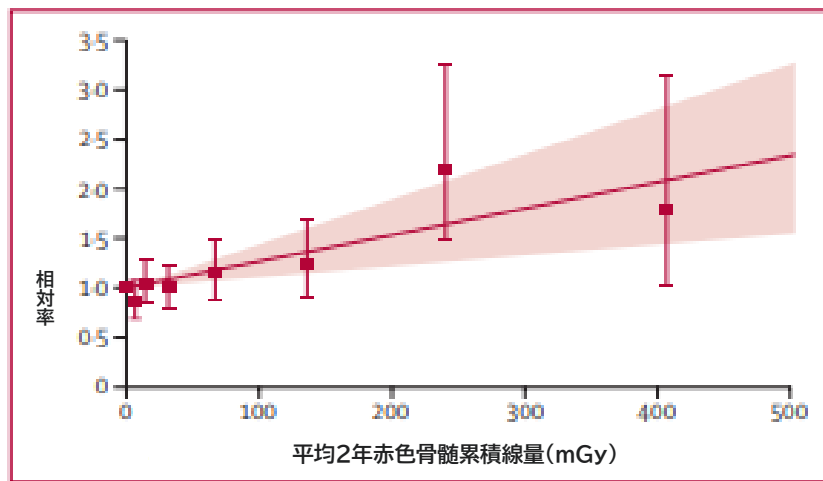
<https://www.bmj.com/content/382/bmj-2022-074520>

原子力・核作業従事者調査 (INWORKS) : 白血病の線量-リスク関係

[Leuraud et al. Lancet Haematol 2024]

[https://doi.org/10.1016/S2352-3026\(24\)00240-0](https://doi.org/10.1016/S2352-3026(24)00240-0)

赤色骨髄累積線量別白血病(慢性リンパ性白血病を除く)による相対死亡率



N=771 - 2年の時間的ラグを考慮した線量。縦棒は90%信頼区間(CI)を示し、実線は線量に対する白血病の過剰相対率(ERR)の線形回帰を示す。モデルは、国、性別、出生コホート、および到達年齢で層別化。



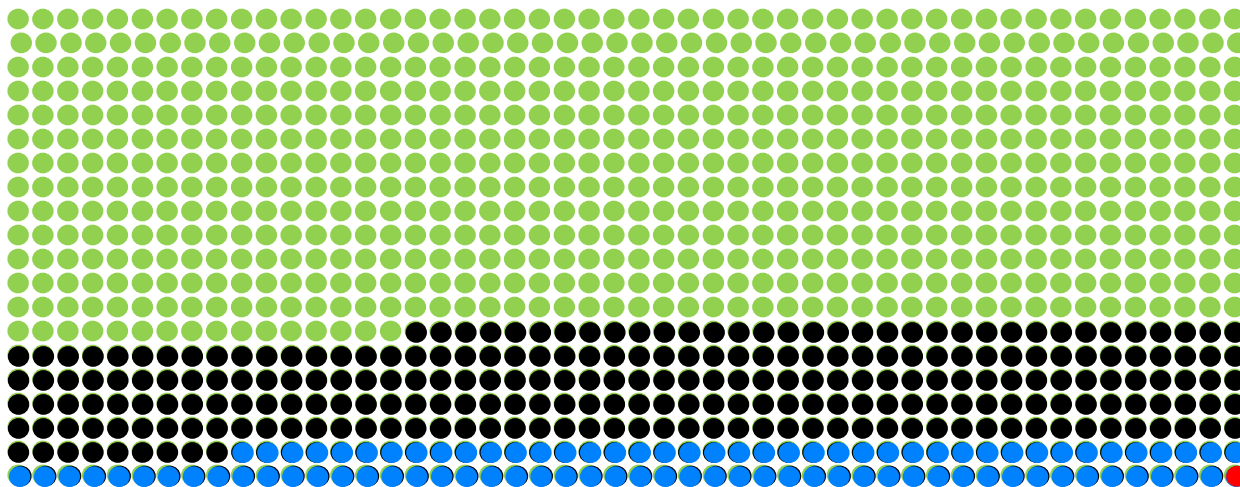
白血病-慢性リンパ性白血病の線量-リスク関係

ERR/Gy = [2.68, 90%CI 1.13 to 4.55]

- 線形モデルでわかりやすく解説される
- 中性子線被ばく、内部被ばく状態あるいは雇用期間による調整はない
- 線量範囲を0~300 mGyに制限した場合でも有意性を維持

INWORKS:被ばくによってどの程度の規模のリスク増加が生じるか

作業員数：1000人



死亡者334人

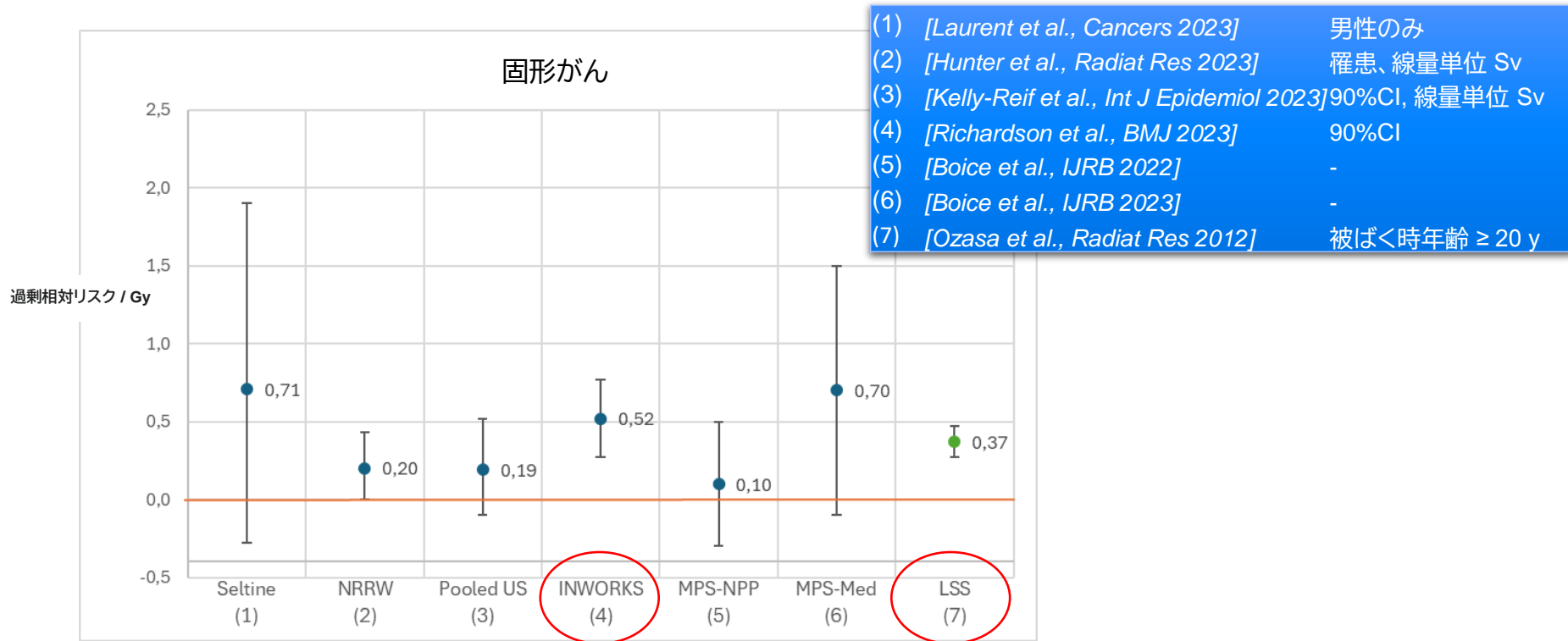
固形がん又は白血病（CLLを除く）の死亡者93人を含む

電離放射線被ばくに起因する1例を含む

(INWORKS コホート調査に基づく: 35年間の作業者309,932人の追跡調査-終了年齢66歳)

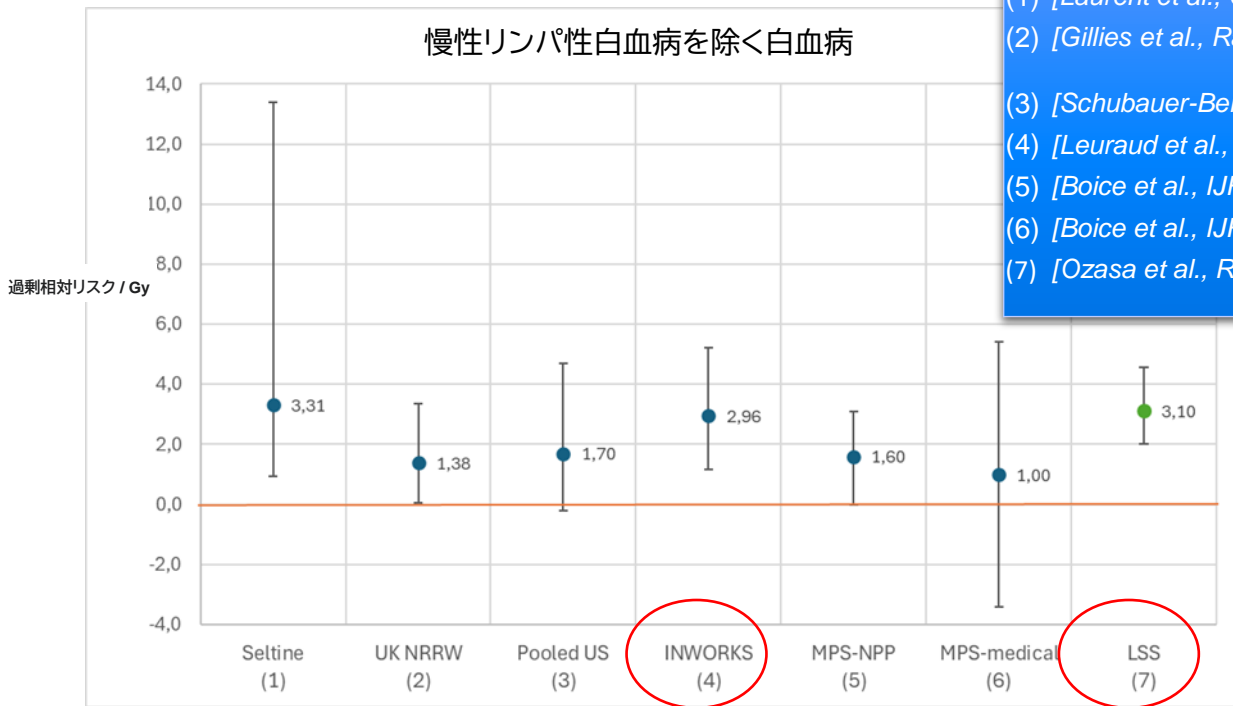
最新の研究結果の比較:固形がん

線形モデルを用いて推定した、累積線量1 Gy当たりの死亡の過剰相対率と95%信頼区間



最新の研究結果の比較:白血病

線形モデルを用いて推定した、累積線量1 Gy当たりの死亡の過剰相対率と95%信頼区間



- (1) [Laurent et al., Cancers 2023] 男性のみ
- (2) [Gillies et al., Radiat Res 2019] 罹患、男性のみ、90%信頼区間、線量単位 Sv
- (3) [Schubauer-Berigan et al., Radiat Res 2015] 線量単位 Sv
- (4) [Leuraud et al., Lancet Haematol 2015] 90%信頼区間
- (5) [Boice et al., IJRB 2022] -
- (6) [Boice et al., IJRB 2023] -
- (7) [Ozasa et al., Radiat Res 2012] 被ばく時年齢 ≥ 20 y, 全ての白血病

成人前に受けたCT検査によるがんリスクのプール解析



Thierry-Chef I et al. Radiat Res 2021
Bernier et al Int J Epidemiol 2019
Bosch de Basea M et al. J Radiol Prot 2015

過去の記録に基づく後ろ向きコホート調査

- 22歳になる前に、少なくとも1回CT検査を受けたことがある
未成年
- ヨーロッパ 9 各国
- 約100万人

共通のコアプロトコル

特に注意すべき点

- 潜在的なバイアス/不確実性の特定と評価
- 個人線量(および不確実性)の再推計



小児期のCT検査後における 血液悪性腫瘍リスクのプール解析

- 最初に受けたCT検査から少なくとも2年間追跡調査された876,771人
- 追跡調査の中央値は 7.8 年 – 6.9 万人-年
- 血液悪性腫瘍 790 症例
- 1,331,896 CT検査 (平均 1.5回/人)
- 骨髄への平均線量: 15.5 mGy (症例群のうち20例)

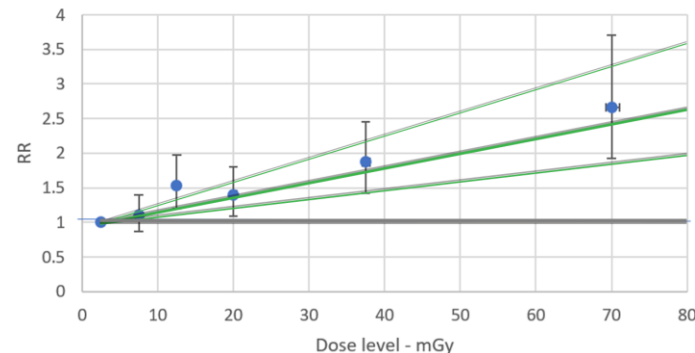
100 mGy毎のERR: 1.96 (95% 信頼区間(CI): 1.10-3.12)

(赤色骨髄に対する2年ラグの累積線量)

寄与リスク: CT検査を受けた方**1万人毎** (線量: 8 mGy)

血液悪性腫瘍においては、CT検査後2~12年後に**放射線被ばく**
に起因する症例が約1.4例発生すると予想されている

全ての血液悪性腫瘍



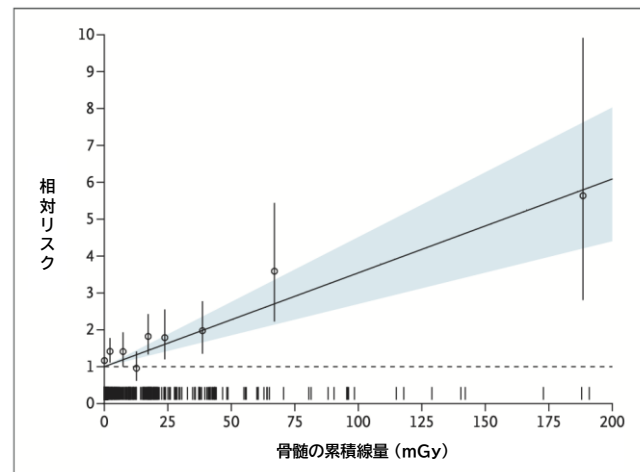
[Bosch de Basea Gomez et al. Nature Medicine 2023]
<https://www.nature.com/articles/s41591-023-02620-0>

小児期のCT検査後における血液悪性腫瘍のリスク解析

- 後ろ向きコホート研究:カナダ・オンタリオ州および米国6医療システム - 3,724,623人の未成年
- 出生時から21歳までの未成年者を追跡調査
- 平均追跡期間10.1年 - 35,715,325人年
- 血液がん症例2,961例
- 平均赤色骨髓累積被ばく線量14.0mGy(症例群では24.5mGy)
- 全検査についての実施適応に関する詳細情報
- ダウン症候群と診断

100 mGy毎のERR: 2.54 (95% 信頼区間(CI): 1.70-3.51)

(赤色骨髓に対する6か月ラグの累積線量)



[Smith-Bindman et al. N Engl J Med. 2025]

<https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJMoa2502098>

がんリスク: 低線量/線量率での結果

固定がん – INWORKS

プール解析 - 作業員のコホート調査3件- n > 308000

[Richardson et al. BMJ 2015;
Richardson et al. BMJ 2023]

固定がん – ICRP TG91

メタ解析 – 低線量率研究22件 – n > 900000

[Shore et al. IJRB 2017]

固定がん – NCI Monograph

メタ解析 – 22 研究 – 平均線量 < 100 mSv

[Hauptmann et al.
JNCI Monog 2020]

甲状腺がん – PIRATES

プール解析 - 未成年のコホート調査 9件 - n > 107000 – 低線量 (< 200 mGy)

[Lubin et al. JCEM 2017]

白血病 (慢性リンパ性白血病を除く)

プール解析 - 未成年のコホート調査 9件 - n = 262000 – 低線量 (< 100 mSv)

[Little et al.
Lancet Haematol 2018]

脳腫瘍及び血液がん – Epi-CT

プール解析 - 未成年のコホート調査 9件 - n > 658000 – CT 検査

[Hauptmann et al. Lancet Oncol 2023;
Bosch de Basea et al. Nature Med 2023]

血液がん – RIC

プール解析 米国-カナダにおける未成年コホート調査 - n > 3.7M – CT検査

[Smith-Bindman et al. N Engl J Med. 2025]

 100 mGyを超える線量を解析から除外した場合に有意な関連が認められた

低線量・低線量率でのがんリスクの解釈

- 低線量分野でのがんリスクについては、ここ20年で明らかに知見が向上した。
- 低線量放射線被ばく後に、一部のがんにおいて過剰リスクがみられることを示唆するエビデンスがある。
- 反復的または長期にわたる被ばくにより、がんリスクが増加することを示すエビデンスがある。
- 低線量・低線量率において、線形しきい値なし(LNT)仮説に基づく線量-リスク関係は、その仮説から大きく逸脱することを示す疫学的なエビデンスは乏しい。
- 低線量は低い過剰リスクと関連している。もし、しきい値が存在するのであれば、数十 mGyを超えることはない。

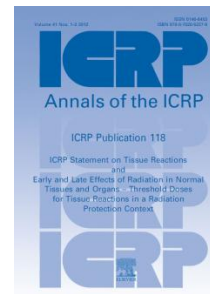


コンテンツ

- 放射線疫学
- がん
- **がん以外の疾病**
- まとめ

循環器系疾患のリスク

2012年ICRP報告書 - 基準線量 0.5 Gy における、細胞反応としての循環器系疾患の分類



thebmj RESEARCH

OPEN ACCESS **Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis**

Check for updates

Mark P Little,¹ Tamara V Azizova,² David B Richardson,³ Soile Tapio,⁴ Marie-Odile Bernier,⁵ Michaela Kreuzer,⁶ Francis A Cucinotta,⁷ Dimitry Bazyka,⁸ Vadim Chumak,⁹ Victor K Ivanov,⁹ Lene H S Veiga,¹ Alicia Livinski,¹⁰ Kossi Abalo,^{11,12} Lydia B Zablotska,¹³ Andrew J Einstein,¹⁴ Nobuyuki Hamada¹⁵

[Little BMJ 2023]

- システミックレビューとメタ解析
- 93の関連研究
- 全ての DCS + 主なサブタイプ（虚血性心疾患、脳血管疾患など）

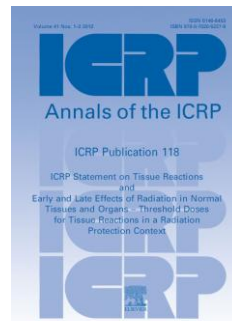
“近年蓄積されつつあるエビデンスは、心血管疾患を放射線誘発性の健康影響として位置づける必要性を示唆している。ただし、この点については今後の検討が必要であり、放射線防護における概念や基準への影響についても、国内外の専門機関により慎重に評価されるべきである。”

[Auvinen BMJ 2023]

眼への影響 - 白内障/水晶体混濁のリスク

組織反応としての白内障の分類

2012年ICRP報告書 - 基準線量 0.5 Gy

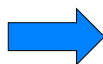


最近発表された複数の総合的解析

[Hamada BJR 2020; Ainsbury Environ Int 2021; Little IJRB 2022]

疫学研究結果のレビュー(1999年以降に実施された12件の研究)

- 低線量・低線量率における過剰リスクの可能性を示唆するエビデンスが、複数のコホート研究(チヨルノービリ廃炉作業員、米国放射線技師[USRT]、ロシアのマヤーク原子力施設作業員)において報告されている
- 後囊下白内障および皮質白内障のいずれについても、放射線被ばくとの関連が示唆されている
- USRTコホートでは、100 mGy未満の線量域においても、過剰リスクの存在を示唆する結果が報告されている



現行の分類と、必ずしも整合がとれている
とは言い切れない結果

[Little IJRB 2022]

神経認知系疾患のリスク

2件のメタ解析

[Lopes Brain Sc 2022; Srivastava Rad Res 2023]

- 21件の研究 – チョルノービリ処理作業、原子力作業、鉱山作業、エアクルー、医療従事者、核実験に関係した退役軍人、患者

➡ 100 mSvを超える被ばく線量域において、認知症およびパーキンソン病の相対リスクの上昇を示す有意な関連が報告されている

最新の関連文献の概要

[Hamada Mut Res 2025]

成人期における職業被ばく後の神経変性疾患(パーキンソン病及び認知症)に関して、近年、新たなエビデンスが報告され始めている

- ごく最近の結果であること、評価対象のエンドポイントの不均一性、研究数が限られていることや結果のばらつき、などが認められる

➡ これらの結果の解釈にあたっては、慎重な検討が必要である

遺伝的影響

- 中～高線量域において、動物実験では遺伝的影響が観察されている
- 放射線による遺伝子損傷のリスクは、ICRP勧告(1956年)において導入され、その後、確率的影響として位置づけられた(ICRP 1977)

過去30年にわたり発表された130件以上の疫学研究の総合的レビュー

INTERNATIONAL JOURNAL OF RADIATION BIOLOGY
<https://doi.org/10.1080/09553002.2024.2306328>



REVIEW

OPEN ACCESS

A systematic review of human evidence for the intergenerational effects of exposure to ionizing radiation

Jade Stephens^a, Alexander J. Moorhouse^{a,b,c,*}, Kai Craenen^a, Ewald Schroeder^a, Fotios Drenos^a, and Rhona Anderson^a

INTERNATIONAL JOURNAL OF RADIATION BIOLOGY
<https://doi.org/10.1080/09553002.2024.2309917>



REVIEW

OPEN ACCESS

Intergenerational effects of ionizing radiation: review of recent studies from human data (2018–2021)

A. Amrenova^a, C. Baudin^a , E. Ostroumova^b , J. Stephens^c, R. Anderson^c , and D. Laurier^a



- 評価項目(エンドポイント)の多様性が大きいため疫学研究には限界がある
- 被ばく者の子孫(次世代)における影響について、一貫したエビデンスは認められていない
- 「仮に被ばくした親をもつ子どもに有害な健康影響が生じるとしても、その影響は小さく、再現性をもって測定することは困難である」

放射線災害と健康

チヨルノービリ及び福島原発事故からの疫学的教訓

- 病院・介護施設の避難時における医療支援不足の影響。
- 放射線被ばくに関連するリスク認知などの個人的要因ではなく、社会的支援の欠如や社会・地域・住環境の変化などにより、避難者において代謝性疾患(高血圧、肥満、糖尿病、脂質異常症)が増加。
- **メンタルヘルスの悪化**:緊急作業従事者、妊婦、さらには被災地域住民において、心的外傷後ストレス障害(PTSD)、不安、抑うつが増加など、様々な心理的影響が報告されている。これらは生活環境の変化や事故に伴う社会的・経済的影響に起因するものであり、放射線被ばくとの直接的な関連は認められていない。
- 避難等により新たな居住地へ移転した方々は、受け入れ先の地域住民から社会的排除を受けることがあり得る。このような**スティグマ化(偏見の対象となるような扱い)**の現象は、避難・移転を余儀なくされた人々に心理的苦痛をもたらす可能性がある。

がん以外の影響：サマリー

- 過去数十年にわたり、がん以外の長期的健康影響に関する疫学的知見が蓄積されている。
- 中～低線量域における線量-リスク関係を示すエビデンスが増えており、特に**水晶体の混濁や循環器疾患**について顕著である。**神経認知機能**への影響についても新たな知見が出始めている。
- 一方で、**結果の不均一性**が顕著で、生物学的な機序に関する知見は依然として不十分である。
- **原子力事故に伴う健康影響**には、放射線に起因しない影響(**メンタルヘルス、代謝性疾患**など)も含まれる
 - ➡ 現在、複数の専門家グループが科学文献のレビューを行い、放射線防護体系への潜在的影響を評価している。(UNSCEAR, ICRP)



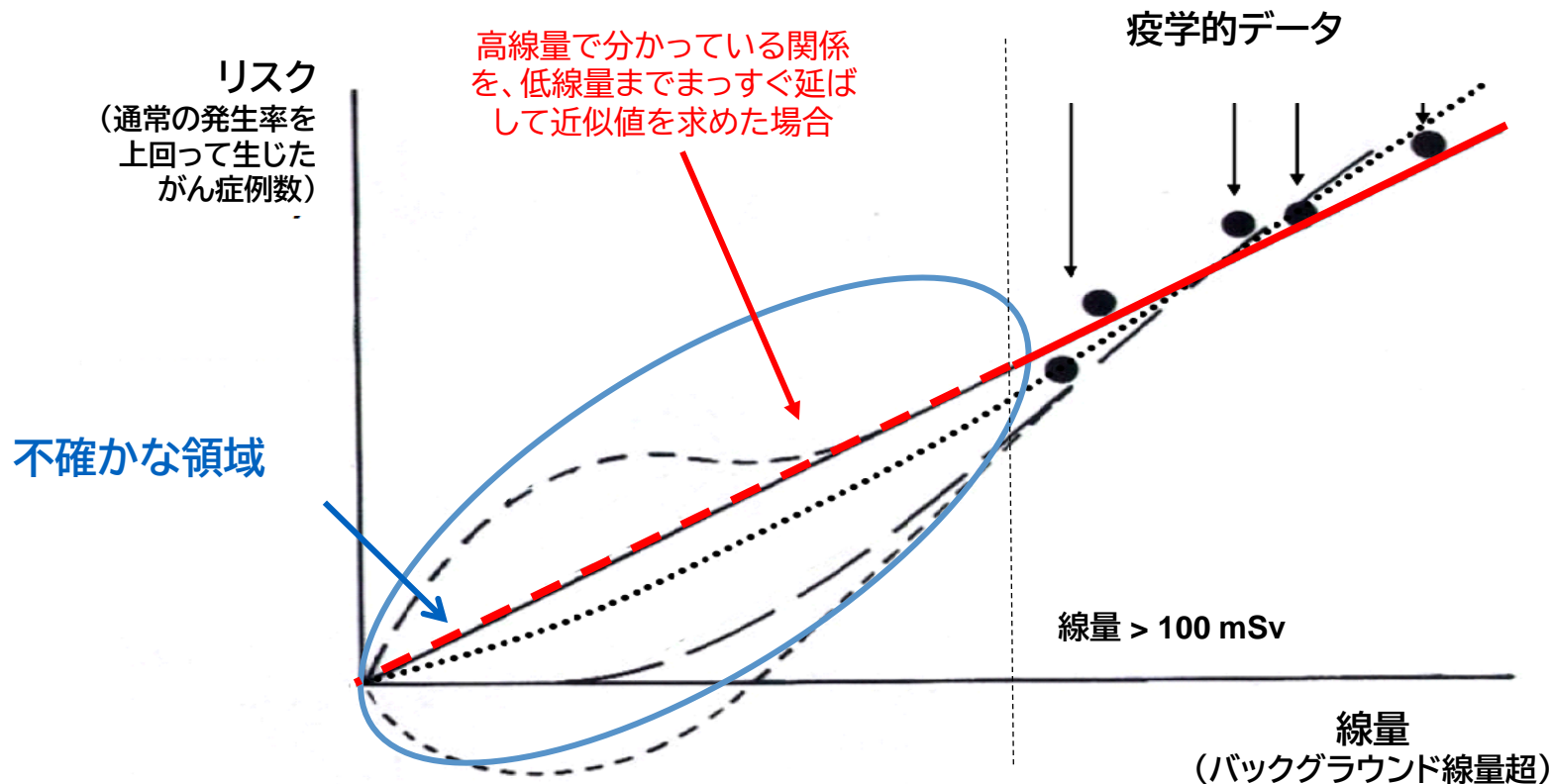
コンテンツ

- 放射線疫学
- がん
- がん以外の疾病
- **まとめ**

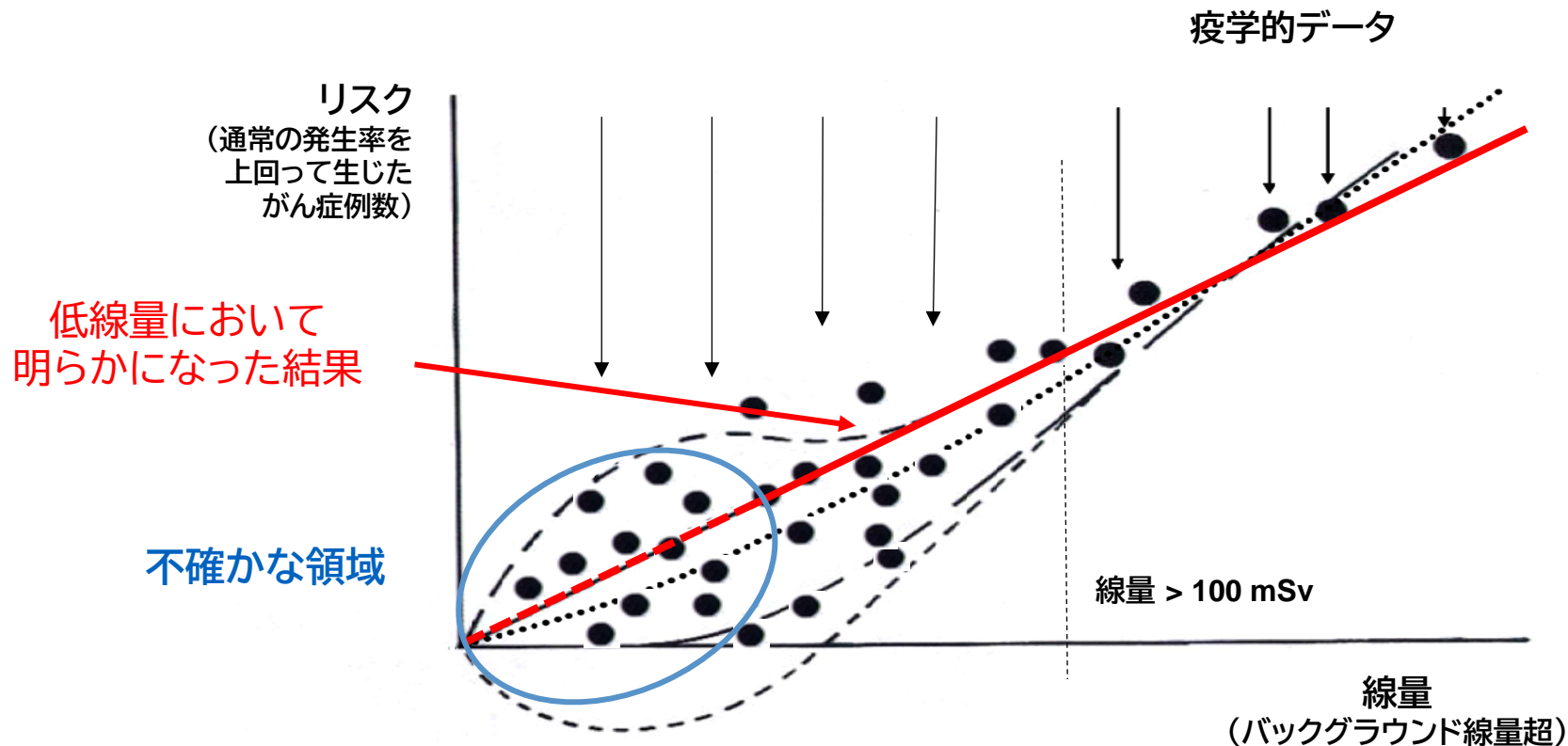
低線量・低線量率における放射線疫学

- 低線量の放射線影響を調べる研究は、計画を立てることも、実施することも、結果を正しく理解することも**簡単ではない**。
- その多くは観察研究である(研究デザインの**制限**、**生活習慣などの影響(交絡因子)**、**調査の偏り**、**地域ごとの病気の発生率**)
- 特にごく低い線量(<10mSv)については、**依然として知見が不足しており**、**確実ではない点が多く残っている**。
- **そのため、得られているすべてのデータを見る必要がある。**
- **新しい研究成果が出るたびに、新たな疑問も生まれる！**

がんの線量-リスク関係: 20年前



がんの線量－リスク関係: 現在



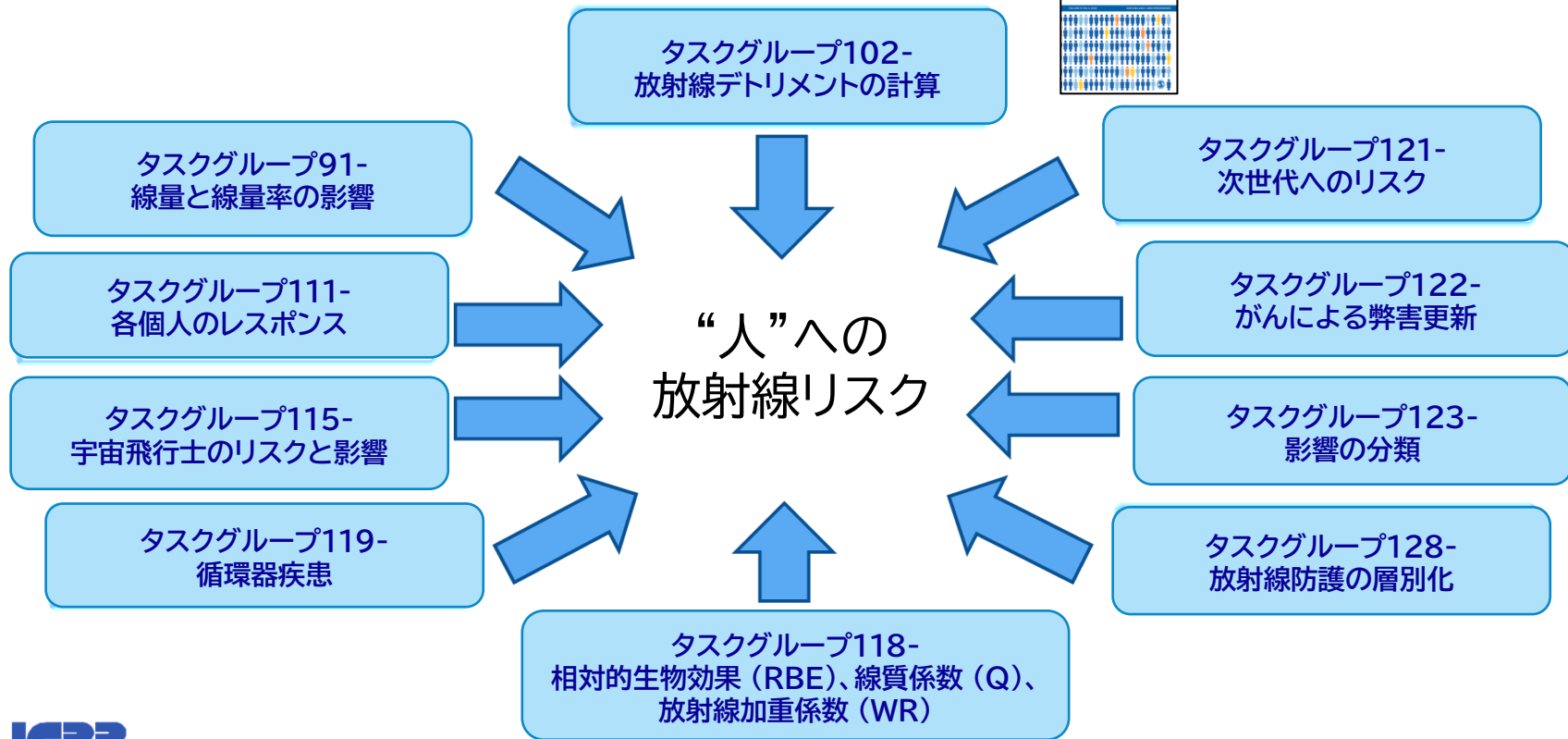
放射線疫学: 放射線防護のサポート

- **低線量・低線量率における線量-リスク関係の形状** (がんの部位別モデル、LNT(*注1)、DDREF(*注2)) -現在のところ、「被ばく量が増えるほどリスクも少しずつ増える」と考える標準的なリスクモデル(LNT)が、分かっている科学的知見を最もシンプルに説明できる考え方とされている。
- **線量-リスク関係に影響を与える修飾因子** (性別、被ばく時年齢、遺伝的な特性など…)
- **集団間での違い** (ベースライン時の発生率の差、乗法モデル・加法モデルによるリスク移行、被ばく状況の特定など)
- **低線量でのがん以外の疾病の影響** (循環器系疾患、白内障、認知機能への影響、次世代への影響など)

(*注1)LNT - しきい値無し直線仮説(Linear Non-Threshold : LNT仮説)
放射線の被ばく線量と影響の間には、しきい値がなく直線的な関係が成り立つという考え方。

(*注2)DDREF - 線量・線量率効果係数(DDREF:Dose and Dose Rate Effectiveness Factor)
高線量・高線量率の放射線被ばくデータを、低線量・低線量率環境に外挿(換算)する際に使用する修正係数。

ICRP 委員会 1 タスクグループ



国際放射線防護委員会 (ICRP)による 放射線防護システムの レビューと改善のプロセス

新たな一般的勧告
を策定し、その検討
と助言を行う

広範かつ深い関与により
「構成要素」を開発する

新たな一般的勧告策定
に不可欠な作業である
「構成要素」を特定する

計画・実施期間 約10年

事故後の疫学的調査監視に向けた準備態勢

チヨルノービリ、福島、ならびにその他の放射線事故の影響を受けた人々の経験から得られた教訓を踏まえて確立する。



過去および将来の放射線事故で影響を受ける人々について、医療や健康の調査・監視に関する提言をまとめる。

Contents lists available at [ScienceDirect](#)
2021 146; 106278
Environment International
journal homepage: www.elsevier.com/locate/envint

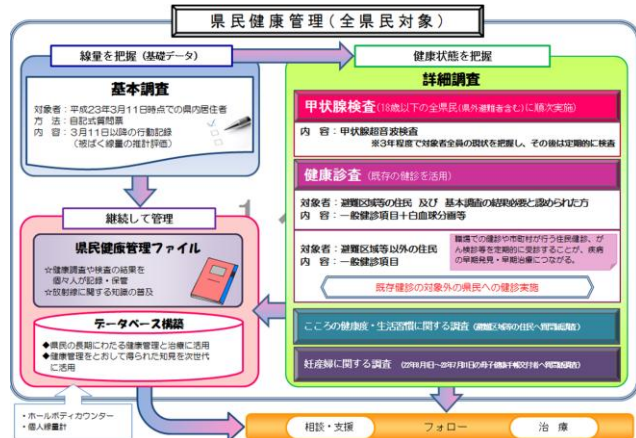
The SHAMISEN Recommendations on preparedness and health surveillance of populations affected by a radiation accident

Liudmila Liutsko^{a,b,c,*}, Deborah Oughton^d, Adelaida Sarukhan^a, Elisabeth Cardis^{a,b,c}, on behalf of the SHAMISEN Consortium¹

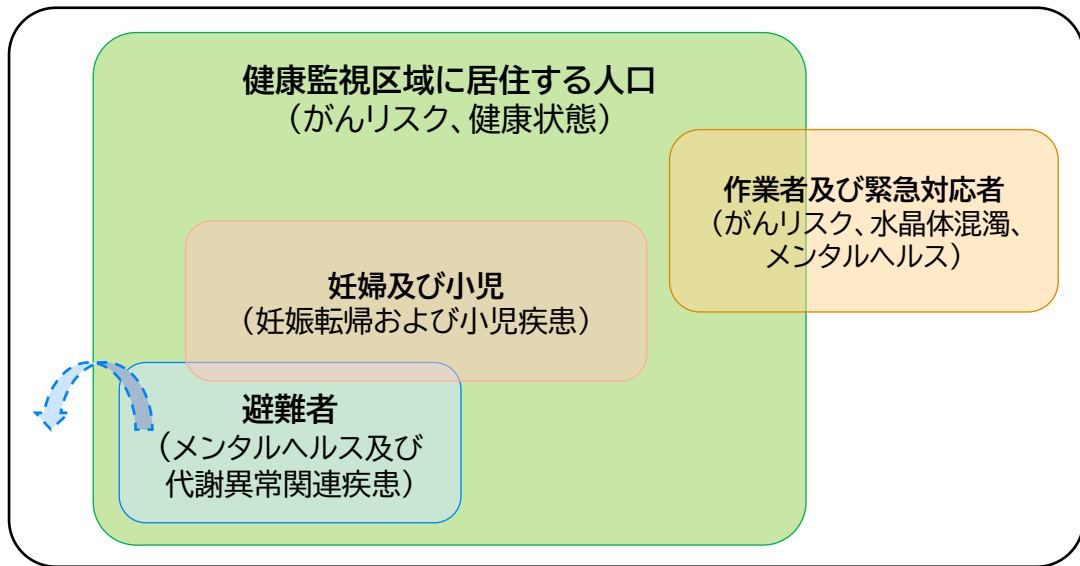


事故後の疫学的調査監視に向けた準備態勢

「県民健康調査」



フランスで大規模な原子力事故が発生した場合の、疫学的な健康監視のための提案枠組み (暫定)



ご清聴ありがとうございました

謝辞

Enora Cléro

Klervi Leuraud

David Richardson

Richard Wakeford

● このスライドの著作権は、原則として著作者に帰属します。著作権法上認められた場合を除き、その利用には原則として著作者の許諾が必要です。

As a general rule, the copyright of the slides belongs to the author. In principle, the author's authorization is required for their use, except in cases recognized by the copyright law.