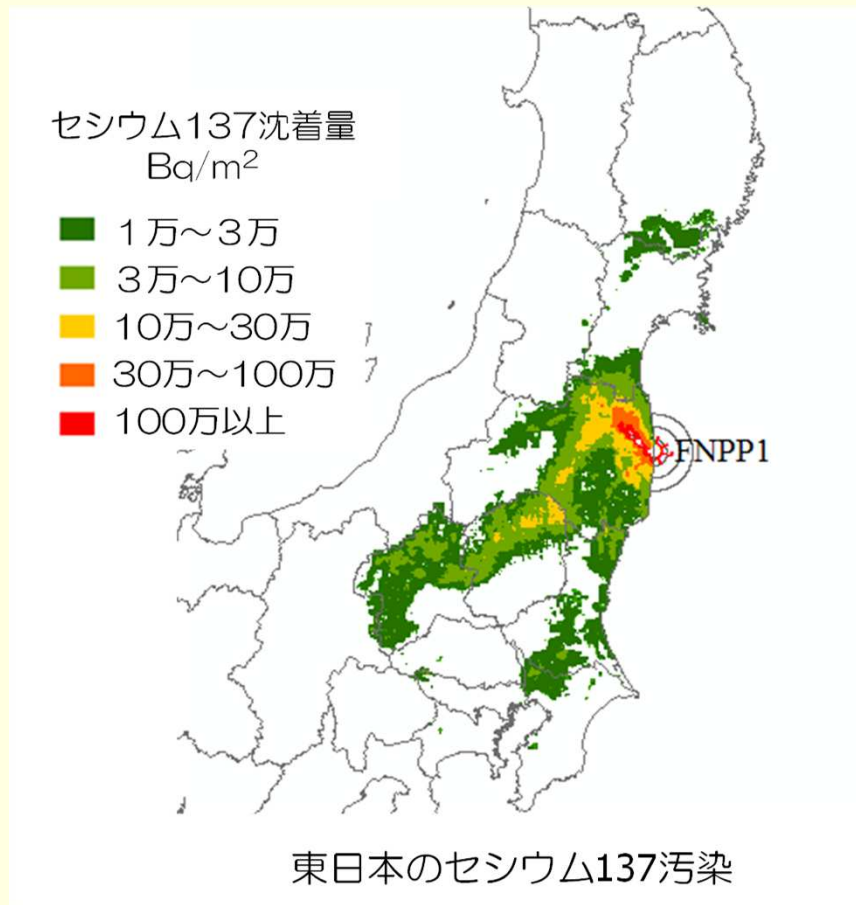


放射線・放射能と被曝についての 基礎講座（Ⅱ）

ー 被ばくとその影響、放射能汚染 ー



今中哲二

京都大学複合原子力科学研究所

2023年4月13日
ZOOM

今日の話題

- **軽く、前回の復習**
- **被曝障害の歴史とICRP勧告の変遷など**
- **福島原発事故が起きてからのこと**
- **放射性物質の環境基準が必要だ**

復習（Ⅰ）

1. 我々をとりまく物質世界は原子で出来ている
2. 原子は、中心の原子核とまわりの電子で出来ている
3. 原子核は、陽子と中性子で出来ている
4. つまり、物質世界は、陽子と中性子と電子で出来ている

復習（Ⅱ）

1. 周期表の位置（原子番号）は、**原子核の中の陽子の数**で決まっている

2. 原子核の中の、陽子の数と中性子の数を合わせたものが『**質量数**』

たとえば、**質量数235のウランの原子核**には、**陽子92個、中性子143**が含まれている

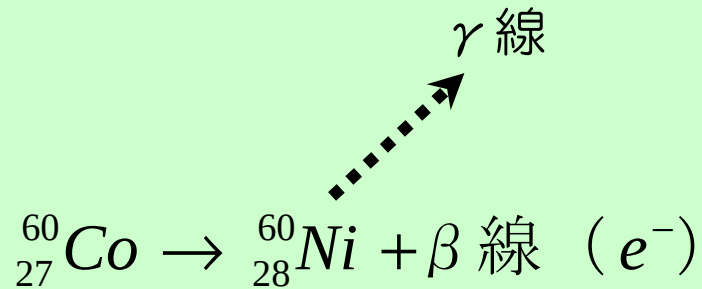
3. 陽子の数が同じで、中性子の数が異なるものは『**同位体**』と呼ばれる

●放射性壊変しないものが『**安定同位体**』

●放射性壊変するものが『**放射性同位体**』

ベータ崩壊とアルファ崩壊

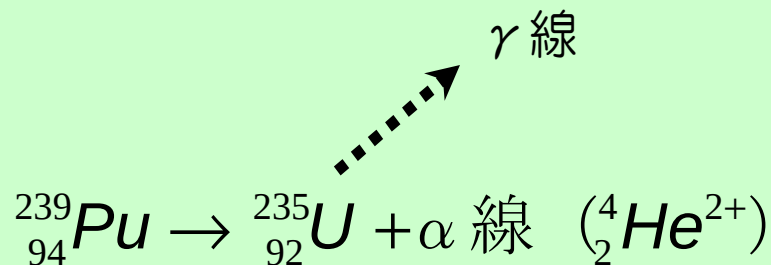
ベータ崩壊: 例えば、コバルト 60



●原子核内の中性子が多めのときに、中性子のひとつが電子（ベータ線）を出して陽子になる。

●原子番号がひとつ増えるが、質量数はかわらない。

アルファ崩壊: 例えば、プルトニウム 239



●原子核が大きくなりすぎると、「陽子2個と中性子2個の塊」（アルファ線、ヘリウムの原子核と同じもの）を放出。

●原子番号が2つ、質量数は4つ減る。

陽子・中性子の重さ（質量）は、電子の約1800倍。つまり、アルファ線の重さは、ベータ線の約7000倍。

地球上の万物は原子の組み合わせで出来ている

周期表：原子を軽い順に並べた表

1 1 <u>H</u>	2											13	14	15	16	17	18 2 <u>He</u>
3 <u>Li</u>	4 <u>Be</u>											5 <u>B</u>	6 <u>C</u>	7 <u>N</u>	8 <u>O</u>	9 <u>F</u>	10 <u>Ne</u>
11 <u>Na</u>	12 <u>Mg</u>	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 <u>Al</u>	14 <u>Si</u>	15 <u>P</u>	16 <u>S</u>	17 <u>Cl</u>	18 <u>Ar</u>
19 <u>K</u>	20 <u>Ca</u>	21 <u>Sc</u>	22 <u>Ti</u>	23 <u>V</u>	24 <u>Cr</u>	25 <u>Mn</u>	26 <u>Fe</u>	27 <u>Co</u>	28 <u>Ni</u>	29 <u>Cu</u>	30 <u>Zn</u>	31 <u>Ga</u>	32 <u>Ge</u>	33 <u>As</u>	34 <u>Se</u>	35 <u>Br</u>	36 <u>Kr</u>
37 <u>Rb</u>	38 <u>Sr</u>	39 <u>Y</u>	40 <u>Zr</u>	41 <u>Nb</u>	42 <u>Mo</u>	43 <u>Tc</u>	44 <u>Ru</u>	45 <u>Rh</u>	46 <u>Pd</u>	47 <u>Ag</u>	48 <u>Cd</u>	49 <u>In</u>	50 <u>Sn</u>	51 <u>Sb</u>	52 <u>Te</u>	53 <u>I</u>	54 <u>Xe</u>
55 <u>Cs</u>	56 <u>Ba</u>	*1	72 <u>Hf</u>	73 <u>Ta</u>	74 <u>W</u>	75 <u>Re</u>	76 <u>Os</u>	77 <u>Ir</u>	78 <u>Pt</u>	79 <u>Au</u>	80 <u>Hg</u>	81 <u>Tl</u>	82 <u>Pb</u>	83 <u>Bi</u>	84 <u>Po</u>	85 <u>At</u>	86 <u>Rn</u>
87 <u>Fr</u>	88 <u>Ra</u>	*2	104 <u>Rf</u>	105 <u>Db</u>	106 <u>Sg</u>	107 <u>Bh</u>	108 <u>Hs</u>	109 <u>Mt</u>	110 <u>Ds</u>	111 <u>Rg</u>	112 <u>Uub</u>	113 <u>Uut</u>	114 <u>Uuq</u>	115 <u>Uup</u>	116 <u>Uuh</u>	117 <u>Uus</u>	118 <u>Uuo</u>

水素の同位体

^1_1H : 普通の水素 (軽水素)

^2_1H : 重水素

^3_1H : 三重水素 (トリチウム)

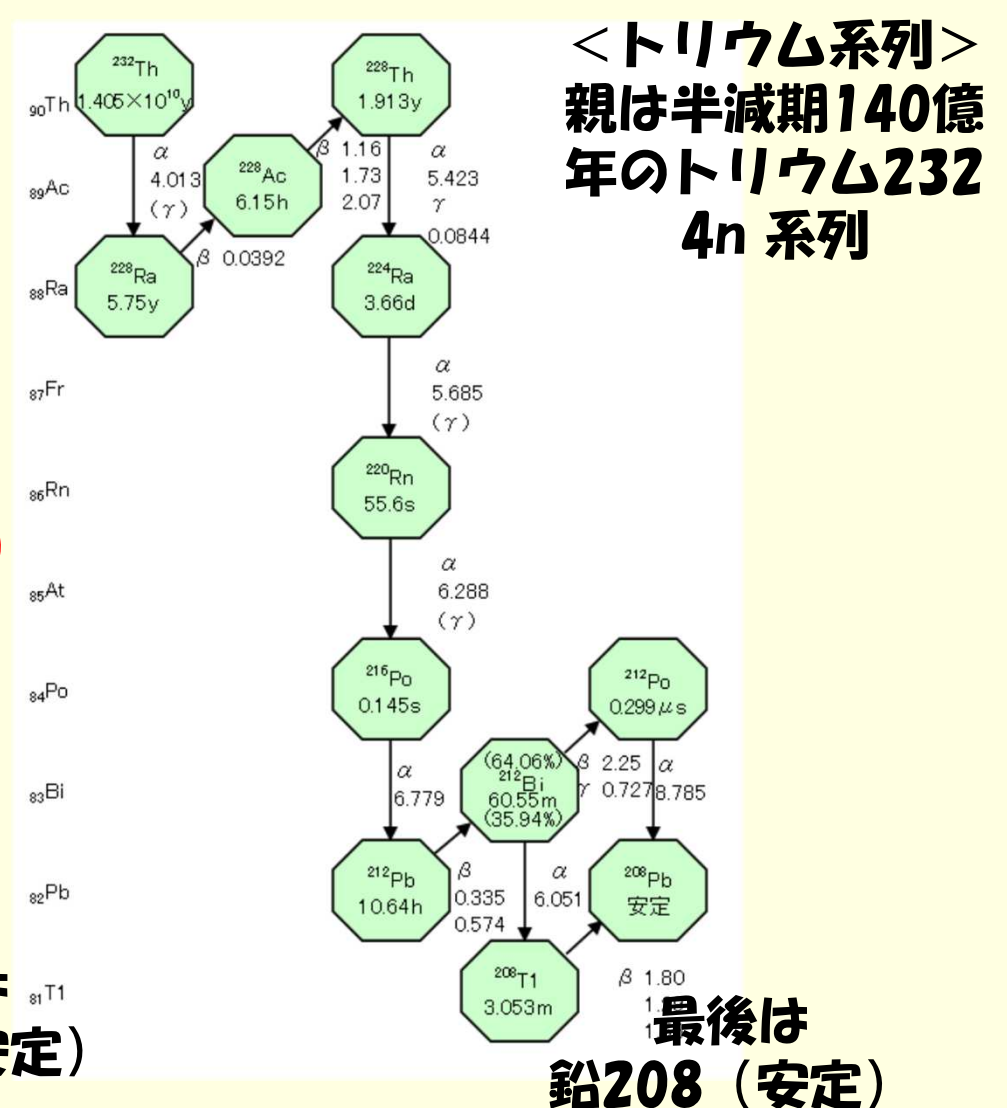
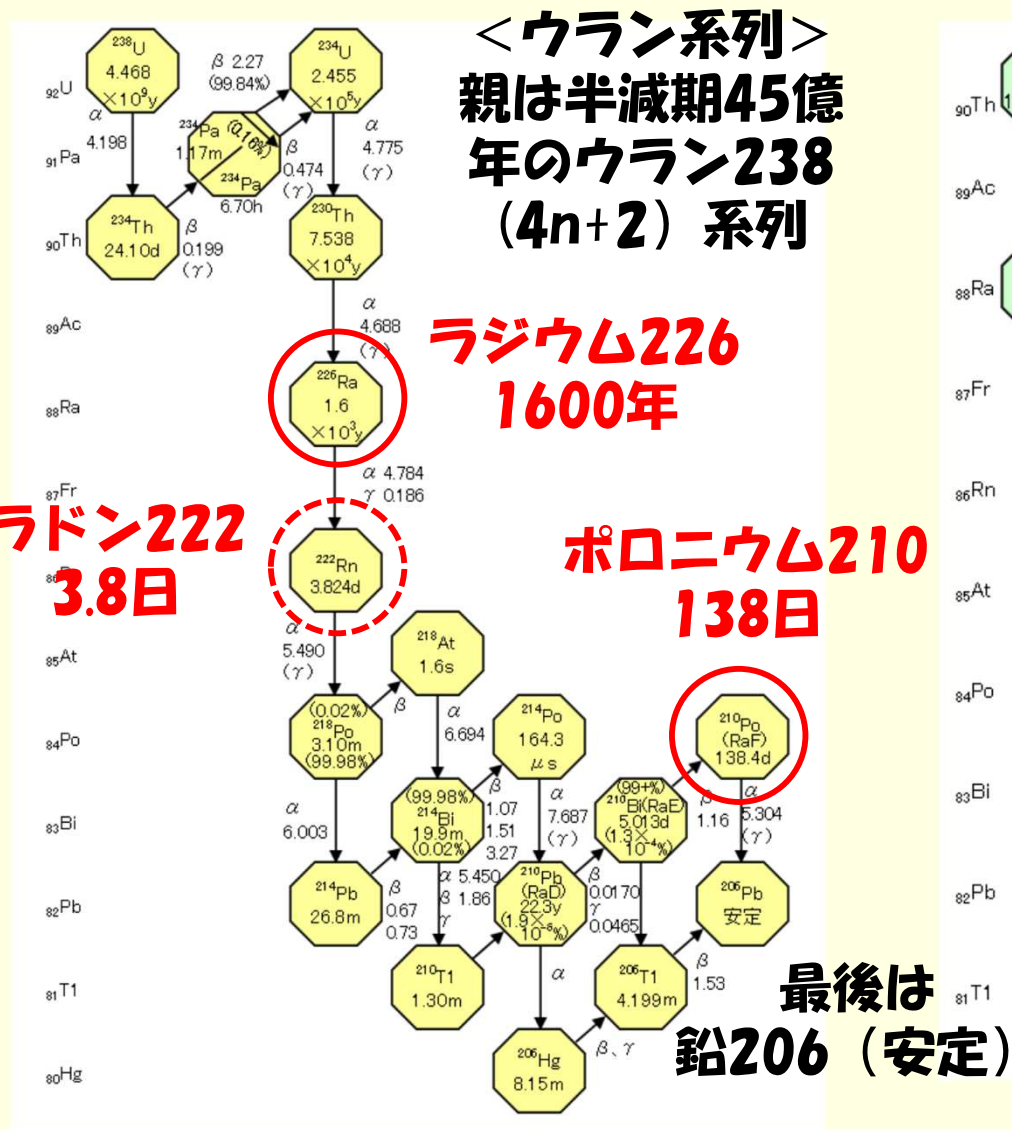
*1 ランタノイド:

57 <u>La</u>	58 <u>Ce</u>	59 <u>Pr</u>	60 <u>Nd</u>	61 <u>Pm</u>	62 <u>Sm</u>	63 <u>Eu</u>	64 <u>Gd</u>	65 <u>Tb</u>	66 <u>Dy</u>	67 <u>Ho</u>	68 <u>Er</u>	69 <u>Tm</u>	70 <u>Yb</u>	71 <u>Lu</u>
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

*2 アクチノイド:

89 <u>Ac</u>	90 <u>Th</u>	91 <u>Pa</u>	92 <u>U</u>	93 <u>Np</u>	94 <u>Pu</u>	95 <u>Am</u>	96 <u>Cm</u>	97 <u>Bk</u>	98 <u>Cf</u>	99 <u>Es</u>	100 <u>Fm</u>	101 <u>Md</u>	102 <u>No</u>	103 <u>Lr</u>
-----------------	-----------------	-----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------

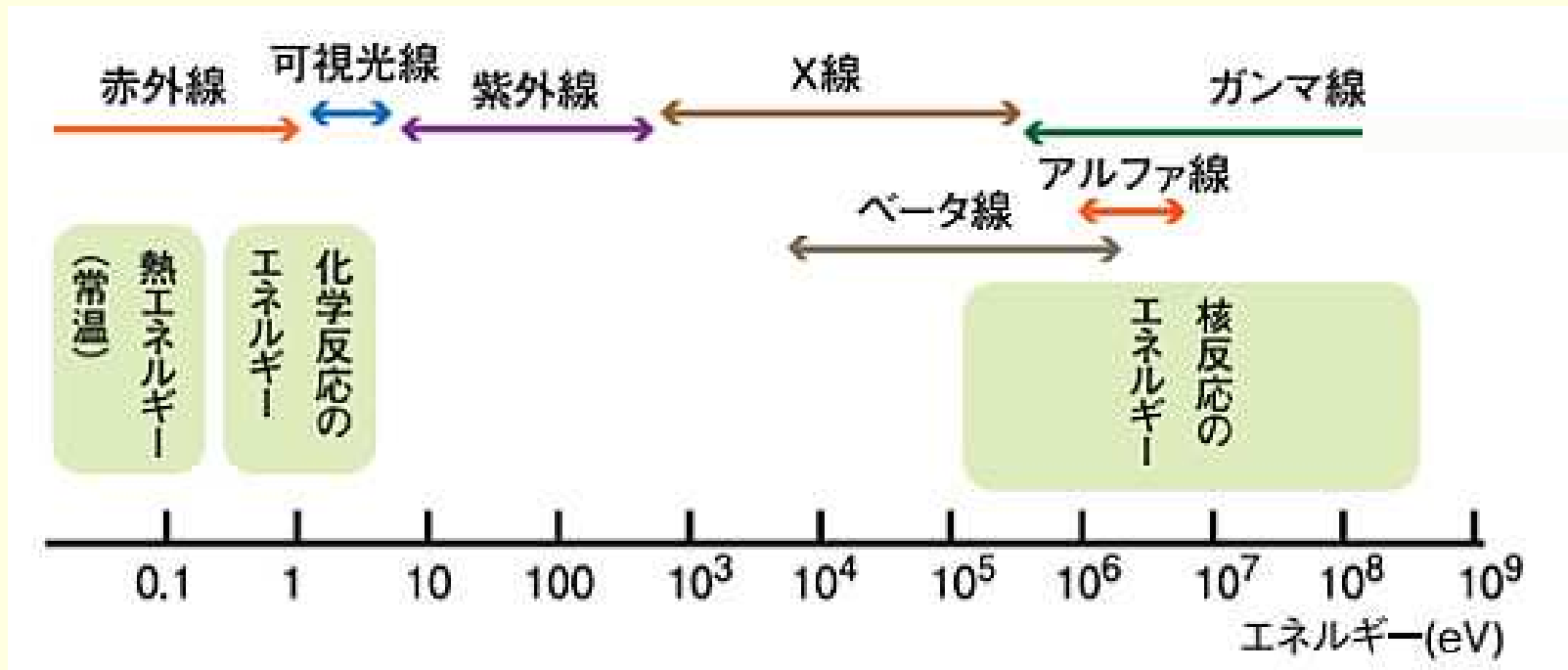
自然界に元々存在している放射能



放射平衡：

親の半減期は、子や孫に比べずっと長いので、地下深くにあるウランやトリウムでは、子や孫の放射能の強さ（ベクレル数）は、親と同じになる。⁷

放射線が持っているエネルギー



eV(電子ボルト): 粒子や電磁波のエネルギーの単位

生物体内で原子・分子が結合しているエネルギーは数eVからせいぜい10eV. 一方、放射線のエネルギーは数万eVから数百万eV.

アルファ線、ベータ線の飛程

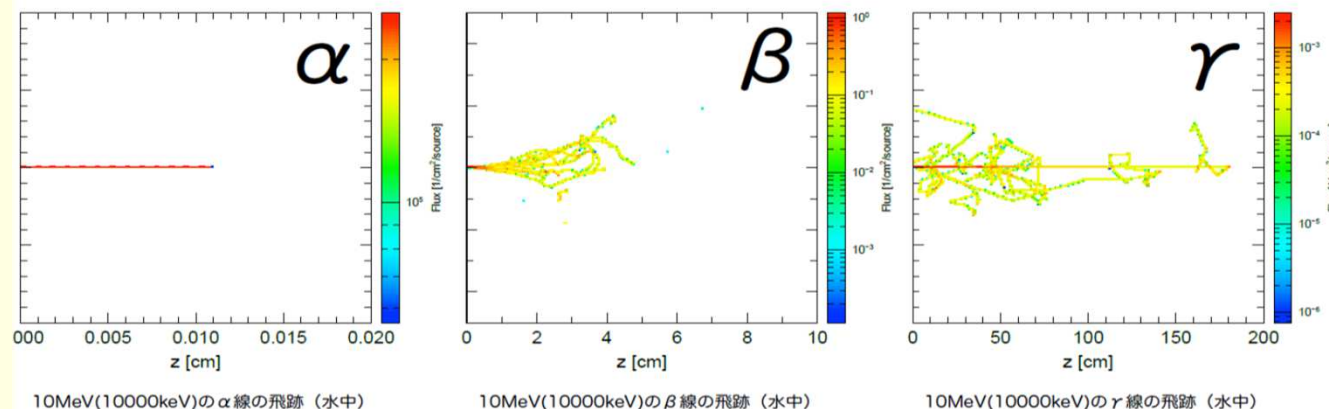
	空気中	水中	アルミ中
1 MeV ベータ線	3 m	4 mm	1.5 mm
5 MeV アルファ線	3.5 cm	30 μm	10 μm

ガンマ線の半減厚

	空気中	水中	鉛中
0.662 MeV ガンマ線	70 m	8 cm	0.6 cm
1.46 MeV ガンマ線	100 m	12 cm	1.2 cm

PHITSによる放射線挙動シミュレーション

1) 粒子による飛跡の違い



今日の話題

- 軽く、前回の復習
- 被曝障害の歴史とICRP勧告の変遷など
- 福島原発事故が起きてからのこと
- 放射性物質の環境基準が必要だ



2019年、パリのキュリー博物館を見物してきました



**実験室は立入禁止
入口で毎時 $0.19\mu\text{Sv}$**

マリーキュリーは66歳で再生不良貧血、娘イリーナは58歳で白血病、娘婿ジョリオも58歳で白血病により死亡

万能と宣伝されたラジウム製品

“STANDARD”
RADIUM
PREPARATIONS



“Standard” Radium Solution for Drinking

Each bottle contains two micrograms radium element in 60 cc. aqua dist.

Maximum-equilibrium constant of radium emanation, 5400 mache units.

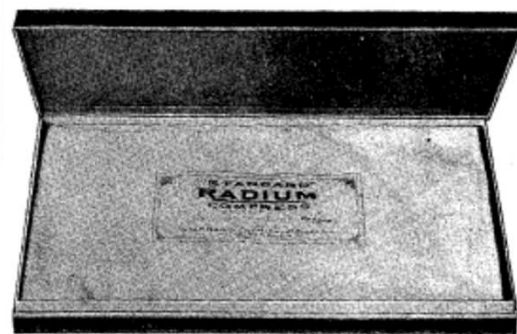
PERMANENT



“Standard” Radium Solution for Intravenous Use.

In Ampulles of 2 cc. N. P. S. S. containing 5, 10, 25, 50, or 100 micrograms radium element.

PERMANENT



PERMANENT RADIO-ACTIVITY

“Standard” Radium Compress

A means of applying radium locally for the relief of pain.

A flexible pad of standardized, guaranteed radium element content.

INDICATIONS

Subacute and Chronic Joint and Muscular Conditions.
High Blood Pressure. Nephritis.
The Simple and Pernicious Anemias.

Rowland 1994

飲むラジウム、注射用ラジウム、貼るラジウムの宣伝 1916年



5 lb. Can Pre-paid \$1.00

RADIUM MAKES THINGS GROW

In July, a little food, a little water, and a little loving care, insure a beautiful lawn and flowers. Top dress your lawn with Radium Plant Food, dig it in around your flowers and shrubbery—they will respond with spring vigor. Plants are living things and need food while growing.



RADIUM



FERTILIZER (Plant Food)

Contains nitrogen, phosphoric acid, potash and radium. One pound will fertilize 50 sq. ft., or a plot 10x5 ft. Sold by dealers, or prepaid East of Mississippi River (West, add 5c lb.) as follows:

12 oz. can, \$.25	2 lb. can, \$.50
5 lb. can, 1.00	10 lb. can, 1.75
	25 lb. can, \$3.75

Our famous booklet, “Radium Makes Things Grow,” free for the asking.

RADIUM FERTILIZER CO.
206 Vanadium Building PITTSBURGH, PA.

Lubenau & Landa 2019

ラジウム肥料の宣伝 1915年

ラジウムダイヤルペインターの骨肉腫

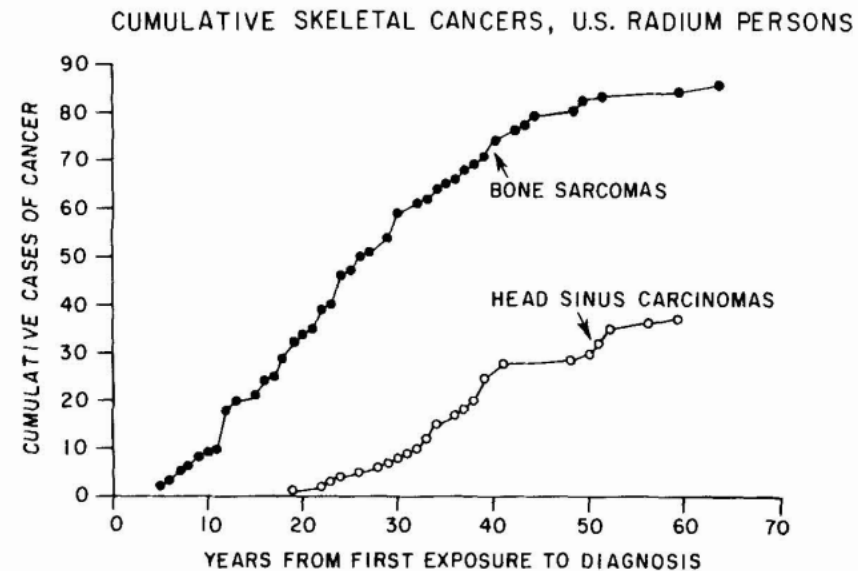
1910年頃から、夜行時計の文字盤にラジウムを塗るため、筆先を舐めながら作業した。



ALPHA-PARTICLE-INDUCED CANCER IN HUMANS*†

Charles W. Mays‡

Radiobiology Division, Building 351, University of Utah, Salt Lake City, UT 84112



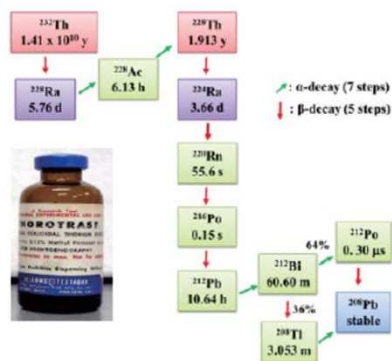
Mays. Health Physics 1988

米国では、約3000人の作業員から約100件以上の骨がんと頭洞部がんが発生

トロトラスト（酸化トリウムX線造影剤） による肝臓ガン

日本では主に戦時中の負傷兵約2万人に使われたと推定

トロトラスト誘発肝腫瘍



	トロトラスト症		非トロトラスト症
	日本	デンマーク	日本
胆管細胞癌	43.5	32.3	9.6 (%)
血管肉腫	35.6	26.0	0.2
肝細胞癌	15.4	35.4	81.5
その他	31.3	6.3	8.6

(Andersson M et al. Rad Res 1994)
(Mori T et al. Ibid 1999)

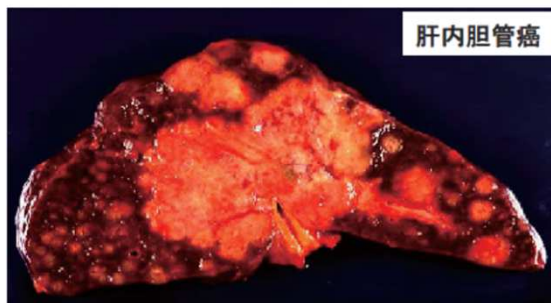


Table 2. Cancers in German Thorotrast patients and controls (Va86).

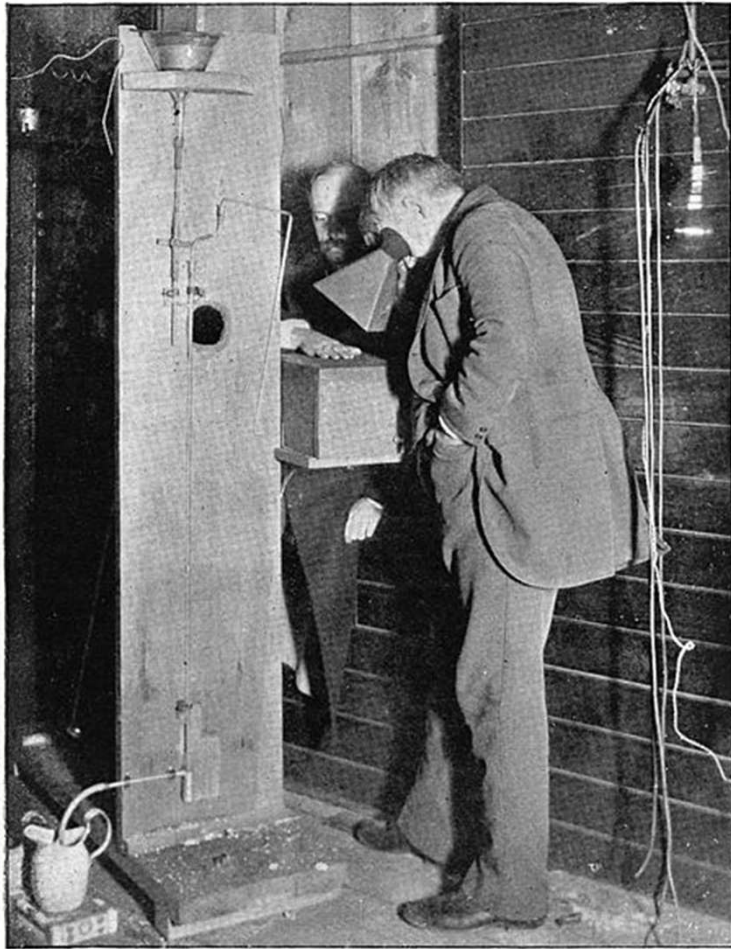
	Thorotrast	Control
Followed patients	2334	1912
Dead	1964	1409
Liver cancer	347	2
Cancer of extrahepatic bile ducts	14	6
Myeloproliferative disease (mostly myeloid leuk.)	35	3
Chronic lymphatic leukemia	3	2
Hodgkin's lymphoma	2	1
Non-Hodgkin's lymphoma	16	7
Multiple myeloma	4	1
Bone sarcoma	4	1
Cancer of the larynx	5	1
Lung cancer	46	40
Pleural mesothelioma	4	0
Pancreatic carcinoma	20	4
Cancer of the G.I. tract	58	70
Kidney cancer	4	2
Prostate cancer	13	9
Malignant brain tumor	14	9

酸化トリウムは主に肝臓に蓄積され、長期にわたるアルファ線被曝をもたらす

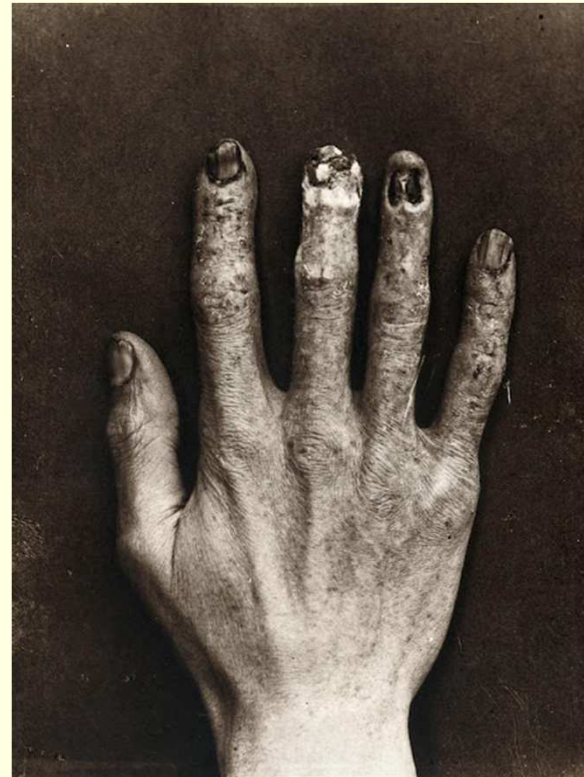
福本学パワポ

Mays. Health Physics 1988

1896年3月 トーマス・エジソンもX線の研究を始めた



助手の手のX線透視を
のぞき込むエジソン



助手の手に潰瘍ができ、さらにガン化し転
移して1904年に死亡した。
米国で最初のX線による犠牲者。

Wiki より

1903年エジソンは『X線のこととは話したくない。X線はこ
わい』と述べたそうだ。

X線利用にともなう医療従事者の皮膚炎・皮膚ガン死



館野之男「放射線と人間」岩波新書(1974)より

第2表 第2版『顕彰書』に採録されている日本の放射線障害物故者

花室憲章(医師)	宮原立太郎(医師)	渡辺安太郎(技師)
林静一郎(技師)	中村慎一(医師)	大山馨(技師)
今城信貫(技師)	白井講一(技師)	今村岩松(技師)
松田政次郎(技師)	浦野多門治(医師)	小林寅市(技師)
永井隆(医師)	林直紀(技師)	永原義雄(医師)
柴田利吉(技師)	伊貝幸次郎(技師)	佐藤元吉(技師)
宮原敏也(医師)	勝野井素一(医師)	鈴木孝喜(医師)
大谷国吉(医師)	宮田太喜男(医師)	吉野源蔵(技師)
肥田七郎(医師)	小沢清躬(医師)	
飲峰竹吉(技師)	末次逸馬(医師)	

第4表 放射線障害物故者数の国際比較

年代	イギリス	ドイツ	アメリカ	フランス	日本	全世界
1900—10	3	2	8	3	—	16
1911—20	5	4	10	8	—	34
1921—30	10	10	5	25	4	84
1931—40	10	18	22	18	7	105
1941—50	8	11	6	4	10	58
1951—60	6	14	4	4	13	55
1961—					9	

日本以外は第2版『顕彰書』から、日本は日本医学放射線学会の調査から。

ドイツ放射線学会「全世界レントゲン学者・放射線学者顕彰書 第2版」1959.
物故者総数360名. うち日本人28名.

世界中のお医者さんが診断と治療に使い始めたX線の濫用で、皮膚潰瘍や皮膚ガンが医者や技師に多発した。

1928年 国際X線ラジウム防護委員会 (IXRP) の勧告

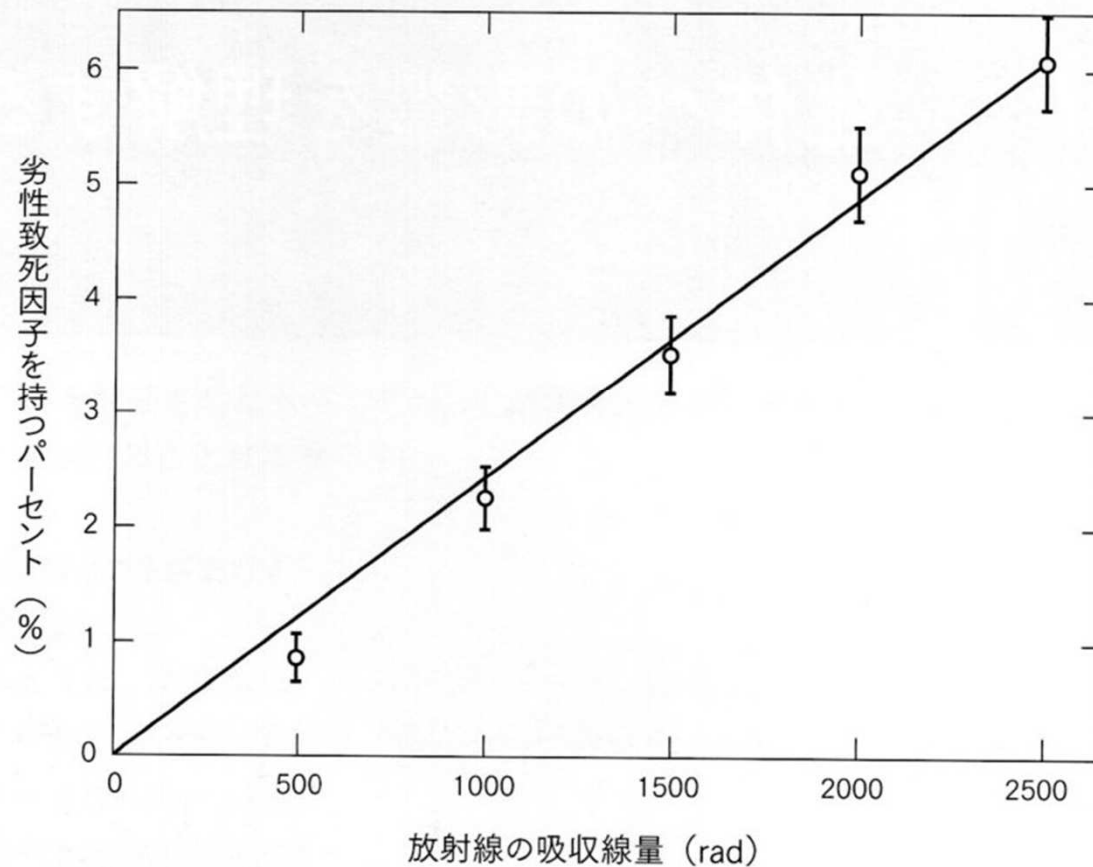
- X線被曝について
 - 1日当り0.2R（約2mSv）の被曝に制限
 - ラジウムについて
 - 取扱うときに指で直接触れない
 - 取扱うとき身体を鉛で遮蔽する
 - 保管は鉛の金庫で行う
- などなど

被曝影響には、それ以下であれば健康障害は起きないという『耐用線量がある』と考えられていた。

<被曝量と比例する放射線影響>

Mullerによるショウジョウバエをつかった 人工突然変異の実験 (1927)

X線照射によるキイロショウジョウバエの劣性致死突然変異の誘発



Mullerは人為的にはじめて突然変異を発生させることに成功し、ノーベル賞を受賞。

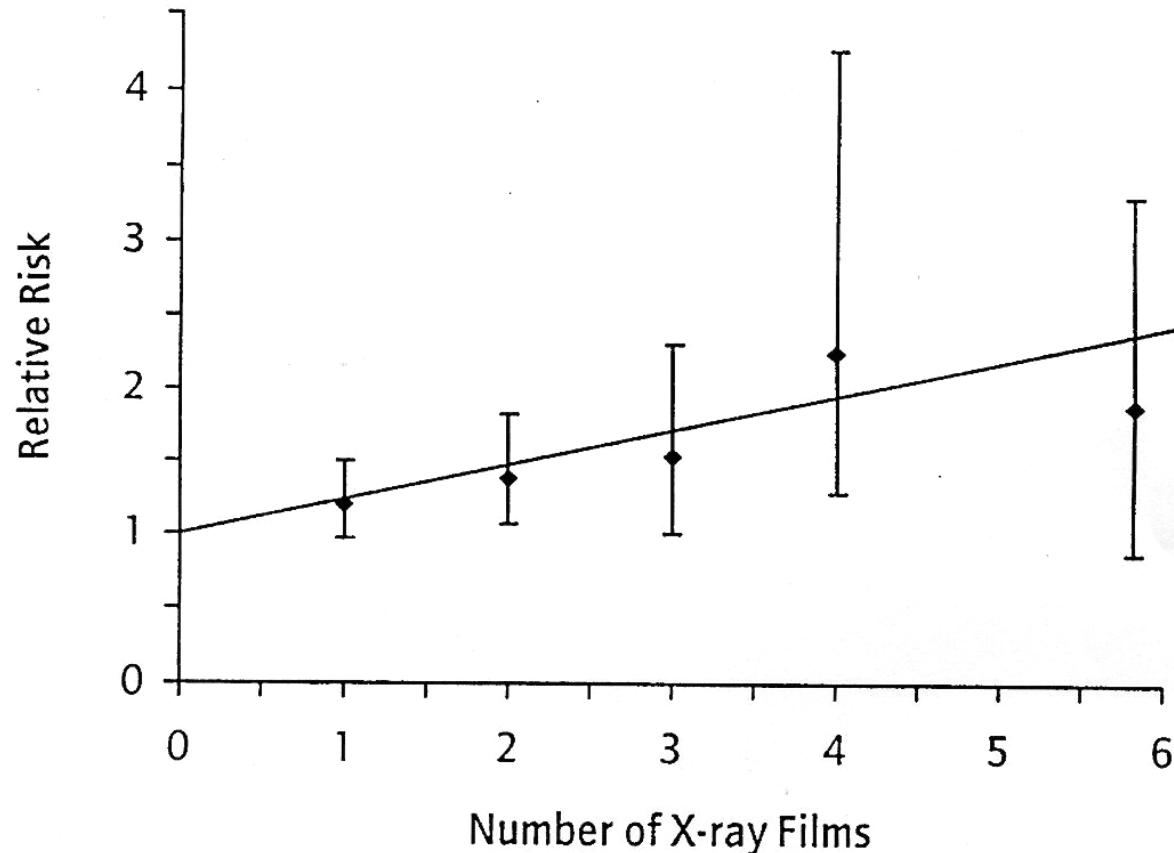
田中司朗ほか「放射線必須データ32:被ばく影響の根拠」創元社2016より

オックスフォード小児ガン研究

妊娠中に受けたX線検査の数と危険度の関係: 1953-1972

R Doll, British J Radiology (1997)

X線検査1回(約5ミリグレイ)当り20%のリスク増加



1956年、英国のAlice Stewartは、妊娠中にX線診断を受けた母親の子供に小児ガンが多いことを報告した。この結果は後の研究でも確認された。

放射線障害

■ 急性放射線障害(確定的影響)

- 大量の被曝により多くの細胞が死亡し臓器機能がやられる



広島 爆心から1kmの兵隊さん

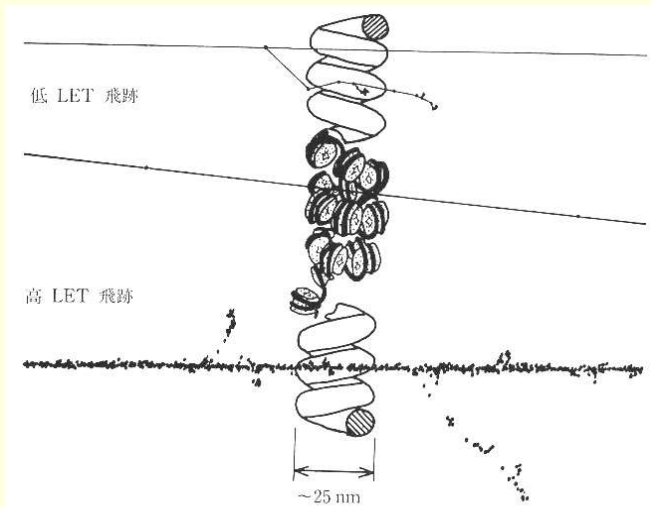
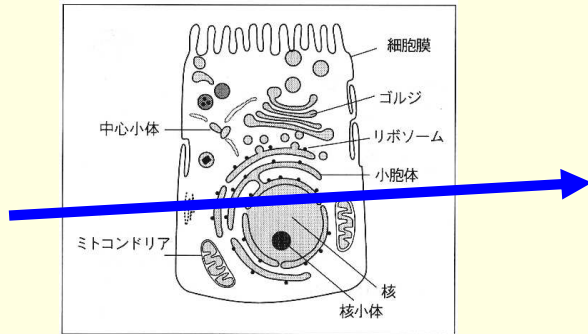


チェルノブイリ原発の
職員と消防士

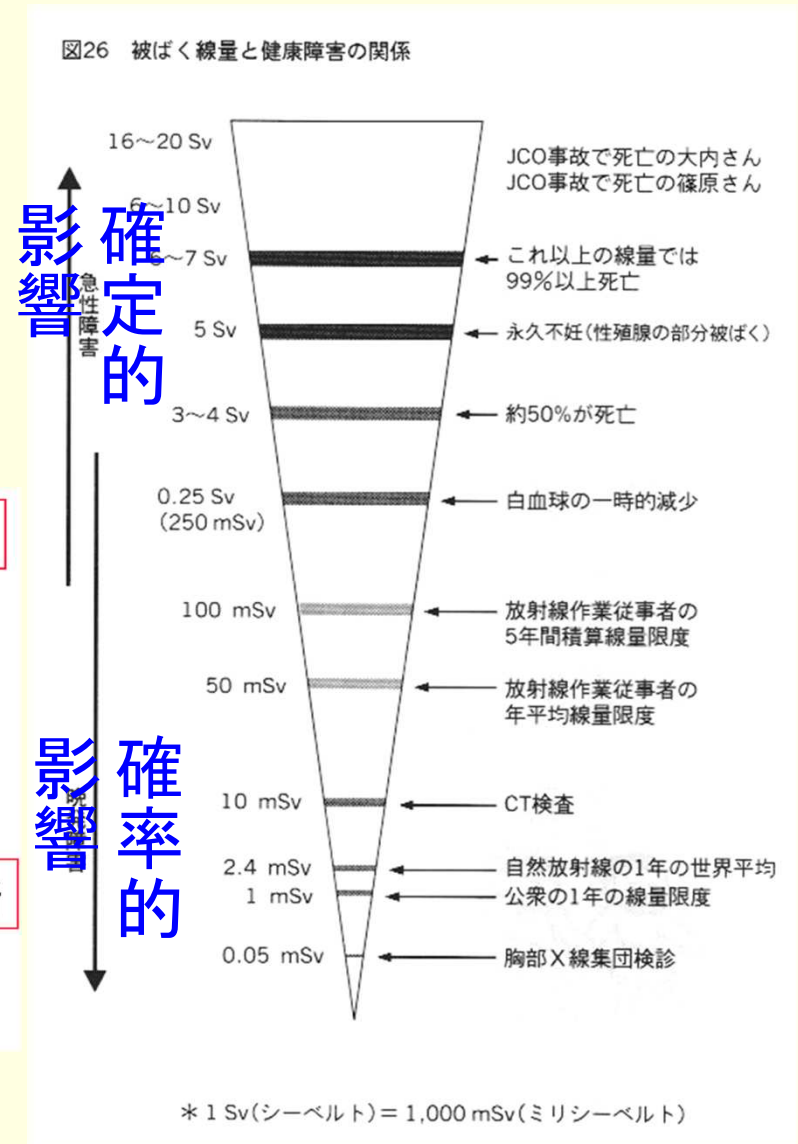
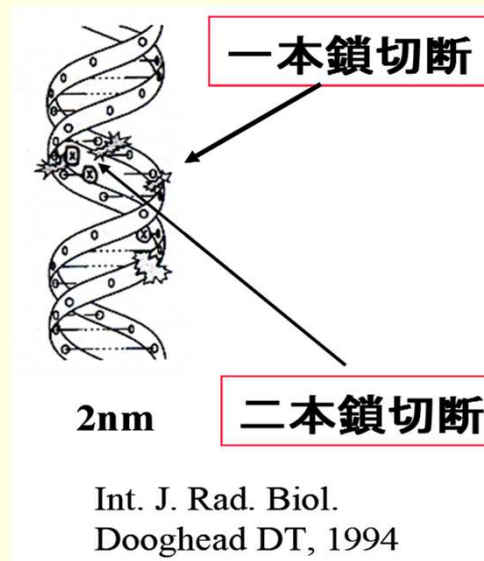
■ 晩発性放射線障害(確率的影響)

- 細胞の突然変異により、後になってガン・白血病や遺伝的障害として現われる

放射線に被曝すると！



図B-1 クロマチン（DNA と蛋白質の混合物）の断面を通過する高 LET 飛跡と低 LET 飛跡のダイヤグラム



一度にたくさん浴びると“急性障害”（確定的影響）が起き、被曝が少なくてもガン・白血病といった“晩発障害”（確率的影響）の恐れがある。

放射線作用の時間

直接作用と間接作用

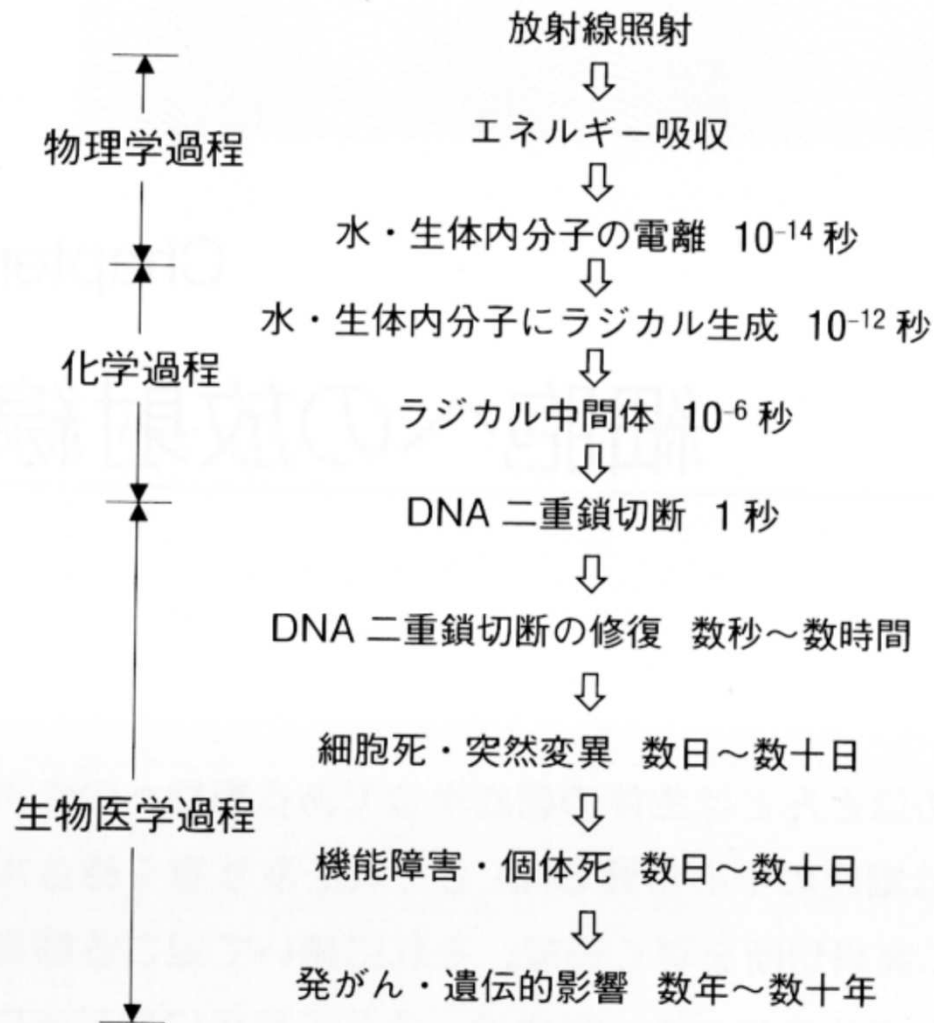
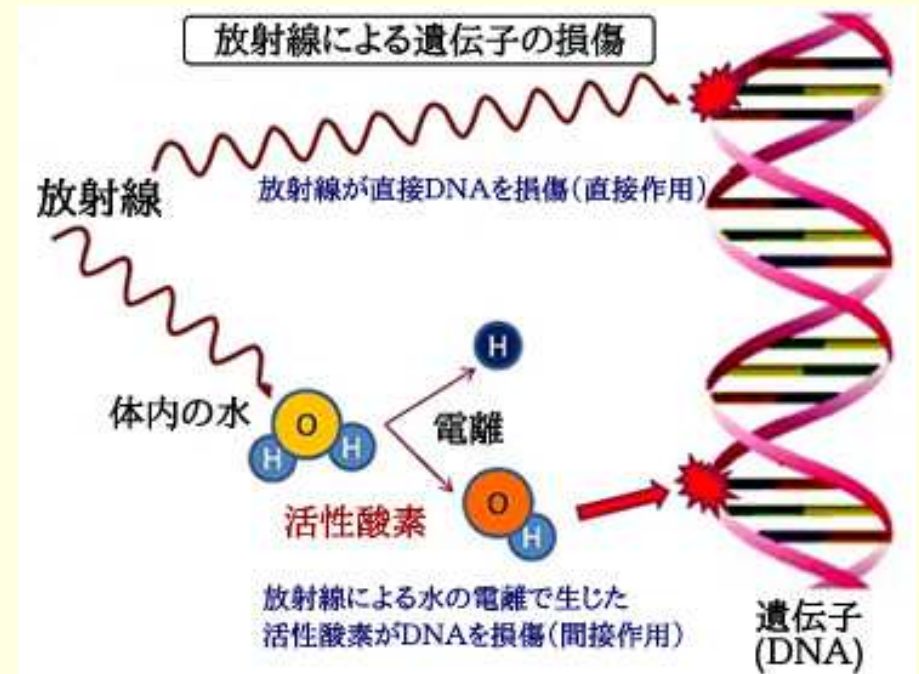


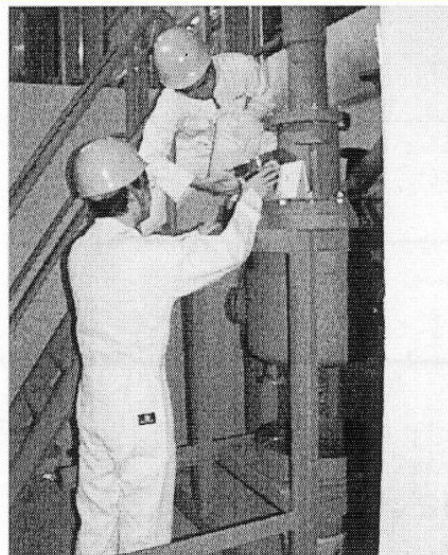
図 3.1 放射線作用の時間経過



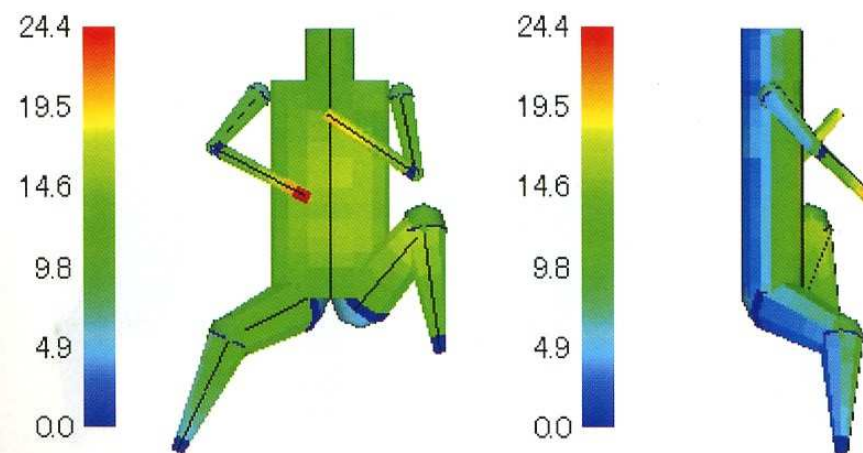
<http://www.imr-oarai.jp/teaching/health.html>

<急性放射線障害>

1999年9月30日東海村JCO臨界事故



中性子 + γ 線



臨界事故を起こした沈澱槽で作業していた2人のうち、立っていたAさんが12月末に、槽の上にまたがっていたBさん(上図)は翌年4月末に死亡した。

被曝量の推定は、Aさんが18~20グレイ相当、Bさんが8~10グレイ相当。

<急性放射線障害>

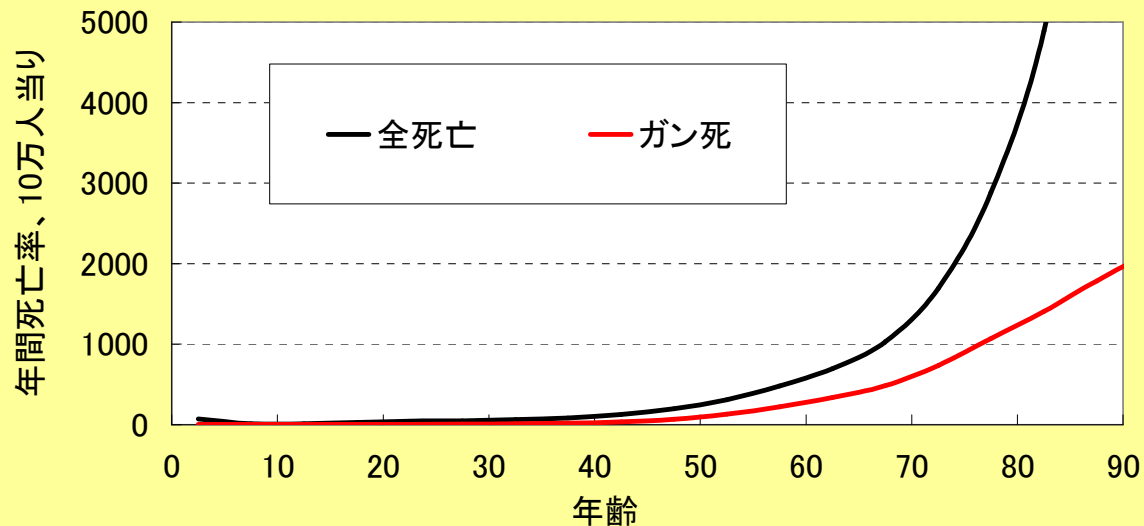
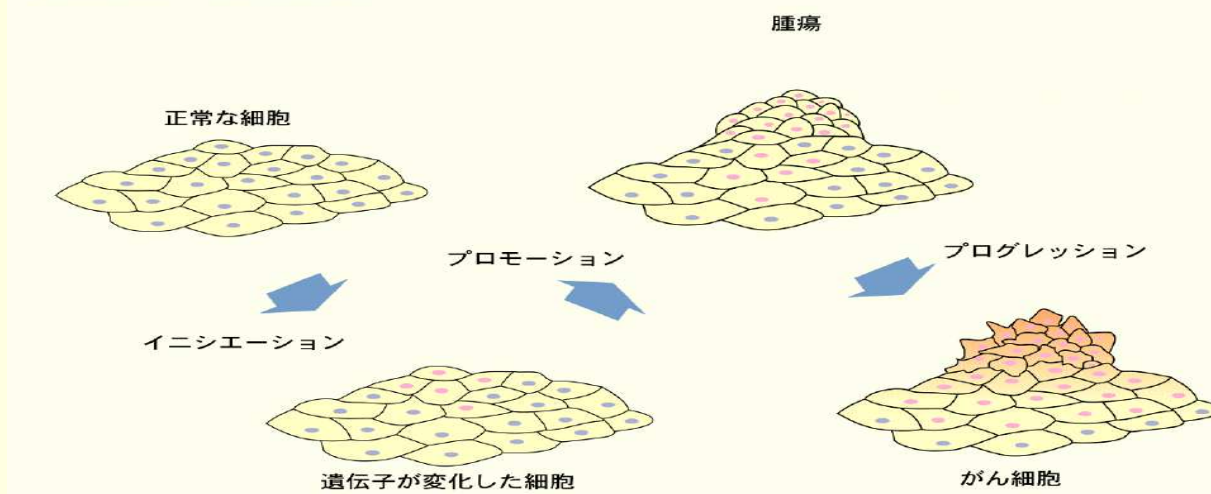
2006年11月 元KGB将校リトビネンコ暗殺事件



2006年11月1日、英国亡命中の元KGB将校が、放射性物質（ポロニウム210、20億Bq：致死量の約20倍）入りの紅茶を飲まされ、多臓器不全で11月23日に死亡。

ガンができる仕組み

多段階のがん発生過程



- ・長い間にいろいろな傷が重なって、ガンになる。
- ・修復が完全だったらガンにはならないだろう。

<被曝量と比例する放射線影響>

ムラサキツユクサ雄しべの毛色の突然変異

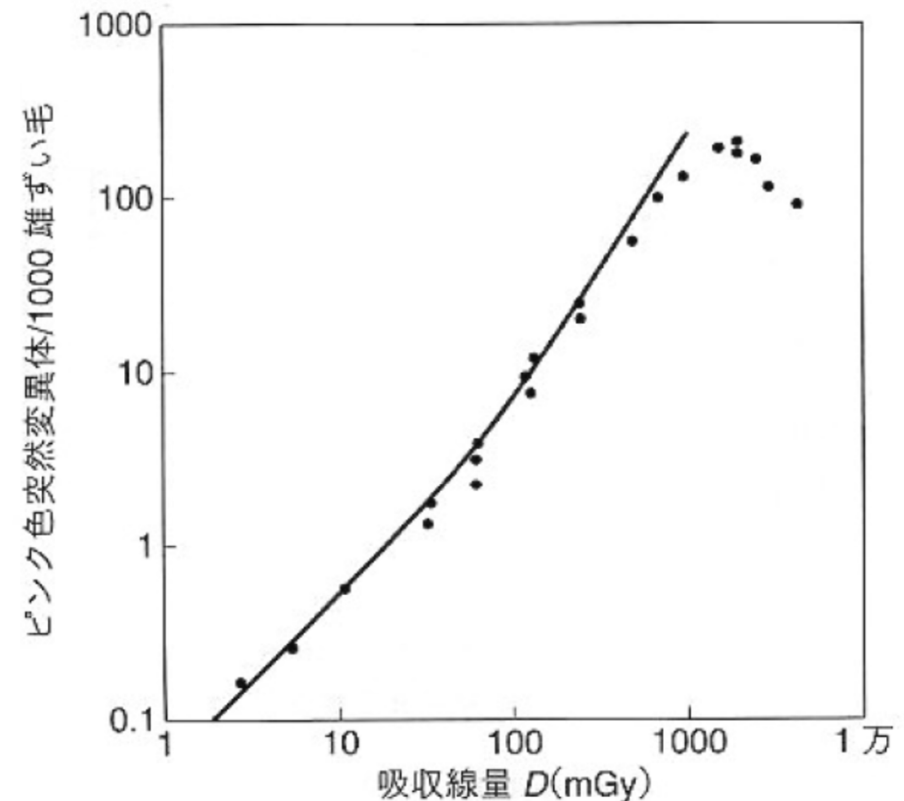


図1—ムラサキツユクサの雄しべの毛の変化を指標とした、250 キロボルト X 線による被曝量と突然変異率との関係(文献 11 より作成)

Sparrowら 1972

2.5mGyのX線被曝で、雄しべの毛の色の突然変異が増加を示した。

<被曝量と比例する放射線影響>

染色体の2重鎖切断 (DSB) は照射線量に比例する

Evidence for a lack of DNA double-strand break repair in human cells exposed to very low x-ray doses

Kai Rothkamm and Markus Löbrich*

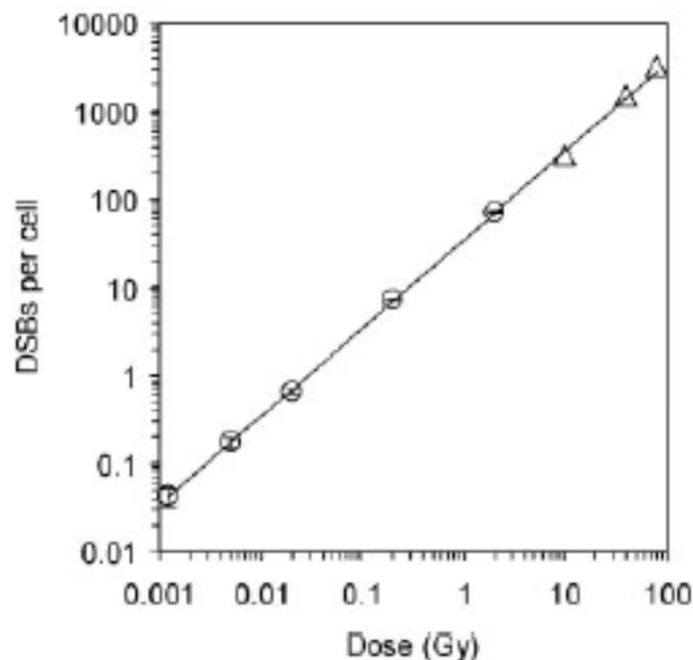
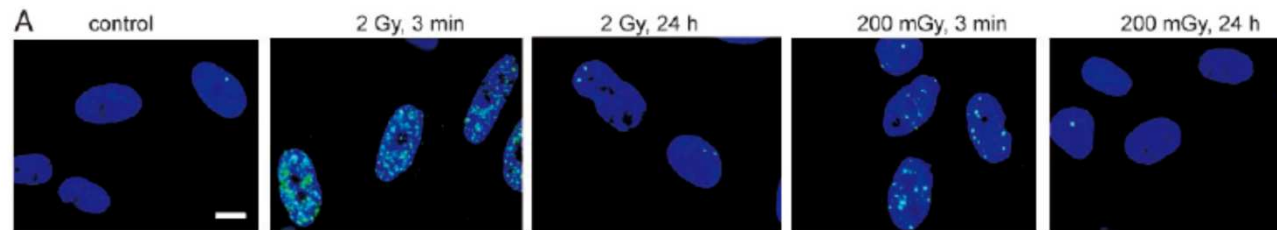


Fig. 2. DSB induction in MRC-5 cells. γ -H2AX foci were counted 3 min after irradiation, and the mean values of foci per cell are shown (circles). Triangles represent DSB induction data obtained from PFGE analysis. The line is a linear fit to the data points with a slope of 35 DSBs per cell per Gy.

Rothkammら
PNAS 2003

1細胞当りDSB数：
1 Gyで40個
1 mGyで0.04個

ICRP（国際放射線防護委員会）の変遷(1)

■ 1950年 ICRP結成

- 1950年勧告 ALAP：「被曝は可能な限り少なく」
- 1958年勧告 放射線作業者 年50mSv、公衆はその1/10の年5mSv
- 1965年勧告 ALARA 「被曝は合理的に達成可能な限り少なく」

■ ICRPの基本的スタンス

- 確定的影響（急性障害）をもたらしさない
- 確率的影響（晩発性影響）は、容認できる範囲に押さえる

ICRPによる公衆線量限度の変遷（2）

1977年勧告

■ 公衆の線量限度：年間5ミリシーベルト

- 『一般公衆の構成員に関する確率的現象についてのリスクの容認できるレベルは．．．公共輸送機関の利用に伴うリスクである．．．この根拠から、**年当り $10^{-6} \sim 10^{-5}$ の範囲のリスクは、公衆の個々の構成員のだれにとっても多分容認できるだろう**』

- ★ 当時のガン死リスク係数：1ミリシーベルト当り 10^{-5} 。
年間5ミリだと、ガン死リスクは年間 5×10^{-5} 。
- ★ 年間5ミリシーベルトを基準にすると、“平均は0.5ミリシーベルト程度”になるので、リスクは 10^{-5} 以下になる、と弁明。

1977年当時の放射線発がん疫学データ

表-1 UNSCEAR 1977 年報告で検討されている主な疫学データ

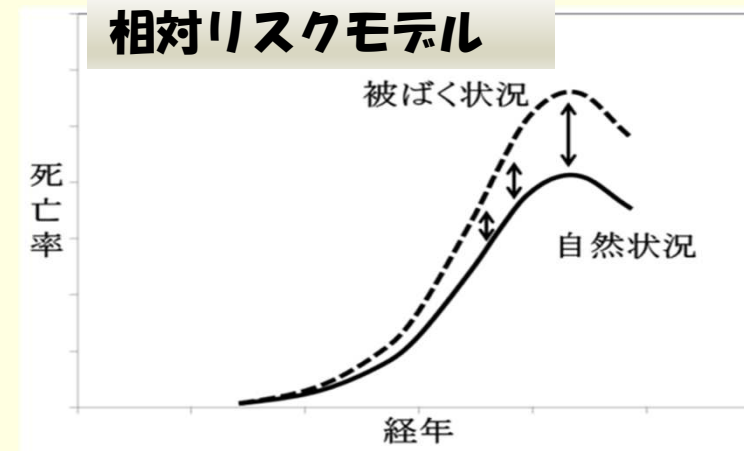
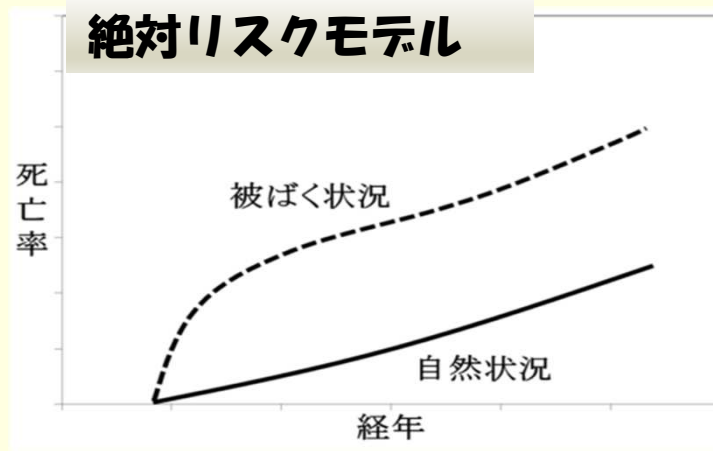
(データの種類)	(調査集団規模)	(被曝線量)	(追跡期間)	(検討対象ガン)
(原爆放射線被曝データ)				
広島・長崎被爆生存者	約 11 万	0～600 ラド以上	1950-74	すべてのガン
核実験被爆マーシャル諸島住民	271		1954-70	甲状腺, 白血病
(医療被曝データ)				
治療用 X 線被曝患者:				
強直性脊椎炎	イギリス 1.4 万	骨髓平均 350 ラド	平均 11 年	白血病, 全/白比
乳児胸腺肥大	アメリカ 2872	甲状腺 100-300 ラド	平均 24 年	甲状腺, 唾液腺
小児頭部白癬	イスラエル～1 万	甲状腺平均 6.5 ラド	13-24 年	甲状腺, 唾液腺, 骨他
〃	アメリカ 2215		平均 20.5 年	
産後乳腺炎	アメリカ 571	乳腺平均 247 ラド	平均 25.2 年	乳腺
各種乳腺良性疾患	スウェーデン 1115	〃 845 ラド	平均 31.5 年	乳腺
子宮出血症	イギリス 2068	骨髓平均 134 ラド	平均 19 年	白血病, 子宮, 全/白比
閉経誘発	277		平均 16.1 年	白血病
診断用 X 線被曝患者:				
胸部 X 線透視結核患者	カナダ 326		22-32 年	乳腺
	アメリカ 1047	乳腺約 150 ラド	平均 26.8 年	乳腺
妊娠 X 線検査の胎児	イギリス, アメリカ			小児白血病, ガン
放射性医薬品体内被曝:				
トロトラスト患者	5 ケ国 4594	骨髓(α 線)	平均 27 年	白血病, 肝臓
結核又は強直性脊椎炎	ドイツ数千	骨(α 線)	平均 23 年	骨
(職業被曝データ)				
鉱山労働者: ウラン鉱山	アメリカ, チェコ, カナダ			肺
その他の鉱山	スウェーデン, イギリス, カナダ			肺
放射線科医の白血病, ガン死:	アメリカ		1935-58	全/白比

1 mSv 当りのガン死リスクは 1×10^{-5}

今中、公害研究 1986

被ばく影響モデルに関する当時の議論

● がん発生数の予測モデル：絶対リスクモデルか、相対リスクモデル



● 疫学データの低線量への外挿：直線しきい値なし(LNT)かしきい値有か



ICRPによる公衆線量限度の変遷（3）

1985年パリ声明

- **公衆の線量限度：年間1ミリシーベルト**
 - 『**委員会は原則として年間1ミリシーベルトを勧告する。**しかしながら、生涯にわたる平均年間被曝量が1ミリシーベルトを越えないという制限の下で、数年間にわたる年5ミリシーベルトも数年間であれば許容される』
 - ★ **広島・長崎の被曝生存者追跡データは、ガン死リスク係数が以前に考えられていたより、ずっと大きいことを明らかにしはじめた。公衆の被曝リスクを一定に保つには、線量限度を引き下げざるを得なくなった。**

ICRPによる公衆線量限度の変遷（４）

1990年勧告

■ 公衆の線量限度：年間1ミリシーベルト

- 『公衆の構成員に対する適切な線量限度を選定することは（職業被曝の場合より）さらに難しい。
．．． 1ミリシーベルトの年線量による寄与生涯致死確率は 4×10^{-3} となる．．． **読者はリスク情報のみによって早まった結論を導かないよう注意されたい。**』

★1990年勧告のガン死リスク係数は、1ミリシーベルト当り 5×10^{-5} である。年1ミリシーベルトという線量限度は“公衆が容認できる年 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ ”というリスクを越えている。

ICRPによる公衆線量限度の変遷（５）

2007年勧告

■ 公衆の線量限度：年間１ミリシーベルト

- 『約100ミリシーベルトを下回る低線量域では、がん又は遺伝性の影響の発生率が、**等価線量の増加に比例して増加するであろうと仮定するのが科学的にもっともらしい**という見解を支持する。しかし．．．低線量における健康影響が不確実であることから、非常に長期間にわたり多数の人にとが受けたごく小さい線量に関係するかも知れないがん又は遺伝性疾患について**仮想的な症例数を計算することは適切でない**。』

★年１ミリシーベルトという被曝にともなうリスクの評価を放棄。（というか逃げた。）

米国科学アカデミー BEIR-VII報告 (2005)

☆発ガンに関する線量・効果関係は、「しきい値なし直線」である

☆1ミリシーベルトの被曝により後に発ガンする確率は(人間集団の平均で)1万分の1である

(第3種郵便物認可)



毎日新聞

放射線被ばく

低線量でも発がん

米調査 CT1回、1000人に1人

【ワシントン共同】放射線被ばくは低線量でも発がんリスクがあり、職業上の被ばく線量限度である5年間で100ミリシー

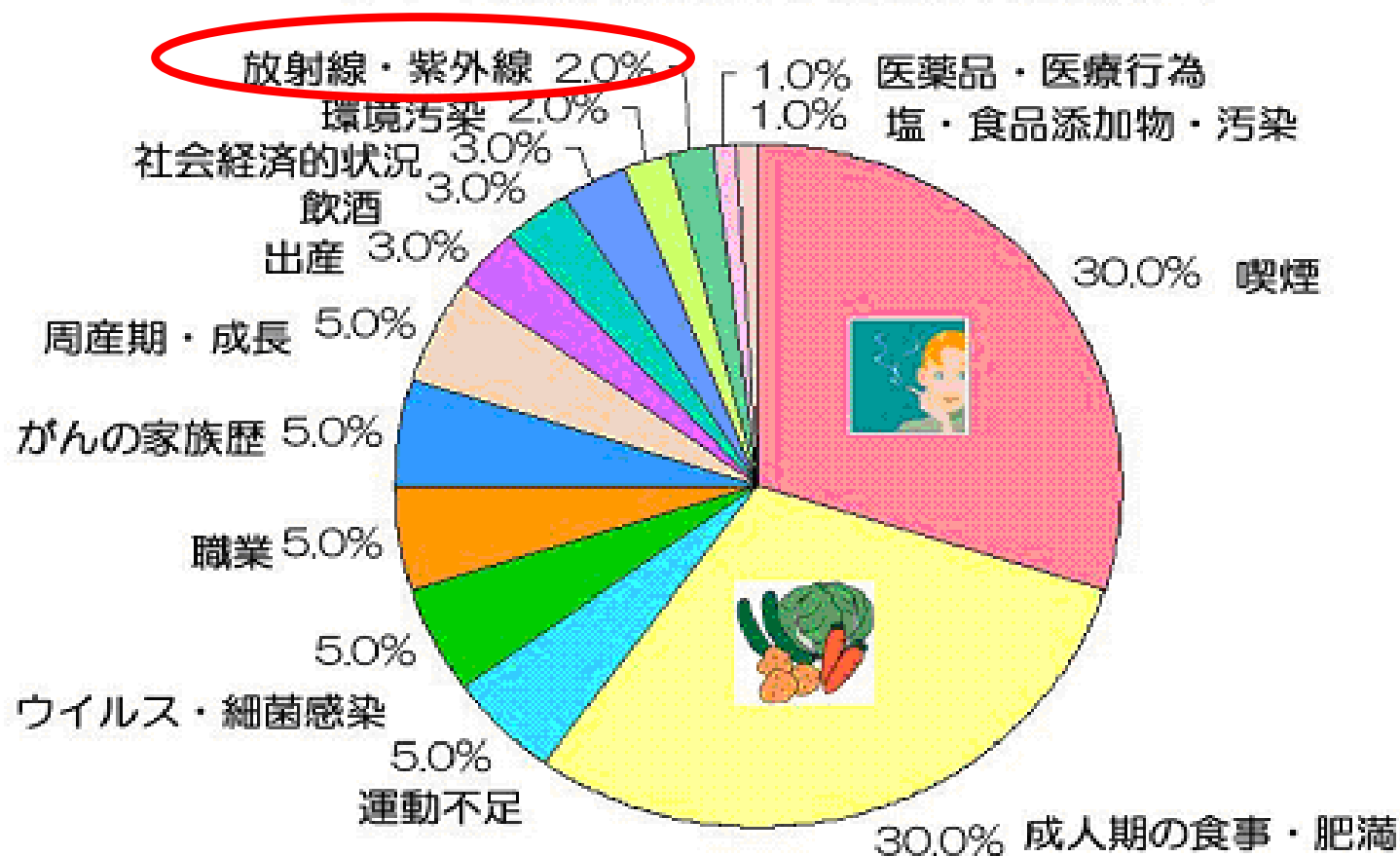
の被ばくでも約1%の人が放射線に起因するがんになるとの報告書を、米科学アカデミーが世界の最新データを基に30日ま

でにまとめた。報告書は「被ばくには、これ以下なら安全」と言える量はないと指摘。国際がん研究機関などが日本を含む

15カ国の原発作業員を対象にした調査でも、線量限度以内の低線量被ばくで、がん死の危険が高まることが判明した。

自然放射線もがんの原因

アメリカ人についてのがんの原因



Harvard Center for Cancer Prevention: Harvard Report on Cancer Prevention, Volume 1: Causes of Human Cancer, Cancer Causes Control 7:S3-S59, 1996.

放射線影響協会HPより

2020年の日本のガン死38万件のうち、その2%の原因が放射線とすると、 $38万 \times 2\% = 7600$ 件となる。この数は、無視は出来るものではないが、自然放射線ばっかいは、神経質になっても仕方がないだろう、と今中は思っている。

今日の話題

- 軽く、前回の復習
- 被曝障害の歴史とICRP勧告の変遷など
- 福島原発事故が起きてからのこと
- 放射性物質の環境基準が必要だ

福島原発事故が起きて驚いたこと！

多くの専門家が『100mSv以下は影響ない』といった発言をし始めた....

彼らの根拠は広島・長崎データのようなだった....

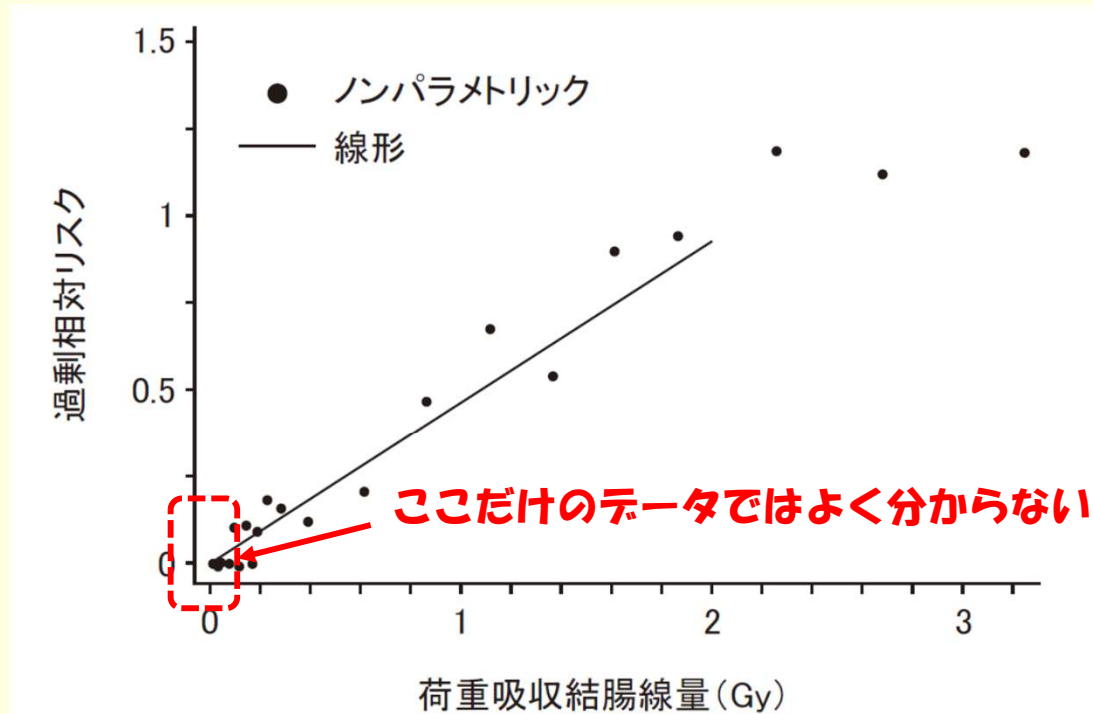
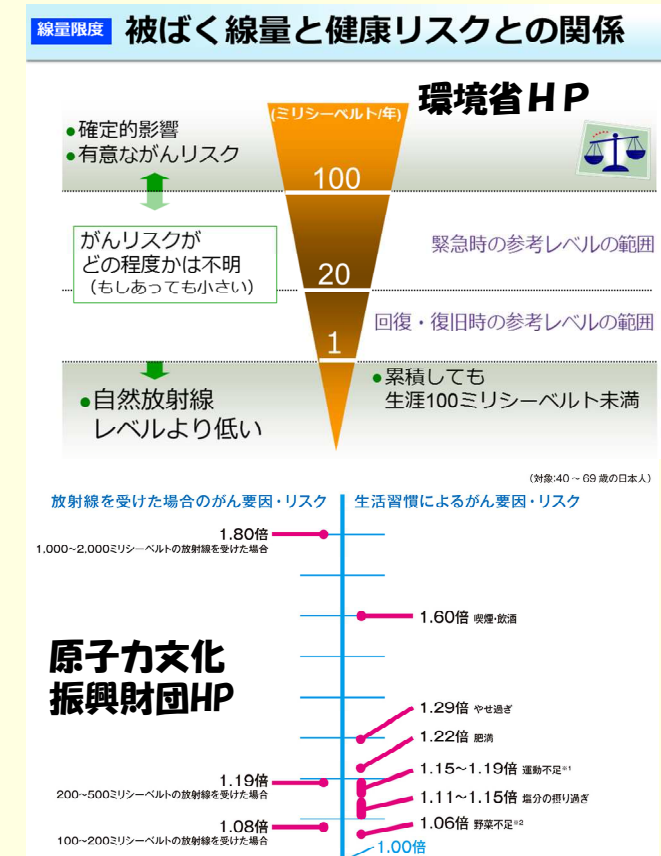


図 9. LSS 集団における固形がん罹患過剰相対リスクの線量反応関係²²より改変 放射線影響研究所要覧 2014



『がんリスクがあったとしても小さい』（100mSvは野菜不足程度）と言い出した

広島・長崎被爆者追跡調査データ全体は、被曝量の増加に直線的に比例してガン死が増加することを強く示している。

ABCC（原爆障害調査委員会）の設立からLSS（寿命調査）の開始

- 1945 米軍合同調査団
- 1946 軍からトルーマン大統領へ、研究機関設立の要請
- 1946.11 ABCC設置のトルーマン大統領命令
- 1947 ABCC広島・長崎での活動開始
< 1950.10.1 国勢調査での被爆に関する付帯調査 >
- 1955 固定集団追跡調査LSSの開始
- 1956 ICHIBAN Dosimetry Projectの開始
 - T65D（1965 Tentative Dose）
 - DS86（Dosimetry System 1986）
 - DS02（Dosimetry System 2002）

1975年、ABCCは日米共同の財団法人『放射線影響研究所』に改組。

ABCC・放影研の疫学調査

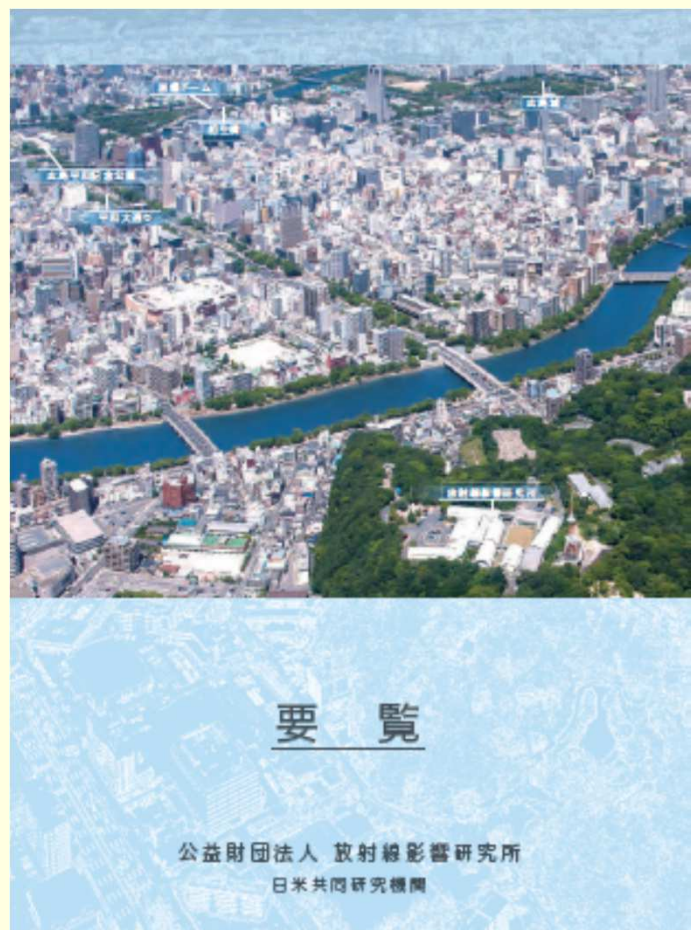


表 1. 主要調査プログラムと調査人数

寿命調査	120,321
└ 成人健康調査（被爆者）	25,379
胎内被爆者調査	3,638
└ 成人健康調査（胎内被爆者）	1,021
被爆者の子どもの調査	
死亡とがんの発生調査	76,814
└ 被爆二世臨床調査	12,451
細胞遺伝学調査	約 16,000
遺伝生化学調査	約 24,000
分子遺伝学調査	約 1,500

<晩発性障害疫学データ>

広島・長崎被爆生存者の寿命調査 LSS (Life Span Study) 1950.10.1~

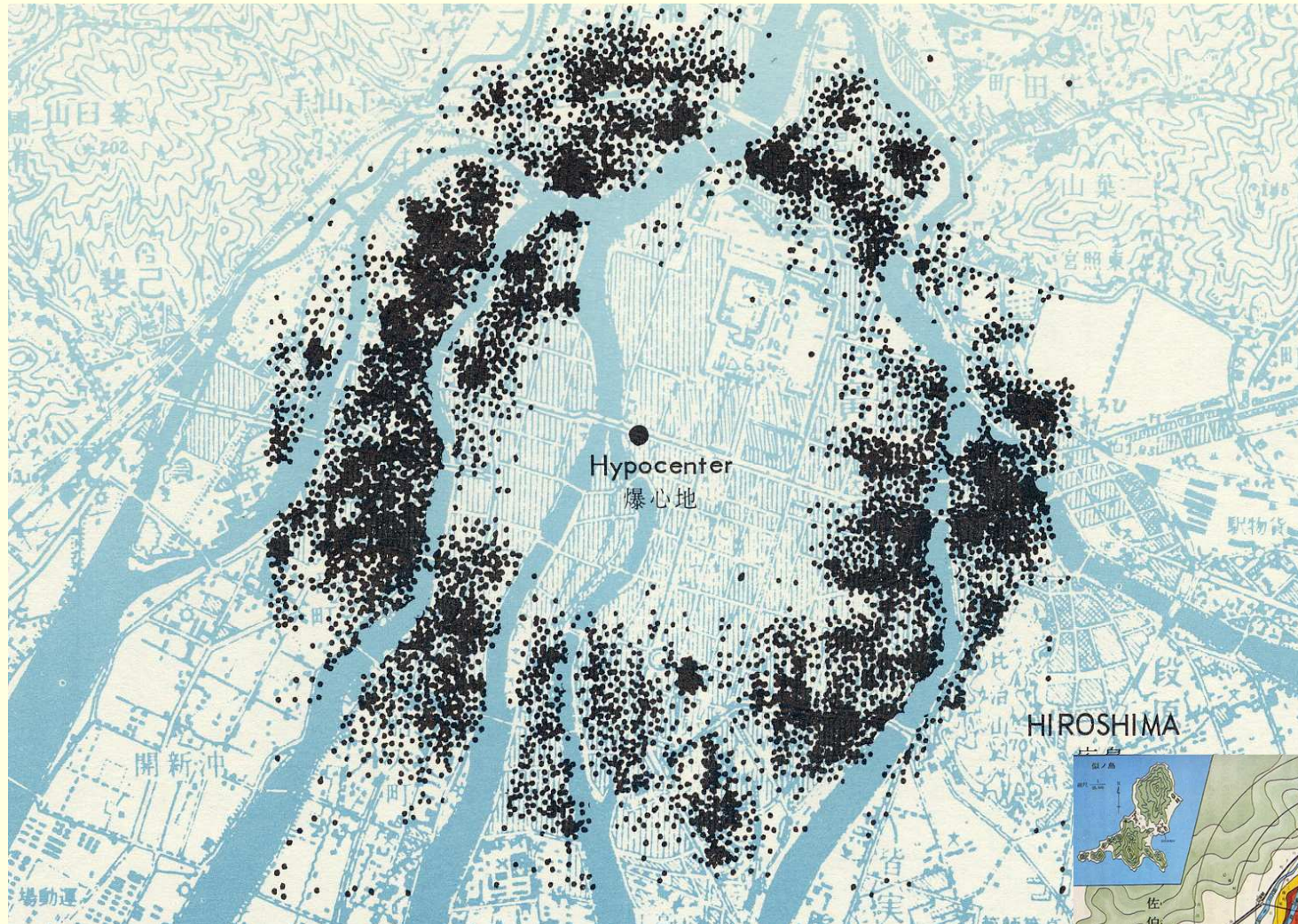
	Number of survivors (1950 Census)	Life Span Study Cohort (1950)		
		Exposed	Not-exposed	Total
Hiroshima	159,000	62,000	20,000	82,000
Nagasaki	125,000	32,000	6,000	38,000
Total	284,000	94,000	26,000	120,000

**1950年国勢調査の附帯調査を基に、ABCC
は12万人の固定追跡集団を設定。
戸籍を基に定期的に生死をチェック。死亡
の場合は、死亡診断書で死因を確認。
一方、各被曝生存者の被曝量を推定。**

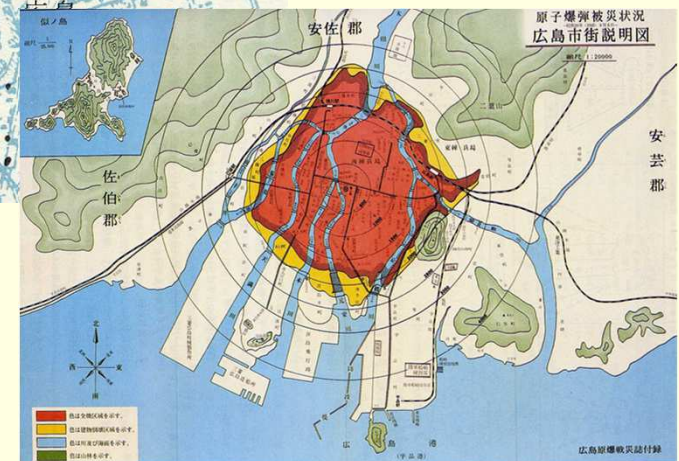


RERF in Hiroshima

LSS対象者の被爆時の位置



ABCC TR 7-67(1967)



DS86 / DS02の原爆放射線量計算スキーム

Prompt source term

Leakage from the casing

Delayed source term

Emission from rising fire ball

Transport in Air-over-Ground

2 dimensional discrete ordinates

Transport in Air-over-Ground

2 dimensional discrete ordinates

Radiation fluence
above the ground

Coupling

Fluence inside
houses

Coupling

Organ dose

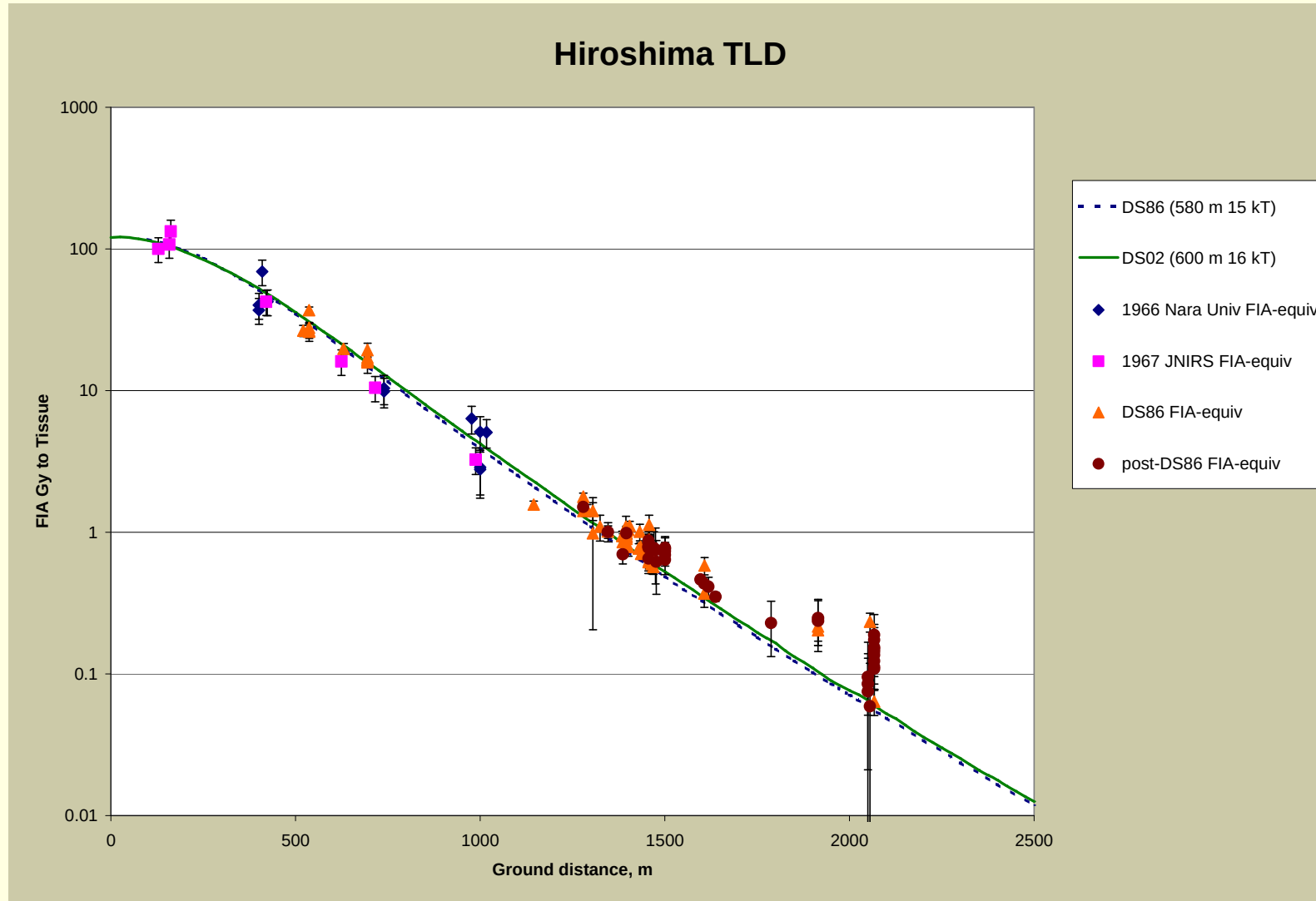
Shielding calculation in local structures

3 dimensional adjoint Monte Carlo

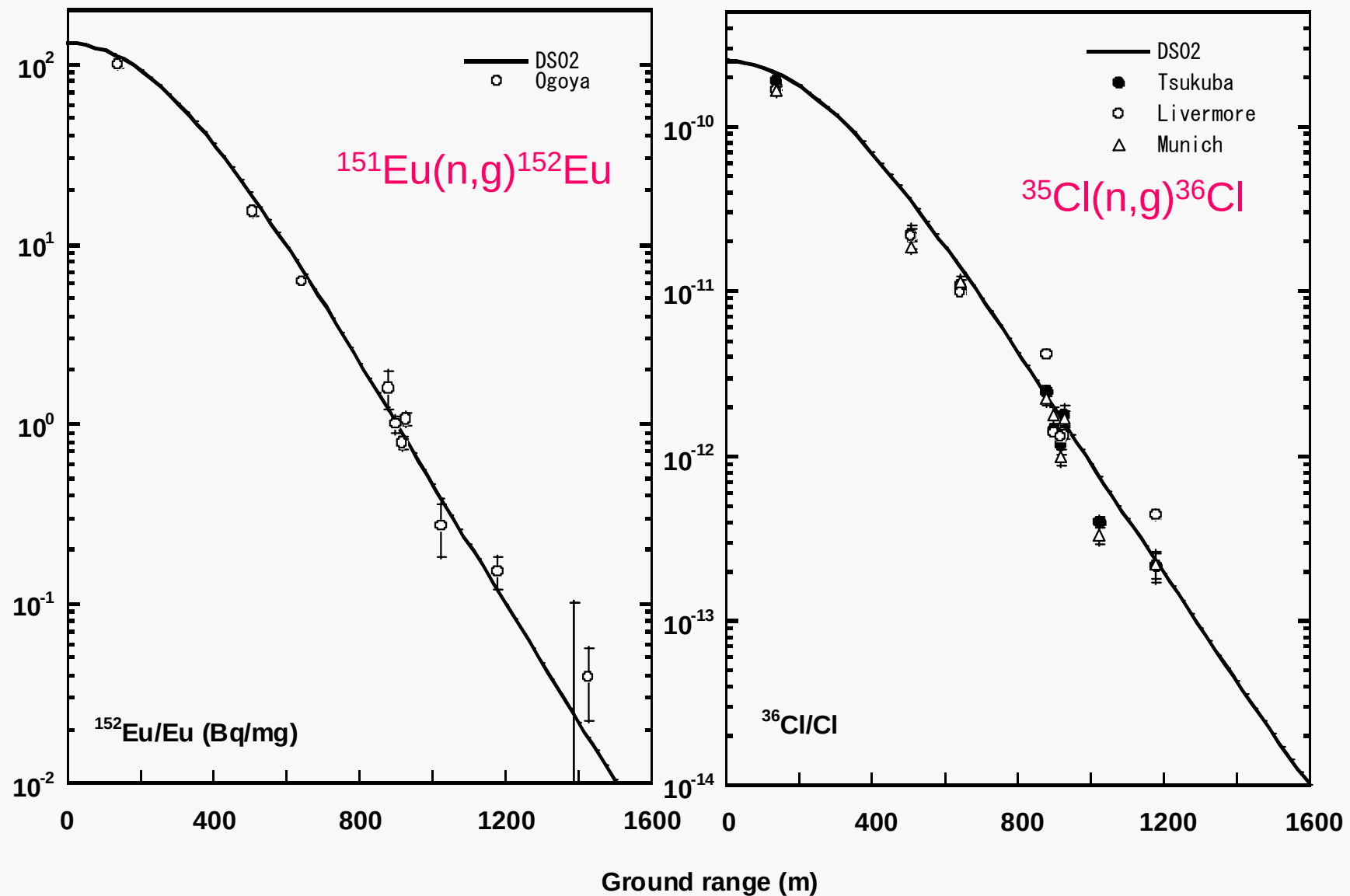
Shielding calculation by human body

3 dimensional adjoint Monte Carlo

広島ガンマ線量：計算値とTL測定値



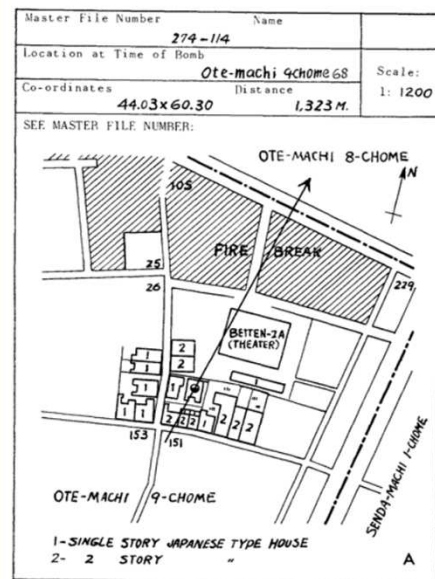
熱中性子放射化量：計算値と測定値 広島



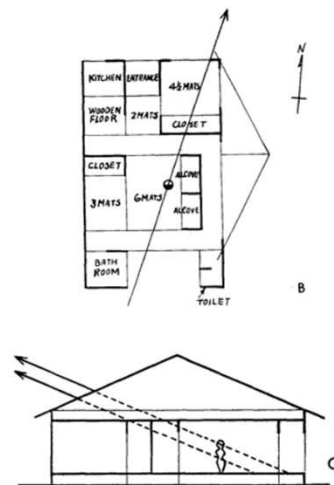
Hoshi et.al, DS02 report (2005)

DS86 / DS02での個人線量の計算

藤田正一郎 KURRI-KR-114 2005



A. Site Plan 区画図
B. Floor Plan 間取図
C. Cross Section 断面図



遮蔽状況の聞き取り調査

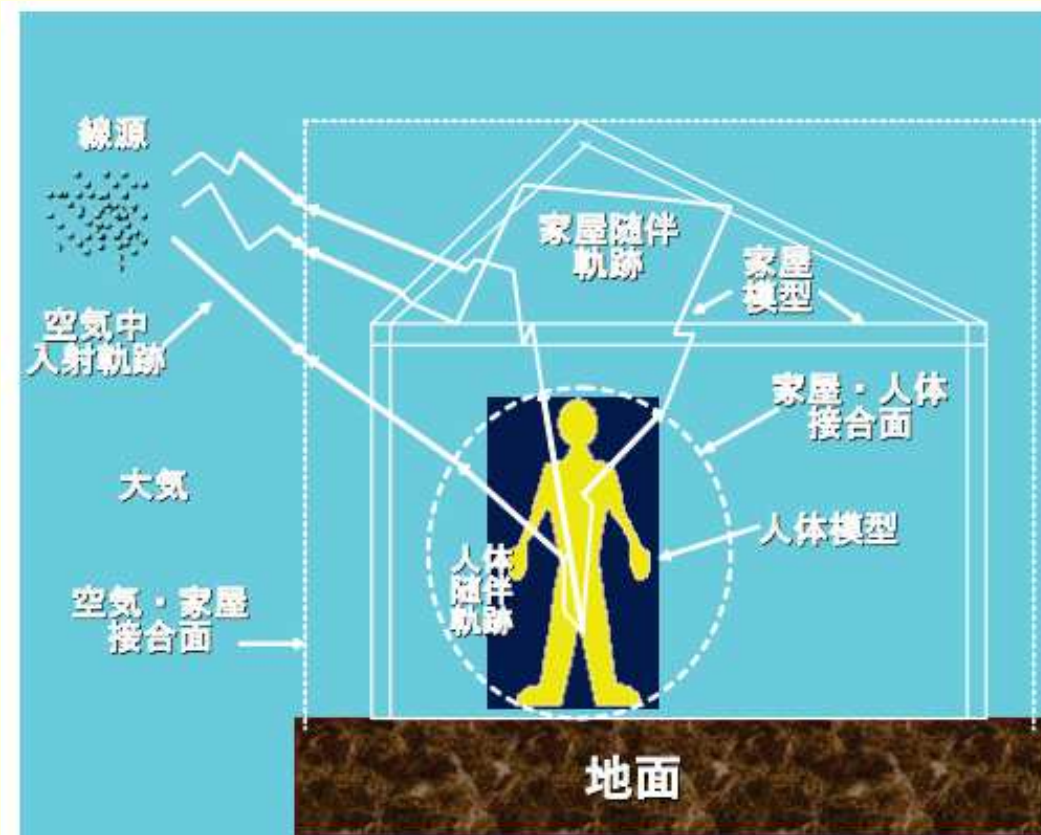


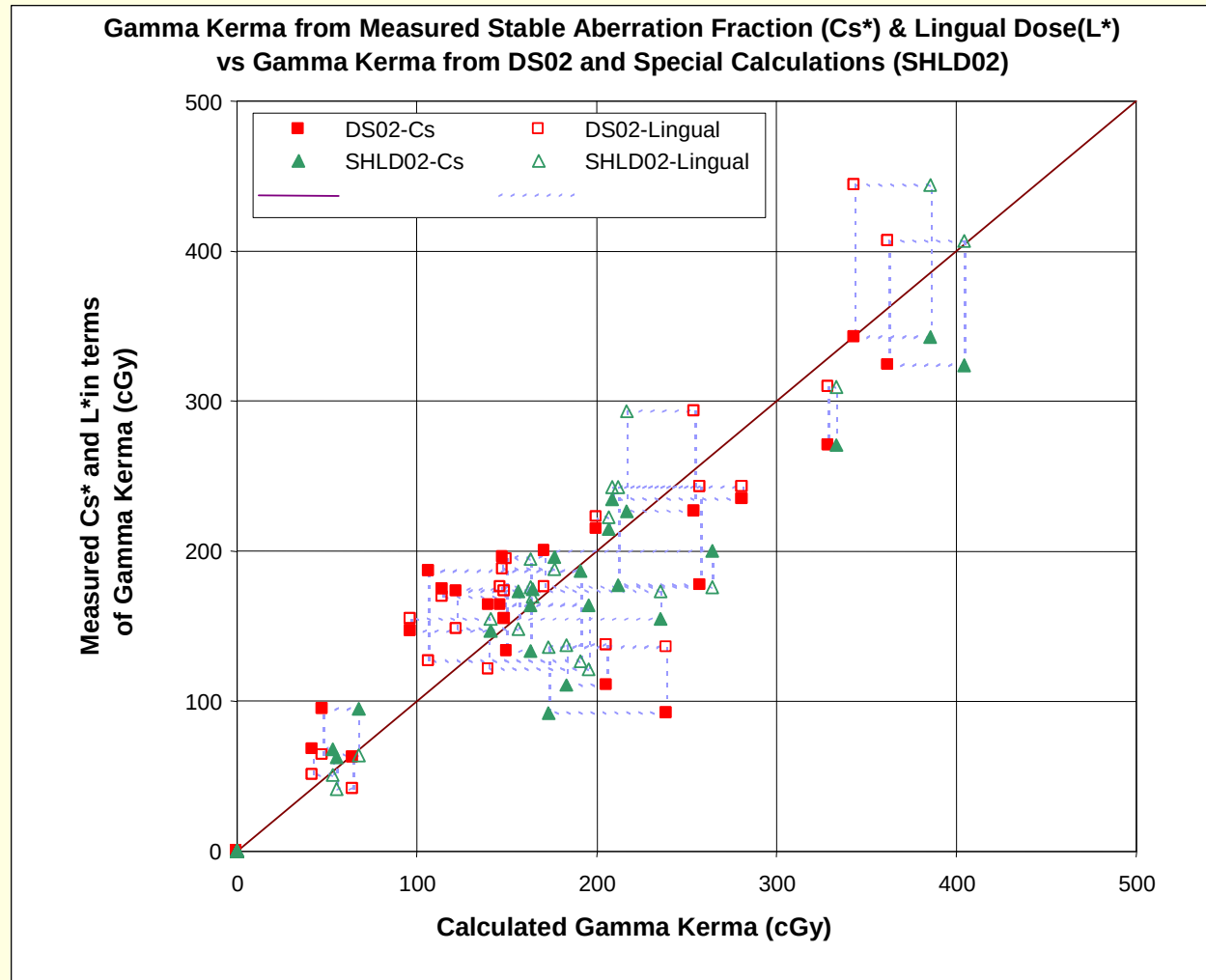
図4 DS86/DS02方式による個人被曝線量の計算方式。

無遮蔽大気中フルエンスと、家屋遮蔽、人体遮蔽3次元モンテカルロ計算結果とをカップリングして臓器線量を算出

個人線量としてDS02はどの程度アテになるか？

DS02 vs Biodosimetry

– Chromosome aberration, Tooth enamel ESR –

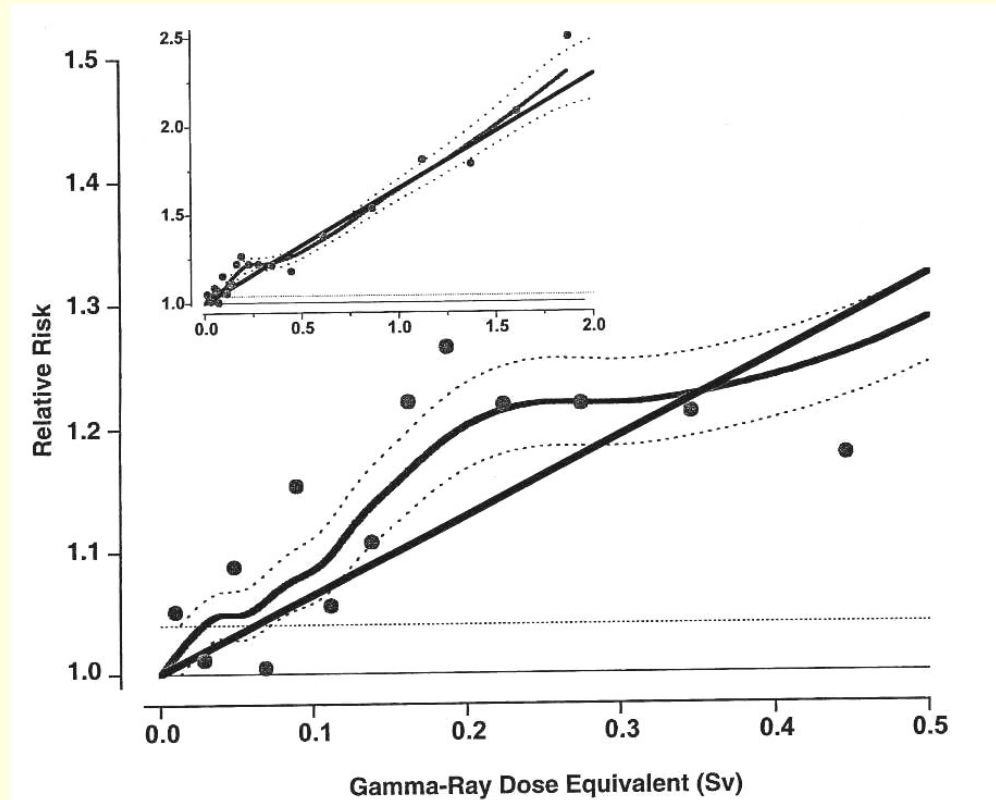


Kaul et.al, DS02 report (2005)

一見、DS02計算と生物学的線量評価はまずまずの一致を示している。ただし、全体データ（41例）から“測定と計算が合わない”19例が除かれ、このプロットには22例しか示されていない。

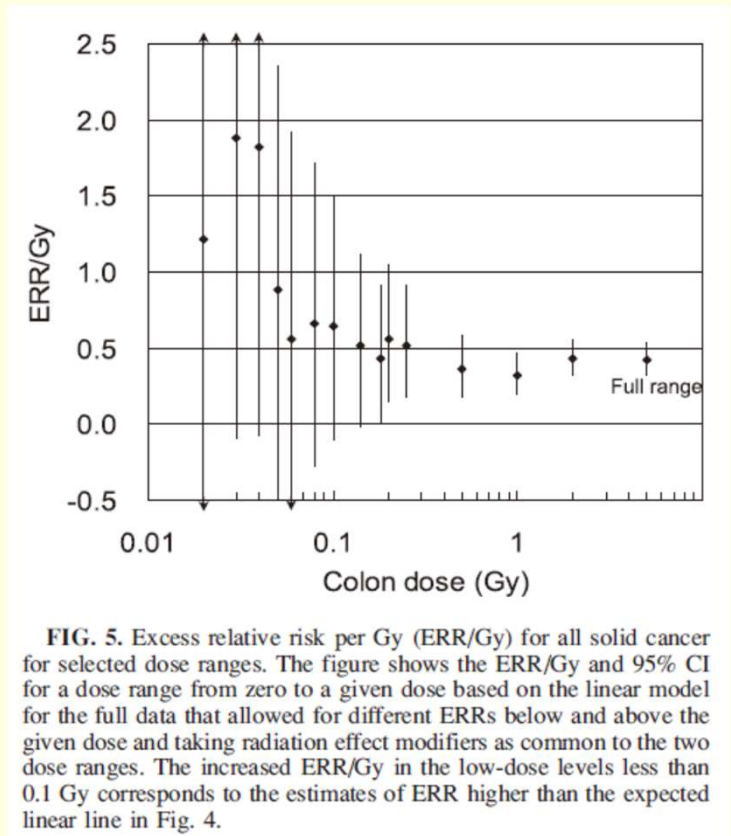
福島原発事故が起きて驚いたこと！ 多くの専門家が『100mSv以下は影響ない』と いった発言をし始めた....

彼らの根拠は広島・長崎データのようなだったが....



Pierceら、Radiation Research 2000

『影響が観察されていないこと』と『影響がないこと』とは全く異なる。広島・長崎データから、100ミリシーベルト以下(0.1シーベルト以下)の影響は、直接的には分からない。



Ozasa et al, LSS14 report

LSS集団での脳卒中と心疾患の増加

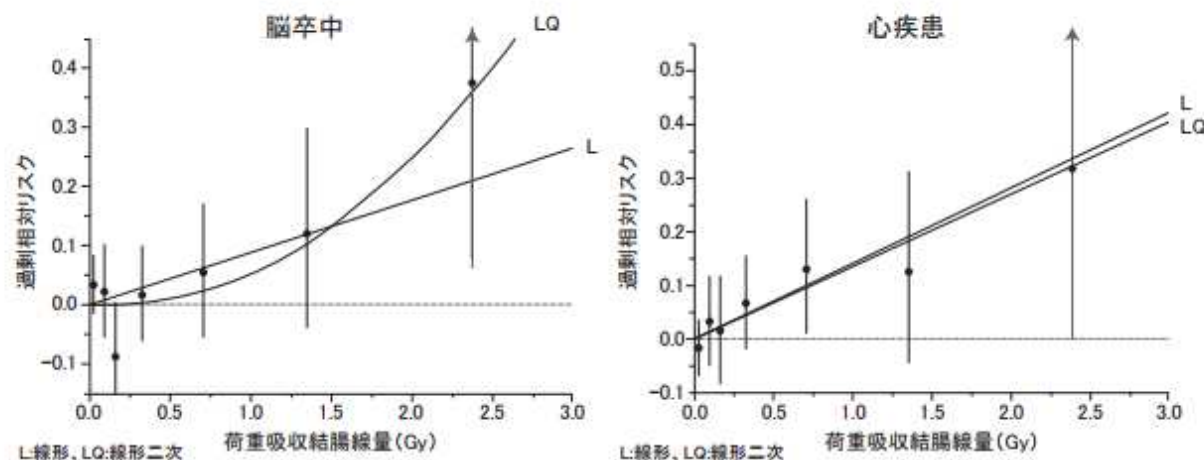


表 8. 脳卒中の年齢調整発生率⁴³

被曝線量 (Gy)	対象者数	出血性脳卒中 [†]		虚血性脳卒中	
		発生数	発生率 [*]	発生数	発生率 [*]
男性					
<0.05	1,539	33	12.2	112	40.5
0.05-1	1,266	37	17.6	81	38.5
1-2	376	13	21.4	20	34.9
≥2	130	5	25.2	8	46.3
p 値 [†]			0.006		0.788
合計	3,311	88	15.7	221	39.4
女性					
<0.05	2,765	66	13.1	173	34.4
0.05-1	2,720	63	12.4	174	33.9
1-2	531	8	9.3	33	39.8
≥2	188	10	41.9	6	27.9
p 値			0.098		0.930
合計	6,204	147	13.1	386	34.4

[†] 出血性脳卒中は脳出血とくも膜下出血を含む。

* 10,000 人年当たりの発生率

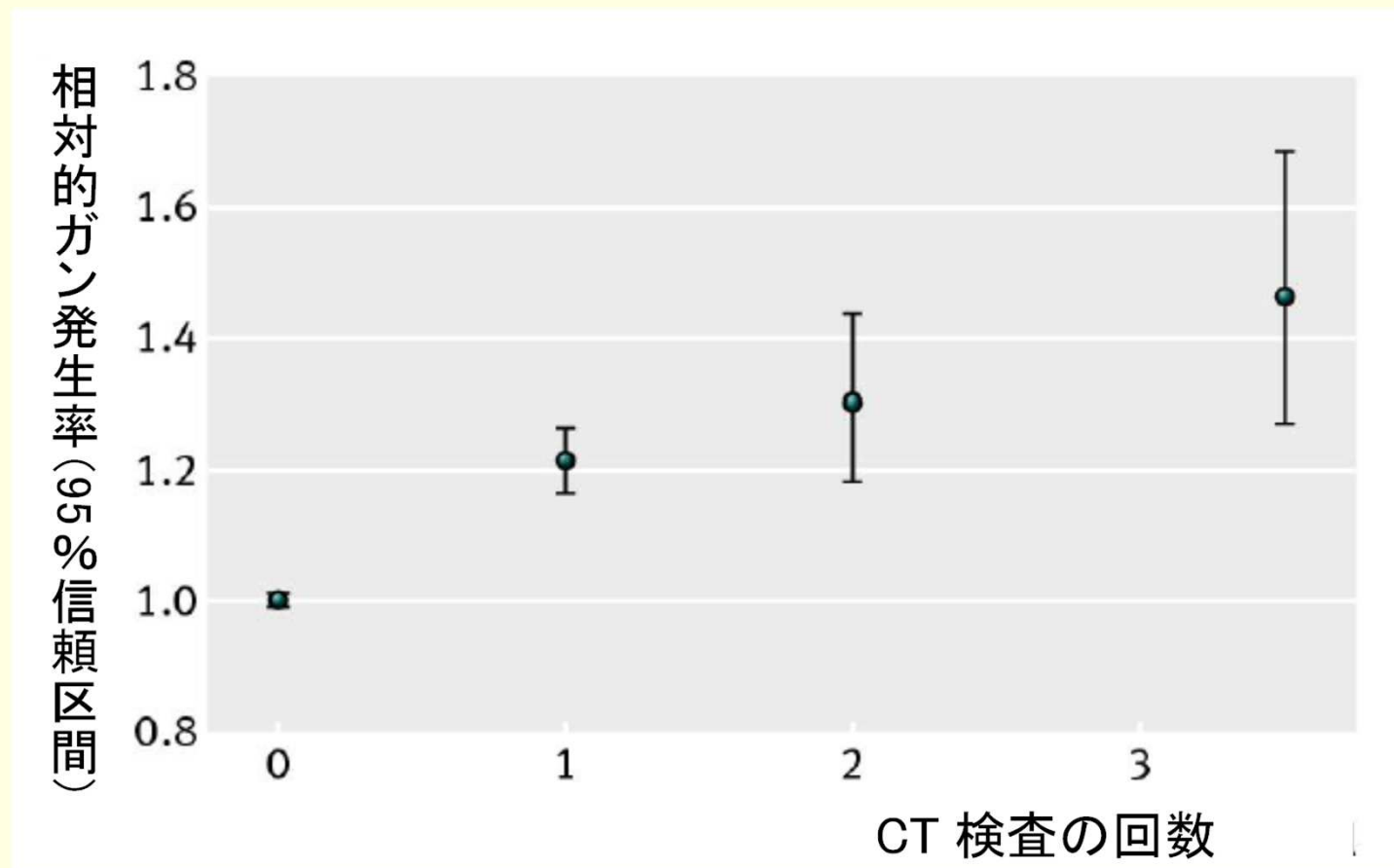
[†] 傾向検定

<福島事故以降の疫学データ>

オーストラリアでCT検査を受けた子供68万人の追跡調査

CT検査によるガン増加データ

Mathewsら BMJ誌 2013年



**CT 1 回当りの被曝量は4.5ミリシーベルト。
CTの回数とともに有意なガン増加が認められた。**

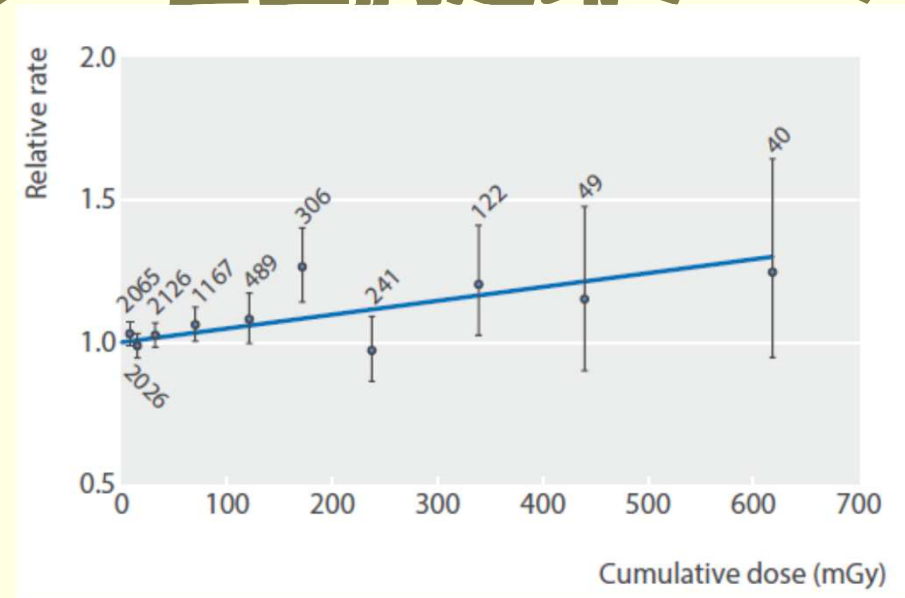
INWORKSデータ：英米仏3カ国の原子力労働者30万人のガン・白血病追跡データ

白血病以外の全ガン BMJ 2015

Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)

David B Richardson,¹ Elisabeth Cardis,^{2,3,4} Robert D Daniels,⁵ Michael Gillies,⁶ Jacqueline A O'Hagan,⁶ Ghassan B Hamra,⁷ Richard Haylock,⁶ Dominique Laurier,⁸ Klervi Leuraud,⁸ Monika Moissonnier,⁹ Mary K Schubauer-Berigan,⁵ Isabelle Thierry-Chef,⁹ Ausrele Kesminiene⁹

- ・平均骨髄被曝量 21mGy
- ・被曝の相対過剰リスク 0.51/Gy



白血病 Lancet Haematology 2015

Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study

Klervi Leuraud, David B Richardson, Elisabeth Cardis, Robert D Daniels, Michael Gillies, Jacqueline A O'Hagan, Ghassan B Hamra, Richard Haylock, Dominique Laurier, Monika Moissonnier, Mary K Schubauer-Berigan, Isabelle Thierry-Chef, Ausrele Kesminiene

- ・平均骨髄被曝量 16mGy
- ・被曝の相対過剰リスク 2.96/Gy

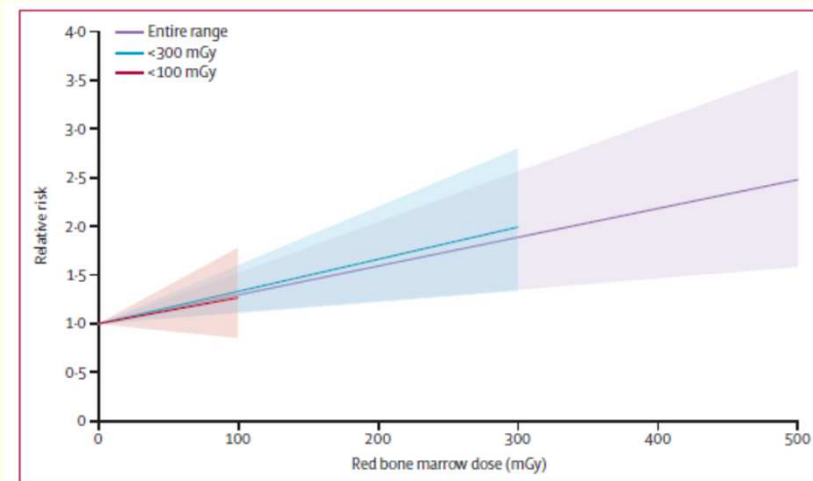
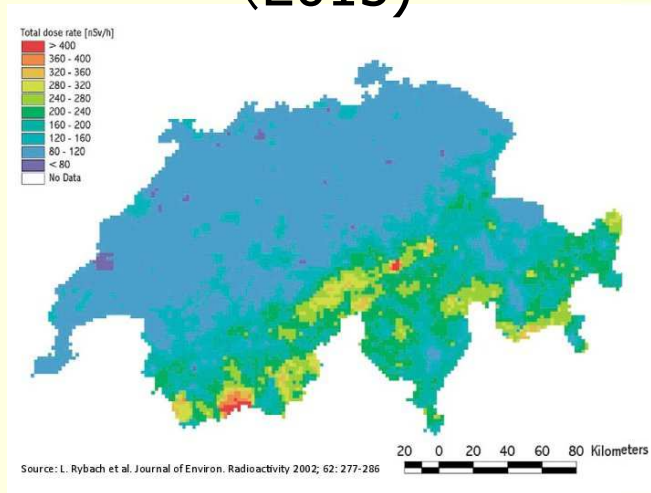


Figure: Relative risk of leukaemia excluding chronic lymphocytic leukaemia associated with 2-year lagged cumulative red bone marrow dose
The lines are the fitted linear dose-response model and the shading represents the 90% CIs.

全ガン、白血病ともに積算被曝量が大きくなるとともにリスクが増加している。リスクの大きさ(直線近似したときの傾き)は広島・長崎データと同じ程度である。

自然放射線と小児ガン スイスの200万人追跡データ

Spycher et al,
EHP 123:622-8
(2015)



スイスの自然放射線量率分布

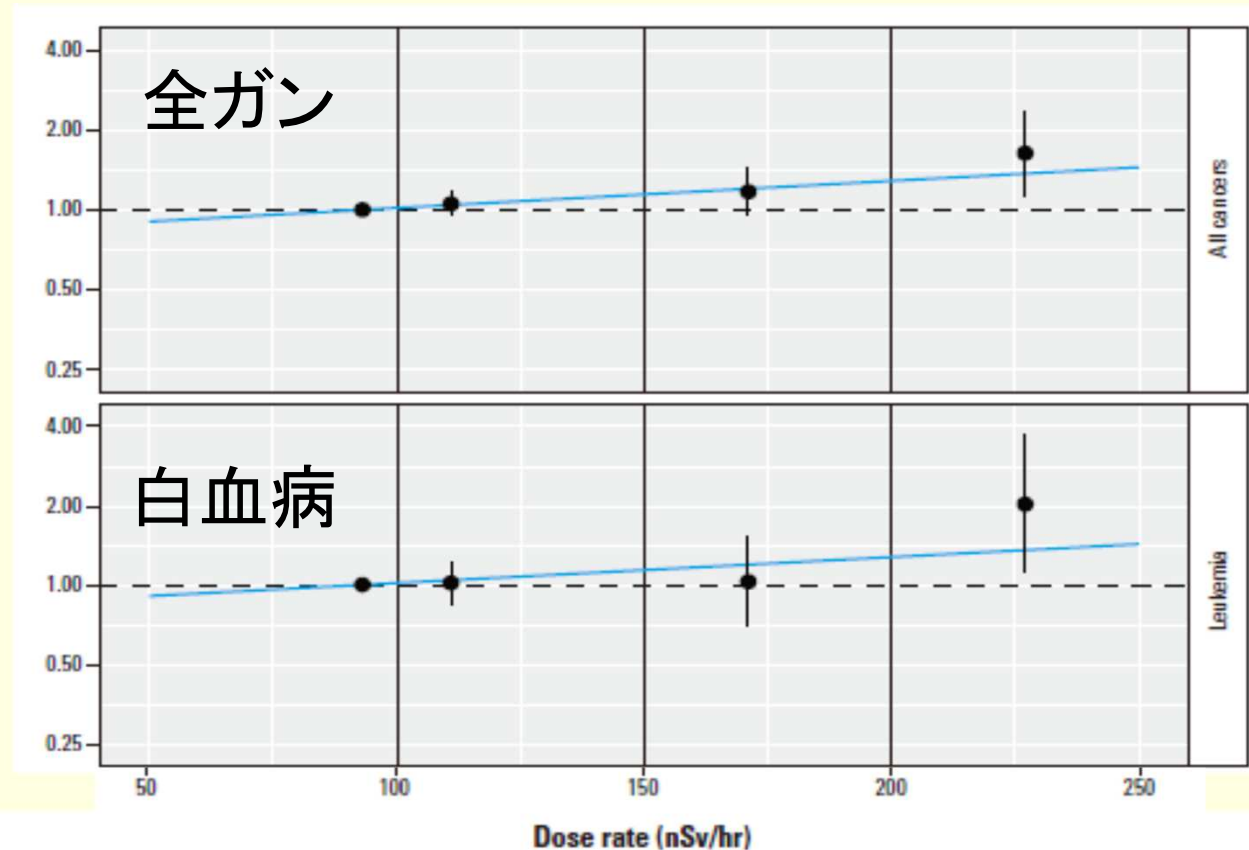


Figure 2. Hazard ratios for cancer by dose rate of external ionizing radiation among children < 16 years of age in the Swiss National Cohort. Results from Cox proportional hazards models adjusting for sex and birth year using a categorized exposure [points and bars (95% CIs) placed along the x-axis at mean dose rates within categories; categories delineated by vertical lines] and a linear exposure term (blue line). Dose rates < 100 nSv/hr are the reference category.

スイスで16歳以下の子供たち200人を、居住地域の自然放射線量で4つの区分に分けて固定集団調査したところ、自然放射線量が高い地域でガン・白血病が多かった。

福島原発事故後の疫学論文

表2 100 mSv 以下での被曝の影響を示唆する最近の論文

著者(年)	調査対象	被曝量	結果	雑誌
Eisenberg et al. (2011)	カナダの心臓透視患者 8.3万人コホート	平均5.3 mSv	全がん増加傾向	Can. Med. Ass. J. 183(4):430-6 doi:10.1503/cmaj.100463
Pearce et al. (2012)	英国の22歳以下CT検査 18万人コホート	平均 50~60 mGy	脳腫瘍、 白血病増加	Lancet 380:499-505 doi:10.1016/S0140-6736(12)60815-0.
Kendall et al. (2013)	英国の子供白血病・がん 2.7万人と自然放射線の 関係	自然放射線	白血病増加	Leukemia 27:3-9 doi:10.1038/leu.2012.151
Mathews et al. (2013)	オーストラリア18歳以下 CT検査68万人コホート	4.5 mSv/CT	脳腫瘍や白血病 など増加	Brit. Med. J. 346:f2360 doi:10.1136/bmj.f2360
Huang et al. (2014)	台湾の18歳以下頭部 CT検査2.4万人コホート	(評価なし)	脳の良性腫瘍増加	Brit. J. Cancer 110:2354-60 doi: 10.1038/bjc.2014.103
Spycher et al (2015)	スイス16歳以下209万 人コホート	自然放射線	白血病と全がん 増加	Env. Heal. Persp. 123(6):622-8 doi:10.1289/ehp.1408548
Richardson et al. (2015)	英米仏の原子力産業労働者 30万人コホート	平均大腸線量 20.9 mGy	全がん増加	Brit. Med. J. 351:h5359 doi:10.1136/bmj.h5359
Leuraud et al. (2015)	英米仏原子力産業労働者 30万人のコホート	平均骨髄線量 15.9 mSv	白血病増加	Lancet Haem. 2(7):e276-81 doi:10.1016/S2352-3026(15)00094-0
Nikkila et al. (2018)	フィンランドの子供白血病 1100例とCT検査の 関係	6-10 mGy/CT	白血病増加	Haematologica 103(11):1873-80 doi:10.3324/haematol.2018.187716

被曝影響についてのまとめ

- 放射線被曝に安全量はなく、『被曝の害は被曝量に比例する』と考えるべきである。
- 自然放射線も日常的に私たちの身体を傷つけている。
- 医療放射線も当然、害をもたらしている。
- 福島原発事故は、その上に不条理な被曝をもたらしている。

1 mSvには1mSvの、1 μ Svには1 μ Svのリスクがある！

今日の話題

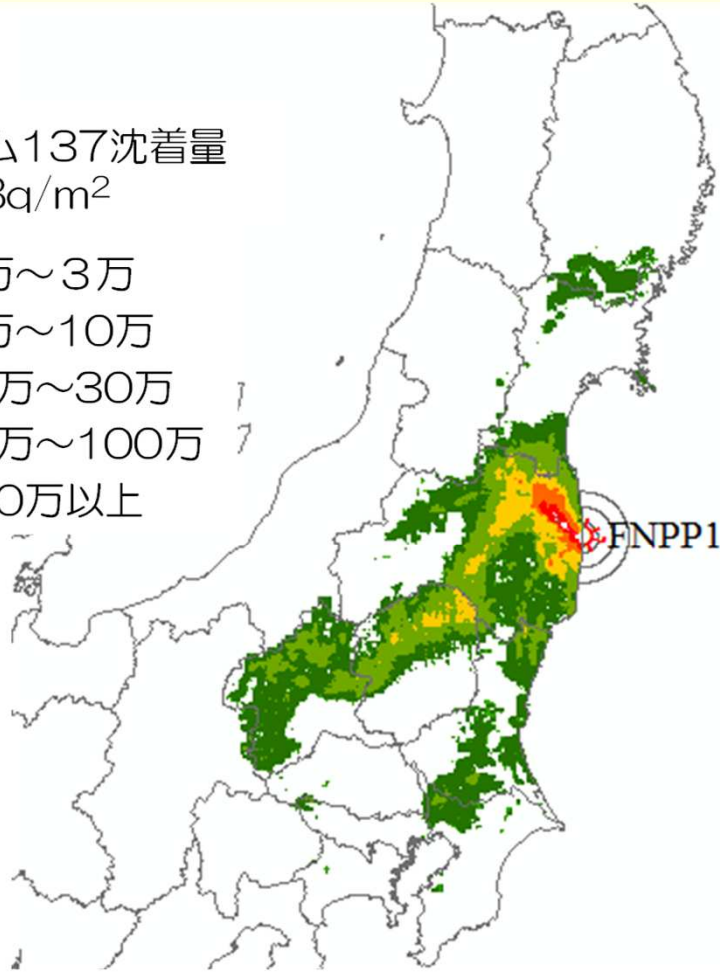
- 軽く、前回の復習
- 被曝障害の歴史とICRP勧告の変遷など
- 福島原発事故が起きてからのこと
- 放射性物質の環境基準が必要だ

福島後の時代

私たちは、これから50年、100年にわたって、放射能汚染と向き合わざるを得ない

セシウム137沈着量
Bq/m²

- 1万～3万
- 3万～10万
- 10万～30万
- 30万～100万
- 100万以上



東日本のセシウム137汚染

セシウム137が1平方m当り1万ベクレル以上の面積は約2万5000平方kmで、本州の約1割に相当する。

東京も、私に言わせればセシウムだらけである。

汚染地域で暮らすとは

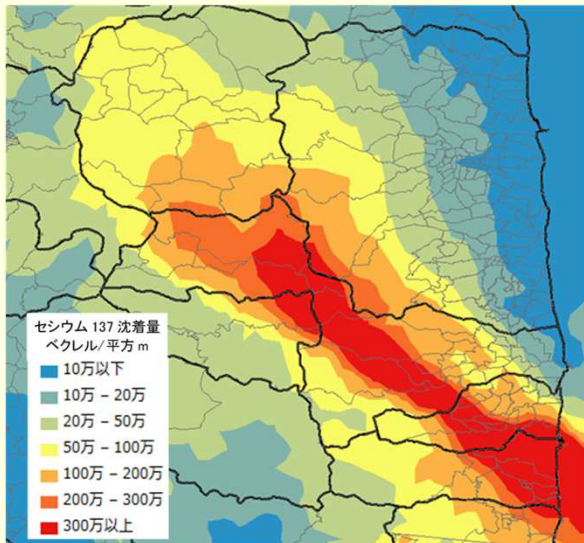
- 余計な被曝はしない方がいい
- ある程度の被曝は避けられない

この相反する2つのことに
どう折り合いをつけるか！

●福島原発事故による汚染が余計なものである以上、私たちに『1ベクレル、1マイクロシーベルトたりともイヤだ』という権利はある。

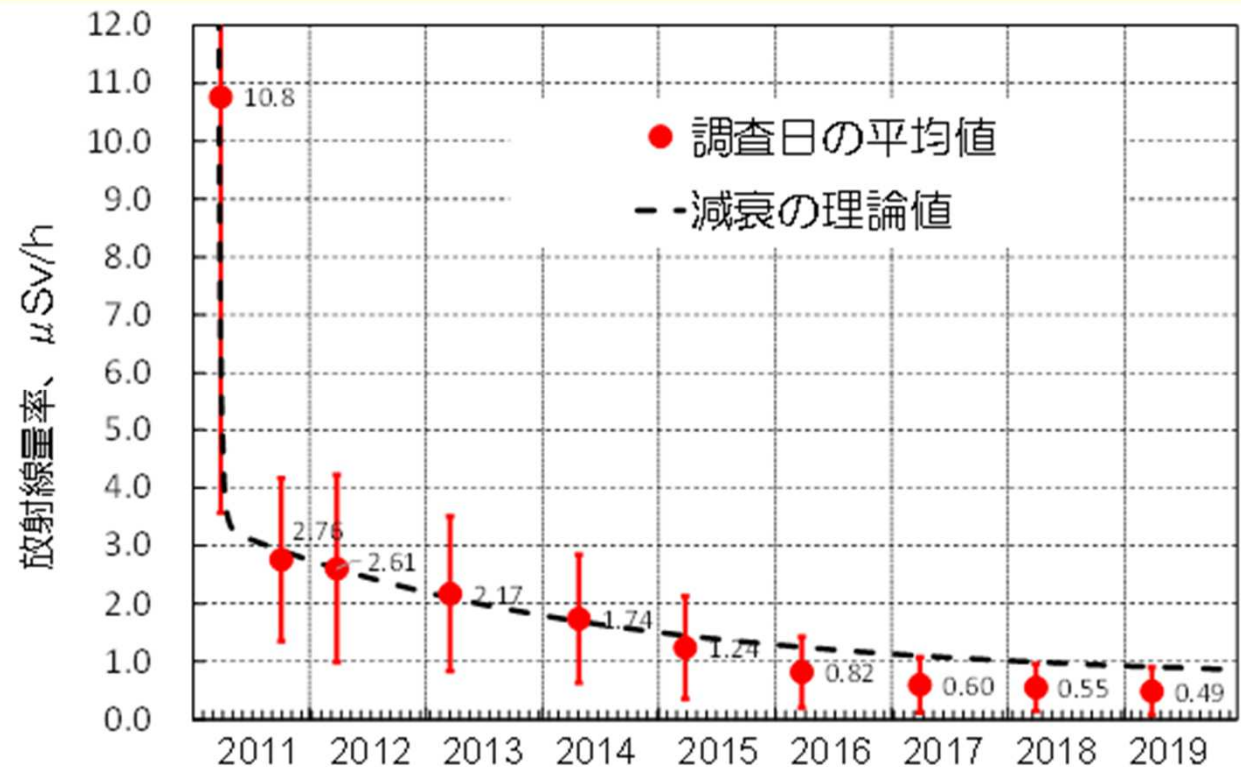
●専門家の役割は、放射能汚染、被曝量、被曝リスクについて、できるだけ確かな情報を提供し、人々が自分で判断するのを手伝うことにある。

飯舘村の汚染と放射線量の推移



北西方向セシウム137汚染

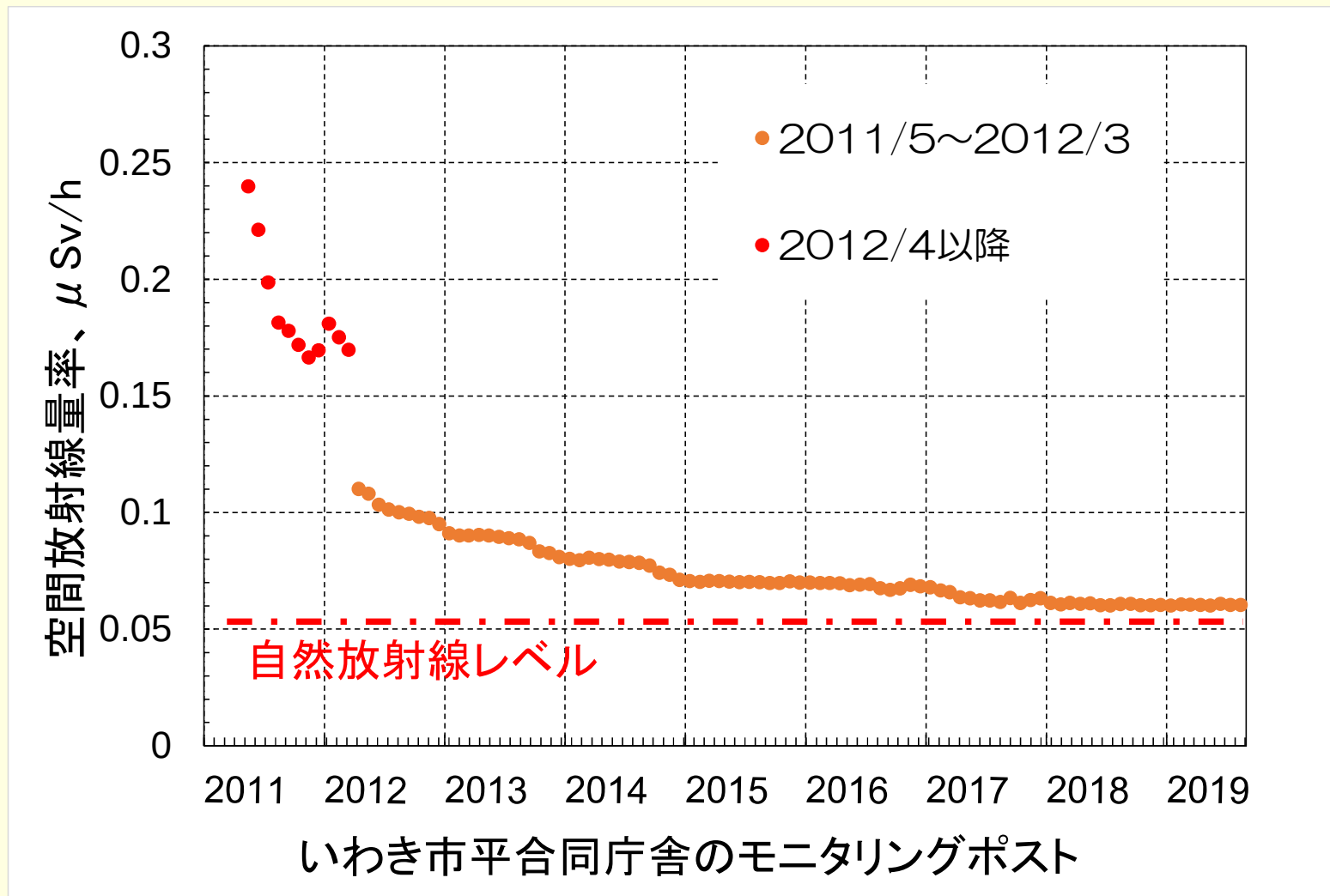
飯舘村は平均100万Bq/m²



飯舘村の平均放射線量の推移

8年間で飯舘村の放射線量は20分の1になったが、
セシウム137は15%しか減っていない。

いわき都市部のモニタリングポスト



ここ数年は $0.06\mu\text{Sv/h}$ 程度で落ち着いてきた。

自然バックグラウンドの値が確かでないが、汚染の寄与は $0.01\sim0.02\mu\text{Sv/h}$ くらいと思われる。

広島市内の放射線量



平和公園
2015年11月23日

放射線量: 0.08 $\mu\text{Sv/h}$

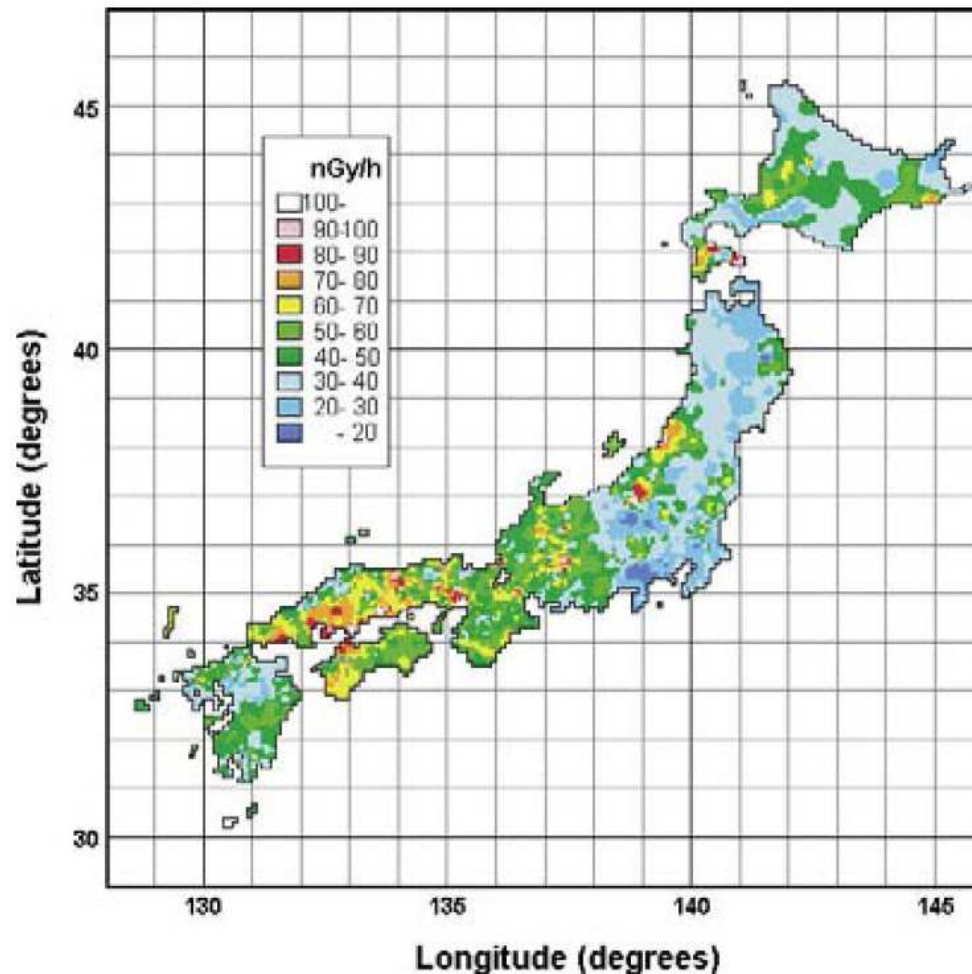


広島市内比治山
2017年8月29日

放射線量: 0.10 $\mu\text{Sv/h}$

自然の放射線量も場所によって結構違っている

日本の自然放射線 地面からのガンマ線量率分布



Minato, J Geography, 2006

私たちは常時、地面に含まれている、ウラン系列、トリウム系列、カリウム40といった放射性物質から被曝を受けている。東日本に比べ、西日本の方が高めなのは、ウラン、トリウムの含有量の大きい花崗岩地帯が多いからである。

福島後の時代

どこまでの被曝をがまんするのか？
一般的な答はなく、自分で決めよう

<参考>

- 原子力施設からの一般公衆の線量限度：年間1ミリシーベルト
- 放射線作業従事者の線量限度：年間20ミリシーベルト
- 自然放射線による年間1ミリシーベルトの被曝を受けている

国や東電には、被災者がどのような選択をしようと、その選択を支援する責任がある。

放射性物質の環境基準が必要だ

放射性物質汚染対処特別措置法について

●「原子炉等規制法」に基づけば、汚染地域は福島市や郡山市を含め、事業者である東京電力が“一時管理区域”に設定し、しかるべく除染した後に“管理区域解除”をするのが法律のスジであると思って、政府がどう対応するのか眺めていた。

●2011年8月に「汚染対処特別法」が成立し、原発事故による放射能汚染は、“事故由来放射性物質”という新概念に基づいて「原子炉等規制法」の枠外とされた。

言い換えると、特措法は、汚染対策を手抜きするための『徳政令』となった。

●特措法は、特定の種類の汚染物についての規制を定めているが、一般環境の汚染やや被曝についての基準はない。つまり、除染の対象ではない山林については『放っておいても構わない』というザル法である。

放射能汚染の環境基準が必要

●大気汚染防止法や水質汚濁防止法は、環境基本法の考え方に基づいて『環境基準』を設定している。

福島原発事故まで、放射性物質は環境基本法の対象外とされていたが、2012年に対象外の規定は削除された。

●年1mSvという公衆に対する線量限度は、「そこまではガマンせよ」と原子力産業の都合で決められたものであり、環境基準としては大きすぎる。

土壤汚染については年0.1mSv、水と空気については年0.01mSvで、放射線や放射性物質の『環境目標値』を設定し、汚染地域の自治体はハザードマップを作成して住民に周知すべきであろう。

今夜はここまで お疲れさまでした

ついでながら、今中がアレコしまとめたものは下記ご参照下さい

◇原子力安全研究グループHP

<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/>

たとえば、

-放射能・被ばくの単位：<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/etc/skihyoron.pdf>

-放射能計算に必要な数学：

http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/temp/2019/suugakutebiki_19-6-24.pdf

などなど...

ウクライナに平和を！

