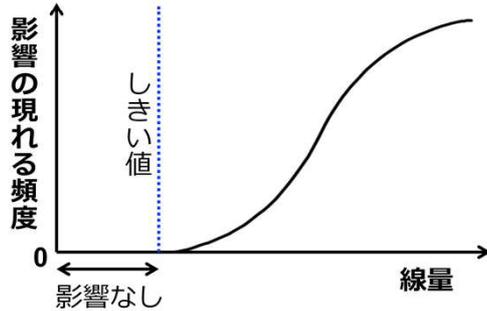


確率的影響と確定的影響

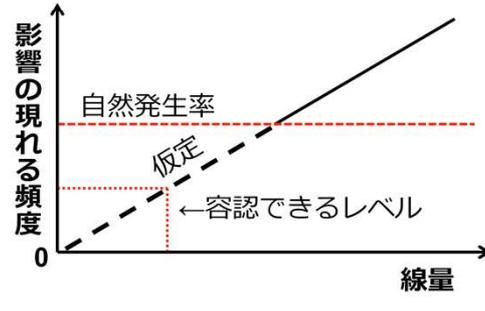
確定的影響

放射線を受けた人のうち最も放射線に対して感受性が高い1%の人が発症する線量を「しきい値」としている。
(ICRP2007年勧告)



確率的影響

一定の線量以下では、喫煙や飲酒と言った他の発がん影響が大きすぎて見えないが、ICRPなどではそれ以下の線量でも影響はあると仮定して、放射線防護の基準を定めることとしている。

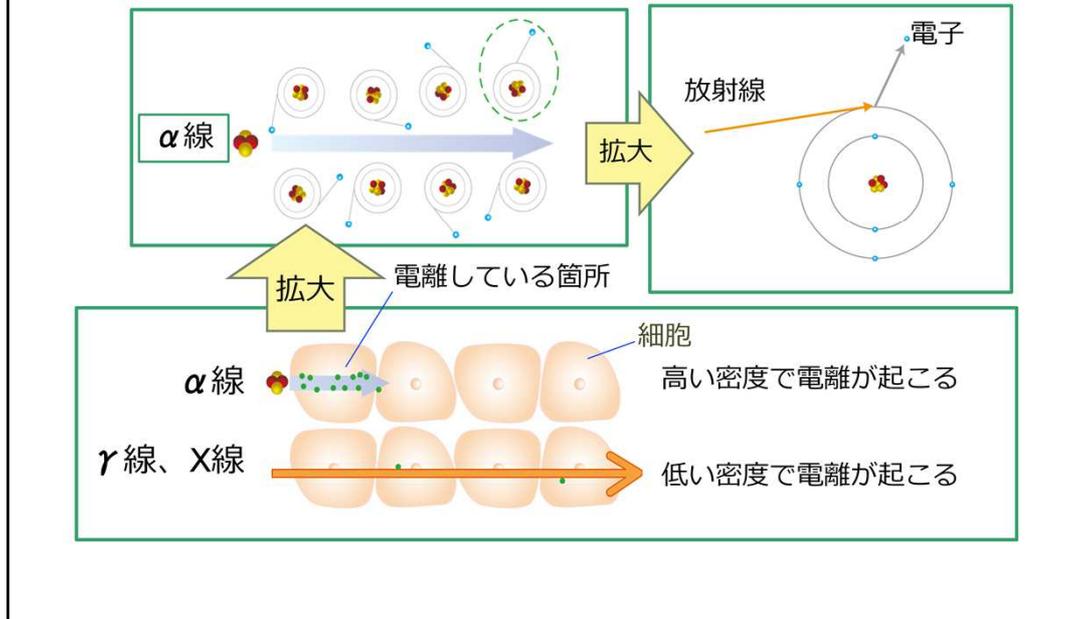


確定的影響の特徴は、これ以下なら影響が生じない、これ以上なら影響が生じるというしきい値が存在することです。一方、確率的影響にはしきい値の存在は確認されていません。

実際には、100mSv以下の放射線被ばくによる確率的影響を疫学的に検出することは極めて難しいのですが、ICRPは、100mSv以下でも線量に依存して影響があると仮定して、放射線防護の基準を定めています。

本資料への収録日:2013年3月31日

放射線による電離作用



放射線はその通り道の近くにエネルギーを与えていきます。与えられたエネルギーにより、通り道の物質の電子が弾き飛ばされます。これが電離作用です。

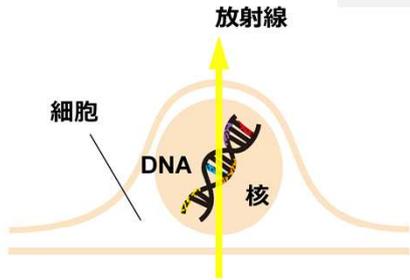
放射線の種類によってエネルギーを与える密度が異なりますが、 β (ベータ) 線や γ (ガンマ) 線に比べ、 α (アルファ) 線は密度が高くなります。このような電離作用の密度の違いにより、同じ吸収線量であっても放射線の生物学的効果が異なります。

放射線が直接生体分子に損傷を与える過程を直接作用と言います。細胞は約2/3が水で構成されているので、放射線によって水のイオン化も起こります。このイオン化によって生じた反応性の高いラジカルにより、生体分子に損傷を与える過程を間接作用と言います。

本資料への収録日: 2013年3月31日

DNAの損傷と修復

X線 1 ミリグレイ当たりの損傷(1細胞当たり)

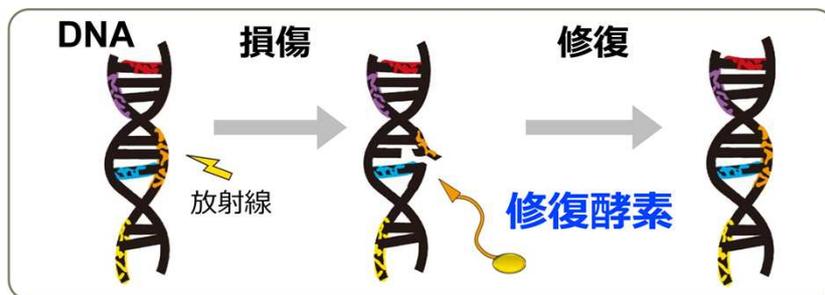


塩基損傷 2.5 箇所

一本鎖切断 1 箇所

二本鎖切断 0.04 箇所

Morgan, 米国放射線防護委員会
年次総会(第44回、2009)

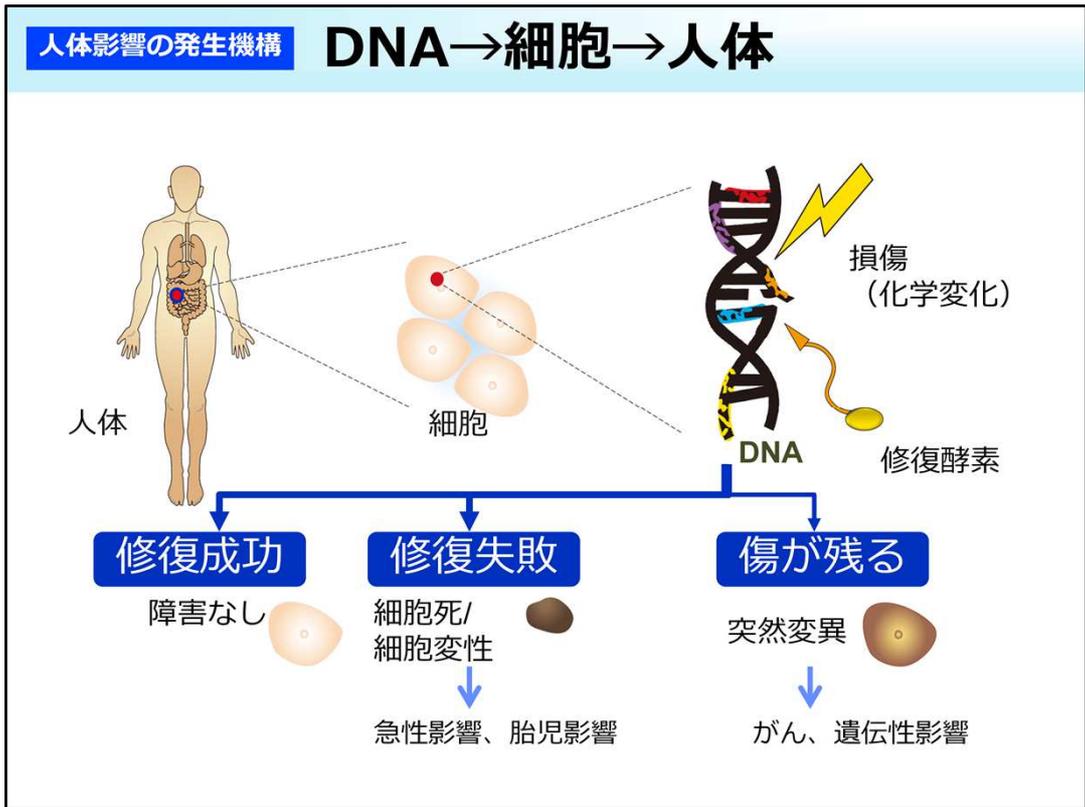


細胞は生命の設計図ともいえるDNAを持っています。DNAは糖・リン酸そして4種類の塩基を持った2本の鎖からできています。塩基の並び方に遺伝情報が組みこまれているので、並び方を保つために塩基は互いの鎖のいがたになるように組み合わせられています。このDNAに放射線が当たると、当たった量に応じてDNAの一部が壊れる事があります。

X線1ミリグレイ当たり、1細胞で平均1か所の一本鎖切断が起こると言われています。これは1ミリシーベルトに相当します。また二本鎖切断の頻度はこれより少なく0.04ですから、100細胞が均一に1ミリグレイ浴びたら、4細胞に二本鎖切断が起こることになります。

DNAを傷つける原因は、放射線以外にも、食物の中の発がん物質、タバコ、環境中の化学物質、活性酸素などがあり、一日1細胞当たり、1万から100万か所の頻度でDNAは損傷を受けているといわれています。細胞には、DNA損傷を修復する機能があり、DNAが損傷を受けると、修復酵素が駆けつけて、こうした傷を修復します。

本資料への収録日: 2013年3月31日



放射線の当たる箇所を細かく見てみると、放射線は細胞に当たり、細胞の中にある遺伝子の本体であるDNAに傷を付けることがあります。この付いた傷は、体の中に備わっているシステムで修復されます。

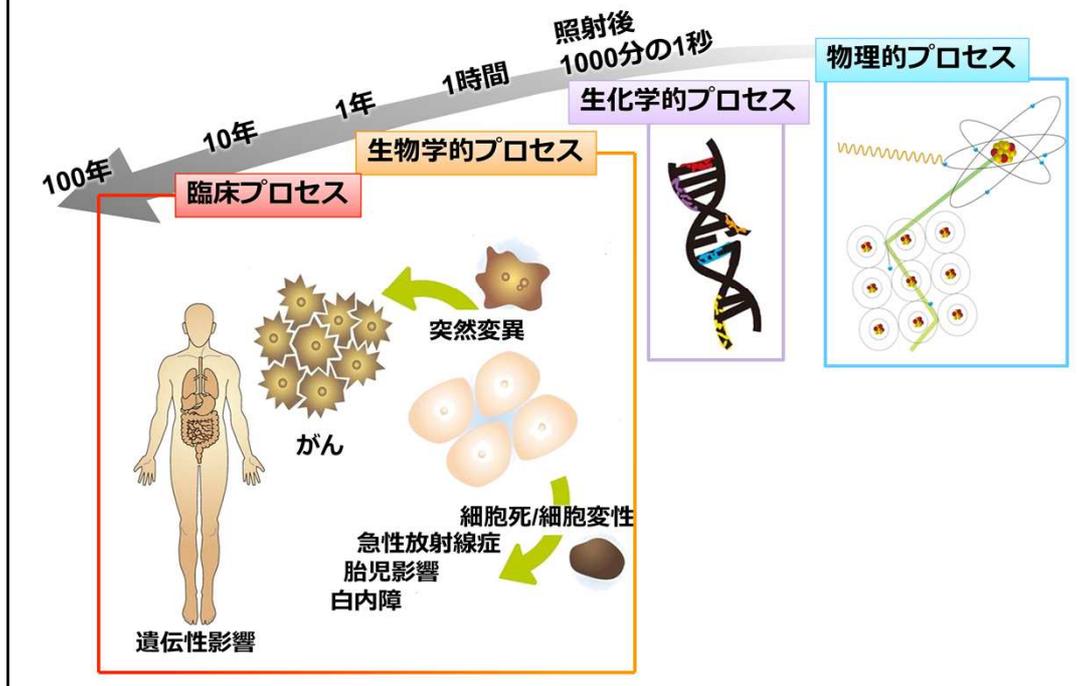
少しの傷なら修復が成功し、元に戻ります。傷が多ければ修復できずに細胞自体が死んでしまいます。少しの細胞が死んでも、他の細胞が代わりをすれば、その臓器や組織の機能障害は生じません。

また修復が完全ではないけれど、細胞が生き長らえた場合、この細胞が遺伝子の突然変異を起こし、ここからがん細胞が生じる可能性があります。

細胞レベルで起こる細胞死や突然変異、これが個体レベルで見ると、急性影響や胎児影響、あるいはがんや遺伝性影響の原因になります。しかし細胞死が起これば必ず急性影響がおこるというものではありませんし、突然変異が起これば必ずがんが起こるというものでもありません。

本資料への収録日：2013年3月31日

被ばく後の時間経過と影響



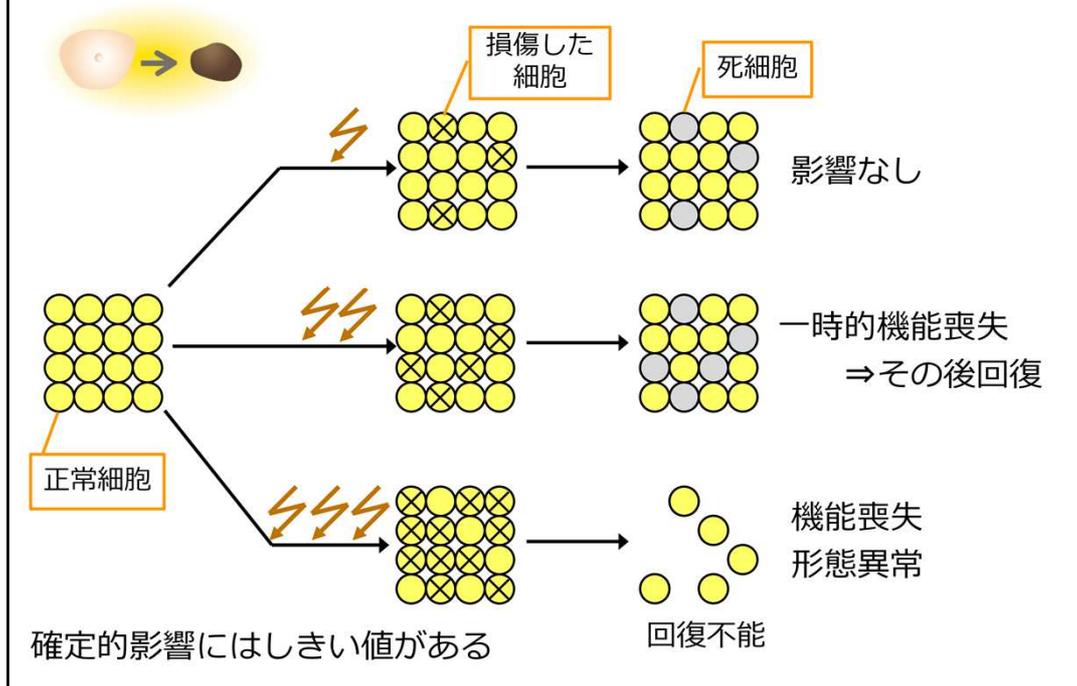
放射線を浴びた後、1000分の1秒という短い時間にDNA切断や塩基損傷は起こります。1秒後には修復が始まり、修復に失敗した場合には、1時間～1日の間に細胞死や突然変異が起こります。

しかし、こうした細胞レベルでの反応が生じてから、個体レベルで臨床症状が出るまでにはしばらく時間がかかります。この時間のことを潜伏期といいます。

被ばく後、数週間以内に症状が生じるものを急性(早期)影響、比較的長くかかる影響を晩発影響と呼びます。特にがんが発症するには数年から数十年の時間を要します。

本資料への収録日: 2013年3月31日

確定的影響



放射線が少し当たって、多少細胞が死んでも、残りの細胞だけで十分組織や臓器が機能すれば、症状としては現れません。

放射線の量が増え、死亡する細胞が増加すると、その臓器や組織の機能が一時的に衰え、臨床症状が出る場合があります。しかし、その後、正常の細胞が増殖すれば、症状は回復します。

さらに大量の放射線を浴び、組織や臓器の細胞のダメージが大きい場合には、永久に機能喪失や形態異常が起こる可能性があります。

このように、細胞死によって起こる確定的影響には、これ以上放射線を浴びると症状が生じる、これ以下では症状が生じないという線量が存在します。この線量のことを「しきい値」と呼びます。

本資料への収録日：2013年3月31日

臓器・器官の放射線感受性

分裂が盛ん 感受性が高い

造血系：骨髄、リンパ組織（脾臓、胸腺、リンパ節）

生殖器系：精巣、卵巣

消化器系：粘膜、小腸絨毛

表皮、眼：毛嚢、汗腺、皮膚、水晶体

その他：肺、腎臓、肝臓、甲状腺

支持系：血管、筋肉、骨

伝達系：神経

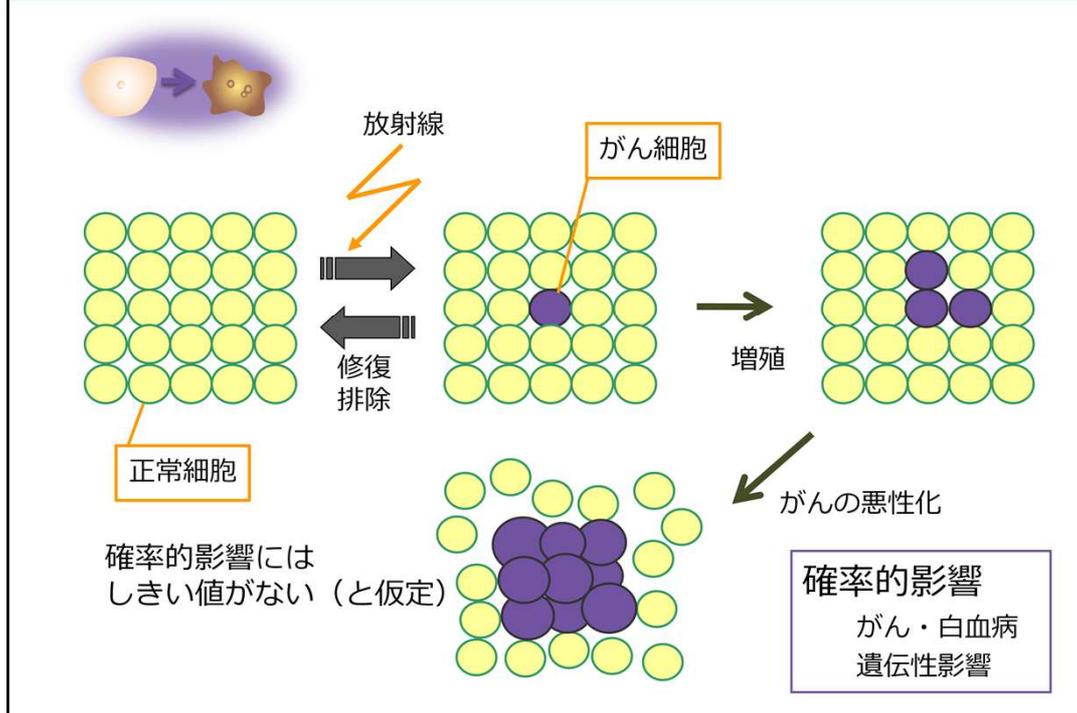
分裂しない 感受性が低い

細胞分裂が盛んで、分化の程度の低い細胞ほど、放射線感受性が高い傾向にあります。例えば、骨髄にある造血幹細胞はさかんに分裂しながら、血中の各種血液細胞に分化する細胞です。幹細胞から分裂（増殖）が進んだ未成熟（未分化）な造血細胞の放射線感受性は極めて高く、分化した細胞よりも少量の放射線で細胞死が起こります。その結果、血液細胞の供給が止まり、血中の各種の細胞の数が減少します。また消化管の上皮も常に新しい細胞に置き換わる新陳代謝が激しい臓器なので、放射線感受性が高くなります。

一方、分裂をしない神経組織や筋組織は放射線に強いことが知られています。

本資料への収録日：2013年3月31日

確率的影響

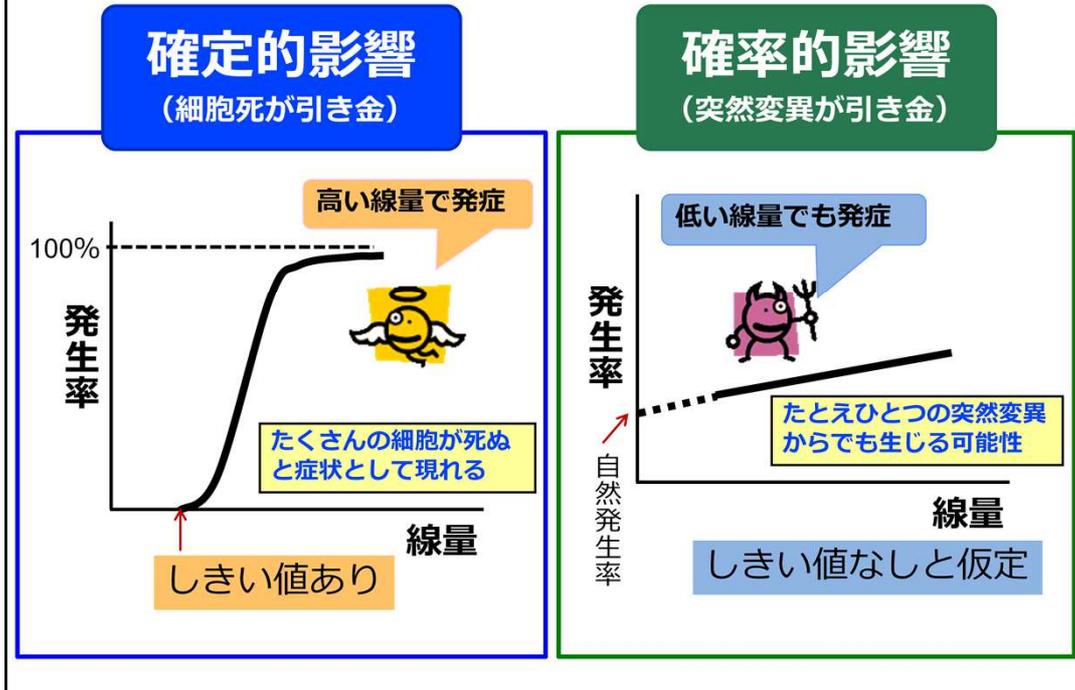


細胞の遺伝子変異(突然変異)で起こる影響は、一つの細胞に突然変異が起こってもそのリスクが増加すると考えられています。

突然変異を起こした細胞が全てがん細胞になるわけではなく、修復したり、排除されたりします。それでもある確率で、変異細胞が増殖し、さらに複数の遺伝子に突然変異が起きると、がん細胞が生じます。がん細胞が増殖すると、臨床的ながんになります。細胞のがん化は、複数の遺伝子に変異が起こり、修復されずに蓄積された結果として生じるため、発がん影響を評価する際には、受けた線量を全て足し合わせた量を問題にします。

本資料への収録日：2013年3月31日

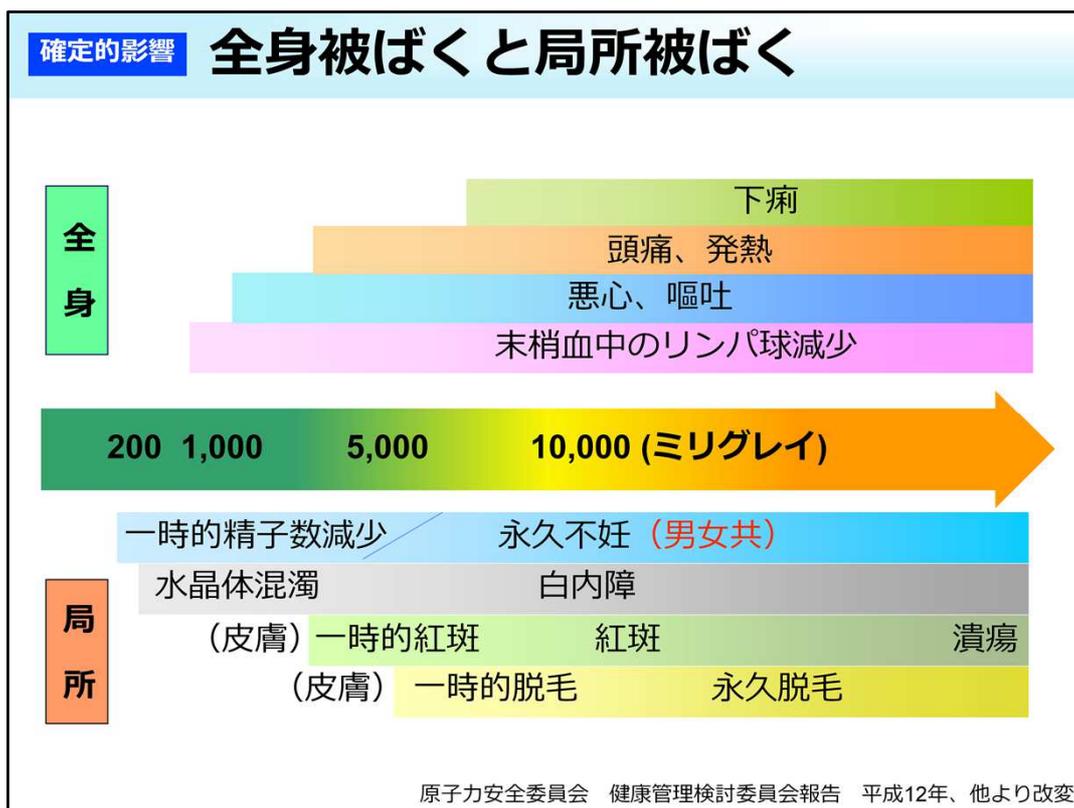
線量反応関係



確定的影響には、これ以下では影響がみられない、これ以上浴びると影響が生じるというしきい値があるといわれています。しきい値を超えると影響の発生率は急激に増加します。

一方、確率的影響は、どんなに少量の放射線であっても受けただけ影響が生じる確率が高まり、自然発生率に加算されると理論上はわれています。

本資料への収録日：2013年3月31日



一度に100 ミリグレイ程度以上の放射線を受けた場合、細胞死を原因とする人体影響が生じることがあります。こうした症状は、放射線の感受性の高い臓器ほど、少しの線量で症状が生じます。

分裂が盛んな臓器である精巣は、放射線感受性が高く、一時的な精子数の減少は100-150ミリグレイで現れ、一過性の不妊になることがあります。骨髄も感受性が高く、1000ミリグレイ以下の被ばくでも血中のリンパ球が減少することがあります。しかし、こうした症状は自然に治癒します。

一方、2000 ミリグレイ以上の放射線を一度に受けた場合、治療を要する臨床症状が起きることがあります。

局所被ばくの場合は、当然被ばくした部分の臓器に障害が現れます。

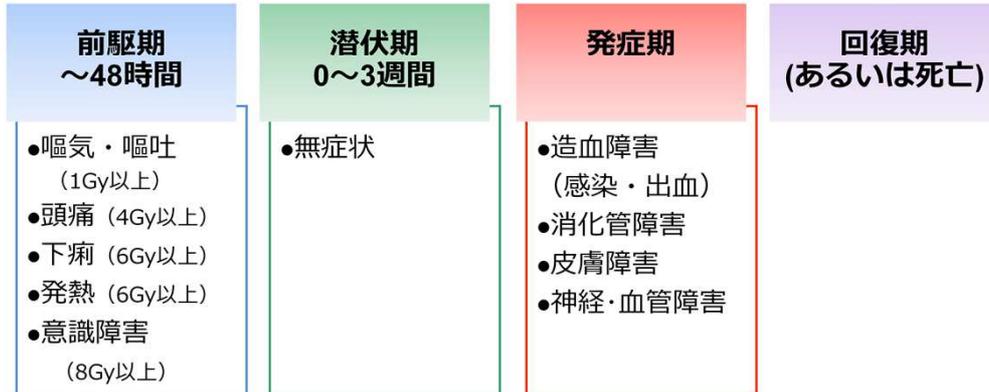
本資料への収録日：2013年3月31日

急性放射線症

急性放射線症の病期

被ばく時
↓

時間経過 →



※全身に1 グレイ (1000ミリグレイ) 以上の放射線を一度に受けた場合に見られる急性放射線症

全身に1 グレイ(1000ミリグレイ)以上の放射線を一度に受けた場合、急性放射線症と呼ばれる、一連の臓器障害を来すことがあります。この時間経過をみると、典型的には、前駆期、潜伏期、発症期の経過をたどり、その後、回復するか死亡します。

被ばく後48 時間以内に見られる前駆症状により、おおよその被ばく量を推定することができます。1 グレイ以上の被ばくで、食欲不振、悪心、嘔吐と言った症状が見られることがあります。4 グレイ以上の被ばくをした場合、頭痛などを訴えることがあります。下痢や発熱といった症状を示す場合は6 グレイ以上被ばくした可能性があります。

その後、潜伏期を経て、発症期に入ると、線量増加とともに造血器障害、消化管障害、神経血管障害の順で現れます。これらの障害は、放射線感受性の高い臓器や組織を中心に現れます。概して線量が多いほど潜伏期は短くなります。

皮膚は1.3から1.8m²/大人と生体でもかなり大きな面積を持つ組織です。被ばく直後に初期皮膚紅斑がでることもありますが、一般には皮膚障害は被ばく後数日以上たってから現れます。

本資料への収録日: 2013年3月31日

ガンマ線急性吸収線量のしきい値

障害	臓器／組織	潜伏期	しきい値 (グレイ)*
一時的不妊	精巣	3～9週	約0.1
永久不妊	精巣	3週	約6
	卵巣	1週以内	約3
造血能低下	骨髄	3～7日	約0.5
皮膚発赤	皮膚 (広い範囲)	1～4週	3～6以下
皮膚熱傷	皮膚 (広い範囲)	2～3週	5～10
一時的脱毛	皮膚	2～3週	約4
白内障 (視力低下)	眼	数年	約1.5 (0.5**)

*臨床的な異常が明らかな症状のしきい線量 (1%の人々に影響を生じる線量)

**国際放射線防護委員会報告書118(2012)では、しきい値が下げられた。

国際放射線防護委員会2007年勧告

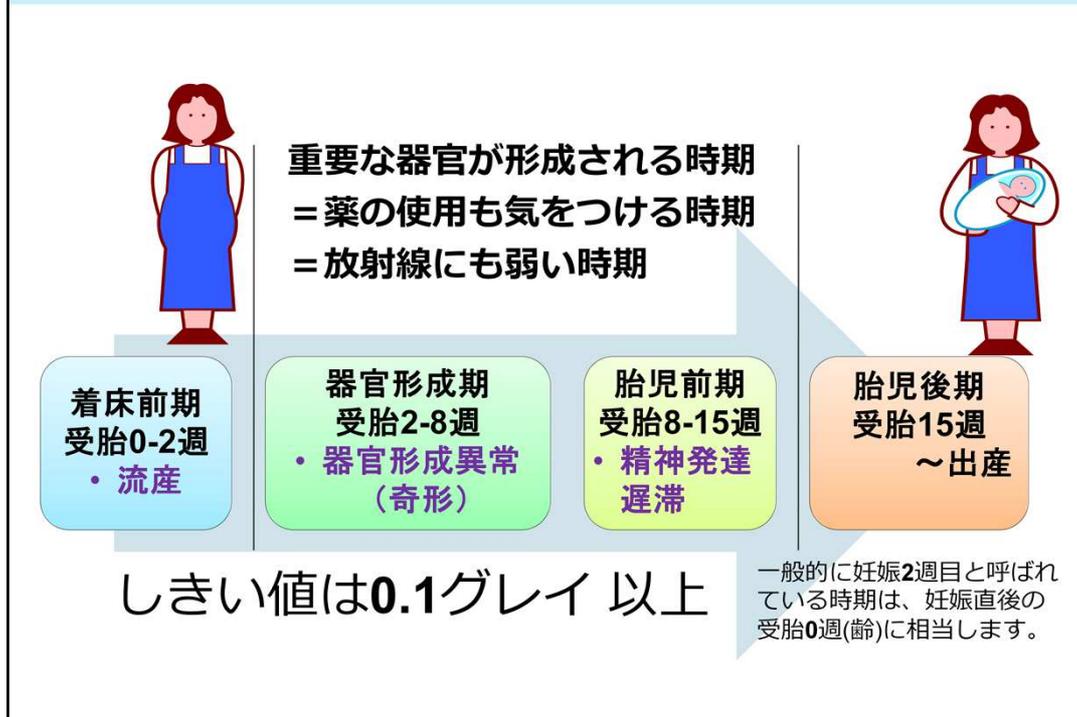
放射線の感受性は臓器によって異なりますが、最も感受性の高いのは精巣です。一度に0.1 グレイ(100 ミリグレイ)以上のγ(ガンマ)線などの放射線を受けると、精子数が一時的に減少する一時的不妊を引き起こすことがあります。これは、精巣が活発に増殖している臓器だからです。

また骨髄が0.5 グレイ(500 ミリグレイ)以上の被ばくをすると、造血能が低下し、血液細胞の数が減少します。

確定的影響の中には、白内障のように発症するまでに数年かかるものもあります。なお白内障のしきい値は1.5 グレイとされていますが、最近の報告ではそれ以下かもしれないとも考えられています。

本資料への収録日: 2013年3月31日

確定的影響と時期特異性



確定的影響の中でもしきい値の低いものに、胎児影響があります。妊婦が被ばくした場合、子宮内を放射線が通過したり、放射性物質が子宮内に移行したりすれば、胎児も被ばくする可能性があります。

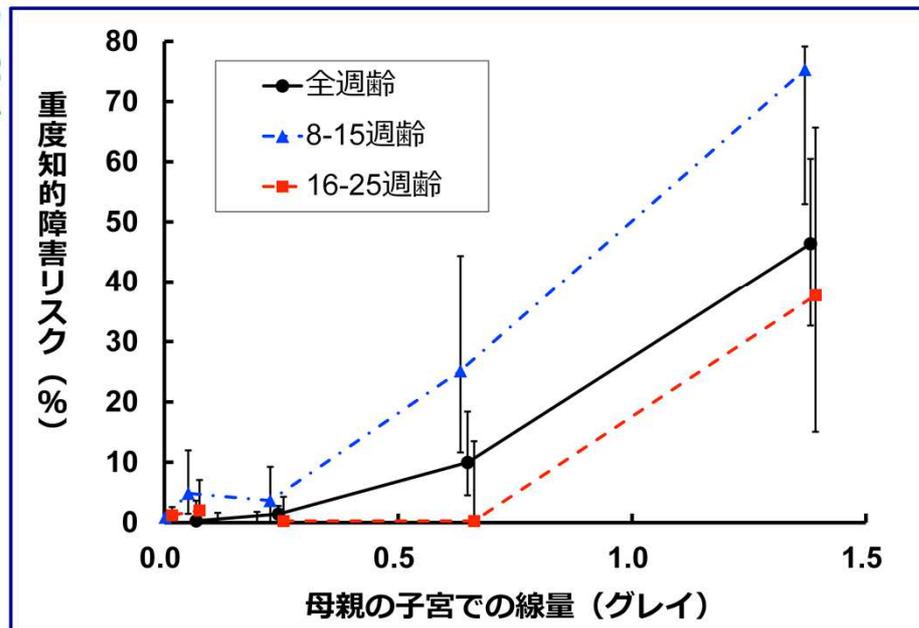
胚／胎児期は放射線感受性が高く、また影響の出方に時期特異性があることが分かっています。妊娠のごく初期に0.1 グレイ以上の放射線を受けると、流産が起こることがあります。この時期を過ぎての被ばくの場合、流産の可能性は低くなりますが、赤ちゃんの体がどんどんできている時期に放射線を受けると、その形成されている部分に、器官形成異常が起こることがあります。脳が活発に发育しているときに放射線を受ければ、精神発達遅滞の危険性があります。

放射線への感受性が高い時期は、妊婦さんが、薬をやたらと飲まないようにしなうと、指導されている時期と一致します。安定期に入るまでのこの時期は、薬同様、放射線の影響も受けやすい時期になります。

こうした胚／胎児影響は0.1 グレイ以上の被ばくで起こることから、国際放射線防護委員会は、2007年の勧告の中で「胚／胎児への0.1 グレイ未満の吸収線量は妊娠中絶の理由と考えるべきではない」という考え方を示しています。これはγ(ガンマ)線やX線を一度に100ミリシーベルト受けた場合に相当します。また母体の被ばく線量と必ずしも同じではありません。

また被ばく線量に応じて、がんや遺伝性影響といった確率的影響のリスクも高まります。

本資料への収録日：2013年3月31日



放射線影響研究所HPより作成 <http://www.rerf.or.jp/>

胎児影響の時期特異性については、原爆による胎内被ばくした集団の健康調査により明らかになりました。

これは、原爆投下時の胎齢と精神発達への影響との関係を調べたグラフです。

原爆被ばく時の胎齢が8～15週齢の場合、放射線感受性が高く、子宮内での線量が0.1グレイから0.2グレイの間にしきい値があるように見えます。これ以上の線量域では、線量の増加に応じて重度知的障害の発生率が上がっているのが分かります。

しかし16週から25週だった子供たちは、不幸にして0.5グレイ程浴びてしまった場合でも重度な知的障害は見られず、1グレイを超えるような被ばくをすると、かなりの頻度で障害が発生することが分かりました。

つまり、同じ量の被ばくをしても、8～15週齢で被ばくした場合と、16～25週齢の被ばくでは、障害の発生率が異なっていました。

本資料への収録日：2013年3月31日



原爆被爆者の子供における安定染色体異常

異常の起源	染色体異常を持った子どもの数 (割合)	
	対照群(7,976人)	被ばく群(8,322人) 平均線量は0.6グレイ
両親のどちらかに由来	15 (0.19%)	10 (0.12%)
新たに生じた例	1 (0.01%)	1 (0.01%)
不明 (両親の検査ができなかった)	9 (0.11%)	7 (0.08%)
合計	25 (0.31%)	18 (0.22%)

放射線影響研究所HP <http://www.ref.or.jp/>

原爆被爆者二世の健康影響調査では、重い出生時障害、遺伝子の突然変異や染色体異常、がん発生率やがんやその他の疾患による死亡率等について調べられていますが、どれも対照群との差は認められませんでした。

安定型染色体異常は細胞分裂で消失することがなく、子孫に伝わるタイプの染色体異常です。両親の少なくともどちらかが爆心地から2,000 m 以内で被ばくした子供8,322人の中には安定型染色体異常を持つ子が18人いました。対照群の子供7,976人からは25人に安定型染色体異常が認められました。しかしその後の両親および兄弟姉妹の検査により、突然変異の大半は新しく生じたものではなく、どちらかの親が異常を持っていて、それが子に遺伝したものであることが明らかとなりました。こうしたことから、被ばくにより、親の生殖細胞に安定型染色体異常が生じ、二世に伝わるといった影響は、原爆被爆者では認められないことが分かりました。

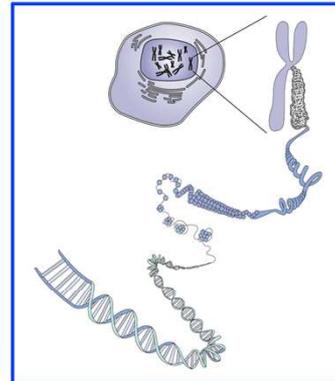
本資料への収録日: 2013年3月31日

■ 生殖腺（生殖細胞）が放射線を受けると

- ◎ 遺伝子突然変異
DNAの遺伝情報の変化（点突然変異）
- ◎ 染色体異常
染色体の構造異常

■ 遺伝性影響のリスク(子と孫の世代まで)

= 約 **0.2%/グレイ** (1グレイあたり1000人中2人)
(国際放射線防護委員会2007年勧告)



上記の値は、以下のデータを用いて間接的に推定されている

- ・ ヒト集団での各遺伝的疾患の自然発生頻度
- ・ 遺伝子の平均自然突然変異率（ヒト）、平均放射線誘発突然変異率（マウス）
- ・ マウスの放射線誘発突然変異からヒト誘発遺伝性疾患の潜在的リスクを外挿する補正係数

■ 生殖腺の組織加重係数(国際放射線防護委員会勧告)

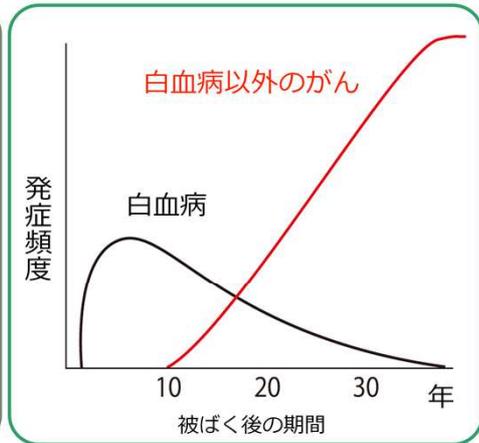
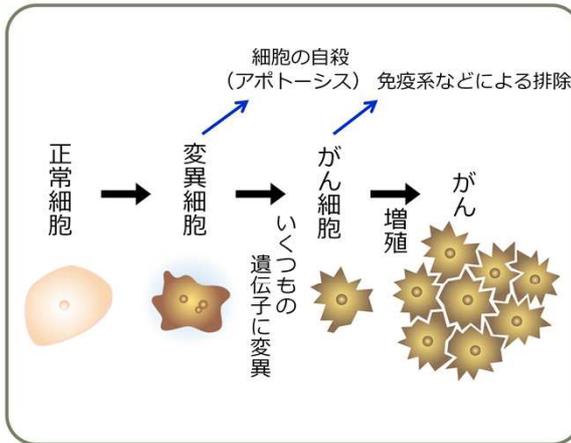
0.25(1977年)→0.20(1990年)→0.08(2007年)

動物実験では親に高線量の放射線を照射すると、子孫に出生時障害や染色体異常などが起こることがあります。しかし人間では、両親の放射線被ばくが子孫の遺伝病を増加させるという直接の証拠はありません。そのため、国際放射線防護委員会では、1グレイ当たりの遺伝性影響のリスクは0.2%と見積もっています。これはがんの死亡リスクの20分の1にも満たない値です。

原爆被爆者の二世については、死亡追跡調査、臨床健康診断調査や様々な分子レベルの調査が行われています。こうした調査結果が明らかになるにつれ、従来心配されるほど遺伝性影響のリスクは高くないことがわかってきましたので、生殖腺の組織加重係数の値も、最近の勧告ではより小さい値に変更されています。

本資料への収録日：2013年3月31日

発がんのしくみ



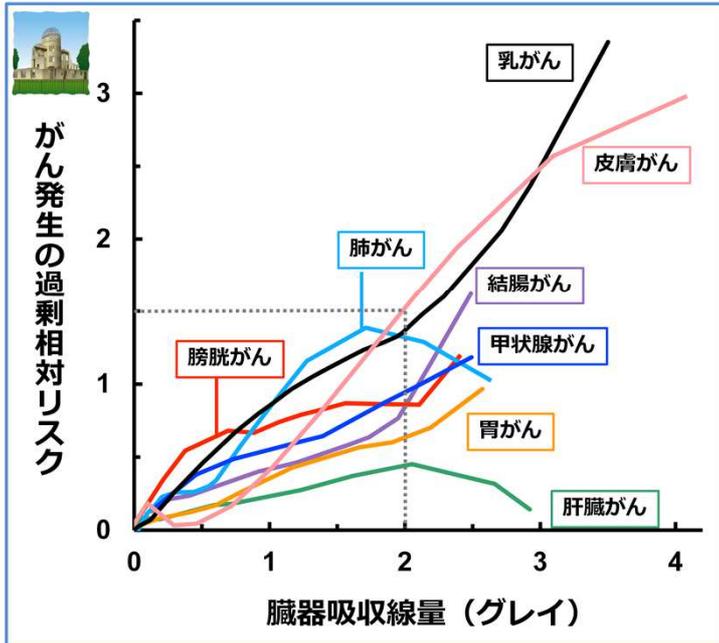
- ・放射線はがんを起こすさまざまなきっかけの一つ
- ・変異細胞ががんになるまでには、いろいろなプロセスが必要
→数年～数十年かかる

DNA を傷つけるのは、放射線ばかりではなく、さまざまなありふれた化学物質や紫外線などにもその作用があります。しかし、細胞には傷ついたDNA を修理する仕組みがあり、たいていの傷はすぐに元通りに修繕され、また修理に失敗した場合でも、その細胞を排除する機能が体には備わっています。

ごく稀に、修理し損なった細胞が、変異細胞として体の中に生き残ることがあります。こうしたがんの芽は生じては消え、生じては消えといったことを繰り返します。中にたまたま生き残ったものに遺伝子の変異が蓄積し、がん細胞となることもあります。それに長い時間がかかります。

本資料への収録日：2013年3月31日

放射線感受性の高い臓器



組織	組織加重係数 w_T
骨髄(赤色)、胃、肺、結腸、乳房	0.12
生殖腺	0.08
膀胱、食道、肝臓、甲状腺	0.04
骨表面、脳、唾液腺、皮膚	0.01
残りの組織の合計	0.12

国際放射線防護委員会
2007年勧告

Preston et al., Radiat Res, 168, 1, 2007より作成

これは、原爆被爆者を対象に、どれだけの線量をどこに受けるとがんのリスクが増加したかを調べたものです。横軸は、原爆投下時の高線量率一回照射による臓器吸収線量です。縦軸は、過剰相対リスクといって、放射線を受けなかった集団に比べ、どのくらいがん発生のリスクが増加したかを調べています。例えば、臓器吸収線量が2グレイの群では、皮膚がんの過剰相対リスクが1.5 となっていますので、この被ばく群では、放射線を受けなかった集団の1.5倍のリスクが加算されていることを意味しています(つまり、2グレイ被ばく群では皮膚がんの発生リスクは、放射線を受けていない群の2.5倍となります)。

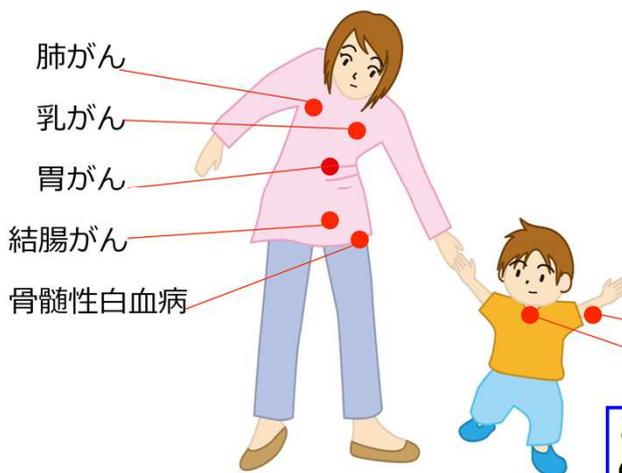
こうした疫学研究の結果から、乳腺、皮膚、結腸などは、放射線によってがんが出やすい臓器・組織であることが分かりました。国際放射線防護委員会の2007年勧告では、臓器の感受性やがんの致死性なども考慮し、組織加重係数を決めています。

本資料への収録日: 2013年3月31日

改訂日: 2014年3月31日

年齢による感受性の差

こどもは小さなおとなではない



実効線量係数 (μSv/Bq)	
ヨウ素131	
3ヶ月児	0.18
1歳児	0.18
5歳児	0.10
成人	0.022

μSv/Bq: マイクロシーベルト/ベクレル

こどもでは甲状腺や皮膚のがんリスクも高くなる

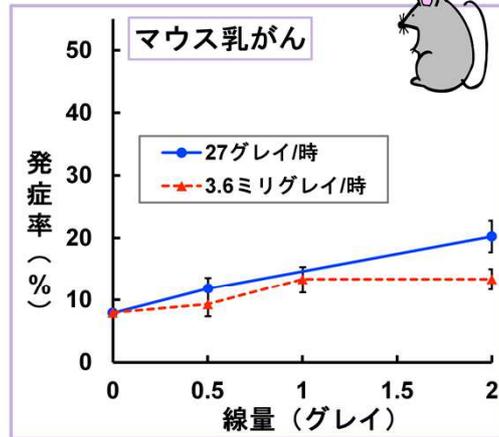
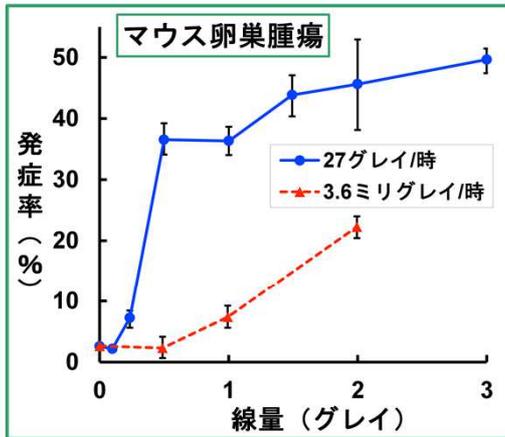
※代謝や体格の違いから、こどもは実効線量係数が高くなっている。

大人の場合、骨髄、結腸、乳腺、肺、胃という臓器は、放射線によってがんが出やすい臓器ですが、子どもの場合は、甲状腺や皮膚も放射線によるがんリスクが高いことが分かってきました。

特に子どもの甲状腺は放射線に対する感受性が高いうえに、摂取放射エネルギー(ベクレル)当たりの実効線量が大人よりもはるかに大きいので、緊急時に関しては、1歳児の甲状腺の被ばく線量が、防護策を考える基準に取り入れられています。また、摂取放射エネルギー(ベクレル)当たりの実効線量係数は、成人よりもはるかに大きい数値が採用されています。

本資料への収録日: 2013年3月31日

低線量率被ばくの発がんへの影響



UNSCEAR 1993

低線量・低線量率のリスク

高線量・高線量率のリスク

$$= \frac{\text{高線量・高線量率のリスク}}{\text{線量・線量率効果係数}}$$

線量・線量率効果係数

機関	線量・線量率効果係数
国連科学委員会1993	3より小さい(1~10)
米国科学アカデミー2005	1.5
国際放射線防護委員会1990,2007	2

原爆被爆者のデータは、大きな線量を一度に受けた被ばくによる影響を調べたものです。しかし職業被ばくや、事故による環境汚染からの被ばくは、慢性的に低線量率での被ばくです。

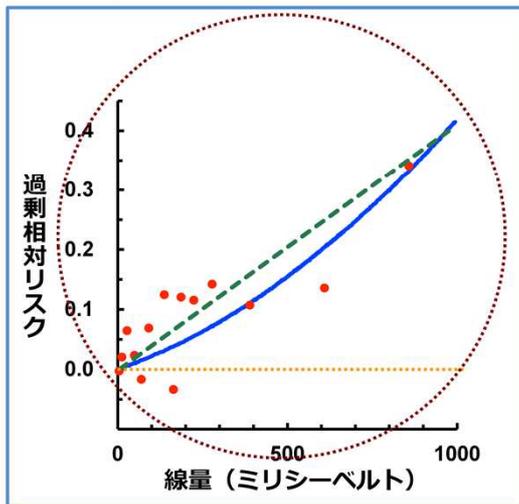
そこで、マウスを用いて、一度に大きな線量を受けた場合と、じわじわと少しずつ受けた場合とでは、放射線による発がん率にどのくらい違いがあるのかを調べる実験が行われました。その結果、がんの種類によって、結果に違いはあるものの、概してじわじわと被ばくする方が影響の出方が小さいことが分かってきました。

線量効果係数と線量率効果係数は、それぞれ高線量のリスクから低線量のリスクを外挿する際、あるいは急性被ばくのリスクから慢性被ばくや反復被ばくのリスクを推定する際に用いられる補正值です。この補正值をいくつにして放射線防護を考えればいいのかについては、研究者によっていろんな意見がありますが、国際放射線防護委員会の勧告では、少しずつの被ばくの場合、一度に被ばくした場合に比べ、同じ線量を受けた場合でも、影響の出方は半分になるとしています(補正值として2を使う)。

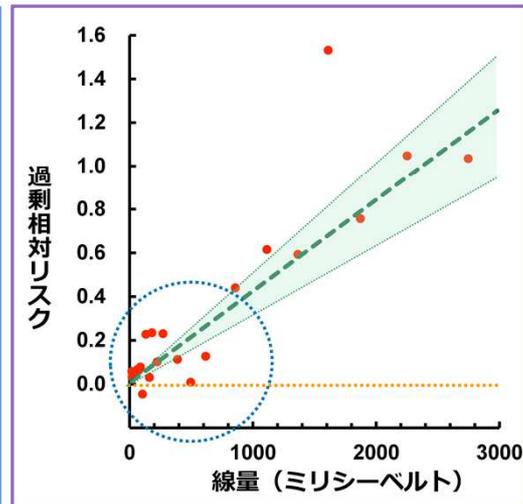
本資料への収録日: 2013年3月31日



固形がんによる死亡(原爆被爆者データ)



Preston *et al.*, Radiat Res, 162, 377, 2004より作成

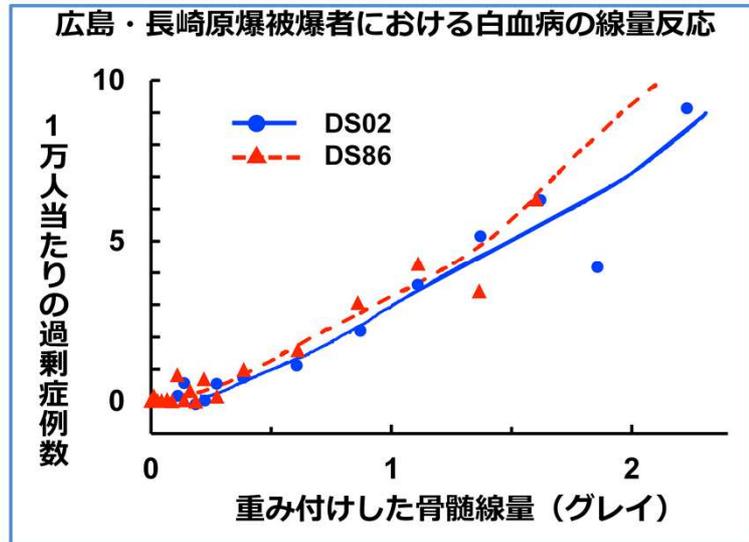


Ozasa *et al.*, Radiat Res, 177, 229, 2012より作成

原爆被爆者の健康影響調査の結果から、放射線を受けた量が増えると、発がんのリスクが高まることが知られています。固形がんによる死亡リスクと線量の関係には、約100ミリシーベルト以上で直線性が見られるものの、100ミリシーベルト以下のリスクについては研究者によって意見が分かれています。

100ミリシーベルト以下でも線量とがんリスクは比例関係にあるのか、それとも実質的なしきい値が存在するのかは、今後の研究によって明らかにする必要があります。

本資料への収録日: 2013年3月31日



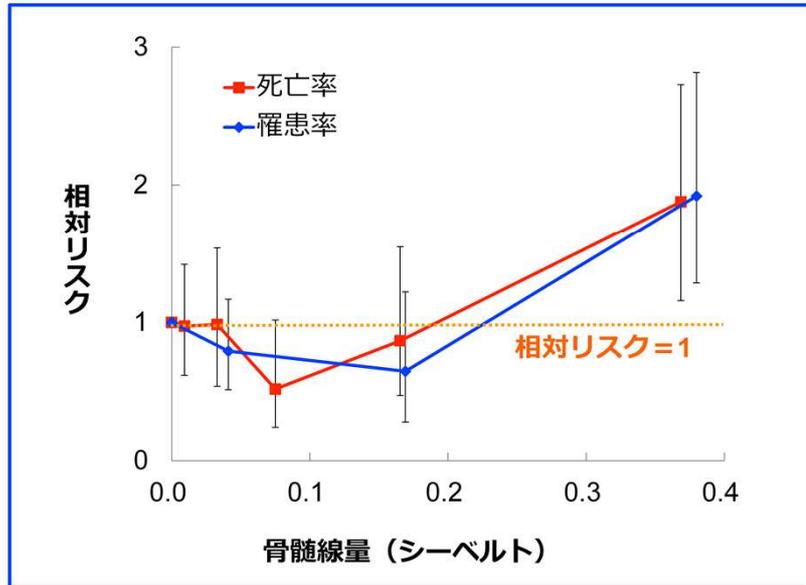
DS02とDS86による白血病のノンパラメトリックな線量反応 (1950-2000年)
Preston et al., Radiat Res, 162, 377, 2004より作成

他のがんとは対照的に、白血病の線量反応関係は二次関数的であり、低線量では単純な線形線量反応で予測されるよりもリスクは低くなっています。しかし0.2-0.5 グレイの低い線量範囲においても白血病リスクの上昇が認められています。

本資料への収録日: 2013年3月31日



原爆被爆者における発がんのリスク（白血病）



UNSCEAR 2006年報告書より作成

0.2シーベルト以下の線量域では、白血病リスクの増加は顕著ではありませんが、0.4シーベルト近くの群では顕著な増加が認められます。

本資料への収録日：2013年3月31日
改訂日：2014年3月31日



原爆被爆者の被爆時年齢別相対リスク

		男性(ミリシーベルト)			女性(ミリシーベルト)		
		5～500	500～1000	1000～4000	5～500	500～1000	1000～4000
年齢	0-9歳	0.96	1.10	3.80	1.12	2.87	4.46
	10-19歳	1.14	1.48	2.07	1.01	1.61	2.91
	20-29歳	0.91	1.57	1.37	1.15	1.32	2.30
	30-39歳	1.00	1.14	1.31	1.14	1.21	1.84
	40-49歳	0.99	1.21	1.20	1.05	1.35	1.56
	50歳以上	1.08	1.17	1.33	1.18	1.68	2.03

Preston et al., Radiat Res, 168,1, 2007

これは、原爆被爆者のがん罹患相対リスクを、男女別、被ばく時年齢別で表したものです。相対リスクとは、放射線を受けていない人を1とした時、放射線を受けた人のがんリスクが何倍になるかを表しています。

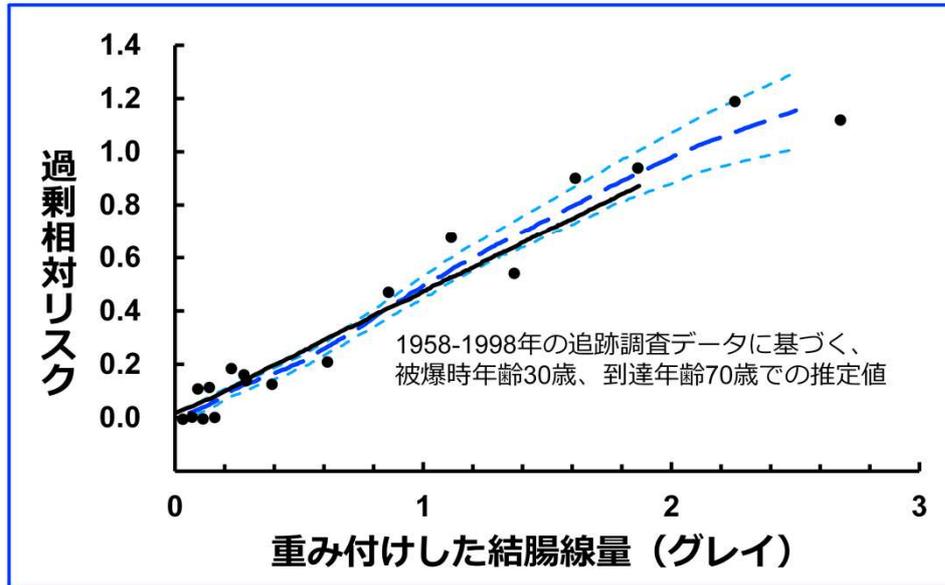
0-9歳の男性群では、5～500ミリシーベルト被ばくのがんリスクは、非照射群の0.96倍と非照射群と差がありません。500～1,000ミリシーベルトを受けた集団で1.1倍、1,000～4,000ミリシーベルトでは3.8倍と、線量に比例して相対リスクも増えます。女性でも同じ傾向が見られます。一方、50歳以上の集団でも、5～500ミリシーベルトの群では相対リスクが1に近く、線量が増えるにつれてがんリスクも増えていますが、その増え方が、0-9歳ほど顕著ではありません。年齢による差は1,000～4,000ミリシーベルトの被ばく群で顕著で、0-9歳の相対リスクは3.80(男性)あるいは4.46(女性)であり、20歳以上の群の相対リスクの2～3倍になっています。

このように高線量域では、子どもが大人より放射線感受性が高いことが明らかですが、低線量域については、リスクの変化があったとしても小さすぎて疫学的手法では検出できないため、これまでのところの科学的知見は十分ありません。そこで、放射線防護の観点からは、どの線量域でも、子どもは大人より3倍程度感受性が高いとみなすべきであると考えられています。

本資料への収録日: 2013年3月31日



広島・長崎原爆被爆者における固形がんの線量反応



Preston *et al.*, Radiat Res, 168,1, 2007より作成

このグラフは原爆被爆者の寿命調査(LSS)集団における固形がん発生の過剰相対リスクを示した結果です。太い実線は、被爆時年齢30歳の方が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク(ERR)ですが、直線の線量反応を示しています。なお太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平均化推定値の上下1標準誤差を示します。

1 Gyあたりの男女平均の過剰相対リスクは0.47(90%信頼限界:0.40-0.54)ですが、女性(0.58)は男性(0.35)よりも60%ほど高くなります。

本資料への収録日:2013年3月31日

改訂日:2014年3月31日



広島長崎の原爆生存者の調査結果 100mSvでの急性被ばくによる推定

被ばく時年齢	性	過剰の生涯リスク (%)	被ばくがない時 (%)
10歳	男	2.1	30
	女	2.2	20
30歳	男	0.9	25
	女	1.1	19
50歳	男	0.3	20
	女	0.4	16

10歳の男性が、100mSv被ばくすると、被ばくしないときにはその後の生涯で30%の発がんの可能性があるが、被ばくにより2.1%増加し、32.1%になると推定される。

mSv : ミリシーベルト

Preston *et al.*, Radiat Res, 160, 381, 2003

放射線による過剰相対リスクの大きさは、被ばく年齢によって異なります。たとえば10歳の男の子には、被ばくしないときにはその後の生涯で30%の発がんの可能性がありますが、100mSv被ばくしたら、発がんリスクが2.1%増加し、32.1%になると推定されます。

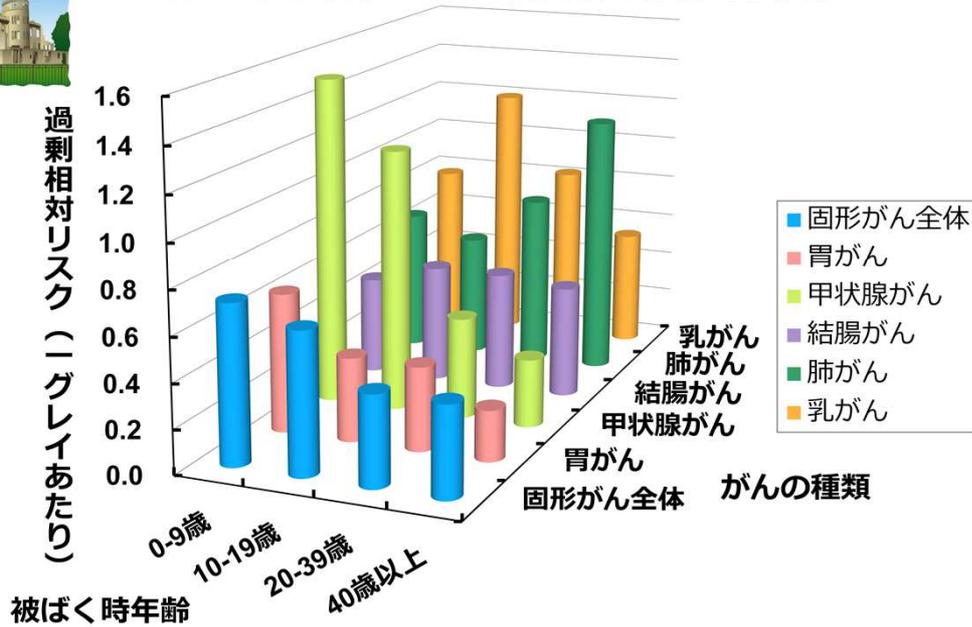
一方、50歳の男性では、その後の生涯での発がんの可能性は20%と減少します。100mSvを被ばくした場合、発がんリスクは0.3%増加し、20.3%になると推定されます。

本資料への収録日: 2013年3月31日

被ばく時年齢とがんの種類



被ばく時年齢ごとの発がん過剰相対リスク

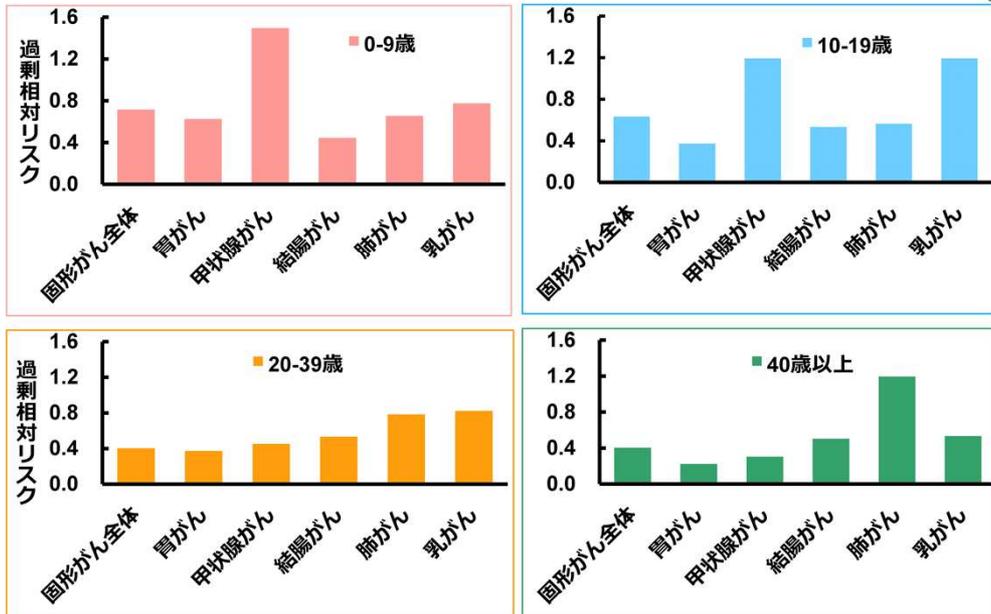


Preston et al., Radiat Res, 168,1, 2007より作成

原爆被爆者のデータを用いて、被ばくした時の年齢別、がんの部位別に、がんの過剰相対リスク(1Gyあたり)を比較すると、①被ばく時の年齢が若いほどリスクが高いもの(甲状腺がん)、逆に40歳以上でリスクが高いもの(肺がん)、思春期のリスクが高いもの(乳がん)、年齢依存が顕著でないもの(大腸がん)と、がんの種類によって放射線への感受性が高い時期が異なります。

本資料への収録日: 2013年3月31日

被ばく時年齢ごとの発がん過剰相対リスク（1 Gyあたり）

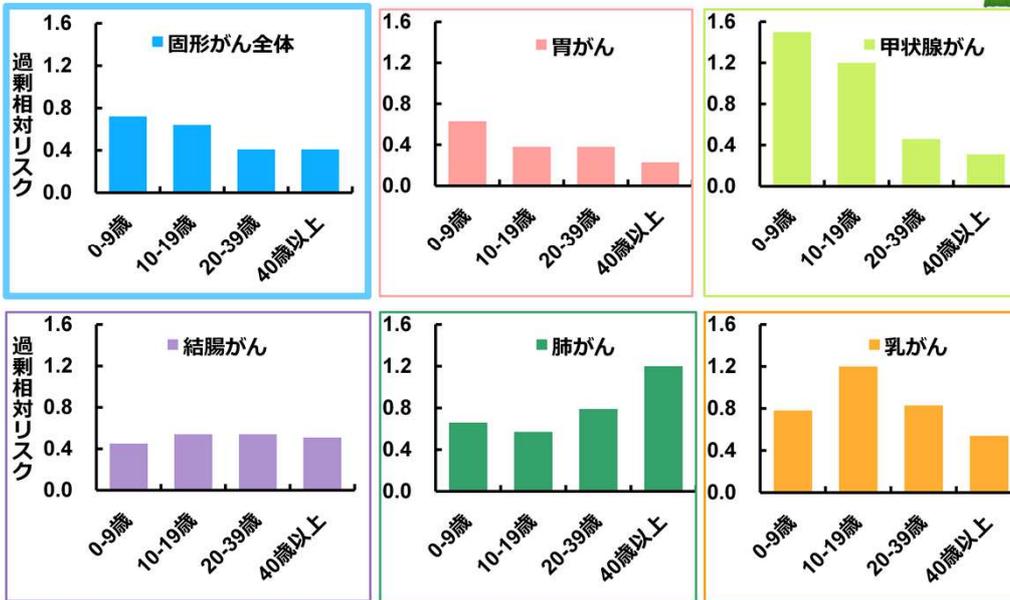


Preston et al., Radiat Res, 168,1, 2007より作成

被ばく時年齢によって、最も放射線発がんのリスクが高い臓器に違いがあることがわかります。
 グラフの値は到達年齢70歳に対するものです。

本資料への収録日：2013年3月31日

被ばく時年齢ごとの発がん過剰相対リスク（1 Gyあたり）



Preston et al., Radiat Res, 168,1, 2007より作成

これは原爆被爆者のデータですが、1グレイあたりの過剰相対リスクです。たとえば固形がん全体の0-9歳の過剰相対リスクは0.7ぐらいですので、1Gyを浴びた集団では、放射線に被爆していない集団よりも0.7相対リスクが増加することを意味しています。つまり、対照群のリスクが1なら、1Gy被ばくした群のリスクは1.7倍になることを意味しています。20歳以上では過剰相対リスクは0.4ぐらいですので、1Gy浴びたときにはリスクが対照群の1.4倍になります。

このようにリスクは、被ばく年齢やがんの種類によって、リスク係数の値が変わってきます。

本資料への収録日：2013年3月31日

急性外部被ばくの発がん

原爆被爆者における甲状腺がんの発症



甲状腺線量	平均線量 (mSv)	対象 (人)	患者 (人)	オッズ比
<5mSv	—	755	33	1
5-100mSv	32	936	36	0.85 (0.52-1.39)
100-500mSv	241	445	22	1.12 (0.64-1.95)
500mSv<	1237	236	15	1.44 (0.75-2.67)

mSv : ミリシーベルト

Hayashi *et al.*, Cancer, 116, 1646, 2010

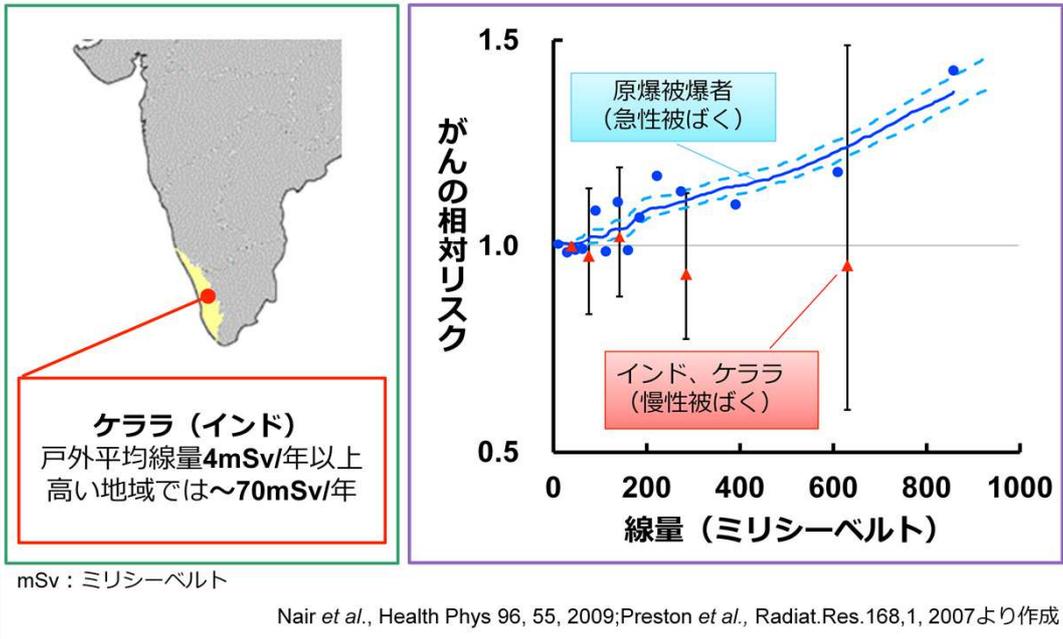
原爆被爆者における甲状腺がんの発症についてオッズ比を見てみると、等価線量で100mSvまではオッズ比が低いことがわかります。

本資料への収録日 : 2013年3月31日

慢性被ばくの
発がん

低線量率長期被ばくの影響

インド高自然放射線地域住民の発がん



低線量率被ばくと高線量率被ばくで、影響の出方は違います。
これは原爆被爆のデータとインドケララのような高自然放射線地域住民のリスクを比較したのですが、ケララでは積算線量が数百ミリシーベルトになってもがんの相対リスクの増加がみられません。しかし、信頼限界の幅もこんなに大きいので、現時点で、リスクの換算には使えないのですが、慢性被ばくの場合、急性被ばくよりもリスクが小さくなることは言えそうです。

本資料への収録日:2013年3月31日

原発事故由来の
内部被ばくによる発がん

チェルノブイリ原発事故による セシウム137の内部被ばく

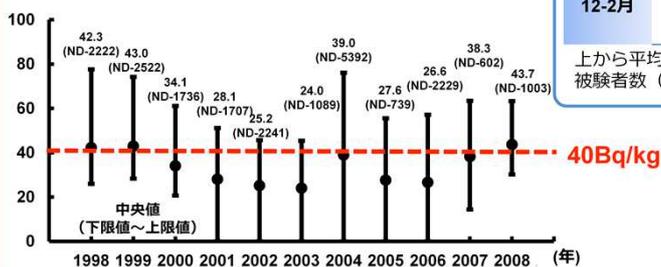


体内のセシウム137濃度の
季節ごとの変化(Bq/kg)と被験者数

	1998-2001年	2002-2005年	2006-2008年
3-5月	34.6 (ND-2154.9) 10993	27.3 (ND-5392.2) 18722	32.0 (ND-1757.1) 9284
6-8月	71.5 (ND-399.0) 265	32.2 (ND-393.0) 268	21.2 (ND-271.1) 451
9-11月	40.9 (ND-2521.7) 9590	33.5 (ND-1089.3) 8999	44.2 (ND-2229.3) 4080
12-2月	33.5 (ND-1735.8) 8971	20.6 (ND-607.0) 6603	39.8 (ND-1454.3) 6404

上から平均値 (Bq/kg)、(検出下限値~検出上限値)、
被験者数 (人)。NDは検出限界以下。

(Bq/kg) ホールボディカウンタで計測された体内セシウム137濃度



Bq/kg : ベクレルキログラム

Sekitani et al., Radiat Prot Dosimetry, 141, 1, 2010より作成

ブリヤンスク州では、
1998-2008年の間、
平均40Bq/kgの
内部被ばくを認めた

1986年におこったチェルノブイリ原発事故では、福島原発事故よりもはるかに大量の放射性物質が放出されました。事故当初ソ連はこの事故を公表せず、施設周辺住民の避難措置などがとられませんでした。また、事故が起こった4月下旬には、旧ソ連の南部地域ではすでに放牧がおこなわれていたため、ミルクの汚染等が起こりました。

1998年から2008年の間、ホールボディカウンタを用いて、ブリヤンスク州の住民の¹³⁷Csの体内放射能を測定した結果、期間中の体内¹³⁷Csの中央値は20-50Bq/kgを推移しつつ、2003年まで低下していたが、2004年から上昇傾向がみられています。¹³⁷Csによる被ばくは長期にわたって続くことがわかります。

本資料への収録日: 2013年3月31日

原発事故由来の
内部被ばくによる発がん

チェルノブイリ事故 避難集団の被ばく

国	人数 (千人)	平均実効線量(mSv)		平均甲状腺 線量(mGy)
		外部	内部 (甲状腺以外)	
ベラルーシ	25	30	6	1100
ロシア連邦	0.19	25	10	440
ウクライナ	90	20	10	330
合計	115	22	9	490

国連科学委員会2008年報告より

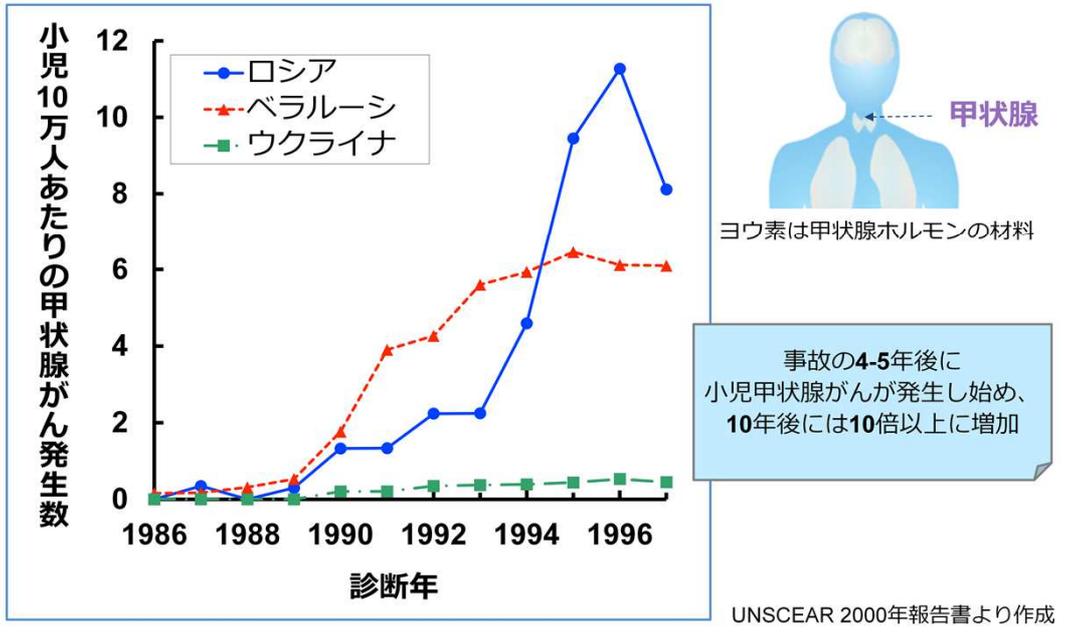
チェルノブイリ事故に際して避難した人々の甲状腺線量は高く、平均約500mGyと推定されています。事故直後から2-3週間にわたって、¹³¹Iで汚染した牛乳を飲んだことが主な原因です。

避難しなかった旧ソ連の居住者の平均甲状腺線量(約20mGy)、汚染地域に住んでいる人々の線量(約100mGy)、その他欧州諸国の居住者の線量(約1 mGy)よりはるかに高いという結果でした。

甲状腺被ばく以外の内部被ばくと外部被ばくからの実効線量は、平均で約30mSvでした。平均甲状腺線量同様、平均実効線量はウクライナやロシア連邦よりもベラルーシにおいて高いことがわかっています。

本資料への収録日:2013年3月31日

小児甲状腺がん（チェルノブイリ事故）

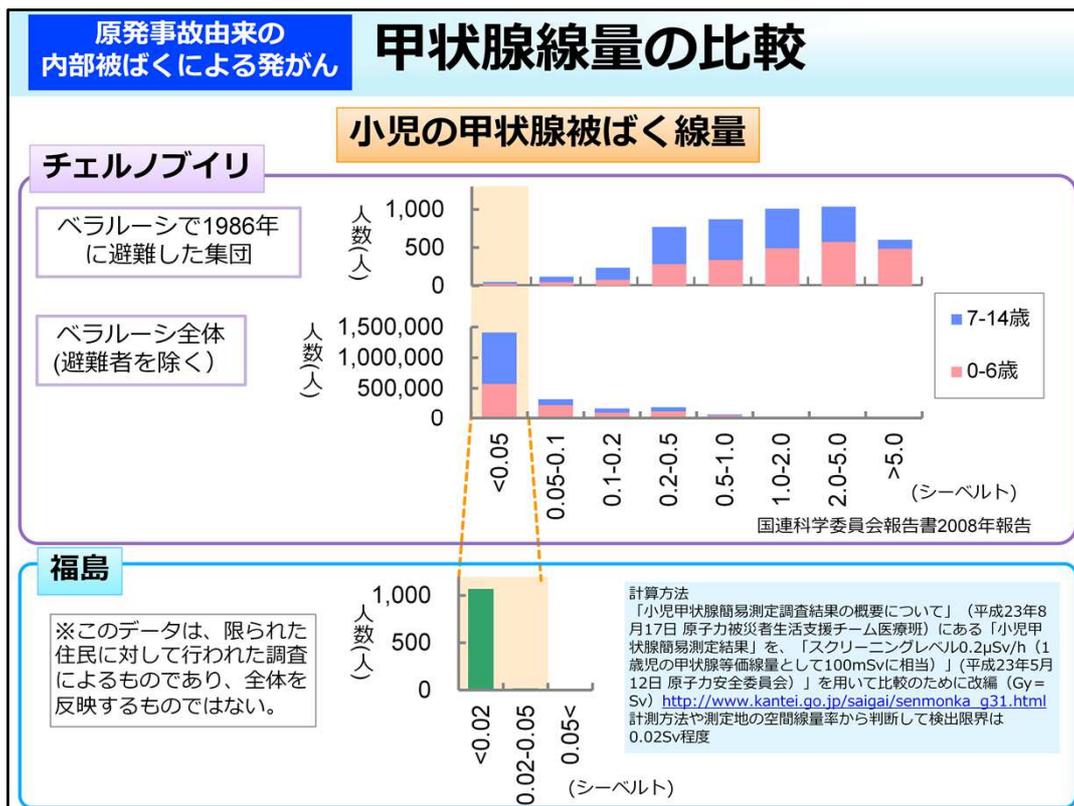


チェルノブイリ事故では、爆発によって放射性物質が大量に飛び広がりました。その中で健康被害をもたらしたのは、主には放射性ヨウ素であったといわれています。

地上に降り注いだ放射性ヨウ素を吸入したり、食物連鎖によって汚染した野菜や牛乳、肉を食べた子どもたちの中で、小児甲状腺がんが発症しました。特に、ミルクに含まれていたヨウ素¹³¹による内部被ばくに由来するところが大きかったといわれています。

ベラルーシやロシアでは、事故後4-5年ごろから小児甲状腺がんが発生し始め、10年後に10倍以上に増加しました。チェルノブイリ事故における小児甲状腺がんの5年、および10年生存率は、それぞれ99.5%、98.8%でした(引用:D Williams, Oncogene (2009) 27, S9-S18)。

本資料への収録日: 2013年3月31日



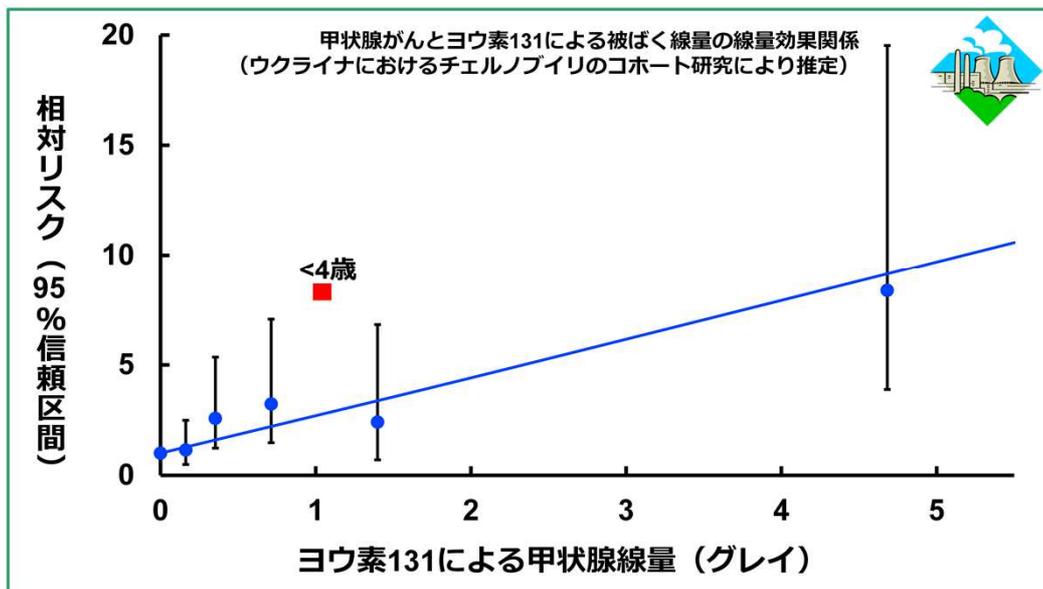
福島原発事故により子どもたちの甲状腺が放射性ヨウ素によりどのくらいの被ばくをしたのか、正確に評価することは大変難しいのですが、事故後約2週間の時点で行われた小児甲状腺線量のスクリーニング調査の結果を用いると、おおよそのことはわかります。

このスクリーニング調査は、事故後2週間の時点で、甲状腺線量が高いと予想された川俣、いわき、飯館の子どもたちに対し、サーベイメータを用いて行われたものです。1000人以上の15歳以下の子どもたちを検査した結果、原子力安全委員会がスクリーニングレベルを超える子どもはいないこと、検査を受けた子ども全員が50mSv以下であることがわかりました。

国連科学委員会によるチェルノブイリ事故での甲状腺被ばく線量に関する解析では、50mSv以下の線量域は最も小さい線量域として扱われています。ベラルーシで1986年に避難した集団はもとより、ベラルーシ全体の線量分布と比べても、福島原発事故による甲状腺の被ばく線量が低かったことがわかります。

本資料への収録日：2013年3月31日

改訂日：2014年3月31日



Brenner et al., Environ Health Perspect 119, 933, 2011より作成

チェルノブイリ事故の子どもたちの内部被ばく線量と甲状腺がんのリスクの関係に関しては、こう言った研究結果が出ています。
つまり甲状腺が1Gyの放射線を受けると、甲状腺がんになる可能性が2倍になるというものです。この2倍と言う数値は18歳までの子供たちの平均であり、幼児までの場合は、これよりも高くなると、この研究では紹介しています。

しかしこの数値が日本人にそのまま使えるかというと、少し慎重に考える必要があります。なぜなら、ヨウ素が足りない地域では甲状腺がんリスクが増加する傾向にあるからです。

本資料への収録日: 2013年3月31日

安定ヨウ素剤	1Gyでの相対リスク (95%信頼区間)	
	土壌中ヨウ素 濃度が高い地域	土壌中ヨウ素 濃度が低い地域
投与なし	3.5 (1.8-7.0)	10.8 (5.6-20.8)
投与あり	1.1 (0.3-3.6)	3.3 (1.0-10.6)

Cardis *et al.*, JNCI, 97, 724, 2005

ヨウ素が足りない地域では、1Gyあたりの甲状腺がんの相対リスクが約3倍に増加します。そこで、内陸のチェルノブイリ周辺のリスク係数を、日本人にそのままはあてはめることはできない可能性があります。

本資料への収録日：2013年3月31日

リスク 確率的影響のリスク

被ばく無し*



少し被ばく



たくさん被ばく



*実際には、放射線被ばくのない集団でも、がんになる人はゼロではありません。

同じように放射線を浴びても
がんになる人とならない人がいる

がんや遺伝性影響といった確率的影響では、同じように放射線を受けた集団の中でも、疾患になる人とならない人ができます。しかも誰がなるかという予想はできません。また、たくさん被ばくしたからといって、症状が重くなるわけでもありません。

そのため、がんや遺伝性影響の危険性は、何人中何人が病気になるかという確率で表現されます。

本資料への収録日：2013年3月31日

リスク 相対リスクと寄与リスク

要因	罹 患		計
	あ り	な し	
曝露群	A	B	A+B
非曝露群	C	D	C+D

要因ばく露によってその個人が何倍罹患しやすくなるか

$$\text{相対リスク} = \frac{\text{要因曝露群の罹患リスク}}{\text{要因非曝露群の罹患リスク}} = \frac{\frac{A}{A+B}}{\frac{C}{C+D}}$$

要因ばく露によってその集団の罹患率がどれだけふえるのか

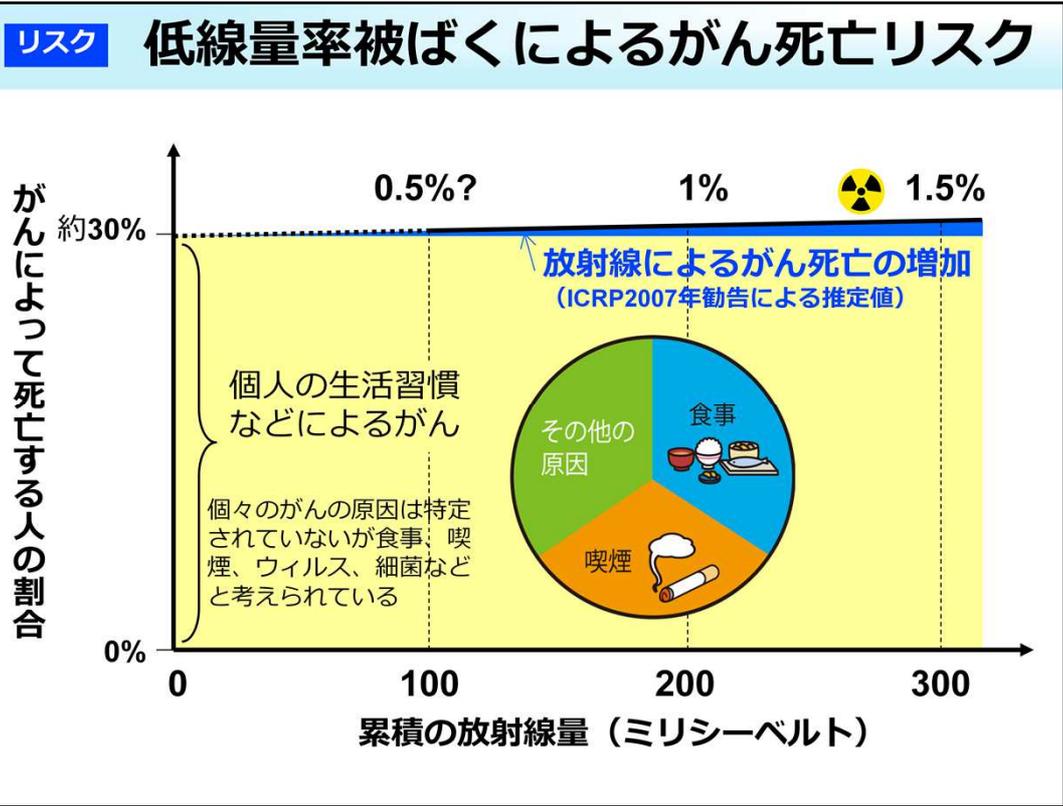
$$\begin{aligned} \text{寄与リスク} &= \text{要因曝露群の罹患リスク} - \text{要因非曝露群の罹患リスク} \\ &= \frac{A}{A+B} - \frac{C}{C+D} \end{aligned}$$

相対リスクとは、ある原因により、それを受けた個人のリスクが何倍高まるか、ということを表したリスクです。疫学で普通にリスクと言った際には、「相対リスク」のことを指していることが多いのですが、これ以外にも、寄与リスクと言う考え方があります。寄与リスクとは、ある原因により、集団の罹患率や死亡率がどのくらい増えるかということを表しています。

例えば、ある集団がなにかしらのリスク源に曝されている、ある集団は曝されていないとします。曝されていない集団では、ある疾患の患者が、100万人に2人出るのに対し、曝されている集団では100万人中3人患者が出るとします。

相対リスクと言うのは、どれだけ疾患になりやすくなるかという観点のリスクですので、患者が2人が3人になった、つまり、リスクは1.5倍になったと評価します。一方寄与リスクでは、集団内でどれだけ患者が増えた分を考えますので、100万人中の1人、つまりは 10^{-6} リスクが増加したと考えます。これを寄与危険とよびます。また、患者3人のうちの1人分は、リスク源によるものとして1/3を寄与割合と呼びます。

本資料への収録日：2013年3月31日



国際放射線防護委員会では、大人も子供も含めた集団では、100 ミリシーベルト当たり0.5%がん死亡の確率が増加するとして、防護を考えることとしています。これは原爆被爆者のデータをもとに、低線量率被ばくによるリスクを推定した値です。

現在、日本人の死因の1位はがんで、大体30%の方ががんで亡くなっています。つまり1000人の集団がいれば、このうちの300人はがんで亡くなっています。これに放射線によるがんでの死亡確率を試みに計算して加算すると、全員が100 ミリシーベルトを受けた1000人の集団では、生涯で305人ががんで死亡すると推定できます。

しかし実際には、1000人中300人と言うベースラインも年や地域によって変動しますし*、今のところ病理診断のような方法でがんの原因が放射線だったかどうかを確認することができません。そのため、この100 ミリシーベルト以下の増加分、つまり最大で1000人中5人と言う増加分について実際に検出することは大変難しいと考えられています。

*平成22年度の年齢調整死亡率を県別で比較すると、人口10万対で248.8人(長野県女性)から662.4人(青森県男性)とばらつきますが、そのうちがんが死因である割合を調べると、これも29.0%(沖縄男性)から36.1%(京都女性)とばらつきがみられます。

本資料への収録日:2013年3月31日