



# 放射線

鳥居 寛之  
小豆川勝見  
渡辺雄一郎  
著

中川 恵一  
執筆協力

科学的に  
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

## 「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

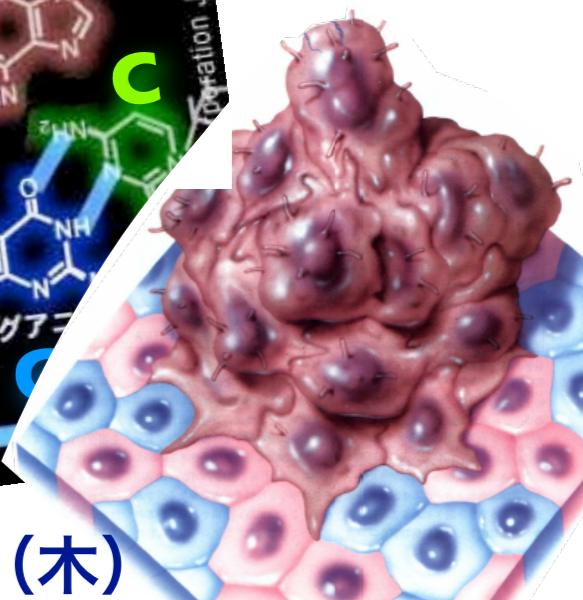
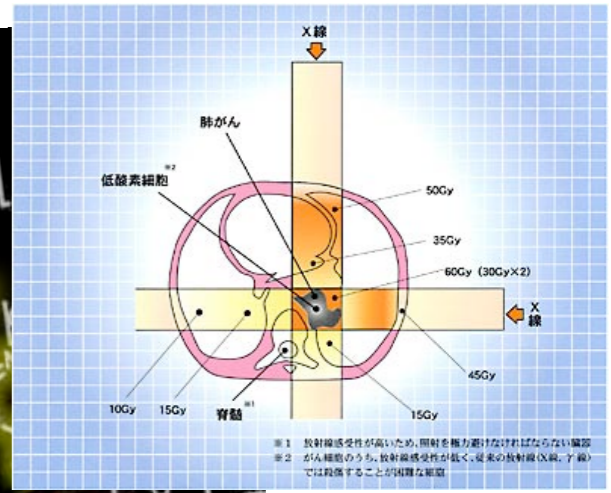
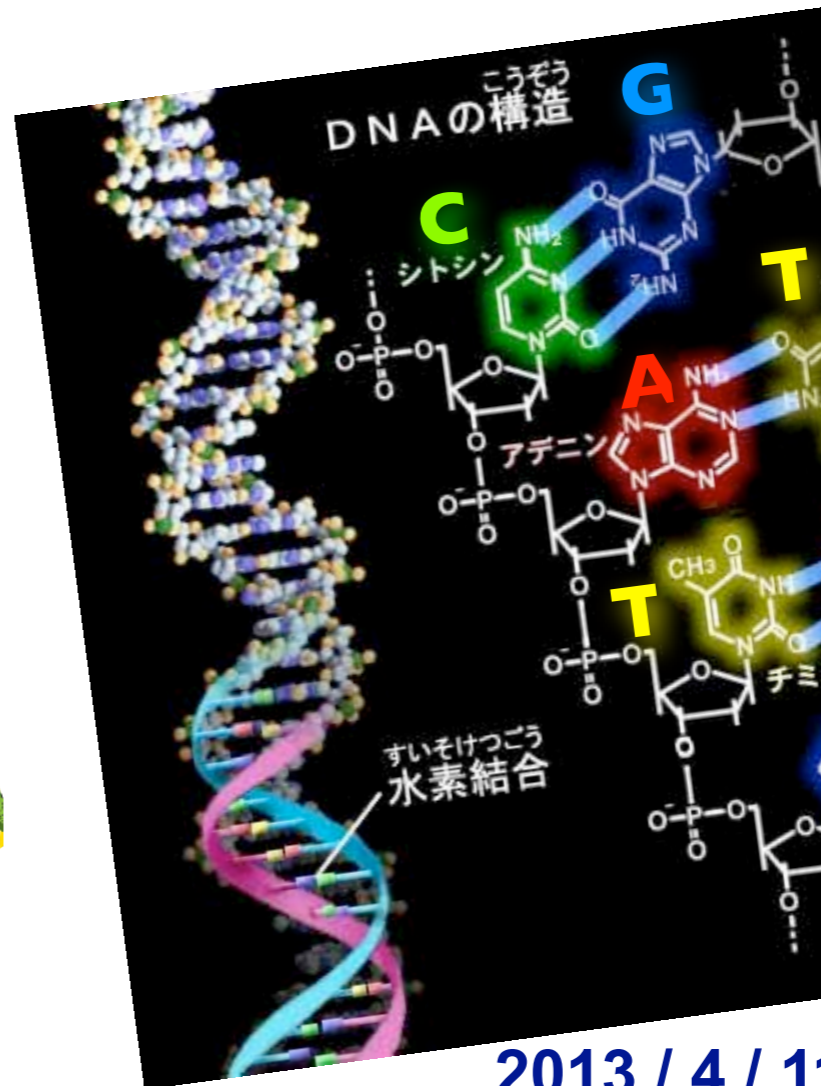
本体 2500円＋税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
  - 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
  - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質  
《原子核物理学・原子力工学》
  - 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
  - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
  - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
  - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
  - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
  - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥料学》
  - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
  - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会は非常に少ないのが実情です。

本書は東京大学教養学部で行われた講義をもとに、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

# 放射線の科学と安全



2013 / 4 / 11 (木)

## 第4話 放射線生物学・放射線防護学

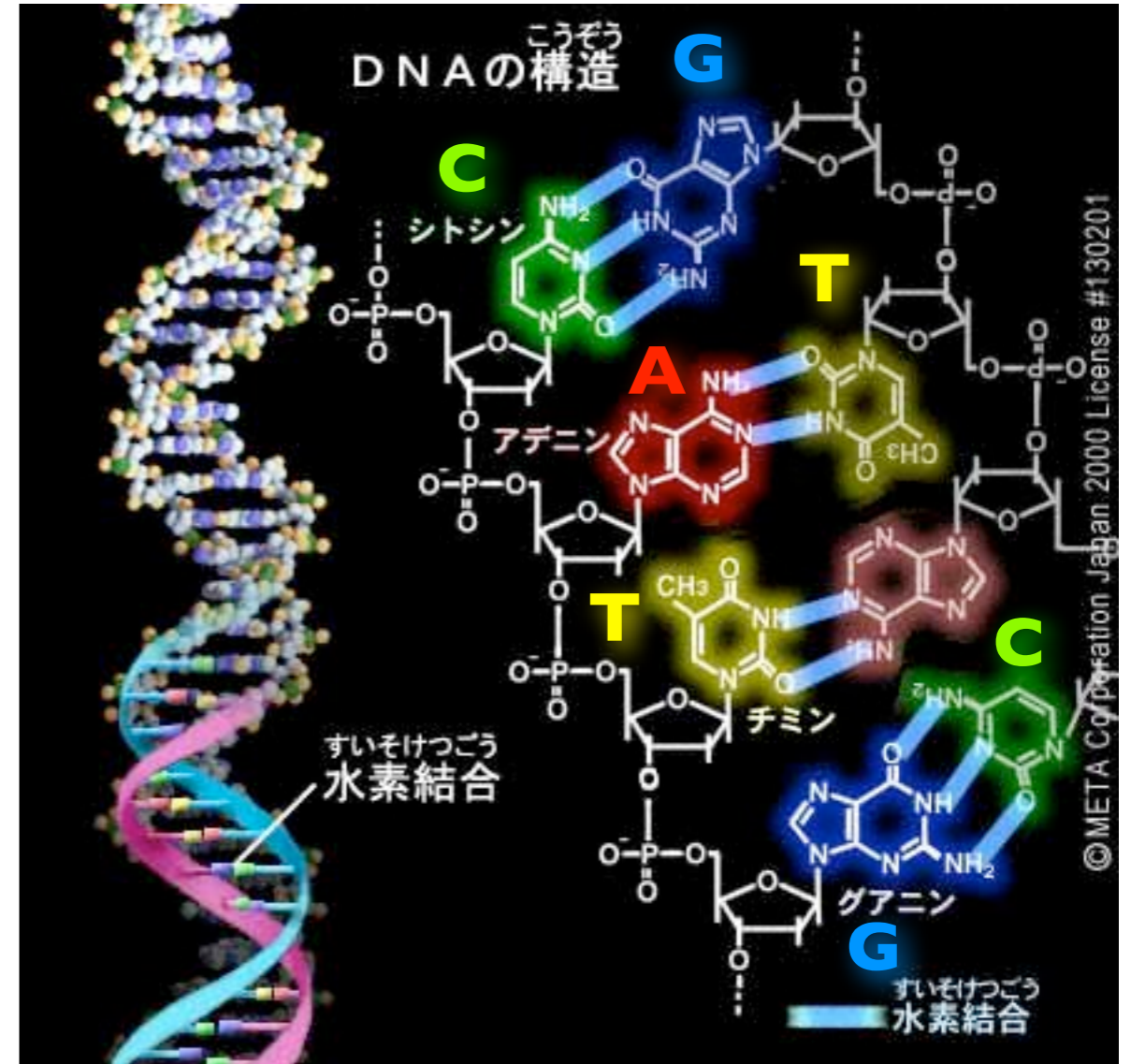
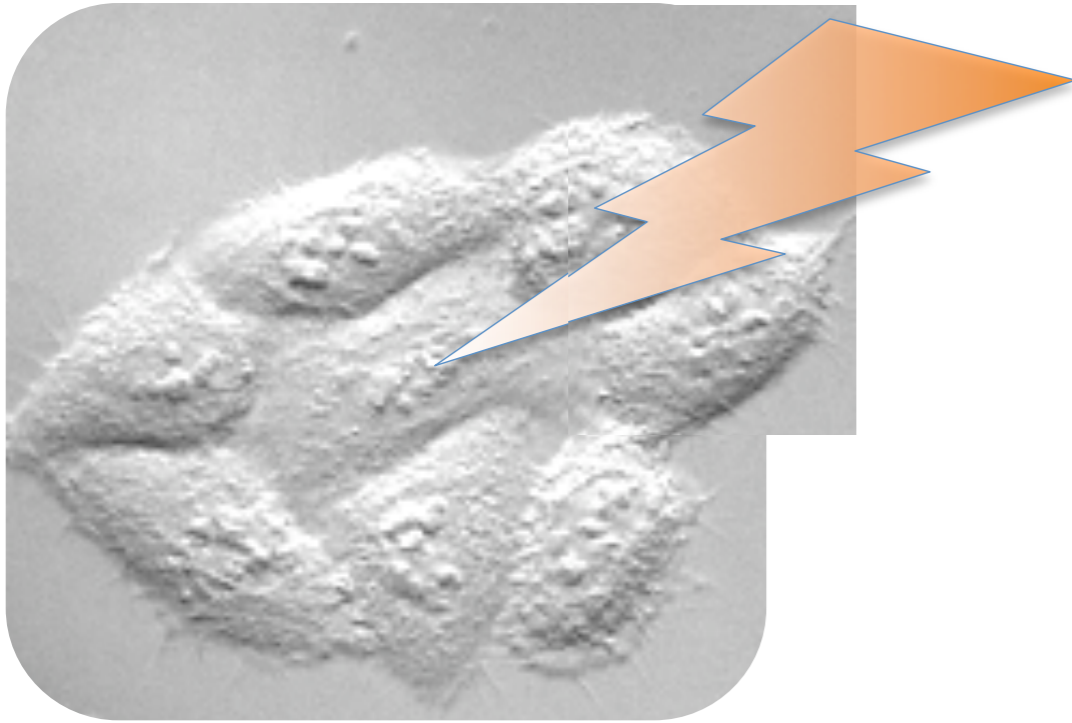
### 放射線の利用・医療



# 放射線生物学

# 細胞の核に放射線が照射

## DNA



出典：IPA「教育用画像素材集サイト」 <http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>

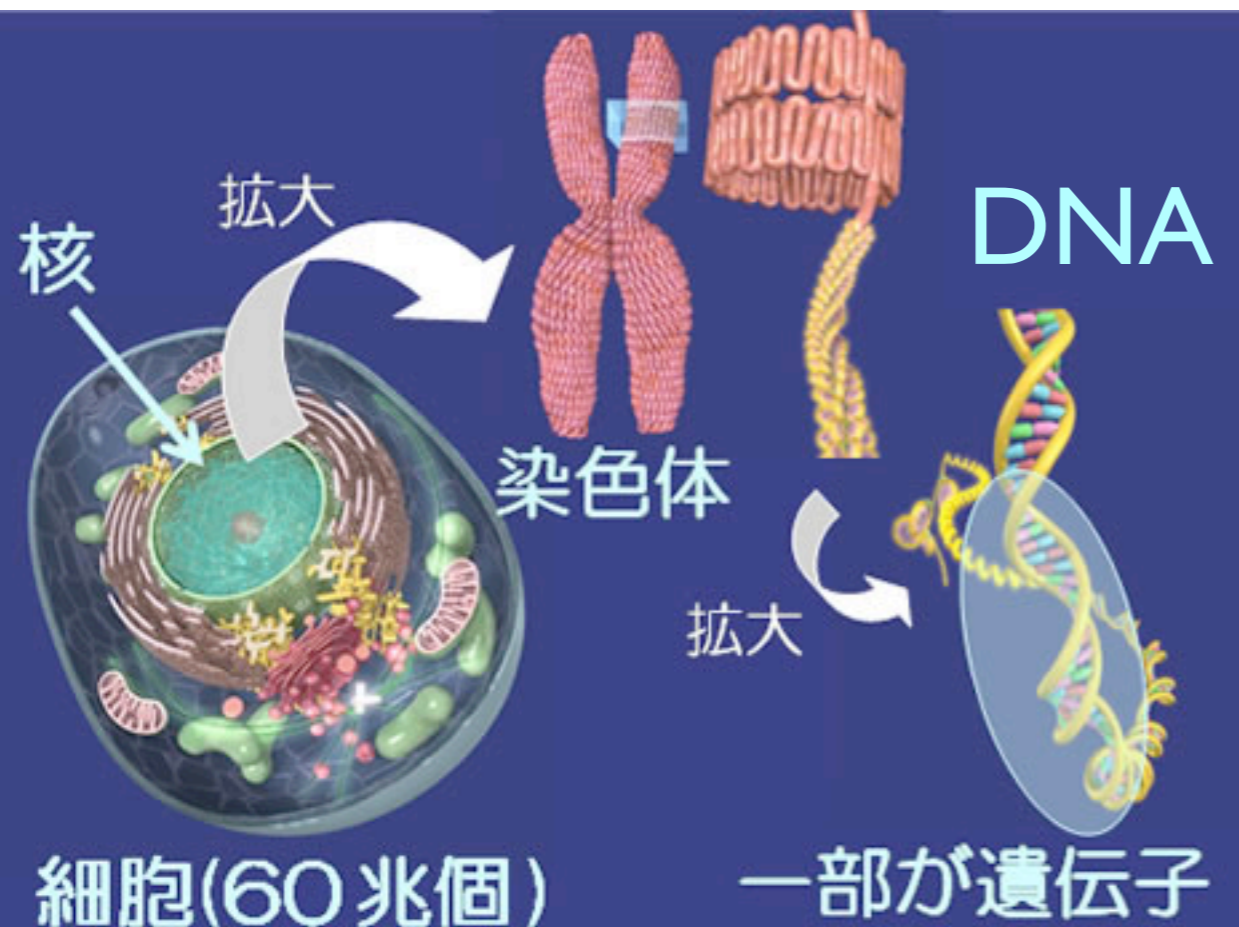
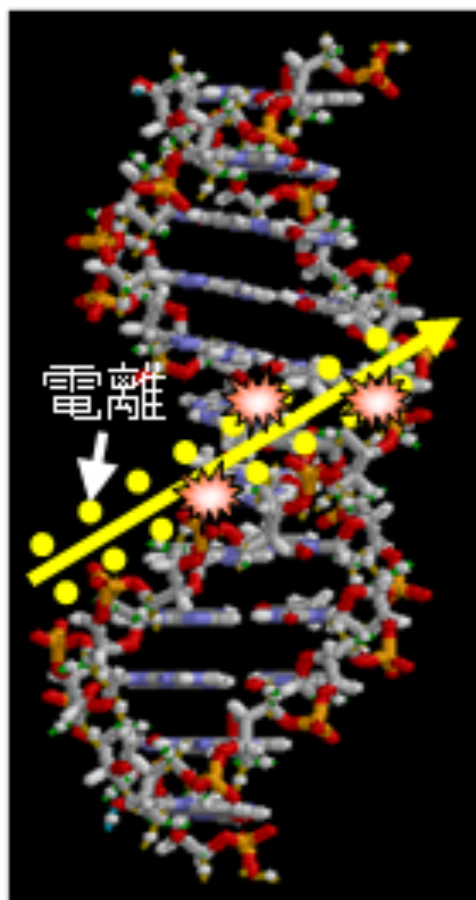


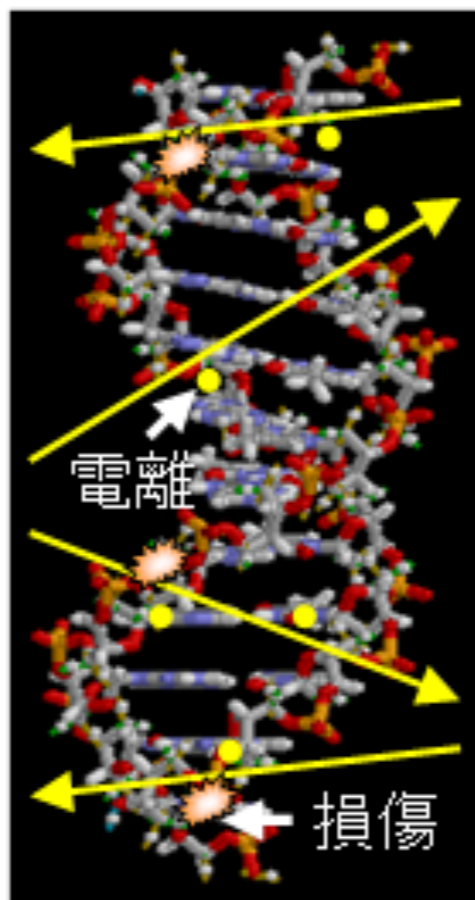
図1 核、染色体、遺伝子



# 放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

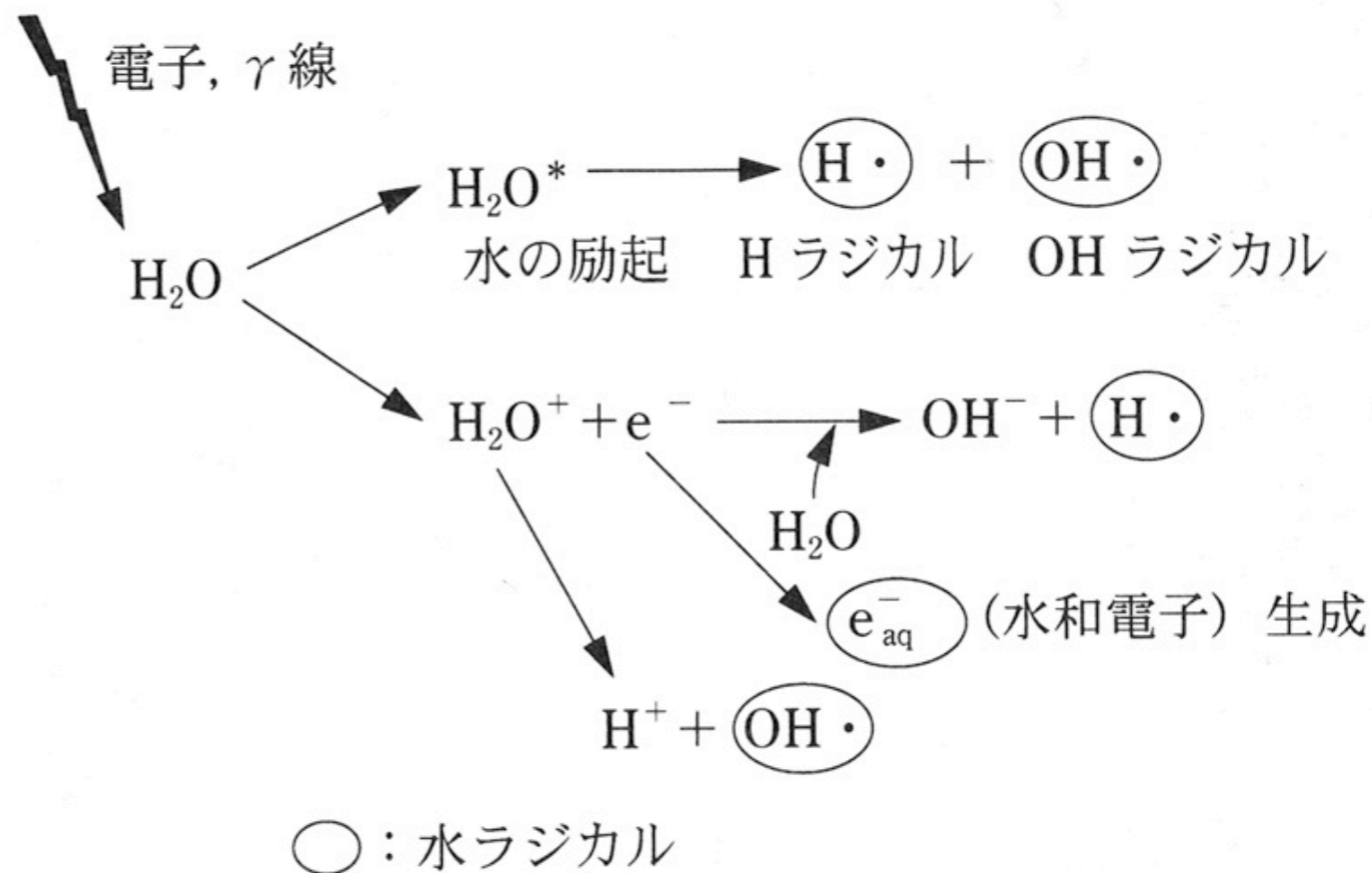


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

## LET : 線エネルギー付与

放射線の直接作用 : 荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く **高 LET 放射線**  
 $\alpha$ 線

と間接作用 : 水の電離で生じるラジカルが DNA 分子に作用

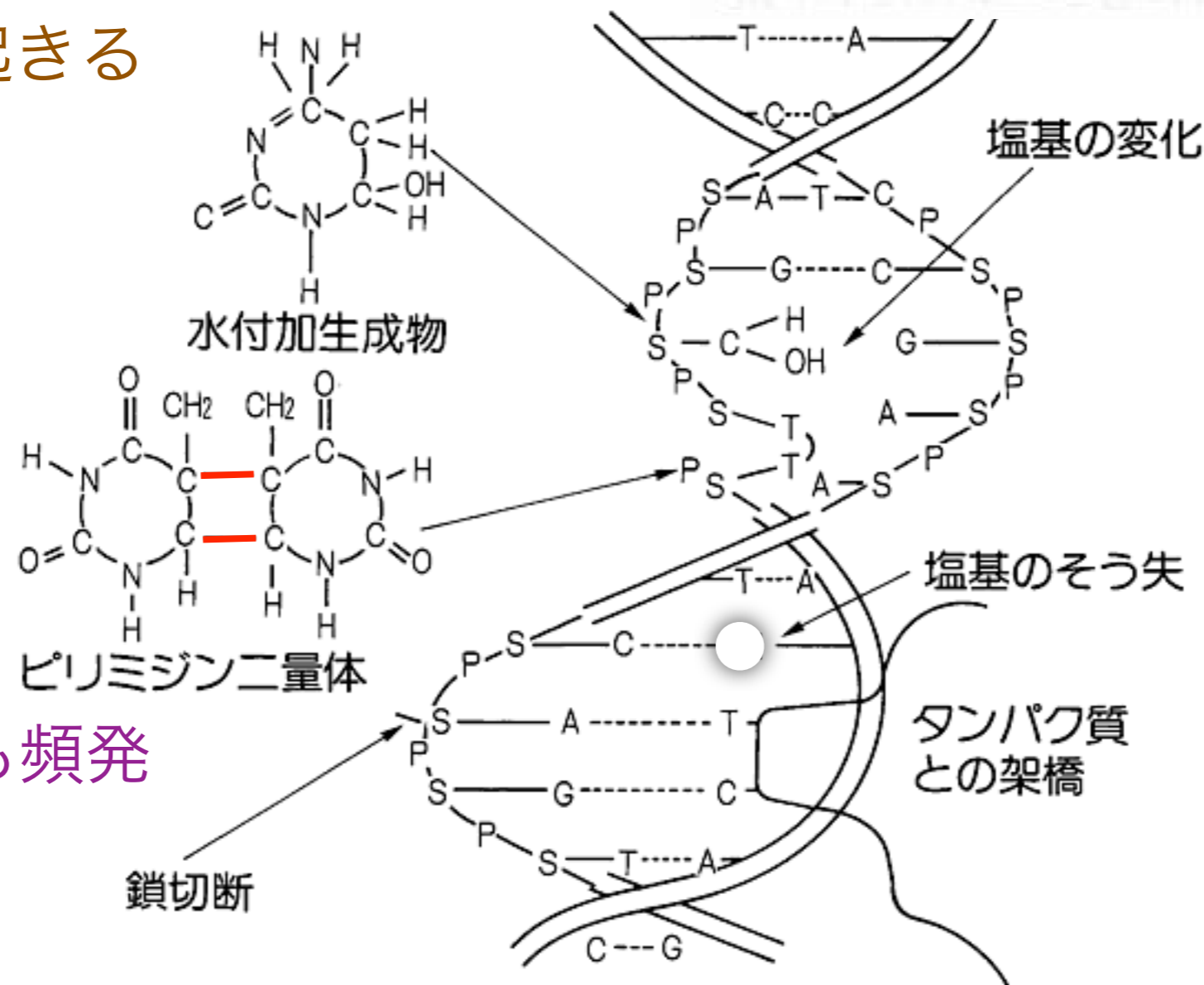
**低 LET 放射線**  
 $\beta$ 線,  $\gamma$ 線

何もなくても DNA 損傷は自然発生している（複製ミスなど）

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

表5 増殖期のヒト細胞における DNA 損傷の自然発生率と放射線誘発率の比較<sup>7)</sup>

傷の種類	自然の傷(/細胞/日)	X線誘発の傷(/細胞/1 Sv)
塩基損傷	20,000	300
1本鎖切断	50,000	1,000
2本鎖切断	50(推定 <sup>2,19)</sup> )	40

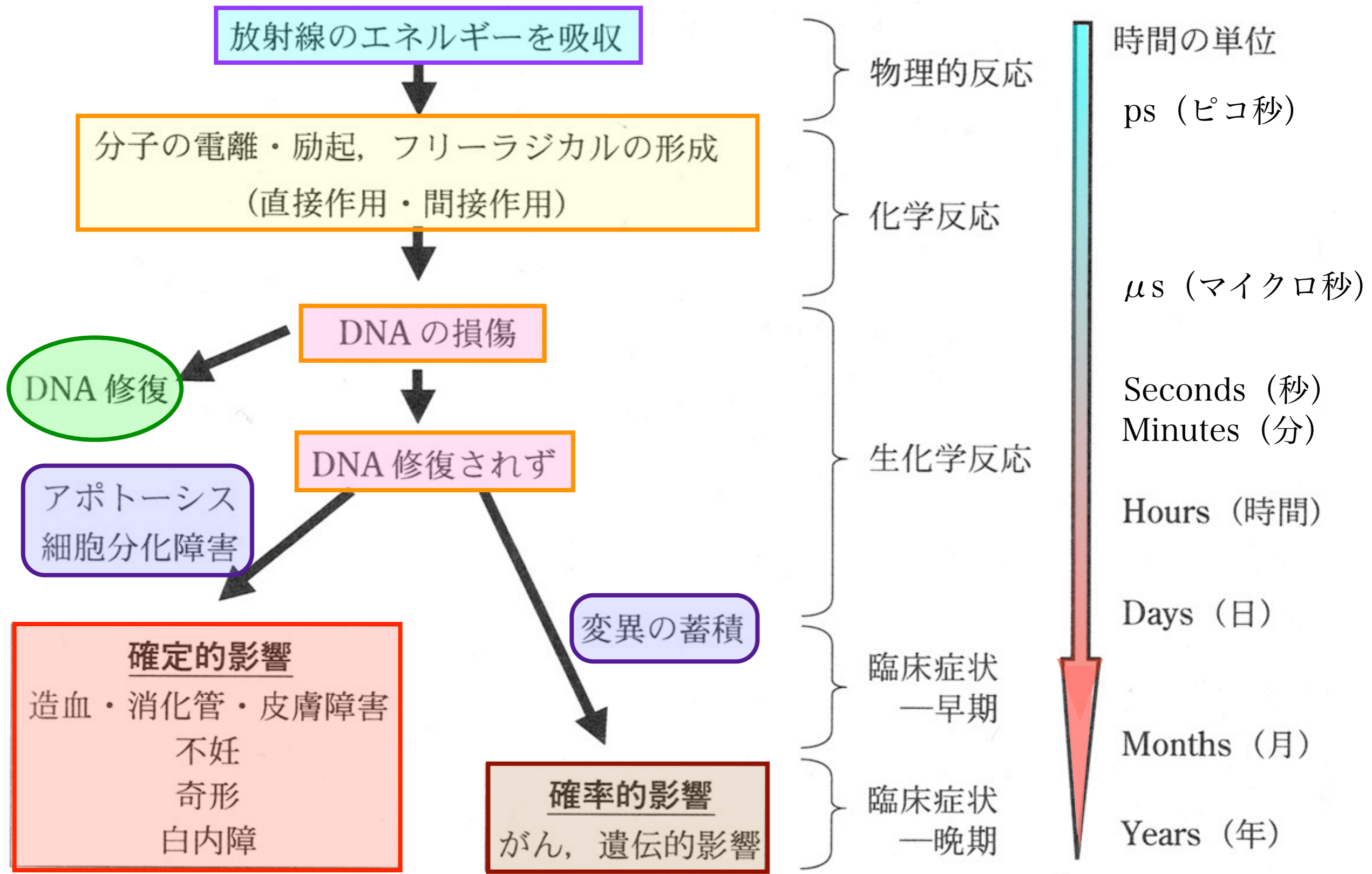


紫外線照射でも頻発

図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNA に見られる種々の損傷

[出典] 江上信雄：生き物と放射線、東京大学出版会、1975

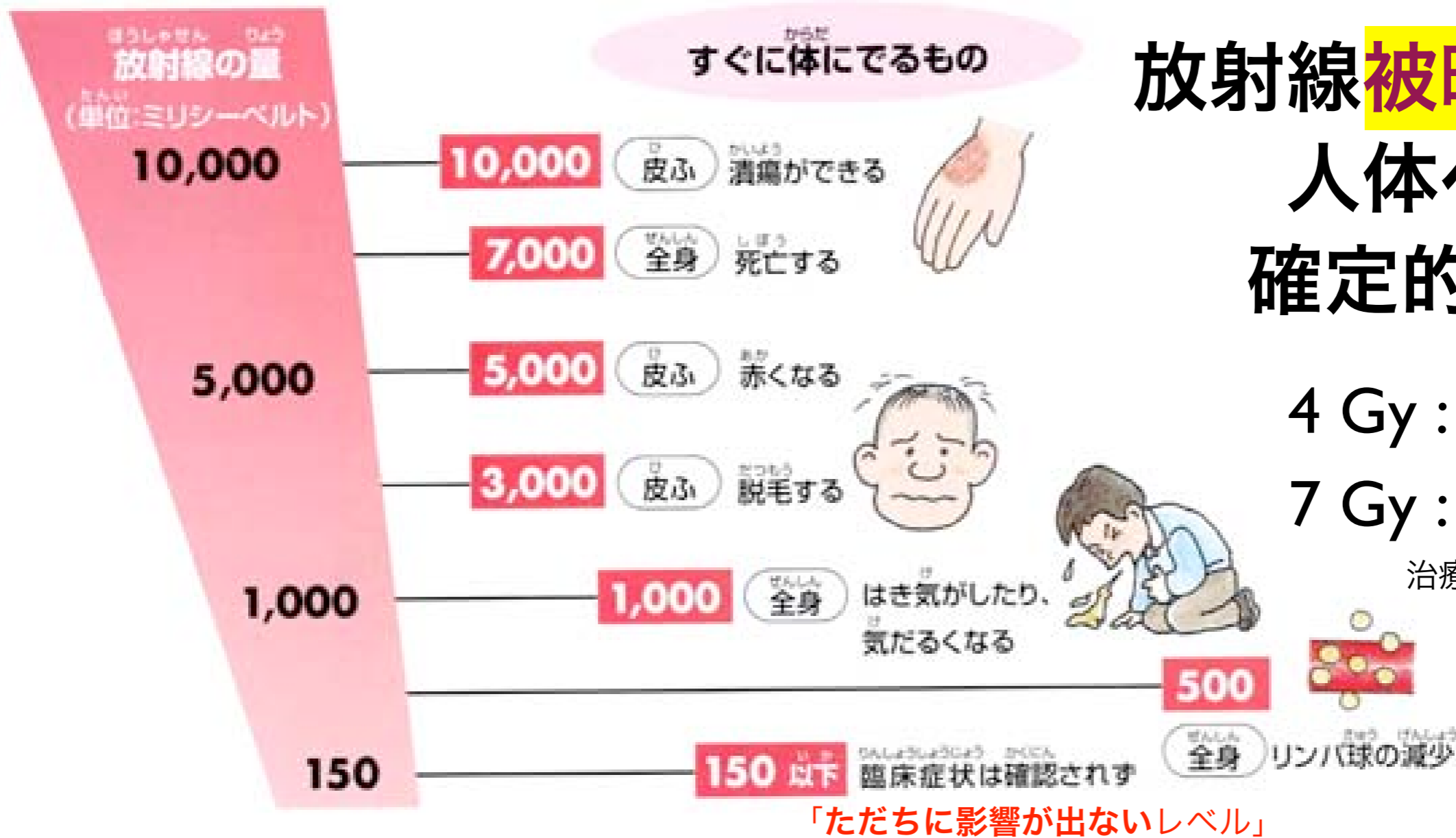




放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

# 放射線被曝による 人体への 確定的影響

すぐに体にできるもの



4 Gy : 半数死亡  
7 Gy : 全員死亡

治療により助かることも。

JCO 事故  
チェルノブイリの  
消防隊員

細胞再生系	造血組織	腸上皮	皮膚	精巣	水晶体			
幹細胞 幹細胞 芽細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)	幹細胞 リンパ球 好中球 赤血球 球(血小板)	腺窩(幹細胞) 絨毛	基底細胞(幹細胞) 角質層	幹細胞 精子	上皮(幹細胞) 水晶体繊維 赤道部			
正常な分化過程	4 4 4 4日	2日	2週間	3-4週間	1/2-3年			
正常な成熟過程	1 7-10 7 100日	2日		7-8週間				
照射による変化	免疫能力低力	血液凝固時間延長	食作用低力	酸素輸送低力	絨毛の短縮と喪失、出血、下痢	紅斑、萎縮、潰瘍	一時的または永久不妊	白内障



# 放射線被曝の確定的影響

線量閾値あり

細胞再生系	造血組織	腸上皮	皮膚	精巣	水晶体
<p>幹細胞 幹細胞 芽細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)</p>	<p>幹細胞 リンパ球 粒球 好中性球 赤血球 球(血小板)</p>	<p>腺窩 (幹細胞) 絨毛</p>	<p>基底細胞 (幹細胞) 角質層</p>	<p>幹細胞 精子</p>	<p>上皮 (幹細胞) 水晶体繊維 赤道部</p>
正常な分化過程	4 4 4 4日	2日	2週間	3-4週間	1/2-3年
正常な成熟過程	1 7-10 7 100日	2日	2週間	7-8週間	
照射による変化	免疫能力低力	絨毛の短縮と喪失、出血、下痢	紅斑、萎縮、潰瘍	一時的または永久不妊	白内障

図1 細胞再生系

(造血組織、腸上皮、皮膚、精巣、水晶体の分化、成熟過程による変化)

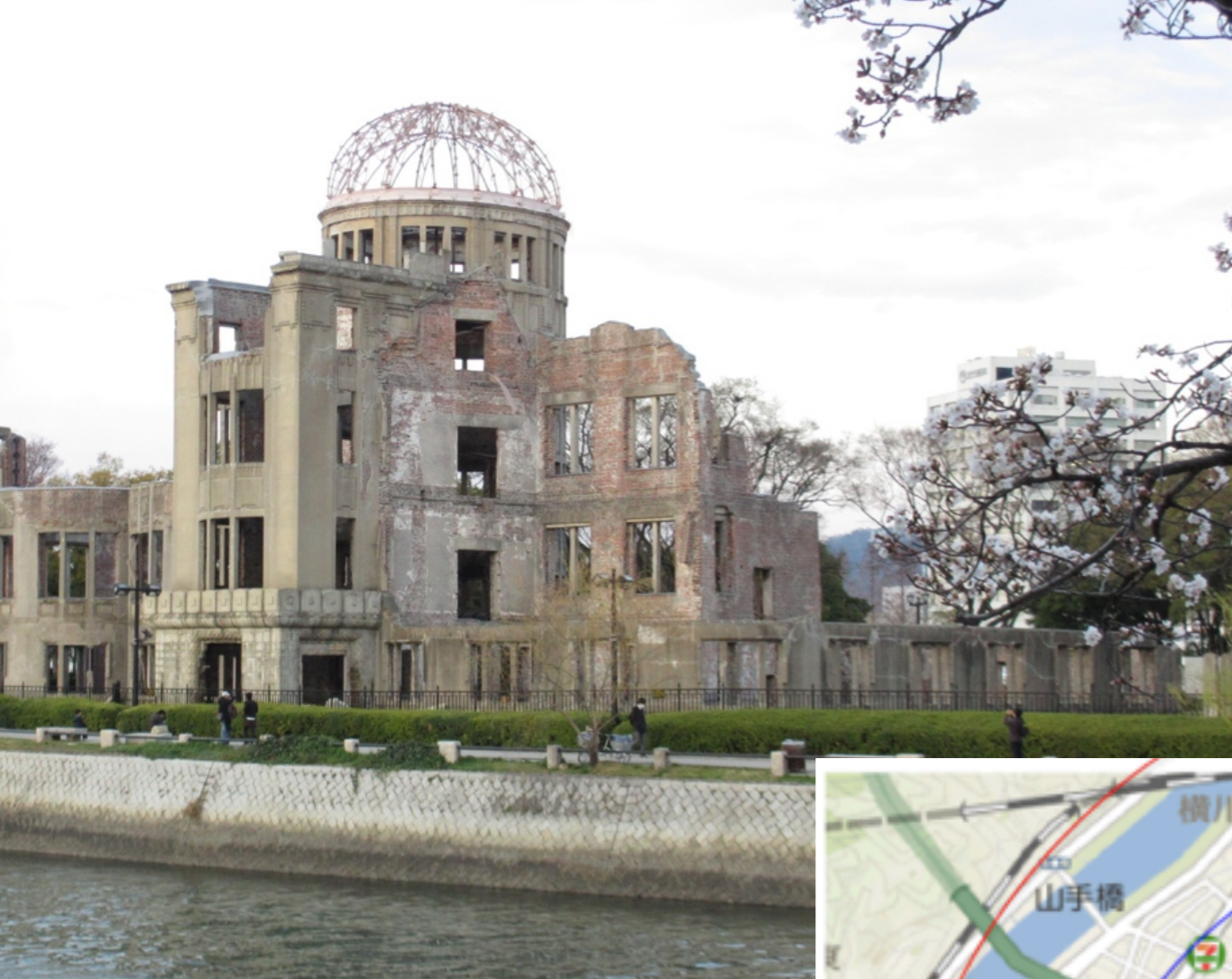
[出典]吉井義一:放射線生物学概論[第2版](1922)



# 広島 原爆ドーム







# 広島 原爆ドーム

γ線による推定被曝線量

中性子線による

(mGy)





### 胎内被爆と小頭症

被爆は、胎児にもいろいろな影響を及ぼしました。死産する例もありましたが、無事に生まれた子どもも、乳児期を過ぎて他の子どもに比べると死亡率が高く、発育が下回る傾向にありました。特に頭部が著しく小さく、小頭症と呼ばれる状態の人もありました。近距離で妊娠初期に胎内被爆した人のなかには、小頭症で日常生活にも介護が必要なほどに高度の知的障害をとまなう場合もありました。

### In-utero Exposure and Microcephaly

Radiation harmed fetuses in various ways. Some were stillborn, but children who were born without obvious problems also had higher mortality rates, even those who lived past infancy. Furthermore, their development tended to be slower than that of other children. Some were born with abnormally small heads, a condition known as microcephaly. Those who were exposed close to the hypocenter in early pregnancy were likely to display microcephaly accompanied by severe mental retardation that renders them unable to manage everyday life without assistance.

### 悪性腫瘍(ガン)

1960(昭和35)年ころからガンの発生が増加し始めました。被爆距離あるいは被爆した放射線量とガンの発生率との間に関係があると認められるのは骨髄腫、卵巣ガン、泌尿器ガン、乳ガン、結腸ガン、肺ガン、食道ガン、胃ガンなどとされています。

### Malignant tumors (Cancers)

Cancers began to increase about 1960. Some cancers for which a correspondence has been confirmed between distance from the incidence are: myeloma, ovary cancer, urinary tract cancer, breast cancer, colon cancer, lung cancer, esophagus cancer, stomach cancer.



正常な骨髄(上)と急性白血病の骨髄(下)

### 白血病

白血病は、血液のガンです。血液中の白血球が未熟なまま増え続けます。このため赤血球や血小板が減少して、貧血などを引き起こします。また、増えた白血球も正常な機能を失って、感染に対する抵抗力が弱くなります。白血病の発生は被爆して7~8年後に多発しました。被爆時の年齢が若いほど、早く白血病が発生しました。

### Leukemia

Leukemia is cancer of the blood. The white blood cells multiply wildly without fully maturing. Red blood cells and platelets are reduced, leading to anemia. The white blood cells increase in number but lose normal functioning, which lowers resistance to infection. The incidence of leukemia was greatest 7 to 8 years after the bombing. The younger the survivor was at the time of exposure, the earlier was the onset of leukemia.

### 原爆白内障

放射線によって目の中の水晶体(レンズ)の後ろ中心部が白くにごり、視力が低下する症状です。被爆して数か月から数年後に多発しました。

### A-bomb Cataracts

Radiation can cause the center posterior part of the lens to become white and cloudy, leading to loss of sight. Cataracts occurred several months to several years after exposure.



原爆白内障患者の目  
1966(昭和41)年4月撮影  
爆心地から820メートルで被爆し、

### ケロイド

火傷は皮膚が再生して傷をおおい、傷跡を残して治ります。ケロイドとは、正常でない皮膚組織が過剰に増殖して不規則に盛り上がった状態をいいます。急性障害が収まった1946(昭和21)年初めころから1947(昭和22)年のころに最もよく現れました。ケロイドの発生は、爆心地から2キロメートル前後までの地域で熱線を直接受けて火傷を負った人びとの50~60パーセントに達しました。

### Keloids

After a burn, skin regenerates to cover and heal the injury, and this process usually leaves a scar. The term "keloid" refers to an irregular mass of abnormal scar tissue that reproduces excessively. Keloids appeared most frequently just as the acute disorders were fading in early 1946 through 1947. Fifty to sixty percent of those burned directly by the A-bomb heat rays within about two kilometers from the hypocenter developed keloid scars.



γ線による推定被曝線量

中性子線による

(mGy)



低線量被曝では**確定的**影響は起きない。

「**ただちに影響が出ないレベル**」

**確率的**影響(の可能性)が議論の対象となる。

❖ がん

❖ 遺伝的影響の有無

あくまで確率でしか議論できない。

**リスクの確率。**

しかしそもそも、放射線を浴びなくても確率はゼロではない。

(日本人の3人に1人はがんで死亡する。)

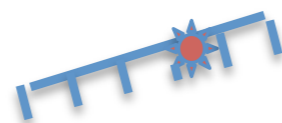
**疫学調査**の結果から結論を導きだすのは**統計学的**に困難。



塩基の損傷(異常な塩基対)



DNA一本鎖の切断(不連続な鎖の状態)



周辺配列の除去



DNA修復合成

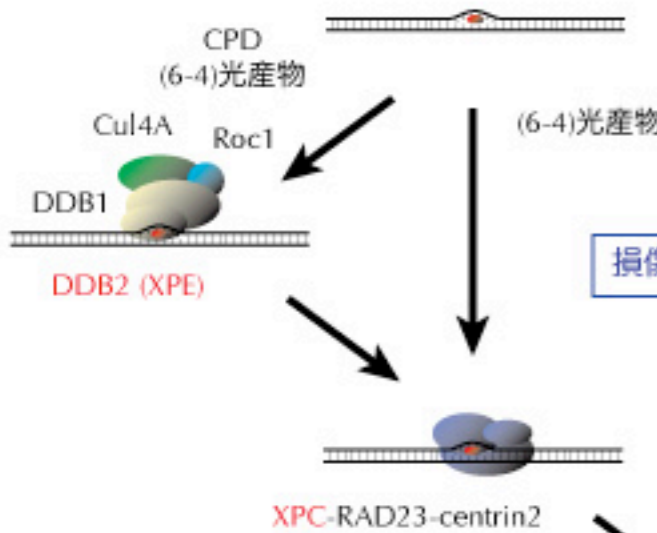


前後のDNA間の結合

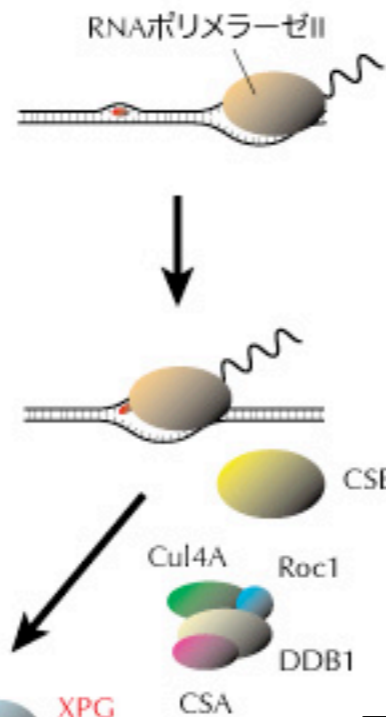




## ゲノム全体を対象とする修復 (GGR)



## 転写と共役した修復 (TCR)

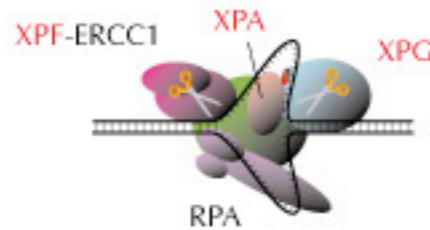


損傷の認識

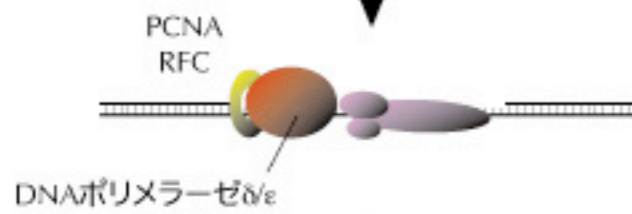
TFIIHによるDNA二重鎖の巻き戻し

TFIIH (XPB, XPD, TTDA)

損傷両側における一本鎖切断



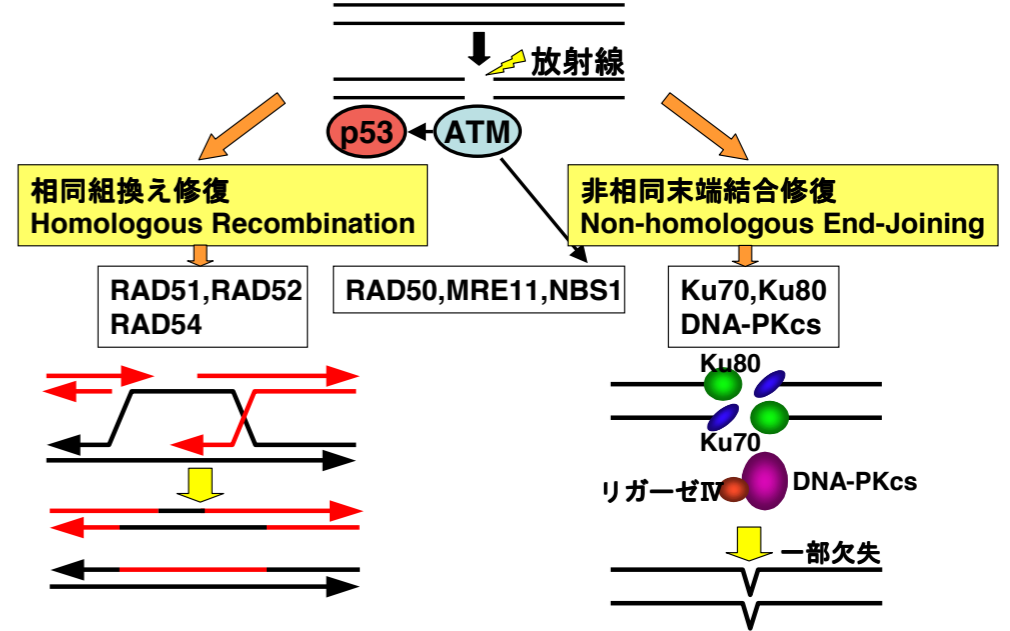
DNA修復合成



DNAリガーゼI

DNA鎖の再連結

## DNA二本鎖切断の修復経路



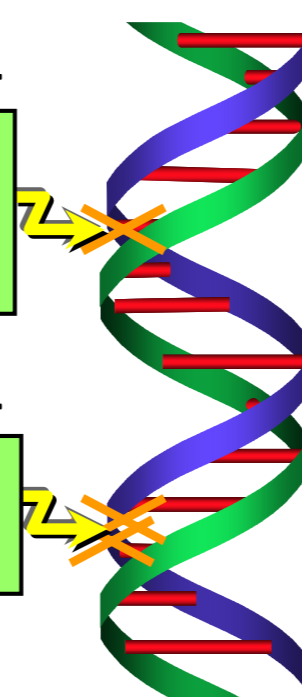
## ゲノムのキズを修復するシステム

外因性  
障害因子

化学物質  
紫外線  
放射線  
その他

内因性  
障害因子

活性酸素  
代謝産物  
その他



ゲノム修復装置

除去修復\*  
相同組み換え修復  
ミスマッチ修復  
末端結合修復  
損傷乗り越え修復  
その他

正しい修復

誤修復

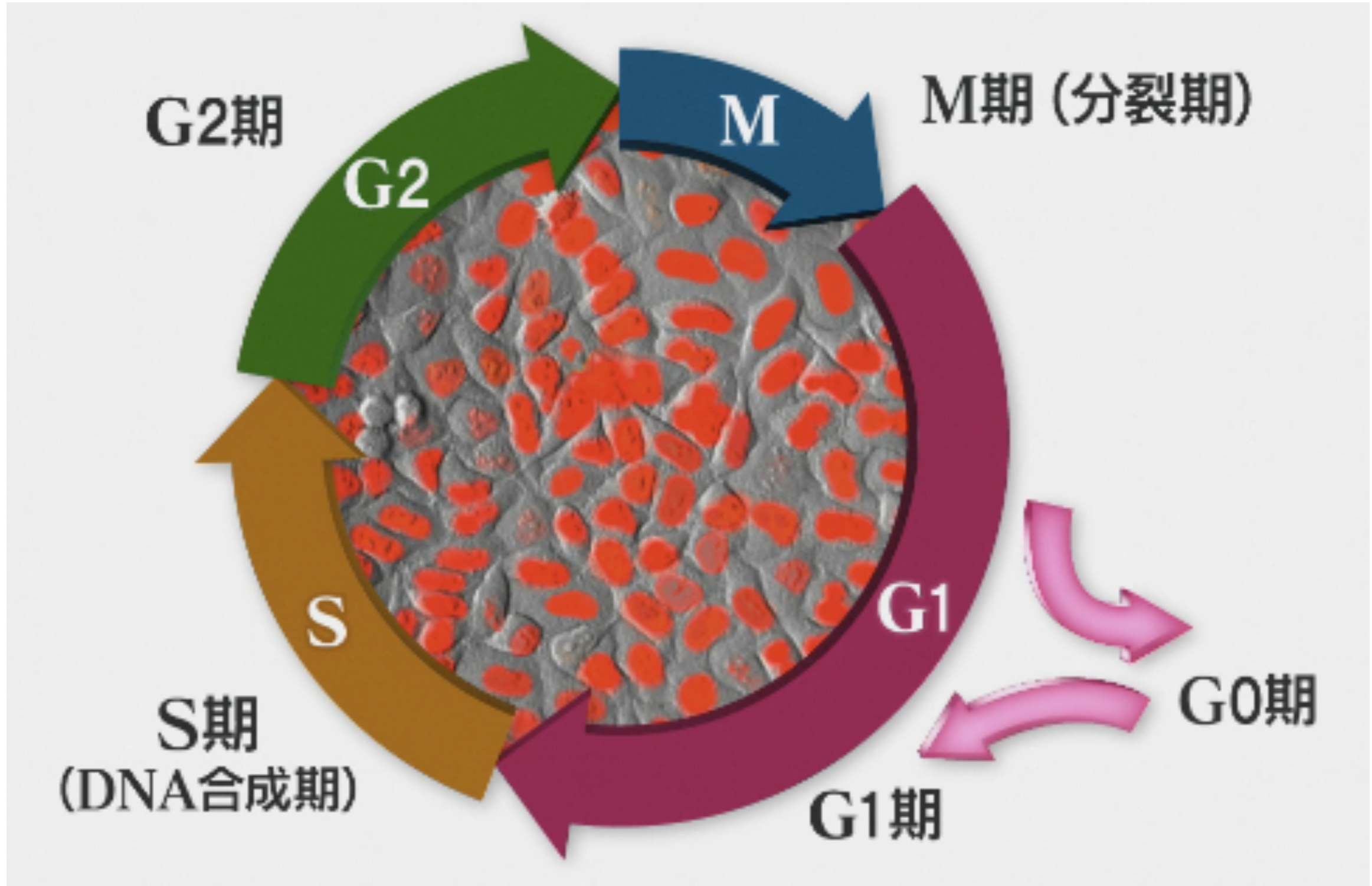
突然変異

がん

アポトーシス

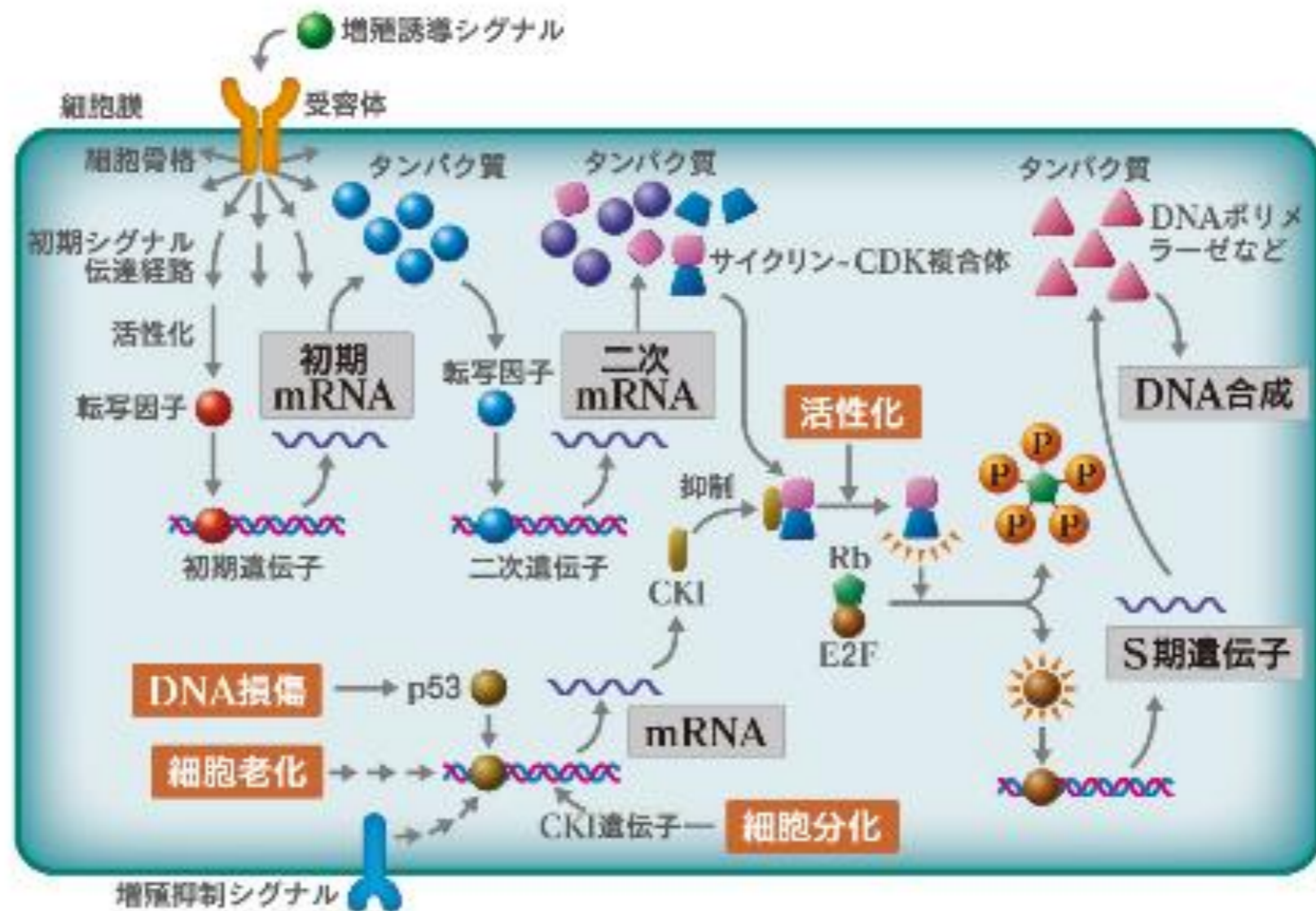
(\*) { 塩基除去修復  
ヌクレオチド除去修復

# 細胞周期と放射線感受性



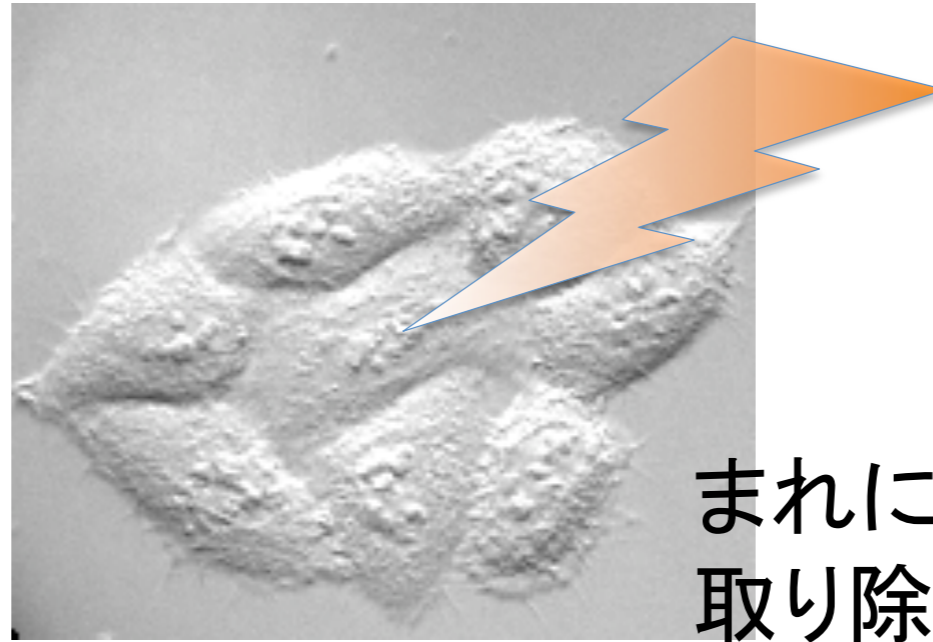
## チェックポイント機構

# DNA損傷→P53がみつける 細胞周期の進行を調節する



## 細胞周期の進行を調節する

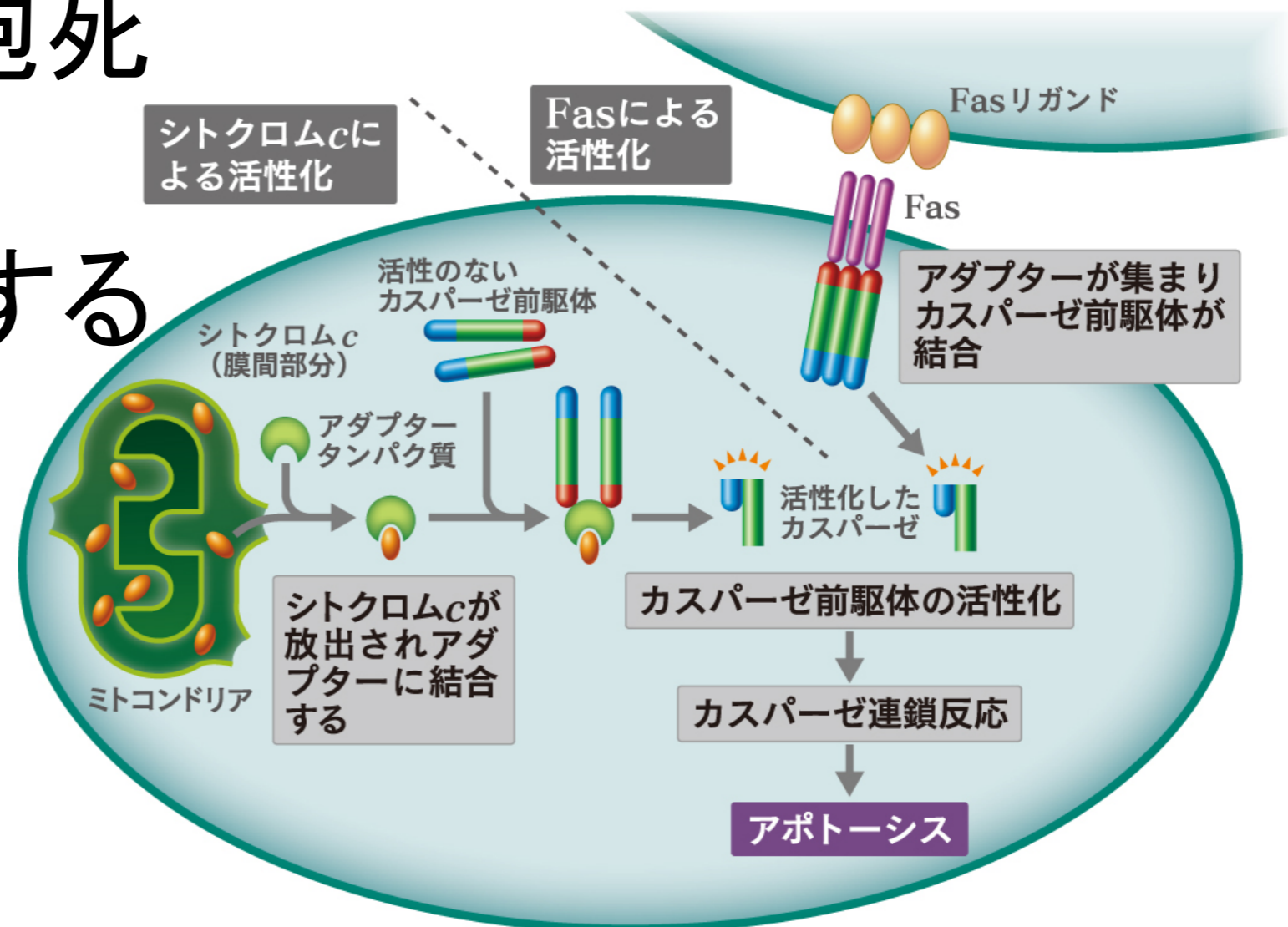


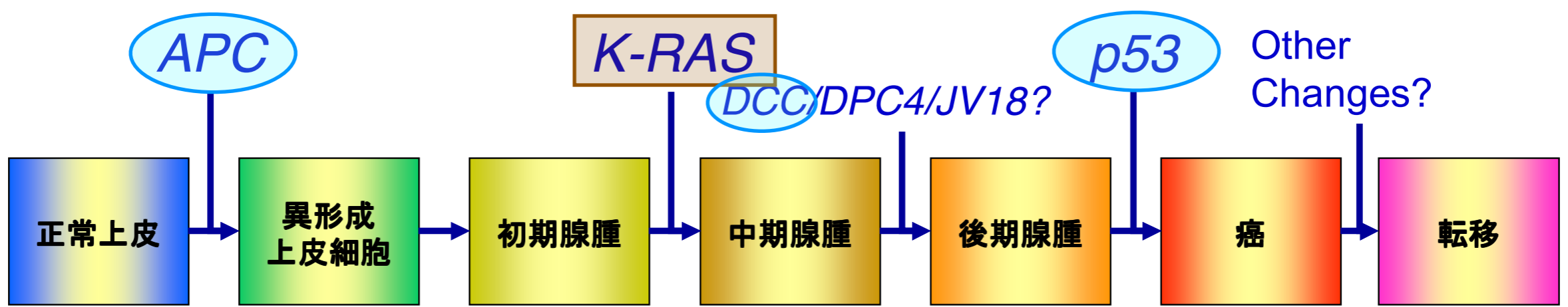


まれにDNA分子の傷が  
取り除けずに残ってしまう

# プログラム細胞死

## 細胞が自爆する





## 多段階発がん仮説

がん = 細胞の異常増加

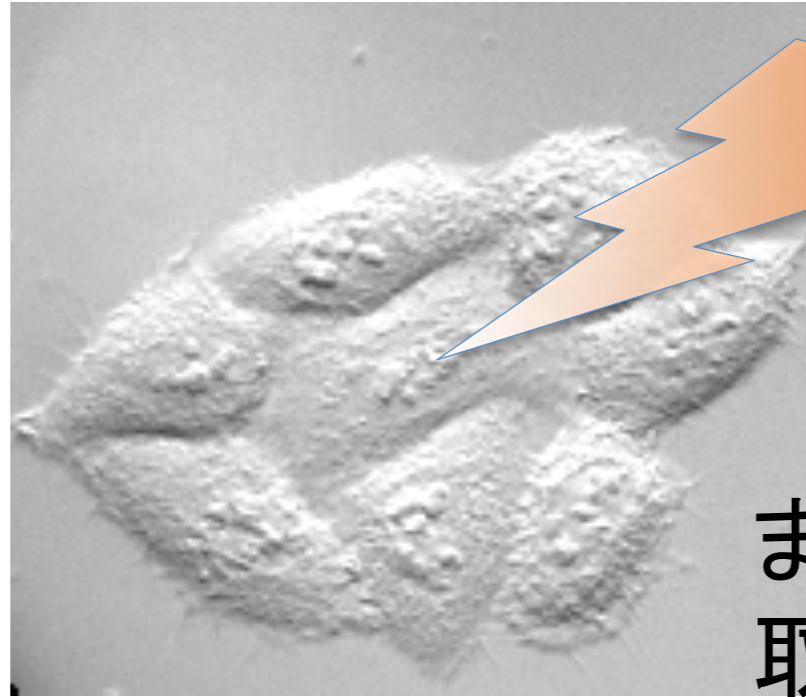
がん遺伝子

がん抑制遺伝子

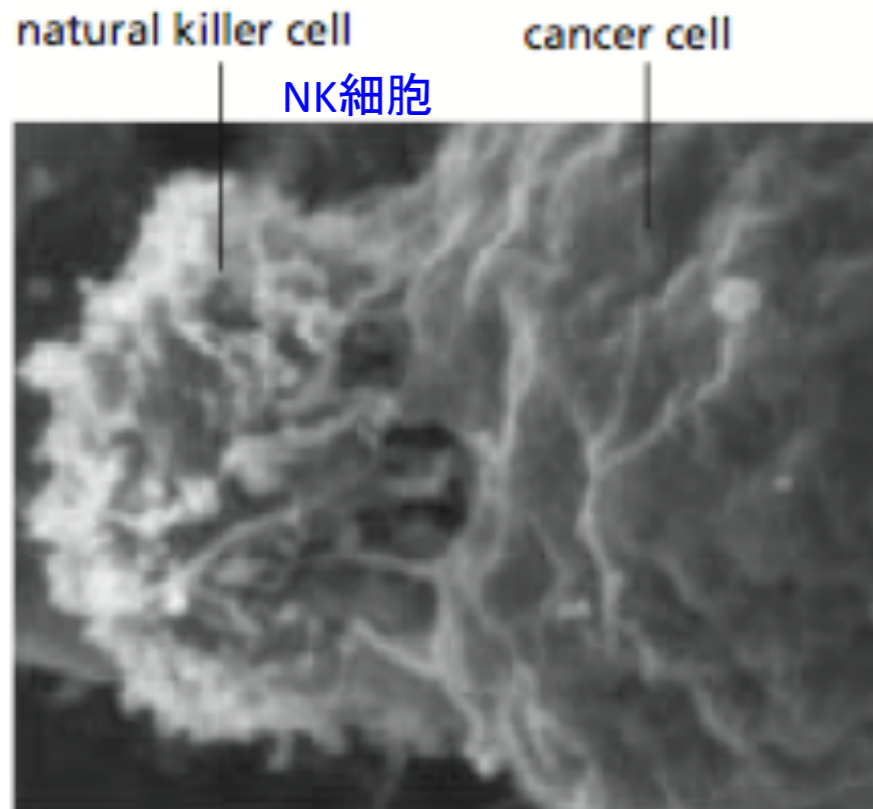
ミスマッチ  
修復の欠陥

ゲノム不安定性の誘導

- 放射線による直接電離、および水のイオン化で生じるラジカルはたしかに DNA に損傷を与える（おそらく線量に比例）。なかでも二本鎖切断が特に問題となる（高LETを与えるα線、中性子線は生物学的効果が大い）。
- しかしそもそも DNA 損傷は化学物質など放射線以外の要因によっても、また普段の DNA 複製の際の複製エラーでも生じている。
- ヒトを含む生物の細胞には、DNA 損傷に対する多種多様な修復機能が備わっている。
- それら DNA 修復遺伝子自体が損傷を受けると修復機能が低下するが、DNA 損傷が残ってもすぐガンになるのではなく、細胞がガン化するのは多段階のガン遺伝子（アポトーシス(細胞死)に関与する p53 ガン抑制遺伝子を含む）に次々に突然変異が生じた場合。
- 一方で、DNA 修復遺伝子に異常のある病気の人、通常の人よりはるかにガンにかかりやすい。（色素性乾皮症、運動失調性毛細管拡張症、ナイミーヘン切断症候群など）



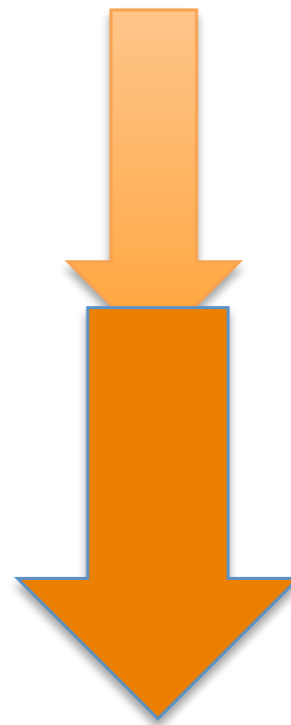
まれにDNA分子の傷が  
取り除けずに残ってしまう



natural killer cell

NK細胞

cancer cell

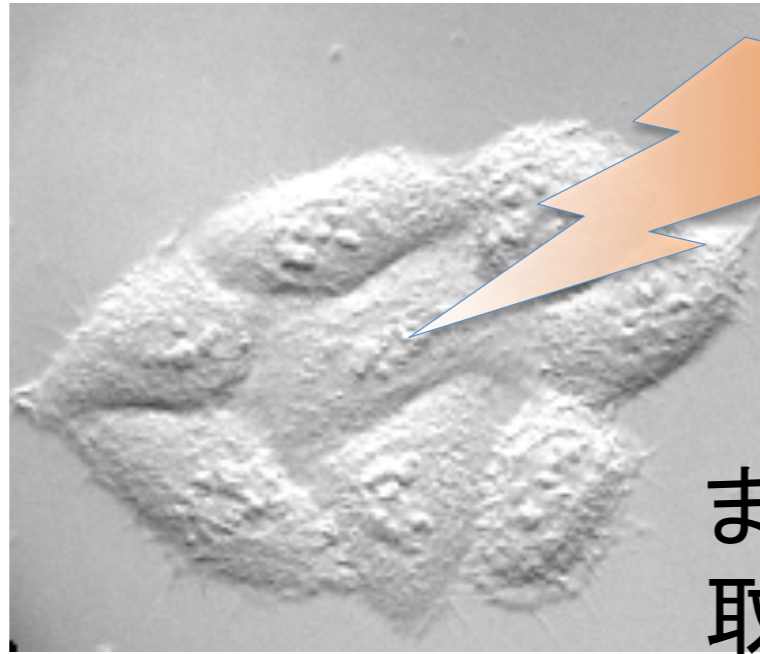


修復の失敗

細胞死も起こらない

自然免疫系にとらえられる





まれにDNA分子の傷が  
取り除けずに残ってしまう

修復の失敗

細胞死も起こらない

NK細胞も取り逃がした

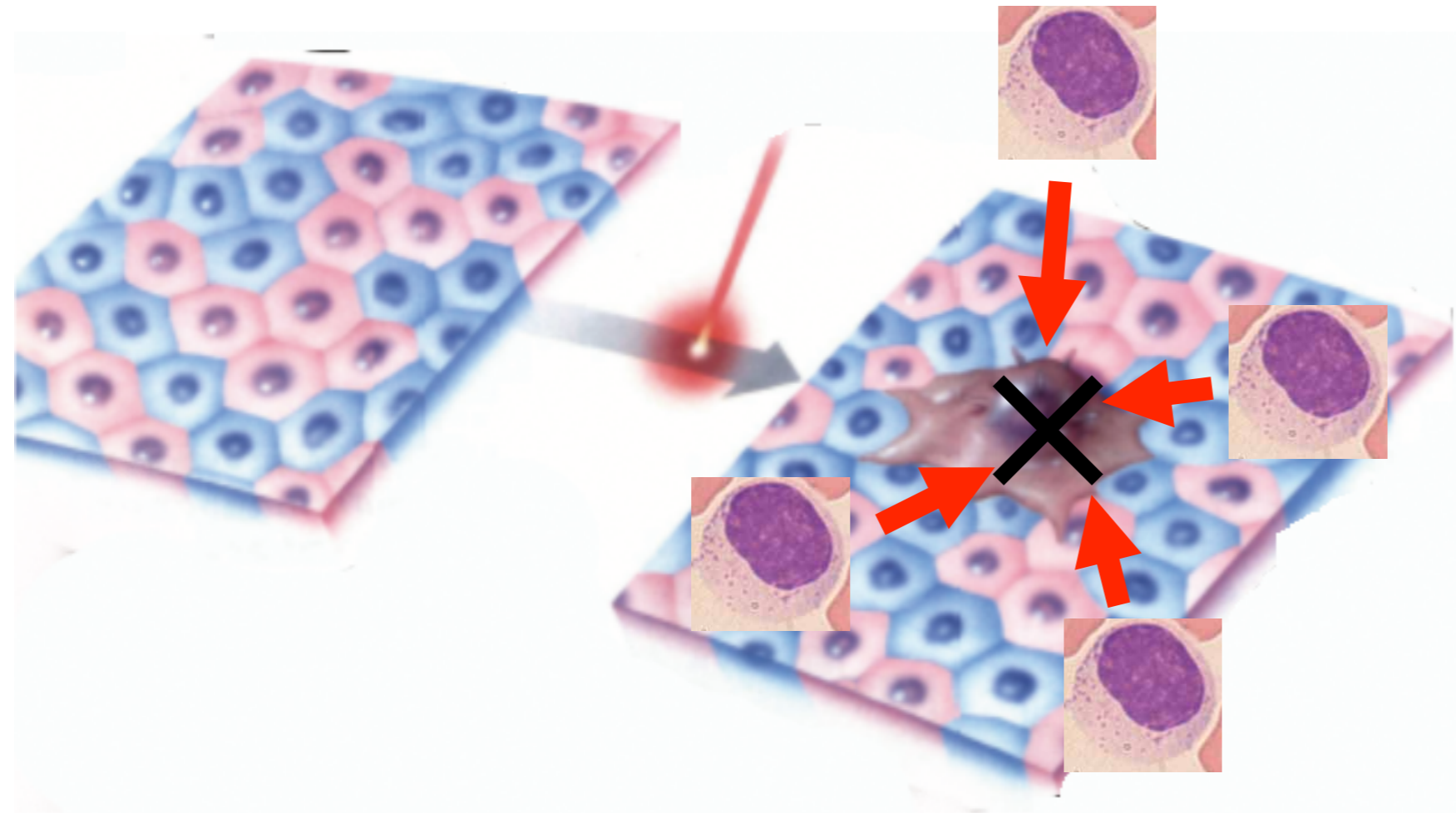
benign 良性  
malignant 悪性

浸潤性

がん細胞が残ってしまう

# がん、とは？

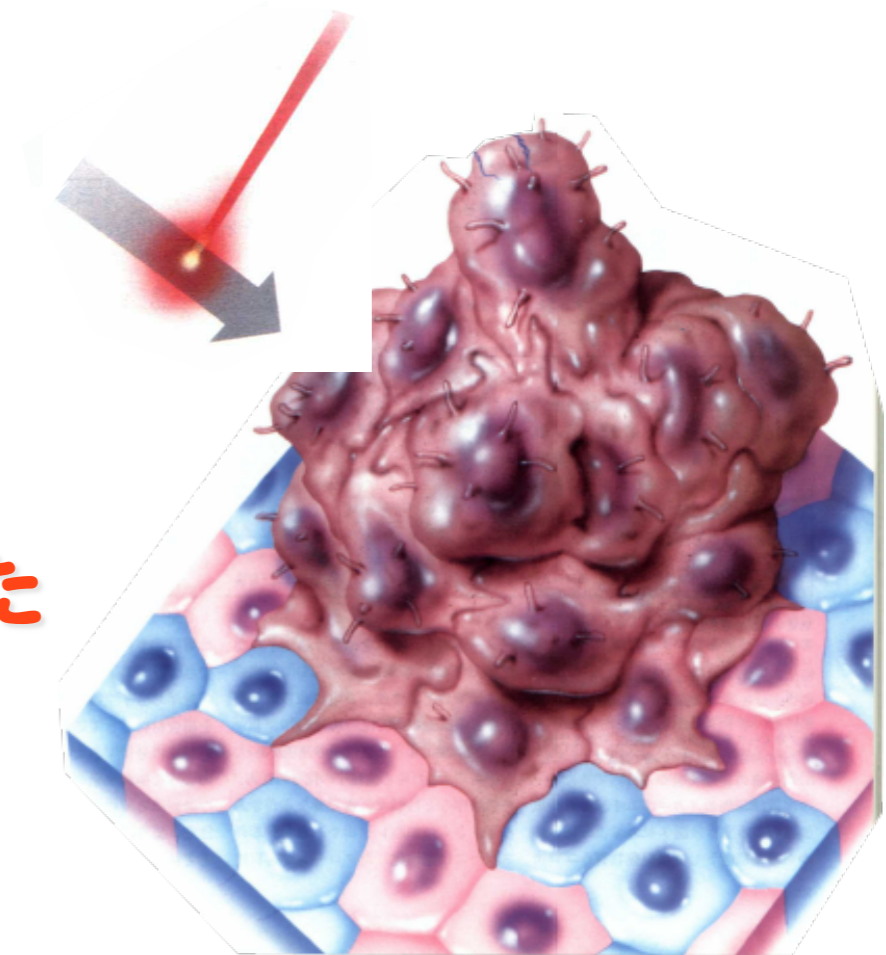
がん細胞は毎日5000個もできている！！



リンパ球が、できたてのがん細胞を殺す

免疫の攻撃をかいくぐった  
ものが「がん」

がん、とは一種の「老化」





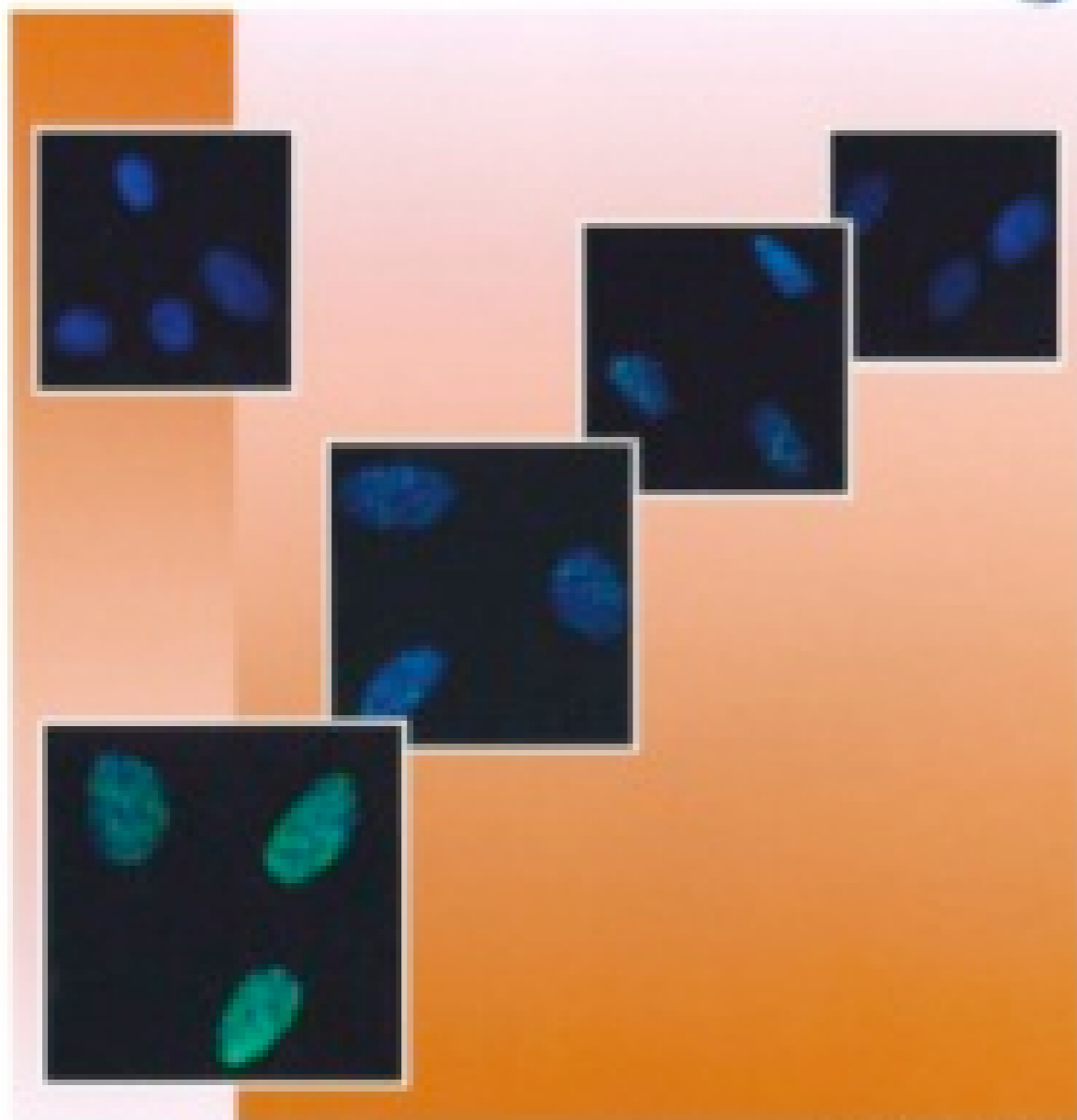
# 日本物理学会誌

- 放射線の人体への影響
- スケール不変性 vs 実形不変性

**BUTSURI**

ISSN 0021-9718 (Print), ISSN 1346-2226 (Online)  
CODEN BUTSUD  
2013 VOL. 68 NO. 3

3



<http://www.jppt.or.jp/>

## 放射線の人体への影響

泉 雅子

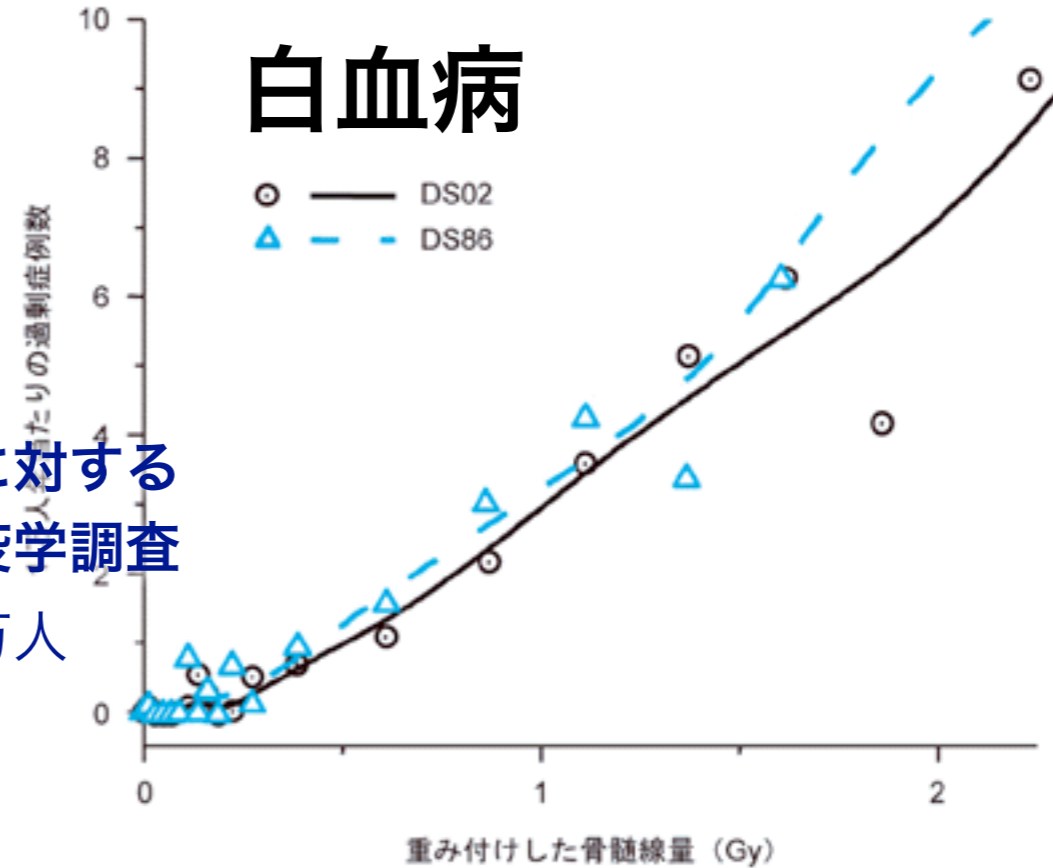
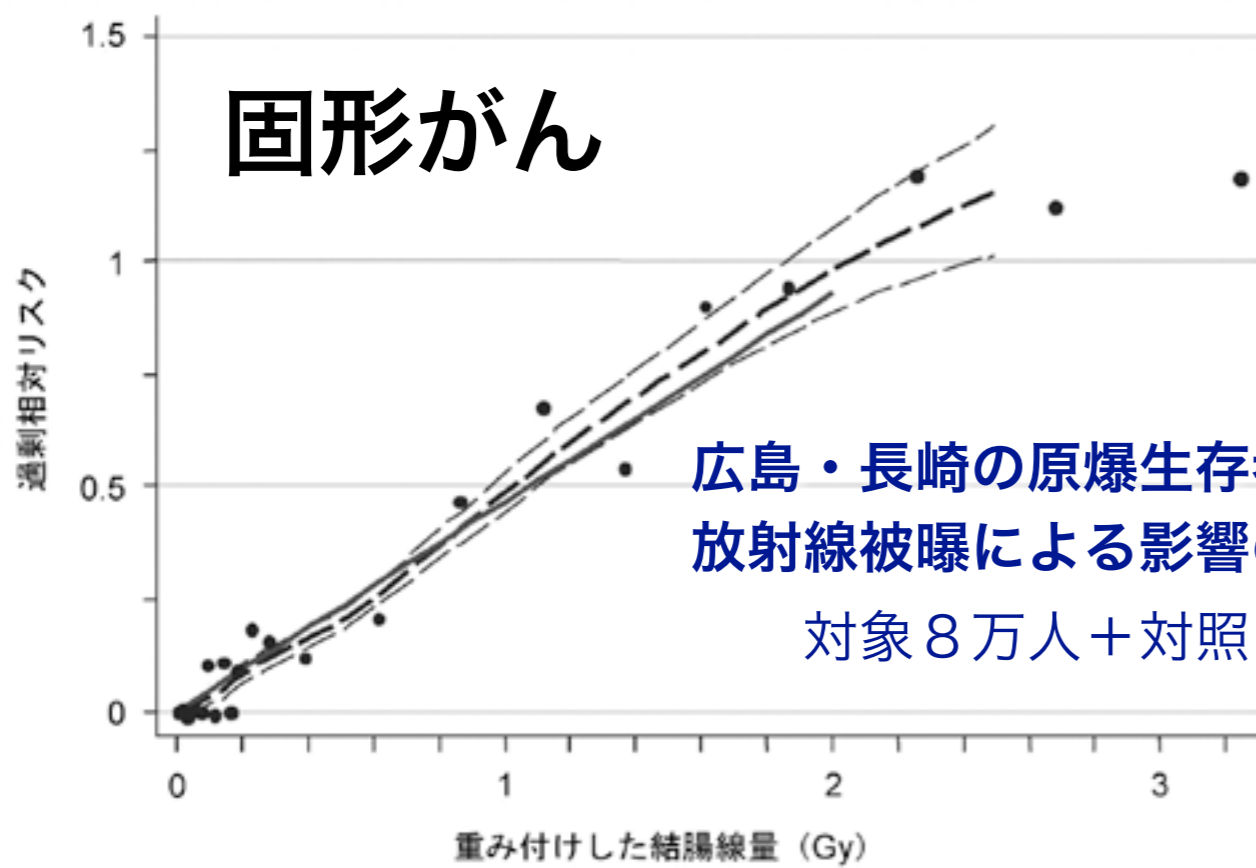


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

図. 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。被爆時年齢20-39歳の人の1970年における男女平均リスク。

表. LSS集団における固形がん発生のリスク (線量別)、1958-1998年

重み付けした結腸線量 (Gy)	対象者数	がん		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	27,789	4,406	81	1.8%
0.1 - 0.2	5,527	946	75	7.6%
0.2 - 0.5	5,935	1,144	179	15.7%
0.5 - 1.0	3,173	688	206	29.5%
1.0 - 2.0	1,647	460	196	44.2%
>2.0	564	185	111	61.0%
合計	44,635	7,851	848	10.7%

表. LSS集団における白血病による死亡の観察数と推定過剰数、1950-2000年

重み付けした骨髄線量 (Gy)	対象者数	死亡		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	30,387	69	4	6%
0.1 - 0.2	5,841	14	5	36%
0.2 - 0.5	6,304	27	10	37%
0.5 - 1.0	3,963	30	19	63%
1.0 - 2.0	1,972	39	28	72%
>2.0	737	25	28	100%
合計	49,204	204	94	46%

(財) 放射線影響研究所 データ

**低線量被曝の影響について疫学調査の結果から結論を導きだすのは統計学的に困難。**



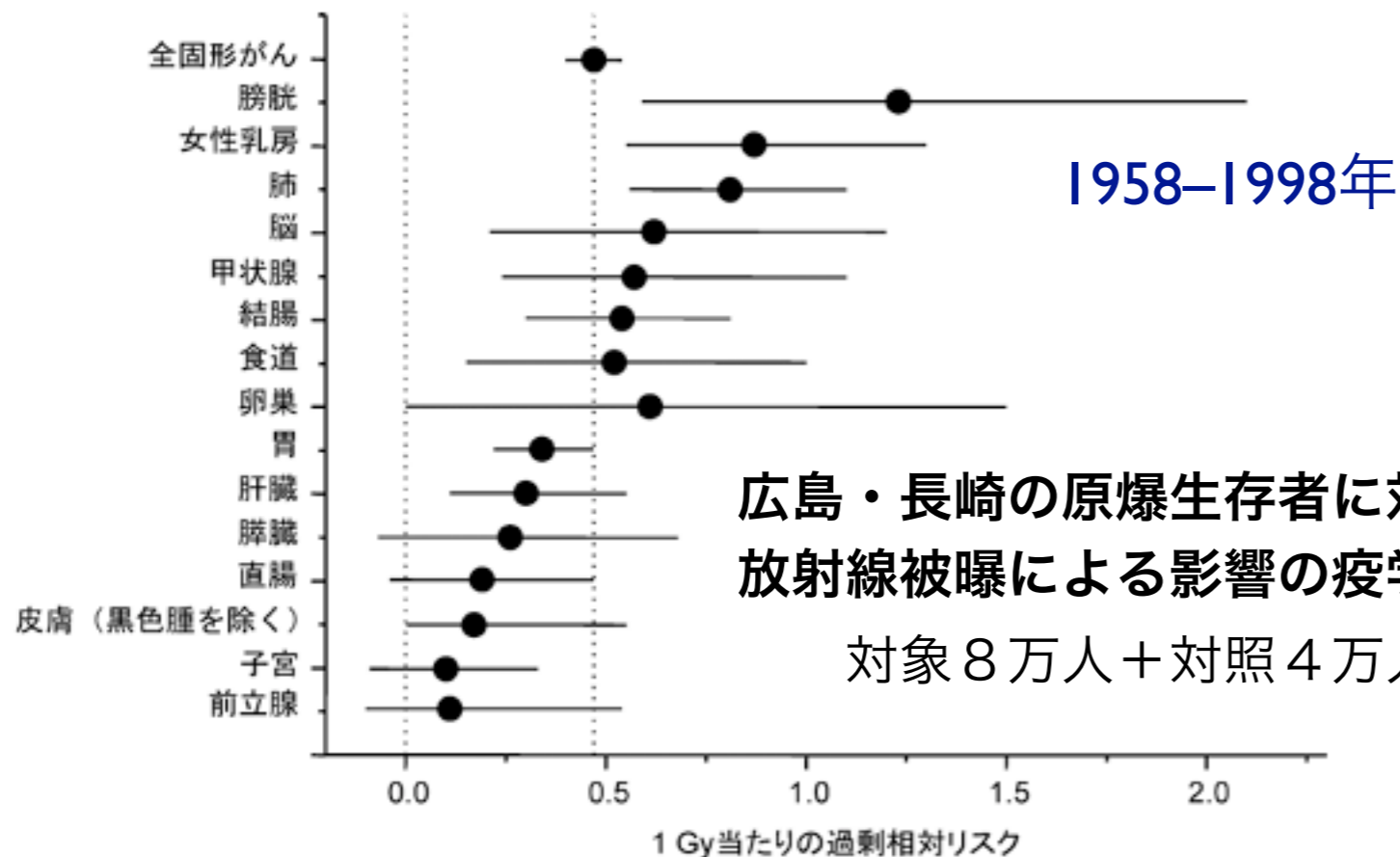
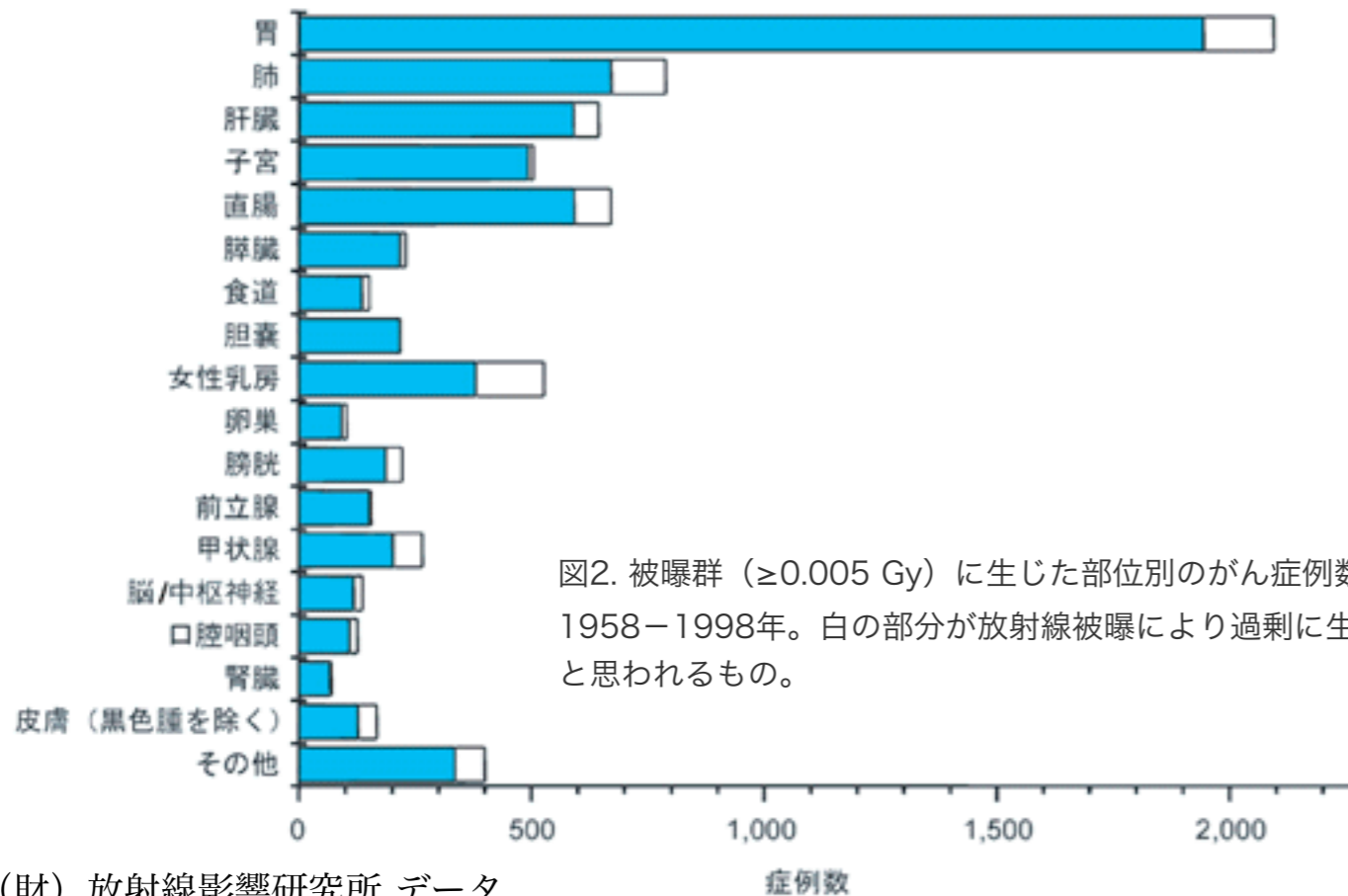
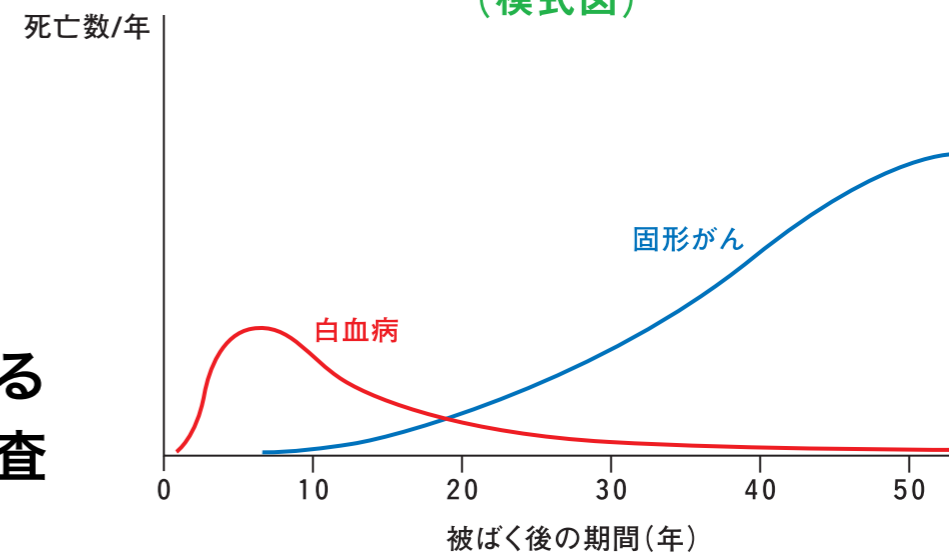


図1. LSS集団における被曝時年齢30歳（男女平均）の人が、70歳に達した時の1 Gy 当たりの部位別がん発生率の過剰相対リスク。横線は90%信頼区間を示す。

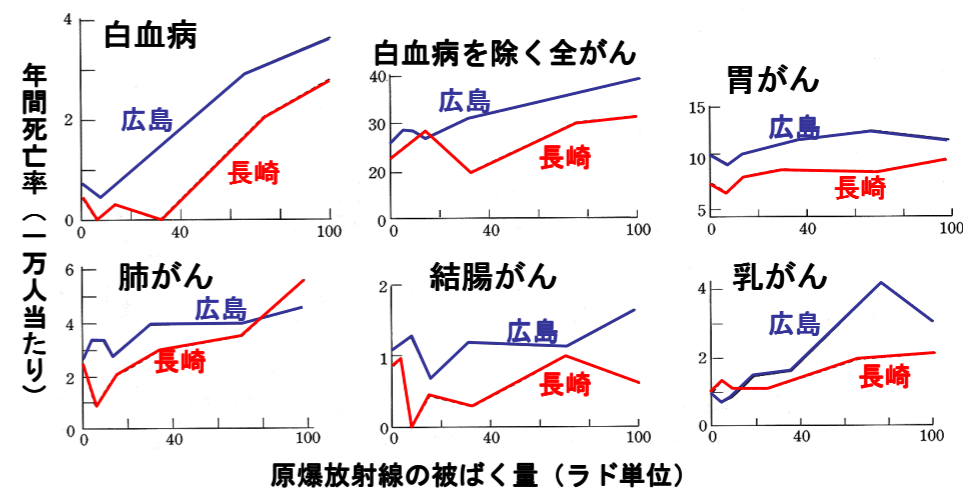


(財) 放射線影響研究所 データ

原爆放射線に関連する死亡数の時間的経過 (模式図)

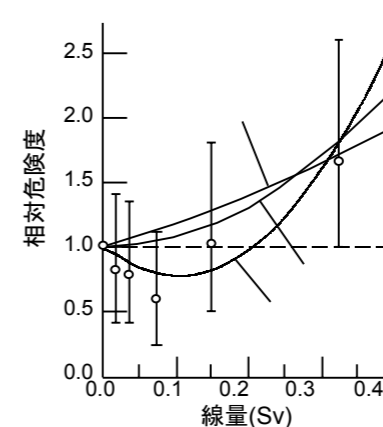


5種類のがん死亡率 (1950-1986間の平均値) と 低レベル原爆放射線被ばく量の関係

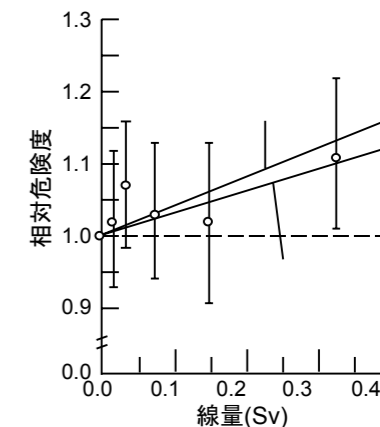


清水由紀子ほか (1987)

白血病



白血病以外の全がん



Shimizu, Y., et al.: RERF Update RERF News 1992.



# 公益財団法人 放射線影響研究所 (放影研 RERF)



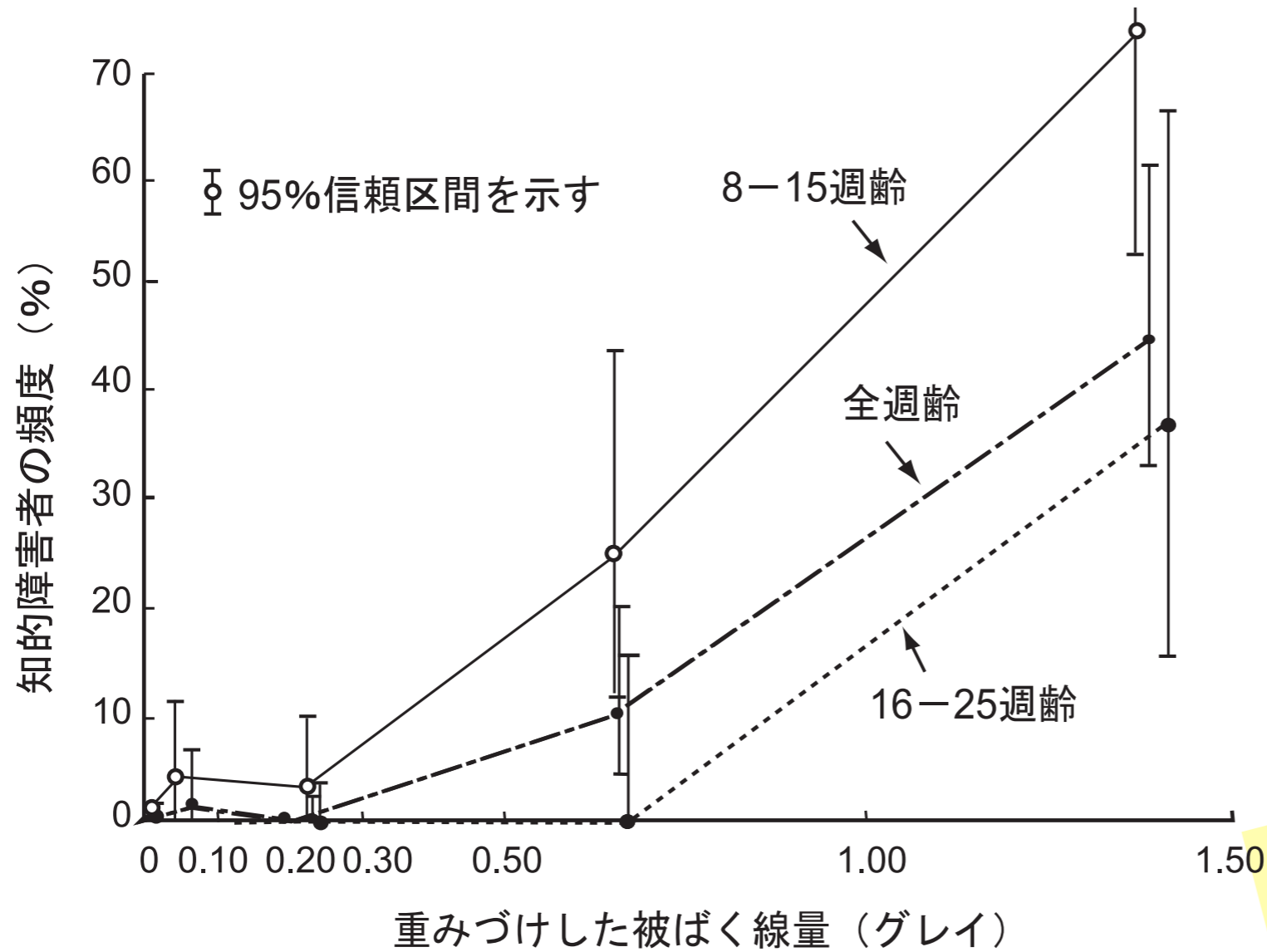
@広島市南区 比治山公園



@長崎市蛭茶屋



# 胎内被爆者における放射線の影響



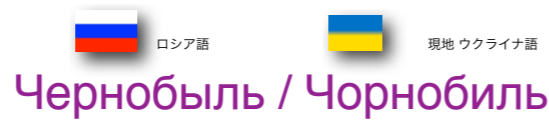
(財)放射線影響研究所 パンフレット「放射線影響研究所のご案内」

チェルノブイリ事故の後、ヨーロッパ全土で不必要な堕胎が数万人以上だったともいわれる。(風評・過度の心配による犠牲)

## 放射線による遺伝的影響は認められず

これまでのところ原爆被爆者の子供に臨床的または潜在的な影響を生じたという証拠は得られていない。事実これはマウスを用いた実験からの予測と一致しており、遺伝的变化に関する限り、ヒトは放射線に対してマウス以上に高い感受性を示すわけではないことを示唆している。

# 低線量・低線量率の被曝とガン死亡



## チェルノブイリ原発事故

チェルノブイリ原発  
黒鉛炉  
格納容器なし  
1週間燃え続けた

福島第一原発  
沸騰水型軽水炉  
格納容器あり  
水素爆発・汚染水流出

$^{131}\text{I}$  (ヨウ素 $^{131}\text{I}$ ) total **200京ベクレル !!**

初期消火に当たった原発作業員・消防隊員が  
致死・亜致死量の被曝。28人死亡。

事故処理に当たった軍人ら“リクビダートル”  
60万人が数百 mSv 被曝

3 km にあるプリピャチ市民は翌日に強制避難  
半径 10 km 圏内の避難が1週間遅れた。

(最大で 750 mSv の被曝)

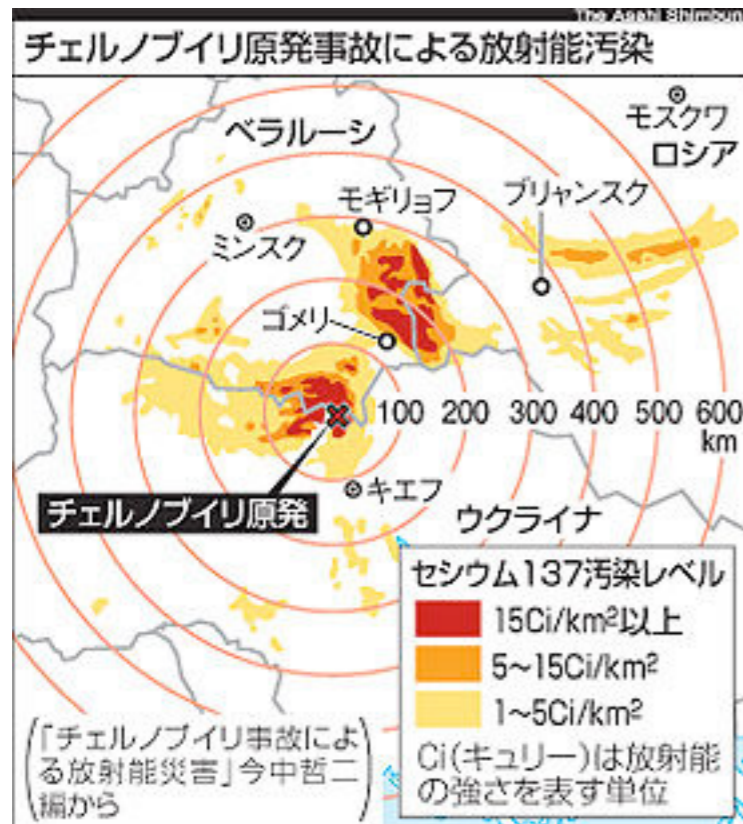
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

一般住民で確認された健康への影響は  
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。

毎年 1/300,000人 → 1/10,000人  
(患者数 5000人、死亡 15人)

甲状腺平均被曝量 2 Gy !!

と、ずっと大きいストレスによる失調





# 低線量・低線量率の被曝とガン死亡

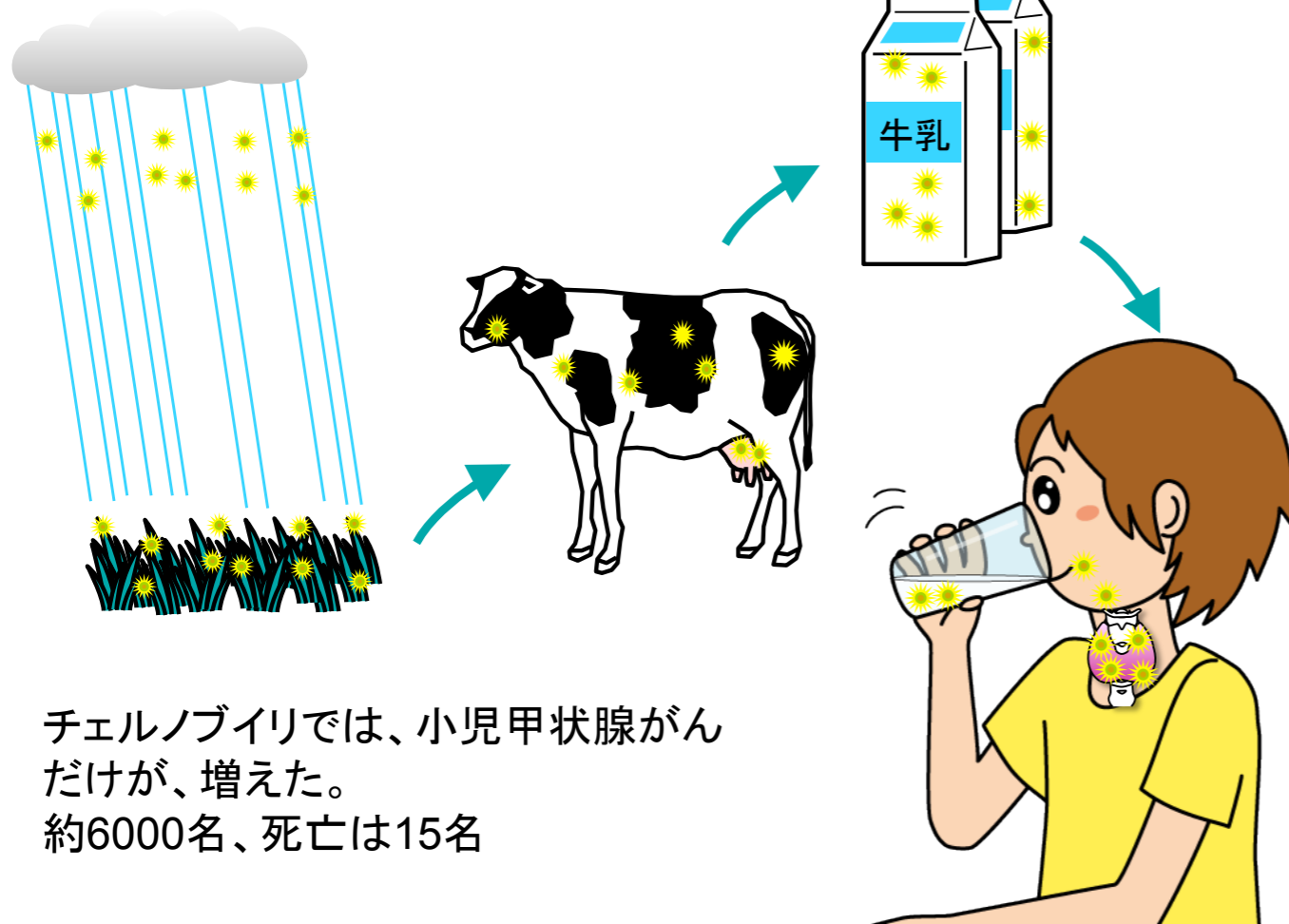


ロシア語  
Чернобыль / Чорнобиль



## チェルノブイリ原発事故

$^{131}\text{I}$  (ヨウ素 $^{131}\text{I}$ ) total 200京ベクレル !!



チェルノブイリでは、小児甲状腺がんだけが、増えた。  
約6000名、死亡は15名

一般住民で確認された健康への影響は  
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。  
(地産地消の牛乳による摂取が問題)

毎年 1/300,000人 → 1/10,000人  
(患者数 5000人、死亡 15人)

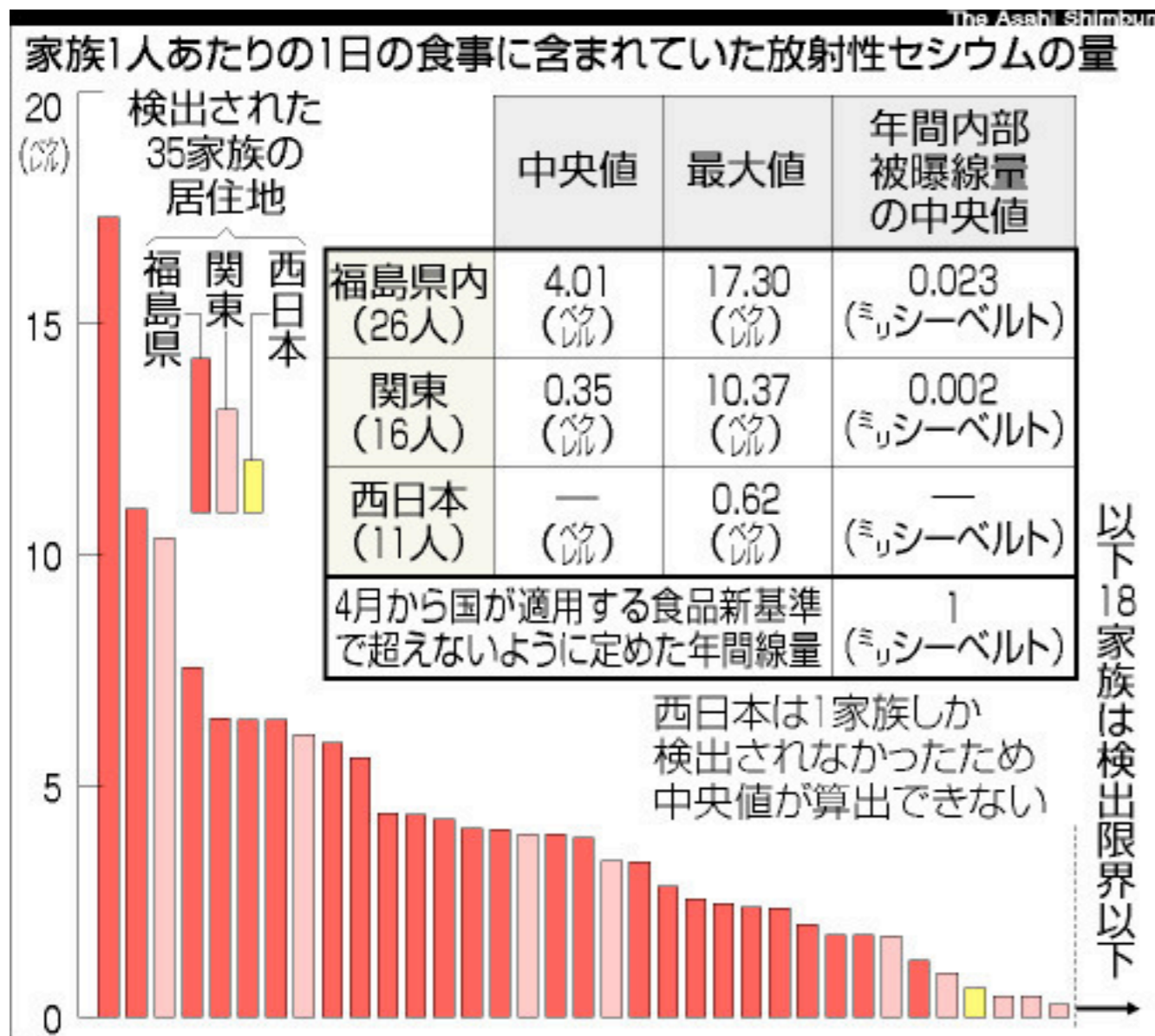
甲状腺平均被曝量 **2 Gy**

= **2000 mSv !!** (10 Gy 以上の被曝も!)  
と、ずっと大きいストレスによる失調

いわき市、飯舘村のこどもの甲状腺被曝調査  
最大で **35 mSv** の被曝 (甲状腺等価線量)

震災・事故による喪失感は共通

# セシウムによる内部被曝について



2012/1/18 朝日新聞：京都大医学研究科 小泉昭夫教授らの調査

最近の調査結果をみれば、ひとまず安心。

自然の内部被曝に比べ一割以下  
(いろいろ批判されてきたが)  
食品規制が奏効しているようだ。

## ■放射性セシウムの基準

暫定基準		新基準案	
野菜類	500%	一般食品 (野菜類、穀類、肉・卵・魚・その他)	100%
穀類	500%		
肉・卵・魚・その他	500%		
飲料水	200%	飲料水	10%
牛乳・乳製品	200%	牛乳	50%
		乳児用食品	50%

(1kgあたり)

事故前から体内に存在する放射性物質による自然放射線の内部被曝量 (体重 60 kg の人)

カリウム40、炭素14などあわせて 7200 ベクレル：0.3 ミリシーベルト／年間

うち、カリウム40 が 4100 ベクレル：0.2 ミリシーベルト／年間

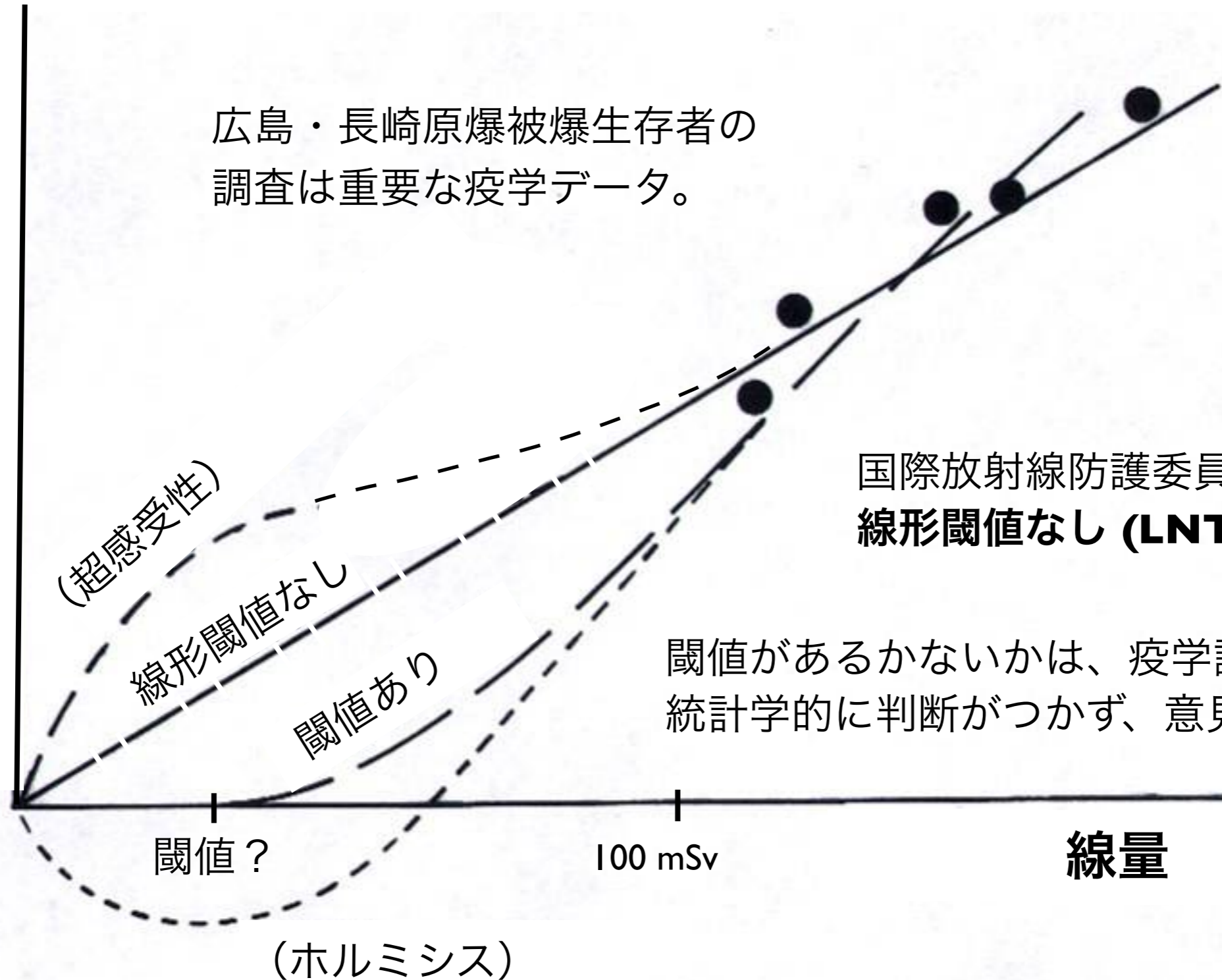


# 放射線のリスク評価と防護

# 低線量におけるリスク評価

将来のガンの増加リスク

広島・長崎原爆被爆生存者の調査は重要な疫学データ。



国際放射線防護委員会 (ICRP) は線形閾値なし (LNT) 仮説を採用。

閾値があるかないかは、疫学調査から統計学的に判断がつかず、意見が分かれる。

(ホルミシス)



表2 低線量、低線量率放射線被ばくに伴うがん死亡の生涯リスク(ICRP1990)

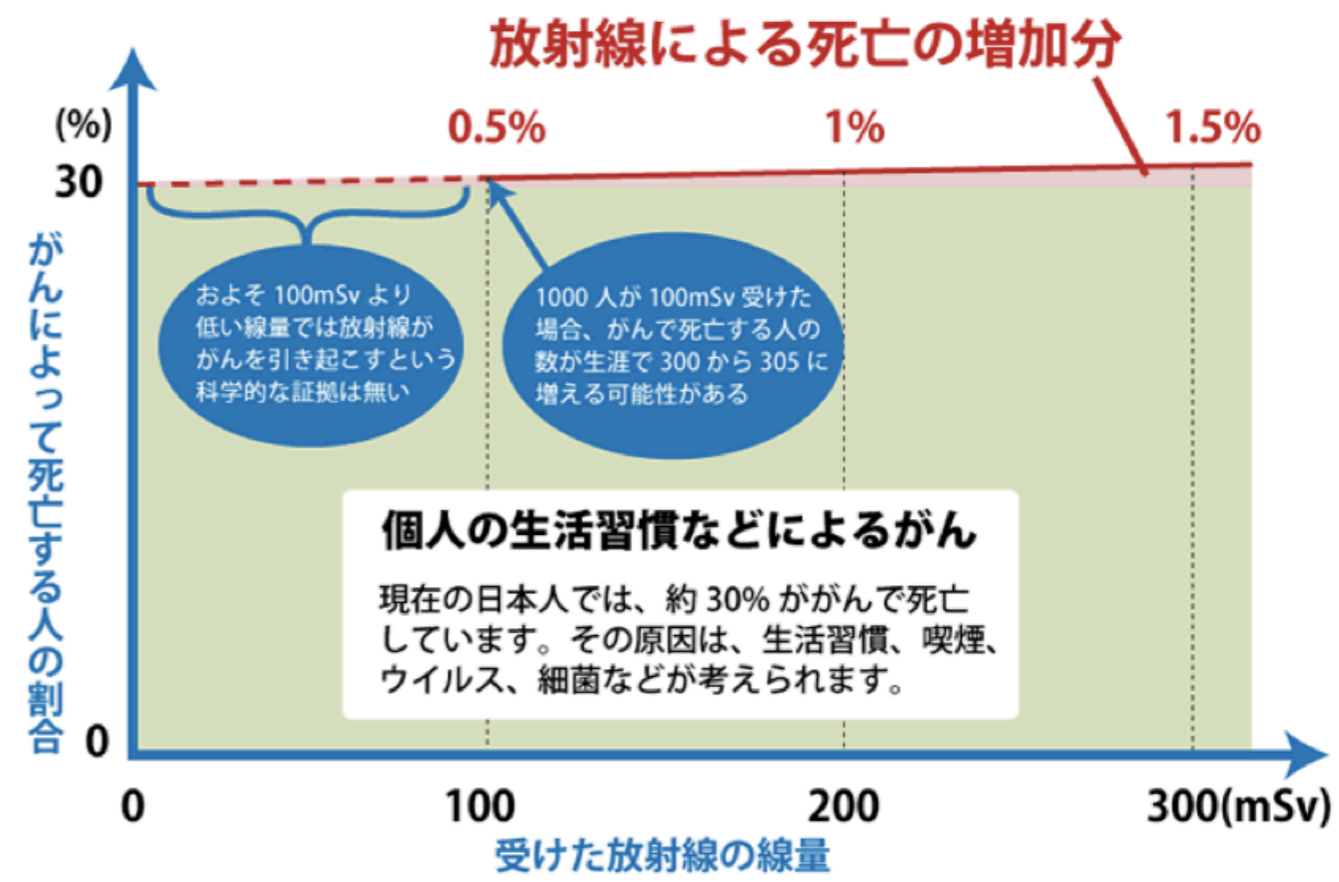
(10,000人当り、全年齢平均、1Sv当り過剰死亡数)

	ICRP 1977年勧告	ICRP 1990年勧告
赤色骨髄	20	50
骨表面	5	5
膀胱		30
乳房	25	20
結腸		85
肝臓		15
肺	20	85
食道		30
卵巣		10
皮膚		2
胃		110
甲状腺	5	8
その他	50	50
合計	125	500

[出典](社)日本アイソトープ協会:国際放射線防護委員会の1990年勧告(1991年11月)、p.157

# 低線量・低線量率の被曝

## 放射線によるがん・白血病の増加



国際放射線防護委員会

## ICRP 1990 の勧告値

100 mSv の被曝で人口あたり 0.5% の増加 (LNT仮説)

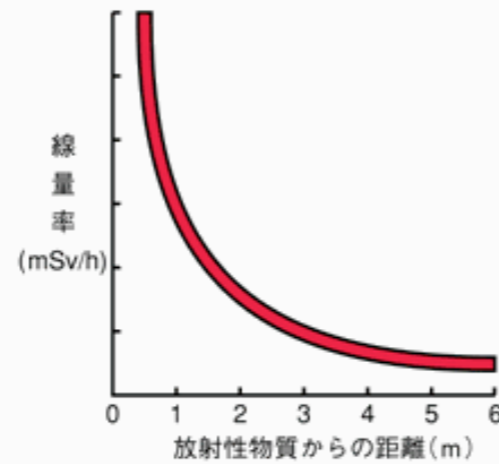
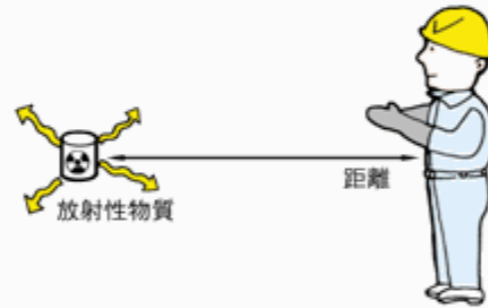
喫煙によるリスクより遥かに小さい。

**LNT (線形閾値なし) 仮説はあくまでも**放射線あるいは環境化学物質に対する基準の策定に必要な防護の具体的数値を算出するための**仮説**として提出されたもので、メカニズムの面からは必ずしも支持されるわけではない。

# 放射線防護

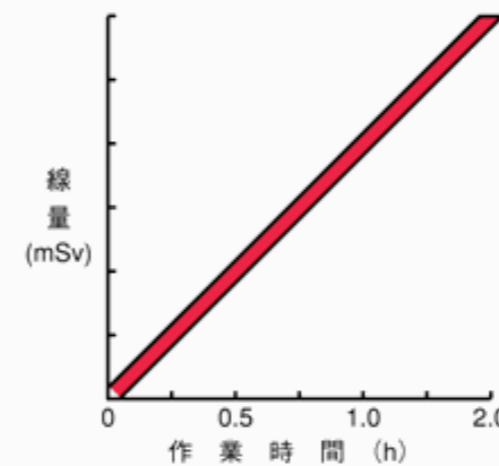
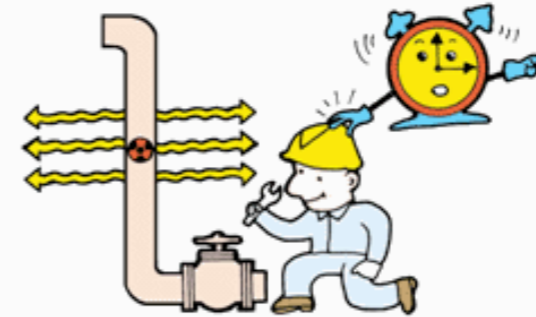
## ● 距離による防護

$$[\text{線量率}] = [\text{距離}]^2 \text{に反比例}$$



## ● 時間による防護

$$[\text{線量}] = [\text{作業場所の線量率}] \times [\text{作業時間}]$$



## ● 遮へいによる防護

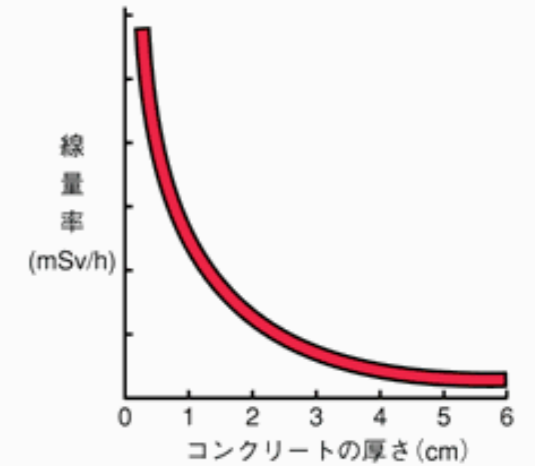
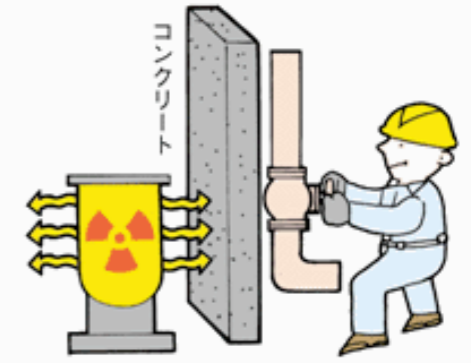


図1 遮へい3原則の図

[出典] 電気事業連合会:「原子力・エネルギー」図面集2003-2004、p.130

**防護の最適化**：個人線量、被曝人数、潜在的被曝の可能性のすべてを、経済的および社会的要因を考慮に入れたうえで、合理的に達成できる限り低く保つべきである。

**(ALARA の原則 = As Low As Reasonably Achievable)**



# 個人被曝の線量限度

## 線量限度の一覧表（作業者）

### 職業被曝（作業者 放射線業務従事者）

実効線量	100 mSv / 5年 かつ 50 mSv / 年
女子 妊娠中の女子	5 mSv / 3月 内部被曝について 1 mSv
等価線量	
水晶体	150 mSv / 年
皮膚	500 mSv / 年
妊娠中の女子の 腹部表面	2 mSv / 年

	1990勧告	1977勧告
実効線量	20mSv/年（5年平均）	50mSv/年
水晶体等価線量	150mSv/年	150mSv/年 <sup>2)</sup>
皮膚等価線量	500mSv/年 <sup>1)</sup>	500mSv/年
手・足の等価線量	500mSv/年	500mSv/年 <sup>3)</sup>
その他の組織	—	500mSv/年

1) 被ばく部位に関係なく、深さ7 mg/cm<sup>2</sup>、面積1 cm<sup>2</sup>の皮膚についての平均線量に適用される。

**年リスク千分の1** (18歳から65歳までの就業期間の被曝の場合で、65歳までのリスクの最大値)

## 線量限度の一覧表（一般公衆）

### 公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量	
水晶体	—
皮膚	—

	1990 勧告	1977 勧告
実効線量	1 mSv/年	5 mSv/年 <sup>1)</sup> , 1 mSv/年（生涯の平均）
水晶体等価線量	15 mSv/年	50 mSv/年
皮膚等価線量	50 mSv/年 <sup>3)</sup>	50 mSv/年
その他の組織	—	50 mSv/年 <sup>2)</sup>

1) 1985年のパリ声明で主たる限度を1年につき1 mSvとして、補助的な限度を5 mSv/年とした。

2) 1985年のパリ声明で実効線量当量の制限によって不要になった。

**年リスク1万分の1** (毎年被曝の場合、65歳までの最大値) **ICRP 勧告**

〔出典〕（1990年ICRP新勧告と1977年ICRP勧告における線量限度値対照表）

〔「ICRP1990年勧告-その要点と考え方-」、草間朋子編、日刊工業新聞社、50ページ〕

国内法令による防護基準

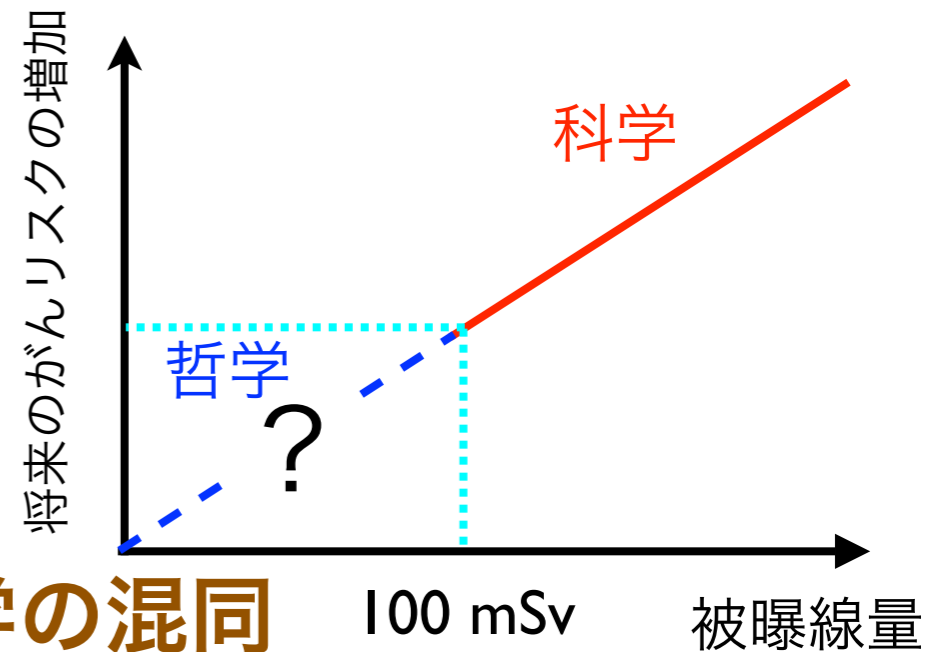
# 放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

がんの原因が医学的に分かっていない

疫学調査の問題点

統計学的有意性

影響の因果関係 スクリーニング効果・別の要因

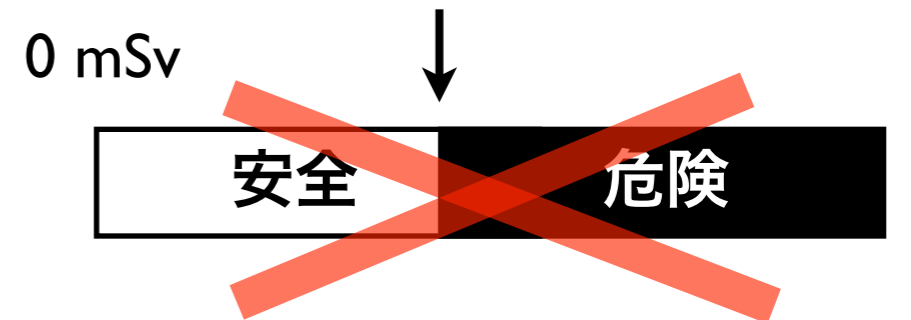


科学的知見と防護学(安全管理学)の哲学の混同

リスクをどこまで許容するか

安全と危険の線引きはできない。

他のリスクとの相対比較



「絶対安全」は世の中に存在しない。

相対的なリスク評価の目を養うべき。

正しい情報をどうやって判断するか。

基準値 (社会が決める) 放射線のリスク

根拠のない過信・安心は問題だが、

☞ JCO の事故

根拠のない恐れや不安もまた問題。

☞ パニック、風評、健康被害。



## コメント

**LNT（線形閾値なし）仮説はあくまでも放射線あるいは環境化学物質に対する基準の策定に必要な防護の具体的数値を算出するための仮説として提出されたもので、メカニズムの面からは必ずしも支持されるわけではない。**

佐渡敏彦ほか「放射線および環境化学物質による発がん：本当に微量でも危険なのか？」（医療科学社）

**等価線量も実効線量も、放射線防護の目的にのみ使用できる量である。つまり、放射線を利用する計画に伴う将来のリスクを予測評価するための目安であって、すでに受けてしまった放射線曝露から個人が受けるリスク（たとえば、将来がんを誘発する可能性）を評価するために用いるべきではない。**

多田順一郎「わかりやすい放射線物理学 改訂2判」オーム社

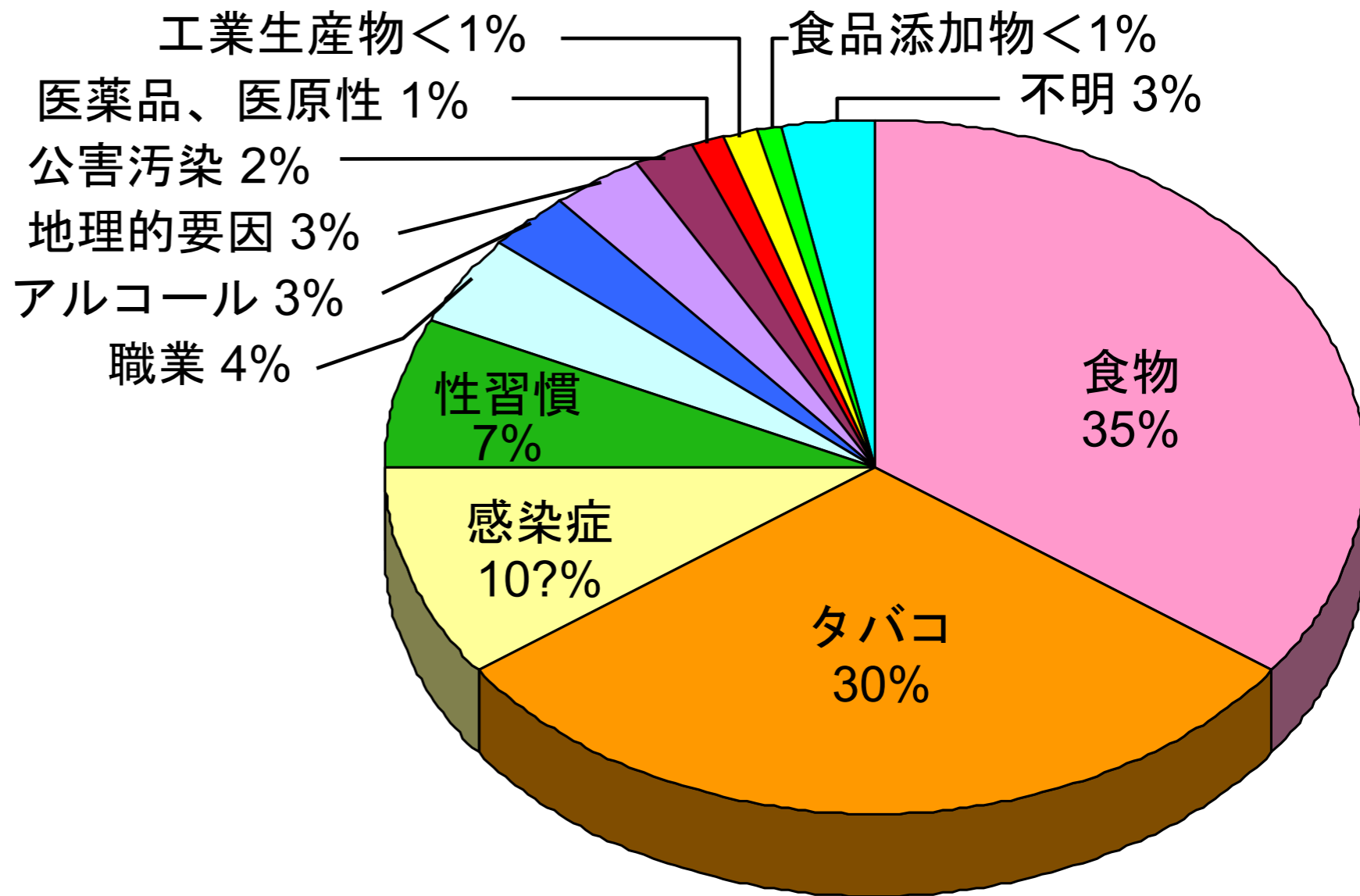
## 放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

受動喫煙の女性	1.02~1.03倍
野菜不足	1.06倍
100~200ミリシーベルトを浴びる	1.08倍
塩分の取りすぎ	1.11~1.15倍
運動不足	1.15~1.19倍
200~500ミリシーベルトを浴びる	1.19倍
肥満	1.22倍
500~1000ミリシーベルトを浴びる	1.4倍
毎日2合以上の飲酒	1.6倍
喫煙	
毎日3合以上の飲酒	1.8倍
1000~2000ミリシーベルトを浴びる	

※網かけは放射線

(注)相対リスクは、例えば喫煙者と非喫煙者のがんの頻度を比較した数字

## ヒトのがんの原因と関連のある因子



(R.Dool and R.Peto, 1981)

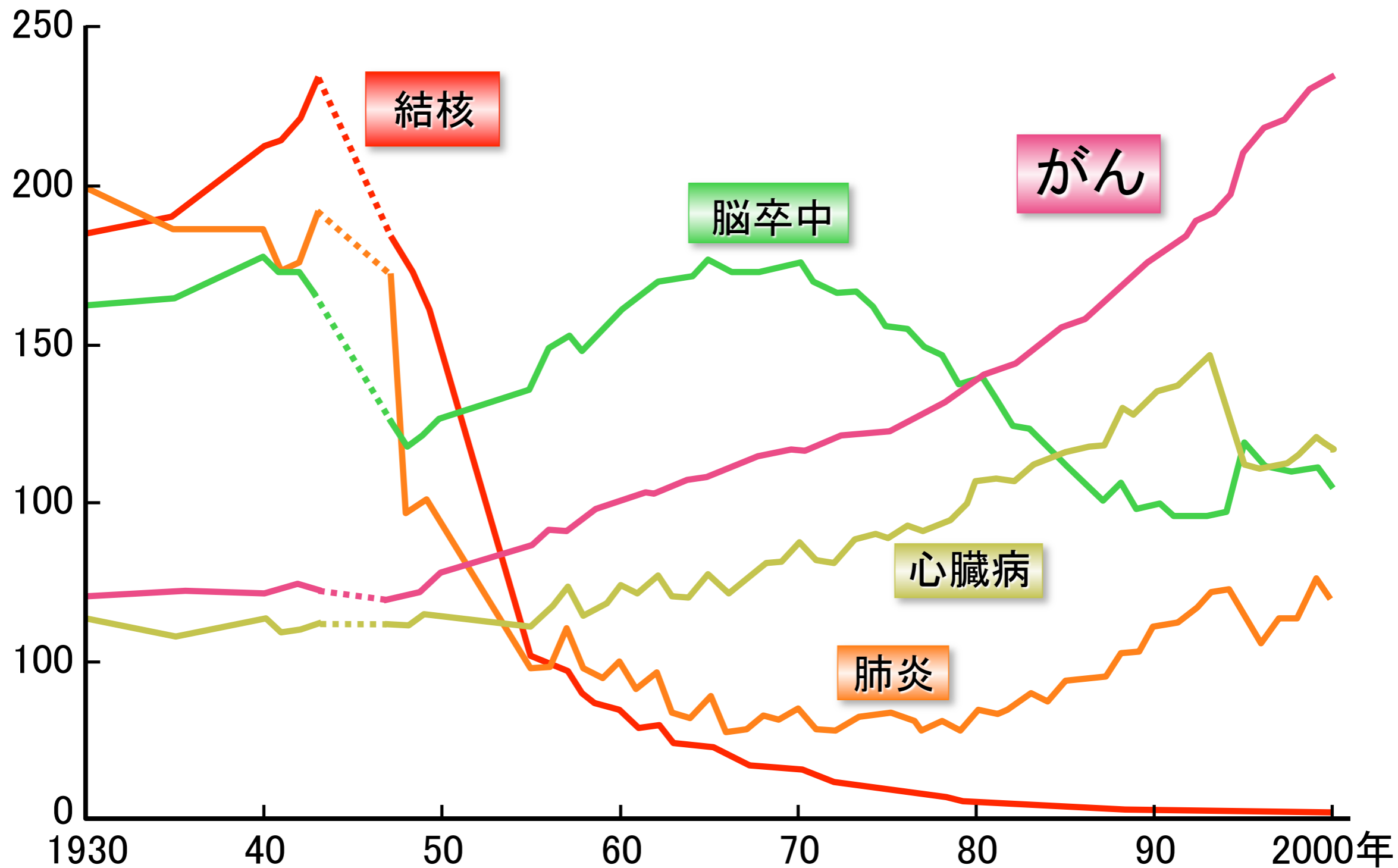
表の値は短時間での被曝の場合。

がん死中にしめる各因子の割合 (%)

(低線量率では損傷の修復のためリスクはより小さい。どれだけ小さいかは議論のあるところで、結論は出ていない。ICRPは係数1/2を採用。)



日本人の2人に1人が、がんになり、3人に1人が、がんで死んでいる



がんで死なないためには、

👉 がんにならないのが一番

+ なくても、早期発見で完治させる

**早期発見 = がん検診**

(症状に気づいてからでは遅い)

## がんにならない生活習慣

- タバコは吸わない
- 酒はひかえめ (赤くなる人は特に)
- 肉と塩分はひかえめ
- 野菜を十分に
- 運動

東大医学部附属病院

中川 恵一 先生





「ものをこわがらな過ぎたり、こわがり過ぎたり  
するのはやさしいが、**正当にこわがる**ことは  
なかなかむづかしい**ことだと思われた。**」

寺田 寅彦 (1935年)

## 被曝を

**怖れすぎても、怖れなさすぎても**

**健康被害が出る。**

(東大病院 放射線科 中川恵一先生)

**病は気から** = 精神失調、免疫力低下などに注意

# 放射線に対する強い恐怖心をもっている人たちがいる

あるウェブページのコメント欄より (2011/11~12)

まったく汚染されていない瓦礫などありません。

「私たちにできることは、被災地の苦しみ、痛み、悲しみを分かち合う、寄り添うことだ」とおっしゃっていますが、瓦礫受け入れによって、その苦しみや痛み、悲しみを市民に与えることになるとは思われないのでしょうか？瓦礫を受け入れたことによってもたらされる影響を熟考され、適切な判断をされるべきです。

大反対です！今回の瓦礫受け入れは、被災地の隣、福島県内の食べ物ばかりです。放射線レベルを高くても、手間をかけてでも、この期に及んで「安全」を、一般国民の何人が心から信じますか？

**放射線に関する科学的知識の欠如、  
科学者の社会への情報発信の失敗、  
行政に対する不信感、が問題。**

市長さんの今回の決定に不安を感じます。皆さんが仰る通り、正直風評被害が一番怖いのです。私の大事な故郷が悪く言われるのは耐えられません。被災地の方を少しでも助けたいという思いは、私も溢れそうなくらいあります。本当に今回の件を遂行されたいのなら**反対する市民、日本国民をどうか納得させて下さい。**





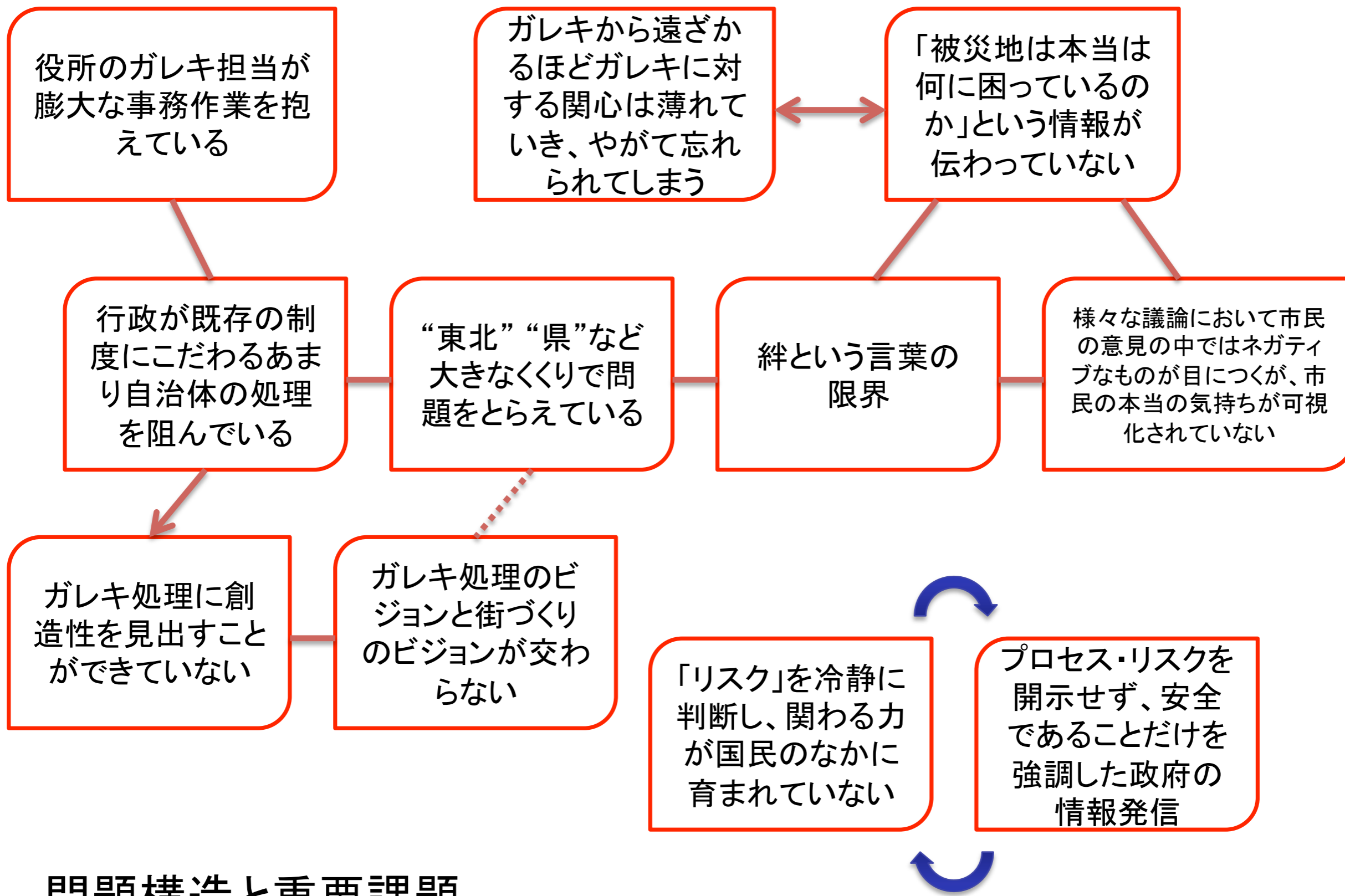
# 震災がれき処理問題

東京大学 × 博報堂 × 時事通信社









## 問題構造と重要課題

# 放射線医療

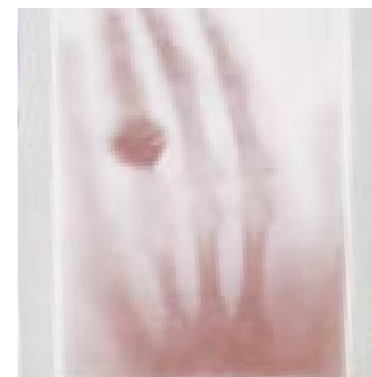
～ 治療 ～



## 医療で活躍する放射線



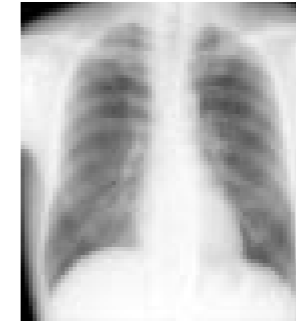
ウィルヘルム・レントゲン博士



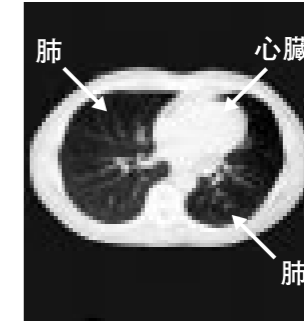
博士が撮った  
夫人の手のX線写真

### ■ エックス線で体内を見る

エックス線(X線)が物質の中を通りぬける性質(透過性<sup>とうかせい</sup>)を利用して、体の内部を見ることができます。体を透過するX線の量は、通りぬけた部分の状態(空気や水分量など)によって異なるので、これを白黒の画像として映し出し、腫瘍<sup>しゅよう</sup>や炎症などを見分けます。X線を体のまわりに360度回転させて撮影し、コンピュータを使って画像を再構成するCT(コンピュータ断層撮影<sup>だんそうさつえい</sup>)では、鮮明な人体の断面図を作成することができます。CT検査により腫瘍や血管疾患などの診断が飛躍的に進歩しました。



レントゲン写真  
(胸部の正面)



CT画像  
(胸部の断面)

### ■ 放射性薬剤で病気を診断する

放射性薬剤を体内に投与すると、その化学的性質に応じて特定の臓器や組織に取り込まれます。この薬剤から出る放射線を検出し、病気を診断します。最近、がん診断で注目を集めているPET(陽電子放出断層撮影)では、ブドウ糖をたくさん取り込んで増殖するがん細胞の性質を利用して、ブドウ糖によく似た放射性薬剤を注射し、がんのある場所を診断します。

### ■ 放射線照射でがん細胞を取り除く

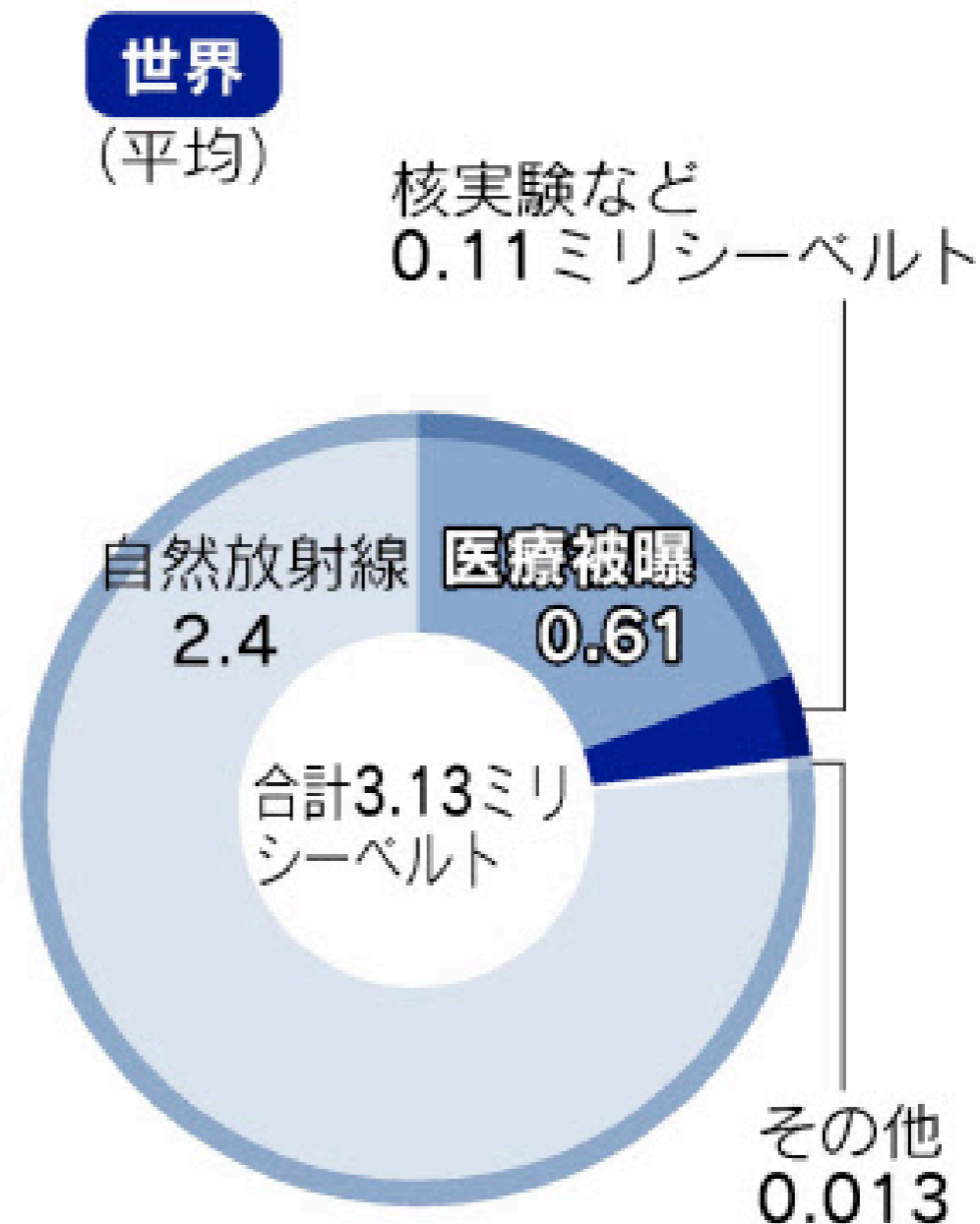
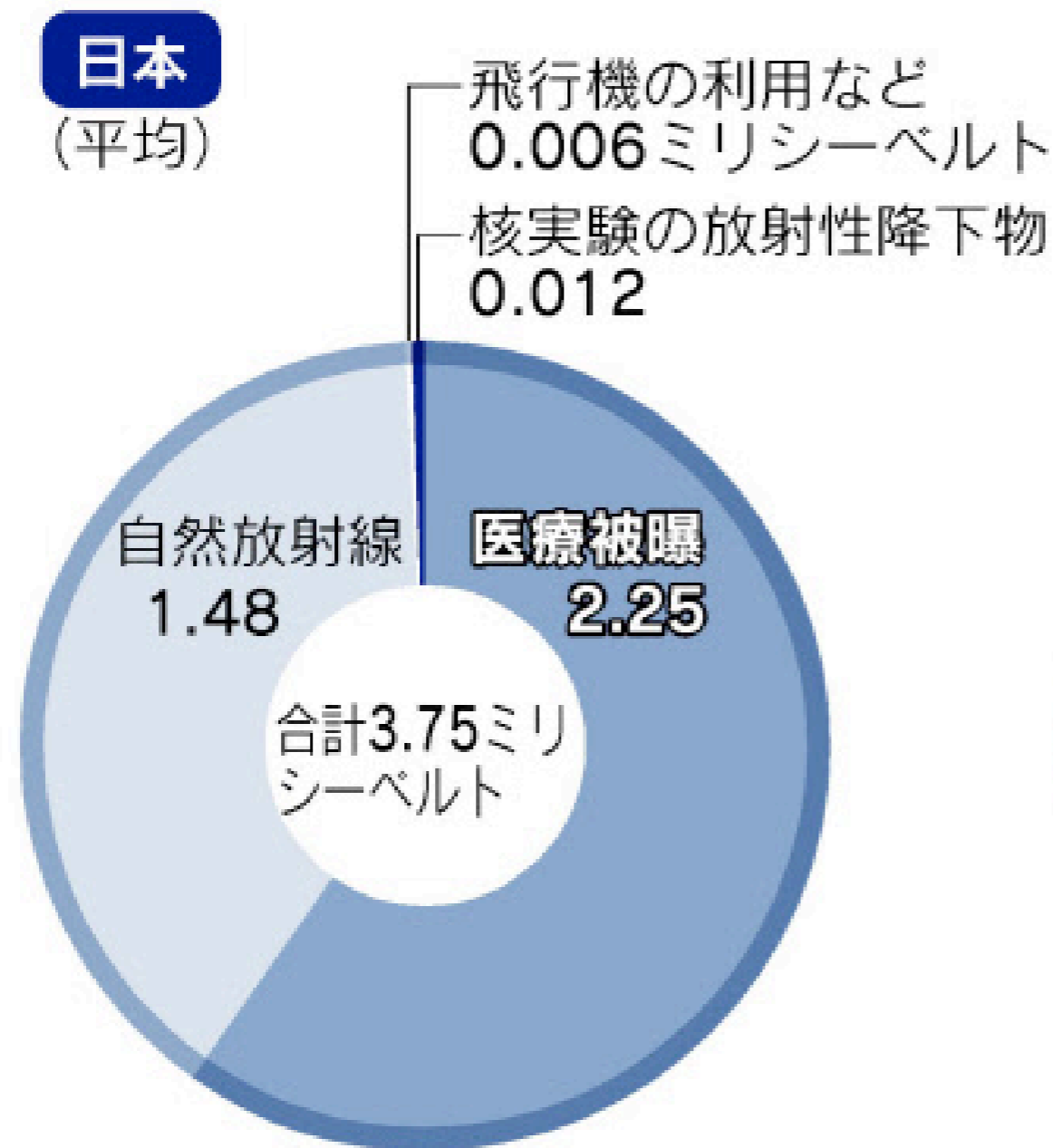
がん細胞は細胞分裂が盛んなため放射線の影響を受けやすい細胞です。そこで、体外から放射線を当てたり、体内に放射性物質を入れたりして、がん細胞を取り除く放射線治療が行われています。この方法は、手術や抗がん剤による化学療法と並んで、がんの一般的な治療法のひとつです。治療には、X線でエネルギーの高いものや、電子線、ガンマ線が用いられてきましたが、最近、陽子線や重粒子線などを用い、標的とするがん組織にエネルギーを集中し、周辺の正常な細胞への影響が少ない放射線治療法が注目されています。

### 放射線によるがん治療

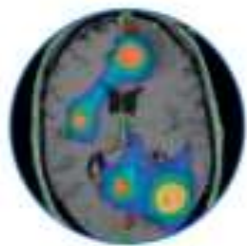


細胞分裂が盛んながん細胞は  
次々に死んでいく

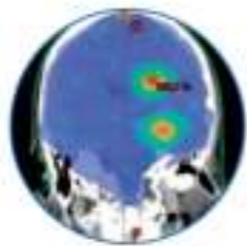
# 1人が1年間に浴びる放射線量



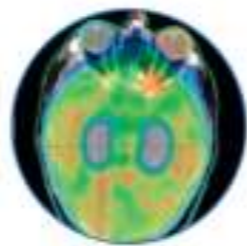
(注) ICRPが定める一般人が浴びてもさしつかえないとする限度1ミリシーベルトは医療被曝と自然放射線は除く。「原子力・エネルギー図面集 2011年版より」



Brain SRS – Multiple Metastases  
3 non-coplanar arcs, 330 sec



Brain SRT – Multiple Metastases and Whole Brain  
2 arcs, 151 sec



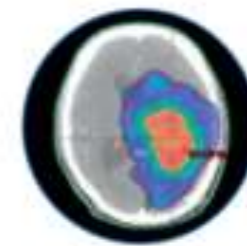
Prophylactic Cranial Irradiation with Hippocampus Sparing  
2 arcs, 155 sec



Head & Neck (Nasopharynx)  
1 arc, 79 sec



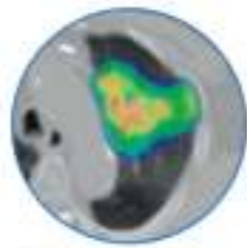
Vestibular Schwannoma  
2 arcs, 140 sec



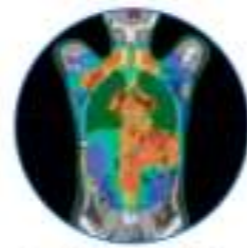
Glioblastoma  
2 arcs, 150 sec



Skull Skin Irradiation  
1 arc, 100 sec



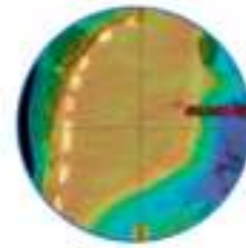
Non-Small Cell Lung Carcinoma SRT  
2 arcs, 210 sec



Pediatric Hodgkin's Lymphoma  
2 arcs, 150 sec



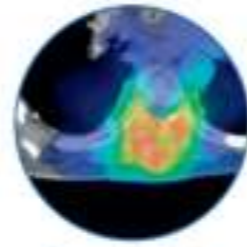
Hodgkin's Lymphoma  
2 arcs, 148 sec



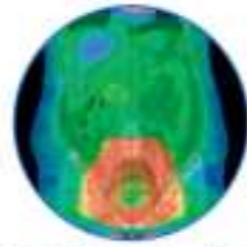
Mesothelioma  
2 arcs, 150 sec



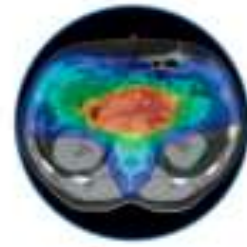
Bilateral Breast  
2 arcs, 150 sec



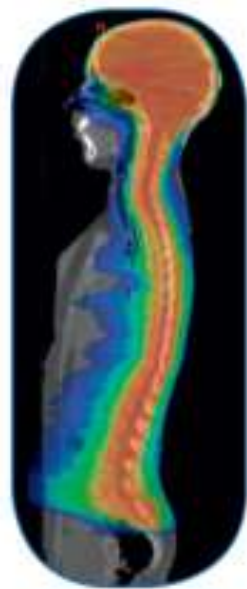
Paraspinal Lesion  
1 arc, 215 sec



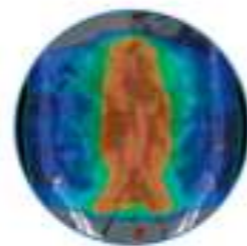
Whole Abdominal Irradiation  
3 arcs, 225 sec



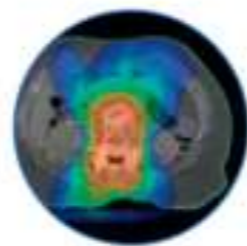
Pancreas  
1 arc, 74 sec



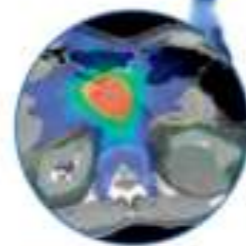
Medulloblastoma  
2 arcs, 148 sec



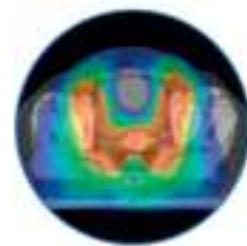
Seminoma  
1 arc, 74 sec



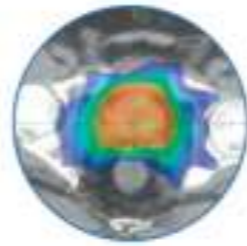
Chordoma  
1 arc, 74 sec



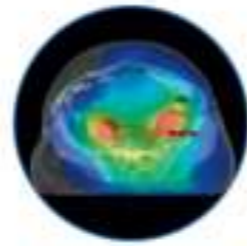
Abdominal Metastases  
1 arc, 176 sec



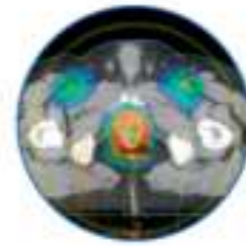
Cervix Uteri  
1 arc, 74 sec



Prostate  
1 arc, 75 sec



Multiple Pelvic Nodes  
2 arcs, 150 sec



Anal Canal  
2 arcs, 170 sec

Data Courtesy:  
VU Medical Center, Amsterdam  
IRCCS Oncologico della Svizzera Italiana, Bellinzona  
Rigshospitalet, Copenhagen  
CRG, Via Olcese, Montpellier  
Humanitas Institute, Rozzano-Milano  
University Hospital, Turin

Legend  
Number of arcs, beam-on time, Pa





# がんの放射線治療とは？

## ◆外部照射

体外から遠隔照射装置を用いて病巣に放射線を照射する



## ◆小線源療法

腔内照射法

自然にある体腔に密封線源を留置して照射する



組織内照射法

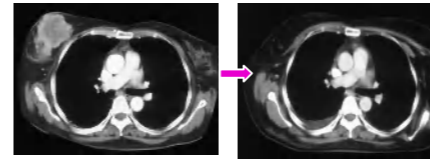
組織内に直接密封線源を挿入して照射する



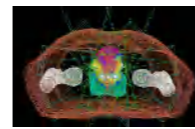
## ◆内用療法

非密封線源を静脈内あるいは経口投与する

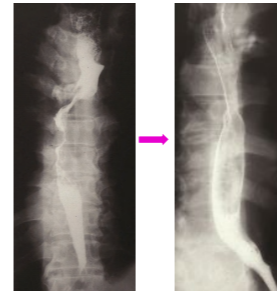
### ■乳がん



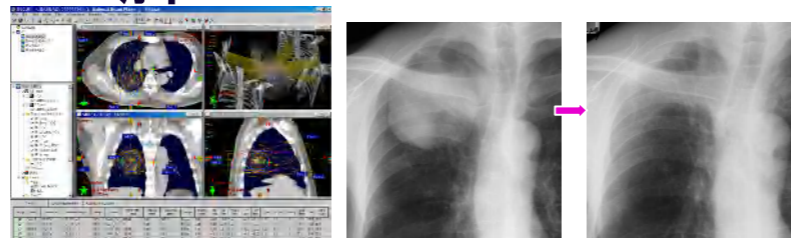
### ■前立腺がん



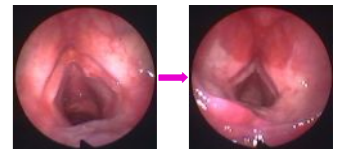
### ■食道がん



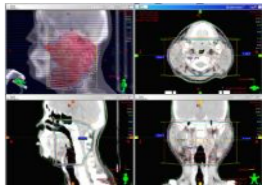
### ■肺がん



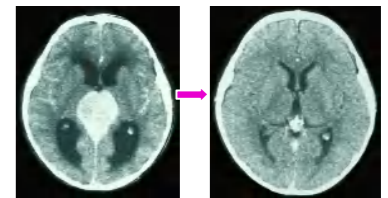
### ■頭頸部がん



### ■悪性リンパ腫



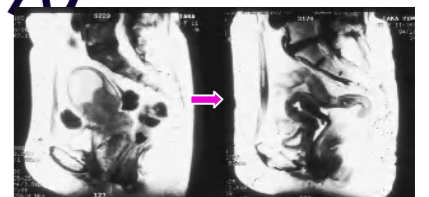
### ■脳腫瘍



### ■膝がん



### ■子宮頸がん

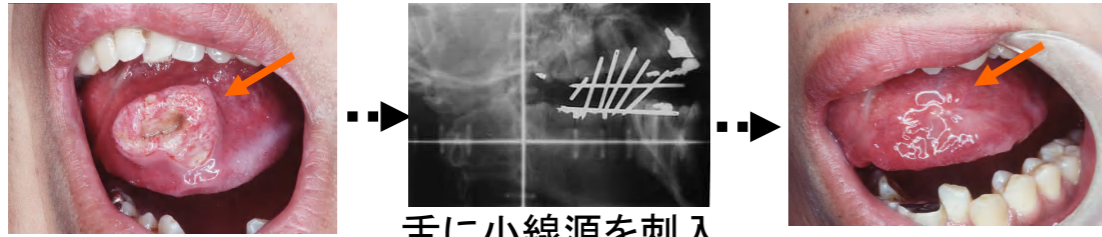


放射線治療が有用ながん

# 頭頸部癌

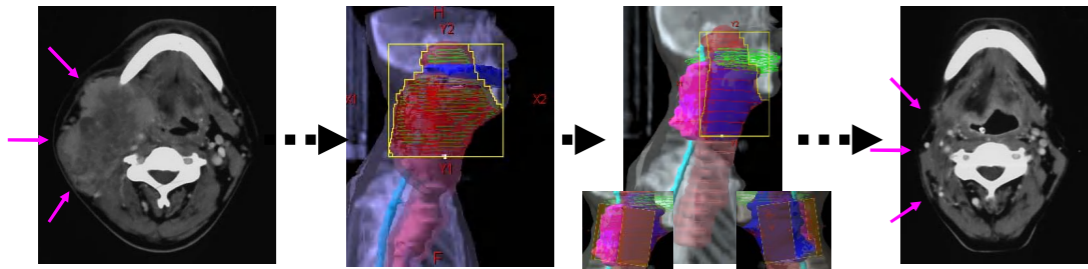
舌癌 I期

組織内照射



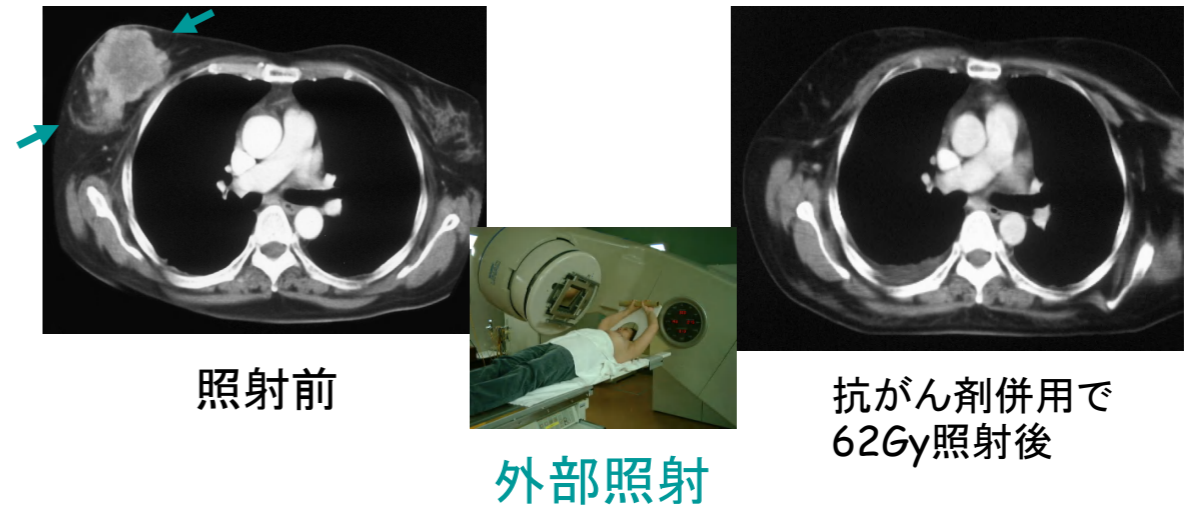
下咽頭癌 IVB期

外部照射



# 乳癌

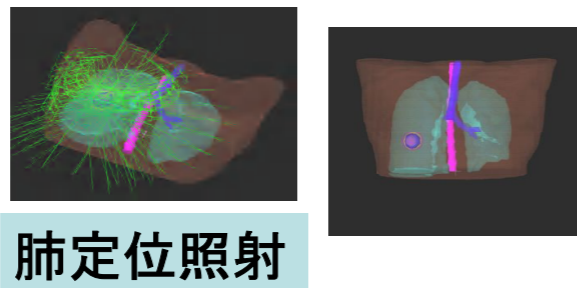
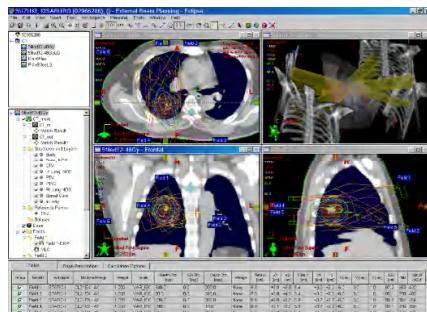
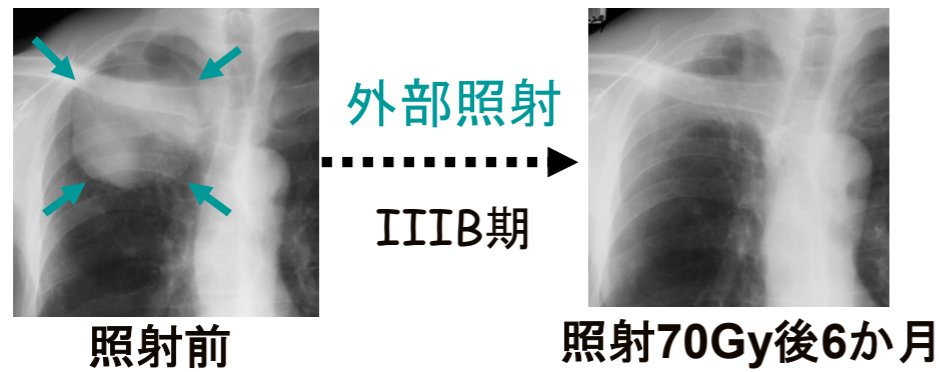
進行乳癌に対する抗がん剤療法併用放射線治療



# 肺癌

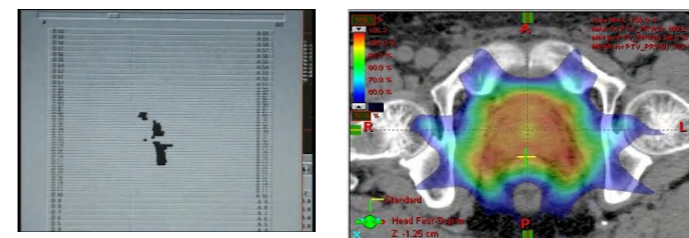
外部照射

IIIB期



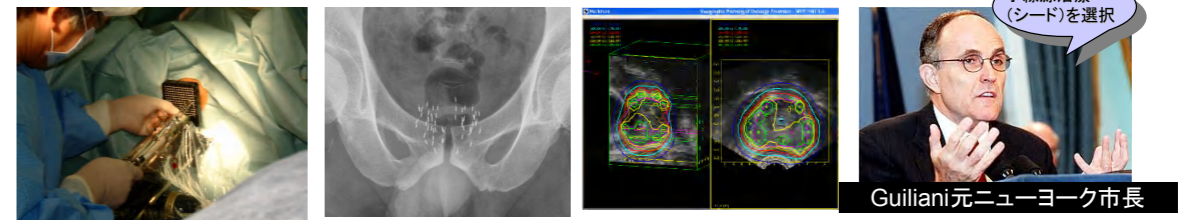
# 前立腺癌

強度変調放射線治療(IMRT)



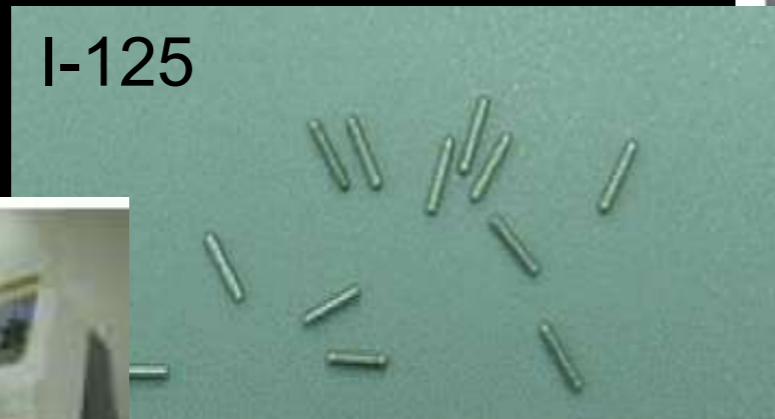
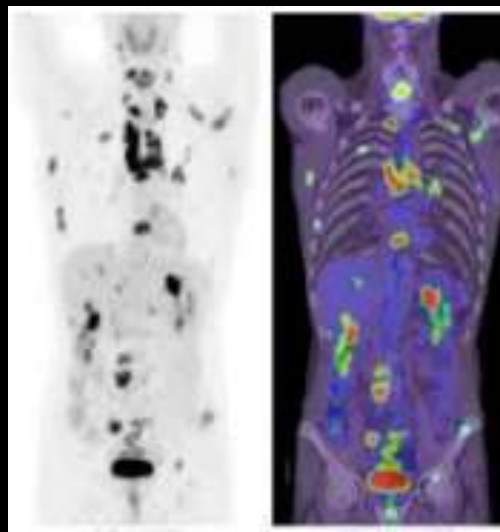
IMRT法により前立腺がんの照射線量を70 Gyから90Gyに増加し、直腸出血率を30%から3%に減少させ、治癒率を70%から90%に改善することができた。

ヨウ素125シード密封小線源治療





# 医療で使う放射線





他人の放射能を気にすべき場合は特殊例を除いて存在しない。

## 放射線治療

### 甲状腺機能亢進症（バセドウ病など）：

ヨウ素131をGBq単位で内服。暫くは他人が近づかないほうがいい。

一方で、福島で服についた放射能の場合は除染すればいいだけ。体内に取り込まれた放射性物質は、本人の内部被曝には問題になるが、傍らにいる他の人にとっては全く関係ないレベル。

また、**放射化**が問題になるのは**原子炉内**や**加速器施設**など、高エネルギー放射線による大量照射の場合のみ。

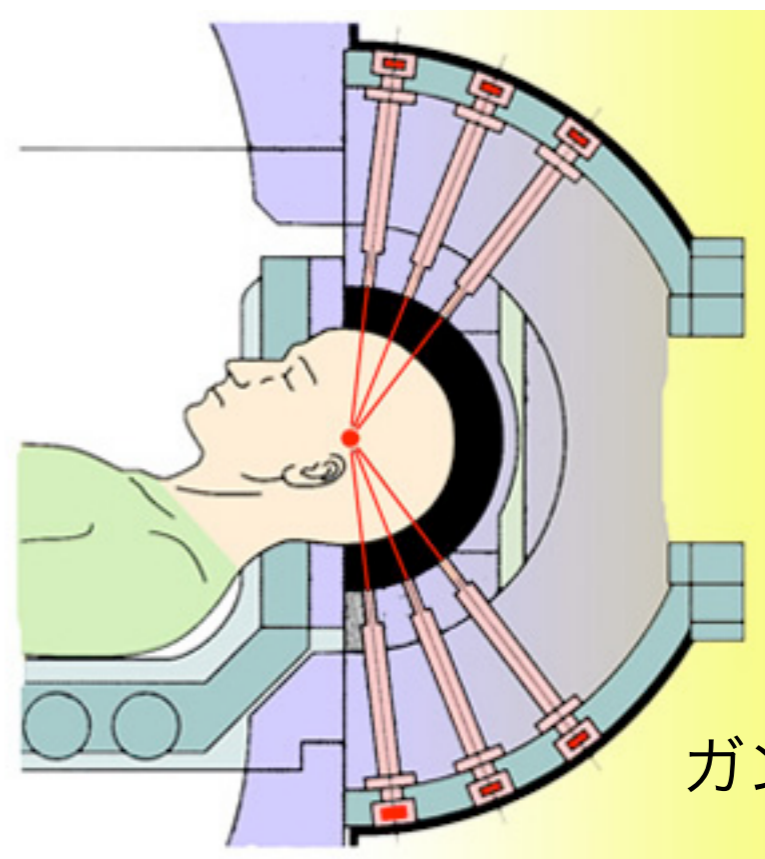
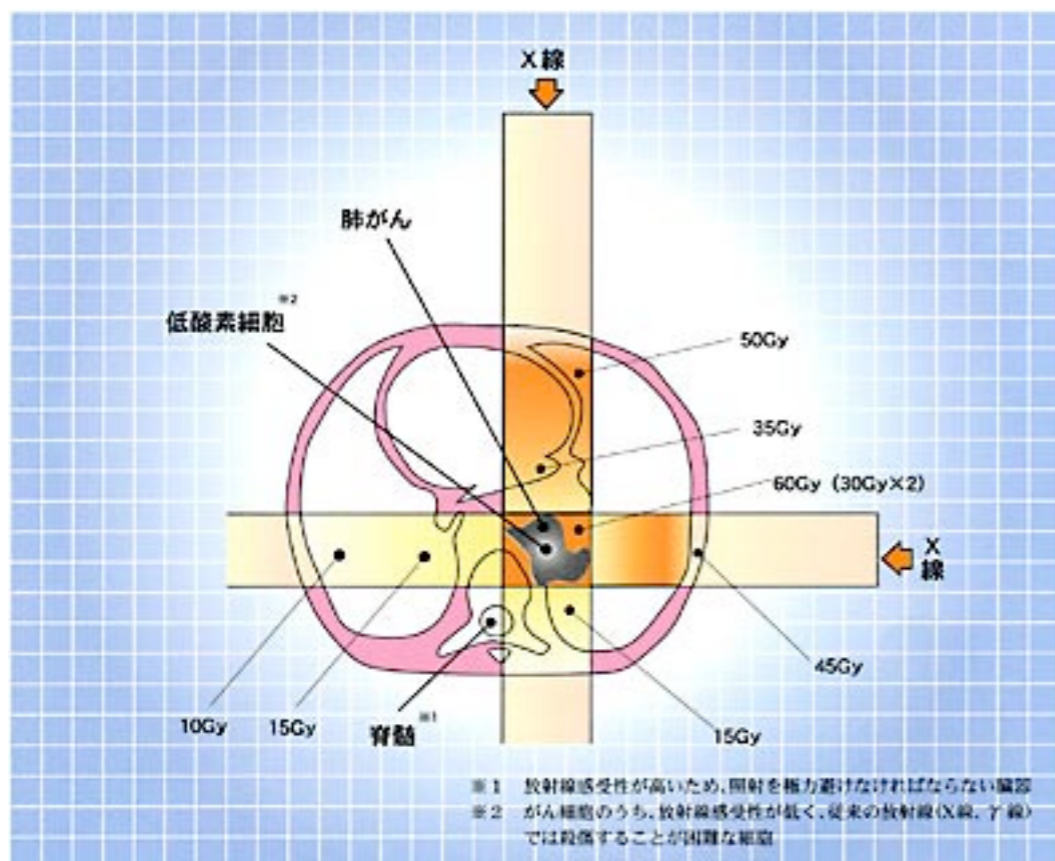
**放射化**：安定な原子核が原子核反応により放射性核種に壊変すること。

**(誘導放射能)**

# 放射線 がん治療

数 Gy を数十回

## X線 外部照射



医療技術：ガンマナイフ (γ線)  
サイバーナイフ (X線)



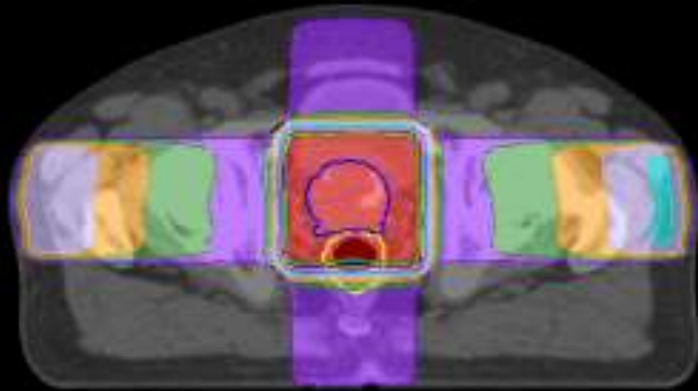
サイバーナイフ

写真提供：(独)放射線医学総合研究所



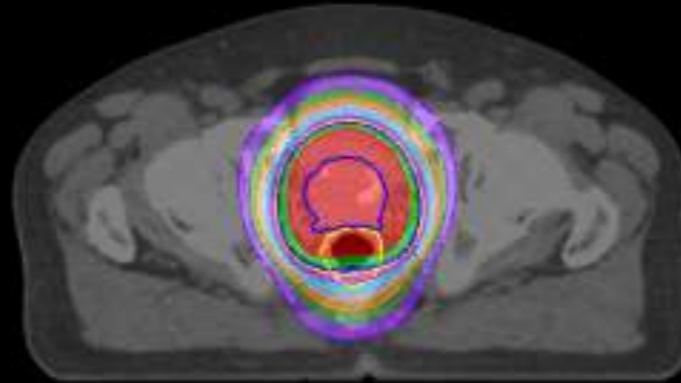
# 前立腺がんの例

前後左右4門照射



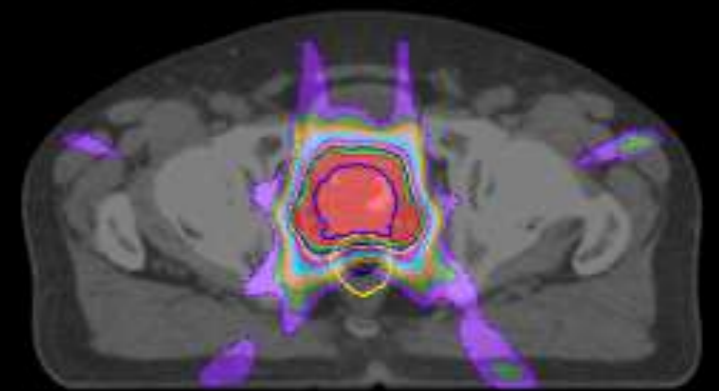
- 前立腺の他に、膀胱や直腸が高線量域に含まれる
- 70Gyが限界（難治性の晩期粘膜障害の発現を許容範囲に抑えるためには、実際には60～66Gy程度が限界となる）

3次元原体照射



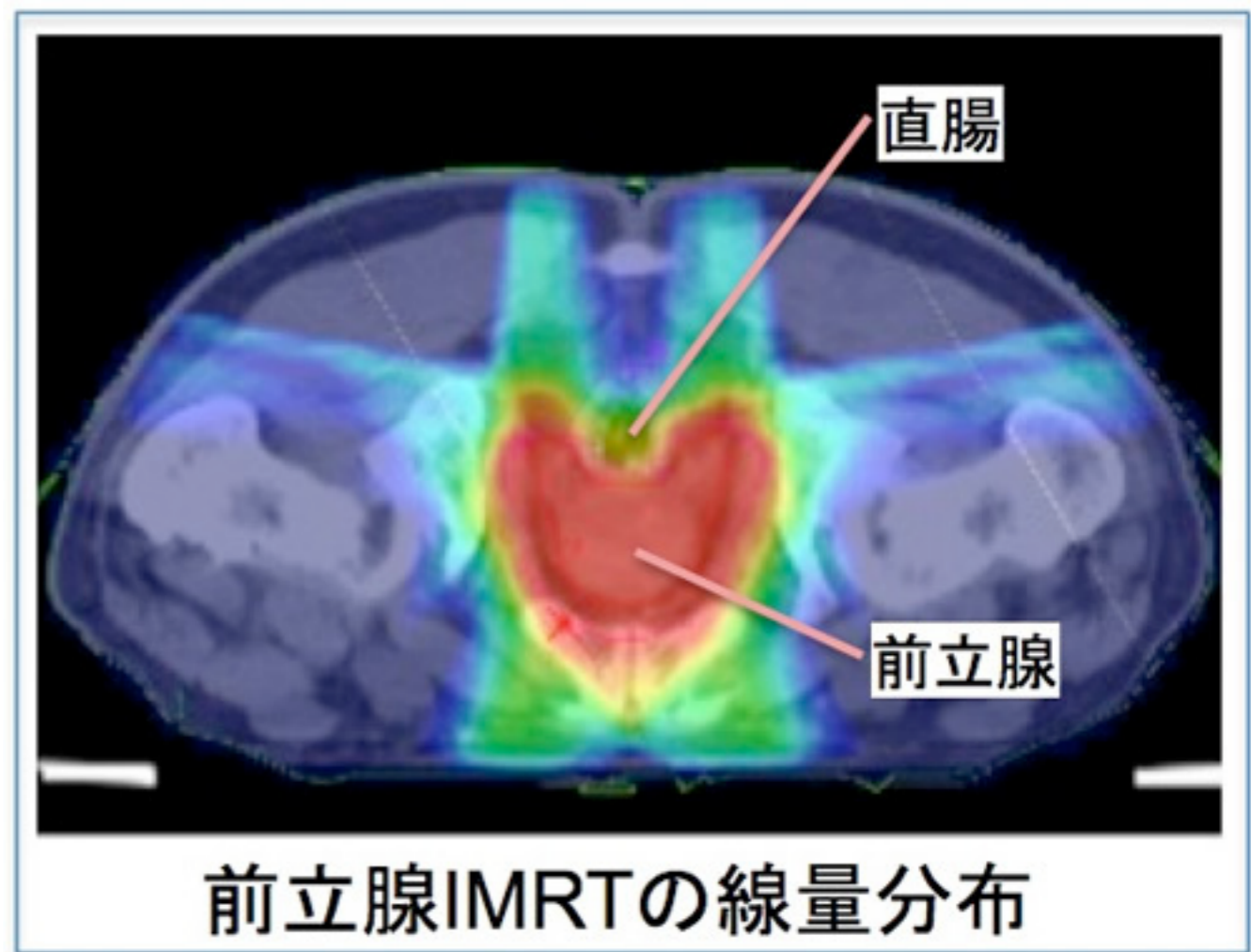
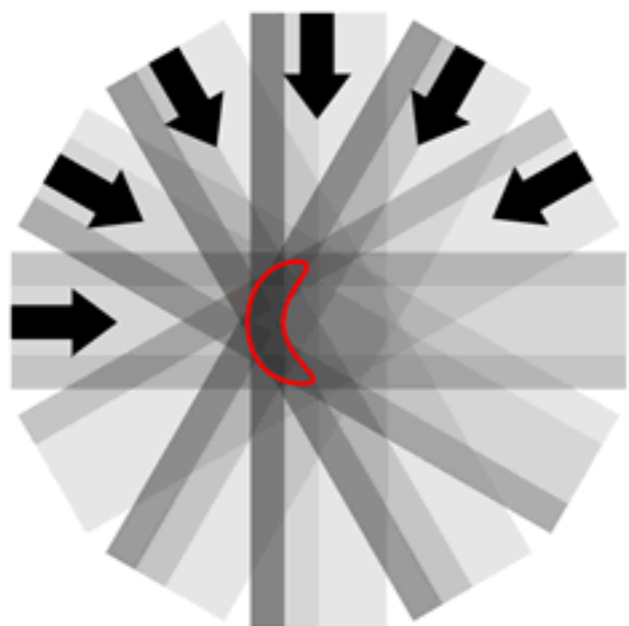
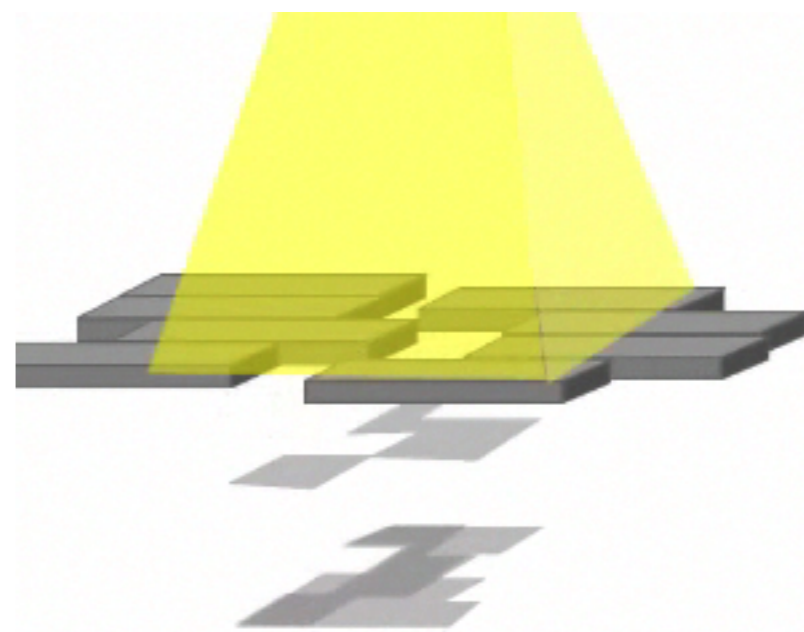
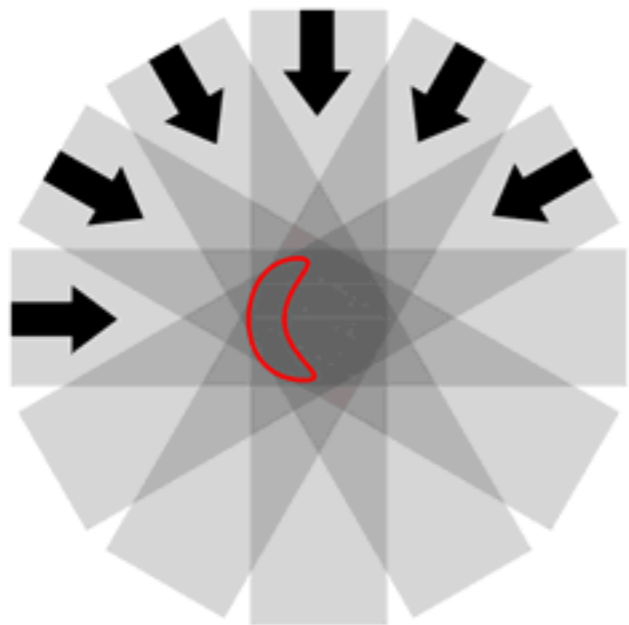
- 前立腺に線量が集中し、膀胱や直腸への線量が低く抑えられる
- 70Gy以上の投与が可能であるが、線量の集中に限界があり、線量増加に伴う副作用の増加が懸念される

強度変調放射線治療

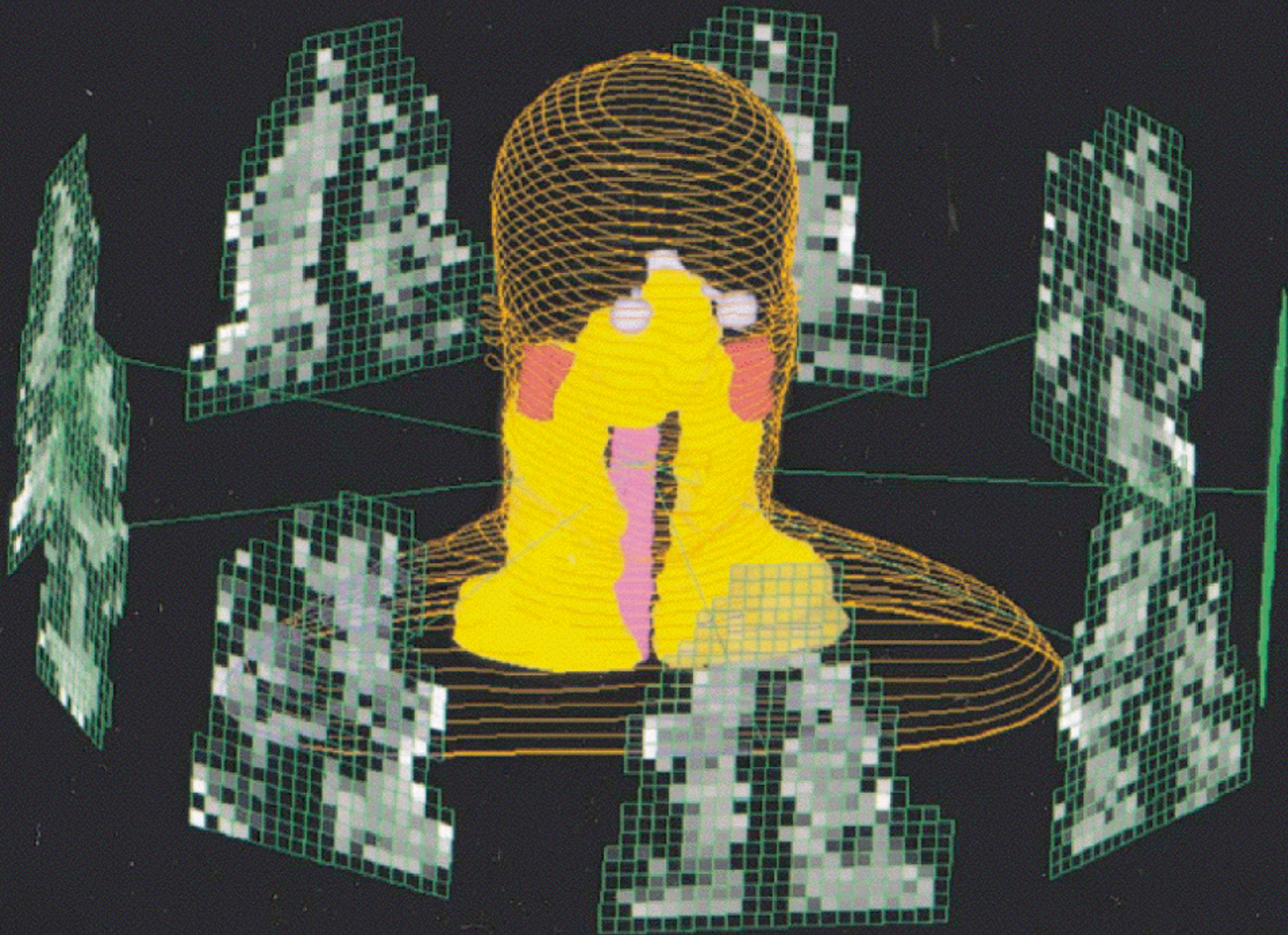


- 前立腺への集中性がさらに強化
- IGRTを併用することで、3次元原体照射を超える高線量を安全に投与することが可能

外照射法の進歩を背景に、前立腺癌に対する線量増加効果が積極的に検討されている。



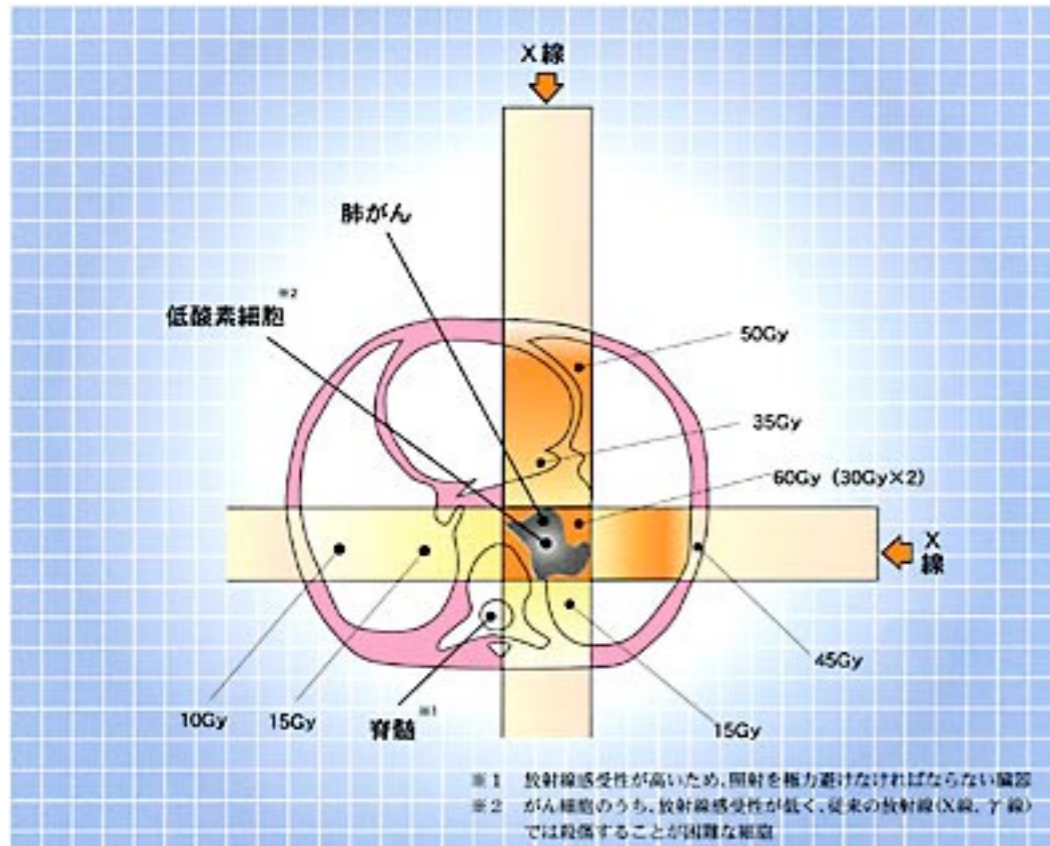






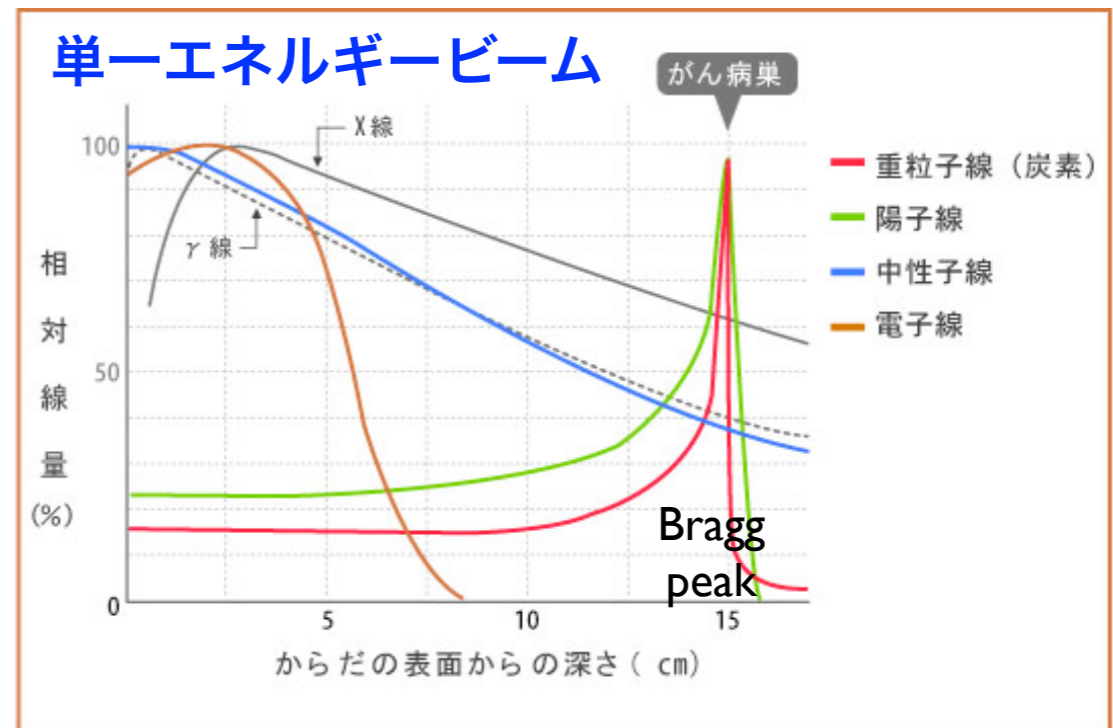
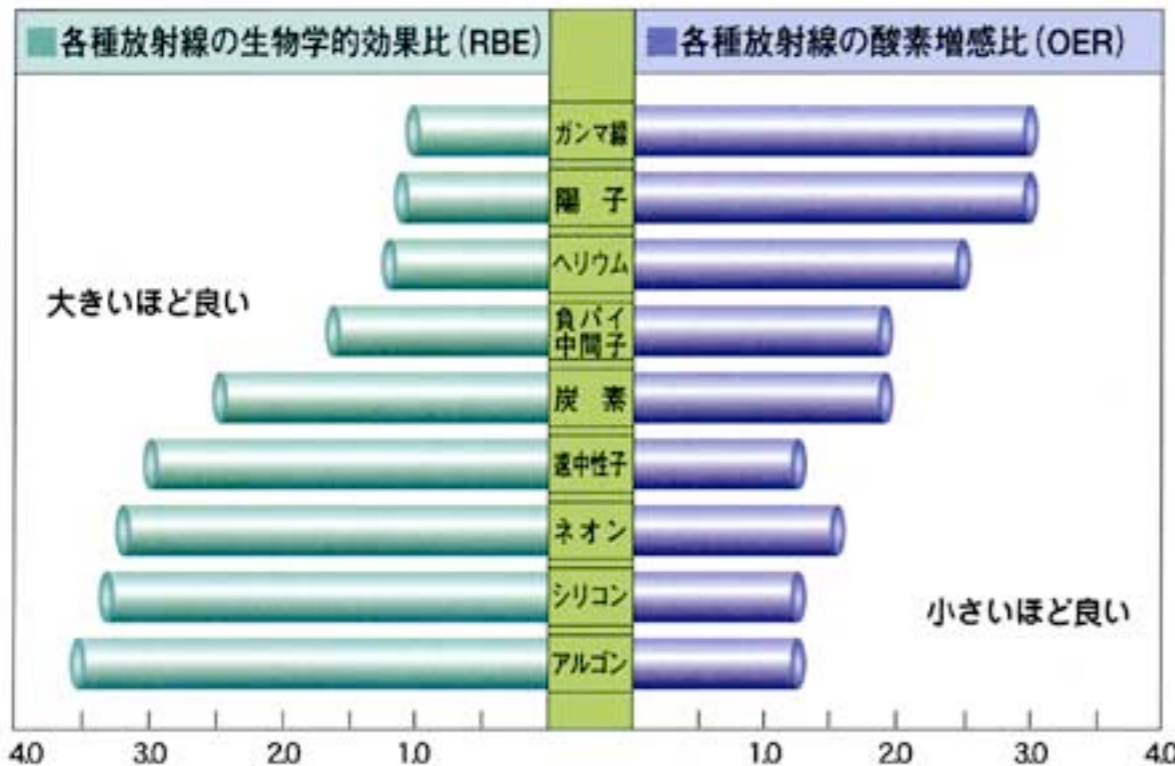
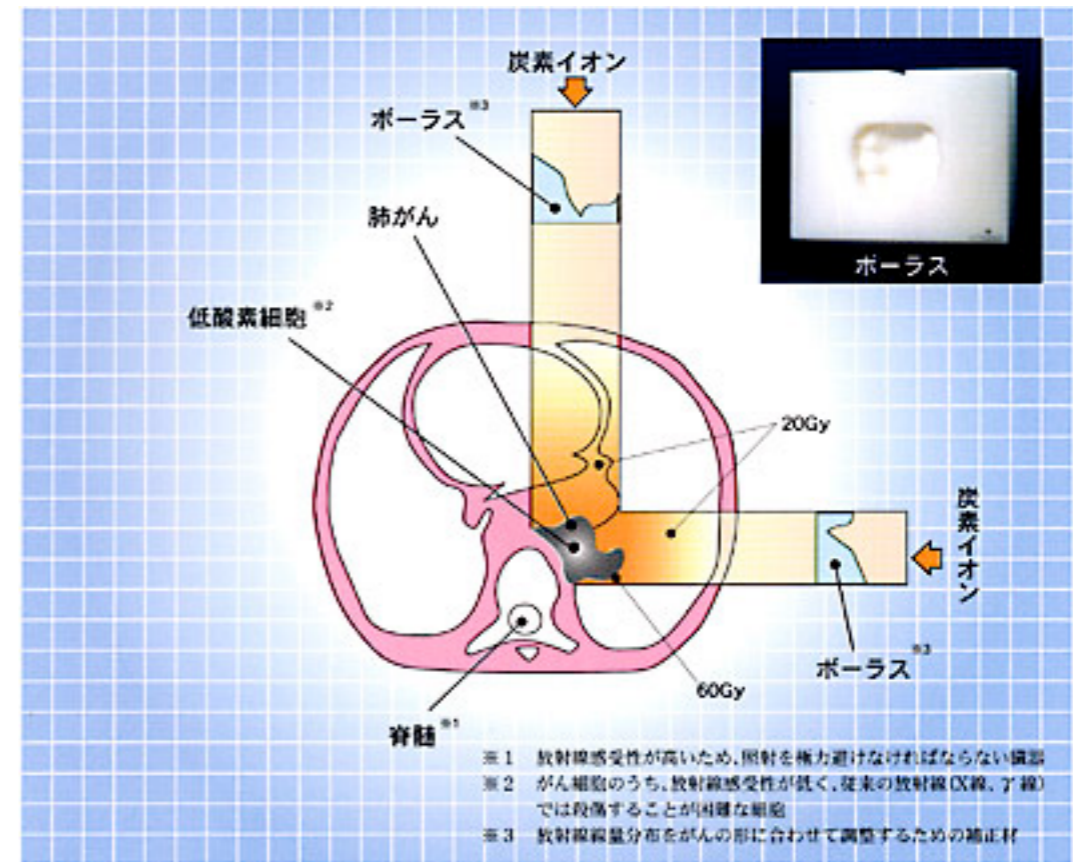
# 放射線 がん治療

## X線



# 数 Gy を複数回

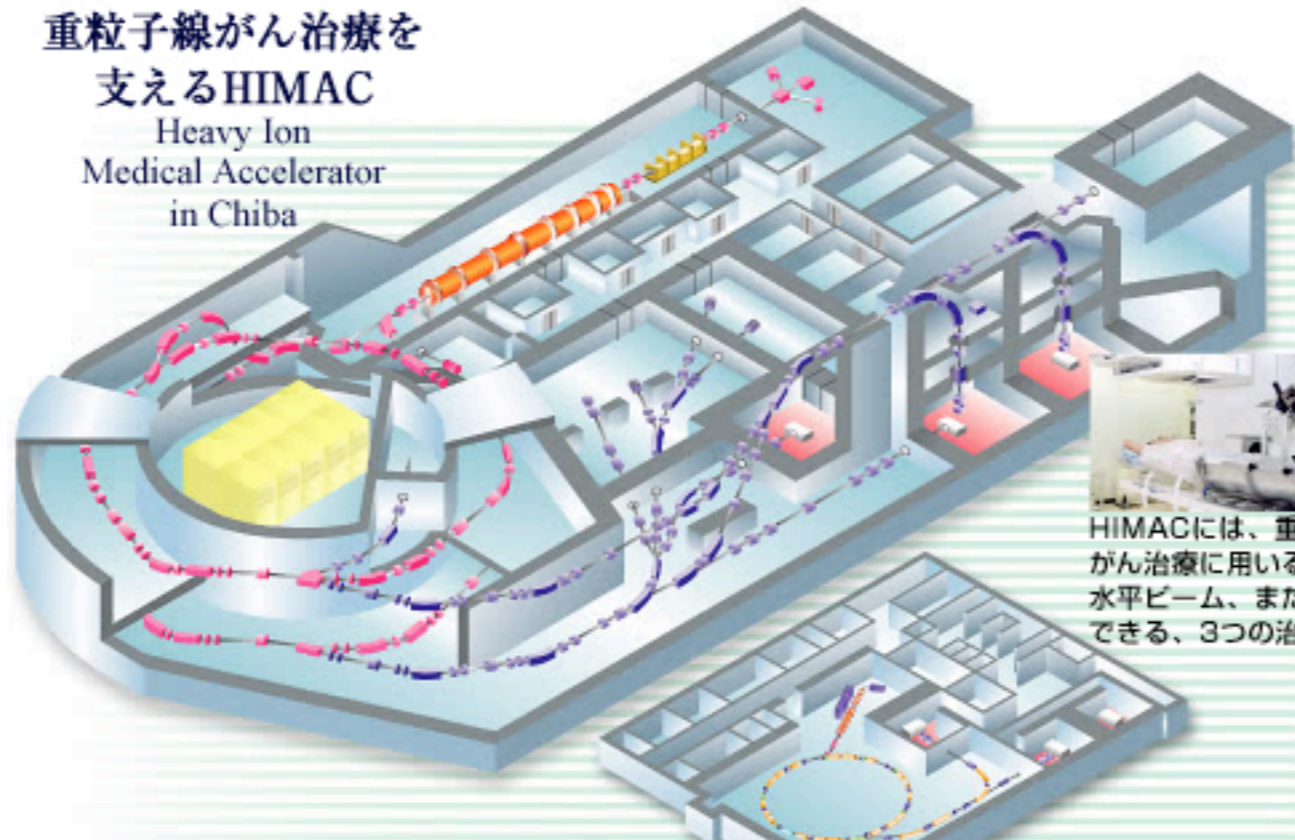
## 重粒子線 (炭素イオン)





# 放射線医学総合研究所（千葉）

重粒子線がん治療を  
支えるHIMAC  
Heavy Ion  
Medical Accelerator  
in Chiba



HIMACには、重粒子線を効率的にがん治療に用いるため垂直ビーム、水平ビーム、またはその両方を照射できる、3つの治療照射室があります。

## ■小型重粒子線がん治療装置

放医研における装置小型化開発研究の成果は、2006(平成18)年度から建設が開始される群馬大学の重粒子線がん治療装置に採用されています。放医研は群馬大学に装置を建設するための技術的な支援を行っています。



写真提供：(独)放射線医学総合研究所

# 放射線医療

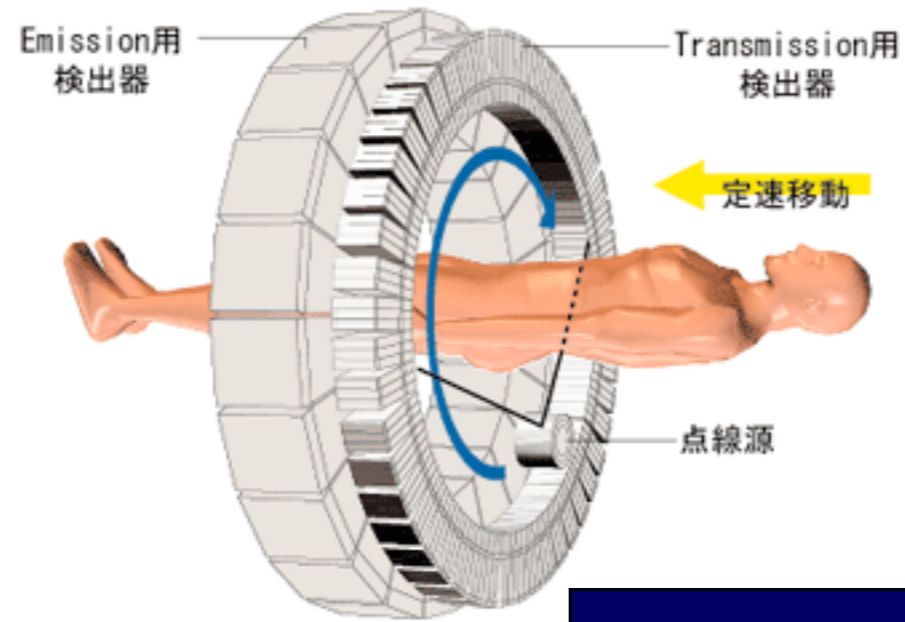
～ 診断 ～



## 胸部単純X線撮影

### 胸部正面像

- ・立位
- ・吸気呼吸停止
- ・管電圧120kVp程度
- ・撮影時間～50ミリ秒
- ・X線投影：背→腹

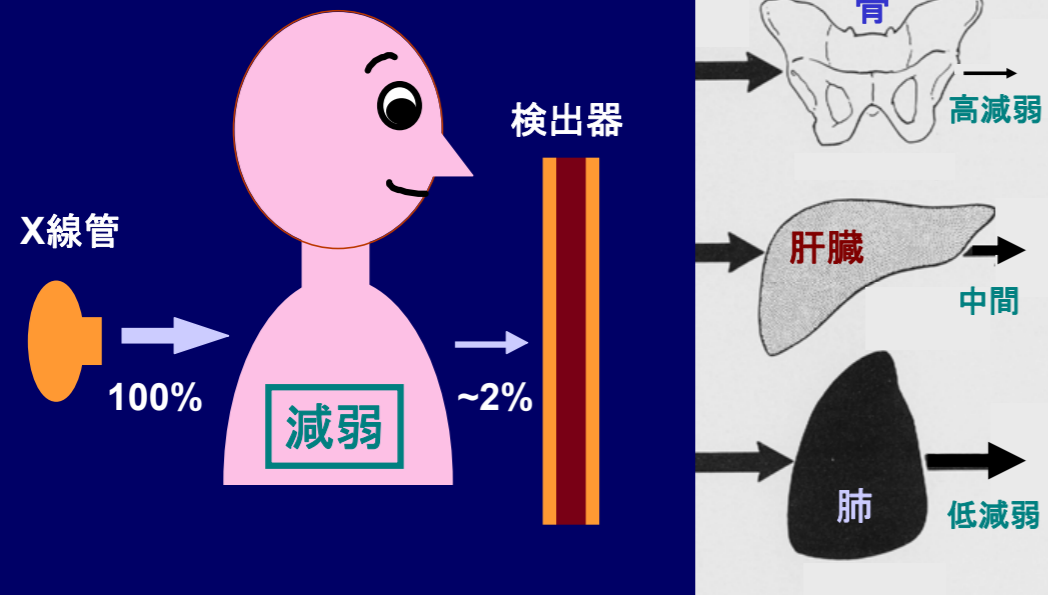
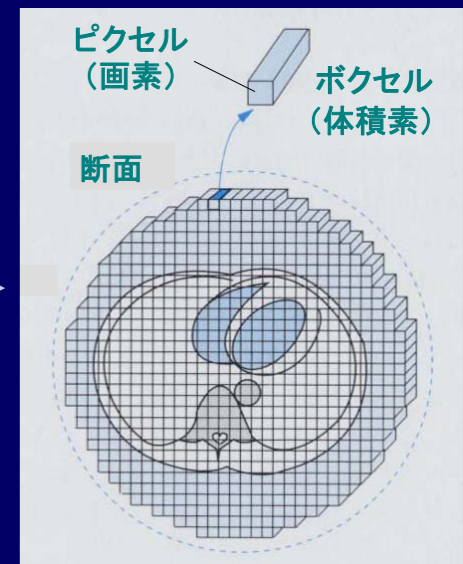
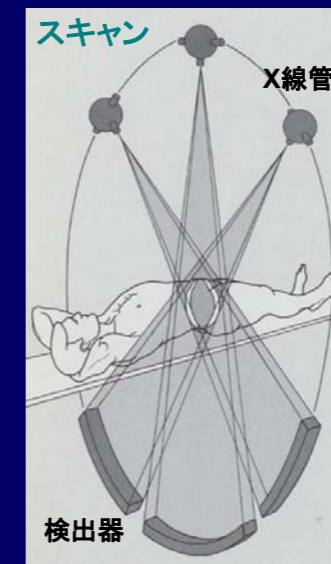


# X線 CT

# レントゲン(X線)撮影

国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

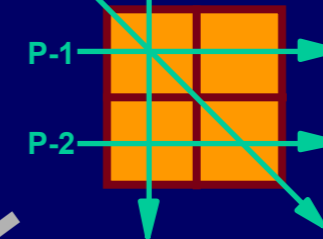
## X線コンピュータ断層撮影法:CT



### 未知の線減弱係数

$\mu_1$	$\mu_2$
$\mu_3$	$\mu_4$

### X線投影



### 連立方程式

- P-1;  $\mu_1 + \mu_2 = 8$
- P-2;  $\mu_3 + \mu_4 = 9$
- P-3;  $\mu_1 + \mu_3 = 6$
- P-4;  $\mu_1 + \mu_4 = 5$

### 解答

1	7
5	4

## 逆問題

# PET (Positron Emission Tomography) 陽電子断層撮影法


組織の”はたらき”を知る

$^{18}\text{F}$ -FDG (fluorodeoxy glucose),  $^{15}\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2^{15}\text{O}$




放射線医療：診断

$e^+$



陽電子 positron

電子 electron



$e^-$

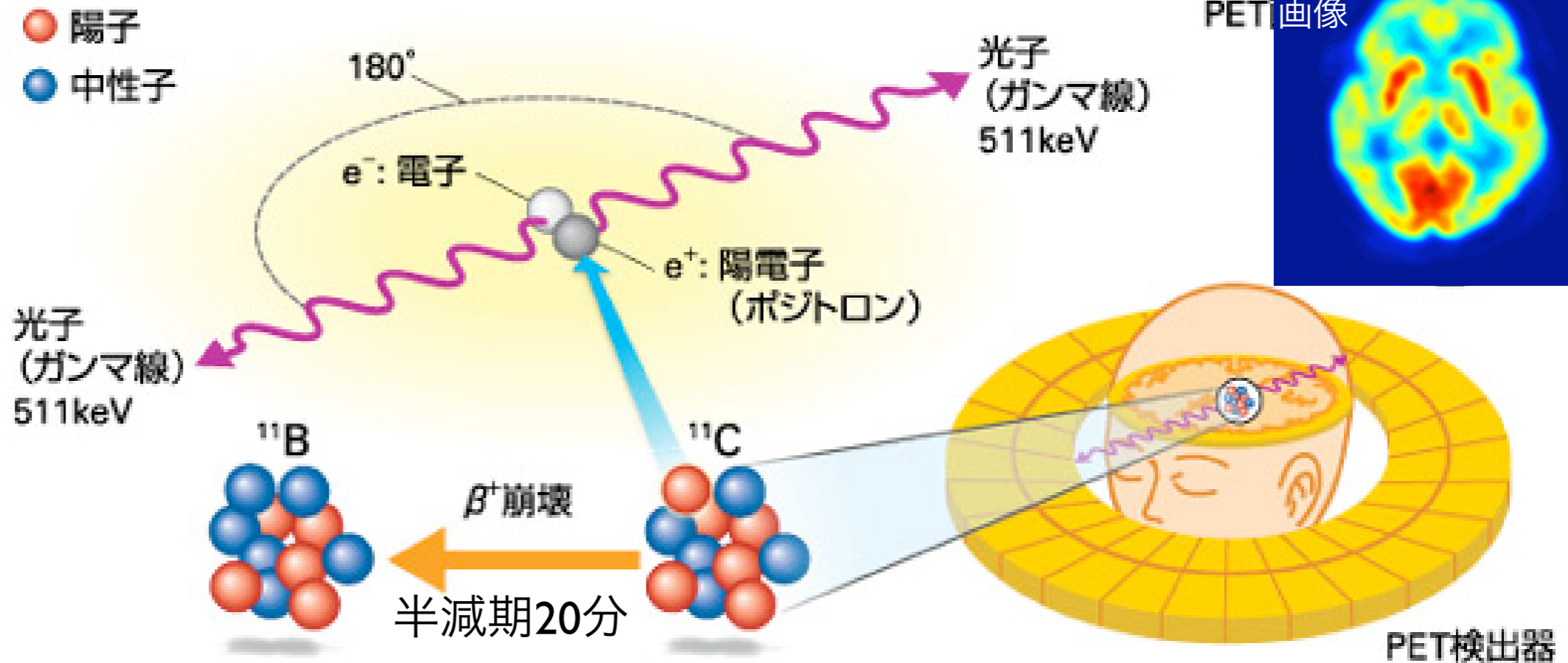


図1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

調べたい分子に陽電子を放出する放射性核種を付け、静脈注射によって投与する。例えば、炭素 11 ( $^{11}\text{C}$ ) はホウ素 11 ( $^{11}\text{B}$ ) に崩壊するとき、陽電子を 1 個放出する。その陽電子が近くにある電子と衝突し、両方向にガンマ線が放出される。検出器がガンマ線をとらえることで断層画像が得られ、分子がどこに、どれだけ存在しているのかを知ることができる。

$^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  
 $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$



**VIDEO**

# 放射線診断

日本原子力文化振興財団：エネコチャンネルのビデオ映像「探検！身近な放射線」より抜粋

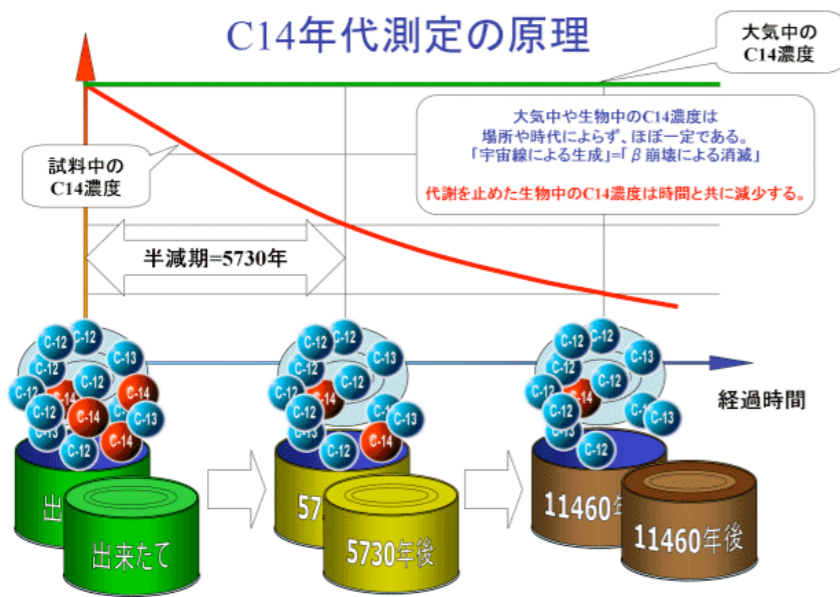
<http://eneco.jaero.or.jp/20110322/>



# 放射線の利用



# 放射線年代測定



C14の濃度を測れば「代謝を止めてからの時間」が判る！

測定方法		100年 1000年 1万年 10万年 100万年 1000万年 1億年 10億年	主要対象
放射性同位元素を使う方法	炭素14年代測定法	0 - 50,000	動植物・貝殻・水など
	カリウム・アルゴン法	10,000 - 100,000	鉱物
	ウラン・鉛法	100,000 - 10,000,000	鉱物
	ルビウム・ストロンチウム法	100,000 - 10,000,000	鉱物
	フィッション・トラック法	100,000 - 10,000,000	鉱物・天然ガラス
放射線の照射量を測定する方法	熱ルミネッセンス法	100 - 100,000	鉱物・天然ガラス
	光ルミネッセンス法	100 - 100,000	鉱物
	電子スピン共鳴法	100 - 100,000	鉱物・貝殻・サンゴなど
放射線を使わないその他の方法	ラセミ化法	100 - 100,000	貝殻・甲羅・重炭酸塩
	黒曜石水和層法	100 - 100,000	天然ガラス
	考古(古)地磁気法	100 - 100,000	岩石・磁性鉱物
	火山灰層序法	100 - 100,000	火山灰
	年輪年代法	100 - 100,000	樹木
	氷縞粘土法	100 - 100,000	湖底堆積物(粘土)

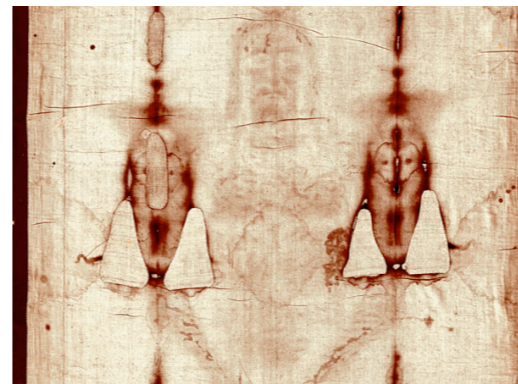
<<図 2-1>> 主な年代測定法による測定可能な年代の範囲

出典:ATOMICA他より作成

- $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}$ -Ar, U-Pb, Rb-Sr

- 弥生時代

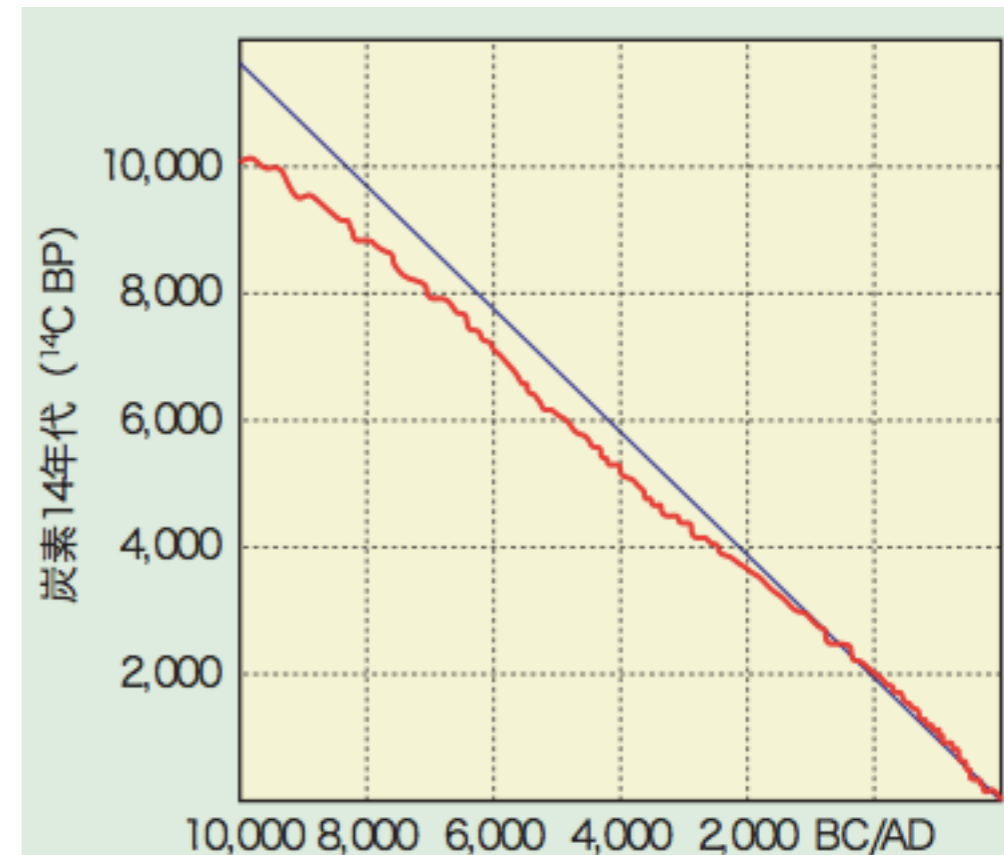
- 聖骸布 (Torino の聖骸布 (1260-1390 A.D., 95% CL))



- 空気中の  $^{14}\text{C}$  の比率はほぼ一定

- 微小な変動は年輪中の炭素データで較正

- 地層、火山灰、年輪データと比較



炭素14年代と年輪年代との較正曲線(赤線)(時代が古くなるほど両者がずれることと大気中の炭素14濃度が変動することによる細かな動きが分かる)

出典:国立歴史民俗博物館



# 粒子加速器 (Accelerators)

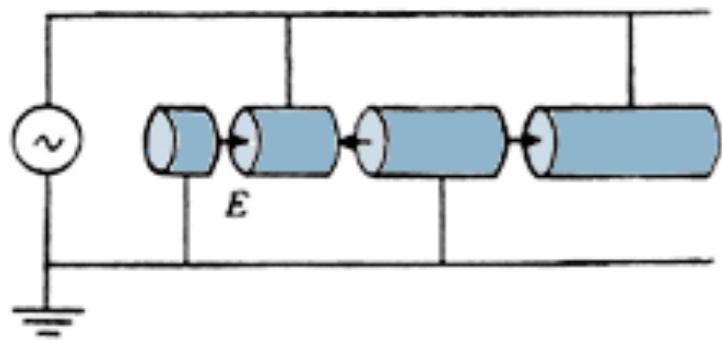


図1 ヴィデレー型リニアック

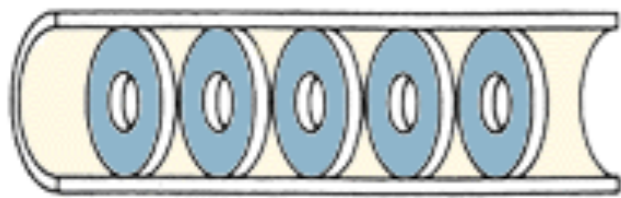


図2 円盤装荷導波管

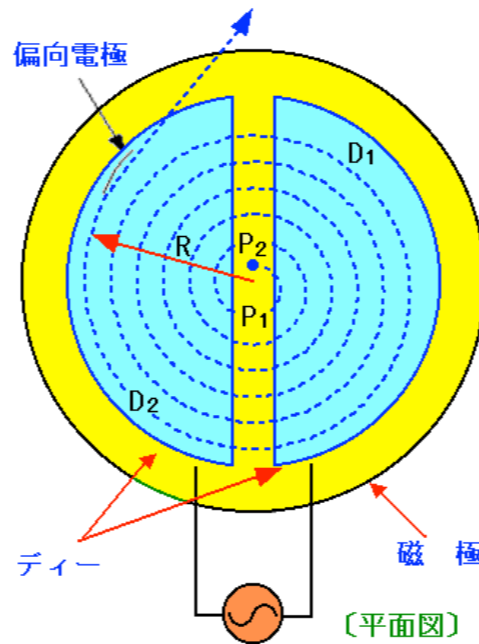
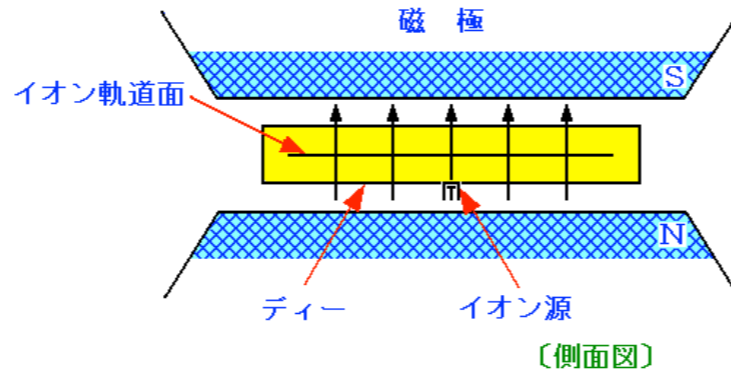
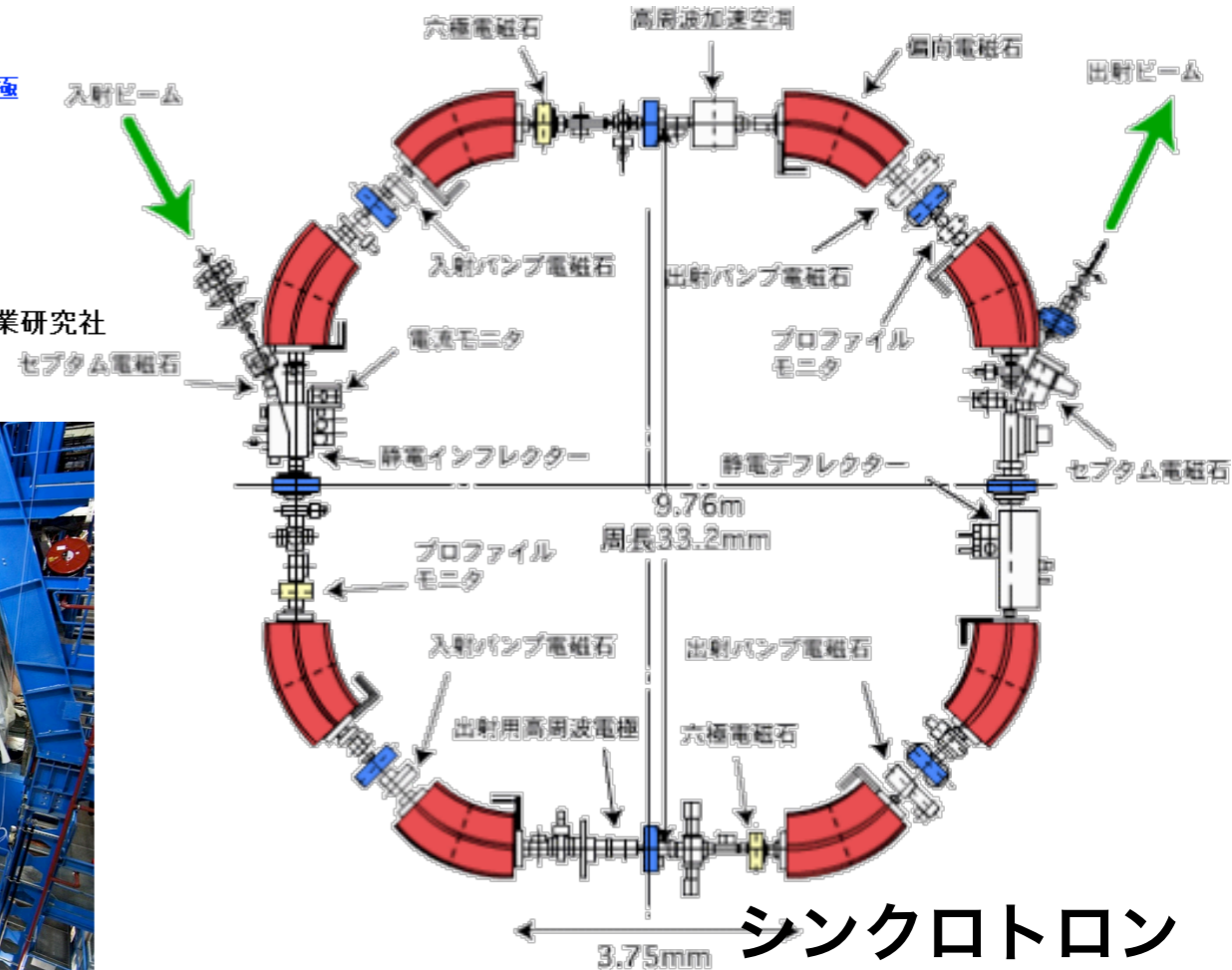
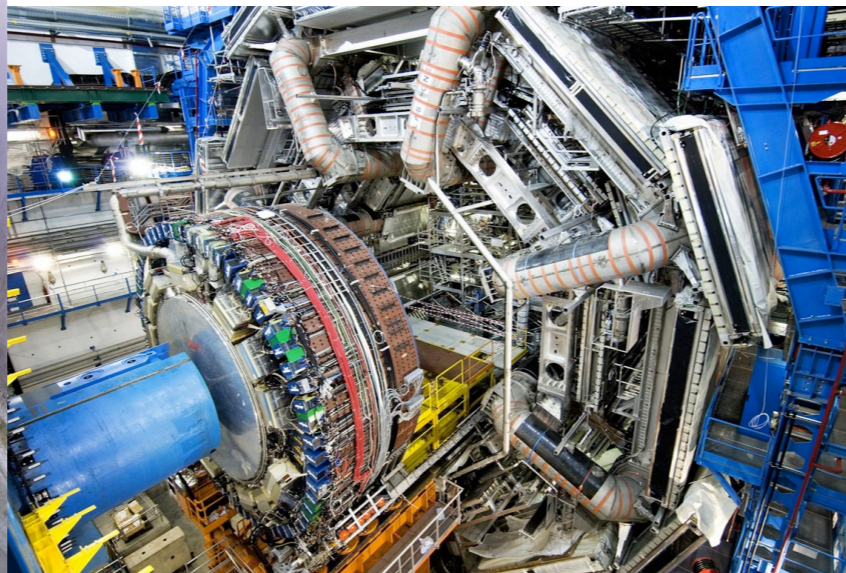
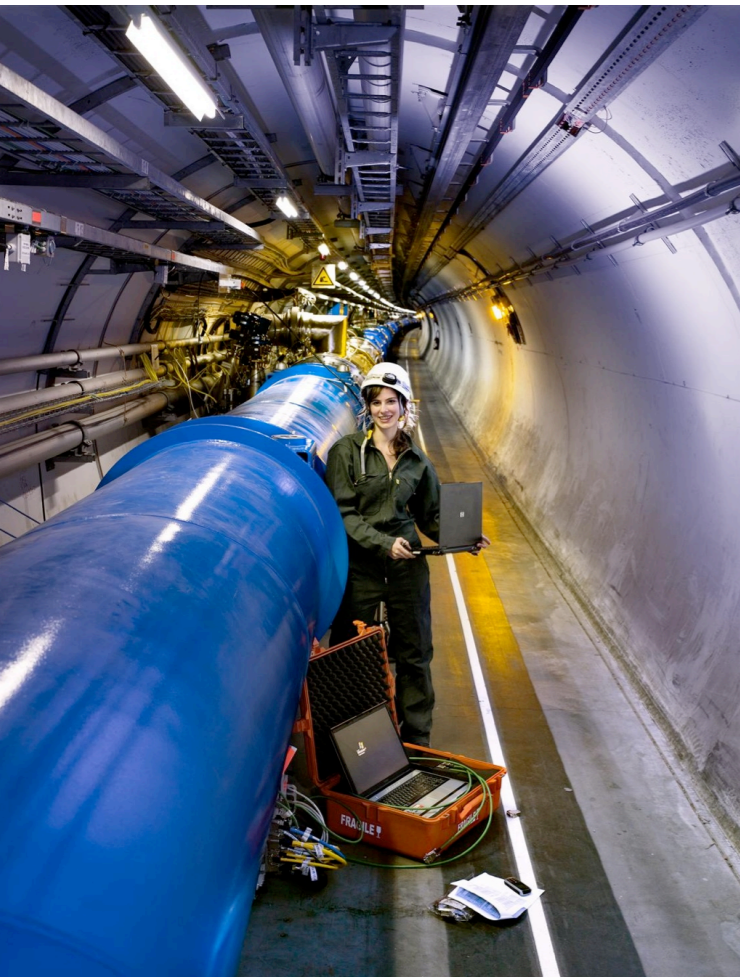
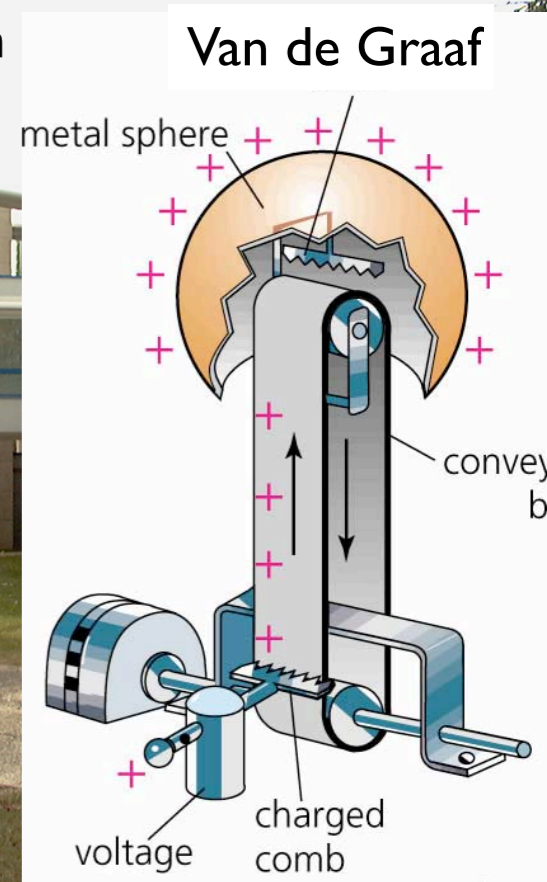


図5 サイクロトロン

[出典] 石川 友清 (編) : 放射線概論、通商産業研究社 (1991年4月)、p. 64



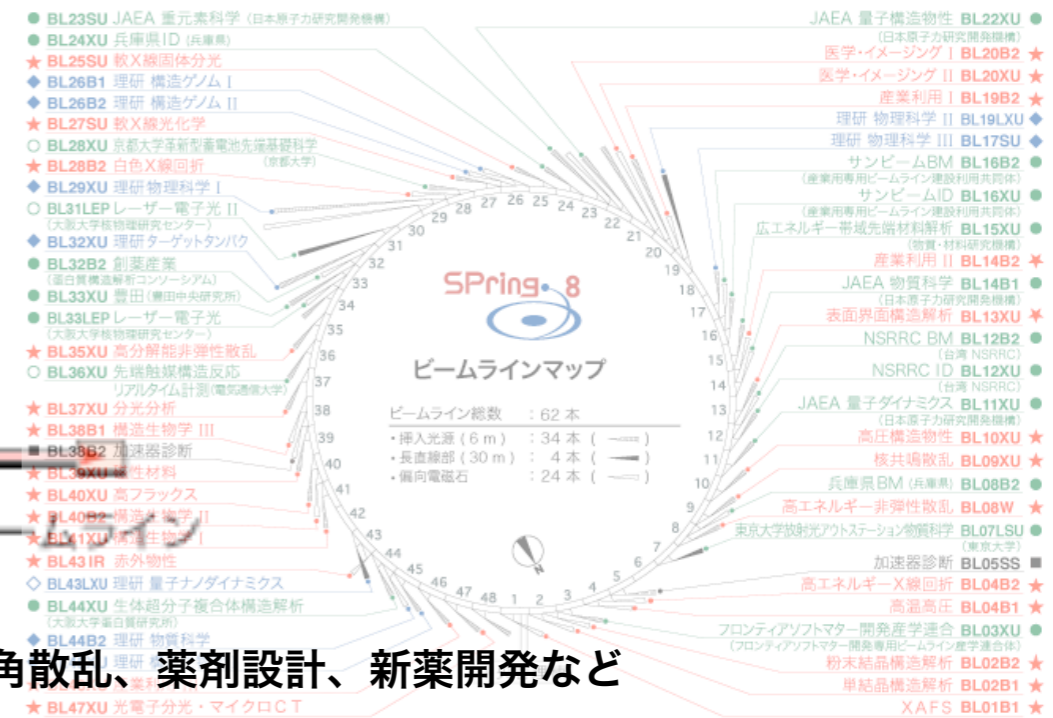
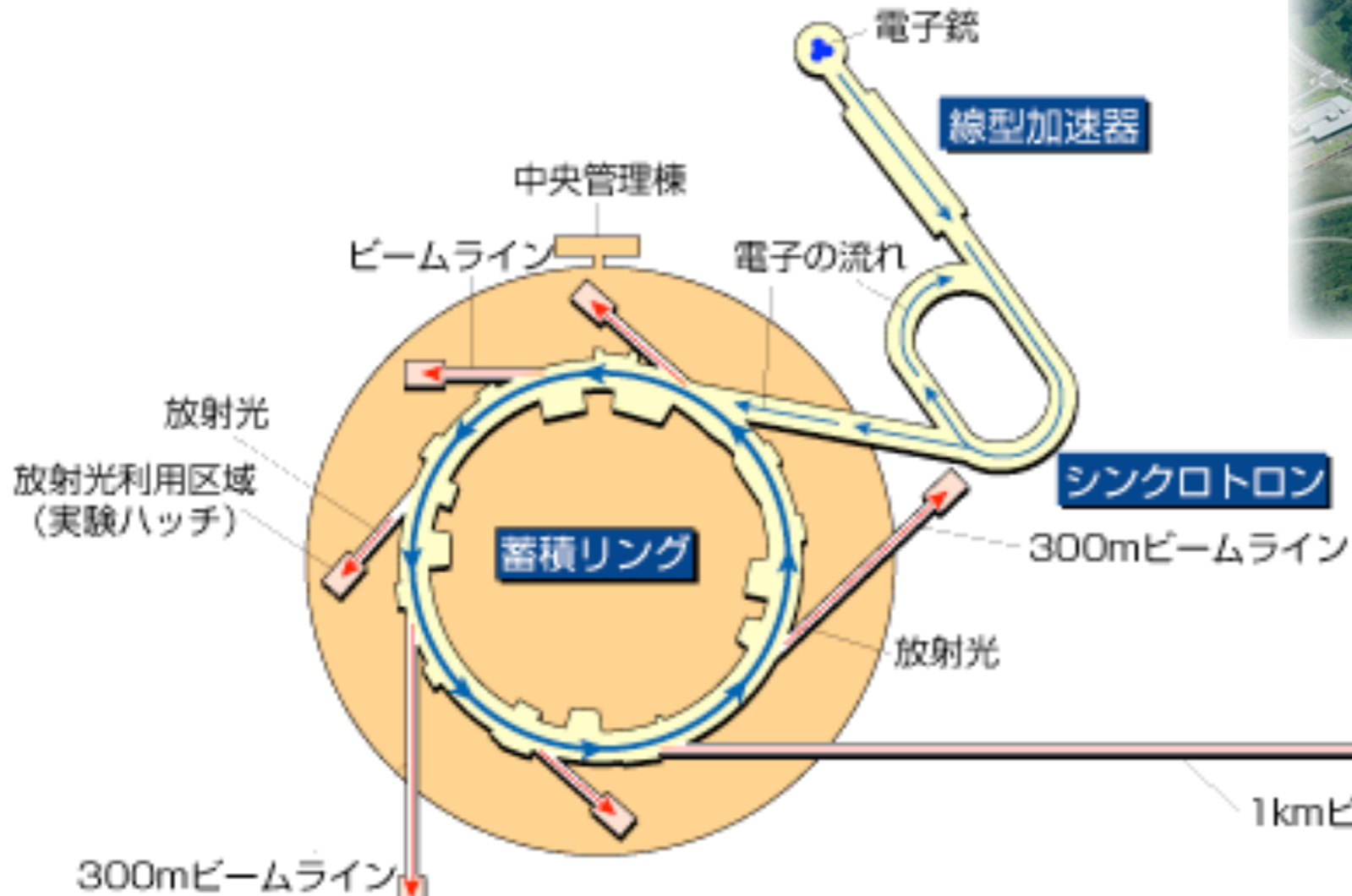
高電圧発生装置・静電加速器





# SPring-8 (大型放射光施設：播磨)

8 GeV 電子ビーム ⇒ 放射光 (X線, γ線)



- ・ 生命科学への利用：タンパク質巨大分子の3次元構造解析、非結晶生体材料の小角散乱、薬剤設計、新薬開発など
- ・ 物質科学への利用：先端材料の原子・電子の構造、極端条件下の材料物性、産業材料の評価、新物質創製と材料改質など
- ・ 化学への利用：触媒反応の動的挙動、表面のX線光化学過程、原子・分子分光、超微量元素分析及び化学状態、考古学的研究など
- ・ 地球科学への利用：地球深部物質の構造と状態、極限環境下の物性、隕石・宇宙塵の構造など
- ・ 環境科学への利用：生体試料中の環境汚染微量元素の分析、環境浄化用触媒の分析など
- ・ 医学への利用：微小血管造影法による腫瘍血管の観察、トモグラフィ、屈折コントラスト映像法による呼吸器系疾患の観察など
- ・ 産業への利用：半導体用新酸化物材料の評価、高性能電池材料の局所構造解析、ナノ材料の評価、微量元素分析、材料の断面観察、材料の歪み分布解析など
- ・ 核物理への利用：レーザー電子光 (逆コンプトン散乱) による中間子の生成・クォーク核物理など



# 農業分野での利用

## \*ジャガイモの発芽防止

$^{60}\text{Co}$   $\gamma$  (1.17 MeV / 1.33 MeV), 50–150 Gy

- ◆ 動物飼育実験などで急性毒性、慢性毒性、発がん性、変異原性、遺伝毒性、催奇形性は見出されておらず、**健康に有害な影響を及ぼすような食品成分の変化は生じない。**
- ◆ 食品照射に用いるCo-60の $\gamma$ 線、10 MeV以下の電子線、5 MeV以下のX線のエネルギーは核反応のしきい値以下であり、適正な照射条件では**誘導放射能は生成されない。**  
= **放射化はおこらない。**

## \*放射線育種（品種改良） $\gamma$ 線、イオンビーム

花卉 ・ ゴールド二十世紀ナシ（黒斑病耐性）

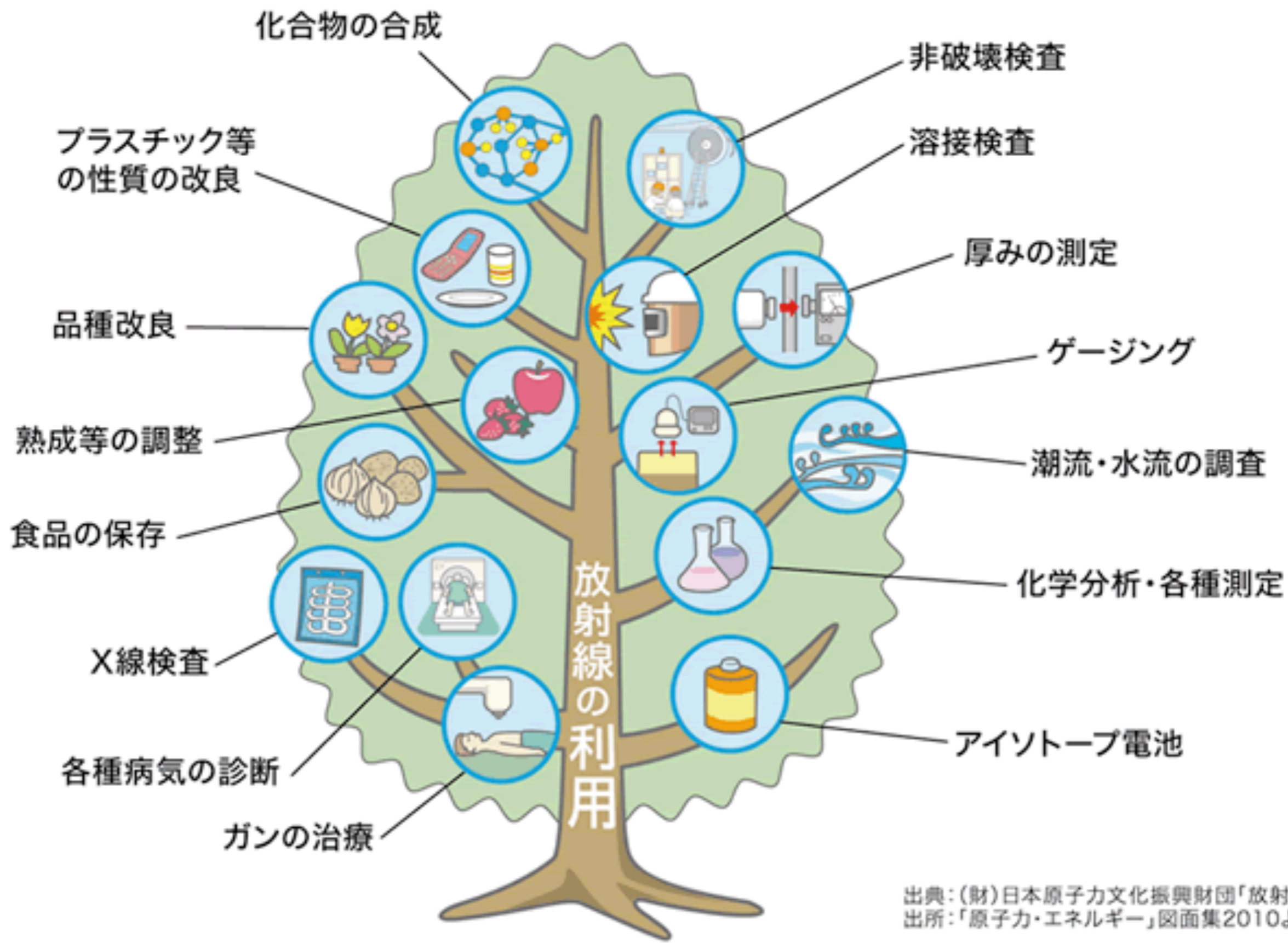
## \*害虫駆除（不妊虫放飼法）

$^{60}\text{Co}$   $\gamma$  (1.17 MeV / 1.33 MeV), 70 Gy

さなぎに照射してオスを不妊化。



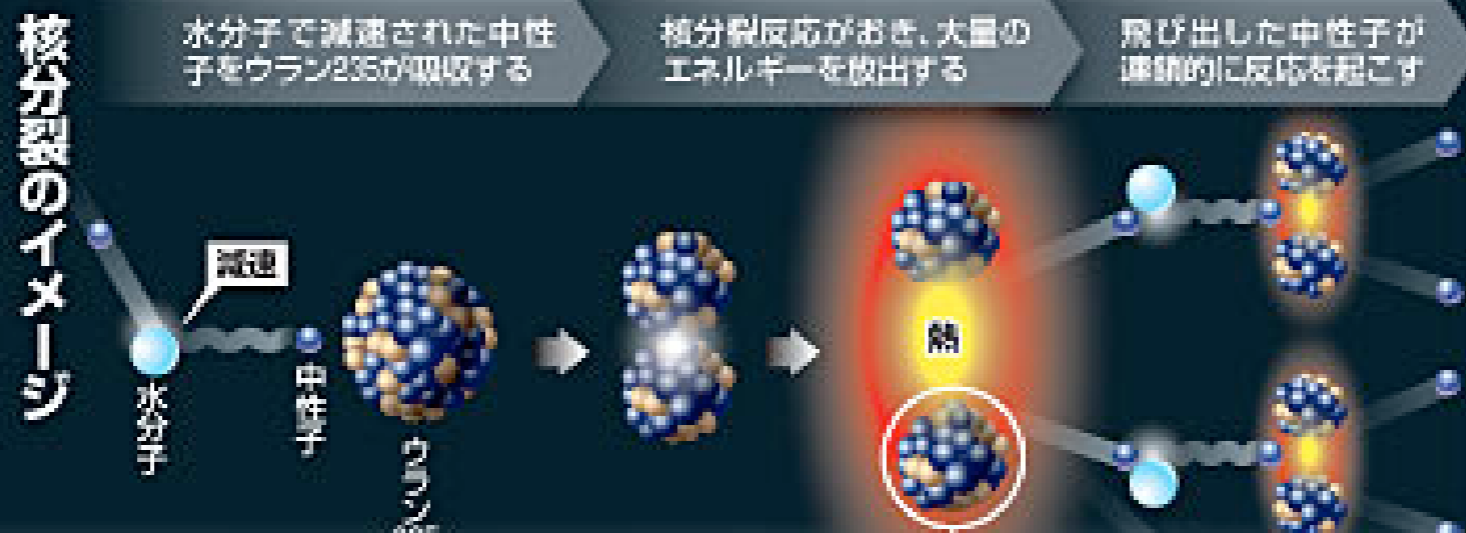
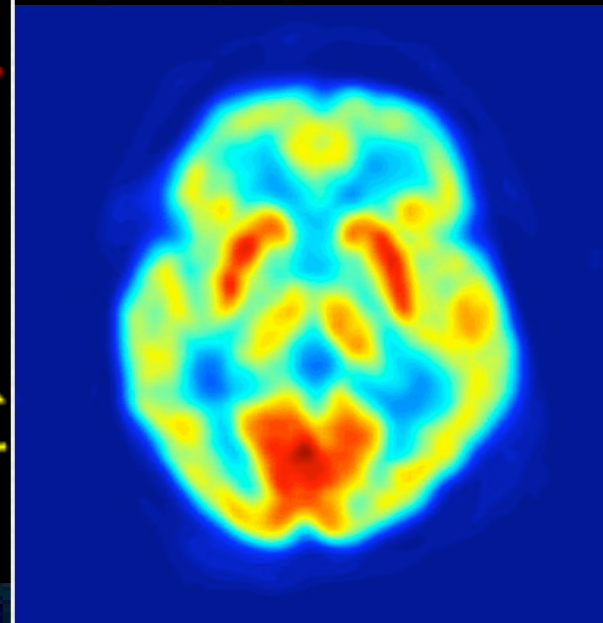
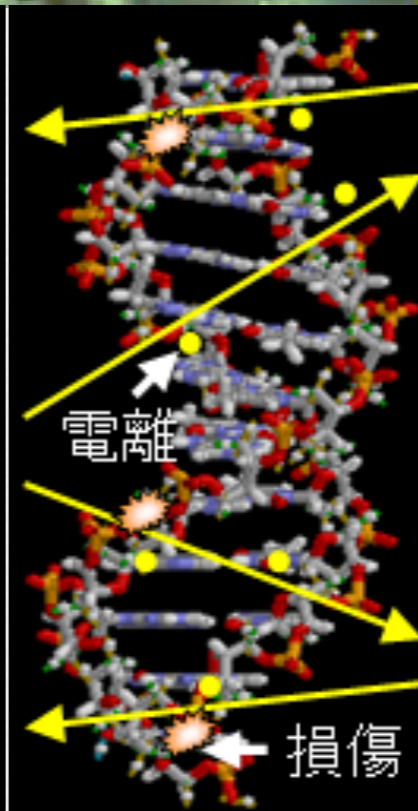
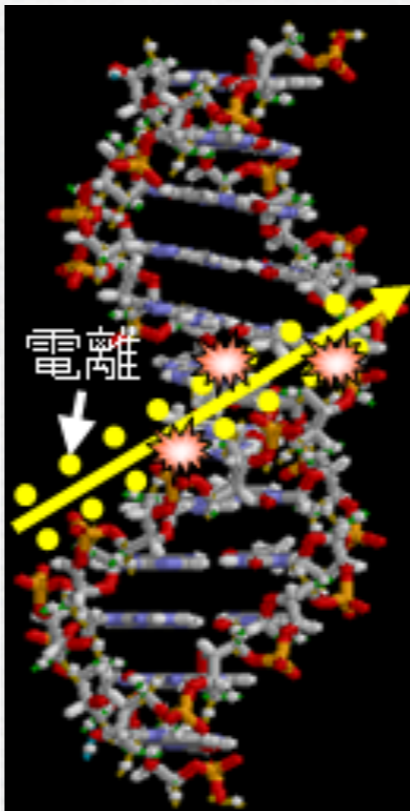
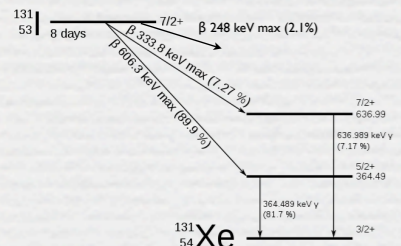
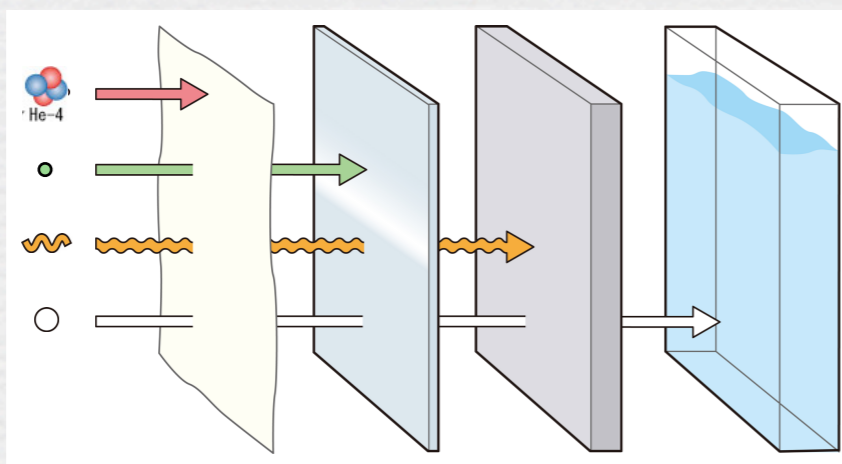
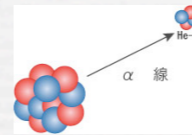
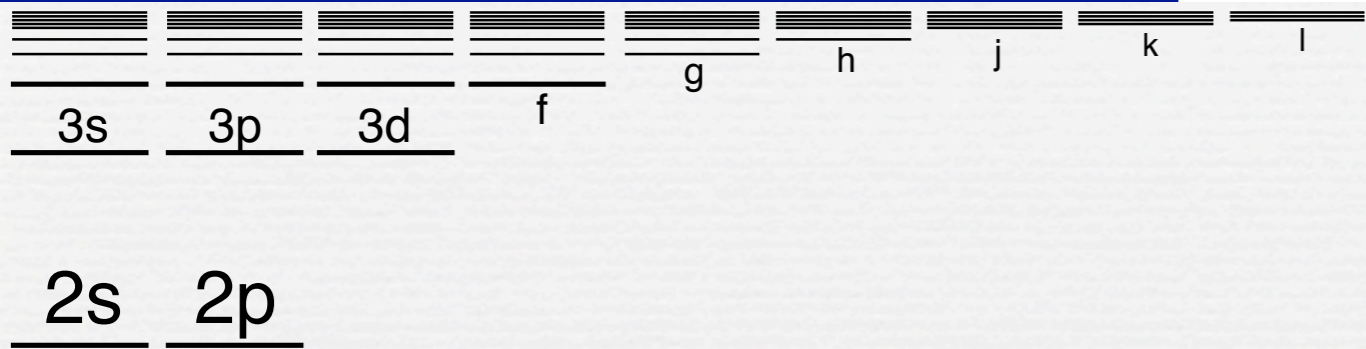
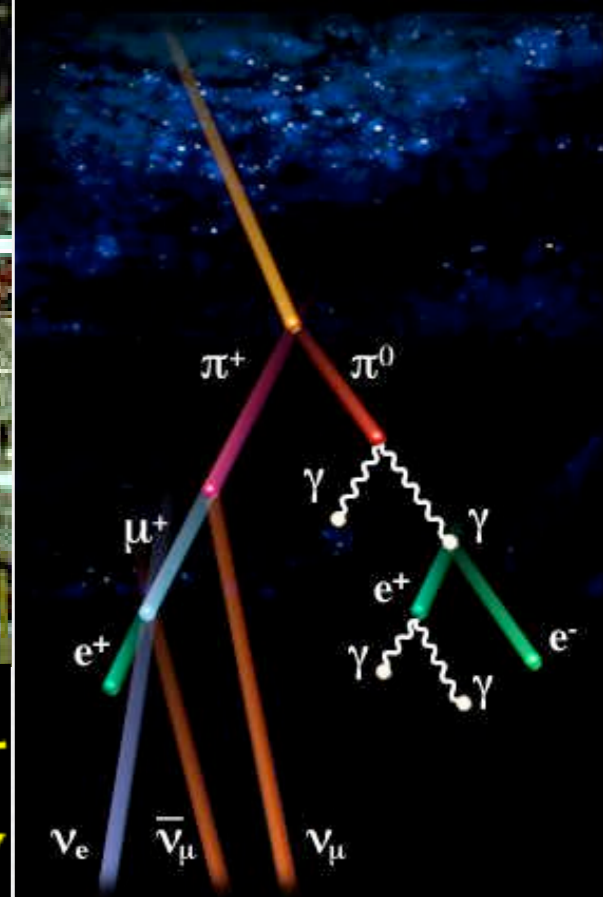
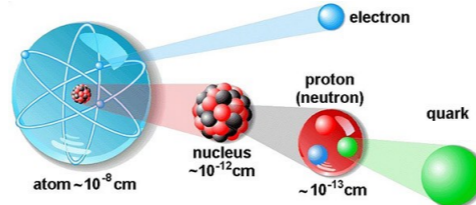




出典：(財)日本原子力文化振興財団「放射線のはなし」  
 出所：「原子力・エネルギー」図面集2010より



# 放射線





Fine.

Grazie per vostra attenzione.

Merci pour votre attention.

Thank you for your attention.

Спасибо за внимание.

경청해 주셔서 감사합니다.

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A.TORII



# 放射線 の科学と 安全

- 放射線入門
- 原子核物理学・放射線物理学
- 放射線計測学・環境放射化学  
放射線の単位・線量計算
- 放射線生物学・放射線防護学  
放射線の利用・医療

完

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科