

# 放射線の科学と安全

スライドと講師連絡先のご案内

予め今のうちにダウンロードしておくとう便利です。

講義スライド、レポート課題

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-dbs.html>

東大教養 放射線 鳥居



検索

講義中の連絡： Zoom のチャット機能にて

講義後の連絡先

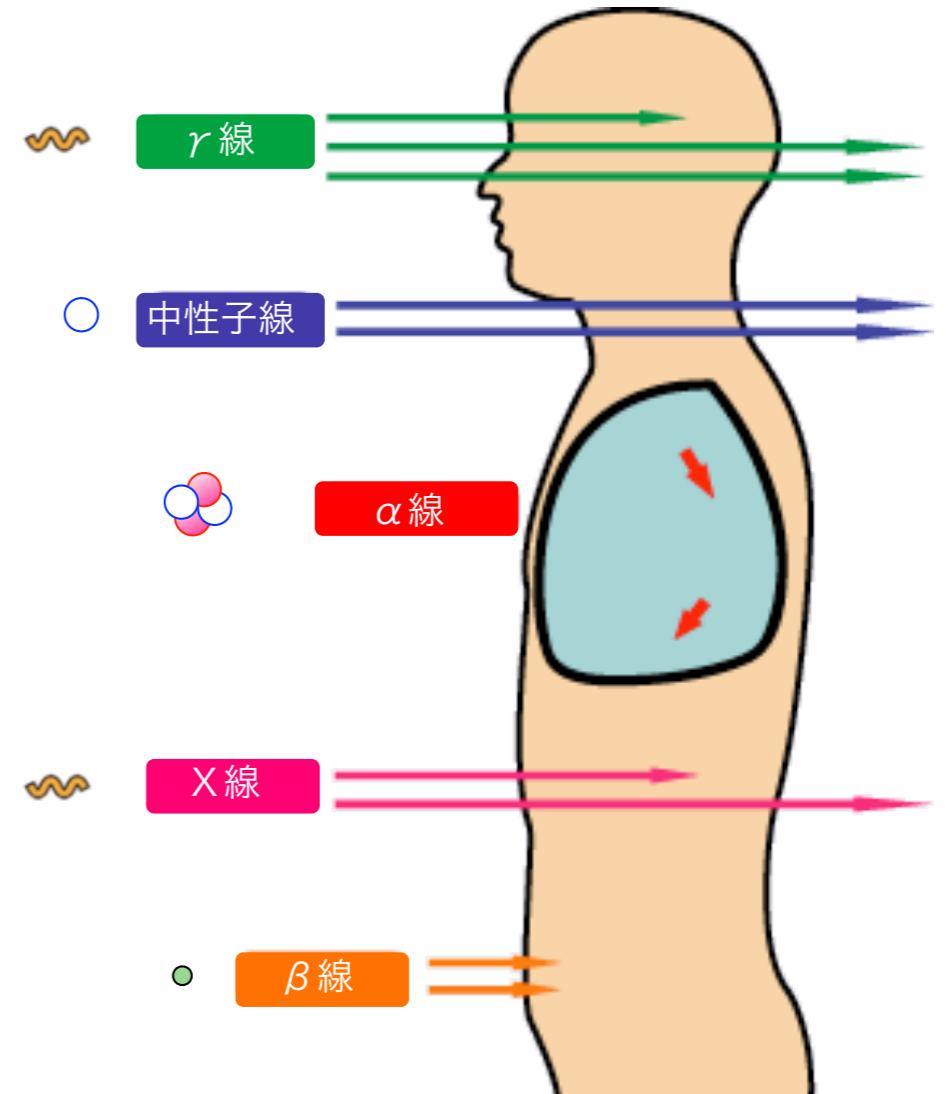
[torii-energy@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp](mailto:torii-energy@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp)



担当教員：東京大学 大学院理学系研究科

鳥居 寛之

# 放射線の科学と安全



2020 / 5 / 12 (火)

鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 大学院理学系研究科 放射線管理室

(化学専攻 放射性同位元素研究室)



# 相関基礎科学系 集中講義 環境安全学



## 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  
リスクコミュニケーション

2020 / 5 / 12 (火)

鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 大学院理学系研究科 放射線管理室

(化学専攻 放射性同位元素研究室)

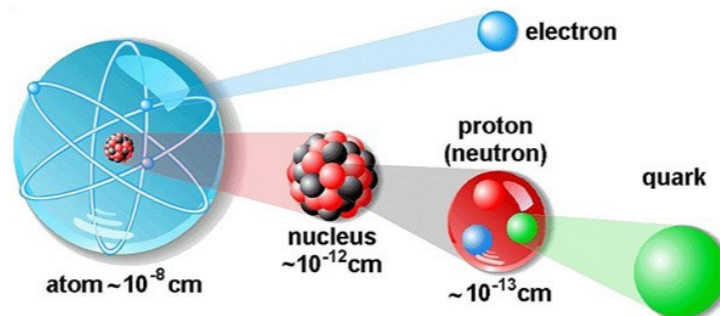
# 東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

書籍「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 —」

とあわせて、どうぞご利用下さい。 <http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp>

2011年度夏学期

自主講義 放射線学



2019年度 Aセメスター

2018年度 Aセメスター

2017年度 Aセメスター

2016年度 Aセメスター

2015年度 Aセメスター

2014年度冬学期

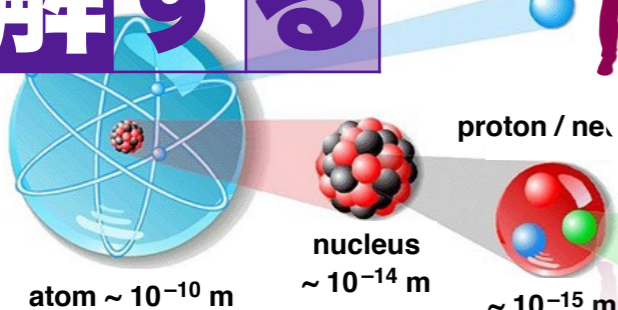
主題科目テーマ講義/学術フロンティア講義

2011年度冬学期

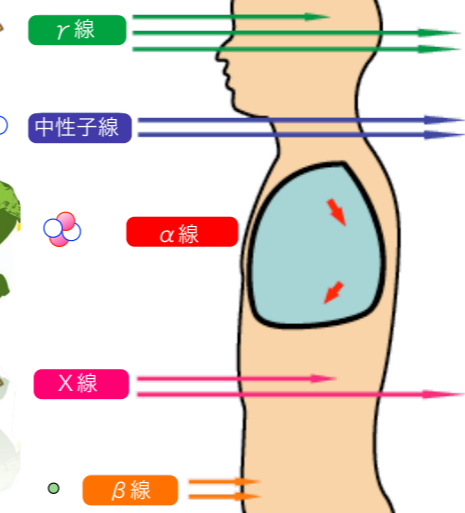
2012年度冬学期

2013年度冬学期

放射線を科学的に理解する



放射線を科学的に理解する



放射線を科学的に理解する



# 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是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。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>



# 放射線を科学的に理解する

- 放射線の影響についての様々な意見が乱立している
- 放射線に関する学問は多岐にわたり、一人の専門家でまかないきれない。
  - 原子力工学、原子核物理学
  - 放射線物理学、放射線計測学、放射線化学、放射化学
  - 放射線生物学、放射線医学
  - 環境学、気象学、海洋科学、植物学・土壌学（農学）
  - 食品衛生学
  - 放射線防護学（安全管理学）
  - リスク学、リスクコミュニケーション
  - 社会学（社会科学技術論、社会心理学）、法律



# 放射線を科学的に理解する

《教養学部》

**鳥居 寛之** 《物理》\*

放射線物理学・原子核物理学

**小豆川 勝見** 《化学》\*

放射線計測学・環境放射化学

**渡邊 雄一郎** 《生命》\*

放射線生物学・放射線の利用



ゲスト講師

**中川 恵一** 《医学部》

放射線医学

**石渡 祐樹** 《原子力》

原子力工学

**藤原 徹** 《農学部》\*

植物栄養・土壌肥料学



【2011年度】 \* 2011~19





# 放射線を科学的に理解する

ゲスト講師 **【2012年度】**

**作美 明** 《医病院》 12  
放射線医療

**森口 祐一** 《都市工》 12  
環境汚染・廃棄物問題

**藤垣 裕子** 《教養学部》 12  
科学技術社会論



**【2013年度】**

**坪倉 正治** 《(南)相馬病院》  
被曝調査・医療支援 13~18

**飯本 武志** 《環境本部》  
放射線防護学 13



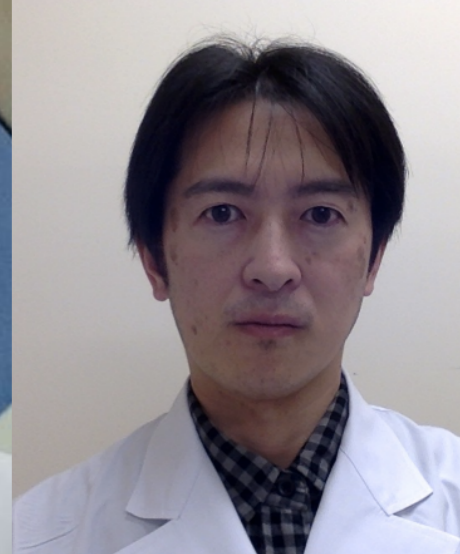
**小笹 晃太郎** 《放影研》 **【2014年度】**  
放射線影響の疫学 14

**【2015年度】**

**芳賀 昭弘** 《医病院》 **【2016年度】**  
放射線医療 15~16

**【2017年度】**

**太田 岳史** 《医病院》 17~19 **【2018年度】**





# 東京大学教養学部報

2011年(平成23年)11月2日 教養学部報 第542号

## 悪意なき殺人者と 憎悪なき被害者の住む楽園

ヒロシマ、チェルノブイリ、フクシマ

「悪意なき殺人者」と「憎悪なき被害者」の住む楽園。ヒロシマ、チェルノブイリ、フクシマ。この3つの地名は、人類の歴史に刻み込まれた悲劇の象徴である。しかし、これらは単なる悲劇ではなく、人類の未来を問う問いかけでもある。私たちは、過去の悲劇を繰り返さないために、何を学ばなければならないのか。この問いかけを、本報の特集記事が探る。



## 放射線学

放射線学とは、放射線の性質やその応用に関する学問である。医療、産業、農業など、幅広い分野で応用されている。本報では、放射線学の基礎知識と最新の研究成果を紹介する。

## 放射性物質を測ってみると



放射線計測器の読み方と、身の周りの放射線レベルについて解説する。放射線計測器は、放射線の強さを測定するための重要なツールである。本報では、放射線計測器の読み方と、身の周りの放射線レベルについて詳しく解説する。



東京大学教養学部  
発行人 藤田 孝  
2011年11月2日

## 「一高/獨逸」 展の開催の経緯 と準備について



「一高/獨逸」展の開催の経緯と準備について。本報では、この展覧会の開催の経緯と準備について詳しく解説する。

## ヒトラー・ネーゲットの ハカヤロ!

ヒトラー・ネーゲットのハカヤロ!。本報では、この展覧会の開催の経緯と準備について詳しく解説する。



## 秘密の小部屋

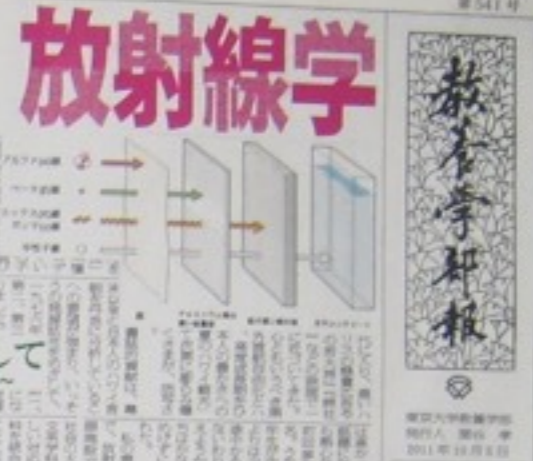
「トポフィリ」 夢の空間展をめぐって

「トポフィリ」 夢の空間展をめぐって。本報では、この展覧会の開催の経緯と準備について詳しく解説する。

2011年(平成23年)10月5日 教養学部報 第541号

## 放射線学

放射線学の基礎知識と最新の研究成果を紹介する。本報では、放射線学の基礎知識と最新の研究成果を紹介する。



## 教養学部の新しい後期課程

新しい後期課程は平成25年4月進学の学生から適用です

### 身体運動科学シンポジウム 報告

身体運動科学シンポジウムの報告。本報では、このシンポジウムの開催の経緯と準備について詳しく解説する。

### 学際科学 統合自然科学

学際科学と統合自然科学の紹介。本報では、学際科学と統合自然科学の紹介をする。

### 本のおもてなし 楽園リゾートの創られ方

本のおもてなし 楽園リゾートの創られ方。本報では、楽園リゾートの創られ方について詳しく解説する。

### 受け継がれる教養教育

受け継がれる教養教育。本報では、受け継がれる教養教育について詳しく解説する。

### ジェノサイドと現代世界

ジェノサイドと現代世界。本報では、ジェノサイドと現代世界について詳しく解説する。

### ジェノサイドと現代世界

ジェノサイドと現代世界。本報では、ジェノサイドと現代世界について詳しく解説する。



東京大学教養学部  
発行人 藤田 孝  
2011年10月5日



## 大学教養課程での放射線講義の取り組み



鳥居 寛之

東京大学教養学部

### 1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故は、我々の環境を一変させた。拡散した放射性物質が広範囲に生活を脅かし、人々を不安に陥れた。原発の状況と並んで、放射線については連日報道され、さまざまなメディアで特集を組んで解説がなされたが、必ずしも国民一人ひとりが納得して正しい科学的知識を身につけたか疑問である。我が国では、これまで30年以上にわたって、放射線の基礎的知識に対する教育が疎かにされ、それが科学的リテラシーの欠如となって表れてしまった。

放射線の関わる学問領域は広い。たとえば放射線取扱の国家資格である主任者試験では、物理

### 2. 自主講義「放射線学」

震災後の混乱のなかで、東京でも正しい科学的知識が求められていた。放射線のことかわからないので教えて欲しいという学生の声を受け、2011年5月から6月にかけて計6回の自主講義を開講し、加えて最後に討論会を設けることにした。対象は東京大学の1,2年生全員を中心とし、教養学部キャンパスにいる学生、院生らも自由聴講とした。チラシやtwitterなどでの宣伝の結果、初回に集まったのは40名で、うち1,2年生は28名。学期途中の開講で単位も出ないなか、学生のみならず、院生、教員や外部聴講者も熱心に耳を傾けていた。



## 放射線を科学的に理解するための教育

鳥居寛之

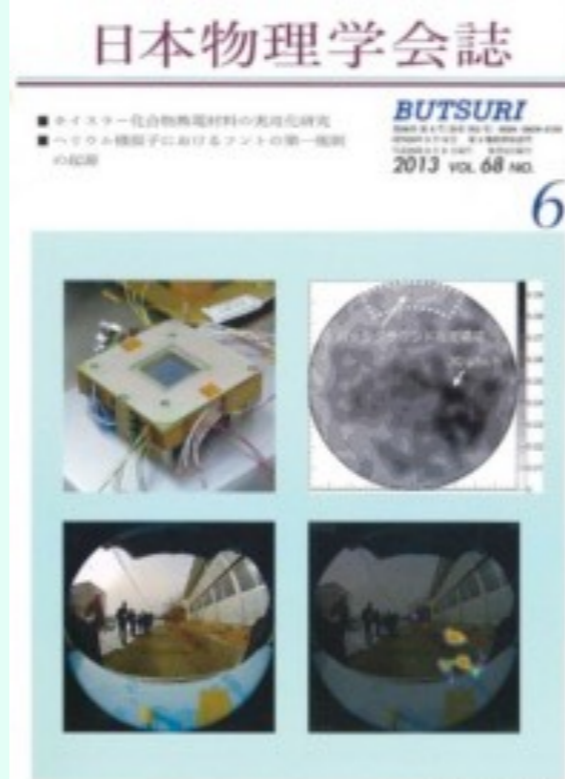
〈東京大学教養学部・大学院総合文化研究科 153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1 e-mail: torii@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp〉

### 1. はじめに

東日本大震災は我々の価値観をも大きく変える未曾有の災害だった。さらに追い討ちをかけるように原発事故が起こり、被災地域はもとより、全国に影響を及ぼすこととなってしまった。放射線に関する知識不足から多くの人々が混乱し、様々な不確かな、あるいは間違っただけでなく、見解がばらついた科学者に対する信頼も凋落し、世の中の不安感が未だに尾を引いている。放射線への恐怖心から、あるいは「安全」な食品を求めて、福島のみならず東京を離れ、なかには海外に子どもを疎開させた親さえいる。そんななか、私は実験核物理・原子物理学を専門とする物理学者として、学生に対する教育の必要性を感じ、講義活動に奔走した。放射線を理解するには、物理・化学・生命科学・医学・工学など様々な分野の

東京の日常風景も、金町浄水場から基準を超える放射性ヨウ素が検出され、やいなやペットボトルが売り切れ、計画停電で列車運行が影響を受けた。辺り一帯が真っ暗の闇、都会のマンションから、皮肉いときほど美しい星空を仰ぎ見ることができなかった。

テレビでは原発の構造の解説、マイクロシーベルトとい



向けていなかったことを反省もしたが、

の教員による放射線・放射能の勉強会が開かれた。内容は放射線や放射能レ

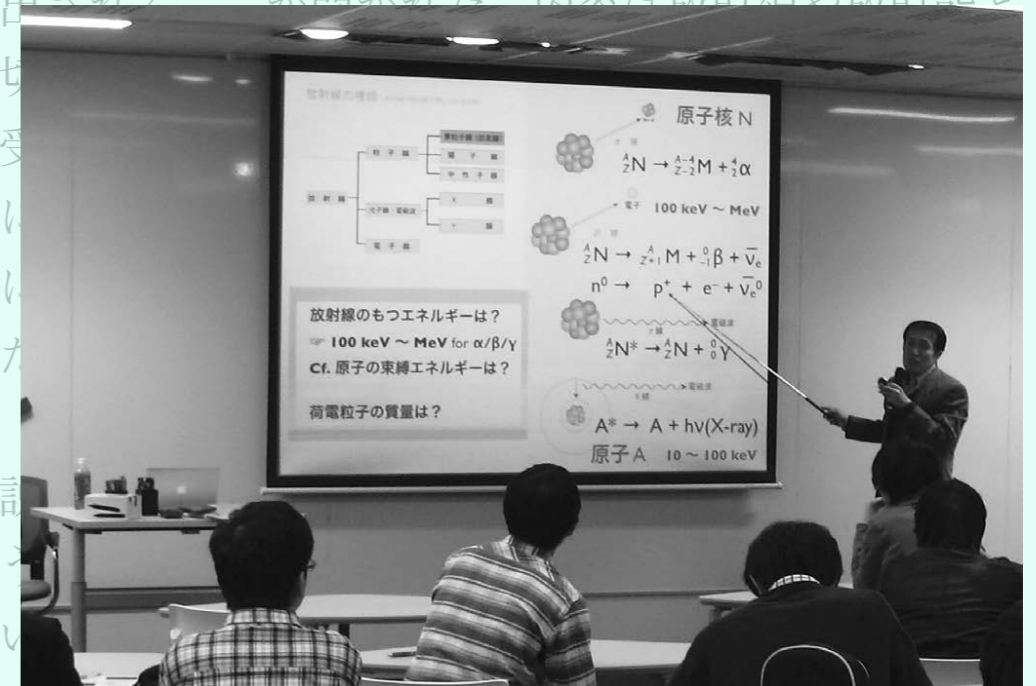


図1 放射線物理学のスライド下例と講義風景。



図2 放射線生物学の講義で放射能の食品基準の説明に聞き入る学生たち。



# 自己紹介

**研究**：Exotic原子（ミューオニウム、反陽子原子）

**専門**：放射線科学・素粒子原子物理学

## 放射線講義・講座

2011/4：東大広域科学専攻にて教員・院生向けに講演・討論会

2011/春夏：東大教養にて1、2年生向けに**自主講義「放射線学」**

2011/6：オープンラボで大学・高校生・一般向けシンポジウム

2011/秋冬：**主題科目テーマ講義「放射線を科学的に理解する」**

2011/11：**高校生のための特別講座「放射線の科学」** 福島高校にも配信

2012/3：東京大学 × 博報堂 × 時事通信社（特別協力：環境省）

「3.11のガレキを考える」プロジェクト 細野環境大臣に提言

**資格**：第1種放射線取扱主任者

**委員会**：東大安全環境本部 放射線安全教育WG

(~2016)

放射線取扱者全学一括講習会資料検討TG メンバー

日本学術振興会 先導的研究開発委員会

「放射線の影響とクライシスコミュニケーション」委員



# 平成24年度 放射線取扱主任者試験 受験の手引き

この試験は、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（昭和32年6月10日法律第167号）」に基づき、登録試験機関である財団法人原子力安全技術センターが行う国家資格試験です。第1種及び第2種の放射線取扱主任者免状は、放射線取扱主任者試験に合格し、かつ、所定の講習を修了した者に対し、文部科学大臣より交付されます。

## 試験日程 第1種放射線取扱主任者試験

平成24年8月22日（水）、23日（木）

## 第2種放射線取扱主任者試験

平成24年8月24日（金）

## 申込受付期間 平成24年5月18日（金）～6月18日（月）

郵送の場合、平成24年6月18日の消印まで有効

料金別納及び後納郵便の場合、平成24年6月18日到着分まで有効

試験会場	札幌会場	〔東海大学 札幌キャンパス〕
	仙台会場	〔東北学院大学〕
	東京会場	〔成蹊大学〕
	名古屋会場	〔名城大学 八事キャンパス〕
	大阪会場	〔大阪商業大学〕
	福岡会場	〔九州大学 箱崎キャンパス〕



# 試験課目及び時間割

## 1. 第1種試験

平成24年8月22日（水）

試験課目	時間割	備考
物理学、化学及び生物学のうち放射線に関する課目 (6問、択一式)	9:40～10:00	注意事項等の伝達、問題用紙等の配布
	10:00～11:45	試験 (105分)
	11:45～13:20	休憩
物理学のうち放射線に関する課目 (30問、択一式)	13:20～13:30	注意事項等の伝達、問題用紙等の配布
	13:30～14:45	試験 (75分)
	14:45～15:20	休憩
化学のうち放射線に関する課目 (30問、択一式)	15:20～15:30	注意事項等の伝達、問題用紙等の配布
	15:30～16:45	試験 (75分)

平成24年8月23日（木）

試験課目	時間割	備考
放射性同位元素及び放射線発生装置による放射線障害の防止に関する管理技術並びに放射線の測定技術に関する課目（法律別表第1に掲げる課目(2)、(3)及び(4)を含む） (6問、択一式)	9:40～10:00	注意事項等の伝達、問題用紙等の配布
	10:00～11:45	試験 (105分)
	11:45～13:20	休憩
生物学のうち放射線に関する課目 (30問、択一式)	13:20～13:30	注意事項等の伝達、問題用紙等の配布
	13:30～14:45	試験 (75分)
	14:45～15:20	休憩
放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律に関する課目（※） (30問、択一式)	15:20～15:30	注意事項等の伝達、問題用紙等の配布
	15:30～16:45	試験 (75分)



# 新規 放射線取扱者 講習

全学一括講習会 (丸~~2~~<sup>1</sup>日)

1日目：講義

~~2日目：実習~~

@ 本郷キャンパス or 柏キャンパス

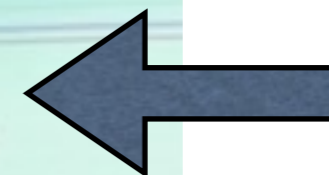
放射線取扱者 健康診断

部局講習会 @ 駒場キャンパス

共通技術室にて受講申し込み



質疑応答 2 時間



双方向通信

高校生のための  
金曜特別講座

2011/11/11 & 18

主催：東京大学教養学部附属 教養教育高度化機構

全国約20の高校に同時双方向配信

延べ 1000人以上が受講

東大オープンコースウェア (OCW)  
にて動画配信を準備中



講義 1 時間



# 基調講演 「放射線と正しく向き合うために」



子どもの笑顔・元気サミット  
—被災地の子どもたちのために いま私たちができること—

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

紫外線照射でも頻発

損傷の種類	自然発生率 (細胞あたり)	放射線誘発率 (細胞あたり)
複製ミス	20,000	100
1本鎖切断	50,000	1,000
2本鎖切断	50 (推定)	40

## 子どもの笑顔・元気サミット in 福島 「被災地の子どもと放射能」

主催：NPO 法人みやぎ・せんだい子どもの丘、財団法人こども未来財団  
2011/11/23 於：福島市「こむこむ」わいわいホール







# 震災がれき処理問題

東京大学 × 博報堂 × 時事通信社





飯舘村



対話型講演会 @ 福島県

伊達市・南相馬市・郡山市

チーム  
「あいんしゅたいん」

2014/8/5-7

企画：NPO 法人あいんしゅたいん

双葉町



郡山市



南相馬市



伊達市



# 放射線リスクコミュニケーションの研究

「ビッグデータ解析による 3.11 以降の放射線に関する科学者の情報発信とその波及効果の検証：クライシス時に有効な科学者の情報発信法の開発を目指して」

3/11 4月 5月 6月 7月 8月 9月

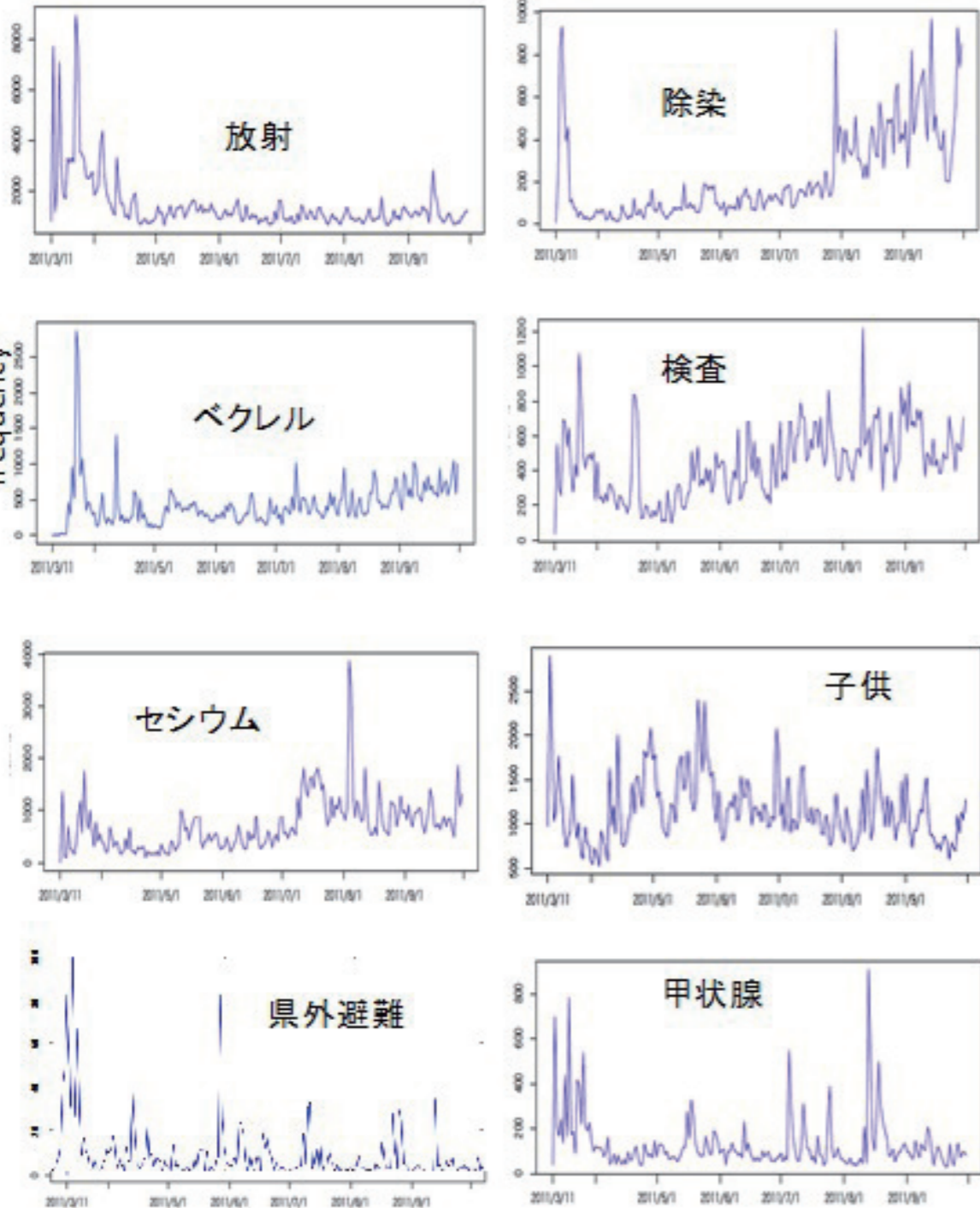


図2 サンプルされた Twitter データ 500 万件のキーワードの推移

環境省補助金 宇野賀津子・鳥居寛之  
原子力災害影響調査等事業  
(放射線の健康影響に係る研究調査事業)

原発事故後の twitter データの解析

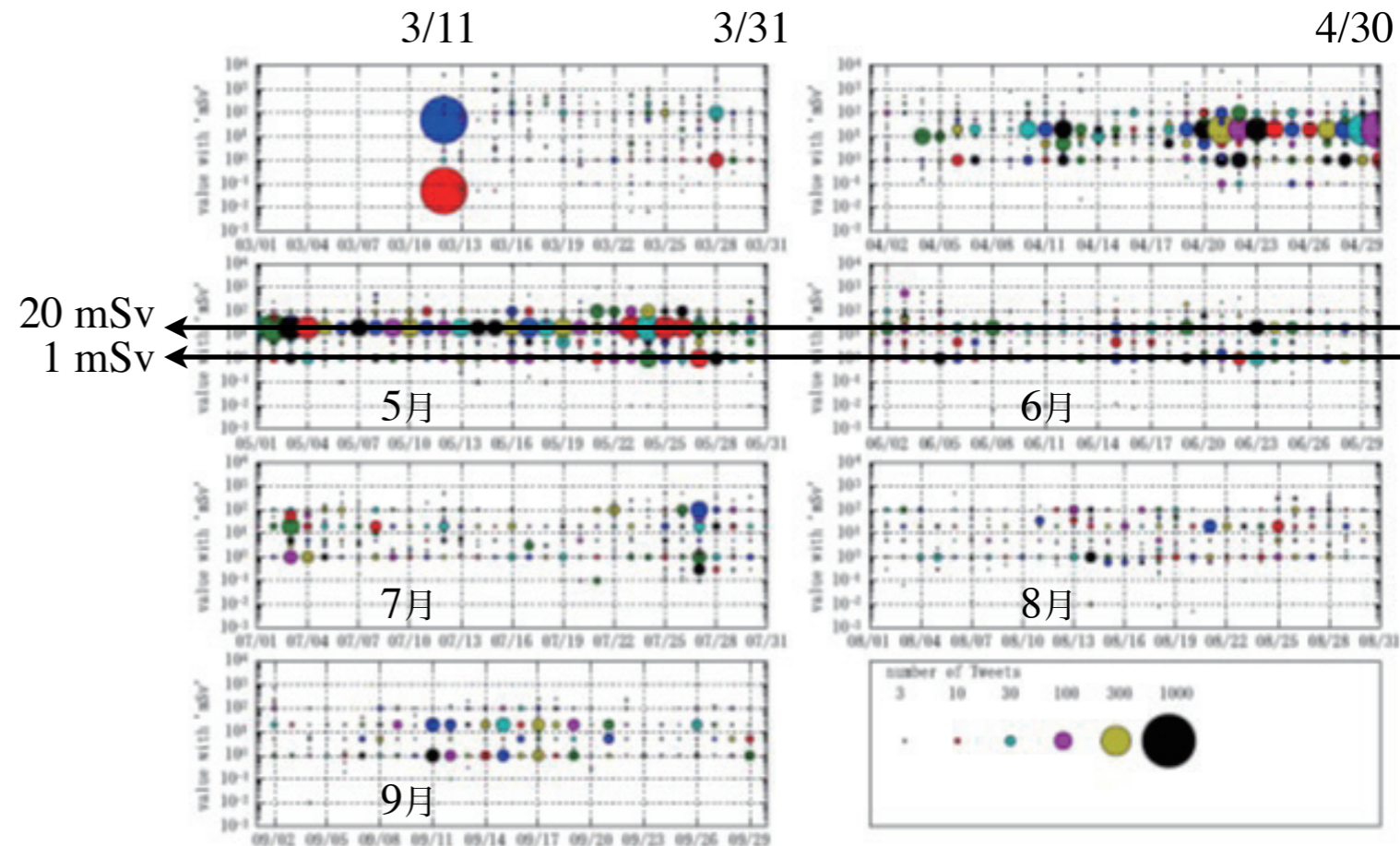


図3 数値と“mSv”が連続して現れる Tweet 数



# アンケート

専門分野

放射線講義の履修状況

放射線実習の履修（GM管・霧箱）

放射線取り扱い経験

放射線の知識度



# 講義の理解目標の一例

以下のような問いに答えられるように

「放射線が物質に及ぼす作用と人体への影響について、物理学的、化学的、分子生物学的、医学的観点からそれぞれ論ぜよ。」

「外部被曝と内部被曝で人体への影響はどう違うか、あるいは同じか。また、放射性核種や放射線の種類によって、どういった違いがあるか。」

「放射性物質が農業や食品衛生に与える影響について述べよ。ゼロでないリスクをどう伝え、どう判断すべきだろうか。安全と安心を確保する方策は？」





# 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  
リスクコミュニケーション

第1話

## 放射線入門 鳥居 寛之

東京大学 大学院理学系研究科 放射線管理室



**放射線**  
**放射能**  
**放射性物質**



# 「放射能うつる」といじめ＝福島から避難の小学生に―千葉

2011年4月15日11時6分

福島第1原発事故を受け、福島県から千葉県船橋市に避難した小学生の「**放射線がうつる**」といじめられたという訴えが市教育委員会で15日、分かった。市教委は同日までに、避難者の不安な気持ちを考え言動に注意し、思いやりを持って被災者の児童生徒に接するよう指導を求める通達を市立小中学校に出した。

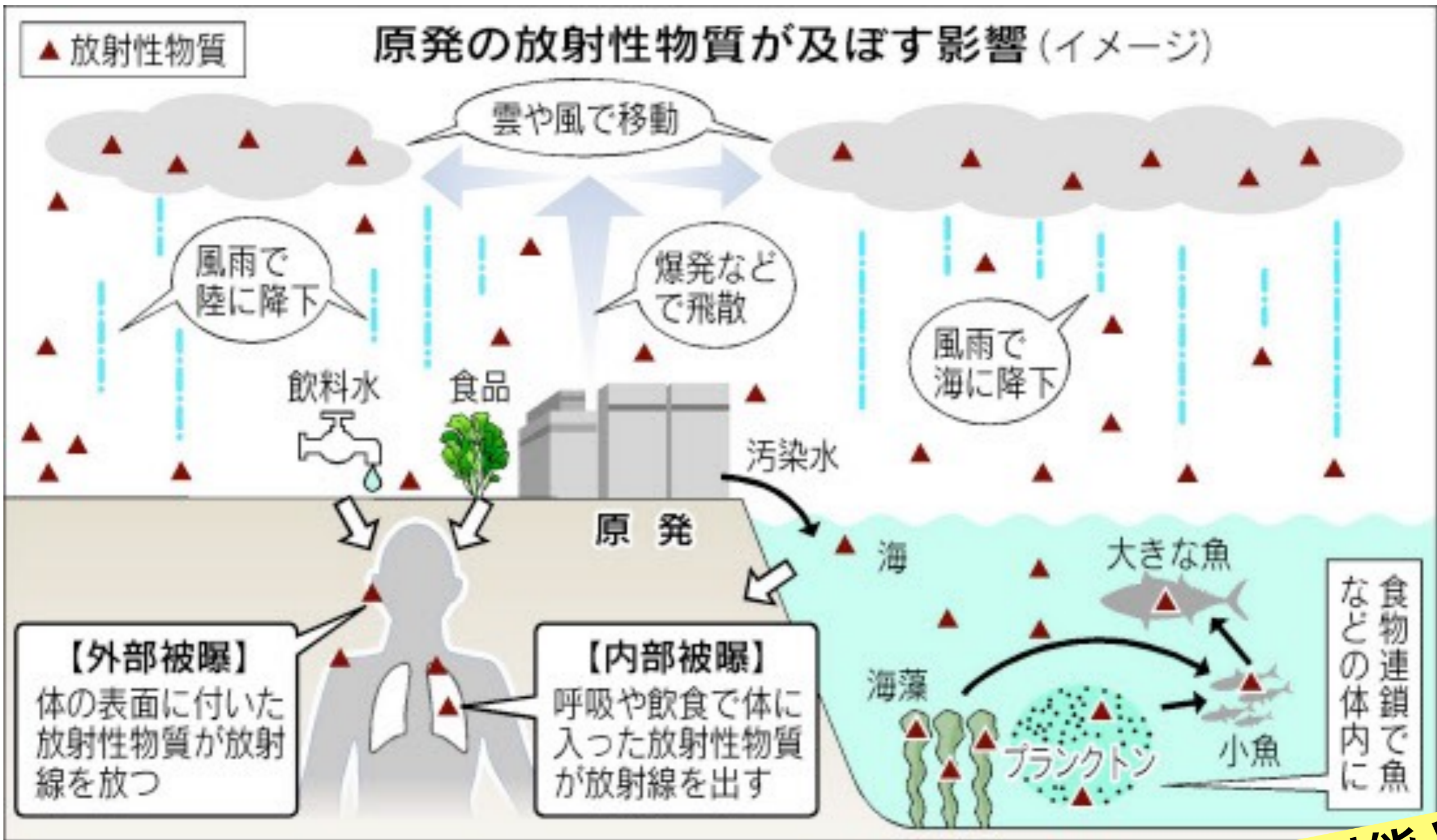
市教委によると、福島県南相馬市から避難した小学生の兄弟が、地元の子どもに「どこかへ逃げるの」と話しかけられた。兄弟が「福島」と答えると地元の子どもは「**放射線がうつる**」と言い、数人が一斉に逃げ出したという。

放射線はうつらない

放射能と放射線を混同しない

放射線に対する正しい知識をもって  
「正しく怖がる」ことが必要。



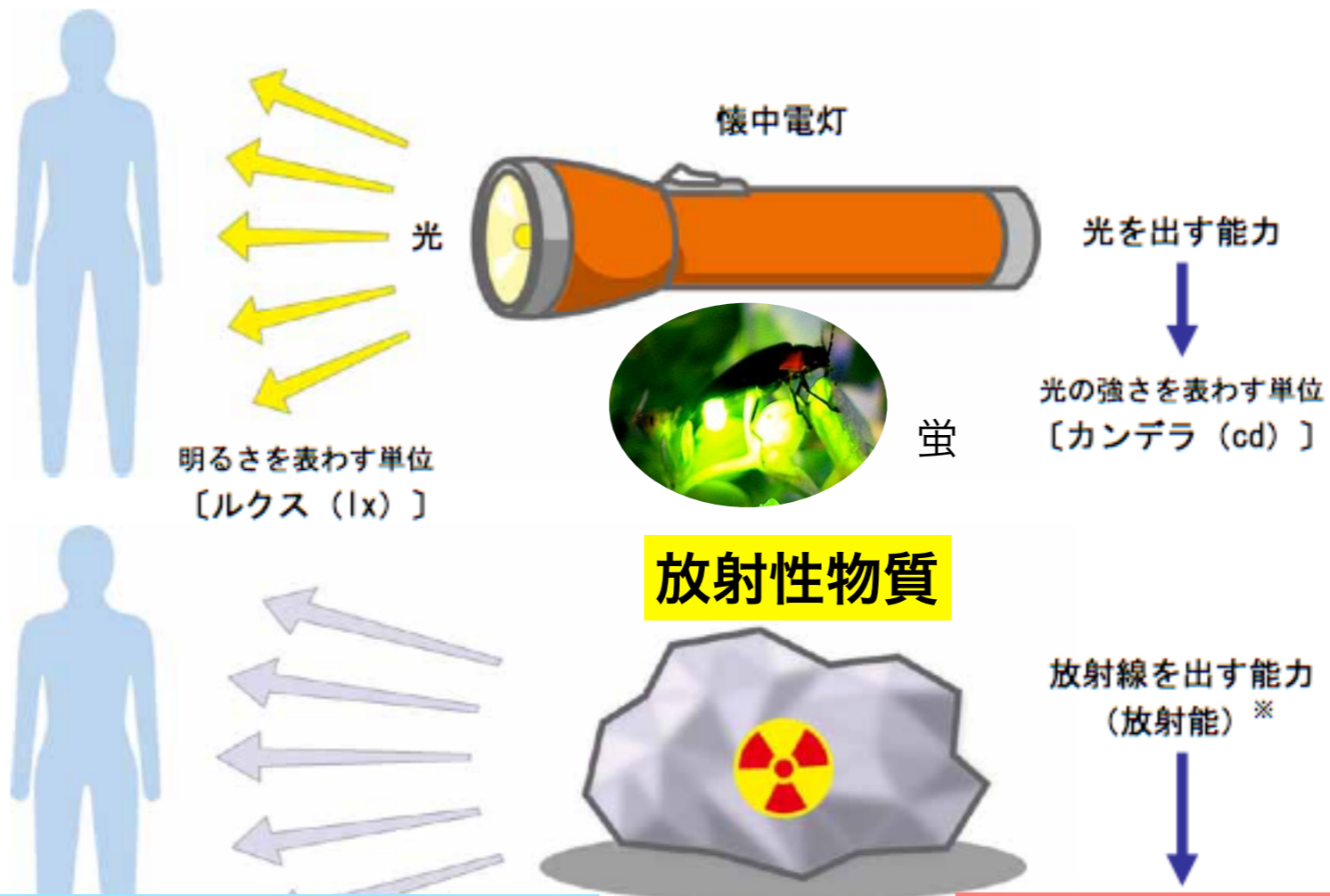


放射性物質が一部東京まで飛来。  
放射線が直接東京に届いたのではない

放射性物質、放射能と  
放射線を混同しない

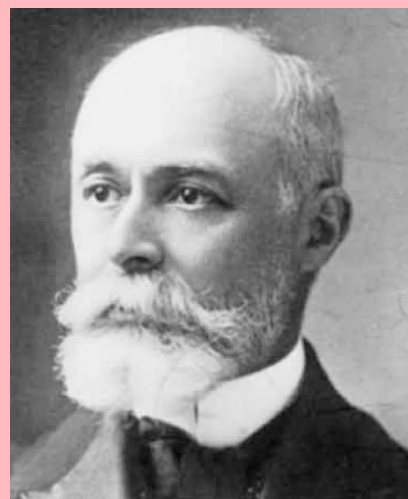


# 放射能と放射線



放射線の強さ・影響を表す単位  
シーベルト [Sv]

放射能の強さを表す単位  
ベクレル [Bq]



## 放射能 (radioactivity) の単位

[Bq] | Bq = 1 dps, [Ci] | Ci = 37 GBq

Becquerel

decay/disintegration  
per second

Curie

1 キュリー = 370億ベクレル





# SI (国際単位系)

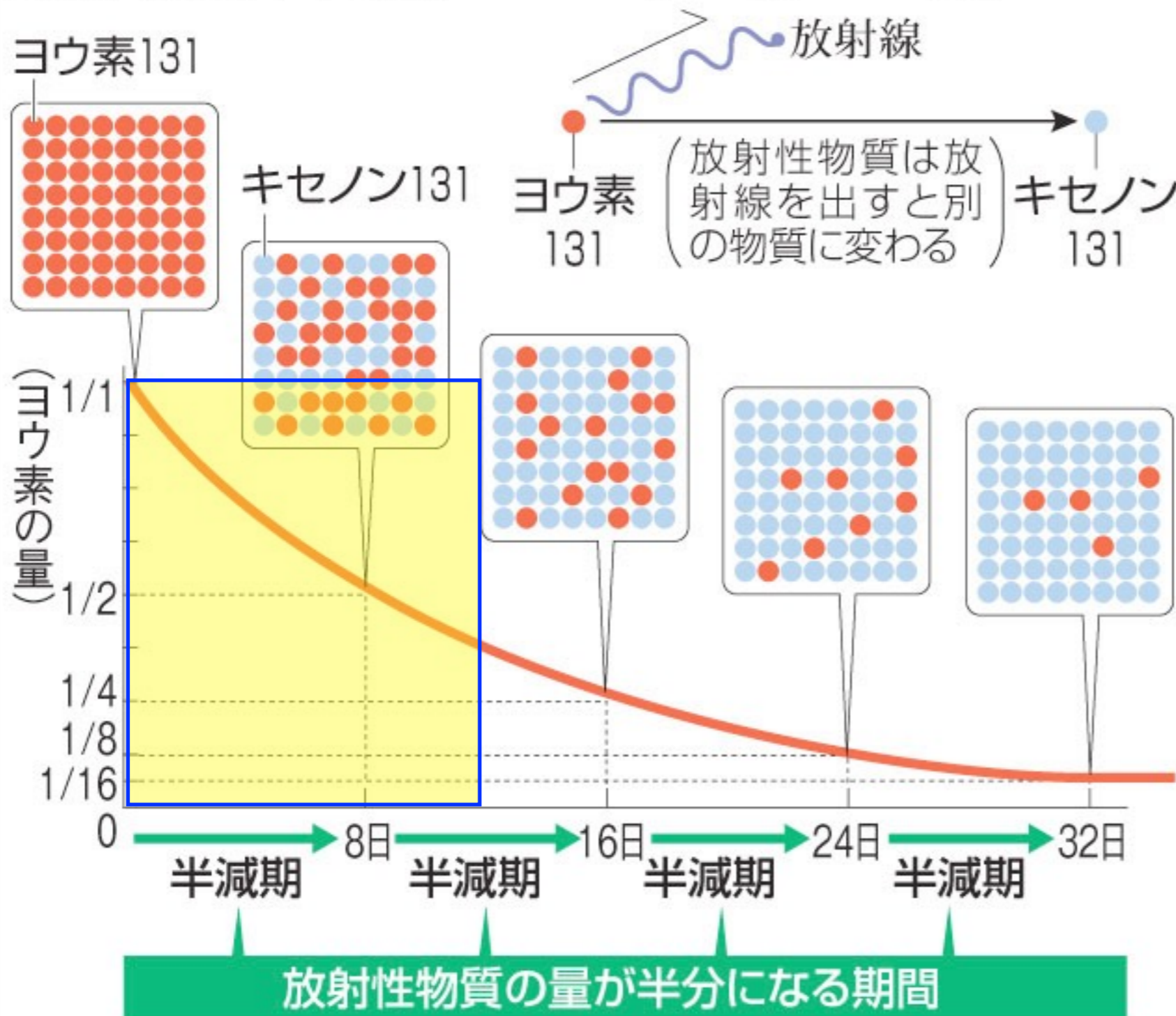
表2: 単位の倍数

接頭辞	記号	倍数	接頭辞	記号	倍数
デシ (deci)	d	$10^{-1}$	デカ (deca)	da	10
センチ (centi)	c	$10^{-2}$	ヘクト (hecto)	h	$10^2$
ミリ (milli)	m	$10^{-3}$	キロ (kilo)	k	$10^3$
マイクロ (micro)	$\mu$	$10^{-6}$	メガ (mega)	M	$10^6$
ナノ (nano)	n	$10^{-9}$	ギガ (giga)	G	$10^9$
ピコ (pico)	p	$10^{-12}$	テラ (tera)	T	$10^{12}$
フェムト (femto)	f	$10^{-15}$	ペタ (peta)	P	$10^{15}$
アト (atto)	a	$10^{-18}$	エクサ (exa)	E	$10^{18}$
ゼプト (zepto)	z	$10^{-21}$	ゼタ (zetta)	Z	$10^{21}$
ヨクト (yocto)	y	$10^{-24}$	ヨタ (yotta)	Y	$10^{24}$



(ヨウ素換算63万テラベクレル. <http://bit.ly/fRxmkt> これを放射性ヨウ素131の質量に焼き直すと, およそ1) 100トン 2) 100 キログラム 3) 100 グラム 4) 100ミリグラム, ?)

### 放射性物質の半減期のしくみ(ヨウ素131の例)



注：ヨウ素等価換算は、環境や人への影響を勘案して係数を決めている。ヨウ素以外の核種の質量を計算するには適していない。ヨウ素131については、15万テラベクレルの放出と言われているので、その質量は上の問いに対する計算値の4分の1となる。また、半減期の長いセシウム137などでは、同じベクレル数でも、モル数も質量もヨウ素に比べてずっと大きくなる。



# 放射線量 (radiation dose) の単位

Gray

吸収線量 absorbed dose  $D [J / kg] = [Gy]$

等価線量 equivalent dose  $H_T [J / kg] = [Sv]$

実効線量 effective dose  $E [J / kg] = [Sv]$

Sievert



## 放射線量率 (dose rate) の単位

単位時間あたりの放射線量

$[Gy/h], [Sv/h], \text{etc....}$

放射線量率の時間積分が（積算）放射線量になる。



# 身の回りの放射線

mSv (実効線量)



ブラジル・ガラバリの放射線  
(年間、大地等から) 10

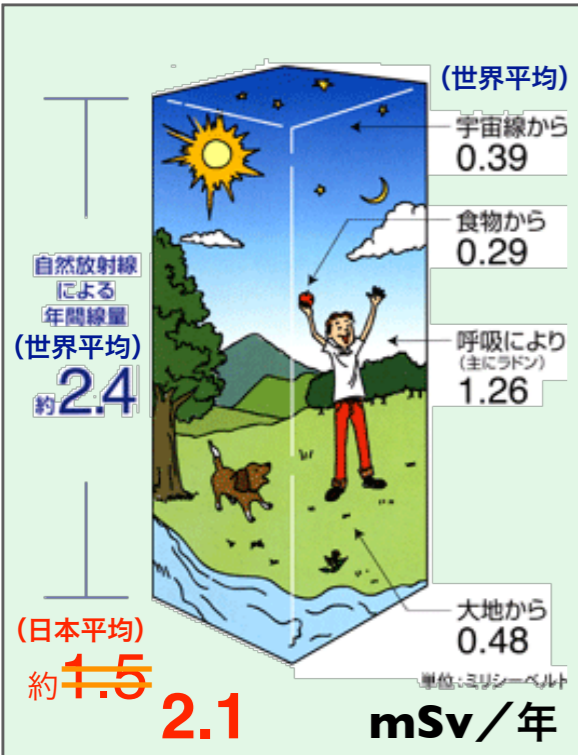
放射線の量  
(ミリシーベルト)

10

胸部X線コンピュータ断層  
撮影検査(CT スキャン)(1回) ★



6.9



(世界平均) (日本平均)  
宇宙線から 0.39 <del>0.29</del> 0.30

食物から <del>0.41</del> 0.99

呼吸により (主にラドン) 1.26 <del>0.40</del> 0.48

大地から <del>0.38</del> 0.33



2.4

1人あたりの自然放射線(年間)(世界平均) ★

1

一般公衆の線量限度(年間)  
(医療は除く) 1.0



岐阜 ↔ 神奈川



0.4

国内自然放射線の差(年間)  
(県別平均値の差の最大)

0.6 胃のX線集団検診(1回)



東京-ニューヨーク航空機  
旅行(往復)  
(高度による宇宙線の増加)



0.2

0.1

胸のX線集団検診(1回) ★



再処理工場からの放射性物質  
の放出による評価値(年間) 0.022

0.05



原子力発電所(軽水炉)周辺の線量目標値(年間)  
(実績ではこの目標値を大幅に下回っています)

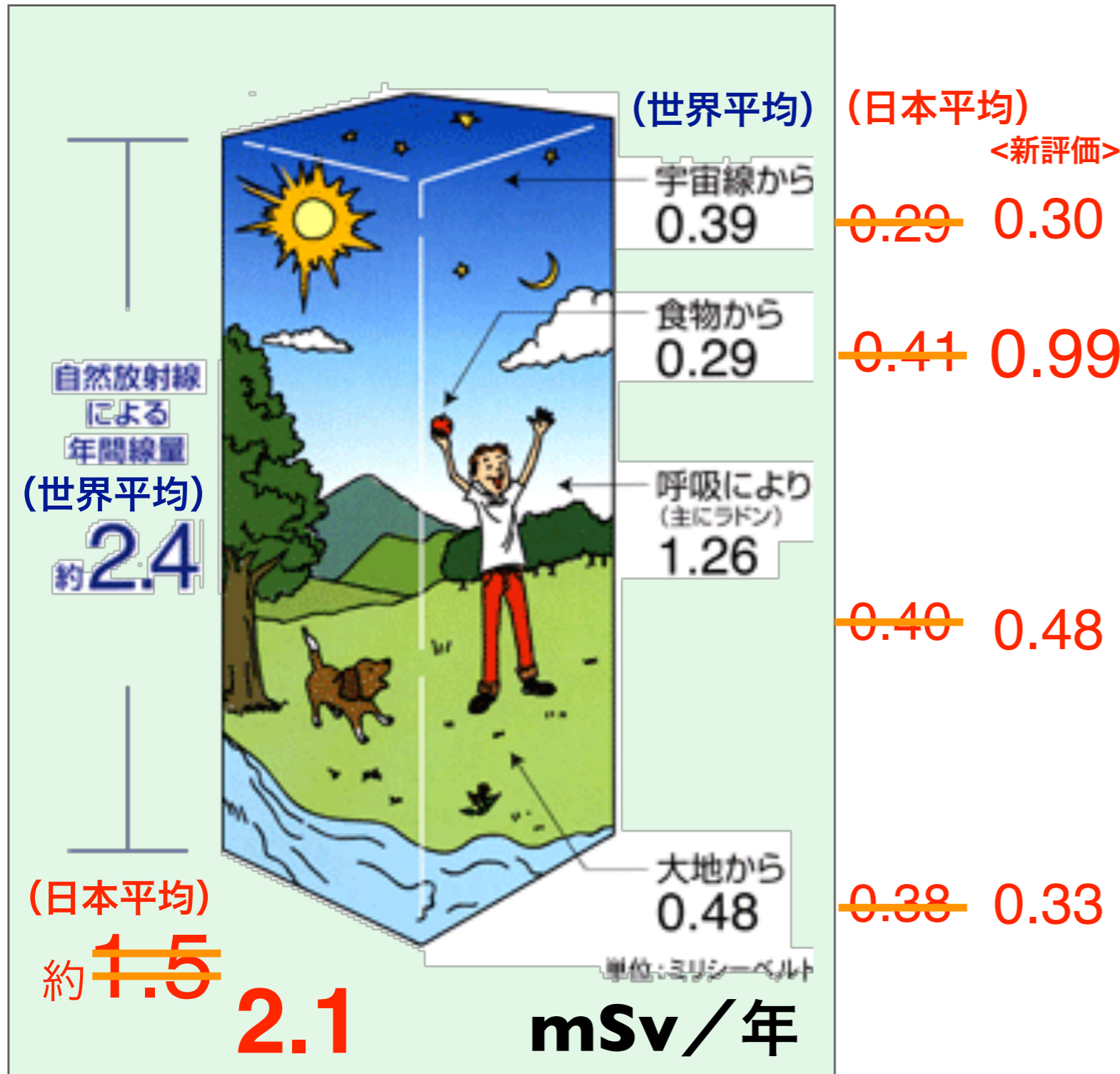
クリアランスレベル導出の  
線量目安値(年間) 0.01

0.01



# 身の周りの放射線

mSv (実効線量)



日本人の食す魚介類に  $^{210}\text{Po}$  や  $^{210}\text{Pb}$  が多く含まれ、それによる  $\alpha$  線内部被曝の評価値を従来より上方修正。

元図: 東京電力の旧ホームページより



# 関西は自然放射線量が高い！

mSv/年

## 全国の自然放射線量

宇宙、大地からの放射線と  
食物摂取によって受ける放射線量  
(ラドンなどの吸入によるものを除く)

関東・東北は低い！

日本全体  
0.99

御影石  
(花崗岩)

温泉地



《表5》 土壌や岩石中に含まれる天然の放射性物質

放射性物質の種類	放射能濃度 (ベクレル/kg)	
	一般の土壌・岩石	花こう岩
カリウム40	100~700	500~1600
ウラン238 (娘核種を含む)	10~50	20~200
トリウム232	7~50	20~200

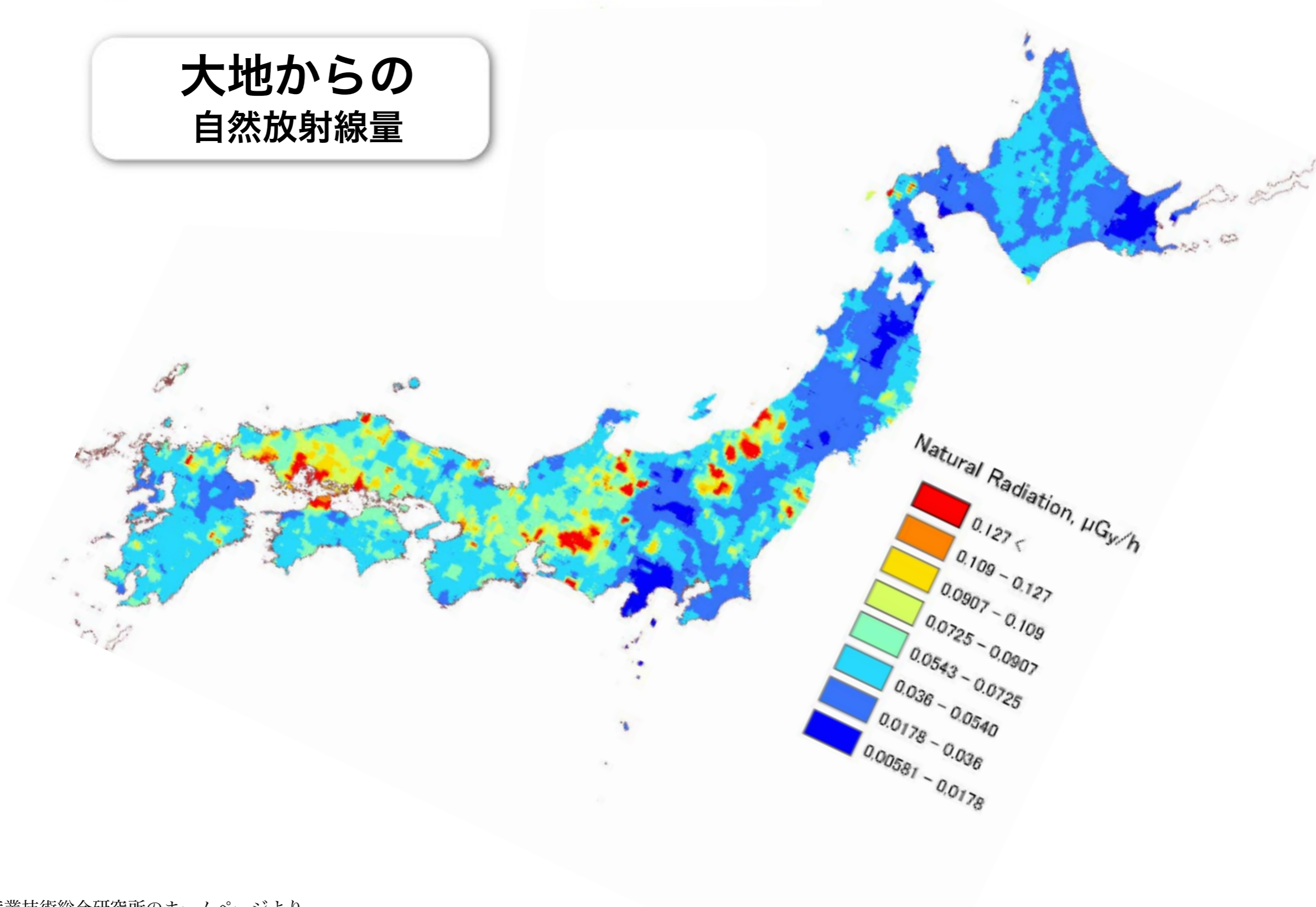
関東ローム層



全国の自然放射線量

$\mu\text{Gy}/\text{時}$

大地からの  
自然放射線量





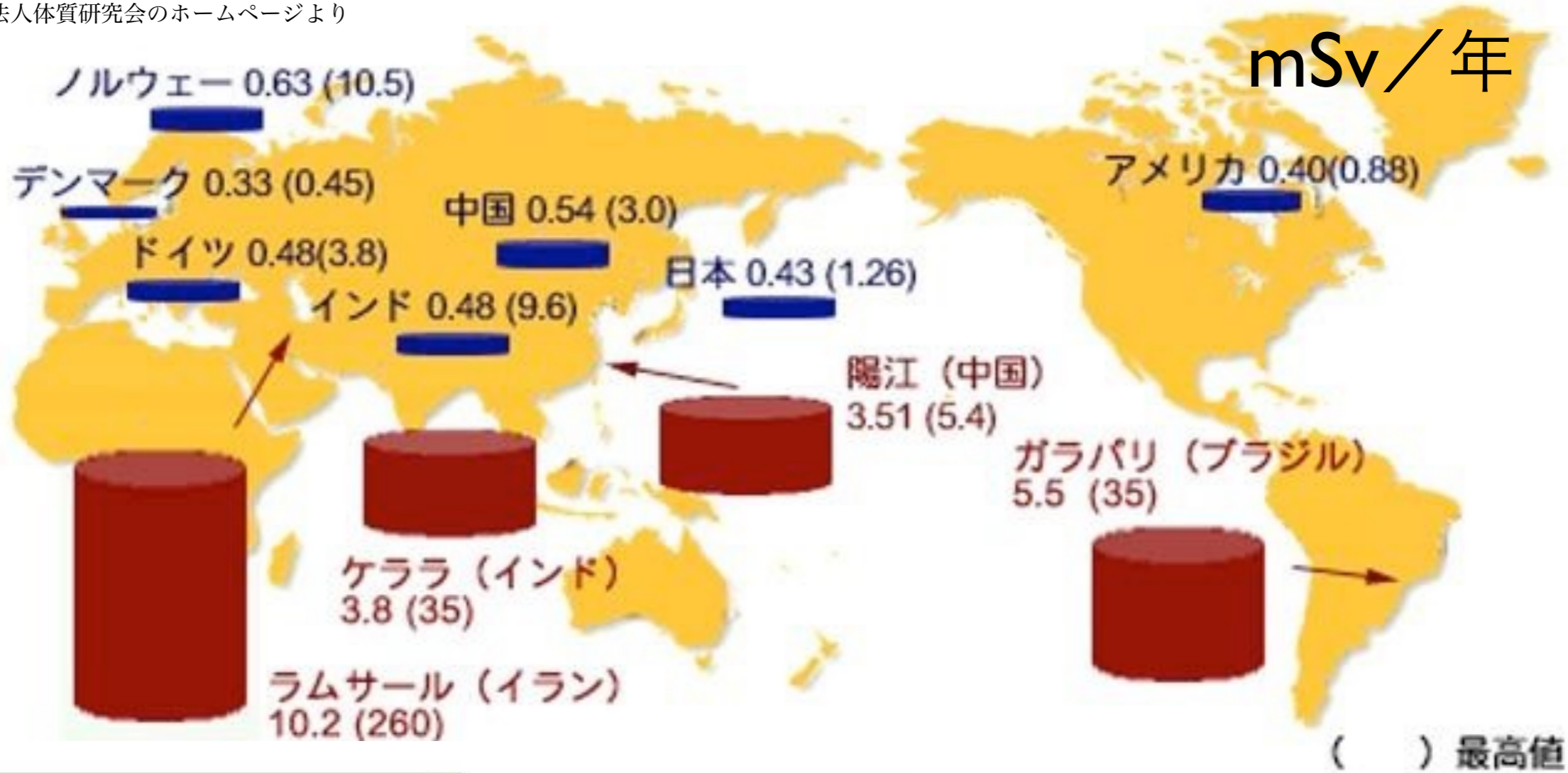
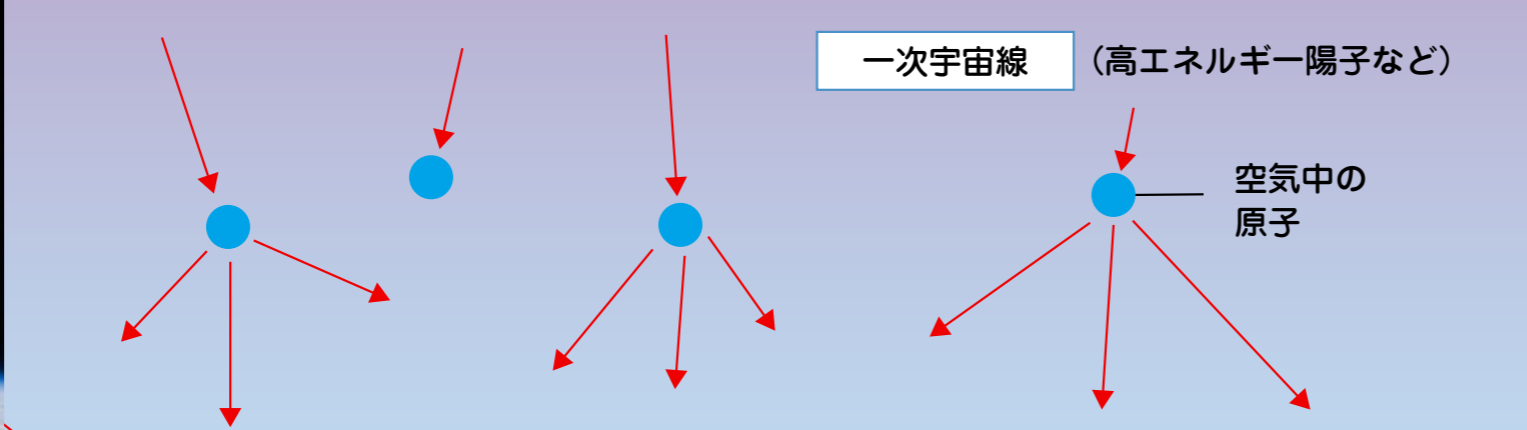


表1 高自然放射線地区と対照地区におけるがん死亡率の比較<sup>7,8)</sup>

	高自然放射線地区	対照地区
自然放射線量率 (mSv/年)	5.5	2.1
がん死亡率 (10万人・年)	48.8	51.1
調査人数・年	1,008,769	995,070

図2 陽江市・恩平県放射線環境調査実施地域

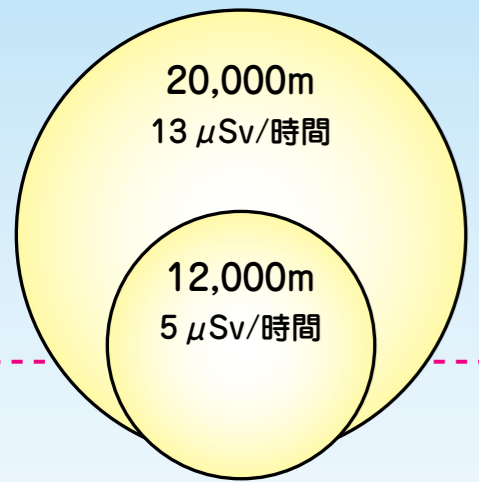




三重水素、ベリリウム7、ベリリウム10、ナトリウム22、ナトリウム24などの宇宙線生成核種が生じる (一次宇宙線のエネルギーが比較的低い場合)

中性子、陽子、 $\pi$ 中間子、K中間子などの放射性物質が生じる (一次宇宙線のエネルギーが高い場合)

※○の大きさは、放射線を受ける量をあらわしている。



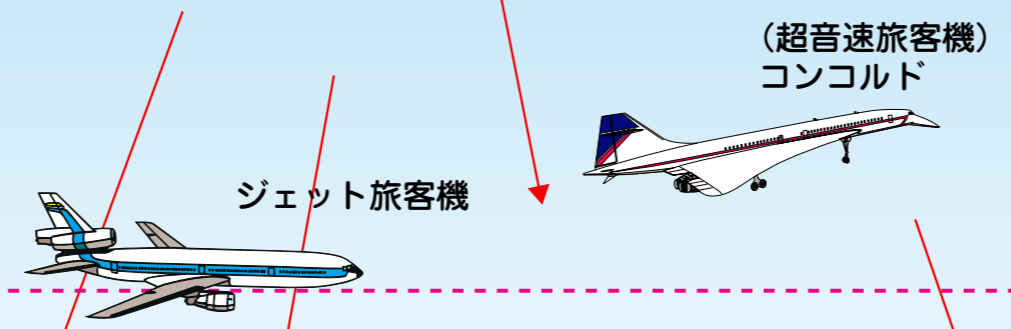
100km

10km

1km

海面 0.03  $\mu$ Sv/時間

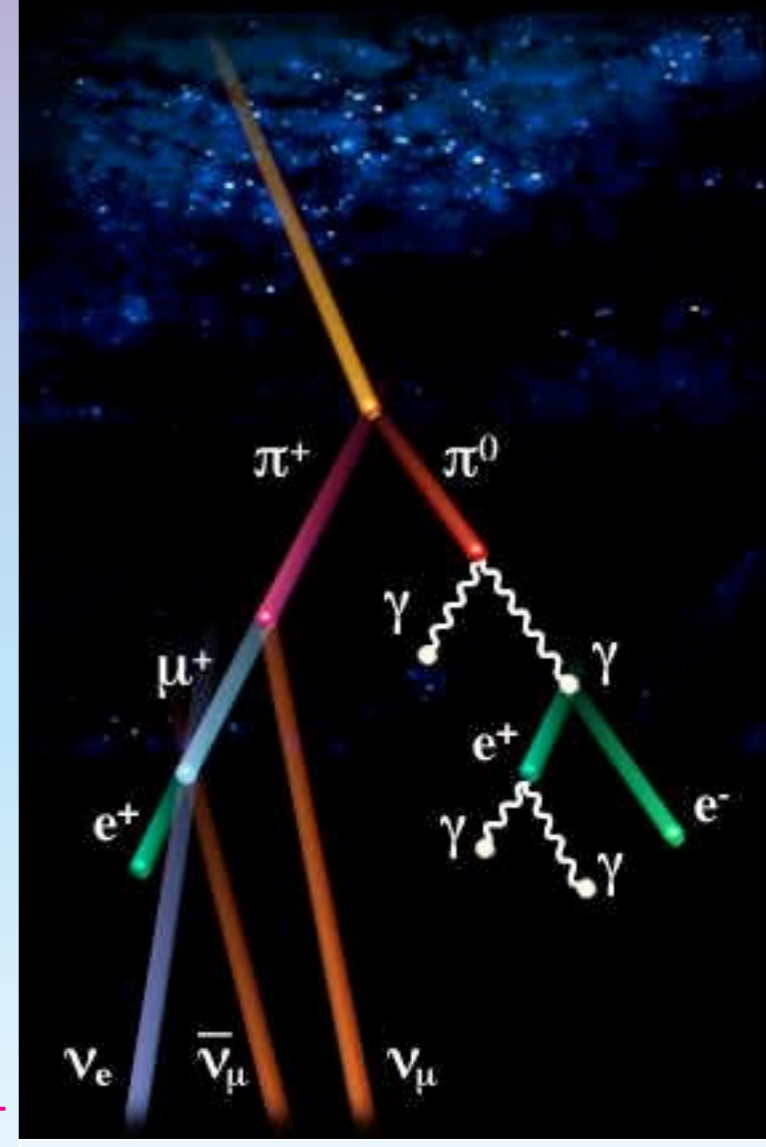
$\mu$ Sv = マイクロシーベルト



《表4》宇宙線による年平均実効線量

地域 (高高度地域)	人口 (百万人)	高度 (m)	年実効線量 ( $\mu$ Sv)		
			電離成分	中性子	合計
ラパス (ボリビア)	1.0	3900	1120	900	2020
ラサ (中国)	0.3	3600	970	740	1710
キトー (エクアドル)	11.0	2840	690	440	1130
メキシコシティ (メキシコ)	17.3	2240	530	290	820
ナイロビ (ケニア)	1.2	1660	410	170	580
デンバー (米国)	1.6	1610	400	170	570
テヘラン (イラン)	7.5	1180	330	110	440
海面			240	30	270
世界平均			300	80	380

出典：国連放射線影響科学委員会報告 (1993)



東京～NY 往復  
200  $\mu$ Sv (max)



# 体内、食物中の自然放射性物質

出典：旧科学技術庁パンフレット

Bq / kg

Bq (60 kg)

●体内の放射性物質の量

放射性物質	濃度 (ベクレル/kg)	全身の放射能 (60キログラムの人のベクレル数)
カリウム 40	67	4,100
炭素 14	41	2,600
ルビジウム 87	8.5	520
鉛 210または ポロニウム 210	0.074~1.5	19
ウラン 238	—	1.1

日本人は高い値  
(魚介類に多く  
含まれる)

●食物中のカリウム40の放射能量 (日本)

(単位：ベクレル/kg)



Bq / kg

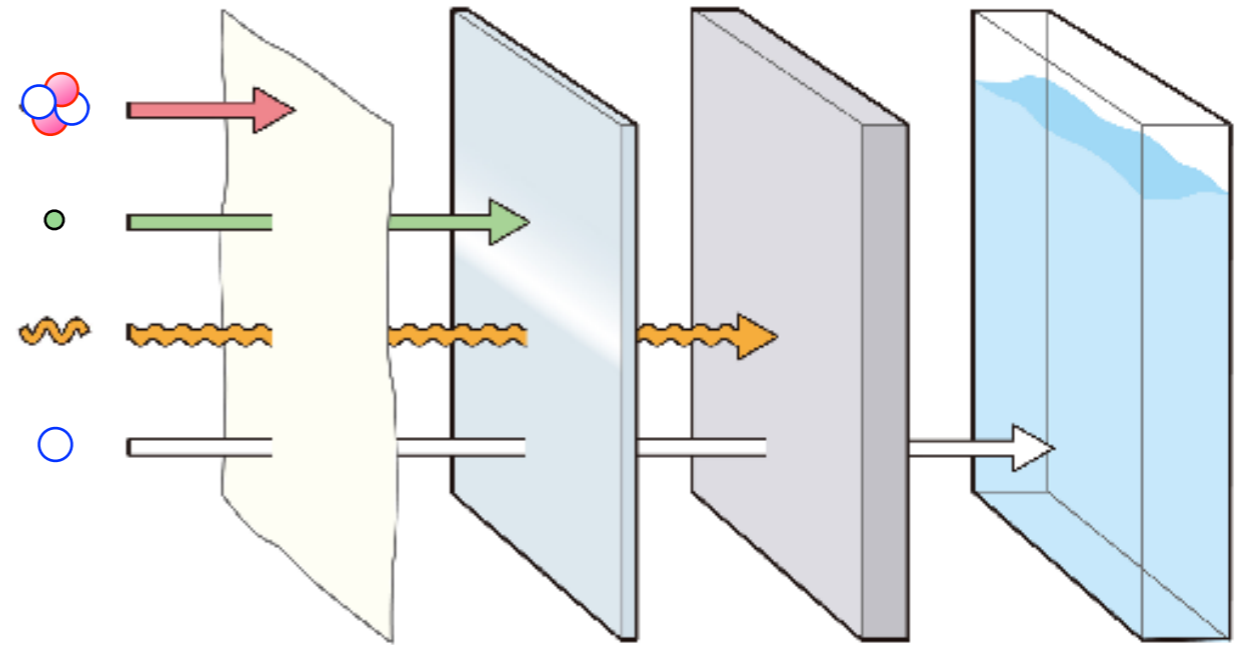
$^{40}\text{K}$   
 同位体比 0.012%  
 半減期 13億年

$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$  (EC $\gamma$ ) 11%  
 $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$  ( $\beta^-$ ) 89%

毎日カリウム 3 g =  $^{40}\text{K}$  を 80 Bq 摂取。同量を排泄。



# 放射線の科学と安全



2020 / 5 / 12 (火)

## 第2話 原子核物理学・放射線物理学

原子核と放射能・放射線の種類・放射線と物質との相互作用



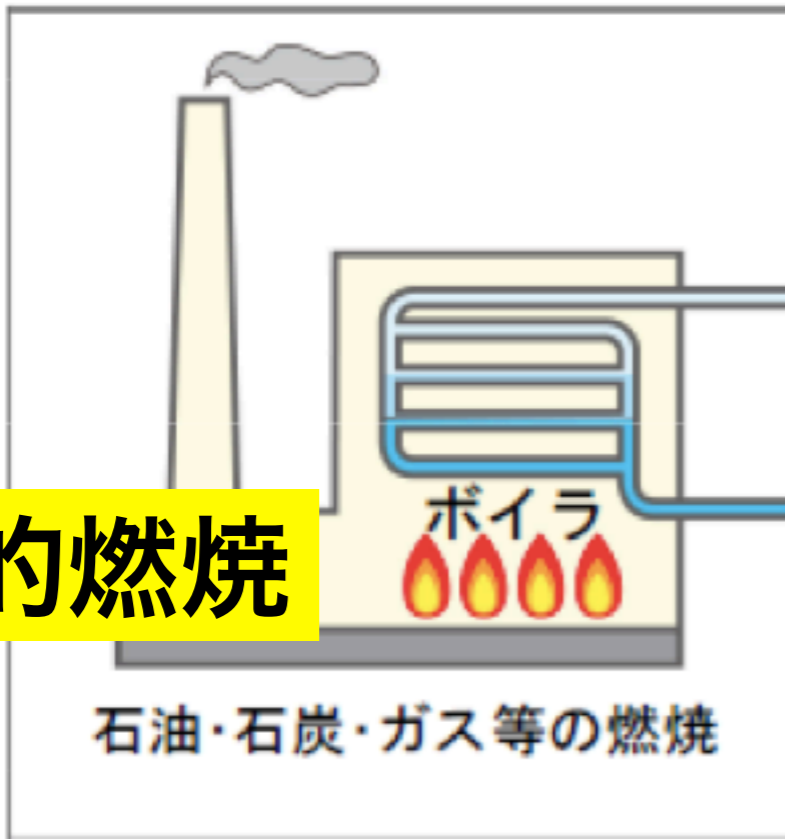
# 原子核物理学



# 火力発電と原子力発電の違い

火力

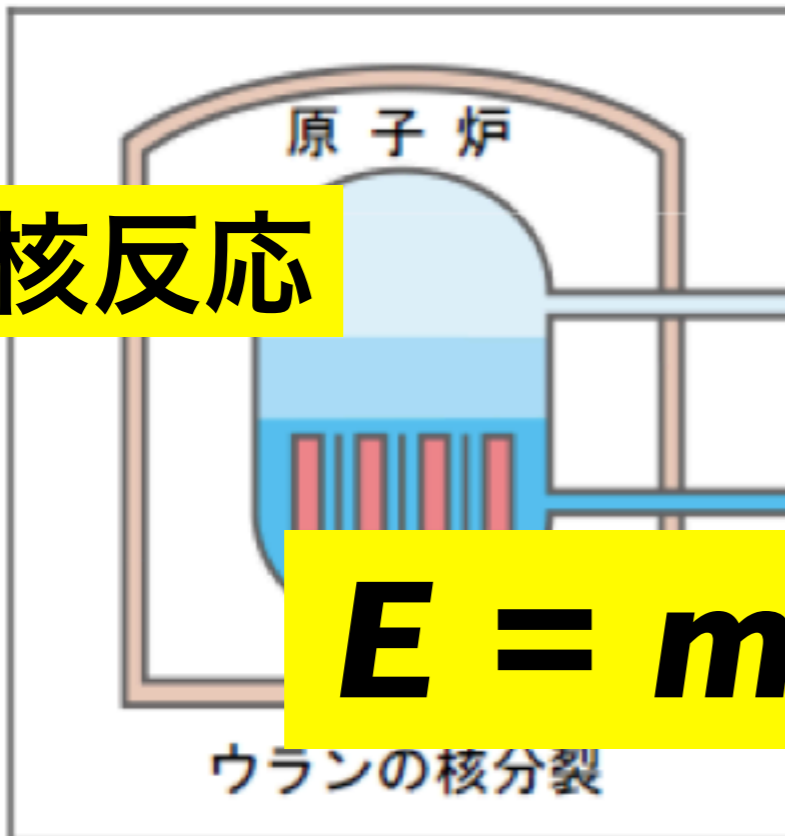
化学的燃焼



原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$



蒸気

水

蒸気

給水ポンプ

タービン

復水器

循環水ポンプ

変圧器

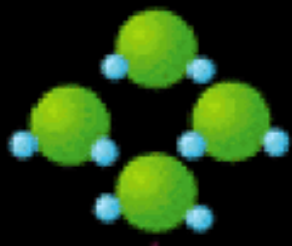
発電機

→ 放水路へ

← 冷却水(海水)







分子  
molecule

nm ( $10^{-9}$  m) 化学  
ナノメートル

eV Chemistry  
電子ボルト

原子: atom < atomus < ατομος < a- + témnein + -os  
(切ることができない)

原子物理学 Atomic Physics



原子  
atom

Å ( $10^{-10}$  m)  
オングストローム Ångström

eV – keV  
数電子ボルト～  
キロ電子ボルト

# 錬金術はなぜ失敗したか

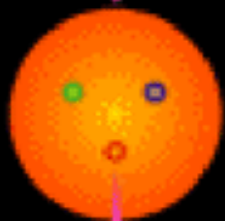


原子核  
nucleus

原子核物理学 Nuclear Physics

fm ( $10^{-15}$  m)  
フェムトメートル

MeV  
メガ電子ボルト



陽子  
proton

素粒子物理学 Particle Physics



クォーク  
quark

am ( $10^{-18}$  m)  
アトメートル

GeV  
ギガ電子ボルト



# 周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																
1	1 <b>H</b> 1.0079	Atomic Sym Mass																2 <b>He</b> 4.0026																																
2	3 <b>Li</b> 6.941	4 <b>Be</b> 9.0121	<table border="1"> <tr> <td><b>C</b> 固体</td> <td colspan="5">金属</td> <td colspan="2">非金属元素</td> </tr> <tr> <td><b>Hg</b> 液体</td> <td>アルカリ金属</td> <td>アルカリ土類金属</td> <td>ランタノイド</td> <td>遷移元素</td> <td>卑金属</td> <td>非金属元素</td> <td>希ガス</td> </tr> <tr> <td><b>H</b> 気体</td> <td></td> <td></td> <td>アクチノイド</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>Rf</b> Unknown</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>										<b>C</b> 固体	金属					非金属元素		<b>Hg</b> 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス	<b>H</b> 気体			アクチノイド					<b>Rf</b> Unknown								5 <b>B</b> 10.811	6 <b>C</b> 12.010	7 <b>N</b> 14.006	8 <b>O</b> 15.999	9 <b>F</b> 18.998	10 <b>Ne</b> 20.179
<b>C</b> 固体	金属					非金属元素																																												
<b>Hg</b> 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス																																											
<b>H</b> 気体			アクチノイド																																															
<b>Rf</b> Unknown																																																		
3	11 <b>Na</b> 22.989	12 <b>Mg</b> 24.305																	18 <b>Ar</b> 39.948																															
4	19 <b>K</b> 39.098	20 <b>Ca</b> 40.078	21 <b>Sc</b> 44.955	22 <b>Ti</b> 47.867	23 <b>V</b> 50.941	24 <b>Cr</b> 51.996	25 <b>Mn</b> 54.938	26 <b>Fe</b> 55.845	27 <b>Co</b> 58.933	28 <b>Ni</b> 58.693	29 <b>Cu</b> 63.546	30 <b>Zn</b> 65.38	31 <b>Ga</b> 69.723	32 <b>Ge</b> 72.64	33 <b>As</b> 74.921	34 <b>Se</b> 78.96	35 <b>Br</b> 79.904	36 <b>Kr</b> 83.798																																
5	37 <b>Rb</b> 85.467	38 <b>Sr</b> 87.62	39 <b>Y</b> 88.905	40 <b>Zr</b> 91.224	41 <b>Nb</b> 92.906	42 <b>Mo</b> 95.96	43 <b>Tc</b> (97.907)	44 <b>Ru</b> 101.07	45 <b>Rh</b> 102.90	46 <b>Pd</b> 106.42	47 <b>Ag</b> 107.86	48 <b>Cd</b> 112.41	49 <b>In</b> 114.81	50 <b>Sn</b> 118.71	51 <b>Sb</b> 121.76	52 <b>Te</b> 127.60	53 <b>I</b> 126.90	54 <b>Xe</b> 131.29																																
6	55 <b>Cs</b> 132.90	56 <b>Ba</b> 137.32	57-71	72 <b>Hf</b> 178.49	73 <b>Ta</b> 180.94	74 <b>W</b> 183.84	75 <b>Re</b> 186.20	76 <b>Os</b> 190.23	77 <b>Ir</b> 192.21	78 <b>Pt</b> 195.08	79 <b>Au</b> 196.96	80 <b>Hg</b> 200.59	81 <b>Tl</b> 204.38	82 <b>Pb</b> 207.2	83 <b>Bi</b> 208.98	84 <b>Po</b> (208.98)	85 <b>At</b> (209.98)	86 <b>Rn</b> (222.01)																																
7	87 <b>Fr</b> (223)	88 <b>Ra</b> (226)	89-103	104 <b>Rf</b> (261)	105 <b>Db</b> (262)	106 <b>Sg</b> (266)	107 <b>Bh</b> (264)	108 <b>Hs</b> (277)	109 <b>Mt</b> (268)	110 <b>Ds</b> (271)	111 <b>Rg</b> (272)	112 <b>Cn</b> (285)	113 <b>Uut</b> (284)	114 <b>F1</b> (289)	115 <b>Uup</b> (288)	116 <b>Lv</b> (292)	117 <b>Uus</b>	118 <b>Uuo</b> (294)																																

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

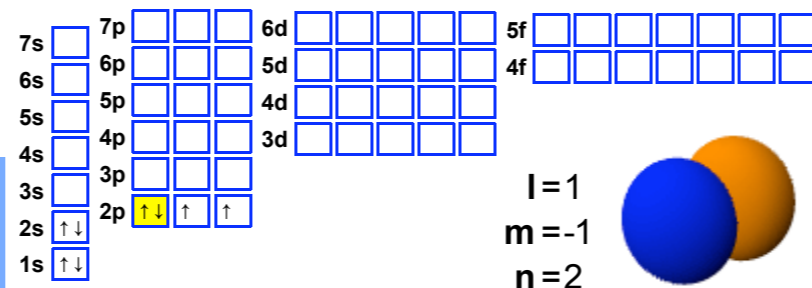
57 <b>La</b> 138.90	58 <b>Ce</b> 140.11	59 <b>Pr</b> 140.90	60 <b>Nd</b> 144.24	61 <b>Pm</b> (145)	62 <b>Sm</b> 150.36	63 <b>Eu</b> 151.96	64 <b>Gd</b> 157.25	65 <b>Tb</b> 158.92	66 <b>Dy</b> 162.50	67 <b>Ho</b> 164.93	68 <b>Er</b> 167.25	69 <b>Tm</b> 168.93	70 <b>Yb</b> 173.05	71 <b>Lu</b> 174.96
89 <b>Ac</b> (227)	90 <b>Th</b> 232.03	91 <b>Pa</b> 231.03	92 <b>U</b> 238.02	93 <b>Np</b> (237)	94 <b>Pu</b> (244)	95 <b>Am</b> (243)	96 <b>Cm</b> (247)	97 <b>Bk</b> (247)	98 <b>Cf</b> (251)	99 <b>Es</b> (252)	100 <b>Fm</b> (257)	101 <b>Md</b> (258)	102 <b>No</b> (259)	103 <b>Lr</b> (262)



# 周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 <b>H</b> 1	2 <b>He</b> 0																
2	3 <b>Li</b> 1	4 <b>Be</b> 2																
3	11 <b>Na</b> 1	12 <b>Mg</b> 2																
4	19 <b>K</b> 1	20 <b>Ca</b> 2	21 <b>Sc</b> 3	22 <b>Ti</b> 4	23 <b>V</b> 5	24 <b>Cr</b> 6	25 <b>Mn</b> 4	26 <b>Fe</b> 3	27 <b>Co</b> 4	28 <b>Ni</b> 4	29 <b>Cu</b> 2	30 <b>Zn</b> 2	31 <b>Ga</b> 3	32 <b>Ge</b> 4	33 <b>As</b> 5	34 <b>Se</b> 6	35 <b>Br</b> 7	36 <b>Kr</b> 4
5	37 <b>Rb</b> 1	38 <b>Sr</b> 2	39 <b>Y</b> 3	40 <b>Zr</b> 4	41 <b>Nb</b> 5	42 <b>Mo</b> 6	43 <b>Tc</b> 7	44 <b>Ru</b> 6	45 <b>Rh</b> 6	46 <b>Pd</b> 4	47 <b>Ag</b> 4	48 <b>Cd</b> 2	49 <b>In</b> 3	50 <b>Sn</b> 4	51 <b>Sb</b> 5	52 <b>Te</b> 6	53 <b>I</b> 7	54 <b>Xe</b> 6
6	55 <b>Cs</b> 3	56 <b>Ba</b> 2	57-71 Lanthanides	72 <b>Hf</b> 4	73 <b>Ta</b> 5	74 <b>W</b> 6	75 <b>Re</b> 7	76 <b>Os</b> 7	77 <b>Ir</b> 6	78 <b>Pt</b> 6	79 <b>Au</b> 7	80 <b>Hg</b> 2	81 <b>Tl</b> 3	82 <b>Pb</b> 4	83 <b>Bi</b> 5	84 <b>Po</b> 6	85 <b>At</b> 7	86 <b>Rn</b> 6
7	87 <b>Fr</b> 3	88 <b>Ra</b> 2	89-103 Actinides	104 <b>Rf</b> 4	105 <b>Db</b> 5	106 <b>Sg</b> 6	107 <b>Bh</b> 7	108 <b>Hs</b> 7	109 <b>Mt</b> 6	110 <b>Ds</b> 6	111 <b>Rg</b> 7	112 <b>Cn</b> 2	113 <b>Uut</b> 3	114 <b>Fl</b> 4	115 <b>Uup</b> 5	116 <b>Lv</b> 6	117 <b>Uus</b> 7	118 <b>Uuo</b> 6

8  
**O**  
酸素  
15.9994  
[He]2s<sup>2</sup> 2p<sup>4</sup>



For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

57 <b>La</b> 3	58 <b>Ce</b> 4	59 <b>Pr</b> 4	60 <b>Nd</b> 3	61 <b>Pm</b> 3	62 <b>Sm</b> 3	63 <b>Eu</b> 3	64 <b>Gd</b> 3	65 <b>Tb</b> 4	66 <b>Dy</b> 3	67 <b>Ho</b> 3	68 <b>Er</b> 3	69 <b>Tm</b> 3	70 <b>Yb</b> 3	71 <b>Lu</b> 3
89 <b>Ac</b> 3	90 <b>Th</b> 4	91 <b>Pa</b> 5	92 <b>U</b> 6	93 <b>Np</b> 6	94 <b>Pu</b> 6	95 <b>Am</b> 4	96 <b>Cm</b> 4	97 <b>Bk</b> 4	98 <b>Cf</b> 4	99 <b>Es</b> 4	100 <b>Fm</b> 3	101 <b>Md</b> 3	102 <b>No</b> 3	103 <b>Lr</b> 3

# 元素周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 氢	Atomic Sym																	2 氦
2	3 锂	4 铍	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">                     1 氢 Hydrogen 1.00794 1s<sup>1</sup> </div> <div> <span style="border: 1px solid orange; padding: 2px;">α</span> A衰变  <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">p</span> Proton emission  <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">n</span> Neutron emission  <span style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">SF</span> Spontaneous fission                 </div> <div> <span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">β</span> β衰变  <span style="border: 1px solid purple; padding: 2px;">β+</span> Beta+ decay  <span style="border: 1px dashed purple; padding: 2px;">EC</span> Electron capture  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">□</span> Stable                 </div> </div>															10 氖	
3	11 钠	12 镁	Selected All															18 氩	
4	19 钾	20 钙	21 钪	22 钛	23 钒	24 铬	25 锰	26 铁	27 钴	28 镍	29 铜	30 锌	31 镓	32 锗	33 砷	34 硒	35 溴	36 氪	
5	37 铷	38 锶	39 钇	40 锆	41 铌	42 钼	43 锝	44 钨	45 铼	46 钨	47 铟	48 锡	49 铊	50 铅	51 铟	52 碲	53 碘	54 氙	
6	55 铯	56 钡	57-71 镧系	72 铪	73 钽	74 钨	75 铼	76 钨	77 铱	78 铂	79 金	80 汞	81 铊	82 铅	83 铋	84 钋	85 砹	86 氡	
7	87 钫	88 镭	89-103 锕系	104 镱	105 铷	106 铪	107 铱	108 铂	109 金	110 汞	111 铊	112 铅	113 铋	114 钋	115 铊	116 钋	117 砹	118 奥	

铱

镅

这些原理没有一致稳定的同位素,大量的同位素最长的半衰期

元素周期表 设计版权 © 1997 Michael Dayah. <http://www.dayah.com> d: May 30, 2008

57 镧	58 铈	59 镨	60 钕	61 钐	62 铈	63 镧	64 铈	65 铈	71 镧	
89 钪	90 钪	91 钪	92 钪	93 钪	94 钪	95 钪	96 钪	97 钪	102 钪	103 钪



## 周期表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1.0079																	2 He 4.0026
2 Li 6.941	3 Be 9.0121											4 B 10.811	5 C 12.010	6 N 14.006	7 O 15.999	8 F 18.998	9 Ne
3 Na 22.989	10 Mg 24.305											13 Al 26.981	14 Si 28.085	15 P 30.973	16 S 32.065	17 Cl	18 Ar
4 K 39.098	19 Ca 40.078	20 Sc	21 Ti 47.867	22 V 50.941	23 Cr 51.996	24 Mn 54.938	25 Fe 55.845	26 Co 58.933	27 Ni 58.693	28 Cu 63.546	29 Zn 65.38	30 Ga 69.723	31 Ge 72.64	32 As 74.921	33 Se 78.96	34 Br	35 Kr
5 Rb 85.467	37 Sr 87.62	38 Y	39 Zr 91.224	40 Nb 92.906	41 Mo 95.96	42 Tc	43 Ru 96.906	44 Rh 101.07	45 Pd 106.32	46 Ag 107.868	47 Cd 112.411	48 In 114.818	49 Sn 118.710	50 Sb 121.757	51 Te 127.60	52 I	53 Xe
6 Cs 132.905	55 Ba 137.327	56 La	57-71 Hf 178.49	72 Ta 180.948	73 W 183.84	74 Re 186.207	75 Os 190.23	76 Ir 192.22	77 Pt 195.084	78 Au 196.967	79 Hg 200.59	80 Tl 204.384	81 Pb 207.2	82 Bi 208.980	83 Po (209)	84 At	85 Rn
7 Fr (223)	87 Ra (226)	88 Ac	89-103 Rf (261)	104 Db (262)	105 Sg (266)	106 Bh (264)	107 Hs (277)	108 Mt (268)	109 Ds (271)	110 Rg (272)	111 Cn (285)	112 Nh (284)	113 Fl (289)	114 Mc (288)	115 Lv (292)	116 Ts (294)	117 Og (294)
超重元素																	
周期表 Design and Interface C...																	
57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.242	61 Pm	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.254	65 Tb 158.925	66 Dy 162.503	67 Ho 164.930	68 Er 167.255	69 Tm 168.933	70 Yb 173.054	71 Lu 174.967			
89 Ac (227)	90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)			

113 Nh  
Nihonium  
铈

116 Lv  
Livermorium  
鉷

114 Fl  
Flerovium  
鈇

鎢

砷

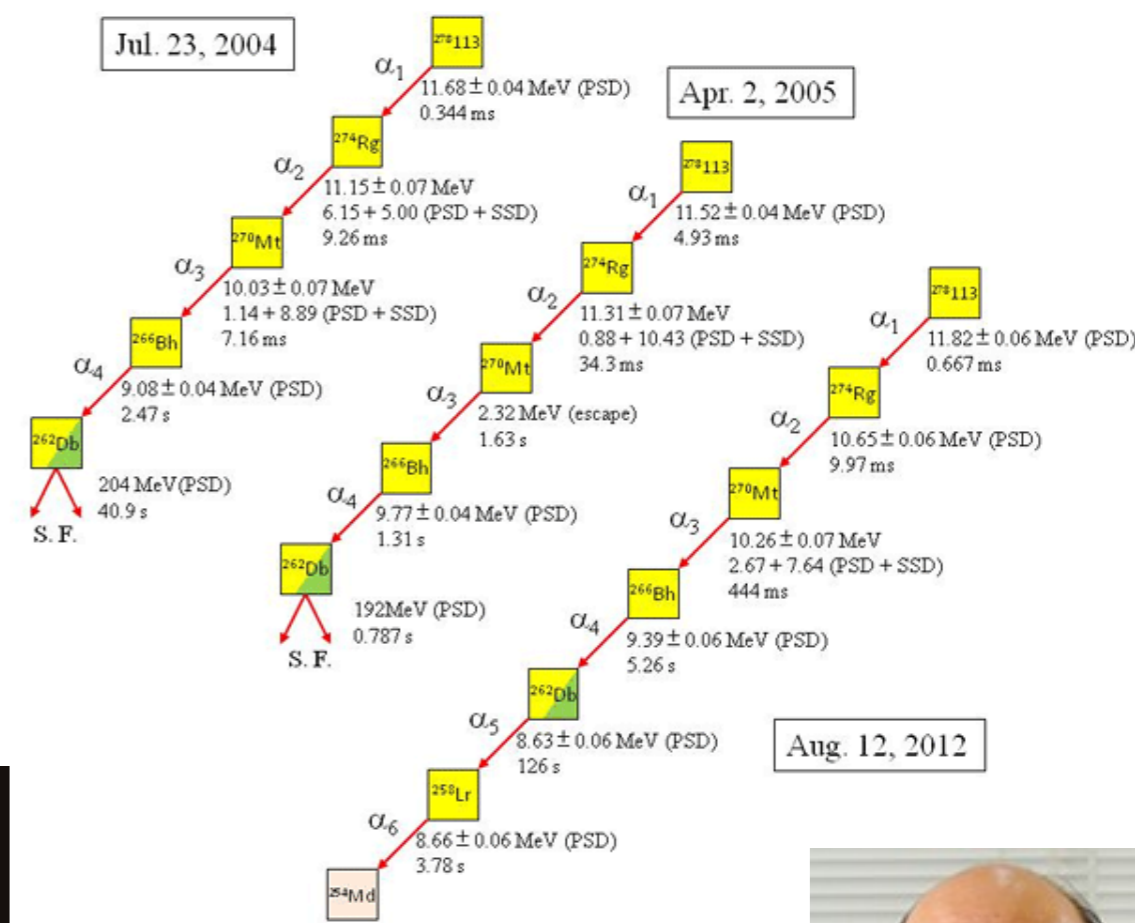
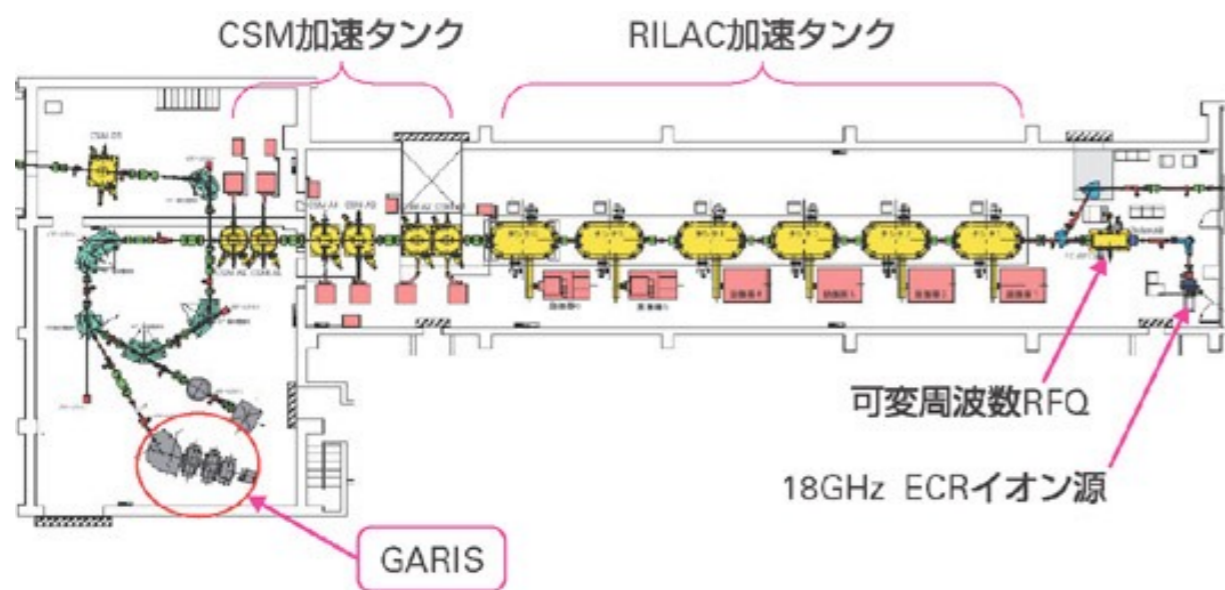
氮

米口の共同研究

ロシア合同原子核研究所の原子核反応研究室創設者 Georjy Flërov  
米国 Lawrence-Livermore 国立研究所

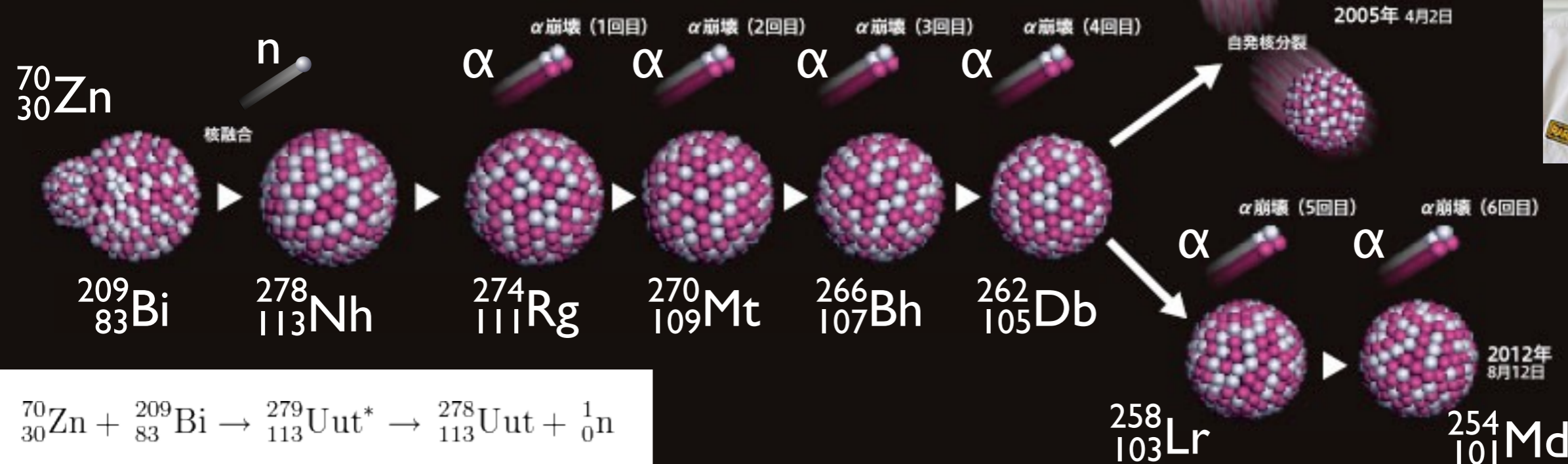
# 超重元素 $_{113}\text{Nh}$ ニホニウム 生成

2004, 05, 12年、理研 森田浩介氏ら



## $^{278}_{113}\text{Nh}$ の合成と崩壊の様子

原子番号30の亜鉛 ( $^{70}\text{Zn}$ ) と原子番号83のビスマス ( $^{209}\text{Bi}$ ) が核融合を起こし、原子番号113の $^{278}_{113}\text{Nh}$ が合成された。2004年と2005年に合成した113番元素 ( $^{278}_{113}\text{Nh}$ ) は、4回の $\alpha$ 崩壊を繰り返し、原子番号105のドブニウム ( $^{262}_{105}\text{Db}$ ) は自発核分裂を起こして2個の原子核となった。2012年に合成した $^{278}_{113}\text{Nh}$ は、 $^{262}\text{Db}$ からさらに2回の $\alpha$ 崩壊を繰り返し、原子番号103のローレンシウム ( $^{258}_{103}\text{Lr}$ )、原子番号101のメンデレビウム ( $^{254}_{101}\text{Md}$ ) となった。3個の $^{278}_{113}\text{Nh}$ の崩壊の様子から、113番元素の平均寿命は2ミリ秒であることが分かった。



## 自発核分裂

2004年 7月23日  
2005年 4月2日

2012年 8月12日



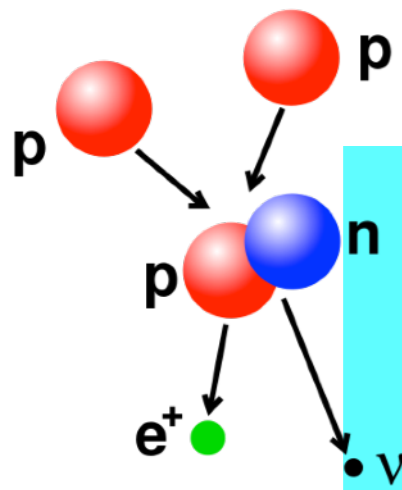
# Periodic Table of Elements

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																																	
1	1 H 1 1.00794	<table border="0"> <tr> <td>Name</td> <td>Hydrogen-3</td> <td><b>α</b></td> <td>Alpha decay</td> <td><b>β</b></td> <td>Beta decay</td> <td>Selected</td> <td>All</td> </tr> <tr> <td>Mass</td> <td>3.01604927767</td> <td><b>p</b></td> <td>Proton emission</td> <td><b>β+</b></td> <td>Beta+ decay</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Binding Energy</td> <td>2.827266</td> <td><b>n</b></td> <td>Neutron emission</td> <td><b>EC</b></td> <td>Electron capture</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Abundance</td> <td>0%</td> <td><b>SF</b></td> <td>Spontaneous fission</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Stable</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Half-Life</td> <td>12.32 y</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Decay Width</td> <td>1.174e-30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>																	Name	Hydrogen-3	<b>α</b>	Alpha decay	<b>β</b>	Beta decay	Selected	All	Mass	3.01604927767	<b>p</b>	Proton emission	<b>β+</b>	Beta+ decay			Binding Energy	2.827266	<b>n</b>	Neutron emission	<b>EC</b>	Electron capture			Abundance	0%	<b>SF</b>	Spontaneous fission	<input type="checkbox"/>	Stable			Half-Life	12.32 y							Decay Width	1.174e-30							2 He 2
Name	Hydrogen-3	<b>α</b>	Alpha decay	<b>β</b>	Beta decay	Selected	All																																																												
Mass	3.01604927767	<b>p</b>	Proton emission	<b>β+</b>	Beta+ decay																																																														
Binding Energy	2.827266	<b>n</b>	Neutron emission	<b>EC</b>	Electron capture																																																														
Abundance	0%	<b>SF</b>	Spontaneous fission	<input type="checkbox"/>	Stable																																																														
Half-Life	12.32 y																																																																		
Decay Width	1.174e-30																																																																		
2	3 Li 2 6.941	4 Be 2 9.012182	5 B 2 10.811	6 C 3 12.0107	7 N 3 14.0064	8 O 3 15.999	9 F 2 18.998	10 Ne 3 20.1797																																																											
3	11 Na 2 22.989769	12 Mg 3 24.304											13 Al 2 26.981538	14 Si 4 28.0855	15 P 3 30.973762	16 S 5 32.06	17 Cl 3 35.453	18 Ar 7 39.948																																																	
4	19 K 3 39.0983	20 Ca 9 40.078	21 Sc 5 (44.955912)	22 Ti 6 47.88	23 V 4 50.9415	24 Cr 5 51.9961	25 Mn 4 54.938	26 Fe 7 55.845	27 Co 5 58.9332	28 Ni 8 58.6934	29 Cu 2 63.546	30 Zn 7 65.38	31 Ga 2 69.723	32 Ge 7 72.630	33 As 3 74.9216	34 Se 9 78.96	35 Br 2 79.904	36 Kr 9 83.80																																																	
5	37 Rb 5 85.4678	38 Sr 9 87.62	39 Y 5 (88.905848)	40 Zr 8 91.224	41 Nb 5 92.90638	42 Mo 9 95.94	43 Tc 5 (98.90625)	44 Ru 10 101.07	45 Rh 5 101.07	46 Pd 9 106.36	47 Ag 6 107.8682	48 Cd 11 112.411	49 In 2 114.818	50 Sn 11 118.710	51 Sb 3 121.757	52 Te 11 127.6	53 I 3 126.905	54 Xe 13 131.29																																																	
6	55 Cs 4 132.90545	56 Ba 8 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 8 178.49	73 Ta 7 180.94788	74 W 7 183.84	75 Re 2 186.207	76 Os 11 190.23	77 Ir 7 192.222	78 Pt 9 195.084	79 Au 5 196.96657	80 Hg 11 200.59	81 Tl 3 204.3833	82 Pb 6 207.2	83 Bi 3 208.9804	84 Po 3 (209)	85 At 1 (210)	86 Rn 2 (222)																																																	
7	87 Fr 3 (223)	88 Ra 4 (226)	89-103 Actinides	104 Rf 1 (261)	105 Db 1 (262)	106 Sg 1 (263)	107 Bh 2 (264)	108 Hs 2 (265)	109 Mt 1 (266)	110 Ds 1 (271)	111 Rg 1 (272)	112 Cn 1 (285)	113 Nh 1 (286)	114 Fl 1 (289)	115 Mc 1 (290)	116 Lv 1 (293)	117 Ts 1 (294)	118 Og 1 (294)																																																	

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Periodic Table Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

57 La 3	58 Ce 8	59 Pr 3	60 Nd 7	61 Pm 3	62 Sm 8	63 Eu 4	64 Gd 7	65 Tb 3	66 Dy 8	67 Ho 5	68 Er 11	69 Tm 5	70 Yb 11	71 Lu 4
89 Ac 3	90 Th 6	91 Pa 6	92 U 6	93 Np 3	94 Pu 6	95 Am 3	96 Cm 8	97 Bk 5	98 Cf 7	99 Es 4	100 Fm 4	101 Md 3	102 No 3	103 Lr 1



# Periodic Table of Elements

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Name: Hydrogen-3  
 Mass: 3.01604927767  
 Alpha decay:  $\alpha$   
 Beta decay:  $\beta$   
 Selected: All  
 He-2: 2

陽子 p  
 重陽子 d = (pn)  
 三重陽子 t = (pnn)  
**原子核**  
 アルファ粒子  
 $\alpha = (ppnn)$   
 ${}^3\text{He}^{++} = h = (ppn)$

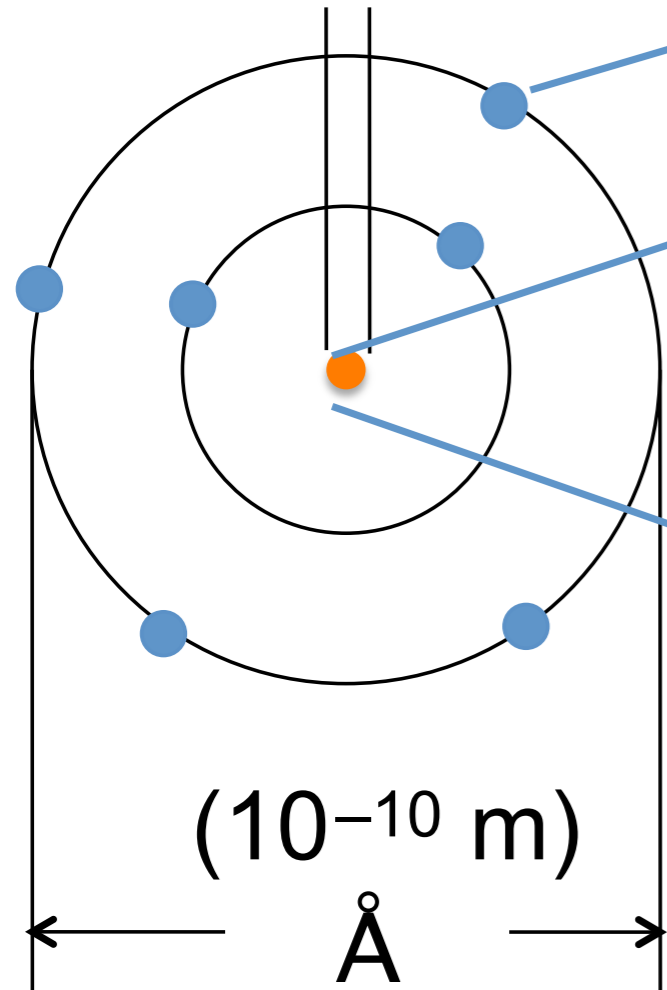
H	Hydrogen	水素	氫 qīng
${}^1\text{H}$ (H)	Protium	軽水素	気 piē
${}^2\text{H}$ (D)	Deuterium	重水素	気 dāo
${}^3\text{H}$ (T)	Tritium	三重水素	気 chuān
He	Helium	ヘリウム	氦 hài
${}^4\text{He}$	Helium-4	ヘリウム4	
${}^3\text{He}$	Helium-3	ヘリウム3	<b>原子</b>



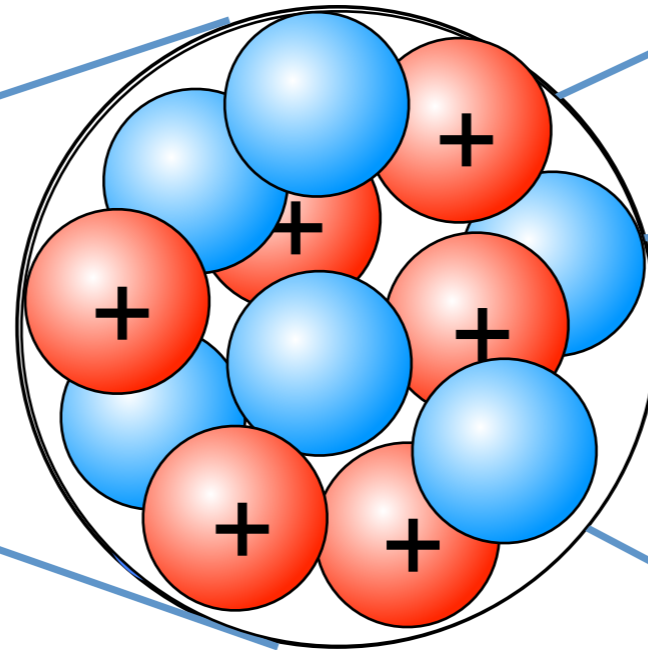
# 原子と原子核

( $10^{-15} - 10^{-14}$  m)  
1 - 10 fm

軌道電子

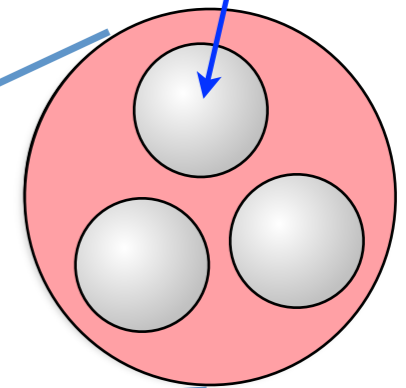


原子

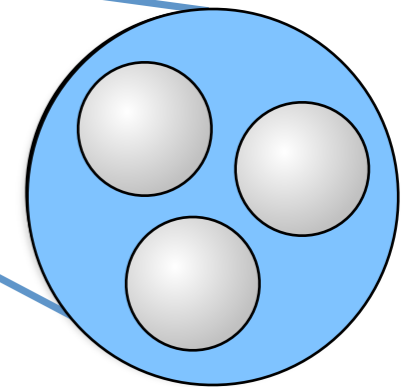


原子核

クォーク



陽子



中性子

炭素原子  ${}^6_{12}\text{C}$  の模式図

# 放射性物質とは

放射性核種  
= 放射性同位体  
= 不安定原子核

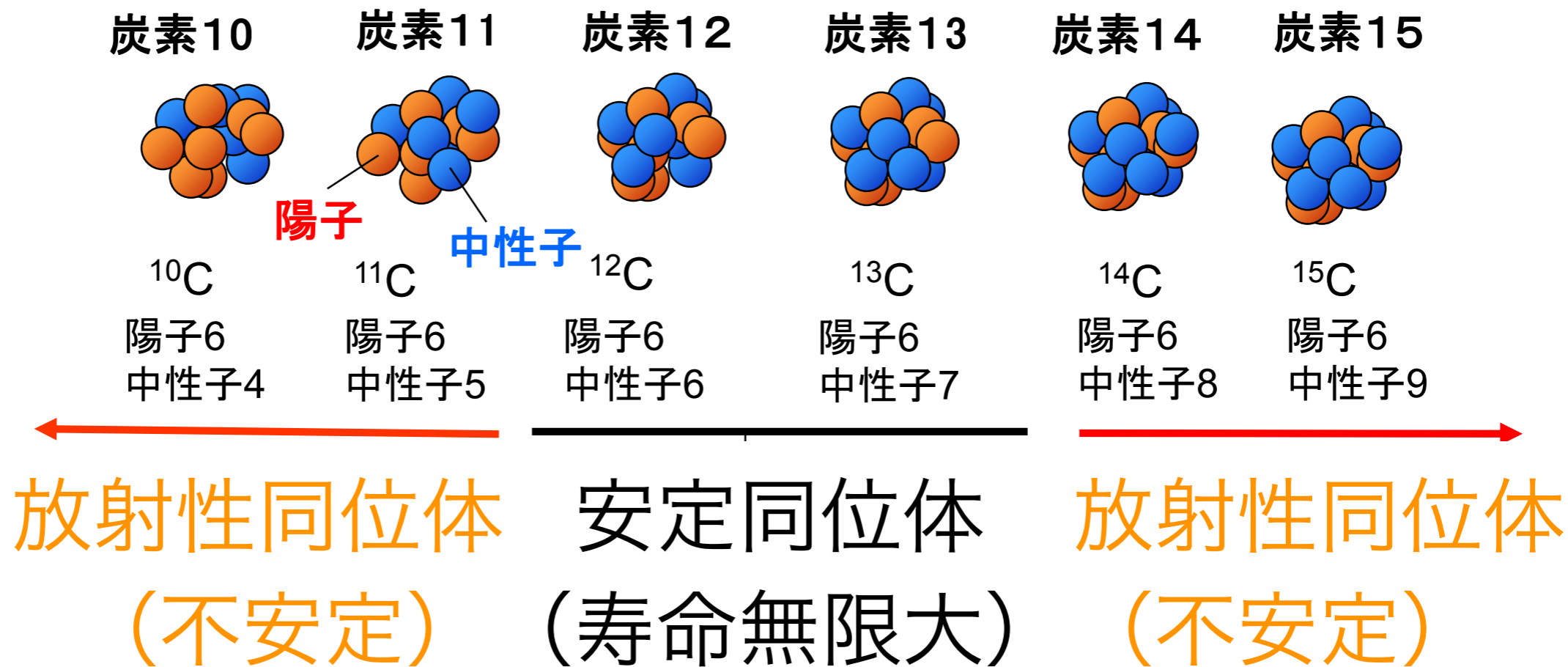
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



陽子数  $Z$  が同じなら化学的には同じ元素  
中性子数  $N$  が違う原子核が多種存在する

炭素原子核の例





# 核種の表記法

nuclide



C-12

炭素12

# 同位体 (原子番号(=陽子数)は同じで中性子数が異なる**原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ

半減期

19.3秒

20.3分

99%

1%

存在比

5730年

2.4秒

炭素10

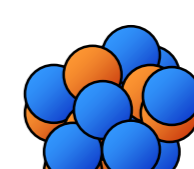
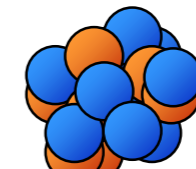
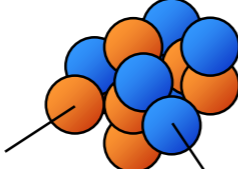
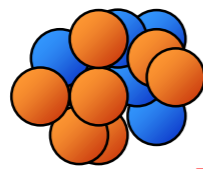
炭素11

炭素12

炭素13

炭素14

炭素15



陽子

中性子

$^{10}\text{C}$

$^{11}\text{C}$

$^{12}\text{C}$

$^{13}\text{C}$

$^{14}\text{C}$

$^{15}\text{C}$

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

中性子4

中性子5

中性子6

中性子7

中性子8

中性子9

陽子過剰になると？

(寿命がある:  $\beta^+$ 壊変、電子捕獲(EC))

天然に存在=**安定同位体**  
寿命が無限大

中性子過剰になると？

(寿命がある:  $\beta^-$ 壊変)

**放射性同位体**

半減期

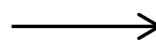
5730 ± 40年



中性子

炭素14

(放射性同位体)



陽子

窒素14

(安定)

+  $e^-$

電子

( $\beta$ 線:放射線)

+  $\bar{\nu}_e$

反ニュートリノ

**放射性同位体**

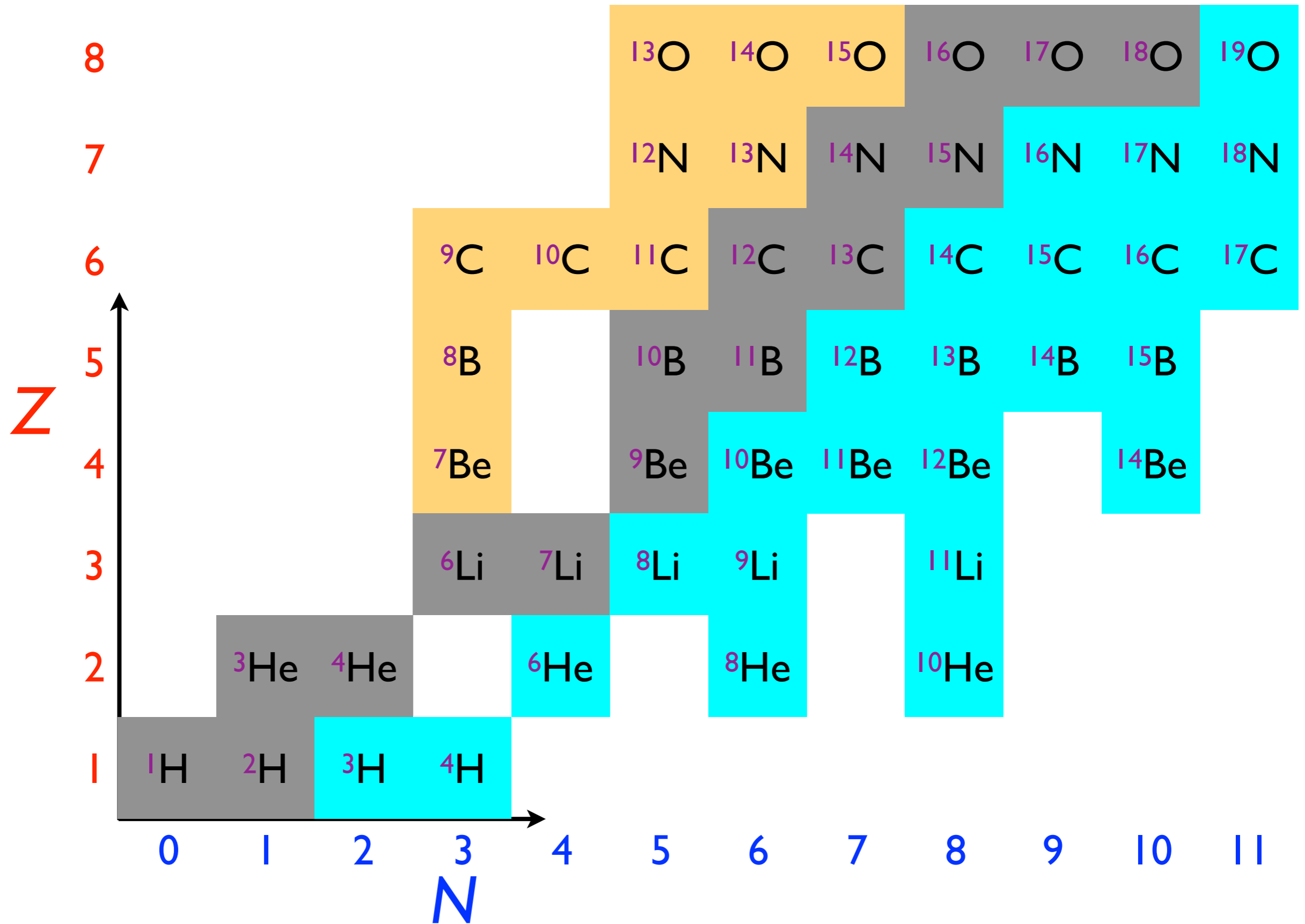
ベータマイナス壊変 (崩壊)

$\beta^-$  decay





# 核图表



# Nuclear Science

**Nuclear Science** is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations of protons and neutrons are possible? What happens when nuclei are compressed or rapidly cooled? What is the origin of the nuclei found on Earth?"

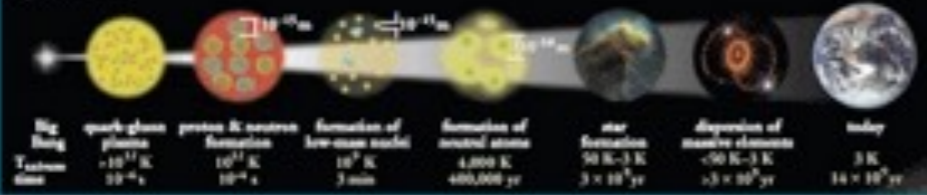
**Legend**

- electron ( $e^-$ )
- quark
- gluon field
- photon
- neutrino ( $\nu$ )
- gluon
- photon ( $\gamma$ )
- neutrino ( $\bar{\nu}$ )
- photon ( $\gamma$ )
- Nucleon =  $A - Z$

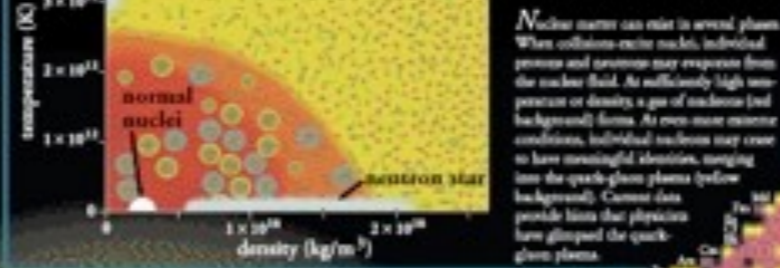
$A$  Atomic Number = 14  
 $Z$  Atomic Number = 6  
 $C$

## Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about  $10^{-35}$  second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe,  $T_{universe}$ , cooled to about  $10^{12}$  K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding stars (supernovae) from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.



## Phases of Nuclear Matter



## Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei far from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclides. Nuclear theory predicts that there are at least 4000 more to be discovered with  $Z \leq 112$ .



## Radioactivity

**Alpha Decay** (alpha particle)  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$

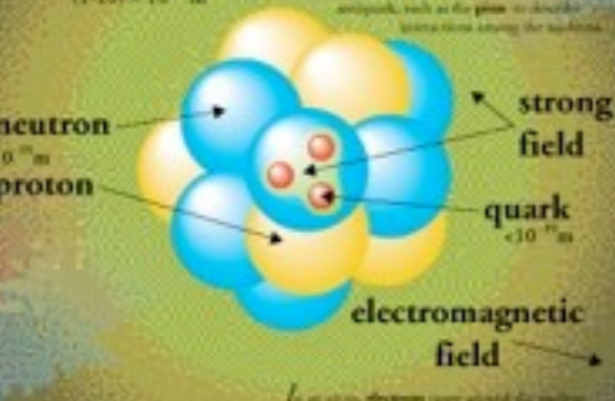
**Beta Minus Decay** (beta particle)  ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$

**Beta Plus Decay** (beta particle)  ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu$

**Gamma Decay** (gamma ray)  ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a  ${}^4_2\text{He}$  nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino for a proton and neutron) or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the name for the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

## The Nucleus



As the source of the element's stability depends on the number of protons and neutrons, each nucleon is made from three quarks held together by strong interactions, which are mediated by gluons. In turn, the nucleon is held together by the strong interaction between the gluons and quarks that compose the nucleon. Nuclear physicists often use the term "strong field" to describe the interactions between quarks and gluons within the nucleus. In an alpha particle, two protons and two neutrons are bound together by the strong interaction. The strong interaction is a type of force that binds quarks together to form protons and neutrons. It is the strongest of the four fundamental forces, but it only acts over a very short range. The strong force is what holds the nucleus together, preventing the protons from repelling each other due to their positive charges. The strong force is also what holds the quarks together to form protons and neutrons. The strong force is a type of force that binds quarks together to form protons and neutrons. It is the strongest of the four fundamental forces, but it only acts over a very short range. The strong force is what holds the nucleus together, preventing the protons from repelling each other due to their positive charges. The strong force is also what holds the quarks together to form protons and neutrons.

## Nuclear Energy

**Fission**  ${}^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow {}^{141}_{54}\text{Xe} + {}^{92}_{38}\text{Sr} + 2n$

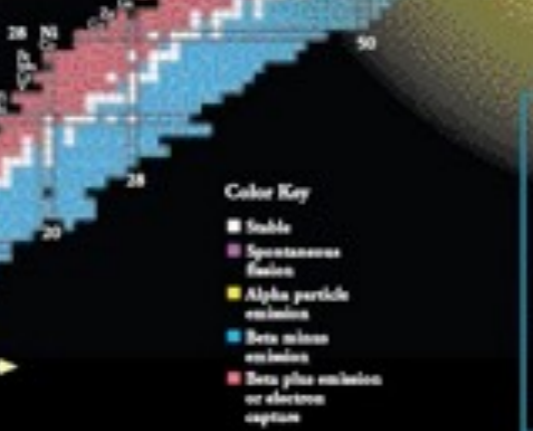
**Fusion**  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$

**Sun** photon

In the early stages of nuclear evolution, our sun and other stars, hydrogen fuses to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stages of nuclear evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of neutrinos that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that neutrinos must have a mass greater than zero.

## Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number,  $Z$ , and neutron number,  $N$ . Each nuclide is represented by a box colored according to its predominant decay mode. Magic numbers ( $N$  or  $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$  and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major closed shells and show regions of greater nuclear binding energy.



## Applications

**Radioactive Dating**  
Naturally occurring radioactive isotopes such as  ${}^{14}\text{C}$  are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of willows found at the site, scientists determined that the bridge was built nearly 4,000 years ago.

**Smoke Detectors**  
Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter  ${}^{241}\text{Am}$  to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.

**Nuclear Medicine**  
Radioactive isotopes, such as  ${}^{99m}\text{Tc}$ ,  ${}^{131}\text{I}$ , and  ${}^{18}\text{F}$ , are commonly used in the diagnosis and treatment of illness. Positron emission tomography (PET) uses  ${}^{18}\text{F}$  and is used to diagnose brain tumors.

**Space Exploration**  
Cesium-137 and alpha particles in specially designed detectors provide information on Mars. On Earth, nuclear reactors are used to study some form of natural phenomenon or an environment.

**Nuclear Reactors**  
Nuclear reactors are the basis of  ${}^{235}\text{U}$  or  ${}^{239}\text{Pu}$  nuclei to produce electric power. Reactors will meet other nuclear applications generate radioactive waste. Disposal of the waste is a subject of current research.

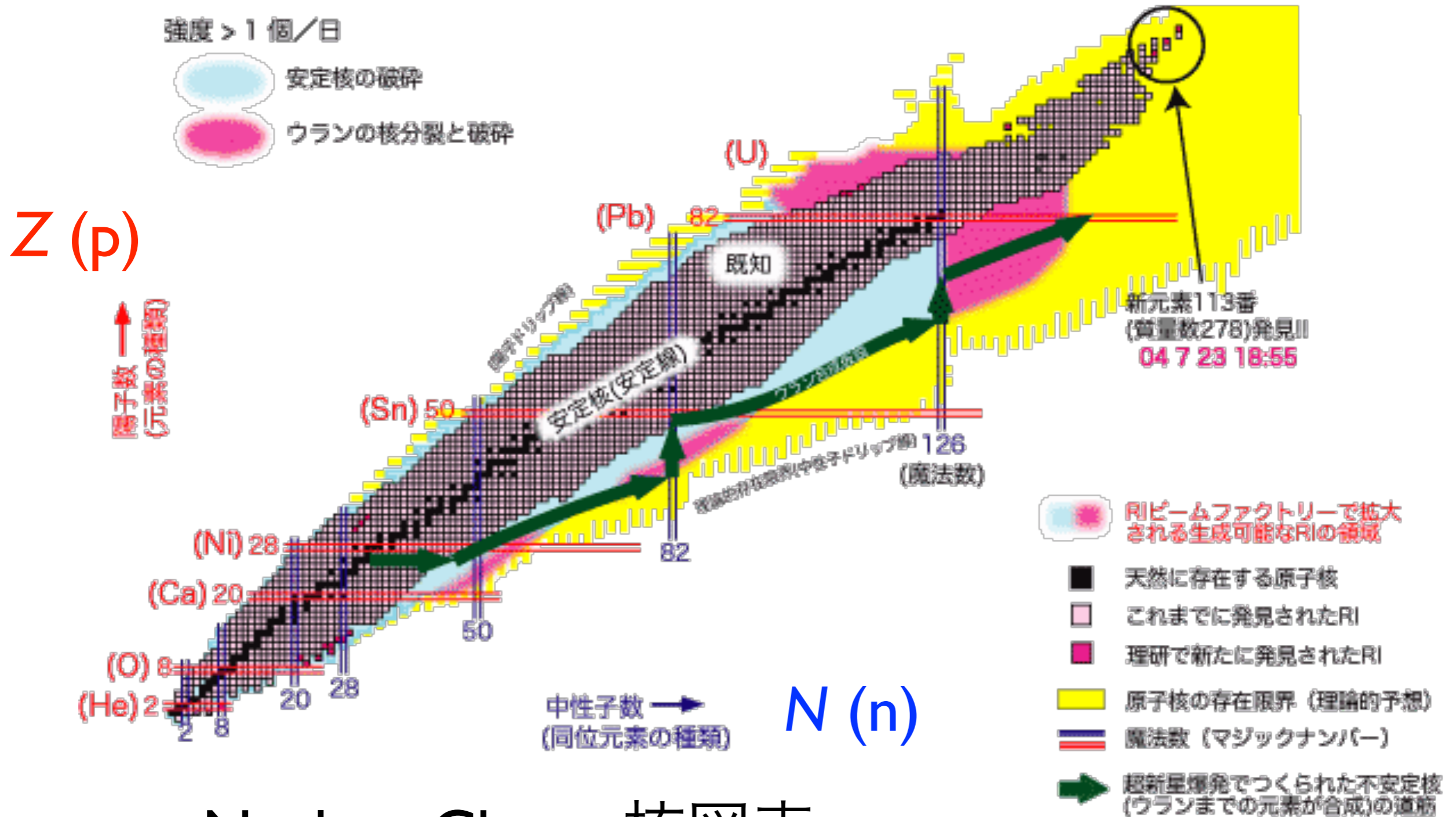
**Magnetic Resonance Imaging**  
Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of atomic transitions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. This technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org





# RIKEN



## Nuclear Chart 核図表

# 核種の数

安定核種

約300種

実験的に確認

3000種

理論的に予想

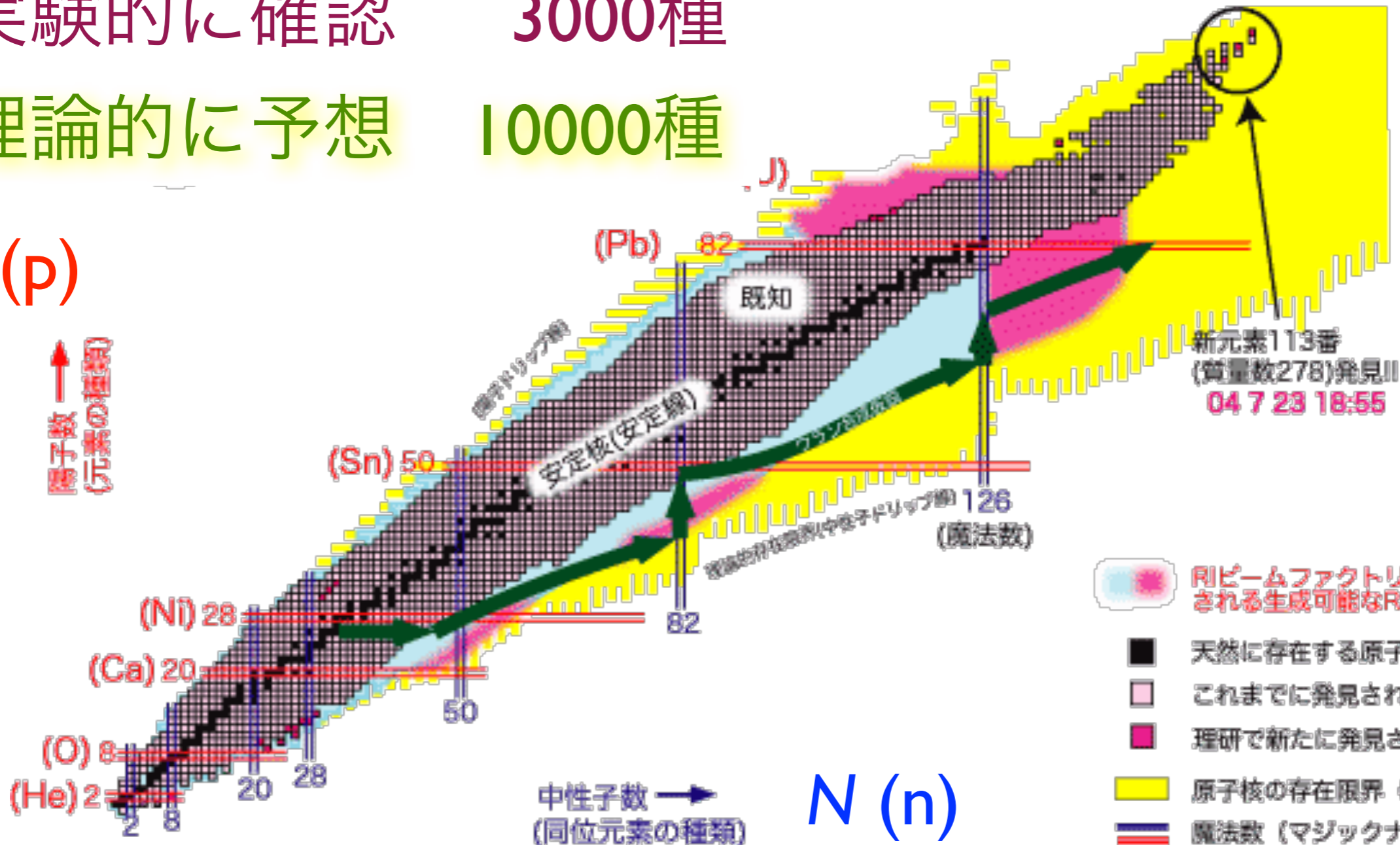
10000種

# 原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p)

↑  
陽子数  
(元素の種類)



新元素113番  
(質量数278)発見!!  
04 7 23 18:55

中性子数 → N (n)  
(同位元素の種類)

Nuclear Chart 核図表



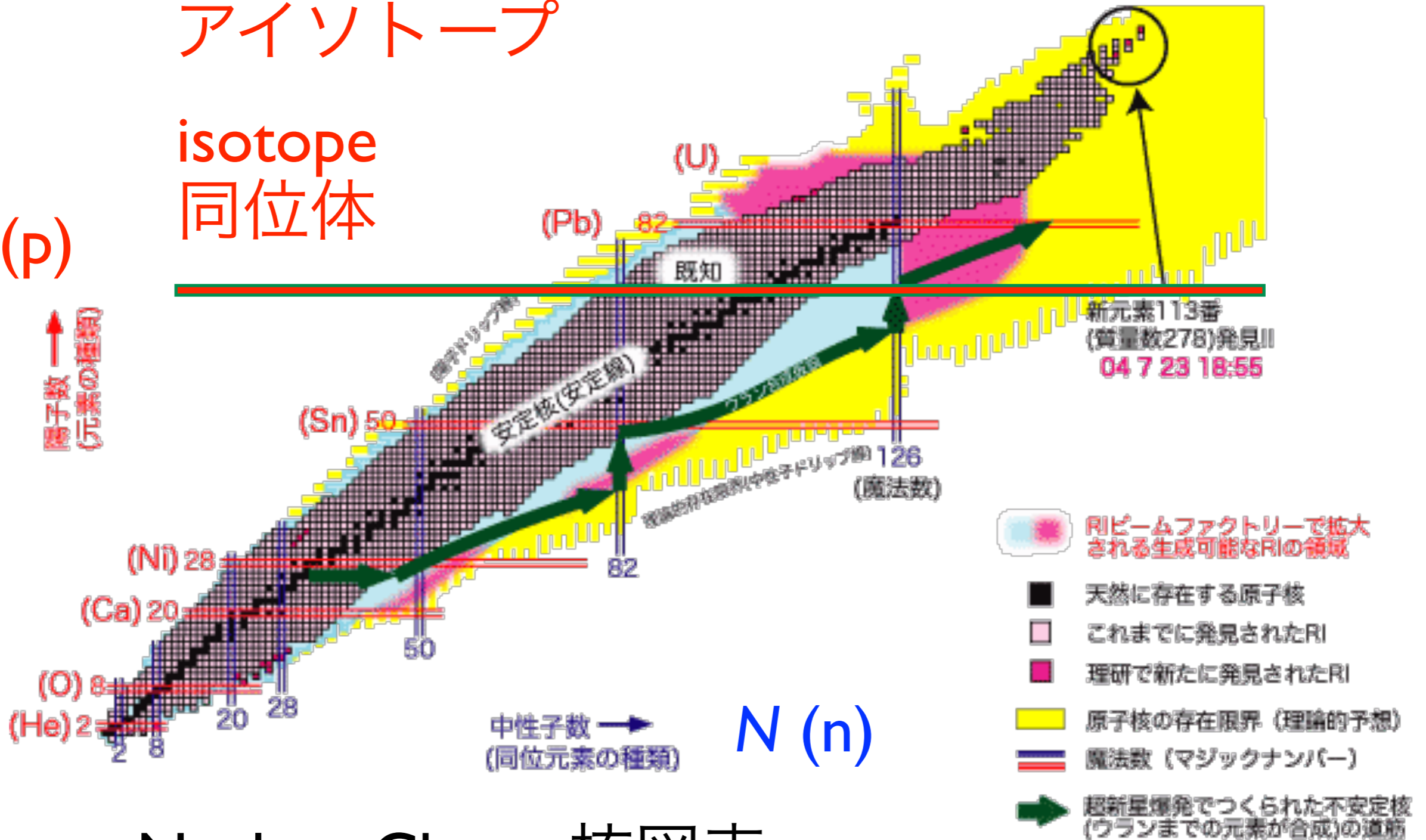
# 原子核物理学

## Nuclear Physics

アイソトープ

isotope  
同位体

Z (p)



Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

Nuclear Physics

$\beta$  崩壊

isobar  
同重体

$\alpha$  崩壊

isodiapher  
同余体

isotone  
同調体

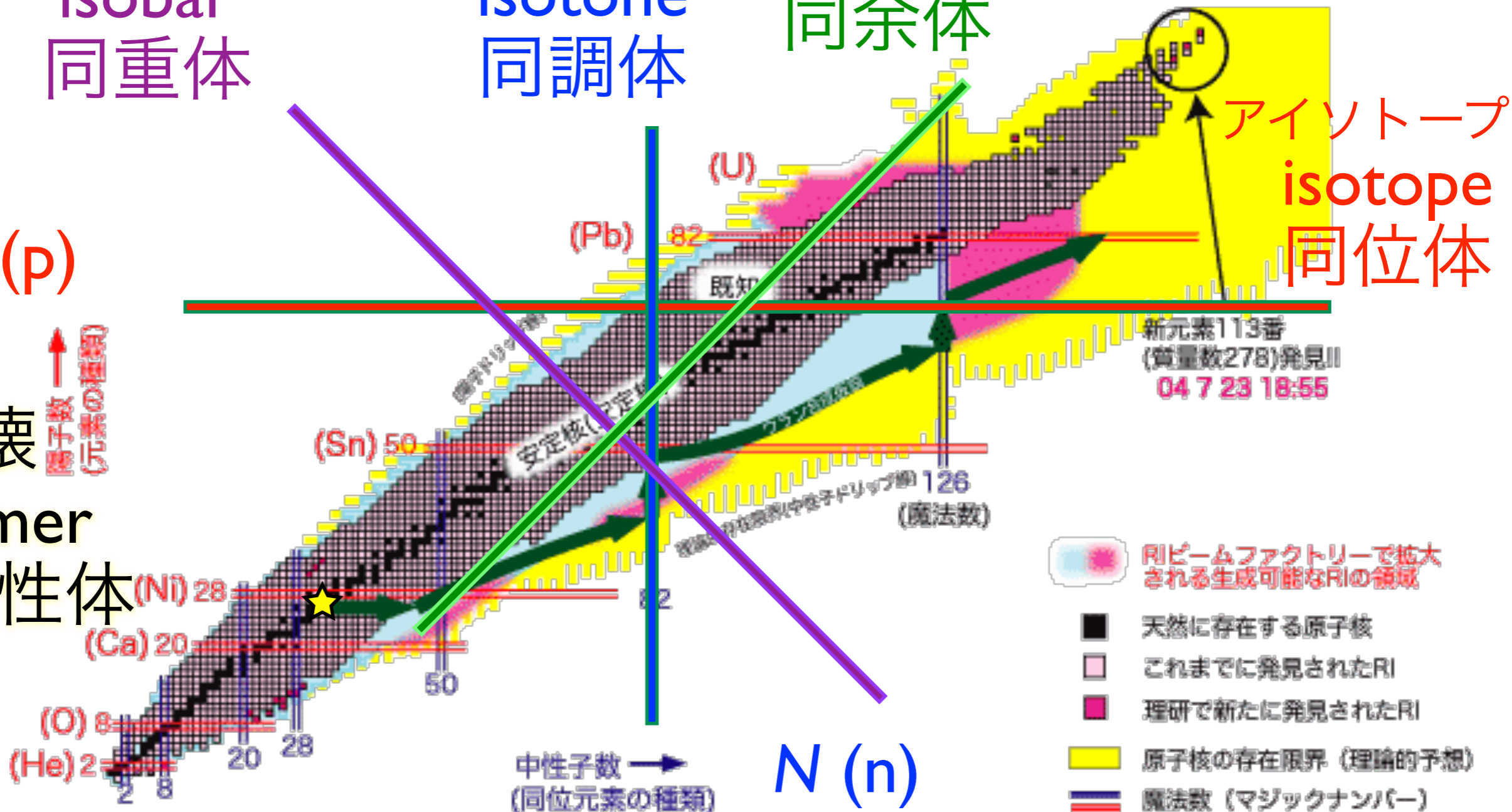
$Z (p)$

↑ 原子種 (元素の種類)  
↑ 原子数

$\gamma$  崩壊

isomer

核異性体



Nuclear Chart 核図表

- RIビームファクトリーで拡大される生成可能なRIの領域
- 天然に存在する原子核
- これまでに発見されたRI
- 理研で新たに発見されたRI
- 原子核の存在限界 (理論的予想)
- 魔法数 (マジックナンバー)
- 超新星爆発でつくられた不安定核 (ウランまでの元素が合成)の道筋



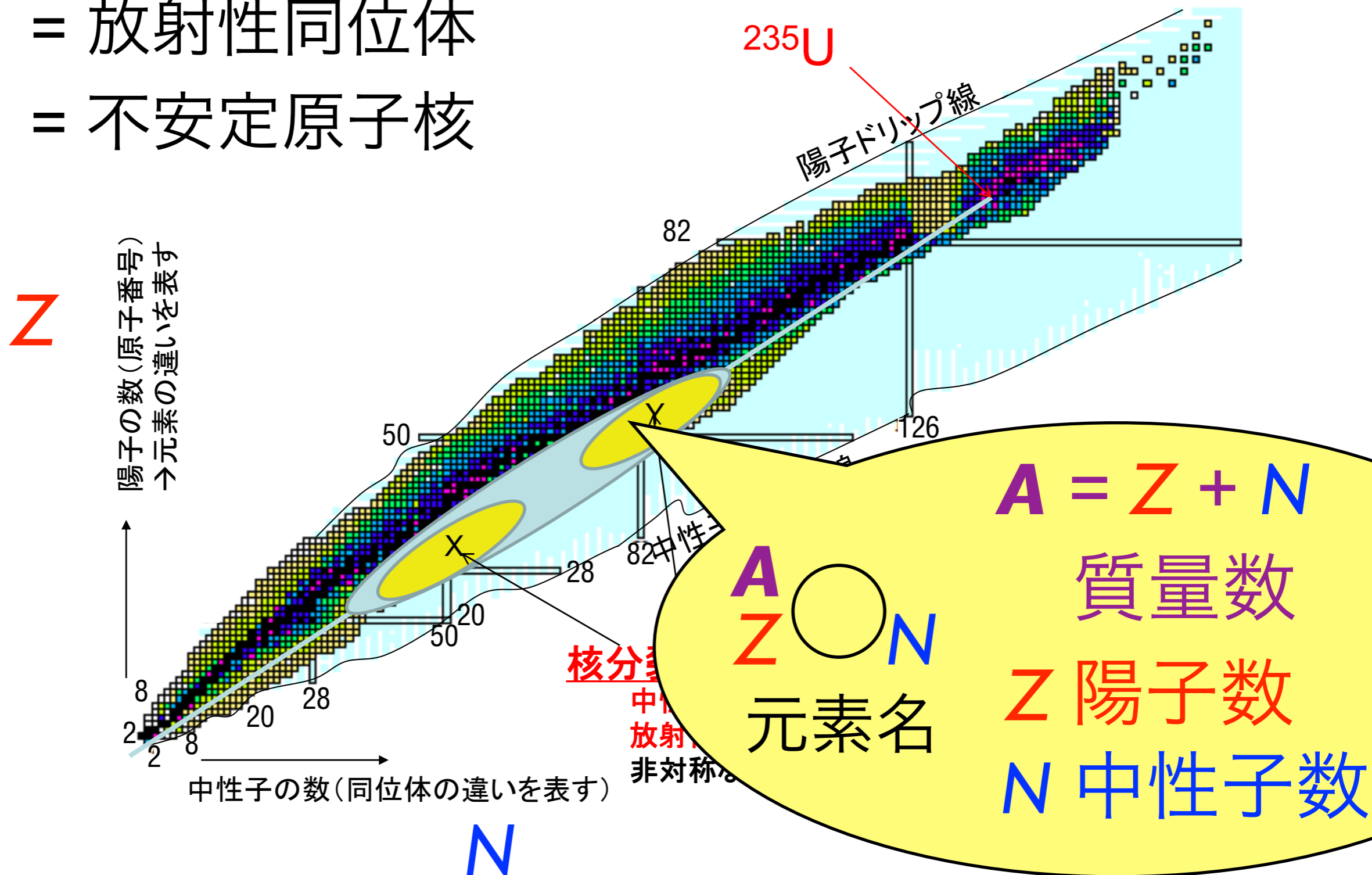
# 放射性物質とは

放射性核種

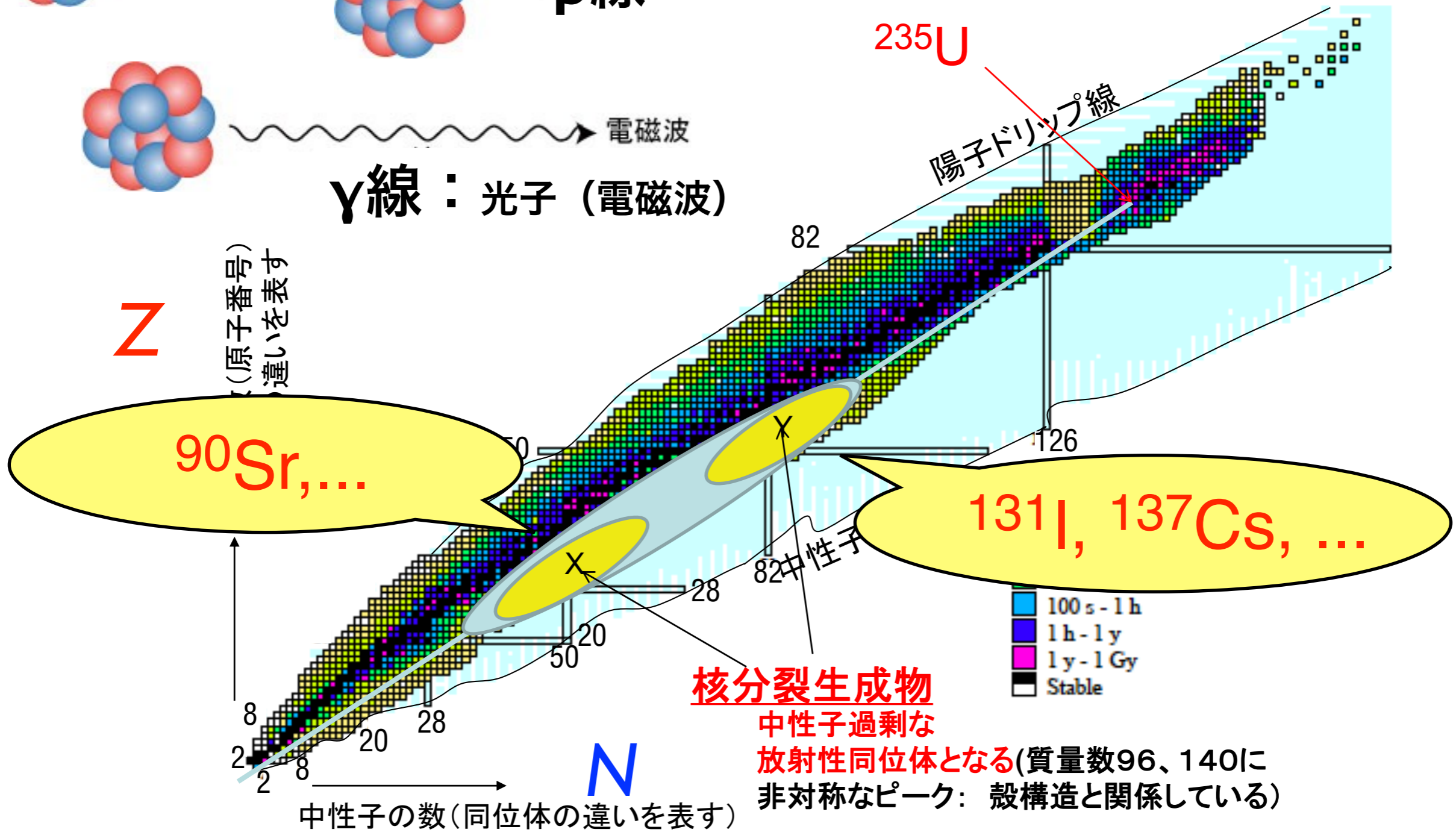
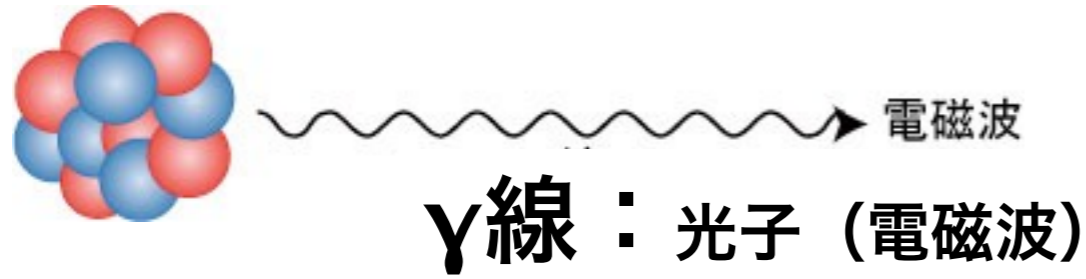
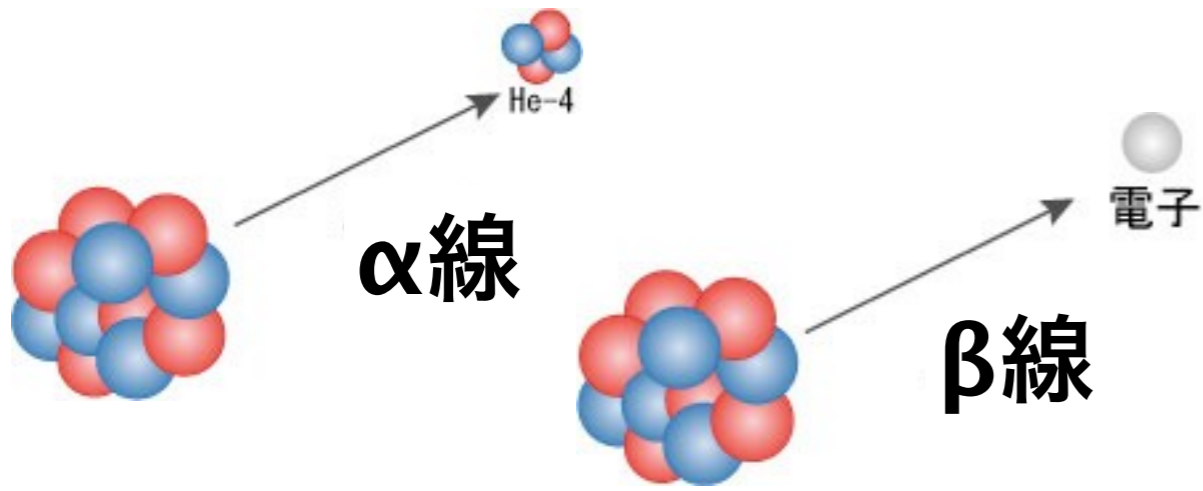
= 放射性同位体

= 不安定原子核

核図表



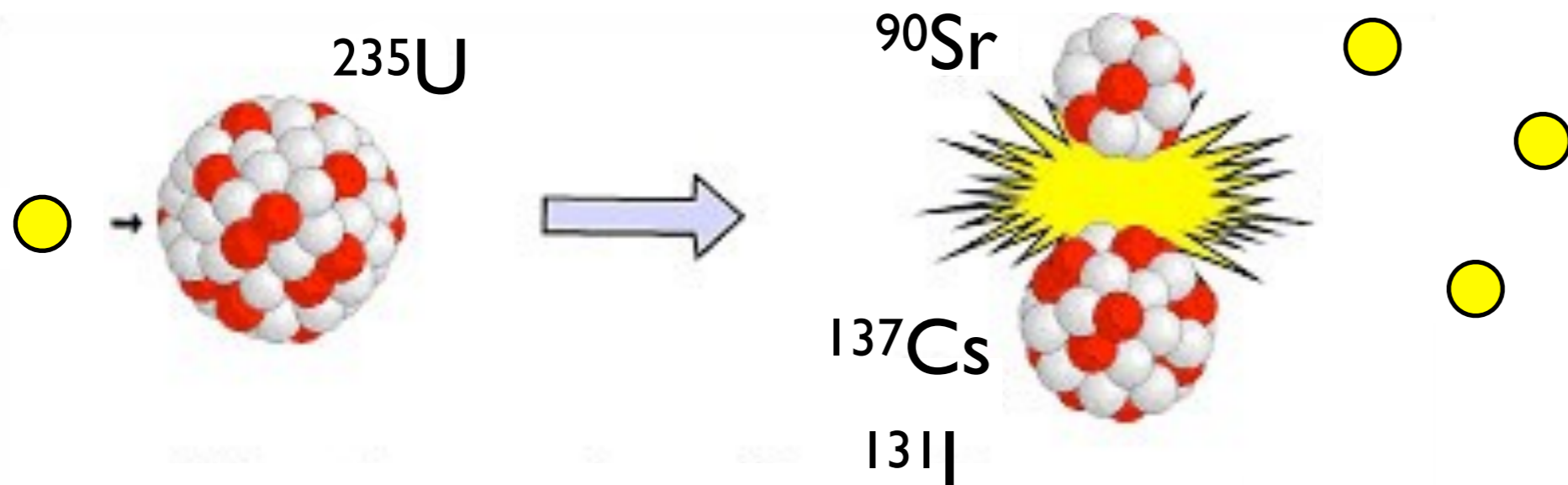
放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



Nuclear Chart 核図表

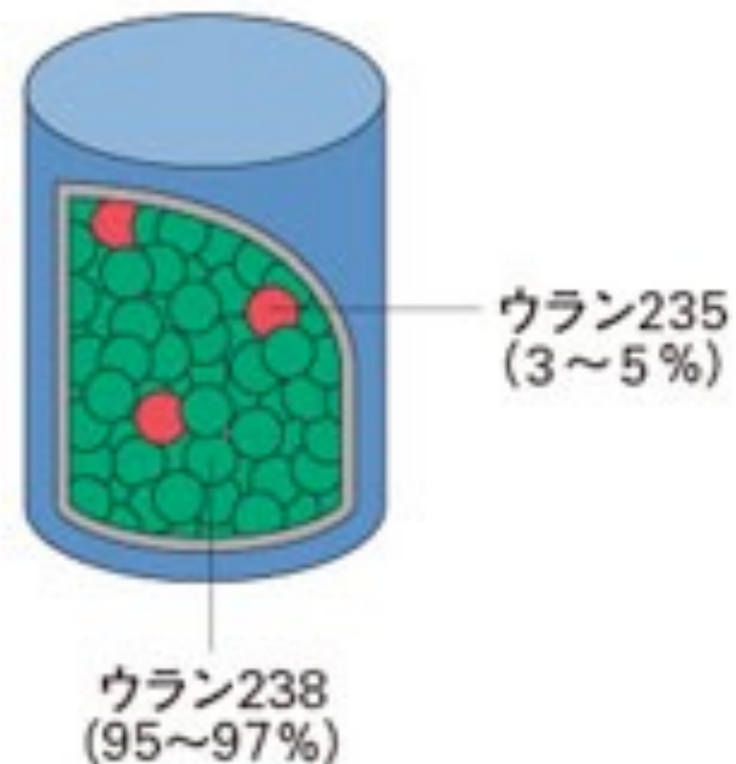
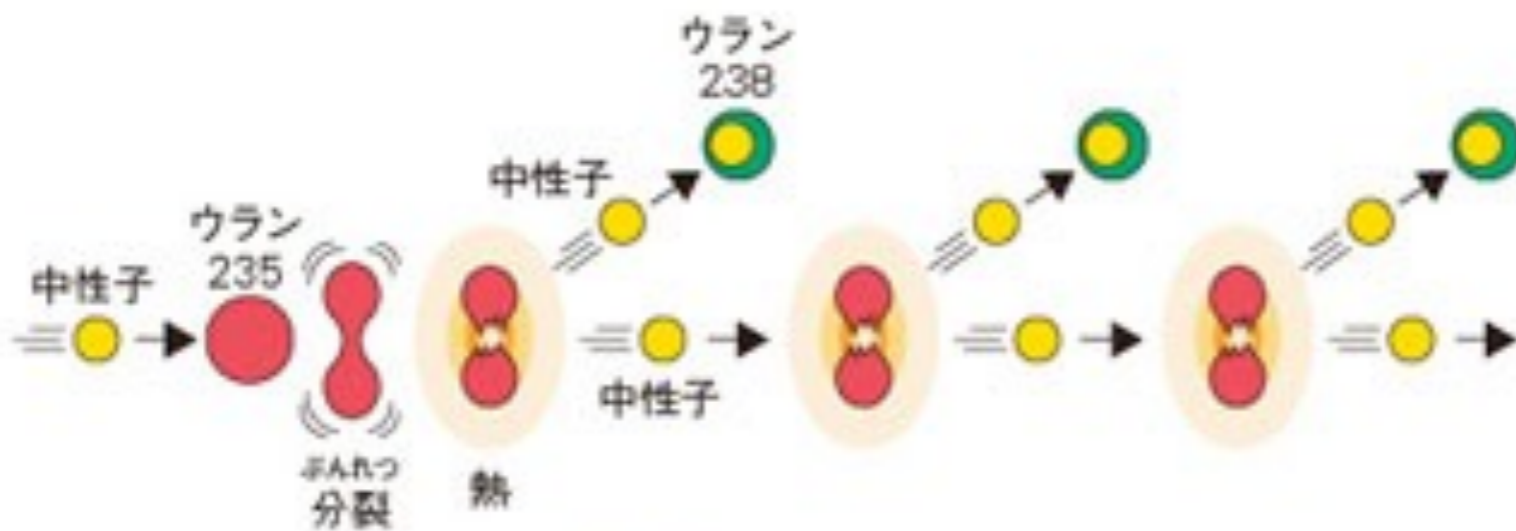


# 原子核分裂反応



熱中性子

減速



中性子 + ウラン 235 / 238



# 放射線の種類





Billet de 500 Francs Français en circulation: 1993–1999



- α線   ヘリウム原子核
- β線   高速の電子
- γ線   光子（電磁波）
- X線   光子（電磁波）



**VIDEO**

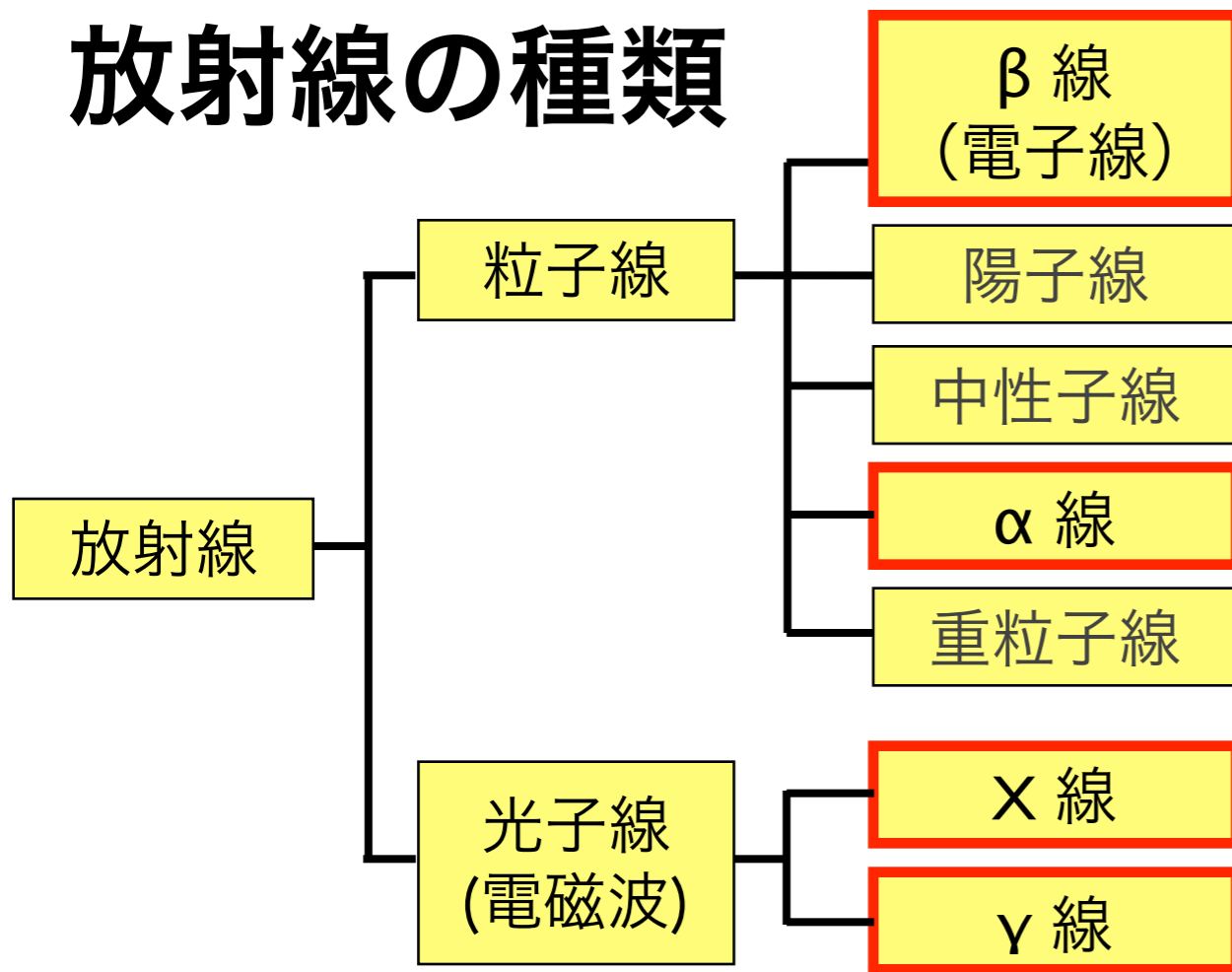
# 放射線とは

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/>



# 放射線の種類



原子核 N



放射線のもつエネルギーは？

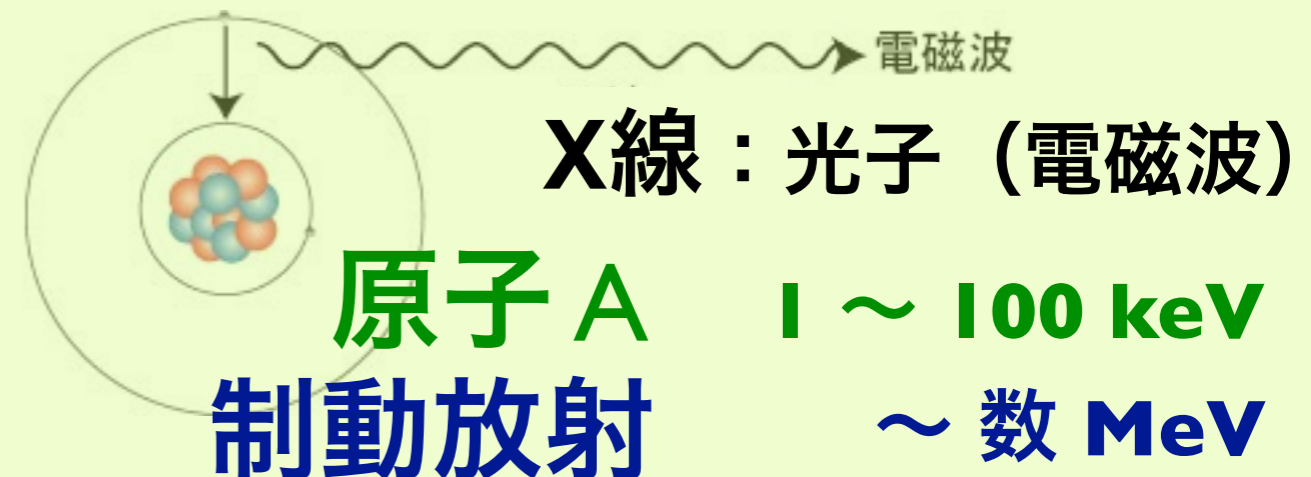
☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

**Cf.** 原子の束縛エネルギーは？

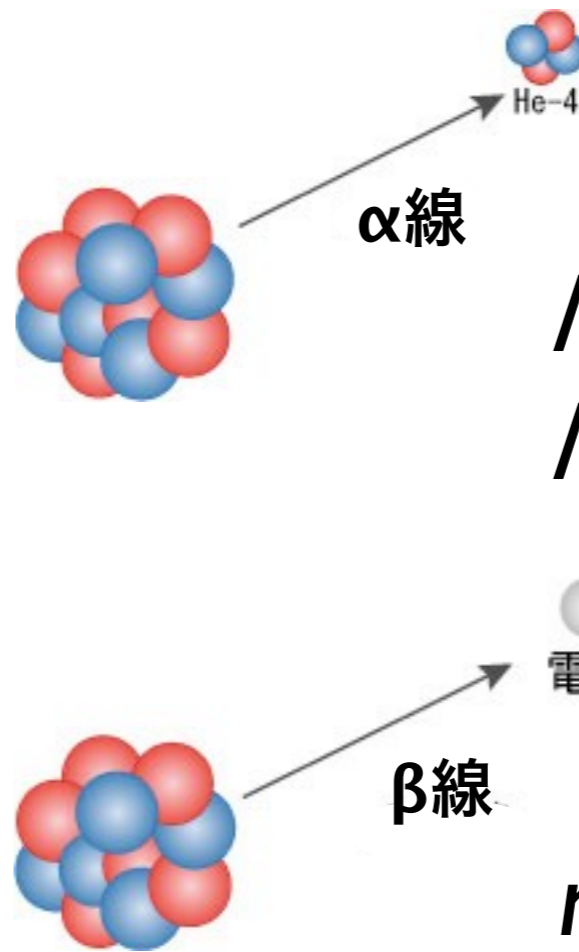
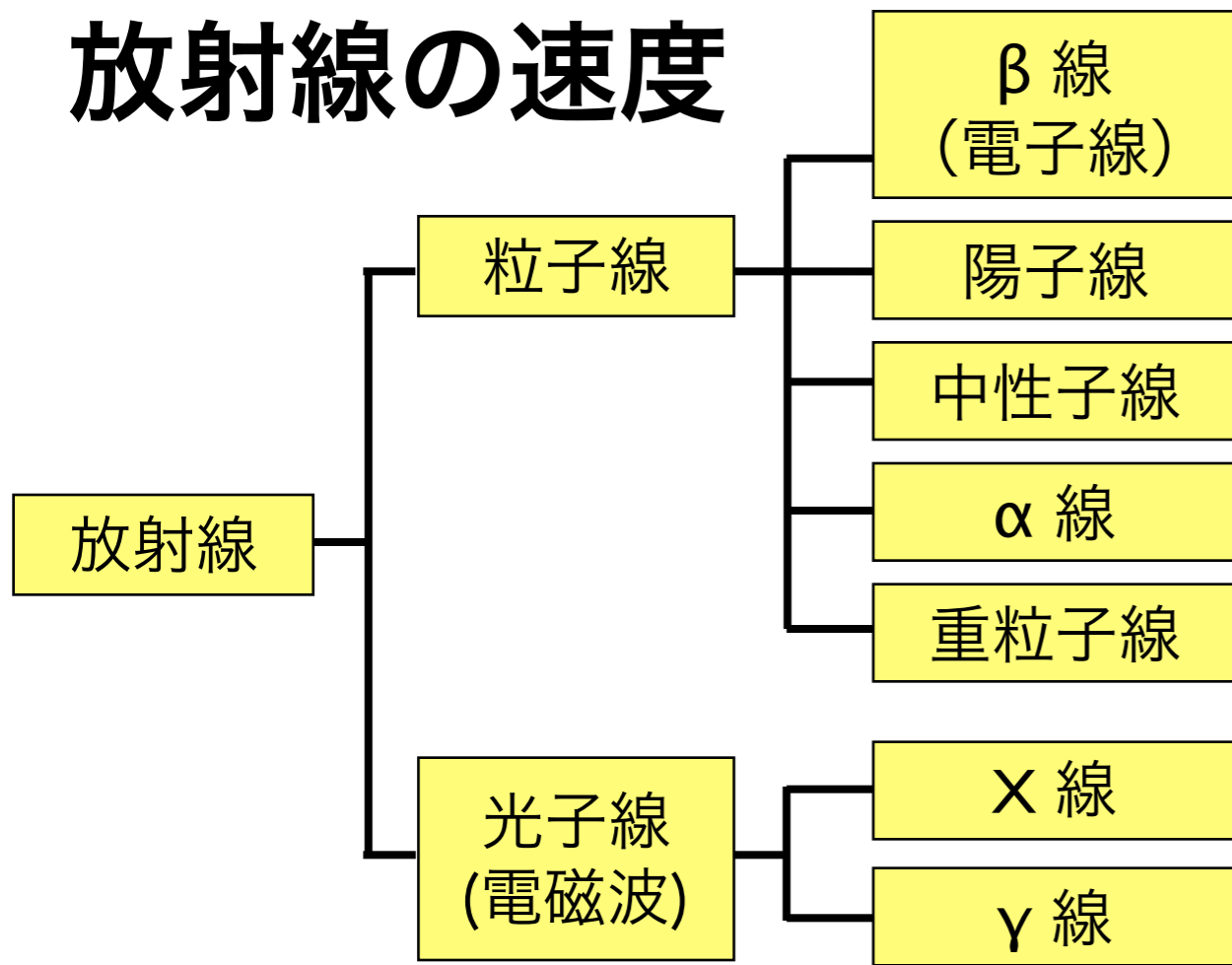
☞ 最外殻電子で 10 eV 程度  
(1 eV = 96 kJ/mol)

放射線の速度は？

☞ 光速の数% ~ 100%



# 放射線の速度



$$M_{\alpha} \approx 4 \text{ GeV}/c^2$$

~~$$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$$~~

$$M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$$



~~$$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$~~

$$m_e = 511 \text{ keV}/c^2$$

$$\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

放射線のもつエネルギーは？

☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

☞ 最外殻電子で 10 eV 程度  
(1 eV = 96 kJ/mol)

荷電粒子の質量は？

~~$$T = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} mc^2 \beta^2$$~~

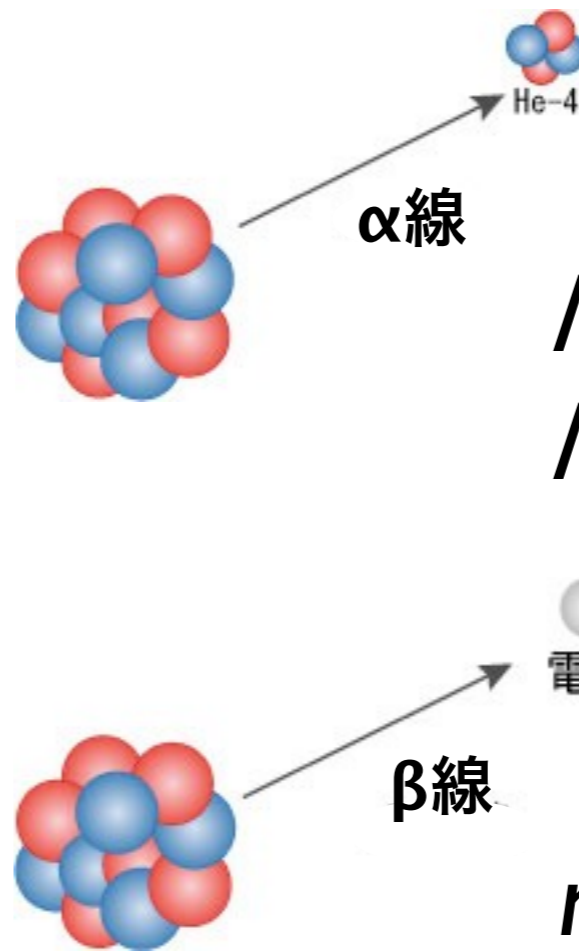
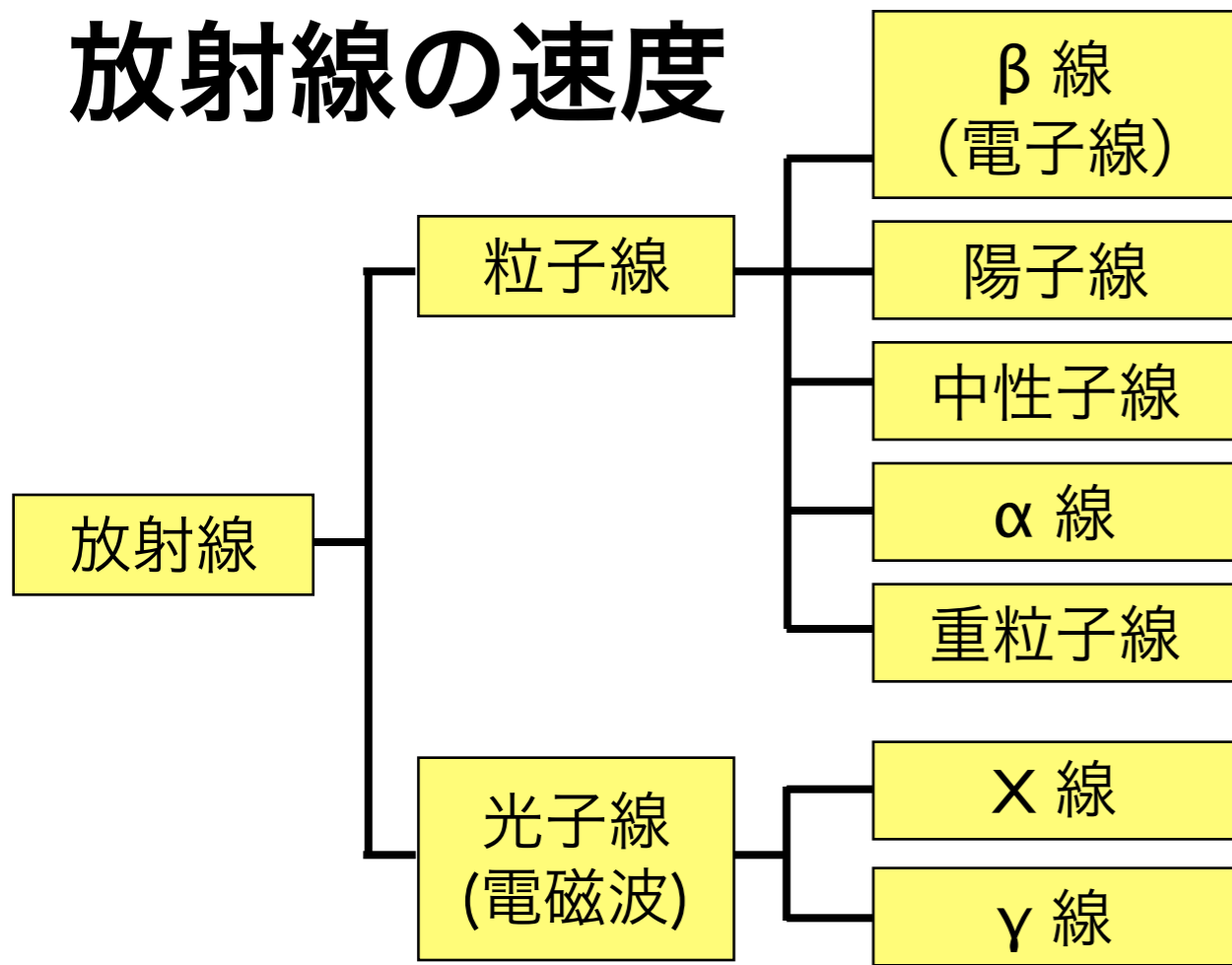
$$\beta = v/c$$

5 MeV の α線の速度は？

1 MeV の β線の速度は？



# 放射線の速度



$$M_{\alpha} \approx 4 \text{ GeV}/c^2$$

~~$$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$$~~

$$M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$$



~~$$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$~~

$$m_e = 511 \text{ keV}/c^2$$

$$\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

放射線のもつエネルギーは？

☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

☞ 最外殻電子で 10 eV 程度  
(1 eV = 96 kJ/mol)

荷電粒子の質量は？

$$E = mc^2 \gamma = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$T = E - mc^2 \quad \beta = v/c$$

$$\approx \frac{1}{2} mv^2 \quad (v \ll c)$$

# α 崩壊 (壊変)

decay

# β<sup>-</sup> 崩壊 (壊変)

# γ 崩壊 (壊変)

(核異性体転移)

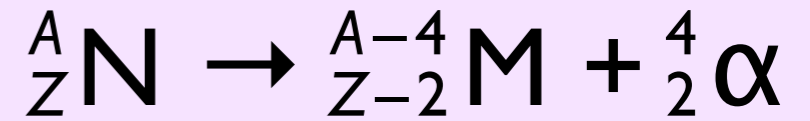
Isomeric Transition (IT)

原子の脱励起  
制動放射

原子核 N



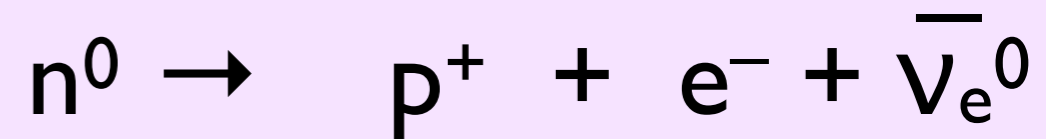
α線



β線

電子

数十 keV ~ MeV

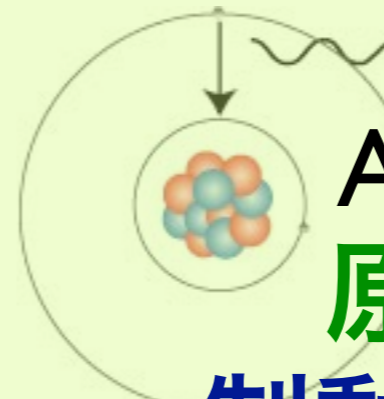


γ線

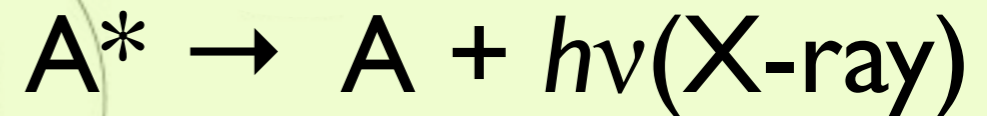
電磁波



X線



電磁波



原子 A

I ~ 100 keV

制動放射

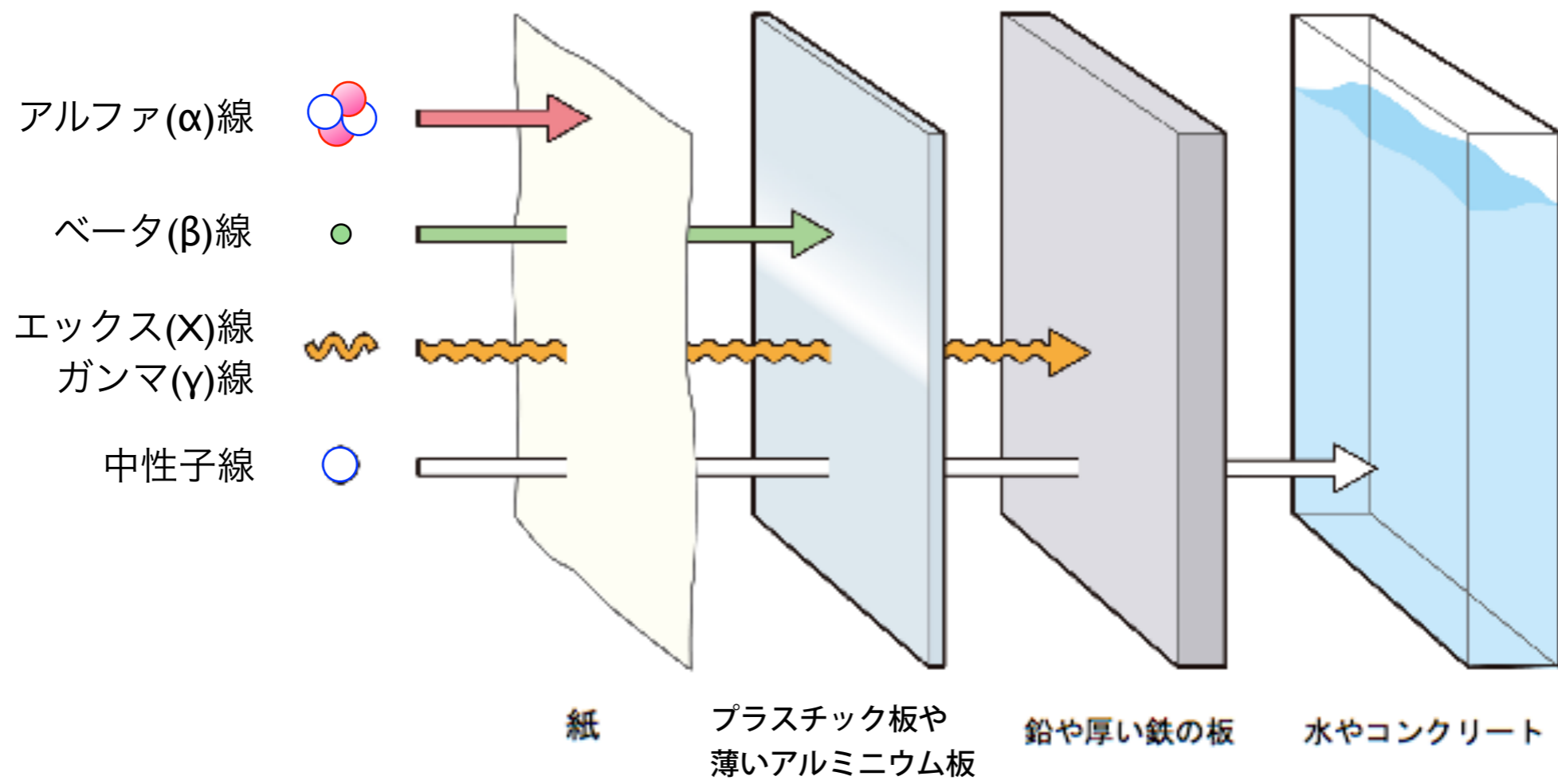
~ 数 MeV



# 放射線と物質との相互作用

## 荷電粒子の減速

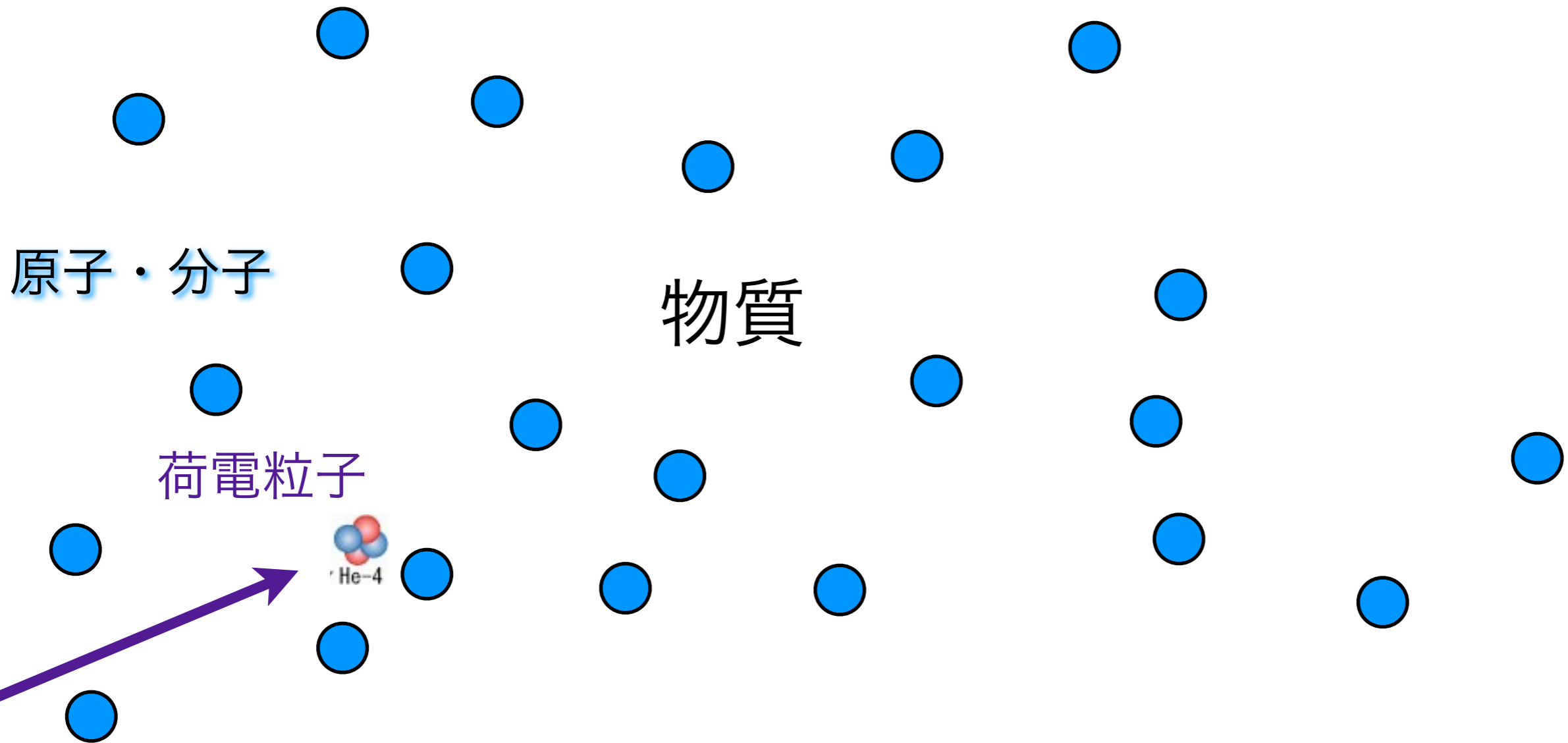
# 放射線の種類と透過力





# 荷電粒子のエネルギー損失過程

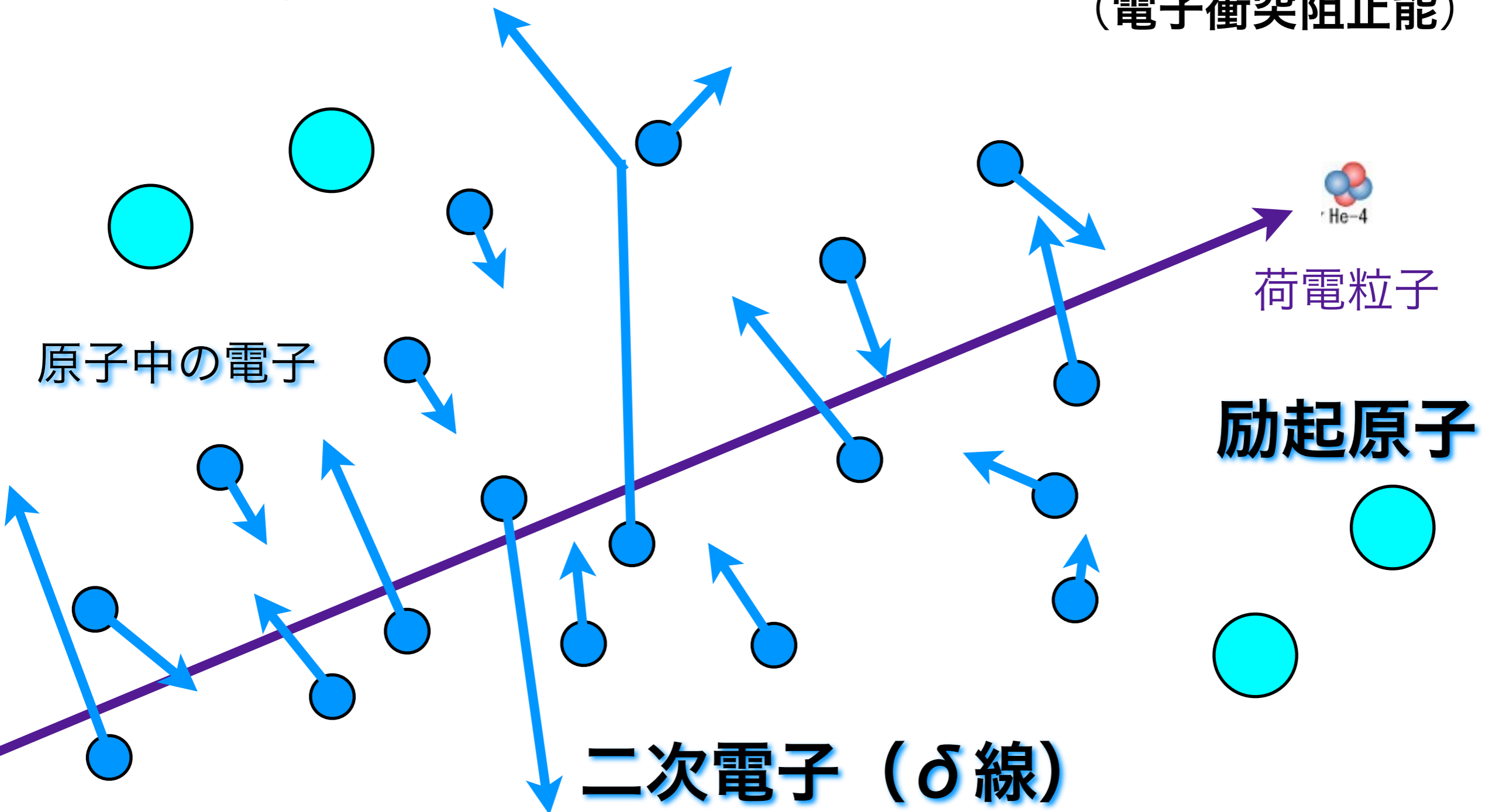
荷電粒子：  
クーロン力



# 荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：  
クーロン力

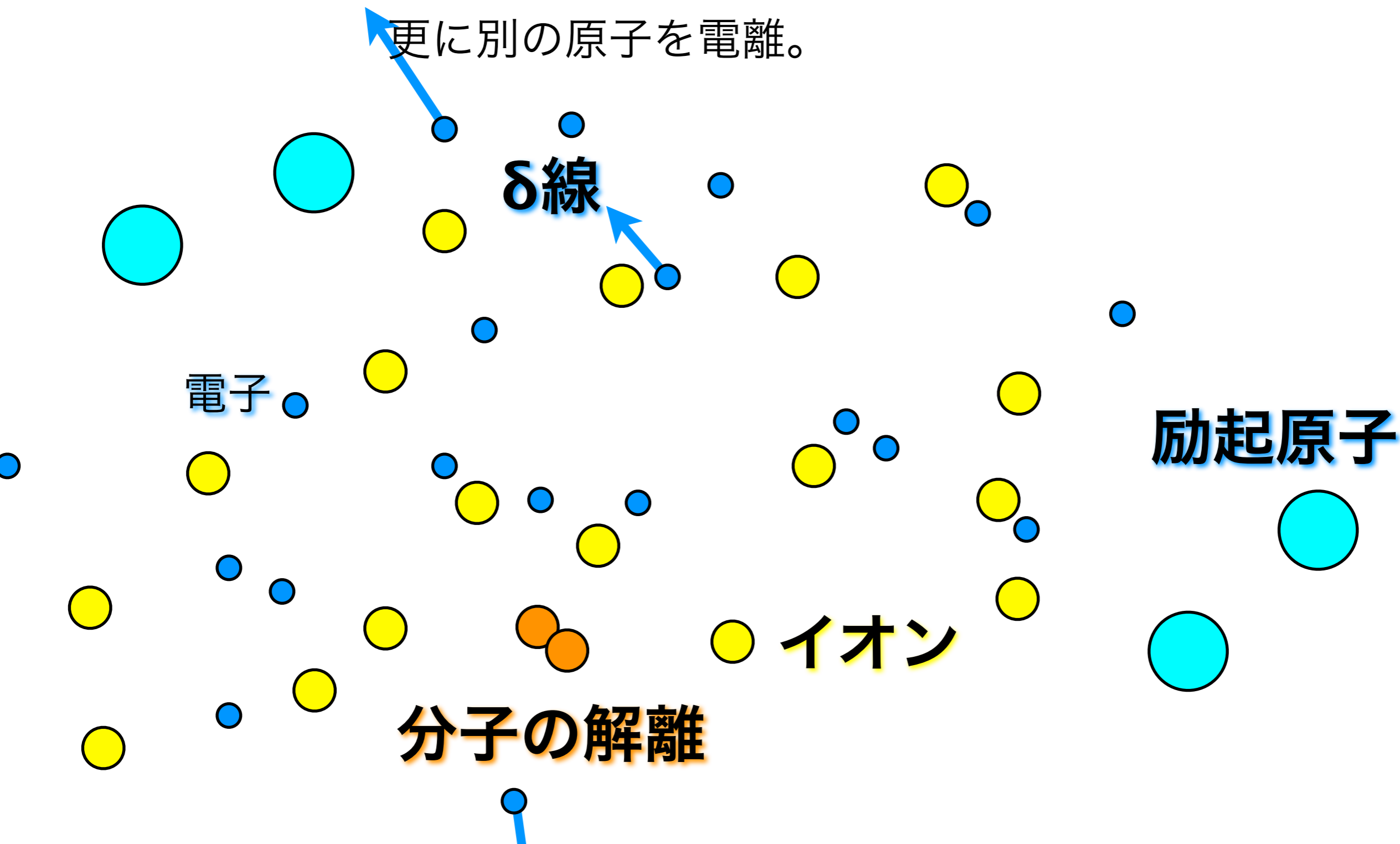
物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される。  
(電子衝突阻止能)





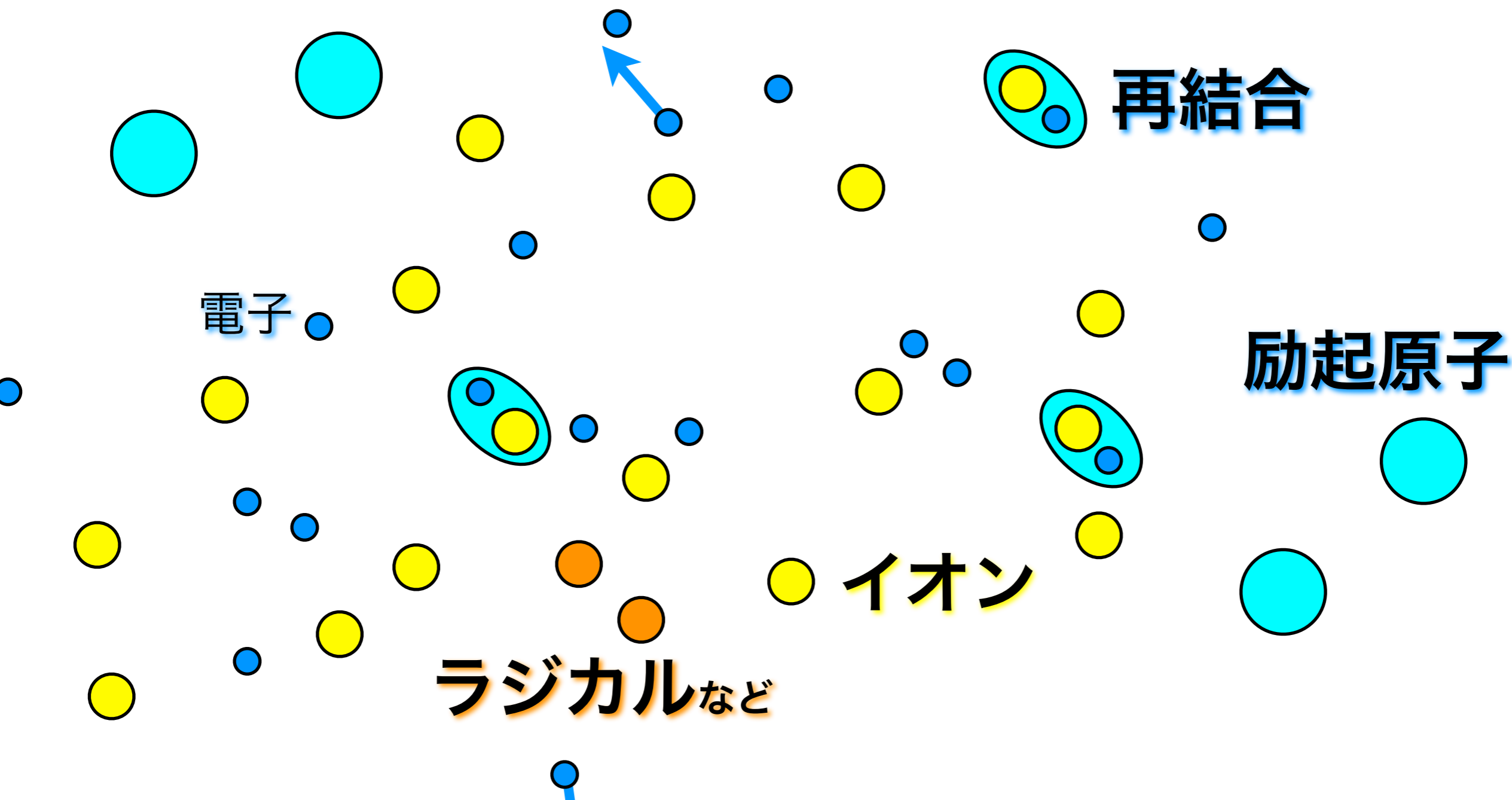
# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。また再結合によりX線が発生。





# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

励起原子

電子

イオン

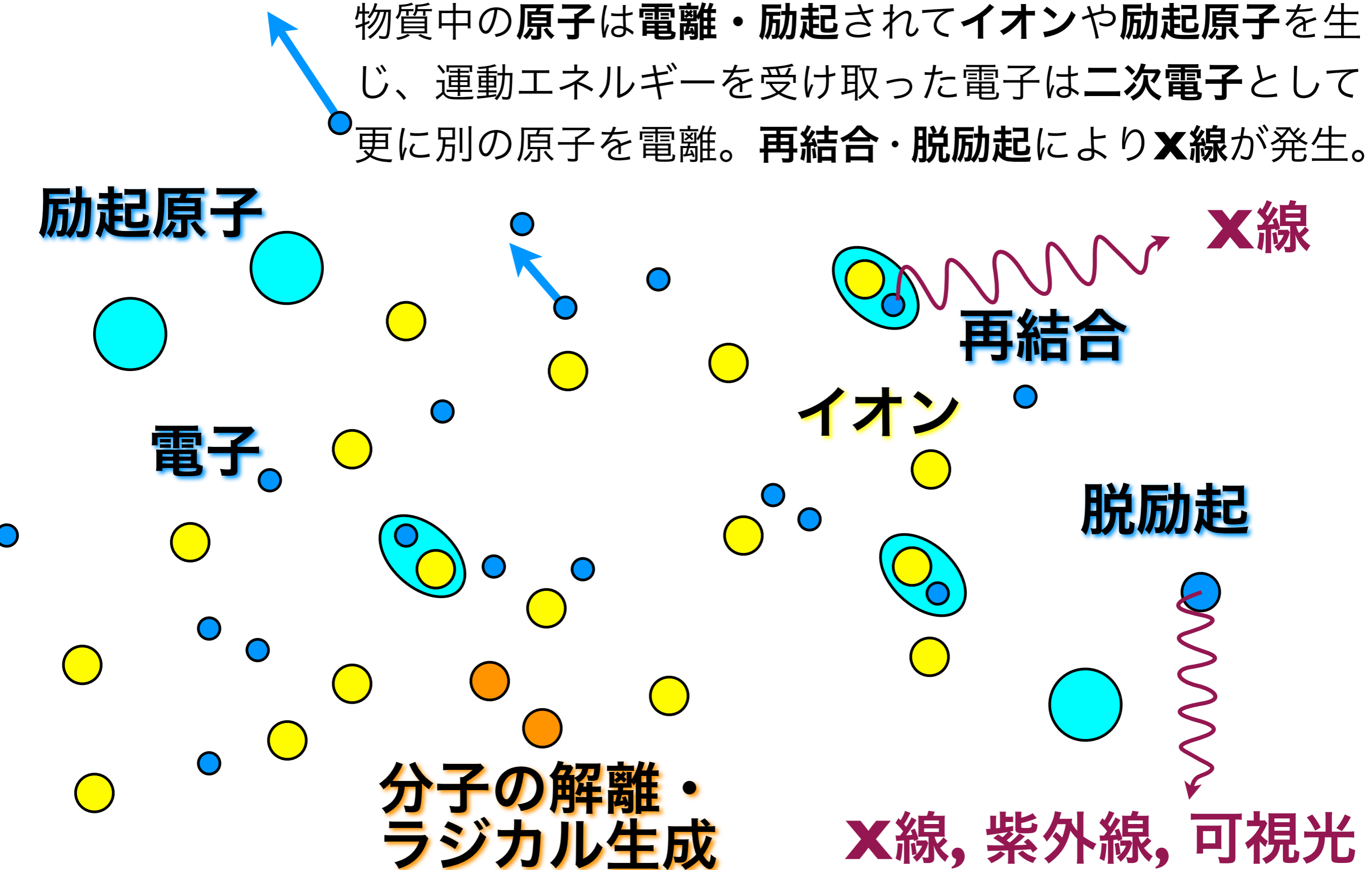
分子の解離・ラジカル生成

再結合

脱励起

X線

X線, 紫外線, 可視光



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

原子の電離（イオン化）・励起

励起原子の脱励起

X線、紫外線・可視光

イオン・電子の再結合

化学結合の切断、組み替え

ラジカル、活性分子の生成

DNA の損傷

シンチレーション光

(放射線による原子・分子の蛍光)



# 阻止能（エネルギー損失、線エネルギー付与）

Stopping power

Energy Loss

Linear Energy Transfer : LET

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

## 荷電粒子：クーロン力

物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して（二次電子）運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。

● **重い粒子**：陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線 /  $\pi$ 中間子 /  $\mu$ 粒子

1個の電子に与えるエネルギーは微小。多数個の電子との散乱により減速される。運動量変化も小さいので軌道はほぼ直線。

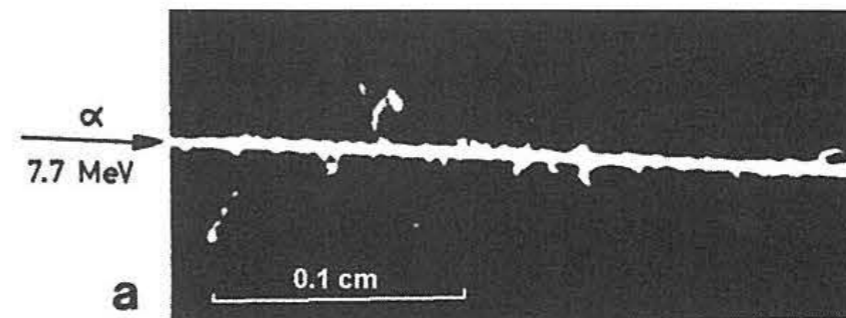
● **軽い粒子**：電子(e<sup>-</sup>)・陽電子(e<sup>+</sup>)

1回の散乱で失うエネルギーが大きい。ジグザグの軌道も。大きな運動エネルギーをもつ二次電子を生成しうる。

# 放射線の軌跡

霧箱による観察

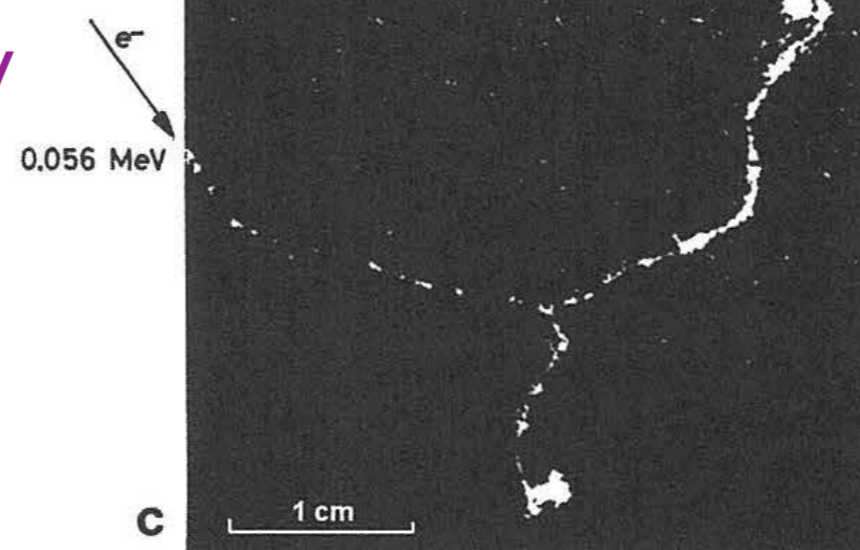
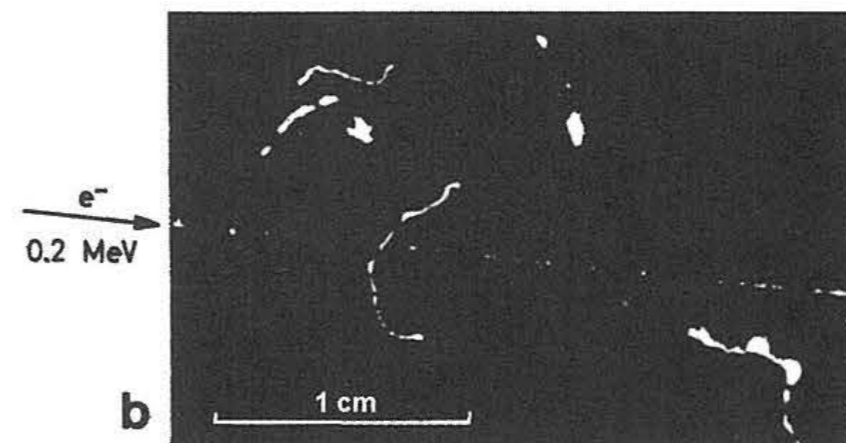
$\alpha$ -ray  
7.7 MeV



0.2 MeV

$\beta$ -ray

0.056 MeV



$\gamma$ -ray  
0.047 MeV

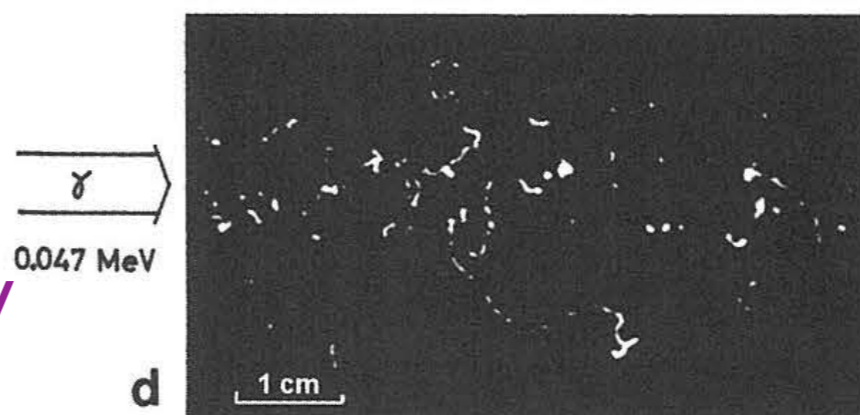


Figure 7.5 Cloud chamber tracks of  $\alpha$ ,  $\beta$ , ( $e^-$ ), and  $\gamma$ -rays at 1 bar in air ((a), (b), and (c)) and in methane (d). (From W. Gentner, H. Maier-Leibnitz, and H. Bothe.)



## 荷電粒子：クーロン力

$$S = - \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \quad \text{阻止能 (エネルギー損失、線エネルギー付与)}$$

Stopping power      Energy Loss      Linear Energy Transfer : **LET**

陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線：高 LET 放射線

中性子線(n)：物質中の陽子を叩いて弾き出すので、  
高い LET を与える。

電子( $\beta$ )線：低 LET 放射線

光子(X線,  $\gamma$ 線)：物質中の電子を弾き出す。

あるいは高エネルギーでは電子陽電子対を生成する。  
低い LET。

物質の種類にさほど依らない

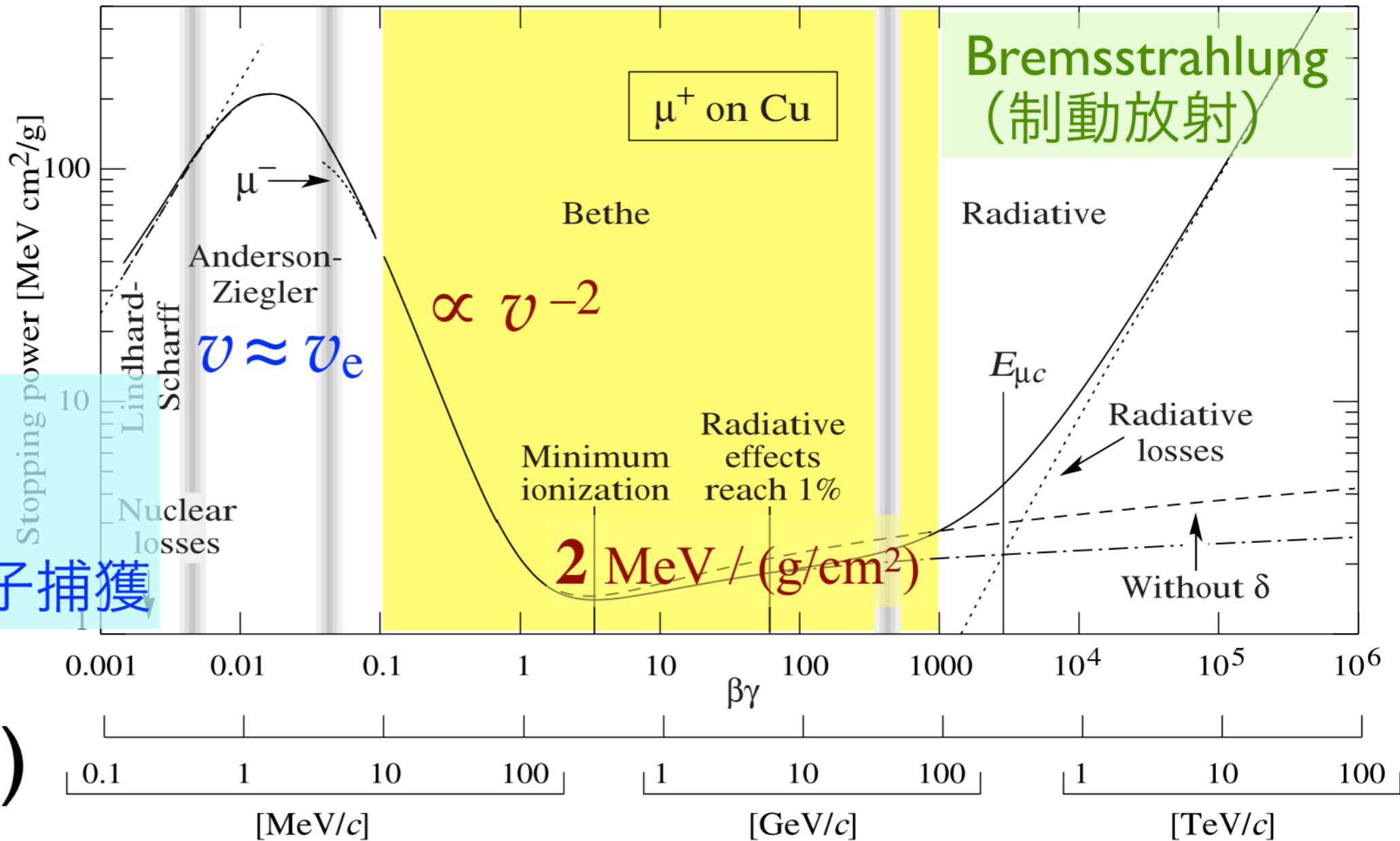
$$\text{質量阻止能} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

高エネルギー物理学業界では  $\rho$  を書かない (x について、 $\rho$  を含んだ次元だと見なす) ことが多い。前のスライドではそう表記。

- 非断熱的
- Barkas 効果
- イオンは電子捕獲



(線エネルギー付与)  
keV /  $\mu\text{m}$

### 27.2.2. Stopping power at intermediate energies :

The mean rate of energy loss by moderately relativistic charged heavy particles,  $M_1/\delta x$ , is well-described by the "Bethe" equation,

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]. \quad (27.3)$$

質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

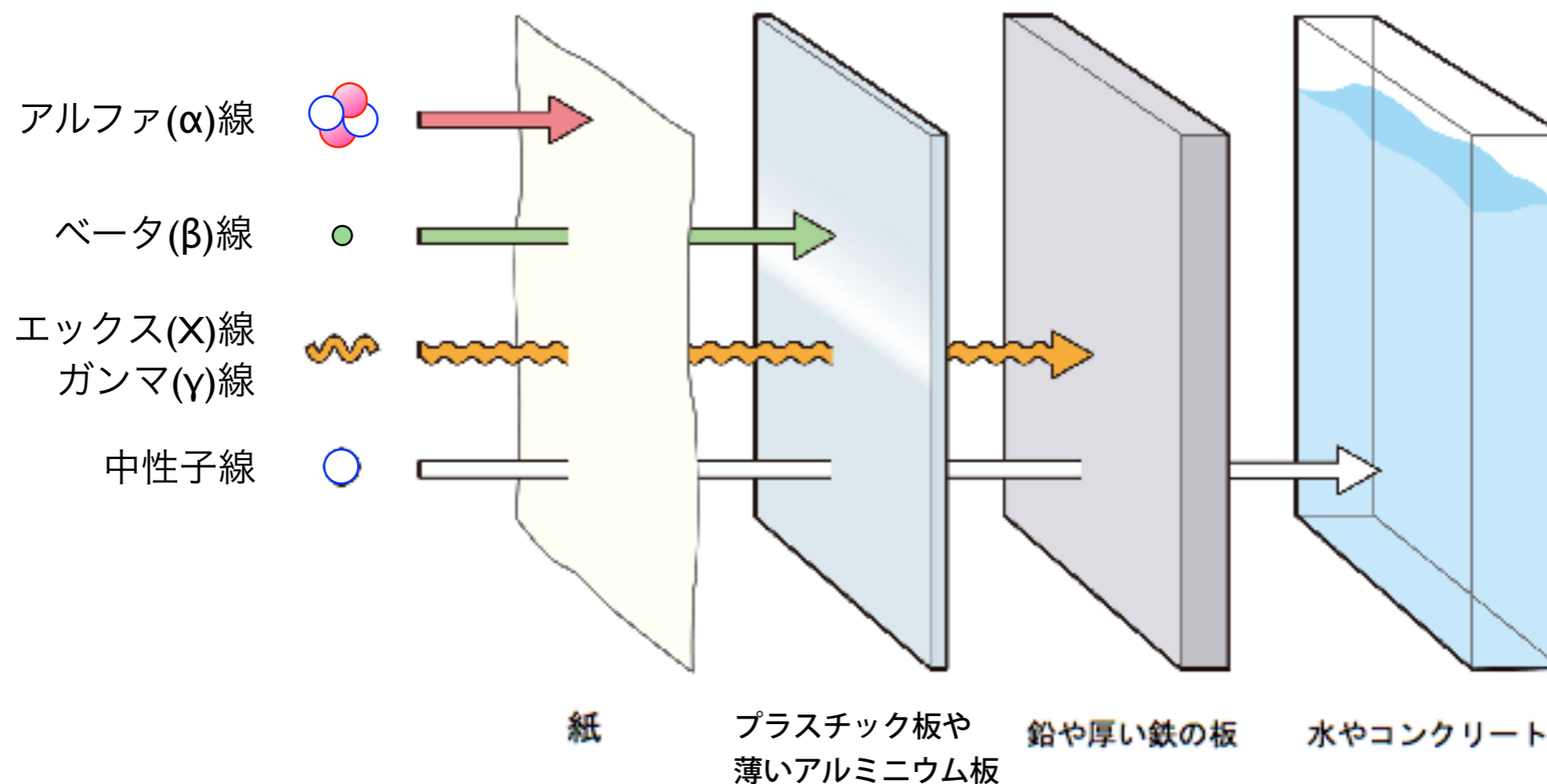


# 飛程 Range

阻止能の逆数を積分。

相互作用の大きい放射線ほど  
遮蔽しやすい。

$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle^{-1} dE$$

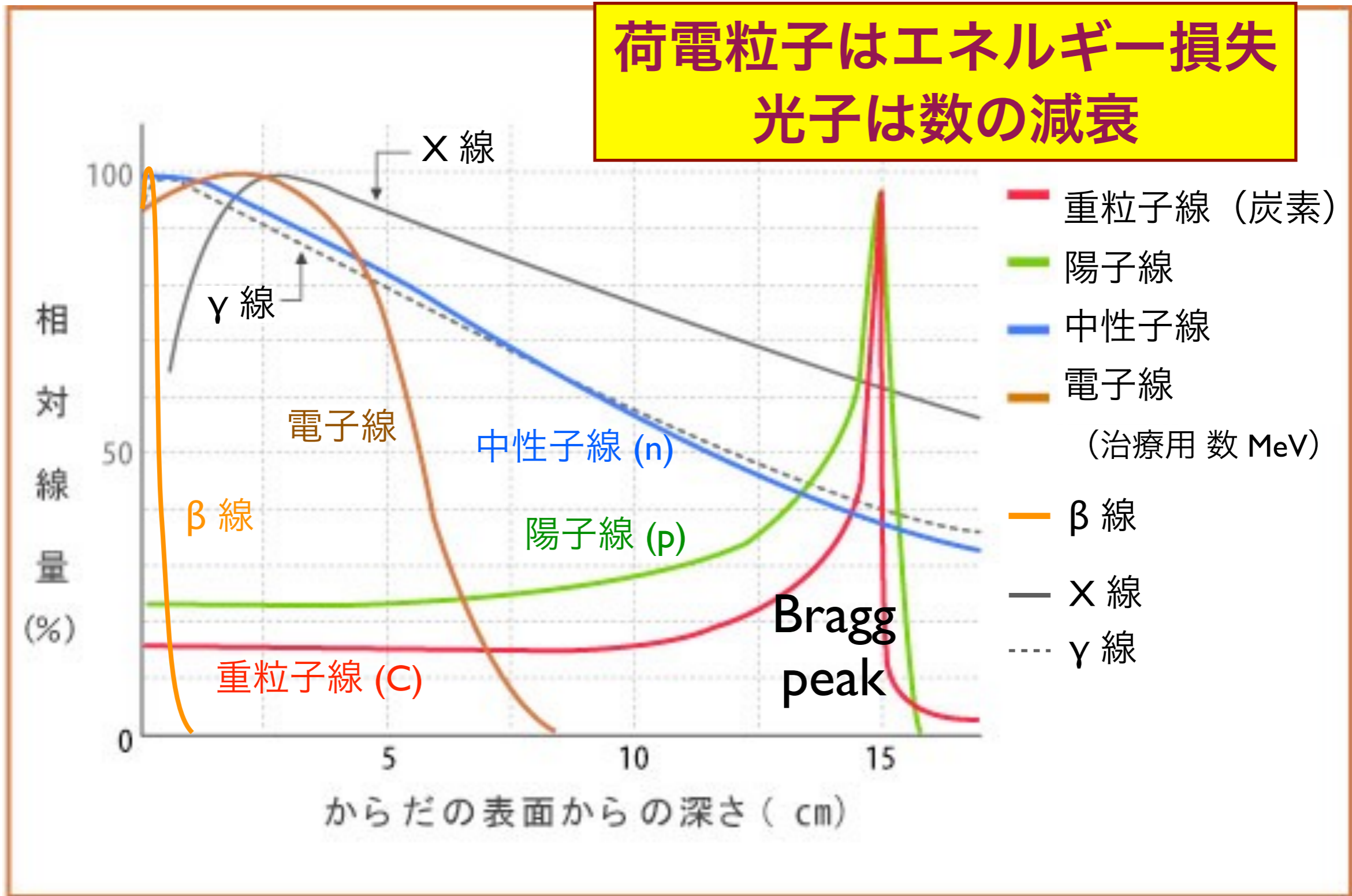


質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

陽子(p)、 $\alpha$ 、重粒子線は飛程が揃っている。  
 電子( $\beta$ )は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。  
 中性子(n)、光子(X, $\gamma$ )は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

**荷電粒子はエネルギー損失  
 光子は数の減衰**

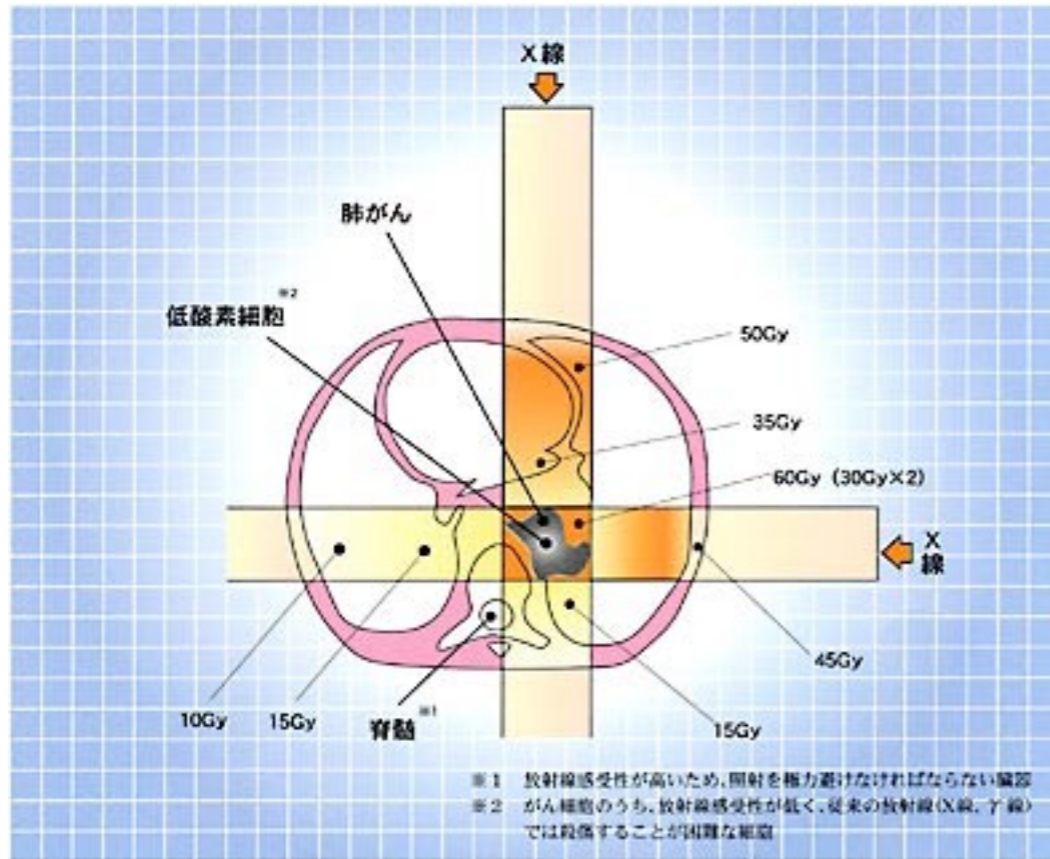


元図：群馬大学重粒子線医学研究センターの旧ホームページより



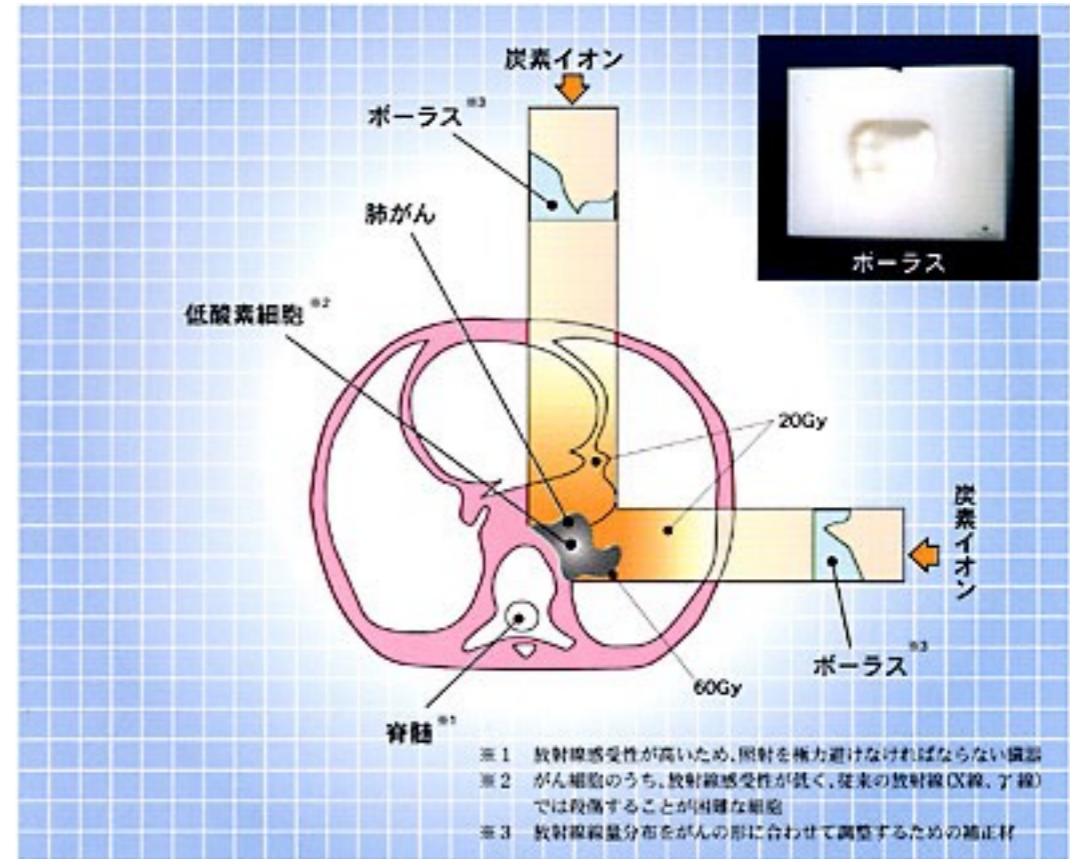
# 放射線医療：がん治療

## X線

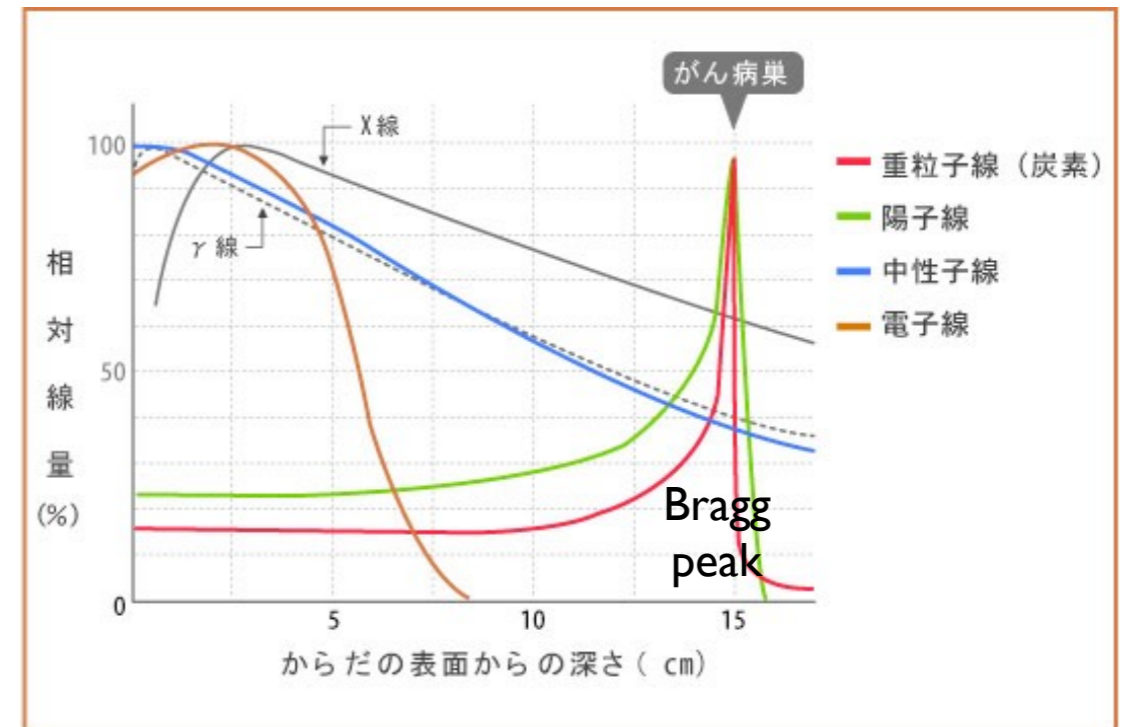


# 数 Gy を複数回

## 重粒子線 (炭素イオン)



他には：ガンマナイフ、  
 陽子線、パイ中間子  
 研究中：反陽子





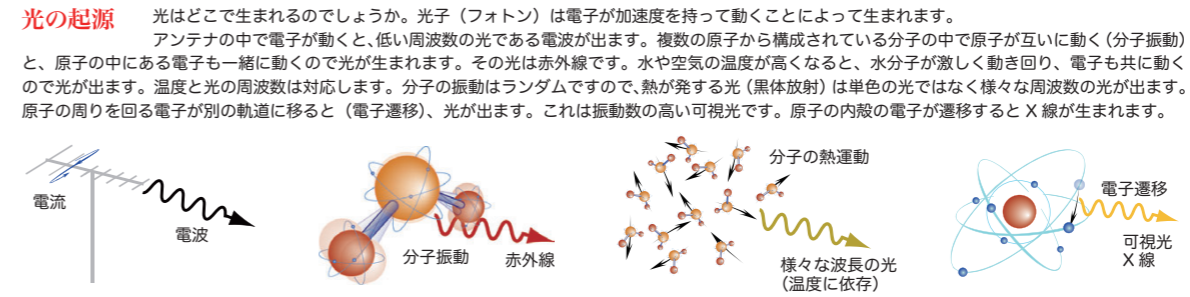
# 放射線と物質との相互作用

## 光子の減衰



# 光マップ THE LIGHT MAP

光は、自然界にいつも存在していて、あらゆる植物や生物、人間の生命と営みを支えています。太陽からの光は、地球上に温度をもたらす、植物の光合成のエネルギーとなります。蛍光灯やランプは私たちの生活を明るく照らします。レーザーは材料を加工したり、手術や治療をします。ラジオやテレビや携帯電話の信号を送る電波、電子レンジで使われるマイクロ波、電気こたつや電熱線で加熱に用いる赤外線、日焼けや殺菌作用がある紫外線、レントゲン写真に用いるX線や、原子崩壊のときに発生するγ線などすべて、光のなかまです。この光マップは、光が自然界や私たちの生活の中でどのようにつくられ、どのように使われているかをまとめたものです。

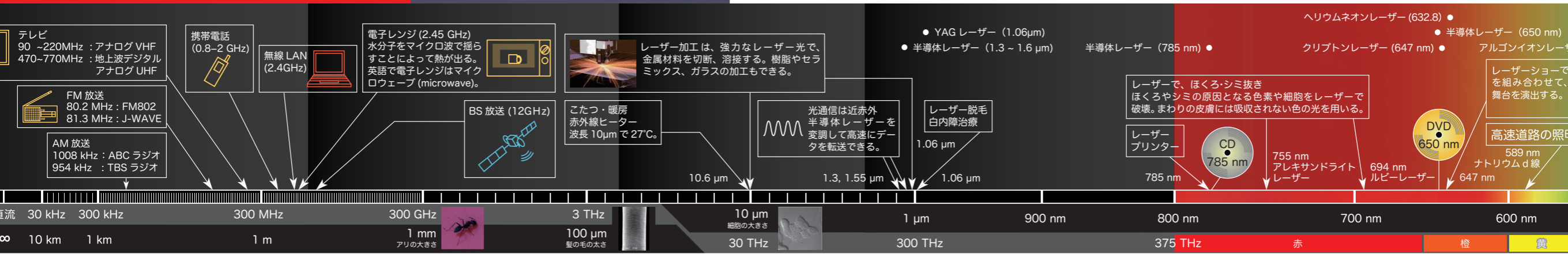


### 波としての光

光は空間横波です。振動数は1秒間の振動の回数（周波数）です。振動数と距離のかけ算は波長です。振動数や波長に関係なく一定で進む速度があります。

### 粒としての光

光の強度は光子の密度（振動数）に相当するエネルギーです。光子のエネルギーは振動数に比例しています。ちょうど、電流が明るいか暗いかは光子の密度（振動数）に相当するエネルギーです。



### 電波領域 (電波も光)

アンテナで送受信

- FM放送: 80.2 MHz: FM802, 81.3 MHz: J-WAVE
- AM放送: 1008 kHz: ABC ラジオ, 954 kHz: TBS ラジオ
- ICカード: 電車で乗るのもラク。
- MRI (核磁気共鳴): 磁場と電波を使って体の輪切りに見せる。脳梗塞などの早期発見に有効。
- 速度取締り: レーダーの原理。
- レーダー: 電波を照射して反射波を検出し、飛行機の位置を捕捉したり、降雨や降雪を観測する。ステルス戦闘機は奇抜な外形や電波吸収材料で電波の反射を抑える。

単位: 1メートル = 10<sup>0</sup> m = 1,000 mm, 1センチメートル = 10<sup>-2</sup> m = 10 mm, 1ミリメートル = 10<sup>-3</sup> m = 0.001 m, 1マイクロメートル = 10<sup>-6</sup> m = 0.000001 m = 1/1000 mm, 1ナノメートル = 10<sup>-9</sup> m = 0.000000001 m = 1/100万 mm, 1ピコメートル = 10<sup>-12</sup> m = 0.000000000001 m = 1/10億 mm, 1フェムトメートル = 10<sup>-15</sup> m = 1/1,000 pm, 1アトメートル = 10<sup>-18</sup> m = 1/1,000,000 pm

単位: 1秒間に1回振動, 1ヘルツ = 10<sup>0</sup> Hz = 1,000 Hz = 1秒間に1000回振動, 1メガヘルツ = 10<sup>6</sup> Hz = 1,000,000 Hz = 1秒間に100万回振動, 1ギガヘルツ = 10<sup>9</sup> Hz = 1,000,000,000 Hz = 1秒間に10億回振動, 1テラヘルツ = 10<sup>12</sup> Hz = 1,000,000,000,000 Hz = 1秒間に1兆回振動, 1ペタヘルツ = 10<sup>15</sup> Hz = 1,000 THz, 1エクサヘルツ = 10<sup>18</sup> Hz = 1,000,000 THz

### 遠赤外光

低温の黒体放射

電波望遠鏡: 波長約1mmから1cmの電波を検出する望遠鏡。日本では野辺山宇宙電波観測所にある。温度が非常に低い星間ガスなどからの黒体放射を観測する。

黒体放射: 物体はその温度に応じて様々な波長の光を放射する。この現象を黒体放射という。

自由電子レーザー (FEL): 紫外から赤外までの広範囲で波長を自由に選択して強力な光をつくる。高速の自由電子を磁場によって蛇行させて発生したシンクロトロン放射からレーザー光線をつくる。国内では大阪大学、東京理科大学などにある。

ハッブル宇宙望遠鏡は、近赤外光検出で63光年離れた惑星でメタンと水を見つけ、太陽系外で有機物が確認された。宇宙の他の星にも生物がいるかも？

### 中赤外光

分子振動・格子振動、有機分子が見える領域

有機分子の指紋領域: 中赤外は分子の振動単位が豊富。有機分子の「指紋領域」と呼ばれる。

二酸化炭素 (C=O基): 4.3 μm  
水・アルコール (O-H基): 2.9 μm  
メタン (C-H伸縮): 3.3 μm  
トルエン (ベンゼン環): 6.7 μm

二酸化炭素の吸収スペクトル

すばる望遠鏡: ハワイ島にある日本の大型天体望遠鏡。可視光から中赤外光の光を使って宇宙を探る。直径8.2mの反射鏡は世界最大級。

気象衛星ひまわり: 10 μm付近 (大気窓): 黒体放射から雲や地表温度を観測する。6~7 μm (水の吸収): 水蒸気の分布を観測する。

### 近赤外光

物質と相互作用しない、物質が透明な領域 (光通信に使われる)

監視カメラ (ナイトビジョン): 近赤外光を照射し、カメラで検知する。目に見えない波長なので、暗闇でも相手に気付かれない。防犯のほか、軍事用にも用いられる。

センサー・赤外線通信 (IrDA): 自動ドアやトイレ、照明用のセンサーや、テレビやステレオのリモコン、パソコンの通信にも近赤外光が使われる。

血糖値測定、果実糖度計: 糖の分子の振動エネルギーが近赤外に相当する。果実を傷つけずに糖度を簡単に測ることができる。

赤外線温度計/体温計: 赤外線の黒体放射から、非接触で温度を測定します。人の体温で波長約10 μm。

リサイクル識別: 様々なプラスチックの種類を近赤外領域の吸収スペクトルの違いから識別し、リサイクルする。

光CT: 脳の中の酸素濃度を断面画像として取得する。

白熱灯 (2,500°C) の黒体放射のピークは、1 μm付近。

サーモグラフィ: 赤外光の強度から温度を測定する。体温分布計測、軍事用に用いられる。

### 可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

血液の赤色はヘモグロビンの色。動脈は酸素を含んで鮮やかな赤色。静脈では黒っぽい色になる。波長800 nmで入れかわる吸収率から、近赤外光を使って血中酸素濃度を計測することができる。

紅葉: アントシアン、カロテノイド、クロロフィル。秋になると、葉緑素のクロロフィルが分解されてカロテノイドの黄色に、その後、アントシアンがつくられて赤色に変わる。

3次元ナノ加工は、近赤外パルスレーザーを用いて、レーザー光の波長よりも遙かに小さい100nmの分解能で立体加工を実現。

細胞手術では、近赤外パルスレーザーを細胞内に集光して、細胞内部を加工、刺激する。

半導体量子ドット: 直径数nmの半導体粒子で蛍光を発する。小さい粒子ほど短い波長で光る。

ルビーの赤は不純物のクロムの色。世界初のレーザーはルビーから出た光。

太陽電池は、電卓、腕時計、街路灯から人工衛星にまで使われる。光のエネルギーでクリーン発電。

発光ダイオードは、発光効率の高光源として、信号機、パイロットランプ、街のイルミネーション、車のヘッドライト、光合成等、多目に使用される。

太陽が黄色に見えるのは、500nm付近の黒体放射のため。表面温度は約6,000°C。

ホテルの発光の源はルシフェリン。熱をほとんど出さずに発光する。

白色をつくるには青と赤が必要。テレビの液晶の画素、CRTの蛍光体

### 色づくのは光の干渉

向かって伝わってくる光が重なり合うと、互いにめっけたり弱め合ったりします。シャボン玉や油膜が七色に見えますが、これは膜の表面と反射した光が干渉するからです。立体像である(1971年ノーベル賞)は、光の干渉を使っています。光は**コヒーレント** (可干渉) であるといえます。コヒーレントな光を出す装置です。

七色に光るシャボン玉

クレジットカードのホログラム

### 空の青色は光の散乱

光が小さな粒子 (分子) に当たると散乱します。波長の短い光は長い波長の光よりよく散乱します。空が青いのも夕焼けが赤いのも光の散乱の効果です。もとの光から散乱して散乱する光があります。**ラマン散乱**といひ、分子や結晶の振動エネルギーが光子に足し算 (引き算) されるために生じます。この色のずれを計測して、半導体結晶の欠陥や分子の種類を分析する技術があります。空の色は散乱された青い光

### 虹の七色は光の屈折

光が空気から水やガラスに入ると、曲がります。この現象を屈折といひます。屈折率は光の波長 (色) によって異なります。万有引力の法則で有名なニュートンはプリズムを使って太陽の光には様々な色が混ざっていることを発見しました。雨上がりの路地に虹が見えるのは空気中の水滴がプリズムとして太陽光を分光するからです。最先端の光学には、**負の屈折率**の物質 (逆方向に光が曲がる) を人工的に作る研究が進んでいます。

折れたように見えるけど...

プリズムで屈折して色分けされた光

### 光は回折する

光の進路に障害物を置くと、光は障害物の裏側にも回り込んで伝わっていきます。細い光線をつくらうとして細い穴に光を通して、すぐ広がってしまいます。光の回折を利用して光を選択することができます。細かい周期構造に光を照射すると、それぞれの構造で回折した光が干渉し、角度によって違う色が見えます。CDやDVDの表面が七色に見えるのは、記録ビットの列が回折格子として働くためです。タマシヤやチョウの羽、貝殻も、表面に周期構造があって七色に見えます。このように回折で現れる色のことを**構造色**といひます。

モルフォ蝶と、羽の電子顕微鏡写真

七色に光るCDの表面

### 光子ロケットは光の放射圧

光が物質の境界面で屈折や反射、散乱すると、物質に力がかかります。光の放射圧は、400年前に予言されたといひわれています。天文学者のケプラーは彗星 (ほうき星) の尾がいつも太陽と反対側にのびのびを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。スティブン・チューらは光の放射圧で原子を冷却する技術を発明しノーベル賞を受賞しました。SF小説には放射圧で飛ぶ光子ロケットが出てきます。JAXAやアメリカでは実際にソーラーセイル宇宙船を研究しています。

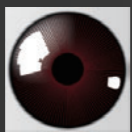
ハレー彗星

アメリカで光が進む



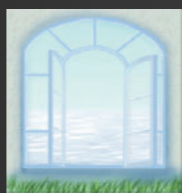
325 nm

近視矯正手術、角膜切除には、エネルギーの高い紫外光が使われる。エキシマレーザーを使って角膜を蒸発させ削り取る。サブミクロンの精度で精密に一部の角膜だけを削り角膜の形を変えて屈折矯正する。

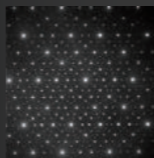


極端紫外光リソグラフィー  
極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

水の窓  
水の吸収がない波長。水分を多く含む生物試料の観察に使えるX線。



X線回折結晶構造解析  
原子の配列による回折を利用し、配列パターンや原子間距離を測る技術。原子間隔に相当する波長のX線を使う。タンパク質分子の立体構造も知ることができる。



XFEL(X線自由電子レーザー)  
SPring-8に自由電子レーザーの発振器を建設し、X線の波長域でレーザー光を得る施設。2006年から建設が始まり、2010年に完成を目指している。



### 紫外光

紫外線洗浄  
半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、品質に紫外線を使う。

紫外線殺菌  
を与えずに、水、食品、薬品などを殺菌する。



地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

触媒は、紫外光を吸収して、窓ガラスや壁の汚れを分解する。

酸化チタン

SPring-8

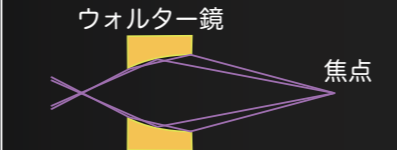
兵庫県佐用郡にある大型の放射光施設。X線から赤外線まで広い波長範囲で世界最高輝度の光をつくる。周長 1.4 km の蓄積リングと呼ばれる軌道に電子を閉じ込め、光速近くまで加速した電子からのシンクロトロン放射でX線を得る。

### 軟X線 (極短紫外を含む)

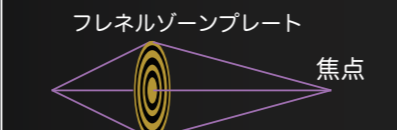
レーザープラズマ光源  
高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

軟X線顕微鏡  
「水の窓」を使えば、高い空間分解能で生物試料を生きたまま観察できる。軟X線は大気をほとんど伝わらないので、装置を真空中に置く。

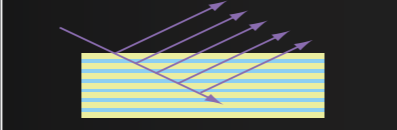
X線のレンズ  
軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。



反射には、Mo/Si や Cr/Sc などの多層膜が用いられる。



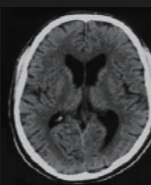
静電気除去  
空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

### X線

レントゲン写真  
からだが見える。X線が透過しにくい骨が影となって映る。胃を見るときはバリウム(造影剤)を飲む。空港の手荷物検査もX線。



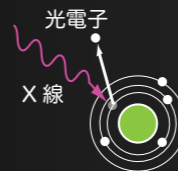
X線CT (コンピュータ断層撮影)  
様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



X線天文衛星すざく  
X線は大気層で吸収されるため、望遠鏡を搭載した衛星を宇宙まで飛ばして観測する。

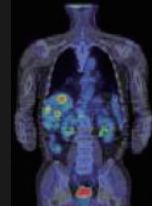


XPS(X線光電子分光)  
X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。

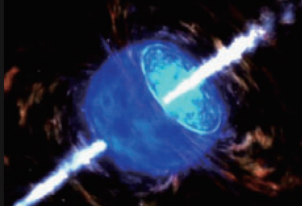


### γ線

PET (ポジトロン断層法)  
放射性分子をマーカーにした新しいがん検診技術。



γ線バースト  
太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。



強い放射線  
強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

放射線治療  
弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

γ線滅菌  
弱いγ線なら医療器具などの滅菌にも使える。じゃがいもの発芽防止にもγ線を照射する。



一家に1枚 光マップ <http://stw.mext.go.jp/>



## 荷電粒子 ( $\alpha$ 線・ $\beta$ 線など) の減速 (エネルギー損失)

荷電粒子は物質中の多数の電子を蹴散らかしつつ  
徐々にエネルギーを失って減速する。

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

単位距離当たりの**エネルギー損失**  $-\left\langle\frac{dE}{dx}\right\rangle$  が重要

## 光子 (X線・ $\gamma$ 線) の減衰 (減弱)

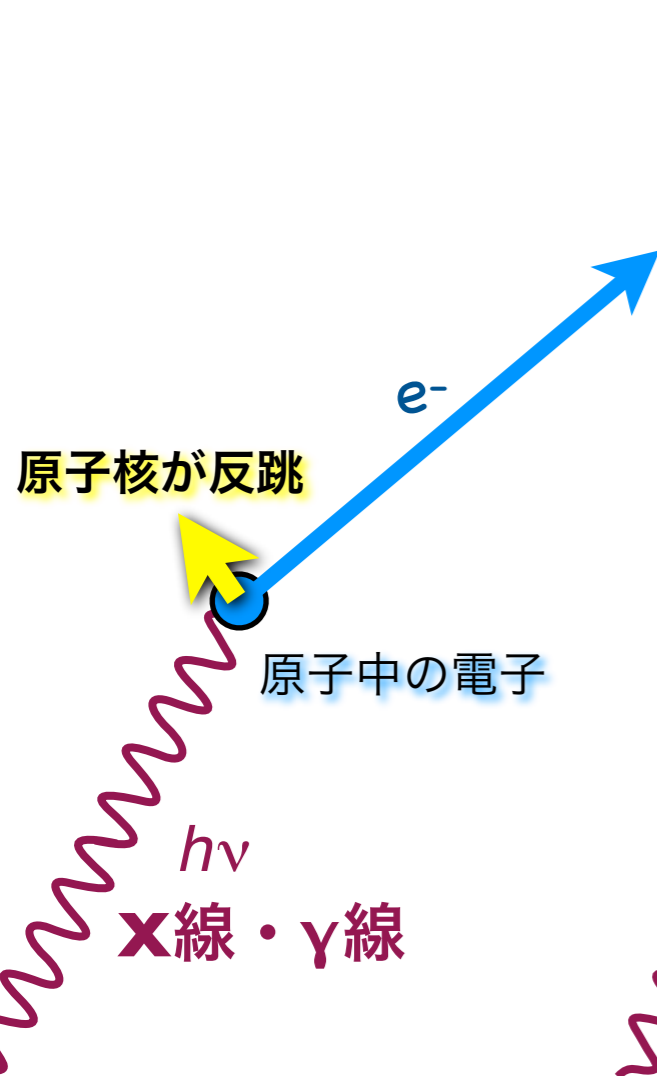
光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて  
一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず  
素通りするものも多い。☞

**光子数の指数関数的減少**

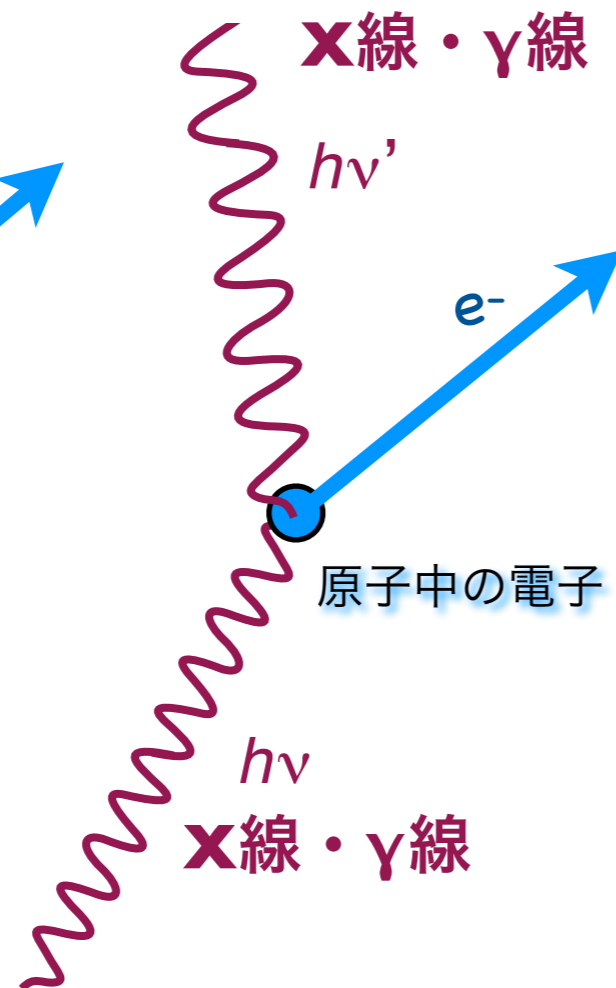
**反応断面積  $\sigma$**  (単位距離当たりの**反応確率**を与える) が重要

# 光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

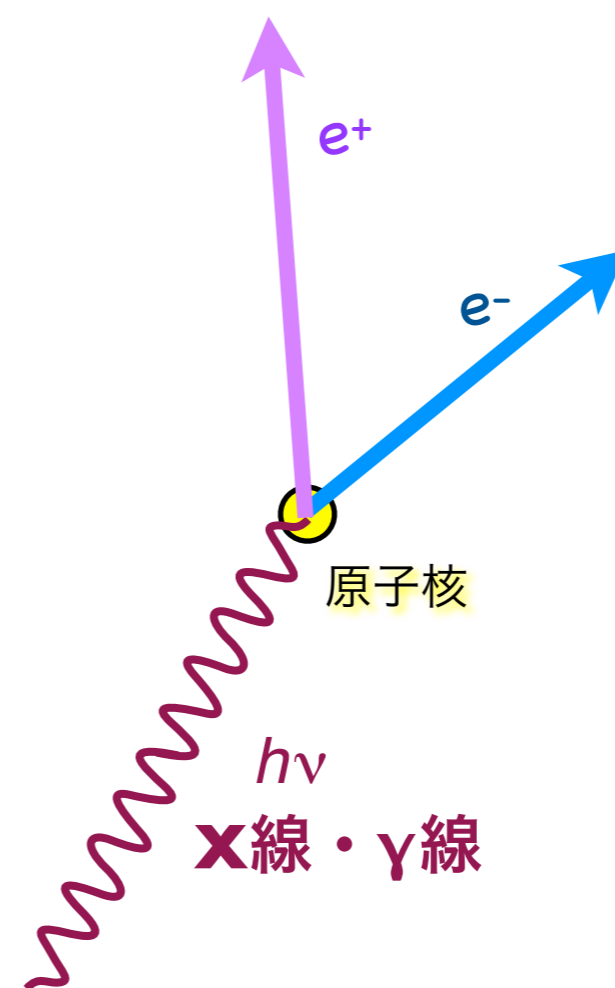
## 光電効果



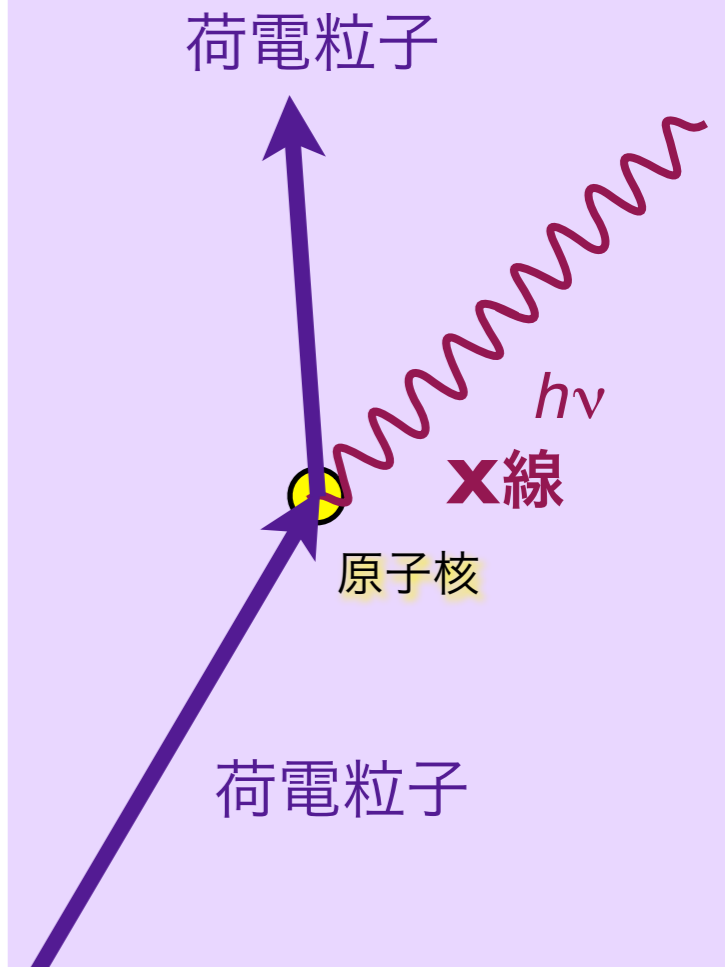
## コンプトン散乱



## 電子対生成



## 制動放射



高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生



# 光子

## 反応断面積

1 Mb  
=  $(0.1 \text{ \AA})^2$

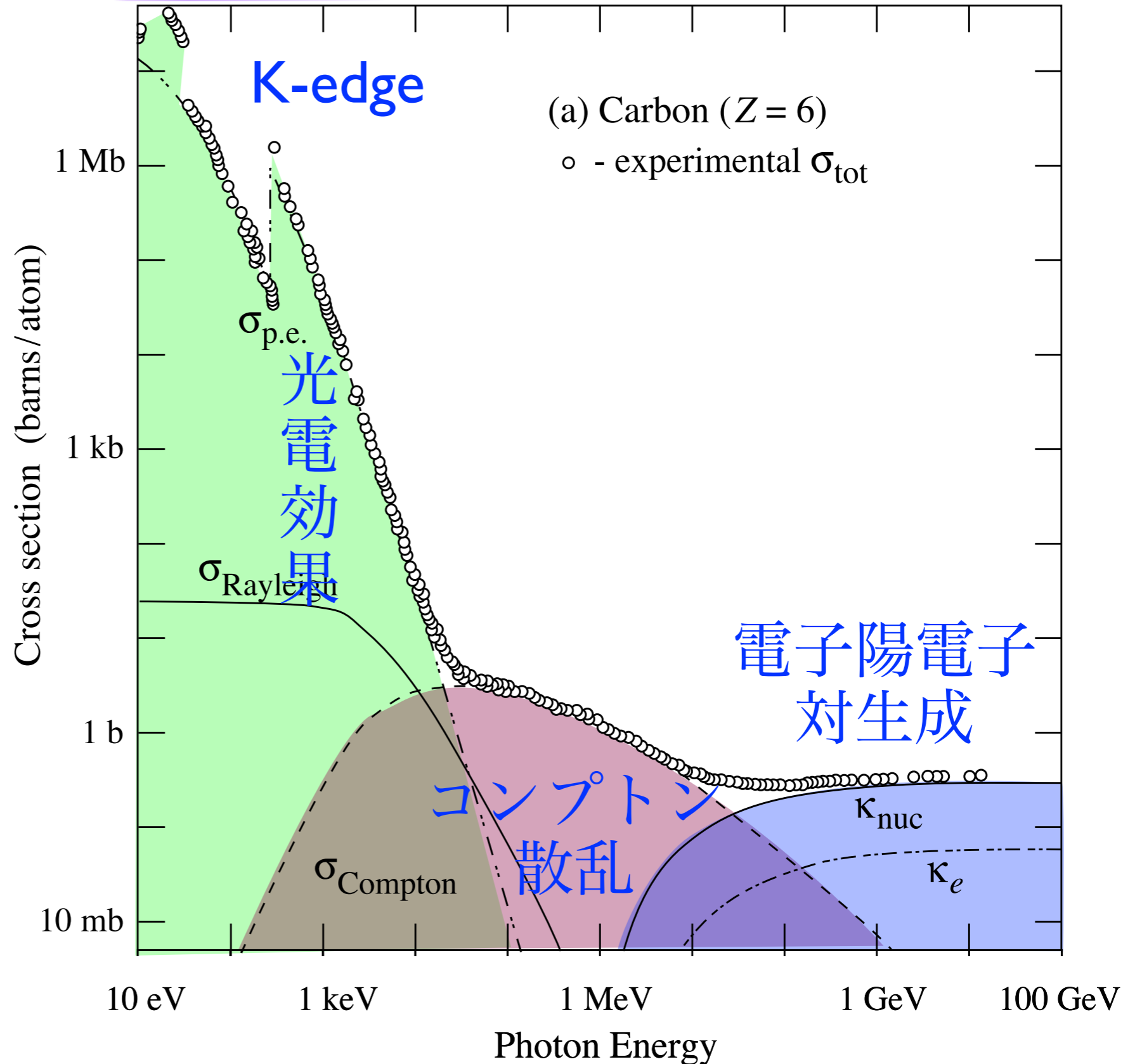
1 Mb

1 kb

1 barn  
=  $10^{-28} \text{ m}^2$   
=  $(10 \text{ fm})^2$

1 b

1 mb



# レントゲン(X線)撮影

吸収率の差を利用して撮像する。



(減弱)

造影剤 (I, Ba, Xe) :  $Z$  大 = 減衰係数 大

光電効果やコンプトン散乱の反応断面積は原子番号  $Z$  が大きい元素ほど顕著に大きい。

## X線 CT

### X線検査用造影剤

#### \* 陽性造影剤

・ヨード造影剤: 血管造影用

・硫酸バリウム: 消化管造影用

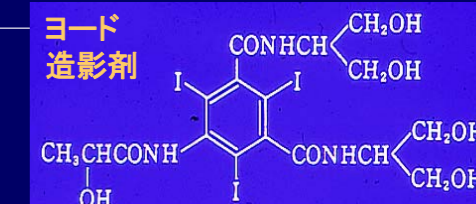
・キセノンガス(脳血流CT)

#### \* 陰性造影剤

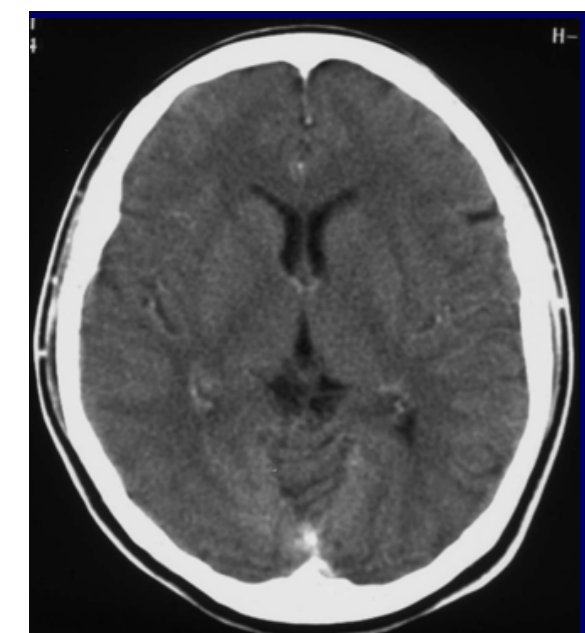
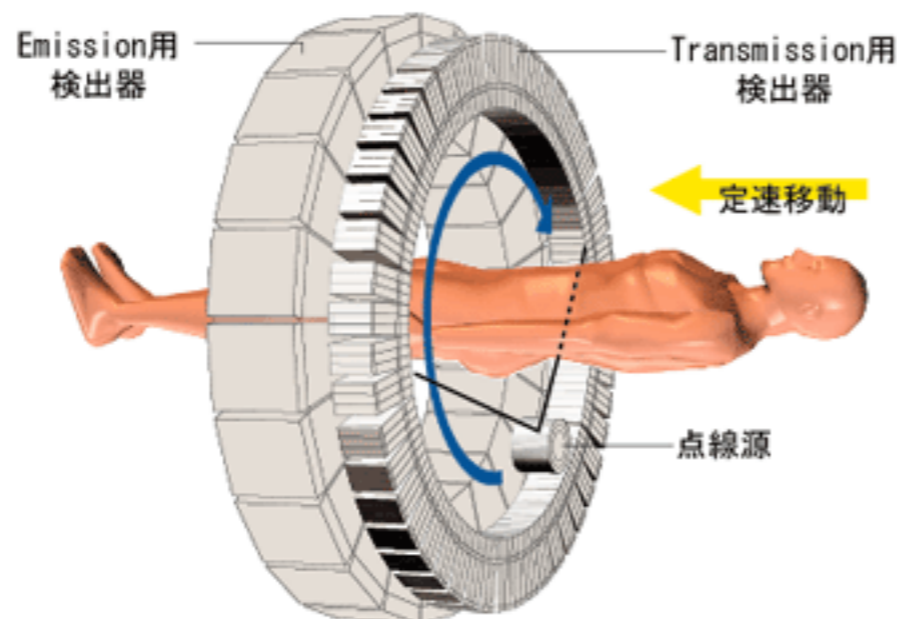
・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...

・オリーブ油(膀胱CT)

元素	原子番号	K吸収端
I	53	33.16 keV
Ba	56	37.41 keV
Xe	54	34.56 keV



イオパミドール 分子量: 777.09





# 放射線と物質との相互作用

## 中性子の反応と放射化

# 中性子の反応と放射化

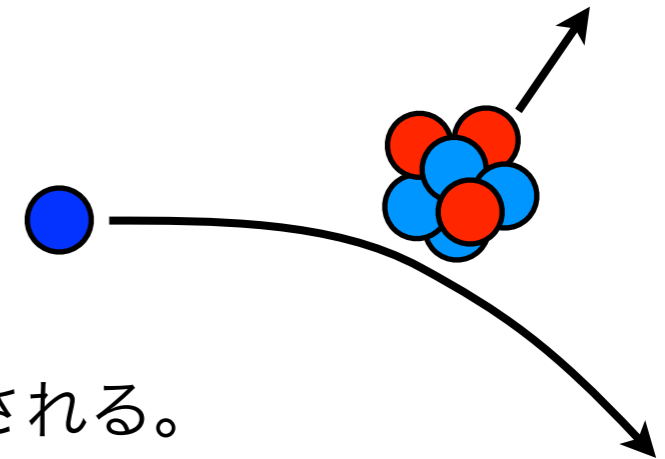
## 中性子の弾性散乱

高速中性子は原子核と衝突を繰り返して減速する。  
衝突毎にエネルギーを指数関数的に減らす。

中性子は、同じ質量をもつ陽子により最も効率的に減速される。

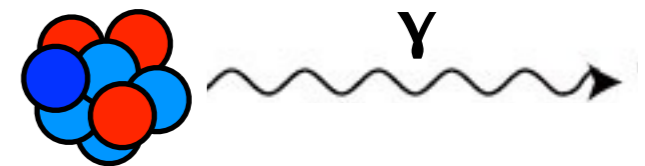
中性子の遮蔽には、水やコンクリートなど、水素原子を含む物質を用いる。

陽子など散乱された原子核が高 LET の荷電粒子として原子・分子をイオン化する。



## 中性子の吸収と核反応

質量数が1つ大きい原子核を形成したあと、 $\gamma$ 線などを放出。  
放射化の原因となる。



## 放射化

放射性物質でないものが放射線照射によって放射性を帯びること。

中性子や、**10 MeV 以上の  $\gamma$  線**による核反応で放射性核種が生じることがある。

通常の放射性核種による  $\beta$  線や  $\gamma$  線、原子からの X 線などでは起こらない。

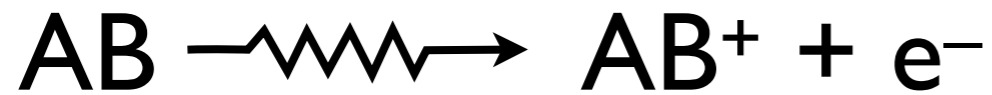
加速器施設や原子炉などの第一種管理区域では放射化に注意が必要。



# 放射線化学

# 放射線が誘起する素反応

(一部抜粋)



電離 (イオン化)



励起

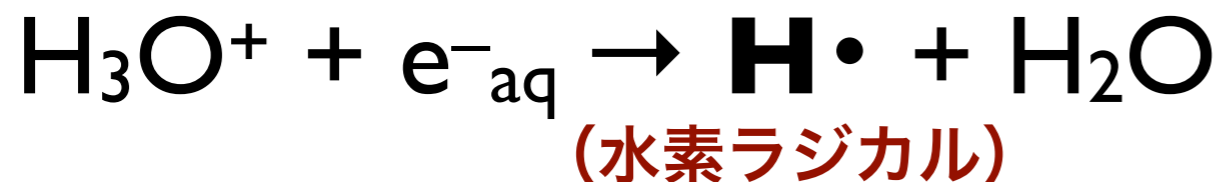
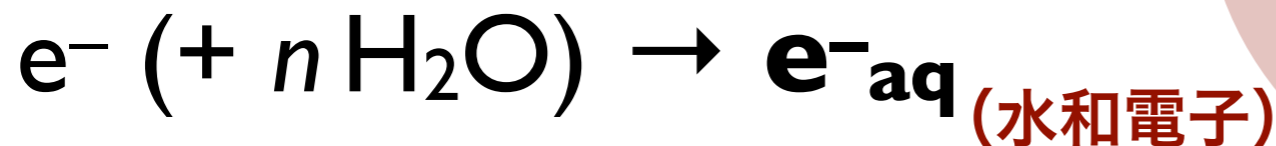
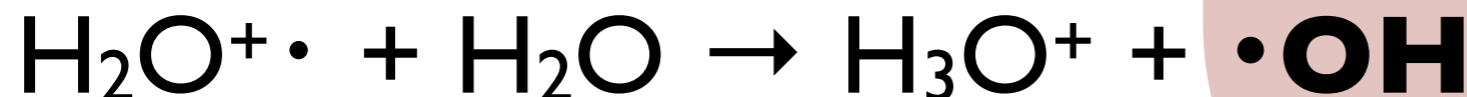
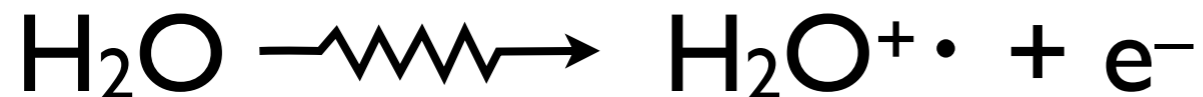


再結合



ラジカル生成

## 水中での反応



## 酸素効果



(ヒドロペルオキシラジカル)



(スーパーオキシドアニオン)



(過酸化水素)

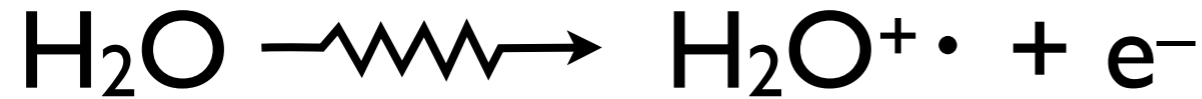
(活性酸素)



# 水中での反応

γ線照射による  
放射線化学収率  
(G値)

100 eV あたりに変化・生成する  
原子・分子・イオンの数。

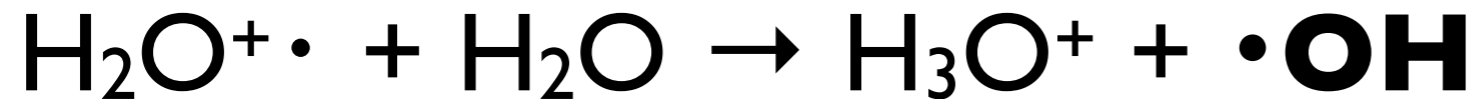


電離 (イオン化)

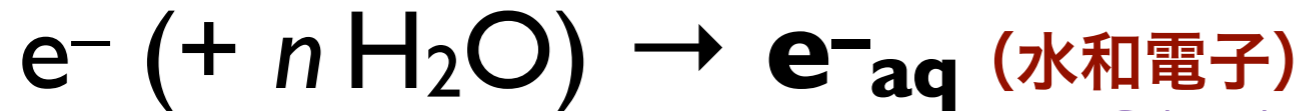


励起

$G(\cdot\text{OH}) = 2.7$   
(ヒドロキシルラジカル)



イオン分子反応

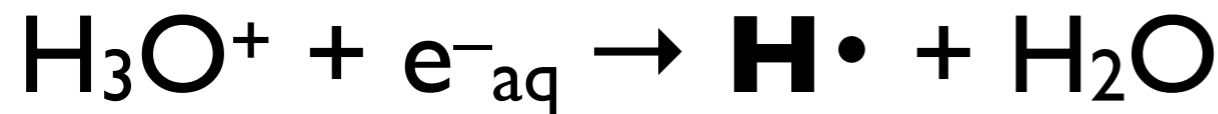


水和電子生成

$G(\text{e}^-_{\text{aq}}) = 2.65$



解離 (ラジカル生成)



電子捕捉

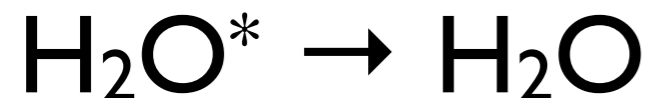
(水素ラジカル)  $G(\text{H}\cdot) = 0.55$



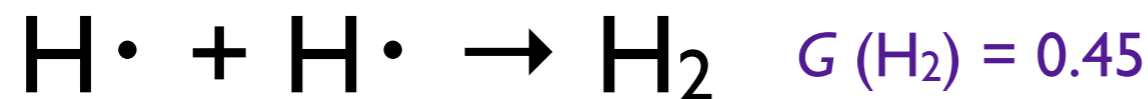
再結合



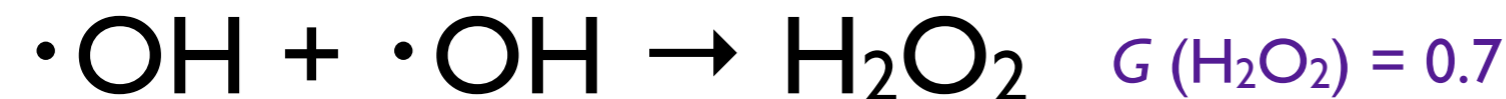
電子捕捉



脱励起



分子生成



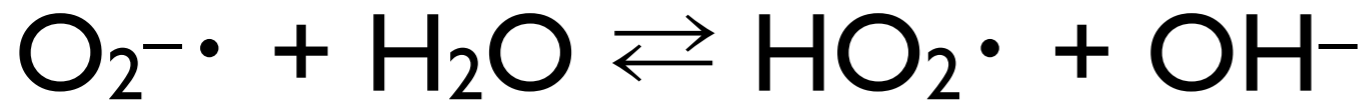
分子生成



分子生成

# 酸素効果

(活性酸素)



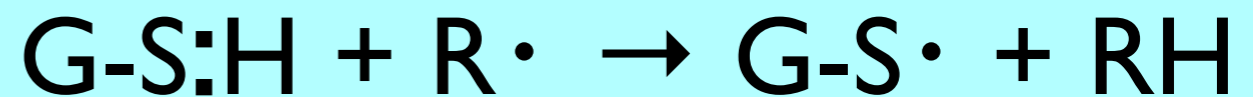
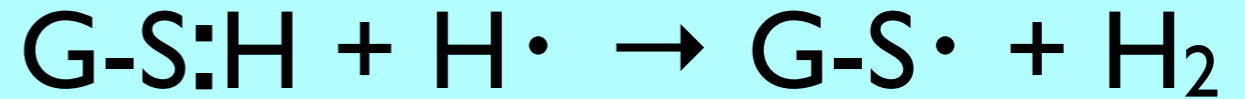
## 放射線防護剤

(ラジカルスカベンジャー)

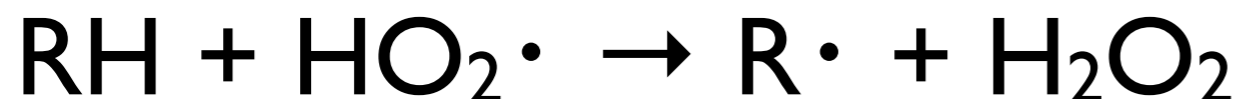
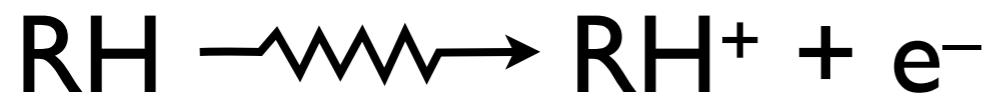
SH基, S-S 結合

例: システイン、システアミン

(グスタチオン)

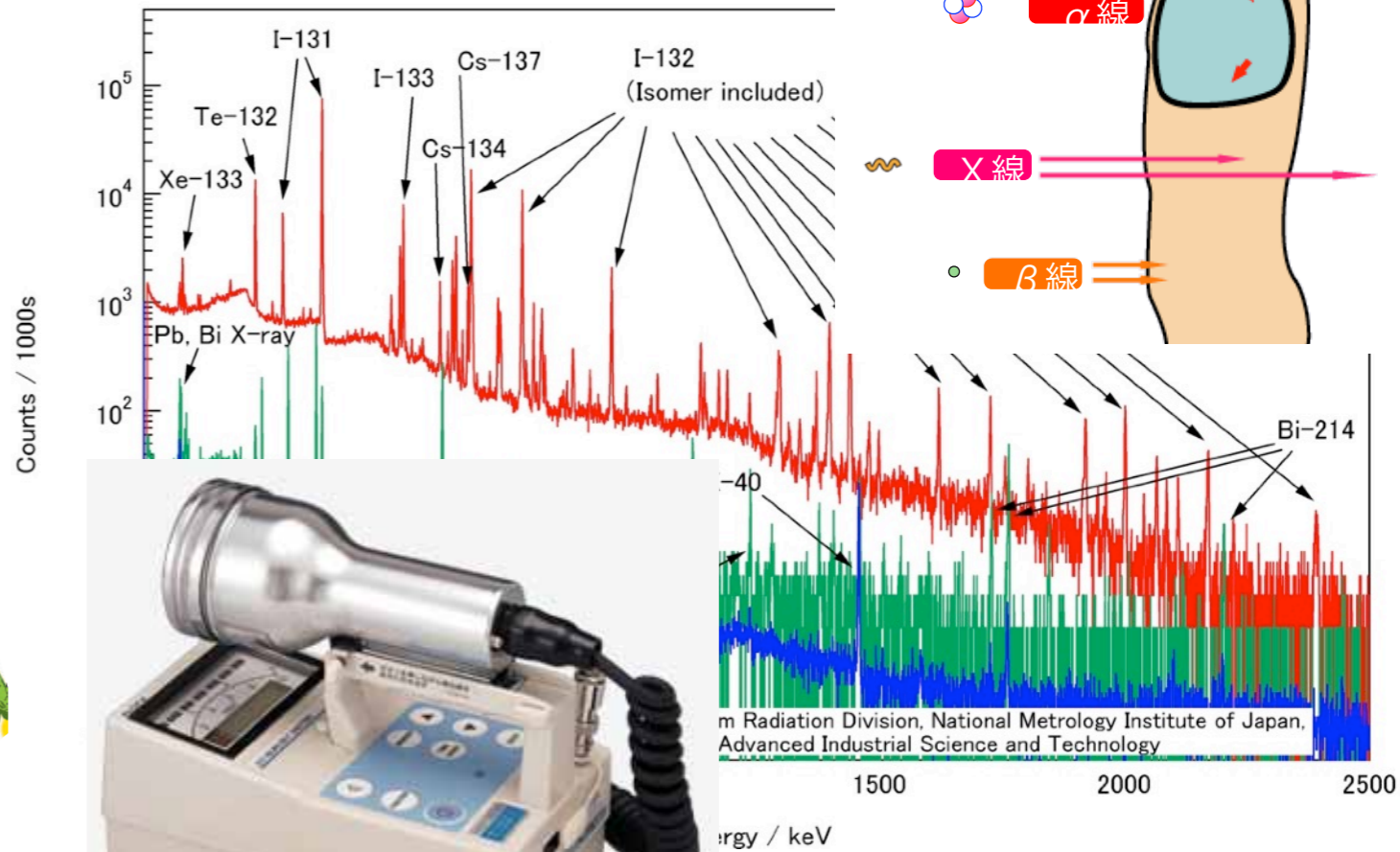
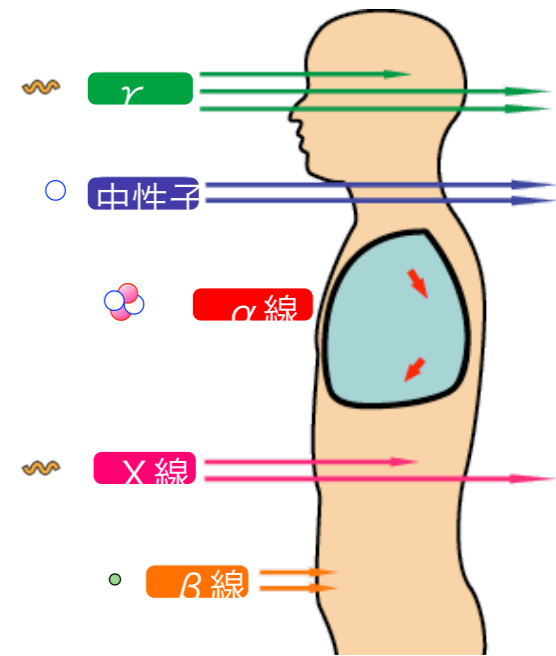


# 有機物の放射線化学反応





# 放射線の科学と安全



2020 / 5 / 12 (火)

第3話

## 放射線計測学・環境放射化学

### 放射線の単位・線量計算



# 放射線計測学



# 空間線量率測定 表面汚染検査



$\beta$  ( $\gamma$ )

# 放射線の測定



$\gamma$

## 検出器

気体の電離を利用

電離箱・比例計数管・GM管

シンチレータ + 光電子増倍管

NaI, CsI, plastic scinti., ZnS

半導体検出器

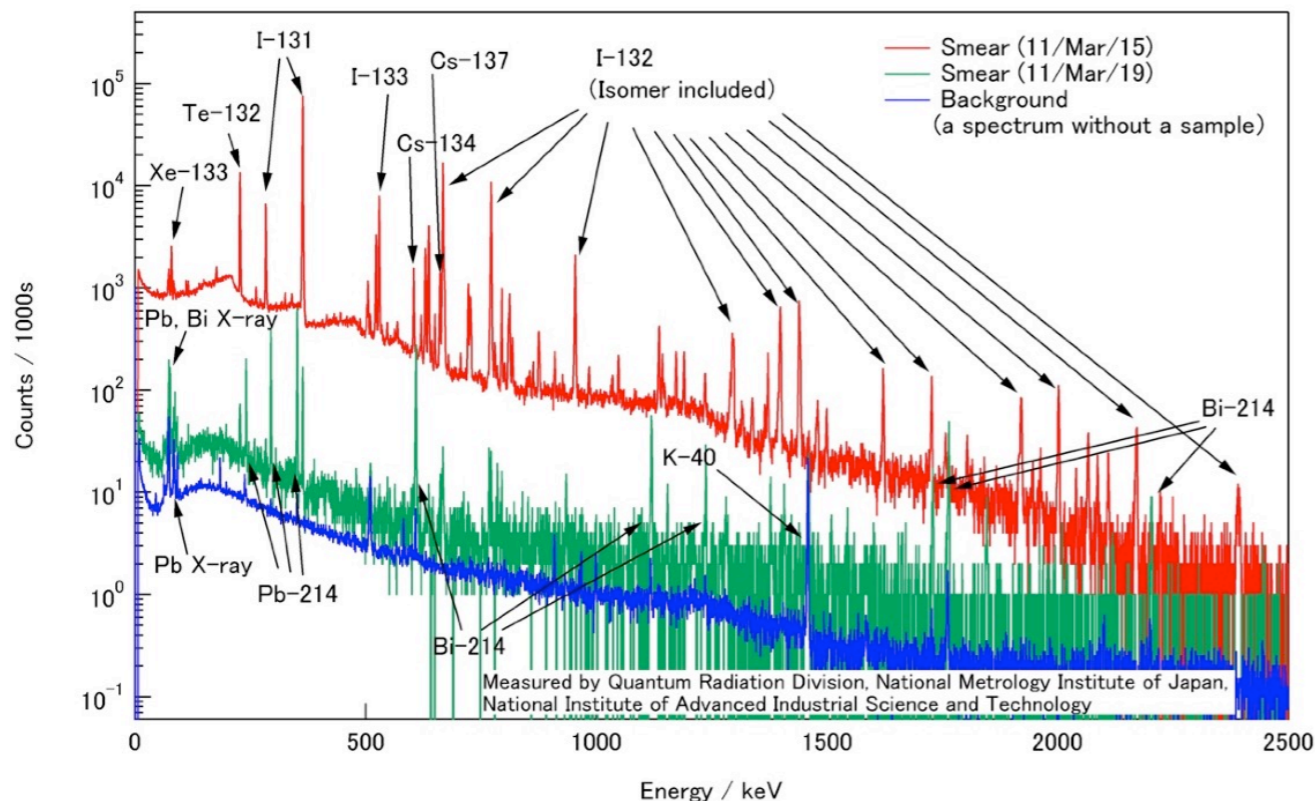
Ge, Si(Li)

計数 (cps = counts per second)

表面汚染検査計 (例: GM サーベイメータ) 空間線量計 (例: NaI(Tl) サーベイメータ)

# エネルギー分析 (核種同定)

ガンマ線スペクトル (ゲルマニウム検出器)



# 食品検査

食品検査用ゲルマニウム検出器





霧箱

Stream chamber





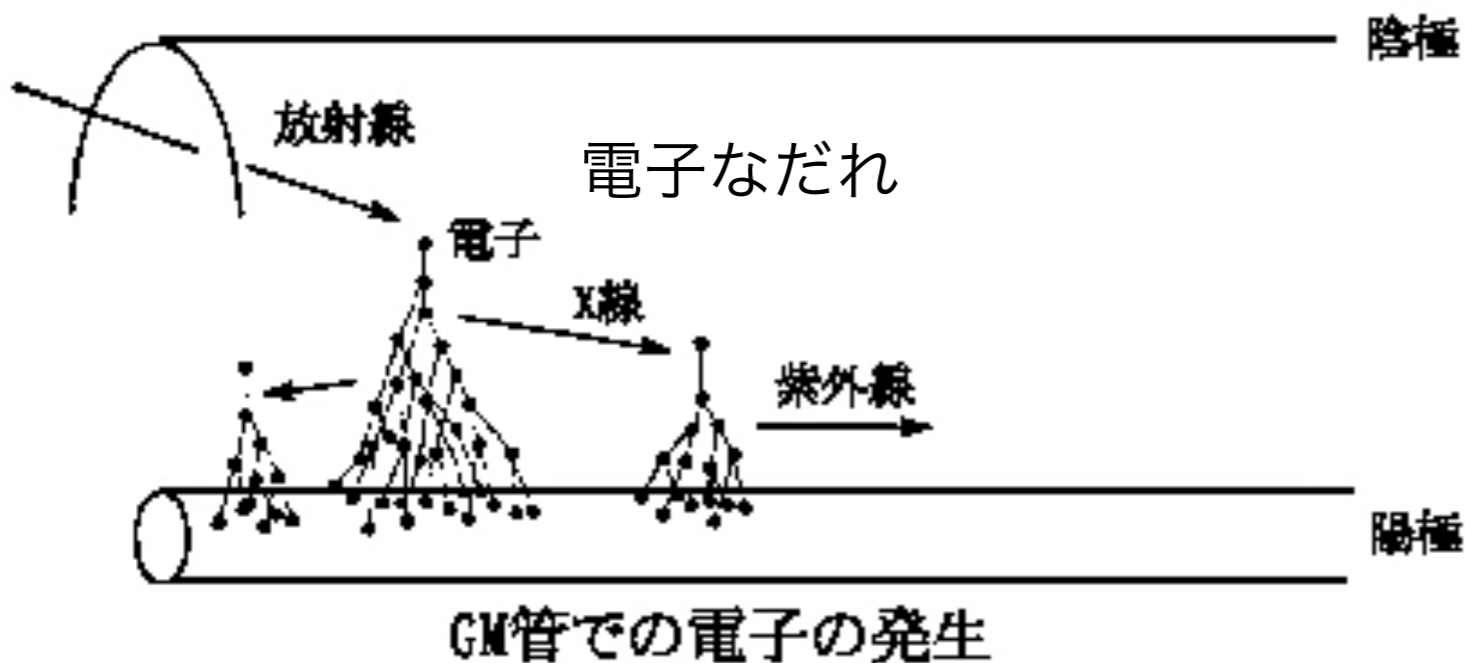
# GM管 表面汚染用 サイベイメータ



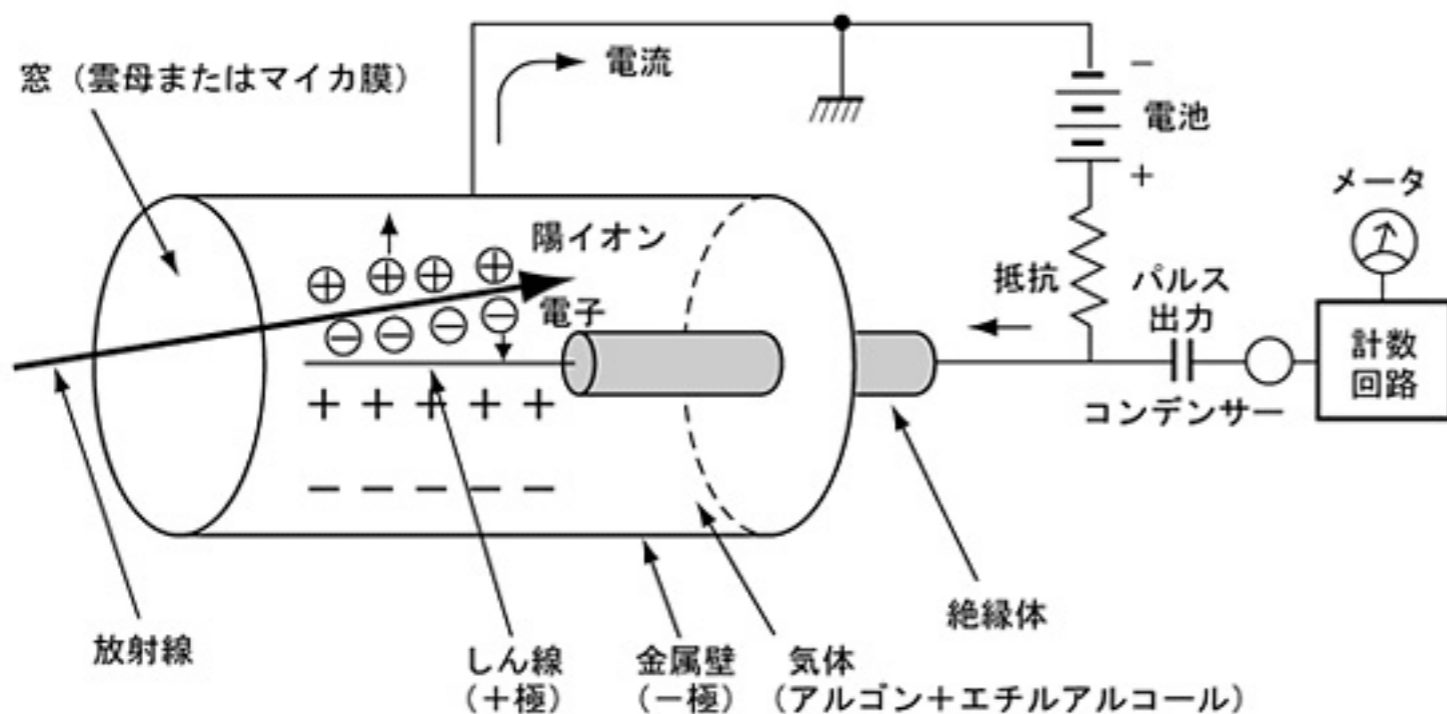
# 気体の電離を利用する放射線計測

## 電離箱, 比例計数管, GM管

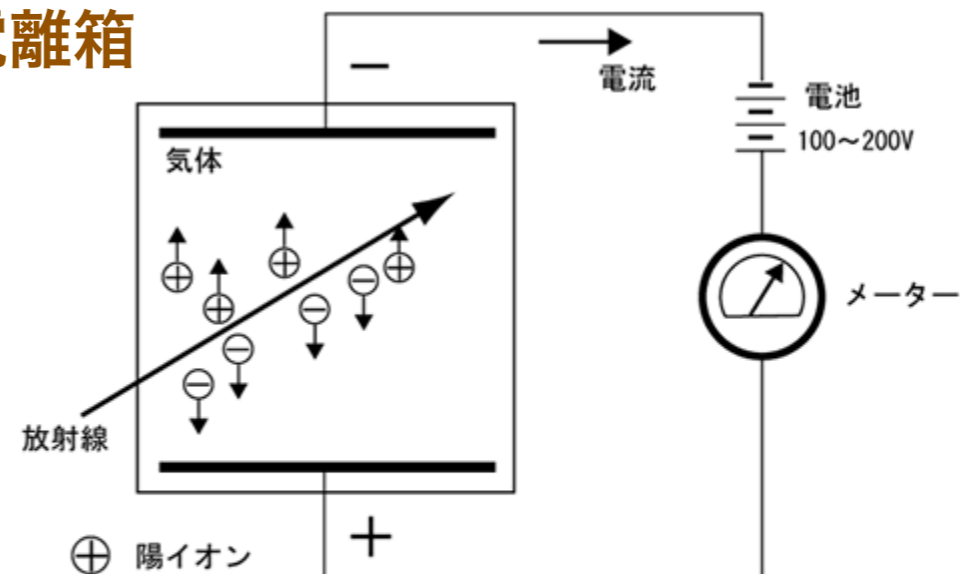
(ガイガー・ミュラー管)



### GM管

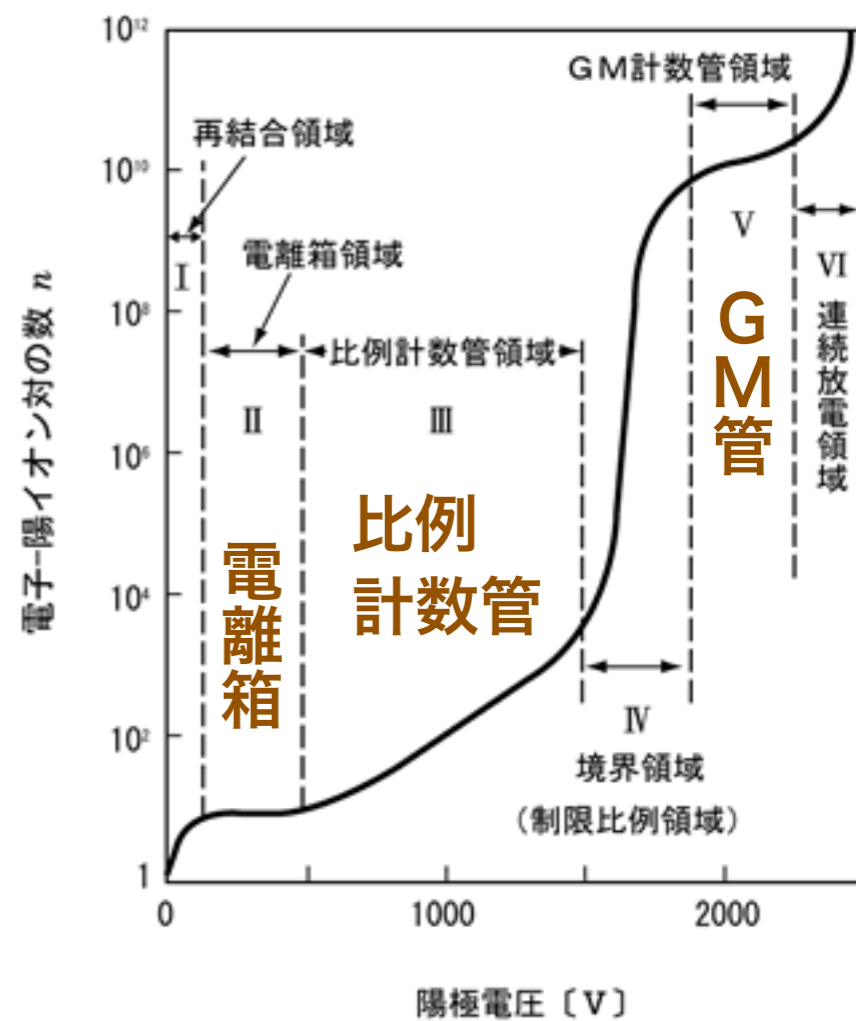


### 電離箱



- ⊕ 陽イオン
- ⊖ 陰イオン

電離箱では、 $10^{-9} \sim 10^{-14}$ A程度の微電流を測定する必要がある。





# 放射線照射による物質の**蛍光発光** シンチレータ (Scintillators)

プラスチックシンチレータ  
およびライトガイド

無機 : NaI (Tl), CsI (Tl) (γ線、X線)

BGO, GSO など (γ線、X線)  
 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$   $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$

ZnS (Ag) (α線)

BaF<sub>2</sub>

有機 : プラスチックシンチレータ (電子線)  
(荷電粒子)

例 : PPO, POPOP / ポリスチレン

: 液体シンチレータ (β線)

例 : p-テルフェニル

/ トルエン、キシレン

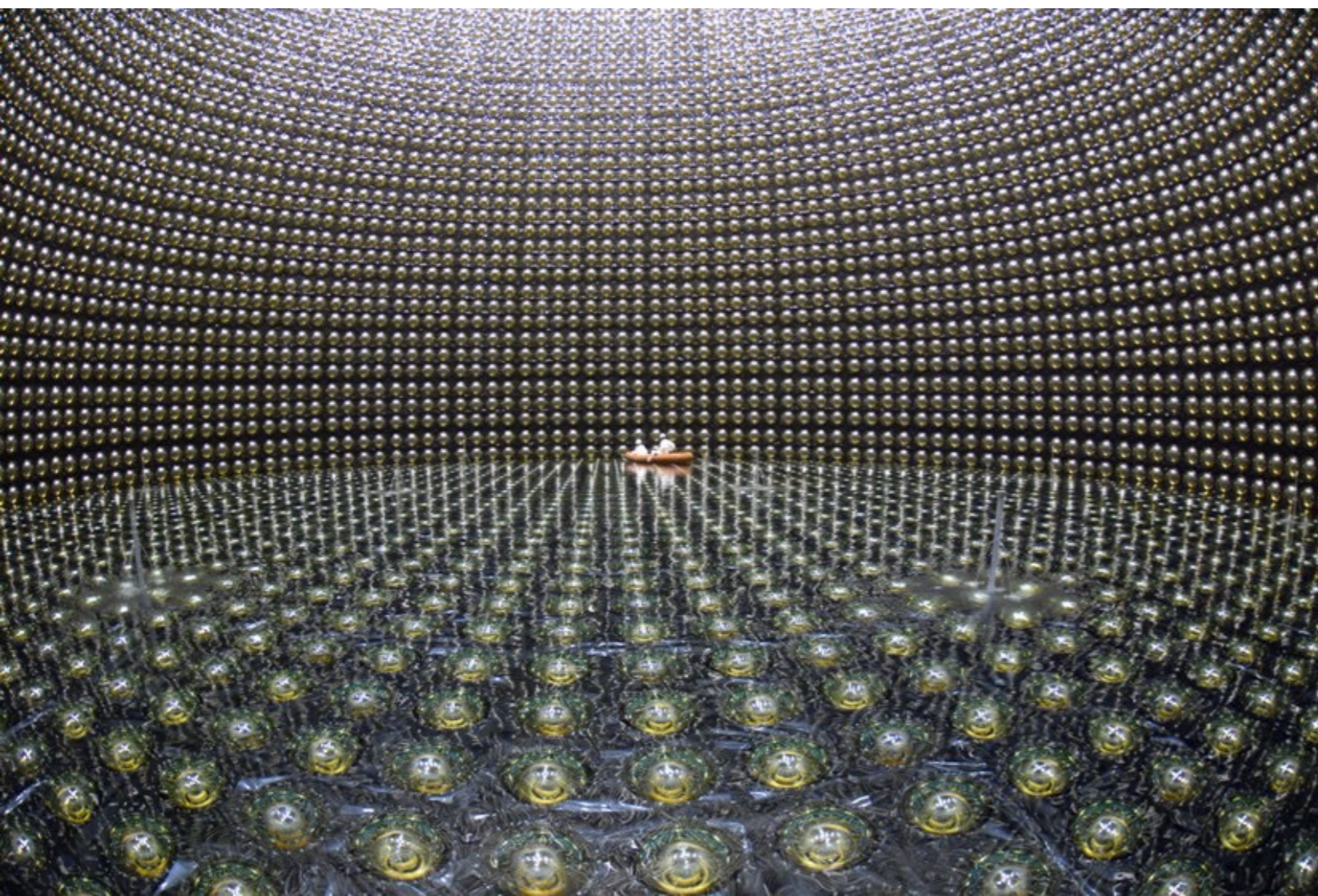
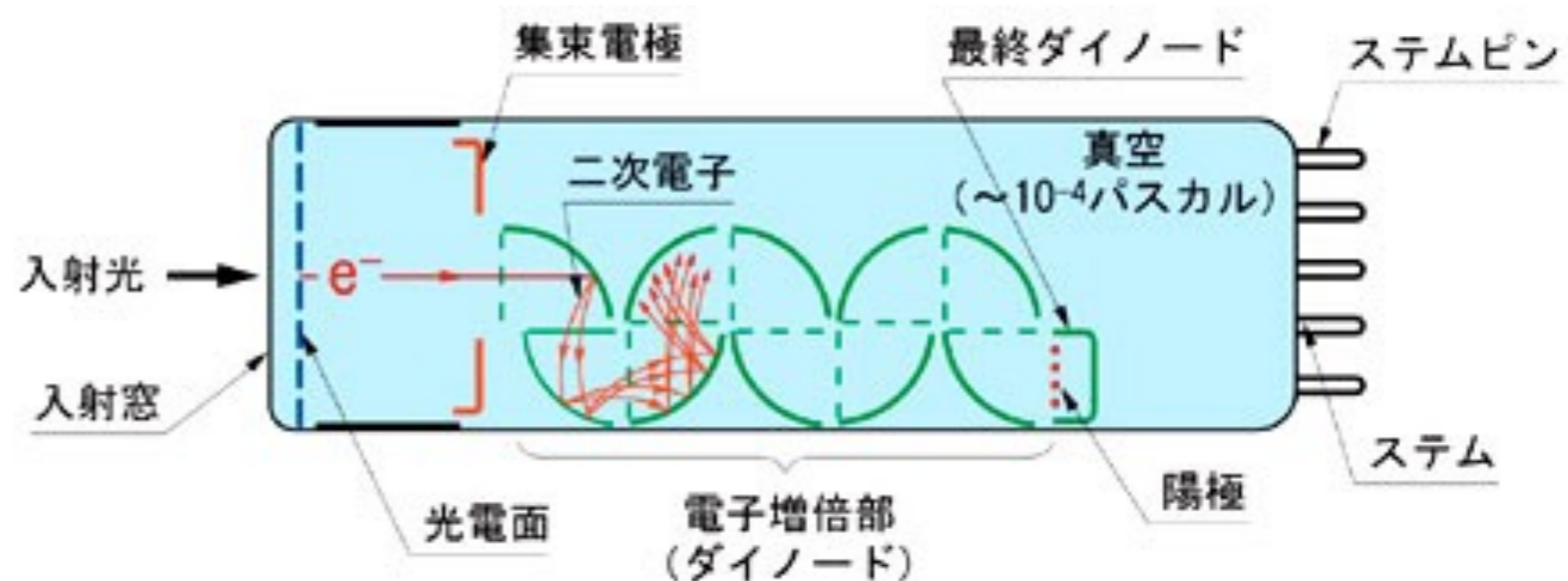
電気パルス : タイミング : 粒子透過時刻  
: パルス高 : エネルギー



液体シンチレーションカウンタ



# 光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)



光 ⇒ 光電効果 ⇒ 電子増幅  
⇒ 電流

シンチレータとの組み合わせ  
Scintillator

放射線 ⇒ 分子の励起 ⇒ 蛍光  
光 ⇒ 光電子増倍管



# 放射線の測定

計数 (cps = counts per second)

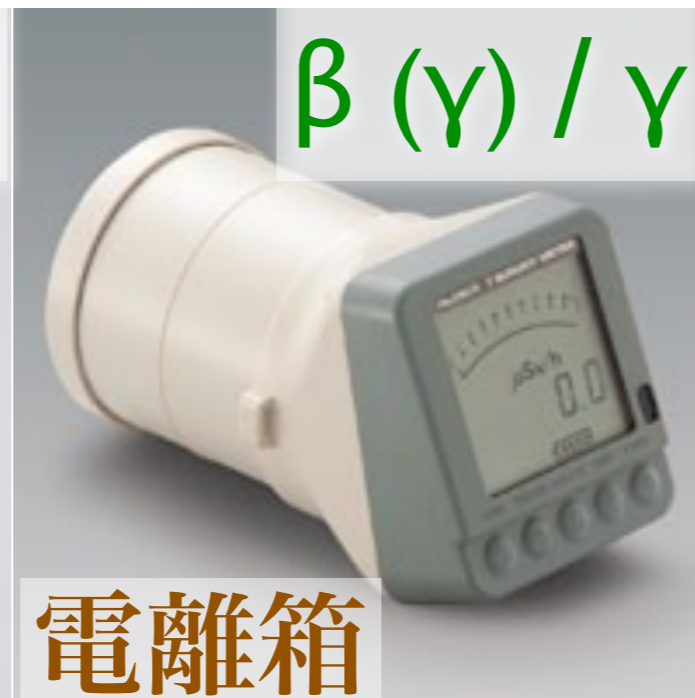
サーベイメータ 【空間線量率測定】

$\beta (\gamma) / \gamma$



GM管

$\beta (\gamma) / \gamma$



電離箱

$\gamma$



CsI (Tl)



NaI (Tl)

シンチレーション  
(放射線照射による物質の蛍光発光)

$\beta (\gamma)$



【表面汚染検査】



気体の電離

$\gamma$

$\beta (\gamma)$



GM管

$\alpha$



ZnS (Ag)



# 放射線管理区域

管理区域  
(使用・貯蔵施設)



許可なくして  
立ち入りを禁ず

放射性同位元素  
使用室



第 2 種

←開閉→





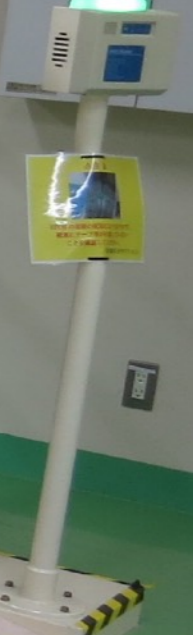


管理区域 (限域エリア) 用靴履  
Shoehorn for Controlled Area  
(Maintenance Area)

管理区域 (限域エリア) 用靴履  
Shoehorn for Controlled Area  
(Maintenance Area)

更衣室  
Changing Room

管理区域 (限域エリア) 用靴履  
Shoehorn for Controlled Area  
(Maintenance Area)



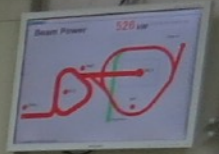
△注意  
RPCM の故障の原因になりますので  
靴底にテープ等が付着していない  
ことを確認してください。  
放射線安全セクション

△注意  
RPCM の故障の原因になりますので  
靴底にテープ等が付着していない  
ことを確認してください。  
放射線安全セクション

静かにお乗りください。  
Please step on the foot detector with care.

RPCM  
Please step on the foot detector with care.

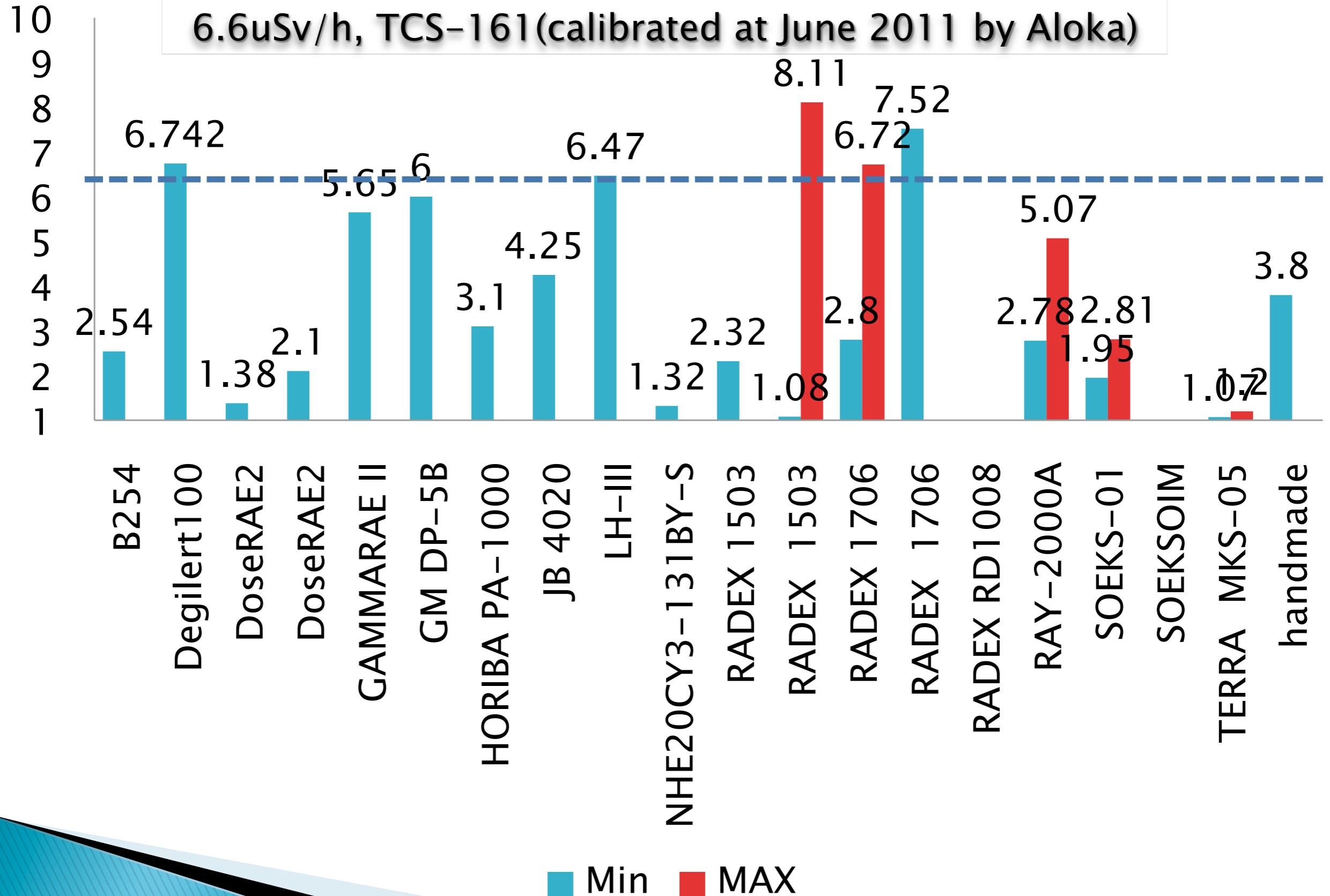
RPCM  
Please step on the foot detector with care.



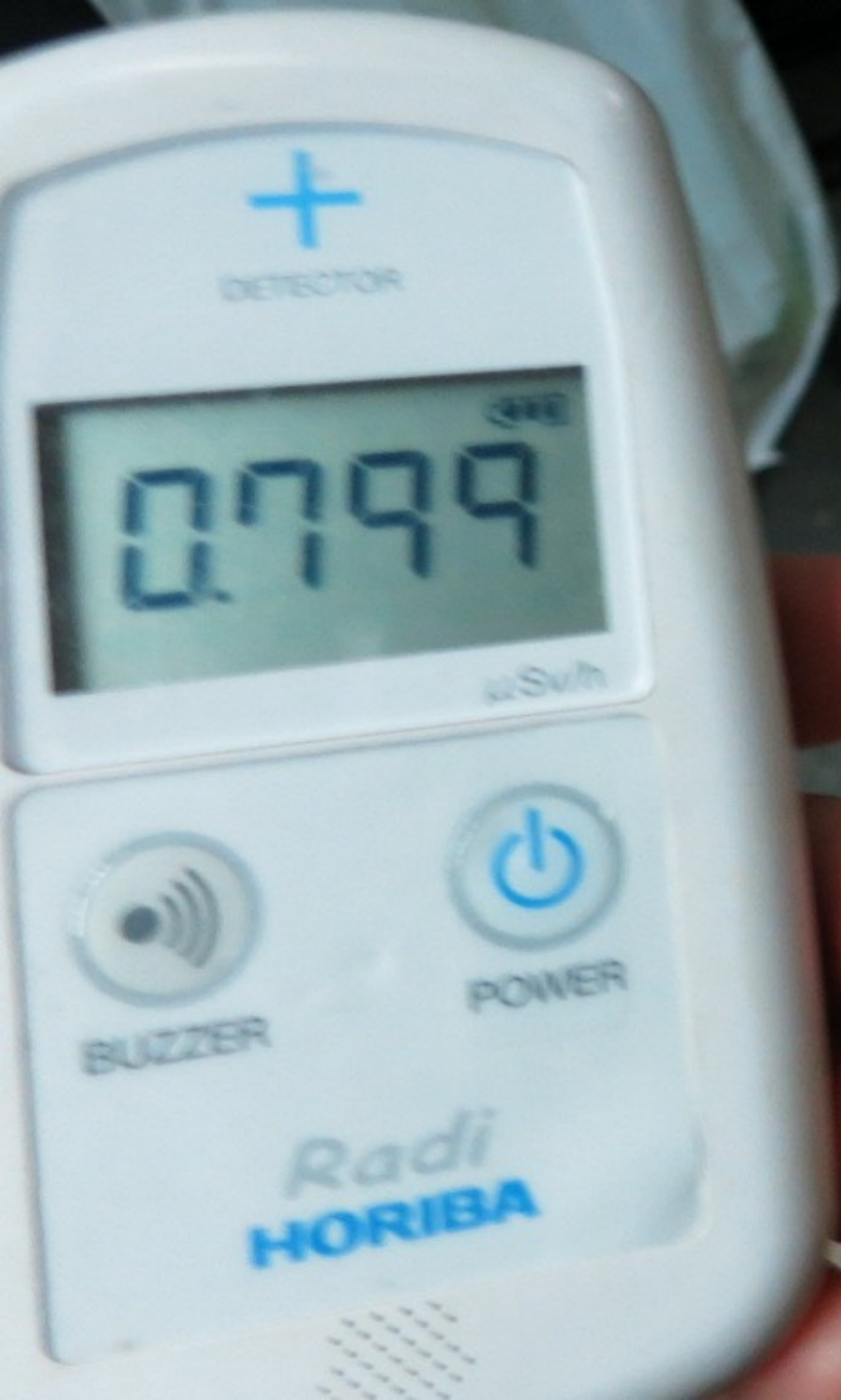




# 以前の勉強会での測定結果









# 放射線の測定

## 半導体検出器

(Semiconductor detectors)

例：Si(Li) 検出器 (X線)

Ge 検出器 (高エネルギー分解能)

( $\gamma$ 線・X線)

放射線  $\Rightarrow$  電離

$\Rightarrow$  電子正孔対  $\Rightarrow$  電荷測定

電気パルス：パルス高：エネルギー

**エネルギー分析 (核種同定)**

## 試料測定

$\gamma$  ゲルマニウム検出器 (Ge detector)



食品検査用ゲルマニウム検出器

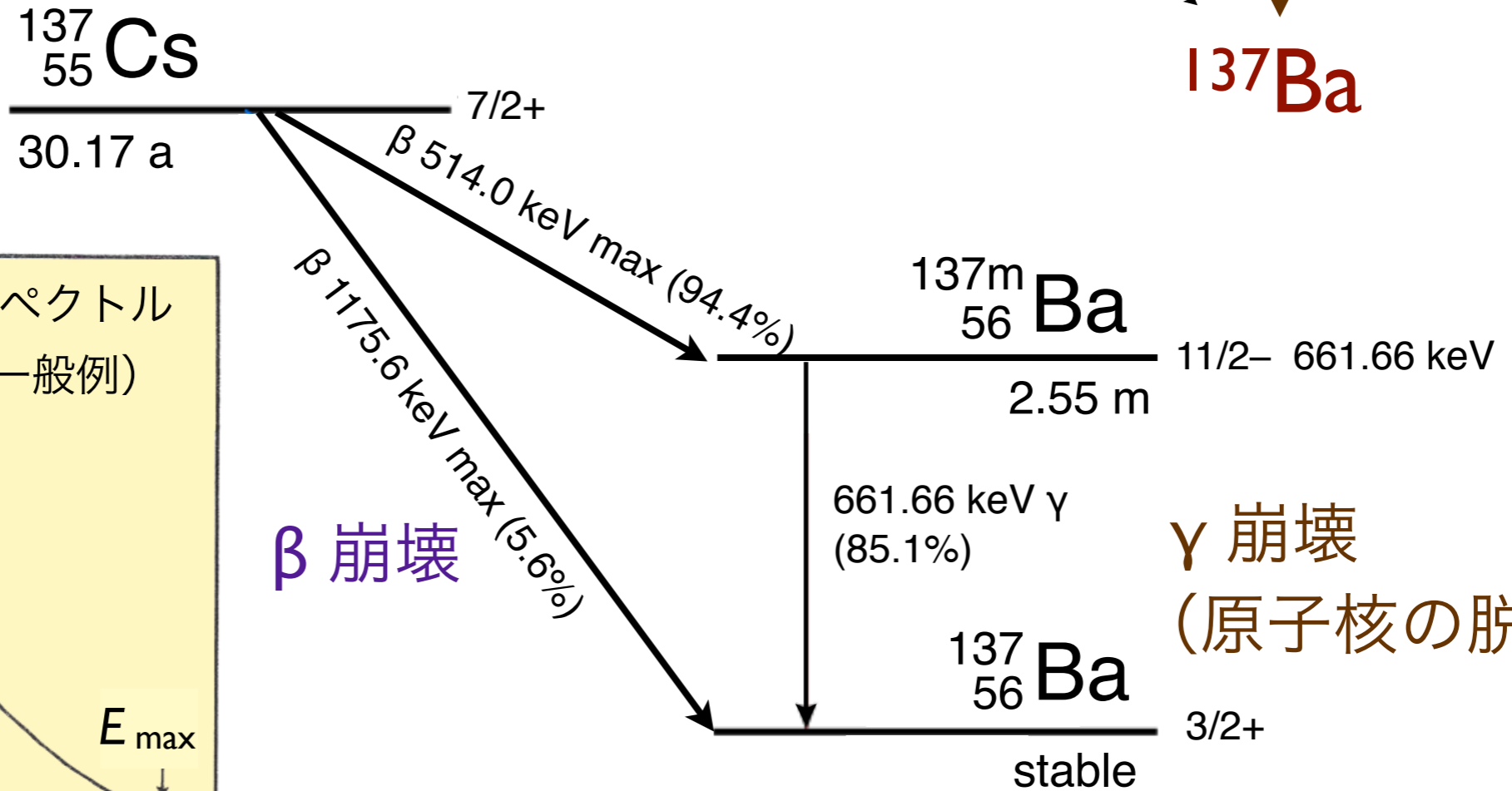




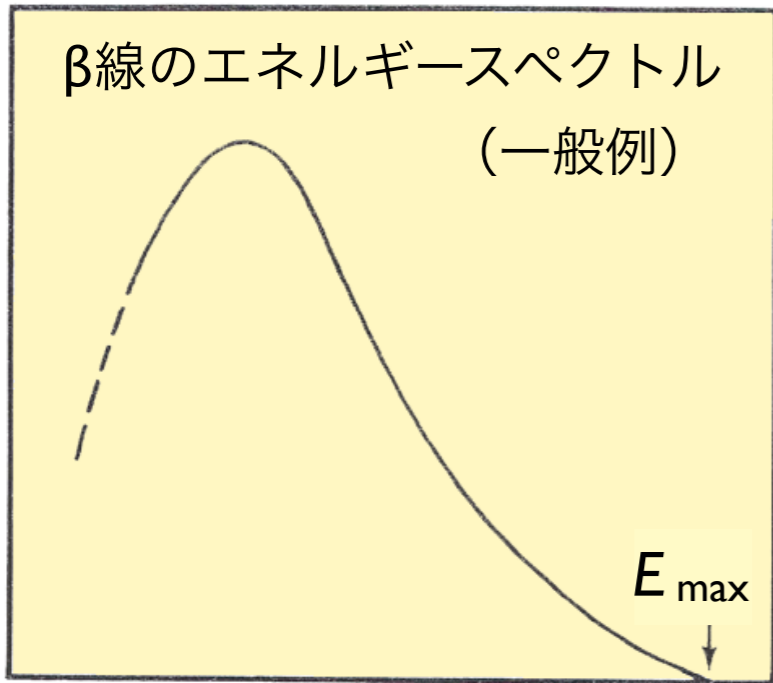


# 壊変図式

例： $^{137}\text{Cs}$

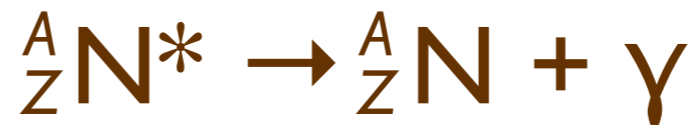
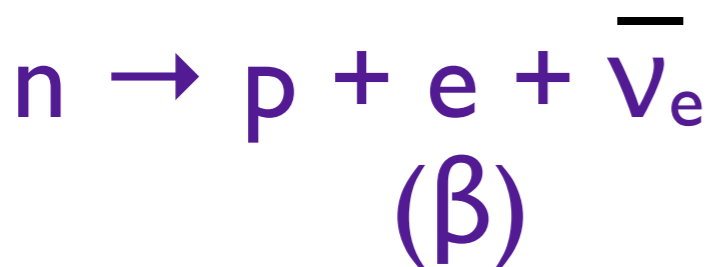


粒子数の分布



エネルギー  $E_\beta$

β線 (連続スペクトル)



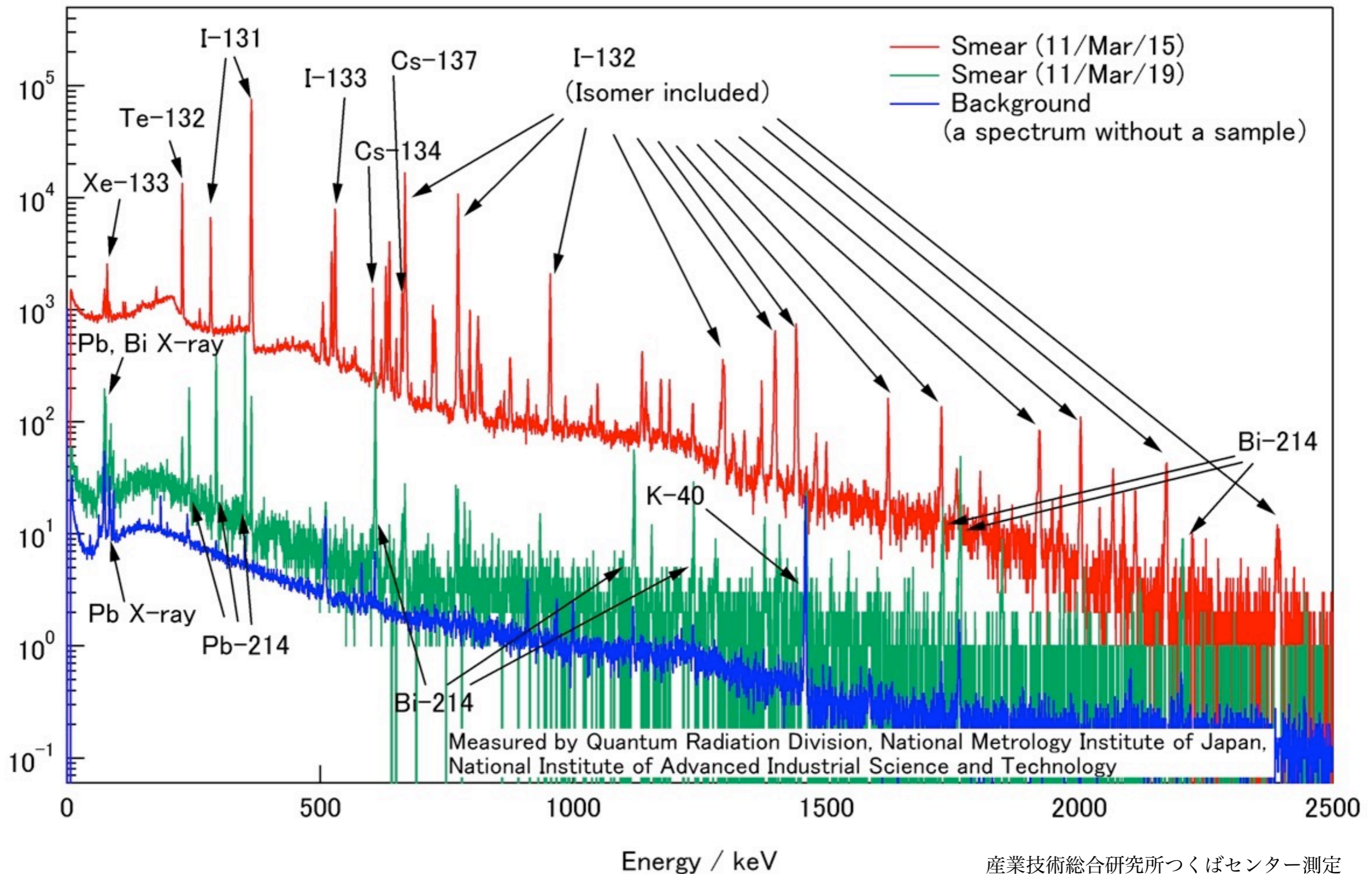
γ線 (線スペクトル=決まったエネルギー)

γ線のエネルギーで核種を同定

γ崩壊  
(原子核の脱励起)

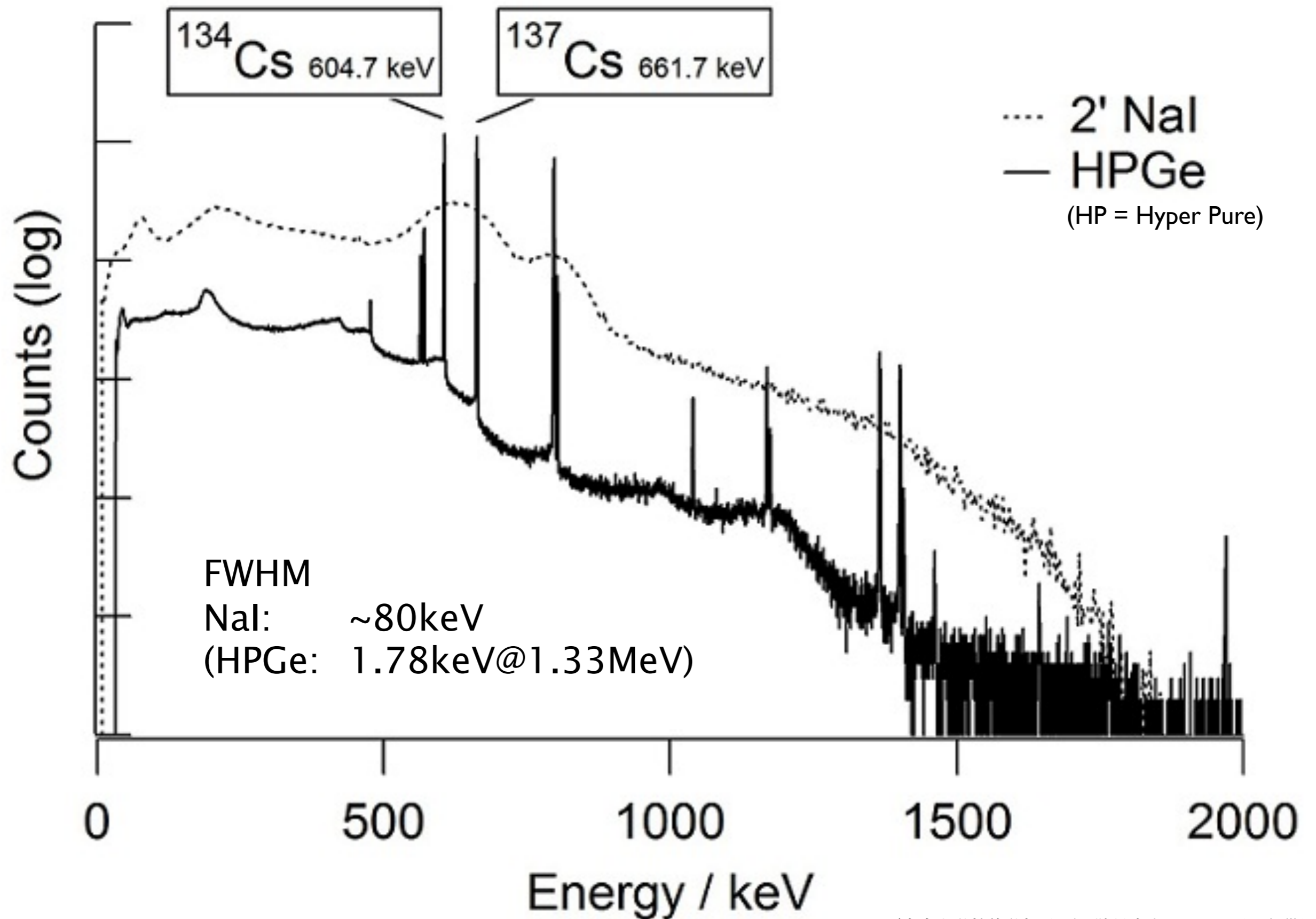
# エネルギー分析 (核種同定)

## ガンマ線スペクトル (ゲルマニウム検出器)





# γ線スペクトルの比較(NaIカウンターvsGe半導体検出器)



# 食品中の放射性物質の基準値

## ■放射性セシウムの基準

2012/1/20 朝日新聞

暫定基準 2011		新基準案 2012	
野菜類	500 Bq	一般食品 (野菜類、穀類、 肉・卵・魚・ その他)	100 Bq
穀類	500 Bq		
肉・卵・魚・その他	500 Bq		
飲料水	200 Bq	飲料水	10 Bq
牛乳・乳製品	200 Bq	牛乳	50 Bq
		乳児用食品	50 Bq

(1kgあたり)

100 ベクレルの放射性セシウムは何グラムか。

(そもそも、福島第一原発から環境中に放出された放射性物質は全部でどのくらいの量か。)

放射線はどうやって測るのか。検出限界以下 (N.D.) とは？

(検出限界値を限りなく下げるより、スクリーニングで多量汚染のものを確実に避けることが重要)

一般食品の新基準値の出し方  
mSvはミリシーベルト。Bqはベクレル

食品からの被曝線量の限度

1mSv/年

飲料水分

0.1mSv/年

一般食品に割り当てる分

0.9mSv/年

食品に含まれるセシウムが1kgあたり何Bqまでなら0.9mSvを超えないか？

食べる量、種類などをもとに年代別に計算

年齢区分	性別	限度値 (Bq/kg)
1歳未満	男女平均	460
1~6歳	男	310
	女	320
7~12歳	男	190
	女	210
13~18歳	男	<b>120</b>
	女	150
19歳以上	男	130
	女	160
妊婦		160

最も厳しい

さらに切り下げ

新基準値

100 Bq/kg



# どうやって測っている？ (I)

100 Bq/kg = 10 Bq / 100 g

検出効率は 1% 程度

(立体角・Ge結晶による検出効率)

$^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の放射能比は 1:1

(福島原発事故当時)

**基準値は、測定上はそれぞれの核種で**

**0.05 cps / 100 g に相当**

(20秒に1カウント！)

**低バックグラウンド環境での測定が必須**

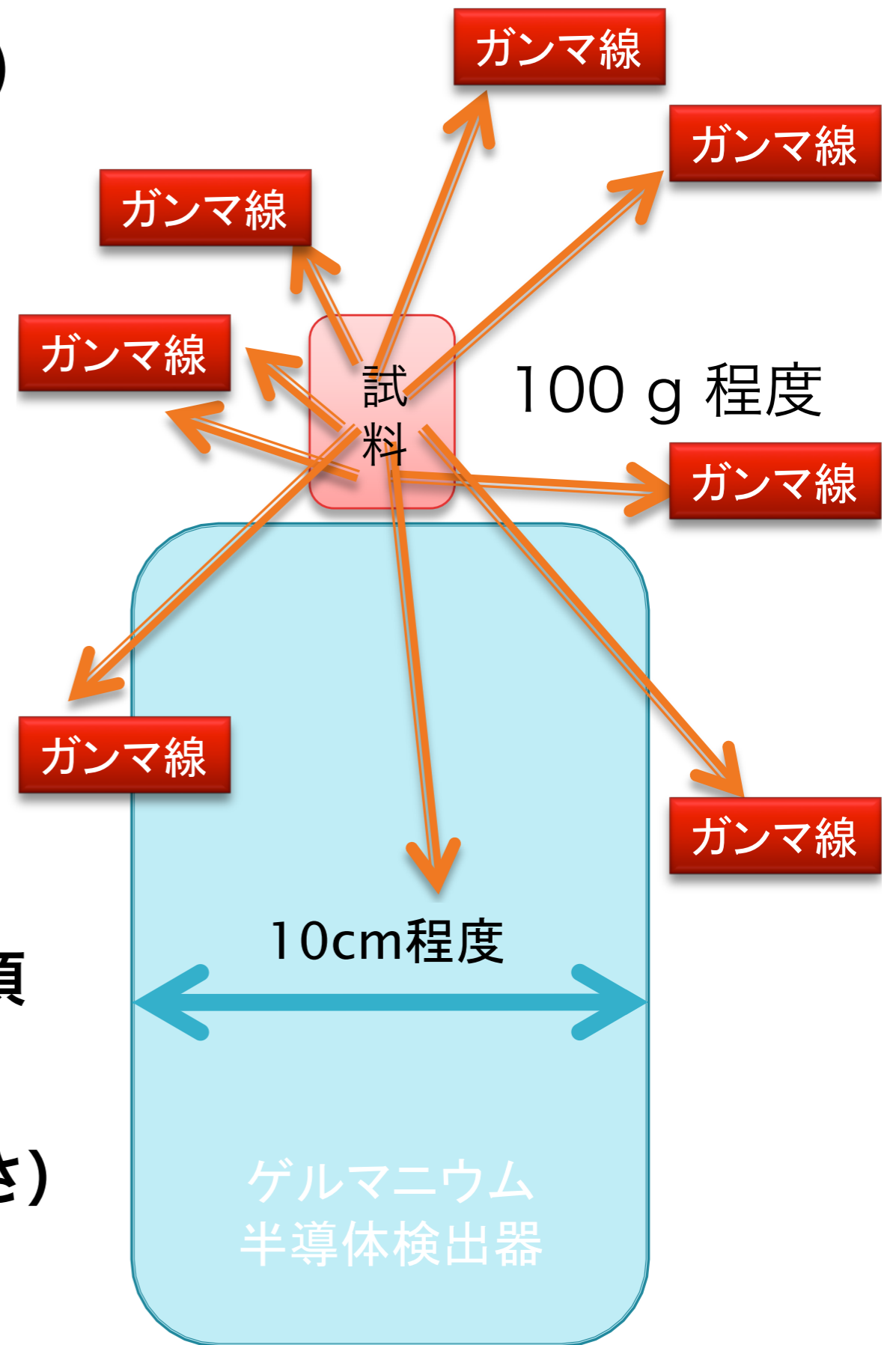
(環境放射線の遮蔽)

**長時間の測定が必要 (統計学的不確かさ)**

(最低でも1時間以上の測定)

短時間では**検出限界値**が低くできない。

⇒ **N.D.** (Not Detected = **不検出**)  $\neq$  0 Bq (不存在)



(図の提供：東京大学教養学部 小豆川勝見先生)

# 10試料の測定結果(詳細)

No.	試料	採取場所	$^{134}\text{Cs}$ (Bq/kg)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
1	畑の土	練馬区内	ND(5.56)	14.1±2.17
2	ジャガイモ	練馬区内	4.58±0.55(0.23)	7.16±0.86(2.33)
3	培養土	練馬区内	5.95±1.43(5.82)	9.35±1.89(6.78)
4	梅	練馬区内	ND(2σ)(3.98)	ND(2σ)(4.04)
5	干し椎茸	群馬産	ND(26.6)	ND(29.4)
6	路傍の土	練馬区内	4110±20.9(24.6)	6330±38.7(21.6)
7	生椎茸	富山産	ND(5.65)	ND(5.73)
8	カツオ	?	ND(4.12)	ND(5.32)
9	田圃の土	練馬区内	185±11.6(37.5)	298±19.4(33.5)
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42±0.29(1.01)	ND(2σ)(1.38)



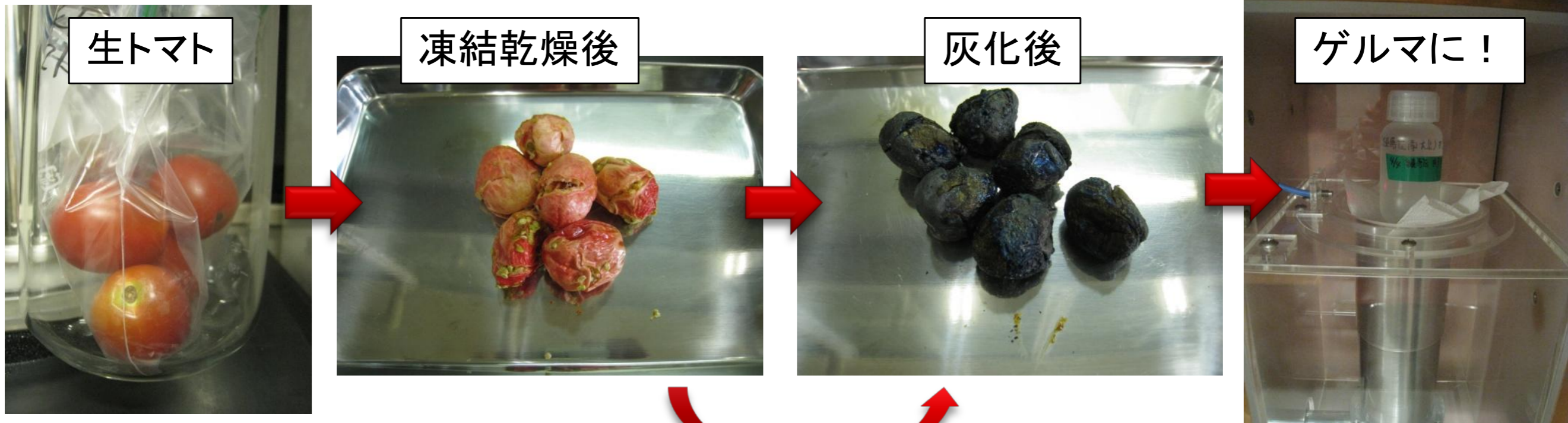
# 食品に含まれる放射性物質の測り方

- ▶ 食品の放射能は正確に測りにくい！
  - 水っぽい(水は放射線の遮蔽剤)
  - 隙間があったり密度が一定でなかったり
  - ひとつひとつのサンプルには揺らぎがある

なぜ灰にするの？

含まれる放射性物質を濃縮する(焼却炉の灰と同じ理屈)ことで、検出限界値を超えて測りやすくする

## 食品(トマト)の前処理



飛灰を発生させないように炭状にする

## 現在の放射性物質の基準値

核種	基準値(Bq/kg)	
放射性ヨウ素( $^{131}\text{I}$ )	300	
放射性セシウム( $^{134+137}\text{Cs}$ )	飲用水	10
	一般食品	100



# 福島米の全量全袋検査



基準値 (100 Bq/kg) 超え

0袋 / 1025万袋 (2016年)

0袋 / 1050万袋 (2015年)

2袋 / 1077万袋 (2014年)

28袋 / 1100万袋 (2013年)

71袋 / 1034万袋 (2012年)



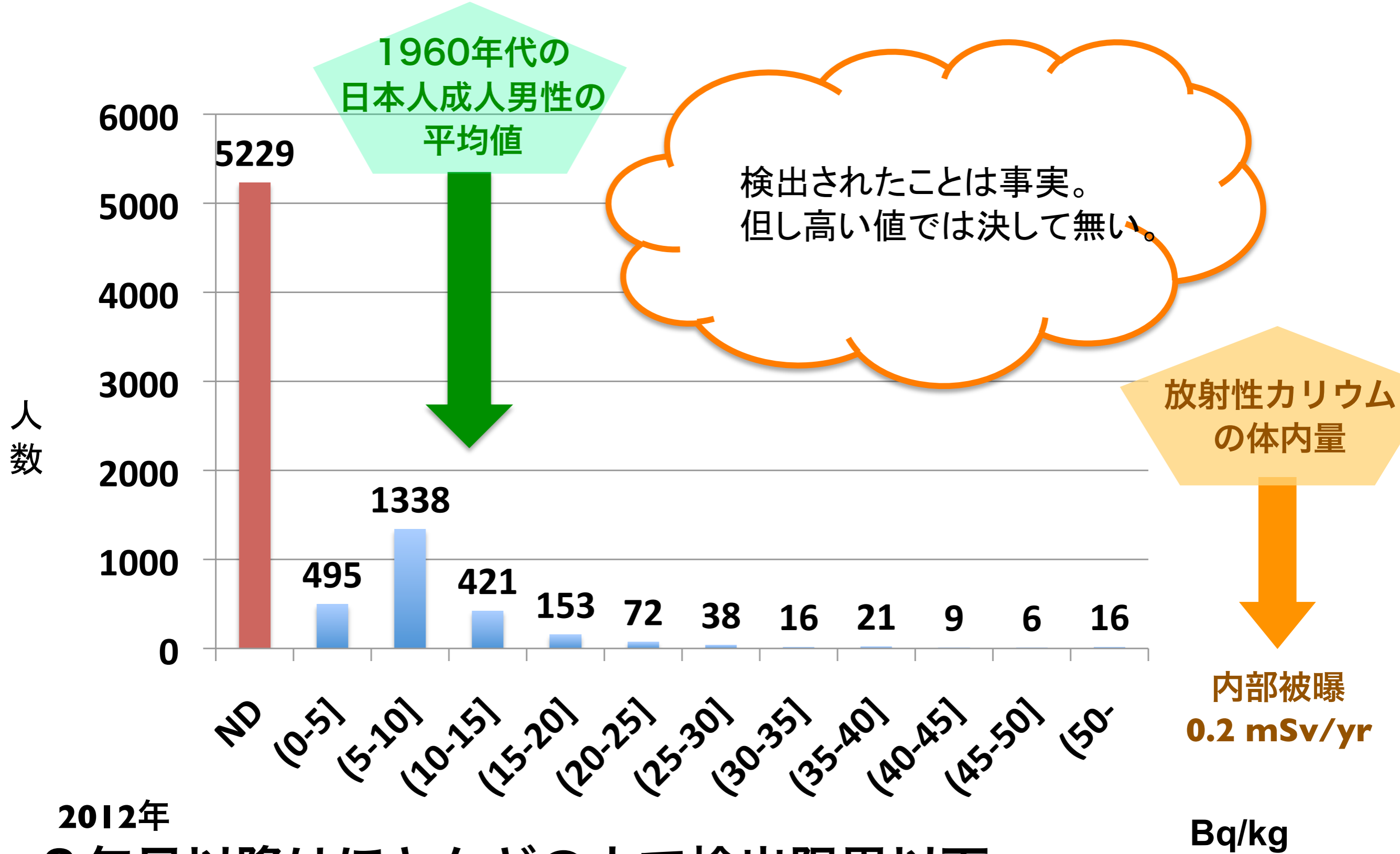
# 内部被曝の評価

## WBC による体内放射能の測定

ホールボディカウンター



# 南相馬市立総合病院で計測したセシウム137体内放射能量別被験者数 2011/9/26～2012/3/31施行 (7814人) 高校生以上+成人対象



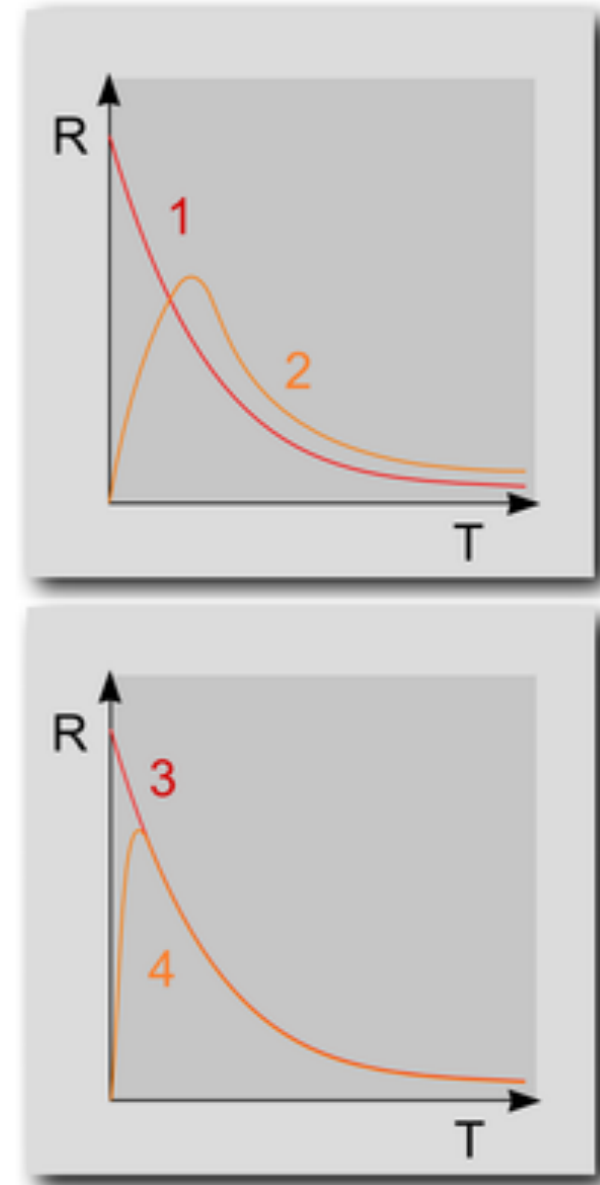
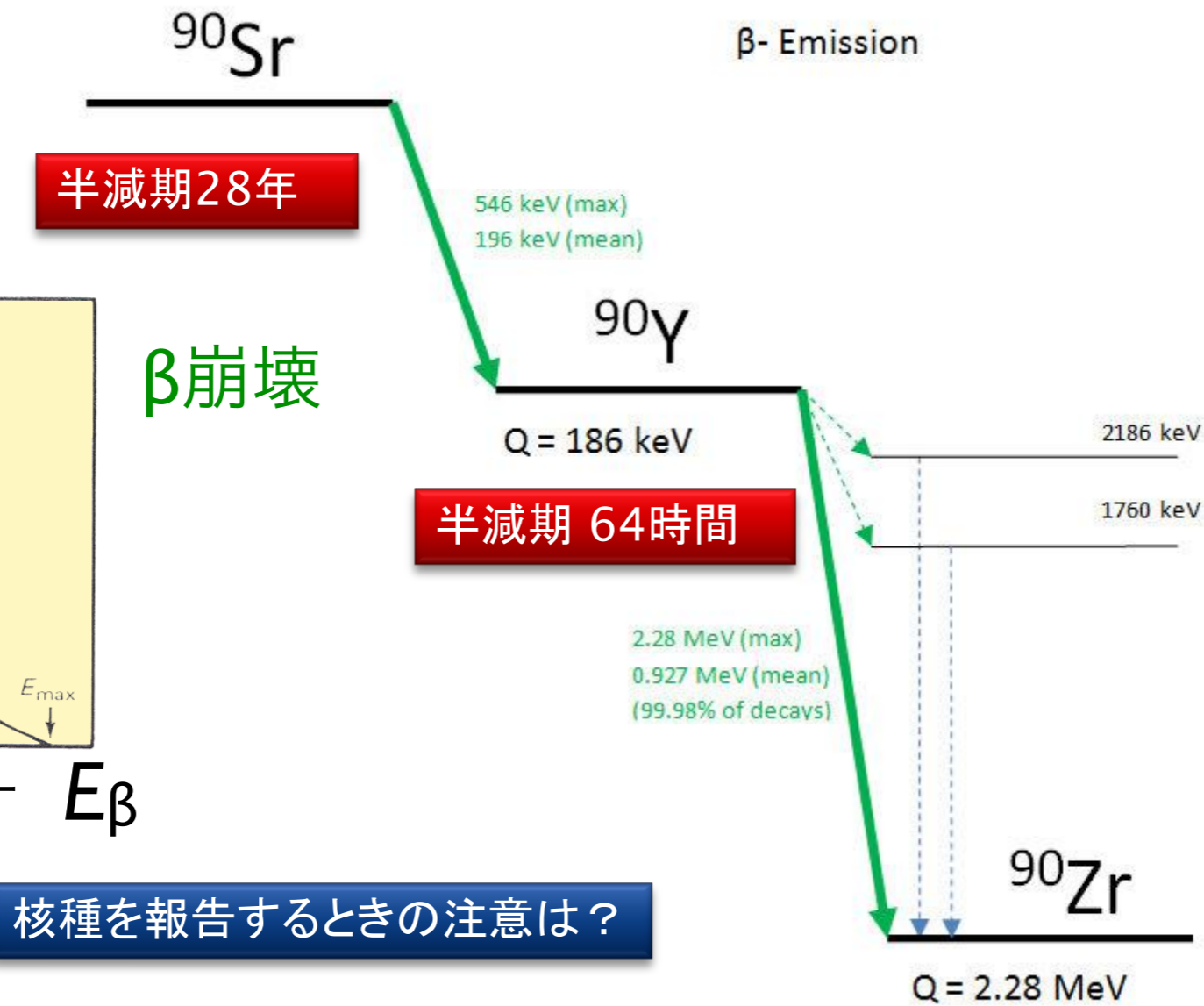
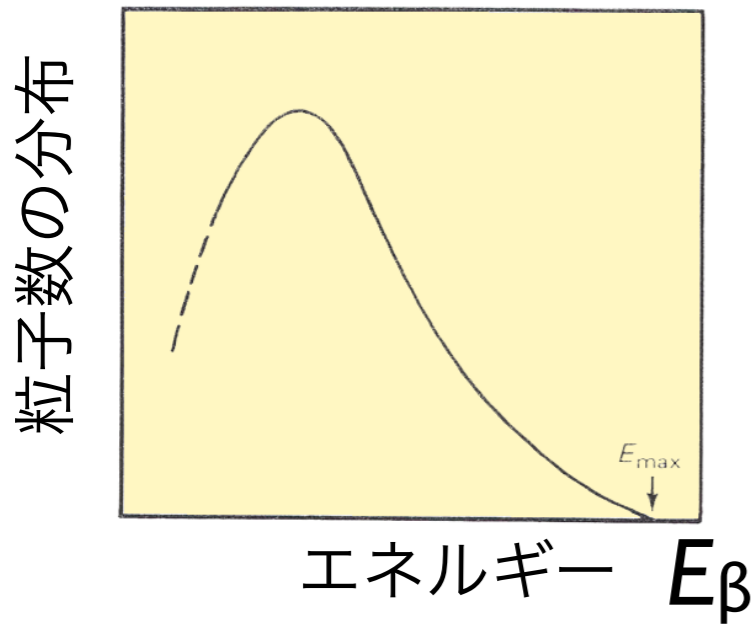
2012年  
2年目以降はほとんどの人で検出限界以下。



# β崩壊核種の同定 (γ線を出さないもの)

化学分離が必須

例： **$^{89}, ^{90}\text{Sr}$**



α崩壊核種の同定  $\rightarrow$  アルファスペクトロメトリ

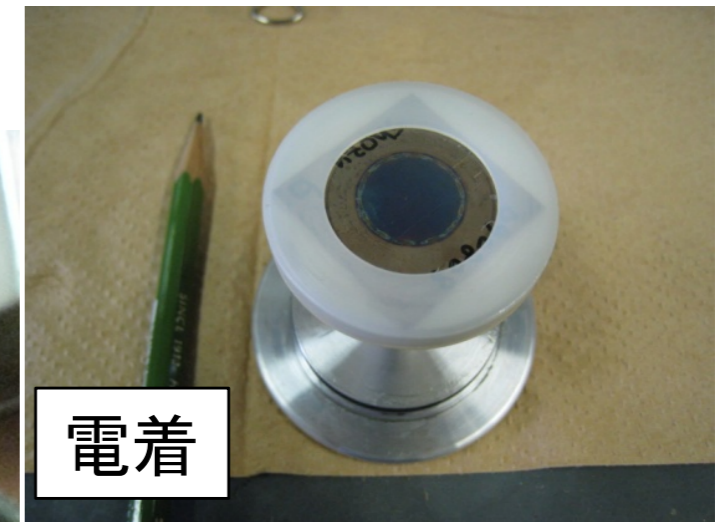
例： **$^{238}, ^{239}, ^{241}\text{Pu}$**



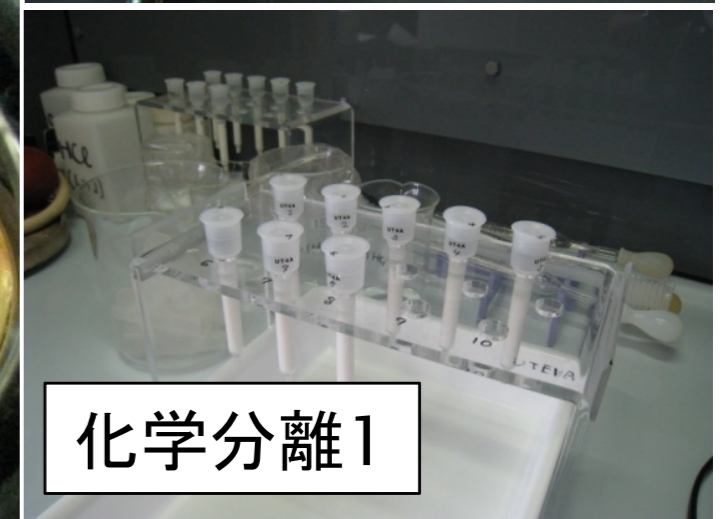
# アルファ線の測定装置

U, Th, Pu, Am, Cm...はこれ!

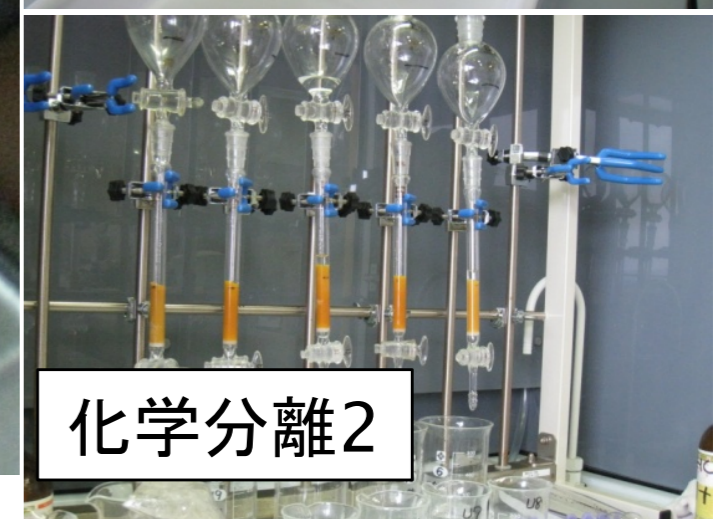
## ▶ アルファスペクトロメトリ



電着



化学分離1



化学分離2

分析はものすごく大変。

ターゲット元素を化学分離 → 精製 → 電着(線源を作る) →  $\alpha$ 線計測



# 線量計 (個人線量計、環境放射線測定)

フリッケ線量計 Fricke dosimeter

$\text{Fe}^{2+} + \text{放射線} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ , 吸光度測定

熱ルミネッセンス線量計 TLD: thermoluminescence dosimeter

蛍石などの固体結晶 + 放射線  $\rightarrow$  (加熱)  $\rightarrow$  蛍光

電子・正孔が格子欠陥に捕えられる

蛍光ガラス線量計 glass badge (RPL: radio-photoluminescence)

銀活性リン酸塩ガラス + 放射線  $\rightarrow$  (紫外線)  $\rightarrow$  蛍光

$\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}^0, \text{Ag}^{++}$  発光中心 color center ができる

ガラス線量計: コバルトガラス  $\rightarrow$  発光中心 (着色)

光刺激ルミネッセンス線量計 OSL: optically stimulated luminescence

ポケット線量計: 電離箱、半導体検出器

フィルムバッジ: 銀塩写真フィルム  $\text{AgBr}$



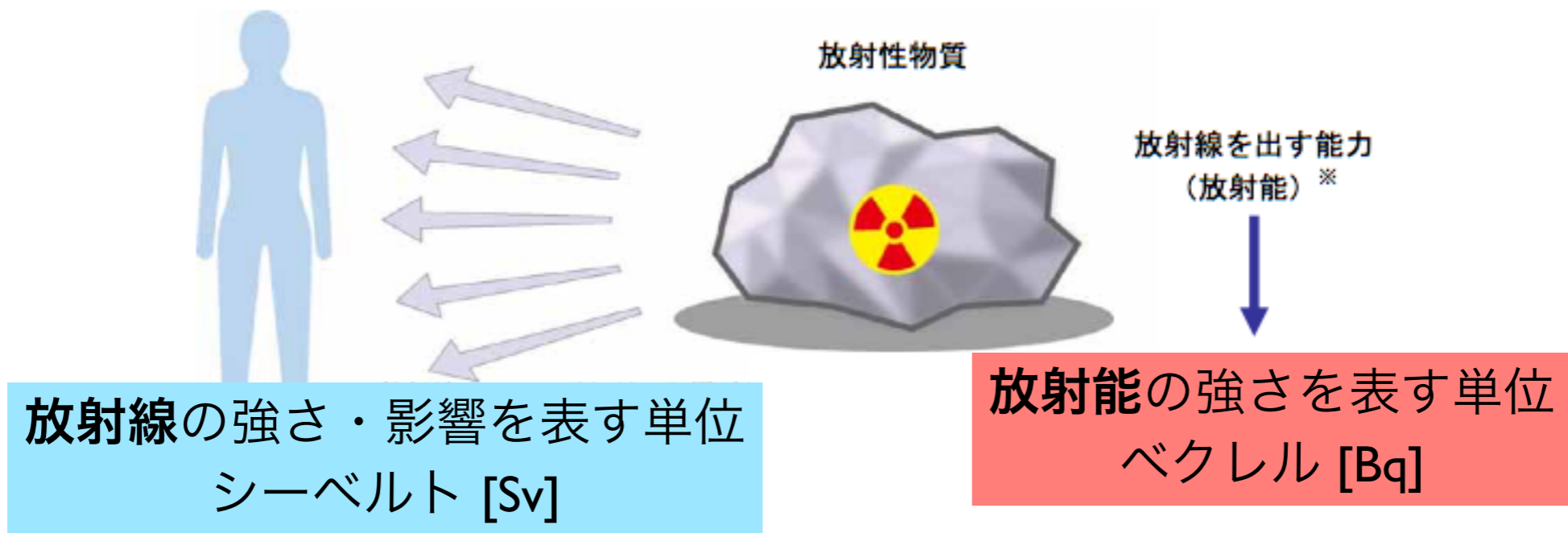
OSL ルクセルバッジ®





# 放射線の単位





## 放射線量の単位

グレイ

吸収線量  $D [J / kg] = [Gy]$

等価線量  $H_T [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

実効線量  $E [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

## 放射能の単位

放射能の強さ  $[Bq]$   
ベクレル

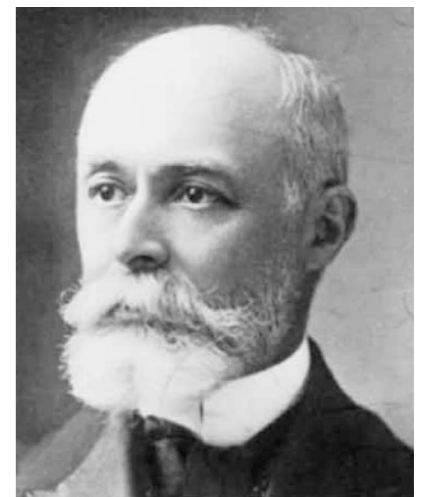
Gray



Sievert



Becquerel



# 放射線量の単位

放射場には

多様なエネルギーの

多種放射線（光子、粒子線）が

様々な方向を向いて飛び交い、

それぞれの強度で存在している。

これをひとつの物理量で表すのは

一筋縄ではいかない。

様々な放射線量の単位が存在する。



# 放射線量の単位

## 放射計測量 radiometric quantity

粒子フルエンス fluence  $\Phi$  [ $\text{cm}^{-2}$ ]

エネルギーフルエンス energy fluence  $\Psi$  [ $\text{MeV cm}^{-2}$ ]



Röntgen



Gray

## 線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー変換

カーマ kerma (Kinetic Energy Released in MAterial / MAtter) 非荷電粒子線  $K$  [ $\text{J} / \text{kg}$ ] = [ $\text{Gy}$ ]

シーマ cema (Charged particle Energy imparted to MAtter) 荷電粒子線  $C$  [ $\text{J} / \text{kg}$ ] = [ $\text{Gy}$ ]

照射線量 空気のみ 光子 (X線・ $\gamma$ 線)  $X$  [ $\text{C}/\text{kg}$ ], [ $\text{R}$ ] | R  $\approx 2.58 \times 10^{-4}$  C/kg <sup>Röntgen</sup>

## 線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー付与

吸収線量  $D$  [ $\text{J} / \text{kg}$ ] = [ $\text{Gy}$ ], [ $\text{erg} / \text{g}$ ] = [ $\text{ram}$ ] | Gy = 100 ram <sub>Gray</sub>

物質が吸収したエネルギー（単位質量あたり）

吸収線量  $D$  [J / kg] = [Gy] グレイ

# 放射線量の単位

radiation dose

Gray

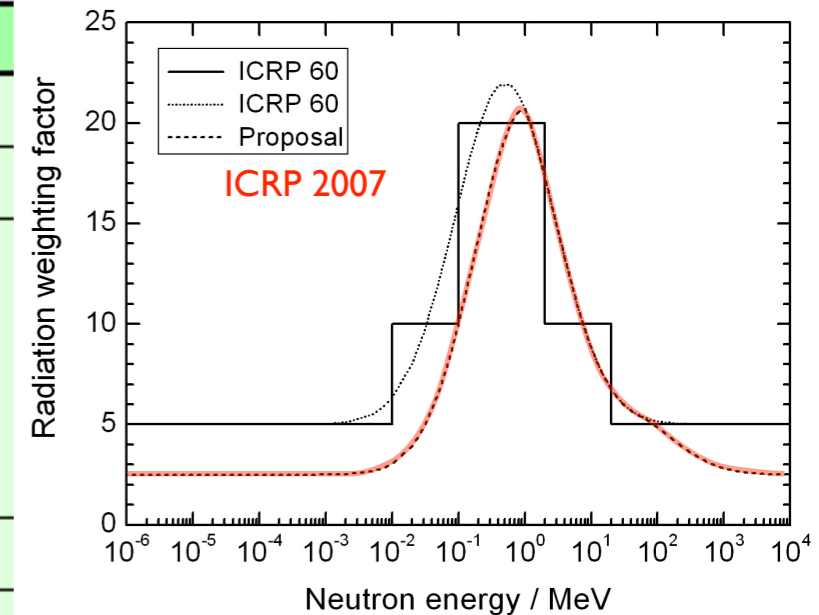


放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

等価線量  $H_T = W_R \times D$  [Sv] シーベルト

放射線加重係数  $W_R$

放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線加重係数: $W_R$	
光子(X線・γ線); 全てのエネルギー	1	1
電子(β線)およびミュー粒子; 全てのエネルギー	1	1
中性子; 10keV 以下	5	右図を参照
10keV~100keV	10	
100keV~2MeV	20	
2MeV~20 MeV	10	
20MeV以上	5	
反跳陽子以外の陽子; エネルギー 2MeV 以上	5	2 (正負パイオンも)
アルファ粒子(α線)	20	20
核分裂片	20	20
重原子核	20	20



[出典] 日本アイソトープ協会:ICRP Pub 60、国際放射線防護委員会の1990年勧告、丸善、p7(1991)

赤字 ICRP 2007

全身被曝での影響に換算（臓器ごとに組織加重係数  $w_T$  をかけて合算）

実効線量  $E = \sum_T w_T \times H_T$  [Sv] シーベルト

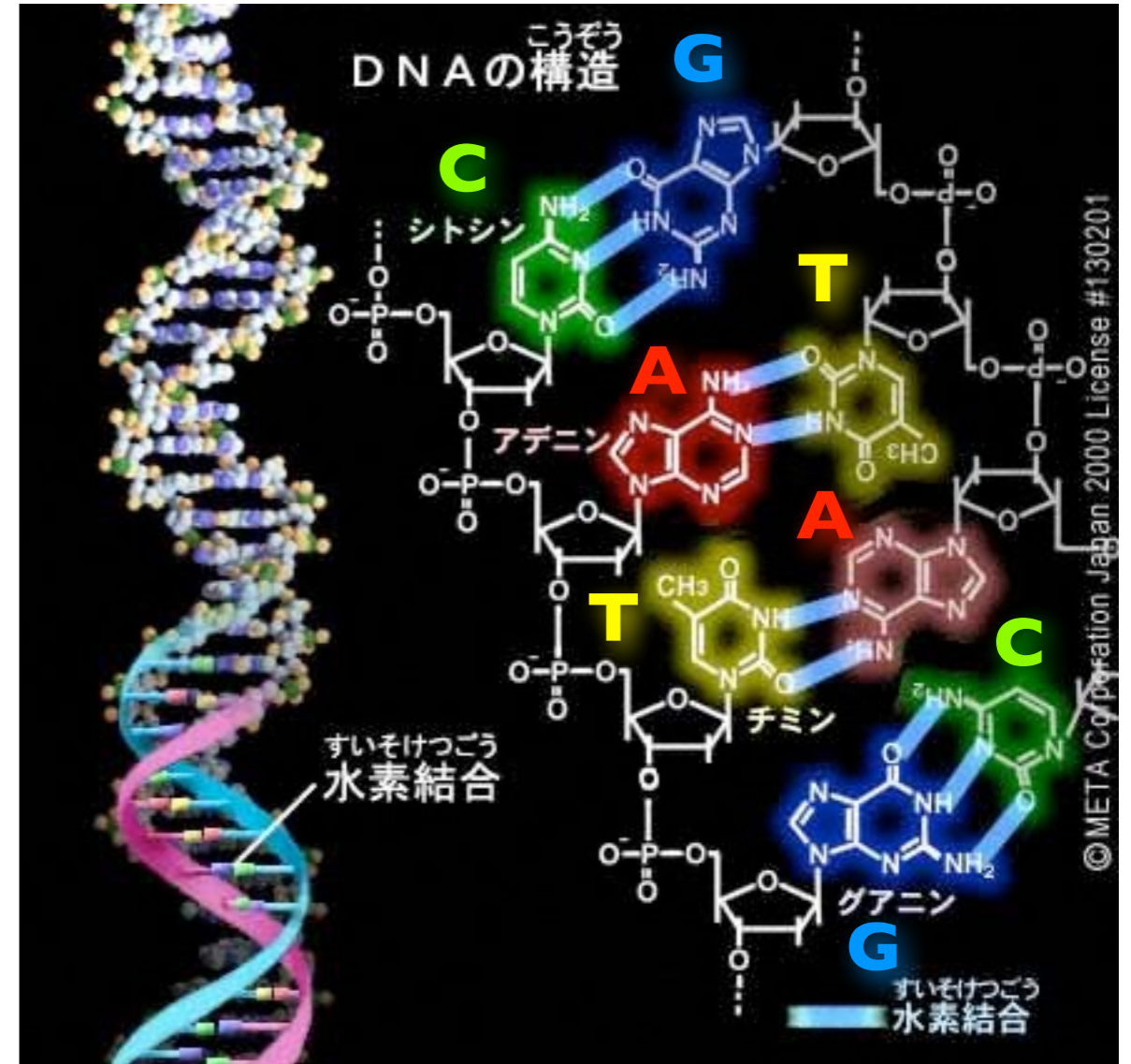
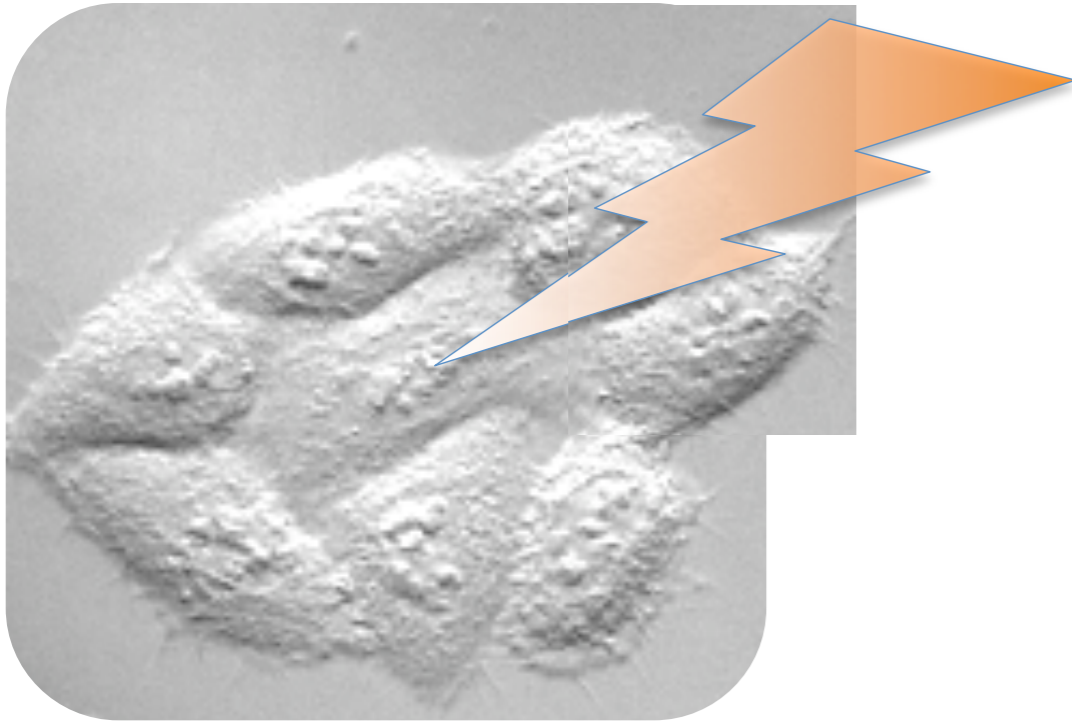
Sievert



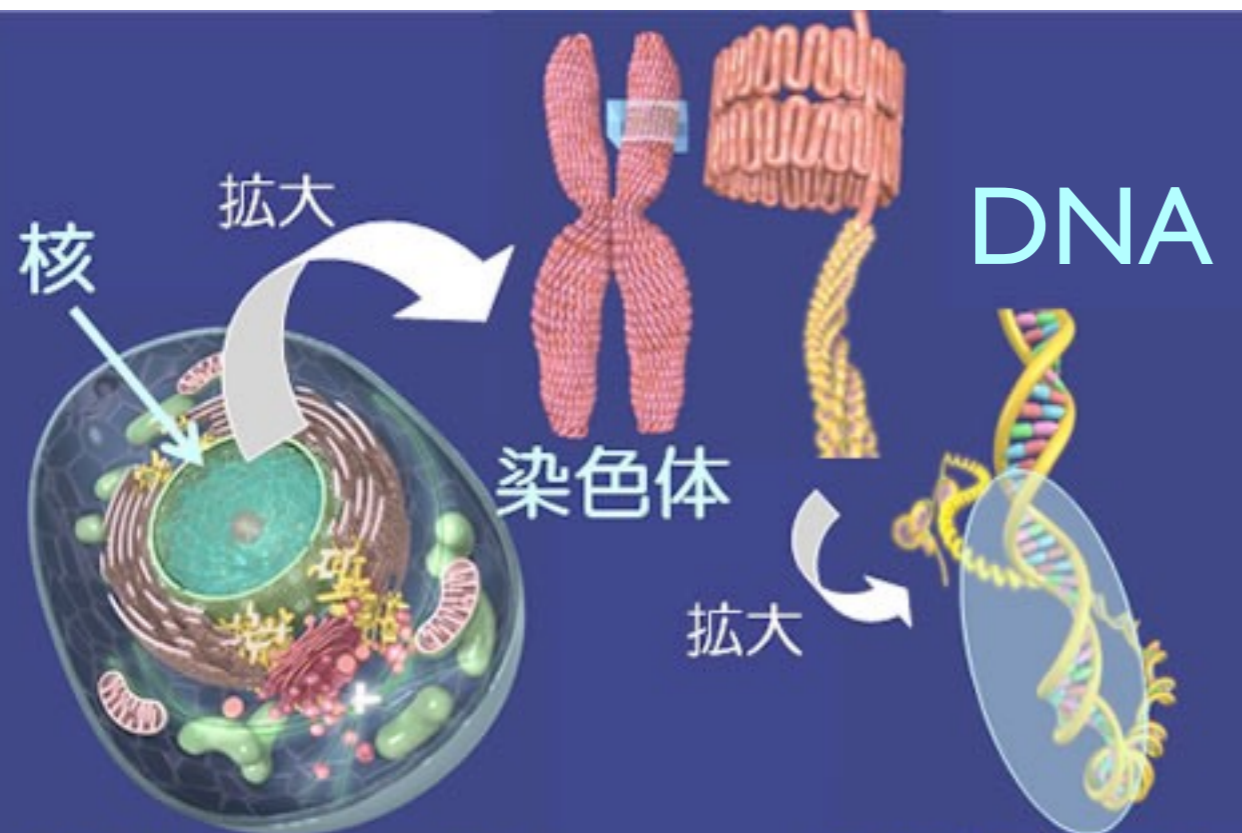


# 細胞の核に放射線が照射

## DNA



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



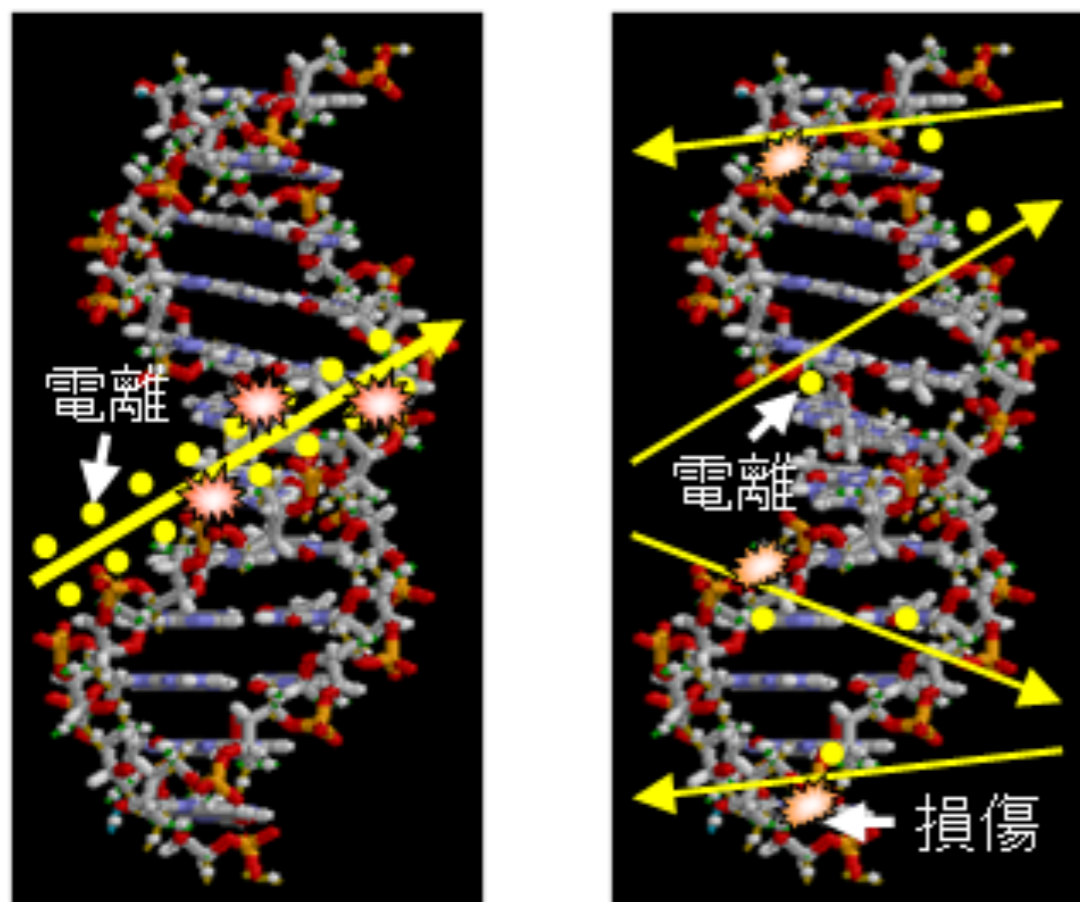
細胞(60兆個)

一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子

# 放射線による DNA 損傷

**ラジカル  
(活性酸素)**



重イオン

電子

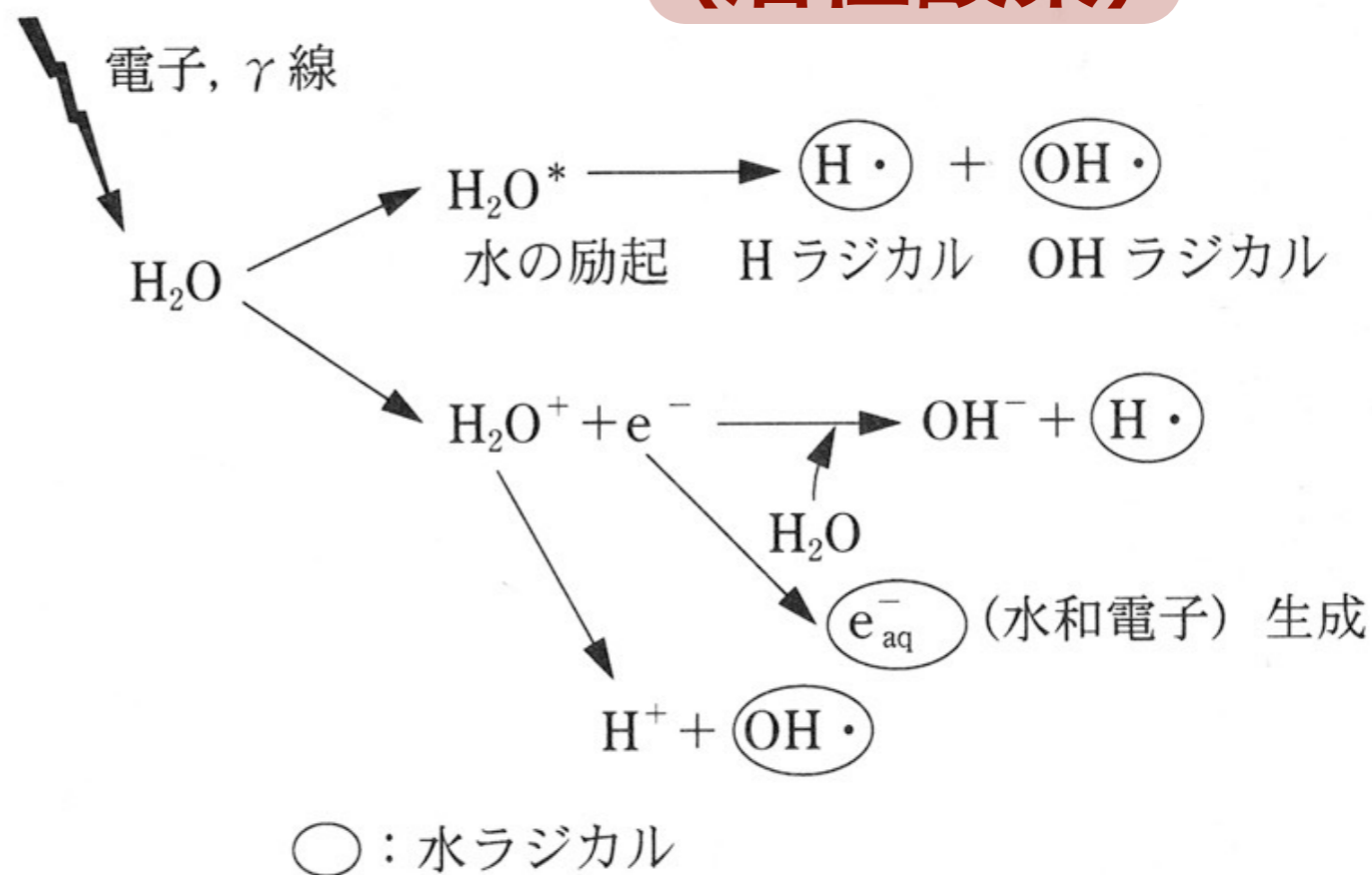


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略  
(書籍「図解 放射性同位元素等取扱者必携」オーム社、より引用)

## LET : 線エネルギー付与

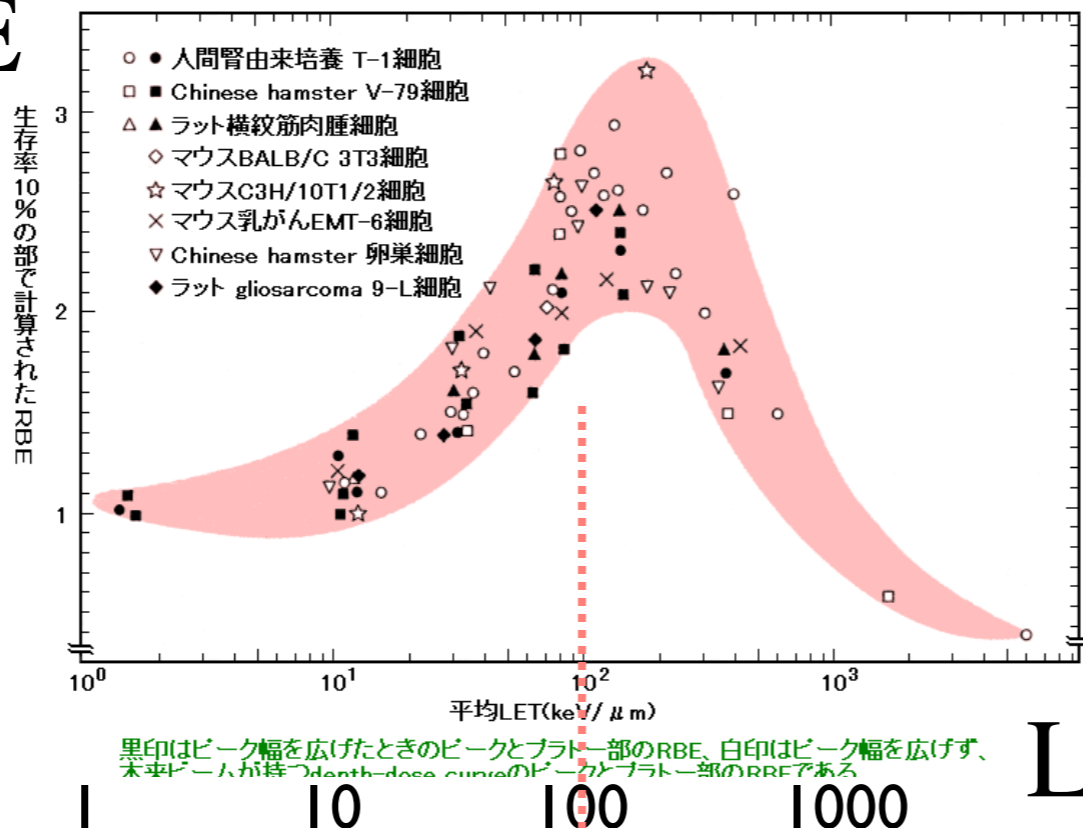
放射線の直接作用 : 荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く **高 LET 放射線**  
 $\alpha$ 線

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



# RBE



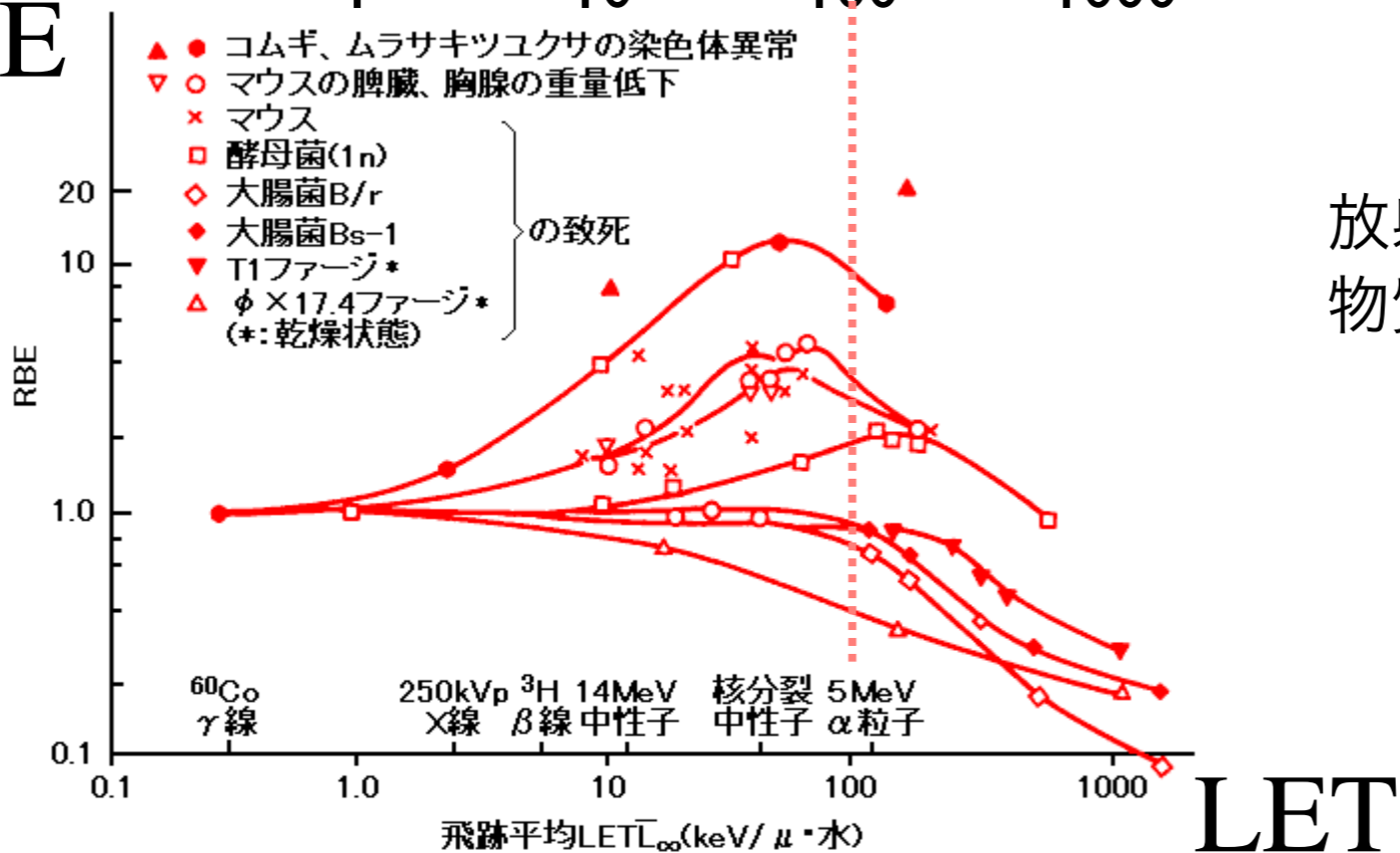
# 生物学的効果比 RBE

(Relative Biological Effectiveness)

LET (線エネルギー付与)  
keV/μm

放射線の軌跡上の単位長さ当たり  
物質に与えられるエネルギー

# RBE



様々な生物反応(マウスの臓器の重量低下や致死、高等植物の染色体異常等)において、いずれも約80keV/μm付近のLET値をもつ放射線が最大のRBE値を示す。

図2 体細胞的効果に対する各種放射線のRBEとLETの関係

[出典]近藤 宗平:分子放射線生物学、東京大学出版会(1972年)、p.174

# 実効線量 effective dose $E [J / kg] = [Sv]$

$$E = \sum_T w_T \times H_T = \sum_T w_T \times \left( \sum_R w_R \times D_{T,R} \right)$$

組織  $T$  の組織加重係数

組織  $T$  における  
等価線量 [Sv]

組織  $T$  における  
平均吸収線量 [Gy]

器官・組織	組織加重係数: $w_T$	
生殖腺	0.20	0.08
骨髄(赤色)	0.12	0.12
結腸	0.12	0.12
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
膀胱	0.05	0.04
乳房	0.05	0.12
肝臓	0.05	0.04
食道	0.05	0.04
甲状腺	0.05	0.04
皮膚	0.01	0.01
骨表面	0.01	0.01
脳		0.01
唾液腺		0.01
残りの器官・組織 <sup>※2</sup>	0.05	0.12
合計(全身)	1.00	1.00

左欄黒字 ICRP 1990

右欄赤字 ICRP 2007



# 線量計算

内部被曝と外部被曝



# 放射線の種類と被ばく

- $\alpha$ 線は空気中の飛程が数 cm。  
生体では**表層**の細胞で止まる。  
**内部被ばくが問題**。全てのエネルギーが短い飛程の間に細胞に与えられる。
- $\beta$ 線は外部被ばくでは**皮膚**への影響を考える。**内部被ばくも問題**。
- $\gamma$ 線は多くは相互作用（光電効果・コンプトン散乱）せず**体を素通り**し、一部が体内で吸収される。**外部被ばくでも体内も被ばくする**。
- **X線**は高エネルギーの場合は  $\gamma$ 線と同様。数十 keV 程度以下の場合は**皮膚**への影響が問題。

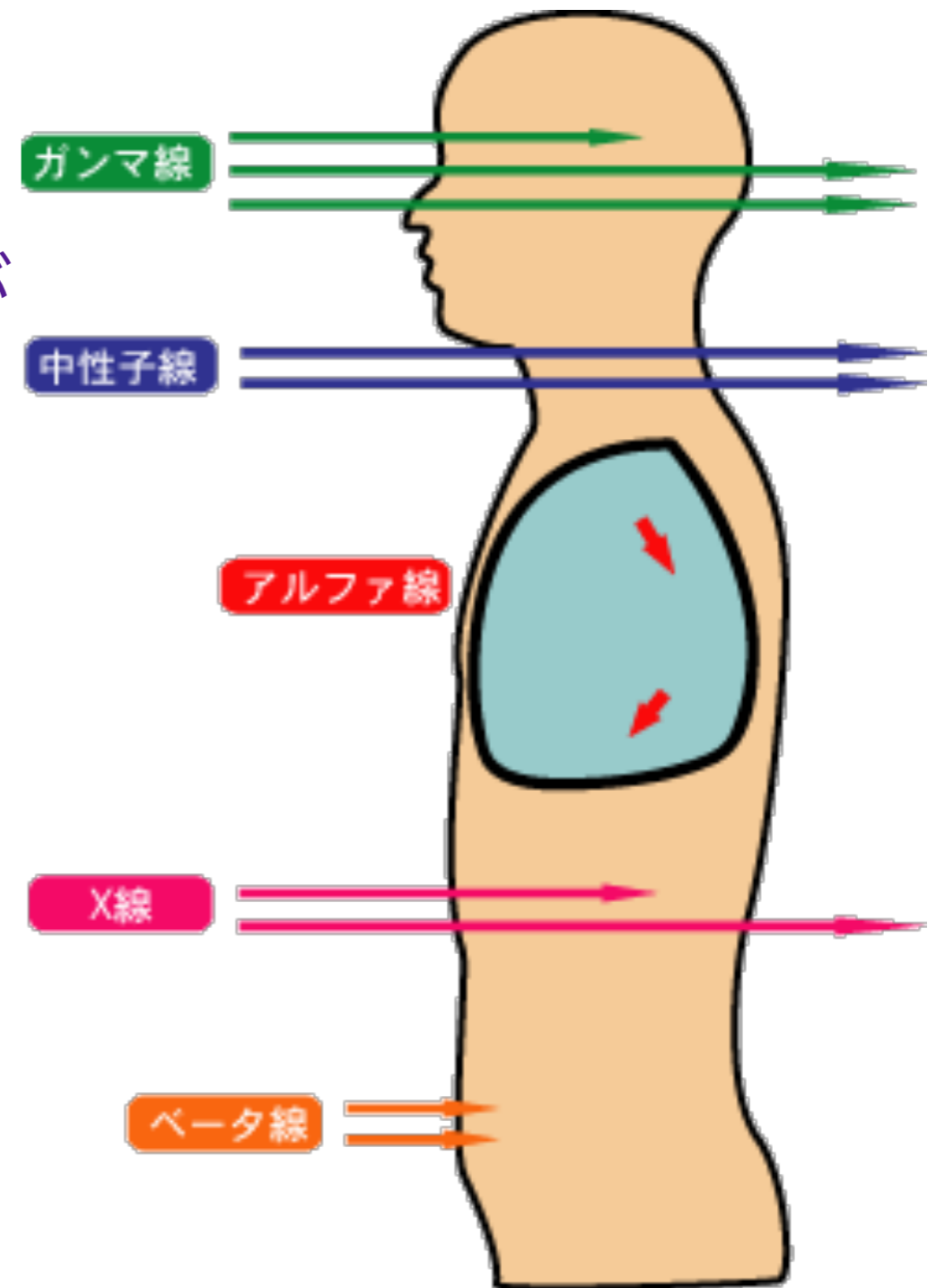
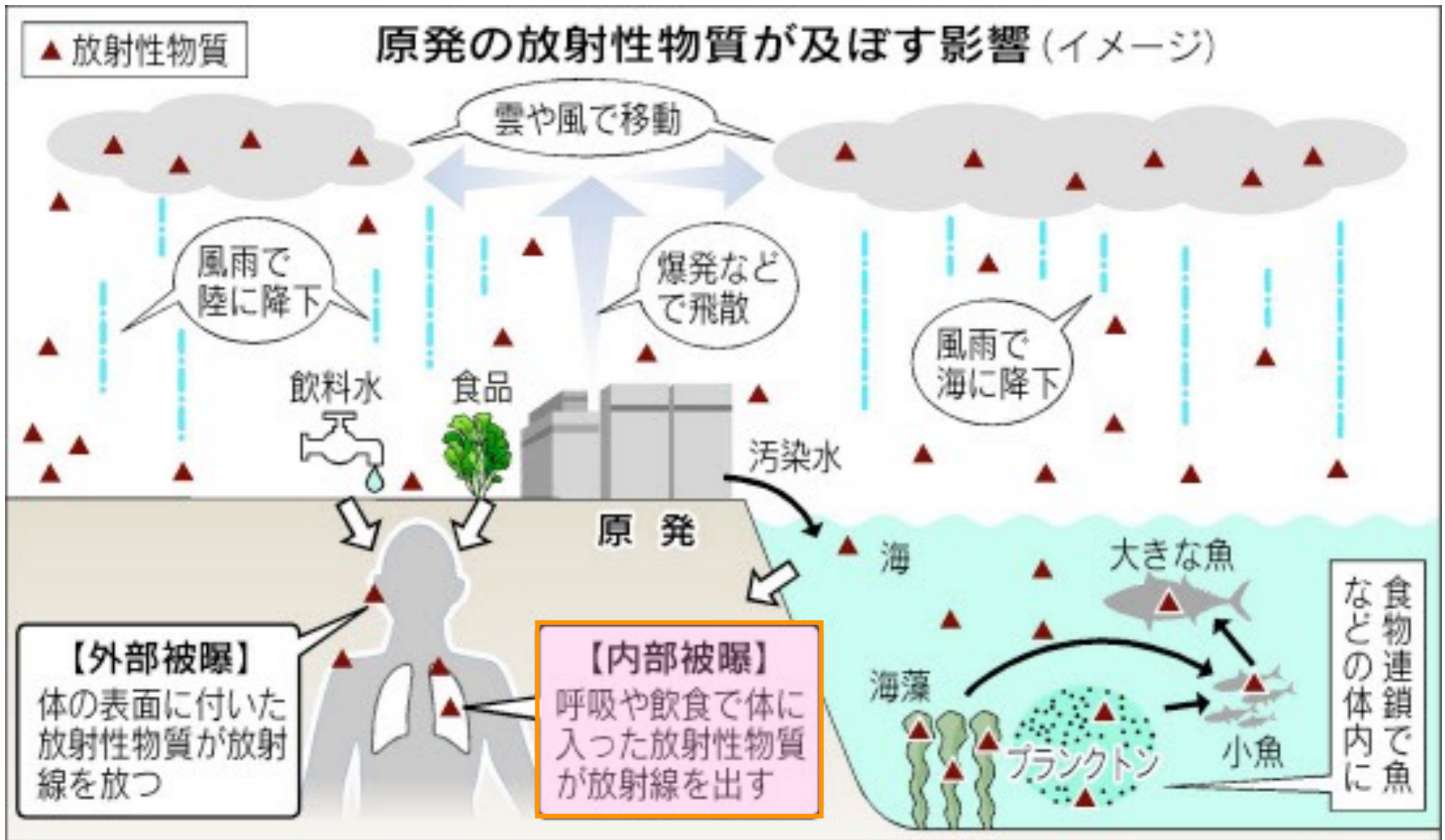


図3 人体を透過する放射線





放射性物質が一部東京まで飛来。  
放射線が直接東京に届いたのではない。

# 内部被曝

放射性物質を体内に取り込むことにより、**体の内部から放射線に被曝すること。**

放射性物質を**体内に取り込まない**ことは放射線防護の鉄則。

**放射線防護服**（ $\gamma$ 線を遮ることはできない）

放射性物質が皮膚や服に付着し、あるいは経口摂取してしまうことを防ぐ。



一般に**被曝が継続**するため、注意が必要。

- 物理学的半減期
- 生物学的半減期（体内からの排出）

**臓器親和性**（Cs  $\Rightarrow$  筋肉、I  $\Rightarrow$  甲状腺、Sr  $\Rightarrow$  骨、Pu  $\Rightarrow$  肝臓, ...）

に注意しつつ、**預託線量**を計算して、被曝期間を通じてのトータルの線量が同じであれば、外部被曝とも影響は同じ。



# 内部被曝の計算例

(<sup>131</sup>I による甲状腺預託線量)

## 放射線防護のための線量 **protection quantity**

預託線量 **committed dose** (内部被曝) [Sv]

預託等価線量

預託実効線量

体内摂取した放射性物質から出るすべての放射線を、摂取した時点で被曝したと見なして計算をする。Bq から Sv への換算には、物理学的半減期のみならず排泄機能による生物学的半減期も考慮のうえ、50年間分の積分をする。

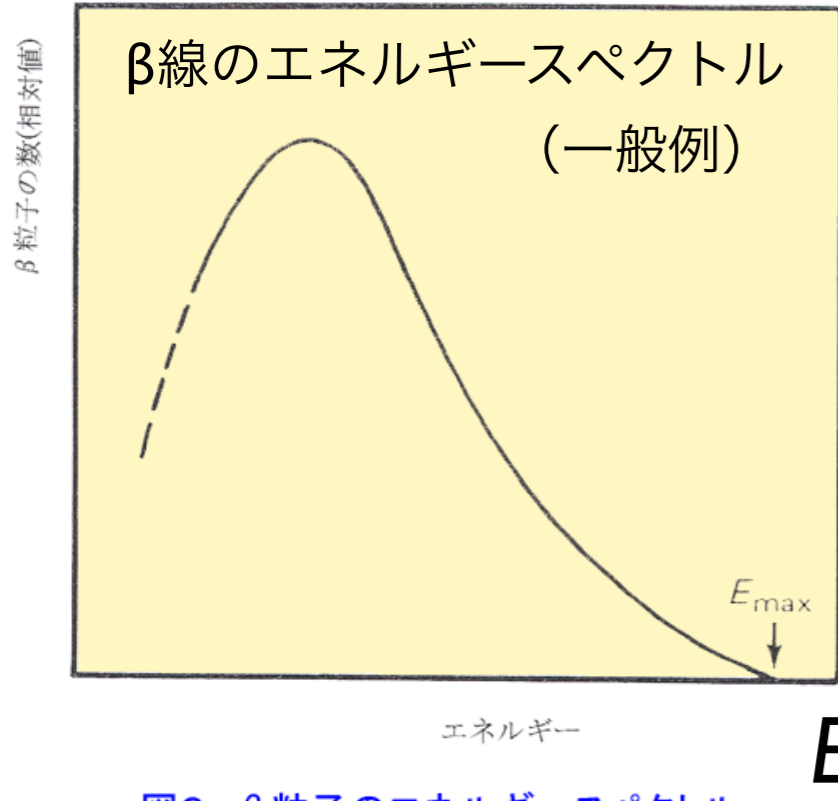
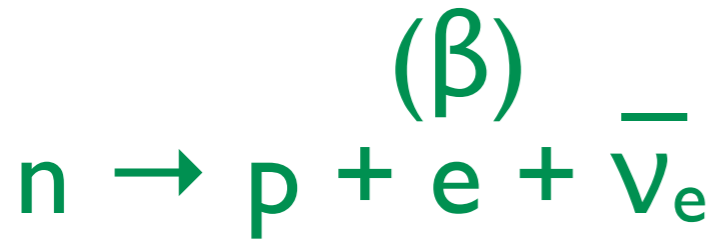
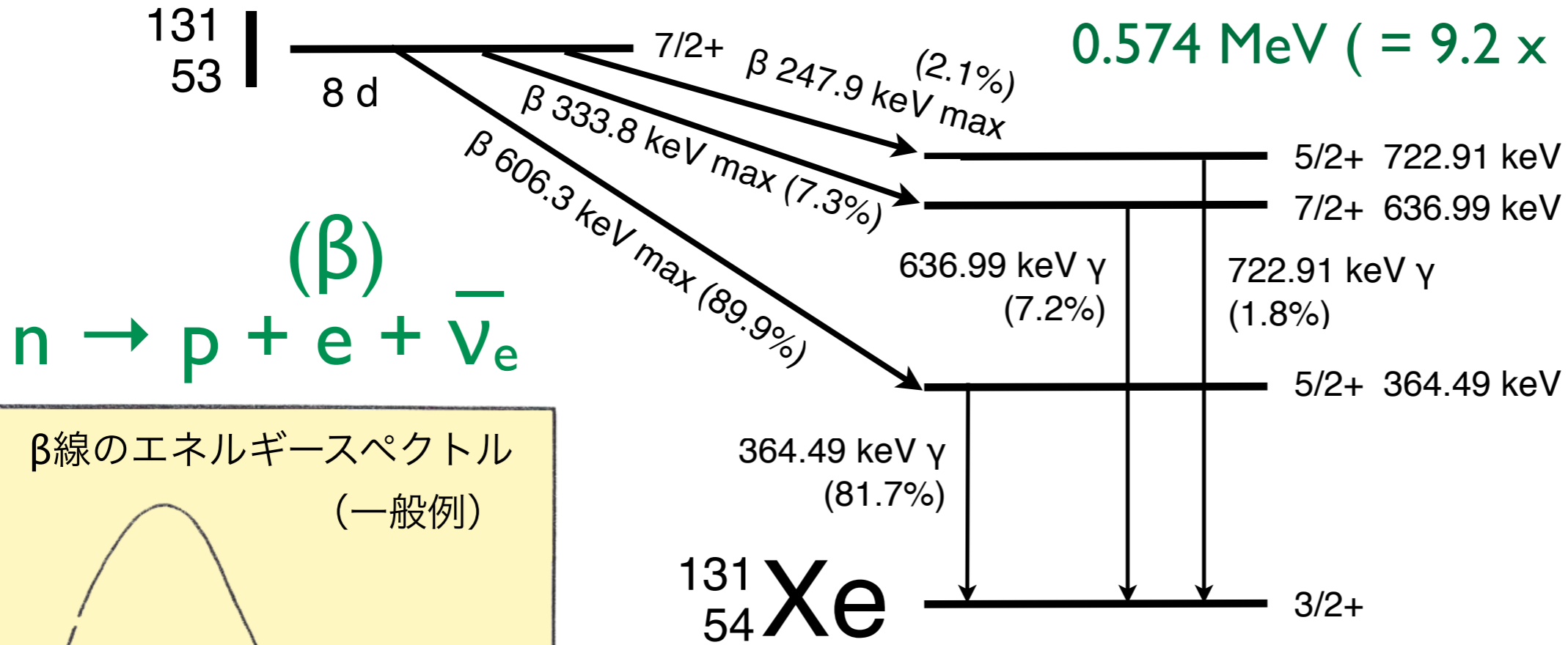
実効線量係数 (成人)

※ 子供や乳幼児は 70歳になるまでの期間

核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取 (Sv/Bq)
C-14	5730年	$5.8 \times 10^{-10}$	$5.8 \times 10^{-9}$
P-32	14.3日	$2.4 \times 10^{-9}$	$3.4 \times 10^{-9}$
K-40	12.8億年	$6.2 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$
I-131	8.04日	$2.2 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-9}$
Sr-90	29.1年	$2.8 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$
Cs-137	30.0年	$1.3 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-8}$

経口摂取	乳児 (3ヶ月)	幼児 (1歳)	子供 (2-7歳)	成人
I-131	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-8}$

β線の最大エネルギーの平均値  
 0.574 MeV (= 9.2 x 10<sup>-14</sup> J)



γ線：原子核の脱励起



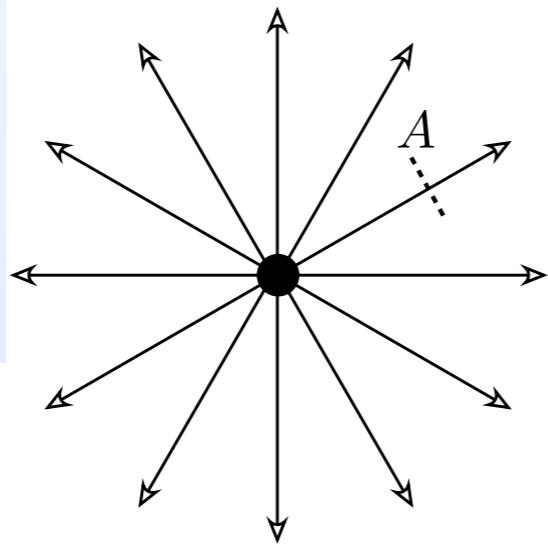
γ線 (定まったエネルギー)

図2 β粒子のエネルギースペクトル  
 [出典]石川友清(編):初級放射線、通商産業研究社、p.37

β線 (連続スペクトル)  
 エネルギーの平均値 ~ 0.3 MeV



# 外部被曝 の線量計算



$\dot{\Phi}$  : 粒子フルエンス率

$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu^{\text{air}} r} \eta P}{4\pi r^2}$$

$$\eta = 0.851$$

$\gamma$ 線の放出率

$P$  : 放射能 [Bq]

$\mu^{\text{air}} = 0.0100 \text{ m}^{-1}$  空気の線減衰定数

$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

$^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線は空气中 70 m で半減する。

$$\dot{H}/\dot{\Phi} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho)^{\text{water}} = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2$$

$(\mu_{\text{en}}/\rho)^{\text{water}} = 0.033 (\text{g/cm}^2)^{-1}$  水の質量エネルギー吸収係数

## 平面が一様に放射性物質で汚染されている場合

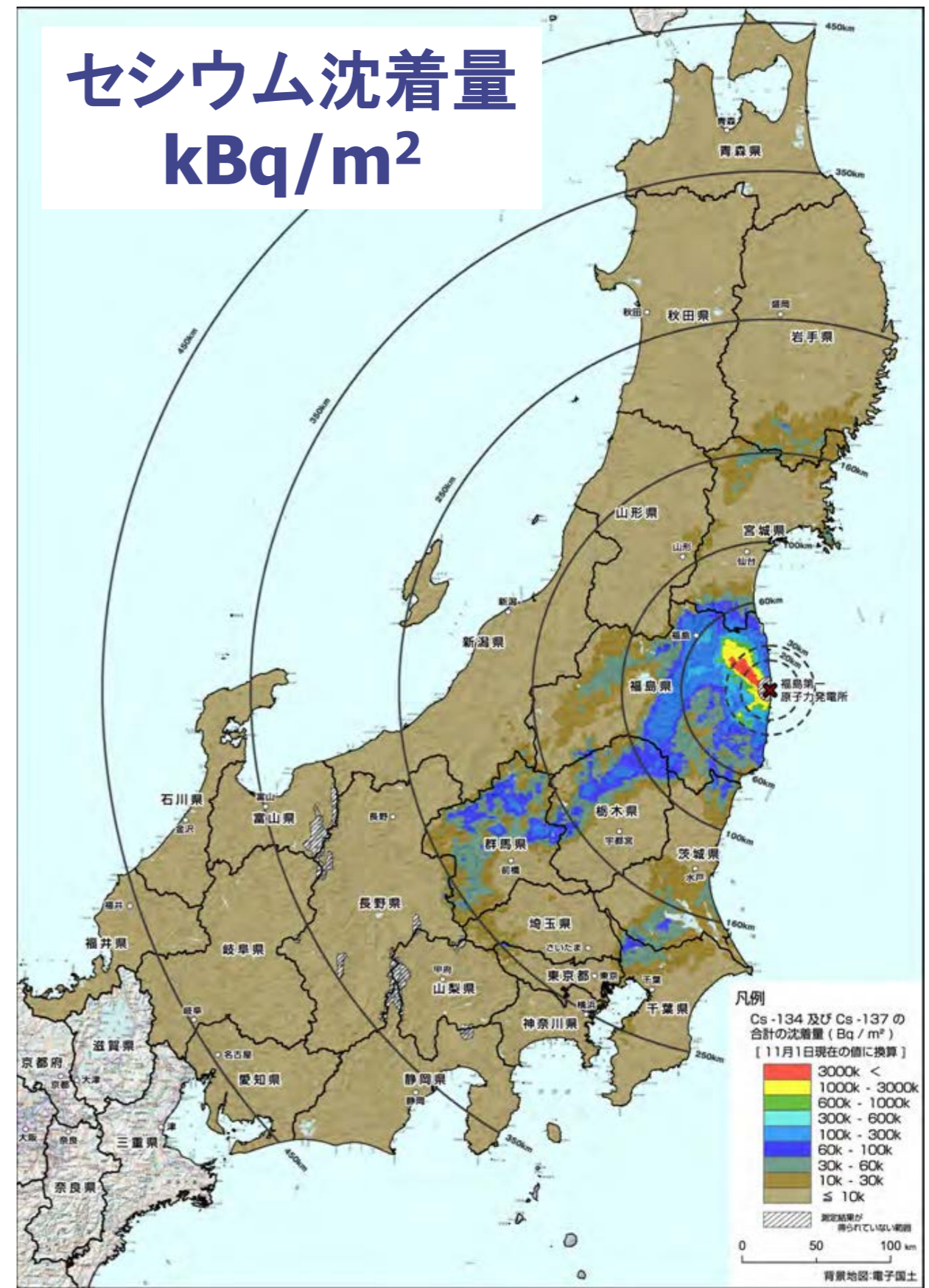
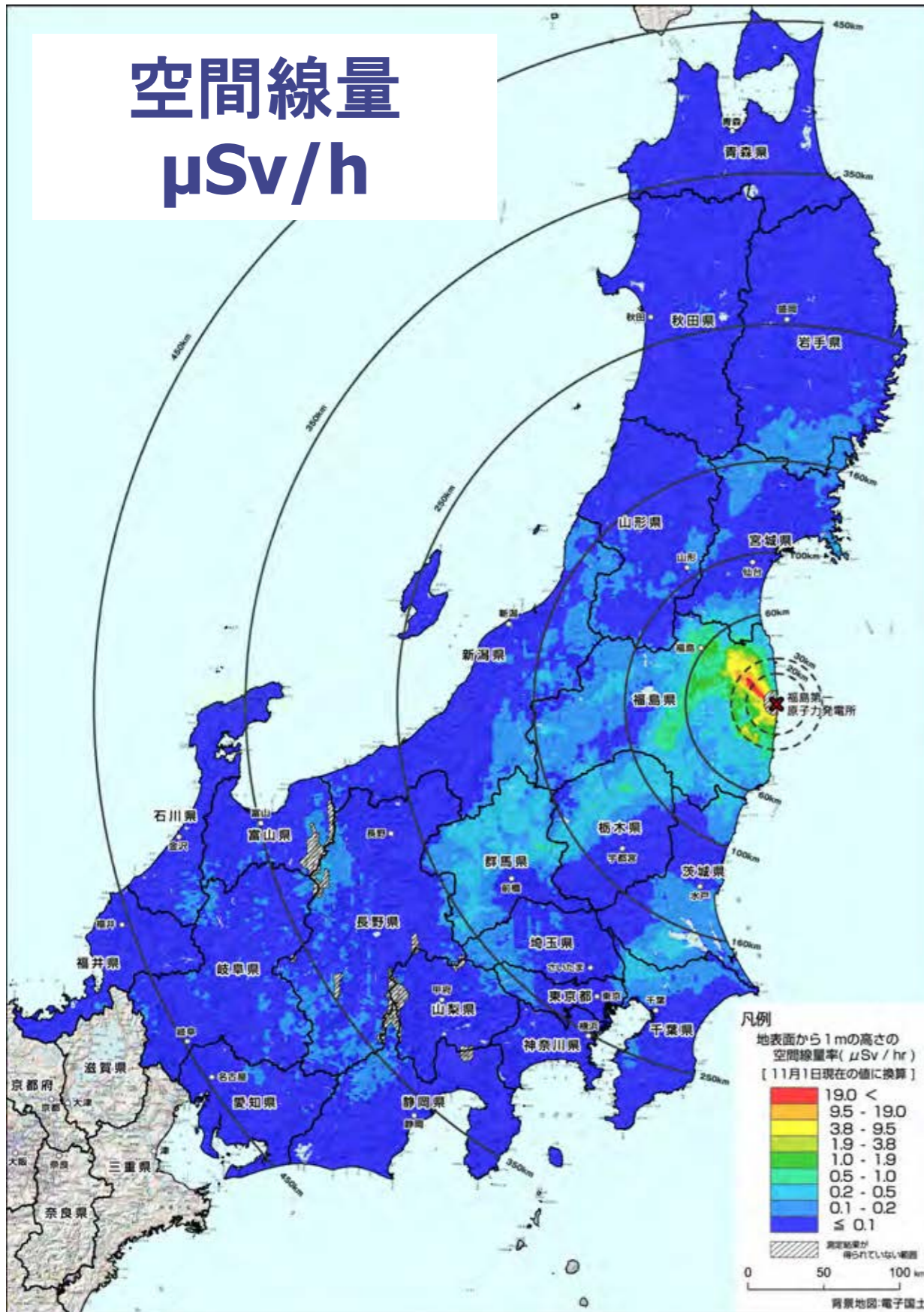
$^{137}\text{Cs}$  : 2.1 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) / ( $\text{MBq/m}^2$ ) .... IAEA による値

高さ 1 m でも 50 cm でもさして違くない

遮るものがない平地の場合、半径 10 m だけ除染しても線量は半分も減らない。半径 100 m からの寄与が効く。



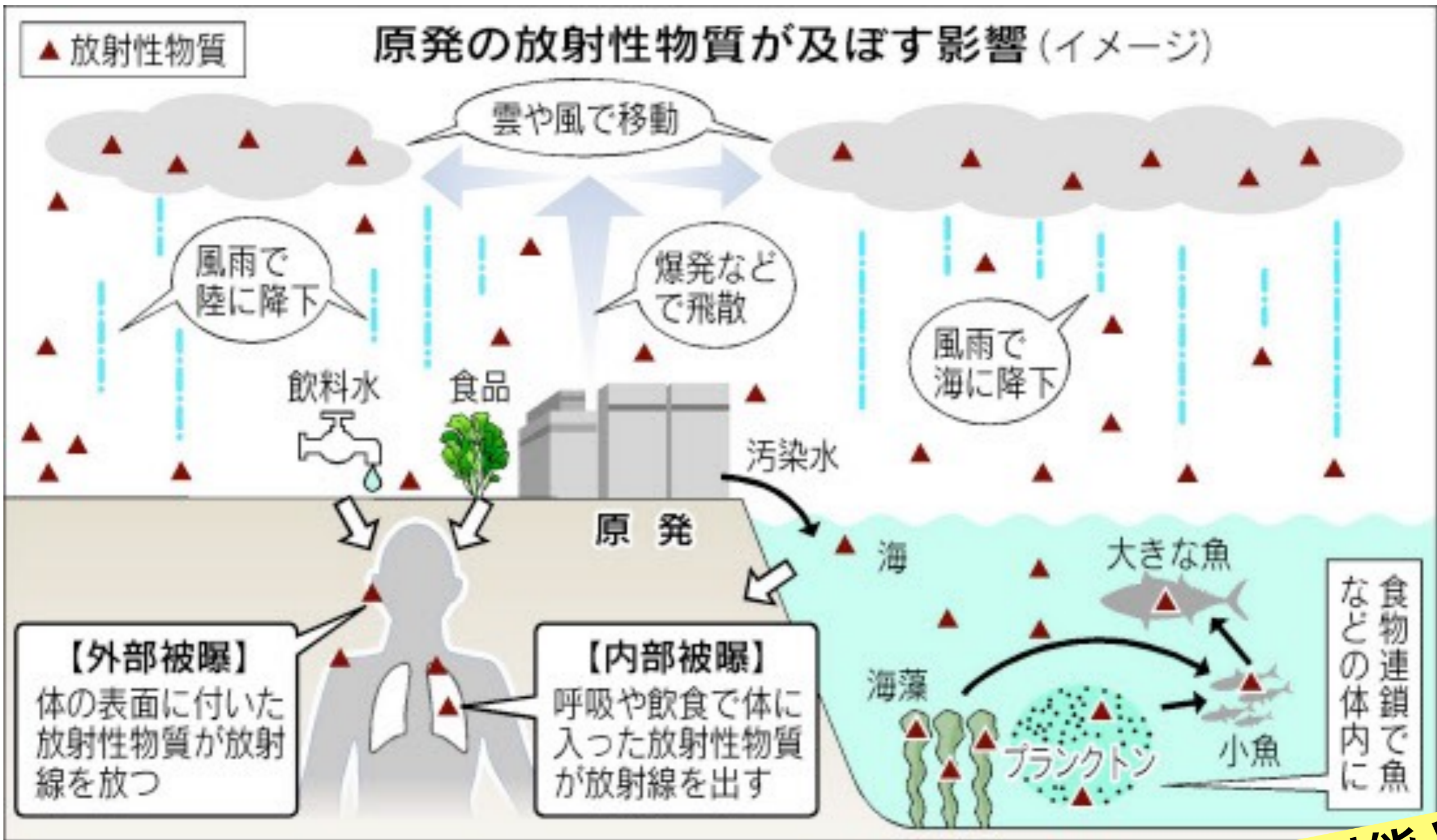
# 文部科学省の航空機モニタリングによる広域汚染マップ





# 環境放射化学





放射性物質が一部東京まで飛来。  
放射線が直接東京に届いたのではない

放射性物質、放射能と  
放射線を混同しない



# 原発北西方向の汚染と「ホットスポット」

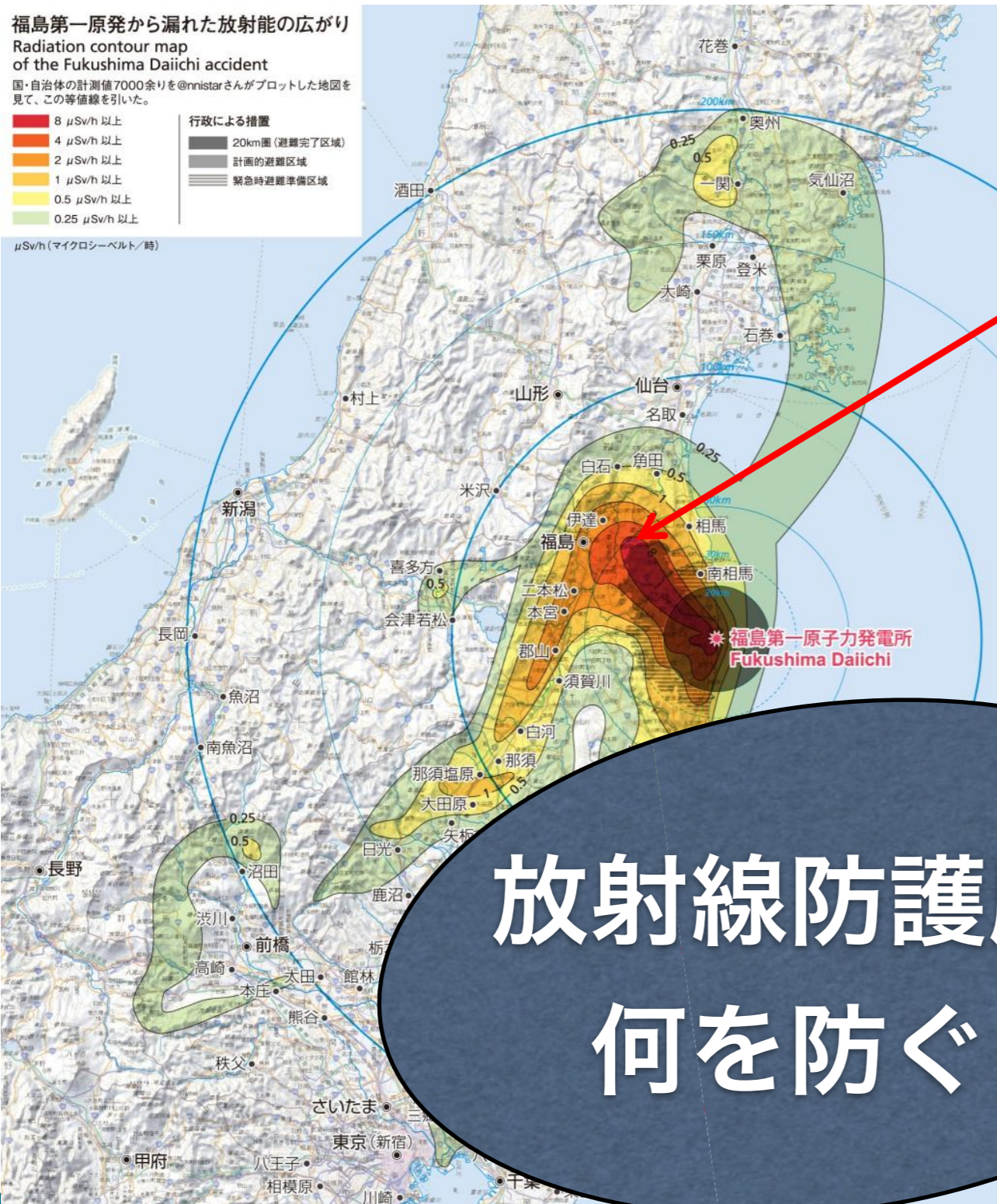
福島第一原発から漏れた放射能の広がり  
Radiation contour map  
of the Fukushima Daiichi accident

国・自治体の計測値7000余りを@nnistarさんがプロットした地図を見て、この等値線を引いた。

- 8  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 4  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 2  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 1  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 0.5  $\mu\text{Sv/h}$  以上
- 0.25  $\mu\text{Sv/h}$  以上

- 行政による措置
- 20km圏 (避難完了区域)
  - 計画的避難区域
  - 緊急時避難準備区域

$\mu\text{Sv/h}$  (マイクロシーベルト/時)



放射線防護服は  
何を防ぐ？



早川由紀夫教授(群馬大学)作成、7月26日版

三訂版7月26日(初版4月21日)  
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/)  
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)  
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),  
Source: @nnistar  
地図製図: 萩原佐知子  
背景地図には電子国土ポータル(portal.cyberjapan.jp)の地図を使用しました。



# 原発北西方向の汚染と「ホットスポット」



放射線防護服は  
何を防ぐ？

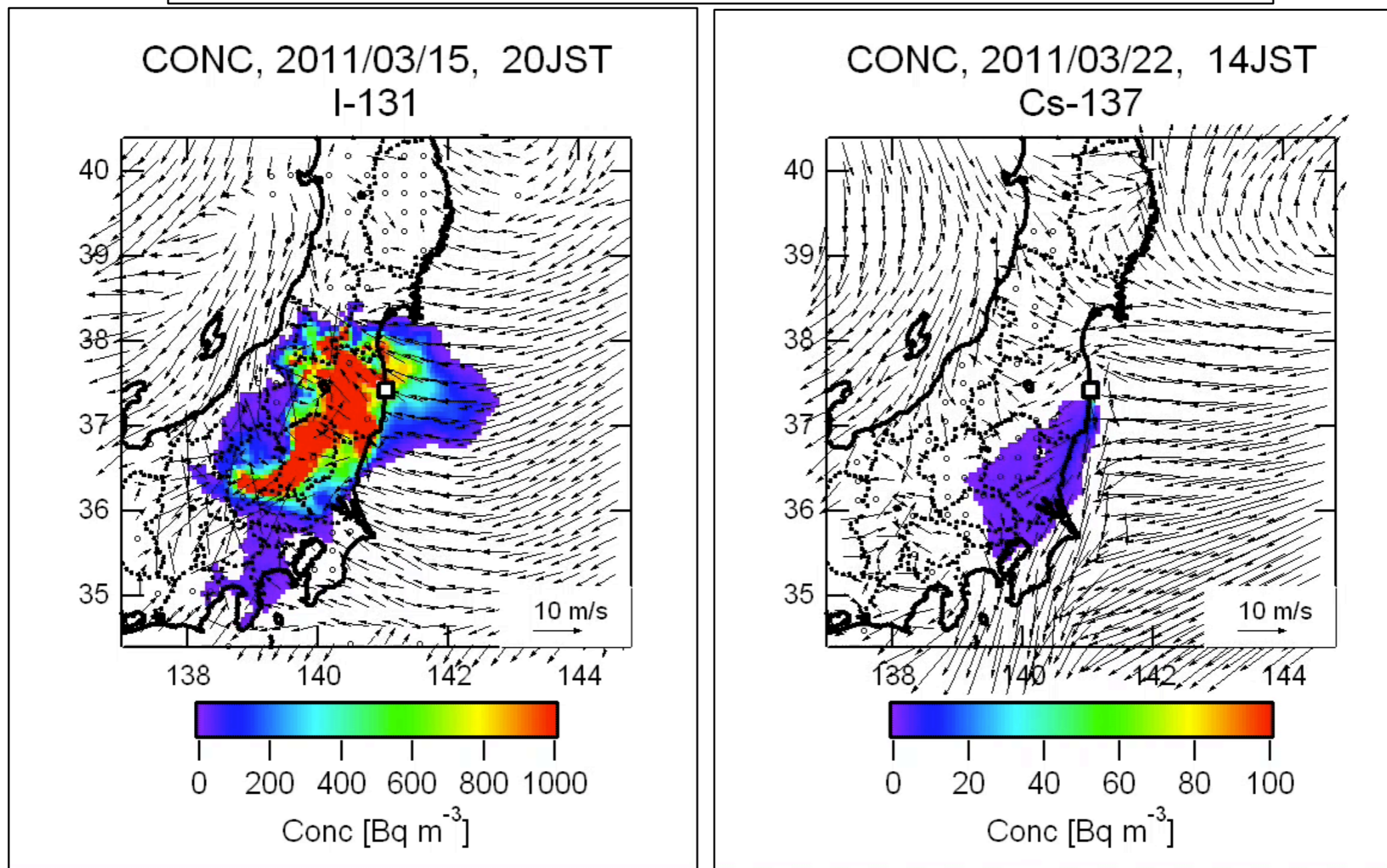
早川由紀夫教授(群馬大学)作成、7月26日版

三訂版7月26日(初版4月21日)  
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/)  
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)  
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),  
Source: @nnistar  
地図製図: 萩原佐知子  
背景地図には電子国土ポータル(portal.cyberjapan.jp)の地図を使用しました。



# 拡散シミュレーションと実際に観測された放射能の差違

2011年8月25日付 国立環境研究所 報道発表資料



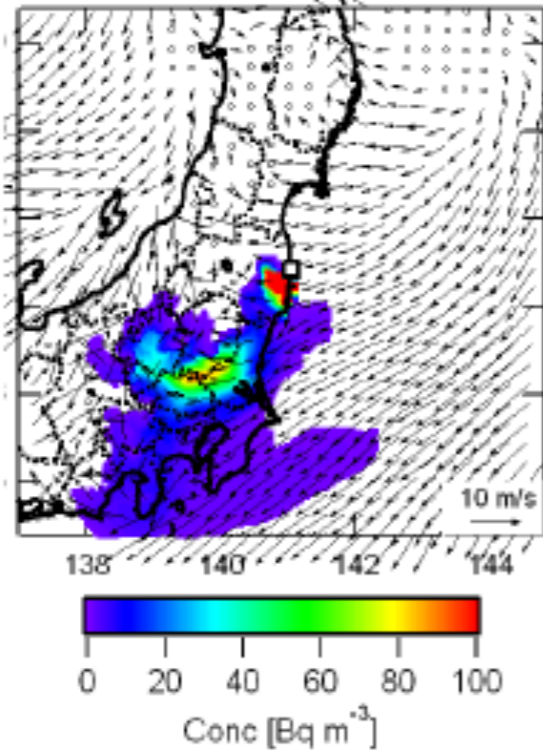
▶ 実測値との差違を議論したい



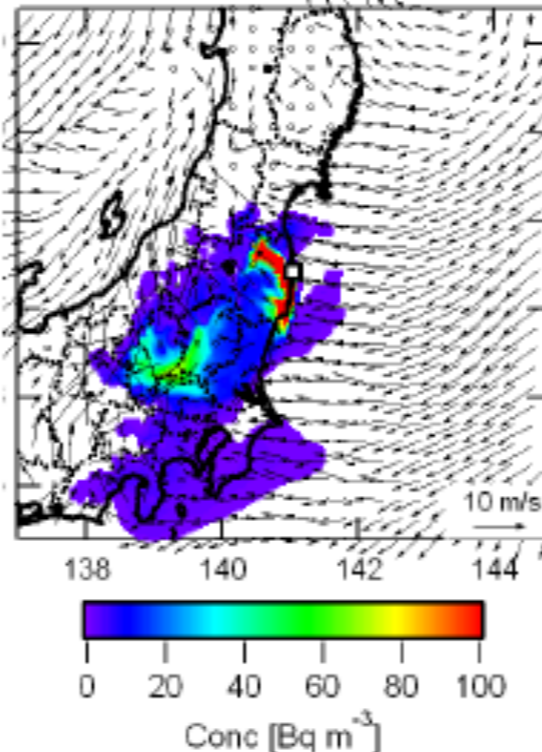
# ホットスポットの生成メカニズム

大気濃度

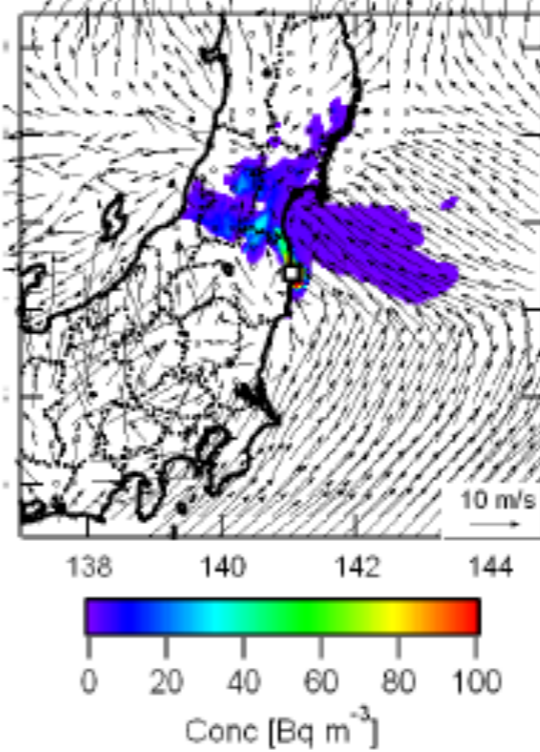
3/15の15時



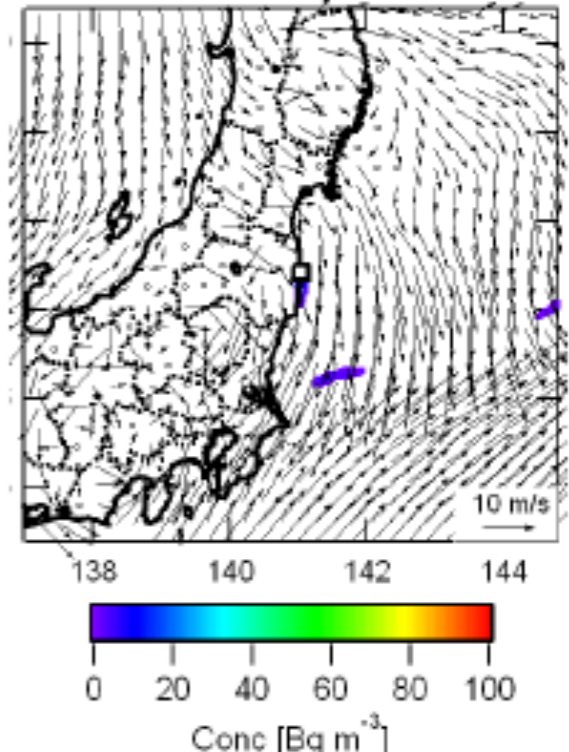
3/15の19時



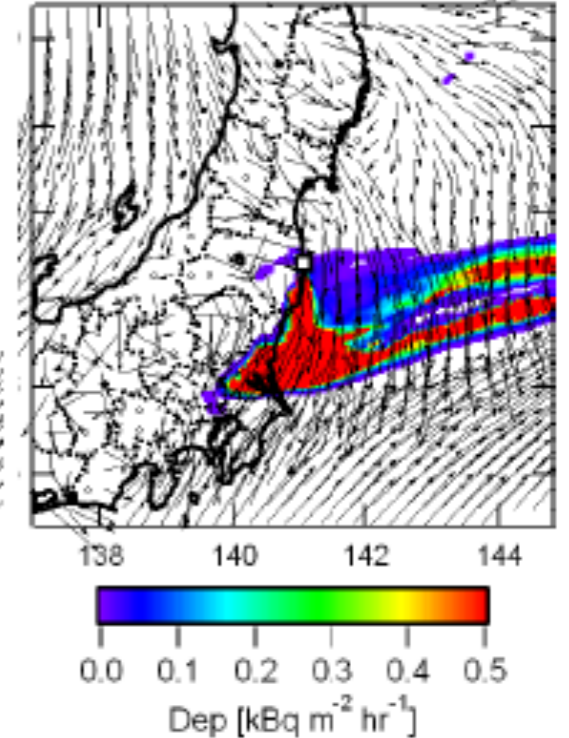
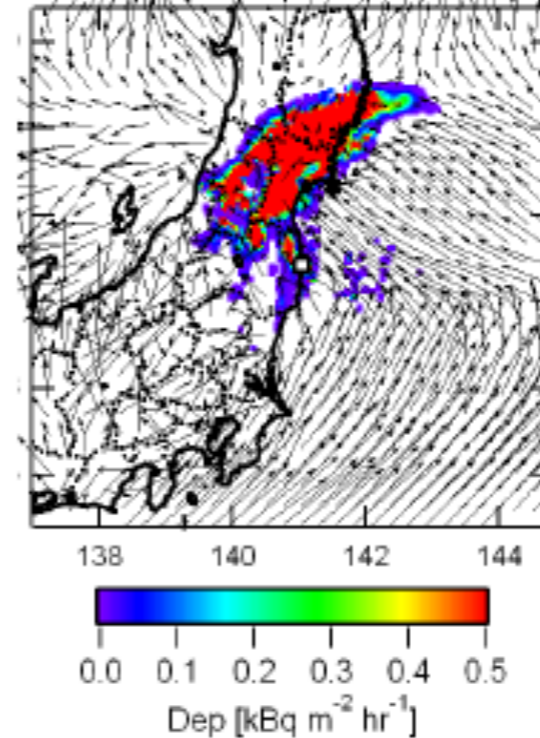
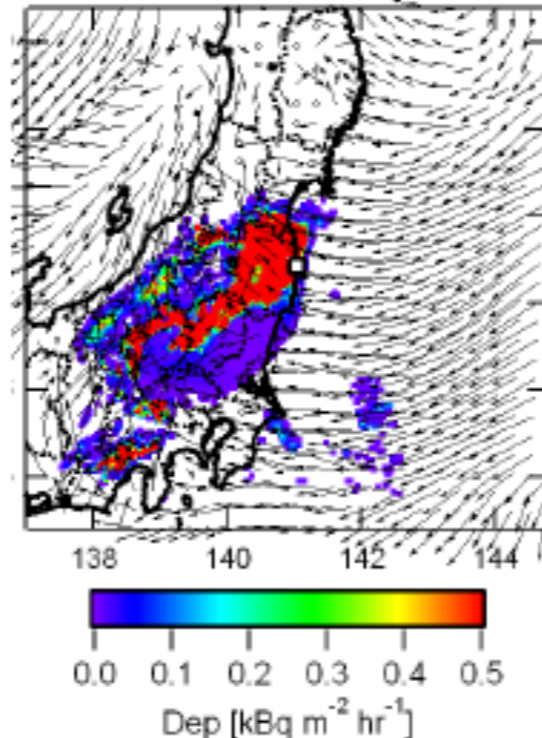
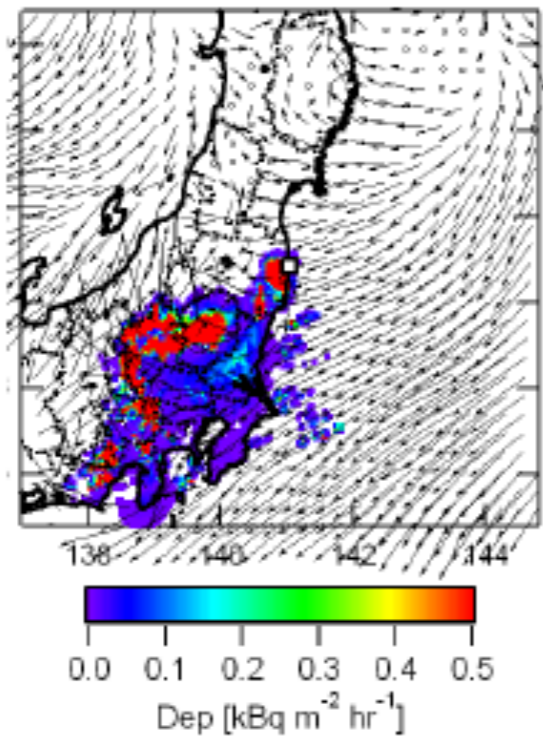
3/20の18時



3/21の8時



降下量



関東への最初の影響

福島 of 深刻な汚染、  
北関東の汚染

宮城県北部の稲藁汚染

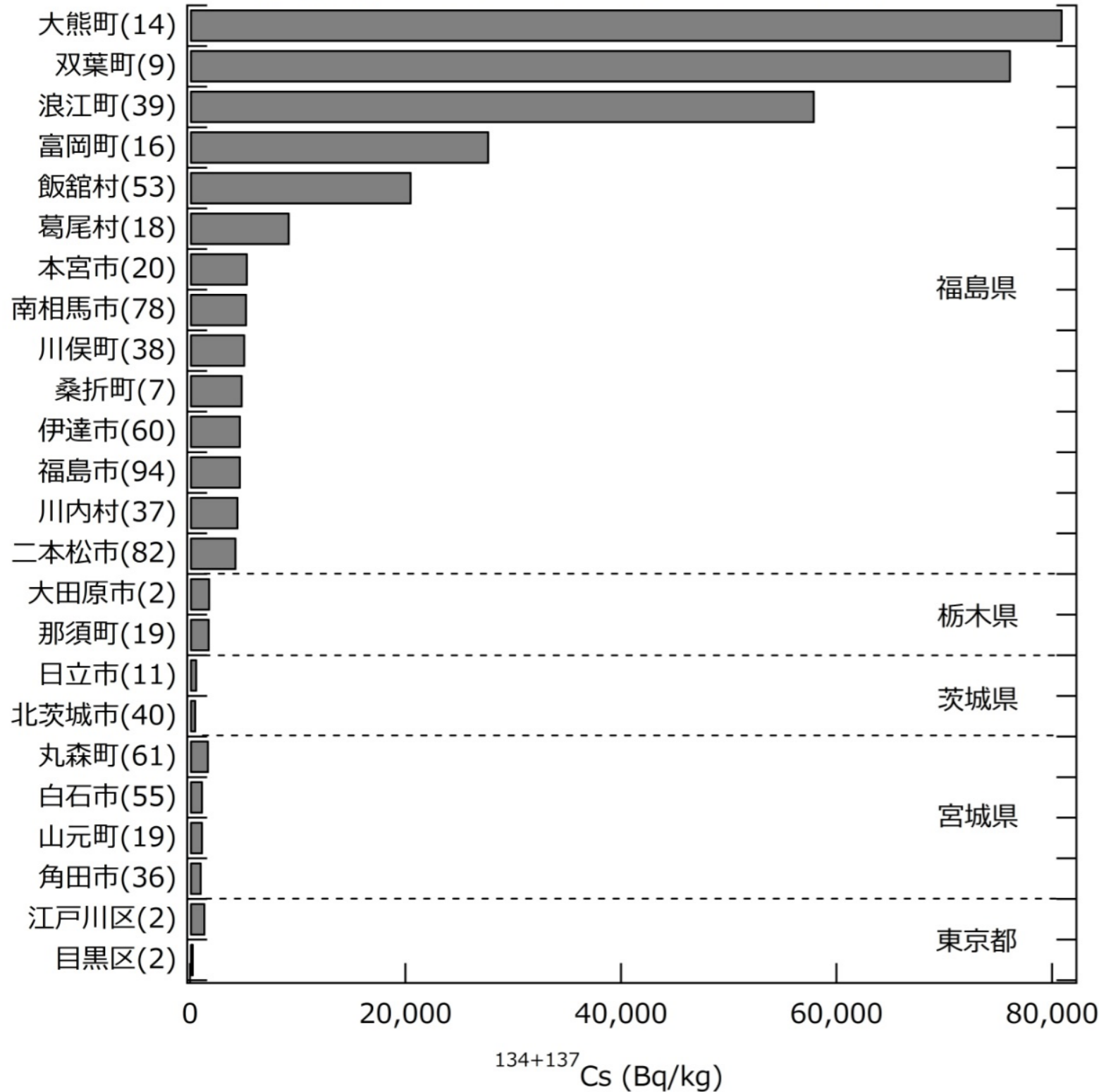
水道水汚染、千葉北西部  
のホットスポット



# 広域的な放射性セシウムの評価(文部科学省提供)+自分のデータ

(小豆川勝見先生自身の観測データ)

非濃縮地点における土壤中の放射性セシウムの放射能



放射性セシウム( $^{134}+^{137}\text{Cs}$ 合算値)  
 測定点はすべて非濃縮地点  
 それぞれ5-40点程度の平均値



大熊町でのサンプリングの様子

1. 市町村名の中の(カッコ)内の数字はサンプル数であり、ここではその平均値を示した。
2. 土壌サンプルの採取は2011年6月から7月であり、採取時点で半減期補正を行っている。
3. 文部科学省から提供された値に筆者の測定結果を加えた。

# 原発周辺で観測された核種

$^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  
 $^{132}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  
 $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  
 $^{239}\text{Np}$ ,  $^{59}\text{Fe}$

Shozugawa et al., 2012

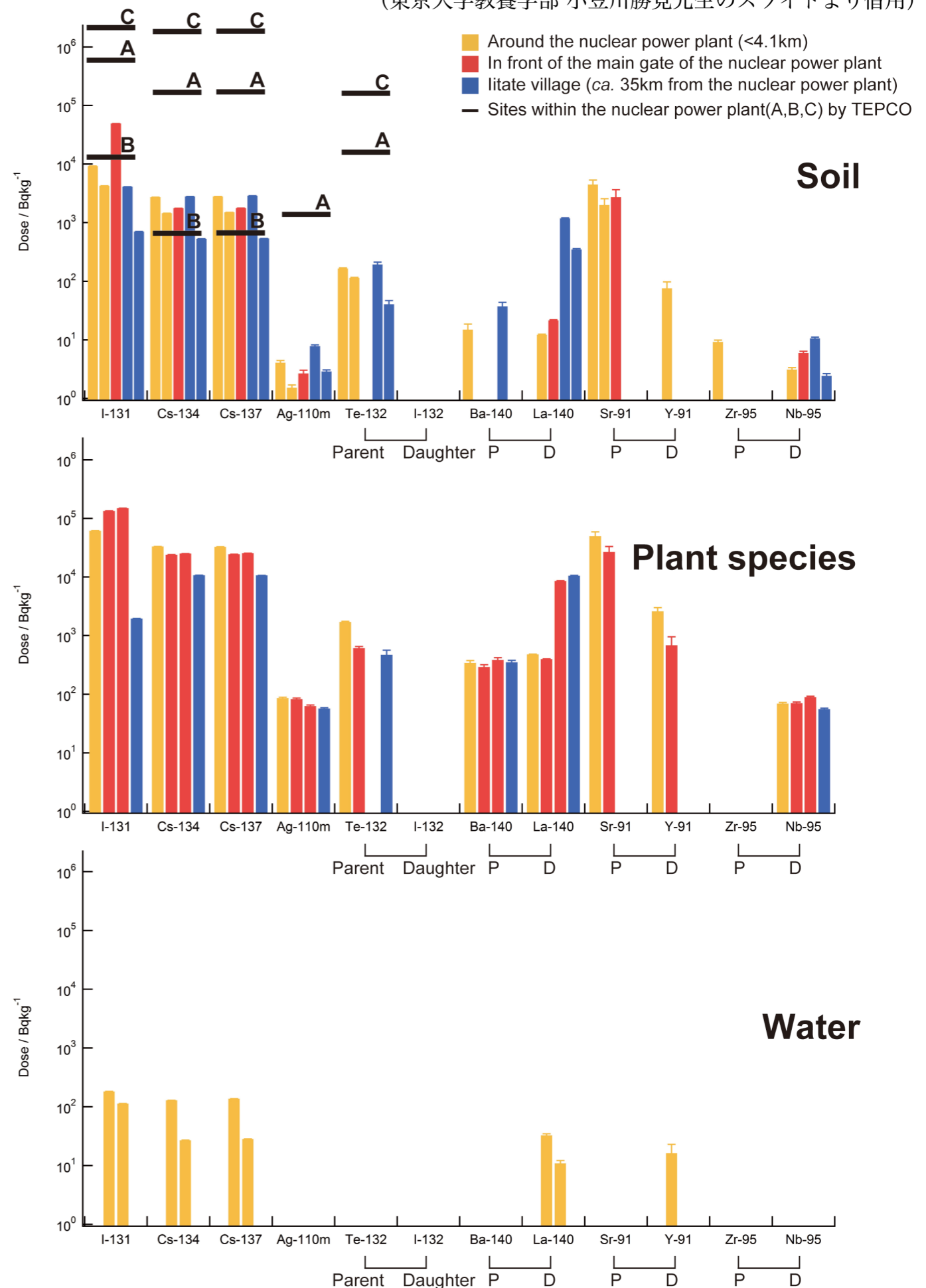
$^{125}\text{Sb}$ ,  $^{127\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$ ,  
 $^{136}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  
 $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{114\text{m}}\text{In}$

小島ら, 2011,2012

$^{241}\text{Pu}$

Zheng et al, 2012

(東京大学教養学部 小豆川勝見先生のスライドより借用)









## 福島での測定例 (東京大学 塩沢らによる)

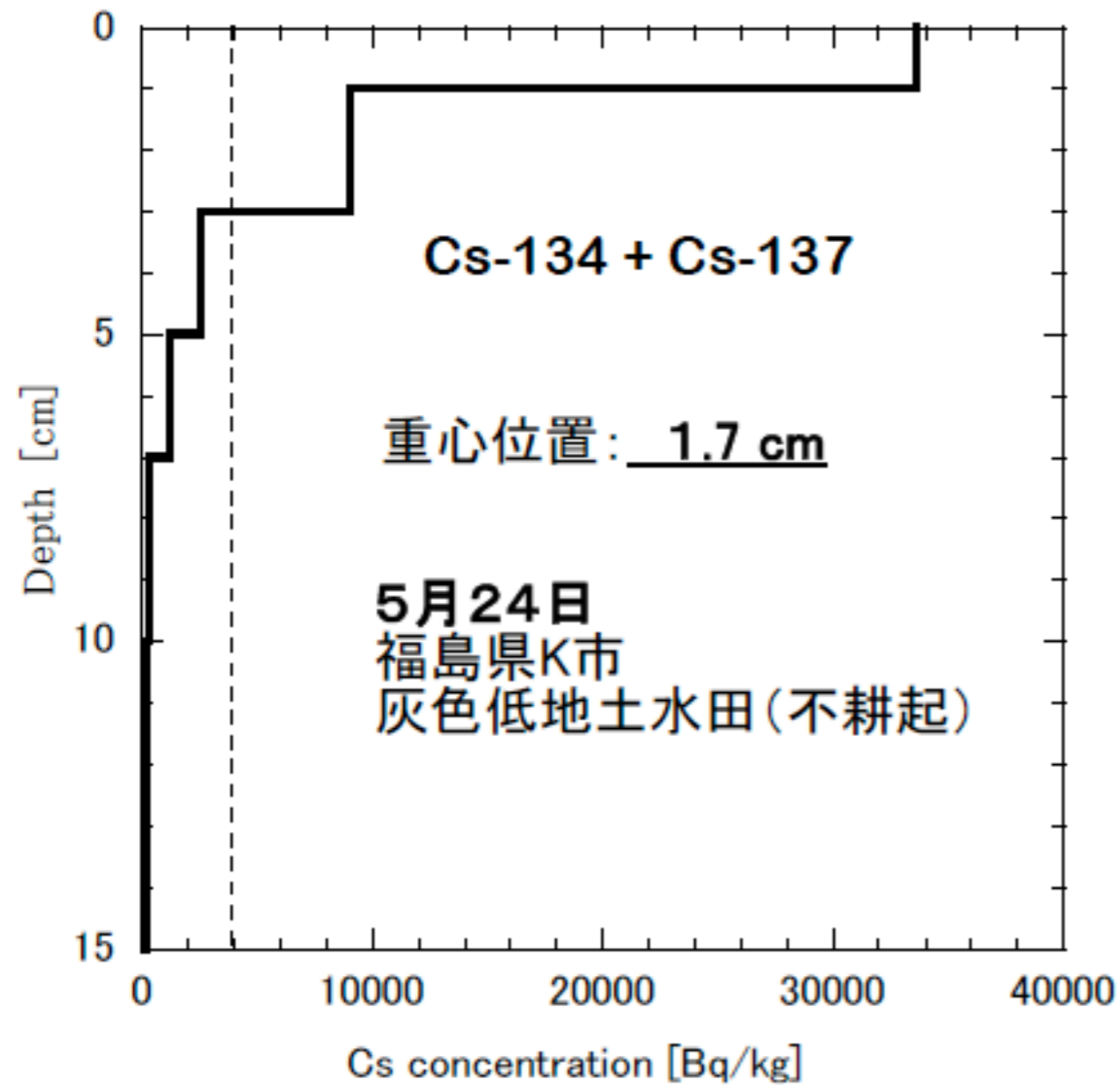


図 1 a 水田土壌の放射性 Cs の鉛直分布例 1

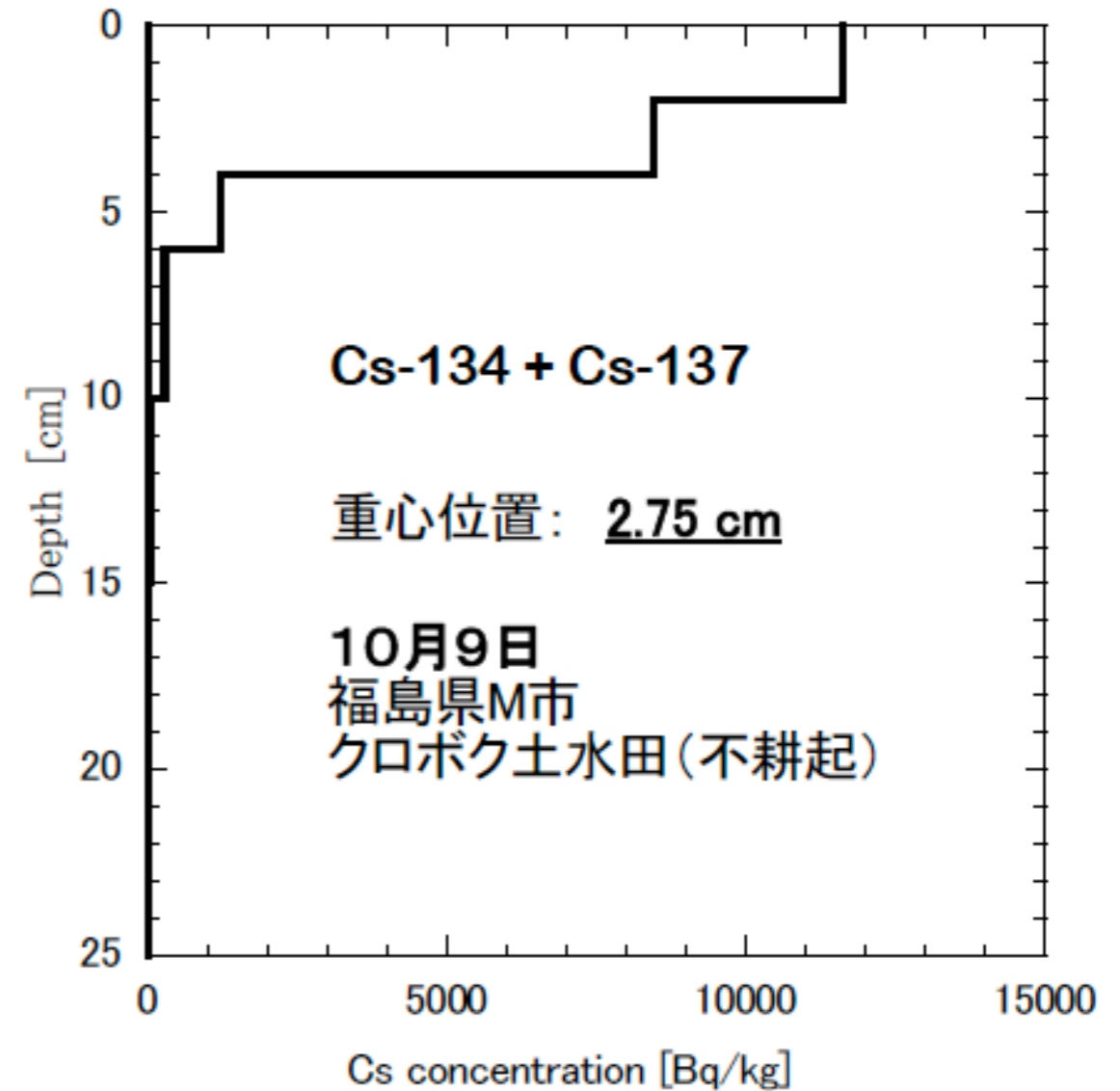


図 1-b 水田土壌の放射性 Cs の鉛直分布例 2

**$^{137}\text{Cs}$  は浅い。表土 5 cm 以内にほぼ収まっている。  
うち大半が上層 1 cm にある。**



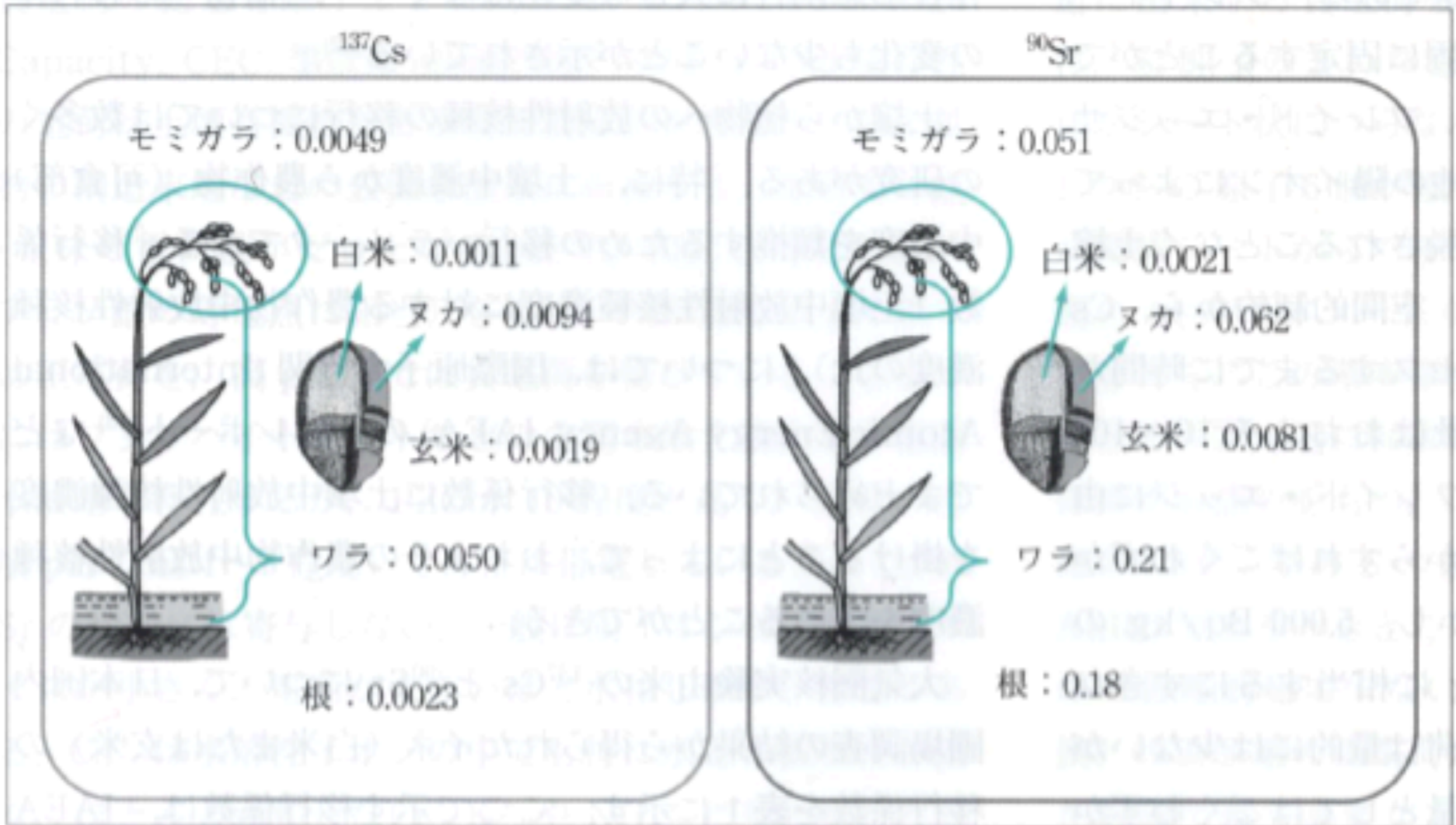


図5 ■ 土壌中濃度を1.0としたときのイネにおける部位別  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{90}\text{Sr}$  の相対濃度

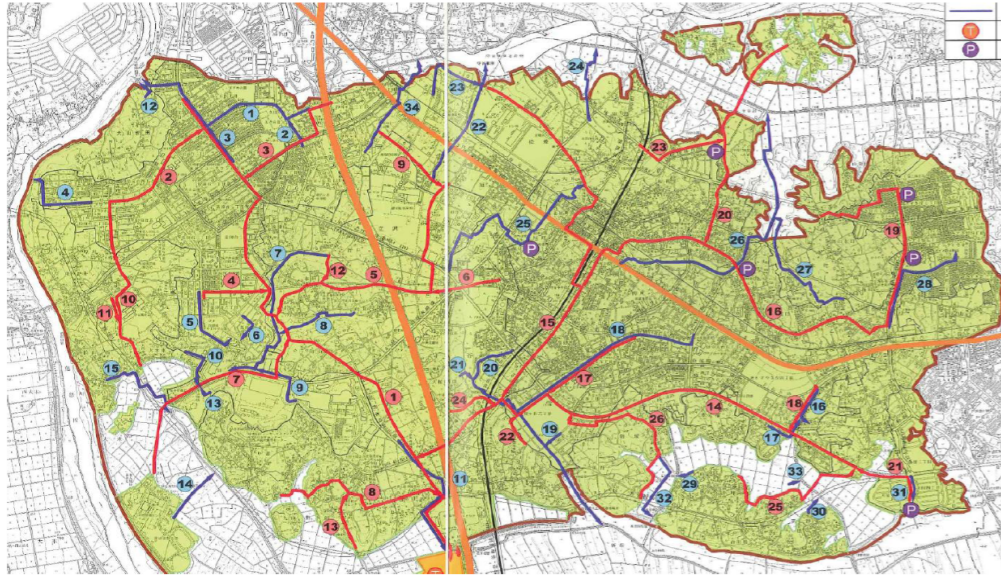
福島産の米は全袋検査されている。現状はほとんど全てが不検出。



# 濃縮の顕著な例 - 茨城県守谷市 放射性物質の都市濃縮

## 守谷市雨水・下水幹線

市役所作成のパンフレットから転載



都市部に降った雨水は地下雨水幹線を通じて周辺部の河川・遊水池・水路に放出される。  
 【北守谷雨水幹線】  
 青色1, 2, 3, 12: 新守谷一鬼怒川ルート、5, 6: 北守谷野球場ルート  
 【南守谷雨水幹線】  
 青色26: 守谷郵便局ルート、27: 愛宕中学校ルートの合流先、16, 17: 南守谷野球場ルート、18-21: 松ヶ丘ルート

## 住宅地からの雨水の処理



プロムナード水路  
 全長1.2km  
 (地上部のみ)

プロムナード水路に雨水を排出する地域  
 面積約1.9km<sup>2</sup>

城址公園  
 水路下流に位置

## 公園は雨天時の調整池として活用



雨天時



## ホットスポット・ホットエリアの形成

これまでに測定してきた守谷市内の地点 (東大教養：放射化学：小豆川氏)  
 市役所周辺(大柏)・プロムナード水路・城址公園・愛宕中裏手・郵便局・松ヶ丘・五反田川・みずき野・けやき台公園など...

(東京大学教養学部 小豆川勝見先生のスライドより借用)



# 除染

写真：福島大学キャンパスのモデルケース

セシウム元素：土壌表層

土壌の引き剥がし、天地返し

拭き取り、高圧洗浄

吸着剤（ゼオライト・プルシアンブルー・粃殻・稲藁）

除染物の保管  
焼却処分



飯舘村



浪江町





大熊町



双葉町



富岡町











# 中間貯蔵施設





# 中間貯蔵施設の建設地











相馬野馬追祭  
執行委員会

# 相馬野馬追

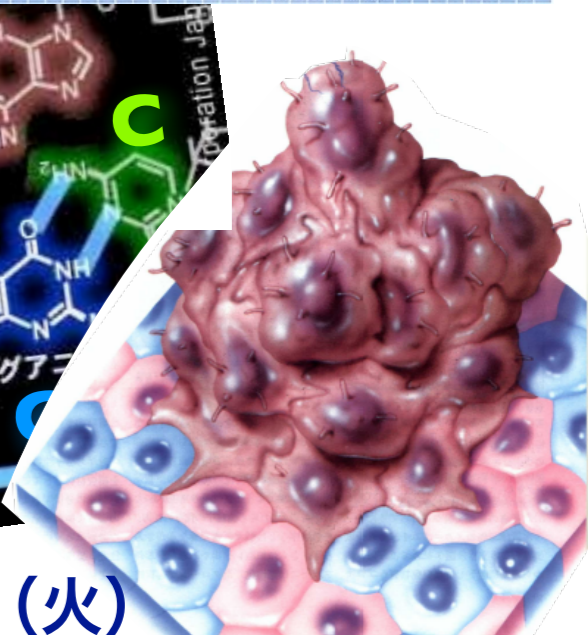
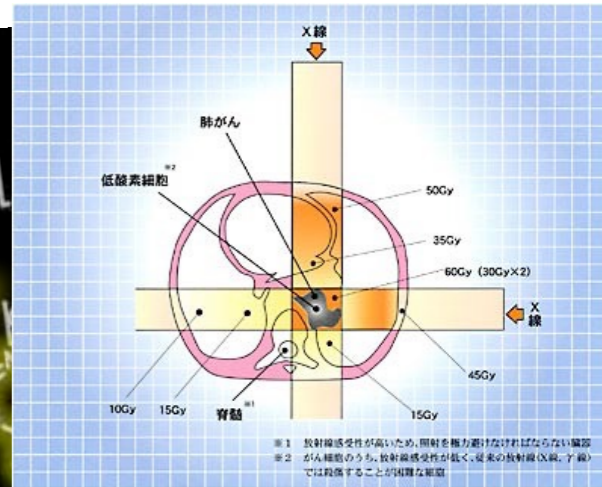
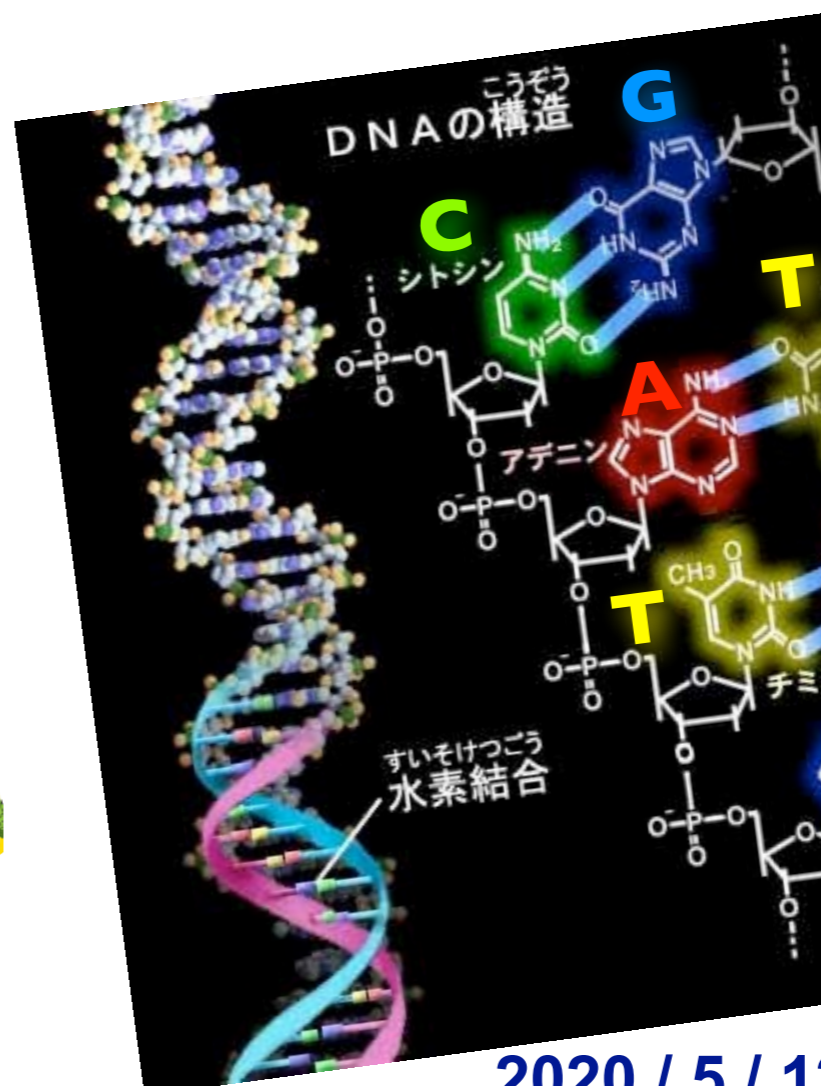




# 相馬野馬追



# 放射線の科学と安全



2020 / 5 / 12 (火)

## 第4話 放射線生物学・放射線防護学 リスクコミュニケーション

# 参加したセミナーリスト

2011～12年度分

理化学研究所原子物理セミナー「低線量放射線の生体への影響」2011年6月6日

日本物理学会主催「物理学者から見た原子力利用とエネルギー問題」，立教大学，2011年6月10日。

日本学術会議緊急講演会「放射線を正しく恐れる」2011年7月1日

東大病院講演「チェルノブイリから福島を学ぶ」2011年10月28日

日本アイソトープ協会勉強会「ICRPを読み解く—第2回—」，學士會館，2012年2月13日

東京大学大学院 理工農医 4 研究科合同公開講座「放射線を知る」，2012年2月19日

東京大学，博報堂，時事通信社，特別協力：環境省，「災害廃棄物処理を考えるプロジェクト」2012年3月

文部科学省「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査研究結果」に関するシンポジウム，2012年3月13日

日本物理学会第67回年次大会シンポジウム，領域1「放射線が生体に与える影響—原子分子から生物まで—」，関西学院大学，2012年3月24日

日本物理学会第67回年次大会シンポジウム，物理と社会「福島原発事故から1年：これまでとこれから」・「科学者の役割とは何か：不確実性の中での科学と社会」・「福島原発事故と物理学者の社会的責任」，関西学院大学，2012年3月。

東京大学教養学部 学術俯瞰講義「リスクと社会」，2012年4月～7月

京都大学 基研主導研究会2012「原子力・生物学と物理」2012年8月8日～10日，プレ・コンファレンス 8月7日

アルスタウンミーティング「福島原発事故の反省と「科学と社会」の在り方について」（共催：東北大学GCOE「物質階層を紡ぐ科学フロンティアの新展開」），東北大学，2012年8月24日

日本学術会議主催学術フォーラム「リスクを科学するフォーラム」2012年8月31日

日本学術会議主催学術フォーラム「原発事故調査で明らかになったこと—学術の役割と課題—」2012年9月1日

東京大学医科学研究所「現場からの医療改革推進協議会 第7回シンポジウム」2012年11月10・11日

日本学術会議主催学術フォーラム「東日本大震災がもたらした食料問題を考える」2012年11月21日

日本物理学会第68回年次大会シンポジウム，物理と社会「医学における物理学の貢献」，広島大学，2013年3月28日

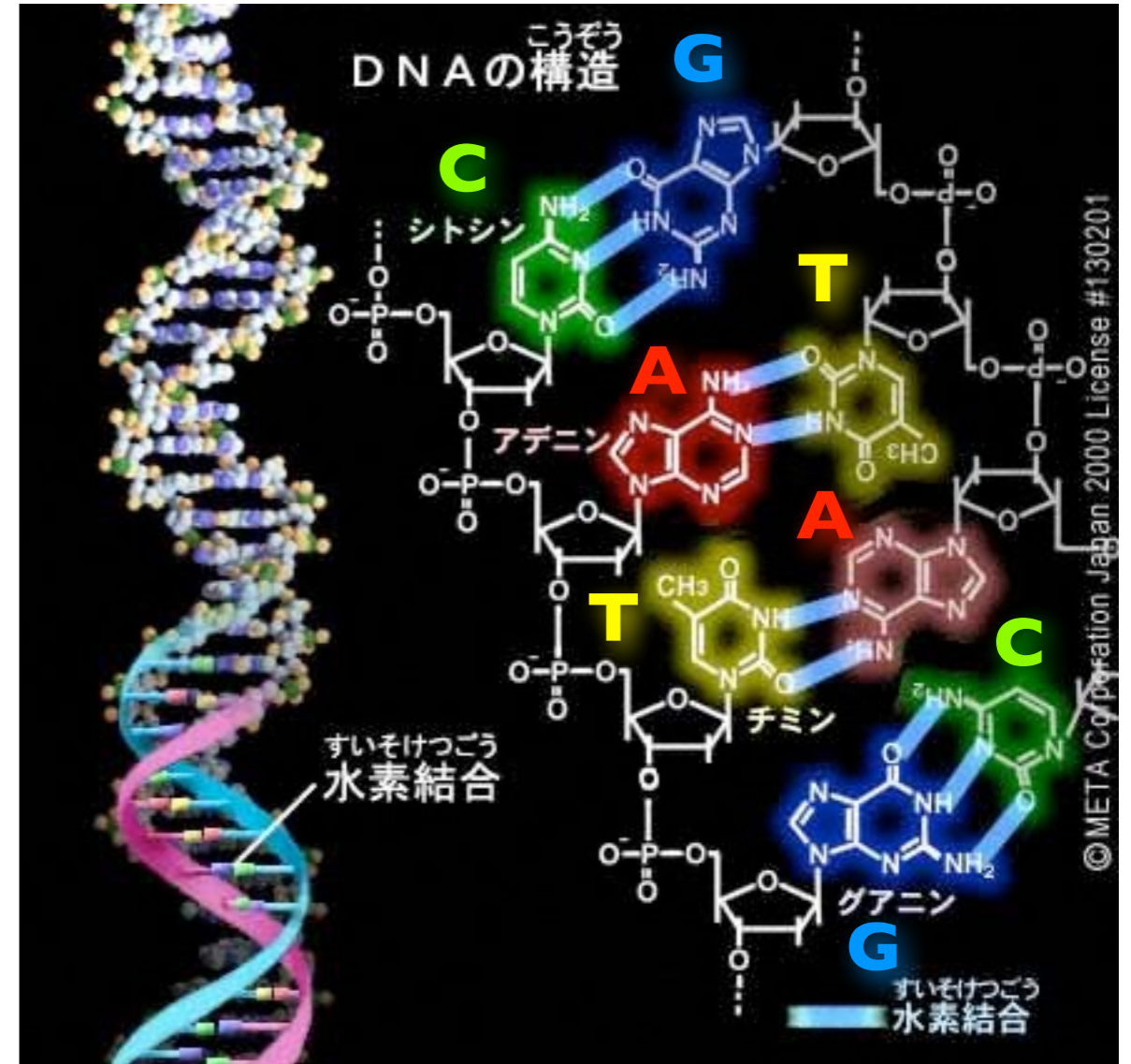
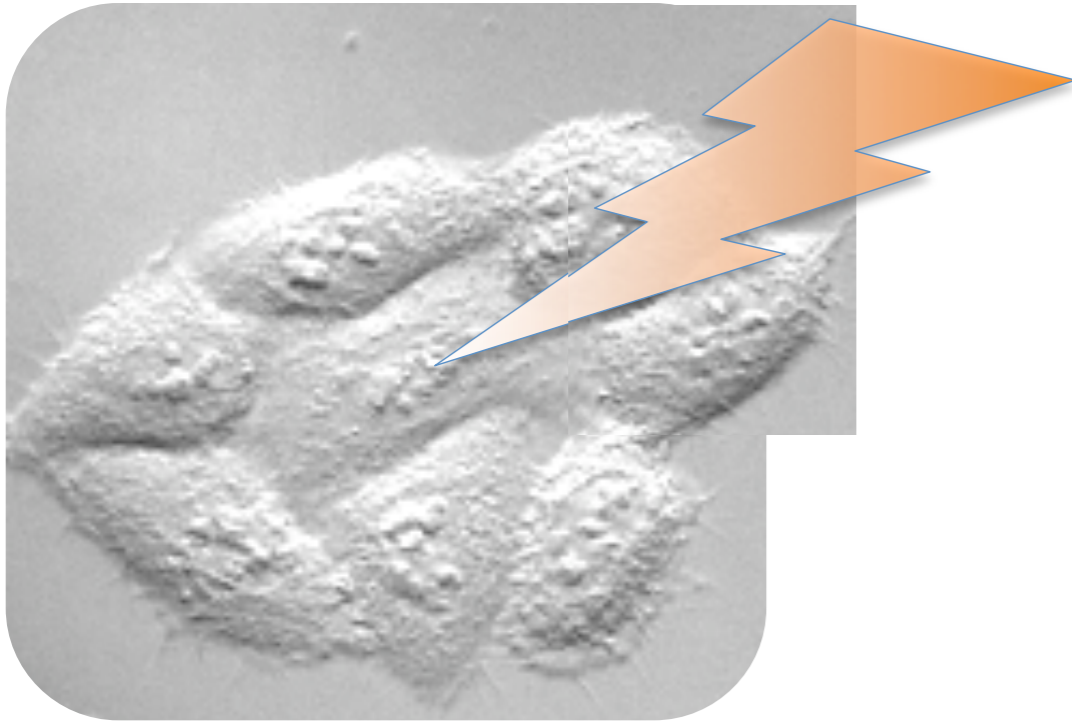


# 放射線生物学

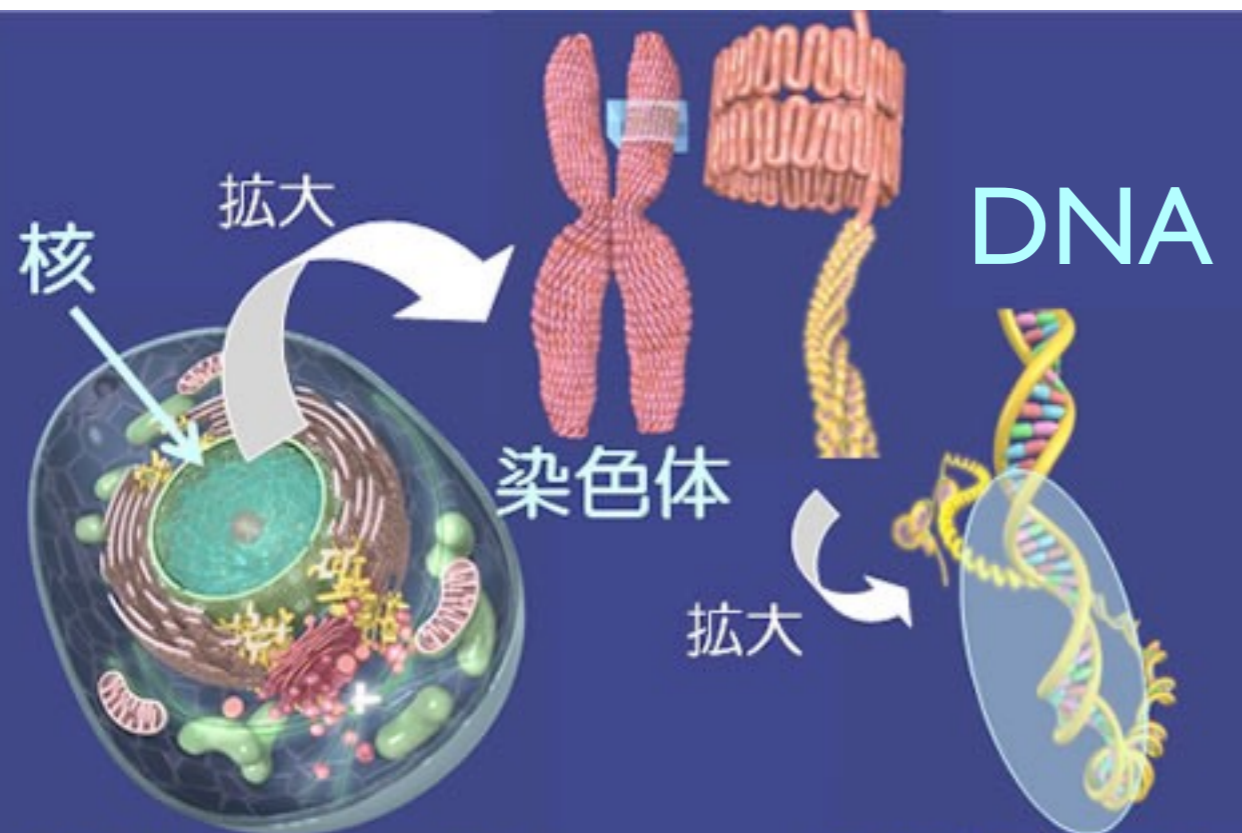


# 細胞の核に放射線が照射

## DNA



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



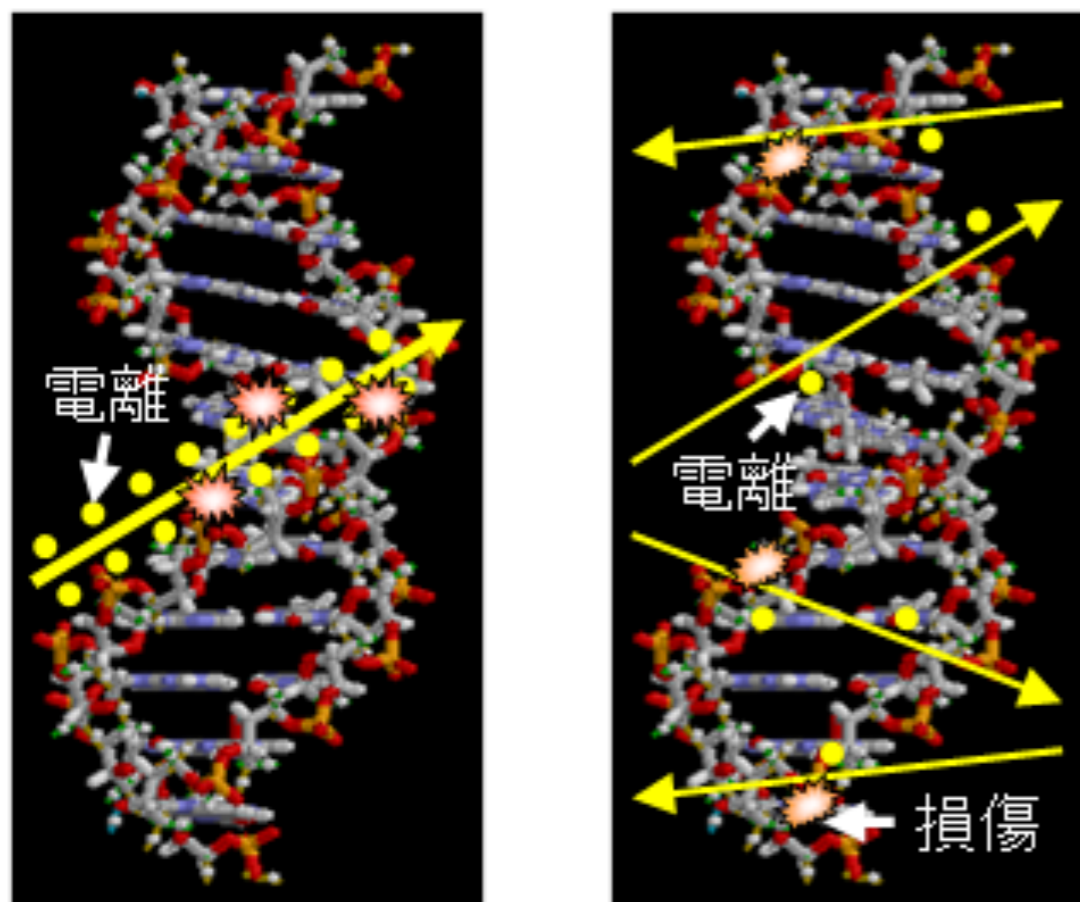
細胞(60兆個) 一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子



# 放射線による DNA 損傷

**ラジカル  
(活性酸素)**



重イオン

電子

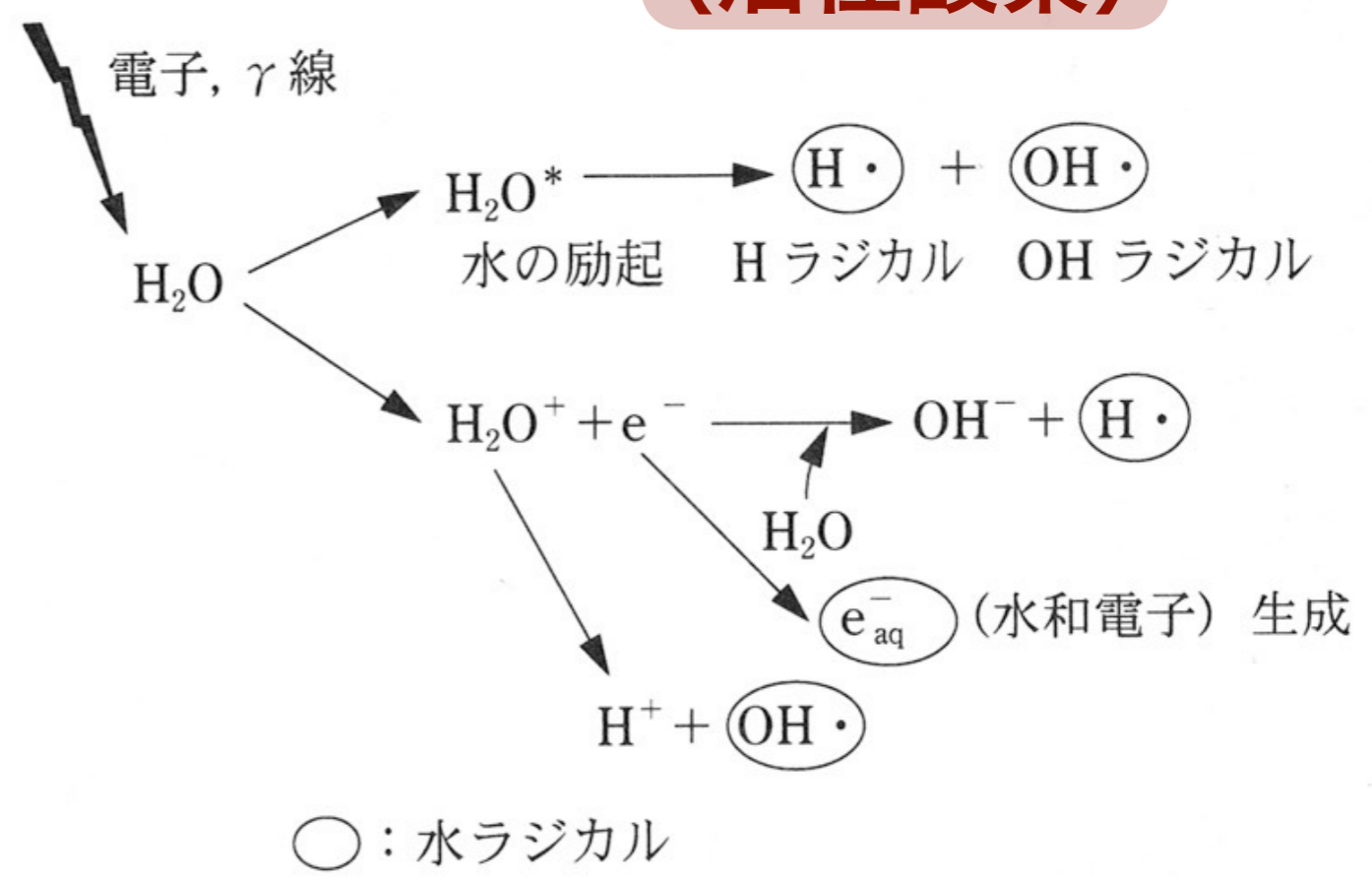


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略  
(書籍「図解 放射性同位元素等取扱者必携」オーム社、より引用)

## 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）

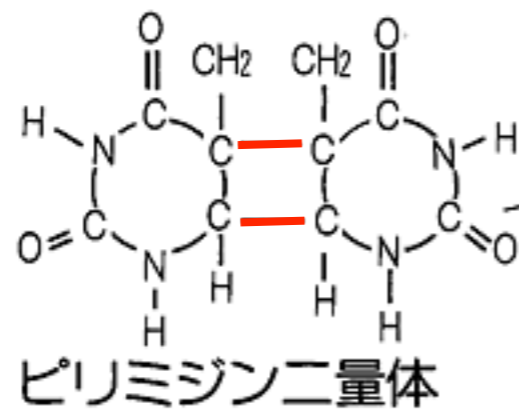
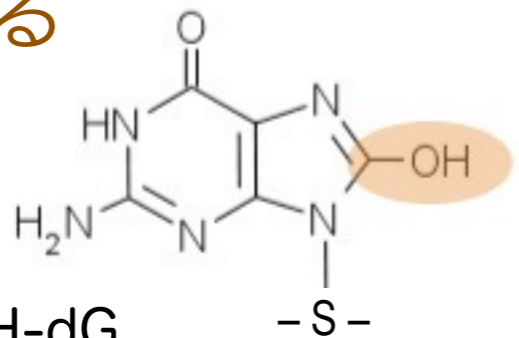
表5 増殖期のヒト細胞における DNA 損傷の自然発生率と放射線誘発率の比較<sup>7)</sup>

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

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

・OH ラジカルによる酸化

8-OH-dG



紫外線照射でも頻発

鎖切断

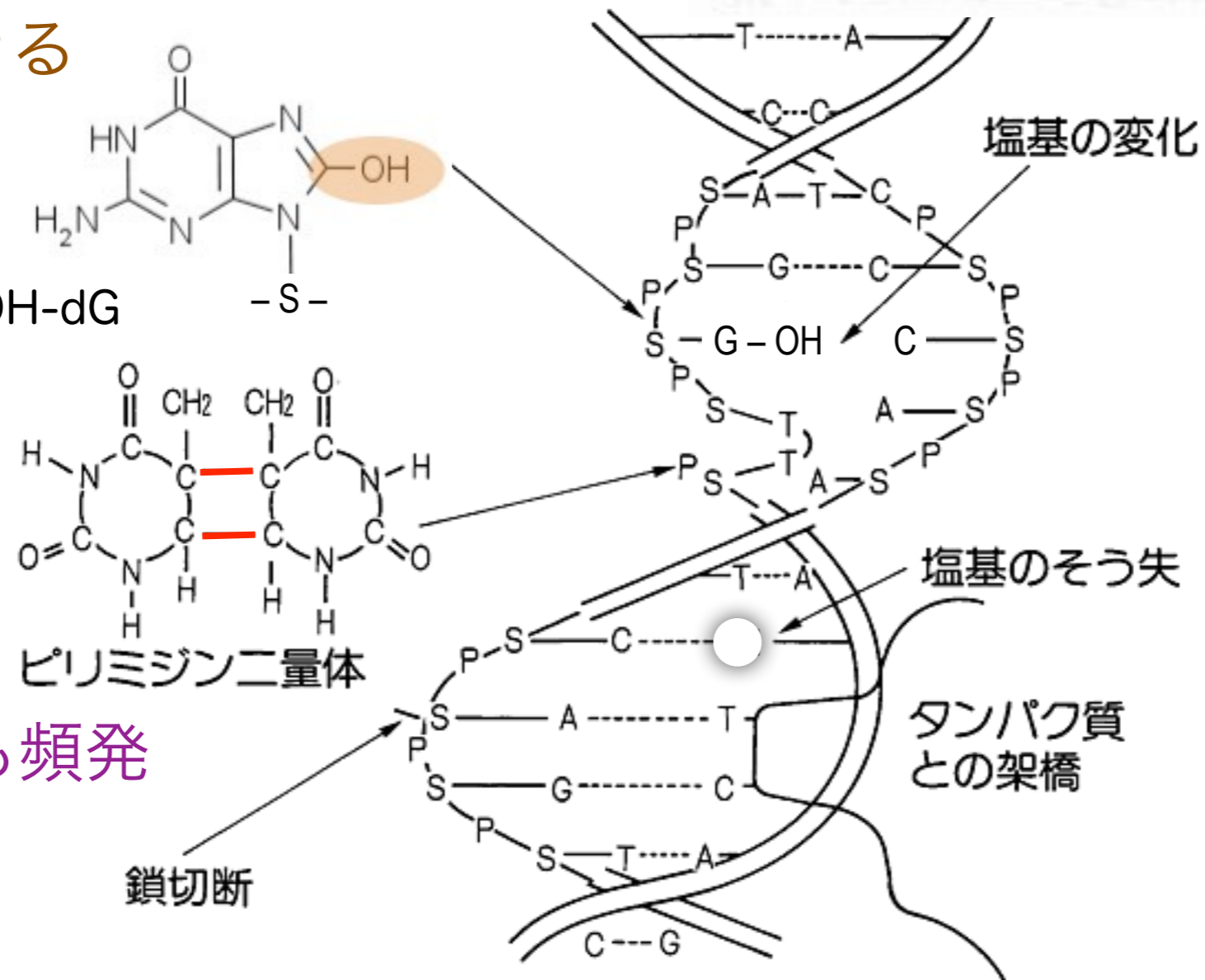
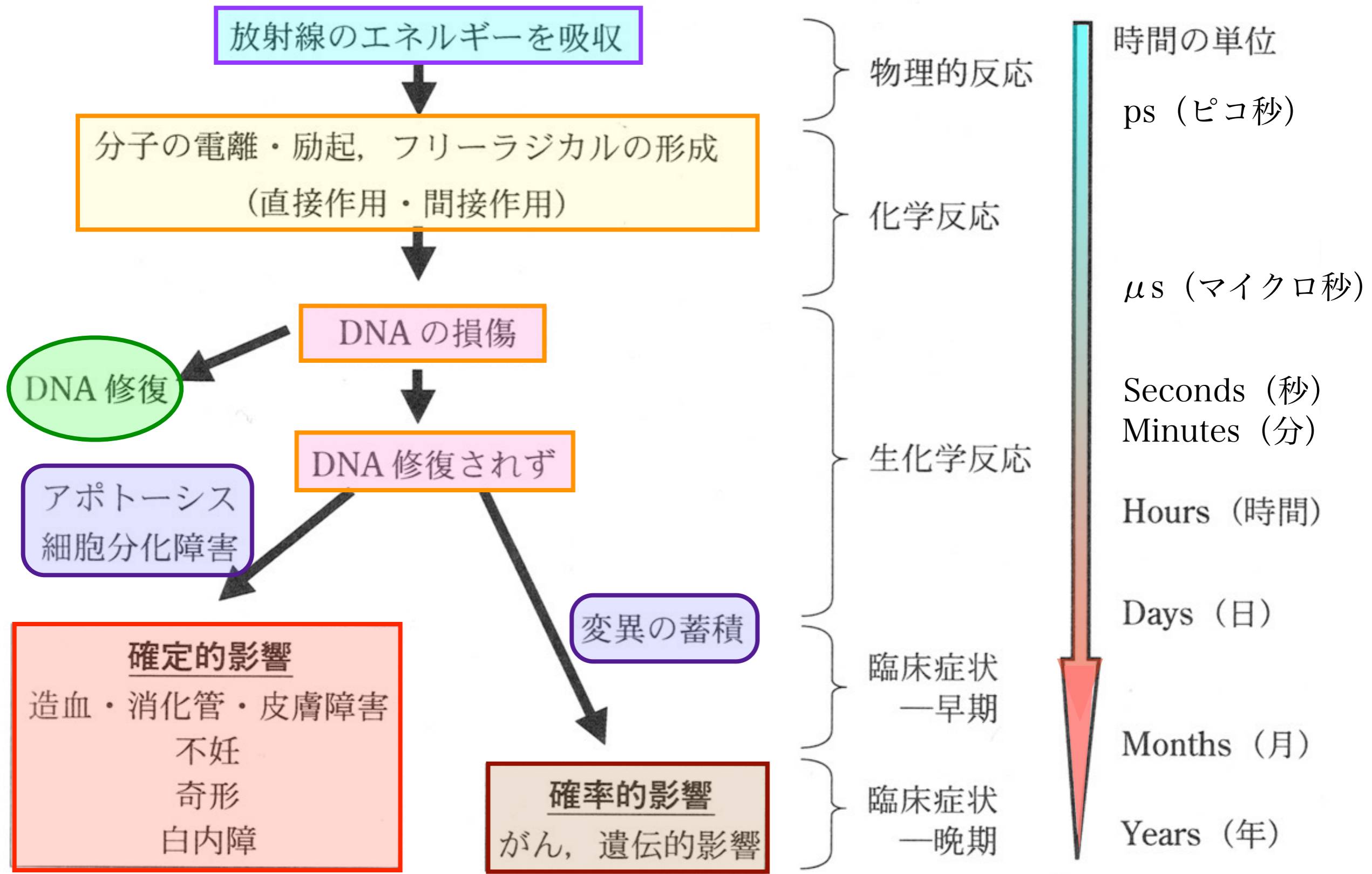


図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNA に見られる種々の損傷

[出典] 江上信雄：生き物と放射線、東京大学出版会、1975

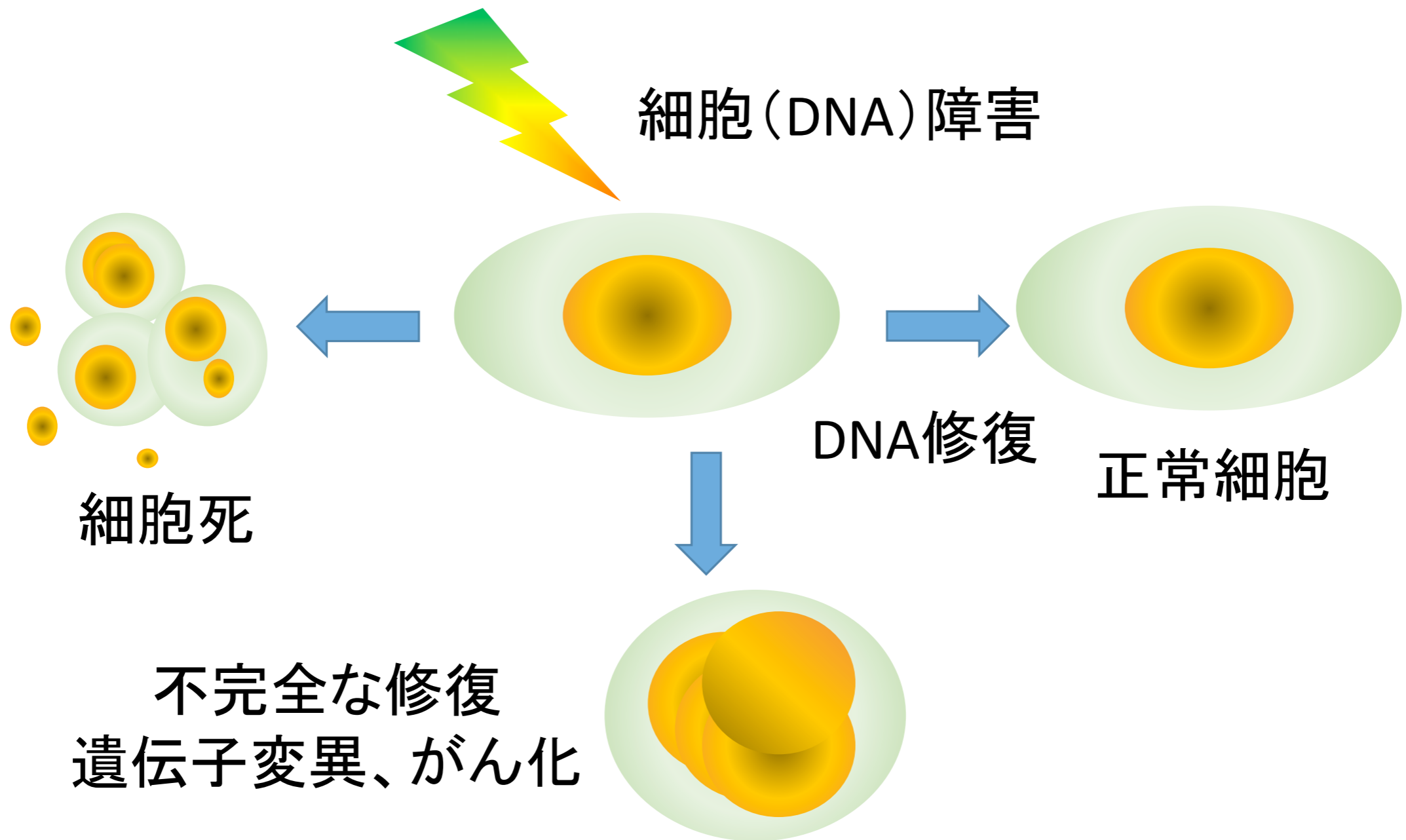
図は一部内容を改変。





放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

# 細胞死とがん化

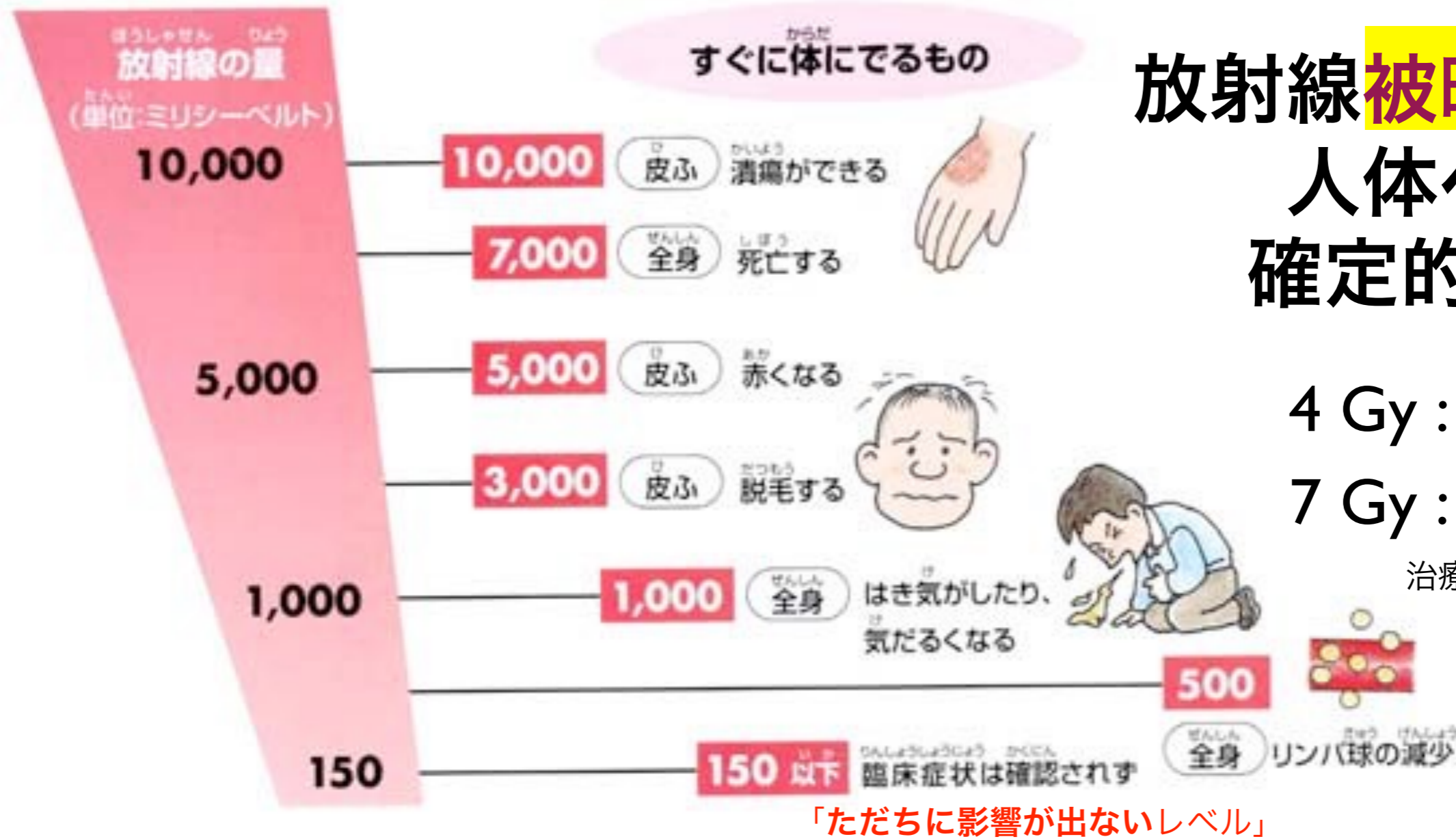




# 放射線被曝による 人体への 確定的影響

4 Gy : 半数死亡  
7 Gy : 全員死亡

治療により助かることも。



東海村 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 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



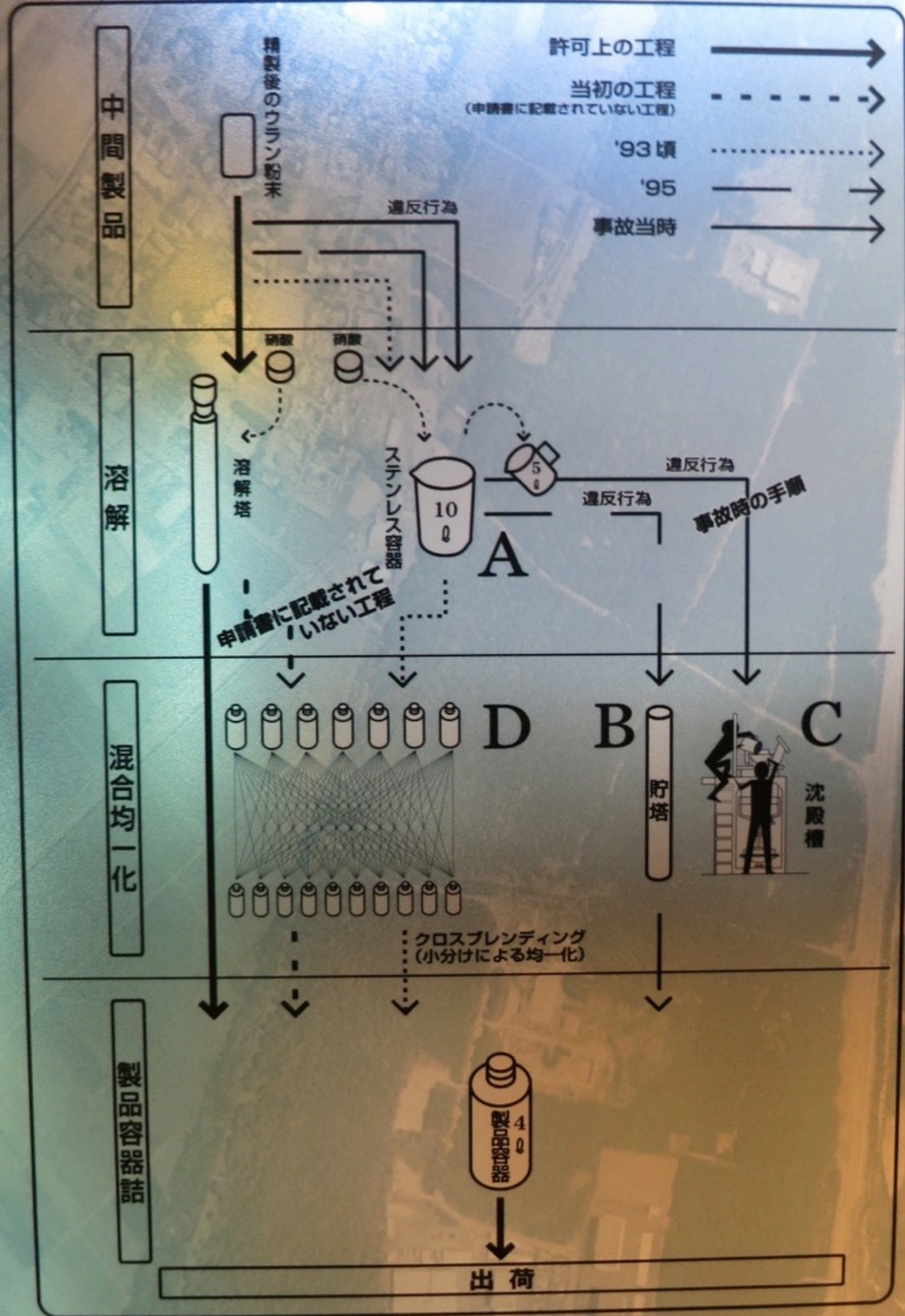
# JCO 臨界事故

The JCO Criticality Accident

この事故は、株式会社ジェー・シー・オー (JCO) 東海事業所のウラン転換試験棟で発生した。当時、この建物では高速実験炉「常陽」の燃料原料となる濃縮度18.8%のウランを硝酸に溶かし、均一にする作業が行われていた。

この作業に使用すべきでない沈殿槽と呼ばれる設備に、制限量を大幅に上回るウラン溶液を投入した結果、内部でウランがひとりりで核分裂し始めた。このような事態を「臨界事故」とよぶ。

その結果、核分裂連鎖反応による放射線 (中性子線およびガンマ線) が敷地外にまで放出され、このような状態が約20時間にわたって継続した。事故の最初の瞬間には激しい核分裂が起こったため、沈殿槽を使って作業していた2名の方が亡くなるといういたましい結果となった。

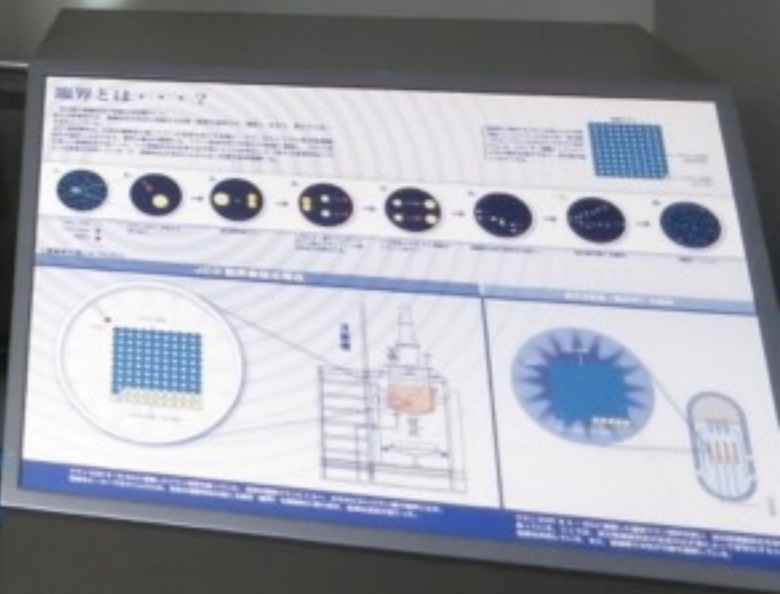






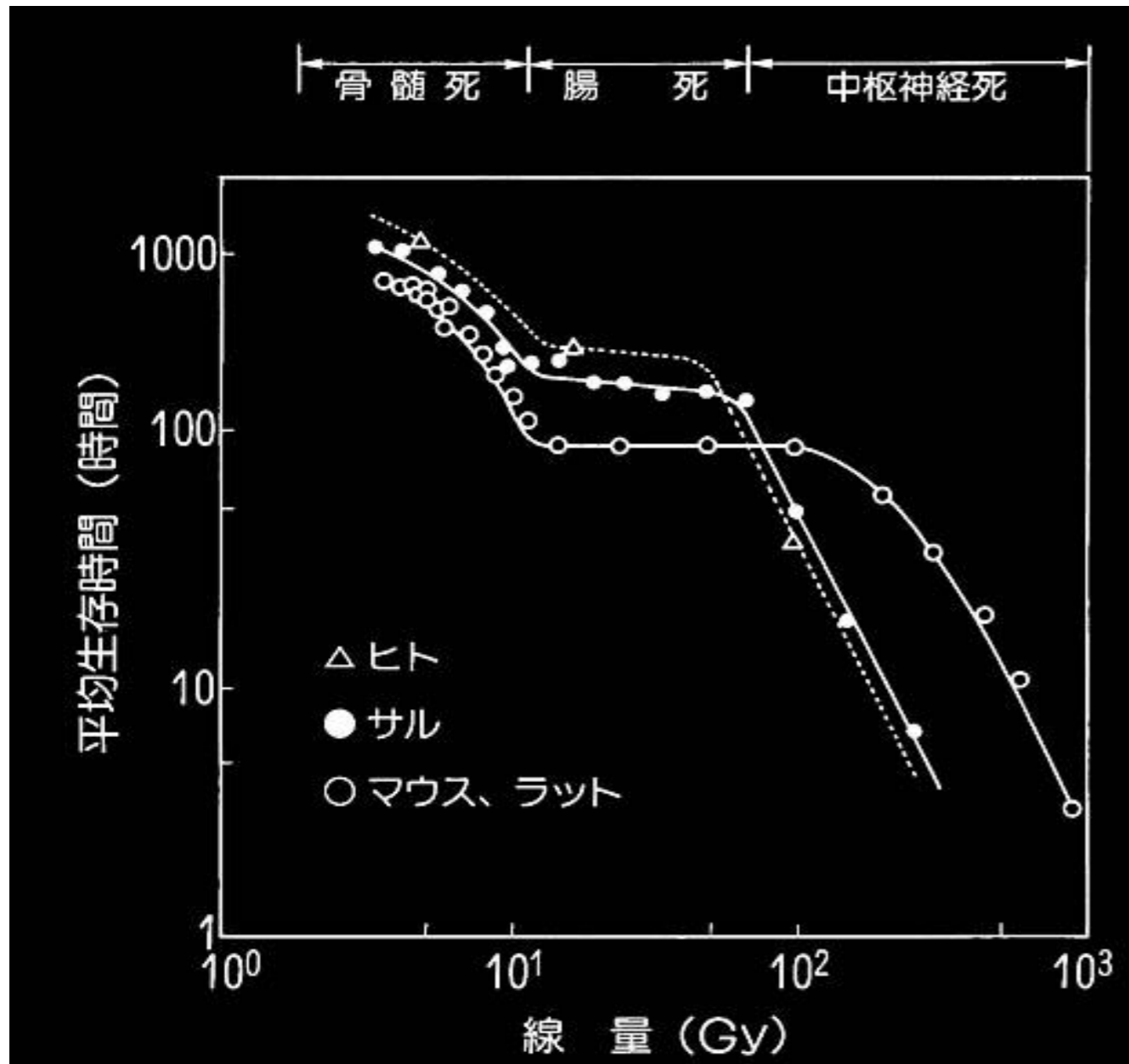
沈澱槽B

ウラン溶液をステンレス製ビーカーと  
漏斗を使い、手作業で投入していった。



# 急性放射線障害

## 全身被曝による死亡



骨髓死 4 Gy

腸管死 10 Gy

中枢神経死 20 – 100 Gy以上

東海村 JCO 事故

チェルノブイリの消防隊員

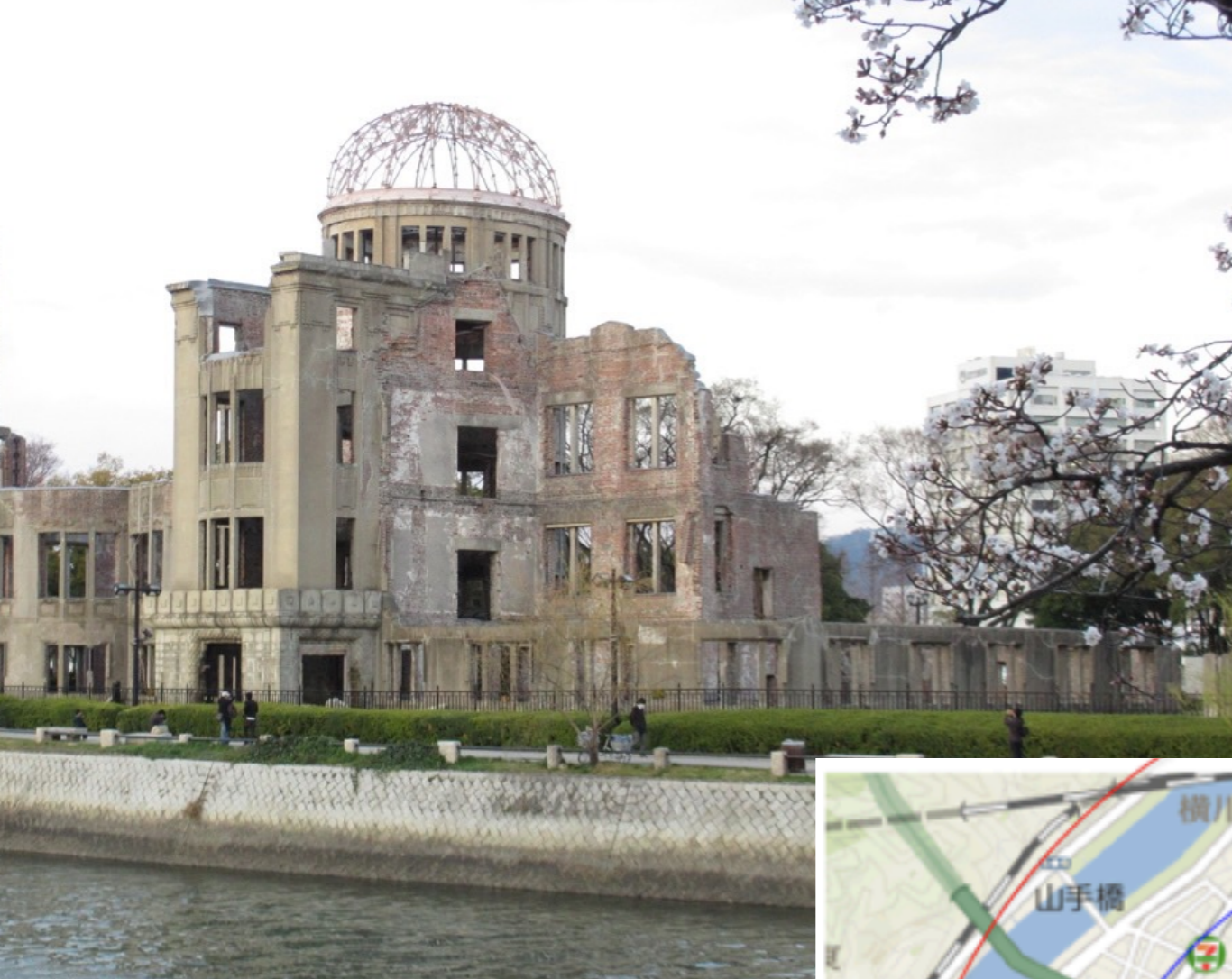
原爆



# 広島 原爆ドーム

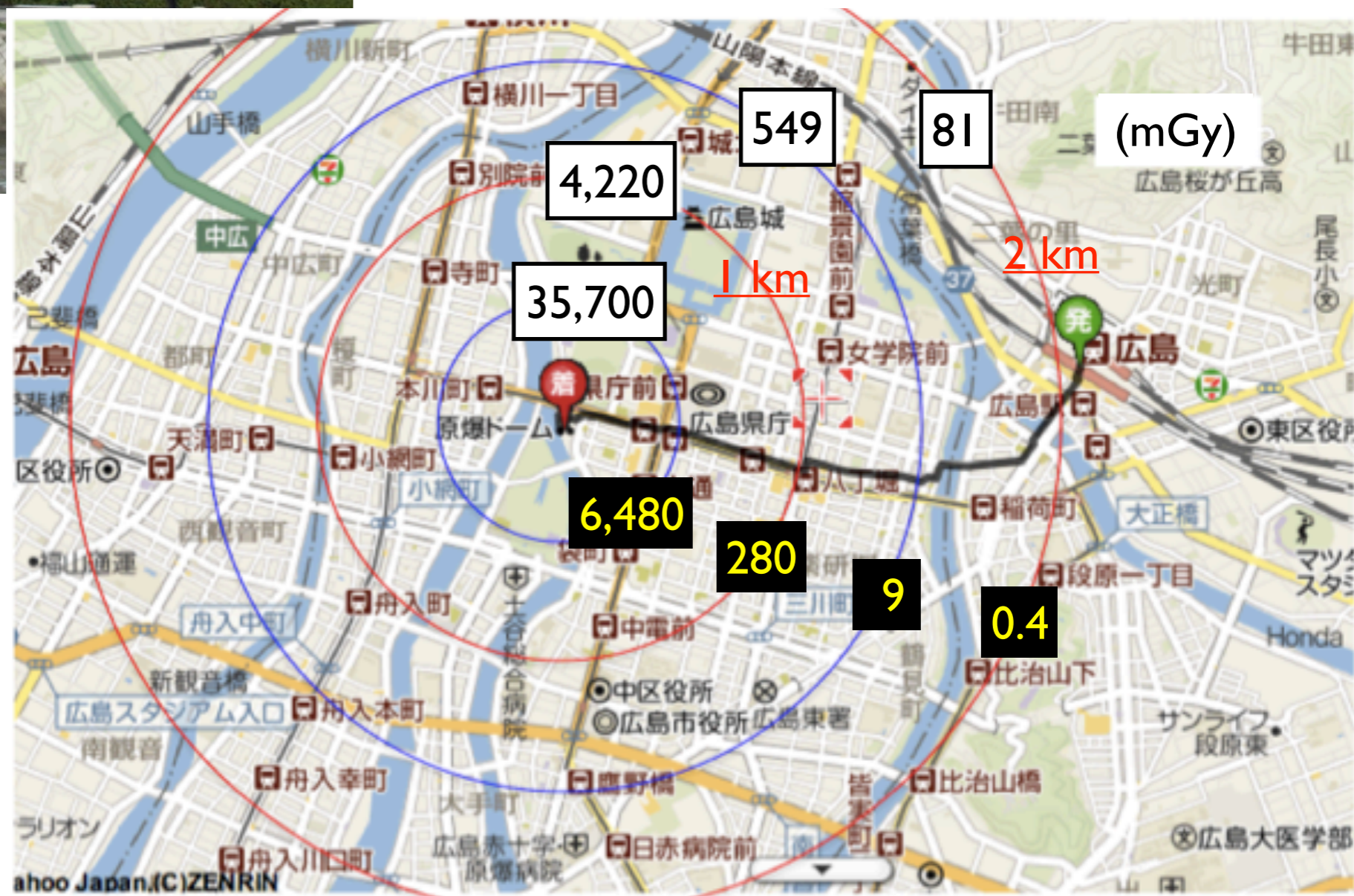






# 広島 原爆ドーム

$\gamma$ 線による 推定被曝線量  
中性子線による (mGy)





# 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
	血液凝固時間延長				
	食作用低力				
	酸素輸送低力				

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)



# 確定的影響の閾値

組織及び影響	しきい値 (1回照射、ミリシーベルト)
骨髓(造血能低下)	500
悪心・嘔吐	1000
精巣 一時的な不妊(精子の一時的減少) 永久不妊	150 3500—6000
卵巣 不妊	2500—6000
水晶体 検知可能な白濁 視力障害(白内障)	500—2000 5000
胎児 奇形 重度精神発達遅滞	100 120—200

菅原、青山、丹羽、放射線基礎医学、  
第11版 (金芳堂) より引用



# 放射線の健康影響

## 確定的影響

放射線によって細胞や組織が障害される

線量の高いところで生じる（**閾値がある**）

**重篤度が線量に依存する**

急性：消化管障害、造血障害、不妊（生殖細胞）など

晩発性：白内障

## 確率的影響

放射線によって細胞の DNA に損傷が生じる

ほとんどは修復されるが、修復できなかった場合、他の発がんメカニズムと合わさって、長期間かかってがんが生じる可能性がある。

線量に応じて確率が増す（**閾値はないとする**）

**線量と発症後の重篤度とは関連しない**

晩発性：**がん**と、遺伝的影響（生殖細胞）の可能性

**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。**

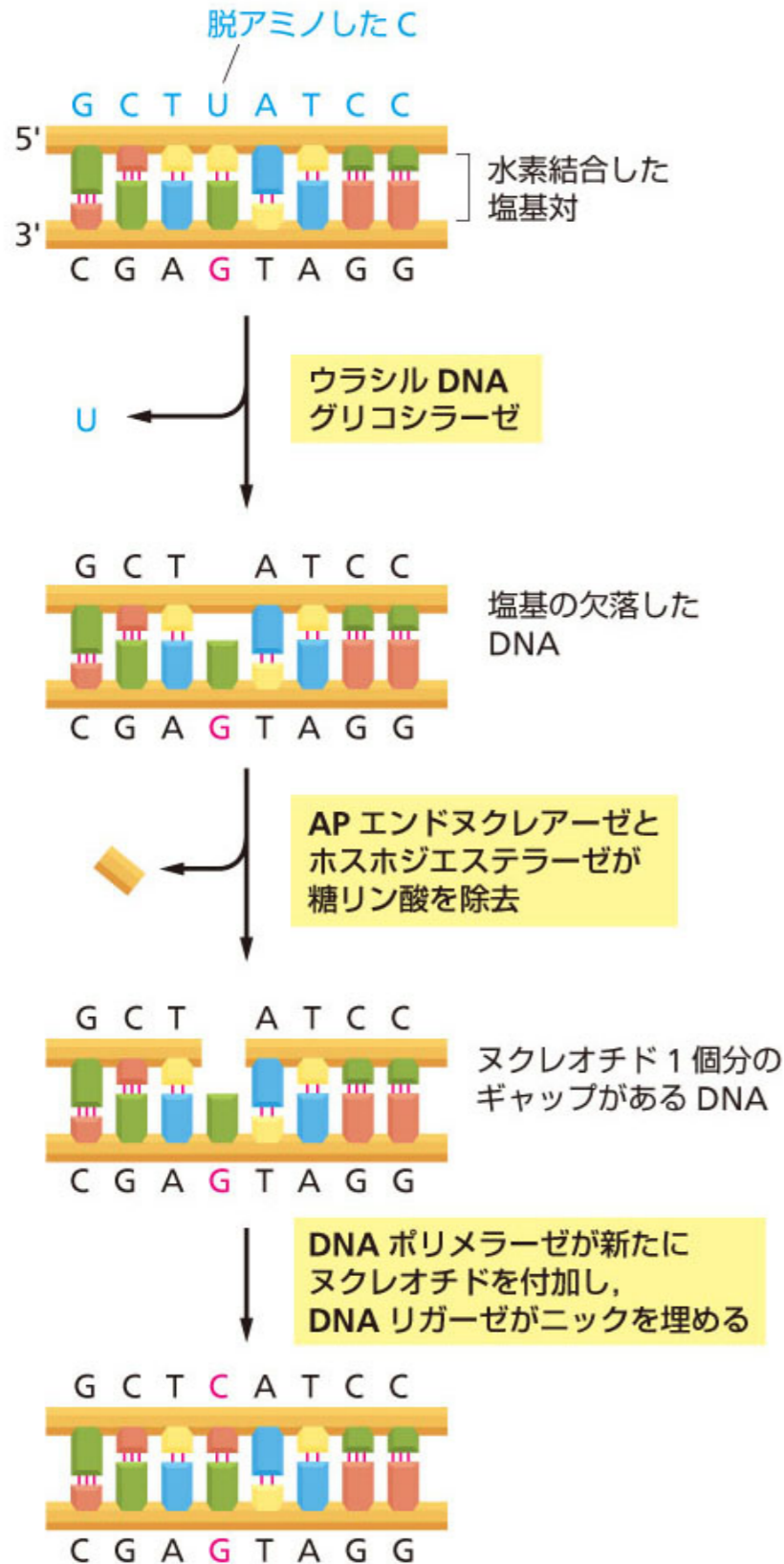
しかしそもそも、放射線を浴びなくても確率はゼロではない。

(日本人の死亡者の3人に1人はがんが原因。)

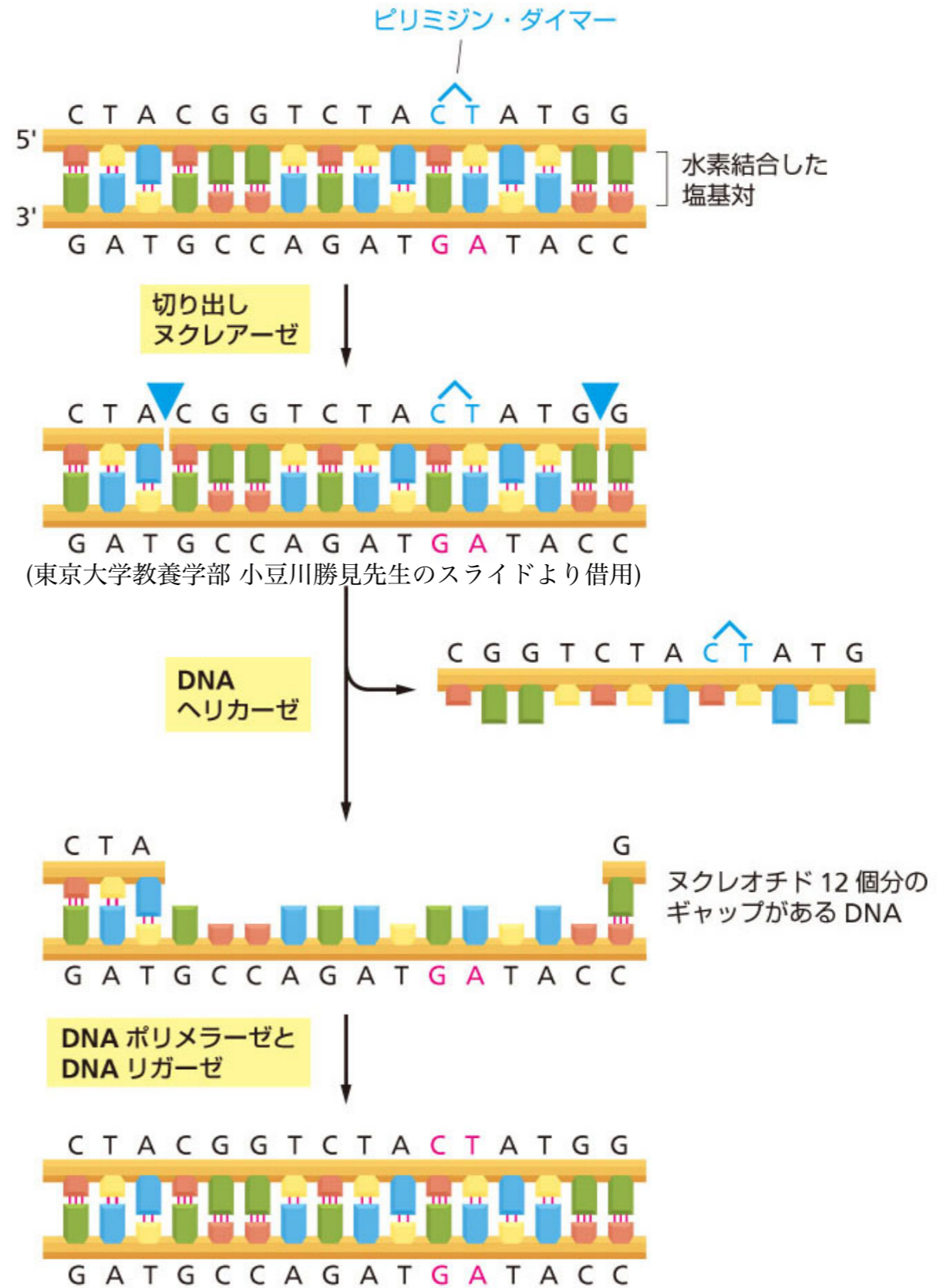
**疫学調査**の結果から結論を導きだすのは**統計学的**に困難。



# 塩基除去修復

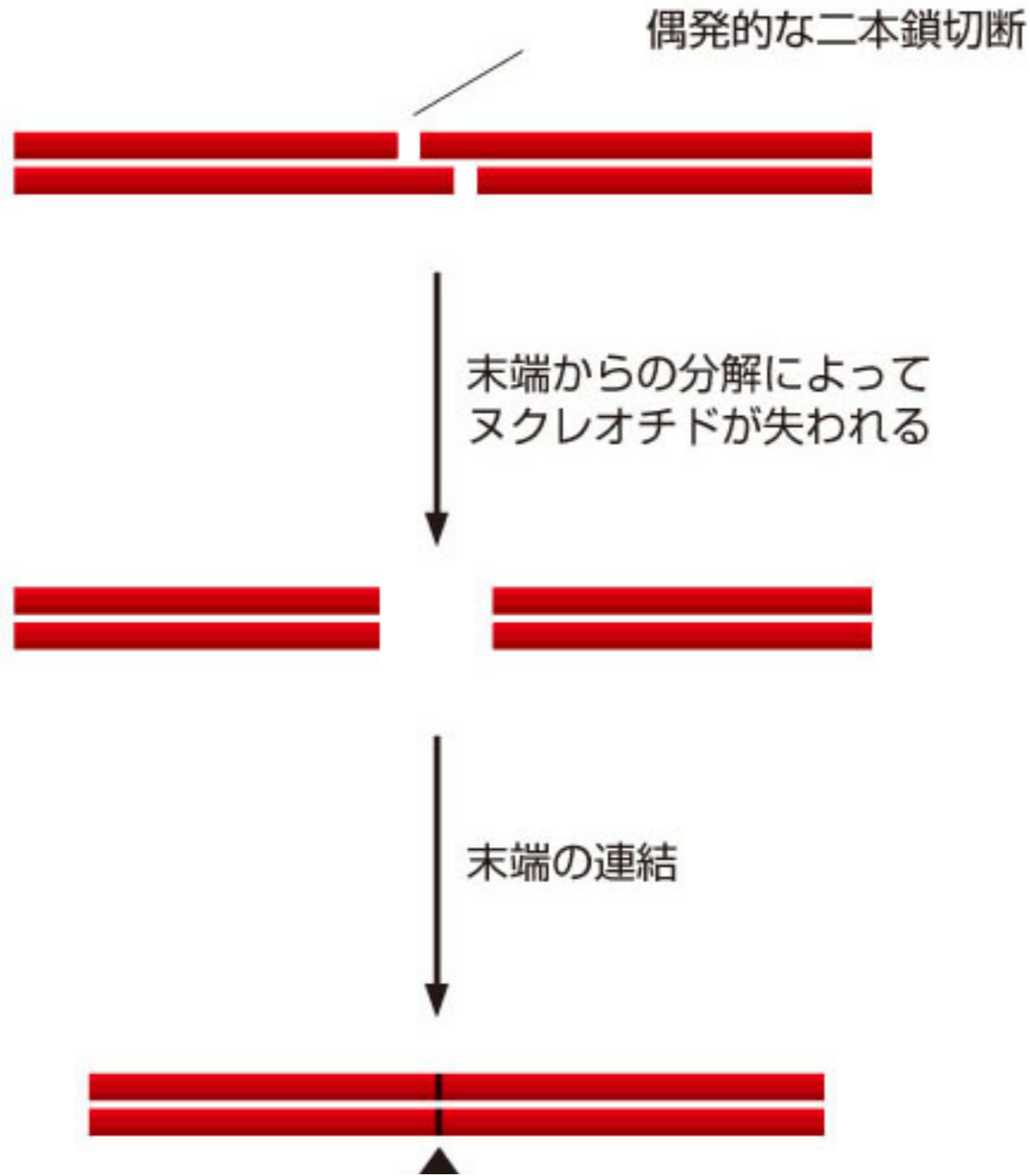


# (B) ヌクレオチド除去修復



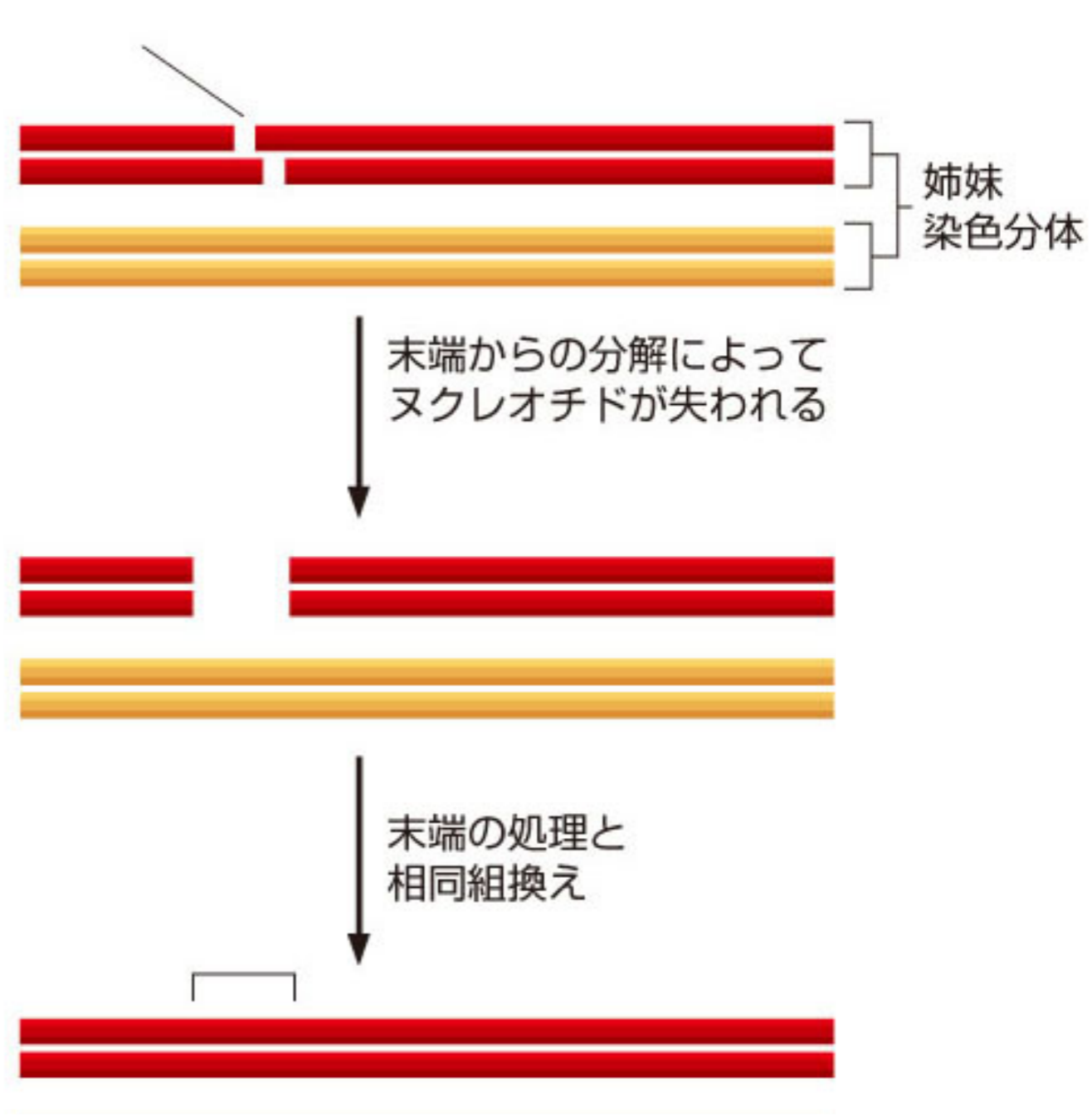
# DNA二本鎖同時切断の場合の修復

## 非相同末端結合修復



非分裂細胞の場合

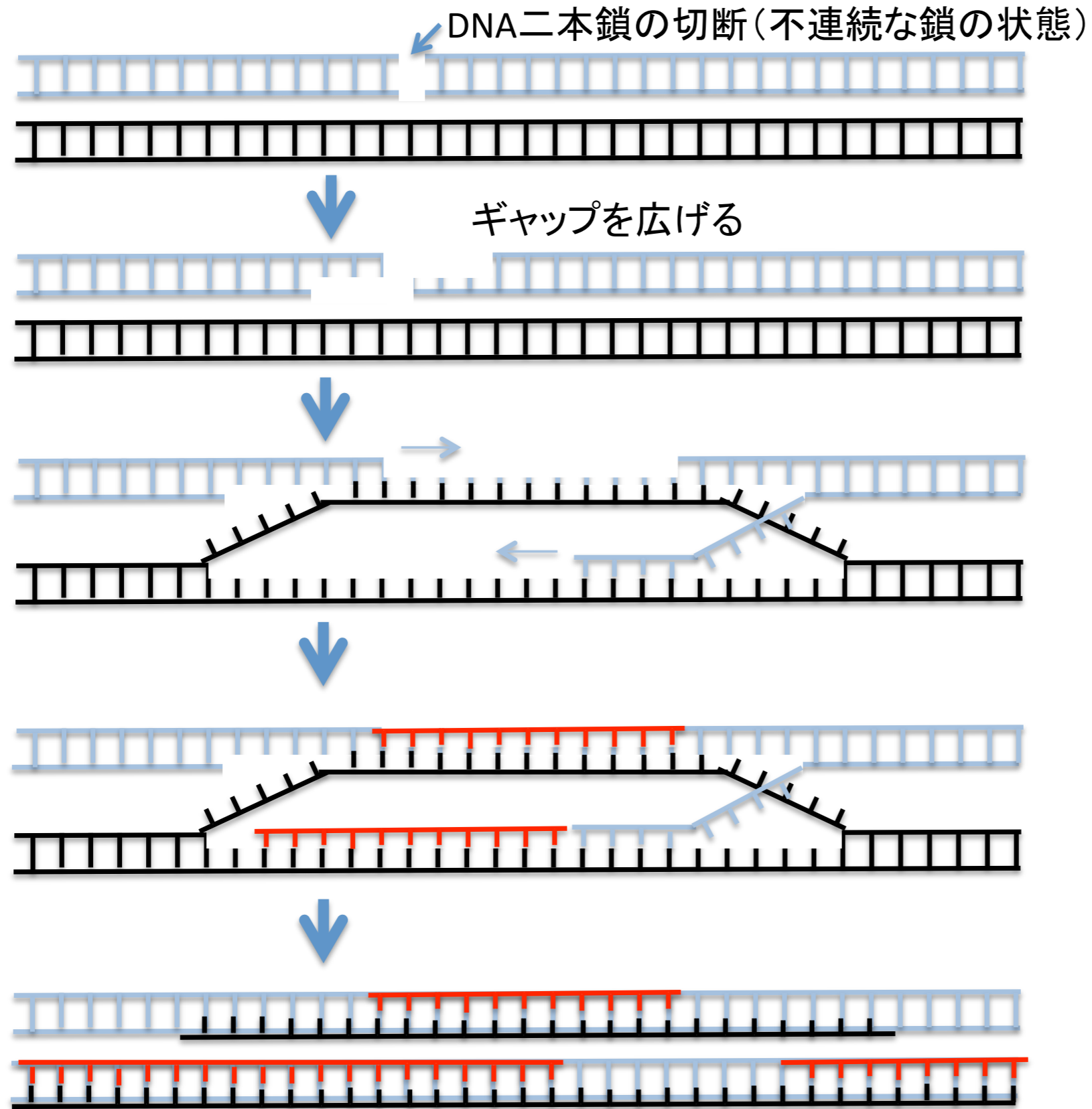
## 相同組み換え修復



分裂細胞の場合



# 相同組み換え修復



分裂細胞の場合

# The Nobel Prize in Chemistry 2015



Photo: Cancer Research UK

**Tomas Lindahl**

Prize share: 1/3



Photo: K. Wolf/AP Images for HHMI

**Paul Modrich**

Prize share: 1/3



Photo: M. Englund, UNC-School of Medicine

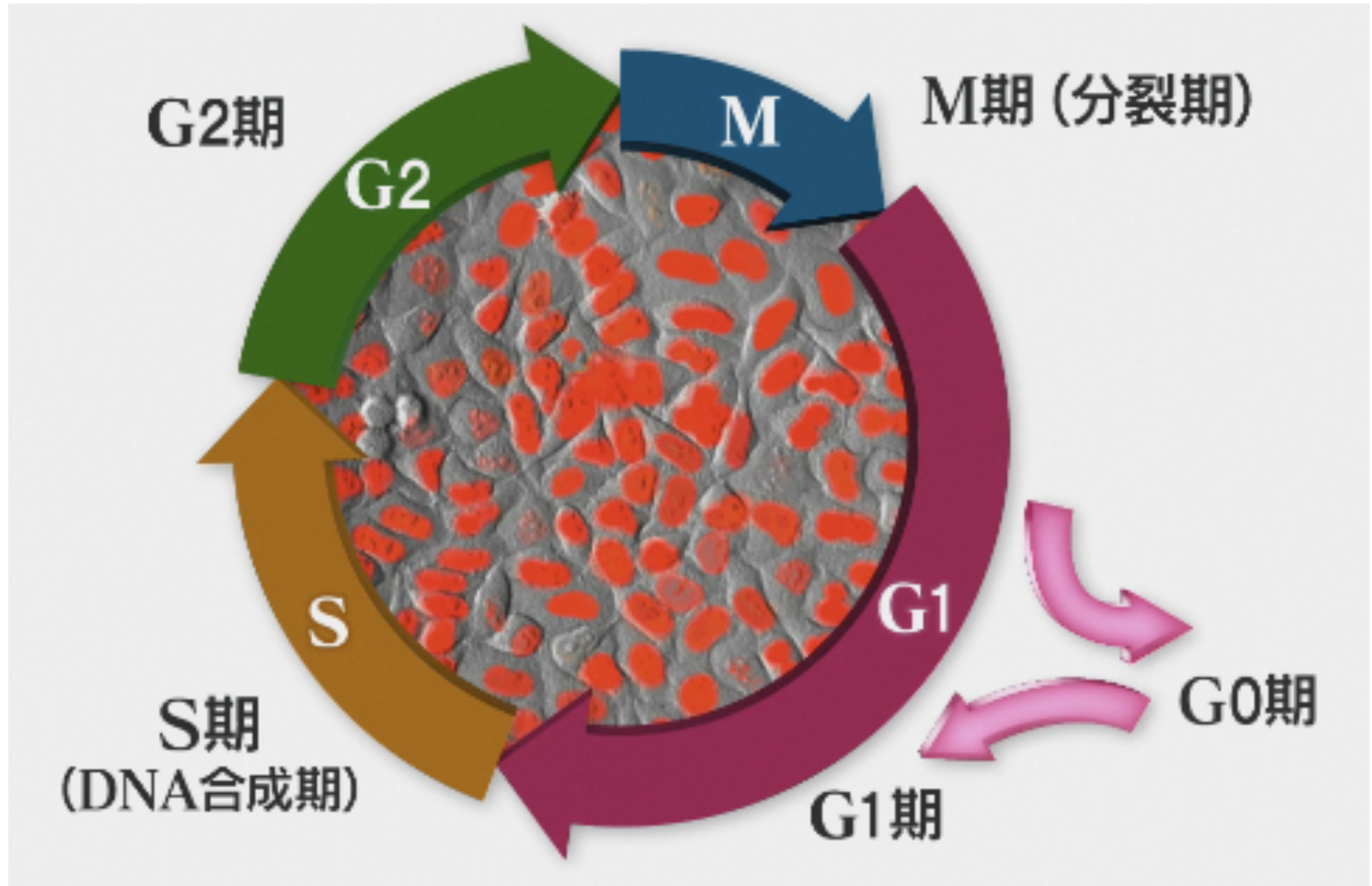
**Aziz Sancar**

Prize share: 1/3

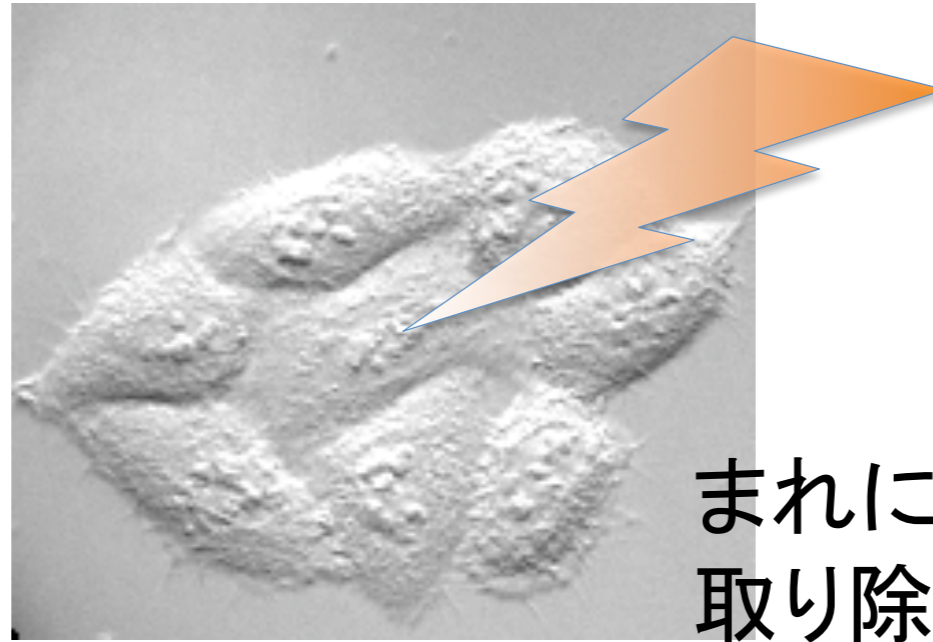
The Nobel Prize in Chemistry 2015 was awarded jointly to Tomas Lindahl, Paul Modrich and Aziz Sancar *"for mechanistic studies of DNA repair"*.



# 細胞周期と放射線感受性



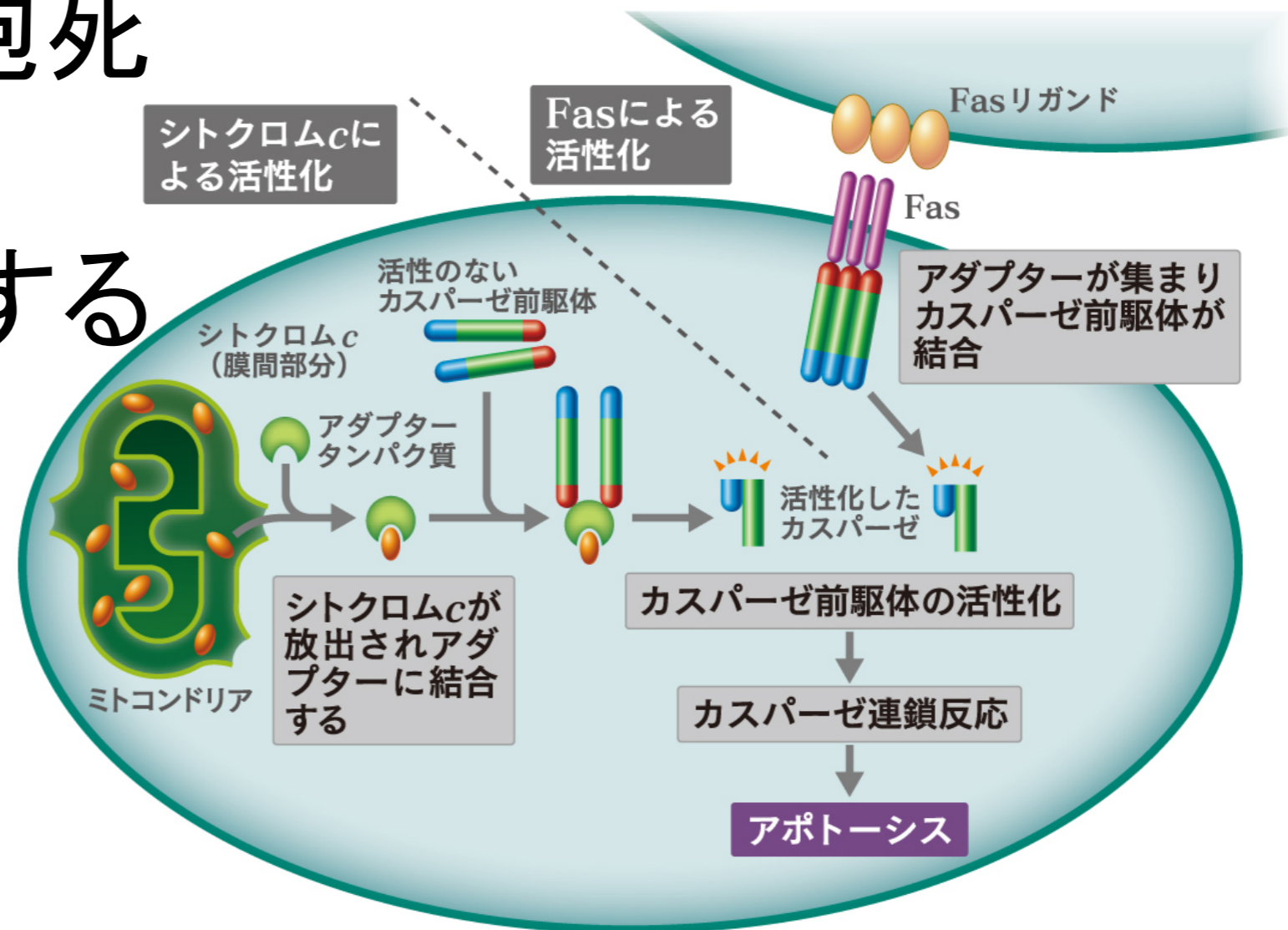
チェックポイント機構



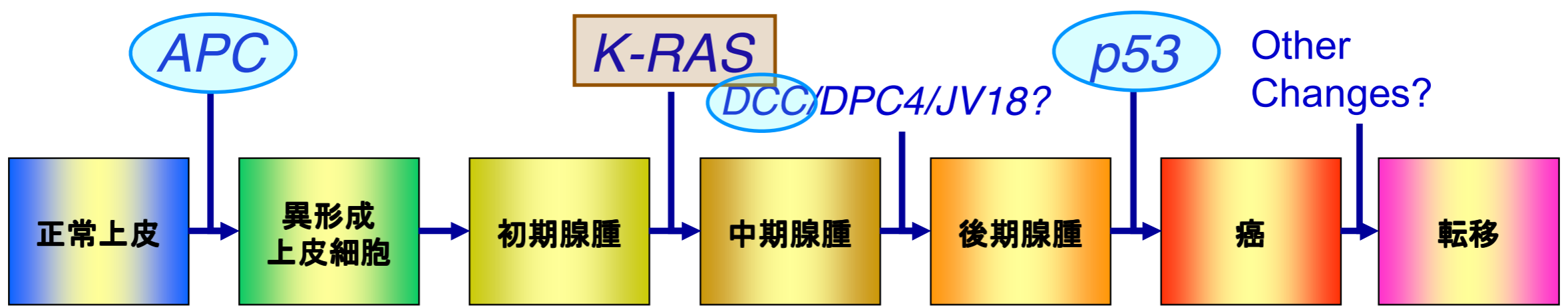
まれにDNA分子の傷が  
取り除けずに残ってしまう

# プログラム細胞死

## 細胞が自爆する







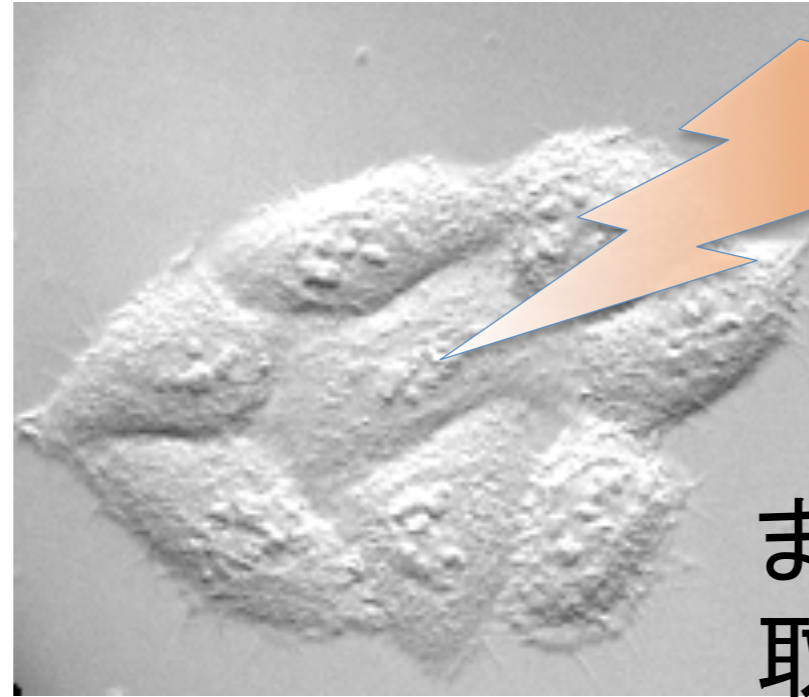
## 多段階発がん仮説

がん = 細胞の異常増加

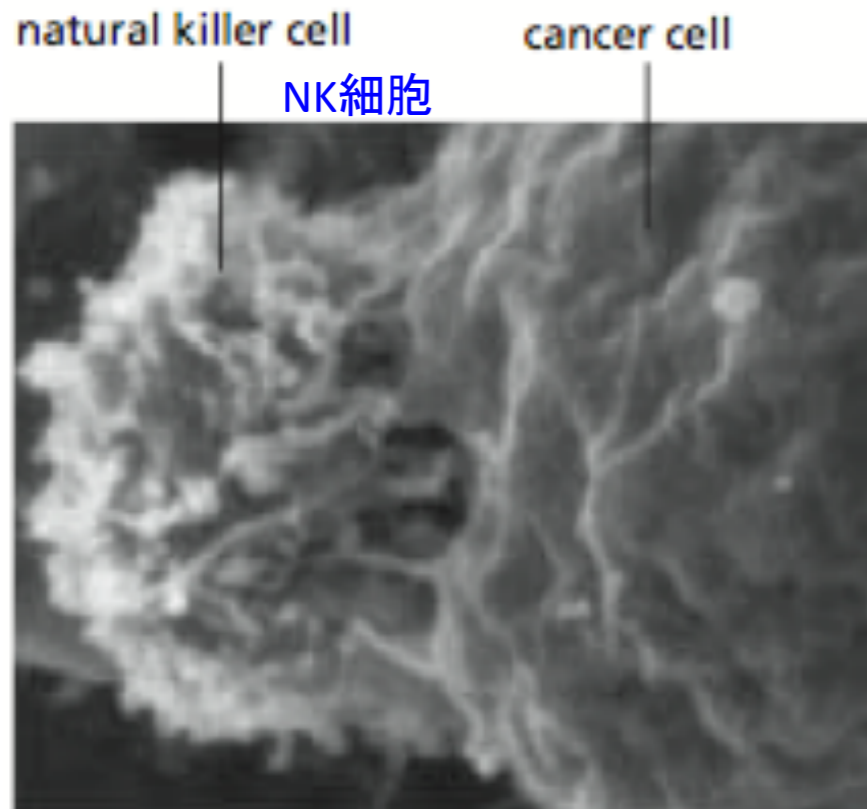
がん遺伝子      がん抑制遺伝子



- 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きい）。
- 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）



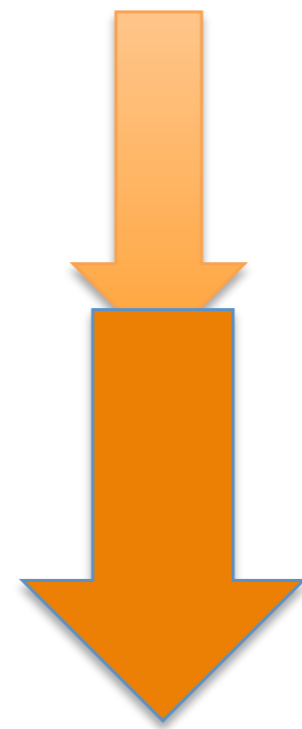
まれにDNA分子の傷が  
取り除けずに残ってしまう



natural killer cell

NK細胞

cancer cell

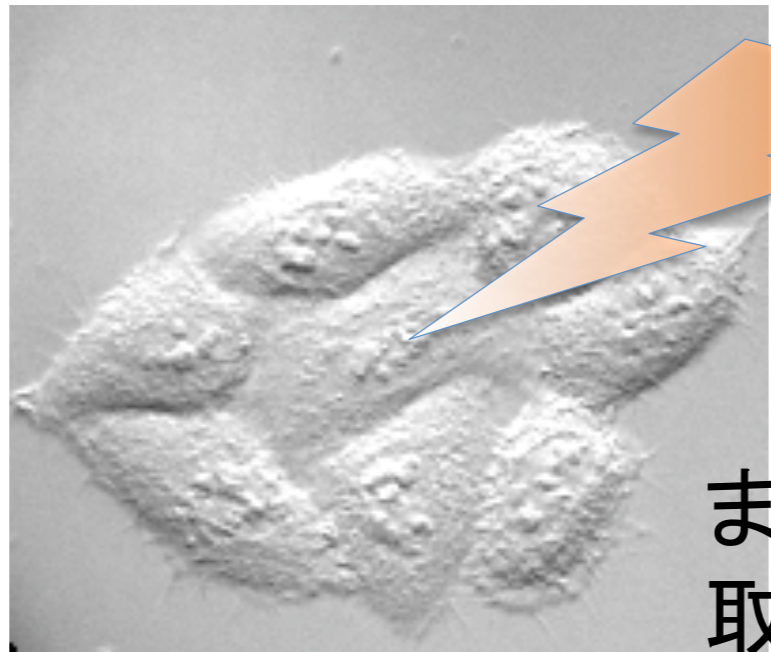


修復の失敗

細胞死も起こらない

自然免疫系にとらえられる



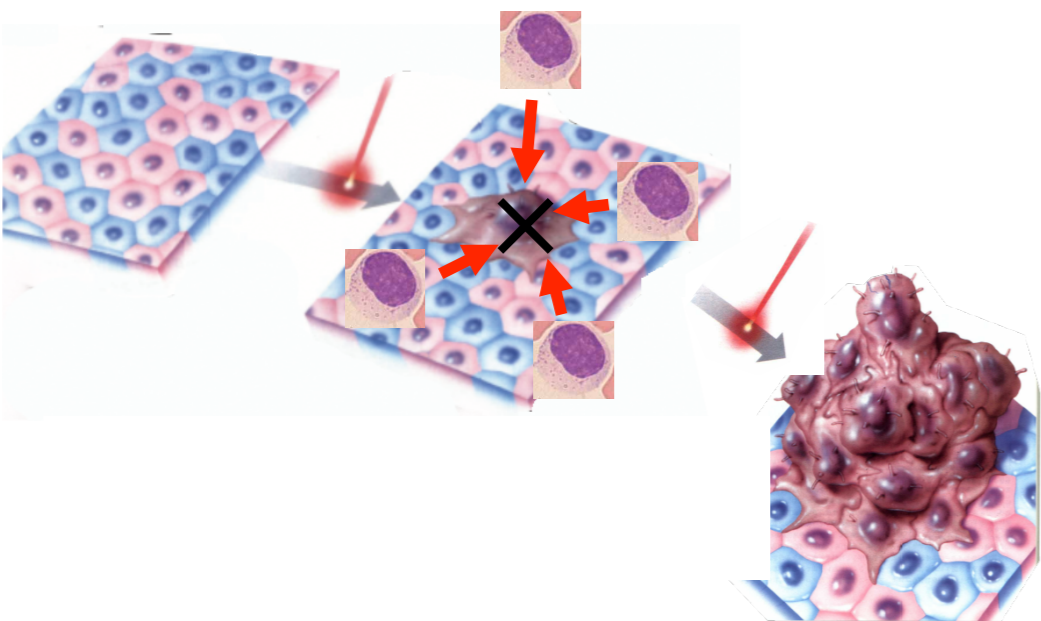


まれにDNA分子の傷が  
取り除けずに残ってしまう

修復の失敗

細胞死も起こらない

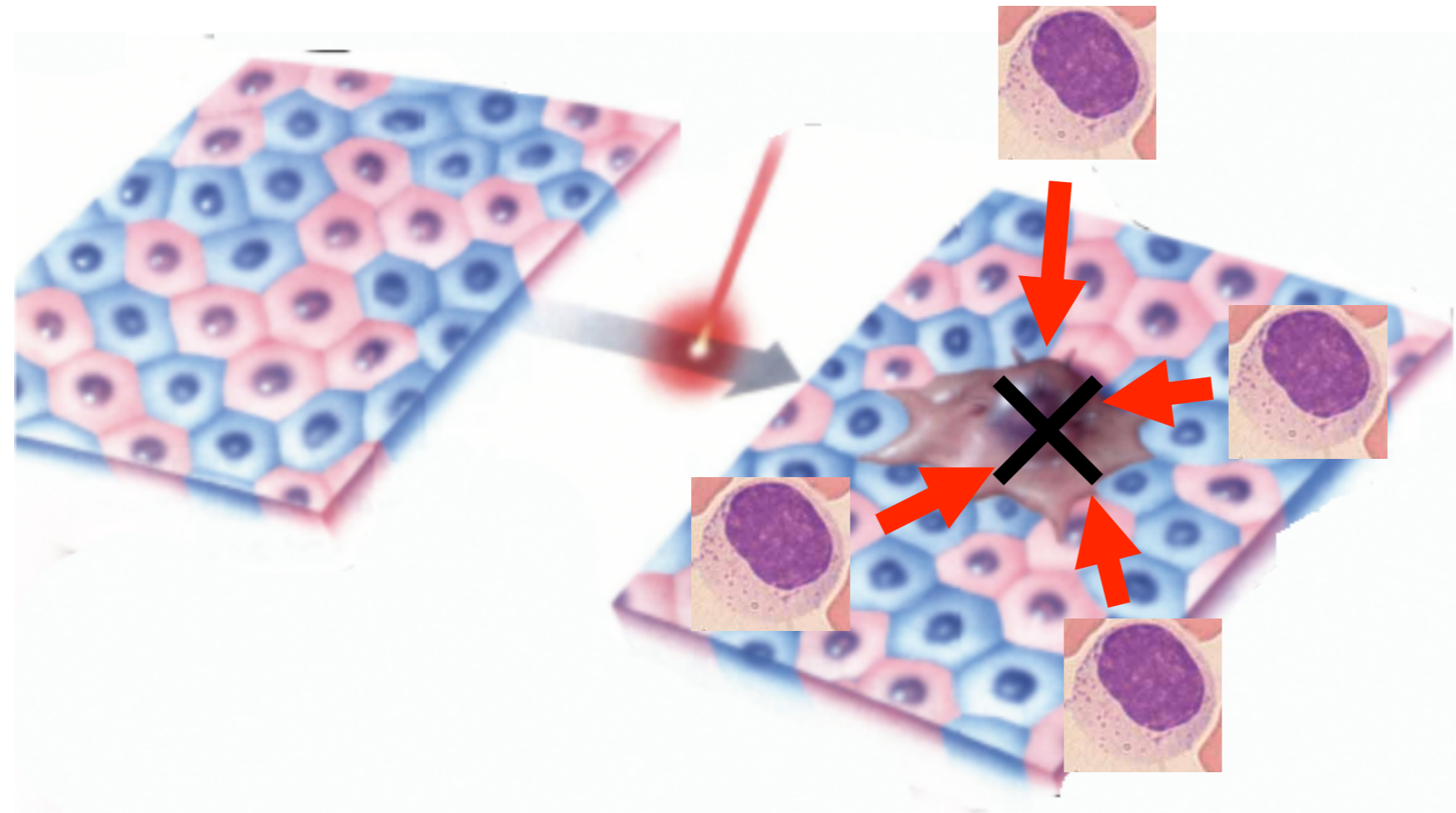
NK細胞も取り逃がした  
(自然免疫系)



がん細胞が残ってしまう 良性／悪性  
浸潤性

# がん、とは？

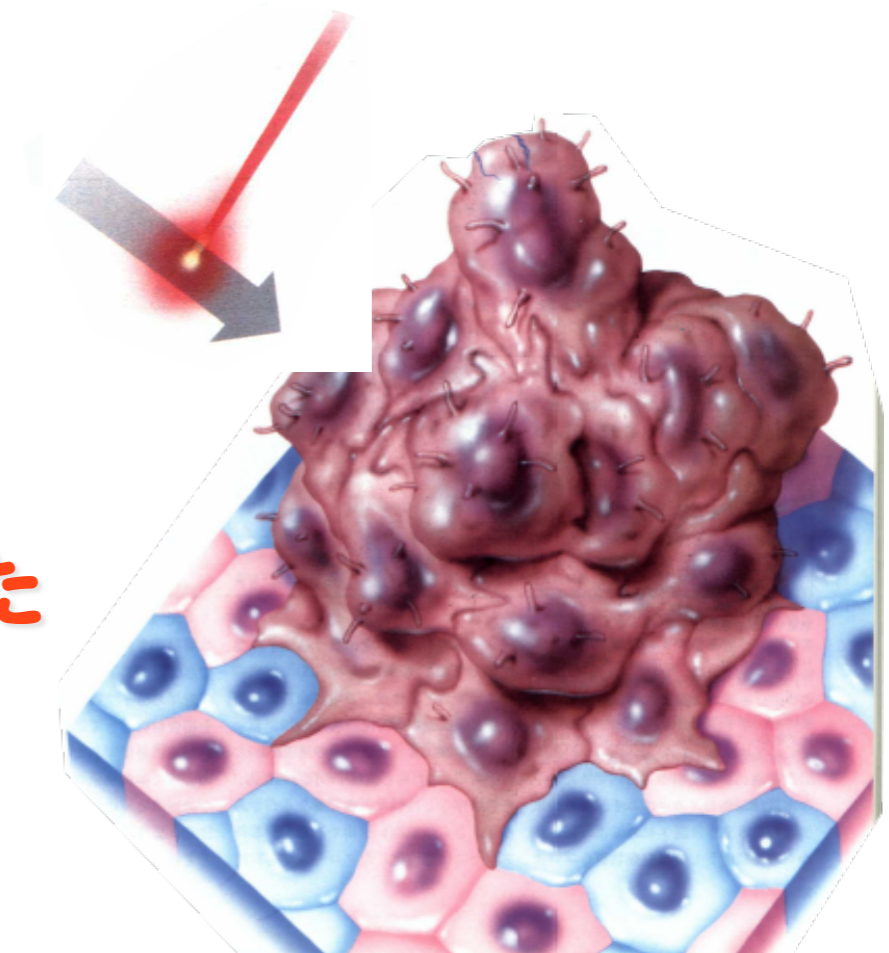
がん細胞は毎日5000個もできている！！



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」





# 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



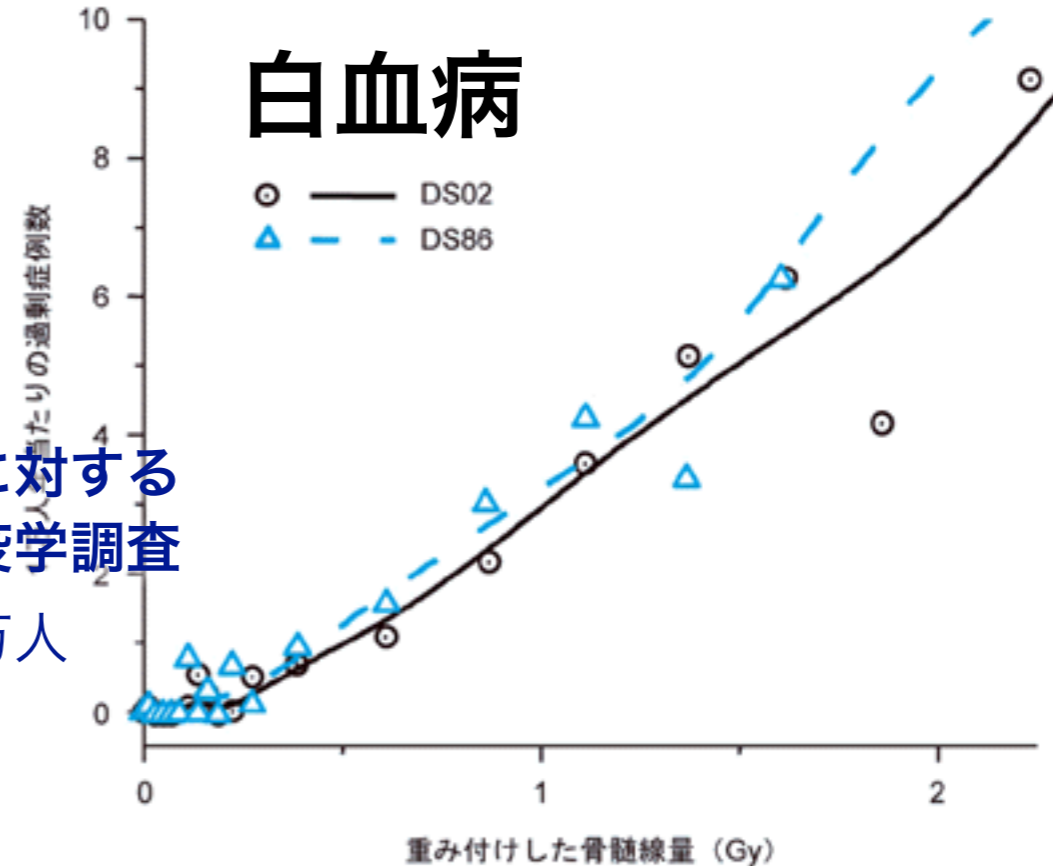
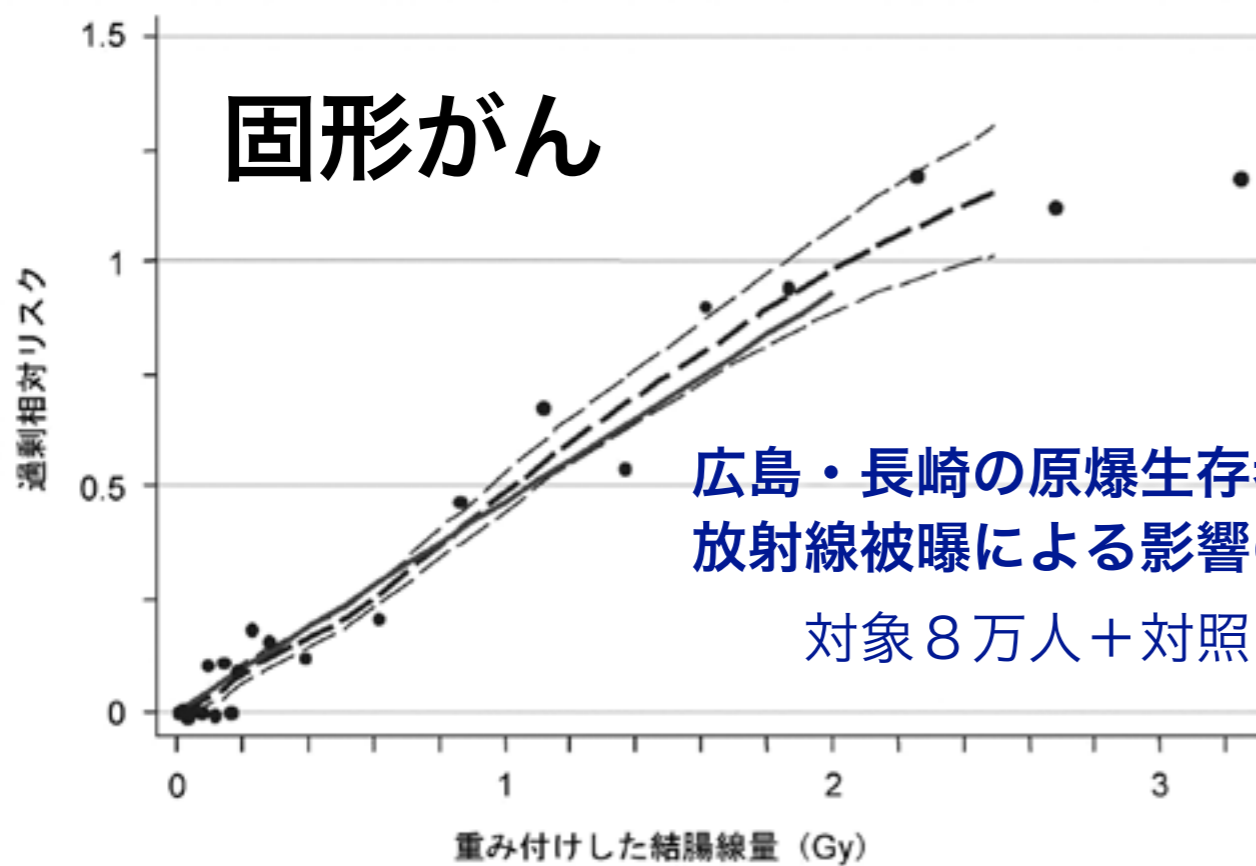


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

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

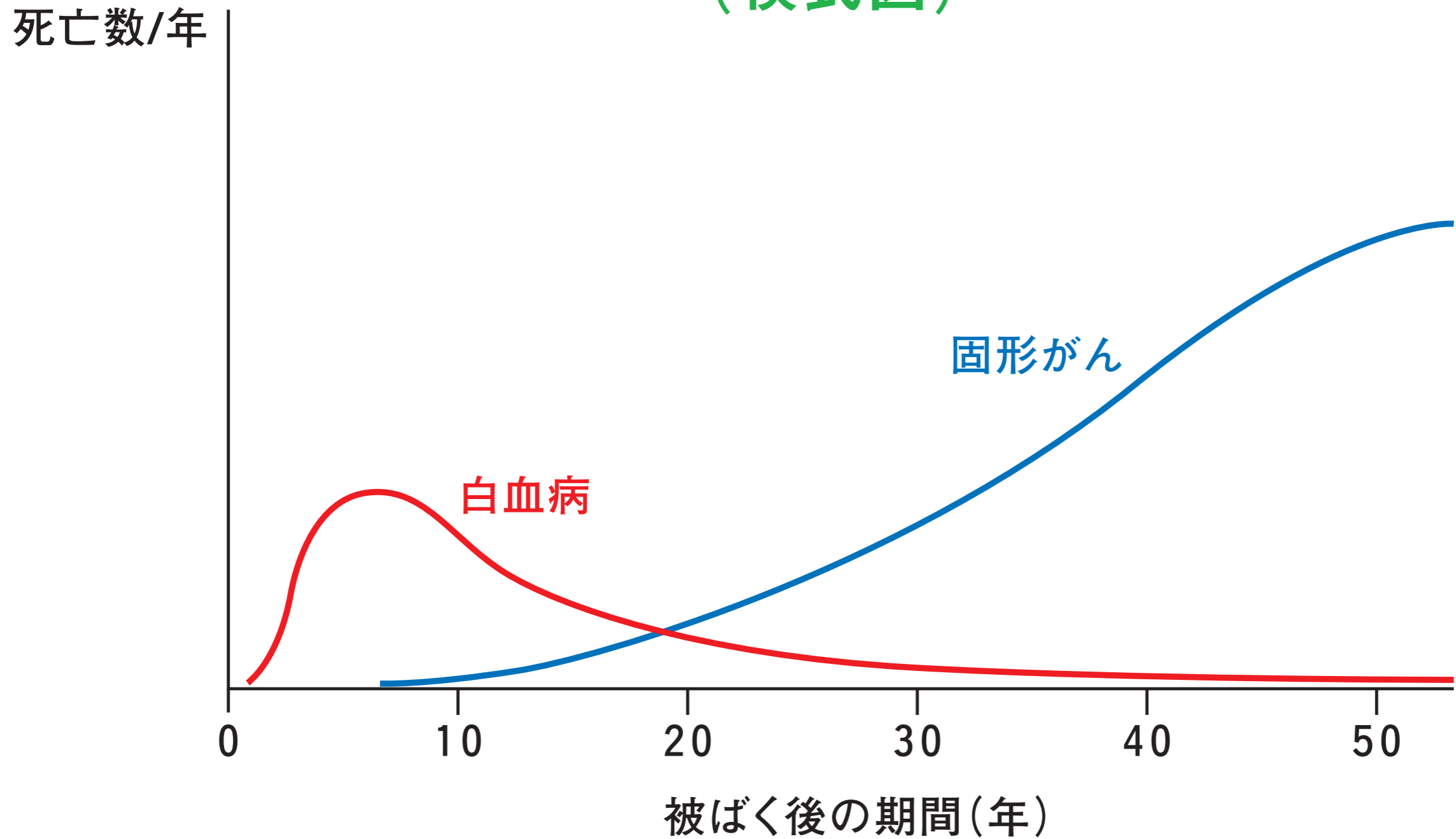
重み付けした骨髄線量 (Gy)	対象者数	死亡		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	30,387	69	4	6%
0.1 - 0.2	5,841	14	5	36%
0.2 - 0.5	6,304	27	10	37%
0.5 - 1.0	3,963	30	19	63%
1.0 - 2.0	1,972	39	28	72%
>2.0	737	25	28	100%
合計	49,204	204	94	46%

(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。**

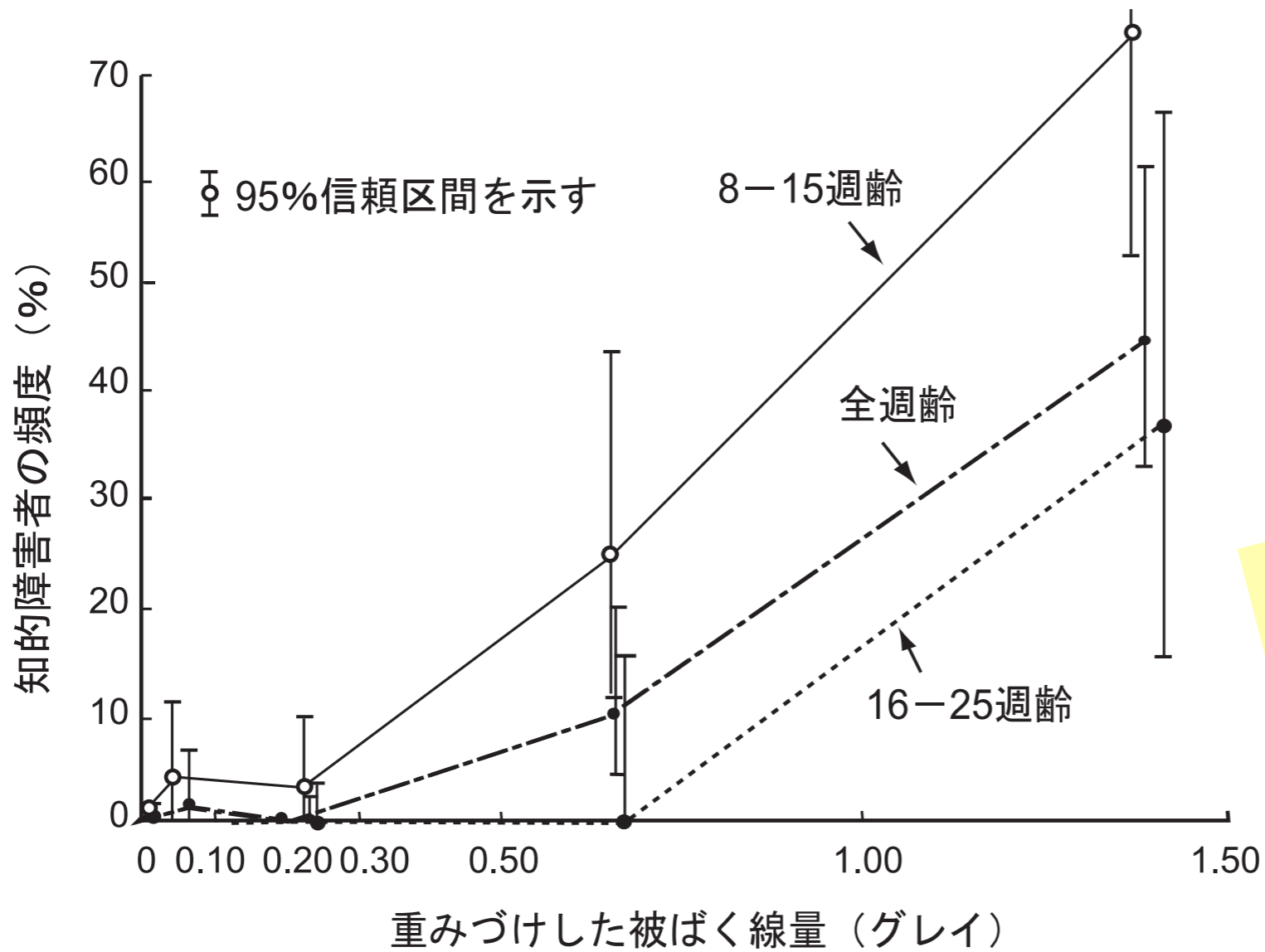


# 原爆放射線に関連する死亡数の時間的経過 (模式図)



# 胎内被爆者における放射線の影響

本人が胎内で被曝



チェルノブイリ事故の後、ヨーロッパ全土で不必要な墮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)

(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」

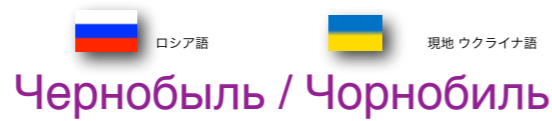
## 放射線による**遺伝的影響**は認められず

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。

親の精子／卵子が被曝



# 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)

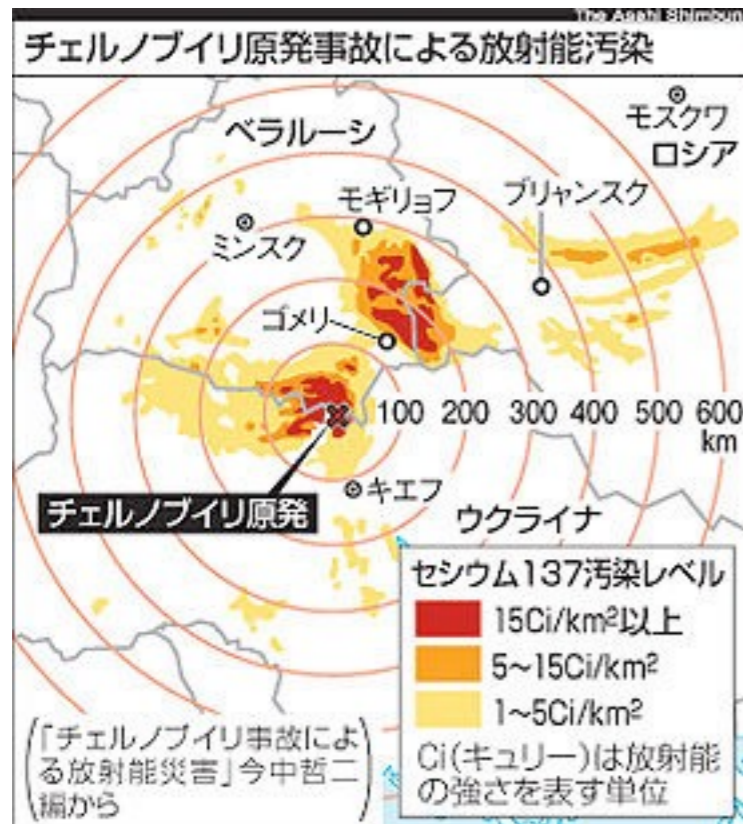
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

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

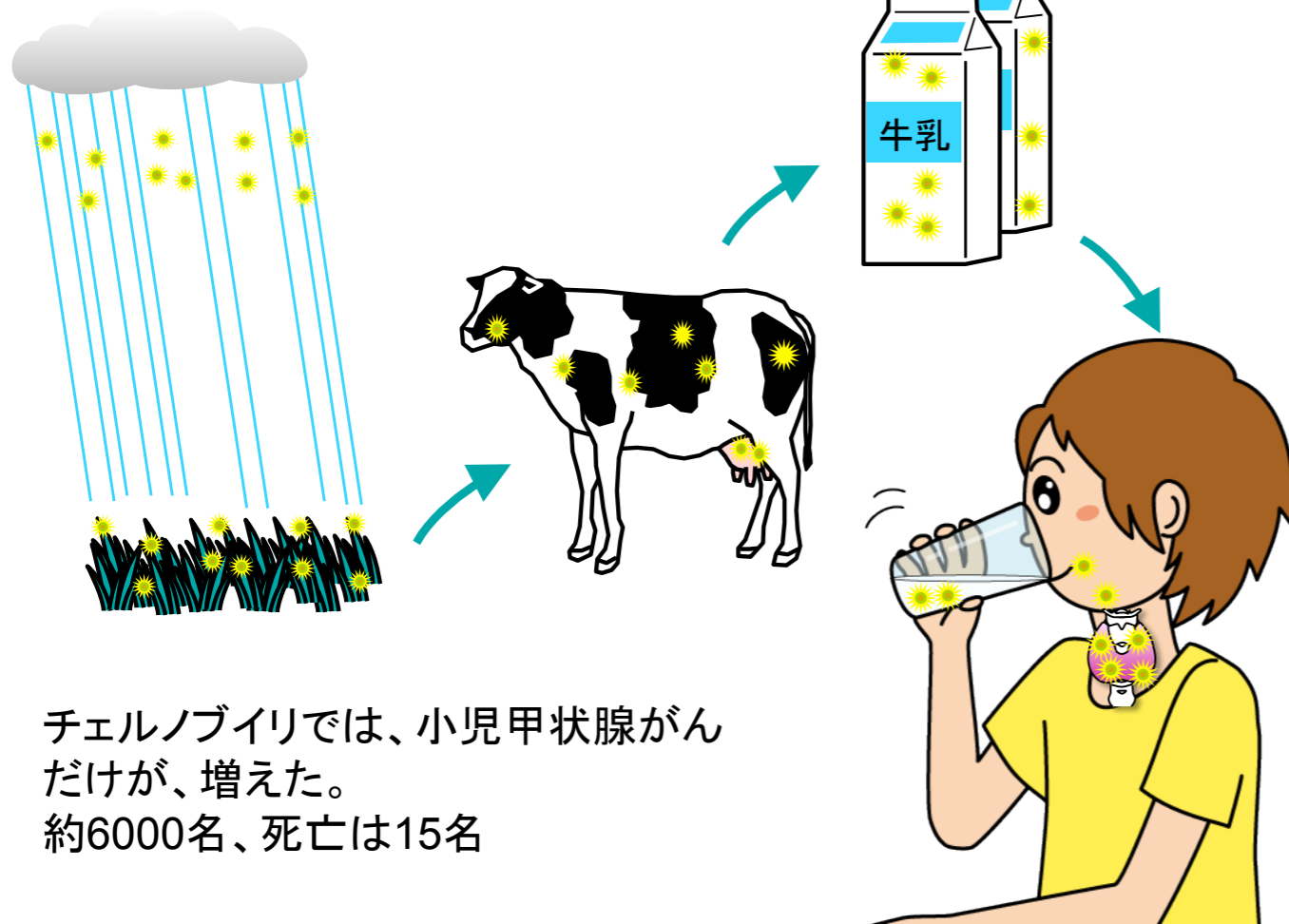


ロシア語  
Чернобыль / Чорнобиль



## 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)

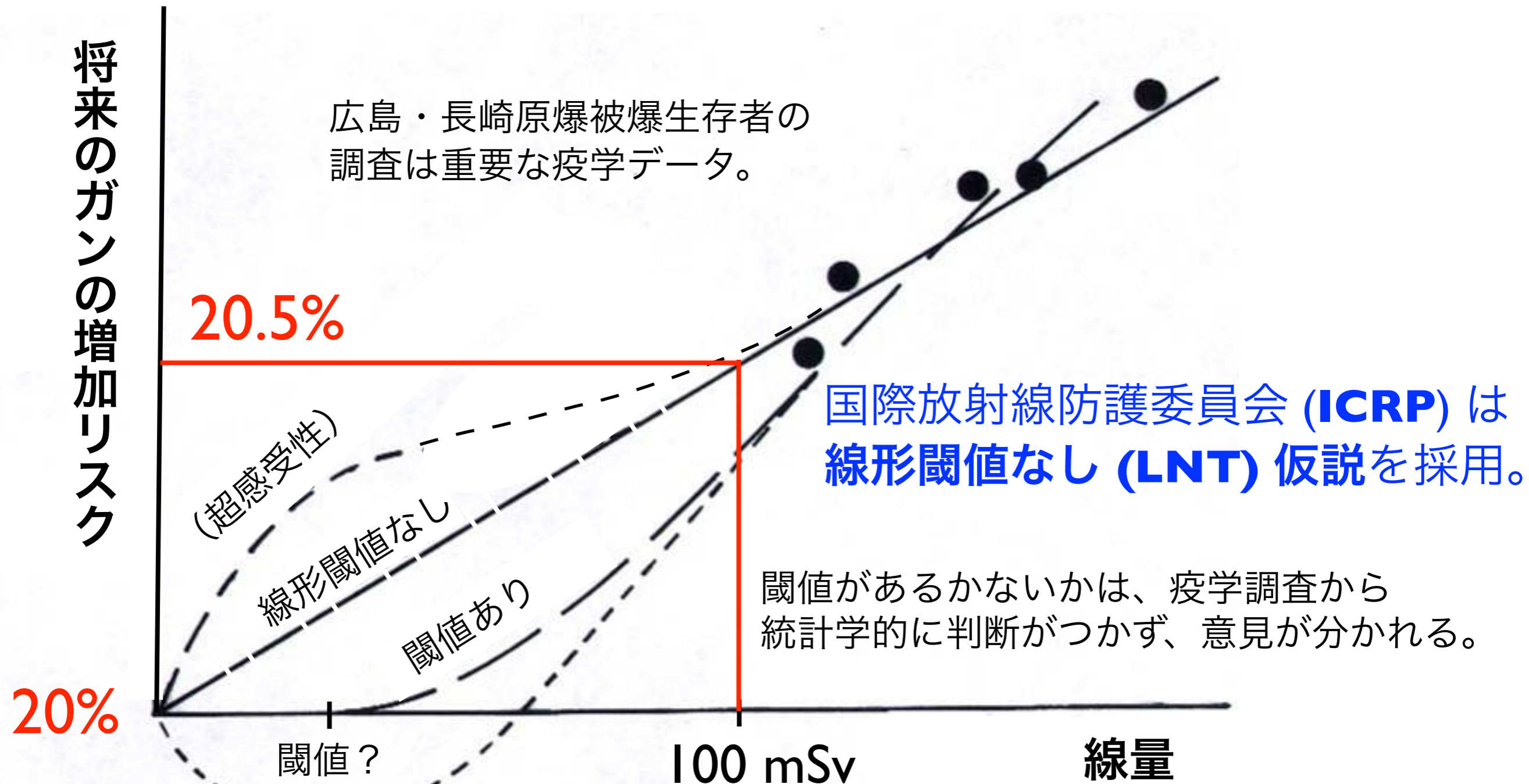
震災・事故による喪失感は共通



# 放射線のリスク評価と防護



# 低線量におけるリスク評価



日本人の将来のガン死亡リスクは男性が 26%、女性が 16%

(ホルミシス)

慢性被曝が急性被曝に比べて効果が何分の1になるかの係数

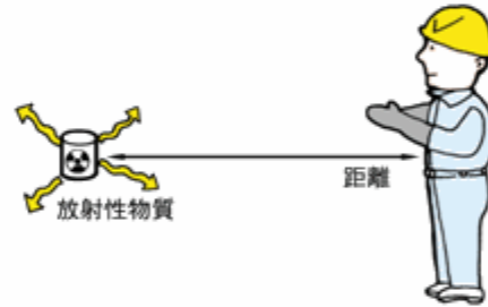
線量・線量率効果係数 **DDREF = 2**



# 放射線防護

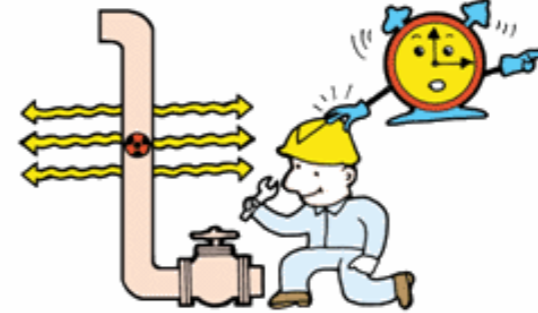
## ● 距離による防護

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

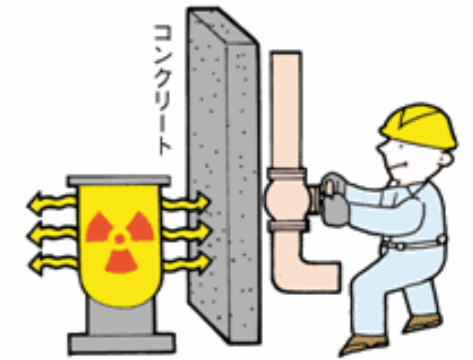


## ● 時間による防護

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



## ● 遮蔽による防護



確定的影響は  
発症させない。  
確率的影響を  
できるだけ減らす。

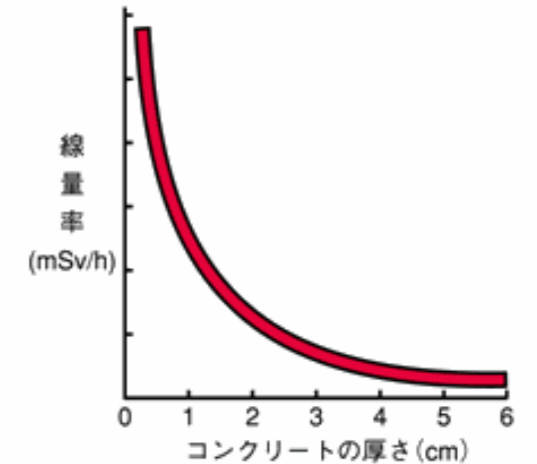
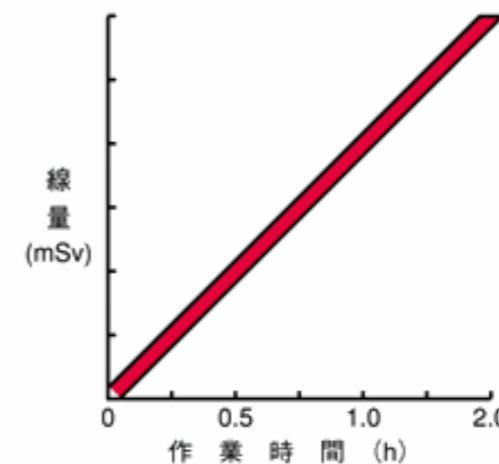
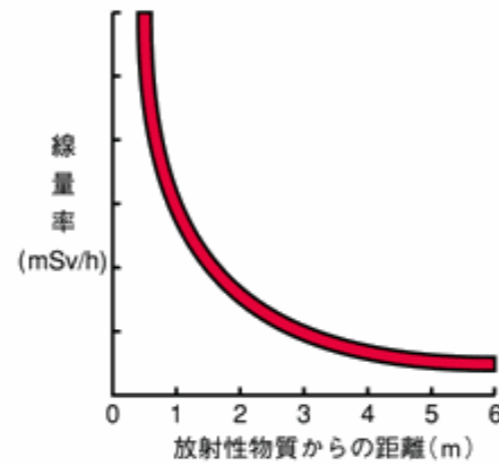


図1 遮へい3原則の図

[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 / 期間中
等価線量	150 mSv / 年
水晶体	500 mSv / 年
皮膚	2 mSv / 期間中
妊娠中の女子の 腹部表面	

	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5mSv/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**

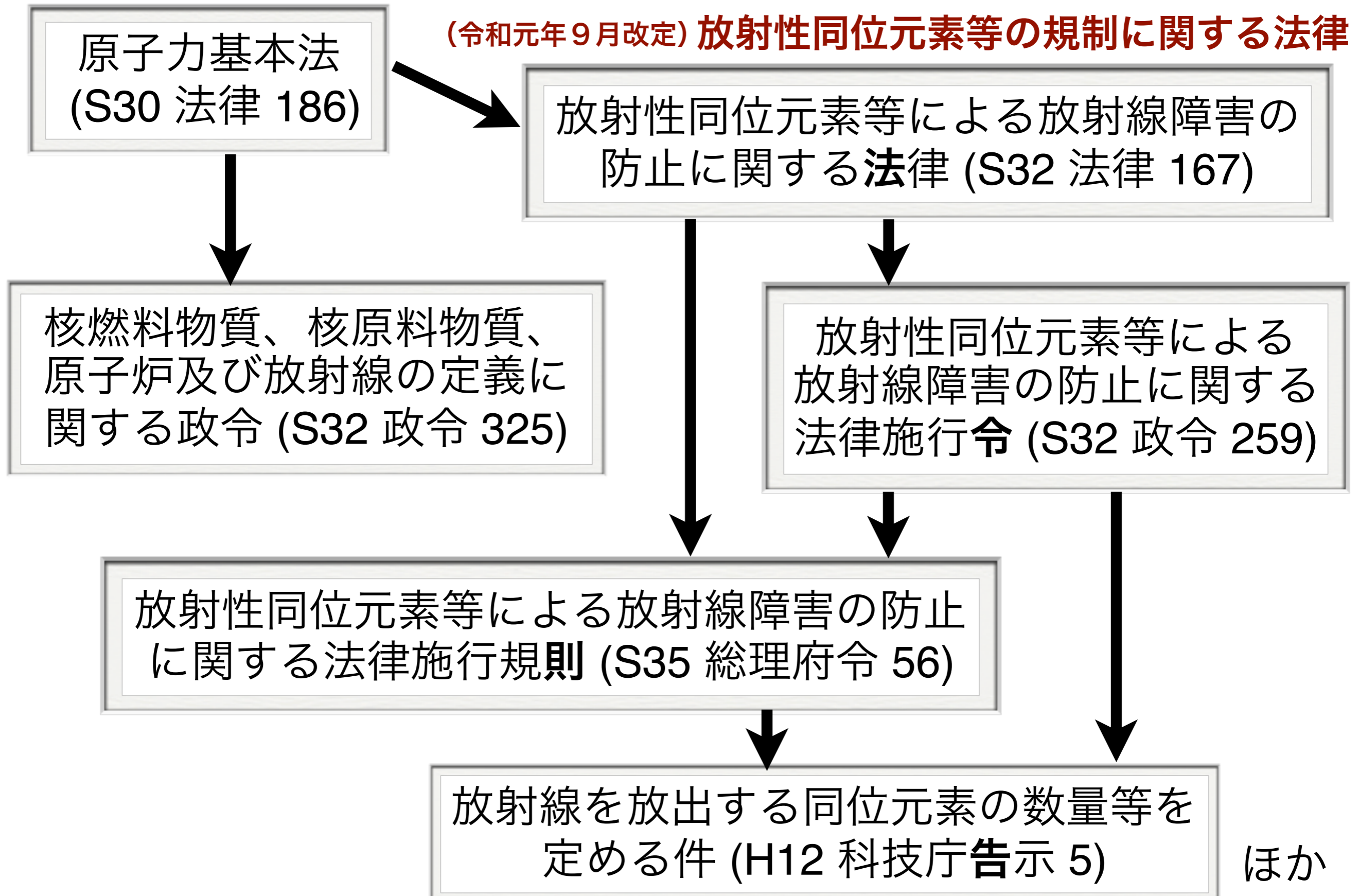
〔出典〕（1990年ICRP新勧告と1977年ICRP勧告における線量限度値対照表）

〔「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〕

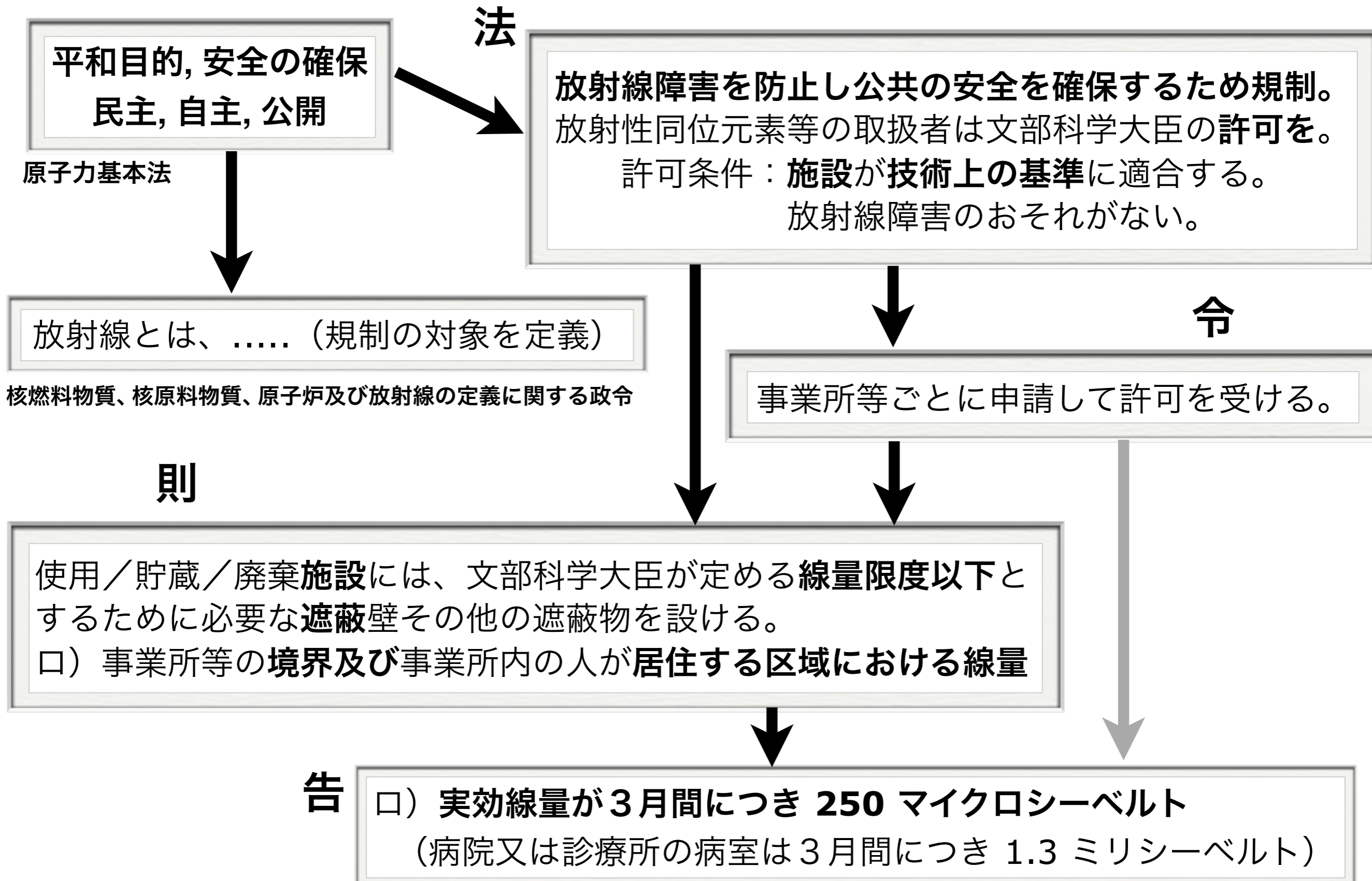
国内法令による防護基準



# 放射性同位元素等による放射線障害防止の法体系

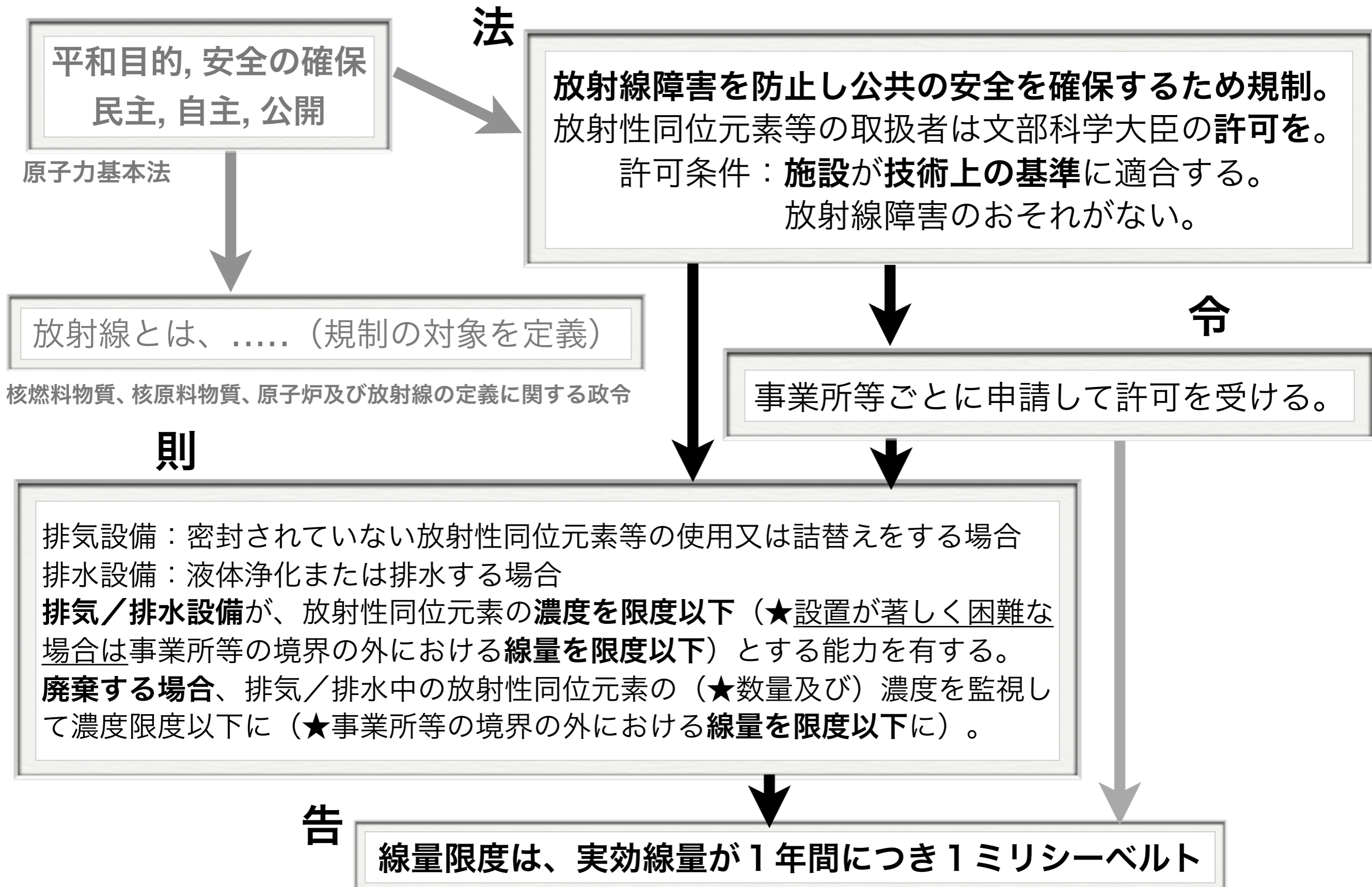


# 公衆の追加線量限度が 1 mSv である法的根拠 (1)





# 公衆の追加線量限度が 1 mSv である法的根拠 (2)



# 放射線規制に関するそのほかの法令・規則

## 電離放射線障害防止規則 労働安全衛生法・同施行令

事業者は、労働者が電離放射線を受けることをできるだけ少なくするように努めなければならない。

- ◆ 障害防止法に含まれないX線装置およびX線作業が主な対象。
- ◆ 障害防止法同様、管理区域の明示、放射線業務従事者の被曝限度などを定めているが、一般公衆に関わる規定はなさそうである。

## 医療法施行規則 医療法・同施行令

- ◆ 医療および医薬品は、放射線障害防止法施行規則の適用外

病院又は診療所の管理者は、放射線取扱施設又はその周辺に適当なしゃへい物を設ける等により、人が**居住する区域及び敷地の境界**における線量を限度以下としなければならない。

-  **実効線量が3月間につき 250 マイクロシーベルト**を超えない

## 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律・同施行令

-  **周辺監視区域外の線量限度は、実効線量について1年間につき1ミリシーベルト**



国際放射線防護委員会 (ICRP) や国の法令による放射線**線量限度**は、**自然放射線を除いた追加被曝線量**についてのもので、検診や治療などの**医療被曝も対象外**。

**年間1ミリシーベルト**は、国が**事業所に求める基準値**  
(施設の遮蔽、排気や排水に関して敷地境界で守るべき値)

自然放射線との比較：放射線ゼロの場所は地球上に存在しない  
**ゼロリスクは存在しない**

リスクが十分に小さくなるように**基準値**を決めてある  
(**社会的合意**)

**安全と危険の境界ではない**

**Q. 政府が計画的避難地域を指定しましたが、基準になっている20ミリシーベルトの意味について教えてください。**

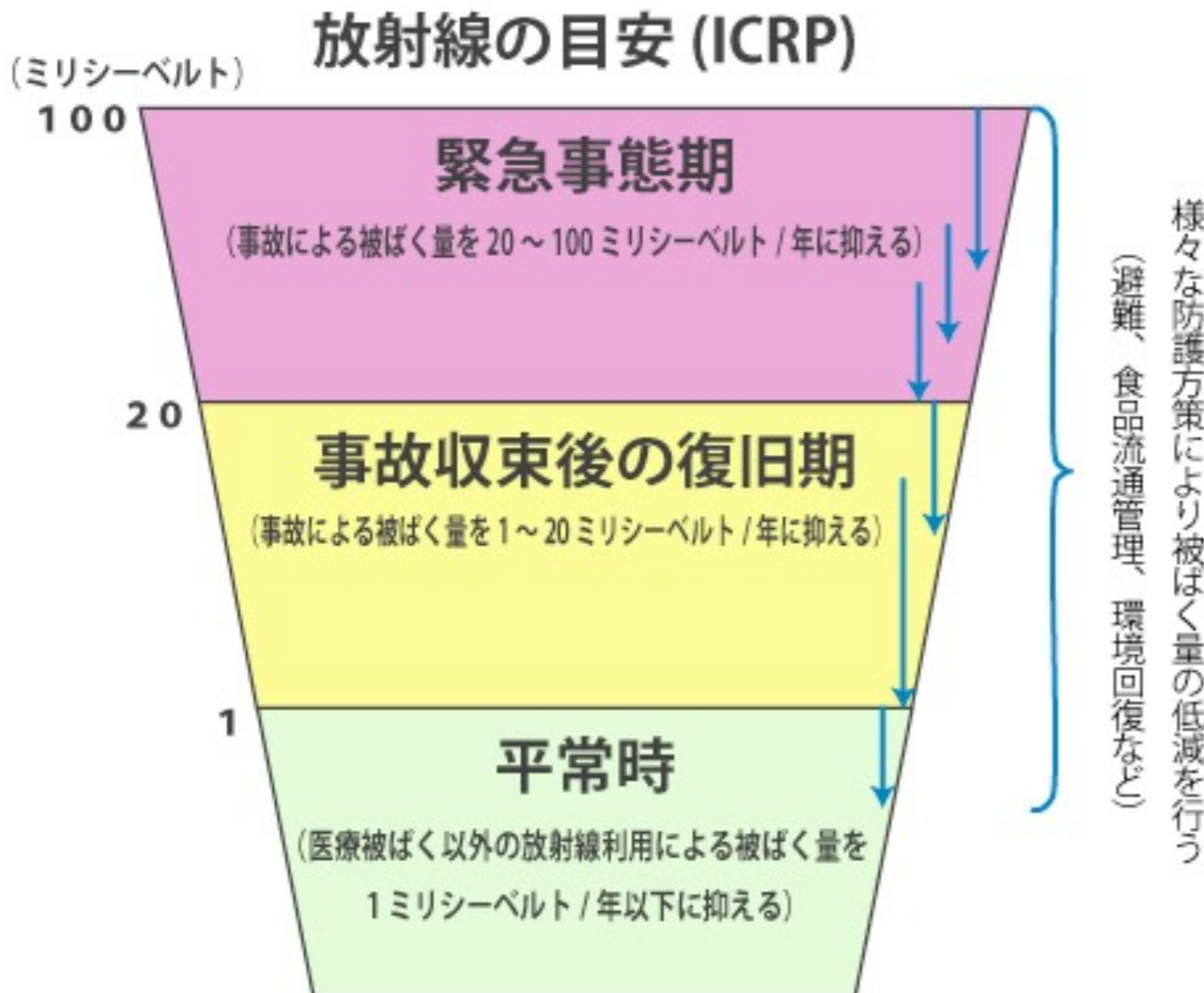
**国内法未整備**

A. 国際放射線防護委員会(ICRP)は専門家の立場から放射線防護に関する勧告を行う国際学術組織ですが、今回の基準は、このICRPの勧告を基に原子力安全委員会の助言を得て定められたと報道されています。

**ICRPの2007年勧告では、非常時の放射線の管理基準は、平常時とは異なる基準を用いることとしています。**

また非常時も、緊急事態期と事故収束後の復旧期を分けて、以下のような目安で防護対策を取ることとしています。現在の福島第一原子力発電所の状況は、緊急事態期に当たります。

今回の国の方針は、緊急事態期の被ばくとして定められている20~100ミリシーベルトの下限値にあたるもので、福島原発周辺の方々の被ばくが、事故による被ばくの総量が100ミリシーベルトを超えることがないような対応をしつつ、将来的には年間1ミリシーベルト以下まで戻すための防護策を講ずることを意味していると思われます。





# リスクコミュニケーション



# 放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

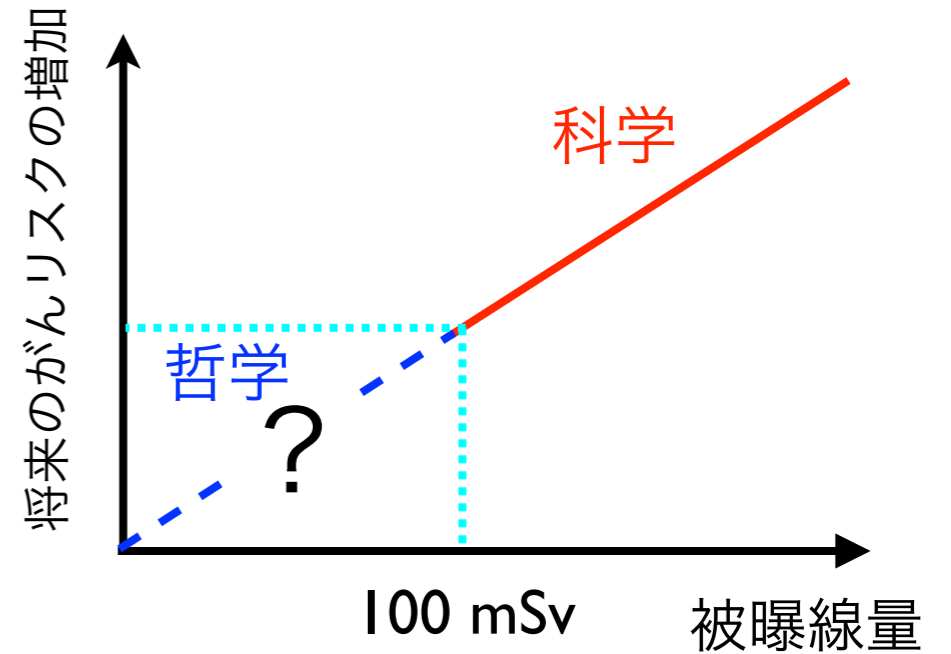
がんの原因が医学的に分かっていない

疫学調査の問題点

統計学的有意性

影響の因果関係

線形のリスク  
は判断し難い



科学的知見と防護学の哲学の混同

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 (トレードオフ)

福島住民のリスクは？

住み続けるリスク

原発作業員のリスクは？

放射線の影響？、日常サービスの低下/欠如

避難生活でのリスク

慣れない土地での生活ストレス、生業・収入の損失 (社会が決める)

基準値

放射線のリスク

根拠のない過信・安心は問題だが、

☞ 東海村 JCO 臨界事故

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。

**風評** 風評被害は落ち着きつつあるが、依然として福島土地や産物を避けようとする人も一定数存在。

**風化** 放射線の科学的知識を身につけないまま関心が風化しつつある。



# 科学的「確率」をどう理解するか。

がんの影響は「確率的」に現れる

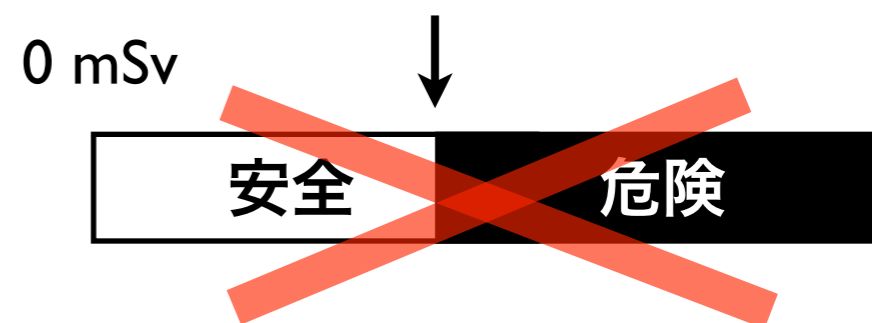
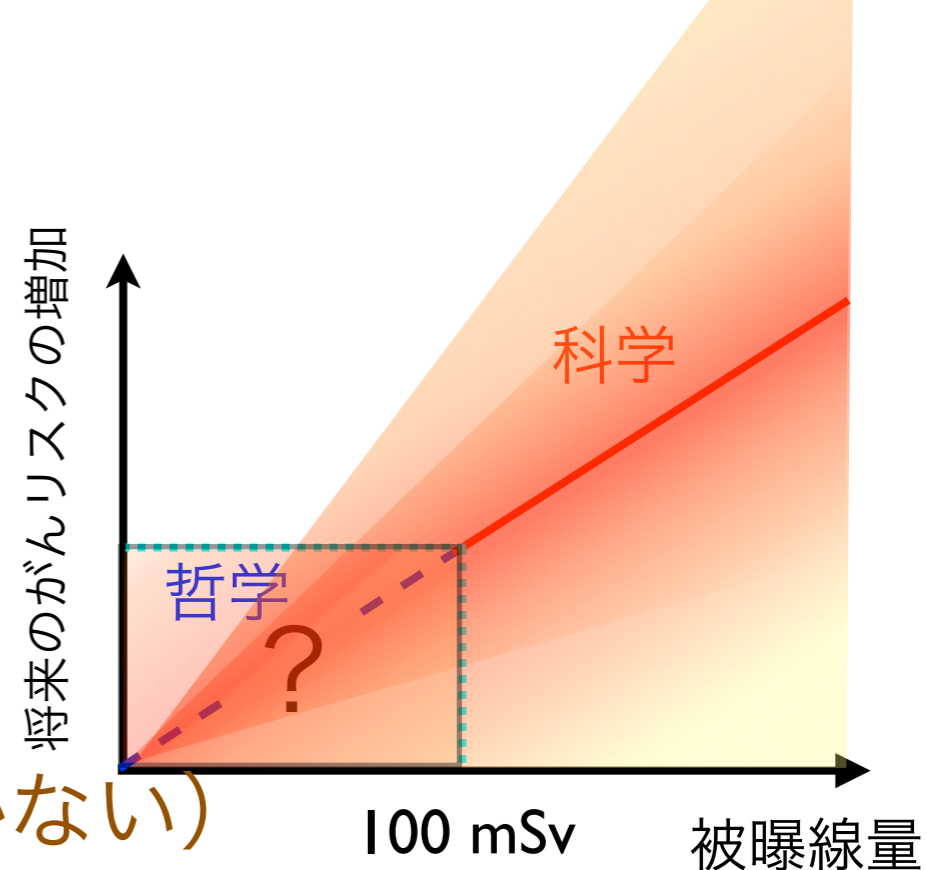
個別の事象との因果関係は分からない

放射線によるがんは特徴がないのが特徴  
(ほかの要因によるがんと全く区別がつかない)

その確率さえ不確かさを伴う

トランスサイエンス

科学に問うことはできるが、科学(だけ)  
では答えることのできない問題群の領域



リスクは相対的

基準値  
(社会が決める)

放射線のリスク



# 原発と共存が現実 自ら置かれた環境 どう見極めるか

原発事故における避難などの根拠となったのが国際放射線防護委員会（ICRP）が示す数値だ。副委員長のジャック・ロシャルールさんは3・11後、福島で被災者との対話を続けてきた。チェルノブイリ原発事故後の歩みもよく知るフランス人の目に、福島や日本はどう映ったのか。専門家が語るべきことは。来日した際に東京で聞いた。

「2年半前の初来日から、福島での対話集会は少人数の車座のものも含めると10回以上になります。そうした集いを重ね続けているのですか。」  
「国際会議で来日した際にNPOの人たちと出会い、復興にかかわる様々な関係者が協力する必要があると感じ、福島市や伊達市、いわき市で開いてきました。最初、被災者は政府や東京電力に懐疑的で、不信感も渦巻き、日本人以外の専門家に話を聞きたいという感じでした。『このまま住み続けても大丈夫か』という質問が大半でした」

## 国際放射線防護委員会（ICRP）

1928年に前身の組織が生まれた。医療現場でエックス線の利用が広まり始めたころだった。50年にいまの組織に。主委員会と五つの専門委員会構成で、世界約30カ国の専門家が無報酬で参加。運営費は各国にある約20の原子力の研究組織による資金援助が8割、残りは刊行物の収入。日本からは、主委員会のメンバーで震災後に福島に移住した丹羽太貴・京都大学名誉教授ら7人がいる。

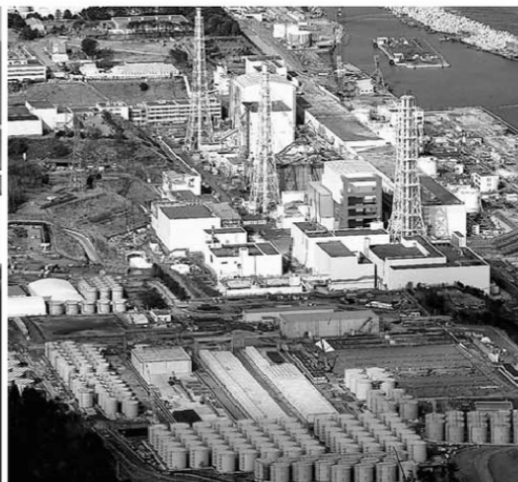
「**で開いてきました。最初、被災者は政府や東京電力に懐疑的で、不信感も渦巻き、日本人以外の専門家に話を聞きたいという感じでした。『このまま住み続けても大丈夫か』という質問が大半でした』**」

「**しかし、その答えは人生で何を重視するかという個々の価値観によります。冷たく聞こえたと思います。が、人生相談には乗れませんと断ったうえで、どのように自らを取り巻く環境を見極めるか、ということを放射線防護の経験から伝えました」**」

「**選択をした人たちに、影響を最小限に抑え、生活の質を高めるアドバイスをするのが目的で、そこにどこまでもいいとは言っていない」**」  
「**個人的に福島への思い入れも強いようですね。**」

国際放射線防護委員会（ICRP）副委員長 ジャック・ロシャルール さん

Jacques Lochard 50年生まれ。放射線防護の専門家、経済学者。フランスのNPO、原子力防護評価研究所（CEPN）所長も務める。パリ在住。



東京電力福島第一原発＝本社機から



「5月中旬に南相馬市の対話集会に出て福島県立医科大学を訪ねます。ムネオさんにも会いたい」  
＝麻生健撮影

「**た。残念ながら私のコートではなかったのですが、感動で胸がいっぱいになりました。福島市のレストランに財布を忘れたときも、必死の形相で従業員が追いかけてきました。丁寧で物事がスムーズに進み、清潔で居心地がよく安心感がある。1ミルシーベルト以下にこだわるのは、日本人のそういう気質や日本の文化が根底にあると思えました」**」

# 無力感漂う人々に 専門家が持つ情報 沈黙せず伝える

「**だとなれば、そうした意識はなかなか変わりません。**」

「**昨年11月のいわき市の集会はそのままで違った雰囲気でした。以前は立場の違う人に向けた言葉が飛び交っている感じだったのが、『私は』という主語が増え、自身について語る人が多かったのです。『事故直後はマラソンを走っているように感じたけれど、私はもう一度歩けるようになった』、『どこまで放射線防護が必要なのかと考え続け、私がたどりついた答えはどこまで私がそれを求めているかということだった』など、希望や慈愛、ときにユーモアも感じました」**」

「**もちろん、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミルシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます」**」

「**『もちろん、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミルシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます』**」

「**『もちろん、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミルシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます』**」

「**ロシャルールさん自身もチェルノブイリ事故の調査や支援に長く関わっていました。**」  
「**『事故から4年後に汚染地域を訪ねると、住民は無力で事態をコントロールできていない状態でした。私**」

（聞き手・梶原みずほ）



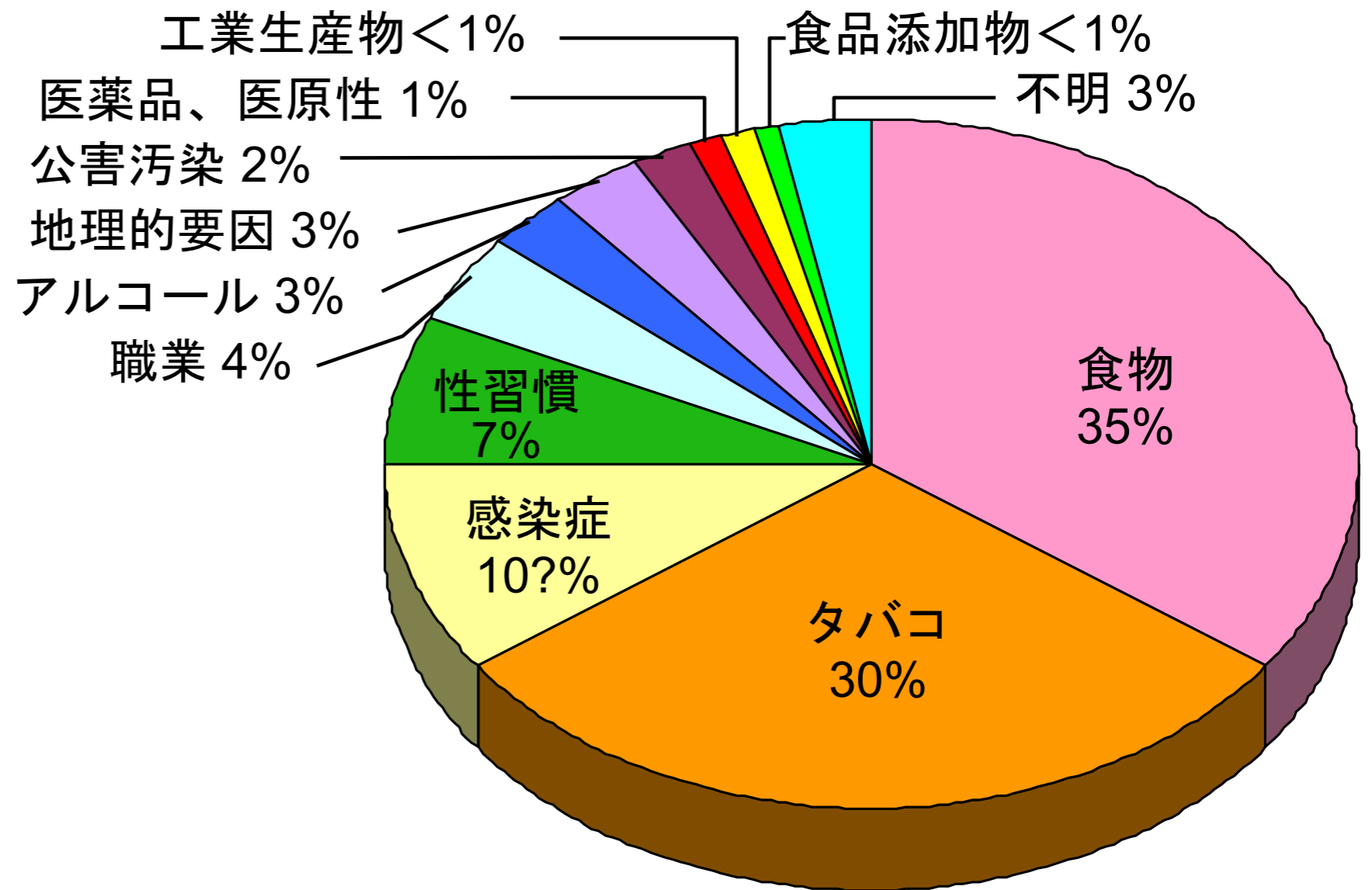
## 放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

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



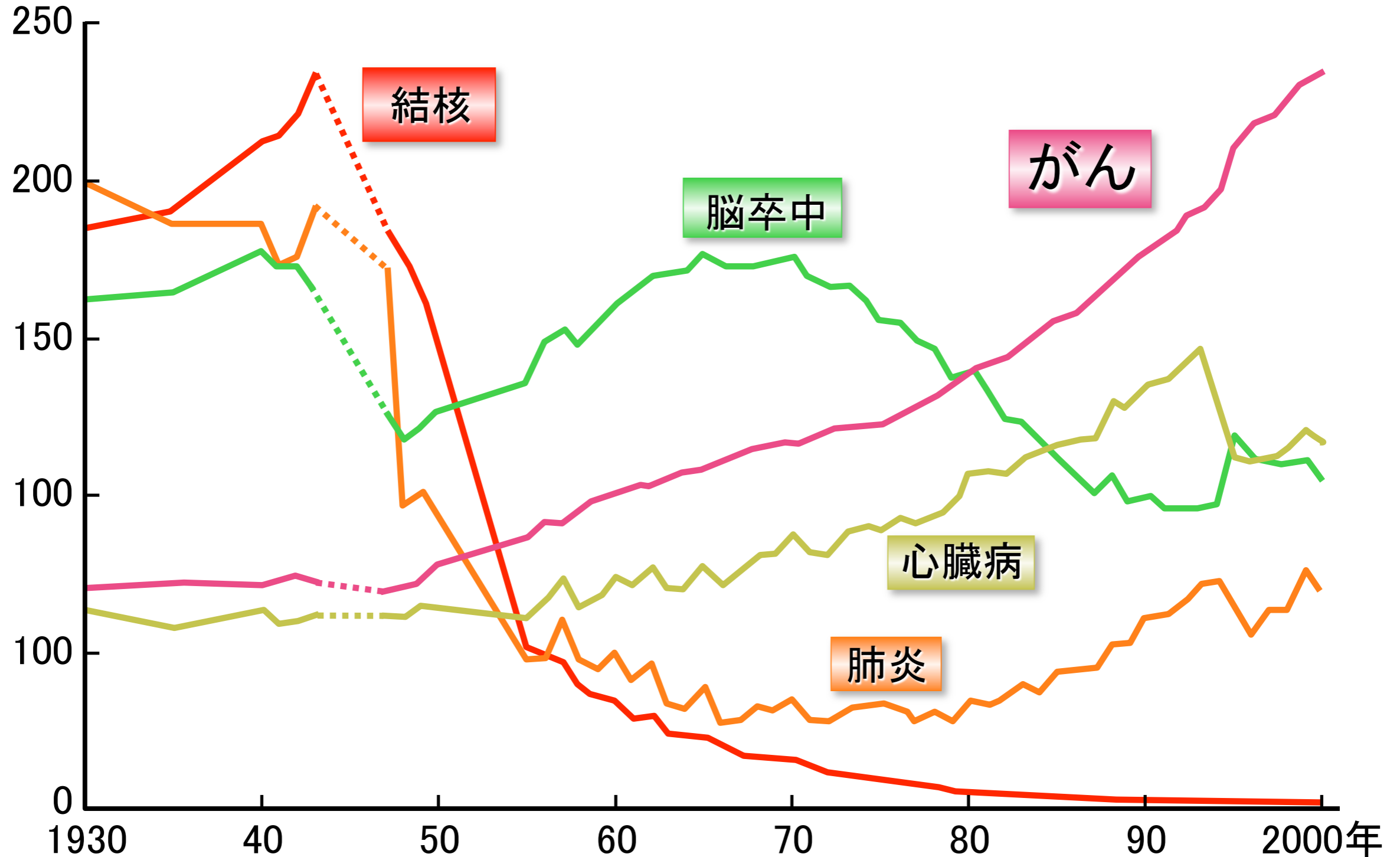
(R.Dool and R.Peto, 1981)

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、生涯のうちにがんにかかり、  
毎年の死亡者のうち3人に1人はがんで死んでいる。





がんで死なないためには、

👉 がんにならないのが一番

+ なっても、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



内部被曝は怖い！という主張

チェルノブイリの「悲惨な例」のイメージ

放射線の安全を説く本は売れない。

安全と安心

**小さい子どもを持つ母親が特に過敏**

信頼と納得、不信と不安と不満

ゼロリスク神話の盲点

定量的判断の必要性

「放射能の検査は大前提」 安全の担保としての基準値

科学者の立場・役割

情報開示・「伝える」ことの重要性

# リスクの伝え方

リスクを誇大に喧伝するのは正義か  
リスクの適切な評価が不可欠。  
過小評価も過大評価もダメ。

危険(hazard)が起きたら誰が責任をとるのか  
起きなかったらそれでめでたしですむのか

科学者による踏み越え

誰が何の「専門家」なのかの見極め  
科学的合意点と論争点との峻別  
科学的事実と個人の価値判断の区別

中立な立場での発言

御用学者？／恐怖の煽動？

イデオロギーの問題（原発推進／反原発、その他の利権？）



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。

事故後の政府・行政や東電のお粗末な対応

ほとんど説明になっていない保安院の会見

参与の涙の辞任会見、文科省と原子力安全委の食い違い

原子力政策の歴史

なぜ東京電力の原発が福島と新潟にあるのか。

原子力村の構造

原発反対運動 v.s. 事故は起きない  安全神話

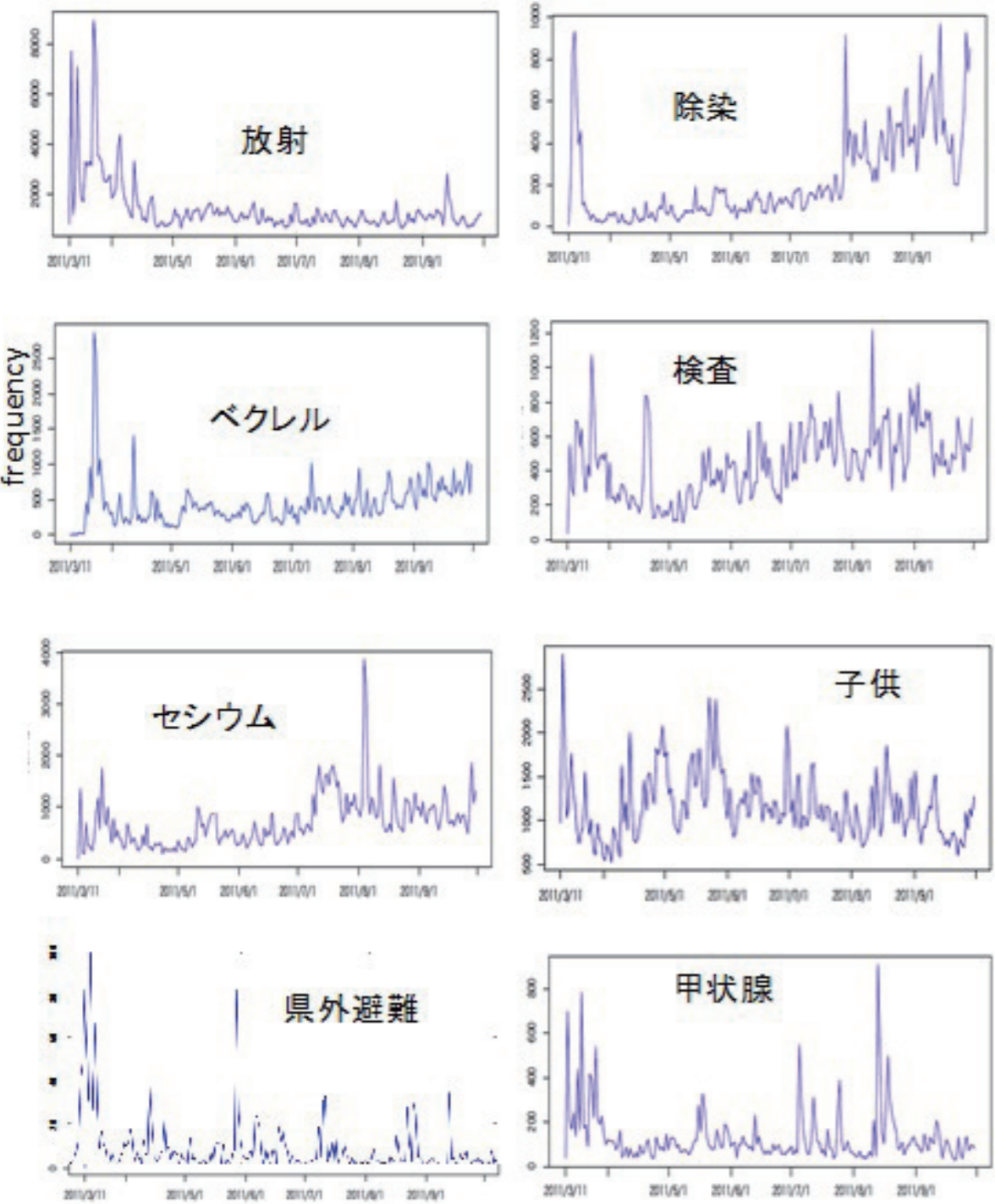
隠蔽体質

# SNS (twitter) での放射線リスク

「ビッグデータ解析による 3.11 以降の放射線に関する科学者の情報発信とその波及効果の検証：クライシス時に有効な科学者の情報発信法の開発を目指して」

3/11 4月 5月 6月 7月 8月 9月

環境省補助金 宇野賀津子・鳥居寛之  
原子力災害影響調査等事業  
(放射線の健康影響に係る研究調査事業)



原発事故後の twitter データの解析

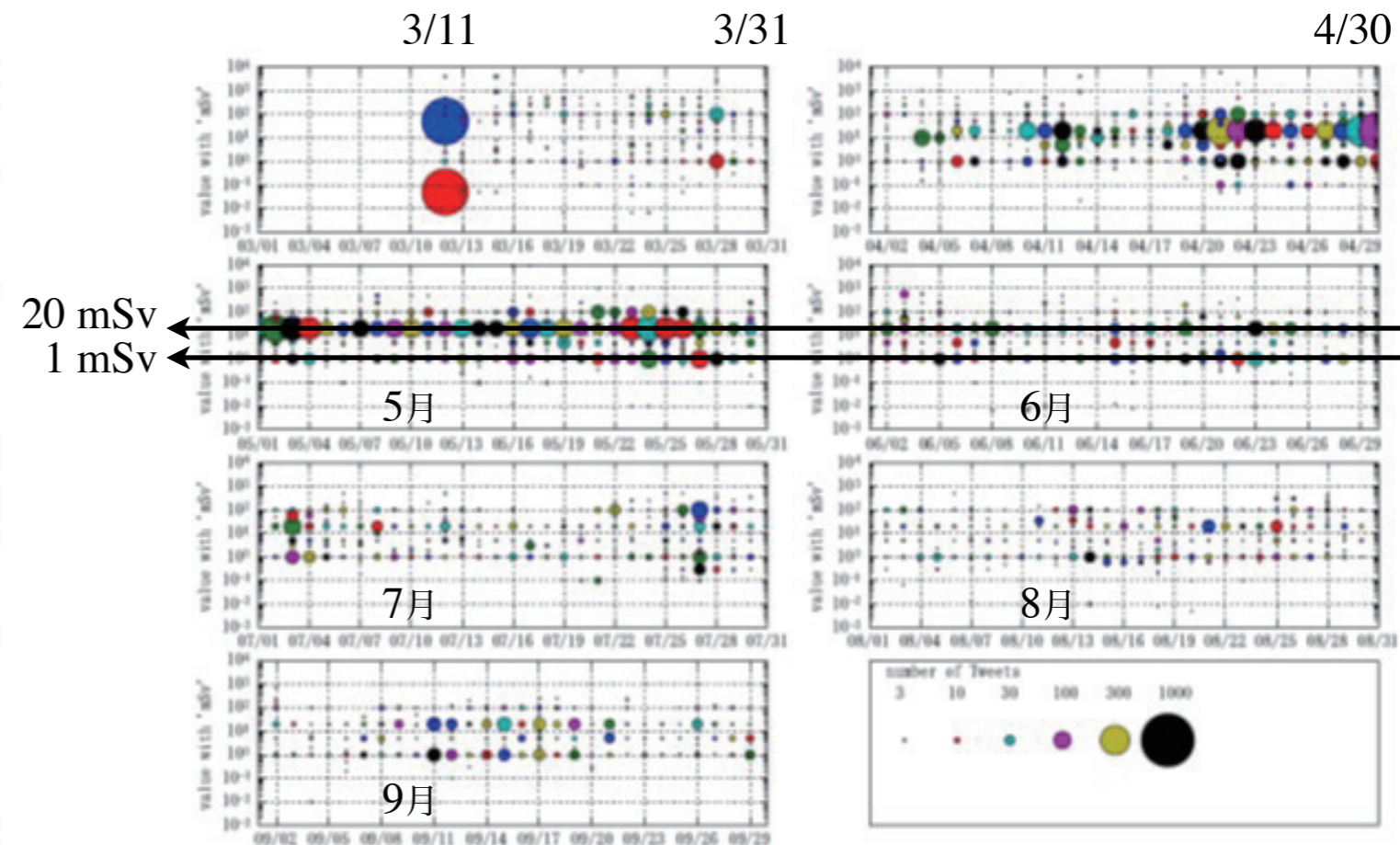


図2 サンプルされた Twitter データ 500 万件のキーワードの推移

図3 数値と “mSv” が連続して現れる Tweet 数

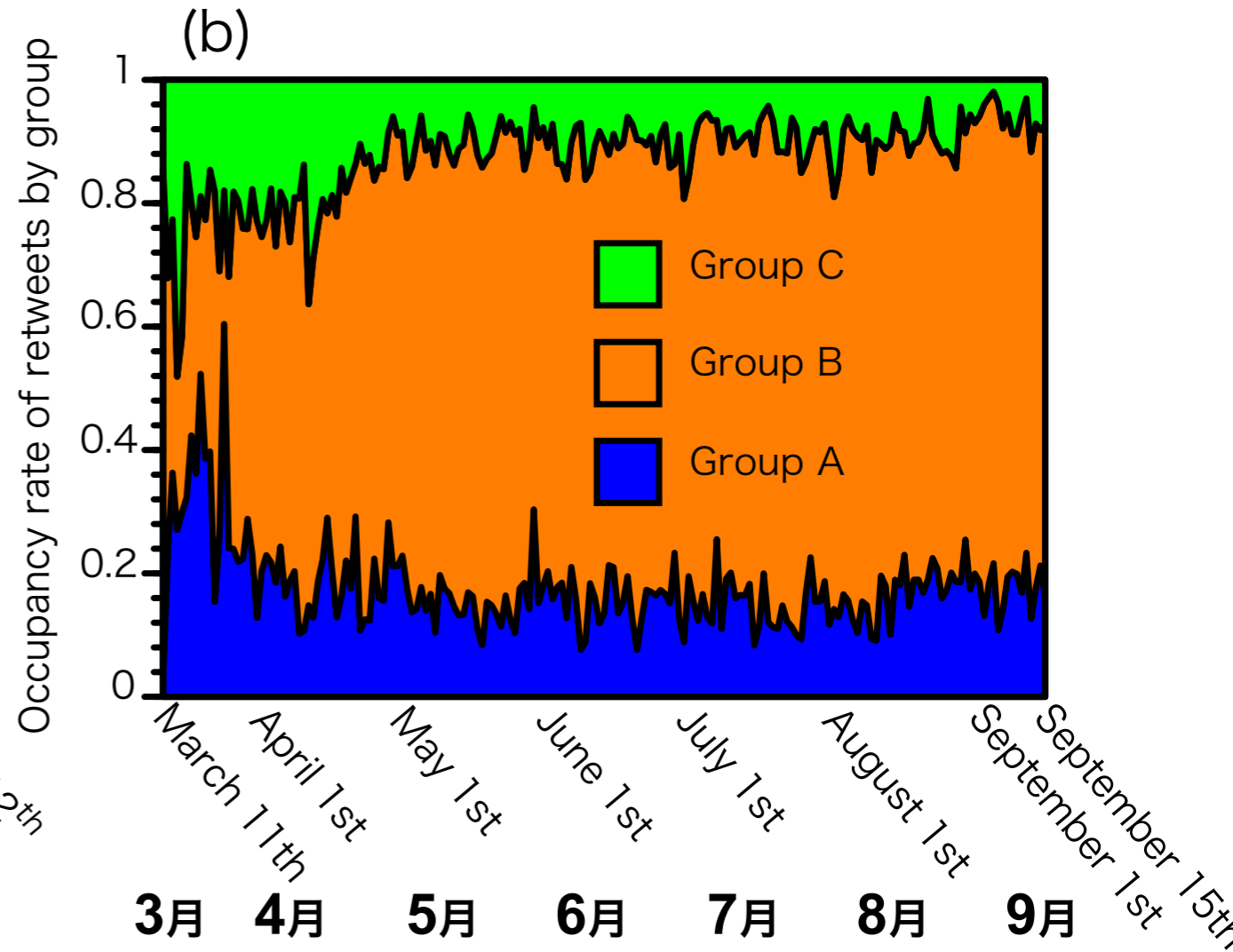
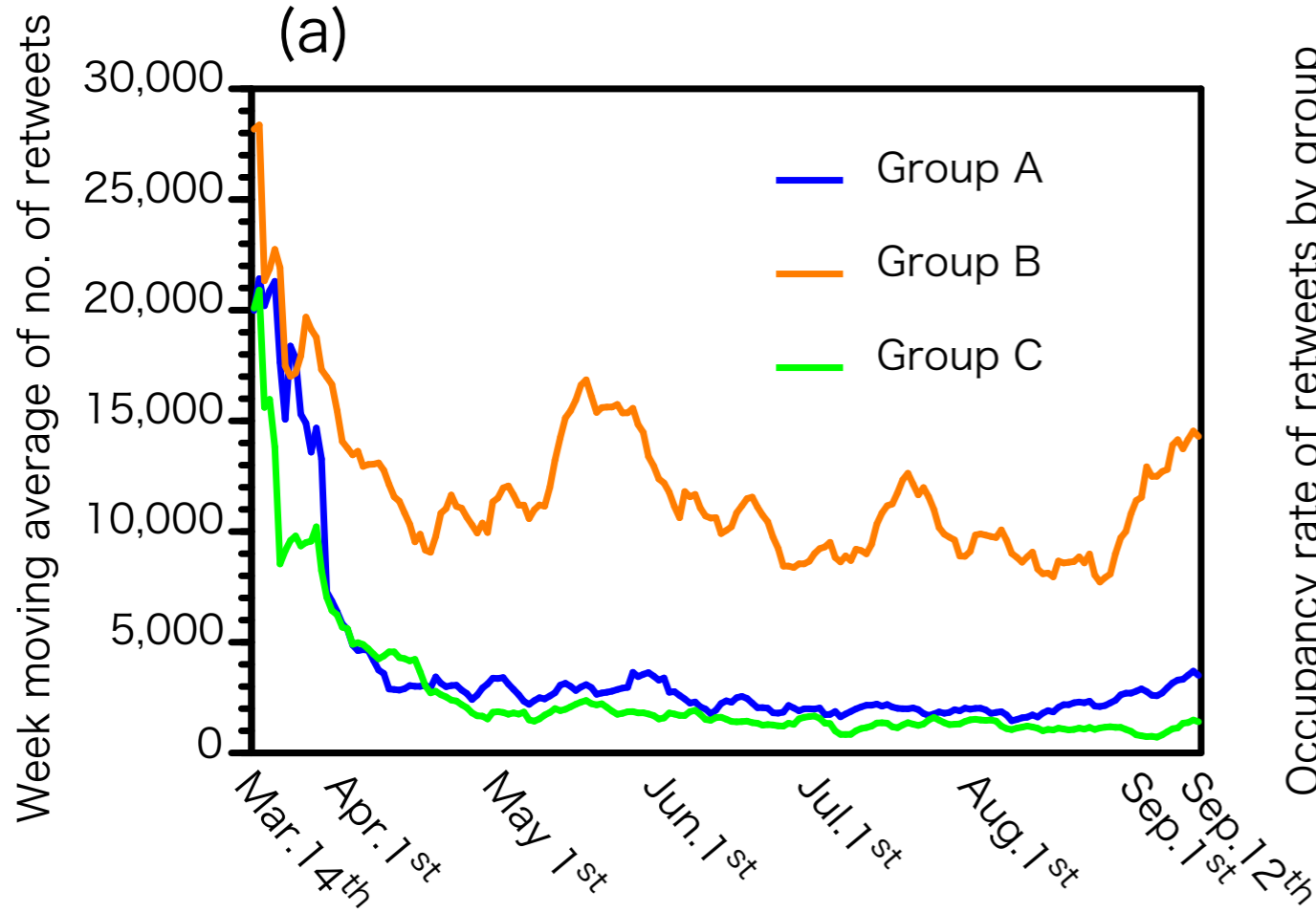


# 科学者 vs. 危険派匿名一般人

5866	2011-03-13	<b>【参考】</b> 1974年に中国が <b>大気圏核実験</b> を行い、東京に雨とともに放射性物資が降った。学生だった私はガイガーカウンター
		<b>【参考】</b> 1974年に中国が <b>大気圏核実験</b> を行い、東京に雨とともに
2946	2011-03-24	放射性物資が降った。学生だった私はガイガーカウンターで人々の
226		頭髮や衣服などを測定。その数値は、福島 of 病院で被曝された方々
220		と同程度以上、都民の多くが被曝したはずだが、それによる <b>健康被</b>
16		<b>害は現在にいたるまで報告されていない。</b>
		ない国際基準は 3000 Bq/kgです。日本の暫定基準値 300 Bq/kg は、国際基準より10倍厳しい。
1446	2011-03-16	全国各地の放射線レベル。鈴木寛文科副大臣がモニタリング担当で陣頭指揮。都道府県別環境放射能水準調査結果が出るよう
		になりました。すばらしい、 <b>今後はこちらをご覧ください。</b> <a href="http://bit.ly/fByHZk">http://bit.ly/fByHZk</a>
2703	2011-08-29	あたしは何度でも言う！ <b>放射能汚染された農作物や水産物を買って食べることは「被災者支援」ではなく「東電支援」だ！</b> 本
		あたしは何度でも言う！ <b>放射能汚染された農作物や水産物を買って</b>
209	2011-09-12	<b>食べることは「被災者支援」ではなく「東電支援」だ！</b> 本来なら東
15	2011-09-09	電が賠償すべき被害を、消費者が自らの健康を犠牲にして身代わり
14	2011-09-19	になるなんて、 <b>こんなバカバカしいことは今すぐやめる！</b> 子供を甲
136	2011-09-29	状腺ガンにしてまで東電を助けたいのか？
		<b>に、ぜひご覧ください。</b> わずか5分ほどの映像です。これは原発から100キロも離れたキエフでの現実です→ <a href="http://t.co/HQ6fSGS">http://t.co/HQ6fSGS</a>
1057	2011-09-09	「 <b>死の街</b> 」というのは、もともとは英語の「ゴーストタウン」を訳した言葉で「以前はたくさんの方がいたが何かの原因で誰もいなくなってしまった街」という意味。 <b>チェルノブイリ</b> 関連の書籍や映像では数え切れないほど使われてきた表現なのに、なぜ福島第一原発周辺を「死の街」と呼んだら問題なのか？

# グループ毎の tweet 数と占有率

Retweet ネットワーク、テキスト情報からインフルエンサーをグループ分けした。



2011年 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月

3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月 September 1st September 15th

Group A (科学派) 14 : 個人実名 / 匿名 10 / 3. 学者 4 ジャーナリスト 2 官僚 1

Group B (感情派) 67 : 個人実名 / 匿名 42 / 21. 学者 5 実業家 4 ジャーナリスト 8 政治家 9

Group C (メディア) 13 : 個人実名 / 匿名 1 / 0. 報道機関 12

グループ人数

個人実名 / 匿名

属性

Twitter use in scientific communication ....  
M. Tsubokura, Y. Onoue, H. A. Torii *et al.*,  
PLoS ONE 13(9): e0203594.



# twitter ネットワーク解析

2011/3 ~ 2012/9

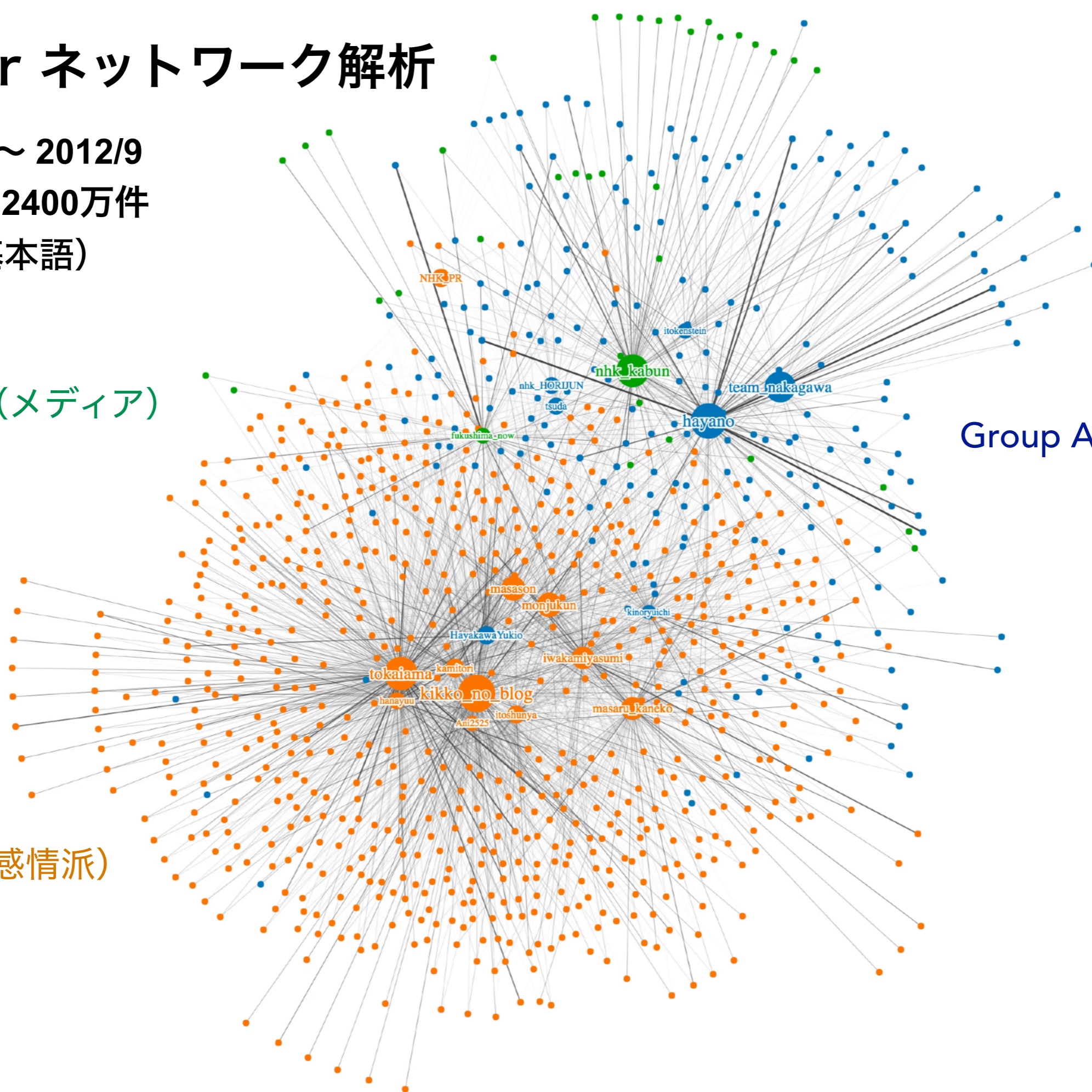
100% = 2400万件

P (基本語)

Group C (メディア)

Group A (科学派)

Group B (感情派)



# 新聞報道の問題点

## 両論併記

「専門家」は適切に選ばれたのか

両極端の意見だけで、実際の科学者の間の意見分布が分からない。

中庸がいちばん把握しづらい。

結論ありき      結論のない記事は書けない。

読者自身に判断してもらおうことができない

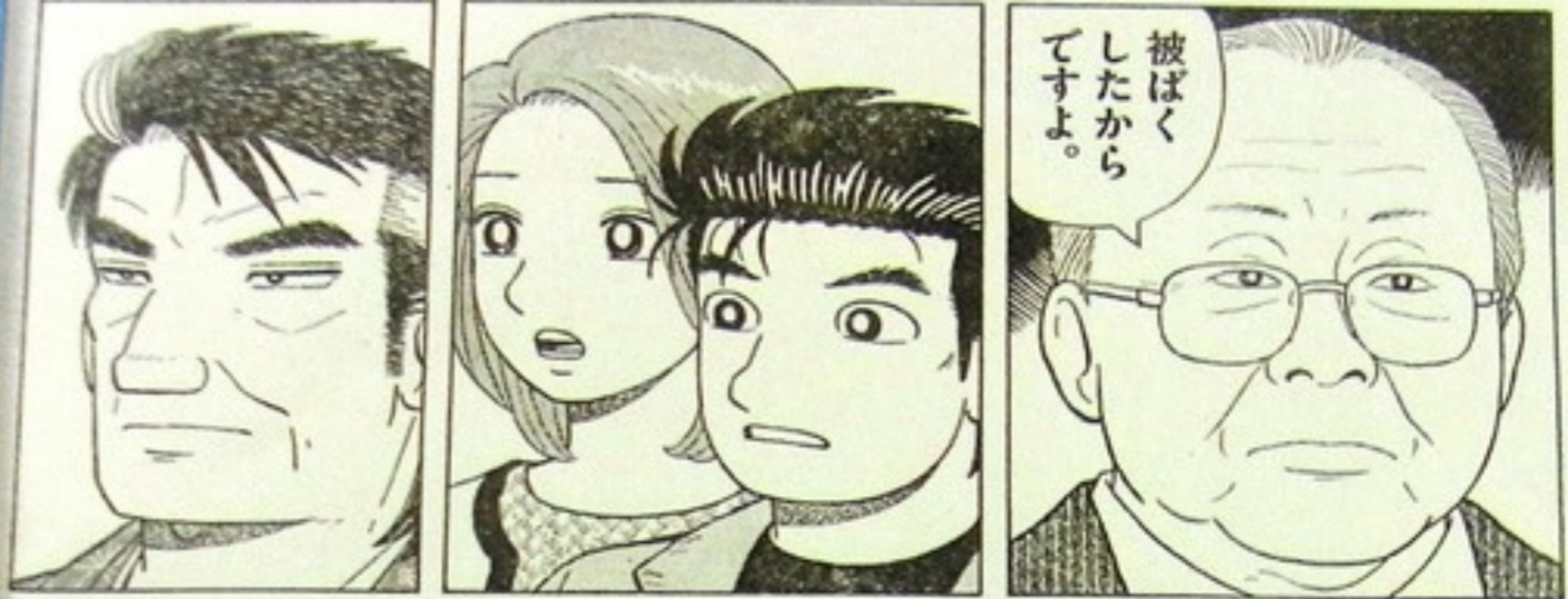
危険報道・批判報道に偏る

「安全です」は記事にならない  
書籍も安全を説くものは売れない



# 美味しんぼ論争 の功罪

医学研究所所長・松井英介先生が語る福島の実情とは…!!



## 美味しんぼ

258





# 『美味しんぼ』福島の実編に寄せられたご批判とご意見

弊誌22/23合併号が4月28日に発売されて以降、『美味しんぼ』の内容につきまして、皆様から多くのご批判・ご意見を頂戴しました。福島第一原発の事故は、これからも日本中のすべての人が考え続け、向き合わなければならない問題です。作品内容が提起する問題について、識者や行政の皆様から寄せられたお考えを紹介する、特集記事を掲載させていただきます。頂戴したご意見につきましては、真摯に受け止め、今後の誌面作りに活かしていきたいと思っております。(ビッグコミックスピリッツ編集部)

## 安齋育郎氏

立命館大学名誉教授  
(放射線防護学)

鼻血や倦怠感については、福島の方でそうした症状を心配している方がいるという話は伝わってきています。そして、それが放射線によるものかの議論がある。ただ、原発事故前の鼻血や倦怠感に関する統計データと今を比べなければ、増えているのかどうかはなんとも言えません。具体的な、そういう比較データは承知していません。

こうした症状は「後付けバイアス」によって出ることが知られています。これは心理学用語で、鼻血が出た、疲れたという症状が出た場合、福島で放射線を浴びたからではないかと考える。今、こんなに疲れているのは、きっと福島に行ったせいだろう、などと考えることはよくあることです。そういうふうにいる方が多く現れることはあり得ると思います。が、これは原発事故によるものだと断じるようなものではないでしょう。

放射線の影響が、人々にどういう影響を与えるのか。それは、4つのカテゴリーに分けて考えるべきでしょう。①身体的影響、②遺伝的影響、③心理的影響、④社会的影響です。

このうち、社会的影響というのは、福島に対する差別や偏見、風評被害もそうですし、避難していた人が、これまでかかっていたお医者さんに通えなくなったり、衛生面の変

## 小出裕章氏

京都大学原子炉実験所  
助教(原子核工学)

今も帰れない地域が存在している、危険が存在するという事実を伝える必要はもちろんあります。国や電力会社、大手マスコミがその責任を放棄する、むしろ意図的に伝えないようにしている現状では、そうした活動は大切です。「鼻血」が出ることについては、現在までの科学的な知見では立証できないと思えます。ただし、現在までの科学的な知見では立証できないことであっても、可能性がないとは言えません。科学とは、事実の積み重ねによって進んでいくもので、従来は分からなかったことが少しずつ分かってくるものです。もちろん、心因性の「鼻血」は十分にありうると思います

## 野呂美加氏

NPO法人「チェルノブイリへのかけはし」代表

私達はチェルノブイリの子どもの達を大病を予防するために、日本へ保養に招待する活動をしてきました(福島原発事故以来は休止しています)。

今、日本で行われている被曝対策は広島・長崎のデータに基づいていますが、チェルノブイリの医師達も、広島の実例は使えないと言っています。特に、低線量内部被曝は、核実験などを頻繁に行っていた旧ソ連の科学者もそこまで被害が悪化すると思っていませんでした。適切で大規模な疫学調査をしなければ、鼻

## 福島県庁

福島県においては、東日本大震災により地震や津波の被害に遭われた方々、東京電力福島第一原子力発電所事故により避難されている方々など、県内外において、今なお多くの県民が避難生活を余儀なくされている状況にあります。

原発事故による県民の健康面への影響に関しては、国、市町村、医療関係機関、原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)等の国際機関との連携の下、全ての県民を対象とした県民健康調査、甲状腺検査やホルボディカウスター等により、放射性物質による健康面への影響を早期発見する検査体制を徹底しており、これまでにこれらの検査の実施を通して、原発事故により放出された放射性物質に起因する直接的な健康被害が確認されたと例はありません。

## 蜂須賀禮子氏

元東電福島原発事故調査委員  
大熊町商工会会長

主人公の山岡さんは6回福島に入り、1回第一原発の中に入ったというのですが、その程度の放射線量で鼻血が出るというのは、これはあり得ない話です。鼻血が出るほど被曝したとなれば、山岡さんは死んでいるはずですが。どのくらいの知識を持って取材にのぞまれたのか、大変疑問を抱きました。

## 山田真氏

医師  
子どもたちを放射能から守る  
全国小児科医ネットワーク代表

私は原発事故後、2011年5月頃から福島に入って健康相談会を行ってきました。その頃から、「鼻血が出る。放射能のせいではないか」という話はあちこちから寄せられていました。多くの方が心配していたのは事実です。ただ、子供が鼻血を出すのは日常のことだから、これを放射線の影響と短絡的に考えるわけにはいきません。

## 大阪府・大阪市

週刊ビッグコミックスピリッツ  
「美味しんぼ」に関する  
抗議文

平成26年5月9日付で貴社宛に、「平成26年5月12日発売予定週刊ビッグコミックスピリッツ掲載の『美味しんぼ』の内容の一部訂正」について申し入れを行いました。訂正等の対応をいただけなかったため、次のとおり厳重に抗議いたします。

## 青木理氏

ジャーナリスト  
ノンフィクション作家

メディアは福島原発事故による被害の問題を扱う時、細心の注意を払わなければいけません。現地に今も暮らしている人がいる以上、住民の不安をいたずらに煽る、または県外の人々の不当な偏見を助長するような表現にならないよう慎重を期すべきです。

## 矢ヶ崎克馬氏

琉球大学名誉教授  
(物性物理学)

放射能の健康への影響については、国際的に二つの潮流に分かれています。一つはICRP(国際放射線防護委員会)やIAEA(国際原子力機関)が主張する、放射能の影響は大したことがないという論調。100ミリシーベルトまで問題はなく、チェルノブイリ事故後の健康被害は甲状腺ガンだけというもの。もう一つは、事実をありのままに見つめ、率直に理解する考え方。こちらは、低線量の健康被害を重大視しています。日本政府は、前者のスタン

## 津田敏秀氏

岡山大学教授  
(疫学、環境医学)

チェルノブイリでも福島でも鼻血の訴えは多いことが知られています。(雁屋さんが)実際に対面した人が「鼻血を出した」わけですから、それを描くのは問題ないと思います。「低線量放射線との因果関係をデータとして証明しないかぎり、そのような印象に導く表現をすべきではない」という批判が多いとのことですが、「因果関係がある」という証明はあっても、「因果関係がない」という証明はされていません。

## 双葉町

小学館への抗議文

平成26年4月28日に貴社発行「スピリッツ」の「美味しんぼ」第604話において、前双葉町長の発言を引用する形で、福島県において原因不明の鼻血等の症状がある人が大勢いると受け取られる表現がありました。双葉町は、福島第一原子力発電所の所在町であり、事故直後から全町避難を強いられておりますが、現

## 肥田舜太郎氏

医師

私は、原爆投下後の広島で被爆者の治療にあたり、内部被ばくを研究してきた医師として、震災後に日本各地から講演の依頼がありました。そして全国を訪ね歩いたのですが、行く先々でこんな相談を受けたんです。「あまり人には言えないけれど、実はうちの子は鼻血が出て困りました。大丈夫でしょうか」と。鼻血のほか、下痢の症状を訴える人もいました。事故を起こした福島第一原発の放射性物質はアメリカやイギリスにまで拡散したのですから、狭い日本のすみずみまで被害が及んでいてもおかしくありません。

## 野口邦和氏

日本大学歯学部准教授  
(放射線防護学)

福島県内で被曝の原因とする鼻出血(鼻血)が起こることは絶対にありません。ごく短期間に全身が500〜1000ミリシーベルトを超え



# 風評と風化

## 東京では放射線の話題は他人事

**風評被害**は落ち着きつつあるが、依然として福島  
の土地や産物を避けようとする人も一定数存在。

放射線影響の疫学データをどう解釈すべきか。

そんなことよりもっと大事な健康影響がある。

## 福島では放射線の話題はタブー

立場や考え方の違い、補償の違い、避難の有無で  
**家庭や地域が分断**されてしまった。

「南相馬はひとつになれない」

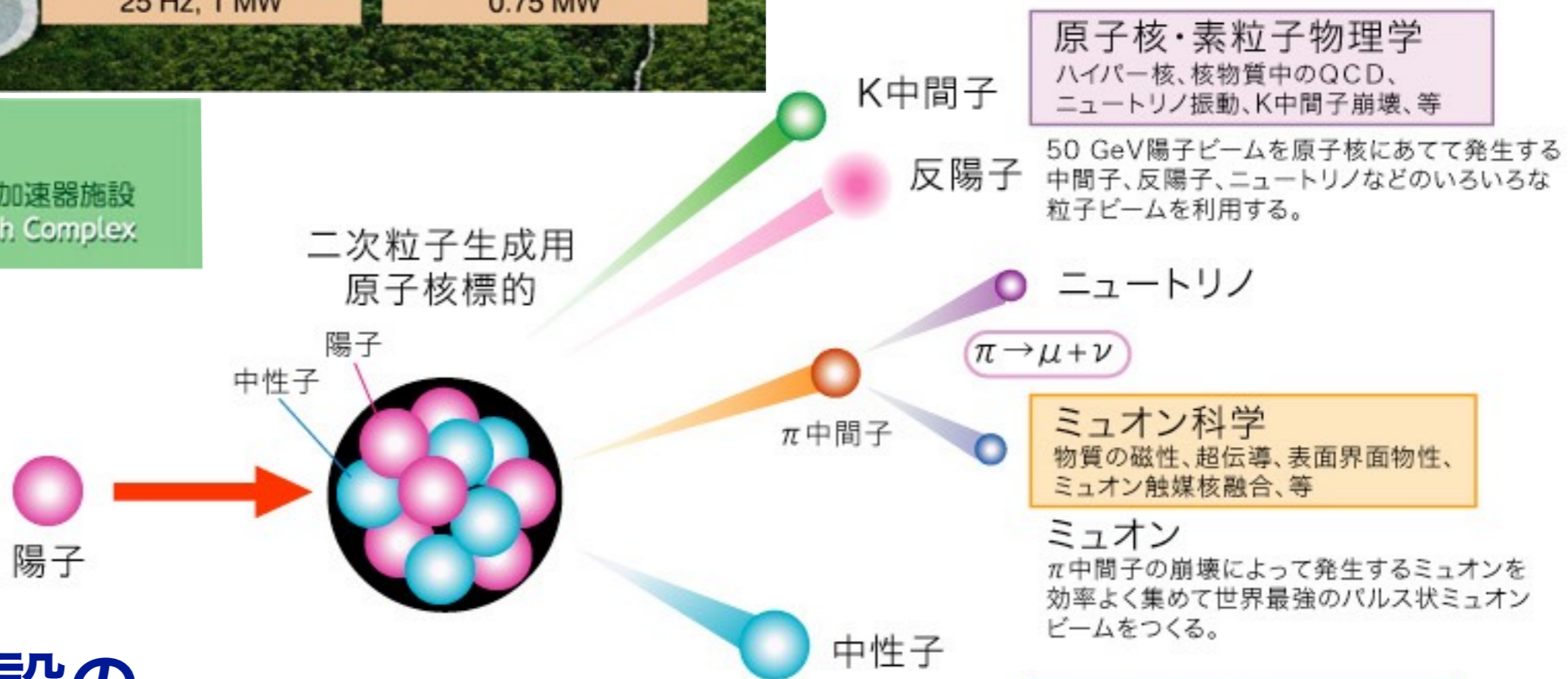
放射線の科学的知識を身につけないまま関心が  
**風化**しつつある。





独立行政法人 日本原子力研究開発機構  
Japan Atomic Energy Agency

**J-PARC** 大強度陽子加速器施設  
Japan Proton Accelerator Research Complex



**原子核・素粒子物理学**  
ハイパー核、核物質中のQCD、  
ニュートリノ振動、K中間子崩壊、等

50 GeV陽子ビームを原子核にあてて発生する  
中間子、反陽子、ニュートリノなどのいろいろな  
粒子ビームを利用する。

**ミュオン科学**  
物質の磁性、超伝導、表面界面物性、  
ミュオン触媒核融合、等

**ミュオン**  
 $\pi$ 中間子の崩壊によって発生するミュオンを  
効率よく集めて世界最強のパルス状ミュオン  
ビームをつくる。

**中性子科学**  
高温超伝導発現機構、生命現象、  
高分子・液晶・超分子、新素材、等

3 GeVの大強度陽子ビームによって  
発生する世界最高強度の1 MWパルス中性子源。

**加速器駆動核変換**

リニアックからの陽子ビームを用いて  
原子力の科学と技術開発を行う。

# 加速器施設の 放射線・放射能管理



# まとめ

放射性物質が放射線を出す能力を**放射能**という。

放射性物質は**放射性同位体**を含んだ物質。

核種に応じて**壊変の種類**や**半減期**が決まっている。

$\gamma$ 線のエネルギー**測定**により核種の同定が可能。

放射線には  $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、X線、中性子線などがある。

**MeV** オーダーの**高いエネルギー**で物質を**イオン化**し、**化学結合を切断**する。

**ラジカル**が生成され、これが**DNA 損傷**を引き起こす恐れがある。

放射線の種類による**透過力**と線エネルギー付与 (**LET**) の違いに応じて防護。

人体は **DNA 損傷**に対する**修復機能**を備えている。

**自然放射線**による被ばくは年間 2 mSv 程度ある。

**放射線防護**の ALARA の原則。**リスク**の正しい理解と伝達。

# Fine.

Grazie per la vostra attenzione.

Gratias ago pro audientia vestra.

Спасибо за внимание.

Merci de votre attention.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Thank you for your attention.

경청해 주셔서 감사합니다.

感謝您的聆聽。

谢谢您的关注。

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  
リスクコミュニケーション

完

鳥居 寛之

東京大学 大学院理学系研究科 放射線管理室

# レポート課題

以下の課題 (A) についてレポートを作成して提出して下さい。

学籍番号、氏名のほかに、研究室や研究分野についても記すこと。

(A) 放射線が物質に及ぼす作用、生体に与える影響を踏まえた上で、放射線防護の考え方や、放射線や放射性同位体を取り扱う際の対策・注意点について述べなさい。被曝事故を起こさないために具体的にどんな準備が有効でしょうか。

ただし、研究において放射線を扱うことがない分野の学生は、上の課題に代えて、以下の課題 (B) を選択してもよい。

(B) 放射線と放射性物質の違い、および放射線と放射能の単位について簡単に説明しなさい。また、福島原発事故後の放射線被曝のリスクと防護対策について、自分の考えを自由に述べなさい。放射線の影響については、安全だという意見と、危険だとする言説とが対立することがありましたが、リスクについてどのように考えるべきなのでしょう。

## 講義スライド

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>

東大教養 放射線 鳥居



検索