放射線教育の在り方について

宮城県教育委員会 2015年度 防災主任研修会

東北大学大学院理学研究科物理学専攻

金田雅司

kaneta@lambda.phys.tohoku.ac.jp

http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~kaneta



自己紹介

何をしてる人？

専門

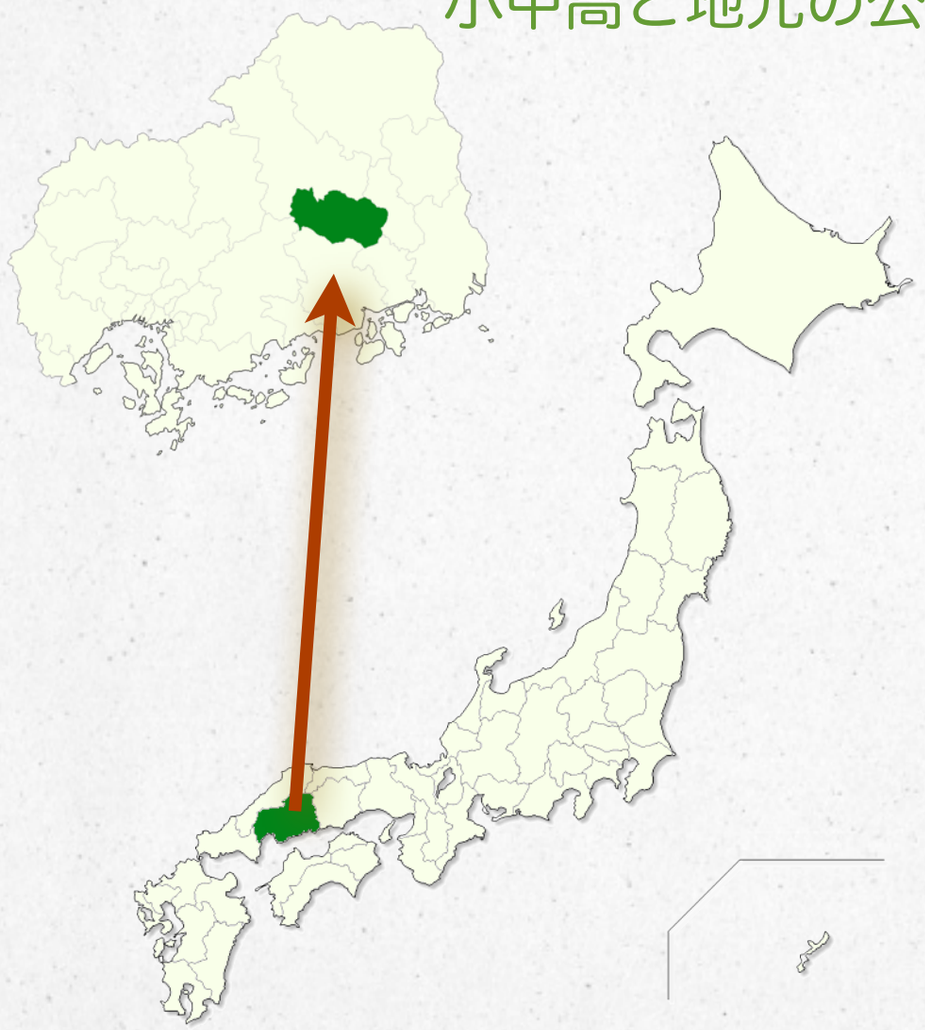
素粒子・原子核物理

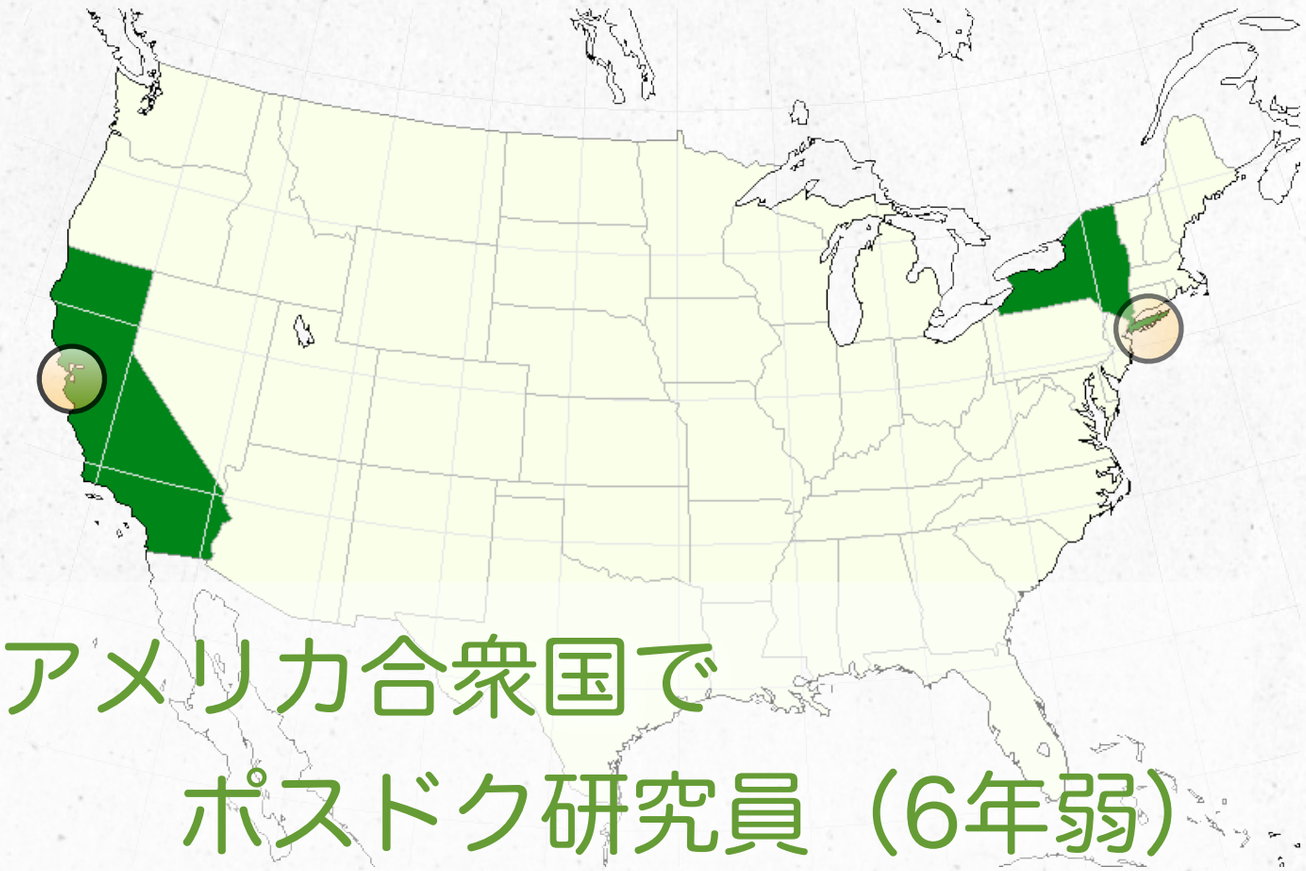
(実験)

経歴

出身：広島県世羅郡

小中高と地元の公立





アメリカ合衆国で
ポスドク研究員（6年弱）

ローレンス・バークレイ国立研究所
ブルックヘブン国立研究所

広島大学教育学部教科教育学科理科教育学専修（物理）
広島大学大学院理学研究科物理学専攻

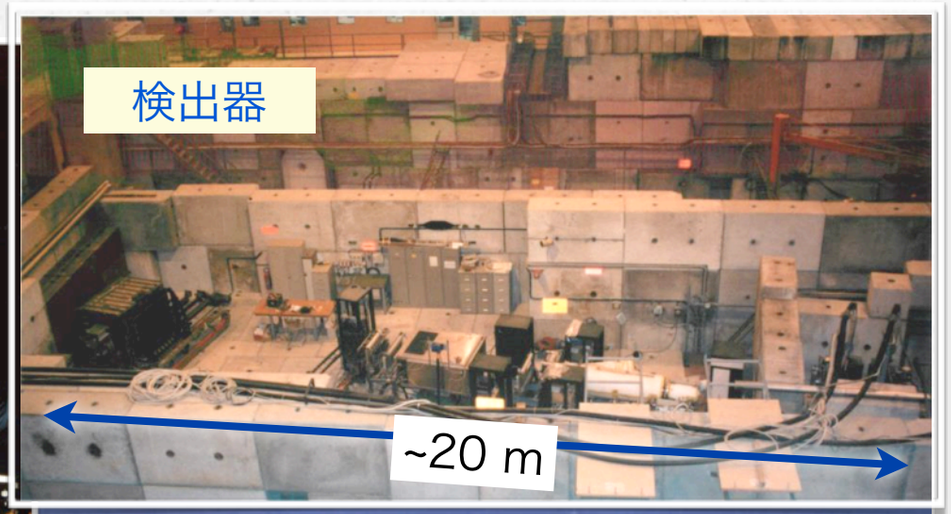
大学院生時代

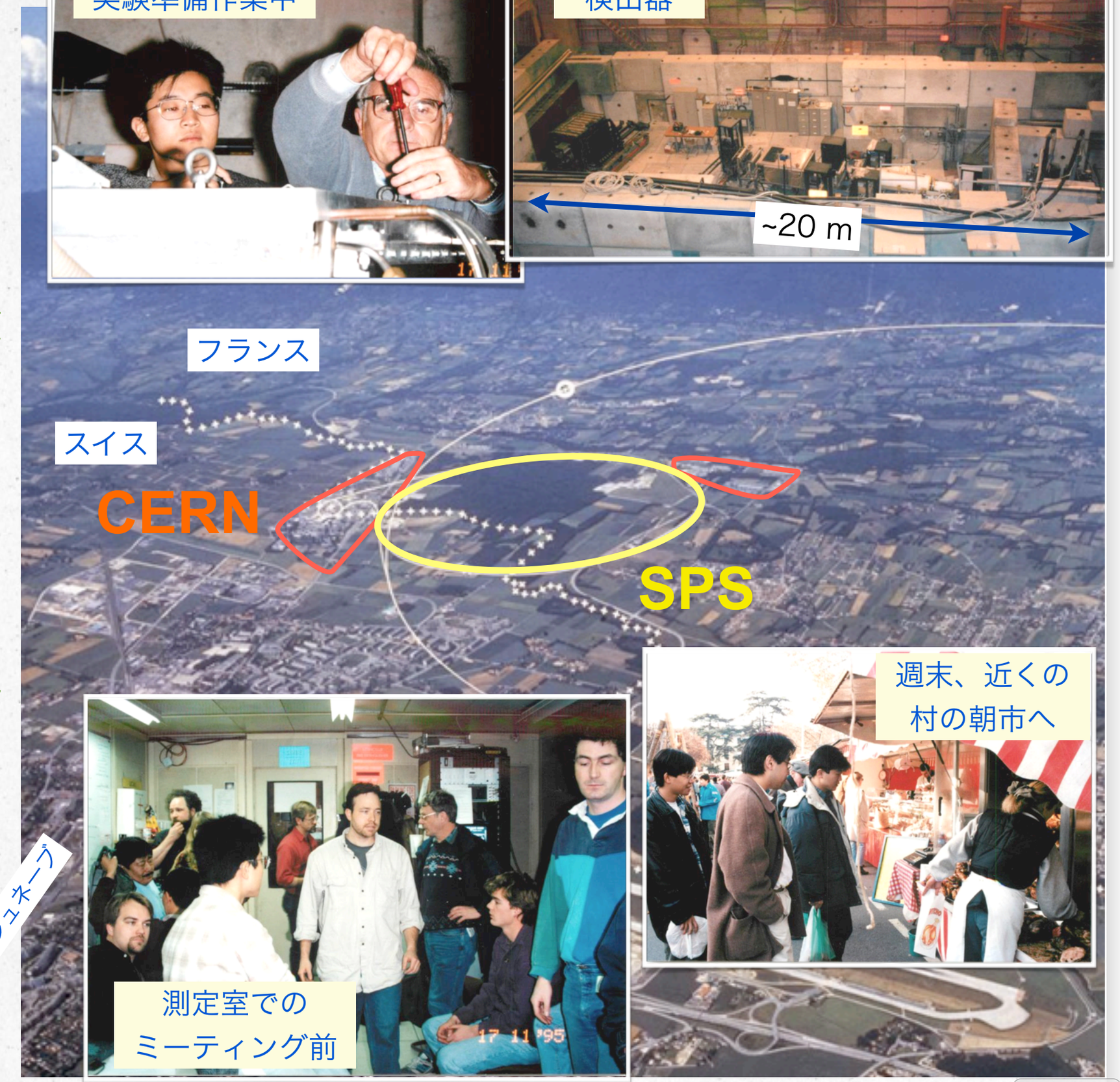
CERN
（欧州合同原子核研究所）
の加速器SPSを用いた
高エネルギー原子核衝突実験

国際共同実験
アメリカ、スェーデン、
デンマーク、フランス、日本
から１１の大学・研究所、約４０名
に参加

宇宙初期にあったと考えられる、クォーク・グルーオン・プラズマ探索実験







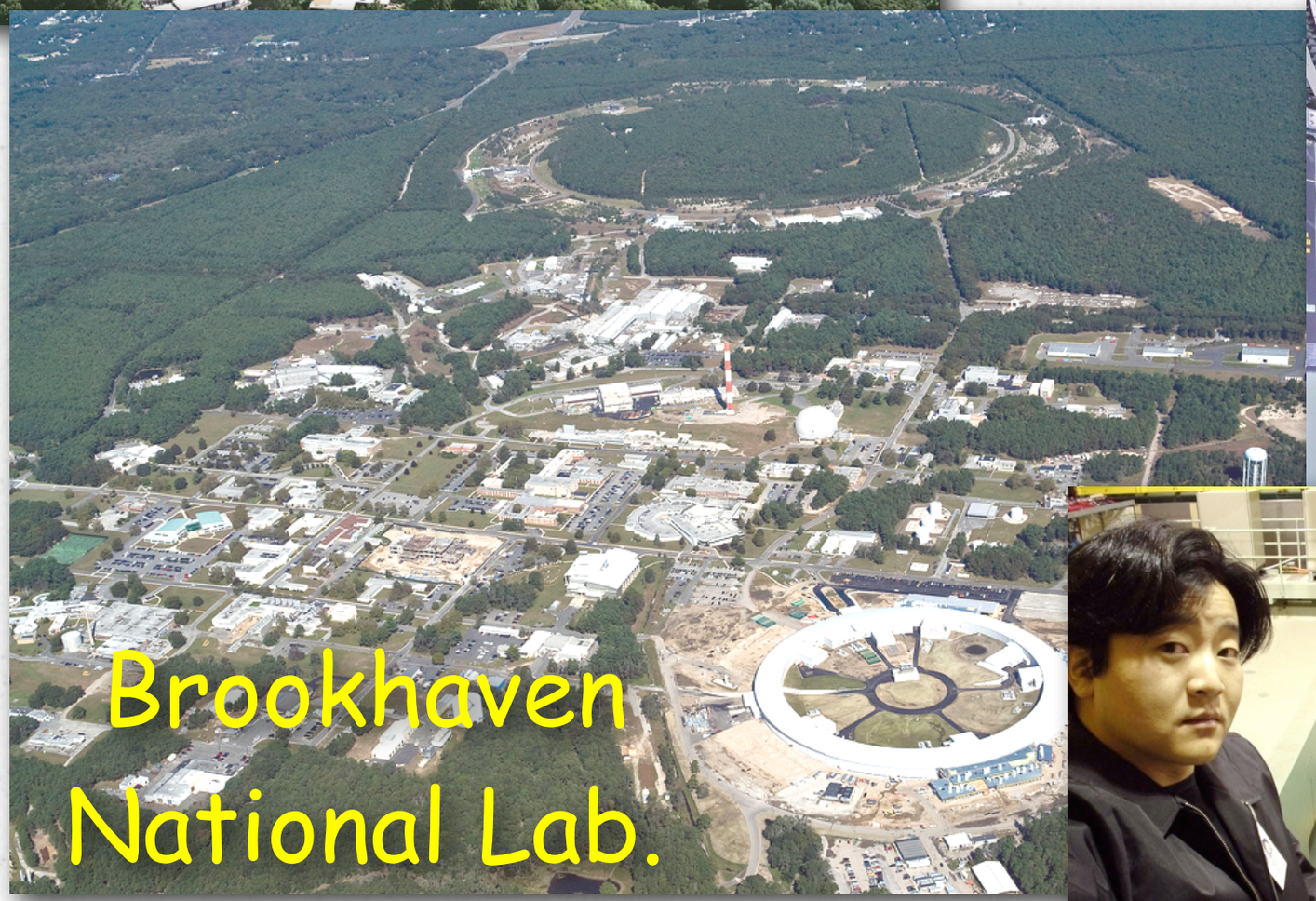
←ジュネーブ

測定室での
ミーティング前

週末、近くの
村の朝市へ

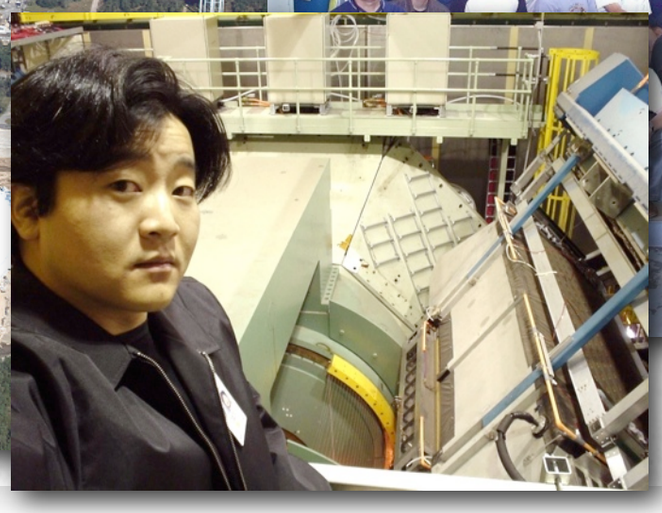
Lawrence Berkeley Lab.





Brookhaven National Lab.





東北大学大学院理学研究科物理学専攻
原子核物理研究室
助教

研究と教育に従事



素粒子・原子核物理

- 役にたつもの？
  - 「たちません」
    - 何か役に立つことを目的として研究していない
  - 「たちます」
    - 後から役に立つことが見つかる：応用
- 応用の例
  - X線写真
    - 病気の発見、治療の手助け
  - 量子力学
    - エレクトロニクスの世界
  - 特殊・一般相対性理論
    - GPS(カーナビゲーション)
  - 加速器・検出器技術
    - 放射光を用いた、物質構造の解明
    - PET(陽電子放出断層撮影), MRI(核磁気共鳴画像法) などの画像診断
    - 電子線・陽子線・重粒子線による癌治療

はじめに

講義の概要

- 放射線・放射能・放射性物質とは？
  - 物質は何から出来ているのか
  - 放射性物質と放射線
  - 生体への影響
- 福島第一原発事故による放射性物質
  - 仙台市での放射線量率の推移
    - 事故以降の東北大学青葉山北キャンパスでの測定
  - 大規模土壌調査の結果

講義の概要

- 放射線測定
  - 測定機の性質
  - 空間線量率の測定
    - 時間変化（どのように揺らぐか）
    - 放射性物質が側にあるときの振る舞い（^{40}Kを用いて）

私の話せること・話せないこと

- 話せること
  - 放射線・放射性物質ついての基礎知識
  - 科学的な考え方とはなにか
  - 自分の専門で無いことをどのように判断しているのか

- 話せないこと
  - 安全かどうか断言する
    - 条件によって変わるものは歯切れ良く答えられない
    - どんなものでは、100%安全、100%危険なものはない
  - 教育学の方法論に踏み入った話題

小学生にどう教えるか

娘(現在小3)との会話から学んだこと

- 原子、さらに小さな原子核の世界
  - 教科書の内容を超えている
  - 発展的な課題なる
- 丹念に説明する（児童だけではなく特に保護者へ）
  - 分かっていることについて
    - 放射線・放射性物質とはどんなものか
    - 原発事故で何が起きたか、現在環境はどうなっているか
    - 比喩も必要
  - 「分からない」とはどういう意味か

小学生にどう教えるか

娘(現在小3)との会話から学んだこと

- 丹念に説明する（続き）
  - 定量的に説明する必要
    - 単に危険か安全とは言えない
  - 目に見えない物の概念
    - 順を追って説明するしかない
  - 教える側の継続的な知識習得の努力が必要
    - 基礎的な知識の習得
    - 原発事故の影響がどなっているか
      - 他の事故との比較、何が違うか
      - 事故直後に比べ現在はどうなっているか
    - 流れてくる情報ではなく自分で元の情報を探す
      - マスコミはセンセーショナルな事を好む

教諭の方々へのお願い

- もし理科が苦手な場合
  - せめて嫌わないで下さい
- 自然科学の位置づけ
  - 我々の世界がどう成り立っているかを解き明かす
  - 様々な知見の積み重ねでなりたっている
  - 数学を道具に使う
    - 国・地域、人種、言語に依らず平等に表現される
    - 自然界の原理は、人の主義主張や政治的立場に依らない

事前アンケート

- 園児・児童・生徒に聞かれて答えることが難しかったこと
- 保護者から園・学校に寄せられた質問
- 講義で知りたいことや聞きたいこと

幼稚園・小学校教諭の方々からの解答

事前アンケートのまとめ

- 園児・児童・生徒に聞かれて答えるのが難しかったこと
  - そもそも放射線・放射能とは、人体への影響は？
    - 放射性物質と放射線、放射能の違い
    - 放射線の種類と人体への影響
    - 被曝とはなにか
    - 放射能や放射線から身を守るにはどうすれば良いか
    - 放射線による害はどのようなものがあるか、どうしてそうなるかをどう説明するか

事前アンケートのまとめ

- 園児・児童・生徒に聞かれて答えるのが難しかったこと
  - 安全かどうか？
    - 住んでいる土地は安全なのか（何ミリシーベルトまでが本当に安全なのか、学校の所在地はホットスポットにあたっているのか）
    - この場所が放射線大丈夫かと聞かれてどのように答えるか
    - 飲料水の安全性
    - 児童に「放射線は本当に大丈夫なの？」と聞かれたとき。低線量被曝を浴び続けた事例が殆ど無い以上「分からない」が現状ではないか

事前アンケートのまとめ

- 園児・児童・生徒に聞かれて答えるのが難しかったこと
  - どのように指導するか
    - 放射線をどのようにイメージさせればよいか
    - 霧箱を使って放射線の様子を観察させたが、児童の反応がもう一歩だった。保護者の反応もあまりなかった。
    - 原子力災害をどのように園児に実感させればいいか。わかりやすい教材や知らせ方はないか。
    - 原発事故想定の避難訓練の事前指導で、小学生に対してどこまで説明して理解させたらよいか

事前アンケートのまとめ

- 保護者から園・学校に寄せられた質問
  - 放射線・放射性物質の測定
    - 独自で計測をしているか
    - いろいろな場所での空間線量の数値
    - 排水溝の放射線量や数値について
    - 園の芝生の放射能の数値を知りたい
    - 実際に放射能測定機で測らせて欲しい　→　部屋の表面を測定していた
  - 安全性について
    - 学校の畑で育てた作物への放射能の影響
    - 福島への修学旅行に問題がないかどうか
    - 給食の安全性
    - 給食の食材の産地
    - 牛乳・水道水を飲ませないようにして欲しい
    - 田んぼでの作業が安全かどうか

事前アンケートのまとめ

- 保護者から園・学校に寄せられた質問
  - 不安にどうむきあうか
    - 給食で、放射線が心配だからキノコや牛乳を飲食させたくないという親に、どう理解してもらうのか
    - チェルノブイリの事故では牛乳が原因で小児癌が増えたと報告されていると聞いた。牛乳を飲ませることを不安に感じている保護者がいる。放射線教育ではどのように指導すべきか。
    - 給食で線量０を求める保護者。国の定める基準だからという説明では理解が得られない
    - 放射能検査の数値は真実か
    - 地域の数値が心配で沖縄や北海道に避難する家庭があった
  - 放射線の影響について
    - 放射線の身体への影響（どの位浴びればどういうことが起きるのか）
    - 日常生活で気をつけること

事前アンケートのまとめ

- 講義で知りたいことや聞きたいこと
  - 放射線・放射能・放射性物質について
    - 放射能・放射線の単位と人体への影響
    - α、β、γ線をどのように説明すれば理解させられるか
  - 人体への影響について
    - 放射線をどのくらいあびると癌になる確率があがるのか
    - 甲状腺ガンが出ているとのことだが、被害が出ているということではないか
    - 常磐道を南相馬から広野まで通行すると5.6μSvを被曝するが、妊婦や乳幼児でも本当に人体に影響はないのか
    - 食品購入の際に含有放射線量の表示がないので内部被曝が心配。スーパーで販売されているものは大丈夫だと信じてよいか
    - 側溝の泥上げをしたあと、地下１ｍに埋めたがそれでよかったか

事前アンケートのまとめ

- 講義で知りたいことや聞きたいこと
  - 放射線教育について
    - 何の放射線について教えるべきか
    - 小学生に対して放射線教育はどこまで必要か
    - 児童に放射線について知らせるときに留意すべき点は何か
    - 目に見えない放射線の怖さを子供にどう教えるか
    - 放射線の危険性や児童が身近で気をつけること
    - 幼児の興味を引く教材はないか、具体的な指導方法は
    - 保護者に対する放射線教育の指導は必要か
    - 小学生の発達段階に応じた指導内容
    - 小学校での学年の発達段階に応じた放射線教育の具体的な例
    - 学校の教育課程にどのように位置づけるか
    - 「新しい放射線副読本」の増刷、改訂版が何時出るか
    - 放射線教育をこれまで実施していない。初期段階の指導、留意点について

事前アンケートのまとめ

- 講義で知りたいことや聞きたいこと
  - 放射線・放射性物質の規制値の根拠
    - 放射線の安全性について
    - 放射線被曝量の上限の根拠、計算方法
    - 食品への放射性物質の規制値と健康への影響
  - 保護者への対応
    - 修学旅行を福島にすることについて理解してもらえない保護者への説明の仕方
    - 人によって「安全」の基準が違う、敏感な方への対応をどうしたらよいか

事前アンケートのまとめ

- 講義で知りたいことや聞きたいこと
  - 原子力事故の避難訓練について
    - 原子力事故を想定した避難訓練の展開例など
    - 原子力災害発生時の避難訓練を実施する際の留意点
    - 女川原子力発電所で事故が発生した場合、学校施設にいて安全かどうか。安全であればどのような場所が安全なのか
  - 福島第一原発について
    - 福島の原子力発電所はどのようにして廃炉されるか、期間は？　周辺に住民が住めるようになるのかどうか
    - 日々、どれほどの放射性物質（汚染水）が流出し、放射能が飛散しているのか
    - 海へ流れ出た放射能汚染水の環境や人体への影響
    - 福島原発の事故と、広島・長崎の原爆との違いや差があれば知りたい

中学教諭方々から
の解答

事前アンケートのまとめ

- 園児・児童・生徒に聞かれて答えるのが難しかったこと
  - 放射線・放射性物質の防護について
    - 外壁や排水溝などを除染作業後の汚染水は，地下に浸み込んだ後，再度地上に影響を与えることはあるのか
    - 目張りをすることで完全に放射線を遮断することができるのか

事前アンケートのまとめ

- 保護者から園・学校に寄せられた質問
  - 放射線・放射性物質・放射能について
    - 教諭間で偏りのない科学的な知識を身につけて欲しい
    - レントゲンなどの有益なことについても生徒に教えて欲しい
  - 安全性について
    - 牛乳の放射線物質汚染の心配が電話でよせられたことがある
    - 検査の結果、生徒に甲状腺異常の疑いがもたれたときに、どのような配慮をすればよいか
  - 原子力発電について
    - チェルノブイリの事故で起きた影響について状況を知りたい
    - 他の国での放射性廃棄物の保管方法はどうなっているか
    - 原発事故が起きたときの放射性物質の飛散はどうなるのか
    - 汚染について報道がないが口止めされているのか

事前アンケートのまとめ

- 講義で知りたいことや聞きたいこと
  - 放射線・放射能・放射性物質について
    - 放射線量の数値とか(原発推進派　原発慎重派では，とらえ方が全然違う)どうとらえて良いのか分からない
    - 除染した土砂がブルーシートの覆いを被されただけで大丈夫なのか？
  - 放射線の人体への影響
    - 被ばくしたときの段階的な(被ばくの程度による)人体・環境の被害の程度は
    - 国際的な放射線量の許容範囲は
    - ヨウ素液はどのような効果があるのか
    - どの情報を信用したらよいのか

事前アンケートのまとめ

- 講義で知りたいことや聞きたいこと
  - 原子力災害について
    - 避難するとき気をつけること
    - 一次避難所、二次避難所はどんな場所が良いのか
    - 女川原発の30km内にあるが安全を確保されているかどうかをどう答えるか
    - 福島第一原子力発電所の事故の現状はどうなっているのか
    - 原発事故に係わる放射線量情報は，果たして国民に正しく伝わっているのか？
    - 原発が安全ならなぜ都市部につくらないのか
  - 放射線教育の実践について
    - 平成２６年度原子力防災訓練の際，原子力規制委員会のホームページ「原子力災害発生時の住民としての対応」を活用し，講義を行った。原子力災害発生時にどのような対応をすればよいかについてはある程度理解することができた。今年度も原子力防災訓練実施を計画しているが，放射線教育の実践事例を紹介していただきたい。

高校教諭方々から
の解答

事前アンケートのまとめ

- 講義で知りたいことや聞きたいこと
  - 原子力災害について
    - 女川原発で福島第一原発のような事故があった場合どのようにすれば被害が最小限に抑えられるか
  - 保護者の理解を求める方法
    - 2013の夏、部活動の練習試合を福島市で実施するにあたり、保護者からの反対の為、取りやめになったことがあった。放射線量に関する様々な情報を総合して、実施に特に問題はないと考えていたが、保護者の納得を得ることができなかった。出かける度に線量計を持参して、数値を示す他に保護者の理解を得る方法はないか。

事前アンケートのまとめ

- 講義で知りたいことや聞きたいこと
  - 放射線量の情報について
    - 福島第1原発とその周辺で線量が高いと言われる地域のこまめな情報提供と安全確認ができないものか、たとえば福島県と宮城県南部地域の毎日の土壌・森林・動植物の線量の測定記録が必要である。
  - 安心について
    - 被災地の生徒・保護者が安心して生活し、学習や部活動に取り組めるよう に、日常必要なことをご教示願いたい。

放射線・放射性物質・放射能とは？

呪いや穢れのように
訳がわからず怖い物ではなく
それが何か分かっているものです

放射線が生じる反応

人間の生活スケールと比べると

非常に小さな世界

通常の常識（感覚）が通じない

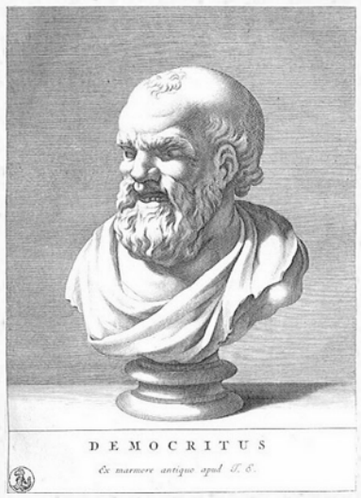
物質の最小単位は？哲学者の考え

ギリシャ哲学

レウキッポス



デモクリトス



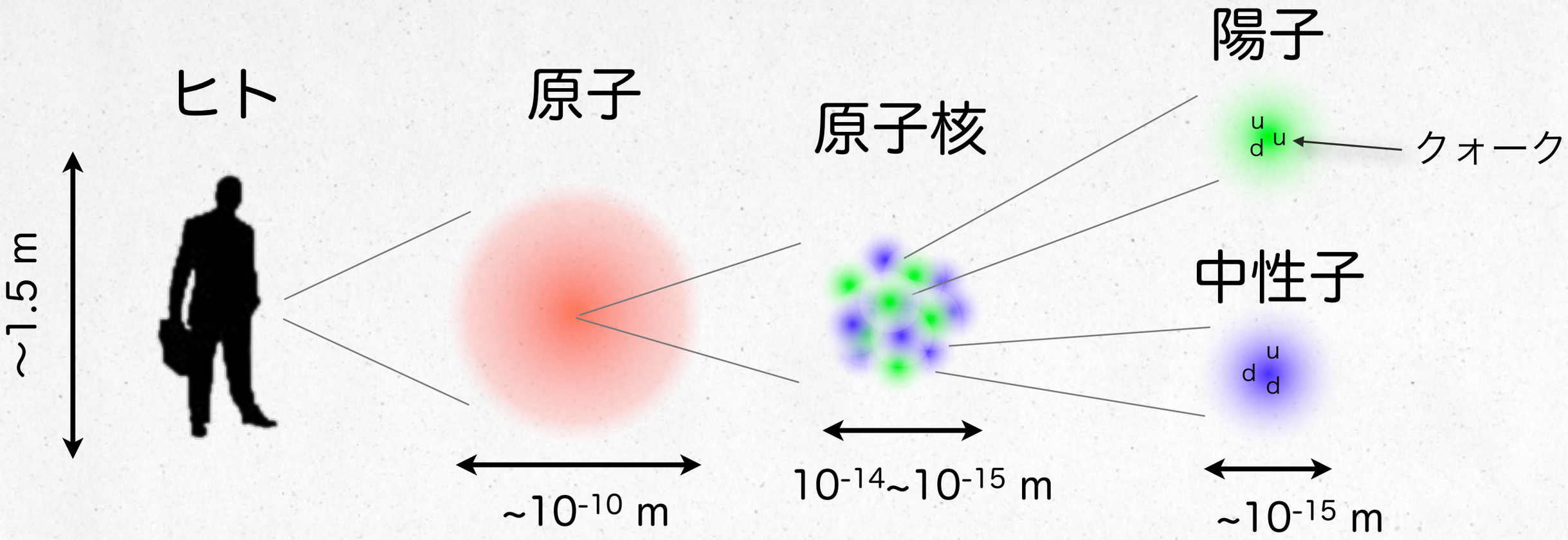
これ以上
“分解できないもの”
ἄτομος (atomos)
がある

近代哲学

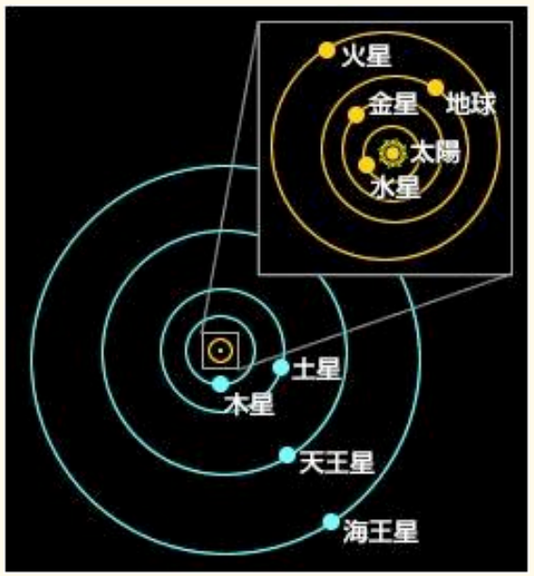
デカルト



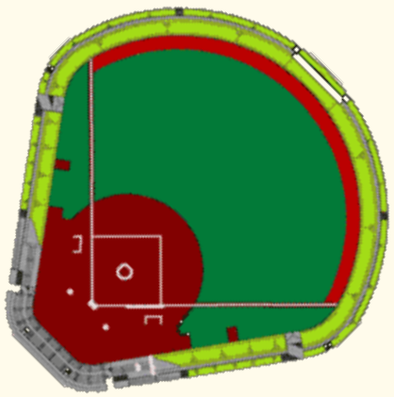
どんなに細かくしても
さらに分割出来る



同じくらいの比率のもの



太陽から土星までの距離
1,400,000,000 [km]



野球場の外野まで距離
約 100 m



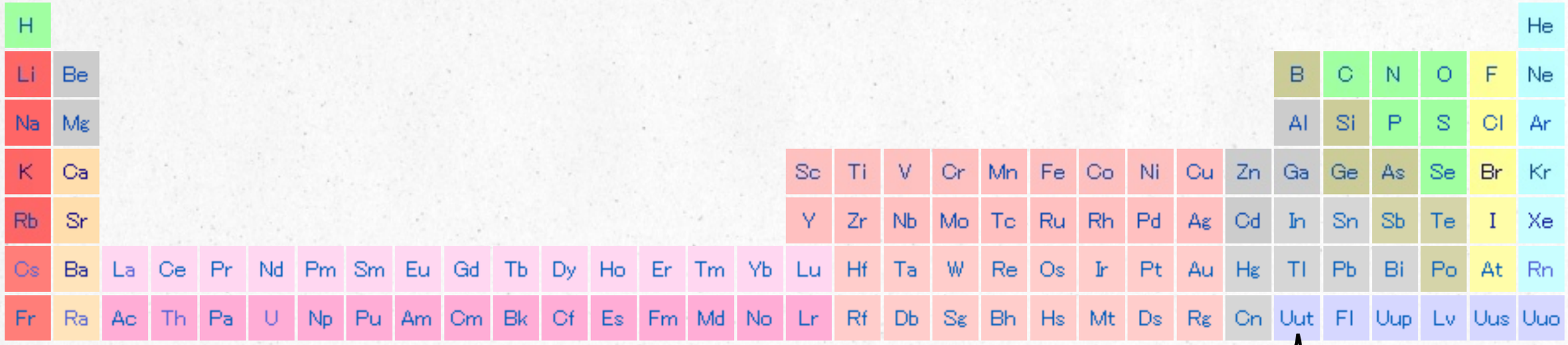
ビー玉
約 1 cm



ボールペンのボール
約 1 mm

元素（原子）の種類

周期表：物理的・化学的に似た元素を並べたもの



- 元素の性質
  - 原子中の電子配置が決定
  - 電子の個数＝原子核中の陽子の個数

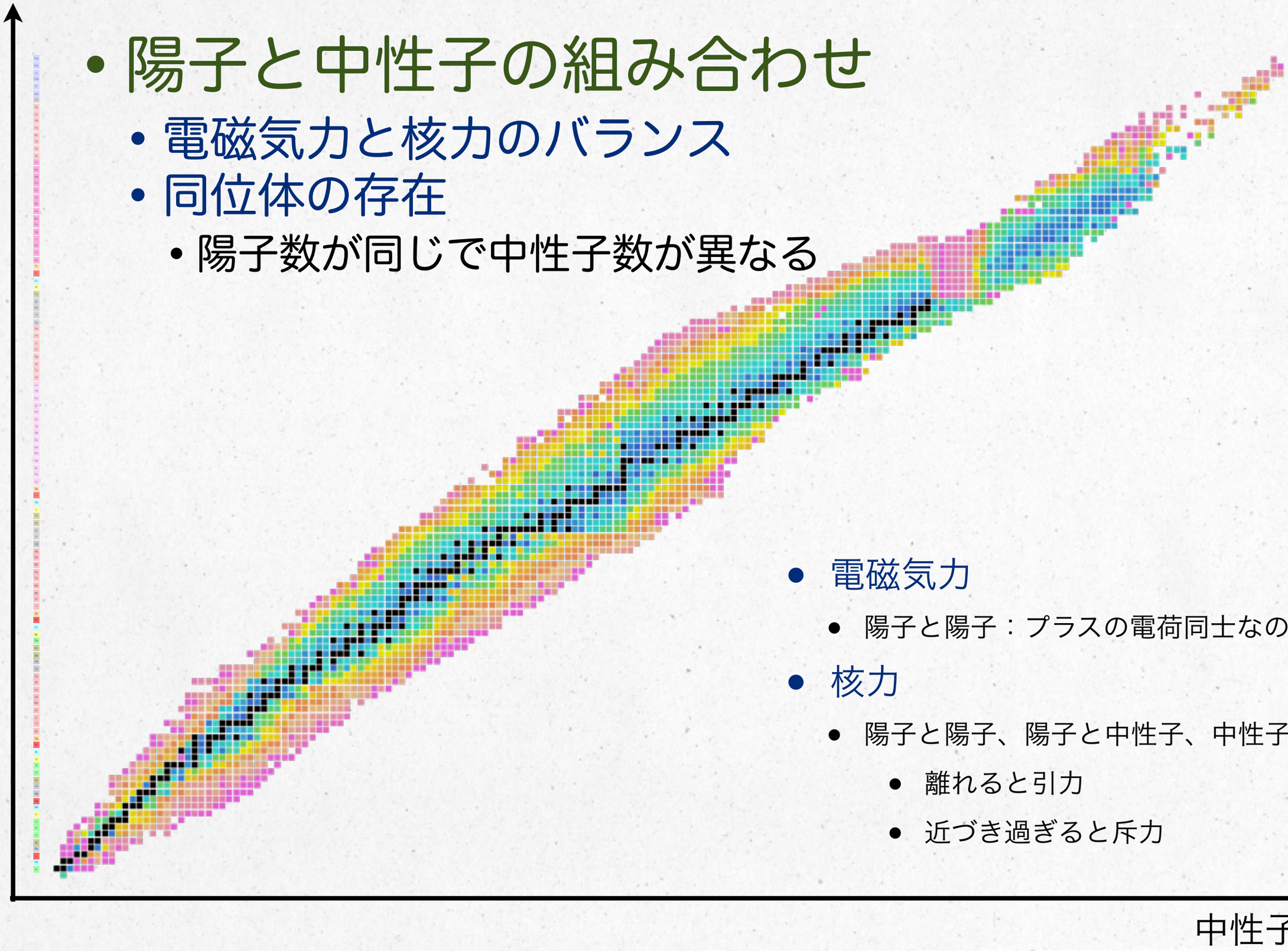
１１３番元素

2004年9月28日
理化学研究所の線形加速器を用い
亜鉛とビスマスを衝突させて合成に成功と発表
2012年9月28日
三個目の113番元素の合成を確認。

命名はまだ。
候補：ジャポニウム、ニッポニウム

原子核の種類

- 陽子と中性子の組み合わせ
  - 電磁気力と核力のバランス
  - 同位体の存在
    - 陽子数が同じで中性子数が異なる



- 電磁気力
  - 陽子と陽子：プラスの電荷同士なので斥力
- 核力
  - 陽子と陽子、陽子と中性子、中性子と中性子
    - 離れると引力
    - 近づき過ぎると斥力

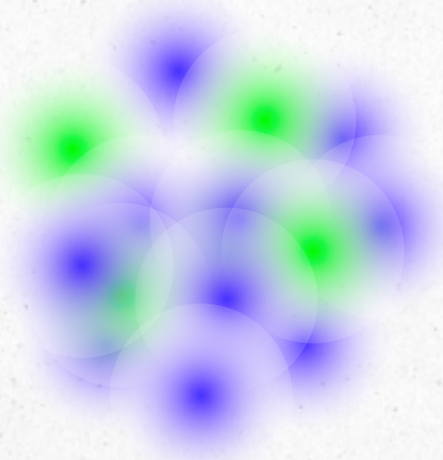
原子核

- 陽子と中性子からなる
  - この二つをまとめて核子と呼ぶ
- 元素の種類を決めるもの
  - 電子の数 = 原子核中の陽子の数
  - 物質の性質は、電子軌道がどのような状態かで決まる
- 同位体
  - 同じ元素で、中性子の数が異なるもの
  - 陽子と中性子の数の組み合わせで、安定・不安定なものがある

原子核

- 陽子と中性子からなる
  - この二つをまとめて核子と呼ぶ

原子核のイメージ



ギリシャ語由来の接尾語-onに対応するのが「子」

proton: 陽子

neutron: 中性子

nucleon: 核子

原子核

- 元素の種類と性質
  - 電子の数 = 原子核中の陽子の数、で決まる
- 同位体
  - 陽子の数が同じで中性子の数が異なる

質量数

陽子と中性の個数の合計

同位体には安定なものと
不安定なものがある

不安定なものは放射線を出して
安定なものに変わる

セシウムの同位体

質量数が112から151まであることが知られている
安定なのはセシウム1333

^{133}Cs

^{134}Cs

^{137}Cs

名前(元素記号)が同じ

原子番号が同じ

= 原子核中の陽子の個数が同じ

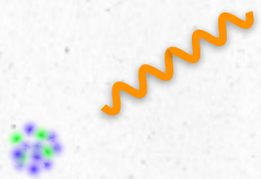
化学的性質が同じ

セシウムは原子番号55

放射線と放射能

放射性物質

＝ 放射線を出す能力(放射能)
　を持った物質



放射線

＝ 放射性物質から放射されるもの

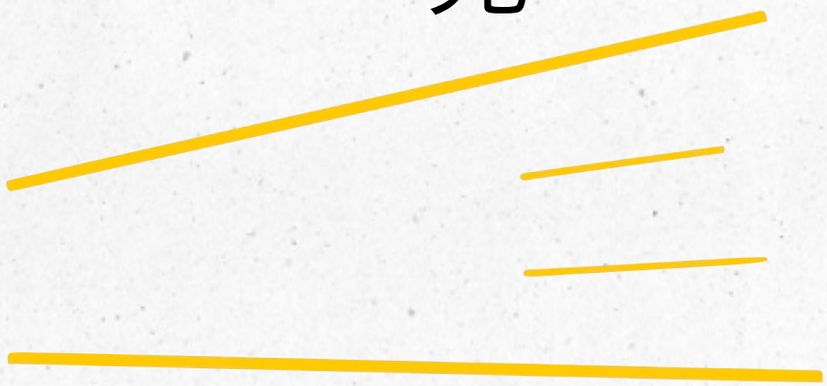
例えると

懐中電灯

＝ 光（光線）を出す
　能力を持ったもの

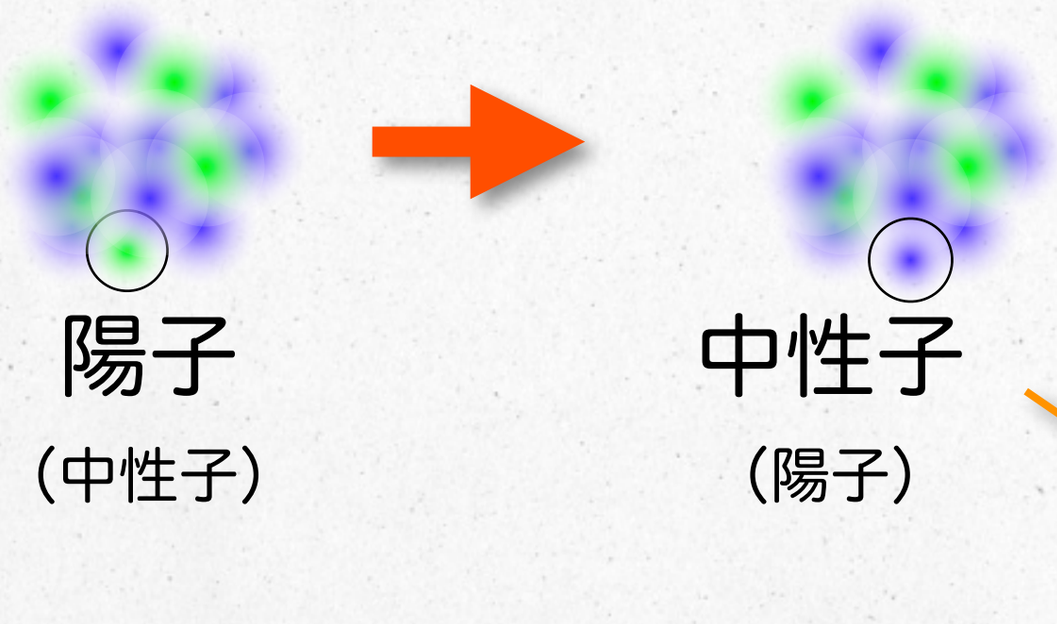


光 ＝ 懐中電灯から放射されるもの

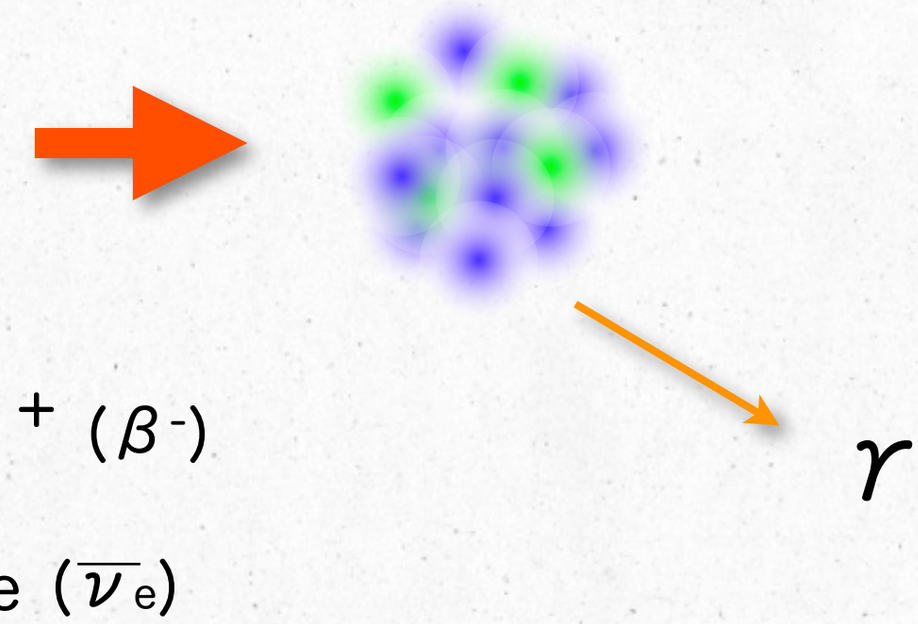


原子核の崩壊(壊変)

β(ベータ)崩壊



γ(ガンマ)崩壊



一つ一つの原子核がいつ崩壊するか：わからない （しかし、平均時間はわかる）

ガンマ線のエネルギーは原子核ごとに異なる

核分裂

重たい原子核が、二つ（まれに三つ以上）の原子核に分裂

自然に起きる

中性子、陽子、ガンマ線、ベータ線の吸収によって起きる

原子炉のウラン燃料

^{235}Uが3-5% その他は核分裂をしないウラン

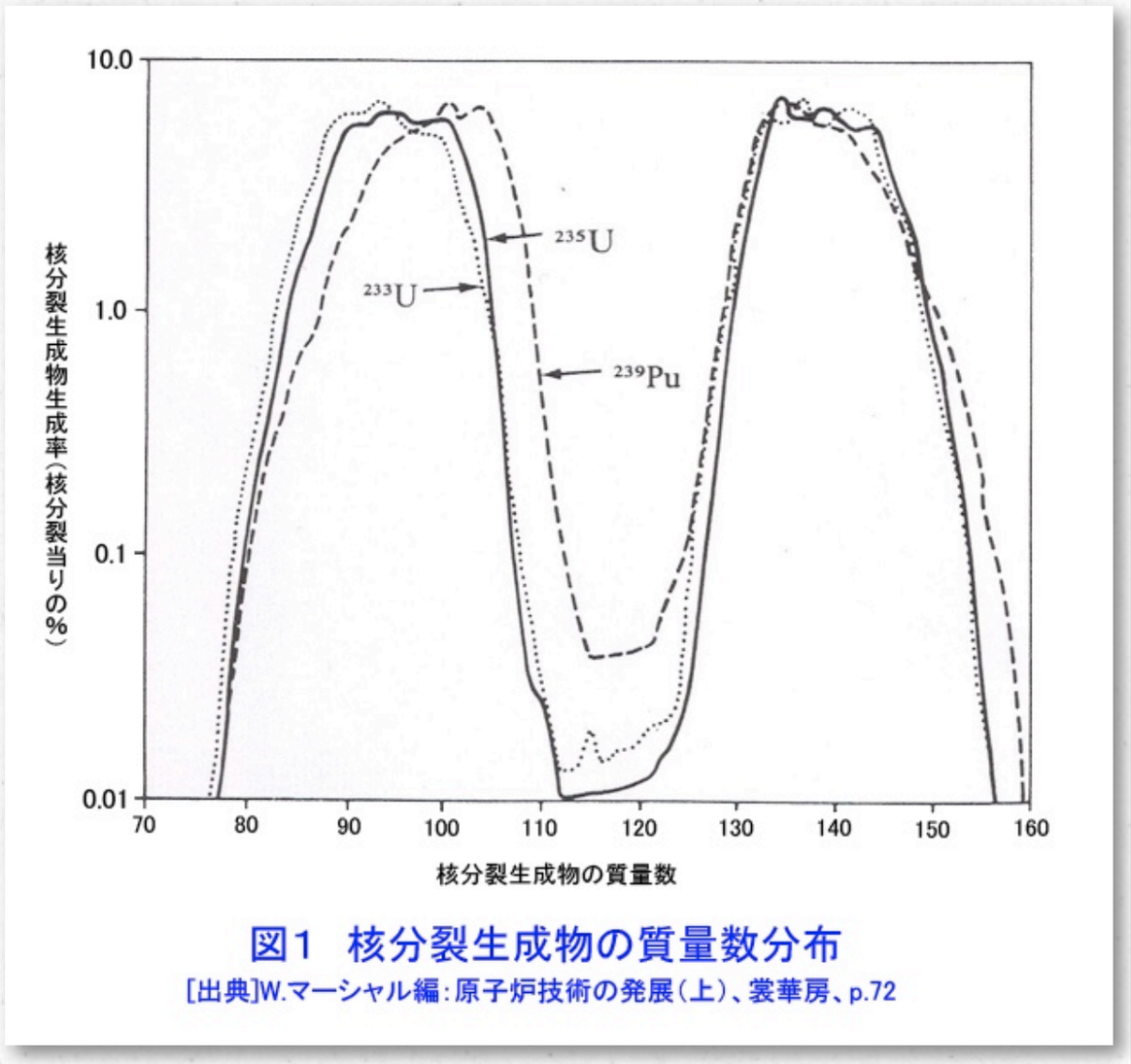
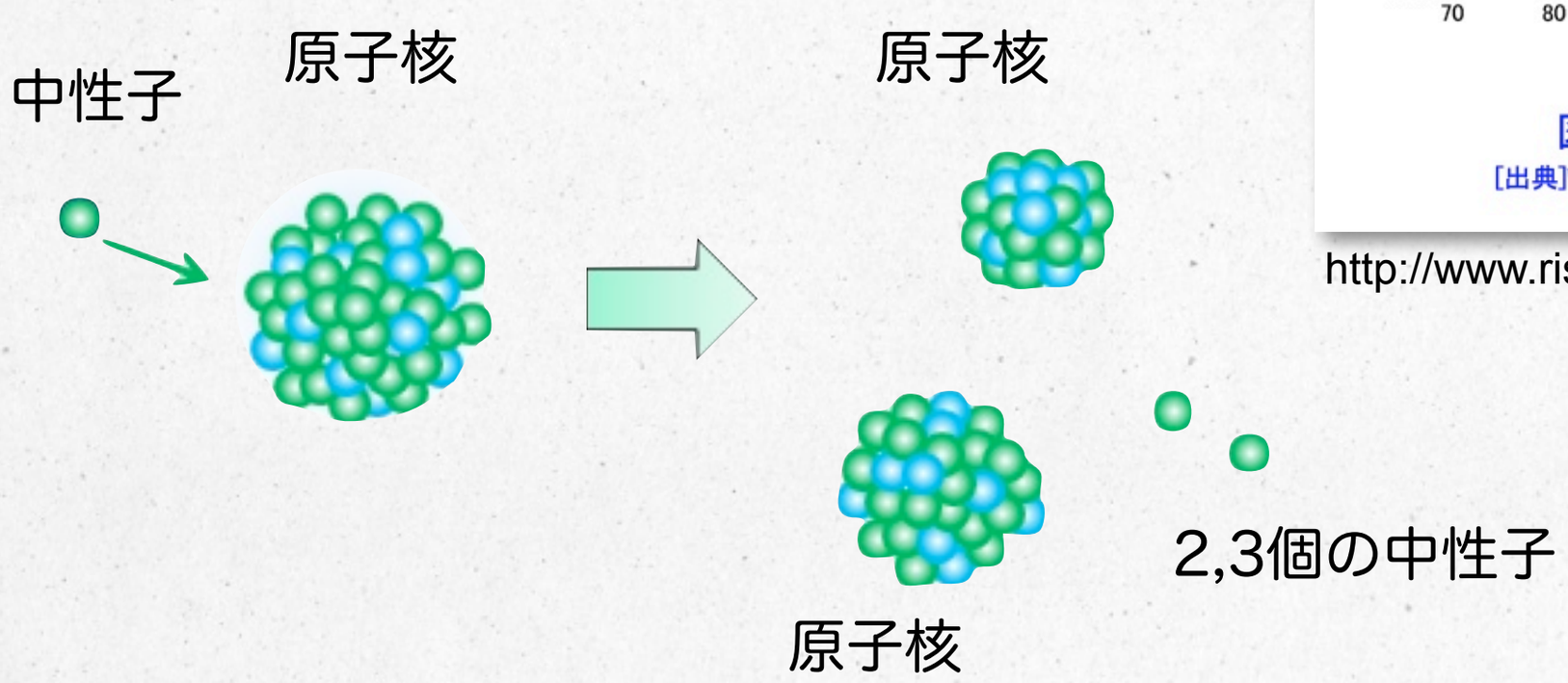


図1　核分裂生成物の質量数分布

[出典]W.マーシャル編：原子炉技術の発展（上）、裳華房、p.72

http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/03/03060304/03.gif



放射線の種類

原子の中から発生する物

電子軌道から

X線　　＝ 光子

原子核から

α(アルファ)線　　＝ ヘリウム４の原子核

β(ベータ)線 ＝ 電子・陽電子

γ(ガンマ)線 ＝ 光子

中性子

宇宙から降り注ぐもの

宇宙線

μ(ミュー)粒子　＝　素粒子の一種、電子の仲間

人工放射線

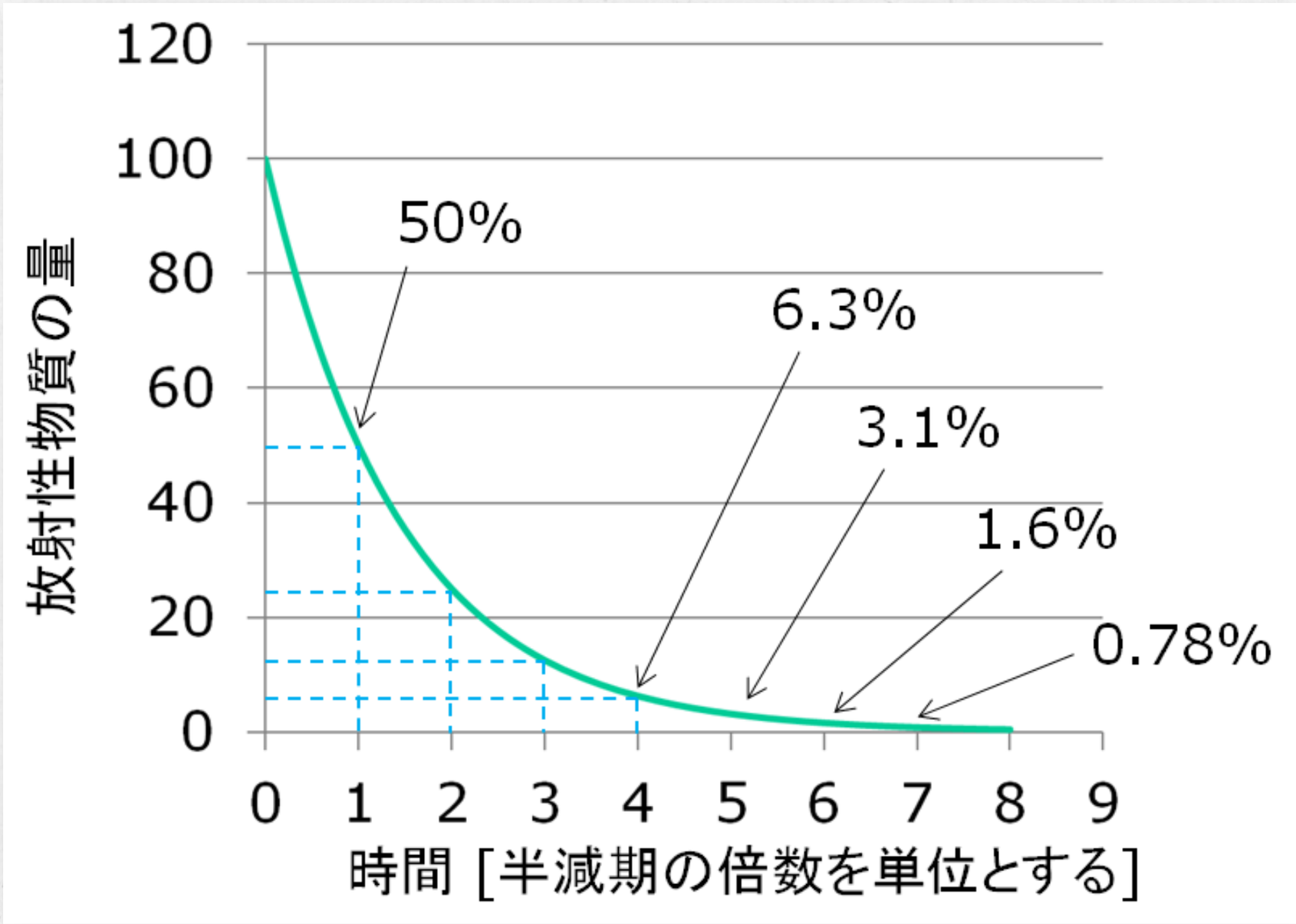
加速器を使用

電子、陽子、イオン自身を加速し取り出す

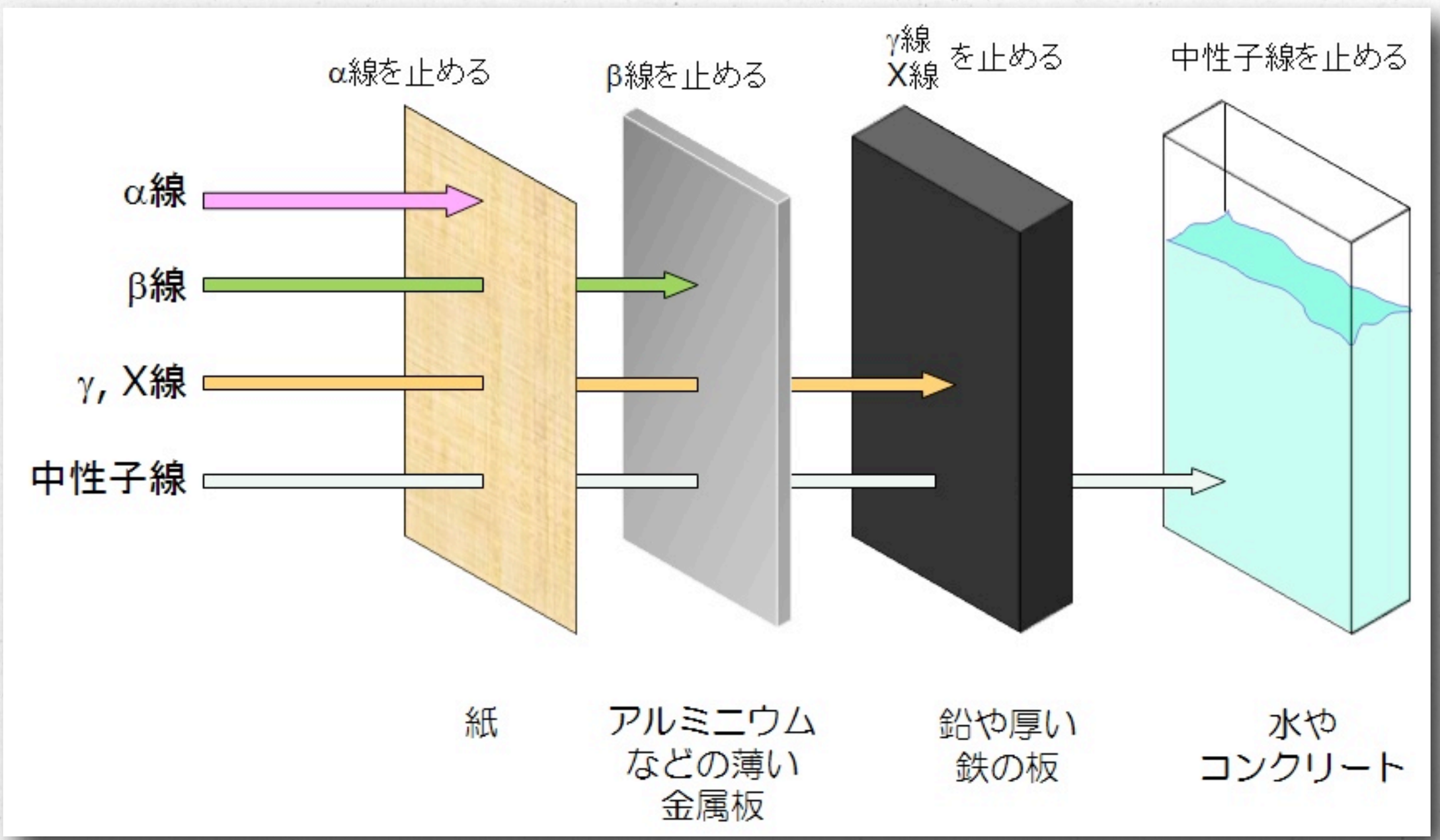
シンクロトロン放射・制動放射を利用し電磁波（紫外光、X線、γ線）を生成

半減期

半減期分の時間が経過すると、
放射性物質の量が半分になる



放射線の遮蔽


α線を止める
β線を止める
γ線
X線
を止める
中性子線を止める
α線
β線
γ, X線
中性子線
紙
アルミニウム
などの薄い
金属板
鉛や厚い
鉄の板
水や
コンクリート

放射性物質の性質

化学反応では原子核は変わらない

錬金術が成り立たない理由

化学反応は、原子核の周りを回っている電子の状態が決める

電子がどこにいるか、何個いるか

当然、生物の力でも原子核は変わらない

「生物の力で放射性物質を別の物に変える」←あり得ない！！！

特定の元素を集める生物は存在する

期待ほどの効果無し：ヒマワリ、菜種による土壌中セシウム吸収（農水省の実験）

セシウムはイオンの状態で粘土に吸着して離れにくい

濃縮した放射性物質はどこに持って行く？

放射性物質の性質

放射線を出すプロセス

極小の世界の現象： 100兆分の１ m （原子核の大きさ）

量子力学の世界（＝物事が確率現象として起きる）

反応のエネルギー

keV ～ MeV (千～百万 電子ボルト)のオーダー

比較：化学反応(=分子・原子間での電子のやりとり）は、約数eV

$1\ [\mathrm{eV}] = 1.6\times10^{-19}\ [\mathrm{J}]$

化学反応は、モル数（6.02×10^{23}個）の

数のオーダーであることに注意

被曝とは

- 放射線に 曝される こと
  - 外部被曝
    - 放射線源（放射性物質）が生体の外部にある
    - 被曝量を減らすには
      - 線源に近づかない
      - 線源と生体の間に放射線をさえぎるもの（遮蔽体）をおく
      - 被曝している時間を減らす
  - 内部被曝
    - 放射線源が生体の内部にある
      - 体内に入ったものは、代謝により体外に排出される
      - 元素の種類によりたまりやすい場所がことなる
      - 継続して放射性物質をとり続けた場合
        - 体内の放射性物質量はある量で平衡状態に

質問

外部被曝と内部被曝
どちらが危険でしょうか？

単位

Bq (ベクレル)

一秒間に一個の原子核が崩壊すること

放射能の単位

Sv (シーベルト)

放射線による生体への影響の強さを示す

外部被曝も内部被曝も同じシーベルト数なら同じ影響

生体 1 kg あたりに吸収された放射線量（放射線が生体内で反応して落としたエネルギー）から見積もっている

Svで表されるもの

- 空間線量率
  - 標準的な単位は、μSv/h (マイクロ・シーベルト毎時)
- 実効線量
  - 被曝によって体全体が通算としてどれだけのダメージを受けた（可能性がある）かを表す
  - 外部被曝からの実効線量
    - 場所毎の空間線量率とどこにどのくらいいたか
  - 内部被曝からの実効線量
    - 有る量を生体に取り入れたときに、排出されるまでどのくらい被曝するか（預託線量）
    - 放射性物質の種類毎に Bq と Sv の換算計数が見積もられている

放射線量の測定単位

- 吸収線量
  - 1 Gy (グレイ)：1 kg の物質に 1 J のエネルギーを与える
- 等価線量
  - 同じ吸収線量でも放射線の種類によって生物学的影響が異なる
  - 1 Sv = 放射線荷重計数 × 1 Gy
    - 放射線加重計数
      - γ, X線, β線：1
      - 中性子：5～20 （エネルギーによって異なる）
      - α線：20
- 等価線量に臓器毎の影響の違いを考慮し、体全体の平均を取ったものが実効線量

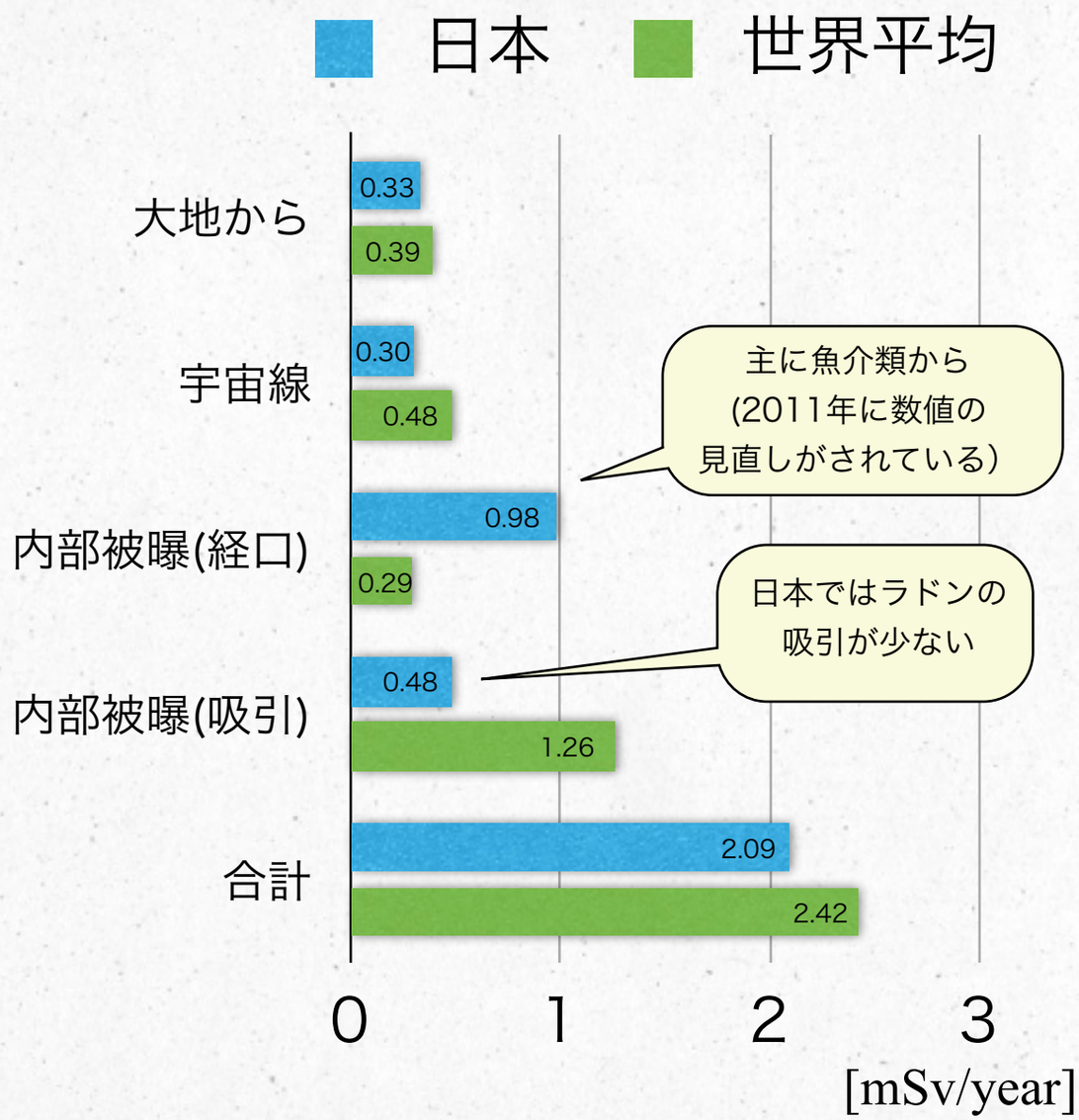
唇問

放射性物質の無い世界は作れますか？

はい・いいえ

自然放射線

- 外部被曝
  - 大地から
    - 花崗岩(御影石)など
  - 宇宙線
- 内部被曝
  - 経口摂取
    - 主に 鉛210, ポロニウム210, カリウム40
  - 吸引摂取
    - 主に ラドン、トロン
    - 喫煙 (鉛210, ポロニウム210 など)



日本の数値：原子力安全研究協会「新版生活環境放射線（国民線量の算定）」（2011年）の表1.4.1から
世界平均の数値：UNSCEAR2000年報告書の集団実効線量から算出した年間実効線量

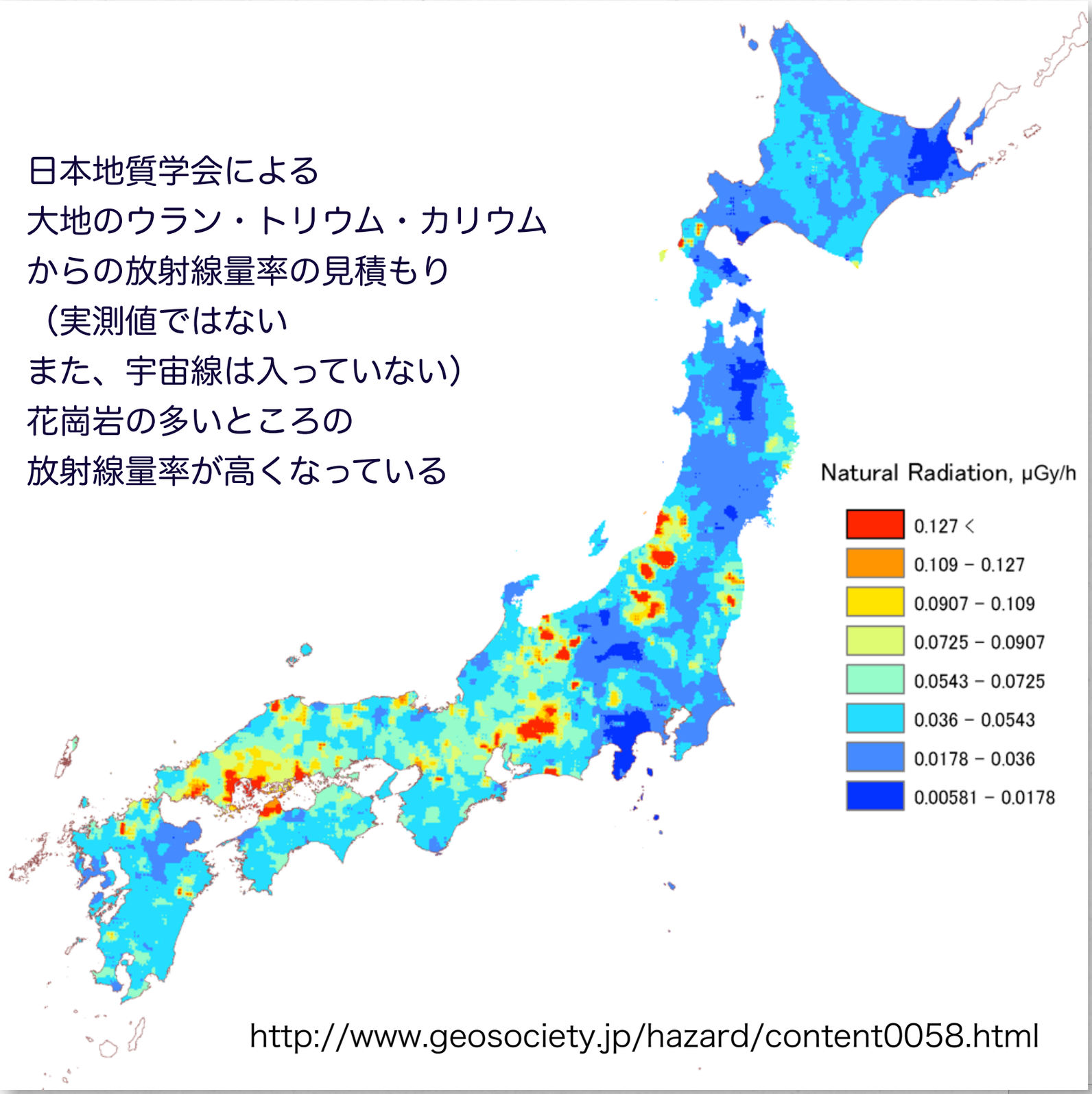
日本地域別の自然放射線

西日本が高め

⇓

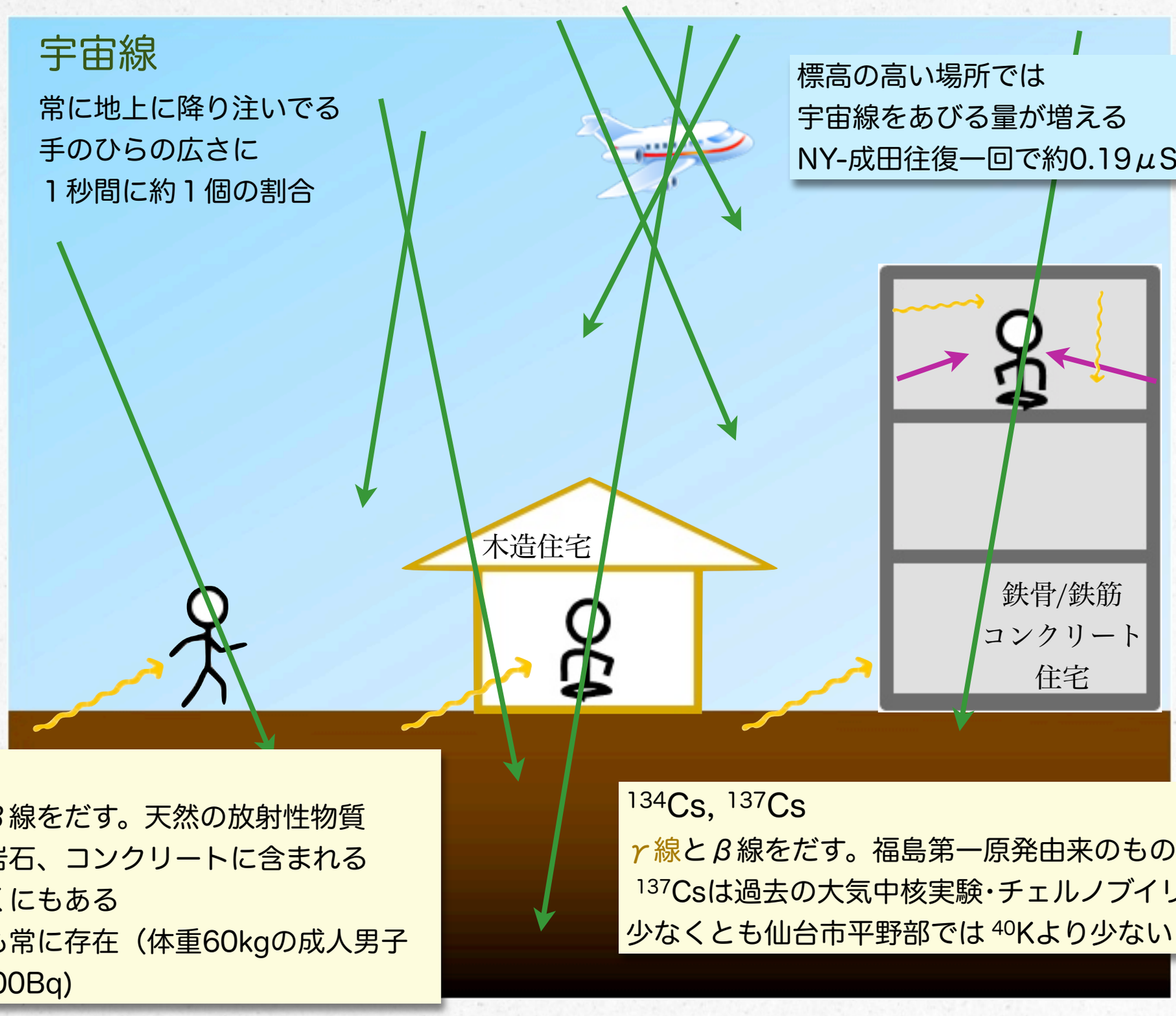
岩石の組成による

日本地質学会による
大地のウラン・トリウム・カリウム
からの放射線量率の見積もり
（実測値ではない
また、宇宙線は入っていない）
花崗岩の多いところの
放射線量率が高くなっている



http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html

私たちがあびている放射線



宇宙線

常に地上に降り注いでる
手のひらの広さに
１秒間に約１個の割合

標高の高い場所では
宇宙線をあびる量が増える
NY-成田往復一回で約0.19μSvの被曝

ラドン
おもに花崗岩に含まれ、コンクリートにも含まれている
α線をだす
気密性が高い住宅ではラドンがたまり、ラドンを吸うことで肺ガンのリスクが高まる

^{40}K
γ線とβ線をだす。天然の放射性物質
土壌、岩石、コンクリートに含まれる
地下深くにもある
体内にも常に存在（体重60kgの成人男子で約4000Bq)

^{134}Cs, ^{137}Cs
γ線とβ線をだす。福島第一原発由来のものは、地表数cmに局在
^{137}Csは過去の大気中核実験・チェルノブイリ原発事故由来もまだ残っている
少なくとも仙台市平野部では ^{40}Kより少ない

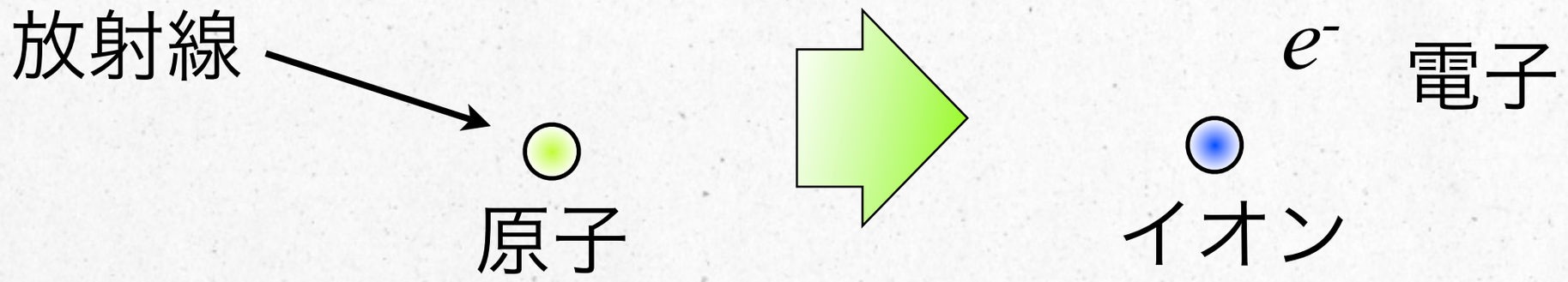
β線は空気中では数10cmから数mで止まるので遠くからは飛んでこない

放射線による

生体への影響

放射線と物質の反応

- 電離化 (Ionization, イオン化)
  - 原子中の電子が放射線ではがされ、イオンになる
  - イオン化させるのに十分なエネルギーを持っている放射線
    - ＝ 電離性放射線
  - イオン化エネルギーは放射線の持つエネルギーより小さい
    - 放射線がエネルギーを失うまで複数の原子・分子をイオン化



壊れる分子構造

ラジカル(オゾンや過酸化酸素)の発生 → DNAやリボゾームの損傷

ただし、生体には修復機能やアポトーシス（プログラムされた細胞死）の機能がある。

放射線の生体への影響

確定的影響

ある放射線量を超えると現れると考えられている

がん・遺伝的影響以外

皮膚障害、白内障、組織障害、個体死等

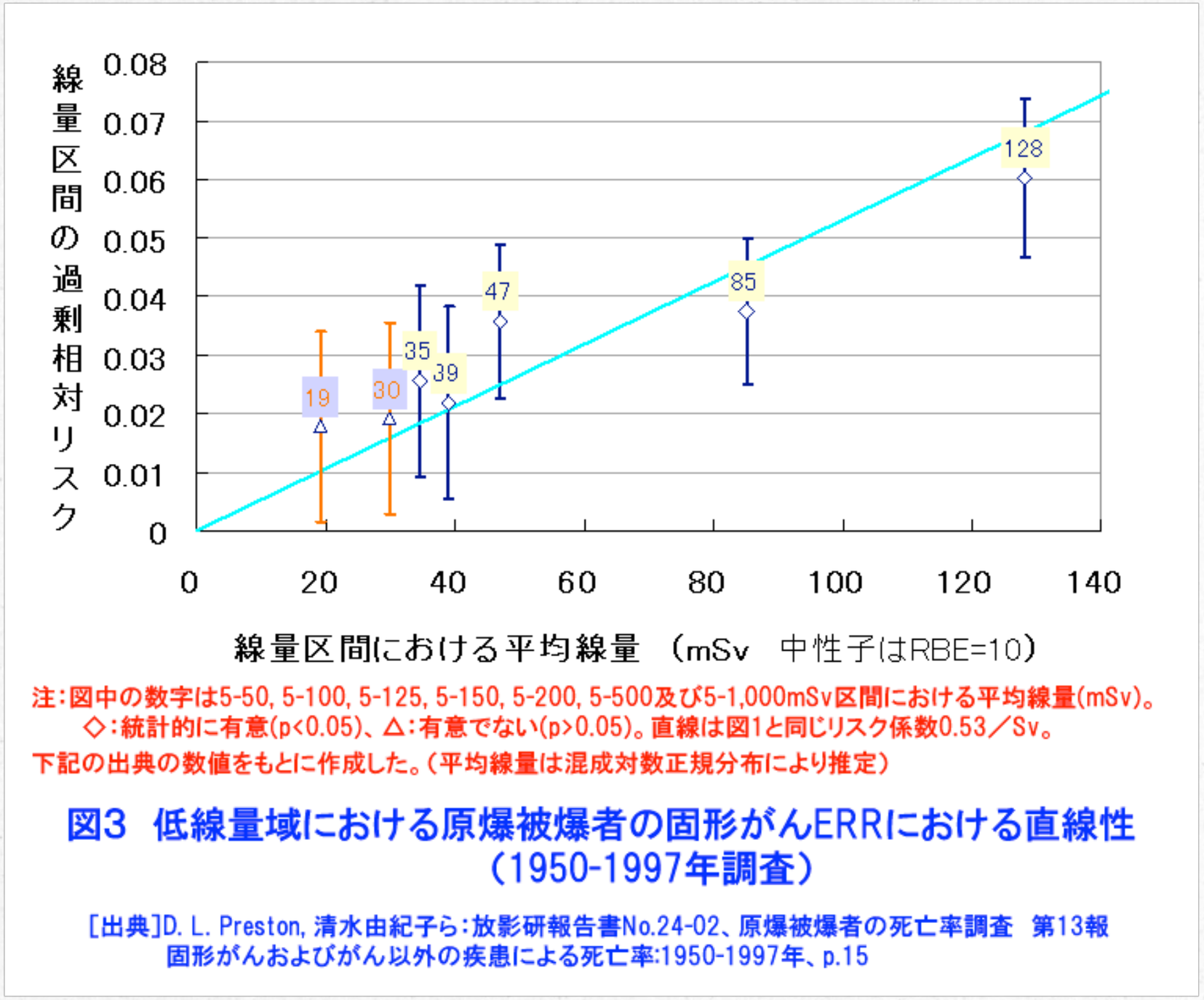
確率的影響

DNAが少しずつ傷つくことで、後から出てくる

と考えられている影響

確率的影響

原爆被害者への調査
その他の被曝のデータも
取り入れている



注：図中の数字は5-50, 5-100, 5-125, 5-150, 5-200, 5-500及び5-1,000mSv区間における平均線量(mSv)。
◇：統計的に有意(p<0.05)、△：有意でない(p>0.05)。直線は図1と同じリスク係数0.53／Sv。
下記の出典の数値をもとに作成した。（平均線量は混成対数正規分布により推定）

図3 低線量域における原爆被爆者の固形がんERRにおける直線性（1950-1997年調査）

[出典]D. L. Preston, 清水由紀子ら：放影研報告書No.24-02、原爆被爆者の死亡率調査 第13報 固形がんおよびがん以外の疾患による死亡率:1950-1997年、p.15

図の出展：**「放射線のリスク評価」**
http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-02-03-06

ERR: Excess Relative Risk, 過剰相対リスク
0.05は1.05倍になることを意味する

放射線のリスク評価

ICRP(国際放射線防護委員会)の考え方

放射性への生体への確率的影響

線量の増加に応じて増えている

しかし、1 Sv 以下では、その形が正確にどうなっているかは統計誤差も大きく不明

← 他のリスクが大きくて疫学調査でははっきり因果関係が証明できない

リスクの増加は、放射線量に比例すると“仮定”

閾値なし・線形モデル（Linear, Non Threshold (LNT) model)

LNTモデルによる評価（ICRP1990勧告）

致死性の発癌率の増加を、1000 mSv あたり 5% 上乗せされる、と評価

自然・医療被曝以外の「追加」被爆は年 1 mSv が望ましいと勧告

低線量被曝のリスクが「わからない」とはこのこと

このリスクは他のリスクに比べて大きいか

タバコによるがんのリスク：　男性(女性)の非喫煙者の2(1.6)倍

出展： 国立がん研究センター　http://ganjoho.jp/public/pre_scr/cause/smoking.html

内部被曝の評価

核種ごとに評価

元素によって体内に蓄積される場所が違う

ヨウ素：甲状腺

セシウム：全身（主に筋肉）、カリウムと同じ場所に蓄積される

ストロンチウム：骨

代謝によって体外に排出される影響も考慮

摂取後50年後（乳児・幼児は７０歳まで）までの全被曝量を評価

＝預託線量

福島第一原発から放出された放射性物質

ヨウ素：半減期８日なので現在は土壌中には殆どない

セシウム：^{134}Cs (半減期約２年）と^{137}Cs(半減期約30年)

2011年４月時点での土壌中のベクレル比は、おおよそ 1:1

ストロンチウム：地表には殆ど降っていない （セシウムの1/2000～1/4000)

文部科学省の調査 2011/9/30, http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5048/24/5600_0930_n.pdf

飲食物の規制値について

- 放射性ヨウ素について
  - ICRP pub.63 の勧告 甲状腺の等価線量 50mSv/年を基礎とする
  - 飲料水、牛乳・乳製品、野菜（根菜芋類を除く）の３つについて
    - 穀類、肉類などは貯蔵期間が長くもてるので、人体への移行の程度が小さいと考える
  - この三つに50 mSvの 2/3 を適用し、それぞれ1/3ずつ割り当て
    - それぞれに 2/3 の 1/3 つまり、50 mSv の2/9 ずつ
- 放射性セシウムについて
  - セシウムがあるとその10%の放射性Srが同時にあると仮定
  - 実効線量 5 mSv/年 を5つの食品に均等に1/5ずつ割り当てる
  - 日本における食物の摂取量を考慮して算出

原子力安全委員会：「原子力施設等の防災対策について」
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/sonota/houkoku/bousai220823.pdf

甲状腺等価線量は、体全体の実効線量に直すと
1/25に相当とすると考えられている

リスクの考え方

その前に

質問

微量の放射性物質を含む食品をとることについて

１．絶対いやだ
２．規制値以下なら気にしない
３．一回位なら規制値の倍でも気にしない

どの意見に一番近いですか？

個人の価値観は
自然科学では答えられない

しかし

判断の基準となる
数値を示すことは出来る

数値を知る

エビデンスに基づいた議論を

知彼知己　百戦不殆
不知彼而知己　一勝一負
不知彼不知己　毎戦必殆

孫子より

原発事故で

放出された放射性物質

仙台市青葉区での測定

測定地点: 仙台市青葉区
測定器具: γサーベイメーター ALOKA TCS171
（NaI カウンター）
測定者: 田村裕和
（東北大学理学研究科物理学専攻）
各測定点には±10%程度の誤差があります。また、これは簡易測定であり、測定方法による誤差もあります。
図の作成: 金田雅司
（東北大学理学研究科物理学専攻）
放射線量のデータ: http://bit.ly/i3j1B7
降水量: 日本気象協会, http://tenki.jp
天気: 測定者の観測

放射線量
- ●屋外
- ■雨の当たらない軒下
- ▲屋外の土に接触させて測定
- ●室内(鉄筋コンクリート)

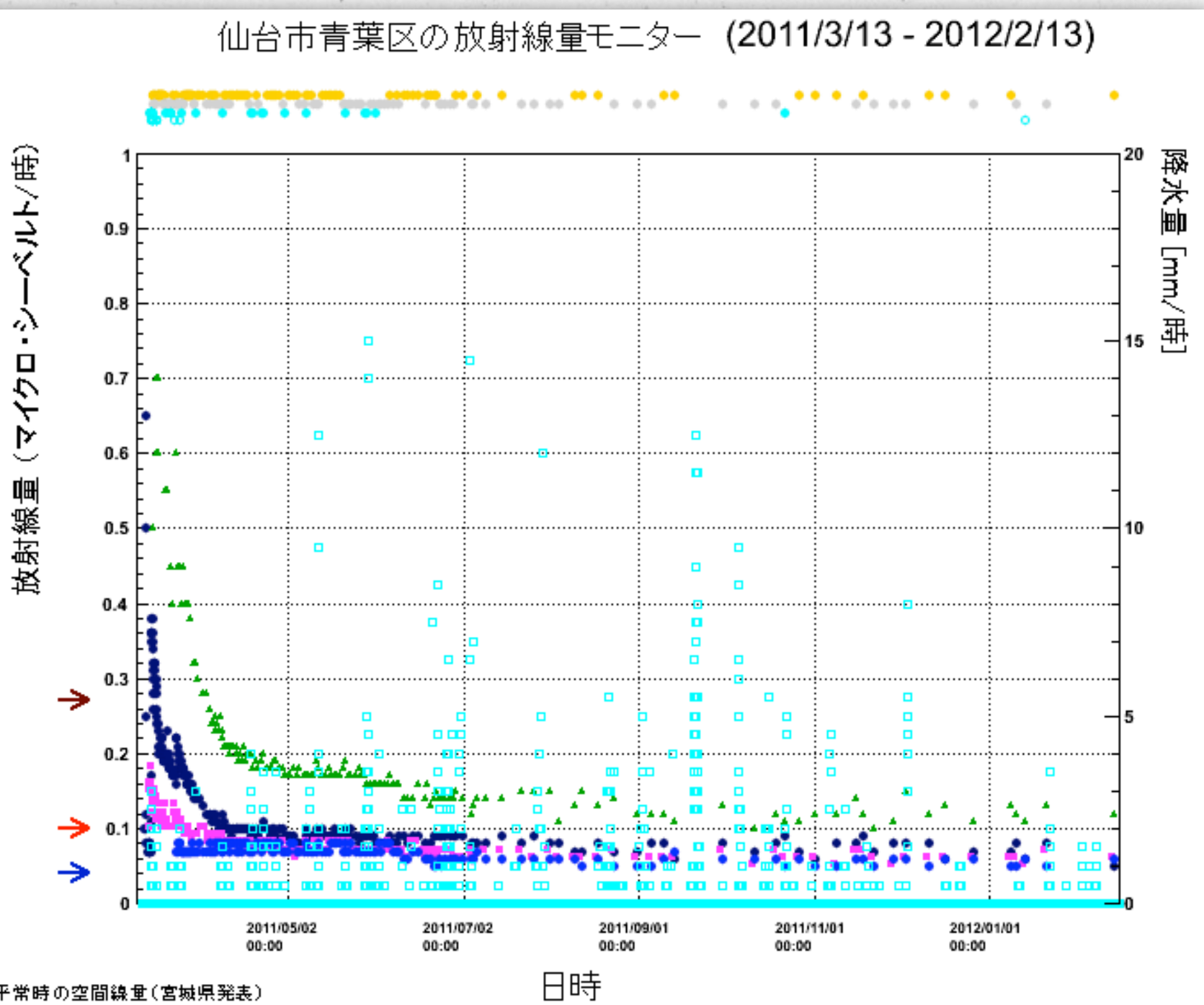
天気
- ●晴れ
- ●曇り
- ●雨
- ○雪

- □降水量

国連科学委員会(UNSCEAR)の2000年版の報告書による
内部被曝と外部被曝の和の世界平均は
年間 2.4 mSv (ミリ・シーベルト)
= 年間 2400 μSv (マイクロ・シーベルト)
= **1時間あたり 0.27μSv (マイクロ・シーベルト)**

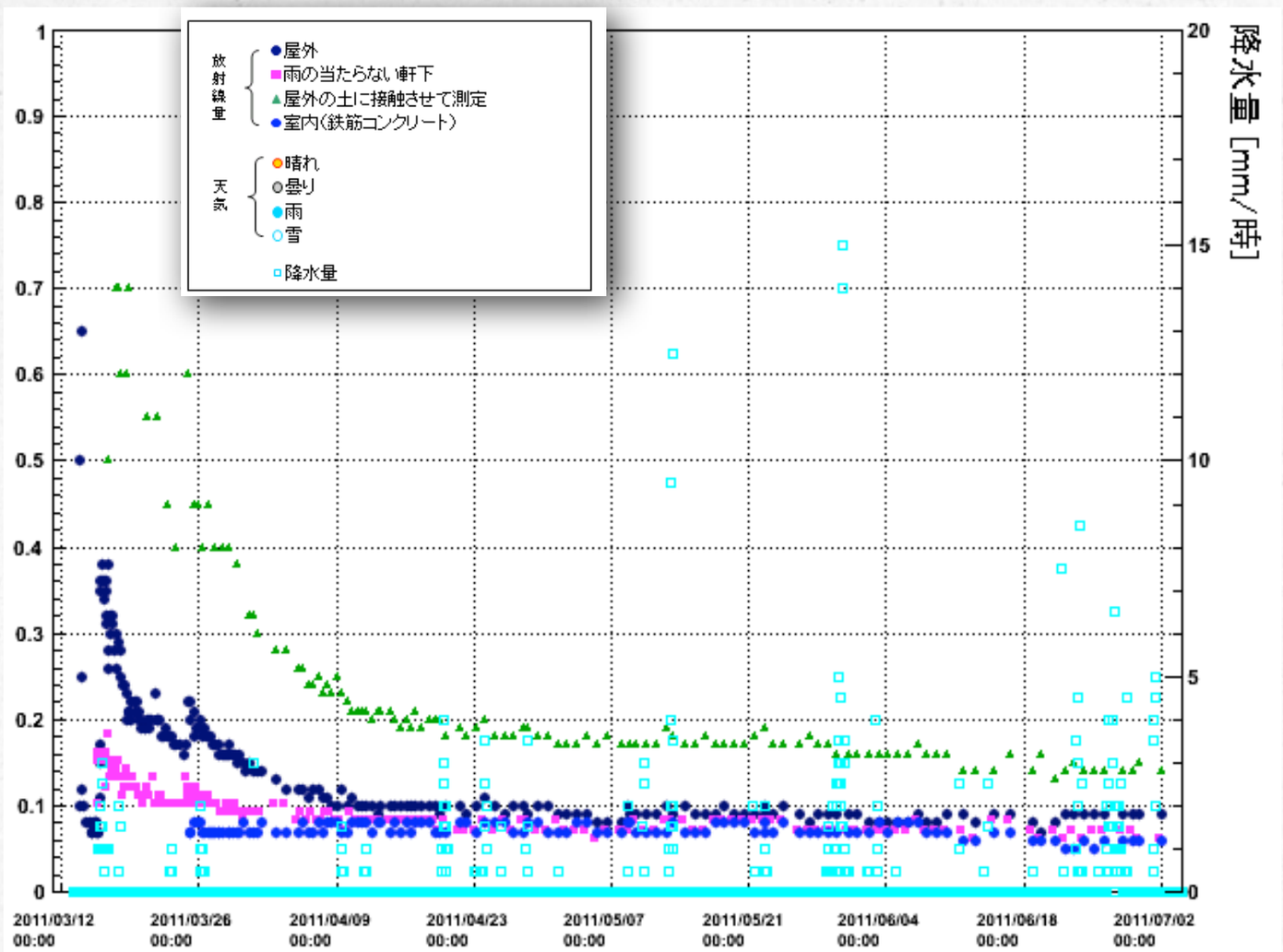
外部被曝 (宇宙線＋大地) のみでは、
年間 0.87 mSv = **1時間あたり 0.10 μSV**

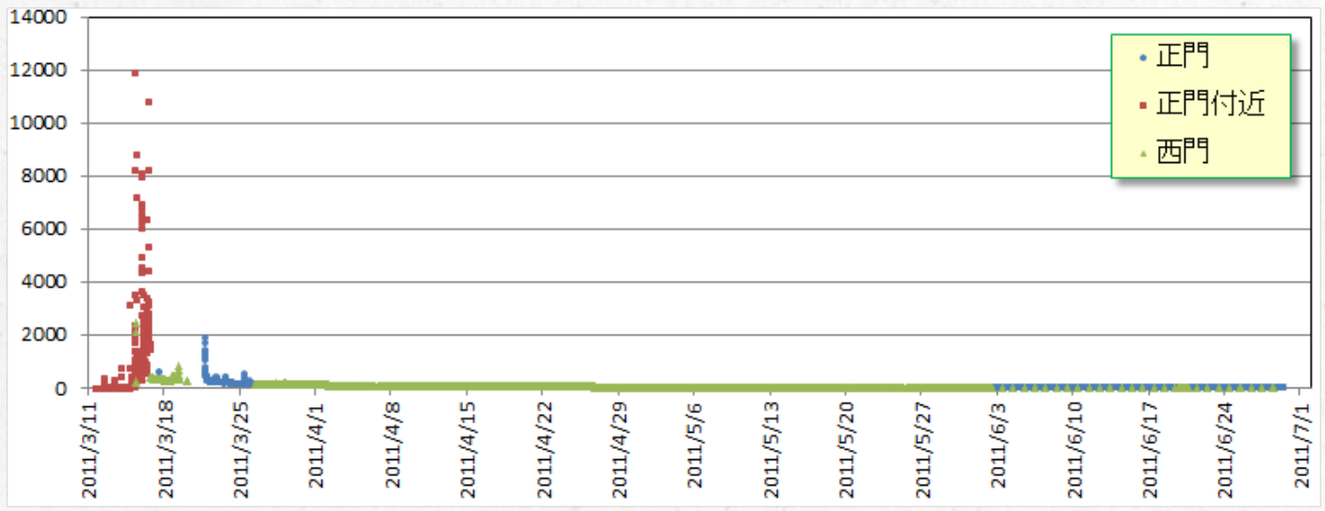
m(ミリ)は、1/1000 を意味し、μ(マイクロ)はミリの1/1000 。つまり、マイクロは、100万分の1。



平常時の空間線量（宮城県発表）
1時間あたり 0.03 ～ 0.05 μSv
http://www.pref.miyagi.jp/gentai/Press/soudan/soudan00.htm

福島第一原発敷地での測定と比較





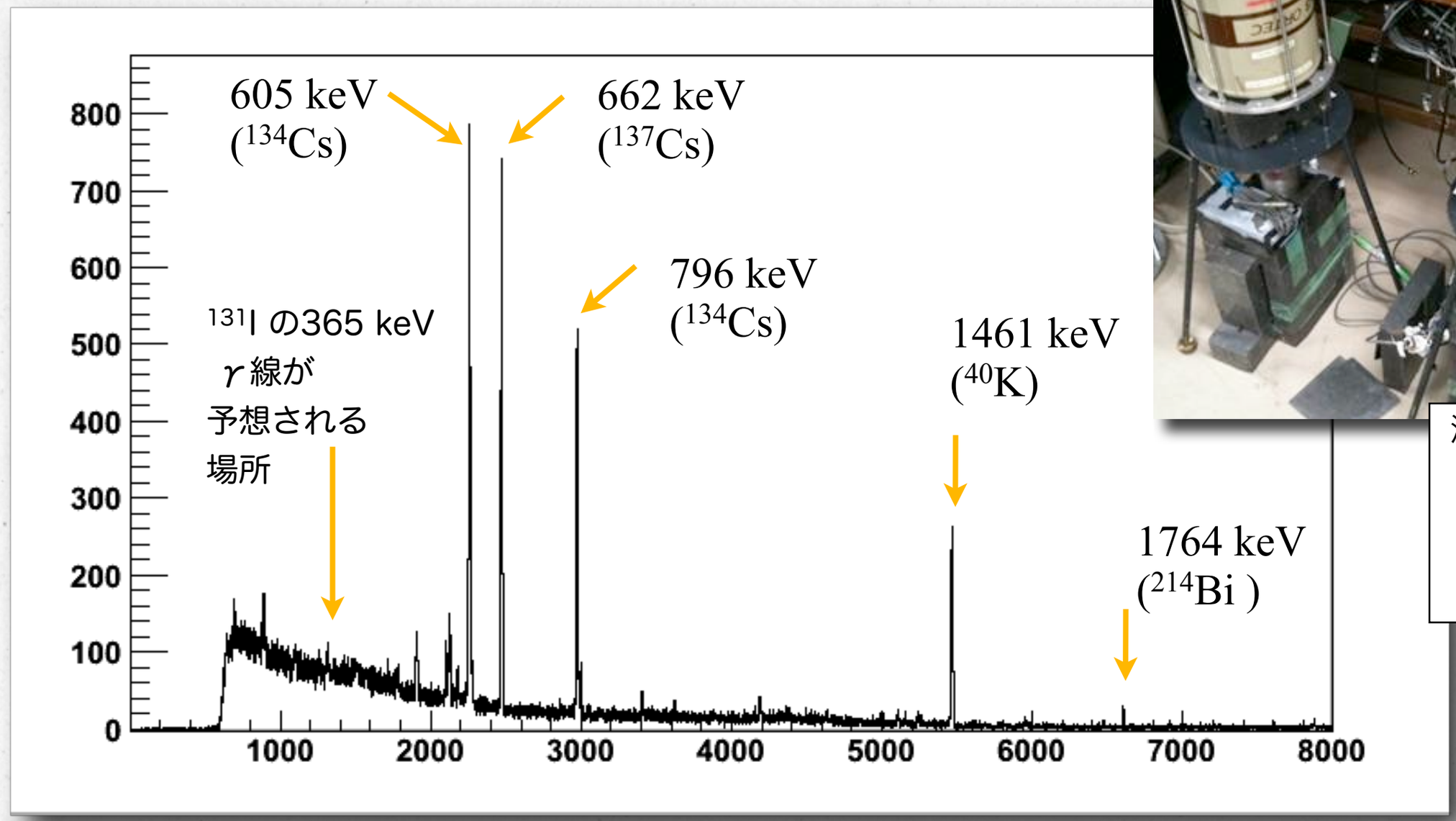
３月から７月の
測定値を表示

３月のベント、水素爆発
以降は放射性物質の大気への
大量放出は起きていない

福島第一原子力発電所構内での計測データ
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/index-j.html
より金田が作図

青葉山キャンパスの土壌測定

2011/6/25 測定　東北大学大学院理学研究科物理学専攻　原子核物理研究室





液体窒素タンク

ゲルマニウム
半導体検出器

鉛ブロック

高いところで、Cs134, Cs137 あわせて 500Bq/kg 程度

幼児が外で遊んでいる場合のリスクの見積もり

東北大青葉山キャンパス 2012年6月の土壌
Cs134: 250 Bq/kg
Cs137: 250 Bq/kg

毎日1 g の土が口に入り飲み込んだと仮定。
それぞれのセシウムは、
年間 250×0.001×365=91.25 Bq。
実効線量は、
91.25 × 0.013 + 91.25 × 0.010 =
1.18625 + 0.9125 = 2.1 [μSv]

食物による内部被曝の世界平均
一年あたり 0.29 mSv = 290 μSv

100分の1弱だけリスクが増えたことに相当

私（金田）はこの100分の1弱のリスク増は気にしない
　　自分の子供が外で遊ぶことを止めさせていないし、マスクもさせていない

出典: http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001558e-img/2r98520000015cfn.pdf
注: 元のデータの換算係数は、mSv/Bq ですが、ここでは μSv/Bq になおしています。

別表4　経口摂取による実効線量及び甲状腺等価線量への換算係数

	線量係数 [μSv/Bq]					
核種	乳児	幼児	少年	青年	成人	
Sr-89	0.036	0.0089	0.0058	0.0040	0.0026	
Sr-90	0.23	0.047	0.060	0.080	0.028	半減期: 28.90年
I-131	0.14	0.075	(0.038)	(0.025)	0.016	半減期: 8.02 日
I-133	0.038	0.017	(0.0072)	(0.0049)	0.0031	
Cs-134	0.026	0.013	0.014	0.019	0.019	半減期: 2.06 年
Cs-137	0.021	0.010	0.010	0.013	0.013	半減期: 30.07年
U-234	0.37	0.088	0.074	0.074	0.049	
U-235	0.35	0.085	0.071	0.070	0.047	
U-238	0.34	0.080	0.068	0.067	0.045	
Pu-238	4.0	0.31	0.24	0.22	0.23	
Pu-239	4.2	0.33	0.27	0.24	0.25	
Pu-240	4.2	0.33	0.27	0.24	0.25	
Pu-241	0.056	0.0060	0.0050	0.0050	0.0050	
Pu-242	4.0	0.32	0.26	0.23	0.24	

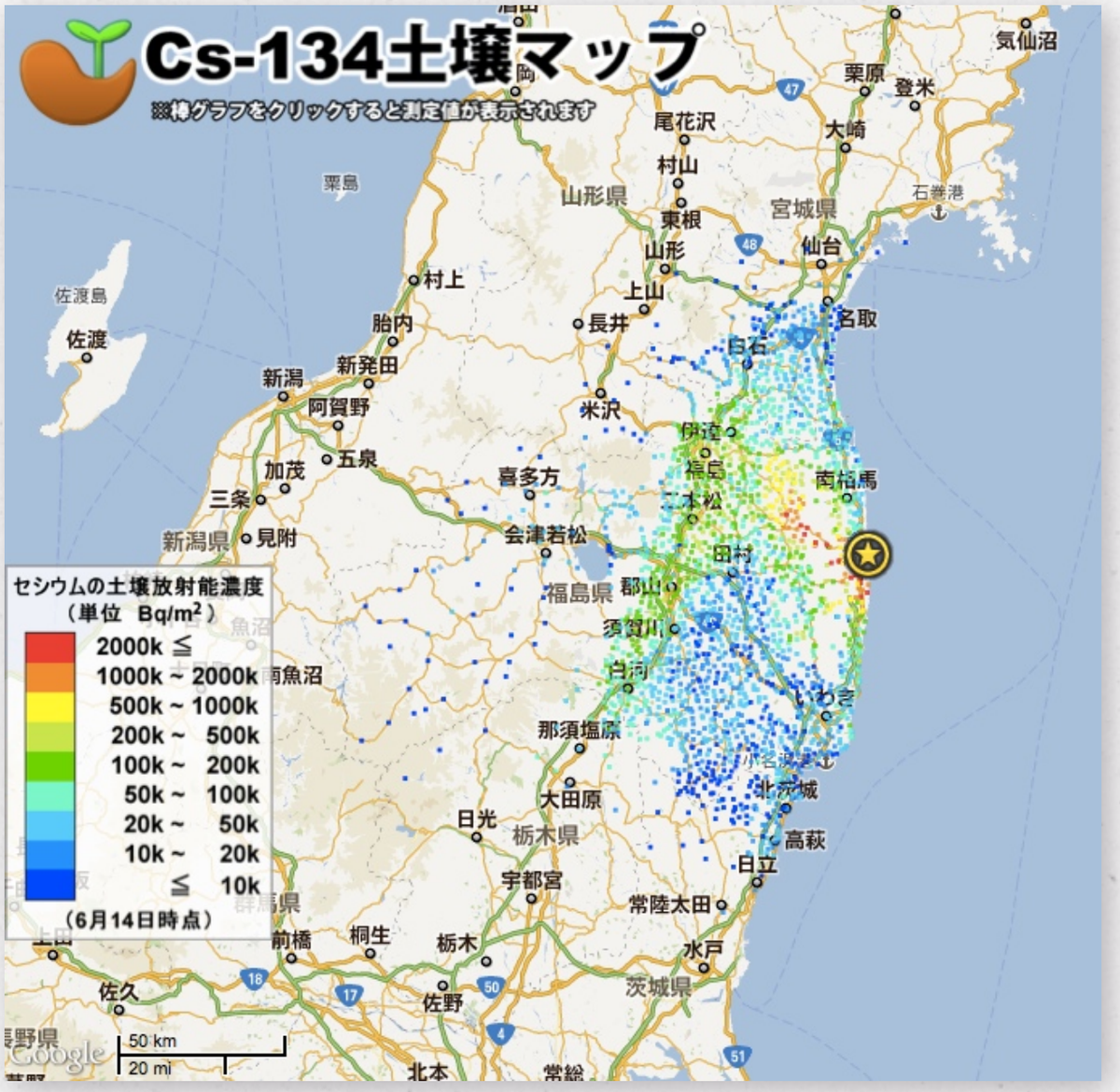
	等価線量(甲状腺)				
核種	乳児	幼児	少年	青年	成人
I-131	2.8	1.5	(0.76)	(0.50)	0.32
I-133	0.73	0.33	(0.14)	(0.093)	0.059

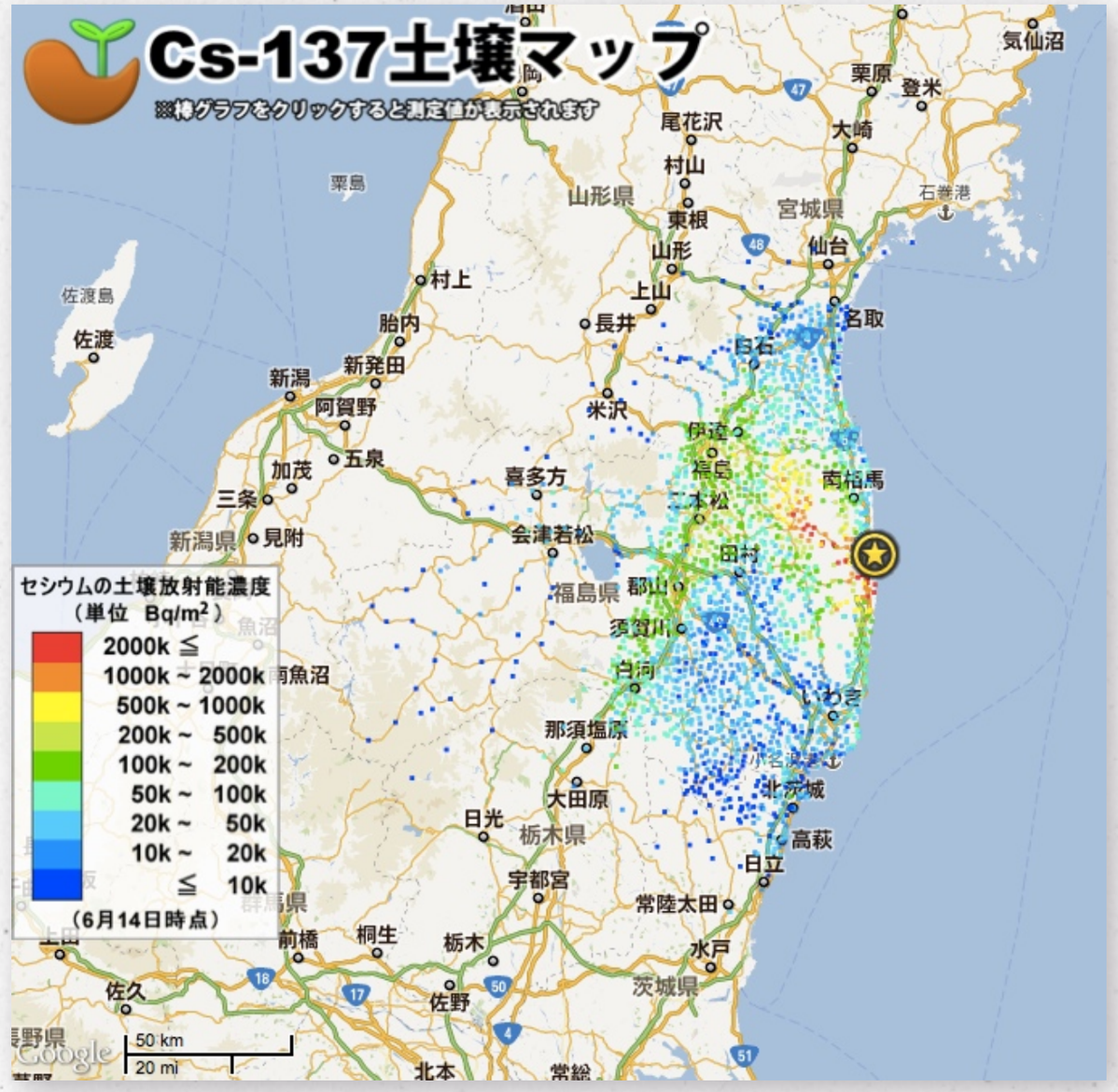
ICRP-56(1989),- 67(1993),-69(1995),- 72(1996)より引用。( )内の数値は ICRP-72(1996)及び「環境放射線モニタリングに関する指針」(平成12 年8 月一部改訂2000)を基に年齢補正を行った試算値。

(出典:平成12年度厚生科学特別研究「原子力施設の事故等緊急時における食品中の放射能の測定と安全性評価に関する研究」)

http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~kaneta/　左側のメニューから「備忘録」のページへ行き
「経口摂取による実効線量および甲状腺透過線量への換算係数の抜粋」の下行の「グーグル・ドキュメントのスプレッドシート」のリンク

土壌測定



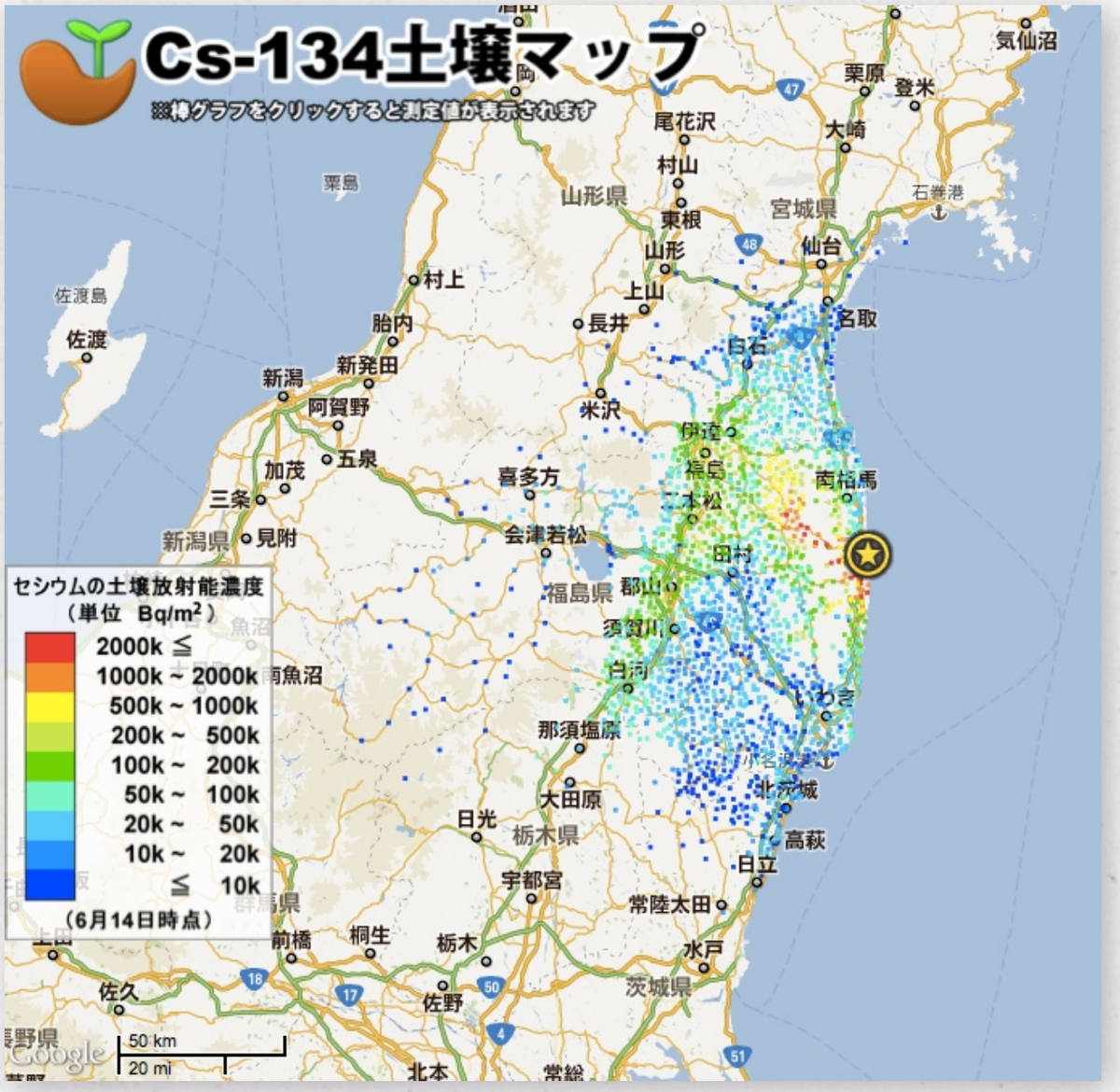


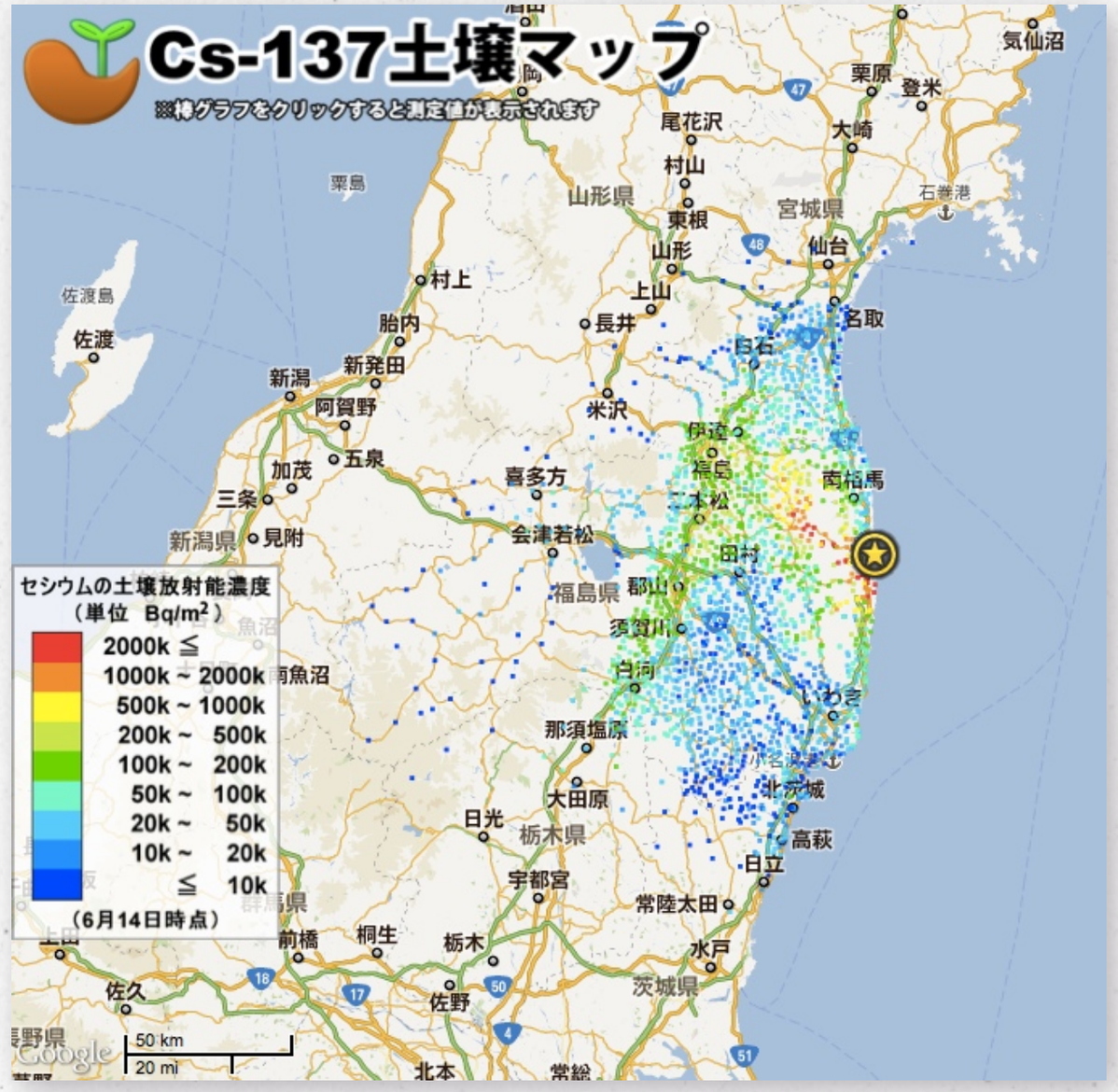
福島第一原子力発電所周辺の「放射線量等分布マップ作成」プロジェクト

国内の多くの研究者の協力を得て、６－７月に土壌採取、７－８月にガンマ線の測定。
土壌の採取には大阪大学とJAEAが中心となり、東北大を含む９４の大学等研究協力機関と民間企業３社から４０９人の科学者等が参加。

http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/dojo/

土壌測定





原発事故で放出された放射性物質は地上への降下量は、拡散する際の風の向きと降雨・降雪に関係する

原子力関連施設の事故に伴う放射性物質の大気拡散に関する 数値予測情報の活用策について
日本気象学会「原子力関連施設の事故に伴う放射性物質拡散に関する作業部会」

http://www.metsoc.jp/default/wp-content/uploads/2014/12/teigen-201412.pdf

初期被曝のスクリーニング調査

- 原子核物理研究者の社会貢献
  - 大阪大学核物理研究センターを活動の拠点
  - 幅広い研究者が参加、医療関係者も参加
  - 2011年3月21日から福島県で
    - 福島市、郡山市、川俣町、いわき市、飯舘村
    - 他のグループが、棚倉町、飯舘村、二本松市、須賀川市、田村市、白河市、西郷村、会津若松氏、南会津町、南相馬市、勿来市、いわき市でも測定
  - 福島県及び放医研が準備したマニュアルに則って測定
  - 約９００人のスクリーニングを行い全員について2μSv/hを超える値は観測されなかった

2011/6/10 日本物理学会シンポジウム「物理学者から見た原子力利用とエネルギー問題」講演資料より
http://www.jps.or.jp/information/movie/symposium.html

データに基づく説明

- 安全かどうか、安心出来るかどうかにどう答えるか
  - 100%安全、100%危険というものはない
  - 安心できるかどうかは個人の価値観に基づく
- データ（測定値）があれば比較出来る
  - 放射線量率、食品中の放射性物質の量について
    - 日本でも、仙台の現在の空間線量率の2倍程度の場所あり
    - 体内には常に^{40}Kが数千ベクレルある
  - 土壌汚染について
    - 広域な測定結果がある
    - 細かい場所が心配な場合は自分で空間線量を測る
    - チェルノブイリとは違い、今回の事故では放射性ストロンチウムは放射性セシウムの1/2000から1/4000以下
  - 一次情報を自分で調べる努力が必要
    - マスコミはセンセーショナルなことしか報道しない

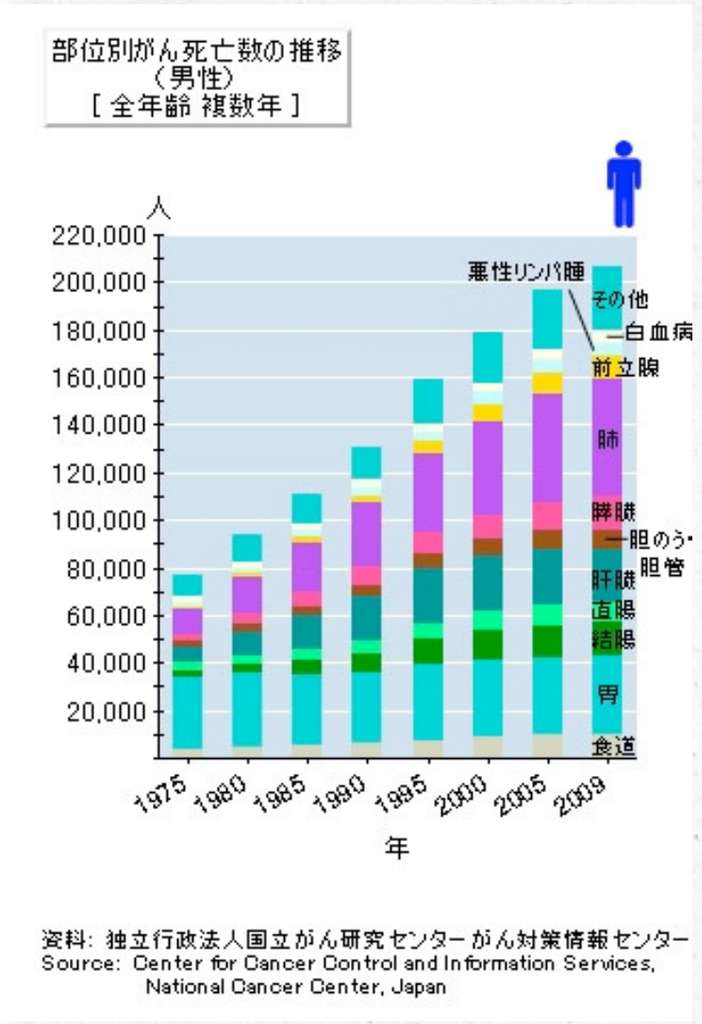
科学的

とは？

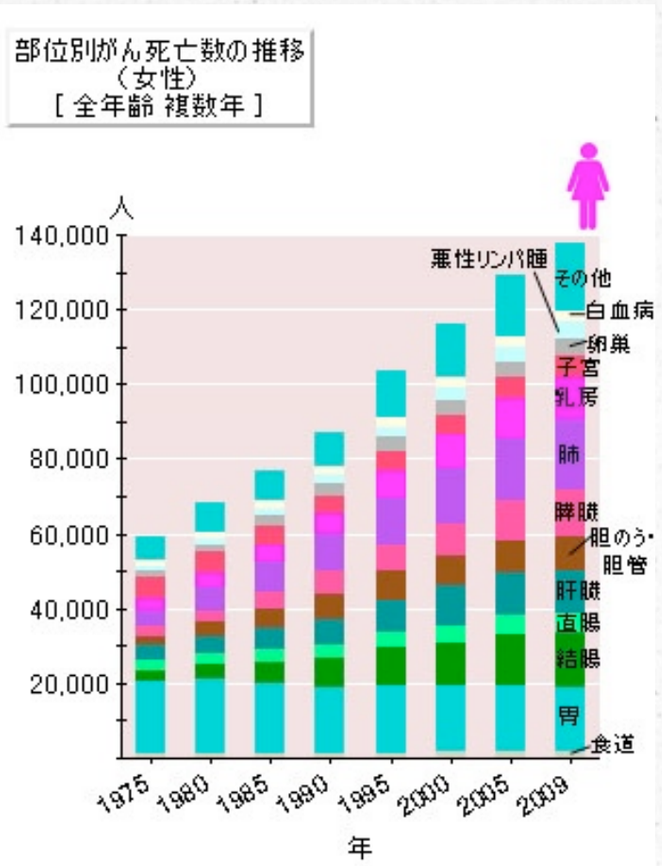
自然科学に限定して考える

- データに基づく
  - 定量的
  - 再現性が必要
    - 条件を変えても起きるか？
    - 因果関係の立証
    - 統計学的に有意か？
- 実験・観測と理論
  - データから仮定・モデルを立てる
  - モデルが他の現象を再現するか（予言能力）

因果関係：統計に御用心



資料：独立行政法人国立がん研究センターがん対策情報センター
Source: Center for Cancer Control and Information Services, National Cancer Center, Japan

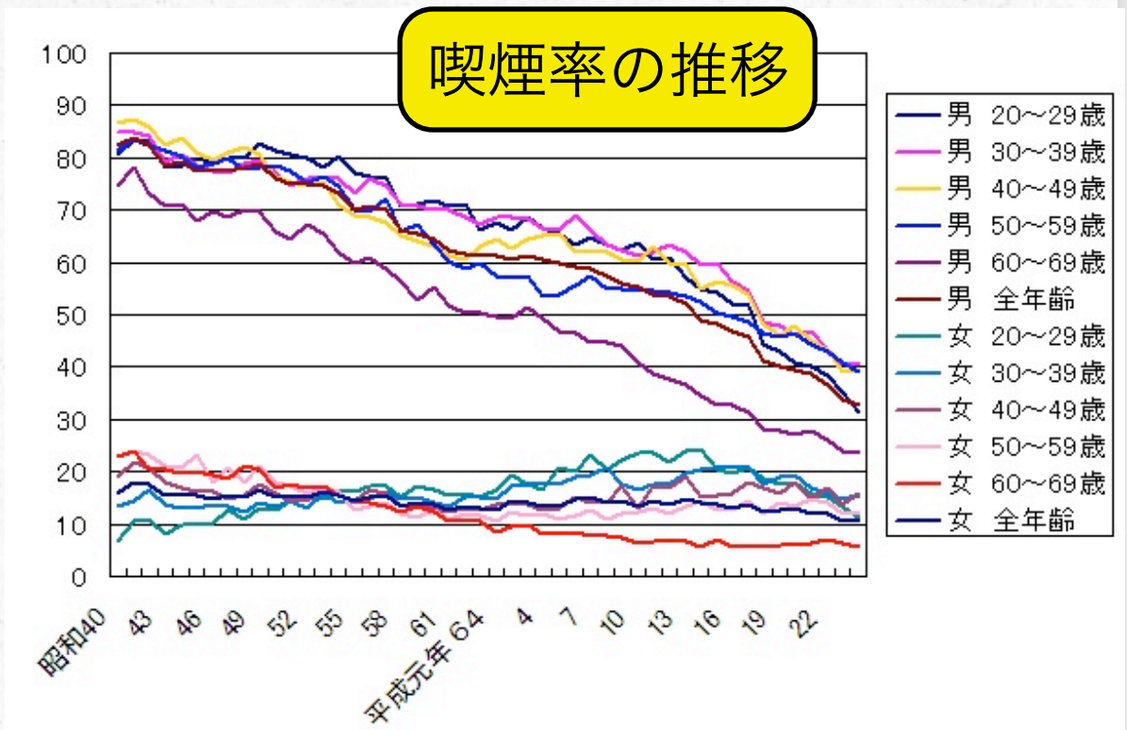


※子宮は、子宮頸部および子宮体部の他に「子宮部位不明」を含む。

資料：独立行政法人国立がん研究センターがん対策情報センター
Source: Center for Cancer Control and Information Services, National Cancer Center, Japan

http://ganjoho.jp/public/statistics/pub/statistics02.html より

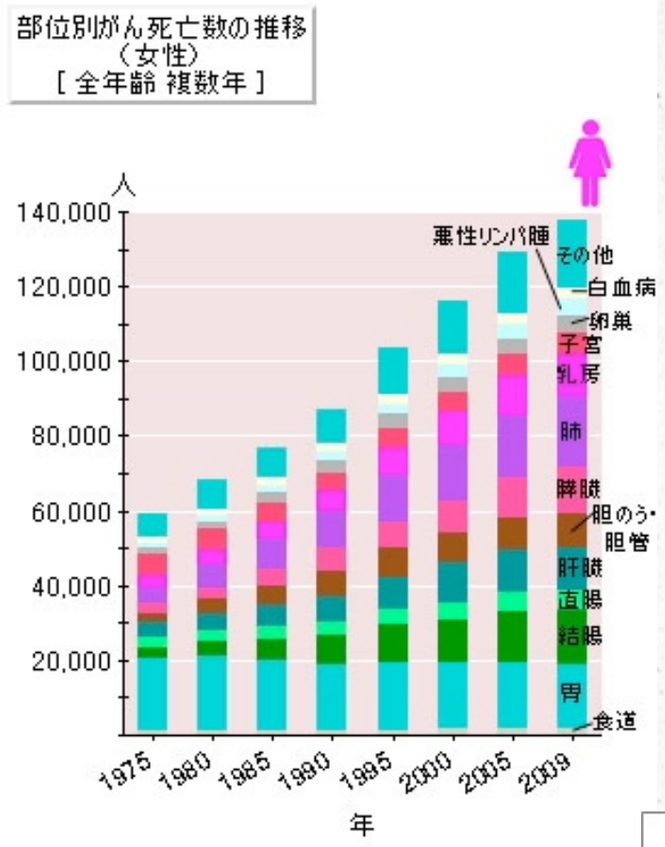
http://www.health-net.or.jp/tobacco/product/pd090000.html
公益財団法人　健康・体力作り事業財団のページより



- 喫煙率が減少すると、ガン死亡率が増加？
  - この二つは恣意的な組み合わせ



資料：独立行政法人国立がん研究センターがん対策情報センター
Source: Center for Cancer Control and Information Services, National Cancer Center, Japan

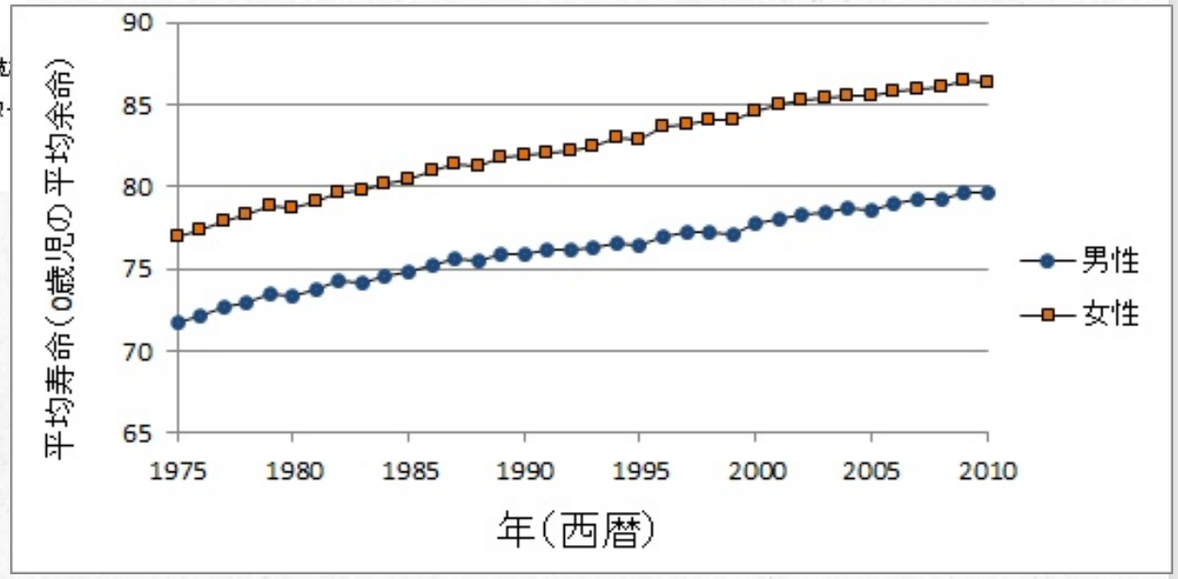


※子宮は、子宮頸部および子宮体部の他に「子宮部位不明」を含む

資料：独立行政法人国立がん研究センターがん対策情報センター
Source: Center for Cancer Control and Information Services, National Cancer Center, Japan

http://ganjoho.jp/public/statistics/pub/statistics02.html より

- ガン死亡率増加
  - 平均余命が延びたからと考えられている
  - ガン以外の病気で死亡しなくなった



http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/life10/sankou02.html
のデータを元に金田が作図

科学のようなもの

占星術

永久機関

ゲーム脳

錬金術

血液型性格診断

水からの伝言

マイナスイオン

ホメオパシー

EM菌（有用微生物群）

ゲルマニウム健康法

特徴

・データに基づいている様だが再現性がない、あるいは恣意的に利用

・科学用語を使って説明しているが、内容が荒唐無稽

新聞の見出しから

- 甲状腺がん　確定12人に　福島県民18歳以下（産経新聞 2013/6/4）
- 甲状腺がんの子、12人に　福島県調査被曝影響は否定（朝日新聞 2013/6/5）
- 甲状腺がん新たに９人 福島県調査、計12人に（共同通信 2013/6/5）
- 18歳以下　甲状腺がん12人…福島県内、17万5000人を検査（読売新聞 2013/6/6）
- 福島第１原発事故　福島の子供、12人が甲状腺がん　疑い15人--事故時に18歳以下（毎日新聞 2013/6/7）

これら見出しの印象は？

レトリックに注意

- 一見公平に見える（数字が示してある）
  - 朝日新聞以外の見出しは「あった」という情報しかない
- 問題点
  - 比較対象がない
    - 18歳以下に対して大規模かつ精度の高い調査は世界初の試み（環境省）
    - そもそも甲状腺がんの発生率は？
    - 被曝した可能性の無い母集団との比較は？

「ふくしま国際医療科学センター」の甲状腺検査の結果, 2013/01
http://fukushima-mimamori.jp/thyroid-examination/result/media/thyroid_status_201301.pdf
5.1mm 以上のしこりが94975人中549人に見つかった。

環境省　福島県外３県における甲状腺有所見率調査結果について（お知らせ）, 2013/3/29
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=16520
長崎市、甲府市、弘前市、４３６５人に対する調査で、甲状腺検査の結果5.1mm以上のしこりが４４人の子供に見つかった。

ここまでのまとめ

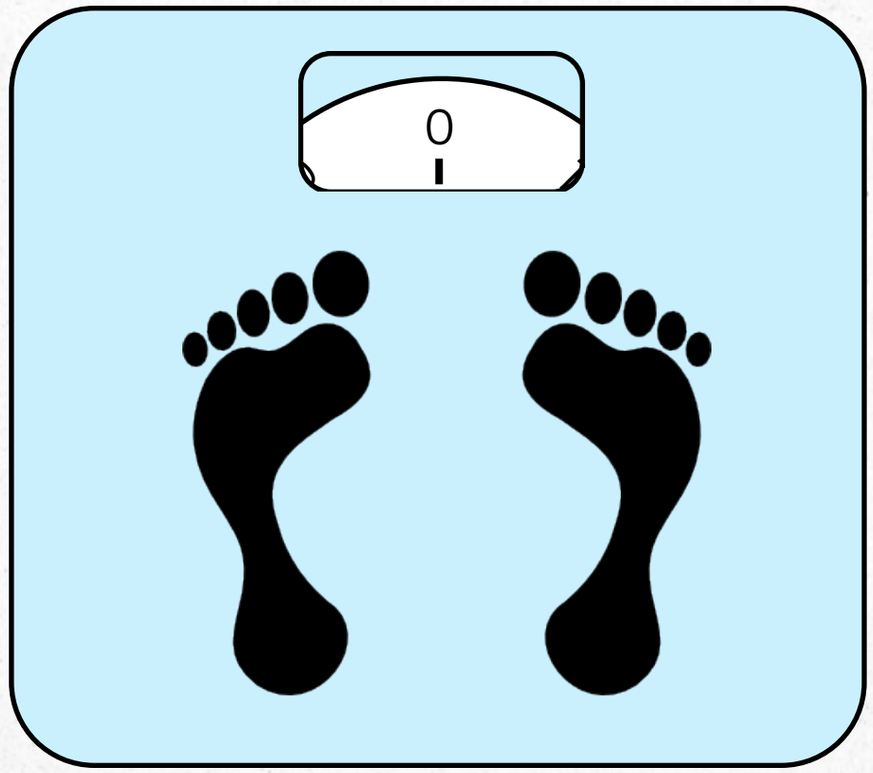
- 用語、概念の説明
  - 放射線、放射性物質、放射能
  - 単位
  - 放射線と生体への影響
- 放射線・放射性物質の測定値について

測定

通常、我々が考える測定

例えば体重測定

体重計に乗るたびに数値が変わると、、、



そんな
ばかな！

壊れてるに
違いない

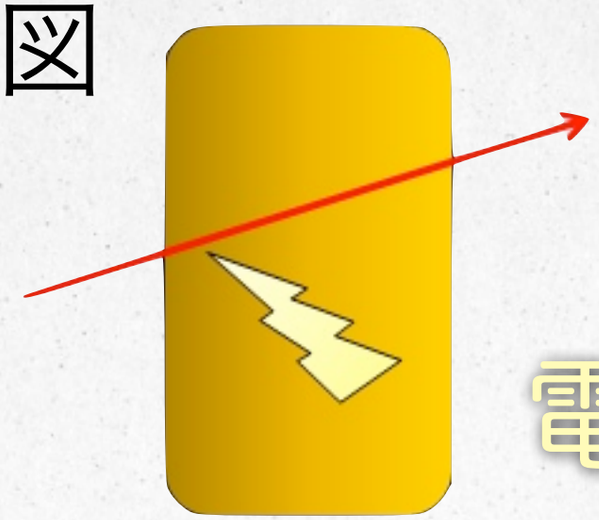
役に立たないよ！

ゆれる

１秒あたりの放射線の個数

エネルギー測定値

概念図



放射線が通過

電気パルス（信号）が発生

人間の考える理想

電気パルス = 元の放射線のエネルギーに一対一対応

現実（＝自然界の法則）

放射線と物質の反応：確率的に起きる（量子力学の世界）

同じエネルギーの放射線が一つ通過したときにいつも同じ信号にならない

反応したり、しなかったりもする

ゆれる

放射線の放出

放射線と物質の反応

確率で現象が起きる

量子力学の世界

演示実験

- 空間線量計
  - HORIBA の PA-1000 Radi
    - γ線サーベイメータ
    - ヨウ化セシウム・シンチレータと半導体光検出器から構成
    - 30秒間の測定値の平均を5秒ごとに更新
  - 測定値はどのように揺らぐか？
    - 数値の読み取りと、記録に協力してもらえる方を募集
    - グラフにして時間変化をみてみる
  - 空間線量計で食物中の放射性物質量が分かるか？
    - ^{40}Kを測定してみる（やさしお）を使用

お勧めの参考書

- やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識
  - 田崎 晴明
- いちから聞きたい放射線のほんとう: いま知っておきたい22の話
  - 菊池 誠 , 小峰 公子
- 専門家が答える 暮らしの放射線Q&A
  - 日本保健物理学会「暮らしの放射線Q&A活動委員会」
- 放射線被曝の理科・社会
  - 児玉 一八, 清水 修二, 野口 邦和
- はじめての福島学
  - 開沼 博
- 知ろうとすること。
  - 早野 龍五, 糸井 重里













付録

現在素粒子と考えられているもの

クォーク

u	c	t
d	s	b

レプトン

e	μ	τ
ν_e	ν_μ	ν_τ

クォークとレプトンには
それぞれの反粒子が存在する

ゲージ粒子

自然界の四つの力を伝える仮想粒子

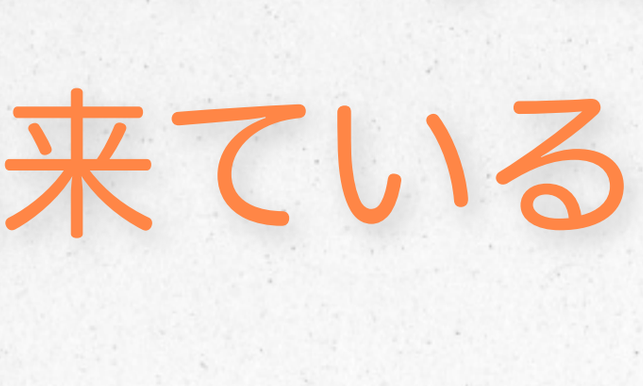
- γ 光子(フォトン): 電磁気力
- g グルーオン: 強い力
- W^+ W^- Z^0 W,Zボゾン: 弱い力
- G 重力子(グラビトン): 重力 未発見

- H ヒッグス粒子：素粒子の質量

クォークから出来ているもの ＝ハドロン

クォーク三つ バリオン

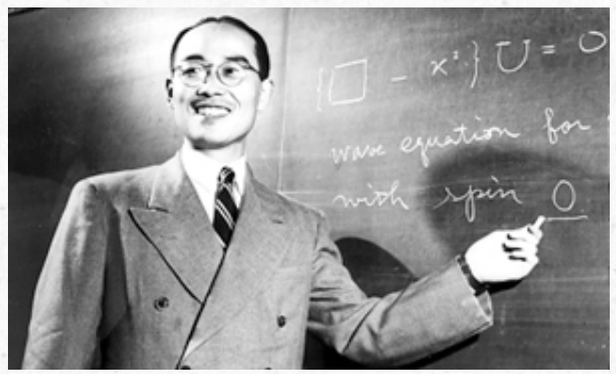
陽子　　中性子



Λ (ラムダ)

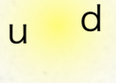


クォークと反クォーク メソン（中間子）



湯川秀樹博士によって予言。後に発見され、1949年ノーベル物理学賞を受賞

写真： http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/about_us/history.html より



π^+



K^+

ここに挙げたよりもさらに数多くのバリオンとメソン

桁の記号

記号	読み方	漢数字	指数表示
P	ペタ	千兆	10^{15}
T	テラ	一兆	10^{12}
G	ギガ	十億	10^{9}
M	メガ	百万	10^{6}
k	キロ	千	10^{3}
		一	10
m	ミリ	千分の一	10^{-3}
μ	マイクロ	百万分の一	10^{-6}
n	ナノ	十億分の一	10^{-9}
p	ピコ	一兆分の一	10^{-12}

放射性物質と放射線

1 Bq の放射性物質が何グラムになるか

2.40×10^{-24} × 質量数 × 半減期[秒]

セシウム１３７（^{137}Cs）の半減期は 30.1 年

(=30.1×365×24×60×60 =949233600 ≃ 9.49×10^{8} [秒])

この計算式は　http://www.gakushuin.ac.jp/~881791/housha/details/BqGySv.html　から引用

^{134}Cs	2.07 年
	2.1×10^{-14} g
^{137}Cs	30.1 年
	3.1×10^{-13} g
^{40}K	12億8千万 年
	3.9×10^{-6} g

半減期 と 1 Bq 相当の質量(g)

指数表示

小さな数字や大きな数字の表し方

例１：アボガドロ定数（^{12}C 12 g 中の原子の数）

602000000000000000000000

⇒ 6.02×10^{23}

指数表示

小さな数字や大きな数字の表し方

例２：^{12}C 原子一つの質量

^{12}C 1 g 中の原子の数 6.02×10^{23} /12 = 5.02×10^{22}

$\Rightarrow 2.0\times10^{-23}$

$10^{-1} = 1 / 10^{1} = 1/10 = 0.1$

$10^{-2} = 1 / 10^{2} = 1/100 = 0.01$

$10^{-3} = 1 / 10^{3} = 1/1000 = 0.001$

. . . . . .

$10^{-23} = 1 / 10^{23} = 1/100000000000000000000000$

$= 0.00000000000000000000001$

指数表示

掛け算が簡単になる

$50200000000 \times 230000$



$5.02\times10^{10} \times 2.3\times10^{5}$

$= 5.02 \times 2.3 \times 10^{10} \times 10^{5}$

$= 5.02 \times 2.3 \times 10^{10+5}$

$= 11.546 \times 10^{16} = 1.1546 \times 10 \times 10^{16}$

$= 1.1546 \times 10^{1} \times 10^{16} = 1.1546 \times 10^{1+16}$

$= 1.1546 \times 10^{17}$

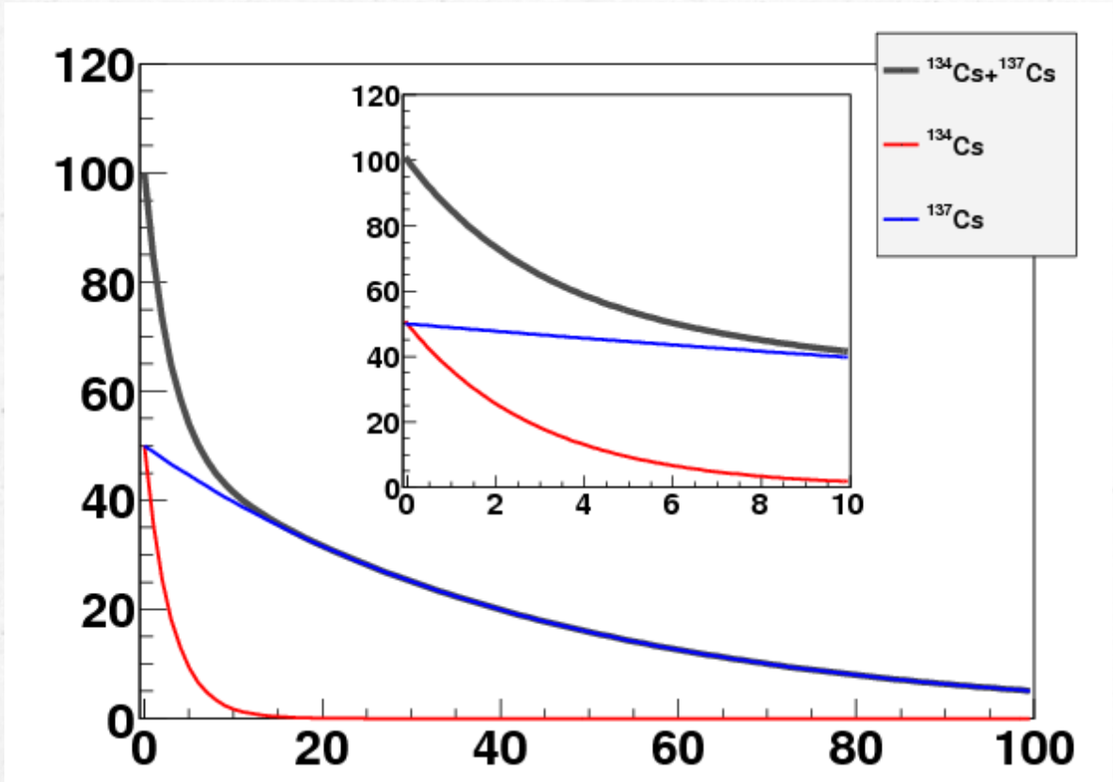
桁の数を最初から数えて計算している

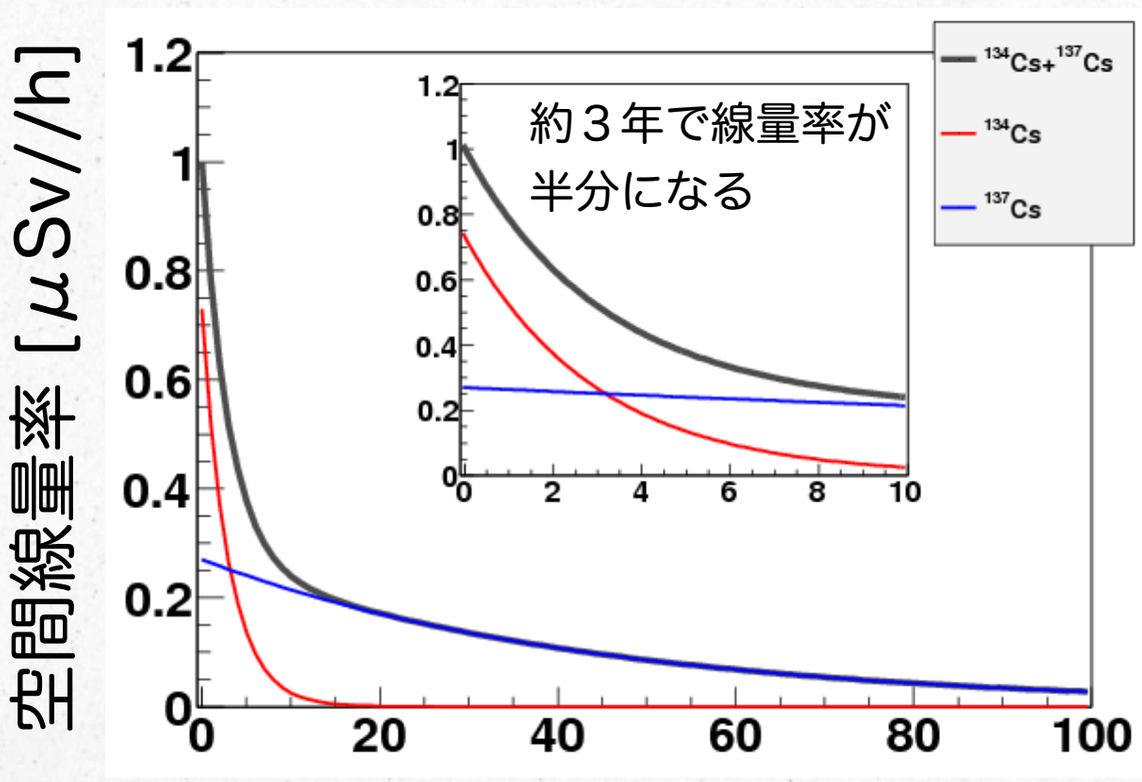
天然に存在する放射性物質

- カリウム４０
  - 半減期： 12.77億年、地球が出来る以前から存在している
  - 天然カリウムの中に 0.0117%の割合で存在
    - 天然カリウム 1g あたり 30.4 Bq の放射能を持つ
    - 成人で体内に数千Bqある
  - カリウムは、生物にとって必須元素
    - カリウム不足は、高血圧、低カリウム血症等を起こす
  - １年あたり 165 μSv の内部被曝と評価されている
- 炭素14
  - 宇宙線による生じた中性子が窒素に吸収されて生成される
  - １年あたり 10 μSv の内部被曝と評価されている
- ラドン及びその娘核種
  - よく知られているのは温泉
  - 花崗岩に多く含まれている
  - 呼吸による内部被曝の主な原因（肺がんのリスク要因の一つ）
    - 日本は世界平均よりも少ないレベル

放射能・放射線量の変化

- 2011年４月の時点で ^{134}Cs:^{137}Cs のベクレル数での比は約1:1
  - ^{134}Cs：　半減期　約2.06年
  - ^{137}Cs：　半減期 約30.17年
- 同じベクレル数でも、放射線の強さ（等価線量率, Sv/h の単位で測る）は、核子の種類によって異なる
  - ^{134}Cs は、^{137}Csの約2.7倍

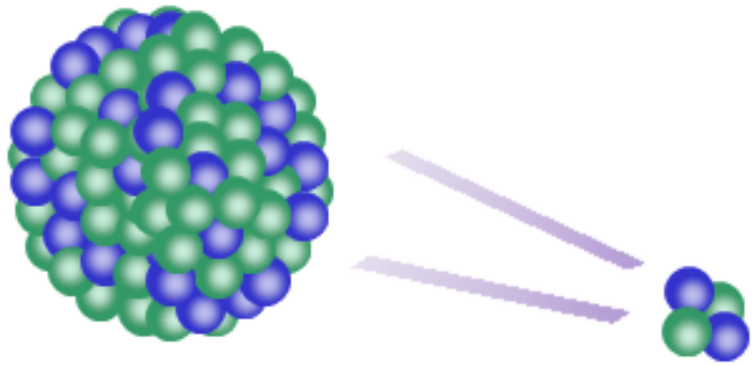


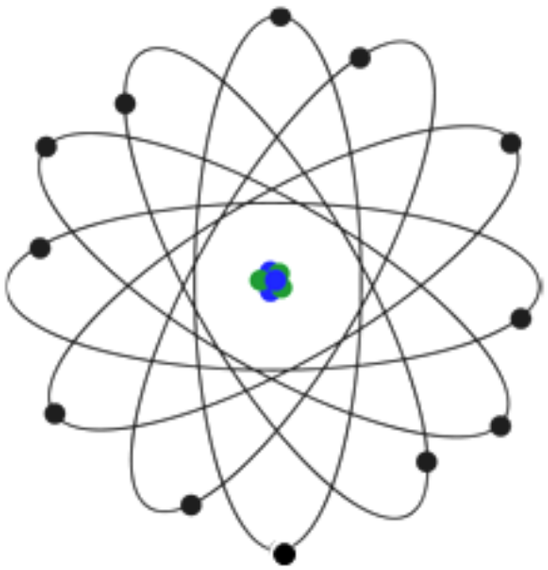


2011年4月からの経過年

α線

- 物理的性質
  - 主に質量数の大きい不安定原子核から放出される
    - トンネル効果
  - 電荷 +2
  - 陽子２個と中性子２個から成る（^{4}Heの原子核）
  - 電子の側を通過するとき電子をはがす
    - 電離







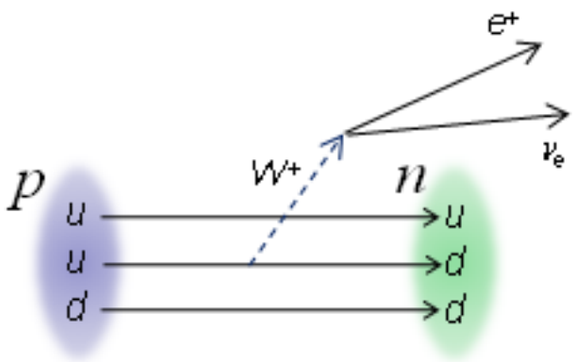
α線

- 飛距離 (Range)
  - 短い距離でエネルギーを失う
    - 透過能力は高くない
    - 空気に対して数cm程度
- 防御物 (Shield)
  - 紙
  - 皮膚の表面
- 生物学的危害 (Biological hazard)
  - 体外被曝
    - 外からα線を人体に照射しても表皮で止まってしまうので影響はない
  - 体内被曝
    - もしα線源を体内に取り込んでしまうと、放射性物質が無くなるまで浴び続ける

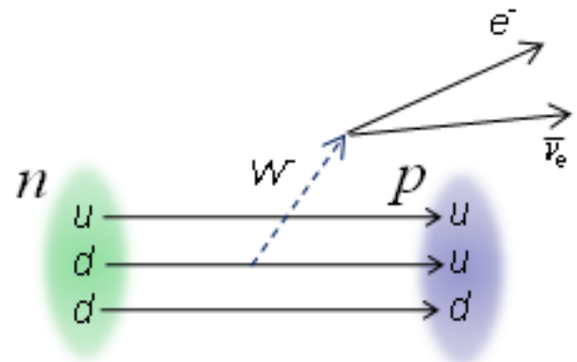
β線

- 物理的性質
  - 電荷 1
  - β^- (電子)と β^+ (陽電子)
    - α線に比べると質量は7000分の1程度
  - 原子核中で陽子（中性子）が中性子（陽子）に崩壊するときに放出される

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$



$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



このプロセスは三体崩壊

- 電子の持つエネルギーは0からある最大値までいろいろな値を持つ

- β線を出さずに陽子が中性子に変わるプロセスもある（電子捕獲，Electron Capture）
  - 軌道上の電子を陽子が捕獲

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

  - 空いた軌道に上の軌道が電子が移動する際にX線(電磁波)が放出される

β線

- 飛距離 (Range)
  - α線よりは遠くまで届く
    - 空気に対して数m程度
    - 皮膚の表面に線源をおいた場合でも2,3mm程度しか進まない
- 防御物 (Shield)
  - 数ミリ圧のプラスチック、アルミ、ガラス、木
  - 密度の高い物質（鉛など）は電子が当たることによってX線を出すので逆に危険
- 生物学的危害 (Biological hazard)
  - 体外被曝
    - 皮膚や眼球に対して危険
    - 内蔵や骨までには届かない
  - 体内被曝
    - α線源よりはダメージが少ない

γ線/X線

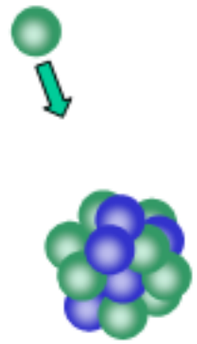
- 物理的性質
  - 電磁波
  - 電荷を持たない
  - γ線とX線の違いは発生機構
    - γ線
      - 原子核内の核子が励起状態からエネルギーの低い状態へ遷移する時に余分なエネルギーが電磁波として放出される
    - X線
      - 軌道電子が励起状態からエネルギーの低い状態に遷移する際に放出される
        - » 電子捕獲によるもの
          - » 陽子が軌道電子を捕獲、空いた軌道に上の軌道から電子が落ちて来るときにX線が放出される
        - » 内部転換によるもの
          - » 原子核のエネルギーが直接電子の軌道に与えられることがあり、主にK殻の電子が放出され、L殻等の電子がK殻に落ちて来るときにX線が放出される
      - X線が出る代わりに別の電子が放出されることもある：オージェ電子

γ線/X線

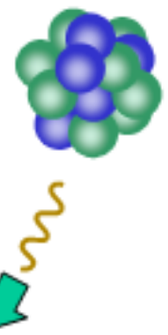
- 飛距離 (Range)
  - 長く透過力が強い
    - 電離作用は強くない
- 防御物 (Shield)
  - 密度の高い物質を用いる
  - 鉛、鉄、コンクリートなど
- 生物学的危害 (Biological hazard)
  - 体外被曝
    - 透過力が高いことから体全体が被曝する
  - 体内被曝
    - 放射性物質の近くだけではなく体の広い範囲で被曝する

中性子

- 物理的性質
  - 不安定原子核から放出
  - 中性子は電荷を持たない
  - 質量は陽子とほぼ同じ
    - $m_n = 939.6$ ($m_p = 938.3$) [MeV/c^2]
  - 電子とは相互作用しない
  - 中性子と反応した原子核から放出される放射線により、間接的に電離が行われる



中性子と
原子核の
反応



中性子が吸収され
γ線が原子核から
放出される



核子を原子核から
はじき飛ばす

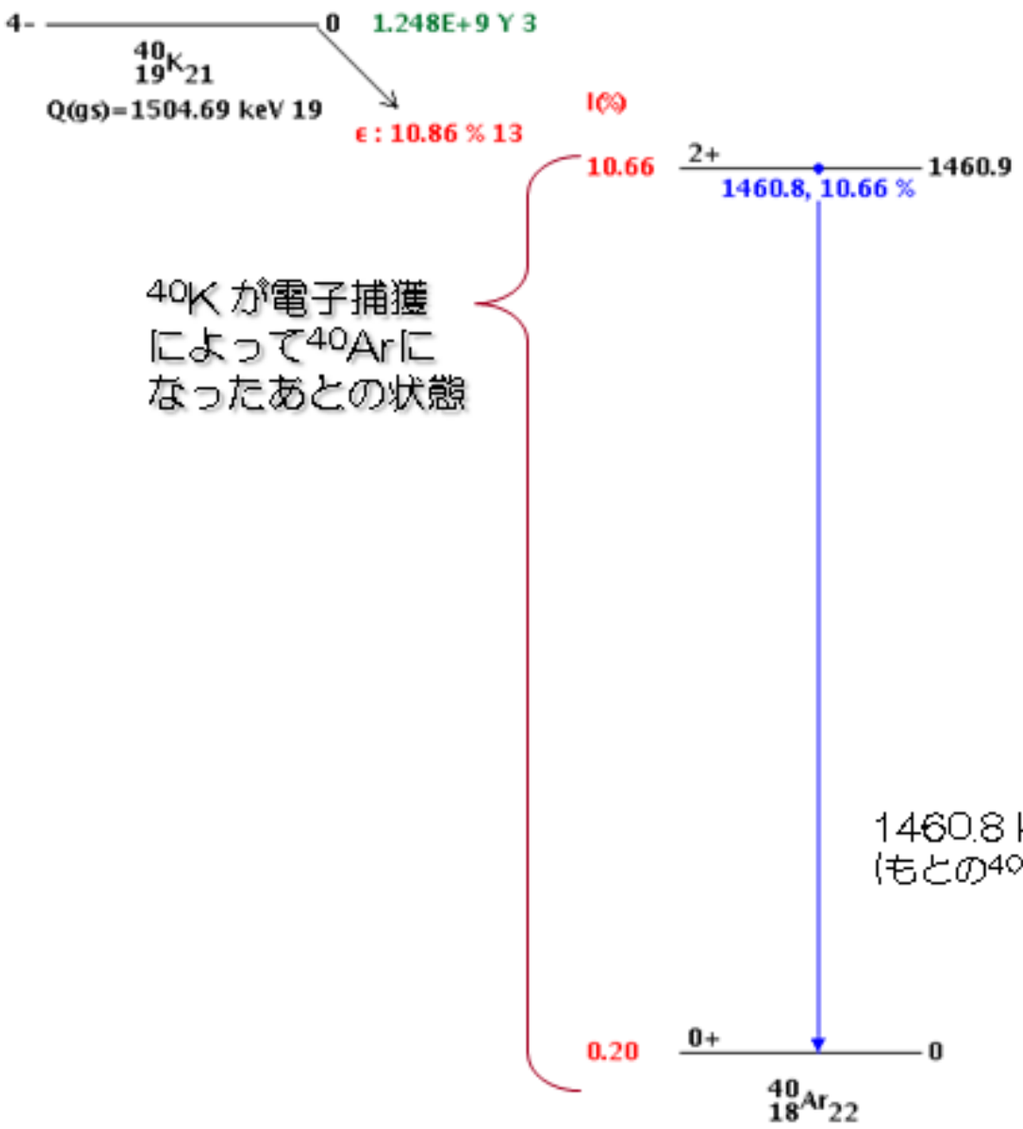
中性子

- 飛距離 (Range)
  - 他の放射線に比べて比較的遠くまで届く
  - 空気中での平均自由行程（一回相互作用するまでに進む距離の平均）
    - 220 m
- 遮蔽 (Shield)
  - 水、ポリエチレン、コンクリート
    - 同程度の質量の陽子との衝突では、陽子に運動量の殆どを渡して中性子は静止する。
      - ボールの集めたなかに、ボール一つを投げてるとすぐ静止する
      - 質量数の大きな物質とでは、壁にボールをぶつけるようなもの
- 生物学的危害 (Biological hazard)
  - 体全体で被曝する
  - 強い透過力を持つ

その他の放射線

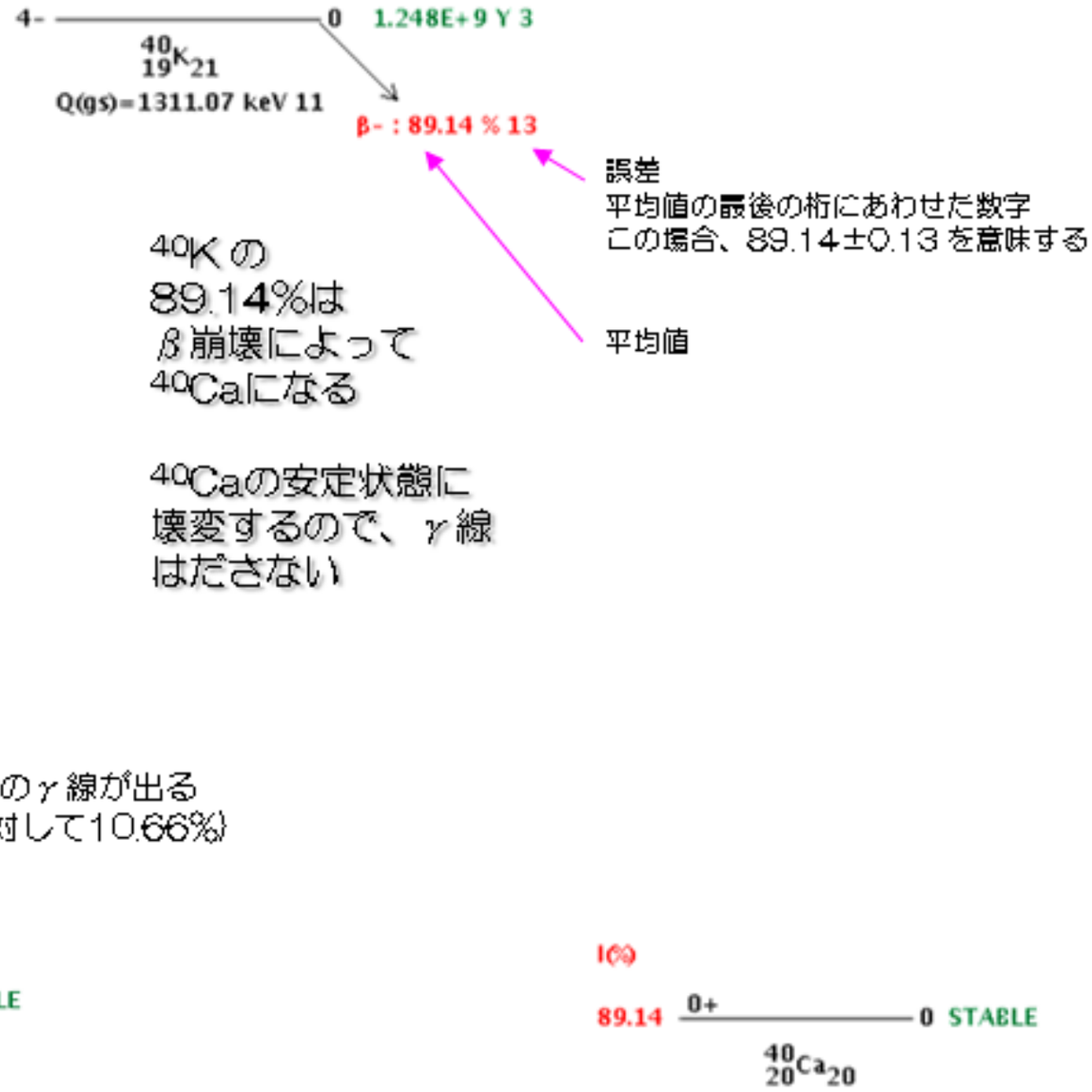
- 宇宙線
  - 常に地球に降り注いでいる
    - 10 cm^2 辺り 1秒間に一個程度
  - 最初に地球の大気に突入するのは陽子や原子核等
  - 地表から5km程度では殆どμ粒子
    - 大気との相互作用でパイ中間子を生成、パイ中間子がμ粒子に崩壊し地上に届く
    - 平均寿命は 2.2×10^{-6} [s]
      - 光速(3×10^{8} [m/s])近くまで加速された場合
        - » 相対論効果を考えないと、進む距離は6×10^{2} [m]
        - » 相対論効果を考慮
          - » μ粒子の質量は 105.7 [MeV],
          - » 1 GeV/c の運動量を持つ場合、静止系で観測した寿命は約10倍に伸び、6×10^{3} [m] 程度まで届く

^{40}Kの崩壊図



^{40}K が電子捕獲によって^{40}Arになったあとの状態

1460.8 keV のγ線が出る
(もとの^{40}Kに対して10.66%)



^{40}K の
89.14%は
β崩壊によって
^{40}Caになる

^{40}Caの安定状態に
壊変するので、γ線
はださない

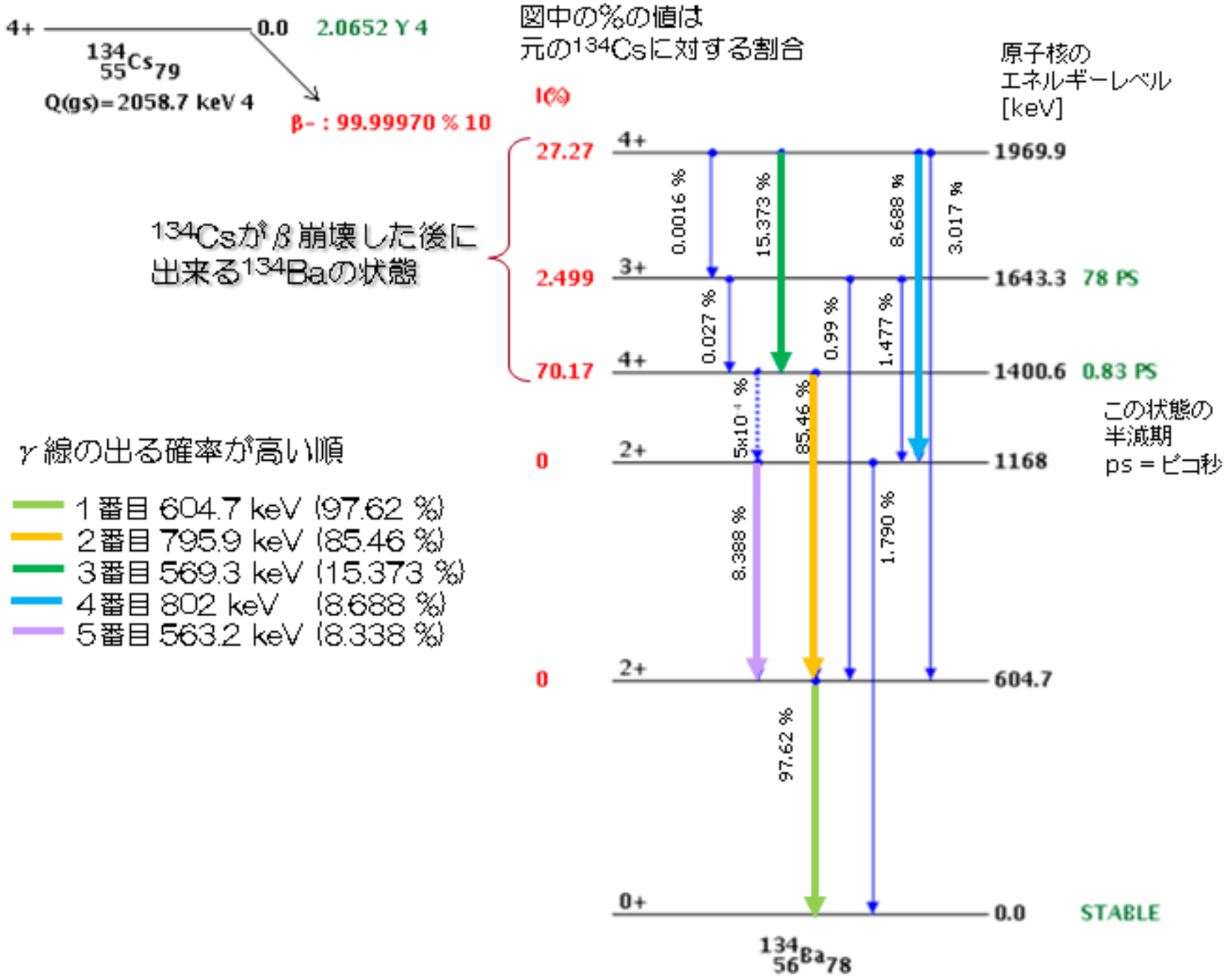
誤差
平均値の最後の桁にあわせた数字
この場合、89.14±0.13 を意味する

平均値

^{40}Kの出すγ線を数えて個数/秒が分かったとする、
実際に崩壊している^{40}Kはγ線の個数の約１０倍存在している。
たとえば、γ線が100 [個/秒] 出ているとすると、 ^{40}Kは 938 [Bq]あることを意味する。

崩壊図の出典: http://www.nndc.bnl.gov

^{134}Csの崩壊図



γ線の出る確率が高い順

- 1番目 604.7 keV (97.62 %)
- 2番目 795.9 keV (85.46 %)
- 3番目 569.3 keV (15.373 %)
- 4番目 802 keV (8.688 %)
- 5番目 563.2 keV (8.338 %)

原子核がとれる
エネルギー状態
は飛び飛び

高いエネルギー状態から
低い方に変わっていく

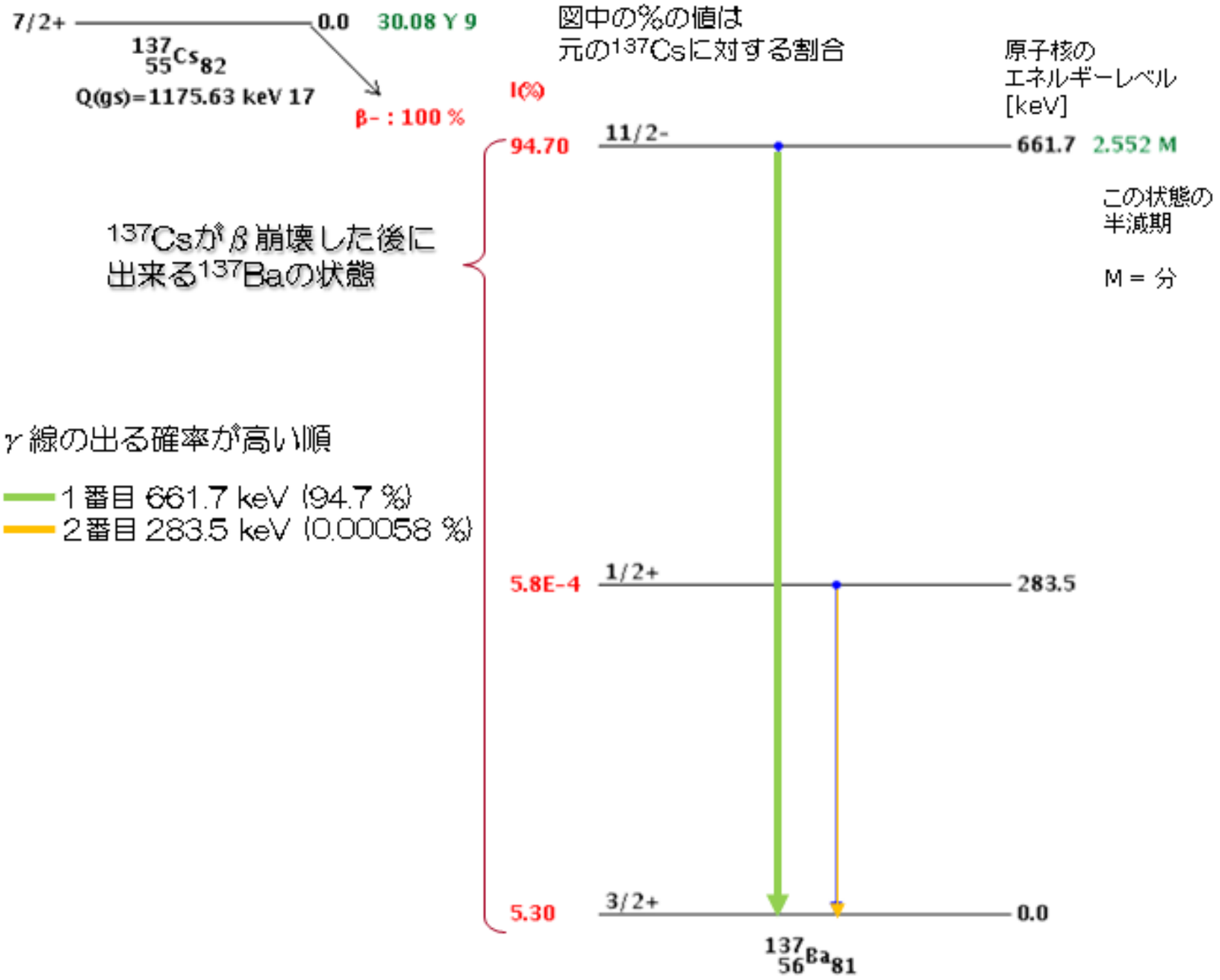
この時、二つの状態の
エネルギー差がγ線
として放出される

とれる状態が複数あると
経路も増える
→ 複数個のγ線を出す

1個の^{134}Csがβ崩壊
→ 約2.2個のγ線がでる。

崩壊図の出典: http://www.nndc.bnl.gov

^{137}Csの崩壊図



図中の%の値は
元の^{137}Csに対する割合

原子核の
エネルギーレベル
[keV]

この状態の
半減期

M = 分

^{137}Csがβ崩壊した後に
出来る^{137}Baの状態

γ線の出る確率が高い順

- 1番目 661.7 keV (94.7 %)
- 2番目 283.5 keV (0.00058 %)

原子核がとれる
エネルギー状態
は飛び飛び

高いエネルギー状態から
低い方に変わっていく

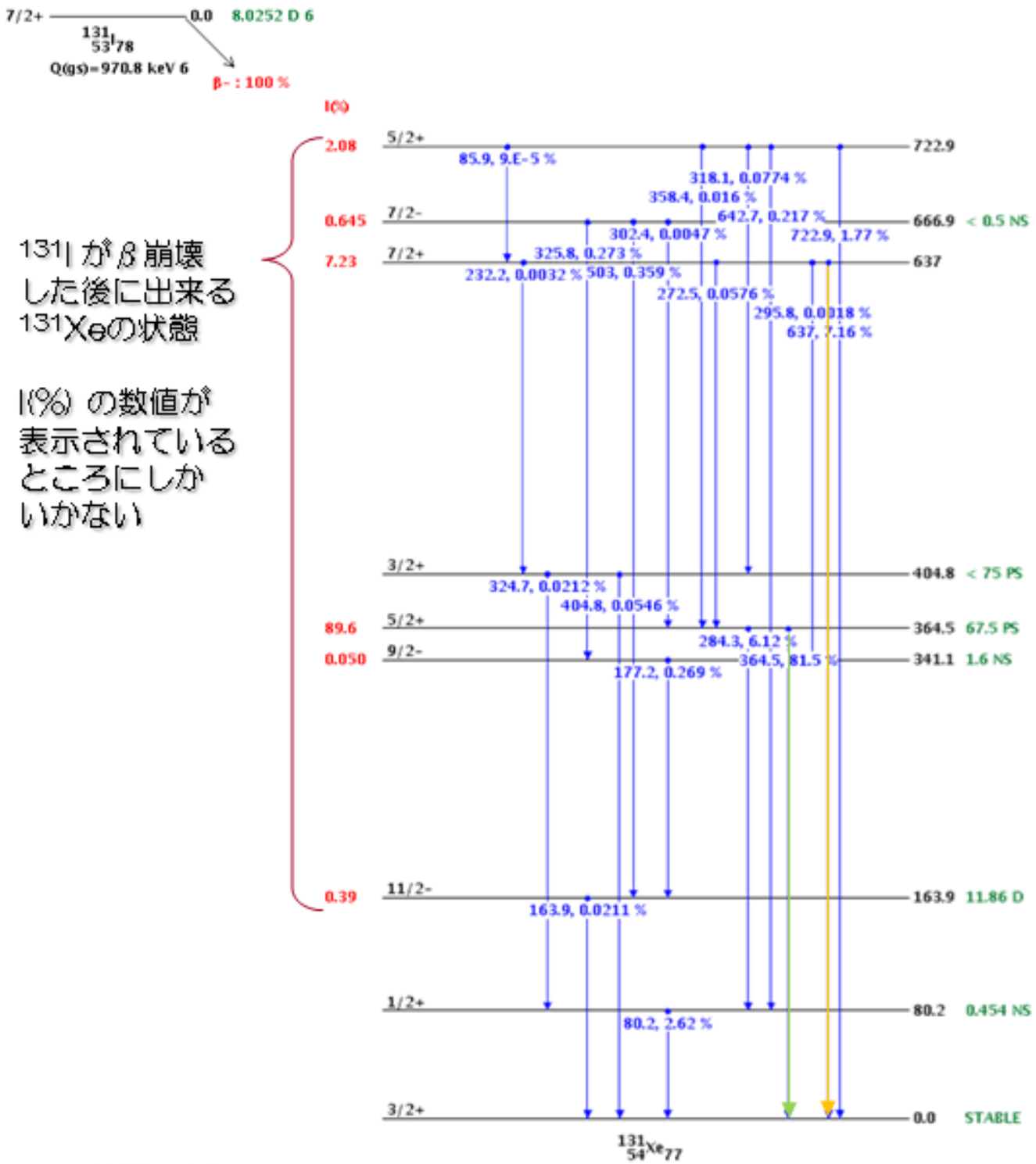
この時、二つの状態の
エネルギー差がγ線
として放出される

とれる状態が複数あると
経路も増える
→ 複数個のγ線を出す

^{137}Cs の場合、
一個の原子核がβ崩壊
すると、661.7 keV
のγ線が0.947個でる
と考えて差し支えない

崩壊図の出典: http://www.nndc.bnl.gov

^{131}Iの崩壊図



^{131}I が β 崩壊した後に出来る ^{131}Xeの状態

I(%) の数値が表示されているところにしかいかない

γ線の出る確率が高い順

- 1番目 364.5 keV (81.5 %)
- 2番目 637 keV (7.16 %)

崩壊図の出典: http://www.nndc.bnl.gov

降雨と放射線量率の関係

縦軸は対数表示

雨が降ると大気中に浮かんでいる天然放射性物質
Bi-214（半減期２０分）が落ちてきて線量率が上がる

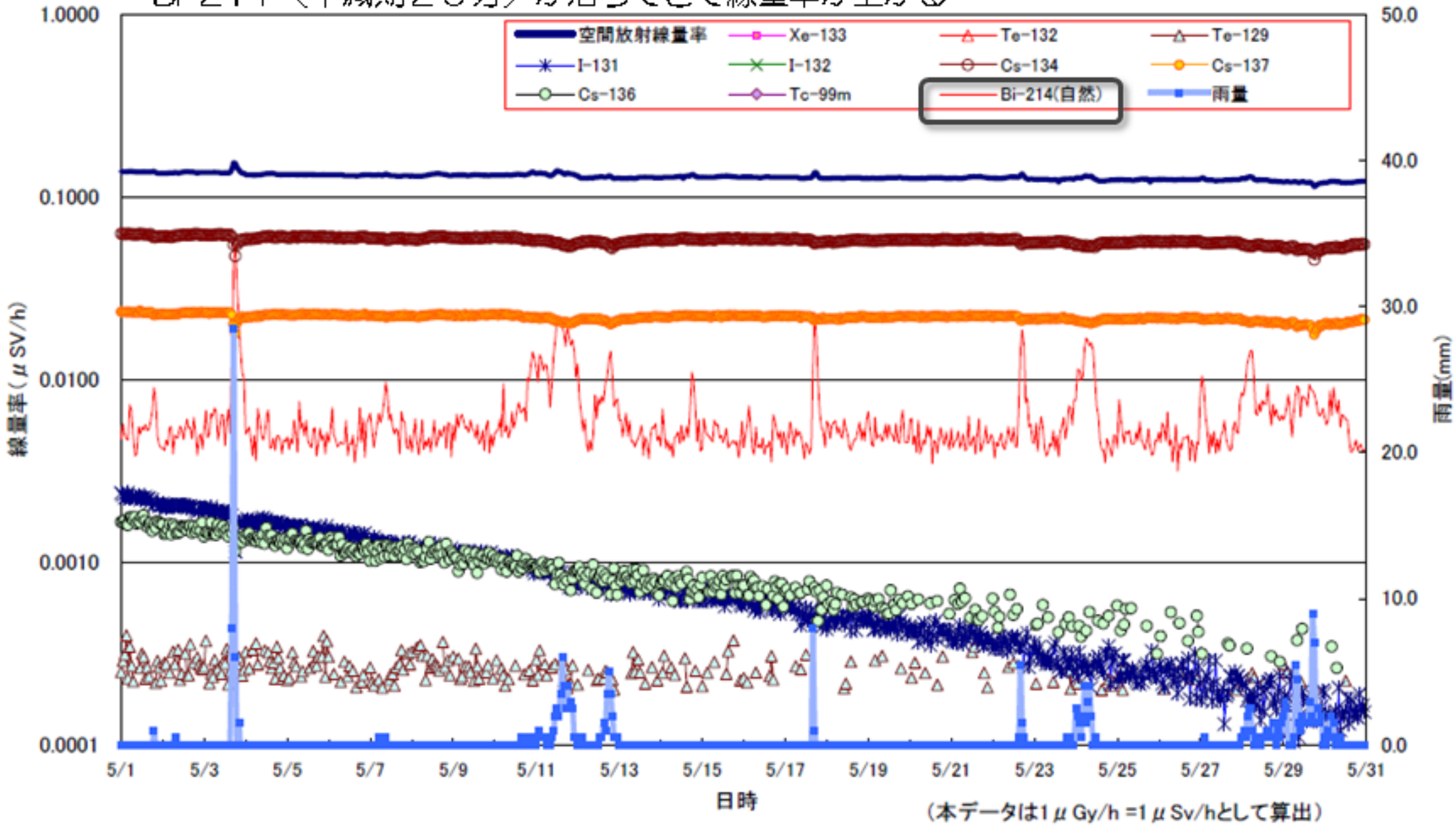


図　日本分析センターにおける空間放射線量率の測定結果

2011/5/31
日本分析センター調べ

出典:　http://www.jcac.or.jp/lib/senryo_lib/nodo.pdf 4ページ

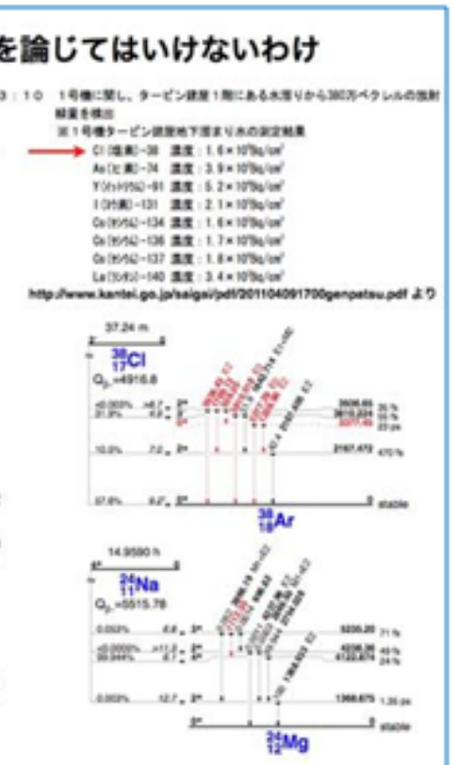
^{38}Cl誤検出にまつわる話

早野龍五(@hayano)氏のツイートより

2011年4月10日
(ちょっとテクニカルだけど，質問が多かったので) **Cl-38**検出のみに基づいて再臨界を論じてはいけないわけ(及び，塩素38m検出誤りについて再掲 http://bit.ly/h5xRwZ)．
http://plixi.com/p/91019372

Cl-38検出のみに基づいて再臨界を論じてはいけないわけ

- 3/25夜，塩素-38検出と報道．
- 再臨界→大量な中性子→海水中の塩素-37が中性子捕獲→塩素-38．
  塩素-38が見えた→再臨界というのがロジック
  （塩素-37の中性子捕獲断面積は 0.43b，同位体存在比 24%，
  塩素-38の半減期37分，1642.7 keVと2167.4 keVのガンマ線を出す．）
- しかし待て
- 塩=NaCl，海水中にはナトリウム-23もある．
  ナトリウム-23が中性子捕獲→ナトリウム-24も検出されるはず．
  （ナトリウム-23の中性子捕獲断面積は 0.40b，同位体存在比 100%，
  ナトリウム-24の半減期14.9時間，1368.6 keVと2754.0 keVのガンマ線を出す．
  塩素-38が1.6×10^{6} Bq/cm³あったなら，ナトリウム-24も2.6×10^{5} Bq/cm³ - 溜まり水で検出されたヨウ素-131と同じくらいの線量 - は検出されるはずだ．）
- しかし，ナトリウム-24は検出されていない！
- 東電が4/1に塩素-38m検出という，明らかな間違いをやったことも考えると（http://bit.ly/h5xRwZ），
  塩素-38が見えた→「すわ再臨界」は早計．



http://lockerz.com/s/91019372
(pilixi.com は、現在lockerz.com に変わっている)

2011年4月1日
【April Foolにしても，ありえない！】ガンマ線による東電の核種の同定に，明らかな間違いあり．プロなら全員同意するはず．もとのガンマ線スペクトル，一度見せてください→ @OfficialTEPCO
http://plixi.com/p/88437524

https://twitter.com/#!/hayano/status/53594238520270848

April Foolにしても，これはありえない．

http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake/monitor.pdf

にて公開された福島【第二】原発敷地内空気から塩素-38m検出．

これは東電の測定が間違っていると断言できます．プロなら誰でもすぐに変だと分かる．

ガンマ線スペクトルを見せてください→TEPCO



http://lockerz.com/s/88437524

^{38}Cl誤検出にまつわる話(続き)

http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110420006/20110420006-7.pdf
6ページ目

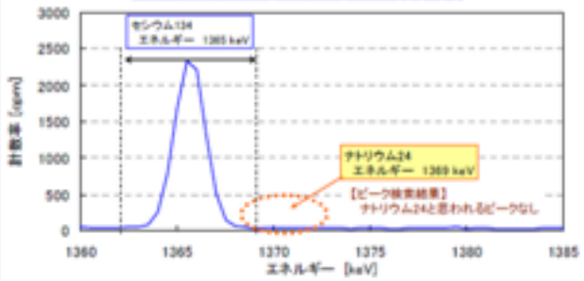
（参考） 福島第一　1号機タービン建屋地下1階のたまり水 Cl-38核種分析の評価について

○再評価結果

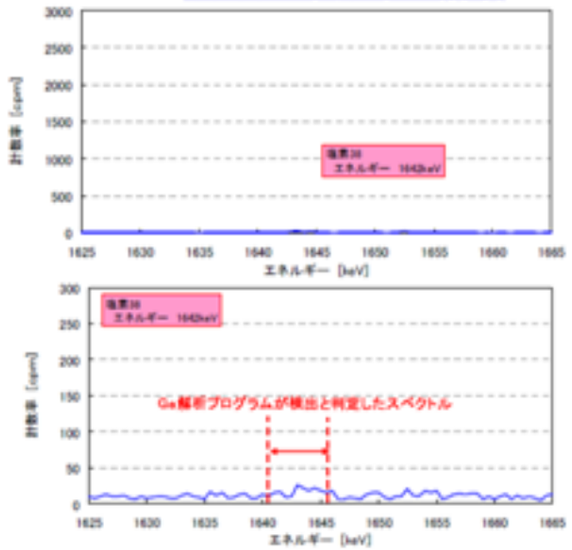
福島第一1号機では、3月23日～25日の間、原子炉に海水注入しているため、Cl-37(n, γ)Cl-38反応により、塩素38が生成されているとの可能性はあった。

しかし、この場合、塩素と同様に炉内に持ち込まれたナトリウムも放射化され、塩素38より半減期が長いナトリウム24も検出されることが推測されるものの、ナトリウム24は検出されていない。このため、Cl-38が生成されたとは考えにくく、他の核種の散乱線などの影響でわずかに検出限界を超えたものと推測している。

Na-24エネルギー領域



Cl-38エネルギー領域



縮尺：1/10

注：Cl-37(n,γ)Cl-38 反応というのは、中性子がCl-37にあたり、Cl-38とγ線 が出るという反応です。Cl-38が出来るのは、海水中に含まれる塩化ナトリウム（NaCl)が中性子と反応したということを意味します。中性子があるということは、原子炉内で再臨界が起こって核分裂反応が起きているの証拠だと騒がれたのですが、データを見なかったこととデータを総合的に判断しなかった（Na-24が検出されていないことを無視していた）ことが間違いの原因です。

生データを見ることなしに、機械（解析プログラム）の表示することを鵜呑みにすると間違っていても気がつかない！

2011年4月20日
東京電力が同じデータを再解析した結果についての発表
Cl-38は検出限界以下
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110420j.pdf
1ページ目

福島第一　1号機タービン建屋地下階の溜まり水の核種分析結果

	（再評価）	（3月25日参考配布）	（変更理由）※
採取場所	福島第一1号機 タービン地下溜まり水 （1回目）	福島第一1号機 タービン地下溜まり水 （1回目）	－
試料採取日	平成23年3月24日	平成23年3月24日	－
検出核種 （半減期）	試料濃度 (Bq/cm^3)	試料濃度 (Bq/cm^3)	－
Cl-38 （約37分）	検出限界未満	1.6×10^{0}	①
As-74 （約18日）	検出限界未満	3.9×10^{2}	①
Y-91 （約59日）	5.2×10^{4}	5.2×10^{4}	－
I-131 （約8日）	2.1×10^{5}	2.1×10^{5}	－
Cs-134 （約2年）	1.6×10^{5}	1.6×10^{5}	－
Cs-136 （約13日）	1.7×10^{4}	1.7×10^{4}	－
Cs-137 （約30年）	1.8×10^{5}	1.8×10^{6}	③
La-140 （約2日）	3.0×10^{2}	3.4×10^{2}	②

※再発防止対策に基づき、①主要ピークによる核種の同定及び放射能濃度の決定、②放射平衡を踏まえた放射能濃度の評価により再評価を実施。その他、③データの転記誤りの修正を実施。

ホール・ボディ・カウンター(WBC)

A社



椅子型

遮蔽がない
自分で遮蔽を用意するか、
バックグランドの放射線
レベルの低い場所に設置
しなければならない。

F社



ベッド型



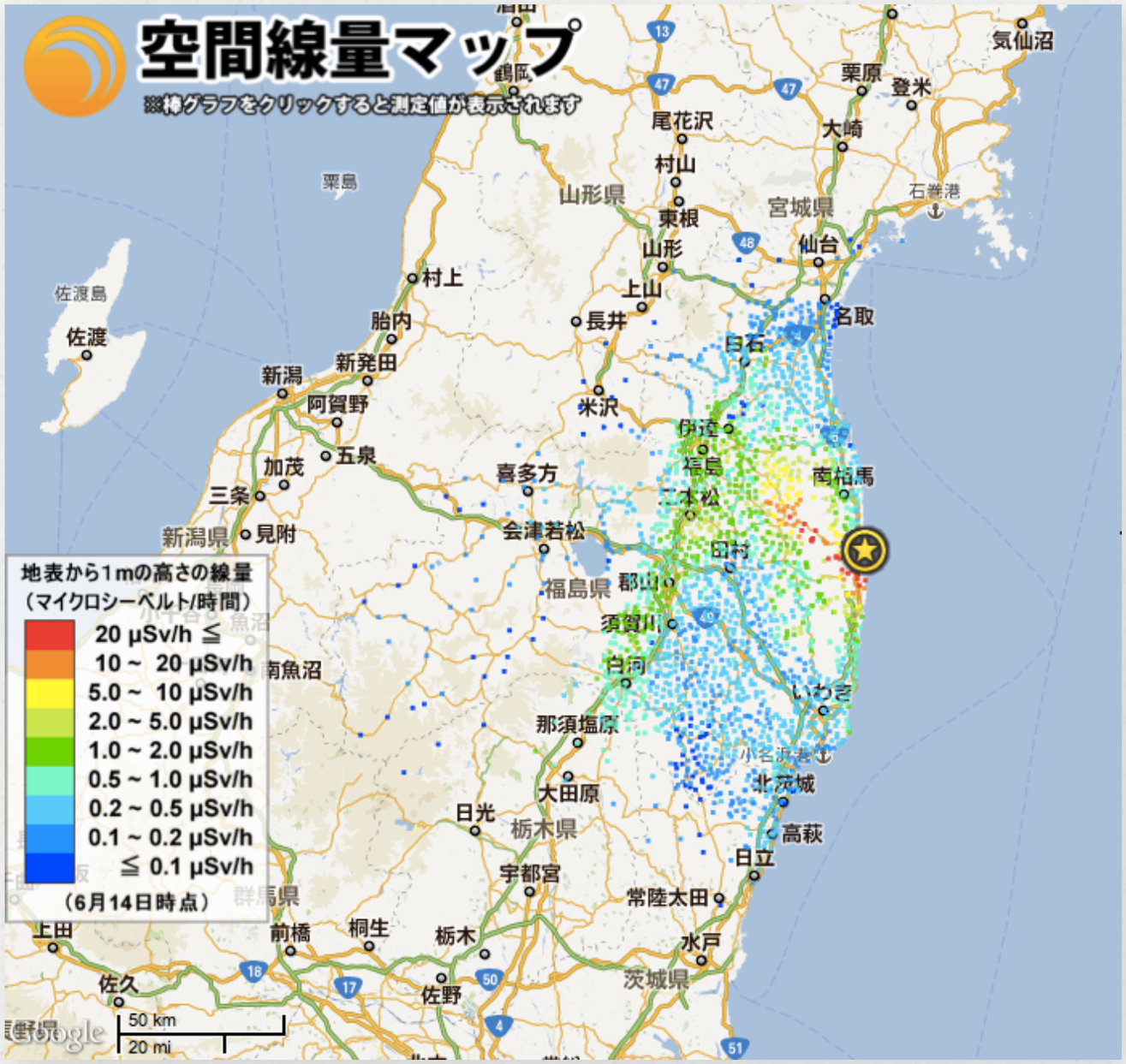
チェア型
周りに遮蔽がある

C社

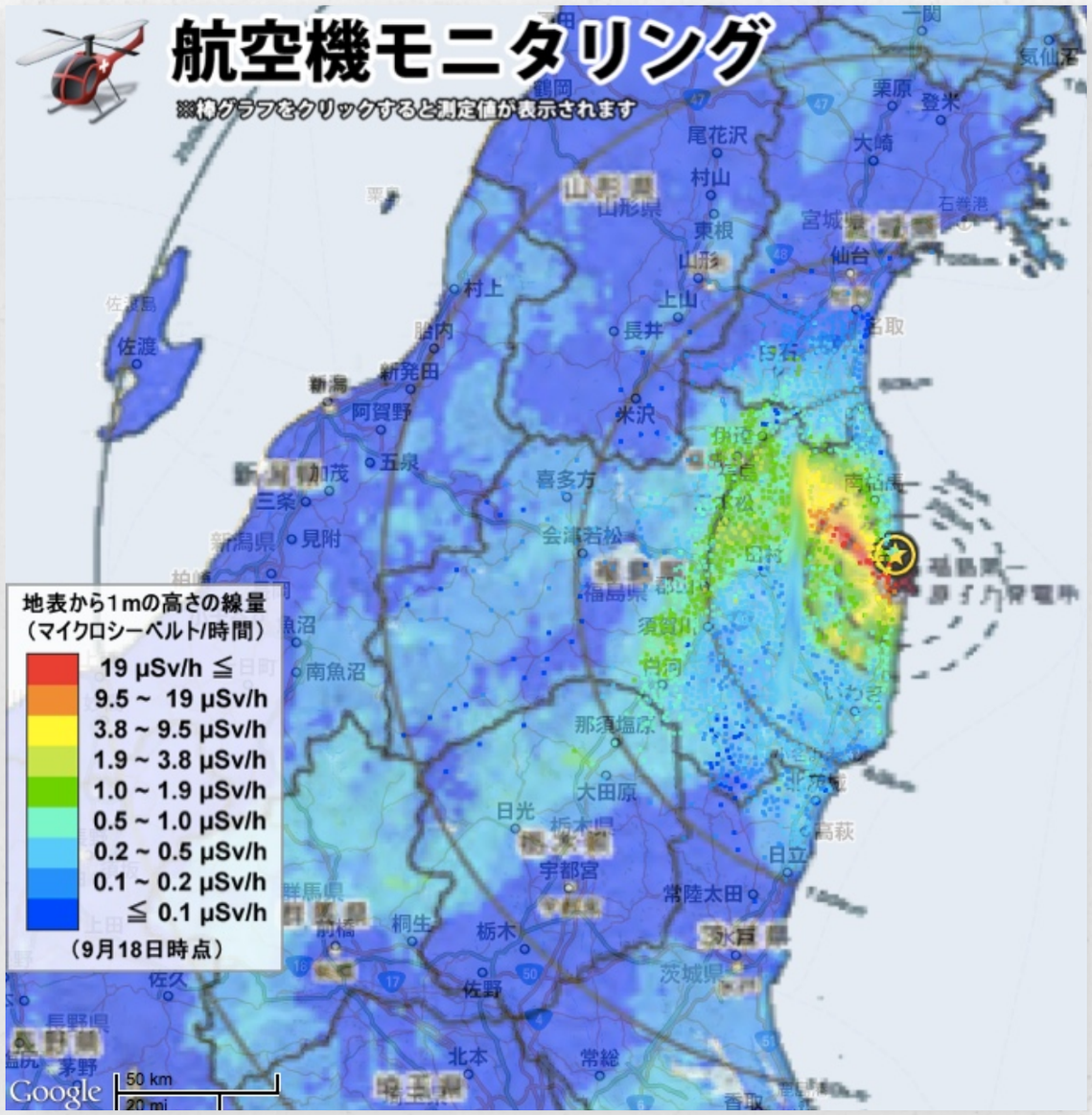


宮城県周辺の測定

空間線量率



「放射線量等分布マップ作成」プロジェクト
地表１ｍの高さで実際に測定

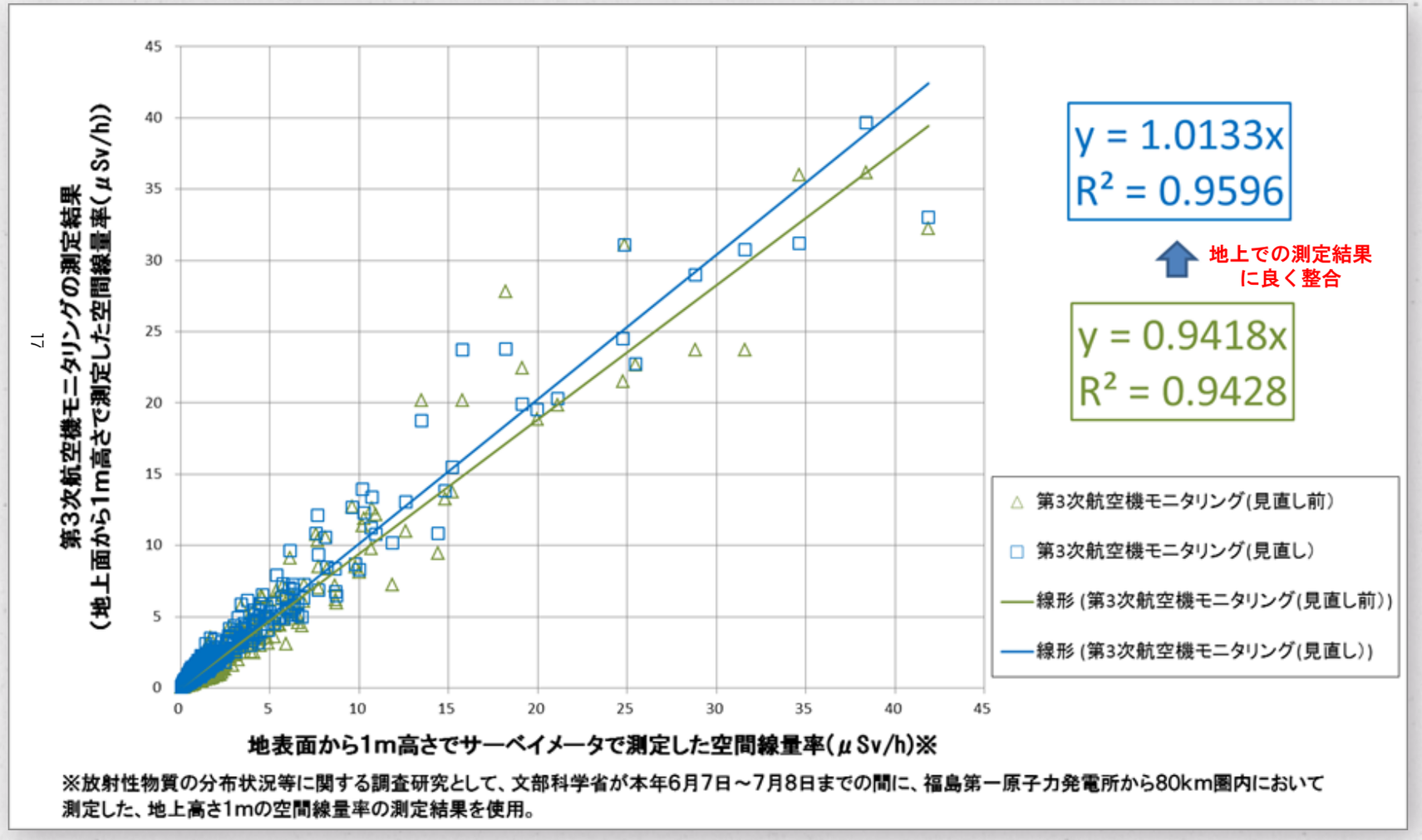


航空機モニタリング
上空(150-900 m)で測定を
地表１ｍの高さに外挿

http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_around_FukushimaNPP_MEXT_DOE_airborne_monitoring/

別紙5（参考4）

第3次航空機モニタリングの測定結果（空間線量率）の見直し結果と文部科学省が6月に実施した約2,200箇所の空間線量率の測定結果の比較



※放射性物質の分布状況等に関する調査研究として、文部科学省が本年6月7日～7月8日までの間に、福島第一原子力発電所から80km圏内において測定した、地上高さ1mの空間線量率の測定結果を使用。

文部科学省による 第4次航空機モニタリングの測定結果について（平成23年12月16日）、より

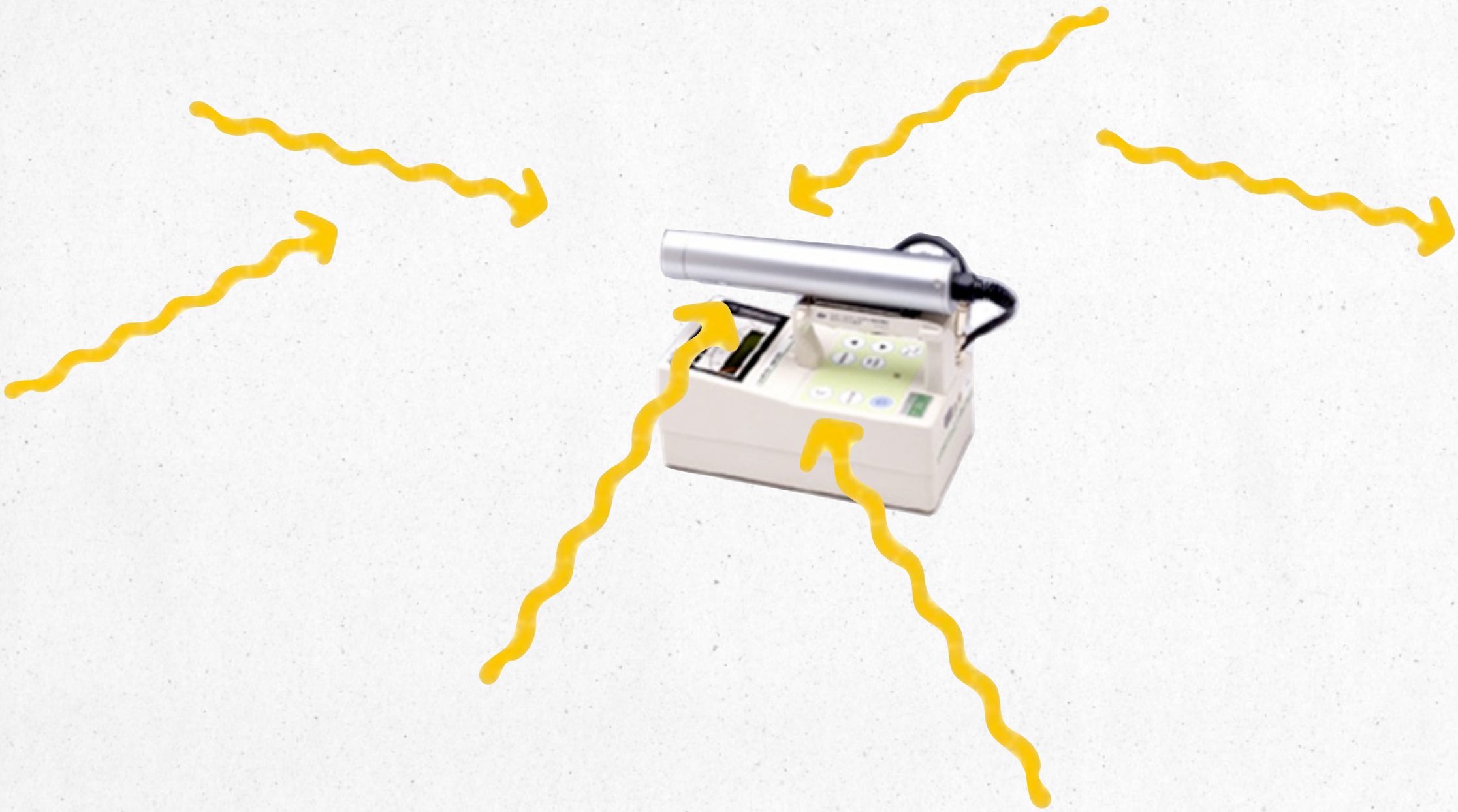
http://radioactivity.mext.go.jp/ja/1910/2011/12/1910_1216.pdf

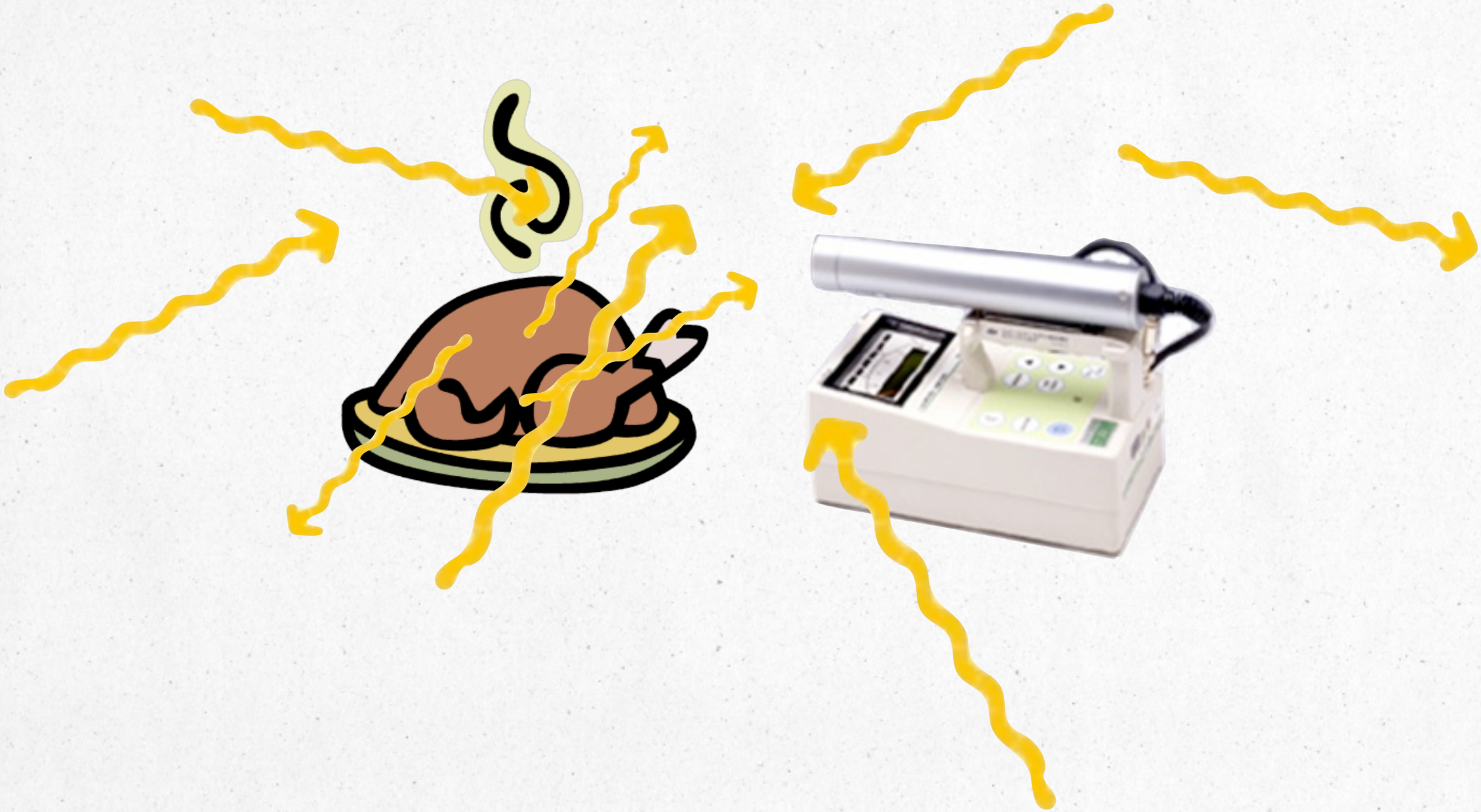
点がばらついていることに注意

（５０％位違う点がある）

土壌・食品中に含まれる放射性物質の測定を行う時の注意

空間線量率の測定





測定したガンマ線

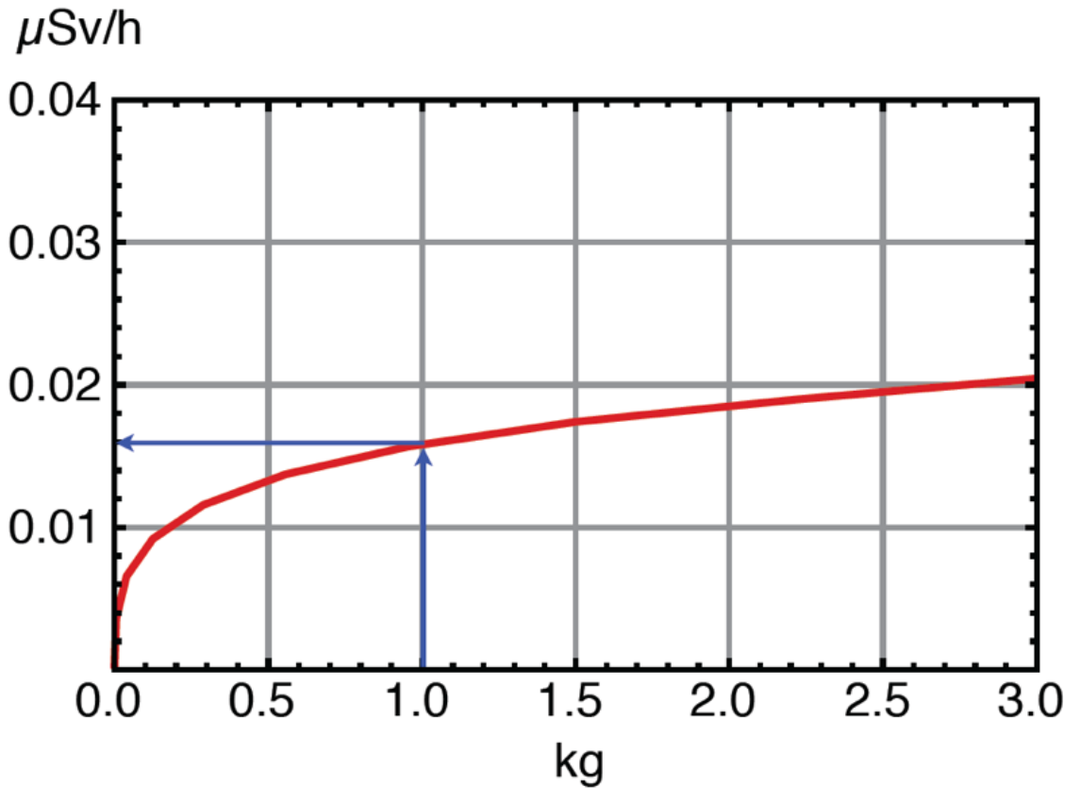
どこから来た？

測定器が「見ている」
ガンマ線

殆どは、別の場所から

遮蔽が不可欠

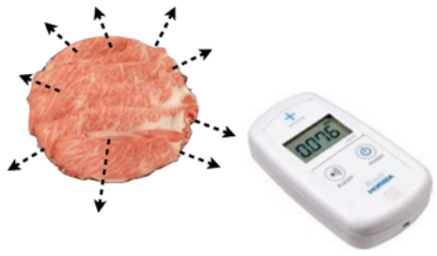
セシウム 500Bq/kg の食品表面の空間線量



Thursday, October 20, 11

500Bq/kg のセシウム汚染食品 1kg

表面線量は 0.01μSv/h 程度



これなら楽勝？

注意）1kg, 5kg, 10kgと増やしても，0.03μSv/hぐらいで頭打ち

Thursday, October 20, 11

このページ内のスライドは、東京大学大学院理学系研究科早野龍五氏提供
2011年10月21日のニコニコ生放送
「緊急報告！アナタの食べ物は大丈夫？～放射線による食品汚染の実態に迫る～」
で使われた説明のスライドから。
全てのスライドは
http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou で見れます。

食品検査に使われる測定器の例

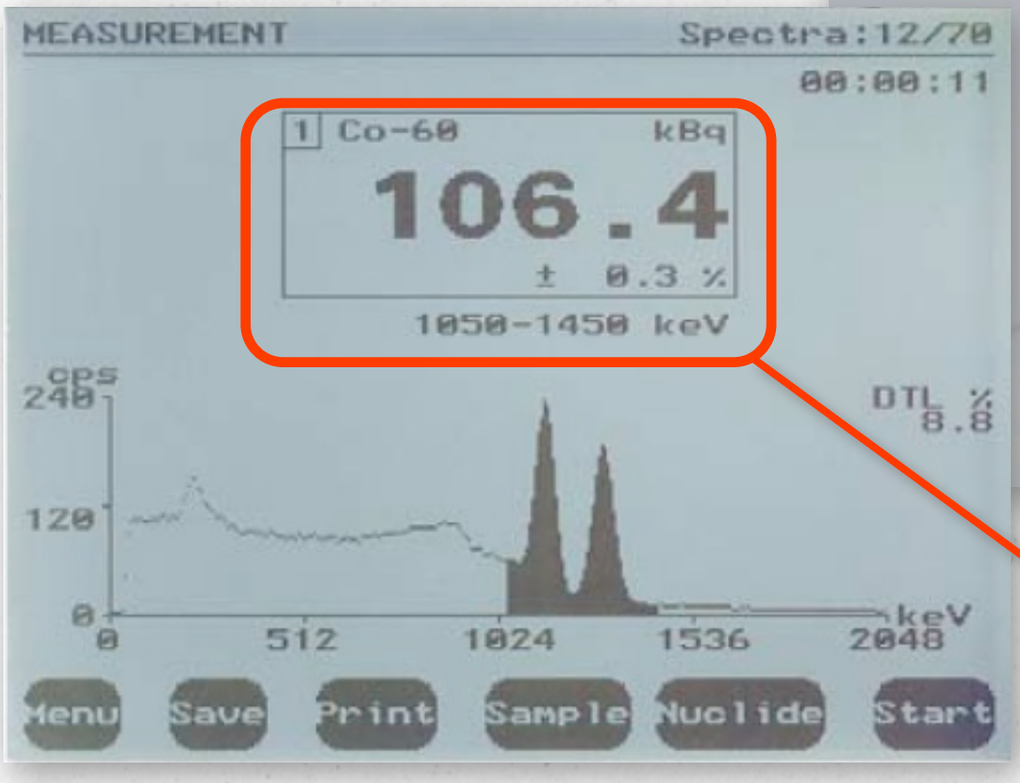
写真
あるメーカの
カタログから



サンプルを専用容器
に入れて設置する場所

鉛で囲み
バックグランドを
遮蔽している

下の筒状の部分：
NaI (ヨウ化ナトリウム)
結晶とセンサーの入って
いる場所



縦軸：一秒あたりのガンマ線の個数

横軸：ガンマ線のエネルギー

あるエネルギーのガンマ線が1秒辺り
何個来たかという数字からベクレルに換算
（この換算方法に注意が必要）

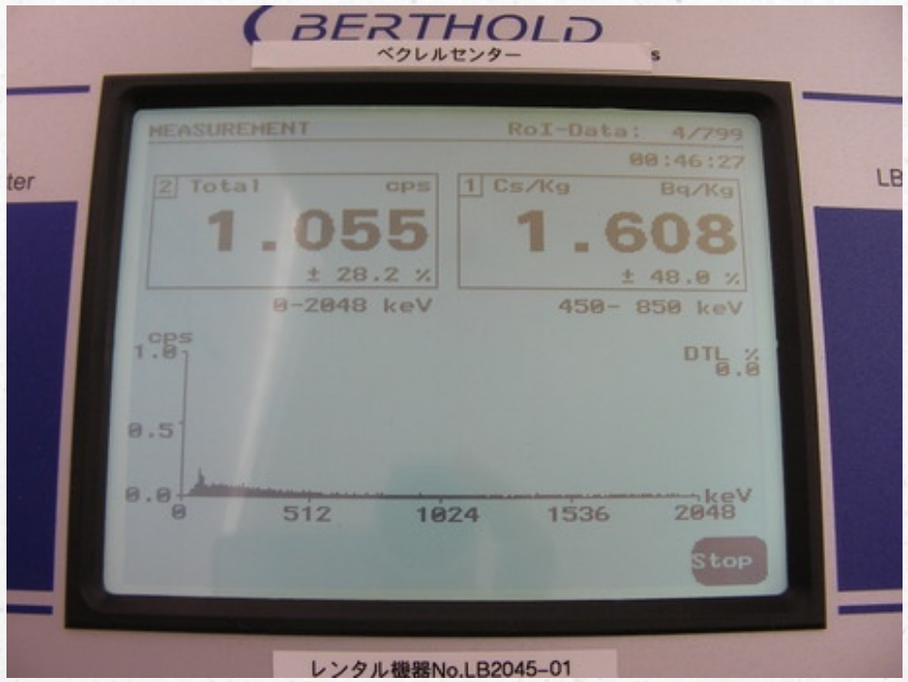
放射能の測定

ガンマ線

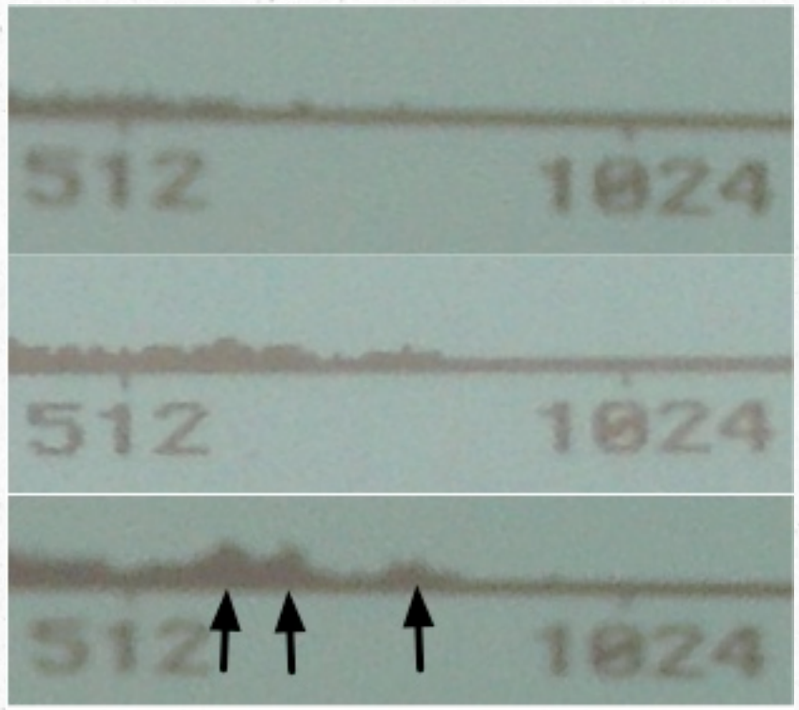
エネルギー

個数

核種ごとにBq数を見積もる



ピークが見える？

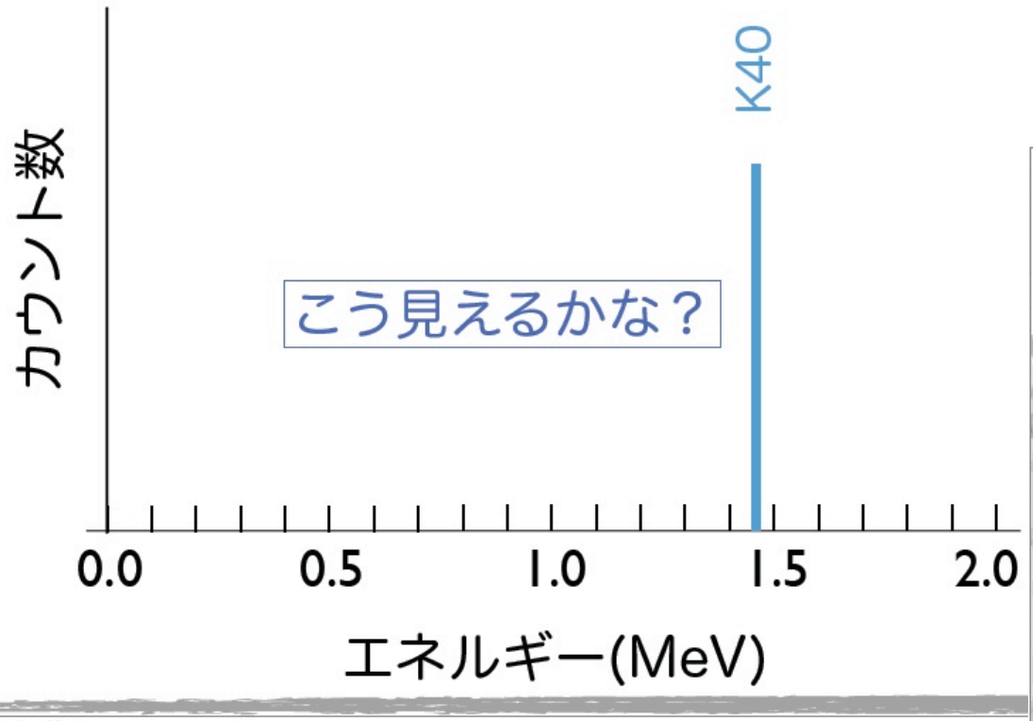


^{134}Cs, ^{137}Cs のガンマ線の
エネルギーの場所

写真：KEK野尻美保子氏のブログ　http://nojirimiho.exblog.jp/14639366/ より

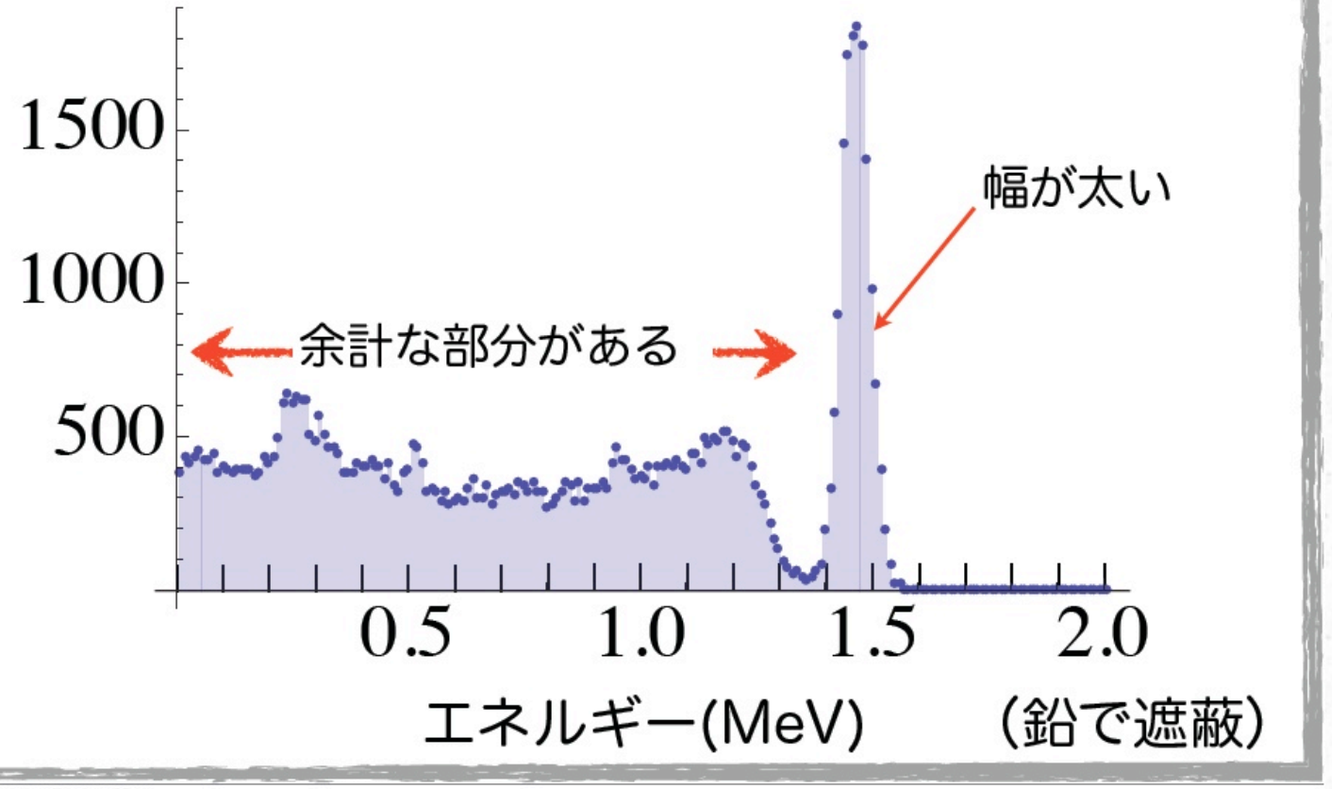
NaI 検出器で「やさしお®」を測定してみる

（天然放射性物質であるK40を多く含む）



Thursday, October 20, 11

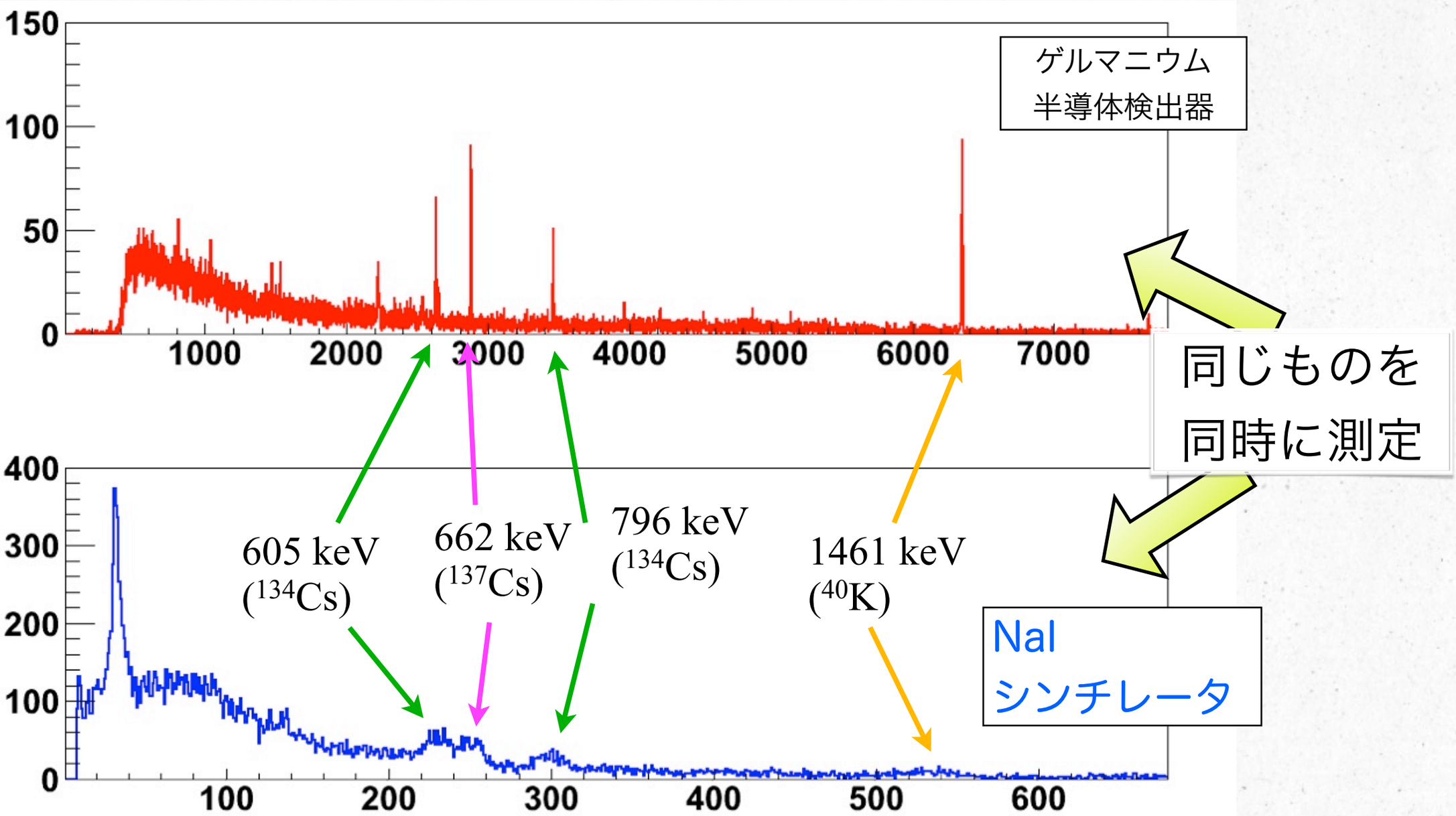
おや，どうしてこうなっちゃうの？



Thursday, October 20, 11

このページ内のスライドは、東京大学大学院理学系研究科早野龍五氏提供
http://www.slideshare.net/RyuHayano/nicohou より

検出器の違いによる分解能の違い



縦方向の「ギザギザ」：測定個数のゆらぎ

ピークの横方向の広がり：分解能

分解能が良い（幅が細い）とピークが重ならず区別しやすくなる

放射能の測定

十分な遮蔽

測りたいガンマ線個数

ピークの下にあるゴミの正しい見積もり

検出効率の見積もり

通り抜けたガンマ線すべてを数えていない

そんなに簡単ではない

が、きちんとやれば誰がやっても同じ結果になる