放射線・放射性物質

- 科学的な見方から -

東北大学大学院理学研究科物理学専攻

助教　金田雅司

今日の講義のスライドは

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

から、後日ダウンロード出来るようにします

この授業のポイント

この授業のポイント

物質は何から出来ている？

この授業のポイント

物質は何から出来ている？

放射性物質と放射線

この授業のポイント

物質は何から出来ている？

放射性物質と放射線

素粒子・原子核の研究

講義に入る前に

自己紹介

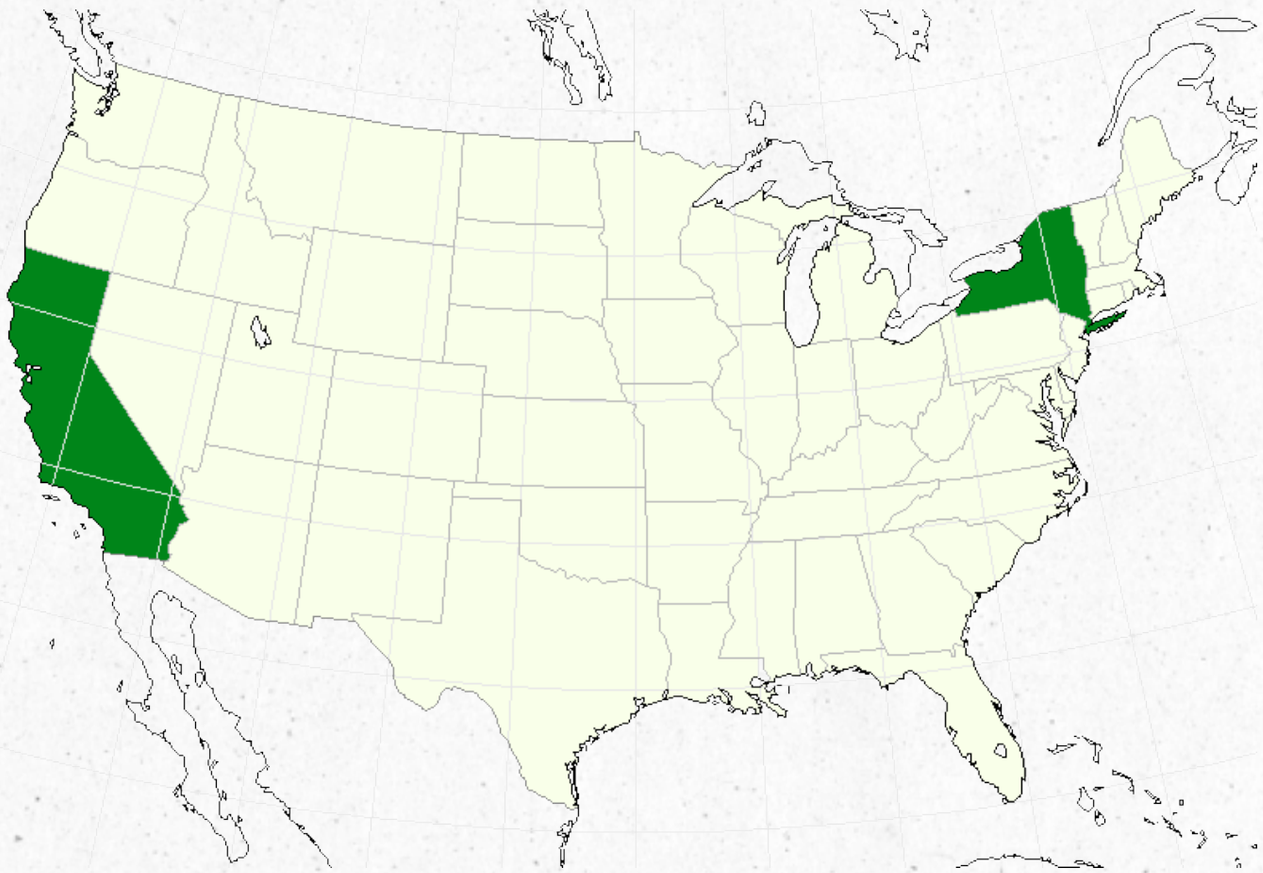
何してる人？

専門

素粒子・原子核物理

(実験)

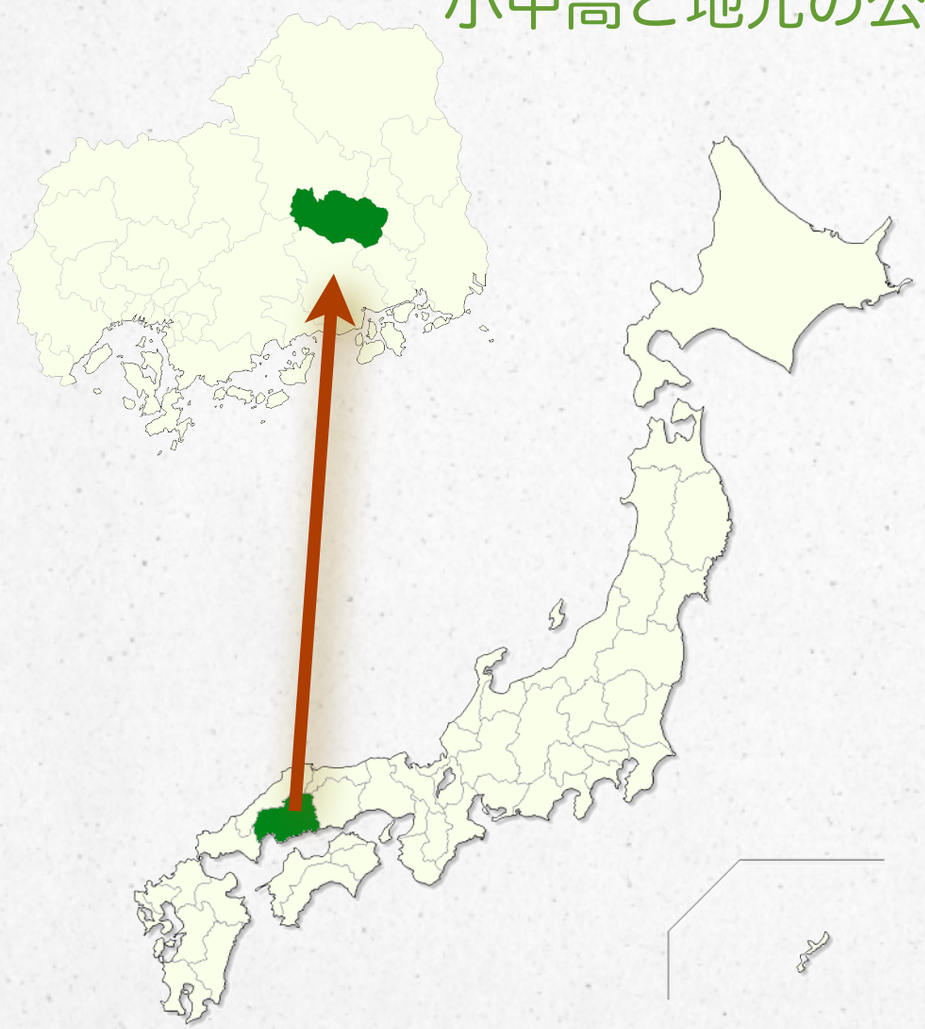
経歴

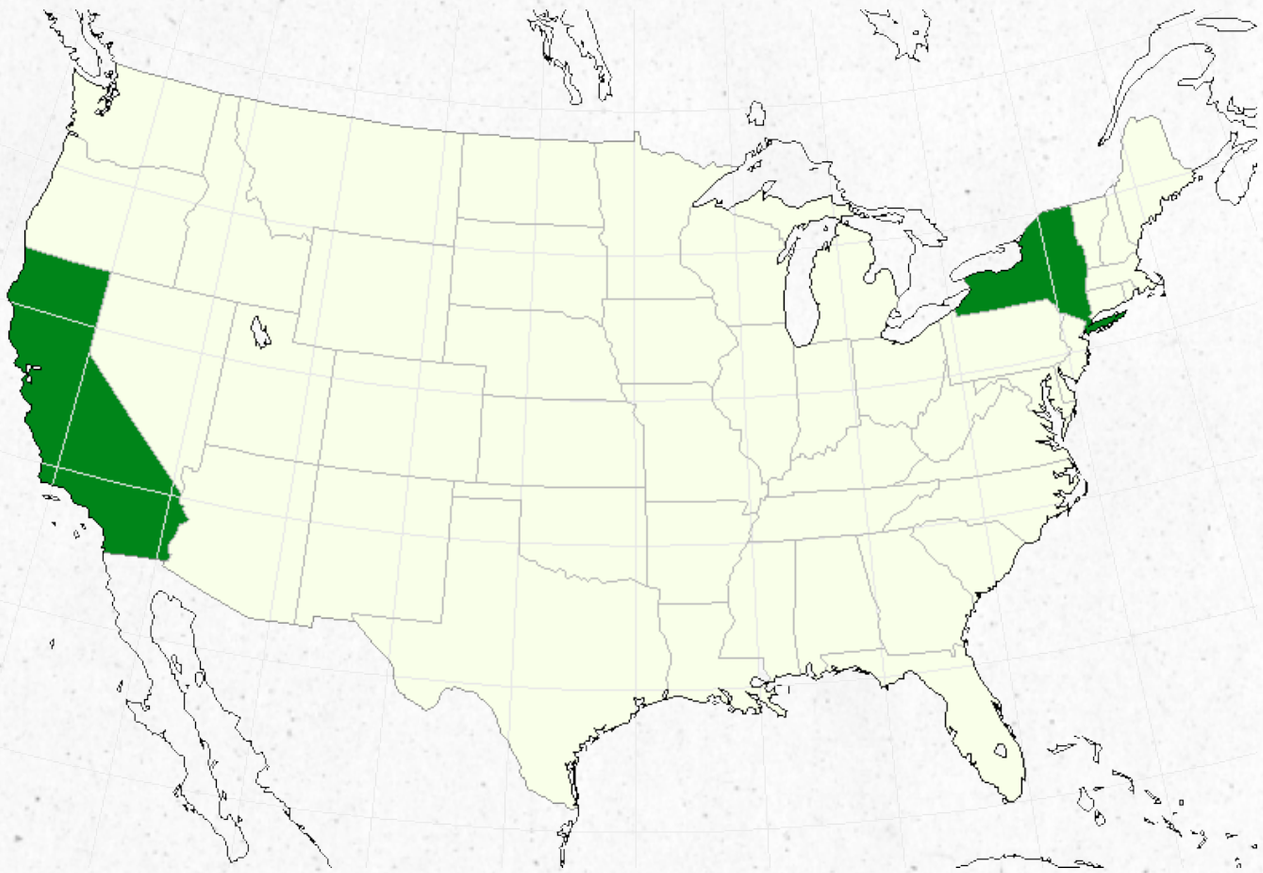


経歴

出身：広島県世羅郡

小中高と地元の公立

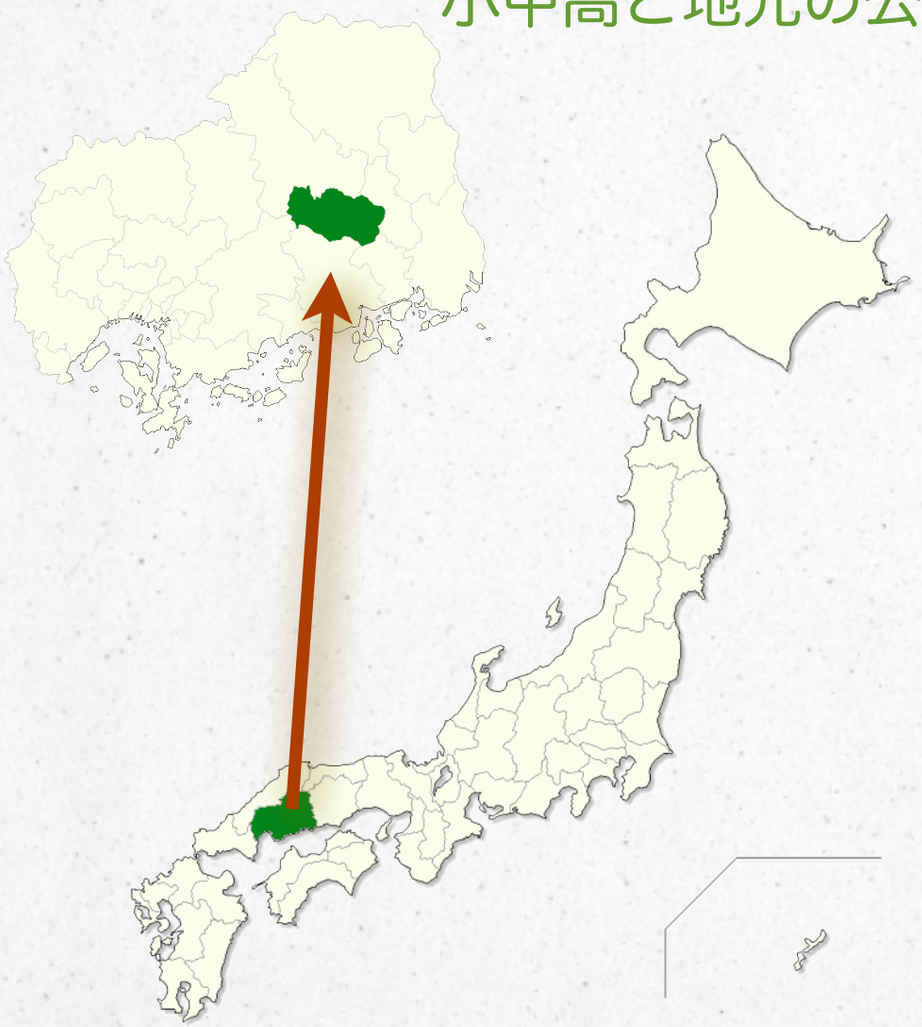


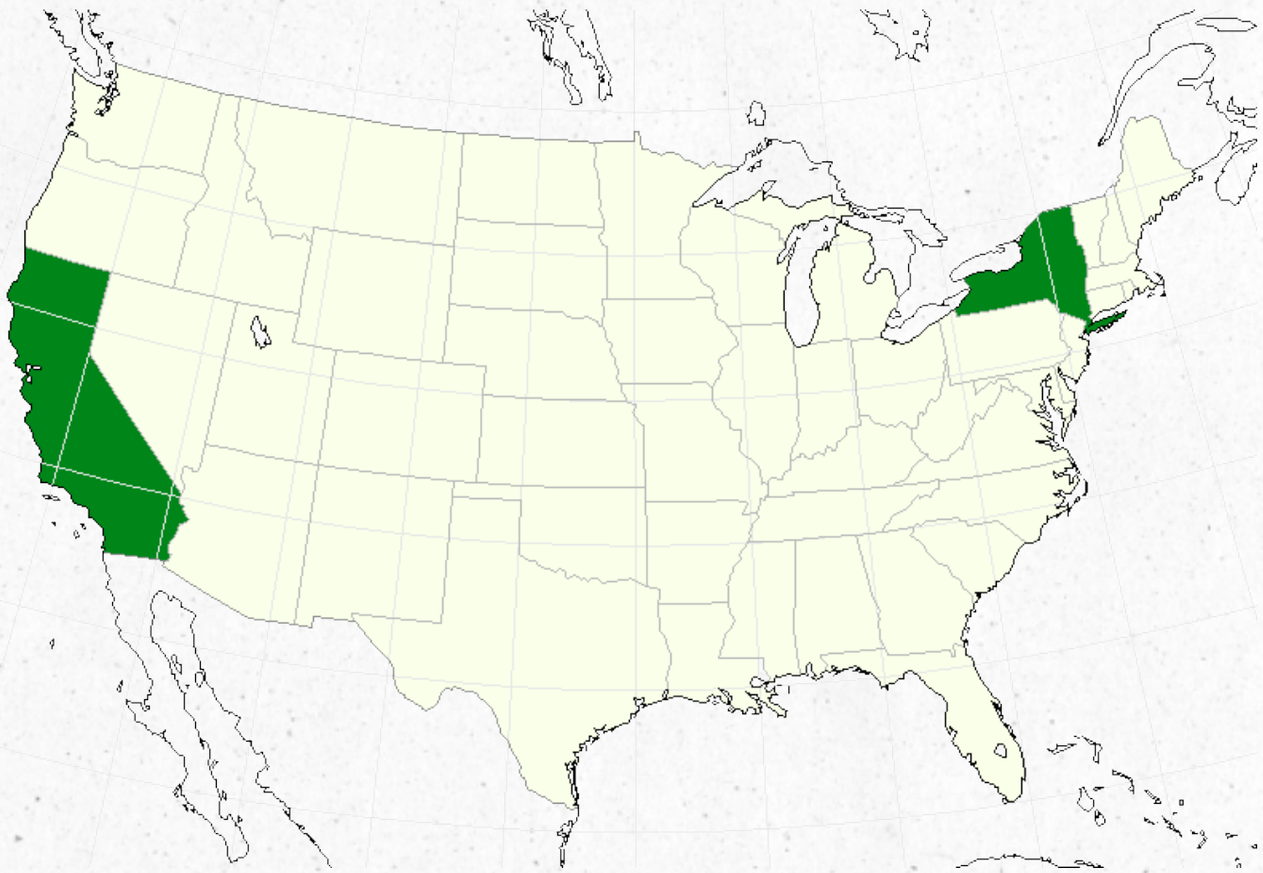


経歴

出身：広島県世羅郡

小中高と地元の公立





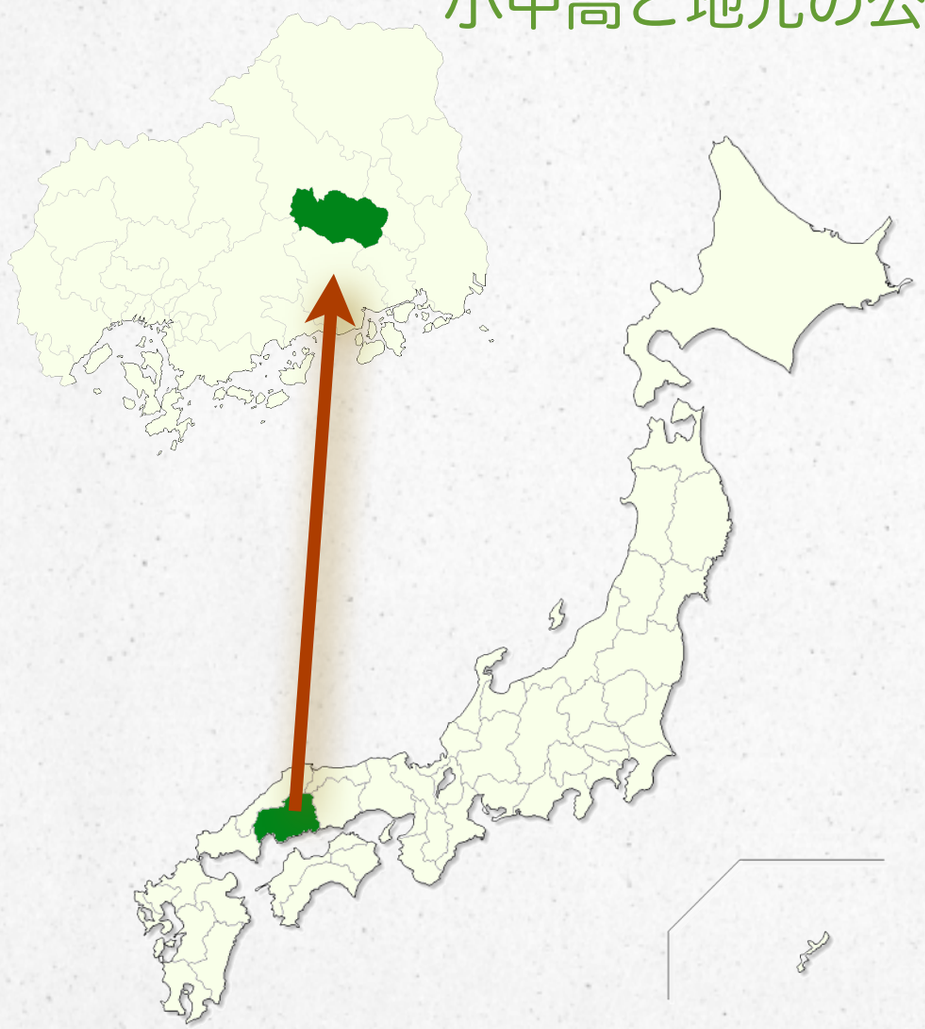
広島大学教育学部教科教育学科

広島大学大学院理学研究科物理学専攻

経歴

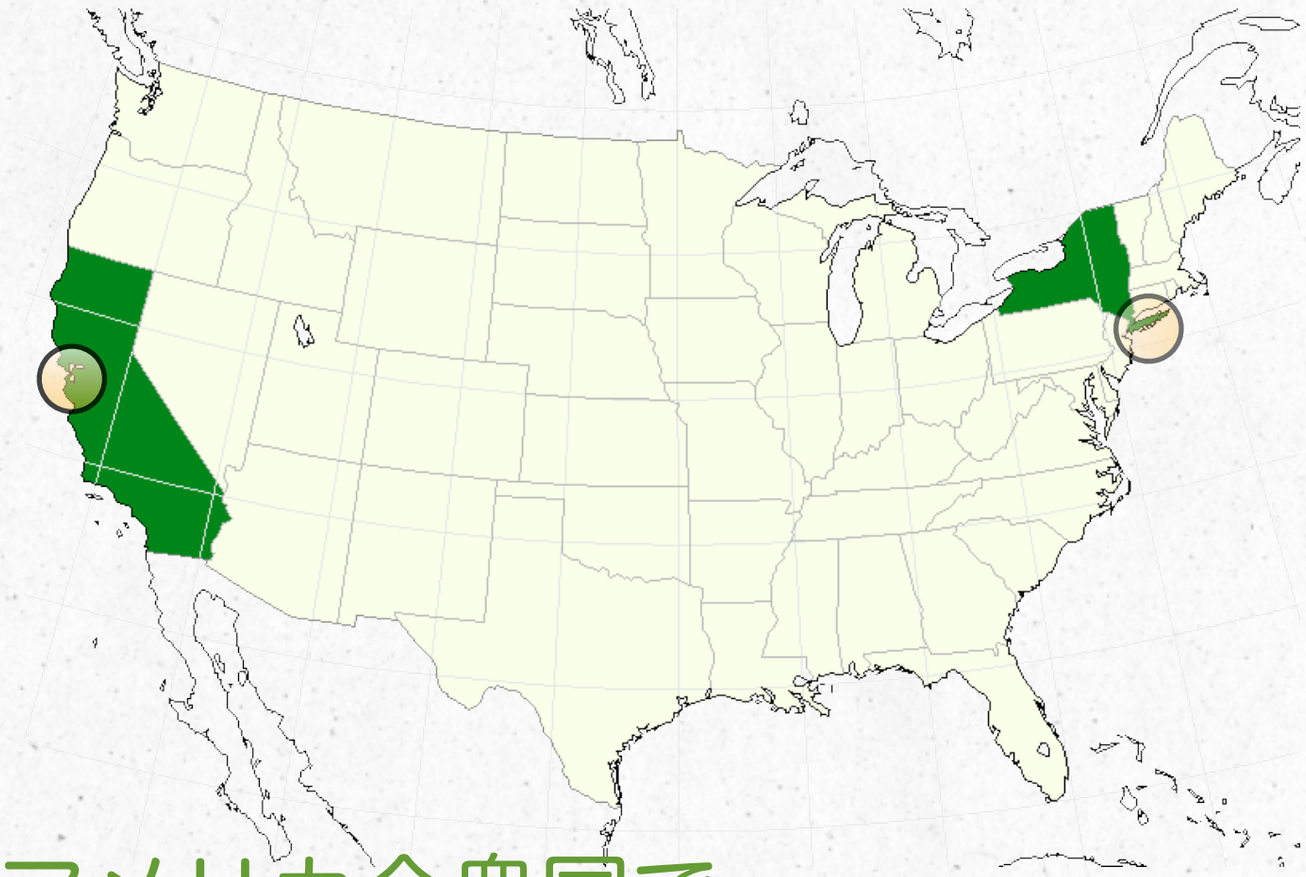
出身：広島県世羅郡

小中高と地元の公立



広島大学教育学部教科教育学科

広島大学大学院理学研究科物理学専攻



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

日本に戻ってきて、７年目

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

日本に戻ってきて、７年目

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

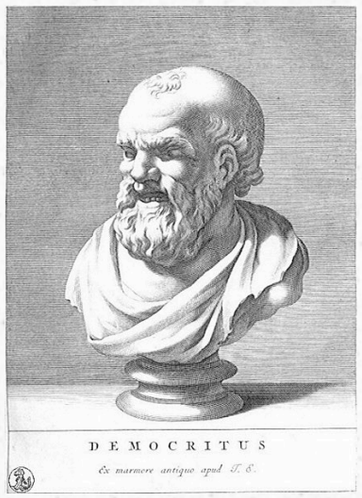
物質は何から出来ている？

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

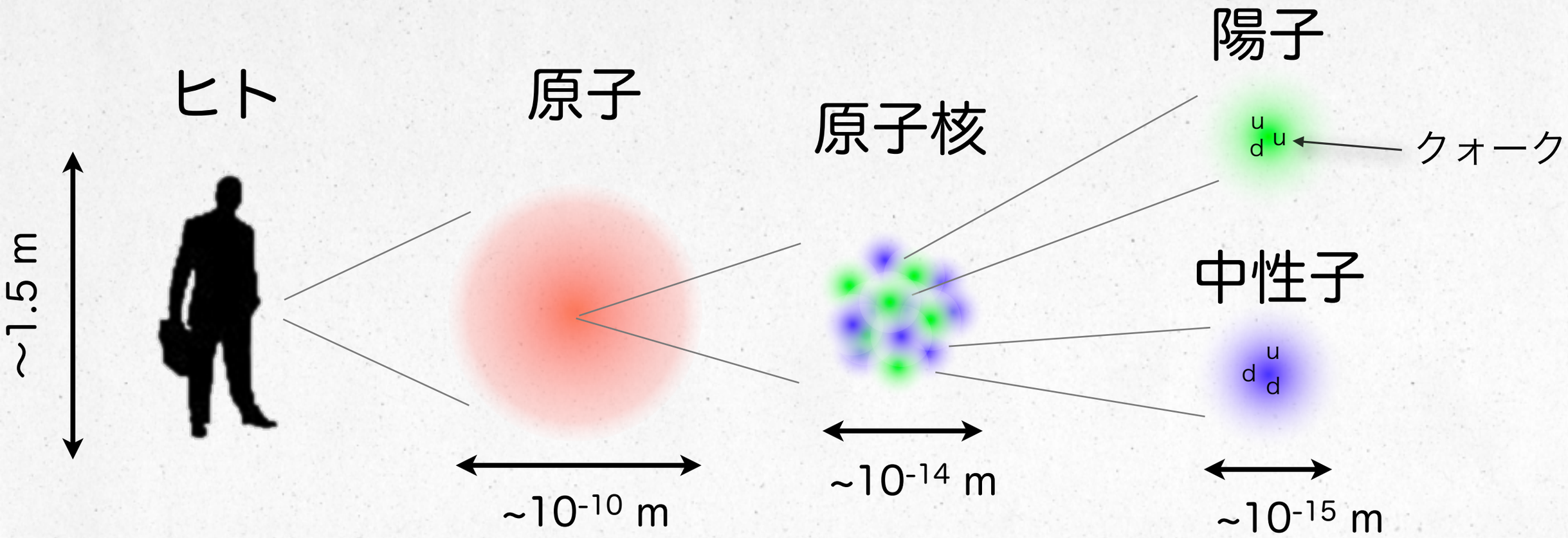


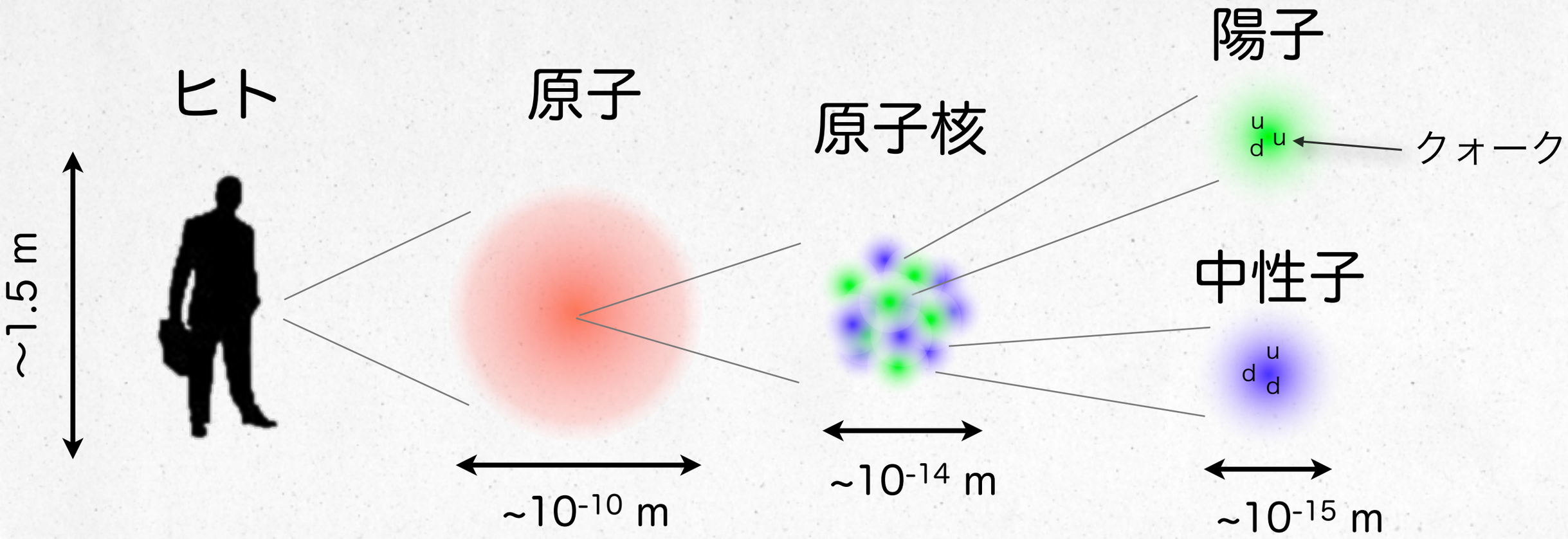
これ以上
“分解できないもの”
ἄτομος (atomos)
がある

近代哲学

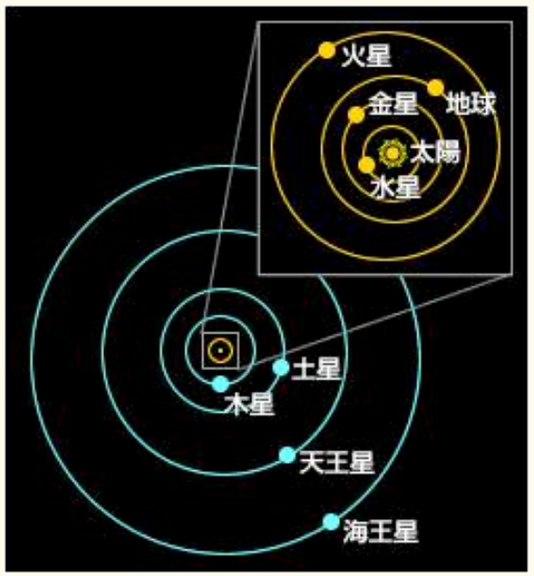
デカルト

どんなに細かくしても
さらに分割出来る

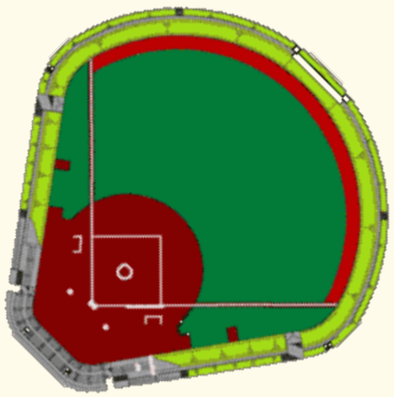

ヒト
原子
原子核
陽子
中性子
クォーク
~1.5 m
~10-10 m
~10-14 m
~10-15 m
u
d
u
u
d
d



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

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

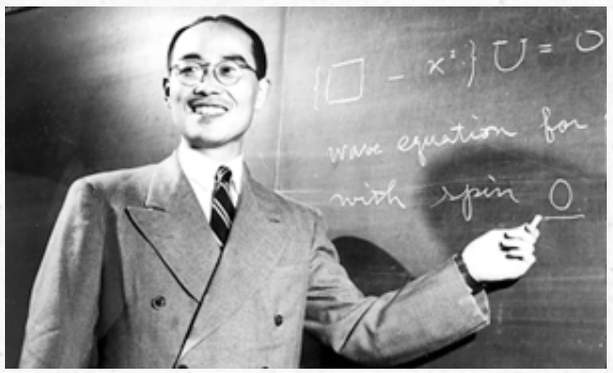
クォークから出来ているもの ＝ハドロン

クォーク三つ バリオン

陽子　　中性子

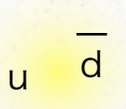
Λ (ラムダ)

クォークと反クォーク メソン（中間子）

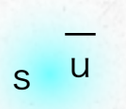


湯川秀樹博士によって予言。後に発見され、1949年ノーベル物理学賞を受賞

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



π^+

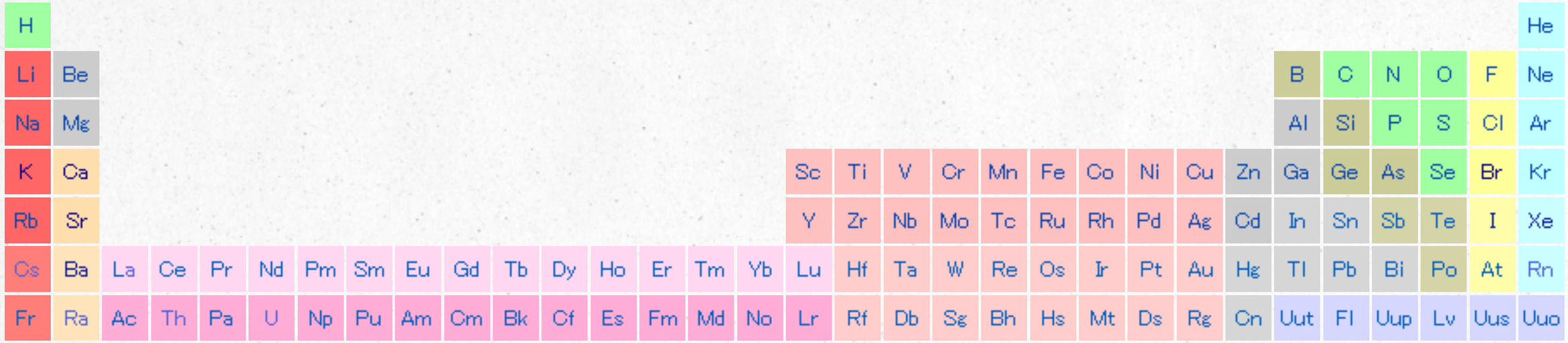


K^+

ここに挙げたよりもさらに数多くのバリオンとメソン

元素（原子）の種類

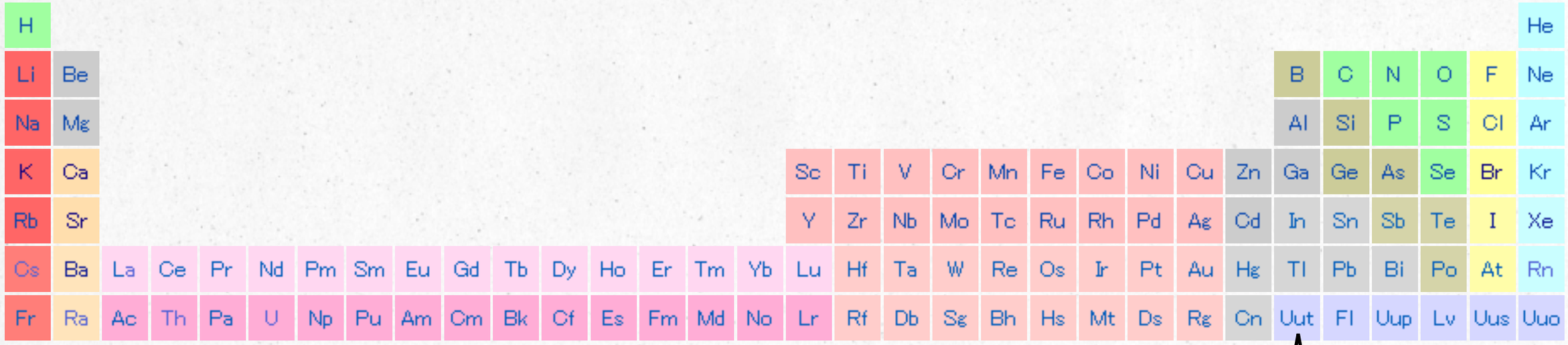
周期表：物理的・化学的に似た元素を並べたもの



- 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

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

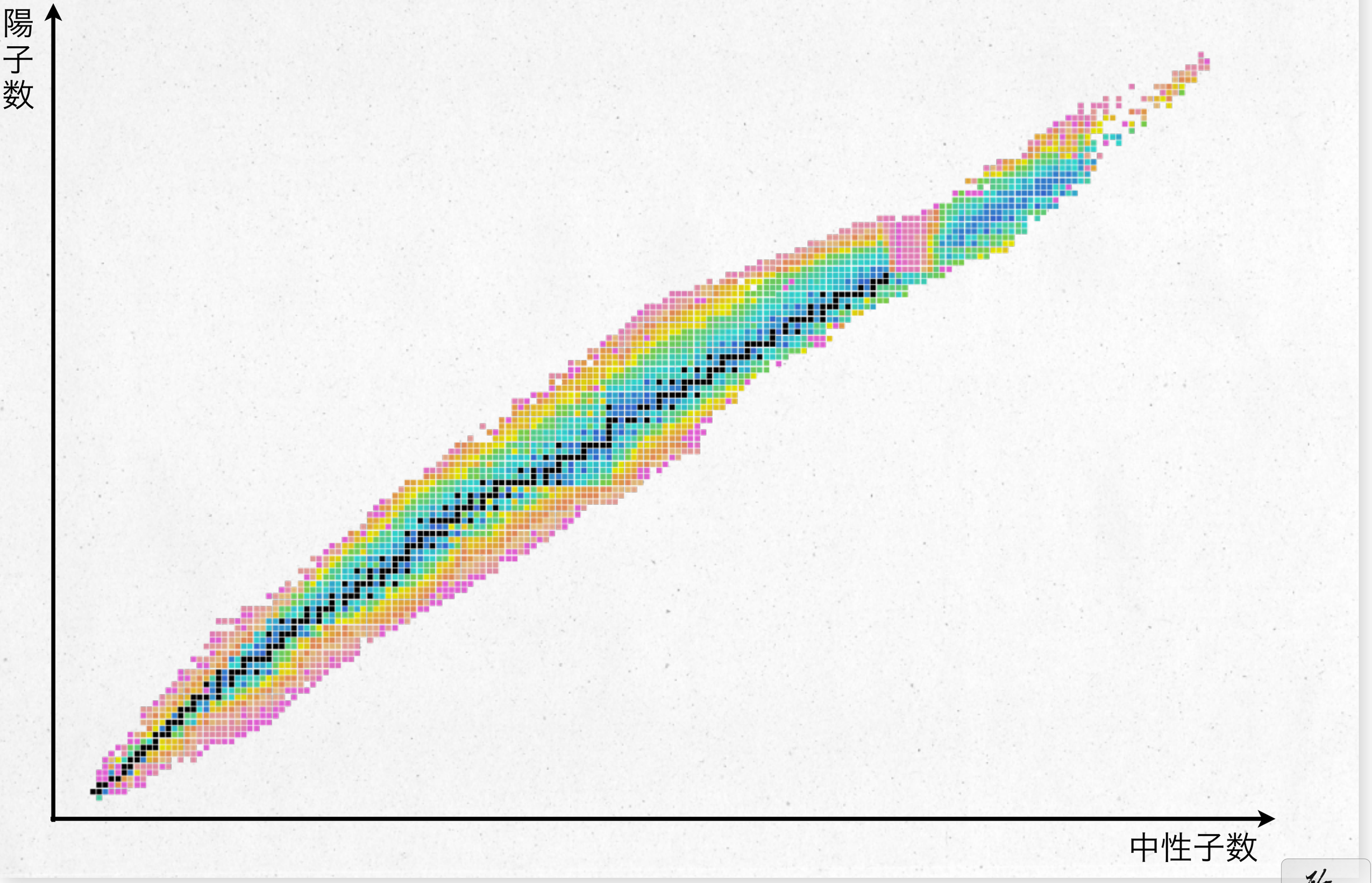
2004年9月28日
理化学研究所の線形加速器を用い
亜鉛とビスマスを衝突させて合成に成功と発表
2012年9月28日
三個目の113番元素の合成を確認。

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

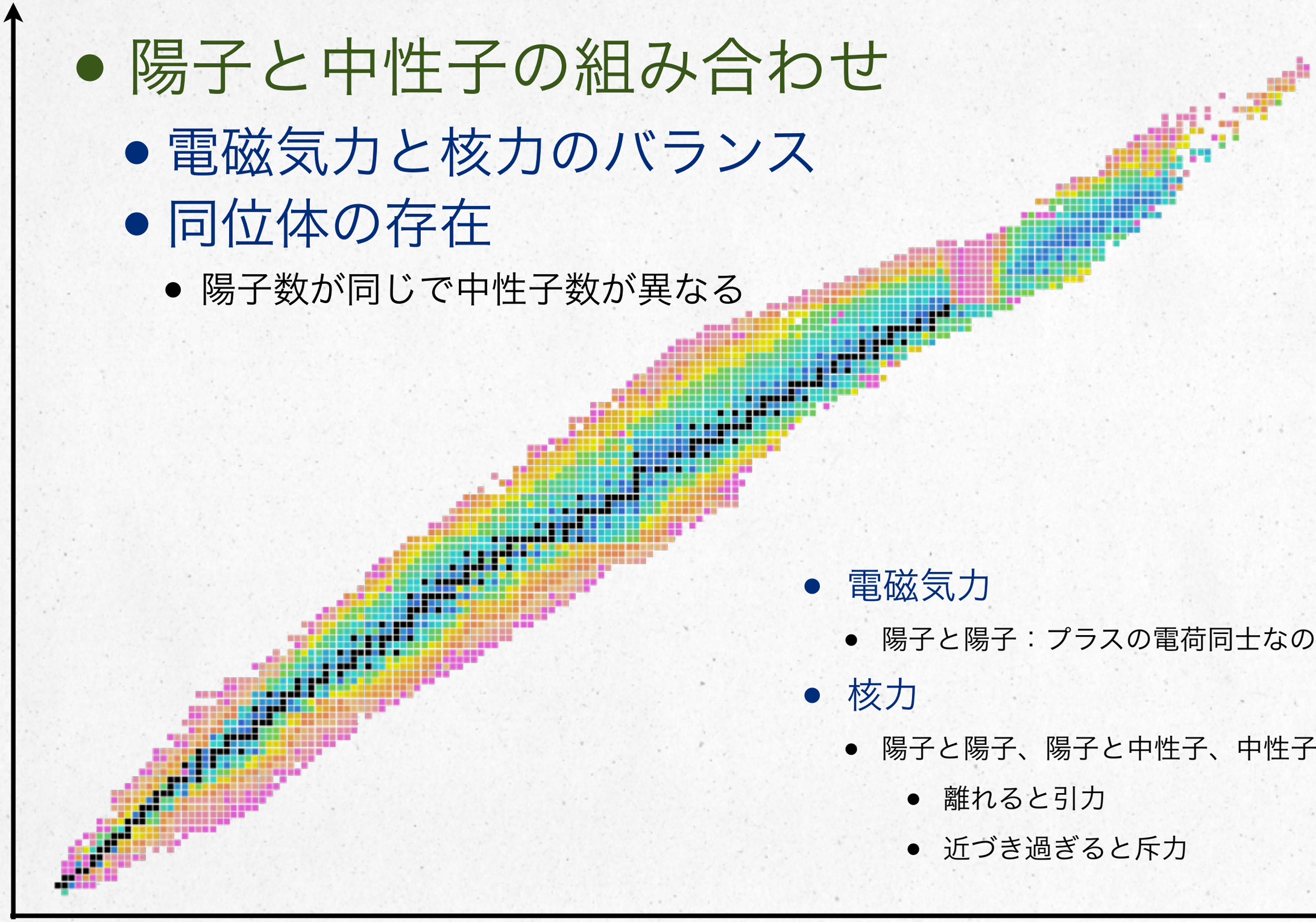
陽子数

原子核の種類



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

放射性物質

と

放射線

性質

測定

リスク

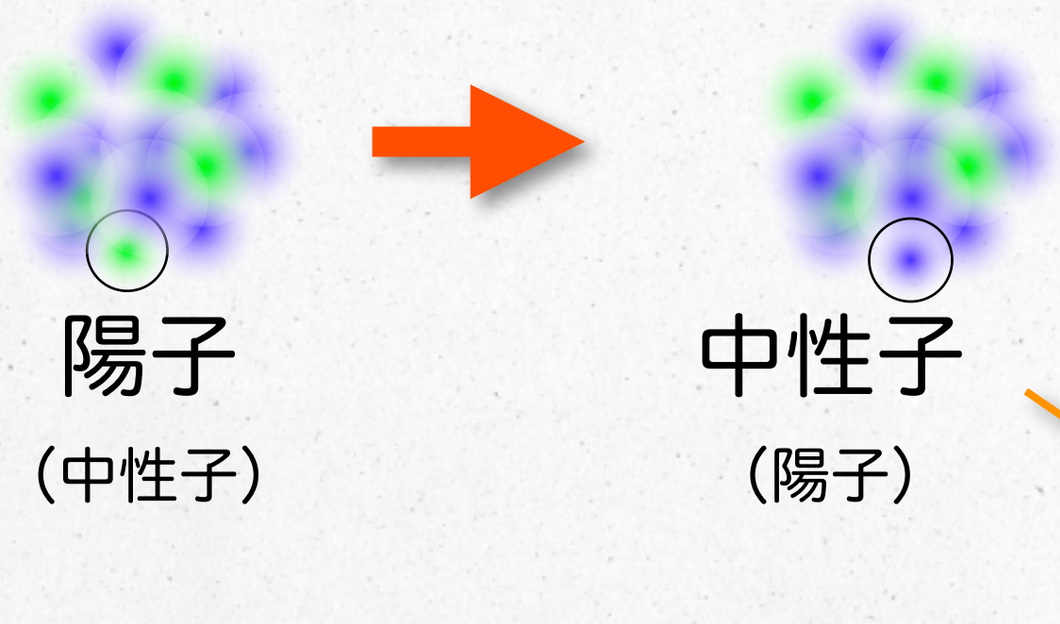
性質

人間の生活スケールと比べると

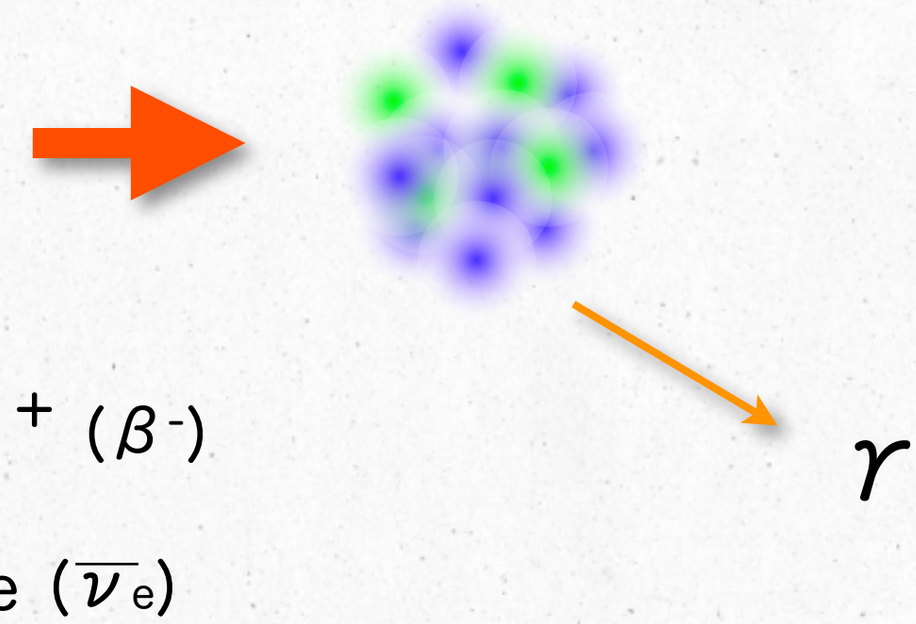
非常に小さな世界

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

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）を生成させる

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

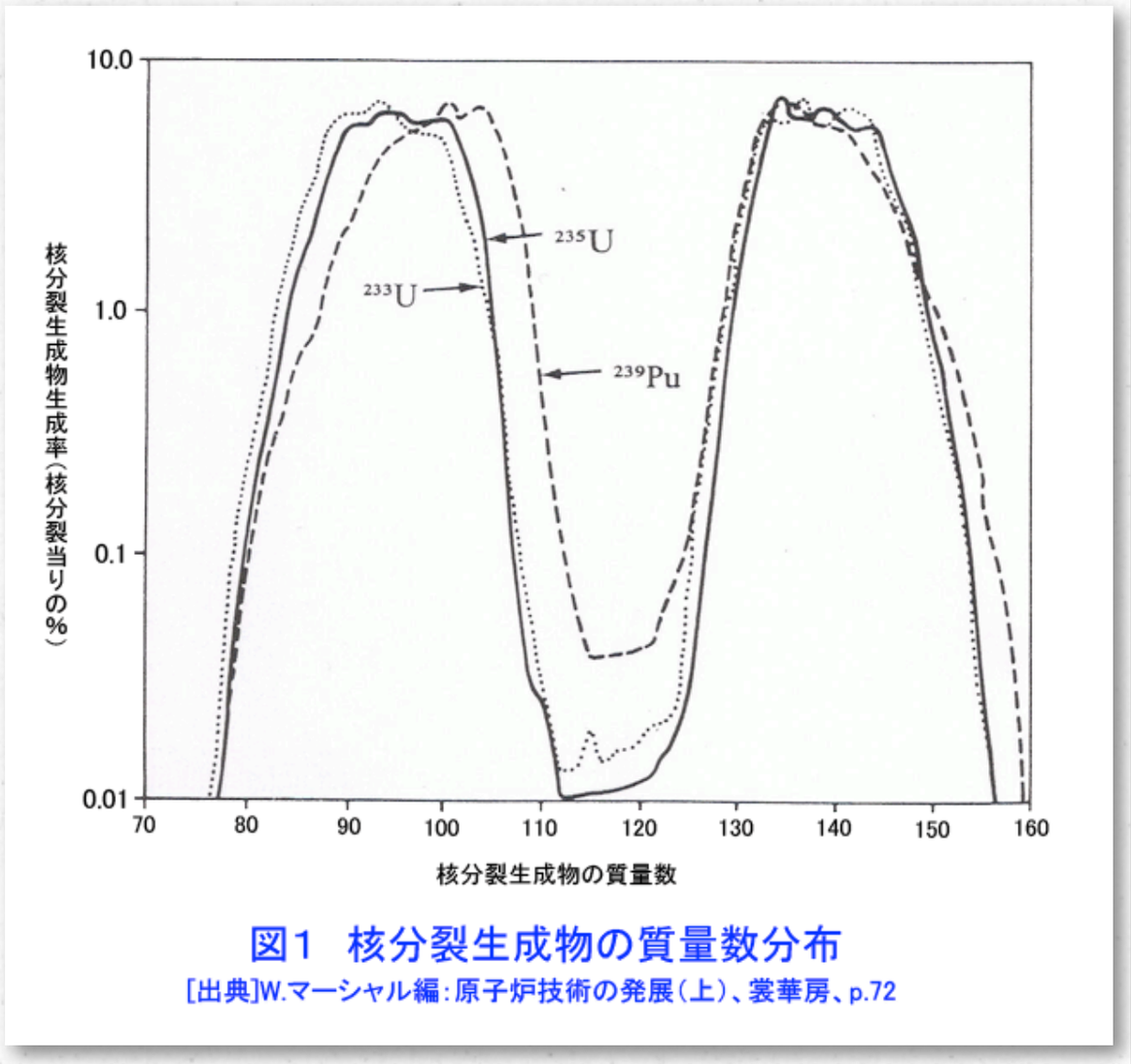
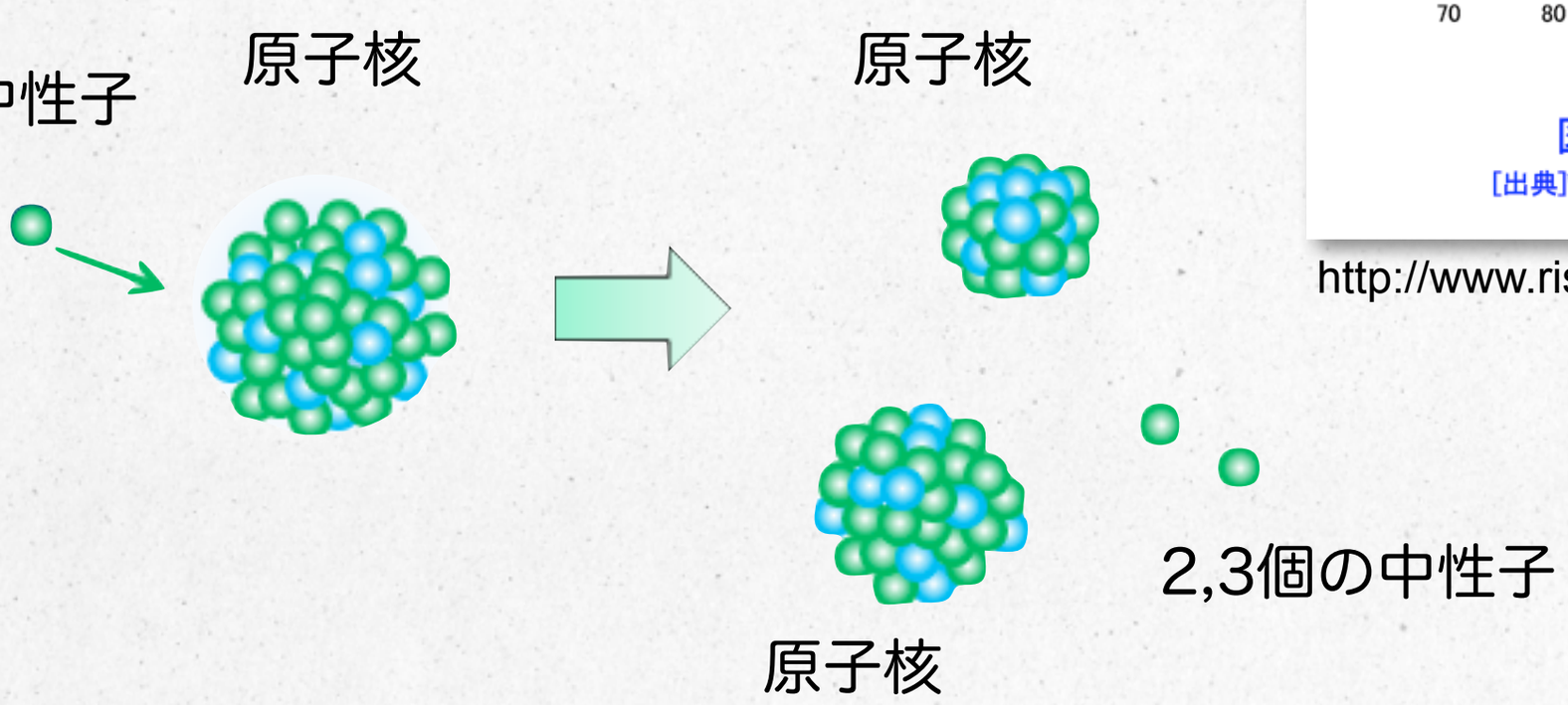


図1　核分裂生成物の質量数分布

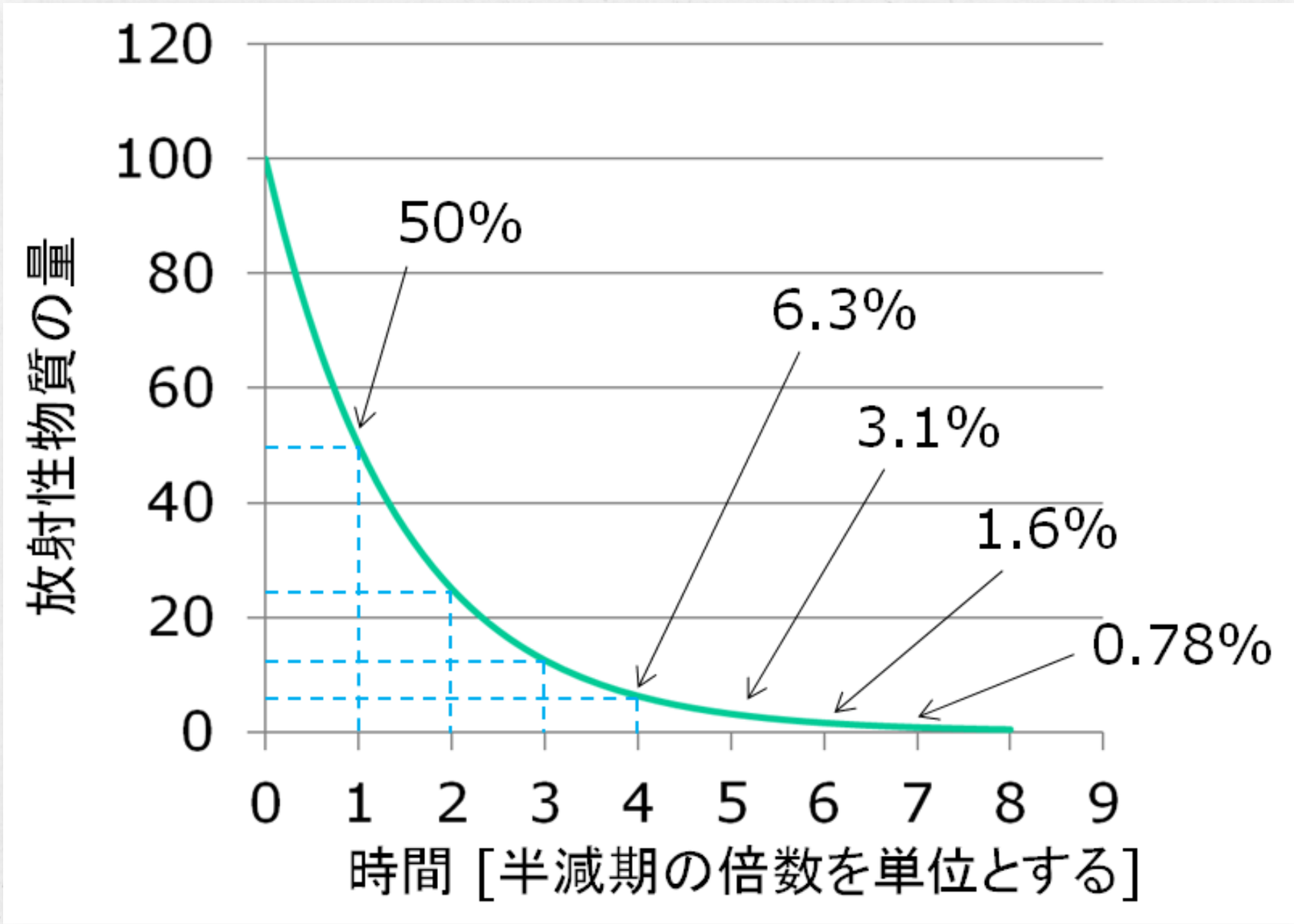
[出典]W.マーシャル編：原子炉技術の発展（上）、裳華房、p.72

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



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

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）
- 濃縮した放射性物質はどこに持って行く？

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

^{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

^{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)

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}

質問

放射性物質の無い世界は作れますか？

はい・いいえ

答

いいえ

自然放射線

天然放射線

^{40}K、ラドンなどから

宇宙線

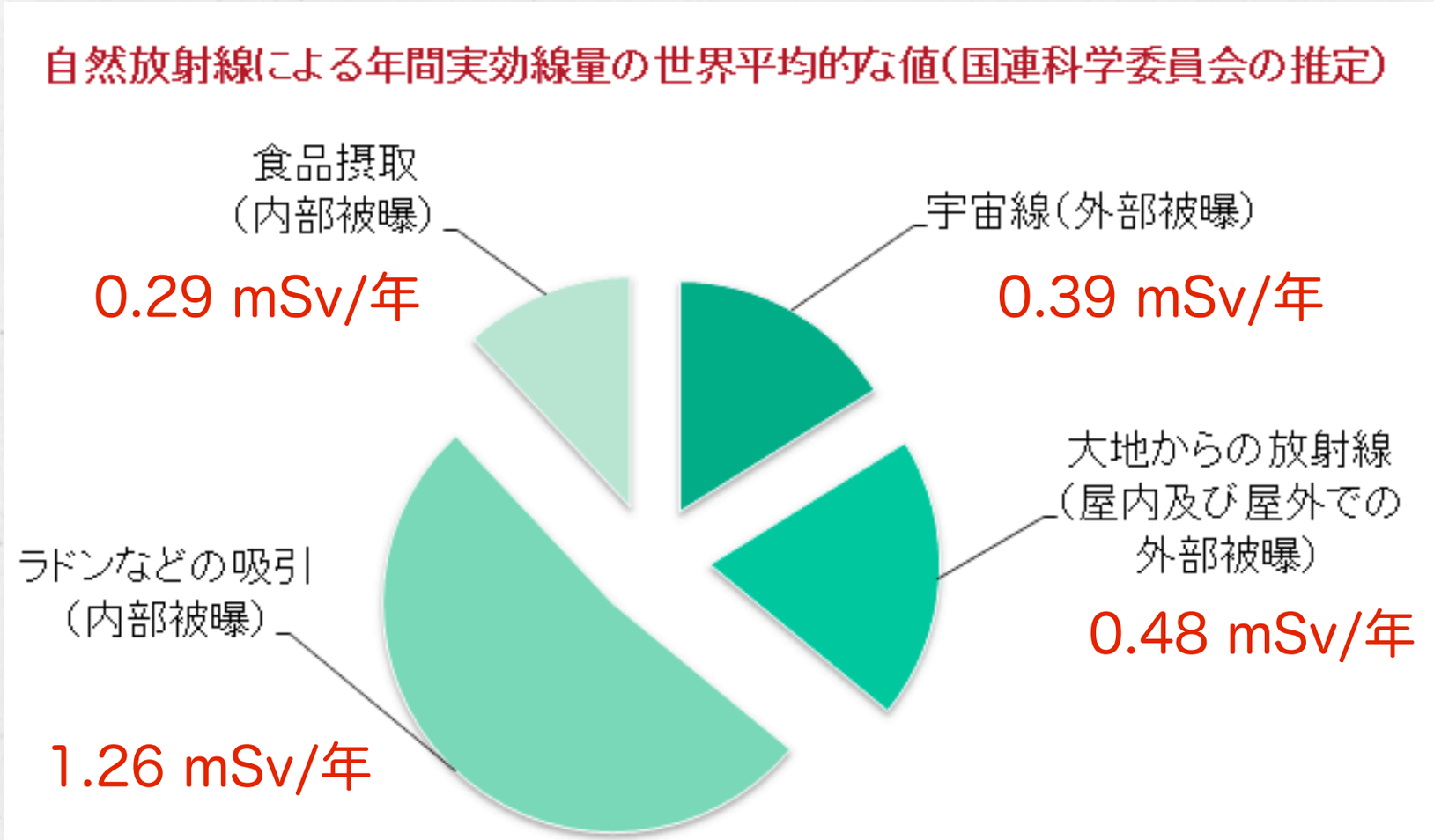
地球上での典型的範囲

1～10 mSv/年

平均値 2.4 mSv/年

日本全国平均値

0.99 mSv/年



数値の出典： http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-01-05-04

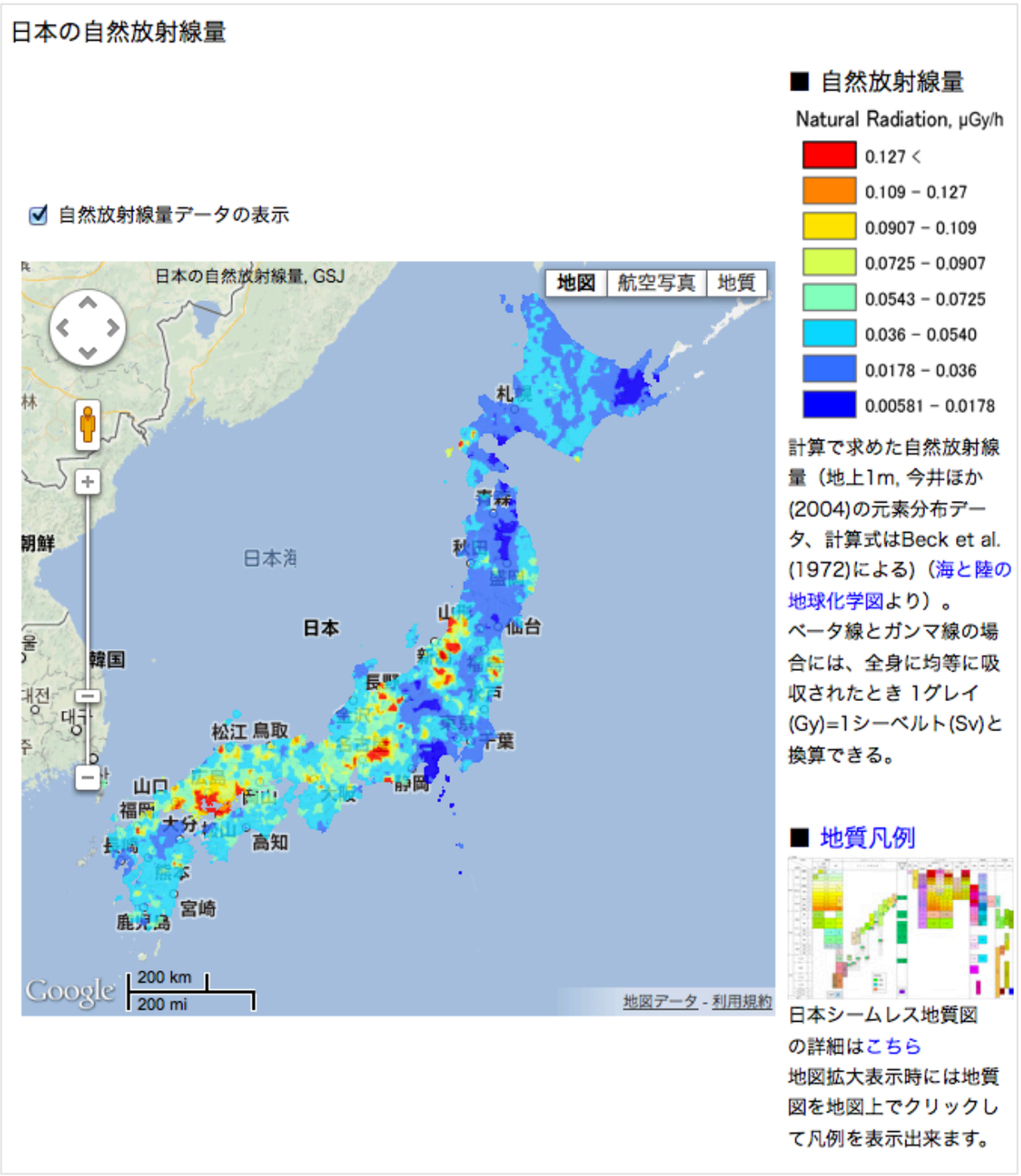
日本地域別の自然放射線

日本地質学会のウェブページより

西日本が高め

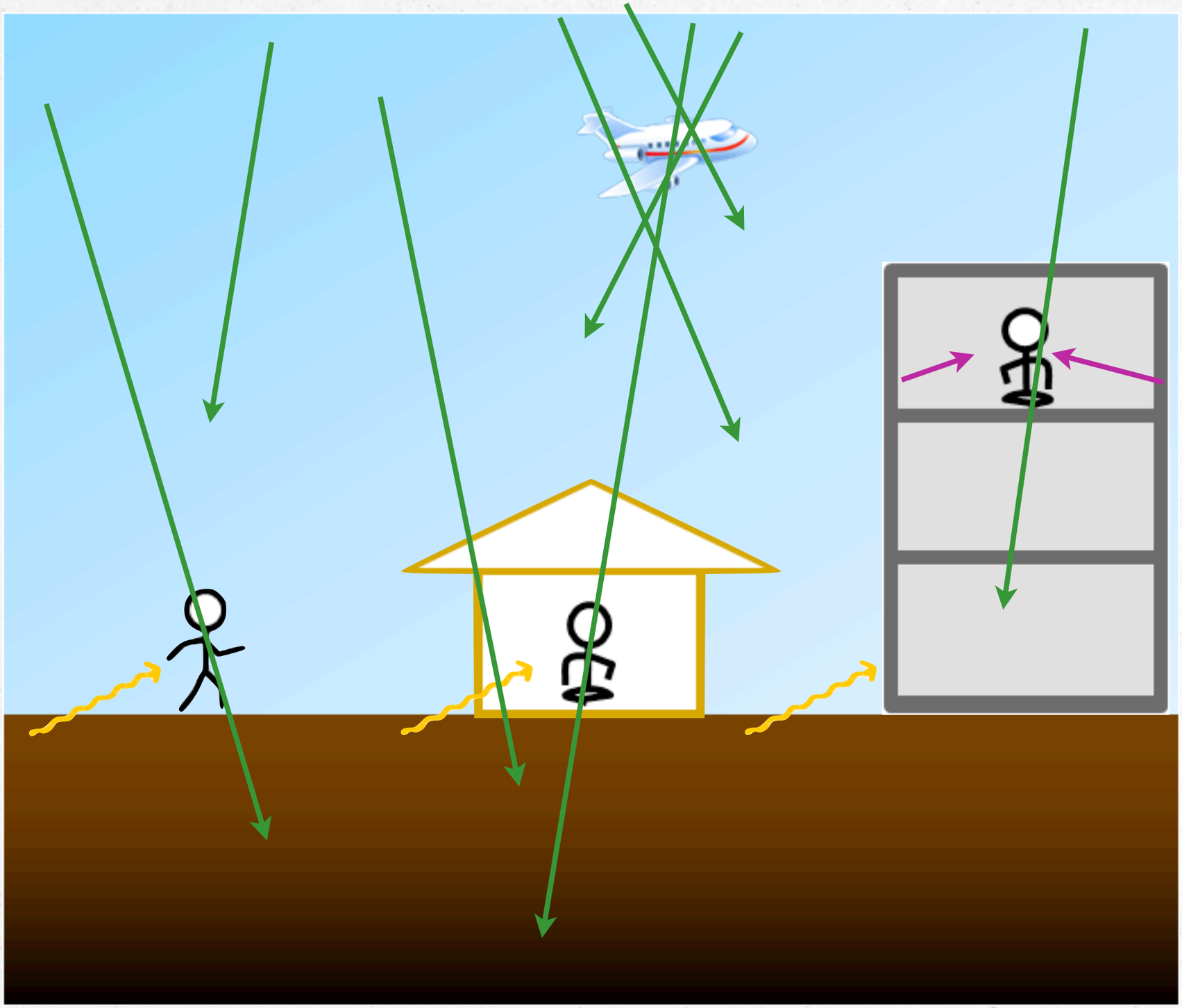
⇓

岩石の組成による



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

通常さらされている放射線



宇宙線

^{40}K等からのガンマ線

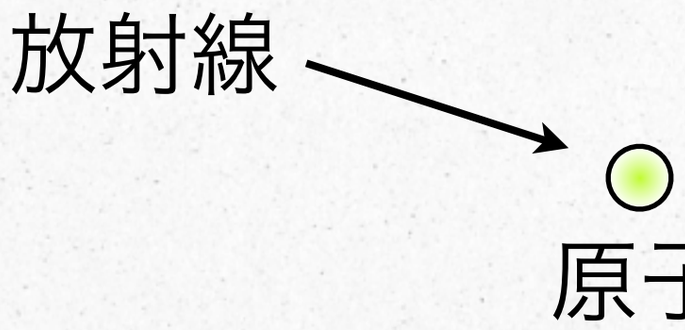
ラドンの吸引

α線内部被曝

体内には常に
^{40}Kが約4000 Bq
⇒約0.17mSv/年

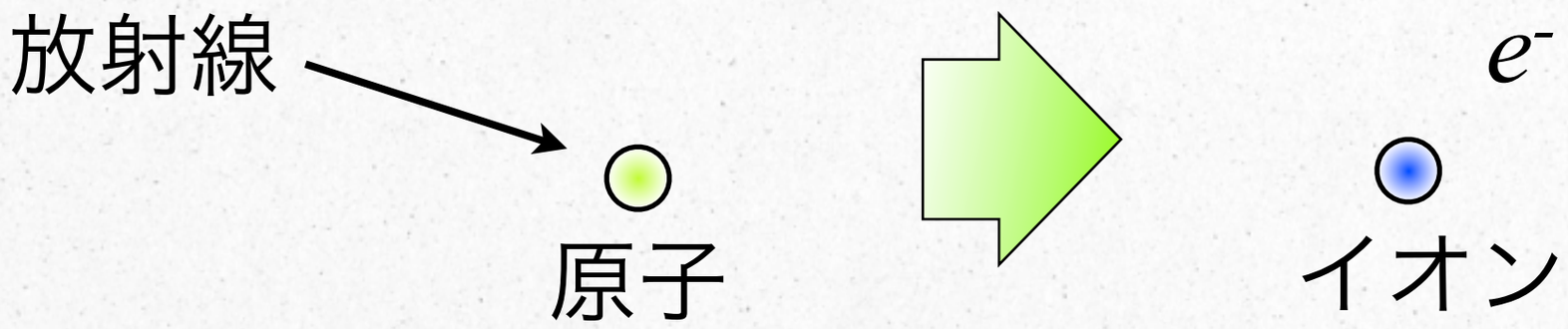
放射線と生体の反応

イオン化（電離）



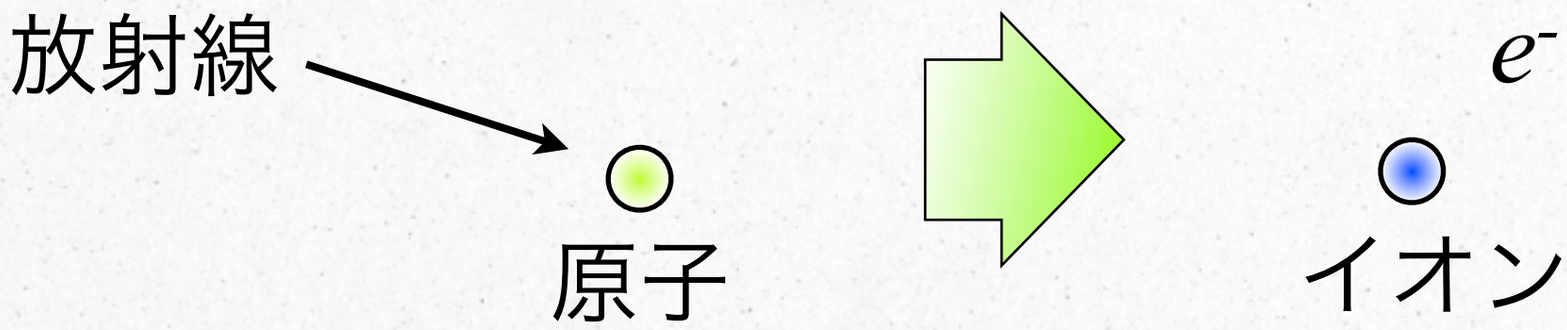
放射線と生体の反応

イオン化（電離）



放射線と生体の反応

イオン化（電離）



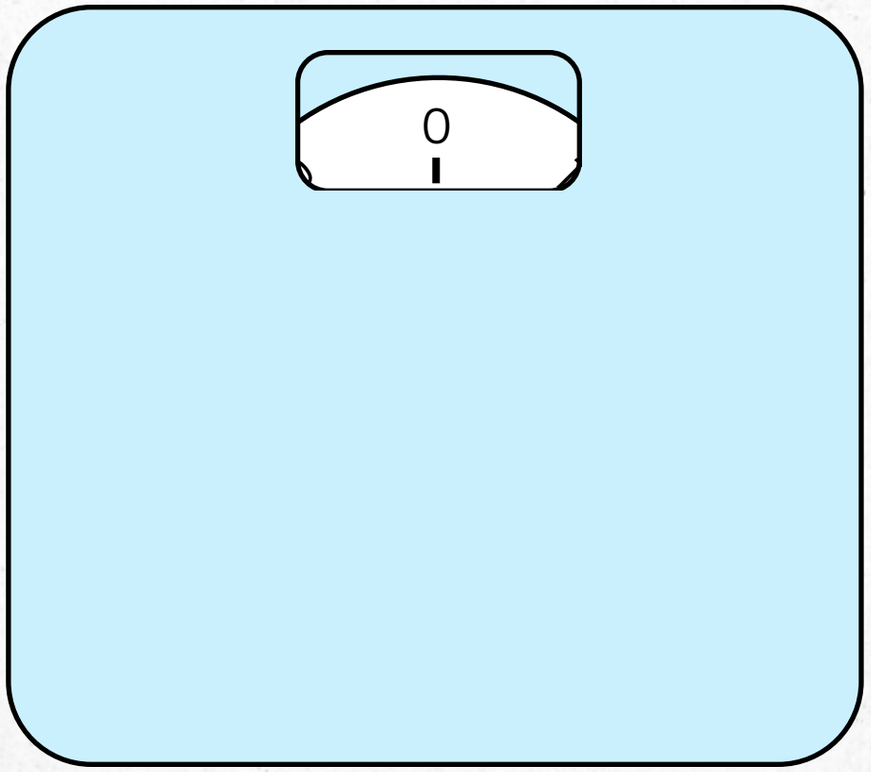
壊れる分子構造

ラジカル(オゾンや過酸化酸素)の発生

測定

通常、我々が考える測定

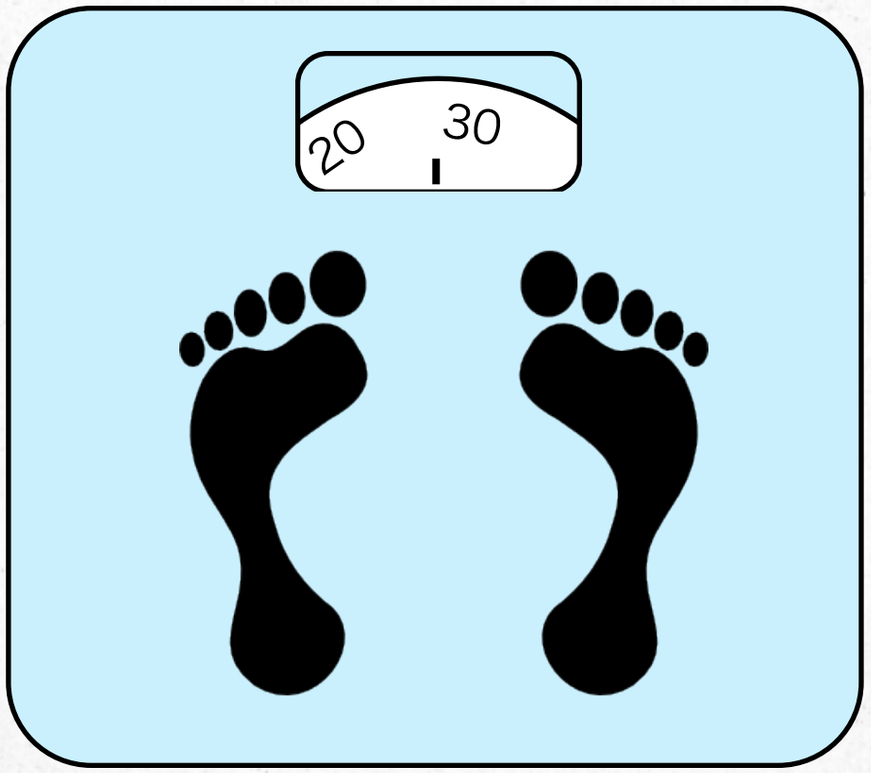
例えば体重測定



通常、我々が考える測定

例えば体重測定

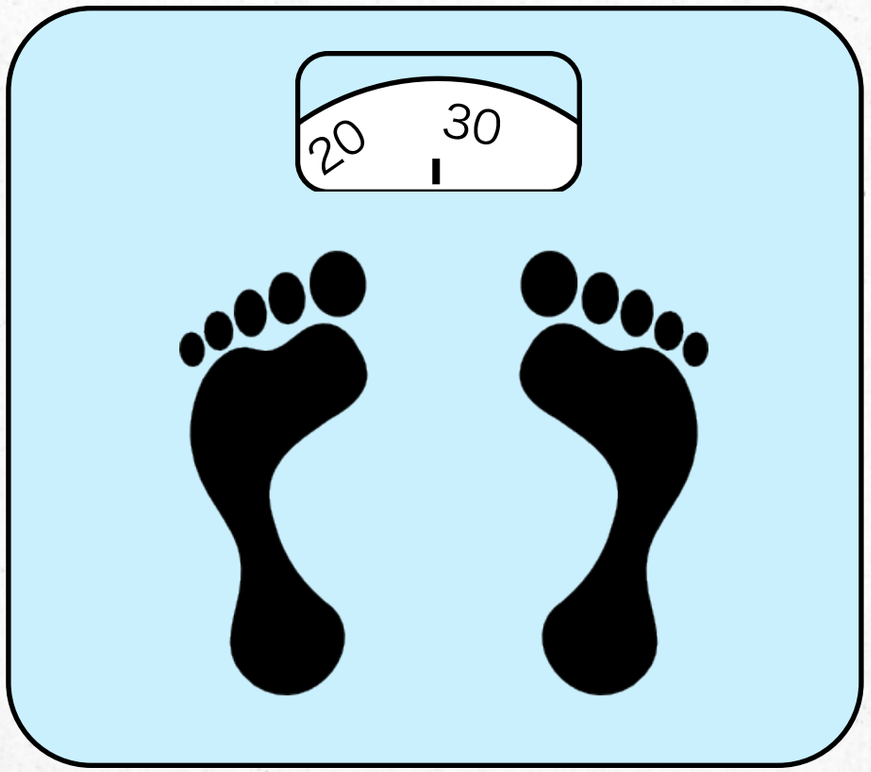
体重計に乗るたびに数値が変わると、、、



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

ゆれる

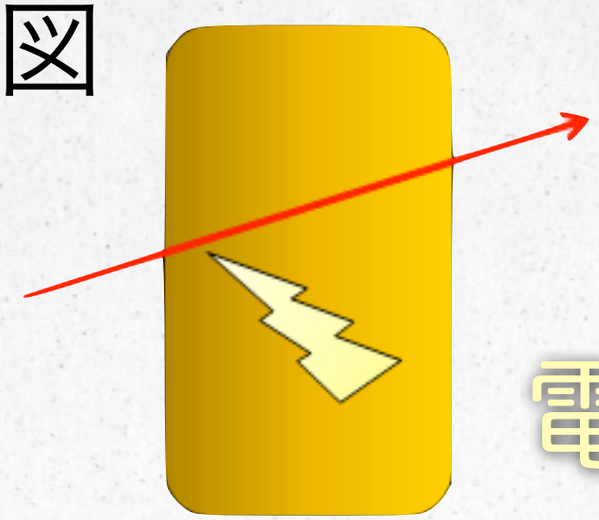
１秒あたりの放射線の個数

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

ゆれる

放射線の放出

放射線と物質の反応

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

リスク

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？

正しい答えは

正しい答えは

ありません

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

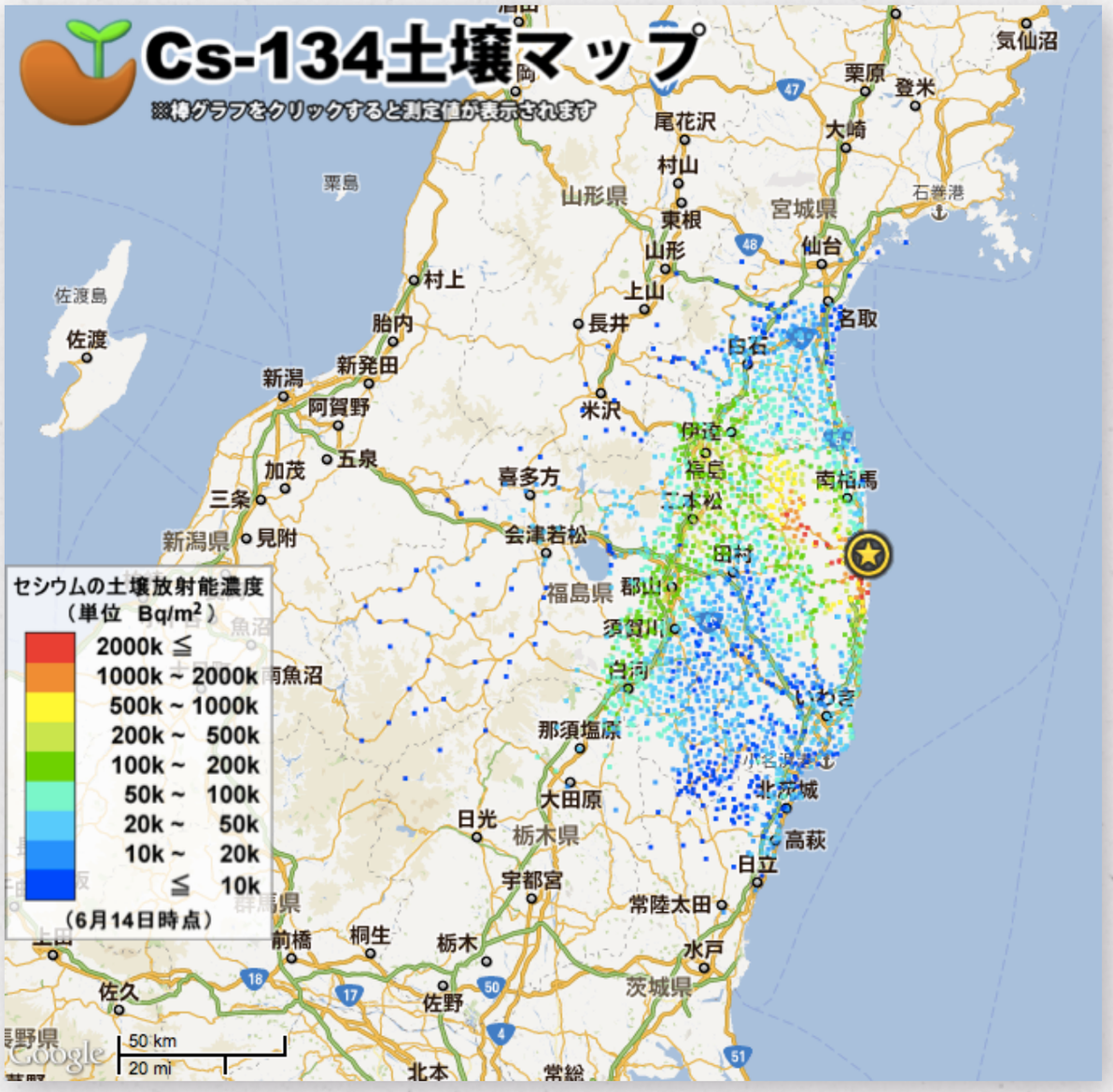
知彼知己　百戦不殆

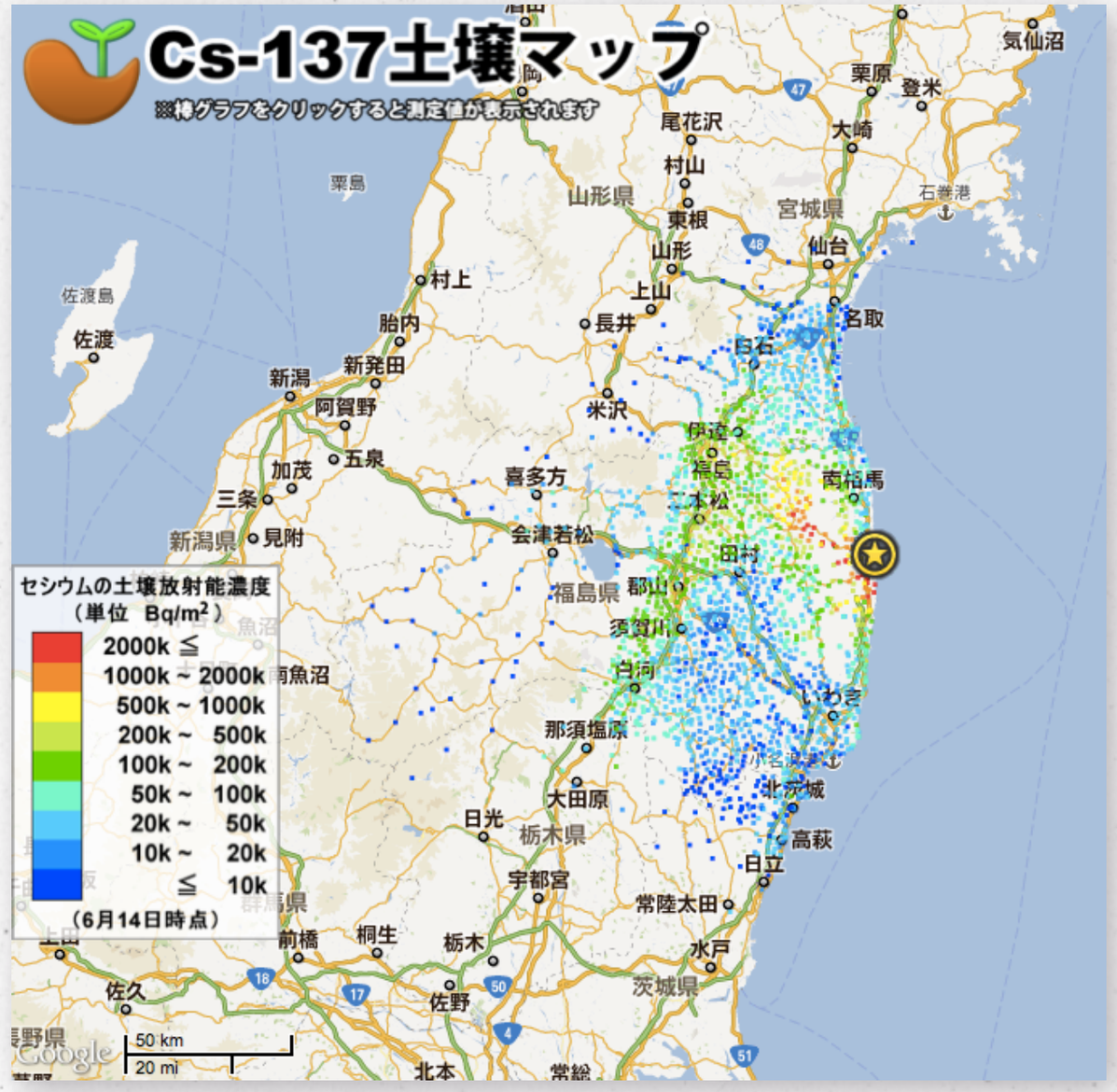
不知彼而知己　一勝一負

不知彼不知己　毎戦必殆

孫子より

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/

放射線の生体への影響

確定的影響

確率的影響

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

ある値を超えたら危険

ある値以下なら安全

確率的影響

~~ある値を超えたら危険~~

~~ある値以下なら安全~~

確率的影響

~~ある値を超えたら危険~~

~~ある値以下なら安全~~

閾値なし・線形モデル

国際放射線防護委員会の勧告

確率的影響

~~ある値を超えたら危険~~

~~ある値以下なら安全~~

閾値なし・線形モデル

国際放射線防護委員会の勧告

放射線被曝

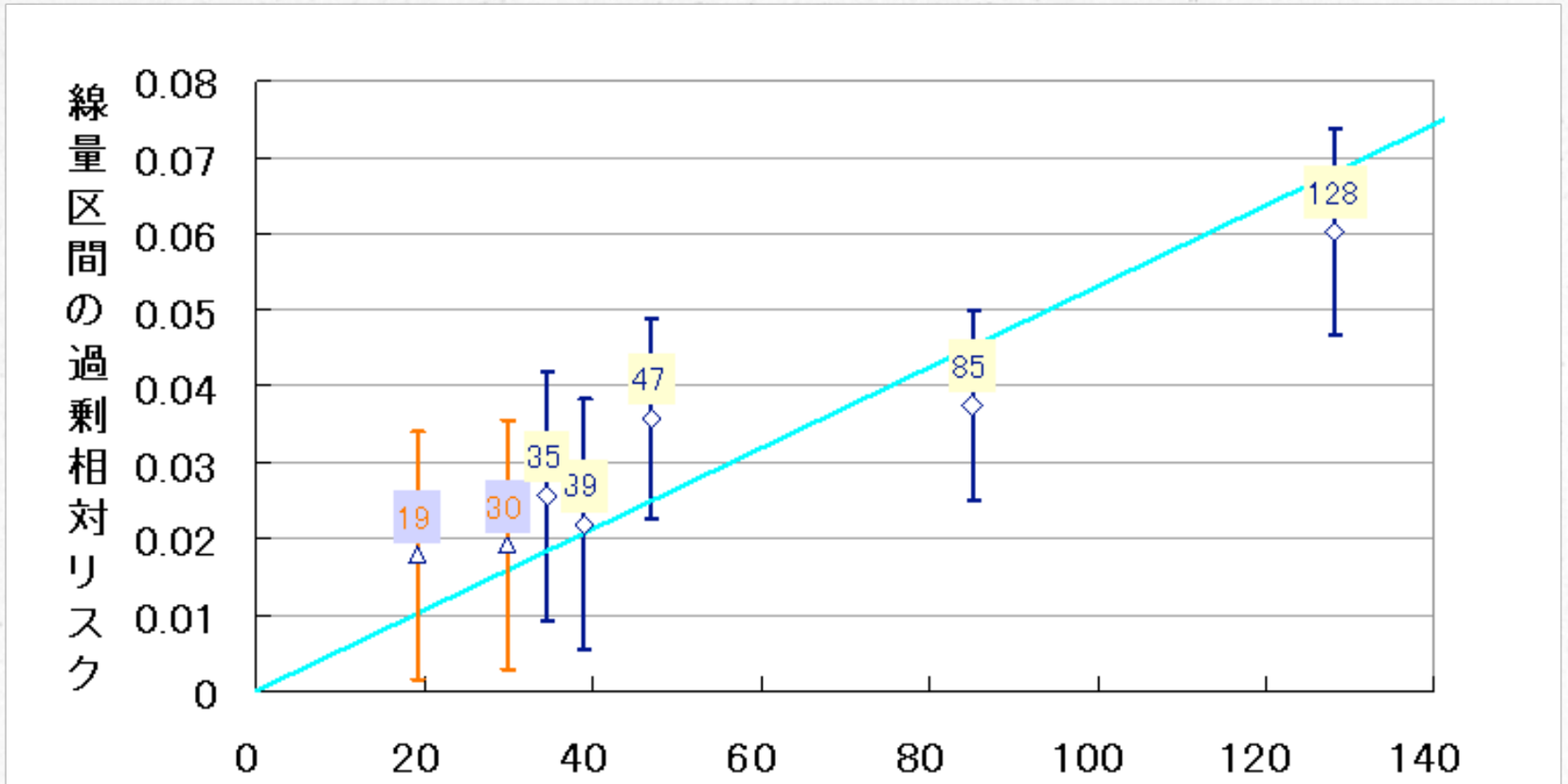
社会的・経済的要因を考慮に入れながら

合理的に達成できる限り低くする

リスクの見積もり

確率的影響

原爆被害者への調査から



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

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

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% と評価

自然・医療被曝以外の「追加」被爆は年 1mSvが望ましいと勧告

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

ただし、平均的個人は存在しない

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

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
I-131	0.14	0.075	(0.038)	(0.025)	0.016
I-133	0.038	0.017	(0.0072)	(0.0049)	0.0031
Cs-134	0.026	0.013	0.014	0.019	0.019
Cs-137	0.021	0.010	0.010	0.013	0.013
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」)

半減期: 28.90年
半減期: 8.02 日

半減期: 2.06 年
半減期: 30.07年

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

放射性物質について

性質　測定　リスク

素粒子
原子核
の研究

素粒子物理学

物質の最小単位、第一原理の追求

“標準理論”を超えた素粒子の探索

自然界の四つの力の統合

宇宙物理とのつながり

ビッグバン

消えた反物質

等々

現代の原子核物理

原子核そのものだけではなく
クォークから出来ているもの全てが対象

第一原理の追求（＝素粒子物理）ではなく

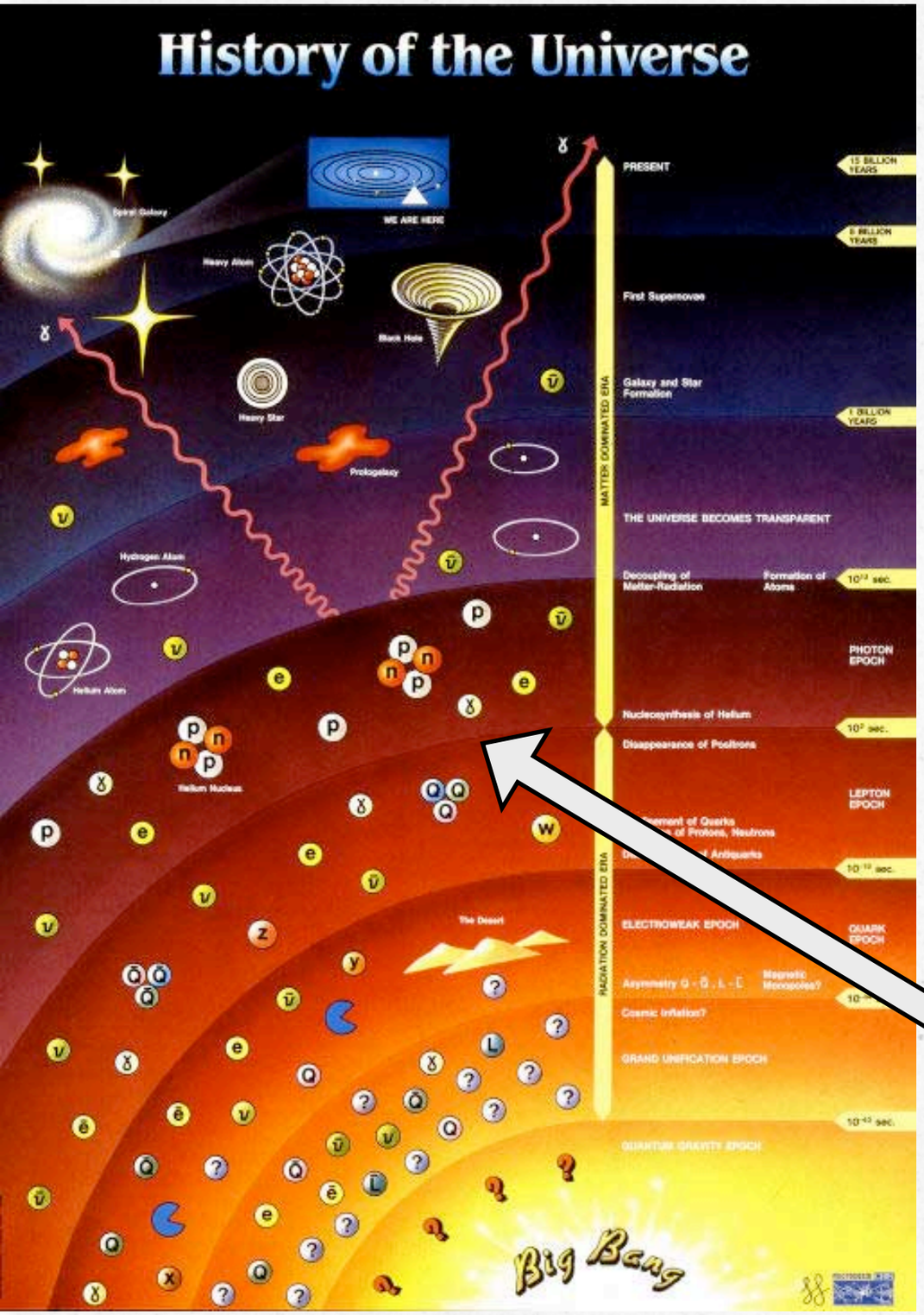
どのようにハドロンが作られているのか？

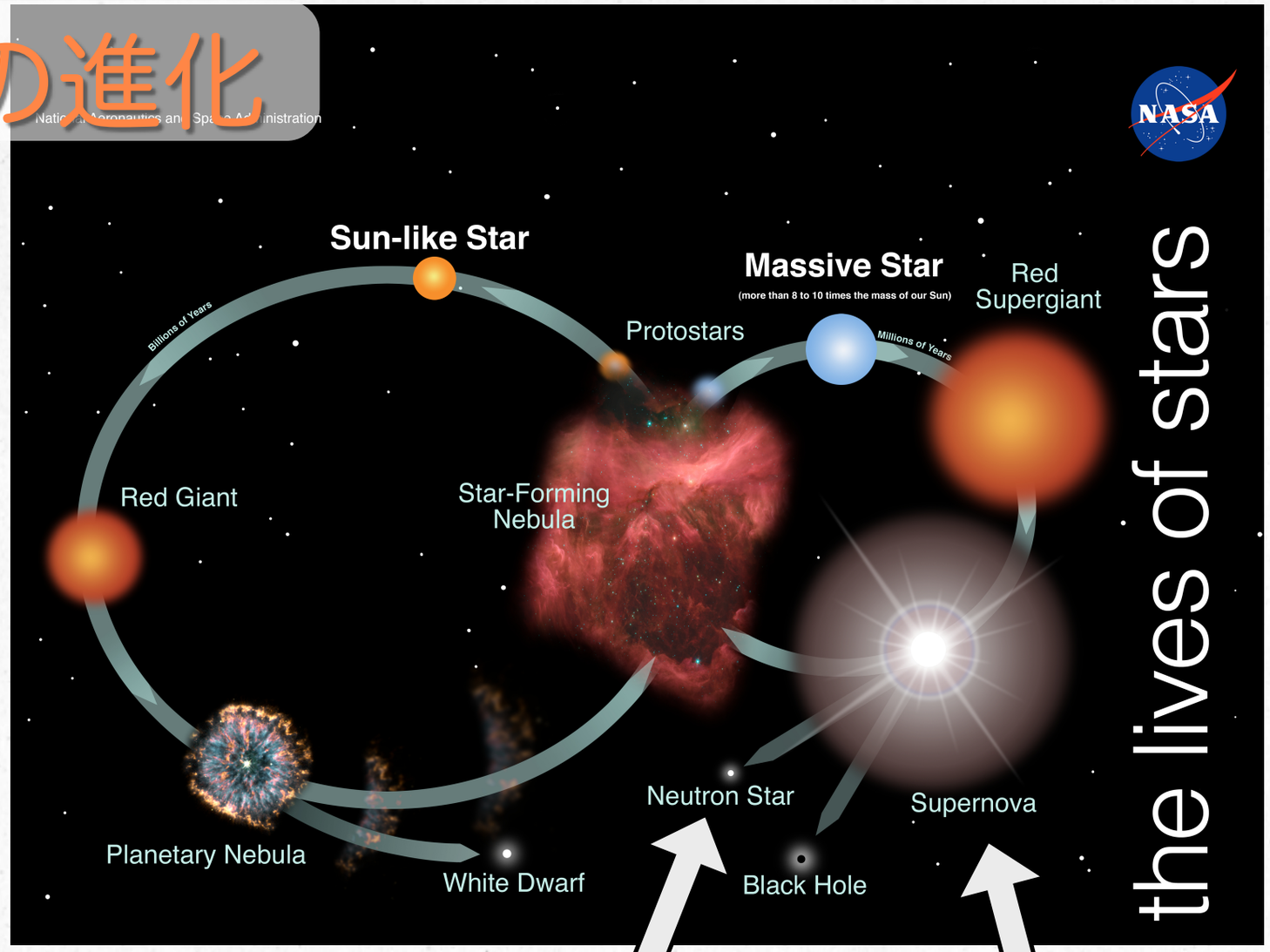
核力の性質は？

質量の起源は？

原子核を構成している陽子・中性子の
質量の源は、真空中に凝縮されているクォーク・反クォーク対による場から
ヒッグス場は、素粒子に質量を与える

宇宙における物質の進化





中性子星（高密度核物質）の生成および内部の状態

超新星爆発における重元素の合成

クォーク-グルーオン・プラズマからハドロンへの相転移（核子の生成）

Original: poster of CERN microcosm

極微の世界の探索

極微の世界の探索

粒子 (電子、陽子、原子核)を

極微の世界の探索

粒子 (電子、陽子、原子核)を

加速して

極微の世界の探索

粒子 (電子、陽子、原子核)を

加速して

衝突させて

極微の世界の探索

粒子 (電子、陽子、原子核)を

加速して

衝突させて

壊して

極微の世界の探索

粒子(電子、陽子、原子核)を

加速して

衝突させて

壊して

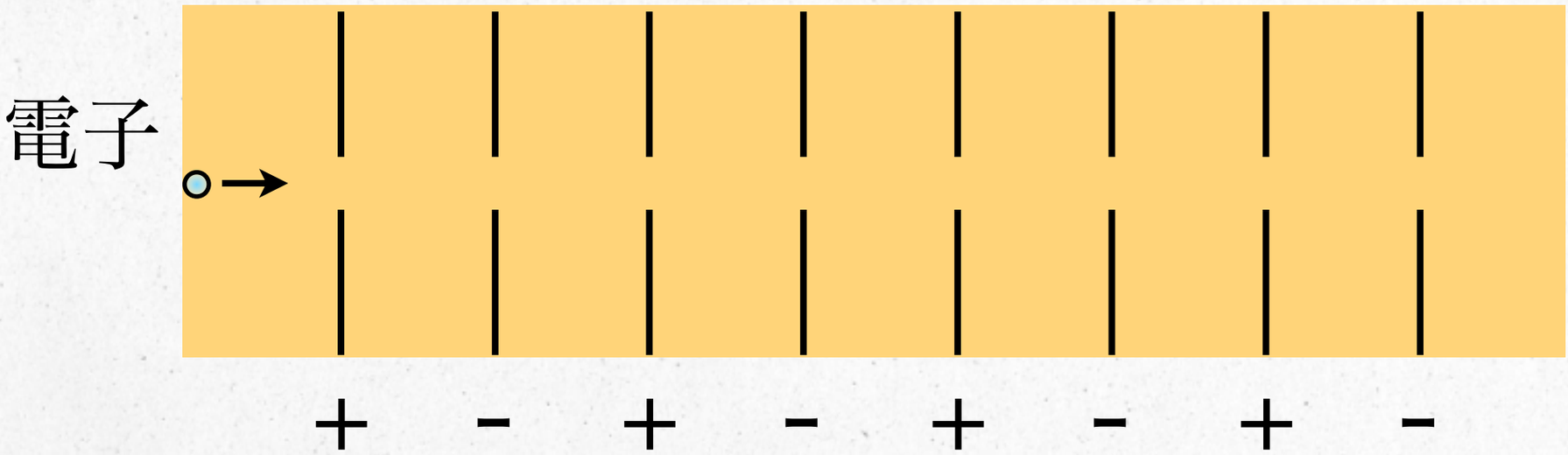
中から出てくる物を調べる

加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

＋と－の電荷は引き合い
＋同士、－同士は反発する



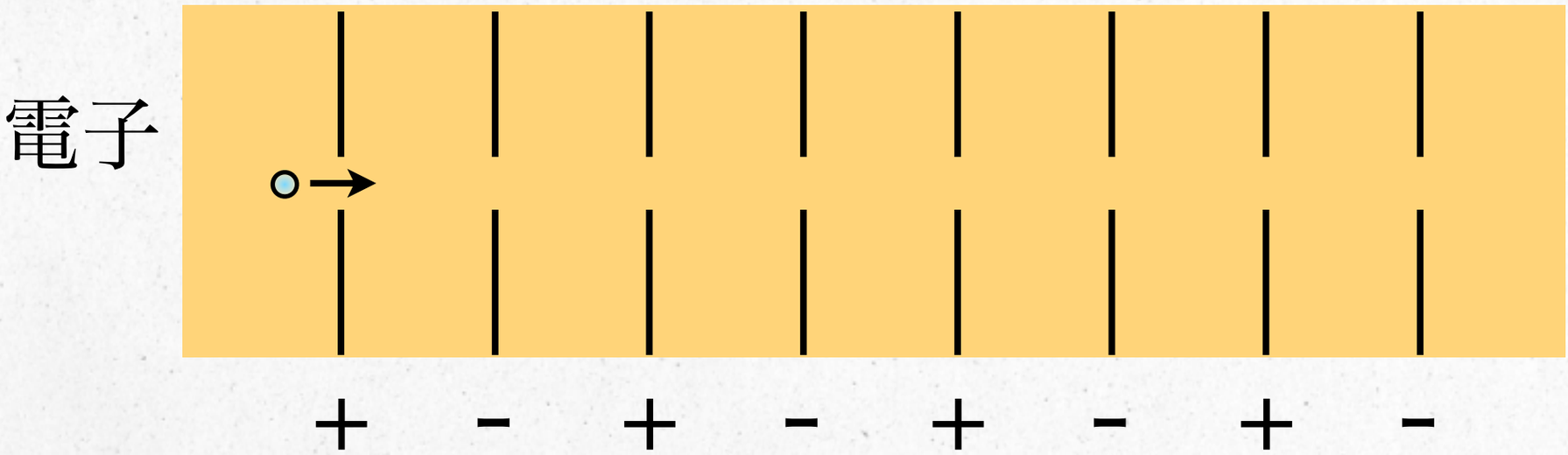
マイナスの電荷を持った電子は
＋に引き寄せられる

加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

＋と－の電荷は引き合い
＋同士、－同士は反発する



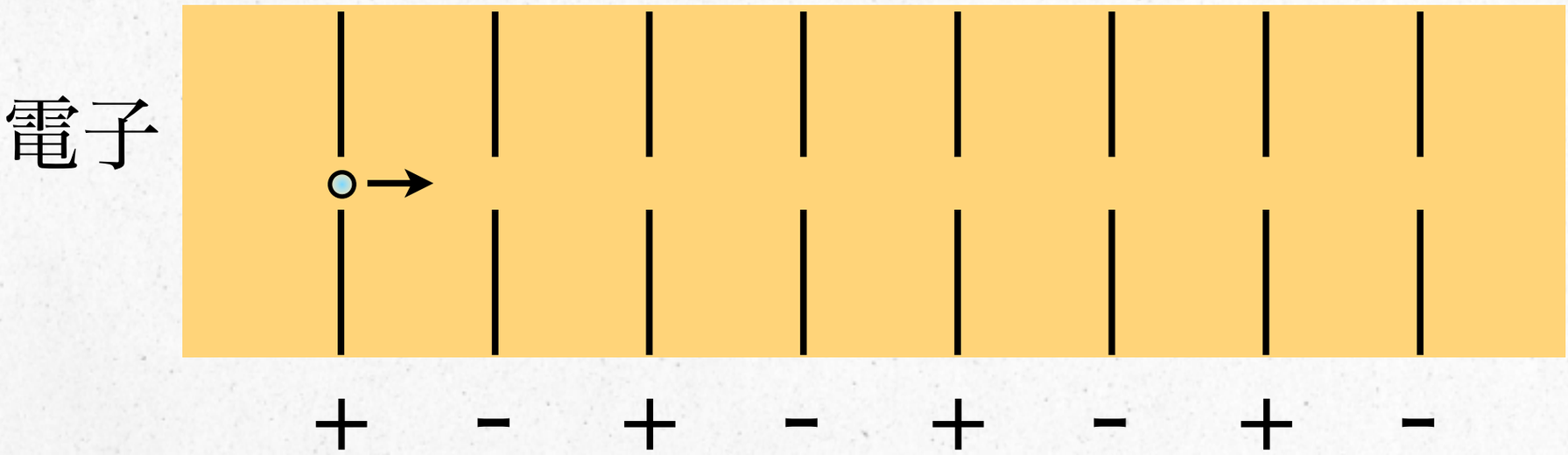
マイナスの電荷を持った電子は
＋に引き寄せられる

加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

＋と－の電荷は引き合い
＋同士、－同士は反発する



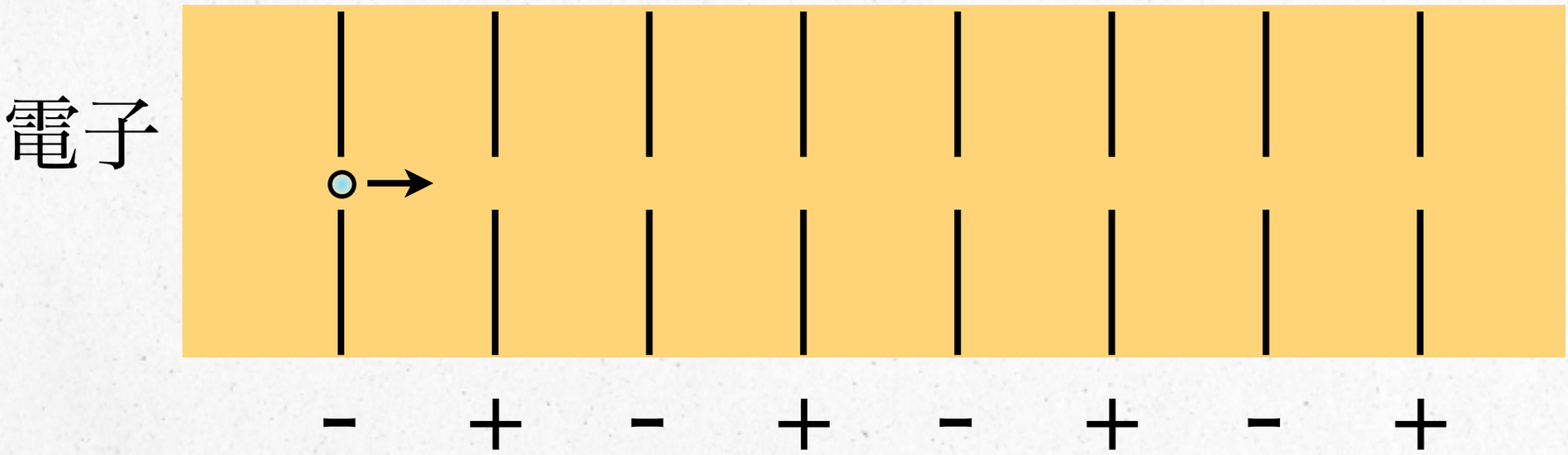
プラスの電極を通り過ぎた瞬間に
電極のプラスとマイナスを入れ替える

加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

＋と－の電荷は引き合い
＋同士、－同士は反発する



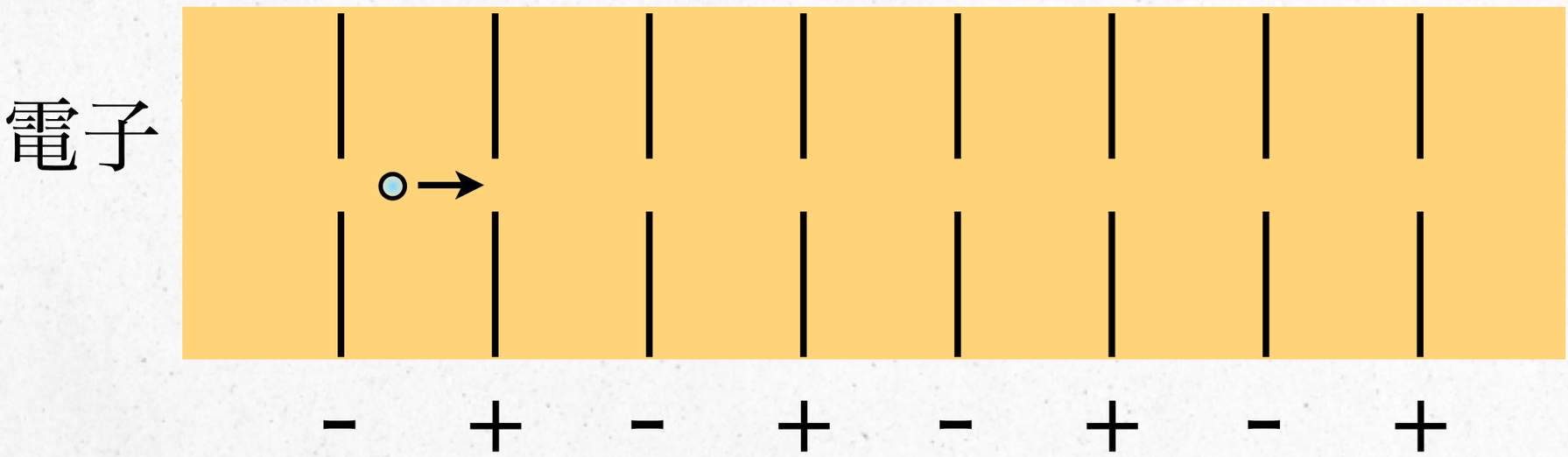
プラスの電極を通り過ぎた瞬間に
電極のプラスとマイナスを入れ替える

加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

＋と－の電荷は引き合い
＋同士、－同士は反発する



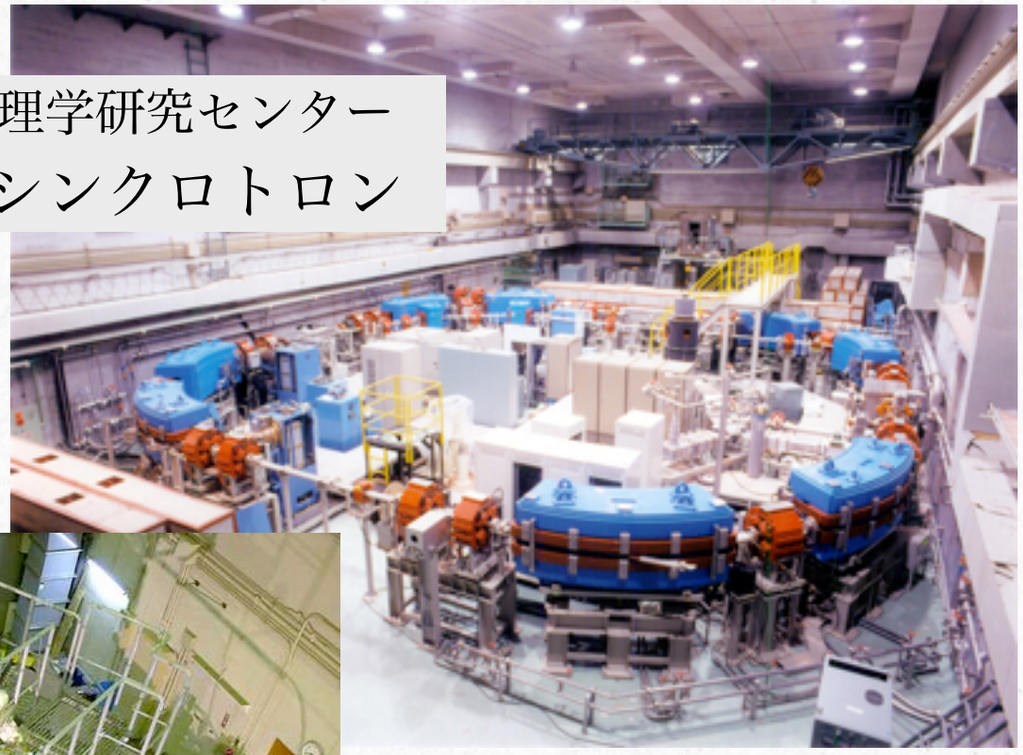
前方のプラス電極に引き寄せられ
後方のマイナス電極からは反発力を受ける

線形加速器 と 円形加速器

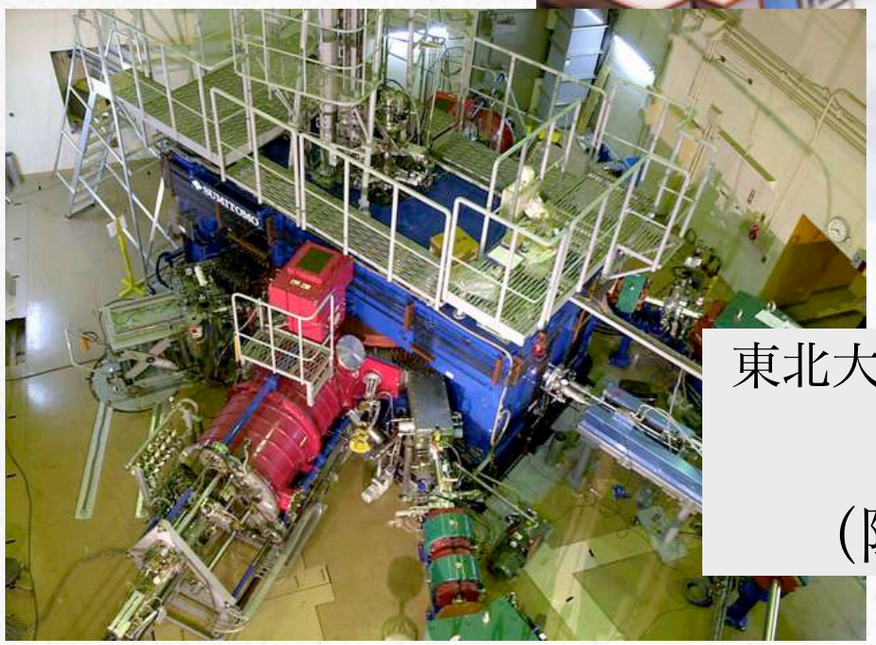
加速部分を直列にたくさん並べる

東北大学電子光理学研究センター
300MeV 電子LINAC

加速部分は一カ所
円形にビームを回すことにより
何回も加速させる



東北大学電子光理学研究センター
1.2GeV 電子シンクロトロン



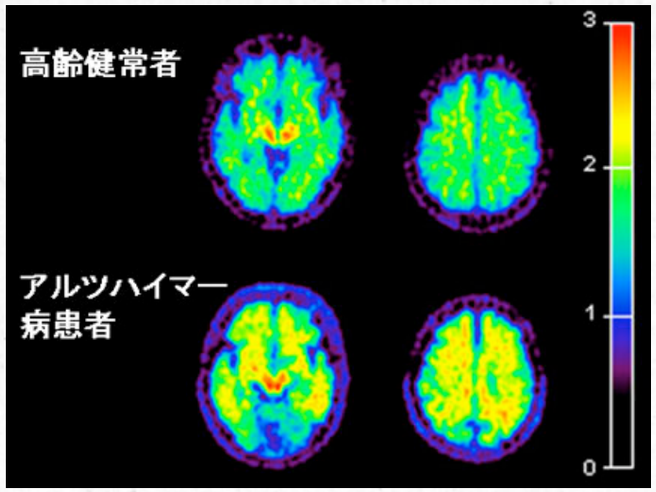
東北大学サイクロトロンRIセンター
サイクロトロン
(陽子、原子核を加速)

加速器の応用

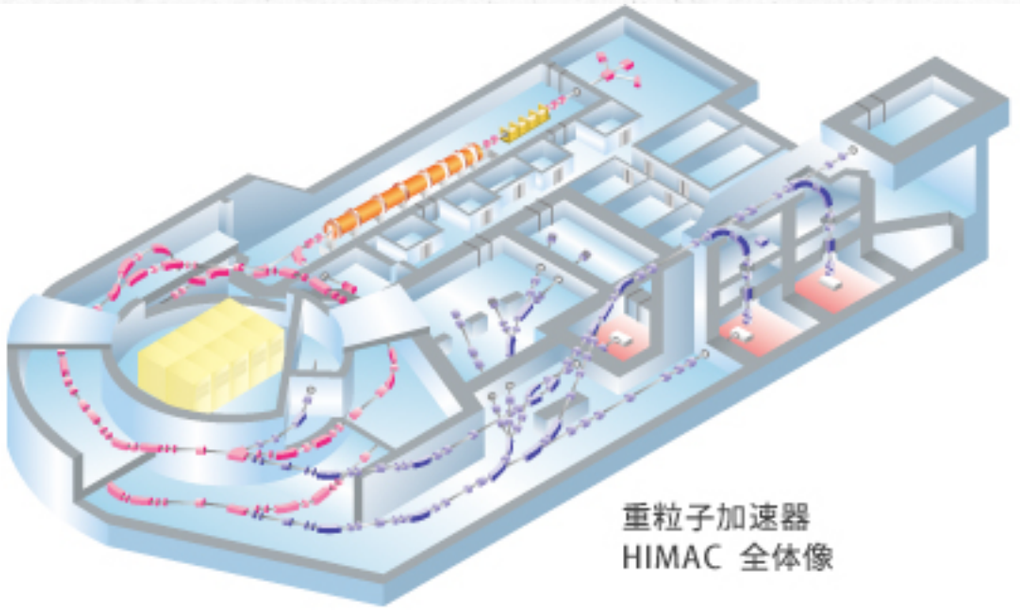
医療目的

電子線、ガンマ線、
陽子・原子核ビーム
を用いた
診断およびガン治療

PET（陽電子放出断層撮影）



http://kakuigaku.cyric.tohoku.ac.jp/activities.html より



重粒子線棟

http://www.nirs.go.jp/rd/collaboration/himac/outline.shtml より

加速器の応用

非破壊検査
物質の構造解析

放射光（赤外線からX線まで）
中性子を使用

茨城県つくば市
KEK フォトンファクトリ

http://pfwww.kek.jp/outline/pf/PF-Pamph2012_08.pdf

http://j-parc.jp/Acc/ja/img/accelerator_ja.jpg

茨城県東海村
大強度陽子加速器施設
(J–PARC)の
物質・生命科学実験施設

兵庫県佐用郡佐用町
Spring-8 大型放射光施設

http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2009/090605_fig/fig4.png

これまでの
私の研究で使った
加速器施設

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

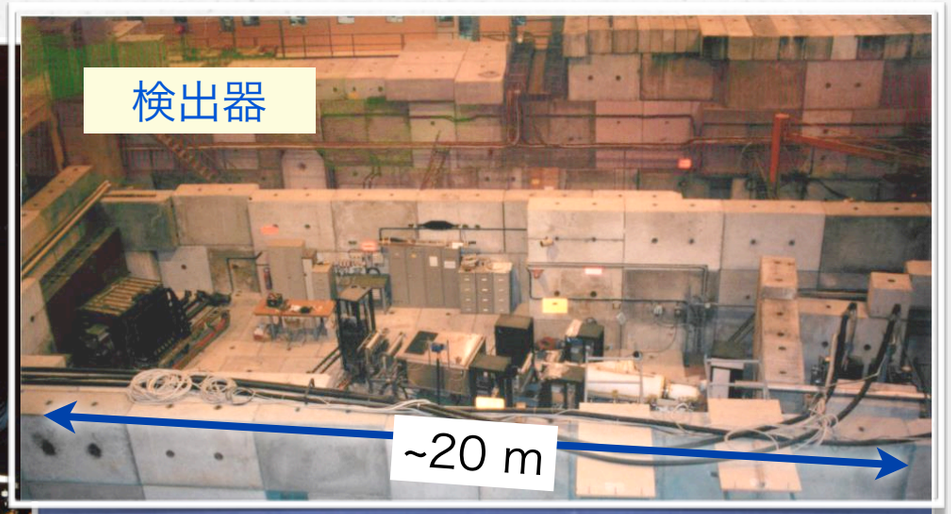
宇宙初期にあったと考えられる、クォーク・グルーオン・プラズマ探索実験

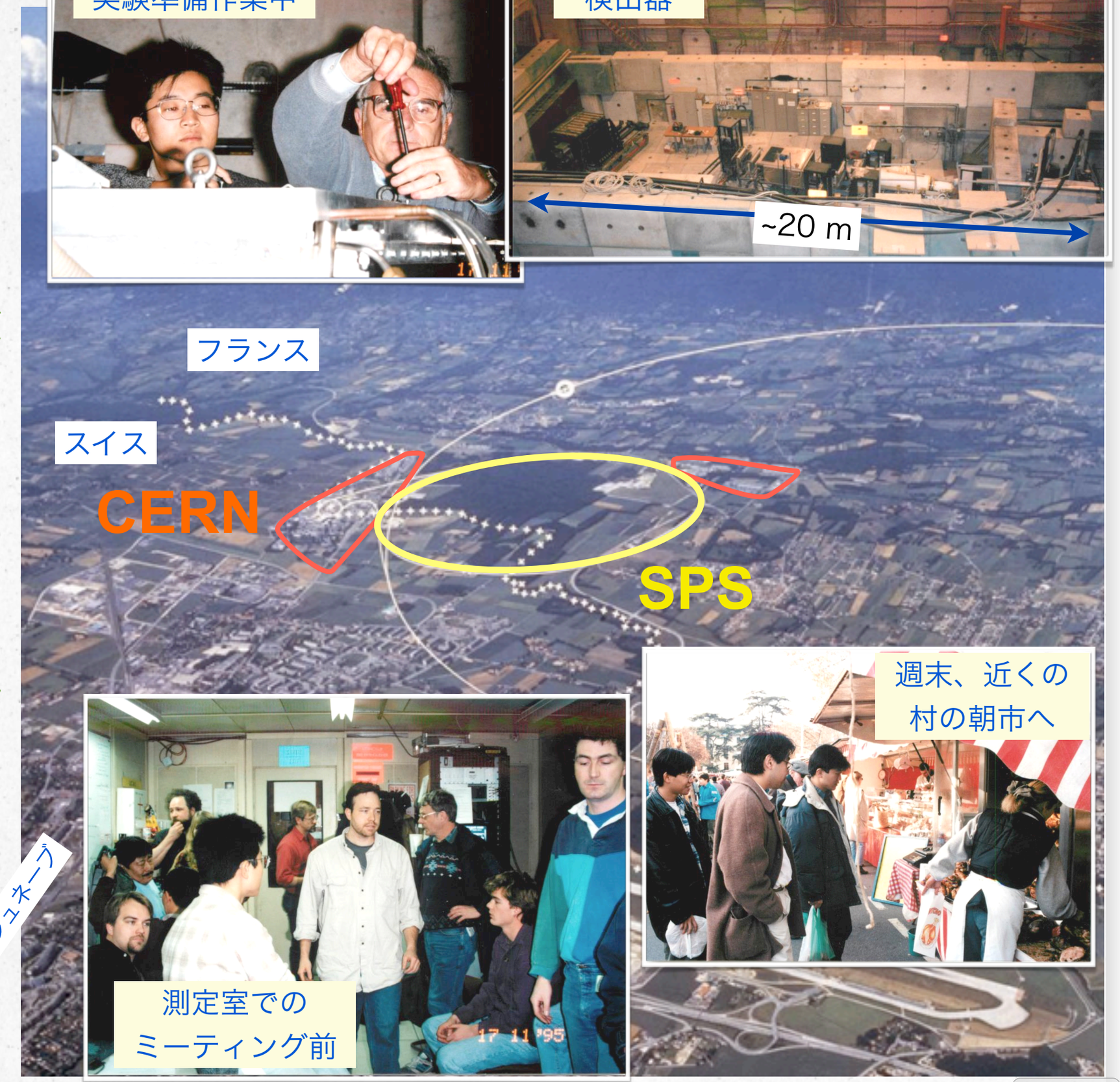
大学院生時代

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





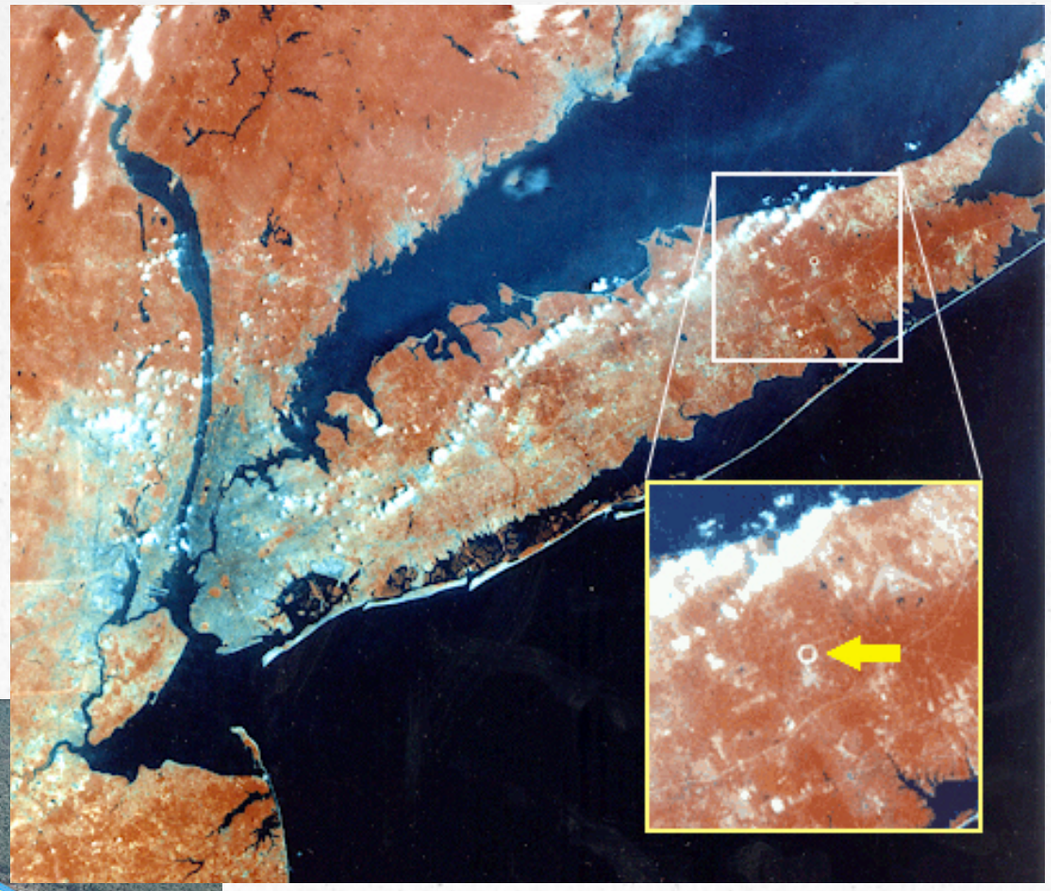
←ジュネーブ

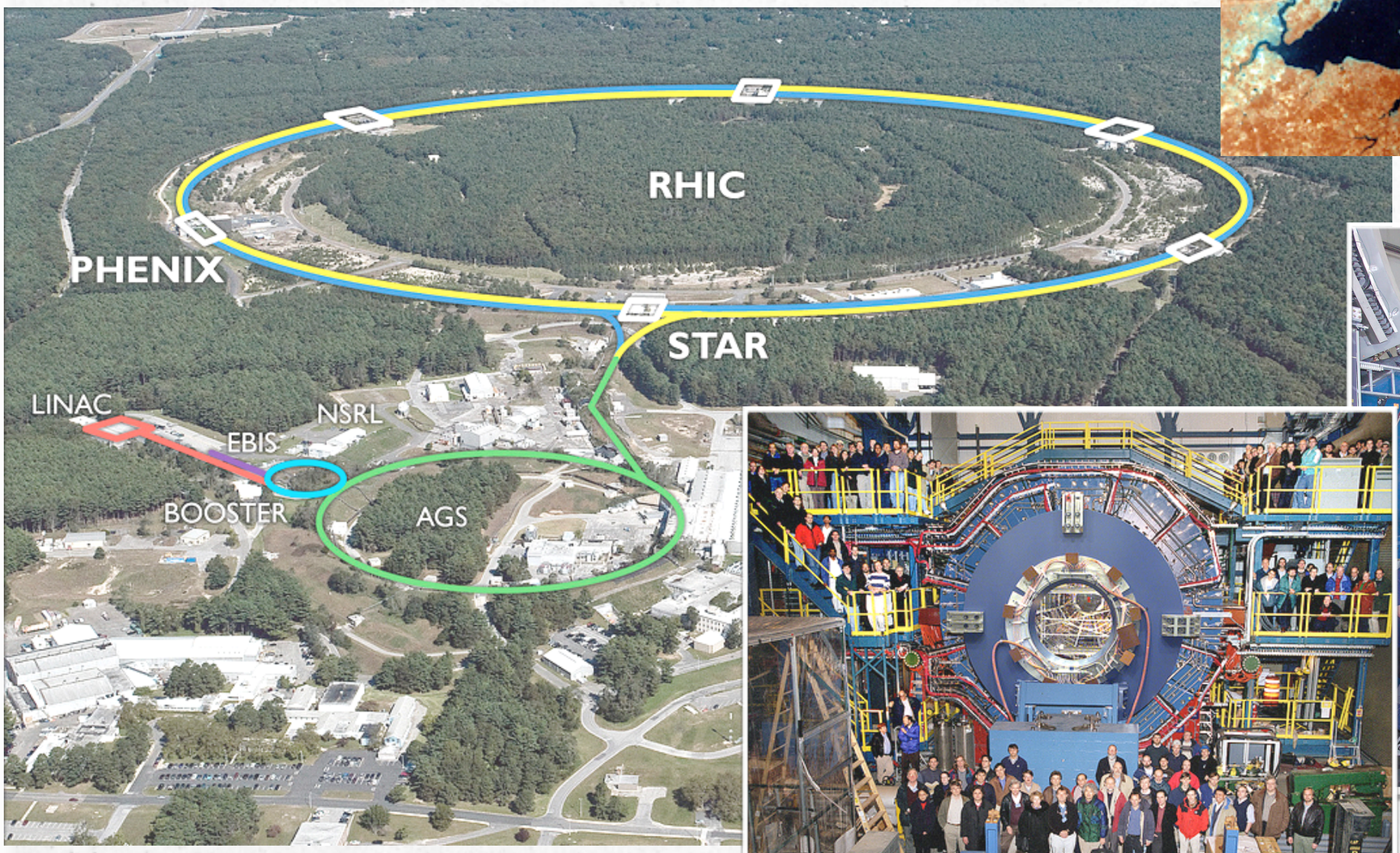
ポスドク研究員時代

ブルックヘブン国立研究所の加速器RHICを用いた
高エネルギー原子核衝突実験

- STAR
- PHENIX

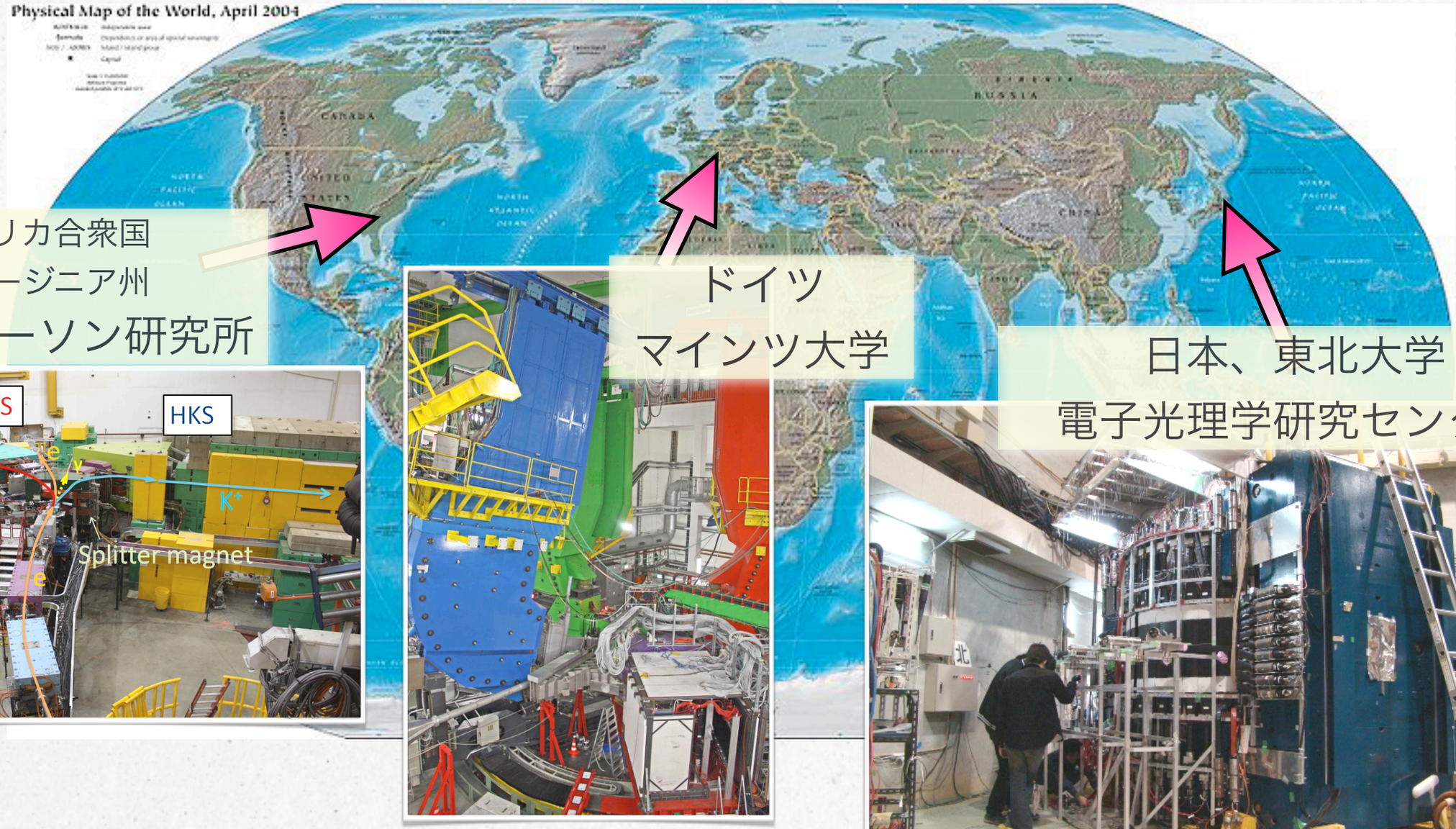
に参加 (それぞれ400名程度)





現在

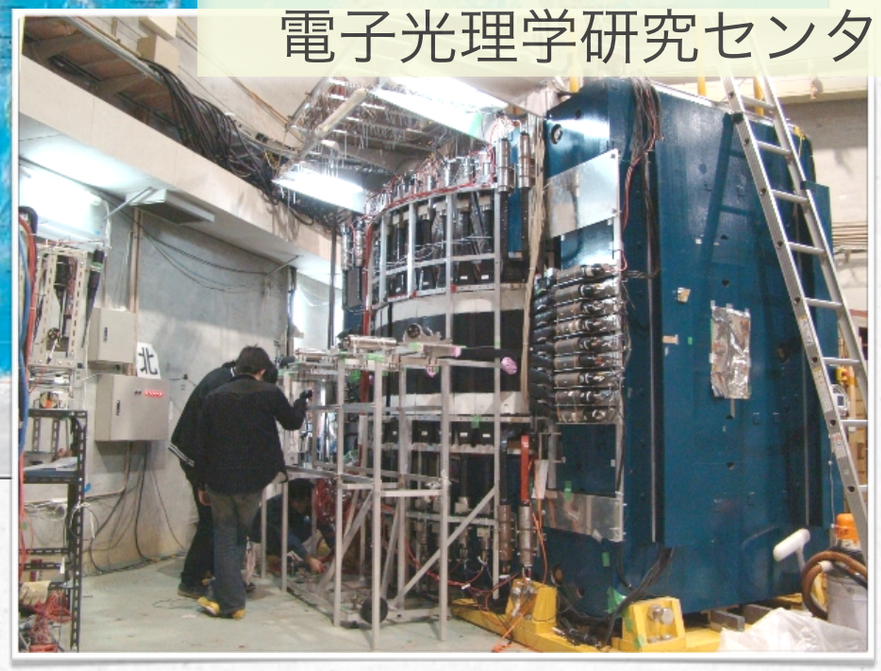
電子ビームを用いたストレンジネス核物理



アメリカ合衆国
ヴァージニア州
ジェファーソン研究所

ドイツ
マインツ大学

日本、東北大学
電子光理学研究センター



基礎科学の意義
に関する逸話を少し

基礎科学

19世紀英国の大蔵大臣 William E. Gladstone
Michael Faradayの電磁誘導の演示実験を見学した後に

「で、これは何の役に立つのかね？」

基礎科学

19世紀英国の大蔵大臣 William E. Gladstone
Michael Faradayの電磁誘導の演示実験を見学した後に

「で、これは何の役に立つのかね？」

「何の役に立つか分かりませんが、
いつの日か、閣下はこれに
税金をかけるようになるでしょう」

Michael Faraday

基礎科学

アナウンサー

「ニュートリノの研究は、
どのように役立つんでしょうか？」

基礎科学

アナウンサー

「ニュートリノの研究は、
どのように役立つんでしょうか？」

「役に立たないよ」

アナウンサー

「ニュートリノの研究は、

どのように役立つんでしょうか？」

「役に立たないよ」

小柴昌俊

2002年ノーベル物理学賞

「天体物理学とくに宇宙ニュートリノの検出に対するパイオニア的貢献」

により、レイモンド・デイヴィスと共に

基礎科学

1969年、アメリカ合衆国

原子力エネルギーについての両院合同委員会でJohn Pastore上院議員

「数百万ドルする粒子加速器が

我が国も守るのにどの様に役に立つんだ？」

基礎科学

1969年、アメリカ合衆国
原子力エネルギーについての両院合同委員会でJohn Pastore上院議員

「数百万ドルする粒子加速器が
我が国も守るのにどの様に役に立つんだ？」

「加速器は我が国を守るのに
直接には役に立ちませんが、
守るのに値する国にすることが出来ます」

Robert R. Wilson（米国物理学者）
マンハッタン計画グループリーダー
フェルミ国立加速器研究所の初代所長

科学 ≠ 技術

まとめ：素粒子・原子核の実験研究

- 人間・世界の起源を追い求める基礎科学
  - 知的好奇心に基づく
  - 直接、応用（“役に立つ”）を考えない

まとめ：素粒子・原子核の実験研究

- 人間・世界の起源を追い求める基礎科学
  - 知的好奇心に基づく
  - 直接、応用（“役に立つ”）を考えない
- 理学・工学の知識を集約した総合科学
  - 実験に必要な検出器・測定器
    - 研究者が自ら設計・製作を行う
    - 電磁気学の応用、粒子（素粒子・原子核等）と物質の相互作用
  - 周辺から応用が生まれてくる
    - 放射線検出器、医学分野での診断・治療、等
    - GPS（一般相対性理論）、半導体技術（量子力学）
    - World Wide Web
      - CERNの物理学者 Sir Timothy John Berners-Lee によって開発

まとめ：素粒子・原子核の実験研究

- 人間・世界の起源を追い求める基礎科学
  - 知的好奇心に基づく
  - 直接、応用（“役に立つ”）を考えない
- 理学・工学の知識を集約した総合科学
  - 実験に必要な検出器・測定器
    - 研究者が自ら設計・製作を行う
    - 電磁気学の応用、粒子（素粒子・原子核等）と物質の相互作用
  - 周辺から応用が生まれてくる
    - 放射線検出器、医学分野での診断・治療、等
    - GPS（一般相対性理論）、半導体技術（量子力学）
    - World Wide Web
      - CERNの物理学者 Sir Timothy John Berners-Lee によって開発

付録

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

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

$50200000000 \times 230000$

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

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

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

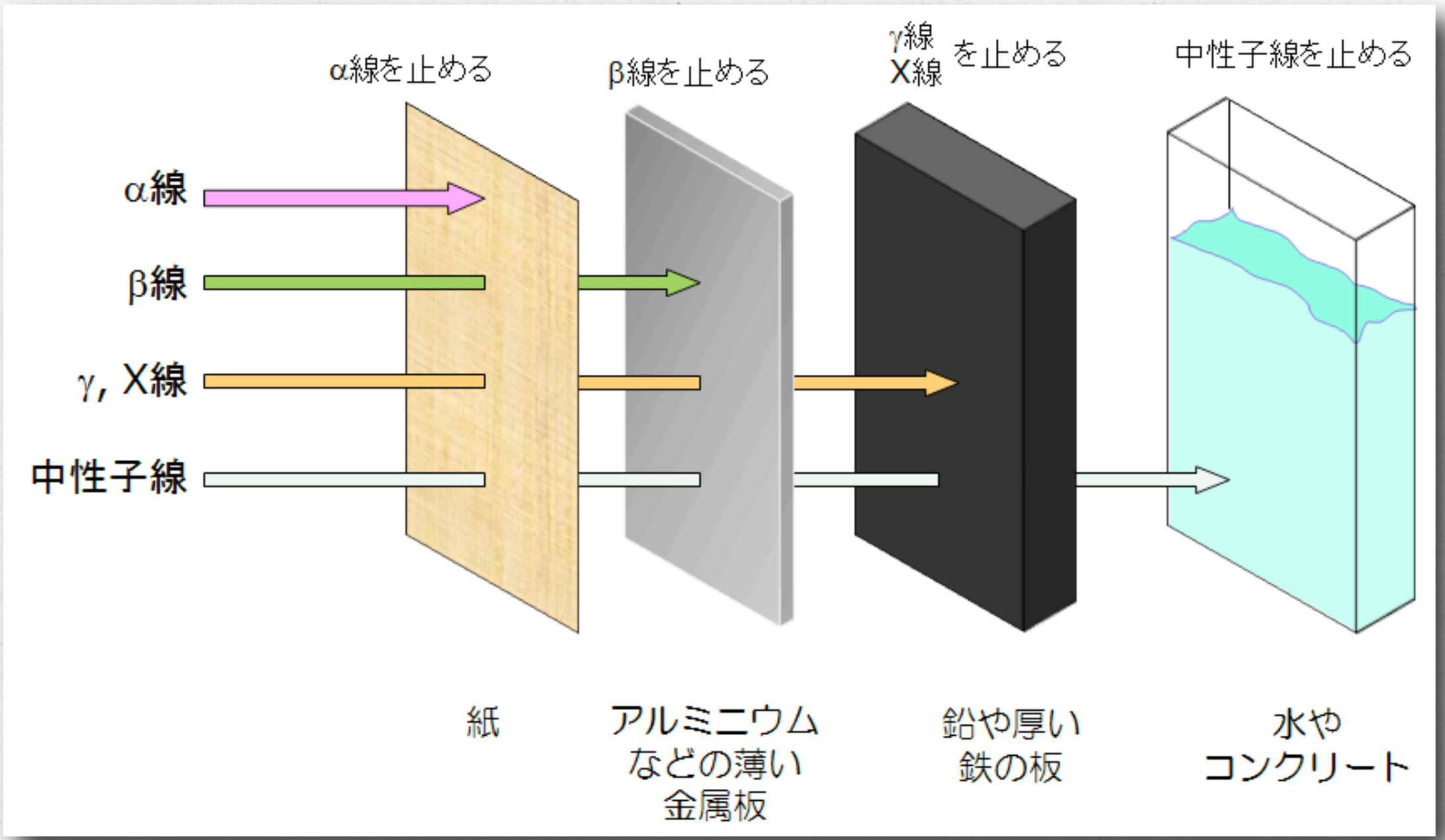
$= 11.546 \times 10^{16} = 1.1546 \times 10 \times 10^{16}$

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

$= 1.1546 \times 10^{17}$

桁の数を最初から数えて計算している

放射線の遮蔽

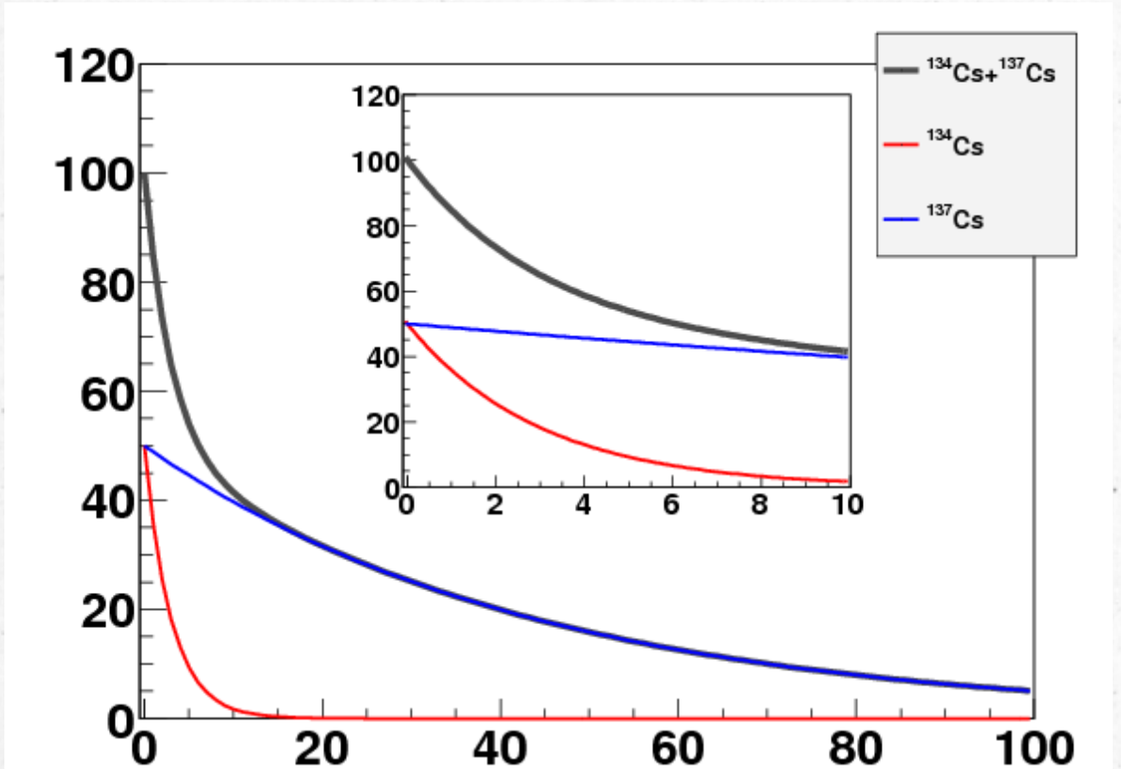

α線を止める
β線を止める
γ線
X線
を止める
中性子線を止める
α線
β線
γ, X線
中性子線
紙
アルミニウム
などの薄い
金属板
鉛や厚い
鉄の板
水や
コンクリート

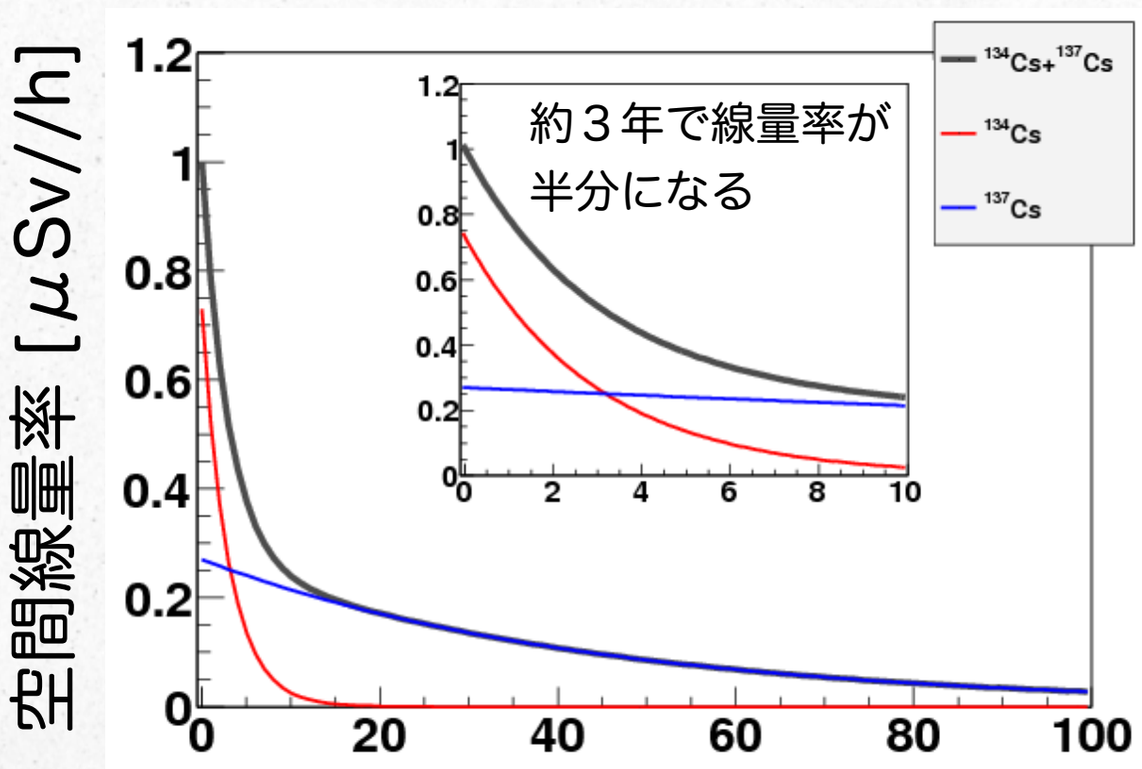
天然に存在する放射性物質

- 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

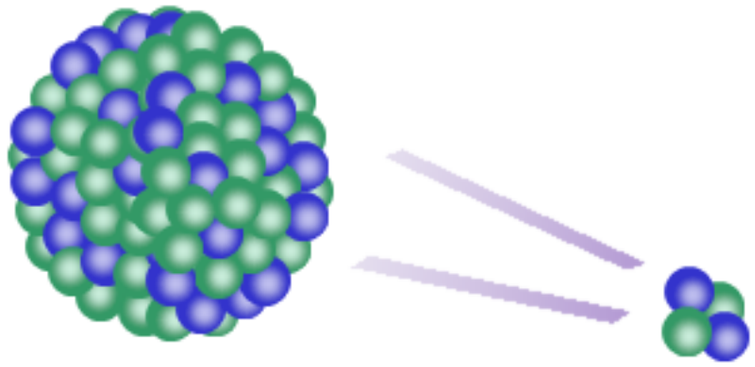


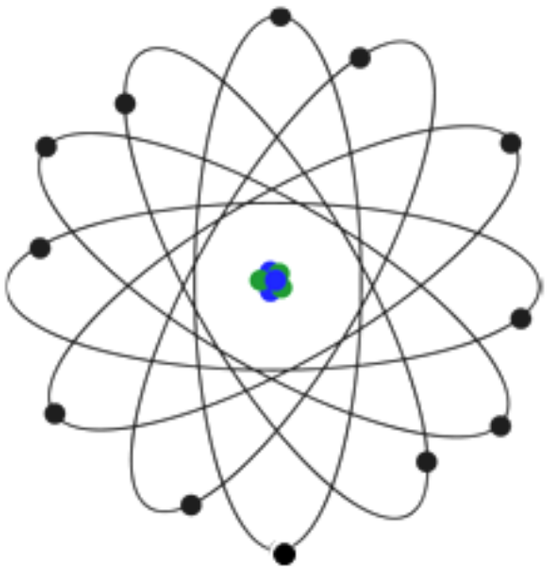


2011年4月からの経過年

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





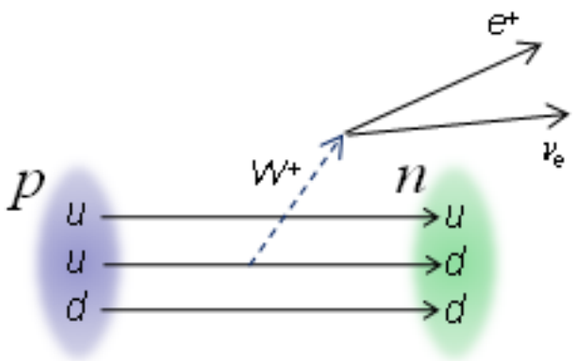
α線

- 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

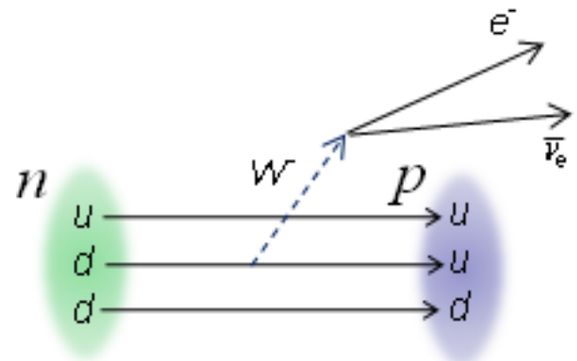
β線

- 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

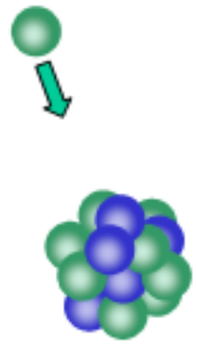
- 物理的性質
  - 電磁波
  - 電荷を持たない
  - γ線とX線の違いは発生機構
    - γ線
      - 原子核内の核子が励起状態からエネルギーの低い状態へ遷移する時に余分なエネルギーが電磁波として放出される
    - X線
      - 軌道電子が励起状態からエネルギーの低い状態に遷移する際に放出される
        - » 電子捕獲によるもの
          - » 陽子が軌道電子を捕獲、空いた軌道に上の軌道から電子が落ちて来るときにX線が放出される
        - » 内部転換によるもの
          - » 原子核のエネルギーが直接電子の軌道に与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

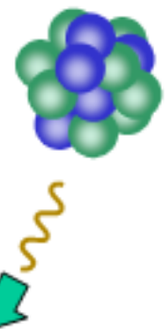
- 飛距離 (Range)
  - 長く透過力が強い
    - 電離作用は強くない
- 防御物 (Shield)
  - 密度の高い物質を用いる
  - 鉛、鉄、コンクリートなど
- 生物学的危害 (Biological hazard)
  - 体外被曝
    - 透過力が高いことから体全体が被曝する
  - 体内被曝
    - 放射性物質の近くだけではなく体の広い範囲で被曝する

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

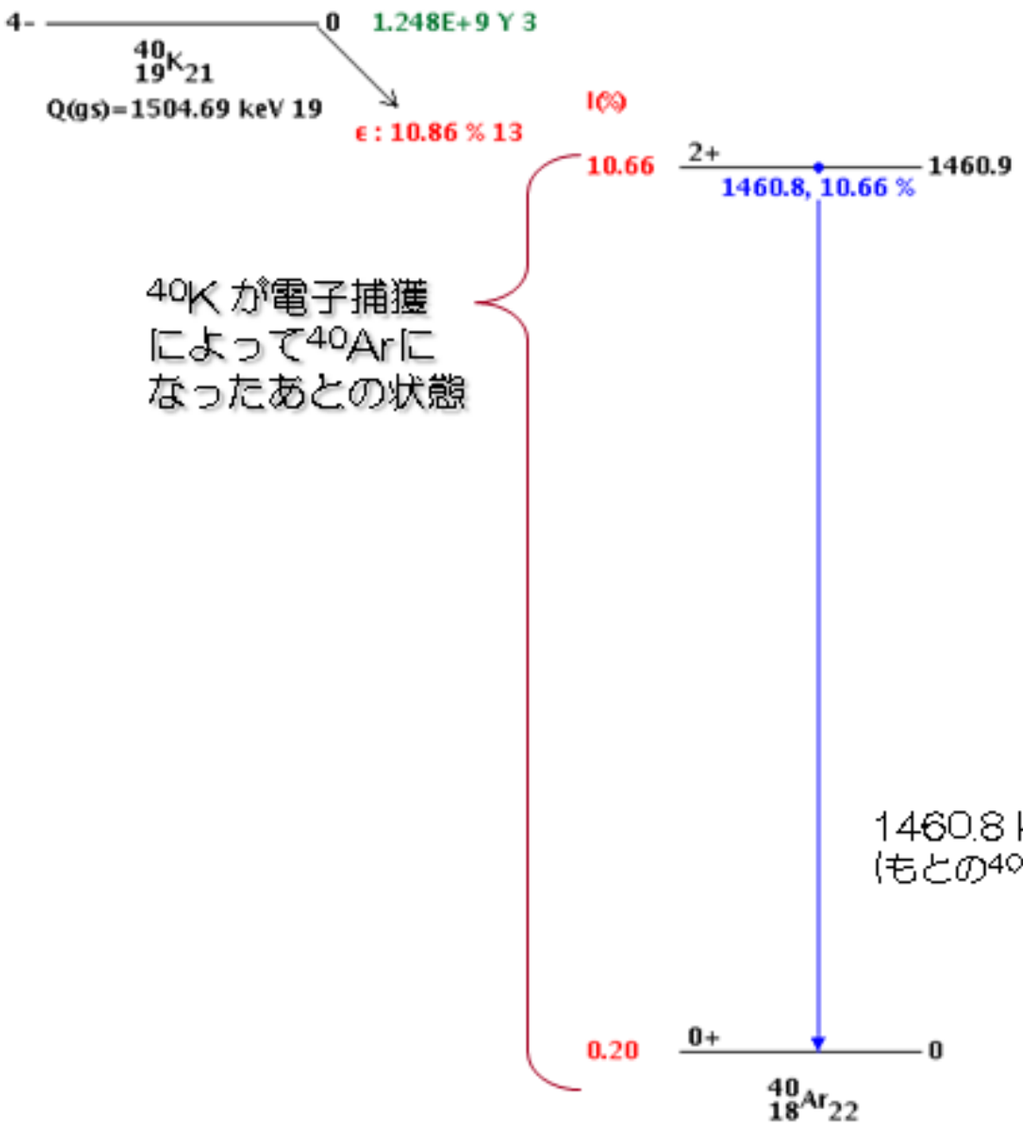
中性子

- 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

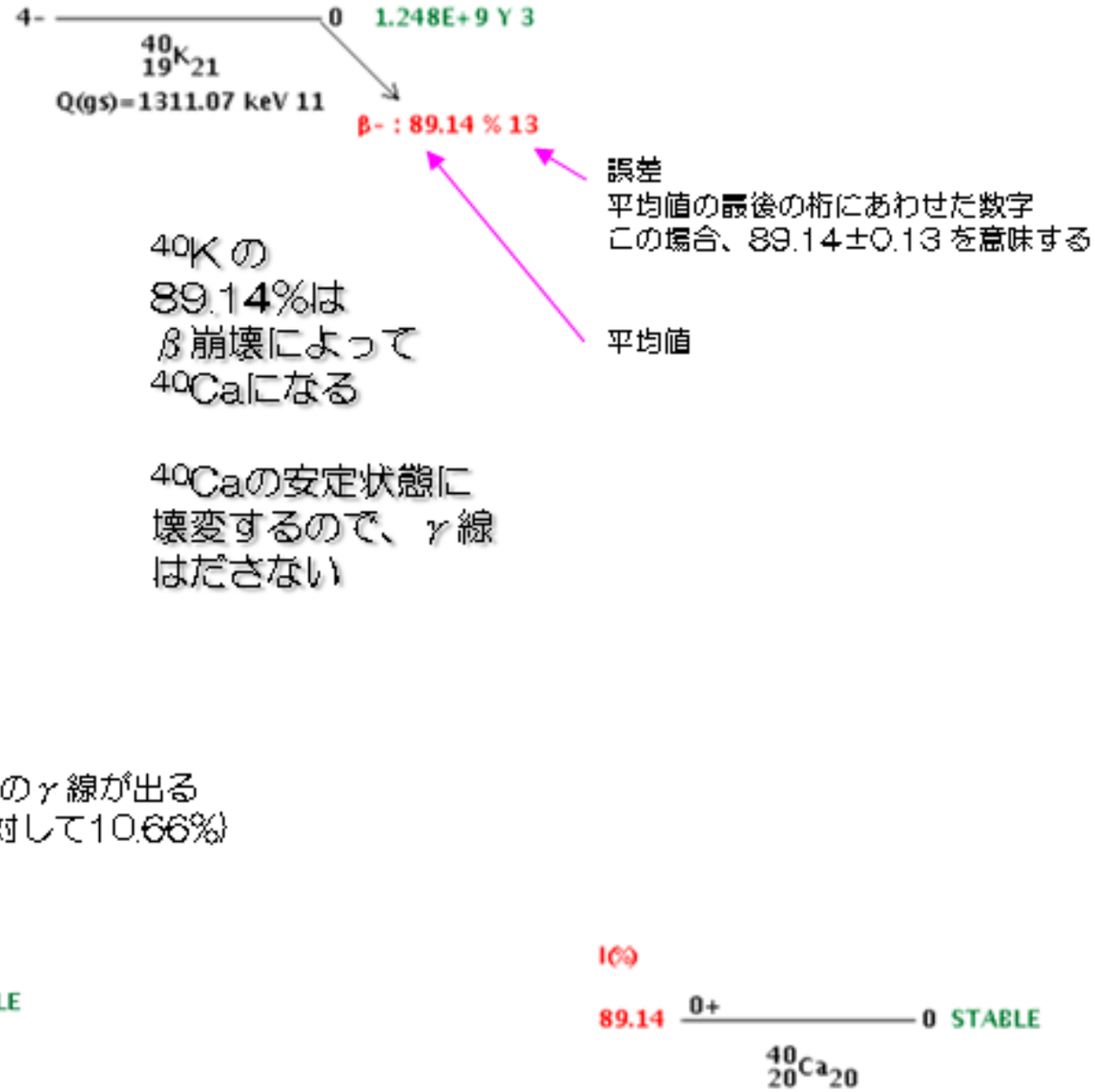
- 宇宙線
  - 常に地球に降り注いでいる
    - 10 cm^2 辺り 1秒間に一個程度
  - 最初に地球の大気に突入するのは陽子や原子核等
  - 地表から5km程度では殆どμ粒子
    - 大気との相互作用でパイ中間子を生成、パイ中間子がμ粒子に崩壊し地上に届く
    - 平均寿命は 2.2×10^{-6} [s]
      - 光速(3×10^{8} [m/s])近くまで加速された場合
        - » 相対論効果を考えないと、進む距離は6×10^{2} [m]
        - » 相対論効果を考慮
          - » μ粒子の質量は 105.7 [MeV],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

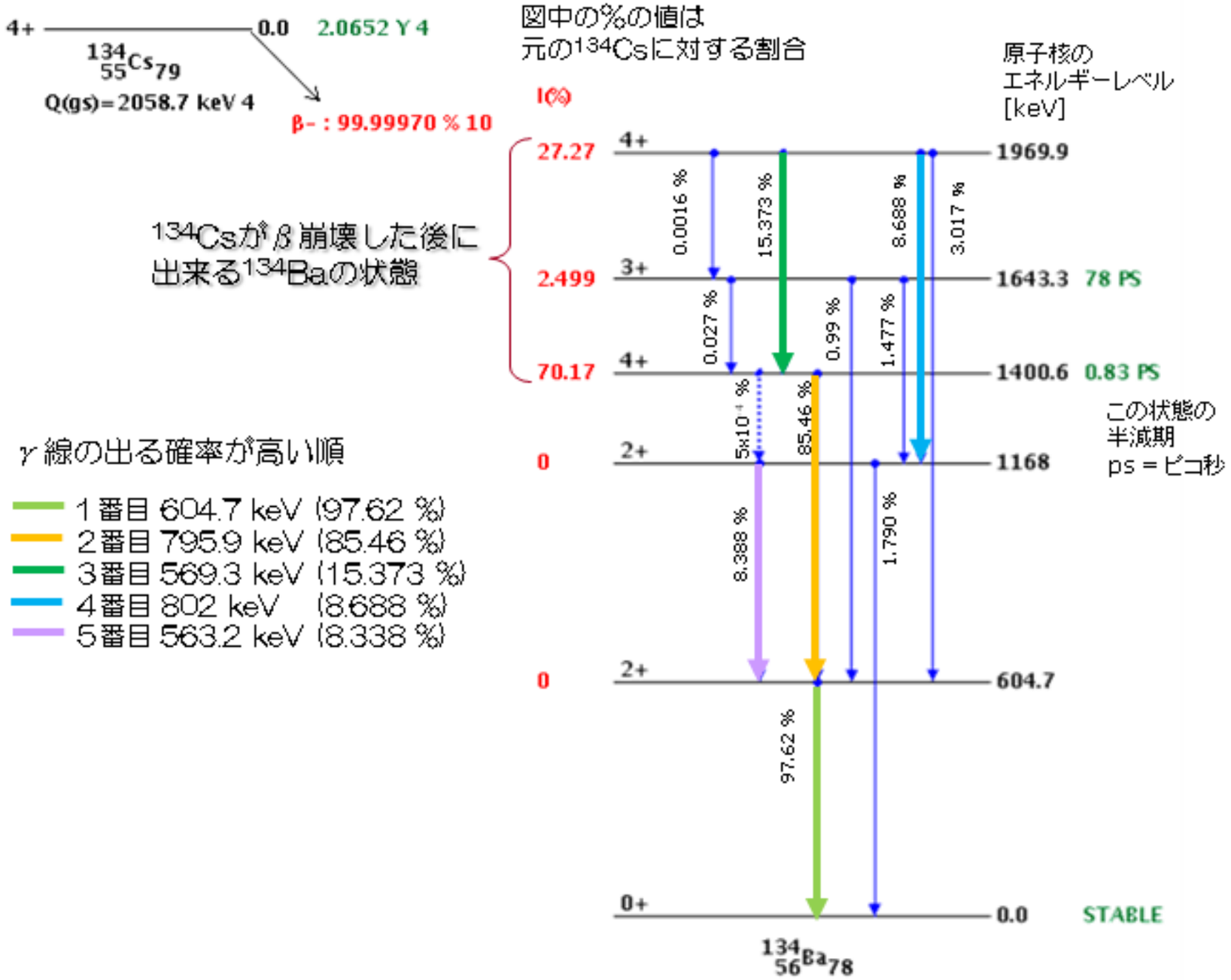
誤差
平均値の最後の桁にあわせた数字
この場合、89.14±0.13 を意味する

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

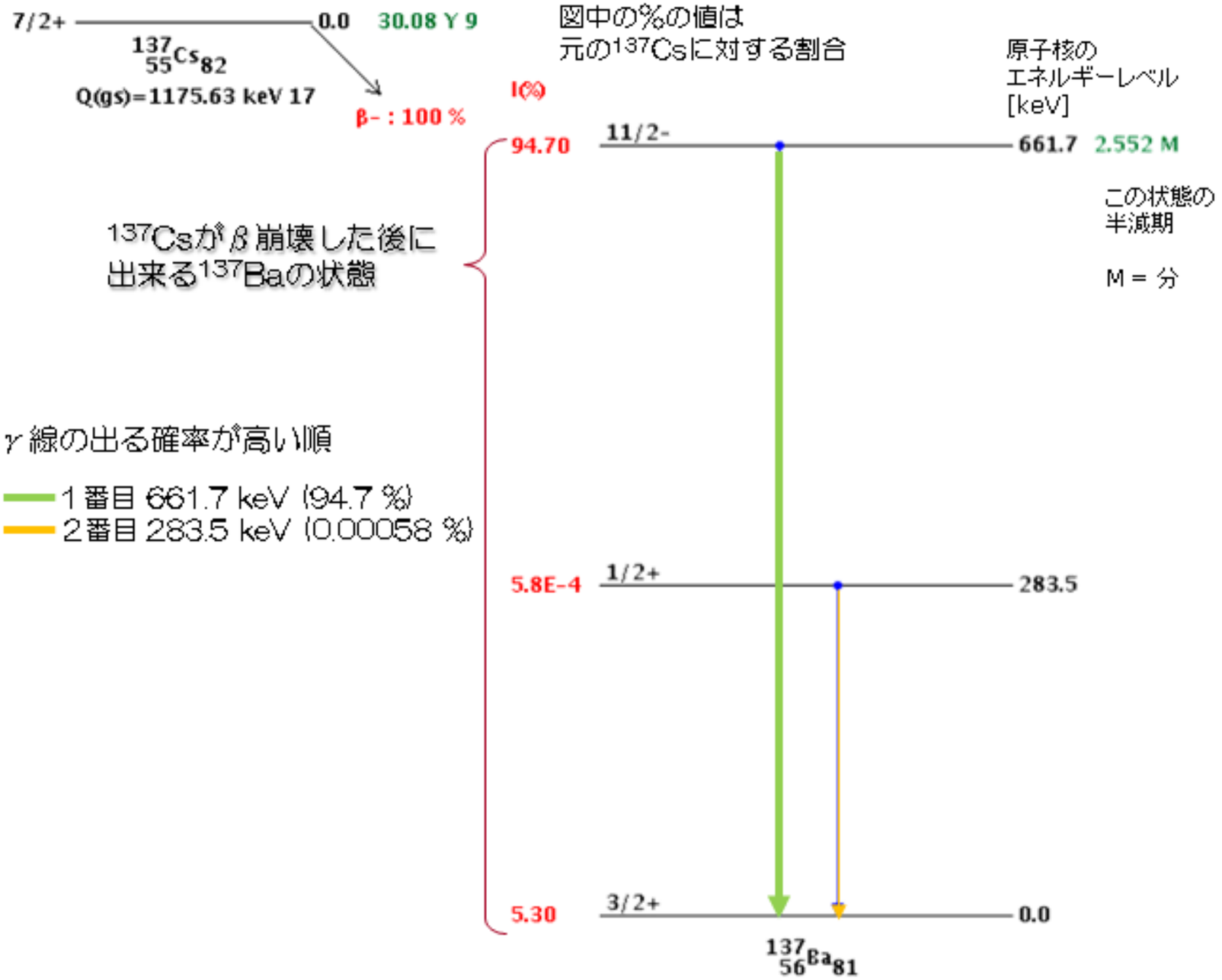
この時、二つの状態の
エネルギー差がγ線
として放出される

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

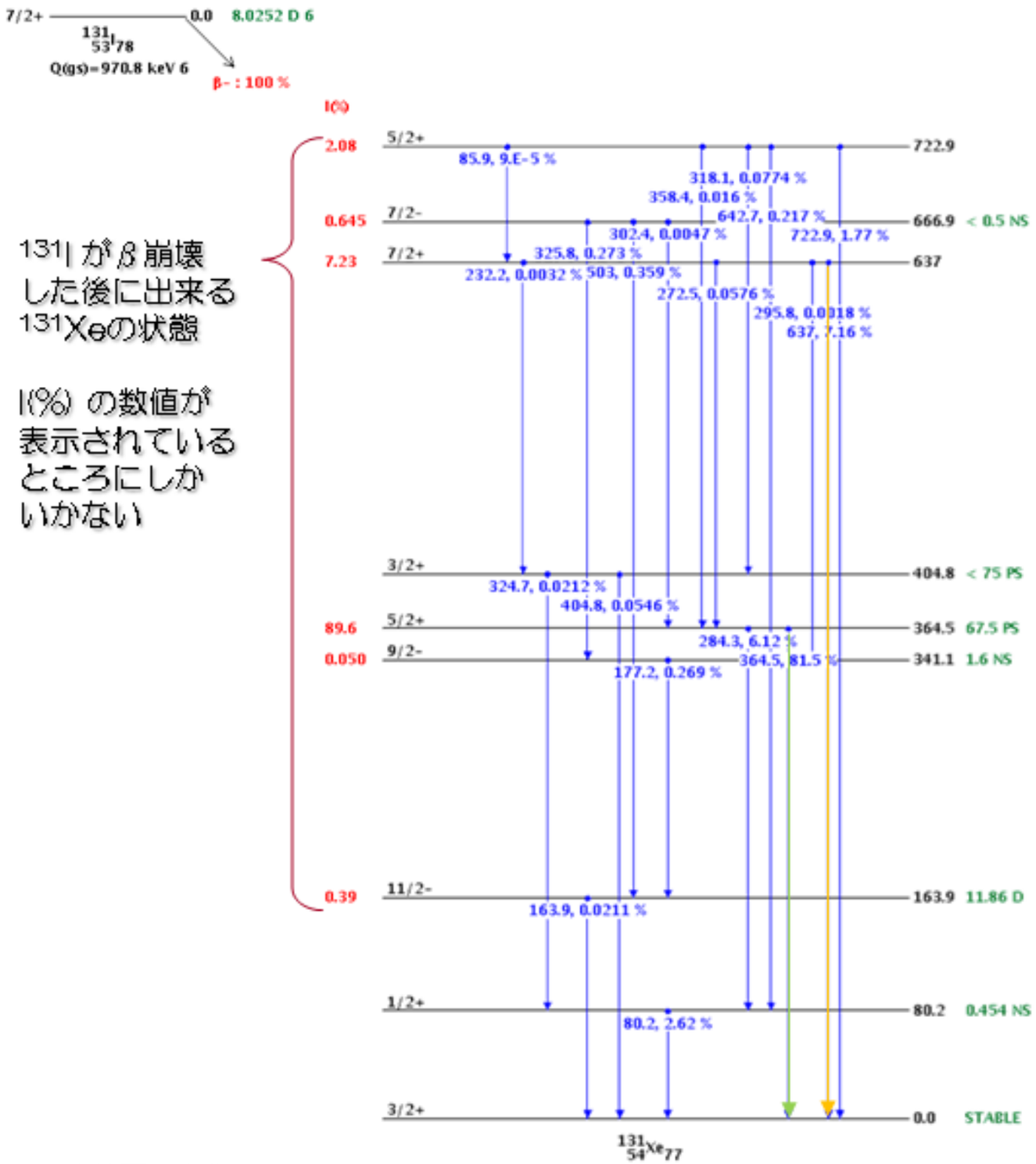
この時、二つの状態の
エネルギー差がγ線
として放出される

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

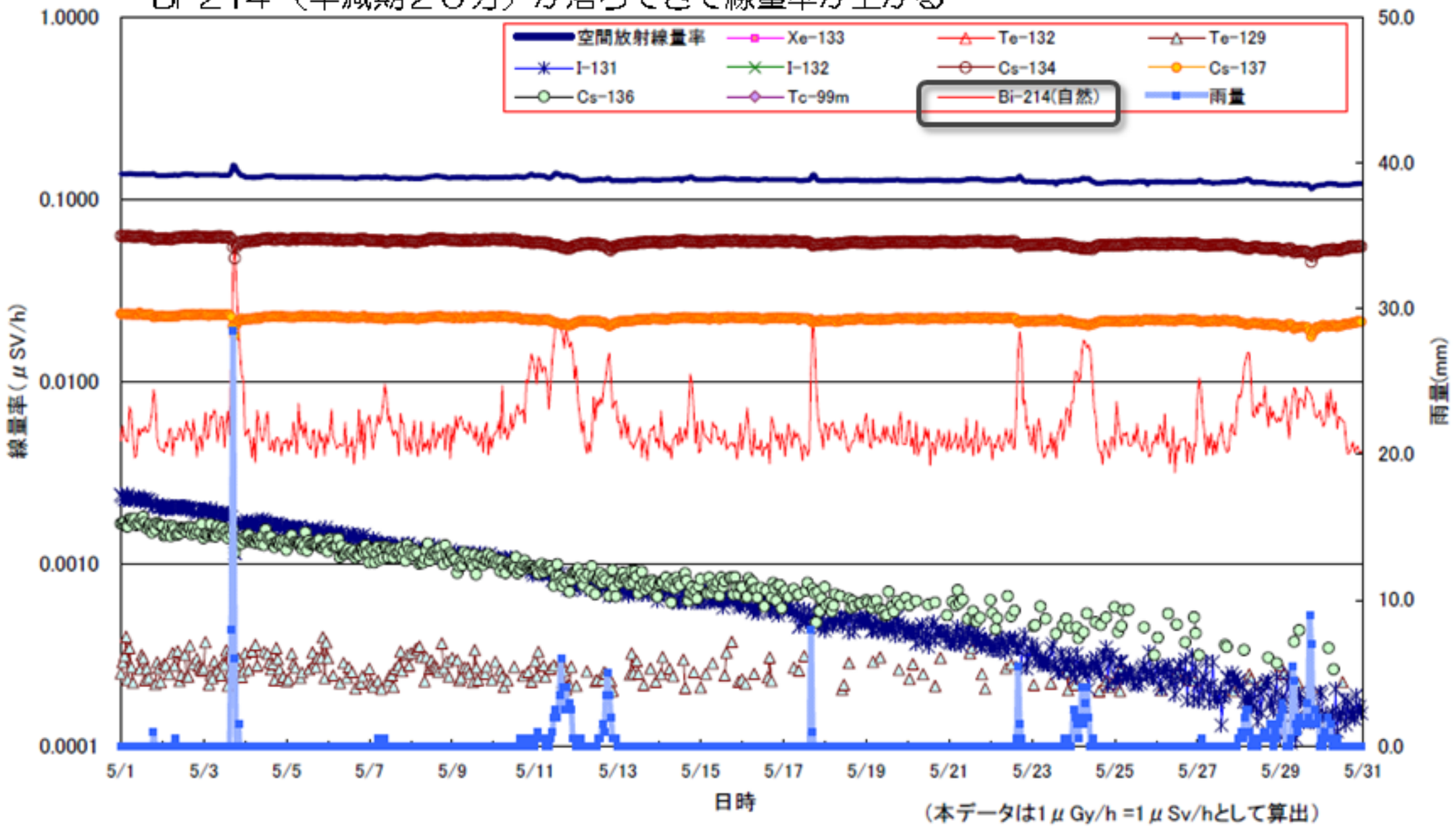


図　日本分析センターにおける空間放射線量率の測定結果

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

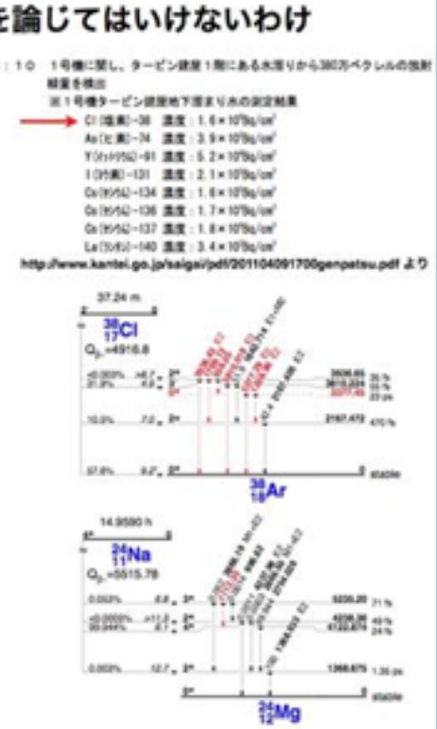
^{38}Cl誤検出にまつわる話

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

	核種	3月17日 ①放射能濃度 (Bq/cm3)	3月17日 ②検出限界濃度 (Bq/cm3)	3月17日 採取分① 全核種濃度に対する割合 (①/一番大きい①)	3月18日 ①放射能濃度 (Bq/cm3)	3月18日 ②検出限界濃度 (Bq/cm3)	3月18日 採取分① 全核種濃度に対する割合 (①/一番大きい①)	3月18日 ①放射能濃度 (Bq/cm3)	3月18日 ②検出限界濃度 (Bq/cm3)	3月18日 採取分② 全核種濃度に対する割合 (①/一番大きい①)
揮発性	I-131	9.432E-05	2.351E-06	0.09	8.630E-04	3.145E-05	0.86	4.298E-03	4.993E-05	4.30
	I-132	ND	--	--	1.720E-03	3.821E-05	0.02	2.625E-03	9.359E-05	0.04
	I-133	3.304E-04	4.476E-06	0.00	ND	--	--	5.246E-05	4.213E-05	0.01
粒子状	Co-58	2.494E-05	2.061E-05	0.00	3.060E-05	2.048E-05	0.00	1.578E-04	1.435E-05	0.02
	Co-134	3.314E-04	1.680E-05	0.17	3.345E-04	1.868E-05	0.17	4.863E-04	1.538E-05	0.24
	Co-136	6.107E-05	1.298E-05	0.01	5.882E-05	1.012E-05	0.01	8.419E-05	1.436E-05	0.01
	Co-137	3.232E-04	1.702E-05	0.11	3.147E-04	1.883E-05	0.10	4.306E-04	1.715E-05	0.14
	Cl-38m	ND	--	--	ND	--	--	3.160E+00	3.292E-02	

元はWiley-Interscience Table of Isotopes CD-ROM Eighth Edition: 1998より転載

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

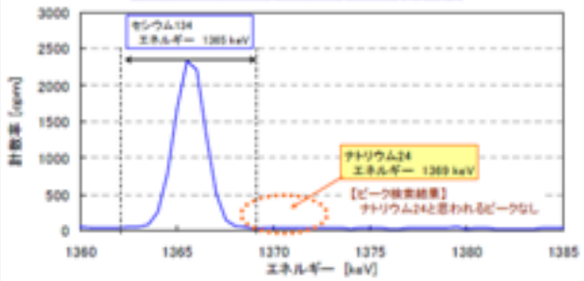
（参考） 福島第一　1号機タービン建屋地下1階のたまり水 Cl-38核種分析の評価について

○再評価結果

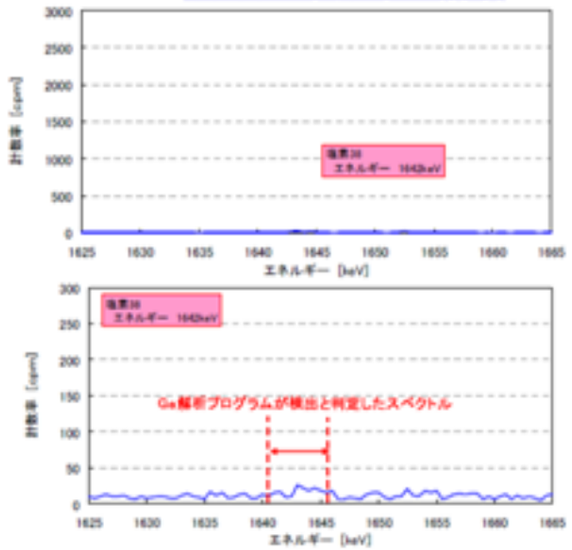
福島第一1号機では、3月23日～25日の間、原子炉に海水注入しているため、Cl-37(n, γ)Cl-38反応により、塩素38が生成されているとの可能性はあった。

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



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

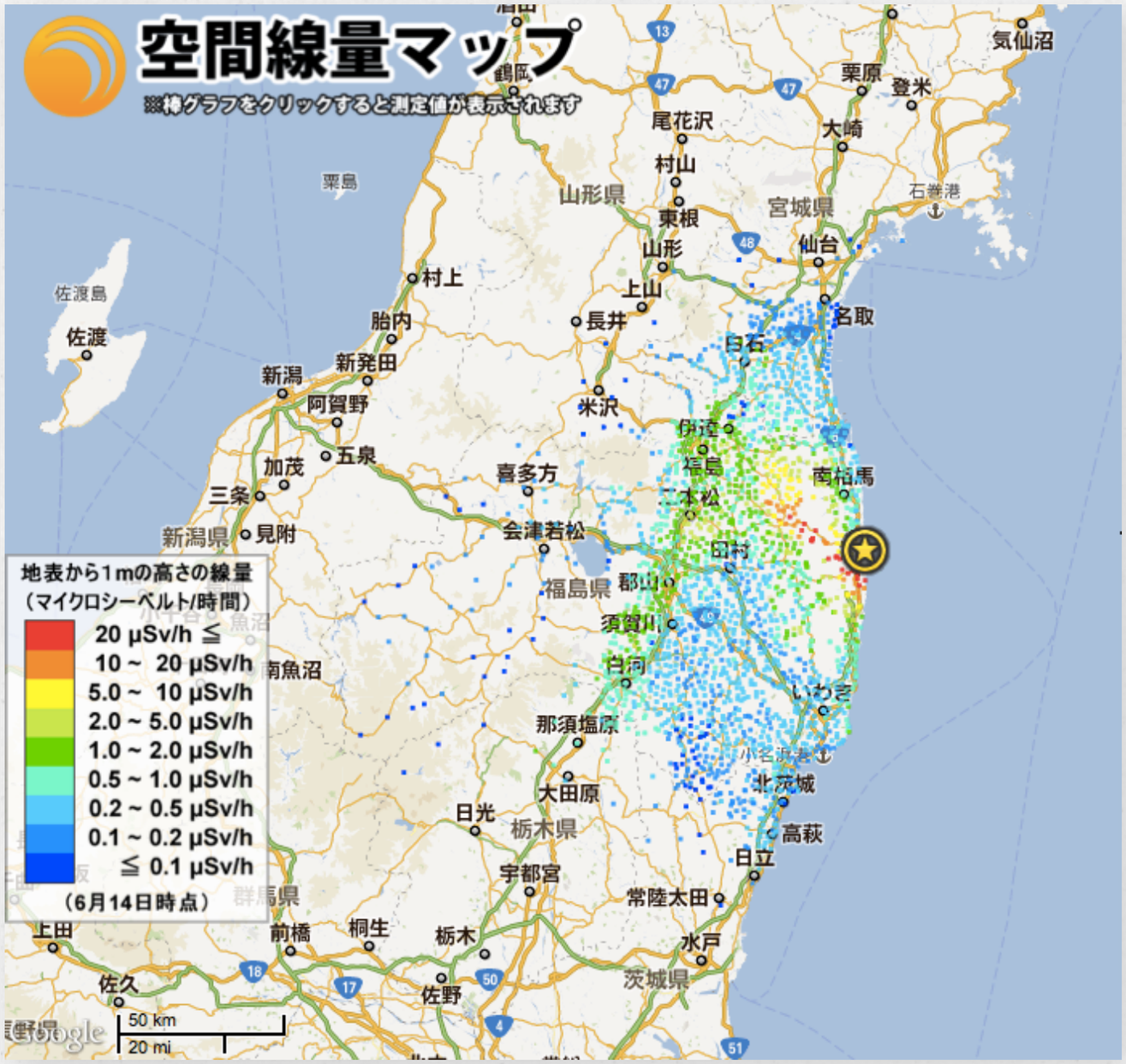
ベッド型

チェア型
周りに遮蔽がある

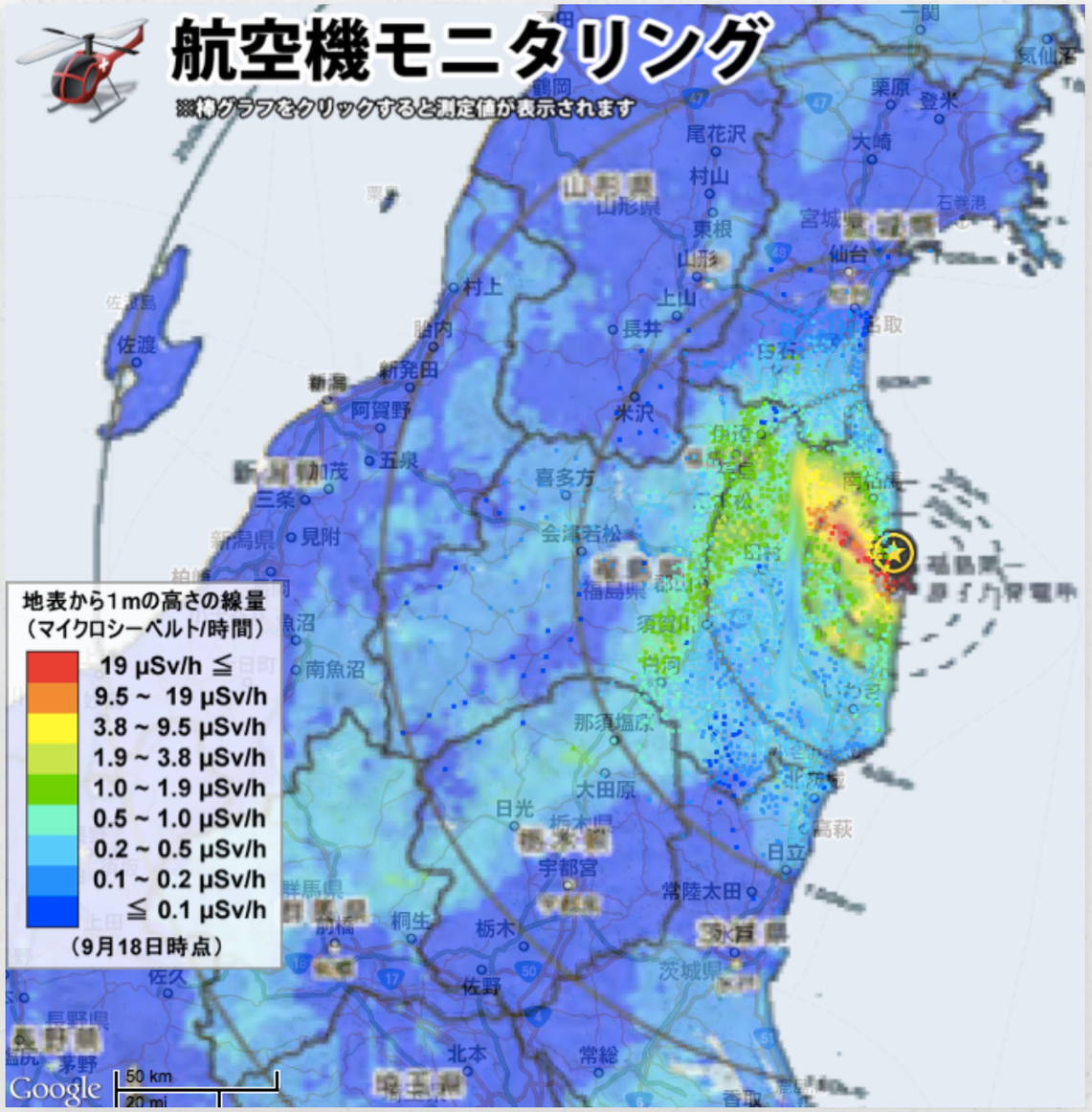
C社

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

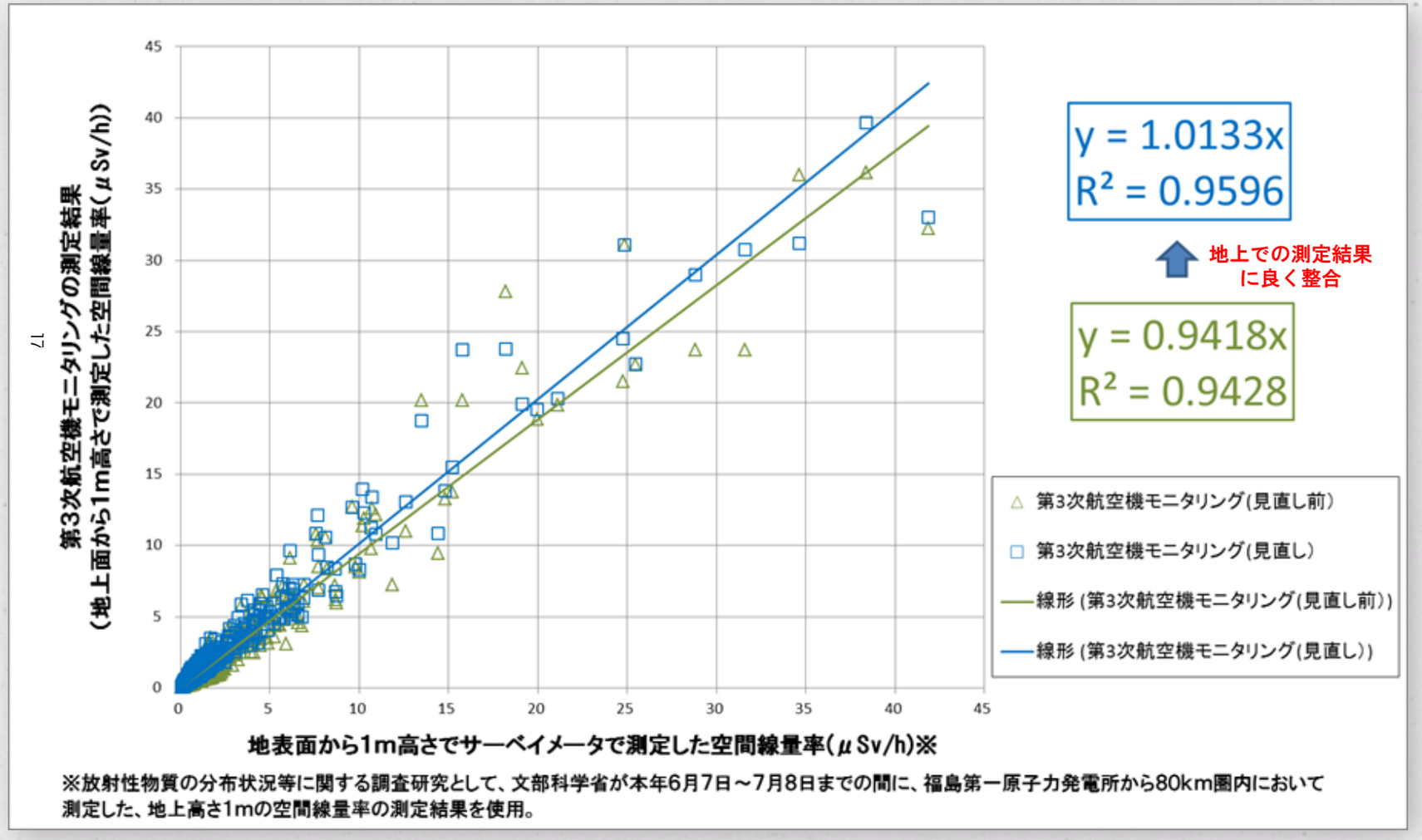


航空機モニタリング
上空(150-900 m)で測定を
地表１ｍの高さに外挿

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



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）

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)

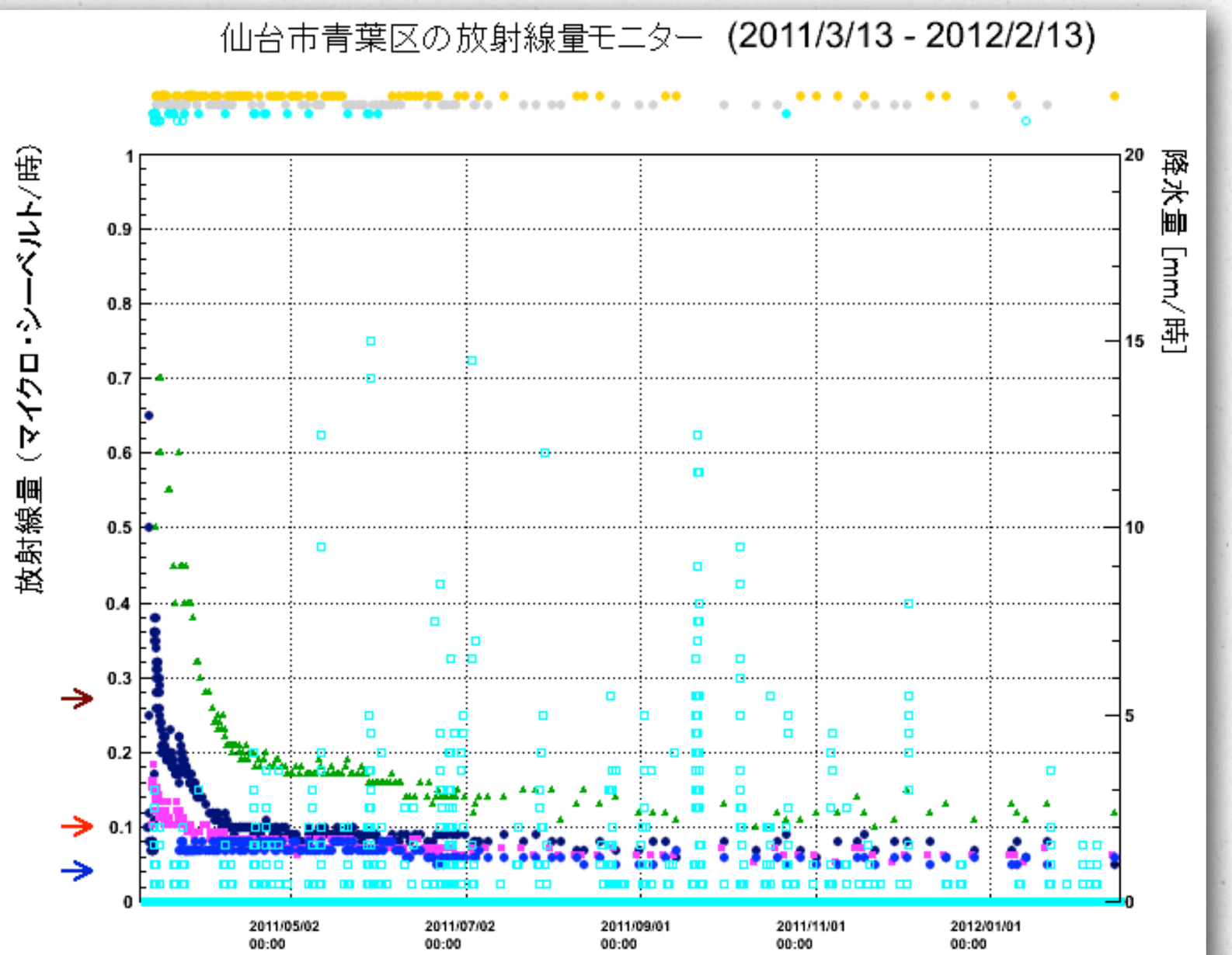
天気
- ●晴れ
- ◎曇り
- ●雨
- ○雪

- □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 0.27 μSv (マイクロ・シーベルト)**

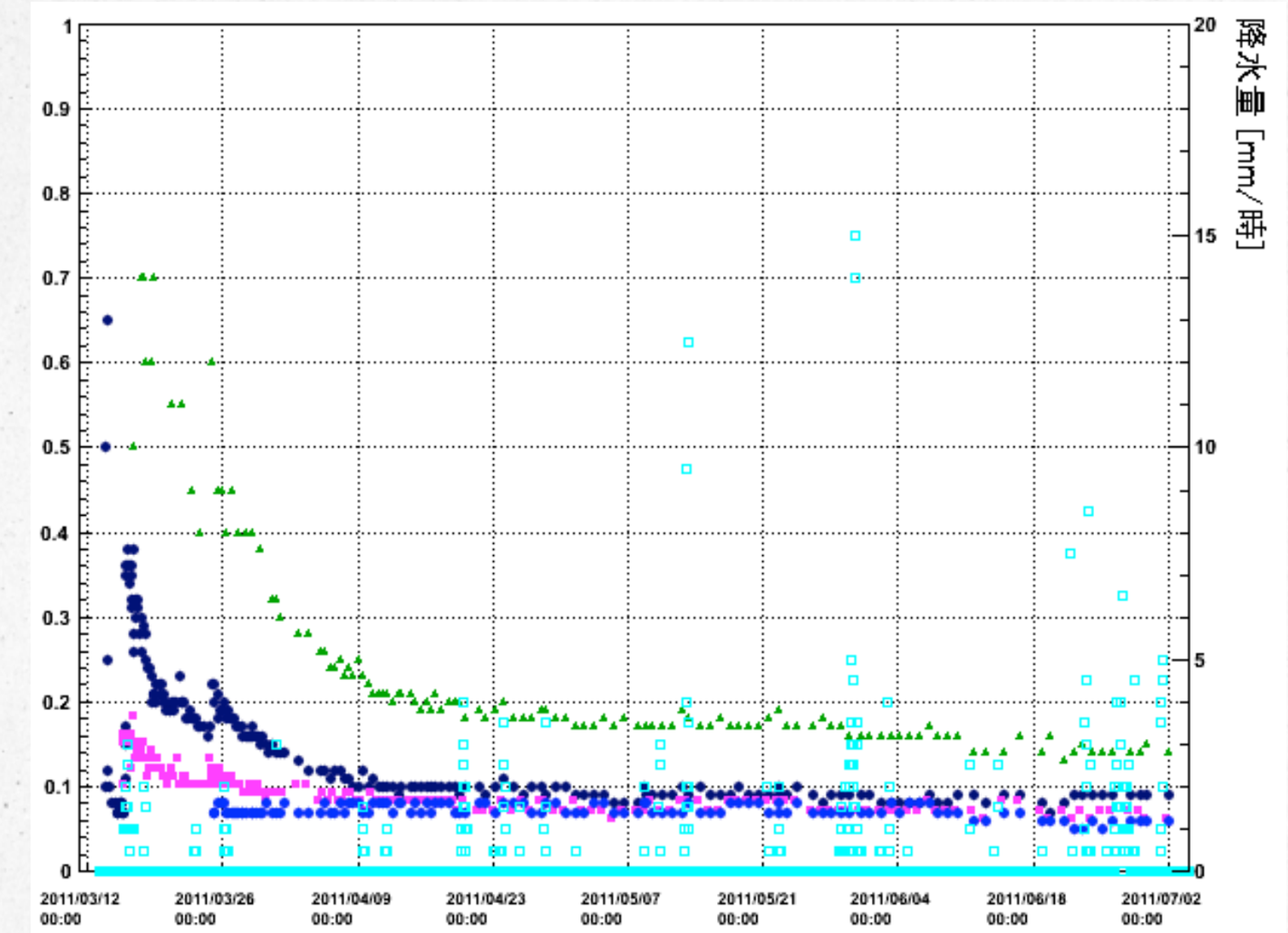
外部被曝 (宇宙線＋大地) のみでは、
年間 0.87 mSv = **1時間あたり 0.10 μSV**

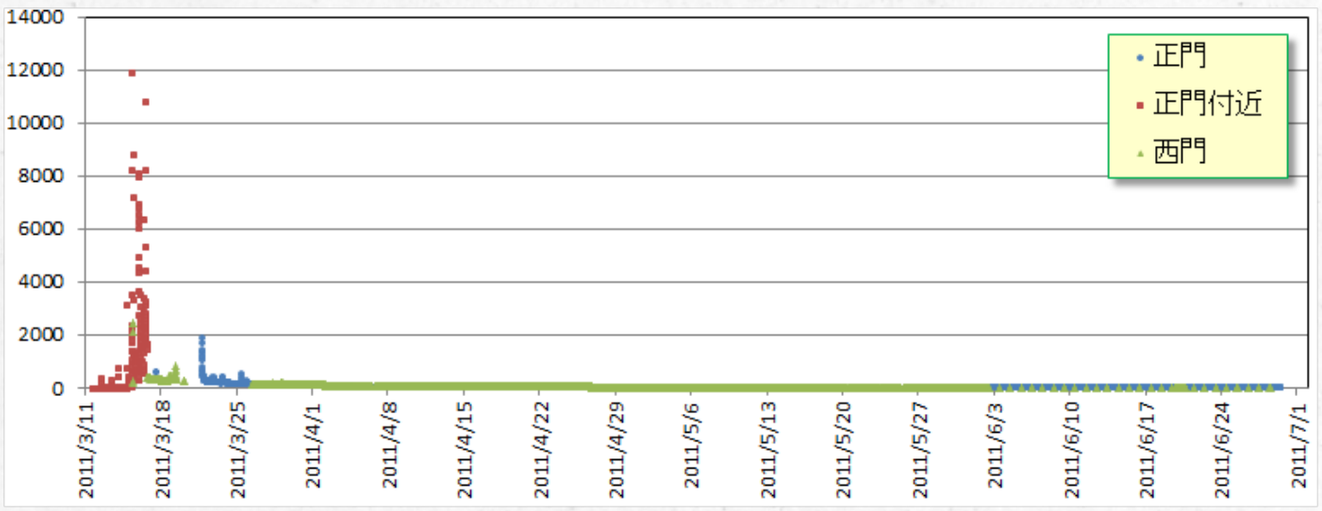
m(ミリ)は、1/1000 を意味し、μ(マイクロ)はミリの1/1000 。つまり、マイクロは、100万分の1。



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





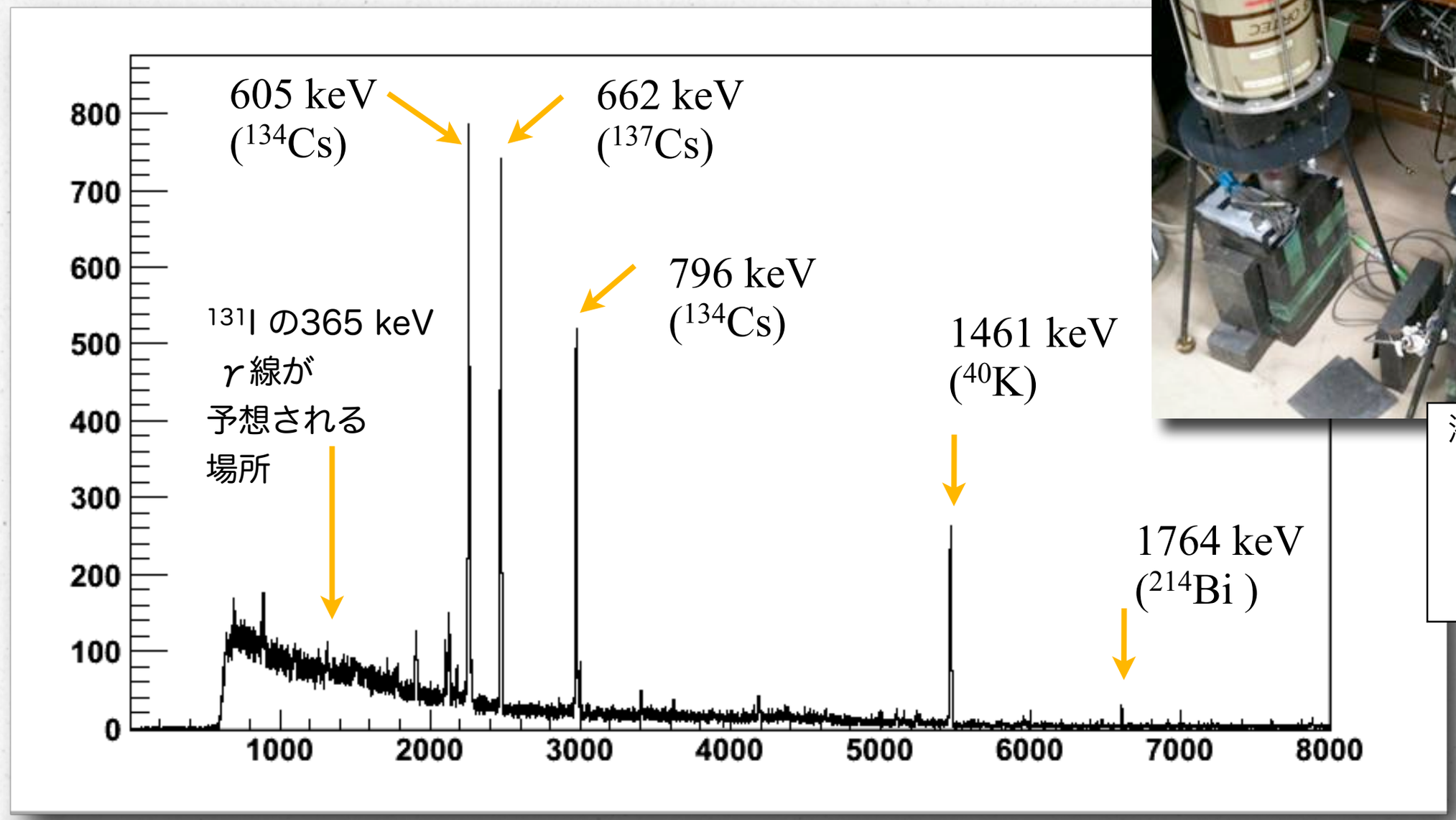
３月から７月の
測定値を表示

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

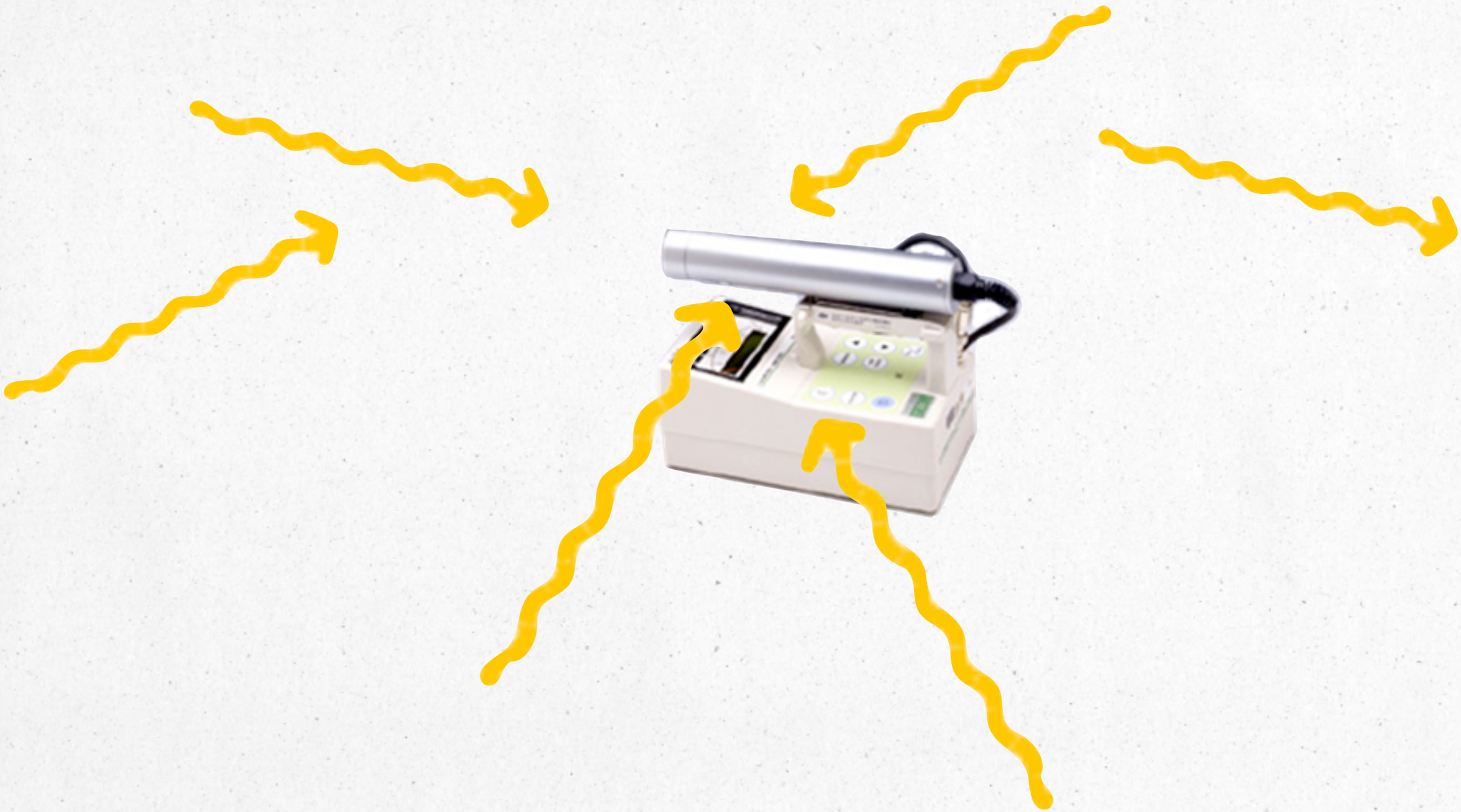


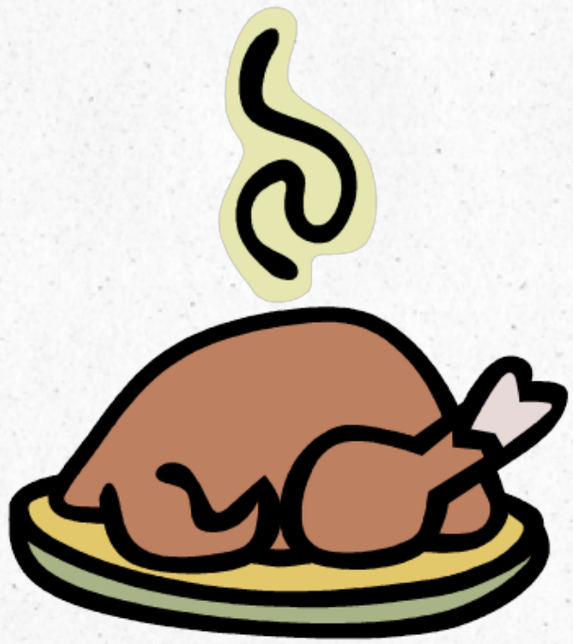
液体窒素タンク
ゲルマニウム
半導体検出器
鉛ブロック

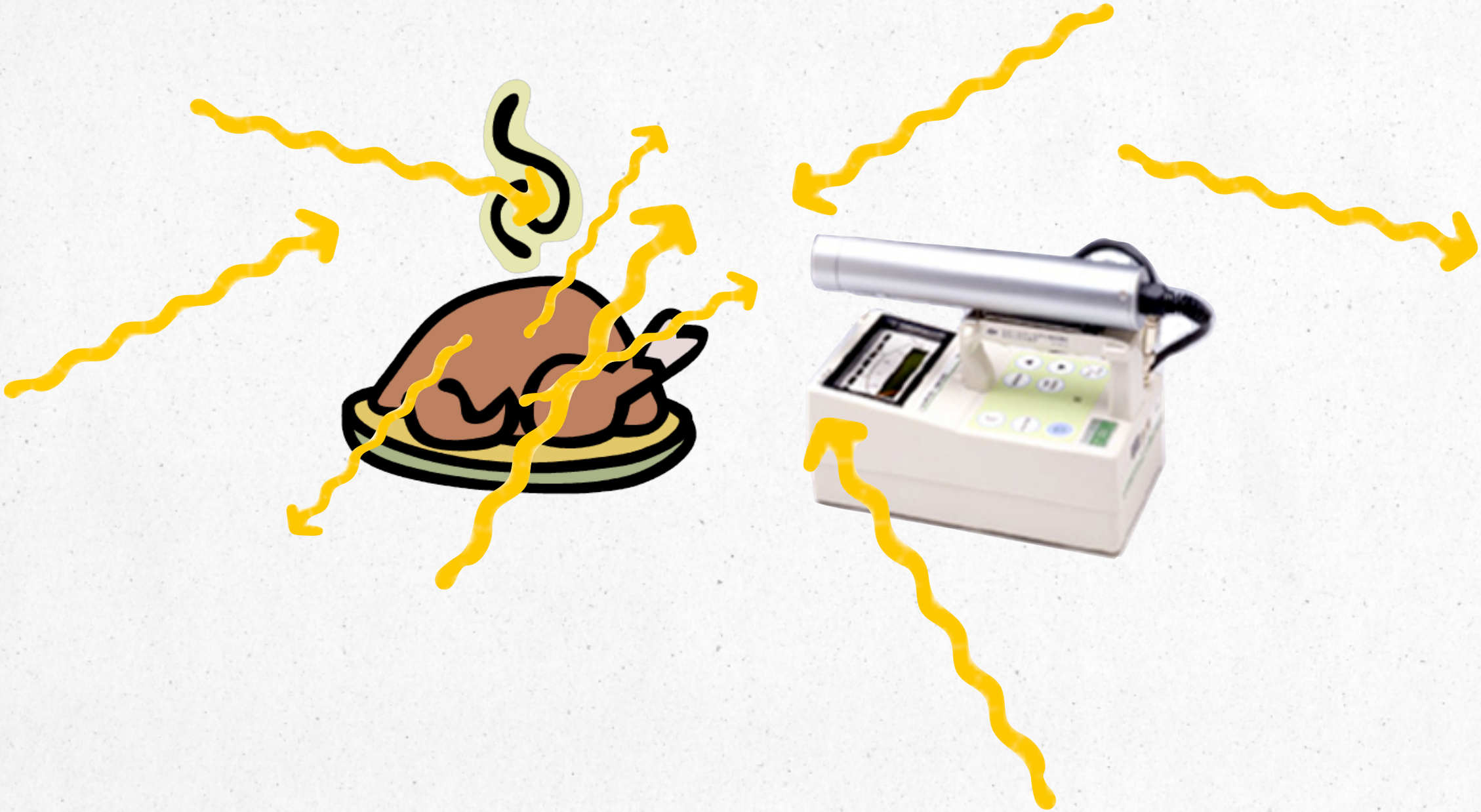
高いところで、Cs134, Cs137 あわせて 500Bq/kg 程度

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

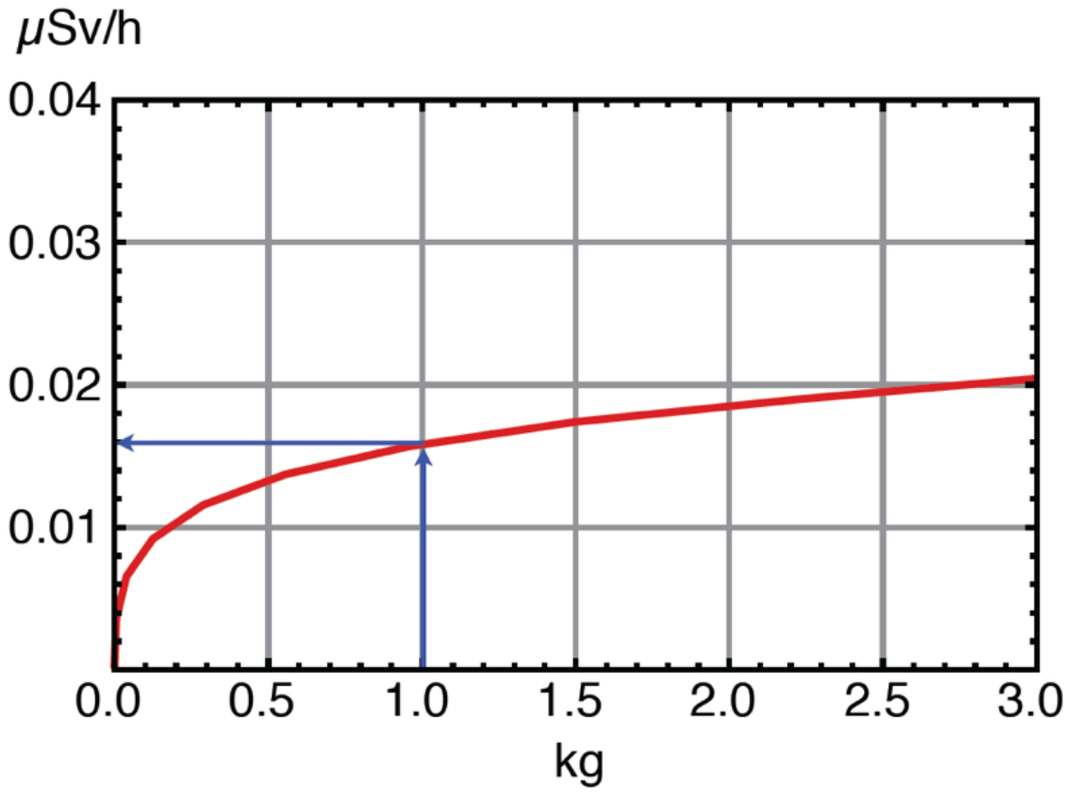
どこから来た？

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

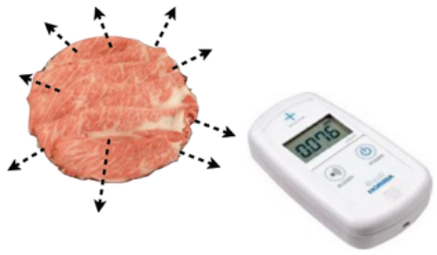
セシウム 500Bq/kg の食品表面の空間線量



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。

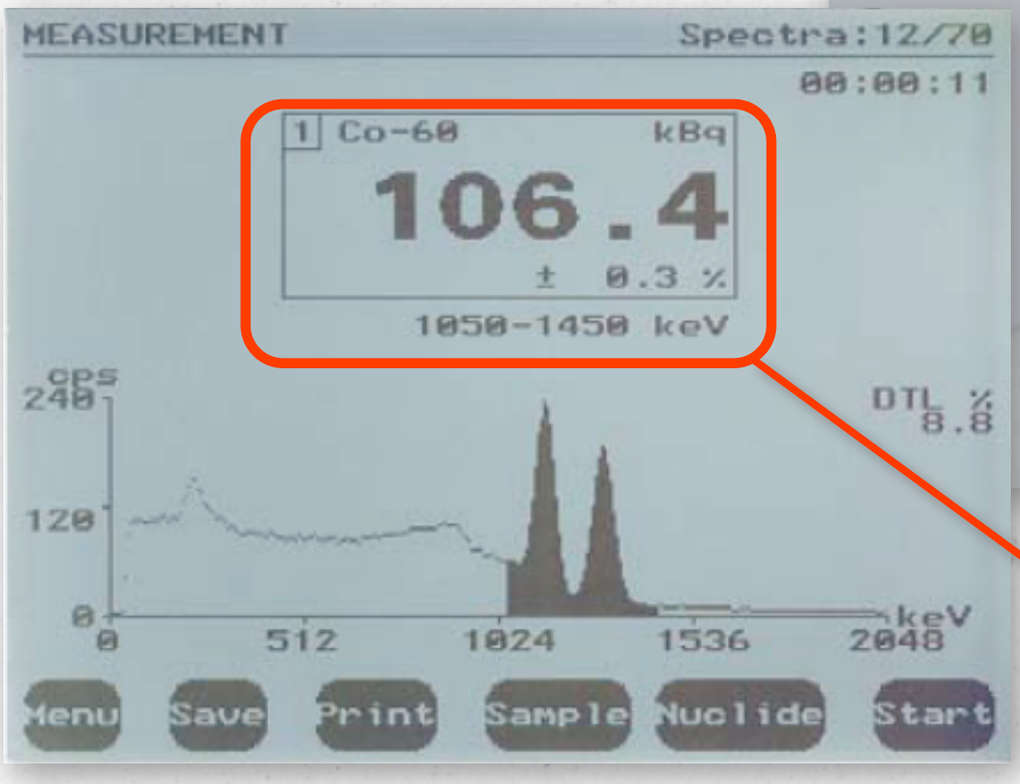
食品検査に使われる測定器の例

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）

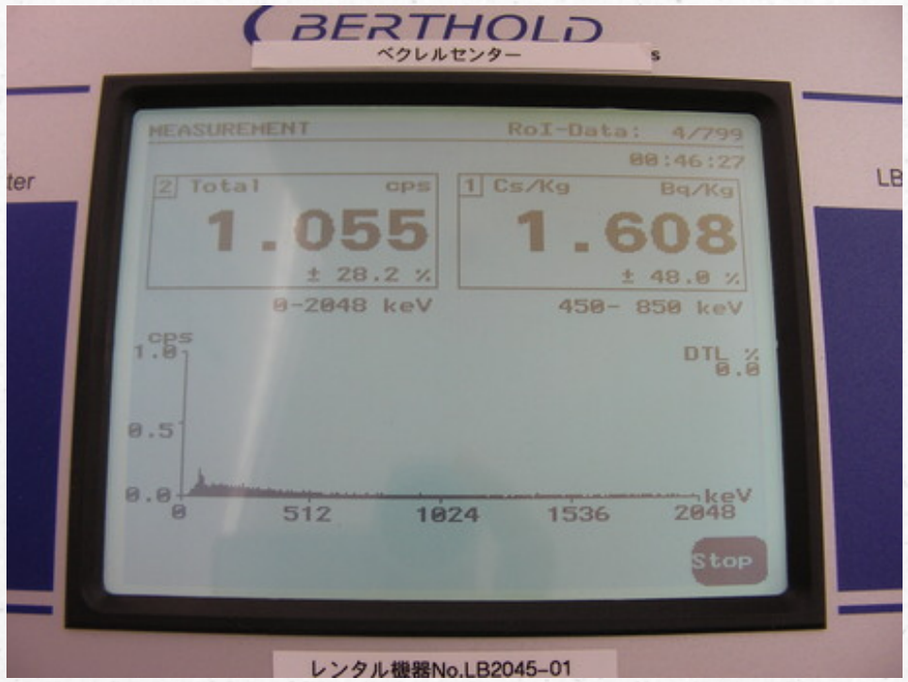
放射能の測定

ガンマ線

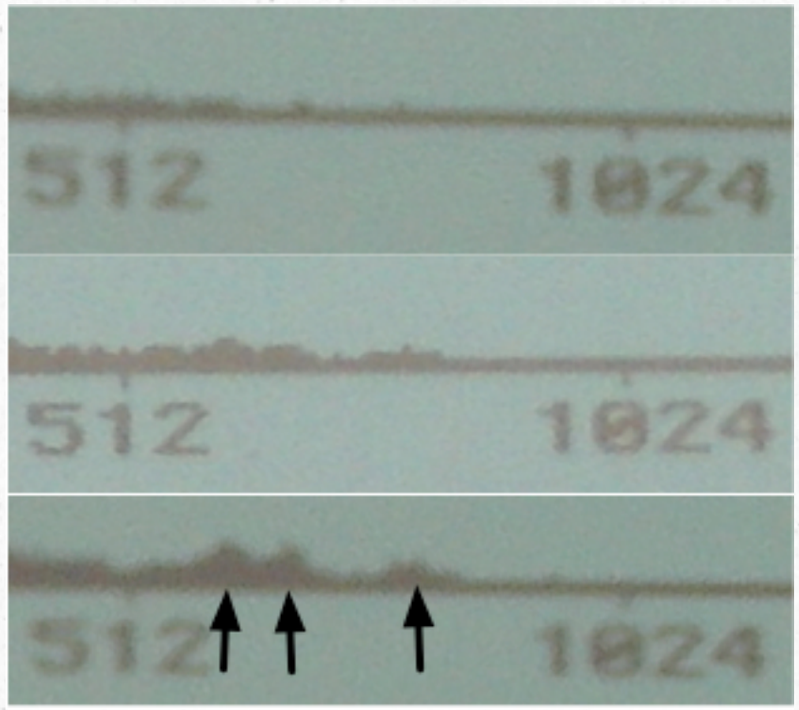
エネルギー

個数

核種ごとにBq数を見積もる



ピークが見える？

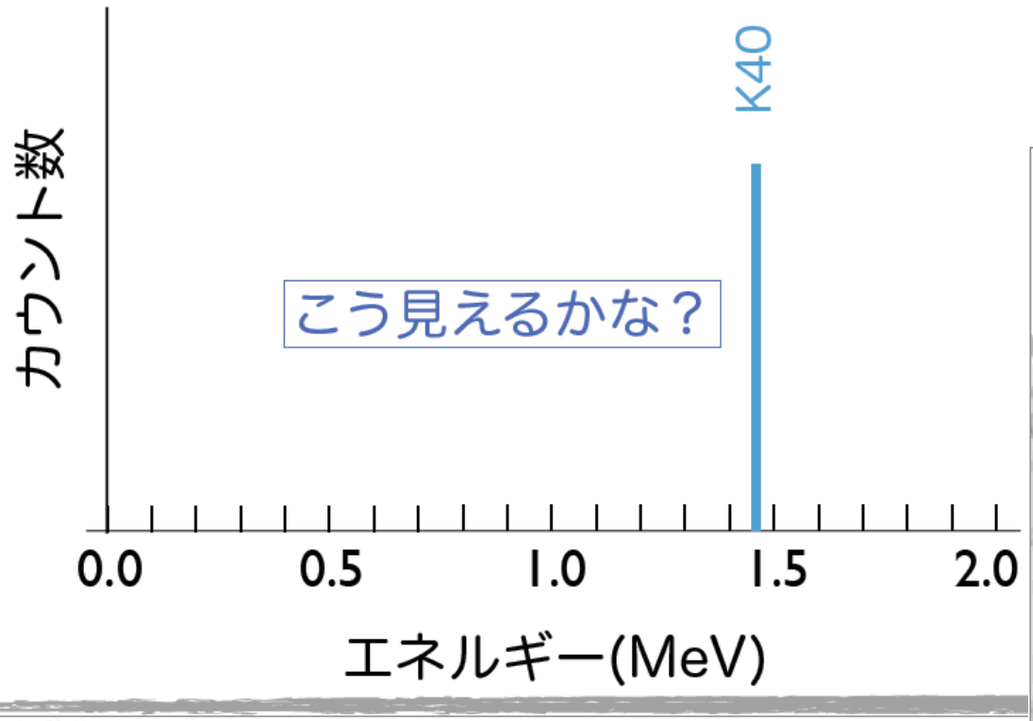


^{134}Cs, ^{137}Cs のガンマ線の
エネルギーの場所

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

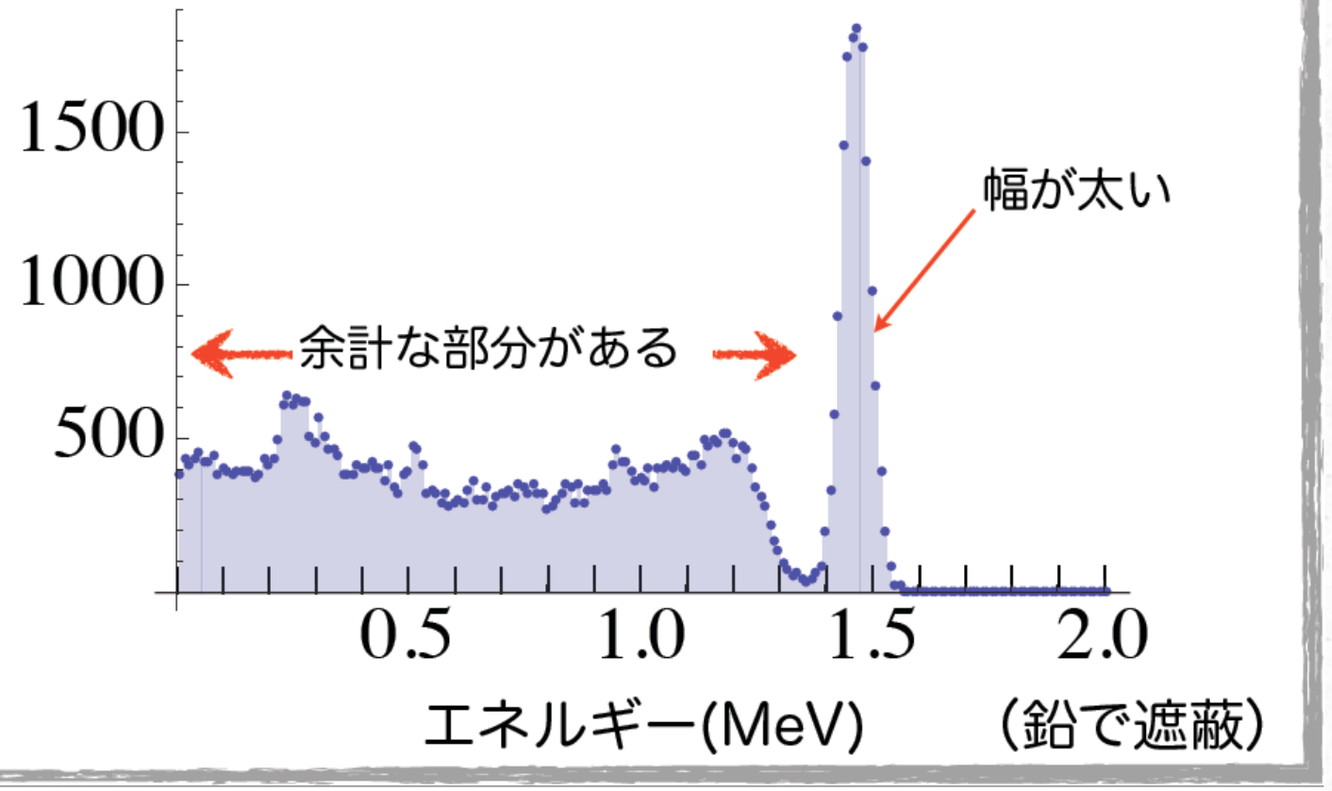
NaI 検出器で「やさしお®」を測定してみる

（天然放射性物質であるK40を多く含む）



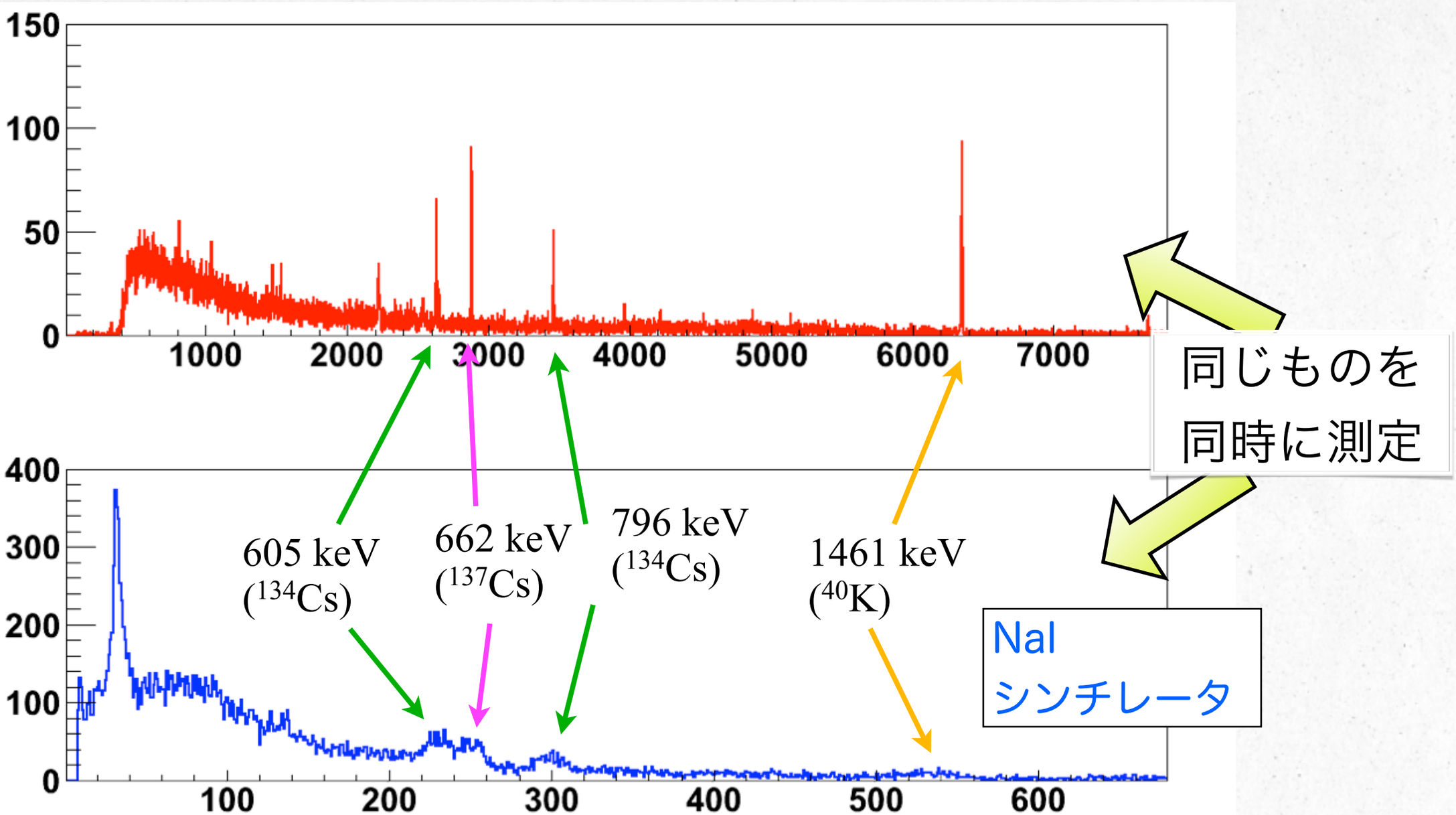
Thursday, October 20, 11

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



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

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

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