

環境放射線モニタリング

～平常時から緊急時まで～

平成28年7月11日

青森県危機管理局原子力安全対策課
木村 秀樹

環境放射線モニタリングとは？

環境試料中の放射能の測定

水、土、農畜産物、海産物などの環境試料中の放射能を測定します。

1 前処理



2 乾燥・灰化



3 測定・解析



空間放射線の測定

原子力施設周辺の空間放射線量率を測定し、公表しています。

●モニタリングステーション



●モニタリングポスト

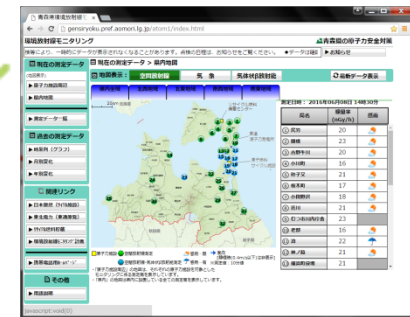
●モニタリングカー



(連続測定)

テレメータシステムによる
測定値の収集・解析
測定結果のリアルタイム公表

- インターネット
- 関係市町村の大型表示装置



平常時における環境放射線モニタリングの現状

＜原子力施設周辺地域における環境放射線モニタリング＞

- ◆ 環境放射線モニタリングは、原子力施設周辺地域の概ね30km圏内において、自治体を中心となり原子力事業者とともに実施
- ◆ モニタリング結果は、自治体が設置した監視・評価機構により評価し、公表
- ◆ 自治体によるモニタリングの財源は国の交付金であり、平成26年度時点で24の道府県に交付

＜環境放射能水準調査＞

- ◆ 全国47都道府県が、国からの委託調査として実施
- ◆ 調査地域は、基本的に都道府県内全域をカバー
- ◆ 調査結果は、国のホームページ等で公開

モニタリングに関する指針

環境放射線モニタリングに関する指針

昭和53年1月 原子力委員会



緊急時モニタリング指針

昭和59年6月

原子力安全委員会



環境放射線モニタリング指針
平成20年3月 原子力安全委員会

法令に基づくものではない

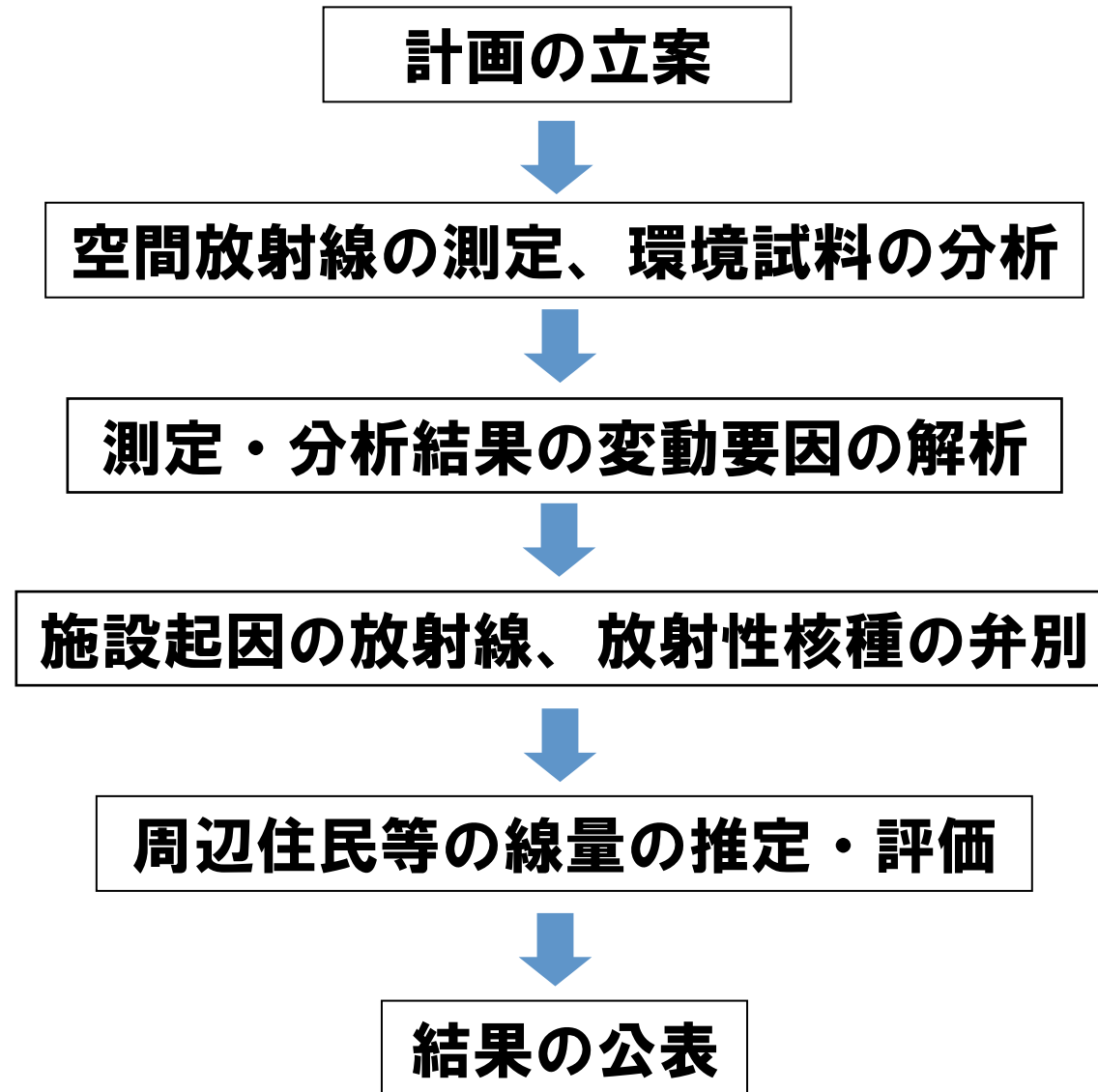
環境放射線モニタリングの目的

平常時モニタリングの目的は、環境における原子力施設に起因する放射性物質又は放射線による周辺住民等の線量が、1年間の線量限度(1ミリシーベルト)を十分に下回っていることを確認し、その結果を周辺住民等に提供すること

- ◆ 周辺住民等の線量の推定及び評価
- ◆ 環境における放射性物質の蓄積状況の把握
- ◆ 原子力施設からの予期しない放射性物質又は放射線の放出の早期検出及び周辺環境への影響評価
- ◆ 異常事態又は緊急事態が発生した場合における環境放射線モニタリングの実施体制の整備

原子力安全委員会「環境放射線モニタリング指針」(平成20年3月)

環境放射線モニタリングの流れ



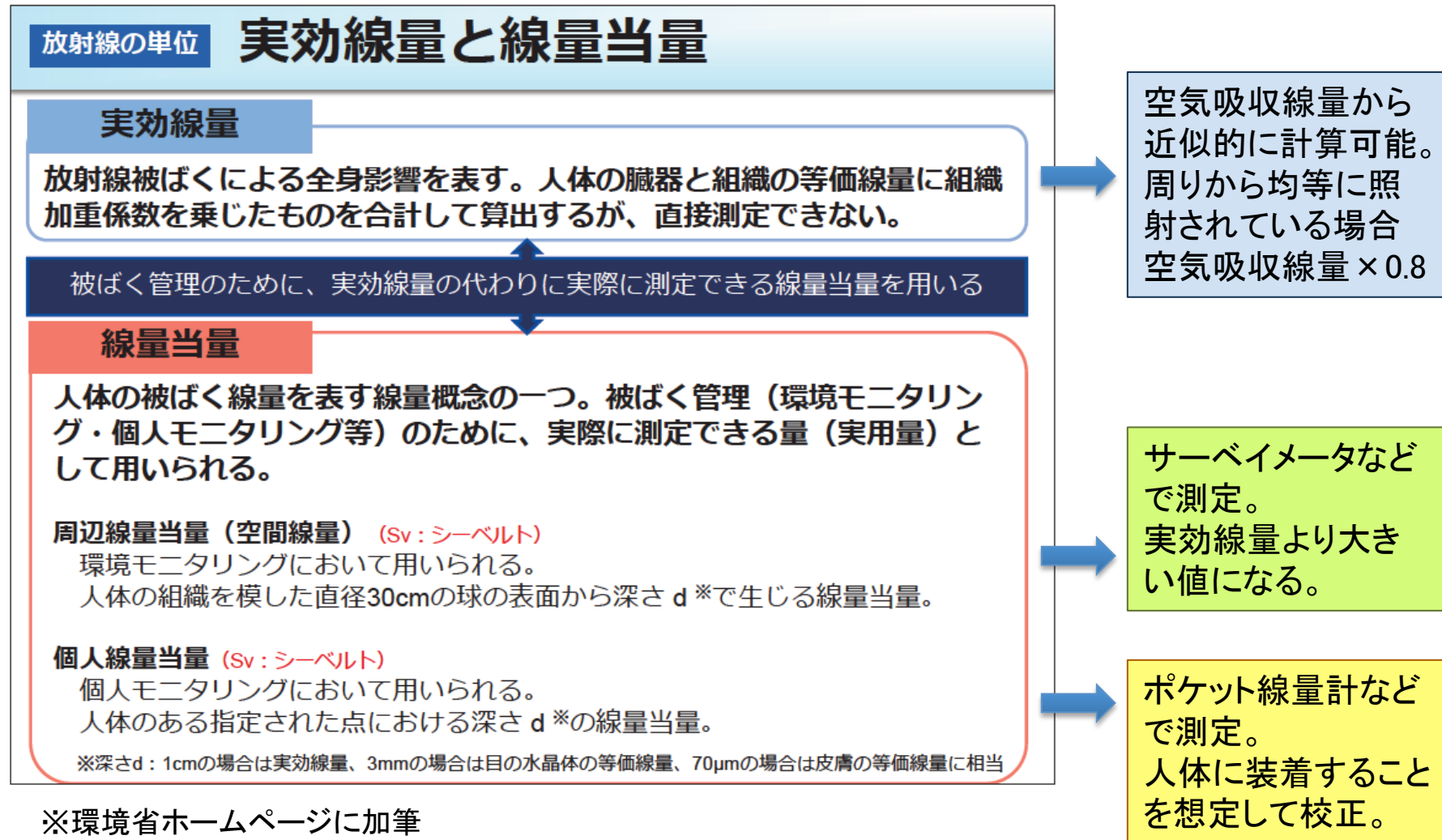
青森県におけるモニタリング項目一覧

区分	原子燃料サイクル施設	東通原子力発電所
空間放射線の測定	①空間放射線量率 NaI(Tl)シンチレーション検出器 電離箱検出器 ②積算線量 蛍光ガラス線量計(RPLD)	NaI(Tl)シンチレーション検出器 電離箱検出器 蛍光ガラス線量計(RPLD)
大気中放射能の連続測定	①試料 ②項目 大気浮遊じん、大気 全 α 放射能、全 β 放射能、 気体状 β 放射能、 ^{131}I	大気浮遊じん、大気 全 β 放射能、 ^{131}I
環境試料中放射性核種の測定	①試料 大気浮遊じん、大気、雨水、 降下物、河川水、湖沼水、 水道水、井戸水、河底土、 湖底土、表土、牛乳、精米、 野菜、牧草、淡水産食品、 海水、海底土、海産食品、 指標生物 ②核種 γ 線放出核種、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{90}Sr 、 ^{129}I 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm 、 U	大気浮遊じん、降下物、 河川水、水道水、井戸水、 表土、牛乳、精米、牛肉、 野菜、牧草、海水、海底土、 海産食品、指標生物 γ 線放出核種、 ^3H 、 ^{90}Sr 、 ^{131}I 、 $^{239+240}\text{Pu}$

空間放射線量率の測定

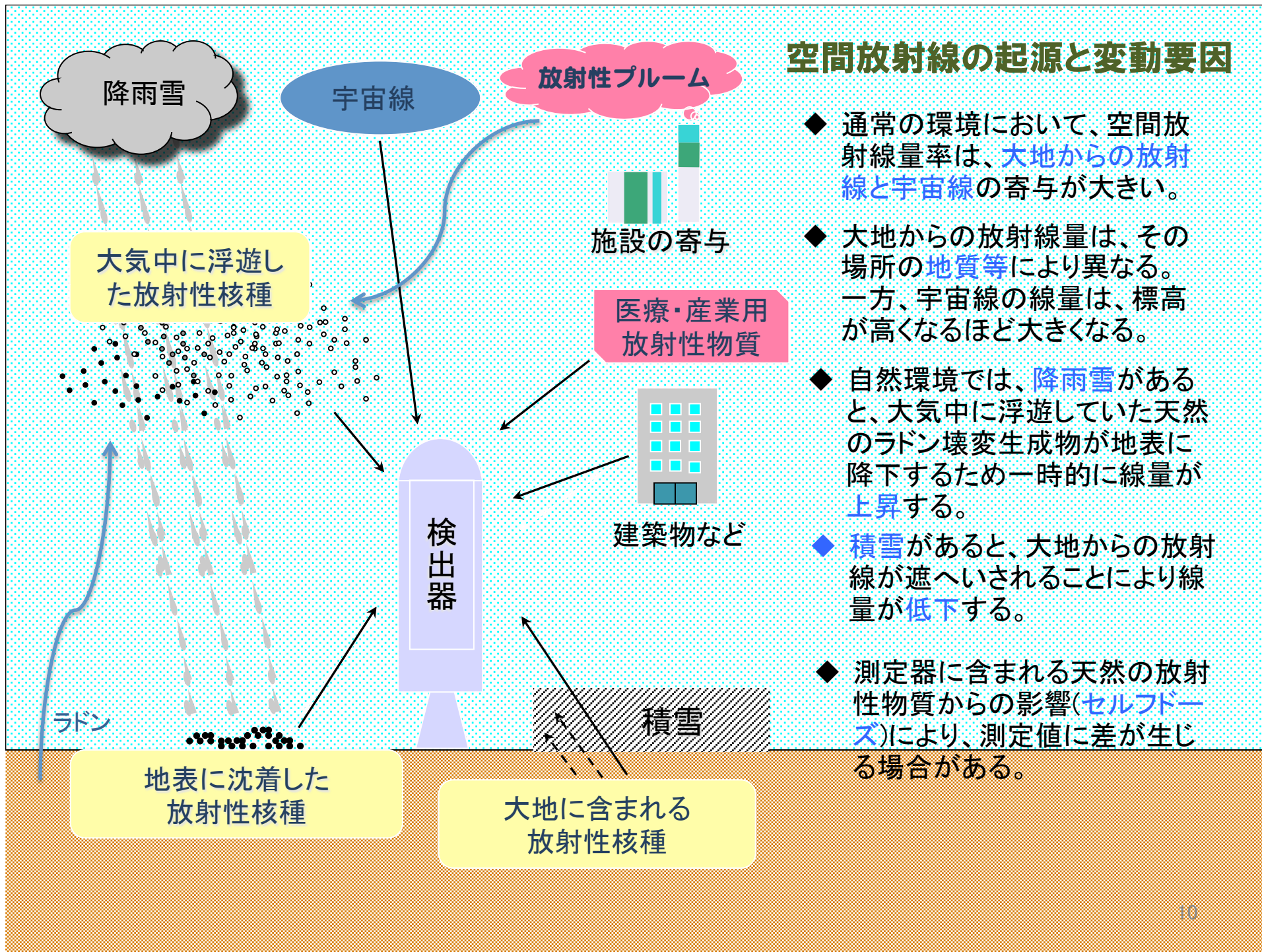
- ◆空間放射線は人が外部から受ける放射線で、通常的环境中では主にガンマ線であり、モニタリングにおいてもガンマ線を対象としている。
- ◆モニタリングで測定されているのは空気吸収線量で、Gy（グレイ）という単位で表す。時々刻々変わる空間放射線量は、1時間当たりの線量として空間放射線量率で表す。単位は、Gy/hを用いる。
- ◆空間放射線量率は、モニタリングステーション・ポストに設置した、NaI(Tl)シンチレーション式線量率計(NaI)や電離箱式線量率計(IC)により測定している。
- ◆NaIは高感度であり、バックグラウンドレベルの線量率を精度良く測定できるが、測定できる上限は3"φ×3"の検出器で10μGy/h程度である。エネルギー情報が得られる利点がある。
- ◆ICは、バックグラウンドレベルでの測定精度は劣るが、100mGy/h程度までの高線量率の測定が可能である。
- ◆NaIは、3MeV以上の放射線（ほとんどが宇宙線）をカットしている機器があり、この場合測定値がICより30nGy/h程度低くなっている。
- ◆高線量率用の測定器として、半導体検出器も最近よく使われている。

実効線量と周辺線量当量



※環境省ホームページに加筆

<http://www.env.go.jp/chemi/rhm/kisoshiryo/attach/201510mat1-01-40.pdf>

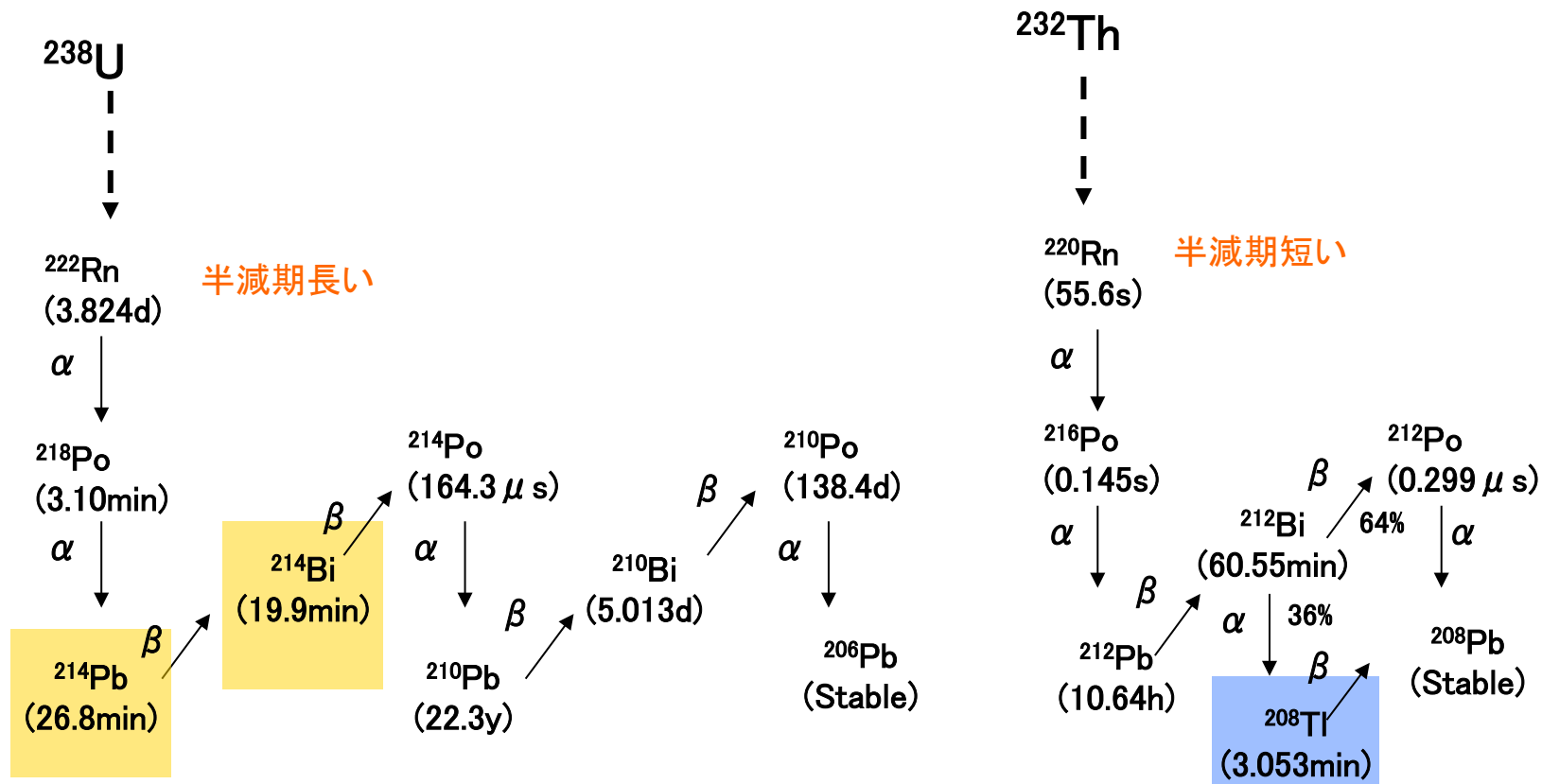


空間放射線の起源と変動要因

- ◆ 通常的环境中において、空間放射線量率は、**大地からの放射線と宇宙線**の寄与が大きい。
- ◆ 大地からの放射線量は、その場所の**地質等**により異なる。一方、宇宙線の線量は、標高が高くなるほど大きくなる。
- ◆ 自然環境では、**降雨雪**があると、大気中に浮遊していた天然のラドン壊変生成物が地表に降下するため一時的に線量が**上昇**する。
- ◆ **積雪**があると、大地からの放射線が遮へいされることにより線量が**低下**する。
- ◆ 測定器に含まれる天然の放射性物質からの影響(**セルフドーズ**)により、測定値に差が生じる場合がある。

空間放射線量率の変動に関わる天然放射性核種

～ラドン (^{222}Rn) 及びビロン (^{220}Rn) の壊変系列～



半減期長い

半減期短い

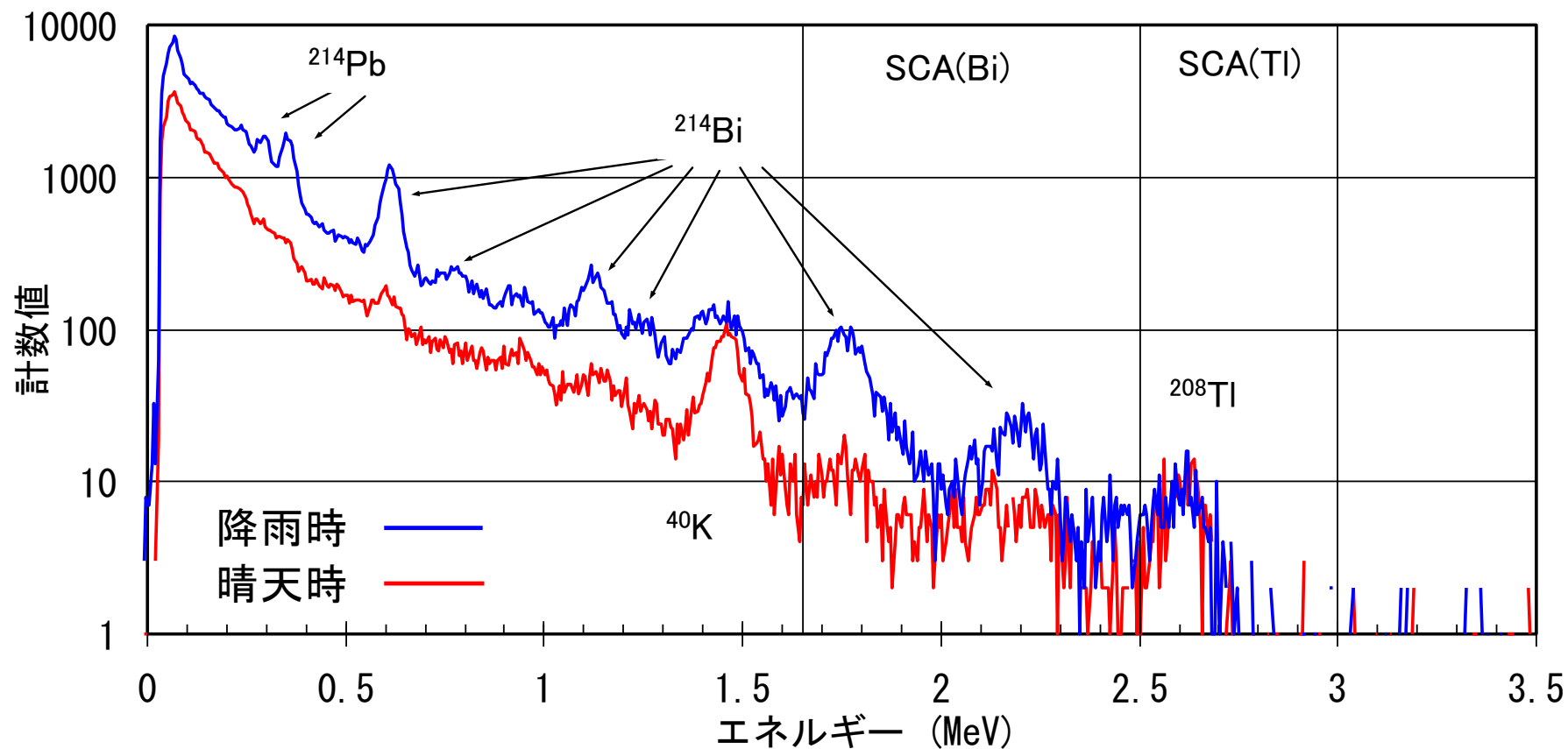


降雨雪による空間放射線量率の上昇に寄与する核種



積雪による空間放射線量率低下の指標となる核種

環境γ線スペクトルにおけるSCA (Bi) 及びSCA (Ti) のエネルギー範囲



NaI(Tl)シンチレーション検出器で測定したγ線スペクトル

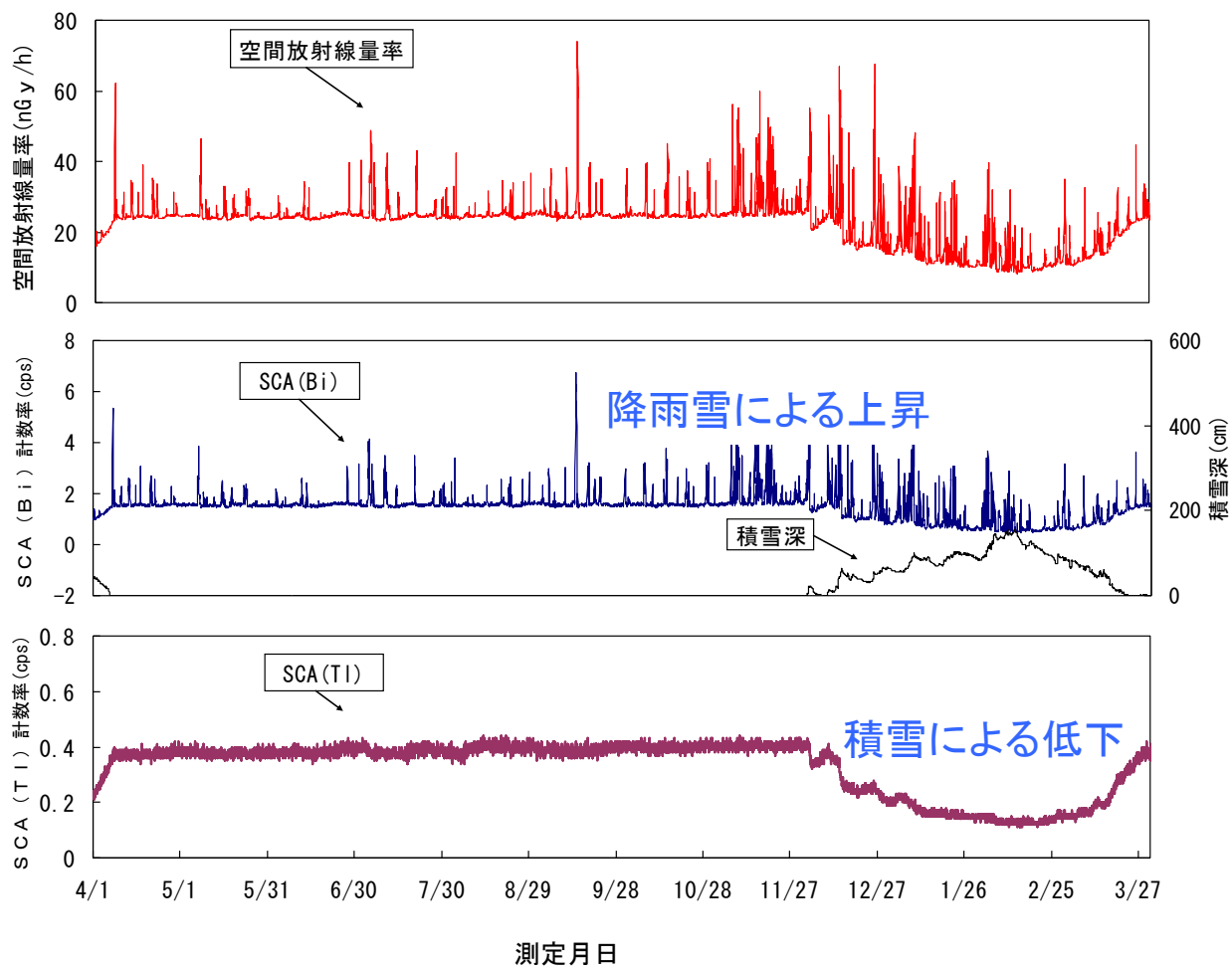
※SCA(Single Channel Analyzer)

設定したエネルギー範囲のγ線の計数率を測定する装置

SCA(Bi) : 1.65-2.50 MeV

SCA(Tl) : 2.51-3.00 MeV

空間放射線量率、SCA (Bi) 計数率、SCA (TI) 計数率及び積雪深の変動パターン



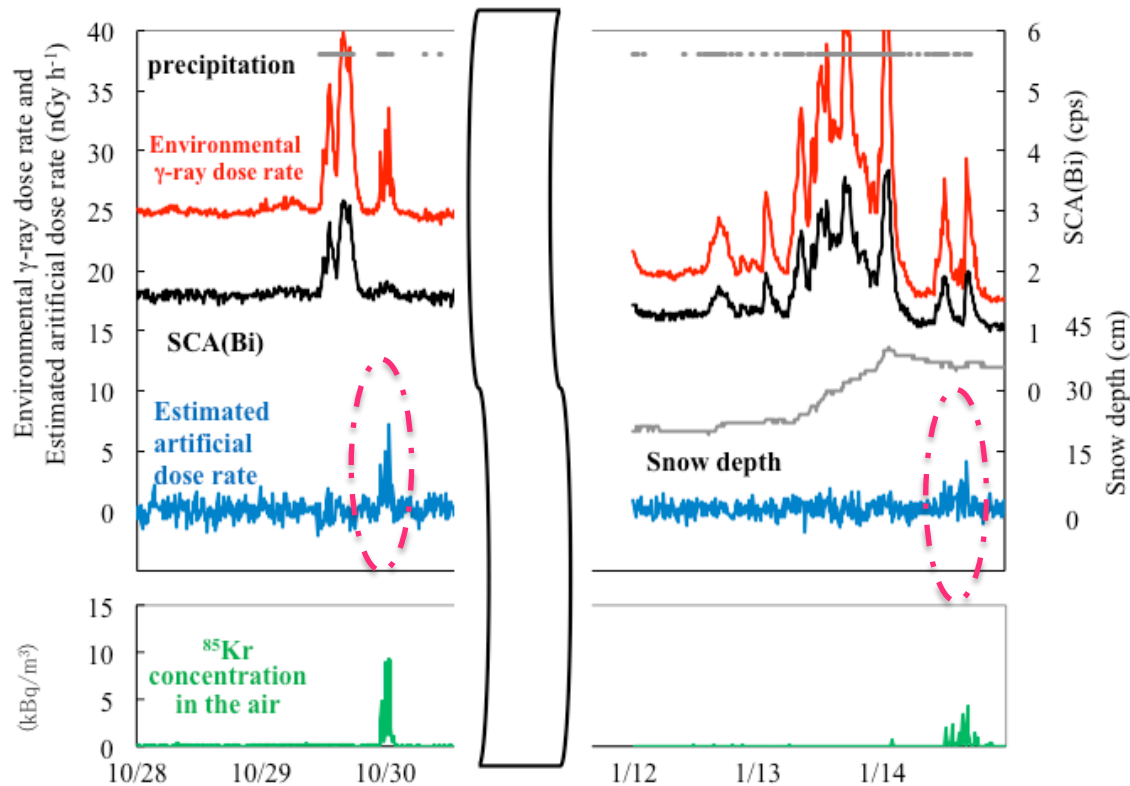
^{214}Bi は降雪による線量率上昇の指標に、
 ^{208}Tl は積雪による大地放射線の遮へいの指標になる

人工放射性核種の寄与の弁別 (1/2)

$$\text{推定自然線量率} = A * \text{SCA}(\text{Bi}) + B * \text{SCA}(\text{TI}) + C$$

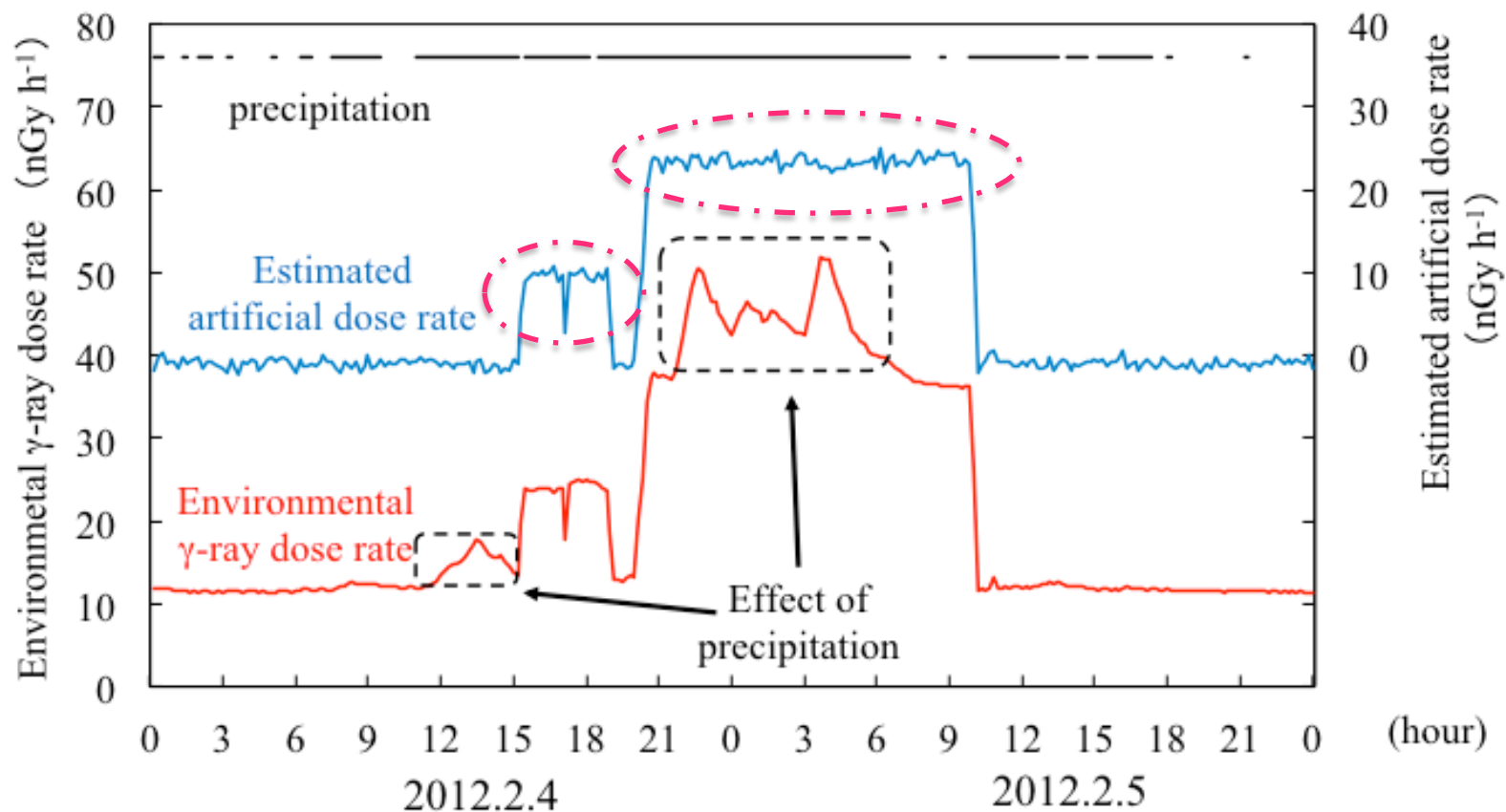
A, B, C:重回帰係数 SCA(Bi):²¹⁴Biのγ線の計数率 SCA(Tl):²⁰⁸Tlのγ線の計数率

$$\text{推定人工線量率} = \text{空間放射線量率測定値} - \text{推定自然線量率}$$



六ヶ所再処理工場のアクティブ試験により放出された⁸⁵Krによる影響

人工放射性核種の寄与の弁別 (2/2)



放射能セシウムが付着した車が駐車したと考えられる影響

※ K Kumagai, H. Ookubo and H. Kimura,
Discrimination between natural and other gamma ray sources from environmental gamma ray dose rate
monitoring data, *Radiation Protection Dosimetry*, **167**(1-3), 293-297 (2015)

空間放射線量率測定結果のリアルタイム公表

青森県環境放射線モニタリング

gensiryoku.pref.aomori.lg.jp/atom1/index.html

青森県の原子力安全対策

検索により、一時的にデータが表示されなくなることがあります。点検の日程は、お知らせをご覧ください。 ◆データは確認 ▶お知らせ

現在の測定データ > 現在の測定データ > 県内地図

地図表示: **空間放射線** 気象 気体状β放射能 最新データ表示

測定日時: 2016年06月08日 14時30分

局名	線量率 (nGy/h)	感雨
① 尻岩	20	☀️
② 関根	23	☀️
③ 古野牛川	20	☀️
④ 小川町	16	☀️
⑤ 砂子又	21	☀️
⑥ 桜木町	17	☀️
⑦ 小田野沢	18	☀️
⑧ 近川	21	☀️
⑨ むつ市川内庁舎	23	☁️
⑩ 老部	16	☀️
⑪ 泊	22	☔️
⑫ 林ノ脇	21	☀️
⑬ 横浜町役場	21	☁️

■ 原子力施設 ● 空間放射線測定
 ● 空間放射線・気体状β放射能測定 ☔️ 感雨…有 ※測定値: 10分値
 ☁️ 感雨…無 → 風向 [静穏時(0.4m/s以下)は非表示]

・「原子力施設周辺」の地図は、それぞれの原子力施設を対象としたモニタリングに係る測定局を表示しています。
 ・「県内」の地図は県内に設置している全ての測定局を表示しています。

javascript:void(0)

<http://gensiryoku.pref.aomori.lg.jp/atom1/index.html>

移動サーベイ

- ◆ モニタリングカー
地上を走行しながら空間放射線量率の測定を行うため、測定器等を装備した車両。ダストサンプリング装置や放射性物質の測定器を備えたものもある。
- ◆ KURAMA (クラマ, Kyoto University RAdiation MApping system)
京都大学が開発したGPS連動型放射線自動計測システム。車両などへ取り付け可能。

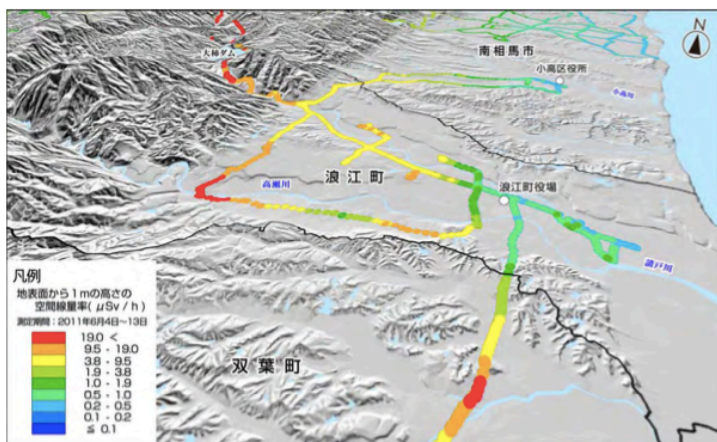
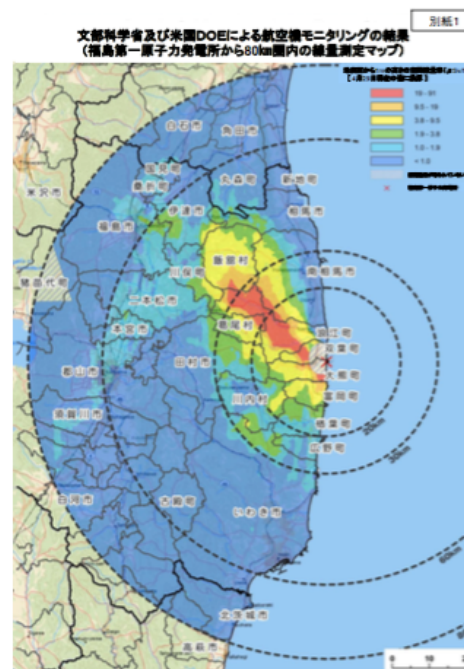


図 4-6(1) 走行サーベイによる測定結果の3次元画像表示
- 福島第一原発より北西方向を眺める -

- ◆ 航空機モニタリングシステム
ヘリコプター等に搭載し、上空から空間放射線量率の測定を行うシステム。広い範囲の測定には、有人のヘリコプターが用いられるが、比較的狭い範囲を詳細に測定するためには、無人ヘリが用いられる。これらの中間の領域用に、小型無人飛行機を用いる場合がある。



※文部科学省及び米国エネルギー省航空機による航空機モニタリング結果について
(平成23年5月6日)
http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/1305820_20110506.pdf

※「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査結果(平成24年3月)文部科学省・農林水産省」
http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5235/24/5253_20120615_1_rev20130701.pdf

放射能測定の基本

一般的に放射能の測定は、放射性核種から単位時間当たりに放出される放射線の数を測定することにより行う。放射能は、基本的に次式により求めることができる。

$$\text{試料中の放射能(Bq)} = \text{正味計数率(cps)} \times 100 / \text{計数効率(\%)} \cdots (1)$$

$$\text{正味計数率(cps)} = \text{試料の計数率(cps)} - \text{BG計数率(cps)} \cdots (2)$$

ここで、計数率：単位時間当たりに測定器で検出された放射線の数
1秒当たりの値はcps、1分当たりの値はcpmで表す。

BG計数率：測定器に試料を入れずに測定したときの計数率

計数効率(\%)：放射能が保証された標準線源を試料と同じ条件で測定したときの
計数率(cps) / 放射能(Bq) × 100

ただし、放射能の測定は放射性壊変による統計的な誤差(計数誤差)を伴うため、この計数誤差を考慮する場合は、次式を用いる必要がある。

$$\text{総計数} = N \pm N^{1/2} \cdots (3)$$

$$\text{計数率} = N/t \pm (N/t^2)^{1/2} \cdots (4)$$

$$\text{正味計数率} \pm \text{計数誤差} = (N/t - N_b/t_b) \pm (N/t^2 + N_b/t_b^2)^{1/2} \cdots (5)$$

ここで、N：試料の計数値 N_b ：BGの計数値

t：試料の測定時間 t_b ：BGの測定時間

また、放射能の測定値は、必要に応じて基準日(通常試料採取日)を決め、次式により半減期補正を行う。

$$\text{基準日の放射能} = \text{測定日の放射能} / (1/2)^{t/T} = \text{測定日の放射能} \times 2^{t/T} \cdots (6)$$

ここで、t：基準日から測定日までの時間 T：半減期 (tとTの単位を合わせる)

大気浮遊じん中の全 α 及び全 β 放射能の測定

施設から大気中に放出された粒子状の放射性物質及びいったん地表沈着し再浮遊した放射性物質の濃度を連続して自動的に測定する。測定値は、核種の情報がないために、そのまま評価に用いることはできないが、その変動状況の解析は異常の検知に役立つ。ただし、大気中には天然放射性核種のラドン(ガス状)とその壊変生成物(粒子状)が存在するため、これらのバックグラウンドから人工放射性核種を弁別するための工夫が必要である。

<青森県の例>

◆原子燃料サイクル施設

再処理工場から、平常時においても放射性物質が放出される可能性があることから、この変動状況を把握するため、短半減期のラドン壊変生成物が減衰した後測定を行う。

- ・集じん時間: 168 h
- ・測定条件: 集じん終了後72 h放置1 h測定
- ・通常測定されている主な核種 全 α : ^{210}Po 全 β : ^{210}Bi

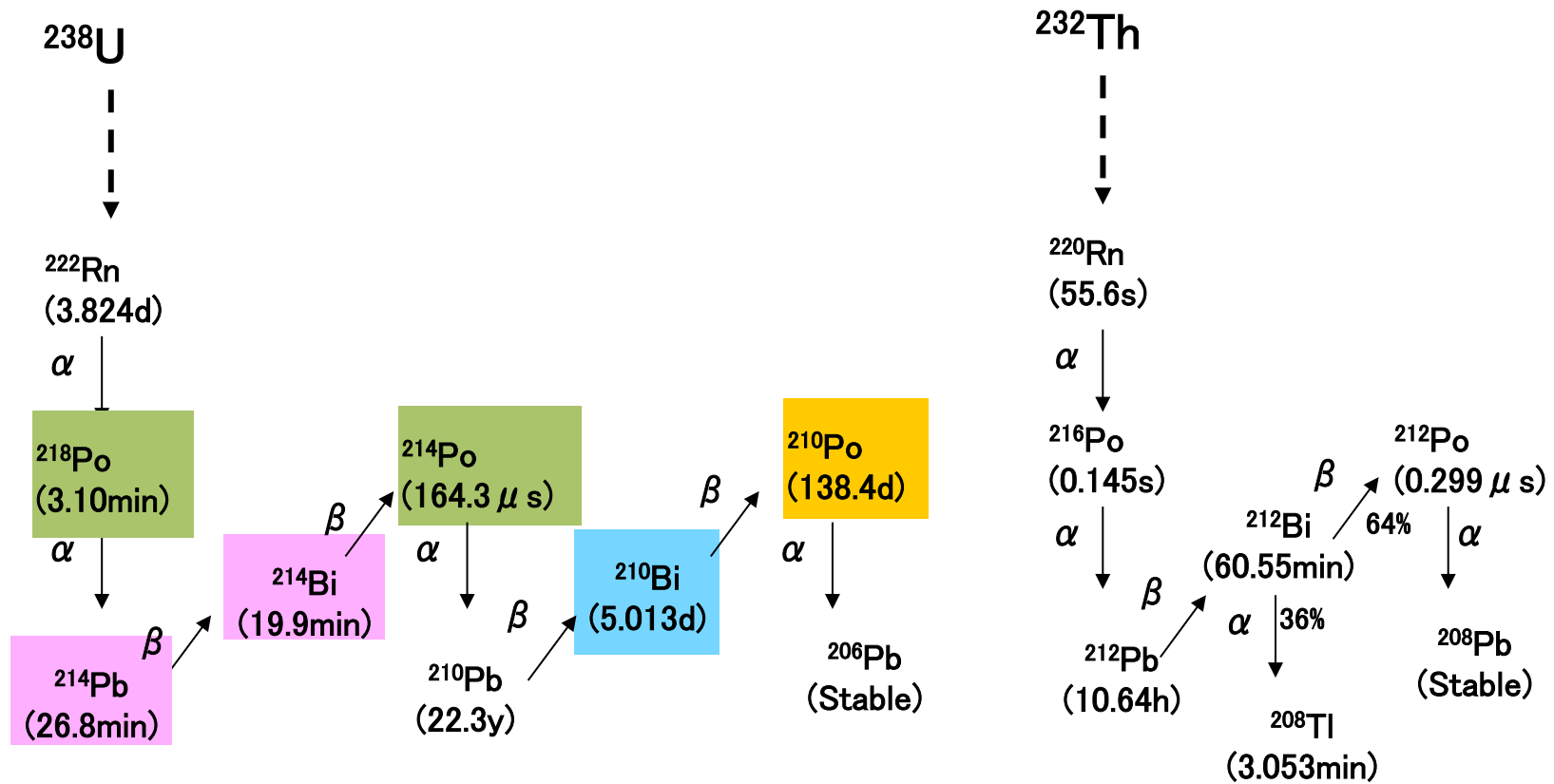
◆東通原子力発電所

発電所から放出される可能性のある核種は、ほとんどが β 核種であることから、測定項目は全 β 放射能である。発電所の場合、大気中の放射性物質が問題となるのは緊急時の場合が多いことから、異常を早期に検知するため、集じん時間、測定までの時間ともに原子燃料サイクル施設の調査より短くしている。ただし、この場合短半減期のラドン壊変生成物の影響が大きく、測定値自身から施設寄与を把握するのは難しい。このため、自然環境では β/α 比が一定になることを利用し、この比が通常範囲を外れた場合に原因調査を行うこととしている。

- ・集じん時間: 3 h
- ・測定条件: 集じん終了直後10 min測定
- ・通常測定されている主な核種 全 α : ^{218}Po 、 ^{214}Po 全 β : ^{214}Pb 、 ^{214}Bi

大気中全α及び全β放射能の変動に関わる天然放射性核種

～ラドン (^{222}Rn) 及びトロン (^{220}Rn) の壊変系列～



原子燃料サイクル施設

東通原子力発電所

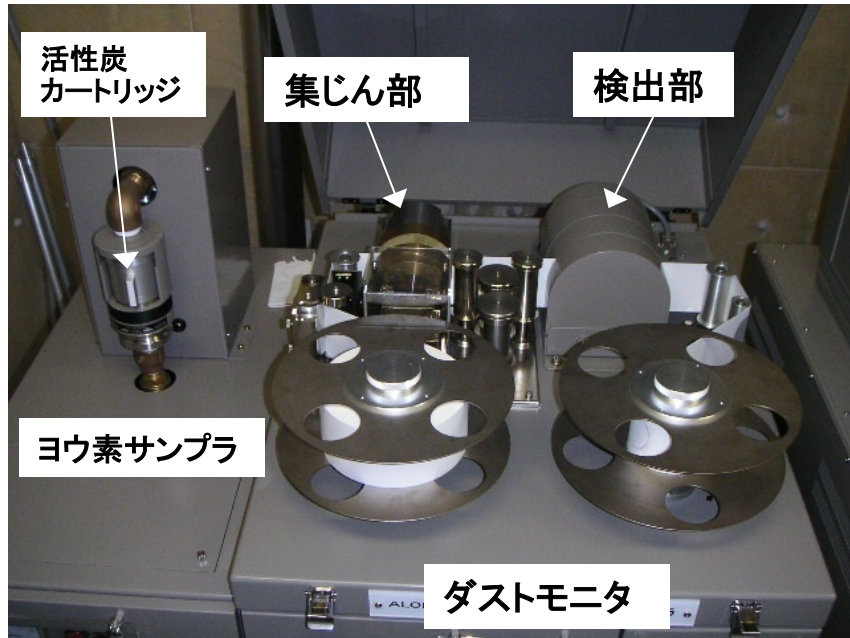
全α放射能に寄与する核種



全β放射能に寄与する核種

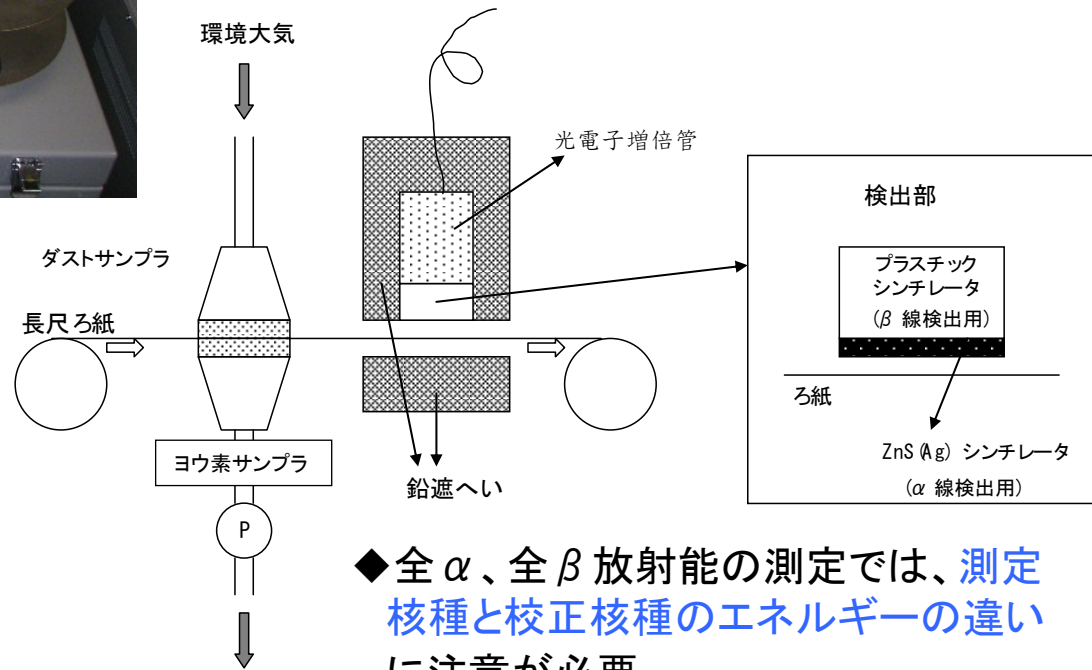


ダストモニタ・ヨウ素サンプラの概要



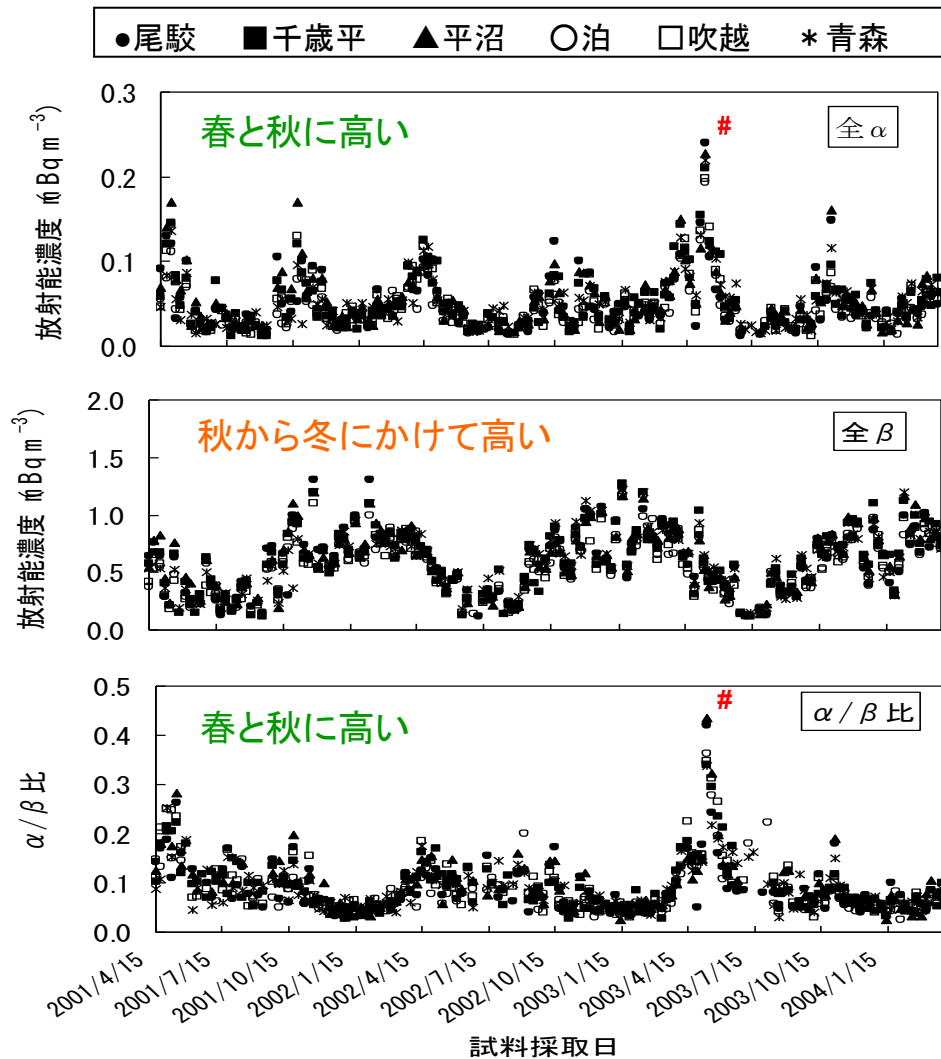
- ◆ 集じん開始後所定の時間が来ると、いったん集じんを止め、**集じんスポット**を検出部に送る。
- ◆ 集じんスポットが検出部に来ると放射線測定を開始し、集じん部では新たに集じんを開始する。
- ◆ ろ紙を通過した大気は、一部を**ヨウ素サンプラ**に送り**活性炭カートリッジ**を通して、**ガス状のヨウ素**を捕集する。カートリッジは手動で回収する。

- ◆ 検出器は、 β 線測定用の**プラスチックシンチレータ**の表面に α 線測定用の**ZnS(Tl)シンチレータ**のフィルムが貼り付けてあり、 α 線と β 線の同時測定を行っている。
- ◆ これらのシンチレータは、放射線が当たると光を発する性質があり、その光を**光電子増倍管**が電気信号に変える。



- ◆ 全 α 、全 β 放射能の測定では、**測定核種と校正核種のエネルギーの違い**に注意が必要。

大気浮遊じん中全 α 及び全 β 放射能及び α/β 比の推移（原子燃料サイクル施設）※



◆ 全 β 放射能は、²¹⁰Biの親核種である²²²Rn濃度が高い**中国大陸からの風**が優勢になる**秋から冬にかけて**高くなる傾向を示す。

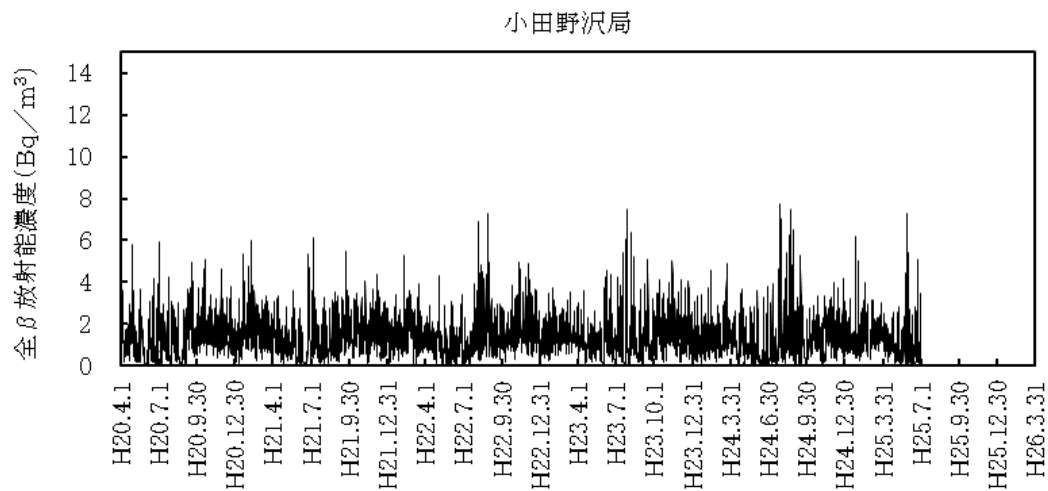
◆ 全 α 放射能及び α/β 比は、²¹⁰Poを相対的に多く含む**土壌の舞い上がり**の影響が大きい**春と秋**に高くなる傾向を示す。

◆ 全 α 放射能及び α/β 比に特異的な上昇が見られた2003年5月の測定値(#)**は、ロシア東部における森林火災**の影響と考えられる。

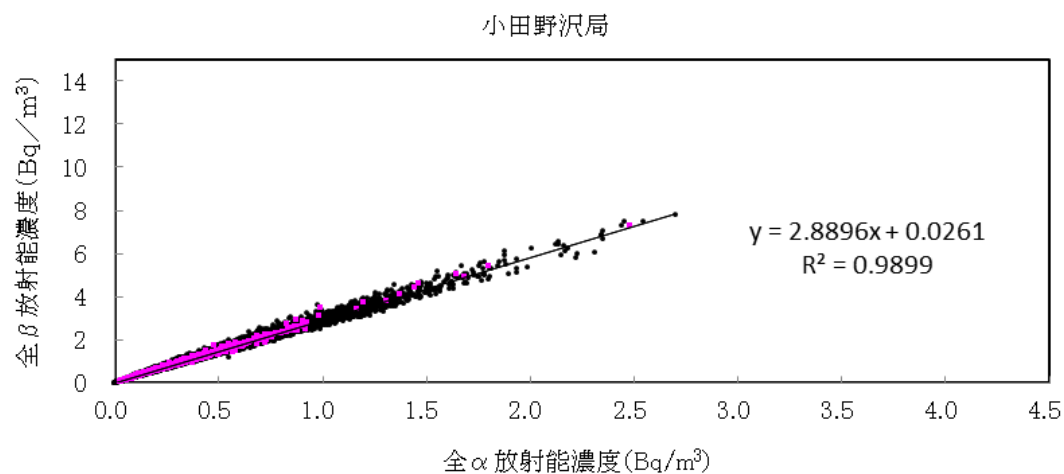
◆ Poは比較的揮発しやすい性質を持つため、植物に含まれる²¹⁰Poが火災により大気中に放出され、その煙がこの時期六ヶ所村に流入したことを確認している。

※木村秀樹他, 大気浮遊じん中全 α 及び全 β 放射能の起源の推定, 保健物理, 43(1), 60-68(2008)

大気浮遊じん中全β放射能の推移とβ/α比（東通原子力発電所）



◆全β放射能(²¹⁴Pb+²¹⁴Bi)濃度は、風向、風速、大気安定度などの要因により大きく変動する。

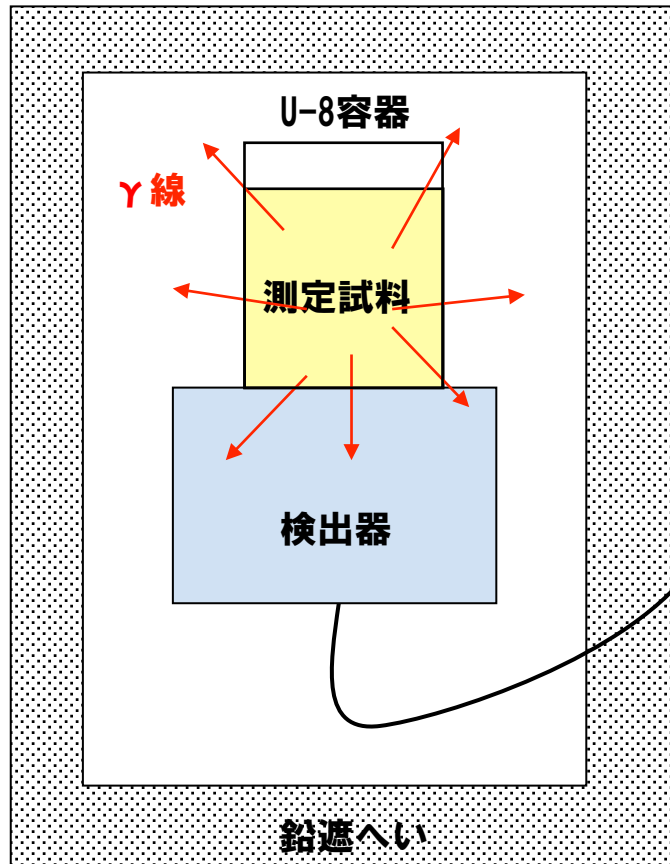


◆²¹⁸Po(α)、²¹⁴Po(α)、²¹⁴Pb(β)及び²¹⁴Bi(β)は、親核種である²²²Rnの壊変から数時間程度で平衡になることから、自然の状態ではβ/α比が一定になる。

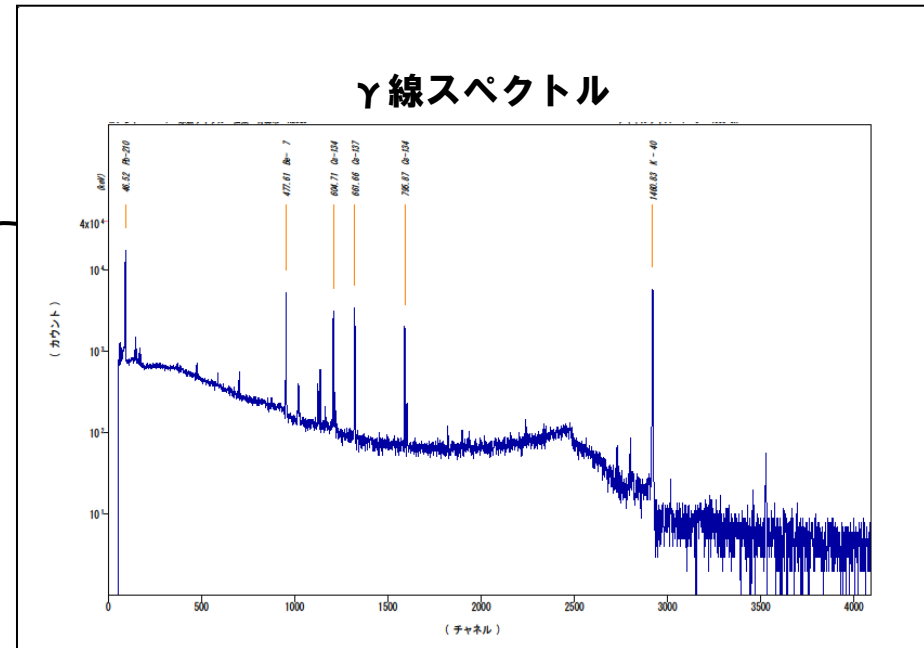
環境試料中の γ 線放出核種の測定（1/2）

- ◆ 環境試料中の γ 線放出核種の測定は、施設周辺において採取した環境試料について、前処理、化学分離などを行った後、Ge半導体検出器により行う。
- ◆ 前処理として、土試料は乾燥後、2mmのフルイを通す。生物試料は、食品については可食部（通常、人が食べる部分）を取り出した後、乾燥・灰化して0.35mmのフルイを通す。降水物、水道水や河川水などの淡水は蒸発濃縮法により、海水等は吸着捕集法により濃縮する。化学分離は必要最小限とし、試料に含まれるできるだけ多くの物質を測定試料に残すように処理するのが基本である。
放射性ヨウ素のように揮発性の核種が対象の場合、また緊急時など迅速に測定する必要がある場合は、乾燥や灰化をせずに測定する。
- ◆ 放射性核種から放出される γ 線は単一のエネルギーを持っており、Ge半導体検出器の分解能が高いため、多核種同時定量が可能である。
 γ 線は透過力が高いため、試料を一定の形状の容器（U-8容器、マリネリビーカー等）に詰めるだけで測定が可能である。ただし、正確に定量するために、測定試料の高さ補正や試料自身による自己吸収補正等が必要である。
- ◆ 代表的な γ 線放出核種は、人工核種としては、半減期30.04 yで現在の環境においても検出される核分裂生成物セシウム-137 (^{137}Cs)、中性子放射化生成物で原子炉の一次冷却水等に多くみられるコバルト-60 (^{60}Co)などがあり、天然核種としては、宇宙線と大気の相互作用で生成されるベリリウム-7 (^7Be)、太古から地球に存在するカリウム-40 (^{40}K)などがある。

環境試料中の γ 線放出核種の測定(2/2)



Ge半導体検出装置



- ◆測定試料を検出器の上に置き、測定を開始する。
- ◆スペクトルのピーク位置(エネルギー)から核種を同定する。
- ◆ピークの面積から放射能(Bq)を定量し、測定試料の重量で除すことにより、放射能濃度(Bq/kg)を算出する。
- ◆放射能の校正は、測定試料と同じ形状の標準容積線源を用いて行う(機器によりシミュレーションで代用することもできる)。

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に起因するγ線放出核種の検出例

試料名	測定された核種 (半減期)
大気	^{131}I (8日)
大気浮遊じん	^{134}Cs (2年) ^{137}Cs (30年) ^{95}Nb (35日)
降下物	^{131}I ^{134}Cs ^{137}Cs ^{95}Nb $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (250日) ^{125}Sb (2.8年) $^{129\text{m}}\text{Te}$ (34日) ^{136}Cs (13日) ^{140}La (1.7日) ^{90}Sr (29年)
定時降下物	^{131}I ^{134}Cs ^{137}Cs
湖沼水	^{134}Cs ^{137}Cs
表土	^{134}Cs ^{137}Cs
農畜産物	^{131}I ^{134}Cs ^{137}Cs ^{95}Zr (64日) ^{95}Nb
指標生物 (松葉)	^{131}I ^{134}Cs ^{137}Cs ^{95}Nb $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ^{125}Sb $^{129\text{m}}\text{Te}$ ^{136}Cs ^{140}La
海水	^{134}Cs ^{137}Cs
海底土	^{137}Cs
海産食品	^{134}Cs ^{137}Cs $^{110\text{m}}\text{Ag}$
指標生物 (海産生物)	^{131}I ^{137}Cs

大気中ヨウ素-131の測定

- ◆ ヨウ素-131(^{131}I)は、代表的な核分裂生成物の一つであり、特に原子力発電所の事故における被ばく評価上重要である。半減期が8.02 dと短いため、試料採取後迅速に測定する必要がある。
- ◆ 原子炉において、通常は燃料棒の中に閉じ込められているが、被覆管にピンホールがあったり、破断したりすれば一次冷却水中に放出される。
- ◆ 環境大気においては、ガス状と粒子状で存在するため、まず粒子状のものをフィルタで捕集し、その後ガス状のものを活性炭カートリッジにより捕集する。
- ◆ 東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故における大気中への放出量は、平成23年3月11日から4月5日まで、 ^{131}I が $1.5 \times 10^{17}\text{Bq}$ 、 ^{137}Cs が $1.2 \times 10^{16}\text{Bq}$ ※と試算されており、 ^{131}I の方が ^{137}Cs より1桁多くなっている。

※原子力安全委員会：福島第一原子力発電所から大気中への放射性核種(ヨウ素131、セシウム137)の放出総量の推定的試算値について(平成23年4月12日)

<http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001eap9-att/2r9852000001eawy.pdf>

- ◆ 国立環境研究所の報告では、平成23年4月4～11日に筑波で採取した ^{131}I のほとんどがガス状であるが、一部は微小粒子として存在していたとされている。

※大原利真 他：福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の大気中の挙動, 保健医療科学, 60(4), 292-299 (2011)

トリチウムの分析（1/2）

- ◆ トリチウム(^3H 又はT)は、半減期12.35 yの水素の放射性同位体であり、環境中ではほとんどが水の形で存在するため、大気中の水蒸気や水道水、海水等を対象としてモニタリングが行われている。最大エネルギーが18.6 keVと低エネルギー β 線のみを放出することから、測定には試料による自己吸収が小さい液体シンチレーション測定法を用いる。
- ◆ 地球環境に存在する ^3H は主に、大気高層で窒素又は酸素と宇宙線との核反応
$$^{14}\text{N} + n \rightarrow ^3\text{H} + ^{12}\text{C} \quad ^{16}\text{O} + n \rightarrow ^3\text{H} + ^{14}\text{N}$$
により生成する天然起源と、過去の大気圏内核実験(主に水爆実験)によりもたらされた人工起源がある。原子力施設からも放出され、再処理施設からの放出量が比較的多い(六ヶ所再処理工場の場合、気体で最大 $1.9 \times 10^{15}\text{Bq/y}$ 、液体で最大 $1.8 \times 10^{16}\text{Bq/y}$ と評価)。
- ◆ 天然起源の ^3H については、自然界で生成と壊変が平衡状態にあり、その平衡存在量は $1 \sim 1.3 \times 10^{18}\text{ Bq}$ と評価されている。一方、核実験による放出量は天然存在量の200倍以上と見積もられるが、大気圏内核実験が停止されて以来減少してきており、2004年時点で $2.4 \times 10^{19}\text{ Bq}$ 、天然存在量の20倍程度がほとんど海洋に保持された状態で残っていると推定されている*。
*百島則幸:環境トリチウムの現状と未来と環境挙動モデル, *Isotope News*, 2004年7月号, 2-4.
- ◆ 生物試料においては、自由水 ^3H (FWT : Free Water Tritium)と組織結合同型 ^3H (OBT : Organically Bound Tritium)がある。OBTはFWTより人が摂取した場合の影響が比較的大きく、特に有機物のC-C骨格に結合した非交換型OBTは、生物の生育期間での蓄積を反映するため重要である。

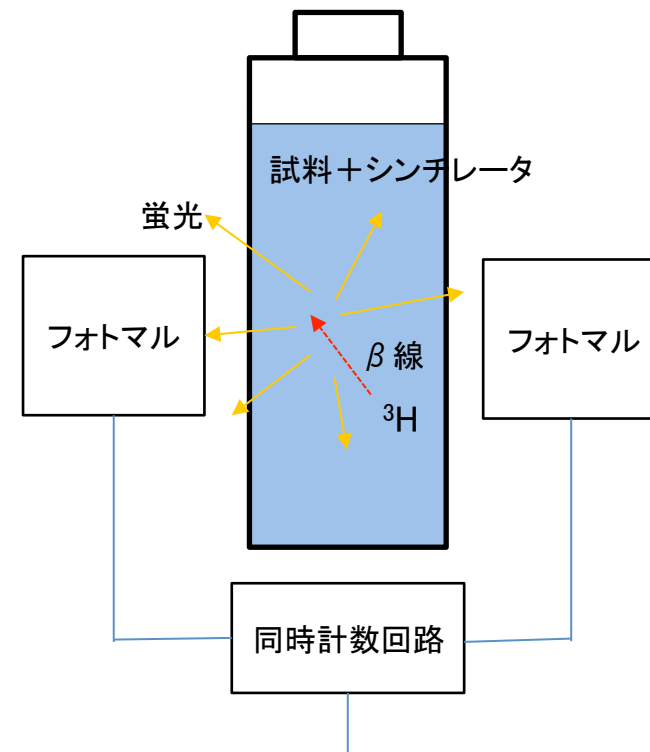
トリチウムの分析（2/2）



液体シンチレーション計数装置

- ◆ ^3H から放出される β 線と有機溶媒に溶解したシンチレータとの相互作用により生じた発光の数を同時計数する。
- ◆溶液の色や共存する物質の影響などにより、この発光が阻害される現象があり、クエンチングという。
- ◆計数装置で放射線測定時にクエンチングの度合いも測定し、標準線源によりあらかじめ作成した効率曲線により計数効率を決定する。

- ◆採取した水試料に酸化剤を添加して蒸留し精製する。
- ◆この蒸留水50mLと液体シンチレータ50mLを145mLポリバイアルに入れ、よく混合して測定試料とする。



ストロンチウム-90の分析

- ◆ ストロンチウム-90 (^{90}Sr)は、 ^{137}Cs と同様に核分裂生成物として代表的な核種であり、大気圏内核実験により我が国にも相当量が降下した。半減期が28.74 yと比較的長いため、現在の環境でも検出されている。降下した ^{90}Sr は土壤に吸着保持されるが、SrはCsと比較して移動しやすい元素であるため、より深い層まで分布が確認されている。また、地下数m程度の浅井戸水や植物中の濃度が安定Srと同様の変動を示すなどの特徴がみられる。
- ◆ ^{90}Sr は β 線のみを放出する核種であり、 β 線は連続エネルギーとなることからスペクトロメトリによる定量が難しい。このため、 ^{90}Sr の定量は、炭酸塩沈殿、シュウ酸塩沈殿、陽イオン交換などの手法により ^{90}Sr を放射化学的に単離した後、 ^{90}Sr から生成したイットリウム-90 (^{90}Y)を水酸化鉄共沈分離(ミルクキング)し、低バックグラウンドGMガスフローカウンタ等で β 線を計数することにより行うのが一般的である*。
※文部科学省放射能測定法シリーズ:放射性ストロンチウム分析法(平成15年改訂)
- ◆ 福島第一原子力発電所事故においては、原子炉から放射性ストロンチウムも放出されたが、影響の範囲は揮発性の大きいヨウ素やセシウムより狭かった。原子炉の事故の影響を把握するには、同位体で放出量が多い ^{89}Sr の測定を行うのが有効である。ただし、 ^{89}Sr は、半減期が50.53 dと短いため、迅速な分析が必要である。
- ◆ 従来法に比べて感度は低いですが、緊急時における ^{90}Sr の迅速な分析のために、ICP-MSを用いた分析法も提案されている*。
※高貝慶隆 他:ICP質量分析法による放射性 ^{90}Sr の迅速分析とその適用事例, *Isotope News*, 2014年5月号, 2-7.

福島第一原子力発電所事故におけるストロンチウム-90の沈着量

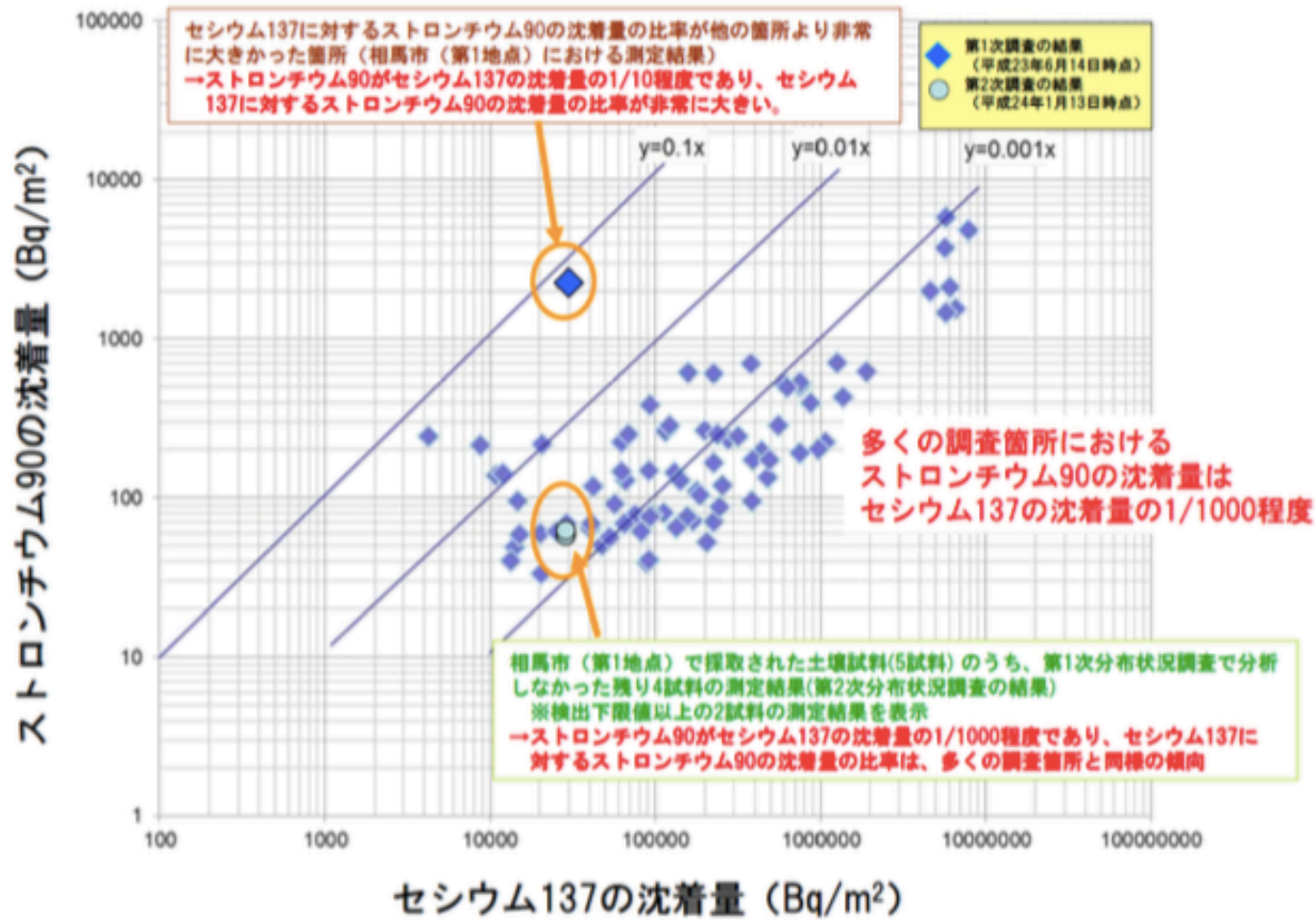


図 4.2.2-5 第1次分布状況等調査におけるセシウム137に対するストロンチウム90の沈着量の比率

※日本原子力研究開発機構:「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」成果報告書(第1編)平成25年3月

プルトニウム同位体の分析

◆超ウラン元素の代表的な核種であるプルトニウム(Pu)は、原子炉において ^{235}U 又は ^{238}U が中性子を取り込むことにより生成する。軽水炉による使用済燃料中に存在する主な核種は ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 及び ^{241}Pu であり、初めの3核種は α 線放出核種(Pu(α))、 ^{241}Pu が β 線放出核種である。 ^{241}Pu の壊変生成物は、 α 線放出核種のアメリシウム-241 (^{241}Am)である。多くの同位体が α 線放出核種であり、内部被ばく上重要な核種である。

◆Pu(α)は、陰イオン交換法によりPuを放射化学分離した後、Si半導体検出器を用いた α 線スペクトロメトリにより測定する。この際、 ^{239}Pu と ^{240}Pu のエネルギーがそれぞれ5.16 MeV及び5.17 MeVと近接しているため、これらの核種の放射能は合算して定量される。

^{241}Pu は低エネルギーの β 線のみ放出するため、放射化学分離の後、液体シンチレーション計数装置により測定するが、高感度の分析は難しい。

Pu同位体の分析に、ICP-MSを用いる方法もある。

◆環境におけるPu同位体の起源は、ほとんどが大気圏内核実験であり、地球環境に広く分布している。国連科学委員会の報告では、このグローバルフォールアウトによる $^{238}\text{Pu}/(^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu})$ 放射能比を0.025と評価している。一方、使用済燃料や東海再処理施設からの排水中の $^{238}\text{Pu}/(^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu})$ 放射能比は1.5～3.5で、グローバルフォールアウトより2桁程度高く、この比を施設から環境への影響の指標とすることができる※。

※水谷朋子 他:東海再処理施設における液体廃棄物の放出モニタリングについて, サイクル機構技報, No. 28, 21-25 (2005)

プルトニウム同位体比による福島第一原子力発電所事故影響の評価

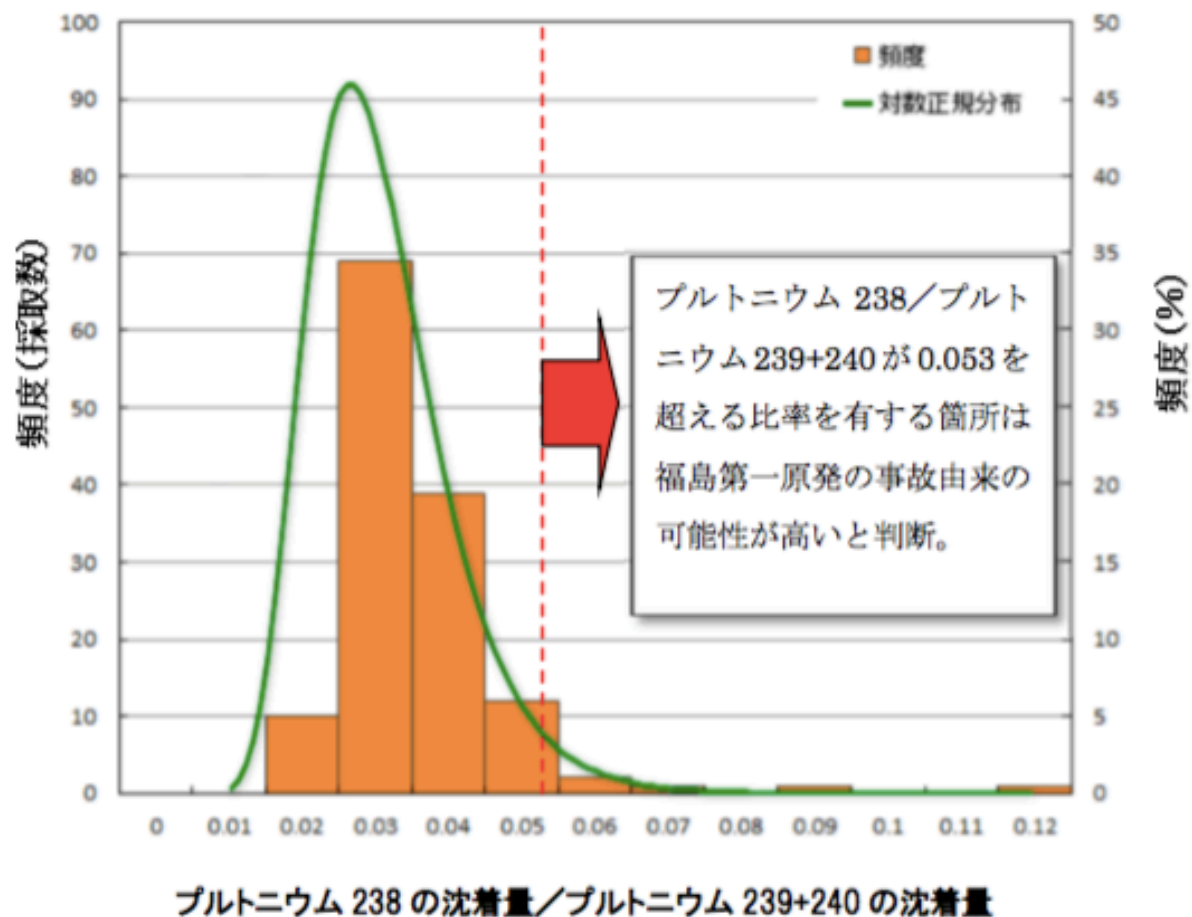


図 4.2.2-2 平成 11~21 年度までの環境放射能水準調査の結果
(プルトニウム 238 の沈着量 / プルトニウム 239+240 の沈着量)

※日本原子力研究開発機構:「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の二次分布状況等に関する調査研究」成果報告書(第1編)平成25年3月

施設周辺住民等の線量の推定・評価

線量の推定・評価は、測定結果の施設寄与分について、1年間の外部被ばくによる実効線量と内部被ばくによる預託実効線量をそれぞれ算定し、その結果を総合して行う。

① 外部被ばくによる実効線量

◆外部被ばくによる実効線量は、施設に起因する空間放射線量率を1年分積算し、これに0.8 を乗じて算出する。

$$\text{実効線量(mSv)} = \sum \text{施設起因の空間放射線量率(nGy/h)} \times 0.8 \times 10^{-6}$$

② 内部被ばくによる預託実効線量

◆内部被ばくについては、1年間に摂取した放射性核種により、その後50年間に受ける線量である預託実効線量を用いる。

◆それぞれの食品等について、施設に起因する放射性核種の年平均濃度を求め、この食品等を1年間毎日摂取するものと仮定して年間の核種摂取量を算出する。これに、実効線量係数(mSv/Bq: 当該核種を1Bq摂取した場合の預託実効線量)を乗じて、預託実効線量を算出する。

$$\text{預託実効線量(mSv)} = \text{施設起因の核種濃度の平均値(Bq/kg生)} \times \text{1日の摂取量(g)} \times 365(\text{d}) \\ \times \text{実効線量係数(mSv/Bq)} \times 10^{-3}$$

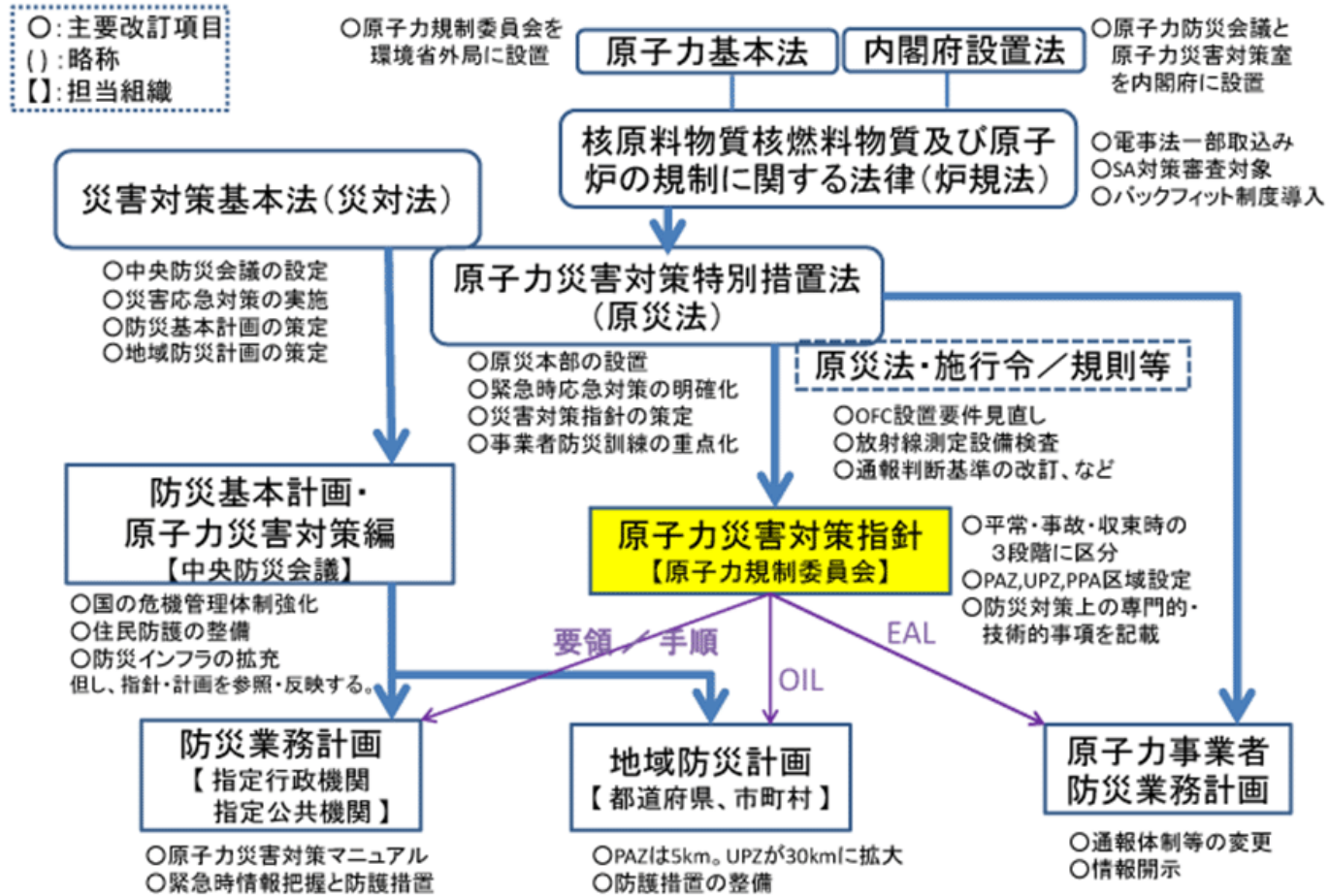
◆食品等の摂取量は、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針」(原子力安全委員会、平成13年3月)に示されている他、「国民健康・栄養調査」の結果や独自に調査した結果を用いる場合がある。

◆実効線量係数は、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」に、吸入摂取、経口摂取それぞれについて、核種ごと、化学形別に記載されている。

緊急時モニタリング

～原子力災害対策指針から～

原子力災害対策に関連する法令、指針等の体系

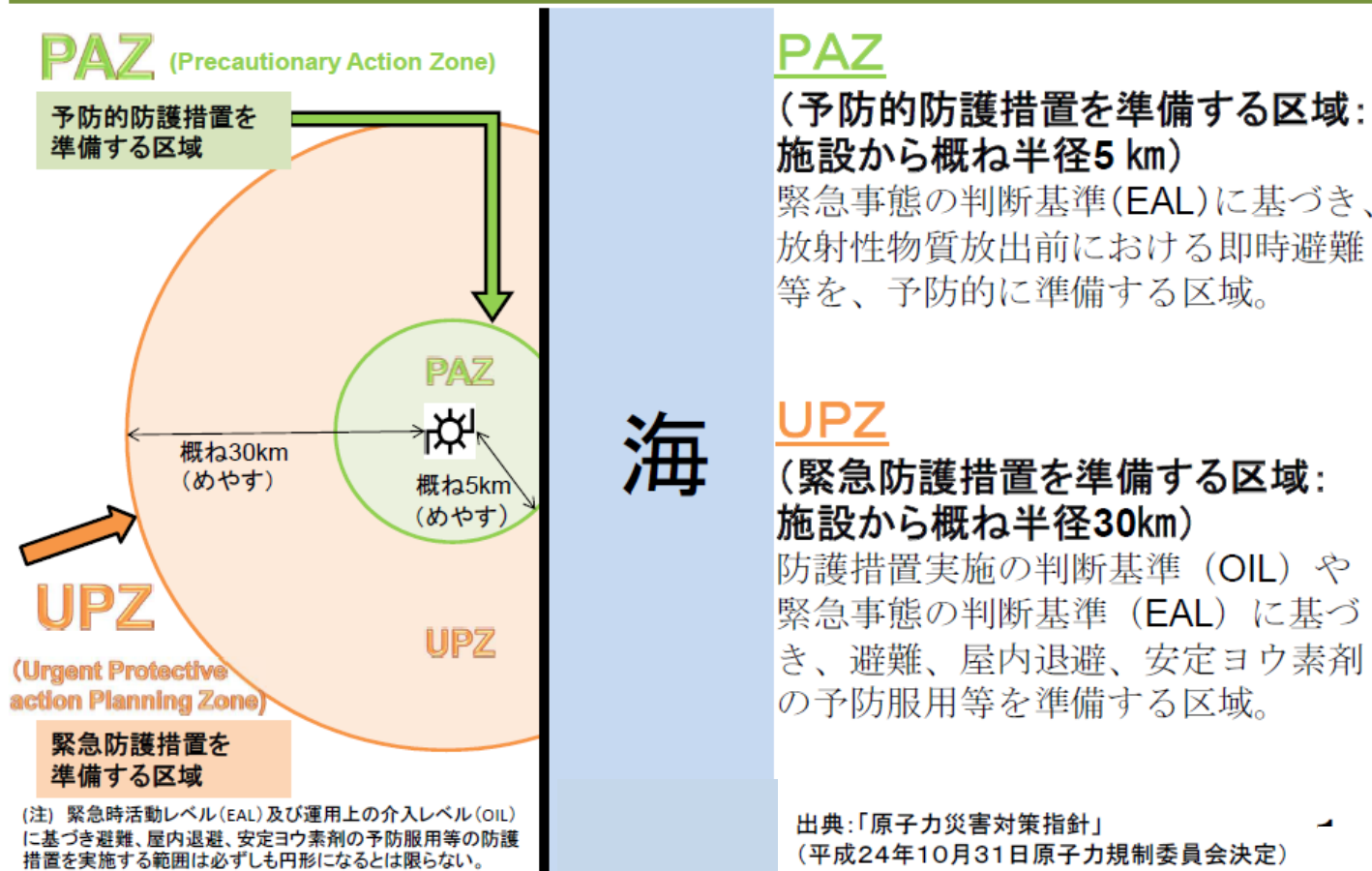


出典: 防災に関わる法令、指針、計画、等の体系と改正点(原子力百科事典 ATOMICA) <http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/11/11030604/15.gif>

原子力災害対策重点区域【原子力災害対策指針】

原子力災害が発生した場合に、住民等に対する被ばくの防護措置を短期間で効率的に行うためには、あらかじめ異常事態の発生を仮定し、施設の特性を踏まえて、その影響が及ぶ可能性がある区域を定めた上で、重点的に原子力災害に特有な対策を講じておくことが必要である。

原子力災害対策重点区域の設定



出典：原子力災害対策指針の主なポイント(平成25年9月)原子力規制庁

緊急事態の初期対応段階における防護措置の考え方【原子力災害対策指針】

緊急事態区分及び緊急時活動レベル(1/2)

◆ 警戒事態

原子力施設における異常事象の発生又はそのおそれがあるため、情報収集や緊急時モニタリングの準備等を行う段階

◆ 施設敷地緊急事態

原子力施設において公衆に放射線による影響をもたらす可能性のある事象が生じたため、緊急時に備えた避難等の主な防護措置の準備を開始する必要がある段階

- ・緊急時モニタリングの実施等による情報収集の強化
- ・主にPAZ内における避難等の準備

◆ 全面緊急事態

原子力施設において公衆に放射線による影響をもたらす可能性が高い事象が生じたため、迅速な防護措置を実施する必要がある段階

- ・PAZ内における避難や安定ヨウ素剤の服用等の実施
- ・事態の規模、推移に応じたUPZ内における避難等の実施

緊急事態区分及び緊急時活動レベル(2/2)

これらの緊急事態区分に該当する状況であるか否かを原子力事業者が判断するための基準として、原子力施設の状態や外的事象の発生の状態等に基づき緊急時活動レベル(EAL:Emergency Action Level)を設定する。

緊急事態区分及びその判断基準となるEAL	
緊急事態区分	主なEAL
警戒事態	<ul style="list-style-type: none">・原子力施設立地道府県において震度6弱以上の地震・原子力施設立地道府県において大津波警報・東海地震注意情報
施設敷地緊急事態	<ul style="list-style-type: none">・原子炉冷却材の漏えい・全ての交流電源喪失(5分以上継続)・原子炉停止中に全ての原子炉冷却機能喪失
全面緊急事態	<ul style="list-style-type: none">・全ての非常用直流電源喪失(5分以上継続)・非常停止の必要時に全ての原子炉停止機能喪失・敷地境界の空間放射線量率が5μSv/h(10分以上継続)

出典:原子力災害対策指針の主なポイント(平成25年9月)原子力規制庁

緊急事態の初期対応段階における防護措置の考え方【原子力災害対策指針】

運用上の介入レベル(OIL)

- ◆放射性物質の放出後は、その拡散により比較的広い範囲において空間放射線量率等の高い地点が発生する可能性があるため、**緊急時モニタリング**を迅速に行い、その測定結果を防護措置を実施すべき基準に照らして、必要な措置の判断を行い、これを実施
- ◆判断基準として、空間放射線量率や環境試料中の放射性物質の濃度等の**原則計測可能な値**で表される**運用上の介入レベル(OIL: Operational Intervention Level)**を設定
- ◆現在のOILの値は、福島第一原子力発電所事故の際に実施された防護措置の状況や教訓を踏まえ、当面運用できるものとして設定したもの

OILと防護措置【原子力災害対策指針】

基準の種類	基準の概要	初期設定値	防護措置の概要
OIL1	地表面に沈着した放射性物質による被ばく影響の防止のため、数時間以内に避難又は屋内退避	空間放射線量率 (地上1m) 500 μ Sv/h	<ul style="list-style-type: none"> ・数時間内を目途に区域特定 ・避難(又は屋内退避)
OIL2	地表面に沈着した放射性物質による被ばく影響の防止のため、1週間程度内に一時移転	空間放射線量率 (地上1m) 20 μ Sv/h	<ul style="list-style-type: none"> ・1日内を目途に区域特定 ・地域生産物摂取制限 ・1週間程度内に一時移転
飲食物スクリーニング基準	OIL6による判断のための飲食物中放射性物質測定を実施すべき地域の特定	空間放射線量率 (地上1m) 0.5 μ Sv/h	<ul style="list-style-type: none"> ・数日内を目途に測定を実施すべき区域の特定
OIL6	経口摂取による被ばく影響の防止のため飲食物の摂取を制限	(例)飲料水 放射性ヨウ素 300Bq/kg 放射性セシウム 200Bq/kg 等	<ul style="list-style-type: none"> ・1週間内を目途に飲食物中放射性物質測定実施 ・飲食物摂取制限

緊急時モニタリングの実施【原子力災害対策指針】

国、地方自治体、原子力事業者及び関係指定公共機関は、警戒事態において緊急時モニタリングの準備を行い、施設敷地緊急事態に緊急時モニタリングセンター(EMC)を設置し、緊急時モニタリングを実施する。

＜緊急時モニタリングの目的＞

- ◆ 原子力災害による環境放射線の状況に関する情報収集
- ◆ OILに基づく防護措置の実施の判断材料の提供
- ◆ 原子力災害による住民等と環境への放射線影響の評価材料の提供

＜初期モニタリングにおける測定項目＞

- ◆ 原子力災害対策重点地域を中心とした空間放射線量率及び大気中の放射性物質
- ◆ 放射性物質の放出により影響を受けた環境試料中の放射性物質濃度
- ◆ 広範な周辺環境における空間放射線量率及び放射性物質濃度
ただし、防護措置に関する判断に必要な項目を優先する。

OIL1及びOIL2のためのモニタリング 【原子力災害対策指針補足参考資料】

- ◆ 固定観測局及び可搬型モニタリングポスト等による空間放射線量率の連続測定を第一
- ◆ 必要に応じてモニタリングカーやサーベイメータによる測定、航空機モニタリングを実施
- ◆ 固定観測局等は、基本的には防護措置の実施に係る指示が発出される単位となる地域ごとに1地点以上設置
- ◆ このようなニーズに対応するために、地域の実情を考慮しつつ、降雨に關与する対流雲の水平方向の大きさや福島第一原子力発電所事故の実態を踏まえ、観測地点間の距離が5km程度となることを目安として、UPZ圏内に固定観測局を整備

OIL6のためのモニタリング 【原子力災害対策指針補足参考資料】

- ◆ 飲食物中の放射性物質濃度測定を実施すべき地域の特定
空間放射線量率 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 以上
固定観測局等に加え、モニタリングカーやサーベイメータによる測定、
航空機モニタリングが有効
環境放射能水準調査の固定観測局も活用可能
- ◆ 対象試料
「飲料水、牛乳・乳製品」
「野菜類、穀類、肉、卵、魚、その他」
- ◆ 対象核種
放射性ヨウ素、放射性セシウム、プルトニウム及び超ウラン元素の
アルファ核種、ウラン

UPZ外の防護措置に係るモニタリング

【原子力災害対策指針(H27年3月4日改定案)別添2】

放射性物質の大規模放出



**屋内退避の指示範囲をUPZ外に拡張
(同心円を基礎とし、行政区域単位)**



放射性物質が当該地域外へ通過



屋内退避の解除

施設側の状況

緊急時モニタリング結果

緊急時モニタリング結果

(放射性プルームの流跡の観測)

**放射線状況を時間的・空間的に連続して
把握するためのモニタリング体制を整備**

UPZ外における避難や一時移転の必要性については、施設の状況等を踏まえつつ放射性プルームの通過から概ね1日後以降に走行サーベイや航空機モニタリング等の測定値により判断

空間放射線量率測定のポイント

◆ 自動連続測定が基本

高機能のモニタリングポストと簡易型線量計のベストミックス

◆ 自然災害に強い測定システム

通信回線の多重化

機器の堅牢性とともにも交換・代替測定を考慮

◆ 測定手法の整理、充実

測定量は、空気吸収線量か周辺線量当量か？

測定高さの補正は？

航空機モニタリング、走行サーベイ等の実施体制の充実

◆ 線量率レベルの面的把握、プルーム流跡の把握

測定値の二次元補間

計算シミュレーションと測定値の組合せ

環境試料中の放射性核種測定のポイント

- ◆ γ 線放出核種(ヨウ素、セシウム等)の測定が主流
膨大な試料数への対応が必要

行政分野を横断した測定体制の確立と維持

前処理・測定マニュアルの充実

- ◆ α 線放出核種(プルトニウム等)、 β 線放出核種(ストロンチウム90等)の分析も必要

分析専門機関の充実と維持

- ◆ 施設寄与の把握・線量評価

大気中放射性核種の採取・測定体制の整備

同位体比測定技術の向上(プルトニウム241、ストロンチウム89分析 等)

まとめと展望

「データをとる」

- ・ 堅牢かつ柔軟な
モニタリング体制の構築
- ・ 組織間の連携・支援体制の強化

「データを活かす」

- ・ モニタリング結果評価方法の体系化
- ・ 評価結果のわかりやすい表現
- ・ 住民へ届けるしくみの充実

「人を育てる」

- ・ モニタリングの考え方、技術等の継承
- ・ 教育・研修体制の充実・強化
- ・ 実践的な訓練の継続実施