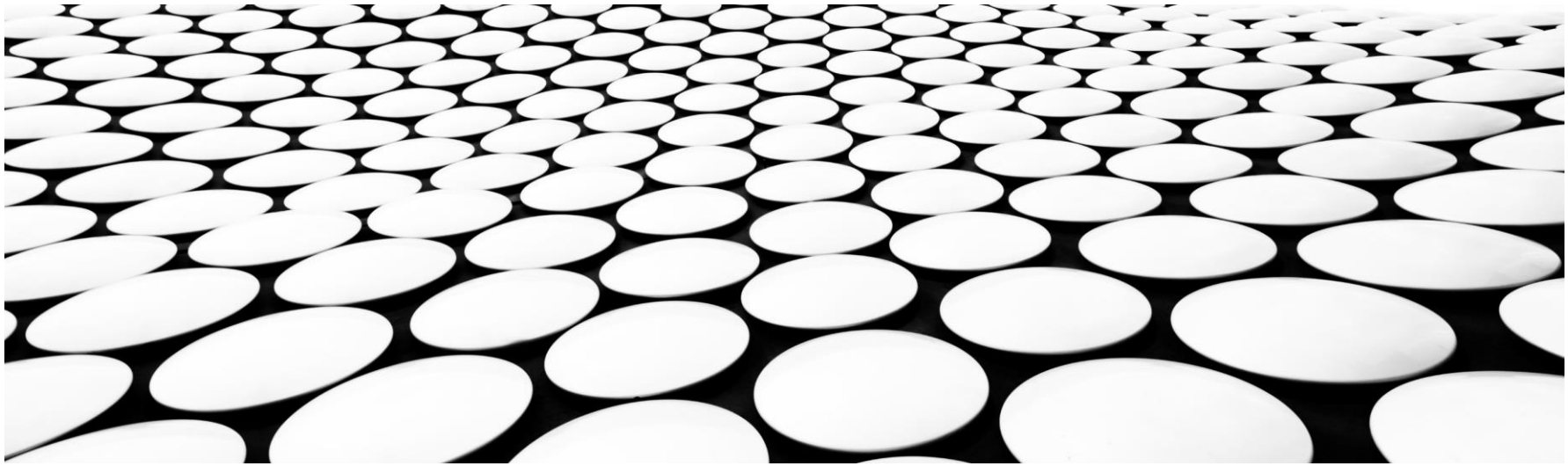
令和3年12月3日（金）

令和3年度原子力施設等防災対策事業補助金
（原子力災害等医療実効性確保事業）
第1回　体外計測研修

ホールボディカウンタ（WBC）を用いた体外計測



講師　栗原　治（量子科学技術研究開発機構）

講義内容

- ホールボディカウンタ（WBC）とは
- WBCの測定系，測定ジオメトリ，校正など
- 東電福島第一原発事故におけるWBC測定の経験
- 話題

講義内容

- ホールボディカウンタ（WBC）とは
- WBCの測定系，測定ジオメトリ，校正など
- 東電福島第一原発事故におけるWBC測定の経験
- 話題

全身計測（whole-body counting）の定義

- 全身計測…全身（entire body）に存在する放射性核種の測定

まさしく身体全部 ⇦ 全身 計測 ⇨ 身体から放出される放射線（主にγ線）を測定

特定器官の計測…肺計測（lung counting），肝臓計測（liver counting），
甲状腺計測（thyroid counting），頭骨計測（skull counting）など

- 全身計測によって得られるもの…検出核種の測定時点での放射能（全身量）

- 全身計測の用途
  - 原発や再処理施設等の放射線作業者の定常/緊急時の内部被ばくモニタリング
  - 原子力災害時の公衆に対する内部被ばくモニタリング
  - 核医学（放射性ヨウ素の甲状腺モニタリングなど）
  - 診断（^{40}K量は除脂肪体重の評価に用いられる）

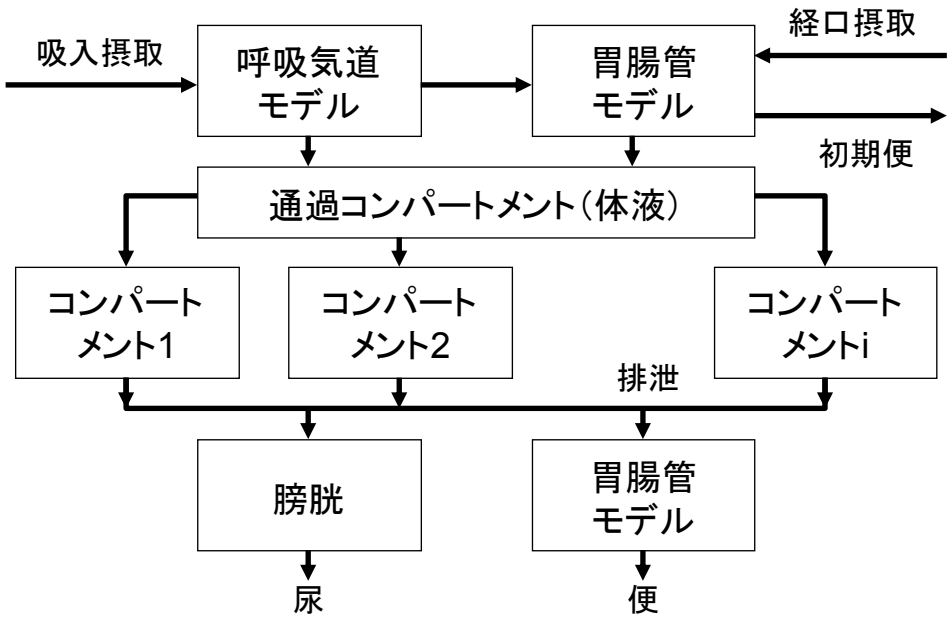
⚠ バイオアッセイとは，広義な意味では体外計測と排泄物等の放射能分析の両方をさす（IAEA Safety Report Series No.37）

- Bioassay. Any procedure used to determine the nature, activity, location or retention of radionuclides in the body by direct (in vivo) measurement or by in vitro analysis of material excreted or otherwise removed from the body.

全身計測（whole-body counting）のフィージビリティ

資料R3-5-7

- 吸入，経口，経皮（傷部からの侵入含む）を介して，体内に取り込まれた核種の検出に有効な手段。ただし，核種は時間経過とともに初期の沈着部位から移動してゆく（体内動態）ことに留意する必要がある。
- 全身計測が適用できる核種：体外に配置した検出器に到達するのに十分なエネルギーの光子（主に200keV以上のγ線）を放出する核種
  - 体外計測としては，骨に沈着した^{90}Sr/^{90}Y（純β核種）から発生する制動放射線やPuからの低エネルギー特性X線（17keV）を測定する方法もある。



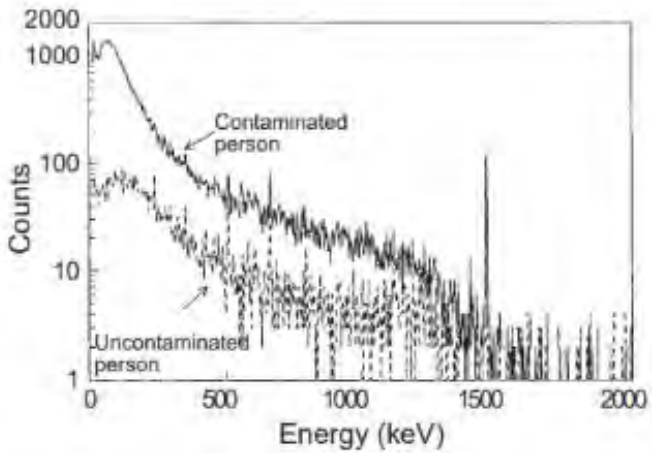


Figure 1. Spectrum of a person internally contaminated by ^{90}Sr-^{90}Y and the spectrum of a person with similar body content of ^{137}Cs and ^{40}K. Detector: HPGe, P-type, relative efficiency 55%, resolution 1.9 keV.

Malátová et al. Radiat. Prot. Dosim. 79, 201-204 (1998)

全身計測（whole-body counting）の長所・短所

資料R3-5-7

長所（排泄物分析，いわゆるバイオアッセイと比較して…）

1. 検出可能な放射性核種が体内に残留していれば正確な測定が可能
2. 排泄されにくい不溶性の放射性物質の測定が可能
3. 測定・分析に時間を要しない
4. 測定時点の放射性核種の残留量が分かる
5. 複数核種の同時定量が可能（ガンマスペクトロメトリ）

短所

1. バイオアッセイと比較して検出限界が高い→排泄されるのは体内残留量の一部であるため，バイオアッセイは代謝モデルの不確実性が大きい
2. 体表面汚染との弁別不可（測定前の徹底した体表面サーベイ必要）

NATIONAL

Cesium found in child urine tests

Citizens' groups urge government to carry out thorough checks on all Fukushima Prefecture kids

*Cesium-134 and cesium-137 were detected in the urine samples of all 10 children aged between 6 and 16 who participated in the survey. The largest amount of cesium-134, which has a half-life of two years, was **1.13 becquerels per liter**, found in the urine of an 8-year-old girl. July 1, 2011. the Japan times (https://www.japantimes.co.jp/news/2011/07/01/national/cesium-found-in-child-urine-tests/)*

全身計測（whole-body counting）の歴史（1）

1925年頃…Flinnによる全身ラジウム量の測定。

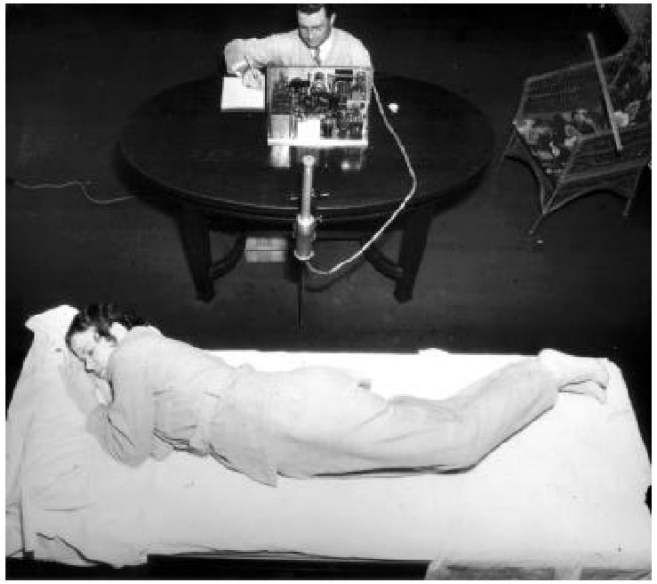
1929年…Schlundtらが被検者の脊柱にWulf-Hess検流計を配置してラジウム及びメソトリウムを測定

1937年…EvansのGM計数管を用いたラジウム患者の測定

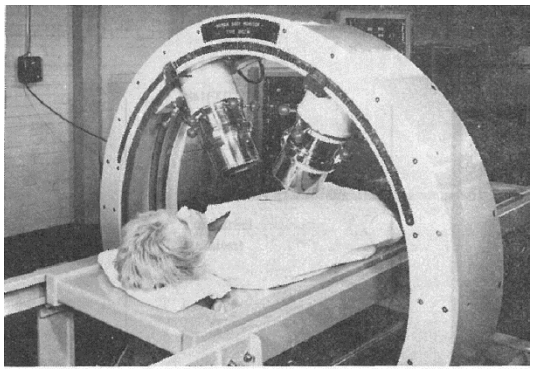
第二次世界大戦やマンハッタンプロジェクトにより，
放射線検出器やエレクトロニクスの開発が進展

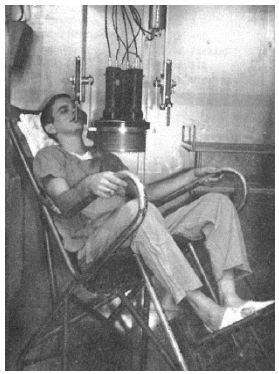
1955年…液体シンチレーション検出器を備えたGeneva counter（GENCO）開発

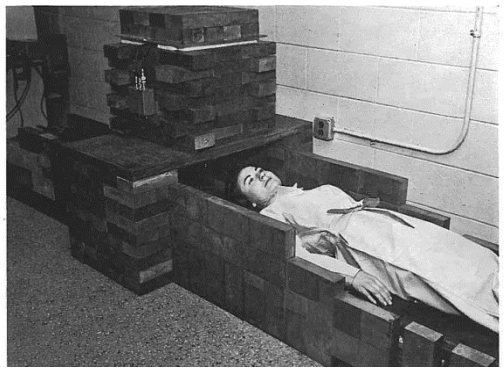
1959年…HUMICO-II LANL研究所において稼働

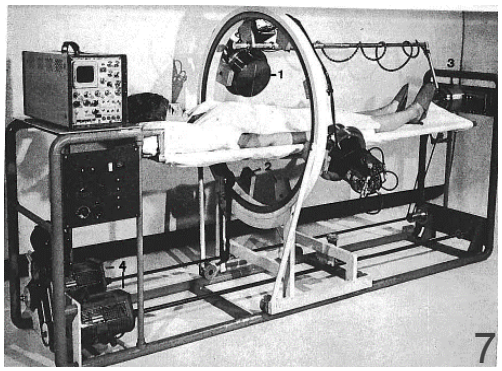


Evans（1937）
（^{214}Pb, ^{214}Bi等からのγ線を検出）









全身計測(whole-body counting)の歴史(2)

資料R3-5-7

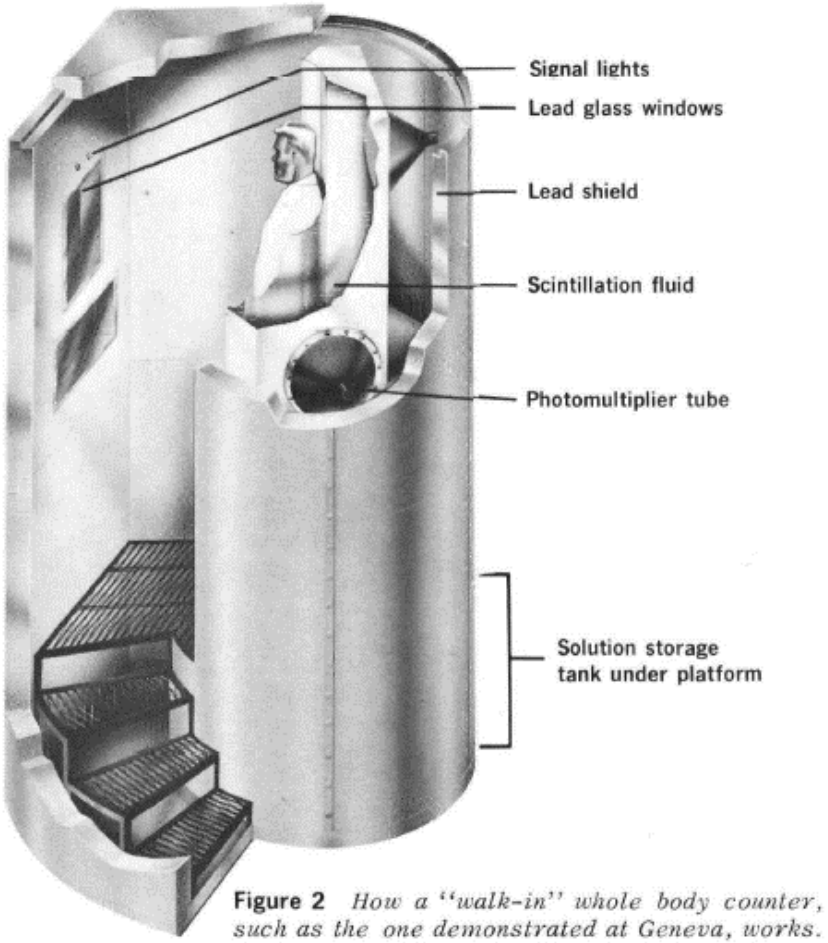


Figure 2 *How a "walk-in" whole body counter, such as the one demonstrated at Geneva, works.*

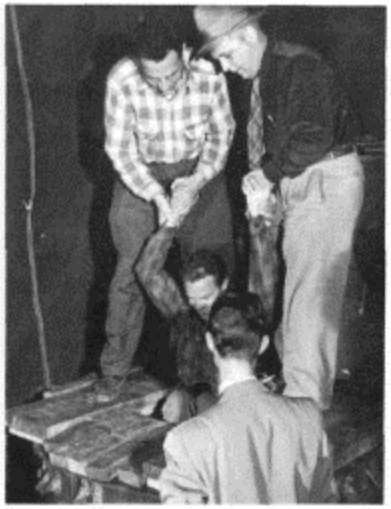
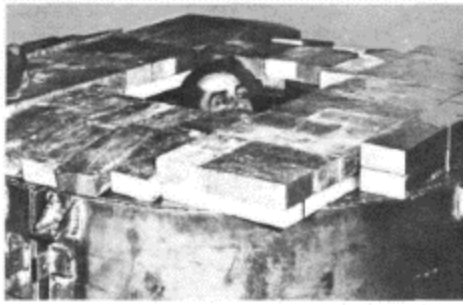


Figure 5 *Dr. Frederick Reines (left) and Dr. Clyde L. Cowan (right), co-discoverers of the neutrino, lower a fellow worker into the first "whole body counter", the scintillation assembly used in their experiment. Below, Dr. Wright Lanham, inside the counter, peers from the opening.*



1950年代前半，CowanとReniesはニュートリノ研究のための巨大なシンチレーションカウンタを開発(ある日の試験測定中，作業員が調整のためのカウンター内に入ったところ，計数が増加…)

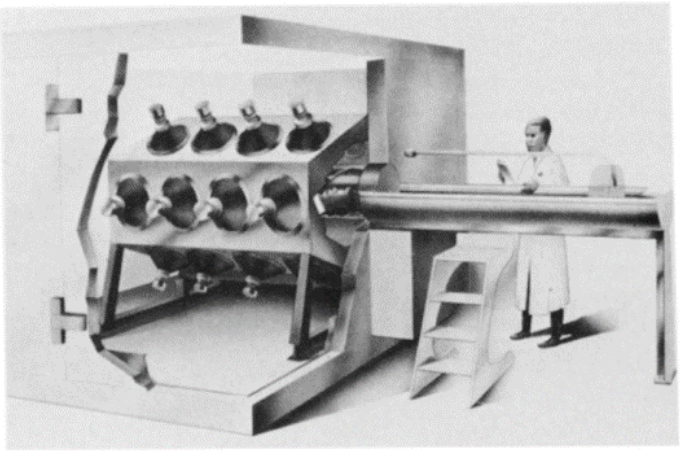


Fig. 1. A whole-body counter using a liquid scintillator (HUMCO II). (From Anderson.[18])

Whole Body Counter, U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION
https://www.osti.gov/includes/opennet/includes/Understanding%20the%20Atom/Whole%20Body%20Counters.pdf
Andrews et al. Seminars in Nuclear Medicine (1973)
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001299873800285

全身計測（whole-body counting）の歴史（3）

1950年代…NaI(Tl)を初めとした固体シンチレーション検出器の開発が進む。

1960年代…低エネルギー光子の検出可能な体外計測システムの開発が進む。

1962年…TaylorとRundoによりガス比例検出器が開発。

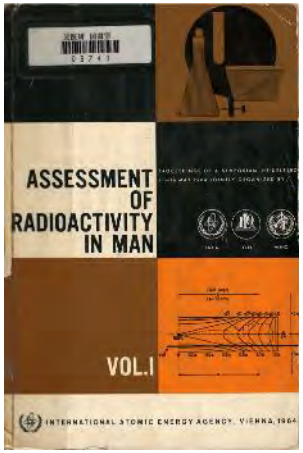
1965年…PalmerとRoeschにより，アラスカ原住民の^{137}Csを測定するためのシャドーシールド式の体外計測装置が開発。

1968年…Laurerによりホスウィッチ検出器（NaI/CsI）の開発。

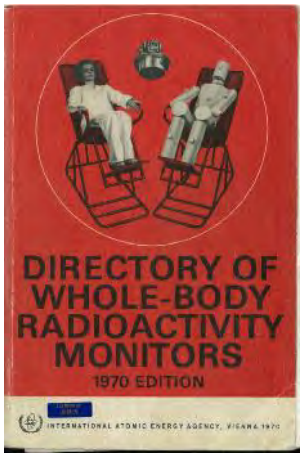
1960年代後半…半導体検出器の開発が進む。

1950~1960年代はグローバルフォールアウトの研究が盛んになる。

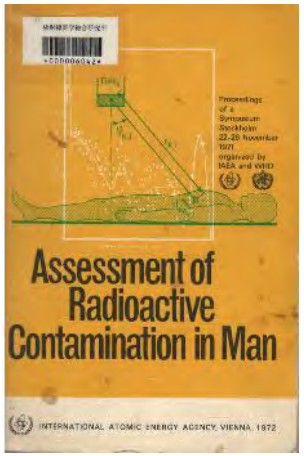
1961



1964



1970



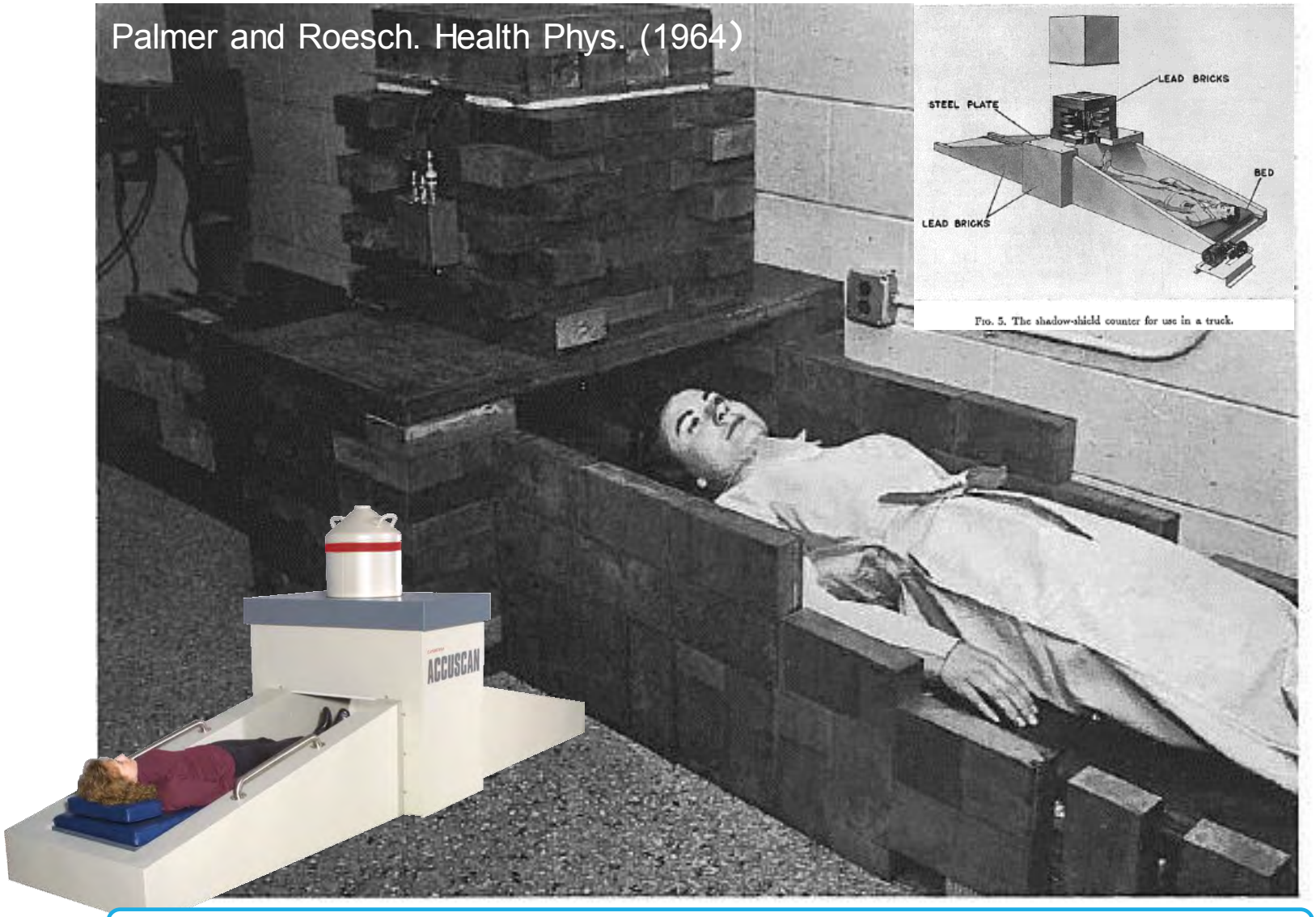
1972

1984

全身計測に関する国際シンポジウム

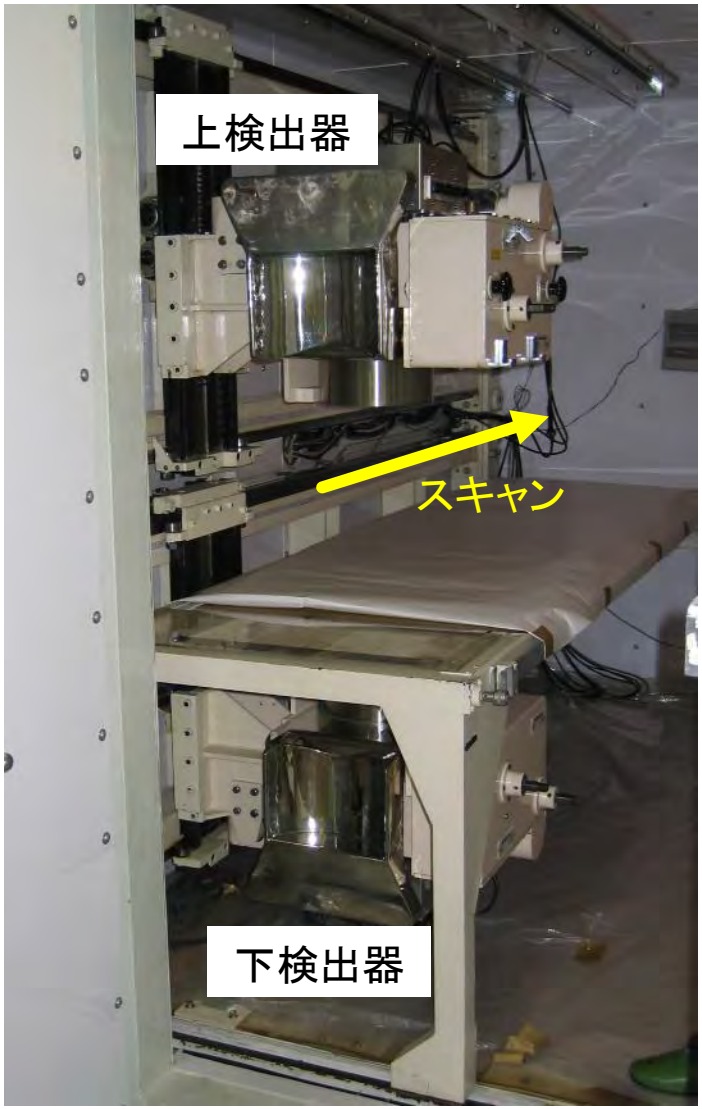
Symposium on Whole Body Counting held in Vienna from 12 to 16 June 1961
27カ国から120名以上の科学者が参加

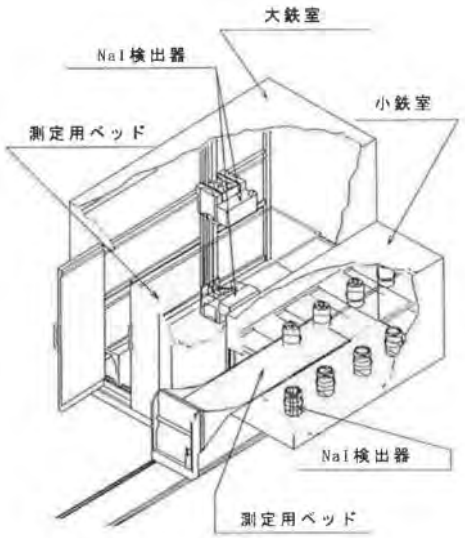
全身計測（whole-body counting）の歴史（4）



測定の基本コンセプトは50-60年代から殆ど変わっていない

放医研のヒューマンカウンタ





仕様・性能

- 厚さ20cmの鉄遮へい室内に設置（大鉄室）
  （戦前の鉄材を使用，BGを約/100に低減）
- NaI(Tl)検出器 2式（上下）：結晶サイズ8″ϕ×4″
- エネルギー分解能：約8.5%@662keV
  （1検出器当たりフォトマル4式使用）
- コリメータ：有効鉛厚5cm
- スキャン速度：5, 10, 20cm/min （可動域186cm）
- 空気調和装置（高性能フィルタ）を装備

前田武. 放射線科学 38, 456–463 (1995), 前田武 高野裕之 NIRS Technology 2, 43–51 (2008)

全身計測（whole-body counting）の歴史（5）

ヒューマン・カウンター

人体内にあるごく微量の放射性物質の種類や強さ，核種の定着部分などがいっきょにわかる装置が保健物理部で完成し，３月から基礎測定を始めている．そこで今回は，この装置の概要，この装置による体内放射能の測定法，測定成果などについて紹介することにしよう．

体内の線量を測る

ヒューマン・カウンター（human counter）はホールボディ・カウンター（whole body counter）ともいい，人体内に存在する微量の放射性物質を検出する微量放射能測定装置である．

放射線や放射性物質による被曝線量を明らかにすることは，放射線障害防止上きわめてたいせつである．

一般に放射線被曝は，外部被曝と内部被曝とに分けることができる．外部被曝はフィルム・バッジ，ポケット線量計，ガラス線量計などで測定できるが，内部被曝はこのヒューマン・カウンターを用いるか，排出物中の放射能から推定する以外にない．内部被曝の測定が始まったのは割合新しい．わが国でも最近，尿検査などの施設ができたが，排出物中の放射能から体内の放射性物質の量をかなり正確に推定できる核種はウラン，セシウム-137など限られており，他の核種については定性的な推定しかできない現状である．

ところで，ヒューマン・カウンターは，直接人体から放出されるガンマ線または阻止エックス線を測定して，体内にある放射性物質の量を求める装置である．したがって，あらゆるガンマ線またはベータ線放出核種を検出できるので，内部被曝測定の有力な手段となっている．原研では，低レベル放射能の計測技術を生かし，２年間にわたる研究成果として，昭和 36 年３月３日，ヒューマン・カウンターを完成し，体内放射能の測定を始めることになった．

原研のヒューマン・カウンターは現在運転中のものとしてはアジア地域唯一のもので，1960年の調査では世界中で運転中のもの 31 台，建設中のもの 21 台である．わが国においてもさらに放射線医学総合研究所で建設中で，間もなく体内放射能測定をおこなうことになっている．

試料は生きた人間

ヒューマン・カウンターの根本原理は，放射能を測定するという点では通常の放射能測定装置と大差ないが，試料が生きた人体であるので，従来の放射能測定と異なり，次のような問題点がある．

①人体は普通の測定試料と違って，試料を加工したり処理することができない．

②測定試料が人体であるために，試料の寸法が大きい．

③放射性物質の体内分布が，その化学的性質，摂取と吸入の径路，摂取から吸入後測定するまでの時間の経過によって異なる．

④体内に放射性物質が取り入れられたかどうかを早期に見いだすために，検出感度が高くなければならない．

⑤体内には，天然放射性物質のカリウム-40 が 0.5～2 $\times 10^{-8}$キュリー，セシウム-137 が 2～10$\times 10^{-9}$キュリー，ラドン-226 が 0.5～50$\times 10^{-10}$ キュリー存在しており，試料の自然放射能が高い．

これらの問題点を解決するためには，次のような工夫をする必要がある．

①検出器の遮蔽体の中に人体をそのまま入れ，低バックグラウンドで幾何学的効率の高い測定をおこなう．

②測定は比較的短時間でおこなう．測定時間の上限は，だいたい 30 分と考えられている．また測定中，被測定者が退屈しないような設備を設ける．

③測定結果は身長，体重，ふとり具合に無関係にする．

④測定結果は，放射性物質の体内の存在場所に無関係にする．

⑤放射性物質の体内分布の分解能を高くする．

⑥測定器のガンマ線エネルギーの分解能を高くする．

⑦測定器は低エネルギーのガンマ線に対しても，検出効率を高くする．

⑧感度の校正は，体内に放射性物質を投入しないでおこなえるものにする．

⑨エネルギーの校正は，安定で再現性のあるものにする．

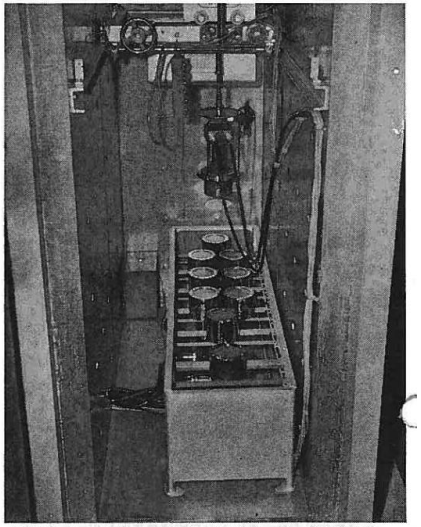
原研のヒューマン・カウンター

原研のヒューマン・カウンターは上述の問題点を考慮したうえ，体内放射能測定に便利なように設計された．

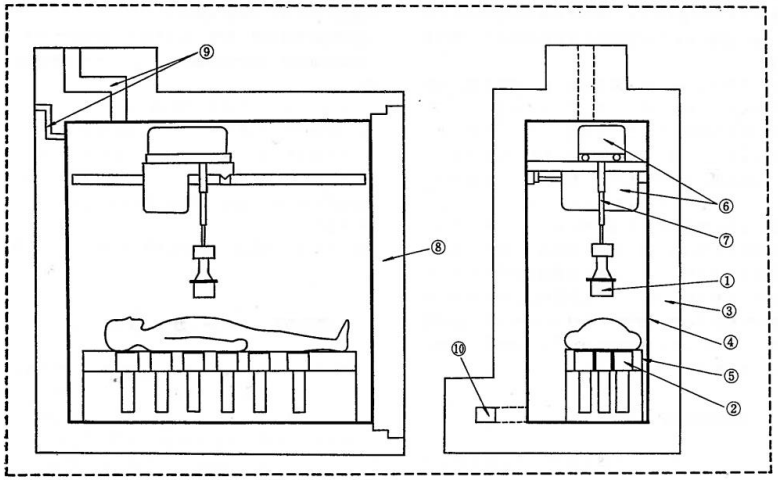
ヒューマン・カウンター室（鉄室）は図で示すように，鉄遮蔽を用い，鉄板の厚さは 20 cm で内側に 3 mm の鉛を内張りしてある．鉄材，鉛材その他の鉄室内の材料はあらかじめその自然放射能を測定し，自然放射能の少ない材料を選んで作ったものである．自然放射能の測定は，内部に塗布する塗料についてもおこなってきた．鉄室の大きさは内寸 ２m×２m×80cm である．[鉄室内への給気は，高効率フィルターで空気中の天然のラドン，トロン崩壊生成物を除去した空気を用いるか，または液体空気をしばらく放置して放射能がなくなったものを気化した空気を用いている．

被測定者はベッドの上に横臥するが，検出器としては，上部に 5″φ×4″ の NaI シンチレーション・カウンター１個を用い（現在は NaIが２個用いられるように改造した）ベッドの下部に 115 mmφ×100 mmφ のプラスチック・シンチレーション・カウンターを９個配列している．下部のプラスチック・シンチレーション・カウンターは固定されているが，１個の NaI シンチレーション・カウンターは可動式で，身体各部に密着したり，身体から適当な距離を離して，いわゆる全身放射能計測をすることができる．また NaI は鉛のプローブを用いてコリメートすることもできる．NaI シンチレーション・カウンターの出力はマルチ・チャンネル波高分析器を用いてスペクトル分析され，プラスチック・シンチレーション・カウンターの出力は 50 keV 以上の出力パルスを計数装置で読みとることができる．

NaI シンチレーション・カウンターは主として核種の存在位置の決定に用いられるものであって，また両者とも，いわゆる全身放射能計測にも用いられる．なお測定中，被測



⇧第１図．ヒューマン・カウンター室の内部．ベッドに固定されたシンチレーション・プローブが９個，天井から可動型のシンチレーション・プローブ１個が下がっている．

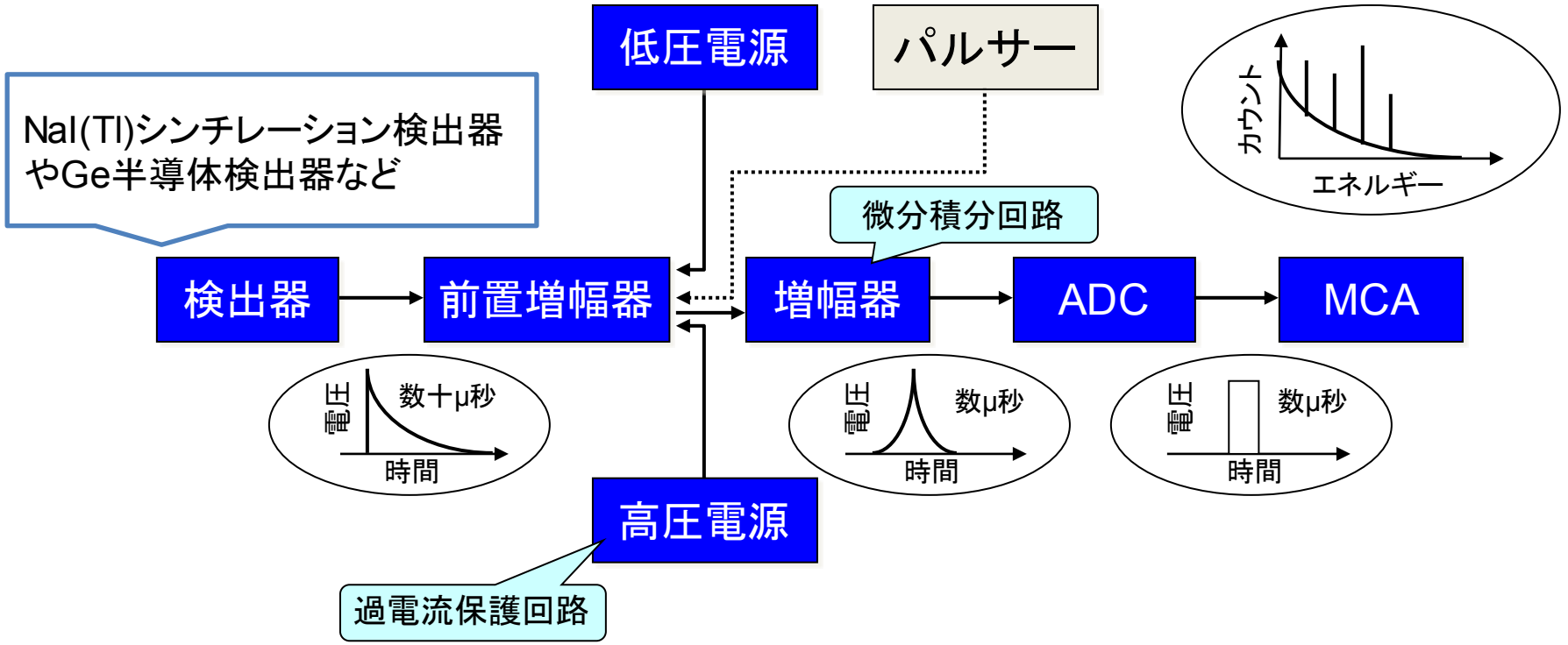


⇩第２図．ヒューマン・カウンター室の断面図．①5″φ×4″NaI シンチレーション・プローブ ②115mmφ×100mmφ プラスチック・シンチレーション・プローブ（９個）③20cm厚の鉄遮蔽 ④３mm厚の鉛板⑤ベッド⑥移動架台⑦上下移動棒 ⑧扉 ⑨給気用ダクトの迷路（太いほうが高性能フィルターで ロ過された 空気を送る．細いほうが液体空気を気化して送る）⑩ケーブル用迷路

講義内容

- ホールボディカウンタ（WBC）とは
- WBCの測定系，測定ジオメトリ，校正など
- 東電福島第一原発事故におけるWBC測定の経験
- 話題

ガンマ線スペクトロメータの測定系

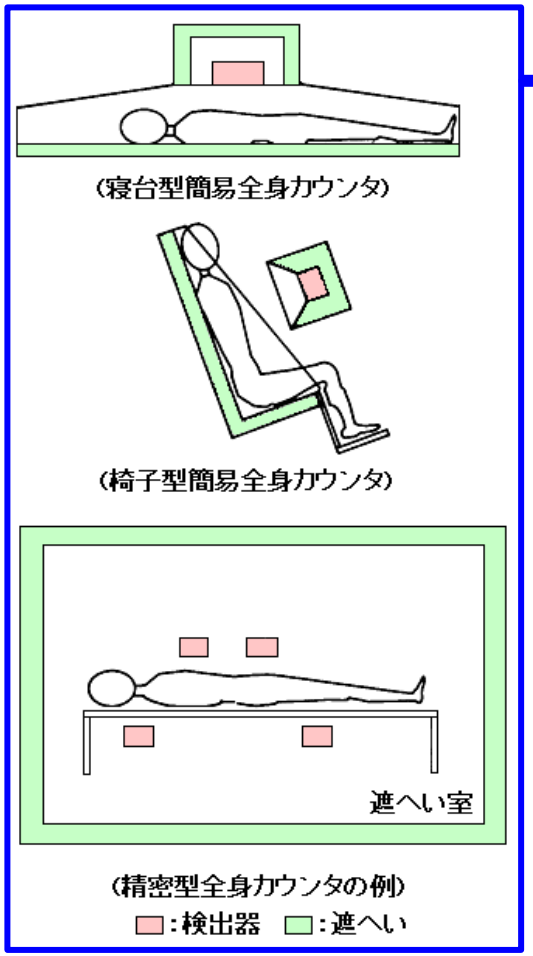


ホールボディカウンタの測定系も基本的に同じ!!

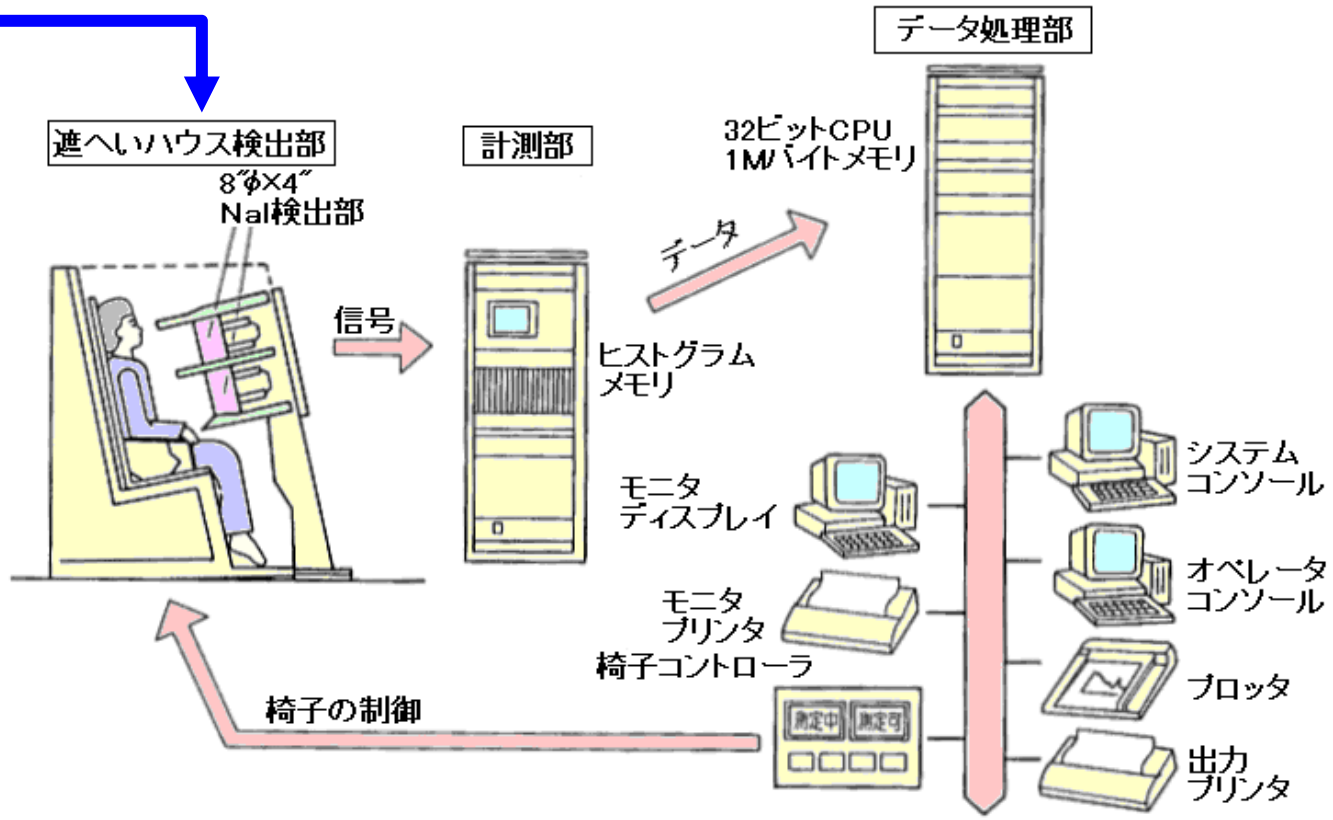
食品中放射能検査も同様な
ガンマ線スペクトロメトリーを利用

厚生労働省ウェブサイト「食品中の放射性物質への対応」より作成

ホールボディカウンタのシステム構成例



遮へい体と検出部



検出部(遮へい体含む)，計測部，データ処理部から構成

ATOMICA, https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-04-03-11.html

放射線と物質の相互作用（光子）

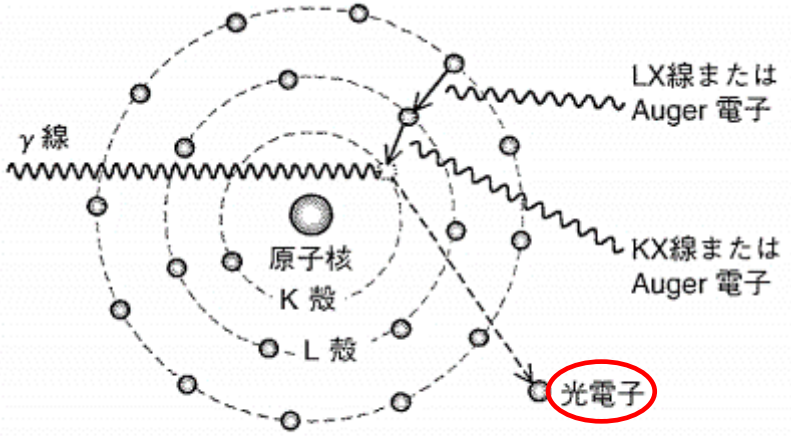


図6-18　K軌道電子における光電効果

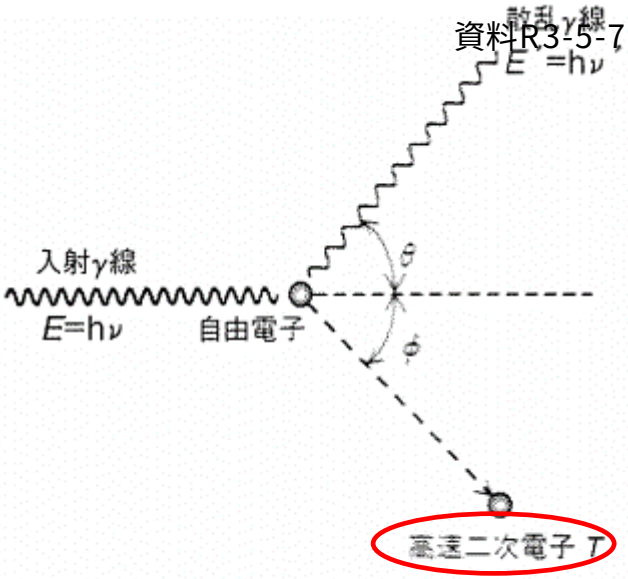


図6-19　コンプトン散乱

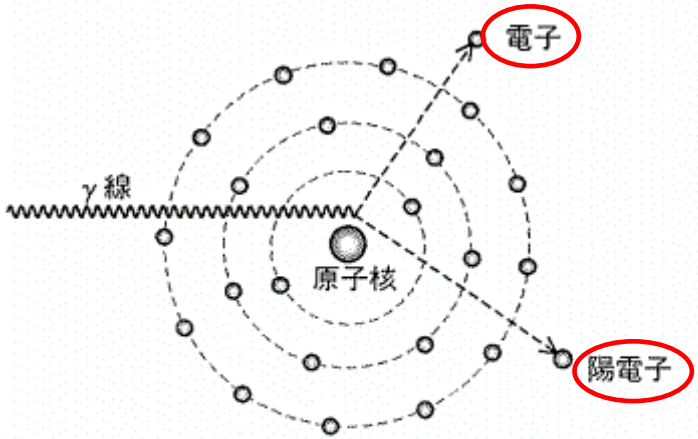


図6-23　原子核の場における電子対生成

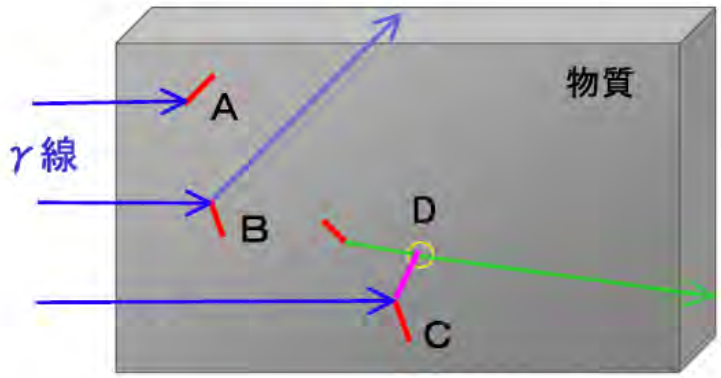
光子と物質（検出器有感領域）の相互作用の結果，二次電子が発生する。

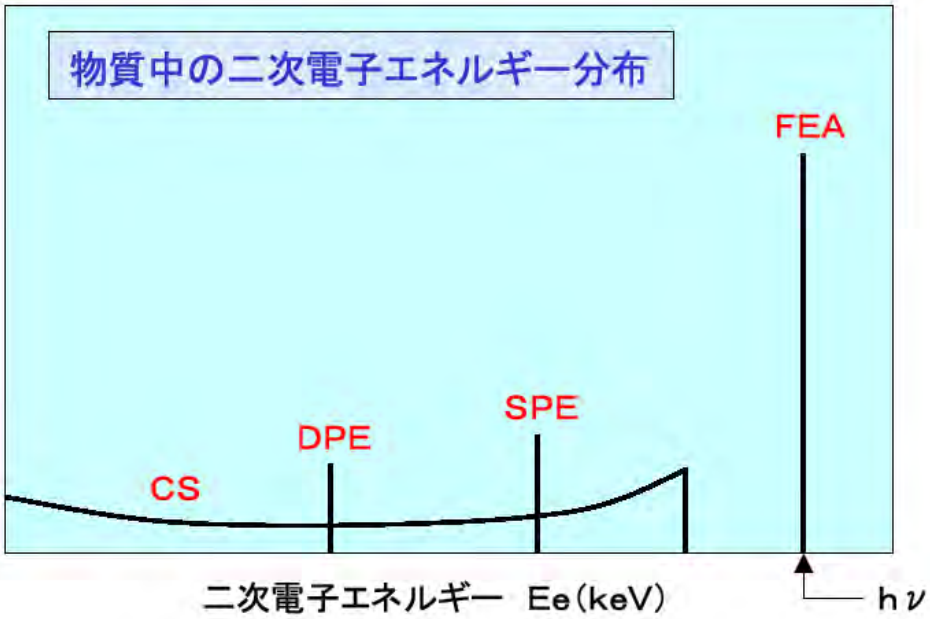
二次電子のエネルギーに比例した信号が観測される。

- 実際の検出器では，その特性に応じた揺らぎが付加される（分解能）

野口正安，富永洋 放射線応用計測 基礎から応用まで，日刊工業新聞社（2004）

二次電子エネルギー分布





A) 光電効果

全エネルギー(hν)が二次電子に与えられる。

$E_e = h\nu$

FEA ： 全エネルギー吸収

B) コンプトン散乱

一部のエネルギーが二次電子に与えられ、散乱γ線(hν')となる。

$E_e = h\nu - h\nu'$

CS ： 連続分布

多重相互作用 ： 散乱γ線が光電効果を起こすと、FEAに等しい。

C) 電子対生成

全エネルギーが電子・陽電子の生成とその運動エネルギーとなる。

$E_{e+p} = h\upsilon - 2m_0c^2$　　$m_0c^2 = 511$ keV

D) 陽電子消滅放射線

FEA $= h\upsilon$

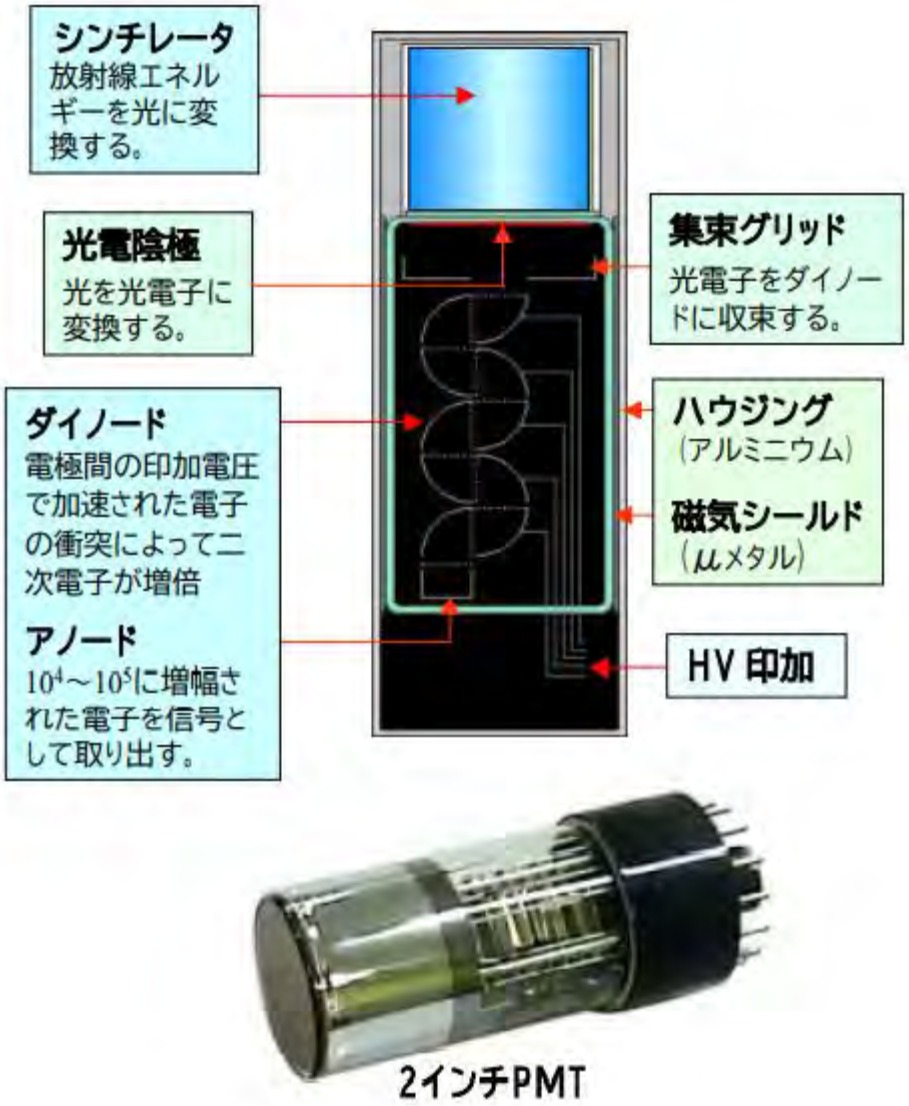
SPE $= h\upsilon - 511$ keV

DPE $= h\upsilon - 1022$ keV

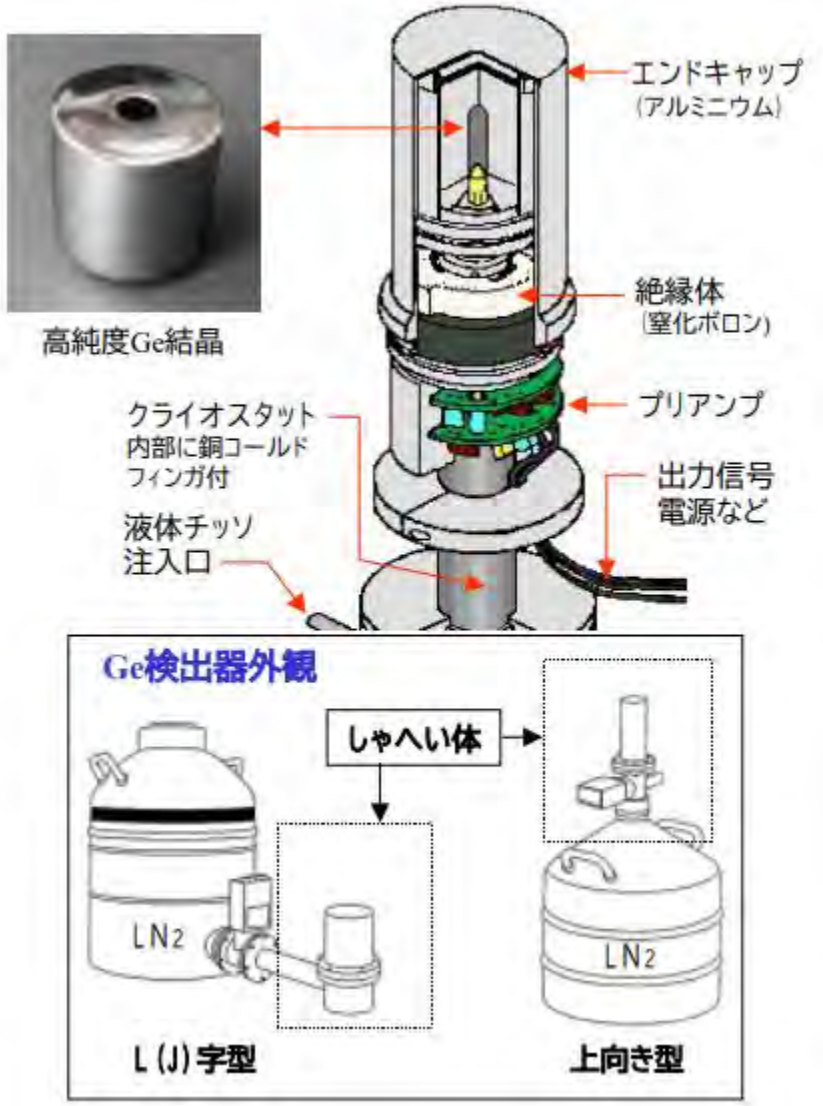
野口正安，富永洋 放射線応用計測 基礎から応用まで，日刊工業新聞社(2004)

ホールボディカウンタに用いられる代表的な検出器

資料R3-5-7



NaI(Tl)シンチレーション検出器



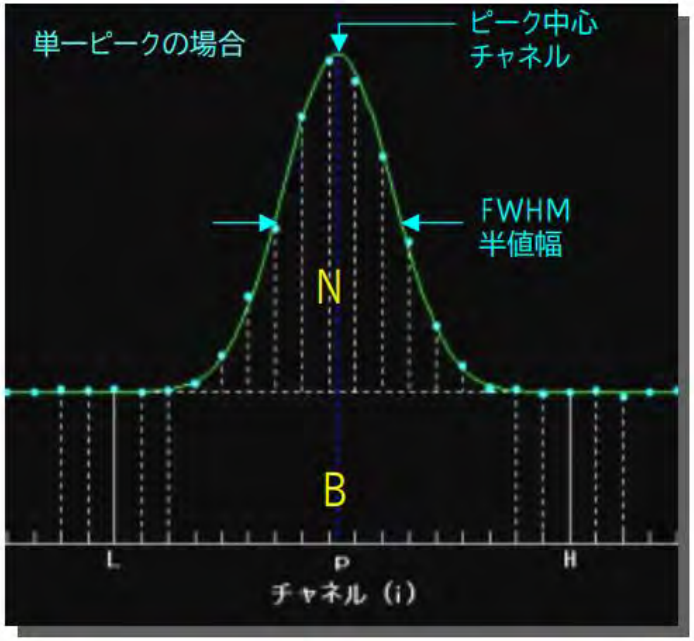
高純度Ge半導体検出器

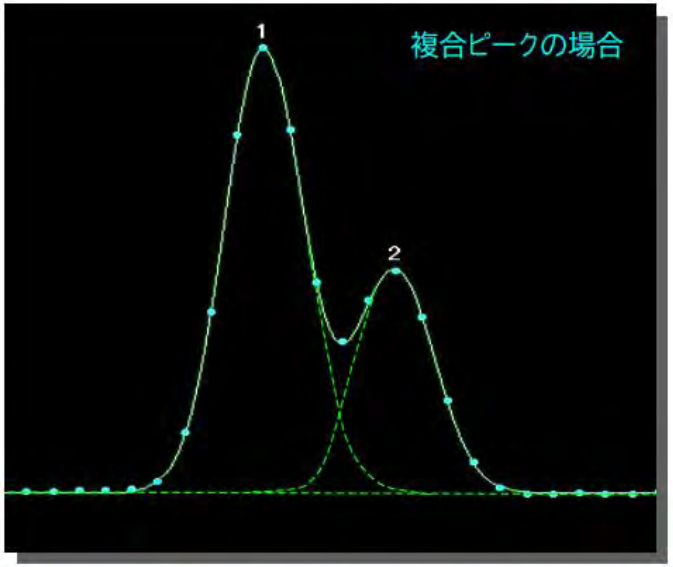
野口正安，富永洋 放射線応用計測 基礎から応用まで，日刊工業新聞社(2004)

スペクトル解析

スペクトル解析の概要

ピーク中心チャネル ： エネルギーの決定、 核種の同定
FWHM ： 性能テスト、ピーク領域の決定、多重度判定、パラメータ初期値
ピーク面積 ： 放射能の定量





コベル法：単一ピークにのみ適用

$N = (T - B) \pm \sigma$

$T = \Sigma n_i \quad (i = L \sim H)$

$B = (H - L + 1)\ (\overline{n}_L + \overline{n}_H) / 2$

$\sigma = (\sigma_T^{\,2} + \sigma_B^{\,2})^{1/2}$

ピーク フィッティング法 ：最小二乗法

ピーク関数 $f(i) = B(i) + G(k,i)$

$B(i) = a + b \cdot i + c \cdot i^2 + d \cdot i^3 + , , , , ,$

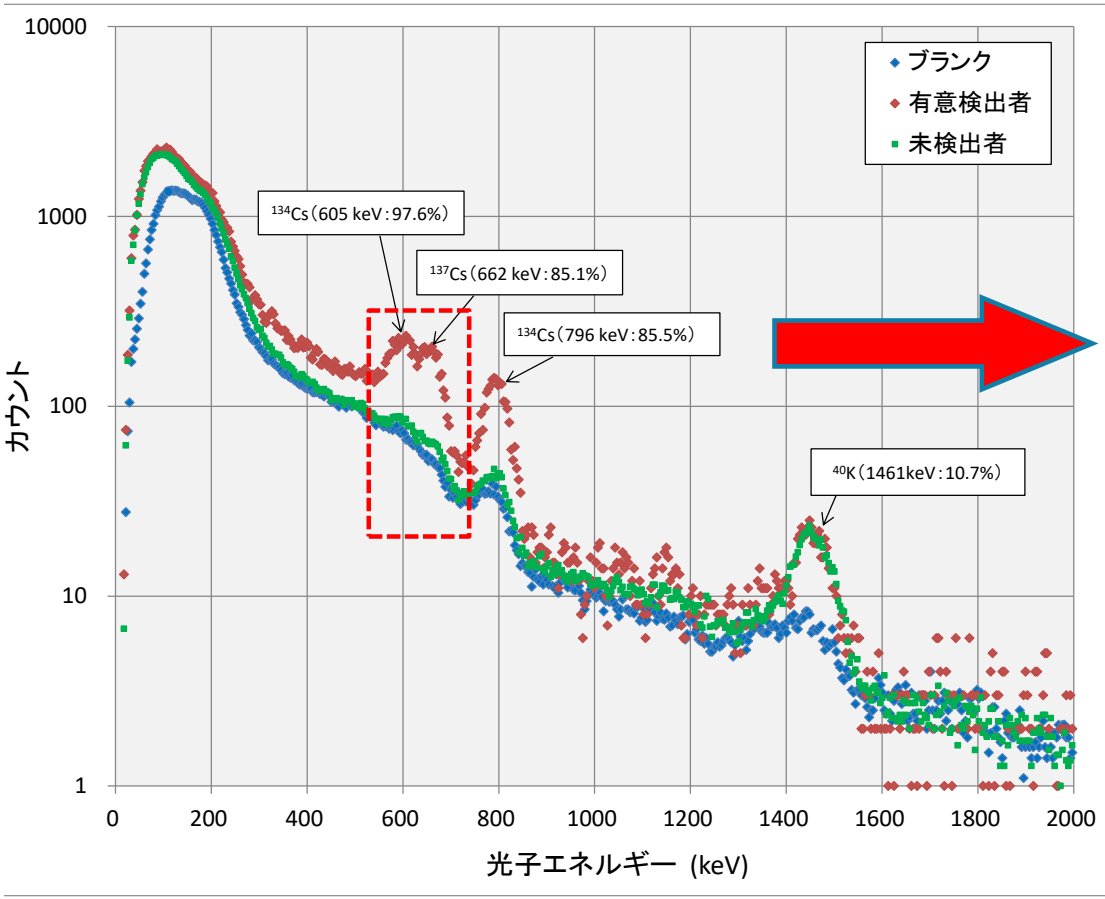
$G(k,i) = \Sigma A_k \exp\{-2.773\,(P_k - i)^2 / W_k^2\}$

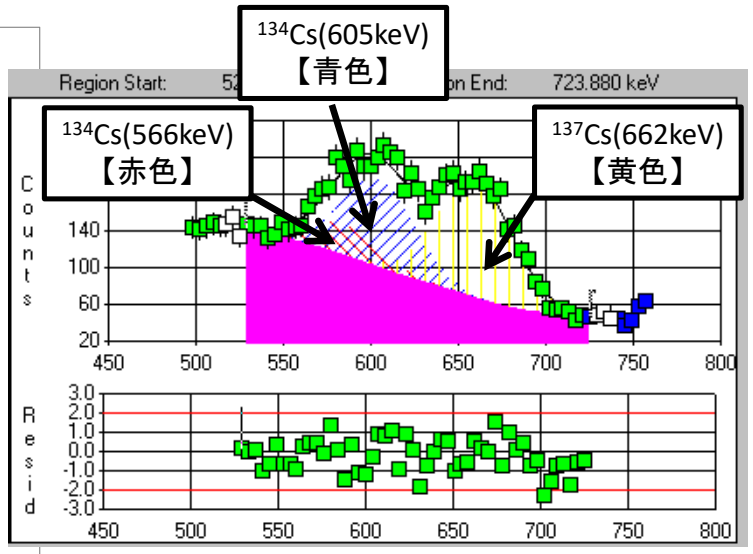
i はチャネル数、k はピークの数、 a, b, c, d, Ak, Pk, Wk (=FWHMk) は未知パラメータ

ピーク面積 ： $N_k = 1.064 \cdot A_k \cdot W_k$

野口正安，富永洋 放射線応用計測 基礎から応用まで，日刊工業新聞社(2004)

スペクトル解析（続）





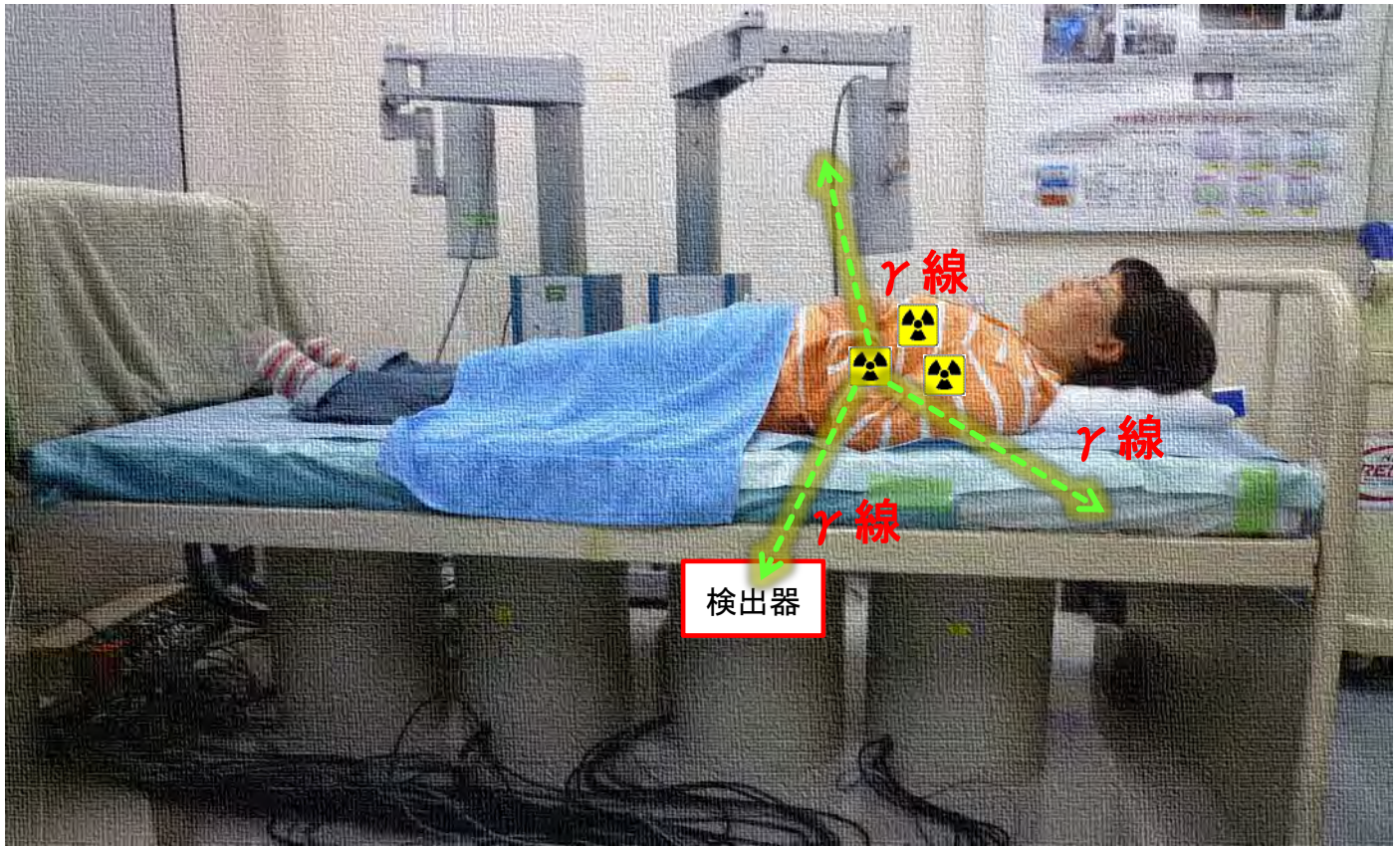
核種	光子エネルギー(keV)	収率 (%)
K-40	1461	10.7
Cs-134	566 605 796.6* 1167.94 1365.00	23.8 97.6 94.2 1.8 3.0
Cs-137	662	85.1

*796.6 keVは796 keVと802 keVの放出率の加重平均値
（アイソトープ手帳第10版のデータに基づく）

NaI検出器から得られたガンマ線スペクトルの解析例

全身計測における計数効率

量研のベッド型WBC

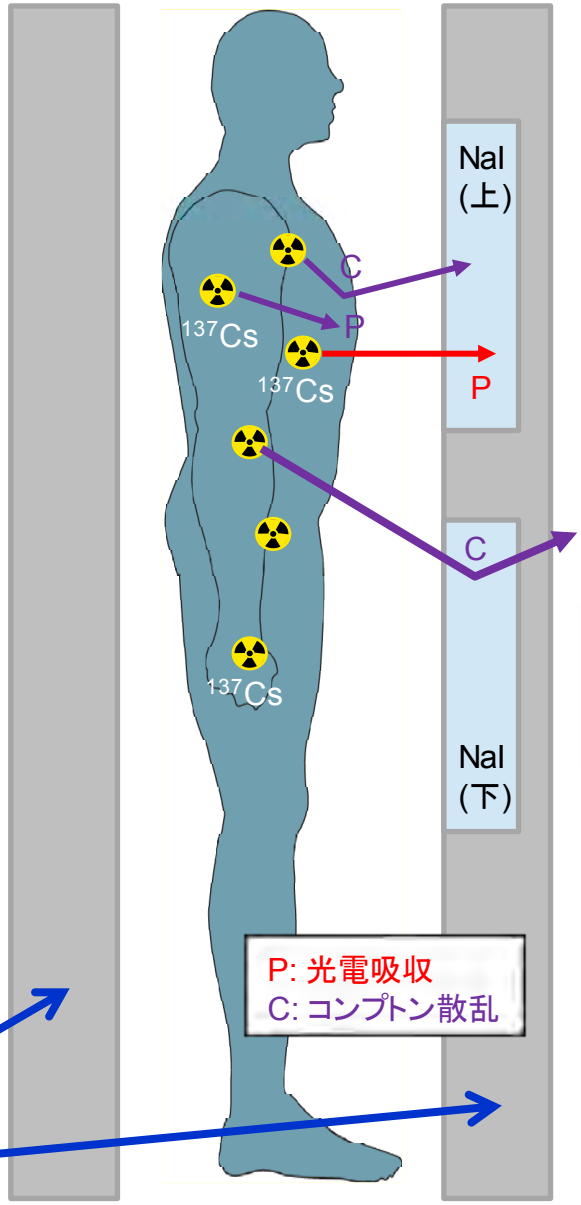


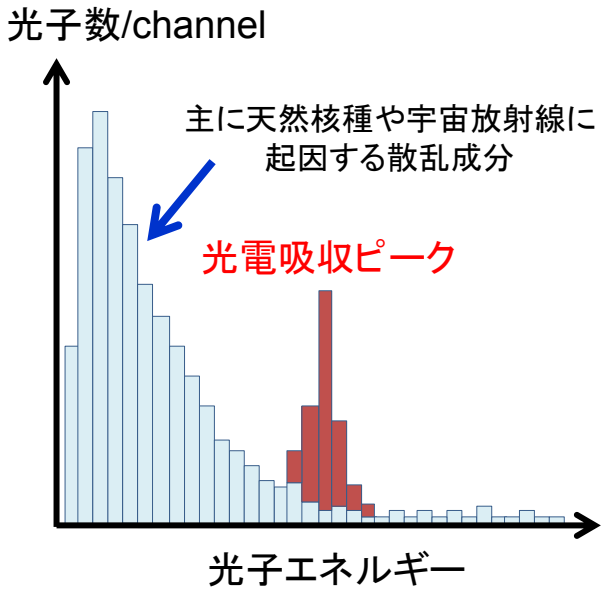
大口径NaI検出器（8″ϕ×4″）4式有するWBCであっても
^{137}Csの662keV全吸収ピーク効率は僅か1%程度

※写真のWBCは福島住民の方々の内部被ばく検査にも使用された。Kim et al. Health Phys. 115 (2016)

全身計測における計数効率（続き）

Canberra社製
FASTSCAN





光電吸収ピークにカウントされる要件
人体組織及び周辺空気において全く相互作用せず，
検出器の有感領域で全エネルギーを付与する光子

FASTSCANのピーク計数効率
≒0.007 (cps per p/s) @ 662 keV
※全身均一分布の場合

体内残留量200Bqの^{137}Csを有する
被検者を2分間測定すると

ピーク計数 ≒140カウント

WBC測定に適した核種（核分裂生成物・腐食生成物） 資料R3-5-7

Table 2.1. Decay and radiological characteristics for common fission and activation product radionuclides.

Nuclide	Half-life[a]	Gamma		Type	Inhalation dose coefficient[b] (mSv Bq^{-1})	Intake equivalent to 1 mSv acute[c] whole-body exposure (Bq)
		Energy[a] (keV)	Emission probability[a] (%)			
^{22}Na	2.602 y	511.0	179.8	F	2.0×10^{-6}	5.0×10^{5}
		1274.54	99.94			
^{51}Cr	27.705 d	320.08	9.87	F	3.0×10^{-8}	3.3×10^{7}
				M	3.4×10^{-8}	2.9×10^{7}
				S	3.6×10^{-8}	2.8×10^{7}
^{54}Mn	312.15 d	834.85	99.98	F	1.1×10^{-6}	9.1×10^{5}
				M	1.2×10^{-6}	8.3×10^{5}
^{59}Fe	44.503 d	192.35	3.08	F	3.0×10^{-6}	3.3×10^{5}
		1099.25	56.5	M	3.2×10^{-6}	3.1×10^{5}
		1291.60	43.2			
^{57}Co	271.83 d	122.06	85.60	M	3.9×10^{-7}	2.6×10^{6}
		136.47	10.68	S	6.0×10^{-7}	1.7×10^{6}
^{60}Co	5.2712 y	1173.24	99.90	M	7.1×10^{-6}	1.4×10^{5}
		1332.50	99.98	S	1.7×10^{-5}	5.9×10^{4}
^{65}Zn	243.94 d	1115.55	50.60	S	2.8×10^{-6}	3.6×10^{5}
^{123}I	13.27 h	158.97	83.3	F	1.1×10^{-7}	9.1×10^{6}
^{125}I	54.391 d	35.49	6.68	F	7.3×10^{6}	1.4×10^{5}
^{131}I	8.0207 d	364.49	81.7	F	1.1×10^{-5}	9.1×10^{4}
^{137}Cs	30.13 y	661.66	85.00	F	6.7×10^{-6}	1.5×10^{5}

[a]Wahl (2000).
[b]For 5 μm activity median aerodynamic diameter (AMAD) (IAEA, 1996b, 1999a; ICRP, 1997a).
[c]A single intake assumed to occur instantaneously.

Not considering the loss of exhalation.

* These rates, expressed as *approximate* half-times, and the corresponding amounts of material deposited in each region *that reach body fluids* can be summarised as follows. Type F: 100% absorbed with a half-time of 10 min. Type M: 10% absorbed with a half-time of 10 min and 90% absorbed with a half-time of 140 d. Type S: 0.1% absorbed with a half-time of 10 min and 99.9% with a half-time of 7000 d (ICRP, 1994).

ICRU Report 69 (2003)

全身計測の測定ジオメトリ

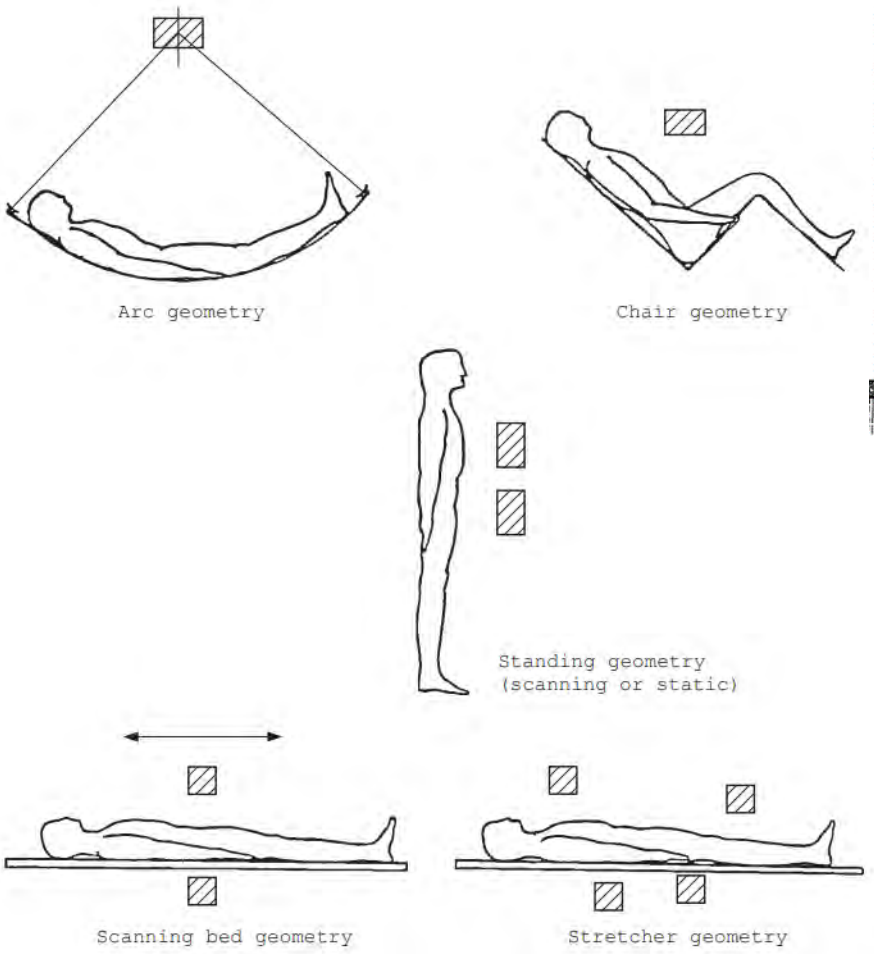
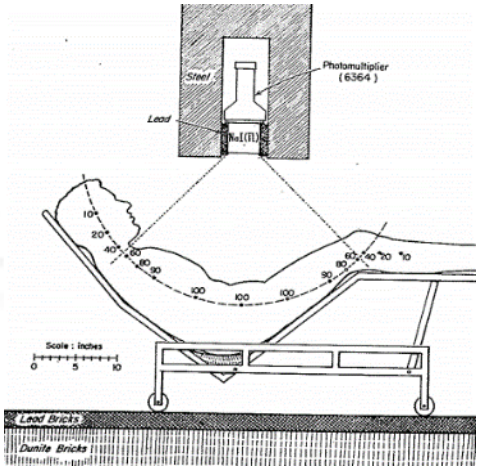
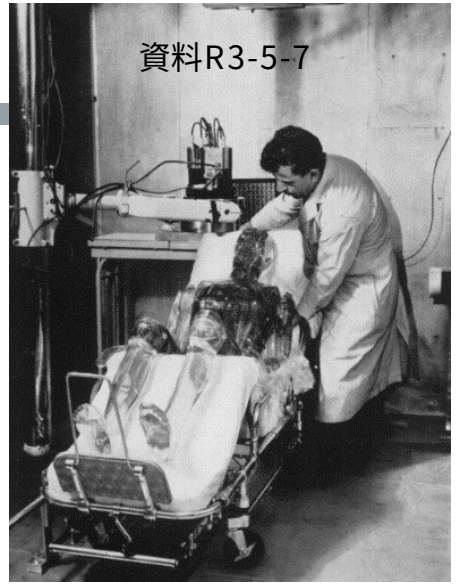


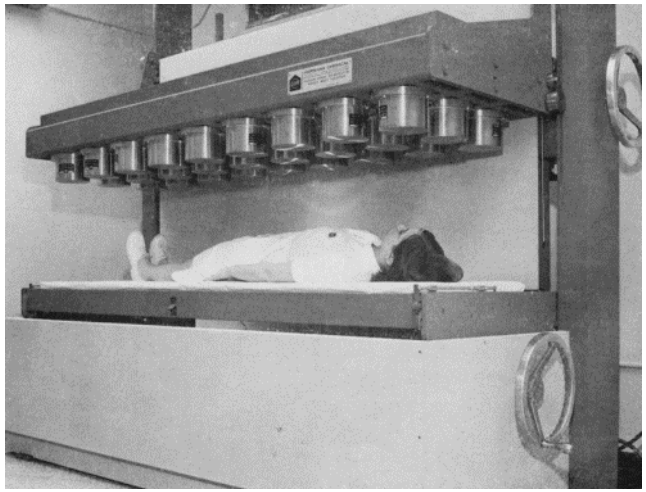
FIG. 1. Various geometries used for whole body monitoring.



Hine et al. IAEA (1961)



Brookhaven chair-type whole body counter



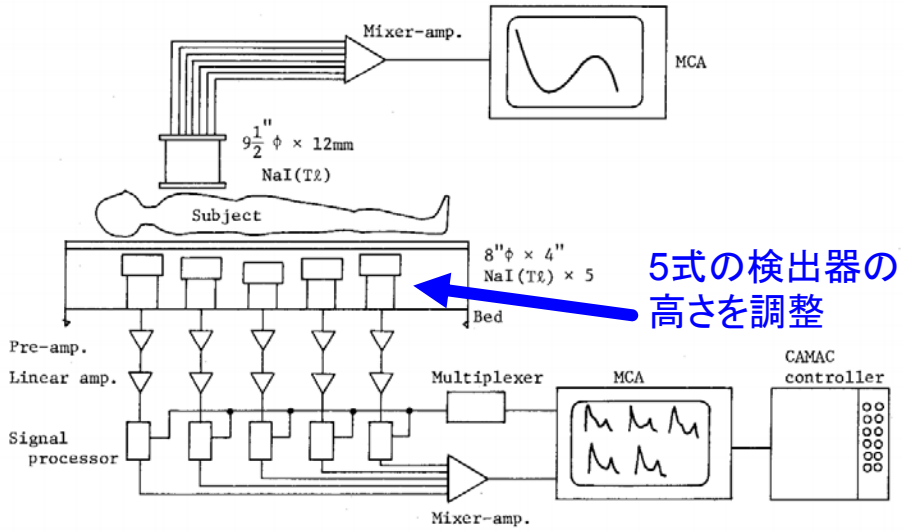
Brookhaven 54-detector whole body counter

検出感度と感度均一性の両者のバランスを使用目的やコスト等に応じて決定

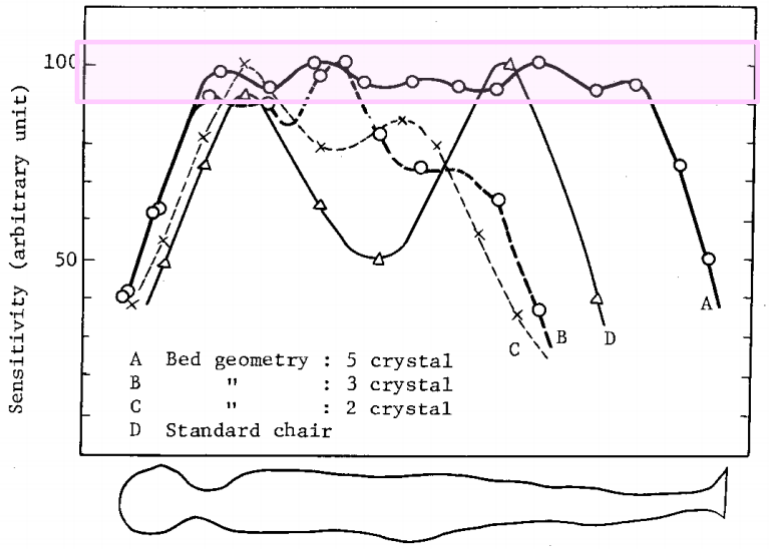
IAEA Safety Report Series No.RS-G-1.2 (1999), Toohey et al. Health Phys. 60 (1991)

全身計測の測定ジオメトリ例（1）

原子力機構（旧原研）の精密型WBC



5式の検出器の高さを調整



体軸方向にフラットなレスポンスを確保

放医研ヒューマンカウンタ

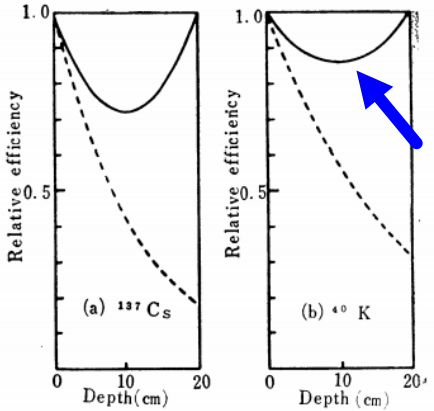


図 9 20 cm 水ファントム中の種々の深さにおかれた点線源に対する吸収による計数の変化
点線：一方向からの測定
実線：上下両方向からの測定

上下の検出器を応答を合算することで厚さ方向の感度が一定

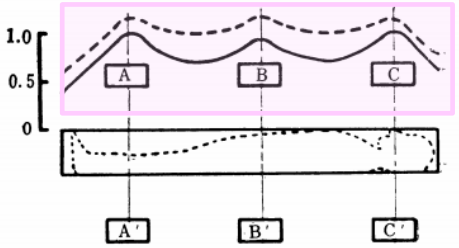


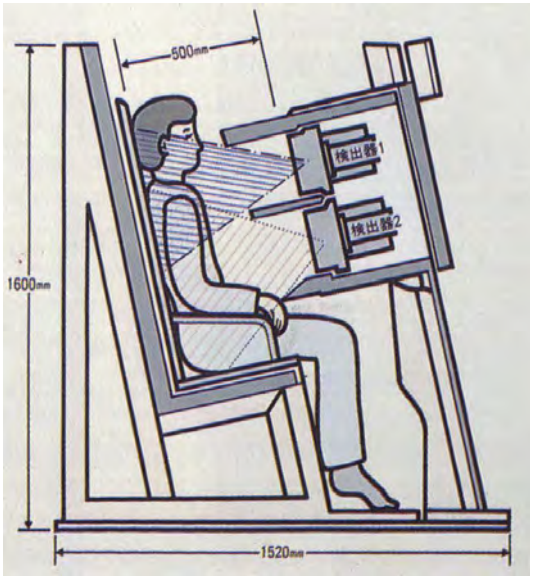
図 10 8″ϕ×4″ NaI を 3 カ所に移動してデータを集計したときの効率の一様性
点線：20 cm ファントムの中心線上にある RI に対する幾何学的効率
実線：上記に ^{137}Cs の γ 線の吸収を考慮した場合

多数検出器アレイではなくスキャンジオメトリを採用

JAERI-M-9066（1980）
江藤・田中. Radioisotopes 10（1961）

全身計測の測定ジオメトリ例（2）

原子力機構（旧原研）の椅子型WBC



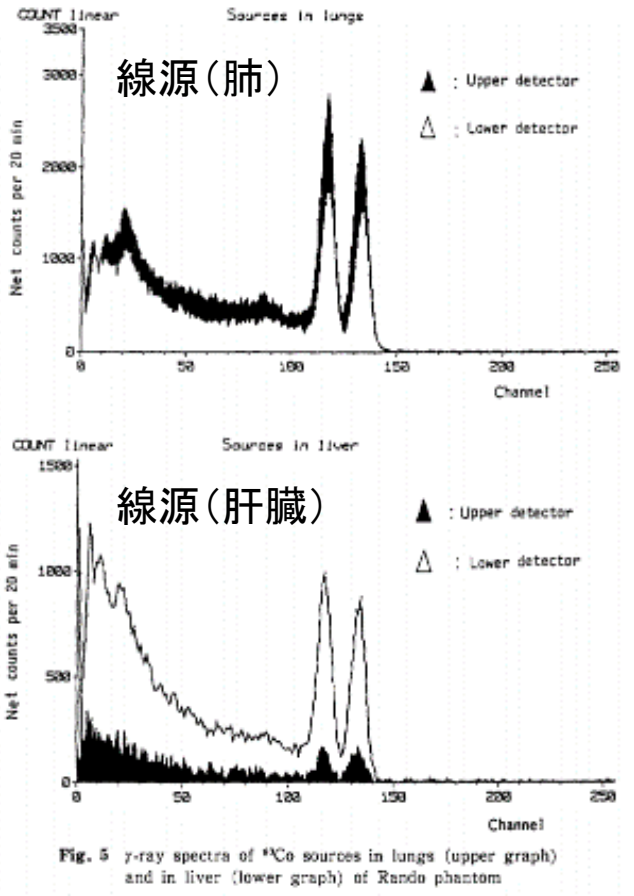


Fig. 5 γ-ray spectra of ^{60}Co sources in lungs (upper graph) and in liver (lower graph) of Rando phantom

仕様・性能

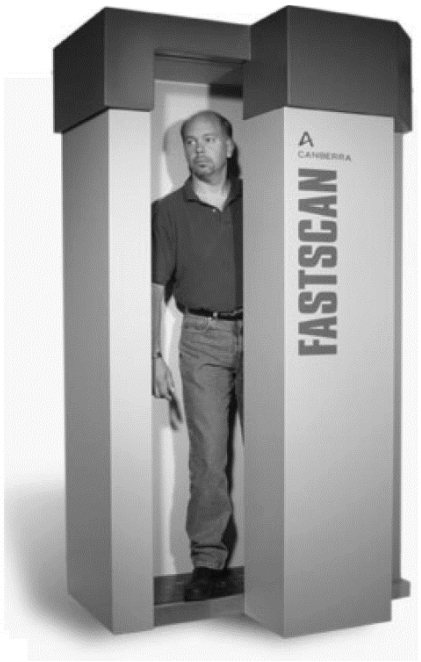
- 検出器：8″ϕ× 4″　NaI(Tl)検出器２台
  （各検出器にPMT3式装着）
- ジオメトリ：椅子型
- 遮へい：検出器周囲 鉛5cm
  被検者背面 鉛5cm
- 検出下限値（^{137}Cs）：220Bq（2分測定）
- 測定エネルギー範囲：0.15~2MeV

体軸方向の感度変化が大きい。
→肺かそれ以外の部位の判定に使える。

Mizushita. J. Nucl. Sci. Technol. 26 (1989).

全身計測の測定ジオメトリ例（3）

資料R3-5-7



Canberra FASTSCAN

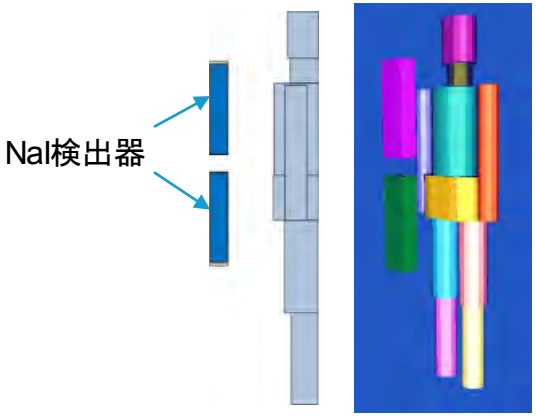


Table 3. Efficiencies of FASTSCAN vs. Subject Height

HEIGHT (in.)	99 PERCENTILE MALE	95 PERCENTILE MALE	50 PERCENTILE MALE	5 PERCENTILE FEMALE	1 PERCENTILE FEMALE	TYPICAL PERCENT EFFICIENCY
76	Head	Head	Head	Head	Head	38
74						46
72						53
70						60
68						70
66						78
64						86
62						90
60						94
58						102
56						104
54						103
52						102
50						101
48						100
46						101
44						102
42						103
40						104
38						103
36						98
34						87
32						83
30						78
28						62
26						52
24						38
22						34
20						31
18						22
16						18
14						13
12						11
10						10
08						8
06						6
04						5
02						5
00 Feet	Th, URT, LUNG, UGI, LGI	Th, URT, LUNG, UGI, LGI	Th, URT, LUNG, UGI, LGI	Th, URT, LUNG, UGI, LGI	Th, URT, LUNG, UGI, LGI	5

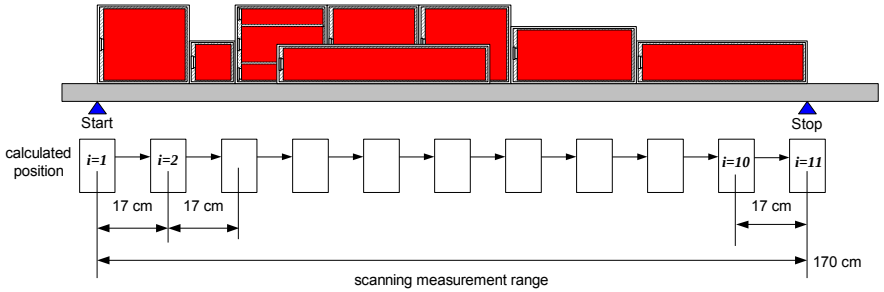
URT: 呼吸器官上，Th: 甲状腺
LUNG: 肺
UGI: 消化器官上部
LGI: 消化器官下部

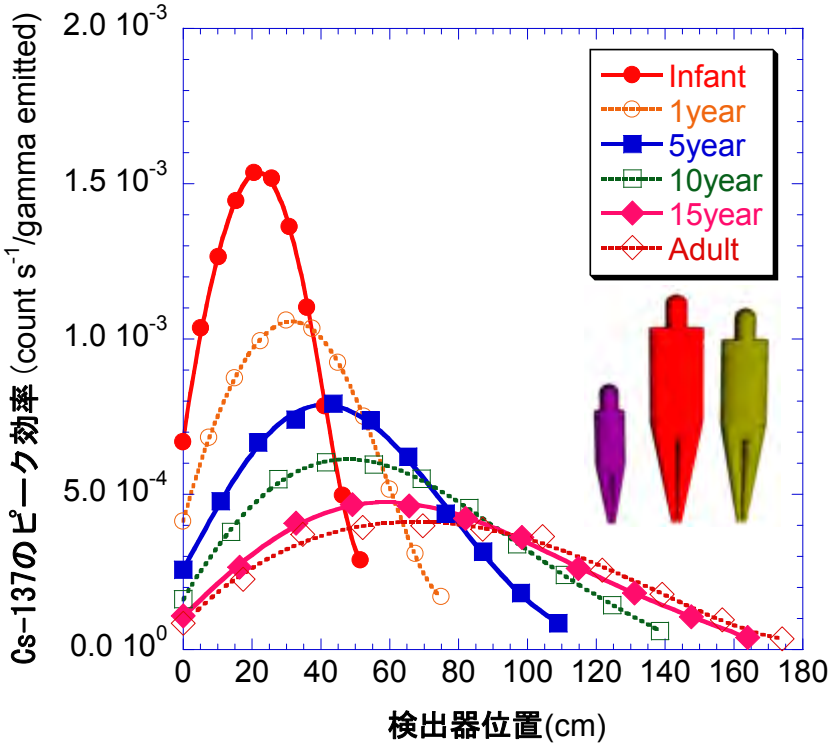
フラットなレスポンス

幅広い体格の被検者に対する感度変化が少ない

Canberra https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4_mirion/files/pdf/technical-papers/fastscan.pdf?1534969742

全身計測の測定ジオメトリ例（4）





MIRD型年齢別ファントムに対する
各検出器位置毎の計数効率

仕様・性能

- 検出器：ゲルマニウム半導体検出器（相対効率50%）×2式
- 測定モード：スキャン及びステップ
- スキャン速度：1-20cm毎分
- 測定エネルギー範囲：10-2000keV

全身均一分布の場合，被検者の身長と同じ範囲をスキャンして得られるカウントは小児から成人までの体格にあまり依存しない。（100-1,500keVのエネルギーで1割程度）

栗原ら. サイクル機構技報25（2004） https://rdreview.jaea.go.jp/gihou/pdf3/n25-06.pdf

体外計測法の原理（相対測定）

既知量の放射性核種を封入したファントム

ピークカウント：C
放射能：A

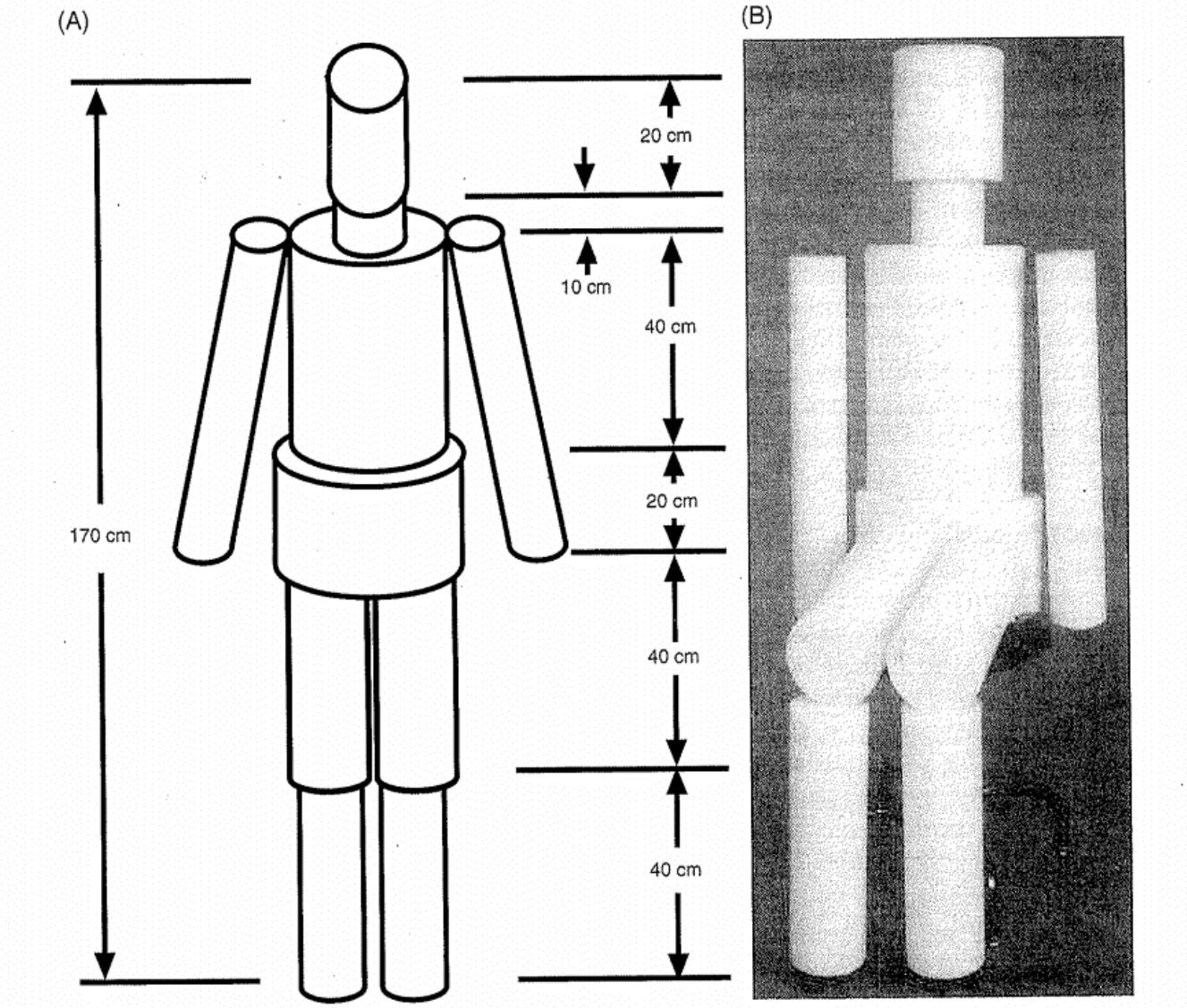
ピーク効率 C/A=ε

被検者

ピークカウント：C’

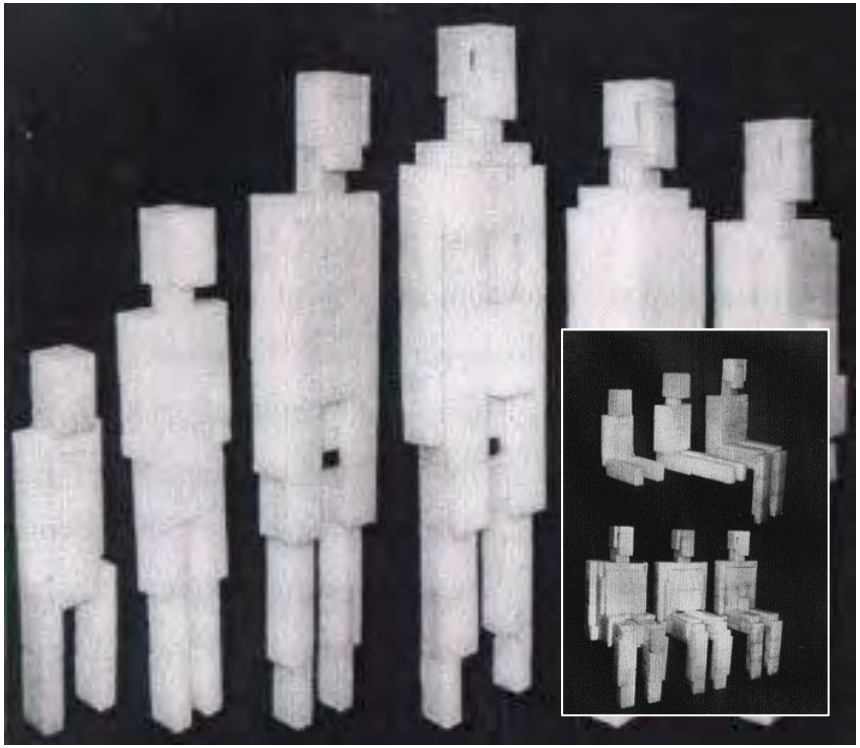
体内放射能：A’=C’/ε=(C’/C)×A

校正用ファントム（1）



BOMAB（Bottle Manikin Absorption）ファントム，ICRU Report 69（2003）

校正用ファントム(2)



Type of the phantom (reference sample index of the set)	Age and anthropometric characteristics of human body			
	Age, years	Weight, kg	Height cm	Average thickness, cm
F_1	2	12	82,5	8,8
F_2	6	24	121,0	10,9
F_3	14	50	160,0	11,8
F_4	≥ 18	70	170,5	14,3
F_5	≥ 18	90	170,5	15,7
F_6	≥ 18	110	170,5	19,4

Kovtun et al. Radiat. Prot. Dosim. 89 (2000)

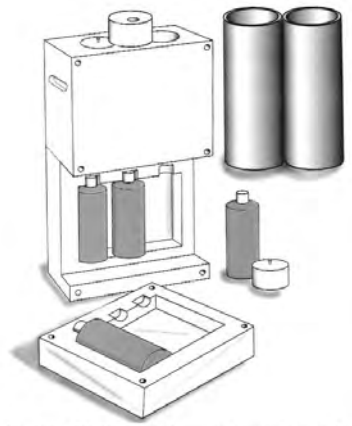


Fig. 2. The ORTEC whole body counting phantom showing the placement of the sources.

Fig. 3. The ORTEC whole body counting phantom positioned for calibration of a StandFast counter.

Kramer et al. Health Phys. 88 (2005)

Figure 5.3: Bottle phantom (70-kg-configuration) in the WBC.

Lars Hegenbart, Doctor thesis (2009)

計数効率校正の手順

使用するファントムの放射能強度をソフトウエアに入力

Certificate File Editor - JNC Phantom 2006 Feb20.CTF

File Options Help

Title: JNC Phantom 1 Feb 2006 20

Quantity: 1 unit(s) Assay date: 2006/02/20 at 0:00:00

Line

Nuclide: Ba-133 Half-Life: 10.57 Y D H M S

Energy: 81 keV Uncertainty: +/- 1

Emission Rate: 8230.00 gps or aps per unit quantity

Rate Uncertainty: +/- 5.00 % Use for Calit

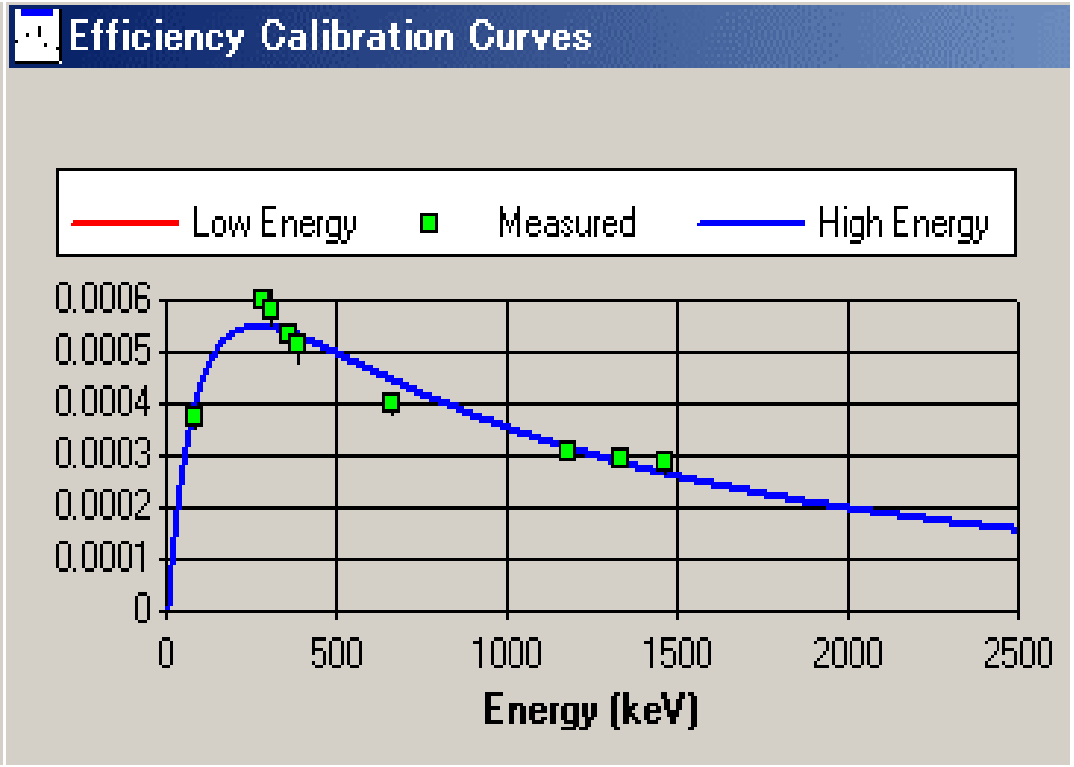
Add Change Delete

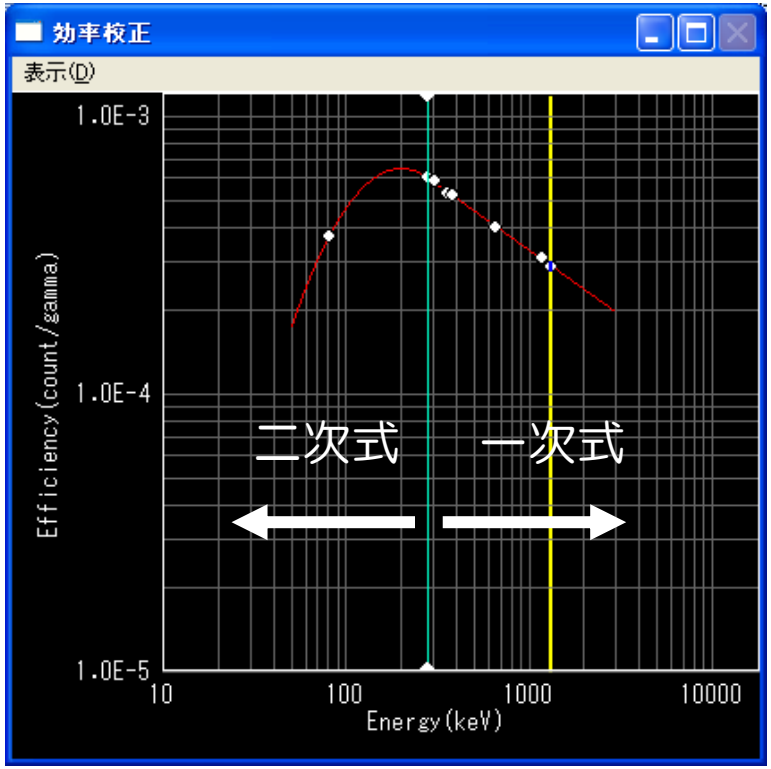
Nuclide	Energy (keV)	Rate	%Uncert	
* Ba-133	81.000	8230.00	5.00	10.57 Y
* Ba-133	276.400	1730.00	5.00	10.57 Y
* Ba-133	302.850	4420.00	5.00	10.57 Y
* Ba-133	356.020	15000.00	5.00	10.57 Y
* Ba-133	383.850	2150.00	5.00	10.57 Y
* Cs-137	661.600	27200.00	5.00	30.07 Y

Canberra GENIE 2K, Certificate File Editor

計数効率校正カーブの取得

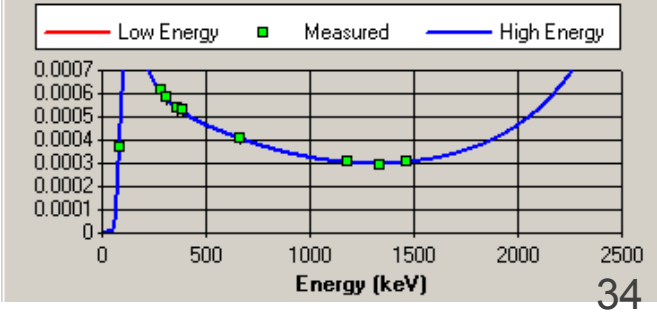
計数効率カーブの例





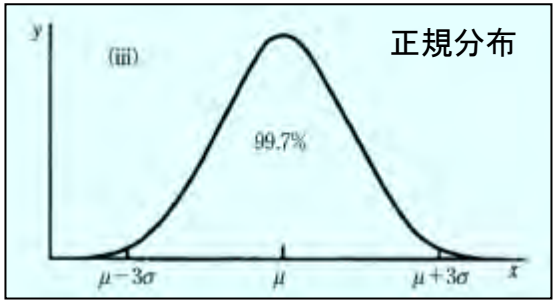
ソフトウエア上でカーブを自動で作成してくれるが以下を留意

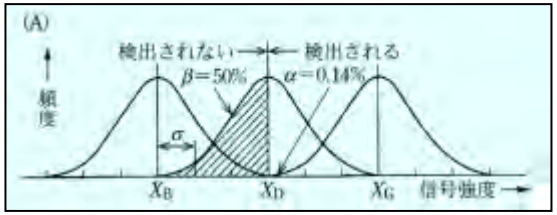
- 適合関数は何でも良いが，なるべく低次の間数式を選択
- 150~200keV付近に極大値（knee）が存在すること
- 高エネルギー側でカーブが持ち上がらない自然の形になること
- 校正スペクトルは何回か取得

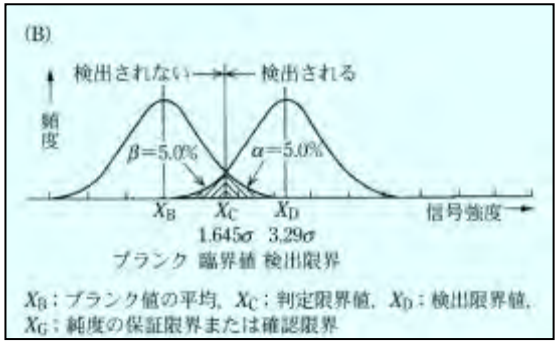


検出限界値

- 検出限界（下限）：信号として検出し得る最低量
- 定量下限：分析値として定量し得る最低量（数値の信頼性とともに決定）





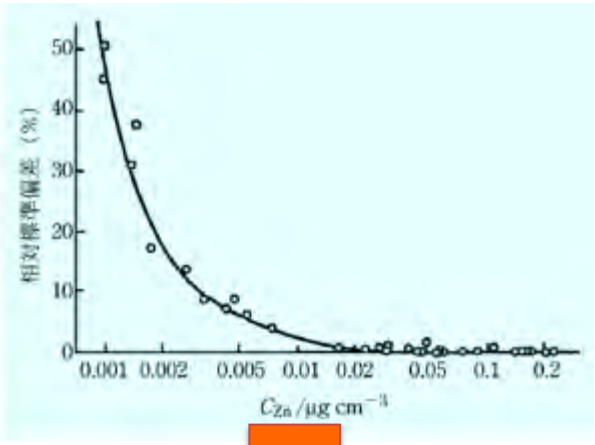


バックグラウンド（ブランク）の信号分布に対して，
検出限界は（平均+3σ）として定義

被測定物側の分布が考慮されない

- false positive (α): 0.14%
- false negative (β): 50% !!

Currieの考え方
「真の検出限界」：α=β
平均+3.29σ
（α=β=0.05のとき）



定量下限は求める精度によって変化
（実験的に求める）

	L_C	L_D	L_Q
試料とブランクの両者を観測	2.33 σ_B	4.65 σ_B	14.1 σ_B
ブランク単独を観測	1.64 σ_B	3.29 σ_B	10 σ_B

$\alpha=\beta=0.05$, $k_Q=10$, $\sigma=\sigma_B$（濃度によって変化せず一定），と仮定

近年ではCurrieの式に代わる新しい式がISOで導入されている。

上本道久，検出限界と定量下限の考え方，ぶんせき（2010）

検出限界値の計算例

- あるWBCにおいて，^{137}Cs（662 keV）の関心領域（ROI）のバックグラウンド計数が4600（測定時間20分間）であったとする。計数効率は0.006 (cps/Bq)であったとすると，3σ法でのMDA（Minimum Detectable Amount）は次のとおり計算される。

$$MDA = \frac{k}{2}\left\{\frac{k}{t_s} + \sqrt{\left(\frac{k}{t_s}\right)^2 + 4n_b\left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)}\right\} / K$$

$$= \frac{3}{2}\left\{\frac{3}{1200} + \sqrt{\left(\frac{3}{1200}\right)^2 + 4 \times \frac{4600}{1200} \times \left(\frac{1}{1200} + \frac{1}{1200}\right)}\right\} / 0.006 = \frac{0.24}{0.006} = 40Bq$$

ここで，n_bはバックグラウンド計数率，Kは計数効率，t_sは試料（被検者）の測定時間，t_sは試料（被検者）の測定時間，t_bはバックグラウンドの測定時間（t_sと同じとする），kは有意水準を決める定数（3σとするので3）である。

- 他方，CurrieでのMDAは次のとおり計算される。

$$MDA = \frac{4.65 \cdot s_b + 3}{KT} = \frac{4.65 \cdot \sqrt{4600} + 3}{0.006 \cdot 20 \cdot 60} = 44.2Bq$$

近年ではCurrieの式に代わる新しい式がISOで導入されている。

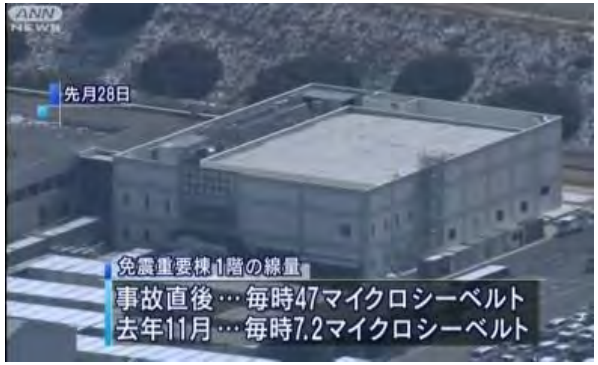
講義内容

- ホールボディカウンタ（WBC）とは
- WBCの測定系，測定ジオメトリ，校正など
- **東電福島第一原発事故におけるWBC測定の経験**
- 話題

事故初期における緊急作業従事者の放射線防護

資料R3-5-7

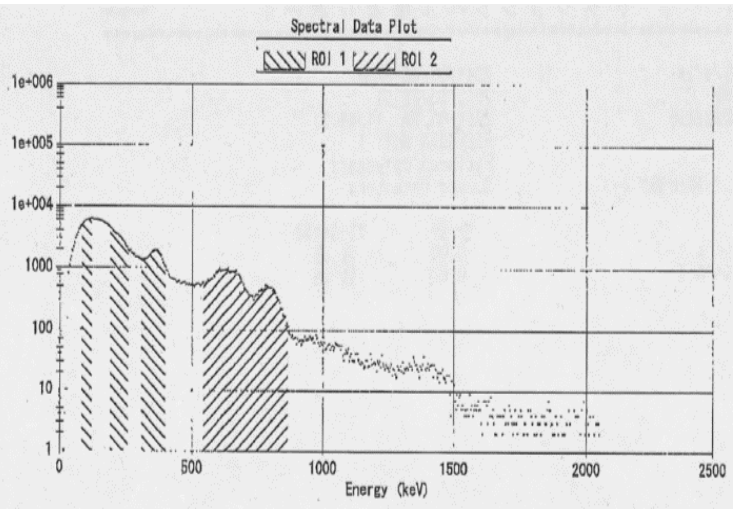
- **津波により個人線量計の大半が喪失**
  - ➡残った個人線量計を代表者が着用することで対応
- **敷地内の空間線量率の上昇により，ホールボディカウンタ（WBC）使用不可**
  - ➡小名浜での車載型WBCを用いた内部被ばく線量測定
  - ➡一部の作業者について原子力機構，放医研での詳細測定
- **個人被ばく線量管理**
  - ➡免振重要棟及び20km境界（Jビレッジ）での出入管理



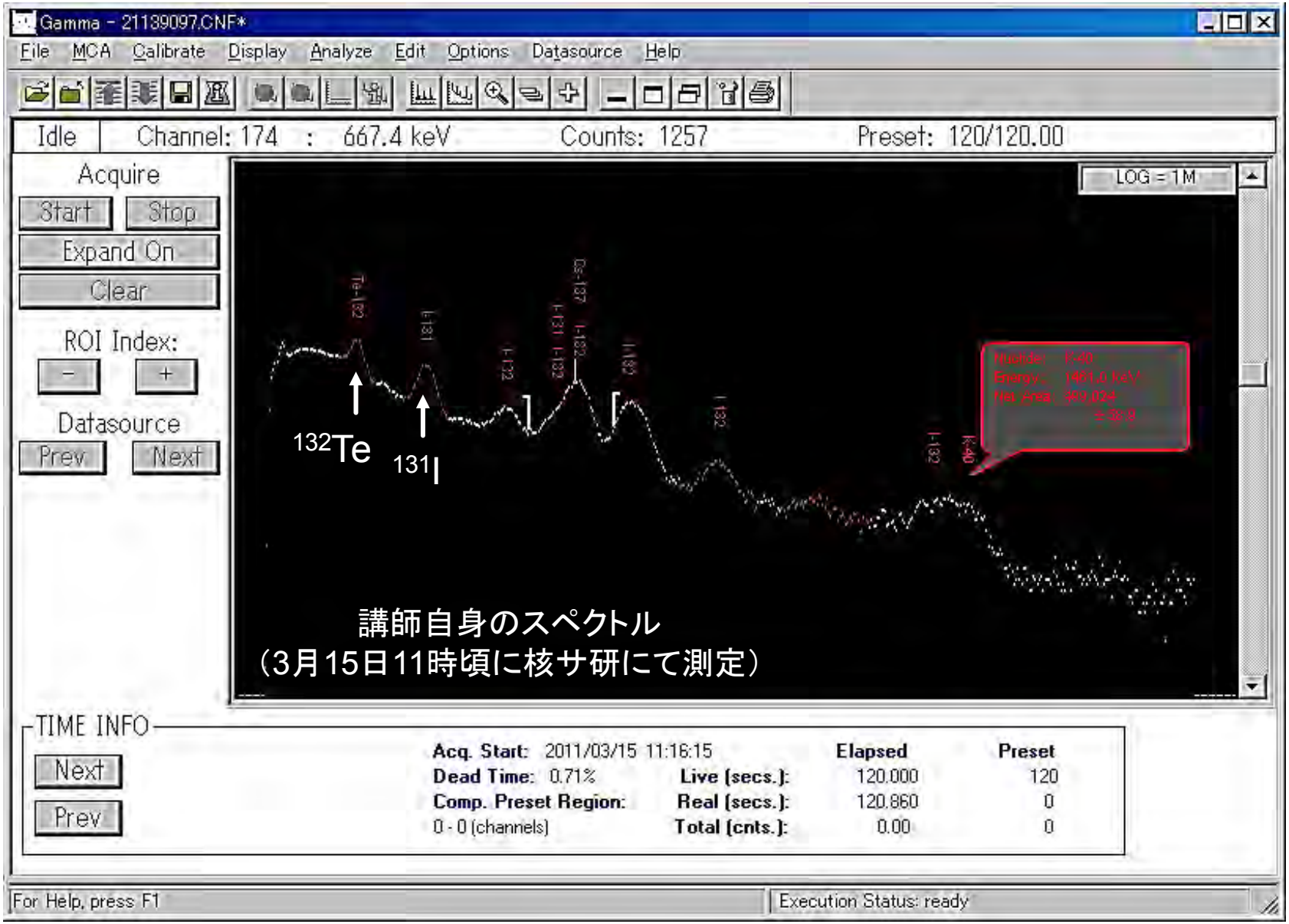
小名浜でのWBC測定

- 東電からの協力要請により，原子力機構は車載型WBCによる緊急作業者の内部被ばくモニタリングを3月22日から開始

- 検出核種：^{131}I，^{134}Cs，^{137}Cs（一部の被検者からは$^{132}Te/^{132}I$も検出）
- 見出された課題
  - NaI(Tl)検出器ではエネルギー分解能低く，複合ピークの解析困難
  - 除染しきれない身体汚染の影響
  - ヨウ素に対する校正が未実施
  - 測定能力をはるかに上回る多数の作業者（数千人）



事故初期の波高スペクトル（FASTSCAN）

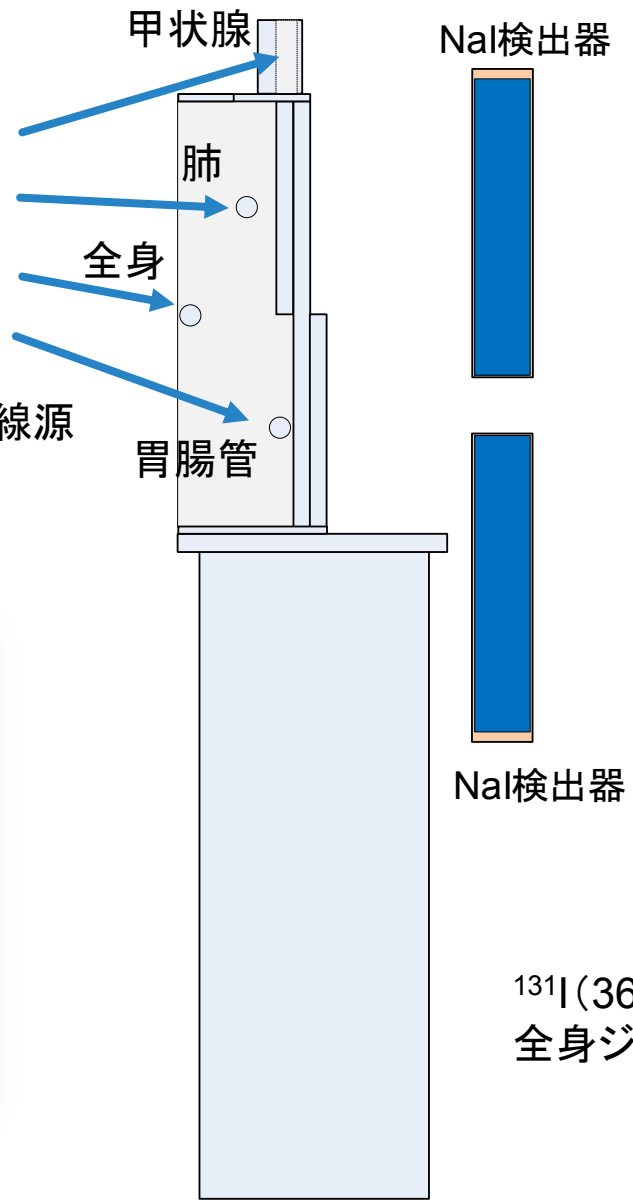


WBC（FASTSCAN）による甲状腺中^{131}I測定

資料R3-5-7

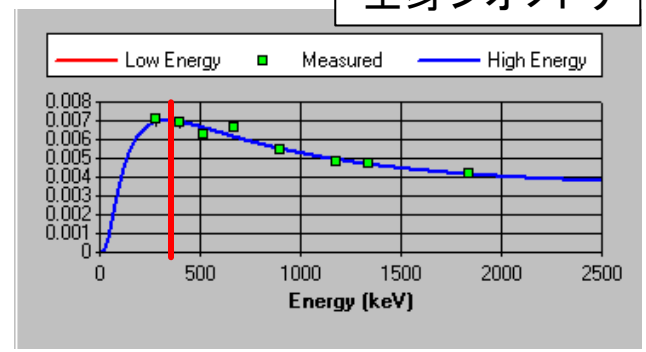
FASTSCAN™

バイヤル線源

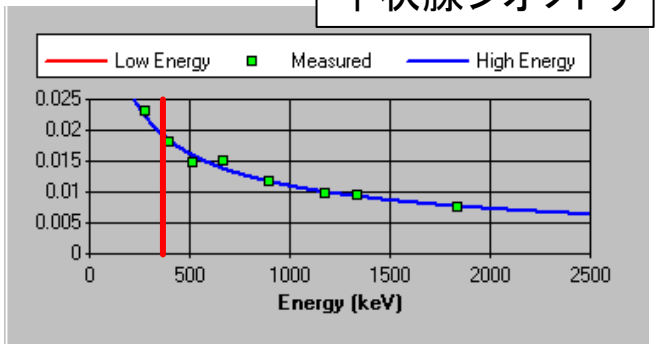


付属するTransfer Phantom
4つの測定ジオメトリに対する
校正を行える

全身ジオメトリ



甲状腺ジオメトリ



^{131}I（365keV）では，甲状腺ジオメトリの方が全身ジオメトリよりも効率が約3倍大きい。

緊急作業従事者の内部被ばく線量測定

原子力機構核サ研での詳細測定

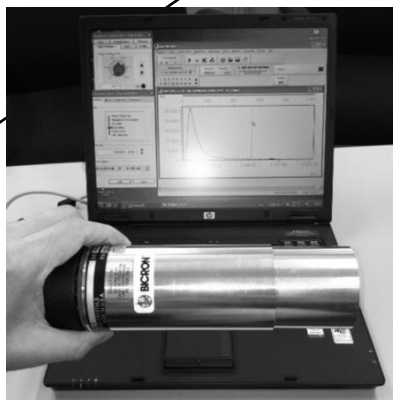
- 小名浜のWBC測定から，内部被ばく線量（預託実効線量）が20mSvを超過したおそれのある者が対象（線量寄与の高い^{131}Iを中心に測定）
- 鉄遮へい室内に設置されたWBCのHPGe検出器を利用→10分間測定で検出限界値は約10Bq
- 2011年4月20日から8月5日までに560名測定→内7名は放医研でも測定（実効線量の最大値は590mSv ※内部被ばくのみ）

Kurihara et al. J. Nucl. Sci. Technol. (2013)., Kurihara et al. NIRS-M-152 (2012).

原子力機構核サ研での内部被ばく線量測定（使用した装置）

精密型（椅子型）全身カウンタ

- Ge検出器（Canberra Inc., GC5021）2式搭載
- 鉄遮へい室（厚さ20cm）内に設置
- 用途：体内汚染時の精密検査
- 測定時間：10分間（1回）
- 頸部計測にも活用



NaI（Tl）スペクトロメータ

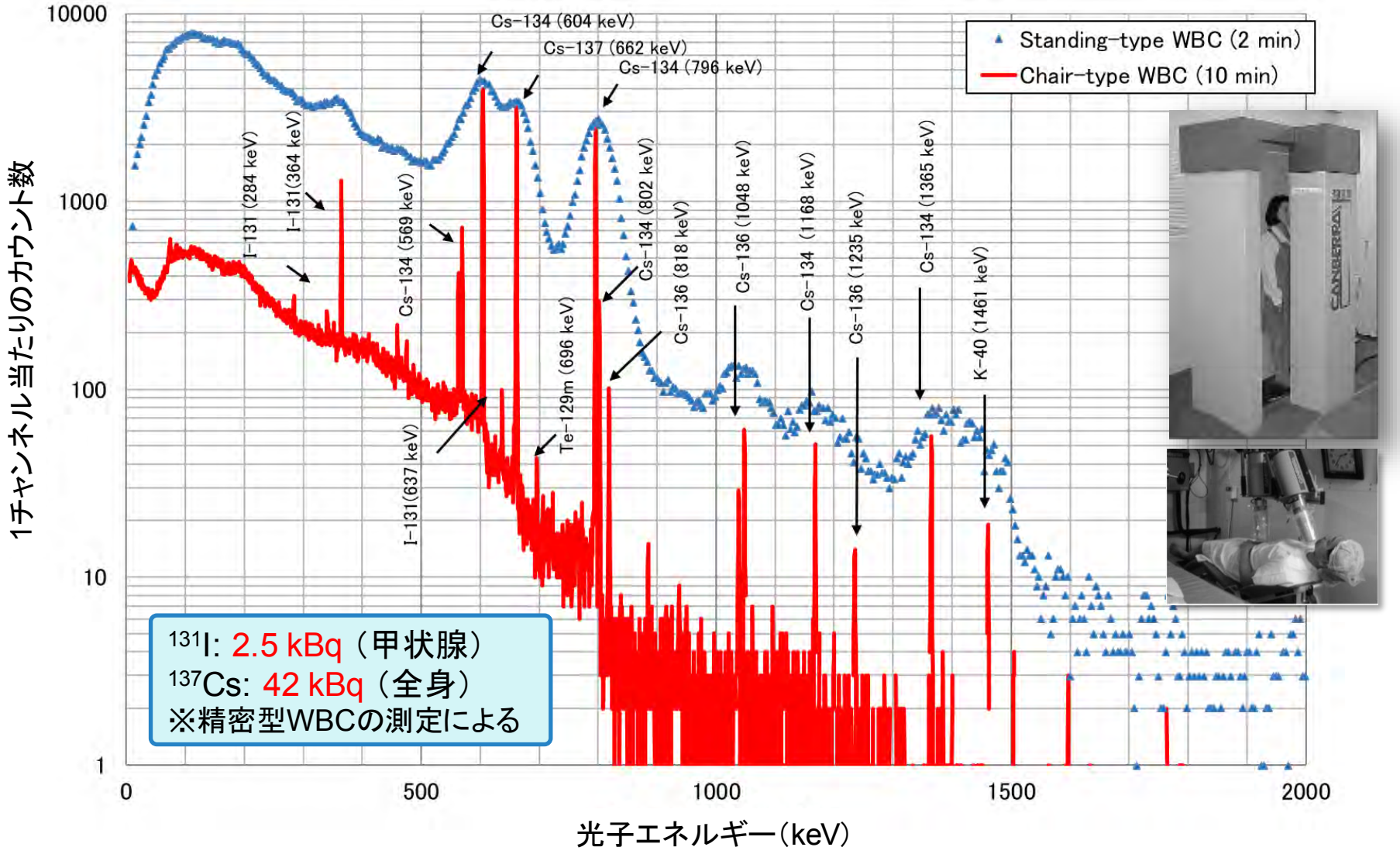
頸部計測及び他の身体計測に補完的に活用

簡易型全身カウンタ

- FASTSCAN® (Canberra Inc., US)
- シャドーシールド型遮へい（鉄材10cm）
- NaI(Tl) 検出器（12.7cm×7.6cm×40.6cm）2式搭載
- 車載型全身カウンタ搭載のものと同型機
- 測定時間：2分間 or 5分間

WBC測定から得られたガンマ線波高スペクトル

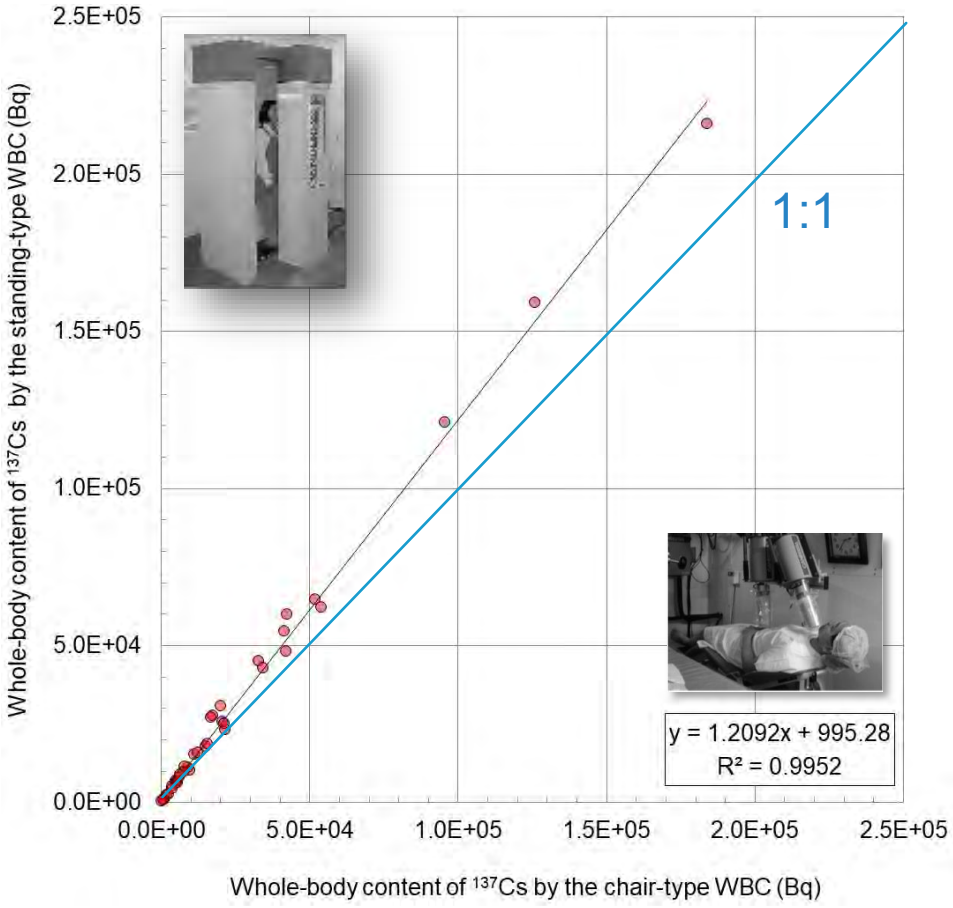
資料R3-5-7



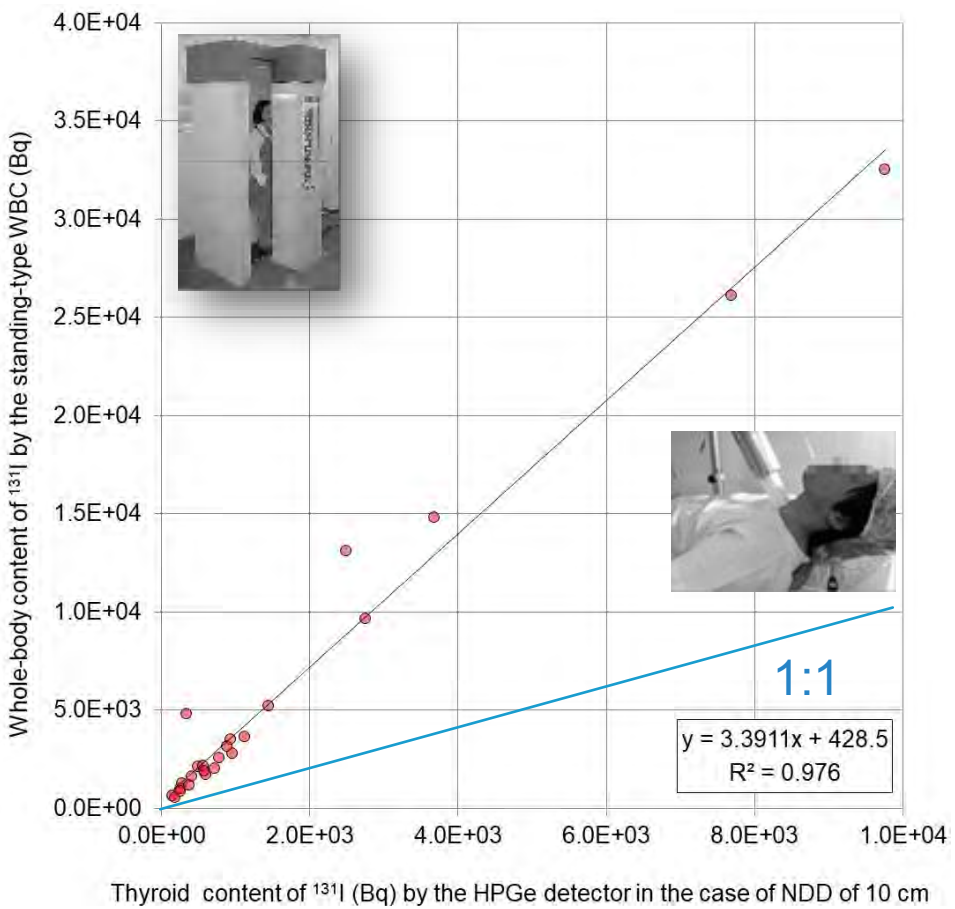
原子力機構・核サ研で測定した最初の緊急作業者のスペクトル（2011年4月20日）

Kurihara et al. NIRS-M-252 (2012) https://www.nirs.qst.go.jp/publication/irregular/02.html

立位型WBCと精密型WBCとの比較



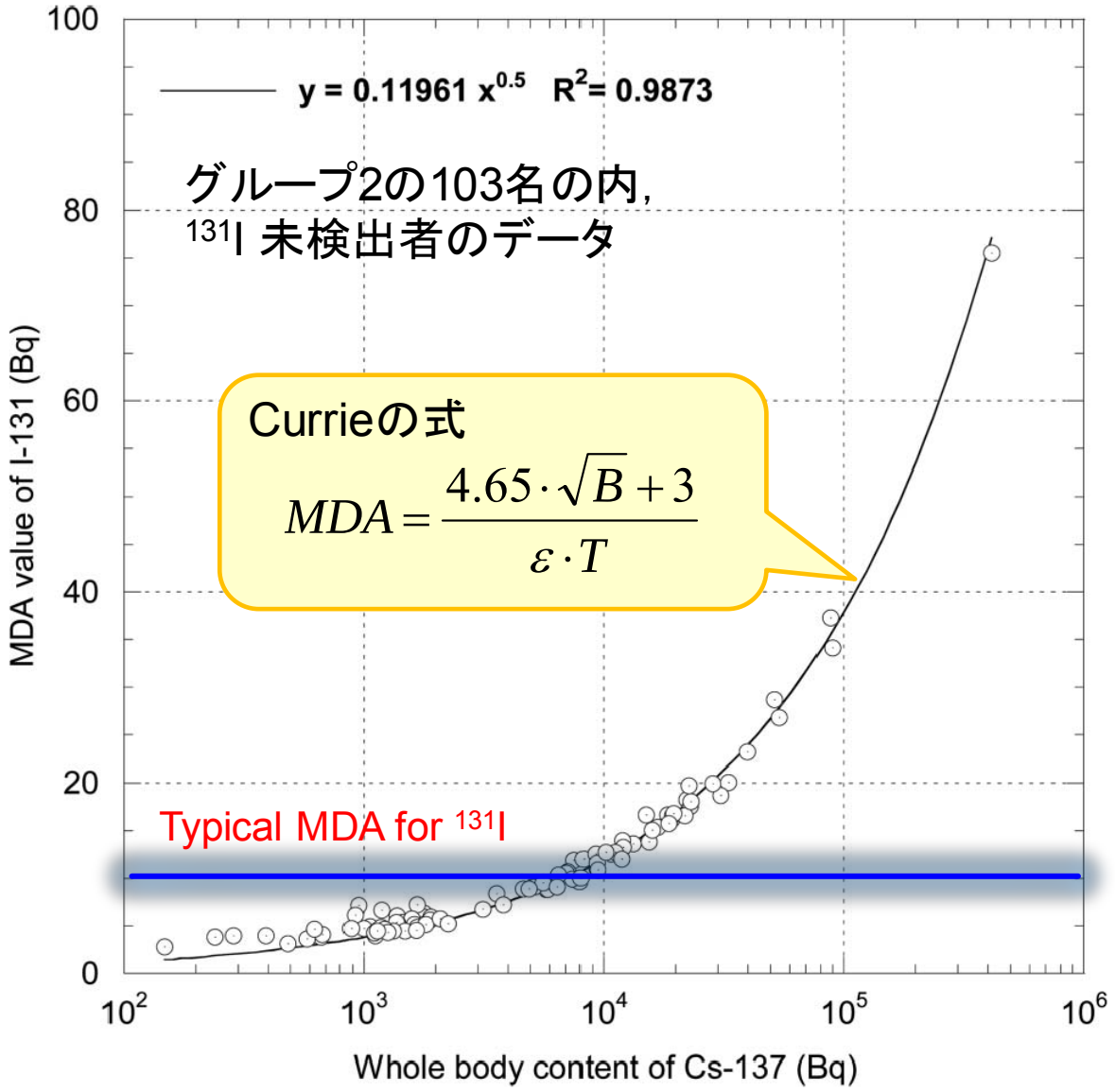
精密型WBCと立位型WBCによる
全身^{137}Cs残留量の比較
38名（グループ1）の測定値



精密型WBC（Det1）と立位型WBCによる
甲状腺中^{131}I残留量の比較
24名（グループ1）の測定値

立位型WBCの過大評価の理由は，
校正ジオメトリが全身分布のため

全身中セシウム量と甲状腺中ヨウ素検出下限値の関係

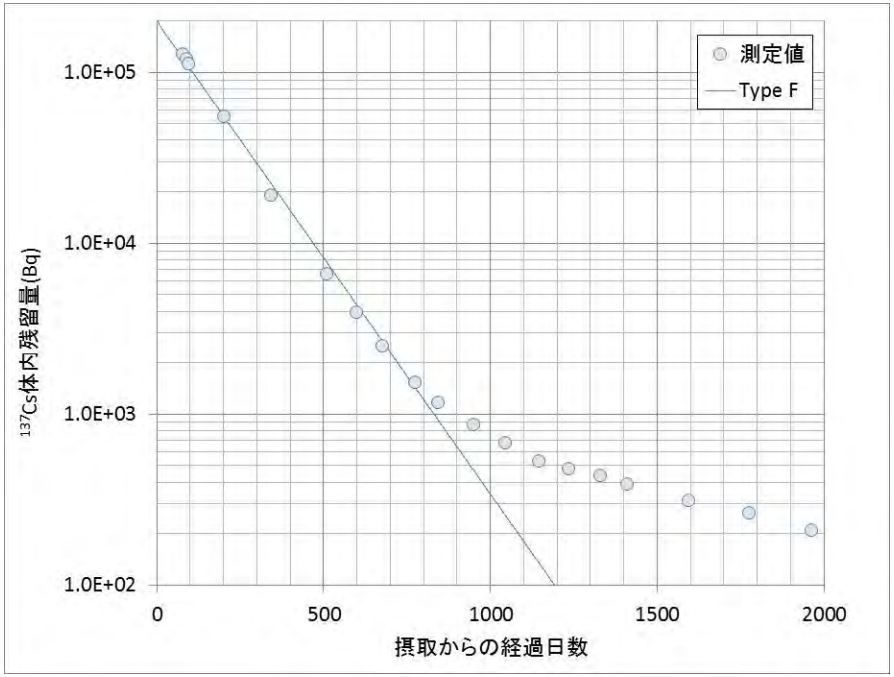


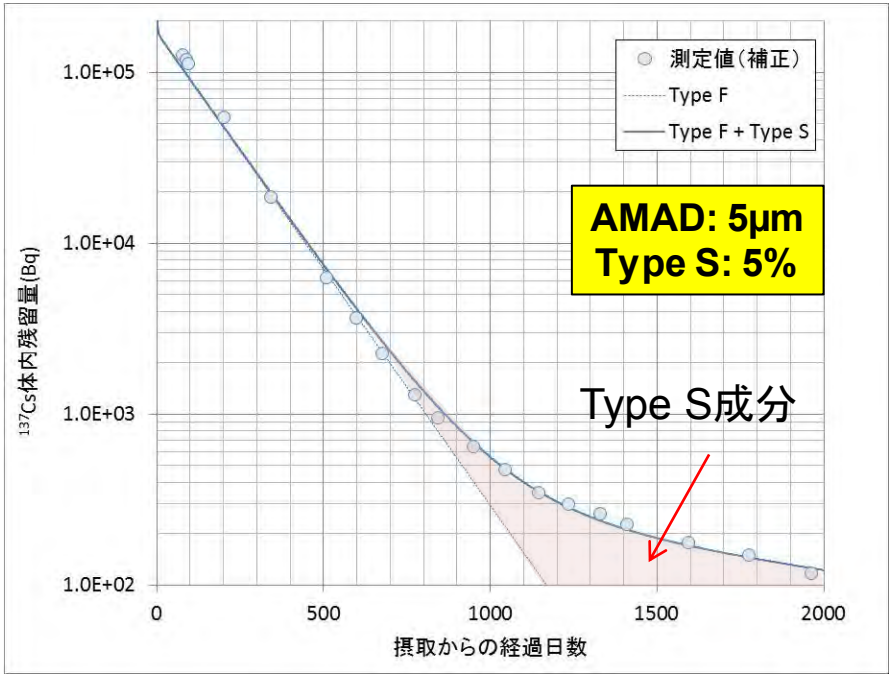
全身中セシウム量が多くなるほど甲状腺中^{131}Iの検出限界値は高くなる。

緊急作業員の長期間WBC測定

量研でフォローアップしている緊急作業員の体内放射性セシウムの解析

2年目以降からタイプFの吸入摂取を仮定した予測値からの乖離が顕著





※摂取日は3月11日を設定

吸収の早い分画と遅い分画の2成分の摂取を示唆
（タイプSの摂取量の割合は概ね全体の1割未満）

Nakano et al. Radiat. Prot. Dosim. (2016).

福島第一原発事故に伴う住民を対象としたWBC検査

資料R3-5-7

福島県民の内部被ばく調査のために多くの
WBCが導入（福島県下で約50台）

※詳細は保健物理学会専門研究会報告書（2016）

ひらた中央病院

車載型全身カウンタによる出張測定

南相馬市立総合病院

福島県立医科大学

本宮市

福島第一原発事故に伴う住民を対象としたWBC検査（QST）

①聞き取り及び事前説明（約15分）

・いつ、どこにいたか、露地物、自家栽培作物の摂取の有無等の聞き取り
・検査の概要説明

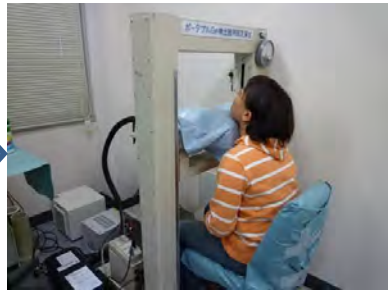
②体表面汚染の検査（約5分）

・汚染があると検査に影響があるため、体表面に汚染がないかを検査
・汚染があれば、除染や衣類の着替え

③WBCによる検査（3分～5分）

・体内に取り込まれた放射性物質の種類と量を測定

④甲状腺モニタによる検査（3分）



・甲状腺に集積した放射性物質を測定

⑤摂取シナリオの推定（数十分から数日）

・摂取状況の推定等を踏まえ、放射性物質の性状や摂取経路など様々な仮定をする時間が必要。
・場合によっては、再度聞き取りの時間も必要

③、④の他に以下の作業が必要

- **位置決め等調整（毎回約20分）**
- **BGの測定**
  午前中、終了前の2回（各約60分）
- **解析結果の確認（データの入力、保存、出力等）（毎回20～30分）**

⑥測定結果から線量計算（3分）

・シナリオに基づいて、数値をMONDAL3に入力し、線量計算

⑦医師による説明（約15分）

・評価結果に関する説明

★注意事項
・WBCは全国に数十台あるものの，検出器の種類やその配置（立て型やベッド型など），検出効率など，それぞれ特徴がある。
・それぞれの結果については，丁寧に説明しないと誤解を生じかねない (他施設のWBCの生データと比較されると誤解される可能性がある)。
・検査結果から被ばく線量を算出するためには、摂取状況の推定等を踏まえ、放射性物質の性状や摂取経路等、様々な仮定を行う必要がある。
・このため，線量評価は慎重に対処せざるを得ず，医師からの説明等とあわせて評価結果を開示するのが望ましい。
・放医研は，WBCや甲状腺モニタによる検査等から預託実効線量の評価等の計算を支援するためのプログラム「MONDAL3」を公開し，希望する研究者・実務者にも提供している。

福島第一原発事故に伴う住民を対象としたWBC検査（JAEA）

検査受付

9AM~11AM

検査内容の説明

9AM~11AM

白衣への更衣
(2012/1/1~)

検査1
（身体サーベイ）

10AM~1PM

検査2
（WBC検査）

3台のWBCを
用いて最大
150人/日

10AM~2PM

検査結果の説明

1PM~3PM

被検者は福島県が選定
県が手配した観光バスまたは自家用車でJAEAに来訪

2012年2月1日から摂取シナリオの変更
日常生活から受ける摂取（連続経口摂取）

線量評価

※放射性プルームによる内部被ばくを仮定（3月12日の単一吸入摂取）。10月1日以降，8歳未満の子供の線量評価は，同伴者の結果を参考に推定。

WBC測定結果の説明

資料R3-5-7

平成　　年　　月　　日

検　査　結　果

検査実施機関：(独) 放射線医学総合研究所

氏　名：　　様　(職・称　　年　　月　　日生、男　女)

検査日：　　平成　　年　　月　　日

検査結果：

1) 体表面検査　　体表面汚染の有無：　　有 (　　cpm)・無

2) 甲状腺部検査　　甲状腺部残留 I-131 の有無：　有 (　　Bq)・無
(I-131：放射性ヨウ素)

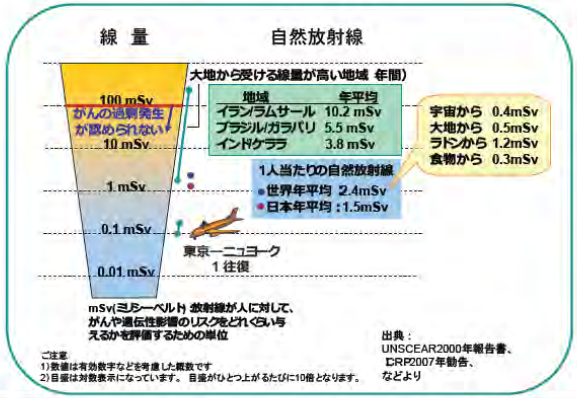
3) 全身検査

測定器	測定時 (秒)	核種	測定値 (Bq)	預託実効線量(mSv)[注1),2)]
ﾍﾟｯﾄﾞ型ﾎｰﾙ ﾎﾞﾃﾞｨｶｳﾝﾀ(WBC)		Cs-134		
		Cs-137		

(Cs-134, Cs-137：放射性セシウム)

4) 尿検査

測定器	測定時 (秒)	核種	測定値(Bq/cm³)
遮蔽体付き ｶﾞﾝﾏ線測定器		I-131	
		Cs-134	
		Cs-137	



今回の検査の結果、あなたの体内にある放射性物質から、概ね一生の間に受けると思われる線量[注1,2)]は、

と推定しました。

注1)　成人では 50 年間、子供では 70 歳までに体内から受けると思われる内部被ばく線量を表す

注2)　線量推定においては、線量が最大となる摂取条件 (3 月 12 日に全量を吸入摂取) で推定

裏面に検査結果の見方と解説を示します。裏面もご覧下さい。

-検査結果の見方-

1) 体表面検査
- 体の表面に放射性物質が付着しているか、どのくらいかを調べる検査
- 測定値の単位：シーピーエム (cpm) で 1 分間当たりのカウント数を表す

2) 甲状腺部検査
- 甲状腺部に放射性ヨウ素が残留しているか、どのくらいかを調べる検査
- 測定値の単位：ベクレル (Bq) で放射性物質の量を表す

参考：今回の検査における検出限界　I-131：38 Bq

3) 全身検査　(ホールボディカウンターWBC)
- 体内に放射性物質が残留しているか、どのくらいかを調べる検査
- 測定値の単位：ベクレル (Bq) で放射性物質の量を表す
- 線量の単位：シーベルト (Sv) で 放射線による人体への影響の度合いを表す
ミリシーベルト (mSv) はシーベルト (Sv) の 1000 分の 1

参考：今回の検査における検出限界　Cs-134：320 Bq、Cs-137：570 Bq
参考：1mSv に相当する放射能量 (検査日：　6 月 27 日時点)
成人の場合　Cs-134:約 21,000 Bq、Cs-137:約 33,000 Bq

4) 尿検査
- 尿中に放射性物質が排出しているか、どのくらいかを調べる検査
- 測定値の単位：　ベクレル (Bq/cm³) で尿 1 cm³ 当たりの放射性物質の量を表す

参考：今回の検査における検出限界　I-131：0.008 Bq/cm³、Cs-134：0.013 Bq/cm³、Cs-137：0.013 Bq/cm³

放射線量とがん

低線量放射線の人体への影響については必ずしも全てが解明されている訳ではありませんが、安全側で評価するために、低い線量でも影響があると考える場合があります。この考え方に基づいた場合、がんのリスクは広島、長崎の被爆者を含めた今までの結果から、100 ミリシーベルトの被ばくでは 0.5%のリスクが増加するとされています。しかし、実際には 100 ミリシーベルトを超えなければ、がんの増加は認められていません。なお、外部被ばくでも、内部被ばくでも、線量が同じならばリスクは同じと考えます。

講義内容

- ホールボディカウンタ（WBC）とは
- WBCの測定系，測定ジオメトリ，校正など
- 東電福島第一原発事故におけるWBC測定の経験
- **話題**

新棟ー高度被ばく医療線量評価棟

建屋構造

- 地上4階RC構造
- 地上高：約20m
- 敷地面積：約640m^2
- 延床面積：約2,550m^2

階別の主要用途

1階：体外計測，放射線管理
2階：バイオアッセイエリア（1）
3階：バイオアッセイエリア（2）
4階：空調機械室

施設整備事業の内容と必要性*

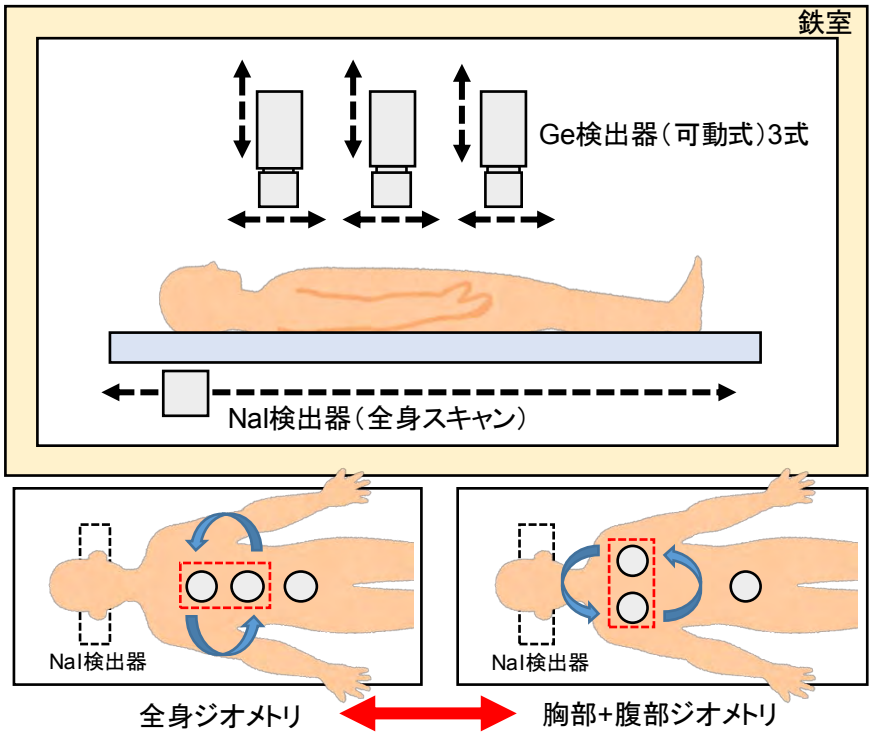
➢ 国内の原子力災害医療機能を維持するため，被ばく線量評価等の実施施設として基幹部を整備するもの。量子科学技術研究開発機構（量研）は，これまでに我が国の被ばく医療において最も実績があり，高度被ばく医療支援センターとして，高度専門的な診療及び支援並びに高度専門研究による人材育成とそれらの高度化等の活動を行っているが，量研の被ばく医療関連施設は老朽化が進み，維持管理も難しく，保守不可能となる施設もあることから，この活動を継続するため，新たに同等の機能を有する施設を整備することが必須となっている。

*平成30年度原子力災害対策事業費補助金（原子力災害医療実効性確保事業）交付申請書から抜粋

統合型体外計測装置

別建屋に設置の精密型WBCと肺モニタの機能を統合

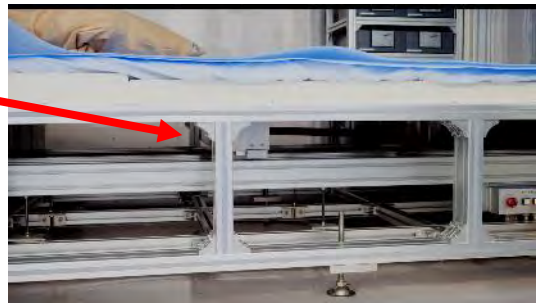
統合型体外計測装置（設計概念図）



電気冷却式・広エネルギー帯域型の大口径Ge検出器を3式使用。検出器の内2式は肺モニタとしてのアレンジメントが可能。被検者用ベッドの下には全身スキャン機構を備えた大型NaI検出器を設置。メンテナンス性に優れ，高精度な体外計測を行うことが可能。

スキャン測定

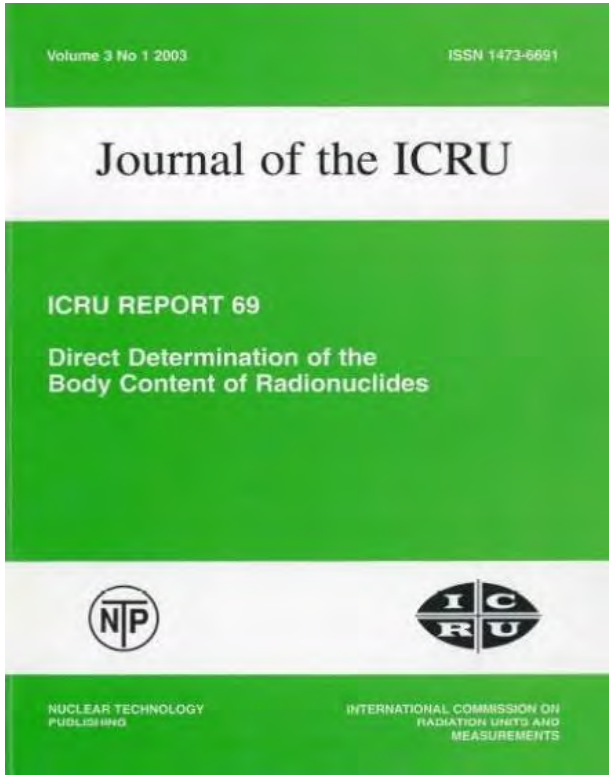
ベッド下に設置したNaI(Tl)検出器が体軸方向にスキャンし，体内分布を測定



まとめ

- ホールボディカウンタ（WBC）は対象核種の全身中の放射能を定量する装置－優れたWBCは，その検出感度が核種の体内分布に影響を受けにくいが，**様々な体内分布に対する応答を評価**することが重要
- 福島第一原発事故対応の教訓として，
  - **体内動態の異なる複数核種**の測定（^{131}I, ^{132}Te/^{132}I, ^{134}Cs, ^{137}Cs など）
  - 成人から子供まで**幅広い年齢・体格の被検者**の測定
  - **大多数モニタリング（population monitoring）**の方法

参考文献



ICRU Report 69 (2003)

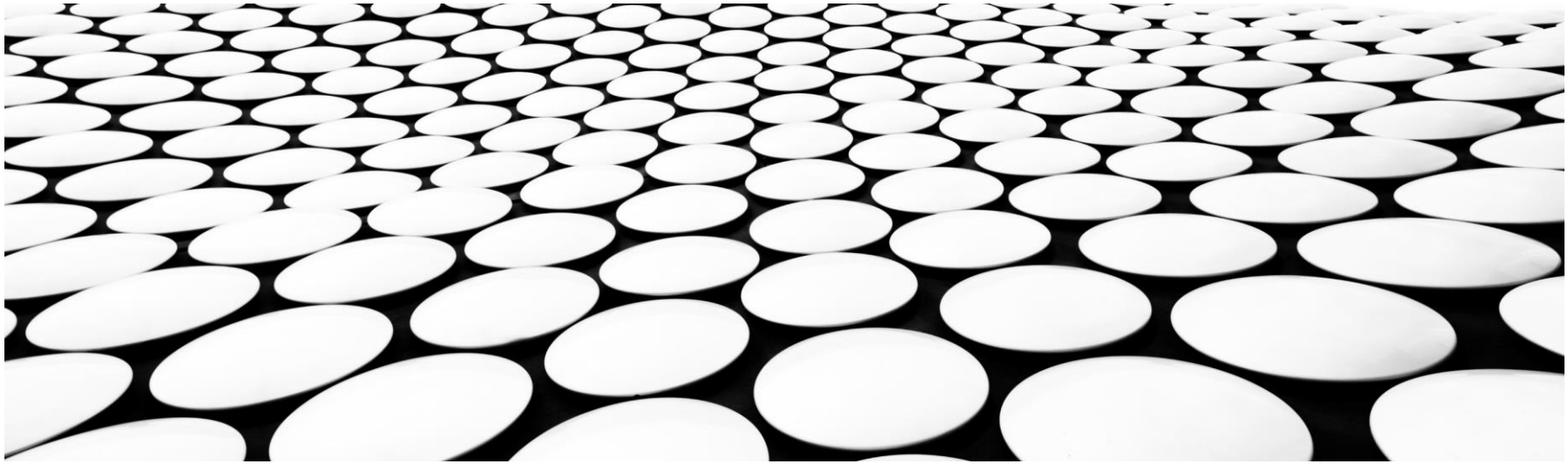
1. Introduction
2. Application
3. Detectors and Electronics
4. Reduction of Background Radiation
5. Measurement Geometry
6. Calibration Technique
7. Data Analysis
8. Quality Assurance
9. Summary and Recommendations

- Toohey ed. “Current status of whole-body counting as a means to detect and quantify previous exposure to radioactive materials” Health Phys. 60, suppl.1, 7–42 (1991).
- Kurihara et al. Experiences of population monitoring using whole-body counters in response to the Fukushima nuclear accident. Health Phys. 115, 259–264 (2018).

令和3年12月3日（金）

令和3年度原子力施設等防災対策事業補助金
（原子力災害等医療実効性確保事業）
第1回　体外計測研修

甲状腺モニタを用いた体外計測



講師　栗原　治（量子科学技術研究開発機構）

講義内容

- 放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばくと線量評価モデル
- 甲状腺中ヨウ素の測定と線量評価
- 東電福島第一原発事故における甲状腺測定の経験
- 話題

※本講義ではヨウ素は特に断りが無い場合はヨウ素-131（^{131}I）をさす。

講義内容

- 放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばくと線量評価モデル
- 甲状腺中ヨウ素の測定と線量評価
- 東電福島第一原発事故における甲状腺測定の経験
- 話題

甲状腺とは

前頸部の喉頭下部から気管上部の高さに存在する内分泌腺

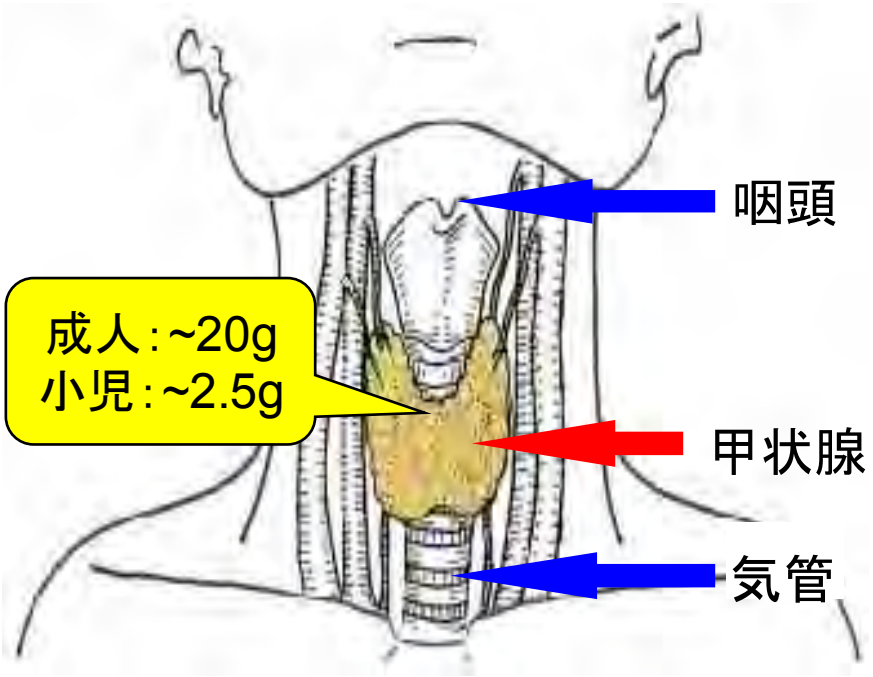
甲状腺ホルモン

- サイロキシン（T_4）とトリヨードサイロニン（T_3）の2種
- ヨウ素を含有したアミノ酸の一種

＜作用＞

1. 幼児期の成長と成熟の促進
2. 糖蛋白質、核酸、脂質の代謝促進
3. 酸素消費と熱産生の促進

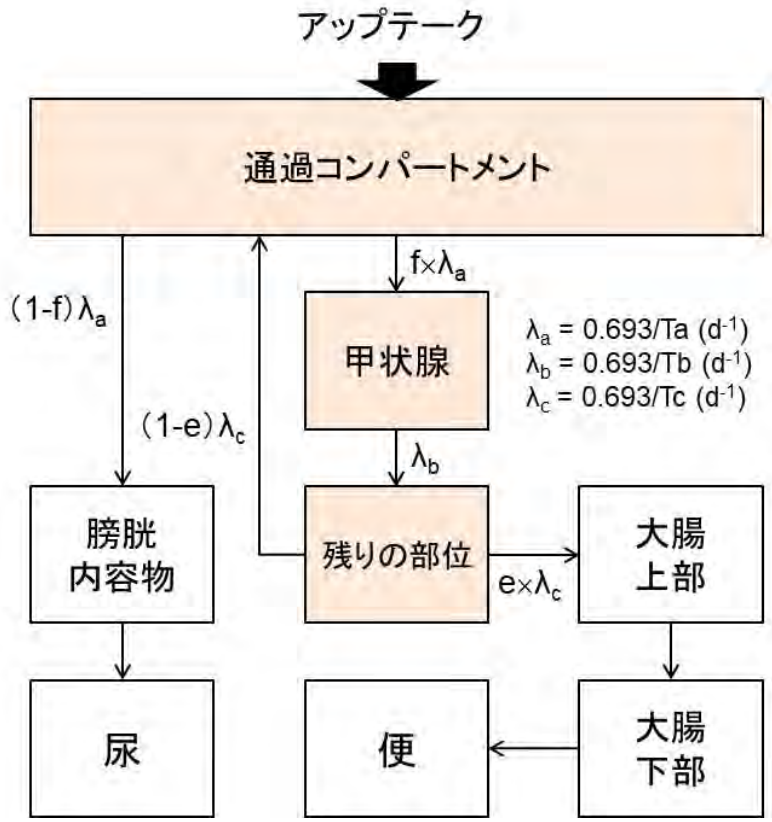
（医学書院 医学大辞典 第1版2003.3.1）



放射性ヨウ素も安定ヨウ素と区別なく甲状腺に取り込まれる!!

ヨウ素の体内動態

ICRP Publ.56



年齢区分	f_1	甲状腺 f_a(%)	便排泄 e(%)	血液 T_a(d)	甲状腺 T_b(d)	残り臓器 T_c(d)
3 mo	1	30	20	0.25	11.2	1.12
1-y	1	30	20	0.25	15	1.5
5-y	1	30	20	0.25	23	2.3
10-y	1	30	20	0.25	58	5.8
15-y	1	30	20	0.25	67	6.7
Adult	1*	30*	20	0.25*	80*	12*

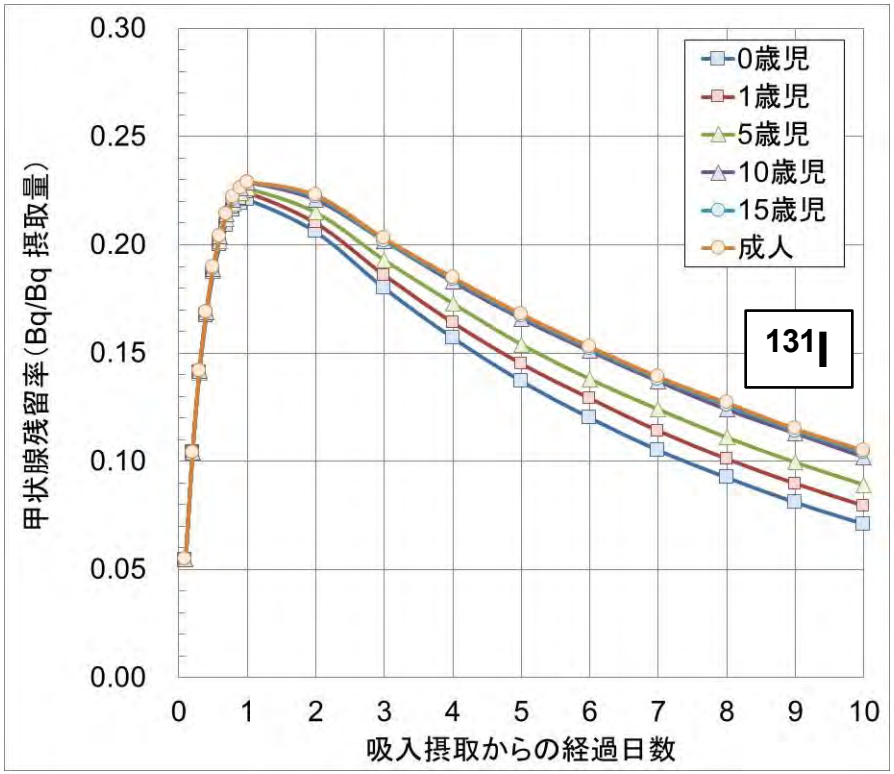
ICRP Publ.30

血中のヨウ素から甲状腺へのアップテークは，ICRPモデルでは30%に設定されているが，日本人被検者の調査では15~20%の範囲を示すものが多い。

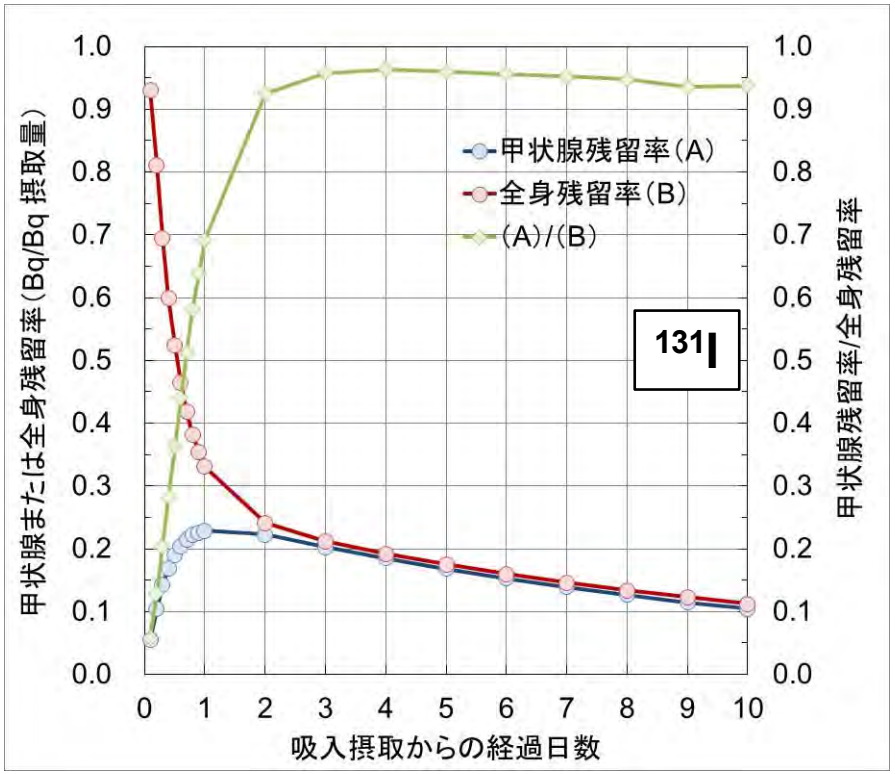
インテーク（intake）とアップテーク（uptake） IAEA Safety Report Series No.37

インテークとは吸入，経口，経皮により放射性核種が体内に取り込まれる行為またはプロセス。さらには，ある事象の結果として，ある時間に体内に取り込まれた放射性核種の放射能（摂取量）を意味する。
アップテークとは呼吸器官，消化器官から，あるいは経皮から放射性核種が体液（主に血液）に入るプロセス，または，これらのプロセスによって体液に入るインテーク（摂取量）の割合。

ヨウ素の体内動態



各年齢群の甲状腺残留率
（化学形は元素状ヨウ素）



甲状腺残留率と全身残留率の比較（成人）
（化学形は元素状ヨウ素）

ヨウ素の甲状腺残留量が最大になるのは吸入摂取から1日後
甲状腺中ヨウ素の測定は摂取から数日後以降が良い（緊急性のある場合を除き）

（参考）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

○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

昭和51年９月28日
原子力委員会決定

一部改訂　平成元年３月27日　原子力安全委員会
平成13年３月29日　原子力安全委員会

Ⅰ．目的

この指針は、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」に基づき、原子炉施設の基本的設計段階における平常運転時の原子炉施設周辺の線量を評価するため、放射性物質の放出量とそれによる線量の評価に使用する標準的な計算モデルとパラメータ等を定めたものである。

本指針で用いた計算モデルとパラメータは、現在における知識と経験をもとに現実的観点にたって定めたものであり、新たな知見、運転経験の蓄積等に応じて見直されるべきものである。

また、本指針以外の計算モデルとパラメータを用いる場合があっても、十分な根拠があれば、その使用は認められるものである。

Ⅱ．線量評価の範囲

１．評価の対象

(1)　外部被ばく及び吸入摂取による実効線量の評価は、原子炉施設周辺でそれぞれ最大の被ばくを与える地点に居住する人を対象とする。

(2)　食物摂取による実効線量の評価は、現実に存在する被ばく経路について、集落における各年令グループの食生活の態様等が標準的である人を対象として行うものとする。

２．被ばく経路

(1)　放射性希ガスからのガンマ線による実効線量は、放出源から拡散移動する放射性雲のガンマ線からの外部被ばくによる実効線量を求めるものとする。

(2)　液体廃棄物中の放射性物質に起因する実効線量は、放射性物質を含む海産物の摂取に伴う内部被ばくによる実効線量を求めるものとする。

(3)　気体廃棄物中に含まれる放射性よう素に起因する実効線量は、吸入摂取、葉菜摂取及び牛乳摂取に伴う内部被ばくによる実効線量を求めるものとする。

Ⅲ．放出放射性物質の発生源の計算

放出放射性物質の発生源の計算は、放射性物質処理系等の機能及び性能を考慮して、排気口及び排水口から環境に放出される放射性物質の量を求めるものとする。

発生源の計算にあたっては、気体状で挙動する放射性物質については、核分裂生成物で

第１表　正常日本人のfwに関する主な文献調査結果

報　告　書	被検者（例数　年令）	fw　測　定　値[*1]	備　　考
中　島 （千葉大） （1959）	85例 （3～10才） （小　児）	22.3%（24.07～20.57）[*2] 男 23.7%（26.61～20.93） 女 20.9%（23.07～18.81） 6才以下 25.7% （28.35～23.05） 6才以上 20.8% （22.81～17.79）	(1) 成人との有意差なし (2) 性による有意差なし (3) 6才以下と以上は、1%の危険率で有意差あり
中　村 （松江市立H） （1966）	31例 （成　人）	20.5%（4.8～43.2）	
中　村 （鳥取大） （1965）	47例 （成　人）	11.7%（2.8～29.8）	
久　保 （東邦大） （1958）	31例 （小　児）	24.6±8.3%	(1) 年令差なし
越　山 （京都大） （1962）	81例 男 48 女 33 （成　人）	10～49才（51例）17.3±1.5% 50～79才（30例）18.5±3.6%	(1) 年令差なし (2) 性差なし
岡　田 （太田H） （1961）	80例 （3～14才） 小児	23.2%	
木　下 （大久保H） （1966）	400例 男 78 女322 （10才以上）	20.7±8.3% （1.0～55.4）	(1) 性差なし (2) 年令差なし (3) 季節差なし

*1　投与24時間後の甲状腺のI-131のとりこみ割合

*2　信頼限度（%）

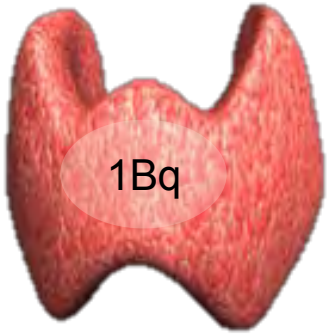
内部被ばく線量係数

吸入摂取による線量係数（単位摂取量Bqあたりのmsv）

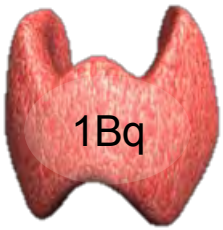
核種	評価対象	乳児	1歳児	5歳児	10歳児	15歳児	成人
^{134}Cs	全身	1.1E-05	7.3E-06	5.2E-06	5.3E-06	6.3E-06	6.6E-06
^{137}Cs	全身	8.8E-06	5.4E-06	3.6E-06	3.7E-06	4.4E-06	4.6E-06
^{131}I	全身	1.7E-04	1.6E-04	9.4E-05	4.8E-05	3.1E-05	2.0E-05
	甲状腺	3.3E-03	3.2E-03	1.9E-03	9.5E-04	6.2E-04	3.9E-04

※吸収タイプはいずれもタイプF，^{131}Iの化学形は元素状ヨウ素の数値を引用（ICRP Publ.71）

同じ1Bqの^{131}Iが甲状腺に存在した場合…



吸収線量：小さい



吸収線量：大きい

$$\text{吸収線量} = \frac{\text{吸収エネルギー}}{\text{被吸収体の重量}}$$

標準人モデル上の甲状腺重量は，
1歳児が1.78g，成人が20g

β線のエネルギーはほぼ
全て甲状腺に付与される

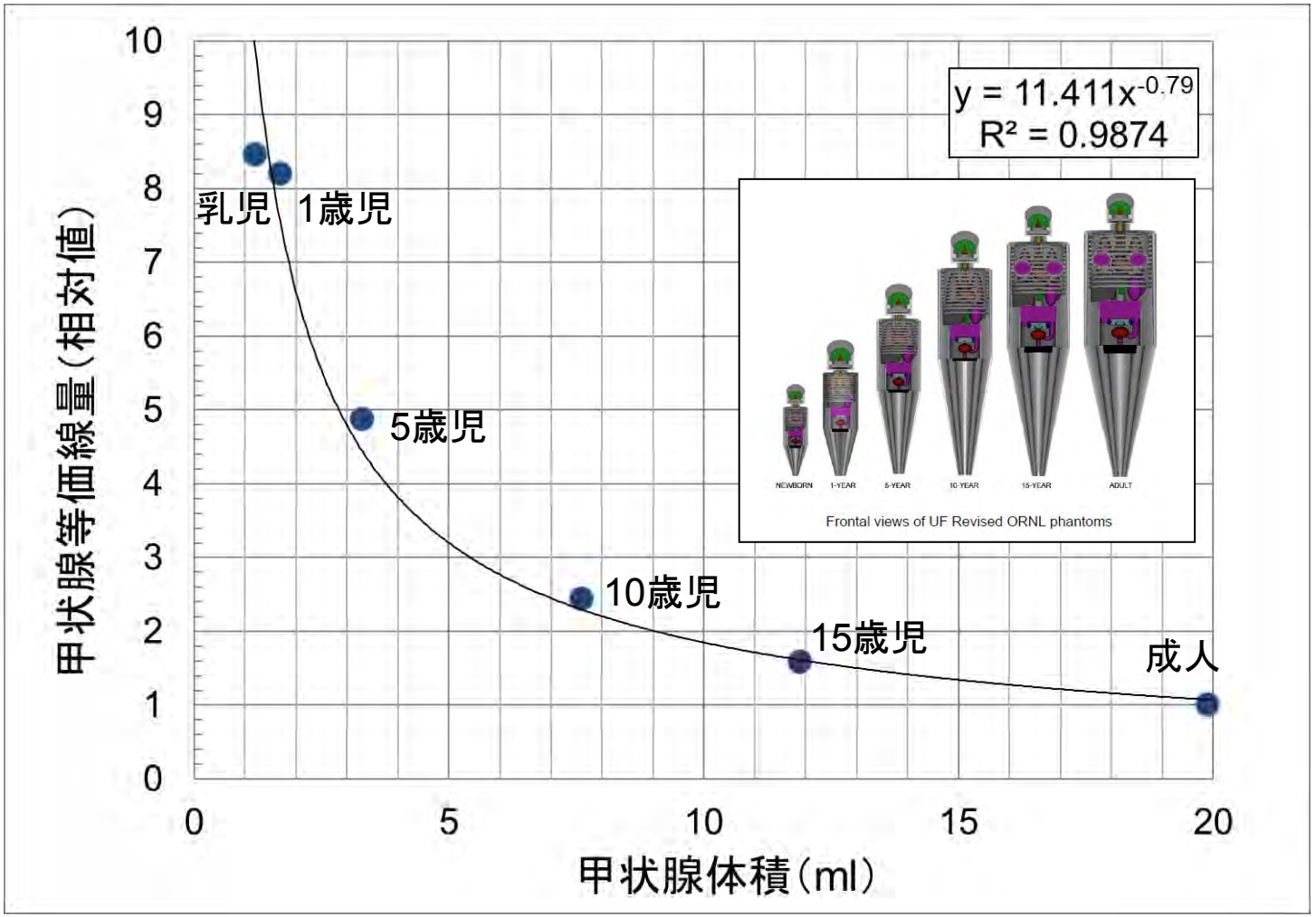
ICRP線量評価モデルは，人体ファントムの甲状腺体積の年齢変化を考慮することにより，線量係数の年齢依存を表現

甲状腺等価線量係数と甲状腺体積の関係

資料R3-5-7

評価対象	乳児	1歳児	5歳児	10歳児	15歳児	成人
甲状腺体積(ml)	1.24	1.71	3.32	7.62	11.9	19.9

ORNL/TM-8381/V1



甲状腺重量の地域による違い

ICRP Publ.89

Table 11.3. Comparison of median values for mass of the thyroid gland (g) in children in countries or regions with suspected iodine insufficiency with those having an iodine sufficiency. Results are based on sonographic measurements

Dietary iodine	Country or region	Mass (g)[a]	
		5 years	10 years
Iodine sufficiency	Europe[b]	1.6	2.9
	Malaysia[c]	–	3.3
	Switzerland[d]	2.3	3.8
	USA[e]	–	4.3
	WHO and ICCIDD[f]	2.4	3.4
Iodine insufficiency suspected	Belarus (Gomel)[g]	3.1	6.6
	Belarus (Mogilev)[g]	4.8	7.4
	Russia (Bryansk)[g]	4.1	8.5
	Ukraine (Kiev)[g]	6.8	9.3
	Ukraine (Zhitomir)[g]	4.4	5.7

安定ヨウ素摂取の多い地域

安定ヨウ素摂取の少ない地域

[a] The thyroid mass, in grammes, is taken to be numerically equal to the measured thyroid volume, in cm^3.

[b] Guntekust and Martin-Teichert (1993).

[c] Foo et al. (1999).

[d] Hess and Zimmerman (2000).

[e] Xu et al. (1999).

[f] Zimmerman et al. (2001). Corrected values.

[g] Yamashita and Shibata (1997). Values for boys only.

西洋人の日常生活からの安定ヨウ素の1日当たりの摂取量は数百mgに対し，日本人は1000-3000 mg 【Zeva and Zeva. Thyroid Res. (2011)】

新しいヨウ素体内動態モデル（ICRP Publ.136）

資料R3-5-7

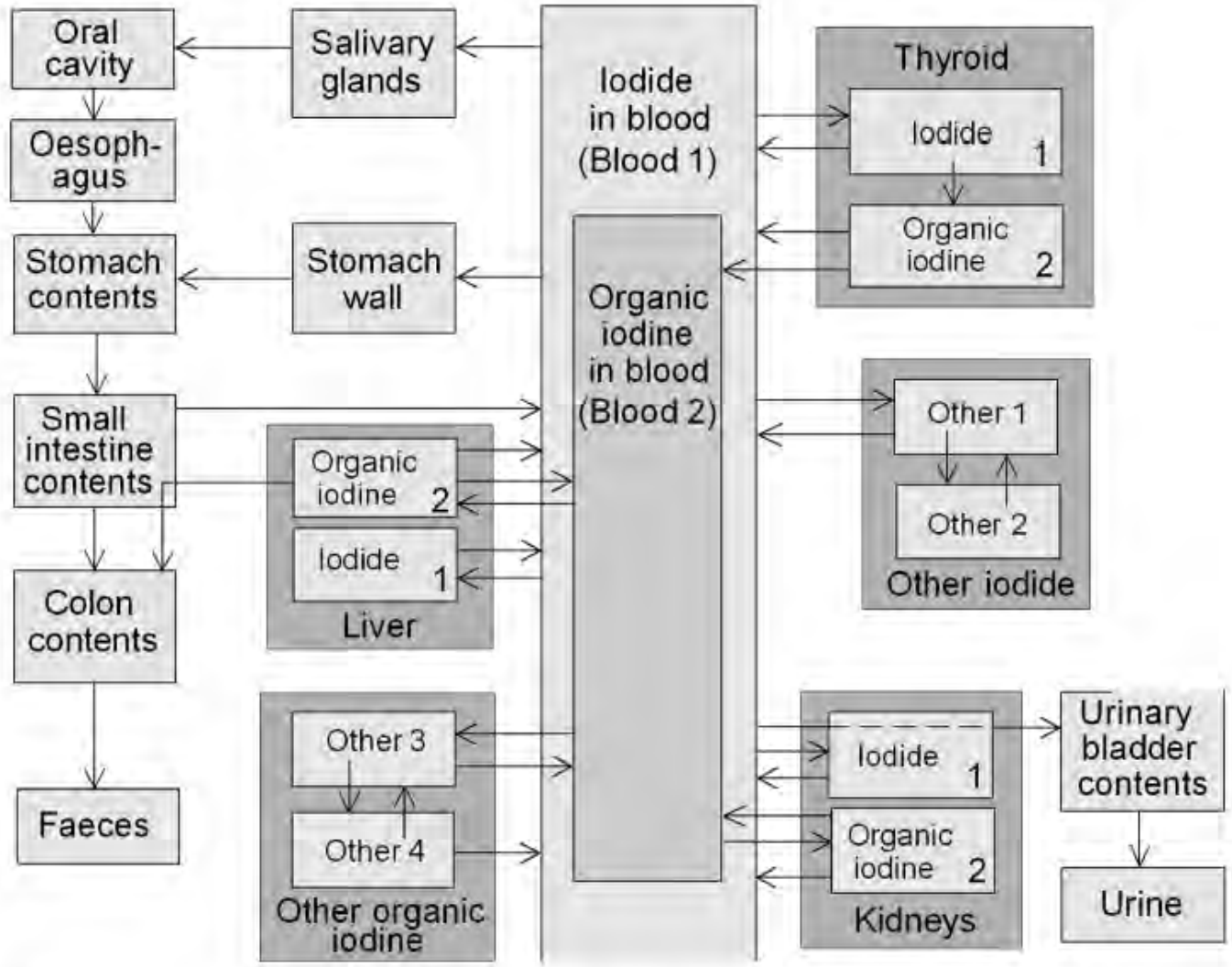
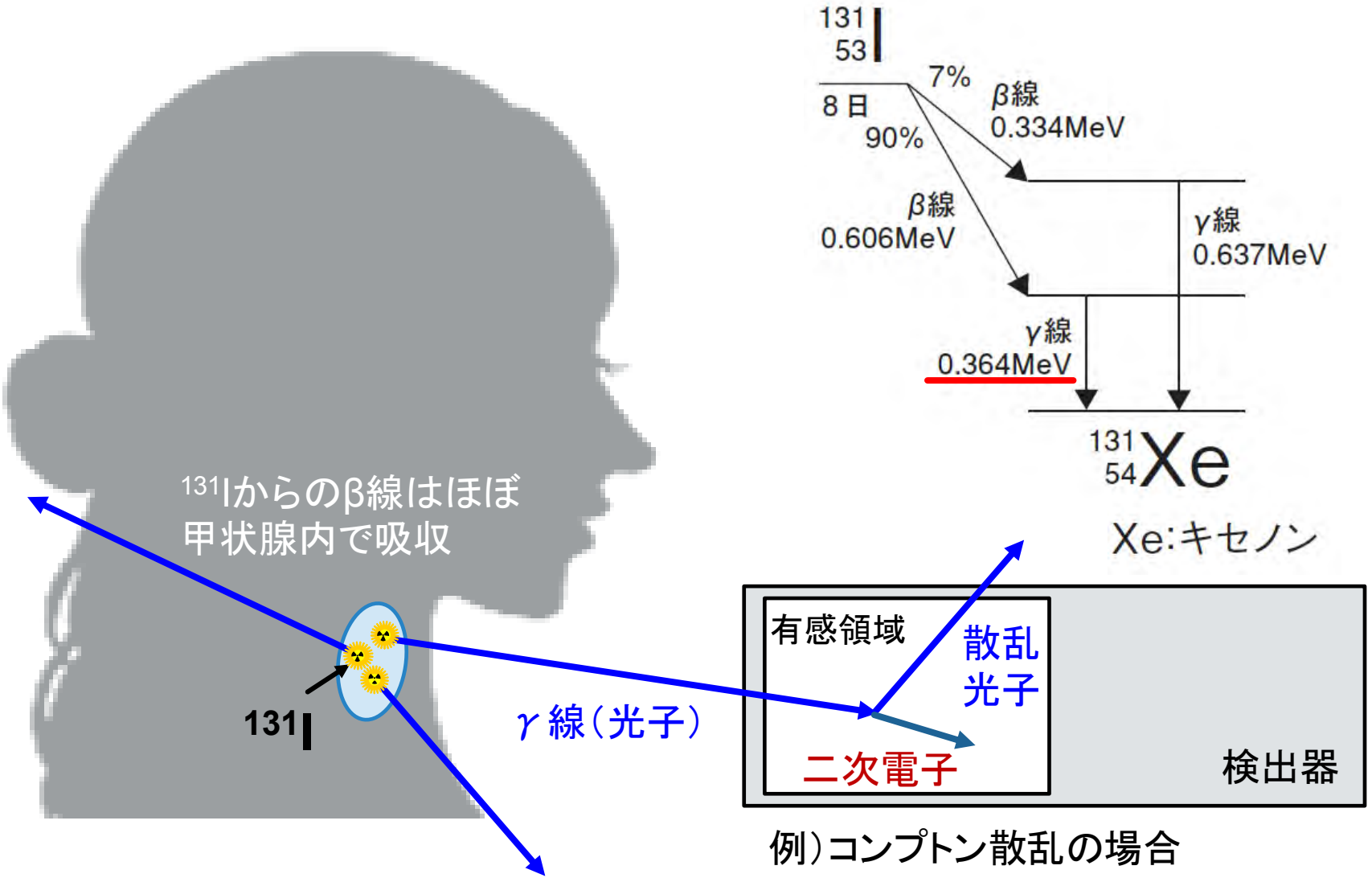


Fig. 5.2. Structure of the biokinetic model for systemic iodine used in this publication.

講義内容

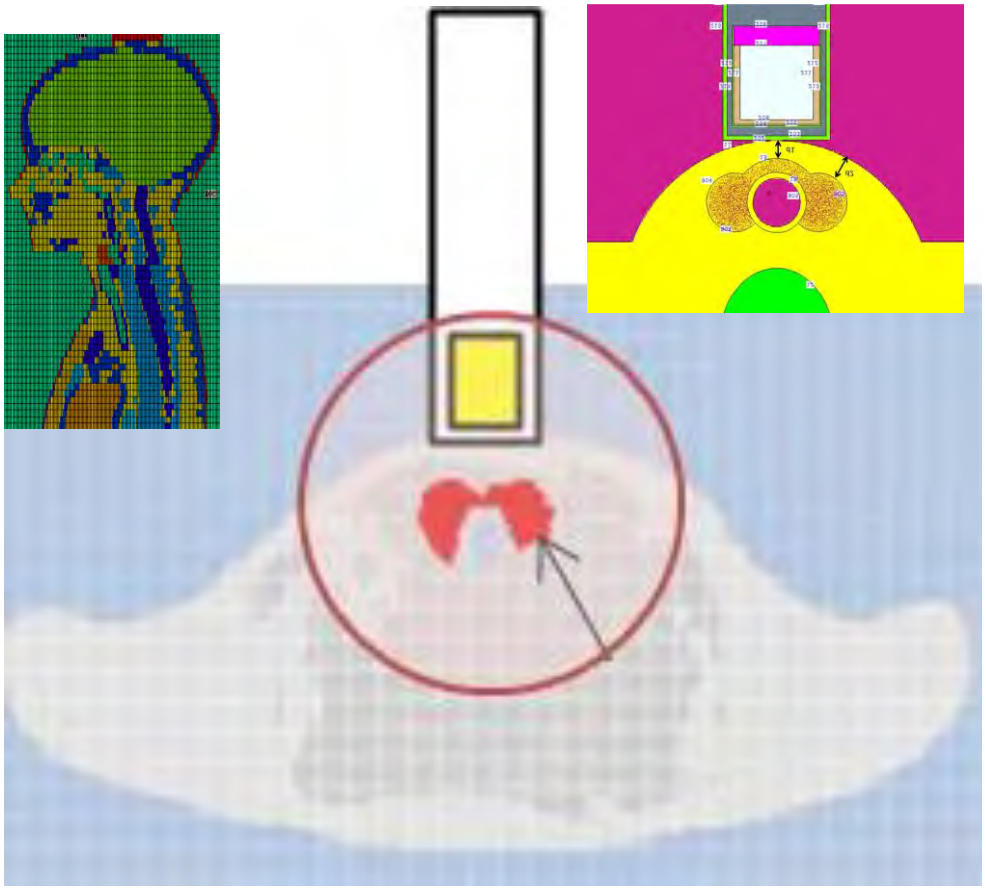
- 放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばくと線量評価モデル
- 甲状腺中ヨウ素の測定と線量評価
- 東電福島第一原発事故における甲状腺測定の経験
- 話題

甲状腺中ヨウ素の測定（体外計測法）



体外計測：体外に通過したγ線（光子）の一握りを計測する

甲状腺中ヨウ素の測定（体外計測法）続き



甲状腺測定の計測ジオメトリ

THE ASSESSMENT OF THE EFFECT OF THYROID SIZE AND SHAPE ON THE ACTIVITY ESTIMATE USING MONTE CARLO SIMULATION

Gary H. Kramer and Paul Crowley*

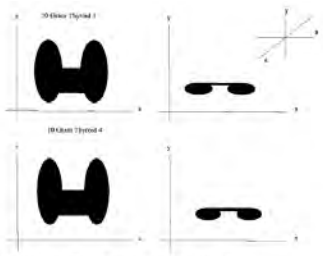


Fig. 2. Ten-gram thyroid: shapes three and four.

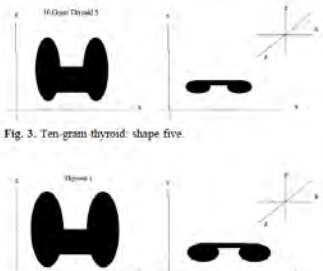


Fig. 3. Ten-gram thyroid: shape five.

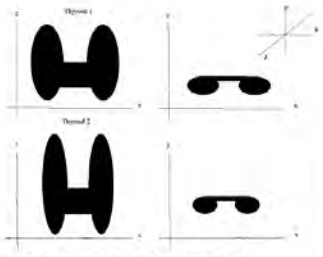


Fig. 4. Twenty-gram thyroid: shapes one and two.

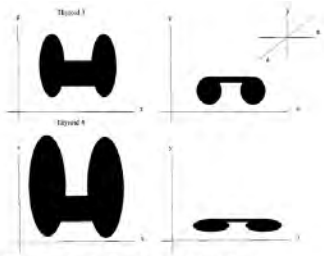


Fig. 5. Twenty-gram thyroid: shapes three and four.

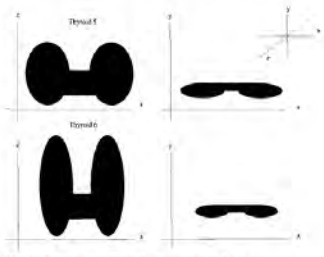


Fig. 6. Twenty-gram thyroid: shapes five and six.

efficiencies of the detectors and give an indication of the uncertainty of an activity estimate when the calibration is based on a 20-g thyroid size of a fixed shape.

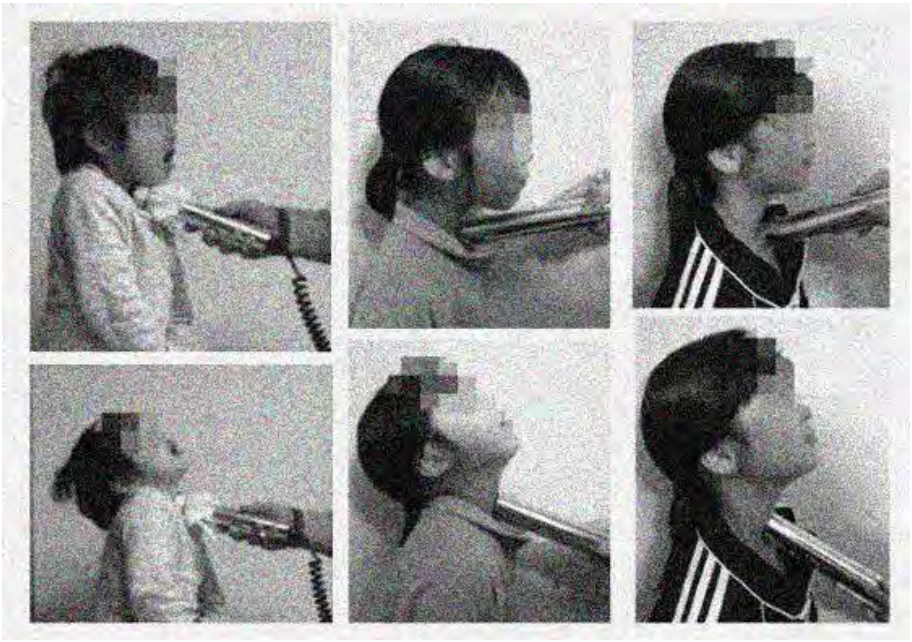
Two simulations were performed with the standard thyroid shape (shape number 20/1) with the lobes rotated in either the xy-plane or the xz-plane (Figs. 13–14) and one with a modified shape (shape number 20/9). These simulations were performed to assess the effect of a thyroid gland that had lobes either not vertical or curving backwards into the neck.

Health Phys. 78, 727-738 (2000)

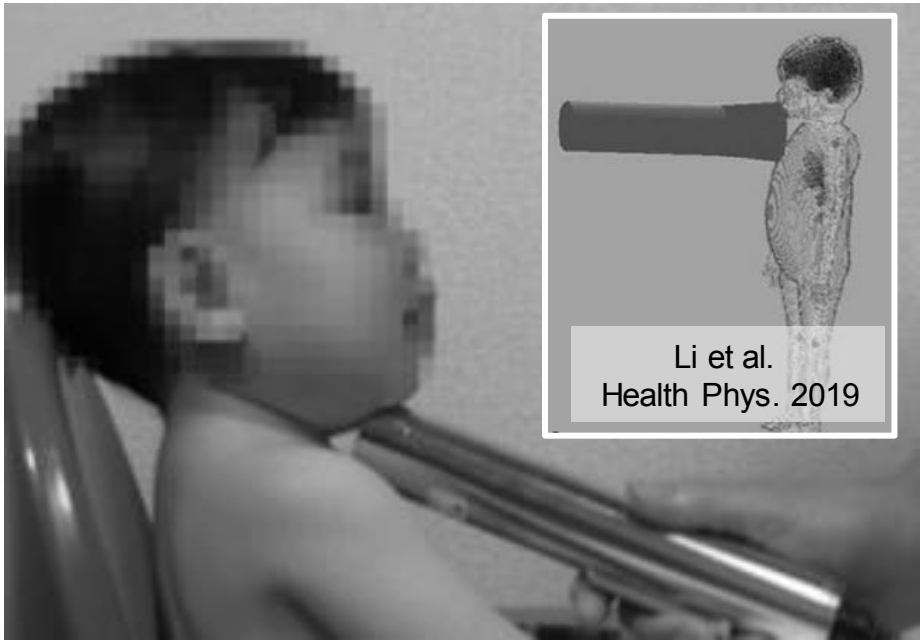
頸部前面に検出器（1インチNaI）を直付けしても，^{131}Iから放出されるγ線の内，有感領域と相互作用するのは1割にも満たない…

甲状腺形状の個人差を勘案すると，大きな検出器を用いて，頸部からの距離を離して測定するのが精度が高い。→ しかしデメリットも多い

子どもの甲状腺測定



（左から，4歳男児，8歳女児，11歳女児）



（1歳男児）

就学前小児の甲状腺測定の課題がEUのCAThyMARAプロジェクトでも認識

https://www.researchgate.net/project/CAThyMARA-Child-and-Adult-Thyroid-Monitoring-After-Reactor-Accident-OPERRA-Project-number-604984

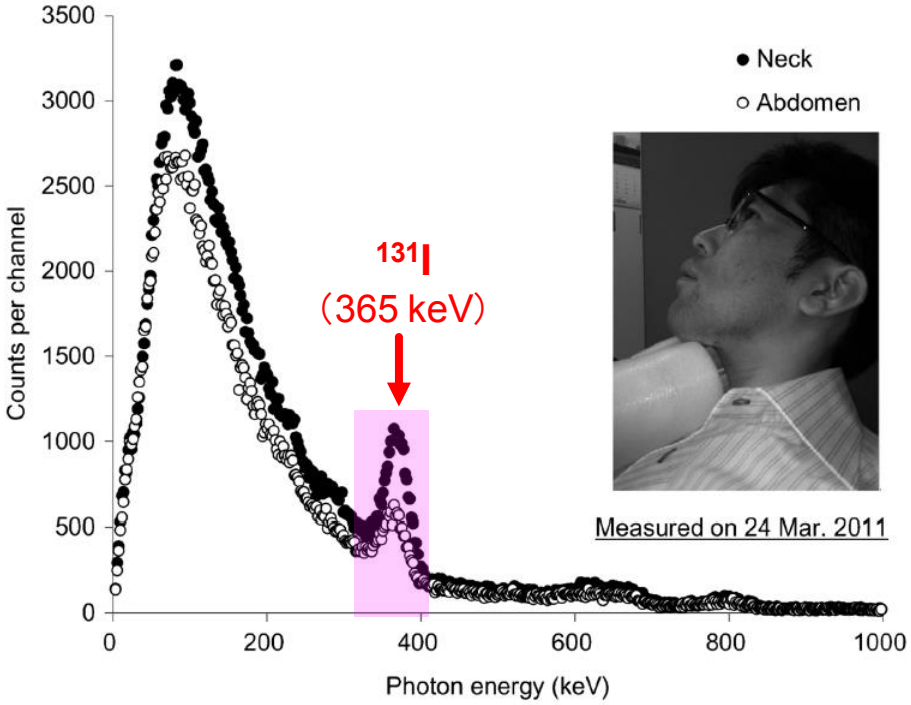
甲状腺中ヨウ素の測定に用いる機器

機器	NaI(Tl) サーベイメータ	可搬型スペクトロメータ	甲状腺モニタ
外観（写真）			
結晶	NaI(Tl)	NaI(Tl), $LaBr_3$(Ce)etc.	高純度Ge
エネルギー分解能	―	良	優
測定時間（1名）	1.5 ~ 2分間	3 ~ 5分間	3 ~ 10分間
測定人数（1時間）	~ 30人	~ 10人	~ 5人
コスト	低	中	高
操作性	容易	やや難（スペクトル測定）	中（スペクトル測定）
欠点	核種同定は不可	操作性（解析はPC上）	移動不可

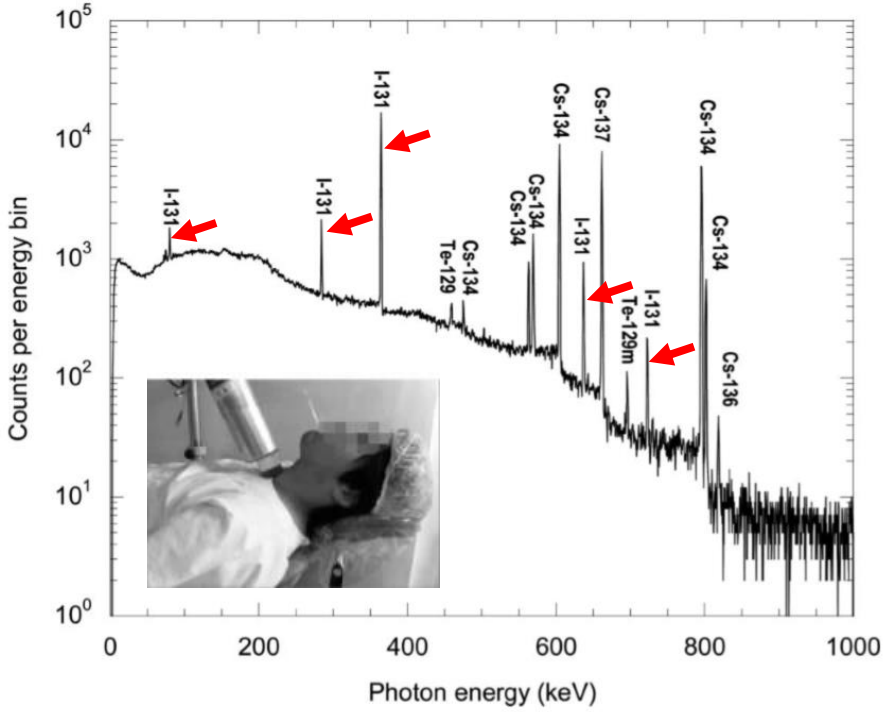
現地の検査会場において使用

被ばく医療機関

甲状腺中ヨウ素の測定（スペクトロメータ）



NaI(Tl)検出器で得られた波高スペクトル



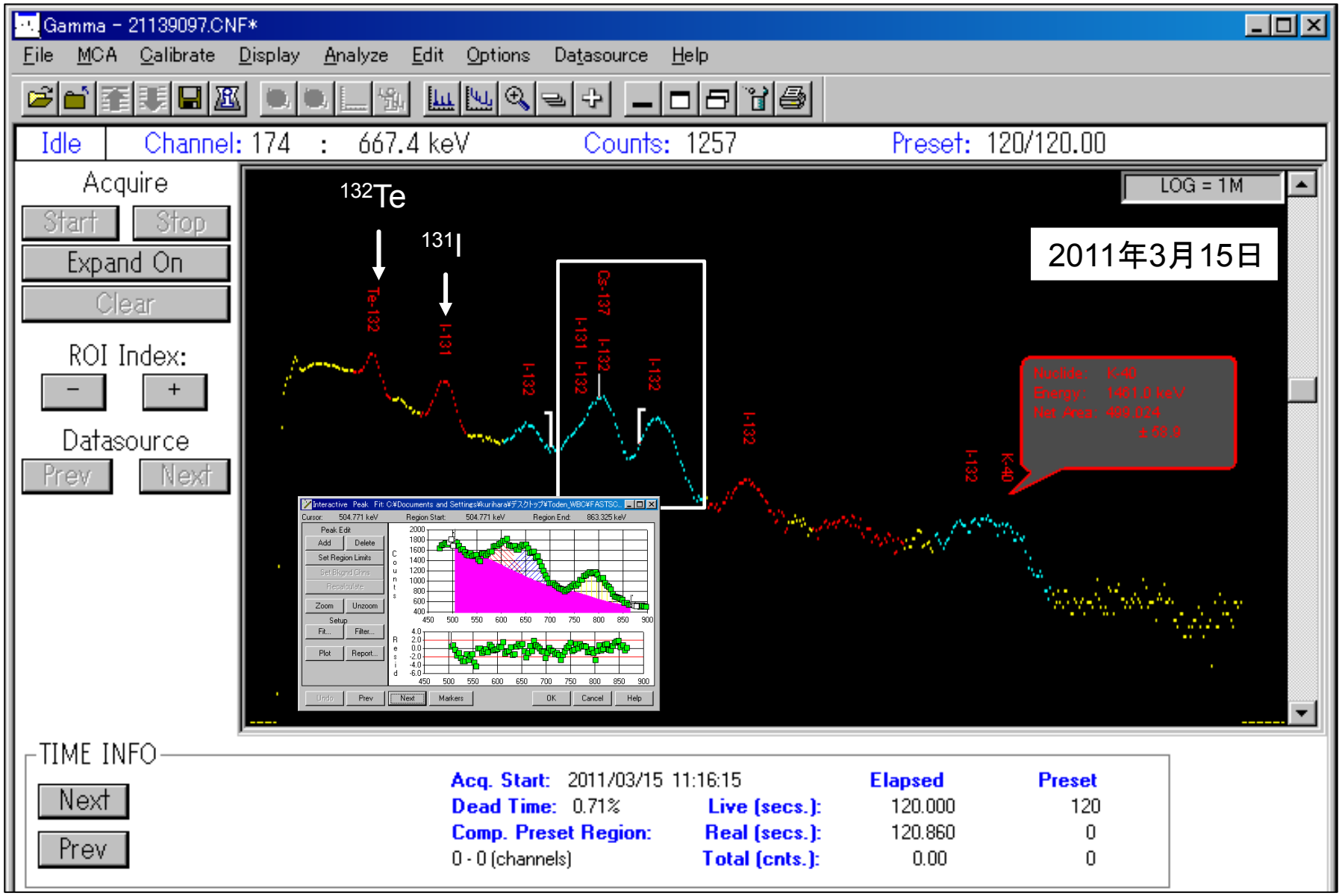
HPGe検出器で得られた波高スペクトル

スペクトロメータで測定すれば核種が同定できる。

Kurihara et al. Radiat. Prot. Dosim. (2016); Kurihara et al. J. Nucl. Sci. Technol. (2013)

福島原発事故初期の波高スペクトル−NaI(Tl)検出器

資料R3-5-7



^{131}Iの識別（365keV）は原発事故直後でもNaI(Tl)検出器のエネルギー分解能で十分

（ただし，ピーク下連続部分の増加による検出限界値の上昇には留意する必要あり）

NaI(Tl)サーベイメータの応答

PMT　シンチレータ

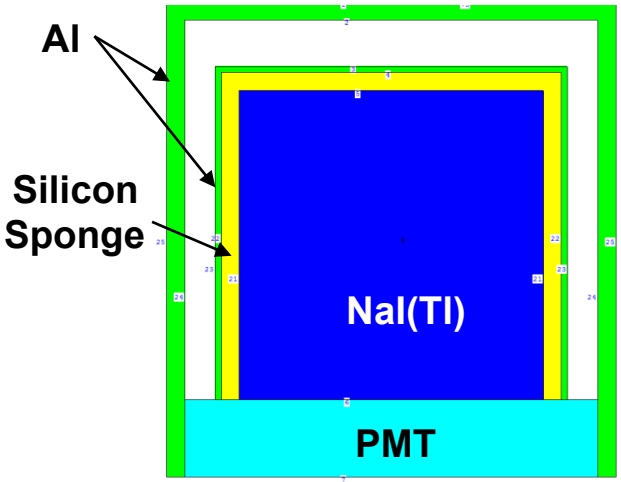
TCS-172B（日立アロカメディカル）

検出器の主な仕様

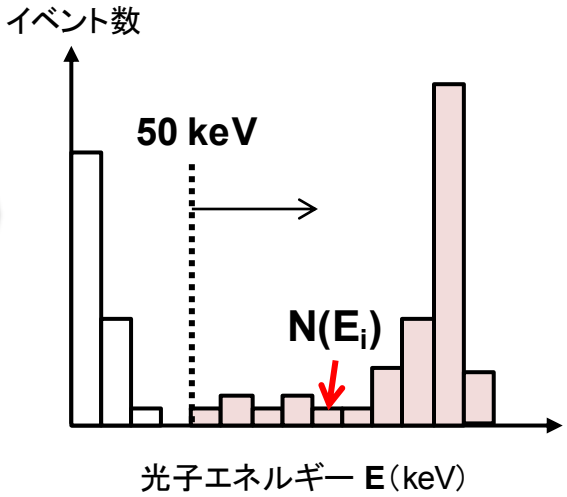
- 測定放射線：γ線
- シンチレータ：25.4φ×25.4 mm NaI(Tl)
- 時定数：3，10，30秒
- 測定エネルギーレンジ：50 keV ~ 3 MeV
- 測定範囲（線量当量率）：BG ~ 30 μSv/h
- 測定範囲（計数率）：0 ~ 30 ks^{-1}
- エネルギー特性：^{137}Csに対して±15%以下

検出器応答の計算シミュレーション（MCNP）

プローブヘッドのモデリング



Pulse height tally (F8)で，
NaI(Tl)での波高スペクトルを計算



計数率（N）と線量当量率（D）の計算

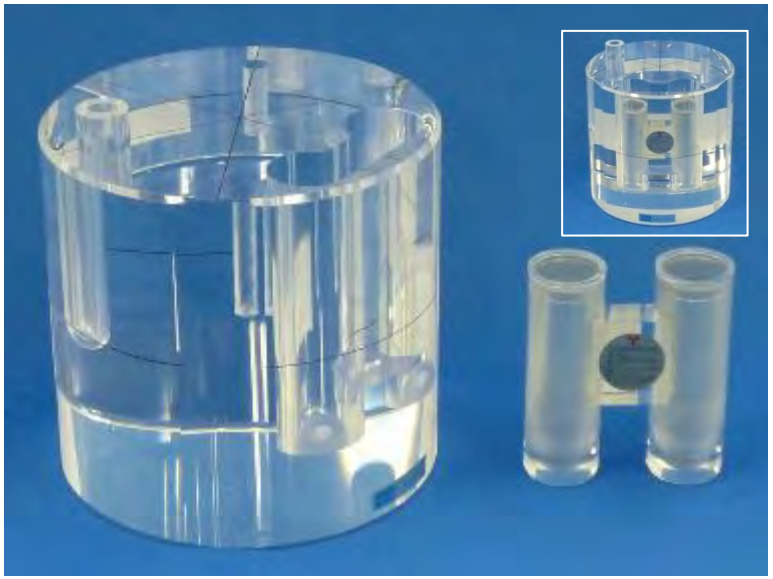
$$N = \sum_i N(E_i)$$

$$D = \sum_i G(E_i) \cdot N(E_i)$$

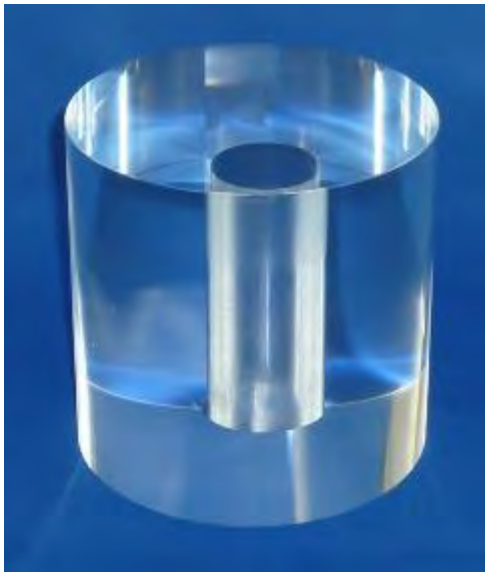
G関数（nSv/h/cpm）
H*(10)　JAERI-Memo 91-204参照

甲状腺測定に用いるファントム

頸部ファントム
京都科学製
Ref. ICRU 48 (1992).



ORINSファントム
Ref. ORINS-19 Thyroid radioiodine uptake measurement (1959).



ANSIファントム
Ref. ANSI N44.3-1973, ANSI/HPS N13.44-2014

年齢別甲状腺ファントム
Beaumon et al. Phys Med Biol. (2017)

NaI(Tl)サーベイメータの校正定数(1)

資料R3-5-7

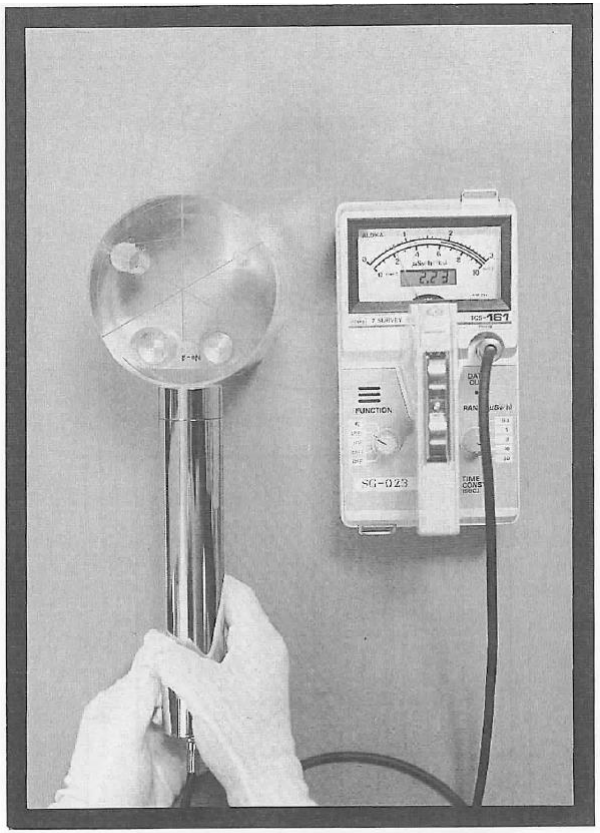


Photo. 2.1.2－1 Measurement to estimate conversion coefficient.

オリンス型ファントム内の線源部の位置にプローブの前端を密着して測定

JAERI－M 93－172

Table 2.1.2－2 Simplified Conversion coefficient of NaI survey meters for the estimation of deposited amount of ^{131}I in thyroid.

Type of survey meters	Conversion coefficient for measurement in touch with neck [kBq／(μSv/h)]	
	Mean and sigma	usable approximation
Descriminator bias modulation type (TCS-161)	32 ± 2	30
Count-rate meter types (TCS-121C, TCS-151)	17 ± 1	20

TCS-161(TCS-171/172先代モデル)
密着測定にて，**1 μSv/h → 30 kBq(^{131}I)※成人用**

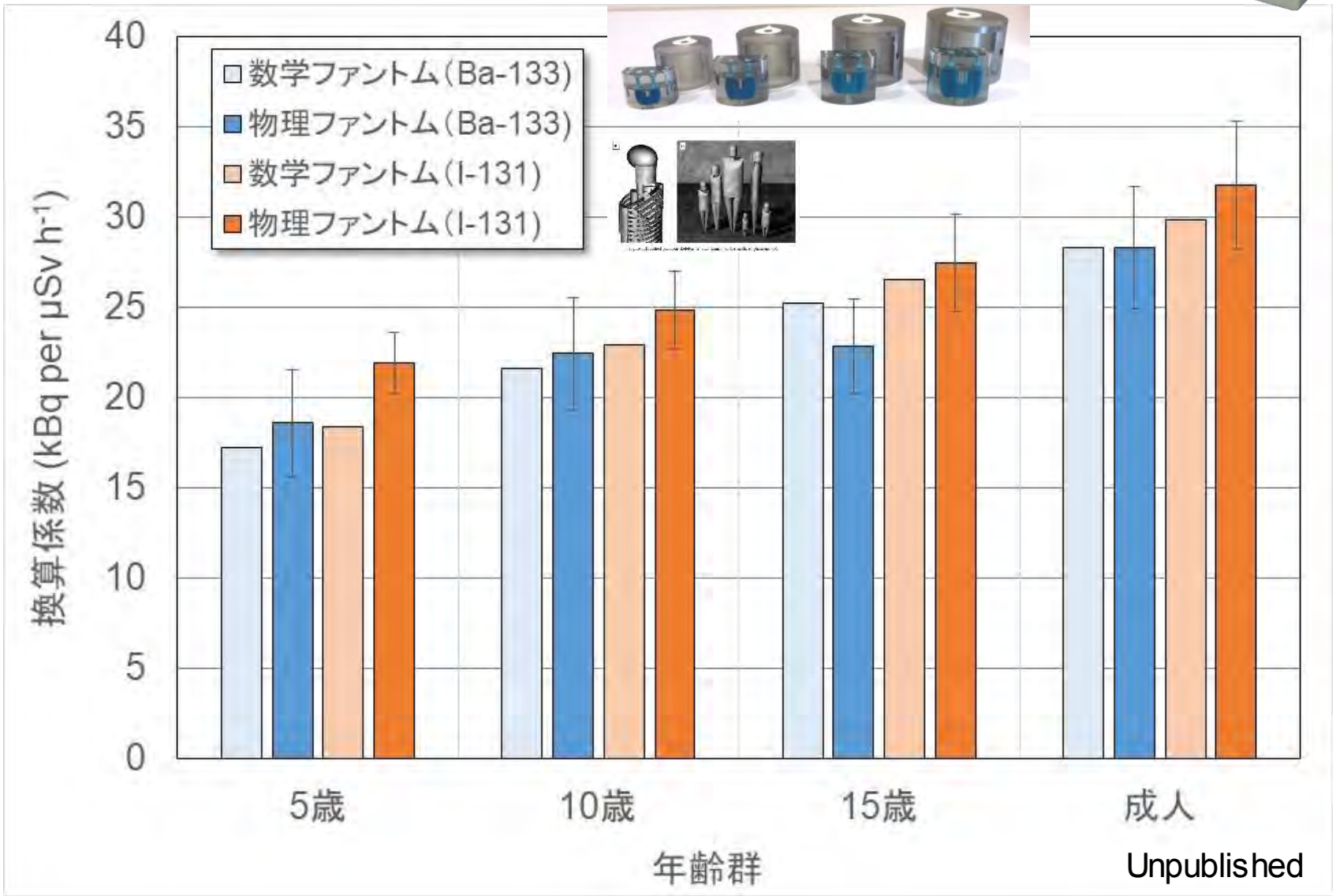
引用:JAERI-M 93-172(1993)

NaI(Tl)サーベイメータの校正定数(2)

資料R3-5-7

各年齢群に対する校正定数(TCS-172)

※ファントムとプローブ間距離が5mmの場合



Unpublished

（参考）NaI（Tl）サーベイメータの校正定数

各年齢群の数学ファントムに対する校正定数（TCS-172）

Table 4. Age-specific conversion factors for the measuring device (^{131}I kBq [μSv h^{-1}]$^{-1}$).

Age group	Thyroid volume (cm^3)	Distance between the neck and the probe (mm)			Averaged ratio[b]
		0 (contact)	5	10	
3-mo-old (infant)	1.2	11.0 (0.46)[a]	15.2 (0.51)[a]	20.0 (0.56)[a]	(0.51)
1-y-old	1.7	12.4 (0.51)	16.7 (0.56)	21.7 (0.60)	(0.56)
5-y-old	3.3	13.8 (0.57)	18.4 (0.62)	23.6 (0.65)	(0.61)
10-y-old	7.6	17.9 (0.74)	22.9 (0.77)	28.7 (0.80)	(0.77)
15-y-old	11.9	21.1 (0.87)	26.6 (0.89)	32.7 (0.91)	(0.89)
Adult	19.9	24.2 (1.00)	29.8 (1.00)	36.0 (1.00)	(1.00)

[a]Numbers in parentheses are the ratios of the values for each age group to that for adults.
[b]Numbers in parentheses are averages of the ratios for different distances of 0, 5, and 10 mm.

小児は成人の約6割
→ 小児の方が感度が高い

Table 5. Conversion factors obtained from experiments (kBq [μSv h^{-1}]$^{-1}$).

Phantom	ORINS-type (this study)	Neck phantom (previous dose assessments) (Fig. 2)	ORINS-type (JAERI 1993)
Radionuclide			
^{131}I	33 ± 2 (46 ± 3)[a]	30	32 ± 2 (44 ± 2)[a]
^{133}Ba	31 ± 2 (44 ± 2)		
^{137}Cs	27 ± 2 (38 ± 2)		
Note	The loaded volume of solution was 20 mL (20 g)	The loaded volume of solution was 19 mL (19 g) to imitate a 15 y old	Only TCS-161 was used

従来の評価値と大きく変わらない

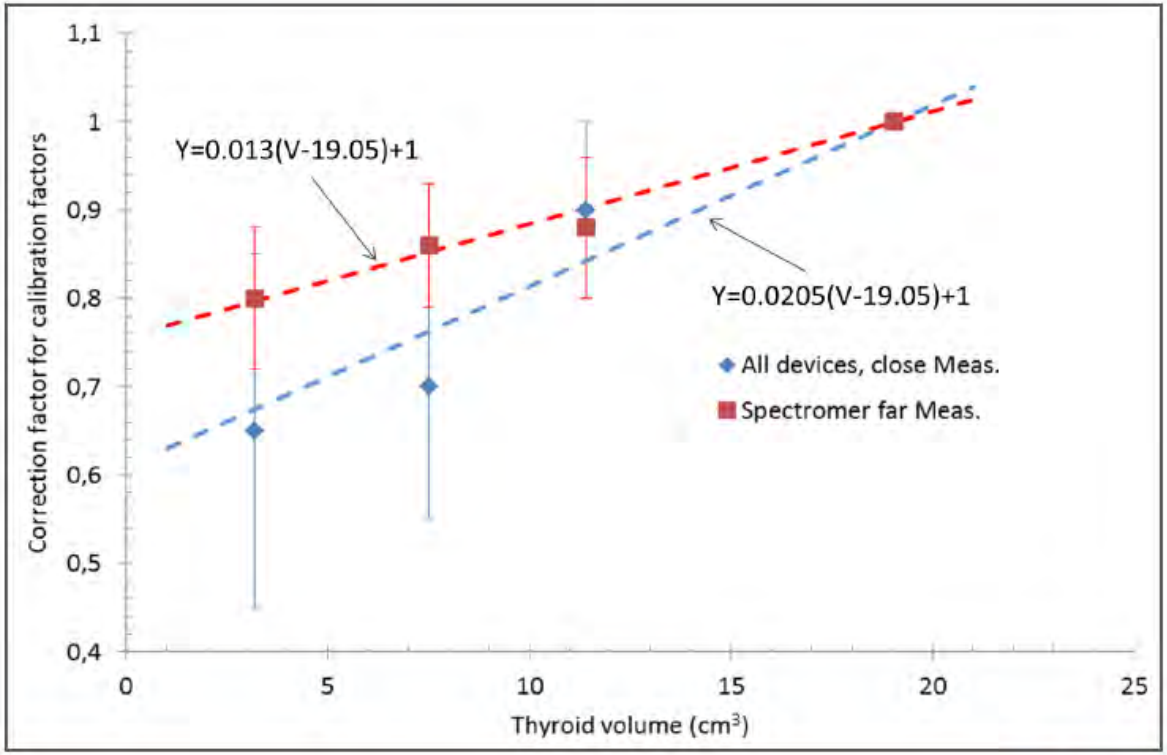
[a]Numbers in parentheses are values in the case of the probe located 10 mm away from the phantom. Other numbers are for the contact geometry.
Error = standard deviation.

Kim et al. Health phys. (2020)

甲状腺測定における年齢補正ファクター

Choice of suitable calibration factors

- If child thyroid phantoms are not available use default correction factors



IRSN 16/35

D. Broggio. 4th ARADOS presentation 2018; Broggio. Radiation Measurements (2019)

（参考）CAThyMARAプロジェクト

SEVENTH FRAMEWORK PROGRAMME

OPERA
OPEN PROJECT FOR EUROPEAN RADIATION RESEARCH AREA

OPERRA Deliverable D5.31

CAThyMARA report: Technical guidelines for radio-iodine in thyroid monitoring

DESCRIPTION

This report gives technical guidelines for radio-iodine monitoring following a nuclear incident. Monitoring aspects addressed include the choice of detectors, the calibration and measurement process, factors affecting measurements, measurement uncertainties, the preparation of equipment and measurement locations, the measurement time, the measurement of very young children, management of results and measurements performed by members of the public. This latter point is addressed by making recommendations to professionals to enable them to train and inform citizens. Interpretation of measurements is addressed by providing data on doses per unit measurement, enabling the direct conversion of a measurement into thyroid doses and committed effective doses. The information provided can be used to calculate doses for different age groups, for the embryo or foetus, and for different radio-iodine isotopes. Interpretation of measurements following iodine prophylaxis is also addressed, as well as the case of doses from intakes of short-lived radio-iodine isotopes that cannot usually be measured in the thyroid.

Due date: May 2017
Actual submission date: May 2017 *[Submitted to EC by Coordinator on 31 May 2017]*
Status: Final

Nature	Report
Dissemination level	PU (Public)
Lead beneficiary organisation	PHE
Authors	G Etherington, J Marsh, D Gregoratto, M Youngman, D Franck, A L Lebacq, M Isaksson, J Ośko, J M Gómez-Ros, M A Lopez, P Fotjik, I Malatova, P Zagyvai, O Monteiro Gil, P Teles, P Vaz, M A Saizu, T Vrba, V Berkovskyy, G Ratia, Y Bonchuk, D Broggio
Contributors	G Etherington, J Marsh, D Gregoratto , M Youngman, D Franck, A L Lebacq, M Isaksson, J Ośko, J M Gómez-Ros, M A Lopez, P Fotjik, I Malatova, P Zagyvai, O Monteiro Gil, P Teles, P Vaz, M A Saizu, T Vrba, V Berkovskyy, G Ratia, Y Bonchuk, D Broggio
Approval	OPERRA coordinator Jean-René Jourdain: 31/05/2017

1

https://www.researchgate.net/

Section II.1. Monitoring equipment

Recommendations

i. Spectrometric instruments are preferred over non-spectrometric instruments, because they can discriminate radionuclide gamma peaks from the diffuse gamma background, and because they can identify and differentiate between gamma-emitting radionuclides.

ii. Available spectrometric detectors generally fall into one of three main types: Ge semiconductor detectors, NaI(Tl) scintillation detectors and $LaBr_3$ scintillation detectors.

iii. An NaI(Tl) detector with a diameter between 25 and 51 mm and a thickness in the same range is adequate. Ge detectors with a diameter between 50 and 70 mm and a thickness in the same range or smaller is recommended. These dimensions determine the sensitivity of the detector.

iv. Other types of detectors with smaller crystal sizes such as cadmium zinc telluride (CZT) (a semiconductor), and caesium iodide (CsI) (a scintillator) are appropriate for monitoring the thyroid of very young children. CZT detectors have better energy resolution than scintillators.

v. Shielding and collimation of the detector help to reduce measured background radiation levels and so reduce detection limits and improve the reliability of the measurement. They are not essential, but their use should be considered.

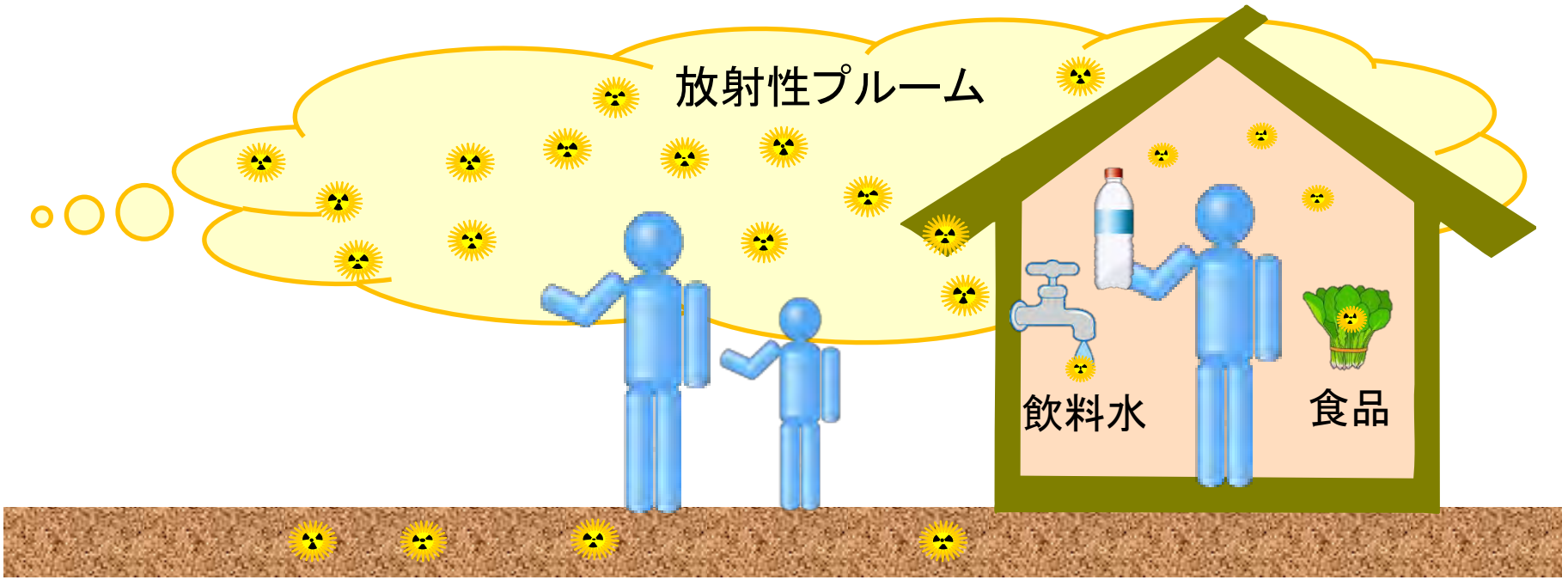
vi. Gamma cameras are available in medical imaging and nuclear medicine departments. They may be useful for large scale screening of the population, although collimators would need to be removed and pre-planning is required.

vii. Portable non-spectrometric instruments may be either gas-filled detectors (e.g. GM tubes) or scintillation detectors. Examples are described in the text. Instruments should comply with the requirements of the international standard IEC 60846-1:2014.

viii. Required sensitivity of non-spectrometric instruments for dose rate meters is such that the lower limit of the dose rate range is 0.03 $\mu Sv \cdot h^{-1}$, although instruments with a lower limit of 0.1 $\mu Sv \cdot h^{-1}$ are also adequate to detect levels below IAEA's operational intervention level for thyroid monitoring.

個人モニタリング（甲状腺測定）の利点（1）

一般的な内部被ばく線量推定モデル



吸入摂取=空気中濃度×呼吸量

- ✓ 時空間的に広範囲の実測データが必要
- ✓ 個人差や身体負荷による変動が大きい

経口摂取=食品中濃度×摂食（水）量

- ✓ 対象とする食品の選定やサンプルの代表性
- ✓ 個人差が大きい
- ✓ 市場希釈効果の評価

各パラメータの不確実性が多く，正確な線量評価は困難
→ 個人モニタリングの補完として位置づけられるべき

個人モニタリング（甲状腺測定）の利点（2）

吸入摂取に伴う^{131}Iの甲状腺量線量係数（Sv/Bq intake）

性状	乳児	1歳児	5歳児	10歳児	15歳児	成人
元素状ヨウ素	3.3E-06	3.2E-06	1.9E-06	9.5E-07	6.2E-07	3.9E-07
ヨウ化メチル	2.6E-06	2.5E-06	1.5E-06	7.4E-07	4.8E-07	3.1E-07
粒子*	1.4E-06	1.4E-06	7.3E-07	3.7E-07	2.2E-07	1.5E-07

*空気力学的放射能中央径（AMAD）：1 μm

1週間後に甲状腺中に1,000Bqの^{131}Iを検出した場合の甲状腺等価線量

甲状腺等価線量（mSv）

性状	乳児	1歳児	5歳児	10歳児	15歳児	成人
元素状ヨウ素	31.4	28.1	15.3	6.9	4.5	2.8
ヨウ化メチル	31.7	28.1	15.5	6.9	4.4	2.8
粒子*	31.0	28.1	15.3	6.9	4.4	2.9

甲状腺中の^{131}Iを直接定量するので線量評価はヨウ素の性状に影響しない
（空気中濃度からの線量評価では各性状の割合を把握することが重要になる）

講義内容

- 放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばくと線量評価モデル
- 甲状腺中ヨウ素の測定と線量評価
- **東電福島第一原発事故における甲状腺測定の経験**
- 話題

原子力機構における緊急作業員の甲状腺測定(1)

資料R3-5-7

HPGe検出器を用いた甲状腺計測

- HPGe検出器と頸部前面までの距離: 10 cm または 5 cm
- 測定時間: 1名につき10 min
- 遮へい体無し
- 検出限界値: ~10 Bq(平均的な数値)

– グループ1(2011年4月20日～6月17日までに受け入れた39名)の23名は距離を変えて2回測定
– グループ2(2011年6月17日～8月5日までに受け入れた521名)の被検者は1名を除き，距離5cmで1回測定

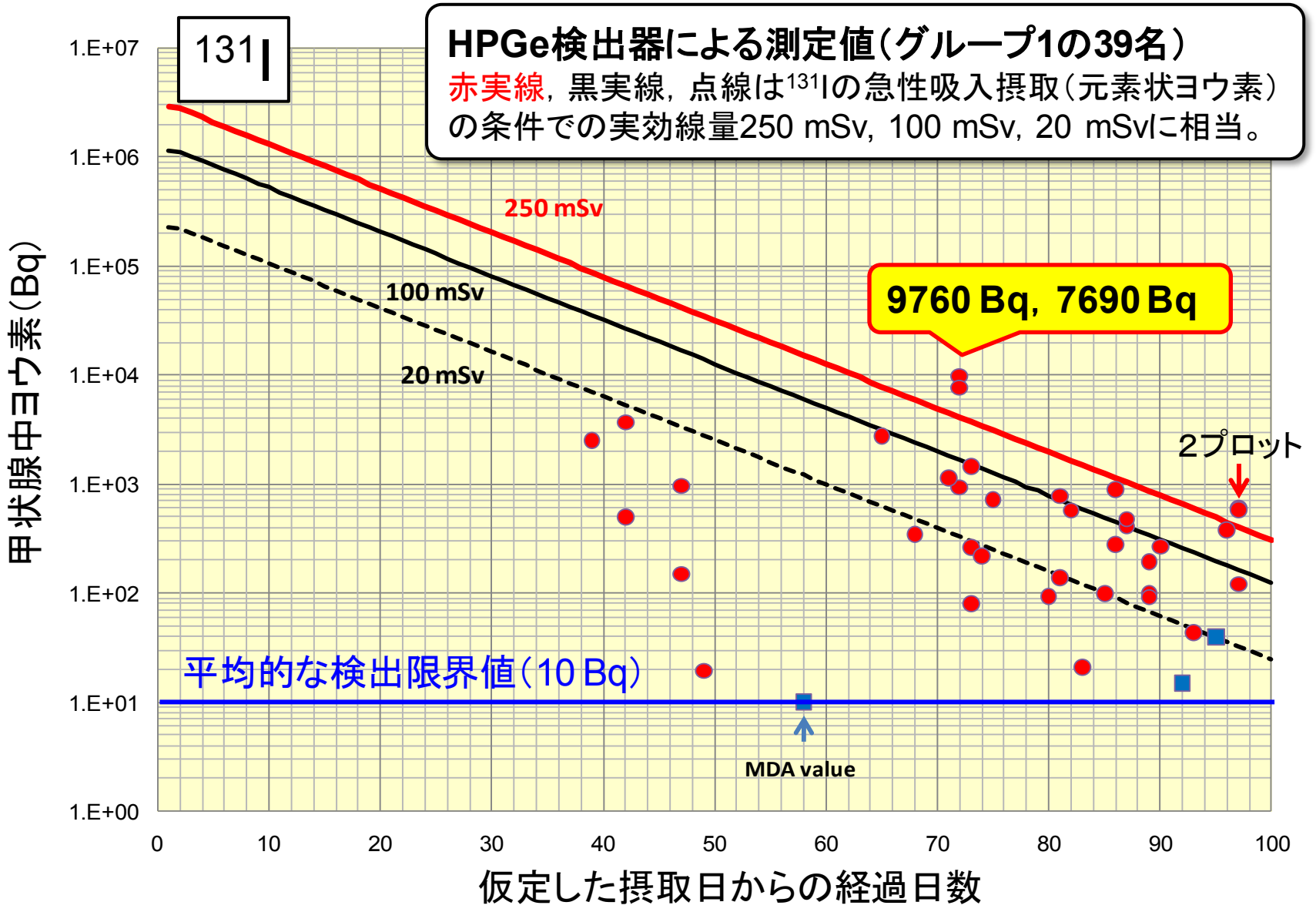
NaI(Tl) 検出器を用いた甲状腺計測

- 頸部密着測定

Kurihara et al., NIRS-M-252, (2012), Kurihara et al. J. Nucl. Sci. Technol. (2013).

原子力機構における緊急作業員の甲状腺測定(2)

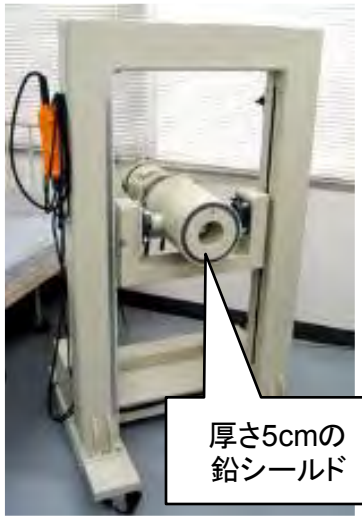
資料R3-5-7

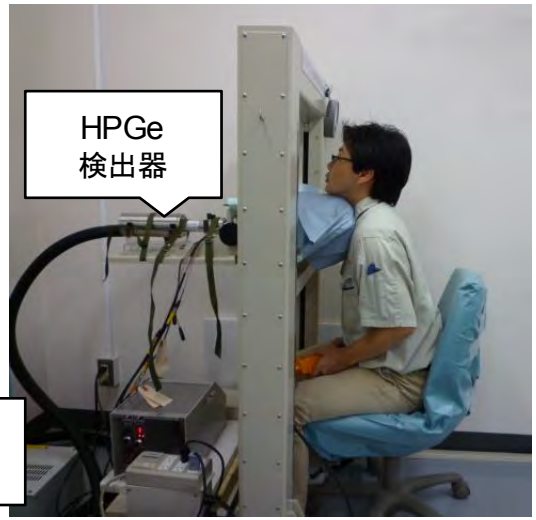


Kurihara et al. J. Nucl. Sci. Technol. (2013).

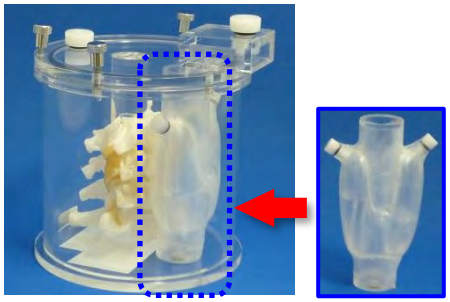
量研における緊急作業員の甲状腺測定(1)

預託実効線量で250mSvを超過したおそれのある緊急作業員7名を測定





甲状腺モニタによる測定



校正用ファントムによる校正

実効線量
E(50) (Sv)

実効線量係数
(Sv/Bq)

^{131}I 摂取量
I (Bq)

摂取シナリオ
- 摂取日
- 摂取経路(吸入)
- 物理化学的性状

ピーク計数率
C (cps)

^{131}I 甲状腺残留量
A (Bq)

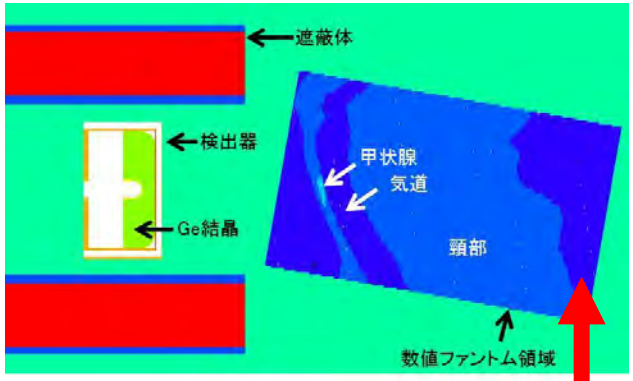
計数効率
ε (cps/Bq)

線量評価の
不確実性

量研における緊急作業員の甲状腺測定(2)

数値ファントムに基づく体外計測の精度検証及び線量評価(甲状腺)

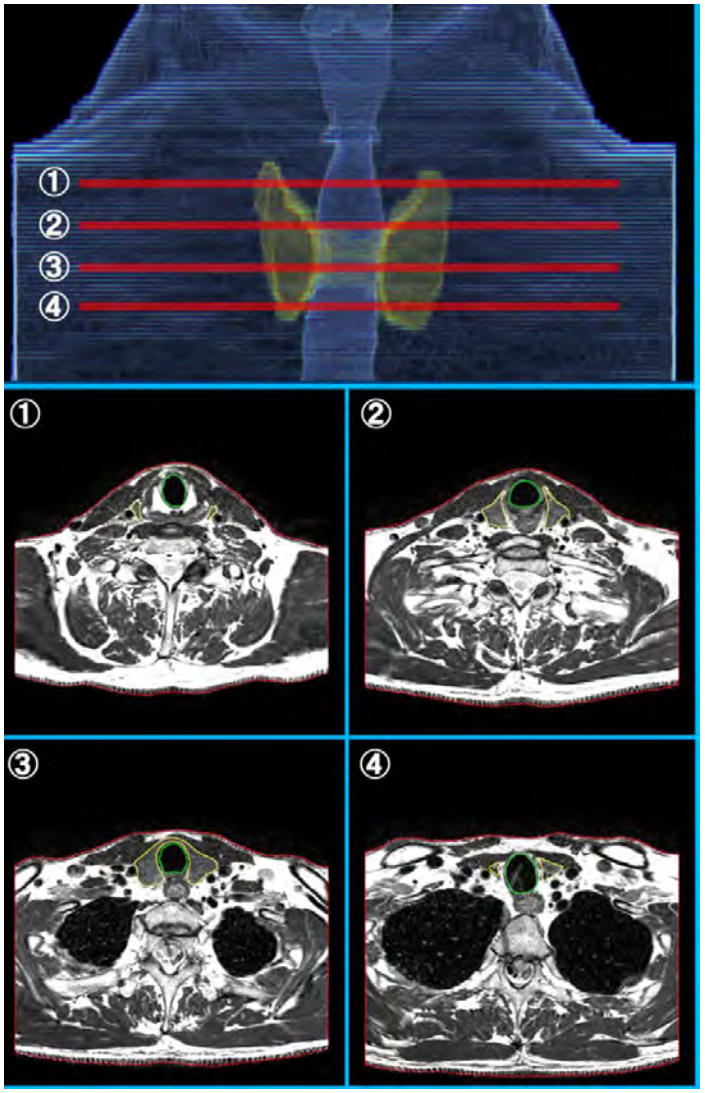
甲状腺モニタの応答評価



被検者と物理ファントムとの違いによる測定誤差(検出器の計数効率)を評価

放医研及び原子力機構が実施したGe検出器を用いた甲状腺計測の測定精度は20%以内であったことを確認

校正に用いた物理ファントム



本研究の遂行に際し，放医研でフォローアップしている作業員7名の内6名から，本人同意を得てMRI画像を取得し，個人の数値ファントムを作成

Kunishima et al. Health Phys. (2019)

福島県住民の^{131}I測定（体外計測）

Tokonami *et al* Sci. Rep. 2 (2012).

- 浪江町住民の甲状腺中^{131}Iをスペクトロメータを用いて測定。
- 46人/62人から検出（74%）
- 成人（20歳≤）：ND~33 mSv（median: 3.5 mSv）
- 子ども（≤19歳）：ND~23 mSv（median：4.2 mSv）

Matsuda *et al* Radiation Res. (2013).

- 事故発生から1ヶ月以内に福島県に滞在した初動対応者及び避難者をWBCを用いて測定。
- ^{131}Iは55人/173人から検出（32%）
- 甲状腺等価線量の最大値：20.04 mSv
- 滞在時期が早い集団ほど線量が高い。

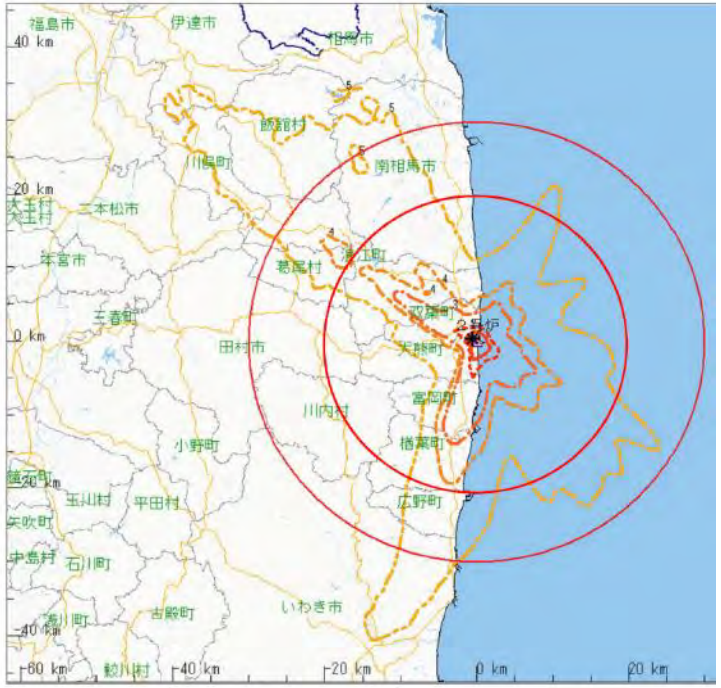
Kim *et al* NIRS-M-252 (2012).

- 原子力安全委員会（当時）の依頼により現地対策本部が行った1,080名のNaI(Tl)サーベイメータを用いたスクリーニング検査
- 甲状腺等価線量の最大値43 mSv※

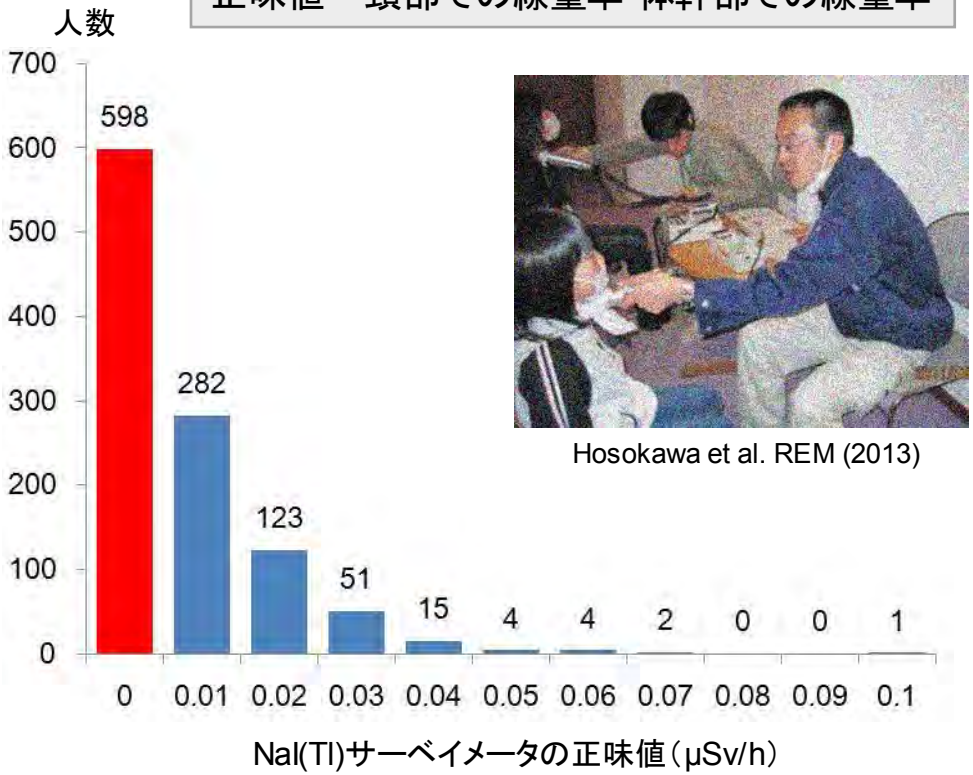
※校正定数や摂取シナリオを見直す前の数値

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査

- 川俣町，いわき市，飯舘村の3市町村にて，**1080**名の子ども（15歳以下）の甲状腺中ヨウ素（^{131}I）の測定が原子力災害現地対策本部により実施。
- 全員スクリーニングレベル（0.2 μSv/h）未満⇒**甲状腺等価線量100mSv未満**



正味値＝頸部での線量率-体幹部での線量率



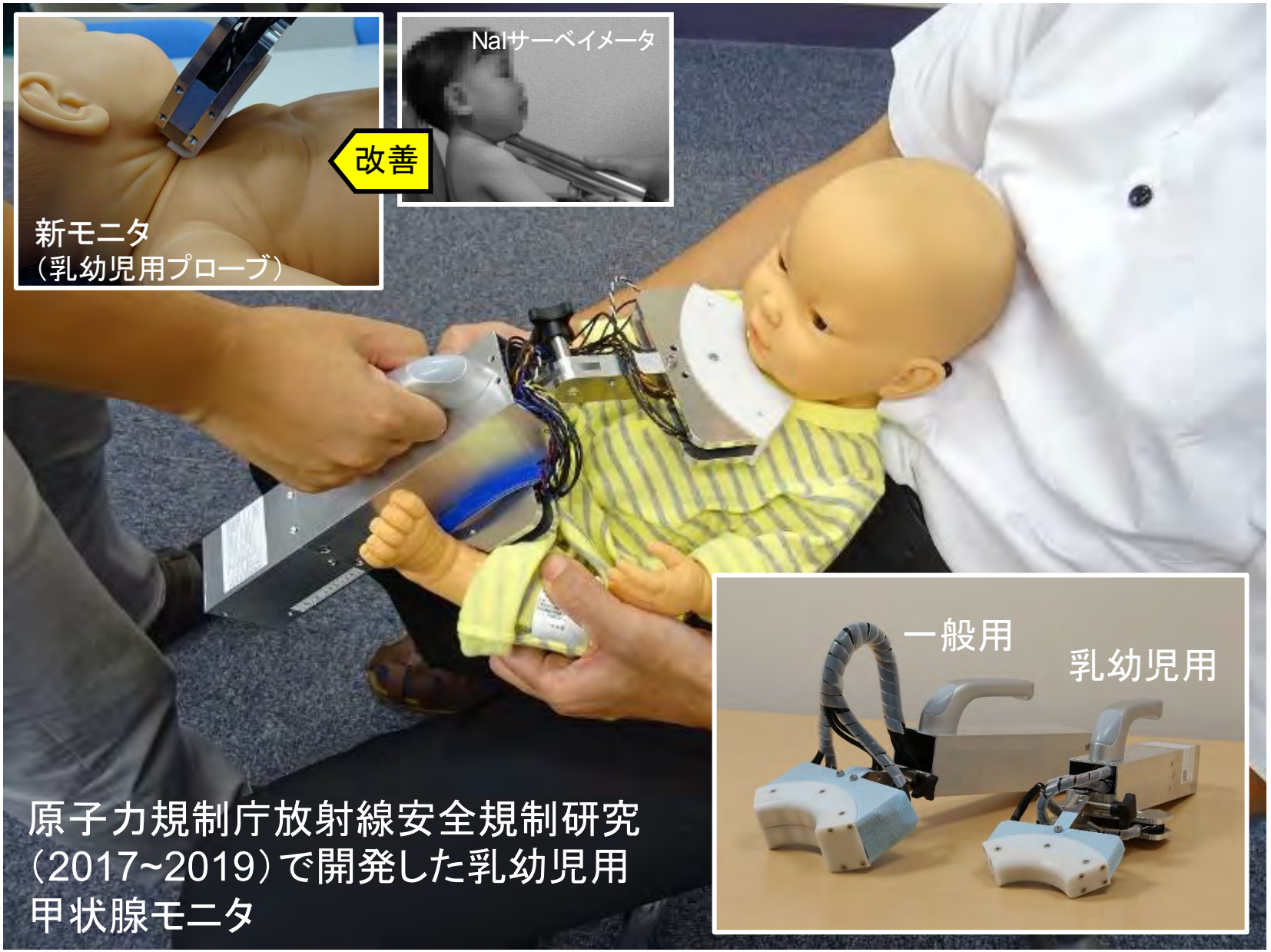
Hosokawa et al. REM (2013)

※スクリーニングを目的とした簡易検査であったが，甲状腺中ヨウ素の実測データが他に十分に得られなかったために福島住民の初期内部被ばくの線量再構築の基礎とされた。被検者の約半数が正味値0であり，甲状腺被ばく線量は総じて低いことが確認されたが，正確な線量測定及び評価には課題を残した。

講義内容

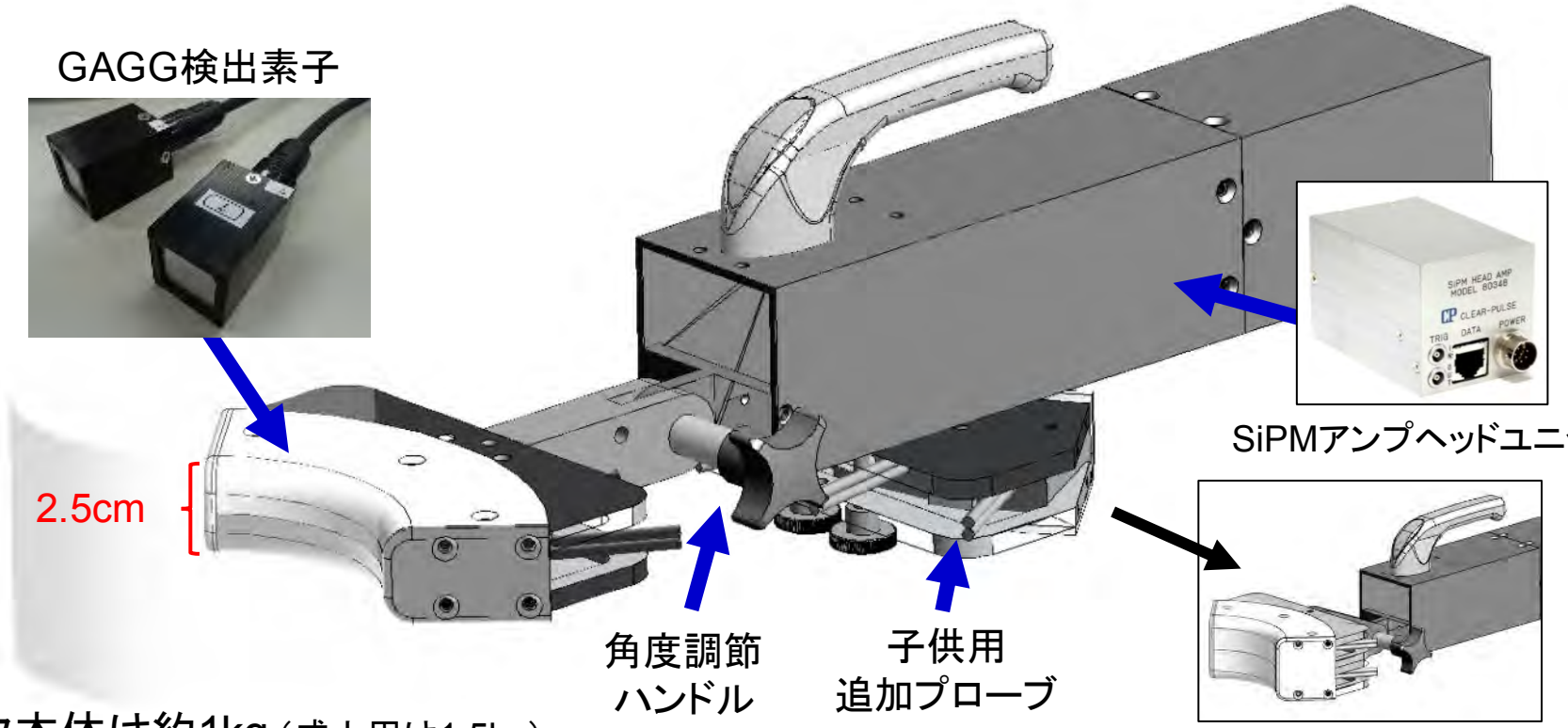
- 放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばくと線量評価モデル
- 甲状腺中ヨウ素の測定と線量評価
- 東電福島第一原発事故における甲状腺測定の経験
- **話題**

新・甲状腺モニタの開発


NaIサーベイメータ
改善
新モニタ
（乳幼児用プローブ）
一般用
乳幼児用
原子力規制庁放射線安全規制研究
（2017~2019）で開発した乳幼児用
甲状腺モニタ

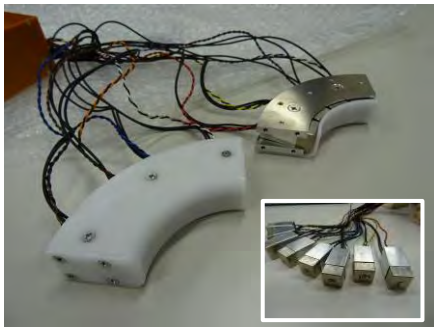
新・甲状腺モニタの構造と特徴

GAGG検出素子



SiPMアンプヘッドユニット

モニタ本体は約1kg（成人用は1.5kg）



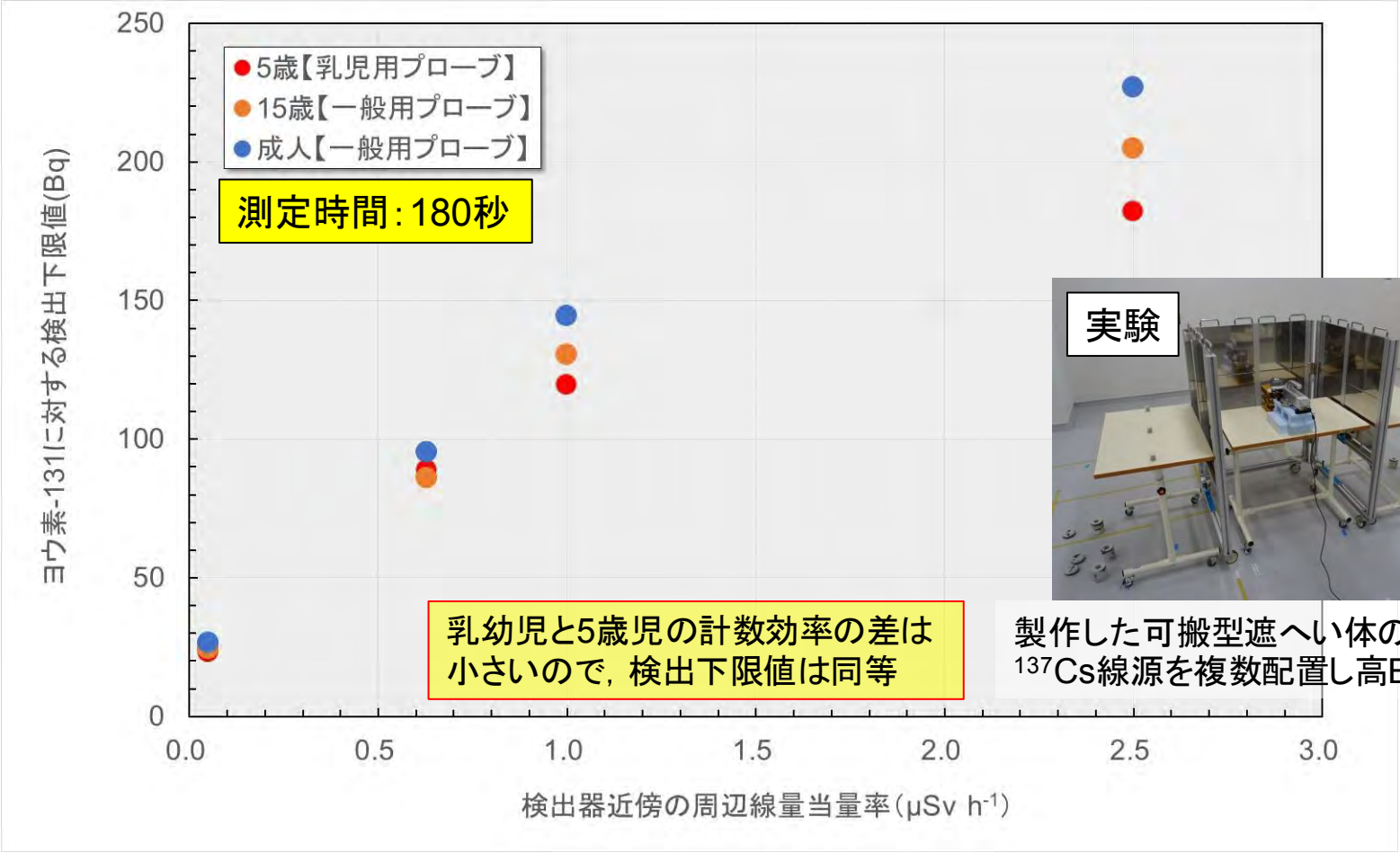
プローブ（左：乳幼児用，右：一般用）

【新モニタの特徴】

- **乳幼児にも対応可能（おそらく世界初）**
- 甲状腺に対する幾何学的効率が高い
- 測定ジオメトリの再現性が高い
- 高感度・高分解能なスペクトル測定
- 温度変化に伴うゲイン変化の自動調整
- 軽量コンパクトかつ省力（USB電源供給）

新・甲状腺モニタの性能試験

バックグラウンド線量率と^{131}I検出限界値の関係



製作した可搬型遮へい体の外側に^{137}Cs線源を複数配置し高BGを模擬

数μSv h^{-1}の環境下で乳幼児の甲状腺等価線量10mSv程度まで評価可能
（ただし，吸入摂取から1週間以内　※通常BGであれば1桁低い線量まで評価可）

提案する公衆の甲状腺内部被ばくモニタリング

資料R3-5-7

緊急時段階（放射性核種の環境放出）

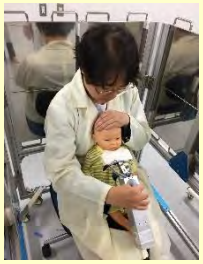
中期段階（環境放出が概ね収束）

原子力緊急事態発生

OIL1,2超

避難

避難退域時検査
OIL4基準



複数のGAGG検出素子を用いた新モニタの提案

既存あるいは新規に開発する
スペクトロメータによる測定

車載型WBCによる
測定（セシウムを対象）

1. 簡易測定

基準超

2. 詳細測定

3. 追加測定

簡易検査の精度確認のため，
異なる方法で同一被検者の
一部を詳細検査に含める。

ヨウ素・セシウム比の評価の
ため，詳細検査の対象者の
一部を追加調査に含める。

～1週間

～1ヶ月

～半年

内部被ばく線量評価のためには，行動情報（避難経路，摂水，安定ヨウ素剤）も必要

Kim and Kurihara JRPR(2020)

甲状腺測定ガイダンス素材の製作

資料R3-5-7

小川真澄先生（自衛隊中央病院）作成

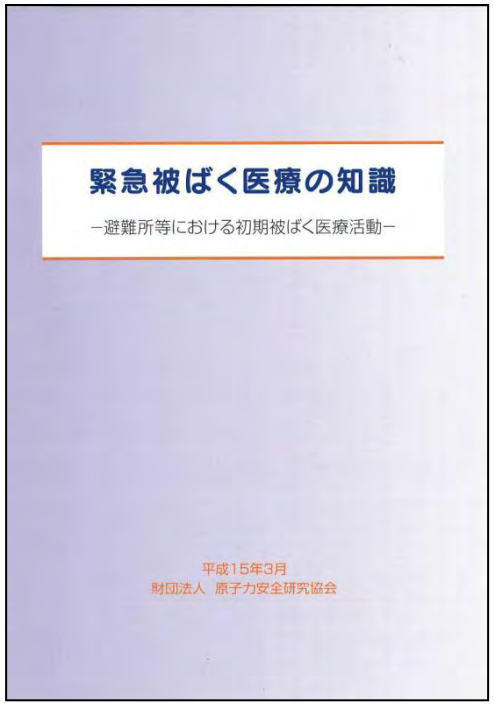
まとめ

- 原子力災害時における公衆被ばくに関して，放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばくが重要（**特に小児**）。
- 放射性ヨウ素の物理半減期は短い（^{131}Iは約8日）ので，**タイムリーな甲状腺測定が必要**。
- **様々な年齢群の公衆**が甲状腺測定の対象となる。
- 原子力災害対応の1つとして**実行的かつ堅牢な**甲状腺測定のスキーム作りが課題である。

以下は参考資料

甲状腺測定マニュアル（1）

資料R3-5-7



「緊急被ばく医療の知識」
原子力安全研究協会
※現在，閲覧不可

換算係数

第4章 参 考

3.頸部甲状腺に沈着した放射性ヨウ素の測定

頸部甲状腺部位の測定は、放射性ヨウ素の体内量のさらに精密な測定、医学的な診察等を行う二次被ばく医療のためのスクリーニング測定の一部として行われます。

ここでは、頸部甲状腺部位の測定方法と、そのために使用される代表的な1″ φ1″ NaI（Tℓ）シンチレーションサーベイメータについて述べます。

(1)頸部甲状腺汚染スクリーニングの準備

1）単位の表示がμSv/hのγ線量率測定用NaIシンチレーションサーベイメータを準備します。

NaI（Tℓ）シンチレーションサーベイメータ

2）サーベイメータの検出器の先端を頸部甲状腺部位に密着させた場合の指示値（μSv/h）から^{131}Iの甲状腺残留量（Bq）を求める換算係数[Bq/（μSv/h）]は、NaIシンチレーションサーベイメータの型式に従い次の値を用いるのが適切です。

NaIシンチレーションサーベイメータ（ディスクリレベル　50KeV,100KeV）	20 KBq/（μSv/h）
NaIシンチレーションサーベイメータ（DBM型）	30 KBq/（μSv/h）

ただし、サーベイメータの校正は^{137}Csのγ線を円筒形の検出部の軸方向から照射することによって行われているとします。

3）別法として、アクリル製の甲状腺用ファントムであるオリンスファントムに模擬ヨウ素線源（^{133}Baと^{137}Csを混合した線源により^{131}Iのγ線スペクトルを模擬し、^{131}I相当の放射能が値づけされている。日本アイソトープ協会から購入できる。）を挿入して、換算係数を求める方法があります。

甲状腺用ファントムによる値づけ

(2)頸部甲状腺部位の測定の方法

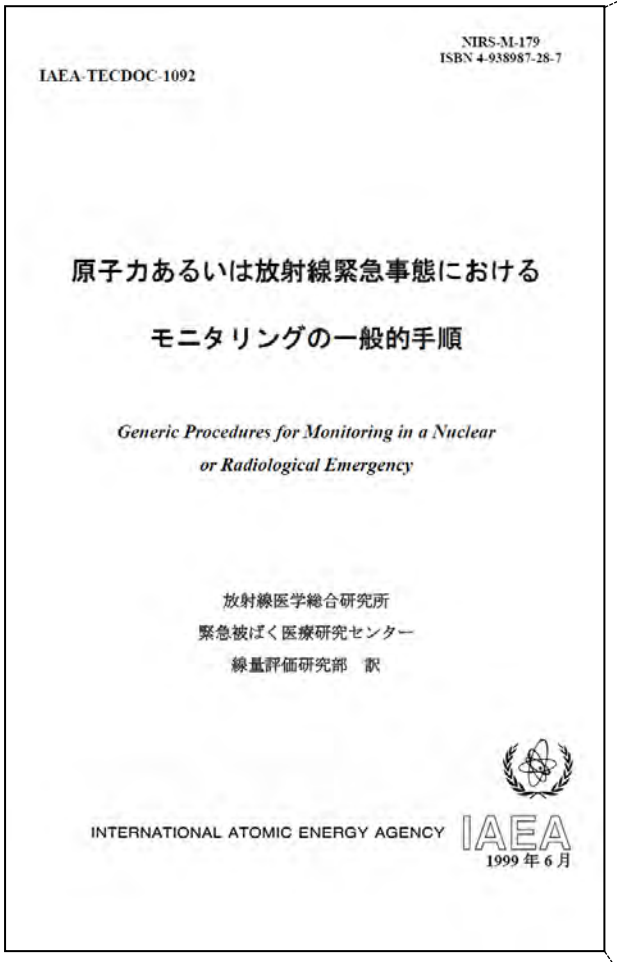
1）近くに線源や汚染のないとき、測定場所のγ線のバックグラウンド線量率を測定します。

2）NaIシンチレーションサーベイメータの検出部の先端を、男性では甲状軟骨（"のどぼとけ"のある位置）の下に付け、女性では頸部中央に付けてできるだけ密着させて測定します。測定は、20秒間以上その状態を保持した後、指針のふれの平均（μSv/h）を読み取って、記録します。そして、指示値とスクリーニングレベルに対応する値（μSv/h）と比較します。（スクリーニングレベルは、測定時3KBqです。）

3）読み取った指示値（μSv/h）からバックグラウンド線量率を引き、その答えに換算係数を乗じ、甲状腺における^{131}I残留量を算出します。

甲状腺測定マニュアル(2)

資料R3-5-7



NIRS-M-179
ISBN 4-938987-28-7

IAEA-TECDOC-1092

原子力あるいは放射線緊急事態における

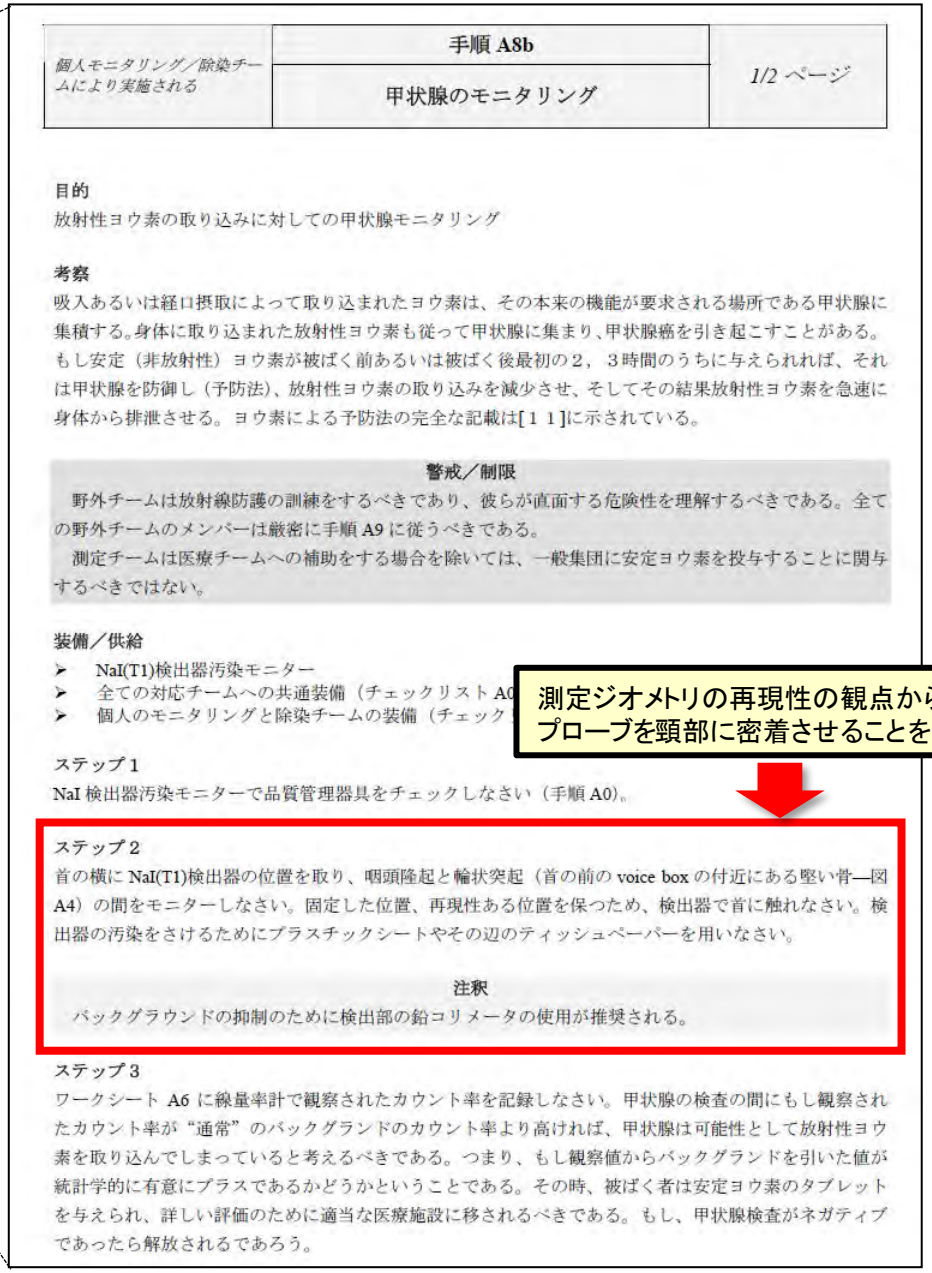
モニタリングの一般的手順

Generic Procedures for Monitoring in a Nuclear or Radiological Emergency

放射線医学総合研究所
緊急被ばく医療研究センター
線量評価研究部　訳

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY IAEA
1999 年 6 月

IAEA, TECDOC-1092
（邦訳版：NIRS-M-179）



個人モニタリング／除染チームにより実施される	手順 A8b 甲状腺のモニタリング	*1/2 ページ*

目的
放射性ヨウ素の取り込みに対しての甲状腺モニタリング

考察
吸入あるいは経口摂取によって取り込まれたヨウ素は、その本来の機能が要求される場所である甲状腺に集積する。身体に取り込まれた放射性ヨウ素も従って甲状腺に集まり、甲状腺癌を引き起こすことがある。もし安定（非放射性）ヨウ素が被ばく前あるいは被ばく後最初の２，３時間のうちに与えられれば、それは甲状腺を防御し（予防法）、放射性ヨウ素の取り込みを減少させ、そしてその結果放射性ヨウ素を急速に身体から排泄させる。ヨウ素による予防法の完全な記載は[１１]に示されている。

警戒／制限
野外チームは放射線防護の訓練をするべきであり、彼らが直面する危険性を理解するべきである。全ての野外チームのメンバーは厳密に手順 A9 に従うべきである。
測定チームは医療チームへの補助をする場合を除いては、一般集団に安定ヨウ素を投与することに関与するべきではない。

装備／供給
- NaI(T1)検出器汚染モニター
- 全ての対応チームへの共通装備（チェックリスト A0
- 個人のモニタリングと除染チームの装備（チェック

測定ジオメトリの再現性の観点から
プローブを頸部に密着させることを推奨

ステップ１
NaI 検出器汚染モニターで品質管理器具をチェックしなさい（手順 A0）。

ステップ２
首の横に NaI(T1)検出器の位置を取り、咽頭隆起と輪状突起（首の前の voice box の付近にある堅い骨—図 A4）の間をモニターしなさい。固定した位置、再現性ある位置を保つため、検出器で首に触れなさい。検出器の汚染をさけるためにプラスチックシートやその辺のティッシュペーパーを用いなさい。

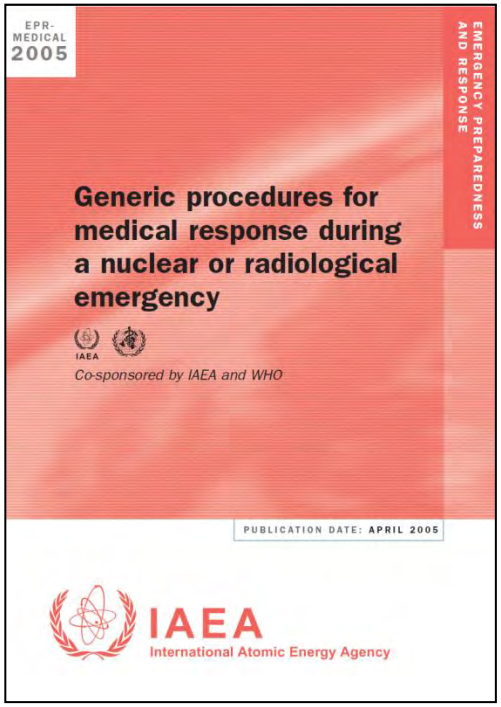
注釈
バックグラウンドの抑制のために検出部の鉛コリメータの使用が推奨される。

ステップ３
ワークシート A6 に線量率計で観察されたカウント率を記録しなさい。甲状腺の検査の間にもし観察されたカウント率が“通常”のバックグランドのカウント率より高ければ、甲状腺は可能性として放射性ヨウ素を取り込んでしまっていると考えるべきである。つまり、もし観察値からバックグランドを引いた値が統計学的に有意にプラスであるかどうかということである。その時、被ばく者は安定ヨウ素のタブレットを与えられ、詳しい評価のために適当な医療施設に移されるべきである。もし、甲状腺検査がネガティブであったら解放されるであろう。

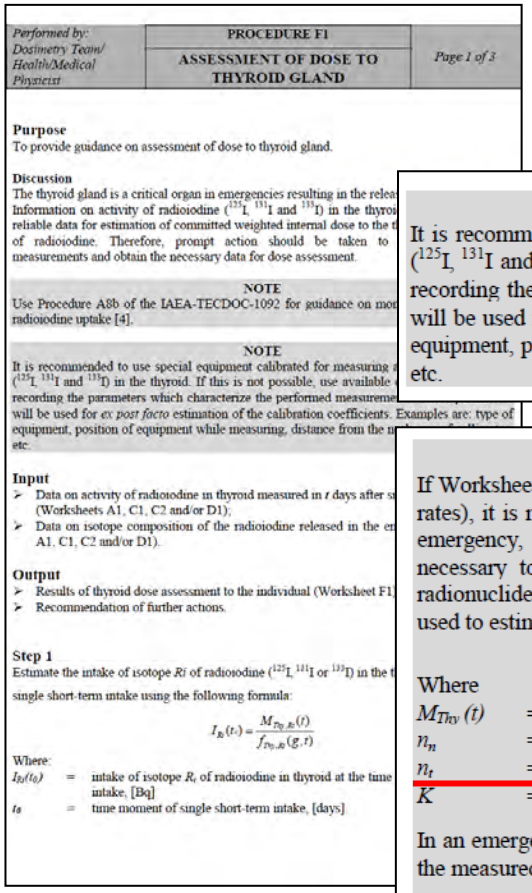
http://www.nirs.qst.go.jp/publication/irregular/03.html

甲状腺測定マニュアル(3)

資料R3-5-7



IAEA, EPR-Medical 2005



Performed by: Dosimetry Team/ Health/Medical Physicist

PROCEDURE F1

ASSESSMENT OF DOSE TO THYROID GLAND

Page 1 of 3

Purpose

To provide guidance on assessment of dose to thyroid gland.

Discussion

The thyroid gland is a critical organ in emergencies resulting in the relea
Information on activity of radioiodine (^{125}I, ^{131}I and ^{133}I) in the thyroi
reliable data for estimation of committed weighted internal dose to the t
of radioiodine. Therefore, prompt action should be taken to
measurements and obtain the necessary data for dose assessment.

NOTE

Use Procedure A8b of the IAEA-TECDOC-1092 for guidance on mot
radioiodine uptake [4].

NOTE

It is recommended to use special equipment calibrated for measuring
(^{125}I, ^{131}I and ^{133}I) in the thyroid. If this is not possible, use available
recording the parameters which characterize the performed measureme
will be used for *ex post facto* estimation of the calibration coefficients. Examples are: type of
equipment, position of equipment while measuring, distance from the n
etc.

Input

- Data on activity of radioiodine in thyroid measured in *t* days after s
(Worksheets A1, C1, C2 and/or D1);
- Data on isotope composition of the radioiodine released in the e
A1, C1, C2 and/or D1).

Output

- Results of thyroid dose assessment to the individual (Worksheet F1
- Recommendation of further actions.

Step 1

Estimate the intake of isotope *Ri* of radioiodine (^{125}I, ^{131}I or ^{133}I) in the t
single short-term intake using the following formula:

$$I_{Ri}(t_s) = \frac{M_{Thy,Ri}(t)}{f_{Thy,Ri}(g,t)}$$

Where:

$I_{Ri}(t_0)$ = intake of isotope R_i of radioiodine in thyroid at the time
intake, [Bq]

t_s = time moment of single short-term intake, [days]

NOTE

It is recommended to use special equipment calibrated for measuring activity of radioiodine (^{125}I, ^{131}I and ^{133}I) in the thyroid. If this is not possible, use available equipment noting and recording the parameters which characterize the performed measurements. These parameters will be used for *ex post facto* estimation of the calibration coefficients. Examples are: type of equipment, position of equipment while measuring, distance from the neck, use of collimator, etc.

NOTE

If Worksheets C1 and/or D1 represent the only data on thyroid survey (gamma radiation count rates), it is necessary to estimate the measured activity of radioiodine in thyroid. In a reactor emergency, when a mixture of radionuclides has been released to the environment, it is necessary to measure count rate above neck and thigh (to eliminate input from other radionuclides in the body, e.g., ^{134}Cs or ^{137}Cs in count rate). The following formula is to be used to estimate the measured activity of radioiodine in thyroid:

$$M_{Thy}(t) = (n_n - n_t) \times K ,$$

Where

$M_{Thy}(t)$ = the activity retained in thyroid [Bq] at time t_m after intake

n_n = gamma-radiation count rate from the neck [unit of count rate]

n_t = gamma-radiation count rate from the thigh [unit of count rate]

K = calibration coefficient [Bq/unit of count rate].

In an emergency with involvement of radioiodine, use only the following formula to estimate the measured activity of radioiodine in thyroid:

$$M_{Thy}(t) = (n_n - n_b) \times K ,$$

Where

$M_{Thy}(t)$= the activity retained in thyroid [Bq] at time t_m after intake

n_n = gamma-radiation count rate from the neck [unit of count rate]

n_b = background gamma-radiation count rate in place of measurement [unit of count rate]

K = calibration coefficient [Bq/unit of count rate].

110

大腿部でバックグラウンドを測定することを推奨

http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/EPR-Medical-2005_web.pdf

甲状腺測定マニュアル(4)

資料R3-5-7

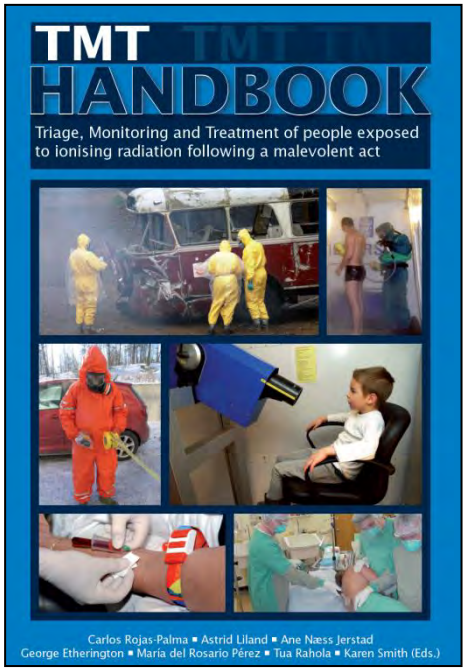


Figure F14a. Measurement of ^{131}I in the thyroid.

Photos: STUK.

Figure F14b. Background measurement to be used for the thyroid measurement of a person. This is important for later dose assessment.

These photographs illustrate the method, but when responding to an incident, additional measures would need to be employed, i.e. the detector would be wrapped in plastic film, and the subject would wear disposable gloves.

http://www.tmthandbook.org/

F.80 Thyroid monitoring with hand-held instruments

(PEOPLE MONITORING TEAM)

1. Choose a suitable area for the monitoring with as low a level of background radiation as possible. If this is not possible outdoors, try a building with high shielding factor, a basement or cellar. The facility should be large enough to make it possible to arrange separate waiting and monitoring rooms.
2. Arrange facility for measurement and for handling the people to be measured. Establish waiting room and monitoring area that should be kept free of contamination. Cover chairs with plastic or other material that can easily be changed.
3. Prepare the monitoring equipment. Preferably use NaI or CsI detector. Provide instrument manuals.
4. Switch on the monitor.
5. Set measuring time (100 seconds or the standard for the instrument used).
6. Do an environmental background measurement.
7. Do a reference measurement on a non-contaminated person, if possible.
8. Register the name of the person to be monitored and other information indicated in the registry form [Annex 3].
9. Shield the detector with a plastic bag which should be replaced after each measurement.
10. Keep the detector close to the persons neck when performing the thyroid measurement [Figure F14a, Information F.80].
11. Perform a background measurement, asking the person to keep the detector resting on the thigh as shown in Figure F14b in Information F.80.
12. Record the results and fill in the registry form.
13. Check that the form is completed correctly.
14. Inform the person monitored about the result.
15. Advise the person on suitable follow up actions.

甲状腺測定マニュアル(5)

資料R3-5-7

HPA-CRCE-044

Practical Guidance on Thyroid Monitoring for Radioiodine Using Hand-held Instruments

M J Youngman

ABSTRACT

Following an incident involving release of radioactive iodine, it may well be necessary to monitor large numbers of people for internal contamination. In the case of iodine-125 (^{125}I), iodine-131 (^{131}I) and radioiodine releases from nuclear reactors (mixtures of ^{131}I and shorter lived iodine radionuclides) screening measurements can be done with simple scintillation probe based instruments held over the thyroid.

This guidance gives a procedure for monitoring of the thyroid using Mini Instruments type 44 and type 42 probes. Factors are given to convert measured count rates to activity in thyroid, dose to the thyroid and committed effective dose for intakes by inhalation. Measurements with these instruments are capable of detecting about 2 kBq of ^{131}I and 1 kBq of ^{125}I in the thyroid of an adult. For measurements made 24 hours after intake, these activities correspond to values of committed effective dose of 0.2 and 0.05 mSv for ^{131}I and ^{125}I respectively, assuming stable iodine has not been administered.

プローブは頸部に近接させる
(計数率が高い場合は10 cm離す)

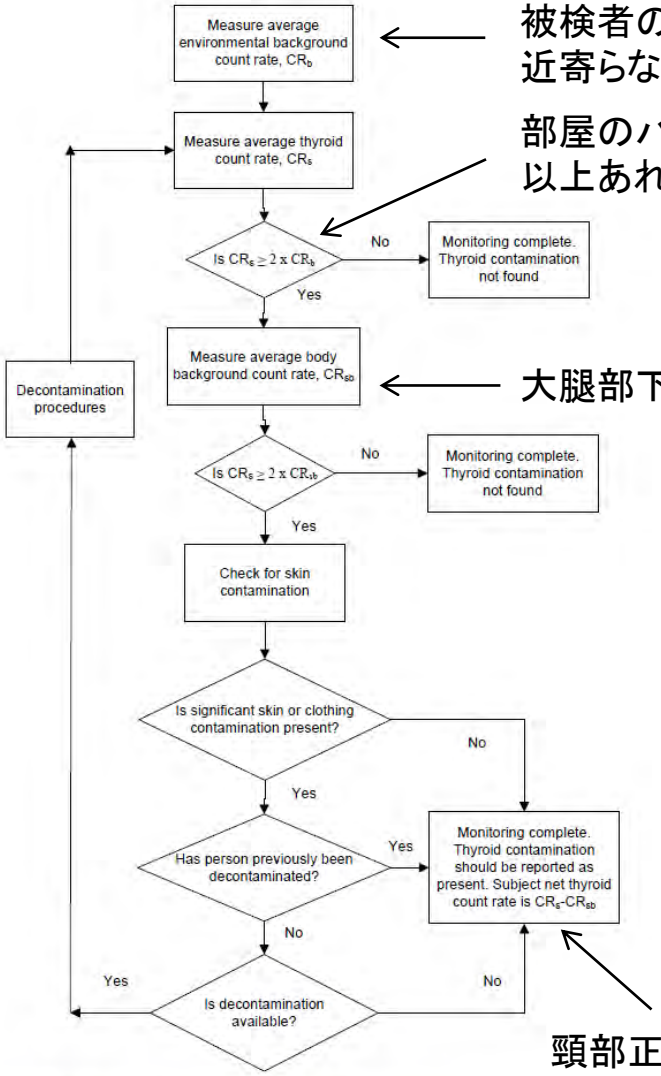


Figure 3 Flow diagram showing thyroid monitoring procedure

被検者の周囲に測定者以外の人が近寄らないようにする。

部屋のバックグラウンド計数の2倍以上あれば検査継続。

大腿部下の計数を測定する。

頸部正味計数＝
頸部の計数－大腿部下の計数

https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/337139/HPA-CRCE-044_for_website.pdf

甲状腺測定マニュアル(5)続き

資料R3-5-7

Table 4 Calibration factors for determining activity of ^{131}I, Type 44 Probe

	Activity Conversion Factor, Bq per cps	
Age	Monitoring Distance - close	Monitoring Distance – 10 cm
< 18 years	110	710
Adult	190	1000

Note: This table should also be used for reactor incidents where the time from reactor shutdown to release is greater than 12 hours.

Table 8 Conversion factors for determining committed effective dose for measurements of ^{131}I, type 44 probe, no stable iodine taken

	Dose Conversion Factor (mSv per cps)					
	Monitoring Distance – close			Monitoring Distance – 10 cm		
Time between intake and monitoring	Less than 5 years	5 to 10 years	10 years and over	Less than 5 years	5 to 10 years	10 years and over
1 hour	0.86	0.49	0.25	5.5	3.2	1.6
2 hours	0.40	0.22	0.11	2.6	1.4	0.71
3 hours	0.27	0.15	0.076	1.7	0.96	0.49
4 hours	0.21	0.11	0.058	1.4	0.71	0.37
6 hours	0.15	0.083	0.042	0.96	0.53	0.27
8 hours	0.12	0.068	0.035	0.77	0.44	0.23
12 hours	0.10	0.055	0.028	0.64	0.35	0.18
1 day	0.09	0.046	0.023	0.58	0.30	0.15
4 days	0.12	0.060	0.029	0.77	0.39	0.19
6 days	0.16	0.075	0.035	1.0	0.48	0.23
8 days	0.20	0.094	0.043	1.3	0.60	0.28
10 days	0.27	0.12	0.052	1.7	0.75	0.33
12 days	0.35	0.15	0.063	2.3	0.93	0.41
14 days	0.45	0.18	0.076	2.9	1.2	0.49
16 days	0.59	0.22	0.092	3.8	1.4	0.59
18 days	0.76	0.28	0.12	4.9	1.8	0.77
20 days	0.99	0.35	0.14	6.4	2.3	0.90

Notes: To obtain thyroid doses these values should be multiplied by a factor of 20.

This table should also be used where the time from reactor shutdown to intake is greater than 12 hours.

令和3年度原子力施設等防災対策事業補助金
（原子力災害等医療実効性確保事業）
第1回　体外計測研修

話題　原子力災害時の甲状腺モニタリング

2021年12月3日【金】

量子科学技術研究開発機構
講師:栗原　治

講義内容

1. 緊急時の甲状腺線量モニタリングに関する検討チーム会合報告書（令和3年9月7日）の内容について

2. 今後の検討課題

検討の経緯

「緊急時の甲状腺被ばく線量モニタリングに関する検討チーム」の設置

令和3年2月3日第53回原子力規制委員会において了承

第1回検討チーム会合 令和3年2月18日	主な議題：対象者の要件について ※OILと甲状腺被ばく線量の関係の試算結果
第2回検討チーム会合 令和3年3月25日	主な議題：甲状腺被ばく線量の測定方法について ※詳細測定器の紹介、簡易・詳細測定の議論
第3回検討チーム会合 令和3年5月27日	主な議題：甲状腺モニタリングの実施体制について スクリーニングレベルについて ※詳細測定器の第3者評価
第4回検討チーム会合 令和3年7月29日	主な議題：検討結果の取りまとめについて ※検討チーム報告書案の提示

別紙

緊急時の甲状腺被ばく線量モニタリング
に関する検討チーム会合
報告書

令和３年９月７日
緊急時の甲状腺被ばく線量モニタリングに関する検討チーム

令和3年9月22日第34回原子力規制委員会に報告書を提示
その後、地域原子力災害医療連携推進協議会等で周知

「緊急時の甲状腺被ばく線量モニタリングに関する検討チーム」からの報告
https://www.nsr.go.jp/data/000365637.pdf

甲状腺被ばく線量モニタリングの対象者

1. 対象とする地域について

- 原子力災害対策指針に示されている運用上の介入レベルであるOIL1及びOIL2に基づく防護措置の対象となった地域を基本とする。
- なお、事故の態様や放射性物質の拡散状況等による不確かさがあるため、状況に応じて対象地域を見直すなど柔軟に対応する必要がある。

※OIL1：500μSv/h【1時間値】、OIL2：20μSv/h【基準値を超過してから概ね1日後の1時間値】

2. 対象とする年齢層について

- 甲状腺がんのリスクが相対的に高い年齢層である19歳未満を基本とする。
- 胎児・乳児への影響が懸念される妊婦・授乳婦も対象とし、さらに、必要に応じて乳幼児と行動を共にした保護者等も対象とする。

対象者の選定根拠 – 地域

事故シナリオのシミュレーションによる屋外の空間線量率と1歳児の甲状腺被ばく線量の関係

H26 の OSCAAR コードによる計算（放出開始時間：12 時間）の特定気象シーケンスの結果
（1.5km～30km 評価点）

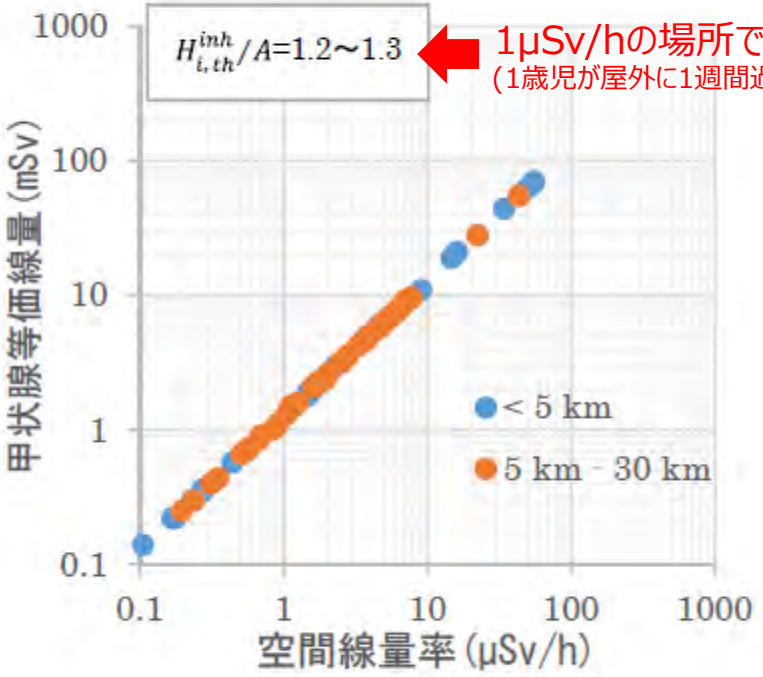


図１　降雨なし

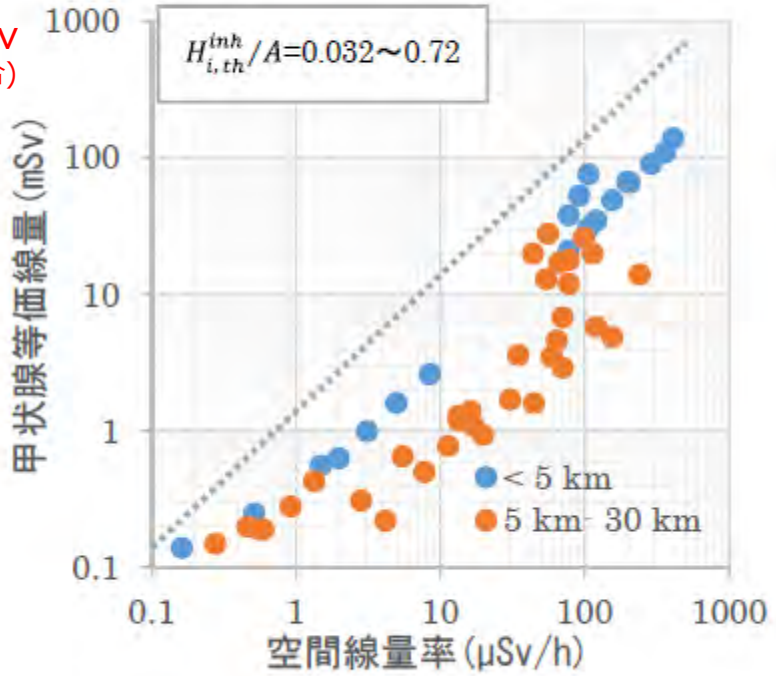


図２　降雨あり

OIL２【20μSv/h】以下であれば、安定ヨウ素剤服用の基準となる国際的基準【最初の7日間で50mSv】を十分に下回る。

対象者の選定根拠－年齢

考慮すべき事項

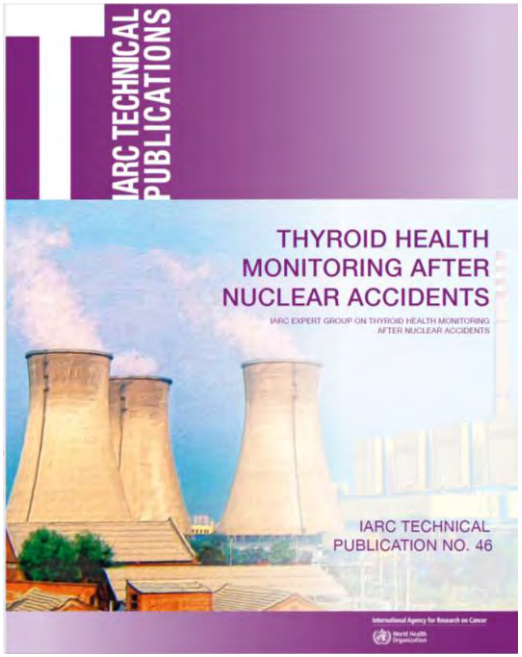
- 放射線被ばくによる健康影響（確定的及び確率的影響）及び対象地域住民の全体的な被ばく線量分布の把握の両方の観点から、対象年齢の検討が必要。
- チェルノブイリ事故後のコフォート調査では19歳未満を重点的に解析
  - 小児に認められた甲状腺がんの増加が放射性ヨウ素による内部被ばくによるものであることが判明
- 胎児及び乳児に対する放射線影響を考慮
  - ICRP Publ.88、Publ.95には母親の内部汚染による胎児または（授乳を介した）乳児への線量係数を掲載
- 成人の放射線リスクは子供に比べて低いが、対象地域住民に対する線量再構築の観点から成人のモニタリングを一定数行うことは有用
  - 高い線量が測定された子供の親や妊婦を対象とした測定を追加
- 福島県民健康調査の甲状腺検査は、震災当時に県内に居住していた19歳未満の住民を対象

「緊急時の甲状腺被ばく線量モニタリングに関する検討チーム」第1回会合資料より（一部改編）

参考-IARCレポート

Considerations specific to release of radioactive substances, and radioiodine in particular

Dosimetric monitoring in case of a radiological or nuclear accident involving release of radioiodine



- 個人の甲状腺の放射性ヨウ素摂取量（つまり^{131}I摂取量）を測定し評価するために、訓練を受けた専門スタッフをなるべく早期に、できれば原子力事故から4週間以内、また遅くても6週間以内に配置すべきである（測定器の^{131}I最小検出可能放射能が500Bqより小さければ、評価は事故後6週間後以降も行える）。
- この測定及び評価は、主要な被ばく経路をよりよく理解するのに有用な被ばくの概観を示すため、十分な数の代表的な被災住民のサンプルに対して実施しなければならない。
- 被ばくした住民の甲状腺の放射性ヨウ素摂取量を直接測定することは重要で、被ばく時に小児期と思春期の子どもたち（19歳未満）そして妊婦だった女性を優先的に測定する。
- 乳幼児の甲状腺の放射性ヨウ素摂取量の測定が不可能な場合、授乳中の女性に母乳の測定を受けてもらうべきである。
- 資源が許すならば、放射性ヨウ素によって高線量の被ばくをした成人の甲状腺測定も非常に有用な情報をもたらす。なぜなら、これによって、主な被ばく経路など、線量推定に重要となりうる因子を、子どもに見られるもの以外にも特定できるからである。

環境省：http://www.env.go.jp/chemi/rhm/post_132.html

甲状腺被ばく線量モニタリングの測定方法

1. 簡易測定の方法

- 簡易測定はNaI(Tl)サーベイメータによる測定を基本とすること。
- バックグラウンド値を差し引いた正味値を評価すること。
- バックグラウンド値の測定は、被測定者の大腿部を基本とすること。
  （ただし、着衣等に汚染がある場合には汚染のない腹部等を直接測定する）
- 測定部位となる首周りは拭うなどの簡易除染を行うこと。

2. 詳細測定の対象

- 簡易測定から詳細測定に移行する際のスクリーニングレベルを設定し、スクリーニングレベルを超えた者を対象に行うことを基本とする。
- 具体的なスクリーニングレベルは、0.2μSv/hを目安とする。
- なお、事故の態様や放射性物質の拡散状況等に不確かさがあることから、国はスクリーニングレベルを適切に見直し判断できる体制をあらかじめ構築しておくことが必要である。

NaIサーベイメータを用いた簡易測定

1. 体表面汚染が無いことを確認した後、被検者の咽頭下部（写真）にプローブを密着させた状態で保持し、時定数10秒で指示値が安定したときの数値**【測定値A】**を読み取る。

（補足説明）
- プローブの先端はティッシュペーパー等を被せて、汚染を確認した場合には速やかに外せるようにしておく。
- 可能であればウエットティッシュ等で軽く拭う。
- 一度リセットをした場合、指示値が安定するのは30秒後以降（時定数10秒の場合）

2. 着衣の汚染が無いことを確認した後、大腿部中央付近にプローブを密着させた状態で保持し、時定数10秒で指示値が安定したときの数値**【測定値B】**を読み取る。

正味値＝測定値A−測定値B

↕

基準値等と比較

※測定室内の空間線量率も定期的に測定する。

量研-甲状腺簡易測定マニュアル

1. 甲状腺簡易測定の概要

吸入や経口を介して放射性ヨウ素が体内取り込まれると，安定（放射性でない）ヨウ素と同様に甲状腺に集積するため，甲状腺内部被ばくをもたらす。原子力災害時に最も甲状腺内部被ばく線量に寄与する核種はヨウ素-131（^{131}I）である[1]。甲状腺は外部放射線からも被ばくを受けるが，その線量は外部放射線による実効線量と同程度であり，甲状腺内部被ばく線量に比べて軽微である。ヨウ素-131の物理学的半減期は8.02日であるため，原子力災害時に近隣住民の内部被ばくのおそれがある場合には，速やかに対象者に対する甲状腺線量測定を開始する必要がある。

ヨウ素-131は放射性壊変（ベータ壊変）に伴い，幾つかのエネルギーのγ線を放出する。最も放出率の高いガンマ線のエネルギーは365 keV（81.7%）であり，被測定者の頸部（前面）近傍にガンマ線検出器を配置することにより，甲状腺に集積したヨウ素-131を確認することができる（図1）。また，使用するガンマ線検出器を事前に校正（後述）しておけば，甲状腺中のヨウ素-131を定量することができる。こうした測定は体外計測とよばれ，ホールボディカウンタ（WBC）は体外計測装置の代表例である。

本マニュアルで述べる甲状腺簡易測定では，場の空間線量率（または周辺線量当量率）の測定に広く使われている NaI(Tl)サーベイメータを用いる。同機器では核種同定はできないものの，操作が簡易なために測定者の確保がしやすく，多数の住民を対象としたスクリーニングを目的とした測定には適している。また，事前に機器を適切に校正しておけば，必要十分な精度で甲状腺中ヨウ素-131の定量が可能である。

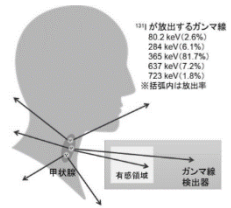


図1　甲状腺中ヨウ素の測定原理

[1] ^{131}I以外に，^{132}Te～^{132}I，^{133}I等も甲状腺内部被ばく線量に寄与する場合がある。^{132}Te，^{132}I，^{133}Iの物理学的半減期はそれぞれ3.204日，2.295時間，20.8時間である（^{132}Teと^{132}Iは速やかに放射性平衡になる）。これらの核種は，原子力発電所の運転停止直後は^{131}Iよりも放射能が高い。

4. 甲状腺簡易測定の手順

図6は甲状腺簡易測定の手順を示している。各手順について以下に説明する。

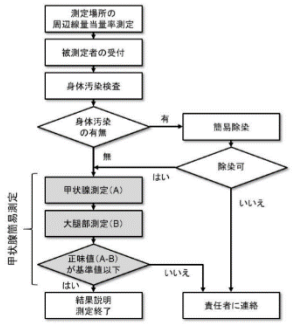


図6　甲状腺簡易測定の手順

(1) 測定場所の周辺線量当量率測定

現時点で甲状腺簡易測定を行う場所は決まっていないものの，避難退域時検査[3]と併せて行うことは困難[2]であることから，同検査後の移動先となる避難所の中から選定されるものと思われる。甲状腺簡易測定の対象者としては，UPZ（緊急防護措置区域，概ね当該原発から30 km圏内）において避難指示の出された区域の住民が第一候補として想定される[4]。

(2) 被測定者の受付

被測定者に対し，①氏名，②生年月日，③性別，④住所，⑤避難経路，⑥安定ヨウ素剤の服用有無，⑦食事状況等について回答してもらうためのアンケート用紙（参考2）を配布し，必要事項を記載してもらう。アンケート用紙はなるべく簡便なものとする。

[2] 避難退域時検査（OIL4を超過する身体汚染の有無を確認する検査）は，避難者が検査場所までの移動に使用した車両を測定することを基本とするため，その運用を変更しない限り甲状腺簡易測定を行うのは難しい。

[4] より近傍のPAZ（予防的措置区域）内住民については，放射性物質の放出前に避難することとされている。

(3) 身体汚染検査

避難退域時検査と同等な要領（時定数3秒，スキャン速度10 cm/秒程度，測定レンジは10 kcpm）でGMサーベイメータを用いて身体汚染検査を行う。ただし，バックグラウンドの変動範囲を超える有意な汚染を検知した場合[5]には，汚染箇所の特定を行い詳細なサーベイを行うとともに，被測定者に対して簡易除染を促す。

(4) 簡易除染

被測定者に上着を脱いでもらい，再度身体汚染の測定を行う。それでも汚染が残っているようであれば，濡れワイプ等を用いて簡易除染を行う。

(5) 甲状腺測定

NaI(Tl)サーベイメータのプローブを，普座した被測定者の頸部下部（左右鎖骨の中央付近の上側）に軽く密着させる形で保持し（図7），前章の要領で指示値(A)を読み取る。測定中はなるべくプローブが動かないようにする。なお，被測定者に上を見るような形で頸部を伸展してもらうと，プローブを密着させやすい。

図7　甲状腺測定におけるプローブ位置

(6) 大腿部測定

(5)と同様な要領で被測定者の大腿部上にプローブを置いて指示値(B)を読み取る。

(7) 正味値の確認

指示値(A)から指示値(B)を差し引いて正味値(A-B)を求める。正味値が下記の基準値（参考3）を超えた場合には甲状腺簡易測定の責任者に連絡する。

[5] 避難退域時検査に用いるOIL4は，緊急時に行う除染の基準として用いられるものである。甲状腺簡易測定を行う前は，可能な限り身体汚染のない状況であることが必須である。これは体外計測全般に言えることである。

量研が主催する甲状腺簡易測定研修においてマニュアルを解説。同研修では、内側に様々な強度の線源をセットとしたマネキンを用いた実習を併せて実施。

資料R3-5-7

基準値【スクリーニングレベル】の導出-量研マニュアル

線量: 100 mSv

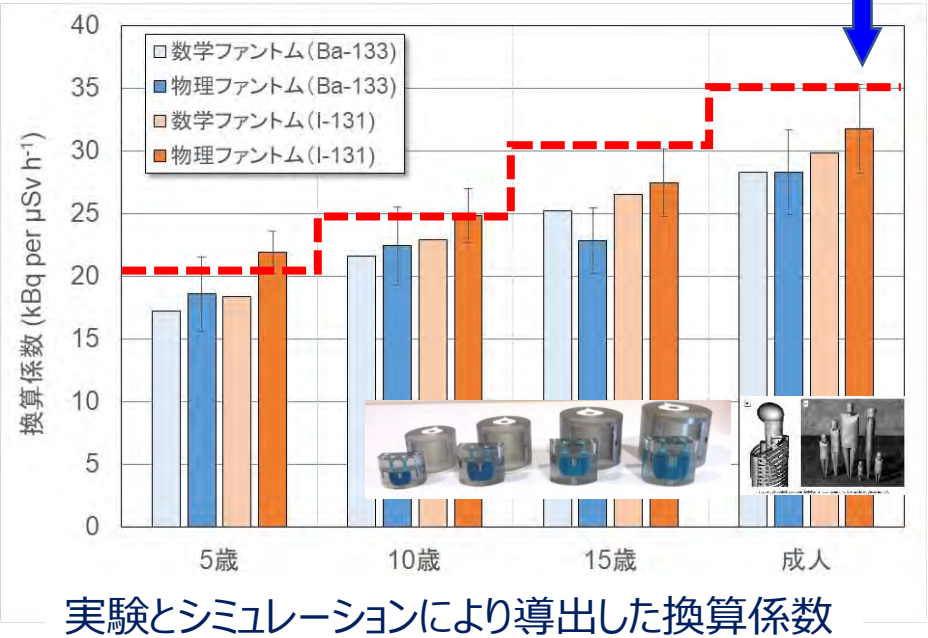
甲状腺残留率 （Bq/Bq）

General Criteria

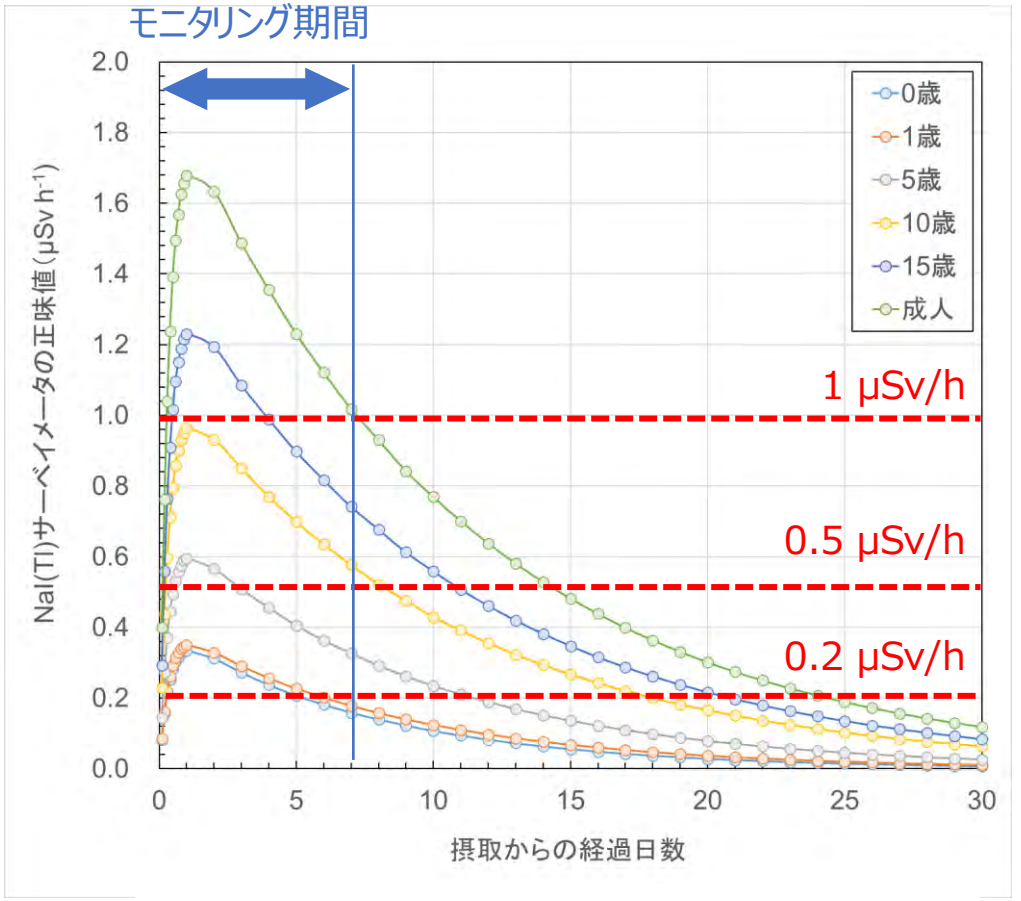
$$SL = \frac{0.1 \times R_{thyroid,\,age}(t)}{e_{thyroid,\,age} \times C_i} \ (\mu Sv/h)$$

甲状腺線量係数（Sv/Bq）

換算係数（kBq per μSv/h）



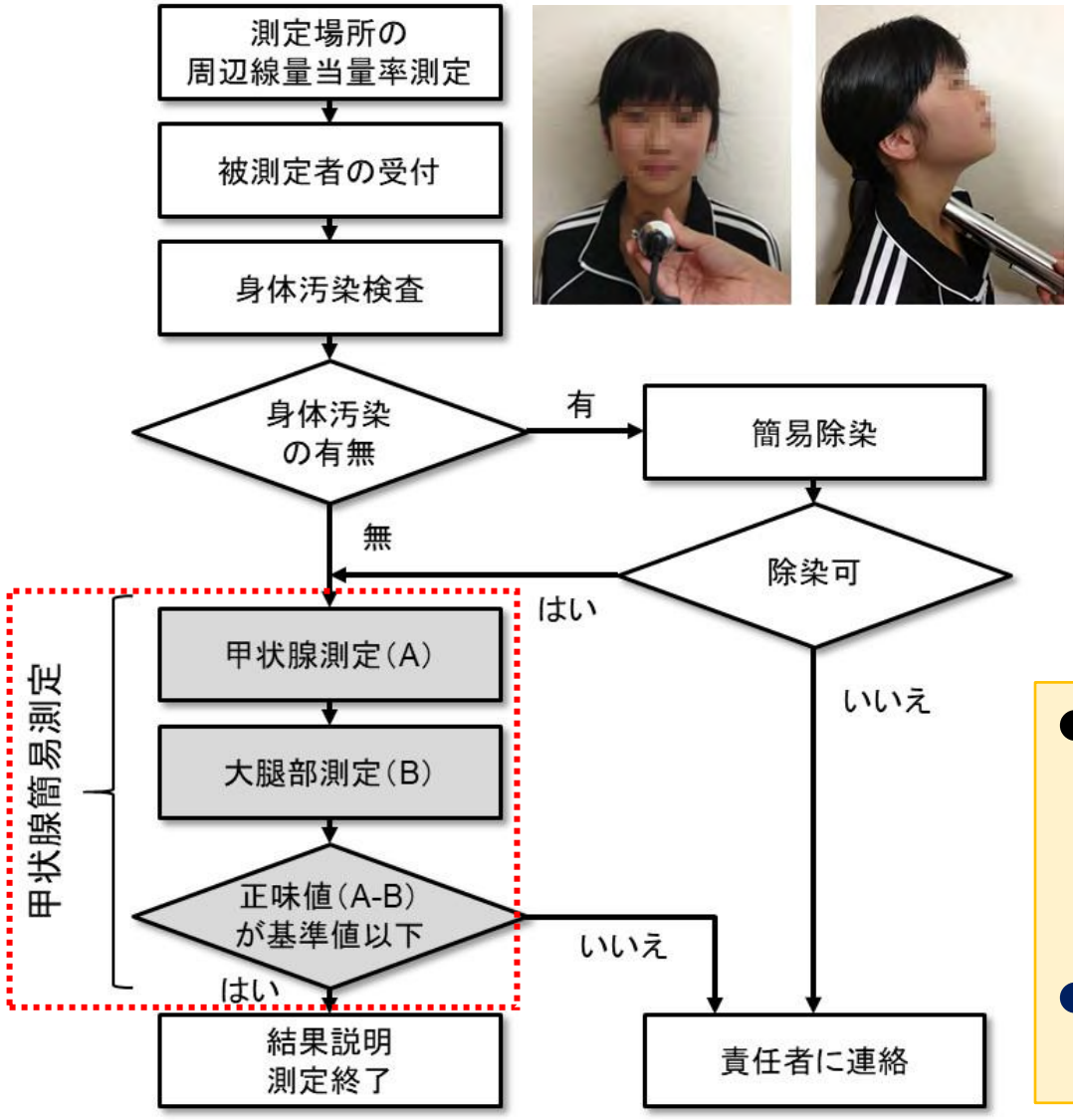
実験とシミュレーションにより導出した換算係数
（ファントムとプローブの距離は5mm）



甲状腺等価線量100 mSvに相当する正味値

0y：1歳未満（満年齢で0歳のみ）
1y：1歳以上3歳未満（満年齢で1歳、2歳）
5y：3歳以上8歳未満（満年齢で3歳、4歳、5歳、6歳、7歳）
10y：8歳以上13歳未満（満年齢で8歳、9歳、10歳、11歳、12歳）
15y：13歳以上18歳未満（満年齢で13歳、14歳、15歳、16歳、17歳）
Adult：18歳以上（満年齢で18歳以上）

甲状腺簡易測定の手順-量研マニュアル

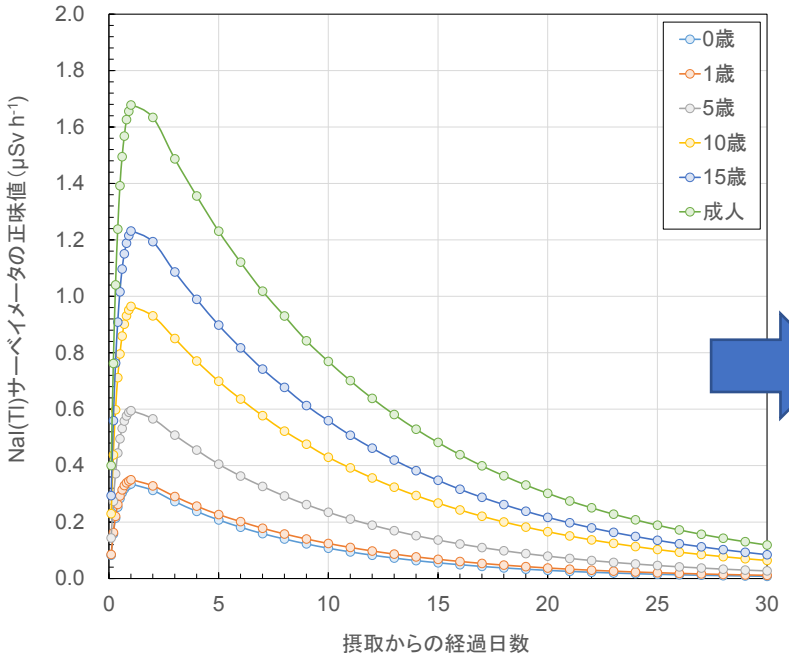


量研マニュアルでは、基準値を甲状腺等価線量100mSvを概ね担保する値（ただし、1週間以内の測定）として**暫定的に**以下のとおりに設定

7歳以下：**0.2 μSv h^{-1}**
8歳以上17歳以下：**0.5 μSv h^{-1}**
18歳以上：**1.0 μSv h^{-1}**

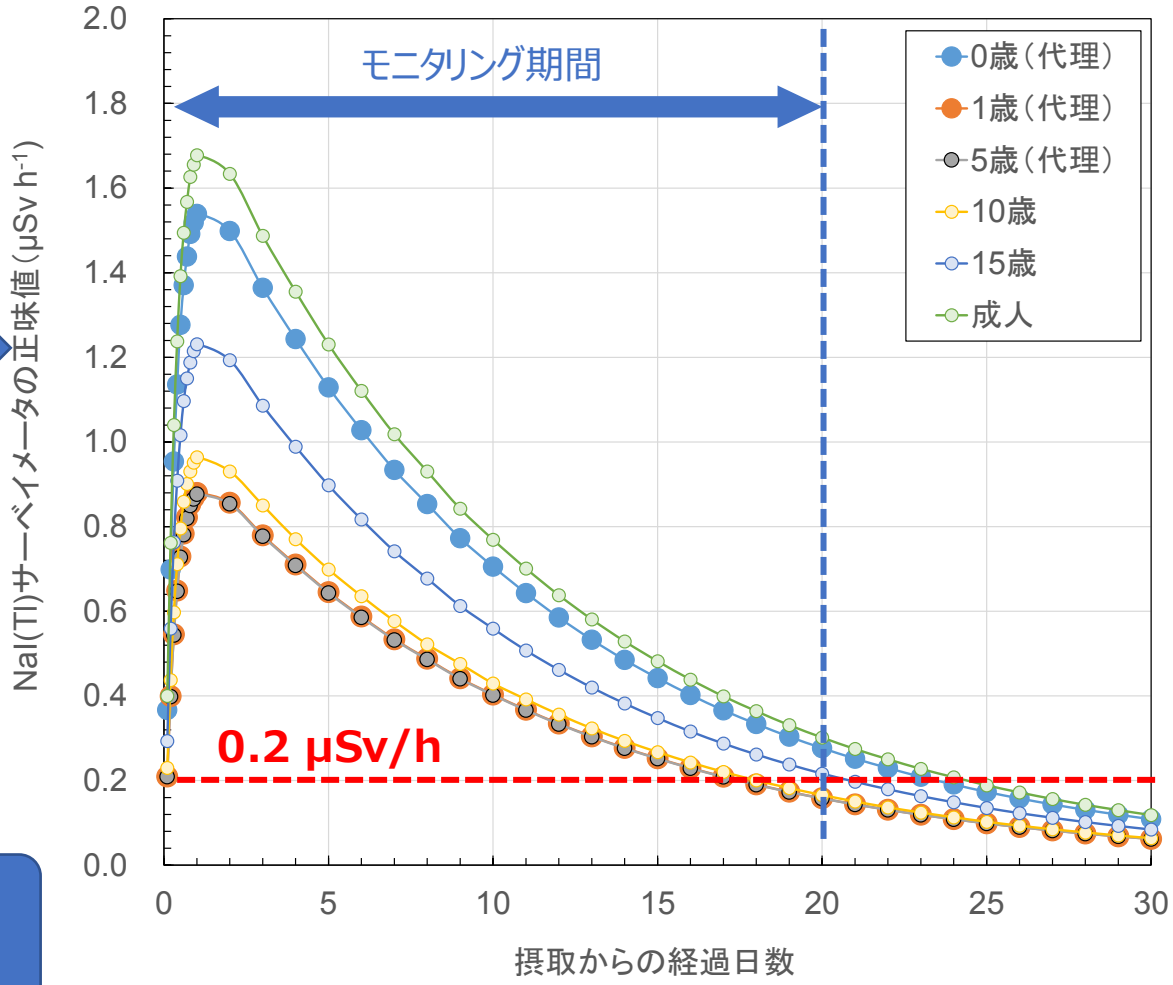
- 検討チーム報告書では、8歳未満は保護者等を代わりに測定することとし、基準値【スクリーニングレベル】を8歳以上を対象に**0.2μSv/hに統一**
- 概ね**3週間**までのスクリーニングが実施可能

基準値【スクリーニングレベル】の導出-検討チーム報告書



子供【5歳児年齢群以下】の保護者が、
呼吸量の差に応じて吸入すると仮定

$$\text{保護者の摂取量} = \text{子供の摂取量} \times \frac{\text{成人の呼吸量}}{\text{子供の呼吸量}}$$



甲状腺等価線量100 mSvに相当する正味値
（ただし5歳児年齢群以下は保護者による代理測定）

参考-線量係数と呼吸量

吸入摂取による線量係数（単位摂取量Bqあたりのmsv）

核種	評価対象【年齢】	乳児【0歳】	1歳児【1-2歳】	5歳児【3-7歳】	10歳児【8-12歳】	15歳児【13-17歳】	成人【18歳以上】
^{134}Cs	全身	1.1E-05	7.3E-06	5.2E-06	5.3E-06	6.3E-06	6.6E-06
^{137}Cs	全身	8.8E-06	5.4E-06	3.6E-06	3.7E-06	4.4E-06	4.6E-06
^{131}I	全身	1.7E-04	1.6E-04	9.4E-05	4.8E-05	3.1E-05	2.0E-05
	甲状腺	3.3E-03	3.2E-03	1.9E-03	9.5E-04	6.2E-04	3.9E-04

※吸収タイプはいずれもタイプF，^{131}Iの化学形は元素状ヨウ素の数値を引用（ICRP Publ.71）

評価対象（年齢）	乳児	1歳児	5歳児	10歳児	15歳児（男性）	成人（男性）
1日呼吸量（m^3/day）	2.86	5.16	8.72	15.3	20.1	22.2
1日呼吸量×甲状腺線量係数の成人に対する比	**1.1**	**1.9**	**1.9**	**1.7**	**1.4**	**1.0**

※1日平均呼吸量（ICRP Publ.71）

^{131}Iの甲状腺等価線量係数は年齢差が大きく、１歳及び5歳年齢群が決定集団となる

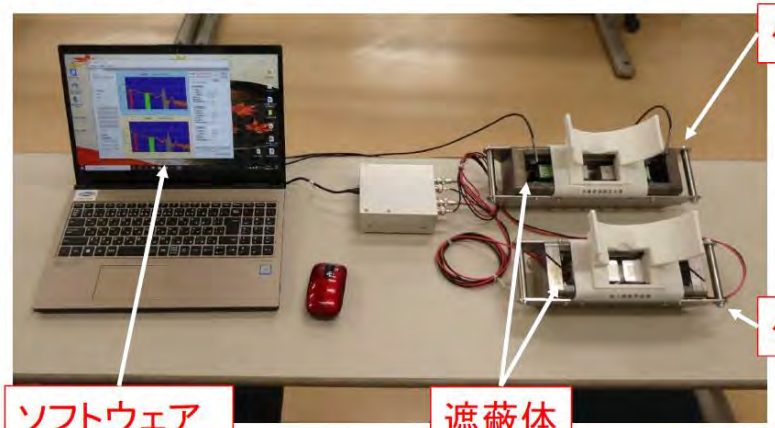
詳細測定器-JAEA開発機器

- 遮へい一体型であり、高バックグラウンド線量率環境下での測定が可能
- 測定がうつ伏せ姿勢が基本であるが、乳児や妊婦等の場合は仰向け姿勢で測定

【機器概要】
- 検出素子：$LaBr_3(Ce)$…公衆用
- 電源供給：制御用ノートPCから給電
- 重量：約14.4 kg　※遮へい体含む

【測定性能】
- 20μSv/hの環境下で150秒測定での検出下限値：小児650Bq、成人950Bq
  → 摂取5日後の甲状腺等価線量10mSv相当

甲状腺モニタシステム



ソフトウェア
簡単なボタン操作で測定・保存が可能（専門知識不要）
測定結果（放射能、等価線量）のリアルタイム表示

遮蔽体
タングステン合金採用（検出器付近）により、コンパクトで効果的な遮蔽を実現

作業者用：16.6kg
様々な核種が混在する高B.G.環境下での測定
→ エネルギー分解能に優れるCdZnTe検出器

CdZnTe検出器（2個）

公衆用：14.4kg
乳幼児などを考慮して短時間測定、低い評価下限値が必要
→ 高い検出効率を持つ$LaBr_3$検出器

$LaBr_3$検出器（2個）

◎検出器2個、被検者固定用治具
⇒ 位置ずれの影響軽減、感度向上を図り測定精度を向上

測定のイメージ

小児・成人（うつ伏せ）

詳細測定器-QST開発機器

- 小児・乳幼児用、成人用の複数のプローブがあり、年齢・体格に合わせた対応が可能

【機器概要】
- 検出素子：GAGG
- 電源供給：制御用ノートPCから給電
- 重量：約1.5 kg　※成人用

【測定性能】
- 2.5μSv/hの環境下で180秒測定での検出下限値：約300Bq
  → 摂取1w後の甲状腺等価線量10mSv相当

GAGG検出素子
温度変化によるゲインシフトの自動調整機能あり

組立式シールド

モニタ支持機構
【左写真】

資料R3-5-7

甲状腺被ばく線量モニタリングの実施体制-簡易測定

- 測定場所は、避難所又はその近傍の実施可能な適所を基本とする。
- 測定期間は、おおむね3週間内の実施を基本とする。
- 測定体制については、地方公共団体が原子力災害医療協力機関、原子力事業者等の協力を得て体制を構築することを基本とすることが適切である。

簡易測定

	平時の役割	緊急時の役割
国	●甲状腺被ばく線量モニタリングの実施に関する考え方を示すとともに、地方公共団体等による実施体制の整備を支援する	●甲状腺被ばく線量モニタリングの実施について判断し、地方公共団体に対して指示を行う ●地方公共団体等の求めに応じて必要な各種支援を行う
地方公共団体	●OIL対象地域の住民等を対象とした簡易測定を実施するための体制整備（測定資機材の整備、測定場所、測定要員の確保、対象住民等の名簿作成、測定結果の管理等）を行う ●簡易測定を行うことができる測定者をあらかじめ確保するとともに、高度被ばく医療支援センター（基幹を含む）が実施する甲状腺計測研修を受講する	●甲状腺被ばく線量モニタリングの実施体制を立ち上げ、測定を実施するとともに、測定結果を含め、測定を実施した住民等の個人情報の適切な管理を行う
原子力災害医療協力機関	●簡易測定を行うことができる測定者をあらかじめ確保する ●高度被ばく医療支援センター（基幹を含む）が実施する甲状腺計測研修を受講する	●当該被災道府県及び非被災道府県の原子力災害医療協力機関は国又は地方公共団体の求めに応じて簡易測定要員を派遣し、測定又は記録を行う
原子力事業者	●簡易測定の実施に当たり、検査の円滑な実施のため、測定、会場設営等に必要な要員や測定器等の資機材を確保する	●検査の実施に必要な要員の派遣や資機材の提供を行う
高度被ばく医療支援センター（基幹を含む）	●原子力災害医療協力機関等に対する甲状腺計測研修の実施のほか、必要な技術的支援を行う	●国、地方公共団体等に対して必要な技術的支援を行う
指定公共機関（量子科学技術研究開発機構、日本原子力研究開発機構）	●ホールボディカウンタ、甲状腺モニタ等の配備・維持管理、測定・評価要員の確保等を行う	●国及び地方公共団体と連携し、緊急時における内部被ばく線量及び外部被ばく線量の推計等に必要な技術的支援を行う

資料R3-5-7

甲状腺被ばく線量モニタリングの実施体制-詳細測定1

- 測定期間は、おおむね4週間内の実施を基本とする。

開発された詳細測定器が普及した場合における詳細測定の実施体制

- 測定体制は、地方公共団体が高度被ばく医療支援センターや原子力災害医療協力機関等の協力を得て体制を構築することが適切である。
- 測定場所は、避難所又はその近傍の実施可能な適所を基本とする。
- 詳細測定を実施する主体は地方公共団体とし、測定者又は記録者は詳細測定器の取り扱いなど一定の技能や経験を有することが望ましいことから、高度被ばく医療支援センターや原子力災害医療協力機関とすることが適切である。

開発された詳細測定器が導入されるまでの間の対応

- 測定体制は、その実施主体は地方公共団体とし、現行の甲状腺モニタが設置されている原子力災害拠点病院、高度被ばく医療支援センターにおいて実施することを基本とすることが適切である。
- 測定者は現行の甲状腺モニタが設置されている原子力災害拠点病院等に所属する診療放射線技師等が測定者となる。

資料R3-5-7

甲状腺被ばく線量モニタリングの実施体制-詳細測定2

詳細測定

	平時の役割	緊急時の役割
国	●甲状腺被ばく線量モニタリングの実施に関する考え方を示すとともに、地方公共団体等による実施体制の整備を支援する	●甲状腺被ばく線量モニタリングの実施について判断し、地方公共団体に対して指示を行う ●地方公共団体等の求めに応じて必要な各種支援を行う
地方公共団体	●簡易測定の結果、スクリーニングレベル超えた者を対象とした詳細な測定を実施するための体制整備（測定場所、測定要員の確保、対象住民等の名簿作成、測定結果の管理等）を行う	●甲状腺被ばく線量モニタリングの実施体制を立ち上げ、測定結果を含め、測定を実施した住民等の個人情報の適切な管理を行う ●詳細測定実施後の線量評価について、測定結果を個人が特定できないよう加工した上で基幹高度被ばく医療支援センターに線量評価を依頼する
基幹高度被ばく医療支援センター	●原子力災害拠点病院、原子力災害医療協力機関等に対する甲状腺計測研修、体外計測研修（WBC研修）を実施するほか、必要な技術的支援を行う ●詳細測定を行うことができる測定者をあらかじめ確保するとともに、詳細測定器の管理を行う	●国又は地方公共団体の求めに応じて詳細測定の結果について線量評価を行う ●地方公共団体等に対して評価結果を伝えるとともに、必要な技術的支援を行う
高度被ばく医療支援センター（基幹を含む）		●国又は地方公共団体の求めに応じて詳細測定要員を派遣し、測定を行う
原子力災害医療協力機関	●詳細測定を行うことができる測定者をあらかじめ確保する ●高度被ばく医療支援センター（基幹を含む）が実施する甲状腺計測研修を受講する	●当該被災道府県及び非被災道府県の原子力災害医療協力機関は国又は地方公共団体の求めに応じて詳細測定要員を派遣し、測定を行う
指定公共機関（量子科学技術研究開発機構、日本原子力研究開発機構）	●ホールボディカウンタ、甲状腺モニタ等の配備・維持管理、測定・評価要員の確保等を行う	●原子力緊急事態宣言発出後、国及び地方公共団体と連携し、緊急時における内部被ばく線量及び外部被ばく線量の推計等に必要な技術的支援を行う
原子力災害拠点病院	●体外計測を行うことができる測定者をあらかじめ確保する ●高度被ばく医療支援センター（基幹を含む）が実施する体外計測研修（WBC研修）を受講する	●当該被災道府県及び非被災道府県の原子力災害拠点病院は、国又は地方公共団体の求めに応じて体外計測（WBC）を行う
原子力事業者	●詳細測定の実施に当たり、検査の円滑な実施のため、会場設営等に必要な要員をあらかじめ確保する	●検査の実施に必要な要員を派遣する

今後の検討課題-検討チーム報告書

- 甲状腺モニタリングに係る体制整備
  - モニタリングの実施主体となる地方公共団体に対して、広域的な測定要員の派遣を可能とする制度整備、測定マニュアル類の整備、資機材や体制整備に関する技術的・財政的な支援等が必要
- 甲状腺モニタリングの解釈と被検者への説明
  - 測定結果から被ばく線量評価を行うための摂取シナリオの特定→環境モニタリング結果と行動調査が必須
  - 線量推定結果の住民説明→リスコミ的なアプローチ
  - 後の健康管理への活用→データの電子化、個人情報保護

提案する甲状腺内部被ばくモニタリング

緊急時段階（放射性核種の環境放出）

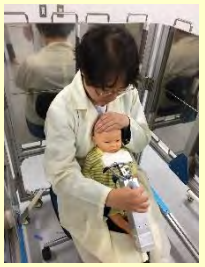
中期段階（環境放出が概ね収束）

原子力緊急事態発生

OIL1、2超

避難

避難退域時検査
OIL4基準



複数のGAGG検出素子を用いた新モニタの提案
既存あるいは新規に開発する
スペクトロメータによる測定

車載型WBCによる
測定（セシウムを対象）

1. 簡易測定

基準超

2. 詳細測定

3. 追加測定

ヨウ素・セシウム比の評価のため、詳細検査の対象者の一部を追加調査に含める。

簡易検査の精度確認のため、異なる方法で同一被検者の一部を詳細検査に含める。

～1週間

～1ヶ月

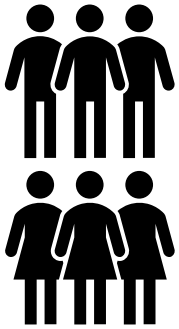
～3カ月

内部被ばく線量評価のためには，行動情報（避難経路、摂水、安定ヨウ素剤等）も必要

Kim and Kurihara J. Radiat. Prot. Res. (2020) から改編

甲状腺被ばくモニタリング会場の設置

甲状腺測定会場の人員配置例



模擬被検者

受付（3名）

身体汚染測定 レーン1（2名）

身体汚染測定 レーン2（2名）

身体汚染測定 レーン3（2名）

甲状腺線量測定 レーン1（2名）

甲状腺線線量測定 レーン2（2名）

甲状腺線量測定 レーン3（2名）

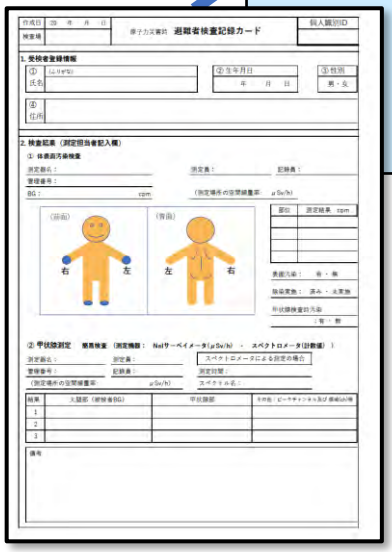
結果説明（3名）

模擬被検者

医師による説明

簡易除染（2名）

待合場所、荷物保管場所等スペース



量研機構で実施した新型コロナウイルスワクチン職域接種の実施会場

行動調査

作成日	20　年　月　日	原子力災害時 **避難者検査記録カード**	個人識別ID
検査場			

1. 受検者登録情報

① 氏名	(ふりがな)	② 生年月日	③ 性別
		年　月　日	男・女

④ 住所	

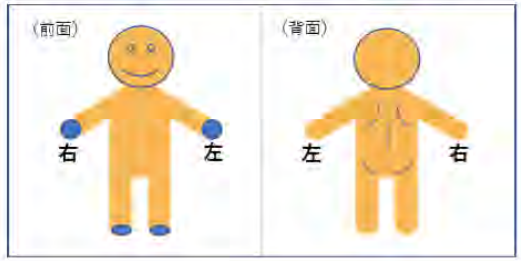
2. 検査結果（測定担当者記入欄）

① 体表面汚染検査

測定器名：　　測定員：　　記録員：

管理番号：

BG：　　cpm　　（測定場所の空間線量率：　μSv/h）



部位	測定結果　cpm

表面汚染：　有・無

除染実施：　済み・未実施

甲状腺検査時汚染：有・無

② 甲状腺測定　簡易検査（測定機器：　NaIサーベイメータ(μSv/h)　・　スペクトロメータ(計数値)　）

測定器名：　　測定員：

管理番号：　　記録員：

（測定場所の空間線量率：　μSv/h）

スペクトロメータによる測定の場合

測定時間：

スペクトル名：

結果	大腿部（被検者BG）	甲状腺部	その他：ピークチャンネル及び核種(cm)等
1			
2			
3			

備考

3. 避難行動調査

① 避難準備指示、屋内退避指示、避難指示を受け取った場所と、その時の屋内・屋外滞在の別をご記入ください。

避難準備指示：　自宅 ・ 自宅外（場所・住所　　）／ 屋内 ・ 屋外

屋内退避指示：　自宅 ・ 自宅外（場所・住所　　）／ 屋内 ・ 屋外

避難指示　：　自宅 ・ 自宅外（場所・住所　　）／ 屋内 ・ 屋外

② 避難を開始した日時をご記入ください。　（　月　日　：　）

③ 避難時に同行者（一緒に行動した人）がいた場合、家族・その他別に代表者のお名前と人数をご記入ください。

家族：代表者（　　）・人数（　人）　／　その他：代表者（　　）・人数（　人）

④ 避難開始から避難完了までの避難経路（行動、移動手段、期間、場所）を教えてください。

	行動	移動手段	期間	場所（移動元・先、滞在）
1	移動 ・ 滞在	車・徒歩・その他（　）	/　:　～　/　:	
2	移動 ・ 滞在	車・徒歩・その他（　）	/　:　～　/　:	
3	移動 ・ 滞在	車・徒歩・その他（　）	/　:　～　/　:	
4	移動 ・ 滞在	車・徒歩・その他（　）	/　:　～　/　:	
5	移動 ・ 滞在	車・徒歩・その他（　）	/　:　～　/　:	
6	移動 ・ 滞在	車・徒歩・その他（　）	/　:　～　/　:	

⑤ 避難中の出来事や気づいた点があればご記入ください。

4. 安定ヨウ素剤の服用

① 安定ヨウ素剤*を服用しましたか？：　はい ・ いいえ　　*：ヨウ化カリウム(mg)，ヨウ化カリウム錠(錠)

② ①で「はい」の場合、服用回数、服用時期、日時、服用量を教えてください　服用回数：

1回目　服用時期：避難前 ・ 避難後　|　服用日時（　月　日　：　）|　服用量：　mg ・ 錠

2回目　服用時期：避難前 ・ 避難後　|　服用日時（　月　日　：　）|　服用量：　mg ・ 錠

3回目　服用時期：避難前 ・ 避難後　|　服用日時（　月　日　：　）|　服用量：　mg ・ 錠

5. 食事状況調査

①発災後から現在まで、摂取制限指示のあった食品等を摂取しましたか？　：　はい ・ 可能性あり ・ いいえ

②発災後から現在まで、放射能汚染の可能性のある食品等を摂取しましたか？　：　はい ・ 可能性あり ・ いいえ

③　①②で「はい」「可能性あり」を選択した方は、その状況について詳しく教えてください

6. 個人情報利用の許諾

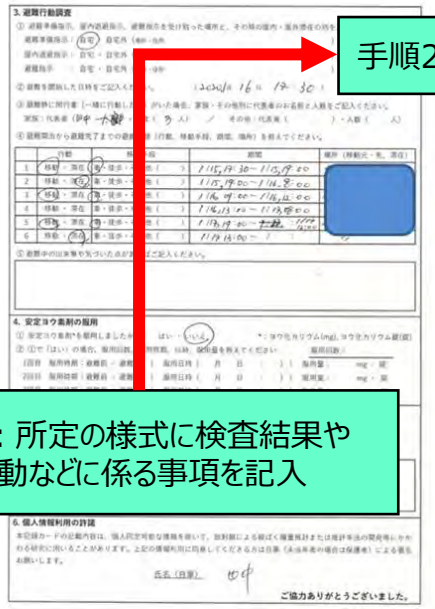
本記録カードの記載内容は、個人同定可能な情報を除いて、放射線による被ばく線量推計または推計手法の開発等にかかわる研究に用いることがあります。上記の情報利用に同意してくださる方は自筆（未成年者の場合は保護者）による署名お願いします。

氏名（自筆）

ご協力ありがとうございました。

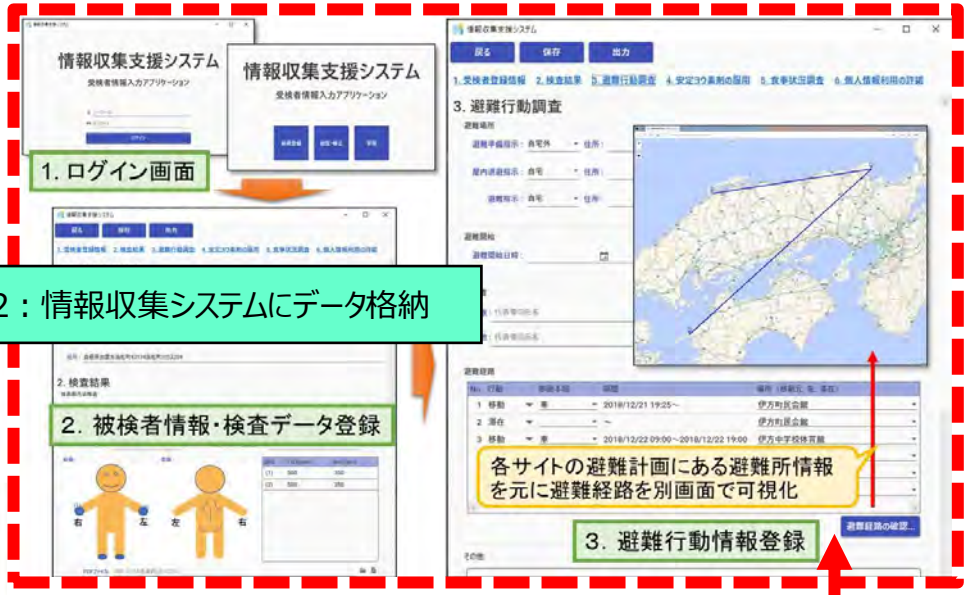
情報収集システム

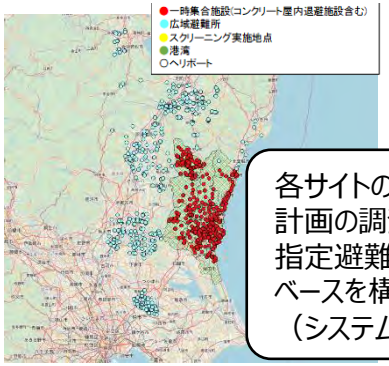
原子力災害後の公衆の内部被ばく線量評価に必要な情報を漏れなく収集



手順1：所定の様式に検査結果や避難行動などに係る事項を記入

手順2：情報収集システムにデータ格納





各サイトの広域避難計画の調査を基に，指定避難所のデータベースを構築（システムに格納）

原子力事故直後に避難住民に対して行われる体表面検査（身体サーベイ）や甲状腺簡易測定等のデータとともに、避難行動情報を散逸することなく収集・格納するシステムを構築

原子力規制庁 放射線安全規制研究推進事業 放射線防護基盤に係る研究（2017-2019）により実施