

【話題提供】
福島原発事故における
内部被ばく線量測定の実験

原子力災害 専門研修
甲状腺簡易測定研修
標準テキスト 3
ver.202203

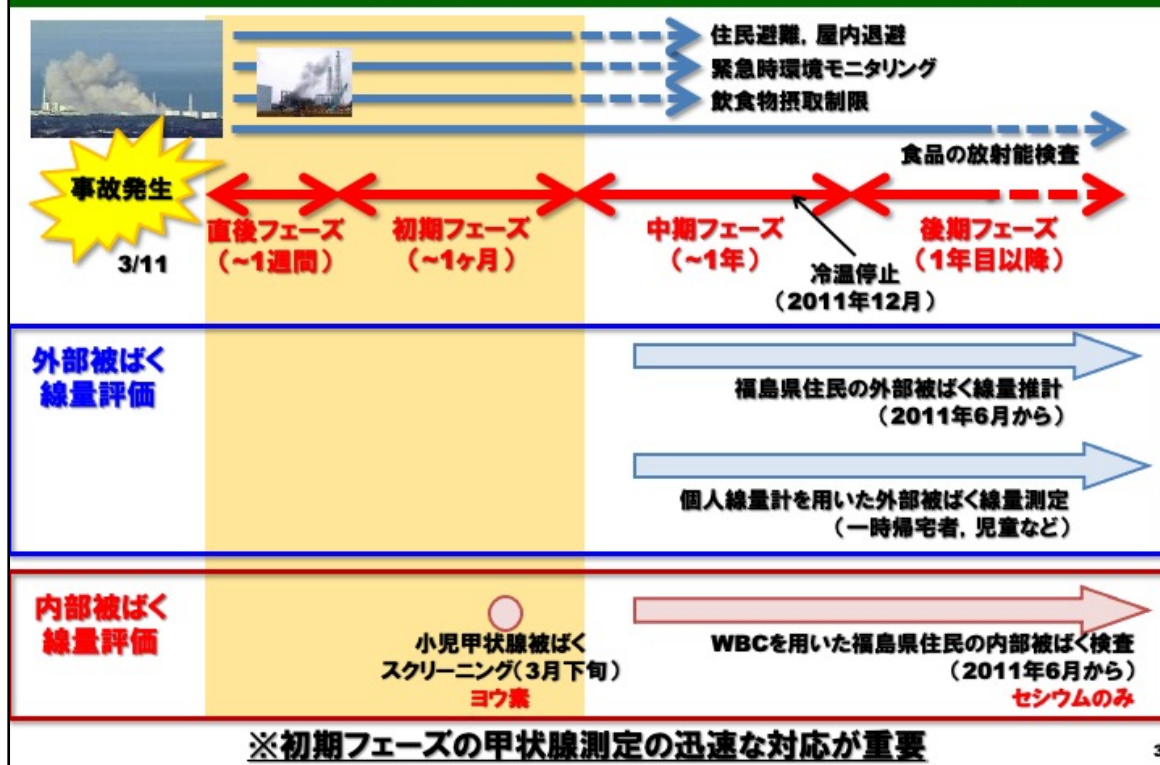
本日の内容

- **住民の内部被ばく線量測定の実際**
- 初期内部被ばく線量の推計
- 今後に向けて



本講義では、住民の内部被ばく線量測定の実際、初期内部被ばく線量の推計及び今後に向けた見通しを紹介します。

住民の放射線防護及び線量評価対応



福島第一原子力発電所事故後には、住民の放射線防護と線量評価が同時進行で実施されていました。

線量評価は外部被ばくと内部被ばくに分けられ、事故後1ヵ月以内の初期には放射性ヨウ素による内部被ばくを対象とした小児甲状腺のスクリーニング検査が実施されました。

その後、中期から長期にかけて、外部被ばく線量評価やWBCを使用した福島県住民の内部被ばく検査が実施されました。

甲状腺中ヨウ素-131(^{131}I)測定

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

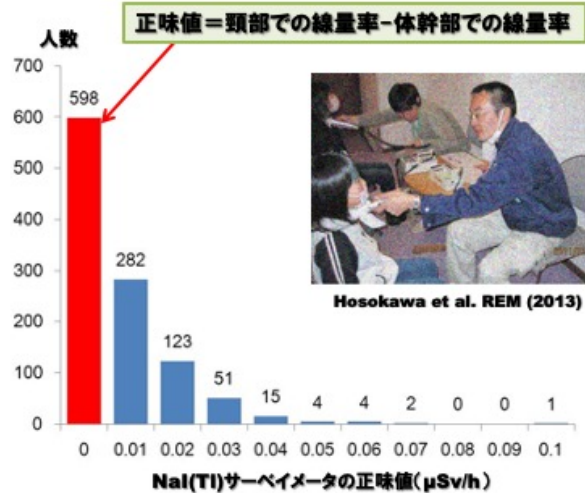
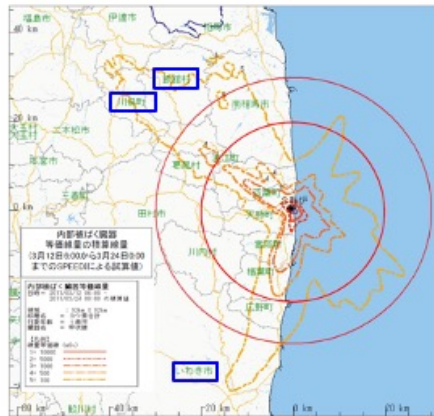


合計しても
1,300件程度...

甲状腺中 ^{131}I の測定結果はいくつかの論文で報告されていますが、測定件数は合計1,300件程度であり、十分な測定が実施することが困難であったことが課題として残されました。

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査 (1)

- 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って実施。
- 全員スクリーニングレベル($0.2\ \mu\text{Sv/h}$)未満⇒**甲状腺等価線量100mSv未満**



ほぼ全員が30mSv未満

5

福島第一原子力発電所から30km圏内の川俣町、いわき市及び飯舘村の3市町村において、15歳以下の子ども1080名を対象として実施された小児甲状腺被ばくスクリーニング検査では、全員がスクリーニングレベル($0.2\ \mu\text{Sv/h}$)未満であり、甲状腺等価線量は少なくとも100mSv未満であると評価されました。

しかし、測定結果の半数は正味値0であり、より早く測定することができれば、検出下限以下だった方々についてより正確な線量評価が可能であったと考えられます。

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査 (2)

スクリーニングレベルの導出(当時)

1歳児の甲状腺等価線量 100 mSv(当時)*



摂取シナリオの設定(12日間連続吸入)



摂取後翌日の甲状腺中¹³¹I残留量を計算



甲状腺中¹³¹I残留量に対応する
検出器の応答を評価

*100 mSvは「原子力施設の
防災指針について(当時)」の安定
ヨウ素剤の予防的服用の基準値
として示されていた



0.2 μSv/h (1歳児)

5歳児では約60mSv, 成人では約15mSvに相当

参考) 鈴木敏和, 放射線事故医療研究会(2011)

6

福島第一原子力発電所事故当時のスクリーニングレベルとして、0.2μSv/hを設定しました。

導出に至る過程をスライドに示していますが、1歳児の甲状腺等価線量100mSvを基に算出されています。

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査 (3)

Nalサーベイメータの校正(当時)

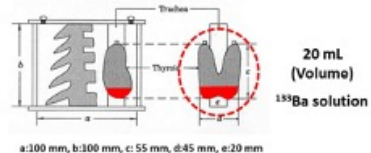


ファントムを用いて校正

測定器:アロカ製(現在, 日立製作所)
TCS-161, 171, 172

校正条件:京都科学製ファントムの甲状腺形状
容器に ^{133}Ba 溶液を, 年齢に応じた甲状腺容積
*を考慮して封入

- 1歳児:2.5 ml
- 5歳児:6.1 ml



照射施設で高線量場の再現

年齢区分	0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 正味値に 相当する ^{131}I 量	12日間吸入摂取 翌日に計測した 場合の実効線量	左条件での 甲状腺等価線量
1歳児	4400 Bq	5.4 mSv	108 mSv
5歳児	4690 Bq	3.2 mSv	64 mSv
成人	6030 Bq	0.8 mSv	16 mSv

(1歳児条件の場合, 1 $\mu\text{Sv/h}$ は約22 kBq)

Ref. Mettler et al. J. Nucl. Medicine (1996)

7

甲状腺に存在する放射能と使用するサーベイメータの指示値との関係については、 Ba-133 線源を封入したファントムを使用して評価されました。

福島第一原子力発電所事故当時は子どもの頸部を再現したファントムが用意できなかったため、 Ba-133 の封入量を年齢ごとの甲状腺体積に合わせて変化させて校正しました。

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査 (4)

シンチレーションサーベイメータによる甲状腺線量の簡易測定法 (2011年3月25日改訂版: 当時)

1. 概要

本測定法は簡易的に甲状腺内の放射能を調査することを目的とする。

2. 測定対象

1歳児～15歳児

3. 使用可能な測定器

TCS-161, 171, 172に限定する。

4. 測定条件

- 1) 音は出ないようにする。
- 2) 時定数を10秒にする。
- 3) 指示値を $\mu\text{Sv/h}$ 単位とする。
- 4) 測定は30秒とし、30秒後の指示値を3回読んで、その平均値を記録する。
- 5) プローブは養生すること。子どもが対象であることから、その上にティッシュを巻くこと。

5. バックグラウンド測定

測定場所のバックグラウンドを甲状腺測定前に測定し、記録する。

6. 甲状腺測定

- 1) 首の回りを汚染のない濡れタオルで拭き、除染する。水は未開封のペットボトルの水を用いると良い。
- 2) 甲状腺にプローブを密着して測定する。プローブの位置は体軸中心で高さは首と鎖骨の交点である。
- 3) 指示値を記録し、バックグラウンドの値を差し引き、正味値を求める。
- 4) 正味値が $1\mu\text{Sv/h}$ のとき、甲状腺残留放射能は 22kBq である。これは1歳児の場合であり、年齢とともに数値は減少する。
- 5) 正味値は居住地や避難経路とともに記録する。
- 6) 1歳児以下で $0.2\mu\text{Sv/h}$ を超える場合、放医研に問合せとする。

当時の資料を一部修正して掲載

8

2011年に作成した小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の方法を示しています。使用可能な測定器は日立製のサーベイメータで、時定数を10秒として30秒測定した指示値を3回読んで、それらの平均値を記録することとされています。

甲状腺測定にあたっては、首の周りを汚染のない濡れタオルで拭くことやサーベイメータのプローブの測定位置などが明記されています。

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査 (5)

各測定場所における被検者数

実施日	測定場所	被検者数	評価対象者数
3月24日	川俣町保健センター	18	(18)* ¹
	川俣町山木屋出張所	48	(48)* ¹
3月26, 27日	いわき市保健所	137	134* ²
3月28-30日	川俣町中央公民館	631	631
3月29, 30日	飯館村役場	315	315
合計		1,149	1,080

*1 高BGのため、評価対象者から除外

*2 年齢不詳の3名を評価対象者から除外

	川俣町	いわき市	飯館村
評価対象者数	631	134	315
人口(15歳以下)*	1,917	50,482	865

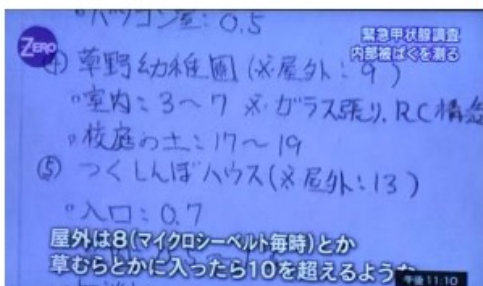
* 2010年国勢調査より

川俣町、いわき市、飯館村で実施された小児甲状腺スクリーニング検査では、1080名の甲状腺被ばく線量が評価されました。

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査 (6)

検査の実際(飯舘村のケース)

サイエンスZERO (NHK)



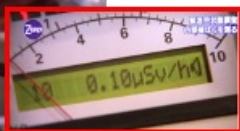
小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の実施にあたって困難だったことのひとつは、バックグラウンド放射線による空間線量率が0.2 μ Sv/h未満である測定場所を確保することでした。

特に屋外では8 μ Sv/hを超えるような場所もある状況でした。

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査 (7)

検査の実際(飯舘村のケース)

サイエンスZERO (NHK)



0.2 μ Sv/hを下回る場所として、例えば建物の構造物で良く遮へいされているような場所で小児甲状腺被ばくスクリーニング検査が実施されました。

ホールボディカウンタによる内部被ばく検査

福島県内におけるホールボディカウンタ(WBC)を用いた 福島県等住民の内部被ばく検査

被検者数: 345,919 名(平成23年6月～令和3年6月)
1 mSv 未満 345,893人(99.99%)
(1 mSv: 14名, 2 mSv: 10名, 3 mSv: 2名)



現存被ばく状況下における内部被ばくのリスクはほぼゼロ



福島県HP <http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/ps-wbc-kensa-kekka.html>

12

ホールボディカウンタによる内部被ばく検査は、平成23年6月から令和3年6月までに345,919名に対して実施されていますが、99.99%が被ばく線量1mSv未満であると評価されています。

福島県におけるWBC検査の経験

ISSN 1881-7297

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ

Vol.9 No.1

体外計測に関する標準計測法の策定に関する専門研究会

報告書

2016 年 3 月

一般社団法人 日本保健物理学会

Paper

EXPERIENCES OF POPULATION MONITORING USING WHOLE-BODY COUNTERS IN RESPONSE TO THE FUKUSHIMA NUCLEAR ACCIDENT

Osamu Kurihara,¹ Chunsheng Lu,² Maria Antonia Lopez,³ Eunjo Kim,³ Kotaro Tani,¹ Takashi Nakano,¹ Chie Takada,⁴ Takumaro Momose,² and Makoto Akashi¹

Abstract—Whole-body counter measurements of residents of Fukushima Prefecture have been extensively performed after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident in March 2011. These measurements have demonstrated that the levels of internal contamination with radioactive cesium (^{134}Cs and ^{137}Cs) in the residents are very low. This article provides an overview of and lessons learned from these whole-body counter measurements with emphasis on the technical problems encountered, and it discusses the effective use of whole-body counters for assessing the internal thyroid doses of individuals when direct measurements of ^{131}I in the thyroid are difficult or impossible to implement for the total affected population in a short time after a nuclear reactor accident. The application of this dose reconstruction method requires determining the intake ratio of ^{131}I to cesium isotopes at appropriate times and considers the short biological half-lives of cesium isotopes, in particular for children.

Health Phys. 115(2):259–274; 2018

Key words: accident analysis; dose assessment; dosimetry, internal; Fukushima Daiichi

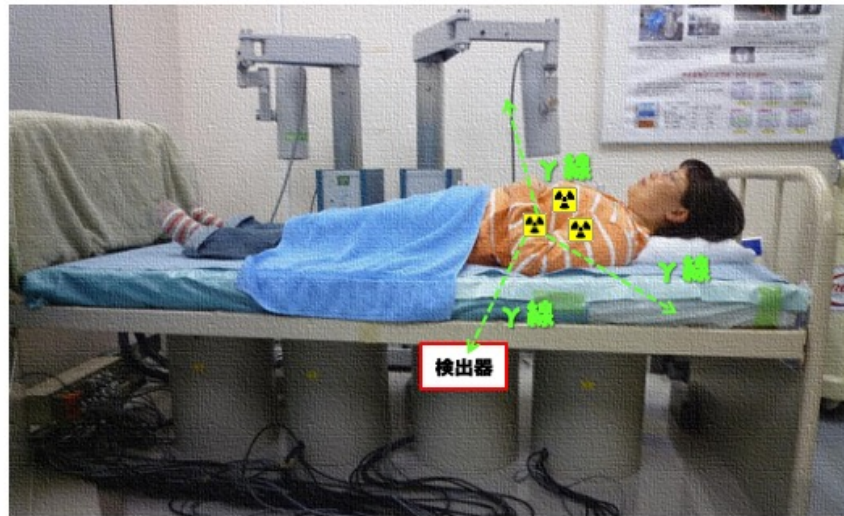
<http://www.jhps.or.jp/report/pdf/report9.1.pdf>

13

福島県におけるWBC検査の経験については、日本保健物理学会の専門研究会報告書や論文で報告されています。

ホールボディカウンタ(WBC)

放医研の簡易型WBC



体外に出てくる γ 線を**体外**に配置した放射線測定器で検出する

14

ホールボディカウンタでは、体内の放射性物質から放出される放射線を体外に配置した放射線検出器で検出します。

α 線や β 線は体内で吸収されるため、体外計測の対象は γ 線放出核種となります。

体外計測法の原理

ホールボディカウンタの校正



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

↓
計数効率: $C/A = \epsilon$



被検者

ピークカウント: C'

↓
放射能: $A' = C'/\epsilon$

体外計測によって被験者の体内放射能を定量する場合には、ファントムを使用した相対測定を実施する必要があります。
例えば、放射能 A のファントムに対する測定によるピークカウントが C であった場合、ピーク効率は C/A として表されます。
被験者の測定で得られるピークカウントが C' であった場合、被験者の体内放射能 A' は $(C'/C) \times A$ で計算することができます。

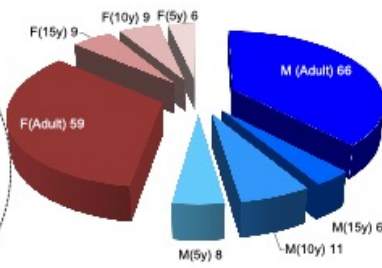
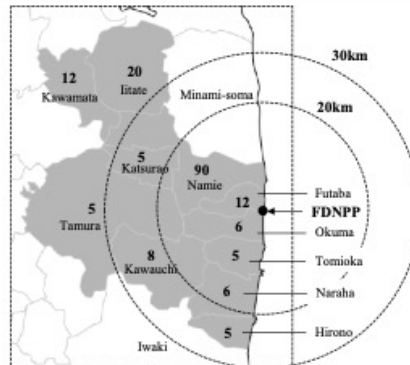
放医研パイロット調査



Paper

EARLY INTAKE OF RADIOCESIUM BY RESIDENTS LIVING NEAR THE TEPCO FUKUSHIMA DAI-ICHI NUCLEAR POWER PLANT AFTER THE ACCIDENT. PART 1: INTERNAL DOSES BASED ON WHOLE-BODY MEASUREMENTS BY NIRS

Hunjo Kim,^{*} Osamu Kurihara,^{*} Naoaki Kunishima,^{*} Takashi Nakano,^{*} Kotaro Tani,^{*} Misao Hachiya,^{*} Takumaro Momose,[†] Tetsuo Ishikawa,[‡] Shinji Tokonami,[§] Masahiro Hosoda,[§] and Makoto Akashi^{*}



福島県委託により放医研で実施した初期の内部被ばく検査(2011/6/27-7/28)
被検者数:174名(成人125名, 子ども49名)

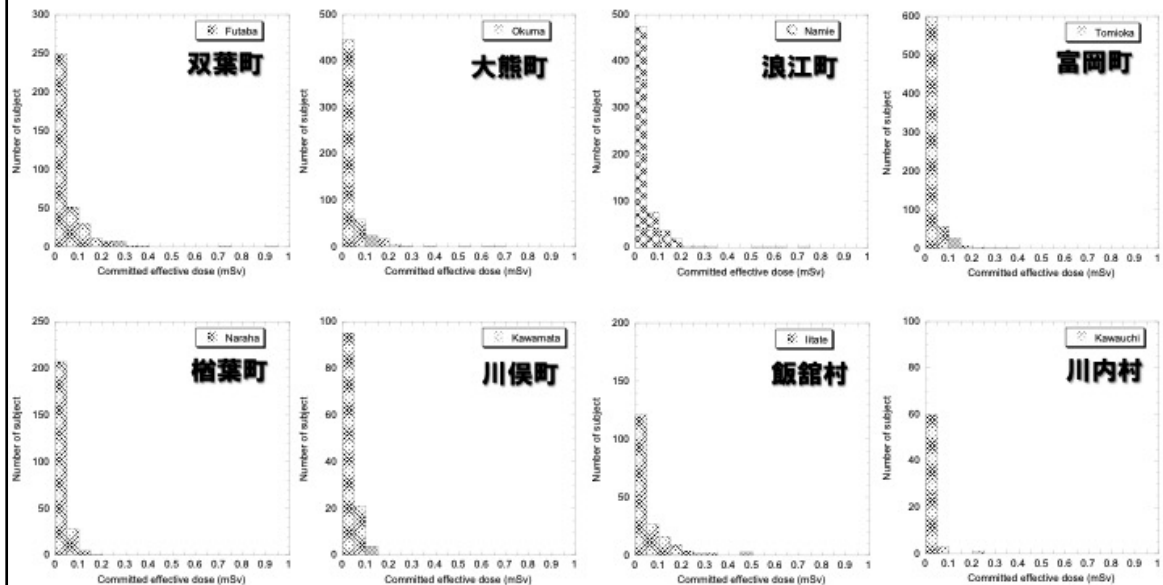
16

2011年6月～7月にかけて、放射線医学総合研究所では福島県の委託による初期の内部被ばく検査を実施しました。

ホールボディカウンタによる測定の実験者数は成人125名、子ども49名の合計174名でした。

原子力機構によるWBC測定

各市町村の成人被検者の預託実効線量分布



Cs預託実効線量の90パーセンタイル値は~0.1 mSv

Kim et al. J. Radiat. Res. (2016)

17

放医研での調査を踏まえて、より大規模なWBC測定が日本原子力研究開発機構で実施されました。

各地域ごとの預託実効線量分布が示されましたが、Csによる線量は90パーセンタイル値で0.1mSv未満でした。

WBC測定から得られる線量分布

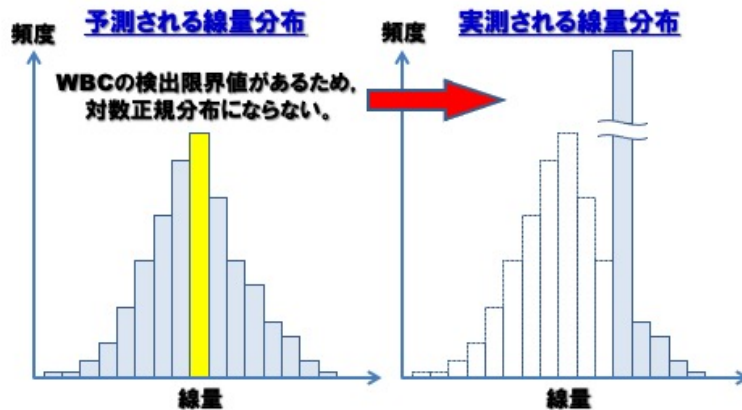


原子力機構でのWBC測定の様子



WBC測定結果の説明の様子

- 2012年度の放医研による初期内部被ばく線量推計では、日本原子力研究開発機構が実施したWBC測定の結果(成人被検者の実効線量のみ約3千名)を使用。
- 摂取シナリオ: 3月12日の急性吸入摂取。
- 測定期間: 2011年7月11日-2012年1月31日



測定が長期化するにつれて検出限界未満の被検者が増加し、初期以外の慢性的な摂取の寄与も大きくなる。

18

2012年度には、日本原子力研究開発機構が実施したWBC測定の結果を使用した放医研による初期内部被ばく線量推計が報告されました。摂取シナリオは3月12日の急性吸入摂取と仮定しましたが、測定の長期化に伴い体内の残留率が低下していくため、検出限界未満の被験者が増加しました。また、時間とともに吸入摂取に対して慢性摂取による影響の程度が大きくなることも、正確な線量評価を難しくする要因となっています。

急性摂取シナリオ

急性摂取シナリオ(WBC測定期間:2011年6月27日から2012年1月末まで)

- WBC測定で検出された放射性セシウムが、福島第一原子力発電所から放射性物質の環境中への放出が始まった2011年3月12日に吸入によって全量が体内に取り込まれたと仮定し、内部被ばく線量を算出。

$$E_i = \frac{A_{134}}{R_{i,134}(t)} \cdot e_{i,134} + \frac{A_{137}}{R_{i,137}(t)} \cdot e_{i,137}$$

E_i : 年齢区分*i*の実効線量, A_{134} , A_{137} : ^{134}Cs 及び ^{137}Cs それぞれの体内残留量, $R_{i,134}(t)$, $R_{i,137}(t)$: ^{134}Cs 及び ^{137}Cs それぞれの年齢区分*i*に応じた全身残留割合(*t*は摂取日からの経過日数), $e_{i,134}$, $e_{i,137}$: ^{134}Cs 及び ^{137}Cs それぞれの年齢区分*i*に応じた実効線量係数

実効線量係数の年齢区分

- **3ヶ月児(乳児)**: 1歳未満(満年齢で0歳のみ)
- **1歳児**: 1歳以上－3歳未満(満年齢で1歳, 2歳)
- **5歳児**: 3歳以上－8歳未満(満年齢で3歳, 4歳, 5歳, 6歳, 7歳)
- **10歳児**: 8歳以上－13歳未満(満年齢で8歳, 9歳, 10歳, 11歳, 12歳)
- **15歳児**: 13歳以上－18歳未満(満年齢で13歳, 14歳, 15歳, 16歳, 17歳)
- **成人**: 18歳以上(満年齢で18歳以上)

ICRP Publication 71

19

WBC測定では、Cs-134及びCs-137の両方が検出される場合があり、それぞれの核種に対する残留率と線量係数を用いて線量を計算しました。
使用する残留率や線量係数の値は年齢区分ごとに異なります。

Csの預託実効線量係数等 (吸入)

$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の実効線量係数(吸入摂取, タイプF)[1]

	3ヶ月児	1歳児	5歳児	10歳児	15歳児	成人
^{134}Cs	1.1E-08	7.3E-09	5.2E-09	5.3E-09	6.3E-09	6.6E-09
^{137}Cs	8.8E-09	5.4E-09	3.6E-09	3.7E-09	4.4E-09	4.6E-09

※単位(Sv/Bq)

$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の摂取300日後の全身残留割合(吸入摂取, タイプF)[2]

	3ヶ月児	1歳児	5歳児	10歳児	15歳児	成人
^{134}Cs	6.87E-07	3.52E-08	1.44E-04	2.97E-03	2.29E-02	3.48E-02
^{137}Cs	8.88E-07	4.56E-08	1.86E-04	3.83E-03	2.96E-02	4.50E-02

※単位(Bq/Bq)

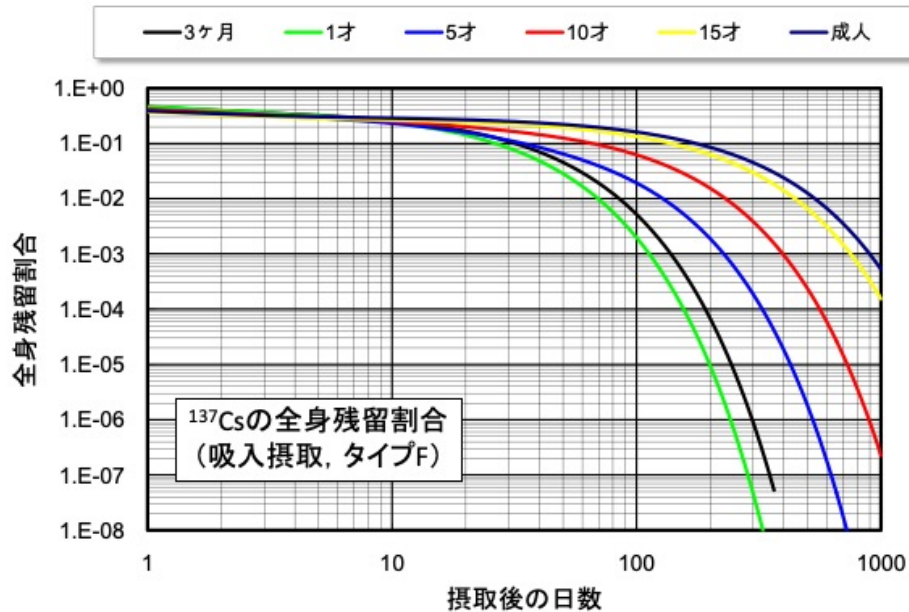
[1] International Commission on Radiological Protection; ICRP Database of dose coefficients: workers and members of the public Ver. 3.0., <http://www.icrp.org/page.asp?id=145>

[2] N. Ishigure et al.; MONDAL3: Support system for internal dosimetry, National Institute of Radiological Sciences. <http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/RPD/mondal3.php>

20

Csの実効線量係数及び300日後の全身残留率を示します。
年齢ごとに値が異なるので、適切な値を用いて計算する必要があります。

^{137}Cs の全身残留割合



- 吸入摂取から300日後にWBCの検出限界値(^{134}Cs , ^{137}Cs ともに約300 Bq)に等しい全身残留量が検出された場合の実効線量は?

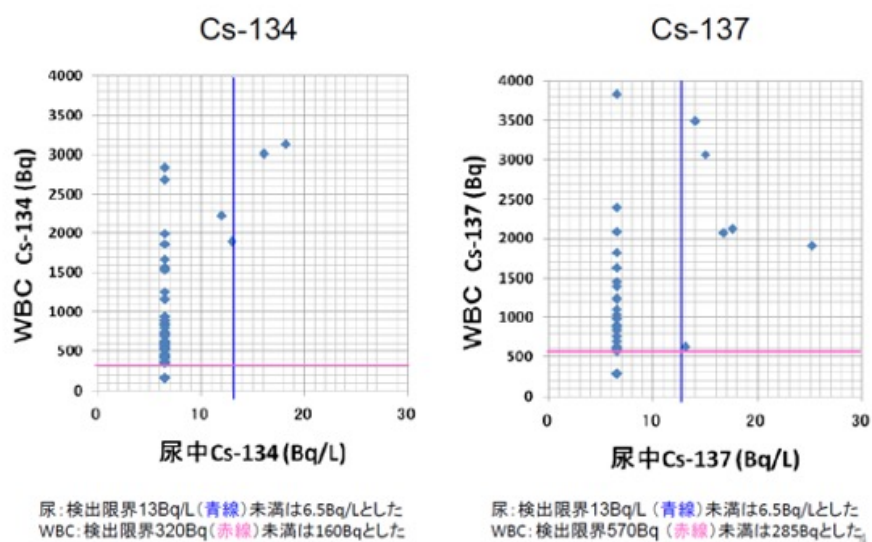
21

体内の放射性物質は物理学的半減期と代謝による排泄によって減少していきます。

一般に年齢が低い方が代謝・排泄が早いため、成人よりも子どもの方が全身残留率の減少も早くなります。

尿バイオアッセイ

WBCと尿からのCs-134とCs-137 (成人)



平成23年度第3回福島県「県民健康管理調査」検討委員会資料(平成23年7月24日)

22

体外計測以外の内部被ばく線量の評価手法として、尿のバイオアッセイがあります。

尿中に含まれる放射能とWBCによって評価される体内残留量の両方の結果を解釈することにより、より信頼性の高い線量を提供できる可能性があります。

乳幼児のWBC測定

福島県民を対象とした FASTSCANによる 4歳未満児の測定の検討について

(独) 日本原子力研究開発機構

測定時の配置条件(検討上の仮定)

以下の条件で、測定すると仮定する。

- ・90cm高の台座を使用
- ・被検者は横向きに台の上に着座
- ・子どもの安全・安心確保のため、測定補助者(親等)が近傍に立つ
- ・(運用上の作業効率を考慮)測定補助者単独の測定は行わない



公益社団法人 福島県診療放射線技師会
http://fart.jp/wbc/file/wbc_childoren.pdf

JOP Publ. Off. J. Society for Radiological Protection
J. Radiol. Prot. 34 (2014) 645-655

Journal of Radiological Protection
(doi:10.1088/0959-4746/34/06/0645)

BABYSCAN: a whole body counter for small children in Fukushima

Ryugo S Hayano¹, Shunji Yamanaka², Frazier L Bronson³,
Babelunde Oginni³ and Isamu Muramatsu⁴

¹ Department of Physics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

² Department of Mechanical and Biofunctional Systems, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

³ Canberra Industries, Inc., 800 Research Parkway, Meriden, CT 06050, USA

⁴ Canberra Japan KK, 4-19-8 Asakusabashi, Taitoh-ku, Tokyo 111-0053, Japan

E-mail: hayano@phys.s.u.tokyo.ac.jp

Received 22 February 2014, revised 23 June 2014

Accepted for publication 24 June 2014

Published 13 August 2014

Abstract

BABYSCAN, a whole body counter for small children with a detection limit for ^{137}Cs of better than 50 Bq/body, was developed, and the first unit has been installed at a hospital in Fukushima, to help families with small children who are very much concerned about internal exposures. The design principles, implementation details and the initial operating experience are described.

Keywords: Fukushima Dai-ichi accident, radioactive caesium, whole-body counting, radiological protection

J. Radiol. Prot. 34 (2014) 645

R S Hayano et al

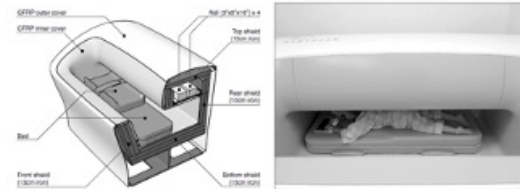


Figure 1. Left: a cutaway view of the BABYSCAN. Right: a 4-year-old child lying on front, playing with a tablet computer, during a 4 min measurement in the BABYSCAN.

福島第一原子力発電所事故後、乳幼児を対象とした測定についても検討されました。
新たにBabyscanと呼ばれる装置も開発され、論文として報告されています。

本日の内容

- 住民の内部被ばく線量測定の実際
- **初期内部被ばく線量の推計**
- 今後に向けて



初期内部被ばく線量(甲状腺線量)の推計

量研・放医研の方法

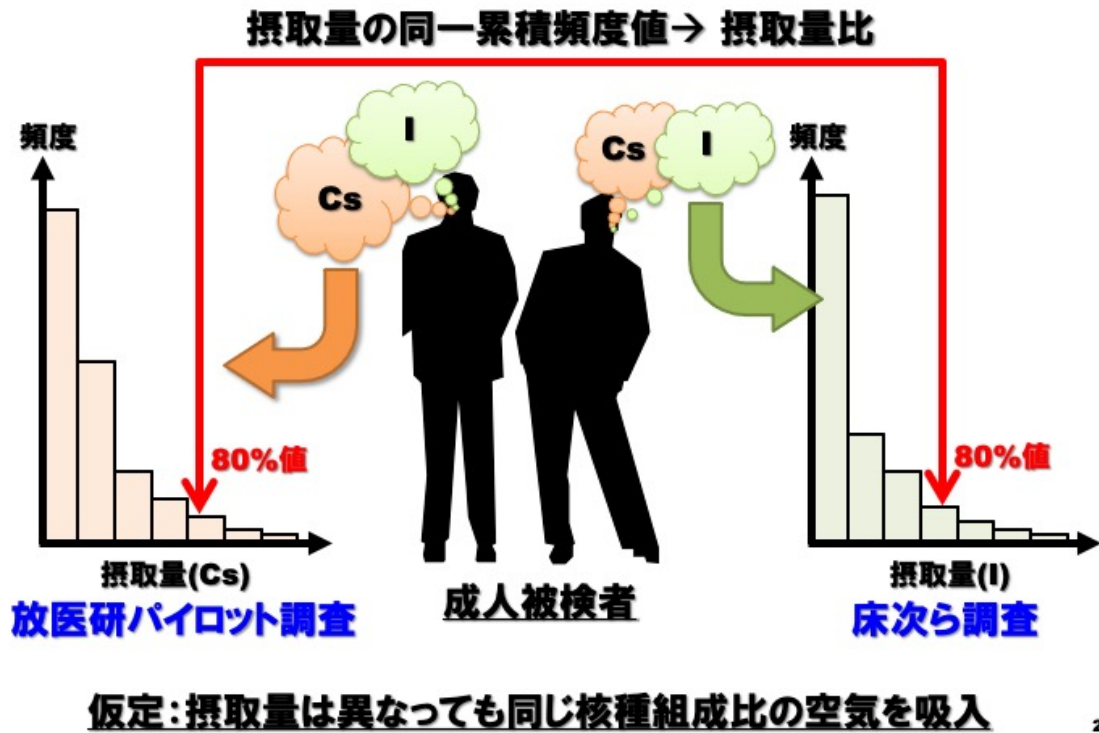


25

初期の内部被ばく線量の推計に利用できるものとして、「甲状腺中ヨウ素の測定結果」、「WBCによる全身中セシウムの測定結果」及び「大気拡散シミュレーションの結果」があります。

甲状腺中ヨウ素の測定結果は信頼性が高いが利用できるデータ数が少ないのに対し、全身中セシウムの測定結果は信頼性が劣るが多くのデータが利用できます。また、大気拡散シミュレーションは実測ではないため不確実性が高くなります。人の実測データを優先しつつ、利用可能なデータを補完しながら推計していくことが重要です。

ヨウ素・セシウム摂取量比の導出 (1)

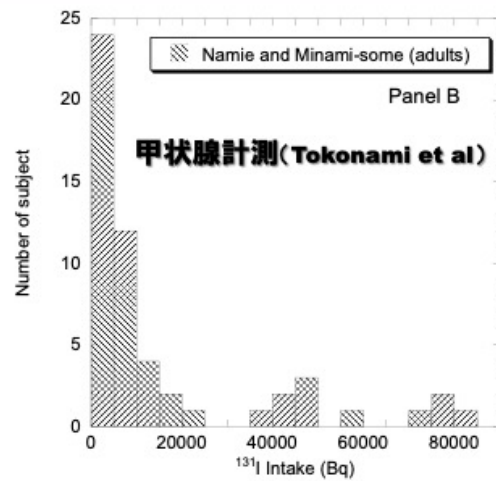
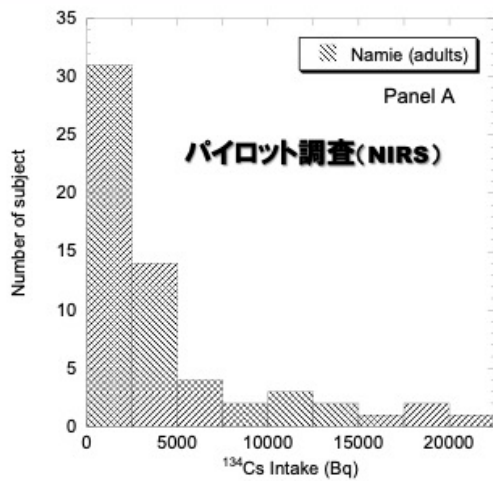


26

成人被験者に対するCsの測定結果とヨウ素の測定結果から、環境中のヨウ素・セシウムの摂取量比が導出されました。

摂取量が異なっても、空気中の核種組成比が同じであると仮定することで、必ずしも全ての実測値がない人の線量を評価できるようにしました。

ヨウ素・セシウム摂取量比の導出 (2)



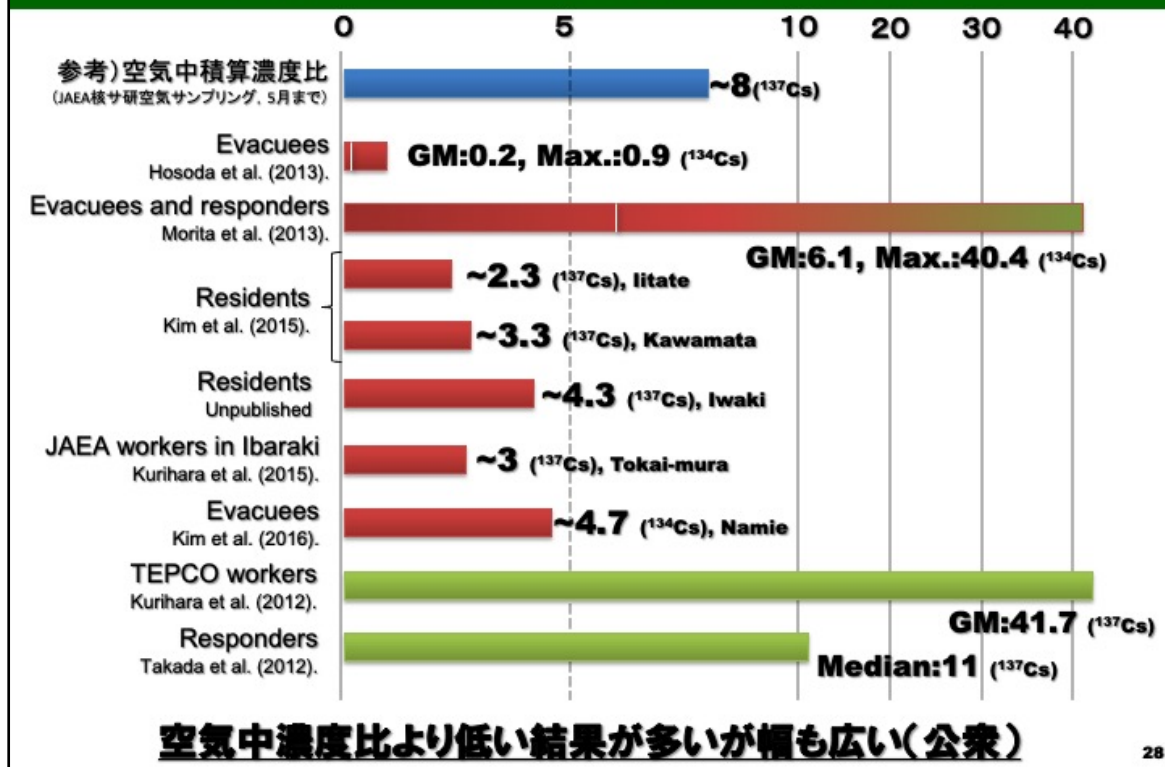
	最大値	95%頻度値	90%頻度値	75%頻度値	中央値
(A) ^{131}I 摂取量(Bq)	8.50E+04	7.33E+04	4.93E+04	1.58E+04	6.79E+03
(B) ^{134}Cs 摂取量(Bq)	2.16E+04	1.58E+04	1.10E+04	4.98E+03	2.34E+03
(A)/(B)*	3.93	4.65	4.47	3.18	2.90

※(A)は元素状ヨウ素を仮定した評価値のため、粒子状ヨウ素の存在比を考慮すると1.5倍程度になる。

27

異なる組織によるCs-137の測定結果とI-131の測定結果を組み合わせて、ヨウ素・セシウムの摂取量比を導出することができます。

ヨウ素・セシウム摂取量比の推定値

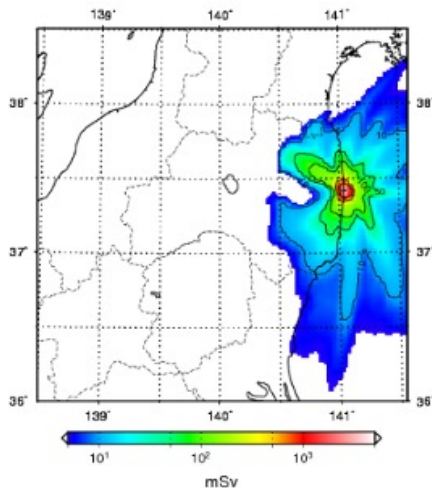


28

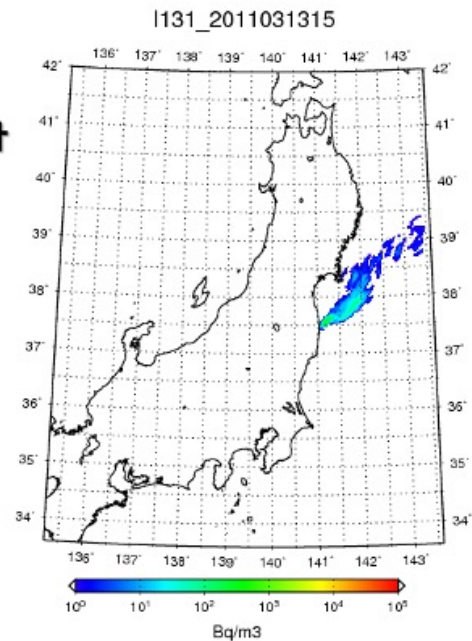
さまざまな測定結果から評価されたヨウ素・セシウム摂取量比の推定値のバラつきを示します。

大気拡散シミュレーションによる推計

- 実測データに基づく線量推計の補完
- 摂取シナリオの推定
- 大気拡散シミュレーションによる線量推計の精度把握



¹³¹I吸入摂取による甲状腺等価線量マップ(1歳児)

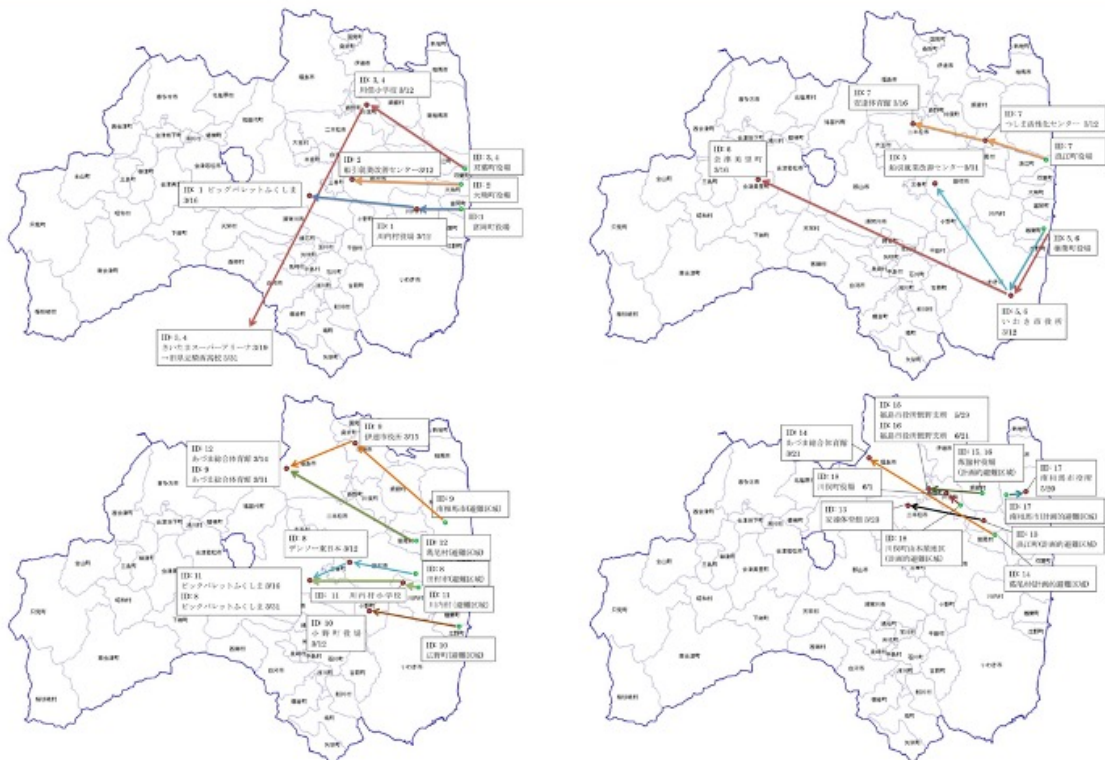


**¹³¹I地表高大気中濃度
WSPEEDI-II, Terada (2012)**

29

大気拡散シミュレーションによっても甲状腺線量が推計されていますが、摂取シナリオ等に起因する不確かさが大きいため、多角的な解釈が必要となります。

代表的避難パターンのモデルケース



30

大気拡散シミュレーションと住民の行動パターンとを組み合わせた線量推計を可能とするため、代表的な避難パターンのモデルケースについて検討されています。

表 20 避難時の行動パターン（警戒区域住民）

ID	行動パターン
1	3月12日 富岡町役場(0.4)→川内村役場(0.4)に6時まで移動完了。移動時間3時間。 3月16日 ビッグバレットふくしま(0.1)に10時から移動開始。移動時間6時間。
2	3月12日 大熊町役場(0.4)→船引就業改善センター(0.4)に13時に移動完了。移動時間3時間。
3	3月12日 双葉町役場(0.4)→8時に川俣小学校(0.4)に移動完了。移動時間5時間。 3月19日 さいたまスーパーアリーナ(0.1)に10時から移動開始。移動時間7時間。 3月31日 旧県立駒西高校(0.1)に10時から移動開始。移動時間1時間。
4	3月12日 双葉町役場(0.4)→一号楼の水素爆発に伴い川俣小学校(0.4)に16時から移動開始。移動時間5時間。 3月19日 さいたまスーパーアリーナ(0.1)に10時から移動開始。移動時間7時間。 3月31日 旧県立駒西高校(0.1)に10時から移動開始。移動時間1時間。
5	3月12日 楢葉町役場(0.4)→いわき市役所(0.4)に13時に移動完了。移動時間4時間。 3月31日 船引就業改善センター(0.4)に朝10時から移動。移動時間2時間。
6	3月12日 楢葉町役場(0.4)→いわき市役所(0.4)に13時に移動完了。移動時間4時間。 3月16日 会津美里町役場(0.4)に10時から移動開始。移動時間5時間。
7	3月12日 浪江町役場(0.4)→15時につしま活性化センター(0.4)に移動完了。移動時間3時間。 3月16日 安達体育館(0.4)に10時から移動開始。移動時間は4時間。
8	3月12日 田村市20km圏内最大線量領域(0.4)→デンソー東日本(0.4)に8時まで移動完了。移動時間1時間。 3月31日 ビッグバレットふくしま(0.1)に10時から移動。移動時間1時間。
9	3月15日 南相馬市20km圏内最大線量領域(0.4)→伊達市役所(0.4)に10時から移動開始。移動時間6時間。 3月31日 あづま総合体育館(0.4)に10時から移動開始。移動時間1時間。
10	3月12日 広野町20km圏内最大線量領域(0.4)→小野町役場(0.4)に8時に移動完了。移動時間7時間。
11	3月13日 川内村20km圏内最大線量領域(0.4)→川内村小学校(0.1)に10時から移動開始。移動時間1時間。 3月16日 ビッグバレットふくしま(0.1)に10時から移動開始。移動時間8時間。
12	3月14日 葛尾村20km圏内最大線量領域(0.4)→あづま総合体育館(0.4)に10時から移動開始。移動時間8時間。

表 21 避難時の行動パターン（計画的避難区域）

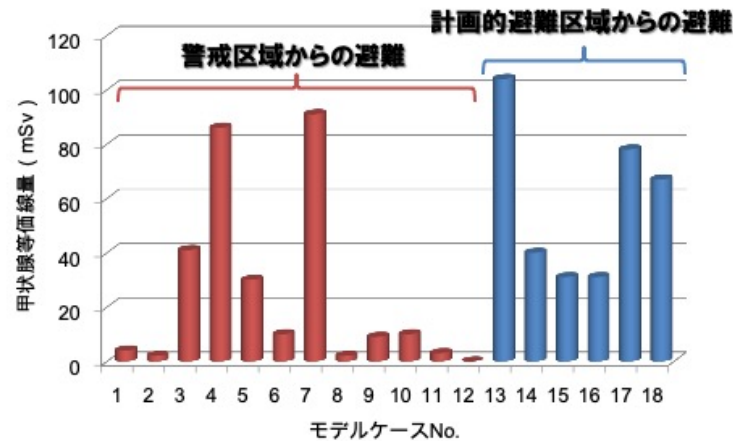
ID	行動パターン
13	3月23日 浪江町つしま活性化センター(0.4)→安達体育館(0.4)に10時から移動開始。 移動時間は4時間。
14	3月21日 葛尾村役場(0.4)→あづま総合体育館(0.4)に10時から移動開始。移動時間2時間。
15	5月29日 飯館村役場(0.4)→福島市役所飯野支所(0.4)に10時から移動開始。移動時間1時間。
16	6月21日 飯館村役場(0.4)→福島市役所飯野支所(0.4)に10時から移動開始。移動時間1時間。
17	5月20日 南相馬市計画的避難区域内最大線量領域(0.4)→南相馬市役所(0.4)に10時から移動開始。移動時間0.5時間。
18	6月1日 川俣町計画的避難区域内最大線量領域(0.4)→川俣町役場(0.4)に朝10時から移動開始。移動時間0.5時間。

警戒区域住民及び計画的避難区域における避難時の行動パターンの例を示します。

代表的避難パターンのモデルケース計算結果

^{131}I 吸入摂取による甲状腺等価線量(1歳児)

- 大気拡散シミュレーションにはWSPEEDI-II(Terada, 2012)を使用
- 甲状腺等価線量係数は元素状60%、粒子状40%に設定



- ◆ 3月12日中の避難行動により甲状腺等価線量を大きく回避。ただし、避難時刻の差が顕著に出る場合もあり(No.3とNo.4)。
- ◆ 3月15日の滞在所へのブルームの通過による線量寄与大(No. 5, No.7, No.13-18)

32

代表的な避難パターンのモデルケースに基づく計算結果を示します。
モデルケースによって、甲状腺等価線量に大きな差が生じることが明らかとなりました。

大気拡散シミュレーションの精度

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査との比較

各市町村中心に最も近いグリッド及びその周囲の8グリッドの濃度の幾何平均値を用いて計算した5歳児年齢の ^{131}I 甲状腺等価線量(バンドは $\text{GM}/\sigma_g \sim \text{GM} * \sigma_g$)

※屋外24時間を仮定した評価⇒実測線量を過大評価することを予想

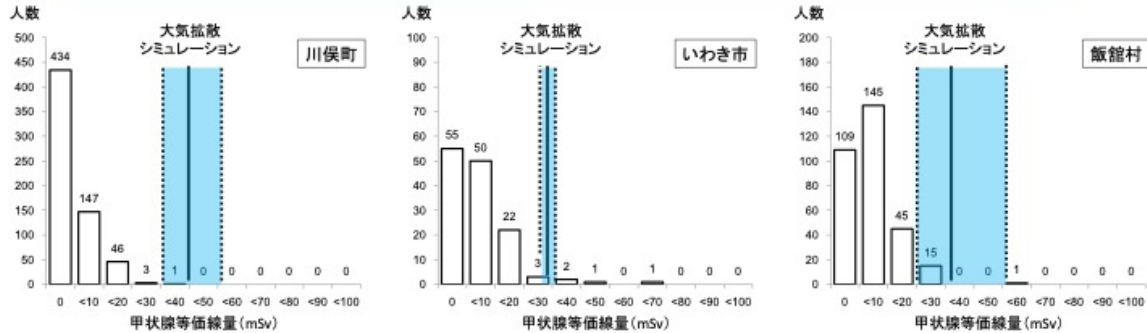


Table 1. Internal doses estimated using human measurements and simulations.

Municipality	Subjects	Type of internal dose	(A) 90th percentile	(B) GM (σ_g)	(B)/(A)
Kawamata Town	Children under 15 y	Thyroid equivalent dose (mSv)	7	40 (1.3)	5.7
Iwaki City			16	28 (1.1)	1.8
Itate Village			15	32 (1.6)	2.1
Namie Town ^a	Adults	Effective dose (mSv)	0.15	0.23 (1.3)	1.5

^aThe simulation result was obtained for Tsushima District of Namie Town.

大気拡散シミュレーションによる推計と小児甲状腺被ばくスクリーニング検査との比較について、論文で報告されています。

甲状腺線量の推計結果 (放医研, 2012)

福島県各地の住民の甲状腺等価線量推計値
(概ね90パーセンタイル頻度値)

市町村	1歳児(mSv)	成人(mSv)	方法
双葉町	30	10	全身計測
大熊町	20	< 10	全身計測
富岡町	10	< 10	全身計測
楢葉町	10	< 10	全身計測
広野町	20	< 10	全身計測
浪江町	20	< 10	全身計測, 甲状腺計測
飯館村	30	20	甲状腺計測, 全身計測
川俣町	10	< 10	甲状腺計測, 全身計測
川内村	< 10	< 10	全身計測
葛尾村	20	< 10	浪江町の数値を代用
いわき市	30	10	拡散シミュレーション, 甲状腺計測
南相馬市	20	< 10	浪江町の数値を代用
その他の地域	< 10	< 10	拡散シミュレーション

34

福島県各地の住民の甲状腺等価線量推計値はスライドに示す通りで、90パーセンタイルの最大値は30mSvとなりました。

甲状腺線量の推計結果(UNSCEAR2013レポート)

Table C10. Estimated district- or prefecture-average absorbed doses to the thyroid in the first year following the accident for residents of Japan for locations that were not evacuated

Residential area	Absorbed dose to thyroid ^a (mGy)								
	Adults			10-year old			1-year old		
	External + inhalation	Ingestion ^b	Total	External + inhalation	Ingestion ^b	Total	External + inhalation	Ingestion ^b	Total
Group 2 ^c —Fukushima Prefecture									
Districts not evacuated ^d	0.1–9.6	7.8	7.8–17	0–16	15	15–31	0.2–19	33	33–52
Group 3 ^c prefectures									
Chiba Prefecture	0.2–2.1	2.1	2.3–4.2	0.2–3.3	4.3	4.6–7.7	0.3–4.0	9.4	9.7–13
Gunma Prefecture	0.2–1.4	2.1	2.3–3.5	0.3–2.2	4.3	4.6–6.5	0.3–2.6	9.4	9.7–12
Ibaraki Prefecture	0.2–1.5	2.1	2.3–3.6	0.3–2.4	4.3	4.6–6.7	0.3–2.9	9.4	9.7–12
Miyagi Prefecture	0.1–1.5	2.1	2.2–3.6	0.2–2.4	4.3	4.6–6.8	0.2–3.0	9.4	9.6–12
Tochigi Prefecture	0.2–3.0	2.1	2.3–5.1	0.3–4.8	4.3	4.6–9.1	0.4–5.8	9.4	9.7–15
Iwate Prefecture ^e	0.1–0.9	0.5	0.6–1.4	0.2–1.4	1.2	1.3–2.5	0.2–1.7	2.6	2.7–4.2

Table C12. Estimated settlement-averaged absorbed thyroid doses to 1-y-old infants (modified)

Locality	Evacuation No.	Destination	Absorbed dose to thyroid of 1-y-old infant (mGy)		
			Evacuation	Destination	1st year dose
Tomiooka	1	Koriyama	5.2	42	47
Okuma	2	Tamura	0	36	36
Futaba	3	Saitama	12	3	15
Namie	7	Nihonmatsu	37	44	81
Tamura	8	Koriyama	1.9	42	44
Katsurao	12	Fukushima	0	49	49
Tsushima	13	Nihonmatsu	59	24	83 (Max)

経口摂取の寄与が大きい

35

UNSCEAR 2013年報告書での甲状腺線量の推計結果では、経口摂取の寄与が大きくなっていますが、報告書が作成された当時は十分な実測データを利用できなかったため、安全側の仮定に基づいています。

福島原発事故の教訓（線量評価）

- **個人モニタリングの遅れ**：迅速な住民避難や飲食物摂取制限により被ばくを低減できたものの、**初期内部被ばく線量の推計が困難**
対応：迅速かつ実効的な個人モニタリング体制の構築
- **モニタリング対象者の選定**：事故初期の甲状腺被ばくスクリーニング検査（3地域のみ）、WBC検査では子供を優先して実施
対応：後の健康調査等に資する個人モニタリングの検討
- **個人モニタリングの課題（住民、作業者）**：上昇した放射線バックグラウンド環境下での実施、大規模な自然災害
対応：最悪な状況を想定した堅牢な個人モニタリング手法の検討



原子力災害対応の一環として確実な準備が不可欠

36

福島第一原子力発電所事故後の教訓として、「個人モニタリングの遅れ」、「モニタリング対象者の選定」及び「個人モニタリングの課題」が挙げられます。

特に、避難した住民に対する甲状腺測定を十分に実施できなかったために、初期内部被ばく線量の推計が困難になりました。

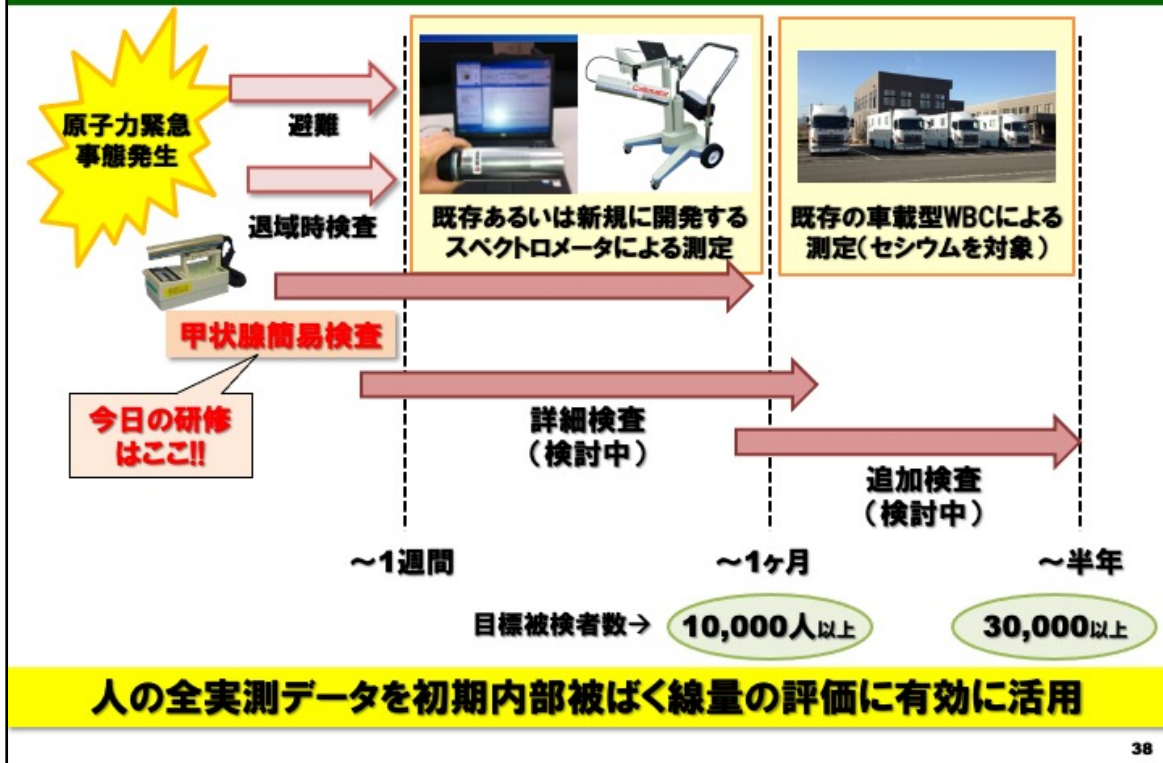
将来の原子力事故対応に向けて、確実な準備が不可欠です。

本日の内容

- 住民の内部被ばく線量測定の実際
- 初期内部被ばく線量の推計
- 今後に向けて



提案する個人内部被ばくモニタリング



38

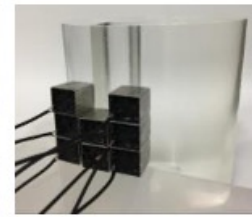
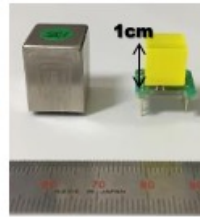
将来の原子力災害の際に実施する個人内部被ばくモニタリングとして、1週間以内に実施する甲状腺簡易測定、1ヵ月以内に実施する詳細測定、半年以内に実施する追加検査が考えられます。
本研修の実習の対象となる甲状腺簡易検査は、1週間以内に実施するスクリーニングの部分になります。

複数のHR-GAGG検出素子を用いた新モニタの開発 (1)

● 複数のHR-GAGG 検出素子を用いた新モニタの提案

福島原発事故において見出された課題

- 周辺環境中の着目核種の影響
- 小児を含む幅広い年齢群を対象とした検査



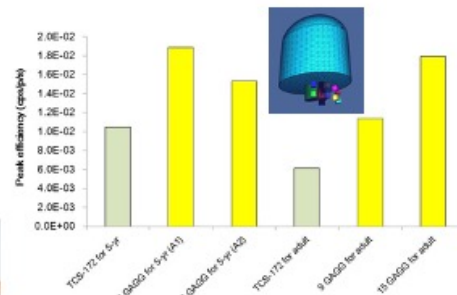
写真左: GAGG結晶(+SiPM)とケーシング
写真右: GAGG検出素子をファントムに配置

解決策

- 複数のHR-GAGG*検出素子を用いた最適配置
- 装置自体の小型化による遮へい体の軽量化



*HR-GAGG: High Energy Resolution $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}(Ce)$



新モニタとNaI(Tl)サーベイメータの感度比較
(数値シミュレーション)

1ヵ月以内に実施する詳細測定に用いる測定器として、複数のGAGGシンチレーション検出素子を用いた新規モニタを開発しています。

複数のHR-GAGG検出素子を用いた新モニタの開発 (2)

● 年齢別頸部ファントムを用いて新モニタの配置検討及び特性評価



既存検出器 (1インチNaI) (左) と
新モニタ (HR-GAGG) (右)

- IRSN年齢別ファントム
- I-131標準溶液線源
各甲状腺容器への注入量：
約30kBq



順: Adult, 15y, 10y, 5y

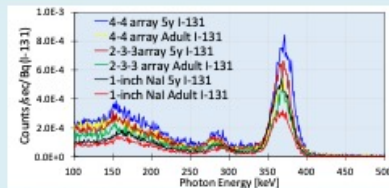
新モニタ試作機の検出素子配置



配置1 (2x4密着) 配置2 (甲状腺形状)



例: 配置1 (2x4),
5歳児ファントム

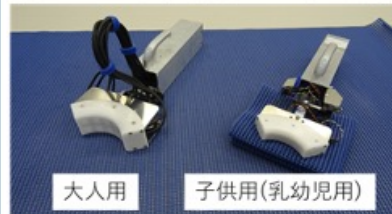


各配置での5歳児及び成人ファントムでの波高スペクトル

検出器	M D A of I-131 (Bq)			
	Adult	15y	10y	5y
配列1:GAGG	31	26	23	19
配列2:GAGG	35	34	28	23
既存NaI(1inch)	45	38	35	27

- 新モニタのエネルギー分解能及び検出下限値: 既存NaI検出器よりも良好
- 新モニタの配置決め ⇒ 固定治具作成

新モニタと電気回路部との一体型治具



大人用

子供用(乳幼児用)



午後の実習にてデモ実施

新規モニタの校正にはI-131を封入した年齢別甲状腺ファントムを使用し、エネルギー分解能及び検出下限値が既存のNaIサーベイメータよりも良好であることが確認されました。

本研修の実習では、開発した新規モニタによるデモも実施します。

情報収集支援システムの製作 (1)

原子力災害後の公衆の線量再構築に用いる情報を効率的に散逸することなく収集する。

情報収集システムの入力データとなる避難者検査記録カード

氏名 性別	生年月日 国籍	避難者検査記録カード	個人識別コード	
1. 受検者登録情報 ① 氏名 ② 性別 ③ 住所 ④ 検査実施日 年 月 日 時 分 所 在 地				
2. 検査結果 (測定結果を記入欄へ) ① 体表汚染検査 測定項目: _____ 測定場所: _____ 測定日時: _____ 測定結果: _____ 測定場所: _____ 測定日時: _____ ② 体表汚染検査結果  (正面)  (背面)				
3. 避難行動情報 ① 避難場所 (避難先) _____ ② 避難経路 (避難先) _____ ③ 避難開始日時 (避難先) _____ ④ 避難終了日時 (避難先) _____ ⑤ 避難場所の名称 (避難先) _____ ⑥ 避難場所の住所 (避難先) _____ ⑦ 避難場所の電話番号 (避難先) _____ ⑧ 避難場所の地図 (避難先) _____				
4. 安定ヨウ素剤 ① 安定ヨウ素剤の服用状況 (安定ヨウ素剤) _____ ② 安定ヨウ素剤の服用回数 (安定ヨウ素剤) _____ ③ 安定ヨウ素剤の服用時間 (安定ヨウ素剤) _____ ④ 安定ヨウ素剤の服用場所 (安定ヨウ素剤) _____ ⑤ 安定ヨウ素剤の服用方法 (安定ヨウ素剤) _____ ⑥ 安定ヨウ素剤の服用量 (安定ヨウ素剤) _____ ⑦ 安定ヨウ素剤の服用回数 (安定ヨウ素剤) _____ ⑧ 安定ヨウ素剤の服用時間 (安定ヨウ素剤) _____ ⑨ 安定ヨウ素剤の服用場所 (安定ヨウ素剤) _____ ⑩ 安定ヨウ素剤の服用方法 (安定ヨウ素剤) _____ ⑪ 安定ヨウ素剤の服用量 (安定ヨウ素剤) _____				
5. 食事状況 ① 食料摂取状況 (食料摂取) _____ ② 食料摂取回数 (食料摂取) _____ ③ 食料摂取時間 (食料摂取) _____ ④ 食料摂取場所 (食料摂取) _____ ⑤ 食料摂取方法 (食料摂取) _____ ⑥ 食料摂取量 (食料摂取) _____ ⑦ 食料摂取回数 (食料摂取) _____ ⑧ 食料摂取時間 (食料摂取) _____ ⑨ 食料摂取場所 (食料摂取) _____ ⑩ 食料摂取方法 (食料摂取) _____ ⑪ 食料摂取量 (食料摂取) _____				
6. 個人情報利用の許諾 ① 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ② 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ③ 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ④ 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ⑤ 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ⑥ 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ⑦ 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ⑧ 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ⑨ 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ⑩ 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____ ⑪ 個人情報利用の許諾 (個人情報) _____				

甲状腺測定を行う会場の受付にて被検者に配布し、測定後にコピーを収集。

住民の避難行動情報や体表面汚染検査の結果などの情報を効率的に散逸することなく収集する必要があります。

そのために、避難者検査記録カードを活用した情報収集支援システムを開発しています。

情報収集支援システムの製作(2)



1. ログイン画面



2. 被検者情報・検査データ登録



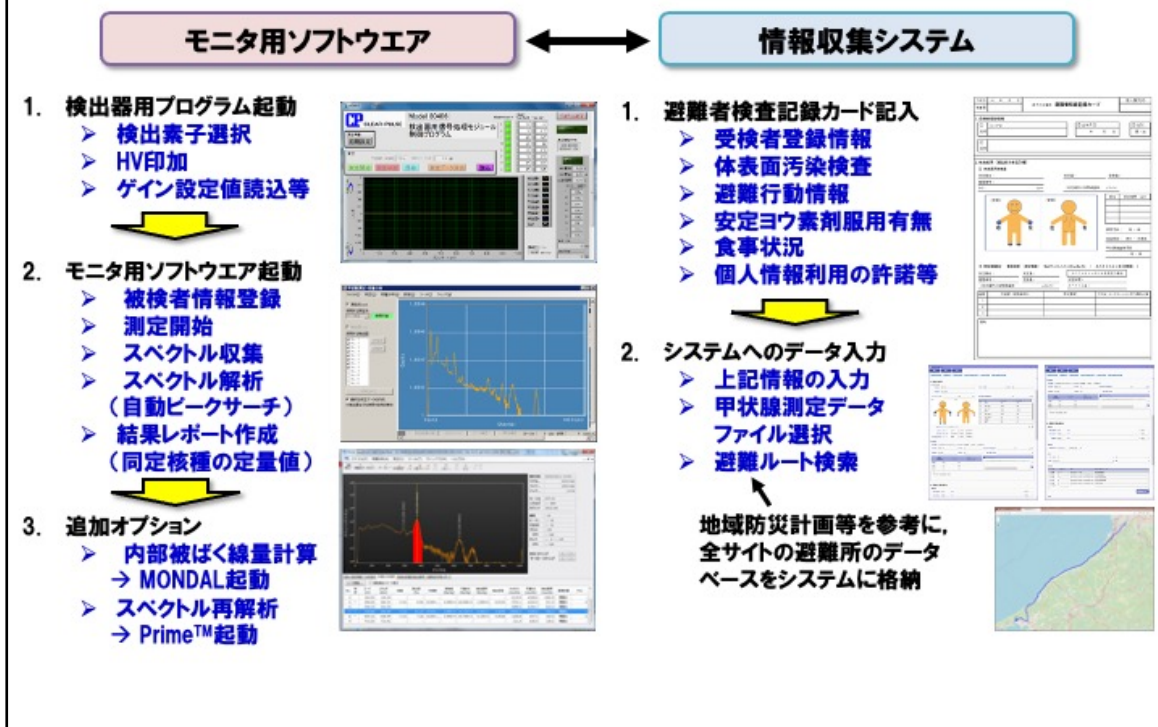
3. 避難行動情報登録

避難者の検査データの一元管理と放射線防護対策の立案に有用

開発した情報収集システムでは、「被験者情報・検査データ」及び「避難行動情報」が登録できます。

原子力発電所の避難計画に含まれる避難所情報を元に、避難経路が別画面で可視化されるため、避難者の検査データの一元管理と放射線防護対策の立案に有効です。

新モニタ用ソフトウェア・情報収集システムの製作



開発した新規モニタ用のソフトウェアと情報収集システムを上手く活用しながら、原子力災害に対応することが重要です。