

平成31年度(令和元年度)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

# 原子力事故時における近隣住民の 確実な初期内部被ばく線量の把握に向けた 包括的個人内部被ばくモニタリングの確立

成果報告会  
令和2年2月6日

量子科学技術研究開発機構

主任研究者

栗原 治

# 研究概要

課題名「放射性ヨウ素等の迅速・高精度な内部被ばくモニタリング手法に関する研究」

研究期間:2017-2019(3年間)

背景・目的(公募要領から要約)

- 原子力災害に伴う放射性ヨウ素による公衆の内部被ばくを早い段階で把握するために、**できるだけ沢山の人を対象とし、精度の高い線量測定を行う必要がある。**
- そのため、様々な年齢の公衆(**特に乳幼児**)に適用可能な測定手法、スペクトル分析による**核種同定、高バックグラウンド環境**に対応できる測定器の開発が必要である。

実施状況(ロードマップに従い、**ほぼ当初の計画通り進捗**)

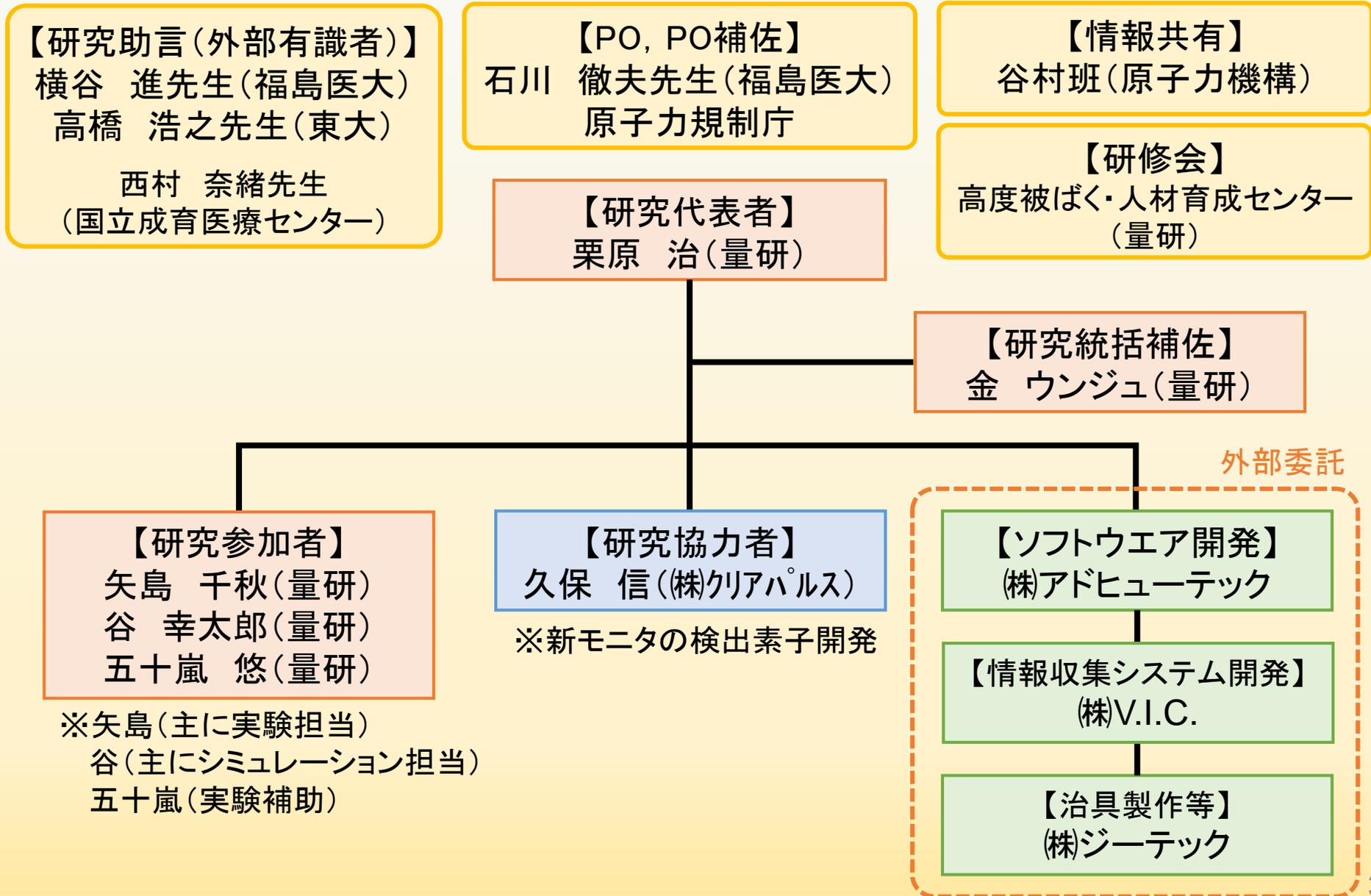
今年度(最終年度)は主に以下を実施

- **乳幼児にも適用可能な甲状腺モニタ(実用機)の開発を完了**
- **実用機の性能評価(年齢別ファントムによる校正、高BG試験など)**
- **モニタ用ソフトウェア及び情報収集システムの改良**

期待される成果

**原子力災害時の公衆の確実な内部被ばく線量の把握に貢献**

# 研究実施体制(今年度)



# ロードマップ及び研究進捗状況

項目	平成29年度	平成30年度	平成31年度(令和元年度)
1. 検出器応答評価 (スペクトル解析ソフトの 開発を含む)	<ul style="list-style-type: none"> <li>資機材準備</li> <li>応答試験</li> <li>ソフトウェア試作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>数値シミュレーション</li> <li>応答試験</li> <li>ソフトウェア改良</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定条件決定※</li> <li>ソフトウェア改良</li> </ul>
2. 新モニタの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>試作器の製作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試作器の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実用機の開発</li> </ul>
3. マニュアル作成 (情報収集システムの開 発を含む)	<ul style="list-style-type: none"> <li>簡易検査見直し</li> <li>システム概念設計</li> <li>海外調査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>換算係数の整備</li> <li>システム試作</li> <li>海外調査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>マニュアル作成※</li> <li>システム改良</li> </ul>
4. 研修・ワークショップ	<ul style="list-style-type: none"> <li>実務者会合</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実務者会合</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>研修会</li> <li>代わりに国際 学会での発表</li> <li>WS</li> </ul>

※3月末までに終了見込み

# 提案する原子力災害時の個人内部被ばくモニタリング

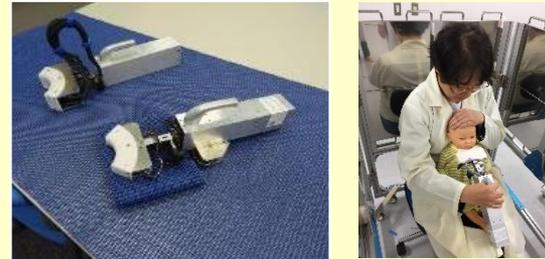
緊急時段階(放射性核種の環境放出)

中期段階(環境放出が概ね収束)

原子力緊急  
事態発生

避難

避難退域時検査



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

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。

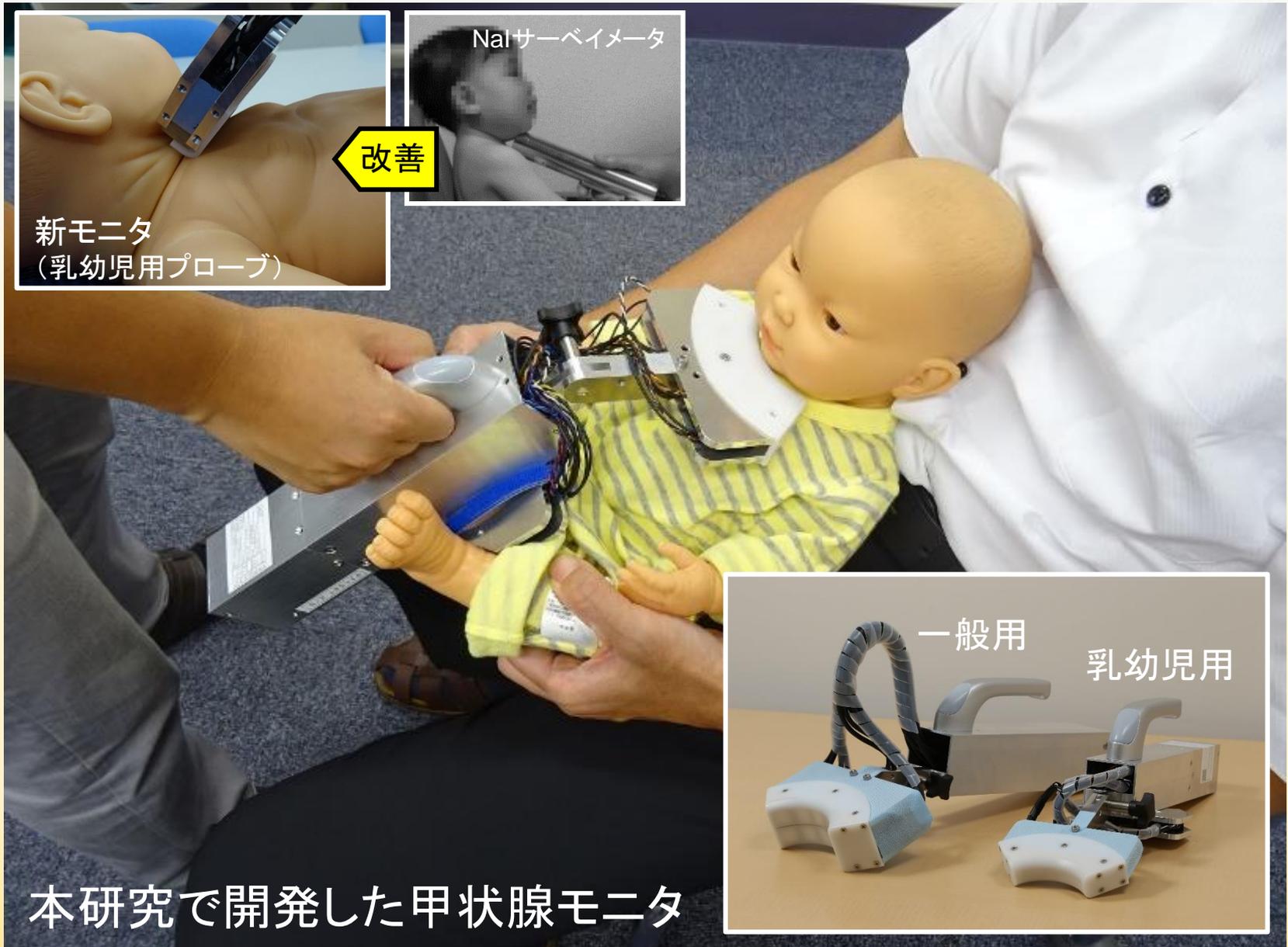
~1週間

~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  
※なるべく早い段階での情報収集が重要

# 【今年度の研究概要①】 新モニタの開発



# 【今年度の研究概要②】 モニタ用ソフトウェア・情報収集システム

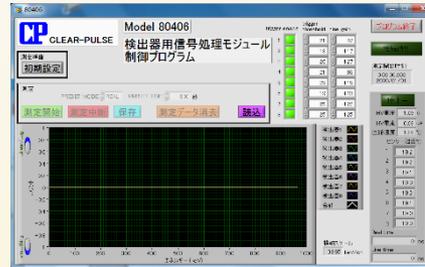
## モニタ用ソフトウェア



## 情報収集システム

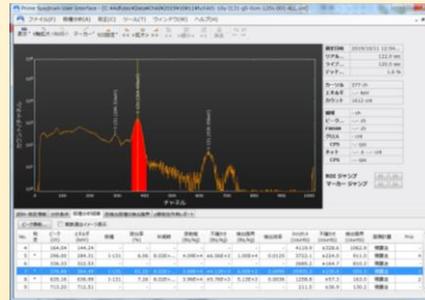
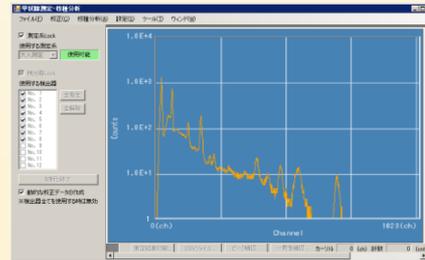
### 1. 検出器用プログラム起動

- 検出素子選択
- HV印加
- ゲイン設定値読込等



### 2. モニタ用ソフトウェア起動

- 被検者情報登録
- 測定開始
- スペクトル収集
- スペクトル解析 (自動ピークサーチ)
- 結果レポート作成 (同定核種の定量値)



### 3. 追加オプション

- 内部被ばく線量計算  
→ MONDAL起動
- スペクトル再解析  
→ Prime™起動

### 1. 避難者検査記録カード記入

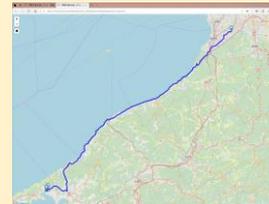
- 受検者登録情報
- 体表面汚染検査
- 避難行動情報
- 安定ヨウ素剤服用有無
- 食事状況
- 個人情報利用の許諾等



### 2. システムへのデータ入力

- 上記情報の入力
- 甲状腺測定データ  
ファイル選択
- 避難ルート検索

地域防災計画等を参考に、  
全サイトの避難所のデータ  
ベースをシステムに格納



今年度はモニタ用ソフトウェア及び情報収集システムの機能拡張(入力者権限分類, 他メーカー検出器の制御, 体表面汚染検査結果の入力補助, 避難経路の探索機能, データベース統合機能など)を追加した。

# 【研究の進捗①】 乳幼児の測定方法

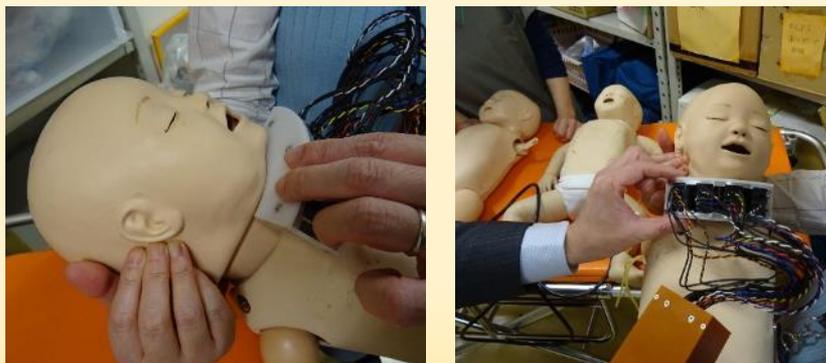
昨年度

試作機(プローブ)の開発



- ファントムを用いた検出素子配置の検討
- 検出素子固定治具の製作

- 乳幼児用... 1段4列アレイ
- 子供用... 2段4列アレイ
- 一般用... 2段5列アレイ



乳幼児ファントムを用いたモックアップ  
(成育医療研究センターにて)

今年度

測定体位・プローブの選択

## 1. 基本となる測定体位

横谷先生(福島医大)からのご助言

- 2歳未満... 母親が抱きかかえて測定
- 2~5歳... ベットに寝かせて測定
- 5歳以上... 椅子に座って測定



## 2. プローブの選択



2歳7カ月(女子)



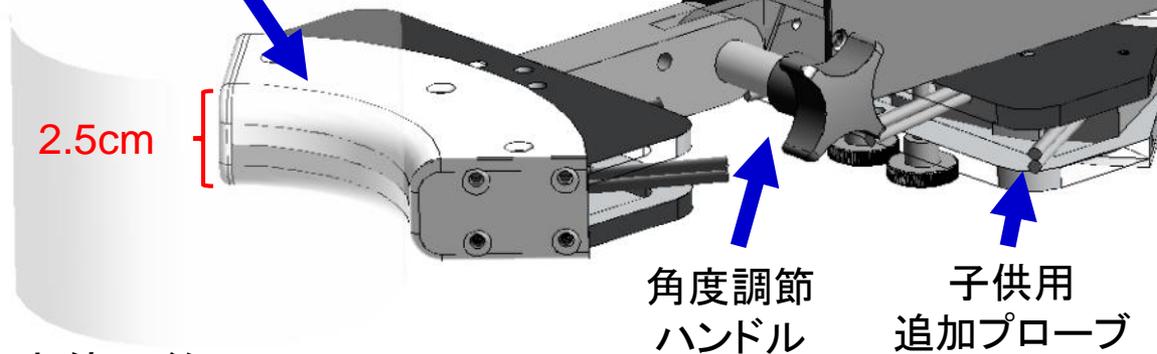
4歳(男子)

目安として、5歳までは乳幼児用、小学生(6~12歳)は子供用、中高生以降は一般用

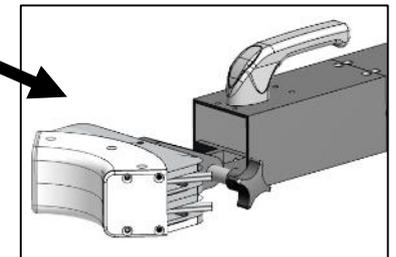
# 【研究の進捗②】 新モニタ(実用機)の製作

## 新モニタ(乳幼児・子供用)

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)

### 【新モニタの特徴】

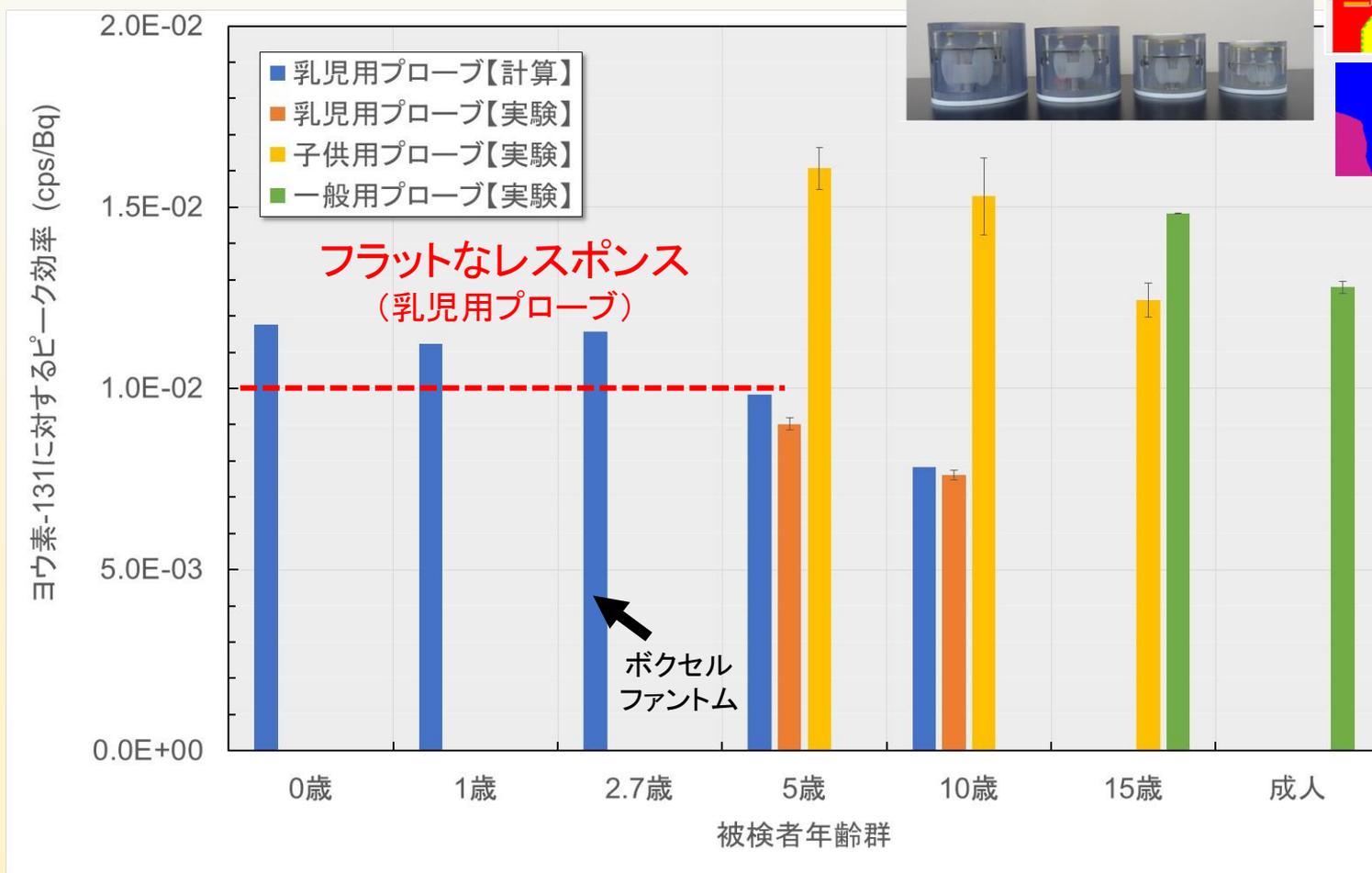
- 乳幼児にも対応可能(おそらく世界初)
- 甲状腺に対する幾何学的効率が高い
- 測定ジオメトリの再現性が高い
- 高感度・高分解能なスペクトル測定
- 温度変化に伴うゲイン変化の自動調整
- 軽量コンパクトかつ省力(USB電源供給)



プローブ(左:乳幼児用, 右:一般用)

# 【研究の進捗③】 新モニタ(実用機)の性能評価(1)

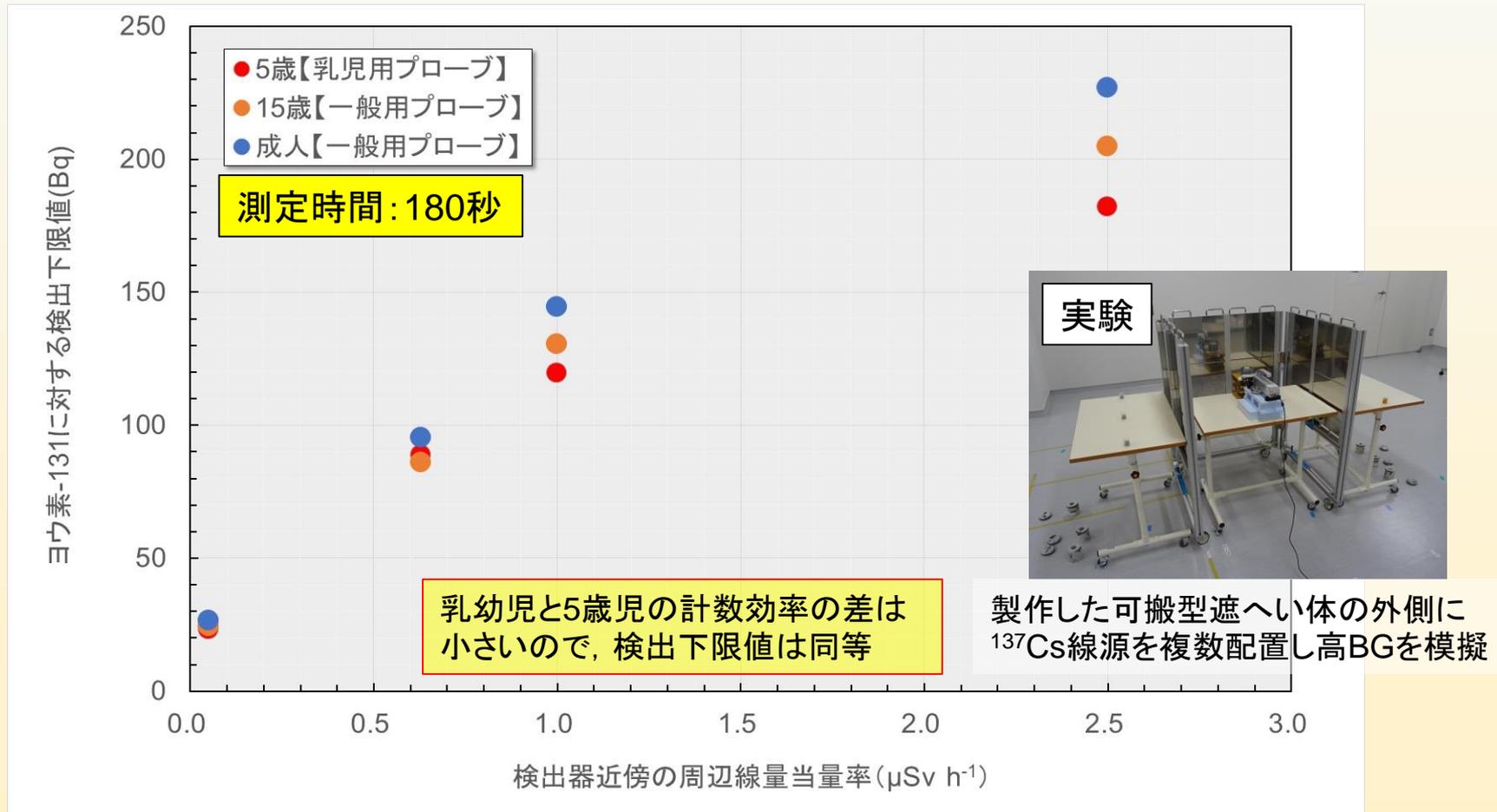
## 年齢別ファントムに対する<sup>131</sup>Iのピーク効率



- 実験と計算により乳幼児から成人までの新モニタの<sup>131</sup>Iピーク効率を評価(5歳児までは乳幼児用プローブで安定した感度が得られる見込み)

# 【研究の進捗④】 新モニタ(実用機)の性能評価(2)

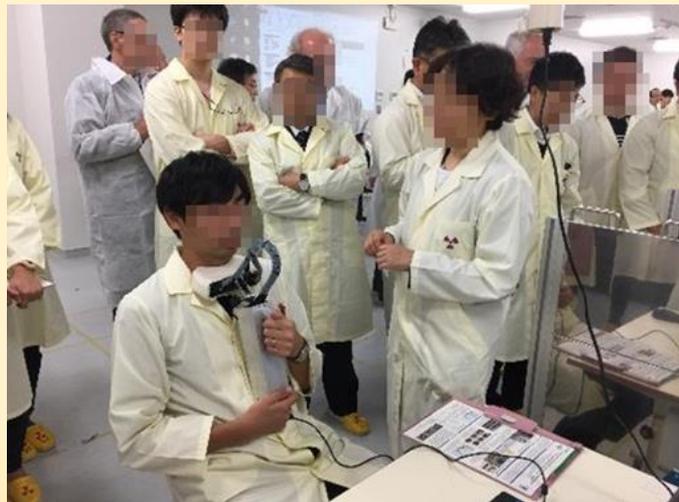
## バックグラウンド線量率と<sup>131</sup>I検出限界値の関係



数μSv h<sup>-1</sup>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)

# 今年度の成果

- 乳幼児の甲状腺中ヨウ素の測定にも適用可能な新しいモニタの開発を完了。また、同モニタの性能を評価するとともに、実被検者(子ども)によるモックアップ試験を行った。
- 提案した原子力災害時における公衆の甲状腺モニタリングに必要な材料(測定マニュアル類, 情報収集システムなど)を整備した。
- 本研究成果を国際学会や研修会等を通じて発信した。



甲状腺簡易測定研修での新モニタのデモンストレーション



新モニタのモックアップ試験

# 成果公表

## 学会発表

- K. Yajima, E. Kim, K. Tani, H. Tatsuzaki, O. Kurihara. “A reliable and robust method for monitoring large populations to assess thyroid internal exposure in a nuclear accident”. 12<sup>th</sup> International conference on the Health Effects of Incorporated Radionuclides (HEIR). 8-11 October 2018, Fontenay-aux-Roses, Paris, France. BIO Web of Conference 14, 03010 (2019).
- K. Yajima et al. the same presentation as the above. 4<sup>th</sup> ARADOS annual meeting. 17-19 October 2018, Seoul, Korea.
- K. Tani, Y. Igarashi, E. Kim, T. Iimoto, O. Kurihara. “Monte Carlo simulation with computational phantom to investigate the effectiveness of a whole-body counter for thyroid measurement”. 19<sup>th</sup> International conference on Solid State Dosimetry (SSD). 15-20 October 2019, Hiroshima, Japan.
- K. Yajima. E. Kim, K. Tani, O. Kurihara. “A new concept thyroid monitor using multiple GAGG detectors for population monitoring in a nuclear accident”. 19<sup>th</sup> International conference on Solid State Dosimetry (SSD). 15-20 October 2019, Hiroshima, Japan.
- K. Yajima et al. the same presentation as the above. 5<sup>th</sup> ARADOS annual meeting. 6-8 November 2019, Beijing, China.

## 論文

- K. Yajima, E. Kim, K. Tani, H. Tatsuzaki, C. Li, O. Kurihara. “A screening survey exercise for thyroid internal exposure from radioiodine after a nuclear accident”. Radiat. Prot. Dosim. 183:483-488 (2018).
- K. Yajima. E. Kim, K. Tani, O. Kurihara. “A new thyroid monitor using multiple high resolution GAGG detectors for direct thyroid measurements of small children following a nuclear accident”. Radiation Measurements. (under review).

2020年5月に開催されるIRPAでも本研究成果を紹介予定

# 自己評価

## 1. 研究代表者による自己評価

評価の視点	自己評価	コメント
評価時点までの研究の実施が研究計画に沿って行われているか	概ね計画どおり	<ul style="list-style-type: none"><li>● ほぼ当初の計画通り、研究を遂行することができた。</li><li>● 特に最終年度は外部有識者の先生方を含む多くの方々から貴重なご助言やご支援を頂いた。この場を借りて感謝申し上げたい。</li></ul>
今年度の進捗や達成度を踏まえて、次年度の研究計画に変更が必要か	今年度で終了	<ul style="list-style-type: none"><li>● 本研究の終了後も乳幼児・小児の測定について引き続き検討していきたい(最適な測定時間や安心して測定を受けられる工夫など)</li><li>● 提案した手法を各地域の原子力防災計画にどのように実装できるかを検討していきたい。</li></ul>

## 2. 分担研究者による自己評価

研究分担者不在のため本項目は該当しない。

### 評価時までの研究成果

- 本資料で示したとおり。

ご清聴ありがとうございました

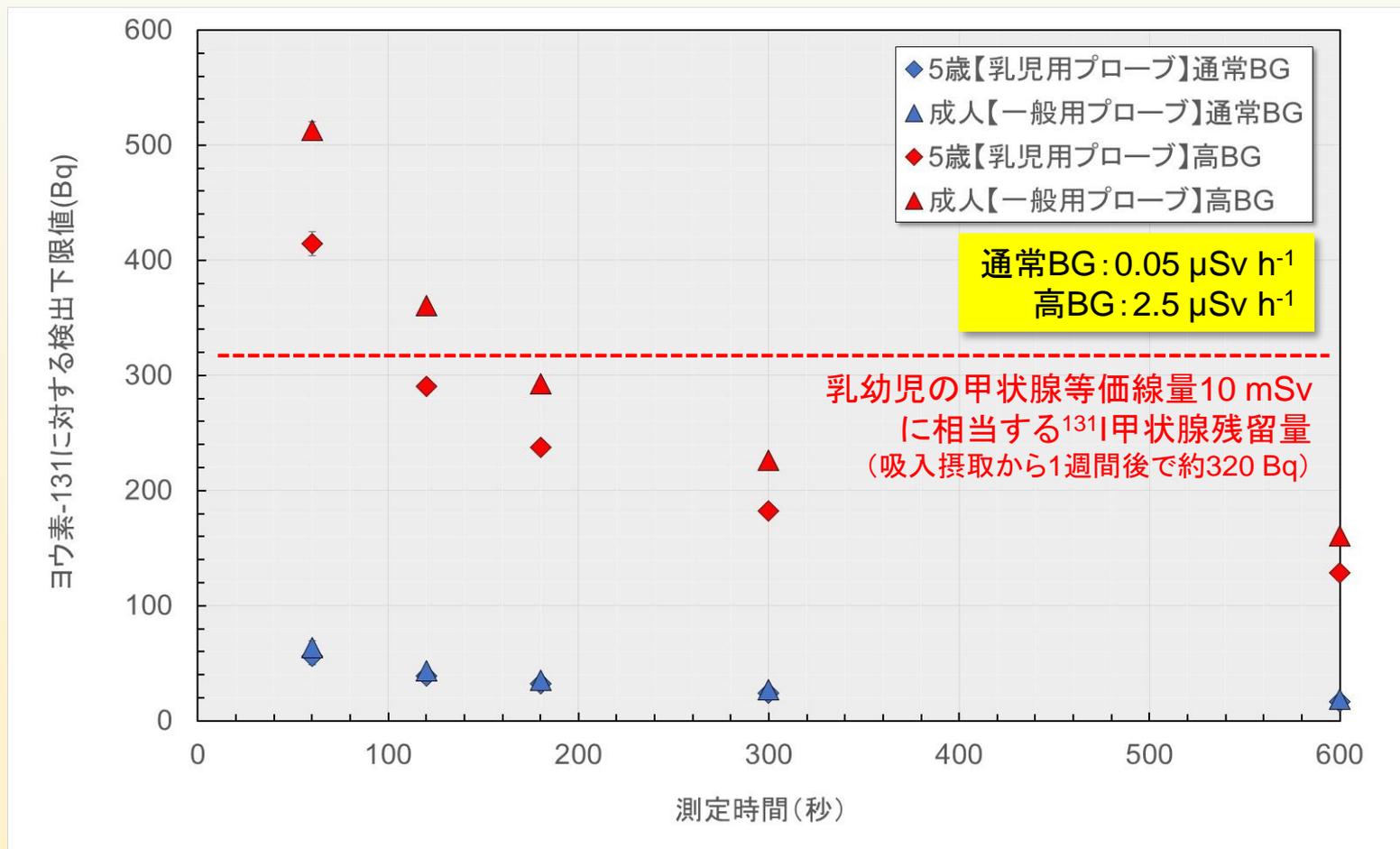
# (参考)他検出器との比較

項目	Nal(Tl) サーベイメータ	新モニタ(GAGG)	甲状腺モニタ(HPGe) (量研所有の装置)
BG線量率 (推奨値)	0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以下 (IAEA EPRに準じる)	数 $\mu\text{Sv/h}$ 以下	通常BG
対象者	小学生(低学年)~成人	乳幼児~成人	成人
用途	スクリーニング(現地)	詳細測定(現地)	詳細測定(医療機関等)
測定時間	2~3分間 (頸部と大腿部の2カ所測定)	3分間 (定期的に測定室内のBG測定)	3分間
検出限界値 ( $^{131}\text{I}$ )	約500 Bq(通常BG) ※0.02 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ を検出限界とした場合	30 Bq(通常BG)~ 300 Bq(2.5 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	38 Bq(通常BG)
重量	約1.5 kg (TCS-171/172)	約1 kg(乳児・子供用) 約1.5 kg(一般用)	約1 ton
電源	内蔵電池	ノートPCから供給	商用電源

細田らの報告(Health Phys. 2019)によれば, 3インチNal(Tl), 2インチCeBr<sub>3</sub>, 1.5インチSrl<sub>2</sub>(Eu), 1インチSrl<sub>2</sub>(Eu)の検出限界値を比較し, 通常BG(0.04 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ )で約20~40 Bq, 空間線量率1.38 $\mu\text{Gy}$ の環境で約200~600 Bqであった。  
(ただし, 計数効率校正には成人を模擬したORINSファントムを使用し, 測定時間は300秒の結果である)

# (参考)新モニタ(実用機)の性能評価(3)

## 検出下限値と測定時間の関係



数 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ 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)

# (参考) 甲状腺簡易測定マニュアルの作成

## Nal(Tl)サーベイメータを用いる甲状腺簡易測定に関するマニュアル

### 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に取り込まれると、安定（放射性でない）ヨウ素と同様に甲状腺に蓄積するため、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 ( $^{131}\text{I}$ ) である<sup>1)</sup>。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は放射性遷移（ベータ線）に伴い、幾つかのエネルギーの $\gamma$ 線を放出する。最も放射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、甲状腺に蓄積したヨウ素-131を測定することができる（図1）。また、使用するガンマ線検出器を事前に校正（後述）してあげれば、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、種々の空間線量率（または周辺線量当量率）の測定に広く使われているNal(Tl)サーベイメータを用いる。同機器では検出器固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あげれば、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。

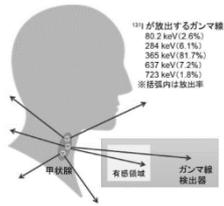


図1 甲状腺中ヨウ素の測定原理

<sup>1)</sup>  $^{131}\text{I}$ 以外に、 $^{132}\text{I}$ 、 $^{134}\text{I}$ 、 $^{135}\text{I}$ 等も甲状腺内部被ばく線量に寄与する可能性がある。 $^{132}\text{I}$ 、 $^{134}\text{I}$ 、 $^{135}\text{I}$ 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。 $^{132}\text{I}$ と $^{134}\text{I}$ は速やかに放射線平衡になる。これらの核種は、原子力発電所の運転停止直後は $^{131}\text{I}$ よりも放射線が高い。

### 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。

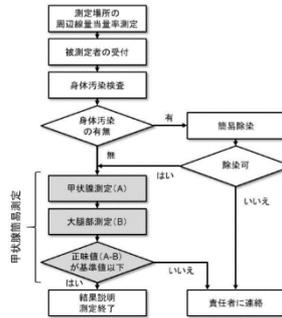


図6 甲状腺簡易測定の手順

#### (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くても、避難遅延時検査<sup>2)</sup>と併せて行うことは困難<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>。

#### (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おう。アンケート用紙はなるべく簡便なものとする。

#### (3) 身体汚染検査

避難遅延時検査と同様な手順（待機数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出した場合<sup>5)</sup>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

Nal(Tl)サーベイメータのプロブを、着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ブが動かないようにする。なお、被測定者に上を見ようような形で頸部を伸展してもらおうと、プロブを密着させやすい。



図7 甲状腺測定におけるプロブ位置

#### (6) 大領域測定

(5)と同様な要領で被測定者の大頸部にプロブを置いて指示値(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。

<sup>2)</sup> 避難遅延時検査に用いる OIL4 は、緊急時に行う除染の準備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態で受検することが必須である。これは体外計測施設に書入ることである。

<sup>3)</sup> 避難遅延時検査（OIL4 を超過する身体汚染の有無を確認する検査）は、避難所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、その適用を望まない限り甲状腺簡易測定を行うのは難しい。

<sup>4)</sup> より広域の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。



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、10体以上のマネキン(内側に様々な強度の線源をセット)を用いた実習を併せて実施。

# (参考) 避難者検査記録カード

昨年度成果発表スライドから

## 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

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											
<b>1. 受検者登録情報</b>											
① (ふりがな) 氏名	② 生年月日 年 月 日	③ 性別 男・女									
④ 住所											
<b>2. 検査結果 (測定担当者記入欄)</b>											
<b>① 体表面汚染検査</b>											
測定器名:	測定員:	記録員:									
管理番号:	(測定場所の空間線量率: $\mu\text{Sv/h}$ )										
BG:	cpm										
		<table border="1"> <tr> <th>部位</th> <th>測定結果 cpm</th> </tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </table>	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
部位	測定結果 cpm										
<b>② 甲状腺測定 簡易検査 (測定機器: NaIサーベイメータ(<math>\mu\text{Sv/h}</math>)・スペクトロメータ(計数値))</b>											
測定器名:	測定員:	スペクトロメータによる測定の場合									
管理番号:	記録員:	測定時間:	スペクトル名:								
(測定場所の空間線量率: $\mu\text{Sv/h}$ )											
結果	大脳部(被検者BG)	甲状腺部	その他: ピークチャンネル及び領域(ch)等								
1											
2											
3											
備考											

1. 被検者情報

3. 避難行動情報

2. 体表面検査

4. 安定ヨウ素剤

5. 食事状況

6. 個人情報  
利用の許諾

<b>3. 避難行動調査</b>			
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
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。			
<b>4. 安定ヨウ素剤の服用</b>			
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
<b>5. 食事状況調査</b>			
① 震災後から現在まで、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 震災後から現在まで、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			
<b>6. 個人情報利用の許諾</b>			
本記録カードの記載内容は、個人情報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下さる方は自筆(未成年者の場合は保護者)による署名をお願いします。			
氏名(自筆)			ご協力ありがとうございました。

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