

福島第一原発事故における周辺住民の 初期内部被ばく線量推計：現状と課題

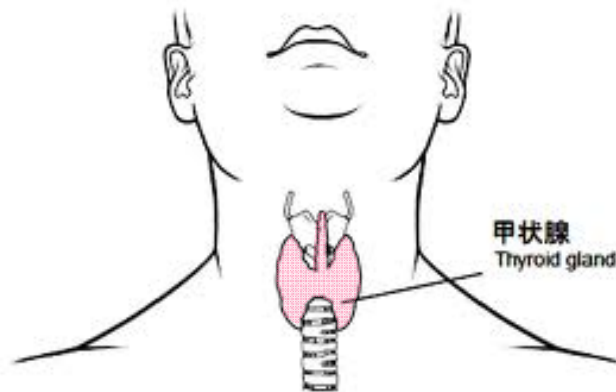
本発表の一部は、(独)放射線医学総合研究所が環境省委託事業(平成24年度原子力災害影響調査等事業「事故初期のヨウ素等短半減期による内部被ばく線量評価調査」)を受託して実施した成果によるものです。

平成26年3月2日(日)

(独)放射線医学総合研究所
緊急被ばく医療研究センター
栗原 治

本日の内容

- これまでに行われた初期内部被ばく線量（本発表では**甲状腺等価線量**）の推計
- 放医研が行った初期内部被ばく線量の再構築
- 線量推計における検討項目と今後の展望



- 体内に取り込まれた放射性ヨウ素の約2～3割が甲状腺に集積
- 甲状腺の質量は成人で約20g, 1歳児で約2.5g
- 内部被ばくに最も寄与する核種： ^{131}I （半減期8.04日）



初期内部被ばく線量の再構築の必要性

チェルノブイリ原発事故と福島原発事故との比較

	チェルノブイリ原発事故	福島原発事故
炉形	軽水冷却黒鉛減速炉	沸騰水型軽水炉(BWR)
放出量 (PBq=10 ¹⁵ Bq)	¹³¹ I: 1760 PBq* ¹ ¹³⁴ Cs: 47 PBq* ¹ ¹³⁷ Cs: 85 PBq* ¹	¹³¹ I: 160 PBq* ² ¹³⁴ Cs: 18 PBq* ² ¹³⁷ Cs: 15 PBq* ²
初期の人の実測	約35万件* ¹	~ 1500* ³

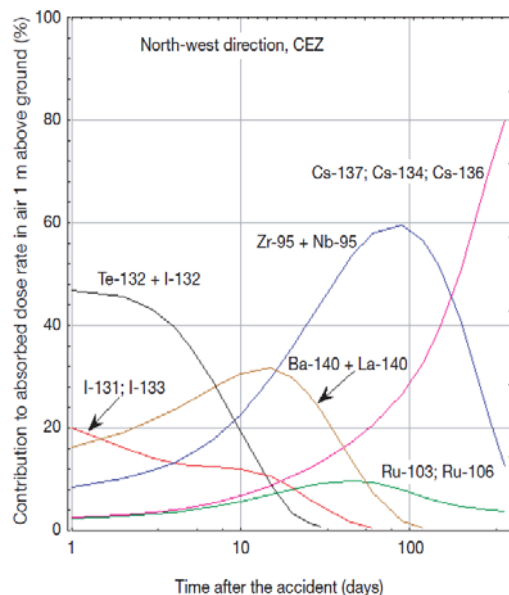


FIG. 5.4. Relative contribution of gamma radiation from individual radionuclides to the external gamma dose rate in air during the first year after the Chernobyl accident (north-west direction, CEZ) [5.12].

表 5.6. 甲状腺のヨウ素 131 測定に基づく、ウクライナのキエフ、ジトーミルとチェルニゴフ地域の子供や若者の甲状腺被曝線量の分布[5.45]

カテゴリと年齢層	測定回数	下記の甲状腺線量に該当する子供の比率				
		0.2 Gy以下	0.2~1 Gy	1~5 Gy	5~10 Gy	10 Gy 超
避難していない居住地						
農村地域						
1-4 歳	9119	40 %	43 %	15 %	1.7 %	0.9 %
5-9 歳	13460	62 %	31 %	6.5 %	0.44 %	0.07 %
10-18 歳	26904	73 %	23 %	3.7 %	0.16 %	<0.01 %
都市域						
1-4 歳	5147	58 %	33 %	7.5 %	1.0 %	0.7 %
5-9 歳	11421	82 %	15 %	2.6 %	0.23 %	0.04 %
10-18 歳	24442	91 %	7.7 %	1.4 %	0.12 %	<0.01 %
避難済みの居住地						
1-4 歳	1475	30 %	45 %	22 %	2.7 %	1.0 %
5-9 歳	2432	55 %	36 %	8.4 %	0.6 %	0.08 %
10-18 歳	4732	73 %	23 %	3.6 %	0.13 %	0.02 %

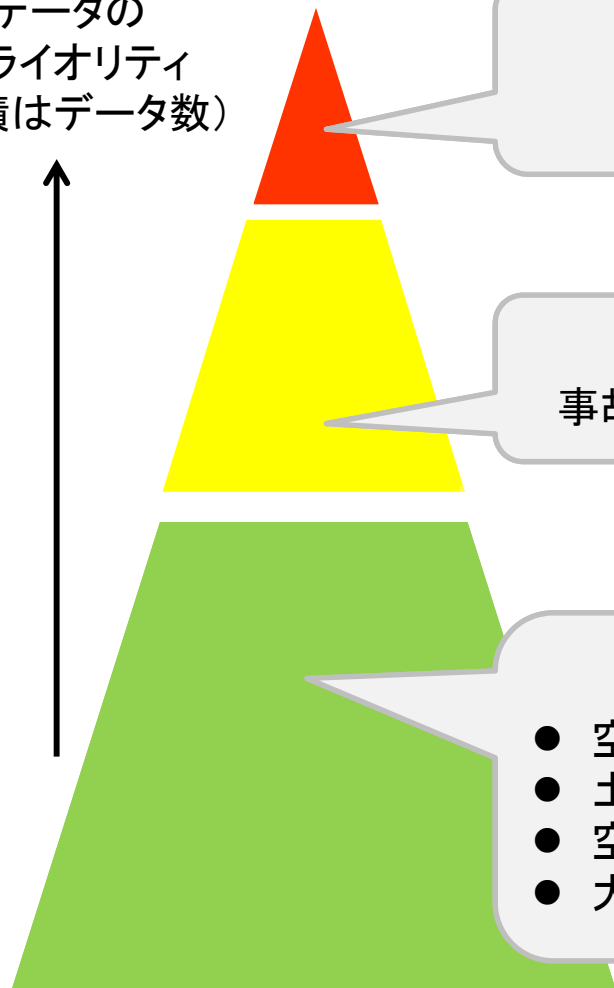
*1 IAEA, Environmental Consequence of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience (2006).

*2 原子力安全・保安院, 第77回原子力安全委員会資料第1号, 平成23年10月24日

*3 原発作業者を除く

初期内部被ばく線量推計の基礎データ

データの
プライオリティ
(面積はデータ数)



甲状腺中ヨウ素の直接計測(人の実測データ)
小児甲状腺被ばくスクリーニング検査(1,080名),
浪江町住民(62名), 初動対応者(~300名)など

- 摂取シナリオの仮定

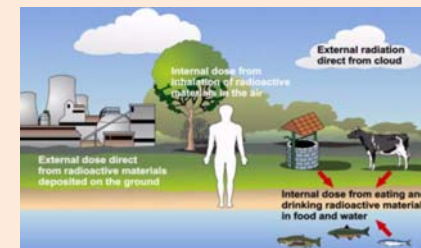
全身中セシウムの直接計測(人の実測データ)
事故後約1年間以内の福島県住民のWBCデータ(約10,000名)

- 摂取シナリオの仮定が必要
- 摂取量比(ヨウ素/セシウム)の推定

その他のデータ

- 空気サンプリング(実測)
- 土壌サンプリング(実測)
- 空間線量率マップ(実測)
- 大気拡散シミュレーション(計算)

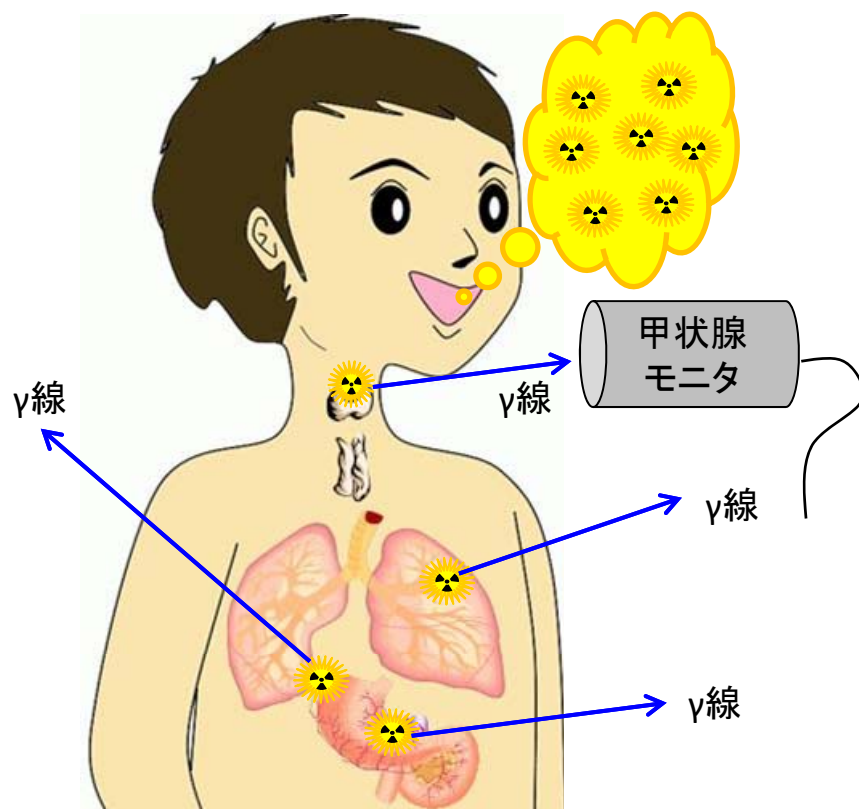
- 摂取モデルが必要



福島県住民全体の初期内部被ばく線量推計には
総合的なデータの活用が不可避

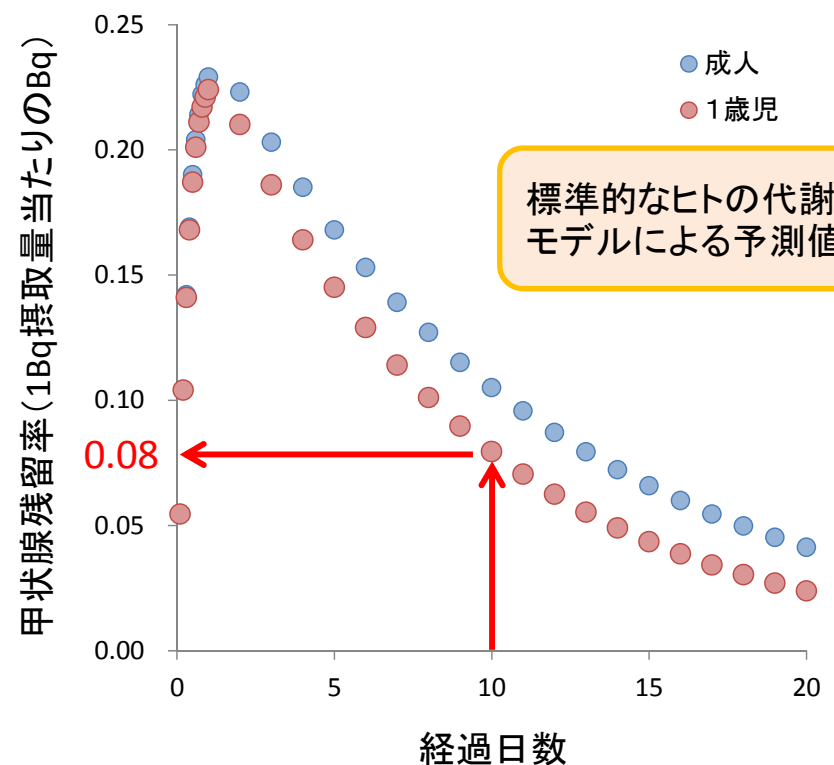
内部被ばく線量の計算

体外計測法: ホールボディカウンタ(WBC)や甲状腺モニタ等で体内の放射性核種を同定・定量する方法



内部被ばく線量の計算: 測定値から摂取量を推定し、これに線量係数を乗じる。

吸入摂取時の甲状腺残留率(^{131}I , 元素状ヨウ素)



- 内部被ばく線量 (Sv) = 摂取量 (Bq) × 線量係数 (Sv/Bq)
- 摂取量 (Bq) = 測定値 (Bq) ÷ 残留率 (Bq/Bq)

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査

- 川俣町, いわき市, 飯舘村の住民(小児) 1,080名について, NaI(Tl)サーベイメータを用いた甲状腺中ヨウ素の測定を実施。
- 全員スクリーニングレベル ($0.2\mu\text{Sv h}^{-1}$) 未満 \Rightarrow 甲状腺等価線量 100mSv 未満。

SPEEDIによる甲状腺等価線量の予測マップ



Nuclear Regulation Authority of Japan
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/mext_speedi/0312-0324_in.pdf



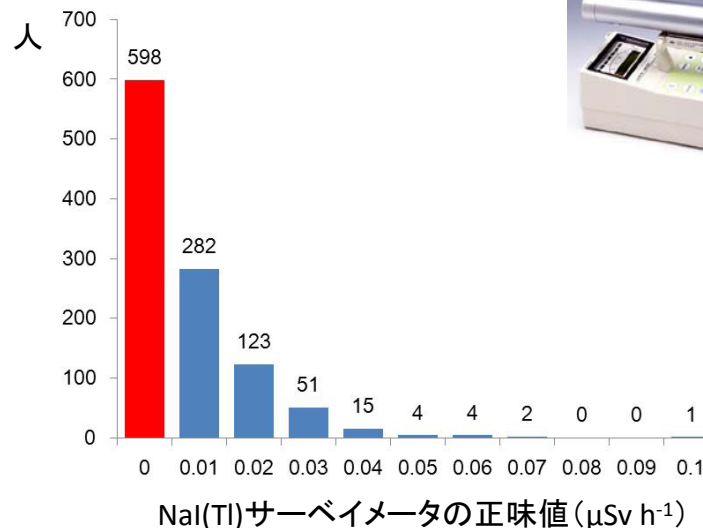
NaI(Tl)サーベイメータを頸部に密着させて測定
(写真右はバックグラウンド測定の様子)

福島靖正, 保健物理, **47**, 17-19(2012).
Hosokawa et al., Radiation Emergency Medicine, **2**, 82-86 (2013).
Kim et al., NIRS-M-252, 59-66 (2012).

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の実施状況

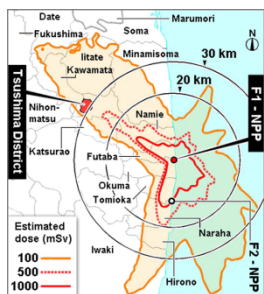
実施日	測定場所	被検者数	評価対象者数
3月24日	川俣町保健センター 川俣町山木屋出張所	18 48	(18)* ¹ (48)* ¹
3月26, 27日	いわき市保健所	137	134* ²
3月28-30日	川俣町中央公民館	631	631
3月29, 30日	飯舘村役場	315	315
合計		1,149	1,080

*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



浪江町住民の甲状腺線量

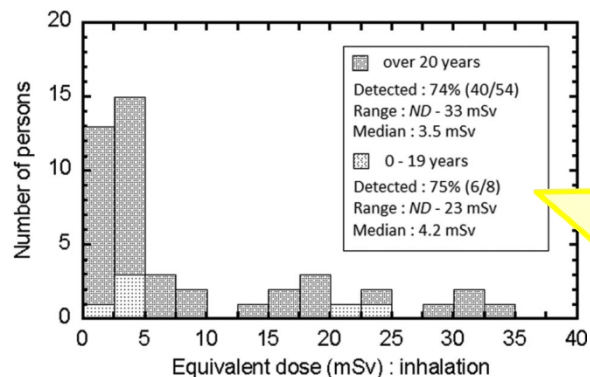
- 浪江町住民62名の甲状腺中ヨウ素 (^{131}I) を実測。46名から有意値を検出。子供と成人の最大甲状腺等価線量は、それぞれ**23mSv**と**33mSv**。
- WBC測定による浪江町住民2393名の体内セシウム量 (^{134}Cs , ^{137}Cs) から、摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$) を用いて、甲状腺等価線量を推定。最大**18mSv**。



実施期間: 4/12-4/16
(2011)



甲状腺計測



甲状腺計測に基づく甲状腺等価線量分布



^{131}I 検出者の5名から
 ^{134}Cs を定量



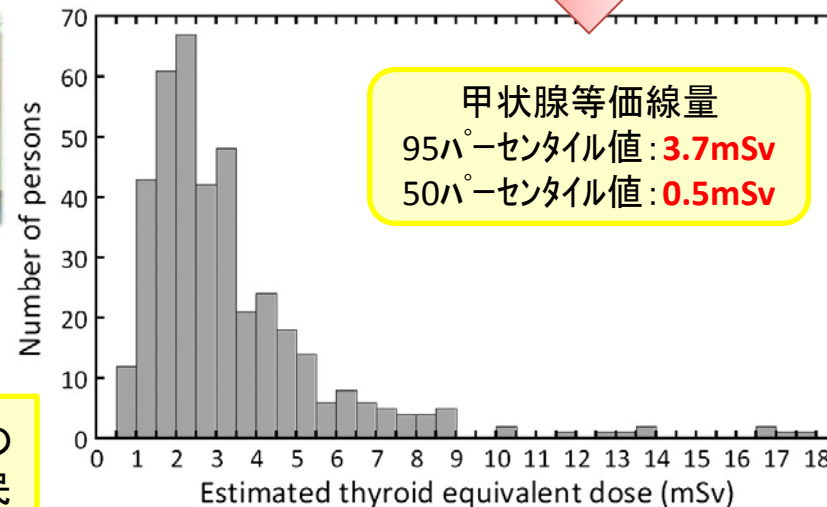
摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$) を
推定 (最大0.9)



WBC測定

実施機関: JAEA
実施期間: 7/11-8/31 (2011)

45名の沿岸地域からの
避難者と津島地区住民
17名では検出率に差異。
— 避難者: 39名 (87%)
— 住民: 7名 (41%)



WBC測定に基づく甲状腺等価線量分布

甲状腺等価線量
95パーセンタイル値: **3.7mSv**
50パーセンタイル値: **0.5mSv**

Tokonami et al., Sci. Rep. **2**, 507 (2012).
Hosoda et al., Environ. International, **61**, 73-76 (2013).

初動対応者・避難者の甲状腺線量

- 長崎大学において、事故発生1ヶ月以内に初動対応者及び避難者(計173名)をWBCにより測定。**30%以上**の被検者から有意な内部汚染確認。
- 甲状腺等価線量の最大値は約**20mSv**。事故発生から**1週間**の放射性核種の摂取が重要。避難行動の違いによる内部被ばく線量の有意差。

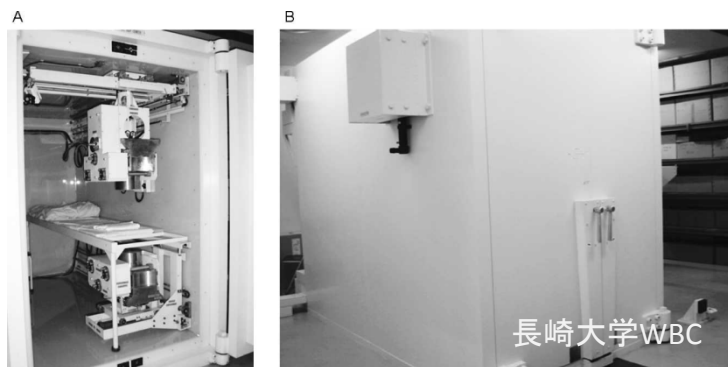


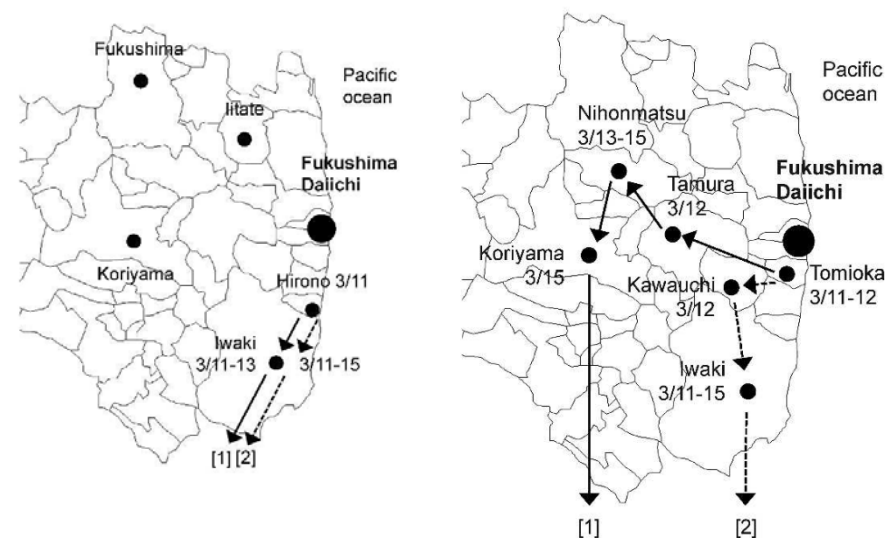
TABLE 3

Estimated Internal Exposure Doses

Group	Committed effective dose range (μSv)				Thyroid equivalent dose (mSv)
	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs	Total	
1	7.6–1000.0	1.1–110.0	0.7–120.0	1.1–1039.0	<20.04
2	7.8–49.0	0.9–7.4	0.7–5.1	1.2–6.8	<1.79
3	3.1–55.0	0.9–2.6	0.6–1.8	1.2–57.8	<1.10
4	6.0–67.0	0.9–13.0	0.6–6.0	0.9–85.5	<1.36

Group1: 3/11-3/18, Group2: 3/14-3/22

Group3: 3/18-3/31, Group4: 3/22-4/10



推定摂取量 (kBq)

行動	^{131}I		^{134}Cs	
	^{131}I	^{134}Cs	^{131}I	^{134}Cs
[1]	1.1-1.2	ND	5.9-7.7	0.4-0.5
[2]	5.0-54.0	5.3-16.0	13.7-17.0	1.4

放医研が行った甲状腺線量の再構築(方法)

甲状腺計測



小児甲状腺被ばく
スクリーニング検査
(3市町村, 1080名)

摂取シナリオ及び装置の校正定数の見直しを行い、甲状腺等価線量を評価。

全身計測



JAEAが2011年7月~2012年1月
までに実施した成人被検者の
WBC検査
(9市町村, 約3000名)

甲状腺計測の全身計測の双方の線量分布
から摂取量比(ヨウ素/セシウム)を導出。

放射性ヨウ素等の取り込み
による甲状腺等価線量

人の実測値

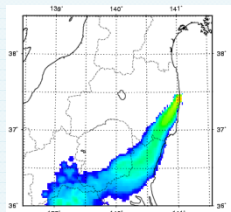
比較検証

予定

大気拡散シミュレーション
+ 個人行動情報

実測値を有する人の行動パターン化

大気拡散シミュレーション



WSPEEDI-IIによる
 ^{131}I の大気中濃度マップ
(2011/3/12~4/30)

積算大気中濃度から摂取量を計算
人の実測データが活用できない地域に適用

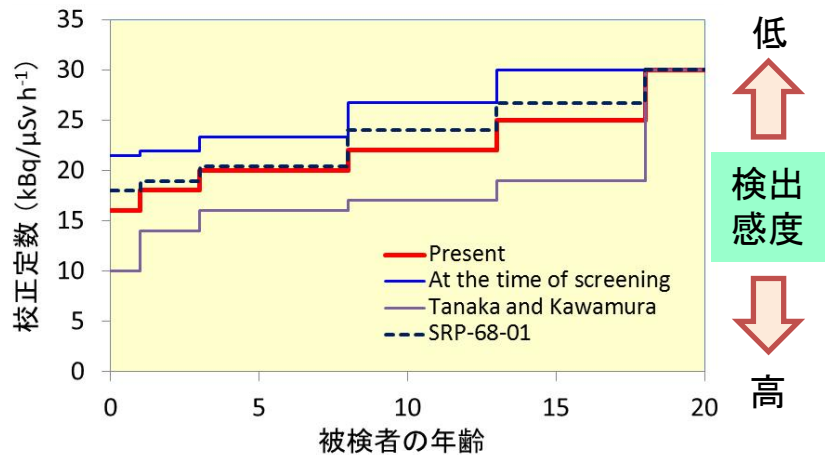
甲状腺計測に基づく甲状腺線量推計(1)

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査のデータから甲状腺線量の推計

機器の校正定数の再検討

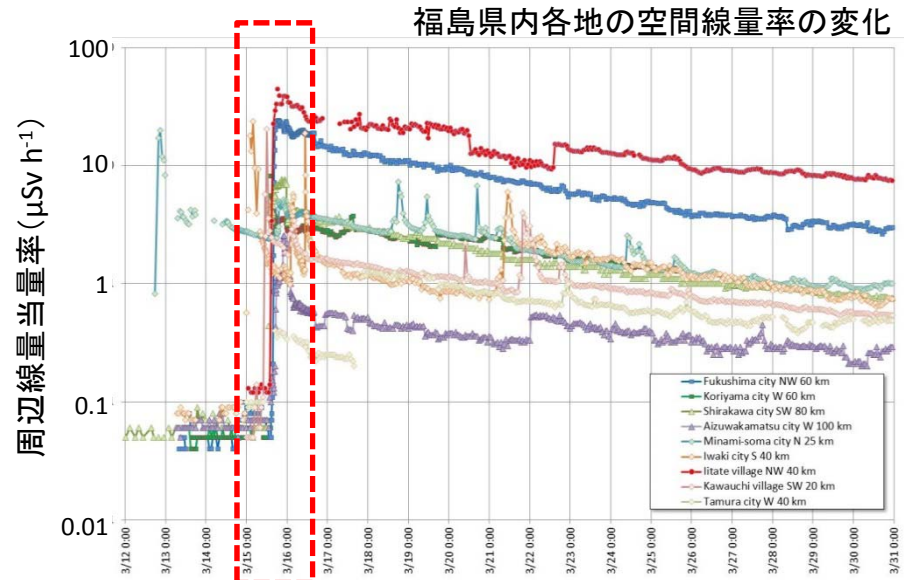


校正定数 (kBq \leftrightarrow μ Sv h⁻¹)



成人模擬の頸部ファントムを用いたため
従来の校正定数は過大評価

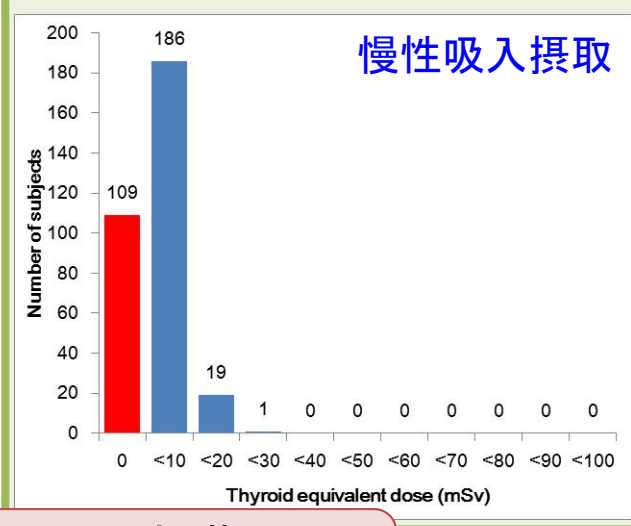
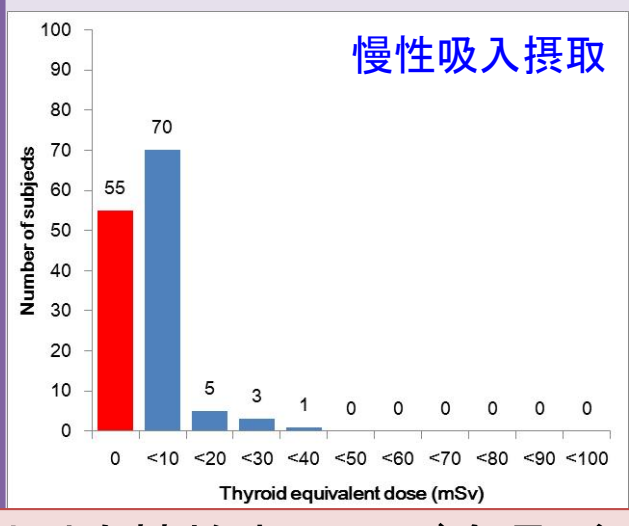
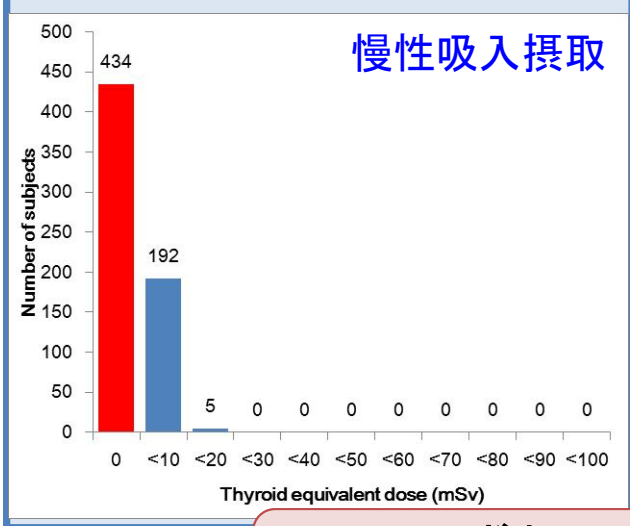
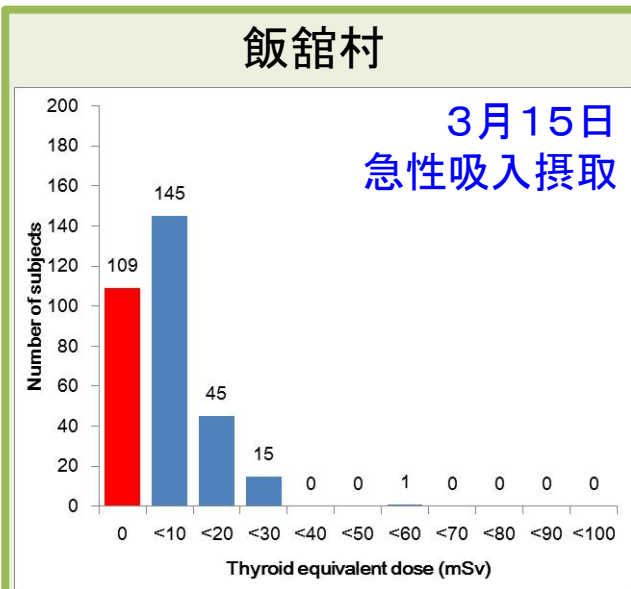
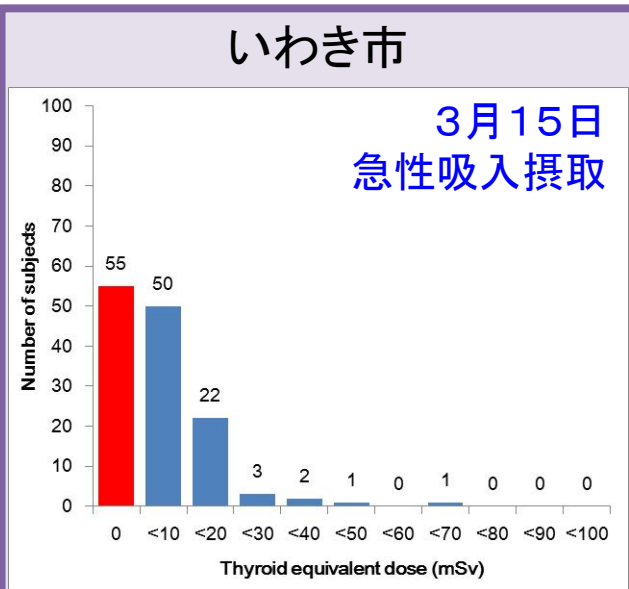
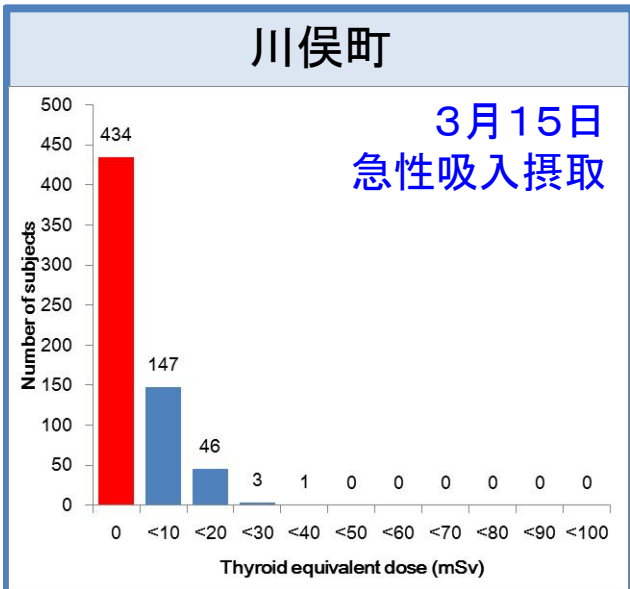
摂取シナリオの再検討



個人の行動情報が利用できないため、
3月15日の急性吸入摂取を仮定

スクリーニング当時は、3月12日から
検査開始前日までの慢性吸入摂取を仮定

甲状腺計測に基づく甲状腺線量推計(2)

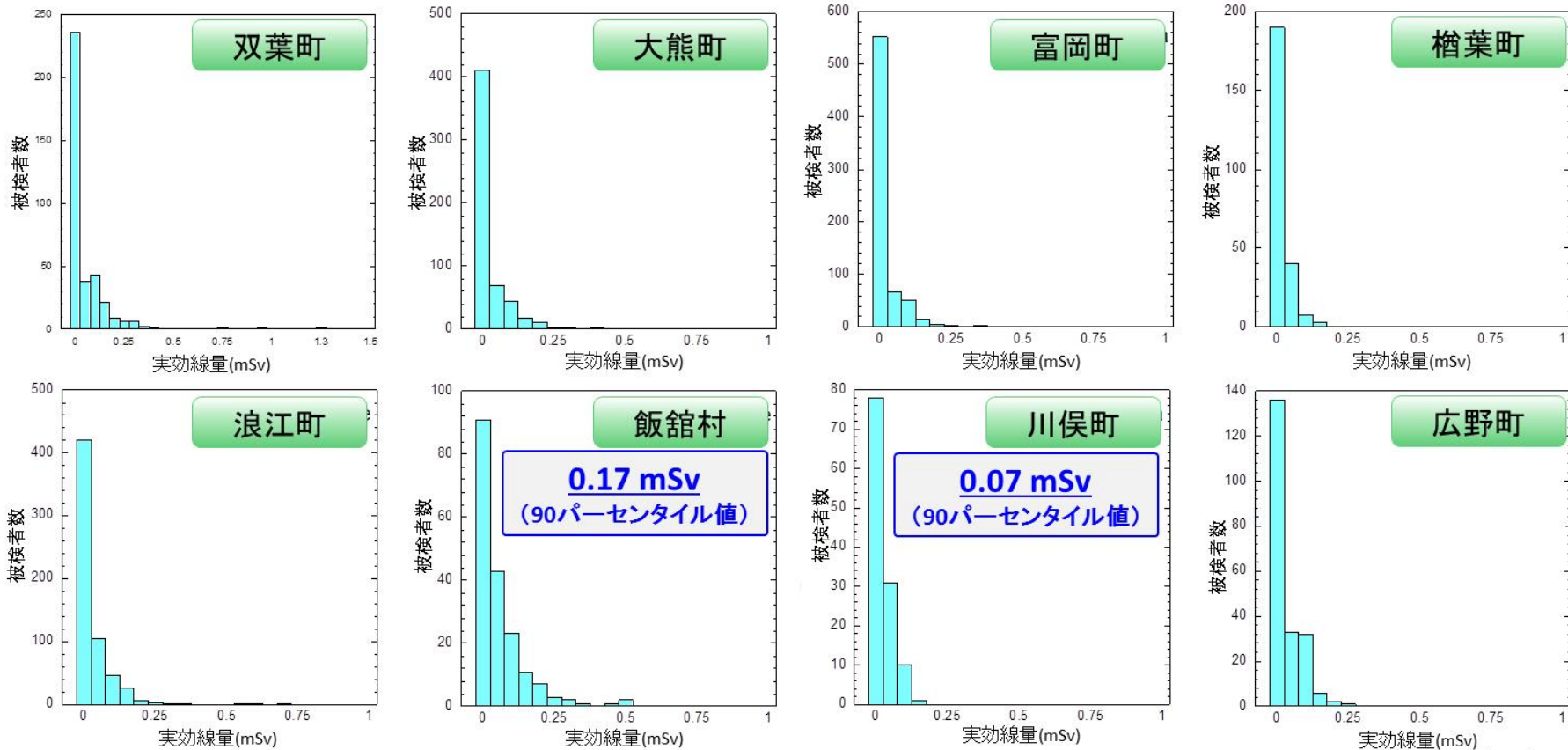


いずれの地域も被検者のほぼ全員が30mSv未満
(検出限界相当線量≒10mSv ※5歳児の場合)

全身計測に基づく甲状腺線量推計(1)

使用データ

- 2011年7月から2012年1月までにJAEAでWBC検査を受検した**成人**約**3000名の実効線量分布**
 - 摂取シナリオは3月12日の放射性セシウム (^{134}Cs と ^{137}Cs) 急性吸入摂取を設定



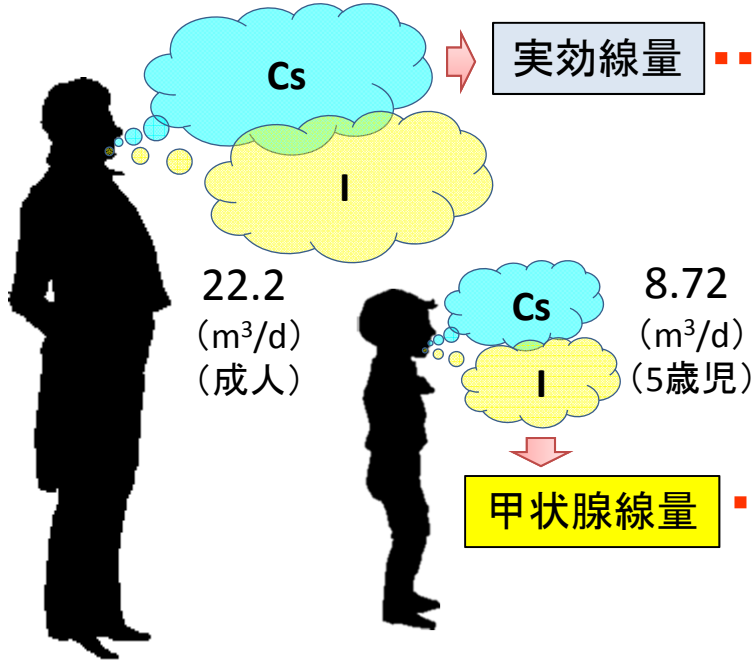
9市町村の実効線量分布を解析

全身計測に基づく甲状腺線量推計(2)

摂取量比(ヨウ素/セシウム)の導出

- 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査
- WBCによる全身計測(成人)

※ 飯館村と川俣町は両データあり



摂取量比は成人と小児で同じと仮定

放射性セシウムの実効線量(成人): **1mSv**

吸入摂取量: ¹³⁴Csと¹³⁷Csで**90kBq**づつ

摂取量比(¹³¹I/¹³⁷Cs)を1とすると

感度解析

吸入摂取量		
1歳児 20kBq	10歳児 60kBq	成人 90kBq

※呼吸率の違いを考慮

甲状腺等価線量		
1歳児 60mSv	10歳児 50mSv	成人 30mSv

※線量係数の違いを考慮

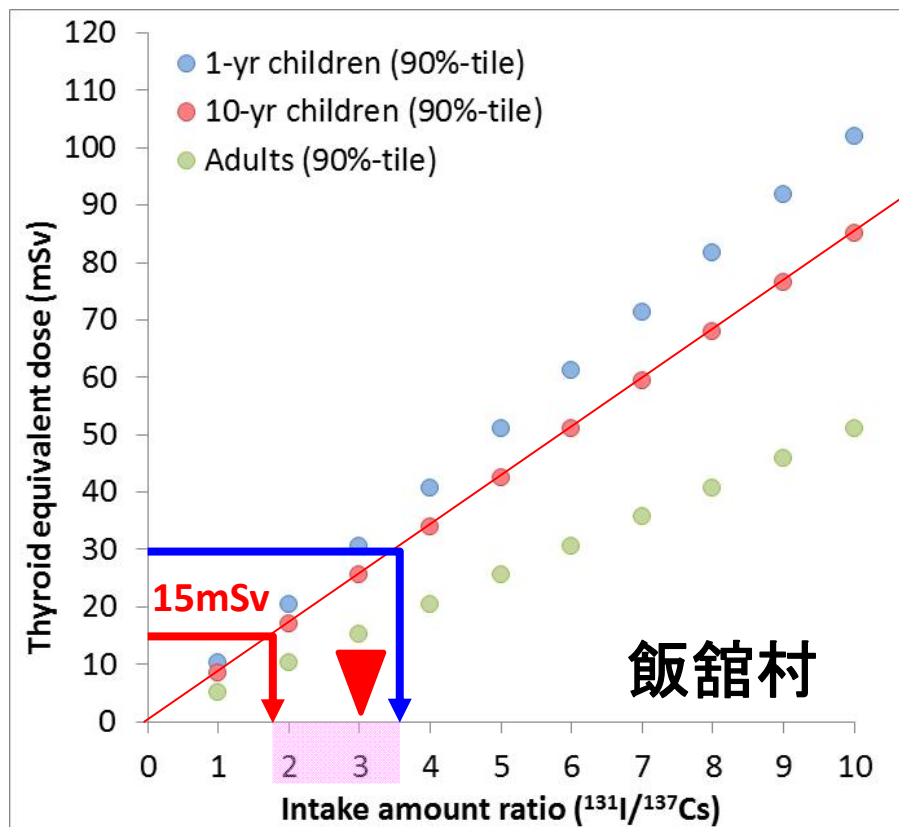
成人の実効線量(Cs)と小児の甲状腺線量(¹³¹I)の整合がとれる摂取量比を導出

全身計測に基づく甲状腺線量推計(3)

摂取量比(ヨウ素/セシウム)の導出

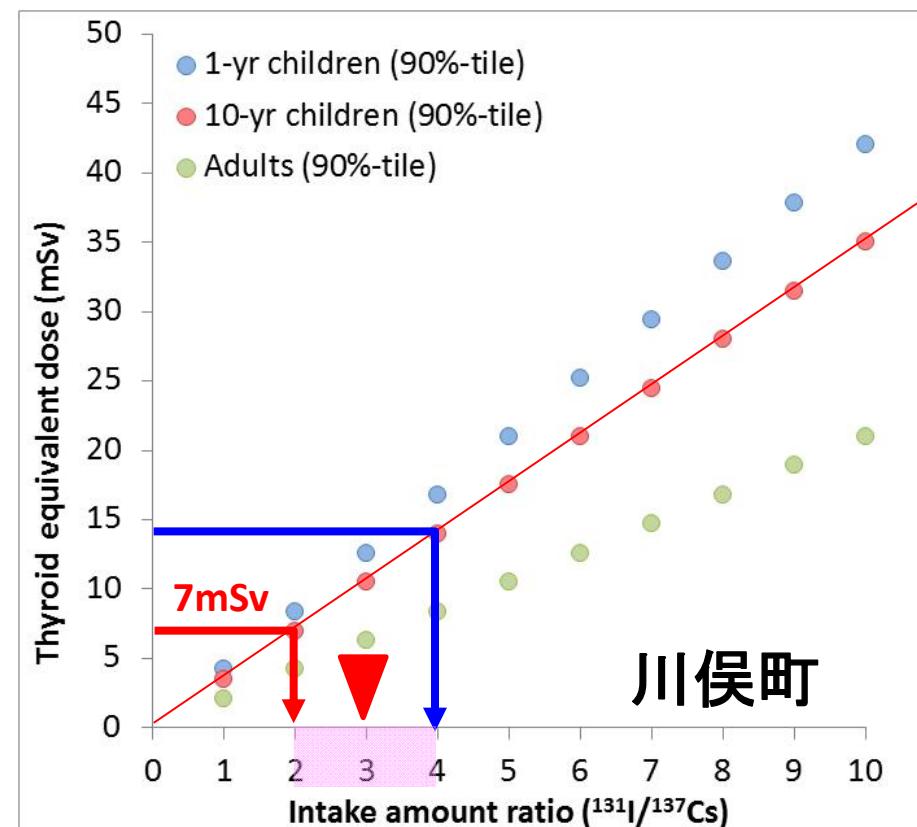
飯舘村

- 実効線量(Cs): **0.17 mSv** (成人)
- 甲状腺線量(I): **15 mSv** (小児)
(90パーセンタイル値)



川俣町

- 実効線量(Cs): **0.07 mSv** (成人)
- 甲状腺線量(I): **7 mSv** (小児)
(90パーセンタイル値)



全身計測に基づく甲状腺線量推計(4)

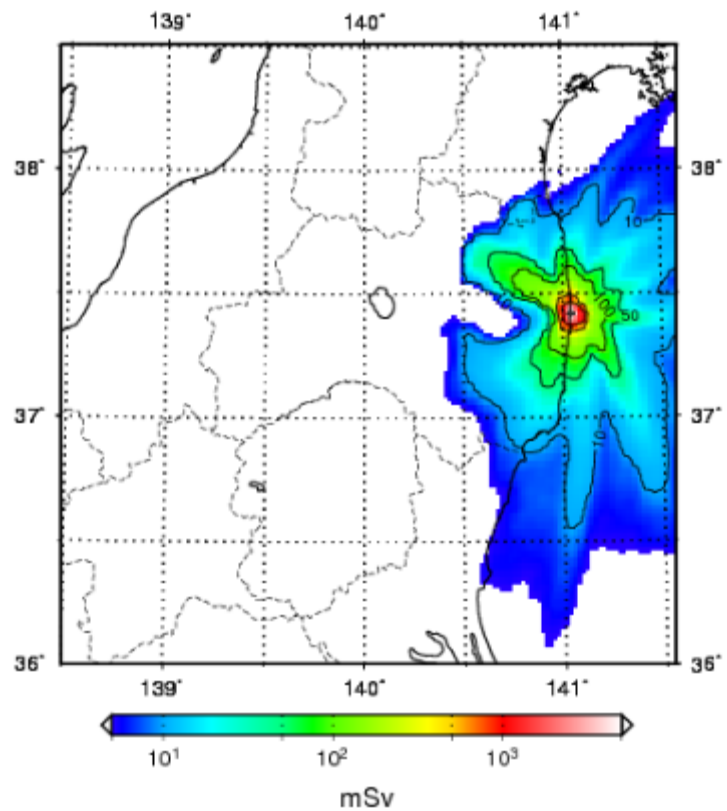
各自治体住民の線量推計結果(90パーセンタイル値)

成人の実効線量(mSv)			甲状腺線量の推計値(mSv)		
自治体	人数	実効線量	1歳児	10歳児	成人
双葉町	365	0.15	27	23	14
大熊町	561	0.10	18	15	9
富岡町	696	0.08	14	12	7
檜葉町	241	0.06	11	9	5
広野町	210	0.10	18	15	9
浪江町	614	0.10	18	15	9
飯舘村	184	0.17	31	26	15
川俣町	120	0.07	13	11	6
川内村	64	< 0.01	2	2	1

摂取量比($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) = 3を一律に適用

大気拡散シミュレーションによる線量推計

- 福島県全域住民の甲状腺線量の推計
- プルームの挙動と行動情報の照合による摂取状況の把握



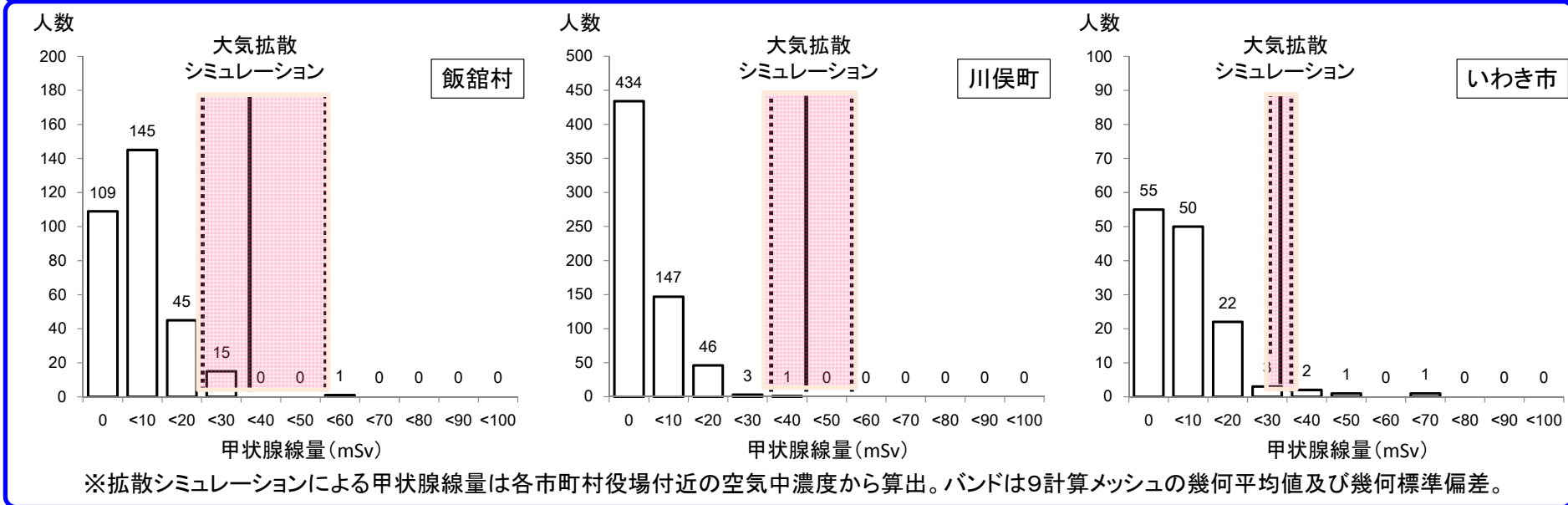
¹³¹I吸入摂取による甲状腺線量マップ(1歳児)
(摂取期間: 2011/3/12~2011/3/31)

初期内部被ばく線量の推計方法

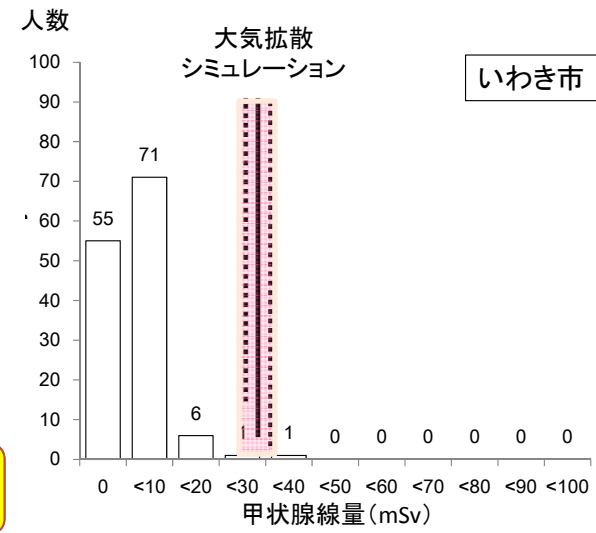
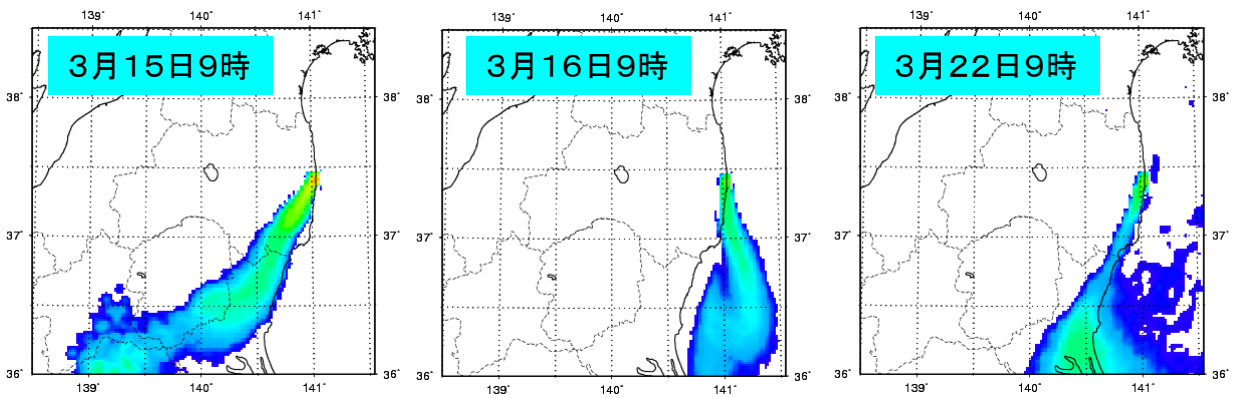


大気拡散シミュレーションによる線量推計精度

実測からの甲状腺線量分布(急性摂取シナリオ:3月15日)と大気拡散シミュレーションからの甲状腺線量計算値との比較



拡散シミュレーションによる摂取シナリオの再構築



拡散シミュレーション → 線量分布(実測)の上端を予測

放医研が行った甲状腺線量の再構築(結果)

福島県内住民の甲状腺線量の推計値
(90パーセンタイル値 ※拡散シミュレーションによる推定を除く)

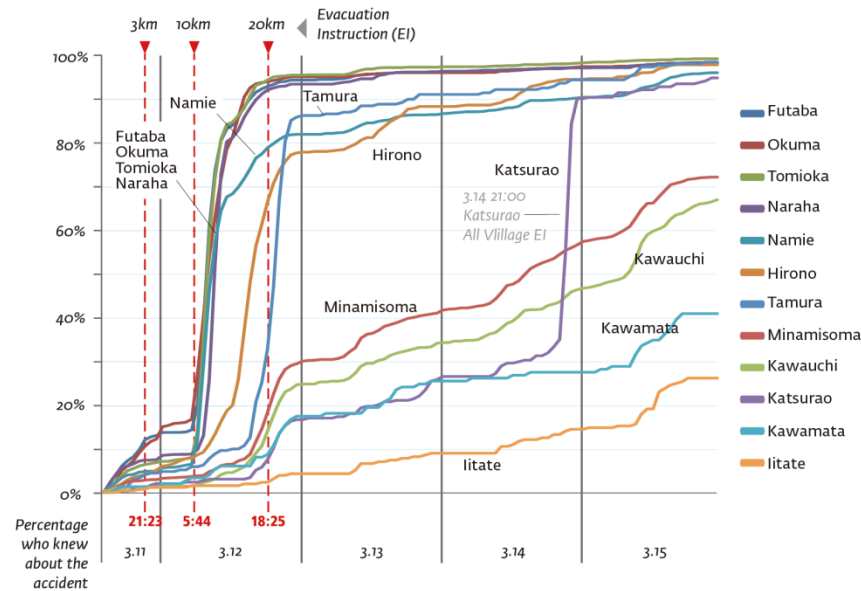
自治体	1歳児	成人	方法
双葉町	30	10	全身計測
大熊町	20	< 10	全身計測
富岡町	10	< 10	全身計測
楢葉町	10	< 10	全身計測
広野町	20	< 10	全身計測
浪江町	20	< 10	全身計測, 甲状腺計測
飯舘村	30	20	甲状腺計測, 全身計測
川俣町	10	< 10	甲状腺計測, 全身計測
川内村	< 10	< 10	全身計測
葛尾村	20	< 10	浪江町の推定値を代用
いわき市	30	10	拡散シミュレーション, 甲状腺計測
南相馬市	20	< 10	浪江町の推定値を代用
福島県内(上記以外)	< 10	< 10	拡散シミュレーション

(単位mSv)

線量推計における検討項目(1)

1. 摂取シナリオ

- 20km圏内住民
- 経口摂取

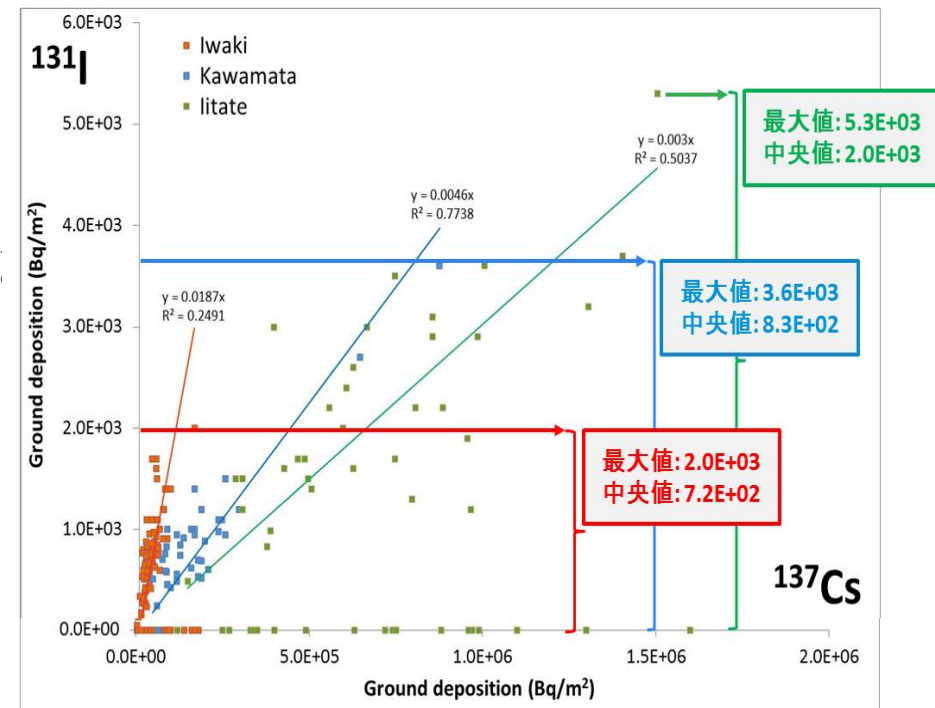


各自治体住民の避難開始時期
(国会事故調報告書より転載)

- 20km圏内住民の多くが12日中に避難。
- 拡散シミュレーションによる試算では、避難経路によって線量に顕著な差異。
- 経口摂取の寄与はほぼない・・・？

2. ヨウ素/セシウム比

- 時間・空間的な変化
- 環境と人の比の違い

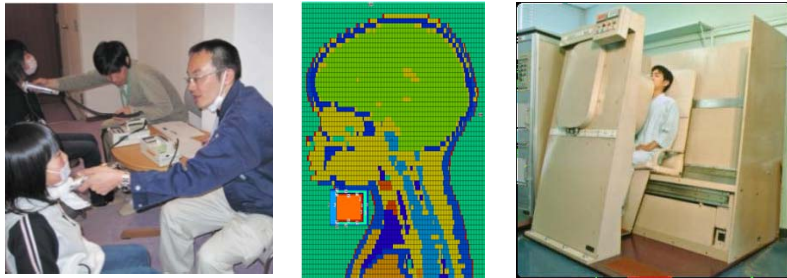


- 地表沈着量のI/Cs比: 北西方向には低く、南方向には高い(ただし、量としては北西)。
- ヨウ素, セシウムの物理化学的性状
- 日本人ヨウ素甲状腺アップテーク

線量推計における検討項目(2)

3. 人の実測データ

- 甲状腺中ヨウ素計測
- 全身セシウム計測(WBC)



- 甲状腺中ヨウ素計測の再構築(シミュレーション)⇒機器の年齢別校正定数の導出
- 体格差に起因するWBCの校正定数の誤差

測定誤差は概ね数30%以内

- WBC測定から評価された実効線量⇒急性摂取シナリオ(3月12日)

過大な線量推計の可能性(特に小児)

4. その他

- 放射性核種の物理化学的性状
 - ✓ ヨウ素には元素状, 粒子状及びヨウ化メチルがある。ただし, 甲状腺計測からの線量推定には影響しない。
- 実測データのある者の代表性
 - ✓ 行動情報の調査が必要。
- ^{131}I 以外の短半減期核種
 - ✓ ^{132}I (^{132}Te), ^{133}I の線量寄与(甲状腺線量全体の1割から2割程度)。
- ...

今後の展望

- 個々の不確かさ要因の抽出と評価
- 個人の行動情報を活用した内部被ばく線量推定
- 外部被ばく線量推定との関連...