

平成26~28年度原子力災害影響調査等事業  
(放射線の健康影響に係る研究調査事業)

東京電力福島第一原子力発電事故における住民  
の線量評価に関する包括研究

国際医療福祉大学クリニック  
鈴木 元

# 包括研究の背景

- 原発事故早期の個人被曝線量に関連する実測値が少ない
- 原発事故早期の環境モニタリングが手薄
- このため、半減期の短い $^{132}\text{Te}$ や $^{131}\text{I}$ 等による外部被曝、内部被曝線量評価に不確実性あり
- UNSCEAR2013福島報告書の不確実性を縮小する必要性  
甲状腺検査、WBC実測値からの甲状腺等価線量とUNSCEARのATDMシミュレーションによる地域の平均線量推計値との乖離



ソースターム、大気拡散シミュレーションの精度向上

経口摂取量の過剰評価？

個人防護行動の影響？

ICRPモデルと日本人甲状腺代謝の違いによるバイアス？

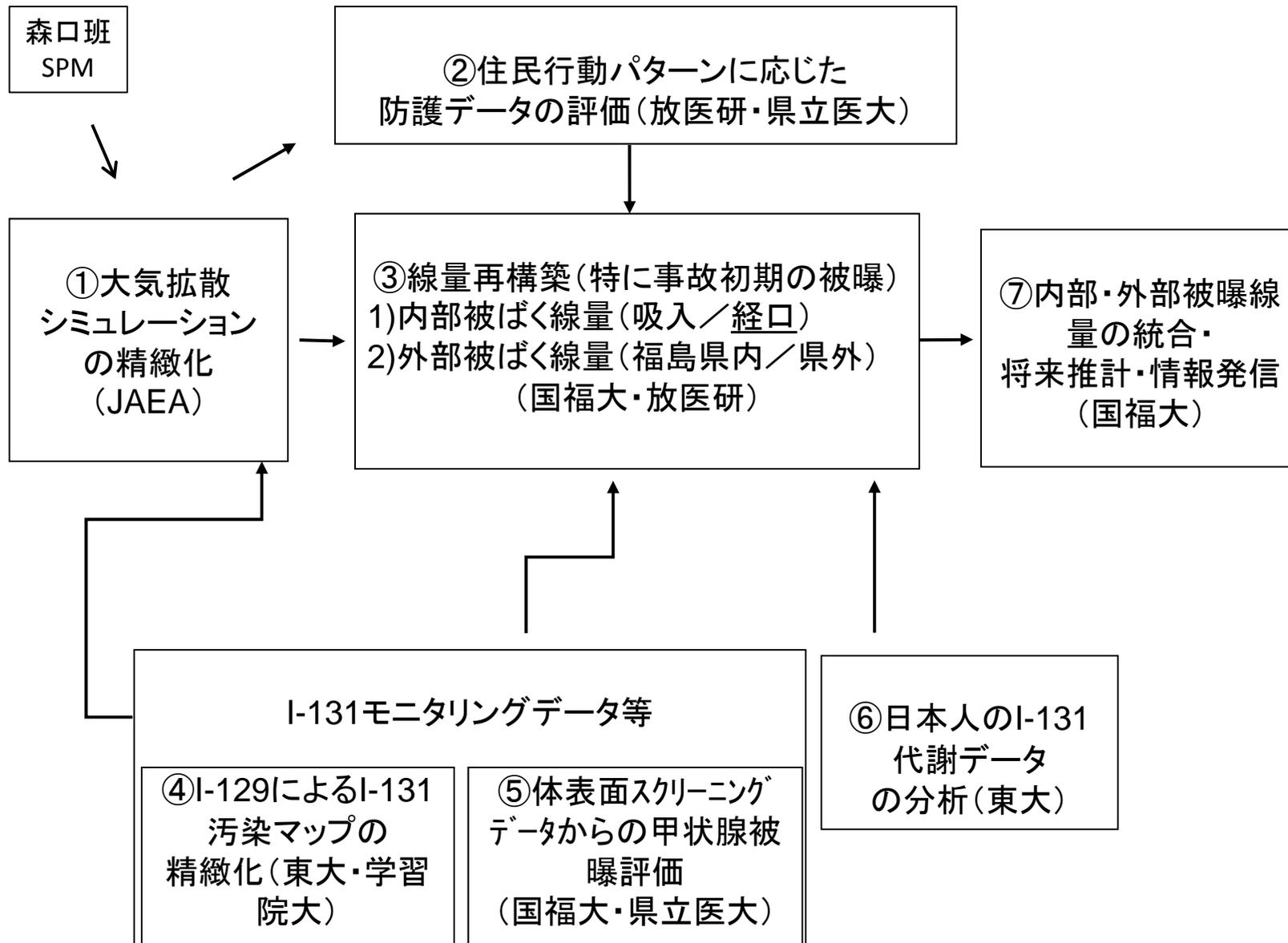
# UNSCEAR 2015白書

## UNSCEAR 2013 福島報告書刊行後の進展

- パラグラフ16: 本委員会は、以下の特定分野での調査が、2013年福島報告書で特定されたニーズ対策に、より大きく寄与する可能性が高いと確信した。
  - a) ATDMおよびグリッドサイズの効果で使用する湿性沈着スキームのさらなる徹底調査
  - b) 利用可能なあらゆる測定データを利用してソースタームを推定する逆モデル計算 (SPMデータの利用)
- パラグラフ43: Hirakawaらの報告(事故後早期の福島の流れ、食料品、飲料水の等の調査)。課題として「飲料水の測定が開始される前の水道水と河川の水を摂取していた点に注意」
- パラグラフ48: もし日本の当局が、一貫性のある気象学的データとATDMと共に、その新規ソースタームを用いた避難民の被ばく線量の詳細な評価および避難したコミュニティの住民の移動と行動の詳細な分析を実施するならば、有益であろう。

# 包括研究の目的

- (1)最新のソースタームと改訂WSPEEDIを使ったシミュレーションの実施(Katataのソースターム改訂をも視野に)
- (2)WSPEEDIのパラメータ調整に利用できるデータの収集(空間線量率・土壌沈着データその他、新たに発掘した<sup>129</sup>I、SPMデータ等)と、それらを使ったソースタームやパラメータ調整
- WSPEEDIのアウトプットを用いて、個人行動記録、避難住民体表面汚染データ等と付き合わせた避難ルート毎の内部被曝、外部被曝線量の再評価
- 実測値の無い時期の飲料水汚染推計・食品の流通実態を反映した経口摂取推計
- ICRP甲状腺モデルと日本人甲状腺モデルの検討(甲状腺線量評価におけるバイアスの検討)



## 【目的】

- 新規データ及び最新の知見を反映した大気拡散シミュレーションにより事故時の放射性物質の拡散状況を再構築し、線量推計に必要となる放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベースを構築する。
- 大気中濃度からの吸入及び降下量に基づく飲料水や食物摂取による内部被曝線量、大気中濃度及び沈着量分布に基づく外部被曝線量について、同一の拡散解析データによる一貫した線量評価を可能とする。

## 【実施内容】

- **放出源情報の精緻化**: 放射性核種を粒径や化学形態別に細分し大気拡散と被曝評価への影響を考慮するとともに、短時間間隔(1時間程度)で放出率時間推移を設定し、設定値の不確実性を評価する。
- **大気拡散計算の改良**: 最新モデルと高度なデータ同化計算手法による気象場再現計算、及び沈着過程等を精緻化した拡散モデルによる大気拡散・沈着状況の再現性を向上し、他モデルとの比較により計算の不確実性を評価する。
- **データベース構築**: 精緻化した放出源情報と改良した大気拡散計算に基づき、大気中濃度分布に加えて、降下量、沈着量分布も含む、放射性物質大気濃度・沈着量の時間空間分布データベースを再構築する。
- **他の研究項目のフィードバック**: 新規データ(環境省SPMデータ等)や被曝線量評価研究の反映により、放出源情報及び拡散計算を最適化しデータベースを完成する。

## 【これまでの線量評価】

### 大気拡散シミュレーション(WSPPEEDI)

気象計算:MM5、拡散計算:簡易な沈着過程

UNSCEAR 2013の放出源情報



### 大気中濃度分布データベース

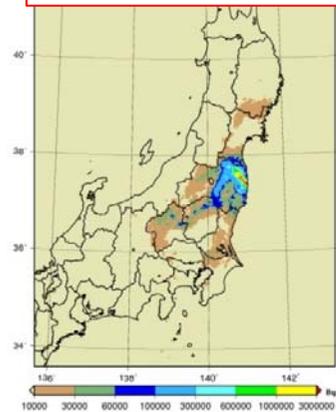
吸入による線量推計(H24:放医研)

### 沈着量時系列データ

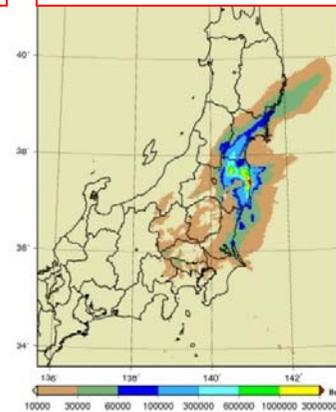
飲料水摂取による線量推計(H25:三菱総研)

## <sup>137</sup>Cs沈着量分布の再現性に課題

航空機モニタリング



WSPPEEDI計算



## 【本研究の線量評価】

### 大気拡散シミュレーション(WSPPEEDI)改良

→ 拡散・沈着過程の再現性向上

- 気象計算:WRF+データ同化(4D-Ver)
- 拡散計算:精緻な沈着過程+DB出力



### 核種化学形・放出区分ごとの計算出力

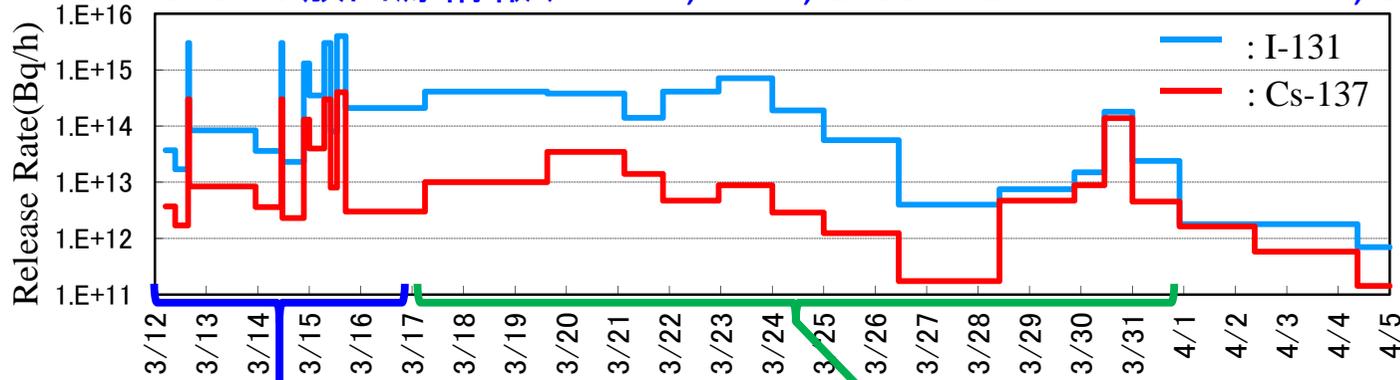
← 放出源情報(UNSCEAR, JAEA等)+各種実測データ(環境省SPM等)

- 大気中濃度 → 吸入による線量
- 降下量 → 飲料水・食物摂取による線量
- 沈着量 → 外部被ばく線量

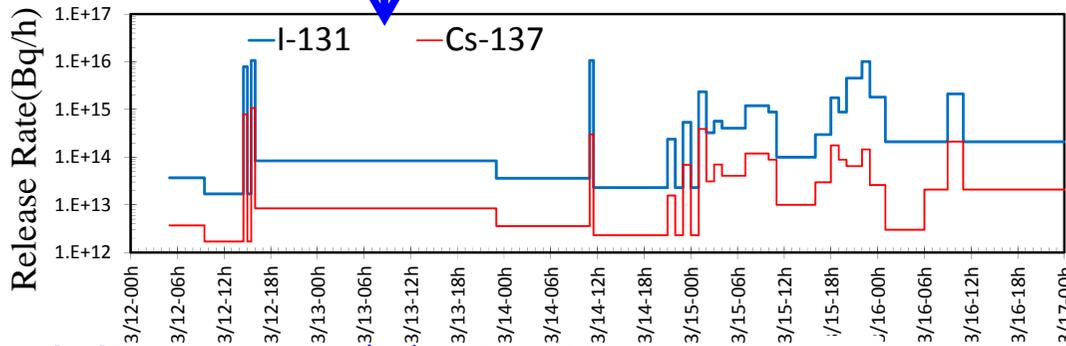
一貫した  
線量評価

放射性物質大気濃度・沈着量の  
時間空間分布データベース  
(新規データによる最適化)

UNSCEAR 2013の放出源情報 (Terada, et al., 2012: J. Environ. Radioactiv., 112, 141-154)



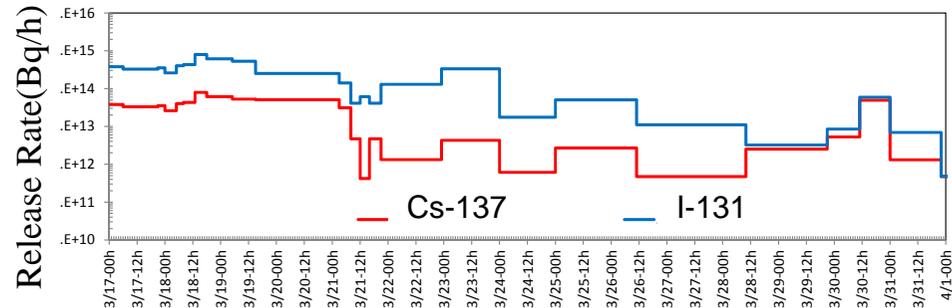
**JAEA再推定** (Katata, et al., 2014: Atmos. Chem. Phys. Discuss., 14, 14725–14832)  
 拡散モデルの沈着過程を改良+新規データ利用



大気・海洋拡散モデルの融合  
 プルームが海側に流れた期間  
 の放出率を海表面濃度データ  
 を用いて補正

## 新規モニタリングデータの利用

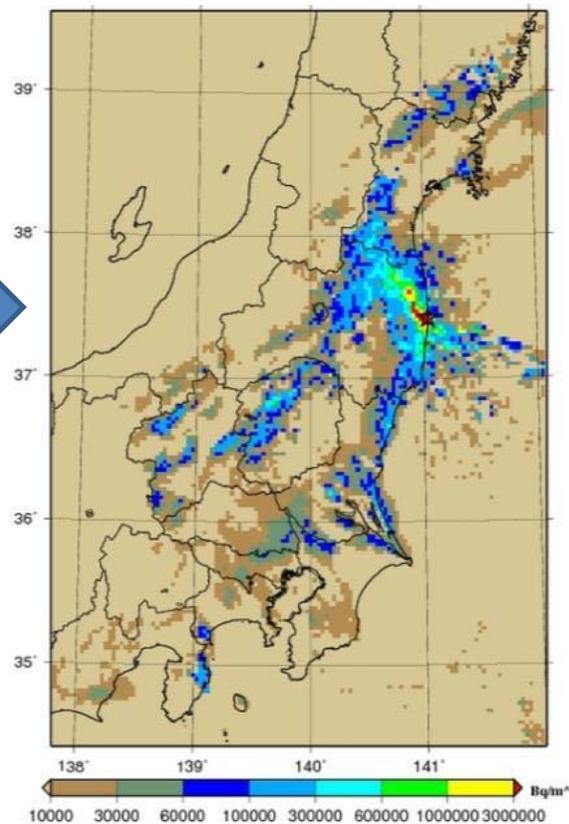
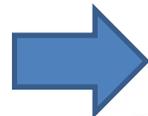
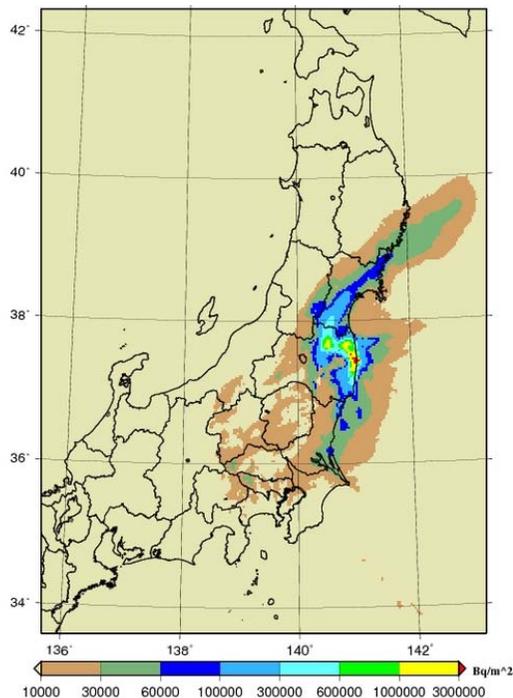
- ・福島県の環境モニタリングポストデータ (3月12日～16日)
- ・米国DOEとJAEAの航空機サーベイに基づくI-131及びCs-137の地表沈着量分布 (Torii et al. 2013)



## 【計算モデルの改良】

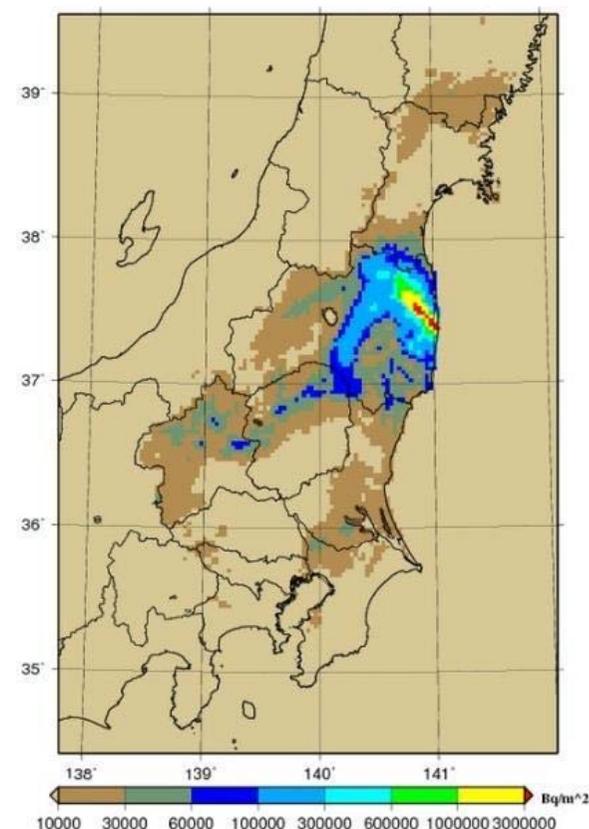
- 最新の気象モデル(WRF)及び高度なデータ同化手法(4D-Ver)の導入
- 化学形態を考慮した精緻な沈着過程の導入+放出源再推定結果利用
- 放射性物質の大気拡散及び沈着状況の再現性を向上

WSPEEDI計算値 (2011年4月1日)



航空機モニタリング

(文科省:2012年5月31日)

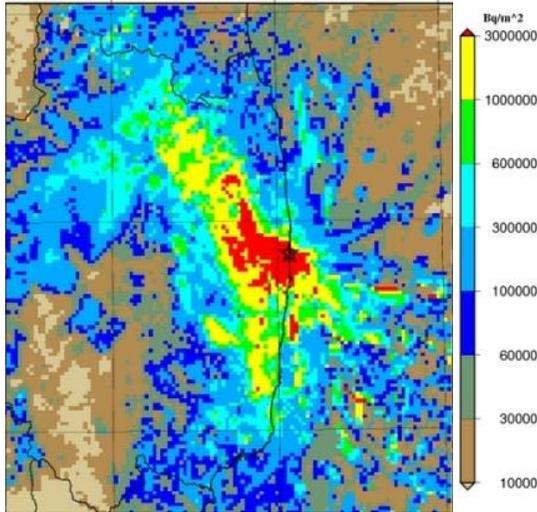


## 沈着過程の精緻化による改善

- ・宮城県の過大評価
- ・栃木県・群馬県の過小評価

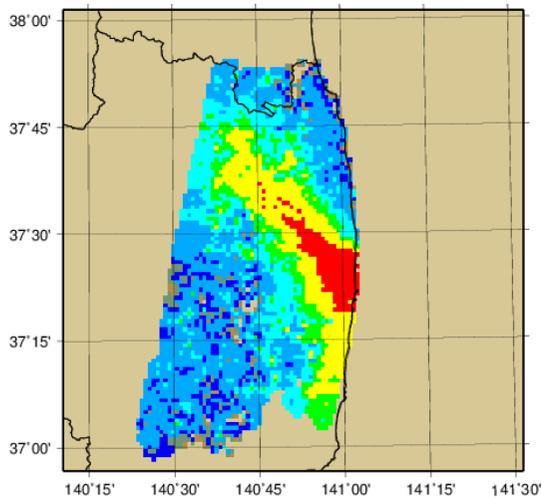
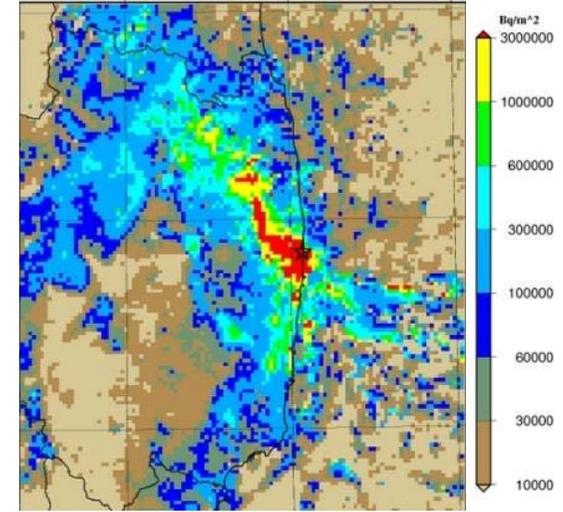
## 局地域のI-131及びCs-137沈着量分布を良好に再現

I-131



WSPEEDI計算値  
(2011年4月1日)

Cs-137



航空機モニタリング

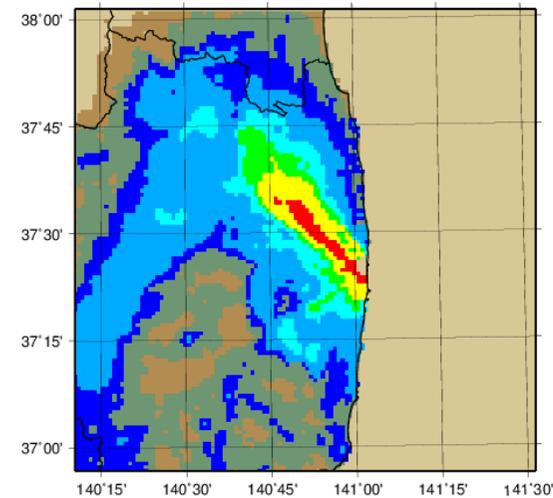
Cs-137 →

(2012年5月31日)

← I-131

(2011年4月1日)

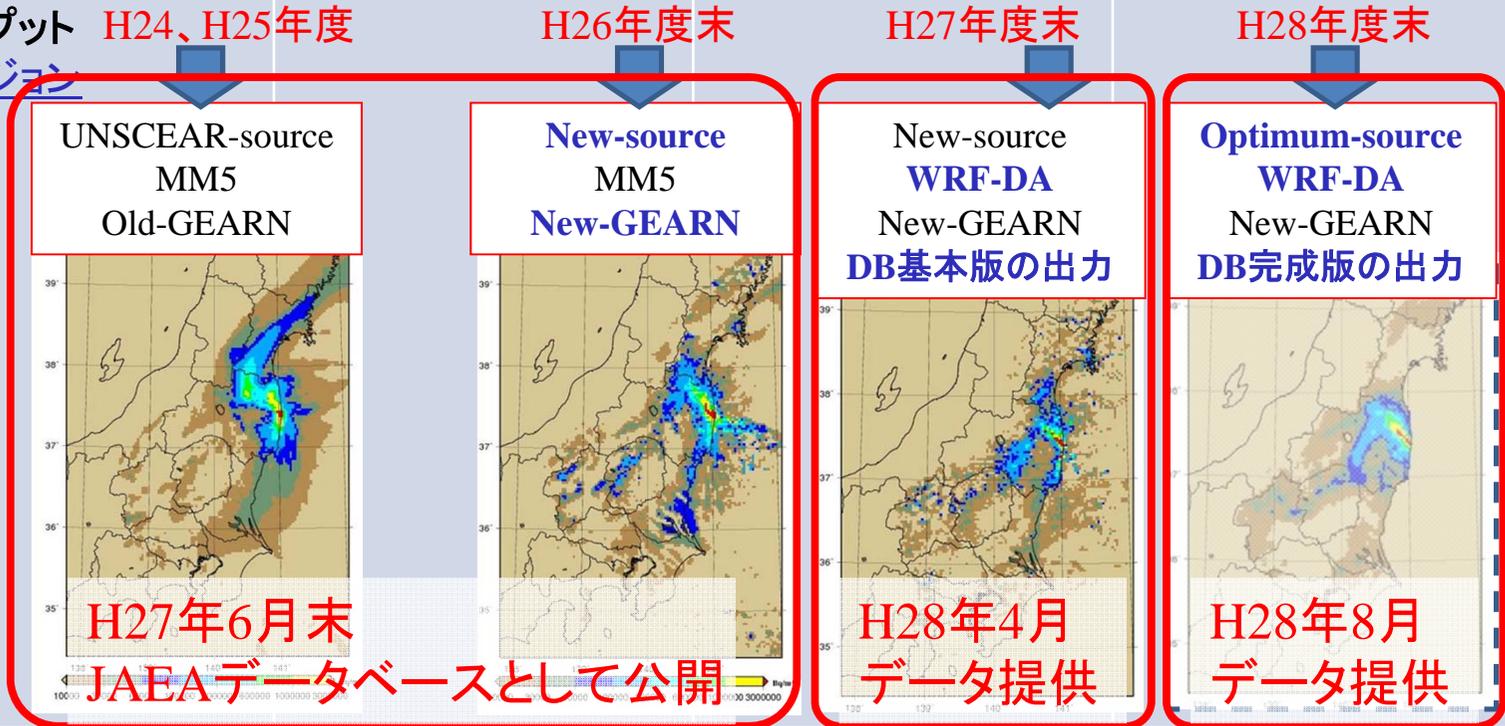
Torii et al. (2013)



実施内容	H26年度	H27年度	H28年度
• 放出源情報の精緻化	放出源検討(文献)	—	放出源最適化
• 大気拡散計算の改良	WRF, WRF-DA導入 GEARN沈着精緻化	計算実行と再現評価 DB出力作成	拡散計算の改良 DB出力の改良
• データベース構築	計算機環境整備 測定データセット	解析機能開発 基本版の試作	解析機能の改良 DBの最適化
• 新規データ・フィードバック	SPMデータ等	I-129に基づくI-131沈着データ(一部)等	線量評価結果、 I-131沈着データ等

提供アウトプット  
計算出力バージョン

- ✓ 放出源
- ✓ 気象モデル
- ✓ 拡散モデル



## 内部被ばくの要因となる喫食状況調査(国福大)

■ 福島県内で事故直後から3月末までに避難した住民の避難のパターンや、当時の食生活のパターンから、内部被ばく線量(経口摂取)の推計評価調査のための摂取量の推計。

- ヒアリング結果より3月時期に露地野菜等は一般的には摂取しておらず、一般的な避難者・非避難者における放射性ヨウ素による内部被ばく線量(経口摂取)は、水からの影響が大きいと考えられる。
- 測定されていない時期における水の濃度は、モデル推計し、摂水量を仮定し、水道水からの内部被ばく線量を推計する。

－ 避難者と非避難者の一日の摂水量を以下のように設定。

区分	年齢	対象	中央値 (ml)	算術平均 (ml)	95%値 (ml)
非避難者	□10歳 □成人	□飲料水(通常は水道水・ボトル水、市販の飲料等で摂取)をすべて水道水で摂取したと仮定 □水道水で調理した米による摂取	1,714	1,822	3,084
	□1歳	□粉ミルクから摂取			
避難者	□10歳 □成人	□飲料水をすべて水道水で摂取していると仮定(ただし、避難所でペットボトル1ℓ配布されたと仮定し、マイナス1ℓ) □水道水で調理した炊き出し(おにぎり、汁物、カップ麺)による水の摂取	1,130	1,174	2,100
	□1歳	□粉ミルクから摂取			

## 飲料及び食品からの水の摂取量の推計（避難者／非避難者）

- **避難者**：飲料による摂水量はヒアリング結果と既存のアンケート結果を元に仮定。さらにPETボトル水が1日1リットル配布されたと想定し、算定。食品由来の水の摂取は、ヒアリング調査結果を元に算出。

飲料由来	<div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #e6f2ff;">1: (非加熱) 水道水</div> <div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #e6f2ff;">2: (加熱) 水道水</div> <div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #e6ffe6;">4: ボトル水</div> <div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #e6e6ff;">5: 市販 飲料</div> </div>	<div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #ffcc00; text-align: center;">PETボトル 水 1L</div>	<p><b>(中央値)</b> 1,130(ml)</p>
汁物・食品由来	<div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #ffe6cc;">炊き出し(おにぎり、汁物、カップ麺) に含まれる水分量 800ml</div>		<p><b>(算術平均)</b> 1,174(ml)</p>

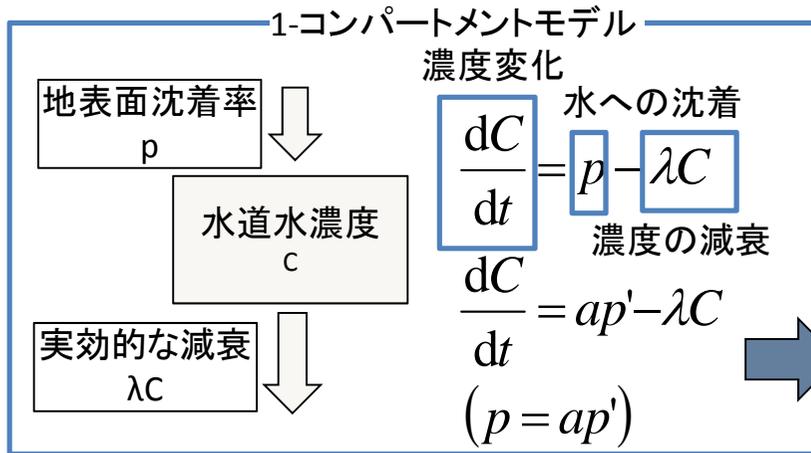
- **非避難者**：基本的には水道水が確保され、流通が途絶していなかったことから、既存のアンケート調査※1に基づき、日本人の通常の食事パターンから水の摂取量を推計した。

飲料由来	<div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #e6f2ff;">1: (非加熱) 水道水</div> <div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #e6f2ff;">2: (加熱) 水道水</div> <div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #e6ffe6;">4: ボトル水</div> <div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #e6e6ff;">5: 市販 飲料</div> </div>		<p><b>(中央値)</b> 1,714(ml)</p>
汁物・食品由来	<div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #e6f2ff;">3: スープ・汁物</div>	<div style="border: 1px solid #ccc; border-radius: 10px; padding: 5px; background-color: #ffe6cc;">米に含まれる水分量 184ml</div>	<p><b>(算術平均)</b> 1,822(ml)</p>

※1：厚生労働省「平成22年度国民健康・栄養調査報告（平成24年）」

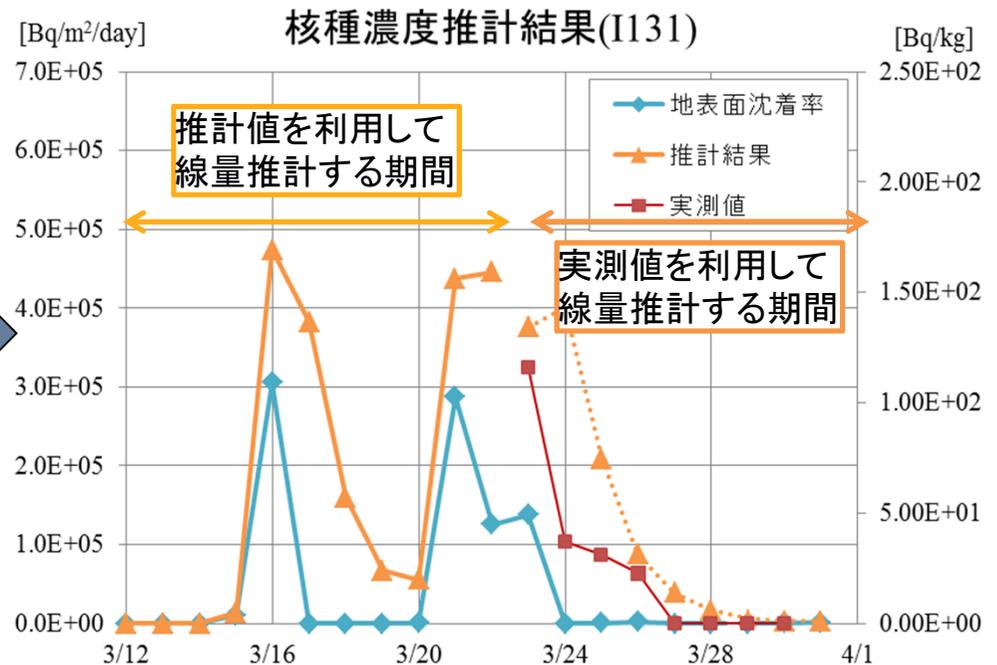
# 経口摂取による内部被ばく線量推計(水道水の放射能濃度推計)

- 水道水の放射能濃度を1-コンパートメントモデルを用いて推計する。
  - 水道水の核種濃度変化が、新たな放射性物質の水への沈着率と放射性物質の実効的な減衰で表されるモデル。
  - 水への沈着率は、拡散シミュレーションによる地表面沈着率に換算係数を掛けることで算出する。
  - $dC/dt$ を水道水中濃度の変化、 $C$ をある時点での水道水中濃度、 $p'$ を地表面沈着率として代入し、パラメータの換算係数 $a$ と実効減衰係数 $\lambda$ を最小2乗法等で求める。
  - 避難地域等の水道情報は調査済みであり放射性物質の沈着が想定される水源への沈着量を用いて推計を行う。
- 別途検討している水の摂取量を用いて、内部被ばく線量を推計する。その際、放射能濃度の実測値がある期間は実測値を用いて線量を推計し、実測値が無い期間のみ推計値を利用する。



C	水道水中の核種濃度 (Bq kg <sup>-1</sup> )
p	水への沈着率 (Bq kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
p'	地表面沈着率 (Bq m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
a	換算係数 (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )
λ	実効減衰係数 (s <sup>-1</sup> )

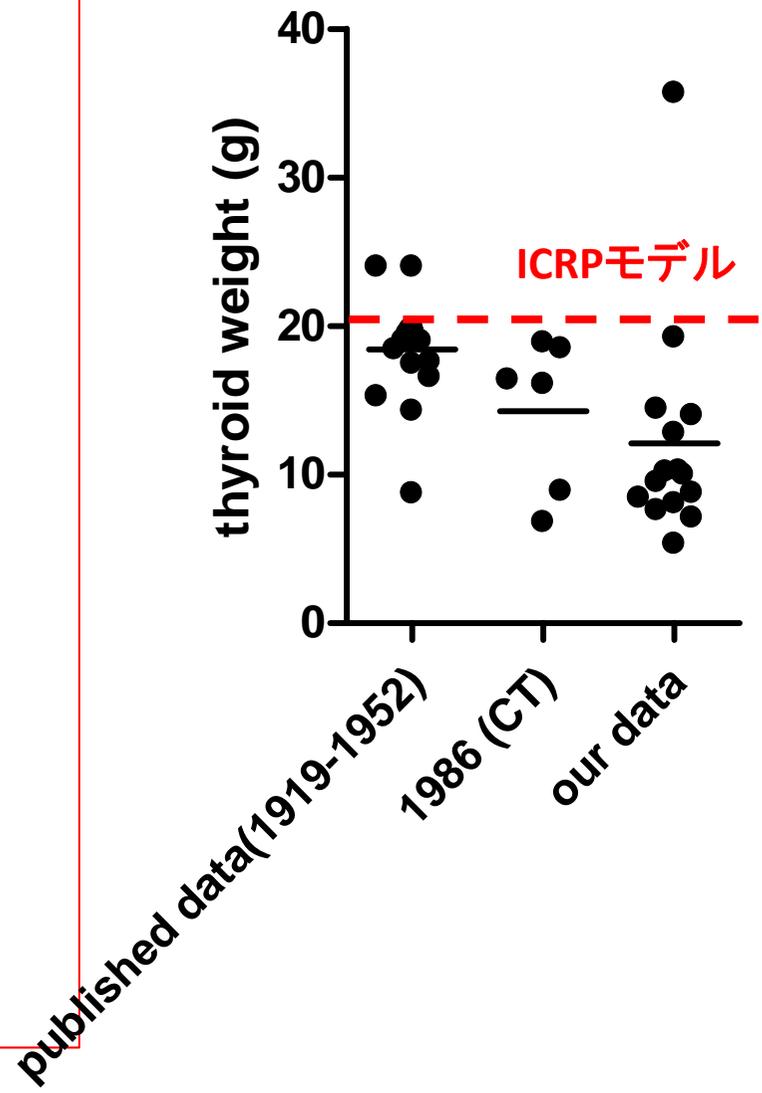
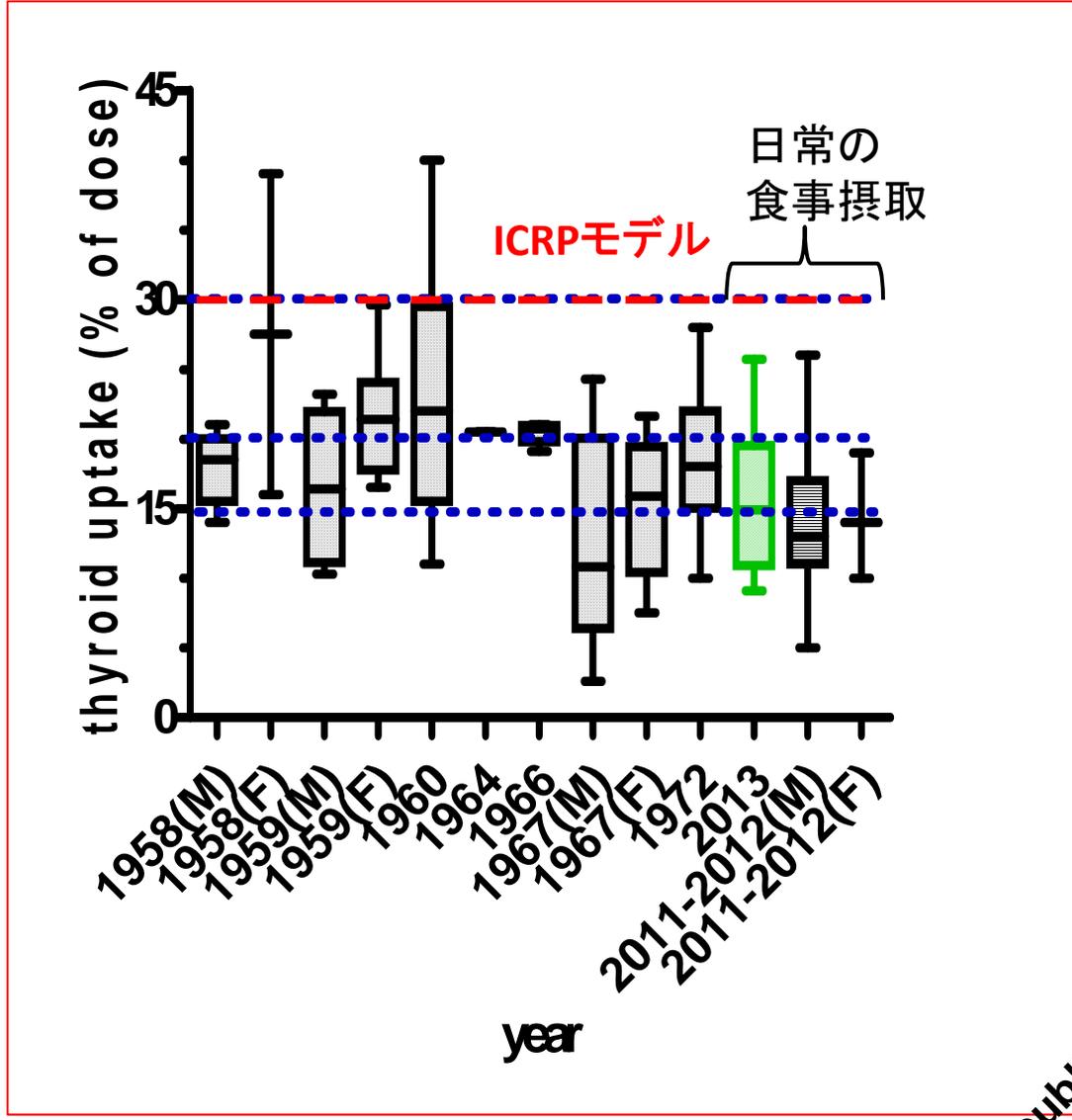
赤字:未知



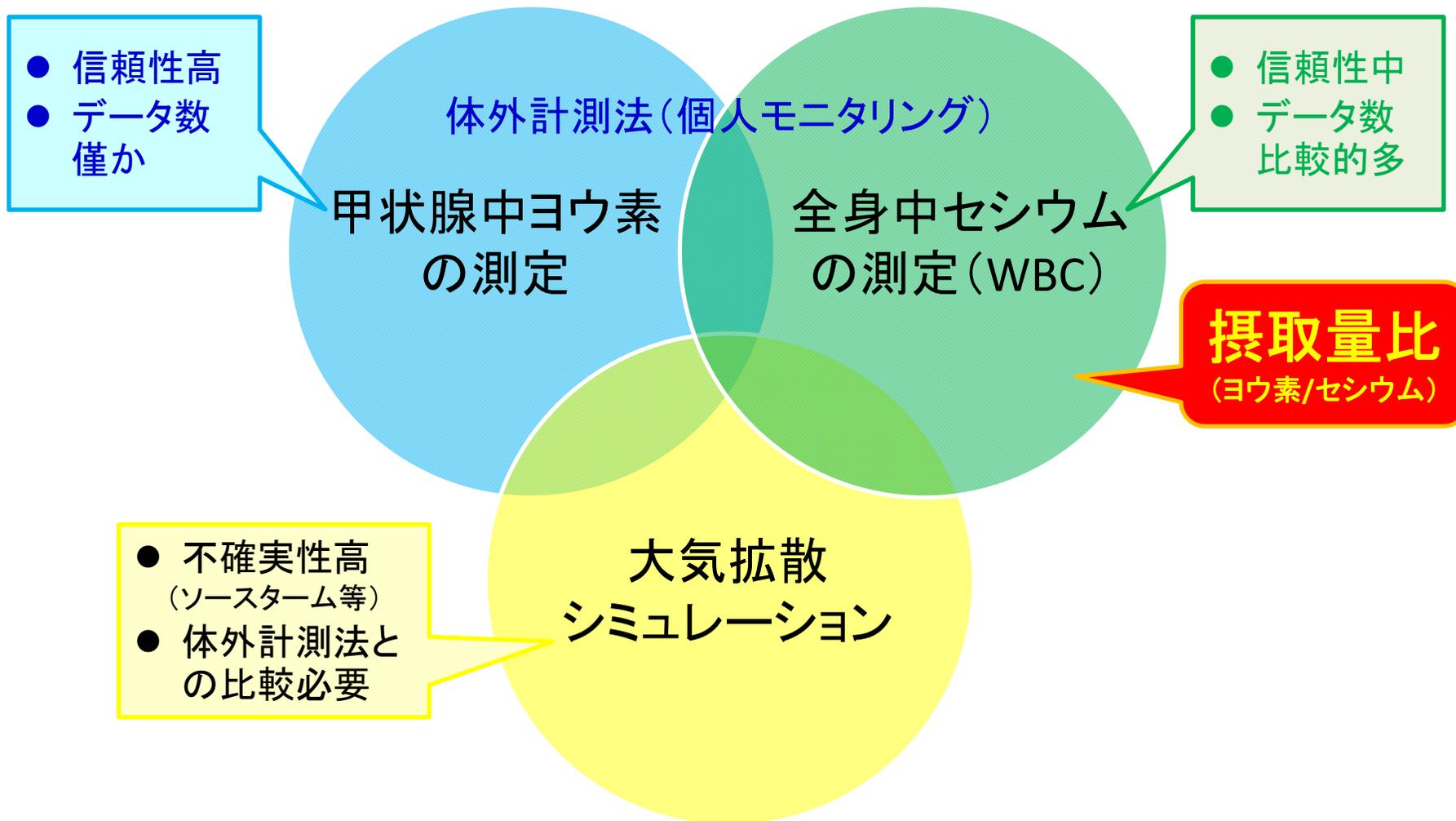
推計予測の例示

# 楠原(東大): 日本人甲状腺モデル構築

甲状腺機能が健全な日本人における放射性ヨウ素( $^{131}\text{I}$  or  $^{123}\text{I}$ )の甲状腺集積率と重量

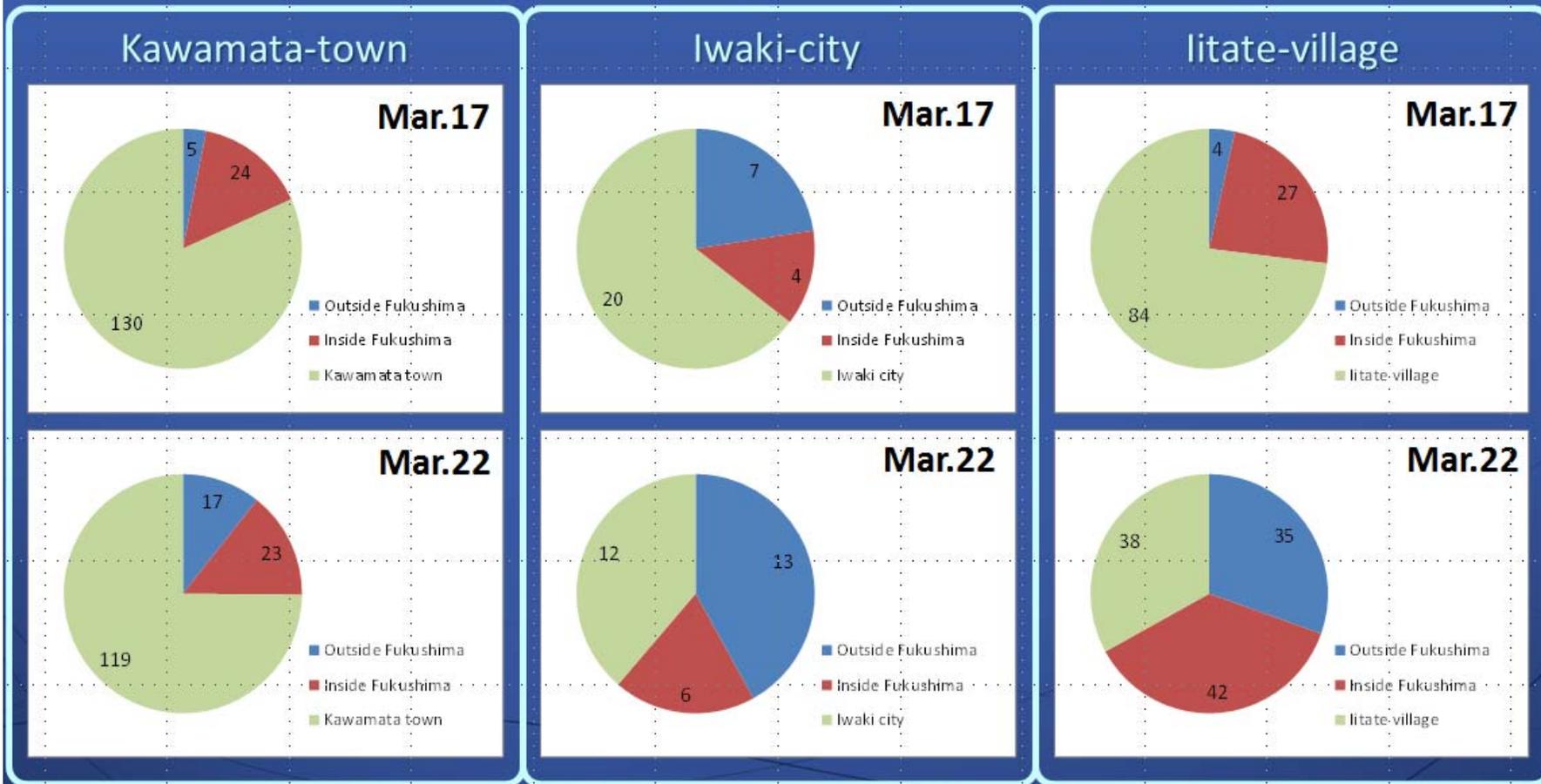


# NIRS: 初期内部被ばく(甲状腺)線量の推計方法



# 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者の行動

## Whereabouts of subjects of screening survey



## Reasons for low thyroid doses?

※ICRR2015(2015/5/26)の発表スライド

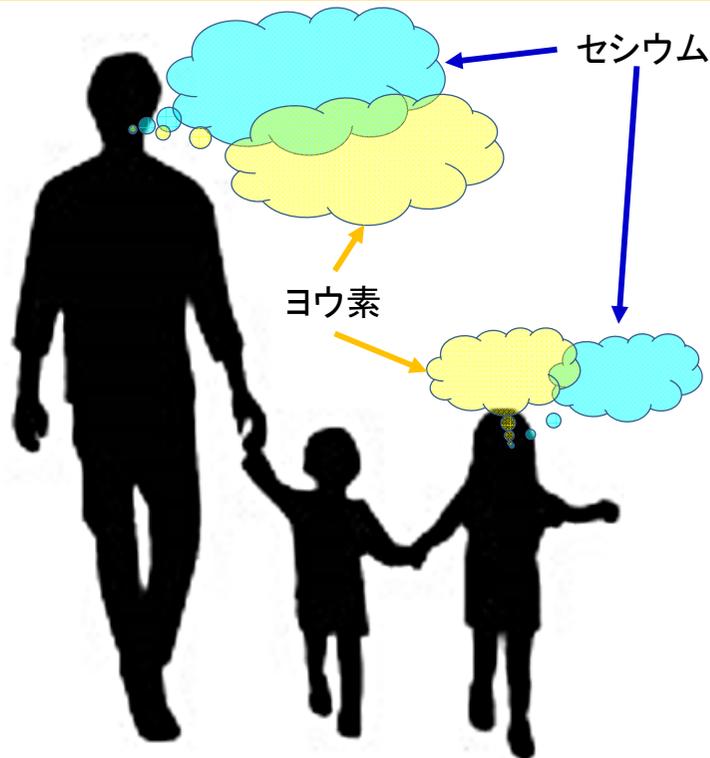
# ヨウ素/セシウム比の導出(1)

## 放医研(2012)のアプローチ

- 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査
- 成人のWBC測定結果(実効線量のみ)

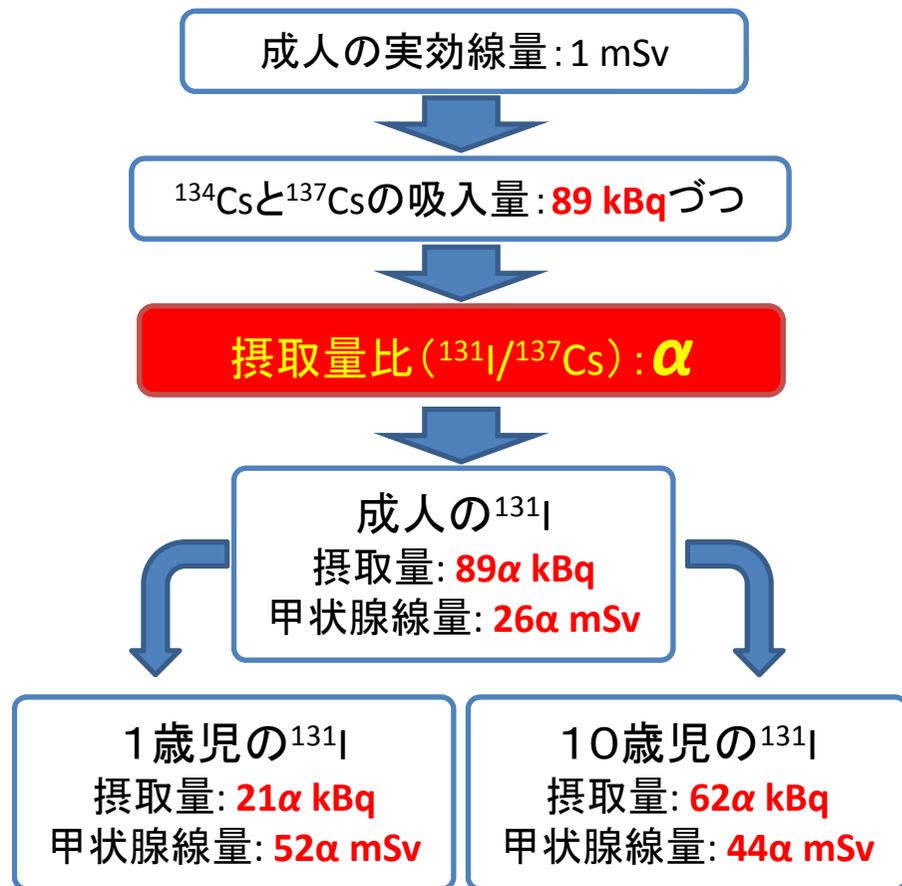


両方が得られている  
飯舘村と川俣町のデータから導出



成人呼吸量: 22.2 m<sup>3</sup>/日 5歳児呼吸量: 8.72 m<sup>3</sup>/日

仮定: 呼吸量は大人と子どもで異なるが、  
核種の摂取量比は同じ



ヨウ素の化学形及び呼吸量の年齢間差を考慮

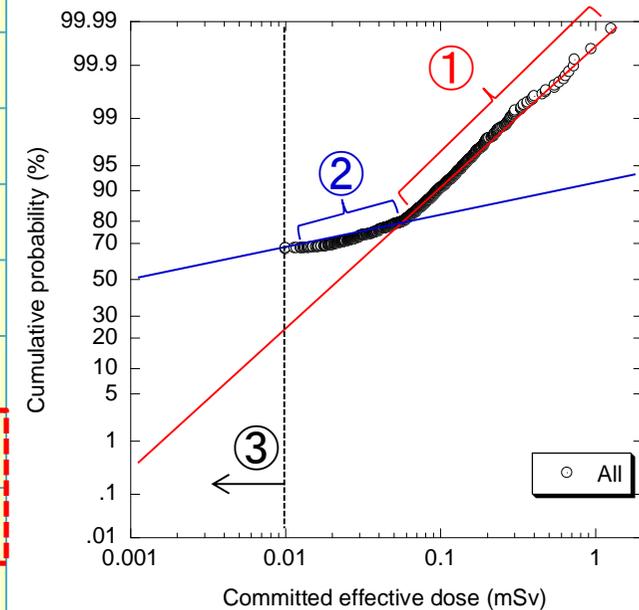
# 各市町村住民(成人)の実効線量分布

## 成人の実効線量(mSv):放射性セシウム

市町村	N	最大値	95%	90%	50%
双葉町	365	1.26	0.22	0.15	ND
大熊町	561	0.68	0.15	0.10	ND
富岡町	696	0.36	0.11	0.08	ND
檜葉町	241	0.15	0.07	0.06	ND
広野町	210	0.26	0.12	0.10	ND
浪江町	614	0.72	0.15	0.10	ND
飯舘村	184	0.48	0.22	0.17	0.03
川俣町	120	0.13	0.08	0.07	0.01
川内村	64	0.25	0.05	0.01	ND
いわき市※	212	0.34	0.11	0.08	ND
全て**	3325	1.26	0.14	0.10	ND

※いわき市のデータは放医研が同市に依頼して提供されたもの。  
 \*\*データが少数である伊達市, 南相馬市, 葛尾村等のデータを含む。

実効線量の累積頻度確率プロット



### 3成分の混合分布

- ①  $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ 両方検出者
- ②  $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の片方検出者
- ③ 未検出者

## NDの被検者が多い...

## ヨウ素/セシウム比の導出(2)

摂取量比 $\alpha$ は次式で求まる。

10歳児の甲状腺線量(90%頻度値)=成人の実効線量(90%頻度値)× $\alpha$ ×44

Table 2. 80th, 90th and 95th percentiles of effective and thyroid dose distributions.

Municipality	Category	Number of subjects	80th percentile	90th percentile	95th percentile
Iitate village	Effective dose (mSv)	184	0.10	0.17	0.22
	Thyroid dose (mSv)	315	9.9	14.7	20.4
Kawamata town	Effective dose (mSv)	120	0.05	0.07	0.08
	Thyroid dose (mSv)	631	5.9	7.3	11.8

$$\alpha = 14.7 / (0.17 \times 44) = 2.0$$

Table 3. Estimated intake ratios of  $^{131}\text{I}$  to  $^{137}\text{Cs}$  for 10-y-old children.

Municipality	80th percentile	90th percentile	95th percentile
Iitate village	2.3	2.0	2.1
Kawamata town	2.7	2.4	3.3

Kim et al., Radiat. Prot. Dosim. (2015)

放医研(2012)では $\alpha$ を3に決定し、WBCデータ(成人)を有する市町村に一律に適用。

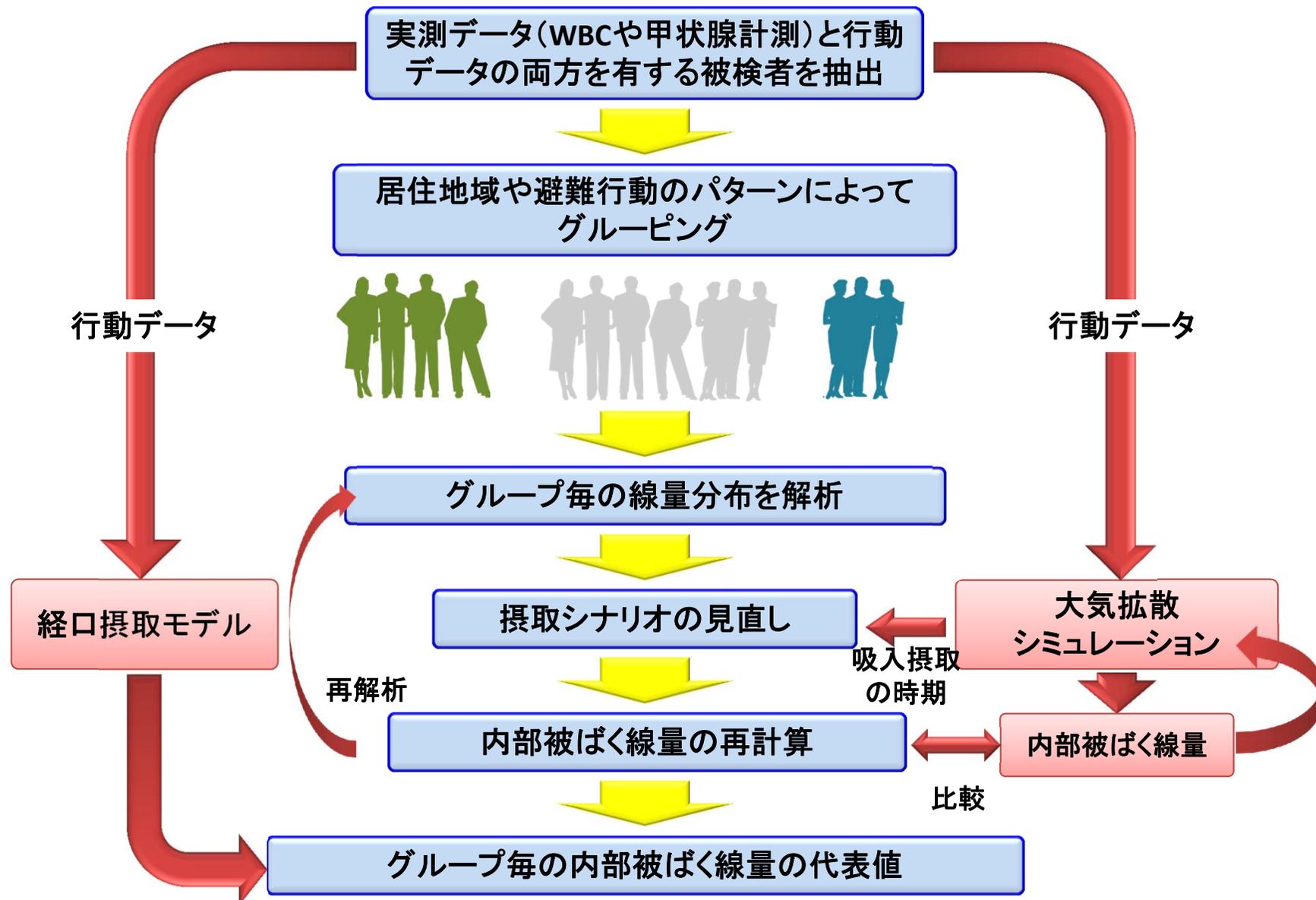
同様な手法をいわき市に適用した結果は $\alpha=4.3$ であった。

# 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%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
楡葉町	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

# NIRS:新しい初期内部被ばく線量推計のアプローチ





# NIRS: 今後の研究方向

- 追加WBCデータの解析を開始
- 行動データのグルーピング, データ精度検証
- ヨウ素・セシウム摂取量比
- 大気拡散シミュレーションによる推計精度の向上を検討
  - 実測値からの線量推計に用いる摂取シナリオも併せて評価
- 他研究との連携
  - 新しい大気拡散シミュレーションデータの使用とフィードバック
  - 経口摂取モデルの取込み
  - 日本人ヨウ素モデルの取込み

## 本研究に関連する論文発表

- Eunjoo Kim, Kotaro Tani, Osamu Kurihara, Naoaki Kunishima, Kazuo Sakai, Makoto Akashi: Estimation of early internal doses to Fukushima residents after the nuclear disaster based on the atmospheric dispersion simulation. Radiation Protection Dosimetry (Accepted, 2015).
- Eunjoo Kim, Osamu Kurihara, Kotaro Tani, Yasushi Ohmachi, Kumiko Fukutsu, Kazuo Sakai, Makoto Akashi: Intake ratio of  $^{131}\text{I}$  to  $^{137}\text{Cs}$  derived from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents. Radiation Protection Dosimetry (Published May 15, 2015).
- Kotaro Tani, Osamu Kurihara, Eunjoo Kim, Satoshi Yoshida, Kazuo Sakai, Makoto Akashi: Implementation of iodine biokinetic model for interpreting I-131 concentration in breast milk after the Fukushima nuclear disaster. Sci. Rep., 5, 12426 (2015).