

テーマ（４）
事故後の住民の被ばく線量の包括的な把握に関する研究

- ４－１ 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
鈴木 元（国際医療福祉大学クリニック）

東京電力福島第一原子力発電所事故における

住民の線量評価に関する包括研究

東京電力福島第一原子力発電所事故における住民の線量評価 に関する包括研究

主任研究者名（所属）：鈴木 元（国際医療福祉大学クリニック・院長）

ソースターム評価と大気拡散シミュレーション

分担研究者：永井 晴康（日本原子力開発機構・ディビジョン長）

土壌中 I-129 の分析による I-131 土壌沈着等の推計

分担研究者：松崎 浩之（東京大学 総合博物館・教授）

事故初期段階における住民の被ばく線量再構築

分担研究者：栗原 治（量子科学研究開発機構 放射線医学総合研究所・部長）

放射性ヨウ度の血中動態並びに甲状腺集積率の予測

分担研究者：楠原 洋之（東京大学 大学院薬学系・教授）

研究要旨

「原子放射線の影響に関する国連科学委員会」（UNSCEAR）2013 年報告書の線量評価は、直接的な小児甲状腺検査や、ホールボディカウンタ（WBC）検査データなどから間接的に推計される線量より過大評価となっている。東京電力福島第一原子力発電所事故の線量評価を改善する目的で、UNSCEAR 2013 年報告書で指摘されていた線量評価の不確実性を解消するため、包括研究を行った。包括研究には二重の意味が込められており、第一に、異なる専門分野の研究者、すなわちシミュレーションを実施する研究者と放射科学的な測定を実施する研究者、測定値から線量を推計する研究者、住民の避難行動や飲食行動を解析する研究者、そして、甲状腺のヨウ素代謝を薬物動態的に解析する研究者が協力し合い、総合的な線量評価につなげること、第二に、複数の評価項目を使い大気輸送・拡散・沈着モデル（ATDM）シミュレーションの妥当性を検討し、異なる方法論による線量評価を相互比較し、それぞれの不確実性を明らかにすることを目指した。本研究では、とりわけ不確実性の高かった甲状腺等価線量評価に焦点をあてて解析した。

新たなソースタームと ATDM の一種である改良された世界版緊急時環境線量情報予測システム（WSPEEDI）を使い、そのパラメータ調整に既存の空間線量率の連続計測データ、土壌放射性セシウム汚染マップ等のほか、UNSCEAR 2013 年報告書以降に発掘された大気中の浮遊粒子状物質（SPM）に含まれる放射性セシウムの連続測定データを使うことによって、従来より精度高い土壌汚染密度、大気中放射性核種濃度、空間線量率の時間空間データベースを作成した。平行して、福島県内および北茨城の約 900 カ所の土壌で ^{129}I の汚染密度を測定し、実測値の少なかった ^{131}I の汚染マップを充実させた。こうして得られた ^{131}I マップ、あるいは、放射

性セシウム・マップと WSPEEDI のシミュレーション結果とは、大凡整合していた。局所的に見るとまだ ^{131}I マップと齟齬のある地域が残るものの、従来よりシミュレーション精度が上がっていることが確認された。

聞き取り調査から、事故直後の内部被ばくの主因が、食品ではなく飲料水や煮炊きの水であることが判ったので、水道の水源への ^{131}I 沈着を WSPEEDI でシミュレーションし、ワンコンパートメントモデルにより水からの内部被ばく線量を評価した。避難途上の放射性核種の沈着速度の確率密度関数と地区特異的な体表面汚染確率密度関数を使って、避難途上の吸入被ばく線量を評価する 2 次元モンテカルロ (2D-MC) シミュレーション法を開発した。2D-MC シミュレーションでは、衣服および 3 月 12 日のダストの Ge-スペクトル解析結果を使って ^{131}I だけでなく ^{132}Te (^{132}I), ^{133}I などの短半減期核種の線量寄与も新たに評価した。また、事故後 1 ヶ月以内に実施された浪江・南相馬住民の甲状腺直接測定データの分布と、事故後 4 ヶ月以内に同じ地域住民の実施されたホールボディカウンタ (WBC) 測定による実効線量分布とを比較し、適切な $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比 3.8 を求めた。この比を使い、急性曝露シナリオで成人の ^{131}I 摂取量を推計する方法論を確立した。さらに方法論を拡張し、年齢依存的な一日換気量の違いを使い、10 歳児、1 歳児の ^{131}I 摂取量を推計し、さらに、 ^{131}I に対する ^{132}Te (^{132}I), ^{133}I の甲状腺等価線量の寄与割合を 3 月 12 日プルームと 3 月 15 日プルームそれぞれに対して求め、それらを乗じて甲状腺等価線量を推計した。

今回開発されたこれらの方法論を使い、小児も甲状腺等価線量を推計した。飲料水と煮炊き水の経口摂取による甲状腺等価線量と 2D-MC シミュレーションによる吸入摂取による甲状腺等価線量の和の中央値は、2 つの町と 1 市を除き、WBC からの甲状腺等価線量の評価値より大きくなったが、外部被曝線量を加味しても 1 歳児の甲状腺等価線量の平均値で 40 mSv を超す自治体はなかった。一方、UNSCEAR 2013 年報告書では、避難対象となった 12 市町村中 9 市町村で 1 歳児の甲状腺吸収線量の平均値が 40 mGy を超し、最大 83 mGy であった。改定されたソースタームと精緻化された WSPEEDI シミュレーションと共に、我々の解析は間接的に避難時期、避難ルート、屋内退避、ペットボトル水使用などの個人の防護行動を反映した評価になっていることが UNSCEAR より現実的な線量評価になった理由と考えられる。

将来の課題を以下に挙げる。第一に、日本人のヨウ素の甲状腺取り込み率および甲状腺体積は国際放射線防護委員会 (ICRP) のモデルより小さい。しかし、今回の線量評価に応用できなかった。この違いは、とりわけ甲状腺直接測定および WBC からの間接的線量評価の際にバイアスの原因となるため、今後の課題として残された。第 2 に、WSPEEDI のシミュレーション結果による ^{131}I の土壌沈着量の分布は、 ^{129}I の測定から再現された ^{131}I の土壌汚染分布とまだ齟齬がある。特に原発から西～北西方向の中通りで一致度が低い。これらの地域では水からの ^{131}I 摂取が主な被ばく経路なので、さらなる WSPEEDI シミュレーションの改善を必要としている。第 3 に、避難時期、避難ルート、屋内退避状況の詳細な解析により線量評価は改善すると思われる。また、今回の解析相互の齟齬の解消に役立つと期待される。

キーワード: 大気輸送拡散沈着モデル (ATDM)、内部被ばく線量、短半減期核種、体表面汚染、コンパートメントモデル

研究協力者氏名・所属施設 及び 所属施設における職名

中村 尚司（東北大学・名誉教授）、山澤 弘実（名古屋大学・教授）、茅野 政道（日本原子力開発機構・部門長）、高橋 知之（京都大学・教授）、堤 知昭（国立医薬品食品衛生研究所・室長）（平成 27 年度）、浅見 真理（国立保健医療科学院・上席研究員）、長谷川 有史（福島県立医科大学・教授）、大葉 隆（福島県立医科大学・主任放射線技師）、近藤 久禎（国立病院機構災害医療センター・室長）、小早川 義貴（国立病院機構災害医療センター・医師）

I. 研究目的

I-1. 研究の背景

東京電力福島第一原子力発電所から放出された放射性物質による住民の被ばく線量評価には、未だ不確実性が高い。それは、東日本大震災による社会インフラの崩壊と同時並行的に事故が進展したため、事故後 2 週間程度の放射線の環境および住民の実測値が少ないためである。このため、世界保健機関（WHO）や「原子放射線の健康影響に関する国連科学委員会」（UNSCEAR）は、暫定的な放出核種の経時的变化の推計値（ソースターム）と大気輸送・拡散・沈着モデル（ATDM）に依拠して事故初期の線量評価を行ってきた。2011 年に報告書が出された WHO に比較すると、2013 年末までの情報をベースに書いた UNSCEAR 2013 年報告書の方が、より実測値を利用できた分、現実的な線量評価になっている（表 1）。しかし、UNSCEAR 報告書が認めているように、とりわけ ^{131}I を含めた短半減期核種による内部被ばく線量評価には多くの不確実性が残されており（表 2）、UNSCAER の評価値は、小児甲状腺の実測値やホールボディカウンタの実測値より過大評価になっている。とりわけ小児甲状腺線量は、今後の疫学調査において放射線起因性を検証する上で必要不可欠であり、より現実的な評価を行うことが重要である。

UNSCEAR 2013 年報告書以降に、福島県民健康調査の行動調査データが利用可能になってきたこと、ソースタームの見直しが進められていること、浮遊粒子状物質（SPM）の放射能測定が開始されたこと、 ^{129}I の土壌沈着濃度測定が実施され始めていること、避難住民の体表面汚染検査データ等が発掘されてきたことなど、線量評価やシミュレーションの精度向上に利用できるデータが以前より増してきた。新規のデータを利用することにより UNSCEAR 2013 年報告書が指摘した不確実性の要因を減らし、より実態に合った線量評価となることが期待される。

I-2. 研究の目的

包括研究には二重の意味が込められており、第一に、シミュレーションを実施する研究者と放射科学的な測定を実施する研究者、測定値から線量を推計する研究者、住民の避難行動や飲食行動を解析する研究者、そして、甲状腺のヨウ素代謝を薬物動態的に解析する研究者が協力し合い、総合的な線量評価につなげること、第二に、複数の評価項目を使いシミュレーションの妥当性を相互に検討し、シミュレーションと実測値ベースの線量評価手法を組み合わせることで外部被ばく、吸入および経口摂取による内部被ばく線量を総合的に評価することである。本研究では、とりわけ不確実性の高かった甲状腺等価線量評価に焦点をあてて解析した。

UNSCEAR 2013 報告書以降に利用可能となったソースターム、SPM 連続測定データ、 ^{129}I 土壌沈着分布データ等を利用し、ATDM の一つである世界版緊急時環境線量情報予測システム（WSPEEDI）のパラメータの最適化を図る。WSPEEDI 計算により得られた時空放射能データベ

ースと県民の避難行動、WBC 調査、甲状腺実測調査、体表面汚染実態を考慮し、UNSCEAR 2013 年報告書より現実的な外部被ばく、食品/飲料水による内部被ばく、吸入被ばく線量の平均値、中央値と幅を評価する。

表 1. UNSCEAR 2013 報告書

事故後 1 年間の地域平均の実効線量及び甲状腺吸収線量の推定値

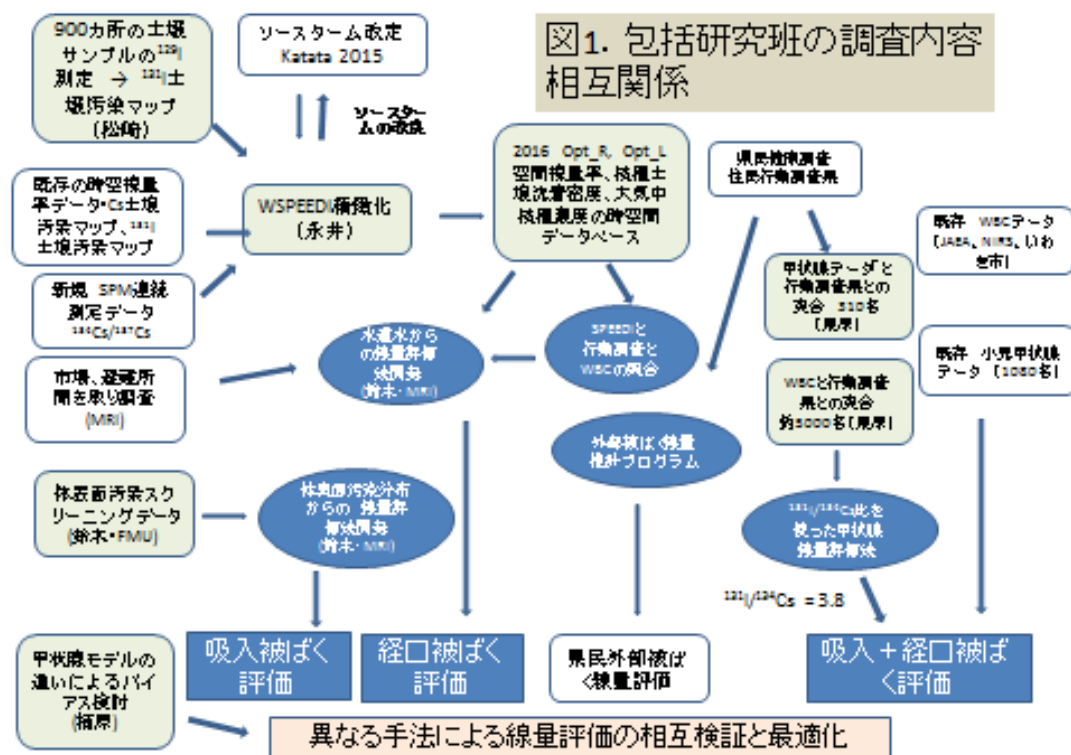
グループ	避難をした地区				
		実効線量(mSv)		甲状腺吸収線量 (mGy)	
		20 歳 (成人)	1 歳児(乳児)	20 歳 (成人)	1 歳児(乳児)
1	予防的 避難地域	1.1 - 5.7	1.6 - 9.3	7.2 - 34	15 - 82
	計画的 避難地域	4.8 - 9.3	7.1 - 13	16 - 35	47 - 83
	避難をしていない地域				
2	福島県 (避難区域外)	1.0 - 4.3	2.0 - 7.5	7.8 - 17	33 - 52
3	近隣県	0.2 - 1.4	0.3 - 2.5	0.6 - 5.1	2.7 - 15
4	その他の 都道府県	0.1 - 0.3	0.2 - 0.5	0.5 - 0.9	2.6 - 3.3

表2. UNSCEAR 2013 “福島報告書”不確実性の原因となる事項

- (111) ^{131}I 測定とその空間的分布
- (C116) 家による遮蔽係数と屋内滞在時間
- (112) ソースターム
 - (C120) ATDM パラメータ
- (113) 大気中の ^{131}I の粒子型とガス型(元素と有機化)の相対的量
(C121) とりわけ福島県内における相対的量
- (114) 市場でスクリーニングされた食品の代表性、および市場での
福島産の割合
 - (C123) 検出限界以下の食品の取り扱い
- (114) 食品の流通および消費の変化
 - (C128) 規制前の食品/水の消費実態
- (115) 日本人のICRPモデルより低い ^{131}I 甲状腺取り込み率
- (C133-C136) 将来の緩和策と防護策

II. 研究の方法

包括研究は、主任研究者が実施する研究の他、4 つの分担研究により実施された。大きく WSPEEDI の精緻化に関する研究（永井、松崎）と、WSPEEDI の出力データベースを利用しつつ、他の情報を統合しながら線量評価する研究（栗原、鈴木）、国際放射線防護委員会（ICRP）のモデルと日本人ヨウ素代謝の違いを検証し、甲状腺等価線量推計への影響を検討する研究（楠原）に大別される。包括研究班の班構成と相互の関係を図 1 に示す。



II-1. ソースタームの評価と大気拡散シミュレーション

日本原子力研究開発機構（JAEA）の永井分担研究者は、JAEA の改訂されたソースタームを用い、大気輸送・拡散・沈着モデル WSPEEDI の改良・精緻化を担当する。この研究は、UNSCEAR 2013 年報告書で不確実性の原因としてあげられていた「ソースターム」「ATDM パラメータ」「大気中の ^{131}I の粒子型とガス型の相対量」に直接対応する研究である。精緻化の方法の第 1 は、個々の放射性核種、放射性ヨウ素に関しては、 $1\ \mu\text{m}$ type F 粒子、元素ヨウ素、メチルヨウ素別に単位ベクレル毎の拡散計算ができる柔軟性を持たせること、第 2 に、気象場の計算モデルを MM5 と Old-GEARN から WRF-DA と New-GEARN に変更し、気象データを使った同化手法を使って気象場の再現性を高めること、第 3 に、改良された WSPEEDI を使って、改めて核種毎の沈着パラメータを調整し直すにあたり、既存の空間線量率の時空間データ、航空機による放射性セシウムの汚染マップに加え、新規に公開された SPM データや松崎分担研究者が実施する福島県内の約 900 カ所の土壌 ^{129}I 汚染から再現された ^{131}I マップと照合することなどである。第 4 に、放出量が変わらないが放出のタイミングを調整する、あるいは、放射性ヨウ素の物理化学型の修正といったソースタームの変更による最適化を行うなど所謂リバース・モデリング手法を取り入れることである。「大気中の ^{131}I の粒子型とガス型の相対量」に関しては、東海村での実測値を反映した Katata らのソースタームを用いている¹⁾。WSPEEDI の計算結果は、最終年度に 1 時間毎の福島県内の狭域（1 km メッシュ）ないし、東日本の広域（3 km メッシュ）の空間線量率、土壌沈着濃度、大気中放射性物質の濃度の時空間データベースとして他の研究者に提供することを可能とした。（詳細は、分担研究報告書参照）

II-2. 土壌中 ^{129}I の分析による ^{131}I 土壌沈着等の推計

東大/博物館の松崎分担研究者は、学習院大の故村松康行先生の後任として平成 27 年度から分担研究を担当してきた。この研究は、UNSCEAR 2013 年報告書で不確実性の原因の一つに数えられていた「 ^{131}I 測定とその空間的分布」の不確実性を減ずる研究である。研究では、事故 3 ヶ月後に採取された福島県内および北茨城の約 900 カ所の土壌の ^{129}I を加速器質量分析 MALT-AMS の手法で測定し、 ^{129}I と ^{131}I が同時に測定されたサンプルから $^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比を求め、約 900 カ所の ^{131}I 土壌汚染濃度を求める。そして、隙間だらけであった既存の ^{131}I の汚染マップを充実させ、そのデータを永井分担研究者に提供し、WSPEEDI のパラメータ精緻化に貢献する。（詳細は、分担研究報告書参照）

II-3. 事故初期段階における住民の被ばく線量再構築

量研機構/放医研の栗原分担研究者は、2011 年 3 月、4 月に測定された甲状腺計測データ、事故後概ね半年以内に実施された WBC のデータと、県民健康調査の行動記録、WSPEEDI の時空間データベースの照合作業を実施した。甲状腺測定実測値のない住民の甲状腺等価線量を推計するため、WBC データからの推計手法の開発研究、WSPEEDI 出力と住民行動調査の突合による推計手法の開発研究を行う。県民健康調査の行動記録と WSPEEDI の時空間データベースを組み合わせる住民の外部被ばく線量を推計するプログラムを作成し、そのプログラムを使って福島県が外部被ばく線量を推計する体制構築に寄与する。（詳細は、分担研究報告書参照）

II-4. 放射性ヨウ素の血中動態並びに甲状腺集積率の予測

東大/薬学の楠原分担研究者は、日本人甲状腺のヨウ素代謝モデルの文献検討と包括研究に先行する研究によって取得していた放射性ヨウ素 ^{123}I 経口投与研究のデータ解析を実施した。臨床研究より甲状腺クリアランスや腎クリアランスなどのパラメータを求め、経口投与された場合の日本人ヨウ素の体内動態をシミュレーションする数学モデルを構築する。さらに、文献調査から得られる年齢と腎臓機能変化（クレアチニン・クリアランス）の関係を利用して、腎クリアランスが異なる小児や高齢者のヨウ素代謝をシミュレーションできる数学モデルに拡張するとともに、安定ヨウ素摂取による甲状腺クリアランスの変化も計算できるモデル構築を目指す。最終的には、日本人ヨウ素の体内動態モデルを ICRP の肺モデルとドッキングさせ、吸入被ばく時のシミュレーションを行えるプログラムを完成させる。この研究は UNSCEAR 2013 年報告書で不確実性の原因の一つに数えられていた「日本人の ICRP モデルより低い ^{131}I 甲状腺取り込み率」に対応する研究である。（詳細は、分担研究報告書参照）

II-5 経口摂取による内部被ばく線量及び福島県外の外部被ばく線量の推計、体表面スクリーニング検査結果からの甲状腺被ばく線量推計

鈴木主任研究は、既存の食品からの内部被ばくデータの収集と評価（三菱総合研究所（以下、三菱総研）への外注）、WSPEEDI の時空間データベースを使った飲料水・煮炊き水からの内部被ばくの推計（三菱総研への外注）、体表面汚染からの甲状腺等価線量評価法の確立と地域別の甲状腺等価線量の推計（福島県立医科大学との共同研究）、県外の外部被ばく線量推計（三菱総研への外注）を個別に実施するとともに、分担研究者の成果を踏まえ、複数の手法による線量評価の整合性を検討し、地域ごとに食品、飲料水・煮炊き水、呼吸による内部被ばくと外部被ばくを統合

した線量評価を行う。主任研究者が行う個々の研究手法は、以下に詳述する。

II-5-1. 経口摂取による内部被ばく線量の推計

UNSCEAR 2013 年報告書では、避難住民および非避難地域の福島県民が飲料水や食品から大きな内部被ばく線量を受けたと評価していた。そこで、文献調査およびヒアリング調査により、避難状況、避難所での食事状況、福島県内の流通状況を生鮮食料品（野菜の出荷、卸売市場、小売業）と原乳に注目してデータを収集した。避難所における水（飲料用と炊き出し用）の消費量を推計し、ペットボトルの支給状況や自衛隊による供給実態を確認した。非避難地域の水消費量は、過去の統計値を利用した（表 3）。発災 1 週間に消費された飲料水・煮炊き水は、水道水、井戸水、沢水、断水地域では給水車による配布、ペットボトルなどであった。2011 年 3 月 21 日以降、水道水の汚染レベルが測定されはじめ、暫定規制レベル（一般 300 Bq/Kg、乳児 100 Bq/Kg）に従って乳児の摂取制限やペットボトル水の支給が一部の自治体で実施されたことを確認した。福島県内の水道事業の情報を入手し、水道の水源位置を確認した。

水道水からの内部被ばくに関しては、実測値がある時期からは水道水の ^{131}I 濃度実測値を、実測値がない時期には WSPEEDI の時空データベースを用いて水源への ^{131}I 沈着量を推計し、ワンコンパートメントモデルにより水道水の ^{131}I 濃度を推計した（図 3）。

事故後 4 ヶ月以降に実施されたマーケットバスケット法、陰膳法による食品からの内部被ばく線量評価値を系統的に収集した。

表3. 内部被ばくの要因となる喫食状況調査

- 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を行った。

調査結果から得られた知見

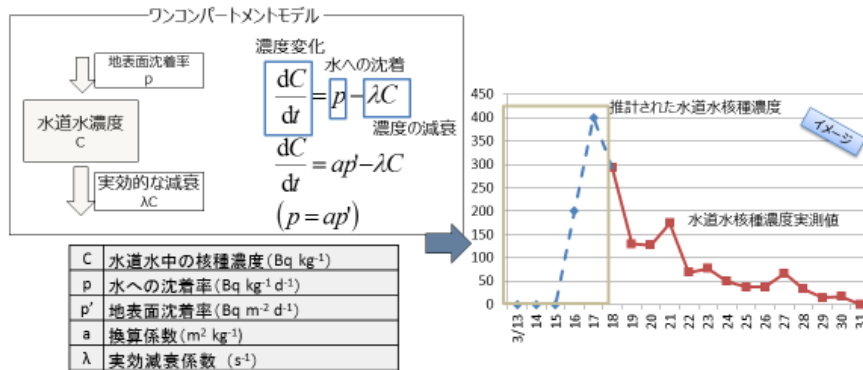
- ヒアリング結果より3月時期に露地野菜等は一般的には摂取しておらず、一般的な避難者・非避難者における内部被ばく線量（経口摂取）は、水からの影響が大きいと考えられる。
 - 測定されていない時期における水の濃度も推計し、本資料では参考として摂水量を仮定し、水道水からの内部被ばく線量を推計した。
- － 避難者と非避難者の一日の摂水量を以下のように設定。

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			1,000
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1箱配布されたと仮定し、マイナスイオン水） □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			1,000

図2. 水道水の放射能濃度推計(1-コンパートメントモデル)

ー 水道水の放射能濃度は、1-コンパートメントモデルを用いて推計を行う。

- ・ 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 は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 λ を最小2乗法等で求める。



10

II-5-2. 体表面汚染スクリーニングデータを使った2次元モンテカルロ (2D-MC) シミュレーション法による吸入甲状腺等価線量推計法

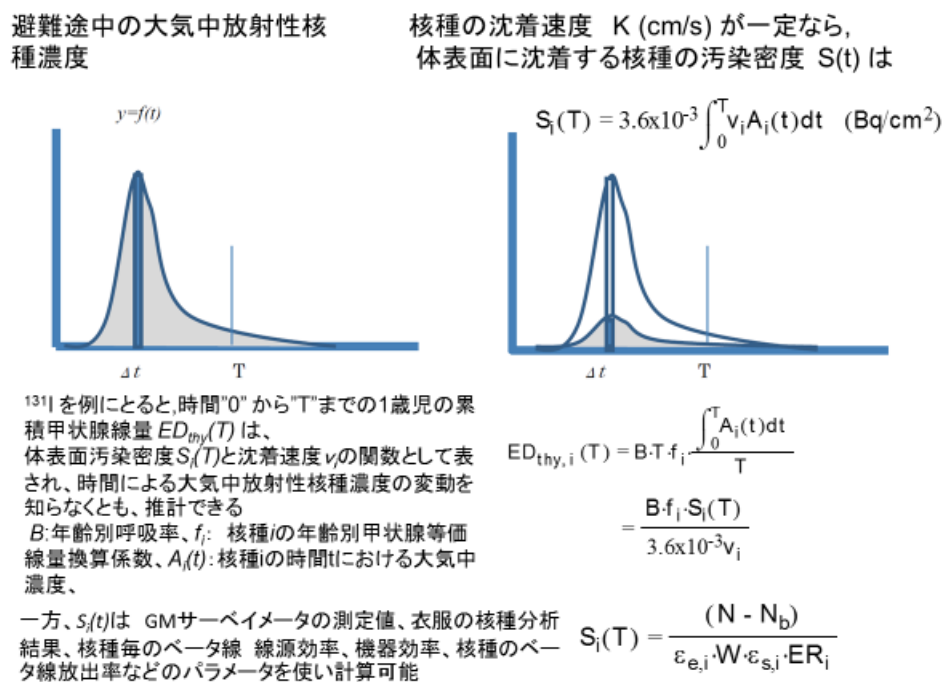
吸入被ばく線量は、住民一人一人の曝露時の位置や防護状況により、プルーム曝露の程度は変わる。放医研での実測値によれば、2011年3月15日から16日のプルーム来襲時の屋内と屋外の¹³¹I濃度比は、1/4～1/2と変動しており、また、チェルノブイリ事故時、原発近隣のPrypiat住民の甲状腺測定では、屋内退避により 2 ± 0.6 の幅のある甲状腺線量低減係数が得られている^{2,3)}。このため、住民の屋内退避状況、建造物の密封性などによりプルーム曝露の程度は大きく変わる。体表面汚染データは、住民のプルーム曝露を反映しており、有用なデータである。そこで、WSPEEDIベースの評価とは別個に、体表面汚染の分布を利用した吸入被ばくの推計手法を確立した。

福島県内の避難所で実施されたガイガーミュラー (GM) サーベイメータによる体表面汚染スクリーニングデータを解析するため、福島県庁および福島県立医科大学に保管されていた2011年3月13日から3月17日の間にスクリーニングされた7,539件のスクリーニング個人票をデータベース化した。複数の測定部位に関してcount per minute (cpm)単位で記録が残っていた対象者に関して、頭頸部の複数(最大6か所)測定値の平均をもって、個人の代表値とした。3月12日のプルーム曝露と3月15日～16日のプルーム曝露に分け、事故時の居住地別に集計し、体表面汚染レベルの度数分布を得た。GMサーベイメータと同時に測定できた避難住民の衣服のガンマスペクトロメータ解析と3月13日の原発20 km圏のダストモニタリングの結果から、主要な汚染核種(¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁵I, ¹³²Te, ^{131m}Te, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Csなど)の核種比を求めた。そして各々の核種のベータ線エネルギーとその放出率、GMサーベイメータの計測効率、機器効率、測定日ごとに物理的半減期補正を行い、曝露日の核種組成を推計した。また、この核種組成比を使って、3月12日プルームと3月15～16日プルーム吸入時の¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I, ¹³²Teの甲状腺等価線量に占める割合を計算した。その他の核種は甲状腺等価線量にほとんど寄与していない。一旦皮膚、頭髮、衣服に付着した放射性物質は、GMサーベイメータ測定までの時間に、物理的半減期で減衰すると

共に、自然脱落すると考えられる。サブミクロンの蛍光シリカ粒子を使ったデータによると、自然脱落による半減時間は 14.7 時間であった⁴⁾。そこで、本研究では、3 月 12 日プルームに関しては 3 月 12 日 19 時から GM サーベイメータ測定日時まで、3 月 15 日のプルームに関しては、3 月 16 日 9 時から GM サーベイメータ測定日時までの経過時間中に、自然脱落半減期 15 時間で脱落するとして補正した。

避難途上に吸入していた大気中の核種濃度は、体表面汚染核種の密度と核種の体表面への沈着速度 k (cm/s) の関数として表すことができる。そして、年齢別の避難途上の換気率、甲状腺等価線量換算係数を ICRP のモデルから採用すれば、避難途上の吸入被ばくによる甲状腺等価線量を計算できる(図 3)。プルームごと、地域ごとの GM サーベイメータの実測値から Anderson-Darling スコアを使って最適の体表面汚染核種の確率密度分布を選択し、一方、不確実性部分の沈着速度 k (cm/s) の確率密度分布は、文献値から 0.1 - 0.5 cm/s の一様分布と仮定し、2D-MC シミュレーション法により甲状腺等価線量を推計した。3 月 12 日と 3 月 15～16 日のプルームに 2 回曝露したシナリオでは、二つの体表面汚染確率密度分布からランダムに 8000 回サンプリングし、沈着速度の一様分布から 800 回ランダムにサンプリングし、それぞれの組み合わせで計算される甲状腺等価線量の和の分布を求めた。

図 3. 大気中放射性核種と体表面汚染核種の汚染密度の関係

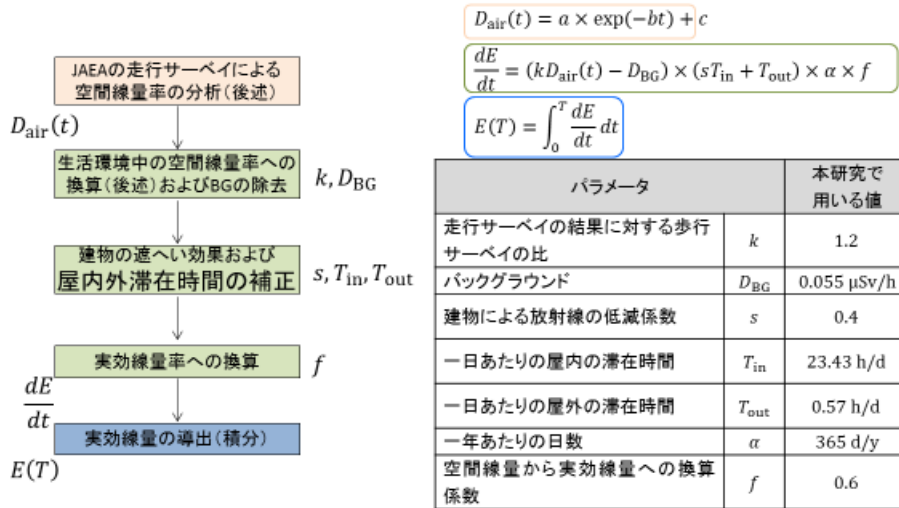


II-5-3. 福島県外の外部被ばく線量評価

図 4 に示すように、複数次に渡る JAEA による走行サーベイデータを使い、外部被ばく線量の減衰を求めた。この減衰カーブから、事故直後および将来の線量を推計した。福島県の調査から得られた屋内滞在時間と遮蔽係数を組み合わせることにより、外部被ばく線量を推計した。

図4. 周辺県における外部被ばく線量の評価方法

- JAEAの走行サーベイによる空間線量率の測定結果をベースに実効線量率への換算を行い、東京電力福島第一原子力発電所事故に起因する追加実効線量の評価を行う。
- 評価フロー、換算式、使用するパラメータは下記の通り。



4

(倫理面の配慮)

楠原が利用した臨床研究データは、包括研究が開始される以前の研究計画により取得されたデータである。包括研究に先行する楠原の研究計画書は、東京大学薬学部、臨床調査を実施した長崎大学、ボランティアを募集した医療法人それぞれの施設で研究倫理委員会の審査を受け、承認されて実施されている。

甲状腺測定や事故後4ヶ月以内にWBC検査を受けた住民のデータと行動調査の突合を行う栗原の研究計画は、放射線医学総合研究所および福島県立医科大学の研究倫理委員会で審査され、承認を受けて実施されている。

鈴木が実施した体表面汚染データの解析に当たっては、国際医療福祉大学病院および福島県立医科大学の研究倫理審査委員会において研究計画書の審査が行われ、承認を受けてから実施している(国際医療福祉大学承認番号 13-B-79、福島県立医科大学 承認番号 26医大研号外 受付番号 2136)。

III. 研究成果

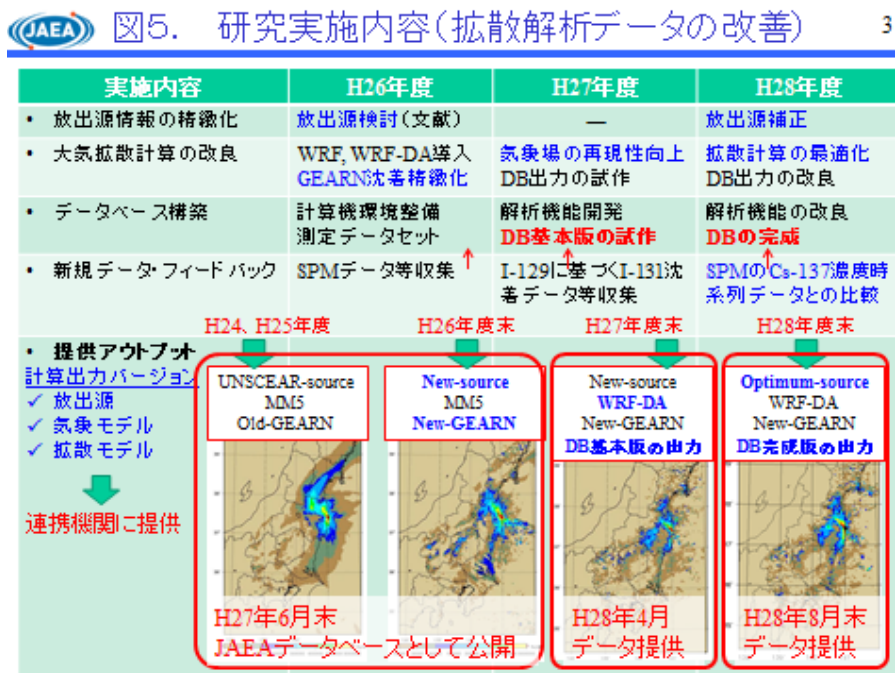
分担研究者の成果に関して、ハイライト部分のみここで紹介することとする。詳細は各分担研究者の報告書を参照されたい。

III-1. ソースタームの評価と大気拡散シミュレーション

ソースタームは、UNSCEAR 2013 年報告書で採用していた Terada らのソースタームから、Katata らのソースタームへ変更された^{1,5)}。¹³¹Iの物理化学型は50%粒子、50%ガス(20%元素ヨウ素、30%メチルヨウ素)と定義された。また、2011年3月12日時点の核種比は、¹³²Te:¹³¹I:¹³⁷Cs比は、1.5:1:0.1とされた。¹³²Te/¹³¹I比に関しては、3月12日の20km圏のダストの比や衣服の

比より小さく、また最新の炉の解析結果より小さいので、将来変更される可能性がある。WSPEEDIの精緻化において、気象場の計算モデルをMM5とOld-GEARNからWRF-DAとNew-GEARNに変更した。これにより気象観測データ同化手法が取り入れられるようになり、気象場の再現性が向上した。加えて、福島県内のSPMの放射性セシウム連続測定データとの整合性や ^{131}I の土壤汚染マップとの整合性を向上させるため沈着パラメータの調整やソースタームを微修正した。これらにより放射能の土壤沈着分布は大幅に改善した（図5）。

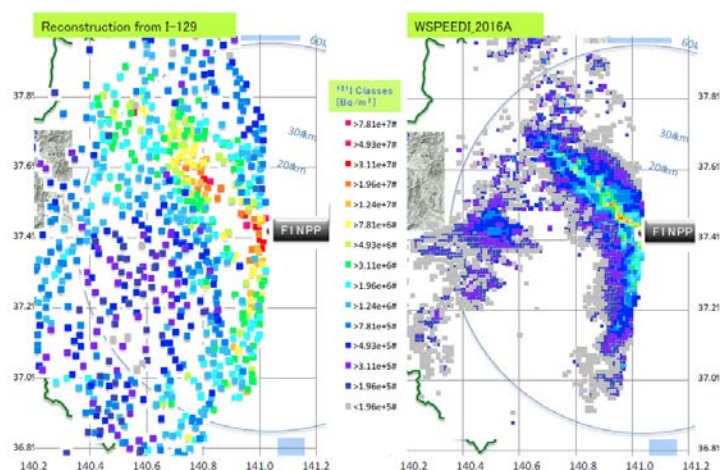
WSPEEDIの計算結果は、1時間毎、県内狭域1kmメッシュ、広域3kmメッシュの核種毎の土壤沈着濃度、大気中核種濃度、空間線量率のデータベースとして包括研究班の班員と共有すると共に、公開を予定している。



III-2. 土壤中 ^{129}I の分析による ^{131}I 土壤沈着等の推計

サンプリング、測定のパラッキ、 $^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比の不確実性等を含めて $\pm 30\%$ の精度で ^{129}I の分析から ^{131}I の濃度を再現し、約900地点の ^{131}I マップが完成した。土壤マップと比較すると、WSPEEDIの出力結果は原発から西～北西方向の中通り地区で整合性が悪い地域が認められた（図6）。将来、このデータは、ソースターム、WSPEEDIパラメータのさらなる改良に利用されよう。

図6. WSPEEDI と ^{129}I から再現された ^{131}I マップの比較



III-3. 事故初期段階における住民の被ばく線量再構築

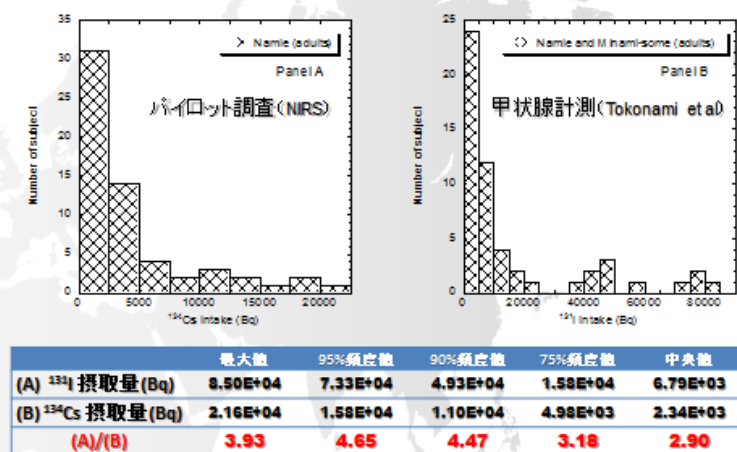
放射性セシウムの WBC 測定値から甲状腺等価線量を推計する手法を開発した。事故時に ^{131}I と ^{134}Cs ・ ^{137}Cs を同時に吸入したと仮定すると、吸入後の特定日に体内に残留する ^{131}I と ^{134}Cs ・ ^{137}Cs は、ICRP モデルを実装した MONDAL3 により計算できる。吸入された $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比を知ることができれば、WBC で測定した放射性セシウムの総量から甲状腺等価線量を推計できる。この手法の難しいところは、プルームの放出日および天候によりプルームの中の ^{131}I の粒子とガスの存在比が変わる点である。さらに、 $1\mu\text{m}$ type F の粒子状ヨウ素とガス状の元素ヨウ素やメチルヨウ素では、吸入後の気道沈着率が異なるので、当然、体内に残留する ^{131}I と ^{134}Cs から得る $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比は、環境試料のそれとは異なる点である。また、 ^{131}I の甲状腺取り込み率の個人変動によっても体内に残留する ^{131}I は変動し、 $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比が影響を受ける。栗原らは、甲状腺の実測データとして最も信頼性の高い床次らの 2011 年 4 月に測定した浪江町民・南相馬市民の成人甲状腺内 ^{131}I 活性の分布と浪江町成人の WBC 実効線量分布を比較し、(元素ヨウ素として) $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比の平均 ≈ 3.8 を得た (図 7) ⁶⁾。この比の値は、それ以前に栗原らのグループが川俣町や飯舘村の小児甲状腺の線量測定データと WBC の比較から推計していた比 ≈ 3.0 より大きくなっている。この比は、線量評価における不確実性の原因となるが、本包括研究班では、 $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比 ≈ 3.8 として線量評価を進める。

WBC の測定データからの甲状腺等価線量評価手法は、急性曝露シナリオを採用しているための不確実性がある。実際、小児と成人の放射セシウム測定値の分布を比較すると、体内の実効半減期が短いはずの小児と成人は、ほぼ同じ蓄積量を示しており、事故直後の急性摂取とすると矛盾する。WBC 測定値には、慢性的な放射性セシウム摂取や衣服汚染等が影響していると考えられた。以上の理由で、小児の WBC の測定データから小児の甲状腺等価線量を評価することは成人のデータを使うより不確実性が高い。そこで、栗原らは、成人の WBC データから成人と小児の一日換気体積の違いを考慮して小児の吸入摂取量を推計する手法を提案した。すなわち、成人：10 歳児：1 歳児 $= 22.2 \text{ m}^3/\text{d} : 15.3 \text{ m}^3/\text{d} : 5.16 \text{ m}^3/\text{d}$ の比を使った。データは、統合された線量の項で紹介する。

一方、行動記録を持つ住民の WBC データと WSPEEDI からの内部被ばく線量計算値の相関は、未だ十分な精度が得られていない。住民の行動データの時空の不確実性と WSPEEDI による住民

の存在場所にプルームが到達する時刻と放射能濃度推計の不確実性、さらには吸入だけでなく経口摂取による内部被ばくがあるためと思われる。今後、WSPEEDIの精度を向上させると共に、1 km メッシュではなく 3 km メッシュのデータでも比較する予定である。

図7. ^{134}Cs と ^{131}I の摂取量の比較(成人被検者)



Kim et al. Health Phys. (2016).

III-4. 放射性ヨウ素の血中動態並びに甲状腺集積率の予測

先行臨床研究で取得済みのデータと他の研究者が実施したデータをプールし、経口投与の場合のヨウ素の体内動態をシミュレーションするための日本人パラメータを決定した。この体内動態モデルで計算される放射性ヨウ素の24時間甲状腺取り込み率は約20%とICRPの甲状腺モデルより小さい。しかし、甲状腺クリアランスのパラメータの分散が大きいため、精度を上げるためには追加のデータが必要である。文献調査より得た情報をベースに、腎クリアランスの年齢依存性、甲状腺クリアランスの年齢依存性、安定ヨウ素摂取による非線形的甲状腺クリアランスの変化をモデルに組み入れた。この体内動態モデルをICRPの肺モデルとカップリングさせ、Python言語によりプログラムを構築した(図8)。

甲状腺組織の吸収線量は、体積当たりの放射活性により決定されるので、日本人の甲状腺体積のデータが必要である。Suzuki等によって、福島で甲状腺超音波検査を受けた小児の甲状腺体積が報告されている。それによれば、日本人の甲状腺体積はICRPモデルより小さい⁷⁾。ICRPモデルに比して、 ^{131}I 取り込み率だけでなく甲状腺体積も小さいことが判ってきたが、Suzukiらの評価値は簡易的な体積測定にもとづくため、両者のネットの効果としての甲状腺等価線量推計は、不確実性が高い。そこで、本包括研究においては、ICRPモデルの甲状腺モデルと甲状腺等価線量換算係数を使って線量評価を行う事とする。日本人甲状腺モデルが完成した後に、甲状腺等価線量を再評価する必要がある。

図 8. 日本人甲状腺モデルの構築

小児における放射性ヨウ素の体内動態パラメータのまとめ

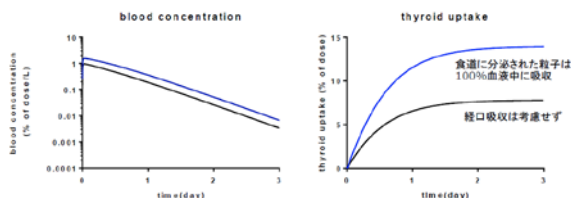
甲状腺集積率を決定する3つのパラメータ($CL_{thyroid}$, $CL_{uptake, thyroid}$, V)について、
・6歳までは、体表面積あたりでは成人と同程度と見なすことが出来る。
→パラメータの絶対値は体表面積の違いにより、加齢に伴う変動を示すが、血中に入った後の放射性ヨウ素の甲状腺集積率は、成人と同程度になる。
($eGFR \propto CL_{renal}$ を仮定)

$$Thyroid\ uptake\ (\% \text{ of dose}) = \frac{CL_{thyroid}}{CL_{thyroid} + CL_{thy}} \left[1 - \exp \left(- \frac{CL_{thyroid} + CL_{thy}}{V} \times 24 \right) \right] \left[\frac{BSA}{BSA^{1.34}} \right]$$

1ではないが、ほぼ1とみなすことができる(3歳と成人との間で、3%程度の誤差)

・3～6歳までは、甲状腺集積率に基づいて、 $CL_{uptake, thyroid}$ を27%程度高めに設定することで、甲状腺集積率が24%高い値(19.7%→24.5%)を得ることが出来る。

Pythonを用いた放射性ヨウ素の経鼻投与後の血液中濃度の時間推移および甲状腺集積率の時間推移



III-5 経口摂取による内部被ばく線量及び福島県外の外部被ばく線量の推計、体表面スクリーニング検査結果からの甲状腺被ばく線量推計

III-5-1. 経口摂取による内部被ばく線量の推計

ヒアリング調査により、事故直後に避難者が摂取した食料品等の多くは、事故前からの備蓄品または被災地以外からの支援物資であったことが確認された。さらに、対象野菜の出荷制限、水道水の摂取制限のほか、原乳の集荷施設、流通施設の被災、小売り店舗の閉鎖等の状況から、 ^{131}I で汚染された食品等が大量に流通し、消費される状況ではなかったことが判明した。一方、福島県内では、水道水の乳児に対する摂取制限が2011年3月21日ないし22日以降に開始されたため、それ以前の飲料水や調理水を介した内部被ばくが重要と考えられた。

表 4-1 と表 4-2 は、表 3 の調査で決定した避難者および非避難者の飲料水・煮炊き水の総量をそれぞれ 1.2 L/日、1.8 L/日、乳児は 1 L/日として、避難者は代表的な避難シナリオに基づき、地区ごとに ^{131}I の甲状腺等価線量を示したものである。計画的避難地域においては、乳幼児の避難が一般住民より先行したことが分かっている。また、井戸水やペットボトル水の使用頻度が高い場合は、表 4-1 の評価値、とりわけ乳幼児の評価値は過大評価になる。さらに、粉ミルクではなく母乳栄養の場合は、母乳の ^{131}I 濃度は飲水した水道水の汚染濃度ではなく、母体の細胞外液の ^{131}I 濃度と考えられるため、低くなる。身長 160 cm、体重 65 kg の母親が 1.8 L の汚染水道水を摂取した場合の母乳 1 L は、1 L の汚染水を使って調整した粉ミルクに比べると、 ^{131}I 濃度は約 6.9 分の 1 に希釈される。このため、仮に母乳と粉ミルクの使用頻度が半々だとすると、1 歳児の甲状腺線量は約 42%減少し、評価値の約 58%となる。地域的には、WSPEEDI の計算結果と ^{129}I の土壌汚染マップに齟齬が認められた原発から西～北西の中通り地域の評価値は、不確実性が高く、将来再評価する必要がある。

事故後 4 ヶ月以降のマーケットバスケット法による食品からの放射性セシウムの摂取量は、福島県内でも 0.4～3.3 Bq/日と低く、年間換算で 0.1 mSv 未満であると評価された。

表 4-1. 典型的避難シナリオでの飲料水・煮炊き水からの甲状腺等価線量(mSv)

	避難者											
	田村	川俣	広野	楡葉	富岡	大熊	双葉	葛尾	川内	浪江	南相馬 [#]	飯舘 ^{\$}
1 歳児	5.6	4.9	2.0	4.3	10	5.6	3.5	0.3	10	6.3	6.1	22
10 歳児	1.9	1.6	0.7	1.4	3.4	1.9	1.2	0.1	3.4	2.1	2.0	11
成人	0.8	0.7	0.3	0.6	1.5	0.8	0.5	0.0	1.5	0.9	0.9	4.7

[#]小高区から原町経由で 3 月 23 日に新潟に避難した場合

^{\$}飯舘では、国会事故調のアンケート調査結果や WBC 測定者の記録を参照して、3 月 15 日から 3 月 19 日までに段階的に避難したとのシナリオで評価した平均値を示す。また、主要な 3 カ所の水道水供給割合、井戸水の割合を含めて平均を推計した。飯舘では 3 月 21 日以降にペットボトルの支給が実施されており、煮炊きを含めて全ての水がペットボトル水に変わったとのシナリオで評価している (http://archive.vill.iitate.fukushima.jp/dsearch/ics/view_data.php?dataId=0005641)。

表 4-2. 非避難者の飲料水・煮炊き水からの甲状腺等価線量 (mSv)

	非避難者							
	浜通り				中通り			会津/南会津
	いわき	原町	新地	相馬	県北	県中 ^{&}	県南	
1 歳児	4.0	6.1	3.6	2.8	0.4~1.2	0~ 9.4	0.7~ 9.5	0.0~0.9
10 歳児	2.0	3.1	1.8	1.4	0.2~0.6	0 ~4.7	0.3~4.8	0.0~0.5
成人	0.9	1.3	0.8	0.6	0.1~0.3	0 ~2.0	0.1~2.0	0.0~0.2

[&]三春では、3 月 15 日に安定ヨウ素剤が服用されたので、3 月 16 日および 3 月 17 日の甲状腺内部被ばくを、各々、90%、30%ブロックしたと計算。

III-5-2. 体表面汚染スクリーニングデータを使った 2 次元モンテカルロ (2D-MC) シミュレーション法による吸入甲状腺等価線量推計法

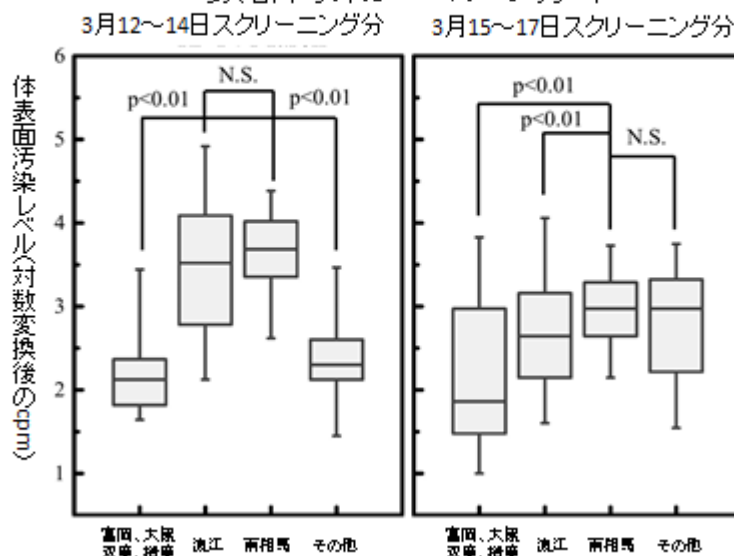
2011 年 3 月 12 日から 13 日に放出されたプルームは、主に 20 km 圏の避難住民が曝露したが、とりわけ浪江町の住民と南相馬市小高区の住民が曝露したと考えられる。一方、3 月 15 日から 16 日に放出されたプルームは、広く福島県を覆ったが、北方向までは影響を与えていない。20 km 圏の避難住民のうち、浪江町津島地区や飯舘村、川内村などに避難した住民は、3 月 15 日から 16 日へのプルーム曝露のレベルが比較的高くなったと思われる。3 月 13 日から 3 月 17 日までの体表面汚染スクリーニングデータを地域別、時期別に図 9 に表示する。浪江と南相馬からの避難住民の汚染レベルは、3 月 12 日のプルームへの曝露レベルの方が 3 月 15 日の曝露レベルより高いことが判る。また、3 月 15 日のプルームに関しては、地域差が小さくなっていることが判る。これは、20 km 圏外の計画的避難地区を主とした避難住民の汚染レベルを反映している。

体表面汚染の核種分析、3 月 12 日の 20 km 圏のダストの核種分析結果を使って、¹³¹I だけでなく、¹³²I、¹³³I および ¹³²Te の甲状腺等価線量の寄与を計算した。この結果、3 月 12 日のプルームに

関しては、トータルの甲状腺等価線量のうち ^{132}I , ^{133}I , ^{132}Te による線量の割合は、1 歳児、10 歳時、成人でそれぞれ 37 % (^{131}I 線量の 1.59 倍)、31 % (^{131}I 線量の 1.45 倍)、30 % (^{131}I 線量の 1.44 倍)、3 月 15 日のプルームでは各々 8 % (^{131}I 線量の 1.09 倍)、6 % (^{131}I 線量の 1.07 倍)、5.9 % (^{131}I 線量の 1.06 倍) と計算された。この値 (年齢により 30 %~37 %) は、Shinkarev らの福島原発事故における短半減期放射性核種の吸入による甲状腺線量の影響を、2011 年 3 月 12 日のプルームで 30 %~40 %程度との評価値と合致している⁸⁾。

体表面汚染分布を使って、2D-MC シミュレーション法により、甲状腺等価線量を推計した (表 5)。2D-MC シミュレーション法の不確実性の一つに、沈着速度がある。福島原発事故時に千葉で測定した実測値、英国ウィンズケール事故の実測値、米国 SL-1 原発事故時の実測値を参照しているが、その設定に応じて、甲状腺等価線量の中央値と幅は変わる⁹⁻¹¹⁾。そこで、表 5 の評価値の妥当性を検討するため、栗原等の開発した WBC からの甲状腺等価線量評価法と比較検討した。

図9. 3月12日、15日のプルーム曝露の地域差
頭部汚染レベルの分布



WBC の分布は、放医研が開催した第 2 回国際シンポジウム「東京電力福島第一原子力発電所事故における初期内部被ばく線量の再構築」で JAEA の百瀬らが発表した浪江 614 名の成人の放射性セシウムによる実効線量評価値 (50%-tile 値 0.02 mSv, 90%-tile 値 0.10 mSv) を用いる¹²⁾。 ^{134}Cs と ^{137}Cs を同量急性摂取したと仮定すると、 ^{134}Cs の 50%-tile と 90%-tile 摂取量は、各々 1,790 Bq、8,930 Bq となる。 $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比=3.8 より、 ^{131}I 摂取量の 50%-tile と 90%-tile は、各々、6,800 Bq、34,000 Bq となる。2D-MC シミュレーション法の評価によれば、浪江からの避難住民の ^{131}I からの甲状腺等価線量の中央値は、2011 年 3 月 12 日と 3 月 15 日のプルーム曝露でほぼ 1.5 : 1 であるので、短半減期核種の寄与 (12 日プルームで 1.44 倍、15 日プルームで 1.06 倍) を入れた WBC データからの甲状腺等価線量は、50%-tile 3.3 mSv、90%-tile 17 mSv と計算される。一方、表 5 の 2D-MC シミュレーション法の浪江町成人の吸入被ばく線量評価値に表 4 の飲用水と煮炊き水からの線量を加えると、50%-tile 値は $2.4 + 0.9 = 3.3$ mSv、90%-tile 値は、 $23.6 + 0.9 = 24.5$ mSv と 2D-MC シ

ミュレーション法のほうが高めの評価となるが、不確実性区間を考慮するとほぼ等しい。

表 5. 2次元モンテカルロシミュレーション法*による甲状腺等価線量推計 (mSv)

地区グループ	年齢区分	平均値 (90% U.I.)	50%-tile (90% U.I.)	90%-tile (90% U.I.)
富岡/大熊/双葉/楢葉	1 歳児	6.1 (3.2-12.6)	0.5 (0.3-1.0)	5.8 (3.0-12.0)
	10 歳児	5.5 (2.8-11.3)	4.3 (2.2-8.9)	5.2 (2.8-11.3)
	成人	3.0 (1.6-6.2)	0.2 (0.1-0.5)	2.9 (1.5-5.9)
浪江	1 歳児	31.4 (16.2-64.5)	5.1 (2.7-10.5)	50.8 (26.2-104)
	10 歳児	26.6 (13.7-54.6)	4.4 (2.3-9.0)	40.1 (22.3-88.6)
	成人	14.5 (7.5-29.9)	2.4 (1.3-5.0)	23.6 (12.2-48.5)
南相馬	1 歳児	8.3 (4.3-17.0)	6.5 (3.3-13.3)	16.8 (8.7-34.6)
	10 歳児	7.1 (3.7-14.6)	5.6 (2.9-11.4)	14.4 (7.4-29.5)
	成人	3.9 (2.0-8.0)	3.1 (1.6-6.3)	7.9 (4.1-16.2)
その他	1 歳児	3.7 (1.9-7.6)	1.6 (0.8-3.4)	9.2 (4.8-18.9)
	10 歳児	3.3 (1.7-6.7)	1.4 (0.7-3.0)	8.2 (4.2-16.8)
	成人	1.8 (0.9-3.7)	0.8 (0.4-1.6)	4.5 (2.3-9.3)

*地区別の体表面汚染密度関数と沈着速度 0.1-0.5cm/s の一様分布と仮定したシミュレーション

同様に、百瀬等の WBC 測定値¹²⁾をベースに飯舘村など他の避難地区住民の¹³¹I とその他の短半減期核種の甲状腺等価線量を計算してみる (表 6)。飯舘村の 50%-tile 値 と 90%-tile 値は、それぞれ 1.6 mSv と 9.2 mSv となる。一方、2D-MC シミュレーション法による「その他」の評価値は、50%-tile 値と 90%-tile 値は、それぞれ 0.8 mSv と 4.5 mSv であり、これに飯舘村の飲用水と煮炊きの水からの甲状腺の線量の平均値 4.7 mSv を加えると、50%-tile 値 5.5 mSv , 90%-tile 値 9.2 mSv となり、50%-tile 値では 2D-MC シミュレーション法のほうが高めの評価となるが、90%-tile 値は同じとなる。

一方、WBC 測定値をベースに大熊町、楡葉町、富岡町、双葉町の成人甲状腺等価線量を計算すると、成人の 50%-tile 値、90%-tile 値は、各々 1.4～5.6 mSv と 8.4～21 mSv の範囲にある。2D-MC シミュレーション法による吸入被ばくの線量は、50%-tile 0.2mSv, 90%-tile 2.9 mSv なので、それに水からの甲状腺等価線量分 0.5～1.5 mSv を加算しても、WBC からの推計値のほうが大きな値となる。但し、注意が必要なのは、百瀬らの報告によれば、2011 年 9 月までに測定終了した浪江、飯舘、川俣の測定値の信頼性が高いに対し、その後に測定した広野、双葉、大熊、楡葉、富岡、川内の住民の測定では、汚染している衣服からのカウント寄与が大きくなっていた¹²⁾。これは、2011 年 9 月下旬から一時帰宅が始まったため、避難住民が汚染された衣服を自宅から持ち帰り、汚染衣服を着たまま WBC 検査を受けたためである。このため、浪江、飯舘、川俣以外の地域の WBC からの推計値は、あくまで参考値として評価するべきである。

南相馬市に関しては、Hayano 等が 2011 年 7 月に実施した WBC 解析結果を報告している。遮蔽のない車載型の WBC だったため、線量推計に不確実性が残されているものの比較を試みた。百瀬等の WBC の線量分布が対数正規分布だったのに対し、Hayano 等の線量分布は正規分布であった。事故後平均 125 日の成人の ^{134}Cs の蓄積量の平均値は 825 (不確実性 ± 110) Bq、その SD は 360 Bq と評価された。MONDAL3 で事故直後の摂取量を計算すると ^{134}Cs の摂取量平均値と SD は、6,700 $\pm$ 2,900 Bq、 $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比=3.8 より、 ^{131}I 摂取量の平均値と SD は 25,000 $\pm$ 11,000 Bq となる。よって、甲状腺等価線量は 平均 9.9 (不確実性 ± 1.6 mSv)、SD 4.3 mSv と計算され、90%-tile 値は 15.4 mSv と計算される。一方、表 4 の南相馬の飲用水と煮炊きの水からの内部被ばく分は、浪江町津島地区経由で避難した場合に 0.9 mSv、南相馬市原町区経由で避難した場合に 0.9 mSv、南相馬市原町区付近に留まった場合に 1.3 mSv である。Hayano のデータと比較するため、2D-MC の南相馬の 50%-tile 値ではなく、平均値の 3.9 mSv と 90%-tile 値 7.9 mSv とを比較する。これに水からの線量を加算すると、平均値で 4.8～5.2 mSv。90%-tile 値で 8.8～9.2 mSv と評価され、Hayano らの WBC から推測される値より低い。我々の評価値は、原町方面に向かった 3 月 18 日のプルームを考慮にいれていないので、3 月 18 日以降も原町に滞在した住民に関しては、過小評価になっている。

一方、床次等が事故後 1 ヶ月以内に浪江・南相馬からの避難住民の甲状腺直接測定を実施している⁶⁾。床次等の成人の甲状腺等価線量の中央値 3.5mSv と比較すると、我々の推計した中央値は、南相馬で 4.0～4.4 mSv (吸入 3.1 mSv + 経口摂取 0.9～1.3 mSv)、浪江で 3.5 mSv (吸入 2.4 mSv + 経口 0.9 mSv) とほぼ等しい評価値になっている。

表 6. WBC 放射性セシウム蓄積量からの甲状腺等価線量評価 (mSv)

	飯舘 184 名		川俣 120 名		広野 210 名		双葉 365 名		浪江 614 名	
	50%-tile*	90%-tile	50%-tile*	90%-tile	50%-tile	90%-tile	50%-tile	90%-tile	50%-tile	90%-tile
成人	4.2	23.8	1.4	7.0	7.0	14.0	5.6	21.0	3.3	17
10 歳児	7.1	40	2.4	17	12	24	9.5	36	5.6	28
1 歳児	8.3	47	2.8	19	14	28	11	41	6.8	34
	大熊 561 名		楡葉 241 名		富岡 696 名		川内 64 名		(南相馬)	

	50%-tile	90%-tile	50%-tile	90%-tile	50%-tile	90%-tile	50%-tile	90%-tile	平均	90%-tile
成人	2.8	14	1.4	8.4	1.4	11.2	<1.4	<1.4	(9.9)	(15)
10 歳児	4.8	24	2.4	14	2.4	19	<2.4	<2.4	(17)	(27)
1 歳児	5.5	28	2.8	17	2.8	22	<2.8	<2.8	(19)	(29)

*栗原等の手法に従い、呼吸による成人 (22.2 m³/d) と 10 歳児 (15.3 m³/d)、1 歳児 (5.16 m³/d) の一日換気体積の比を用いて放射性セシウム吸入量を計算し、¹³¹I/¹³⁴Cs 比=3.8 を使って、¹³¹I 吸入量を計算した。これらの集団には、短半減期核種の寄与を年齢に応じた 3 月 1 5 日ブルーム用の係数を ¹³¹I 甲状腺線量に乗じた (テキスト参照)。

先行して実施された浪江、川俣、飯館に比べると、その他の地域は一時帰宅により持ち出した汚染衣服により、過大評価になっていると考えられる。南相馬に関しては、WBC の測定値に不確実性が高いため、参考データである。

III-5-3. 福島県外の外部被ばく線量評価

福島県内の外部被ばく線量評価に関しては、WSPEEDI による時空データベースと行動調査を突合した事故後 4 ヶ月間の平均値が Ishikawa らによって報告されている¹³⁾。それによれば、外部被ばく実効線量の平均値は、県北 1.4 mSv、県中 1.0 mSv、相双 0.8 mSv、県南 0.6 mSv、いわき 0.3 mSv、会津 0.2 mSv、南会津 0.1 mSv と評価されている。年齢による違い、性別による違いはないと報告されているので、そのままの値を本研究では小児用に引用する。

福島県外の外部被ばく線量に関して、JAEA の走行サーベイをベースに評価した値を UNSCEAR 2013 年報告書の評価値と並べて表 7 に示す。

表 7. 周辺県の外部被ばく累積線量評価

	本研究の評価 (mSv)		UNSCEAR 2013 年報告書の評価 (mSv)	
	事故後 1 年	事故後 10 年	事故後 1 年	事故後 10 年
岩手県	0.26	BG*	0.14～0.31	0.1～0.7
宮城県	0.53	0.92	0.05～0.55	0.1～1.3
茨城県	0.39	1.2	0.06～0.54	0.1～1.3
栃木県	0.62	1.7	0.06～1.07	0.2～2.5
群馬県	0.16	BG*	0.06～0.50	0.1～1.2
千葉県	0.23	BG*	0.05～0.76	0.1～1.8

*バックグラウンドに達した場合には、評価を行わない

IV. 考察

UNSCEAR 2013 年報告書の甲状腺線量評価値は、当初より小児甲状腺測定結果や WBC からの評価値より過大になっていることが指摘されていた。包括研究においては、同報告書で指摘されていた不確実性の要因を減らすべく、新たな取り組みを行った。第 1 に、UNSCEAR の評価時点より改良されたソースタームを用いた。第 2 に、大気輸送・拡散・沈着モデルの一つである WSPEEDI の精度を上げるため、気象場の再現性を向上させるための改良を行った。第 3 に、従来の空間線量連続測定データ、地表面放射性セシウム沈着データなどに加え、新規に公開された

SPM 中の放射性セシウムの時空データベースを用いて、WSPEEDI のパラメータの最適化を行った。第 4 に、約 900 カ所の土壌 ^{129}I の測定を行い、福島県内の ^{131}I 沈着マップを完成させ、それを WSPEEDI の精度評価に用いた。これらの努力によって、WSPEEDI による放射性物質の拡散沈着のシミュレーションは、大幅に精度が上がり、不確実性が低減された。この結果、UNSCEAR 報告書で使われた大気輸送・拡散・沈着モデルより精度の高い 1 時間単位で 1km メッシュないし 3km メッシュの空間線量率、個々の放射性核種の土壌沈着線量、大気中放射性核種の濃度に関するデータベースを作成することができた。

シミュレーションのデータを線量評価に生かすためには、避難住民の詳細な避難行動のタイミングや屋内退避状況あるいは飲食物の摂取状況等の情報が不可欠である。UNSCEAR や WHO の線量評価においては、これらの情報が不足しており、住民個人の行動や自治体の放射線防護策を線量評価に生かすことが十分にできなかったため、過大評価になったと思われる。包括研究においては、二つのアプローチを実施した。すなわち、第 5 として、WSPEEDI のデータベースと福島県民の行動記録を付き合わせて、内部被ばく線量を評価するプログラムを作成し、不確実性の減少を試みた。しかし、包括研究 3 年目の時点で、未だ WBC データとの整合性が低い。屋内退避による吸入被ばくの低減率や飲食の影響の不確実性、プルーム到達時間帯の行動調査の不確実性、WSPEEDI の評価値の不確実性が関係していると思われる。今後、さらなる検討が必要である。

第 6 のアプローチは、吸入被ばくと経口被ばくに分けて、それぞれ避難住民の行動を反映するアプローチである。吸入被ばくに関しては、避難途上に曝露したプルーム曝露量を体表面汚染により評価し、沈着速度を仮定して 2 次元モンテカルロシミュレーション法により評価した。また、WSPEEDI による水源地への ^{131}I の沈着量の推計をベースに水道水の汚染を評価し、飲料水・煮炊き水からの内部被ばく線量を推計した。

第 7 に、飲料水からの経口被ばくが大きいと考えられた飯舘村に関しては、水道の供給経路とその供給割合、井戸水利用の割合、さらに国会事故調アンケートや WBC を受けた住民の行動記録の照合結果を使い、住民の避難が段階的に行われたシナリオにより水からの経口摂取量を評価した。また、3 月 21 日からは、ペットボトル水が全村住民に供給されたことを考慮した。

そして、第 8 に、事故後 4～9 ヶ月以内に実施された成人の WBC 測定値（放射性セシウムの摂取量）のデータを使って、3 月 15 日に放射性セシウムと ^{131}I を同時期に摂取したと仮定して、 ^{131}I 摂取量の再評価を行った。再評価に当たっては、事故後 1 か月以内に床次等が実施した浪江町と南相馬小高地区住民の甲状腺検査結果と放医研が事故後先行実施した同地区住民の WBC のデータを再検討し、適切な $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比を再定義した。そして、年齢別の一日換気量の比を使って 10 歳児、1 歳児の ^{131}I 吸入量を推計した。さらに、 ^{132}Te (^{132}I)、 ^{133}I 、 ^{135}I などの短半減期核種の寄与を入れた線量評価に変更した。

表 8 に、UNSCEAR の評価値と比較するため、平均値が求まっている外部被ばく線量、2D-MC シミュレーション法による吸入被ばく線量と飲料水・煮炊き水からの経口被ばく線量の合計と UNSCEAR の評価値を纏めた。我々の評価値と比較すると、予防的避難地域（註）、計画的避難地域（註）のいずれでも、1 歳児の甲状腺等価線量の平均値は、UNSCEAR の評価値を大幅に下回った。UNSCEAR の甲状腺吸収線量の地域平均は、予防的避難地域で 15～82 mGy であるのに対し（表 1）、外部被ばく、2D-MC による体表面汚染データからの評価値に水からの線量を加えた甲状腺線量の

平均値は、4.4~38.7 mSv と UNSCEAR 評価値の 13%~55%に低下した。また、計画的避難地域の評価においても、UNSCEAR の 47~83 mGy に対し、外部被ばく、吸入と水からの線量を加えた甲状腺線量の平均値は 1.1~29.8 mSv と、UNSCEAR 評価値の 10~53 % に低下した。改定されたソースタームと精緻化された WSPEEDI シミュレーションと共に、我々の解析は間接的に避難時期、避難ルート、屋内退避、ペットボトル水の使用などの個人の防護行動を反映していることが UNSCEAR より現実的な線量評価になった要因と考えられる。

(註) UNSCEAR 2013 報告書では、富岡、大熊、双葉、楢葉、浪江（避難シナリオ7）、田村、南相馬（避難シナリオ9）、広野、川内、葛尾（避難シナリオ12）が予防的避難地域に分類され、浪江津島活性化センター（シナリオ13）、葛尾（シナリオ14）、飯舘、南相馬（シナリオ17）、川俣山木屋地区が計画的避難地区に分類されている。

表 8. 1 歳児甲状腺線量の間とりまとめ

	1.事故後 4 ヶ月の外部 被ばく (mSv) (註 1)	2. 吸入被 ばく (mSv) (註 2)	3. 経口被ばく (mSv) (註 3)	1+2+3	UNSCEAR 2013 地区平 均値 (mGy)
富岡	0.7	6.1	10.2	17.0	49
大熊	0.9		5.6	12.6	36
双葉	0.8		3.6	10.5	15-19
楢葉	0.5		4.3	10.9	69-82
浪江	1	31.4	6.3	38.7	81-83
南相馬	0.8	8.3	6.3 (津島経由で 避難)	15.4	47-53
			6.1 (原町で屋 内退避)	15.2	
飯舘	4.1	3.7	22	29.8	56
川俣	0.8		4.9	9.4	65
田村	ND		5.6	$9.3 + \alpha$	44
広野	0.5		2	6.2	34
川内	0.8		10.2	14.7	47
葛尾	0.8		0.3	4.8	49
いわき	0.3		4	8	33-52
中通(県北)	1.4	ND (註 4)	0.4 ~ 1.2	$(1.8 \sim 2.6) + \alpha$	
中通(県中)	1		0~9.4	$(1 \sim 10.4) + \alpha$	
中通(県南)	0.6		0.7~9.5	$(1.3 \sim 10.1) + \alpha$	
会津	0.2		0~0.9	$(0.2 \sim 1.1) + \alpha$	
南会津	0.1		0~0.7	$(0.1 \sim 0.8) + \alpha$	

- 註 1. 県民健康調査「基本調査」H29 年 3 月 31 日現在の集計に基づく実効線量の平均値。年齢による差はないと報告されている¹³⁾。甲状腺吸収線量の代替値として示す。
- 註 2. 体表面汚染検査データから推計した 3 月 12 日～3 月 17 日の吸入被ばく。
- 註 3. 乳児の飲水量を 1 L/日と固定。100 %粉ミルクの場合の線量を表示している。母乳と粉ミルクの使用割合が 1 : 1 の場合は、この 58%程度の値に下がる。
- 註 4. WSPEEDI シミュレーションによる大気中の放射性ヨウ素濃度平均値をベースに推計すると、24 時間屋外に居続けた場合、3 月 12 日から 3 月 31 日までの 1 歳児の吸入被ばくによる甲状腺等価線量は、中通地区で 1~5mSv)、会津・南会津地区で 1 mSv 未満と評価される。

残された課題

①WSPEEDI が使ったソースタームは、原子炉内の解析が進んできたこともあり、将来改訂されると思われる。これに伴い、現行の WSPEEDI の沈着パラメータは、再度調整され直す。その際には、近い将来利用可能になると期待される SPM の ^{129}I データが利用できるであろう。②今回、WSPEEDI の評価値は、飲用水と煮炊き水からの線量評価に使われている。このため、ソースタームと WSPEEDI のさらなる精緻化に伴い、飲用水と煮炊き水からの評価値も精緻化されることが期待される。特に、県北と県中の評価値が、 ^{129}I の土壤汚染マップと齟齬があるので、この地域に関しては不確実性の低減が期待される。③飯舘村の水からの甲状腺線量評価では、子供の避難タイミングが大きな不確実性の要因である。将来、行動調査票との照合により、不確実性が低減されよう。④甲状腺測定データや WBC 測定値と行動調査データの突合による線量評価に関しては、WSPEEDI の大気中放射性核種濃度の時空間データベースと行動調査を使った吸入による内部被ばく線量評価値と実測値に基づく線量評価の相関を調べたが、未だその相関は高くない。ソースタームと WSPEEDI のさらなる精緻化により相関が改善するならば、WSPEEDI に依拠した吸入被ばく線量評価の不確実性が改善されるだろう。⑤線量評価に使った $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比=3.8 は、ICRP モデルに従い甲状腺クリアランスのパラメータを 0.3 として計算されている。日本人甲状腺モデルに改訂され、この値が例えば 0.2 に変更された場合には、この比も変更される。しかし、同時に甲状腺体積も修正されるので、等価線量換算係数もまた変更されると思われる。このため、今回の評価値は、あくまで ICRP モデルによる評価値であり、不確実性が残されている。⑥2D-MC シミュレーションと WBC データや甲状腺直接測定データの比較において、2011 年 3 月 12 日と 3 月 15 日のプルーム中の ^{131}I 曝露割合を浪江町の住民で 1.5 : 1 としたが、避難経路により浪江町と南相馬市では同一ではない。行動調査との突合と WSPEEDI による緯度経度による比較検討により精緻化が図られると考える。⑦ 南相馬に関しては 3 月 18 日のプルームによる吸入被ばくを受けた住民の割合と、その線量を評価する必要がある。

V.結論

東京電力福島第一原子力発電所事故後の福島県住民の被ばく線量、とりわけ甲状腺等価線量を精緻化する目的で包括的研究を実施した。3 年間の研究の結果、以下の成果が得られた。

- 1) WSPEEDI の気象場計算プログラムの改訂とソースタームの改定、および新規の SPM 測定データを使ったパラメータ調整により、WSPEEDI シミュレーションの計算結果は、実測値との整合性が大幅に改善した。この WSPEEDI 計算による放射線場の時空間データベースは、他の

研究者に提供され、外部被ばく線量、水道水の汚染推計、吸入被ばく線量推計などに利用された。

- 2) 約 900 カ所の土壌サンプルの ^{129}I を微量測定し、 $^{131}\text{I}/^{129}\text{I}$ 比の実測値を使い ^{131}I 土壌汚染濃度を推計した。もって、まだらであった福島県の ^{131}I の土壌汚染マップを充実させた。このマップは、WSPEEDI シミュレーションの妥当性検討に使われた。
- 3) 聞き取り調査により、避難住民の内部汚染のソースとして水道水が重要であることを確認した。そこで、水道水の ^{131}I 実測値、実測値のない事故初期に関しては WSPEEDI の水源への ^{131}I 沈着量の計算値を使いワンコンパートメントモデルにより推計し、代表的な避難ルート毎に経口摂取による甲状腺等価線量を推計した。
- 4) 避難住民の汚染衣服、3 月 12 日の 20km 圏ダスト・サンプルの核種分析から、 ^{131}I 以外の短半減期核種 (^{132}Te (^{132}I), ^{133}I) による甲状腺等価線量への寄与率を推計した。
- 5) 避難住民の地域毎の体表面汚染確率密度分布と放射性核種の沈着速度の確率密度関数を使って 2 次元モンテカルロ (2D-MC) シミュレーションにより吸入被ばくによる甲状腺等価線量を計算するモデルを開発した。
- 6) 事故早期に実施された浪江町成人住民の WBC の放射性セシウムの実効線量分布と浪江・南相馬成人住民の ^{131}I 甲状腺実測値の分布を比較し、 $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ 比=3.8 という数値を導いた。年齢別一日換気量の違いを考慮し、この比を用いて小児の甲状腺等価線量を推計する方法論を確立した。さらに、短半減期核種の寄与分を含めて、WBC 測定値から避難住民の甲状腺等価線量を推計した。
- 7) WBC を実施した住民の行動記録を入手し、WBC による内部被ばく線量評価と、WSPEEDI の時間空間データベースと避難のルートおよびタイミングから推計される内部被ばく線量の相関解析が開始された。両者の相関は未だ悪く、将来の検討課題として残された。
- 8) 飲料水と煮炊き水からの経口内部被ばくと 2D-MC シミュレーションによる吸入被ばくによる 1 歳児の甲状腺等価線量の和の中央値は、2 町村 1 市を除いて WBC からの内部被ばく線量評価より高かったが、平均値で 40 mSv を超す自治体はなかった。他方、UNSCEAR の避難住民の甲状腺吸収線量評価では、12 市町村中 9 市町村で 40 mGy を超しており、2 町では 80 mGy 超の評価であった。
- 9) 改定されたソースタームと精緻化された WSPEEDI シミュレーションと共に、我々の解析は間接的に避難時期、避難ルート、屋内退避などの個人の防護行動を反映していることが UNSCEAR より現実的な線量評価になった要因と考えられる。
- 10) 日本人の甲状腺体積、甲状腺ヨウ素取り込み率は ICRP モデルより小さい。このため、ICRP モデルを使った今回の甲状腺等価線量推計は、系統的誤差が入っている可能性があり、将来の検討課題として残された。

主任研究者のこの研究に関する現在までの研究状況、業績

- 1) Kondo H, Shimada J, Tase C et al. Screening of residents following the Tokyo Electric Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accidents, Health Phys. 2013; 105: 11-20.
- 2) Ohba T, Miyazaki M, Sato H et al. A strategy for a rapid radiological screening survey in large scale radiation accidents: A lesson from an individual survey after the Fukushima Daiichi Nuclear Power

- Plant accidents, *Health Phys.* 2014; 107: 10-17.
- 3) Hirakawa S, Yoshizawa N, Murakami K, Takizawa M, Kawai M, Sato O, Takagi S, Suzuki G: Surveys of food distribution just after the nuclear accident at the Fukushima Daiichi nuclear power station and future issues, *The Food Hygienic Society of Japan*. 2017; Vol. 57, No. 2, to be published.
 - 4) Miyatake K, Yoshizawa N, Kawai M, Hirakawa S, Takizawa M, Murakami K, Sato O, Takagi S, Suzuki G: Assessment of Dose from External Exposure in Tochigi Prefecture after the Accident, *Journal of Japan Society for Safety Engineering* 2016,55(2):101-106.(in Japanese)
 - 5) Takizawa M, Yoshizawa N, Kawai M, Miyatake H, Hirakawa S, Murakami K, Sato O, Takagi S, Suzuki S: Consideration of the Estimations of the Internal Dose from Food after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster, *Journal of Japan Society for Safety Engineering* 2016,55(1):26-33.(in Japanese)
 - 6) Kawai M, Yoshizawa N, Hirakawa S, Murakami K, Takizawa M, Sato O, Takagi S, Miyatake H, Takahashi T, Suzuki G: Internal Dose from Food and Drink Ingestion in the Early Phase after the Accident, *Proceedings of the ICRS13 & RPSD-2016 meeting, Paris, 2016 in Eur. Phys. J. –Web of Conference*, to be published in 2017.
 - 7) Miyatake H, Yoshizawa N, Hirakawa S, Murakami K, Takizawa M, Kawai M, Sato O, Takagi S, Takahashi T, Suzuki G: Internal Assessment of Effective Dose from External Exposure in Tochigi Prefecture, *Proceedings of the ICRS13 & RPSD-2016 meeting, Paris, 2016 in Eur. Phys. J. –Web of Conference*, to be published in 2017.
 - 8) Ohba T, Hasegawa A, Kobayakawa Y, Kondo H, Suzuki G: Estimated thyroid equivalent doses for 1-year-old children based on body surface contamination level during evacuation following the 2011 FDNPS nuclear accident. *Proceedings of the ICRS13 & RPSD-2016 meeting, Paris, 2016 in Eur. Phys. J. –Web of Conference*, to be published in 2017.
 - 9) Ohba T, Hasegawa A, Kobayakawa Y, Kondo H, Suzuki G: Body-surface contamination levels of residents under different evacuation scenarios after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Health Physics*, (in press) .

引用文献

- 1). Katata G, Chino M, Kobayashi T, et al. Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi nuclear power station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015; 15: 1029-1070
- 2). Ishikawa T, Sorimachi A, Arae H, et al. Simultaneous sampling of indoor and outdoor airborne radioactivity after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Environ Sci Technol*. 2014; 48: 2430-2435
- 3). Balonov M, Kaidanovsky G, Zvonova I, et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early in vivo activity measurements. *Radiat Prot Dosimetry*. 2003; 105: 593-599
- 4). Hession H, Byrne M, Cleary S, Andersson KG, et al. Measurement of contaminant removal from skin

- using a portable fluorescence scanning system. *J Environ Radioact.* 2006; 85: 196-204
- 5). Terada H, Katata G, Chino M, et al. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J Environ Radioact.* 2012; 112C: 141-154
 - 6). Tokonami S, Hosoda M, Akiba S, et al. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident. *Sci Rep.* 2012; 2: 507-.
 - 7). Suzuki S, Midorikawa S, Fukushima T, et al. Systematic determination of thyroid volume by ultrasound examination from infancy to adolescence in Japan: The Fukushima health management survey. *Endocrine Journal.* 2015; 62: 261-268
 - 8). Shinkarev SM, Kotenko KV, Granovskaya EO, et al. Estimation of the contribution of short-lived radioiodines to the thyroid dose for the public in case of inhalation intake following the Fukushima accident. *Radiat Prot Dosimetry.* 2015; 164: 51-56
 - 9). Amano H, Akiyama M, Chunlei B, et al. Radiation measurements in the Chiba metropolitan area and radiological aspects of fallout from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plants accident. *J Environ Radioact.* 2012; 111: 42-52
 - 10). Chamberlain AC. Deposition of iodine-131 in northern England in October 1957. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 1959; 85: 362-370
 - 11). Gifford Jr. FA, Pack DH. Surface deposition of airborne material. Draft, Technical progress review, Nuclear safety. 1962; 3(4): 205-241. ORNL-TM-195
 - 12). Momose T, Takada C, Nakagawa T et al.: Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. In the Proceedings of The 1st NIRS Symposium on Reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. NIRS-M-252, ISBN: 978-4-938987-79-4.
 - 13). Ishikawa T, Yasumura S, Ozasa K, et al. The Fukushima health management survey: Estimation of external doses to residents in Fukushima prefecture. *Sci Rep.* 2015; 5: 12712-

Comprehensive studies on the dose reconstruction for residents in Fukushima Nuclear Accident:

Chief Investigator: Gen Suzuki

International University of Health and Welfare Clinic

Updating source term and atmospheric transport dispersion Co-simulations

Co-investigator: Haruyasu Nagai

Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency

Dose reconstruction of Fukushima residents in the early stage of the nuclear disaster

Co-investigator: Osamu Kurihara

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology,

National Institute of Radiological Sciences

Retrospective reconstruction of Iodine-131 distribution released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident through the analysis of Iodine-129

Co-investigator: Hiroyuki Matsuzaki

The University Museum, The University of Tokyo

Prediction of blood disposition and thyroid accumulation of radioiodide

Co-investigator: Hiroyuki Kusuhara

Graduate School of Pharmaceutical Sciences, the University of Tokyo

Abstract

It was noted that the dose estimation by United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) in their 2013 Report was much higher than those estimates based on direct thyroid measurements or indirect whole body counter (WBC) measurements. In order to improve dose estimation after the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, we have conducted Comprehensive Studies on the Dose Reconstruction for Residents in Fukushima Nuclear Accident and tried to reduce uncertainties in dose estimation that were pointed out by UNSCEAR 2013 Report. “Comprehensive Study” means two folds: First, researchers with different disciplinary gather together to conduct the Study, *i.e.*, those who conduct atmospheric transport, diffusion and deposition model (ATDM) simulation, those who conduct radiological measurements, those who reconstruct doses based on ATDM simulation and measurements, those who conduct research on foods and water consumption during evacuation, and those who study the pharmacological dynamics of radio-iodine in Japanese. Second, ATDM simulation should be validated by different sets of measurements, and dose estimations by different methodologies should be compared each other to elucidate uncertainty. In the study, we have focused on

thyroid dose via inhalation and ingestion, of which uncertainty was high.

In the study, we utilized a new source term and the sophisticated version of World-wide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI), a kind of ATDM, and old and new sets of measurements after UNSCEAR 2013 Report such as continuous dose rate measurements, radio-caesium deposition map, and continuous sampling data of radio-caesium in suspended particulate matter (SPM) in air. Those measurements have been used for adjusting the parameters of WSPEEDI in order to achieve realistic simulation and create the time-space database of radionuclides' deposition density on soil, radionuclides' concentration in air, and ambient dose rate. In parallel, about 900 soil samples were measured for ^{129}I in Fukushima and northern area of Ibaraki Prefecture, which enabled us to update an otherwise scarce ^{131}I deposition map. A ^{131}I map by WSPEEDI simulation and a ^{131}I soil map by ^{129}I measurement or radio-caesium soil map agreed generally well with each other, indicating the improved accuracy of WSPEEDI simulation, though there remained discrepancy in several areas.

Hearing survey revealed that major route of radionuclides' ingestion was water for drinking and cooking but not food. Thus, we estimated ^{131}I concentration in tap water by one compartment model utilizing ^{131}I deposition on land near water supply source simulated by WSPEEDI. We also have established a two dimensional Monte Carlo (2D-MC) simulation model, where inhalation dose is simulated using the probability density function of radionuclides' deposition velocity and the district-specific probability density function of body surface contamination during evacuation. In the 2D-MC simulation, ^{131}I as well as other short-lived radionuclides, *i.e.*, ^{132}I , ^{132}Te and ^{133}I , were evaluated based on the results of Ge-spectrometry analyses of evacuees' clothing and dusts in air on 12 Mar. In addition, we established a methodology to estimate thyroid equivalent dose based on whole body counter (WBC) measurements, where we determined the acute exposure ratio of $^{131}\text{I}/^{134}\text{Cs}$ as 3.8 by comparing thyroid dose distribution obtained within one month after the accident in adult residents from Namie/Minamisoma and effective dose distribution in adult residents in Namie obtained by WBC within 4 months after the accident. Supposing children and adults inhaled the same air during evacuation, this methodology was adopted for the estimation of thyroid equivalent doses by ^{131}I in 10- and 1-year-old children by adjusting for ventilation volumes in each age category. Finally, the contribution of short-lived radionuclides was adjusted by multiplying ratios between equivalent dose by $^{132}\text{I}/^{132}\text{Te}/^{133}\text{I}$ and that by ^{131}I in 12 Mar plume and 15 Mar plume, respectively.

By these methodologies, we estimated thyroid equivalent doses in children. Median thyroid doses via water consumption and inhalation by 2D-MC simulation were generally higher than those estimated based on WBC except for 3 municipalities. Mean thyroid doses by external radiation, water consumption and inhalation were less than 40mSv in all municipalities. While the mean thyroid doses were more than 40 mGy in 9 out of 12 municipalities and maximum dose was 83 mGy in the municipalities that had been ordered to evacuate in the UNSCEAR 2013 Report. In conjunction with updated source term and sophisticated ATDM simulation, our estimates indirectly reflected exposure avoidance behavior such as evacuation timing, evacuation route or sheltering condition, which may contribute to more realistic dose estimation than UNSCEAR.

Future issues: First, in the present analyses, we have realized that iodine uptake rate into thyroid and thyroid volume in Japanese are much smaller than ICRP model. These differences may introduce bias in

dose estimation, especially in thyroid dose estimation based on direct thyroid measurement or WBC measurement. We will evaluate the effect in future works. Second, there remains some discrepancy between WSPEEDI simulation and ^{131}I soil contamination map especially at west to southwest direction from the plant in Nakadori area. As ingestion was a major source for thyroid dose in the area, further improvement of WSPEEDI simulation should be done. Third, detailed analyses of evacuation timing, evacuation route and sheltering condition will improve dose estimation and possibly solve the discrepancy observed in the current analyses.

Key words: atmospheric transport, diffusion, deposition model (ATDM), internal exposure dose, short-lived radionuclide, body surface contamination, compartment model

東京電力福島第一原子力発電所事故における住民の線量評価に関する包括研究

ソースタームの評価と大気拡散シミュレーション

永井晴康（日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター
環境・放射線科学ディビジョン ディビジョン長）

研究要旨

東京電力福島第一原子力発電所の事故時に放出された放射性物質による住民の被ばく線量について、現時点では実測に基づく評価が困難な事故初期段階における被ばく線量を詳細に評価するために、計算シミュレーションにより放射性物質の時間空間分布を再構築する。本研究項目においては、放出源情報の精緻化及び大気拡散シミュレーションの高精度化により、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開発し、住民の行動パターンや移行モデルと組み合わせた推計に活用する。

本年度は、放出源情報及び拡散計算の最適化を行い、計算結果を他の分担研究による最終的な線量評価の基礎データとして提供するとともに、拡散計算の不確実性の評価を行った。また、データベースの解析手法、ユーザーインターフェイス等の機能を改良し、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構築を完了した。

キーワード：放出源情報、大気拡散シミュレーション、福島第一原発事故、線量再構築、放射性物質の時間空間分布データベース

研究協力者：

山澤弘実（名古屋大学 大学院工学研究科 エネルギー理工学専攻・教授）、Matthew Hort（UK Met Office）、Werner Rühm（Helmholtz Center Munich）、André Bouville（National Cancer Institute, NIH, DHHS）

I 研究目的

東京電力福島第一原子力発電所（以降、福島第一原発と称す）の事故時に放出された放射性物質による住民の被ばく線量の把握において、ヨウ素等の短半減期核種による事故初期段階における内部被ばく線量については、現時点では実測に基づく評価が困難である。また、外部被ばく線量についても、実測データがない地点でのプルーム通過時の直接線量と地表汚染からの線量の積算を評価することはできない。そこで、放射性物質の空間分布及び時間変化を再現可能な大気拡散シミュレーションを活用し、実測データと整合するように拡散状況を再現することにより、実測データを時間空間的に補完した線量推計が可能となる。本研究では、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、線量推計に必要な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ことを目的とする。

このデータベースと他の研究項目で実施する住民の行動パターン及び陸上の核種移行モデルを組み合わせることで、実態に近い被ばく線量評価が可能となるとともに、事故による環境影響の把握と将来予測にも有効な基礎・基盤的な技術及び知見としての活用が期待される。

II 研究方法

本研究では、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。この目的を達成するために、具体的に以下の課題を実施する。

①放出源情報の設定と不確実性の評価

大気拡散シミュレーションの入力条件として必須となる放出源情報について、短半減期核種を含む放射性核種を粒径や化学形態別に細分し大気拡散と被ばく評価への影響を考慮できるようにする。また、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。

②大気拡散シミュレーションの精度向上と計算手法の開発

大気拡散シミュレーションについて、最新の気象モデルとデータ同化手法を用いた気象場計算を実施するとともに、拡散モデルに化学形態を考慮した精緻な沈着過程を導入し、放射性物質の大気拡散及び沈着状況の再現性を向上する。また、他モデルとの相互比較等により計算精度と不確実性の評価を行う。さらに、任意の放出源情報に基づく大気拡散シミュレーション結果を効率的に作成可能なデータベース計算手法を開発する。

③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の構築

②で開発した計算手法に基づき、単位放出条件による大気濃度及び沈着量の時間空間分布データセットを作成し、任意の放出源情報を設定すると、即座にその条件に基づく放射性物質の大気濃度及び沈着量を評価可能なデータベース解析機能を開発する。これにより、これまでの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構築する。

④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の改良

他の研究項目による新規データやデータベースを用いた被ばく線量評価研究からのフィードバックを反映させることにより、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。

平成28年度は、1) 放出源情報及び拡散計算の最適化、2) 拡散計算の不確実性の評価、及び3) データベース機能の改良を進め、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完成した。最適化した拡散計算結果は、他機関の分担研究による最終的な線量評価の基礎データとして利用された。各研究項目の実施方法を、以下に記述する。

1) 放出源情報及び拡散計算の最適化

昨年度までに実施した拡散シミュレーションの精度向上において、最新気象モデル（WRF）及

び高度な気象観測データ同化手法（4D-Var）を用いた気象計算と、国連科学委員会（UNSCEAR）2015年白書¹⁾で推奨されている最新の放出源情報（Katata et al. 2015²⁾）を用いた拡散シミュレーション結果は、プルームの軸方向やその時間変化が変わったことに起因すると考えられる地表沈着分布の再現性向上が見られた。しかしながら、ここで用いた放出源情報は、改良前の気象計算を用いて推定され、その気象場において環境モニタリング結果を最も再現するように最適化されたものである。そのため、改良した気象計算で最も環境モニタリング結果を再現するように放出源情報を補正することにより、拡散シミュレーションのさらなる精度向上が期待できる。

そこで、昨年度構築した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の基本版を活用して、放出源情報及び拡散計算の最適化を検討した。本データベースでは、データベース計算手法で作成した単位放出条件による大気濃度及び沈着量の時間空間分布データセットから、設定した任意の放出条件に基づく放射性物質の大気濃度及び沈着量をデータベース解析手法により即座に評価することができる。この機能を用いることで、放出源情報の補正により拡散シミュレーション結果がどのように変わるかを即座に評価可能となり、様々なケースの試行を効率的に実施することができた。また、拡散シミュレーション結果の改善を評価するための環境モニタリングデータとして、環境省のSPM 捕集用ろ紙に付着した放射性核種分析による大気中のCs-137濃度の多地点・連続データ（Oura et al., 2015³⁾）を利用した。このデータは、事故初期段階の3月12日から測定値があり、内部被ばく線量評価に重要なプルーム通過時の放射性物質濃度の再現性を評価することが可能である。今回は、これまでに測定結果が公開されている99の測定点から、サンプリングに用いたろ紙テープ（PTFE、Grass fiber）のうちCross-contamination errorが比較的小さいとされるGrass fiber を使用した71地点、及び福島第一原発近傍のPTFEを使用した1地点についてデータを精査したうえで使用した。比較に利用した72の測定点を図1に示す。

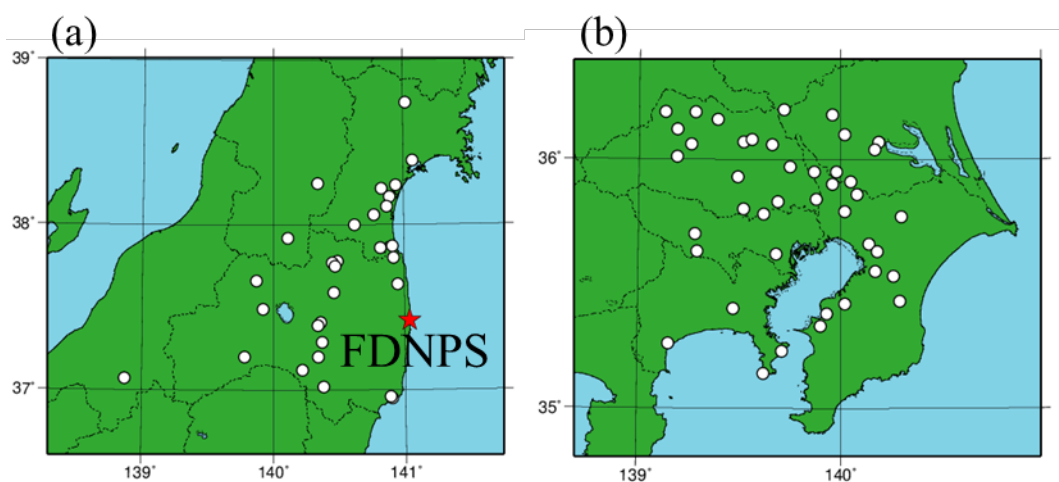


図1 環境省のSPM観測点のうち大気中のCs-137濃度の測定値を計算値との比較に用いた72地点：(a)は福島県、宮城県、山形県、及び新潟県内の地点、(b)は関東地方の地点を示す。

2) 拡散計算の不確実性の評価

昨年度の大気拡散シミュレーションの性能評価において、計算モデルやデータ同化手法が異なる組合せの拡散計算結果の観測値再現性が比較、評価された。この結果では、気象場のみの違いによっても拡散計算結果は影響を受けて異なるものとなった。この気象場の違いが拡散計算の不確かさに与える影響を詳細に解析することは重要である。また、昨年度提供した放射性物質大気

濃度・沈着量の時間空間分布データベースの作成に用いた放出源情報Katata et al. 2015²⁾は、特に事故初期の内部被ばくで重要となるI-131について、放出されたI-131のガス態と粒子態の比率（図2）を、東海村の原子力機構における環境モニタリング値（Ohkura et al., 2012⁴⁾）に基づき決めている。しかし、プルームによってはこの測定地点付近を通過していないものもあり、放出時期により異なる不確かさが存在する。また、ガス状ヨウ素の無機（I₂）／有機（CH₃I）比については、その知見が限られることから、米国原子力規制委員会の被ばく線量評価コードRASCAL 4（US NRC, 2012⁵⁾）を参考にして、無機（I₂）：有機（CH₃I）＝2:3の固定値が仮定されている。これらガス／粒子、無機／有機といった化学形の違いは、その物理化学的性状により沈着過程に影響するため、拡散計算における不確かさの要因となる。

そこで、これらの拡散計算へ入力する気象場やソースタームによる拡散計算結果の不確かさを評価するため、（1）気象場の違いによるCs-137計算値の不確かさと、（2）I-131の化学組成比によるI-131計算値の不確かさの評価を行った。（1）においては、気象モデルWRFと沈着過程を改良した拡散モデルGEARNによる計算結果のうち、気象計算において観測値のデータ同化を行わないケースと4次元変分法（4D-Var）を用いたケースを比較し、福島県および関東におけるCs-137の地表沈着量分布に対する気象場の影響を解析した。（2）においては、昨年度試作した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基本版を活用し、I-131の化学組成比を様々に変えた多数ケースの拡散計算結果を作成し、感度解析を実施した。各ケースの計算結果について、I-131の沈着量および時間積算した地上大気中濃度の空間分布と統計解析結果を比較した。計算結果の再現性の評価に用いたI-131沈着量は、平成23年度から25年度にかけて文部科学省および原子力規制庁により実施された「東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」事業（例えば原子力規制庁、2014⁶⁾）の結果に、分担研究「土壌中I-129 の分析によるI-131 土壌沈着量等の推計」（東京大学）によりデータの追加が進められているものである。比較に使用した公開データ（放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト「放射性物質の分布状況等調査によるヨウ素の放射能濃度分布」：<http://emdb.jaea.go.jp/emdb/portals/b215/>）は、2011年6月14日時点に減衰補正されている。

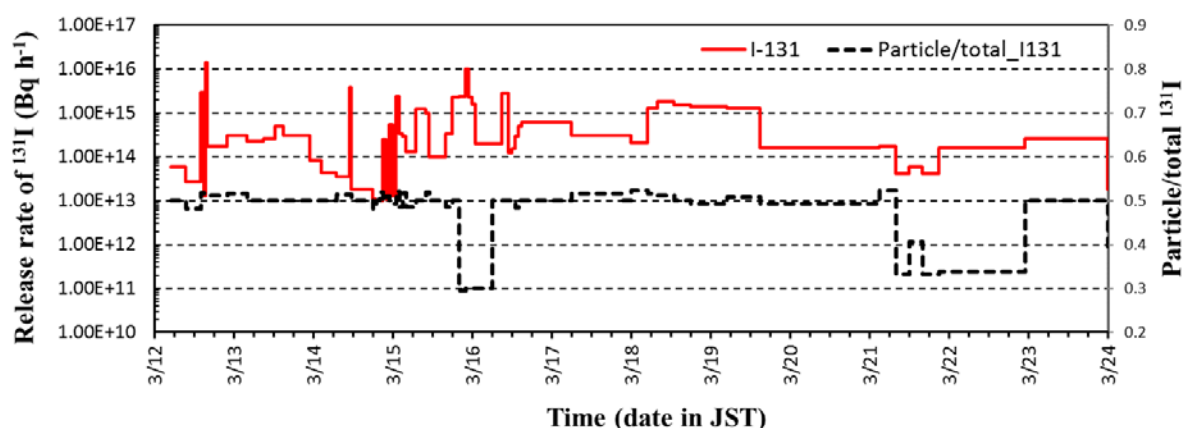


図2 ソースタームkatata et al. 2015²⁾におけるI-131の総放出率とガス態＋粒子態の合計に対する粒子態の割合の推移：粒子割合の微小変動は放出率設定ファイルに実際に設定した数値の丸め誤差

3) データベース機能の改良

昨年度試作した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の基本版について、

様々な図形作成や統計解析を行う機能を追加するなどにより高度化し、各種機能を簡便に操作可能なインターフェイスを作成した。本データベースは、放出源情報（付録1）、気象・拡散シミュレーションによる計算出力、測定データ等の格納データと、放出源情報の設定、拡散分布の解析や評価を行うデータベース解析機能、及び各種機能を操作するインターフェイスにより構成される（図3）。

昨年度の試作では、単位放出条件による大気濃度及び沈着量の時間空間分布データセットから、任意の放出源情報を設定すると、即座にその条件に基づく放射性物質の大気濃度及び沈着量を評価する「拡散分布解析機能」を開発するとともに、「放出源設定機能」、「拡散分布解析機能」、及び大気濃度及び沈着量の「結果表示機能」について、WebベースのGUIの試作版を整備した。この基本版に対して、「放出源設定機能」及び「拡散分布解析機能」の機能拡張を行い、「拡散分布評価機能」を追加することで、データベースの全解析機能を開発し、それらの処理実行をより機能的に操作可能なWebベースのGUI（付録2）を整備し、データベースを完成した。

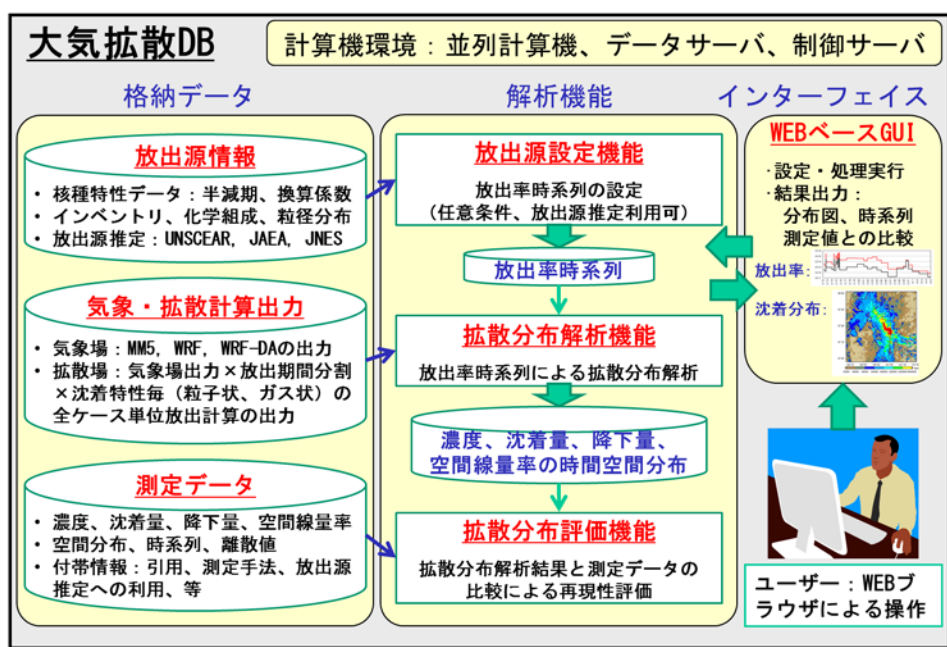


図3 大気拡散データベースの構成

（倫理面への配慮）

本研究は、放射性物質の大気拡散シミュレーションが実施内容であり、倫理面への配慮が必要な状況は発生しないと考えられる。

III 研究結果

1) 放出源情報及び拡散計算の最適化

最新気象モデル（WRF）及び高度な気象観測データ同化手法（4D-Var）を用いた気象計算、沈着過程を改良した拡散モデル（新GEARN）、及び最新の放出源情報（Katata et al. 2015²⁾）を用いた拡散シミュレーション結果を、環境省のSPM 捕集用ろ紙に付着した放射性核種分析による大気中のCs-137濃度の多地点・連続データ（Oura et al., 2015³⁾）と比較し、統計値としてFA2：ファクター2の割合（計算値が測定値のファクター2（1/2から2倍）の範囲に含まれる割合）、FA5：ファクター5の割合、FA10：ファクター10の割合、CC：相関係数を求めた（表1）。この際、プルームの通過事象を考慮して、測定データを地域・期間で分割した以下の6ケースを設定して比較を行った。

Case 1：浜通り北部、3月12～14日

Case 2：関東、3月15～16日

Case 3：福島県、3月15～16日

Case 4：浜通り北部、3月18～19日

Case 5：東北南部、3月20～21日

Case 6：関東、3月20～21日

この比較における計算と測定との差異を低減するように、放出源情報の修正を試行錯誤的に繰り返し、以下の修正結果を得た。

Case 1：3月12日14～15時の高放出率の期間を削除

Case 2, 3：3月15日午前の高放出率の期間を、7～11時から8～13時に変更

Case 4：3月18日21時～19日15時の期間の放出率を1/20に低下

Case 5, 6：3月20日0時～10時、3月20日10時～20時、3月20日20時～21日6時の各期間の放出率をChino et al., 2016⁷⁾に基づき、それぞれ1/4、1.5、及び1.3倍に変更

この修正前後のCs-137放出率の時間変化を図4に示す。

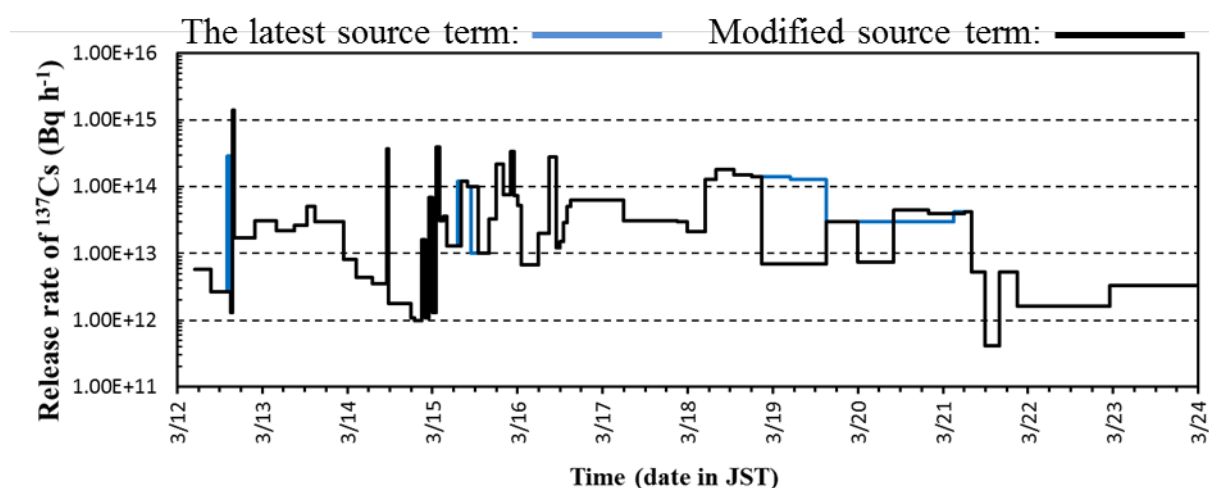


図4 Katata et al. 2015²⁾ の放出源情報（青線）と修正放出源情報（黒線）のCs-137放出率時間変化

この修正放出源情報を用いた拡散シミュレーション結果と大気中のCs-137濃度の多地点・連続データ（Oura et al., 2015³⁾）の比較による統計値を表2に示す。表1と表2を比較すると、多くのケースで統計値のスコアに改善が見られる。以下、各測定地点の計算値の改善について、福島県浜通り北部のケース（Case 1及びCase 4）について、図5～図8に具体的に示す。

図5及び図6は、Case 1（浜通り北部、3月12～14日）における放出源情報修正前後の計算値と測定値の大気中のCs-137濃度時系列の比較である。放出源情報を修正する前の計算値は、濃度上昇の開始時刻が早く過大評価している。放出源情報では、この期間に発生した1号機のベント及び水素爆発を考慮して、放出率が增大する期間を求めている。ここでは、ベントに関連する高放出率期間（3月12日14～15時）について、原発近傍での空間線量率上昇は主に希ガス（Xe-133）によるもので、Cs-137の放出は少なかった可能性を考えて、この高放出率期間を削除した。一方、水素爆発に関連するCs-137の高放出率については、希ガスの影響のない地表沈着した放射性核種からの空間線量率を用いて推定しており、大きく変更することはできないと考え、修正は行わなかった。この修正により、計算値の濃度上昇の開始時刻と過大評価に改善は見られたが、十分ではなかった。計算による濃度上昇の開始時刻を測定値に一致させるには、1号機の水素爆発に関連する高放出率期間を3時間以上遅くする必要があるが、現状で原発近傍の空間線量率測定値を再現していることから、放出源情報以外の要因を検討すべきである。この期間のプルームの動きに蛇行が見られることから、測定された濃度変動は、放出率の変動によるものではなく、プルームが横切ることによって生じた可能性が高い。この変動を再現するには、気象場の再現性について検討が必要である。

図7及び図8は、Case 4（浜通り北部、3月18～19日）における放出源情報修正前後の計算値と測定値の大気中のCs-137濃度時系列の比較である。放出源情報を修正する前の計算値は、3月18日21時から19日15時にかけて、濃度上昇の出現時刻が異なり過大評価している。特に、3月19日6時頃に測定にはない極端に過大な濃度上昇が見られるが、線量評価において重大な過大評価をもたらすため、改善が必要である。ここでは、3月18日21時～19日15時の期間の放出率を1/20に低下することで、図8に示すように計算値の過大評価を改善したが、濃度上昇の出現時刻の差異を修正することはできなかった。これは、Case 1の場合と同様に、気象場の再現性に問題があると考えられる。今後の課題として、気象場も含めて拡散計算を最適化する必要がある。

表1 放出源情報 (Katata et al. 2015²⁾) を用いた拡散シミュレーション結果と大気中のCs-137濃度の多地点・連続データ (Oura et al., 2015³⁾) の比較による統計値：(FA2：ファクター2の割合、FA5：ファクター5の割合、FA10：ファクター10の割合、CC：相関係数)

ケース：地域・期間	FA2 (%)	FA5 (%)	FA10 (%)	CC
Case 1：浜通り北部、3月12～14日	12.0	24.0	42.0	-0.20
Case 2：関東、3月15～16日	16.2	37.3	49.0	0.19
Case 3：福島県、3月15～16日	13.5	35.4	44.8	0.27
Case 4：浜通り北部、3月18～19日	11.4	25.7	34.3	-0.09
Case 5：東北南部*、3月20～21日	13.0	34.1	42.2	0.22
Case 6：関東、3月20～21日	22.7	51.4	66.3	0.69
全ケース	17.8	41.7	54.3	0.08

* 東北南部：福島県、宮城県、山形県

表2 表1と同様、ただし修正放出源情報を用いた拡散シミュレーション結果との比較

ケース：地域・期間	FA2 (%)	FA5 (%)	FA10 (%)	CC
Case 1：浜通り北部、3月12～14日	12.0	26.0	48.0	-0.16
Case 2：関東、3月15～16日	16.2	37.3	49.0	0.19
Case 3：福島県、3月15～16日	15.6	34.4	46.9	0.27
Case 4：浜通り北部、3月18～19日	14.3	34.3	45.7	0.33
Case 5：東北南部*、3月20～21日	12.4	28.1	39.5	0.23
Case 6：関東、3月20～21日	24.1	52.0	66.9	0.71
全ケース	18.3	41.7	54.7	0.26

* 東北南部：福島県、宮城県、山形県

**Case 1: 浜通り北部、3月12～14日
放出率修正前**

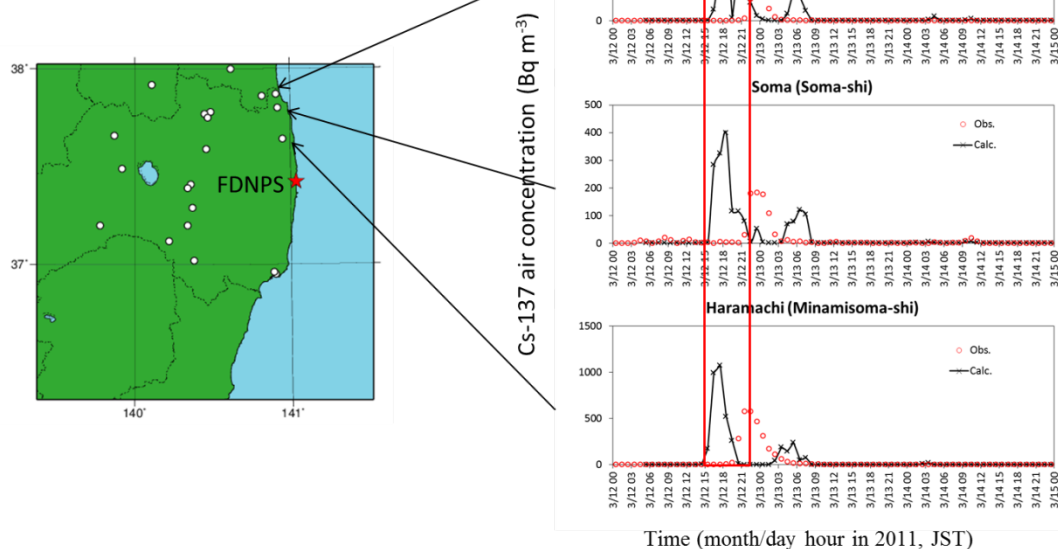


図5 浜通り北部、3月12～14日における大気中Cs-137濃度時系列の比較：黒線はKatata et al. 2015²⁾の放出源情報を用いた計算値、赤丸は環境省SPM観測のろ紙分析により得られた測定値（Oura et al., 2015³⁾）を示す。

**Case 1: 浜通り北部、3月12～14日
放出率修正：
3月12日14～15時の放出率を低下**

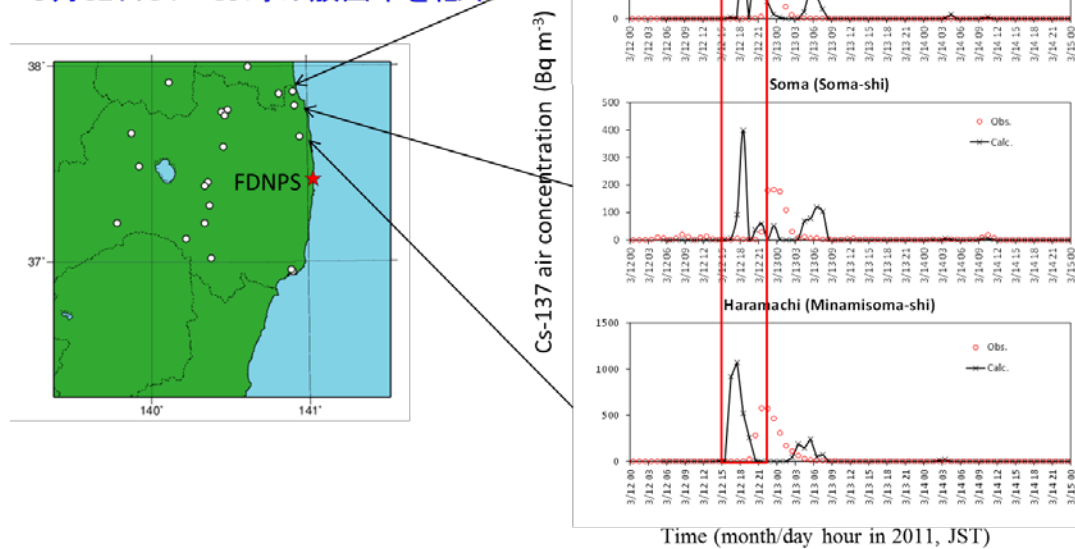
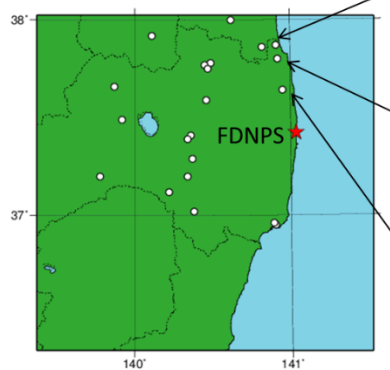


図6 図5と同じ：計算値は修正放出源情報を使用

**Case 4: 浜通り北部、3月18～19日
放出率修正前**



Cs-137 air concentration (Bq m⁻³)

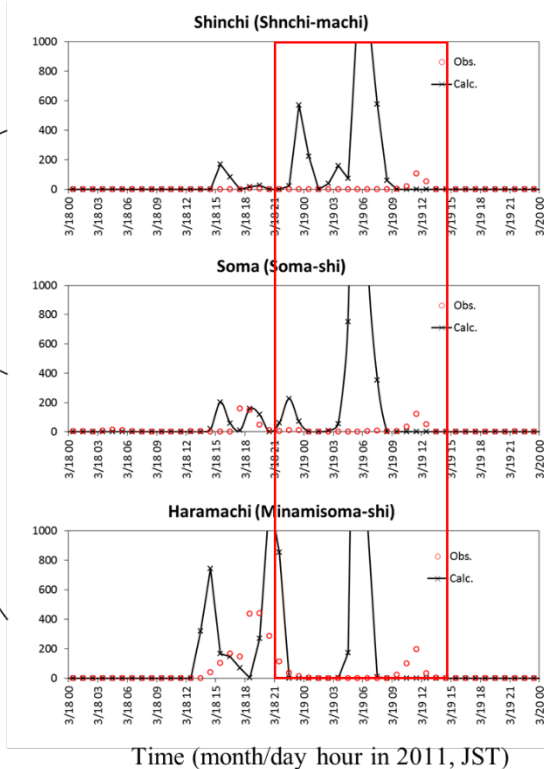
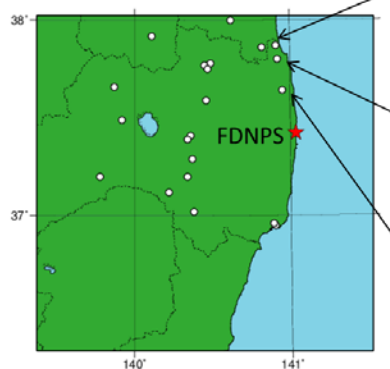


図7 浜通り北部、3月18～19日における大気中Cs-137濃度時系列の比較：黒線はKatata et al. 2015²⁾の放出源情報を用いた計算値、赤丸は環境省SPM観測のろ紙分析により得られた測定値（Oura et al., 2015³⁾）を示す。

**Case 4: 浜通り北部、3月18～19日
放出率修正：
3月18日21時～19日15時の
放出率を1/20に低下**



Cs-137 air concentration (Bq m⁻³)

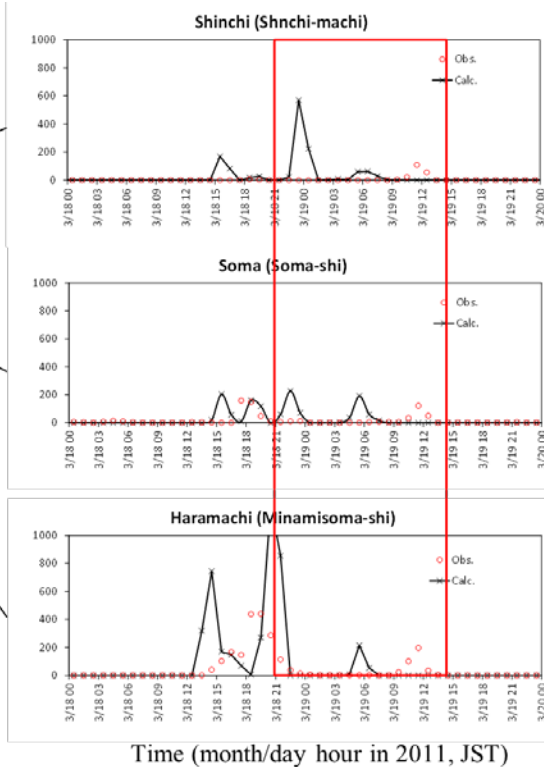


図8 図7と同じ：計算値は修正放出源情報を使用

2) 拡散計算の不確実性の評価

(1) 気象場の違いによるCs-137計算値の不確かさ

気象モデルWRFと沈着過程を改良した拡散モデルGEARNによる計算結果のうち、気象計算において観測値のデータ同化を行わないケース（以下、ORIGINALと称す）と4D-Varを用いたケース（以下、4DVARと称す）を比較し、福島県および関東におけるCs-137の地表沈着量分布に対する気象場の違いによる影響を解析した。4DVARでは、①福島第一原発北西部及び南部、②茨城県北部沿岸及び県央部、及び③福島県中通り南部から栃木県北部で、Cs-137の地表沈着量の再現性が向上した（図9、(a)の図中に示した1～3の領域が①～③に対応する）。以下、これらの再現性の向上をもたらした気象要素を抽出し、気象場の違いによる拡散計算の不確実性について評価した結果を記す。

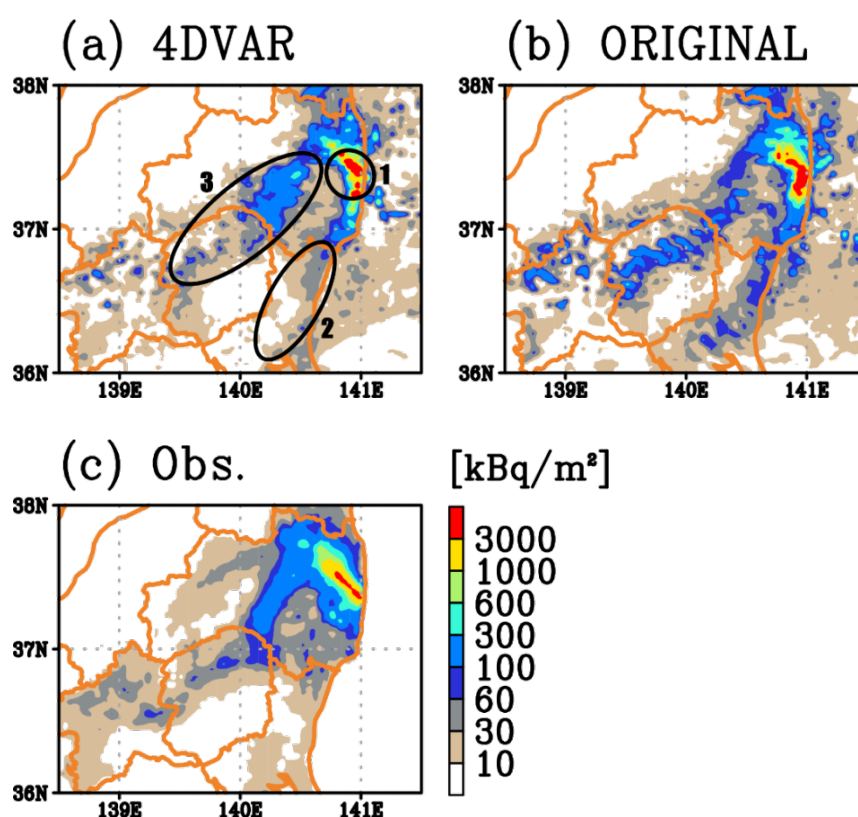


図9 Cs-137の沈着量（2011年3月12～31日の積算）：(a) 4DVAR、(b) ORIGINAL、(c) 航空機サーベイの結果を示す。(a)の黒線で囲まれた1～3の領域は、4DVARでCs-137の積算沈着量の再現性の向上がみられた領域を示す。

① 福島第一原発北西部及び南部

福島第一原発北西部及び南部でのCs-137の主要な沈着は、3月15日の夜から3月16日の未明に形成された（図10、図11）。同時間帯において、4DVARとORIGINALの計算結果の降水量分布に差異は見られなかったが、放出点近傍の風向に特徴的な差異が見られた。図12に東京電力福島第二原子力発電所（以降、福島第二原発と称す）における風向の時系列を示す。4DVAR（図12の赤線）では、3月15日の21時から同日の23時までに、福島第二原発の120m高度の風向（以下、120m風向と称す）が南東風から東風へと変化していた。この風向の時間変化は観測された120m風向（図12

の×印)の時間変化とよい一致を示す。3月16日の0時に、4DVARの福島第二原発の120m風向は東風から北風へ変化した。一方、ORIGINAL(図12の青線)では、3月15日の23時までには、福島第二原発の120m風向は南東風から北風へ変化していた。Katata et al. 2015²⁾では、この風向の差がみられた時間帯に、福島第一原発からCs-137の大規模な放出があったことが推定されている(図4)。つまり、ORIGINALでは、高濃度のCs-137を含む大気塊の南向きの輸送が、実現象よりも1時間以上早く始まった可能性が考えられる。そのために、福島第一原発の南部において、観測結果を過大評価するCs-137の地表沈着が形成された。一方、4DVARでは、大気塊の南向きの輸送の時系列が観測のそれと整合的であったために、福島第一原発北西部および南部のCs-137の地表沈着量の再現性が向上した。このように、放出点近傍では、風向変動のタイミングに1時間程度の差異があるだけでも、拡散計算に大きな影響がある。

② 茨城県北部沿岸及び県央部

茨城県北部沿岸及び県央部でのCs-137の沈着は、3月21日の午前～正午に形成された(図13)。茨城県北部(ここでは北緯36.5度以北の茨城県と定義)の沿岸では、3月21日の午前～正午に4DVARとORIGINALの降水量に明瞭な差異は見られなかった。一方、ORIGINALでは、高濃度のCs-137を含む空気塊の一部が茨城県北部の上空を通過したのに対して、4DVARでは、高濃度のCs-137を含む空気塊は主に茨城県北部の洋上を通過していた。この空気塊の通過場所の違いが、4DVARでの茨城県北部沿岸でのCs-137の沈着量の減少に影響したと考えられる。次に茨城県央部では、4DVARの積算降水量はORIGINALの積算降水量と比較して1/2程度に減少していた。4DVARでの高濃度のCs-137を含む空気塊は茨城県央部上空を通過していたものの、ORIGINALよりも狭い範囲に分布していた。この降水量の減少と高濃度のCs-137を含む空気塊の分布の違いが、4DVARでの茨城県央部でのCs-137の沈着量の減少に影響したと考えられる。以上のように、4DVARでは、茨城県北部沿岸及び県央部でのCs-137の地表沈着量がそれぞれ減少したことで、Cs-137の地表沈着量の再現性が向上した。

③ 福島県中通り南部から栃木県北部

福島県中通り南部～栃木県北部でのCs-137の主要な沈着は、3月15日の夕方に形成された。この期間に、高濃度のCs-137を含む空気塊が茨城県側から福島県側へ北上していたことは4DVARもORIGINALも共通であったが、両者には以下の違いが見られる。ORIGINALにおける、栃木県北部(福島中通り南部)のCs-137の地表沈着量の観測値の過大(過小)評価(図9(b))は、高濃度のCs-137を含む空気塊が主に栃木県北部の降水帯を通過したことが原因と考えられる(図14(b)、図15(b))。一方、4DVARでは、高濃度のCs-137を含む空気塊は栃木県北部の降水帯を通過せず、北上した際に空気塊の一部が福島中通り南部の降水帯を通過したために、福島中通り南部にCs-137の沈着が形成され(図14(a)、図15(a))、福島県中通り南部～栃木県北部でのCs-137の地表沈着量の再現性が向上した。

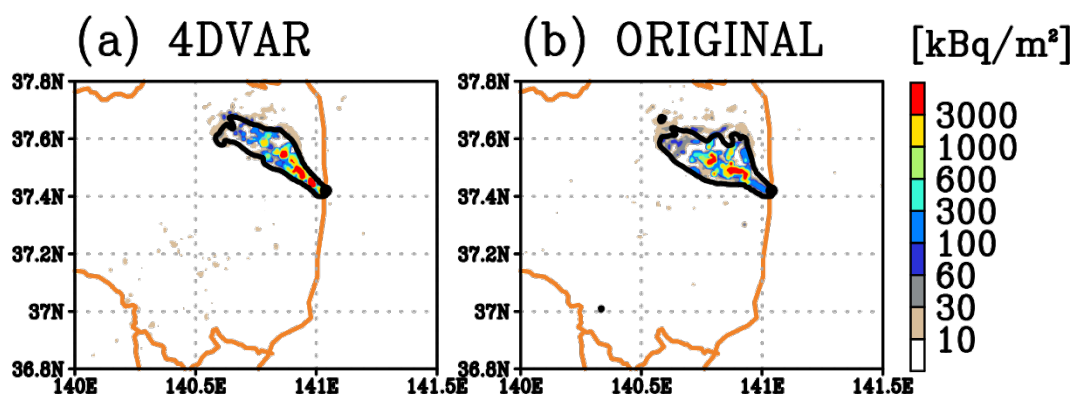


図10 3月15日20～21時のCs-137の地表沈着量（陰影）と3月15日21時の鉛直積算したCs-137の大気中濃度（黒線、 $100\text{Bq}/\text{m}^3$ ）：(a)と(b)はそれぞれ4DVARとORIGINALの結果を示す。

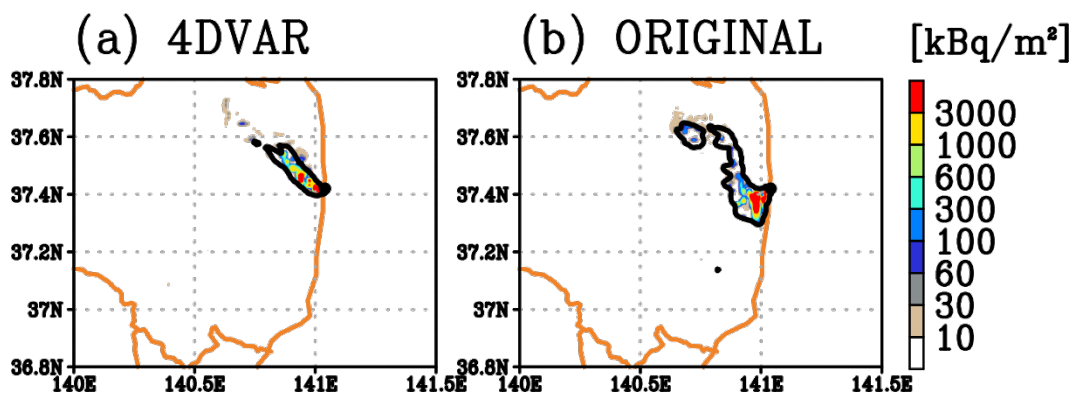


図11 図10と同じ。ただし、3月15日23～3月16日0時のCs-137の地表沈着量と3月16日0時の鉛直積算したCs-137の大気中濃度。

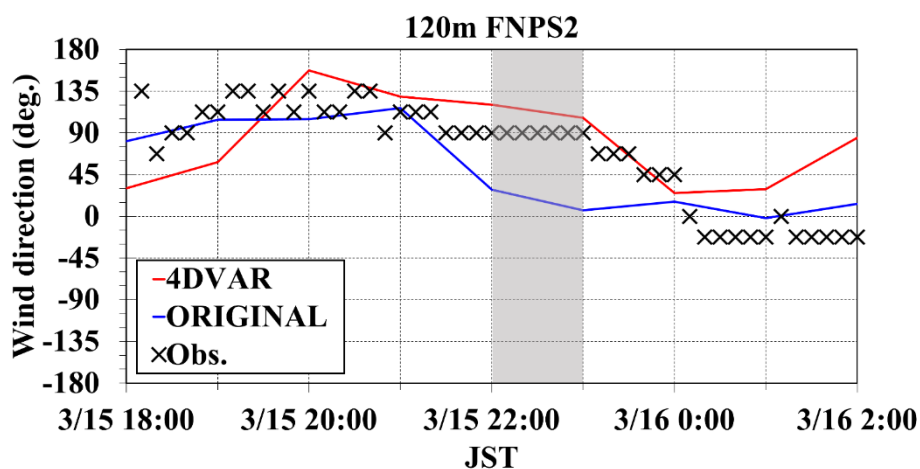


図12 福島第二原発における、地上120mの風向の時系列。0°は北風、90°は東風をそれぞれ示す。グレーのハッチはCs-137の放出率が大きかった時間帯を示す（図4）。

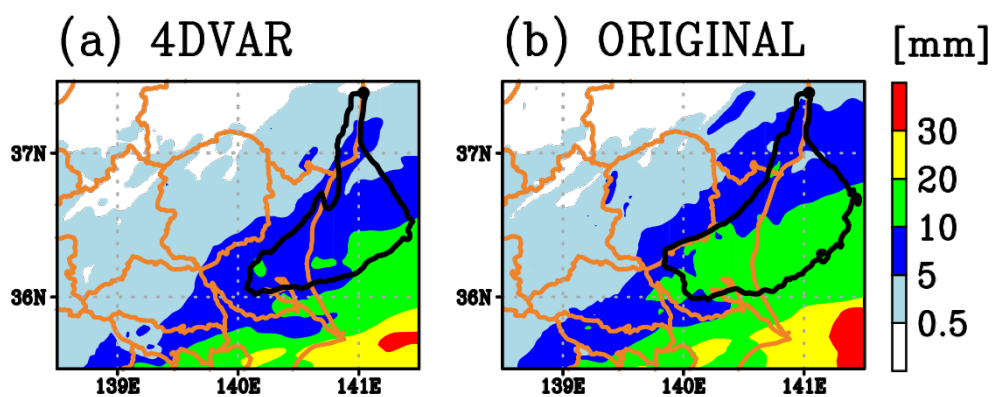


図13 3月21日7時～12時の積算降水量（陰影）と3月21日12時の鉛直積算したCs-137の大気中濃度（黒線、 100Bq/m^3 ）。(a)と(b)はそれぞれ4DVARと ORIGINALの結果を示す。

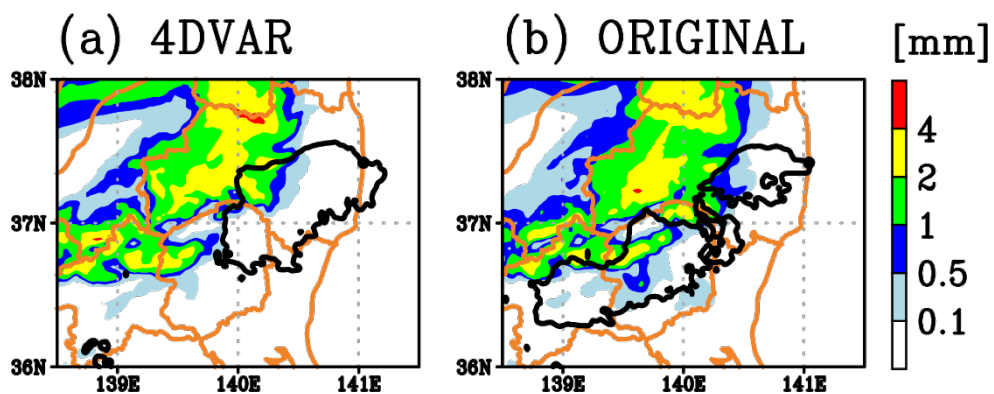


図14 図13と同じ。ただし、3月15日16時～17時の積算降水量と3月15日17時の鉛直積算したCs-137の大気中濃度。

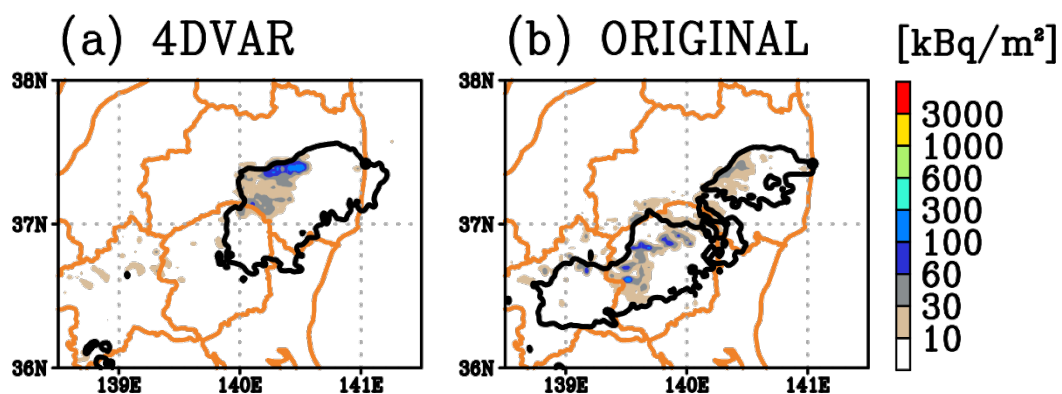


図15 図10と同じ。ただし、3月15日16～17時のCs-137の地表沈着量と3月15日17時の鉛直積算したCs-137の大気中濃度。

(2) I-131の化学形組成比によるI-131計算値の不確かさ

I-131化学組成比の感度解析に用いた拡散計算結果は、最新気象モデル（WRF）及び高度な気象観測データ同化手法（4D-Var）を用いた気象計算と、沈着過程を改良した拡散モデル（新GEARN）によるものである。水平解像度は1kmであり、地上第1層の幅は約20mである。I-131の総放出率としては、最新の放出源情報（Katata et al. 2015²⁾）を用いた。I-131化学形組成比による感度実験ケースとして、以下の8ケースを設定した。

Case1 : Katata et al. 2015（ガス/粒子比は時間変動（図2）、無機ガス：有機ガス=2:3で固定）	
Case2 : ガス：粒子=1:1、無機ガス：有機ガス=2:3（無機ガス：有機ガス：粒子=2:3:5）	
Case3 : ガス：粒子=1:1、全て有機ガス（無機ガス：有機ガス：粒子=0:5:5）	
Case4 : ガス：粒子=1:1、全て無機ガス（無機ガス：有機ガス：粒子=5:0:5）	
Case5 : 全てガス、無機ガス：有機ガス=2:3（無機ガス：有機ガス：粒子=4:6:0）	
Case6 : 全て無機ガス（無機ガス：有機ガス：粒子=10:0:0）	
Case7 : 全て有機ガス（無機ガス：有機ガス：粒子=0:10:0）	
Case8 : 全て粒子（無機ガス：有機ガス：粒子=0:0:10）	

上記の各ケースの計算結果のI-131沈着量の空間分布を図16に示す。Case1～Case4の結果の比較では、顕著な差は見られないが、Case4は、全体の半分を占めるガスの全量を、有機ガスに比べて沈着しやすい無機ガスとしたことにより、沈着量が全体的に少し増加している。Case5、6、7は粒子態がなく全てガス態と仮定した結果であるが、福島県中通りと栃木県に大きな沈着分布が見られず、サイト近傍に放射状の沈着量分布が見られる。これは、主に乾性沈着によるものであり、湿性沈着の計算で用いる洗浄係数が、粒子態に比べてガス態では小さいためと考えられる。Case7ではさらにガス態の全量を乾性沈着速度が他に比べて極めて小さい有機ガスとしたため、沈着量の高い場所が非常に少ない。全量を粒子態のみとしたCase8では、大部分が湿性沈着により形成された福島県中通りと栃木県において沈着量が増加した結果となった。これは粒子態に対する洗浄係数がガス態に比べて大きいことによるものであると考えられる。

表3に、これら8ケースのI-131沈着量計算値の測定値との統計解析結果を示す。図17は散布図である。この統計解析では、測定値として各地点最大5ヶ所のサンプルによる推定結果の平均値を用いた。同一計算セル内に複数の測定値が存在する場合は平均化し、これと測定地点を含む計算セル値を比較した。比較したデータ点数は764点である。統計指標は、III-1)で使用したものに加えて、計算値の測定値からの統計的な誤差を評価するFractional Bias（式（1））を使用した。

$$FB = 2(\overline{C} - \overline{O}) / (\overline{C} + \overline{O}) \quad (1)$$

ここでCは計算値、Oは測定値である。Case1～Case4およびCase8の比較では、FA2、FA5、FA10、CCにおいて顕著に大きな違いは見られないが、Case4およびCase8のFBが他に比べてやや大きい。これは空間分布の比較で見られた沈着量の増加と対応している。Case2～4のガス態と粒子態を同量としたケース間において、ガス態の無機：有機の比率の違いの影響は顕著には見られない。Case5～7の全量をガス態と仮定（粒子態なし）した場合、CCを除いて顕著に統計値が低い。これは空間分布の比較や散布図の特徴とも対応している。

図18に、時間積算したI-131地上大気中濃度計算値の空間分布を示す。Case1～Case4の比較では、

空間分布に大きな違いは見られない。Case5～Case7の全量ガスと仮定したケース間について無機：有機の比率の違いの影響を見ると、Case7で茨城県北部や福島県中通りで濃度が比較的大きい。これは全量を有機ガスとしたために沈着量が減った影響と考えられる。Case8では特にサイト北西方向および福島県中通りで濃度が小さい。これは全量粒子態としたことにより湿性沈着が増加した影響と考えられる。全体的に、地表沈着量と比較するとケース間の差は小さい結果となった。

表3 I-131沈着量の統計解析結果

Case	I ₂ : CH ₃ I:particle	FA2 (%)	FA5 (%)	FA10 (%)	CC	FB
1	Katata et al. 2015	28.5	64.4	82.1	0.54	-0.20
2	2:3:5	30.4	66.5	83.4	0.53	0.06
3	0:5:5	25.7	58.5	78.1	0.52	-0.04
4	5:0:5	36.0	72.1	86.3	0.54	0.19
5	4:6:0	9.6	25.9	45.5	0.64	-1.28
6	10:0:0	18.8	49.2	65.7	0.64	-0.65
7	0:10:0	0.5	2.6	5.0	0.32	-1.90
8	0:0:10	40.2	71.6	84.8	0.52	0.62

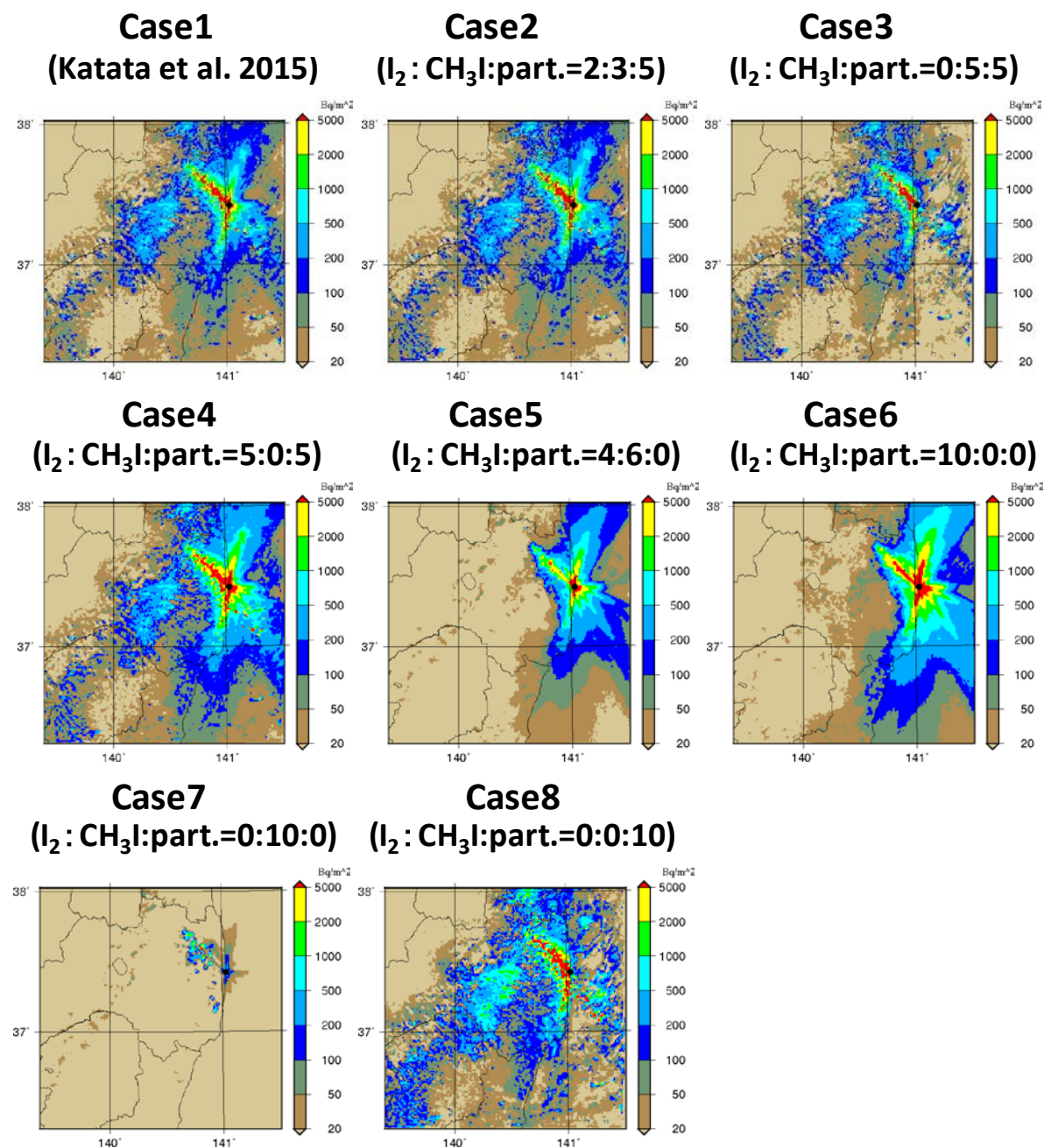


図16 I-131沈着量計算値の空間分布：2011年6月14日時点に減衰補正

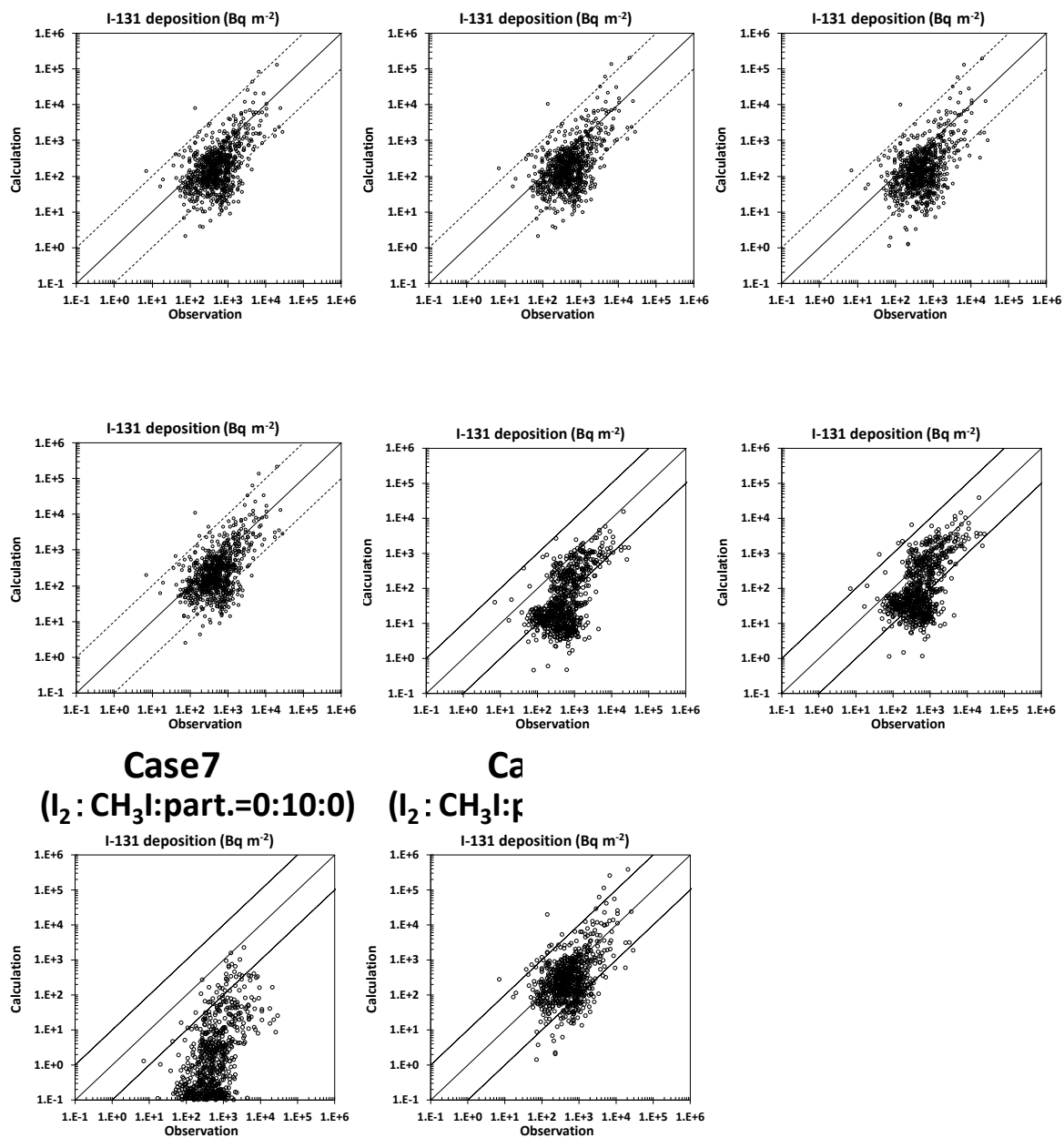


図17 I-131沈着量の計算値と測定値の散布図：横軸が測定値、縦軸が計算値。実線は1 : 1、破線はファクター10を示す。

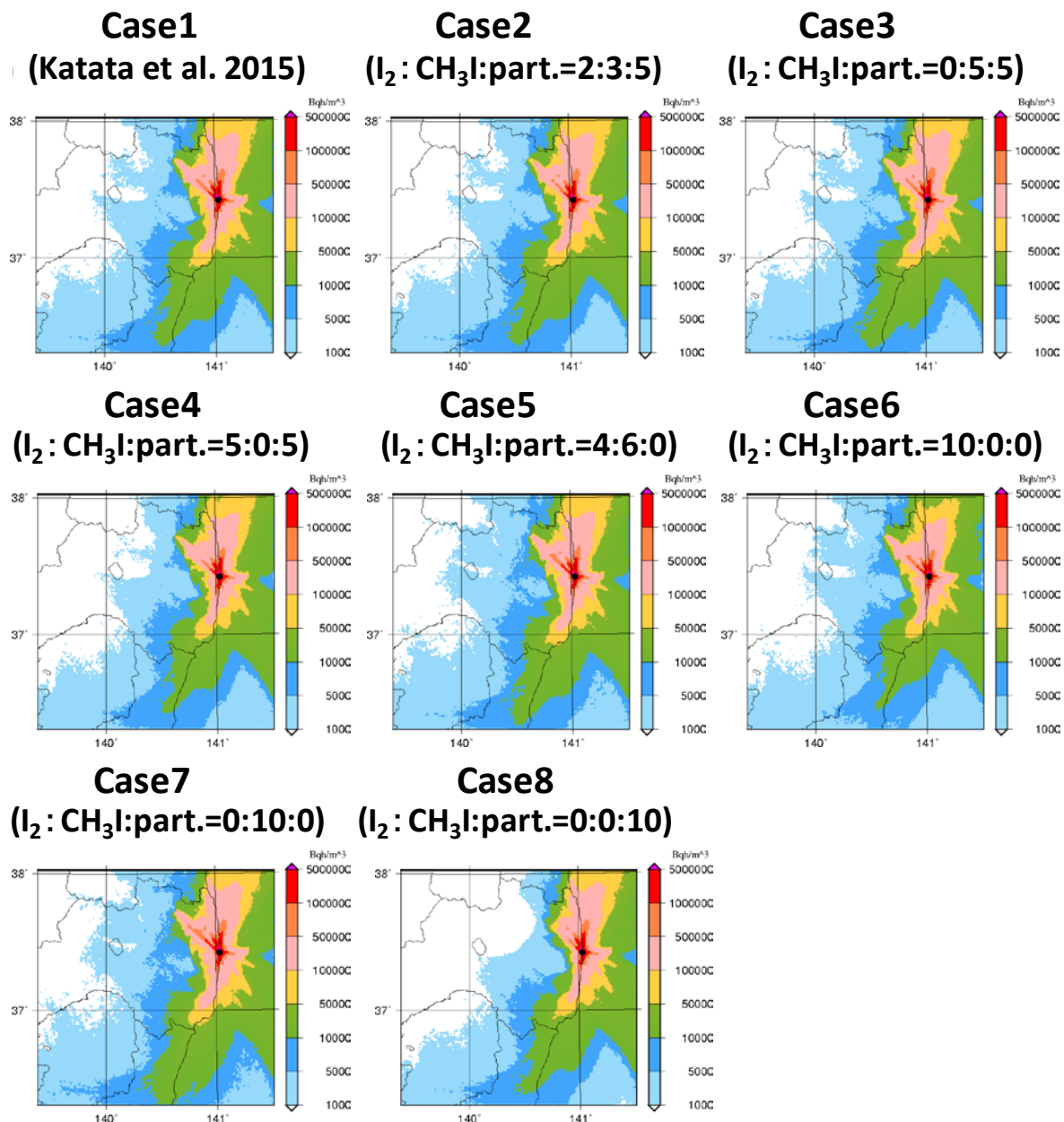


図18 時間積算したI-131地上大気中濃度計算値の空間分布 (2011年3月12日～31日の積算)

3) データベース機能の改良

(1) データベース解析機能の改良

①「放出源設定機能」の機能拡張

昨年度までに試作したデータベース基本版では、放出条件ファイル作成時に選択可能な核種は7種に固定されていた。これを、別途用意したシステム用核種テーブルファイルに設定した候補からWebベースのGUIで任意に選択可能とした。核種テーブルファイルには、希ガス系核種15種、ヨウ素系核種7種3形態（ガス状2種（化学形： I_2 及び CH_3I ）及び粒子状）、その他の粒子状核種37種及び非放射性物質ガス1種が記載されている。また、データベース基本版では、シャットダウン時刻は固定され、設定する放出率は各時刻における放出率に固定されていた。これを、任意のシャットダウン時刻を設定可能とし、シャットダウン時刻換算の放出率と各時刻における放出率のいずれかを指定して設定できるように機能を拡張した。

②「拡散分布解析機能」の機能拡張

データベース基本版では、放出条件ファイルに記載されている1つの核種について、1つの出力変数のみを対象とした放出率適用データベースを作成するようになっていた。この際、大気中濃度の高度は、最下層のみとしている。これを、今年度の機能拡張では、複数核種、複数出力変数、複数高度の一括処理を可能とするとともに、大気中濃度の初期時刻からの時間積算濃度とヨウ素系核種については3形態の結果を合算した大気中濃度及び地表沈着量を放出率適用データベースに格納する機能を追加した。また、地表沈着量については、単位放出データベースの対象期間以降でも、指定する任意の時刻までの放射性壊変を補正した地表沈着量を作成し、放出率適用データベースに格納する機能についても追加した。さらに、計算条件（気象場、領域）の異なる複数の単位放出データベースから選択可能とする機能を追加した。加えて、作成した放出率適用データベースと放出条件ファイルをパッケージ化し、クライアント端末の指定場所へダウンロードする機能を追加した。

③「結果表示機能」の機能拡張

基本版の「拡散分布解析機能」で作成した図の表示機能は、単一の結果のみとなっていたが、例えば地表沈着量と大気中濃度といった異なる2つの結果を並べて表示できる機能を追加した（図19）。作成時の対象期間と出力間隔が同一であれば、図は時系列順にコマ送りでの表示と動画による表示が可能となっている。

④「拡散分布評価機能」の追加

新たに、拡散分布解析機能で作成した放出率適用データベースを評価するために、計算値と実測値との比較を行う機能を追加した。使用する実測値は、航空機モニタリングによるCs地表面沈着量及びSPMろ紙分析による放射性セシウムの大気中濃度測定値である。この機能を使う際には、実測値と比較を行う放出率適用データベースに、セシウムの計算結果が必要となる。実測値として航空機モニタリングによるCs地表面沈着量を選択した場合、実測値及び計算値の沈着量分布図、散布図及び統計値（ファクター2、ファクター5、ファクター10、相関係数、Normalized Mean Square Error (NMSE)、Fractional Bias (FB)、Figure of Merit in Space (FMS)）を表形式で表示する（図20）。SPMろ紙分析による放射性セシウムの大気中濃度測定値を選択した場合、計算値の水平分布に測

定値をプロットした図、測定地点ごとの時系列グラフ及び統計値（ファクター2、ファクター5、ファクター10、相関係数、Normalized Mean Square Error (NMSE)、Fractional Bias (FB)）を表形式で表示する（図21）。測定地点については、複数地点を選択することができる。また、作成した図及び統計値は保存でき、別途、表示する機能を有する。加えて、放出条件を変更しながら拡散分布評価機能の対象となるデータを繰り返し作成するのに要する時間を短縮するために、実測値と放出条件ファイルのみ指定することで、拡散分布解析と拡散分布評価を一括して実行できる機能も追加した。

(2) データベース動作確認試験

開発したデータベースの動作確認試験を実施した。基本版で作成した放出率適用データベースを基に、計算値と実測値との比較を行った結果と追加した「拡散分布評価機能」による比較結果が一致することを確認した。以上により、本データベースが正常に動作し、それにより得られる結果が妥当であることを確認した。

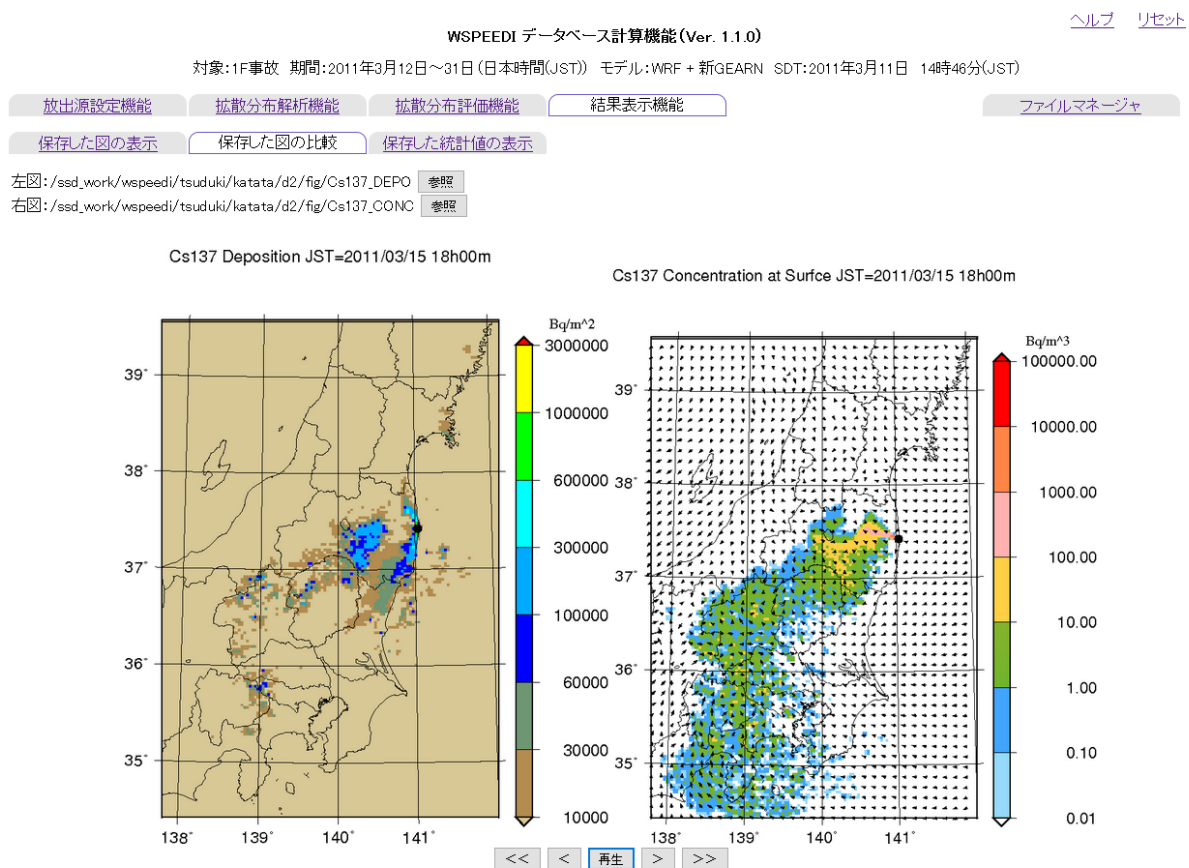


図19 2つの図を並べて表示するGUI

測定値:航空機 d2

計算値:/ds_work/jaea/wspeedi/nagai_test/Katata2015/GEARN_d2_20110331150000.nc

対象核種: Cs137

出力変数: 総沈着量[DEPO]

色設定: DepoCs137_FKSM_MEXTAir.cpt

グラフ範囲: 最小: 1E+2 最大: 1E+8

散布図:

種類: 丸 色: 赤 サイズ: 0.5

ファクター: なし

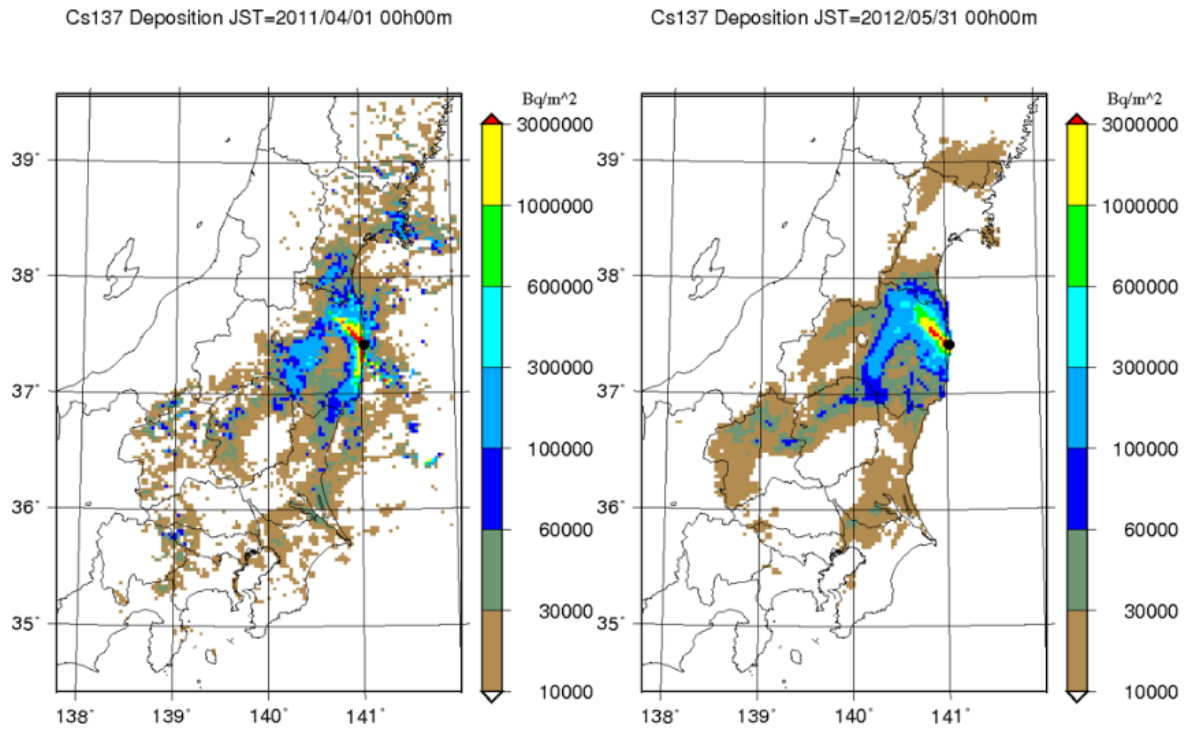
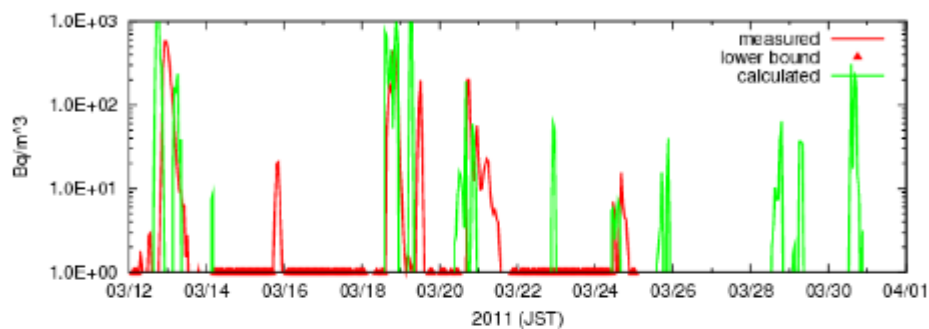


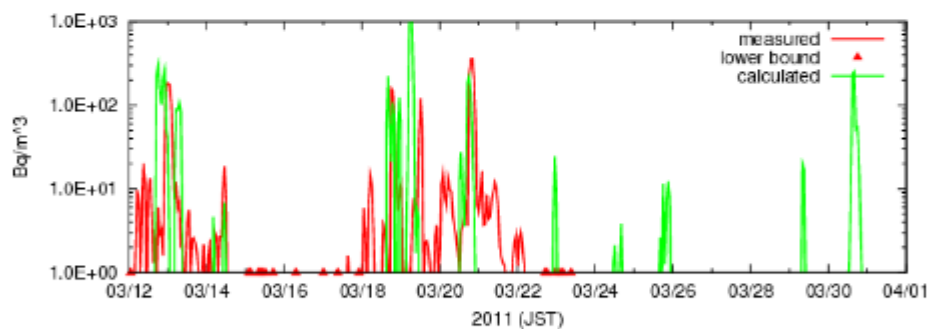
図20 航空機モニタリングによるCs地表面沈着量との比較画面

測定値: SPM Cs137
 計算値: /ds_work/jaea/wspeedi/nagai_test/Katata2015
 対象核種: Cs137
 出力変数: 大気中濃度[CONC]
 高度: 0m
 出力期間: 2011/3/12 ~ 2011/4/1

Haramachi,lon140.9499969,lat37.6399994,CONC,0m



Soma,lon140.9199982,lat37.7999992,CONC,0m



Shinchi,lon140.9100037,lat37.8699989,CONC,0m

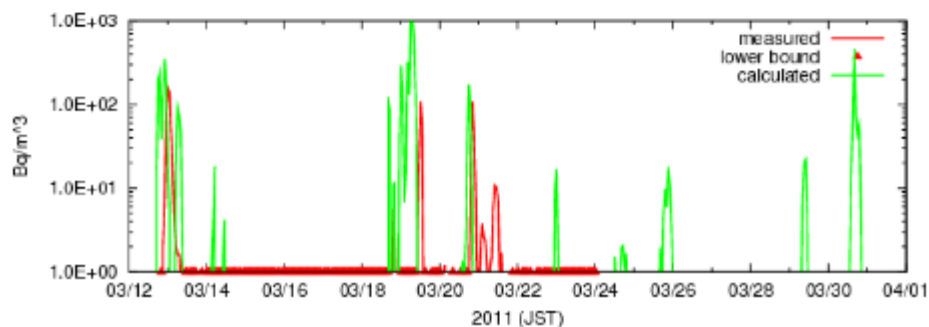


図21 SPMろ紙分析による放射性セシウムの大気中濃度測定値との比較画面

IV 考察

放出源情報及び拡散計算の最適化は、他機関の分担研究による被ばく線量推計のために、最終的な計算結果を本年度前半で作成する必要があったこと、データベースの「拡散分布評価機能」が開発途上で利用できなかったことなど、時間的及び技術的な制約から解析が限定的であった。放出源情報修正については、試行ケースを十分に増やすことができなかったため、被ばく評価上重要となるプルーム通過の再現性に着目し、陸上にプルームが流れた期間に限定し、放出量推定の確度が高い部分や根拠のある変動については固定し、それ以外の放出率を変更するようにした。また、比較するデータは、プルーム通過の再現性の評価に適したSPMろ紙分析によるCs-137濃度時系列データだけを用いることとした。今後、開発したデータベースの解析機能を活用するとともに、客観的な最適化手法を開発し、放出源情報と拡散計算の最適化をより多くの測定データを用いて総合的に実施する必要がある。ただし、気象場の再現性に問題があり放出率の修正だけでは測定値を再現できない事例もあったことから、客観的な手法により放出率の修正を行うと非現実的な修正結果となる場合も想定される。気象場計算の再現性向上のために、これまでは気象観測データを気象計算に同化する手法を高度化することで対応してきたが、今回の解析で問題となった地点は震災の影響で気象観測データが得られていないため、データ同化手法によるこれ以上の改善の可能性は低い。

そこで、今後の課題として、様々な環境モニタリングデータから気象場の修正も含めた放出源情報と拡散計算の最適化を行う手法を検討する必要がある。この手法開発に適用可能な気象シミュレーション技術として、アンサンブル予報が考えられる。アンサンブル予報は、条件が少しずつ異なる多数の予報計算を行い、その平均やばらつきなどの統計値を利用して、最も起こりやすい現象と不確実性を評価する手法であり、台風予報や中長期予報に活用されている。この手法を応用し、アンサンブル気象計算のそれぞれの気象場を用いて大気拡散計算を実施し、放射性物質や放射線の環境モニタリングデータを最も再現する気象場を特定することで、気象場と拡散計算を同時に最適化することが可能になると考えられる。本研究で開発したデータベースを活用した研究開発の展開として、この解析手法の開発を検討していきたい。

また、拡散計算の不確実性の評価においては、I-131の化学形組成比によるI-131計算値の不確かさについて、組成比を変更する感度解析を実施したが、実測データと核種組成比に関する情報の不足により、十分な検討を行うことができなかった。今回計算結果と比較した環境省のSPM捕集用ろ紙に付着した放射性核種分析による大気中の放射性核種濃度の多地点・連続データについては、Cs-134、Cs-137だけでなく、I-129の分析が進められており、それに基づくI-131の濃度データがまとまりつつある。また、炉内の事故進展解析と環境測定データに基づく拡散解析の融合により、放出源情報や拡散挙動のさらなる精緻化を目指す取り組みが行われている。これらの情報を活用することにより、放出源情報における放出量と核種組成の時間推移を厳密に設定できることが期待される。これらの新規データ及び核種組成に関する情報は、上記気象場と拡散計算を同時に最適化する手法においても非常に有効なデータとなる。

V 結論

東京電力福島第一原子力発電所の事故時に放出された放射性物質による住民の被ばく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の構築において、以下の成果を得た。

- 1) 昨年度試作したデータベース基本版を活用して、環境省SPMろ紙分析による大気中のCs-137濃度の多地点・連続データとの比較により、放出源情報及び拡散計算の最適化を行った。最適化した拡散計算結果は、他機関の分担研究による最終的な線量評価の基礎データとして利用された。
- 2) 拡散計算へ入力する気象場やソースタームによる拡散計算結果の不確かさの評価として、気象場の違いによるCs-137計算値への影響の分析と、放出源情報のI-131化学形組成比の変更によるI-131計算値への影響の感度解析を行い、拡散計算結果の不確実性の要因と程度を整理した。
- 3) データベースの解析手法、ユーザーインターフェイス等の機能を改良し、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構築を完了した。

以上により、本研究で目標とする「最新の知見を反映した大気拡散シミュレーションによる事故時の放射性物質の拡散状況を再構築」と「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の構築」を達成し、構築したデータベースは、他機関の分担研究による線量評価の基礎データとして活用された。

この研究に関する現在までの研究状況、業績

- 1) 東京電力福島第一原子力発電所の事故時に放出された放射性物質の大気放出量の推定により、原子力安全委員会の放出量発表（平成23年4月12日）、IAEAに対する日本政府の報告書（平成23年6月、9月）、世界保健機関（WMO）、国連科学委員会（UNSCEAR）等による被ばく線量評価に貢献。
- 2) 局地詳細拡散解析により、プラント北西部の線量上昇過程を解明し、プレス発表（平成23年6月13日）。
- 3) 日本全域での事故後2ヶ月間の被ばく線量を試算し、原子力機構ホームページに掲載（平成23年6月15日）。
- 4) 東日本域大気拡散解析により、Cs-137降下量解析結果を厚生労働省に提供し（平成23年8月31日、厚生労働省プレス発表）、茨城県内の線量上昇過程について環境放射線監視委員会に報告（平成23年9月2日）。
- 5) 公開ワークショップを開催し（平成24年3月6日）、国内の6機関からの10名の専門家との議論により、放出量推定結果を検証し、東日本域におけるCs-137沈着プロセスを解明。
- 6) 平成24年度環境省受託事業「事故初期のヨウ素等短半減期による内部被ばくの線量評価調査」の一部「大気拡散シミュレーションによる時系列大気中放射性物質濃度マップの整備」により、暫定的な内部被ばく評価に貢献。

【論文】

- 1) Chino M, Nakayama H, Nagai H, et al., Preliminary Estimation of Release Amount of ^{131}I and ^{137}Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere, *Journal of Nuclear Science and Technology* 2011; 48: 1129-1134.
- 2) Katata G, Ota M, Terada H, et al., Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident, *Journal of Environmental Radioactivity* 2012; 109: 103-113.
- 3) Katata G, Terada H, Nagai H, et al., Numerical reconstruction of high dose rate zones due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity* 2012; 111: 2-12.
- 4) Terada H, Katata G, Chino M, et al., Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion, *Journal of Environmental Radioactivity* 2012; 112: 141-154.
- 5) Chino M, Terada H, Katata G, et al., Reconstruction of atmospheric releases of ^{131}I and ^{137}Cs resulting from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, *Proceedings of the first NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident*, NIRS-M-252 2012; 127-135.
- 6) Nagai H, Chino M, Terada H, et al., Atmospheric dispersion simulations of radioactive materials discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant due to accident: Consideration of deposition process, *Proceedings of the first NIRS symposium on reconstruction of early internal dose*

- in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, NIRS-M-252 2012; 137-149.
- 7) Kobayashi T, Nagai H, Chino M, et al., Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations, *Journal of Nuclear Science and Technology* 2013; 50: 255-264.
 - 8) Arnold D, Seibert P, Nagai H, et al., Lagrangian models for nuclear studies: Examples and applications, *Lagrangian Modeling of the Atmosphere*, American Geophysical Union, Washington, D. C. 2013; 329-348.
 - 9) Nagai H, Katata G, Terada H, et al., Source Term Estimation of ^{131}I and ^{137}Cs Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere, *Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident*, Springer 2014; 155-173.
 - 10) Katata G, Chino M, Kobayashi T, et al., Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model, *Atmospheric Chemistry and Physics* 2015; 15: 1029-1070.
 - 11) Nagai H, Terada H, Chino H, et al., Source term estimation for the Fukushima Daiichi nuclear power station accident by combined analysis of environmental monitoring and plant data through atmospheric dispersion simulation, *Proceedings of 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics* 2015; 4044-4052.
 - 12) Chino M, Terada H, Nagai H, et al., Utilization of $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ in the environment to identify the reactor units that caused atmospheric releases during the Fukushima Daiichi accident, *Scientific Reports*, 2016; 6:31376, DOI: 10.1038/srep31376.
 - 13) Nagai H, Terada H, Tsuduki K, et al., Updating source term and atmospheric dispersion simulations for the dose reconstruction in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, *EPJ Web of Conferences: 13th International Conference on Radiation Shielding (ICRS-13) & 19th Topical Meeting of the Radiation Protection & Shielding Division of the American Nuclear Society -2016 (RPSD-2016)*, 2017; (in press).
 - 14) Kadowaki M, Nagai H, Terada H, et al., Improvement of atmospheric dispersion simulation using an advanced meteorological data assimilation method to reconstruct the spatiotemporal distribution of radioactive materials released during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, *Energy Procedia*, 2017; (submitted).

引用文献

- 1) UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Development since the 2013 UNSCEAR Report on the Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident Following the Great East-Japan Earthquake and Tsunami, A 2015 white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work, United Nations, New York, USA, 2015.
- 2) Katata G, Chino M, Kobayashi T, et al., Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model, *Atmospheric Chemistry and Physics* 2015; 15: 1029-1070.
- 3) Oura Y, Ebihara M, Tsuruta H, et al., Database of Hourly Atmospheric Concentrations of Radiocesium (^{134}Cs and ^{137}Cs) in Suspended Particulate Matter Collected in March 2011 at 99 Air Pollution Monitoring Stations in Eastern Japan, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* 2015; 15: 15-26.
- 4) Ohkura, T., Oishi, T., Taki, M., et al., Emergency Monitoring of Environmental Radiation and Atmospheric Radionuclides at Nuclear Science Research Institute, JAEA Following the Accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, JAEADData/Code 2012-01, Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan, 2012 (in Japanese with English abstract).
- 5) US NRC (Nuclear Regulatory Commission), RASCAL 4: Description of Models and Methods, NUREG-1940, Richland, WA, 2012.
- 6) 原子力規制庁委託事業「平成 25 年度東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」事業成果報告書, 2014, <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry06.html> (2017 年 2 月 1 日アクセス確認)
- 7) Chino M, Terada H, Nagai H, et al., Utilization of $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ in the environment to identify the reactor units that caused atmospheric releases during the Fukushima Daiichi accident, *Scientific Reports*, 2016; 6:31376, DOI: 10.1038/srep31376.

付録 1：公開された放出源推定結果における推定放出率の時間変化

(注：平成 26 年度報告書の付録と同じ。ただし Table 2 及び Table 5 を改訂した。)

Table 1. 原子力機構の推定結果 1 (Chino et al., 2011)

時間変化は、放出率が一定の期間の開始時刻 (Start time、年月日：yyyymmdd 及び時分秒：hhmmss) で標記、日本標準時：JST 使用) と継続時間 (Duration)、及びその期間についての核種ごとの 1 時間当たりの放出率 (Bq h^{-1}) により示される。(以下、各推定結果においても同様。)

Start time (JST)		Duration (h)	I-131 (Bq h^{-1})	Cs-137 (Bq h^{-1})
yyyymmdd	hhmmss			
20110312	100000	61	2.3E+13	2.3E+12
20110314	230000	10	3.5E+14	4.0E+13
20110315	090000	6	1.0E+16	1.0E+15
20110315	150000	39	2.1E+14	3.0E+12
20110317	060000	57	4.1E+14	1.0E+13
20110319	150000	36	3.8E+14	3.5E+13
20110321	030000	18	1.4E+14	1.1E+12
20110321	210000	26	4.1E+14	4.7E+12
20110322	230000	25	7.1E+14	8.9E+12
20110324	000000	24	1.9E+14	2.9E+12
20110325	000000	35	5.6E+13	1.2E+12
20110326	110000	47	4.0E+12	1.7E+11
20110328	100000	38	7.5E+12	4.7E+12
20110330	000000	24	1.8E+14	1.4E+14
20110331	000000	22	2.4E+13	4.5E+12
20110331	220000	35	1.8E+12	1.6E+12
20110402	090000	48	1.8E+12	5.8E+11
20110404	090000	39	7.0E+11	1.4E+11

Table 2. 国外の研究機関の推定結果 1 (Stohl et al., 2012)

Start time (JST)		Duration	Xe-133	Cs-137
yyyymmdd	hhmmss	(h)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)
20110310	2100000	3	2.9E+12	1.4E+10
20110311	000000	3	1.3E+12	1.4E+10
20110311	030000	3	1.6E+13	1.2E+10
20110311	060000	3	2.2E+12	6.4E+09
20110311	090000	3	3.7E+12	2.6E+09
20110311	120000	3	1.2E+13	2.0E+09
20110311	150000	3	5.4E+14	7.2E+10
20110311	180000	3	2.6E+15	9.3E+09
20110311	210000	3	4.1E+16	2.5E+11
20110312	000000	3	6.8E+16	1.4E+12
20110312	030000	3	9.0E+16	9.1E+12
20110312	060000	3	1.3E+17	1.4E+14
20110312	090000	3	1.7E+17	3.9E+14
20110312	120000	3	4.7E+17	4.1E+14
20110312	150000	3	3.6E+15	6.0E+14
20110312	180000	3	6.1E+15	5.2E+13
20110312	210000	3	9.1E+15	2.7E+13
20110313	000000	3	3.5E+16	1.2E+13
20110313	030000	3	9.2E+16	4.8E+12
20110313	060000	3	2.4E+17	3.9E+11
20110313	090000	3	1.0E+18	1.1E+14
20110313	120000	3	4.1E+17	9.9E+13
20110313	150000	3	6.6E+15	2.0E+12
20110313	180000	3	4.3E+15	2.0E+13
20110313	210000	3	2.3E+15	4.2E+13
20110314	000000	3	9.8E+14	5.9E+13
20110314	030000	3	3.1E+16	9.9E+13
20110314	060000	3	9.2E+16	1.9E+14
20110314	090000	3	2.2E+17	1.9E+14
20110314	120000	3	3.6E+17	1.3E+14
20110314	150000	3	1.4E+17	1.7E+14
20110314	180000	3	2.1E+16	1.0E+15
20110314	210000	3	6.7E+16	1.5E+15
20110315	000000	3	5.1E+17	2.4E+14
20110315	030000	3	2.3E+17	3.0E+14
20110315	060000	3	2.6E+17	1.1E+15
20110315	090000	3	2.2E+17	9.4E+14
20110315	120000	3	1.1E+17	1.9E+14
20110315	150000	3	3.1E+16	9.2E+13
20110315	180000	3	2.6E+15	7.7E+13
20110315	210000	3	1.2E+13	6.3E+13
20110316	000000	3	9.3E+12	5.2E+13
20110316	030000	3	9.5E+12	4.3E+13
20110316	060000	3	1.0E+13	3.6E+13
20110316	090000	3	1.1E+13	2.5E+14
20110316	120000	3	1.1E+13	2.8E+14
20110316	150000	3	1.2E+13	9.9E+13
20110316	180000	3	1.0E+13	1.0E+14
20110316	210000	3	1.2E+13	9.5E+13
20110317	000000	3	1.3E+13	8.6E+13
20110317	030000	3	1.3E+13	7.3E+13
20110317	060000	3	1.3E+13	6.1E+13

20110317	090000	3	9.4E+12	4.9E+13
20110317	120000	3	6.6E+12	3.8E+13
20110317	150000	3	7.1E+12	3.1E+13
20110317	180000	3	6.9E+12	2.5E+13
20110317	210000	3	8.5E+12	1.9E+13
20110318	000000	3	9.6E+12	1.4E+13
20110318	030000	3	1.6E+13	1.3E+13
20110318	060000	3	1.2E+13	1.5E+13
20110318	090000	3	1.2E+13	3.1E+13
20110318	120000	3	1.3E+13	5.9E+13
20110318	150000	3	1.9E+13	8.9E+13
20110318	180000	3	1.2E+13	1.1E+14
20110318	210000	3	8.5E+12	1.1E+14
20110319	000000	3	2.8E+13	7.6E+13
20110319	030000	3	1.6E+13	4.4E+13
20110319	060000	3	1.8E+13	3.2E+13
20110319	090000	3	1.1E+13	4.4E+13
20110319	120000	3	1.0E+13	1.1E+14
20110319	150000	3	1.0E+13	2.1E+14
20110319	180000	3	1.0E+13	2.9E+14
20110319	210000	3	9.9E+12	2.5E+14
20110320	000000	3	9.9E+12	1.5E+14
20110320	030000	3	9.5E+12	5.5E+13
20110320	060000	3	9.3E+12	1.1E+13
20110320	090000	3	9.2E+12	2.0E+12
20110320	120000	3	9.7E+12	1.4E+08
20110320	150000	3	9.1E+12	4.2E+11
20110320	180000	3	8.8E+12	8.3E+11
20110320	210000	3	9.0E+12	7.4E+11
20110321	000000	3	8.8E+12	4.3E+10
20110321	030000	3	8.6E+12	3.9E+08
20110321	060000	3	8.6E+12	3.3E+08
20110321	090000	3	8.4E+12	1.7E+08
20110321	120000	3	7.1E+12	1.7E+12
20110321	150000	3	6.4E+12	3.8E+12
20110321	180000	3	4.3E+12	1.7E+11
20110321	210000	3	5.3E+12	5.5E+11
20110322	000000	3	5.1E+12	2.3E+12
20110322	030000	3	4.1E+12	5.6E+12
20110322	060000	3	5.7E+12	8.9E+12
20110322	090000	3	5.5E+12	1.1E+13
20110322	120000	3	5.0E+12	1.2E+13
20110322	150000	3	4.1E+12	1.0E+13
20110322	180000	3	4.0E+12	8.2E+12
20110322	210000	3	3.1E+12	6.8E+12
20110323	000000	3	5.0E+12	6.8E+12
20110323	030000	3	6.2E+12	7.9E+12
20110323	060000	3	6.9E+12	9.4E+12
20110323	090000	3	7.8E+12	1.0E+13
20110323	120000	3	8.1E+12	1.1E+13
20110323	150000	3	8.5E+12	1.0E+13
20110323	180000	3	9.2E+12	1.0E+13
20110323	210000	3	8.2E+12	1.1E+13
20110324	000000	3	1.0E+13	1.4E+13
20110324	030000	3	1.1E+13	1.7E+13
20110324	060000	3	1.1E+13	2.0E+13
20110324	090000	3	1.1E+13	1.9E+13

20110324	120000	3	1.2E+13	1.6E+13
20110324	150000	3	1.1E+13	1.4E+13
20110324	180000	3	1.0E+13	1.2E+13
20110324	210000	3	1.1E+13	8.5E+12
20110325	000000	3	1.1E+13	4.8E+12
20110325	030000	3	1.1E+13	2.1E+12
20110325	060000	3	1.2E+13	1.4E+12
20110325	090000	3	1.2E+13	1.6E+12
20110325	120000	3	1.1E+13	2.7E+12
20110325	150000	3	1.1E+13	3.1E+12
20110325	180000	3	1.1E+13	3.8E+12
20110325	210000	3	1.1E+13	4.3E+12
20110326	000000	3	1.1E+13	4.7E+12
20110326	030000	3	1.2E+13	4.4E+12
20110326	060000	3	1.2E+13	3.5E+12
20110326	090000	3	1.1E+13	2.5E+12
20110326	120000	3	9.9E+12	1.6E+12
20110326	150000	3	9.2E+12	1.2E+12
20110326	180000	3	9.2E+12	1.1E+12
20110326	210000	3	9.0E+12	1.1E+12
20110327	000000	3	9.0E+12	1.2E+12
20110327	030000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110327	060000	3	9.2E+12	2.2E+12
20110327	090000	3	9.0E+12	2.9E+12
20110327	120000	3	9.3E+12	4.0E+12
20110327	150000	3	9.6E+12	5.9E+12
20110327	180000	3	1.0E+13	8.5E+12
20110327	210000	3	1.0E+13	1.0E+13
20110328	000000	3	1.1E+13	8.5E+12
20110328	030000	3	9.8E+12	6.5E+12
20110328	060000	3	9.5E+12	5.2E+12
20110328	090000	3	9.3E+12	4.7E+12
20110328	120000	3	9.5E+12	4.6E+12
20110328	150000	3	9.2E+12	4.8E+12
20110328	180000	3	8.9E+12	5.1E+12
20110328	210000	3	9.2E+12	5.4E+12
20110329	000000	3	9.7E+12	6.3E+12
20110329	030000	3	1.0E+13	6.8E+12
20110329	060000	3	1.1E+13	7.4E+12
20110329	090000	3	1.2E+13	8.4E+12
20110329	120000	3	1.4E+13	9.3E+12
20110329	150000	3	1.6E+13	8.6E+12
20110329	180000	3	1.7E+13	6.7E+12
20110329	210000	3	1.6E+13	4.9E+12
20110330	000000	3	1.5E+13	3.5E+12
20110330	030000	3	1.4E+13	3.3E+12
20110330	060000	3	1.1E+13	3.6E+12
20110330	090000	3	1.1E+13	4.0E+12
20110330	120000	3	1.6E+13	4.6E+12
20110330	150000	3	1.2E+13	5.6E+12
20110330	180000	3	1.0E+13	6.6E+12
20110330	210000	3	9.6E+12	7.0E+12
20110331	000000	3	9.7E+12	6.9E+12
20110331	030000	3	9.3E+12	6.4E+12
20110331	060000	3	9.2E+12	6.0E+12
20110331	090000	3	9.1E+12	6.0E+12
20110331	120000	3	9.4E+12	6.7E+12

20110331	150000	3	1.8E+13	8.4E+12
20110331	180000	3	1.4E+13	1.1E+13
20110331	210000	3	1.0E+13	1.1E+13
20110401	000000	3	1.4E+13	1.2E+13
20110401	030000	3	1.4E+13	1.3E+13
20110401	060000	3	1.2E+13	1.4E+13
20110401	090000	3	1.2E+13	1.3E+13
20110401	120000	3	1.2E+13	1.1E+13
20110401	150000	3	1.5E+13	8.8E+12
20110401	180000	3	1.2E+13	6.4E+12
20110401	210000	3	9.7E+12	4.4E+12
20110402	000000	3	9.2E+12	2.8E+12
20110402	030000	3	1.1E+13	2.1E+12
20110402	060000	3	8.8E+12	1.8E+12
20110402	090000	3	8.6E+12	2.1E+12
20110402	120000	3	8.9E+12	2.2E+12
20110402	150000	3	9.1E+12	1.6E+12
20110402	180000	3	9.2E+12	8.2E+11
20110402	210000	3	9.2E+12	8.3E+11
20110403	000000	3	9.0E+12	6.4E+11
20110403	030000	3	8.8E+12	7.9E+11
20110403	060000	3	8.7E+12	2.1E+12
20110403	090000	3	8.7E+12	2.0E+12
20110403	120000	3	8.7E+12	1.3E+12
20110403	150000	3	8.9E+12	7.0E+11
20110403	180000	3	8.8E+12	7.0E+11
20110403	210000	3	8.9E+12	1.2E+12
20110404	000000	3	8.7E+12	1.7E+12
20110404	030000	3	8.6E+12	2.0E+12
20110404	060000	3	8.8E+12	2.0E+12
20110404	090000	3	9.0E+12	2.0E+12
20110404	120000	3	8.9E+12	1.7E+12
20110404	150000	3	8.8E+12	1.3E+12
20110404	180000	3	9.3E+12	1.2E+12
20110404	210000	3	9.2E+12	6.9E+11
20110405	000000	3	8.6E+12	1.0E+12
20110405	030000	3	8.2E+12	8.8E+11
20110405	060000	3	8.1E+12	2.7E+11
20110405	090000	3	8.0E+12	3.6E+11
20110405	120000	3	7.7E+12	5.5E+11
20110405	150000	3	5.8E+12	1.1E+12
20110405	180000	3	6.2E+12	2.4E+12
20110405	210000	3	7.4E+12	6.1E+12
20110406	000000	3	6.4E+12	1.0E+13
20110406	030000	3	6.6E+12	1.1E+13
20110406	060000	3	6.6E+12	9.4E+12
20110406	090000	3	6.6E+12	9.0E+12
20110406	120000	3	6.7E+12	8.3E+12
20110406	150000	3	6.7E+12	6.3E+12
20110406	180000	3	7.0E+12	4.8E+12
20110406	210000	3	7.0E+12	3.3E+12
20110407	000000	3	7.0E+12	2.2E+12
20110407	030000	3	7.6E+12	1.9E+12
20110407	060000	3	6.6E+12	1.6E+12
20110407	090000	3	6.8E+12	1.5E+12
20110407	120000	3	6.8E+12	1.6E+12
20110407	150000	3	6.9E+12	1.6E+12

20110407	180000	3	7.4E+12	1.7E+12
20110407	210000	3	7.6E+12	1.6E+12
20110408	000000	3	7.0E+12	1.5E+12
20110408	030000	3	6.7E+12	1.5E+12
20110408	060000	3	6.8E+12	1.6E+12
20110408	090000	3	8.9E+12	1.8E+12
20110408	120000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110408	150000	3	8.9E+12	1.0E+12
20110408	180000	3	9.1E+12	6.4E+11
20110408	210000	3	9.6E+12	1.5E+12
20110409	000000	3	1.0E+13	1.3E+12
20110409	030000	3	1.0E+13	2.5E+11
20110409	060000	3	9.3E+12	1.0E+12
20110409	090000	3	9.4E+12	2.6E+12
20110409	120000	3	9.6E+12	3.6E+12
20110409	150000	3	1.0E+13	2.8E+12
20110409	180000	3	1.1E+13	1.1E+12
20110409	210000	3	1.0E+13	1.1E+12
20110410	000000	3	9.9E+12	9.9E+11
20110410	030000	3	9.4E+12	1.2E+12
20110410	060000	3	9.1E+12	1.7E+12
20110410	090000	3	9.0E+12	2.0E+12
20110410	120000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110410	150000	3	9.0E+12	2.3E+12
20110410	180000	3	9.0E+12	2.3E+12
20110410	210000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110411	000000	3	9.0E+12	2.0E+12
20110411	030000	3	9.3E+12	1.7E+12
20110411	060000	3	9.9E+12	1.3E+12
20110411	090000	3	1.0E+13	1.4E+12
20110411	120000	3	1.1E+13	1.9E+12
20110411	150000	3	9.2E+12	2.5E+12
20110411	180000	3	9.0E+12	2.5E+12
20110411	210000	3	9.0E+12	2.5E+12
20110412	000000	3	9.0E+12	2.4E+12
20110412	030000	3	9.0E+12	2.4E+12
20110412	060000	3	9.0E+12	2.3E+12
20110412	090000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110412	120000	3	9.0E+12	2.1E+12
20110412	150000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110412	180000	3	9.0E+12	1.8E+12
20110412	210000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110413	000000	3	9.0E+12	1.4E+12
20110413	030000	3	9.0E+12	1.0E+12
20110413	060000	3	9.0E+12	6.0E+11
20110413	090000	3	9.0E+12	3.5E+11
20110413	120000	3	9.0E+12	2.8E+11
20110413	150000	3	9.0E+12	4.8E+11
20110413	180000	3	9.0E+12	1.0E+12
20110413	210000	3	9.0E+12	1.5E+12
20110414	000000	3	9.0E+12	1.8E+12
20110414	030000	3	9.0E+12	2.1E+12
20110414	060000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110414	090000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110414	120000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110414	150000	3	9.0E+12	2.1E+12
20110414	180000	3	9.0E+12	2.0E+12

20110414	210000	3	9.0E+12	1.8E+12
20110415	000000	3	9.0E+12	1.5E+12
20110415	030000	3	9.0E+12	1.1E+12
20110415	060000	3	9.0E+12	7.9E+11
20110415	090000	3	9.0E+12	9.1E+11
20110415	120000	3	9.0E+12	1.4E+12
20110415	150000	3	9.0E+12	1.7E+12
20110415	180000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110415	210000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110416	000000	3	9.0E+12	1.8E+12
20110416	030000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110416	060000	3	9.0E+12	1.2E+12
20110416	090000	3	9.0E+12	6.4E+11
20110416	120000	3	9.0E+12	9.1E+10
20110416	150000	3	9.0E+12	9.6E+10
20110416	180000	3	9.0E+12	1.1E+11
20110416	210000	3	9.0E+12	4.2E+11
20110417	000000	3	9.0E+12	2.1E+10
20110417	030000	3	9.0E+12	1.7E+12
20110417	060000	3	9.0E+12	8.1E+11
20110417	090000	3	9.0E+12	3.8E+10
20110417	120000	3	9.0E+12	1.4E+12
20110417	150000	3	9.0E+12	5.3E+11
20110417	180000	3	9.0E+12	7.3E+11
20110417	210000	3	9.0E+12	1.3E+12
20110418	000000	3	9.0E+12	1.8E+12
20110418	030000	3	9.0E+12	2.0E+12
20110418	060000	3	9.0E+12	2.1E+12
20110418	090000	3	9.0E+12	2.1E+12
20110418	120000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110418	150000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110418	180000	3	9.0E+12	1.3E+12
20110418	210000	3	9.0E+12	1.0E+12
20110419	000000	3	9.0E+12	6.2E+11
20110419	030000	3	9.0E+12	4.1E+11
20110419	060000	3	9.0E+12	5.1E+11
20110419	090000	3	9.0E+12	5.4E+11
20110419	120000	3	9.0E+12	2.5E+11
20110419	150000	3	9.0E+12	1.7E+11
20110419	180000	3	9.0E+12	5.7E+11
20110419	210000	3	9.0E+12	1.2E+12
20110420	000000	3	9.0E+12	1.7E+12
20110420	030000	3	9.0E+12	2.1E+12
20110420	060000	3	9.0E+12	2.4E+12

Table 3. 東京電力の推定結果 (TEPCO, 2012a,b)

Start time (JST)		Duration	I-131	Cs-137
yyyymmdd	hhmmss	(min.)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)
20110312	030000	60	2.0E+08	3.0E+06
20110312	040000	370	4.9E+14	6.5E+12
20110312	101000	40	7.5E+14	1.2E+13
20110312	105000	190	9.5E+12	1.3E+11
20110312	140000	70	6.0E+14	8.6E+12
20110312	151000	20	6.0E+10	9.0E+08
20110312	153000	10	1.8E+16	2.4E+14
20110312	154000	140	2.6E+11	4.3E+09
20110312	180000	360	8.3E+13	1.3E+12
20110313	000000	480	3.7E+10	5.0E+08
20110313	080000	60	7.0E+14	1.0E+13
20110313	090000	10	1.8E+15	1.8E+13
20110313	091000	110	1.6E+11	1.6E+09
20110313	110000	90	2.7E+11	3.3E+09
20110313	123000	60	9.0E+12	1.0E+11
20110313	133000	210	1.1E+15	1.4E+13
20110313	170000	220	2.7E+11	5.5E+09
20110313	204000	200	3.0E+11	6.0E+09
20110314	000000	120	3.5E+12	4.5E+10
20110314	020000	120	3.5E+15	4.5E+13
20110314	040000	80	3.8E+12	4.5E+10
20110314	052000	120	2.0E+13	2.5E+11
20110314	072000	120	5.0E+14	1.0E+13
20110314	092000	100	1.2E+12	1.8E+10
20110314	110000	10	4.2E+15	5.4E+13
20110314	111000	610	9.8E+10	2.0E+09
20110314	212000	60	4.0E+16	6.0E+14
20110314	222000	100	1.5E+10	2.3E+08
20110314	234000	20	1.5E+13	2.4E+11
20110315	000000	370	3.2E+12	3.2E+10
20110315	061000	70	3.4E+15	6.0E+13
20110315	072000	180	2.0E+16	3.0E+14
20110315	102000	350	8.6E+14	1.4E+13
20110315	161000	280	8.6E+13	1.3E+12
20110315	205000	40	1.3E+15	1.5E+13
20110315	213000	150	1.6E+16	2.4E+14
20110316	000000	140	1.3E+14	1.7E+12
20110316	022000	240	1.0E+15	1.7E+13
20110316	062000	130	3.7E+14	4.6E+12
20110316	830000	90	4.0E+14	6.0E+12
20110316	100000	180	3.3E+16	6.7E+14
20110316	130000	660	9.1E+13	1.8E+12
20110317	000000	1290	1.4E+12	2.3E+10
20110317	213000	10	2.4E+17	4.8E+15
20110317	214000	140	1.3E+12	2.6E+10
20110318	000000	330	1.5E+13	3.6E+11
20110318	053000	110	1.1E+15	2.7E+13
20110318	072000	480	1.2E+13	3.7E+11
20110318	152000	120	9.2E+15	2.3E+14
20110318	173000	390	1.5E+13	4.6E+11
20110319	000000	470	7.7E+12	1.3E+11
20110319	075000	10	1.8E+17	3.6E+15

20110319	080000	30	8.0E+12	1.6E+11
20110319	083000	10	3.6E+16	6.0E+14
20110319	084000	50	7.2E+12	1.2E+11
20110319	093000	10	6.0E+15	1.8E+14
20110319	094000	860	7.0E+12	2.1E+11
20110320	000000	220	2.5E+14	5.5E+12
20110320	034000	10	6.0E+15	1.2E+14
20110320	035000	340	8.8E+13	1.8E+12
20110320	093000	20	6.0E+14	1.8E+13
20110320	095000	90	1.3E+14	2.7E+12
20110320	112000	90	1.3E+14	2.7E+12
20110320	125000	60	1.0E+14	3.0E+12
20110320	135000	170	7.1E+15	1.4E+14
20110320	164000	190	2.2E+14	6.3E+12
20110320	195000	20	1.2E+16	2.7E+14
20110320	201000	230	1.8E+15	5.2E+13
20110321	000000	980	6.1E+13	1.2E+12
20110321	162000	10	1.2E+16	3.0E+14
20110321	163000	30	6.0E+13	1.4E+12
20110321	170000	60	5.0E+15	1.0E+14
20110321	180000	360	3.3E+13	1.0E+12
20110322	000000	910	2.0E+13	4.6E+11
20110322	151000	80	2.3E+14	5.3E+12
20110322	163000	450	1.3E+13	4.0E+11
20110323	000000	820	2.2E+13	5.9E+11
20110323	134000	140	2.6E+15	8.6E+13
20110323	160000	480	2.5E+13	6.2E+11
20110324	000000	1440	1.3E+14	4.2E+12
20110325	000000	610	3.9E+12	2.0E+11
20110325	101000	20	3.0E+16	1.2E+15
20110325	103000	480	3.7E+12	2.5E+11
20110325	183000	150	3.2E+14	1.6E+13
20110325	210000	180	3.3E+12	2.0E+11
20110326	000000	1440	8.3E+12	3.3E+11
20110327	000000	1440	8.3E+12	3.8E+11
20110328	000000	520	1.0E+13	4.6E+11
20110328	084000	10	3.6E+15	1.8E+14
20110328	085000	50	1.1E+13	4.8E+11
20110328	094000	440	2.7E+15	1.2E+14
20110328	170000	420	1.1E+13	5.7E+11
20110329	000000	260	6.9E+12	4.6E+11
20110329	042000	90	1.3E+15	6.7E+13
20110329	055000	60	6.0E+12	4.0E+11
20110329	065000	300	1.2E+15	8.0E+13
20110329	115000	180	6.7E+12	3.3E+11
20110329	145000	90	6.7E+14	4.7E+13
20110329	162000	30	6.0E+12	4.0E+11
20110329	165000	90	1.3E+14	6.7E+12
20110329	182000	340	7.1E+12	3.5E+11
20110330	000000	1440	1.7E+12	8.3E+10
20110331	000000	1440	1.7E+12	1.3E+11

Table 4. 原子力機構の推定結果 2 (Terada et al., 2012)

Start time (JST)		Duration	I-131	Te-132	Cs-137	Cs-134
yyyymmdd	hhmmss	(h)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)
20110312	050000	4.5	3.7E+13	7.4E+13	3.7E+12	3.7E+12
20110312	093000	6	1.7E+13	3.4E+13	1.7E+12	1.7E+12
20110312	153000	0.5	3.0E+15	6.0E+15	3.0E+14	3.0E+14
20110312	160000	31	8.4E+13	1.1E+14	8.4E+12	8.4E+12
20110313	230000	12	3.6E+13	4.7E+13	3.6E+12	3.6E+12
20110314	110000	0.5	3.0E+15	3.9E+15	3.0E+14	3.0E+14
20110314	113000	10	2.3E+13	3.0E+13	2.3E+12	2.3E+12
20110314	213000	2.5	1.3E+15	1.3E+15	1.3E+14	1.3E+14
20110315	000000	7	3.5E+14	3.5E+14	4.0E+13	4.0E+13
20110315	070000	3	3.0E+15	3.0E+15	3.0E+14	3.0E+14
20110315	100000	3	8.0E+13	8.0E+13	8.0E+12	8.0E+12
20110315	130000	4	4.0E+15	4.0E+15	4.0E+14	4.0E+14
20110315	170000	37	2.1E+14	2.1E+14	3.0E+12	3.0E+12
20110317	060000	57	4.1E+14	1.2E+14	1.0E+13	1.0E+13
20110319	150000	36	3.8E+14	7.6E+13	3.5E+13	3.5E+13
20110321	030000	18	1.4E+14	1.4E+13	1.4E+13	1.4E+13
20110321	210000	26	4.1E+14	4.1E+13	4.7E+12	4.7E+12
20110322	230000	25	7.1E+14	3.6E+13	8.9E+12	8.9E+12
20110324	000000	24	1.9E+14	9.5E+12	2.9E+12	2.9E+12
20110325	000000	35	5.6E+13	2.8E+12	1.2E+12	1.2E+12
20110326	110000	47	4.0E+12	2.0E+11	1.7E+11	1.7E+11
20110328	100000	35	7.5E+12	3.8E+11	4.7E+12	4.7E+12
20110329	210000	14	1.5E+13	7.5E+11	8.8E+12	8.8E+12
20110330	110000	13	1.8E+14	9.0E+12	1.4E+14	1.4E+14
20110331	000000	22	2.4E+13	1.2E+12	4.5E+12	4.5E+12
20110331	220000	35	1.8E+12	9.0E+10	1.6E+12	1.6E+12
20110402	090000	48	1.8E+12	9.0E+10	5.8E+11	5.8E+11
20110404	090000	80	7.0E+11	3.5E+10	1.4E+11	1.4E+11
20110407	170000	150	7.0E+11	1.4E+10	3.5E+11	3.5E+11
20110413	230000	409	7.0E+11	0.0E+00	1.8E+11	1.8E+11

Table 5. JNES の推定結果 (Hoshi and Hirano, 2012)

Start time (JST)		Duration (h)	Xe-133 (Bq h ⁻¹)	Cs-137 (Bq h ⁻¹)	Cs-134 (Bq h ⁻¹)	Te-132 (Bq h ⁻¹)	I-131 (Bq h ⁻¹)	I-133 (Bq h ⁻¹)
yyyymmdd	hhmmss							
20110311	150000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311	153000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311	160000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311	163000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311	170000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311	173000	0.5	1.4E+06	4.2E+00	3.6E+00	8.1E-02	9.6E+00	1.9E+01
20110311	180000	0.5	4.3E+09	2.5E+07	2.1E+07	7.5E+07	1.8E+08	3.5E+08
20110311	183000	0.5	1.5E+11	1.0E+09	8.7E+08	5.0E+09	1.1E+10	2.1E+10
20110311	190000	0.5	3.1E+11	1.9E+09	1.6E+09	9.3E+09	2.3E+10	4.2E+10
20110311	193000	0.5	6.8E+11	3.5E+09	3.0E+09	2.0E+10	5.1E+10	9.3E+10
20110311	200000	0.5	9.4E+11	4.1E+09	3.5E+09	2.7E+10	6.8E+10	1.2E+11
20110311	203000	0.5	1.5E+12	6.0E+09	5.1E+09	4.3E+10	1.1E+11	1.9E+11
20110311	210000	0.5	1.6E+12	5.7E+09	4.9E+09	4.4E+10	1.2E+11	2.0E+11
20110311	213000	0.5	2.5E+12	9.3E+09	8.0E+09	7.1E+10	2.3E+11	3.9E+11
20110311	220000	0.5	2.4E+12	9.5E+09	8.2E+09	8.4E+10	2.7E+11	4.6E+11
20110311	223000	0.5	3.1E+12	1.2E+10	1.0E+10	1.6E+11	4.1E+11	6.9E+11
20110311	230000	0.5	2.7E+12	1.0E+10	8.7E+09	1.8E+11	3.8E+11	6.3E+11
20110311	233000	0.5	3.6E+12	1.3E+10	1.1E+10	2.7E+11	5.1E+11	8.3E+11
20110312	000000	0.5	2.8E+12	9.6E+09	8.3E+09	2.4E+11	3.9E+11	6.3E+11
20110312	003000	0.5	3.6E+12	1.2E+10	1.0E+10	3.2E+11	4.8E+11	7.6E+11
20110312	010000	0.5	3.0E+12	9.3E+09	8.0E+09	2.7E+11	3.9E+11	6.0E+11
20110312	013000	0.5	3.8E+12	1.1E+10	9.6E+09	3.3E+11	4.6E+11	7.1E+11
20110312	020000	0.5	3.0E+12	8.3E+09	7.2E+09	2.4E+11	3.4E+11	5.2E+11
20110312	023000	0.5	4.0E+12	1.1E+10	9.4E+09	3.2E+11	4.4E+11	6.6E+11
20110312	030000	0.5	3.1E+12	8.3E+09	7.2E+09	2.4E+11	3.3E+11	4.8E+11
20110312	033000	0.5	4.1E+12	1.1E+10	9.8E+09	3.2E+11	4.3E+11	6.2E+11
20110312	040000	0.5	4.3E+12	1.2E+10	1.1E+10	3.3E+11	4.3E+11	6.1E+11
20110312	043000	0.5	3.4E+12	1.1E+10	9.2E+09	2.5E+11	3.3E+11	4.6E+11
20110312	050000	0.5	4.8E+12	1.6E+10	1.4E+10	3.5E+11	4.6E+11	6.4E+11
20110312	053000	0.5	5.0E+12	1.7E+10	1.5E+10	3.4E+11	4.5E+11	6.1E+11
20110312	060000	0.5	5.0E+12	1.6E+10	1.4E+10	3.1E+11	4.2E+11	5.6E+11
20110312	063000	0.5	4.9E+12	1.6E+10	1.4E+10	2.9E+11	3.9E+11	5.1E+11
20110312	070000	0.5	5.8E+12	1.8E+10	1.6E+10	3.2E+11	4.4E+11	5.7E+11
20110312	073000	0.5	2.6E+14	8.0E+11	6.9E+11	1.3E+13	1.8E+13	2.3E+13
20110312	080000	0.5	3.6E+14	1.0E+12	9.1E+11	1.7E+13	2.4E+13	3.0E+13
20110312	083000	0.5	2.0E+14	5.5E+11	4.8E+11	8.8E+12	1.2E+13	1.5E+13
20110312	090000	0.5	1.7E+14	4.2E+11	3.7E+11	6.9E+12	9.4E+12	1.1E+13
20110312	093000	0.5	1.4E+14	3.0E+11	2.6E+11	4.9E+12	6.6E+12	8.0E+12
20110312	100000	0.5	1.1E+14	2.1E+11	1.8E+11	3.4E+12	4.6E+12	5.4E+12
20110312	103000	0.5	6.4E+16	7.6E+11	6.6E+11	1.2E+13	1.8E+13	2.1E+13
20110312	110000	0.5	9.7E+16	8.3E+11	7.2E+11	1.3E+13	2.0E+13	2.4E+13
20110312	113000	0.5	7.6E+16	6.0E+11	5.1E+11	9.4E+12	1.5E+13	1.7E+13
20110312	120000	0.5	9.4E+16	6.9E+11	6.0E+11	1.1E+13	1.7E+13	1.9E+13
20110312	123000	0.5	7.5E+15	1.5E+11	1.3E+11	2.4E+12	3.4E+12	3.8E+12
20110312	130000	0.5	1.1E+14	1.4E+11	1.2E+11	2.1E+12	2.8E+12	3.1E+12
20110312	133000	0.5	8.4E+13	1.0E+11	8.7E+10	1.5E+12	2.1E+12	2.2E+12
20110312	140000	0.5	1.0E+14	1.2E+11	1.1E+11	1.7E+12	2.4E+12	2.6E+12
20110312	143000	0.5	2.3E+17	1.2E+12	1.0E+12	1.6E+13	2.6E+13	2.7E+13
20110312	150000	0.5	6.6E+17	4.8E+12	4.2E+12	4.1E+13	7.7E+13	7.9E+13
20110312	153000	0.5	1.9E+15	1.3E+12	1.1E+12	3.6E+12	8.2E+12	8.2E+12
20110312	160000	0.5	5.5E+15	4.2E+12	3.6E+12	9.7E+12	2.5E+13	2.5E+13
20110312	163000	0.5	7.2E+15	6.4E+12	5.5E+12	1.2E+13	3.7E+13	3.7E+13

20110312	170000	0.5	6.1E+15	6.1E+12	5.3E+12	9.1E+12	3.6E+13	3.4E+13
20110312	173000	0.5	6.5E+15	7.4E+12	6.4E+12	9.1E+12	4.3E+13	4.0E+13
20110312	180000	0.5	8.8E+15	1.1E+13	9.8E+12	1.1E+13	6.6E+13	6.1E+13
20110312	183000	0.5	7.3E+15	1.1E+13	9.4E+12	8.8E+12	6.3E+13	5.8E+13
20110312	190000	0.5	9.7E+15	1.7E+13	1.4E+13	1.1E+13	9.8E+13	8.9E+13
20110312	193000	0.5	8.6E+15	1.7E+13	1.5E+13	9.1E+12	1.0E+14	9.3E+13
20110312	200000	0.5	1.1E+16	2.6E+13	2.3E+13	1.1E+13	1.6E+14	1.4E+14
20110312	203000	0.5	1.1E+16	3.2E+13	2.8E+13	1.1E+13	2.1E+14	1.8E+14
20110312	210000	0.5	8.9E+15	3.0E+13	2.6E+13	8.8E+12	2.1E+14	1.8E+14
20110312	213000	0.5	1.1E+16	4.1E+13	3.5E+13	1.1E+13	3.1E+14	2.6E+14
20110312	220000	0.5	1.1E+16	4.8E+13	4.1E+13	1.2E+13	4.1E+14	3.4E+14
20110312	223000	0.5	1.1E+16	5.1E+13	4.4E+13	1.3E+13	5.3E+14	4.3E+14
20110312	230000	0.5	8.7E+15	4.4E+13	3.8E+13	1.2E+13	5.4E+14	4.3E+14
20110312	233000	0.5	8.6E+15	4.6E+13	4.0E+13	1.3E+13	6.5E+14	5.1E+14
20110313	000000	0.5	1.1E+16	6.2E+13	5.4E+13	2.0E+13	1.0E+15	7.9E+14
20110313	003000	0.5	8.8E+15	5.4E+13	4.7E+13	1.9E+13	9.9E+14	7.7E+14
20110313	010000	0.5	1.3E+16	8.1E+13	7.0E+13	3.4E+13	1.7E+15	1.3E+15
20110313	013000	0.5	8.8E+15	5.7E+13	4.9E+13	2.9E+13	1.3E+15	1.0E+15
20110313	020000	0.5	1.1E+16	6.9E+13	6.0E+13	4.6E+13	1.8E+15	1.3E+15
20110313	023000	0.5	8.3E+15	5.3E+13	4.6E+13	4.7E+13	1.5E+15	1.1E+15
20110313	030000	0.5	1.0E+16	6.6E+13	5.7E+13	8.0E+13	2.0E+15	1.5E+15
20110313	033000	0.5	8.0E+15	5.0E+13	4.3E+13	8.2E+13	1.7E+15	1.2E+15
20110313	040000	0.5	1.1E+16	6.9E+13	5.9E+13	1.5E+14	2.4E+15	1.7E+15
20110313	043000	0.5	9.0E+15	5.3E+13	4.6E+13	1.5E+14	2.0E+15	1.4E+15
20110313	050000	0.5	1.0E+16	5.8E+13	5.0E+13	1.9E+14	2.2E+15	1.5E+15
20110313	053000	0.5	7.4E+15	4.2E+13	3.6E+13	1.6E+14	1.7E+15	1.1E+15
20110313	060000	0.5	9.1E+15	5.0E+13	4.3E+13	2.2E+14	2.0E+15	1.3E+15
20110313	063000	0.5	6.8E+15	3.7E+13	3.2E+13	1.8E+14	1.5E+15	9.8E+14
20110313	070000	0.5	8.4E+15	4.4E+13	3.8E+13	2.3E+14	1.8E+15	1.2E+15
20110313	073000	0.5	7.7E+15	3.8E+13	3.3E+13	2.3E+14	1.6E+15	1.0E+15
20110313	080000	0.5	9.1E+15	4.4E+13	3.8E+13	3.1E+14	1.9E+15	1.2E+15
20110313	083000	0.5	7.0E+15	3.2E+13	2.8E+13	2.6E+14	1.4E+15	8.5E+14
20110313	090000	0.5	8.4E+15	3.8E+13	3.3E+13	3.3E+14	1.7E+15	9.9E+14
20110313	093000	0.5	6.7E+15	2.9E+13	2.5E+13	2.6E+14	1.3E+15	7.5E+14
20110313	100000	0.5	9.7E+16	4.4E+13	3.9E+13	3.3E+14	1.6E+15	9.0E+14
20110313	103000	0.5	1.7E+17	7.1E+13	6.8E+13	3.2E+14	1.6E+15	9.4E+14
20110313	110000	0.5	2.3E+17	5.7E+13	5.3E+13	3.2E+14	1.6E+15	9.2E+14
20110313	113000	0.5	6.2E+15	2.4E+13	2.0E+13	2.4E+14	1.1E+15	5.9E+14
20110313	120000	0.5	7.5E+15	2.8E+13	2.4E+13	2.8E+14	1.2E+15	6.8E+14
20110313	123000	0.5	4.3E+18	2.9E+15	3.0E+15	1.1E+16	3.2E+16	1.7E+16
20110313	130000	0.5	1.8E+18	5.6E+15	5.8E+15	3.1E+16	9.9E+16	5.3E+16
20110313	133000	0.5	1.4E+17	1.4E+15	1.4E+15	5.7E+15	2.9E+16	1.5E+16
20110313	140000	0.5	1.5E+17	6.5E+14	6.7E+14	2.3E+15	1.7E+16	8.8E+15
20110313	143000	0.5	6.0E+16	1.4E+14	1.5E+14	5.9E+14	5.2E+15	2.7E+15
20110313	150000	0.5	6.6E+15	2.0E+13	1.8E+13	2.2E+14	9.2E+14	4.6E+14
20110313	153000	0.5	5.1E+15	1.5E+13	1.3E+13	1.7E+14	6.9E+14	3.4E+14
20110313	160000	0.5	7.2E+15	2.1E+13	1.8E+13	2.4E+14	9.5E+14	4.6E+14
20110313	163000	0.5	5.1E+15	1.5E+13	1.3E+13	1.7E+14	6.6E+14	3.2E+14
20110313	170000	0.5	6.0E+15	1.7E+13	1.4E+13	1.9E+14	7.5E+14	3.5E+14
20110313	173000	0.5	4.7E+15	1.3E+13	1.1E+13	1.5E+14	5.7E+14	2.7E+14
20110313	180000	0.5	5.6E+15	1.5E+13	1.3E+13	1.7E+14	6.6E+14	3.0E+14
20110313	183000	0.5	4.6E+15	1.2E+13	1.0E+13	1.4E+14	5.3E+14	2.4E+14
20110313	190000	0.5	6.5E+15	1.6E+13	1.4E+13	2.0E+14	7.3E+14	3.3E+14
20110313	193000	0.5	4.3E+15	1.0E+13	8.9E+12	1.3E+14	4.7E+14	2.0E+14
20110313	200000	0.5	5.1E+15	1.3E+13	1.1E+13	1.5E+14	5.4E+14	2.3E+14
20110313	203000	0.5	3.8E+16	1.6E+13	1.5E+13	1.4E+14	6.3E+14	2.7E+14

20110313	210000	0.5	3.8E+16	1.9E+13	1.8E+13	1.7E+14	7.6E+14	3.2E+14
20110313	213000	0.5	6.5E+15	1.0E+13	9.0E+12	1.3E+14	4.5E+14	1.9E+14
20110313	220000	0.5	5.1E+15	1.0E+13	8.7E+12	1.4E+14	4.5E+14	1.9E+14
20110313	223000	0.5	3.4E+15	6.9E+12	6.0E+12	9.5E+13	3.0E+14	1.2E+14
20110313	230000	0.5	4.8E+15	9.0E+12	7.8E+12	1.3E+14	4.0E+14	1.6E+14
20110313	233000	0.5	4.0E+15	7.2E+12	6.2E+12	1.0E+14	3.1E+14	1.2E+14
20110314	000000	0.5	4.9E+15	8.6E+12	7.5E+12	1.3E+14	3.7E+14	1.4E+14
20110314	003000	0.5	5.4E+15	8.7E+12	7.5E+12	1.4E+14	3.8E+14	1.4E+14
20110314	010000	0.5	3.9E+15	6.0E+12	5.2E+12	9.5E+13	2.6E+14	9.6E+13
20110314	013000	0.5	5.0E+15	1.1E+13	9.9E+12	1.2E+14	3.6E+14	1.3E+14
20110314	020000	0.5	4.0E+15	6.5E+12	5.8E+12	9.1E+13	2.2E+14	8.1E+13
20110314	023000	0.5	5.1E+15	7.9E+12	7.1E+12	1.1E+14	2.8E+14	1.0E+14
20110314	030000	0.5	4.3E+15	7.4E+12	6.8E+12	9.1E+13	2.3E+14	8.2E+13
20110314	033000	0.5	5.4E+15	8.1E+12	7.4E+12	1.0E+14	2.7E+14	9.3E+13
20110314	040000	0.5	4.8E+15	5.6E+12	5.0E+12	8.7E+13	2.1E+14	7.0E+13
20110314	043000	0.5	6.2E+15	6.6E+12	5.8E+12	1.0E+14	2.4E+14	8.1E+13
20110314	050000	0.5	4.4E+15	4.1E+12	3.5E+12	6.7E+13	1.6E+14	5.3E+13
20110314	053000	0.5	4.8E+15	4.9E+12	4.4E+12	7.4E+13	1.9E+14	6.2E+13
20110314	060000	0.5	5.6E+15	6.3E+12	5.7E+12	8.4E+13	2.1E+14	6.8E+13
20110314	063000	0.5	4.5E+15	3.8E+12	3.3E+12	6.1E+13	1.4E+14	4.4E+13
20110314	070000	0.5	5.7E+15	3.3E+12	2.7E+12	8.7E+13	1.8E+14	5.5E+13
20110314	073000	0.5	4.6E+15	2.3E+12	1.8E+12	7.5E+13	1.1E+14	3.3E+13
20110314	080000	0.5	6.7E+15	4.3E+12	3.7E+12	1.3E+14	1.6E+14	4.7E+13
20110314	083000	0.5	5.1E+15	4.4E+12	4.0E+12	1.2E+14	1.3E+14	4.0E+13
20110314	090000	0.5	6.0E+15	5.7E+12	5.3E+12	1.7E+14	1.9E+14	5.5E+13
20110314	093000	0.5	5.0E+15	4.9E+12	4.6E+12	1.6E+14	1.3E+14	3.9E+13
20110314	100000	0.5	6.2E+15	2.8E+12	2.3E+12	2.3E+14	1.2E+14	3.5E+13
20110314	103000	0.5	4.9E+15	2.0E+12	1.7E+12	2.2E+14	9.9E+13	2.8E+13
20110314	110000	0.5	6.4E+15	3.8E+12	3.4E+12	3.3E+14	1.4E+14	3.9E+13
20110314	113000	0.5	5.1E+15	2.2E+12	1.9E+12	3.0E+14	9.5E+13	2.6E+13
20110314	120000	0.5	7.0E+15	2.9E+12	2.5E+12	4.7E+14	1.3E+14	3.4E+13
20110314	123000	0.5	6.4E+15	2.5E+12	2.1E+12	4.8E+14	1.1E+14	2.8E+13
20110314	130000	0.5	6.7E+15	2.4E+12	2.1E+12	5.6E+14	1.1E+14	2.7E+13
20110314	133000	0.5	5.3E+15	1.8E+12	1.6E+12	4.9E+14	7.7E+13	2.0E+13
20110314	140000	0.5	6.6E+15	2.1E+12	1.8E+12	6.7E+14	9.4E+13	2.4E+13
20110314	143000	0.5	5.3E+15	1.6E+12	1.4E+12	5.8E+14	7.2E+13	1.8E+13
20110314	150000	0.5	6.6E+15	2.0E+12	1.8E+12	8.0E+14	8.8E+13	2.2E+13
20110314	153000	0.5	5.4E+15	1.6E+12	1.4E+12	7.1E+14	6.8E+13	1.7E+13
20110314	160000	0.5	6.8E+15	1.9E+12	1.6E+12	9.6E+14	8.3E+13	2.0E+13
20110314	163000	0.5	5.7E+15	1.5E+12	1.3E+12	8.8E+14	6.5E+13	1.5E+13
20110314	170000	0.5	7.9E+15	2.2E+12	1.9E+12	1.3E+15	8.4E+13	2.0E+13
20110314	173000	0.5	5.4E+15	1.5E+12	1.3E+12	9.6E+14	5.5E+13	1.3E+13
20110314	180000	0.5	6.6E+15	1.6E+12	1.4E+12	1.3E+15	6.5E+13	1.5E+13
20110314	183000	0.5	5.2E+15	1.2E+12	1.0E+12	1.1E+15	5.0E+13	1.1E+13
20110314	190000	0.5	6.4E+15	1.2E+12	1.1E+12	1.4E+15	5.7E+13	1.2E+13
20110314	193000	0.5	5.2E+15	1.0E+12	8.7E+11	1.2E+15	4.6E+13	1.0E+13
20110314	200000	0.5	6.5E+15	1.4E+12	1.1E+12	1.5E+15	5.5E+13	1.2E+13
20110314	203000	0.5	5.2E+15	1.1E+12	9.7E+11	1.2E+15	4.1E+13	8.7E+12
20110314	210000	0.5	7.7E+15	1.5E+12	1.3E+12	1.9E+15	6.0E+13	1.2E+13
20110314	213000	0.5	5.5E+15	8.9E+11	7.6E+11	1.4E+15	4.2E+13	8.6E+12
20110314	220000	0.5	6.1E+15	1.0E+12	8.6E+11	1.5E+15	4.7E+13	9.3E+12
20110314	223000	0.5	5.0E+15	7.2E+11	6.1E+11	1.3E+15	3.5E+13	6.9E+12
20110314	230000	0.5	6.1E+15	1.0E+12	8.6E+11	1.6E+15	4.2E+13	8.0E+12
20110314	233000	0.5	4.8E+15	8.4E+11	7.3E+11	1.2E+15	3.1E+13	5.8E+12
20110315	000000	0.5	6.3E+15	3.1E+12	3.1E+12	1.6E+15	7.2E+13	1.4E+13
20110315	003000	0.5	5.7E+15	6.1E+12	6.4E+12	1.3E+15	1.2E+14	2.3E+13

20110315	010000	0.5	8.6E+15	8.2E+12	8.7E+12	2.0E+15	1.7E+14	3.1E+13
20110315	013000	0.5	6.6E+15	7.1E+12	7.5E+12	1.4E+15	1.4E+14	2.5E+13
20110315	020000	0.5	7.8E+15	7.0E+12	7.4E+12	1.5E+15	1.4E+14	2.5E+13
20110315	023000	0.5	6.6E+15	4.8E+12	5.0E+12	1.2E+15	9.9E+13	1.7E+13
20110315	030000	0.5	8.1E+15	4.6E+12	4.8E+12	1.3E+15	9.8E+13	1.7E+13
20110315	033000	0.5	6.7E+15	3.2E+12	3.4E+12	1.0E+15	6.4E+13	1.1E+13
20110315	040000	0.5	8.7E+15	3.5E+12	3.6E+12	1.2E+15	7.3E+13	1.2E+13
20110315	043000	0.5	7.8E+15	2.7E+12	2.7E+12	1.1E+15	5.9E+13	9.6E+12
20110315	050000	0.5	9.3E+15	2.9E+12	2.9E+12	1.2E+15	6.4E+13	1.0E+13
20110315	053000	0.5	7.1E+15	1.9E+12	2.0E+12	8.3E+14	4.5E+13	7.2E+12
20110315	060000	0.5	8.8E+15	2.1E+12	2.1E+12	9.5E+14	5.0E+13	7.9E+12
20110315	063000	0.5	1.3E+17	1.3E+14	1.4E+14	3.2E+15	2.5E+15	3.9E+14
20110315	070000	0.5	1.8E+17	1.2E+14	1.3E+14	3.1E+15	2.4E+15	3.7E+14
20110315	073000	0.5	3.1E+17	9.9E+13	1.1E+14	2.3E+15	2.1E+15	3.2E+14
20110315	080000	0.5	2.9E+17	9.7E+13	1.0E+14	2.1E+15	2.4E+15	3.5E+14
20110315	083000	0.5	4.0E+17	1.4E+14	1.5E+14	1.9E+15	3.6E+15	5.3E+14
20110315	090000	0.5	3.2E+17	1.1E+14	1.2E+14	1.6E+15	3.1E+15	4.4E+14
20110315	093000	0.5	3.8E+17	1.7E+14	1.8E+14	1.6E+15	4.6E+15	6.5E+14
20110315	100000	0.5	2.9E+17	1.7E+14	1.8E+14	1.5E+15	4.6E+15	6.4E+14
20110315	103000	0.5	3.2E+17	2.7E+14	2.9E+14	1.7E+15	6.9E+15	9.5E+14
20110315	110000	0.5	2.4E+17	2.8E+14	3.0E+14	1.8E+15	6.8E+15	9.2E+14
20110315	113000	0.5	2.6E+17	4.5E+14	4.9E+14	2.3E+15	1.1E+16	1.4E+15
20110315	120000	0.5	2.0E+17	4.3E+14	4.6E+14	2.2E+15	9.6E+15	1.3E+15
20110315	123000	0.5	1.9E+17	4.6E+14	4.9E+14	2.1E+15	1.0E+16	1.3E+15
20110315	130000	0.5	1.4E+17	4.4E+14	4.7E+14	1.8E+15	9.2E+15	1.2E+15
20110315	133000	0.5	1.6E+17	6.7E+14	7.2E+14	2.1E+15	1.4E+16	1.7E+15
20110315	140000	0.5	1.3E+17	5.7E+14	6.1E+14	2.1E+15	1.2E+16	1.4E+15
20110315	143000	0.5	1.5E+17	6.6E+14	7.2E+14	2.7E+15	1.3E+16	1.6E+15
20110315	150000	0.5	1.1E+17	4.6E+14	5.0E+14	2.2E+15	9.3E+15	1.1E+15
20110315	153000	0.5	1.3E+17	5.5E+14	5.9E+14	3.0E+15	1.1E+16	1.3E+15
20110315	160000	0.5	1.1E+17	4.6E+14	4.9E+14	3.3E+15	9.1E+15	1.1E+15
20110315	163000	0.5	1.1E+17	4.9E+14	5.3E+14	4.7E+15	9.8E+15	1.1E+15
20110315	170000	0.5	8.9E+16	4.3E+14	4.6E+14	5.2E+15	8.5E+15	9.7E+14
20110315	173000	0.5	8.4E+16	4.2E+14	4.6E+14	5.9E+15	8.5E+15	9.4E+14
20110315	180000	0.5	7.0E+16	3.7E+14	4.0E+14	5.4E+15	7.4E+15	8.1E+14
20110315	183000	0.5	7.5E+16	4.2E+14	4.5E+14	5.9E+15	8.7E+15	9.4E+14
20110315	190000	0.5	5.1E+16	3.1E+14	3.4E+14	4.0E+15	7.1E+15	7.6E+14
20110315	193000	0.5	5.7E+16	3.8E+14	4.1E+14	4.6E+15	9.9E+15	1.0E+15
20110315	200000	0.5	4.1E+16	2.9E+14	3.1E+14	3.4E+15	8.5E+15	8.8E+14
20110315	203000	0.5	4.5E+16	3.4E+14	3.7E+14	3.6E+15	1.0E+16	1.1E+15
20110315	210000	0.5	3.2E+16	2.5E+14	2.7E+14	2.5E+15	7.7E+15	7.7E+14
20110315	213000	0.5	3.4E+16	3.0E+14	3.2E+14	2.8E+15	8.9E+15	8.8E+14
20110315	220000	0.5	2.5E+16	2.3E+14	2.5E+14	2.0E+15	6.8E+15	6.6E+14
20110315	223000	0.5	3.1E+16	3.0E+14	3.2E+14	2.6E+15	8.7E+15	8.3E+14
20110315	230000	0.5	2.4E+16	2.3E+14	2.5E+14	2.1E+15	7.2E+15	6.8E+14
20110315	233000	0.5	2.3E+16	2.6E+14	2.8E+14	2.4E+15	8.3E+15	7.7E+14
20110316	000000	0.5	1.7E+16	1.7E+14	1.8E+14	1.6E+15	5.9E+15	5.4E+14
20110316	003000	0.5	2.1E+16	1.6E+14	1.8E+14	1.8E+15	6.2E+15	5.6E+14
20110316	010000	0.5	1.6E+16	1.1E+14	1.2E+14	1.3E+15	4.3E+15	3.8E+14
20110316	013000	0.5	1.5E+16	1.0E+14	1.1E+14	1.5E+15	4.4E+15	3.9E+14
20110316	020000	0.5	1.0E+16	8.3E+13	8.9E+13	1.3E+15	3.1E+15	2.7E+14
20110316	023000	0.5	1.1E+16	8.7E+13	9.4E+13	1.5E+15	3.3E+15	2.8E+14
20110316	030000	0.5	8.5E+15	5.7E+13	6.1E+13	1.2E+15	2.1E+15	1.8E+14
20110316	033000	0.5	1.0E+16	4.6E+13	4.9E+13	1.3E+15	2.0E+15	1.7E+14
20110316	040000	0.5	8.2E+15	2.9E+13	3.2E+13	8.9E+14	1.6E+15	1.3E+14
20110316	043000	0.5	1.0E+16	2.4E+13	2.6E+13	1.0E+15	1.5E+15	1.2E+14

20110316	050000	0.5	7.9E+15	1.3E+13	1.4E+13	8.0E+14	9.1E+14	7.2E+13
20110316	053000	0.5	9.7E+15	3.0E+13	3.2E+13	1.1E+15	9.4E+14	7.3E+13
20110316	060000	0.5	7.6E+15	2.2E+13	2.4E+13	8.1E+14	5.3E+14	4.0E+13
20110316	063000	0.5	9.3E+15	1.8E+13	2.0E+13	9.2E+14	7.3E+14	5.5E+13
20110316	070000	0.5	7.1E+15	5.7E+12	6.2E+12	6.3E+14	5.1E+14	3.8E+13
20110316	073000	0.5	6.3E+15	9.4E+12	1.0E+13	8.2E+14	3.0E+14	2.2E+13
20110316	080000	0.5	4.0E+15	1.1E+13	1.2E+13	6.9E+14	2.6E+14	1.9E+13
20110316	083000	0.5	1.5E+15	8.3E+12	9.0E+12	8.2E+14	2.4E+14	1.7E+13
20110316	090000	0.5	5.4E+14	5.7E+12	6.2E+12	5.9E+14	2.2E+14	1.6E+13
20110316	093000	0.5	6.0E+14	8.6E+12	9.3E+12	7.6E+14	1.8E+14	1.3E+13
20110316	100000	0.5	3.9E+14	2.5E+11	2.7E+11	5.8E+14	4.0E+13	2.7E+12
20110316	103000	0.5	4.7E+14	9.2E+12	9.9E+12	7.4E+14	1.0E+14	6.8E+12
20110316	110000	0.5	3.8E+14	9.7E+12	1.0E+13	6.8E+14	1.5E+14	9.6E+12
20110316	113000	0.5	4.5E+14	4.9E+12	5.3E+12	8.2E+14	2.0E+14	1.3E+13
20110316	120000	0.5	3.4E+14	1.6E+13	1.7E+13	5.7E+14	1.2E+14	7.6E+12
20110316	123000	0.5	3.6E+14	0.0E+00	0.0E+00	6.9E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	130000	0.5	2.0E+14	5.0E+12	5.4E+12	5.1E+14	1.8E+13	1.1E+12
20110316	133000	0.5	2.0E+14	0.0E+00	0.0E+00	6.7E+14	6.3E+13	3.9E+12
20110316	140000	0.5	1.5E+14	5.6E+12	6.0E+12	6.0E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	143000	0.5	1.6E+14	0.0E+00	0.0E+00	7.1E+14	1.8E+14	1.1E+13
20110316	150000	0.5	8.7E+13	1.1E+13	1.1E+13	5.7E+14	2.3E+13	1.3E+12
20110316	153000	0.5	6.2E+13	2.2E+12	2.4E+12	6.9E+14	1.1E+14	6.4E+12
20110316	160000	0.5	4.3E+13	0.0E+00	0.0E+00	5.5E+14	1.2E+13	6.9E+11
20110316	163000	0.5	4.8E+13	1.1E+13	1.1E+13	6.8E+14	1.2E+14	7.0E+12
20110316	170000	0.5	3.3E+13	0.0E+00	0.0E+00	5.4E+14	6.9E+13	3.8E+12
20110316	173000	0.5	3.8E+13	9.7E+12	1.0E+13	7.3E+14	8.2E+13	4.4E+12
20110316	180000	0.5	3.8E+13	0.0E+00	0.0E+00	5.1E+14	7.4E+13	4.0E+12
20110316	183000	0.5	3.8E+13	6.5E+12	7.0E+12	5.6E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	190000	0.5	2.8E+13	0.0E+00	0.0E+00	4.3E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	193000	0.5	3.8E+13	1.7E+12	1.9E+12	5.5E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	200000	0.5	2.8E+13	0.0E+00	0.0E+00	4.8E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	203000	0.5	3.3E+13	0.0E+00	0.0E+00	5.7E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	210000	0.5	2.3E+13	0.0E+00	0.0E+00	3.7E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	213000	0.5	2.3E+13	0.0E+00	0.0E+00	5.1E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	220000	0.5	1.9E+13	0.0E+00	0.0E+00	3.7E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	223000	0.5	1.8E+13	0.0E+00	0.0E+00	4.7E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110316	230000	0.5	1.4E+13	2.9E+12	3.1E+12	4.8E+14	3.0E+13	1.4E+12
20110316	233000	0.5	9.2E+12	5.1E+10	5.5E+10	5.8E+14	1.0E+14	4.7E+12
20110317	000000	0.5	4.6E+12	1.0E+13	1.1E+13	4.2E+14	4.8E+13	2.2E+12
20110317	003000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.4E+14	1.5E+14	6.4E+12
20110317	010000	0.5	0.0E+00	1.8E+13	1.9E+13	3.9E+14	9.3E+13	4.0E+12
20110317	013000	0.5	0.0E+00	1.4E+13	1.5E+13	6.0E+14	2.7E+14	1.2E+13
20110317	020000	0.5	0.0E+00	3.2E+12	3.4E+12	4.9E+14	8.9E+13	3.8E+12
20110317	023000	0.5	0.0E+00	1.4E+13	1.5E+13	5.4E+14	2.6E+14	1.1E+13
20110317	030000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.9E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110317	033000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.1E+14	1.5E+13	6.2E+11
20110317	040000	0.5	0.0E+00	7.3E+12	7.9E+12	3.9E+14	1.8E+13	7.1E+11
20110317	043000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.0E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110317	050000	0.5	0.0E+00	3.7E+12	4.0E+12	4.0E+14	2.3E+13	9.1E+11
20110317	053000	0.5	0.0E+00	7.1E+11	7.7E+11	4.6E+14	3.1E+13	1.2E+12
20110317	060000	0.5	0.0E+00	1.3E+12	1.4E+12	3.5E+14	5.9E+13	2.2E+12
20110317	063000	0.5	0.0E+00	8.7E+12	9.3E+12	3.8E+14	8.2E+13	3.0E+12
20110317	070000	0.5	0.0E+00	1.7E+12	1.8E+12	3.0E+14	4.8E+13	1.7E+12
20110317	073000	0.5	0.0E+00	3.7E+12	4.0E+12	3.4E+14	1.3E+14	4.6E+12
20110317	080000	0.5	0.0E+00	6.4E+12	6.9E+12	2.7E+14	1.5E+13	5.4E+11
20110317	083000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.0E+14	1.7E+14	5.9E+12

20110317	090000	0.5	0.0E+00	8.2E+12	8.8E+12	2.1E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110317	093000	0.5	0.0E+00	4.5E+12	4.8E+12	2.5E+14	1.5E+14	4.9E+12
20110317	100000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.1E+14	4.0E+13	1.3E+12
20110317	103000	0.5	0.0E+00	1.3E+13	1.4E+13	1.8E+14	0.0E+00	0.0E+00
20110317	110000	0.5	0.0E+00	9.1E+12	9.8E+12	2.1E+14	8.3E+13	2.7E+12
20110317	113000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.4E+14	1.9E+13	6.0E+11
20110317	120000	0.5	0.0E+00	8.6E+12	9.3E+12	1.8E+14	1.3E+14	4.1E+12
20110317	123000	0.5	0.0E+00	1.4E+13	1.5E+13	2.7E+14	1.8E+14	5.5E+12
20110317	130000	0.5	0.0E+00	5.6E+12	6.0E+12	2.1E+14	1.1E+14	3.4E+12
20110317	133000	0.5	0.0E+00	2.2E+13	2.4E+13	2.4E+14	3.3E+14	1.0E+13
20110317	140000	0.5	0.0E+00	1.4E+13	1.5E+13	2.4E+14	2.1E+14	6.3E+12
20110317	143000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.5E+14	3.7E+13	1.1E+12
20110317	150000	0.5	0.0E+00	1.1E+13	1.2E+13	1.7E+14	2.4E+13	6.9E+11
20110317	153000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.7E+14	1.9E+14	5.3E+12
20110317	160000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.4E+14	5.6E+13	1.6E+12
20110317	163000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.7E+14	6.8E+13	1.9E+12
20110317	170000	0.5	0.0E+00	1.2E+12	1.3E+12	1.1E+14	1.5E+14	4.0E+12
20110317	173000	0.5	0.0E+00	1.4E+12	1.5E+12	1.9E+14	1.4E+14	3.8E+12
20110317	180000	0.5	0.0E+00	2.1E+13	2.2E+13	1.4E+14	1.9E+14	5.0E+12
20110317	183000	0.5	0.0E+00	1.2E+13	1.3E+13	1.7E+14	2.7E+14	7.0E+12
20110317	190000	0.5	0.0E+00	8.6E+12	9.2E+12	1.4E+14	2.2E+14	5.5E+12
20110317	193000	0.5	0.0E+00	2.5E+13	2.7E+13	1.7E+14	3.0E+14	7.5E+12
20110317	200000	0.5	0.0E+00	1.2E+13	1.3E+13	1.3E+14	1.8E+14	4.5E+12
20110317	203000	0.5	0.0E+00	1.3E+13	1.4E+13	1.6E+14	2.0E+14	4.8E+12

Table 6. 原子力機構の推定結果 3 (Kobayashi et al., 2013)

Start time (JST)		Duration	I-131	Te-132	Cs-137	Cs-134
yyyymmdd	hhmmss	(h)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)
20110312	050000	4.5	1.1E+14	0.0E+00	1.1E+13	1.1E+13
20110312	093000	6	5.0E+13	0.0E+00	5.0E+12	5.0E+12
20110312	153000	0.5	8.9E+15	0.0E+00	8.9E+14	8.9E+14
20110312	160000	8	2.3E+14	0.0E+00	2.3E+13	2.3E+13
20110313	000000	11	2.8E+14	0.0E+00	2.8E+13	2.8E+13
20110313	110000	4	3.3E+14	0.0E+00	3.3E+13	3.3E+13
20110313	150000	8	3.7E+14	0.0E+00	3.7E+13	3.7E+13
20110313	230000	12	1.1E+14	0.0E+00	1.1E+13	1.1E+13
20110314	110000	8	2.5E+14	0.0E+00	2.5E+13	2.5E+13
20110314	190000	2.5	4.2E+13	0.0E+00	4.2E+12	4.2E+12
20110314	213000	2.5	2.4E+15	0.0E+00	2.4E+14	2.4E+14
20110315	000000	7	6.4E+14	0.0E+00	7.3E+13	7.3E+13
20110315	070000	3	5.5E+15	0.0E+00	5.5E+14	5.5E+14
20110315	100000	3	1.5E+14	0.0E+00	1.5E+13	1.5E+13
20110315	130000	4	7.3E+15	0.0E+00	7.3E+14	7.3E+14
20110315	170000	9	8.3E+14	0.0E+00	1.2E+13	1.2E+13
20110316	020000	4	6.9E+14	0.0E+00	9.9E+12	9.9E+12
20110316	060000	12	3.8E+14	0.0E+00	5.5E+12	5.5E+12
20110316	180000	12	5.8E+14	0.0E+00	8.2E+12	8.2E+12
20110317	060000	12	5.0E+14	0.0E+00	1.2E+13	1.2E+13
20110317	180000	12	4.6E+14	0.0E+00	1.1E+13	1.1E+13
20110318	060000	4	9.5E+14	0.0E+00	2.3E+13	2.3E+13
20110318	100000	14	1.3E+15	0.0E+00	3.1E+13	3.1E+13
20110319	000000	15	1.2E+15	0.0E+00	3.0E+13	3.0E+13
20110319	150000	9	4.5E+14	0.0E+00	4.1E+13	4.1E+13
20110320	000000	27	3.8E+14	0.0E+00	3.5E+13	3.5E+13
20110321	030000	18	1.4E+14	0.0E+00	1.4E+13	1.4E+13
20110321	210000	26	4.1E+14	0.0E+00	4.7E+12	4.7E+12
20110322	230000	25	7.1E+14	0.0E+00	8.9E+12	8.9E+12
20110324	000000	24	1.9E+14	0.0E+00	2.9E+12	2.9E+12
20110325	000000	35	5.6E+13	0.0E+00	1.2E+12	1.2E+12
20110326	110000	32	4.0E+12	0.0E+00	1.7E+11	1.7E+11
20110327	190000	12	4.0E+12	0.0E+00	5.9E+11	5.9E+11
20110328	070000	15	4.0E+12	0.0E+00	6.8E+11	6.8E+11
20110328	220000	23	7.5E+12	0.0E+00	4.7E+12	4.7E+12
20110329	210000	14	1.5E+13	0.0E+00	8.8E+12	8.8E+12
20110330	110000	13	1.8E+14	0.0E+00	1.4E+14	1.4E+14
20110331	000000	22	2.4E+13	0.0E+00	4.5E+12	4.5E+12
20110331	220000	35	1.8E+12	0.0E+00	1.6E+12	1.6E+12
20110402	090000	48	1.8E+12	0.0E+00	5.8E+11	5.8E+11
20110404	090000	80	7.0E+11	0.0E+00	1.4E+11	1.4E+11
20110407	170000	150	7.0E+11	0.0E+00	3.5E+11	3.5E+11
20110413	230000	409	7.0E+11	0.0E+00	1.8E+11	1.8E+11

Table 7. 国外の研究機関の推定結果 2 (Saunier et al., 2013)

Start time (JST)	Dur.	Cs-134	Cs-137	Ba-137m	Cs-136	I-131	I-132	Te-132	Xe-133
yyyymmdd hhmmss	(h)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)
20110311 090000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 100000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 110000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 120000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 130000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 140000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 150000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 160000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 170000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 180000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 190000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 200000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 210000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 220000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110311 230000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 000000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 010000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 020000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 030000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 040000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 050000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 060000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 070000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	1.6E+13	5.8E+14	2.7E+14	2.6E+14	1.3E+15
20110312 080000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	2.1E+13	6.5E+14	2.4E+14	2.3E+14	4.1E+15
20110312 090000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	3.0E+13	6.6E+14	1.9E+14	1.8E+14	6.0E+15
20110312 100000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	3.1E+13	7.0E+14	1.4E+14	1.4E+14	2.8E+15
20110312 110000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	2.7E+13	6.7E+14	1.4E+14	1.4E+14	2.2E+15
20110312 120000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 130000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 140000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 150000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 160000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110312 170000	1	2.3E+14	2.1E+14	2.0E+14	1.0E+14	3.5E+15	6.4E+14	6.3E+14	2.3E+17
20110312 180000	1	3.1E+14	3.0E+14	2.8E+14	1.4E+14	3.7E+15	7.7E+14	7.5E+14	4.9E+17
20110312 190000	1	3.0E+14	2.8E+14	2.7E+14	1.4E+14	3.6E+15	6.7E+14	6.5E+14	4.7E+17
20110312 200000	1	2.0E+14	1.8E+14	1.7E+14	7.0E+13	2.7E+15	5.2E+14	5.1E+14	4.9E+14
20110312 210000	1	2.3E+14	2.2E+14	2.1E+14	1.0E+14	2.7E+15	5.3E+14	5.1E+14	2.6E+17
20110312 220000	1	2.3E+14	2.1E+14	2.0E+14	8.5E+13	2.5E+15	4.9E+14	4.8E+14	2.1E+17
20110312 230000	1	1.9E+14	1.8E+14	1.7E+14	5.7E+13	2.2E+15	4.4E+14	4.3E+14	5.1E+16
20110313 000000	1	1.7E+14	1.6E+14	1.5E+14	5.2E+13	1.9E+15	3.8E+14	3.7E+14	7.7E+14
20110313 010000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	4.8E+13	1.7E+15	3.4E+14	3.3E+14	5.5E+14
20110313 020000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	3.8E+13	1.5E+15	3.0E+14	2.9E+14	2.7E+15
20110313 030000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.3E+14	3.4E+13	1.3E+15	2.6E+14	2.6E+14	1.0E+16
20110313 040000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.2E+14	2.7E+13	1.1E+15	2.1E+14	2.1E+14	2.9E+16
20110313 050000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	1.5E+13	8.4E+14	1.7E+14	1.6E+14	5.4E+16
20110313 060000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	2.2E+13	6.4E+14	1.4E+14	1.3E+14	4.8E+16
20110313 070000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	1.6E+13	6.0E+14	1.3E+14	1.3E+14	3.4E+16
20110313 080000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.4E+14	1.4E+13	5.7E+14	1.2E+14	1.2E+14	2.2E+16
20110313 090000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	1.9E+13	5.4E+14	1.2E+14	1.1E+14	1.6E+16
20110313 100000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	1.3E+13	5.3E+14	1.2E+14	1.1E+14	1.6E+16
20110313 110000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	1.4E+13	5.6E+14	1.2E+14	1.2E+14	2.2E+16
20110313 120000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.2E+14	1.5E+13	5.8E+14	1.2E+14	1.2E+14	4.1E+16

20110313	130000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.4E+14	1.7E+13	5.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	6.2E+16
20110313	140000	1	1.3E+14	1.2E+14	1.2E+14	1.9E+13	5.9E+14	1.4E+14	1.4E+14	8.5E+16
20110313	150000	1	1.0E+14	9.4E+13	8.9E+13	1.8E+13	7.0E+14	1.7E+14	1.6E+14	1.2E+17
20110313	160000	1	7.1E+13	6.6E+13	6.3E+13	1.5E+13	8.1E+14	2.1E+14	2.0E+14	1.3E+17
20110313	170000	1	5.4E+13	5.0E+13	4.8E+13	5.0E+12	6.9E+14	2.3E+14	2.2E+14	4.9E+16
20110313	180000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110313	190000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110313	200000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110313	210000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110313	220000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110313	230000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	000000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	010000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	020000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	030000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	040000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	050000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	060000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	070000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	080000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	090000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.2E+14	1.4E+13	5.0E+14	1.4E+14	1.3E+14	2.6E+16
20110314	100000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.2E+14	1.4E+13	5.0E+14	1.3E+14	1.3E+14	1.1E+16
20110314	110000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	1.4E+13	5.2E+14	1.5E+14	1.5E+14	4.0E+15
20110314	120000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	1.5E+13	5.2E+14	1.5E+14	1.5E+14	3.9E+15
20110314	130000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	140000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	150000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	160000	1	1.6E+14	1.5E+14	1.4E+14	1.6E+13	5.8E+14	1.6E+14	1.5E+14	8.4E+15
20110314	170000	1	1.9E+14	1.7E+14	1.6E+14	3.1E+13	6.8E+14	1.7E+14	1.7E+14	8.7E+15
20110314	180000	1	2.1E+14	1.9E+14	1.8E+14	5.8E+13	8.6E+14	2.4E+14	2.3E+14	6.0E+15
20110314	190000	1	2.7E+14	2.6E+14	2.4E+14	8.6E+13	1.3E+15	3.2E+14	3.1E+14	6.9E+15
20110314	200000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	210000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110314	220000	1	1.7E+14	1.6E+14	1.5E+14	9.0E+13	1.3E+15	2.8E+14	2.7E+14	5.9E+15
20110314	230000	1	1.9E+14	1.8E+14	1.7E+14	7.8E+13	1.1E+15	2.6E+14	2.5E+14	5.9E+16
20110315	000000	1	2.3E+14	2.2E+14	2.1E+14	7.1E+13	1.4E+15	2.8E+14	2.8E+14	8.3E+16
20110315	010000	1	3.1E+14	2.9E+14	2.8E+14	1.5E+14	1.8E+15	3.3E+14	3.2E+14	6.7E+16
20110315	020000	1	3.7E+14	3.5E+14	3.3E+14	1.5E+14	2.3E+15	4.4E+14	4.2E+14	1.8E+17
20110315	030000	1	3.7E+14	3.5E+14	3.3E+14	1.6E+14	2.3E+15	4.6E+14	4.4E+14	5.1E+17
20110315	040000	1	5.0E+13	4.7E+13	4.5E+13	4.7E+12	4.2E+14	2.3E+14	2.2E+14	5.5E+17
20110315	050000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.4E+14	3.4E+13	6.1E+14	9.9E+14	9.6E+14	3.7E+17
20110315	060000	1	3.9E+14	3.7E+14	3.5E+14	1.9E+14	1.8E+15	1.4E+15	1.3E+15	3.5E+17
20110315	070000	1	1.5E+13	1.4E+13	1.3E+13	2.0E+12	4.3E+13	9.2E+12	9.0E+12	1.6E+17
20110315	080000	1	7.0E+12	6.6E+12	6.3E+12	6.8E+11	1.8E+13	1.1E+13	1.1E+13	7.5E+16
20110315	090000	1	3.0E+12	2.8E+12	2.6E+12	1.2E+12	1.5E+13	1.9E+12	1.8E+12	2.7E+16
20110315	100000	1	1.4E+13	1.3E+13	1.3E+13	1.5E+12	3.6E+13	9.0E+12	8.7E+12	1.7E+17
20110315	110000	1	5.8E+13	5.4E+13	5.1E+13	6.3E+12	1.3E+14	3.5E+13	3.4E+13	3.3E+17
20110315	120000	1	9.6E+13	9.0E+13	8.5E+13	1.5E+13	2.2E+14	7.7E+14	7.5E+14	1.0E+18
20110315	130000	1	2.1E+14	2.0E+14	1.9E+14	2.3E+13	1.6E+15	2.3E+15	2.3E+15	1.2E+18
20110315	140000	1	8.7E+14	8.2E+14	7.7E+14	1.4E+14	1.0E+16	3.9E+15	3.8E+15	1.3E+18
20110315	150000	1	1.0E+15	9.7E+14	9.1E+14	1.8E+14	1.1E+16	3.8E+15	3.7E+15	1.2E+18
20110315	160000	1	2.3E+14	2.2E+14	2.1E+14	3.5E+13	5.8E+14	3.5E+15	3.4E+15	7.5E+17
20110315	170000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110315	180000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110315	190000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110315	200000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

[illegible]

20110318	050000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	060000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	070000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	080000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	090000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	100000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	1.9E+13	5.7E+14	1.7E+14	1.6E+14	1.9E+16
20110318	110000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	3.0E+13	5.8E+14	1.7E+14	1.6E+14	1.8E+16
20110318	120000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.4E+14	3.1E+13	5.8E+14	1.7E+14	1.6E+14	1.2E+16
20110318	130000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.4E+14	3.1E+13	5.8E+14	1.7E+14	1.7E+14	1.2E+16
20110318	140000	1	1.3E+14	1.2E+14	1.2E+14	2.4E+13	5.5E+14	1.7E+14	1.6E+14	4.8E+16
20110318	150000	1	9.9E+13	9.3E+13	8.8E+13	2.8E+13	4.9E+14	1.2E+14	1.2E+14	1.5E+17
20110318	160000	1	6.6E+13	6.2E+13	5.9E+13	1.6E+13	4.0E+14	1.4E+14	1.3E+14	6.3E+17
20110318	170000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	180000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	190000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	200000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	210000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	220000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110318	230000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	000000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	010000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	020000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	030000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	040000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	050000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	060000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	070000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	080000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	090000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	100000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	110000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	120000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	130000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	140000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	150000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110319	160000	1	1.5E+14	1.4E+14	1.3E+14	2.1E+13	5.3E+14	1.5E+14	1.4E+14	2.2E+15
20110319	170000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.3E+14	1.3E+13	5.1E+14	1.5E+14	1.4E+14	3.5E+15
20110319	180000	1	1.3E+14	1.2E+14	1.1E+14	1.5E+13	4.8E+14	1.4E+14	1.4E+14	6.0E+15
20110319	190000	1	1.1E+14	1.1E+14	1.0E+14	2.3E+13	3.4E+14	9.3E+13	9.0E+13	1.2E+16
20110319	200000	1	7.7E+13	7.2E+13	6.8E+13	8.3E+12	2.4E+14	8.7E+13	8.5E+13	2.5E+16
20110319	210000	1	5.8E+13	5.5E+13	5.2E+13	5.6E+12	1.5E+14	8.7E+13	8.4E+13	4.1E+16
20110319	220000	1	2.4E+13	2.2E+13	2.1E+13	6.2E+12	8.5E+13	7.0E+13	6.8E+13	4.8E+16
20110319	230000	1	3.3E+13	3.1E+13	3.0E+13	4.5E+12	2.2E+14	9.5E+13	9.2E+13	5.0E+16
20110320	000000	1	4.8E+12	4.5E+12	4.2E+12	2.0E+12	1.7E+13	1.9E+13	1.9E+13	3.3E+16
20110320	010000	1	3.9E+12	3.7E+12	3.5E+12	1.3E+12	1.0E+13	1.3E+13	1.3E+13	3.6E+16
20110320	020000	1	6.2E+12	5.8E+12	5.5E+12	8.0E+11	1.4E+13	6.5E+13	6.3E+13	3.5E+16
20110320	030000	1	4.1E+12	3.8E+12	3.6E+12	1.0E+12	1.1E+13	1.4E+13	1.3E+13	3.5E+16
20110320	040000	1	3.7E+12	3.5E+12	3.3E+12	1.5E+12	1.1E+13	3.9E+12	3.8E+12	3.3E+16
20110320	050000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	060000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	070000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	080000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	090000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	100000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	110000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	120000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

20110320	130000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	140000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	150000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	160000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	170000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	180000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	190000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110320	200000	1	2.1E+13	1.9E+13	1.8E+13	2.7E+12	1.9E+14	4.4E+13	4.3E+13	0.0E+00
20110320	210000	1	1.0E+14	9.4E+13	8.9E+13	1.9E+13	1.2E+15	8.4E+13	8.2E+13	0.0E+00
20110320	220000	1	3.2E+13	3.0E+13	2.9E+13	1.5E+13	3.2E+14	9.2E+13	8.9E+13	0.0E+00
20110320	230000	1	3.5E+13	3.3E+13	3.1E+13	1.6E+13	3.3E+14	5.6E+13	5.4E+13	0.0E+00
20110321	000000	1	6.5E+13	6.1E+13	5.8E+13	2.3E+13	1.4E+14	5.9E+13	5.7E+13	0.0E+00
20110321	010000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.2E+14	2.3E+13	6.7E+14	1.7E+14	1.6E+14	0.0E+00
20110321	020000	1	6.3E+13	6.0E+13	5.6E+13	2.7E+13	6.1E+14	2.7E+14	2.6E+14	0.0E+00
20110321	030000	1	1.0E+14	9.4E+13	8.9E+13	1.5E+13	2.4E+14	1.1E+14	1.1E+14	0.0E+00
20110321	040000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	050000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	060000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	070000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	080000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	090000	1	6.2E+13	5.8E+13	5.5E+13	2.9E+13	1.3E+14	6.9E+13	6.7E+13	0.0E+00
20110321	100000	1	7.7E+13	7.3E+13	6.9E+13	2.3E+13	1.8E+14	1.1E+14	1.1E+14	0.0E+00
20110321	110000	1	1.7E+11	1.6E+11	1.5E+11	3.7E+10	7.9E+11	2.3E+12	2.3E+12	0.0E+00
20110321	120000	1	3.3E+12	3.1E+12	2.9E+12	4.3E+11	9.9E+12	7.0E+12	6.8E+12	0.0E+00
20110321	130000	1	9.2E+10	8.6E+10	8.2E+10	3.6E+10	7.2E+11	2.6E+11	2.5E+11	0.0E+00
20110321	140000	1	4.8E+12	4.5E+12	4.2E+12	1.1E+12	4.4E+13	4.3E+12	4.2E+12	0.0E+00
20110321	150000	1	6.2E+13	5.8E+13	5.5E+13	1.2E+13	5.1E+14	6.9E+13	6.7E+13	0.0E+00
20110321	160000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	170000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	180000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	190000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	200000	1	6.8E+12	6.4E+12	6.1E+12	2.6E+12	1.5E+13	5.9E+12	5.7E+12	0.0E+00
20110321	210000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	220000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110321	230000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	000000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	010000	1	2.9E+13	2.8E+13	2.6E+13	4.0E+12	3.1E+14	2.9E+13	2.9E+13	0.0E+00
20110322	020000	1	4.0E+13	3.8E+13	3.6E+13	4.2E+12	1.6E+14	7.0E+13	6.8E+13	0.0E+00
20110322	030000	1	1.1E+14	1.0E+14	9.7E+13	1.6E+13	3.8E+14	6.9E+13	6.7E+13	0.0E+00
20110322	040000	1	1.4E+13	1.3E+13	1.2E+13	3.3E+12	3.1E+13	2.2E+13	2.1E+13	0.0E+00
20110322	050000	1	3.4E+13	3.2E+13	3.0E+13	4.4E+12	3.9E+14	5.8E+14	5.6E+14	0.0E+00
20110322	060000	1	8.6E+12	8.1E+12	7.6E+12	1.6E+12	2.2E+13	1.3E+14	1.2E+14	0.0E+00
20110322	070000	1	2.6E+13	2.4E+13	2.3E+13	4.4E+12	3.2E+14	2.6E+13	2.6E+13	0.0E+00
20110322	080000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	090000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	100000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	110000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	120000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	130000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	140000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	150000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	160000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	170000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	180000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	190000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110322	200000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

[illegible]

20110325	050000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	060000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	070000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	080000	1	3.4E+11	3.2E+11	3.1E+11	6.0E+10	1.5E+12	9.8E+11	9.5E+11	0.0E+00
20110325	090000	1	8.8E+11	8.3E+11	7.9E+11	1.5E+11	7.6E+12	6.1E+13	5.9E+13	0.0E+00
20110325	100000	1	5.4E+11	5.1E+11	4.8E+11	1.3E+11	1.5E+12	7.0E+11	6.8E+11	0.0E+00
20110325	110000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	120000	1	5.3E+11	4.9E+11	4.7E+11	2.5E+11	1.8E+12	5.9E+11	5.7E+11	0.0E+00
20110325	130000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	140000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	150000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	160000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	170000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	180000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	190000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	200000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	210000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	220000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110325	230000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	000000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	010000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	020000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	030000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	040000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	050000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	060000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	070000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	080000	1	1.4E+14	1.4E+14	1.3E+14	1.5E+13	5.5E+14	1.1E+14	1.1E+14	0.0E+00
20110326	090000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.3E+14	1.5E+13	5.5E+14	1.1E+14	1.1E+14	0.0E+00
20110326	100000	1	1.4E+14	1.4E+14	1.3E+14	1.5E+13	5.5E+14	1.1E+14	1.1E+14	0.0E+00
20110326	110000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.2E+14	1.5E+13	5.5E+14	1.1E+14	1.1E+14	0.0E+00
20110326	120000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.3E+14	1.6E+13	5.5E+14	1.1E+14	1.1E+14	0.0E+00
20110326	130000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.2E+14	1.6E+13	5.5E+14	1.1E+14	1.1E+14	0.0E+00
20110326	140000	1	1.4E+14	1.3E+14	1.3E+14	1.6E+13	5.6E+14	1.1E+14	1.1E+14	0.0E+00
20110326	150000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	160000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	170000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	180000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	190000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	200000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	210000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	220000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110326	230000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110327	000000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110327	010000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110327	020000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110327	030000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110327	040000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
20110327	050000	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

Table 8. 名古屋大学の推定結果 (Hirao et al., 2013)

Start time (JST)		Duration	Cs-137	I-131
yyyymmdd	hhmmss	(h)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)
20110314	120000	1	1.0E+13	1.4E+14
20110314	130000	1	1.0E+13	1.4E+14
20110314	140000	1	1.0E+13	1.4E+14
20110314	150000	1	3.8E+13	6.1E+14
20110314	160000	1	3.8E+13	6.1E+14
20110314	170000	1	3.8E+13	6.1E+14
20110314	180000	1	5.3E+13	9.4E+14
20110314	190000	1	5.3E+13	9.4E+14
20110314	200000	1	5.3E+13	9.4E+14
20110314	210000	1	5.0E+13	8.7E+14
20110314	220000	1	5.0E+13	8.7E+14
20110314	230000	1	5.0E+13	8.7E+14
20110315	000000	1	5.3E+13	1.0E+15
20110315	010000	1	5.3E+13	1.0E+15
20110315	020000	1	5.3E+13	1.0E+15
20110315	030000	1	8.6E+13	1.7E+15
20110315	040000	1	8.6E+13	1.7E+15
20110315	050000	1	8.6E+13	1.7E+15
20110315	060000	1	8.9E+13	2.0E+15
20110315	070000	1	8.9E+13	2.0E+15
20110315	080000	1	8.9E+13	2.0E+15
20110315	090000	1	1.0E+14	3.3E+15
20110315	100000	1	1.0E+14	3.3E+15
20110315	110000	1	1.0E+14	3.3E+15
20110315	120000			
20110315	130000			
20110315	140000			
20110315	150000	1	1.5E+14	7.2E+15
20110315	160000	1	1.5E+14	7.2E+15
20110315	170000	1	1.5E+14	7.2E+15
20110320	000000	1	2.7E+13	2.6E+14
20110320	010000	1	2.7E+13	2.6E+14
20110320	020000	1	2.7E+13	2.6E+14
20110320	030000	1	3.0E+13	3.2E+14
20110320	040000	1	3.0E+13	3.2E+14
20110320	050000	1	3.0E+13	3.2E+14
20110320	060000	1	4.6E+13	4.7E+14
20110320	070000	1	4.6E+13	4.7E+14
20110320	080000	1	4.6E+13	4.7E+14
20110320	090000	1	4.6E+13	4.7E+14
20110320	100000	1	4.6E+13	4.7E+14
20110320	110000	1	4.6E+13	4.7E+14
20110320	120000	1	3.1E+13	3.6E+14
20110320	130000	1	3.1E+13	3.6E+14
20110320	140000	1	3.1E+13	3.6E+14
20110320	150000	1	3.3E+13	2.5E+14
20110320	160000	1	3.3E+13	2.5E+14
20110320	170000	1	3.3E+13	2.5E+14
20110321	060000	1	1.7E+13	1.6E+14
20110321	070000	1	1.7E+13	1.6E+14

20110321	080000	1	1.7E+13	1.6E+14
20110321	090000	1	1.6E+13	1.4E+14
20110321	100000	1	1.6E+13	1.4E+14
20110321	110000	1	1.6E+13	1.4E+14
20110321	120000	1	1.2E+13	1.2E+14
20110321	130000	1	1.2E+13	1.2E+14
20110321	140000	1	1.2E+13	1.2E+14
20110321	150000	1	8.7E+12	1.6E+14
20110321	160000	1	8.7E+12	1.6E+14
20110321	170000	1	8.7E+12	1.6E+14
20110321	180000	1	9.4E+12	1.6E+14
20110321	190000	1	9.4E+12	1.6E+14
20110321	200000	1	9.4E+12	1.6E+14
20110321	210000	1	9.8E+12	1.5E+14
20110321	220000	1	9.8E+12	1.5E+14
20110321	230000	1	9.8E+12	1.5E+14
20110322	000000	1	7.3E+12	1.7E+14
20110322	010000	1	7.3E+12	1.7E+14
20110322	020000	1	7.3E+12	1.7E+14
20110322	030000	1	4.4E+12	2.2E+14
20110322	040000	1	4.4E+12	2.2E+14
20110322	050000	1	4.4E+12	2.2E+14
20110322	060000	1	3.9E+12	2.3E+14
20110322	070000	1	3.9E+12	2.3E+14
20110322	080000	1	3.9E+12	2.3E+14
20110322	090000	1	3.7E+12	2.7E+14
20110322	100000	1	3.7E+12	2.7E+14
20110322	110000	1	3.7E+12	2.7E+14
20110322	120000	1	2.4E+12	1.6E+14
20110322	130000	1	2.4E+12	1.6E+14
20110322	140000	1	2.4E+12	1.6E+14
20110323	060000	1	9.8E+12	7.0E+14
20110323	070000	1	9.8E+12	7.0E+14
20110323	080000	1	9.8E+12	7.0E+14
20110323	090000	1	1.5E+13	9.6E+14
20110323	100000	1	1.5E+13	9.6E+14
20110323	110000	1	1.5E+13	9.6E+14
20110323	120000	1	1.5E+13	9.6E+14
20110323	130000	1	1.5E+13	9.6E+14
20110323	140000	1	1.5E+13	9.6E+14
20110325	000000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	010000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	020000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	030000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	040000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	050000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	060000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	070000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	080000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	090000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	100000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	110000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	120000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	130000	1	1.2E+13	7.7E+13

20110325	140000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	150000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	160000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	170000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	180000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	190000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110325	200000	1	1.2E+13	7.7E+13
20110329	060000	1	1.3E+13	1.3E+13
20110329	070000	1	1.3E+13	1.3E+13
20110329	080000	1	1.3E+13	1.3E+13
20110329	090000	1	1.3E+13	1.3E+13
20110329	100000	1	1.3E+13	1.3E+13
20110329	110000	1	1.3E+13	1.3E+13
20110329	180000	1	6.3E+13	9.9E+13
20110329	190000	1	6.3E+13	9.9E+13
20110329	200000	1	6.3E+13	9.9E+13
20110329	210000	1	6.3E+13	9.9E+13
20110329	220000	1	6.3E+13	9.9E+13
20110329	230000	1	6.3E+13	9.9E+13
20110330	000000	1	7.7E+13	1.3E+14
20110330	010000	1	7.7E+13	1.3E+14
20110330	020000	1	7.7E+13	1.3E+14
20110330	030000	1	7.7E+13	1.3E+14
20110330	040000	1	7.7E+13	1.3E+14
20110330	050000	1	7.7E+13	1.3E+14
20110330	060000	1	1.1E+14	2.1E+14
20110330	070000	1	1.1E+14	2.1E+14
20110330	080000	1	1.1E+14	2.1E+14

Table 9. 国外の研究機関の推定結果 3 (Winiarek et al., 2014)

Start time (JST)		Duration	Cs-137
yyyymmdd	hhmmss	(h)	(Bq/h)
20110311	090000	1	1.0E-10
20110311	100000	1	1.7E+13
20110311	110000	1	1.0E-10
20110311	120000	1	1.0E-10
20110311	130000	1	1.0E-10
20110311	140000	1	3.8E+12
20110311	150000	1	2.0E+13
20110311	160000	1	4.5E+13
20110311	170000	1	7.2E+13
20110311	180000	1	4.5E+13
20110311	190000	1	3.9E+13
20110311	200000	1	5.5E+13
20110311	210000	1	4.4E+13
20110311	220000	1	2.6E+12
20110311	230000	1	5.9E+13
20110312	000000	1	5.1E+13
20110312	010000	1	6.1E+13
20110312	020000	1	1.0E-10
20110312	030000	1	1.0E-10
20110312	040000	1	1.0E-10
20110312	050000	1	1.0E-10
20110312	060000	1	2.9E+13
20110312	070000	1	7.2E+13
20110312	080000	1	1.0E+13
20110312	090000	1	1.0E-10
20110312	100000	1	1.0E-10
20110312	110000	1	1.4E+13
20110312	120000	1	2.7E+13
20110312	130000	1	1.3E+13
20110312	140000	1	1.0E-10
20110312	150000	1	1.0E-10
20110312	160000	1	1.0E-10
20110312	170000	1	1.0E-10
20110312	180000	1	1.0E-10
20110312	190000	1	1.0E-10
20110312	200000	1	1.0E-10
20110312	210000	1	1.0E-10
20110312	220000	1	1.0E-10
20110312	230000	1	1.0E-10
20110313	000000	1	1.0E-10
20110313	010000	1	1.0E-10
20110313	020000	1	1.0E-10
20110313	030000	1	1.0E-10
20110313	040000	1	1.0E-10
20110313	050000	1	1.0E-10
20110313	060000	1	1.0E-10
20110313	070000	1	1.0E-10
20110313	080000	1	1.0E-10
20110313	090000	1	1.0E-10
20110313	100000	1	1.0E-10
20110313	110000	1	1.0E-10
20110313	120000	1	1.0E-10

20110313	130000	1	1.0E-10
20110313	140000	1	1.2E+14
20110313	150000	1	1.4E+13
20110313	160000	1	1.0E-10
20110313	170000	1	2.8E+12
20110313	180000	1	2.0E+12
20110313	190000	1	2.4E+10
20110313	200000	1	1.0E-10
20110313	210000	1	1.0E-10
20110313	220000	1	1.0E-10
20110313	230000	1	5.6E+11
20110314	000000	1	3.1E+12
20110314	010000	1	5.2E+12
20110314	020000	1	1.0E-10
20110314	030000	1	1.0E-10
20110314	040000	1	1.0E-10
20110314	050000	1	1.0E-10
20110314	060000	1	1.0E-10
20110314	070000	1	1.0E-10
20110314	080000	1	1.0E-10
20110314	090000	1	1.0E-10
20110314	100000	1	1.0E-10
20110314	110000	1	2.5E+13
20110314	120000	1	1.8E+13
20110314	130000	1	2.3E+13
20110314	140000	1	3.9E+13
20110314	150000	1	6.6E+13
20110314	160000	1	1.2E+14
20110314	170000	1	7.9E+13
20110314	180000	1	6.9E+13
20110314	190000	1	4.3E+13
20110314	200000	1	1.0E+13
20110314	210000	1	4.5E+13
20110314	220000	1	1.9E+13
20110314	230000	1	1.0E-10
20110315	000000	1	1.0E-10
20110315	010000	1	1.0E-10
20110315	020000	1	3.0E+14
20110315	030000	1	8.4E+14
20110315	040000	1	1.0E-10
20110315	050000	1	1.0E-10
20110315	060000	1	1.0E-10
20110315	070000	1	2.2E+13
20110315	080000	1	1.0E-10
20110315	090000	1	1.0E-10
20110315	100000	1	4.4E+13
20110315	110000	1	1.7E+14
20110315	120000	1	1.0E+14
20110315	130000	1	9.8E+13
20110315	140000	1	5.9E+13
20110315	150000	1	1.0E-10
20110315	160000	1	3.0E+14
20110315	170000	1	1.4E+14
20110315	180000	1	1.0E-10
20110315	190000	1	1.0E-10
20110315	200000	1	1.0E-10

20110315	210000	1	1.0E-10
20110315	220000	1	1.0E-10
20110315	230000	1	1.0E-10
20110316	000000	1	1.0E-10
20110316	010000	1	1.0E-10
20110316	020000	1	1.0E-10
20110316	030000	1	1.0E-10
20110316	040000	1	1.0E-10
20110316	050000	1	1.0E-10
20110316	060000	1	1.0E-10
20110316	070000	1	1.0E-10
20110316	080000	1	1.0E-10
20110316	090000	1	1.0E-10
20110316	100000	1	1.0E-10
20110316	110000	1	1.0E-10
20110316	120000	1	1.0E-10
20110316	130000	1	1.0E-10
20110316	140000	1	2.5E+13
20110316	150000	1	3.3E+13
20110316	160000	1	3.3E+13
20110316	170000	1	3.5E+13
20110316	180000	1	3.3E+13
20110316	190000	1	3.1E+13
20110316	200000	1	3.0E+13
20110316	210000	1	3.3E+13
20110316	220000	1	3.5E+13
20110316	230000	1	3.8E+13
20110317	000000	1	3.1E+13
20110317	010000	1	1.9E+13
20110317	020000	1	1.7E+13
20110317	030000	1	1.9E+13
20110317	040000	1	2.8E+13
20110317	050000	1	3.8E+13
20110317	060000	1	2.9E+13
20110317	070000	1	2.2E+13
20110317	080000	1	3.8E+13
20110317	090000	1	3.3E+13
20110317	100000	1	2.8E+13
20110317	110000	1	2.0E+13
20110317	120000	1	2.9E+13
20110317	130000	1	2.8E+13
20110317	140000	1	3.0E+13
20110317	150000	1	2.3E+13
20110317	160000	1	2.4E+13
20110317	170000	1	2.6E+13
20110317	180000	1	2.8E+13
20110317	190000	1	3.0E+13
20110317	200000	1	2.8E+13
20110317	210000	1	1.1E+13
20110317	220000	1	6.7E+12
20110317	230000	1	1.0E-10
20110318	000000	1	1.0E-10
20110318	010000	1	1.0E-10
20110318	020000	1	1.0E-10
20110318	030000	1	1.0E-10
20110318	040000	1	1.0E-10

20110318	050000	1	1.9E+12
20110318	060000	1	8.7E+12
20110318	070000	1	1.0E-10
20110318	080000	1	2.0E+12
20110318	090000	1	1.2E+13
20110318	100000	1	2.0E+12
20110318	110000	1	2.0E+13
20110318	120000	1	2.6E+13
20110318	130000	1	1.0E-10
20110318	140000	1	1.0E-10
20110318	150000	1	2.9E+13
20110318	160000	1	4.2E+13
20110318	170000	1	5.4E+12
20110318	180000	1	9.4E+12
20110318	190000	1	1.4E+14
20110318	200000	1	8.0E+13
20110318	210000	1	1.0E-10
20110318	220000	1	1.0E-10
20110318	230000	1	1.0E-10
20110319	000000	1	1.0E-10
20110319	010000	1	1.0E-10
20110319	020000	1	1.0E-10
20110319	030000	1	1.0E-10
20110319	040000	1	1.0E-10
20110319	050000	1	1.0E-10
20110319	060000	1	1.0E-10
20110319	070000	1	1.0E-10
20110319	080000	1	1.0E-10
20110319	090000	1	1.0E-10
20110319	100000	1	7.1E+12
20110319	110000	1	8.7E+12
20110319	120000	1	1.8E+12
20110319	130000	1	1.0E-10
20110319	140000	1	1.0E-10
20110319	150000	1	1.0E-10
20110319	160000	1	1.0E-10
20110319	170000	1	3.1E+13
20110319	180000	1	2.3E+14
20110319	190000	1	5.0E+14
20110319	200000	1	1.0E-10
20110319	210000	1	1.0E-10
20110319	220000	1	1.0E-10
20110319	230000	1	1.0E-10
20110320	000000	1	1.0E-10
20110320	010000	1	1.0E-10
20110320	020000	1	1.0E-10
20110320	030000	1	1.3E+14
20110320	040000	1	4.5E+14
20110320	050000	1	1.0E-10
20110320	060000	1	1.0E-10
20110320	070000	1	1.0E-10
20110320	080000	1	1.0E-10
20110320	090000	1	1.0E-10
20110320	100000	1	1.0E-10
20110320	110000	1	1.0E-10
20110320	120000	1	1.0E-10

20110320	130000	1	1.0E-10
20110320	140000	1	3.9E+13
20110320	150000	1	7.1E+14
20110320	160000	1	1.0E-10
20110320	170000	1	1.0E-10
20110320	180000	1	1.0E-10
20110320	190000	1	1.8E+15
20110320	200000	1	1.0E-10
20110320	210000	1	1.0E-10
20110320	220000	1	1.0E-10
20110320	230000	1	1.0E-10
20110321	000000	1	1.0E-10
20110321	010000	1	1.0E-10
20110321	020000	1	1.0E-10
20110321	030000	1	1.0E-10
20110321	040000	1	1.0E-10
20110321	050000	1	1.1E+14
20110321	060000	1	1.0E-10
20110321	070000	1	1.0E-10
20110321	080000	1	1.0E-10
20110321	090000	1	1.0E-10
20110321	100000	1	1.0E-10
20110321	110000	1	1.0E-10
20110321	120000	1	1.0E-10
20110321	130000	1	1.0E-10
20110321	140000	1	1.0E-10
20110321	150000	1	1.0E-10
20110321	160000	1	1.0E-10
20110321	170000	1	1.0E-10
20110321	180000	1	1.0E-10
20110321	190000	1	1.0E-10
20110321	200000	1	1.0E-10
20110321	210000	1	1.0E-10
20110321	220000	1	1.0E-10
20110321	230000	1	1.0E-10
20110322	000000	1	1.0E-10
20110322	010000	1	1.0E-10
20110322	020000	1	1.0E-10
20110322	030000	1	1.0E-10
20110322	040000	1	1.0E-10
20110322	050000	1	1.0E-10
20110322	060000	1	1.0E-10
20110322	070000	1	7.9E+12
20110322	080000	1	3.0E+12
20110322	090000	1	1.0E-10
20110322	100000	1	1.0E-10
20110322	110000	1	1.0E-10
20110322	120000	1	1.0E-10
20110322	130000	1	1.0E-10
20110322	140000	1	1.7E+14
20110322	150000	1	6.5E+14
20110322	160000	1	1.0E-10
20110322	170000	1	8.7E+12
20110322	180000	1	1.0E+14
20110322	190000	1	9.8E+13
20110322	200000	1	1.1E+14

20110322	210000	1	1.5E+14
20110322	220000	1	5.7E+12
20110322	230000	1	1.0E-10
20110323	000000	1	1.0E-10
20110323	010000	1	1.0E-10
20110323	020000	1	1.0E-10
20110323	030000	1	1.0E-10
20110323	040000	1	1.0E-10
20110323	050000	1	1.0E-10
20110323	060000	1	1.0E-10
20110323	070000	1	1.0E-10
20110323	080000	1	6.5E+12
20110323	090000	1	1.0E-10
20110323	100000	1	1.0E-10
20110323	110000	1	5.0E+12
20110323	120000	1	1.7E+13
20110323	130000	1	1.0E-10
20110323	140000	1	1.0E-10
20110323	150000	1	1.0E-10
20110323	160000	1	1.0E-10
20110323	170000	1	1.0E-10
20110323	180000	1	1.0E-10
20110323	190000	1	1.0E-10
20110323	200000	1	1.0E+13
20110323	210000	1	1.7E+13
20110323	220000	1	1.0E-10
20110323	230000	1	4.6E+12
20110324	000000	1	1.0E-10
20110324	010000	1	1.3E+13
20110324	020000	1	1.0E-10
20110324	030000	1	4.5E+13
20110324	040000	1	6.1E+13
20110324	050000	1	8.0E+13
20110324	060000	1	1.0E-10
20110324	070000	1	1.0E-10
20110324	080000	1	1.0E-10
20110324	090000	1	1.0E-10
20110324	100000	1	1.0E-10
20110324	110000	1	1.0E-10
20110324	120000	1	1.0E-10
20110324	130000	1	1.0E-10
20110324	140000	1	1.0E-10
20110324	150000	1	1.0E-10
20110324	160000	1	5.3E+11
20110324	170000	1	3.2E+13
20110324	180000	1	1.0E-10
20110324	190000	1	1.0E-10
20110324	200000	1	1.0E-10
20110324	210000	1	1.0E-10
20110324	220000	1	1.0E-10
20110324	230000	1	1.0E-10
20110325	000000	1	1.0E-10
20110325	010000	1	1.0E-10
20110325	020000	1	1.0E-10
20110325	030000	1	1.0E-10
20110325	040000	1	1.0E-10

20110325	050000	1	1.0E-10
20110325	060000	1	1.0E-10
20110325	070000	1	1.0E-10
20110325	080000	1	1.0E-10
20110325	090000	1	1.0E-10
20110325	100000	1	9.6E+13
20110325	110000	1	2.8E+15
20110325	120000	1	1.0E-10
20110325	130000	1	1.0E-10
20110325	140000	1	1.0E-10
20110325	150000	1	1.0E-10
20110325	160000	1	1.0E-10
20110325	170000	1	1.0E-10
20110325	180000	1	1.0E-10
20110325	190000	1	5.6E+13
20110325	200000	1	1.0E-10
20110325	210000	1	1.0E-10
20110325	220000	1	1.0E-10
20110325	230000	1	1.0E-10
20110326	000000	1	1.0E-10
20110326	010000	1	1.0E-10
20110326	020000	1	1.0E-10
20110326	030000	1	1.0E-10
20110326	040000	1	1.0E-10
20110326	050000	1	1.0E-10
20110326	060000	1	1.0E-10
20110326	070000	1	1.0E-10
20110326	080000	1	1.0E-10
20110326	090000	1	1.0E-10
20110326	100000	1	1.0E-10
20110326	110000	1	1.7E+13
20110326	120000	1	2.5E+13
20110326	130000	1	3.1E+13
20110326	140000	1	3.7E+13
20110326	150000	1	3.7E+13
20110326	160000	1	1.9E+13
20110326	170000	1	9.0E+12
20110326	180000	1	3.4E+13
20110326	190000	1	3.1E+13
20110326	200000	1	4.6E+13
20110326	210000	1	4.6E+13
20110326	220000	1	5.5E+13
20110326	230000	1	5.7E+13
20110327	000000	1	5.1E+13
20110327	010000	1	5.6E+13
20110327	020000	1	4.4E+13
20110327	030000	1	4.1E+13
20110327	040000	1	3.8E+13
20110327	050000	1	2.2E+13
20110327	060000	1	3.4E+13
20110327	070000	1	3.6E+13
20110327	080000	1	3.4E+13
20110327	090000	1	3.4E+13
20110327	100000	1	3.4E+13
20110327	110000	1	3.5E+13
20110327	120000	1	3.7E+13

20110327	130000	1	3.6E+13
20110327	140000	1	3.7E+13
20110327	150000	1	4.0E+13
20110327	160000	1	4.0E+13
20110327	170000	1	4.3E+13
20110327	180000	1	4.4E+13
20110327	190000	1	3.6E+13
20110327	200000	1	4.1E+13
20110327	210000	1	4.4E+13
20110327	220000	1	2.1E+13
20110327	230000	1	1.0E-10
20110328	000000	1	1.0E-10
20110328	010000	1	2.4E+13
20110328	020000	1	3.0E+13
20110328	030000	1	4.6E+13
20110328	040000	1	8.8E+13
20110328	050000	1	5.6E+13
20110328	060000	1	1.0E-10
20110328	070000	1	1.0E-10
20110328	080000	1	9.7E+13
20110328	090000	1	1.8E+14
20110328	100000	1	6.8E+12
20110328	110000	1	1.0E-10
20110328	120000	1	1.0E-10
20110328	130000	1	2.2E+13
20110328	140000	1	9.5E+12
20110328	150000	1	5.4E+13
20110328	160000	1	4.4E+13
20110328	170000	1	2.0E+13
20110328	180000	1	3.0E+13
20110328	190000	1	3.0E+13
20110328	200000	1	3.3E+12
20110328	210000	1	1.0E-10
20110328	220000	1	1.0E-10
20110328	230000	1	1.0E-10
20110329	000000	1	1.0E-10
20110329	010000	1	1.0E-10
20110329	020000	1	7.9E+12
20110329	030000	1	1.0E-10
20110329	040000	1	1.0E-10
20110329	050000	1	1.0E-10
20110329	060000	1	1.0E-10
20110329	070000	1	1.0E-10
20110329	080000	1	1.0E-10
20110329	090000	1	1.0E-10
20110329	100000	1	1.0E-10
20110329	110000	1	1.0E-10
20110329	120000	1	1.0E-10
20110329	130000	1	1.0E-10
20110329	140000	1	1.0E-10
20110329	150000	1	1.0E-10
20110329	160000	1	1.0E-10
20110329	170000	1	7.2E+13
20110329	180000	1	4.4E+13
20110329	190000	1	2.1E+13
20110329	200000	1	5.8E+13

20110329	210000	1	8.9E+13
20110329	220000	1	5.5E+13
20110329	230000	1	3.4E+13
20110330	000000	1	2.7E+13
20110330	010000	1	8.9E+13
20110330	020000	1	6.8E+13
20110330	030000	1	5.2E+13
20110330	040000	1	5.8E+13
20110330	050000	1	6.5E+13
20110330	060000	1	9.6E+12
20110330	070000	1	9.9E+12
20110330	080000	1	1.0E-10
20110330	090000	1	1.0E-10
20110330	100000	1	1.0E-10
20110330	110000	1	4.2E+14
20110330	120000	1	9.3E+14
20110330	130000	1	1.0E-10
20110330	140000	1	6.7E+13
20110330	150000	1	6.8E+13
20110330	160000	1	1.0E-10
20110330	170000	1	1.0E-10
20110330	180000	1	1.0E-10
20110330	190000	1	1.0E-10
20110330	200000	1	3.9E+13
20110330	210000	1	4.7E+13
20110330	220000	1	1.0E-10
20110330	230000	1	1.7E+12
20110331	000000	1	2.6E+14
20110331	010000	1	2.3E+14
20110331	020000	1	3.0E+13
20110331	030000	1	1.0E-10
20110331	040000	1	1.0E-10
20110331	050000	1	1.0E-10
20110331	060000	1	1.0E-10
20110331	070000	1	1.0E-10
20110331	080000	1	1.0E-10
20110331	090000	1	1.0E-10
20110331	100000	1	1.0E-10
20110331	110000	1	1.0E-10
20110331	120000	1	1.0E-10
20110331	130000	1	1.0E-10
20110331	140000	1	1.0E-10
20110331	150000	1	2.8E+13
20110331	160000	1	1.9E+13
20110331	170000	1	1.0E-10
20110331	180000	1	1.3E+13
20110331	190000	1	1.3E+13
20110331	200000	1	1.0E-10
20110331	210000	1	1.0E-10
20110331	220000	1	1.0E-10
20110331	230000	1	1.0E-10
20110401	000000	1	1.0E-10
20110401	010000	1	1.0E-10
20110401	020000	1	1.0E-10
20110401	030000	1	1.0E-10
20110401	040000	1	1.0E-10

20110401	050000	1	1.0E-10
20110401	060000	1	1.0E-10
20110401	070000	1	5.1E+14
20110401	080000	1	5.3E+14

Table 10. UNSCEAR 2013 レポートで利用された放出源情報 (UNSCEAR, 2014)

Start time (JST)		Dur.	Te-132	I-131	I-132a	I-133	Xe-133	Cs-134	Cs-136	Cs-137
y4mdd	hhmm	(h)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)
20110312	0500	4.5	4.0E+13	3.7E+13	4.0E+13	4.8E+13	6.6E+15	3.8E+12	1.1E+12	3.7E+12
20110312	0930	6	1.7E+13	1.7E+13	1.7E+13	1.9E+13	7.6E+16	1.8E+12	5.1E+11	1.7E+12
20110312	1530	0.5	3.0E+15	3.0E+15	3.0E+15	3.0E+15	1.2E+16	3.1E+14	8.9E+13	3.0E+14
20110312	1600	31	7.3E+13	8.4E+13	7.3E+13	5.5E+13	1.2E+17	8.6E+12	2.4E+12	8.4E+12
20110313	2300	12	2.6E+13	3.6E+13	2.6E+13	1.2E+13	5.8E+15	3.7E+12	9.8E+11	3.6E+12
20110314	1100	0.5	2.0E+15	3.0E+15	2.0E+15	8.3E+14	6.4E+15	3.1E+14	8.1E+13	3.0E+14
20110314	1130	10	1.5E+13	2.3E+13	1.5E+13	5.5E+12	6.1E+15	2.4E+12	6.1E+11	2.3E+12
20110314	2130	2.5	7.9E+14	1.3E+15	7.9E+14	2.6E+14	6.6E+15	1.3E+14	3.4E+13	1.3E+14
20110315	0000	7	2.3E+14	3.5E+14	2.3E+14	6.0E+13	1.1E+17	4.1E+13	1.0E+13	4.0E+13
20110315	0700	3	1.7E+15	3.0E+15	1.7E+15	4.4E+14	1.9E+17	3.1E+14	7.7E+13	3.0E+14
20110315	1000	3	4.3E+13	8.0E+13	4.3E+13	1.1E+13	1.1E+17	8.2E+12	2.0E+12	8.0E+12
20110315	1300	4	2.1E+15	4.0E+15	2.1E+15	4.9E+14	2.1E+17	4.1E+14	1.1E+14	4.0E+14
20110315	1700	37	1.3E+13	2.1E+14	1.3E+13	1.5E+13	1.3E+16	3.1E+12	7.3E+11	3.0E+12
20110317	0600	57	2.9E+13	4.1E+14	2.9E+13	7.6E+12		1.0E+13	2.2E+12	1.0E+13
20110319	1500	36	6.6E+13	3.8E+14	6.6E+13	1.7E+12		3.5E+13	6.8E+12	3.5E+13
20110321	0300	18	2.1E+13	1.4E+14	2.1E+13	2.7E+11		1.4E+13	2.6E+12	1.4E+13
20110321	2100	26	5.8E+12	4.1E+14	5.8E+12	4.1E+11		4.8E+12	8.3E+11	4.7E+12
20110322	2300	25	8.7E+12	7.1E+14	8.7E+12	3.3E+11		9.0E+12	1.5E+12	8.9E+12
20110324	0000	24	2.3E+12	1.9E+14	2.3E+12	4.3E+10		2.9E+12	4.6E+11	2.9E+12
20110325	0000	35	7.5E+11	5.6E+13	7.5E+11	5.4E+09		1.3E+12	1.9E+11	1.2E+12
20110326	1100	47	7.3E+10	4.0E+12	7.3E+10	1.2E+08		1.8E+11	2.4E+10	1.7E+11
20110328	1000	35	1.4E+12	7.5E+12	1.4E+12	6.4E+07		4.8E+12	5.8E+11	4.7E+12
20110329	2100	14	2.1E+12	1.5E+13	2.1E+12	6.0E+07		8.9E+12	1.0E+12	8.8E+12
20110330	1100	13	2.9E+13	1.8E+14	2.9E+13	4.8E+08		1.4E+14	1.6E+13	1.4E+14
20110331	0000	22	8.0E+11	2.4E+13	8.0E+11	3.9E+07		4.6E+12	5.0E+11	4.5E+12
20110331	2200	35	2.2E+11	1.8E+12	2.2E+11	1.3E+06		1.7E+12	1.7E+11	1.6E+12
20110402	0900	48	5.5E+10	1.8E+12	5.5E+10	3.9E+05		5.9E+11	5.5E+10	5.8E+11
20110404	0900	80	7.8E+09	7.0E+11	7.8E+09	2.6E+04		1.4E+11	1.2E+10	1.4E+11
20110407	1700	150	7.2E+09	7.0E+11	7.2E+09	1.4E+03		3.5E+11	2.2E+10	3.5E+11
20110413	2300	409	4.5E+08	7.0E+11	4.5E+08	6.2E+00		1.7E+11	6.2E+09	1.8E+11

Table 11. 原子力機構の推定結果 (Katata et al., 2015)

Start time (JST)		Dur.	I-131p	Te-132	Cs-137	Cs-134	I ₂ -131g	CH ₃ I-131g
yyyymmdd	hhmmss	(h)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)
20110312	050000	4.5	2.9E+13	9.2E+13	5.8E+12	5.8E+12	1.2E+13	1.7E+13
20110312	093000	4.5	1.3E+13	4.1E+13	2.7E+12	2.7E+12	5.3E+12	8.0E+12
20110312	140000	1	1.5E+15	4.4E+15	2.9E+14	2.9E+14	5.9E+14	8.8E+14
20110312	150000	0.5	6.7E+12	2.0E+13	1.3E+12	1.3E+12	2.7E+12	4.0E+12
20110312	153000	0.5	7.2E+15	2.1E+16	1.4E+15	1.4E+15	2.9E+15	4.3E+15
20110312	160000	6	8.7E+13	2.3E+14	1.7E+13	1.7E+13	3.5E+13	5.2E+13
20110312	220000	6	1.6E+14	4.1E+14	3.1E+13	3.1E+13	6.3E+13	9.4E+13
20110313	040000	5	1.1E+14	2.9E+14	2.2E+13	2.2E+13	4.4E+13	6.6E+13
20110313	090000	3.5	1.3E+14	3.3E+14	2.6E+13	2.6E+13	5.1E+13	7.7E+13
20110313	123000	2.5	2.5E+14	6.6E+14	5.0E+13	5.0E+13	1.0E+14	1.5E+14
20110313	150000	8	1.5E+14	3.9E+14	3.0E+13	3.0E+13	6.0E+13	9.0E+13
20110313	230000	3.5	4.1E+13	8.8E+13	8.2E+12	8.2E+12	1.6E+13	2.5E+13
20110314	023000	4.5	2.2E+13	4.7E+13	4.4E+12	4.4E+12	8.7E+12	1.3E+13
20110314	070000	4	1.8E+13	3.8E+13	3.5E+12	3.5E+12	7.1E+12	1.1E+13
20110314	110000	0.5	1.9E+15	3.8E+15	3.7E+14	3.7E+14	7.5E+14	1.1E+15
20110314	113000	6.5	9.0E+12	1.8E+13	1.8E+12	1.8E+12	3.6E+12	5.4E+12
20110314	180000	1	5.3E+12	1.0E+13	1.1E+12	1.1E+12	2.1E+12	3.2E+12
20110314	190000	1	5.0E+12	9.4E+12	1.0E+12	1.0E+12	2.0E+12	3.0E+12
20110314	200000	1	5.2E+12	9.6E+12	1.0E+12	1.0E+12	2.1E+12	3.1E+12
20110314	210000	1	1.2E+14	1.5E+14	1.6E+13	1.6E+13	4.8E+13	7.2E+13
20110314	220000	1	5.6E+12	1.0E+13	1.1E+12	1.1E+12	2.3E+12	3.4E+12
20110314	230000	1	2.7E+14	6.3E+14	6.9E+13	6.9E+13	1.1E+14	1.6E+14
20110315	000000	1	6.4E+12	1.1E+13	1.3E+12	1.3E+12	2.6E+12	3.8E+12
20110315	010000	1	1.2E+15	3.5E+15	3.9E+14	3.9E+14	4.7E+14	7.0E+14
20110315	020000	1	1.6E+14	2.7E+14	3.1E+13	3.1E+13	6.5E+13	9.8E+13
20110315	030000	1	1.5E+14	3.2E+14	3.6E+13	3.6E+13	5.8E+13	8.7E+13
20110315	040000	3	6.3E+13	1.1E+14	1.3E+13	1.3E+13	2.5E+13	3.8E+13
20110315	070000	3	6.0E+14	1.0E+15	1.2E+14	1.2E+14	2.4E+14	3.6E+14
20110315	100000	1	5.2E+14	8.6E+14	1.0E+14	1.0E+14	2.1E+14	3.1E+14
20110315	110000	5	5.0E+13	8.1E+13	1.0E+13	1.0E+13	2.0E+13	3.0E+13
20110315	160000	2	1.6E+14	2.6E+14	3.3E+13	3.3E+13	6.6E+13	9.8E+13
20110315	180000	2	1.1E+15	1.7E+15	2.2E+14	2.2E+14	4.3E+14	6.5E+14
20110315	200000	2	6.8E+14	5.7E+14	7.6E+13	7.6E+13	6.4E+14	9.5E+14
20110315	220000	1	3.0E+15	2.5E+15	3.4E+14	3.4E+14	2.8E+15	4.2E+15
20110315	230000	1	6.6E+14	5.4E+14	7.3E+13	7.3E+13	6.2E+14	9.3E+14
20110316	000000	1	4.8E+14	3.8E+14	5.3E+13	5.3E+13	4.4E+14	6.7E+14
20110316	010000	5	6.0E+13	4.8E+13	6.7E+12	6.7E+12	5.6E+13	8.4E+13
20110316	060000	3	1.0E+14	1.4E+14	2.0E+13	2.0E+13	4.0E+13	6.0E+13
20110316	090000	2	1.4E+15	1.9E+15	2.8E+14	2.8E+14	5.7E+14	8.5E+14
20110316	110000	1	6.0E+13	7.9E+13	1.2E+13	1.2E+13	2.4E+13	3.6E+13
20110316	120000	1	7.4E+13	9.6E+13	1.5E+13	1.5E+13	2.9E+13	4.4E+13
20110316	130000	1	1.4E+14	1.9E+14	2.9E+13	2.9E+13	5.7E+13	8.6E+13
20110316	140000	1	2.5E+14	3.2E+14	5.0E+13	5.0E+13	1.0E+14	1.5E+14
20110316	150000	15	3.1E+14	3.9E+14	6.2E+13	6.2E+13	1.2E+14	1.9E+14
20110317	060000	15	1.6E+14	1.4E+14	3.1E+13	3.1E+13	6.3E+13	9.4E+13
20110317	210000	3	1.5E+14	1.3E+14	3.0E+13	3.0E+13	6.0E+13	9.0E+13
20110318	000000	5	1.1E+14	9.1E+13	2.1E+13	2.1E+13	4.2E+13	6.3E+13
20110318	050000	3	6.7E+14	5.8E+14	1.3E+14	1.3E+14	2.7E+14	4.0E+14
20110318	080000	5	9.2E+14	8.0E+14	1.8E+14	1.8E+14	3.7E+14	5.5E+14
20110318	130000	5	7.5E+14	6.5E+14	1.5E+14	1.5E+14	3.0E+14	4.5E+14
20110318	180000	11	6.9E+14	6.0E+14	1.4E+14	1.4E+14	2.7E+14	4.1E+14
20110319	050000	10	6.6E+14	5.8E+14	1.3E+14	1.3E+14	2.7E+14	4.0E+14

20110319	150000	36	7.9E+13	8.7E+13	3.0E+13	3.0E+13	3.2E+13	4.7E+13
20110321	030000	5	8.9E+13	1.0E+14	4.2E+13	4.2E+13	3.4E+13	5.1E+13
20110321	080000	4	1.4E+13	1.2E+13	5.2E+12	5.2E+12	1.1E+13	1.7E+13
20110321	120000	4	2.4E+13	9.1E+11	4.1E+11	4.1E+11	1.4E+13	2.1E+13
20110321	160000	5	1.4E+13	1.1E+13	5.2E+12	5.2E+12	1.1E+13	1.7E+13
20110321	210000	26	5.4E+13	3.1E+12	1.6E+12	1.6E+12	4.4E+13	6.6E+13
20110322	230000	25	1.3E+14	5.0E+12	3.3E+12	3.3E+12	5.2E+13	7.8E+13
20110324	000000	24	7.1E+12	7.6E+11	6.3E+11	6.3E+11	4.3E+12	6.5E+12
20110325	000000	35	1.3E+13	2.0E+12	2.2E+12	2.2E+12	1.1E+13	1.7E+13
20110326	110000	47	1.6E+12	4.4E+11	6.9E+11	6.9E+11	6.0E+12	8.9E+12
20110328	100000	35	2.8E+11	1.4E+12	3.1E+12	3.1E+12	1.4E+12	2.2E+12
20110329	210000	14	4.1E+12	2.0E+12	5.6E+12	5.6E+12	1.9E+12	2.9E+12
20110330	110000	13	1.8E+13	1.6E+13	4.9E+13	4.9E+13	1.6E+13	2.4E+13
20110331	000000	22	4.2E+12	7.3E+11	2.7E+12	2.7E+12	4.1E+12	6.1E+12
20110331	220000	35	6.1E+10	1.9E+11	8.9E+11	8.9E+11	3.4E+11	5.1E+11
20110402	090000	48	1.1E+12	4.7E+11	3.2E+12	3.2E+12	3.6E+12	5.4E+12
20110404	090000	80	4.1E+11	6.6E+10	7.9E+11	7.9E+11	1.4E+12	2.1E+12
20110407	170000	150	3.7E+10	1.0E+10	3.5E+11	3.5E+11	2.7E+11	4.0E+11
20110413	230000	409	3.7E+10	4.5E+08	1.8E+11	1.8E+11	2.7E+11	4.0E+11

Comprehensive studies on the dose reconstruction for residents in Fukushima Nuclear Accident: Updating source term and atmospheric transport dispersion simulations

Haruyasu Nagai^{*1}, Hiromi Yamazawa^{*2}, Matthew Hort^{*3}, Werner Rühm^{*4}, André Bouville^{*5}

^{*1}*Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency*

^{*2}*Department of Energy Engineering and Science, Nagoya University*

^{*3}*Atmospheric Dispersion and Air Quality Team, UK Met Office*

^{*4}*Institute of Radiation Protection, Helmholtz Center Munich*

^{*5}*National Cancer Institute, NIH, DHHS*

Keywords: Source term; Atmospheric dispersion simulation; Fukushima nuclear accident; Dose reconstruction; Database for spatiotemporal distribution of radionuclide

Abstract

In order to assess the radiological dose to the public resulting from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident in Japan, especially for the early phase of the accident when no measured data are available for that purpose, the spatial and temporal distribution of radioactive materials in the environment are reconstructed by computer simulations. In this study, by refining the source term of radioactive materials discharged into the atmosphere and modifying the atmospheric dispersion model, the atmospheric dispersion simulation of radioactive materials is improved. Then, a database of spatiotemporal distribution of radioactive materials in the air and on the ground surface is developed from the output of the simulation, and is used for the dose assessment by coupling with the behavioral pattern of evacuees from the nuclear accident.

In this year, the source term and atmospheric dispersion simulation were optimized. The simulation results were provided to other studies of the dose reconstruction project, and uncertainties in the simulation results were evaluated. Furthermore, the database of spatiotemporal distribution of radioactive materials in the air and on the ground surface was completed by improving analysis functions for database and developing the graphical user interface for the system operation.

東京電力福島第一原子力発電所事故における住民の線量評価に関する包括研究

土壌中I-129 の分析によるI-131 土壌沈着量等の推計

松崎 浩之（東京大学・教授）

研究要旨

福島第一原子力発電所の事故により多種多様の放射性核種が放出されたが、 ^{131}I は、希ガスを除くと初期段階では最も放射能が高く、初期被ばくに大きく寄与したと考えられる。また、体内に取り込まれると甲状腺に濃縮され、甲状腺がんを引き起こす懸念があるため、被ばく評価上重要である。しかし、物理的半減期が8.02日と短いため、事後の計測により初期段階の線量や地表への沈着量を推定する事が難しい。平成23年6月に文科科学省が中心となり、福島第一原子力発電所を中心に概ね80km以内の領域で、約2,200地点から合計約10,000の表層土壌試料が採取され、放射性核種沈着分布のサーベイが行われた（これらの土壌試料を以下では、“文科省コレクション”と称する）。放射性セシウム（ ^{137}Cs 、 ^{134}Cs ）については、ガンマ線スペクトロメトリにより、ほぼ全試料で定量され、汚染マップが作成されたが、この時点で事故後3ヶ月が経過しており、 ^{131}I についてデータは極めて限定的であった。本研究では、 ^{131}I と同時に放出された ^{129}I （半減期1,570万年）に着目し、これを指標として、 ^{131}I の沈着量を復元することを試みた。 ^{129}I は半減期が極めて長いので、物理的崩壊を考える必要が無く、環境中に長く留まる。また、同位体であるため ^{131}I とは環境中での化学的挙動が同一であり、 ^{129}I の沈着分布はそのまま ^{131}I の沈着分布と解釈する事ができる。 ^{129}I は半減期が長いので（放射能が極めて微弱なため）、放射線計測で測定するよりも、核種そのものの濃度が測定対象となるが、その濃度は極めて低い。本研究では、土壌からヨウ素を化学分離し、加速器質量分析法（AMS = Accelerator Mass Spectrometry）を用いて測定した。はじめに、 ^{131}I が検出されている土壌について ^{129}I を測定し、 ^{129}I と ^{131}I 濃度の直線的関係から、事故起源のヨウ素の同位体比（ $^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比）を推定した。推定された同位体比は、炉内燃焼シミュレーションコード（ORIGEN）の結果とも誤差範囲内で一致した。次に、文科省コレクションの試料中の ^{129}I を測定し、放射性ヨウ素の沈着量分布を復元した。得られた沈着量マップは、多くの研究機関で行われている放射性核種の拡散・沈着シミュレーションによる結果では再現できない、分布の微細構造情報を持つことが示された。このことから、本研究の結果は、「大気拡散シミュレーション」（JAEA）のパラメータに有用な制約を与えることが期待される。また、「被ばく線量再構築に関する研究」（放医研・県立医大）及び「事故初期の被ばく線量評価」（国福大・県立医大）に対しても、直接の知見を提供できると考える。なお、平成28年度においては、具体的に「大気拡散シミュレーション」WSPEEDIによる ^{131}I の沈着分布の計算結果と比較したところ、2015年版の計算結果に比べて2016年版の計算結果は大幅に再現性が向上していることが確認できた。それでも分布の微細構造や、分布のダイナミックレンジ（沈着量の最大値と最小値の倍率等）に差異が認められた。シミュレーションの精緻化は、実測データで検証される必要があることから、さらなるパラメーターのチューニングが必要である。

キーワード: ^{129}I 、 ^{131}I 、土壌、放射性ヨウ素沈着量、再構築

研究協力者

大野 剛（学習院大学・准教授）

I 研究目的

福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の沈着状況等を詳細に調査し、その変化傾向を把握することは、住民の被ばく線量を精度良く推定する上でも重要である。特に放射性ヨウ素は人体に取り込まれると甲状腺に濃縮するため、住民の初期被ばくを評価する上で詳細な沈着量を調べるのが求められている。しかし、ヨウ素 131 は半減期が 8 日と短いため事故後数ヶ月たつと減衰してしまい、環境中ではほとんど検出されない。そのため、沈着量に関する情報は非常に不足している。文部科学省により行われた平成 23 年 6 月の調査では、約 2,200 地点で各 5 試料の土壤試料が採取された（合計約 10,000 試料）。それらの試料は、様々な大学や研究機関、および日本分析センターにおいてゲルマニウム半導体検出器を用いて放射性核種の定量が行われた。ほとんど全ての試料について放射性セシウムが検出され、セシウム 137 とセシウム 134 の沈着量マップが作成された。しかし、ヨウ素 131 については、半減期が短いため、試料採取時点ですでに多くが減衰しており、検出下限値以上の測定結果が得られた地点は全体の 2 割未満であった¹⁾。このように、放射性ヨウ素の土壤濃度マップは放射性セシウムに比べデータ数が少ないのが現状である。

本研究では、ヨウ素 131 と同時に放出されたと考えられる長半減期の放射性同位体であるヨウ素 129 (I-129; 半減期 1,570 万年) に注目した。ヨウ素 129 は極めて半減期が長いので、放射線計測の手法では感度が足りない。本研究では、試料からヨウ素を化学分離した後、加速器質量分析法 (AMS = Accelerator Mass Spectrometry) を用いて測定した。

はじめに、¹³¹I が検出されている土壤について ¹²⁹I を測定し、¹²⁹I と ¹³¹I 濃度の直線関係から、事故起源のヨウ素の同位体比 (¹²⁹I/¹³¹I 比) を推定した。推定された同位体比は、炉内燃焼シミュレーションコード (ORIGEN) の結果とも誤差範囲内で一致した。これにより、ヨウ素 129 の測定値から、ヨウ素 131 が復元できる。そこで、本研究では、文科省コレクションの試料中の ¹²⁹I を測定し、放射性ヨウ素の沈着量分布を復元している。

本研究の目的は、

- i) これまでデータの得られていない地域の測定データを拡充し、放射性ヨウ素沈着マップを精緻化すること
- ii) それにより、沈着分布の微細構造を明らかにし、WSPEEDI 等の大気拡散シミュレーションのパラメーターに有用な制約を与え、もって、シミュレーションの精度向上に資すること

である。上記目的を達するため、土壤中ヨウ素 129 の測定によるデータの蓄積を進めながら、測定結果に対する誤差・信頼性の評価、得られた沈着マップの分布と大気拡散シミュレーションの結果との比較の方法論の検討を行う。

さらに、沈着分布情報から、ヨウ素 131 被ばく線量評価にも直接の知見を提供できると考えられる。

これまでのデータで得られた沈着量マップでは、すでに多くの研究機関で行われている放射性核種の拡散・沈着シミュレーションによる結果では再現できない、分布の微細構造情報を持つことが示された。したがって、本研究の結果は、「大気拡散シミュレーション」(JAEA) のパラメーターに有用な制約を与えることが期待される。また、「被ばく線量再構築に関する研究」(放医研・県立医大) 及び「事故初期の被ばく線量評価」(国福大・県立医大) に対しても、直接の知見を提

供できると考える。

放射性ヨウ素の沈着マップ作成は、チェルノブイリ事故においてはなし得なかったことであり、本研究の成果は、我が国独自の取り組みとして評価されるであろう。

II 研究方法

これまでの研究において、土壌中の ^{129}I を分析し、 ^{131}I の沈着量に関するデータを得るための研究手法は確立している。本研究の目的のうち、データ補完に関しては、文科省コレクションより、

- ・ データ密度が疎である南西方向の地点（一部茨城県も含む）の測定
- ・ データ密度が疎である福島第一原子力発電所から 20km 圏内の地点の測定
- ・ 同一地点でのばらつきを評価するための測定（文科省コレクションの同一メッシュから採取された 5 試料を測定して評価する）

を 2 年をかけて行う。また、もう一つの目的である、シミュレーションとの比較の方法論については、まず、本研究で得られている分布データをメッシュ分布図として表現して比較することを検討する。その基礎として、得られた測定データの誤差の評価を重要視する。

具体的な測定手順は以下の通りである。

（1）土壌試料とその調整

分析対象土壌試料は平成 23 年 6 月に採取された文科省コレクションより選んだ。土壌試料を U8 容器から取り出し、ビニール袋中で良く混ぜ合わせ、均一にした。これより一部を取り、乾燥させメノウ製のボールミルにかけ粉碎し、分析用の粉末試料を作った。

分析を行う場合、土壌試料よりヨウ素を分離し、溶液に溶かす必要がある。そこで、ヨウ素が揮発し易い性質を利用し、試料を石英管中で加熱することで試料からヨウ素を揮発分離させ、トラップ溶液に捕集する方法をとった。試料（100～800mg）を燃焼ボートに秤量し、それに、五酸化バナジウムを混ぜ

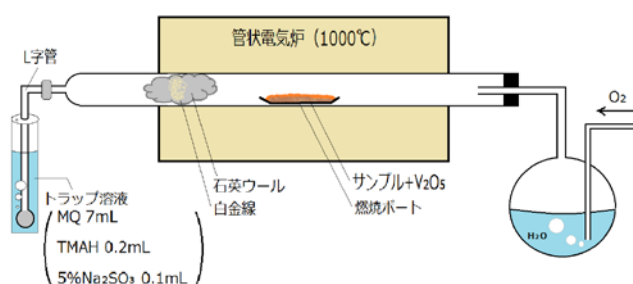


図 1. 加熱気化法を用いたヨウ素回収法

た。試料をのせた燃焼ボートを石英管に入れ、水蒸

気を含んだ酸素気流を流した。電气管状炉（1000℃）により石英管を加熱し、揮発してきたヨウ素を TMAH（tetramethyl ammonium hydroxide）溶液（2%）入りのトラップで捕集した。なお、ヨウ素の化学分離法は、Muramatsu et al. (2008)によった²⁾。

（2）ヨウ素 127 とヨウ素 129 の測定

トラップ溶液の一部を用い、ICP-MS（Agilent 7500）により、ヨウ素 127（安定ヨウ素）を測定し、土壌中の安定ヨウ素濃度を求めた。

また、残りのトラップ溶液を用い溶媒抽出・逆抽出を行い、ヨウ素を分離・精製し、それに硝酸銀を加えて AgI を作成した。この AgI をターゲットとし、東京大学タンデム加速器研究施設にて、加速器質量分析（AMS）により、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比を測定した。AMS の測定条件などは、Matsuzaki et al.(2015)に従った³⁾。

（3）ヨウ素 131 の沈着量の算出

ヨウ素 131 沈着量 (Bq/m^2) は以下の手順で求めた。AMS で得られた試料中の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比と加え

たキャリア量により試料中のヨウ素 129 濃度を (Bq/kg) が求められる。(なお、土壌に含まれるヨウ素 127 量は、キャリアとして加える量に比べて微量なため、無視しても大きな違いは出ないが、より正確には、ICP-MS で測定したヨウ素 127 の濃度を加味して補正する。) 濃度の値をヨウ素 129 の沈着量 (Bq/m²) に変換し、沈着量を ¹²⁹I/¹³¹I 比で除することにより、ヨウ素 131 の沈着量 (Bq/m²) が算出される。福島第一原子力発電所起源の放射性ヨウ素の同位体比 (¹²⁹I/¹³¹I) は、Miyake et al. (2015)のものを用いた⁴⁾。

(倫理面への配慮)

本研究は、土壌中の微量放射性ヨウ素の分析が主であり、安全性に問題はない。また、個人情報にあたる可能性のある陰膳試料中のヨウ素濃度の発表などに際しては、関係部署とも連絡を取り、慎重に行う。分析作業や放射線の取り扱いに際しては、規則を遵守し、安全面でも細心の注意を払う。

III 研究結果

(1) これまでに再構築されたヨウ素 131 沈着分布

これまでに、908 地点におけるヨウ素 131 再構築データが得られている。これらの結果を図 2 に示す。測定結果の範囲は、2011 年 3 月 11 日換算で、 $1.8 \times 10^8 - 2.0 \times 10^4$ Bq/m²であった。

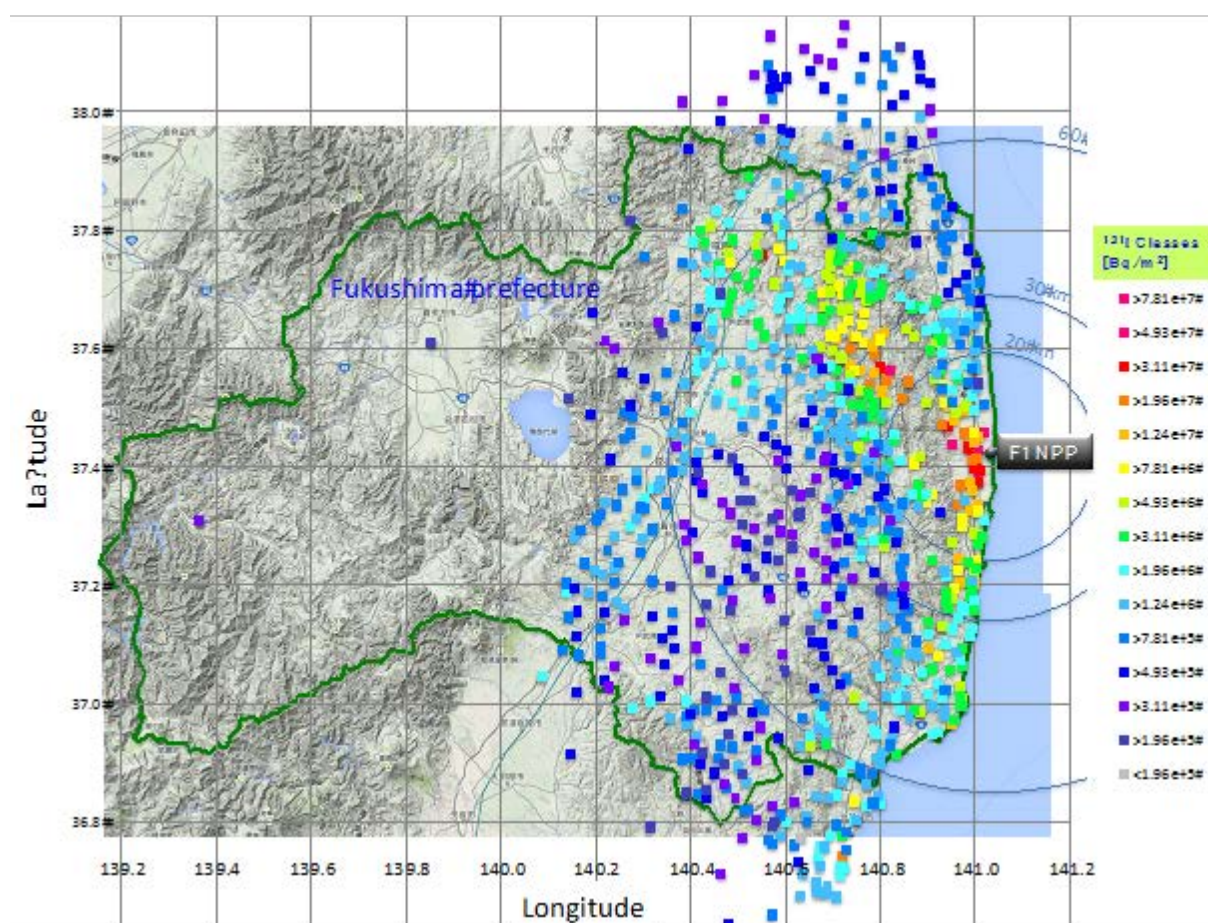


図 2. 本研究でこれまでに得られた ¹³¹I 沈着量(Bq/m²)のマップ

(2) データの誤差評価

得られたヨウ素 131 沈着量に含まれる誤差を図 3 のように評価した。オーバーオールで 30%以下と見積もられる。

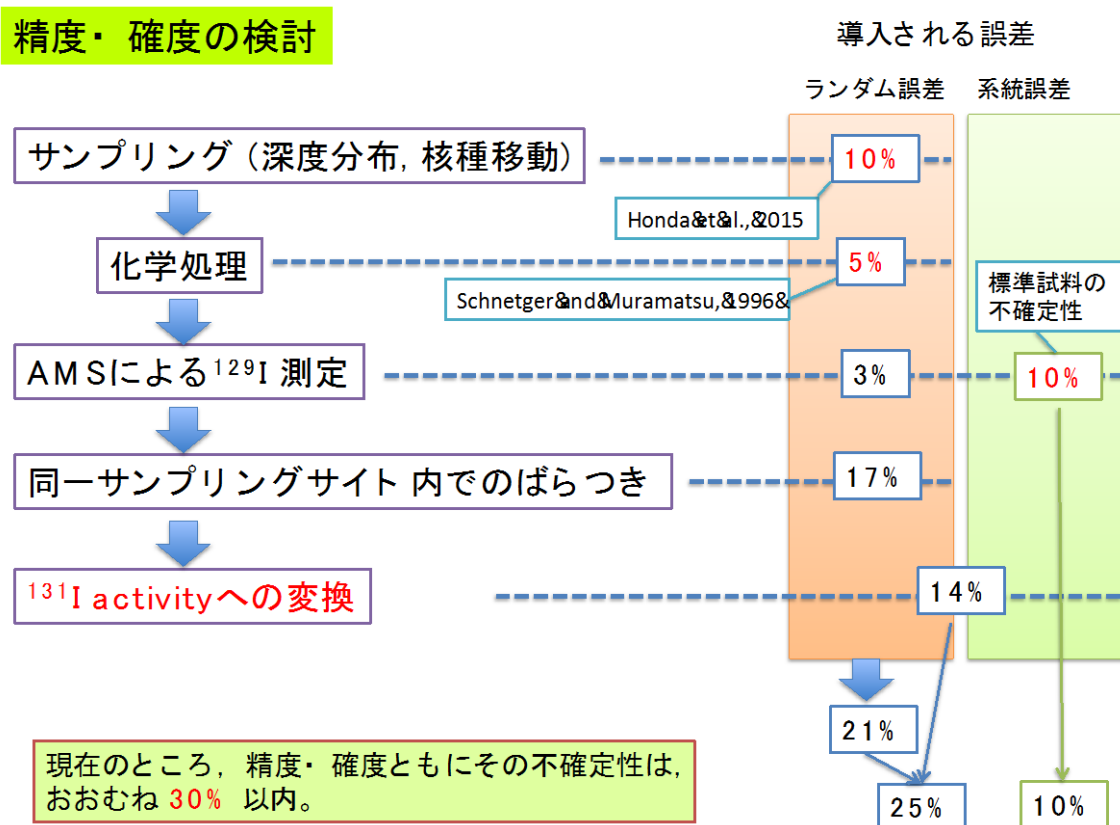


図 3. 再構築されたヨウ素 131 値の誤差の評価

IV 考察

福島第一原子力発電所から 80km 圏内におけるヨウ素 131 の沈着量は、5 桁に渡って分布している。現在の再構築データ精度 30%は十分精緻なマップを作成することのできる精度である。今後さらに精度を上げるための一つのポイントは、同一サンプリングサイト内でのばらつきであろう。文科省コレクションはほとんど同一地点と見なされる領域から 5 試料の土壌試料を採取している。この 5 試料の放射性セシウムの測定値は、同一ではなく、ばらつきを持つが、そのばらつきが代表的には 17%程度になる。このようなばらつきを本質的に持ち得る試料コレクションを実測する場合、そのサンプリングサイトの代表的な沈着量を精度良く推定することは難しい。基本的には放射性核種が地表面に均一に沈着しないことがばらつきの原因だと思われる。したがって、ある程度程度の数を測定し、平均を取る、というのが唯一の方法である。

図 4. は、本研究で得られたヨウ素 131 の沈着分布の再構築と WSPEEDI のシミュレーションによる沈着分布との比較である。WSPEEDI の結果は、2016 年秋にアップデートされたパラメータによるものであり、実測とよく合っているといえる。2015 年時における結果では、福島第一原子力発電所から北西方向にのびる分布の濃い領域の形状や、南側への沈着分布等が正しく再現されていなかったのが、改善されたと言える。しかし、より詳細に観察すると、分布の微細構造や、分布のダイナミックレンジ（沈着量の最大値と最小値の倍率等）に差異が認められ、さらなる検

討が必要である。これには、実際の放射性ヨウ素の移行形態（ガス状、粒子状の別、割合、またその化学形）に対するさらなる知見を得る必要があるだろう。各地で得られている、時間精度の高いフィルター試料の分析結果も重要である。

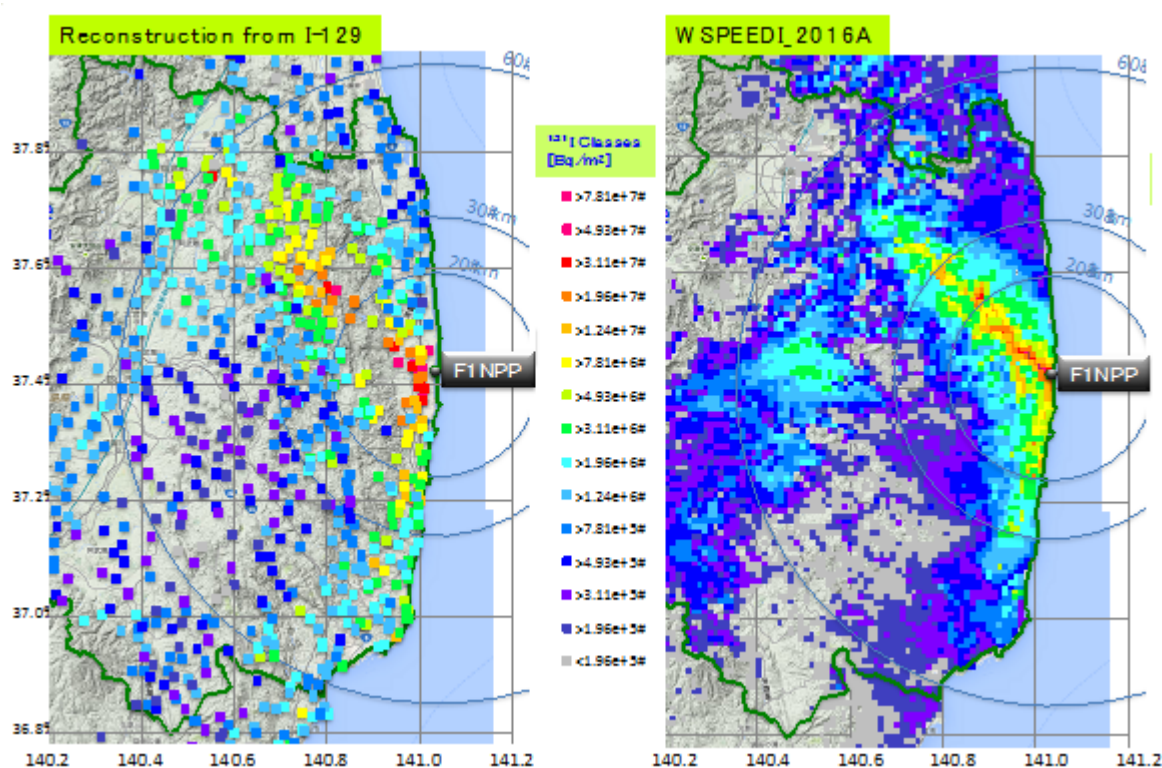


図 4. ヨウ素 129 の実測による再構築結果（左）と
WSPEEDI による計算結果（右）との比較

V 結論

本研究では、文科省コレクションの試料中の ^{129}I を測定し、放射性ヨウ素 131 の沈着量分布を復元した。測定結果の範囲は、2011 年 3 月 11 日換算で、 $1.8 \times 10^8 - 2.0 \times 10^4 \text{ Bq/m}^2$ であった。得られた沈着量マップは分布の微細構造情報を持つことが示された。「大気拡散シミュレーション」WSPEEDI のシミュレーション結果と比較したところ、概ねよく一致している。しかし、より詳細に観察すると、分布の微細構造や、分布のダイナミックレンジ（沈着量の最大値と最小値の倍率等）に差異が認められ、さらなるパラメーターのチューニングにより、さらなる精密化が可能であることが示唆された。放射性ヨウ素の沈着マップ作成は、チェルノブイリ事故においてはなし得なかったことであり、本研究の成果は、我が国独自の取り組みとして評価され得るものである。

この研究に関する現在までの研究状況、業績

- 1) Muramatsu Y Matsuzaki H Toyama C et al., “Analysis of ^{129}I in the soils of Fukushima Prefecture: Preliminary reconstruction of ^{131}I deposition related to the accident at Fukushima Daiichi nuclear power plant”, Journal of Environmental Radioactivity 2015; 139: 344-350.

- 2) Hiroyuki Matsuzaki, Yasuyuki Muramatsu, Takeshi Ohno, Wei Mao, “Retrospective reconstruction of Iodine-131 distribution through the analysis of Iodine-129”, ICRS13 & RPSD2016, 2016.10.04, Paris.

引用文献

- 1) 文部科学省, “文部科学省による放射線量等分布マップ（ヨウ素131の土壌濃度マップ）の作成について（第1次分布状況等調査：H23年9月21日）”, 文部科学省ホームページ <http://radioactivity.mext.go.jp/ja/contents/6000/5047/view.html>
- 2) Muramatsu Y Takada Y Matsuzaki H et al. AMS analysis of ^{129}I in Japanese soil samples collected from background areas far from nuclear facilities, Quaternary Geochronology 2008; 3: 291-297.
- 3) H. Matsuzaki, C. Nakano, Y.S. Tsuchiya, S. Ito, A. Morita, H. Kusuno, Y. Miyake, M. Honda, A.T. Bautista VII, M. Kawamoto, H. Tokuyama (2015) The status of the AMS system in its 20th year, Nuclear Instrument and Method of Physics Research B361, 63-68. DOI:10.1016/j.nimb.2015.05.032.
- 4) Y. Miyake, H. Matsuzaki, K. Sasa, T. Takahashi (2015) Measurement of long-lived radionuclides in surface soil around F1NPP accident site by Accelerator Mass Spectrometry, Nuclear Instrument and Method of Physics Research B361, 627-631. DOI: 10.1016/j.nimb.2015.05.017.

Retrospective reconstruction of Iodine-131 distribution released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident through the analysis of Iodine-129

Hiroyuki Matsuzaki*

The University Museum, The University of Tokyo

Keywords: ^{129}I ; ^{131}I ; Fukushima soil; deposition density; reconstruction

Abstract

Iodine-131 (half-life = 8.02 d) is one of the most critical radionuclides which should be monitored after release from reactor accidents because of the tendency for this nuclide to accumulate in the human thyroid gland. However, there are not enough data related to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP) accident, Japan to provide regional deposition information of this short-lived nuclide. In this study we have focused on the long-lived iodine isotope, ^{129}I (half-life of 1.57×10^7 y), and analyzed it by accelerator mass spectrometry (AMS) for surface soil samples collected at various locations within 80 km region from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. In order to reconstruct a deposition map of ^{131}I , we determined the ^{129}I concentrations (Bq/kg) in over 900 soil samples. The Overall error for reconstruction ^{131}I value is estimated to be within 30% which is enough to observe detailed distribution structure. The knowledge obtained from this reconstruction map can feedback to the selection of parameters needed for the “atmospheric diffusion simulation model” of radioiodine which will result in the more precise time course deposition history of ^{131}I .

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

事故初期段階における住民の被ばく線量再構築

栗原 治（量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 計測・線量評価部長）

研究要旨

東京電力福島第一原子力発電所事故に係る住民の被ばく線量、特に放射性ヨウ素等の短半減期核種による事故初期の内部被ばく線量の把握のため、限られた人の実測値に加え、個人の行動データや最新の大気拡散シミュレーションを用いた多角的な線量推計を試みた。個人の行動データの解析から、当該原発近隣住民の大半が事故後速やかに避難を開始したことが確認された。また、これらの住民の中で解析を行えた人の数は限られるが、避難開始時期と内部被ばく線量に関連があることを示唆する結果を得た。放射線医学総合研究所が2011年6月から7月にかけて実施したホールボディカウンタ（WBC）測定の実験被検者については¹³¹Iによる甲状腺等価線量を推定し、その中央値は3.5 mSvであった。他方、大気拡散シミュレーションと行動データを用いて算定した内部被ばく線量（吸入摂取）と実測値から推定された内部被ばく線量にはまだ大きな乖離が存在し、引き続き改善が必要である。

キーワード：福島原発事故、初期内部被ばく、甲状腺等価線量、ホールボディカウンタ、大気拡散シミュレーション、行動データ

研究協力者：

石川 徹夫（福島県立医科大学・教授），神谷 研二（福島県立医科大学・副学長），安村 誠司（福島県立医科大学・教授），大津留 晶（福島県立医科大学・教授）

I 研究目的

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島原発事故）によって住民が受けた被ばく線量の把握は重要であり、これまでも多くの報告がなされてきた¹⁻⁴⁾。しかしながら、事故初期における放射性ヨウ素に代表される短半減期核種による内部被ばく線量（特に、甲状腺等価線量）については、人及び環境の実測データが不足しており、その評価を困難にしている。放射線医学総合研究所（以下、放医研）は、2012年度に国からの委託を受け、当時入手できた人の実測データに基づき、福島県住民の甲状腺等価線量の推計を試みたが、同推計は各市町村の住民に対する代表値（90及び50パーセンタイル値）のみであり、また、住民の実際の避難行動を考慮していない等の課題があった⁵⁾。そこで本研究では、個人の避難行動情報や最新の大気拡散シミュレーションを取り入れた、より現実的な初期内部被ばく線量の推計を試みる。なお、事故初期の外部被ばく線量の推計についても本研究の範疇であるが、放医研で開発したシステムを用いて得られた結果が報告されており、同推計の不確かさについても初年度（2014年度）の報告書に記載しているため、ここでは割愛した⁶⁾。

II 研究方法

本研究は、福島原発事故における住民の線量評価に関する包括研究（研究代表者：鈴木元（国福大））において他の研究分担者と緊密に連携して進めるとともに、事故発生から4ヵ月間の滞在場所の履歴情報を含む行動データの提供元である福島県立医科大学（以下、福島医大）とも情報共有を図りながら行う（図1）。この行動データは、福島医大が福島県の委託により行っている福島県民健康調査（基本調査）⁷⁾における福島県住民の外部被ばく線量推計に使われているデータと基本的に同じものである。本研究では、事故初期の個人の行動情報を反映した内部被ばく線量の推計方法確立するため、行動データとWBC等の実測データの両方を有する個人を解析対象者として抽出し、避難開始時期と線量との関連性などを解析する。また、行動データと最新の大気拡散シミュレーションから得られる時系列大気中放射能濃度マップを同時刻で突合し、プルームの吸入による内部被ばく線量を算定する⁸⁾。

（倫理面への配慮）

解析対象者の行動データの利用に関しては、福島医大と放医研の両機関において研究倫理委員会の承認を得た。

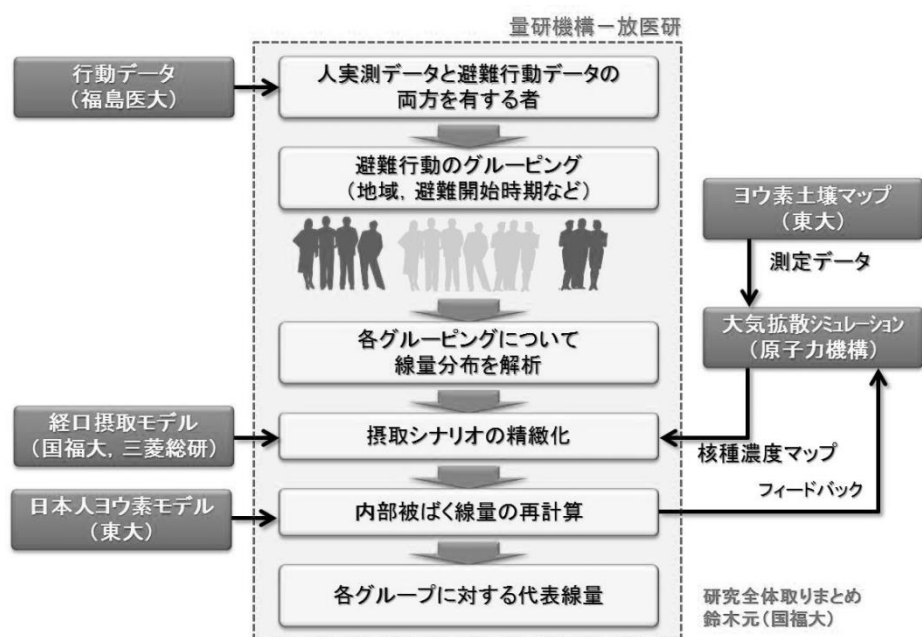


図1 研究方法及び研究体制

III 研究結果

＜パイロット調査被検者の解析＞

放医研が福島県からの依頼により、2011年6月下旬から7月下旬にかけて実施した福島県住民の調査（パイロット調査）で得られたWBCの測定結果を解析した⁹⁾。検出された核種は¹³⁴Csと¹³⁷Csのみである。被検者の約半数が浪江町の住民であり、その他の被検者も概ね福島原発から30 km圏内の市町村に居住していた住民であった。被検者数は174名であり、その内訳は成人（18歳以上）が125名、子ども（18歳未満）が49名であった。WBCから得られた体内セシウム量に基づき、事故発生翌日における急性吸入摂取シナリオを仮定し、被検者の摂取量及び内部被ばく線量（実効

線量)を算定した(図2、図3)。この結果、 ^{134}Cs の体内残留量については成人と子どもで統計的有意差があるのに対し($p=0.007$)、実効線量については両者に差はなかった($p=0.264$)。また、パイロット調査の後に日本原子力研究開発機構(JAEA)で行われたWBC測定から評価された成人被検者の実効線量分布と、パイロット調査の成人被検者の実効線量分布には統計的な有意差が認められなかった($p=0.211$)。その他、浪江町及び南相馬市の避難住民を対象として行われたTokonamiらによる甲状腺測定の結果と比較した結果、 ^{131}I の初期摂取量は ^{134}Cs の3~5倍となった。

<行動データの解析>

前項のパイロット調査、及び、国が2011年3月下旬に15歳以下の子どもを対象として行った甲状腺被ばく検査の被検者(全1,080名)から得られた行動データを解析した。パイロット調査からは112名分、甲状腺被ばく検査からは310名分の行動データが得られた。

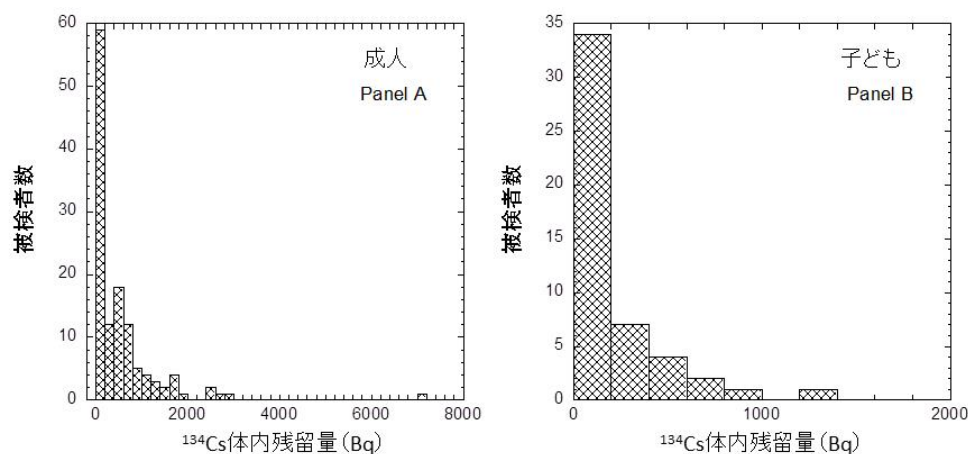


図2 成人と子どもの ^{134}Cs 体内残留量分布の比較

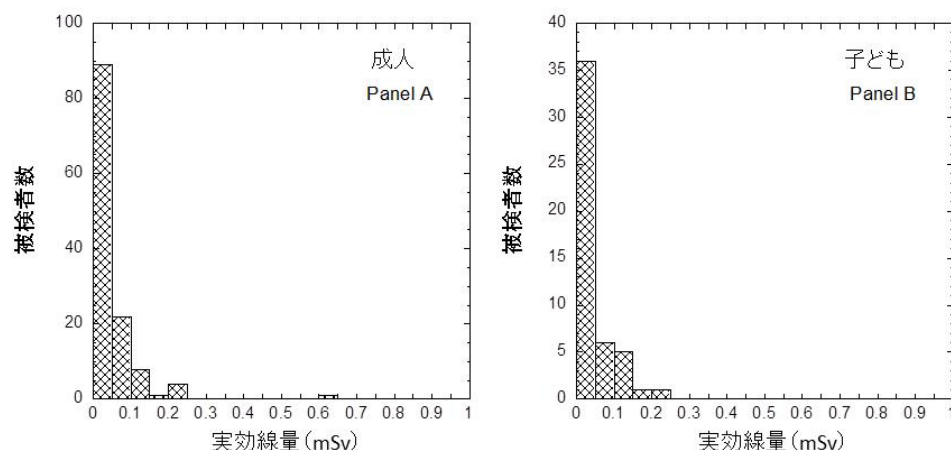


図3 成人と子どもの実効線量分布の比較

図4に甲状腺被ばく検査被検者310名の2011年3月12日から3月31日までの滞在市町村を示した¹⁰⁾。同検査が行われたのは当該原発から概ね30 km以遠の川俣町、いわき市、飯舘村の3市

町村であり、被検者の居住地もこれらの市町村にあると思われる。同図から3市町村外への移動が3月20日頃にピークとなり、その後、3市町村に戻る傾向が見られる。こうした自主避難が被ばく線量の低減化に寄与したことが考えられるが、被検者全体（1,080名）の甲状腺等価線量が低く（半数以上が未検出）であったことから、避難の有無による被検者の甲状腺等価線量の違いを見出すことは困難であった。他方、パイロット調査被検者の行動は、図5に例示するとおりであり、国の事故調査報告でも述べられているように、福島原発の周辺住民の大半が比較的早い段階で避難を開始したことを裏付ける結果が得られた。また、浪江町沿岸部の被検者の多くは、代表的と考えられた避難行動パターンに準じて移動したことが確認された。なお、該当者の数は少ないが、実効線量で0.1 mSvを超えた比較的高い被検者では、避難開始時期が遅い傾向が認められた（表1）¹¹⁾。

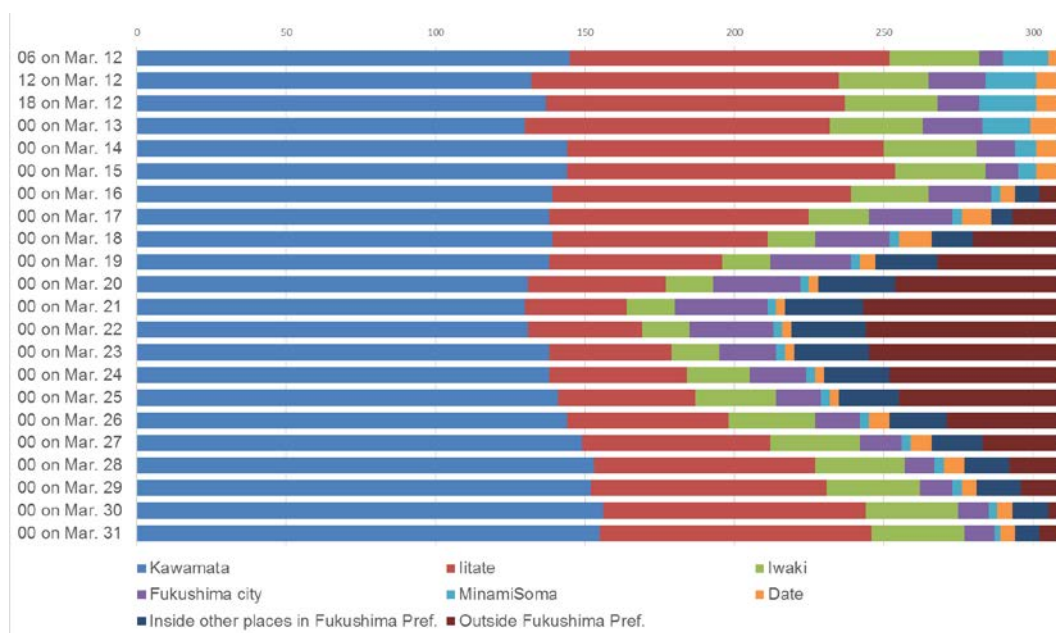


図4 甲状腺被ばく検査被検者の滞在市町村（310名）

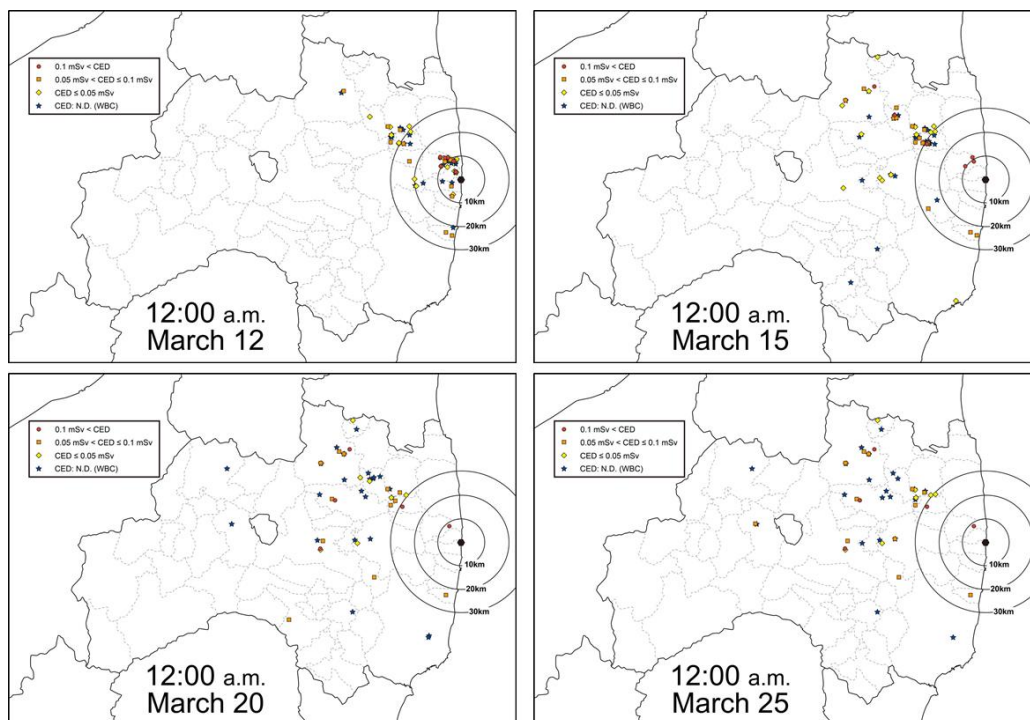


図5 パイロット調査被検者の行動

表1 線量レベルと福島原発20km圏内の滞在割合

	被検者数	3/12 12時	3/12 16時	3/13 0時	3/15 0時	3/20 0時	3/25 0時
グループ1	7	100%	100%	42.9%	42.9%	14.3%	14.3%
グループ2	15	20.0%	13.3%	6.7%	0.0%	0.0%	0.0%
グループ3	20	30.0%	20.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
グループ4	36	27.8%	13.9%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%

※グループ1: 実効線量0.1 mSv以上、グループ2: 実効線量0.05mSv以上0.1 mSv未満、グループ3: 実効線量: 検出限界値(WBC)以上0.05 mSv未満、グループ4: 検出限界値(WBC)未満

<大気拡散シミュレーションによる線量推計>

図6に甲状腺被ばく検査の実測値から推定した甲状腺等価線量分布と、大気拡散シミュレーションから算出した甲状腺等価線量分布を比較した。前者は、甲状腺被ばく検査の被検者の内、行動データが得られた309名（1名は被検者と確認できず）に対し、放射性核種の放出が最も大きかった3月15日における急性吸入摂取を仮定して求めた。後者は、2種類の大気拡散シミュレーション—Terada (2012)¹²⁾とKarata (2015)¹³⁾—から線量を算定し、その際、解析対象者が屋内に滞在していた時間帯では屋内空気中濃度を屋外の半分に設定した。同図から示されるように、大気拡散シミュレーションでは実測から推定された甲状腺等価線量を過大評価する傾向があり、大気拡散シミュレーション間でも違いが見られた。図7には、同様の比較を、パイロット調査被検者の内、行動データが得られた112名に対して示した。

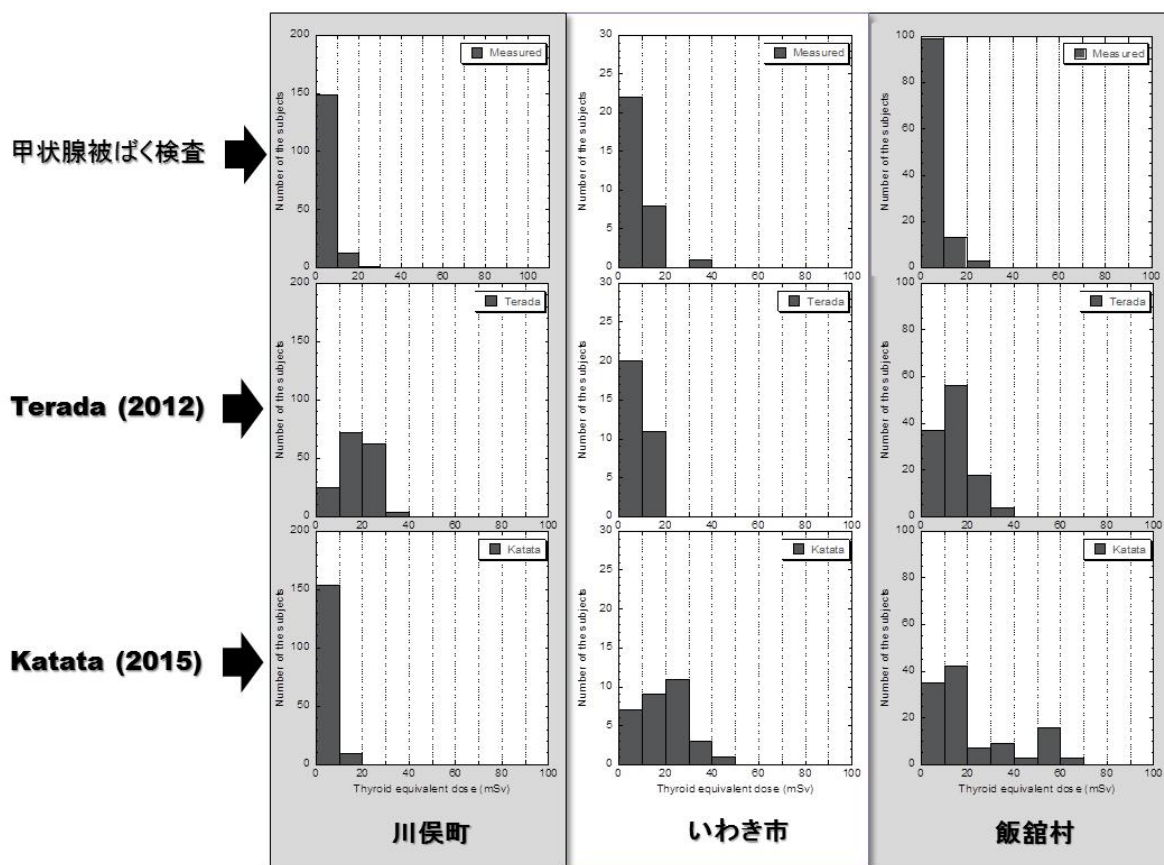


図6 大気拡散ミュレーションと甲状腺被ばく検査から推定された甲状腺等価線量分布の比較
(上段：甲状腺被ばく検査、中段：Terada (2012)、下段：Katata (2015))

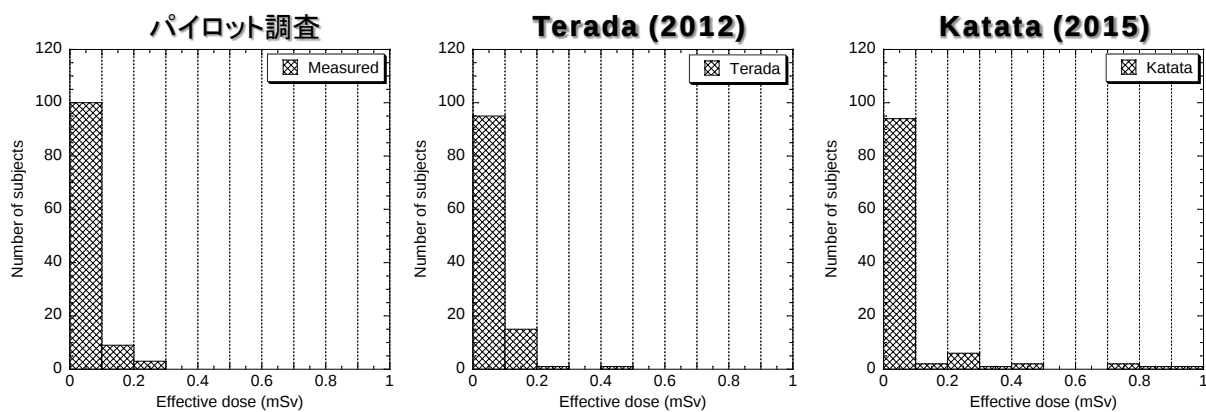


図7 大気拡散ミュレーションとWBC測定から推定された実効線量分布の比較

図8と図9には、個人毎に大気拡散シミュレーションによる線量算定値を実測値による線量推定値と比較した結果を示した。

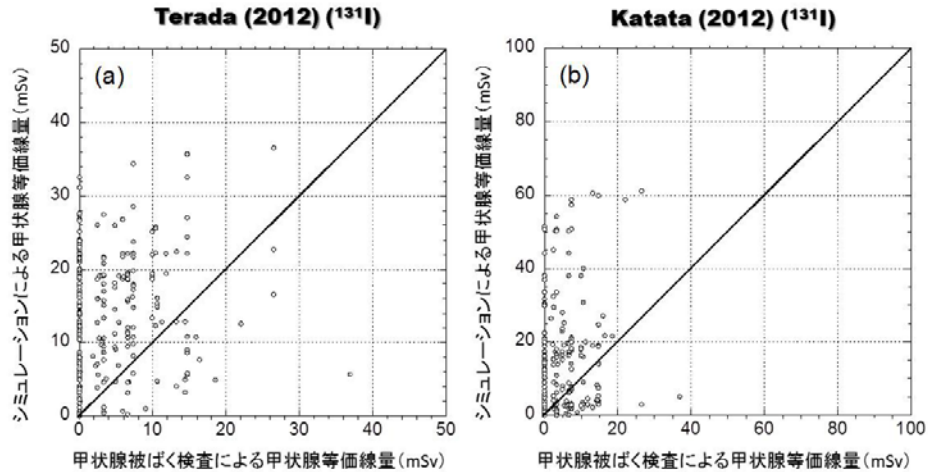


図8 大気拡散ミュレーションと甲状腺被ばく検査から推定された個人の甲状腺等価線量の比較： (a) Terada (2012)、(b) Katata (2015)

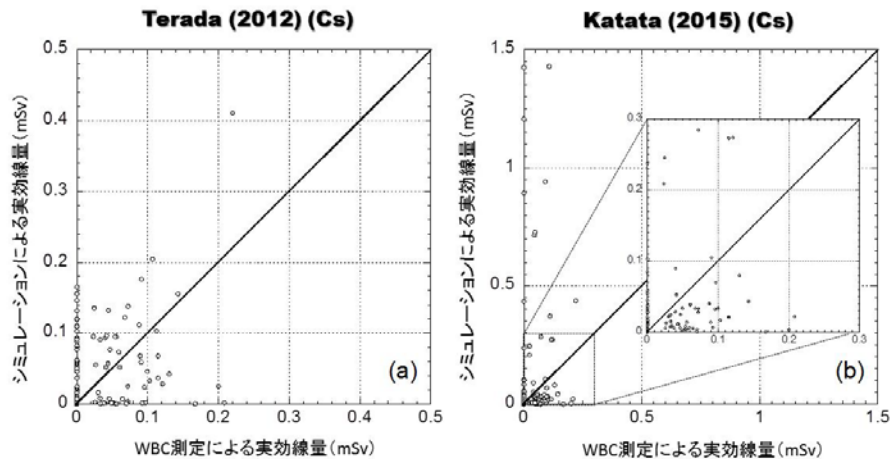


図9 大気拡散ミュレーションとWBC測定から推定された個人の実効線量の比較： (a) Terada (2012)、(b) Katata (2015)

IV 考察

福島原発事故初期に住民が受けた、主として放射性ヨウ素等の短半減期核種の摂取による内部被ばく線量を推計する上で、人及び環境モニタリングの実測データ、さらには本研究に用いた大気拡散シミュレーションや個人の行動データなど、多くの情報を集め、それらを多角的に解析してゆくことが重要であると思われる。3年間（2014年度から2016年度）の研究において、2012年度に放医研が行った福島県住民の初期内部被ばく線量（甲状腺等価線量）に用いたデータに、図10に示す新たなデータが追加された。JAEAが2011年7月上旬から2012年1月下旬までに実施したWBC検査被検者約1万人については、その約半数の5000人分の行動データが福島医大より提供され、現在その解析を進めている。途中経過ではあるが、被検者の滞在場所と福島原発からの距離を日毎に集計したところ、原発周辺市町村の住民の大半が3月12日時点で避難を開始したことを示唆する結果が得られている。

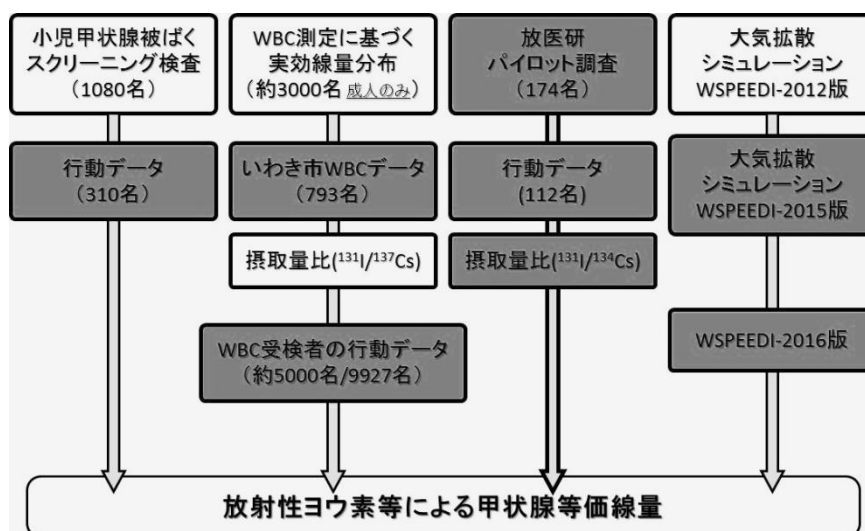


図10 初期内部被ばく線量の基礎とするデータ
(色塗りの枠内に示したのが本研究で追加されたデータ)

WBC測定に基づく甲状腺等価線量の推計で重要となるのは、 ^{131}I とCsの初期摂取量の比の評価である。2012年度の推計では、小児甲状腺被ばく検査の実測データと成人のWBC測定から推定された実効線量分布（実測データは当時入手できなかった）、すなわち、異なる集団の異なる核種の線量分布から初期摂取量を評価した結果から摂取量比を導出し、その結果（ ^{131}I が ^{137}Cs に対して3倍）を推定に反映させた。本研究においても、パイロット調査の成人被検者に対して推定した ^{134}Cs 摂取量分布と、Tokonami¹⁾らが浪江町と南相馬市からの避難住民に対して行った甲状腺検査の結果から推定した ^{131}I 摂取量分布の両者を同一累積頻度値で比較した結果、 ^{131}I の ^{134}Cs に対する摂取量比は3~5（平均値は3.8）となった。この結果を用いて、成人被検者の ^{131}I による甲状腺等価線量を算定したところ中央値は3.5 mSvとなり、Tokonamiらの結果と比較的良く一致した。なお、WBC測定の結果から、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の体内残留量はほぼ同じであり、初期摂取量もほぼ同等とみなせる。

人の ^{131}I とCsの初期摂取量の比が、空気サンプリングから得られた大気中放射能濃度比と比較して低くなった主たる要因としては、日本人のヨウ素の甲状腺アップテークが、ICRPの線量評価モデルにおいて設定されている数値（血中に移行したヨウ素の30%が甲状腺にアップテークされる）の約半分から2/3程度であるためと考えられる¹⁴⁾。他の要因としては、WBC測定の実施時期が事故発生から数カ月以降であるため、初期のCs摂取量以外の寄与が同測定に含まれている可能性があることである。前述したとおり、パイロット調査の成人被検者の実効線量分布と、測定時期の異なるJAEAによるWBC測定で得られた実効線量分布には統計的有意差がないことから、事故から時間が経過した後の経口摂取による影響は少ないと予想されるが、仮にあったとするとCsの初期摂取量を過大評価することになり、 ^{131}I とCsの初期摂取量比を低く評価することになる。他方、これとは逆の要因もある。5000人分の行動データから、JAEAでのWBC測定の成人被検者の半数以上は女性であることが判明した。体内でのCsの実効半減期は、一般的に男性よりも女性の方が短く、他方、ICRPの線量評価モデルで使われているCsの体内での実効半減期は男性のものに近い数値（110日）に設定されていることから¹⁵⁾、遅い時期に行われたWBC測定からCsの初期摂取量を算定した場合、女性の場合ではCsの初期摂取量を過小評価し、結果として ^{131}I とCsの初期摂取量比を低く見積もっている可能性もある。なお、このことは、女性成人被検者のCsによる内部被ばく

線量評価を過小評価したことには必ずしもならない。何故ならば、実効半減期が設定値よりも短ければ、線量係数自体も小さくなるからである。

大気拡散シミュレーションによる初期内部被ばく線量の推計に関しては現時点では精度は十分でなく、引き続き実測値との比較検証を行う必要がある。両者が大きく乖離する要因としては、大気拡散シミュレーションと行動データの双方に不確実性があるためである。行動データでは移動中の正確な場所が不明であるため、長時間かけて遠方に移動する場合は、線量推計の不確実性が大きくなる。他方、大気拡散シミュレーションについても、新たに収集された実測値に対する再現性が未だ十分でなく、今後の改良が待たれる。特に、避難途中のプルームのばく露が顕著と考えられる3月12日に関しては、 ^{131}I 以外の短半期核種 ($^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$ 、 ^{133}I) による線量寄与を評価する上でも、大気拡散シミュレーションの精度向上が必要である。

V 結論

東京電力福島第一原子力発電所に係る福島県住民の初期内部被ばく線量の把握に資するため、個人の避難行動や最新の大気拡散シミュレーション等を用いた多角的な線量推計方法を試みた。事故後の滞在場所の履歴を収録した行動データの解析から、原発周辺住民の大半が国の避難指示に従って速やかに避難を開始したことが確認された。また、解析を行えた人数は限られるが、原発周辺住民について、避難開始時期と内部被ばく線量に関連があることを示唆する結果を得た。放医研が行ったパイロット調査の被検者については、他研究で得られた ^{131}I データと比較し、 ^{131}I と ^{134}Cs の初期摂取量の比を導出した（平均3.8）。この結果を用いて成人被検者の ^{131}I 摂取による甲状腺等価線量を評価したところ、中央値で3.5 mSvであった。また、大気拡散シミュレーションと行動データを用い初期内部被ばく線量を計算したところ、実測値から推定したものと比較して両者には未だ大きな乖離があることが確認された。この方法の限界を見極め、さらに精度向上を図る必要がある。

この研究に関連する現在までの研究状況、業績

- 1) 環境省. 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」. 2012.
- 2) 環境省. 平成 25 年度原子力災害影響調査等事業「東京電力福島第一原子力発電所事故に係る被ばく線量の把握調査等」. 2013.
- 3) National Institute of Radiological Sciences. The 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident, NIRS-M-252, 2012.
- 4) Kurihara O Kim E Fukutsu K et al. NIRS's project for the reconstruction of early dose to inhabitants in Fukushima after the nuclear disaster, Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident, Springer Open, 2013; 177-188.
- 5) 栗原治, 金ウンジュ, 徐素熙 他. 東京電力福島第一原子力発電所事故における福島県住民の初期内部被ばく線量推計, KEK-Proceedings 2013-7, 2013; 7-16.
- 6) 栗原治. 被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーションー東京電力福島第一原子力発電所事故における周辺住民の初期内部被ばく線量再構築, 日本原子力学会誌, 2013; 55: 34-38.
- 7) Akahane K Yonai S Fukuda S et al. NIRS external dose estimation system for Fukushima residents

- after the Fukushima Dai-ichi NPP accident, Sci. Rep., 2013; 3: 1670.
- 8) Tani K Kurihara O Kim E et al. Implementation of iodine biokinetic model for interpreting I-131 concentration in breast milk after the Fukushima nuclear disaster. Sci. Rep. 2015; 5: 12426.
 - 9) Kim E Kurihara O Tani K et al. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs derived from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents. Radiat. Prot. Dosim. 2016; 168: 408-418.
 - 10) Kim E Tani K Kunishima N et al. Estimation of early internal doses to Fukushima residents after the nuclear disaster based on the atmospheric dispersion simulation. Radiat. Prot. Dosim. 2016; 171: 398-404.
 - 11) Kurihara O Nakagawa T Takada C et al. Internal doses of three persons staying 110 km south of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station during the arrival of radioactive plumes based on direct measurements. Radiat. Prot. Dosim. 2016; 170(1-4): 420-424.
 - 12) Kim E Kurihara O Kunishima N et al. Internal thyroid doses to Fukushima residents – estimation and issues remaining. J. Radiat. Res. 2016; 57(S1): i118-i126.
 - 13) Kim E Kurihara O Kunishima N et al. 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. Health Phys. 2016; 115: 451-464.
 - 14) Kunishima N Kurihara O Kim E et al. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi nuclear power plant after the accident Part 2: relationship between internal dose and evacuation behavior individuals. Health Phys. (accepted).
 - 15) Kurihara O Kim E Kunishima N et al. Development of a tool for calculating internal doses in the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident based on atmospheric dispersion simulation. ICRS-13 & RPSD-2016 Joint Conference Proceedings (to be published)

引用文献

- 1) Tokonami S Hosoda M Akiba S et al. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident, Sci. Rep. 2012; 2: 507.
- 2) Matsuda N Kumagai A Ohtsuru A et al. Assessment of internal exposure doses in Fukushima by a whole body counter within one month after the nuclear power plant accident, Radiat. Res. 2013; 179: 663-668.
- 3) Kim E Kurihara O Suzuki T et al. Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. Proceedings of the 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. NIRS-M-252, 2012: 59-66.
- 4) Kamada N Saito O Endo S et al. Radiation doses among residents living 37 km northwest of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant, J. Environ. Radioact. 2012; 110: 84-89.
- 5) Kim E Kurihara O Kunishima N et al. Internal thyroid doses to Fukushima residents – estimation and issues remaining. J. Radiat. Res. 2016; 57(S1): i118-i126.
- 6) 環境省, 平成 26 年度包括研究報告書.

- 7) Yasumura S Hosoya M Yamashita S et al. Study protocol for the Fukushima health management survey, *J. Epidemiol.* 2014; 22: 375-383.
- 8) Kim E Tani K Kunishima N et al. Estimation of early internal doses to Fukushima residents after the nuclear disaster based on the atmospheric dispersion simulation. *Radiat. Prot. Dosim.* 2016; 171: 398-404.
- 9) Kim E Kurihara O Kunishima N et al. 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. *Health Phys.* 2016; 115: 451-464.
- 10) Kurihara O Kim E Kunishima N et al. Development of a tool for calculating internal doses in the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident based on atmospheric dispersion simulation. *ICRS-13 & RPSD-2016 Joint Conference Proceedings* (to be published)
- 11) Kunishima N Kurihara O Kim E et al. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi nuclear power plant after the accident Part 2: relationship between internal dose and evacuation behavior individuals. *Health Phys.* (accepted).
- 12) Terada H Katata F Chino M et al. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J. Environ. Radioact.* 2012; 112: 141-154.
- 13) Katata G Chino M Kobayashi T et al. Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi nuclear power station accident by coupling simulations of atmospheric dispersion model with improved deposition scheme and oceanic dispersion model. *Atoms. Chem. Phys.* 2015; 15: 1020-1070.
- 14) Kim E Kurihara O Tani K et al. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs derived from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents. *Radiat. Prot. Dosim.* 2016; 168: 408-418.
- 15) ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. 1989.

Dose reconstruction of Fukushima residents in the early stage of the nuclear disaster

Osamu Kurihara^{*}

** National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology,
National Institute of Radiological Sciences*

Keywords: Fukushima Daiichi nuclear power plant accident; early internal dose; thyroid equivalent dose, whole-body counter, atmospheric transport and dispersion model simulation; behavior data

Abstract

To understand the levels of radiation exposure of residents due to the TEPCO's Fukushima Daiichi nuclear power plant (FDNPP) accident, in particular the early internal dose by intake of short-lived radionuclides mainly radioiodine, we attempted various dose estimations using personal behavior data including the history of whereabouts after the accident and the latest atmospheric transport and dispersion model (ATDM) simulations together with limited individual monitoring data. From the analyses of the personal behavior data, it was confirmed that the residents living near the FDNPP started evacuation shortly after the accident. Although the persons analyzed were limited, it was suggested that the time of evacuation was one crucial factor on the early internal dose. The thyroid equivalent doses to the adult subjects of WBC measurements by the NIRS during a period between June and July in 2011 were estimated to be 3.5 mSv (median). On the other hand, a large discrepancy still existed between the inhalation internal doses computed using the ATDM and personal behavior data and those estimated from the individual monitoring data. Thus, further studies are necessary for improving this method.

東京電力福島第一原子力発電所事故における住民の線量評価に関する包括研究

放射性ヨウ素の血中動態並びに甲状腺集積率の予測

楠原洋之（東京大学大学院薬学系研究科教授）

研究要旨

近年の日本人における放射性ヨウ素の甲状腺集積率は平均して 15%程度で有り、1958 年以降の文献報告値と比較しても低い値である。種々曝露シナリオに従って、放射性ヨウ素の甲状腺集積率を推定するためには、放射性ヨウ素のほか、安定同位体ヨウ素の摂取状況等種々の情報を統合する必要がある。本研究では、曝露シナリオに従って、放射性ヨウ素の血漿中濃度ならびに甲状腺集積率の時間推移を推定するため、日本人における体内動態パラメータの決定ならびにモデル構築を行った。甲状腺取り込みクリアランスに関しては、1967 年当時と絶対値が同程度であることを確認した。腎機能の加齢に伴う変動および甲状腺集積率に基づいて、放射性ヨウ素の曝露シナリオに従って、小児における甲状腺集積率の時間推移を計算する体内動態パラメータを推定した。各体内動態パラメータの平均値と分散に基づいて、パラメータセットをランダムに発生させ、甲状腺集積率の分布を得、集団に関する分布を推定する方法を確立した。甲状腺集積率の非線形性に関して、日本人での測定データに基づいて、パラメータを決定し、モデルに導入した。ラットに放射性ヨウ素の経気道投与を行い、12 時間後に 15%程度の集積が認められた。ICRP の経肺吸収モデルと血中動態モデルを連結し、経肺吸収後の血中濃度ならびに甲状腺集積率の時間推移を計算する環境を構築した。

キーワード：体内動態、日本人パラメータ、甲状腺集積率、モデル解析、経気管投与

I 研究目的

^{131}I によらず遊離ヨウ素は生体内で甲状腺へと顕著に集積し、血漿中から甲状腺内へと濃縮される。甲状腺内では、甲状腺ホルモン（triiodothyronine ならびに thyroxine）の前駆体であるモノヨードチロシン（MIT）やジヨードチロシン（DIT）に取りこまれ、最終的に、甲状腺ホルモンとして血漿中へと分泌される。そのため、 ^{131}I の物理学的半減期は 8 日であるのに対して、平均的な成人の甲状腺では、ヨウ素の生物学的半減期は約 80 日と非常に長い。放射性ヨウ素への曝露は、甲状腺がんの発症リスクを高める。福島第一原発の事故後、放射性ヨウ素の測定を開始した時点では、すでに ^{131}I は減衰しており、 ^{131}I の被曝線量に関する情報は推定するほかない。

ICRP の reference man では、体内に吸収された放射性ヨウ素の 30%が甲状腺に集積すると想定している。血漿中から甲状腺内へのヨウ素の移行は、非線形性を示し、安定同位体ヨウ素の摂取により、甲状腺集積率ならびに甲状腺移行速度定数は低下する。従来から、日本人は欧米人に比較して、昆布などの安定同位体ヨウ素含量の高い食品を日常的に摂取する機会が多いことから、甲状腺集積率は低いとされている。この点を、平成 25 年度に、甲状腺機能が健常な壮年男性を対象として、経口投与 24 時間後の甲状腺集積率ならびに血漿中濃度の時間推移、尿中排泄量を測定した。本研究では、放射性ヨウ素の種々曝露シナリオに基づいて、仮想的な日本人集団における

甲状腺集積率およびその結果生じる内部被曝線量推定の精緻化を図ることを目的として、これまでに日本人で測定された放射性ヨウ素の実測値と、平成 25 年度に得た測定結果を統合的に解析することで、日本人における甲状腺集積率の中央値ならびに分散を推定する。また、個体間変動要因として、安定同位体ヨウ素摂取量が想定されるため、数理モデルを用いて、血中あるいは尿中の安定同位体ヨウ素量と甲状腺集積率とを関連付け、日本人集団における甲状腺集積率を推定する方法論を開発することを目的とする。

II 研究方法

①文献情報の収集

既存の文献データベース（PubMed、Medical Online 等）に対して、非線形性ならびに甲状腺容積に関する文献収集を行った。

②甲状腺集積率に関するモデル解析

平成 25 年度に実施した臨床試験のデータ（血中濃度の時間推移、甲状腺蓄積率、尿中排泄）を説明するための数理モデルを構築し、非線形性最小二乗法により、体内動態パラメータ（吸収速度定数、分布容積ならびに甲状腺移行クリアランス）の最適化を実施した。腎クリアランスは実測値を用いた。血中濃度の時間推移を表す線形 1-コンパートメントモデルあるいは 2-コンパートメントモデルに、中心コンパートメントから尿中排泄に関連した腎クリアランス、甲状腺移行クリアランスを設定した。投与経路に関しては、臨床試験デザインに即して、基本的に吸収速度定数（ k_a ）を用いた一次速度に従う吸収を仮定したほか、非常に早く吸収が完了し、初期の立ち上がり認められない事例では、時間 0 に外挿した放射性ヨウ素濃度を用いて、静脈内瞬時投与を仮定した解析を実施した。血中濃度の時間推移ならびに甲状腺集積の時間推移の同時当てはめ計算とした。また、吸収速度定数、分布容積、甲状腺移行クリアランスをフリーパラメータ、腎クリアランスは実測値を固定値として、非線形性最小二乗法を実行した。本解析には、すべて Napp¹⁾を利用して行った。

③Virtual clinical trial に基づいた放射性ヨウ素の甲状腺集積に関する個人間変動の推定

平成 26 年度のモデル解析の結果、得たパラメータの平均値ならびに分散値に基づいて、体内動態パラメータ（分布容積、腎クリアランスならびに甲状腺取り込みクリアランス）のセットを、Kato M らの報告に従ってランダムに発生させた²⁾。甲状腺取り込みクリアランスに関しては、平均値と分散が同定度であったことから、Nagataki らの報告値³⁾も含めている。

分布容積(Vd)と腎クリアランス(CL_R)ならびに甲状腺取り込みクリアランス(CL_{thyroid})から、静脈内投与後から 24 時間後までの血液中放射性ヨウ素の時間推移—時間曲線下面積 AUC を下記の式に基づいて算出した。

$$AUC = \frac{Dose}{CL_{thyroid} + CL_R} \left[1 - \exp\left(-\frac{CL_{thyroid} + CL_R}{Vd} 24\right) \right]$$

24 時間までの甲状腺集積率(F₂₄)は

$$F_{24} = \frac{CL_{thyroid} AUC}{Dose} = \frac{CL_{thyroid}}{CL_{thyroid} + CL_R} \left[1 - \exp\left(-\frac{CL_{thyroid} + CL_R}{Vd} \times 24\right) \right]$$

に従い計算した。各パラメータの平均値と分散に基づいて、以下の通り、対数正規分布を仮定して、ランダムに 500 件のパラメータセットを発生させた。

$$z_i = (-2 \ln u_i)^{0.5} \cos(2 \pi u_{i+1})$$

$$z_{i+1}=(-2 \ln u_i)^{0.5} \sin(2 \pi u_{i+1})$$

$$\text{parameter}=\exp(\mu+\sigma z)$$

$$\mu=\ln (\text{arithmetic mean})-\sigma^2/2$$

$$\sigma=\{\ln[(CV/100)^2+1]\}^{0.5}$$

その場合、ポピュレーションサイズ(500 件)からするとごくわずか(数例)ではあるが F_{24} が 50% を超える事例も出てきてしまう点が、観察される甲状腺集積率からすると過大であると指摘された。本件に関して、以下の修正を行った。

- 各パラメータの最大値と最小値を除いて、平均と分散を算出した。
- 非線形性最小二乗法で得たパラメータを用いて、 F_{24} を計算すると、実測値を 10%程度上回る。全 15 例における平均値を算出し、24 時間値の算出にあたりこの割合 (0.878) を乗じた。
- 試行回数を 10 回として、各ヒストグラムの間隔の人数を試行回数の平均値とした。

さらに、任意の摂取タイミングで、安定同位体ヨウ素を摂取した際の、放射性ヨウ素の甲状腺集積を推定するため、Python 上で微分方程式の数値解法プログラムを構築した。

④甲状腺取り込みクリアランスの非線形性について

放射性ヨウ素の甲状腺集積は過剰な安定同位体ヨウ素存在下で低下することが知られている。この非線形性に関して、分子メカニズムに基づいた非線形性に関する文献情報を収集した。また、Nagataki らの報告³⁾では、血漿中の遊離形無機ヨウ素濃度を測定し、同時に甲状腺移行クリアランスが測定されていた。この濃度と取り込み速度の関係から、Michaelis-Menten 式に従い、 K_m ならびに V_{max} 値を決定した。

In vivo での有用性を検証するため、林らの報告⁴⁾に従い、1mg、5mg、100mg を分割投与後の甲状腺放射線集積率（安定同位体を投与後、24、48、72 時間後の回復過程も評価されている）を測定された臨床試験の再現性を評価した。甲状腺移行クリアランスに Michaelis-Menten 式に基づいた飽和性を含め、血液中濃度の時間推移を再現するとともに、放射性ヨウ素の甲状腺集積率を推定した。線形条件下での甲状腺集積率は 30%程度となるが、報告値（14.6%）を再現するため、平均して K_m 値の 2.4 倍の安定同位体ヨウ素が血液中に存在することを想定した。分割投与として、0、5、11 時間後に非標識体を投与し、最終投与時に放射性ヨウ素を 24 時間間隔で 3 回投与したものとして、前述の Python 上にて構築したプログラムを用いて、甲状腺集積率の時間推移に関するシミュレーションを行った。

⑤ラット経肺投与後の、甲状腺集積率の時間推移の測定

既報では、蒸気(Vapor)による放射性ヨウ素の曝露試験が行われているが、放射性ヨウ素の放射活性の大部分は腸管に存在し^{5, 6)}、経口吸収を主に反映していると考えられる。ペンセンチュリーを用いることで、エアロゾルとして放射性ヨウ素を投与することが可能である。ラットにイソフルランを吸引させることで麻酔をかけ、 ^{125}I 薬液 50 μL (6.5uCi/匹、リン酸緩衝生理食塩水)を経気管投与し、12 / 24 / 72 時間後、麻酔下にて、採血後に甲状腺を摘出した。放射線量は γ カウンターで測定した。

(倫理面への配慮)

臨床データは、文献または平成 25 年度に実施した ^{125}I を用いた体内動態試験の結果である。平成 25 年度に実施した臨床試験では、東京大学、長崎大学、相生会博多クリニックの倫理委員

会の承認を得た。

動物実験に関しては、「研究機関等における動物実験等の実施に関する基本指針」及び細則を遵守の上、所属研究機関の承認を得て実施した。

III 研究結果

①甲状腺容積に関する文献情報の収集

我々が実施した臨床試験において、超音波により甲状腺容積を測定した。その平均値は 12 mL (1 例の外れ値を除くと 10 mL) と比重を 1 とすると、ICRP reference man (20g)⁷⁾ に対して低い値であった。過去の日本人での評価事例では、autopsy による摘出した甲状腺の重量測定では平均値はほぼ 20 g 程度 (10~30g の幅を示す) であり⁸⁾、CT での測定報告⁹⁾では、20g 程度(4 人)と 10g 程度(2 人)の群に分かれているように見える。少なくとも以前は、ICRP reference man と同定度⁷⁾の 20g 程度であった。我々と同じく超音波を体積測定に用いた福島での報告例¹⁰⁾でも、同様に甲状腺容積の絶対値が小さい。方法論に関しては、超音波での測定でも、MRI などと同定度の精度が得られることを示す文献¹¹⁾もある。専門家へのインタビューの結果、日常の診療上、甲状腺容積の絶対値を精密に測定することが特に不可欠ではないことから、超音波での甲状腺容積測定の精密さが担保されていない等の理由によりその絶対値の信頼性は担保されていない。MRI で甲状腺容積を精密に測定するためのプログラムが開発されていない、CT での測定では被験者への被曝が懸念されるなど、生体において甲状腺容積を精密に評価するには至っていない。甲状腺容積が、ICRP reference man に比較して小さいとした場合、甲状腺集積率は ICRP reference man に比較して小さいものの、甲状腺容積の絶対値を考慮すると、被曝線量は ICRP reference man と同定度と推定される。

②甲状腺移行における非線形性に関する文献情報の収集

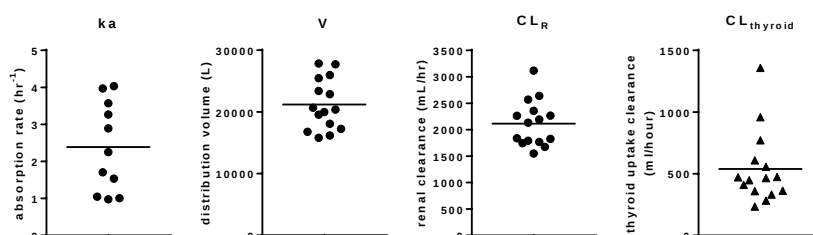
血液から甲状腺内への移行に関しては、基底膜側からの取り込みに働く Na/I symporter (NIS)、細胞内から濾胞内への分泌に働く pendrin ならびに濾胞内のペルオキシダーゼが想定される。NIS ならびにペルオキシダーゼのミカエリス定数はそれぞれ $9\mu\text{M}$ ¹²⁾、約 $200\mu\text{M}$ ¹³⁾と測定されている。pendrin に対しては、直接的に K_m 値を決定した論文は見いだせなかったが、アフリカツメガエル卵母細胞を用いた発現系において、 $50\mu\text{M}$ の放射性ヨウ素(^{125}I)存在下で有意な取り込みが観察されていること、 5mM の安定同位体ヨウ素存在下で 10%程度に低下していることから¹⁴⁾、その K_m 値は NIS よりも大きいと想定される。仮に、pendrin 発現細胞での取り込みが全て pendrin によるものとする、 $500\mu\text{M}$ 程度の K_m 値であることが推定される。一方で、Nagataki らは、血漿中の遊離形無機ヨウ素と甲状腺取り込みクリアランスの関係を報告しており、以下の解析では、報告された臨床データを採用した。

③放射線ヨウ素の血中動態ならびに甲状腺集積率の体内動態モデル解析

昨年度に引き続き、血液中ヨウ素濃度の時間推移は、コンパートメントモデルを用いて解析した。その結果、個体に応じて、吸収が速やかに生じ、静脈内瞬時投与と見なせる事例のほか、1 次の吸収速度からなる事例など、個体差も認められた。また、11 例が 1-コンパートメントモデル、4 例が 2-コンパートメントモデルを用いた当てはめ計算が適当であった。中心コンパートメントから甲状腺への移行に関しては、甲状腺から血液中への戻りを想定していない。本体内動態解析

により、放射性ヨウ素の腎クリアランスならびに甲状腺移行クリアランスについて、図1に示す結果を得た。

図1 123-I における日本人体内動態パラメータの平均と分散



甲状腺移行クリアランスに関して、1967 年の報告³⁾と比較した結果、平均値ならびに分散に関して大きな変動は認められなかった (図2)。そのため、以下の解析では、この報告値も含めている。

④Virtual clinical trial に基づいた放射性ヨウ素の

甲状腺集積に関する個人間変動の推定

体内動態パラメータからの平均値ならびに分散を用いて、対数正規分布を用いてパラメータをランダムに 500 件発生させた。パラメータの分布は、元となった臨床データと一致していた。各パラメータセットに対して、24 時間までの血液中濃度時間曲線下面積並びに甲状腺集積率を推定し、甲状腺集積率に関するヒストグラムを作成した。独立

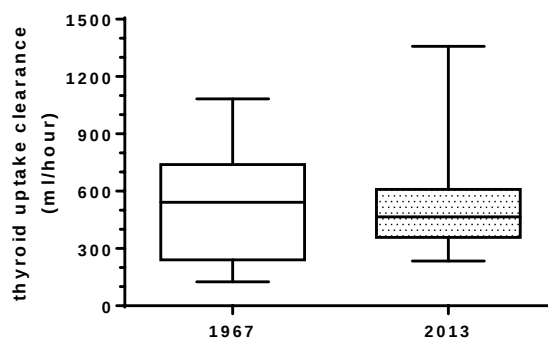


図2 甲状腺取り込みクリアランスの比較

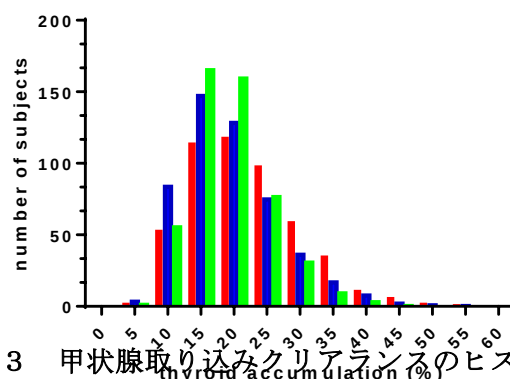
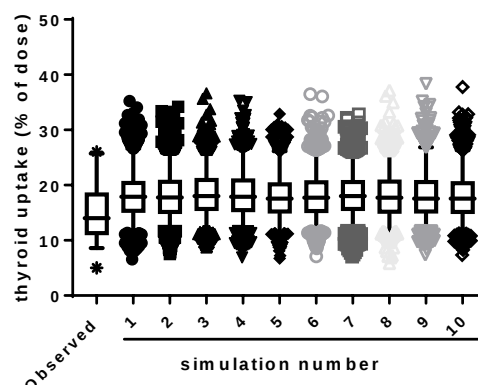


図3 甲状腺取り込みクリアランスのヒストグラム

してパラメータを抽出するため、組み合わせによっては非常に高い集積率(>50%)を示すパラメータセットも確率論的に発生してしまう。II 研究方法の項に記載した通りのアプローチにより、改善が認められた。それでも、40%という高い値を示す事例が 3/500 の割合で発生している。Expert Judgement として、ある閾値以上の集積率を示すパラメータセットは、甲状腺集積率を計算に含めないことも検討する必要がある。

甲状腺集積率に関し、10回のシミュレーションを行い、その分布を実際に行った臨床試験の分布と比較した。その結果を図4に示す。前述の通り、outlierは存在するものの、95%信頼区間で評価する場合には、実測値の分布とほぼ一致している。



上記のパラメータセットを用いることで、種々曝露シナリオ（安定同位体ヨウ素、放射性ヨウ素の摂取量・時間）に従って、モンテカルロ法により放射性ヨウ素の甲状腺集積率を推定することができる。曝露シナリオごとに異なる摂取・暴露時間、曝露量に対応するため、スクリプト言語 Python 上で、Runge-Kutta-Gill 法を用いた数値解法プログラムを構築した。

図4 放射性ヨウ素の24時間甲状腺集積率の比較

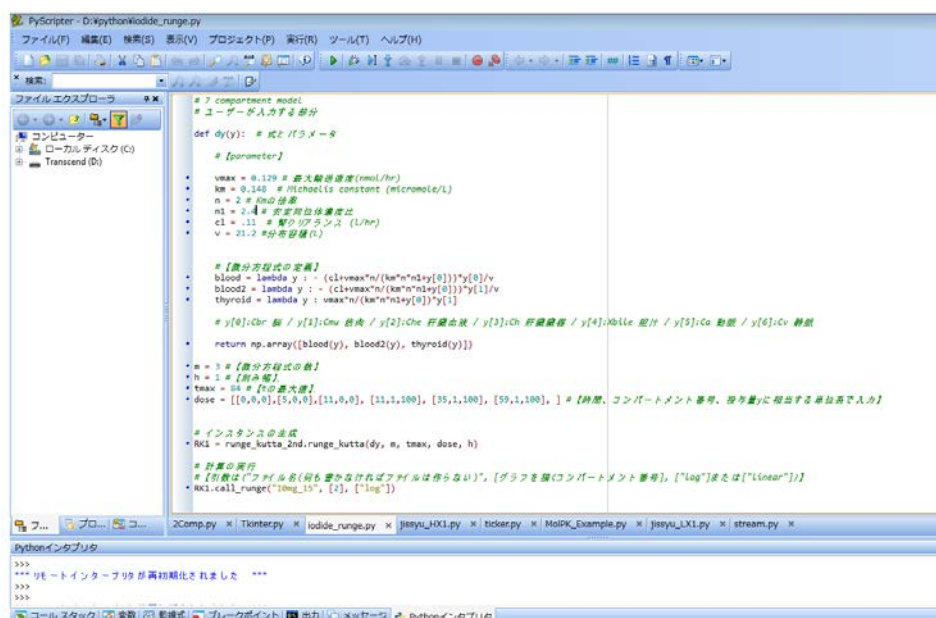


図5 Python 上で構築した体内動態シミュレーションプログラムのスクリーンショット

⑤ 小児パラメータの推定について

放射性ヨウ素の甲状腺集積を推定するための小児パラメータの推定を行った。甲状腺集積率は、甲状腺移行クリアランスと腎クリアランスで決定されるが、血液中濃度の時間推移を計算するためにはさらに分布容積に関する情報が必要である。甲状腺集積率に関しては、1966年に木之下ら

の報告に基づく、10 歳~50 歳（50 歳以上も含む）の 24 時間甲状腺集積率の平均値および分散は 20%程度で変動は認められていない¹⁵⁾。中島らの報告でも、6~10 歳では 20.8%と木下らの報告と一致しているが、3-6 歳では平均値で 25.7%（28.35-23.05%）と、6~10 歳よりも高い値が報告されている。

糸球体ろ過速度(GFR)の加齢に伴う変動について文献調査を行った。Uemura らの報告では腎機能のバイオマーカーとして用いられる creatinine や cystatin C を用いて、小児および乳幼児の eGFR が推定されている。2 歳以降では体表面積で規格化した場合、加齢に伴う変動は認められなかった。3-23 ヶ月齢にかけて、10~20%の体表面積で規格化した eGFR の増加が認められた。

一方、Fisher らの報告では、乳幼児の ¹³¹I 投与後の分布容積が報告されており、体重あたりの分布容積は、0.332 であり、我々が実施した臨床試験では 0.308 であり、10%程度の増大が認められる。細胞外容積に関する加齢の影響を収集した回帰計算式に基づいた場合、Abraham、Peters、Friis-Hansen、Bird らの回帰計算式が報告されているが、Peters および Bird らの回帰式が適当と報告されている（Peters et al. *Pediatr Nephrol*, 2012）。放射性ヨウ素の腎クリアランスおよび分布容積は GFR および細胞外容積に相関すると仮定する。

甲状腺の 24 時間集積率は、以下の式で表すことができる。

Thyroid uptake (% of dose)

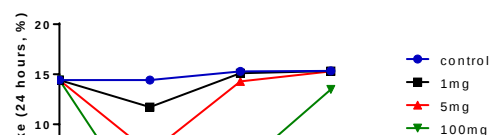
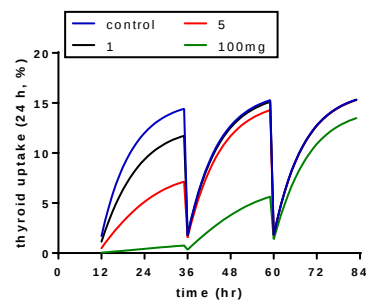
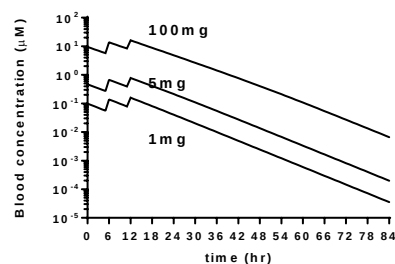
$$= \frac{CL_{thyroid}}{CL_{thyroid} + CL_{r, 24h}}$$

腎クリアランスと甲状腺集積クリアランスは体表面積に、分布容積は表面積^{1,34}に比例するため、BSA が異なる事で血中滞留性は若干加齢の影響を受ける。ただし、 $[1-\exp(-\alpha * 24)]$ の項は、小児と成人とでは 3%程度の違いであるため、加齢の影響は無視できると考えられる。木下らが報告した 24 時間での甲状腺集積率から、甲状腺取り込みクリアランス ($CL_{thyroid}$) は体表面積で規格化した際には、10 歳以降では成人と同程度と考えられる。一方で、3~6 歳では 24%程度大きい値を設定することが適当と思われる。Fisher ら、Ogborn、Martmer らの報告では出生直後の甲状腺集積率が報告されている。出生後、100 時間以降では、24 時間での甲状腺集積率は 25%と成人と同程度の値を示す。出生後 10~40 時間後では、高い値を示す。この期間は甲状腺取り込みクリアランス($CL_{thyroid}$)も高い値を示す。

表面積は身長と体重から計算され（体表面積 $= 0.0243 \times W^{0.538} \times H^{0.396}$ ）、対象の身長と体重を設定することで、個体レベルでの腎クリアランス、甲状腺取り込みクリアランスおよび分布容積の 3 つを計算し、甲状腺への放射性ヨウ素の集積の時間推移をシミュレーションすることができる。

⑥甲状腺移行の非線形性に関するシミュレーション

Nagataki らの報告による遊離形無機ヨウ素



53図6 安定ヨウ素の血中濃度ならびに放射性ヨウ素の甲状腺 24 時間取り込み値

濃度と甲状腺移行クリアランスの関係から、 K_m 値と V_{max} 値を、それぞれ $0.148\mu\text{M}$ と 872ml/hr と算出した。Python 上にて構築した微分方程式の数値解法プログラムを用いて、甲状腺への移行に飽和過程があることを想定した数理モデルを構築し、安定同位体ヨウ素摂取時の放射性ヨウ素の甲状腺集積率を推定した。1mg 服用時には、安定同位体ヨウ素摂取の効果が、若干過大に評価される傾向にあるものの、Nagataki らの報告³⁾に基づいた体内動態パラメータで、安定同位体ヨウ素の摂取に関する時間推移をほぼ説明することができた。林らの報告⁴⁾では、安定同位体ヨウ素非服用時（試験開始前）の甲状腺集積率は 14.6%であり、これを非線形性のみで達成するためには、 K_m 値の 2.4 倍の遊離形ヨウ素の存在を仮定する必要がある。1mg の安定同位体ヨウ素服用で得られる最大濃度は $0.1\mu\text{M}$ であることから、日本人の安定同位体ヨウ素摂取量からすると、妥当な数字ではないかと思われる。 K_m 値をさらに 2 倍に増大させると、1mg 服用時の効果は認められなくなるが、そのために必要な遊離形安定同位体ヨウ素濃度も増加するため、日常的に安定同位体ヨウ素摂取量の観点からも妥当性を検証する必要がある。

臨床データで得られている K_m 値と、ヨウ素の甲状腺移行の分子メカニズムから得られている K_m 値との間には、大きな乖離が存在し、さらなる解析を必要とする。

⑦ラット経気管内投与後の放射性ヨウ素（ ^{125}I ）甲状腺集積率の時間推移の測定

ラットに放射性ヨウ素をエアロゾルにて経肺投与試験をおこなった。投与 5 分後には、肺、気管、胃および小腸で放射線量を測定した結果、これらの組織の中では 95%が肺および気管に存在しており、経気管投与が実施できていることが確認された。また、5 分後の血液には平均して 10%程度（2 例のラットにおいて 13%、5.8%であった）の放射線量が検出されており、経肺投与後、速やかな血液中への移行も認められた。12、24、72 時間後に、甲状腺へは投与量の 13.3 ± 1.7 、 11.4 ± 1.2 および $7.52\pm 0.59\%$ が甲状腺へと集積していた。

甲状腺容積については、1970~1980 年代の Autopsy による摘出した甲状腺容積の測定により、体重と相関することが報告されている⁸⁾。今回帰計算式を用いることで、甲状腺容積にもついても算出可能である。前述の通り、現在の日本人甲状腺容積の絶対値については、議論の余地がある。

⑧ICRP の経肺吸収モデルの実装

前述のモデルは、経口吸収モデルであった。粒子として経肺吸収する可能性もあることから、ICRP が報告している経肺吸収モデルを、Python 上に実装した（図 7）。ICRP では、鼻（ET1 および ET2）、肺（BB1、bb、ALV）にコンパートメントを設置し、粒子経に応じて鼻・肺内の分布、肺内での移動、溶解、血液中への吸収が考慮されている。大気から放射性ヨウ素を吸収した場合、肺から血液中へと吸収される部分と、食道への分泌を通じて経口吸収される部分に分けることが出来る。H27 年度に構築した体内動態モデルと連結し、甲状腺への集積の時間推移をシミュレートすることができた（図 8）。

```

k3 = 100 # ET2からのクリアランス
k4 = 10 # BB'からのET2
k5 = 0.2 # bb'からのBB'
k6 = 0.002 # ALVからのbb'
k7 = 0.001 # ALVからのINT
k8 = 0.00003 # INTからのLNTH
k9 = 0.001 # bbseqからのLNTH
k10 = 0.001 # BBseqからのLNTH
k11 = 0.001 # ETseqからのLNTH
fr = 1 # rapid&slow dissolutionの割合
fb = 0 # bound materialの割合
Sr = 100 # rapidの溶解速度
Ss = 0 # slowの溶解速度
Sb = 0 # bound materialの溶解速度

# 微分方程式の定義
ET1_r = lambda y: -(k1+k2+fb*Sr)*y[0]
ET1_s = lambda y: -(k1+k2+fb*Ss)*y[1]
ET1_b = lambda y: -(k1+k2)*y[2]+ fb*Sr*y[0]+fb*Ss*y[1]
ET2_r = lambda y: k2*y[0]-(k3+Sr)*y[3]+k4*y[6]
ET2_s = lambda y: k2*y[1]-(k3+Ss)*y[4]+k4*y[7]
ET2_b = lambda y: k2*y[2]-(k3+Sb)*y[5]+k4*y[8]+fb*Sr*y[3]+ fb*Ss*y[4]
BB_r = lambda y: -(k4+Sr)*y[6]+k5*y[9]
BB_s = lambda y: -(k4+Ss)*y[7]+k5*y[10]
BB_b = lambda y: -(k4+Sb)*y[8]+k5*y[11]+fb*Sr*y[6]+fb*Ss*y[7]
bb_r = lambda y: k6*y[12]-(k5+Sr)*y[9]
bb_s = lambda y: k6*y[13]-(k5+Ss)*y[10]
bb_b = lambda y: k6*y[14]-(k5+Sb)*y[11]+fb*Sr*y[9]+fb*Ss*y[10]
ALV_r = lambda y: -(k6+k7+Sr)*y[12]
ALV_s = lambda y: -(k6+k7+Ss)*y[13]
ALV_b = lambda y: -(k6+k7+Sb)*y[14]+fb*Sr*y[12]+ fb*Ss*y[13]
INT_r = lambda y: k7*y[12]-(k8+Sr)*y[15]
INT_s = lambda y: k7*y[13]-(k8+Ss)*y[16]
INT_b = lambda y: k7*y[14]-(k8+Sb)*y[17]+fb*Sr*y[15]+ fb*Ss*y[16]
bbseq = lambda y: -k9*y[18]
BBseq = lambda y: -k10*y[19]
ETseq = lambda y: -k11*y[20]
LNTH = lambda y: k8*(y[15]+ y[16]+ y[17])+ k9*y[18]+ k10*y[19]
LNTH = lambda y: k11*y[20]
Blood = lambda y: (1-fb)*Sr*(y[3]+y[6]+y[9]+y[12]+y[15])+(1-fb)*Ss*(y[4]+y[7]+y[10]+y[13]+y[16])

# y[0]:ET1,r / y[1]:ET1,s / y[2]:ET1,b / y[3]:ET2,r / y[4]:ET2,s / y[5]:ET2,b / y[6]:BB,r / y[7]:
return np.array([ET1_r(y), ET1_s(y), ET1_b(y), ET2_r(y), ET2_s(y), ET2_b(y), BB_r(y), BB_s(y), I

m = 24 # 微分方程式の数
h = 0.001 # 刻み幅
tmax = 10 # 時間の最大値
dose = [[0,0,47.94],[0,3,25.82],[0,6,1.78],[0,9,1.10],[0,12,5.32]] # 時間、コンパートメント番号、

# インスタンスの生成
RK1 = runge_kutta_2nd.runge_kutta(dy, m, tmax, dose, h)

# 計算の実行
# 引数は「ファイル名(何も書かなければファイルは作らない)」, [グラフを描くコンパートメント番号], ["Log".
RK1.call_runge("Lung1", [23], ["linear"])

```

図 7 Python 上に実装した放射性ヨウ素の経肺吸収モデルの実装

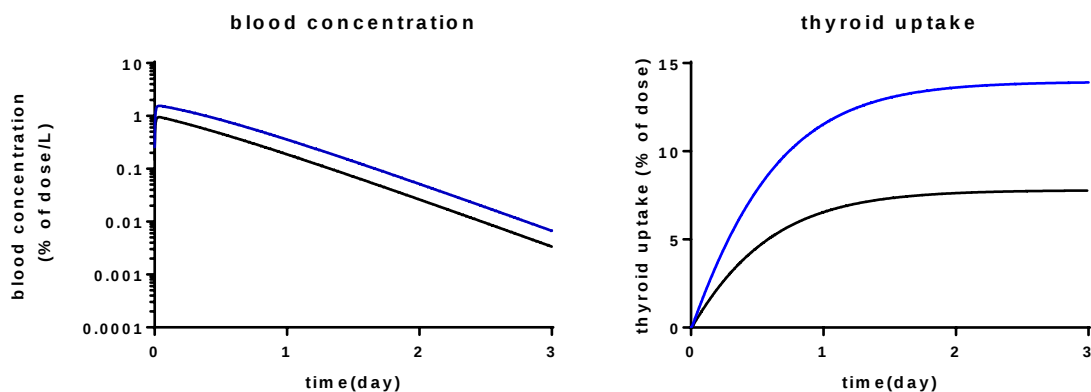


図8 経肺吸収後の血液中濃度および甲状腺集積の時間推移

5 μ m の粒子径を持つ粒子を単回で吸収し、全量が速やかに溶解するとした場合、曝露後、食道を介した経口吸収を考慮しない（黒色実線）、あるいは考慮した（青色実線）2条件で、計算した。

IV 考察

食事制限の有無の違いはあるものの、1958年以降の日本人データと比較して、放射性ヨウ素の甲状腺集積率は低い数字を示した。また、国内の別の機関で近年実施された臨床データ（関東で実施）との比較において、平均値は一致しており、長崎で実施した私の臨床試験において、甲状腺集積率に関して地理的な要因を排除できると考えられる。また、1967年の報告値と甲状腺移行クリアランスの平均値ならびに分散は一致しており、少なくともここ数十年で、甲状腺集積に関する体内動態パラメータは大きく変動していないことがわかる。

一方で、甲状腺の大きさに関しては議論の余地がある。超音波法で測定した甲状腺容量に関しては、過去の報告や ICRP reference man に比較して小さい傾向を示した。これは福島県立医科大学で実施した試験においても、同様である。超音波での測定方法による甲状腺容積の絶対値に対する信頼性については、10g 程度の甲状腺容積から、MRI や他の手法と比較しても遜色（20%程度の誤差）ないことが報告されている¹¹⁾。我々の臨床試験を実施した臨床試験施設ならびに福島県立医科大学の先生に本件に関してインタビューした結果、これまで甲状腺容積の絶対値が診療上重要視されてこなかった背景もあり、本方法での甲状腺容積の絶対値に関する信頼性について結論に至ることはできなかった。甲状腺容積は被曝線量を推定する際に不可欠のパラメータであることから、今後精緻な測定法などを利用して、さらに解析を必要とする。現状では MRI で断層像を得ることができるが、容積計算のアルゴリズムが記載されていないため、仮に定量したとして測定値がどの程度真の値を示しているか、検討する必要がある。CT での測定がもっとも、信頼できるとのことである。測定に際して、被験者への被曝を伴うことが懸念事項である。

モデル解析の結果、¹²³I の血中動態は解析事例の追加により、1-コンパートメントモデル、2-コンパートメントモデルに従う事例が見出されたが、1-コンパートメントモデルに従う事例が多数を示した。中心コンパートメントは細胞外容積に近い値を示し、それと同等のボリュームに相当するコンパートメントを置く必要があった。モデル解析により、甲状腺移行の時間推移も説明できるパラメータを決定することができた（図1）。

各動態パラメータが対数正規分布に従うとして、Excel のランダム関数を利用して、個々のパラメータの CV 値に従った多数のパラメータセットを発生させた。本パラメータセットを用いて、甲状腺集積に関する個人間変動を推定した(図 3)。パラメータを臨床データの平均値ならびに分散に従って、ランダムに発生させた場合には、確率論上、甲状腺集積率が高い値を生じることがあり得る。そこで、パラメータに制限を加えた結果、こうした事例の発生数を抑制することができた。臨床試験で観察された範囲外の甲状腺集積率を示すパラメータセットを除外するなど、実測値に基づいた制限 (Expert Judgement) についても検討する余地がある。その 1 つとして、95% 信頼区間の値は、実測値の平均と分散をほぼ再現できていることから (図 4)、この区間も妥当性の指標の 1 つと考える。

体内動態モデルならびに上記任意に発生させたパラメータセットを利用することで、種々曝露シナリオに従った放射性ヨウ素の甲状腺集積率の分布を推定することが可能になる。①種々曝露シナリオに従った際の甲状腺集積率を推定するため、任意の時間でのヨウ素摂取を物質収支式に組み込むことが必要である。従来のプログラムは定規格の薬物量を一定時間間隔で服用する際のプログラムであったため、新たに Python 上でプログラムを構築した。②甲状腺移行クリアランスの非線形性に関する情報収集を行った。その結果、既知の動態パラメータを利用することで、別個の臨床試験結果を再現することができた(図 5)ことから、本パラメータを用いて、食事等による安定同位体ヨウ素の摂取を考慮した放射性ヨウ素の甲状腺集積推定に貢献するものと考えている。加齢に伴う影響についても、体重・身長に応じて、放射性ヨウ素の甲状腺集積推定ができる環境を整えた。

ラット経気管内投与について、放射性ヨウ素を生理食塩水にてエアロゾルでの経気管投与法を確立した。経気管投与時でも、静脈内投与時と同様に放射性ヨウ素が甲状腺へと集積することを確認することができた。ただし、投与 5 分後のマスバランスとして、半分程度の放射線量が既存の測定組織 (肺、気管、胃、小腸、血液) で説明できる。放射性ヨウ素は速やかに吸収されることを示している。ICRP が提唱している経肺吸収モデルを、血中動態のモデルと連結することで、経肺吸収後の血中濃度ならびに甲状腺集積率の時間推移を計算する環境を構築した。

V 結論

放射性ヨウ素の血中濃度の時間推移は 1-コンパートメントモデルないし、2-コンパートメントモデルにより説明することができ、血液中濃度の時間推移、尿中排泄量ならびに甲状腺移行の時間推移をすることができるパラメータを、被験者ごとに得ることができた。小児についても、腎機能および甲状腺集積率に基づいて、甲状腺集積率の時間推移を計算するための体内動態パラメータを推定した。本モデルならびにパラメータの平均値ならびに分散から発生させたパラメータセットを利用することで、種々曝露シナリオに基づいて、放射性ヨウ素の甲状腺集積率の分布を推定することが可能である。

実験動物における経気管投与の方法を確立し、放射性ヨウ素が肺から速やかに吸収され、甲状腺に蓄積することを確認した。ICRP の経肺吸収モデルと血中動態モデルを連結し、経肺吸収後の血中濃度ならびに甲状腺集積率の時間推移を計算する環境を構築した。

この研究に関する現在までの研究状況、業績

当初の予定どおり、日本人の甲状腺集積率に関する情報収集を行い、放射性ヨウ素の甲状腺集

積率が ICRP の reference man よりも低い値であることを確認した。甲状腺移行クリアランスについて、ここ 50 年程度では大きな変動が認められないことを確認した。集団における甲状腺集積率の推定法、非線形性に関する情報統合も進め、健常成人の甲状腺集積に関するシミュレーションによるブラッシュアップを行った。15th International Congress of Radiation Research のサテライトワークショップ” Updating the dose reconstruction for residents in Fukushima Nuclear Accident” (平成 27 年 5 月 25-29 日、京都)にて、これらの成果を発表した。(Kusuhara H and Maeda K、 Evaluation of Japanese kinetic parameters for thyroid accumulation of radioiodide)

引用文献

- 1) Hisaka A, Sugiyama Y. Analysis of nonlinear and nonsteady state hepatic extraction with the dispersion model using the finite difference method. J Pharmacokinet Biopharm. 1998;26:495-519
- 2) Kato M, Chiba K, Ito T, Koue T, Sugiyama Y. Prediction of interindividual variability in pharmacokinetics for CYP3A4 substrates in humans. Drug Metab Pharmacokinet. 2010;25:367-78
- 3) Nagataki S, Shizume K, Nakao K. Thyroid function in chronic excess iodide ingestion: comparison of thyroidal absolute iodine uptake and degradation of thyroxine in euthyroid Japanese subjects. J Clin Endocrinol Metab. 1967;27:638-47
- 4) 林和徳、ヨード含有薬剤の甲状腺機能検査に及ぼす影響、日本内分泌学会雑誌、1972;48:182-94
- 5) Willard DH, Bair WJ. Behavior of I-131 following its inhalation as a vapor and as a particle. Acta radiol. 1961;55:486-96
- 6) Barry PJ. The deposition of radioiodine in the thyroids of rats following inhalation of the vapour. Health Phys. 1961 4:305-7
- 7) ICRP publication 89 Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values
- 8) Tanaka G. Anatomical and physical characteristics for Asian Reference Man. NIRS-M-95、1993
- 9) 中村修、秋山三郎、佐野芳知、内山暁 CT による甲状腺重量(体積)の測定、日本放射線技術学会雑誌、1986;42:612-619
- 10) Suzuki S, Midorikawa S, Fukushima T, Shimura H, Ohira T, Ohtsuru A, Abe M, Shibata Y, Yamashita S, Suzuki S. Systematic determination of thyroid volume by ultrasound examination from infancy to adolescence in Japan: the Fukushima Health Management Survey. Endocr J. 2015;62:261-8
- 11) van Isselt JW, de Klerk JM, van Rijk PP, van Gils AP, Polman LJ, Kamphuis C, Meijer R, Beekman FJ. Comparison of methods for thyroid volume estimation in patients with Graves' disease. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2013;30(4):525-31
- 12) Dayem M, Basquin C, Navarro V, Carrier P, Marsault R, Chang P, Huc S, Darrouzet E, Lindenthal S, Pourcher T. Comparison of expressed human and mouse sodium/iodide symporters reveals differences in transport properties and subcellular localization. J Endocrinol.

2008;197:95-109

13) Pommier J, Deme D, Nunez J. Effect of iodide concentration on thyroxine synthesis catalysed by thyroid peroxidase. *Eur J Biochem.* 1973;37(3):406-14

14) Scott DA1, Wang R, Kreman TM, Sheffield VC, Karniski LP. The Pendred syndrome gene encodes a chloride-iodide transport protein. *Nat Genet.* 1999;21(4):440-3.

15) 木下 文雄, 前川 全, 安田 三弥, 七里 泰, 荒井 寿朗, 山岸 一郎 正常者および各種甲状腺疾患の ^{131}I -甲状腺摂取率の再検討、*Radioisotopes*, 1966;15:359-370

Prediction of blood disposition and thyroid accumulation of radioiodide

Hiroyuki Kusuhara

Graduate School of Pharmaceutical Sciences, the University of Tokyo

Keywords: disposition, parameters in Japanese population, thyroid accumulation, model-based analysis

Abstract:

Iodide accumulates in the thyroid gland upon exposure. The purpose of this study was to construct a methodology for estimating the thyroid accumulation of radioiodide in Japanese people following various exposure scenarios during the Fukushima nuclear accident. Parameter estimation (clearance for thyroid uptake, distribution volume and absorption rate constant) to account for the time profiles of blood concentrations and thyroid accumulation of ^{123}I was conducted using 1- or 2-compartment model, assuming 1st order absorption or otherwise, rapid absorption. The thyroid uptake clearance of ^{123}I with regard to the blood concentration in our study was comparable to those reported in 1967 in Japanese. Five hundred parameter sets of kinetic parameters of radio-iodide were randomly generated using arithmetic mean, and deviation of each parameter. Using the parameter sets, distribution of the thyroid accumulation of radio-iodide for 24 hours was calculated. To estimate the thyroid accumulation of radioiodide for 24 hours upon various exposure scenarios, a program was constructed on Python to obtain numerical solution of simultaneous differential equation. Finally, the parameters (K_m and V_{max}) related to the non-linearity in the thyroid uptake clearance were estimated assuming the Michaelis-Menten equation. Introduction of the non-linearity in the model analysis could provide the thyroid uptake values similar to the observed values when subjects who received 1, 5 and 100 mg excess stable iodide. Taken together, the blood concentration time profiles and thyroid accumulation of radio-iodide could be simulated by integrating information about the ingestion of stable iodide, and exposure to radio-iodide.