

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・院長)

永井 晴康 (日本原子力研究開発機構・グループリーダー)

栗原 治 (放射線医学総合研究所・チームリーダー)

村松 康行 (学習院大学・教授)

楠原 洋之 (東京大学・教授)

研究要旨

東京電力福島第1原発事故後の福島県住民および周辺県住民の体系的な線量評価は、WHO と UNSCEAR がこれまで行ってきたが、事故初期の測定データの不足に起因する大きな不確かさがある。本研究においては、5つの研究グループが相互に情報を提供し合いながら、大気輸送拡散沈着シミュレーションモデル (WSPEEDI) や他の線量評価手法を改良し、その有効性を確認しながら、福島県住民および周辺県住民の外部被ばく線量、内部被ばく線量、とりわけ甲状腺線量を再評価する。

鈴木のグループは、福島県および周辺県が実施していた空間線量率、土壌汚染密度、農林水産物の汚染検査データを系統的に収集し、さらに、実測値が乏しい時期や地区に関しては、WSPEEDI による評価値をベースに飲料水や農産物等の汚染濃度をシミュレーションするコンパートメントモデルを構築し、評価する。既存の測定値と新たに取得する測定値をつかち、コンパートメントモデルに使うパラメータの妥当性を検討する。我々は、避難住民の衣服汚染の核種分析結果と約 42,000 名の GM サーベイメータ測定データを使って、避難途上の I-131, I-132, I-133, Te-132 の吸入被ばくによる甲状腺被ばく線量を評価する手法を開発する。

キーワード：大気拡散シミュレーション、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

研究者協力者氏名・所属施設名及び所属施設における職名

(専門委員会委員) 中村 尚司 (東北大学・名誉教授)

伴 信彦 (東京医療保健大学・教授)

石樽 信人 (名古屋大学・教授)

手島 玲子 (国立医薬品食品衛生研究所・部長)

茅野 弘道 (日本原子力研究開発機構・部門長)

浅見 真里 (国立保健医療科学院・上席主任研究官)

(研究協力者) 長谷川 有史 (福島県立医大・教授)

大葉 隆 (福島県立医大・臨床放射線技師)

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

研究の背景： 2014年5月にUNSCEARの福島報告書が公表されたが、その評価値は小児甲状腺簡易測定からの評価値や弘前大学の床次等の評価値に比べて過大評価となっている。我彼の違いが出てくる原因としてUNSCEAR報告書は、事故による放出放射能濃度の不確かさ、事故直後のTe-132、I-131などの短半減期核種の測定データの欠如、日本人特有のヨウ素代謝データの不足等をあげている。また、UNSCEARの評価値は平均値であって、住民の行動パターンの違いによりその30～50%から2～3倍までの違いがあると指摘されている。事故直後の必ずしも情報が十分でない中での、WHOやUNSCEARによる評価は、不確かさを承知の上で、将来の健康管理対策や不安対策に早急に利用するために公表された意味合いもある。しかしながら、今後は長期的な健康影響に対するモニタリングや、健康不安、復興に対する懸念対応など、息の長い対応が求められるようになっていくことになる。その際に、事故初期の被ばく線量の不確かさや、保守的な評価の結果をそのまま利用し続けることには課題があり、両報告も詳細なデータの更なる収集等による線量評価の精緻化の必要性を指摘している。

研究の目的： 本研究は主に事故初期の被ばくに注目して、ソースタームおよび大気輸送・拡散・沈着モデルを最新版へ更新するとともに、モデルのパラメータを最適化するための新規データの収集・測定を実施し、避難途上や事故後早期の外部被ばく・内部被ばく（呼吸・飲食）線量の再構築を行うことを目的とする。また、日本人特有のヨウ素代謝パラメータについて分析し将来的な被ばく線量の評価検討に資するものとする。

環境行政の課題との関連性： 住民の不安を解消するために、被ばく線量の中央値だけでなく幅を評価することが重要である。また、将来のUNSCEARによる福島報告に資するため、特に事故初期の被ばく線量評価の大きな不確かさの問題解消を図る必要がある。そのためには、日本からデータを提示することが重要である。この点は、国際的にも強く求められている。なお、事故から3年を経えており、時間の経過に伴い被ばく線量評価に関わる様々なデータの入手は難しくなっていくと思われる。そのため、関連データの収集にはできる限り早く着手する必要がある。この点からも本研究の必要性・緊急性は極めて高いといえる。

II 研究方法

本研究は、包括研究として実施される。JAEAの永井らが、大気拡散シミュレーションの精緻化を担当し、そのシミュレーション結果を国福大・福島県立医大、放医研の班員が利用できる体制を取る。また、大気拡散シミュレーションのパラメータ調整に使われる新規データの取得部分を学習院大、国福大・福島県立医大、および東大の班員が実施する。

JAEAのグループが実施する大気拡散シミュレーションの精緻化は、JAEAが報告した最新のソースタームを使い、また、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させる。事故直後の各地の空間線量率、土壌放射性物質の沈着濃度、PM2.5の連続測定フィルターの放射性セシウムなどのデータに加え、下記のI-129の測定データ等を使い、大気拡散シミュレーションモデルのパラメータの最適化を図る。そして、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（詳細は、分担研究成果報告書参照）。

放医研のグループは、上記の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利用し、福島県住民の行動調査票と甲状腺簡易測定データやホールボディカウンターデータとを突き

合わせて、これらの測定値のある住民の内部被ばく線量・外部被ばく線量を再評価すると共に、大気拡散シミュレーションの評価値との整合性を検討する（詳細は、分担研究成果報告書参照）。

学習院大のグループは、福島県および一部周辺県の土壌のI-129をAMS加速器質量分析法により測定し、もってデータの乏しかった事故直後のI-131の空間的広がりを再現する。これまで650試料の測定が終わっており、最終的には、890試料の測定を計画している。このデータは、大気拡散シミュレーションのパラメータ調整に使われる。また、陰膳法により収集された福島県住民の食品の安定ヨウ素濃度を調べ、現代の日本人の安定ヨウ素摂取の分布を調べる（詳細は、分担研究成果報告書参照）。

東京大学のグループは、欧米人および日本人のヨウ素・甲状腺代謝に関する報告を文献調査し概観すると共に、分担研究者がH25年度に長崎で実施したI-123の体内動態に関する臨床研究データをベースに他の日本人研究者のデータを統合して日本人成人のヨウ素代謝の数理的モデルを構築する（詳細は、分担研究成果報告書参照）。

主任研究者は、3つのテーマ「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」並びに「内部・外部被ばく線量の統合」に関して調査する。第3のテーマ「内部・外部被ばく線量の統合」は、最終年度に班全体の研究成果の総括として取り上げる予定である。

第1のテーマ「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」は、三菱総研に外注し、実施する。H25年度に三菱総研が原子力災害影響調査等事業の一環で実施した福島県内13市町村の事故初期の食品の経口摂取による内部被ばく線量評価調査において確立してきた手法を継承しつつ、13市町村以外の福島県住民、および周辺県住民に適用する。

① 経口摂取による内部被ばく線量の検討

飲料水や食品（野菜等）の放射能濃度の実測値及び検討した喫食量を用いて、対象期間・対象地域の経口摂取による内部被ばく線量を推計する。飲料水や食品（野菜等）の実測データが不足している期間・地域については、実測データ及び大気拡散シミュレーションからの放射性物質の地表面沈着率を利用し、ワン・コンパートメントモデルないしマルチ・コンパートメントモデルによって、飲料水や食品の放射能濃度を推計し、内部被ばく線量を検討する。福島県立医大がサンプリングしていた沢水の核種分析結果、自治体が実施していた水源汚染データなどにより、当該モデルの検証を実施する。また、大気拡散シミュレーションによる放射性物質の地表面沈着量を線量推計に用いるが、土壌中 I-129 の分析による I-131 土壌沈着量等を検証データとして用いることで、線量推計及び大気拡散シミュレーションの精度向上を行う。

② 吸入摂取による内部被ばく線量の検討

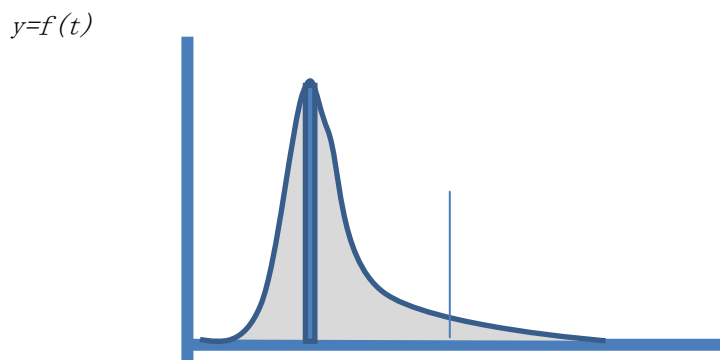
大気拡散シミュレーションによる放射性物質の大気中濃度等の評価結果を用いて、吸入による内部被ばく線量を検討する。その際、人の活動レベルや屋内に滞在することによる防護係数等のパラメータは、他の分担研究によって得られたデータを用いて検討する。

③ 福島県外の外部被ばく線量の検討

福島近隣県の住民の外部被ばく線量の推計に関する系統的な文献収集を行い、情報を整理する。具体的には、関係する自治体などの公表している推計結果を収集・整理して福島県外の外部被ばく線量の推計状況を整理する。

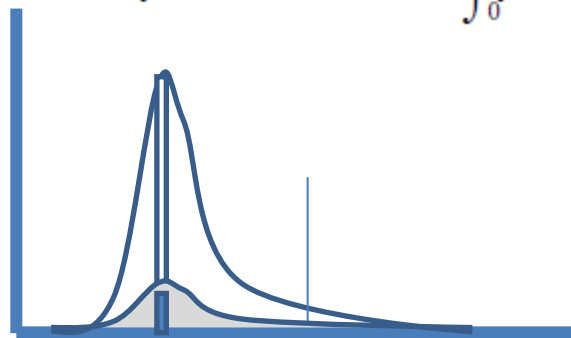
第2のテーマ「体表面スクリーニング検査結果からの甲状腺被ばく線量推計」は、2011年3月12

日から3月17日までに約42,000名の避難住民に実施したGMサーベイメータによる体表面スクリーニング・データをベースに甲状腺等価線量を評価する。GMサーベイメータのベータ線測定結果より、大気中の放射性核種濃度を推測するため、福島県立医大が保有する3名の避難住民の衣服のゲルマニウム半導体検出器による核種分析結果を利用する。福島第一原発1号機、3号機、2号機から漏洩した放射性プルームは、3月15日の夕方までは乾性沈着により避難住民の衣服に沈着したと考えられる。避難途上の乾性沈着速度が一定と仮定すると、避難に要した時間“T”時間に衣服に沈着した放射性核種の量は、避難途上“T”時間に吸引した大気中の放射性核種と比例関係にある（下図参照）。この核種分析データから、体表面のGMサーベイメータを使った計測値に占める各放射性核種の寄与率を計算し、もって、避難途上の短半減期放射性核種（I-131,I-132,I-133, Te-132）の吸入被ばくによる甲状腺等価線量を推計する。



A. 避難途上で呼吸する大気中の放射性ヨウ素濃度

$$S(t) = \int_0^t 3600K(10^{-6}f(t) dt) = 3.6 \times 10^{-3}K \int_0^t f(t) dt$$



B. 避難途上で大気から沈着する放射性ヨウ素量

図1. 大気中放射性ヨウ素と衣服に沈着する放射性ヨウ素の量的関係

t 時間目の空間の放射性ヨウ素濃度を $y=f(t)$ (Bq/m^3) と定義すると、0～T 時間の放射性ヨウ素濃度の積分値と、1 歳児の呼吸率を $0.35(\text{m}^3/\text{h})$ 、1 歳児の甲状腺等価線量係数を 1.4×10^{-6} (Sv/Bq) (ICRP Publ 71)を使って、吸入による 0～T 時間の間の甲状腺預託線量 $D(t)$ (Sv)は、以下の積分値として表現される。

$$D(t) = 0.35 \times 1.4 \times 10^{-6} \int_0^T f(t) dt$$

一方、 t 時における放射性ヨウ素の体表面沈着量 $S(t)$ (Bq/cm²) は、 $f(t)$ と沈着速度 K (cm/s) の積であるので、 $0 \sim T$ 時間間の体表面沈着量は、以下の数式で表現される。

$$S(t) = \int_0^T 3600K(10^{-6}f(t) dt) = 3.6 \times 10^{-3}K \int_0^T f(t) dt$$

放射性ヨウ素濃度の積分値が両式で共通なので、代入すると

$$S(T) = 3.6 \times 10^{-3} \times K \cdot D(T) / 0.35 \times 1.4 \times 10^{-6} = 7.35 \times 10^3 K \cdot D(T)$$

$$D(T) = 1.36 \times 10^{-4} S(T)/K \quad (\text{式 1})$$

となり、沈着速度 K が空間汚染濃度と関係なく一定と仮定すると、体表面汚染密度は甲状腺被ばく線量と線形関係にある。すなわち、汚染密度が判れば、甲状腺等価線量を評価できる。年齢階層に応じた ICRP の呼吸率と甲状腺等価線量換算係数を使い、他の年齢階層の甲状腺等価線量も同様に評価できる。

体表面汚染検査は、福島県および福島県立医大で事故後直後の 3 月 12 日から 3 月 17 日まで約 42,400 名が測定されている。この中で利用可能なデータは、乾性沈着が主の時期に避難した住民の GM サーベイメータの測定値に限られ、かつ、上半身の体幹部の測定（靴や手は除く）であり、どの程度の測定値が利用可能かは来年度の調査により判明する。来年度は、福島県に体表面測定スクリーニング票として残されている紙媒体のデータを電子化し、避難ルート、日時毎に分類して、それぞれの避難ルート毎の甲状腺等価線量推計をする予定である。

(倫理面への配慮)

住民の個人データを扱う鈴木および栗原の研究計画については、それぞれ、国際医療福祉大学 (13-B-79) と福島県立医大 (受付番号2136)、および福島県立医大 (受付番号1892) で別個に倫理審査をうけ、研究倫理委員会から承認を受けている。楠原の研究計画は、公表データの再解析であり、今回、倫理問題は発生しない。永井および村松の研究は、ヒトのデータを使わない研究であり、倫理的問題は生じない。

III 研究結果

分担研究者の研究成果に関しては、それぞれの成果報告書を参照されたい。

1. 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

事故直後の摂食状況を検討するため、福島県の生鮮品の流通状況を調査した。経口摂取による内部被ばく線量を検討するため、事故直後に各地で測定された放射能濃度を収集し、整理した。水道水の実測値が不足している期間や地域において、濃度変化が新たな放射性核種の沈着と含まれる放射性核種の実効的な減衰によって表されるワン・コンパートメントモデル（以下にモデルを記載）を用いて、推計を行った。水源への沈着のみでは説明が困難な地域について、浄水場への放射性核種の沈着を考慮したマルチ・コンパートメントモデルで推計を行った。なお、大気拡散シミュレーションは平成 25 年度に JAEA 殿から入手した WSPEEDI (参考文献：寺田宏明、永井晴康、古野朗子、掛札豊和、原山卓也、茅野政道、緊急時環境線量情報予測システム (世界版) WSPEEDI 第 2 版の開発、日本原子力学会和文論文誌、7、p257-p267、2008) によるデータを用

いた。

$$\frac{dC}{dt} = ap' - \lambda C$$

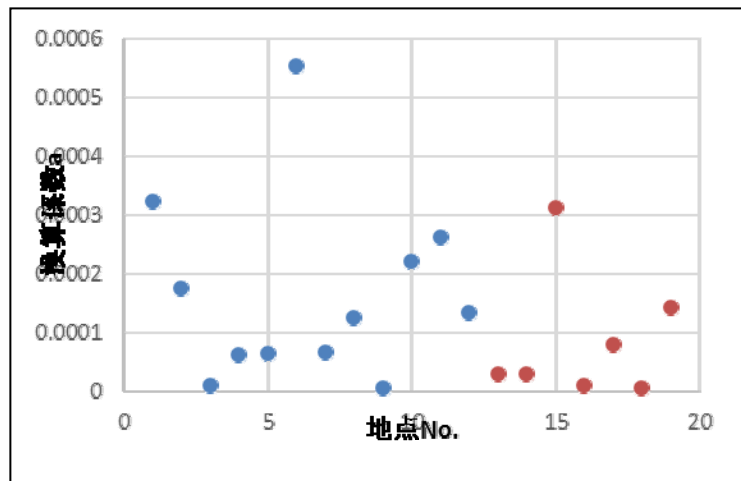
C 水道水中の核種濃度 (Bq kg⁻¹)

p' 地表面沈着率 (Bq m⁻² s⁻¹)

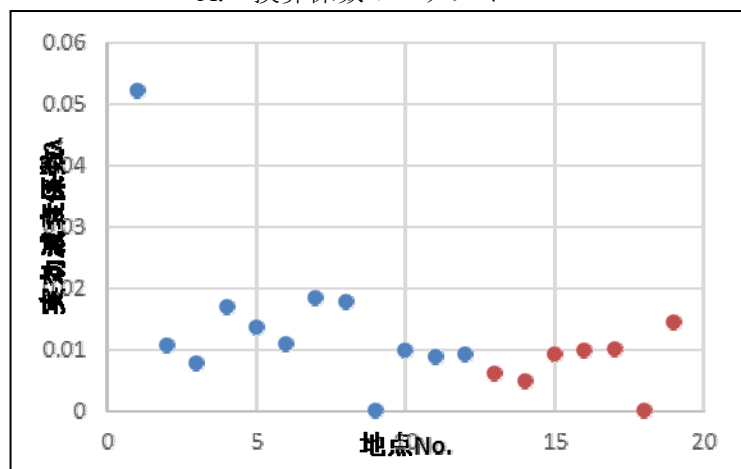
α 換算係数 (m² kg⁻¹)

λ 実効減衰係数 (s⁻¹)

福島県各市町村を対象として、水道水の放射能濃度をワン・コンパートメントモデルで推計した。実測値によってフィッティングされる推計のパラメータ（換算係数および実効減衰係数）は、実測値の十分な全ての地域で推計し、パラメータにどの程度不確かさが含まれるかを検討した。換算係数の平均値は 1.8×10^{-4} 、実効減衰係数の平均値は 1.6×10^{-2} であった。各パラメータのばらつきを図2に示す。また、図3に、放射能濃度推計の具体的な結果として、ある地点の推計を示す。青の線が拡散シミュレーションの地表面沈着率、赤点が計測された実測値、緑の線が実測値と地表面沈着率に基づく推計値を示す。



A. 換算係数のバラツキ



B. 実効減衰係数のバラツキ

図2. 水道水中の放射能推計のためのワン・コンパートメント・モデルの換算係数、実効

線量係数のバラツキ(A、B)

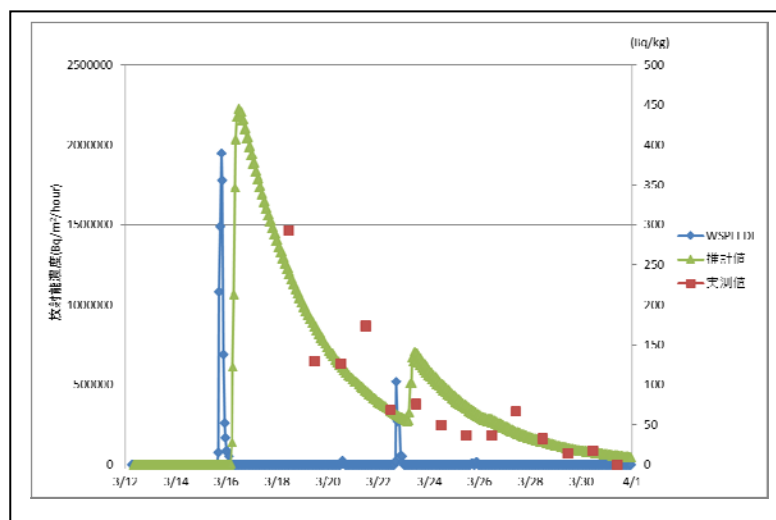


図3. ワン・コンパートメント・モデルによる水道水放射能濃度推計結果

また、ワン・コンパートメントモデルで説明が困難であった地域について、水源と浄水場に沈着した核種量（拡散シミュレーションから推計）を考慮したマルチ・コンパートメントモデルによって、放射能濃度を推計した。

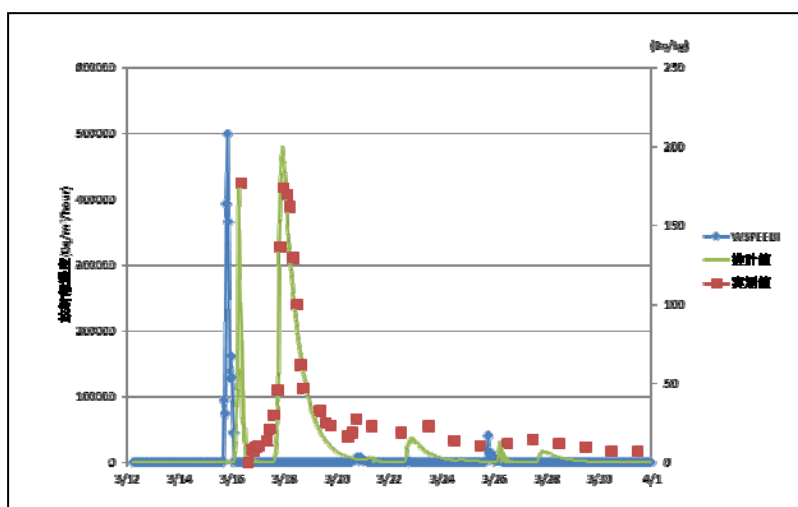


図4. マルチ・コンパートメント・モデルによる水道水の放射能推計結果

2. 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

福島県立医大で実測した3名の衣服のゲルマニウム半導体検出器による放射性核種分析結果をベースに、同一人の上半身GMサーベイメータ測定値に占める各放射性核種の寄与率を算定した。このデータをベースに、同行した避難住民の吸入被ばくによる甲状腺等価線量を推計した。サンプル数が少なく、集団の線量評価を行うことには無理があるが、今後、県の保有するGMサーベイメータの記録票を解析し、避難経路毎にGMサーベイメータの測定値の平均値と変動を調べ、年齢

別甲状腺等価線量の平均値と幅を推計する基礎ができた。

IV 考察

研究全体を概観すると、JAEAが進めている大気拡散シミュレーションを精緻化する研究は、計算のためのワークステーション整備、計算プログラム開発導入、データベース整備などが進んだ。来年度にむけて、最新のソースタームを使い、新しい気象モデルを使ったWSEEDIによる計算環境が整った。福島県内は1Kmメッシュ、1時間間隔での計算が可能となる。一方、WSPEEDIのパラメータ調整に使う実測値の発掘という面では、学習院大グループが進めている土壌のI-129の分析や、環境省の浮遊粒子状物質（SPM）の捕集フィルターに残されていた放射性セシウムデータを使ったデータ収集が進んでおり、これらの実測値を使った調整が来年度後半に可能となる。国福大と福島県立医大では、福島県13市町村以外の地域や周辺県の測定データを系統的に収集開始しており、また、未公表の家庭菜園や原乳、沢水等のデータ発掘も進んだ。来年度後半にはこれらのデータもWSPEEDIのパラメータ調整に利用される体制ができたと言える。放医研グループは、小児甲状腺のガンマ線簡易測定検査をうけた小児および2011年6月～7月に放医研がホールボディカウンター検査を実施した住民に関して、行動調査法との突き合わせが完了した。来年度は、線量と行動との関係を解析する基礎ができた。さらにJAEAが同年7月より翌年1月まで実施したホールボディカウンター検査対象者の行動調査票との照合作業を実施する。個人の防護行動がWSPEEDIの新しいシミュレーション結果を使った住民の外部被ばく線量・内部被ばく線量評価をどのように修飾するのかを評価する予定である。東大のグループは、ヨウ素制限のない通常食を食べていた日本人成人のデータを基に日本人のヨウ素代謝数理モデルを完成した。来年度は、文献的考察より、数理モデルを小児や腎機能の低下した成人にも拡張する。この数理モデルは、最終的に甲状腺被ばく線量を評価する際に、日本人集団の中央値と幅を算定する際に使われる。以下、国福大が実施した分担研究分に関する考察を記載する。

実測値の不足している期間における水道水の放射能濃度をワン・コンパートメントモデルで推計した結果、各地点におけるパラメータ（換算係数、実効減衰係数）のばらつきが比較的小さいことが分かった。推計対象の地点では、福島原子力発電所から近く放射性物質の沈着も多い場所と、福島原子力発電所から遠く放射性物質の沈着が少ない場所の両者が含まれる。また、推計結果としても妥当な結果が得られたと考えられる。そのため、福島県内においては、水源への核種の沈着量を考慮したワン・コンパートメントモデルで実測値の不足した期間の放射能濃度を補完できる可能性がある。さらに、水源への沈着のみでは実測値の説明が困難だった地点について、浄水場への沈着も考慮したマルチ・コンパートメントモデルを用いることで、放射能濃度を補完できると考えられる。

今回、我々は避難住民の行動を反映している体表面汚染に着目して内部被ばく線量を推計する方法論を提案した。旧科学技術庁の委託により原子力安全研究協会が作成した「緊急時医療の知識—第1次緊急時医療活動—」（文献1）において、体表面汚染レベル $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ を小児甲状腺被ばく線量 100mSv のスクリーニングレベルとして提案していたが、この計算では、全て放射性ヨウ素-131による汚染を想定していた。実際の福島原発事故では、放射性ヨウ素-131以外の短半減期核種による体表面汚染が7割以上を占めており、これらの核種を含めた内部被ばくとして評価する必要がある。今回、衣服に付着していた放射性核種のスペクトル分析を行い、GMサーベイメータで測定したcpm値に占めるそれらの核種から放出されるベータ線割合を算定し、同じ割合で吸入被ば

くしたとして線量評価したところに新規性がある。GMサーベイメータの測定者は多数いるので、避難ルート毎の集団の甲状腺被ばく線量の平均値と分散を評価できるところが利点である。このモデルは、幾つかの不確実性を有している。第1に、内部被ばくの評価に際して、放射性核種を粒子径 $1\mu\text{m}$ の粒子と仮定し、その場合のヨウ素の乾性沈着速度を 0.1cm/s として計算したが、ウィンズケール事故やSL-1事故のフィールド調査では、粒子状のヨウ素の乾性沈着速度は $0.1\sim 0.3\text{cm/s}$ と報告されている。さらに、粒子径、風速や沈着表面の性状により変動する(文献2,3)。第2に、ヨウ素の化学型・粒子径の不確実性である。ガス状の元素ヨウ素の乾性沈着速度は、文献的には $0.02\sim 26\text{cm/s}$ と報告されており、メチルヨウ素のそれは、 $10^{-2}\sim 10^{-4}\text{cm/s}$ と報告されている(文献2)。第1の不確実性は、線量評価に際してモデルで採用した値が過大評価側の仮定となっているので、今後、乾性沈着速度の確率密度分布を想定したシミュレーションによる検討を予定する。第2の不確実性は、ガス状の放射性ヨウ素のほうが粒子状放射性ヨウ素より $1.8\sim 2.6$ 倍線量換算係数が大きくなる一方、メチルヨウ素はほとんど沈着に寄与せず、逆に元素ヨウ素はより沈着しやすい傾向にあるため、評価はより複雑である。今後、ガス状放射性ヨウ素と粒子状放射性ヨウ素の実測値を参考にして、不確実性の検討を進める必要がある。第3の不確実性は、放射性ヨウ素の甲状腺取り込み率をICRPの採用している30%としているが、安定ヨウ素の摂取量が多い日本人の中央値は15%前後と報告されている。分担研究者の楠原らの数理工学的モデルを援用して、線量評価の不確実性評価に生かしていく。

V 結論

経口摂取による内部被ばく線量推計に必要な水の放射能濃度について、実測値を収集するとともに、濃度推計の方法を検討した。濃度推計方法としてはワン・コンパートメントモデルおよびマルチ・コンパートメントモデルを用いることで、福島県の各市町村における水道水の放射能濃度が推計可能であることを確認した。

今後の課題として、精緻化された大気拡散シミュレーションの出力データを用いた濃度推計を行い、今年度実施した飲料水の放射能濃度推計と、野菜等の放射能濃度推計を最適化する必要がある。また、今後10年および生涯の被ばく線量の推計や、事故直後でない期間(2011年5月以降等)の摂食状況も考慮した内部被ばく線量の検討を行う必要がある。

体表面汚染データから短半減期核種(I-131、I-132、I-133、Te-132)吸入摂取量を推計し、もって甲状腺等価線量を推計するモデルを構築した。疫学倫理委員会の承認を受け、福島県立医大および福島県が保管する紙媒体の体表面汚染データを電子データベース化し、避難ルート毎の甲状腺等価線量を推計する体制が整った。

VI 次年度以降の計画

平成27年度

1. 福島県13市町村以外の公開資料、および周辺県の公開資料の収集を終える。
2. 福島県立医大から提供されるデータ(土壌、水道水、家庭菜園野菜、原乳、飼料の放射性核種の濃度実測値)を用いて、内部被ばく推計モデルのパラメータを再検討する。また、FARMLANDモデルのパラメータを比較検討し、モデルの改良を行う。県立医大の実測値は、JAEAの大気拡散シミュレーションモデルのパラメータ調整に使う。

3. JAEAから提供される改良バージョンの大気拡散モデルによる土壌汚染シミュレーション結果を使い、実測値のない時期や地域の飲料水・食品からの内部被ばく線量を中間評価する。また、福島県内だけでなく、周辺県の内部被ばく線量の推計を実施する。これらの評価値とホールボディカウンター等の実測値との整合性を検討する。
4. 外部被ばくに関しては、除染効果による減衰の検討を行う。
5. 体表面汚染スクリーニング・データのデータベース化を完了し、避難ルート毎の年齢別甲状腺等価線量の平均値と変動幅を推計する。
6. 不確実性の検討：大気中の放射性核種の構成に関する実測値、大気拡散モデルの推計値と衣服の核種分析、福島県立医大の空間線量率のガンマ・スペクトル連続測定データとの関係を検討する。
7. 不確実性の検討：放射性ヨウ素の化学型に関する実測値の公開データを収集する。
8. 不確実性の検討：体表面汚染データから甲状腺等価線量を推計するモデルの不確実性を総合的に評価する方法論を開発する。

平成28年度

1. JAEAから提供される最終バージョンの大気拡散モデルのシミュレーション結果を使い、福島県内・周辺県の内部被ばくおよび外部被ばく線量を再計算する。
2. 体表面汚染データから甲状腺等価線量を推計するモデルの不確実性の検討により、避難ルート別の年齢別甲状腺等価線量の信頼区間を推計する。

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.

引用文献

- 1) 「緊急時医療の知識—第1次緊急時医療活動—」平成5年3月、(財)原子力安全研究協会
- 2) Sehmel GA. Particle and gas dry deposition: A review. Atmospheric Environment 1980; 14: 983-1011.
- 3) Gifford FA Jr Pack DH. Surface deposition of airborne material. Technical Progress Review, Nuclear Safety, 1974; 3(4): 205-214. (ORNL-TM-195)

Comprehensive study on radiation dose received by residents in the TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station Accident

Gen Suzuki^{*1}, Haruyasu Nagai^{*2}, Osamu Kurihara^{*3}, Yasuyuki Muramatsu^{*4},
Hiroyuki Kusuhara^{*5},

**1 International University of Health and Welfare Clinic*

**2 Japan Atomic Energy Agency*

**3 National Institute of Radiological Sciences*

**4 Faculty of Science, Gakuchuin University*

**5 Graduate School of Pharmaceutical Science, University of Tokyo*

Keywords: Atmospheric transport dispersion deposition model; Internal exposure dose; Short half-life radionuclides; Body surface contamination, Compartment model

Abstract

WHO and UNSCEAR have systematically estimated the dose received by residents in Fukushima and adjacent prefectures after the TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station Accident. However, these dose estimates had large uncertainty due to the lack of measurements in the early phase of the accident. In the present study, 5 research groups will collaborate with each other so as to improve and validate an atmospheric transport dispersion deposition model (WSPEEDI) and other methodologies for the evaluation of internal dose especially thyroid dose in residents living in Fukushima and adjacent prefectures.

Suzuki's group will systematically collect the measurements data of air dose rate, soil contamination, and water/food contamination done by local governments or researchers, and food supply situation after the accident. As to areas in the early phase of accident, where measurements were lacking, we will simulate water/food contamination levels by constructing compartment models based on the output from WSPEEDI. Known and newly acquired measurements will be used for the validation of parameters in these compartment models. We also utilize the GM-survey meter measurements of 42,000 evacuees' cloths in combination with their nuclides analyses by a germanium spectrometer and construct a model to estimate thyroid dose by I-131, I-132, I-133 and Te-132.

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・放射線科学ユニット 環境動態研究グループ・リーダー)

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、以下の調査及び開発を実施した。

- 1) 放出源情報について文献調査を行った。UNSCEAR 2013レポート以降の進展としては、JAEAの放出源再推定結果がサイト周辺のモニタリングポストデータやI-131及びCs-137沈着量分布を良好に再現しており、有効と考えられる。
- 2) 大気拡散シミュレーションについて、最新の気象モデルWRF及び高度なデータ同化手法を導入した。また、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改良を行った。
- 3) 大気拡散シミュレーションの実行とデータベースを構築するための、専用計算機環境を整備し、大規模計算とデータベース構築を可能とした。
- 4) 放出源情報及び計算結果の精度検証・誤差評価用の各種実測データ（環境省のSPM 捕集用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・連続データ等）の収集と整理を行った。

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

研究者協力者：

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）

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、降水量、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26年度は、上記研究項目のうち、1) 放出源情報の検討(①)、2) 計算モデル改良と計算手法の検討(②)を進めるとともに、3) 大気拡散シミュレーションの実行とデータベースを構築する計算機環境の整備、4) 各種実測データの収集と整理を行った。各研究項目の実施方法を、以下に記述する。

1) 放出源情報の検討

放出源情報について調査を行った。調査はソースターム（放出率）の報告値を対象とし、放出源情報としてソースタームの推定期間、推定に利用されたデータ内容、核種組成、放出時の化学

形（ヨウ素）、粒径分布等とした。調査は、科学論文、関係機関の報告書、ウェブサイト上公開情報等を対象として実施した。

2) 計算モデルの改良

放射性物質の大気拡散シミュレーションは、風速場や降水等の気象場を計算する気象モデルと、その気象場に基づき放射性物質の大気中における輸送及び地表沈着を計算する拡散モデルによって行う。したがって、ある放出源情報を入力した際の大気拡散シミュレーションの再現性を向上するには、これら両モデルの再現性を向上させることが必要となる。

(1) 気象モデル

気象モデルについては、これまではペンシルバニア州立大と米国大気研究センター（NCAR, National Center for Atmospheric Research）により開発されたMM5（Grell et al., 1994）を利用していたが、MM5は既に開発が終了しており、NCARにより気象学及び計算科学の最新の知見を基にWRF（Weather Research and Forecasting model）（Skamarock et al., 2008）の開発が進められているため、これを導入することとした。WRFは、圧縮性非静力学領域気象モデルであり、最大で半球規模までの任意の範囲を任意の解像度で計算することができる。座標系には、水平方向は地図投影距離座標、鉛直方向は乾燥大気圧の静水圧成分に基づく地形準拠座標（ η 座標）を用いており、運動量、熱エネルギー、水蒸気、雲水や雨水等の保存式を有限差分法で数値的に解き、風速、温位、降水量等の気象変数の時間発展を予測する。大気の力学過程に加えて、大気放射、地表面熱収支、大気境界層、雲・降水等の物理過程とその相互作用を考慮可能である。計算領域の内側により高解像度の計算領域を入れ子状に設定し、外側領域の計算値を境界値として内側領域を計算するネスティング手法により、効率的な高解像度計算が可能である。各種プログラムは複数種の計算プラットフォームに対応するように並列化されており、並列計算機上での効率的な計算が可能となっている。WRFは入力データの作成、計算実行、計算出力の解析及び可視化までの一連のツールやモデル本体のソースコード、一部入力データが利用手順書とともに整備され、研究目的の利用に対してインターネット上で無償公開されている。

WRFによる気象計算を実施する上で、気象庁等の現業気象機関により提供される解析値あるいは予報値を入力データとして用いる。これら解析値及び予報値は、気象観測値のデータ同化及び気象モデル計算により作成される。データ同化とは、時空間的にまばらで不均一な観測値から、時空間的に均一で物理法則にも整合する大気の状態を表す各種物理量の格子点値（初期値、境界値）を、客観的手法により求めることを言う。データ同化に用いられる気象観測値が同化実施時点までに入手されたものに限られること、観測値が欠損あるいは時空間密度が低い場合は現実再現性が低下すること等が考えられるため、現時点で利用可能な観測値を有効に利用してさらなるデータ同化を実施することで、再現性を向上させることが可能な場合がある。このデータ同化の手法には様々なものがある。そのうちの一つにナッジング手法がある。これは、観測値（あるいは解析値）とモデルによる計算値の差に一定の係数をかけた外力項を運動量や熱エネルギー等の保存式に付加して時間積分することで、計算値を観測値（あるいは解析値）に近づける操作を行うものである。この手法では、観測点周辺の格子点値を直接的に修正することが可能だが、基礎方程式に現実には存在しない項を付加するため、物理的整合性を崩すことになる。本研究では、4次元変分法(4D-Var, Four-Dimensional Variational Data Assimilation)（Talarand and Courtier, 1987）に

よるデータ同化手法を導入した。4D-Varでは、気象モデルの計算値とある一定の解析期間（同化ウィンドウ）内の観測値との差異の大きさを定量的に示す評価関数を設定し、この評価関数が最小になるように以下の手順を反復することで同化ウィンドウ内の観測値と最も整合する解析値を得る。

- ① 推定された初期値に基づく気象モデルの時間積分計算を実施（初期値の情報を時間が進む方向に伝播）
- ② モデル計算値と観測値の差異を計算
- ③ アジョイント（随伴）モデルの時間積分計算を実施（計算値と観測値の差異を過去に向かって伝播）して評価関数の勾配を計算
- ④ 降下法により評価関数が小さくなるように初期値を修正

ここでアジョイントモデルは、通常の気象モデルを基に作成される逆変換モデルである。4D-Varには、得られる解析値が物理法則を満たしている、任意の時刻の観測値を観測された時刻の値として同化可能、といった利点がある。

気象モデルにWRFに基づく4D-Varが実施可能なデータ同化パッケージWRF-DA（WRF Data Assimilation System）（Huang et al., 2009; Barker et al., 2012）が、WRFと同様、NCARにより公開されている。そこで、NCARの公開Webサイト（<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>）から気象モデルWRF及びデータ同化パッケージWRF-DAをダウンロードして入手し、当グループ内計算機に実行環境を整備することにより導入した。これらの公開パッケージと自作した計算制御ツールを組み合わせることで、WRF及びWRF-DAを基にした気象データ同化解析システムを構築した。また、このシステムの動作確認を行うため、福島第一原発事故を対象とした試験計算を実施した。

（2）拡散モデル

一方、放射性物質の大気拡散モデルにおいては、放出源情報の他に計算結果の再現性に影響する不確かさの主要な要因として沈着過程が考えられる。放射性物質の大気拡散を計算する数値モデルにはGEARN（Terada and Chino, 2008; Katata et al., 2012）を用いる。GEARNは、大気中に放出された放射性物質を多数の仮想的な粒子で模擬し、気象モデルによって計算された気象場に基づき仮想粒子の位置を追跡することにより放射性物質の大気拡散を計算するラグランジュ型粒子モデルである。GEARNの従来版の沈着モデルでは、雲・降水が発生している場所に存在する放射性物質に対して洗浄係数により湿性沈着を計算していた。洗浄係数には、地表降水強度のみに依存する一律の値を用いており、核種の化学形態や降水の種類等は考慮されていなかった。また、乾性沈着は、一定の乾性沈着速度により大気からの除去を計算しており、ヨウ素とその他の核種、森林とそれ以外の場所で異なる値を使用していたものの、核種の化学形態、気象条件、地表面状態等を詳細に考慮していなかった。

そこで、拡散モデルGEARNに精緻な沈着スキーム（Katata et al., 2015）を導入することにより改良した。このスキームは、沈着過程を乾性沈着、湿性沈着（雲内洗浄と雲下洗浄）及び霧水沈着に区別して計算するものであり、核種の化学形態、粒子態の粒径、ガス態の溶解度、氷相雲物理、気象条件、地表面状態等を考慮した精緻なものである。

3) 計算機環境の整備

大気拡散シミュレーションの実行とデータベースを構築するための、専用計算機環境を整備し

た。専用計算機は、1CPUあたり12コアのCPUを2個、メモリを192GB搭載し、24台のHDDからなる約73TBの計算結果保存領域と高速のデータアクセスが可能な2台のSSDからなる約370GBの解析用データ領域の構成とした。この計算機により、大規模計算と高速なデータベース解析が可能であることを、試験解析を実行して確認した。

4) 各種実測データの収集と整理

大気拡散シミュレーションの結果と比較して放出源情報及び計算結果の精度検証・誤差評価を行うため、放出された放射性核種の環境中濃度及び空間線量率等の実測データが必要であり、簡便に利用可能なデータベースとして整理しておく必要がある。そこで本研究では、これまでに取得された膨大な実測データのうち、時間・空間解像度等の観点から有用性が高いと考えられる以下の2種のデータ：

①環境省の浮遊粒子状物質（SPM）捕集用ろ紙に付着した放射性核種分析による放射性セシウムの大気中濃度

②航空機モニタリングによる空間線量率及び放射性セシウムの地表沈着量を対象として、データの収集と整理を実施した。

データ①については、データの詳細とともに測定結果の数値が記載された文献（環境省, 2014; 原子力規制委員会, 2014）がPDF形式で公開されており、これらをダウンロードして収集した。データ②の空間線量率については、以下の測定結果の数値がCSV形式の電子ファイルで原子力規制委員会のWebサイト（原子力規制委員会, 2015）で公開されており、これらをダウンロードして入手した。

- ・第1次航空機モニタリング（平成23年4月6日～29日測定）
- ・第2次航空機モニタリング（平成23年5月18日～26日測定）
- ・第3次航空機モニタリング（平成23年5月31日～7月2日測定）
- ・第4次航空機モニタリング（平成23年10月22日～11月5日測定）
- ・第5次航空機モニタリング及び福島第一原子力発電所から80km圏外の航空機モニタリング（平成24年6月22日～28日測定）
- ・第6次航空機モニタリング及び福島第一原子力発電所から80km圏外の航空機モニタリング（平成24年10月31日～11月16日測定）
- ・第7次航空機モニタリング（平成25年8月27日～9月28日測定）
- ・福島県及びその近隣県における航空機モニタリング（平成25年11月2日～19日測定）
- ・警戒区域及び計画的避難区域における航空機モニタリング（平成24年2月6日～10日測定）
- ・避難指示区域における航空機モニタリング（平成25年3月4日～29日測定）

また、米国エネルギー省のWebサイトで、2011年3月17日～19日に実施された航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果が公開されている（US Department of Energy, 2011）。この測定値のCSV形式の電子ファイルを、米国ローレンスリバモア国立研究所のKevin Foster氏からの提供により入手した。データ②の放射性セシウムの地表沈着量については、原子力規制委員会のWebサイト（原子力規制委員会, 2012）で公開されている沈着分布図の作成に使用された測定値のCSV形式の電子ファイルを、平成26年8月まで公開されていたWebサイト（<https://mapdb.jaea.go.jp/mapdb/>）からダウンロードして入手した。

以上により入手した実測データについて、データ①は公開PDFに記載された測定結果の数値を

抽出して作成したデジタルファイルを、データ②は入手したCSV形式のファイルを、III章で記すフォーマットのデータファイルに変換した。

(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) 放出源情報の検討

調査により得られた放出源情報の内訳を公開日が早い順に、表1に記載する。

ソースタームの推定値は、科学論文として19件、関係機関の報告書として6件、関係各所のウェブサイトの公開情報として4件の報告が得られた。得られたソースタームの一部を付録に記載する。推定方法としては、大気拡散シミュレーションと環境データを組み合わせた"reverse method"或いは"inverse method" (定義はUNSCEAR (2014)を参照) と炉内の物理化学現象を炉内物理モデルによって解析する"事故進展解析"に大別された。事故からこれまでの推定の進展としては、事故直後の限られた情報のもとで2011年3月中旬に公開されたもの (IRSN, 2011; ZAMG, 2011) に始まり、事故後数ヶ月の間に国内の機関が推定結果を公開し (NISA, 2011a and 2011b; Chino et al., 2011)、その後、新たな環境データの追加や事故情報の進展等に伴い国内外の機関から種々の推定値 (e.g., Stohl et al., 2012a; Winiarek et al., 2012; TEPCO, 2012a and 2012b; Mathieu et al., 2012) が公開されるとともに、既報値の改訂 (Katata et al., 2012a and 2012b; Terada et al., 2012; Kobayashi et al., 2013; Saunier et al., 2013; Winiarek et al., 2014; Katata et al., 2015) が進められてきた。"reverse method"或いは"inverse method"によるソースターム推定は、当初はプルームが陸上に存在した期間を主な対象としていたものの、解析手法の進展 (大気モデルと海洋モデルの結合シミュレーション及び海洋モニタリングデータの利用) に伴い、プルームが洋上に存在したと思われる期間に対しても実施されてきた (Kobayashi et al., 2013; Katata et al., 2015)。

放出時の核種組成としては、大気中の濃度に代表される環境データから推定されたもの (e.g., Chino et al., 2011; Katata et al., 2012b)、核種の炉内インベントリから推定されたもの (NISA, 2011b; Mathieu et al., 2012; Hoshi and Hirano, 2012; Hoshi et al., 2013)、炉内インベントリと環境データの双方を用いて推定されたもの (Sugiyama et al., 2012; Saunier et al., 2013; UNSCEAR, 2014; Katata et al., 2015) が存在した。核種組成比の推定に用いられた環境データとしては、大気中濃度観測値としてはCTBTO (2011)、Furuta et al. (2011)、Ohkura et al. (2012)、Musolino et al. (2012)、Nagaoka et al. (2012)等があった。炉内インベントリとしては、Nishihara et al. (2012)による報告値が利用されていた。

放出時のヨウ素の化学形として、ガス態・粒子態の存在比率は環境データから推定されてきており、Furuta et al. (2011)、Ohkura et al. (2012)、Doi et al. (2013)による測定結果から引用されている。また、粒子状物質の粒径をあらわに設定したケースでは、単一粒径を仮定したもの (NRA, 2014) および粒径分布を与えたもの (Stohl et al., 2012a; Ten Hoeve et al., 2012; Katata et al., 2015) があり、これらの粒径分布の設定には Kaneyasu et al. (2012)、Doi et al. (2013)、Miyamoto et al. (2014)による粒子状物質の測定結果、あるいは Dorrian (1997)による Chernobyl 事故時の測定結果が用いられていた。

表1 放出源情報の内訳^{a)}

出典 ^{b)} 出版月 ^{c)}	手法 ^{d)}	期間	核種 ^{e)}	利用データ	放出高度	化学形 粒径分布 ^{f)}	備考
IRSN (2011) [web] 2011年3月	事故進展 展解析	3/12 ～ 3/22	¹³⁷ Cs, ¹³¹ I, ¹³³ Xeを含む 46核種	-	-	-	3/12-3/22の間の積算放出 量として評価
ZAMG (2011) [web] 2011年3月	Reverse method	3/12 ～ 3/15	¹³⁷ Cs, ¹³¹ I	大気中 ¹³⁷ Cs, ¹³¹ I濃度(国内 外CTBTO)	-	-	3/12-3/15の間の積算放出 量として評価
NISA (2011a) [rep] 2011年4月	事故進展 展解析	3/12 ～ 3/17	¹³⁷ Cs, ¹³¹ I	-	-	-	事故初期の間の積算放出 量として評価
NISA (2011b) [rep] 2011年6月	事故進展 展解析	3/12 ～ 3/18	¹³⁷ Cs, ¹³¹ I, ¹³³ Xeを含む 31核種	-	-	IはCsI	
Chino et al. (2011) [art] 2011年7月	Reverse method	3/12 ～ 4/5	¹³⁷ Cs, ¹³¹ I (¹³⁴ Cs, ¹³² I+ ¹³² Te)	大気中 ¹³⁷ Cs, ¹³¹ I濃度(国 内), 空間線 量率	-	バルク	核種組成比は環境データ から推定 付録に記載
Katata et al. (2012a) [art] 2011年10月	Reverse method	3/15 ～ 3/17	¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, ¹³¹ I, ¹³² I+ ¹³³ Xe, ¹³² Te	空間線量率	地上20 mの 点源放出	バルク	Chino et al. (2011)を改訂 核種組成比は環境データ から推定
NISA ^{g)} [rep] 2012年2月	事故進展 展解析	3/12 ～ 3/17	¹³⁷ Cs, ¹³¹ I	-	-	-	事故初期の間の総放出量 として評価
Stohl et al. (2012a) [art] 2012年3月	Inverse method	3/10 ～ 4/20	¹³⁷ Cs, ¹³³ Xe	大気中 ¹³⁷ Cs, ¹³³ Xe濃度 (CTBTO), ¹³⁷ Cs 降下量(国内)	地上 0-50, 50-300, 300- 1000 mで時 間的に変化	ガス・粒子状 Logarithmic size分布(d = 0.4 μm, σ = 0.3)	付録に記載
Winiarek et al. (2012) [art] 2012年3月	Inverse method	3/11 ～ 3/26	¹³⁷ Cs, ¹³¹ I	大気 中 ¹³⁷ Cs, ¹³¹ I 濃度(国内 外)	-	バルク	プルームが陸上に存在し た期間のみ推定

Sugiyama et al. (2012) [art] 2012年5月	Reverse method	3/14 ～ 3/16	^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{2}Te , ^{133}Xe	空間線量率 (主に福島県内)	-	-	3/14-3/16の間の積算放出量として評価 核種組成比は環境データ (Musolino et al., 2012)と炉内インベントリから推定
TEPCO (2012a,b) [rep] 2012年6月	Reverse method	3/12 ～ 3/31	^{137}Cs , ^{131}I , (^{134}Cs , 希ガス)	空間線量率 (敷地境界)	-	-	核種組成比は炉内インベントリから推定 付録に記載
Katata et al. (2012b) [art] 2012年6月	Reverse method	3/12 ～ 3/17	^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{2}Te	大気中 ^{131}I 濃度(国内), 空間線量率	地上20, 120mの点源放出, volume sourceで時間的に変化	バルク	Chino et al. (2011), Katata et al. (2012a)を改訂 核種組成比は環境データ (Furuta et al., 2011等)から推定
Terada et al. (2012) [art] 2012年6月	Reverse method	3/12 ～ 4/30	^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{2}Te	^{137}Cs , ^{131}I 降水量, 大気中 ^{131}I 濃度(国内)	地上20, 120mの点源放出, volume sourceで時間的に変化	バルク	Chino et al. (2011), Katata et al. (2012b)を改訂 核種組成比は環境データ (Furuta et al., 2011等)から推定 付録に記載
Mathieu et al. (2012) [art] 2012年6月	事故進展解析	3/12 ～ 3/26	^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}Xe を含む 73核種	空間線量率 (敷地境界)	-	-	空間線量率も使用
Ten Hoeve et al. (2012) [art] 2012年7月	Inverse method	3/12 ～ 4/12	^{137}Cs , ^{131}I	大気中 ^{137}Cs , ^{131}I 濃度(国内外CTBTO)	-	ガス・粒子状 Lognormal 分布 ($d = 0.06 \mu\text{m}$, $\sigma = 2.0$)	主に日単位の放出量として評価 粒径分布はDorrian (1997)によるChernobylでの測定値に準拠
Hoshi and Hirano (2012) [web] 2012年9月	事故進展解析	3/11 ～ 3/17	^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}Xe を含む 11核種	-	-	IはCsI	付録に記載.
Dvorzihak et al. (2012) [art] 2012年10月	事故進展解析	3/11 ～ 3/27	^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}Xe を含む 25核種	-	-	-	^{137}Cs , ^{131}I 以外の核種は3/14のみ評価
Stohl et al. (2012b) [art]	Inverse method	3/12 ～	^{133}Xe	大気中 ^{133}Xe 濃度	Stohl et al. (2012a)に準	-	事故後の総放出量として評価

2012年10月		4/20		(CTBTO)	拠		
Schöppner et al. (2012) [art] 2012年12月	Inverse method	3/12 ～ 3/26	^{137}Cs , ^{131}I	大気中 ^{137}Cs , ^{131}I 濃度 (CTBTO)	-	粒子状	日単位の放出量として評価
Kobayashi et al. (2013) [art] 2013年3月	Reverse method	3/12 ～ 3/19	^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{132}I + ^{13}Te	表層海水中 ^{134}Cs 濃度	Terada et al. (2012)に準拠	Terada et al. (2012)に準拠	Terada et al. (2012)を改訂 核種組成比はTerada et al. (2012)に準ずる 付録に記載
Hoshi et al. (2013) [web] 2013年4月	事故進展解析	3/11 ～ 3/17	Cs, CsI, Te, Ba, Ru, Ce, La, 希ガス	-	-	IはCsI	
Saunier et al. (2013) [art] 2013年11月	Inverse method	3/11 ～ 3/26	^{137}Cs + $^{137\text{m}}\text{B}$ a, ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{131}I , ^{132}I + ^{132}Te , ^{133}Xe	空間線量率 (国内57地点)	地上0-160 m	バルク	Mathieu et al. (2012)を改訂、ブルームが陸上に流れた期間のみ推定 核種組成比は炉内インベントリと環境データ(Nagaoka et al., 2012)から推定 付録に記載
Hirao et al. (2013) [art] 2013年1月	Inverse method	3/12 ～ 3/31	^{137}Cs , ^{131}I	大気中 ^{137}Cs , ^{131}I 濃度, ^{137}Cs , ^{131}I 降下量(国内)	地上15 m	バルク	主にブルームが陸上に存在した期間を3時間間隔で推定 付録に記載
Winiarek et al. (2014) [art] 2014年1月	Inverse method	3/11 ～ 3/31	^{137}Cs	大気中 ^{137}Cs 濃度, ^{137}Cs 降下量, ^{137}Cs 沈着量(国内)	-	バルク	Winiarek et al. (2012)を改訂、ブルームが陸上に流れた期間のみ推定 付録に記載.
Achim et al. (2014) [art] 2014年3月	Reverse method	3/22 ～ 5/14	^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}Xe	大気中 ^{137}Cs , ^{131}I 濃度(敷地境界, CTBTO), ^{133}Xe 濃度 (CTBTO)	地上20 mの点源放出あるいは高度0-200 m	バルク	主に日間隔で推定
Eslinger et al. (2014) [art] 2014年1月	Inverse method	3/12 ～ 3/14	^{133}Xe	大気中 ^{133}Xe 濃度 (CTBTO)	地上0-200 m	-	
NRA (2014)	Inverse	3/11	^{137}Cs	^{137}Cs 沈着量	-	ガス・粒子状	Terada et al. (2012)を修正

[rep]	method	～				粒径 = 1 μm	ガス・粒子比、粒子径は Doi et al. (2013)から推定
2014年3月		4/2					

UNSCEAR (2014) [rep]	-	3/12 ～ 4/30	¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, ¹³⁶ Cs, ¹³¹ I, ¹³² I, ¹³³ I, ¹³² Te, ¹³³ Xe	-	-	-	Terada et al. (2012)に基づく核種組成比は炉内インベントリ(Nishihara et al., 2012)、環境データ(CTBTO, 2011; Furuta et al., 2011; Okura et al., 2012)等から推定 ガス・粒子比はFuruta et al. (2011)およびOhkura et al. (2012)を参照 付録に記載
Katata et al. (2015) [art]	Reverse method	3/12 ～ 4/30	¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, ¹³¹ I, ¹³² I+ ¹³³ I, ² Te, ¹³³ I	大気中 ¹³⁷ Cs, ¹³¹ I濃度(国内), 空間線量率, 表層海水中 ¹³⁴ Cs濃度	地上20, 120 mの点源放出, 20-120 mの線源放出, volume sourceで時間的に変化	ガス・粒子状IはI ₂ , CH ₃ I, CsIに細分化Lognormal分布(d = 0.5, 1.5 μm, σ = 1.6)	Terada et al. (2012), Kobayashi et al. (2013)を改訂 核種組成比は炉内インベントリ(Nishihara et al., 2012)および環境データ(Furuta et al., 2011; Ohkura et al., 2012等)から推定 ガス・粒子比はOhkura et al. (2012)、粒径分布はKaneyasu et al. (2012), Miyamoto et al. (2014)から推定 付録に記載.

a) 公開日順に記載。各項目においては、出典中で評価対象外の項目あるいは評価対象の項目であっても出典内で内容が得られなかった際は“-”と記した。

b) []内の“art”, “rep”, “web”は公表形式を指し、各々、科学論文、報告書、ウェブサイト上での公表を示す。

c) 一部UNSCEAR (2014)による報告を参照した。

d) “Inverse method”, “Reverse method”の定義はUNSCEAR (2014)によるものに準拠。

e) 出典中に示されている核種を記した。ただし、ソースタームが本報告書の付録に記載されるもののうち、ソースタームが入手できなかった核種は括弧付きで記す。

f) d: 平均粒径, σ: 幾何標準偏差。

^{g)} TEPCO (2012a, b)に記載。

2) 計算モデルの改良

(1) 気象モデル

WRF及びWRF-DAを基にした気象データ同化解析システムを構築した。本システムの計算フローを図1に示す。まず、標高及び土地利用等の地形データから対象とする範囲及び格子解像度のデータを作成し、これと気象庁の数値予報格子点値 (GPV) 等の気象データから初期・境界値 (背景値) を作成する (図1のステップ①)。次に、作成した初期・境界値を基に、気象観測値及び背景値の誤差 (背景誤差) を入力として、指定した同化ウィンドウ期間についての4D-Varによる同化計算をWRF-DAにより実施する (図1のステップ②)。これにより解析全体の初期時刻の初期値・境界値が修正される。続いて、この修正した初期・境界値により、一定の時間間隔に設定した解析サイクルの初回サイクルのWRFによる気象計算を実施する (図1のステップ③)。2サイクル目以降は、前サイクルの最終時刻のWRF計算値を初期値 (第一推定値) としたWRF-DA計算により、次サイクルの初期・境界値を修正し、この修正した境界値と、前サイクルの最終時刻のWRF計算値を入力としてWRFによる気象計算 (リスタート計算) を解析終了時刻まで繰り返し実施する (図1のステップ②と③)。この、WRF-DAで初期・境界値を修正し、これを用いてWRFを実行し解析値を得るという一連の流れの解析サイクルを繰り返すことで、必要な期間の連続した解析値を得ることができる。なお、複数領域のネスティング計算については、WRF-DAは複数領域を同時に計算することができないため領域ごとに計算する必要がある。しかし、後述する計算コスト調査で示す通り、高解像度のネスト領域の計算では多大な計算コストを要し現実的でないことから、WRF-DA計算は親領域のみ実施し、これにより修正した初期・境界値を用いてWRFのネスティング計算によりネスト領域の気象場を計算することとした。このWRF-DA解析及びWRFリスタート計算による一連のサイクル計算を連続実行可能なスクリプトを作成して自動化し、気象データ同化解析システムを構築した。

本システムの動作確認試験を実施した。計算領域の範囲を図2に示す。鉛直方向には地表から100hPa面までとした。計算期間は2011年3月12日3時から13日9時 (JST) までとし、WRF-DA及びWRFの解析サイクル期間は6時間とした。初期・境界値 (第一推定値) の作成には気象庁GPV-MSMを用いた。WRFの出力時間間隔は1時間とした。その他の計算条件を表2に示す。試験計算結果の一例として風向風速の計算値と観測値の比較を図3に示す。後半期間で風速の過大評価が見られるが、風速場の変動が概ね再現されている。

計算モデルの実行には、表3で示す仕様の計算機を使用した。今回実施した動作試験におけるWRF-DA及びWRF計算所要時間の合計は、14時間5分15秒であった。なお、システム構築時の事前調査として、WRF及びWRF-DAの計算コストを計算領域ごとに調査した。計算期間を初回の解析サイクルのみ (6時間) とした以外は、上記試験計算と同じ計算条件とした。調査結果を表4に示す。本計算条件では、領域2及び領域3のWRF-DAの実行時間とメモリ使用量が非常に大きいことが分かる。

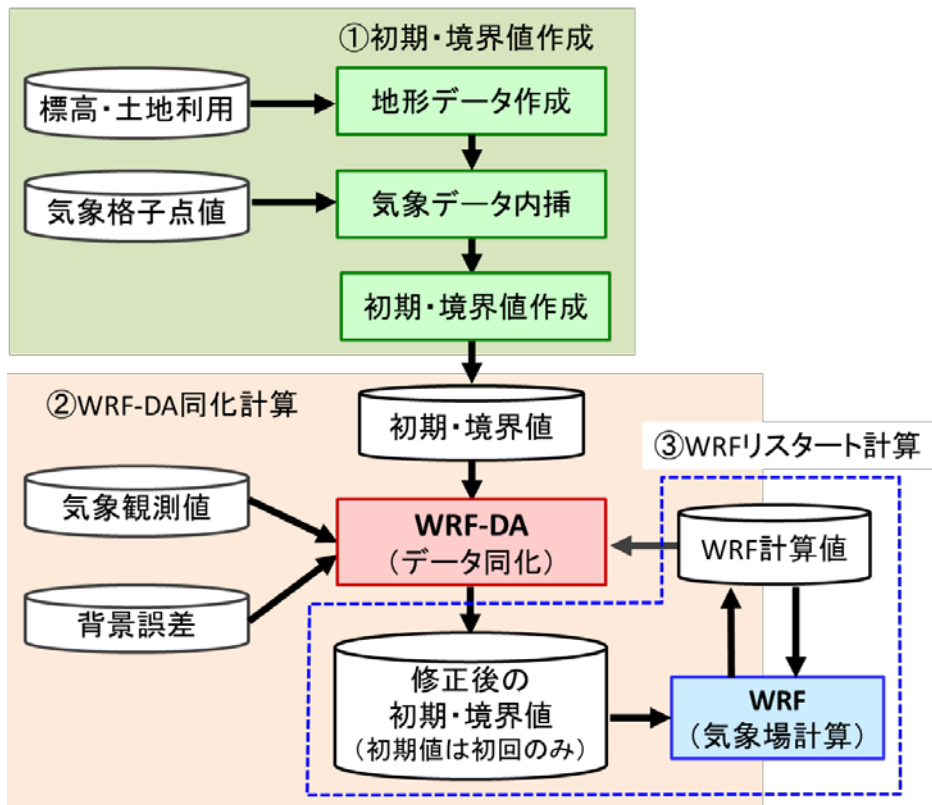


図1 気象データ同化解析システムの計算フロー。

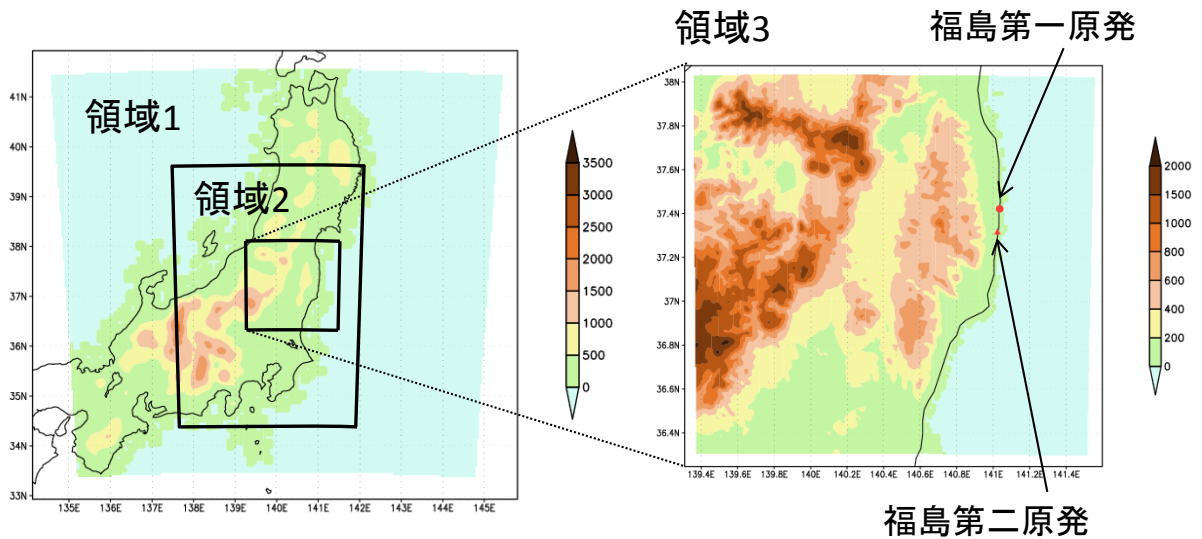


図2 モデル計算領域。色塗り分けは標高 (m) を示す。

表2 WRF-DA及びWRFの計算条件

		領域 1	領域 2	領域 3	
WRFDA (4D-Var)	観測データ挿入間隔	1 時間			
	同化ウィンドウ	6 時間			
WRFDA・ WRF 共通	時間ステップ	60 秒	20 秒	6 秒	
	格子数	100×100×31	130×190×31	190×190×31	
	水平格子幅	9 km	3 km	1 km	
	物理モデル	雲微物理	WSM6		
		積雲対流	Betts-Miller-Janjic		なし
		接地境界層	MYNN		
		地表面過程	5-layer thermal diffusion		
		大気境界層	MYNN Level 2.5		
大気放射	RRTM (長波放射) 及び Dudhia (短波放射)				
解析値ナッジング	不使用				

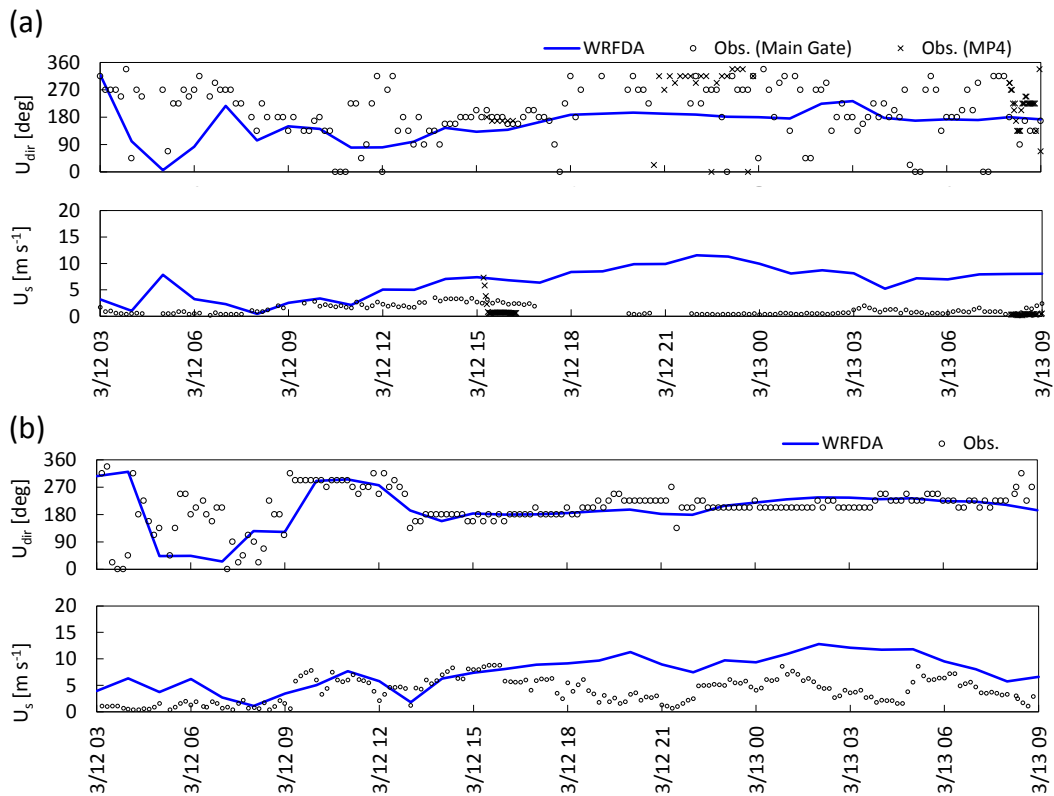


図3 気象データ同化解析システムによる風向 (U_{dir}) 及び風速 (U_s) の計算値と観測値の比較。

(a) は福島第一原発の地表付近 (○: 正門付近、×: モニタリングポストMP4付近)、(b) は福島第二原発の上空120mの観測値との比較結果。

表3 動作試験を実施した計算機の仕様

CPU 名	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2690 @ 2.90GHz
CPU 数	2
総コア数	16
メモリ	384GB

表4 WRF-DA及びWRFの計算コスト

		並列数	実行時間 (時:分:秒)	メモリ最大使 用量(GB)	スワップ最大 使用量(MB)	ディスク使用量 (Byte)
WRFDA (4D-Var)	領域 1	8	1:38:13	30.7	0.0	50M
	領域 2	8	4:28:29	151.7	4.0	101M
	領域 3	8	1 時間経過時 点で中断	355.1	10083.7	45M
WRF	領域 1	8	0:03:55	0.9	0.0	677M
	領域 2	8	0:17:53	1.5	0.0	1.7G
	領域 3	8	1:07:18	2.0	0.0	2.5G
	3 領域 ネステ ィング 計算	8	1:31:17	4.4	0.0	4.8G

(2) 拡散モデル

改良した沈着モデルについて以下にその概要を述べる。詳細はKatata et al. (2015)に記述されている。放射性核種の化学形態は、ガス態と粒子態に分けて扱い、ガス態放射性ヨウ素については、元素状 (I_2) と有機化合物 (CH_3I) を区別して扱う。沈着過程は、湿性沈着（雲内洗浄、雲下洗浄）と乾性沈着、及び霧水沈着を考慮している。

乾性沈着の計算は、従来スキーム同様、拡散して地表近くに到達した放射性物質の除去を乾性沈着速度により計算するが、この乾性沈着速度をガス・粒子の化学形態ごとに異なる計算式で計算する。以下にガス態、粒子態それぞれの乾性沈着速度計算式を示す。

ガス態 (Zhang et al., 2003)

$$V_d = 1/(R_a + R_b + R_c) \quad R_a: \text{空気力学的抵抗}, R_b: \text{準層流抵抗}, R_c: \text{キャノピー抵抗}$$

粒子態 (Zhang et al., 2001; Kajino et al., 2012)

$$V_d = V_g + 1/(R_a + R_s) \quad V_g: \text{重力落下速度}, R_a: \text{空気力学的抵抗}, R_s: \text{地表抵抗}$$

この計算式の抵抗項の計算において、土地利用により異なる地表面状態、風速や大気安定度等の気象条件の他、ガス態の溶解度等の化学的性質、粒子態の粒径も考慮している。

湿性沈着過程のうち、雲内洗浄モデルは、Giorgi and Chameides (1986)及びByun and Schere (2006)に基づくものである。雲内洗浄係数は、ガス・粒子別、雲水量・高度依存性、ガス態の溶解度、

エアロゾルの吸湿性、氷相雲物理、エアロゾルの雲凝結核 (CCN) 活性化過程 (Abdul-Razzak and Ghan, 2000) を考慮して、以下の式で計算される。

$$\Lambda_{in}(z) = \frac{F_{in}}{\Delta t} [1 - \exp(-b_{in}\Delta t)] f_{ccn}(z) f_{ice}(z) f_{qt}(z)$$

ここで、 $F_{in}[1 - \exp(-b_{in}\Delta t)]$ は時間ステップ Δt 間に地表に到達する大気水象相の割合であり、地表降水強度、鉛直平均した雲・降水の水分量、ガスの溶解度、気温等に依存する。

$f_{ccn}(z)$ は、CCN活性化して雲粒を形成するエアロゾルの割合、 $f_{ice}(z)$ は、液相のみの雲に対する固相 (氷相) を含む雲の発達速度の比、 $f_{qt}(z)$ は、ある高度における雲の水分量 (個体+液体) の、鉛直積算値に対する割合である。

雲底下の降水による雲下洗浄係数は雲内洗浄係数と同様に次式で表される。

$$\Lambda_{bl}(z) = \frac{[1 - \exp(-\Delta t/\tau_{bl})]}{\Delta t} f_{wash}(z) f_{qs}(z)$$

ここで、 $1 - \exp(-\Delta t/\tau_{bl})$ は Δt 間に地表に到達する大気水象相の割合、 $f_{wash}(z)$ は時間ステップ Δt 内で降水水象相に取り込まれるエアロゾルの割合、 $f_{qs}(z)$ はある高度における降水水象相 (雨、雪、あられ) 混合比の鉛直積算値に対する割合である。

霧水沈着は、放射性核種を含む霧水 (大気中の水滴、低層雲) が、乱流により地表面へ輸送され、植生キャノピーに捕捉される現象である。霧水沈着速度は、気象モデルにより大気最下層に雲が計算される場合、次式により風速と土地利用依存性を考慮して計算される (Katata et al., 2011; Katata, 2014)。

$$V_{df} = R_{LUC} A_c U$$

ここで、 R_{LUC} は土地利用に依存する係数、 A_c は葉面積指数とキャノピー高度に依存する係数、 U は風速である。

3) 計算機環境の整備

構築した専用計算機において、改良前のモデルによる動作確認を行い正常に計算が実行できることを確認した。また、データベース解析の高速化のために導入したSSDの効果を検証するために、動作確認計算のファイル入出力についてHDDを使用した場合とSSDを使用した場合とで比較した。その結果、SSDを使用した場合、HDDを使用した場合に比べて気象モデルでは約1割程度の計算時間の短縮にとどまったが、拡散モデルと基本的なデータベース解析では、計算時間は約10分の1まで短縮された。これは、拡散計算は単位放出条件による計算、及びデータベース解析は単位時間ごとの計算結果の集計計算を最大20ケース同時に実行したことから、ファイルへのアクセスが大量かつ集中したため、高速なSSDの効果が顕著に表れたものと考えられる。次年度に構築するデータベース解析機能においても大量のファイルアクセスが発生するため、データベースにSSDを導入することは、効果的であることが示された。ただし、SSDはHDDに比べ1台あたりの記憶容量は小さく、また高価であるため、計算結果を全てSSDで保存する記憶領域を構築することは現実的ではない。このため、現状は計算結果の保存はHDDで行い、データベース解析に必要な最小限のデータのみSSDに格納する構成としている。データベース解析をより高速に行うためには、より多くのデータをデータベースに格納するためデータベース解析用領域の拡大、または必

要な計算結果のみSSD上で取り扱う仕組みが必要であり、今年度構築した計算機環境にSSDを追加することは検討に値するものとする。

4) 各種実測データの収集と整理

収集した実測データを、以下のフォーマットのCSV形式のファイルに整理した。

①SPM捕集用ろ紙に付着した放射性核種分析による放射性セシウムの大気中濃度 <ヘッダー部 (Line1~10) >

Line1: ヘッダー部の項目説明 (下記の【】を除く項目名を記載)

Line2: 測定手法 (コード) 【SPM】

測定手法 (詳細) 【浮遊粒子状物質捕集用ろ紙分析】

変数名 【conc”核種名 (Cs-137 または Cs-134) ” : 大気中濃度】

測定値の単位

出典

吸引量 ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)

ろ紙材質

Line3: 利用された放出源推定 (コード)

Line4: 利用された放出源推定 (詳細)

Line5~9: ブランク

Line10: データ部の項目説明 (下記の【】を除く項目名を記載)

<データ部 (Line11~) > (各データにつき以下を1行に記載する)

データコード 【元データにない場合は、1を初期値とする連番とする】

測定開始年月日 (JST) 【YYYYMMDD】

測定開始時刻 (JST) 【hhmmss】

測定終了年月日 (JST) 【YYYYMMDD】

測定終了時刻 (JST) 【hhmmss】

崩壊補正基準年月日 (JST) 【YYYYMMDD】

崩壊補正基準時刻 (JST) 【hhmmss】

地点名 1 (都道府県) 【日本語】

地点名 1 (都道府県) 【英語】

地点名 2 (市町村) 【日本語】

地点名 2 (市町村) 【英語】

地点名 3 (測定局) 【日本語】

地点名 3 (測定局) 【英語】

測定点緯度 (度)

測定点経度 (度)

測定点標高 (m)

測定高度 (m)

福島第一原発からの距離 (km)

測定値

誤差

検出下限値

②航空機モニタリングによる空間線量率及び放射性セシウムの地表沈着量
<ヘッダー部 (Line1~10) >

Line1: ヘッダー部の項目説明 (下記の【】を除く項目名を記載)

Line2: 測定手法 (コード) 【AMS】

測定手法 (詳細) 【航空機モニタリング】

変数名 【下記参照】

depo”核種名 (Cs-137 または Cs-134) ”: 地表沈着量

airds : 空間線量率

測定値の単位

出典

Line3: 利用された放出源推定 (コード)

Line4: 利用された放出源推定 (詳細)

Line5~9: ブランク

Line10: データ部の項目説明 (下記の【】を除く項目名を記載)

<データ部 (Line11~) > (各データにつき以下を1行に記載する)

データコード 【元データにない場合は、1を初期値とする連番】

測定開始年月日 (JST) 【YYYYMMDD】

測定開始時刻 (JST) 【hhmmss】

測定終了年月日 (JST) 【YYYYMMDD】

測定終了時刻 (JST) 【hhmmss】

崩壊補正基準年月日 (JST) 【YYYYMMDD】

崩壊補正基準時刻 (JST) 【hhmmss】

地点名1 (都道府県) 【日本語】

地点名1 (都道府県) 【英語】

地点名2 (市町村) 【日本語】

地点名2 (市町村) 【英語】

地点名3 (測定局) 【日本語】

地点名3 (測定局) 【英語】

メッシュ中心緯度 (度)

メッシュ中心経度 (度)

測定点標高 (m)

測定高度 (m)

福島第一原発からの距離 (km)

測定値

誤差

検出下限値

積雪の有無 【”snow” or “no-snow”】

北東端メッシュ緯度 (度)
 北東端メッシュ経度 (度)
 北西端メッシュ緯度 (度)
 北西端メッシュ経度 (度)
 南西端メッシュ緯度 (度)
 南西端メッシュ経度 (度)
 南東端メッシュ緯度 (度)
 南東端メッシュ経度 (度)

上記フォーマットで作成したデータファイルのサンプルを図4に示す(表計算ソフトにより一部のみ表示)。

測定手法(コード)	測定手法 (詳細)	変数名	測定値の 単位	出典	取引量 (m ³ h ⁻¹)	ろ紙材質																					
SPM	浮遊粒子状物質濃度用ろ紙分析	concCs137	Bq/m ³	原子力規制委員会平成25年度統計	108	ガラス繊維																					
データコード	測定開始年月日(JST)	測定開始時刻(JST)	測定終了年月日(JST)	測定終了時刻(JST)	前導修正基準年月日(JST)	前導修正基準時刻(JST)	都道府県(日本語)	都道府県(英語)	市町村(日本語)	市町村(英語)	測定局(日本語)	測定局(英語)	測定点緯度(度)	測定点経度(度)	測定点標高(m)	測定点高(m)	福島第一原発からの距離(km)	測定値	誤差	検出下限値							
1143-03-16-0001	20110316	0:00	20110316	1:00	20110316	1:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	7.4	0.19	0.1							
1143-03-16-0102	20110316	1:00	20110316	2:00	20110316	2:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	7.3	0.19	0.1							
1143-03-16-0203	20110316	2:00	20110316	3:00	20110316	3:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	3.1	0.12	0.1							
1143-03-16-0304	20110316	3:00	20110316	4:00	20110316	4:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.95	0.068	0.1							
1143-03-16-0405	20110316	4:00	20110316	5:00	20110316	5:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.62	0.056	0.1							
1143-03-16-0506	20110316	5:00	20110316	6:00	20110316	6:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.69	0.058	0.09							
1143-03-16-0607	20110316	6:00	20110316	7:00	20110316	7:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.69	0.059	0.1							
1143-03-16-0708	20110316	7:00	20110316	8:00	20110316	8:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.16	0.032	0.1							
1143-03-16-0809	20110316	8:00	20110316	9:00	20110316	9:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.11	0.027	0.09							
1143-03-16-0910	20110316	9:00	20110316	10:00	20110316	10:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.68	0.058	0.1							
1143-03-16-1011	20110316	10:00	20110316	11:00	20110316	11:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.56	0.053	0.1							
1143-03-16-1112	20110316	11:00	20110316	12:00	20110316	12:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.3	0.041	0.1							
1143-03-16-1213	20110316	12:00	20110316	13:00	20110316	13:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.22	0.038	0.09							
1143-03-16-1314	20110316	13:00	20110316	14:00	20110316	14:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	ND		0.1							
1143-03-16-1415	20110316	14:00	20110316	15:00	20110316	15:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.17	0.031	0.1							
1143-03-16-1516	20110316	15:00	20110316	16:00	20110316	16:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	0.37	0.044	0.1							
1143-03-16-1617	20110316	16:00	20110316	17:00	20110316	17:00	埼玉県	Saitama-ken	深谷市	Fukaya-shi	深谷	Fukaya	36.1869	139.279	55	4	208	ND		0.1							

測定手法(コード)	測定手法 (詳細)	変数名	測定値の 単位	出典																							
AMS	航空機モニタリング	ams1.0	μ Sv/h	原子力規制委員会 第1次航空機モニタリング(平成23年4月6日～29日測定)																							
データコード	測定開始年月日(JST)	測定開始時刻(JST)	測定終了年月日(JST)	測定終了時刻(JST)	前導修正基準年月日(JST)	前導修正基準時刻(JST)	地点名1(都道府県)【日本語】	地点名1(都道府県)【英語】	地点名2(市町村)【日本語】	地点名2(市町村)【英語】	地点名3(測定局)【日本語】	地点名3(測定局)【英語】	メッシュ中心緯度(度)	メッシュ中心経度(度)	測定点標高(m)	測定点高(m)	福島第一原発からの距離(km)	測定値	誤差	検出下限値							
5740-17-52					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.908			1	79.8	1.10E-01	0.1							
5740-17-52					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9104			1	79.8	1.00E-01	0.1							
5740-17-53					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9128			1	79.8	ND	0.1							
5740-17-53					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9152			1	79.8	ND	0.1							
5740-17-53					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9175			1	79.7	ND	0.1							
5740-17-53					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9199			1	79.7	ND	0.1							
5740-17-53					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9223			1	79.7	ND	0.1							
5740-17-53					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9247			1	79.7	ND	0.1							
5740-17-54					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9271			1	79.8	ND	0.1							
5740-17-54					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9295			1	79.8	ND	0.1							
5740-17-54					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9319			1	79.6	ND	0.1							
5740-17-54					20110429		宮城県	Miyagi-ken	岩沼市	Iwanuma-shi			38.13302	140.9343			1	79.6	ND	0.1							
5740-17-54					20110429		宮城県	Miyagi-ken	名取市	Natori-shi			38.13302	140.9366			1	79.5	ND	0.1							
5740-17-55					20110429		宮城県	Miyagi-ken	名取市	Natori-shi			38.13302	140.939			1	79.5	ND	0.1							
5740-17-55					20110429		宮城県	Miyagi-ken	名取市	Natori-shi			38.13302	140.9414			1	79.5	ND	0.1							
5740-17-51					20110429		宮城県	Miyagi-ken	名取市	Natori-shi			38.13063	140.8961			1	79.7	1.10E-01	0.1							

図4 実測データファイルのサンプル。

IV 考察

放出源情報については、JAEAがUNSCEAR 2013レポート (UNSCEAR, 2014) で用いられた放出源情報 (Terada et al., 2012) を基に、詳細な放出源情報の再推定を実施し、結果をまとめた論文が公表されている (Katata et al., 2015)。この再推定では、福島県の環境モニタリングポストデータ (3月12日～16日) と米国DOEとJAEAの航空機サーベイに基づくI-131及びCs-137の地表沈着量分布 (Torii et al., 2013)を新規に用いることで、事故早期の放射性プルームの動きを詳細に再現している。また、海洋拡散モデルとの結合計算と海洋モニタリングデータの比較解析により、これまで課題であったプルームが海上に流れる期間についての放出率を補正している。これらの修正の効果を確認するために、この放出源情報と改良版拡散モデルGEARNを用いて、福島第一原発事故において放出された放射性物質の大気拡散シミュレーションを実施した。

気象計算には従来のMM5を用いて、図2と同様な計算領域で、領域1～3のネスティング計算を実施した。鉛直格子は、地表から100 hPa面までを31層に分割した。初期値・境界値は気象庁GPV-MSMを用いて作成した。データ同化として、解析値ナッジング (福島第一原発 (地上)、福島第一原発 (120m)、及び気象庁地上観測値の風向風速で修正) と観測値ナッジング (福島第一原発 (地上)、福島第二原発 (120m)、及び気象庁地上観測値の風向風速) を実施した。GEARNは領域2と領域3でネスティング計算を実施した。鉛直格子は地表から上空10 kmまでを29層に分割した。計算は2ケースを実施した。ケース①では、従来版の沈着スキームとUNSCEAR 2013レポートで利用された放出源情報 (Terada et al., 2012) を用いた。ケース②では、改良版沈着スキームと最新の放出源情報 (Katata et al., 2015) を用いた。その他の主な計算条件を表5にまとめた。

Cs-137の積算沈着量分布の比較 (図5) から、ケース②の計算結果は、ケース①に比べて東日本域でのCs-137の地表沈着量の再現性が改善されていることが分かる。また、ケース②の計算結果の放出点周辺の地表沈着量分布 (図6) からは、Cs-137の沈着量の高い場所が原発から北西方向に直線的に分布しているのに対して、I-131では沈着量の高い場所が原発の北西だけでなく南側にも広がっている特徴が、計算で概ね再現されていることが分かる。これらの改善は、放出源情報と沈着過程の変更の相乗効果によるものであるが、計算結果を詳細に解析することにより、主要な効果を確認した。その結果、東日本域計算における宮城県付近の過大評価及び栃木・群馬県付近の過小評価の改善については、主に沈着過程の改良が効果的であった。一方、原発周辺の沈着分布については、放出源情報の精緻化の寄与が大きい。特に、Cs-137とI-131の分布傾向の違いは、放出核種の組成比の時間変動によりもたらされていた。このことは、被ばく線量推計を行う上で重要となることから、最新の放出源情報推定値の有効性を示唆するものである。

表5 試験計算条件

	領域 1	領域 2	領域 3
GEARN 計算期間	2011年3月12日3時～4月1日0時 (JST)		
格子数	100×100	190×130	190×190
水平格子幅	9 km	3 km	1 km
MM5 時間ステップ	18 秒	6 秒	3 秒
GEARN 時間ステップ	-	12 秒	4 秒
MM5 物理オプション			
雲微物理		Reisner2	
積雲対流		Grell	
地表面過程		Five-layer soil model	
大気境界層		Eta PBL	
大気放射		Cloud-radiation	

計算値 (2011年4月1日)

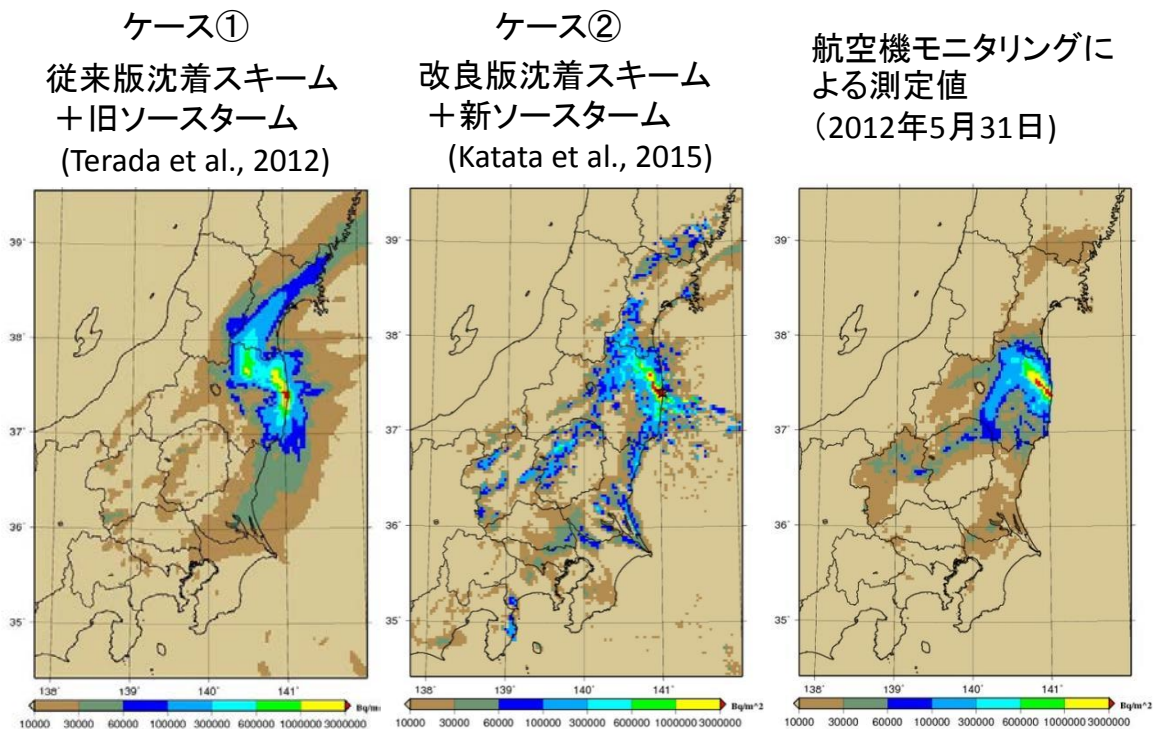


図5 Cs-137の積算沈着量分布の比較。測定値は原子力規制委員会 (2012) による。

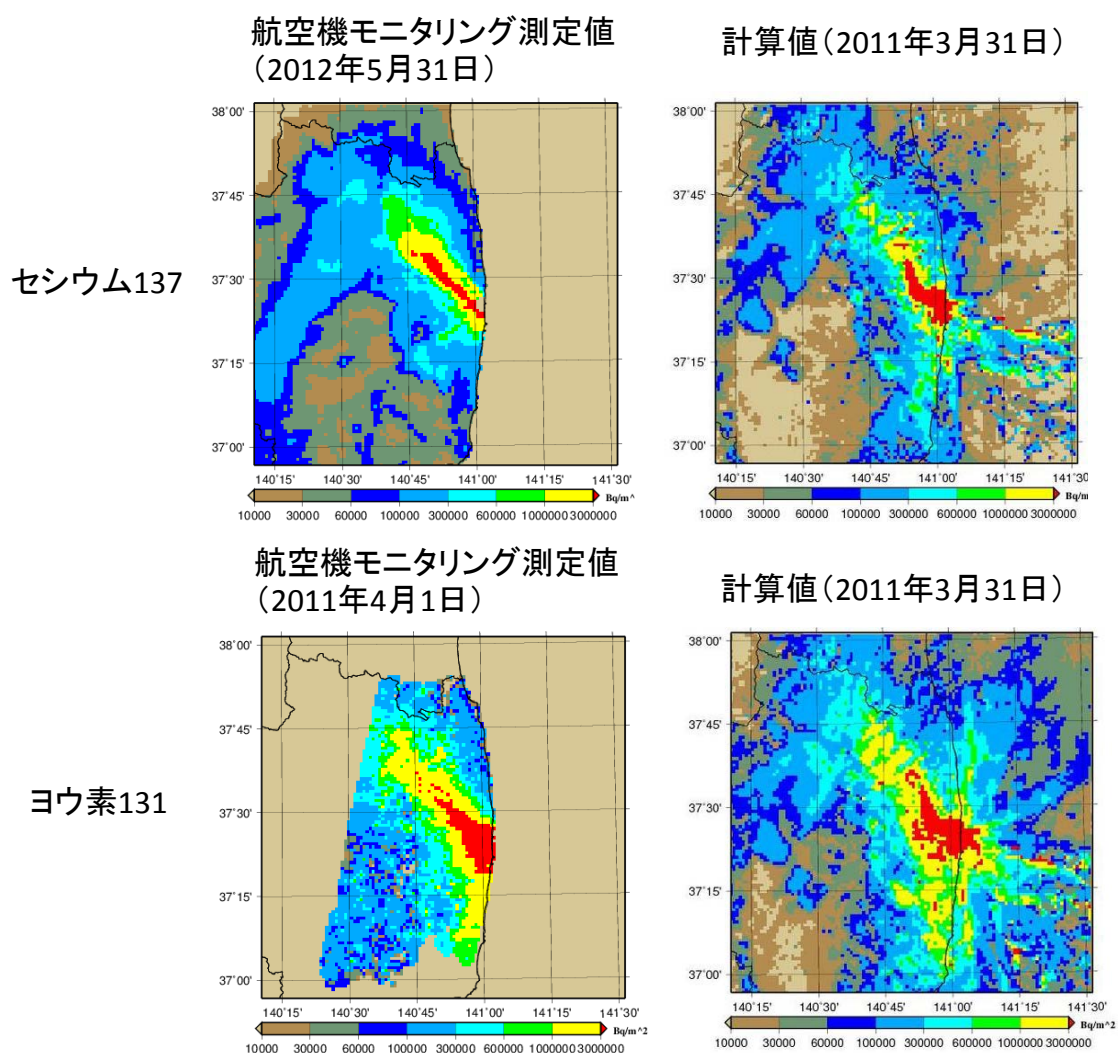


図6 Cs-137及びI-131の積算沈着量分布の比較。計算値は改良版沈着スキームと新ソースターム (Katata et al., 2015) によるケース②の結果。測定値は、Cs-137が原子力規制委員会 (2012)、I-131がTorii et al. (2013) による。

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、本年度は、以下の成果を得た。

- 1) 放出源情報について文献調査を行った。UNSCEAR 2013レポート以降の進展としては、JAEAの放出源再推定結果がサイト周辺のモニタリングポストデータやI-131及びCs-137沈着量分布を良好に再現しており、有効と考えられる。この放出源情報を基本条件として、他の研究テーマによる新規データやフィードバックを受けて、最適化を図っていくこととする。
- 2) 大気拡散シミュレーションについて、最新の気象モデルWRF及び高度なデータ同化手法を導入した。また、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改良を行い、試験計算により沈着分布の再現性向上

を確認した。

- 3) 大気拡散シミュレーションの実行とデータベースを構築するための、専用計算機環境を整備し、大規模計算とデータベース構築を可能とした。また、整備した計算機環境の動作確認により、データベースの詳細設計を行う上で有益な情報を得た。
- 4) 放出源情報及び計算結果の精度検証・誤差評価用の各種実測データ（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・連続データ等）の収集と整理を行った。

VI 次年度以降の計画

次年度は、本年度整備した計算機環境において、改良モデル及び最新の放出源情報による大気拡散シミュレーションを実行し、各種実測データとの比較により再現性の評価を行う。データベース計算手法及びデータベース解析手法を試作し、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の基本版を構築する。このデータベースを、分担研究（「事故初期段階における住民の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再構築及び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」（国福大・県立医大））による線量評価の基礎データとして提供する。また、国外専門家を招聘し、5月25～29日に京都で開催される国際会議ICRR2015（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」及びその後のテーマ別会合において、研究計画の妥当性について協議を行う。

最終年度の3年目は、大気拡散シミュレーション及びデータベース解析機能の改良を進めるとともに、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」（学習院大）及び「事故初期の被ばく線量再構築及び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」（国福大・県立医大））で検討されるI-131モニタリングデータ等の結果を参考にして、放出源情報及び拡散計算を最適化し、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を完成する。本成果は、内部・外部被ばく線量の統合・将来推計に利用される。

この研究に関する現在までの研究状況、業績

- 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.

引用文献

- 1) Abdul-Razzak H Ghan S J. A parameterization of aerosol activation, 2. Multiple aerosol types, Journal of Geophysical Research 2000; 105:6837-6844.
- 2) Achim P Monfort M Le Petit G et al., Analysis of radionuclide releases from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident part II, Pure and Applied Geophysics 2014; 171: 645-667.
- 3) Barker D Huang X-Y Liu Z et al. The Weather Research and Forecasting Model's Community Variational/Ensemble Data Assimilation System: WRFDA, Bulletin of American Meteorological Society 2012; 93: 831-843.
- 4) Byun D Schere K L. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, Applied Mechanics Reviews 2006; 59: 1-6.
- 5) 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.
- 6) Christoudias T Lelieveld J. Modelling the global atmospheric transport and deposition of radionuclides from the Fukushima Dai-ichi nuclear accident, Atmospheric Chemistry and Physics 2013; 13: 1425-1438.
- 7) Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), Fukushima related measurements by

- the CTBTO, available from <http://www.ctbto.org/press-centre/highlights/2011/fukushima-related-measurements-by-the-ctbto>, 2011.
- 8) Doi T Masumoto K Toyoda A et al. Anthropogenic radionuclides in the atmosphere observed at Tsukuba: characteristics of the radionuclides derived from Fukushima, *Journal of Environmental Radioactivity* 2013; 122: 55-62.
 - 9) Dorrian M D. Particle size distribution of radioactive aerosols in the environment, *Radiation Protection Dosimetry* 1997; 69: 117-132.
 - 10) Dvorzhak A Puras C Montero M. Spanish experience on modeling of environmental radioactive contamination due to Fukushima Daiichi NPP Accident using JRODOS, *Environmental Science and Technology* 2012; 46: 11887-11895.
 - 11) Eslinger P W Biegalski S R Bowyer T W et al. Source term estimation of radioxenon released from the Fukushima Dai-ichi nuclear reactors using measured air concentrations and atmospheric transport modeling, *Journal of Environmental Radioactivity* 2012; 127: 127-132.
 - 12) Furuta S Sumiya S Watanabe H et al. Results of the environmental radiation monitoring following the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant; Interim report (Ambient radiation dose rate, radioactivity concentration in the air and radioactivity concentration in the fallout), *IAEA-Review* 2011-035; 2011.
 - 13) Giorgi F Chameides W L. Rainout Lifetimes of Highly Soluble Aerosols and Gases as Inferred From Simulations With a General Circulation Model, *Journal of Geophysical Research* 1986; 91: 14367-14376.
 - 14) Grell G A Dudhia J Stauffer D R. A Description of the Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Tech. Note, NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado, 1994
 - 15) Hirao S Yamazawa H Nagase T. Estimation of release rate of iodine-131 and cesium-137 from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Journal of Nuclear Science and Technology* 2013; 50: 139-147.
 - 16) Hoshi H Hirano M. Severe accident analyses of Fukushima-Daiichi Units 1 to 3, available from <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/files/P-4.pdf>, 2012.
 - 17) Hoshi H, Ogino M, Kawabe M, et al., Computational analysis on accident progression of Fukushima Dai-ichi NPS, available from <http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeqe/seeqe/PSAM2013/OHP-PSAM2013-1061.pdf>, 2013.
 - 18) Huang X Y Xiao Q Barker D M et al. Four-Dimensional Variational Data Assimilation for WRF: Formulation and Preliminary Results, *Monthly Weather Review* 2009; 137: 299-314.
 - 19) IRSN, L' IRSN publie une évaluation de la radioactivité rejetée par la centrale de Fukushima Daiichi (Fukushima I) jusqu'au 22 mars 2011, available from http://www.irsn.fr/fr/actualites_presse/actualites/pages/20110322_evaluation-radioactivite-rejets-fukushima-terme-source.aspx, 2011.
 - 20) Kajino M Inomata Y Sato K et al. Development of the RAQM2 aerosol chemical transport model and predictions of the Northeast Asian aerosol mass, size, chemistry, and mixing type, *Atmospheric Chemistry and Physics* 2012;12: 11833-11856.
 - 21) Kaneyasu N Ohashi H Suzuki F et al. Sulfate aerosol as a potential transport medium of radiocesium

- from the Fukushima nuclear accident, *Environmental Science and Technology* 2012; 46: 5720-5726.
- 22) 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.
 - 23) Katata G Kajino M Hiraki T et al. A method for simple and accurate estimation of fog deposition in a mountain forest using a meteorological model, *Journal of Geophysical Research* 2011; 116: D20102.
 - 24) Katata G Kajino M Matsuda K et al., A numerical study of the effects of aerosol hygroscopic properties to dry deposition on a broad-leaved forest, *Atmospheric Environment* 2014; 97: 501-510.
 - 25) 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* 2012a; 111: 2-12.
 - 26) 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* 2012b; 109: 103-113.
 - 27) 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.
 - 28) Mathieu A Korsakissok I Quélo D et al. Atmospheric dispersion and deposition of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, *Elements* 2012; 8: 195-200.
 - 29) Ministry of the Environment, 環境省 平成 24 年度 SPM 捕集用ろ紙に付着した放射性核種分析報告書, available from <http://www.env.go.jp/air/rmcm/misc/report-201303.html>, 2014.
 - 30) Miyamoto Y Yasuda K Magara M Size distribution of radioactive particles collected at Tokai, Japan 6 days after the nuclear accident, *Journal of Environmental Radioactivity* 2014; 132: 1-7.
 - 31) Morino Y Ohara T Watanabe M et al. Episode analysis of deposition of radiocesium from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, *Environmental Science and Technology* 2013; 47: 2314-2322.
 - 32) Musolino SV Clark H McCullough T et al. Environmental measurements in an emergency: this is not a drill, *Health Physics* 2012; 102: 516-526.
 - 33) Nagaoka K Sato S Araki S et al. Changes of radionuclides in the environment in Chiba, Japan, after the Fukushima nuclear Power Plant accident, *Health Physics* 2012; 102: 437-442.
 - 34) NISA, INES rating on the events in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station by the Tohoku Distinct-off the Pacific Ocean Earthquake, available from <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/files/en20110412-4.pdf>, 2011a.
 - 35) NISA, Regarding the evaluation of the conditions on reactor cores of unit 1, 2, and 3 related to the accident at Fukushima Dai-ichi nuclear power station, Tokyo Electric Power Co. Inc., available from <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/press/2011/06/en20110615-5.pdf>, 2011b.
 - 36) Nishihara K Iwamoto H Suyama K Estimation of fuel compositions in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant, JAEA-Data/Code 2012-018, 2012.

- 37) NRA, 原子力規制委員会 平成 24 年 7 月までの福島第一原子力発電所から 80km 圏外の航空機モニタリング, available from <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/258/list-1.html>, 2012.
- 38) NRA, 原子力規制委員会 平成 25 年度放射性物質測定調査委託費(浮遊粒子物質測定用テープろ紙の放射性物質による大気中放射性物質濃度把握)事業報告書, available from http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/10000/9771/24/tape_1.pdf, 2014.
- 39) NRA, 原子力規制委員会 航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果, available from <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html>, 2015.
- 40) NRA, 原子力規制庁 大気拡散モデルを用いたシミュレーションによる放射性物質の挙動解明事業報告書, available from http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/10000/9770/24/h25fy_kyodou.pdf, 2014.
- 41) 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, 2012.
- 42) Stohl A Seibert P Wotawa G et al. Xenon-133 and cesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, *Atmospheric Chemistry and Physics* 2012a; 12: 2313-2343.
- 43) Stohl A Seibert P Wotawa G. The total release of xenon-133 from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity* 2012b; 112: 155-159.
- 44) Saunier O Mathieu A Didier D et al. An inverse modeling method to assess the source term of the Fukushima Nuclear Plant accident using gamma dose rate observations, *Atmospheric Chemistry and Physics* 2013; 13: 11403-11421.
- 45) Schöppner M Plastino W Povinec P et al. Estimation of the time-dependent radioactive source-term from the Fukushima nuclear power plant accident using atmospheric transport modelling, *Journal of Environmental Radioactivity* 2012; 114: 10-14.
- 46) Skamarock W C Klemp J B Dudhia J et al. A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN - 475+STR, 125 pp., National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado 2008.
- 47) Sugiyama G Nasstrom J Pobanz B et al. Atmospheric dispersion modeling: challenges of the Fukushima Daiichi response, *Health Physics* 2012; 102: 493-508.
- 48) Talagrand O Courtier P Variational Assimilation of Meteorological Observations With the Adjoint Vorticity Equation. I: Theory, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1987; 113: 1311-1328.
- 49) Ten Hoeve J Jacobson M Z. Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident, *Energy and Environmental Science* 2012; 5: 8743-8757.
- 50) TEPCO, 東京電力株式会社 福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中への放出量の推定について, available from http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1204619_1834.html, 2012a.
- 51) TEPCO, 東京電力株式会社 福島原子力事故調査報告書, available from http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1205628_1834.html, 2012b.
- 52) Terada H Chino M. Development of an Atmospheric Dispersion Model for Accidental Discharge of Radionuclides with the Function of Simultaneous Prediction for Multiple Domains and its Evaluation

- by Application to the Chernobyl Nuclear Accident, *Journal of Nuclear Science and Technology* 2008; 45: 920-931.
- 53) 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.
- 54) Torii T Sugita T Okada C E et al. Enhanced analysis methods to derive the spatial distribution of I-131 deposition on the ground by airborne surveys at an early stage after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, *Health Physics* 2013; 105: 192-200.
- 55) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami. Annex A, Sources, effects and risks of ionizing radiation UNSCEAR report 2013, 2014.
- 56) US Department of Energy. Response to 2011 Fukushima Incident - Data and Documentation, available from <http://energy.gov/downloads/us-doennsa-response-2011-fukushima-incident-data-and-documentation>, 2011.
- 57) Winiarek V Bocquet M Saunier O et al. Estimation of errors in the inverse modeling of accidental release of atmospheric pollutant: Application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant, *Journal of Geophysical Research* 2012; 117: D05122.
- 58) Winiarek V Bocquet M Duhanyan N et al. Estimation of the caesium-137 source term from the Fukushima Daiichi nuclear power plant using a consistent joint assimilation of air concentration and deposition observations, *Atmospheric Environment* 2014; 82: 268-279.
- 59) ZAMG. Accident in the Japanese NPP Fukushima: Spread of radioactivity/first source estimates from CTBTO data show large source terms at the beginning of the accident/weather currently not favourable/low level radioactivity meanwhile observed over U.S. East Coast and Hawaii (Update: 22 March 2011 15:00), available from http://www.zamg.ac.at/docs/aktuell/Japan2011-03-22_1500_E.pdf, 2011.
- 60) Zhang L Brook J R Vet R. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models, *Atmospheric Chemistry and Physics* 2003; 3: 2067-2082.
- 61) Zhang L Gong S Padro J. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, *Atmospheric Environment* 2001; 35: 549-560.

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

Haruyasu Nagai

Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency

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 following investigations and developments have been conducted.

- 1) Literatures for the source term estimation were investigated. After the publication of UNSCEAR 2013 report, detailed source term estimation by JAEA is found to be useful for the purpose, because the simulation with this source term can reproduce air dose rates at monitoring posts around the NPS and deposition patterns of I-131 and Cs-137.
- 2) Up-to-date meteorological model WRF and advanced data assimilation method have been installed. The dispersion model was improved by incorporating a sophisticated deposition calculation scheme considering chemical forms of radionuclides.
- 3) High performance computer has been prepared to execute large scale simulations and construct the database.
- 4) Measured data sets (atmospheric radionuclides concentrations derived from filter-tapes of operational air pollution monitoring stations, etc.) have been collected and organized to be used for the comparison with simulations

付録

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

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 : hhmmdd 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	I-131	Cs-137
yyymmdd	hhmmss	(h)	(Bq h^{-1})	(Bq h^{-1})
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)
20110311	000000	3	2.9E+12	1.7E+10
20110311	030000	3	1.3E+12	1.6E+10
20110311	060000	3	1.6E+13	1.5E+10
20110311	090000	3	2.2E+12	8.8E+09
20110311	120000	3	3.7E+12	6.7E+09
20110311	150000	3	1.2E+13	3.7E+09
20110311	180000	3	5.4E+14	4.7E+10
20110311	210000	3	2.6E+15	2.6E+09
20110312	000000	3	4.1E+16	3.4E+11
20110312	030000	3	6.8E+16	1.6E+12
20110312	060000	3	9.0E+16	9.2E+12
20110312	090000	3	1.3E+17	1.2E+14
20110312	120000	3	1.7E+17	3.8E+14
20110312	150000	3	4.7E+17	4.5E+14
20110312	180000	3	3.6E+15	7.4E+14
20110312	210000	3	6.1E+15	8.0E+13
20110313	000000	3	9.1E+15	4.6E+13
20110313	030000	3	3.5E+16	2.2E+13
20110313	060000	3	9.2E+16	8.7E+12
20110313	090000	3	2.4E+17	5.2E+11
20110313	120000	3	1.0E+18	1.4E+14
20110313	150000	3	4.1E+17	1.3E+14
20110313	180000	3	6.6E+15	7.9E+12
20110313	210000	3	4.3E+15	1.3E+13
20110314	000000	3	2.3E+15	2.4E+13
20110314	030000	3	9.8E+14	3.0E+13
20110314	060000	3	3.1E+16	6.7E+13
20110314	090000	3	9.2E+16	1.6E+14
20110314	120000	3	2.2E+17	1.4E+14
20110314	150000	3	3.6E+17	1.8E+13
20110314	180000	3	1.4E+17	3.1E+13
20110314	210000	3	2.1E+16	9.9E+14
20110315	000000	3	6.7E+16	1.3E+15
20110315	030000	3	5.1E+17	1.8E+14
20110315	060000	3	2.3E+17	2.8E+14
20110315	090000	3	2.6E+17	1.1E+15
20110315	120000	3	2.2E+17	7.5E+14
20110315	150000	3	1.1E+17	1.6E+14
20110315	180000	3	3.1E+16	8.9E+13
20110315	210000	3	2.6E+15	7.7E+13
20110316	000000	3	1.2E+13	6.5E+13
20110316	030000	3	9.3E+12	5.6E+13
20110316	060000	3	9.5E+12	4.8E+13
20110316	090000	3	1.0E+13	4.3E+13
20110316	120000	3	1.1E+13	2.6E+14
20110316	150000	3	1.1E+13	2.9E+14
20110316	180000	3	1.2E+13	1.1E+14
20110316	210000	3	1.0E+13	1.1E+14
20110317	000000	3	1.2E+13	1.1E+14
20110317	030000	3	1.3E+13	9.6E+13
20110317	060000	3	1.3E+13	8.3E+13
20110317	090000	3	1.3E+13	7.0E+13

20110317	120000	3	9.4E+12	5.6E+13
20110317	150000	3	6.6E+12	4.4E+13
20110317	180000	3	7.1E+12	3.5E+13
20110317	210000	3	6.9E+12	2.8E+13
20110318	000000	3	8.5E+12	2.0E+13
20110318	030000	3	9.6E+12	1.5E+13
20110318	060000	3	1.6E+13	1.2E+13
20110318	090000	3	1.2E+13	1.4E+13
20110318	120000	3	1.2E+13	2.9E+13
20110318	150000	3	1.3E+13	5.6E+13
20110318	180000	3	1.9E+13	8.5E+13
20110318	210000	3	1.2E+13	1.0E+14
20110319	000000	3	8.5E+12	1.0E+14
20110319	030000	3	2.8E+13	7.2E+13
20110319	060000	3	1.6E+13	4.5E+13
20110319	090000	3	1.8E+13	3.9E+13
20110319	120000	3	1.1E+13	6.5E+13
20110319	150000	3	1.0E+13	1.5E+14
20110319	180000	3	1.0E+13	2.6E+14
20110319	210000	3	1.0E+13	3.4E+14
20110320	000000	3	9.9E+12	2.9E+14
20110320	030000	3	9.9E+12	1.7E+14
20110320	060000	3	9.5E+12	6.5E+13
20110320	090000	3	9.3E+12	1.4E+13
20110320	120000	3	9.2E+12	3.2E+12
20110320	150000	3	9.7E+12	5.9E+11
20110320	180000	3	9.1E+12	2.9E+10
20110320	210000	3	8.8E+12	4.8E+11
20110321	000000	3	9.0E+12	6.5E+11
20110321	030000	3	8.8E+12	2.7E+11
20110321	060000	3	8.6E+12	3.6E+08
20110321	090000	3	8.6E+12	2.5E+08
20110321	120000	3	8.4E+12	1.7E+08
20110321	150000	3	7.1E+12	8.8E+11
20110321	180000	3	6.4E+12	4.4E+12
20110321	210000	3	4.3E+12	3.9E+11
20110322	000000	3	5.3E+12	8.0E+11
20110322	030000	3	5.1E+12	2.7E+12
20110322	060000	3	4.1E+12	7.0E+12
20110322	090000	3	5.7E+12	9.7E+12
20110322	120000	3	5.5E+12	1.1E+13
20110322	150000	3	5.0E+12	1.1E+13
20110322	180000	3	4.1E+12	9.8E+12
20110322	210000	3	4.0E+12	8.0E+12
20110323	000000	3	3.1E+12	6.7E+12
20110323	030000	3	5.0E+12	6.4E+12
20110323	060000	3	6.2E+12	7.3E+12
20110323	090000	3	6.9E+12	8.9E+12
20110323	120000	3	7.8E+12	1.1E+13
20110323	150000	3	8.1E+12	1.1E+13
20110323	180000	3	8.5E+12	1.1E+13
20110323	210000	3	9.2E+12	1.1E+13
20110324	000000	3	8.2E+12	1.1E+13
20110324	030000	3	1.0E+13	1.3E+13
20110324	060000	3	1.1E+13	1.6E+13
20110324	090000	3	1.1E+13	1.8E+13
20110324	120000	3	1.1E+13	1.8E+13

20110324	150000	3	1.2E+13	1.6E+13
20110324	180000	3	1.1E+13	1.3E+13
20110324	210000	3	1.0E+13	1.1E+13
20110325	000000	3	1.1E+13	8.2E+12
20110325	030000	3	1.1E+13	4.8E+12
20110325	060000	3	1.1E+13	2.3E+12
20110325	090000	3	1.2E+13	1.6E+12
20110325	120000	3	1.2E+13	1.7E+12
20110325	150000	3	1.1E+13	2.7E+12
20110325	180000	3	1.1E+13	3.1E+12
20110325	210000	3	1.1E+13	3.8E+12
20110326	000000	3	1.1E+13	4.3E+12
20110326	030000	3	1.1E+13	4.5E+12
20110326	060000	3	1.2E+13	4.2E+12
20110326	090000	3	1.2E+13	3.4E+12
20110326	120000	3	1.1E+13	2.4E+12
20110326	150000	3	9.9E+12	1.7E+12
20110326	180000	3	9.2E+12	1.3E+12
20110326	210000	3	9.2E+12	1.2E+12
20110327	000000	3	9.0E+12	1.3E+12
20110327	030000	3	9.0E+12	1.5E+12
20110327	060000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110327	090000	3	9.2E+12	2.4E+12
20110327	120000	3	9.0E+12	3.1E+12
20110327	150000	3	9.3E+12	4.3E+12
20110327	180000	3	9.6E+12	6.2E+12
20110327	210000	3	1.0E+13	9.0E+12
20110328	000000	3	1.0E+13	1.1E+13
20110328	030000	3	1.1E+13	9.1E+12
20110328	060000	3	9.8E+12	7.1E+12
20110328	090000	3	9.5E+12	5.7E+12
20110328	120000	3	9.3E+12	5.1E+12
20110328	150000	3	9.5E+12	5.1E+12
20110328	180000	3	9.2E+12	5.2E+12
20110328	210000	3	8.9E+12	5.4E+12
20110329	000000	3	9.2E+12	5.8E+12
20110329	030000	3	9.7E+12	6.8E+12
20110329	060000	3	1.0E+13	7.4E+12
20110329	090000	3	1.1E+13	8.0E+12
20110329	120000	3	1.2E+13	8.8E+12
20110329	150000	3	1.4E+13	9.5E+12
20110329	180000	3	1.6E+13	8.8E+12
20110329	210000	3	1.7E+13	7.3E+12
20110330	000000	3	1.6E+13	5.9E+12
20110330	030000	3	1.5E+13	4.4E+12
20110330	060000	3	1.4E+13	4.2E+12
20110330	090000	3	1.1E+13	4.4E+12
20110330	120000	3	1.1E+13	4.7E+12
20110330	150000	3	1.6E+13	5.4E+12
20110330	180000	3	1.2E+13	6.4E+12
20110330	210000	3	1.0E+13	7.5E+12
20110331	000000	3	9.6E+12	7.9E+12
20110331	030000	3	9.7E+12	7.8E+12
20110331	060000	3	9.3E+12	7.3E+12
20110331	090000	3	9.2E+12	6.9E+12
20110331	120000	3	9.1E+12	6.9E+12
20110331	150000	3	9.4E+12	7.6E+12

20110331	180000	3	1.8E+13	9.1E+12
20110331	210000	3	1.4E+13	1.1E+13
20110401	000000	3	1.0E+13	1.1E+13
20110401	030000	3	1.4E+13	1.3E+13
20110401	060000	3	1.4E+13	1.4E+13
20110401	090000	3	1.2E+13	1.4E+13
20110401	120000	3	1.2E+13	1.4E+13
20110401	150000	3	1.2E+13	1.2E+13
20110401	180000	3	1.5E+13	9.1E+12
20110401	210000	3	1.2E+13	6.6E+12
20110402	000000	3	9.7E+12	4.5E+12
20110402	030000	3	9.2E+12	3.0E+12
20110402	060000	3	1.1E+13	2.4E+12
20110402	090000	3	8.8E+12	2.2E+12
20110402	120000	3	8.6E+12	2.2E+12
20110402	150000	3	8.9E+12	2.2E+12
20110402	180000	3	9.1E+12	1.6E+12
20110402	210000	3	9.2E+12	9.7E+11
20110403	000000	3	9.2E+12	1.1E+12
20110403	030000	3	9.0E+12	1.0E+12
20110403	060000	3	8.8E+12	8.9E+11
20110403	090000	3	8.7E+12	2.0E+12
20110403	120000	3	8.7E+12	2.2E+12
20110403	150000	3	8.7E+12	1.7E+12
20110403	180000	3	8.9E+12	1.1E+12
20110403	210000	3	8.8E+12	9.2E+11
20110404	000000	3	8.9E+12	1.4E+12
20110404	030000	3	8.7E+12	1.9E+12
20110404	060000	3	8.6E+12	2.2E+12
20110404	090000	3	8.8E+12	2.2E+12
20110404	120000	3	9.0E+12	2.1E+12
20110404	150000	3	8.9E+12	1.9E+12
20110404	180000	3	8.8E+12	1.6E+12
20110404	210000	3	9.3E+12	1.5E+12
20110405	000000	3	9.2E+12	9.6E+11
20110405	030000	3	8.6E+12	1.2E+12
20110405	060000	3	8.2E+12	1.0E+12
20110405	090000	3	8.1E+12	4.1E+11
20110405	120000	3	8.0E+12	4.1E+11
20110405	150000	3	7.7E+12	7.4E+11
20110405	180000	3	5.8E+12	1.3E+12
20110405	210000	3	6.2E+12	2.6E+12
20110406	000000	3	7.4E+12	5.9E+12
20110406	030000	3	6.4E+12	9.4E+12
20110406	060000	3	6.6E+12	1.0E+13
20110406	090000	3	6.6E+12	9.1E+12
20110406	120000	3	6.6E+12	8.7E+12
20110406	150000	3	6.7E+12	8.0E+12
20110406	180000	3	6.7E+12	6.4E+12
20110406	210000	3	7.0E+12	5.1E+12
20110407	000000	3	7.0E+12	3.8E+12
20110407	030000	3	7.0E+12	2.9E+12
20110407	060000	3	7.6E+12	2.4E+12
20110407	090000	3	6.6E+12	2.2E+12
20110407	120000	3	6.8E+12	2.0E+12
20110407	150000	3	6.8E+12	2.0E+12
20110407	180000	3	6.9E+12	2.0E+12

20110407	210000	3	7.4E+12	2.0E+12
20110408	000000	3	7.6E+12	1.9E+12
20110408	030000	3	7.0E+12	1.8E+12
20110408	060000	3	6.7E+12	1.8E+12
20110408	090000	3	6.8E+12	1.8E+12
20110408	120000	3	8.9E+12	1.9E+12
20110408	150000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110408	180000	3	8.9E+12	9.9E+11
20110408	210000	3	9.1E+12	4.5E+11
20110409	000000	3	9.6E+12	1.0E+12
20110409	030000	3	1.0E+13	1.2E+12
20110409	060000	3	1.0E+13	3.8E+11
20110409	090000	3	9.3E+12	1.3E+12
20110409	120000	3	9.4E+12	2.9E+12
20110409	150000	3	9.6E+12	3.9E+12
20110409	180000	3	1.0E+13	3.1E+12
20110409	210000	3	1.1E+13	1.3E+12
20110410	000000	3	1.0E+13	1.3E+12
20110410	030000	3	9.9E+12	1.0E+12
20110410	060000	3	9.4E+12	1.3E+12
20110410	090000	3	9.1E+12	1.7E+12
20110410	120000	3	9.0E+12	2.1E+12
20110410	150000	3	9.0E+12	2.3E+12
20110410	180000	3	9.0E+12	2.4E+12
20110410	210000	3	9.0E+12	2.5E+12
20110411	000000	3	9.0E+12	2.4E+12
20110411	030000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110411	060000	3	9.3E+12	1.8E+12
20110411	090000	3	9.9E+12	1.5E+12
20110411	120000	3	1.0E+13	1.6E+12
20110411	150000	3	1.1E+13	2.0E+12
20110411	180000	3	9.2E+12	2.5E+12
20110411	210000	3	9.0E+12	2.6E+12
20110412	000000	3	9.0E+12	2.6E+12
20110412	030000	3	9.0E+12	2.7E+12
20110412	060000	3	9.0E+12	2.6E+12
20110412	090000	3	9.0E+12	2.6E+12
20110412	120000	3	9.0E+12	2.5E+12
20110412	150000	3	9.0E+12	2.3E+12
20110412	180000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110412	210000	3	9.0E+12	2.0E+12
20110413	000000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110413	030000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110413	060000	3	9.0E+12	1.2E+12
20110413	090000	3	9.0E+12	6.7E+11
20110413	120000	3	9.0E+12	3.1E+11
20110413	150000	3	9.0E+12	2.9E+11
20110413	180000	3	9.0E+12	5.7E+11
20110413	210000	3	9.0E+12	1.2E+12
20110414	000000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110414	030000	3	9.0E+12	2.0E+12
20110414	060000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110414	090000	3	9.0E+12	2.4E+12
20110414	120000	3	9.0E+12	2.4E+12
20110414	150000	3	9.0E+12	2.4E+12
20110414	180000	3	9.0E+12	2.3E+12
20110414	210000	3	9.0E+12	2.1E+12

20110415	000000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110415	030000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110415	060000	3	9.0E+12	1.2E+12
20110415	090000	3	9.0E+12	8.8E+11
20110415	120000	3	9.0E+12	9.9E+11
20110415	150000	3	9.0E+12	1.4E+12
20110415	180000	3	9.0E+12	1.8E+12
20110415	210000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110416	000000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110416	030000	3	9.0E+12	1.7E+12
20110416	060000	3	9.0E+12	1.5E+12
20110416	090000	3	9.0E+12	1.1E+12
20110416	120000	3	9.0E+12	7.8E+11
20110416	150000	3	9.0E+12	4.2E+11
20110416	180000	3	9.0E+12	2.5E+11
20110416	210000	3	9.0E+12	1.1E+11
20110417	000000	3	9.0E+12	3.0E+11
20110417	030000	3	9.0E+12	6.2E+10
20110417	060000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110417	090000	3	9.0E+12	1.0E+12
20110417	120000	3	9.0E+12	4.3E+11
20110417	150000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110417	180000	3	9.0E+12	6.9E+11
20110417	210000	3	9.0E+12	7.8E+11
20110418	000000	3	9.0E+12	1.3E+12
20110418	030000	3	9.0E+12	1.7E+12
20110418	060000	3	9.0E+12	2.0E+12
20110418	090000	3	9.0E+12	2.2E+12
20110418	120000	3	9.0E+12	2.1E+12
20110418	150000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110418	180000	3	9.0E+12	1.6E+12
20110418	210000	3	9.0E+12	1.2E+12
20110419	000000	3	9.0E+12	7.8E+11
20110419	030000	3	9.0E+12	2.7E+11
20110419	060000	3	9.0E+12	1.6E+11
20110419	090000	3	9.0E+12	3.9E+11
20110419	120000	3	9.0E+12	5.4E+11
20110419	150000	3	9.0E+12	3.7E+11
20110419	180000	3	9.0E+12	3.7E+11
20110419	210000	3	9.0E+12	7.7E+11
20110420	000000	3	9.0E+12	1.4E+12
20110420	030000	3	9.0E+12	1.9E+12
20110420	060000	3	9.0E+12	2.3E+12
20110420	090000	3	9.0E+12	2.7E+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	Xe-133	Cs-137	Cs-134	Te-132	I-131	I-133
yyyymmdd	hhmmss	(h)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)	(Bq h ⁻¹)
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	8.8E+16	8.8E+16	8.9E+16	9.0E+16	8.9E+16
20110313	103000	0.5	1.7E+17	1.6E+17	1.6E+17	1.6E+17	1.6E+17	1.6E+17
20110313	110000	0.5	2.3E+17	2.3E+17	2.3E+17	2.3E+17	2.3E+17	2.3E+17
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	4.3E+18	4.3E+18	4.3E+18	4.3E+18	4.3E+18
20110313	130000	0.5	1.8E+18	1.8E+18	1.8E+18	1.8E+18	1.8E+18	1.8E+18
20110313	133000	0.5	1.4E+17	1.4E+17	1.4E+17	1.4E+17	1.4E+17	1.4E+17
20110313	140000	0.5	1.5E+17	1.4E+17	1.4E+17	1.4E+17	1.4E+17	1.4E+17
20110313	143000	0.5	6.0E+16	5.5E+16	5.5E+16	5.5E+16	5.5E+16	5.5E+16
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	1.2E+13	1.0E+13	1.5E+14	5.4E+14	2.3E+14
20110313	203000	0.5	3.8E+16	3.4E+16	3.4E+16	3.4E+16	3.4E+16	3.4E+16

20110313	210000	0.5	3.8E+16	3.3E+16	3.3E+16	3.3E+16	3.3E+16	3.3E+16	3.3E+16
20110313	213000	0.5	6.5E+15	1.9E+15	1.9E+15	2.0E+15	2.3E+15	2.1E+15	2.1E+15
20110313	220000	0.5	5.1E+15	2.2E+14	2.2E+14	3.5E+14	6.7E+14	4.0E+14	4.0E+14
20110313	223000	0.5	3.4E+15	6.7E+12	5.8E+12	9.4E+13	3.0E+14	1.2E+14	1.2E+14
20110313	230000	0.5	4.8E+15	8.9E+12	7.7E+12	1.3E+14	4.0E+14	1.6E+14	1.6E+14
20110313	233000	0.5	4.0E+15	7.1E+12	6.1E+12	1.0E+14	3.1E+14	1.2E+14	1.2E+14
20110314	000000	0.5	4.9E+15	8.3E+12	7.1E+12	1.3E+14	3.7E+14	1.4E+14	1.4E+14
20110314	003000	0.5	5.4E+15	8.5E+12	7.4E+12	1.4E+14	3.8E+14	1.4E+14	1.4E+14
20110314	010000	0.5	3.9E+15	5.8E+12	5.0E+12	9.5E+13	2.6E+14	9.6E+13	9.6E+13
20110314	013000	0.5	5.0E+15	7.0E+12	6.0E+12	1.2E+14	3.1E+14	1.1E+14	1.1E+14
20110314	020000	0.5	4.0E+15	5.2E+12	4.5E+12	8.9E+13	2.3E+14	8.3E+13	8.3E+13
20110314	023000	0.5	5.1E+15	6.3E+12	5.4E+12	1.1E+14	2.7E+14	9.8E+13	9.8E+13
20110314	030000	0.5	4.3E+15	4.9E+12	4.2E+12	8.5E+13	2.1E+14	7.4E+13	7.4E+13
20110314	033000	0.5	5.4E+15	5.9E+12	5.1E+12	1.0E+14	2.5E+14	8.8E+13	8.8E+13
20110314	040000	0.5	4.8E+15	4.9E+12	4.2E+12	8.6E+13	2.1E+14	7.2E+13	7.2E+13
20110314	043000	0.5	6.2E+15	6.0E+12	5.2E+12	1.1E+14	2.6E+14	8.7E+13	8.7E+13
20110314	050000	0.5	4.4E+15	4.0E+12	3.5E+12	7.2E+13	1.7E+14	5.7E+13	5.7E+13
20110314	053000	0.5	4.8E+15	4.2E+12	3.7E+12	7.6E+13	1.8E+14	5.9E+13	5.9E+13
20110314	060000	0.5	5.6E+15	4.6E+12	4.0E+12	8.5E+13	2.0E+14	6.3E+13	6.3E+13
20110314	063000	0.5	4.5E+15	3.3E+12	2.9E+12	6.8E+13	1.5E+14	4.7E+13	4.7E+13
20110314	070000	0.5	5.7E+15	3.9E+12	3.4E+12	9.1E+13	1.8E+14	5.6E+13	5.6E+13
20110314	073000	0.5	4.6E+15	2.9E+12	2.5E+12	8.0E+13	1.3E+14	4.0E+13	4.0E+13
20110314	080000	0.5	6.7E+15	4.2E+12	3.6E+12	1.4E+14	1.9E+14	5.6E+13	5.6E+13
20110314	083000	0.5	5.1E+15	3.0E+12	2.6E+12	1.2E+14	1.3E+14	4.0E+13	4.0E+13
20110314	090000	0.5	6.0E+15	3.4E+12	2.9E+12	1.7E+14	1.5E+14	4.4E+13	4.4E+13
20110314	093000	0.5	5.0E+15	2.7E+12	2.3E+12	1.6E+14	1.2E+14	3.4E+13	3.4E+13
20110314	100000	0.5	6.2E+15	3.0E+12	2.6E+12	2.4E+14	1.4E+14	3.9E+13	3.9E+13
20110314	103000	0.5	4.9E+15	2.3E+12	2.0E+12	2.2E+14	1.0E+14	2.9E+13	2.9E+13
20110314	110000	0.5	6.4E+15	2.9E+12	2.5E+12	3.3E+14	1.3E+14	3.6E+13	3.6E+13
20110314	113000	0.5	5.1E+15	2.2E+12	1.9E+12	3.0E+14	9.5E+13	2.6E+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	3.4E+13
20110314	123000	0.5	6.4E+15	2.4E+12	2.1E+12	4.8E+14	1.1E+14	2.8E+13	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	2.7E+13
20110314	133000	0.5	5.3E+15	1.8E+12	1.5E+12	4.9E+14	7.8E+13	2.0E+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	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	1.8E+13
20110314	150000	0.5	6.6E+15	2.0E+12	1.7E+12	8.0E+14	8.8E+13	2.2E+13	2.2E+13
20110314	153000	0.5	5.4E+15	1.5E+12	1.3E+12	7.1E+14	6.9E+13	1.7E+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	2.0E+13
20110314	163000	0.5	5.7E+15	1.5E+12	1.3E+12	8.8E+14	6.6E+13	1.5E+13	1.5E+13
20110314	170000	0.5	7.9E+15	2.2E+12	1.9E+12	1.3E+15	8.5E+13	2.0E+13	2.0E+13
20110314	173000	0.5	5.4E+15	1.4E+12	1.2E+12	9.6E+14	5.5E+13	1.3E+13	1.3E+13
20110314	180000	0.5	6.6E+15	1.5E+12	1.3E+12	1.3E+15	6.4E+13	1.4E+13	1.4E+13
20110314	183000	0.5	5.2E+15	1.1E+12	9.5E+11	1.1E+15	4.9E+13	1.1E+13	1.1E+13
20110314	190000	0.5	6.4E+15	1.3E+12	1.1E+12	1.4E+15	5.7E+13	1.3E+13	1.3E+13
20110314	193000	0.5	5.2E+15	1.2E+12	1.0E+12	1.2E+15	5.1E+13	1.1E+13	1.1E+13
20110314	200000	0.5	6.5E+15	1.4E+12	1.2E+12	1.5E+15	5.8E+13	1.2E+13	1.2E+13
20110314	203000	0.5	5.2E+15	1.1E+12	9.7E+11	1.2E+15	4.2E+13	8.7E+12	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	1.2E+13
20110314	213000	0.5	5.5E+15	9.4E+11	8.1E+11	1.4E+15	4.2E+13	8.5E+12	8.5E+12
20110314	220000	0.5	6.1E+15	1.0E+12	8.6E+11	1.5E+15	4.6E+13	9.1E+12	9.1E+12
20110314	223000	0.5	5.0E+15	7.7E+11	6.6E+11	1.3E+15	3.5E+13	7.0E+12	7.0E+12
20110314	230000	0.5	6.1E+15	1.0E+12	8.6E+11	1.6E+15	4.2E+13	8.1E+12	8.1E+12
20110314	233000	0.5	4.8E+15	8.4E+11	7.3E+11	1.2E+15	3.0E+13	5.7E+12	5.7E+12
20110315	000000	0.5	6.3E+15	3.1E+12	3.1E+12	1.6E+15	7.2E+13	1.4E+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	2.3E+13

20110315	010000	0.5	8.6E+15	8.3E+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	9.8E+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	3.1E+12	3.3E+12	1.0E+15	6.4E+13	1.1E+13
20110315	040000	0.5	8.7E+15	3.6E+12	3.7E+12	1.2E+15	7.5E+13	1.2E+13
20110315	043000	0.5	7.8E+15	2.6E+12	2.7E+12	1.1E+15	5.7E+13	9.3E+12
20110315	050000	0.5	9.3E+15	2.9E+12	3.0E+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	7.1E+12
20110315	060000	0.5	8.8E+15	2.1E+12	2.1E+12	9.5E+14	5.1E+13	8.0E+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	5.2E+14	5.5E+14	3.4E+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	1.2E+13	1.3E+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	8.9E+12	8.2E+14	2.4E+14	1.7E+13
20110316	090000	0.5	5.4E+14	5.7E+12	6.1E+12	5.9E+14	2.3E+14	1.6E+13
20110316	093000	0.5	6.0E+14	8.7E+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	4.8E+12	5.2E+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	6.4E+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	2.2E+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	1.3E+13	7.6E+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	6.8E+13	3.8E+12
20110316	173000	0.5	3.8E+13	9.6E+12	1.0E+13	7.3E+14	8.2E+13	4.5E+12
20110316	180000	0.5	3.8E+13	0.0E+00	0.0E+00	5.1E+14	7.7E+13	4.1E+12
20110316	183000	0.5	3.8E+13	6.7E+12	7.3E+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	1.8E+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	4.9E+13	2.2E+12
20110317	003000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.4E+14	1.5E+14	6.5E+12
20110317	010000	0.5	0.0E+00	1.8E+13	1.9E+13	3.9E+14	9.2E+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	3.5E+12	4.9E+14	8.9E+13	3.8E+12
20110317	023000	0.5	0.0E+00	1.4E+13	1.6E+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	1.7E+13	6.9E+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	8.7E+11
20110317	053000	0.5	0.0E+00	7.1E+11	7.7E+11	4.6E+14	3.0E+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	8.6E+12	9.3E+12	3.8E+14	8.2E+13	3.0E+12
20110317	070000	0.5	0.0E+00	1.8E+12	1.9E+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	4.5E+12
20110317	080000	0.5	0.0E+00	6.4E+12	6.9E+12	2.7E+14	1.6E+13	5.6E+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	1.4E+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	8.2E+13	2.7E+12
20110317	113000	0.5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.4E+14	1.8E+13	5.8E+11
20110317	120000	0.5	0.0E+00	8.6E+12	9.2E+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	1.7E+14	5.4E+12
20110317	130000	0.5	0.0E+00	5.5E+12	5.9E+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	7.0E+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	5.5E+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	1.3E+12	1.4E+12	1.1E+14	1.5E+14	4.1E+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	7.1E+12
20110317	190000	0.5	0.0E+00	8.7E+12	9.4E+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	1.9E+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
yyyyymmdd	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

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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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. (h)	Te-132 (Bq h ⁻¹)	I-131 (Bq h ⁻¹)	I-132a (Bq h ⁻¹)	I-133 (Bq h ⁻¹)	Xe-133 (Bq h ⁻¹)	Cs-134 (Bq h ⁻¹)	Cs-136 (Bq h ⁻¹)	Cs-137 (Bq h ⁻¹)
y4mddd	hhmm									
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

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 事故初期段階における住民の被ばく線量再構築

栗原 治（放射線医学総合研究所・チームリーダー）

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事故初期の被ばく線量、特に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の把握に資するため、個人の行動情報を活用した線量推計手法の構築に着手した。その準備として、今年度の研究では、内部被ばく線量測定に係る実測データと行動データの両方を有する個人の情報（422名）を収集するとともに、大気拡散シミュレーションと行動データを用いて内部被ばく線量を計算するソフトウェアの開発を行った。その他、放射線医学総合研究所が2011年6月から7月に実施した先行調査において、ホールボディカウンタ（WBC）による測定を受けた被検者（174名）の解析を行い、成人男性に放射性セシウム¹³⁷の有意値が検出された者の割合が高いこと、2012年度の線量推計の基礎とした日本原子力研究開発機構で行われた別のWBC測定から評価された実効線量の分布と比較して顕著な差がないこと等の結果を得た。また、外部被ばく線量推計の不確実性の要因の一つである周辺線量当量から実効線量への換算係数について考察した。

キーワード：福島第一原子力発電所事故、初期内部被ばく、行動、大気拡散シミュレーション、線量評価

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。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¹⁻⁴⁾。放射線医学総合研究所（以下、放医研）は、2012年度の環境省委託事業において、当時利用できた全ての人の実測データ及び大気拡散シミュレーション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⁵⁻⁷⁾、同推計は市町村毎の住民に対する代表値（90%頻度値及び50%頻度値）のみであること、また、個人の実際の行動を全く考慮していない等の課題があった。本研究では、より正確な線量評価を目的として、個人の行動情報を取り入れた内部被ばく線量評価法の構築を行う。

II 研究方法

本研究は、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（研究代表者：鈴木元（国福大））として他の研究分担者と連携して進めるとともに、個人の行動情報の

提供元である福島県立医科大学（以下、福島医大）とも連携して行う（図1）。個人の行動情報を取り入れた内部被ばく線量評価法の構築のため、内部被ばく線量測定の実測データと行動データを有する個人を解析対象者として選定し、両データの関連性を調べるとともに、行動データと大気拡散シミュレーションを活用した吸入摂取を想定した体内残留量及び内部被ばく線量の計算を行い、実測データとの比較検証を試みる。なお、解析対象者のデータ利用に関しては、福島医大と放医研において研究倫理の承認を得る。また、前述の計算を速やかに正確に行うためソフトウェアの開発を行うとともに、最新の拡散シミュレーションの結果を適宜反映させる。同時に、新たな実測データの探索や既存の実測データの精度検証等の評価も実施する。

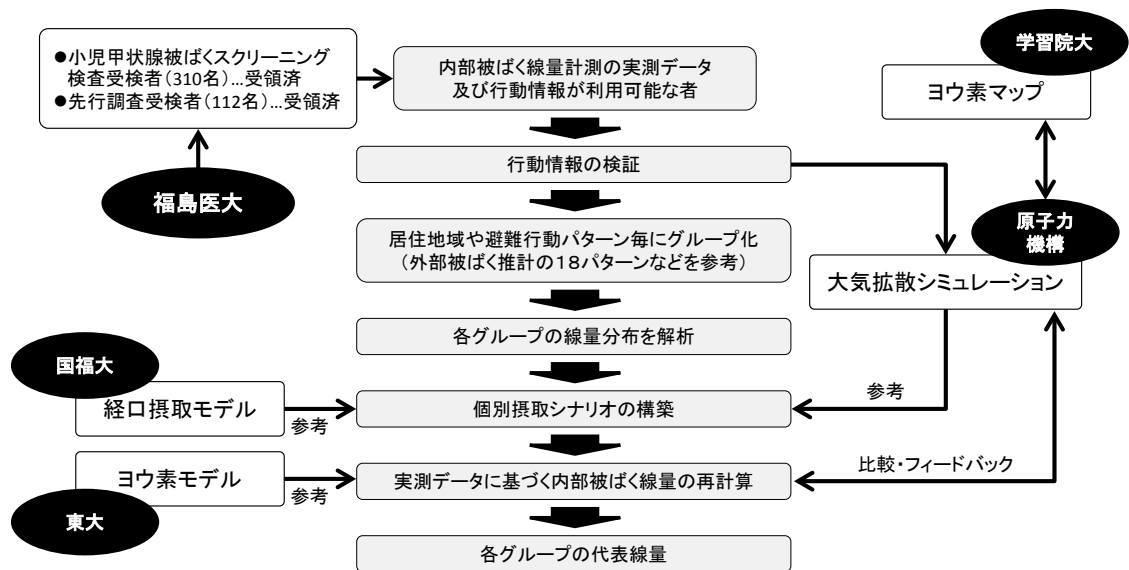


図1 研究方法及び研究体制

<解析対象者の選定>

下記の集団のうち、福島県が実施する県民健康調査⁸⁾への協力の同意が得られ、同調査での行動調査票の回答が得られた者を選定する。

- 福島県の委託を受けて放医研が2011年6月27日から7月16日（後に7月28日まで延長）までに実施した内部被ばくの先行調査においてWBCによる内部被ばく検査を受けた者（計174名）⁹⁾
- 国の原子力災害現地対策本部が2011年3月下旬に川俣町、いわき市、飯舘村において実施した小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の受けた者（計1,080名）³⁾
- 福島県の委託を受けて日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）が2011年7月から2012年1月末までに行ったWBCによる内部被ばく検査を受けた者（計9,927名）¹⁰⁾

<使用するデータ>

以下のデータを福島医大において解析対象者毎に連結匿名化した後、本研究に使用する。

- 個人の内部被ばく線量測定の実測データとして、解析対象者の体内残留量、検査日、検査場所、年齢及び測定における検出限界値

- 福島県が実施する県民健康調査（基本調査）において、事故初期の外部被ばく線量推計の目的のために用いられる個人の行動調査票（それが電子化されたものも含む）

<内部被ばく線量の計算方法>

大気拡散シミュレーションによって得られる放射性核種の大気中濃度マップと解析対象者の滞在場所を同一時間帯で合わせることで、放射性核種の吸入摂取量を求め、これに国際放射線防護委員会（ICRP）の刊行物に示される呼吸率と線量係数を乗じることで内部被ばく線量を計算する。この結果を、個人の内部被ばく線量測定の実測データを基に既に評価された内部被ばく線量と比較し、本法の精度評価とパラメータ値の最適化を行う。また、大気拡散シミュレーションによって得られた吸入摂取量の経時変化に基づき摂取シナリオを個人毎に見直し、これを反映した内部被ばく線量の再評価を行う。

（倫理面への配慮）

本研究において、個人の行動情報の利用に関しては、福島医大と放医研の両機関において平成25年度に研究倫理審査の承認を得ている。

III 研究結果

<放射性セシウムによる実効線量分布の解析>

2012年度に放医研が実施した初期内部被ばく線量の推計において、その基になったWBC測定から評価された成人の実効線量分布について解析を行った。図2に累積確率紙上にプロットした実効線量の分布の一例を示す。同図から分かるように、被検者の半数以上が検出限界値未満であるために、線量分布の全体的な傾向を評価する上で重要となる50%頻度値が直接得られない。そこで対数正規分布を仮定し、50%頻度値の導出を試みた。対数正規分布であれば、両対数軸とした累積確率紙上のプロットは直線に回帰できるが、0.05 mSv付近でプロットの傾きが不連続に変化している。この原因が、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の両方が検出された被検者といずれか一方が未検出であった被検者が混在しているために生じていたことが、内部被ばく線量測定の実測データが入手できた後述する先行調査受検者の解析から判明した。

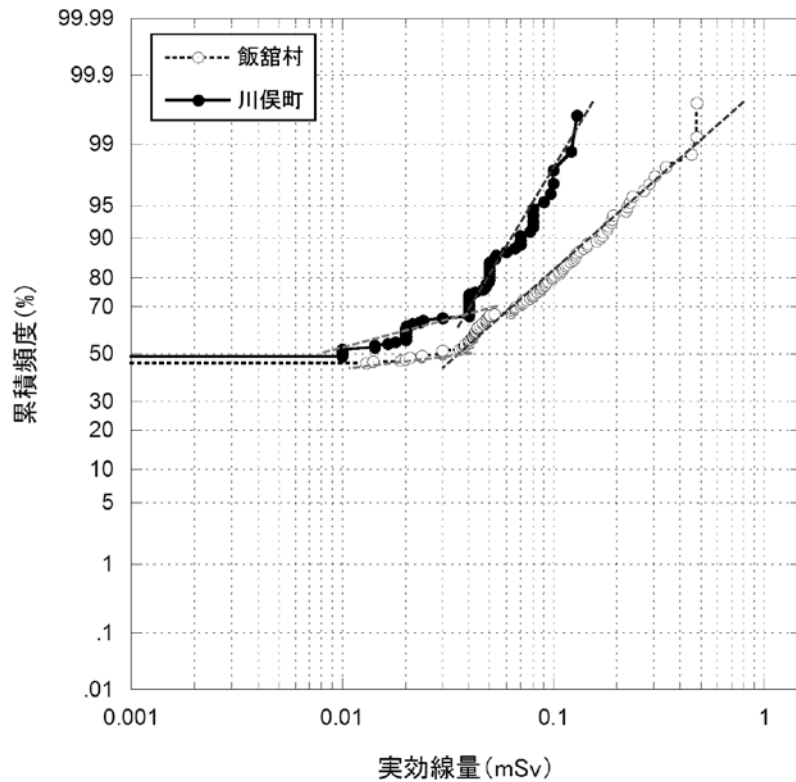


図2 WBC測定から評価された成人の実効線量分布

<先行調査被検者の解析>

放医研が福島県の委託を受けて行った先行調査の被検者174名のWBCデータを解析した。被検者の性別・年齢構成と出身市町村構成は図3に示すとおりであり、成人（18歳以上）の割合が高く、浪江町出身の被検者が全体の約半数であった。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の両核種が検出された被検者の構成は表1に示すとおりであり、成人男性の占める割合が他に比べて高い結果であった。一方、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の体内残留量の比は1:1.1（平均値）であり、これまでに報告されている結果と同様であった。表2には、WBC測定の実測データに基に評価した成人の実効線量を市町村別に示したが、2012年度の初期内部被ばく線量推計の基礎とした原子力機構による別のWBC測定からの結果と比較的良好一致を見ている。

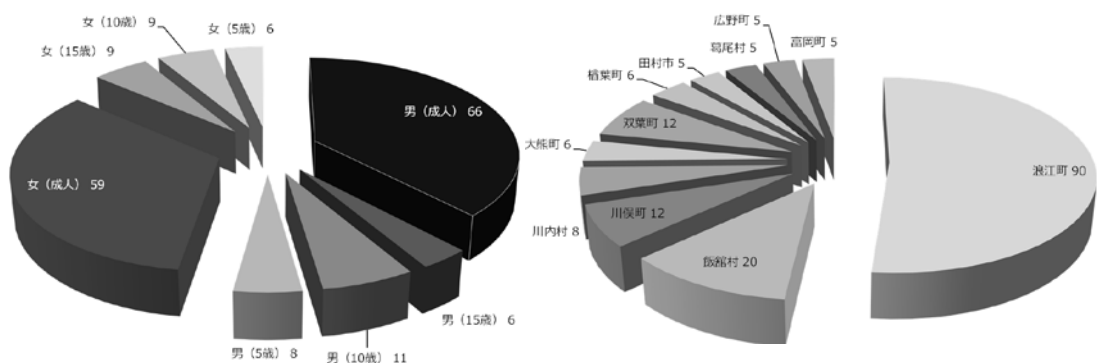


図3 先行調査におけるWBC被検者の性別・年齢構成（左）と出身市町村構成（右）

表1 ^{134}Cs と ^{137}Cs の両核種が検出された被検者の構成

男		女	
全年齢	31名 (34%)	全年齢	7名 (8%)
5歳児区分	0名 (0%)	5歳児区分	0名 (0%)
10歳児区分	0名 (0%)	10歳児区分	0名 (0%)
15歳児区分	2名 (23%)	15歳児区分	0名 (0%)
成人区分	29名 (44%)	成人区分	7名 (12%)

表2 成人被検者の実効線量*

		浪江町	飯館村	双葉町	川俣町
先行調査	90%頻度値	0.15 mSv	0.09 mSv	0.17 mSv	0.04 mSv
	50%頻度値	0.03 mSv	0.03 mSv	0.08 mSv	—
2012年度評価	90%頻度値	0.10 mSv	0.17 mSv	0.15 mSv	0.07 mSv
	50%頻度値	0.02 mSv**	0.03 mSv**	0.04 mSv**	0.01 mSv**

* 2011年3月12日の急性吸入摂取シナリオ、放射性セシウムの性状はタイプF、粒子形 $1\mu\text{m}$ に基づく評価。

** 対数正規分布を仮定して求めた推定値

<行動情報の解析>

解析対象者の行動データに関しては、先行調査被検者（全174名）については112名、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者（全1,080名）については310名から（計422名）得られ、福島医大から今年度受領した。図4に先行調査被検者112名の震災発生時点での滞在場所を、図5に行動データの一例を示す。解析対象者の行動データの解析は、後述するソフトウェアを用いて次年度から本格的に実施する予定であるが、行動データの全体的な傾向としては、先行調査被検者については3月12日の段階で避難を開始した者がほとんどであり、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者については多くが自宅に留まるものの、自主避難（県内・県外）した者の割合も高い等の傾向が見られた。

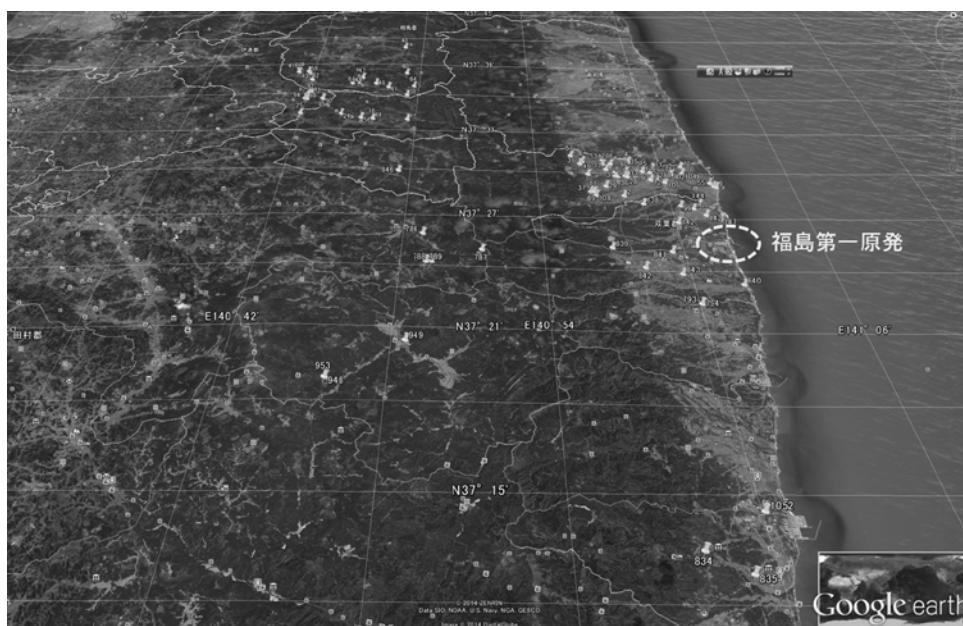


図4 先行調査被検者112名の震災発生時点での滞在場所

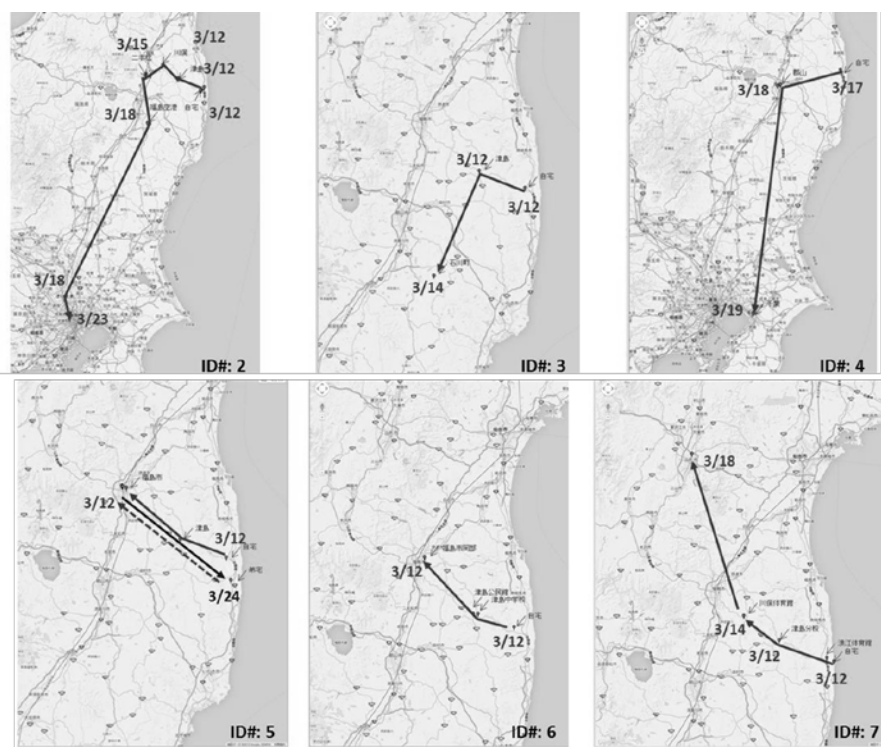
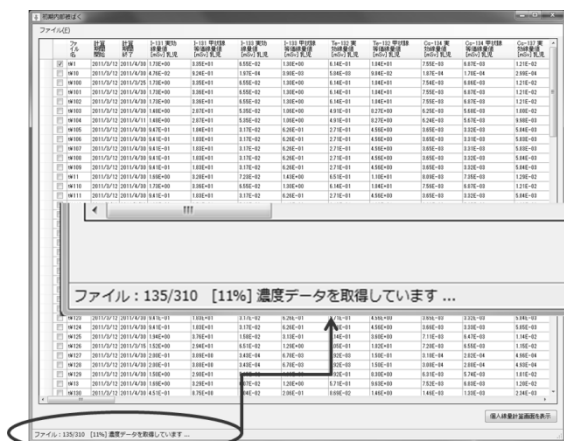


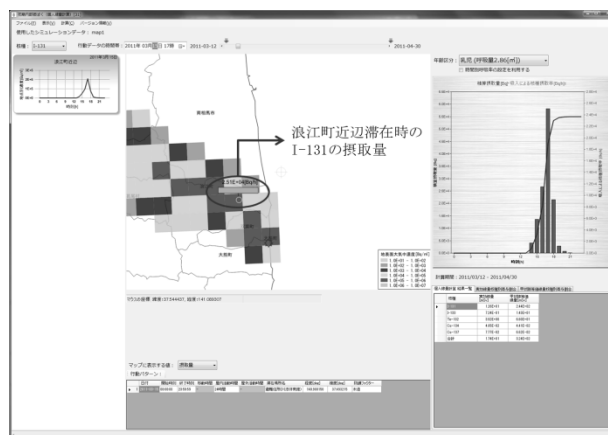
図5 先行調査被検者の行動データの例

<ソフトウェア開発>

2012年度に放医研で開発した内部被ばく線量評価システム^{1,6)}をベースに、電子化された個人の行動データを一括して取込み、大気拡散シミュレーションによる¹³¹Iと¹³⁷Csの大気中濃度マップから吸入摂取量、体内残留量及び内部被ばく線量を計算するソフトウェアを試作した(図6)。



(a) 行動データの一括計算例



(b) 行動データに基づいた線量計算例

図6 内部被ばく線量評価システムによる計算例

<外部被ばく線量推計の不確実性>

事故初期の外部被ばく線量評価の不確実性について、放射線の入射ジオメトリによる周辺線量当量に対する実効線量の変化について公開情報に基づき検討した。

IV 考察

<放射性セシウムの実効線量分布>

事故初期に住民が受けた内部被ばく線量を推計する上で、可能な限り人の実測データを推計の基礎とすることが重要であるものの、公衆に関しては放射性ヨウ素を直接計測したデータは非常に限られている。そこで、2012年度の放医研による初期内部被ばく線量の推計では、事故発生から数か月以降に開始された福島県民を対象としたWBC測定に着目し、放射性ヨウ素と放射性セシウムの摂取量比を決定することで、放射性ヨウ素を主体とした事故初期の内部被ばく線量（特に甲状腺等価線量）の推計を試みた。しかしながら、同推計に用いることのできたWBC測定のデータは、放射性セシウムの体内残留量や測定日などの素データではなく、成人被検者の実効線量のデータのみであり、さらに2011年7月から2012年1月末までの約半年間に測定された被検者のデータを含むものであった。今回、測定開始の時期が比較的早く、かつ、測定期間も限定された先行調査のデータが追加できたことの意味は大きい。特に、測定期間が異なる集団の実効線量を比較することで、時間が経過した段階での経口摂取の可能性を判断できると思われる。WBC測定に基づく実効線量の評価は、過小評価とならないように最も保守的な条件である事故発生翌日（2011年3月12日）の急性吸入摂取シナリオに基づいて行われた。したがって、追加の経口摂取があると実効線量は過大に評価されるが、より重要なことは、前述した放射性ヨウ素と放射性セシウムの摂取量比の推定にも影響を及ぼす点である。WBC測定に用いられた装置や校正方法が異なるため単純な比較はできないものの、先行調査の被検者と2012年度の推計に用いた被検者の実効線量に顕著な差はなく、時間が経過した後の経口摂取の寄与は比較的少ないものと予想される。

<個人の行動情報>

先行調査被検者からは112名、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者からは310名の行動デ

ータ（計422名）が得られた。これらの解析対象者の実測データと行動データとの関連性を見出し、行動データから実測データを再現するモデルを構築することが本研究の目的であり、次年度以降に開発したソフトウェアにより解析を進めてゆく。一方、大気拡散シミュレーションによって再現された放射性プルームの挙動から、行動データを解析する上で特に重要と考えられる項目は次のとおりである。

- 先行調査被検者の約半数が浪江町の住民であり、ほぼ全員が3月12日中に避難を開始している。一方、同日の放射性プルームはほぼ北方に限定して流れているので、沿岸部付近の住民については避難開始時期が放射性セシウムの摂取（吸入）に大きく影響する可能性がある。また、福島第一原子力発電所のある大熊町及びその北に隣接する双葉町の住民の3月12日の避難行動も重点的に解析する。
- 最大量の放出があった3月15日の行動データ。放射性プルームは3月15日の午前中は福島第一原子力発電所の南方に流れ、夕刻から夜半にかけて北西方向に向きを変えている。先行調査被検者の多くは同日には福島市や二本松市等に避難しており、避難先によってWBC測定値に系統的な差があるかを明らかにする。小児甲状腺被ばくスクリーニング検査対象者の多くは自宅に留まっているが、同検査の対象地域となった飯舘村、川俣町及びいわき市ではプルームの通過時間帯が異なり、この時間帯での屋外行動の有無の違いが放射性ヨウ素の摂取（吸入）に影響する可能性があるため、この点を重点的に解析する。
- その他、県外避難者や類似行動者の実測データの傾向を見る。

<外部被ばく線量推計の不確実性>

外部被ばく線量推計の不確かさ要因の一つである周辺線量当量から実効線量への換算係数を検討した。福島県民の事故初期の外部被ばく線量推計は放医研が開発したシステム¹¹⁾によって行われているが、同換算係数には0.6が使われている。この数値は等方照射（ISO）条件において、事故によって放出された主要な核種に対する数値の中で最も高いものとして決定されている。換算係数は、回転照射（ROT）条件では0.7¹²⁾、土壌中線源からの照射条件では0.6（いずれも^{134/137}Csで成人の場合）¹³⁾となるが、山間部以外では後者の方が実際に近い状況と考えられる。他方、姿勢の違いによる実効線量の変化もあり、土壌中線源では横たわった姿勢では立位に比べて2割から3割程度減少するとされている¹⁴⁾。したがって、就寝時間帯や他核種も考慮すると、外部被ばく線量評価期間を通して換算係数0.6を適用することはやや過大評価を与えるものと予想される。

V 結論

東京電力福島第一原子力発電所事故に係る住民の事故初期の内部被ばくの把握に資するため、個人の行動情報を活用した内部被ばく線量推計手法の構築に着手した。行動データを入手した先行調査被検者112名と小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者310名（計422名）について、前者ではほぼ全員が事故翌日に避難を開始し、後者では自宅に留まる者が大半を占めるものの、福島県内外への自主避難者の割合も高いなどの特徴があることが分かった。また、先行調査被検者のWBC測定の実測データの解析を行い、成人男性の放射性セシウムの有意値検出者の割合が高いこと、2012年度の線量推計の基礎とした別のWBC測定から得られた実効線量分布と顕著な差がないこと

等を確認した。

VI 次年度以降の計画

次年度の計画は以下のとおりである。

- 今年度入手した解析対象者（422名）及び次年度に得られる解析対象者の行動データの解析を引き続き進める。
- 更新予定の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精度を、従来のものと比較して評価を行う。
- 内部被ばく線量測定に係る実測データの不確実性を評価する。

この研究に関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.

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) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Yasumura S Hosoya M Yamashita S et al. Study protocol for the Fukushima health management survey, *J. Epidemiol.* 2014; 22: 375-383.
- 9) 福島県. 第3回「県民健康調査」検討委員会（平成23年7月24日開催）, 2012.
- 10) Momose T Takada C Nakagawa T et al. Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO 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; 67-81.
- 11) 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.
- 12) 日本アイソトープ協会, *ICRP Publication 74 外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数（日本語訳）*, 1998.
- 13) Saito K Petoussi-Hens N. Ambient dose equivalent coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground, *J. Nucl. Sci. Technol.* 2014; 51: 1274-1287.
- 14) Saito K Petoussi-Hens N Zankl M. Computational of the effective dose and its variation from environmental gamma ray sources, *Health Phys.* 1998; 74: 698-706.

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

Osamu Kurihara

National Institute of Radiological Sciences

Keywords: Fukushima Daiichi nuclear power plant accident; early internal dose; individual behavior; atmospheric dispersion simulation; dose assessment

Abstract

To understand the levels of exposure doses to Fukushima residents in the early stage of the nuclear disaster, especially internal doses due to the intake of short-lived nuclides as represented by radioiodine, we started to develop an internal dose estimation method using information on individual behaviors. As a preparation for this, we collected information from the individuals having both internal dose measurement data and individual behavior data shortly after the accident (422 persons in total). We also developed a software package that enables to calculate internal doses by superimposing the data of the individual behavior on time-series air concentration maps from atmospheric dispersion simulations. In addition, we analyzed whole-body (WB) measurement data of subjects of a pilot survey that was conducted by National Institute of Radiological Sciences (NIRS) from June to July in 2011 (174 persons). The results showed that the detection rate was the highest in adult male subjects, and effective doses from the subjects of the pilot survey were not significantly different from those evaluated from the other WB measurements. Regarding external doses, we considered one of the uncertainty factors in the dose estimation, a conversion factor from the ambient dose equivalent to the effective dose.

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

村松 康行 (学習院大学・教授)

研究要旨

福島第一原子力発電所の事故により大量の ^{131}I が放出された。この核種は体内に入ると甲状腺に濃縮されるため被ばく評価上重要である。しかし、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、 ^{131}I の沈着量に関する情報は非常に限定的である。平成 23 年 6 月に文部科学省が中心となり、約 2,200 地点から合計約 10,000 試料が採取され放射能測定が行われた。放射性セシウムはほぼ全試料で検出され汚染マップが作成されたが、 ^{131}I については半減期が短いため試料採取時には減衰してしまい、検出できた地点は約 400 箇所と全体の 2 割弱しかなかった。本研究では、 ^{131}I のデータを補う目的で、 ^{131}I と同時に放出された ^{129}I (半減期 1,570 万年) を指標にして、 ^{131}I の沈着量の復元を試みた。 ^{129}I 濃度は非常に低いため、土壌からヨウ素を化学分離し、AMS (加速器質量分析法) を用い測定した。 ^{131}I が検出されている土壌について、 ^{129}I と ^{131}I 濃度の関係 ($^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比) を調べたところ良い相関 ($R^2=0.84$) が見られた。このことは、 ^{129}I を測定することにより、事故で放出された ^{131}I を推定できることを意味する。そこで本研究では、土壌試料中の ^{129}I 濃度の測定を進め放射性ヨウ素の広がりや沈着量を復元し、この手法の有効性が確認できた。また本研究で得られる、 ^{131}I の再構築データ (学習院大) は、大気拡散シミュレーション (JAEA) の検討データとして活用が期待できる。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) の参考データとして有効活用が期待される。

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

研究協力者

松崎浩之 (東京大学・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 試料の土壌試料が採取された (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。殆ど全部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、試料採取時点では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、放射性ヨウ素の土壌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ため、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。土壌中のヨウ素 129 とヨウ素 131 濃度の関係を調べたところ両者には良い相関が見られた。その結果から、ヨウ素 129 を測定することにより、減衰してしまったヨウ素 131 の濃度を推定できることが示唆された。これまで約 400 地点で分析結果が得られ、ヨウ素 131 の土壌中濃度を推定し、各地におけるヨウ素 131 沈着量を再構築した。文部科学省の調査で直接測定できた約 421 地点におけるヨウ素 131 の値と合わせ、合計約 800 地点についてのデータが得られた。これらの値を基にヨウ素 131 沈着量 (Bq/m²) のマップを作成しつつある。本研究では、これまでの研究でデータがあまり得られていない地域に分析領域を拡大するなどしてヨウ素 129 の分析を行い、ヨウ素 131 沈着量の再構築データの拡充を目指しヨウ素 131 沈着量マップの精緻化を図ることを目的としている。放射性ヨウ素の沈着量に関するマップを作成できれば、放射性ヨウ素の大気拡散や環境移行モデルの妥当性などを検証するための実データとしての活用が期待される。放射性ヨウ素のマップ作りは、チェルノブイリにおいてもなし得なかったことであり、これがうまく機能すれば、我が国独自の取り組みとして評価されるであろう。

また本研究では、日常食中の安定ヨウ素の分析も行なう予定である。陰膳法などで集めた日常食中の安定ヨウ素量を測定することにより、食品から採取されるヨウ素量を見積もる予定である。安定ヨウ素の摂取量は甲状腺の被ばく線量の評価にも関係することから重要な知見となる。また、食品中の安定ヨウ素のデータは非常に少ないので、分析データを増やすことは、甲状腺の被ばく線量評価にも貢献できる。

II 研究方法

これまでの研究において、土壌中の ¹²⁹I を分析し、¹³¹I の沈着量に関するデータを得るための研究手法の開発に目処が立っている。本研究では予定している分析試料数 (3 年間合計) は約 240 試料 (年平均 80 試料) である。分析には手間と時間がかかるが、順調に行けば更に分析数を増やすことを試みる。本研究で重点を置く地域は、放射性ヨウ素の分析データが少ない地点、¹³¹I/¹³⁷Cs 比が高かった福島第 1 原子力発電所の南側の地域 (いわき市、北茨城市やその周辺)。プルームが流れた北西方向についてもデータを増やしていく予定である。また、事故前に降下した ¹²⁹I のブランク値 (核実験フォールアウト起源や再処理起源の ¹²⁹I も調べ、分析データの精度を高める。

具体的な研究の流れ及び方法は以下の通りである。

(1) 土壌試料とその調整

土壌試料は平成 23 年 6 月に採取された土壌試料からまだ測定されていない箇所よりヨウ素 129 を分析した。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砕し、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た。試料をのせた燃焼ポートを石英管に入れ、水蒸気を含んだ酸素気流を流した。電気管状炉（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(0.6%)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⁾。

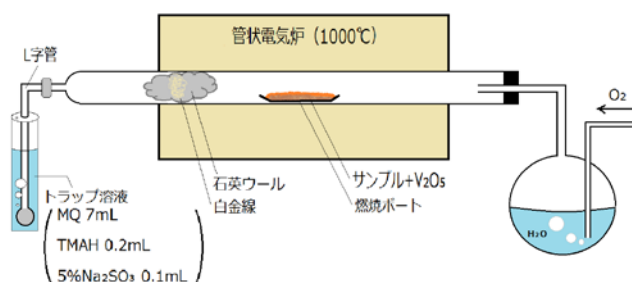


図1. 加熱気化法を用いたヨウ素回収法

(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、学習院大において ICP-MS (Agilent 8800) により、ヨウ素 127 (安定ヨウ素) を測定し、土壤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、東京大学の AMS(加速器質量分析器) により、¹²⁹I/¹²⁷I 比を測定した。AMS の測定条件などは、Matsuzaki et al.(2007)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/m²)は以下の手順で求めた。AMS で得られた試料中の ¹²⁹I/¹²⁷I 比と ICP-MS で測定したヨウ素 127 の濃度より、試料中のヨウ素 129 濃度を (Bq/kg) を求め、濃度の値よりヨウ素 129 の沈着量(Bq/m²)を算出、沈着量に I-131/I-129 比を掛けヨウ素 131 の沈着量(Bq/m²)を算出した。沈着量の換算には I-131/I-129 比はこれまでの研究で得られた値 (9368) を用いた。ヨウ素 131 のマップを作成するにあたっては、平成 23 年 6 月 14 日時点で半減期を考慮して放射能濃度を補正した。

(4) 食品中の安定ヨウ素の量

食品中の安定ヨウ素の量は、甲状腺の被ばく線量の評価にも関係することから、安定ヨウ素の分析も行う。特に、陰膳法などで集めた日常食中の安定ヨウ素の分析は有効であると考え。本研究では、福島県立医大と協力し、陰膳法で採取された日常食中の安定ヨウ素の分析前処理、及び、ICP 質量分析法を用いたヨウ素濃度測定を行なった。

(倫理面への配慮)

本研究は、土壤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

今年度は土壌を含む環境試料中の試料前処理、ヨウ素の抽出、AMS によるヨウ素 129 の分析、ICP-MS による安定ヨウ素の分析を行なった。それらの結果を基に土壌中ヨウ素 129 の沈着量を求め、ヨウ素 131 沈着量の推定を行ない、ヨウ素 131 沈着量マップの精緻化を進めた。

まず、図 2 に文部科学省第 1 次分布調査で検出できたセシウム 137・ヨウ素 131 のマップを示す。セシウム 137 がほとんどの地点で検出されているのに対し、ヨウ素 131 が検出された地点は、試料採取が行われた 2,200 地点のうち 421 地点のデータのみであり、それ以外の地点ではヨウ素

131 は検出されていない。

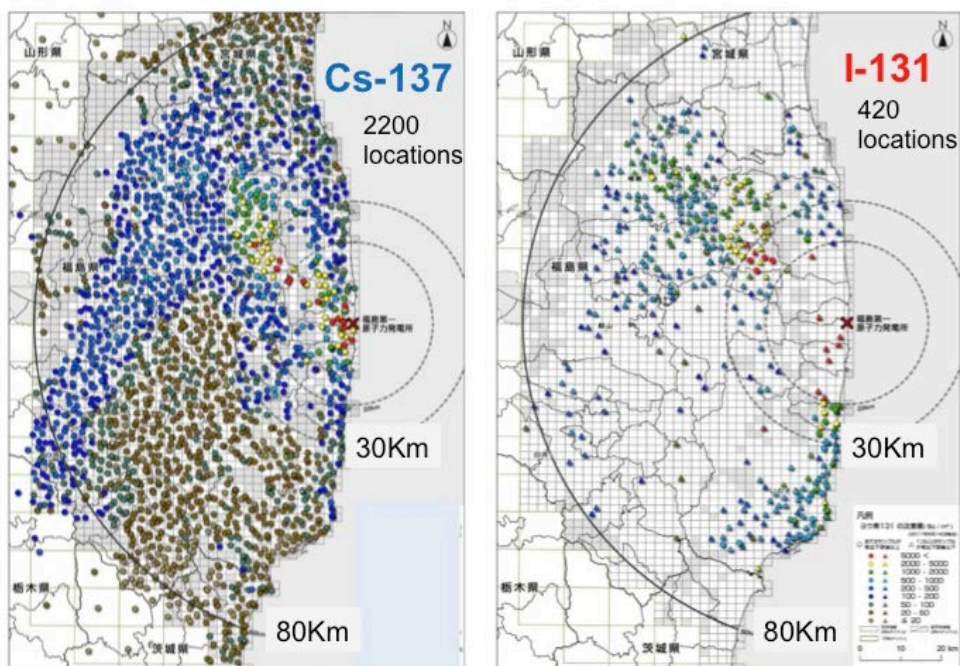


図2. 文部科学省第1次分布調査で得られた ^{137}Cs ・ ^{131}I 沈着量(Bq/m^2)のマップ¹⁾

本研究では、文科省の調査でヨウ素 131 濃度が検出された試料についてヨウ素 129 濃度を調べた。この結果とヨウ素 131 濃度の関係を調べたところ両者には良い相関が見られた(図3)。これにより、ヨウ素 129 を測定することで、減衰してしまったヨウ素 131 の濃度を推定できることが確認された。

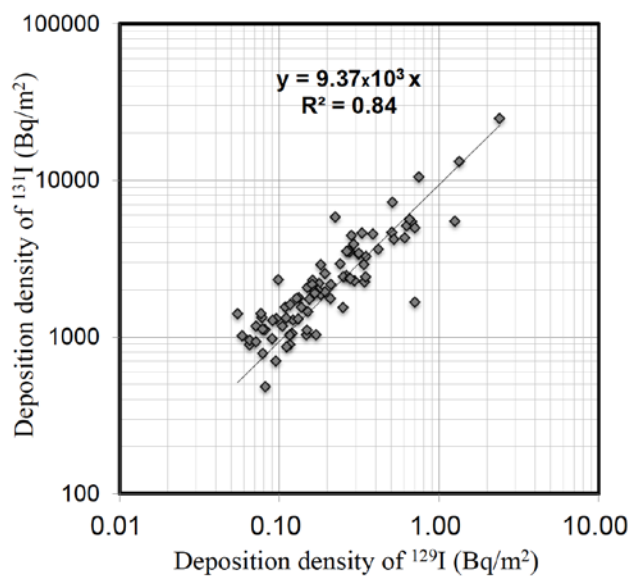


図3. 土壌中ヨウ素 129 とヨウ素 131 の相関性⁴⁾

土壌中のヨウ素 129 分析から得られたヨウ素 131 沈着量(Bq/m^2)を再構築した結果を図 4 に示す。これまで約 400 地点で分析結果が得られ、ヨウ素 131 の土壌中濃度を推定し、各地におけるヨウ素 131 沈着量を再構築した。これまでに得られた値と、文部科学省の調査で直接測定できた約 421 地点におけるヨウ素 131 の値と合わせ、合計約 800 地点についてのデータが得られたことになる。

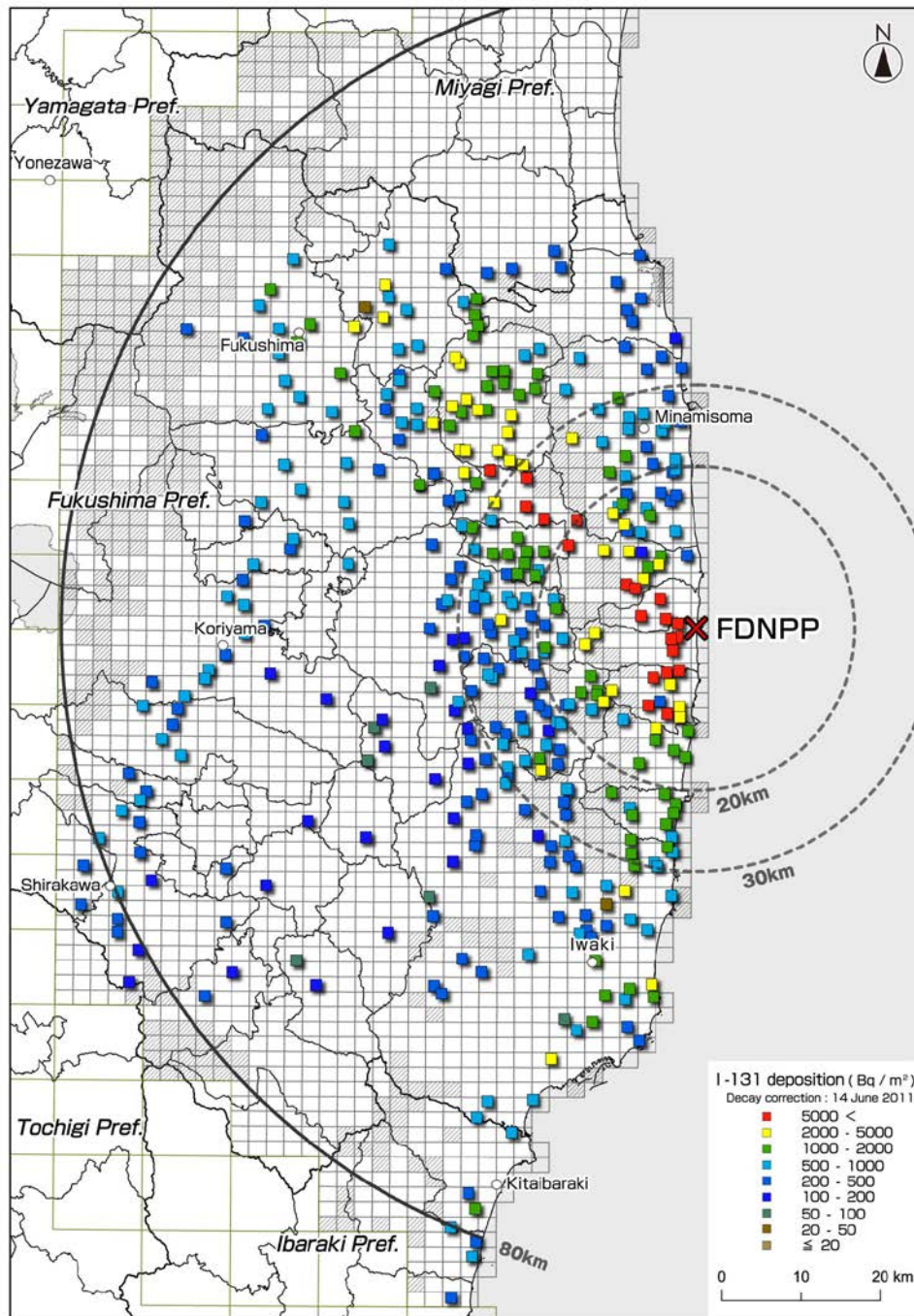


図 4. ヨウ素 129 分析から得られたヨウ素 131 沈着量(Bq/m^2)のマップ⁴⁾

食品中の安定ヨウ素量については標準試料を用いた分析法の検討を行なった。安定ヨウ素についても加熱気化法の有効性を確認できた。福島県立医大と協力し、陰膳法で採取された日常食中の安定ヨウ素量の測定を行なったところ 5 試料の平均で $1 \text{ mg}/\text{day}$ の値が得られた。

IV 考察

文部科学省の第1次分布状況調査ではヨウ素 131 が検出された地点は、試料採取が行われた2,200 地点のうち421 地点のデータのみであり、それ以外の地点ではヨウ素 131 は検出されていない。これは、日数が経過し減衰したためと考えられる。また、放射性セシウム濃度が高いためスペクトルのバックグラウンドが上がった事も原因している。なお、5 試料全部が検出されている地点は41 地点のみである。また、1 点しか検出されていないものは185 地点ある。これらの数字を見ても、ヨウ素 131 のデータ数は少なく、再現性も充分でない可能性がある。また、Ge 半導体検出器による計数誤差が20%を超えている試料は少なくなかった。一方、AMSによるヨウ素 129 の分析の測定誤差はおおむね5%前後であり、精度良い測定ができていると考えている。図4にヨウ素 129 分析から得られたヨウ素 131 沈着量(Bq/m^2)をマップにしたものを示す。これらは、この図から分かるように30km 圏を含め、図2でデータがなかった多くの地点についてヨウ素 131 沈着量を推定できた。文部科学省の第1次分布状況等調査(平成23年6月)で採取した土壌試料を有効に利用し、それらに含まれるヨウ素 129 を分析することで、各地点におけるヨウ素 131 の沈着量(Bq/m^2)を再構築することができた。ヨウ素 129 の分析は現在も継続中であり、この3年間で、更に240 試料程度の分析データが得られる見込みである。

食品中の安定ヨウ素量については標準試料を用いた分析法の検討により食品中安定ヨウ素についても加熱気化法の有効性を確認することができた。陰膳法で採取された日常食中の安定ヨウ素量の測定を行なったところ平均で1 mg/day の値が得られ、安定ヨウ素摂取量が比較的高いことを示す結果が得られた。

V 結論

本研究で得られた結果より、ヨウ素 129 沈着量から放射性ヨウ素の初期における各地点の沈着量を再構築でき、ヨウ素 131 沈着量のマップを精緻化することに繋がること示された。また、本研究で得られた成果は放射性ヨウ素の大気拡散や環境移行モデルの妥当性などを検証する実データとして活用できる。更に、放射性ヨウ素による被ばく線量を評価する上でも重要なデータになると考えられる。なお、チェルノブイリにおいてもヨウ素 131 のマップは作られておらず、甲状腺被ばく線量の評価が十分にできていないため、甲状腺癌の増加と線量との関係を検証できない。福島県では子供たちの甲状腺の検査が進められており、放射性ヨウ素に起因する被ばく線量評価が特に重要である。

VI 次年度以降の計画

来年度は、福島県内の放射性ヨウ素のデータが少ない地域における分析数をさらに増やし、マップの精緻化を進める。更に、深度分布なども調べ、ヨウ素 129 の土壌中への浸透や森林などからの流出についても検討課題とする。また、日常食中の安定ヨウ素量の測定数を増やし、安定ヨウ素摂取量の分布を調べる。

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.

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) Matsuzaki H Muramatsu Y Kato K et al. Development of ^{129}I -AMS system at MALT and measurements of ^{129}I concentrations in several Japanese soils, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* 2007; 259: 721-726.
- 4) 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.

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

Yasuyuki Muramatsu

Faculty of Sciences, Gakushuin University

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

Abstract

Iodine-131 is one of the most critical radionuclides to be monitored after release from reactor accidents due to the tendency for this nuclide to accumulate in the human thyroid gland. However, there are not enough data related to the reactor accident in Fukushima, Japan to provide regional information on the deposition of this short-lived nuclide (half-life = 8.02 d). 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) and ICP-MS for surface soil samples collected at various locations in Fukushima Prefecture. In order to obtain information on the $^{131}\text{I}/^{129}\text{I}$ ratio released from the accident, we have determined ^{129}I concentrations in about 80 soil samples in which ^{131}I concentrations were previously determined. There was a strong correlation ($R^2=0.84$) between the two nuclides, suggesting that the ^{131}I levels in soil samples following the accident can be estimated through the analysis of ^{129}I . In order to construct a deposition map of ^{131}I , we determined the ^{129}I concentrations (Bq/kg) in about 400 soil samples collected from different locations in Fukushima Prefecture and the deposition densities (Bq/m²) of ^{131}I were reconstructed from the results.

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

種々曝露シナリオに基づいて、日本人における放射性ヨウ素の甲状腺集積率を推定する方法論を構築することを目的とした。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を示した。加齢に関して、小児は成人と同程度の集積率であるが、新生児では高い値を示し、甲状腺移行速度に関して加齢に伴う変動を考慮する必要がある。放射性ヨウ素の血中濃度は2-コンパートメントモデルで説明することができ、甲状腺蓄積率の時間推移を説明することができる速度論パラメータを決定することができた。本モデルならびにパラメータを利用することで、曝露シナリオに基づいた体内動態シミュレーションが可能である。

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

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背ヨウ素の実測値と、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、放射性ヨウ素の甲状腺集積率をキーワードとして、文献収集を行った。小児の放射性ヨウ素甲状腺集積率に関する文献収集を行った。

②甲状腺移行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、最小二乗法により、速度論パラメータの最適化を実施した。解析には、Napp¹⁾を利用した。

（倫理面への配慮）

臨床データは、文献また平成25年度に実施した¹²⁵I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。

III 研究結果

①日本人甲状腺移行率の文献収集

甲状腺機能が正常な健常人（男女を含む300名）において、24時間までの甲状腺蓄積率に関する情報を得た²⁻⁷⁾。1972年までのデータをまとめると、15-25%に全体の7割が含まれる。35~45%程度の高い値を示す被験者も、20%（60名程度）程度認められた。これに対して、我々が実測した甲状腺集積率は20%以下に全体の75%の被験者が含まれており、過去の報告に比較して低い値を示す。また、2011~2012年に関東で実施された臨床試験のデータは論文未発表であるものの、研究者より実測値の提供を受けた^{8,9)}。その平均値と分散は、我々の試験結果とほぼ一致していた。

米国での報告値と比較すると、1949年以降報告によっては、平均値は35%超と高い値を示す報告もあったが、日本人と同定度の20%程度の報告も複数認められた。

乳幼児における甲状腺集積率に関する文献情報の収集を行った。欧米の試験では、生後数時間からの¹³¹Iの甲状腺集積率が測定されていた。生後100時間までは甲状腺集積率は高い値を示し（35~101%）、それ以後は、24時間までの集積率に関して、成人と同等の集積率であった。また、同一被験者で、出生後の2時点で、甲状腺集積率が測定された事例があり、時間の経過に伴う甲状腺への¹³¹I集積率の低下が認められた。血液中から甲状腺への移行に関する速度定数（K1）に関して、時間の経過に伴い減少が認められた。同一被験者（出生後100時間以降）での報告ではないものの、静脈内投与と経口投与時の甲状腺集積率はほぼ同定度の値を示した。

②甲状腺移行率に関するモデル解析

血液中ヨウ素濃度の時間推移は、2相性を示したことから、2-コンパートメントモデルを用いて当てはめ計算を行った。5例の解析が終了し、中心コンパートメントとほぼ同等の分布容積を示す容積をおくことで、血中動態を説明できることが明らかとなった。中心コンパートメントの容積はほぼ細胞外容積に相当する。さらに、中心コンパートメントから、尿中への排泄ならびに甲状腺移行のクリアランスを置くことで、甲状腺集積率の時間推移を説明するパラメータを得た。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。

IV 考察

甲状腺機能が健常な日本人において、24時間までの甲状腺集積率は低いことを改めて確認した。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、比較しても低い数字を示した。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。一方で、米国人に関する調査も平行して行ったが、米国人においてもいくつかの測定データを除くと、1949年以降概ね20%程度の集積率を示しており、日本人のデータとほぼ一致する。このことは米国での測定結果を、日本人の解析に採用しても大きな誤差が生じる可能性は小さいものと考えられる。

加齢に関する情報収集を行った結果、欧米人のデータであるものの、生後4日以降は、成人男性と同程度の24時間後甲状腺集積率であるものの、出生後からこの期間までは高い集積率（35-101%）を示した¹⁰⁻¹²。新生児において、経口ならびに静脈内投与時の甲状腺集積率がほぼ同様に値を示したことから、経口での吸収性も高いものと推定される。日本人乳幼児のデータはまだ見つけられていないが、小児（10歳以上）においてはほぼ成人と同様の甲状腺集積率であった¹³。甲状腺集積率は、血液中から甲状腺への移行速度だけではなく、主排泄臓器である腎機能の加齢に伴う影響を受ける。そのため、血液中の放射性ヨウ素の滞留性は年齢により異なる可能性を有しており、24時間以降も更に蓄積が持続する可能性も否定できない。この点については、腎機能に関する加齢の影響も織り込んだモデル解析を実施することで、さらに検討したい。

モデル解析の結果、¹²³Iの血中動態は2-コンパートメントモデルに従う。中心コンパートメントはほぼ細胞外容積に一致し、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。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ており、本モデルを利用することで、曝露シナリオに従った甲状腺集積率を推定することが可能である。新生児における解析においても、分布容積は体重の40%程度に達することから、細胞外液スペースだけではなく、分布に関するコンパートメントを置く必要があると考えられる。血液中濃度の時間推移も、成人同様2-コンパートメントモデルに従うものと考えられる。

V 結論

通常の食生活における日本人甲状腺集積率は、長崎・関東の2地点において、過去の日本人における甲状腺集積率よりも低い値を示した。米国での測定結果と集積率は同程度であり、米国人の臨床データも可能な限り採用することとした。甲状腺集積率は生後100時間までは顕著に高く、以後経時的に減少する。日本人小児においても、少なくとも24時間までの甲状腺集積率に関しては、成人と同程度であった。放射性ヨウ素の血中濃度の時間推移は2-コンパートメントモデルにより説明することができ、尿中排泄ならびに甲状腺移行に関する速度論パラメータを決定する方法論を構築し、実測値を説明することができるパラメータを得ることができた。本モデルならびにパラメータを利用することで、曝露シナリオに基づいた体内動態シミュレーションが可能である。

VI 次年度以降の計画

本年度構築した血液中ならびに甲状腺移行に関する数理モデルを発展させるため、甲状腺移行に関する非線形性に関する文献情報を収集し、妥当な数理モデルを構築する。また、小児におけ

る甲状腺移行率を評価するため、主に腎機能に関する文献情報を収集し、加齢に伴う変動を評価する。経肺投与時の体内への吸収率を測定するため、ラットなど実験動物において、¹²⁵I 水溶液をエアロゾルとして投与する手法を確立し、投与後の甲状腺集積率を比較することで、肺からの吸収率を推定する。

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我々の実測値だけではなく、複数の報告から、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。また、放射性ヨウ素の血中動態ならびに甲状腺集積率に関して、時間推移を説明する数理モデルならびにパラメータ決定法を構築した。本モデルを用いることで、放射性ヨウ素の曝露シナリオに従って、甲状腺集積率を推定することが可能である。また、12月に開催された平成26年度原子力災害影響調査等事業発表会において、小児に関するモデル構築ならびに、実験動物において肺からの吸収率を測定する要請をいただいたことから、乳幼児・新生児における甲状腺集積率ならびにラットにおける経肺投与法に関する情報収集を行った。

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) 飯野史郎, 松田邦夫, 石井淳, 他. 海藻類摂食の甲状腺 I131 摂取率に及ぼす影響. *日本内分泌学会雑誌* 1958; 34: 58-61
- 3) 広野穰. 放射性ヨウ素による甲状腺機能検査に関する研究. *信州医学雑誌.* 1959; 8: 191-205
- 4) 藤田順一, 鳥取広治, 吉川元之. 最近 1 ヶ年間の甲状腺摂取率測定の集計. *医療.* 1960; 16:137-141
- 5) 中村良文. 甲状腺 ³¹¹I 摂取率検査成績. *島根医学.* 1966; 3: 619-624.
- 6) 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;27:638-647.
- 7) 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.
- 8) 國井葉, 吉村弘, 向笠浩司, 他. 健常日本人の甲状腺ヨード摂取率と無機ヨード 10mg 単回投与の甲状腺摂取率に対する効果の検討. *日本内分泌学会雑誌* 2011; 87: 517.
- 9) 國井葉, 吉村弘, 向笠浩司, 他. 健常日本人の甲状腺摂取率に対する 2 週間無機ヨウ素投与の効果. *日本内分泌学会雑誌* 2012; 88: 526.
- 10) Martmer EE Corrigan KE Charbeneau HP et al. A study of the uptake of iodine (I-131) by the thyroid of premature infants, *Pediatrics* 1956; 17: 503-509.
- 11) Ogborn RE Waggenger RE Vanhove E. Radioactive-iodine concentration in thyroid glands of newborn infants, *Pediatrics* 1960; 26: 771-776.
- 12) Fisher DA Oddie TH Burroughs JC. Thyroidal radioiodine uptake rate measurement in infants. *Am J Dis Child* 1962; 103: 738-749.
- 13) 木下文雄, 前川全, 安田三弥, 他. 正常者および核種甲状腺疾患の ¹³¹I-甲状腺摂取率の再検討. *Radioisotopes.* 1966; 15:359-369

Prediction of blood disposition and thyroid accumulation of radioiodine

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. The mean value of thyroid accumulation of radioiodide in Japanese in recent years was about 15%. This value was slightly lower than the previously reported values in Japan after 1958 and the values reported from the United States. The thyroid accumulation of radioiodide in 24 hours was similar in children and adults, whereas accumulation was clearly higher in neonates than in children and adults. This finding suggests an effect of age on the thyroid transfer rate from the blood compartment and that the urinary excretion rate should be considered when predicting thyroid accumulation of radioiodide in neonates. The blood concentration of radioiodide in Japanese people can be described by a 2-compartment model. The kinetic parameters that explain the time profiles of thyroid accumulation and blood concentration of radioiodide can be determined using this model. This model allows the pharmacokinetic simulation of the exposure to radioiodide in Japanese people according to various scenarios.

4. 今後の事業への提言

東京電力福島第一原子力発電所事故後、福島県の行う県民健康調査をはじめとした健康調査や、様々な健康不安への対応が行われてきた。事故後4年経ったが、今もなお放射線に不安を感じている方、避難生活を余儀なくされている方がおり、放射線の人体影響の解明、被災者の健康不安対策等に資する研究調査は、継続的に実施していく必要がある。

本年度の事業を実施する中で、本事業を研究者・国民にとってさらに良くしていく観点から、今後の課題として以下のように提言を取りまとめた。

○事務委任契約締結に関する事項について

事務委任契約締結及び研究費支払いのためには、研究計画書を委員からのコメント（継続課題の場合は前年度の評価委員会・推進委員会、新規課題の場合は採択時の推進委員会からのコメント）に対応して確定させる必要がある。例年はこのコメント対応に時間がかかっているが、コメントを要領よく正確に伝えることができれば、研究者が対応に要する時間も短くできると思われる。コメントのまとめ方・伝え方をさらに検討し、事務手続きに要する時間を短縮し、研究に使える時間をできるだけ確保するべきである。

○研究の内容に関する事項について

本事業で実施している研究のうち、生物影響に関して、特に低線量放射線の影響は成果が出にくく、現場の対応に結びつけることは難しい。また、保健師等による健康不安対策等の研究調査は、現場に介入して実施されているものの、得られたものを研究の成果としてまとめることは難しい。これらのような課題も踏まえつつ研究を実施していくべきである。

○研究の進捗管理に関する事項について

本事業では、当該年度の研究開始時に、計画書への委員からのコメント対応について委員の確認を得た後は、12月頃の研究成果発表会まで委員等が進捗を確認する機会がないため、何らかの形で進捗を確認する機会を設けることが望ましい。例えば、使用した消耗品・旅費等の経費について定期的に証憑の確認を行うなどすることにより、動きの少ない研究について状況の確認などをすることができるとと思われる。