

労災疾病臨床研究事業費補助金

多様な被ばく状況に適用可能な迅速線量評価手法の開発
に関する研究

平成27年度～29年度

総合研究報告書

研究代表者 栗原 治

平成30（2018）年 3月

目次

I. 総合研究報告

多様な被ばく状況に適用可能な迅速線量評価手法の開発 栗原 治（量子科学技術研究開発機構）	3
---	---

II. 研究成果の刊行に関する一覧表	96
--------------------	----

労災疾病臨床研究事業費補助金
総合研究報告書

多様な被ばく状況に適用可能な迅速線量評価手法の開発

研究代表者 栗原 治

研究要旨

高線量被ばくが想定される様々な放射線被ばく事故条件において、多くの被災者の中から緊急被ばく医療の対象となる者を迅速に識別し、その線量を評価する手法を開発・整備することを目的に、以下の研究を実施した。

1) 臨界事故時の線量評価に関する研究

核燃料施設において最も発生する可能性の高い溶液系臨界事故について、予想される第1スパイクの核分裂数と被ばく線量の関係を、核分裂数の簡易推定式とモンテカルロ計算シミュレーションの併用によって算出し、溶液の体積だけから被ばく線量を算出する簡易式を構築した。体内中に生成される ^{24}Na 等放射能と、それらから放出される γ 線による体表面での γ 線1cm線量当量率の関係を明らかにした。これによって、たとえばNaI(Tl)シンチレーション式線量当量率サーベイメータを用いる体表面測定によって高線量被ばく者を容易に識別することが可能である。さらに、代表的な個人線量計及び毛髪の放射化(^{32}P)について、計算シミュレーションによってそのレスポンスを中性子エネルギー及び入射角度の関数として求め、計140個の臨界事故時想定スペクトルに対して数値表としてとりまとめた。

2) アクチノイド核種等による内部被ばく線量評価に関する研究

アクチノイド核種等による内部被ばく事故の際、生体試料（主として排泄物）を用いたバイオアッセイ法による対象者の選別（トリアージ）及び線量評価手法の開発のために、試料回収が容易な尿を用いたバイオアッセイについて、最も時間を要する分析工程となる前処理の高速化を図るため、共沈法（リン酸共沈、シュウ酸共沈、鉄共沈）及び有機物分解装置を用いる方法を試験し、最適な分析条件を探索した。その結果、リン酸塩またはシュウ酸塩を用いた共沈法により、前処理にかかる時間（約28時間）を従来法にかかる時間（約28時間）より約18時間まで短縮できた。しかしながら、この場合、尿中のU、Pu及びAmの回収率が、共沈剤の種類によっては、70%以下である場合もあった。そこで、鉄共沈剤を用いた前処理法の検討で、尿試料の前処理にかかる時間を約15時間まで短縮することができた。さらに、本手法によるU、Pu及びAm成分に対する回収率はそれぞれ75%、85%及び80%まで担保できる鉄共沈法を確認して、この結果からU、Pu及びAmともに既存の測定技術の典型的な検出限界値1 mBq/liter（1日測定）を担保できることを確認した。尿試料を用いた鉄共沈法の検証は尿中の未知核種評価する国際相互比較プログラム（PROCORAD）へ参加し、尿中に含まれている ^{238}Pu ,

^{241}Am 及び ^{244}Cm の定性及びその放射能の評価結果から本手法の妥当性を確認した。本研究で確認した鉄共沈法によるバイオアッセイ法はマニュアルで作成した。また、測定法の最適化では誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)による前処理前の尿試料中の U 成分に対する検量線の作成及び検出下限値を算出し ICP-MS による測定法の有効性を確認した。本研究で確立した鉄共沈法によるバイオアッセイ法、 γ (X)線スペクトロメータ及び誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)による計測法は 2017 年 6 月 6 日に起きた原子力機構大洗の Pu 内部被ばく事故時、内部被ばく線量評価用分析法として用いられた。また、アクチノイド核種と同様に迅速な分析が求められるベータ線放出核種である放射性ストロンチウム (ストロンチウム-89, 90) を対象とした分析法及び測定法を検討した。その結果、150~300 mL の尿を供試量として検討し、ストロンチウム担体の添加なしに 2 日程度で分析が可能であること及びストロンチウムの回収率は、60~70% 程度であることを確認し。さらに、安定ストロンチウムを添加しないことで、測定法として誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) を適用した際に問題となる安定ストロンチウムからの干渉を、従来の方法よりも低減できる可能性のあることを確認した。

3) 皮膚汚染時における線量評価に関する研究

国内で広く使用されている GM 計数管式表面汚染サーベイメータ及び電離箱式線量当量率サーベイメータについて、線源サイズ別に、指示値と皮膚線量率の関係を評価し、特に高レベル汚染の場合、電離箱式サーベイメータによる皮膚汚染測定が有効であることを示した。また、これまでに国内外で使用されてきた表面密度-皮膚線量率換算係数を一覧表として整理し、出典による違いについて分析するとともに、代表的な 281 核種について計算コード VARSKIN 6.0 を用いて換算係数の検証計算を行った。

研究分担者

量子科学技術研究開発機構：

金 ウンジュ 主任研究員

矢島 千秋 主任研究員

谷 幸太郎 研究員

日本原子力研究開発機構：

辻村 憲雄 主任研究員

藤田 博喜 マネジャー

永岡 美佳 技術員

横山 裕也 技術員

吉田 忠義 技術副主幹

星 勝也 技術員

A. 研究目的

本研究の目的は、高線量被ばくが想定される様々な放射線被ばく事故に際し、多くの被災者の中から緊急被ばく医療の対象となる者を迅速に選別し、その線量を評価する手法を開発・整備し、その成果を広く展開することである。

研究協力者

量子科学技術研究開発機構：

大野 雅子 研究員

日本原子力研究開発機構：

背景

臨界事故時における高線量被ばく者の選別及び当該被ばく者の線量評価は、個人線量計や放射化生成物 (体内中 ^{24}Na , 毛髪中

^{32}P 等) の測定に一般に基づく[臨 1]。このうち、選別(スクリーニング)は、個人線量計等にあらかじめ備え付けておいた放射化箔の測定によって通常行われる。しかしながら、こうした備えがない場合、あるいは個人線量計そのものを携帯していない場合、高線量被ばくを受けた者のスクリーニングは容易ではない。例えば、1999年の東海村 JCO 臨界事故では、全身カウンタ(WBC)による体内中 ^{24}Na 放射能の測定によって被ばく者を識別(と線量評価)したという実例[臨 2]はあれども、大人数のスクリーニングには WBC は明らかに不向きであり、より簡便かつ実用的な識別手段を確立しておくことが望ましい。また、そうしたスクリーニング測定による線量見積もりとは別に、事故の状況などから線量がどの程度になるかを見積もることは、今後の緊急対応計画を現場で策定したり、そうした事態に対する対応訓練を実効性のより高いものにしたるための情報として有用である。これまでに国内外の核燃料施設で発生した臨界事故計 22 件のうち 21 件が溶液系臨界事故(JCO 事故もこれに含まれる)であり[臨 3]、日本原子力研究開発機構(JAEA)の東海再処理施設での臨界事故の想定も溶液系であることから、このような溶液系臨界事故について、事故の規模及び被ばく線量を簡便に推定するための方法も必要である。さらに、スクリーニング測定に続いて行われる線量評価では、個人線量計の指示値や放射化生成物の量を、吸収線量に変換する係数が必要になる。こうした換算係数は、原子炉を利用する照射実験等によってこれまで決定されてきた。例えば、原子力機構核燃料サイクル工学研究所では、1980年代に日本原子力研究所(当時)の NSRR、2000年代にフランス原子力庁の SILENE 並びに原子力機構の TRACY といった原子炉で照射実験

を行った。しかしながら、近年、これらの原子炉(特に SILENE 等の液体燃料を用いるパルス炉)が相次いで閉鎖されるなど、臨界事故時の線量評価を研究の目的とした原子炉のアベイラビリティは、国内外を問わず急速に失われつつある。このため、原子炉に替わる照射実験手段を確保しておく必要がある。加えて、換算係数は、中性子スペクトル依存、すなわち臨界事故が発生した装置の構造や周囲の遮へいによって変化するため、その依存の程度を、計算シミュレーション等によって、あらかじめ一覧表等に整理しておくことは、迅速対応の観点でも必須と言える。

アクチノイド核種等による内部被ばく線量評価にあっては、被検者から採取された生体試料(主として排泄物)中に含まれる放射性核種を定量する方法であり、 α/β 放出核種の定量に利用される。一般的に、生体試料中のアクチノイド核種(その多くが α 放出核種)を対象としたバイオアッセイ法は、最初に生体試料中に含まれる不純物(有機物成分)を分解する前処理、次に測定対象核種を精製するための核種分離、そして放射能測定 of 三段階で行われる。尿試料の前処理には強酸化剤による湿式灰化法が一般的に使われてきたが、この方法で尿試料 500 ml をバイオアッセイするのに要する時間が 40~50 時間を要しており、その大半が前処理に要する時間(通常、28 時間)となる。そこで本研究では、前処理の時間短縮を図るために、尿試料中の対象核種を選択的に沈殿させて回収する沈殿法を試験し、最適な条件を探索した。

放射性物質による皮膚汚染時における線量の評価は、汚染箇所の単位面積当たりの放射能(表面密度)を測定によって評価し、その値に、核種によって決まる換算係数(Sv/h(又は Gy/h) per Bq/cm²)を乗じて線

量率とし、さらに汚染物質の付着時間及び着衣の有無等による遮へいを考慮して行う。この手順は、一見してほぼ完成しているように見えるが、必ずしも単純ではない場合がある。例えば、1979年3月に起こった米国スリーマイル島原子力発電所事故において、汚染水（一次冷却水）による作業者の手首の被ばく（皮膚線量で当時の連邦限度である18.75 rem/四半期を超える約50 rem（約500 mSv））[皮1]が発生した。この事例では、汚染レベルが、通常の表面汚染サーベイメータ（パンケーキ形GM計数管式）の計数可能レンジを超えるものであったため、代わりに照射線量率サーベイメータ（側窓GM計数管式）が測定に使用され、汚染部位の表面で観測されたその指示値（115 mR/h）は、汚染と同程度の面積（直径5～10 cm）を有する模擬線源での校正に基づき、55 μ Ci（約2 MBq）の放射能として評価された。また、汚染はその場で容易に除染できなかったため、除染後も測定を行い、観測されたそのカーブを時間積分することによって線量評価が行われた。また、同発電所では、同年8月にも下肢のスポット汚染があり、皮膚線量で約50 remの被ばくと報告された[皮2]。これについては具体的な線量評価の方法は報告されていないが、上述した手首の汚染と同様に、測定に使用した照射線量率サーベイメータを再校正するなどの対応をしたと推測される。これらの事例に類する汚染トラブルは、福島第一原子力発電所の復旧作業現場においても今後生じる可能性があると予想される。こうした事態に迅速に対応するには、汚染の程度に応じたサーベイメータの機種選択（表面汚染測定用を使うか、あるいは線量率測定用を使うか）が必要であり、また、選択したその機種と汚染のサイズの組み合わせ毎に、指示値との関係[皮3]をあらかじめ評価してお

くことが望ましい。さらに、このとき使用する換算係数（もっぱら計算によって評価されている）について、非常に多くの数値データが存在し、我が国では公益財団法人原子力安全技術センター発行の「被ばく線量の測定・評価マニュアル」[皮4]に収録されたものが広く利用されている。しかしながら、これらの異なる出典からの換算係数は必ずしも同じ値ではなく、いずれの出典に準拠したかによって線量評価結果が変わるという現在の状況は、評価手順を標準化する上で好ましいとは言えない。そこで、これら異なる出典の換算係数を同じ単位で一覧表としてとりまとめ、それらの間の相違を精査しておくことは、事故対応準備の一環として欠くことのできないものである。

B. 研究方法

研究は、(1) 臨界事故時における線量評価に関する研究、(2) アクチニド核種等による内部被ばく線量評価に関する研究、及び(3) 皮膚汚染時における線量評価に関する研究の三つからなる。それぞれの研究方法を以下に示す。

1) 臨界事故時における線量評価に関する研究の方法

(1) 体表面の γ 線1cm線量当量率に基づくスクリーニング

中性子曝露によって体内に生成される ^{24}Na 等が γ 線放出核種であることに着目し、それによる体表面の γ 線1cm線量当量率を一般的な線量当量率サーベイメータで観測することによって、被測定者が高線量被ばくを受けたかどうかを識別する方法を検討する。

① 水槽形ファントムでの実験と計算

体幹部を模擬する水槽形ファントム（高さ300 mm × 幅300 mm × 奥行150 mm）

に塩化ナトリウム水溶液を入れ、公称放射能 1 GBq の ^{252}Cf 中性子線源（中性子放出率： 1.19×10^8 n/s）を用いて、線源中心ファントム表面間距離 75 mm で 3.0 時間の中性子照射を行い、塩化ナトリウム水溶液中に $^{23}\text{Na}(n,\gamma)$ 及び $^{37}\text{Cl}(n,\gamma)$ 反応によりそれぞれ ^{24}Na 及び ^{38}Cl を生成させる。ここで使用する塩化ナトリウム水溶液は、塩化ナトリウム 1,011 g を内容積 10,780 cm^3 のファントムに入れ、蒸留水 10,500 cm^3 で満杯にしたものである。照射終了後、ファントム表面（300×300 mm^2 の面）中央で ^{24}Na 及び ^{38}Cl の γ 線による 1cm 線量当量率を、国内で広く使用されている日立アロカメディカル製 TCS-172B 線量当量率サーベイメータ（25.4 mm 径×25.4 mm NaI(Tl)シンチレータ、エネルギー補償機能付き）で測定する。外部出力をデジタル・チャートレコーダで照射終了 10 分後から約三日間にわたって連続して記録する。実験の様子を図 I.1 に示す。

核反応によって塩化ナトリウム水溶液中に生成される ^{24}Na 等の放射能を、二種類の方法によって評価する。第一の方法は、照射終了後にピペッタで採取した塩化ナトリウム水溶液 5.0 ml についての γ 線スペクトロスコピーである。使用する検出器は、PGT 社製 IGC-10200 型高純度 Ge 半導体検出器（以下、「HPGe」と記す）であり、観測されたパルス波高スペクトルから ^{24}Na （半減期：14.96 時間）の 1.369 MeV γ 線と ^{38}Cl （同：37.24 分）の 1.643 MeV γ 線のピーク面積をそれぞれ算出し、放射能に換算する。第二の方法は、モンテカルロ計算シミュレーション（モンテカルロ粒子輸送計算コード MCNP4C2）による。中性子線源及び照射装置の計算モデル[臨 4]に塩化ナトリウム水溶液で満たした水槽形ファントムを追加し、溶液中での $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ 及び

$^{37}\text{Cl}(n,\gamma)^{38}\text{Cl}$ 反応率を、MCNP 計算による溶液中の平均中性子フルエンス、Na と Cl の原子数密度、及びそれぞれの反応の微視的断面積の積から求める。続いて、同じ水槽形ファントムの計算モデルを用い、溶液中で ^{24}Na （1.369 MeV と 2.754 MeV）及び ^{38}Cl （1.642 MeV と 2.168 MeV）の γ 線をランダムに発生させたときのファントム表面での γ 線フルエンス（率）を計算し、それに ICRP Publ. 74 [臨 5]の換算係数を乗じて γ 線の 1cm 線量当量（率）を求める。これらから、放射能と体表面での 1cm 線量当量（率）の関係を求める。

② 人体形状ファントムでの計算

被測定者の体格・姿勢による影響を調べるため、水槽形ファントムに比べて、より人体形状に近い条件での体表面 γ 線 1 cm 線量当量率を MCNP 計算によって調べる。ここで使用する計算モデルは、頭、頸、胸・腹、腰及び四肢を模擬する大小 10 個の円柱又は楕円柱ボトルからなる BOMAB ファントムである。水槽形ファントムでの計算と同様に、 ^{24}Na 及び ^{38}Cl が一様な放射能濃度で体内に分布すると仮定し、水を封入したこのボトル内からそれぞれの核種のガンマ線をランダムに発生させたときの、股下から距離 20 cm、腹部表面から距離 1 cm における γ 線 1 cm 線量当量（率）を求める。このとき、指定された線源領域のうちどこから線源光子が発生したかを追跡する MCNP の機能を利用して、発生源別に線量当量率の内数も調べる。BOMAB ファントムのサイズは、ANSI [臨 6]に定める標準サイズ（身長 170 cm 相当）と大きなサイズ（身長 188 cm 相当）の二種類とし、直立した姿勢（立位）での計算のほか、前者については、椅子に腰かけた姿勢（座位）、さらに、そのまま上体を前屈させた姿勢（前屈座位）についても計算を行う。それぞれの計算モ

デルを図 I.2 に示す。

(2) 線量評価における中性子スペクトル及び入射方向依存性の検討

核燃料サイクル工学研究所では、臨界事故が発生した場合、個人線量計 (TLD バッジ) に含まれるインジウム箔の放射化 (^{116m}In) 測定によるスクリーニング、TLD バッジの測定に基づく γ 線及び中性子被ばく線量の評価、さらに、被ばくの重篤度に応じて、体内中 ^{24}Na 放射能測定、インジウム箔の ^{115m}In 放射能測定及び毛髪中の ^{32}P 放射能測定による詳細評価を行う [臨 7]。この順序は、測定の容易さや放射化生成物の半減期の短さにほぼ対応する。これらの線量評価法は、前述した $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ 反応を含め、入射する中性子のエネルギー (すなわち中性子スペクトル) や方向にその反応の程度が大きく依存するため、その依存の程度をあらかじめ調べておく必要がある。そこで、TLD バッジと頭髪の放射化について、モンテカルロ計算シミュレーションによって、その応答関数を評価する。

① TLD バッジ応答関数の計算

TLD バッジは、ABS 樹脂ケースに TLD (Panasonic UD-808P 及び UD-809P) とインジウムチップ (約 360 mg) を内蔵する構造からなり、前者は、 γ 線と中性子の線量評価、後者のうち ^{116m}In は有意な被ばくを受けた者のスクリーニングに、 ^{115m}In は約 1 MeV 以上のエネルギーを持つ中性子による線量の評価に使用される。ここでは、MCNP4C2 を用いてその精密な計算モデル (図 I.3) を構築し、熱中性子～15 MeV を適当な間隔で分割した 21 群の中性子を、15～30 度間隔の入射角度 (正面を 0 度) で水槽形ファントムの前面中央に設置した TLD バッジに一樣に入射させ、TLD 素子 ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$) 中での $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ 及び $^6\text{Li}(n,\alpha)$ 反応率、並びにインジウムチップ中

での $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116m}\text{In}$ 及び $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$ 反応率を計算する。このとき、座標変換カード指定によって計算体系そのものを、天頂から見て反時計回りに 30 度ステップで水平回転させることで入射角度を変えた計算も行う。

② 頭髪中の $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ 反応の計算

毛髪 1 g には、硫黄 43.6 (± 4.6) mg のほかにリンが 0.171 (± 0.024) mg 含まれる [臨 8]。中性子によるこれらの放射化について、MIRD の頭部ファントムモデルと MCNP を用いてシミュレーション計算を行う。図 I.4 に示す頭部ファントムモデルの前頭部、左右の側頭部、後頭部及び頭頂の表面に縦 2 cm × 横 2 cm × 厚さ 1 cm のセルを設定し、一方向から面平行ビームで頭部全体に中性子を入射させたときの、そのセル内における体積平均中性子フルエンスを計算する。これに、単位体積当たり 1 g の毛髪が含まれると仮定して算出した (毛髪 1 g 相当の) 硫黄及びリンの原子個数密度と核反応断面積を乗じて、毛髪 1 g 当たりの反応率を求める。ここで着目する核反応は、 $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ 、 $^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$ 、及び $^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$ である。 ^{32}P は、中性子線量評価に使用される核種であり、半減期 14.26 日で最大エネルギー 1.711 MeV のベータ線を放出する。一方、 ^{31}Si は、半減期 2.622 時間で最大エネルギー 1.490 MeV の β 線を放出する。熱中性子～15 MeV を適当な間隔で分割した 21 群の中性子及び ^{252}Cf 線源からの中性子を、正面 (0 度) から頭部全体に一樣に入射させる。このとき、座標変換カード指定によって計算体系そのものを、天頂から見て反時計回りに 30 度ステップで水平回転させることで入射角度を変えた計算も行う。

(3) 臨界事故時における緊急対応計画のための線源条件の検討とレスポンスデータベースの整備

① 臨界事故時における線源条件の検討

一般に臨界事故の規模は核分裂数で表され、臨界事故警報装置の設置基準等では、最小で 10^{15} [臨 9]、最大で 2×10^{19} [臨 10]とも言われる。1999 年の JCO 事故での核分裂数は、約 20 h の継続時間の積算で合計 2.5×10^{18} であるが、臨界事故直後のスパイク（初期バースト又は第一出力パルスと呼ぶ場合もある）で、約 5×10^{16} [臨 11]とされる。被災者の被ばく線量評価に最も重要なのは、このスパイクでの核分裂数であり、加えて、中性子及びガンマ線のスペクトル、線源と被災者間の距離及び遮へいもまた重要なファクターとなる。本研究では、核燃料施設において最も発生する可能性の高い溶液系臨界事故について、予想される第 1 スパイクの核分裂数と被ばく線量の関係を、核分裂数の簡易計算式とモンテカルロ計算シミュレーションの併用によって明らかにする。

核分裂数の簡易計算式：水溶液 1 リットル当たりの核分裂数（最確値）を、 10^{15} とする[臨 12]。また、その上下限値は、野村が導出したスパイクの核分裂数の最大及び最小見積もり式[臨 13]から

最大： $6.6 \times 10^{15} \times V$ (fissions)

最小： $1.64 \times 10^{14} \times V$ (fissions)

である。ここで、 V は、溶液の体積（リットル）である。最確値に対してファクター 6 程度の変動幅があり得る。

線源モデル：臨界事故時における緊急対応のための数値早見表として米国で使用されている Nuclear Slide Rule [臨 14]において、典型的な臨界事故における「線源」として指定されているもの（金属系・粉末系・溶液系等 5 種類）のうち、再処理施設での事故想定に近い「高濃縮硝酸ウラニル溶液」線源を基に、溶液の体積や ^{235}U の濃縮度を調節したものを線源とする。さらに、東海再処理施設の一部工程（硝酸

プルトニウム調整槽）を近似する線源を追加する。線源条件を表 I.1 に示す。条件の詳細は、後述する臨界計算によって算出したものである。

臨界計算方法：球形硝酸ウラニル溶液及び円筒形硝酸プルトニウム溶液からなる体系での臨界計算を、モンテカルロ粒子輸送計算コード MCNP4C2 の固有値計算 (kcode) 機能で行う。ここでは、濃縮度及び体積の異なる幾つかの入力条件で臨界計算を行い、実効増倍係数が 1.00 ± 0.02 となる条件をパラメータサーベイによって探索する。

タリー：図 I.5 に示すタリー配置で、体系外に漏れ出る中性子と光子のカレントとフルエンスを計算する。実効増倍係数が 1 になる条件は、常に 1 個の中性子が発生し続けている状態に相当するので、それぞれのタリーの計算値に、 ^{235}U における核分裂当たりの平均中性子発生数 $\nu = 2.44$ を乗じることで、核分裂当たりの値に換算できる。また、硝酸プルトニウム溶液についても、実際の調整槽のステンレス製円筒に近似した体系で同様の計算（ただし、 $\nu = 2.88$ ）を行なう。

線量換算係数：中性子フルエンスから組織吸収線量への換算係数に、1980 年代から国際的に使用されてきた IAEA Technical Report Series No. 211[臨 1]（以下、「IAEA マニュアル」と記す）の表 XIV、及び ANSI/HPS 13.3-2013[臨 15]で採用する個人吸収線量 $D_p(10)$ （数値の出典は文献[臨 16]）を使用する。後者は、ICRU 平板ファントムの表面から深さ 10 mm における吸収線量であり、光子の場合は、実用量である個人線量当量 ($H_p(10)$) と等価である。

図 I.6 に、IAEA マニュアルの組織吸収線量（反跳原子核等の重粒子による線

量と二次 γ 線による線量の合計)と、上記 $D_p(10)$ を比べたものを示す。比較のため、ICRP Publ. 74に与える生殖腺(精巣)の吸収線量も同図に示す。いずれも体表面の比較的浅い位置における吸収線量であるため、ほぼ同程度の値を示す。

スクリーニングレベル：上記の事故想定で得られる中性子スペクトル情報等を用いて、(i)体内 ^{24}Na 放射能、(ii)体内 ^{24}Na による体表面での γ 線1cm線量当量率、及び(iii)TLDバッジ中 ^{116}mIn 放射能に基づくバッジ表面での端窓GM計数管式表面汚染サーベイメータの計数率について、核分裂数及び線量との関係を整理する。

② レスポンスデータベースの整備

体内 ^{24}Na 放射能、体内 ^{24}Na による腹部表面での γ 線1cm線量当量率、頭髪1g中に生成される ^{32}P 放射能、TLDバッジ中 ^{116}mIn 放射能に基づくバッジ表面での端窓GM計数管式表面汚染サーベイメータの計数率、TLDバッジ中 ^{115}mIn 放射能及びTLDバッジの中性子用TLDの指示値について、臨界事故時線量評価プログラムRADAPAS[臨17]に組み込みの計140の中性子スペクトル(金属又は溶液系での ^{235}U の核分裂+様々な遮へい(普通コンクリート、重コンクリート、鉄及び鉛))について、体系的に整理し、一覧表にとりまとめる。

(4) ^{252}Cf 中性子線源を用いる高線量中性子照射装置の開発

核燃料サイクル工学研究所で中性子線量当量率サーベイメータ等の校正に使用している既設の中性子照射設備を利用して、毛髪などの生体試料や放射化箔に高線量の中性子を照射するための装置を製作する。

既設設備は、公称放射能1GBqの ^{252}Cf 中性子線源と、それを地下の遮へい容器から案内管に沿って空気圧で打ち上げ、床から120cmの高さに電磁石で保持する機構

からなる[臨4]。そこで、製作する装置は、この設備

^{252}Cf 中性子線源を案内管上部に保持した状態で、線源に近接した移置で試料に対して均一に中性子を照射できるように、既設照射設備の周囲に取り付け可能な中空円筒形の試料支持具とそれを線源案内管の周りで等速回転させる機構からなるものとする。 ^{252}Cf 線源及びその保持機構を精密に再現する計算での予備計算(MCNP)に基づき製作した装置の外観写真を図I.7(a)、その計算モデルを図I.7(b)に示す。ここで、回転機構は、既設線源案内管の非対称形状(空気をパージする窓や線源位置確認センサー)によって引き起こされる中性子フルエンス率の空間分布の歪みを均一化する役目を果たす。

装置の性能確認のため、インジウム放射化箔を用いる照射実験及び計算による検証を行う。試料支持具の内側8か所(空気をパージする窓に向けた側4か所、窓の無い側4か所)に1cm×1cm×0.005cmのインジウム箔を取り付け、中性子照射を行い、 $^{115}\text{In}(n,n')$ 反応によって生成された ^{115}mIn からの336keV γ 線をHPGeで測定する。また、実験条件と同じ体系でMCNPによる ^{115}mIn 生成量の計算を行う。加えて、本装置を用いてフルエンスで $3.6\times 10^{10}\text{ n/cm}^2$ 、吸収線量で1.2Gyの中性子を毛髪(約2.2g)に照射する。照射後、液体シンチレーションカウンタで分析する。なお、実験で使用する頭髪は、人毛かつらから採取したものである。毛髪1gには、硫黄43.6(±4.6)mgのほかリンが0.171(±0.024)mg含まれるとされるが、確認のため、この毛髪試料について外部機関(株式会社東レリサーチセンター)に依頼し、その組成分析を行う。硫黄については、燃焼管分解・イオンクロマトグラフィー、リンについては、酸で加熱分解し

たのち ICP 発光分光分析によって、それぞれの含有量を求める。

2) アクチニド核種等による内部被ばく線量評価に関する研究

尿中の有機物を除去し、着目核種を選択的に分離するために、強酸化剤による湿式灰化法及び鉄共沈法[内 1]による分析手法を行った。図 II.1 は尿中の U, Pu 及び Am 成分の鉄共沈法による分析法のフローを示す。鉄共沈法による分析法では、まず、尿試料に着目した核種に応じたトレーサ (^{232}U , ^{242}Pu 及び ^{243}Am) 及び強硝酸剤 (HNO_3 , H_2O_2) を添加し、2-3 回繰り返す、蒸発乾固により有機物分解を行った。その後、乾固物は 8M HNO_3 で溶かして、酸化物分離用にアミド硫酸を加え、加熱溶解した。その後、その溶液に鉄キャリアー (Fe^{3+})、塩化アンモニウム (NH_4Cl)、アンモニア水 (NH_4OH) を加え、鉄共沈法により、鉄とともに着目核種を沈殿させた。次に、15 分間程度エイジングを行い、溶液中の沈殿物は遠心分離機 (3000 rpm, 15 分間) を用いて分離させた。分離後の沈殿物は 8M HNO_3 20ml で溶解して、その溶液に硝酸アルミニウム ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$)、アスコルビン酸及び亜硝酸ナトリウム (NaNO_2) を加えて価数調製を行い、核種分離用溶液試料を作成した。着目核種の分離は、抽出クロマトグラフィーレジンをを用いて核種分離を行った。まず、前処理後の核種分離用溶液試料は、予め、8M HNO_3 で洗浄してある TEVA (50-100 μm) レジン及び DGA レジン(50-100 μm) [内 2, 内 3]に流し、Pu 成分は TEVA レジンで吸着させて、U 及び Am 成分は DGA レジンで吸着させた。その後、TEVA レジンに吸着している Pu 成分は TEVA レジンに Pu 成分と一緒に吸着している Th 成分は 8 M HCl 溶液を流すことで TEVA レジンから除

去してから、8M HCl -0.1M NH_4I 溶離液を用いて Pu 成分を溶離させた。次に DGA レジンに吸着している U 成分は 0.2M HNO_3 溶離液で、Am 成分は 0.01M HCl 溶液で溶離した。「前処理」や「核種分離」後の試料溶液は、通常、ステンレスディスク板に着目核種を電着させた後、Si 半導体検出器 Si 半導体検出器 (ULTRA シリーズ BU-017-450-100, ORTEC 製, 直径 1 インチ, 検出効率 28%) によって真空条件下で 86400 秒間の測定を行い、尿中の着目核種の放射能を測定した。

また、放射性ストロンチウム (ストロンチウム-89, 90) を対象として、迅速に尿中放射性ストロンチウムを分析するために、牛乳の分析法 (IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 27) を参考に、尿中放射性ストロンチウム分析法の検討を行った。さらに、尿試料中の安定ストロンチウム量を測定するために、尿試料約 10mL を用いて同様に ICP-AES で測定を行い、迅速分析法での回収率を求めた。図 II.2 は尿中放射性ストロンチウム分析法のフローを示す。

3) 皮膚汚染時における線量評価に関する研究の方法

(1) サーベイメータ指示値と汚染サイズの関係の調査

サーベイメータの機種毎に、その指示値と汚染サイズの間関係を調査し、線量 (率) への換算手順について検討する。使用したサーベイメータは、表面汚染の測定に現在国内で最も広く利用されている 51 mm 径端面 GM 管式表面汚染サーベイメータ、さらに、その測定可能レンジを超える高レベル汚染 (>100 kcpm = せいぜい 10 mGy/h に相当) に備えて、三種類の電離箱式線量当量率サーベイメータである。これら仕様を資

料Ⅲの表Ⅲ.1に示す。

実験は、それぞれのサーベイメータの指示値(cpm 又は Sv/h)と表面密度(Bq/cm²)の関係を汚染サイズ別に調べることを基本とする[皮 3]。ここでは、表面放出率が既知の⁹⁰Sr+⁹⁰Y 及び¹³⁷Csの板状線源(100×150 mm²)を用い、それを直径10~70 mmの穴を開けたステンレス製アパチャーで覆うことにより直径の異なる汚染を模擬する。また、電離箱用に、放射能が既知の⁹⁰Sr+⁹⁰Y 及び¹³⁷Csの点線源(直径5 mmの放射性物質を薄い膜で挟んだもの)を入射窓から距離5 mmに固定したまま入射窓に平行に移動させることにより直径の異なる汚染を模擬する。なお、ここで、選択した核種は、福島第一原子力発電所事故における主たるβ線放出核種(初期は¹³²Te+¹³²I, 続いて¹³¹I)[皮 5]にそれぞれ似たエネルギーを持つ。それぞれのサーベイメータの入射窓を、線源の表面から5 mmの高さに固定し、その信号出力信号をスケータ又はデジタルチャートレコーダで記録する。それぞれの線源サイズでの基準線量率は、点積分核法によって任意形状の汚染による皮膚線量を計算するコード VARSKIN [皮 6]を用いて計算する。計算体系を図Ⅲ.1に示す。

(2) β線スペクトル測定に基づく皮膚線量評価

想定外の事故等で汚染核種が予想不可能な場合、β線スペクトルの測定に基づく線量評価が有効な場合が考えられる。そこで、厚いプラスチックシンチレータを用いる皮膚線量評価に取り組む。使用するプラスチックシンチレータは、直径51 mm×厚さ10 mmのELJEN Technology社製EJ200であり、これまで作業現場におけるβ線スペクトロメトリの目的で使用されてきた[皮 7]。ここでの厚さ10 mmは⁹⁰Sr+⁹⁰Yのβ線最大エネルギー(2.2 MeV)の飛程に相当

する。シンチレータ前面の直径25.4 mmのアルミ蒸着マイラー(2.7 mg/cm²)の窓を通り抜けた電子はシンチレータ中でほぼフルストップするので、観測されるパルス波高スペクトルは、入射β線スペクトルの近似値となる。¹³⁷Cs線源(内部転換電子624 keV)での校正によってチャンネルをエネルギーに変換した波高スペクトルを窓面積で除することによってスペクトラルフルエンスに換算し、それに換算係数を乗じて線量当量を算出する。使用する換算係数は、ICRP Publ. 74(表A.44)[臨 5]の70 μm線量当量(方向性線量当量H'(0.07))である。

実験では、表面放出率が既知の15 cm×10 cmの板状陽極酸化被膜線源(¹⁴C, ³⁶Cl, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr+⁹⁰Y, ⁹⁹Tc, ¹⁰⁶Ru+¹⁰⁶Rh, ¹³⁷Cs+^{137m}Ba, ¹⁴⁷Pm)の中央部分、高さ5 mmにプラスチックシンチレータの入射窓を固定し、計測する。ここで、比較の基準とする線量率は、線源の表面放出率の2倍を放射能と仮定して算出した表面密度を基にVARSKINで計算した値とする。

(3) 表面密度—皮膚線量率換算係数の調査

現在、わが国では、測定に基づき評価された表面密度から皮膚線量率に換算する際に、公益財団法人原子力安全技術センター発行の「被ばく線量の測定・評価マニュアル」[皮 4]に図又は表として再録された龍福ら[皮 8]又はICRU Report 57に再録されたCrossら[皮 9]の係数が利用されている。また、これらのほかに、入手しやすい情報として、Kocherらの論文[皮 10]、IAEAの緊急時対応手順書[皮 11](又はその翻訳版[皮 12])、さらにDelacroixらのハンドブック[皮 13,14]がある。しかしながら、これらの異なる出典からの換算係数は必ずしも同じ値ではなく、いずれの出典に準拠したかによって線量の値が変わるという現状は、評価手順を標準化する上で好ましくない。そこで、

これら異なる出典の換算係数を同じ単位で一覧表としてとりまとめ、VARSKIN による計算値を比較基準とした場合の相違を明らかにする。これにあたって、当初は、計算に VARSKIN 4.0 (Radiation Safety Information Computational Center から 2010 年に公開) を使用したが、後述するように、転換電子を放出する一部の核種(例えば ^{137m}Ba 等) について、その線量寄与を適切に計算していないことが判明したため、一部の研究者の間で試用されていた VARSKIN 5.3 (β 版)、さらにその試用期間を経て 2017 年 10 月に公開された VARSKIN 6.0 [皮 15] を用いて検証計算を行う。計算条件は以下のとおりである。

- ・対象核種：281 核種
- ・汚染形状：皮膚表面に面積 1 cm^2 又は 100 cm^2 の円形汚染
- ・表面密度： 1 kBq/cm^2 (子孫核種と放射平衡のものは親核種の放射能)
- ・対象線量：汚染直下の深さ 0.07 mm (7 mg/cm^2) 又は 0.4 mm (40 mg/cm^2)、面積 1 cm^2 の領域における吸収線量
- ・核データ：VARSKIN 5.3 (以前) は、ICRP Publication 38 [皮 16]、VARSKIN 6.0 からは、ICRP Publication 107 [皮 17]

ここで 281 核種は、文献調査によって換算係数が得られたすべての核種を含む。また、深さ 0.4 mm (40 mg/cm^2) は、確定的影響、すなわち真皮の晩発障害(真皮の萎縮)の防止するため、深さ $0.3\sim 0.5\text{ mm}$ (真皮上皮) [皮 18] を想定したものである。

(倫理面への配慮)

本研究は、特定の個人(またその体から採取された試料等)を対象としたものではないので人権擁護上の配慮等を特に必要としない。

C. 研究結果

1) 臨界事故時における線量評価に関する研究の結果

(1) 体表面の γ 線 1 cm 線量当量率に基づくスクリーニング

図 I.8 に、塩化ナトリウム水溶液で満たした水槽形ファントム表面で観測された γ 線 1 cm 線量当量率の時間変化を示す。横軸は、照射終了時刻からの経過時間であり、照射終了 10 分後にバックグラウンドを差し引いた正味値で最大約 $0.6\text{ }\mu\text{Sv/h}$ が観測された。図中の実線は、 ^{24}Na 及び ^{38}Cl の壊変定数を基に double exponential 関数でフィッティングした曲線であり、 ^{24}Na による長期成分と ^{38}Cl による短期成分からなる実測線量率の経時変化をよく説明する。

塩化ナトリウム水溶液中に生成された ^{24}Na 及び ^{38}Cl の放射能濃度について、HPGe による測定と MCNP による計算の結果を比べたものを表 I.2 に示す。測定値と計算値はほぼ一致した。また、MCNP で計算したファントム表面での γ 線 1 cm 線量当量率をこの放射能濃度で規格化した結果を表 I.3 に示す。ここでは、3 時間の照射終了から 10 分経過後の値に加え、照射終了直後の値、さらに、実験条件と積算中性子フルエンスは同じであるが、照射時間をゼロ(瞬間的な照射)としたときの値も示す。照射終了 10 分後における γ 線 1 cm 線量当量率の計算値 ($0.62\text{ }\mu\text{Sv/h}$) は、実測値 (約 $0.6\text{ }\mu\text{Sv/h}$) とほぼ一致した。計算によれば、実験条件では、照射終了直後に $0.66\text{ }\mu\text{Sv/h}$ の線量当量率の観測が期待され、このうちの約 $1/3$ は ^{38}Cl からの γ 線の寄与による。一方、瞬間的な中性子照射(臨界事故でしばしばみられる)の場合、線量当量率は照射直後で $1.3\text{ }\mu\text{Sv/h}$ 、そのうち約 $1/3$ の $0.46\text{ }\mu\text{Sv/h}$ を ^{24}Na の γ 線が、約 $2/3$ の $0.82\text{ }\mu\text{Sv/h}$ を

^{38}Cl の γ 線が占める。線量当量率と内訳を経過時間の関数として表したものを図 I.9 に示す。図中のインサートは、 ^{24}Na の γ 線からの線量当量率に対する全線量当量率の比である。照射後約 4 時間経過するまでは ^{38}Cl からの γ 線寄与が存在することが確認された。

表 I.2 に示した放射能濃度の ^{24}Na と ^{38}Cl が人体形状の BOMAB ファントム中に含まれるときの、腹部表面（股下から 20 cm）における線量当量率の計算結果を表 I.4 に示す。瞬間的な中性子照射の直後では、水槽型ファントム表面での線量当量率 1.3 $\mu\text{Sv/h}$ に対し、標準サイズの BOMAB ファントムでは、立位で 1.8 $\mu\text{Sv/h}$ 、座位で 2.6 $\mu\text{Sv/h}$ さらに前屈座位で 2.8 $\mu\text{Sv/h}$ となった。この変化は、放射化生成物の絶対量が、体積の大きい人体形状ファントムの方が多いこと、さらに座位～前屈座位の場合、腹部からだけでなく大腿部からの線量当量率寄与が増加するためである。また、被測定者の体格によって 20%程度の変化があり得ることが確認された。

(2) 線量評価における中性子スペクトル及び入射方向依存性の検討

TLD バッジについて計算シミュレーションによって求めた単位中性子フルエンス当たりの TLD（前面に Cd フィルターを配置した素子）指示値を図 I.10、同じく単位中性子フルエンス当たりの $^{115\text{m}}\text{In}$ 及び $^{116\text{m}}\text{In}$ 放射能（曝露直後）を図 I.11 に示す。後者の●プロットは、加速器を用いた単色中性子場及び黒鉛パイル減速熱中性子場で取得した実験値であり、計算値とほぼ一致した。TLD と $^{116\text{m}}\text{In}$ は、熱中性子領域を除き、ほぼ同様の応答関数を持つ。

計算によって得られた、単位中性子フルエンス当たりの毛髪 1 g 中に生成される放射化生成物の放射能のエネルギー依存性を

表 I.5 と図 I.12 に示す。曝露直後の場合、半減期の短い ^{31}Si 放射能は ^{32}P の放射能の約 1/4 になる。これら核種の β 線最大エネルギーは同等であり、両者の測定による分離は困難であるため、事故直後の測定では注意を要する。また、 ^{32}P は、熱中性子との $^{31}\text{P}(n,\gamma)$ によってもわずかに生成される。表 I.6 及び図 I.13 に、 ^{252}Cf 中性子フルエンス当たりに毛髪 1 g 中に生成される放射化生成物の放射能の入射角度依存性を示す。ここでは、正面入射は 0 度、右側頭部入射は +90 度である。図から明らかなように、採取ポイントから中性子の入射が“見える”場合—例えば、前頭部の毛髪であれば、0 度入射と +90 度入射の場合—生成される ^{32}P の放射能に有意差はほとんどない。したがって、頭部の外周 4 箇所から頭髪を採取する場合、その中で最小の放射能を与える位置の反対側を主たる中性子の向きとみなすことができる。なお、頭頂部の頭髪については入射角度による変化は見られない。

(3) 臨界事故時における緊急対応計画のための線源条件の検討とレスポンスデータベースの整備

① 臨界事故時における線源条件の検討

表 I.1 に示した硝酸ウラン及び硝酸プルトニウム溶液線源について計算によって求めた、臨界成立条件（実効増倍係数 ≈ 1 ）における、1 核分裂当たりに溶液外に漏洩する粒子のカレント、スペクトル平均したエネルギー及びフルエンスから線量の換算係数を表 I.7 に示す。そのときの漏洩中性子と漏洩 γ 線のスペクトルをそれぞれ図 I.14 と図 I.15 に示す。図は、核分裂当たりに規格化しており、エネルギー積分した値は、カレントの値に相当する。図から、中性子スペクトルの形状は、体積・溶液組成に依存しないこと、これに対して、ガンマ線スペクトルは、低濃縮度（ ^{238}U が多く含まれ

る) ほど低エネルギー領域で γ 線が ^{238}U 自身によって遮へいされることが確認された。表 I.7 から、体積が小さいほど体系内での中性子の吸収が減るため、中性子が体系外に出やすい一方で、中性子スペクトルが体積によって変わらないため、平均中性子エネルギーやスペクトル平均換算係数などの値にも大きな変化はない。これに対して、ガンマ線の場合、体積よりも濃縮度がカレント、平均エネルギー及びスペクトル平均換算係数に影響を与える。

それぞれの線源条件について、核分裂数を最小臨界事故に相当する 10^{15} 、溶液体積から推定した第一出力パルスの核分裂数(1リットル当たり典型値： 10^{15} 、最大値： 6.6×10^{15} 、及び最小値： 1.64×10^{14})における線源から距離1mでの個人吸収線量 $D_p(10)$ を計算した結果を表 I.8 に示す。また、それらを体積の関数として表したものを図 I.16 に示す。核分裂数は、溶液体積に比例して増加する一方、大容積ほど放射線が体系外に漏洩しにくくなるため核分裂数の増加の程度に比べて線量の増加の程度は小さい。たとえば、硝酸ウラニル溶液の場合、溶液体積が約35倍(28.5→1,000リットル)の変化に対して、中性子 $D_p(10)$ は約6倍、 γ 線 $D_p(10)$ は約7倍の変化に過ぎない。

表 I.9 に、中性子と γ 線による個人吸収線量 $D_p(10)$ を100 mGyとした場合の(i)体内 ^{24}Na 放射能、(ii)体内 ^{24}Na による腹部表面での γ 線1cm線量当量率、及び(iii)TLD バッジ中 ^{116}mIn 放射能に基づくバッジ表面での端窓GM計数管式表面汚染サーベイメータの計数率を示す。代表的な溶液線源の前方入射の場合、 $D_p(10)=100$ mGy 当たり、

- (i) 260~360 Bq/g (26~36 kBq)
- (ii) 立位：0.17~0.24 $\mu\text{Sv/h}$

前屈座位：0.27~0.37 $\mu\text{Sv/h}$

(^{38}Cl 等短半減期核種の寄与を含まない)

(iii) 12~18 kcpm

の観測値が曝露直後に得られることが期待される。吸収線量 $D_p(10)$ が1 Gyを超える場合、一般的な端窓GM計数管式サーベイメータの指示は測定レンジの上限(30~100 kcpm)をオーバーするため、必要に応じて1cm線量当量率サーベイメータを使用する必要がある。全身カウンタは、こうしたレベルの放射能では、感度が高すぎる可能性があるため、被測定者と検出器の距離を変えるなどの工夫が必要であろう。

② レスポンスデータベースの整備

臨界事故時線量評価プログラム RADAPAS に組み込まれた計140個の線源スペクトル情報を使用して、それぞれの線源について、中性子平均エネルギー(MeV)、スペクトル平均した中性子フルエンス—吸収線量換算係数(Gy cm^2)、 γ 線平均エネルギー(MeV)、スペクトル平均した γ 線フルエンス—吸収線量換算係数(Gy cm^2)、ガンマ線/中性子線量比、単位中性子フルエンス当たりの体内 ^{24}Na 比放射能($(^{24}\text{Na Bq}/^{23}\text{Na g}) \text{ cm}^2$)、中性子吸収線量1 Gy 当たりの体内 ^{24}Na 比放射能($(^{24}\text{Na Bq}/^{23}\text{Na g})/\text{Gy}$)、単位中性子フルエンス当たりの ^{24}Na 放射能(Bq cm^2) (ここでは、全身に100 gの ^{23}Na が含まれていると仮定)、中性子吸収線量1 Gy 当たりに生成される体内 ^{24}Na による腹部表面での γ 線1cm線量当量率($\mu\text{Sv/h}$) (曝露直後、 ^{38}Cl 等短半減期核種による影響を含まない)を計算したものを表 I.10 に示す。ここでは、中性子吸収線量の値に、RADAPAS 組み込みのもの $D_p(10)$ の二種類を用いた。また、同様の手順を用いて、単位中性子フルエンス当たりに前頭部の頭髪1g中に生成される ^{32}P 放射能(Bq cm^2)、中

中性子吸収線量 1 Gy 当たりに前頭部の頭髮 1 g 中に生成される ^{32}P 放射能(Bq/Gy), 単位中性子フルエンス当たりに TLD バッジのインジウム中に生成される $^{115\text{m}}\text{In}$ 放射能(Bq cm²), 単位中性子フルエンス当たりに TLD バッジのインジウム中に生成される $^{116\text{m}}\text{In}$ 放射能(Bq cm²), 吸収線量 1 Gy 当たりに生成される $^{116\text{m}}\text{In}$ 放射能に基づき badges 表面で観測される端窓 GM 計数管式表面汚染サーベイメータ計数率(kcpm), 並びに TLD バッジの各 TLD の指示値(Sv cm²)を計算したものを表 I.11 に示す。

臨界事故時に想定される計 140 個の中性子スペクトルについて, 計算結果を整理したものを図 I.17 (平均中性子エネルギーとエネルギー別のフルエンスの内訳) と図 I.18 (中性子吸収線量 1 Gy 当たりの TLD 指示値, $^{115\text{m}}\text{In}$ 放射能, $^{116\text{m}}\text{In}$ 放射能及び ^{32}P 放射能) に示す。図の横軸は, プログラム RADAPAS 組み込みの中性子スペクトルの番号である。例えば, ^{32}P 放射能の場合, 普通コンクリート及び重コンクリート遮へい条件では, 中性子吸収線量 1 Gy 当たりの放射能に大きな変化はなく, 0.8~1.2 Bq/Gy であった。また, 体内中 ^{24}Na 比放射能に対する, 頭髮 1 g 中の ^{32}P 放射能, TLD バッジ中の $^{116\text{m}}\text{In}$ 及び $^{115\text{m}}\text{In}$ 放射能及び TLD 指示値の比を, 入射角度の関数として計算した結果を図 I.19 に示す。

(4) ^{252}Cf を用いる高線量中性子照射装置

計算によって求めた試料固定具内面における中性子フルエンスの位置による変化を図 I.20 に示す。ここで, 位置 $z=0$ は, ^{252}Cf 線源の実効中心の高さに相当する。図の横軸は, 1 個の中性子が線源から放出されたときの中性子フルエンスに, 球の立体角 (4π) と試料支持具内壁までラジアル距離 4.0 cm の二乗を乗じた値であり, 点線源かつ線源周囲に散乱体が存在しない場合, $z=0$ で 1.0

になる。その値に比べて約 20%以上も中性子フルエンスが増加しているが, これは線源を保持するホルダからの散乱線の寄与によるものである。試料を取り付ける位置によってフルエンスの強度にわずかな相違が生じるが, その変動幅は, $z=-5\sim+5$ mm の範囲では $\pm 1\%$ 以下である。また, 同じ範囲 (-5 mm から $+5$ mm) における平均中性子スペクトルを図 I.21 に示す。アクリル製の試料支持具による散乱中性子が僅かに存在するが, 速中性子による反応が主となる $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$ や $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ への影響はほとんどないと考えてよい。当該装置を用いてインジウム箔の中性子照射を行い, HPGe 測定によって得られた $^{115\text{m}}\text{In}$ 誘導放射能を表 I.12 に示す。MCNP による理論計算値と $\pm 15\%$ で一致することが確認された。

速中性子を照射した毛髪について, 測定試料を図 I.22, 観測されたパルス波高スペクトルを図 I.23, 観測結果を表 I.13 に示す。なお, 組成分析の結果, 実験に使用した毛髪に含まれる硫黄及びリンは, 毛髪 1 g 当たりそれぞれ 44 mg, 0.13 mg であり, 文献値[臨 8]とほぼ一致した。

2) アクチノイド核種等による内部被ばく線量評価に関する研究

共沈法によるバイオアッセイ法の検討結果, リン酸塩を用いた共沈法では U 成分の回収率は 70%以下, シュウ酸塩を用いた共沈法では Pu 成分の回収率が 50%で低かったが, 鉄共沈により, U 成分の回収率は 75%, Pu 成分は 85%, Am 成分は 80%であり, U, Pu/Am の 3 核種とも 75%の回収率を担保できた。さらに, 前処理にかかる時間を, 従来法の所要時間を約 12 時間以上, 短縮できた。そして, 本手法の妥当性は, 尿中の未知核種を評価する国際相互比較プログラム

(PROCORAD)に参加してその結果をもって検証した。図Ⅱ.3は我々の評価値に対する真値との比較結果，図Ⅱ.4はPROCORADに参加した機関の結果をまとめたもので，我々の結果(参加番号:22)は真値に対するバイアスがPuで±5%以内，Amで±10%以内，Cmで±15%以内であった。

尿中ストロンチウム分析法では，回収率を測定したところ，純水を試料とした場合には，83%の回収率が得られた。一方，150 mLから200 mLの尿試料を用いて分析を行った結果，回収率は79~94%であった。これらの分析時における尿試料中の安定ストロンチウム量は，0.015~0.033 mg/Lであった。次に，分析フローのうち，ストロンチウム担体を添加するところを省略し，170~320 mLの尿試料を用いて回収率を求めた結果は，65~82%であった。また，既知量のストロンチウム-90(2.45 Bq)を尿試料に添加し，ストロンチウム担体を加えずに分析を行い，回収率及び，液体シンチレーションカウンタでストロンチウム-90濃度を求めた。その結果，回収率は57~78%であった。また，液体シンチレーションカウンタで得られたストロンチウム-90の放射能は(2.2±0.13~2.9±0.11) Bqであり，添加したストロンチウム-90の放射能とほぼ一致した。

図Ⅱ.5(a)はPu溶液(²³⁵U, ²³⁶U, ²⁴¹Am, ²³⁷Npが含まれている)の波高スペクトルと²⁴¹Am単体溶液の波高スペクトルを比較したもので，²⁴¹Am単体溶液からの59.5 keVのピーク領域の計数値とPu溶液に含まれている²⁴¹Am成分の59.5 keVのピーク領域の計数値を合わせることにより， γ (X)スペクトルを用いた²³⁹Puからの特性X線成

分(図Ⅱ.5(b))を弁別することが可能であることが分かった。また，アクチニド核種に対する計測法の最適化では誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)による前処理前の尿試料中のU成分に対する検量線の作成及び検出下限値を算出しICP-MSによる測定法の有効性を確認した。

3) 皮膚汚染時における線量評価に関する研究の結果

(1) サーベイメータ指示値と汚染サイズの関係の調査

図Ⅲ.2に，⁹⁰Sr+⁹⁰Y及び¹³⁷Csについて，汚染の面積を変えた時の4種類のサーベイメータの指示値の変化を示す。ここで表面密度は1 Bq/cm²に固定した。図から，それぞれのサーベイメータの指示値は，窓面積を超える面積の汚染に対してほぼ一定になること，窓面積よりも小さな汚染については面積に比例することが確認された。図Ⅲ.3に，VARSKINで計算した汚染面積と線量率の関係を示す。図Ⅲ.2と同様に，ここでは表面密度を1 Bq/cm²に固定した。図から，線量率は，吸収線量を計算するエリア(1 cm²)よりも大きな汚染でほぼ一定，小さな汚染で面積に比例することが確認された。図Ⅲ.4に，皮膚線量率1 mGy/h当たりのサーベイメータ指示値を汚染面積の関数として表したものを示す。いずれのサーベイメータも皮膚線量率当たりの指示値は，核種間(⁹⁰Sr+⁹⁰Yと¹³⁷Cs)で大きな差は見られない。一方，汚染面積では，端窓 GM:1 cm²以下で一定(mGy/h当たり10 kcpm)，汚染面積の拡大と共に計数率は増加し，入射窓面積(約20 cm²)以上で再び一定(mGy/h当たり200 kcpm)となった。

電離箱:それぞれの窓面積(約44, 46及び約95 cm²)を超える面積の汚染に対して

ほぼ一定であった。 β 線の方向性線量当量率測定用にもともと設計された AE-133B の場合、皮膚線量率当たりの指示値は、ほぼ 1 であった。一方、ICS-321、451B-DE-SU-RYR の場合、カーブの増減の傾向は、AE-133B と同じであるが、広い汚染であっても指示値/線量率は約 0.3 であった。

(2) β 線スペクトル測定に基づく皮膚線量評価

観測されたパルス波高スペクトルを図 III.5 に示す。破線は β 線の理論スペクトル [皮 18] である。プラスチックシンチレータの厚さよりも飛程の長い ^{106}Rh の β 線を除き、パルス波高スペクトルは理論スペクトルをおおむね再現する。表 III.2 に、パルス波高スペクトルから算出した $70\ \mu\text{m}$ 線量当量率と VARSKIN から計算した線量率を比較した結果を示す。面線源の場合、VARSKIN 計算で入力する放射能の値が不確かである点を考慮すれば、前述した $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$ を除き、 β 線スペクトル測定に基づく線量率は、計算によるものとよく合う。系統的なずれは、 β 線スペクトル測定に基づく評価が、平行ビームで入射する β 線を想定しているためであり、一律の補正係数で是正可能であると考えられる。

(3) 表面密度—皮膚線量率換算係数

表 III.3 に、調査の対象とした文献における皮膚線量率換算係数の計算方法を一覧にとりまとめた。表面密度から皮膚の吸収線量率への換算係数（単位：mGy/h per kBq/cm²）について、上記文献の調査で得られたものと VARSKIN による計算によって得られたもの比較した結果を、それぞれ表 III.4（深さ 7 mg/cm²、汚染面積 100 cm²又は十分に広い汚染）及び表 III.5（深さ 40 mg/cm²、汚染面積 100 cm²又は十分に広い汚染）に示す。親核種と娘核種が永続平衡に

なっているものについては、親核種の放射能を基準とした。換算係数間の値の相違については、VARSKIN 6.0 で計算した換算係数を基準としたときの百分率相対偏差 (%) で示した。

また、文献調査又は計算によって得られた換算係数を図 III.6 から図 III.15 に示す。

図 III.6 : JAERI-M 7354 [皮 8] から、最大 β 線エネルギーと深さ 7 mg/cm² での吸収線量換算係数の関係。図の上部のプロットが、汚染が皮膚に付着した条件 (h=0 cm) でのものである。最大エネルギーが 0.07 MeV 未満の β 線は 7 mg/cm² の深さに達しないため、吸収線量はゼロになる。1崩壊当たりの β 線放出率が小さい場合、又は 1崩壊当たりに最大エネルギーの異なる β 線（または転換電子）を複数放出し、かつエネルギーの低い側の放出率が大きい場合に、最大エネルギーに比べて小さな換算係数になる場合がある。図で、周囲から逸脱したプロット— ^{64}Cu と ^{84}Rb —は、主に前者の理由による。

図 III.7 : 図 III.6 のうち、汚染面積 314 cm²、h=0 cm の換算係数を、ICRP Publ 38 の β 線最大エネルギーと平均エネルギー（転換電子等含む）の関数としてプロットしたもの。（以降の図との比較のため）

図 III.8 : Kocher and Eckerman [皮 10] から、 β 線最大エネルギー及び平均エネルギーと深さ 7 mg/cm² での吸収線量換算係数の関係。周囲から逸脱したプロットのうち、 ^{58}Co 、 ^{65}Zn 及び ^{211}Bi は、上述した理由による。 ^{166}mHo は、反対に、その β 線最大エネルギーが転換電子エネルギーよりも低いケースである。一方、高い側に外れた ^{234}Pa の換算係数 (5.4 mGy/h per kBq/cm²) は、論文中に明確な記述はないが、子孫核種である $^{234\text{m}}\text{Pa}$ からの線量寄与も合計した値であると考えられる。

図Ⅲ.9～Ⅲ.10 : Cross ら[皮 9]から, β 線最大エネルギー及び平均エネルギーと深さ 7 mg/cm² での吸収線量換算係数の関係 (汚染面積はそれぞれ 1 cm², 100 cm²)。

図Ⅲ.11 : Faw[皮 19]から, β 線最大エネルギー及び平均エネルギーと深さ 5~10 mg/cm² での吸収線量換算係数の関係。評価対象深さがやや異なるが, Cross らの計算とほぼ一致する。

図Ⅲ.12～Ⅲ.13 : VARSKIN 6.0 での計算から, β 線最大エネルギー及び平均エネルギー (ともに ICRP Publ 107 に基づく) と深さ 7 mg/cm² での吸収線量換算係数の関係 (汚染面積はそれぞれ 1 cm², 100 cm²)。

図Ⅲ.14 : Kocher and Eckerman[皮 10]及び Cross ら[皮 9]から, β 線最大エネルギー及び平均エネルギーと深さ 40 mg/cm² での吸収線量換算係数の関係。周囲から逸脱したプロットのうち, ^{166m}Ho は前述のとおり。一方, ¹²³Sn は, 誤植により 1/10 の値になっていると考えられる。

図Ⅲ.15 : VARSKIN 6.0 での計算から, β 線最大エネルギー及び平均エネルギーと深さ 40 mg/cm² での吸収線量換算係数の関係 (汚染面積は 100 cm²)。

D. 考察

1) 臨界事故時における線量評価に関する研究の考察

(1) 臨界事故時における線源条件の検討

溶液系臨界事故の場合, 臨界の恐れのある工程機器の容積から, 水溶液 1 リットル当たりの核分裂数 (10¹⁵) と表 I.7 に示した換算係数を用いて, 距離の関数として被ばく線量を推定することが可能である。ANSI/ANS N8.23 [臨 12]では, 核分裂数を N_f , 距離を $R(m)$ とするとき,

$$\text{中性子吸収線量(Gy)} = 6.5 \times 10^{-17} \times N_f / R^2$$

$$\gamma \text{線吸収線量(Gy)} = 22 \times 10^{-17} \times N_f / R^2$$

$$\text{合計吸収線量(Gy)} = 28 \times 10^{-17} \times N_f / R^2$$

とする線量推定式が提示されている。これは, 式から分かるように, 吸収線量 \propto 核分裂数を前提にしたものであり, 大容積一すなわち大きな核分裂数が期待される一線源での放射線の自己遮へいを無視している。そこで, 本研究での計算に合致するよう, 上記の ANSI/ANS の線量推定式を修正する。

$$\text{中性子吸収線量(Gy)} = 10 \times (N_f/10^{17})^k / R^2$$

$$\gamma \text{線吸収線量(Gy)} = 20 \times (N_f/10^{17})^k / R^2$$

$$\text{合計吸収線量(Gy)} = 30 \times (N_f/10^{17})^k / R^2$$

ここで, $k = 0.5$ ($N_f > 10^{17}$), $k = 1$ ($N_f < 10^{17}$)

図 I.24 に, ANSI/ANS の線量推定式及びそれに修正を加えたものの両式から算出される合計吸収線量率と核分裂数の関係を示す。破線で示した修正線量推定式による吸収線量は, モンテカルロ計算結果の傾向をよく再現する。

(2) 評価すべき線量について

臨界事故時における線量評価において, 評価される吸収線量は, 選択した線量評価の方法と線量評価の進捗の程度に応じて変わる。表 I.10 及び表 I.11 では, 定義の異なる幾つかの吸収線量について, フルエンス当たりの値を記した。とりあげた線量は, (i) 組織カーマ (ICRU レポート 46), (ii) IAEA マニュアルの重粒子・二次 γ 線による体表面近くでの吸収線量, (iii) 個人吸収線量 $D_p(10)$, そして(iv) RADAPAS 組み込みの全身平均吸収線量 (重粒子・二次 γ 線) である。ここで, (i)は, 入射方向に依存しない量, (ii)及び(iii)は, ともに体表面近くのある点での線量であるため入射方向に依存する量, (iv)は, ある程度の入射方向依存はあれども, その依存の程度が小さい(約0.6倍)量である。これらのうち, たとえば, 体表面

に取り付ける個人線量計の場合、それが測定すべき線量として(ii)又は(iii)以外の選択肢はなく、 γ 線の線量評価が $H_p(10)$ 評価用素子と一般に兼用で行われる点を考慮すれば、(iii)の $D_p(10)$ が合理的である。このとき、背面側から入射する放射線については、線量計の方向特性に基づき放射線の主たる入射面における $D_p(10)$ に補正し、続いて、必要に応じて身体奥深くの(臓器別の)吸収線量に換算する。一方、体内中 ^{24}Na 放射能(及びそれに起因する体表面での γ 線1cm線量当量率)については、 ^{24}Na の生成量と(iv)の吸収線量がともに中性子の入射方向にあまり依存しないという特徴に着目し、かつスクリーニング目的のためだけに使用する場合、あるいは、他の方法等による線量評価値との整合性に留意する必要がない場合に限り、(iv)の吸収線量は有用である。たとえば、表 I.10 から、(iv)の中性子吸収線量1 Gy 当たりの ^{24}Na 比放射能は、

正面(背面)入射：10～42 kBq/g

側面入射：8.5～39 kBq/g

であり、入射方向による変化は小さい。一方、同表から、 $D_p(10)$ の吸収線量に基づく場合、

正面(背面)入射：5.5～19 kBq/g

側面入射：2.5～8.2 kBq/g

となり、入射方向によって2倍程度の変化が生じる。また、スクリーニング目的では、 ^{24}Na の生成に直接関係のない γ 線による被ばく線量も含めるかどうかを決めておく必要がある。

速中性子によって生成される毛髪中の ^{32}P 放射能については、毛髪の採取位置に依存して、(i)又は体表面付近の吸収線量(ii)(iii)のうち重粒子による線量寄与成分を使用することが一般的である。

(3) 体表面の γ 線1cm線量当量率に基づくスクリーニング

RADAPAS [臨 17]によれば、体内での捕獲 γ 線による寄与を含む中性子吸収線量(上述の(iv))1 Gyは、 ^{24}Na 比放射能 $1.0 \times 10^4 \sim 4.2 \times 10^4$ (^{24}Na Bq/ ^{23}Na g)に相当する。この比放射能は、人体中の安定Naの質量パーセント濃度0.14 wt% (体重70 kgで100 gの ^{23}Na [臨 1])を、生体組織の比重1を仮定して 0.0014 g/cm^3 と換算すると、 ^{24}Na ：14～59 Bq/cm³に相当する。この中性子吸収線量と ^{24}Na 濃度の関係(1 Gy = ^{24}Na : 14～59 Bq/cm³)と、表 I.3 で示した瞬間的な中性子曝露での γ 線1cm線量当量率と ^{24}Na 等濃度の関係($0.46 \mu\text{Sv/h} = 1.4 \text{ Bq/cm}^3$)を組み合わせると、水槽形ファントムの場合、中性子吸収線量1 Gy = 体表面の ^{24}Na γ 線による1cm線量当量率4.6～19 $\mu\text{Sv/h}$ 、さらに短半減期核種である ^{38}Cl による影響を含め1 Gy = 13～55 $\mu\text{Sv/h}$ という関係が得られる。さらに、表 I.4 の結果に基づき、水槽形ファントムと人体の大きさの違いを考慮に入れると、同じ中性子吸収線量(1 Gy)に対して、曝露直後の人体表面の線量当量率は、

立位：18～76 $\mu\text{Sv/h}$

前屈座位：26～109 $\mu\text{Sv/h}$

となる。中性子スペクトルによってやや幅が生じるが、高線量被ばくを受けた者をスクリーニングする目的においては、中性子吸収線量当たりの指示値が最も小さくなる条件の数値を使えばよい。

(4) 線量評価におけるレスポンスデータベースの活用

表 I.10 及び表 I.11 にとりまとめた様々な臨界事故条件における体内・毛髪中に生成される ^{24}Na や ^{32}P 放射能、個人線量計レスポンスは、事故対応時に線量評価作業を支援する早見表として活用できるだけでなく、複数の異なる方法から算出された線量に整合が取れているかどうかの確認にも有

用である。仮に整合がつかない場合、線源選択を繰り返し行うことで、最も確からしい被ばく線量の評価が可能になると考えられる。

また、線量評価では放射線の入射方向に関する情報が必要である。(24Na 放射能に基づいて(iv)の吸収線量を評価する場合、この情報はあまり必要ないように見えるが、全身の平均ではなく、ある特定の臓器の吸収線量の評価が必要な場合、それは当てはまらない。) この情報は、入射方向にあまり生成量が依存しない 24Na 放射能と、それ以外の何らかの測定を比較することで、ある程度まで推定できる可能性がある。図 I.19(a)(b)は、24Na 放射能と、116mIn 放射能及び TLD バッジ中の TLD の第 2 素子の指示値(ともに外部から入射する熱中性子に対して特に高い感度を持つ)を比べたものである。正面入射(0 度)側と背面入射(180 度)側での明らかな比の相違は、体の表側に身に着けた熱中性子に敏感な素材—それは個人線量計である必要はなく、携帯電話等の何らかの所持品の構成材料でもよい—を利用することで、入射方向を判別できる可能性を示唆する。ただし、室内散乱線の多い環境では、TLD バッジの 116mIn は背面入射であっても正面入射の約 1/3 の放射能を示す場合があるので[臨 7]、注意が必要である。図 19(c)(d)は、TLD バッジのうち外側から入射する熱中性子を遮る構造的な工夫のなされた TLD(第 3 及び第 4 素子)の指示値と 24Na 放射能を比べたものである。比から、前方入射と背面入射の識別は可能と考えられる。また、この方法は、室内散乱線という外乱因子による影響を受けにくいことが期待される。図 I.19(e)(f)は、速中性子との反応によって生成される(前頭部から採取した毛髪中) 32P 放射能及び TLD バッジの 115mIn 放射能と 24Na 放射能の比

較である。32P 及び 115mIn 放射能はともに背面入射で生成量が小さくなるが、それが、背面入射によるものなのか、それとも MeV 領域の成分の少ない中性子(たとえば鉄・鉛等遮へい)に曝された結果であるのかの識別ができない。したがって、32P 放射能については、身体の様々な部位から毛髪を採取し、それらの放射能の相対強度から入射方向を識別する方法の方が順当であろう。

(4) 252Cf を用いる高線量中性子照射装置と毛髪中の 32P 放射能測定

使用した液体シンチレーションカウンタの場合、約 0.2 Bq 程度まで特別な前処理なしに測定可能であった。計数率/放射能比(約 0.5)はクエンチングによると考えられる。

2) アクチニド核種等による内部被ばく線量評価に関する研究

バイオアッセイ法の迅速化のために、追加試験等により鉄共沈法の確立し、本手法の妥当性を検証するために PROCORAD に参加した。その結果、尿試料を対象としたアクチニド成分(U, Pu 及び Am 成分)の分析に鉄共沈法の妥当性を検証して、本手法によるバイオアッセイ法がアクチニド核種に対する内部被ばく線量評価のための尿中放射能評価法として有効であることが確認した。実際、2017 年 6 月 6 日に起きた原子力機構大洗のプルトニウム内部被ばく事故(以下、大洗事故と言う)では、事故時 Pu 及び Am を体内に取り込んだ 5 人の作業者の Pu 及び Am による内部被ばく線量の評価及び Pu 体内除染剤の治療効果を確認するために、尿中の U, Pu 及び Am 成分の分析を本研究でまとめた鉄共沈法で行った。また、 γ (X)線スペクトロメトリ法による特性 X 線を計測する手法について検討では Pu 溶液の波高スペクトル及び 241Am 単体

の波高スペクトルの違い (Pu 溶液では ^{241}Am 単体の溶液試料に比べて特性 X 線のピークチャンネルが低エネルギー側にシフトし、ピーク半値幅の差) 及び Pu 溶液中の 17keV 及び 20keV の X 線成分の放出率と ^{241}Am 単体溶液での特性 X 線成分の放出率の差異、予め、 ^{241}Am 単体での波高スペクトルの特徴を測定試料の形状毎に自己吸収等に応じて事前に評価しておくことにより、 γ (X) スペクトロメータを用いた計測法による ^{239}Pu からの特性 X 線成分を弁別することが可能であり、 γ (X) 線スペクトロメトリ法による計測法はアクチニド核種の計測法として有効であると考えられる。ICP-MS による尿中の U 成分の計測法では、前処理を行う前の尿試料中の U 成分(^{234}U , ^{235}U , ^{238}U) に対する測定法に検量線及び検出限界値を求め、 ^{238}U の ICP-MS の検出限界値は 0.008 mBq/L でバイオアッセイ法の検出限界値 1mBq/L より低く、 ^{234}U 及び ^{235}U との検出限界値はバイオアッセイ法の検出限界値より高くなっている。これは、 ^{234}U 成分の比放射能によるもので、ICP-MS による測定法では着目している核種の半減期 (比放射能) を考慮する必要があることを確認できる。

ICP-MS による尿中ストロンチウム-90 分析法では、約 60%以上の回収率が安定的に得られることが分かった。また、添加したストロンチウム-90 の放射能とほぼ一致した測定結果の得られたことから、本分析法の妥当性も確認することができた。

本分析法において、安定ストロンチウムを添加する必要のないことが分かり、測定法として誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) を適用した際に問題となる安定ストロンチウムからの干渉を、従来の方法よりも低減できる可能性のあることが分かった。なお、この液体シンチレーション測定法で

は、ストロンチウムストロンチウム-89 も同時に測定が可能であるため、本分析法により、尿試料を対象とした、放射性ストロンチウム-89 及び 90 同時迅速分析が可能であると考えられる。

3) 皮膚汚染時における線量評価に関する研究の考察

(1) 表面汚染及び線量当量率サーベイメータによる皮膚汚染時の線量評価

一般的な GM 計数管式表面汚染サーベイメータ及び電離箱式線量当量率サーベイメータについて、体表面の汚染を測定する場合の汚染密度と指示値の関係、さらに指示値と線量率の関係を明らかにした。高レベル汚染では、表面汚染サーベイメータではなく電離箱式線量当量率サーベイメータによる汚染測定が有用である。広い汚染の場合、電離箱指示値/線量率は 0.3~1 であった。比が 1 のものは、指示値をそのまま表面汚染による皮膚線量率と見なすことができることを表している。それぞれのサーベイメータで測定可能な線量率範囲は、**図 III.16** のとおりである。汚染事故時の初期対応にあつては、本図に基づき汚染の程度に応じて適切なサーベイメータを選択すればよい。文献[20]では、早急な対応を必要とする皮膚汚染のアクションレベルとして 170 mGy/h (汚染が 12 時間継続すると 2 Gy に相当) を提案する。このレベルの測定には、ダイナミックレンジの広い電離箱式線量当量率サーベイメータ 451B-DE-SU-RYR が適切である。本研究の結果をもとに提案された皮膚汚染事故時の線量評価手順の例 (核燃料サイクル工学研究所で取入れ検討中) を**図 III.17** に示す。端窓 GM 計数管式サーベイメータから電離箱式線量当量率サーベイメータへ切り替えが具体的な数値レベルと共に示されている。

一方、汚染核種が不明な場合は、表 2 に示したように β 線スペクトル測定に基づく方法が有効である。例えば、高レベルの汚染事故が発生した場合、作業者の除染及び端窓 GM 計数管又は電離箱サーベイメータによる測定と平行して、除染過程で得られた汚染試料の β 線スペクトルを測定しておけば、のちにその情報を線量評価に活用することも可能になると考えられる。

(2) 表面密度一皮膚線量率換算係数の相違について¹

図 III.18 から図 III.21 に、VARSKIN 6.0 による深さ 7 mg/cm² での皮膚線量の計算結果と文献値の比較を示す。モンテカルロ計算の場合 (Cross ら) と異なり、JAERI-M 7354[皮 8]及び Kocher and Echerman[皮 10]らが使用する点積分核法は、無限均質媒質中において成立する方法であるため、軟組織～空気からなる比均質媒質では、本来は存在しないはずの組織表面での電子の反射の分だけ過大な線量を与える。一方、VARSKIN シリーズでは、点積分核法を計算の基本にしつつも、その電子の反射寄与分の補正がなされている。このことは、Cross[皮 9]らの計算値とほぼ一致することからも分かる。

図 III.22 は、VARSKIN 6.0 による深さ 40 mg/cm² での皮膚線量の計算結果と文献値の比較である。両データはよく一致する。¹⁰³Ru でのずれ (7 mg/cm² 深さでは一致) については、ICRP Publ. 38 の核データに基づく VARSKIN 5.3 ではむしろ過去の文献に一致することから、核データの変更によるものと考えられる。¹²³Sn は、前述したように誤植によるものと考えられる。

現在、我が国で利用されている表面密度

一皮膚線量換算係数 (出典は表 III.2) については、出典によって極端に数値が異なるというほどではなく、また、それは、表面汚染の測定の際の不確かさ (汚染のサイズや自己吸収の程度) や汚染の付着時間といった線量評価における潜在的な不確かさ要因に比べれば十分に小さい。しかしながら、換算係数の算出条件が明らかで、かつモンテカルロ法等の精緻な計算による裏付けがなされており、さらに β 線と γ 線の線量評価が独立して実施可能であるという観点から、表 III.4～表 III.5 に記した VARSKIN 6.0 による換算係数を使うのが好ましいと考えられる。「被ばく線量の測定・評価マニュアル」の改訂作業等が今後ある場合、本報告書でとりまとめた表面密度一皮膚線量換算係数を取り入れるよう働きかけたい。

E. 結論

高線量被ばくが想定される様々な放射線被ばく事故条件において、多くの被災者の中から緊急被ばく医療の対象となる者を迅速に識別し、その線量を評価する手法を開発・整備することを目的に、1) 臨界事故時における線量評価、2) アクチニド核種等による内部被ばく線量評価、及び 3) 皮膚汚染時における線量評価について研究を実施した。

その結果、以下の知見が得られた。

1) 臨界事故時の線量評価に関する研究

核燃料施設において最も発生する可能性の高い溶液系臨界事故について、予想される第 1 スパイクの核分裂数と被ばく線量の間関係を、核分裂数の簡易推定式とモンテカルロ計算シミュレーションの併用によって算出し、溶液の体積だけから被ばく線量を

照のこと。

¹ VARSKIN 4.0 及び 5.3 による計算結果の詳細については平成 28 年度研究報告書を参

算出する簡易式を構築した。これは、万一臨界事故が発生した場合に、被災者及び事故対応要員の被ばく線量がどの程度になるかの見積もりなどに有用である。

体内中に生成される²⁴Na等放射能と、それらから放出されるγ線による体表面でのγ線1cm線量当量率の関係を明らかにした。この関係を利用することによって、たとえばNaI(Tl)シンチレーション式線量当量率サーベイメータによる体表面測定によって高線量被ばく者を識別することが可能である。

原子力機構核燃料サイクル工学研究所で使用している個人線量計(TLDバッジ、臨界事故時スクリーニング用にインジウム箔を内蔵)及び毛髪放射化(³²P)について、計算シミュレーションによって、そのレスポンスを中性子エネルギー及び入射角度の関数として求めた。応答関数は、日本原子力研究所で開発された臨界事故時線量評価プログラムRADAPASに組み込まれた計140個の臨界事故時想定スペクトルでフォールディングされ、体内²⁴Na放射能の関係とともに数値表としてとりまとめられた。これは、事故対応時における線量評価作業を支援する早見表として活用できるだけでなく、複数の異なる方法から算出された線量に整合が取れているかどうかの確認や放射線の入射方向の推定に利用可能である。

²⁵²Cf中性子線源を用いて放射化試料等に高線量の中性子を照射する装置を整備し、毛髪等の照射実験に活用中である。

2) アクチニド核種等による内部被ばく線量評価に関する研究

バイオアッセイ法による内部被ばく線量評価を迅速化のために、鉄共沈法による前処理及び抽出クロマトグラフィーレジンをを用いた手法の検討を行った。その結果、湿式

灰化法と共沈法と組み合わせた前処理法により、従来法で40時間ほどかかった時間を十数時間まで短縮するとともにU、Pu及びAm成分に対する回収率を75%、85%及び80%まで担保していることが確認できた。本研究で行った尿試料を対象とした鉄共沈法によるバイオッセイ手法の検討及び国際相互比較プログラムへ参加して、鉄共沈法によるバイオアッセイ法の妥当性を検証した。

実際、本研究で検討したバイオアッセイ手法及びICP-MSによる測定法は原子力機構大洗のプルトニウム内部被ばく事故時、作業者の内部被ばく線量評価のための尿試料中のU、Pu及びAmの定性・定量に用いられており、鉄共沈法の確立により実際の内部被ばく事故により迅速に貢献することができた。

尿中放射性ストロンチウム分析法の迅速化に係る検討を実施結果、ストロンチウム担体の添加なしに迅速な放射性ストロンチウム分析が可能であることが分かった。今後は、ストロンチウム-89においても分析法の妥当性を検証するとともに、本分析法における定量下限値を求め、緊急時に本分析法により評価できるレベルを把握する必要があると思われる。

3) 皮膚汚染時における線量評価に関する研究

国内で広く使用されているGM計数管式表面汚染サーベイメータ及び電離箱式線量当量率サーベイメータについて、線源サイズ別に、指示値と皮膚線量率の関係を評価し、特に高レベル汚染の場合、電離箱式サーベイメータによる皮膚汚染測定が有効であることを示した。また、β線スペクトルに基づく皮膚線量評価について検討した。本手法は、特に未知核種の場合に有効と考えら

れる。

これまでに国内外で使用されてきた表面密度—皮膚線量率換算係数を一覧表として整理し、出典による違いについて分析するとともに、代表的な 281 核種について計算コード VARSKIN 6.0 を用いて換算係数の検証計算を行った。計算は、二種類の汚染面積（円形 1 cm² 及び 100 cm²）について皮膚の深さ 7 mg/cm² で、汚染面積 100 cm² について深さ 40 mg/cm²（確定的影響を想定）で行った。とりまとめた換算係数一覧表を、国内で広く利用されているマニュアル類に反映させたい。

文献

- [臨 1] International Atomic Energy Agency; Dosimetry for criticality accidents—A Manual, IAEA Technical Report Series No. 211, (1982).
- [臨 2] T. Momose, N. Tsujimura, T. Tasaki, K. Kanai, O. Kurihara, N. Hayashi, K. Shinohara; Dose Evaluation Based on ²⁴Na Activity in the Human Body at the JCO Criticality Accident in Tokai-mura, *J. Radiat. Res.* **42**, Suppl., S95–S105 (2001).
- [臨 3] T. P. McLaughlin, S. P. Monahan, N. L. Pruvost, V. V. Frolov, B. G. Ryazanov, and V. I. Sviridov; A Review of Criticality Accidents, 2000 Revision, Los Alamos National Laboratory Report LA-13638, (2000).
- [臨 4] N. Tsujimura, T. Yoshida, T. Momose; Calculations of Anisotropy Factors for Radionuclide Neutron Sources due to Scattering from Source Encapsulation and Support Structures, *Radiat. Prot. Dosim.* **126**, 168–173 (2007).
- [臨 5] ICRP; Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiations, ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26 (3/4), (1996).
- [臨 6] ANSI, Specifications for the Bottole Manikin Absorption Phantom, ANSI/HPS N13.35-2009, (2009).
- [臨 7] C. Takada, N. Tsujimura, and S. Mikmai; Recalibration of indium foil for personnel screening in criticality accidents, *Radiat. Prot. Dosim.* **144**, 575–579 (2011).
- [臨 8] 丸山隆司, 外部被曝の線量評価, 第 19 回放射医研シンポジウム「緊急時の被曝評価と医療」報文集, NIRS-M-71, 放射線医学総合研究所, (1989).
- [臨 9] H. J. Delafield and J. J. Clifton; Design criteria and principles for criticality detection and alarm system, United Kingdom Atomic Energy Authority report SRD-R-309 (1984).
- [臨 10] American National Standards Institute; Criticality Accident Alarm Systems, ANSI/ANS-8.3-1997 (1997).
- [臨 11] K. Nakajima; Applicability of simplified methods to evaluate consequences of criticality accident using past accident data, *Proceedings of the 7th International Conference on Nuclear Criticality Safety ICNC2003*, Japan Atomic Energy Research Institute report JAERI-Conf 2003-019, 171–176 (2003).
- [臨 12] American National Standards Institute (ANSI); Nuclear criticality accident planning and response, ANSI/ANS 8.23-2007 (2007).
- [臨 13] T. Nomura; Theoretical derivation of simplified evaluation models for the

- first peak of a criticality accident in nuclear fuel solution, *Nucl. Technol.* **131**, 12–21 (2000).
- [臨 14] C. M. Hopper and B. L. Broadhead: An updated nuclear criticality slide rule, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-13322/V2 (1998).
- [臨 15] American National Standards Institute (ANSI); Dosimetry for Criticality Accident, ANSI/HPS 13.3-2013 (2013).
- [臨 16] K. G. Veinot and N. E. Hertel: Personal dose equivalent conversion coefficients for photons to 1 GeV, *Radiat. Prot. Dosim.* **145**(1), 28–35 (2010).
- [臨 17] F. Takahashi: Program for rapid dose assessment in criticality accident, RADAPAS, JAEA-Data/Code 2006-019 (2006).
- [内 1] J. Lehto and X. Hou. Chemistry and analyses of radionuclides. WILEY-VCH (2011).
- [内 2] S. L. Maxell and D. J. Fauth. Rapid analysis of emergency urine and water samples. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **275**, 497-502 (2008).
- [内 3] E. P. Horwitz, R. Chiariza, M. L. Dietz, H. Diamond, D. M. Nelson. Separation and preconcentration of actinides from acid media by extraction chromatography. *Anal. Chem. Acta.*, **281**, 361-372 (1993).
- [皮 1] Nuclear Regulatory Commission: Investigation into the March 28, 1979, Three Mile Island Accident, NUREG-0600, (1979).
- [皮 2] M. Rogovin; Three Mile Island: A report to the commissioners and to the public, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (USA), (1979).
- [皮 3] 須賀新一, 備後一義, 梶本与一; 電離箱型および GM 計数管型サーベイメータの校正(II)—皮膚汚染の β 線線量率測定のための試験一, 保健物理, **14**, 1–10, (1979).
- [皮 4] 被ばく線量の測定・評価マニュアル, 公益財団法人原子力安全技術センター, (2000).
- [皮 5] N. Tsujimura, T. Yoshida, and S. Furuta; Measurements and calculations of beta dose rates on contaminated ground at the Fukushima Daiichi nuclear power plant site, Proc. IRPA-13, May 13–18, 2012, Glasgow, UK, (2012).
- [皮 6] J. S. Durham; VARSKIN 3: A Computer Code for Assessing Skin Dose from Skin Contamination, NUREG/CR-6918 (2006).
- [皮 7] K. Hoshi, T. Yoshida, N. Tsujimura, and K. Okada; The Evaluation of the 0.07 and 3 mm Dose Equivalent with a Portable Beta Spectrometer, *JPS Conf. Proc.* **11**, 070009-1–070009-6, (2016).
- [皮 8] 龍福廣, 中戸喜寄, 備後一義, 立田初己福田整司, 南賢太郎; 点積分核法による β 線皮膚線量の評価, JAERI-M 7354, 日本原子力研究所, (1977).
- [皮 9] W. G. Cross, N. O. Freedman, and P. Y. Wong; Beta ray dose distributions from skin contamination, *Radiat. Prot. Dosim.* **40**(3), 149–168 (1992). 又は, ICRU; Dosimetry for External Beta Rays, ICRU Report 57, (1997).
- [皮 10] D. C. Kocher and K. F. Eckerman; Electron Dose-rate Conversion Factors for External Exposure of the Skin from Uniformly Deposited Activity on the

- Body Surface, *Health Phys.* **53**(2), 135–141, (1987).
- [皮 11] IAEA; Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency, IAEA-TECDOC-1162, (2000).
- [皮 12] NIRS-M-183, 放射線緊急事態時の評価および対応のための一般的手順, 放射線医学総合研究所, (2000).
- [皮 13] D. Delacroix, J. P. Guerre, P. Leblanc, and C. Hickman, Radionuclide and radiation Protection Data Handbook 1998, *Radiat. Prot. Dosim.* **78**(1/2), (1998).
- [皮 14] D. Delacroix, J. P. Guerre, P. Leblanc, and C. Hickman, Radionuclide and radiation Protection Data Handbook 2002, *Radiat. Prot. Dosim.* **98**(1), (2002).
- [皮 15]
<https://ramp.nrcgateway.gov/content/vars-kin-overview>
- [皮 16] ICRP; Radionuclide Transformations—Energy and Intensity of Emissions, ICRP Publication 38, Ann. ICRP 11-13, (1983).
- [皮 17] ICRP; Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38 (3), (2008).
- [皮 18] ICRP; The biological Basis for Dose Limitation in the Skin, ICRP Publication 59, Ann. ICRP 22 (2), (1992).
- [皮 19] R. E. Faw; Absorbed doses to skin from radionuclide sources on the body surface, *Health Phys.* **63**(4), 443–448 (1992).
- [皮 20] C. Rojas-Palma, A. Liland, A. N. Jerstad, G. Etherington, M. D. R. Pérez, T. Rahola, and K. Smith; TMT handbook: triage, monitoring and treatment of people exposed to ionising radiation following a malevolent act, Norwegian Radiation Protection Authority, (2009).
- F. 健康危険情報**
 該当無し
- G. 研究発表**
 口頭発表
 吉田忠義, 星勝也, 辻村憲雄, 岡田和彦; 皮膚汚染における線量評価法の検討—様々な汚染サイズに対する端窓 GM 管の計数率と VARSKIN の活用—, 日本放射線安全管理学会第 15 回学術大会, P29, (2015).
 辻村憲雄, 吉田忠義, 高田千恵; 臨界事故ドシメトリのための TLD バッジの応答関数の評価, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 2A09, (2016).
 山崎巧, 菅巧, 星勝也, 吉田忠義, 辻村憲雄, 高田千恵, 岡田和彦; 皮膚汚染時の線量評価手順の検討—測定から記録まで—, 日本原子力学会 2017 年春の年会, 2B15, (2017).
 辻村憲雄, 高橋史明, 高田千恵; 臨界事故ドシメトリのための TLD バッジレスポンスの目録, 日本保健物理学会第 49 回研究発表会, P26, (2016).
- K. Hoshi, N. Tsujimura, T. Yoshida, O. Kurihara, E. Kim, and K. Yajima; Study of the method for the screening survey using an ambient dose equivalent rate meter in criticality accidents, 9th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-9), July 10–14, 2017, Nagoya, Japan, (2017).

N. Tsujimura, F. Takahashi, and C. Takada; Dataset of TLD badge response and body sodium/hair activation for criticality accident dosimetry, 9th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-9), July 10–14, 2017, Nagoya, Japan, (2017).

論文発表

K. Hoshi, N. Tsujimura, T. Yoshida, O. Kurihara, E. Kim, and K. Yajima; Study of the method for the screening survey using an ambient dose equivalent rate meter in criticality accidents, Progress in Nuclear Science and Technology (in

press).

N. Tsujimura, F. Takahashi, and C. Takada; Dataset of TLD badge response and hair activation for criticality accident dosimetry, Progress in Nuclear Science and Technology (in press).

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

なし

J. 謝辞

本研究の実施にあたり，日本原子力研究開発機構の山崎巧氏，内田真弘氏の協力を得た。この場を借りて深く感謝の意を表す。

資料 I 臨界事故時における線量評価に関する研究

表 I.1 溶液系で想定される臨界事故の線源条件 (計算シミュレーションのための入力条件)

計算条件	K023	K031	K033	K035	265V11-2
	硝酸ウラニル 球(反射無し)	硝酸ウラニル 球(反射無し)	硝酸ウラニル 球(反射無し)	硝酸ウラニル 球(反射無し)	硝酸プルトニウム 円筒(反射無し)
形状					
濃縮度	93.1%	100.0%	20.0%	4.0%	100.0%
密度(g/cm ³)	1.075	1.046	1.185	1.716	1.200
U濃度(g-U/L)又は Pu濃度(g-Pu/L)	55.1	22.0	130.0	540.0	50.0
容積(L)	28.5	100.0	100.0	1000.0	32.6
原子個数密度(#/b-cm)					
Pu-239					1.2596E-04
U-235	1.3154E-04	5.6376E-05	6.6626E-05	5.5351E-05	
U-238	9.6010E-06	0.0000E+00	2.6315E-04	1.3117E-03	
N	2.8205E-04	1.1275E-04	6.5955E-04	2.7341E-03	2.9127E-03
O	3.4012E-02	3.4208E-02	3.5089E-02	3.8436E-02	3.7017E-02
H	6.5769E-02	6.7513E-02	6.4902E-02	5.4999E-02	5.8966E-02
H/X	500	1198	974	994	468

表 I.2 照射終了後における塩化ナトリウム水溶液中の放射能濃度 (Bq/cm³)

	照射時間 (分) : 冷却時間 (分)		²⁴ Na	³⁸ Cl
	HPGe	180 : 0		1.3 (± 9.1%)
MCNP*	180 : 0		1.3 (± 0.3%)	1.9 (± 0.3%)
	180 : 10		1.3 (± 0.3%)	1.5 (± 0.3%)

* 断面積ライブラリに JENDL 3.3 を使用

表 I.3 MCNP 計算によるファントム表面での γ 線 1cm 線量当量率 (括弧内は測定値)

	照射時間 (分) : 照射終了後経過時間 (分)		
	180 : 10	180 : 0	0* : 0
放射能濃度(Bq/cm ³)			
²⁴ Na 濃度	1.3 ± 0.3%	1.3 ± 0.3% (実測 1.3 ± 9.1%)	1.4 ± 0.3%
³⁸ Cl 濃度	1.5 ± 0.3%	1.9 ± 0.3%	6.4 ± 0.3%
1 cm 線量当量率(μSv/h)			
²⁴ Na 1.369 MeV	0.16	0.16	0.17
²⁴ Na 2.754 MeV	0.27	0.27	0.29
²⁴ Na 合計	0.42	0.43	0.46
³⁸ Cl 1.642 MeV	0.074	0.089	0.31
³⁸ Cl 2.168 MeV	0.12	0.15	0.51
³⁸ Cl 合計	0.20	0.24	0.82
²⁴ Na + ³⁸ Cl 合計	0.62 (実測 0.6)	0.66	1.3

* 瞬間的な照射を仮定（ただし、積算中性子フルエンスは 180 分間照射と同じ）

表 I.4 水槽形ファントム及び BOMAB ファントムの表面（1 cm）における
γ線 1cm 線量当量率の時間変化

（水溶液中に生成された ^{24}Na 及び ^{38}Cl の放射能濃度は表 1 を参照）

照射後 経過時間 (h)	実験条件*		瞬間的な照射（積算中性子フルエンスは実験条件と同じ）			
	平板水 ファントム	平板水 ファントム	BOMAB ファントム 立位 ^a	BOMAB ファントム 座位 ^b	BOMAB ファントム 座位前屈 ^c	BOMAB 大 ファントム 立位 ^d
0	0.66	1.3	1.8	2.6	2.8	2.1
0.25	0.60	1.1	1.5	2.2	2.4	1.8
0.50	0.55	0.92	1.3	1.9	2.0	1.5
0.75	0.52	0.80	1.1	1.6	1.7	1.3
1	0.49	0.71	1.0	1.4	1.5	1.2
1.5	0.44	0.58	0.83	1.2	1.3	0.98
2	0.42	0.51	0.72	1.0	1.1	0.85
3	0.38	0.43	0.61	0.87	0.94	0.72
4	0.36	0.39	0.55	0.79	0.85	0.66
5	0.34	0.37	0.52	0.75	0.80	0.62
6	0.32	0.35	0.49	0.71	0.76	0.59
7	0.31	0.33	0.47	0.68	0.73	0.56
8	0.30	0.32	0.45	0.64	0.69	0.53
9	0.28	0.30	0.43	0.62	0.66	0.51
10	0.27	0.29	0.41	0.59	0.63	0.49
15	0.21	0.23	0.33	0.47	0.50	0.38
20	0.17	0.18	0.26	0.37	0.40	0.31
25	0.13	0.14	0.20	0.29	0.32	0.24
30	0.11	0.11	0.16	0.23	0.25	0.19
35	0.085	0.091	0.13	0.18	0.20	0.15
40	0.067	0.072	0.10	0.15	0.16	0.12
45	0.053	0.057	0.081	0.12	0.12	0.10
50	0.042	0.045	0.064	0.092	0.10	0.076

a. 寸法は文献（ANSI/HPS N13.35, Table 1）に基づく。

b. 大腿部については、その容積が立位の場合と同じになるよう長さを調整した

c. 胴体部分の前屈角度：30 度。

d. 寸法は文献（ANSI/HPS N13.35, Table A6）に基づく。

表 I.5 単位中性子フルエンスあたりに毛髪 1 g 中に生成される誘導放射能（曝露直後），採取部位：前頭部（前額）

中性子 エネルギー (MeV)	前方入射						側面入射						後方入射					
	$^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$		$^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$		$^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$		$^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$		$^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$		$^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$		$^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$		$^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$		$^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$	
	pBq cm ²	0.4%	pBq cm ²	3.0%	pBq cm ²	0.4%	pBq cm ²	0.5%	pBq cm ²	2.2%	pBq cm ²	0.5%	pBq cm ²	0.8%	pBq cm ²	3.1%	pBq cm ²	0.8%
1.49E+01	1.5E+02	0.4%	3.8E-03	3.0%	3.0E+01	0.4%	1.6E+02	0.5%	4.2E-03	2.7%	3.2E+01	0.5%	4.1E+01	0.8%	3.3E-03	3.1%	8.6E+00	0.8%
9.05E+00	1.6E+02	0.4%	6.7E-03	2.4%	3.4E+01	0.4%	1.7E+02	0.5%	7.0E-03	2.2%	3.6E+01	0.5%	2.9E+01	0.9%	4.7E-03	2.6%	6.3E+00	0.9%
5.49E+00	1.2E+02	0.4%	1.0E-02	1.9%	2.6E+01	0.4%	1.2E+02	0.5%	1.0E-02	1.8%	2.7E+01	0.5%	9.4E+00	1.4%	5.2E-03	2.7%	2.1E+00	1.4%
3.33E+00	4.7E+01	0.4%	1.5E-02	1.5%	1.3E+01	0.4%	4.8E+01	0.6%	1.4E-02	1.6%	1.3E+01	0.6%	1.4E+00	2.4%	5.8E-03	2.5%	4.1E-01	2.3%
2.02E+00	1.7E+00	0.7%	2.1E-02	1.3%	1.1E+00	0.6%	1.7E+00	1.0%	1.8E-02	1.4%	1.1E+00	0.8%	1.4E-02	7.4%	5.4E-03	2.7%	1.0E-02	5.7%
1.22E+00	5.0E-03	0.6%	2.7E-02	1.1%	1.7E-02	0.7%	5.1E-03	0.9%	2.1E-02	1.3%	1.8E-02	1.0%	8.0E-06	15.6%	3.6E-03	3.2%	2.9E-05	16.5%
7.43E-01			3.2E-02	1.1%	3.0E-08	2.5%			2.2E-02	1.3%	2.8E-08	3.6%			2.9E-03	3.4%		
4.50E-01			3.4E-02	1.1%					2.1E-02	1.5%					1.7E-03	4.3%		
2.73E-01			4.1E-02	1.1%					2.3E-02	1.4%					1.4E-03	4.5%		
1.66E-01			5.1E-02	1.1%					2.7E-02	1.9%					9.5E-04	5.4%		
8.65E-02			5.2E-02	1.0%					2.2E-02	1.9%					8.1E-04	5.8%		
2.48E-02			5.6E-02	0.8%					2.2E-02	1.3%					5.8E-04	6.5%		
7.10E-03			6.5E-02	0.8%					2.3E-02	1.3%					5.3E-04	6.9%		
2.03E-03			7.4E-02	0.8%					2.6E-02	1.2%					4.8E-04	7.1%		
5.83E-04			8.5E-02	0.7%					3.0E-02	1.1%					4.2E-04	7.2%		
1.67E-04			9.9E-02	0.6%					3.6E-02	1.0%					3.7E-04	7.6%		
4.79E-05			1.2E-01	0.6%					4.4E-02	0.9%					3.7E-04	8.1%		
1.37E-05			1.4E-01	0.5%					5.7E-02	0.7%					3.1E-04	9.8%		
3.93E-06			1.7E-01	0.5%					7.6E-02	0.6%					3.0E-04	8.6%		
1.13E-06			2.2E-01	0.4%					1.0E-01	0.5%					1.8E-04	10.6%		
4.14E-07			5.6E-01	0.4%					3.2E-01	0.6%					8.2E-05	15.2%		
1.00E-04																		

表 I.6 単位中性子フルエンスあたりに毛髪 1 g 中に生成される誘導放射能 (曝露直後)

採取位置	入射角度	²⁵² Cf						熱中性子	
		³² S(n,p) ³² P		³¹ P(n,γ) ³² P		³¹ P(n,p) ³¹ Si		³¹ P(n,γ) ³² P	
		pBq cm ²		pBq cm ²		pBq cm ²		pBq cm ²	
前頭部	0	3.5E+01	0.6%	2.2E-02	1.1%	8.3E+00	0.5%	5.6E-01	0.4%
	30	3.5E+01	0.6%	2.2E-02	1.1%	8.3E+00	0.6%		
	60	3.5E+01	0.7%	2.0E-02	1.1%	8.4E+00	0.6%		
	90	3.5E+01	0.8%	1.7E-02	1.2%	8.4E+00	0.7%	3.2E-01	0.6%
	120	1.9E+01	0.9%	1.1E-02	1.5%	4.6E+00	0.9%		
	150	5.0E+00	1.6%	6.4E-03	2.4%	1.2E+00	1.6%		
	180	2.8E+00	2.1%	4.7E-03	2.5%	6.5E-01	2.1%	8.2E-05	15.2%
右側頭部	0	3.6E+01	0.8%	1.7E-02	1.2%	8.6E+00	0.7%	3.0E-01	0.6%
	30	3.4E+01	0.7%	2.4E-02	1.0%	8.2E+00	0.6%		
	60	3.4E+01	0.6%	2.8E-02	1.0%	8.3E+00	0.6%		
	90	3.5E+01	0.6%	3.0E-02	0.9%	8.4E+00	0.5%	5.8E-01	0.4%
	120	3.5E+01	0.6%	2.8E-02	1.0%	8.4E+00	0.6%		
	150	3.4E+01	0.7%	2.4E-02	1.0%	8.3E+00	0.6%		
	180	3.6E+01	0.8%	1.7E-02	1.2%	8.6E+00	0.7%	3.0E-01	0.6%
左側頭部	0	3.6E+01	0.8%	1.7E-02	1.2%	8.6E+00	0.7%	3.0E-01	0.6%
	30	8.6E+00	1.4%	1.1E-02	1.5%	2.0E+00	1.3%		
	60	5.3E+00	1.6%	1.1E-02	1.5%	1.2E+00	1.5%		
	90	4.8E+00	1.6%	1.1E-02	1.6%	1.1E+00	1.6%	5.2E-04	6.6%
	120	5.1E+00	1.6%	1.1E-02	1.5%	1.2E+00	1.5%		
	150	8.9E+00	1.3%	1.1E-02	1.5%	2.1E+00	1.3%		
	180	3.6E+01	0.8%	1.7E-02	1.2%	8.6E+00	0.7%	3.0E-01	0.6%
後頭部	0	2.8E+00	2.2%	4.7E-03	2.3%	6.5E-01	2.1%	8.9E-05	14.2%
	30	4.9E+00	1.6%	6.4E-03	2.0%	1.1E+00	1.6%		
	60	1.9E+01	0.9%	1.1E-02	1.4%	4.5E+00	0.9%		
	90	3.6E+01	0.8%	1.7E-02	1.2%	8.6E+00	0.7%	3.2E-01	0.6%
	120	3.4E+01	0.7%	2.0E-02	1.2%	8.3E+00	0.6%		
	150	3.4E+01	0.6%	2.1E-02	1.1%	8.3E+00	0.6%		
	180	3.5E+01	0.6%	2.2E-02	1.1%	8.3E+00	0.5%	5.5E-01	0.4%
頭頂部	0	3.5E+01	0.8%	1.3E-02	1.4%	8.5E+00	0.7%	3.0E-01	0.6%
	30	3.5E+01	0.8%	1.4E-02	1.3%	8.5E+00	0.7%		
	60	3.5E+01	0.8%	1.5E-02	1.2%	8.5E+00	0.7%		
	90	3.5E+01	0.8%	1.6E-02	1.2%	8.5E+00	0.7%	3.1E-01	0.6%
	120	3.5E+01	0.8%	1.5E-02	1.2%	8.5E+00	0.7%		
	150	3.5E+01	0.8%	1.4E-02	1.3%	8.5E+00	0.7%		
	180	3.5E+01	0.8%	1.3E-02	1.4%	8.5E+00	0.7%	3.0E-01	0.6%

入射角度：天頂方向から見て時計回り

表 I.7 MCNP の固有値計算によって得られた、1 核分裂当たりの漏洩粒子カレント、フルエンス平均エネルギー及びスペクトル平均換算係数

計算によって得られた パラメータ	K023	K031	K033	K035	265V11-2
	硝酸ウラニル	硝酸ウラニル	硝酸ウラニル	硝酸ウラニル	硝酸プルトニウム
中性子					
カレント Nn	0.95	0.54	0.56	0.17	1.19
平均エネルギー (MeV)	1.2	1.1	1.1	1.1	1.3
換算係数					
組織カーマKt (pGy cm ²)	16.7	16.6	15.9	15.8	18.3
組織吸収線量Dhp (pGy cm ²)	18.8	18.6	17.9	17.8	20.5
組織吸収線量Dng (pGy cm ²)	2.2	2.2	2.3	2.3	2.1
Dhp + Dng (pGy cm ²)	21.0	20.8	20.2	20.1	22.6
個人吸収線量D _p (10) (pGy cm ²)	21.3	21.2	20.4	20.3	23.1
個人線量当量H _p (10) (pSv cm ²)	240	238	227	225	260
ガンマ線					
カレント Ng	5.4	5.1	3.5	0.76	5.5
平均エネルギー (MeV)	0.98	0.91	1.2	1.5	1.0
換算係数					
個人吸収線量D _p (10) (pGy cm ²)	4.6	4.2	5.2	6.3	4.7
個人線量当量H _p (10) (pSv cm ²)	4.6	4.2	5.2	6.3	4.7

表 I.8 最小核分裂数 (10¹⁵) 及び溶液体積から算出したスパイクの核分裂数における距離 1 m での線量

核分裂数と吸収線量	K023	K031	K033	K035	265V11-2
	硝酸ウラニル	硝酸ウラニル	硝酸ウラニル	硝酸ウラニル	硝酸プルトニウム
核分裂数(最小臨界事故)	1.0E+15	1.0E+15	1.0E+15	1.0E+15	1.0E+15
中性子D _p (10) (Gy)	0.16	0.09	0.09	0.03	0.22
ガンマ線D _p (10) (Gy)	0.19	0.17	0.14	0.04	0.21
合計D _p (10) (Gy)	0.35	0.26	0.24	0.07	0.43
中性子/ガンマ比	0.8	0.5	0.6	0.7	1.0
溶液体積 (L)	28.5	100.0	100.0	1000.0	32.6
核分裂数(典型値)	2.8E+16	1.0E+17	1.0E+17	1.0E+18	3.3E+16
中性子D _p (10) (Gy)	4.6	9.0	9.0	28	7.1
ガンマ線D _p (10) (Gy)	5.5	17	14	38	6.8
合計D _p (10) (Gy)	10	26	24	66	14
核分裂数(最大値)	1.9E+17	6.6E+17	6.6E+17	6.6E+18	2.2E+17
中性子D _p (10) (Gy)	30	60	60	184	47
ガンマ線D _p (10) (Gy)	37	113	96	249	45
合計D _p (10) (Gy)	67	173	155	433	92
核分裂数(最小値)	4.7E+15	1.6E+16	1.6E+16	1.6E+17	5.3E+15
中性子D _p (10) (Gy)	0.75	1.5	1.5	4.6	1.2
ガンマ線D _p (10) (Gy)	0.91	2.8	2.4	6.2	1.1
合計D _p (10) (Gy)	1.7	4.3	3.9	11	2.3

表 I.9 中性子と γ 線による個人吸収線量 $D_p(10) = 100 \text{ mGy}$ での体内 ^{24}Na 放射能, 体内 ^{24}Na による腹部表面での γ 線 1cm 線量当量率, 及び TLD バッジ中 ^{116}mIn 放射能に基づくバッジ表面での端窓 GM 計数管式表面汚染サーベイメータ計数率

		K023	K031	K033	K035	265V11-2
		硝酸ウラニル	硝酸ウラニル	硝酸ウラニル	硝酸ウラニル	硝酸プルトニウム
個人吸収線量 $D_p(10)$	(mGy)	100	100	100	100	100
中性子	(mGy)	45	34	38	43	51
ガンマ線	(mGy)	55	66	62	57	49
中性子フルエンス	(cm^{-2})	2.1E+09	1.6E+09	1.9E+09	2.1E+09	2.2E+09
前方又は後方入射						
体内 ^{24}Na 比放射能	(Bq/g)	3.3E+02	2.6E+02	2.9E+02	3.2E+02	3.6E+02
体内 ^{24}Na 放射能	(Bq)	3.3E+04	2.6E+04	2.9E+04	3.2E+04	3.6E+04
^{24}Na による体表面 γ 線 1cm線量当量率	(Bq/cm^3) ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	4.7E-01	3.6E-01	4.1E-01	4.5E-01	5.0E-01
2.2E-01		1.7E-01	2.0E-01	2.2E-01	2.4E-01	
前方入射						
^{116}mIn 放射能	(Bq)	4.6E+04	3.4E+04	4.6E+04	5.1E+04	4.0E+04
TLDバッジ ^{116}mIn 放射 能の端窓GM測定	(kcpm)	1.6E+01	1.2E+01	1.6E+01	1.8E+01	1.4E+01
後方入射						
^{116}mIn 放射能	(Bq)	3.7E+03	2.8E+03	3.1E+03	3.4E+03	4.1E+03
TLDバッジ ^{116}mIn 放射 能の端窓GM測定	(kcpm)	1.3E+00	1.0E+00	1.1E+00	1.2E+00	1.5E+00

注：放射能は曝露直後の値。また，ガンマ線 1cm 線量当量率には短半減期核種 (^{38}Cl) の寄与含まず。

表 I.10 様々な臨界事故条件における種々の反応・線量計のレスポンスデータ (体内 ²⁴Na 放射能)

線源条件	Spectrum#	1 2 3 4 5 6 7 8								9 10 11 12 13 14 15 16								17 18 19 20 21 22 23 24									
		Shield (cm)		None		None		None		None		None		None		None		None		None		None		None		None	
		Metal/Solution	R(cm)	None	Solution	None	Solution	None	Solution	None	Solution	None	Solution	None	Solution	None	Solution	None	Solution	None	Solution	None	Solution	None	Solution	None	Solution
スペクトル、線量及び線量計等のレスポンス		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
スペクトルと線量		8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0	8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0	8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0		
中性子フルエンスφ _n	cm ⁻²	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
>1 MeV	%	53	41	40	39	37	36	36	35	27	24	24	23	23	23	23	23	19	19	19	19	19	19	19	19	19	
1 MeV-0.4 eV	%	47	53	51	50	49	47	46	46	54	46	44	44	43	42	42	41	40	34	34	34	33	33	33	33	33	
<0.4 eV	%	0	6	9	12	14	16	18	19	20	31	32	33	34	35	35	36	42	47	48	48	48	48	48	48	48	
平均エネルギー	MeV	1.60	1.28	1.25	1.23	1.20	1.18	1.16	1.16	0.86	0.76	0.76	0.74	0.74	0.74	0.74	0.75	0.58	0.57	0.57	0.56	0.57	0.57	0.57	0.58	0.59	
中性子φ _n -線量換算係数:																											
個人線量当量H _p (10)	pSv cm ²	372	259	250	242	235	228	223	222	188	154	153	150	149	149	148	148	124	119	118	118	118	118	118	119	120	
組織カーマク	pGy cm ²	24.6	17.9	17.3	16.8	16.3	15.9	15.5	15.5	12.5	10.4	10.4	10.2	10.2	10.2	10.1	10.2	8.3	8.0	8.0	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.2	
吸収線量(重粒子)D _{hp}	pGy cm ²	27.3	20.0	19.4	18.8	18.3	17.8	17.5	17.4	13.9	11.8	11.7	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	9.4	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.3	9.3	9.4	
吸収線量(二次γ)H _{ng}	pGy cm ²	1.6	2.1	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	
吸収線量(合計)D _{hp} +H _{ng}	pGy cm ²	28.9	22.1	21.5	21.0	20.5	20.1	19.8	19.8	16.4	14.5	14.5	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	12.4	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3	12.3	12.4	12.5	
個人吸収線量D _p (10)	pGy cm ²	29.9	22.6	21.9	21.4	20.8	20.3	20.0	19.9	16.5	14.2	14.2	14.0	14.0	13.9	13.9	13.9	11.8	11.6	11.5	11.5	11.6	11.6	11.6	11.6	11.8	
ガンマ線フルエンスφ _g	cm ⁻²	0.26	2.11	2.81	3.37	3.66	4.10	4.85	5.22	0.32	1.78	2.30	2.67	2.97	3.38	4.03	4.31	0.68	1.93	2.33	2.62	2.88	3.26	3.84	4.10		
平均エネルギー	MeV	1.34	1.34	1.28	1.23	1.26	1.30	1.34	1.35	1.32	1.16	1.12	1.09	1.11	1.13	1.15	1.15	1.61	1.34	1.29	1.26	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	
ガンマ線φ _g -線量換算係数:																											
個人線量当量H _p (10)	pSv cm ²	6.1	6.0	5.7	5.6	5.6	5.8	5.9	5.9	5.5	5.1	4.9	4.8	4.9	5.0	5.0	5.0	6.2	5.5	5.4	5.2	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	
個人吸収線量D _p (10)	pGy cm ²	6.1	6.0	5.7	5.6	5.6	5.8	5.9	5.9	5.5	5.1	4.9	4.8	4.9	5.0	5.0	5.0	6.2	5.5	5.4	5.2	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	
γ線H _{ng} (0.4eV/0m)	pGy cm ²	1.6	12.8	16.2	16.8	20.7	23.7	28.7	31.0	1.8	9.0	11.3	12.8	14.5	16.7	20.3	21.7	4.2	10.6	12.5	13.8	15.2	17.3	20.4	21.6		
ガンマ線H _{ng} (10) / 中性子φ _n (10)		0.004	0.049	0.065	0.077	0.083	0.104	0.128	0.140	0.009	0.050	0.074	0.085	0.097	0.113	0.137	0.147	0.034	0.089	0.106	0.117	0.128	0.146	0.172	0.192		
ガンマ線D _p (10) / 中性子D _p (10)		0.053	0.559	0.737	0.879	0.996	1.164	1.435	1.561	0.108	0.632	0.797	0.916	1.039	1.201	1.457	1.558	0.356	0.919	1.083	1.197	1.312	1.491	1.751	1.855		
²⁴ Na放射能(RADAPAS読み込み吸収線量に基づく)																											
単位中性子フルエンス当たりの全身 ²⁴ Na比放射能	(Bq/g)/cm ²	1.64E-07	1.61E-07	1.59E-07	1.57E-07	1.56E-07	1.54E-07	1.53E-07	1.52E-07	1.55E-07	1.47E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.44E-07	1.44E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.40E-07	1.35E-07	1.35E-07	1.35E-07	1.34E-07	1.34E-07	1.34E-07	1.34E-07	1.34E-07	
重粒子	pGy cm ²	13.8	10.7	10.4	9.9	9.7	9.5	9.3	9.2	7.1	6.0	5.9	5.8	5.8	6.2	5.7	5.7	4.5	4.3	4.2	4.2	4.2	4.2	4.3	4.3		
二次γ線	pGy cm ²	2.1	2.0	2.0	1.9	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.9	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6		
全身中 ²⁴ Na比放射能当たりの中性子吸収線量																											
中性子吸収線量(重粒子)*	Gy/(Ba/g)	8.44E-05	6.62E-05	6.52E-05	6.30E-05	6.23E-05	6.16E-05	6.09E-05	6.07E-05	4.56E-05	4.08E-05	4.07E-05	4.01E-05	4.01E-05	4.31E-05	4.02E-05	4.03E-05	3.20E-05	3.17E-05	3.15E-05	3.13E-05	3.16E-05	3.17E-05	3.17E-05	3.20E-05		
中性子吸収線量(二次ガンマ線)*	Gy/(Ba/g)	1.29E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.24E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.25E-05	1.25E-05	1.24E-05	1.22E-05	1.21E-05	1.21E-05	1.21E-05	1.31E-05	1.22E-05	1.21E-05	1.20E-05	1.19E-05								
中性子吸収線量(合計)	Gy/(Ba/g)	9.72E-05	7.89E-05	7.78E-05	7.53E-05	7.49E-05	7.41E-05	7.34E-05	7.31E-05	5.80E-05	5.30E-05	5.28E-05	5.23E-05	5.23E-05	5.62E-05	5.23E-05	5.24E-05	4.40E-05	4.36E-05	4.35E-05	4.31E-05	4.34E-05	4.36E-05	4.40E-05	4.44E-05		
中性子吸収線量1Gy当たりの全身 ²⁴ Na比放射能	(Bq/g)/Gy	1.0E+04	1.3E+04	1.3E+04	1.3E+04	1.3E+04	1.3E+04	1.3E+04	1.4E+04	1.7E+04	1.9E+04	1.9E+04	1.9E+04	1.8E+04	1.9E+04	1.8E+04	1.9E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04		
中性子吸収線量1Gy当たりの全身 ²⁴ Na放射能	Ba/Gy	1.0E+06	1.3E+06	1.3E+06	1.3E+06	1.3E+06	1.3E+06	1.4E+06	1.4E+06	1.7E+06	1.9E+06	1.9E+06	1.9E+06	1.8E+06	1.9E+06	1.8E+06	1.9E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06		
γ線1cm線量当量率(曝露直後)	(Ba/cm ³)/Gy	1.4E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.9E+01	1.9E+01	1.9E+01	1.9E+01	1.9E+01	2.4E+01	2.6E+01	2.7E+01	2.7E+01	2.7E+01	2.7E+01	2.7E+01	2.7E+01	3.2E+01	3.2E+01	3.2E+01	3.2E+01	3.2E+01	3.2E+01	3.2E+01	3.2E+01		
γ線1cm線量当量率(曝露直後)	μSv/h	6.9E+00	8.5E+00	8.6E+00	8.9E+00	8.9E+00	9.0E+00	9.1E+00	9.1E+00	1.2E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.2E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.5E+01	1.5E+01	1.5E+01	1.5E+01	1.5E+01	1.5E+01	1.5E+01	1.5E+01		
γ線1cm線量当量率(曝露直後)	前照座位	1.0E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.4E+01	1.7E+01	1.9E+01	1.9E+01	1.9E+01	1.8E+01	1.9E+01	1.8E+01	1.9E+01	2.2E+01	2.3E+01								
単位中性子フルエンス当たりの全身 ²⁴ Na比放射能	(Bq/g)/cm ²	7.59E-08	7.37E-08	7.28E-08	7.21E-08	7.14E-08	7.07E-08	7.01E-08	7.00E-08	6.99E-08	6.66E-08	6.63E-08	6.59E-08	6.57E-08	6.54E-08	6.52E-08	6.51E-08	6.34E-08	6.18E-08	6.16E-08	6.15E-08	6.14E-08	6.13E-08	6.12E-08	6.13E-08		
重粒子	pGy cm ²	8.0	6.4	6.0	6.1	5.7	5.6	5.5	5.4	4.1	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	2.8	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6		
二次γ線	pGy cm ²	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7			
全身中 ²⁴ Na比放射能当たりの中性子吸収線量																											
中性子吸収線量(重粒子)*	Gy/(Ba/g)	1.06E-04	8.73E-05	8.29E-05	8.46E-05	7.95E-05	7.86E-05	7.78E-05	7.73E-05	5.85E-05	5.25E-05	5.20E-05	5.17E-05	5.17E-05	5.16E-05	5.19E-05	5.20E-05	4.13E-05	4.06E-05	4.07E-05	4.03E-05	4.07E-05	4.09E-05	4.13E-05	4.18E-05		
中性子吸収線量(二次ガンマ線)*	Gy/(Ba/g)	1.25E-05	1.27E-05	1.22E-05	1.26E-05	1.20E-05	1.21E-05	1.20E-05	1.20E-05	1.19E-05	1.16E-05	1.15E-05	1.15E-05	1.16E-05	1.16E-05	1.15E-05	1.15E-05	1.14E-05	1.13E-05								
中性子吸収線量(合計)	Gy/(Ba/g)	1.19E-04	1.00E-04	9.51E-05	9.71E-05	9.15E-05	9.07E-05	8.98E-05	8.93E-05	7.04E-05	6.40E-05	6.35E-05	6.32E-05	6.30E-05	6.32E-05	6.30E-05	6.34E-05	5.27E-0									

表 I.10 (続き)

線源条件		Spectrum#																								
		97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	
スペクトル、線量及び線量計等のレスポンス	Shield (cm)	Iron 20	Iron 20	Iron 20	Iron 20	Iron 20	Iron 20	Iron 20	Iron 20	Iron 30	Iron 50	Lead 5														
	Metal/Solution (Rcm)	Metal	Solution	Solution	Solution	Solution	Solution	Solution	Solution	Metal	Solution	Solution	Solution	Solution	Metal	Solution	Solution	Solution	Solution	Metal	Solution	Solution	Solution	Solution	Solution	
スペクトルと線量		8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0	8.7	17.4	20.2	30.0	50.0	8.7	17.4	20.2	30.0	50.0	8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	
中性子フルエンス ϕ_n	cm ⁻²	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
>1 MeV	%	8	9	9	9	9	9	9	9	3	3	3	3	4	1	1	1	1	1	44	34	37	32	31	30	
1 MeV-0.4 eV	%	92	91	91	91	91	91	91	91	97	97	97	97	96	99	99	99	99	99	56	60	58	57	55	54	
<0.4 eV	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	9	12	14	16	
平均エネルギー	MeV	0.43	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.42	0.42	0.29	0.28	0.28	0.28	0.29	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	1.29	1.02	1.00	0.98	0.96	0.95	
中性子 ϕ_n -線量換算係数:																										
個人線量当量H _p (10)	pSv cm ²	244	225	226	226	226	226	227	228	199	190	190	191	193	144	140	140	141	141	357	250	240	233	228	221	
組織カマコ	pGy cm ²	13.1	12.2	12.3	12.3	12.3	12.3	12.4	12.4	10.7	10.3	10.3	10.3	10.4	8.0	7.8	7.8	7.8	7.8	22.3	16.1	15.5	15.0	14.7	14.4	
吸収線量(重粒子)D _{hp}	pGy cm ²	13.2	12.3	12.4	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	10.4	10.0	10.0	10.1	10.2	7.5	7.3	7.4	7.4	7.4	24.3	17.7	17.1	16.6	16.3	15.9	
吸収線量(二次 γ)H _{ng}	pGy cm ²	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	1.7	2.1	2.2	2.3	2.3	2.3	
吸収線量(合計)D _{hp} +H _{ng}	pGy cm ²	15.2	14.4	14.4	14.4	14.4	14.5	14.6	14.6	12.5	12.1	12.1	12.2	12.3	9.7	9.5	9.6	9.6	9.6	26.0	19.9	19.3	18.9	18.6	18.2	
個人吸収線量D _p (10)	pGy cm ²	16.1	15.2	15.3	15.3	15.3	15.3	15.4	15.5	13.2	12.8	12.8	12.9	13.0	10.2	10.0	10.0	10.1	10.1	27.1	20.5	19.8	19.3	18.9	18.5	
ガンマ線フルエンス ϕ_g	cm ⁻²	0.03	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.19	0.23	0.26	0.29	0.34	
平均エネルギー	MeV	1.19	1.60	1.61	1.60	1.61	1.63	1.63	1.61	1.73	1.87	1.85	1.81	1.80	2.18	2.19	2.16	2.25	2.12	1.50	1.65	1.67	1.67	1.69	1.70	
ガンマ線 ϕ_g -線量換算係数:																										
個人線量当量H _p (10)	pSv cm ²	5.1	6.2	6.3	6.3	6.3	6.4	6.4	6.3	6.4	6.8	6.8	6.7	6.7	7.6	7.7	7.6	7.8	7.5	6.6	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	
個人吸収線量D _p (10)	pGy cm ²	5.1	6.2	6.3	6.3	6.3	6.4	6.4	6.3	6.4	6.8	6.8	6.7	6.7	7.6	7.7	7.6	7.8	7.5	6.6	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	
γ 線H _p (10) $\times\phi_g/dm$		0.1	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	1.3	1.6	1.8	2.1	2.4
ガンマ線H _p (10) / 中性子H _p (10)		0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005	0.007	0.008	0.009	0.011	
ガンマ線D _p (10) / 中性子D _p (10)		0.009	0.026	0.030	0.031	0.034	0.037	0.041	0.044	0.009	0.014	0.015	0.015	0.016	0.014	0.015	0.015	0.016	0.015	0.010	0.065	0.082	0.095	0.110	0.130	
²⁴ Na放射能(RADAPAS組み込み吸収線量に基づく)																										
単位中性子フルエンス当たりの全身中 ²⁴ Na比放射能	(Ba/e)/cm ²	1.76E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.76E-07	1.76E-07	1.76E-07	1.76E-07	1.76E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.75E-07	1.68E-07	1.64E-07	1.62E-07	1.61E-07	1.59E-07	1.57E-07	
重粒子	pGy cm ²	4.5	4.2	4.3	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4	3.2	3.1	3.1	3.1	3.2	2.1	2.0	2.1	2.1	2.1	1.1	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	
二次 γ 線	pGy cm ²	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	
全身中 ²⁴ Na比放射能当たりの中性子吸収線量																										
中性子吸収線量(重粒子)*	Gy/(Ba/g)	2.57E-05	2.42E-05	2.44E-05	2.44E-05	2.46E-05	2.46E-05	2.46E-05	2.46E-05	1.83E-05	1.76E-05	1.77E-05	1.78E-05	1.81E-05	1.20E-05	1.17E-05	1.18E-05	1.18E-05	1.19E-05	6.91E-05	5.41E-05	5.29E-05	5.18E-05	5.12E-05	5.05E-05	
中性子吸収線量(二次ガンマ線)*	Gy/(Ba/g)	1.25E-05	1.25E-05	1.25E-05	1.25E-05	1.25E-05	1.25E-05	1.25E-05	1.25E-05	1.24E-05	1.24E-05	1.24E-05	1.24E-05	1.25E-05	1.24E-05	1.23E-05	1.23E-05	1.24E-05	1.24E-05	1.28E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.25E-05	1.25E-05	
中性子吸収線量(合計)	Gy/(Ba/g)	3.82E-05	3.67E-05	3.69E-05	3.70E-05	3.70E-05	3.71E-05	3.73E-05	3.76E-05	3.07E-05	3.00E-05	3.01E-05	3.03E-05	3.05E-05	2.44E-05	2.40E-05	2.41E-05	2.42E-05	2.42E-05	8.19E-05	6.66E-05	6.55E-05	6.44E-05	6.37E-05	6.30E-05	
中性子吸収線量1Gy当たりの全身中 ²⁴ Na比放射能	(Ba/g)/Gy	2.6E+04	2.7E+04	2.7E+04	2.7E+04	2.7E+04	2.7E+04	2.7E+04	2.7E+04	3.3E+04	3.3E+04	3.3E+04	3.3E+04	3.3E+04	4.1E+04	4.2E+04	4.2E+04	4.1E+04	4.1E+04	1.2E+04	1.5E+04	1.5E+04	1.6E+04	1.6E+04	1.6E+04	
中性子吸収線量1Gy当たりの全身中 ²⁴ Na放射能	Ba/Gy	2.6E+06	2.7E+06	2.7E+06	2.7E+06	2.7E+06	2.7E+06	2.7E+06	2.7E+06	3.3E+06	3.3E+06	3.3E+06	3.3E+06	3.3E+06	4.1E+06	4.2E+06	4.2E+06	4.1E+06	4.1E+06	1.2E+06	1.5E+06	1.5E+06	1.6E+06	1.6E+06	1.6E+06	
(Ba/cm ²)/Gy		3.7E+01	3.8E+01	3.8E+01	3.8E+01	3.8E+01	3.8E+01	3.8E+01	3.8E+01	4.6E+01	4.7E+01	4.7E+01	4.7E+01	4.6E+01	5.8E+01	5.8E+01	5.8E+01	5.8E+01	5.8E+01	1.7E+01	2.1E+01	2.1E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01	
中性子吸収線量1Gy当たりの腹部表面での γ 線	μ Sv/h	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.7E+01	2.8E+01	2.8E+01	2.8E+01	2.8E+01	8.2E+00	1.0E+01	1.0E+01	1.0E+01	1.1E+01	1.1E+01	
1cm線量当量率(曝露直後)	前照座位 μ Sv/h	2.8E+01	2.7E+01	2.7E+01	2.7E+01	2.7E+01	2.7E+01	2.7E+01	2.7E+01	3.2E+01	3.3E+01	3.3E+01	3.3E+01	3.2E+01	4.1E+01	4.1E+01	4.1E+01	4.1E+01	4.1E+01	1.2E+01	1.5E+01	1.5E+01	1.6E+01	1.6E+01	1.6E+01	
単位中性子フルエンス当たりの全身中 ²⁴ Na比放射能	(Ba/g)/cm ²	7.52E-08	7.51E-08	7.51E-08	7.51E-08	7.51E-08	7.51E-08	7.51E-08	7.52E-08	7.48E-08	7.45E-08	7.45E-08	7.45E-08	7.45E-08	7.37E-08	7.36E-08	7.37E-08	7.37E-08	7.37E-08	7.62E-08	7.40E-08	7.32E-08	7.25E-08	7.18E-08	7.11E-08	
重粒子	pGy cm ²	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	1.7	1.6	1.6	1.7	1.7	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	6.6	5.1	4.9	4.8	4.7	4.6	
二次 γ 線	pGy cm ²	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	
全身中 ²⁴ Na比放射能当たりの中性子吸収線量																										
中性子吸収線量(重粒子)*	Gy/(Ba/g)	3.22E-05	3.05E-05	3.08E-05	3.08E-05	3.09E-05	3.10E-05	3.12E-05	3.16E-05	2.29E-05	2.20E-05	2.21E-05	2.22E-05	2.26E-05	1.48E-05	1.45E-05	1.46E-05	1.46E-05	1.47E-05	8.68E-05	6.87E-05	6.74E-05	6.60E-05	6.53E-05	6.43E-05	
中性子吸収線量(二次ガンマ線)*	Gy/(Ba/g)	1.20E-05	1.19E-05	1.19E-05	1.19E-05	1.19E-05	1.19E-05	1.19E-05	1.19E-05	1.18E-05	1.17E-05	1.18E-05	1.18E-05	1.17E-05	1.17E-05	1.17E-05	1.16E-05	1.16E-05	1.16E-05	1.24E-05	1.20E-05	1.19E-05	1.18E-05	1.18E-05	1.18E-05	
中性子吸収線量(合計)	Gy/(Ba/g)	4.42E-05	4.24E-05	4.26E-05	4.26E-05	4.28E-05	4.29E-05	4.31E-05	4.34E-05	3.47E-05	3.37E-05	3.39E-05	3.39E-05	3.43E-05	2.66E-05	2.62E-05	2.62E-05	2.62E-05	2.63E-05	9.92E-05	8.07E-05	7.94E-05	7.80E-05	7.72E-05	7.62E-05	
中性子吸収線量1Gy当たりの全身中 ²⁴ Na比放射能	(Ba/g)/Gy	2.3E+04	2.4E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.3E+04	2.9E+04	3.0E+04	2.9E+04	2.9E+04	2.9E+04	3.8E+04	3.8E+04	3.8E+04	3.8E+04	3.8E+04	1.0E+04	1.2E+04	1.3E+04	1.3E+04	1.3E+04	1.3E+04	
中性子吸収線量1Gy当たりの全身中 ²⁴ Na放射能	Ba/Gy	2.3E+06	2.4E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.9E+06	3.0E+06	2.9E+06	2.9E+06	2.9E+06	3.8E+06	3.8E+06	3.8E+06	3.8E+06	3.8E+06	1.0E+06	1.2E+06	1.3E+06	1.3E+06	1.3E+06	1.3E+06	
(Ba/cm ²)/Gy		3.2E+01	3.3E+01	3.3E+01	3.3E+01	3.3E+01	3.3E+01	3.2E+01	3.2E+01	4.0E+01	4.2E+01	4.1E+01	4.1E+01	4.1E+01	5.3E+01	5.3E+01	5.3E+01	5.3E+01	5.3E+01	1.4E+01	1.7E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	
中性子D _p (10)1Gy当たりの腹部表面での γ 線	μ Sv/h	1.5E+01	1.6E+01</																							

表 I.11 (続き)

線源条件	Spectrum# Shield (cm) Metal/Solution R(cm)	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
		Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete
		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
スペクトル、線量及び線量計等のレスポンス		8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0	8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0	8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0	
TLD/バッチ放射化インジウム(n=115m)																										
AP	単位中性子フルエンス当たりの ^{115m} In放射能	Ba/cm ²	3.9E-09	4.2E-09	4.2E-09	4.2E-09	4.2E-09	4.3E-09	4.3E-09	4.3E-09	4.0E-09	4.1E-09	4.1E-09	4.1E-09	4.1E-09	4.2E-09	4.1E-09	3.9E-09	4.0E-09	3.9E-09	4.0E-09	4.1E-09	4.1E-09	4.3E-09	4.3E-09	
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{115m} In放射能	Ba/Gy	377	390	393	393	393	395	396	394	382	392	395	393	395	397	388	388	390	388	396	397	402	402	402	
PA	単位中性子フルエンス当たりの ^{115m} In放射能	Ba/cm ²	5.5E-10	6.0E-10	6.1E-10	6.1E-10	6.2E-10	6.3E-10	6.4E-10	6.4E-10	5.9E-10	5.9E-10	6.1E-10	6.0E-10	6.1E-10	6.3E-10	6.3E-10	5.8E-10	6.1E-10	6.0E-10	6.1E-10	6.3E-10	6.3E-10	6.9E-10	6.9E-10	
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{115m} In放射能	Ba/Gy	53	56	56	57	58	58	59	59	55	57	59	58	59	61	60	58	59	59	60	61	61	64	64	
RLAT	単位中性子フルエンス当たりの ^{115m} In放射能	Ba/cm ²	2.9E-09	3.1E-09	3.1E-09	3.1E-09	3.2E-09	3.2E-09	3.2E-09	3.2E-09	2.8E-09	3.0E-09	3.1E-09	3.0E-09	3.1E-09	3.2E-09	3.1E-09	2.9E-09	3.0E-09	2.9E-09	3.0E-09	3.1E-09	3.1E-09	3.3E-09	3.3E-09	
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{115m} In放射能	Ba/Gy	281	291	293	293	293	295	296	295	285	293	295	294	296	296	296	291	293	291	296	298	298	303	303	
LLAT	単位中性子フルエンス当たりの ^{115m} In放射能	Ba/cm ²	3.3E-09	3.5E-09	3.5E-09	3.5E-09	3.5E-09	3.6E-09	3.6E-09	3.6E-09	3.2E-09	3.4E-09	3.4E-09	3.4E-09	3.4E-09	3.5E-09	3.5E-09	3.2E-09	3.3E-09	3.3E-09	3.4E-09	3.4E-09	3.5E-09	3.7E-09	3.7E-09	
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{115m} In放射能	Ba/Gy	314	326	328	328	328	330	331	330	319	328	330	328	331	331	333	329	325	327	326	332	334	338	338	
TLD/バッチ放射化インジウム(n=116m)																										
AP	単位中性子フルエンス当たりの ^{116m} In放射能	Ba/cm ²	4.8E-05	4.9E-05	5.1E-05	5.1E-05	5.1E-05	5.1E-05	5.1E-05	5.0E-05	5.0E-05	5.2E-05	5.1E-05	5.2E-05	5.2E-05	5.1E-05	5.1E-05	5.1E-05	5.0E-05							
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{116m} In放射能	Ba/Gy	4.7E+06	4.8E+06	4.5E+06	4.6E+06	4.5E+06	4.5E+06	4.5E+06	4.5E+06	5.1E+06	4.9E+06	4.9E+06	4.9E+06	4.9E+06	4.9E+06	4.7E+06	4.7E+06	5.2E+06	5.0E+06	5.1E+06	5.1E+06	4.9E+06	4.7E+06	4.7E+06	
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	kcpm/Gy	1.7E+03	1.6E+03	1.6E+03	1.7E+03	1.6E+03	1.6E+03	1.6E+03	1.6E+03	1.8E+03	1.8E+03	1.8E+03	1.8E+03	1.8E+03	1.7E+03	1.7E+03	1.9E+03	1.8E+03	1.8E+03	1.8E+03	1.8E+03	1.7E+03	1.7E+03	1.7E+03	
	n+γD ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	kcpm/Gy	9.8E+02	7.2E+02	6.7E+02	6.4E+02	6.1E+02	5.7E+02	5.1E+02	4.9E+02	8.7E+02	6.5E+02	6.1E+02	5.9E+02	5.5E+02	5.2E+02	4.7E+02	4.6E+02	7.3E+02	5.7E+02	5.4E+02	5.1E+02	4.8E+02	4.4E+02	4.0E+02	
	単位中性子フルエンス当たりの ^{116m} In放射能	Ba/cm ²	7.8E-07	8.0E-07	8.0E-07	7.9E-07	8.0E-07	8.1E-07	8.1E-07	8.0E-07	7.3E-07	7.6E-07	7.6E-07	7.6E-07	7.6E-07	7.6E-07	7.7E-07	7.7E-07	7.2E-07	7.4E-07	7.3E-07	7.4E-07	7.5E-07	7.7E-07	7.8E-07	
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	Ba/Gy	7.5E+04	7.5E+04	7.5E+04	7.4E+04	7.4E+04	7.4E+04	7.4E+04	7.4E+04	7.3E+04	7.2E+04														
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	kcpm/Gy	2.7E+01	2.6E+01																						
	n+γD ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	kcpm/Gy	1.6E+01	1.2E+01	1.1E+01	1.0E+01	9.9E+00	9.3E+00	8.5E+00	8.1E+00	1.2E+01	8.8E+00	9.1E+00	8.8E+00	8.3E+00	7.9E+00	7.1E+00	1.0E+01	8.1E+00	7.6E+00	7.3E+00	7.0E+00	6.7E+00	6.3E+00	6.1E+00	
	単位中性子フルエンス当たりの ^{116m} In放射能	Ba/cm ²	2.0E-06	1.9E-06																						
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	Ba/Gy	1.9E+05	1.8E+05	2.0E+05	1.9E+05	1.9E+05	1.9E+05	1.9E+05	1.9E+05	1.8E+05	1.8E+05	1.9E+05	1.9E+05	1.9E+05	1.8E+05	1.8E+05	1.8E+05	1.8E+05							
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	kcpm/Gy	6.8E+01	6.6E+01	6.5E+01	6.6E+01	6.5E+01	6.4E+01	6.4E+01	6.4E+01	7.1E+01	6.7E+01	6.7E+01	6.7E+01	6.7E+01	6.6E+01	6.5E+01	6.5E+01	7.0E+01	6.8E+01	6.8E+01	6.8E+01	6.6E+01	6.4E+01	6.4E+01	
	n+γD ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	kcpm/Gy	4.0E+01	2.9E+01	2.7E+01	2.6E+01	2.4E+01	2.3E+01	2.1E+01	2.0E+01	3.3E+01	2.5E+01	2.3E+01	2.2E+01	2.1E+01	2.0E+01	1.7E+01	2.7E+01	2.1E+01	2.0E+01	1.9E+01	1.7E+01	1.5E+01	1.5E+01	1.5E+01	
	単位中性子フルエンス当たりの ^{116m} In放射能	Ba/cm ²	4.7E-06	4.8E-06																						
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{116m} In放射能	Ba/Gy	4.5E+05	4.4E+05	4.4E+05	4.4E+05	4.4E+05	4.4E+05	4.4E+05	4.3E+05																
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	kcpm/Gy	1.6E+02	1.7E+02	1.6E+02																					
	n+γD ₍₁₀₎ 1Gy当たりの線量GM計数率	kcpm/Gy	9.6E+01	7.0E+01	6.5E+01	6.2E+01	5.8E+01	5.4E+01	5.0E+01	4.8E+01	8.2E+01	6.2E+01	5.8E+01	5.5E+01	5.2E+01	4.9E+01	4.5E+01	4.3E+01	6.8E+01	5.3E+01	5.0E+01	4.8E+01	4.5E+01	4.3E+01	3.7E+01	
髪放射化(前頭部から採取した頭髮1g中の ²³² P放射能)																										
AP	単位中性子フルエンス当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)cm ²	8.6E+00	9.3E+00	9.4E+00	9.4E+00	9.6E+00	9.7E+00	1.0E+01	1.0E+01	8.5E+00	9.1E+00	9.4E+00	9.3E+00	9.5E+00	9.7E+00	1.0E+01	9.7E+00	9.0E+00	9.4E+00	9.2E+00	9.3E+00	9.7E+00	9.8E+00	1.1E+01	1.1E+01
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)	0.83	0.87	0.87	0.88	0.89	0.89	0.91	0.92	8.8E-01	8.8E-01	8.8E-01	8.8E-01	8.8E-01	8.9E-01	9.2E-01	8.9E-01	8.4E-01	8.7E-01	8.6E-01	8.6E-01	8.9E-01	9.0E-01	9.9E-01	9.9E-01
PA	単位中性子フルエンス当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)cm ²	7.5E-01	8.2E-01	8.3E-01	8.3E-01	8.6E-01	8.7E-01	9.0E-01	9.1E-01	7.6E-01	8.3E-01	8.5E-01	8.4E-01	8.6E-01	9.0E-01	9.4E-01	9.2E-01	8.4E-01	8.8E-01	8.7E-01	8.7E-01	9.4E-01	9.2E-01	1.0E+00	1.1E+00
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10
LAT	単位中性子フルエンス当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)cm ²	8.8E+00	9.5E+00	9.6E+00	9.7E+00	9.9E+00	1.0E+01	1.0E+01	1.0E+01	8.7E+00	9.4E+00	9.7E+00	9.5E+00	9.7E+00	1.0E+01	1.0E+01	1.0E+01	9.2E+00	9.7E+00	9.5E+00	9.6E+00	1.0E+01	1.0E+01	1.1E+01	1.1E+01
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)	0.85	0.89	0.90	0.90	0.92	0.92	0.94	0.95	0.88	0.91	0.93	0.92	0.94	0.95	0.97	0.95	0.93	0.94	0.94	0.94	0.97	0.97	1.02	1.02
スペクトルと線量(>Cd: カットオフエネルギー以上の内数)																										
	中性子フルエンス(>Cd)	cm ⁻²	0.47	0.45	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.42	0.42	0.41	0.41	0.41	0.42	0.42	0.42	0.39	0.40	0.40	0.39	0.39	0.40	0.41	0.42
	中性子個人線量当量H ₍₁₀₎ (>Cd)	pSv	98	101	102	101	101	102	103	102	92	96	96	96	96	97	98	98	90	93	92	93	95	95	99	99
	中性子個人吸収線量D ₍₁₀₎ (>Cd)	pGy	9.0	9.3	9.4	9.3	9.4	9.4	9.4	9.5	8.4	8.8	8.8	8.8	8.9	8.9	9.0	9.2	8.4	8.7	8.6	8.6	8.8	8.8	9.3	9.3
TLD/バッチ放射化インジウム(n=809P)																										
AP	単位中性子フルエンス当たりのTLD指示値	pSv cm ²	581	595	594	598	596	594	595	597	630	628	632	630	630	627	625	624	653	646	647	651	647	644	636	628
	第2素子	pSv cm ²	91	87	87	87	87	86	87	86	86	84	84	84	84	84	84	83	83	82	83	82	81	82	82	83
	第3素子	pSv cm ²	203	194	194	194	193	193	193	192	190	186	185	185	185	185	185	184	182	181	181	179	179	180	180	183

表 I.11 (続き)

線源条件		Spectrum#		73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96							
		Shield (cm)	H-conc	H-conc	H-conc	H-conc	H-conc	H-conc	H-conc	H-conc	H-conc	Iron	Iron	Iron	Iron	Iron	Iron	Iron	Iron	Iron	Iron	Iron												
スペクトル、線量及び線量計等のレスポンス		Metal/Solution R(cm)	Metal	Solution	Metal	Solution	Metal	Solution																										
TLD/バッチ放射化インジウム(In-115m)			8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0	8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0	8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0	8.7	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0
AP	単位中性子フルエンス当たりの ^{115m} In放射能	Ba cm ²	4.4E-09	4.8E-09	4.8E-09	4.8E-09	4.9E-09	4.9E-09	4.9E-09	5.1E-09	7.9E-09	7.1E-09	7.1E-09	7.1E-09	7.1E-09	7.2E-09	7.2E-09	7.3E-09	7.3E-09	4.6E-09	4.5E-09	4.6E-09	4.6E-09	4.6E-09	4.6E-09	4.6E-09	4.6E-09	4.6E-09						
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{115m} In放射能	Ba/Gy	339	355	356	352	357	358	357	361	310	335	337	338	340	342	344	344	343	344	217	238	240	241	242	244	244	247	248	248	247	248	248	248
PA	単位中性子フルエンス当たりの ^{115m} In放射能	Ba cm ²	5.6E-10	6.3E-10	6.1E-10	6.3E-10	6.6E-10	6.3E-10	6.6E-10	7.3E-10	8.4E-10	8.1E-10	8.1E-10	8.1E-10	8.1E-10	8.3E-10	8.4E-10	8.6E-10	8.6E-10	4.1E-10	4.3E-10	4.3E-10	4.4E-10	4.4E-10	4.4E-10	4.4E-10	4.4E-10	4.4E-10	4.4E-10	4.4E-10	4.4E-10	4.4E-10	4.4E-10	
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{115m} In放射能	Ba/Gy	44	46	45	46	48	48	48	51	33	38	38	38	39	40	41	41	41	19	23	23	23	23	23	24	24	24	24	24	24	24	24	
RLAT	単位中性子フルエンス当たりの ^{115m} In放射能	Ba cm ²	3.2E-09	3.6E-09	3.5E-09	3.5E-09	3.6E-09	3.6E-09	3.6E-09	3.6E-09	5.6E-09	5.1E-09	5.1E-09	5.1E-09	5.1E-09	5.2E-09	5.2E-09	5.3E-09	5.3E-09	3.2E-09	3.2E-09	3.2E-09	3.2E-09	3.2E-09										
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{115m} In放射能	Ba/Gy	249	261	261	259	263	263	263	268	221	242	243	243	246	247	249	249	249	151	167	169	169	171	172	174	174	174	174	174	174	174	174	
LLAT	単位中性子フルエンス当たりの ^{115m} In放射能	Ba cm ²	3.6E-09	4.0E-09	4.0E-09	4.0E-09	4.0E-09	4.0E-09	4.1E-09	4.3E-09	6.4E-09	5.8E-09	5.8E-09	5.8E-09	5.8E-09	5.9E-09	5.9E-09	5.9E-09	5.9E-09	3.7E-09	3.6E-09	3.6E-09	3.6E-09	3.6E-09	3.6E-09									
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{115m} In放射能	Ba/Gy	279	293	293	291	295	295	295	300	249	272	274	274	277	278	280	280	280	171	189	189	191	192	193	195	197	197	197	197	197	197	197	
TLD/バッチ放射化インジウム(In-116m)																																		
AP	単位中性子フルエンス当たりの ^{116m} In放射能	Ba cm ²	3.2E-05	3.2E-05	3.2E-05	3.2E-05	3.2E-05	3.1E-05	3.2E-05	3.1E-05	9.5E-06	1.4E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.6E-05	1.6E-05	1.1E-05	1.3E-05	1.3E-05	1.3E-05	1.3E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.4E-05		
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{116m} In放射能	Ba/Gy	2.5E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.3E+06	2.2E+06	3.7E+05	6.7E+05	6.9E+05	7.1E+05	7.2E+05	7.3E+05	7.3E+05	7.3E+05	5.0E+05	7.1E+05	7.1E+05	7.1E+05	7.1E+05	7.1E+05										
PA	単位中性子フルエンス当たりの ^{116m} In放射能	Ba cm ²	9.0E+02	8.4E+02	8.4E+02	8.4E+02	8.3E+02	8.1E+02	8.3E+02	7.8E+02	1.3E+02	2.4E+02	2.5E+02	2.6E+02	2.6E+02	2.6E+02	2.6E+02	2.6E+02	1.8E+02	2.5E+02	2.5E+02	2.6E+02	2.6E+02	2.6E+02	2.6E+02	2.6E+02								
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{116m} In放射能	Ba/Gy	3.4E+02	3.0E+02	2.9E+02	2.9E+02	2.8E+02	2.8E+02	2.6E+02	2.6E+02	1.3E+02	2.0E+02	1.9E+02	1.9E+02	1.9E+02	1.8E+02	1.8E+02	1.7E+02	1.6E+02	1.8E+02	2.3E+02	2.3E+02	2.3E+02	2.3E+02	2.3E+02	2.3E+02								
RLAT	単位中性子フルエンス当たりの ^{116m} In放射能	Ba cm ²	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.2E-06	2.2E-06	1.8E-06	1.9E-06	1.7E-06	1.7E-06	1.7E-06	1.7E-06	1.7E-06																
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{116m} In放射能	Ba/Gy	8.3E+04	8.3E+04	8.4E+04	8.3E+04	8.3E+04	8.3E+04	8.2E+04	8.2E+04	8.6E+04	8.6E+04	8.6E+04	8.6E+04	8.6E+04	8.5E+04	8.5E+04	8.5E+04	8.5E+04	8.8E+04	8.9E+04	8.8E+04	8.8E+04	8.8E+04	8.8E+04	8.8E+04								
LLAT	単位中性子フルエンス当たりの ^{116m} In放射能	Ba cm ²	3.0E+01	3.0E+01	3.0E+01	3.0E+01	3.0E+01	3.0E+01	3.0E+01	2.9E+01	3.1E+01	3.1E+01	3.1E+01	3.1E+01	3.1E+01	3.1E+01	3.1E+01	3.1E+01	3.1E+01	3.2E+01	3.2E+01	3.2E+01	3.2E+01	3.2E+01										
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの ^{116m} In放射能	Ba/Gy	1.9E+06	1.9E+06	1.9E+06	1.9E+06	1.9E+06	1.9E+06	1.9E+06	1.9E+06	1.1E+06	1.4E+06	1.4E+06	9.7E+07	1.2E+06	1.2E+06	1.2E+06	1.2E+06	1.2E+06															
髪放射化(前頭部から採取した頭髮1g中の ²³² P放射能)																																		
AP	単位中性子フルエンス当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)cm ²	8.5E+00	9.4E+00	9.1E+00	9.5E+00	9.9E+00	9.5E+00	1.0E+01	1.1E+01	1.2E+01	1.2E+01	1.2E+01	1.2E+01	1.2E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	5.9E+00	6.2E+00	6.3E+00	6.3E+00	6.5E+00	6.7E+00	6.8E+00	6.8E+00	6.8E+00	6.8E+00	6.8E+00	6.8E+00	6.8E+00	6.8E+00		
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)/Gy	0.65	0.70	0.67	0.70	0.72	0.70	0.73	0.77	0.49	0.57	0.58	0.58	0.59	0.60	0.61	0.61	0.28	0.33	0.33	0.33	0.34	0.35	0.36	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35		
PA	単位中性子フルエンス当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)cm ²	7.5E-01	8.4E-01	7.8E-01	8.6E-01	9.1E-01	8.3E-01	9.0E-01	1.1E+00	1.0E+00	9.8E-01	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00	4.6E-01	4.9E-01	5.0E-01	5.0E-01	5.2E-01	5.4E-01	5.6E-01	5.6E-01	5.6E-01	5.6E-01	5.6E-01	5.6E-01	5.6E-01			
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)/Gy	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.08	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03			
LLAT	単位中性子フルエンス当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)cm ²	8.7E+00	9.7E+00	9.4E+00	9.8E+00	1.0E+01	9.8E+00	1.0E+01	1.1E+01	1.3E+01	1.2E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	1.3E+01	6.0E+00	6.3E+00	6.4E+00	6.5E+00	6.6E+00	6.8E+00	7.0E+00	7.0E+00	7.0E+00	7.0E+00	7.0E+00	7.0E+00	7.0E+00			
	中性子D ₍₁₀₎ 1Gy当たりの頭髮1g中の ²³² P放射能	(pBa/g)/Gy	0.67	0.72	0.69	0.72	0.75	0.72	0.75	0.79	0.50	0.59	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.63	0.28	0.34	0.34	0.34	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36			
スペクトルと線量(>Cd: カットオフエネルギー以上内数)																																		
中性子フルエンス(>Cd)		cm ⁻²	0.78	0.79	0.79	0.79	0.79	0.80	0.79	0.80	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99			
中性子個人線量当量H ₍₁₀₎ (>Cd)		pSv	143	150	151	150	150	152	151	156	345	271	268	267	266	265	266	266	308	261	261	261	260	261	262	263	263	263	263	263	263			
中性子個人吸収線量D ₍₁₀₎ (>Cd)		pGy	12.4	13.0	13.0	13.0	13.1	13.2	13.2	13.7	25.5	21.2	21.1	21.0	21.1	21.1	21.1	21.1	21.3	18.9	18.9	18.9	19.0	19.0	19.1	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2			
TLD/バッチ(UD-809P)																																		
AP	単位中性子フルエンス当たりのTLD指示値	pSv cm ²	302	291	295	293	290	281	292	283	30	68	74	78	81	84	87	88	35	54	55	56	56	57	57	58	58	58	58	58	58			
	第2素子	pSv cm ²	106	104	103	104	105	103	103	101	42	68	69	70	70	70	69	69	48	65	65	65												

表 I.12 インジウム箔放射化実験（照射終了時刻における ^{115m}In 放射能，誤差は 1σ 相当）

インジウム箔 取り付け位置	中性子フルエンス率 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	計算 (Bq)	測定 (Bq)
窓なし側（回転せ ず）	5.0E+05	10.4 ± 2%	8.7 ± 5%
窓あり側（回転せ ず）	5.4E+05	11.0 ± 2%	9.1 ± 5%
等速回転	5.2E+05	10.5 ± 2%	9.1 ± 5%

試料：インジウム（ $1.0 \times 1.0 \times 0.006 \text{ cm}$ ）×4枚（それぞれの質量は電子天秤で計測）

照射時間：18,000 秒

冷却時間：480 秒

測定時間：50,000 秒

検出器：PGT 社製 IGC-10200 型高純度 Ge 半導体検出器

データ収集・解析ソフトウェア：DppMCA Version 1.0.0.12 及び FitzPeaks Ver. 3.71

表 I.13 毛髪中 ^{32}P （試料 4：0.30 g）の液体シンチレーションカウンタ測定結果

測定モード	照射終了後 経過日数	カウント数	正味 カウント数	計数率 (cps)	^{32}P 放射能 (Bq)	計数率 放射能
通常	2	72,335	14,518	0.17	0.26	0.64
	14	64,982	7,165	0.08	0.14	0.58
	17	63,491	5,674	0.07	0.12	0.53
低BG	2	52,670	10,853	0.13	0.26	0.48
	14	46,917	5,100	0.06	0.14	0.41
	17	45,658	3,841	0.04	0.12	0.36

備考：

- ^{32}P 放射能は MCNP 計算による。
- 未照射の毛髪（0.27 g）をクエンチングのコントロールとした。

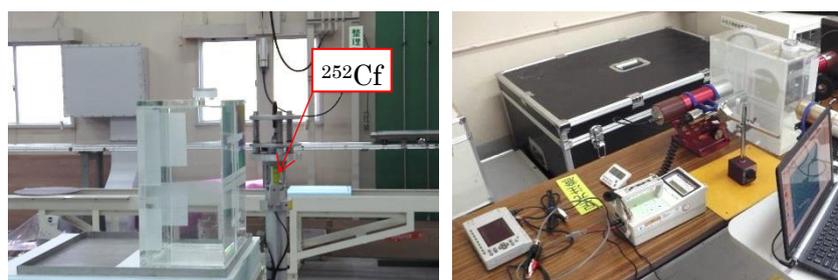


図 I.1 NaCl 実験写真

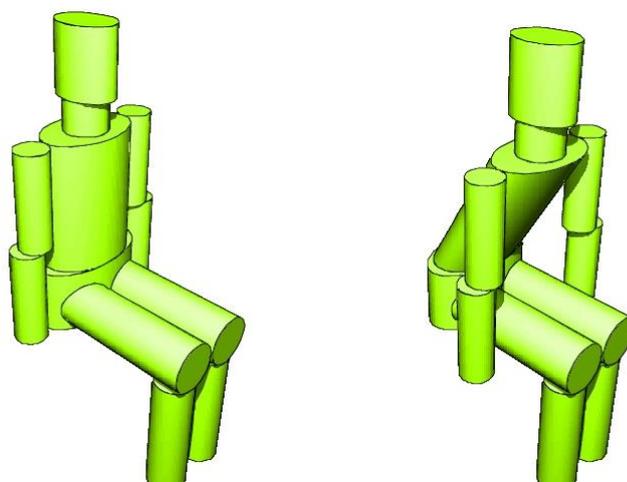
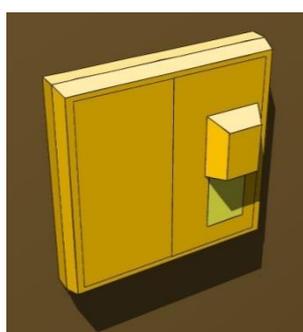
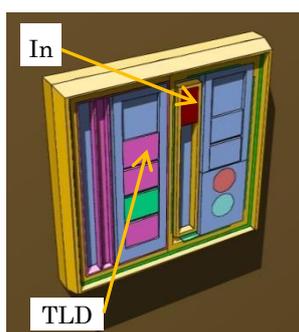


図 I.2 ^{24}Na 及び ^{38}Cl からの γ 線による 1cm 線量当量率 (体表面) を計算するための BOMAB ファントムモデル (左: 座位, 右: 前屈座位)
 検出器位置は, 股下から 20 cm (腰と胴体の接続部分から 5 cm 上)



(a) TLD バッジ外観



(b) 表面カバー及び Cd シールドと取り除いたもの。
 TLD は矢印で示した位置の裏側にある。



(c) TLD バッジを水槽形ファントム表面の中央に設置

図 I.3 TLD バッジの応答のシミュレーション計算モデル

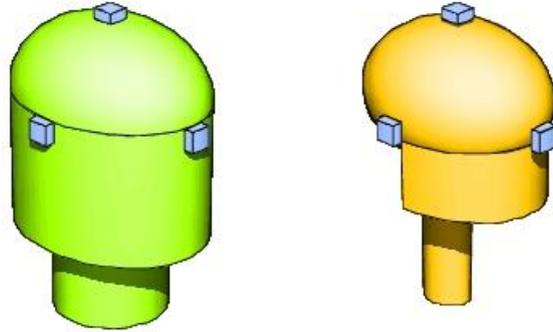


図 I.4 毛髪放射化計算のための計算モデル
 (右図は、左図の軟組織部分を透明にしたものであり、頭蓋骨や頸椎等が見える)

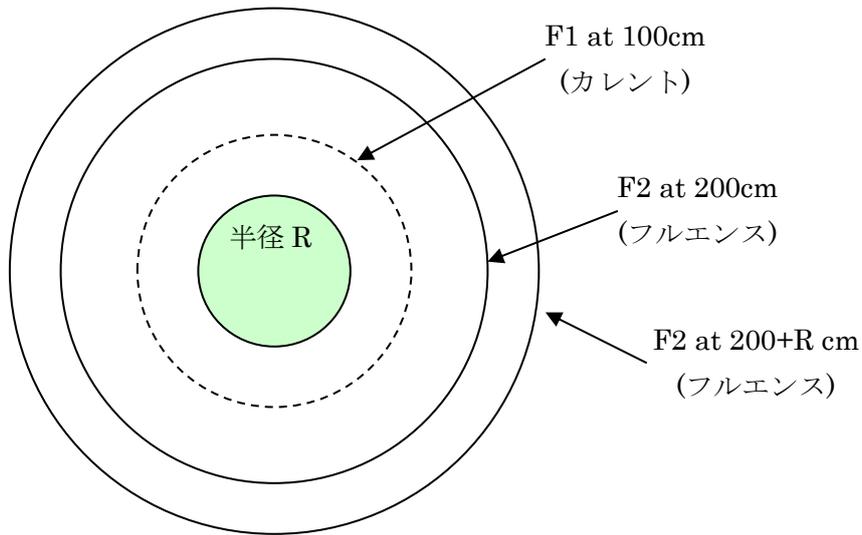


図 I.5 溶液系で想定される臨界事故時の線源の計算体系
 (硝酸プルトニウム調整槽 (265V11-2) のみ球体系ではなく SUS 製円筒容器で計算)

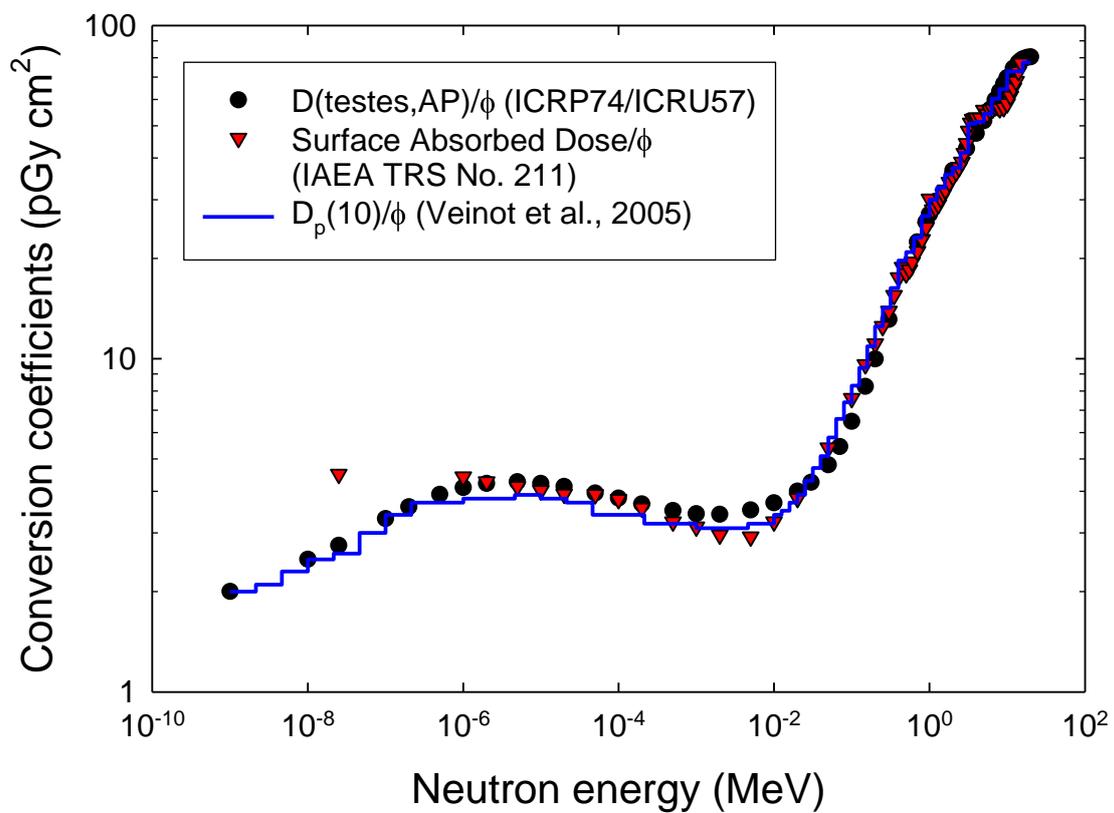


図 I.6 中性子フルエンス—吸収線量換算係数の比較

IAEA の換算係数 (▼) は、重粒子 (反跳原子核等) と捕獲ガンマ線の両者による線量寄与の合計である。



図 I.7 製作した高線量中性子照射装置とその MCNP 計算モデル
(図(b)では、内部が見えるようにアクリル製試料指示具の一部を透明にしている)
試料は図の(等速回転する)中空円筒内側に貼付する。

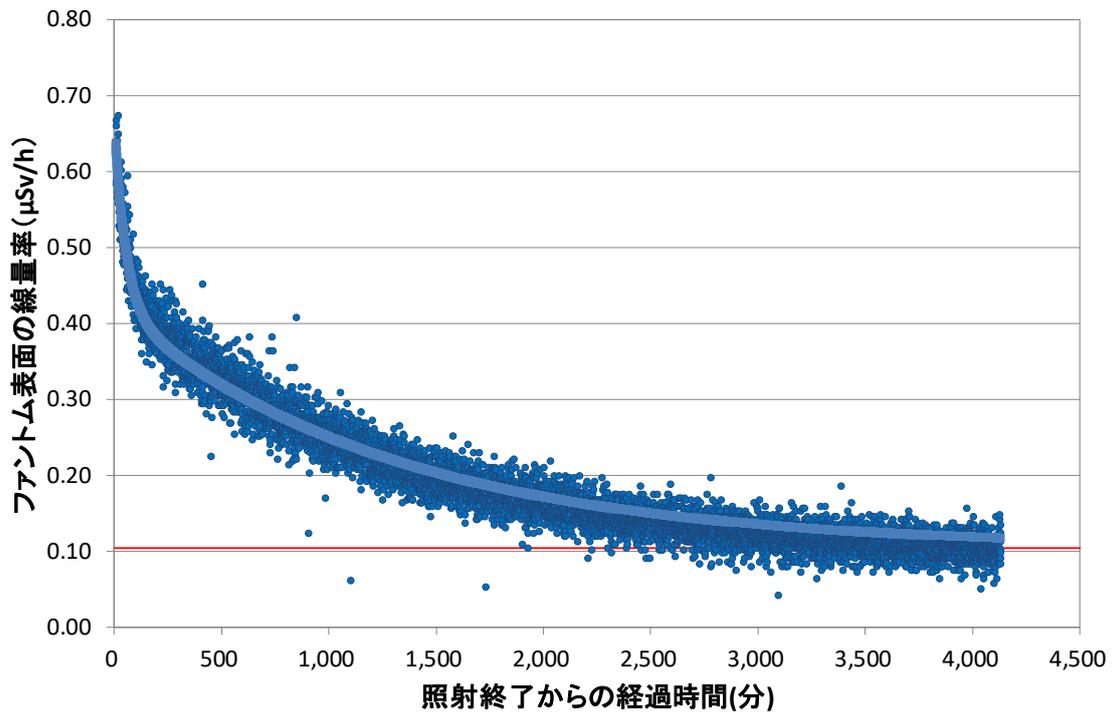


図 I.8 中性子照射した塩化ナトリウム水溶液を満たしたファントム表面で観察された γ 線 1cm 線量当量率 (照射終了 10 分後～約 4,000 分後)
縦軸は、照射前後で観測したバックグラウンド線量率 (約 0.1 $\mu\text{Sv/h}$) を含む。

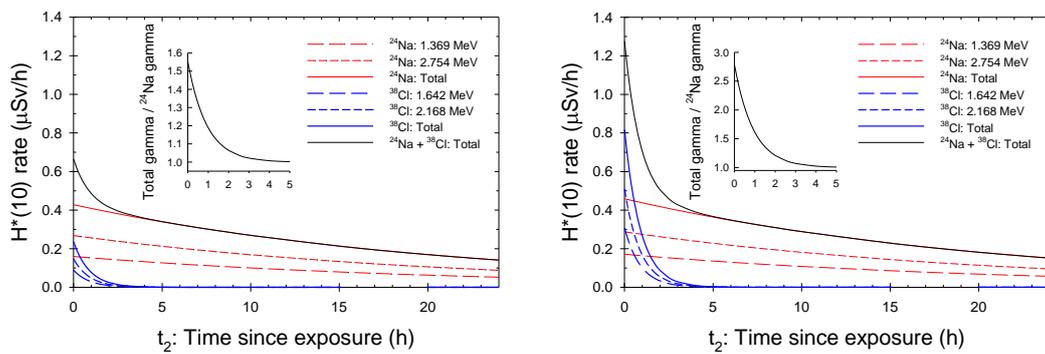


図 I.9 水槽形ファントム実験におけるファントム表面での γ 線 1 cm 線量当量率の内訳
左：中性子照射時間 180 分間 (実験条件と同じ)
右：瞬間的な中性子照射の場合 (ただし、積算中性子フルエンスは実験条件と同じ)

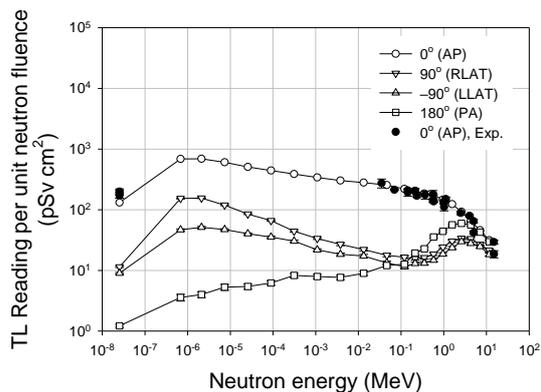


図 I.10 単位中性子フルエンス当たりの TLD バッジ (前面側に Cd フィルターを配置した第 4TLD 素子) の応答

(指示値の単位は、カウント数を γ 線量当量に換算した見掛けのものである)

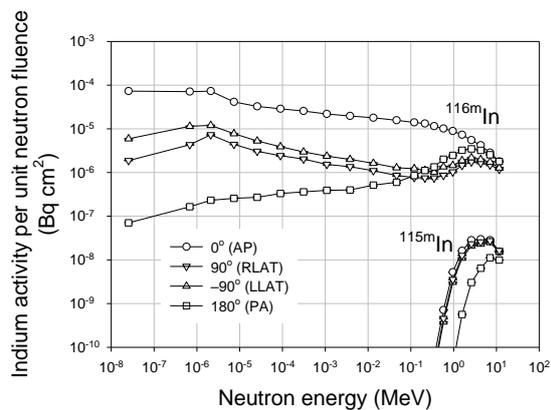


図 I.11 単位中性子フルエンス当たりの TLD バッジ内蔵 In に生成される ^{115m}In 及び ^{116m}In 放射能 (曝露直後)

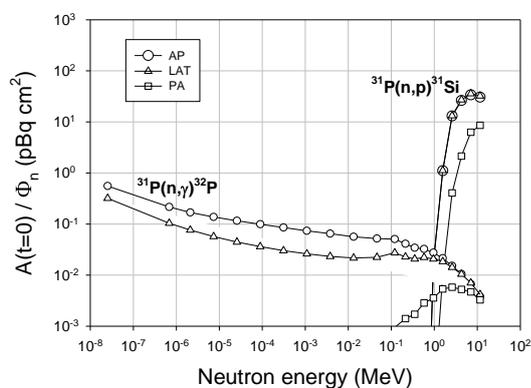
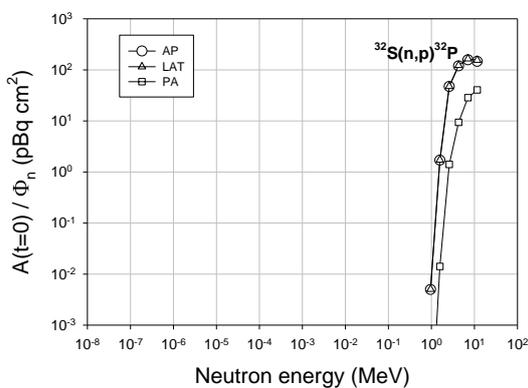


図 I.12 単位中性子フルエンス当たりに毛髪 1 g (試料採取位置：前頭部) 中に生成される放射化生成物の放射能 (曝露直後)

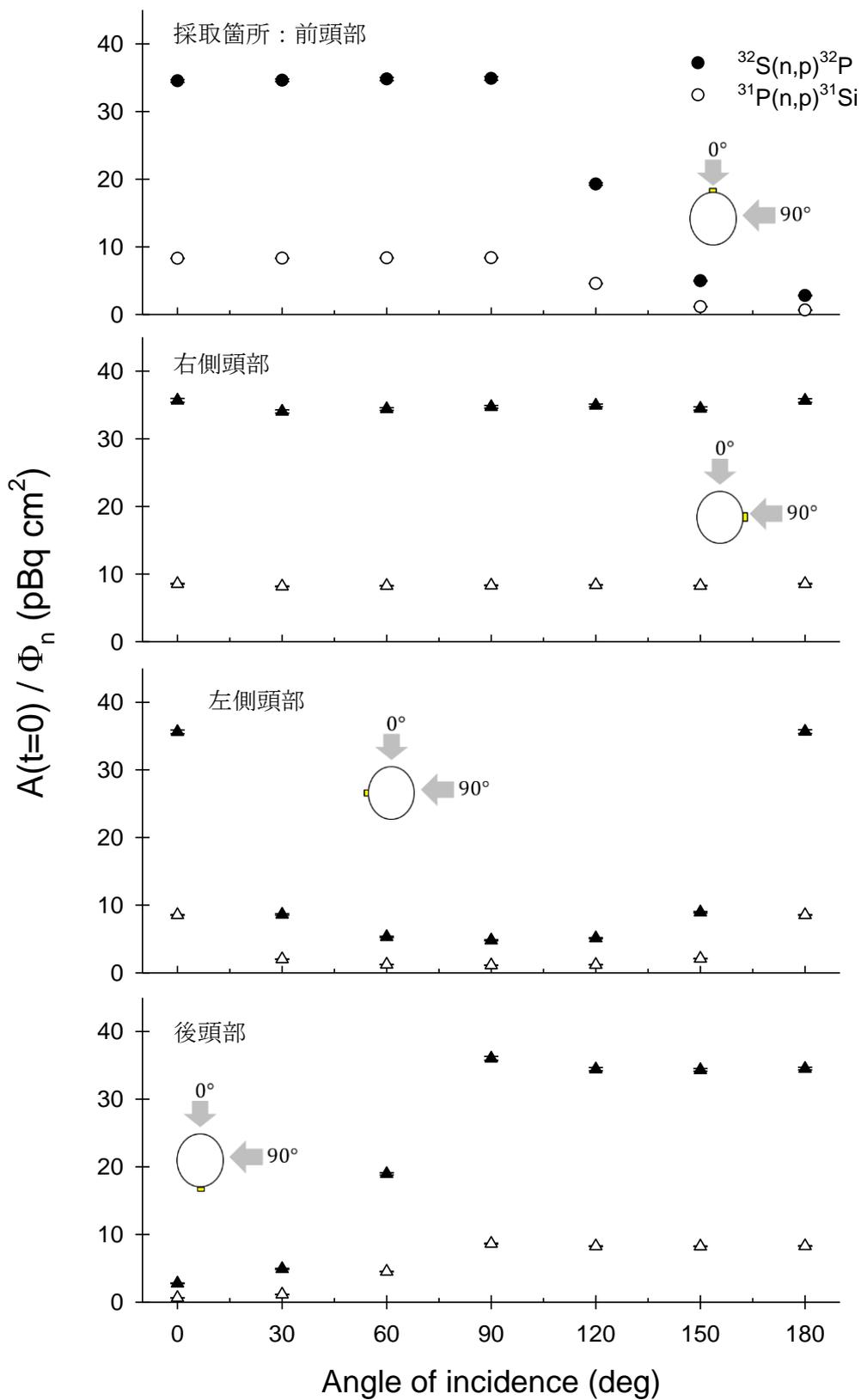


図 I.13 ^{252}Cf からの単位中性子フルエンス当たりに毛髪 1 g 中に生成される放射化生成物の放射能 (曝露直後)

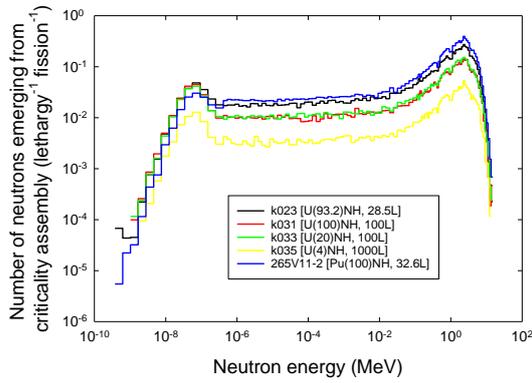


図 I.14 溶液系臨界事故で想定される線源中性子スペクトル

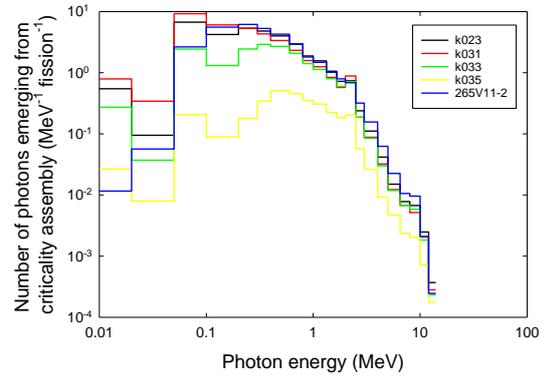


図 I.15 溶液系臨界事故で想定される線源 γ 線スペクトル

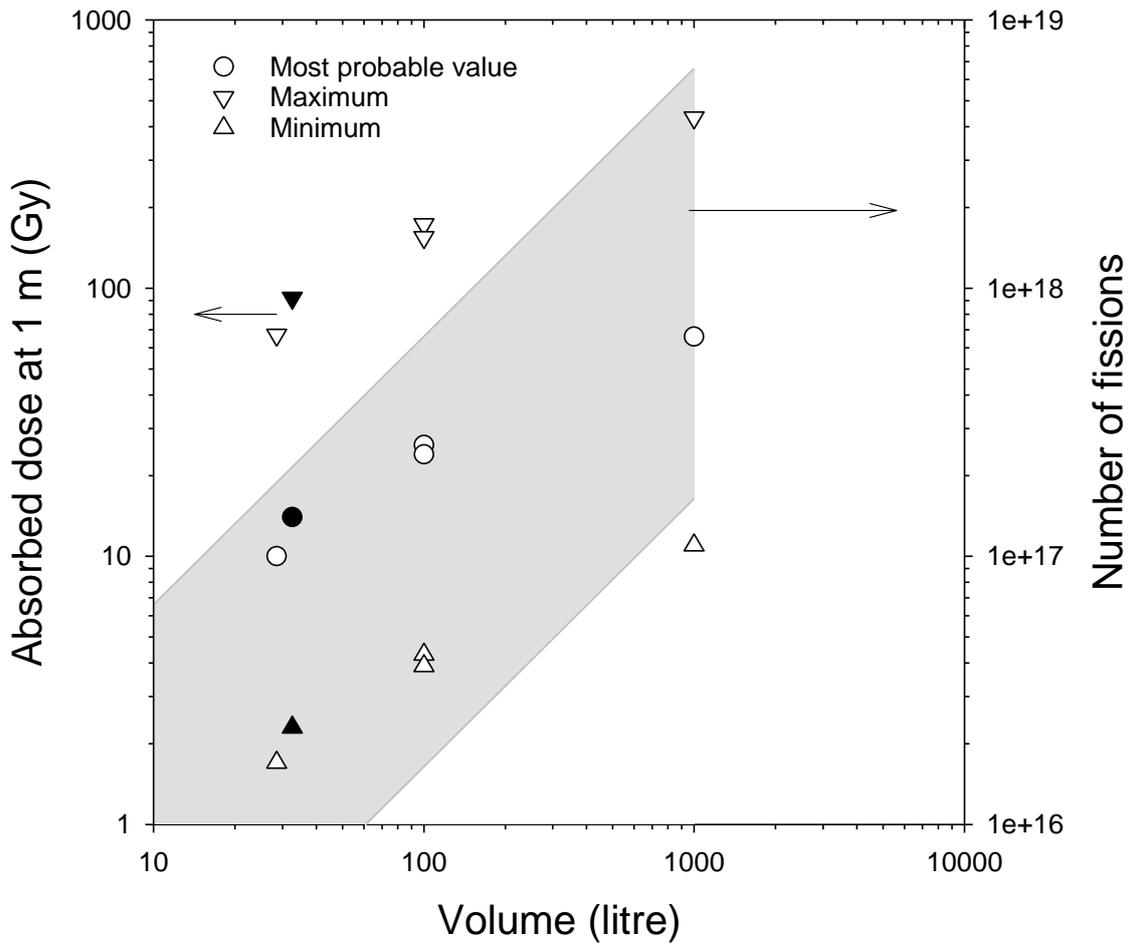


図 I.16 溶液体積と吸収線量（中性子+ γ 線）の関係
 （網掛け範囲は、野村の式から推定される核分裂数の上下限）

スペクトル番号対応表

Radius of slution fuel (cm) Sorrrounding shield (cm)		Metal	Solution in a 3-mm-thick stainless steel container						
		--	17.4	18.6	20.2	23.8	30.0	42.4	50.0
None		1	2	3	4	5	6	7	8
Concrete	10	9	10	11	12	13	14	15	16
	20	17	18	19	20	21	22	23	24
	30	25	26	27	28	29	30	31	32
	40	33	34	35	36	37	38	39	40
	50	41	42	43	44	45	46	47	48
Heavy-type concrete	10	49	50	51	52	53	54	55	56
	20	57	58	59	60	61	62	63	64
	30	65	66	67	68	69	70	71	72
	50	73	74	75	76	77	78	79	80
Iron	5	81	82	83	84	85	86	87	88
	10	89	90	91	92	93	94	95	96
	20	97	98		99		100		101
	30	102	103		104		105		106
	50	107	108	109	110	111	112	113	114
Lead	5	115	116	117	118	119	120	121	122
	10	123	124	125	126	127	128	129	130
	20	131	132		133		134		135
	50	136	137		138		139		140

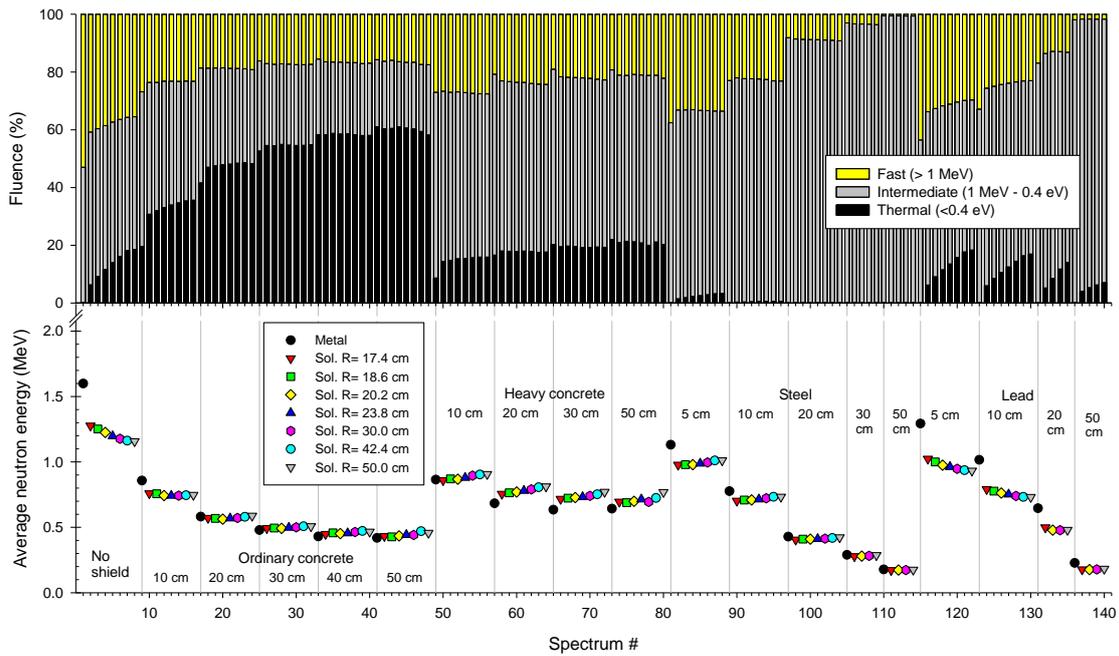


図 I.17 プログラム RADAPAS 内蔵の中性子スペクトルの線質一覧

上：スペクトル番号対応表
 中：エネルギー範囲別のフルエンス内訳
 下：フルエンス平均エネルギー

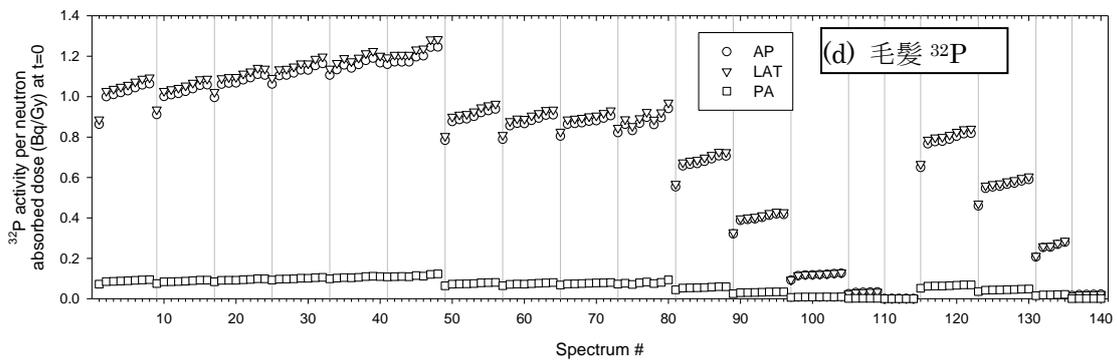
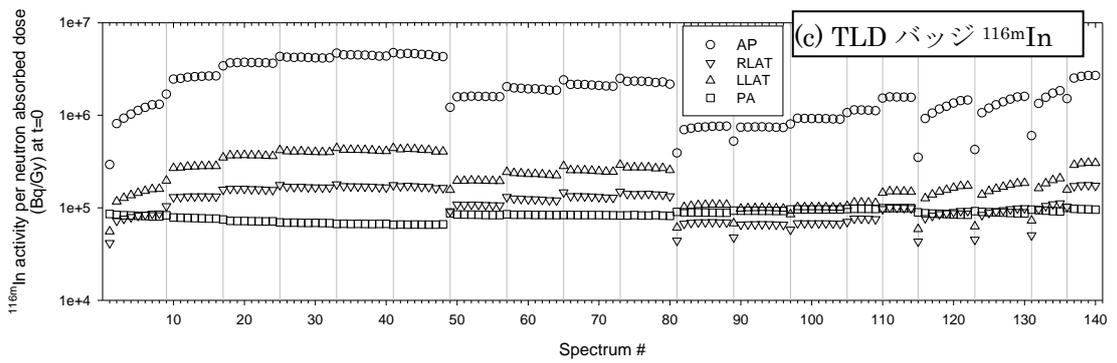
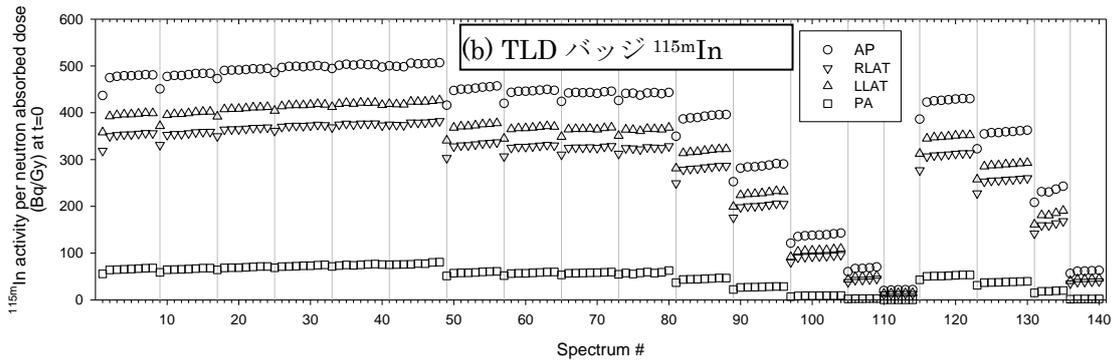
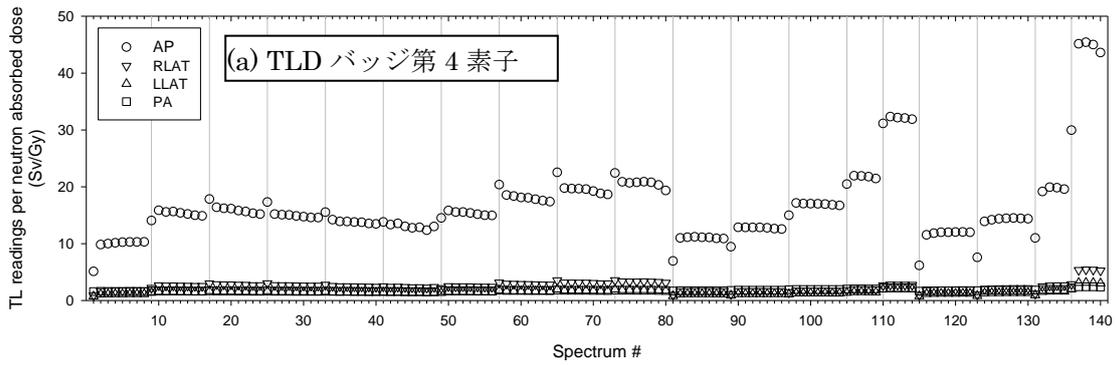
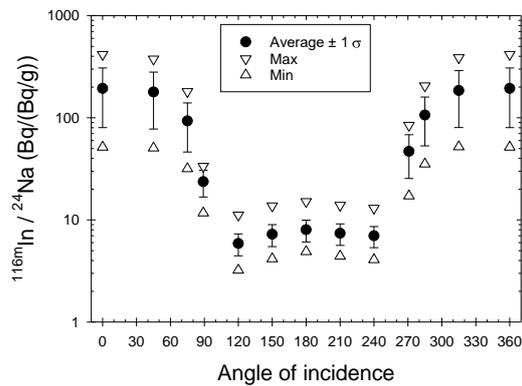
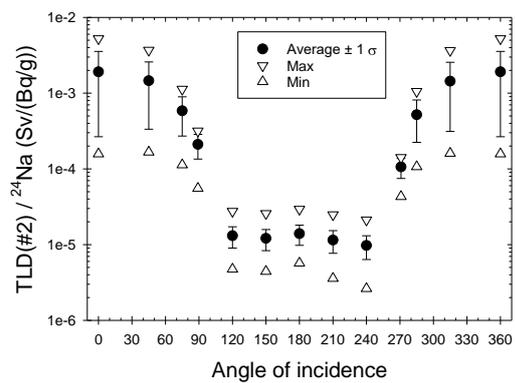


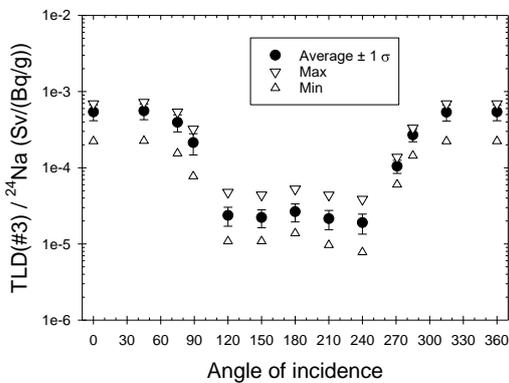
図 I.18 種々の中性子スペクトルに対する中性子吸収線量当たりの TLD 指示値,
 ^{115m}In , ^{116m}In 放射能及び毛髪中 ^{32}P 比放射能



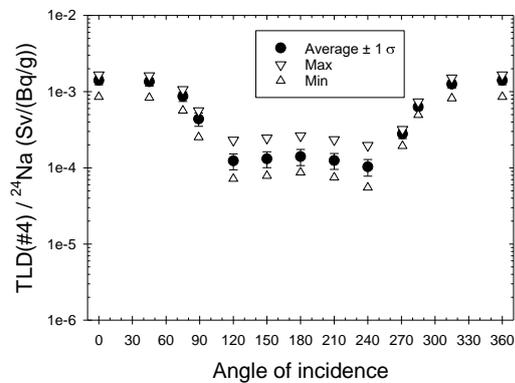
(a) TLD バッジ中 ^{116m}In 放射能/ ^{24}Na 放射能



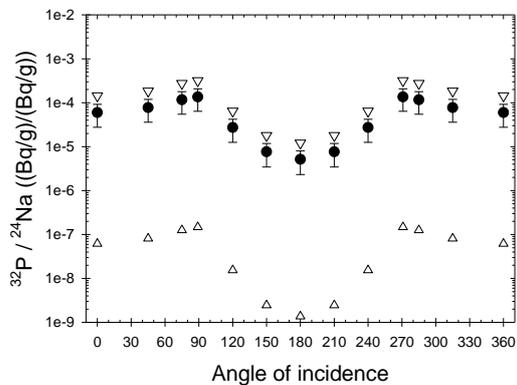
(b) TLD バッジ第 2 素子指示/ ^{24}Na 放射能



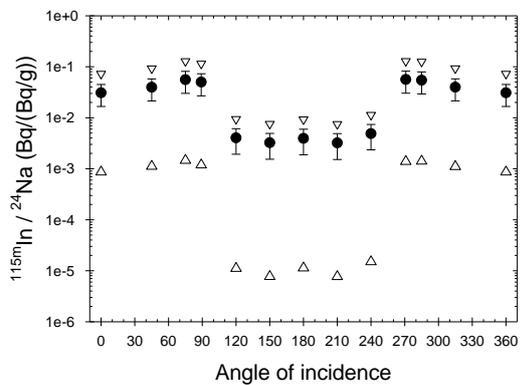
(c) TLD バッジ第 3 素子指示/ ^{24}Na 放射能



(d) TLD バッジ第 4 素子指示/ ^{24}Na 放射能



(e) 毛髪中 ^{32}P 放射能/ ^{24}Na 放射能



(f) TLD バッジ中 ^{115m}In 放射能/ ^{24}Na 放射能

図 I.19 ^{24}Na 比放射能に対する種々の核反応・線量レスポンスの比の入射角度依存性

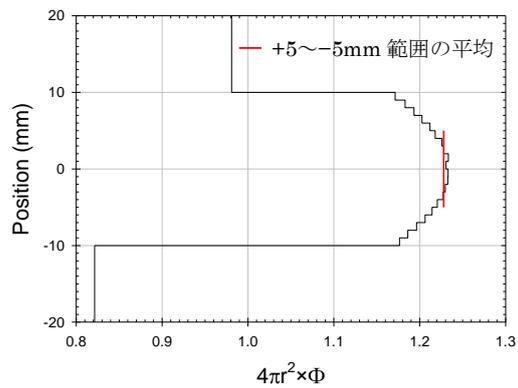


図 I .20 試料指示具内面における中性子フルエンスの位置依存
(縦軸 $z=0$ は線源実効中心に相当する。フルエンスは中性子 1 放出当たり規格化)

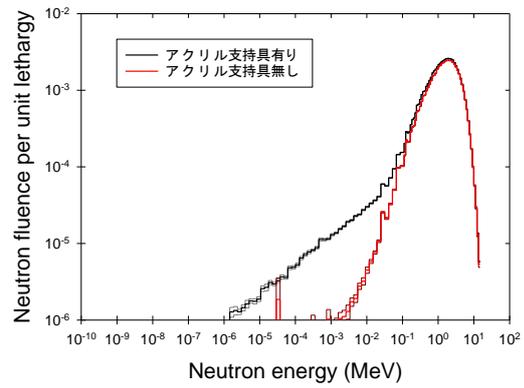


図 I .21 試料指示具内面の試料取り付け領域 ($z=+5\text{ mm}\sim-5\text{ mm}$) における中性子スペクトル



図 I.22 毛髪測定試料

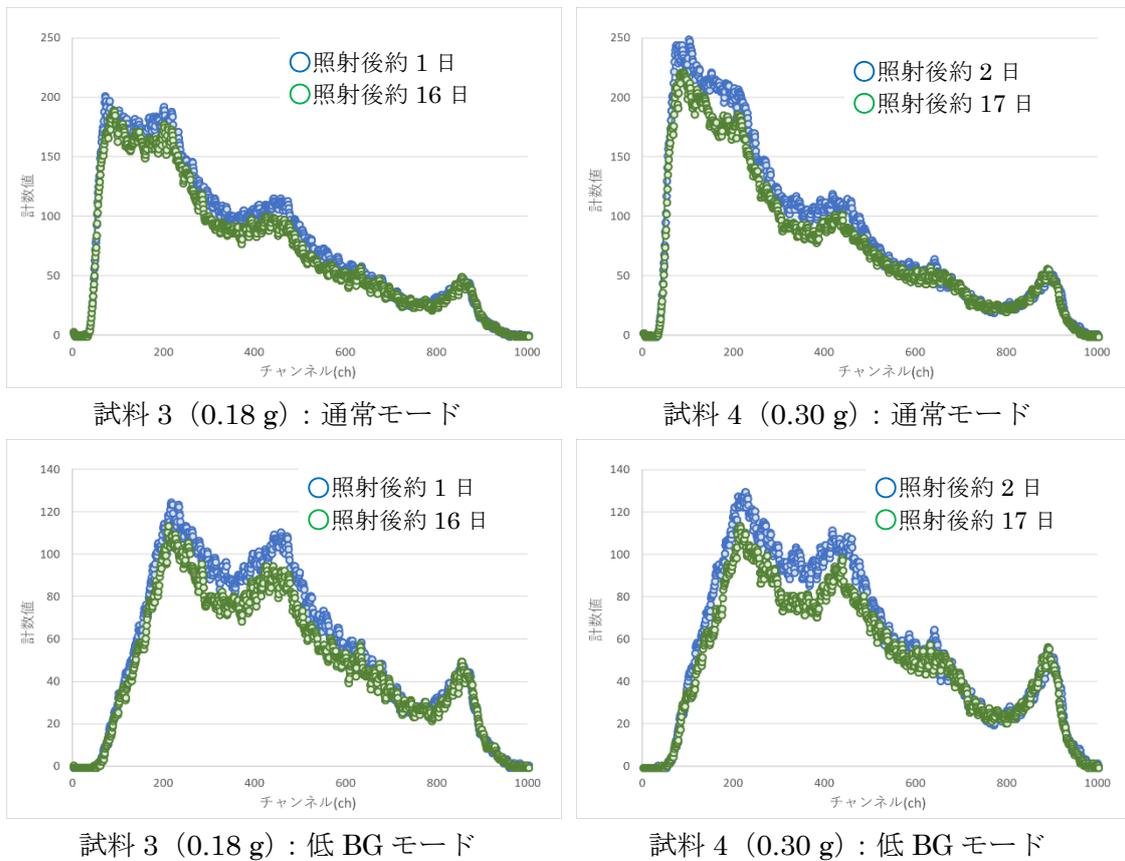


図 I.23 毛髪中 ^{32}P の液体シンチレーションカウンタ測定結果

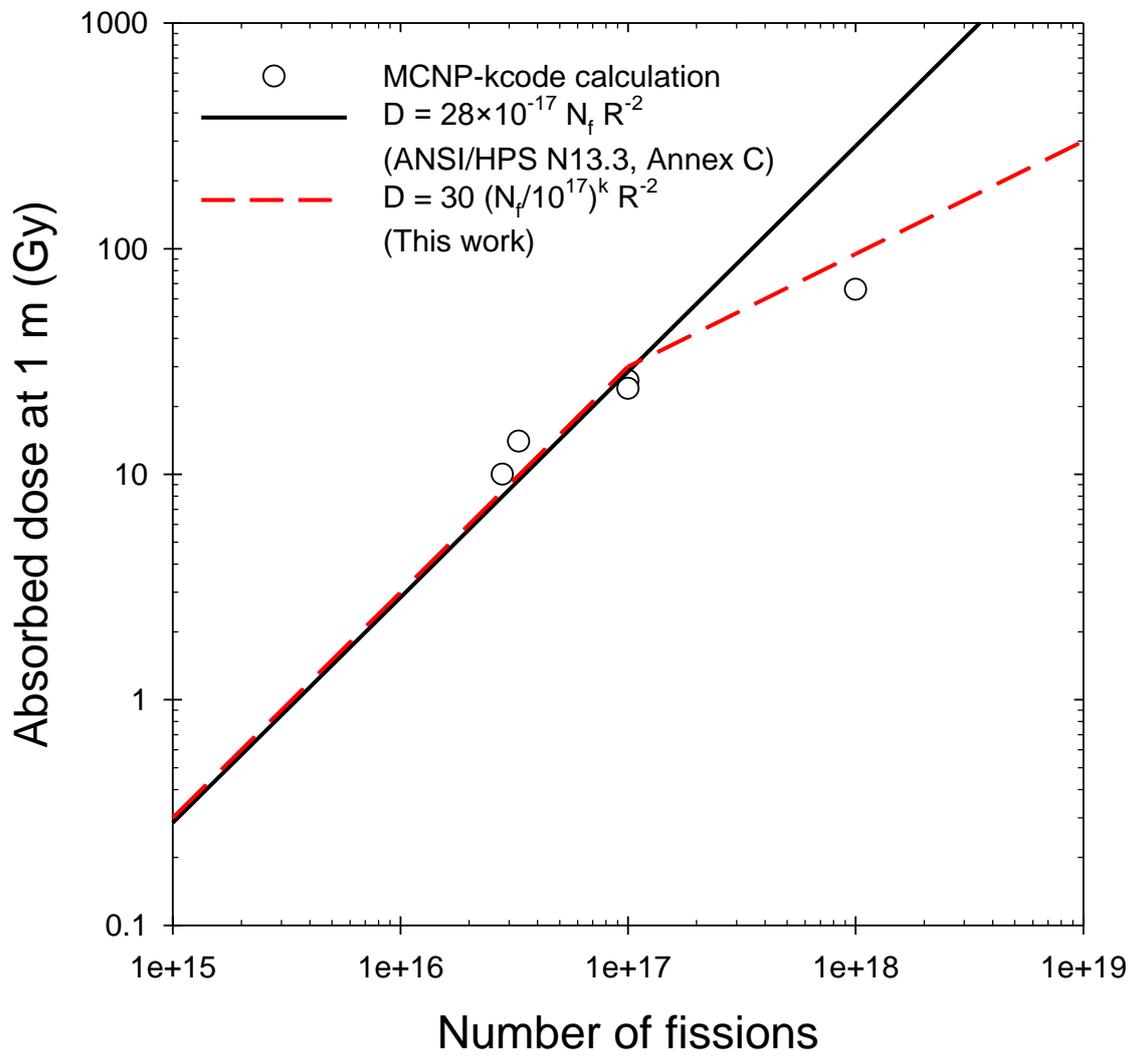
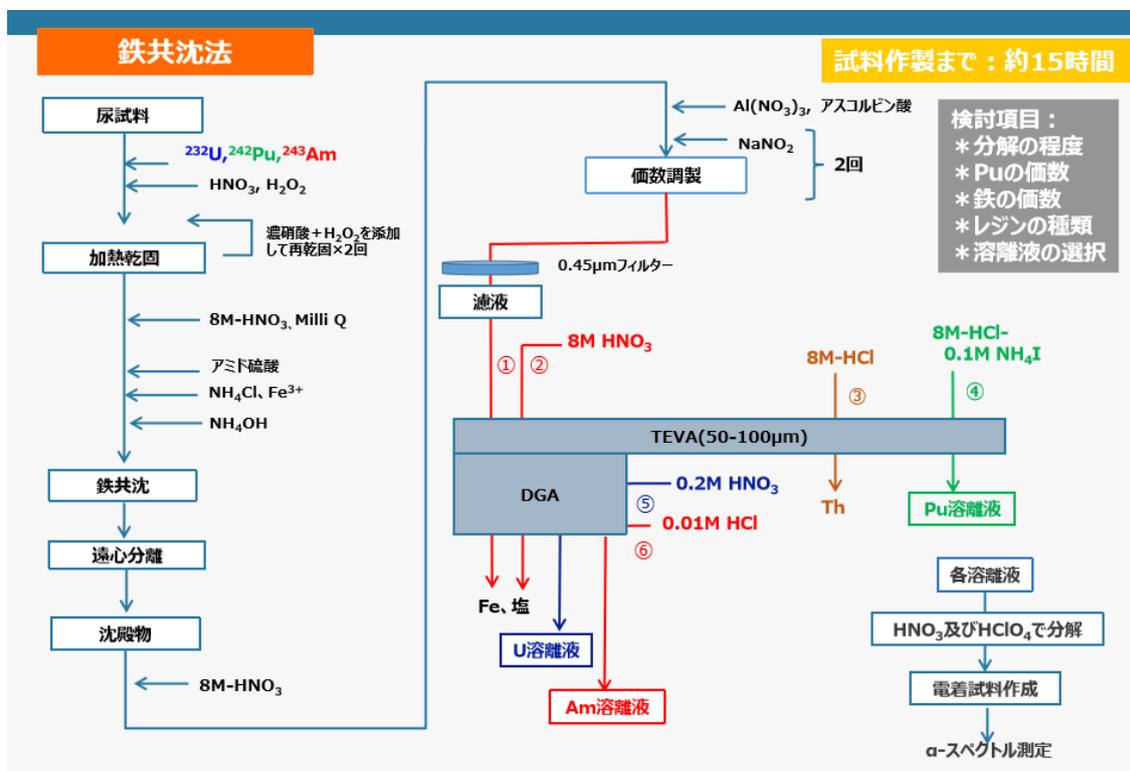


図 I .24 核分裂数に基づく吸収線量（中性子+ γ 線）推定式の比較
 実線：ANSI/HPS 13.3, 破線：本研究

資料Ⅱ アクチノイド核種等による内部被ばく線量評価に関する研究



図Ⅱ.1 尿中 U, Pu, Am の分析手順

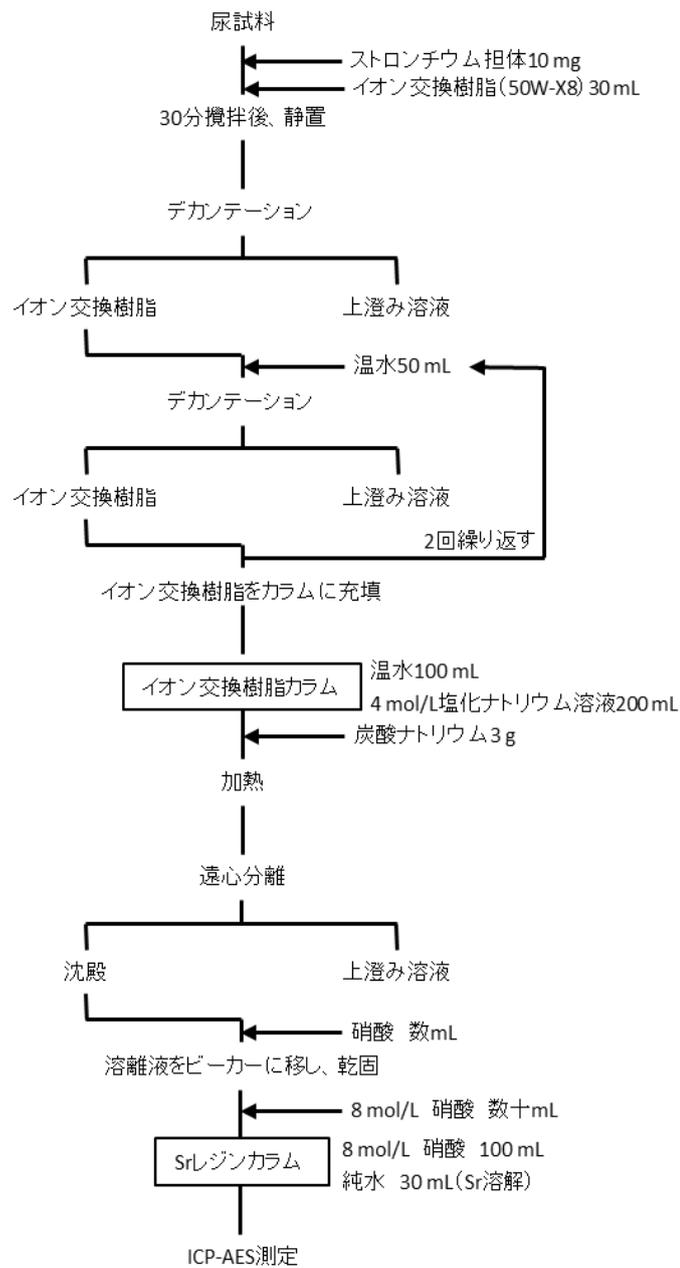


図 II. 2 迅速放射性ストロンチウム分析法のフロー図

2017 - ACTINIDES in urine
LABORATORY N° 22

MATRIX : URINE
UNITY : Bq per sample

	SAMPLE	RESULTS & UNCERTAINTY	ASSIGNED VALUE & UNCERTAINTY	ROBUST MEAN	D.I. Detection limit	BIAS (%)	En	Z-score
241Am	A	2.25E-03 ± 4.48E-04	2.04E-03 ± 2.00E-04	2,05E-03	4,94E-04	10	0,4	0,8
244Cm	A	1.81E-03 ± 3.98E-04	2.12E-03 ± 2.00E-04	2,19E-03	4,94E-04	-15	-0,7	-0,9
238Pu	B	1.15E-02 ± 1.09E-03	1.21E-02 ± 1.20E-03	1,17E-02	4,86E-04	-5	-0,4	-0,6
241Am	B	3.11E-03 ± 5.43E-04	3.06E-03 ± 2.00E-04	2,87E-03	4,99E-04	2	0,1	0,1
244Cm	B	2.13E-03 ± 4.41E-04	2.12E-03 ± 2.00E-04	2,13E-03	1,36E-04	0	0,0	0,0

BIASES are calculated from the assigned value. Without assigned value, biases are calculated from the ROBUST mean.

Zscore
■ In agreement
■ Discrepant
■ Questionnable

En
■ In agreement
■ Discrepant

図 II . 3 我々の評価値に対する真値との比較結果

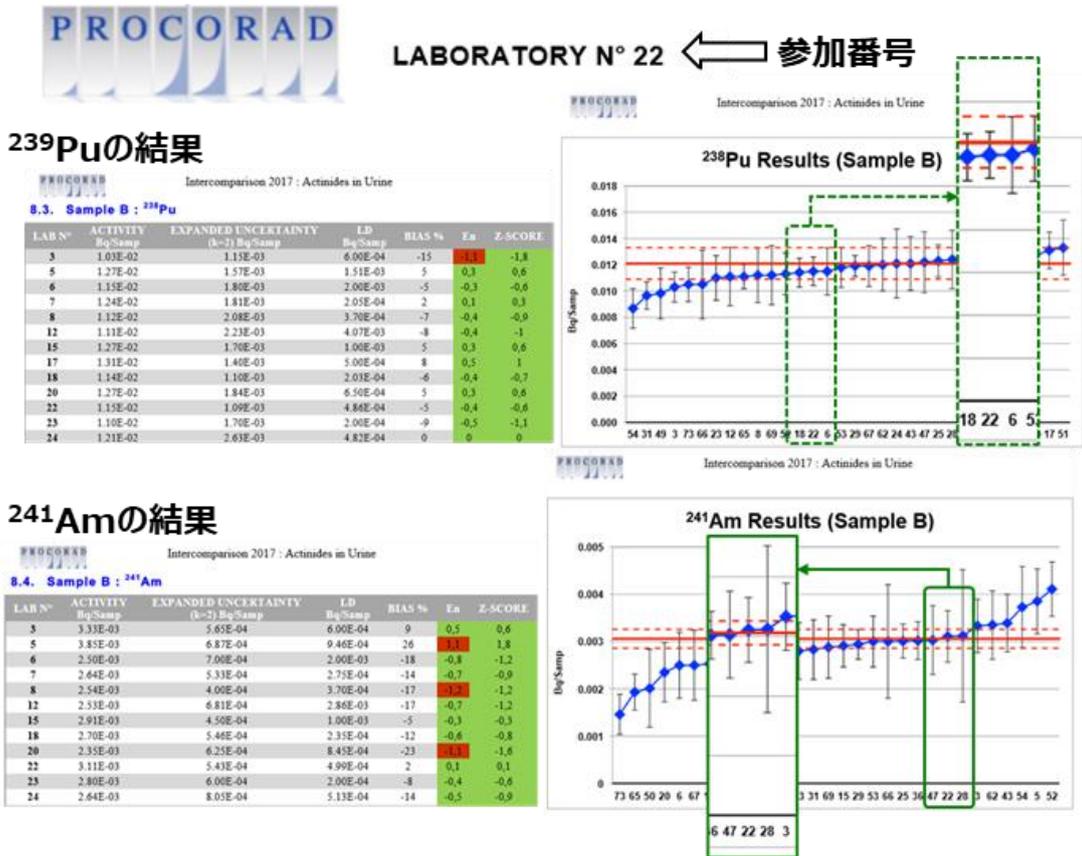
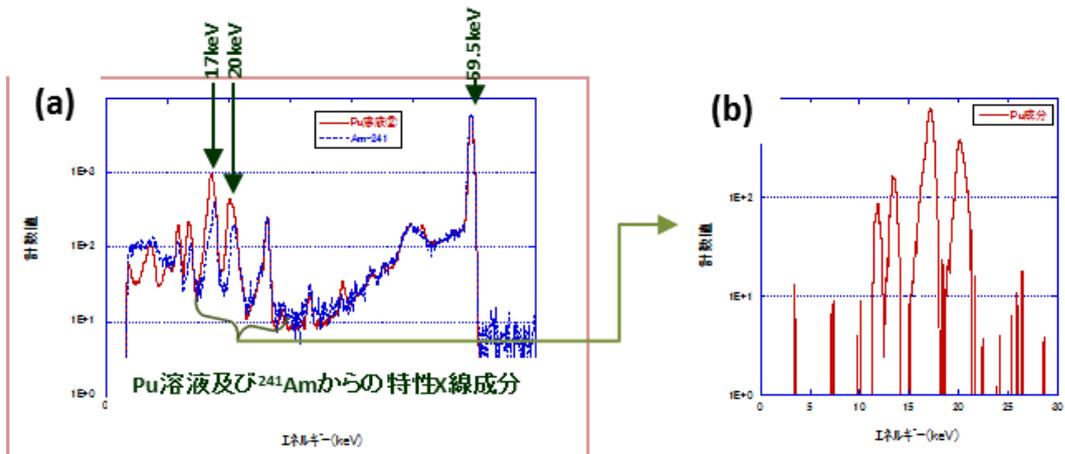


図 II . 4 尿試料の分析結果(一例 : 239Pu 及び 241Am の結果)



(a) Pu 溶液の波高スペクトルと ^{241}Am 単体の波高スペクトルの 59.5 keV ピークの計数が同一になるように規格化した図, (b) ^{239}Pu 溶液の測定結果から ^{241}Am 単体核種からの特性 X 成分を除いた場合の ^{239}Pu の特性 X 線成分評価例

図 II.5 HPGe 検出器による Pu 溶液 ($^{239}\text{Pu}+^{241}\text{Am}$) の及び ^{241}Am 溶液の波高スペクトル

資料Ⅲ 皮膚汚染時における線量評価に関する研究

表Ⅲ.1 使用したサーベイメータ諸元

メーカー	型式	検出器	窓面積(cm ²)	測定レンジ 上限	用途
アロカ (現在, 日立)	TGS-113 a)	GM	20	30 kcpm	表面汚染
アロカ (現在, 日立)	ICS-321 b)	電離箱	44	10 mSv/h	γ線 1cm 線量当量率, シールドを外せばβ線 検知可能
応用技研	AE-133B	電離箱	95	100 mSv/h	γ線 1cm 線量当量率, シールドを外せば 70μm 線量当量率
Victoreen	451B-DE- SU-RYR	電離箱	46	500 mSv/h	γ線 1cm 線量当量率, シールド開でβ線検知 可能

同一のモデルシリーズの製品の場合、一般に窓面積等の形状は変わらず、測定レンジだけが変わる。例えば、

a) TGS-133 の測定レンジ上限：100 kcpm

b) ICS-331 の測定レンジ上限：10 mSv/h, ICS-323C の測定レンジ上限：100 mSv/h

表Ⅲ.2 種々の板状面線源について、β線スペクトロメータのパルス波高スペクトルから算出した皮膚線量率と VARSKIN による皮膚線量率の比較
(面線源の放射能は表面放出率の2倍とした)

Source		7mg/cm ²			40mg/cm ²		
Nuclide	βmax (keV)	Plastic scintillator (A)	VARSKIN (B)	A/B-1	Plastic scintillator (A)	VARSKIN (B)	A/B-1
		(μGy/h)	(μGy/h)	(%)	(μGy/h)	(μGy/h)	(%)
¹⁴ C	156	6.9E-01	9.3E-01	-25	0.0E+00	0.0E+00	—
¹⁴⁷ Pm	224	1.6E+00	2.2E+00	-25	1.2E-03	2.3E-03	-46
⁹⁹ Tc	294	1.7E+01	2.1E+01	-22	3.8E-01	4.9E-01	-22
⁶⁰ Co	318	5.8E-01	7.9E-01	-27	1.8E-02	4.2E-02	-58
³⁶ Cl	709	6.1E+00	8.9E+00	-31	3.1E+00	4.2E+00	-26
¹³⁷ Cs	1176	3.7E+00	5.7E+00	-36	1.1E+00	1.9E+00	-42
⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	2282	7.7E+00	1.1E+01	-30	4.0E+00	6.5E+00	-38
¹⁰⁶ Ru + ¹⁰⁶ Rh	3541	1.7E+00	3.8E+00	-55	1.5E+00	4.4E+00	-66

表Ⅲ.3 各文献における皮膚線量換算係数の計算方法

著者	表題	掲載誌等	備考	計算方法 (計算コード)	線源 条件	線源から媒 質表面まで の距離(cm)	媒質の 深さ (mm)	換算係数 単位
龍福廣, 中戸喜 寄, 備後一義, 立 田初己, 福田整 司, 南賢太郎	点積分核法によるβ線皮膚 線量の評価	日本原子力研究 所 JAERI-M 7354 (1977)	原子力安全技術センター 「被ばく線量の測定・評価 マニュアル」再録	点積分核法	半径 1cm 円形	0, 1, 10	0.07	mrad/h per μCi/cm ²
					半径無限大	0, 10, 100	0.07	
D. C. Kocher K. F. Eckerman	Electron dose-rate conversion factors for external exposure of the skin from uniformly deposited activity on the body surface	Health Phys 53(2), 135-141 (1987)		点積分核法 (DOSFACTOR コード)	一様な広い 汚染	0	0.04 0.07 0.08 0.4	Sv/y per Bq/cm ²
W. G. Cross N. O. Freedman P. Y. Wong	Beta ray dose distributions from skin contamination	Radiat. Prot. Dosim. 40(3), 149-168 (1992)	ICRU Report 56 及び原子 力安全技術センター「被ば く線量の測定・評価マニ ュアル」再録	モンテカルロ法 (SANDYL, CYLTRAN, ACCEPT-P)	円形 1 cm ² 円形 100 cm ²	0	0.07 0.4 3 10	nGy/h per Bq/cm ²
R. E. Faw	Absorbed doses to skin from radionuclide sources on the body surface	Health Phys. 63(4), 443-448 (1992)		モンテカルロ法 (CYLTRAN)	一様な広い 汚染	0	0.05~ 0.10	Sv/y per Bq/cm ²
IAEA	Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency	IAEA- TECDOC-1162, (2000)	放射線緊急事態時の評価 および対応のための一般 的手順(翻訳), 放射線医 学総合研究所 NIRS-M- 183, (2000) で再録		一様な広い 汚染	0	0.07	μSv/h per Bq/cm ²
D. Delacroix J. P. Guerre P. Leblanc C. Hickman	Radionuclide and radiation protection data handbook 1998	Radiat. Prot. Dosim. 78(1/2), (1998)	IAEA-TECDOC-1162 の 換算係数の出典であると思 われる	β線: VARSKIN 2 γ線: Microshield 4.10	一様で広い	0	0.07	mSv/h per kBq/cm ² 液滴の場合, mSv/h per kBq
					0.05 ml 液滴	0	0.07	
	Radionuclide and radiation protection data handbook 2002	Radiat. Prot. Dosim. 98(1), (2002)			一様で広い	0	0.07	
					0.05 ml 液滴	0	0.07	

表Ⅲ.4 (続き)

核種	壊変形式	エネルギー (MeV)		表面密度当たりの深さ7mg/cm ² での吸収線量率 (mGy/h per kBq/cm ²)																				
		最大	平均	JAERI-M 7354	Kocher	Cross	Faw	RPD	IAEA	Varskin 4.0			Varskin 5.3			Varskin 6.0								
				β	β	β	β	β+γ	β+γ	β	γ	β	γ	β	γ	β	γ							
Cu-62	ECB+	2.926	1.28431			1.8E+00	9%					1.9E+00	17%	3.3E-02	11%	1.7E+00	0%	3.0E-02	0%	1.7E+00	3.0E-02			
Cu-64	ECB+B-	0.6531	0.12475	7.0E-01	-13%	8.7E-01	8%		1.0E+00	1.0E+00	22%	8.7E-01	7%	1.7E-02	28%	7.9E-01	-2%	1.4E-02	5%	8.1E-01	1.3E-02			
Cu-66	B-	2.642	1.06637			1.8E+00	13%					1.9E+00	16%	1.6E-03	-11%	1.6E+00	0%	1.5E-03	-14%	1.6E+00	1.8E-03			
Cu-67	B-	0.5617	0.15038			1.5E+00	13%		1.3E+00	1.3E+00	-1%	1.4E+00	6%	1.0E-02	17%	1.3E+00	2%	8.7E-03	1%	1.3E+00	8.6E-03			
Zn-62	ECB+	0.605	0.03264			1.5E-01	7%					1.6E-01	9%	4.2E-02	22%	1.4E-01	1%	3.5E-02	1%	1.4E-01	3.5E-02			
Zn-65	ECB+	0.3288	0.00687			2.6E-02	18%	2.4E-02	8%	2.3E-02	2%	7.6E-02	7.6E-02	48%	2.5E-02	13%	3.5E-02	21%	2.3E-02	5%	3.0E-02	2.9E-02		
Ga-66	ECB+	4.153	0.96337									1.6E+00	1.6E+00	53%	1.2E+00	16%	4.8E-02	11%	1.0E+00	2%	4.4E-02	2%	1.0E+00	4.3E-02
Ga-67	EC		0.03633			3.0E-01	3%	3.0E-01	6%	2.7E-01	-5%	3.5E-01	3.5E-01	9%	0.0E+00	-100%	4.1E-02	25%	2.8E-01	-2%	3.3E-02	1%	2.9E-01	3.3E-02
Ga-68	ECB+	1.8991	0.73794	2.2E+00	49%	2.2E+00	51%	1.6E+00	11%	1.4E+00	1%	1.8E+00	1.8E+00	22%	1.7E+00	15%	3.3E-02	12%	1.4E+00	0%	3.0E-02	0%	1.4E+00	3.0E-02
As-73	EC		0.06062									4.5E-03			0.0E+00	-100%	5.3E-02	27%	4.8E-03	-2%	4.3E-02	3%	4.9E-03	4.2E-02
As-74	ECB+B-	1.5404	0.26584			1.1E+00	7%					1.1E+00	9%	3.2E-02	13%	9.9E-01	0%	2.8E-02	0%	9.8E-01	2.8E-02			
As-76	B-	2.962	1.06699			1.8E+00	9%					2.1E+00	2.1E+00	27%	1.9E+00	15%	1.1E-02	-5%	1.6E+00	-1%	9.7E-03	-12%	1.6E+00	1.1E-02
As-77	B-	0.6829	0.22584									1.8E+00			1.5E+00	9%	2.5E-04	12%	1.4E+00	1%	2.2E-04	0%	1.4E+00	2.2E-04
Se-73	ECB+	1.65089	0.38709			1.2E+00	11%					1.2E+00	12%	5.3E-02	17%	1.1E+00	0%	4.6E-02	2%	1.1E+00	4.6E-02			
Se-75	EC		0.01444			9.6E-02	27%	8.9E-02	18%	8.0E-02	6%	1.4E-01	1.4E-01	20%	0.0E+00	-100%	4.9E-02	19%	7.7E-02	1%	4.2E-02	1%	7.5E-02	4.2E-02
Se-79	B-	0.151	0.05292			4.3E-01	22%					4.3E-01	22%	0.0E+00		4.2E-01	17%	0.0E+00		3.6E-01	0.0E+00			
Br-77	ECB+	0.3431	0.00937									1.0E-02	1.0E-02	-86%	4.5E-02	5%	3.5E-02	18%	4.0E-02	-5%	3.0E-02	0%	4.2E-02	2.9E-02
Br-82	B-	2.31608	0.14543	1.5E+00	29%	1.3E+00	9%					1.5E+00	1.5E+00	20%	1.3E+00	7%	6.0E-02	6%	1.2E+00	-2%	5.7E-02	0%	1.2E+00	5.7E-02
Kr-85	B-	0.6874	0.25068	2.1E+00																			0.0E+00	0.0E+00
Rb-81	ECB+	1.215	0.12223			5.5E-01	21%					1.2E+00	157%	4.4E-02	69%	1.1E+00	144%	3.8E-02	46%	4.5E-01	2.6E-02			
Rb-82	ECB+	3.379	1.41123			1.8E+00	8%					1.9E+00	16%	3.6E-02	9%	1.7E+00	0%	3.2E-02	-1%	1.7E+00	3.3E-02			
Rb-84	ECB+B-	1.6589	0.16334	4.9E-01	-2%	5.3E-01	5%					4.6E-01	-9%	3.7E-02	13%	4.1E-01	-18%	3.3E-02	1%	5.0E-01	3.3E-02			
Rb-86	B-EC	1.7742	0.66799	2.4E+00	57%	2.3E+00	47%	1.7E+00	10%	1.6E+00	0%	1.9E+00	1.9E+00	22%	1.7E+00	12%	1.7E-03	4%	1.6E+00	0%	1.7E-03	2%	1.6E+00	1.7E-03
Rb-88	B-	5.316	2.07196			2.6E+00	41%	2.0E+00	10%			2.1E+00	15%	7.8E-03	2%	1.9E+00	0%	7.7E-03	0%	1.9E+00	7.7E-03			
Sr-85	EC		0.0089			1.5E-02		9.0E-03		1.1E-02		6.0E-02	6.0E-02	93%	0.0E+00		3.6E-02	17%	0.0E+00		3.2E-02	1%	0.0E+00	3.1E-02
Sr-85m	ITECB+	0.13047	0.01296			4.5E-02	225%					0.0E+00	-100%	1.6E-02	11%	3.7E-02	172%	1.4E-02	-1%	1.4E-02	1.5E-02			
Sr-87m	ITEG		0.06724			2.4E-01	-2%					0.0E+00	-100%	1.5E-02	15%	2.7E-01	11%	1.3E-02	0%	2.5E-01	1.3E-02			
Sr-89	B-	1.4951	0.58453	2.4E+00	53%	2.3E+00	48%	1.7E+00	10%			1.8E+00	1.8E+00	17%	1.7E+00	11%	0.0E+00		1.5E+00	0%	0.0E+00		1.5E+00	0.0E+00
Sr-90	B-	0.546	0.19572	1.9E+00	42%	1.8E+00	36%	1.5E+00	10%	1.3E+00	0%				1.5E+00	10%	0.0E+00		1.3E+00	0%	0.0E+00		1.3E+00	0.0E+00
Sr-91	B-	2.707	0.65493			2.3E+00	46%					1.8E+00	12%	1.4E-02	4%	1.6E+00	0%	1.3E-02	-1%	1.6E+00	1.4E-02			
Y-90	B-	2.2801	0.9331	2.5E+00	55%	2.4E+00	49%	1.8E+00	10%	1.6E+00	0%	2.0E+00	2.0E+00	24%	1.9E+00	16%	0.0E+00		1.6E+00	0%	0.0E+00		1.6E+00	0.0E+00
Sr-90/Y-90				4.4E+00	49%							3.5E+00	3.5E+00	18%								3.0E+00	0.0E+00	
Y-91	B-	1.5448	0.60318	2.4E+00	53%	2.3E+00	48%	1.7E+00	10%			1.8E+00			1.7E+00	12%	0.0E+00		1.5E+00	0%	0.0E+00		1.5E+00	0.0E+00
Zr-93	B-	0.0914	0.01941			0.0E+00						0.0E+00			0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Zr-95	B-	1.1248	0.11852	1.4E+00	28%	1.4E+00	29%	1.2E+00	10%	1.0E+00	-3%				1.1E+00	7%	1.8E-02	7%	1.1E+00	-1%	1.7E-02	1%	1.1E+00	1.7E-02
Zr-97	B-	1.91495	0.72121			2.3E+00	43%					1.8E+00	10%	3.0E-03	-84%	1.6E+00	-3%	2.8E-03	-85%	1.6E+00	1.9E-02			
Nb-93m	IT		0.02944			0.0E+00						0.0E+00			2.6E-03	24%	0.0E+00		2.2E-03	5%	0.0E+00	2.1E-03		
Nb-94	B-	0.47168	0.1684			1.6E+00	24%					1.4E+00	9%	3.7E-02	6%	1.3E+00	0%	3.5E-02	1%	1.3E+00	3.5E-02			
NB-95	B-	0.9256	0.04456	2.4E-01	2%	2.6E-01	10%	2.5E-01	4%	2.3E-01	-4%				2.4E-01	0%	1.9E-02	6%	2.4E-01	-1%	1.8E-02	0%	2.4E-01	1.8E-02
Zr-95/Nb-95												1.6E+00	1.6E+00	19%								1.3E+00	3.5E-02	
Nb-95m	ITB-	1.16129	0.17998			1.8E+00	36%			1.3E+00	-3%				0.0E+00	-100%	1.5E-02	19%	1.3E+00	-1%	1.3E-02	3%	1.3E+00	1.2E-02
Nb-97	B-	1.27583	0.46832			2.2E+00	42%					1.7E+00	10%	1.8E-02	7%	1.5E+00	0%	1.7E-02	-1%	1.5E+00	1.7E-02			
Nb-97m						4.7E-02						0.0E+00			1.8E-02		2.8E-02		1.7E-02					
Mo-93	EC		0.00555			0.0E+00						0.0E+00			1.5E-02	19%	0.0E+00		1.3E-02	2%	0.0E+00	1.3E-02		
Mo-99	B-	1.21452	0.39288			2.2E+00	45%	1.6E+00	7%	1.5E+00	-1%				1.6E+00	8%	5.1E-03	11%	1.5E+00	0%	4.7E-03	2%	1.5E+00	4.6E-03
Tc-99	B-	0.2935	0.10125			9.8E-01	-3%	1.0E+00	1%	9.8E-01	-3%	1.2E+00	1.2E+00	19%	1.1E+00	12%	0.0E+00		1.0E+00	0%	0.0E+00		1.0E+00	0.0E+00
Tc-99m	ITB-	0.43618	0.01618			2.4E-01	13%	2.3E-01	8%	1.9E-01	-8%	2.5E-01	2.5E-01	14%	0.0E+00	-100%	8.4E-03	12%	1.7E-01	-21%	7.5E-03	0%	2.1E-01	7.5E-03

表Ⅲ.4 (続き)

核種	壊変形式	エネルギー (MeV)		表面密度当たりの深さ7mg/cm ² での吸収線量率 (mGy/h per kBq/cm ²)																					
		最大	平均	JAERI-M 7354	Kocher		Cross		Faw		RPD	IAEA		Varskin 4.0			Varskin 5.3			Varskin 6.0					
				β	β	β	β	β+γ	β+γ	β	γ	β	γ	β	γ	β	γ	β	γ						
I-124	ECB+	2.1376	0.19428							5.2E-01	5.2E-01	25%	4.3E-01	11%	3.2E-02	8%	3.7E-01	-3%	2.9E-02	-2%	3.9E-01	2.9E-02			
I-125	EC		0.01923			0.0E+00				2.1E-02	2.1E-02	28%	0.0E+00		1.9E-02	15%	0.0E+00		1.6E-02	-4%	0.0E+00	1.6E-02			
I-126	ECB+B-	1.258	0.16058					7.3E-01	2%				7.5E-01	4%	1.8E-02	13%	6.9E-01	-3%	1.6E-02	1%	7.1E-01	1.6E-02			
I-129	B-	0.15442	0.06507			2.2E-01	-35%	1.6E-01	-52%	3.2E-01	-4%	3.4E-01			3.0E-01	-9%	9.3E-03	15%	3.0E-01	-9%	7.7E-03	-4%	3.3E-01	8.1E-03	
I-131	B-	0.80687	0.19184	1.7E+00	31%	1.7E+00	31%	1.4E+00	8%	1.3E+00	-2%	1.6E+00	1.6E+00	21%	1.4E+00	8%	1.5E-02	13%	1.3E+00	0%	1.4E-02	0%	1.3E+00	1.4E-02	
I-132	B-	2.13967	0.49299	2.2E+00	46%	2.2E+00	42%	1.6E+00	6%	1.5E+00	-1%	2.1E+00			1.7E+00	8%	5.2E-02	8%	1.5E+00	0%	4.9E-02	1%	1.5E+00	4.9E-02	
Te-132/I-132										2.9E+00													2.3E+00	6.9E-02	
I-133	B-	1.53778	0.41415			2.2E+00	44%	1.6E+00	8%	1.5E+00	-1%	2.2E+00			1.6E+00	9%	1.7E-02	9%	1.5E+00	0%	1.6E-02	-1%	1.5E+00	1.6E-02	
I-134	B-	2.32083	0.57758			2.3E+00	43%						1.8E+00	10%	5.4E-02	6%	1.6E+00	0%	5.1E-02	1%	1.6E+00		5.1E-02		
I-135	B-	2.12145	0.34652			2.1E+00	45%	1.6E+00	11%				1.6E+00	9%	2.4E-02	3%	1.5E+00	2%	2.3E-02	0%	1.4E+00		2.3E-02		
Xe-133	B-	0.3464	0.13791	1.2E+00																			0.0E+00	0.0E+00	
Cs-131	EC		0.00635							1.0E-02	1.0E-02	24%	0.0E+00		9.4E-03	17%	0.0E+00		7.8E-03	-3%	0.0E+00		8.0E-03		
Cs-134	B-EC	1.45378	0.16388	1.3E+00	33%	1.4E+00	37%	1.1E+00	7%	9.8E-01	-2%	1.4E+00	1.4E+00	35%	1.1E+00	7%	4.1E-02	7%	1.0E+00	0%	3.8E-02	0%	1.0E+00	3.8E-02	
Cs-135	B-	0.2694	0.08938			5.1E-01	-43%						7.1E-01	-21%	0.0E+00		6.3E-01	-30%	0.0E+00		9.0E-01		0.0E+00		
Cs-136	B-	0.6816	0.1449			1.5E+00	20%	9.8E-01	-21%				1.4E+00	10%	5.3E-02	13%	1.3E+00	3%	5.0E-02	6%	1.2E+00		4.7E-02		
Cs-137	B-	1.17563	0.18836	2.1E+00	61%	1.6E+00	23%	1.5E+00	18%	1.3E+00	-3%		1.6E+00	23%	1.4E+00	6%	0.0E+00		1.3E+00	-1%	0.0E+00		1.3E+00	0.0E+00	
Ba-133	EC		0.05531							1.3E-01	1.3E-01	4%	0.0E+00	-100%	3.4E-02	18%	9.3E-02	-3%	2.9E-02	0%	9.6E-02		2.9E-02		
Ba-137m	IT		0.06534			2.4E-01	58%			1.6E-01	5%				0.0E+00	-100%	1.7E-02	7%	1.5E-01	-1%	1.6E-02	0%	1.5E-01	1.6E-02	
Cs-137/Ba-137m										1.6E+00													1.5E+00	1.5E-02	
Ba-140	B-	1.01703	0.32022			1.9E+00	34%	1.5E+00	6%				1.5E+00	5%	1.6E-02	22%	1.4E+00	-2%	1.3E-02	0%	1.5E+00		1.3E-02		
La-140	B-	3.7619	0.53455			2.3E+00	44%	1.7E+00	6%	1.6E+00	-1%	2.1E+00	2.1E+00	30%	1.7E+00	9%	4.0E-02	5%	1.6E+00	0%	3.9E-02	1%	1.6E+00	3.8E-02	
Ba-140/La-140										3.8E+00	3.8E+00	23%											3.0E+00	5.2E-02	
Ce-139	EC		0.0355							4.9E-01	4.9E-01	18%	0.0E+00	-100%	1.9E-02	14%	3.9E-01	-2%	1.6E-02	-2%	4.0E-01		1.7E-02		
Ce-141	B-	0.5807	0.17103			1.9E+00	24%	1.7E+00	8%	1.5E+00	-4%	1.8E+00	1.8E+00	15%	1.6E+00	4%	5.0E-03	-3%	1.6E+00	-1%	4.5E-03	-13%	1.6E+00	5.2E-03	
Ce-143	B-	1.4614	0.43636			2.2E+00	40%			2.0E+00	2.0E+00	28%	1.7E+00	8%	2.1E-02	14%	1.5E+00	-1%	1.8E-02	-1%	1.6E+00		1.8E-02		
Ce-144	B-	0.3187	0.09162	8.9E-01	5%	1.0E+00	19%	9.0E-01	6%				9.2E-01	8%	1.5E-03	24%	8.4E-01	-2%	1.3E-03	11%	8.5E-01		1.2E-03		
Pr-143	B-	0.9339	0.315			2.1E+00	41%	1.6E+00	9%				1.7E+00	1.7E+00	16%	1.6E+00	9%	0.0E+00		1.5E+00	0%	0.0E+00		0.0E+00	
Pr-144	B-	2.9975	1.20843	2.6E+00	53%	2.5E+00	50%	1.8E+00	10%				2.1E+00		1.9E+00	16%	2.7E-04	17%	1.7E+00	0%	2.5E-04	10%	1.7E+00	2.3E-04	
Pr-144m	ITB-	1.54593	0.04746			0.0E+00	-100%								0.0E+00	-100%	6.7E-03	21%	2.0E-04	14%	5.3E-03	-5%	1.8E-04	5.5E-03	
Ce-144/Pr-144				3.6E+00	45%																		2.5E+00	1.4E-03	
Nd-147	B-	0.8953	0.27015			1.9E+00	37%						1.5E+00	4%	1.0E-02	14%	1.4E+00	-1%	8.7E-03	-3%	1.4E+00		9.0E-03		
Pm-147	B-	0.2246	0.06193	6.1E-01	14%	6.2E-01	15%	5.9E-01	10%	5.1E-01	-4%	6.0E-01	6.0E-01	12%	6.0E-01	13%	0.0E+00		5.4E-01	0%	0.0E+00		5.4E-01	0.0E+00	
Pm-148m	B-IT	1.01159	0.16994					1.3E+00	6%						1.3E+00	4%	5.8E-02	9%	1.2E+00	-1%	5.3E-02	1%	1.2E+00	5.3E-02	
Sm-151	B-	0.0767	0.01997			5.9E-04	16%						0.0E+00	-100%	0.0E+00		4.5E-04	-13%	0.0E+00		5.1E-04		0.0E+00		
Sm-153	B-	0.8082	0.26987					1.5E+00	8%				1.6E+00	1.6E+00	14%	1.6E+00	12%	1.0E-02	15%	1.4E+00	-1%	8.5E-03	-6%	1.4E+00	9.0E-03
Eu-152	ECB+B-	1.47452	0.12856			9.0E-01	22%			9.2E-01	9.2E-01	19%	7.9E-01	7%	3.6E-02	12%	7.9E-01	7%	3.2E-02	1%	7.4E-01		3.2E-02		
Eu-154	B-EC	1.84533	0.27301			2.1E+00	18%	2.0E+00	13%	1.7E+00	-5%	2.1E+00	2.1E+00	19%	1.7E+00	-2%	3.0E-02	6%	1.8E+00	3%	2.8E-02	-1%	1.7E+00	2.8E-02	
Eu-155	B-	0.2522	0.06471			3.3E-01	4%	2.9E-01	-8%				3.3E-01		2.9E-01	-9%	7.4E-03	15%	3.0E-01	-8%	6.1E-03	-4%	3.2E-01	6.4E-03	
Eu-156	B-	2.451	0.45788					1.4E+00	1%				1.2E+00	1.2E+00	-16%	1.4E+00	-3%	2.3E-02	12%	1.4E+00	-1%	2.2E-02	6%	1.4E+00	2.0E-02
Gd-153	EC		0.04376			1.3E-01	18%						0.0E+00	-100%	2.2E-02	15%	1.5E-02	-85%	1.8E-02	-6%	1.1E-01		1.9E-02		
Tb-160	B-	1.74851	0.25925			2.1E+00	23%						1.6E+00	-4%	3.2E-02	8%	1.6E+00	-2%	3.0E-02	-1%	1.7E+00		3.0E-02		
Ho-166m	B-	1.31444	0.14973			9.5E-01	17%										1.9E+01	2214%	5.9E-02	6%	8.1E-01		5.6E-02		
Er-169	B-	0.3509	0.10346							1.1E+00	1.1E+00	17%	1.0E+00	8%	0.0E+00		9.4E-01	0%	0.0E+00		9.4E-01		0.0E+00		
Tm-170	B-EC	0.968	0.32799					1.7E+00	13%				2.0E+00		1.6E+00	4%	2.1E-03	-84%	1.5E+00	0%	1.7E-03	-87%	1.5E+00	1.3E-02	
Tm-171	B-	0.0964	0.02547							0.0E+00			0.0E+00	-100%	0.0E+00		1.1E-02	3%	0.0E+00		1.1E-02		0.0E+00		
Yb-169	EC		0.14713			1.0E+00	16%	9.7E-01	12%	8.2E-01	-5%	1.0E+00	1.0E+00	9%	0.0E+00	-100%	4.8E-02	-1%	8.2E-01	-5%	4.0E-02	-18%	8.7E-01	4.9E-02	
Hf-181	B-	1.0283	0.20523					2.0E+00	12%				1.9E+00	3%	2.9E-02	18%	1.8E+00	-1%	2.5E-02	2%	1.8E+00		2.4E-02		
Ta-182	B-	1.71349	0.21045					2.0E+00	12%				1.6E+00	-6%	3.8E-02	7%	1.7E+00	-1%	3.4E-02	-3%	1.7E+00		3.5E-02		

表Ⅲ.4 (続き)

核種	壊変形式	エネルギー (MeV)		表面密度当たりの深さ7mg/cm ² での吸収線量率 (mGy/h per kBq/cm ²)																				
		最大	平均	JAERI-M 7354	Kocher	Cross	Faw	RPD	IAEA	Varskin 4.0				Varskin 5.3				Varskin 6.0						
				β	β	β	β	β+γ	β+γ	β	γ	β	γ	β	γ	β	γ							
Re-186	B-EC	1.0695	0.33624			1.7E+00	14%			1.8E+00	1.8E+00	18%	1.7E+00	8%	1.1E-03	-44%	1.6E+00	2%	9.6E-04	-49%	1.5E+00	1.9E-03		
Re-188	B-	2.1204	0.77934			1.7E+00	-2%			2.3E+00	2.3E+00	30%	1.9E+00	10%	3.0E-03	8%	1.8E+00	0%	2.6E-03	-7%	1.8E+00	2.8E-03		
Os-185	EC		0.0184		3.7E-02	8469%							0.0E+00	-100%	3.2E-02	42%	0.0E+00	-100%	2.9E-02	25%	4.3E-04	2.3E-02		
Os-191	B-	0.14242	0.13716		4.9E-01	-2%							4.2E-01	-16%	2.4E-02	16%	4.1E-01	-18%	2.0E-02	-4%	5.0E-01	2.1E-02		
Ir-192	B-EC	0.67512	0.21769	1.5E+00	1%	1.9E+00	31%	1.5E+00	1%	1.5E+00	-1%	1.9E+00	1.9E+00	26%	1.6E+00	9%	3.5E-02	13%	1.5E+00	-1%	3.1E-02	0%	1.5E+00	3.1E-02
Au-198	B-	1.37239	0.3277	2.1E+00	40%	2.2E+00	43%	1.6E+00	7%	1.5E+00	-2%	1.7E+00	1.7E+00	11%	1.7E+00	9%	1.5E-02	14%	1.5E+00	0%	1.4E-02	1%	1.5E+00	1.3E-02
Hg-197	EC		0.07024									9.2E-02	9.2E-02	9%	0.0E+00	-100%	2.4E-02	13%	6.1E-02	-4%	2.0E-02	-7%	6.3E-02	2.1E-02
Hg-203	B-	0.4918	0.09895	5.3E-01	-35%	1.1E+00	34%	9.1E-01	11%	8.0E-01	-2%	8.9E-01	8.9E-01	7%	8.9E-01	9%	1.7E-02	11%	8.1E-01	0%	1.5E-02	-1%	8.2E-01	1.5E-02
Tl-201	EC		0.04469		2.6E-01	18%	2.2E-01	-1%	2.3E-01	2%	2.7E-01	2.7E-01	11%	0.0E+00	-100%	2.3E-02	13%	2.2E-01	-1%	1.9E-02	-6%	2.2E-01	2.0E-02	
Tl-204	B-EC	0.7637	0.23721	1.9E+00	40%	1.9E+00	47%	1.3E+00	2%			1.6E+00	1.6E+00	21%	1.4E+00	8%	0.0E+00		1.3E+00	0%	0.0E+00		1.3E+00	0.0E+00
Tl-207	B-	1.427	0.49517		2.2E+00	43%							1.7E+00	10%	0.0E+00		1.5E+00	0%	0.0E+00		1.5E+00	0%	0.0E+00	0.0E+00
Tl-208	B-	1.79626	0.61134		2.4E+00	41%	1.8E+00	5%	1.7E+00	0%			1.9E+00	10%	4.6E-02	5%	1.7E+00	0%	4.4E-02	0%	1.7E+00	0%	1.7E+00	4.4E-02
Tl-209	B-	1.94378	0.68754		2.5E+00	47%							1.9E+00	10%	4.3E-02	-1%	1.7E+00	-1%	4.0E-02	-1%	1.7E+00	-1%	1.7E+00	4.3E-02
Pb-209	B-	0.6444	0.19744		1.8E+00	38%							1.4E+00	8%	0.0E+00		1.3E+00	0%	0.0E+00		1.3E+00	0%	0.0E+00	0.0E+00
Pb-210	B-A	0.0631	0.04039		0.0E+00							8.4E-03	8.4E-03	13%	0.0E+00		8.0E-03	7%	0.0E+00		6.6E-03	-12%	0.0E+00	7.5E-03
Pb-211	B-	1.379	0.45425		2.2E+00	44%							1.7E+00	10%	1.2E-03	-13%	1.5E+00	0%	1.1E-03	-21%	1.5E+00	0%	1.5E+00	1.4E-03
Pb-212	B-	0.574	0.17663		2.2E+00	27%	1.9E+00	11%					1.9E+00	11%	1.4E-02	15%	1.7E+00	0%	1.2E-02	0%	1.7E+00	0%	1.7E+00	1.2E-02
Pb-214	B-	1.023	0.29482		2.5E+00	36%	1.6E+00	-13%			2.5E+00		2.0E+00	8%	1.5E-02	11%	1.8E+00	-1%	1.3E-02	-4%	1.9E+00	1%	1.9E+00	1.4E-02
Bi-207	ECB+	0.8065	0.11929							2.1E-01							1.8E-01	-6%	4.5E-02	0%	1.9E-01		4.5E-02	
Bi-210	B-A	1.1615	0.3889	2.0E+00	36%	2.2E+00	45%	1.5E+00	4%	1.7E+00			1.6E+00	9%	0.0E+00		1.5E+00	0%	0.0E+00		1.5E+00	0%	0.0E+00	0.0E+00
Bi-211	A B-	0.575	0.01003		8.4E-02	39%							7.1E-02	17%	1.9E-03	13%	5.9E-02	-3%	1.7E-03	-1%	6.1E-02	1%	1.7E-03	1.7E-03
Bi-212	B-A	2.248	0.50456		1.5E+00	48%	1.1E+00	9%					1.1E+00	12%	5.2E-03	70%	9.9E-01	-1%	4.7E-03	53%	1.0E+00	3%	3.0E-03	3.0E-03
Bi-213	B-A	1.422	0.44404		2.2E+00	40%							1.7E+00	9%	4.6E-03	18%	1.6E+00	0%	4.1E-03	4%	1.6E+00	0%	1.6E+00	3.9E-03
Bi-214	B-A	3.272	0.66313		2.3E+00	43%	1.7E+00	5%			2.3E+00		1.8E+00	12%	2.4E-02	5%	1.6E+00	0%	2.3E-02	1%	1.6E+00	0%	1.6E+00	2.3E-02
Po-210	A		0		0.0E+00						6.9E-07	6.9E-07	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Po-211	A		0.00018		0.0E+00								0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Po-212	A		0		0.0E+00								0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Po-213	A		0		0.0E+00								0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Po-214	A		0		0.0E+00								0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Po-215	A		0		0.0E+00								0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Po-216	A		0		0.0E+00								0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Po-218	A B-	0.259	0.00001		0.0E+00	-100%							1.5E-04	11%	0.0E+00		1.3E-04	-2%	0.0E+00		1.3E-04		0.0E+00	0.0E+00
At-217	A		0.00008		0.0E+00								0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Fr-221	A		0.0089		1.3E-01	197%							0.0E+00	-100%	1.8E-03	19%	7.3E-02	72%	1.6E-03	7%	4.2E-02		1.5E-03	1.5E-03
Fr-223	B-A	1.1491	0.38287		2.3E+00	42%							1.8E+00	12%	1.2E-02	20%	1.7E+00	7%	1.1E-02	3%	1.6E+00	7%	1.0E-02	1.0E-02
Ra-223	A		0.07809		6.3E-01	32%							0.0E+00	-100%	1.3E-02	1%	4.5E-01	-6%	1.2E-02	-14%	4.7E-01	1%	1.3E-02	1.3E-02
Ra-224	A		0.00232		2.7E-02								0.0E+00		6.1E-04	6%	0.0E+00		5.5E-04	-5%	0.0E+00		5.8E-04	5.8E-04
Ra-225	B-	0.354	0.10496		1.1E+00	25%							9.8E-01	12%	4.9E-02	919%	8.9E-01	2%	4.2E-03	-13%	8.7E-01	4%	4.8E-03	4.8E-03
Ra-226	A		0.00391		4.8E-02						4.8E-02		0.0E+00		3.8E-04	2%	0.0E+00		3.4E-04	-9%	0.0E+00		3.7E-04	3.7E-04
Ra-228	B-	0.03962	0.01319		0.0E+00								0.0E+00		0.0E+00	-100%	0.0E+00		0.0E+00	-100%	0.0E+00		4.0E-03	4.0E-03
Ac-225	A		0.02476		5.1E-02	362%							0.0E+00	-100%	4.8E-03	-11%	1.2E-02	8%	4.1E-03	-25%	1.1E-02	5%	5.4E-03	5.4E-03
Ac-227	B-A	0.0448	0.01502		0.0E+00								0.0E+00		0.0E+00	-100%	0.0E+00		0.0E+00	-100%	0.0E+00		9.3E-04	9.3E-04
Ac-228	B-	2.06924	0.44945		2.3E+00	31%	1.6E+00	-7%					1.9E+00	7%	3.0E-02	21%	1.8E+00	5%	2.7E-02	9%	1.7E+00	9%	1.7E+00	2.5E-02
Th-227	A		0.07547		1.7E-01	-11%							0.0E+00	-100%	1.7E-02	-17%	0.0E+00	-100%	1.5E-02	-100%	1.9E-01	2%	2.1E-02	2.1E-02
Th-228	A		0.02101		4.6E-02	-19%							0.0E+00	-100%	2.2E-03	-1%	5.5E-02	-1%	1.8E-03	-17%	5.6E-02	2%	2.2E-03	2.2E-03
Th-229	A		0.12174		5.7E-01	18%							0.0E+00	-100%	2.8E-02	4%	4.9E-01	0%	2.4E-02	-11%	4.8E-01	0%	2.7E-02	2.7E-02
Th-230	A		0.01459		0.0E+00	-100%							0.0E+00	-100%	1.9E-03	1%	8.2E-04	9%	1.6E-03	-15%	7.5E-04	1%	1.9E-03	1.9E-03
Th-231	B-	0.3895	0.1622		9.4E-01	19%	8.2E-01	4%			9.4E-01		8.7E-01	11%	2.2E-02	5%	7.8E-01	-1%	1.9E-02	-11%	7.8E-01	1%	2.1E-02	2.1E-02

表Ⅲ.4 (続き)

核種	壊変形式	エネルギー (MeV)		表面密度当たりの深さ7mg/cm ² での吸収線量率 (mGy/h per kBq/cm ²)																			
		最大	平均	JAERI-M 7354	Kocher	Cross	Faw	RPD	IAEA	Varskin 4.0		Varskin 5.3		Varskin 6.0									
				β	β	β	β	β+γ	β+γ	β	γ	β	γ	β	γ								
Th-232	A		0.01261		2.1E-03	538%								0.0E+00	-100%	1.9E-03	8%	4.1E-04	27%	1.6E-03	-10%	3.2E-04	1.8E-03
Th-234	B-	0.19497	0.06223		3.5E-01	3%	3.8E-01	9%		3.5E-01				3.2E-01	-6%	2.1E-03	-17%	3.3E-01	-6%	1.8E-03	-29%	3.5E-01	2.5E-03
Pa-231	A		0.0538		7.5E-02	137%								0.0E+00	-100%	2.3E-02	39%	0.0E+00	-100%	2.0E-02	17%	3.2E-02	1.7E-02
Pa-233	B-	0.5721	0.21505		1.8E+00	24%								1.5E+00	3%	2.0E-02	-12%	1.4E+00	-5%	1.7E-02	-24%	1.5E+00	2.3E-02
Pa-234	B-	1.2472	0.40371		5.4E+00	91%				5.4E+00				3.2E+00	13%	7.0E-02	31%	3.3E+00	17%	6.3E-02	18%	2.8E+00	5.4E-02
Pa-234m	B-IT	2.273	0.81712		2.4E+00	51%	1.7E+00	10%		2.4E+00				1.8E+00	14%	0.0E+00		1.6E+00	0%	0.0E+00		1.6E+00	0.0E+00
U-232	A		0.01638		3.4E-03	56%								0.0E+00	-100%	3.0E-03	8%	6.6E-04	-70%	2.5E-03	-8%	2.2E-03	2.7E-03
U-233	A		0.0059		7.8E-04					0.0E+00				0.0E+00		1.2E-03	1%	0.0E+00		1.0E-03	-15%	0.0E+00	1.2E-03
U-234	A		0.01365		2.4E-03	415%				0.0E+00				0.0E+00	-100%	2.5E-03	6%	2.8E-04	-40%	2.1E-03	-11%	4.7E-04	2.4E-03
U-235	A		0.053		1.3E-01	110%				1.8E-01	1.8E-01	136%		0.0E+00	-100%	1.5E-02	-8%	6.0E-02	1%	1.4E-02	-19%	6.0E-02	1.7E-02
U-236	A		0.01137		2.2E-03	2915%								0.0E+00	-100%	2.1E-03	0%	5.6E-05	-22%	1.8E-03	-16%	7.2E-05	2.1E-03
U-238	A SF		0.00917		1.8E-03	1027%				2.3E-03	2.3E-03	22%		0.0E+00	-100%	1.9E-03	9%	7.7E-05	-52%	1.6E-03	-8%	1.6E-04	1.7E-03
U-240	B-	0.38	0.12758		1.4E+00	46%								1.0E+00	11%	1.0E-02	35%	9.5E-01	1%	8.6E-03	-6%	9.4E-01	7.5E-03
Np-237	A		0.0681		7.8E-02	70%								0.0E+00	-100%	1.8E-02	8%	4.9E-02	8%	1.5E-02	-8%	4.6E-02	1.7E-02
Np-238	B-	1.24792	0.25191		1.4E+00	29%								1.1E+00	3%	1.8E-02	-3%	1.1E+00	1%	1.7E-02	-11%	1.1E+00	1.9E-02
Np-239	B-	0.71414	0.2623		2.6E+00	17%				2.6E+00				2.3E+00	3%	2.3E-02	-6%	2.2E+00	-2%	2.0E-02	-19%	2.3E+00	2.5E-02
Np-240	B-	1.89369	0.50945		3.4E+00	23%								3.3E+00	20%	6.6E-02	32%	3.5E+00	25%	5.9E-02	18%	2.8E+00	5.0E-02
Np-240m	B-IT	2.208	0.67793		2.2E+00	36%								1.8E+00	11%	1.8E-02	29%	1.6E+00	0%	1.6E-02	13%	1.6E+00	1.4E-02
Pu-236	A SF		0.01282		0.0E+00	-100%								0.0E+00	-100%	3.0E-03	14%	0.0E+00	-100%	2.5E-03	-3%	4.3E-04	2.6E-03
Pu-238	A SF		0.01068		0.0E+00	-100%				3.7E-03	3.7E-03	24%		0.0E+00	-100%	2.4E-03	-1%	0.0E+00	-100%	2.0E-03	-17%	5.7E-04	2.4E-03
Pu-239	A		0.00745		0.0E+00					1.4E-03	1.4E-03	12%		0.0E+00		8.2E-04	-35%	0.0E+00		6.9E-04	-45%	0.0E+00	1.3E-03
Pu-240	A SF		0.01051		0.0E+00	-100%				0.0E+00				0.0E+00	-100%	2.1E-03	-8%	0.0E+00	-100%	1.8E-03	-22%	3.7E-04	2.3E-03
Pu-241	B-A	0.02081	0.00523		0.0E+00					0.0E+00				0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Pu-242	A SF		0.00895		0.0E+00	-100%				0.0E+00				0.0E+00	-100%	1.8E-03	-10%	0.0E+00	-100%	1.5E-03	-24%	5.4E-05	2.0E-03
Pu-243	B-	0.581	0.17294		1.6E+00	30%								1.3E+00	7%	3.6E-03	-2%	1.2E+00	0%	3.2E-03	-14%	1.2E+00	3.7E-03
Pu-244	A SF		0.01974		0.0E+00	-100%								0.0E+00	-100%	1.5E-03	-8%	0.0E+00	-100%	1.3E-03	-22%	2.4E-02	1.6E-03
Am-241	A		0.0373		2.5E-03	-3%				2.0E-02	1.9E-02	33%		0.0E+00	-100%	1.8E-02	50%	0.0E+00	-100%	1.5E-02	28%	2.6E-03	1.2E-02
Am-242	B-EC	0.6648	0.18061		1.5E+00	36%								1.2E+00	7%	6.8E-03	-7%	1.1E+00	-1%	5.8E-03	-20%	1.1E+00	7.3E-03
Am-242m	ITA		0.04389		0.0E+00	-100%								0.0E+00	-100%	5.5E-03	-17%	1.6E-05	-73%	4.7E-03	-29%	6.1E-05	6.7E-03
Am-243	A		0.02337		4.7E-03	-40%				4.7E-03				0.0E+00	-100%	6.9E-03	-7%	7.4E-03	-5%	6.0E-03	-19%	7.8E-03	7.4E-03
Cm-242	A SF		0.00955		0.0E+00									0.0E+00		2.0E-03	-10%	0.0E+00		1.7E-03	-24%	0.0E+00	2.2E-03
Cm-243	A EC		0.13424		1.3E+00	15%								0.0E+00	-100%	2.1E-02	2%	1.1E+00	-3%	1.8E-02	-12%	1.1E+00	2.1E-02
Cm-244	A SF		0.00793		0.0E+00					2.2E-03	2.2E-03	16%		0.0E+00		1.8E-03	-3%	0.0E+00		1.6E-03	-18%	0.0E+00	1.9E-03
Cm-245	A SF		0.08239		6.6E-02	-84%								0.0E+00	-100%	2.0E-02	2%	3.0E-01	-29%	1.7E-02	-13%	4.2E-01	2.0E-02
Cm-246	A SF		0.00847		0.0E+00	-100%								0.0E+00	-100%	1.6E-03	8%	0.0E+00	-100%	1.4E-03	-8%	6.4E-03	1.5E-03
Cm-247	A		0.01135		1.3E-01	56%								0.0E+00	-100%	1.5E-02	34%	7.8E-02	-3%	1.3E-02	17%	8.1E-02	1.1E-02
Cm-248	A SF		0.07158		0.0E+00	-100%								0.0E+00	-100%	1.2E-03	-95%	0.0E+00	-100%	1.1E-03	-96%	9.6E-01	2.4E-02
Bk-249	B-A	0.124	0.03239		9.4E-02	25%								6.7E-02	-10%	0.0E+00		8.2E-02	10%	0.0E+00		7.5E-02	0.0E+00
Cf-249	A SF		0.03994		2.2E-01	14%								0.0E+00	-100%	1.9E-02	16%	1.9E-01	-1%	1.7E-02	1%	1.9E-01	1.7E-02
Cf-250	A SF		0.01027		5.4E-04	-94%								0.0E+00	-100%	1.1E-03	-14%	0.0E+00	-100%	9.7E-04	-27%	8.8E-03	1.3E-03
Cf-252	A SF		0.25158		5.5E-04	-100%				3.2E-03	3.2E-03	-99%		0.0E+00	-100%	1.1E-03	-80%	0.0E+00	-100%	9.3E-04	-83%	3.2E-01	5.4E-03

補足説明：壊変形式，平均β・電子線エネルギー，最大β線エネルギーはICRP Publ 107による。

表Ⅲ.5 表面密度当たりの深さ 40 mg/cm²での吸収線量率 (汚染面積: 100 cm²)

核種	壊変形式	エネルギー (MeV)		表面密度当たりの深さ40mg/cm ² での吸収線量率 (mGy/h per kBq/cm ²)					
		最大	平均	Kocher and Eckerman		Cross		Varskin 6.0	
				β		β		β	γ
H-3	B-	0.0186	0.00567	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00
Be-7	EC		0					7.9E-08	1.7E-03
Be-10	B-	0.5562	0.25247	3.7E-01	-25%			4.9E-01	0.0E+00
C-11	ECB+	0.9602	0.38472	9.0E-01	23%	7.6E-01	3%	7.3E-01	3.4E-02
C-14	B-	0.15648	0.04945	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
N-13	ECB+	1.19849	0.49085					8.5E-01	3.4E-02
O-15	ECB+	1.732	0.73468			1.0E+00	4%	1.0E+00	3.4E-02
F-18	ECB+	0.6335	0.2416	5.2E-01	18%	4.6E-01	2%	4.5E-01	3.3E-02
Na-22	ECB+	1.8202	0.19406	3.8E-01	17%	3.2E-01	1%	3.2E-01	5.6E-02
Na-24	B-	4.14493	0.55381			9.2E-01	4%	8.8E-01	5.6E-02
Al-26	ECB+	1.17342	0.44442					7.4E-01	5.6E-02
Mg-28	B-	0.85963	0.16099			1.8E-01	1%	1.8E-01	3.4E-02
Al-28	B-	2.86289	1.24165			1.2E+00	2%	1.2E+00	2.8E-02
Mg-28/Al-28								1.4E+00	6.2E-02
Si-31	B-	1.4905	0.59485			9.5E-01	4%	9.1E-01	0.0E+00
P-32	B-	1.71066	0.69477	1.3E+00	30%	1.0E+00	4%	9.6E-01	0.0E+00
P-33	B-	0.2485	0.07642	2.9E-03	17%	2.2E-03	-9%	2.4E-03	0.0E+00
S-35	B-	0.16714	0.04872	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	0.0E+00
Cl-36	B-ECB+	0.7086	0.27319	5.4E-01	2%	6.4E-01	21%	5.3E-01	0.0E+00
Cl-38	B-	4.9168	1.55041			1.2E+00	-1%	1.2E+00	2.1E-02
K-40	B-ECB+	1.31109	0.52176	9.5E-01	18%			8.0E-01	2.9E-03
K-42	B-	3.52545	1.43034			1.2E+00	1%	1.2E+00	4.9E-03
K-43	B-	1.815	0.30974			6.1E-01	6%	5.7E-01	3.1E-02
Ca-45	B-	0.2568	0.0772	3.7E-03	3%	3.1E-03	-13%	3.6E-03	0.0E+00
Ca-47	B-	1.9919	0.3521			5.7E-01	3%	5.5E-01	2.2E-02
Sc-46	B-	1.47741	0.11207	6.3E-02	6%	5.8E-02	-2%	5.9E-02	4.9E-02
Sc-47	B-	0.6001	0.16241			2.1E-01	2%	2.1E-01	4.1E-03
Ca-47/Sc-47								7.6E-01	2.6E-02
Sc-49	B-	1.994	0.81773			1.1E+00	4%	1.0E+00	0.0E+00
Ca-49	B-	3.0336	0.86934			1.1E+00	4%	1.0E+00	2.9E-02
V-48	ECB+	2.00677	0.15259					2.9E-01	7.0E-02
Cr-51	EC		0.00382	0.0E+00				0.0E+00	2.0E-03
Mn-52	ECB+	0.57582	0.07504			1.3E-01	-2%	1.3E-01	8.4E-02
Mn-52m	ECB+IT	2.63337	1.1321			1.2E+00	2%	1.1E+00	5.9E-02
Fe-52	ECB+	0.80356	0.19169			3.9E-01	3%	3.8E-01	2.6E-03
Mn-54	ECB+B-	0.6971	0.0042	0.0E+00	-100%			2.1E-06	2.5E-02
Mn-56	B-	2.84874	0.82993			9.5E-01	3%	9.2E-01	3.5E-02
Fe-55	EC		0.00416	0.0E+00				0.0E+00	2.4E-03
Fe-59	B-	1.5652	0.11788	1.1E-01	11%	9.4E-02	-3%	9.6E-02	2.6E-02
Ni-56	ECB+	1.114	0.00734			6.0E-04	-71%	2.1E-03	5.4E-02
Co-56	ECB+	1.45892	0.11983					1.8E-01	7.2E-02
Co-57	EC		0.01863	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	1.2E-02
Co-58	ECB+	1.2854	0.03395	5.0E-02	12%	4.3E-02	-5%	4.5E-02	3.0E-02
Co-60	B-	1.49139	0.09686	2.9E-02	4%	2.6E-02	-5%	2.8E-02	5.2E-02
Co-61	B-	1.25428	0.46642			8.0E-01	4%	7.7E-01	3.4E-03
Ni-59	ECB+	0.0505	0.00453	0.0E+00				0.0E+00	4.4E-03
Ni-63	B-	0.06695	0.01742	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00
Ni-65	B-	2.1362	0.62765					8.0E-01	1.1E-02
Cu-62	ECB+	2.926	1.28431			1.2E+00	1%	1.2E+00	3.3E-02
Cu-64	ECB+B-	0.6531	0.12475			2.1E-01	0%	2.1E-01	8.1E-03
Cu-66	B-	2.642	1.06637			1.1E+00	3%	1.1E+00	2.3E-03
Cu-67	B-	0.5617	0.15038			1.5E-01	-29%	2.1E-01	8.1E-03
Zn-62	ECB+	0.605	0.03264			4.2E-02	-3%	4.3E-02	2.1E-02
Zn-65	ECB+	0.3288	0.00687	1.1E-03	13%	9.0E-04	-11%	1.0E-03	1.9E-02
Ga-66	ECB+	4.153	0.96337					7.3E-01	4.4E-02
Ga-67	EC		0.03633	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	1.4E-02
Ga-68	ECB+	1.8991	0.73794	1.3E+00	34%	9.7E-01	4%	9.4E-01	3.1E-02
As-73	EC		0.06062					0.0E+00	1.7E-02
As-74	ECB+B-	1.5404	0.26584			4.7E-01	1%	4.6E-01	2.7E-02
As-76	B-	2.962	1.06699			1.1E+00	2%	1.1E+00	1.5E-02
As-77	B-	0.6829	0.22584					4.0E-01	1.6E-04
Se-73	ECB+	1.65089	0.38709			6.5E-01	3%	6.3E-01	4.0E-02
Se-75	EC		0.01444	3.3E-03		3.1E-03		0.0E+00	2.4E-02
Se-79	B-	0.151	0.05292	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00

表III.5 (続き)

核種	壊変形式	エネルギー (MeV)		表面密度当たりの深さ40mg/cm ² での吸収線量率 (mGy/h per kBq/cm ²)					
		最大	平均	Kocher and Eckerman		Cross		Varskin 6.0	
				β		β		β	γ
Br-77	ECB+	0.3431	0.00937					2.2E-03	1.9E-02
Br-82	B-	2.31608	0.14543			1.3E-01	-9%	1.5E-01	7.0E-02
Kr-85	B-	0.6874	0.25068						
Rb-81	ECB+	1.215	0.12223			2.6E-01	16%	2.3E-01	2.1E-02
Rb-82	ECB+	3.379	1.41123			1.2E+00	0%	1.2E+00	3.6E-02
Rb-84	ECB+B-	1.6589	0.16334			2.6E-01	0%	2.6E-01	3.1E-02
Rb-86	B-EC	1.7742	0.66799	1.1E+00	28%	9.3E-01	4%	8.9E-01	2.2E-03
Rb-88	B-	5.316	2.07196	1.7E+00	23%	1.4E+00	-2%	1.4E+00	1.0E-02
Sr-85	EC		0.0089	8.3E-03		6.8E-03		0.0E+00	2.5E-02
Sr-85m	ITECB+	0.13047	0.01296			2.7E-03		0.0E+00	9.8E-03
Sr-87m	ITEC		0.06724			1.8E-01	21%	1.5E-01	1.2E-02
Sr-89	B-	1.4951	0.58453	1.1E+00	30%	9.0E-01	4%	8.6E-01	0.0E+00
Sr-90	B-	0.546	0.19572	3.9E-01	19%	3.3E-01	2%	3.3E-01	0.0E+00
Sr-91	B-	2.707	0.65493	1.1E+00	26%			8.6E-01	1.7E-02
Y-90	B-	2.2801	0.9331	1.4E+00	32%	1.1E+00	3%	1.0E+00	0.0E+00
Sr-90/Y-90								1.4E+00	0.0E+00
Y-91	B-	1.5448	0.60318	1.1E+00	30%	9.1E-01	4%	8.7E-01	0.0E+00
Zr-93	B-	0.0914	0.01941	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00
Zr-95	B-	1.1248	0.11852	8.4E-02	4%	8.6E-02	6%	8.1E-02	2.1E-02
Zr-97	B-	1.91495	0.72121	1.1E+00	20%			9.5E-01	2.3E-02
Nb-93m	IT		0.02944	0.0E+00				0.0E+00	1.2E-03
Nb-94	B-	0.47168	0.1684	1.8E-01	-21%			2.3E-01	4.4E-02
NB-95	B-	0.9256	0.04456	2.1E-03		0.0E+00		0.0E+00	2.2E-02
Zr-95/Nb-95								8.4E-02	4.3E-02
Nb-95m	ITB-	1.16129	0.17998	1.8E-01	7%			1.7E-01	7.5E-03
Nb-97	B-	1.27583	0.46832	9.8E-01	25%			7.9E-01	2.0E-02
Nb-97m				2.9E-02					
Mo-93	EC		0.00555	0.0E+00				0.0E+00	7.4E-03
Mo-99	B-	1.21452	0.39288	8.1E-01	24%	6.7E-01	3%	6.5E-01	4.7E-03
Tc-99	B-	0.2935	0.10125	1.4E-02	-43%	1.9E-02	-19%	2.4E-02	0.0E+00
Tc-99m	ITB-	0.43618	0.01618	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	5.2E-03
Mo-99/Tc-99m								6.8E-01	9.3E-03
Ru-103	B-	0.7634	0.06604	2.4E-02	320%	2.8E-02	385%	5.7E-03	1.6E-02
Ru-105	B-	1.916	0.4406	8.7E-01	22%			7.1E-01	2.2E-02
Ru-106	B-	0.0394	0.01003	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00
Rh-103m	IT		0.03768	0.0E+00				0.0E+00	5.5E-04
Ru-103/Rh-103m								3.9E-03	1.7E-02
Rh-105	B-	0.5662	0.15331	2.4E-01	16%	2.1E-01	1%	2.1E-01	2.5E-03
Rh-105m				0.0E+00					
Rh-106	B-	3.541	1.41114	1.6E+00	30%	1.2E+00	0%	1.2E+00	5.8E-03
Ru-106/Rh-106								1.2E+00	5.8E-03
Pd-103	EC		0.00581	0.0E+00				0.0E+00	5.6E-03
Pd-103/Rh-103m								0.0E+00	6.5E-03
Pd-107	B-	0.0341	0.00958	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00
Ag-108	B-ECB+	1.649	0.60708	1.1E+00	29%			8.8E-01	3.5E-04
Ag-108m	ECIT		0.01591	1.5E-02				0.0E+00	5.5E-02
Ag-109m	IT		0.07695	0.0E+00				0.0E+00	2.7E-03
Ag-110	B-EC	2.8922	1.1812	1.5E+00	30%	1.2E+00	3%	1.1E+00	9.1E-04
Ag-110m	B-IT	1.46735	0.07576	8.2E-02	-2%	7.4E-02	-11%	8.4E-02	7.2E-02
Ag-111	B-	1.0368	0.35388					6.4E-01	8.8E-04
Cd-109	EC		0.0827	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	7.8E-03
Cd-113m	B-IT	0.5837	0.18468	3.3E-01	15%	3.0E-01	3%	2.9E-01	0.0E+00
Cd-115m	B-	1.627	0.60448	1.1E+00	29%			8.8E-01	4.8E-04
In-111	EC		0.03481	1.3E-02	34%	1.2E-02	30%	9.4E-03	2.2E-02
In-113m	IT		0.13609	4.0E-01	12%	3.6E-01	2%	3.6E-01	1.0E-02
In-115m	ITB-	0.83124	0.17484			4.7E-01	2%	4.6E-01	7.2E-03
Sn-113	EC		0.00626	0.0E+00				0.0E+00	5.0E-03
Sn-119m	IT		0.07808	0.0E+00				0.0E+00	3.7E-03
Sn-123	B-	1.4027	0.52269			4.6E-02	-94%	8.0E-01	0.0E+00
Sn-125	B-	2.363	0.80369					8.9E-01	7.0E-03
Sn-126	B-	0.2501	0.13802	2.1E-03	-50%			4.1E-03	3.8E-03
Sb-122	B-ECB+	1.9786	0.56183			8.6E-01	4%	8.3E-01	1.4E-02
Sb-124	B-	2.30177	0.38311	6.3E-01	23%	5.2E-01	2%	5.1E-01	4.1E-02

表III.5 (続き)

核種	壊変形式	エネルギー (MeV)		表面密度当たりの深さ40mg/cm ² での吸収線量率 (mGy/h per kBq/cm ²)					
		最大	平均	Kocher and Eckerman		Cross		Varskin 6.0	
				β		β		β	γ
Sb-125	B-	0.62192	0.10098	8.6E-02	9%	7.3E-02	-7%	7.8E-02	1.6E-02
Sb-126	B-	1.8969	0.35449	5.2E-01	1%			5.2E-01	8.2E-02
Sb-126m	B-IT	1.9152	0.63215	1.0E+00	26%			8.4E-01	4.8E-02
Sb-127	B-	1.49274	0.316	6.7E-01	20%			5.6E-01	2.0E-02
Sb-129	B-	2.2745	0.39525	6.5E-01	15%			5.6E-01	3.2E-02
Te-123m	IT		0.09899	0.0E+00				0.0E+00	7.6E-03
Te-125m	IT		0.10907	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	6.5E-03
Sb-125/Te-125m								7.9E-02	1.8E-02
Te-127	B-	0.698	0.22456	4.6E-01	16%			4.0E-01	0.0E+00
Te-127m	ITB-	0.72862	0.08237	1.1E-02				0.0E+00	1.9E-03
Te-129	B-	1.4701	0.54356	1.0E+00	26%			8.3E-01	2.3E-03
Te-129m	ITB-	1.6034	0.27088	4.0E-01	26%			3.2E-01	2.1E-03
Te-131	B-	2.08328	0.71218	1.1E+00	24%			9.2E-01	1.2E-02
Te-131m	B-IT	2.41525	0.18701	1.9E-01	24%			1.6E-01	3.6E-02
Te-132	B-	0.24014	0.1108	5.4E-03	-23%	6.6E-03	-6%	7.0E-03	1.2E-02
I-123	EC		0.02818	0.0E+00	-100%	0.0E+00	-100%	1.5E-04	9.8E-03
I-124	ECB+	2.1376	0.19428					2.5E-01	3.0E-02
I-125	EC		0.01923	0.0E+00				0.0E+00	7.9E-03
I-126	ECB+B-	1.258	0.16058			2.7E-01	-5%	2.8E-01	1.5E-02
I-129	B-	0.15442	0.06507	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	3.6E-03
I-131	B-	0.80687	0.19184	3.4E-01	14%	3.0E-01	0%	3.0E-01	1.3E-02
I-132	B-	2.13967	0.49299	9.4E-01	26%	7.7E-01	3%	7.4E-01	6.0E-02
Te-132/I-132								7.6E-01	7.2E-02
I-133	B-	1.53778	0.41415	8.7E-01	24%	7.2E-01	2%	7.0E-01	1.8E-02
I-134	B-	2.32083	0.57758	1.1E+00	31%			8.4E-01	6.3E-02
I-135	B-	2.12145	0.34652	7.4E-01	31%	6.4E-01	12%	5.7E-01	3.0E-02
Xe-133	B-	0.3464	0.13791						
Cs-131	EC		0.00635					0.0E+00	3.5E-03
Cs-134	B-EC	1.45378	0.16388	3.1E-01	16%	2.6E-01	-2%	2.7E-01	4.6E-02
Cs-135	B-	0.2694	0.08938	5.7E-05	-99%			9.7E-03	0.0E+00
Cs-136	B-	0.6816	0.1449	6.7E-02	-37%	1.9E-02	-82%	1.1E-01	5.6E-02
Cs-137	B-	1.17563	0.18836	2.6E-01	-8%	3.9E-01	35%	2.9E-01	0.0E+00
Ba-133	EC		0.05531					2.0E-02	1.8E-02
Ba-137m	IT		0.06534	1.4E-01	30%			1.1E-01	1.9E-02
Cs-137/Ba-137m								3.9E-01	1.8E-02
Ba-140	B-	1.01703	0.32022	5.7E-01	14%	4.9E-01	-2%	5.0E-01	7.1E-03
La-140	B-	3.7619	0.53455	1.0E+00	25%	8.5E-01	2%	8.4E-01	4.7E-02
Ba-140/La-140	0							1.3E+00	5.4E-02
Ce-139	EC		0.0355					3.1E-04	8.7E-03
Ce-141	B-	0.5807	0.17103	1.8E-01	9%	1.7E-01	1%	1.7E-01	3.2E-03
Ce-143	B-	1.4614	0.43636	8.8E-01	24%			7.1E-01	1.2E-02
Ce-144	B-	0.3187	0.09162	1.9E-02	5%	2.9E-02	55%	1.8E-02	8.3E-04
Pr-143	B-	0.9339	0.315	7.1E-01	22%	6.0E-01	4%	5.8E-01	0.0E+00
Pr-144	B-	2.9975	1.20843	1.5E+00	29%	1.2E+00	2%	1.2E+00	2.8E-04
Pr-144m	ITB-	1.54593	0.04746	0.0E+00				0.0E+00	1.5E-03
Ce-144/Pr-144								1.2E+00	1.1E-03
Nd-147	B-	0.8953	0.27015	4.8E-01	17%			4.1E-01	5.4E-03
Pm-147	B-	0.2246	0.06193	4.1E-04	-22%	2.0E-04	-62%	5.3E-04	0.0E+00
Pm-148m	B-IT	1.01159	0.16994			1.9E-01	-10%	2.1E-01	6.1E-02
Sm-151	B-	0.0767	0.01997	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00
Sm-153	B-	0.8082	0.26987			4.0E-01	2%	3.9E-01	3.8E-03
Eu-152	ECB+B-	1.47452	0.12856	1.7E-01	14%			1.5E-01	2.9E-02
Eu-154	B-EC	1.84533	0.27301	3.8E-01	19%	4.0E-01	25%	3.2E-01	3.0E-02
Eu-155	B-	0.2522	0.06471	3.2E-04		2.0E-04		0.0E+00	2.9E-03
Eu-156	B-	2.451	0.45788			4.7E-01	-6%	5.0E-01	2.3E-02
Gd-153	EC		0.04376	0.0E+00				0.0E+00	7.5E-03
Tb-160	B-	1.74851	0.25925	4.2E-01	23%			3.4E-01	3.0E-02
Ho-166m	B-	1.31444	0.14973	3.3E-02	-48%			6.3E-02	5.1E-02
Er-169	B-	0.3509	0.10346					4.1E-02	0.0E+00
Tm-170	B-EC	0.968	0.32799			6.0E-01	3%	5.8E-01	4.6E-04
Tm-171	B-	0.0964	0.02547					0.0E+00	0.0E+00
Yb-169	EC		0.14713	4.4E-03		2.5E-03		0.0E+00	2.2E-02
Hf-181	B-	1.0283	0.20523			1.1E-01	-18%	1.3E-01	2.0E-02
Ta-182	B-	1.71349	0.21045			1.3E-01	-5%	1.3E-01	3.3E-02

表III.5 (続き)

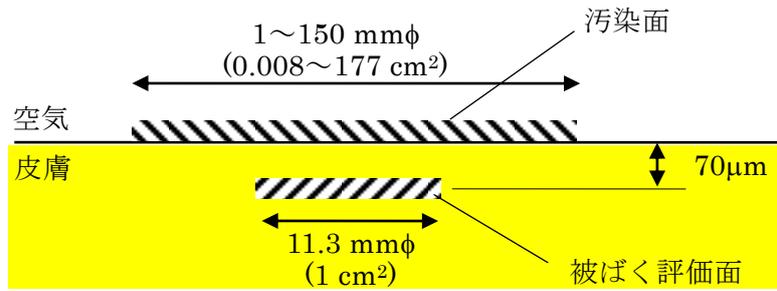
核種	壊変形式	エネルギー (MeV)		表面密度当たりの深さ40mg/cm ² での吸収線量率 (mGy/h per kBq/cm ²)						
		最大	平均	Kocher and Eckerman		Cross		Varskin 6.0		
					β		β	β	γ	
Re-186	B-EC	1.0695	0.33624				6.0E-01	3%	5.8E-01	1.0E-03
Re-188	B-	2.1204	0.77934				1.0E+00	4%	9.6E-01	1.8E-03
Os-185	EC		0.0184	1.3E-02					0.0E+00	2.5E-02
Os-191	B-	0.14242	0.13716	0.0E+00					0.0E+00	9.7E-03
Ir-192	B-EC	0.67512	0.21769	3.9E-01	12%	3.1E-01	-12%	3.5E-01	2.7E-02	
Au-198	B-	1.37239	0.3277	7.3E-01	20%	6.3E-01	3%	6.1E-01	1.3E-02	
Hg-197	EC		0.07024						0.0E+00	1.0E-02
Hg-203	B-	0.4918	0.09895	4.2E-02	28%	3.2E-02	-2%	3.3E-02	1.1E-02	
Tl-201	EC		0.04469	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	9.8E-03	
Tl-204	B-EC	0.7637	0.23721	5.7E-01	35%	4.2E-01	-1%	4.2E-01	0.0E+00	
Tl-207	B-	1.427	0.49517	9.9E-01	26%			7.9E-01	0.0E+00	
Tl-208	B-	1.79626	0.61134	1.1E+00	26%	9.1E-01	2%	8.9E-01	5.3E-02	
Tl-209	B-	1.94378	0.68754	1.3E+00	33%			9.4E-01	4.7E-02	
Pb-209	B-	0.6444	0.19744	3.8E-01	17%			3.2E-01	0.0E+00	
Pb-210	B-A	0.0631	0.04039	0.0E+00				0.0E+00	3.4E-03	
Pb-211	B-	1.379	0.45425	9.4E-01	27%			7.4E-01	1.6E-03	
Pb-212	B-	0.574	0.17663	7.8E-02	-3%	7.2E-02	-11%	8.0E-02	7.3E-03	
Pb-214	B-	1.023	0.29482	5.5E-01	15%	4.1E-01	-15%	4.8E-01	1.0E-02	
Bi-207	ECB+	0.8065	0.11929					1.3E-01	4.5E-02	
Bi-210	B-A	1.1615	0.3889	8.4E-01	24%	5.5E-01	-19%	6.8E-01	0.0E+00	
Bi-211	A B-	0.575	0.01003	2.5E-02	9%			2.3E-02	1.5E-03	
Bi-212	B-A	2.248	0.50456	7.4E-01	22%	6.0E-01	-2%	6.1E-01	2.6E-03	
Bi-213	B-A	1.422	0.44404	9.2E-01	23%			7.5E-01	3.9E-03	
Bi-214	B-A	3.272	0.66313	1.1E+00	26%	8.8E-01	1%	8.7E-01	2.8E-02	
Po-210	A		0	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00	
Po-211	A		0.00018	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00	
Po-212	A		0	0.0E+00						
Po-213	A		0	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00	
Po-214	A		0	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00	
Po-215	A		0	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00	
Po-216	A		0	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00	
Po-218	A B-	0.259	0.00001	0.0E+00	-100%			6.1E-07	0.0E+00	
At-217	A		0.00008	0.0E+00				0.0E+00	0.0E+00	
Fr-221	A		0.0089	1.8E-03	943%			1.8E-04	1.1E-03	
Fr-223	B-A	1.1491	0.38287	7.5E-01	20%			6.3E-01	5.3E-03	
Ra-223	A		0.07809	2.7E-02	64%			1.7E-02	7.7E-03	
Ra-224	A		0.00232	1.7E-03				0.0E+00	4.1E-04	
Ra-225	B-	0.354	0.10496	3.3E-02	21%			2.7E-02	2.5E-03	
Ra-226	A		0.00391	0.0E+00				0.0E+00	2.6E-04	
Ra-228	B-	0.03962	0.01319	0.0E+00				0.0E+00	1.9E-03	
Ac-225	A		0.02476	0.0E+00				0.0E+00	2.5E-03	
Ac-227	B-A	0.0448	0.01502	0.0E+00				0.0E+00	2.1E-04	
Ac-228	B-	2.06924	0.44945	7.2E-01	17%	5.4E-01	-12%	6.2E-01	2.2E-02	
Th-227	A		0.07547	8.2E-03	1000%			7.5E-04	1.1E-02	
Th-228	A		0.02101	0.0E+00				0.0E+00	1.0E-03	
Th-229	A		0.12174	4.6E-04				0.0E+00	1.3E-02	
Th-230	A		0.01459	0.0E+00				0.0E+00	8.7E-04	
Th-231	B-	0.3895	0.1622	1.1E-02	12%	9.6E-03	-1%	9.7E-03	9.6E-03	
Th-232	A		0.01261	0.0E+00				0.0E+00	8.0E-04	
Th-234	B-	0.19497	0.06223	4.9E-05		0.0E+00		0.0E+00	1.1E-03	
Pa-231	A		0.0538	5.1E-03				0.0E+00	7.9E-03	
Pa-233	B-	0.5721	0.21505	9.9E-02	-14%			1.2E-01	1.3E-02	
Pa-234	B-	1.2472	0.40371	5.7E-01	58%			3.6E-01	4.3E-02	
Pa-234m	B-IT	2.273	0.81712	1.3E+00	28%	1.0E+00	4%	9.8E-01	0.0E+00	
U-232	A		0.01638	0.0E+00				0.0E+00	1.3E-03	
U-233	A		0.0059	0.0E+00				0.0E+00	5.2E-04	
U-234	A		0.01365	0.0E+00				0.0E+00	1.1E-03	
U-235	A		0.053	3.3E-05				0.0E+00	9.4E-03	
U-236	A		0.01137	0.0E+00				0.0E+00	9.6E-04	
U-238	A SF		0.00917	0.0E+00				0.0E+00	7.7E-04	
U-240	B-	0.38	0.12758	1.3E-01	201%			4.2E-02	3.1E-03	
Np-237	A		0.0681	0.0E+00				0.0E+00	7.8E-03	
Np-238	B-	1.24792	0.25191	4.0E-01	30%			3.1E-01	1.7E-02	
Np-239	B-	0.71414	0.2623	1.4E-01	12%			1.2E-01	1.3E-02	

表III.5 (続き)

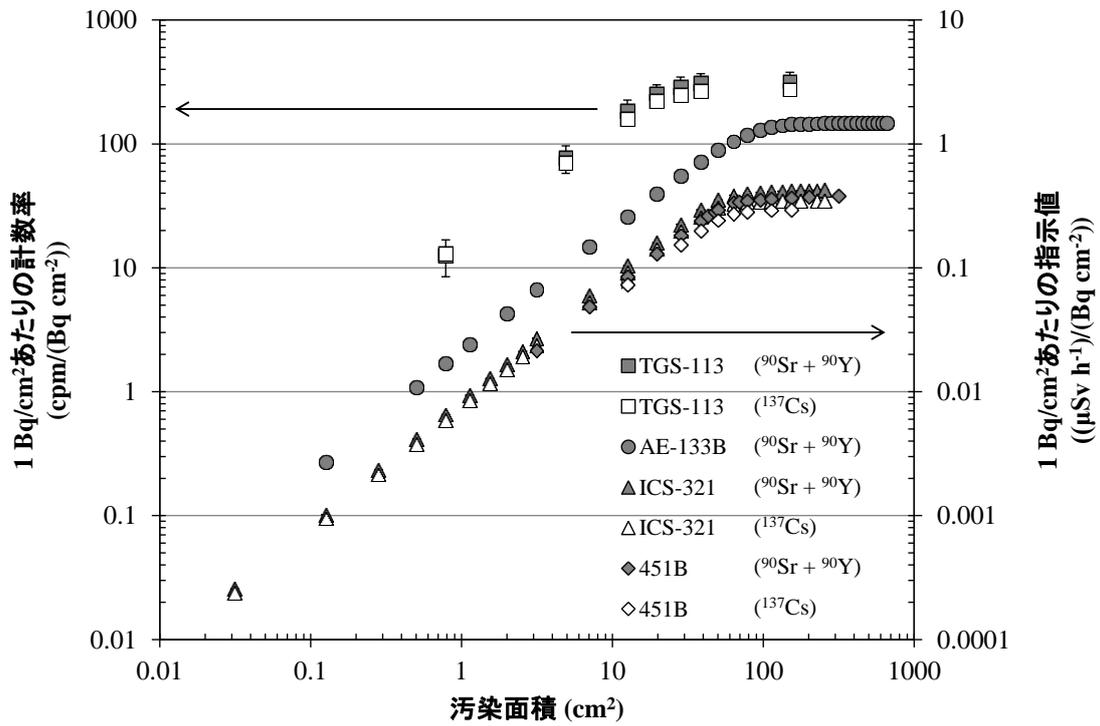
核種	壊変形式	エネルギー (MeV)		表面密度当たりの深さ40mg/cm ² での吸収線量率 (mGy/h per kBq/cm ²)				
		最大	平均	Kocher and Eckerman		Cross	Varskin 6.0	
				β		β	β	γ
Np-240	B-	1.89369	0.50945	5.7E-01	-10%		6.3E-01	4.0E-02
Np-240m	B-IT	2.208	0.67793	1.1E+00	20%		8.8E-01	1.1E-02
Pu-236	A SF		0.01282	0.0E+00			0.0E+00	1.1E-03
Pu-238	A SF		0.01068	0.0E+00			0.0E+00	1.0E-03
Pu-239	A		0.00745	0.0E+00			0.0E+00	4.3E-04
Pu-240	A SF		0.01051	0.0E+00			0.0E+00	9.8E-04
Pu-241	B-A	0.02081	0.00523	0.0E+00			0.0E+00	0.0E+00
Pu-242	A SF		0.00895	0.0E+00			0.0E+00	8.4E-04
Pu-243	B-	0.581	0.17294	2.5E-01	14%		2.2E-01	1.7E-03
Pu-244	A SF		0.01974	0.0E+00	-100%		1.1E-02	6.9E-04
Am-241	A		0.0373	0.0E+00			0.0E+00	5.4E-03
Am-242	B-EC	0.6648	0.18061	3.0E-01	15%		2.6E-01	3.1E-03
Am-242m	ITA		0.04389	0.0E+00			0.0E+00	2.6E-03
Am-243	A		0.02337	0.0E+00			0.0E+00	3.8E-03
Cm-242	A SF		0.00955	0.0E+00			0.0E+00	9.1E-04
Cm-243	A EC		0.13424	3.4E-02	37%		2.5E-02	1.0E-02
Cm-244	A SF		0.00793	0.0E+00			0.0E+00	7.8E-04
Cm-245	A SF		0.08239	0.0E+00	-100%		4.1E-04	9.6E-03
Cm-246	A SF		0.00847	0.0E+00	-100%		2.1E-03	6.2E-04
Cm-247	A		0.01135	1.8E-02	47%		1.2E-02	1.1E-02
Cm-248	A SF		0.77158	0.0E+00	-100%		6.7E-01	2.6E-02
Bk-249	B-A	0.124	0.03239	0.0E+00			0.0E+00	0.0E+00
Cf-249	A SF		0.03994	1.6E-02	-14%		1.9E-02	1.3E-02
Cf-250	A SF		0.01027	0.0E+00	-100%		5.0E-03	5.3E-04
Cf-252	A SF		0.25158	0.0E+00	-100%		2.2E-01	5.6E-03

補足説明：

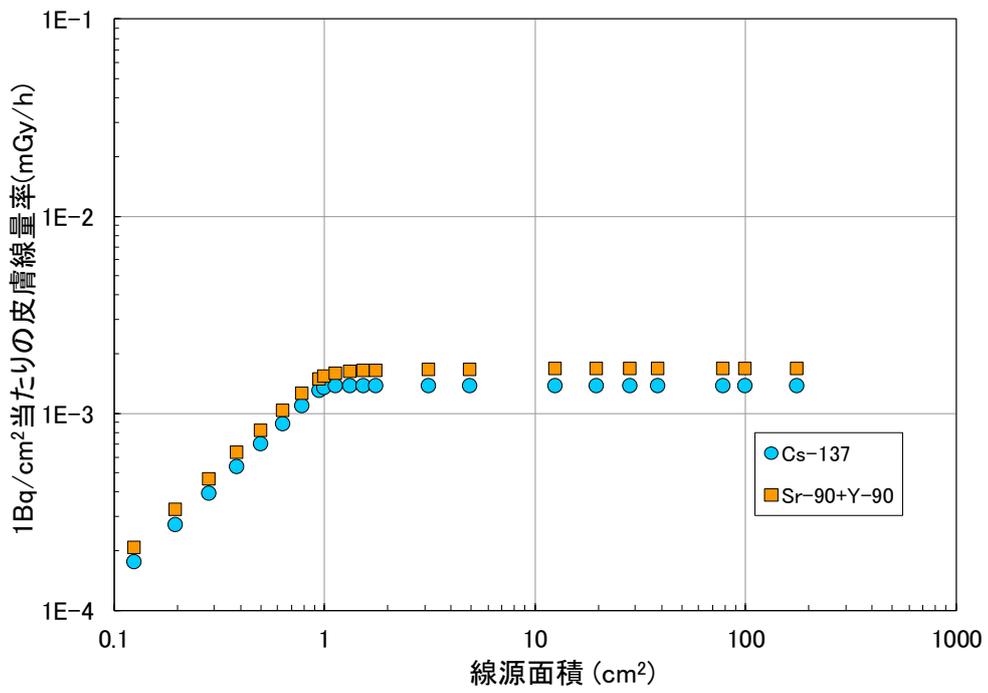
- ・壊変形式，平均β・電子線エネルギー，最大β線エネルギーはICRP Publ 107による。
- ・子孫核種と永続平衡のものは親核種の放射能に基づく



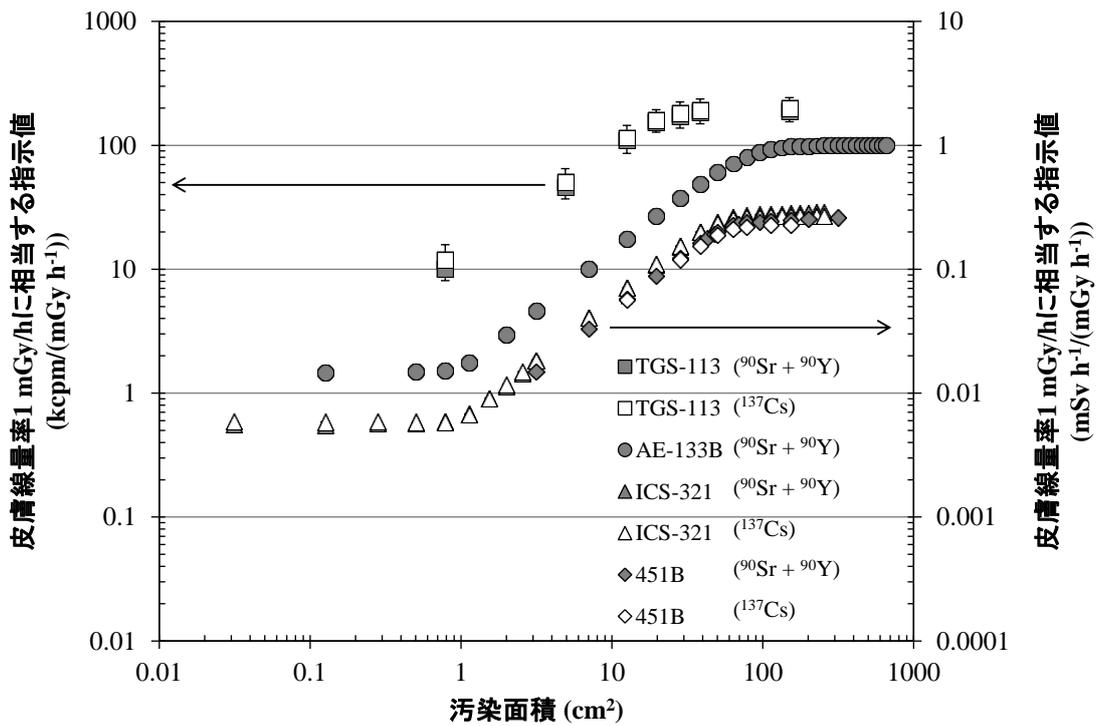
図Ⅲ.1 VARSKIN による計算の体系
(線量評価面積 1 cm² は ICRP Publ. 60 の勧告に基づく)



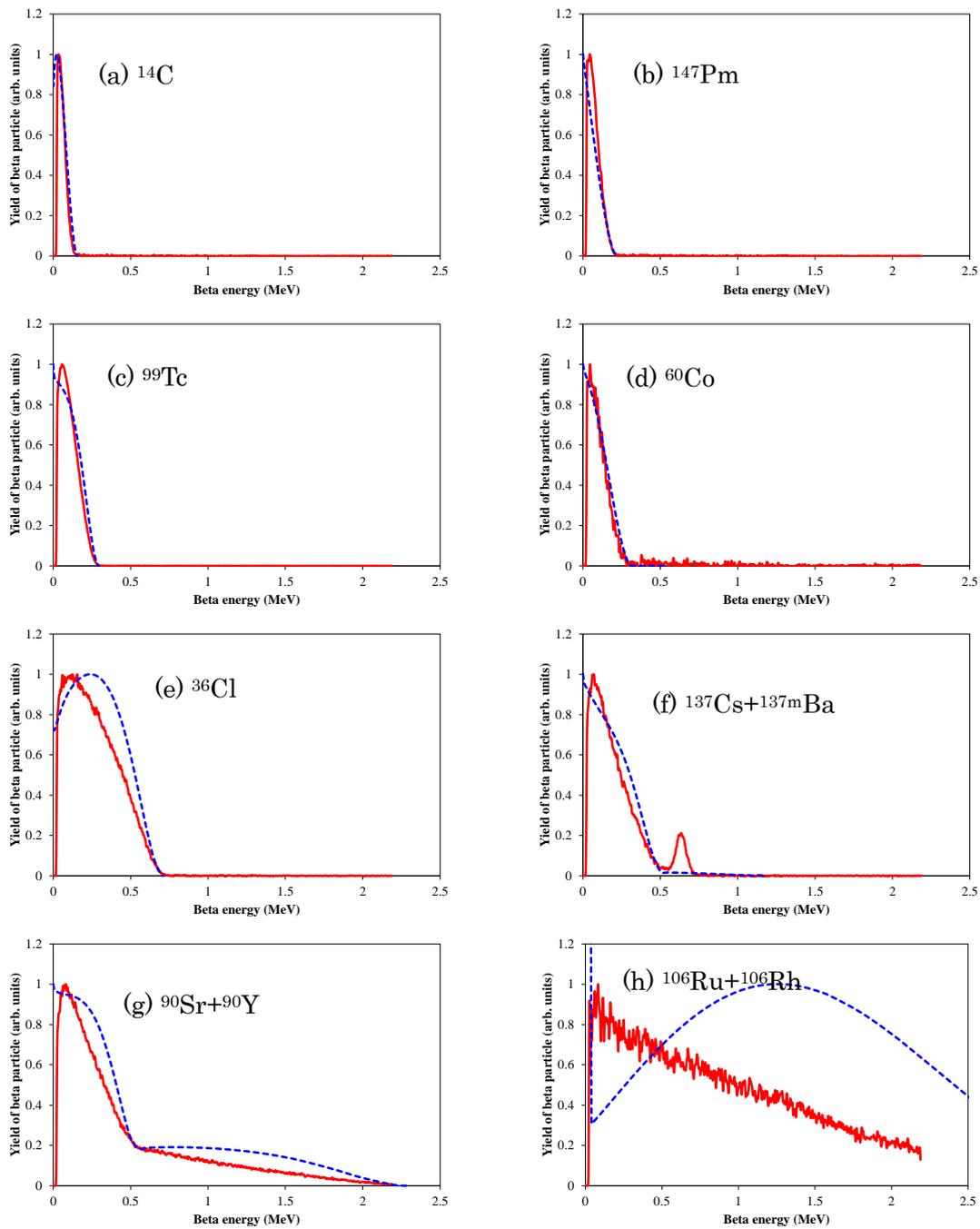
図Ⅲ.2 汚染面積と放射能密度当たりの種々のサーベイメータ指示値の関係
(⁹⁰Sr+⁹⁰Y : 合計 1 Bq/cm², ¹³⁷Cs : 1 Bq/cm²)



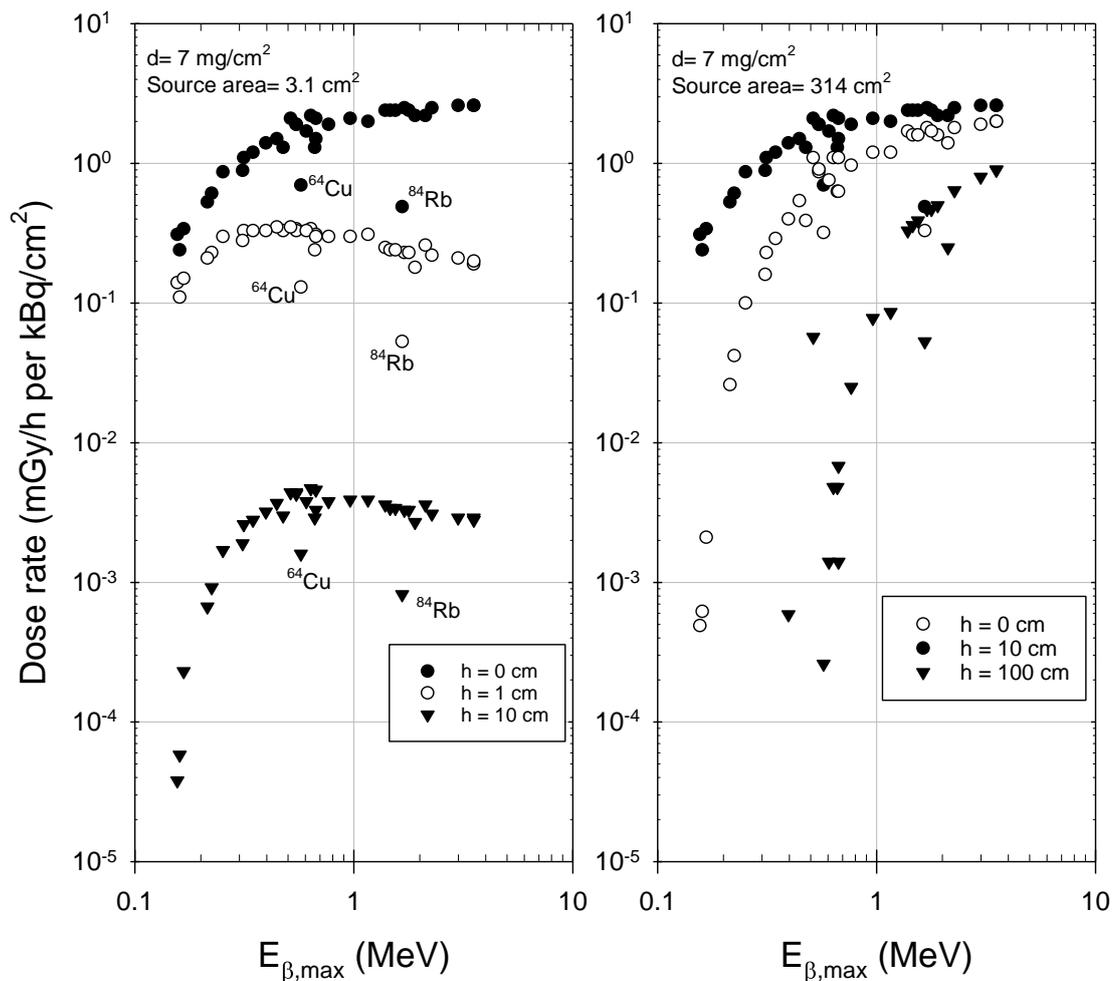
図III.3 汚染面積と線量率の関係 ($^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$: 合計 1 Bq/cm^2 , ^{137}Cs : 1 Bq/cm^2)



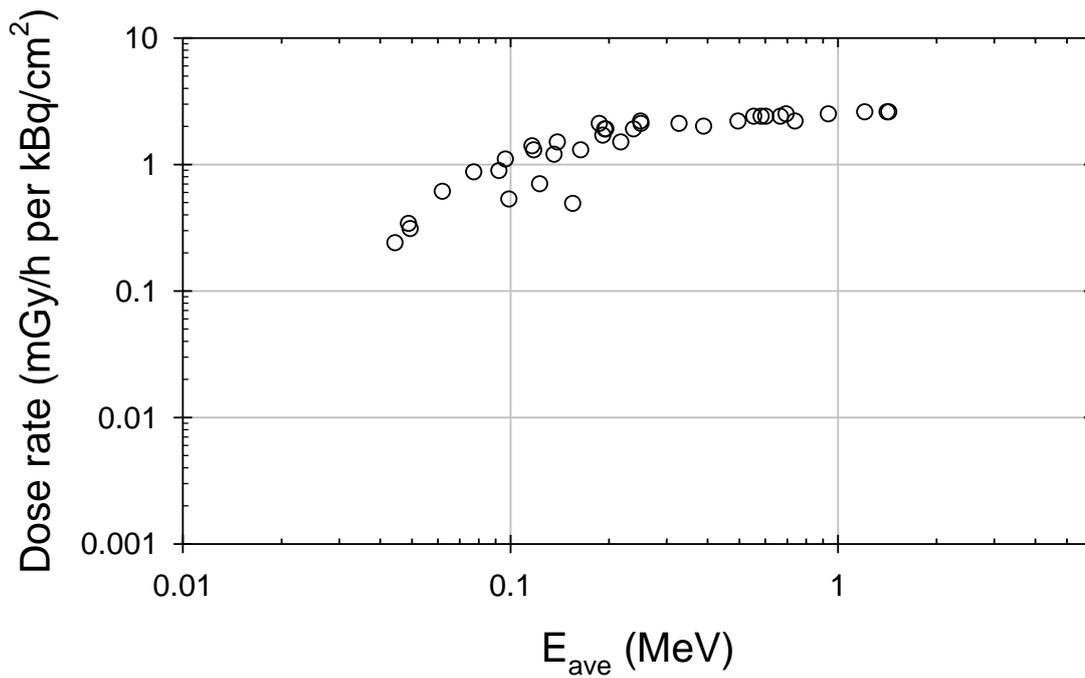
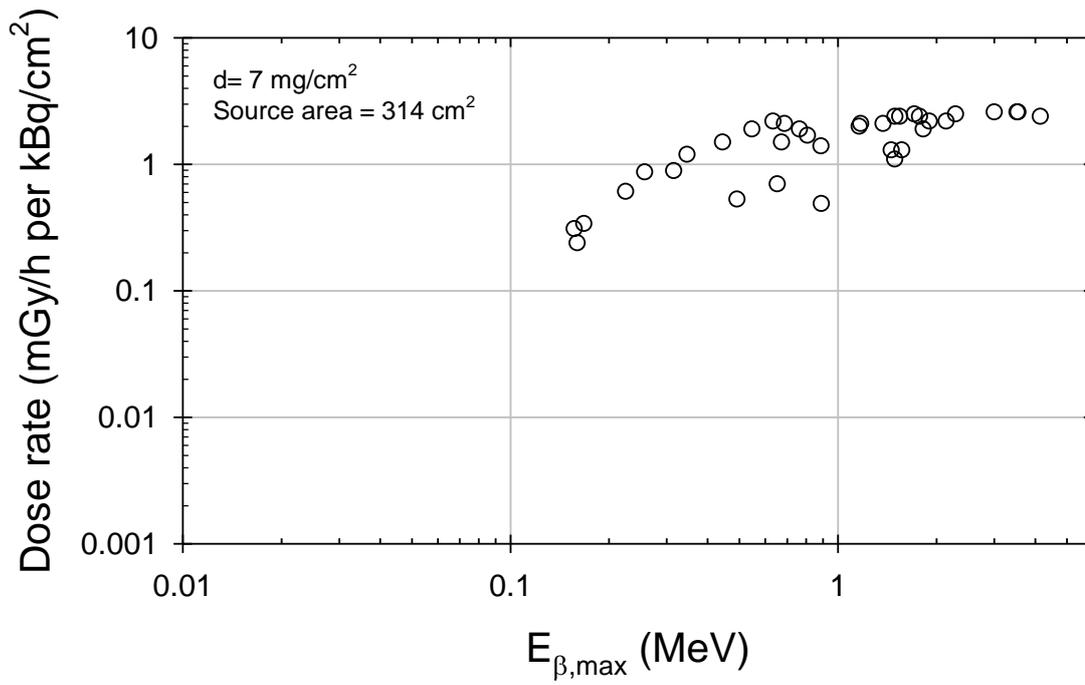
図III.4 汚染面積と皮膚線量率 1 mGy/h に相当するサーベイメータ指示値の関係



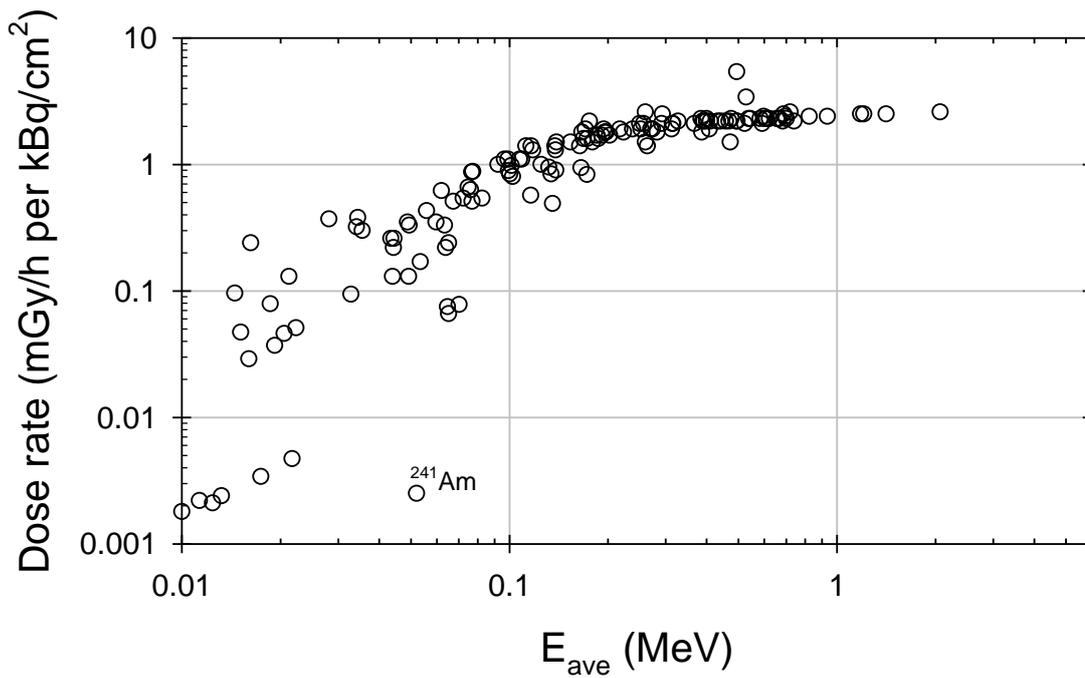
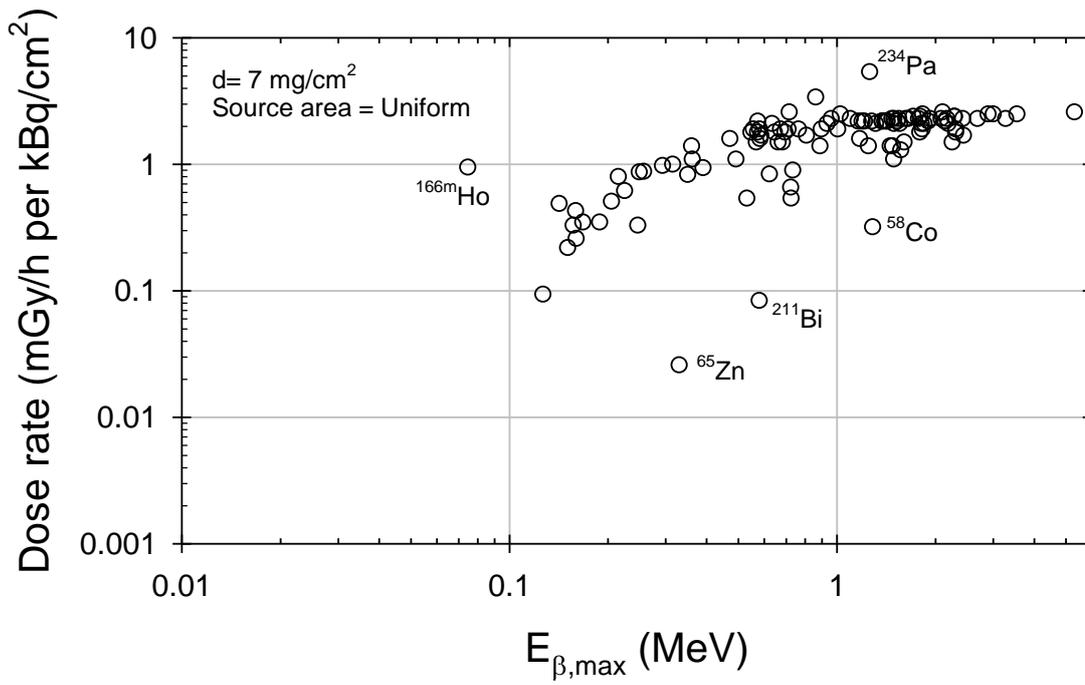
図III.5 β 線スペクトロメータのパルス波高スペクトル（実線）vs 理論スペクトル（破線）



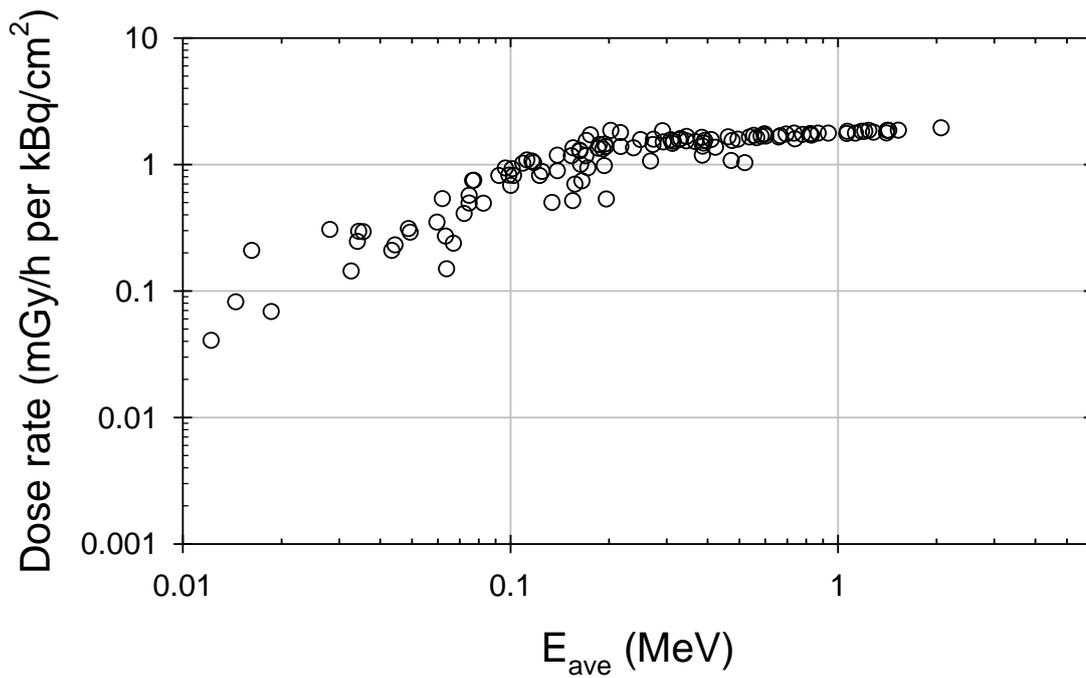
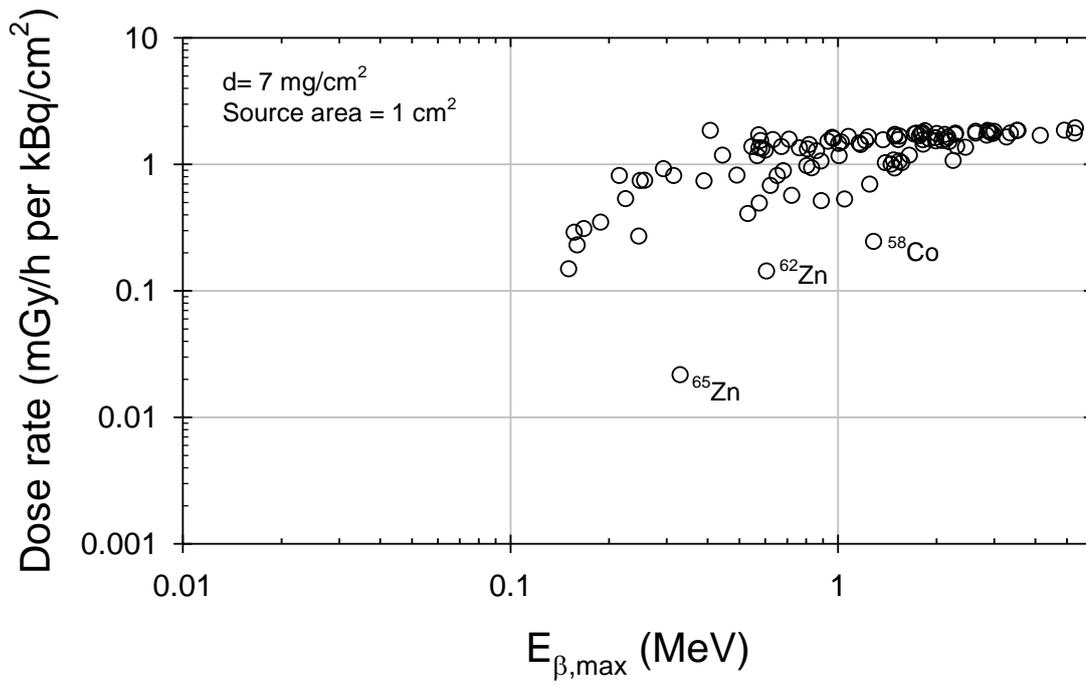
図Ⅲ.6 β 線最大エネルギーと深さ 7 mg/cm^2 での β ・電子線吸収線量率の関係
 h は、汚染源と皮膚表面の距離であり、 $h=0$ は、表面汚染に相当する。
 線源サイズは、左： 3.1 cm^2 （半径 1 cm ），右： 314 cm^2 （半径 10 cm ）である。
 （出典：JAERI-M 7354）



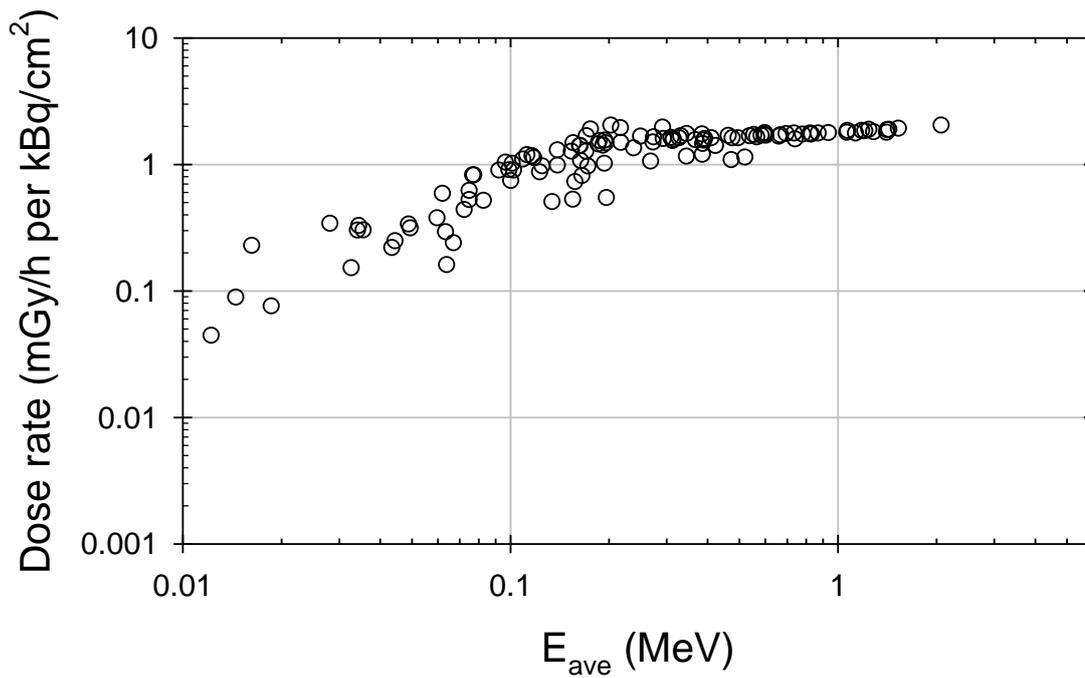
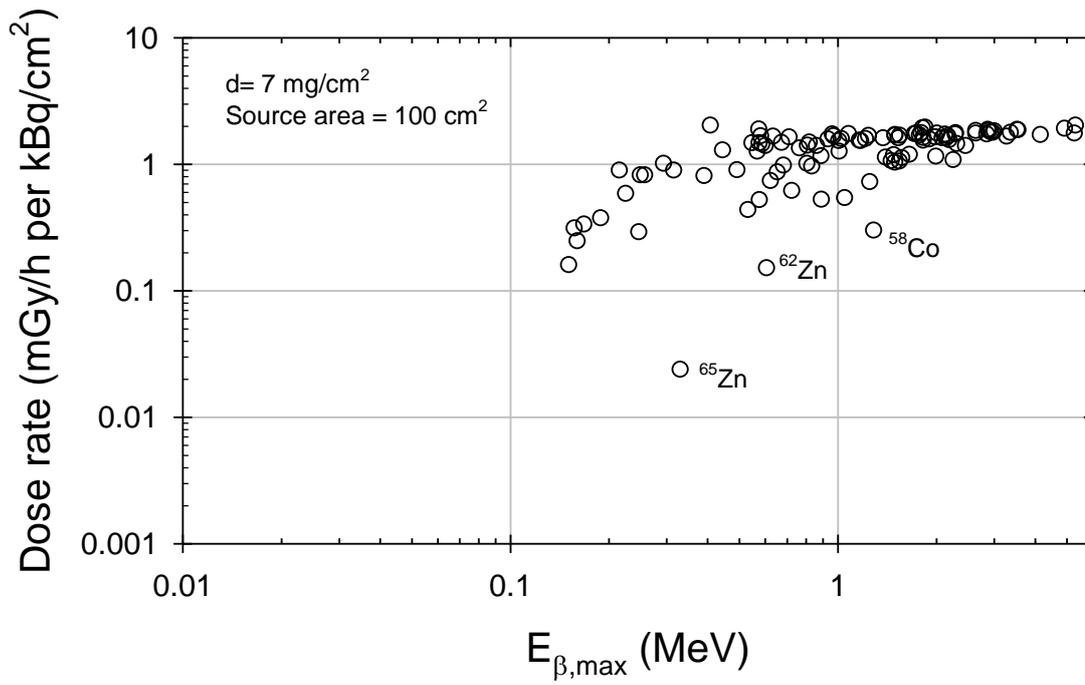
図Ⅲ.7 単位皮膚表面密度 (1 kBq/cm^2) 当たりの深さ 7 mg/cm^2 での β ・電子線吸収線量率と β 線最大エネルギー (上図) 及び平均電子エネルギー (下図) の関係 (汚染面積 314 cm^2)
 (出典: エネルギーは, ICRP Publ. 38, 線量率は, JAERI-M 7354)



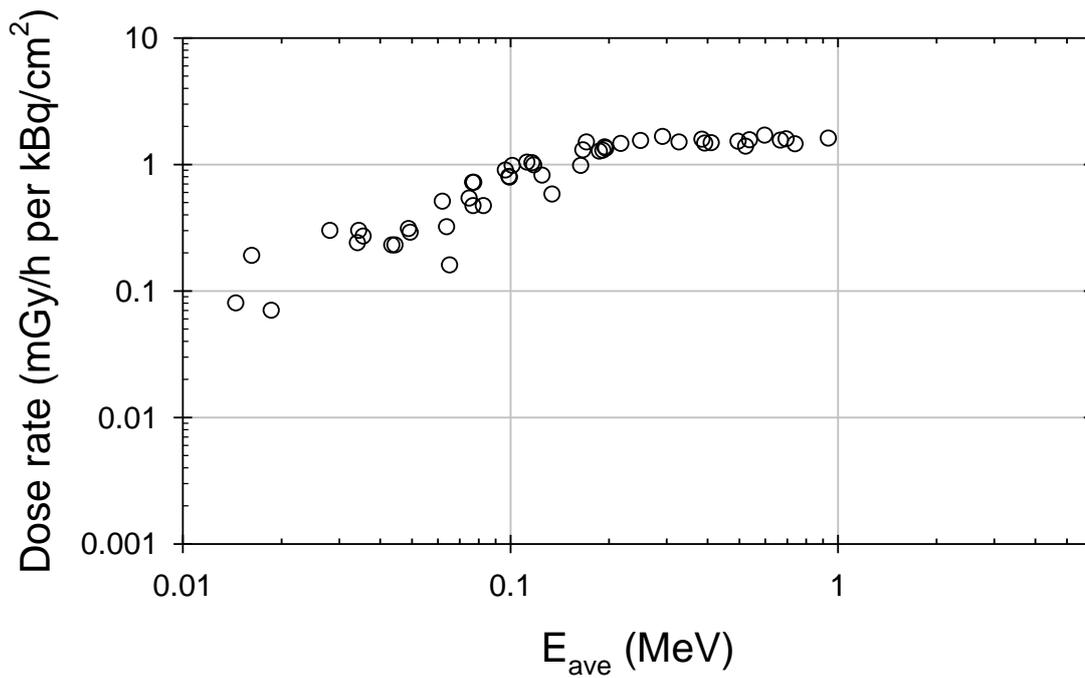
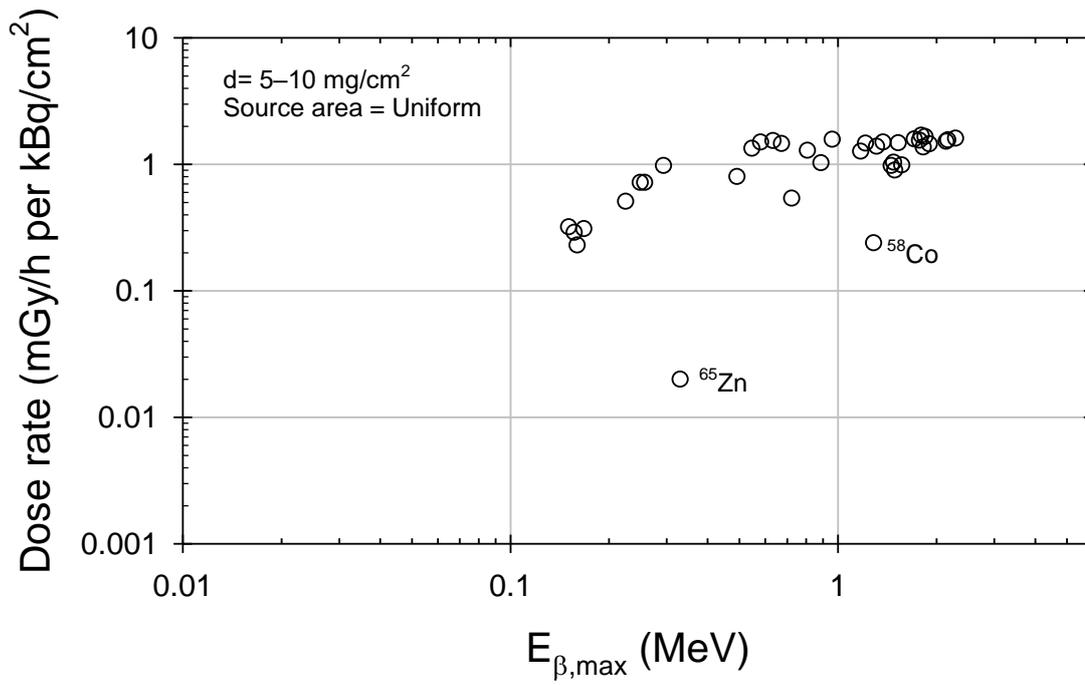
図Ⅲ.8 単位皮膚表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 7 mg/cm²でのβ・電子線吸収線量率とβ線最大エネルギー (上図) 及び平均電子エネルギー (下図) の関係 (一様な広い汚染) (出典: エネルギーは, ICRP Publ. 38, 線量率は, Kocher and Eckerman, 1987)



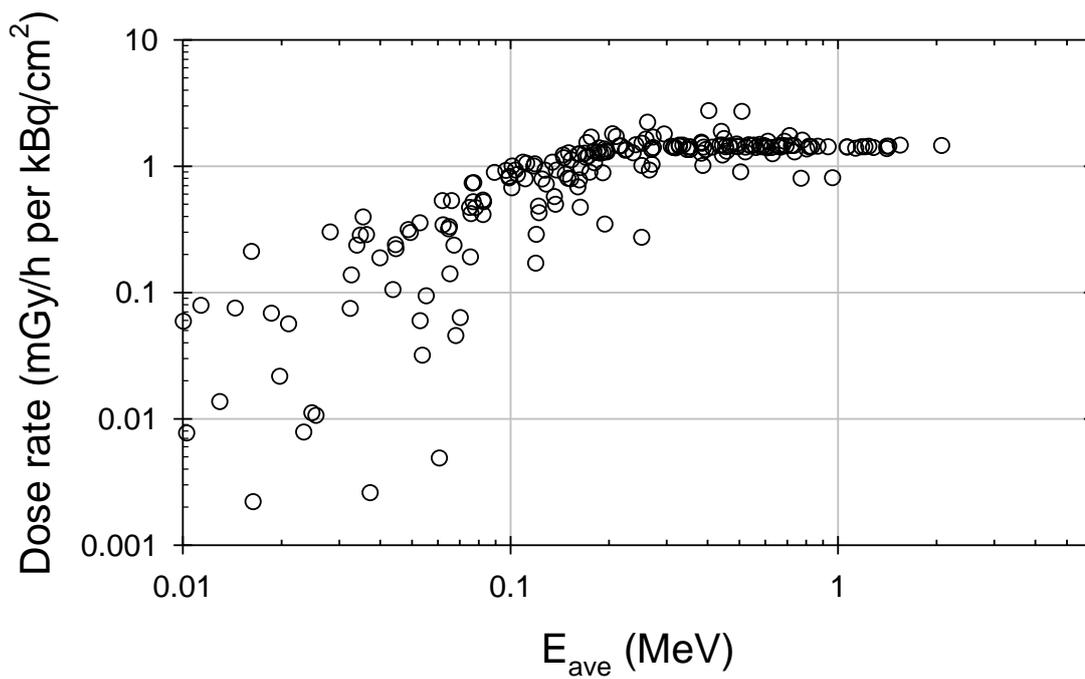
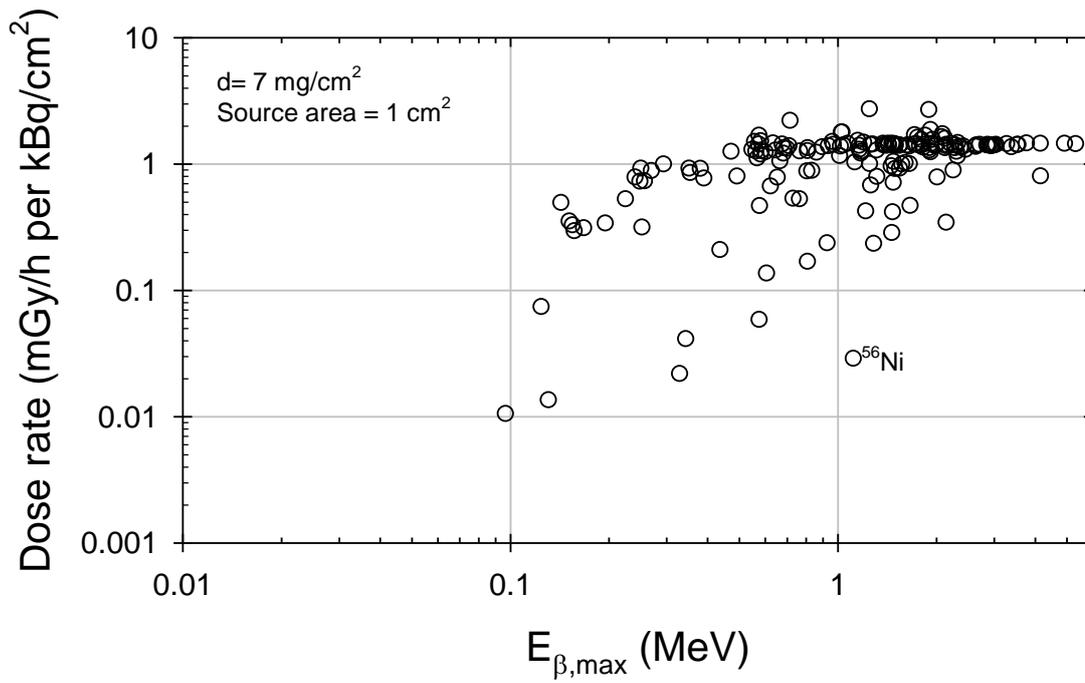
図Ⅲ.9 単位皮膚表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 7 mg/cm²でのβ・電子線吸収線量率とβ線最大エネルギー (上図) 及び平均電子エネルギー (下図) の関係 (汚染面積 1 cm²)
 (出典: エネルギーは, ICRP Publ. 38, 線量率は, Cross et al., 1992)



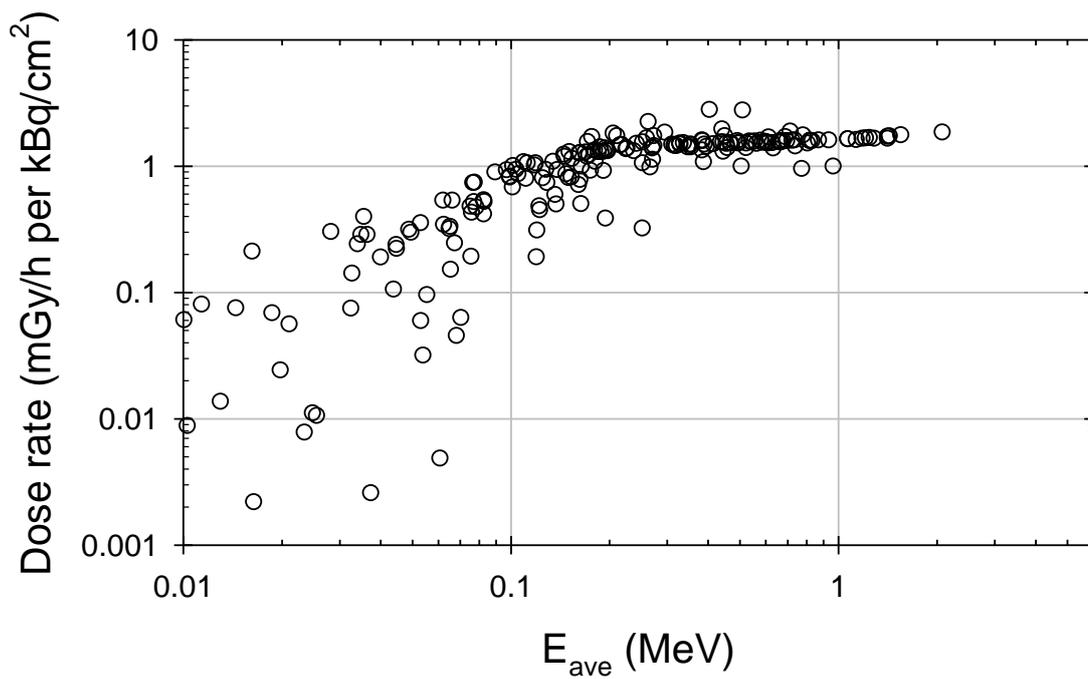
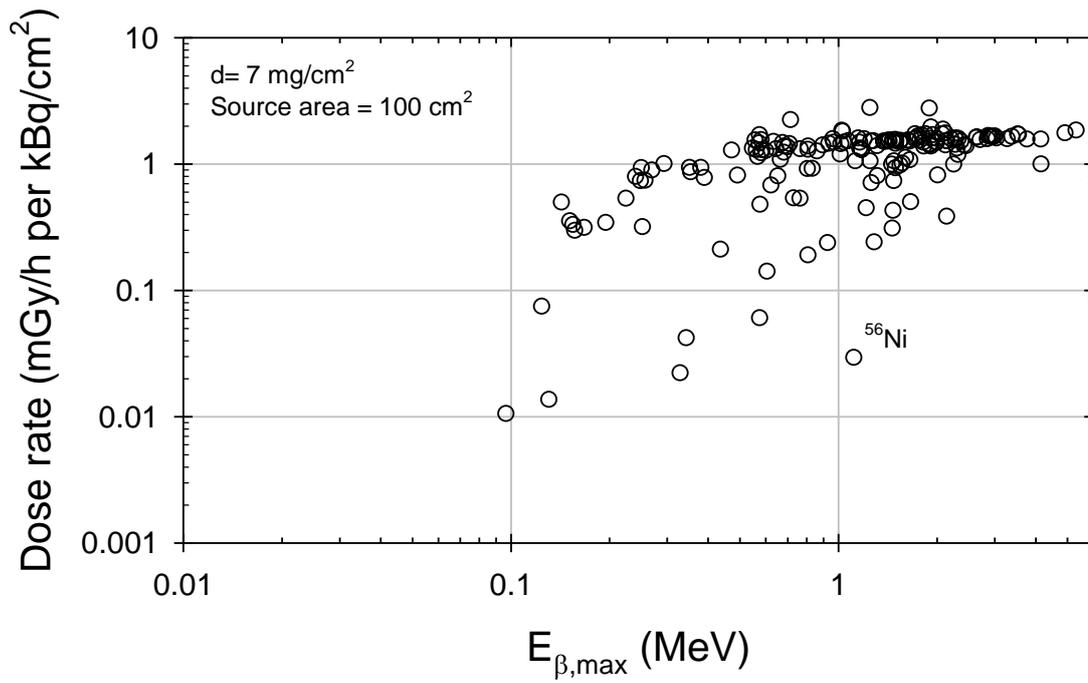
図III.10 単位皮膚表面密度 (1 kBq/cm^2) 当たりの深さ 7 mg/cm^2 での β ・電子線吸収線量率と β 線最大エネルギー (上図) 及び平均電子エネルギー (下図) の関係 (汚染面積 100 cm^2)
 (出典: エネルギーは, ICRP Publ. 38, 線量率は, Cross et al., 1992)



図III.11 単位皮膚表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 5-10 mg/cm²でのβ・電子線吸収線量率とβ線最大エネルギー (上図) 及び平均電子エネルギー (下図) の関係 (汚染面積 100 cm²) (出典: エネルギーは, ICRP Publ. 38, 線量率は, Faw, 1992)

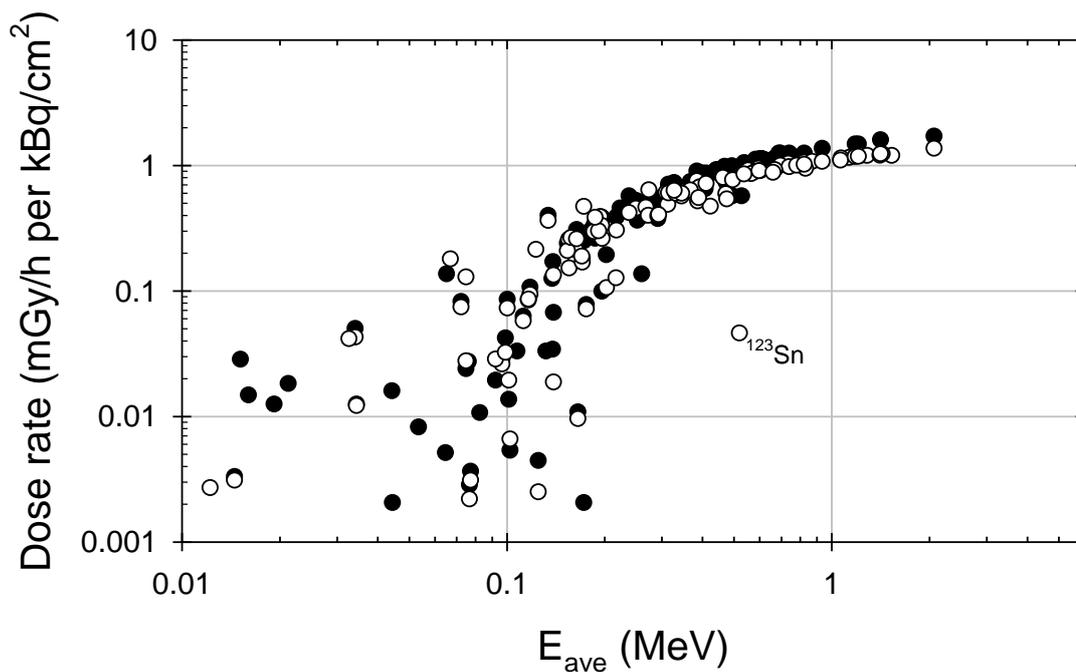
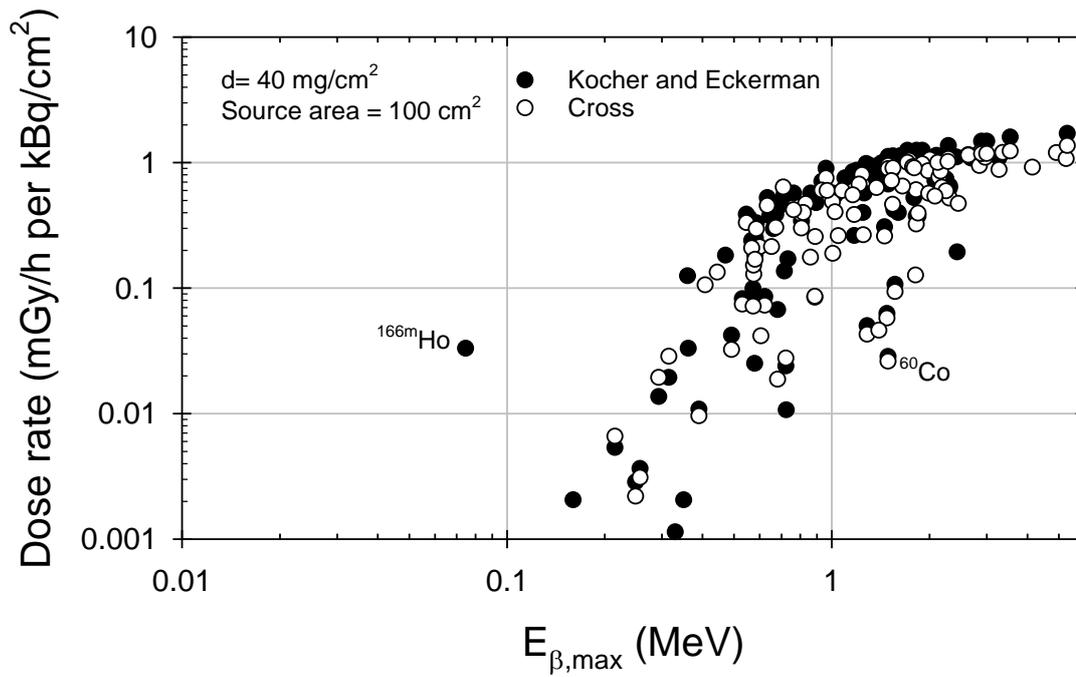


図Ⅲ.12 単位皮膚表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 7 mg/cm²でのβ・電子線吸収線量率とβ線最大エネルギー (上図) 及び平均電子エネルギー (下図) の関係 (汚染面積 1 cm²)
 (出典: エネルギーは, ICRP Publ. 107, 線量率は, VARSKIN 6.0)

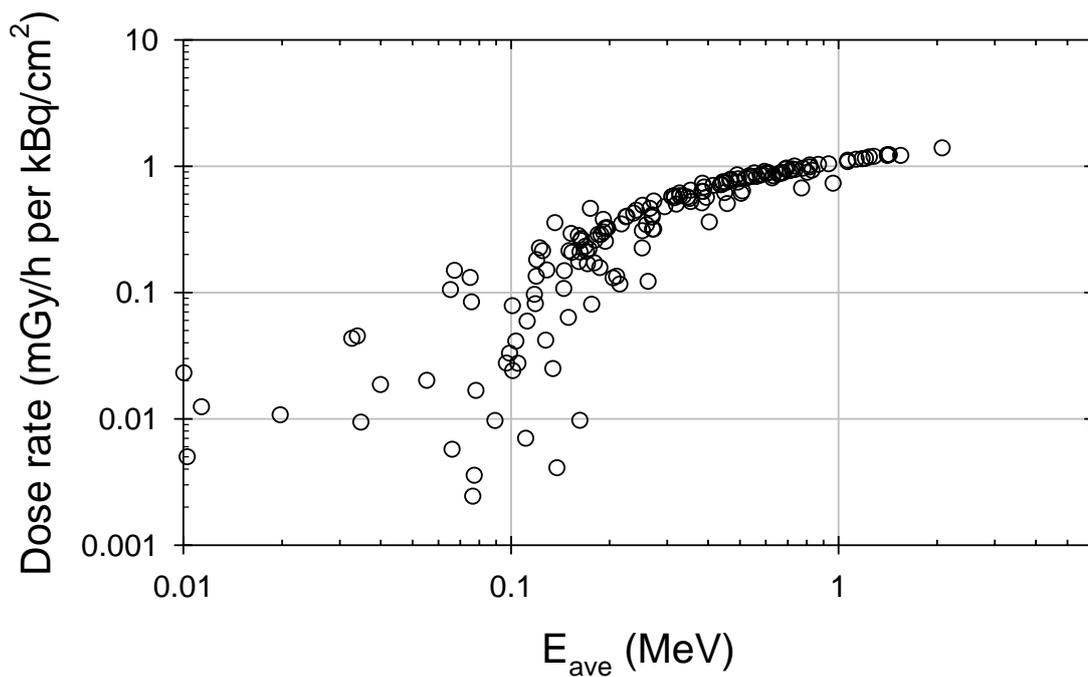
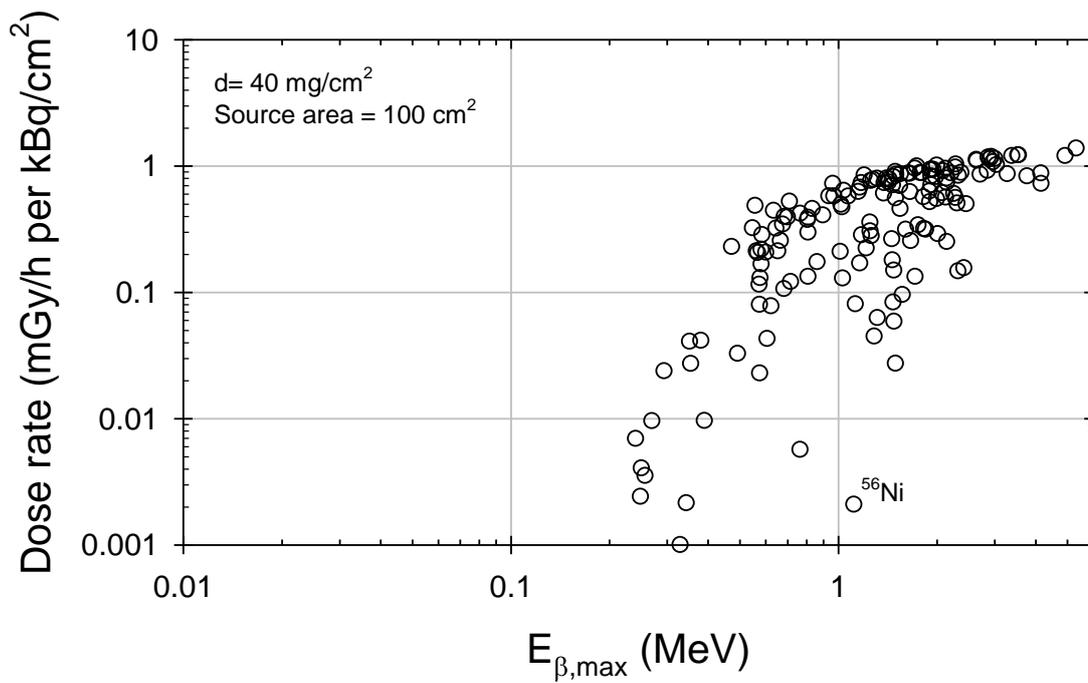


図Ⅲ.13 単位皮

膚表面密度 (1 kBq/cm^2) 当たりの深さ 7 mg/cm^2 での β ・電子線吸収線量率と β 線最大エネルギー (上図) 及び平均電子エネルギー (下図) の関係 (汚染面積 100 cm^2)
 (出典: エネルギーは, ICRP Publ. 107, 線量率は, VARSKIN 6.0)



図Ⅲ.14 単位皮膚表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 40 mg/cm² での β ・電子線吸収線量率と β 線最大エネルギー (上図) 及び平均電子エネルギー (下図) の関係 (汚染面積 100 cm²) (出典: エネルギーは, ICRP Publ. 38, 線量率は, Kocher と Cross)



図Ⅲ.15 単位皮膚

膚表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 40 mg/cm²でのβ・電子線吸収線量率とβ線最大エネルギー (上図) 及び平均電子エネルギー (下図) の関係 (汚染面積 100 cm²) (出典: エネルギーは, ICRP Publ. 107, 線量率は, VARSKIN 6.0)

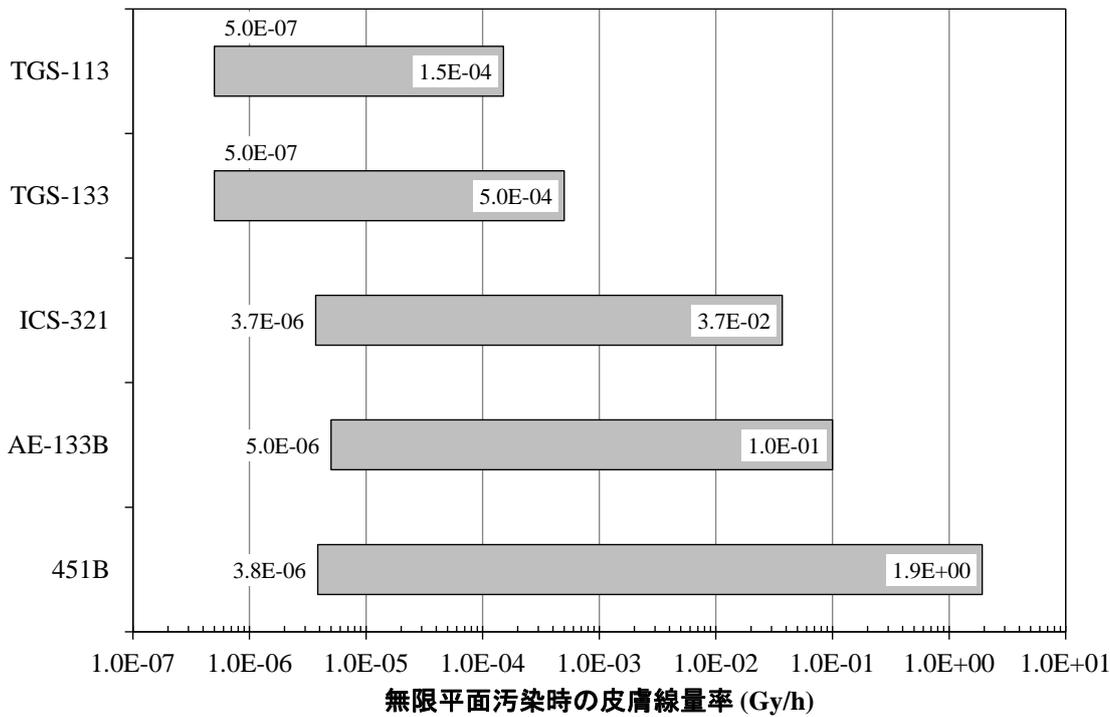
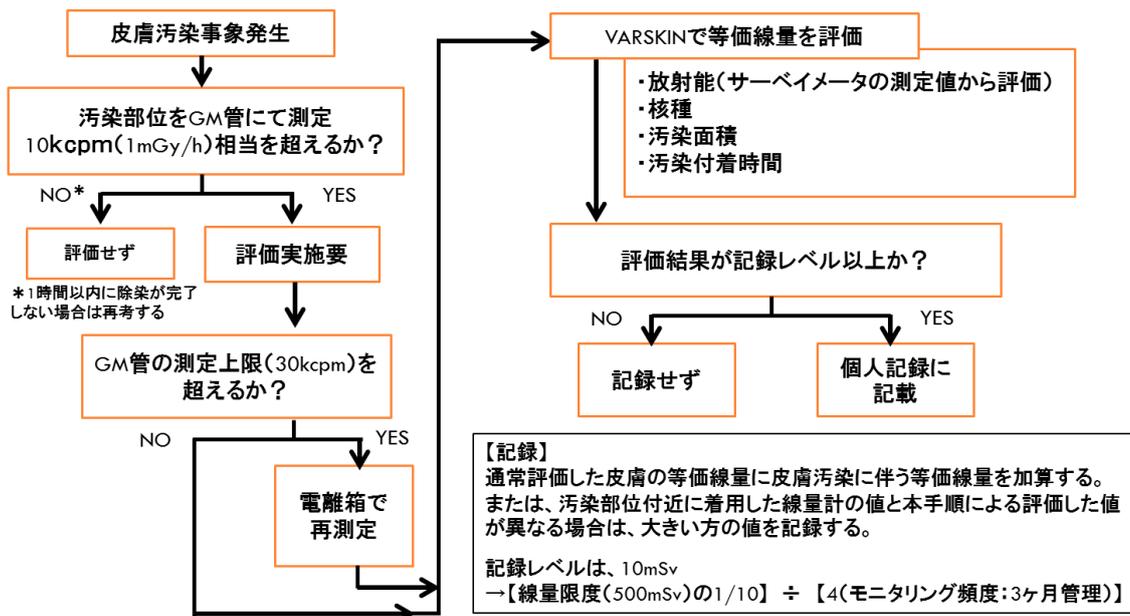
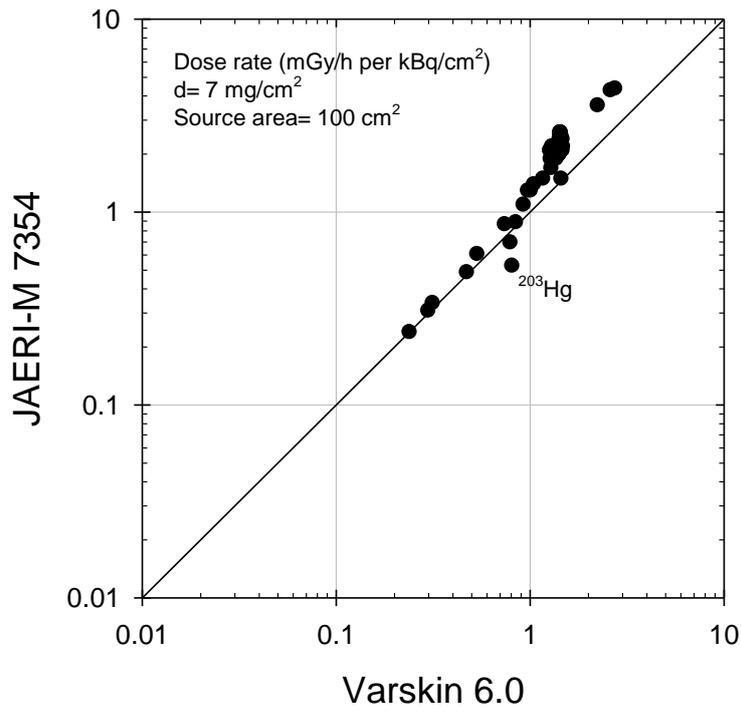


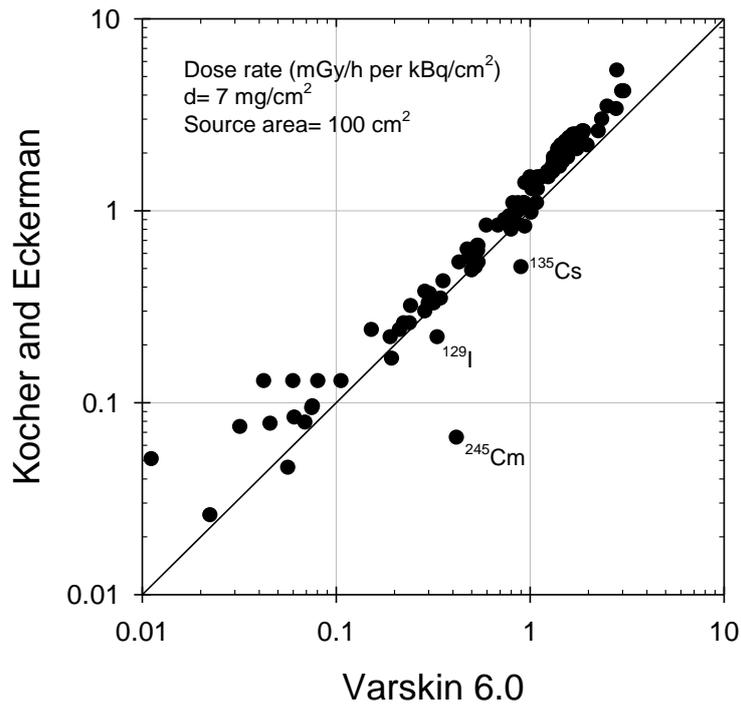
図 I.16 広い皮膚汚染での種々のサーベイメータ（表面汚染用及び線量当量率用）の深さ 7 mg/cm²での吸収線量率の測定可能範囲



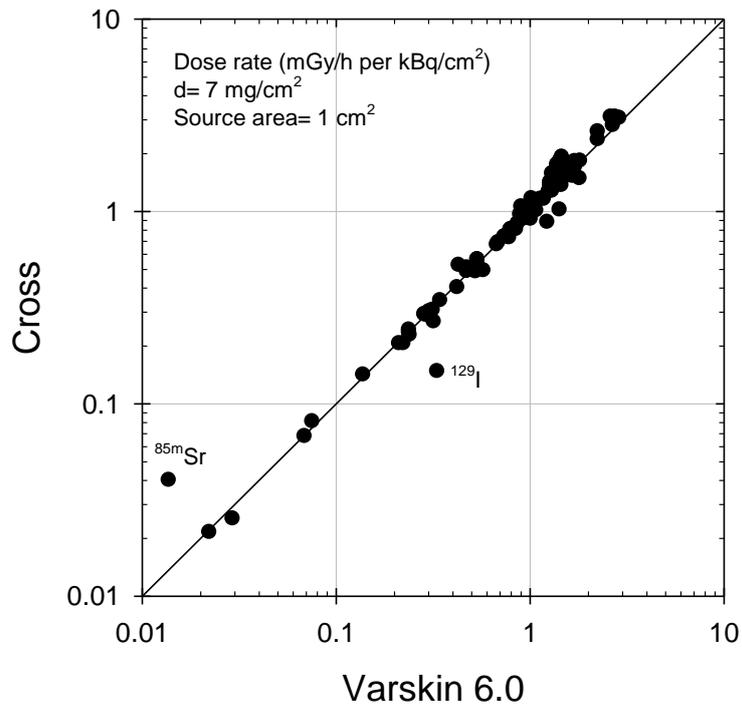
図III.17 線量評価フロー（核燃料サイクル工学研究所の例）



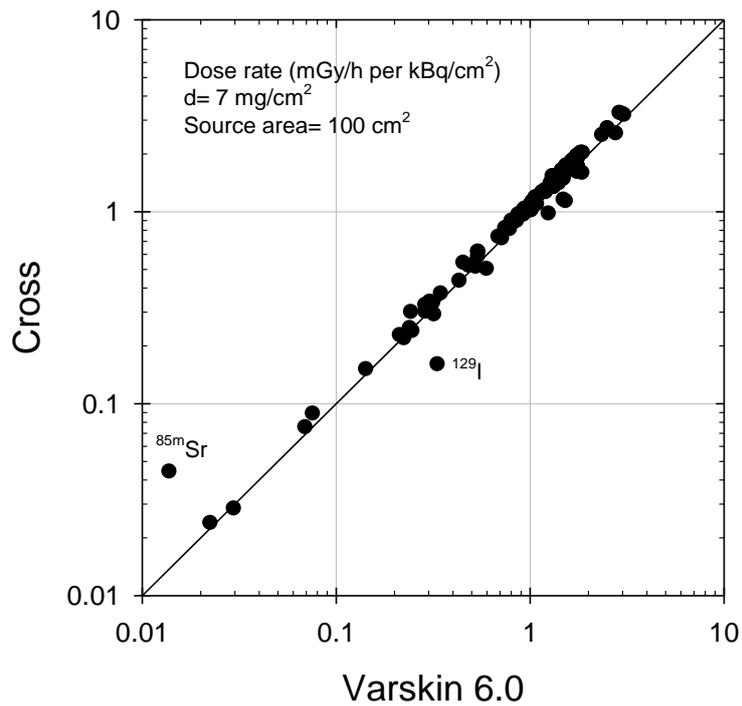
図Ⅲ.18 表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 7 mg/cm² でのβ・電子線吸収線量率の比較
VARSKIN 6.0 対 JAERI-M 7354



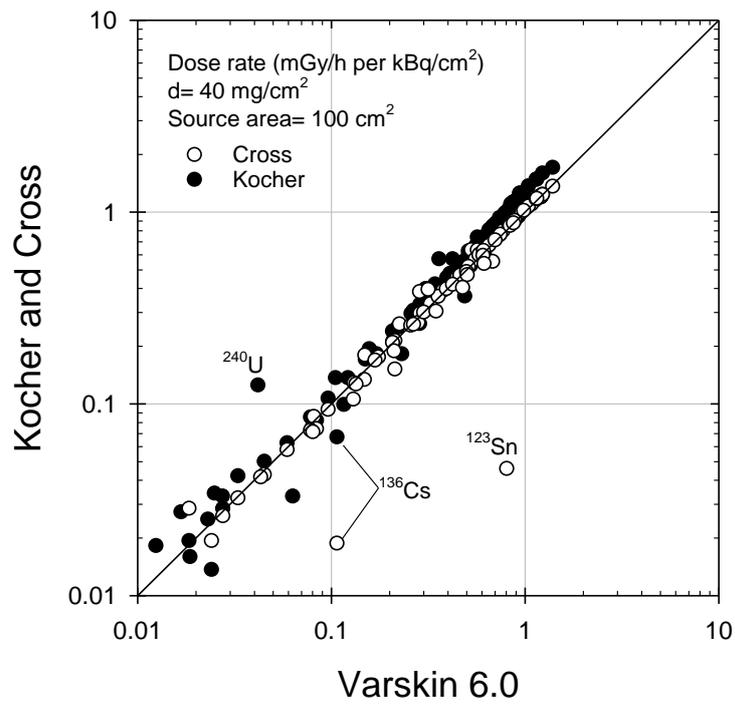
図Ⅲ.19 表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 7 mg/cm² での吸収線量率の比較
VARSKIN 6.0 対 Kocher and Eckerman



図Ⅲ.20 表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 7 mg/cm²でのβ・電子線吸収線量率の比較
 VARSKIN 6.0 対 Cross (1cm²)



図Ⅲ.21 表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 7 mg/cm²でのβ・電子線吸収線量率の比較
 VARSKIN 6.0 対 Cross (100cm²)



図III.22 表面密度 (1 kBq/cm²) 当たりの深さ 40 mg/cm²でのβ・電子線吸収線量率の比較
VARSKIN 6.0 対 ●Kocher and Eckerman, ○Cross

研究成果の刊行に関する一覧表レイアウト

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
C. Li, A. Ansari, C. Bartizel, P. Battisti, D. Frank, U. Gerstmann, I. Giardina, C. Guichet, D. Hammond, M. Hartmann, R. L. Jones, <u>E. Kim</u> , E. Ko, R. Morhard, D. Quayle and B. Sadi	GHSI emergency radionuclides bioassay laboratory network: summary of a recent exercise.	Radiat. Prot. Dosim	171(31)	315-357	2016
H. Itadzu, <u>O. Kurihara</u> and T. Iguchi	Practical self-absorption correction method for various environmental samples in a 1000 cm ³ Marinelli container to perform accurate radioactivity determination with HPGe detector	RADIOISOTOPES	64	661-671	2015
C. Li, C. Bartizel, P. Battisti, A. Böttger, C. Bouvier, A. Capote-Cuellar, Z. Carr, D. Hammond, M. Hartmann, T. Heikkinen, R. L. Jones, <u>E. Kim</u> , R. Ko, R. Koga, B. Kukhta, L. Mitchell, R. Morhard, F. Paquet, D. Quayle, P. Rulik, B. Sadi, A. Sergei, I. Sierra, W. Oliveira Sousa and G. Szabó	GHSI emergency radionuclides bioassay laboratory network: summary of second exercise	Radiat. Prot. Dosim	174 (4)	449-456	2017
K. Hoshi, N. Tsujimura, T. Yoshida, O. Kurihara, E. Kim, and K. Yajima	Study of the method for the screening survey using an ambient dose equivalent rate meter in criticality accidents	Progress in Nuclear Science and Technology			プロシーディングの査読は完了しており、2018年内に日本原子力学会の国際会議論文集Progress in Nuclear Science and Technologyに掲載される予定
N. Tsujimura, F. Takahashi, and C. Takeda	Dataset of TLD badge response and body sodium/hair activation for criticality accident dosimetry	Progress in Nuclear Science and Technology			