

平成8年度安全研究成果（調査票）

-環境放射能安全研究年次計画（平成8年度～平成12年度）-

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
T	N1410 97-041	97.12.03

この資料は技術管理室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です
動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

1997年11月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear
Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku,
Tokyo 107, Japan

©1997 動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1997年11月

平成 8 年度安全研究成果（調査票）
－環境放射能安全研究年次計画（平成 8 年度～平成 12 年度）－

報告者部課室 リスト参照

編 集 安全部安全研究課

要 旨

平成 9 年 10 月 6 日の科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室からの協力依頼に基づき、環境放射能安全研究年次計画（平成 8 年度～平成 12 年度）に登録された研究課題（8 件）について平成 8 年度安全研究成果の調査票を作成した。

本報告書は、国に提出した調査票を取りまとめたものである。

目 次

1. [1]-(3)	地質と環境放射線の関連性に関する研究	東濃・技開課 1
1. [2]-(1)	環境中ラドン及びその壊変生成物濃度の測定 及び性状挙動評価手法に関する研究	人形・安管課 4
1. [3-2]-(4)	放射性物質の環境中での移行挙動及び変動要 因に関する研究	東海・環安課 7
1. [3-4]-(16)	湖沼環境被ばく評価モデルの開発	大洗・安対課 11
1. [5]-(2)	地球規模の広域拡散評価手法に関する研究	東海・環安課 15
1. [5]-(3)	放射性物質の環境影響評価手法に関する研究	東海・環安課 19
1. [6]-(7)	長半減期核種の分析測定技術の高度化に する研究	東海・環安課 23
1. [6]-(9)	内部被ばく線量測定評価法の高度化に する研究	東海・安対課 27

平成8年度

周 評 査 票

安 全 研 究 年 次 計 画 登 錄 研 究 課 題	地質と環境放射線の関連性に関する研究			分類番号 1. [1] - (3) -
実 施 研 究 課 題 (Title)	地質と環境放射線の関連性に関する研究 (Study on the Correlation between Geological Features and Environmental Radiation)			
実 施 機 関 (Organization)	動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation : P N C)			
研究者名及び所属 (Name / Affiliation)	永崎 靖志 / 東濃地科学センター・技術開発課 (Yasushi NAGASAKI / Tono Geoscience Center · Geotechnics Development Section)			
キーワード Key Word	地 質 geology	環境放射線 environmental radiation	吸収線量 absorbed dose	
研究期間	平成8年度 ~ 平成8年度	関連する国際 共同研究課題 及び実施機関	該当せず	
関連する 解 析 コ ー ド	該当せず	関連する特別会計 実 証 試 験	該当せず	
【成果の達成レベル】				
羽越地域（福島県猪苗代湖東部地方）における地質と環境放射線に関する検討を行い、先第三紀の花崗閃緑岩や新第三系との間における吸収線量率値の差を明らかにする等所期の成果を得た。				
【進捗状況（平成8年度）】				
先第三紀の花崗閃緑岩類と新第三系の堆積岩類が広く分布する羽越地域における地質と環境放射線の関連性を評価するため過去のウラン調査探鉱データを吸収線量率に換算した。				
本研究は最終的に国民線量評価を目指していたが、事業団としは、他機関の利用に供することができるよう国内ウラン資源調査探鉱データをまとめ、基礎データを提供することに目標を変更する。これにあわせて本研究は平成8年度をもって終了する。				
【使用主要施設】				
東濃地科学センター : 車載型放射線測定装置（カーボーン）				
連絡先	〒107 〒03-3586-3311 東京都港区赤坂1-9-13 (三会堂ビル) 動力炉・核燃料開発事業団		〔所 属〕 国際部 資源開発室 〔氏 名〕 室長 石堂 昭夫	

【研究目的】

環境放射線の地域的な変動の大きな要因となっている地質に着目し、生活環境における環境放射線レベルと地質との関係、また、人工構造物等との関連性を調査し、国民線量評価に資する。

【研究内容】

過去のウラン資源調査探鉱データを基に地質と環境放射線の関連性評価を実施する。また、既存の車載型放射線測定装置を用いて、現在の生活環境、特に人口の密集する都市部や高速道路網を含む主要国道等における環境放射線レベルを測定する。

上記の研究成果を基に、特に地質との関連性に着目した環境放射線による国民線量評価手法を検討する。

【研究成果】

調査解析を行った地域は福島県猪苗代湖東部の約 300km²であり、調査解析に用いたカーボンデータは昭和56年11月17日～11月30日に測定された走行距離 193km分である。その結果、当該地域における地質と環境放射線の関連性は以下のように明らかとなった。（図1）

- ① 本地域に分布する新第三系の吸収線量率値は、いずれの地質についても露頭部分を除いては35～50nGy/hの値を示し、変動幅は比較的小さく安定している。各地層間には明瞭な差は認められない。
- ② 岩相については、砂岩やシルト岩を主体とした片平層、土湯峠層、堀口層（および小倉砂岩部層）と凝灰岩や凝灰角礫岩から成る他の地層を比較しても、新第三系の地層間では明瞭な差は認められない。
- ③ 一方、先第三紀の花崗閃緑岩類の吸収線量率値は35～57nGy/hの範囲であるが、花崗閃緑岩類の露頭部では 60nGy/h以上を示し、新第三系と比べると明瞭に高い値を示す。
- ④ 河岸段丘及び扇状地堆積物分布域では、全般的には 40nGy/h以下の値を示し極めて変動の幅が少ない。一部に 40nGy/h以上の値を示すが、このような場所では近傍に他の地層が露出したり、これらの堆積物の分布が狭小で薄く、浅部に他の地層が分布するためと考える。
- ⑤ また、第四紀火山岩類については調査ルートも少なく、検討にあたっては層序を区分せず一括して取り扱ったが、河岸段丘及び扇状地堆積物と明瞭な差は認められず、概ね35～40nGy/hの範囲となっている。

【公開資料】

(1)久田司 “羽越地域における地質と環境放射線の関連性評価” (PNC TJ7409 97-001)

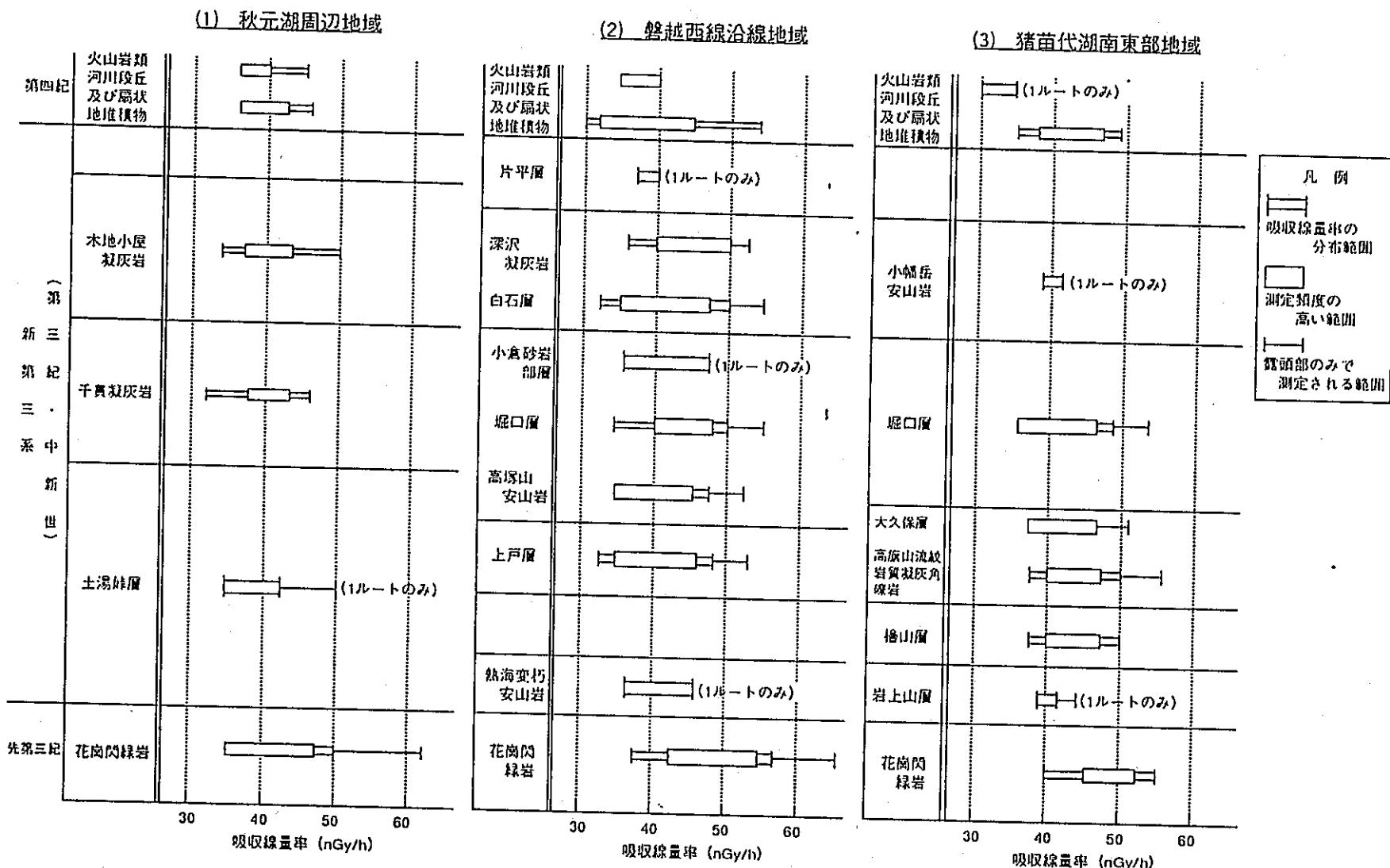


図1 羽越地域における地質と吸収線量率の関係

安 全 研 究 年 次 計 画 登 錄 研 究 課 題	環境中のラドン及びその壊変生成物濃度の測定及び性状挙動評価手法に関する研究				分 類 番 号 1. [2] - (1) -
実 施 研 究 課 題 (Title)	環境中のラドン及びその壊変生成物濃度の測定及び性状挙動評価手法に関する研究 (Study on the measurement of radon and its progeny in the environment, and on the evaluation of their behavior)				
実 施 機 関 (Organization)	動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation : P N C)				
研究者名及び所属 (Name / Affiliation)	石森 有 (Yuu ISHIMORI), 伊藤公雄 (Kimio ITO), 古田定昭 (Sada-aki FURUTA), 中島裕治 (Yuji NAKASHIMA) 以上 人形峰事業所安全管理課 (Health and Safety Section, Ningyo-toge Works) 永崎靖志 (Yasushi NAGASAKI), 石堂昭夫 (Akio ISHIDOU) 以上, 東濃地科学センター技術開発課 (Geotechnics Development Section, Tono Geoscience Center)				
キ ワ ー ド Key Word	ラドン radon	ラドン子孫核種 radon progeny			
研 究 期 間	平成 8 年度 ~ 平成 12 年度まで 継続見込		関 連 す る 国 際 共 同 研 究 課 題 及 び 実 施 機 關	該当せず	
関 連 す る 解 析 コ ー ド	該当せず		関 連 す る 特 別 会 計 実 証 試 験	該当せず	
【成果の達成レベル】					
<p>①ラドンによる被ばく評価上重要なラドン壊変生成物（以下、「ラドン子孫核種」という）の積分型測定器の開発について、試作器による試験測定により、他測定器と比較的よく一致した結果が得られるなど、実器製作への見通しを得た。</p> <p>②ラドン子孫核種の粒径分布について、屋外での測定を開始し、事業所周辺での粒径分布についての知見を得た。</p> <p>③堆積場から発生するラドンの挙動評価を目的としたラドン拡散評価コードの開発について、試作コードの計算結果とトレーサガスによる拡散実験結果とを比較検証して、問題点を抽出し、当面の改良方法について見通しを得た。</p>					
【進歩状況（平成 8 年度）】					
<p>①ラドン子孫核種の積分測定器について、試作器による試験測定を行い、実器へ反映させるべき事項を抽出した。</p> <p>②ラドン子孫核種の粒径分布測定について、事業所周辺の屋外でのデータを蓄積した。</p> <p>③ラドン拡散評価コードの開発について、外部専門家によって検討が実施され、メッシュ・パラメータの改良点が抽出された。</p>					
【使用主要施設】					
ラドン校正設備（人形峰事業所）					
連絡先	〒 107 03-3586-3311 東京都港区赤坂 1-9-13 (三会堂ビル) 動力炉・核燃料開発事業団		(所 属)	安全部安全管理課	
			(氏 名)	課長 金盛 正至	

【研究目的】

環境中ラドン及びその壊変生成物等のデータの拡充を図り、その性状と挙動を明らかにするとともに、ラドン壊変生成物の実用的測定器の開発を行い、ラドン等から受ける線量を正確に推定する手法を確立することにより、適切な線量当量の評価に資する。

【研究内容】

ラドン壊変生成物の実用的な測定器を開発するとともに、粒径分布等の線量に影響を及ぼす要因を把握する。さらにラドン壊変生成物の成長や沈着についての挙動解析を行うための基準標準場を製作し、各種パラメータに関する調査・研究を行う。

上記の成果を踏まえ、地面からのラドン散逸量及び気象データを組み合わせた拡散評価手法を確立する。

【研究成果】

①平成 8 年度は、野外の商用電源のない場所で長期間の平均的なラドン子孫核種濃度を測定できる積分型測定器を開発するため、試作器⁽¹⁾による種々の試験測定を実施した。

試作器のブロック図を図 1 に示す。試作器はポンプにより毎分 0.4 l 前後の流量で、定められた時間毎に、大気中に浮遊するラドン子孫核種をフィルタ上に吸引捕集し、フィルタに対向してセットされた固体飛跡検出器 (CR-39) によってラドン子孫核種起源の α 線を検出する。流量の測定結果の保存及びポンプの起動／停止は内蔵したデータロガー及び制御回路により行われる。電源としては鉛蓄電池を採用した。

試験測定としては、ラドン子孫核種濃度を連続して測定できる測定器（事業所で開発した連続測定器及び市販の測定器）との比較測定を行った。測定結果を図 2 に示す。積分型測定器では、試験期間中の平均的な濃度が測定されるので、連続測定器の結果も試験期間中の平均値を算出し、これと比較する。図 2 より、試作した積分型ラドン子孫核種測定器の測定結果は連続測定器の平均値と比較的良く一致した結果が得られた。

今後、実器の検討と合わせて、測定値のバラツキの原因についても検討する。

②環境中ラドンの被ばく評価上重要なパラメータであるラドン子孫核種の粒径分布に関する情報として、平成 8 年度は事業所構内と堆積場周辺で粒径分布測定を実施した。測定方法は、拡散バッテリーによって得られた透過率曲線から逐次近似法によって粒径分布を求めるものである。

測定結果を図 3 に示す。得られた粒径分布の幾何平均径は 0.15~0.39 μm 、分布の広がりを示す幾何標準偏差は 1.6~3.8 であった。文献では屋外で測定された例は少ないが、家屋内、トンネル内等で測定された結果と同様の分布であった。

他機関との同時測定を行い、測定結果を比較したところ、他機関と比べて、得られた粒径分布が広いことが分かり、今後測定値の蓄積と合わせて、粒径分布の計算方法についても再検討する。

また、ラドン子孫核種のエアロゾルに付着していない成分の測定を進める。

③拡散評価手法の確立に関して、従来より地形の影響を考慮した数値計算による拡散評価コードを試作・検討している。平成 8 年度には外部専門家によって、試作したコードの計算結果と堆積場でのトレーサ・ガスによる拡散実験結果との比較・検証がなされ試作コードの改良点の抽出が行われた。

試作したコードでは、晴天時の夜間に発生する山風（山から谷への下降流）が再現されていることは確認されたが、メッシュの間隔が広く、実際の谷筋を再現できていないことが問題であった。

同コードは、空気の流れを推定する気流推定モデルと推定された気流モデルから大気の拡散を計算するモデルに大きく分けられるが、外部専門家の検討により、気流推定モデルについては現状の計算領域よりもさらに広域の気流場を推定して、その結果を取り込むこと、拡散計算については、メッシュの格子間隔を細かくすること、等が提案された。

【公開資料】

- (1) 石森有、伊藤公雄、古田定昭、中島裕治、「積分型ラドン娘核種測定器の開発」、日本保健物理学会第32回研究発表会要旨集(1997年)
- (2) 古田定昭、伊藤公雄、石森有、中島裕治「捨石堆積場周辺大気中ラドン拡散影響評価」(1997年), PNC TN6410 97-002

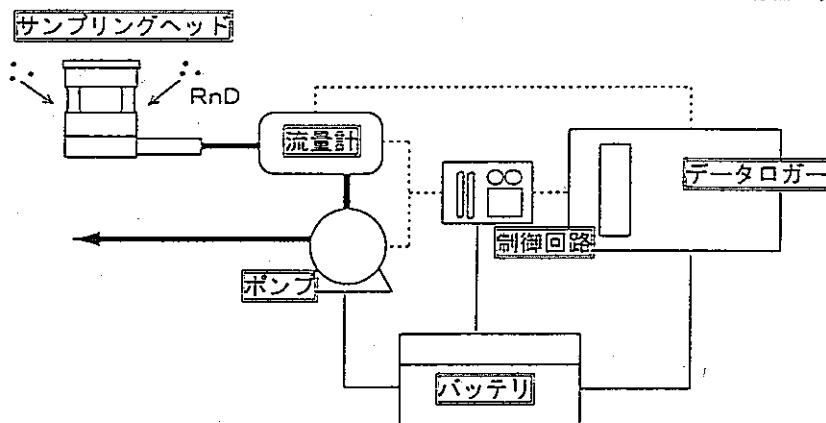


図1 積分型ラドン子孫核種測定器ブロック図

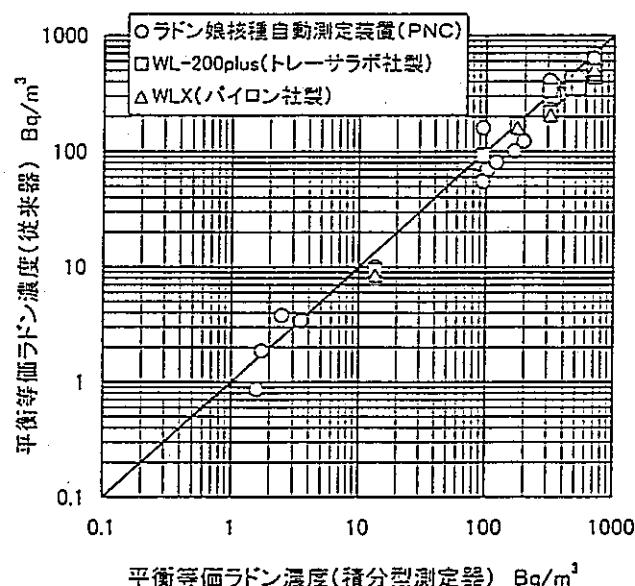
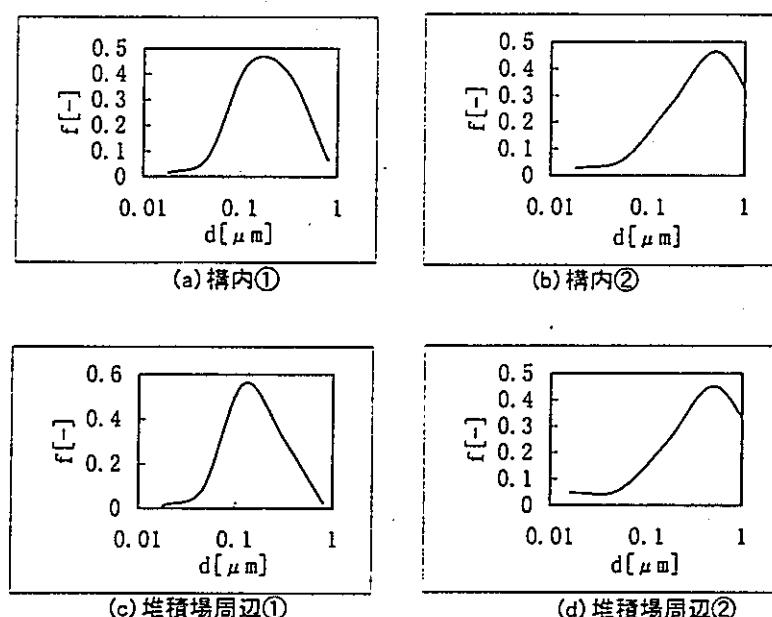


図2 積分型ラドン子孫核種測定器と他測定器との比較



(a), (b) 及び(c), (d)はそれぞれ同一場所での測定例

図3 ラドン子孫核種粒径分布測定結果
(縦軸: 頻度, 横軸: 括弧 $[\mu\text{m}]$)

安 全 研 究 年 次 計 画 登 録 研 究 課 題	放射性物質の環境中での移行挙動及び変動要因に関する研究					分 類 番 号 1. [3-2] - (4)
実 施 研 究 課 題 (Title)	放射性物質の環境中での移行挙動及び変動要因に関する研究 Study on Translation Behavior and Fluctuation Factors of Radionuclides in Environment					
実 施 機 関 (Organization)	動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation : P N C)					
研究者名及び所属 (Name / Affiliation)	森田 重光 (Shigemitsu MORITA) 東海事業所安全管理部(Tokai Works, Health and Safety Division)					
キ ー ワ ード Key Word	長半減期放射性物質 long-lived radionuclides	収着 sorption	酸性雨 acidic rain	溶出 elution	エージング aging	
研 究 期 間	平成 8 年度 ~ 平成 12 年度まで 継続見込		関連する国際 共同研究課題 及び実施機関	該当せず		
関 連 す る 解 析 コ ー ド	該当せず		関連する特別会計 実 証 試 験	該当せず		
【成果の達成レベル】						
<p>1. 日本に分布する代表的な土壌を採取し、土壌の物理・化学的性状と核種の土壤粒子への収着挙動との関連を、トレーサ試験の結果を基に解析し、所期の成果を得た。</p> <p>2. 酸性雨による土壌の酸性化に伴う核種の溶出挙動を、トレーサ試験の結果を基に解析し、所期の成果を得た。</p> <p>3. 海底堆積物試料を採取し、堆積物の物理・化学的性状と核種の土壤粒子への収着挙動との関連を、フィールドデータを基に解析し、所期の成果を得た。</p>						
【進捗状況（平成 8 年度）】						
<p>1. トレーサ試験の結果を基に、放射性核種の土壤粒子への収着機構を解析したところ、土壤の酸化・還元電位、有機物含有量、粒径分布等の物理・化学的性状が強く関与していることがわかった。</p> <p>2. 土壌の酸性化に伴う核種の溶出挙動は、核種の種類及び雨水の水素イオン濃度(pH)により大きく変動することがわかった。また、核種を添加してから溶出試験を行うまでの期間により溶出割合が大きく異なることがわかった。核種移行モデルを構築する上で、この期間は事故発生から最初の降雨までの期間に相当するため、降雨条件は影響評価に大きく影響を及ぼす因子であると推測された。</p> <p>3. トレーサ試験の結果を基に、放射性核種の海底堆積物粒子への収着機構を解析したところ、プルトニウム-239, 240については、粒径分布と核種濃度との相関が高く、収着には物理的要因が関与していることがわかった。</p>						
【使用主要施設】						
誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS) α 線スペクトロメータ 安全管理棟						
連絡先	〒 107 空03-3586-3311 東京都港区赤坂1-9-13 (三会堂ビル) 動力炉・核燃料開発事業団			所 属	安全部 安全管理課 〔氏名〕 課 長 金盛 正至	

【研究目的】

環境中における長半減期放射性物質の移行・挙動及びその変動要因について調査・検討し、長期影響評価のための線量当量評価上重要なパラメータを把握するとともに、蓄積等への影響について検討することにより、公衆の線量当量評価に資する。

【研究内容】

長半減期放射性物質の移行挙動を評価する上で、事故時の環境修復等にも関連して重要な経路である土壤環境に着目し、移行パラメータを取得するとともに、土壤性状と移行パラメータとの関連について解析・評価する。

また、沿岸海洋に放出された長半減期放射性物質について、表層での挙動、沈降・堆積後の海底環境での分布について調査するとともに、その変動に影響を及ぼす因子の解析・評価を行う。

【研究成果】

1. 土壌性状と収着挙動との関連

陸上環境における移行挙動及びその変動要因に関する調査として、日本国内に分布する代表的な 6 種類の土壤をサンプリングし、土壤性状と土壤粒子への核種の収着挙動との関連について、トレーサ試験（カラム法）により解析した。実験方法を図-1に、また、結果を表-1に示す。

実験の結果、テクネチウム-99(Tc-99)は、還元的雰囲気であると考えられる水田土への収着割合が高いことがわかった。この原因としては、Tc-99は還元的な雰囲気の下では化学形が 7 倍の TcO_7^- から 4 倍の TcO_4^- となるため van der waals 力により収着するものと推測される。また、褐色森林土のように有機物含有量の多い土壤へ収着しやすく、砂丘未熟土のように有機物含有量の少ない土壤へは収着し難いという結果が得られた。この理由としては、Tc-99は土壤中有機物と錯体を形成しやすいためであると推測される。

同様に、ブルトニウム-239, 240(Pu-239, 240)は土壤の粒径と相関が高く、粒子が細かい低地土系への収着割合が高かった。また、ネプツニウム-237(Np-237)はTc-99と同様に有機物含有量との相関が高かったが、土壤の酸化還元電位との相関は認められなかった。以上の結果から、Pu-239, 240の収着には物理的性状が、また、Np-237の収着には土壤中有機物との錯体形成が関与していることがわかった。

2. 酸性雨による核種の溶出

酸性雨による核種の溶出挙動をトレーサ試験（バッチ法）を基に解析した。実験方法を図-2に、また、結果を図-3に示す。実験の結果、Tc-99はセシウム-137(Cs-137)に比べ酸性雨による溶出割合が高く、また、pH 4 の模擬雨水の溶出割合は、pH 5 の実雨水よりも 10% から 30% 高くなった。この結果から、溶出挙動は核種及び雨水の pH により大きく変動し、特に pH の変化により化学形が変換する核種ほど変動が大きくなることがわかった。

また、核種を土壤に添加してから雨水と接触させるまでの期間 (Aging期間) を変化させたところ、期間が長くなるほど溶出割合が低くなることがわかった。この原因としては、土壤への収着の因子であると考えられる錯体形成や生物濃縮には、一般的の環境条件下では、ある程度の時間を要するためであると考えられる。

Aging期間は、事故発生後から最初の降雨までの期間に相当するため、核種移行モデルを構築する上で重要なパラメータとなるものと考えられる。

3. 海洋環境における核種の移行挙動

海洋環境における核種の移行挙動及びその変動要因に関する調査としては、海底堆積物試料を採取し、核種濃度と堆積物の性状との関連について解析した。その結果、Pu-239, 240濃度は陸上土壤環境と同様に堆積物の粒径と相関が高く、シルト分が多い堆積物の方が濃度が高いことがわかった。

なお、粒径は新たにレーザー法により測定し、粒状が真円形でない場合の補正係数についても試算した。

【公開資料】

- (1)石黒秀治、片桐裕実、森田重光、原子力基盤技術クロスオーバー研究会平成 8 年度報告
- (2)石黒秀治、片桐裕実、森田重光、原子力基盤技術クロスオーバー研究会最終報告書
- (3)森田重光、片桐裕実、渡辺均、赤津康夫、石黒秀治、Study on Distribution and Behavior of Long-lived Radionuclides in Surface Soil Environment, Proceedings of International Workshop on Improvement of Environmental Transfer Models and Parameters (1996)
- (4)森田重光、片桐裕実、渡辺均、赤津康夫、石黒秀治、Study on the Behavior of Technetium-99 in Soil Environment, Proceedings of IRPA96' (1996)
- (5)森田重光、片桐裕実、渡辺均、赤津康夫、石黒秀治、放射性核種の土壤環境における分布と挙動、日本原子力学会96年春の大会要旨集 (1996)
- (6)片桐裕実、森田重光、赤津康夫、石黒秀治、植物系への核種移行モデルに関する研究、原子力工業 6 月号 (1996)

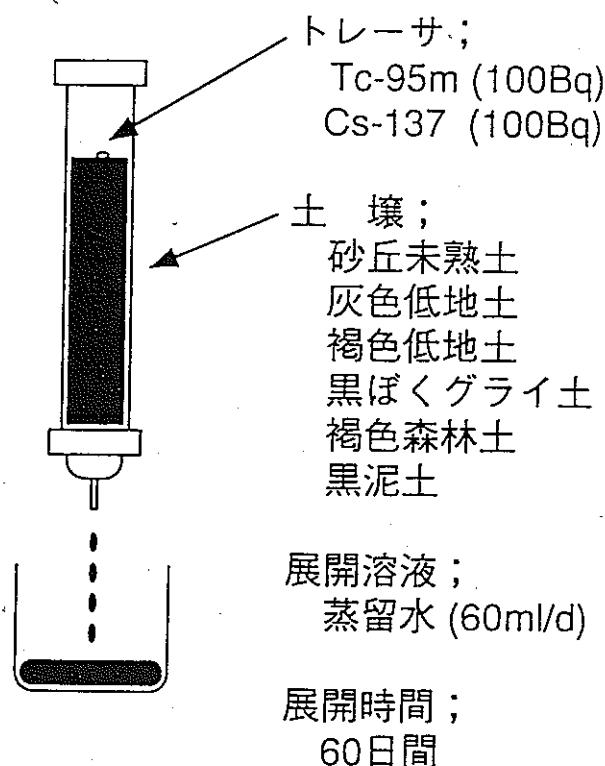


図-1 カラム法による吸着試験

表-1 表層下20mmまでの核種残存率

土壤種類	残存率 (%)	
	Tc-95m	Cs-137
砂丘未熟土	54	64
灰色低地土 (水田)	95	85
褐色低地土	78	84
黒ぼくグライ土	71	98
褐色森林土	87	98
黒泥土 (水田)	98	91

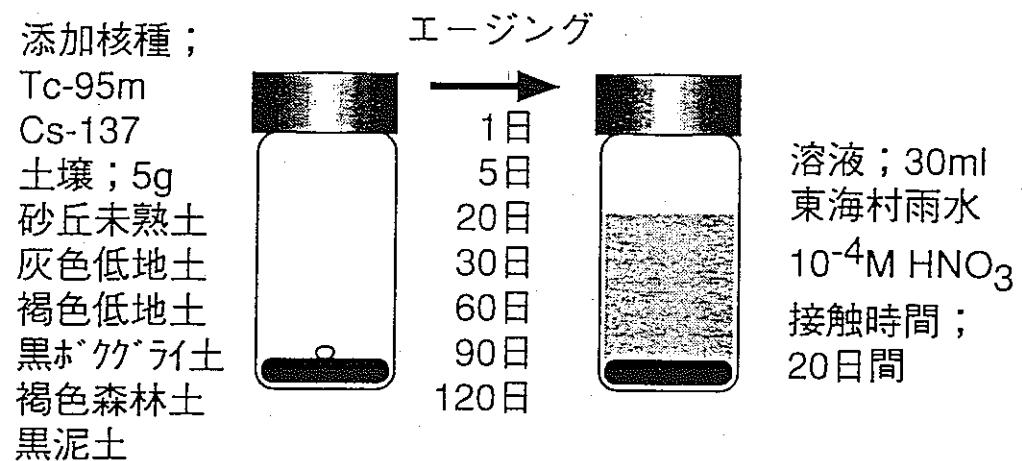


図-2 バッチ法による溶出試験

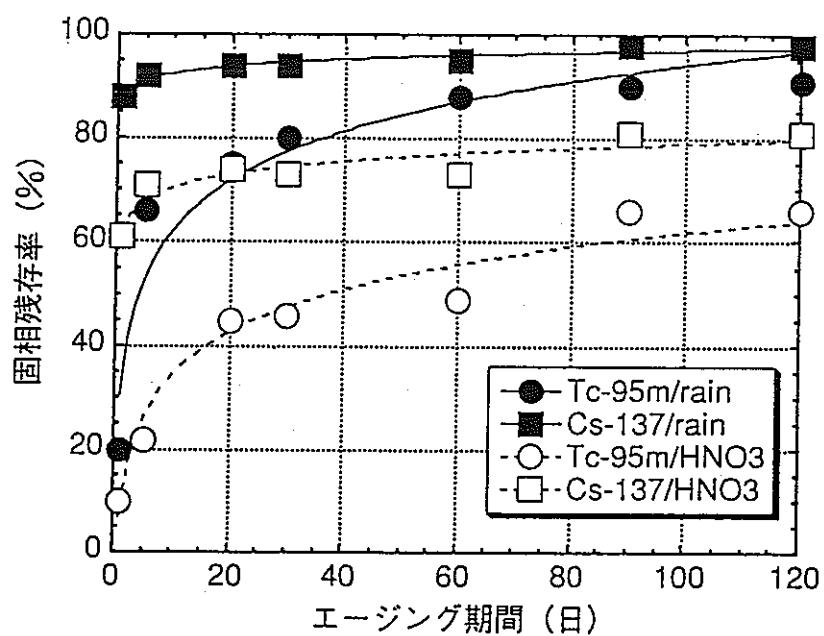


図-3 エージングによる固相残存率の変化

安 全 研 究 年 次 計 画 登 録 研 究 課 題	湖沼環境被ばく評価モデルの開発			分類番号 I. [3-4] - (16) -
実 施 研 究 課 題 (Title)	湖沼環境被ばく評価モデルの開発 Development of a transfer model of fallout nuclides in lake ecosystem			
実 施 機 関 (Organization)	動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation : P N C)			
研究者名及び所属 (Name / Affiliation)	圓尾好宏 大洗工学センター 安全管理部 Yoshihiro MARUO / Health and Safety Division, O-arai Engineering Center			
キーワード Key Word	湖沼環境 lake ecosystem	移行モデル transfer model		
研 究 期 間	平成8年度～平成10年度まで 継続見込	関連する国際 共同研究課題 及び実施機関	該当せず	
関連する 解 析 コ ー ド	該当せず	関連する特別会計 実 証 試 験	該当せず	
【成果の達成レベル】				
<p>1. 実湖沼環境調査 湖沼の湖底堆積物、魚介類中の放射性核種、湖水中の浮遊固形物質等の分析を行い、湖沼に降下する放射性核種の移行挙動について知見を得た。</p> <p>2. 動的移行モデルの開発 実湖沼環境調査結果、流域から湖沼への流入、湖水中及び堆積物中での移行を考慮し、動的移行モデルの基本構造について見通しを得た。</p>				
【進捗状況(平成8年度)】				
<p>1. 実湖沼環境調査 湖沼の湖底堆積物の採取及びCs-137等の分析を行い、核種の経年的な移行挙動を調査した。Cs-137は降雨時には流域から湖沼上流部に供給され中央部、下流部に移行する。また、降雨時には湖水の流出量も増加するので下流部での湖底からのCs-137の流入と流出を同時に起こし、湖沼中央部における濃度は、ほぼ一定で平衡状態にあることが分かった。</p> <p>2. 動的移行モデルの開発 湖沼の地理的条件に基づき、湖水及び堆積物を上流部、中央部、下流部に区分した。湖水については、水温の観測結果から、表層水と底層水の混合が十分であると推察されたため、深度方向の区分はしないことにした。堆積物は、湖水の流動の影響を受けやすい表層と受けにくい深層の二つのコンパートメントに区分した。コンパートメント間の核種の移行については、種々のパラメータを考慮し、フォールアウト核種の移行モデルを構築した。 このモデルについて、降雨強度等のパラメータを変動させ、湖水中のCs-137濃度の検討計算を実施した結果、降雨時に想定される湖水中濃度の変動がモデル上に表現できることが分かった。</p>				
【使用主要施設】				
大洗工学センター 安全管理棟				
連絡先	〒107 東京都港区赤坂1-9-13 (三会堂ビル) 動力炉・核燃料開発事業団		(所 属)	安全部安全管理課
			(氏 名)	課長 金盛 正至

【研究目的】

原子力施設災害時の放射性物質異常放出に伴い、集積・蓄積しやすい湖沼環境中における放射性物質の濃度変化予測を検討し、評価モデルを開発することにより、緊急時モニタリング計画の立案に資する。

【研究内容】

湖沼等の実際の湖沼系における湖水、湖底堆積物、魚介類中の放射性核種、湖水中の浮遊固体物質、塩分量等を観測し、核種の移行挙動を調査するとともに、湖沼及び流入河川における流向・流速、降雨量等の水文・水理学的データを収集する。また、上記の結果等に基づき、モデルの基本的構造、パラメータの種類を検討し、放射性核種の流域不均一降下等を考慮した実用レベルの動的移行モデルを構築する。さらに、モデルの汎用性を向上させるため、複数核種の同時評価等適用範囲の拡張について検討する。

【研究成果】

1. 実湖沼環境調査

湖沼等の実際の湖沼系における湖水、湖底堆積物中の放射性核種、湖水中の浮遊固体物質、塩分量等を観測し、核種の移行挙動等を調査した。試料採取場所を図1に示す。

湖水中のCs-137濃度は検出限界(約2 Bq/m³)未満であった。湖水中のSr-90は4~7 Bq/m³の濃度分布を示し上流部から中央部にかけて高く下流側が低い傾向があった。湖水中のCs-137濃度、浮遊固体物質(SS)濃度及び塩素量の三者を比較すると、Cs-137濃度の分布は、表層部が下流側にいくほど高くなるのに対して、底層部は中央部が高くなるというSS濃度の分布に近いことが分かった。

湖底堆積物中のCs-137とPu-239, 240は変動傾向が近似しているのに対してSr-90は異なっていた。Sr-90及びPu-239, 240とCs-137濃度の相関をとるとCs-137濃度とPu-239, 240濃度は良い相関を示した。

この他、各年の水域毎の濃度変動を降雨量との関係で解析した結果、Cs-137は降雨時に流域から湖沼上流部に供給され中央部、下流部に移行していくと考えられた。また、降雨時には湖水の流出量も増加するので下流部での湖底からのCs-137の再浮遊が活発となり、湖沼からの排出も促進される。この結果、降雨は湖沼へのCs-137の流入と流出を同時に起こすことが分かった。

2. 動的移行モデルの開発

実湖沼環境調査結果等に基づき、核種移行モデルの基本構造を検討した。

湖沼の地理的条件に基づき湖水及び堆積物を上流部、中央部、下流部に区分し、堆積物は、湖水の流動の影響を受けやすい表層と受けにくい深層に区分した。各部は単一コンパートメントで表しコンパートメント間の核種の移行については、①流域及び湖面への直接沈着、②流域からの流達、③流域土壤中での放射性崩壊、④流域土壤から深層への地中移行、⑤湖水中の沈降、⑥湖水中での放射性崩壊、⑦堆積物から湖水への再浮遊及び掃流、⑧堆積物中の放射性崩壊、⑨表層堆積物から深層への地中移行、⑩海の干涸に伴う湖水の流出及び逆流等を考慮した。図2にファールアウト核種の移行モデル及びコンパートメント間の收支を示す。

構築したモデルの特性を評価するため、実環境において環境因子に鋭敏に変動すると予想される、湖水中のCs-137濃度を指標として、(1)降雨時における流域からの放射性核種の流入、(2)湖水中の不溶解性放射性核種の湖底への沈降及び(3)底泥の舞い上がりに伴う不溶解性放射性核種の再浮遊に係るパラメータを変動させ、湖水中のCs-137濃度の検討計算を実施した。

(1) 降雨時における流域からの放射性核種の流入

湖水中濃度がほぼ一定に推移するようにCs-137の日降下量を一定($5 \times 10^5 \text{Bq}/\text{km}^2$)に設定し、ほぼ安定した計算開始30日後に200mm/dの降雨を発生させた。その時の湖沼各位置における湖水中Cs-137濃度の変動を図3に示す。降雨中は、湖面への直接降水の影響で濃度が一次的に低下するが、その後流域から湖沼への流入により、特に上流部における濃度が上昇した。

また、流域からの流達式 $f_d = k_c Q^b$ のb値を1.0~3.0に変化させ、1986年3月から10月までのCs-137の日降下量及び日降雨強度(R24)の観測値を入力し湖水中Cs-137の全平均濃度(C_{wt})を計算した。その結果を図4に示す。198mm/dの降雨が観測された8月1日にはb値が大きいほど流域からの流達量が増え、湖水中Cs-137濃度が上昇した。これらの解析から流域から湖沼への移行に及ぼす降雨の効果がモデル上に表現できることが分かった。

(2) 湖水中の不溶解性放射性核種の湖底への沈降

湖底への不溶解性放射性核種の沈降速度(Vg)を変化させ、1986年3月から10月までのCs-137の日降下量及び日降雨強度(R24)の観測値を入力しC_{wt}を計算した。その結果を図5に示す。C_{wt}は、Vgが小さくなる程高くなつた。特に、Vgが小さいほど濃度上昇後の減少に時間が掛かる傾向等が表現できた。

(3) 底泥の舞い上がりに伴う不溶解性放射性核種の再浮遊

Cs-137の日降下量を一定($5 \times 10^5 \text{Bq}/\text{km}^2$)とし、計算開始30日目に200mm/dの降雨を発生させ、単位面積当たりの底泥舞い上がり速度(a1)を変化させた場合の下流部湖水中Cs-137(C_{w3})の変動を計算した。計算結果を図6に示す。a1が0.0018g/m²/s及び0.018g/m²/sでは、降雨に伴うC_{w3}の上昇は見られず逆に降雨による希釈効果により濃度が低下した。0.18 g/m²/sでは、湖面降水と流域からの流入の両者に起因する湖水流量率の増加に伴うC_{w3}の二度の上昇が計算された。この二度目の上昇は、流域に降った雨水が湖沼に到達するまでの時間的遅れによるものと考えられる。

上記のとおり、降雨の影響について、(1)流域からの放射性核種の流入、(2)湖水中の放射性核種の不溶解性成分の湖底への沈降、(3)底泥の舞い上がりに伴う不溶解性成分の再浮遊等について検討し、降雨時に想定される湖水中濃度の変動を表現できるモデルの基本的な構造を構築した。

【公開資料】

- (1) 武石稔、中島尚子；湖沼系におけるフォールアウト核種の動的移行モデルに関する研究、日本保健物理学会誌、Vol. 32, 1997

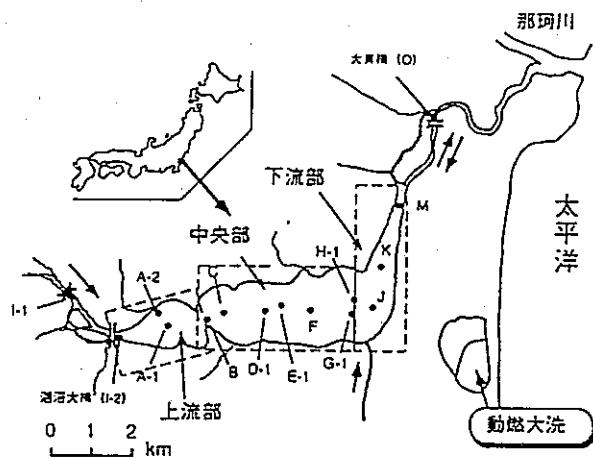


図-1 洞沼の形状及び湖底堆積物採取地点

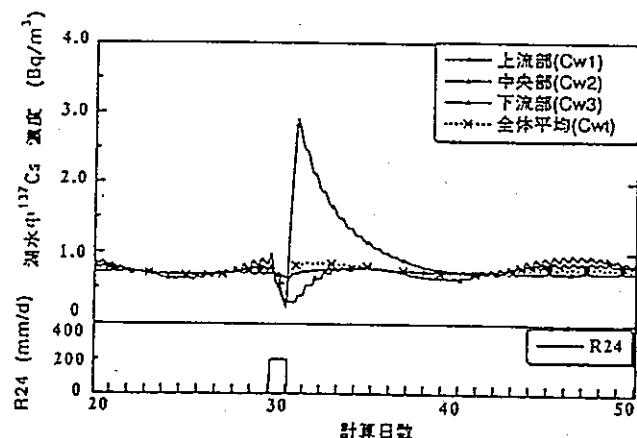


図3 降雨強度(R24)が湖水中Cs-137濃度に及ぼす影響

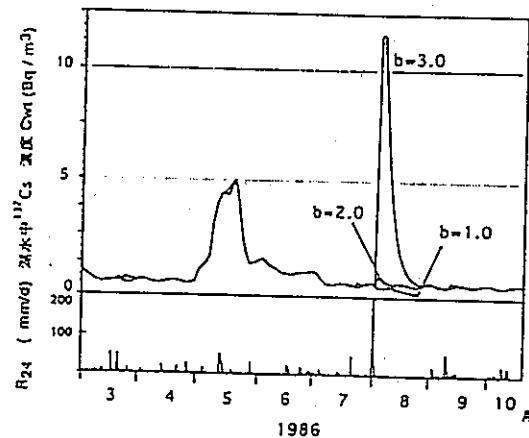
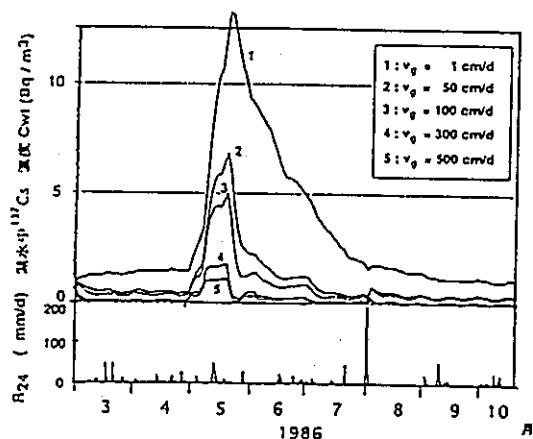
図4 流域からの流達式($fd = kc_0^b$)における b が湖水中Cs-137濃度に及ぼす影響

図5 湖水中不溶性Cs-137の沈降速度(Vg)が湖水中Cs-137濃度に及ぼす影響

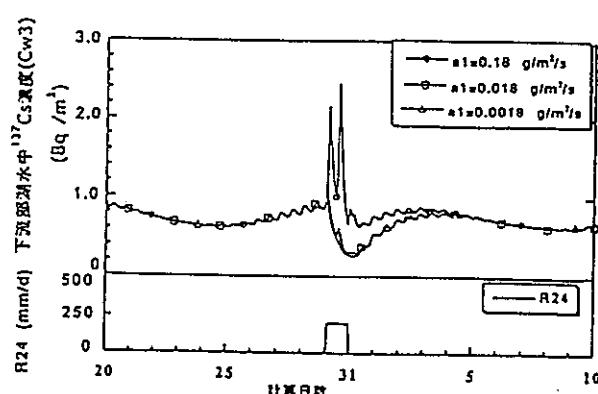
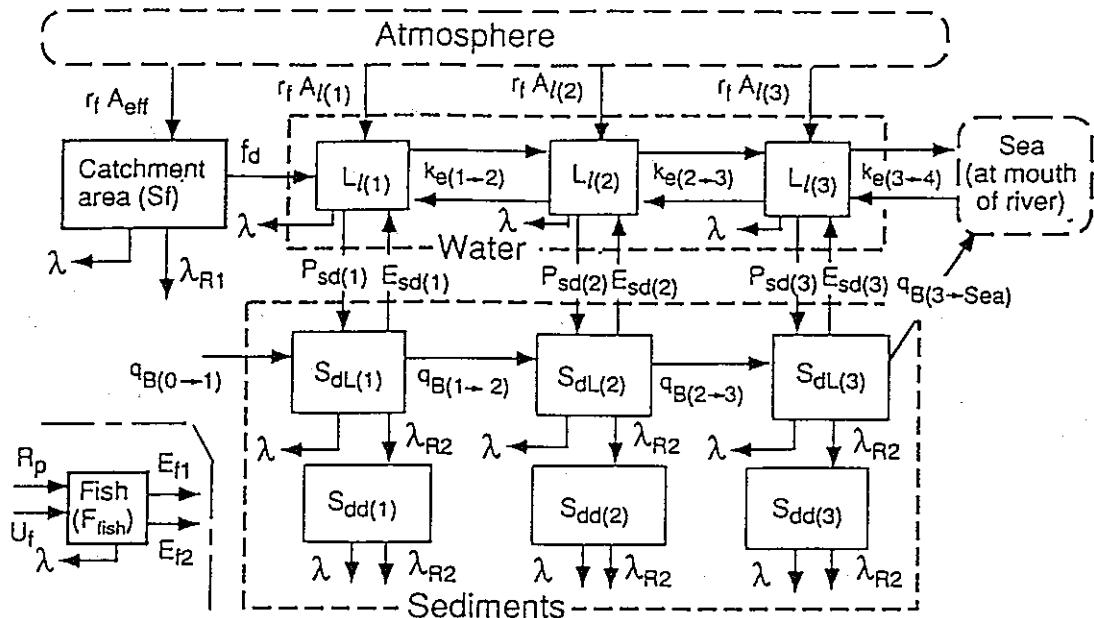


図6 底泥の巻き上げ足と(al)が下流部の湖水中Cs-137濃度に及ぼす影響



コンパートメント間の収支は以下のとおり。

$$(dS_f/dt) = r_f A_{eff} - f_d S_f - \lambda_{R1} S_f - \lambda_{R2} S_f \quad (①\text{流域土壤中のCs-137の収支})$$

$$(dL_{I(i)}/dt) = r_f A_{I(i)} + f_d S_f - k_e(i \rightarrow i+1) - P_{sd(i)} - E_{sd(i)} - \lambda L_{I(i)} \quad (②\text{湖水 i 水域のCs-137の収支})$$

$$(f_d(i \neq 1) = 0)$$

$$(dS_{dL(i)}/dt) = P_{sd(i)} - E_{sd(i)} + q_B(i \rightarrow i+1) - q_B(i+1 \rightarrow i) - \lambda_{R2} S_{dL(i)} - \lambda S_{dL(i)} \quad (③\text{表層湖底堆積物 i のCs-137の収支})$$

$$(dS_{dd(i)}/dt) = \lambda_{R2} S_{dL(i)} - \lambda_{R2} S_{dd(i)} \quad (④\text{深層湖底堆積物 i のCs-137の収支})$$

$$(dF_{fish}/dt) = U_f + R_p - E_{f1} - E_{f2} - \lambda F_{fish} \quad (⑤\text{魚中のCs-137の収支})$$

各記号の意味は以下のとおり。

A_{eff} : 有効流域面積 (km^2)

$A_{I(i)}$: 流水域 i の面積 (km^2)

$E_{sd(i)}$: 湖底 i からの再浮遊フラックス (Bq/y)

f_d : Cs-137 の流達係数 ($1/y$)

$k_e(i \rightarrow i+1)$: Cs-137 の湖水 i から $i+1$ への移行フラックス (Bq/y)

$L_{I(i)}$: 湖水 i の Cs-137 量 (Bq)

$P_{sd(i)}$: 流水域 i からの Cs-137 の湖底沈着フラックス (Bq/y)

$q_B(i \rightarrow i+1), q_B(i+1 \rightarrow i)$: Cs-137 の堆積物 i から $i+1$ 及び $i-1$ から i への揚流フラックス (Bq/y)

r_f : Cs-137 の年降下量 ($Bq/km^2/y$)

S_f : 流域の Cs-137 の量 (Bq)

$S_{dL(i)}, S_{dd(i)}$: 表層及び深層湖底堆積物 i の Cs-137 量

λ : Cs-137 の崩壊定数 ($1/y$)

λ_{R1} : 流域土壤の地中移行定数 ($1/y$)

λ_{R2} : 表層堆積物の地中移行定数 ($1/y$)

U_f : 魚体の Cs-137 の経口移行フラックス (Bq/y)

R_p : 魚体の Cs-137 のエラ移行フラックス (Bq/y)

E_{f1}, E_{f2} : Cs-137 の魚体からの短期及び長期排泄フラックス (Bq/y)

F_{fish} : 魚体中 Cs-137 量 (Bq)

図2 フォールアウト核種の移行モデル

安 全 研 究 年 次 計 画 登 録 研 究 課 題	地球規模の広域拡散評価手法に関する研究			分類番号 1. [5] - (2) -
実 施 研 究 課 題 (Title)	地球規模の広域拡散評価手法に関する研究 (Study on the Assessment for Global Dispersion of Released Radionuclides)			
実 施 機 関 (Organization)	動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation : P N C)			
研究者名及び所属 (Name / Affiliation)	森田 重光 (Shigemitsu MORITA), 中野 政尚 (Masamao NAKANO) 東海事業所安全管理部 (Tokai Works, Health and Safety Division)			
キーワード Key Word	リスク評価 risk assessment	ライフサイクルアセスメント life cycle assessment	診断モデル diagnosis model	流速場 velocity field
研究期間	平成 8 年度 ~ 平成 12 年度まで 継続見込	関連する国際 共同研究課題 及び実施機関	該当せず	
関連する 解 析 コ ー ド	該当せず	関連する特別会計 実証試験	該当せず	
<p>【成果の達成レベル】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 広域海洋の流動評価方法について調査を行い、本研究に適した評価方法の決定について所期の成果を得た。 2. 広域海洋の流動評価コードの整備を行い、計算機による流速場の表現について所期の成果を得た。 3. 発電システムの健康及び環境影響を評価する手法を確立し、核燃料サイクルと他の発電システムとの比較を行うため、ライフサイクルアセスメントについて、その評価手法の概要を取りまとめることにより、所期の成果を得た。 4. 総合評価を行うための基準化手法として、外部性コスト評価システムを確立するため、その評価手法の概要を取りまとめることにより、所期の成果を得た。 				
<p>【進捗状況（平成 8 年度）】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 広域海洋の流動評価方法に関する調査を行い、本研究に最も適した評価手法を決定した。 2. 広域海洋の流動評価コードの整備を開始した。今年度は診断モデルによる流速場の評価を行った。 3. 発電システムにおけるリスクを、施設建設から解体までの広い範囲で補足することを目的に、ライフサイクルアセスメントの体系について整理し、問題点を摘出した。 4. 外部性コスト評価システムのフレームワークを設定した。 				
<p>【使用主要施設】</p> <p>なし</p>				
連絡先	〒 107 東京都港区赤坂 1-9-13 (三会堂ビル) 動力炉・核燃料開発事業団		[所 属] 安全部 安全管理課	[氏 名] 課長 金盛 正至

【研究目的】

核燃料サイクル施設の地球規模の総合的なリスク評価に資するため、広域拡散評価モデル及び集団線量評価モデルを開発する。

【研究内容】

大気及び海洋での拡散を正確に評価するため、広域にわたる流動・拡散モデル、輸送モデル等を開発し、被ばく経路等を考慮した集団線量当量評価手法の開発を行う。

【研究成果】

1. 広域海洋の流動評価方法に関する調査

評価方法には主に力学計算、インヴァース法、 β スパイラル法、数値シミュレーションがある。数値シミュレーションはさらに診断モデルと予報モデルに分かれ。各モデルはそれぞれに利点、欠点をもちあわせている。表1に各モデルの主な利点、欠点を示す。ある程度の精度で全地球規模の観測値が入手可能のこと、また、コンピュータの高速化により数値シミュレーションが行いやすくなった現状を考慮しつつ、より強くポテンシャル水温と塩分の観測結果に立脚し、現実海洋において放射性物質がどのように輸送されるかを検討する立場をとる場合には、診断モデルによる数値シミュレーションが最も望ましいという結論を得た。

2. 広域海洋の流動評価コードの整備

診断モデルによって流速場を評価するため、Sarmiento and Bryan(1982)によって提唱された頑丈な診断モデルを用いることにした。このモデルは運動方程式、連続の式、状態方程式及びポテンシャル水温、塩分の移流拡散式から構成されており、移流拡散式の α 値を変化させることにより、どの程度観測値を計算に反映させるかを指定できる。図1に支配方程式を示す。

温度、塩分の観測値にはLevitusの年平均データを、また、風応力の観測値にはHellerman and Rosensteinの年平均データを与えてモデルを駆動し、約55年の時間積分を行った。その結果、定常な流速場が得られた。図2に水深25mの流速場を示す。

モデル計算の結果、既に各測定機関より報告されている海流図とほぼ同等の流速場を得ることができ、モデルの妥当性を確認できた。

*頑丈な（モデル）：計算格子が大きい広域モデルに対し、広域モデルに合わない中規模渦による密度場を、平滑化を用いて内的に取り除くことによって非現実的な流れを抑えるモデルのこと。

*風応力の観測値：支配方程式には現れないが、海面の境界条件として与えている。

3. ライフサイクルアセスメントに関する調査

発電システムにおけるリスクを、施設建設から解体までの広い範囲で補足することを目的に、ライフサイクルアセスメント(LCA)の体系について整理し、適用に当たっての問題点を摘出した。

①目標設定

発電システムで評価すべき項目としては、地球温暖化の原因となるCO₂の排出が代表的であるが、その他にも表2に示すような環境負荷が考えられる。今後、評価対象とすべき環境負荷について重要度分類を行う必要がある。

②インベントリーアンalysis

インベントリーアンalysisでは、各プロセスにおける環境負荷を積み上げる。この際、どこまでの範囲を評価対象とするプロセスに含むかが問題となる。また、主製品以外に副製品が製造される場合は、環境負荷がダブルカウントにならないように環境負荷を分配する方法について検討する必要があることがわかった。

③インパクトアセスメント

環境影響は環境モデルにより評価すべきであるが、対象範囲が広いLCAの場合は、「環境負荷×定量化係数」の形で推定する。この健康影響を統一尺度で評価するための定量化係数は、大胆な仮定に基づいて算出されており、より現実的な評価を行うためには、定量化係数の見直しが必要であると考えられる。

4. 各発電システムの外部性評価に関する調査

健康影響及び環境影響は、その形態が多様であるため、総合評価を行うためには何らかの基準化が必要とされる。その一つがコスト評価であり、最近のエネルギーに関する環境リスク研究の多くは、外部性コスト*評価を目的としている。

今年度は、対象とする評価システムのフレームワークを設定した。

①対象地域

対象を日本に限定した場合、供給燃料は海外依存性が高いため、燃料供給までの段階における環境リスクは、供給国・地域によって発生することになる。この様に、発電システムで生じる環境リスクは、リスクソースの面から国内で閉じないものであり、また、環境影響現象としても、大気汚染物質の長距離輸送や、長半減期核種の地球規模拡散といった面から大規模スケールで捉えることとした。

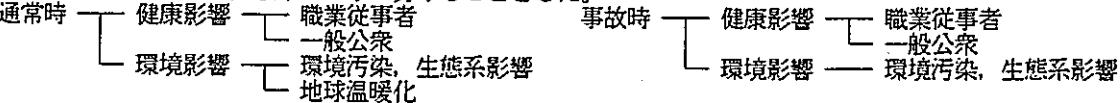
②リスクソース

発電システムの各プロセスで発生するリスクソースはシステム毎に異なるが、おおよそ以下のようにすることとした。

燃料採掘→燃料加工→燃料輸送→燃料貯蔵→発電→廃棄物管理・処理（施設建設、施設解体）

③評価項目

評価項目のカテゴリーは、以下のように分けることとした。



④評価尺度

環境影響評価を行う場合、以下の尺度が考えられるが、総合的な評価を行うためには、最終的な評価尺度を統一する必要がある。以下に総合的な環境影響評価を行うために経済損失を評価尺度とする場合のプロセスについて示す。

健康リスク

発電量当たり死亡リスク
発電量当たり寿命短縮

環境影響

発電量当たり環境汚染
発電量当たり地球温暖化寄与

貨幣換算

発電量当たりの経済損失(¥/GWh)

*外部性コスト：社会的な保障機構等により相殺されないリスク及び便益に対するコストのこと。

表1 各計算モデルの利点と欠点

モデル	利 点	欠 点
力学計算	黒潮のように流れの場が時間的に大きく変化しない場合に有効。	風応力が作る順圧成分は別に計算して加えなければならない。
インヴァース法	観測線が多い北大西洋、北太平洋などの場所で有効。	全地球規模では観測が少ないため使えない。
β スパイラル法	同上。	インヴァース法よりさらに高精度のデータが必要。
数値シミュレーション (診断モデル)	頑丈な診断モデルは平滑化によりモデルと観測データの特性が一致しなくとも非現実的な流れを与えない。	観測密度場中の中規模現象は非現実的な流れを与えることがある。
数値シミュレーション (予報モデル)	観測データが不要。	定常に達するまでに莫大な計算時間が必要。水温・塩分の観測値を再現できない。

表2 環境負荷の例

枯渴	汚染	ダメージ
非生物資源の枯渴	温室効果	直接的な人間の犠牲
生物資源の枯渴	オゾン層破壊 光化学オキシダント 酸性雨・酸性土壌 富栄養化 放射線 廃熱 臭気 騒音 作業環境悪化	間接的な人間の犠牲 砂漠化 生態系破壊 景観破壊

運動方程式

$$\frac{\partial U_H}{\partial t} + (U_H \cdot \nabla_H) U_H + W \frac{\partial U_H}{\partial Z} + \left(t + \frac{U \tan \phi}{R} \right) z \times U_H = - \frac{1}{\rho_0} \nabla_H P$$

$$+ A_H \left\{ \nabla_H^2 U_H + \frac{1 - \tan^2 \phi}{R^2} U_H + \frac{2 \sin \phi}{R^2 \cos^2 \phi} z \times \frac{\partial U_H}{\partial \lambda} \right\} + A_V \frac{\partial^2 U_H}{\partial Z^2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = - \rho g$$

連続の式

$$\nabla_H \cdot U_H + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0$$

海水の状態方程式

$$\rho = F(\theta, S, P)$$

水温・塩分移流拡散式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (U_H \cdot \nabla_H) \theta + W \frac{\partial \theta}{\partial Z} = K_H \nabla_H^2 \theta + K_V \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} + \gamma (\theta^* - \theta)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (U_H \cdot \nabla_H) S + W \frac{\partial S}{\partial Z} = K_H \nabla_H^2 S + K_V \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} + \gamma (S^* - S)$$

λ	: 経度
ϕ	: 紋度
Z	: 高度
U_H	: 水平流速ベクトル
W	: Z 方向流速成分
θ	: ポテンシャル水温
S	: ポテンシャル塩分
t	: 時間
P	: 圧力
ρ	: 海水密度
f	: コリオリ係数
R	: 地球半径
g	: 重力加速度
ρ_0	: 平均海水密度
A_H	: 水平渦混合係数
A_V	: 鉛直渦混合係数
K_H	: 水平渦拡散係数
K_V	: 鉛直渦拡散係数
θ^*	: Levitusの水温観測値
S^*	: Levitusの塩分観測値
γ	: 復元時間の逆数

図1 頑丈な診断モデルの支配方程式

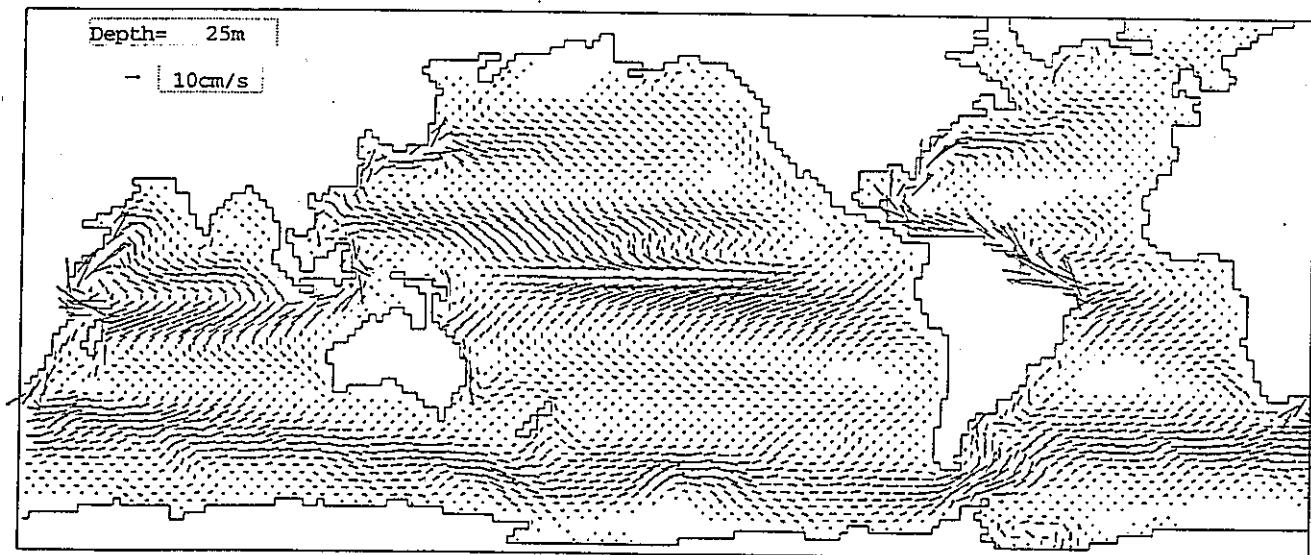


図2 水平流速分布（水深25m）

安全研究年次計画登録研究課題	放射性物質の環境影響評価手法に関する研究			分類番号 1. [5] - (3) -
実施研究課題 (Title)	放射性物質の環境影響評価手法に関する研究 (Study on Assessment for Environmental Influence at Accidental Release)			
実施機関 (Organization)	動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation : P N C)			
研究者名及び所属 (Name / Affiliation)	中野 政尚 (Masanao NAKANO), 植頭 康裕 (Yasuhiro UEZU) 東海事業所安全管理部 (Health and Safety Division, Tokai Works)			
キーワード Key Word	移行モデル transfer model	移行パラメータ transfer parameter		
研究期間	平成8年度～平成12年度まで 継続見込	関連する国際共同研究課題及び実施機関	該当せず	
関連する解析コード	該当せず	関連する特別会計実証試験	該当せず	
【成果の達成レベル】 植物の成長段階等の時間的変動を考慮した評価モデルを構築・整備するとともに、モデルの評価精度を左右する動的パラメータの調査・検討を行い、生態系の放射性物質の汚染状況変化等の環境影響評価について所期の成果を得た。				
【進捗状況（平成8年度）】 日本のフィールドへの適用を念頭に葉菜モデルの高度化を図った。葉菜・土壌への放射性物質沈着時期の差異により可食部への取り込み率が異なると思われるため、各移行パラメータが時間依存で変化するモデルとした。 本モデルにおけるパラメータとして、物質収支の1つである土壌沈着後の放射性物質 (¹³⁷ Cs, ¹²⁵ I) の植物への移行に関する基礎情報を取得した。 地表面に沈着した放射性核種 (¹³⁷ Cs, ¹²⁵ I) の垂直方向への移行に関する基礎情報を取得した。				
【使用主要施設】 なし				
連絡先	〒107 東京都港区赤坂1-9-13 (三会堂ビル) 動力炉・核燃料開発事業団	〔所属〕 安全部 安全管理課 〔氏名〕 課長 金盛 正至		

【研究目的】

生態系の放射性物質の汚染状況変化等の環境影響評価を行うために、植物環境での成長段階等の時間的変化、土壌環境での水の移動特性等を考慮した環境影響評価モデルを整備する。

【研究内容】

植物の成長段階等の時間的変動を考慮した評価モデルを構築・整備するとともに、モデルの評価精度を左右する動的パラメータを調査・検討する。また、土壌環境での水及び物質の浸透・移行を評価するためのモデルを構築・整備する。

【研究成果】

1. 葉菜モデルの高度化

日本のフィールドでは、欧米のように牧草→畜産物摂取という経路よりも葉菜及び米を直接摂取する場合が多い事実から葉菜及び精米を主眼にモデルの再検討を進めていくこととし、今年度は葉菜モデルの高度化を行った。

高度化の内容

植物の生理活性上の観点から、葉菜・土壌への放射性物質沈着時期の差異により可食部への取り込み率が異なると予想される。そこで各移行パラメータが播種後の時間に依存することを考慮したモデルとした。

また、成長の初期段階に葉面への沈着があった場合、沈着した葉そのものは可食部にならず枯れ葉となることから枯れ葉コンパートメントを新たに附加した。さらに収穫時において枯れ葉、表面土壌及び耕作土壌は人為的に攪拌されることが多いことから、収穫時における土壌攪拌過程を考慮してモデルを作成した。

解析方法としては、詳細な評価が行える連立一次微分方程式を用いた方法（以下、「システム解析法」と言う。）と、ただ単に沈着量に移行係数〔収穫時濃度(Bq/m³) / 作物あるいは土壌への沈着量(Bq/m³)〕：成長による移行の変動が反映できるように一週間毎に値を設定）を乗じて収穫時濃度を求める方法（以下、「移行係数法」と言う。）の二方法を使用できるようモデルを作成した。

テストラン（システム解析法）

システム解析法のテストランを行った。計算条件として、播種は 6 月 10 日、沈着は 7 月 1 日で沈着量は I-131 が 1Bq/m³ とした。図 1 にその結果を示す。7 月 1 日に沈着した I-131 は物理的に減衰しながら可食部に取り込まれていく。8 月 4 日には葉菜の収穫によって、可食部、作物外部、非可食部がこの系から取り除かれる。さらに入人为的に表面土壌と土壌中層が攪拌されそれらは単位土壌重量あたりでは同じ濃度になる（土壌厚が異なるため、核種密度は同じではない）。さらに 9 月 1 日に第 2 回目の播種を行うと、土壌からの取り込みの時間変化が植物中濃度に反映される。

テストラン（移行係数法）

移行係数法のテストランの結果を表 1 に示す。成長段階が異なる葉菜及び土壌に放射性物質が沈着した場合、各コンパートメントへの収穫時移行率が異なる。

2. パラメータの取得実験関連

土壌から植物への移行率

パラメータの取得実験関連では、播種後 2 週間から 7 週間という成長段階の異なる時期に水戸土壌（軽粘土）に放射性核種 (¹³⁷Cs-CsCl, ¹²⁵I-NaI) を添加し、それぞれの土壌から植物への移行率を求めた結果、植物への移行率は $1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$ であり、さらに成長段階に左右されることもないことが分かった。このことから、土壌から植物への放射性核種の移行率は、短期間で成長を遂げる葉菜においては、その成長段階に影響を受けないといえる。

地表から垂直方向への移行速度

また、地表面に沈着した放射性核種 (¹³⁷Cs-CsCl, ¹²⁵I-NaI) の垂直方向への移行に関する実験においては、これまで幾つかの報告が出されているが、それらデータと日本の植物成育環境土壤との違いを把握する点から、内径 70mm、高さ 30mm の水戸土壌（軽粘土）を充填したカラムを 10 段重ね、東海村周辺の平均降水量に応じた蒸留水を加える実験を行った。その結果、図 2 に示すように展開後 6 週間では上部 0 ~ 30mm において、¹³⁷Cs が 97.1%，¹²⁵I が 96.7% 存在しており、特に上部 10mm においても ¹³⁷Cs が 90%，¹²⁵I が 89% 保持されていることがわかった。このことから土壌中の移行速度はかなり遅く、これまでの文献値と同様のものであった。

【公開資料】

- (1) 石黒秀治、赤津康夫、片桐裕実、森田重光 原子力基盤技術クロスオーバ研究平成 8 年度報告書

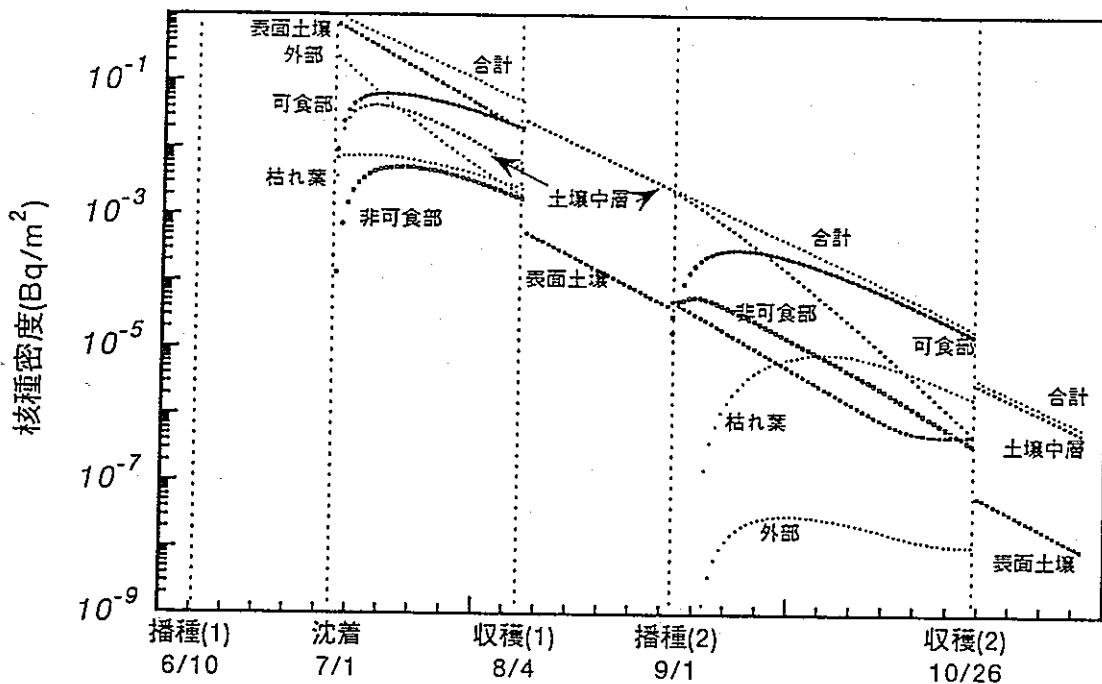


図1 各コンパートメント中I-131面密度
(システム解析法テ스트ラン)

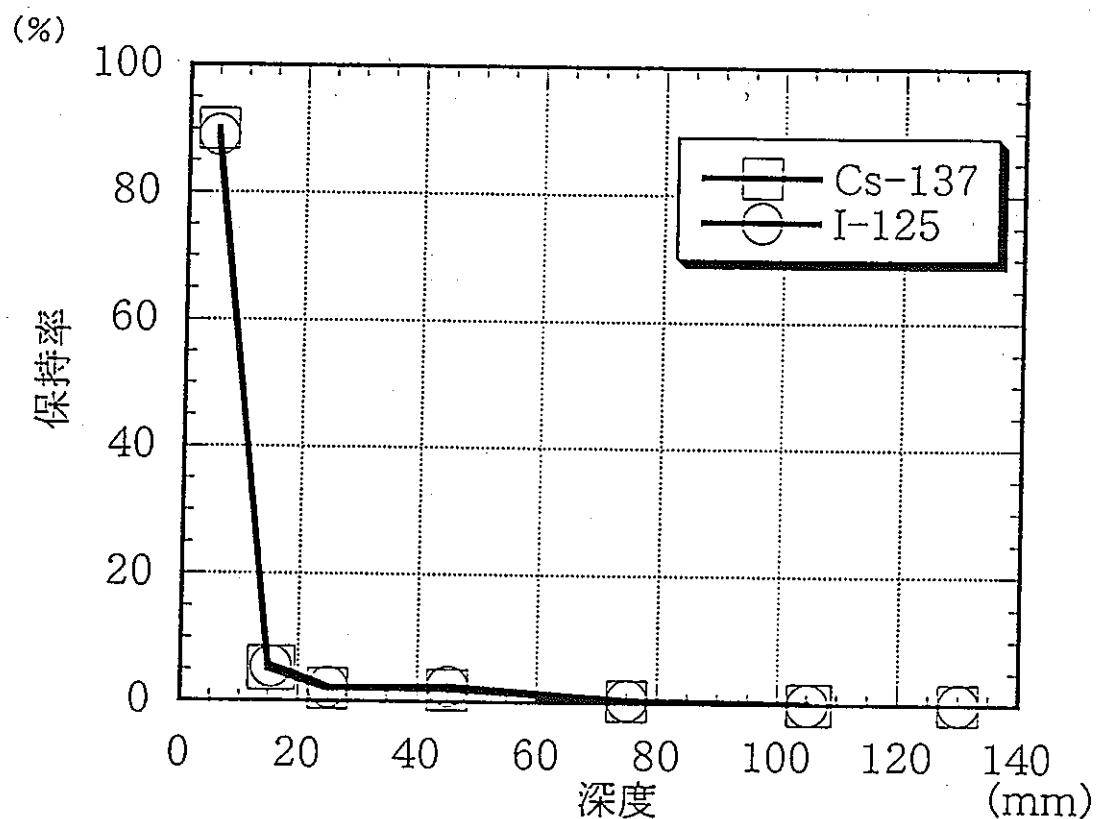


図2 土壤中における放射性核種の保持率

表1 播種日が異なる場合の放射性物質の収穫時核種存在割合
(移行係数法テストラン)

播種日		5月27日	6月10日	7月1日
曝露日		7月1日		
収穫時 核種 存在割合 (%)	作物外部	27	6.25	0
	可食部	36	41.3	50
	非可食部	3.8	4.75	5
	耕作土壌	33.2	47.8	45

収穫時核種存在割合
 = (収穫時における着目コンパートメント中濃度 ; Bq/m²) / (収穫時における全コンパートメント中濃度の合計 ; Bq/m²)

安全研究年次計画登録研究課題	長半減期核種の分析測定技術の高度化に関する研究				分類番号 1. [6] - (7) -
実施研究課題 (Title)	長半減期核種の分析測定技術の高度化に関する研究 (Study on advanced technique of analysis and measurements for long-lived radionuclides)				
実施機関 (Organization)	動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation : P N C)				
研究者名及び所属 (Name / Affiliation)	吉田美香 (Mika YOSHIDA), 植頭康裕 (Yasuhiro UEZU), 小堀直樹 (Naoki KOAKUTSU) 東海事業所安全管理部(Health and Safety Division, Tokai Works)				
キーワード Key Word	長半減期核種 long-lived radionuclide	分析 analysis	測定 measurement	誘導結合ガス質量分析装置 ICP-MS	マイクロ波誘導質量分析装置 MIP-MS
研究期間	平成 8 年度 ~ 平成 12 年度まで 継続見込	関連する国際 共同研究課題 及び実施機関	該当せず		
関連する 解析コード	該当せず	関連する特別会計 実証試験	該当せず		
<p>【成果の達成レベル】</p> <p>① ICP-MSを用いた定量法の高度化として、⁹⁰Tcの定量にキレート樹脂イオン交換法を用いた迅速化・簡略化分析法への環境試料への適応を検討した結果、Ruの除染係数および⁹⁰Tcの回収率に関する所期の成果を得た。 また、従来では測定が困難であった¹³⁵Cs の測定系にICP-MSが適用可能であることがわかった。</p> <p>② MIP-MSを用いた定量法の開発として、装置のイオン輸送系、質量分析系、イオン検出系を対象に各部位の設定値を検討し、¹²⁹Iを対象核種とした装置の最適測定条件について所期の成果を得た。 また、試料の内標準物質の選定を行い、MIP-MS測定における時間的信号強度の変化の補正法について所期の成果を得た。</p> <p>③ α/β弁別法を用いた²⁴¹Pu 測定法については、α線とβ線の弁別時の条件について所期の成果を得た。また、環境試料(水試料)中の⁶³Ni分析法については、試料の前処理、DMG法、塩酸系イオン交換について検討し、所期の成果を得た。</p>					
<p>【進捗状況(平成 8 年度)】</p> <p>① ICP-MSを用いた⁹⁰Tcの定量法の高度化として、マトリクスの複雑な試料に対しても適用できることができた。</p> <p>② MIP-MSを用いた定量法の開発として、¹²⁹Iを対象核種とした装置の最適測定条件及び信号強度の補正法について検討し、質量数129 領域の検出感度を相対的に向上させることができた。また、内標準物質としては¹⁰³Rh が最適であった。</p> <p>③ 放射化学分析法を用いた長半減期核種の定量法 α/β弁別法を用いた²⁴¹Pu 測定法について検討し、その結果、環境試料へ十分適用できることができた。 また、水試料中⁶³Ni分析法について、検出下限値1.9×10^{-3}Bq/cm³の分析法を確立した。</p>					
<p>【使用主要施設】</p> <p>安全管理棟管理区域 放射線測定室 安全管理棟東棟 超微量元素分析室</p>					
連絡先	〒 107 東京都港区赤坂 1-9-13 (三会堂ビル) 動力炉・核燃料開発事業団		[所属]	安全部 安全管理課 〔氏名〕課長 金盛 正至	

【研究目的】

従来の分析法では定量が困難または不可能である環境中における長半減期核種について、分析技術の開発及び高度化を図り、環境中における分布の調査及び移行挙動の解明等に活用する。

【研究内容】

誘導結合プラズマ及びマイクロ波導入プラズマ質量分析法の環境試料分析への適用の可能性を検討する。また、ネプツニウム-237等の定量法の迅速化及び高感度化を進めるとともに、環境試料中のプルトニウム-239, 240の同位体比測定法について検討する。

さらに、放射化学分析法を用いた環境モニタリング手法に係る分析測定技術の高度化及び超高感度測定法等による放射性核種の分離・精製並びに環境試料分析への適用の可能性を検討する。

【研究成果】

1. 誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)を用いた定量法の高度化

ICP-MSを用いた定量法の高度化として、¹³⁷Tcの定量にキレート樹脂イオン交換法を用いた迅速化・簡略化分析法への環境試料への適応を検討した結果、表1のように全体工程においてRuの除染係数が 4.5×10^3 、回収率が68%となり、除染係数においては120倍向上した。以上の検討により、マトリクスの複雑な土壌や有機試料に対しても十分対応できるものであることが分かった。

また、¹³⁵Csの測定法の検討として、ICP-MSによる測定について検討した結果、質量数135の領域にはバックグラウンドが存在せず、定量が可能であることが分かった。

2. マイクロ波導入プラズマ質量分析法(MIP-MS)を用いた定量法の開発

MIP-MSは、イオン化源、試料導入系、プラズマ系、輸送系、質量分析系及びイオン検出系から成り立っている。このうち、¹²⁹Iを対象とした最適測定条件の設定として、輸送系についてはトーチ位置及びイオンレンズ電圧、質量分析系については偏向電極電圧及び分解能係数、イオン検出系については検知器電圧を対象にその設定値を検討した。その結果、質量数129領域のバックグラウンドは、通常の設定値の場合より1/10に低減でき、相対的に検出感度を向上させることができた。

MIP-MS測定は時間的変動を伴うため、信号強度の補正法について検討した。補正法としては、試料に内標準物質を添加することとし、¹²⁹Iの内標準物質としての条件に当てはまると思われる5元素(Y, Rh, In, Cs, Mo)を対象とし、各元素の90分間の時間的信号強度の変化をヨウ素(¹²⁹I及び¹³¹I)と比較検討した。その結果、Y及びInについては測定開始後から60分までヨウ素と異なる挙動を示し、また、Csについては80分以降において若干の信号強度の低下が見られた。一方、Rh及びMoについては、終始ヨウ素と同様な挙動を示した。よって、内標準物質としてRh及びMoが適当と考えられ、このうち¹²⁹Iの質量数により近い¹⁰³Rhが最適であることが分かった。

3. 分析・測定技術の高度化

液体シンチレーションカウンタを用いた²⁴¹Pu測定法の高度化としての検討を行った結果、減衰時間の差によって α 線および β 線を弁別測定することで²⁴¹Puを定量できることが分かった。さらに表2に示すように様々な市販のシンチレータにおける性能指数を求めた結果、 α 線および β 線測定領域においてバックグラウンド、計数効率からDに波長シフタのナフタレンを添加したD'を用いることで α 線と β 線の干渉(スピルオーバー)を約1/2に減少させることができた。これらの結果から供試量200g、バックグラウンド4.0cpm、回収率65%、計数効率35%、測定時間500分での検出下限値は、 1.4×10^{-1} Bq/kg · dryとなり、既存法に比べ約2倍の感度上昇が認められた。

⁶³Ni分析法として従来クロロホルム抽出法が存在していたが、クロロホルムの有害性を考慮し、他の抽出剤であるジメチルグリオキシム(以下DMGと略す)を用いる方法を開発した。環境試料(水試料)中の⁶³Ni分析法として、図1に示す試料前処理法、塩酸系イオン交換法、DMG法を組み合わせた。その結果、供試料100ml、測定時間10分、回収率80%、B.G. 8cpm、計数効率52%の条件において検出下限値は 1.9×10^{-3} Bq/cm³となり既存法に比べ20倍の感度上昇が認められた。

【公開資料】

- (1) 吉田美香、渡辺均、片桐裕実、赤津康夫：“マイクロ波導入プラズマ質量分析装置の¹²⁹I測定への適用”，第38回環境放射能調査研究成果論文抄録集(平成7年度)，P124, 1996
- (2) 植頭康裕、宮河直人、片桐裕実、赤津康夫：“環境試料中の²⁴¹Pu分析法の開発”，第5回液体シンチレーション測定法による低レベル測定の国際シンポジウム要旨集，P123, 1996
- (3) 植頭康裕、宮河直人、片桐裕実、赤津康夫：“環境試料中の²⁴¹Pu分析法の開発”，動燃技報101号, 75-80, 1997.3.
- (4) 植頭康裕、森田重光、渡辺均、宮河直人、片桐裕実、赤津康夫：“土壤環境中におけるTc-99の挙動”，第32回保健物理学会予稿集，P85, 1996

表1 各抽出法における除染係数と回収率

A	B	C	D
除染係数 1.8×10 ⁰	2.1×10 ⁵	1.2×10 ²	4.5×10 ⁸
回収率 90%	83%	91%	68%

*締掛け部は今回検討を実施したもの

- A : 陰イオン交換樹脂
 B : シクロヘキサン抽出
 C : キレート樹脂
 D : 全体工程

表2 シンチレータ試験結果

Scintillator		Spillover (%)		Background (cpm)		Efficiency ^{*3} ³ H (%)	figure of merit ^{*4}	
		α	β	α ^{*1}	β ^{*2}		α	β
ナフタレン	A	4.28	3.64	0.3	4.6	20.9	3.1×10^{-4}	95
	B	3.18	3.84	0.1	5.1	31.5	9.4×10^{-4}	190
キシレン	C	11.82	12.35	0.3	4.3	32.0	2.6×10^{-4}	240
	D	12.00	12.38	0.2	3.4	35.4	3.9×10^{-4}	370
	D' ^{*5}	4.90	6.42	0.1	4.0	34.6	9.0×10^{-4}	300

※1 150~350keV

※2 A、C、D、D'は1.5~7.0keV、Bは1.5~7.5keV

※3 Pu-241の計数効率は、エネルギーの近いH-3にて計測

※4 figure of merit=Efficiency/Background

※5 D'はDにナフタレンを添加したもの

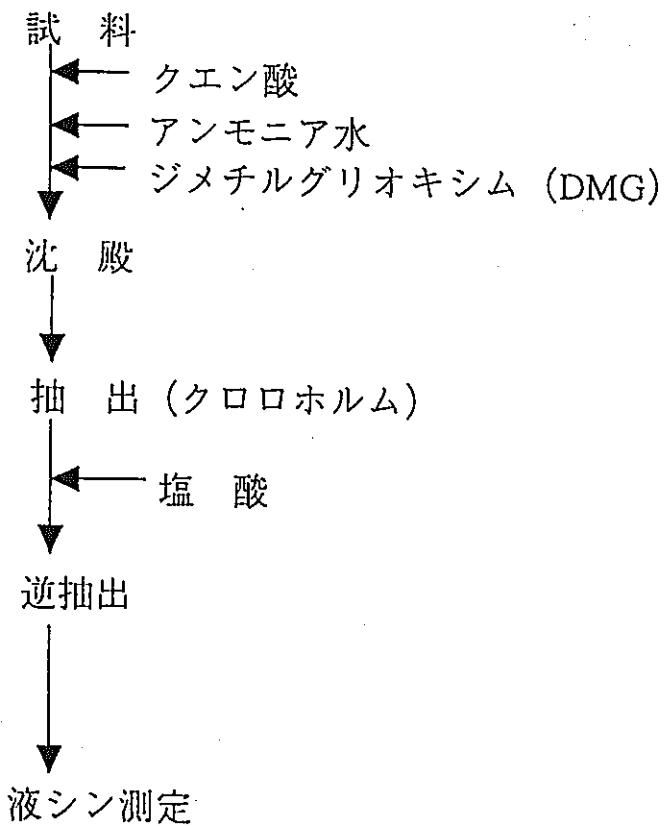
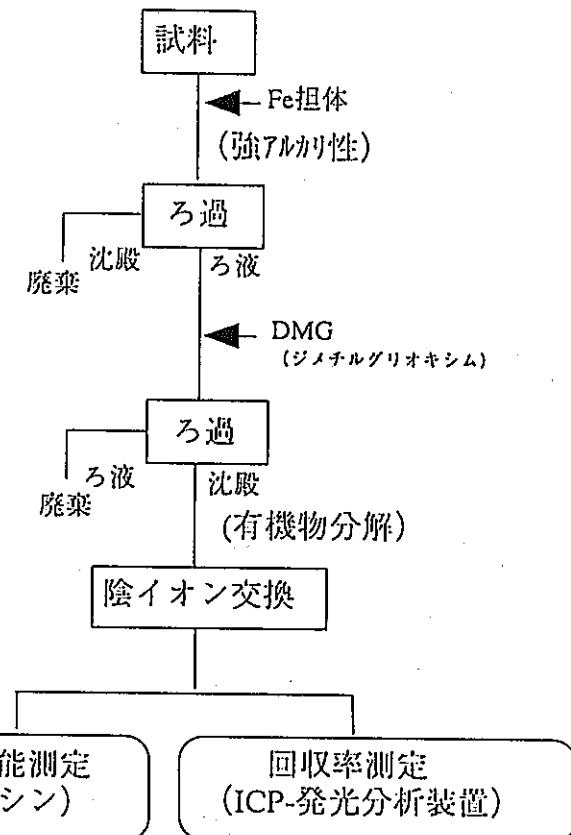
クロロホルム抽出法(従来法)DMG沈殿法

図1 Ni-63 分析フロー

安 全 研 究 年 次 計 画 登 録 研 究 課 題	内部被ばく線量測定評価法の高度化に関する研究			分類番号 1. [6] - (9) -
実 施 研 究 課 題 (Title)	内部被ばく線量測定評価法の高度化に関する研究 (Study on advanced techniques of internal dosimetry)			
実 施 機 関 (Organization)	動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation : P N C)			
研究者名及び所属 (Name / Affiliation)	東海事業所 安全管理部 (Hearth and Safty Division, Tokai Works) 篠原 邦彦 (Kunihiro SHINOHARA) 百瀬 琢磨 (Takumaro MOMOSE) 大塚 隆宏 (Takahiro OTSUKA)			
キーワード Key Word	プルトニウム Pu	肺モニタ lung monitor	呼吸気道モデル Respiratory model	EGS EGS
研究期間	平成 8 年度 ~ 平成 12 年度まで 継続見込		関連する国際 共同研究課題 及び実施機関	該当せず
関連する 解 析 コ ー ド	該当せず		関連する特別会計 実証試験	該当せず
<p>【成果の達成レベル】</p> <p>放射性核種を吸入摂取した場合の線量評価の高度化、迅速化を図るために、対外計測法及び線量計測法の改良に関する研究を行った。対外計測法については、ゲルマニウム半導体検出器を用いた高分解能肺モニタの開発とプルトニウム同位体比に基づく測定法の改良を行った結果、同位体比を用いることで、検出下限の低減が図れる見通しを得た。</p> <p>シミュレーション計算を利用した内部被ばく評価では、肺モニタ検出器をシミュレートするのに適した計算コードへの改良を行った。これにより、計算スピードが数倍に向上する成果が得られた。また、肺モニタの測定環境をコンピュータ上に模擬することが可能になり、個々人の体格データを用いれば、個々人に対応した内部被ばく評価が可能になる見通しを得た。</p>				
<p>【進捗状況(平成 8 年度)】</p> <p>ゲルマニウム肺モニタによる、プルトニウム及びアメリシウム線源の測定を行った。これは、プルトニウム、アメリシウムの同位体比を用いた評価法のための基礎データとなる。実験上では、プルトニウム、アメリシウムの特性 X 線の分離が可能であることが確認できた。</p> <p>C T データに基づき胸部の詳細な組織形状を考慮した肺モニタ検出効率の計算手法を開発中である。具体的には、低エネルギーの三次元 X 線撮影が今回の計算で一番重要なことから、この部分に焦点を当てた計算コードに改良することにより、計算速度の改善を図った。また、実験環境を正確にコンピュータ上に模擬するため、実験で使用するファントムを X 線 C T で断層撮影を行い、撮影結果をコンピュータ上で再現することにした。これを用いて単純なジオメトリでの実験を行い、シミュレーション計算との比較を行った。その結果、EGS4 コードにより肺モニタの測定環境がコンピュータ上に模擬できることが分かった。しかし、コンピュータ上に実験環境をシミュレートする時、C T データからコンピュータへの変換に時間を要すること、及び細かな構造も正確に模擬しないと実験結果に大きな影響を及ぼすことが判明した。</p>				
<p>【使用主要施設】</p> <p>動燃東海事業所 放射線保健室 ゲルマニウム型肺モニタ検出器 ワークステーション</p>				
連絡先	〒 107 東京都港区赤坂 1-9-13 (三会堂ビル) 東京都港区赤坂 1-9-13 (三会堂ビル) 動力炉・核燃料開発事業団		[所 属] 安全部 安全管理課	[氏 名] 課長 金盛 正至

【研究目的】

放射性核種を吸入摂取した場合の線量評価の高度化、迅速化を図るため、体外計測法及び線量評価法の改良に関する研究を行う。

【研究内容】

ゲルマニウム検出器等を用いた高分解能肺モニタの開発とプルトニウム同位体比に基づく測定への適用を行う。また、実験及び計算により計数効率の体格依存性を明らかにするとともに、超音波診断装置等による胸部厚測定に基づく計数効率補正法の開発を行う。

さらに、ICRP新呼吸気道モデル等体内の放射性物質の挙動に関する新しい知見に基づく内部被ばく線量評価法の改良とこれらの実務適用に関する研究を行う。

【研究成果】

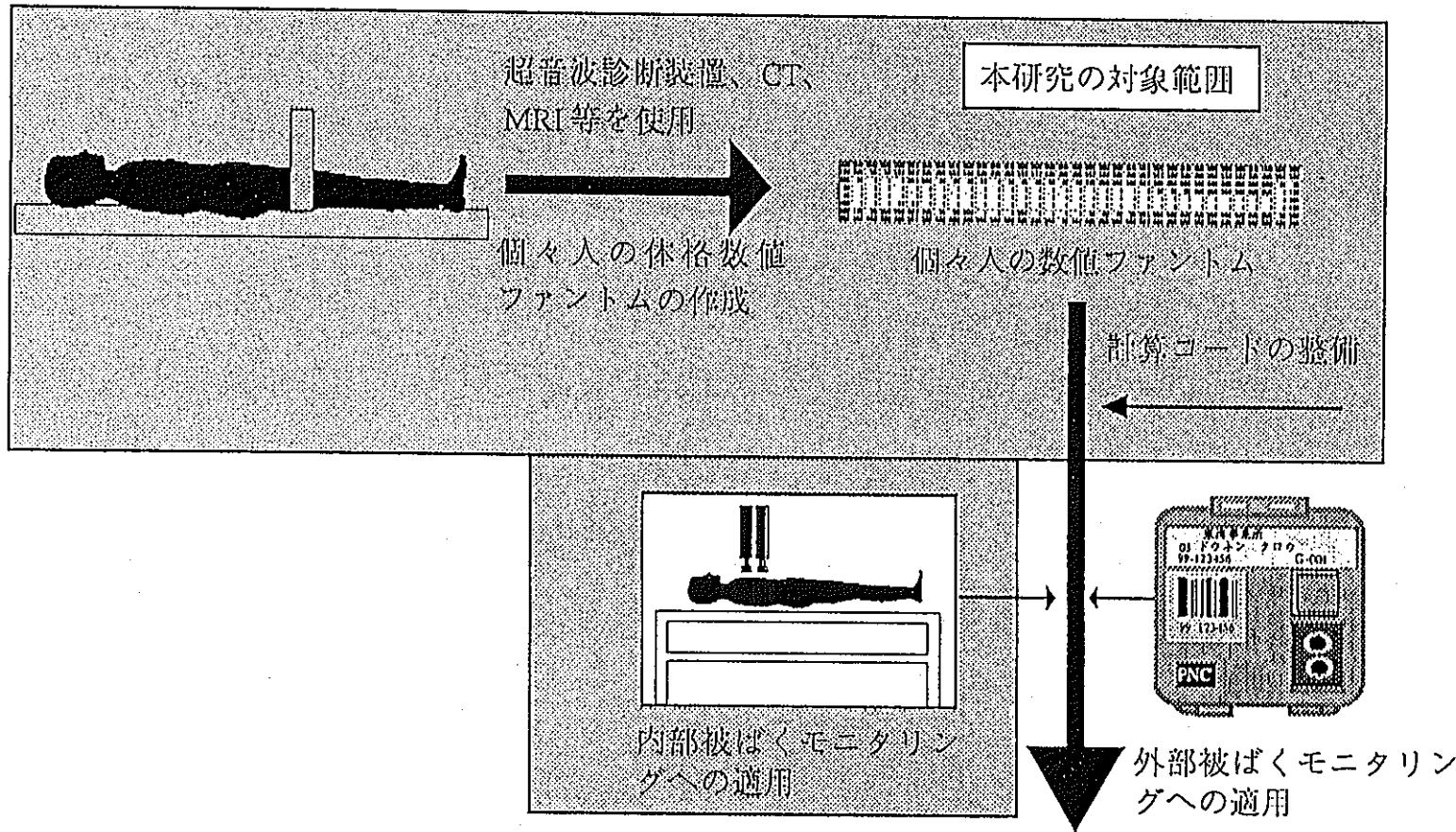
ゲルマニウム肺モニタによる、プルトニウム及びアメリシウム線源の同時測定を行った。ローレンスリバモアファントムを用いた肺モニタ検出器の測定結果では、アメリシウムの検出下限が数Bqであることが確認できた。これは、吸入摂取時に年摂取限度の数十分の1の吸入を検出できる量である。しかしながら、プルトニウムについては、検出下限が数百Bqと年摂取限度の吸入摂取の場合の検出が困難であることが分かった。ただし、実際の吸入摂取事故の場合には、プルトニウム単独の吸入摂取は考えがたく、アメリシウムからプルトニウムを推定することが可能である。推定方法として現在考えているのは、吸入摂取時に体外汚染した衣服などを測定し、プルトニウム及びアメリシウムの同位体比を測定する。その後、人体測定を行い2つのデータを使って吸入摂取したプルトニウム量を推定する。プルトニウム及びアメリシウム線源の同時測定実験では、特性X線の僅かなエネルギーの差を利用することで、短時間にプルトニウムの同位体比を推定することが可能であることが確認できた。

内部被ばく線量測定及び評価の高度化のため、シミュレーション計算を利用した評価法の開発を行うこととした。計算コードには、EGS4コードを利用し、評価モデルには、現在用いられている数学ファンтомに代わり物理形状をそのままコンピュータ上に取り込んだ数値ファンтомを利用する。本年度は、内部被ばく測定及び評価で一番重要となる肺モニタを模擬することとし、肺モニタ検出器や物理ファンтомを数値化しコンピュータ上に模擬する方法の検討を行った。また、シミュレーション計算に使う計算コードの改良を行った。

肺モニタをコンピュータ上に模擬して、計算コードを用いたシミュレーション計算をする場合、人体模擬として数学ファンтомを用いるのが一般的である。これは、数学ファンтомは、人体を数式で置き換えてコンピュータ上に模擬するもので、数式であるため、コンピュータの処理が早いことが利点である。しかしながら、数式で表されたファンтомは、可能なかぎり人体に近づくように工夫はされているものの、曲面の多い人体とは、異なった形をしている。そこで、体格を正確に模擬するため、数学ファンтомを用いずに、人体の形をそのままコンピュータ上に変換することを考えた。そのためには、人体形状を立体的に測定する必要があり、また、その測定データをコンピュータ上に変換する必要がある。人体形状を立体的に測定するに、医療などで用いられているX線CTやMRIを利用することとした。本年度の成果としては、図1の上部に示されている部分、CTデータをシミュレーション計算が可能な形に変換する方法を完成させた。これにより、CTデータさえあれば、どんな形のものもシミュレーション計算することが可能になった。また、物理ファンтомでは、肺中に均一分布させた線源しか測定できなかつたが、シミュレーション計算では、肺モデルや新呼吸気道モデルを用いて計算できるような、肺中の沈着部位に適切に線源を配置して計算することが可能となった。

次に、計算コードの改良であるが、複雑な人体形状をそのまま模擬したものを計算に利用するため、膨大な計算時間が必要となつた。そこで、計算時間の短縮のため、EGS4コードの改良を行うこととした。改良点としては、肺モニタに必要な低エネルギーのγ線の挙動に焦点を絞った計算コードへと改良することにより、計算精度を落とすことなく、高速化を図ることができた。この高速化により、改良前の数倍の速度で、計算することが可能になった。

【公開資料】
該当なし



被ばく線量測定時の体格依存性の補正

図1、個人数値ファントム作成システム概要