

はじめに

大型再処理施設放射能影響調査交付金の交付制度を活用した事業として、青森県等からの委託を受け、青森県全域を対象に環境放射線の線量率分布や放射性物質の分布・移行及びこの移行に及ぼす地域特性の影響を調べるとともに、低線量放射線の生物影響に関する調査研究を遂行した。また、六ヶ所村の大型再処理施設の本格稼働に向けて、更なるデータの蓄積と当該施設の異常放出等の事後対応の調査並びに社会的に関心の高いトリチウムの生体影響に関する調査研究を開始した。これまでの調査研究で得られた成果を含めて、原子力開発利用に伴う環境安全に関する正確な知識と情報を地域の人々に提供し、併せて、それらの普及啓発にも努めた。

さらに、専門家派遣や学生の受け入れ等による人材育成を支援するとともに、専門知識・技術を活用し、各種委員会等への参画、講演、一般からの問合せへの対応を行った。

事業の内容

I. 放射性物質等の環境影響等環境安全に関する調査研究

青森県からの受託調査研究事業として、以下のトリチウム生体影響、環境影響及び生物影響に関する調査研究を進めている。

トリチウムの生体影響に関する調査研究については、トリチウム摂取による内部被ばくへの社会的な関心の高まりに対応し、成人の代謝モデルを拡張することにより幼若期のヒトにおける代謝モデルを作成し、現実的な線量評価を行った。また、トリチウムの内部被ばくの不安に応えるため、重水素トレーサを用いたマウスのトリチウム投与実験の準備を進めた。(1.1節)

排出放射性物質の環境影響に関する調査研究については、六ヶ所村の大型再処理施設の本格稼働を見据えて、当該施設周辺環境における排出放射性核種 (^{85}Kr 、 ^3H 、 ^{14}C 及び ^{129}I 等)の濃度変動、蓄積及び食品・日常食中の放射性核種濃度に関するデータを取得するとともに、野外実験により放射性核種の移行実態及び環境要因が土壤中放射性核種の化学形態に与える影響を調査した。さらに、周辺地域における重要な農水産物中の放射性核種の移行及び残留性を明らかにするための実験を行った。加えて、取得した周辺環境及び食品・日常食における放射性核種濃度データから地域の実態に即した線量評価を行い、線量規制値やバックグラウンド線量と比較・検討した。また、六ヶ所村の大型再処理施設の方が一の異常放出時に環境中への放出が想定される放射性セシウム等を対象として、作物地上部における挙動、及び作物への移行低減に関するデータを取得した。(1.2節)

低線量率放射線による生物影響に関する調査研究については、低線量率放射線被ばく影響の実証調査研究を行い、子どもの被ばくの影響及び生活環境による被ばく影響の現れ方の違いを調べた。また、低線量率放射線被ばく影響の発現機序調査研究では、細胞の遺伝子発現制御システムへの影響及び生物個体の生理学的恒常性維持システムへの影響を調べた。(1.3節)

また、理解醸成・地域共創活動事業として、これまでに蓄積した調査の成果や関連する技術・知見、人材を活かすとともに、現実的な被ばく線量を評価できる総合モデルの検証・可視化等を進め、県民への調査研究成果の発信や排出放射性物質に関する理解醸成活動を行った。

上記の受託研究・事業に加え、六ヶ所村からの地域振興に係る受託調査に積極的に取組むとともに、研究領域の拡大や新たな調査研究の展開のために自主研究及び科研費等競争的研究資金による研究を行った

人材育成支援については、専門家派遣や学生実習の受入他、人材、施設・技術・知識等の提供、所内外との研究協力体制を整備し、事業の円滑・効率的な推進に努めた。

1. トリチウムの生体影響に関する調査研究

六ヶ所村の大型再処理施設から排出される主要な放射性物質であるトリチウムについて、全世代に適用できる内部被ばく線量評価、及び内部被ばく線量とその生体影響との関係について実証的な知見を得るため調査研究を行った。

令和3年度は、これまで環境研で構築した成人でのトリチウム代謝モデルをベースとして、国際放射線防護委員会（ICRP）による年齢別の成長に関する文献値等を用いて年齢別に拡張することにより、幼若期を含む年齢別での線量評価モデルを作成した。また、実験で用いるマウスの内部被ばく線量評価を行うため、投与方法を検討し候補化合物を選定し、化学形を分離して分析する分析前処理方法を決定した。

2. 排出放射性物質の環境影響に関する調査研究

2.1 大気・海洋への排出放射性物質の環境影響に関する調査研究

六ヶ所村の大型再処理施設の本格稼働を見据えて環境試料のサンプリング及び観測体制の増強を図り、周辺環境における排出放射性核種の動態及び蓄積、並びに食品・日常食中の濃度水準の把握や放射性核種濃度データを用いた地域の実態に即した線量評価を実施した。また、野外実験により放射性核種の移行及び環境要因が土壤中放射性核種の化学形態に与える影響を調査した。さらに、周辺地域における重要な農水産物中の放射性核種の移行及び残留性を明らかにするための実験を行った。

2.1.1 排出放射能の環境影響に関する調査研究

大気、陸域、陸水、沿岸海域、及び食品・日常食の5項目に分類し、六ヶ所村の大型再処理施設周辺における ^3H 、 ^{14}C 、 ^{129}I 及び ^{85}Kr 等を対象として、施設由来の排出放射性物質の影響について調査した。

令和3年度は、大気については ^3H 、 ^{14}C 、 ^{129}I 及び ^{85}Kr 等を対象として六ヶ所村及び弘前市（ ^{14}C 及び ^{85}Kr を除く）において連続観測を行い、環境γ線線量率及び排出放射性核種の大気中濃度、降下量変化及び濃度分布のデータを取得した。陸域については、施設周辺の土壌及び植物における ^3H 、 ^{14}C 及び ^{129}I 濃度を取得するとともに、環境研構内において農作物を栽培し、大気環境中の排出放射性核種濃度の測定結果と併せて、土壌・大気－作物間の放射性核種の移行評価を可能にするデータを取得した。また、畑地及び播種後一年目の牧草地において、HT型トリチウムの酸化速度を取得した。陸水及び沿岸海域では、施設周辺の河川水や地下水、湖沼水、沿岸海域の海水、堆積物及び水生生物の ^3H 、 ^{14}C 及び ^{129}I 濃度等のデータを取得した。食品・日常食については、施設周辺において生産・漁獲された農畜水産物及び周辺住民から陰膳法により得た日常食中の ^3H 、 ^{14}C 及び ^{129}I 濃度等の実態を調査した。なお、日常食に含まれる排出放射性核種の摂取による被ばく線量を推定したところ、過去の青森県のバックグラウンド調査と比較してやや低い値であった。

2.1.2 地域主要農水産物への移行・残留性に関する調査研究

地域の主要農産物であるナガイモ及び水産物であるヒラメやメバル等を対象として、六ヶ所村の大型再処理施設から排出される放射性物質の移行及び残留性に関する調査を行った。ナガイモについては ^{14}C を、水産物に関しては ^3H 及び ^{129}I を想定し、それぞれ安定同位体である ^{13}C 及び重水素、並びに放射性同位体の ^{129}I を用いたトレーサ実験を行った。

令和3年度は、圃場でムカゴから栽培したナガイモの生長を調査し、葉、茎、根及び新イモ中炭素量の時間変化を明らかにした。加えて、 ^{13}C をトレーサとした実験系の構築として、溶液供給によりナガイモをムカゴからポット栽培する手法を確立した。また、ヒラメへの ^3H 移行に関する調査では、重水添加海水へ

のばく露実験を水温条件別に行い、低水温条件で筋肉中の非交換型有機結合型重水素濃度の上昇が緩やかになることを明らかにした。ヒラメへの放射性ヨウ素移行に関する調査では、¹²⁹I添加海水へのばく露実験を行い、ヒラメ筋肉中¹²⁹I濃度がばく露開始後から速やかに上昇し、28日間のばく露期間中に平衡に達することを明らかにした。

2.2 放射性物質の異常放出事後対応に関する調査研究

六ヶ所村の大型再処理施設の方が一の異常事象時に環境中への放出が想定される放射性核種について、周辺地域の主要な作物への移行及びその低減に関する調査を行った。

2.2.1 作物地上部表面の放射性物質の挙動に関する調査研究

地域の主要農産物であるナガイモ等の葉面に沈着した放射性セシウムの葉面吸収、転流及びウエザリング、リンゴの果実及び葉面に沈着した放射性セシウムの移行に関する実証的データを取得し、異常放出時の農作物への放射性セシウムの移行に関する信頼性の高い挙動予測手段を提供することを目的とした。

令和3年度は、リンゴのふじ幼木を対象に、粒子状セシウムを負荷した果実表面又は葉面を雨にばく露し、雨ばく露後の果実表面又は葉面におけるセシウム残存率を雨ばく露時間及び降雨強度別に求めた。

2.2.2 放射性物質の移行低減化に関する調査研究

放射性セシウムの吸収及び転流を制御することにより、牧草及びイネ玄米への放射性セシウムの移行を低減化する手法を確立することを目的とした。さらに、科学的知見の乏しい放射性ルテニウムについて、環境試料等からの溶出特性を調査する。

令和3年度は、イネの栄養成長期におけるカルシウム散布が、葉から玄米への放射性セシウム転流に与える影響を調査し、土耕栽培したイネにおいてカルシウム散布が葉に沈着したセシウムの玄米への移行抑制に効果を示すことが示唆された。また、牧草中放射性セシウムの収穫時期別濃度変動を調査するためのRIトレーサを用いた室内実験手法を確立するとともに、経年的変化を調査するための試験圃場を整備した。加えて、環境試料中安定ルテニウムの存在形態分析のための手法及びルテニウム測定時に干渉する元素を除去する化学分離法を確立した。

3. 低線量率放射線の生物影響に関する調査研究

3.1 低線量率放射線による被ばく影響の実証調査研究

人の被ばく影響のデータのほとんどは、高線量率急性被ばくに関する知見（原爆被爆者のデータ）であり、低線量率長期被ばくに関する知見は極めて少ないことから、これらの知見を得ることは重要である。そこで、本調査では、制御された条件下で多数のマウスに低線量率放射線の長期照射を行い、各種影響に関するデータを取得する。既に、成体期における低線量率被ばくによる影響に関しては多くの知見を蓄積してきているが、現在、放射線リスク評価において最も重要な課題の一つとされているのが、年齢や生活環境などによる放射線感受性の個体差である。そこで、本調査では、特に子供の被ばくによる影響（幼若期被ばく影響解析）、及び生活環境などによる放射線影響の修飾作用（修飾要因解析）に焦点を当て調査を行った。

3.1.1 幼若期被ばく影響解析

幼若期（出生から56日齢）における低線量率放射線連続被ばく影響の全体像を、出生前に照射した場合、

成体を照射した場合と対比しつつ明らかにする。照射後短期間で現れる影響（生殖能力、行動異常や染色体異常など）を検索する「短期影響解析」、及び終生飼育し体重、寿命、死因、発がんなどを検索する「長期影響解析」を行う。

令和3年度は、短期影響解析及び長期影響解析に用いる至適放射線照射線量及び実験手法を決定するための「フィージビリティ試験」を実施した。

3.1.2 修飾要因解析

マウスの餌や飼育環境による低線量率放射線長期照射の影響の大きさや現れ方の変化を、腫瘍発生率や免疫能等を標識に遺伝的背景が異なるマウスを用い解析し、放射線被ばく影響の修飾要因及びその作用を明らかにする。

令和3年度は、これまでに確立した条件を用い、飼育環境を変更した（環境エンリッチメント飼育実験）を開始し、照射開始、0、200、300、400日目のマウスから採取した末梢血・脾臓・骨髄細胞を用いて、免疫に関わるパラメータを取得した。また、大腸腺腫症モデルマウスを用いた腸腫瘍発生への放射線照射と抗酸化剤投与による影響を観察する実験を行った。

3.2 低線量率放射線被ばく影響の発現機序調査研究

人の低線量率被ばくに関するデータが十分ではないため、高線量率被ばく時（原爆被爆者）のデータを用いて、低線量率被ばく時のリスク評価を行っている。しかしながら、リスク評価を行うために必要な低線量率と高線量率での放射線影響の発現機序の違いに関する知見は非常に不十分である。そこで、本調査では低線量率放射線被ばく影響の発現機序に関する知見を得ることを目的とし、特に、これまでの調査で変化が見られた、遺伝子発現等への影響（細胞・分子・遺伝子への影響の解析）及び個体の恒常性維持機能等への影響（生理機能への影響の解析）に着目し、高線量率放射線の場合と対比しつつ解析を行う。

3.2.1 細胞・分子・遺伝子への影響の解析

細胞や分子、遺伝子のレベルでの低線量率放射線影響の発生機序を調査するが、これまでの調査の結果に基づき特に、「エピジェネティックな変化」すなわち、細胞の遺伝子の発現変化の原因となっている変化（DNAメチル化変化等）、また遺伝子発現変化の結果として生じる細胞の性質の変化を解析する。

令和3年度は、これまでに確立した解析手法を用い、マウス低線量率長期照射及び経時的サンプリング実験を開始した。また、肝臓細胞におけるDNAメチル化変化等の解析、肝臓から分離・培養した幹細胞・前駆細胞（オルガノイド）を用いた細胞の分化状態と低線量率放射線に対する応答能の解析を行った。

3.2.2 生理機能への影響の解析

低線量率放射線が生理学的恒常性維持のためのネットワークに与える影響を調査する。特に、これまでの調査により放射線の影響が顕著であることが明らかとなった内分泌系、また近年そのリスク評価が強く求められている神経系及び血管系を対象とした解析を行い、低線量率放射線照射による個体レベルの影響発現機序について全体像を得る。

令和3年度は、これまでの予備的検討の結果等を踏まえ、低線量率放射線の卵巣への影響が他臓器へ伝播していく機構、マウスの日周期時間に対する低線量率放射線の影響、及び低線量率放射線照射された血管内皮細胞に生じる特徴的なシグナルの解析を進めた。

4. その他の受託研究

六ヶ所村から環境対策及び地域振興に関する委託調査として、「田面木沼水質浄化法及び流入水浄化試験調査」、「富ノ沢農用地圃場における候補植物選定調査」、「市柳沼における水質実態調査」を行った。

5. 競争的研究資金等による研究

科学研究費補助金等による研究として、以下の9課題を実施した。

研究代表者である研究

- ・ 土壌に蓄積するscyllo-イノシトールリン酸の動態に関わる生物学的要因の解明
- ・ 低線量率放射線照射によるROS産生とインスリン抵抗性惹起機構の解明
- ・ 放射線が細胞競合に及ぼす影響をラット乳腺培養系で評価する（7月担当者転出）

分担研究者である研究

- ・ 根圏の微量元素可溶化メカニズムとその制御による放射性セシウム吸収抑制手法の開発
- ・ 海洋酸性化に対する海藻藻場生態系のエネルギーフローの応答
- ・ 植物根圏におけるヨウ素還元機構の分析化学的、分子遺伝学的解明
- ・ アポプラスト障壁形成の環境応答機構の栄養循環における機能の理解
- ・ 高精度かつ簡易な環境トリチウム計測手法の確立と日本のバックグラウンド濃度変動
- ・ 近赤外光を利用した寒冷地における陸上養殖、種苗生物の省エネ技術研究

6. 環境科学技術研究所自主研究

これまでの受託研究を中心とした調査・研究に加え、研究領域の拡大や新たな調査研究の展開を目指し、研究所独自の調査研究を下記のとおり行った。

令和2年度に採択し、令和3年度へ継続した自主研究

- ・ 植物におけるヨウ素必須性証明に向けての生理学・遺伝学的研究
- ・ 低線量率放射線長期連続照射がマウス聴覚に及ぼす影響

令和3年度に採択した自主研究

- ・ がん抑制遺伝子Apcを標的とした新規突然変異解析系の構築
- ・ 放射性炭素及び強熱減量法を利用した陸上土壌及び水圏堆積物中の有機炭素における滞留時間の評価方法の開発
- ・ 海水中DOMを起点とした海洋一大気間における炭素フラックスに対するヨウ化物イオンの影響
- ・ 経時的に撮影可能なオートラジオグラフィ技術を用いた低カリウムストレス時におけるセシウム動態制御機構の解明
- ・ 落葉果樹成木における新器官の初期成長への貯蔵炭素の利用特性の評価
- ・ 低線量率放射線照射が及ぼすセノリシス効果への影響解析

II. 放射性物質等の環境影響等環境安全に関する普及啓発

1. 排出放射性物質影響調査理解醸成活動

調査研究の内容や得られた成果等を、報告会開催や対話集会の実施等により県民に紹介し理解醸成を図った。特に近隣地域の行政、団体、教育機関と連携し、地域に根差した共創活動の充実を図った。また、これまでに培った研究資産、人材などの活用最大化を図るために成果等の可視化に取り組み、さらに、インターネットや印刷物等を通じて、それら情報を県内外の住民に広く発信し、理解醸成を図った。

令和3年度は、六ヶ所村及び近隣市町村などの行政、医療機関、地域婦人団体とともに日頃の疑問や関心事などについてテーマを設定し、住民や関係者などを対象に対話活動を実施した他、地域からの要望により六ヶ所村からの受託調査研究の内容について関係者との交流を図りながら地域交流支援を行った。また、大型再処理施設が立地する六ヶ所村、及び県内の主要都市である八戸市と弘前市の3ヶ所において報告会を開催するとともに、むつ市において「むつ海洋・環境科学シンポジウム」を共催した。人材育成及び交流活動については、研究情報の相互共有のための国際シンポジウムや若手研究者合同セミナーを開催した。ホームページ及び印刷物による理解醸成については、ホームページの更新及びスマートフォン表示への対応を図った他、新たに作成したリーフレットや放射線の基礎知識パンフレット等を掲載した。また、これまでの主要な研究資産等の可視化のため、総合的環境移行・線量評価モデルのコンテンツ検討とマウス病理サンプルのデータ整備を進めた。

2. その他の普及啓発に関する活動

当研究所が独自に進める広報活動や調査研究成果の普及活動について、県内外での講演やインターネットによる情報発信、印刷物発行等を行った。なお、施設公開や六ヶ所村内の小学生を対象とした理科教室、村内イベントへの出展はコロナウィルス感染症流行のため中止した。

Ⅲ. 原子力開発利用の発展に寄与する人材育成の支援

青森大学薬学部の放射線実習への派遣や北里大学、青森県立保健大学、弘前大学、北海道大学などの教育機関の講義を担当した。また、六ヶ所高校における病理・分子に関する実習、六ヶ所村内中学生の職場研修の受け入れなど教育機関との連携による人材育成を行った。

Ⅳ. その他本財団の目的を達成するために必要な事業

1. 福島原発事故対応への貢献

令和2年度まで行った福島県内での放射性セシウムの環境移行に関する調査データを元に、要請に応じ行政機関等へ情報を提供した。また、トリチウム水の対策に関する委員会への就任要請に応え職員を派遣した。

2. 地域との共創活動に向けた取り組み

六ヶ所村の協力の下、地域との共創活動への取り組みを進めるため、村内有識者で構成される地域共創委員会を定期開催し、地域住民の意見・要望を聴取するなど議論を深めた。

3. 地域からの要請への対応

地域からの要請に応え、六ヶ所村次世代エネルギーパーク事業への参加や青森県防災会議や青森県原子力施設環境放射線等監視評価会議等に職員が委員として参画した。

4. 研究協力体制の整備

調査研究事業を円滑に推進するため、新たに福島大学環境放射能研究所との包括的連携協定を結ぶとともに、シンガポール国立大学や量子科学技術研究開発機構等国内外7件の共同研究を実施した。また、新たに放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点（ERAN）として文部科学省から採択され、筑波大学他4機関とともに構成機関として令和4年度から参画することが決定した。