

はじめに

大型再処理施設放射能影響調査事業の一環である環境影響及び生物影響に関する調査研究を、当研究所の主要事業として、これまで青森県から受託しており、令和元年度においても同事業を受託し、これを遂行した。それに加えて、環境省が進める環境研究総合推進費による大型再処理施設周辺のヨウ素に関する研究や競争的研究資金による研究を行った。また、それらの調査研究に係る情報を青森県民に提供するための情報発信活動等を行った。さらに、研究領域の拡大や新たな調査研究の展開を目指し、研究所独自の自主研究による研究を行った。その他、学生に対する放射線の実習・講義等により、人材育成を支援した。

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

排出放射性物質の環境影響に関する調査研究では、これまでに開発した気圏、陸圏、水圏における放射性核種の移行及び人体の被ばく線量を評価する総合的環境移行・線量評価モデル（総合モデル）を高度化するとともに、検証を目的として、各種環境試料中の排出放射性核種濃度を測定した。さらに、より現実的な線量評価を行うために、放射性炭素等を対象とした環境からリング等の県内産物への移行、被ばく線量評価に用いる人体代謝、及び長期的な土壌への蓄積に係るサブモデルの構築を実証的に進めている。加えて、大型再処理施設周辺に分布するクロマツの被ばく線量評価法の開発及び土壌から作物への放射性セシウムの移行低減化手法の開発を実施した。（1節）

低線量放射線の生物影響に関する調査研究では、マウスを用いて低線量率放射線長期連続照射の子孫への影響（継世代影響）を高線量率放射線照射と比較する研究を行った。また、母体内で低線量率放射線照射された胚・胎仔への短期影響及び出生後の長期影響に関する研究、低線量率放射線が生体の細胞に引き起こす応答及びゲノムへの影響に関する研究、並びに低線量率放射線に対する生体の造血系・免疫系・内分泌系の応答に関する研究を行った。（2節）

また、環境省が必要とする研究テーマを提示して公募を行う環境研究総合推進費の調査研究、環境科学技術研究所自主研究、及び科学研究費補助金による研究についても報告する。（3節～5節）

1. 排出放射性物質の環境影響に関する調査研究

1.1 排出放射能の環境移行に関する調査研究

平成27年度までに開発した大型再処理施設から排出された放射性核種の環境における移行及び被ばく線量を評価する総合的環境移行・線量評価モデル（以下、総合モデル）を高度化し、実測データによる検証を行うため、以下の調査研究を行った。

1.1.1 総合モデルの高度化と運用体制の構築

総合モデルの高度化を行うため、大気中放射性核種濃度等の実測値をデータ同化する機能、被ばく線量の確率論的評価機能及びこれまでの調査で得られた知見をモデルに導入する。また、気象データをオンラインで入手し、使用する運用体制を整えるとともに、水圏関連サブモデルへの機能追加等を行う。

令和元年度は、総合モデルに被ばく線量の確率論的評価機構を導入した。また、陸域移行サブモデルに、これまで開発した大気－作物間3H移行モデルを導入するとともに、土壌－牧草間のCs移行係数の経時変化を取り入れたモデルを導入するための基本設計を行った。

1.1.2 大型再処理施設周辺等データの取得とモデル検証

大型再処理施設の本格稼働に備えて、気圏、陸圏及び水圏環境における排出放射性核種の濃度及び動態に関するフィールド調査を実施し、モデル検証用の基礎データとする。また、青森県内で得られにくい、 ^{137}Cs 等の環境移行パラメータを福島県において取得する。

令和元年度は、六ヶ所村等の大気、降下物、土壌、植物、日常食及び農畜水産物、並びに水圏環境における水、堆積物、懸濁粒子及び水生生物中の排出放射性核種濃度 (^3H 、 ^{14}C 及び ^{129}I) を測定するとともに、環境研構内に整備した圃場において栽培した農作物中の排出放射性核種濃度を測定して、総合モデルの検証に資した。さらに、青森県内で得られにくい、 ^{137}Cs 等の土壌からの再浮遊、河川を通じての移動等に関連する環境移行パラメータを福島県において取得した。

1.2 青森県産物への放射性物質移行に関する調査研究

大型再処理施設の稼働に伴い、 ^{14}C 、放射性ヨウ素等が環境中に排出され、また、異常放出時には、これらに加えて放射性セシウム及び放射性ストロンチウムの放出が考えられる。そこで、果樹（リンゴ）及び海産物（ヒラメ）等の経済的に重要な青森県産物を対象に、大気放出される ^{14}C 、放射性ヨウ素及び放射性セシウムの果樹への移行並びに海洋放出される放射性ストロンチウム及び放射性ヨウ素の海産物への移行に関する実験を行い、それぞれの移行・蓄積サブモデルを構築する。このため、以下の調査研究を行った。

1.2.1 果樹における放射性炭素移行調査

本調査では、リンゴ幼木を対象に、 ^{14}C の大気からリンゴの果実への移行・蓄積モデルを開発するとともに、屋外栽培個体のばく露実験等によるモデル検証を行う。

令和元年度は、これまでに得られた室内栽培下のリンゴ幼木への $^{13}\text{CO}_2$ ばく露実験結果を用いて炭素移行・蓄積モデルを作成するとともに、屋外で栽培したリンゴ幼木への $^{13}\text{CO}_2$ ばく露実験を行って、モデルの屋外条件への適用性を検証した。

1.2.2 果樹における放射性ヨウ素等移行調査

本調査では、姫リンゴ幼木を対象に、放射性ヨウ素及び放射性セシウムの葉面、樹皮表面及び果実表面から果実への移行モデルを、それぞれの安定元素を用いた実験により構築する。表面への負荷形態は、乾性及び湿性沈着を考慮して、それぞれ粒子状及び液状とする。

令和元年度は、姫リンゴ幼木を対象に、粒子状ヨウ素（I）の果実表面への負荷実験、及び粒子状セシウムを結実後に葉面、樹皮表面又は果実表面へ負荷する実験を行った。さらに、平成29～31年度の実験結果を用いて、姫リンゴ幼木におけるヨウ素及びセシウムの吸収及び転流に関する移行モデルを負荷形態別に作成した。

1.2.3 海産物への放射性ストロンチウム・ヨウ素移行調査

本調査では、ヒラメを対象に、放射性ストロンチウム及び放射性ヨウ素について海水からの直接移行及び摂餌に伴う移行を含む移行・蓄積モデルを構築する。

令和元年度は、 ^{86}Sr 安定同位体を加えた海水中で飼育したヒラメを、平成30年度に通常海水中に移してヒラメ体内の ^{86}Sr 濃度の減衰を継続的に測定しており、長期的な ^{86}Sr 排泄速度を明らかにした。加えて、 ^{125}I を添加した海水中でヒラメを飼育し、 ^{125}I のヒラメへの短期的な移行速度を調べた。平成28～令和元年度の

実験で得られたデータに基づき、ヒラメにおけるストロンチウム移行モデル及びヨウ素の短期移行モデルを作成した。

1.3 人体内における放射性炭素・トリチウム代謝に関する調査研究

大型再処理施設から排出される ^{14}C 及び ^3H による被ばく線量をより現実的に評価することを目的として、 ^{13}C で標識した多種の脂質及びアミノ酸等について、ボランティアへの経口投与実験を行い、精度の高い ^{14}C 代謝モデルを作成するとともに、水の代謝モデルと組み合わせて ^3H 代謝モデルを構築する。

令和元年度は、平成30年度に ^{13}C 標識ラッカセイ投与実験により得られた毛髪中 ^{13}C 濃度を測定した。また、 ^{13}C 標識ダイズを作製して投与実験を行い、呼気及び毛髪中 ^{13}C 濃度を測定した。これまでに得られた ^{13}C 標識ラッカセイ及びダイズ投与実験結果を用いて、平成30年度に作成した ^{14}C 代謝モデルの検証を行った。さらに、水の代謝モデルと組み合わせて ^3H 代謝モデルを構築し、 ^{14}C 代謝モデルと併せて、それぞれの線量換算係数を求めた。

1.4 陸圏における放射性物質蓄積評価に関する調査研究

大型再処理施設の稼動に伴い排出される ^{14}C の土壌への蓄積性を評価するため、施設周辺に広く分布するクロマツ林におけるモデルを構築するとともに、排出量の多い ^3H について、各種環境（クロマツ林、牧草地等）での土壌への蓄積モデルを構築する。

令和元年度は、牧草地及び畑地における土壌水の挙動を明らかにするため水文学的データの取得を継続した。また、牧草体内での ^{13}C 標識有機物の長期挙動を、平成30年度より継続して調査した。クロマツ林では水文学的データ、炭素現存量及び炭素固定量関連データ、並びにリター分解速度関連データの取得を継続した。令和元年度までに取得したデータに基づき、 ^3H 及び ^{14}C の土壌有機物としてのクロマツ林、牧草地等における蓄積を評価するモデルを構築した。

1.5 樹木の被ばく線量評価法の開発に関する調査研究

大型再処理施設周辺には放射線感受性が高いとされるクロマツが広く分布している。そこで、クロマツの被ばく線量率を計算する手法を開発し、その手法を用いて自然被ばく線量率を求めるとともに、大気放出される放射性ヨウ素によるクロマツの被ばく線量評価に必要なパラメータを安定ヨウ素により求める。

令和元年度は、調査区域から根部を含めたクロマツ1個体を採取して部位別形状、重量及び安定元素濃度測定を行うとともに、周辺土壌中安定元素濃度の鉛直分布を調査した。さらに、これまでに得られた部位別形状等のデータを基にしたクロマツ個体ファントムの作成と線量率の計算条件等の設定を行った。加えて、クロマツ林内外の降雪や大気中粒子態及びガス態の安定ヨウ素濃度の測定を行い、大気中ヨウ素のクロマツへの沈着速度等を求めた。

1.6 放射性物質の移行低減化に関する調査研究

大型再処理施設周辺の重要な作物である牧草を対象として、青森県の土壌で栽培した場合の放射性セシウムの移行に影響を及ぼす土壌要因を明らかにし、要因に応じた施肥や資材等による移行低減化手法の検証を行う。さらに、青森県の主要農産物であるイネを対象として、玄米へのセシウムの転流を植物成長調節物質や化学物質によって制御する手法を確立する。

令和元年度は、牧草を対象とした調査では、三八・津軽地域の牧草地土壌に ^{137}Cs を添加して牧草を栽培し、 ^{137}Cs の移行性と土壌特性との関連を調べた。また、平成30年度に ^{137}Cs を添加した下北地域牧草地土壌

を用いて同様の栽培実験を行い、¹³⁷Csの移行性の変化を明らかにした。さらに平成30年度に調査した下北地域の牧草地土壌のうち¹³⁷Cs移行性が高いことが明らかになった土壌を対象に平成29年度に確立した移行低減化手法の有効性を検証した結果、カリウム肥料や放射性セシウム固定資材とリン酸施肥の併用が効果的であった。加えて、イネにおいて、成長調節物質及び輸送体ブロッカー投与が玄米中セシウム濃度に及ぼす影響を調査した。

2. 低線量放射線の生物影響に関する調査研究

低線量率・低線量放射線のヒトへの影響を推定するため、異なる線量率と集積線量の放射線をマウスに照射して以下の研究を実施した。

2.1 低線量放射線生物影響実験調査（継世代影響・線量率効果解析）

高線量率（700～800 mGy/分）及び低線量率（20 mGy/日）ガンマ線を同じ集積線量になるまでオスマウスに照射し、照射終了後に非照射メスマウスと交配して得られる仔マウスとオス親マウスを終生飼育し、病理学的に死因やがんの発生率等を調べ、線量率の違いが異なる継世代影響を及ぼすかどうかを調査する。さらに尾組織から抽出・精製したDNAを用いて遺伝子変異を調べる。

令和元年度は、平成30年度に引き続き、第1～5回実験の終生飼育を継続し、マウスの飼育、死亡マウスの病理学的解析並びに遺伝子変異解析を実施した。

2.2 母体内における低線量率放射線被ばく影響実験調査

母体内、すなわち出生前の時期における低線量率放射線長期被ばくの健康影響を評価するため、受精卵、胎仔、仔の生死、胎仔の発生異常、外表奇形などの胎仔期あるいは生後比較的早期に発現する短期的影響を調べる。また、寿命、死因、発がんなどに関する長期的影響を明らかにする。

調査最終年度にあたる令和元年度は、短期影響解析においては、母体内で照射されたマウスが成体になったときの生殖機能の解析を完了し、短期影響全体の実験結果の取り纏めを行った。長期影響解析においては、受精から出生までの全期間照射したマウスの寿命、死因、発がんなどの解析を完了し、実験結果を取り纏めた。

2.3 低線量率放射線に対する分子細胞応答影響実験調査

低線量率放射線長期連続照射マウスで見られたがんの誘発や寿命短縮を理解するためには、低線量率放射線が個々の細胞において引き起こす遺伝子発現変化やゲノムの変異を明らかにすることが必須であると考え、以下の調査研究を行った。

2.3.1 低線量率放射線照射による応答分子への影響解析

低線量率放射線を照射された個体中の細胞において誘起される遺伝子発現変化等を、高中線量率放射線との相違点、加齢との関連、雌雄差に重点を置いて解明する。

調査最終年度にあたる令和元年度は、低線量率放射線長期照射マウスの臓器を用いた網羅的遺伝子発現解析や低分子代謝物の網羅的解析（メタボローム解析）を完了し、さらにそれらの実験結果の統合解析を行った。

2.3.2 線量率の違いによるゲノムへの影響解析

低線量率及び高線量率放射線を照射したマウスの脾臓リンパ球における転座型染色体異常誘発を解析したこれまでの調査の結果、両者は明白に異なる反応を示すことが分かっている。本課題では、染色体異常誘発の線量効果関係が、線量率の変化に従いどのように変化するかについて解析することにより、放射線効果における線量率依存性の解明を目指す。またこのような解析の際の染色体異常頻度の見積りに大きな影響を与える可能性がある染色体異常の経時的安定性について評価する。

調査最終年度にあたる令和元年度は、染色体異常の経時的安定性を評価するための、マウスを照射後経時的に採取した脾臓細胞における染色体異常頻度の解析を完了し、実験結果を取り纏めた。

2.4 低線量率放射線に対する生理応答影響実験調査

生物個体が備えている生理学的恒常性維持のための各種調節システムの低線量率放射線照射に対する反応、及び低線量率放射線がこのようなシステムへの関与を通して生物個体に最終的に及ぼす影響（寿命短縮やがん発生）のプロセスを明らかにするため、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になっている造血系、免疫系、内分泌系の3システムに関し以下の調査研究を行った。

2.4.1 造血系解析

低線量率放射線の造血幹細胞への影響が、造血幹細胞が照射されたことによる直接的な影響であるのか、あるいは周辺の細胞や液性因子を介した間接的な影響であるのかを明らかにする。

調査最終年度にあたる令和元年度は、マウス個体または培養造血幹細胞を用いた実験系により、造血幹細胞に対する放射線照射の直接的、間接的影響を分別して解析する実験を完了し、実験結果を取り纏めた。

2.4.2 免疫系解析

抗がん免疫能（がん細胞を排除する機能）などに対する低線量率放射線の悪影響が、飼育環境変化により低減されるか否かを明らかにする。

調査最終年度にあたる令和元年度は、移植したがん細胞に対する排除能力を観察する実験系を用い、低線量率放射線照射によって生じる抗がん免疫能低下に対する飼育環境変化の影響を調査する実験を完了し、実験結果を取り纏めた。

2.4.3 内分泌系解析

低線量率放射線により誘発された卵巢機能障害が、照射メスマウスのがん発生頻度の増加及び寿命短縮の原因であるか否かを明らかにする。

調査最終年度にあたる令和元年度は、低線量率放射線照射、健常卵巢移植処置、卵巢切除処置を行ったメスマウスの終生飼育および寿命等の解析を完了し、実験結果を取り纏めた。

3. その他の受託研究

環境省が必要とする研究テーマを提示して公募を行う環境研究総合推進費の調査研究について所管する環境再生保全機構からの委託により、「沿岸堆積物に蓄積した放射性ヨウ素の溶出及び底生魚への移行過程の把握」の調査研究を行った。

4. 競争的研究資金等による研究

競争的研究資金等による研究として、以下の14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
- ・ ジョロウグモを指標種とした複数放射性核種による汚染及び被ばく線量の総合的評価
- ・ 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
- ・ 食品中炭素の脂肪組織への長期的な蓄積及び代謝排出の評価（公益信託医用薬物研究奨励富岳基金助成）

分担研究者である研究

- ・ 難分解性溶存態有機物の消失経路 -泡による粒子化-
- ・ 海水減少が北極陸域水循環に与える影響の実態解明
- ・ アポプラスト障壁の形成と機能の理解
- ・ 寒冷地河川における実用的アイスジャム計算モデルの開発と陸面モデルによる広域展開
- ・ 非栄養元素・毒性元素を代替利用する細胞の危機適応力の探求
- ・ 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
- ・ 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
- ・ 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
- ・ 超新星背景ニュートリノの高感度観測でせまる宇宙星形成の歴史
- ・ 農業・環境分野での環境媒体中の各種イオンの生物利用可能量の次世代型評価方法の開発

5. 環境科学技術研究所自主研究

研究所の調査研究領域の拡大及び既存の調査研究の新たな展開を目指し、研究所独自の自主研究を下記のとおり行った。

平成30年度に採択し、令和元年度へ継続した自主研究

- ・ 土壌HT酸化を黒ボク土牧草地で測定する手法の開発
- ・ 低線量率放射線長期連続照射マウス表現型の包括的観察

令和元年度に採択した自主研究

- ・ 低線量率放射線照射によるポリアミン変動が及ぼす概日周期への影響についての解析
- ・ 低線量率放射線が加齢関連分子に及ぼす影響
- ・ キメラマウスを用いた新規発がん解析系の構築
- ・ 放射線肥満と肝腫瘍発生との関連を調べるためのマウス用給餌時間制限装置の開発

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研究情報発信活動

青森県からの受託事業として、大型再処理施設放射能影響調査事業で実施した環境影響及び生物影響に関する調査研究の内容や成果等を県民に対して発信することにより、大型再処理施設から排出される放射性物質の影響に関する県民の理解を得る活動を行った。具体的には、成果報告会、出前説明会、ホームページ及び印刷物によって、下記のとおり発信した。

成果報告会は、六ヶ所村、青森市、弘前市及び八戸市の4か所で開催し、「牧草への放射性セシウム移行低減に向けて」、「母体内における放射線被ばくの影響を調べる」と題してそれぞれ環境影響研究、生物影響研究の成果について報告した。また、全ての会場において外部有識者による基調講演をあわせて実

施し、更に六ヶ所村、八戸市では日本海洋科学振興財団から「下北半島太平洋側沿岸における流れの変動の伝播について」の報告も行った。参加者は4会場合計で278名であった。

出前説明会は青森県内で21回実施し、参加者総数は1,286名であった。説明会は講演、出展の形式で実施し、前者では調査研究成果等を中心に放射線の基礎知識や生物影響についての講演、後者では青森県内の大学祭や六ヶ所村内のイベントに出展し、パネルを用いた成果の説明や放射線に関する基礎的な内容について説明した。

ホームページに関しては、研究の進捗に応じた研究紹介に関するページの更新等を行った。アクセス数は、福島原発事故以前に比べて高い水準を維持した状況であった。

印刷物については、放射線の基礎知識や調査で得られた成果を解説した放射線の基礎知識パンフレットや、調査成果を解説するリーフレットを作成した。

2. 広報活動

環境研が実施する事業活動の理解促進のため、年報及び環境研ニュース等の印刷物やインターネットを通じたホームページによる情報発信を行った。また、施設公開や六ヶ所村内の小学生等を対象とした理科教室等の開催、村内イベントへの出展等を実施した。

Ⅲ. 原子力開発利用の発展に寄与する人材育成の支援

青森大学薬学部放射線実習や八戸工業大学第一高等学校、むつ市立田名部中学校などの教育機関の研究等を受け入れた。さらに、弘前大学や東北大学から学生実習生を受け入れ、分析手法等の指導を行った。また、北里大学と八戸工業高等専門学校において職員が講義を担当した他、弘前大学において被ばく医療に関する委員会の委員を務め、人材育成の支援を行った。

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

福島県内において放射性セシウムの環境移行に関する調査を行い、それらのデータを研究に用いるとともに現地の行政機関へ放射性物質移行等の実態に関する情報として提供した。また、事故に関する調査や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. 地域からの要請への対応

六ヶ所村内の教育機関からの支援要請により、講師としての職員の学校等への派遣や、職業体験学習の受け入れを行った。また、地域からの要請に応え、六ヶ所次世代エネルギーパーク事業に参加するとともに、産業まつりへの後援及び出展、各種委員会への職員の委員としての参画等を通じて、地域振興や社会教育に貢献した。さらに、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。

3. 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、量子科学研究開発機構や電力中央研究所との包括的連携協定を結ぶとともに、弘前大学や日本原子力研究開発機構等国内の機関と9件の共同研究を実施した。