

環境科学セミナー

成果報告資料

令和3年度

公益財団法人 環境科学技術研究所

公益財団法人 日本海洋科学振興財団

本成果報告の内容は、青森県から（公財）環境科学技術研究所が受託している「排出放射性物質影響調査」及び（公財）日本海洋科学振興財団が受託している「六ヶ所村沖合海洋放射能等調査」により得られた成果の一部です。

目 次

これまで約 30 年の研究で分かったこと

—放射線と放射性物質の話—

①放射性物質の環境中での動きについて 1-20

(公財) 環境科学技術研究所

環境影響研究部次長 植田 真司

②弱い放射線の生物影響について 21-39

(公財) 環境科学技術研究所

生物影響研究部長 小村 潤一郎

③海における放射性物質の動きについて 40-59

(公財) 日本海洋科学振興財団

むつ海洋研究所 中山 智治

これまでの約30年の研究でわかったこと
－放射線と放射性物質の話－



①放射性物質の環境中での動きについて

(公財)環境科学技術研究所
環境影響研究部次長
植田 真司

公益財団法人 環境科学技術研究所 (環境研) とは？



—要点—

1. 環境研は、六ヶ所村にある大型再処理施設（原子力発電所の使用済み燃料を再処理する工場）から排出される放射性物質に関する研究を行うところである。
2. 電気事業連合会による大型再処理施設の六ヶ所村への立地協力要請を契機に、青森県は地域住民や県民の安全・安心が得られるよう関連研究所等の設置を国に要望し、これを受けて平成2年に、同村内に環境科学技術研究所が設立された。
3. (公財) 環境科学技術研究所は、大型再処理施設と尾駮沼をはさんで、尾駮地区に環境研の本所、鷹架地区に先端分子生物科学研究センターがある。
4. 尾駮沼や鷹架沼といった湖沼、そして東側は太平洋に面し、西側はむつ湾を望んで、周囲には水環境が多いという特徴がある。

環境研 調査研究の2つの柱



排出放射性物質影響調査



—要点—

(公財) 環境科学技術研究所には2つの研究部があり、平成2年の創設時より、国や青森県から排出放射性物質影響調査を受託して行っている。

1. 環境影響研究部

再処理施設から排出された放射性物質が環境中でどのように動くのかを明らかにして、その動きを予測し、被ばく線量を評価するモデルを構築した。

2. 生物影響研究部

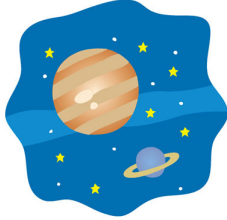
低線量・低線量率の放射線（合計して少量、時間あたりで少ない量、の放射線）を長期間受けた生物に、どのような影響があるかを調査している。

自然の中の放射線



私たちは、日常生活でも自然の放射線を受けています
日本人の1年間の平均の放射線量は約2.1ミリシーベルトです

宇宙線から ……約15%



大地(ガンマ線)から ……約15%



空気(ラドン)から ……約23%



食物から ……約47%

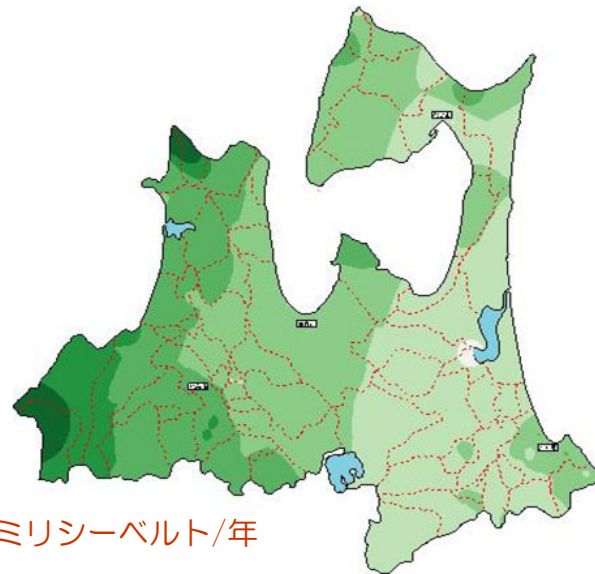
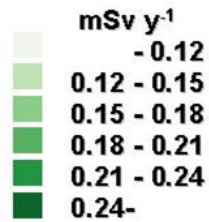


出典：文部科学省「放射線等に関する副読本掲載データ（中学校生徒用）」

—要点—

1. 私たちは、宇宙、大地、空気、そして食物等から放射線を受けている。目に見えていなくても、私たちは今も昔も放射線がある中で暮らしており、放射線を受ける量をゼロにすることはできない。
2. 宇宙線は、宇宙の誕生時からたくさんの放射線が存在し、常に地球に降り注いでいる。
3. 空気中の主な放射線量は、ラドンという放射性物質が寄与している。
4. 食べ物からは、カリウム40という放射性物質の放射線量が多い。
5. 大地からの放射線は、岩石の中などに含まれている放射性物質からの放射線が寄与している。
6. 日本人の1年間の平均の放射線量は約2.1ミリシーベルトである。

大地からのガンマ線



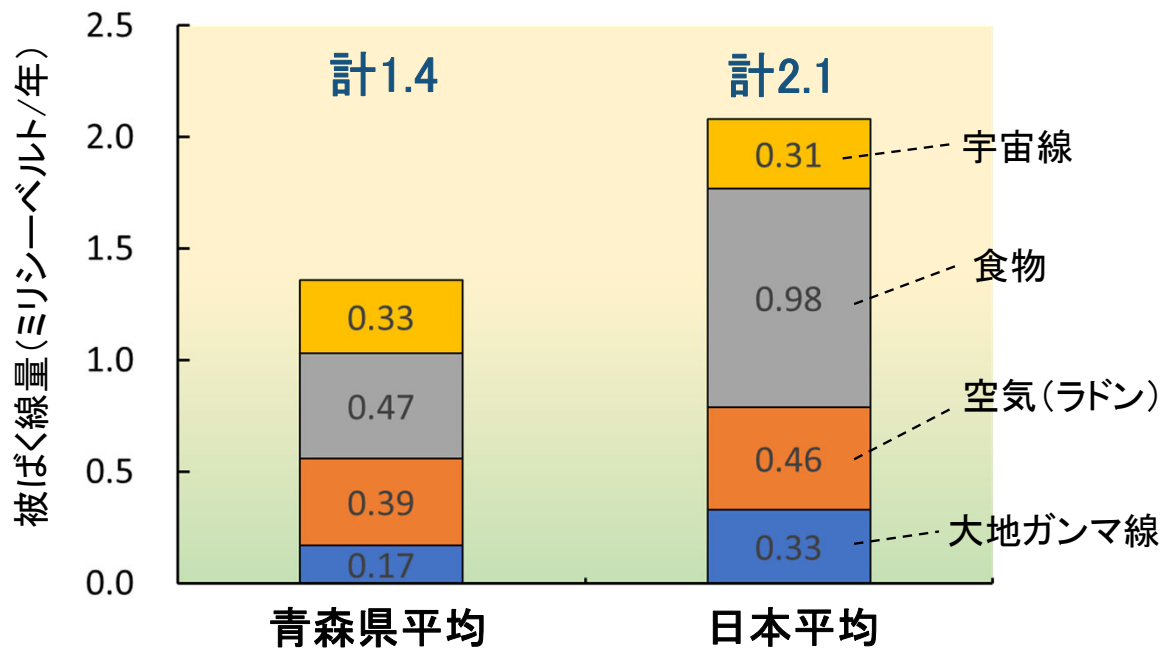
青森県平均: 0.17 ミリシーベルト/年

大地からのガンマ線による被ばく線量の県内分布を初めて明らかにした

—要点—

1. 自然から受ける放射線量を求めるため、県内109カ所において調査し、大地からのガンマ線による被ばく線量の分布図を作成した。
2. 青森県内における大地からのガンマ線は南部地方より、津軽地方の方が高くなる分布を示した。これは、地質の違いによるものである。

県内の自然放射線量



自然放射線による県民の被ばく線量を評価した

—要点—

1. 環境研では、県内100地点以上において大地からのガンマ線に加えて、ラドン及び食品に関する調査を実施してきた。
2. 青森県内における自然放射線による被ばく線量は年間約1.4ミリシーベルトであり、日本全体の平均値と比較して低い値であった。

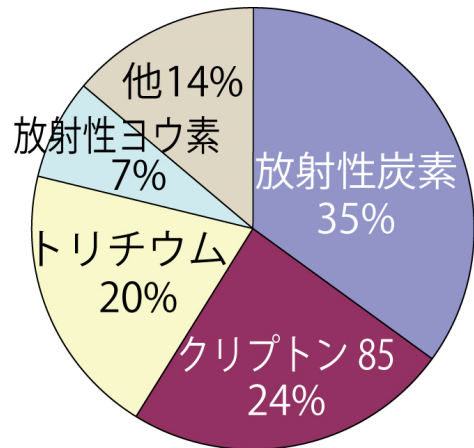
大型再処理施設から出る主な放射性物質

大気排出 ガス状

クリプトン85: ^{85}Kr
放射性炭素: ^{14}C
トリチウム: ^3H
放射性ヨウ素: ^{129}I , ^{131}I

海洋排出 液体状

トリチウム: ^3H
放射性ヨウ素: ^{129}I , ^{131}I



0.022ミリシーベルトの内訳

これらによる周辺住民の年間被ばく線量は
最大で1年間に0.022 ミリシーベルト
(安全審査値)と計算されている

*公衆被ばくの限度として年あたり1ミリシーベルトが勧告されている(ICRP)

—要点—

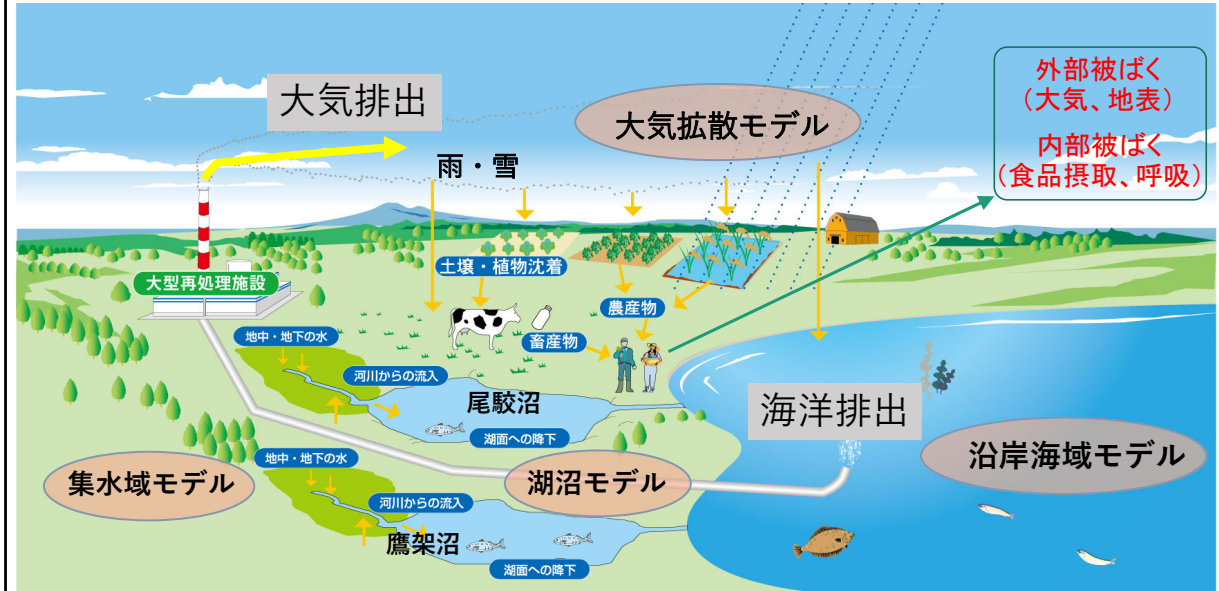
1. 大型再処理施設からの排気、排水には放射性物質が含まれる。排気は、施設にある主排気塔（煙突）から大気中に、排水は、六ヶ所村沖合の海洋排出口から海洋中に出される。
2. 出てくる放射性物質の代表的なものとして、放射性炭素（炭素14）、クリプトン85、トリチウム、放射性ヨウ素の放射性物質の4種類が挙げられる。
3. 想定される放射性物質の排出量から計算した結果、周辺住民の方が受ける1年あたりの最大の放射線量は0.022ミリシーベルトとされている。
(安全審査での評価値)

*なお、身近な放射線量では、日本人の自然放射線から受ける放射線量が1年あたり約2.1ミリシーベルト、集団検診の胸部X線撮影で1回あたり0.05ミリシーベルト程度。

放射性物質の動態を評価



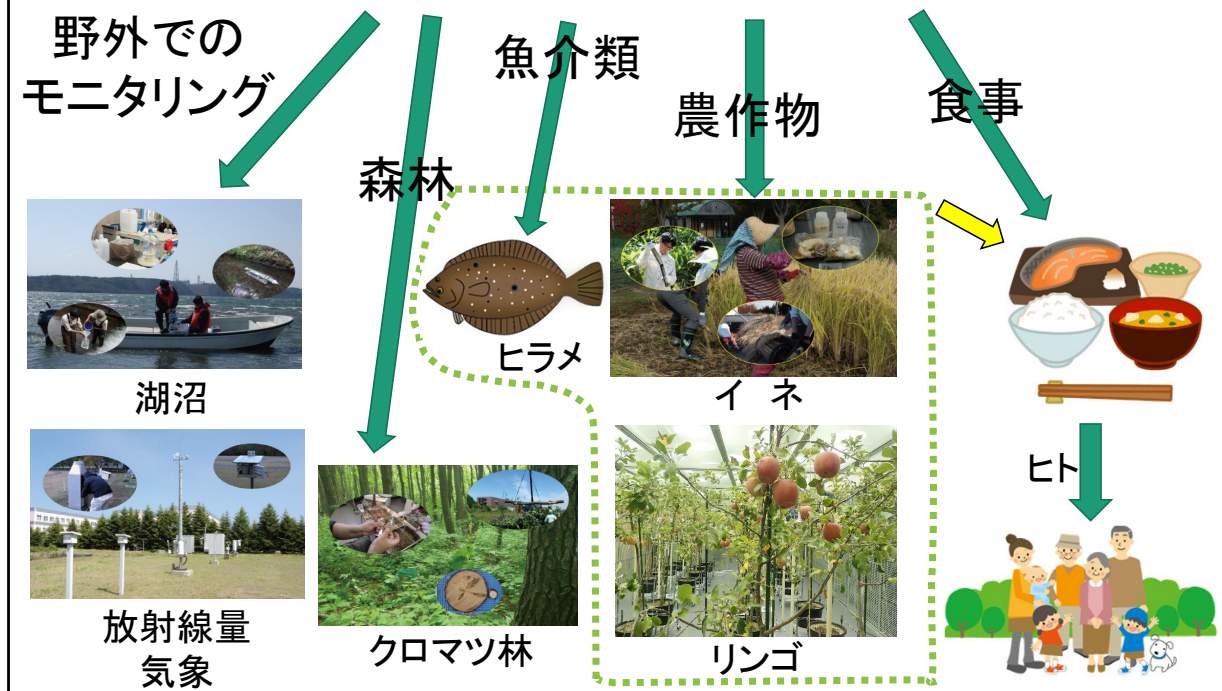
大型再処理施設の操業に伴って排出される放射性物質の挙動を明らかにするとともに、人体や生態系に対する放射線による被ばく線量の評価を行うことにより、周辺環境への影響についての住民の理解と安心の醸成に資することを目的としています。



—要点—

1. 大型再処理施設の操業後、どのような影響があるかを科学的に明らかにし、地域住民へ情報を提供していく必要がある。
2. 施設の操業に伴って排出される放射性物質の挙動を明らかにするとともに、人体や生態系に対する放射線による被ばく線量の評価を行ってきた。
3. 排出される放射性核種の環境中の動きやその実態に即した被ばく線量を評価する事を目的として、シミュレーションモデルを開発してきた。
4. モデルは、大気拡散や水の流れなどを計算するための各サブモデルで構成され、すべてを統合して計算を行う。

放射性物質の動きをみる



—要点—

1. 放射性物質が環境中に排出された場合、どのように動き、どのような場所に蓄積し、どのようにヒトへ移行するかを野外調査と室内実験の両面から明らかにしてきた。
2. 環境中に排出された放射性物質のモニタリング、加えて、青森県の主要農水産物に係る放射性物質の移行調査をトレーサ（物質の動きを調べるための目印となる物質）を用いて解明してきた。
3. 最終的には、空気や食べ物などによる人体に対する放射線の被ばく線量を求めてきた。

研究をおこなう施設



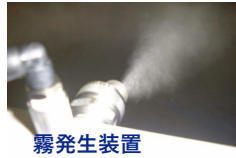
研究を進めていくために、人工気象施設や放射性物質を取り扱える管理区域、加えて様々な分析機器などが整備されている。

【実験施設】



全天候型人工気象実験施設

➤ 大型人工気象室



大きさ：幅12m、奥行11m、高さ13m
制御項目：温度・湿度・日射・降雨・降雪・霧

【測定器】



Ge半導体検出器



ICP-質量分析装置



液体シンチレーションカウンター



安定同位体比質量分析装置

—要点—

1. 環境研では、さまざまな実験を行うための施設が整備されている。
2. 全天候大型人工気象施設は、実際の気象条件に合わせた実験を行うことができ、日射、気温、湿度、降雨、降雪、霧をコントロールできる。
3. シミュレーションモデルに用いるパラメータ（各過程の速度定数や係数など）について、放射性同位元素、安定同位元素をトレーサに用いた野外調査と室内実験の両面からデータを取得してきた。

トリチウムについて



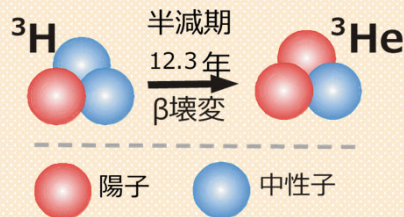
トリチウム(^3H , T)とは

質量数が3の水素同位体

質量数1：軽水素

質量数2：重水素

弱いエネルギーのベータ線を出してヘリウム3になる



半減期：12.3年

発生源：宇宙線で生成した中性子と大気中の窒素や酸素の核反応により生成する**天然**のものと、過去の大気圏内核実験や原子炉内で発生した**人為的**なもの

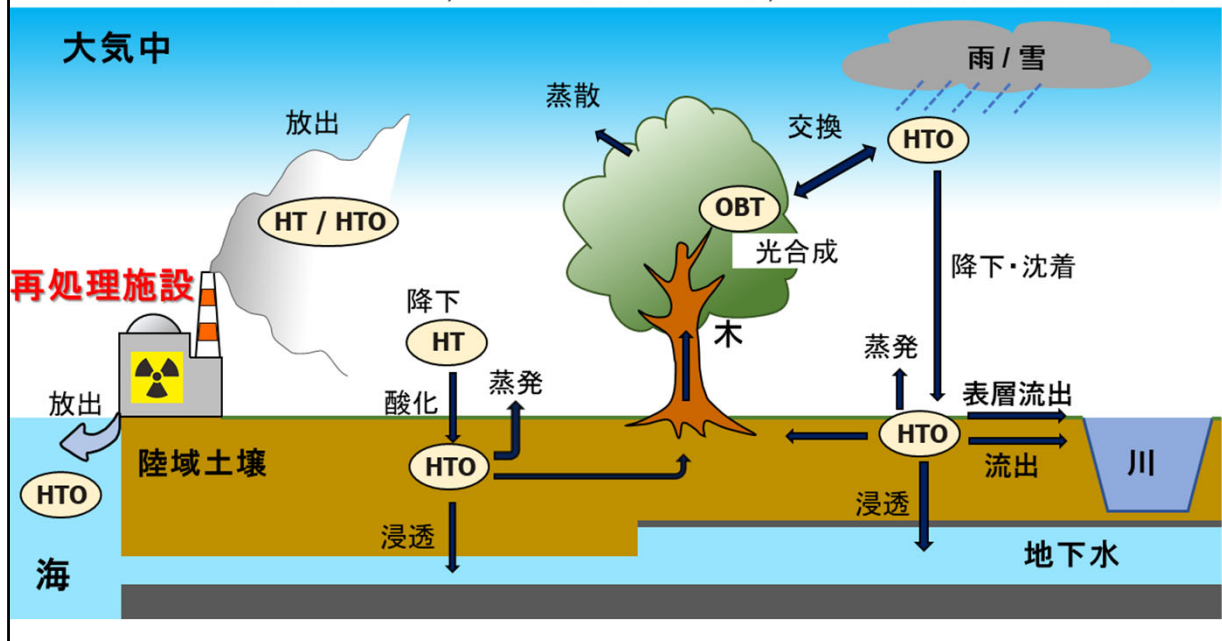
利用用途：ベータ線を蛍光物質にあてて発光させた時計の文字盤、核融合炉の燃料、生体試験用トレーサ など

—要点—

1. 今回、成果としてトリチウム (^3H) の挙動について紹介する。
2. トリチウムは半減期12.3年の、水素の放射性同位体である。
3. トリチウムは β 壊変して ^3He になるとき、弱いエネルギーの β 線（最大18.6キロ・エレクトロンボルト (keV)、平均5.7keV) を放出する。
4. 環境中に存在しているトリチウムの主な発生源には、宇宙線で生成した中性子と大気中の窒素や酸素の核反応により生成する天然のものと、過去の大気圏内核実験や原子炉内で発生した人為的なものがある。
5. 六ヶ所村の大型再処理施設の稼働に伴ってトリチウムは管理放出される。

環境中におけるトリチウムの挙動

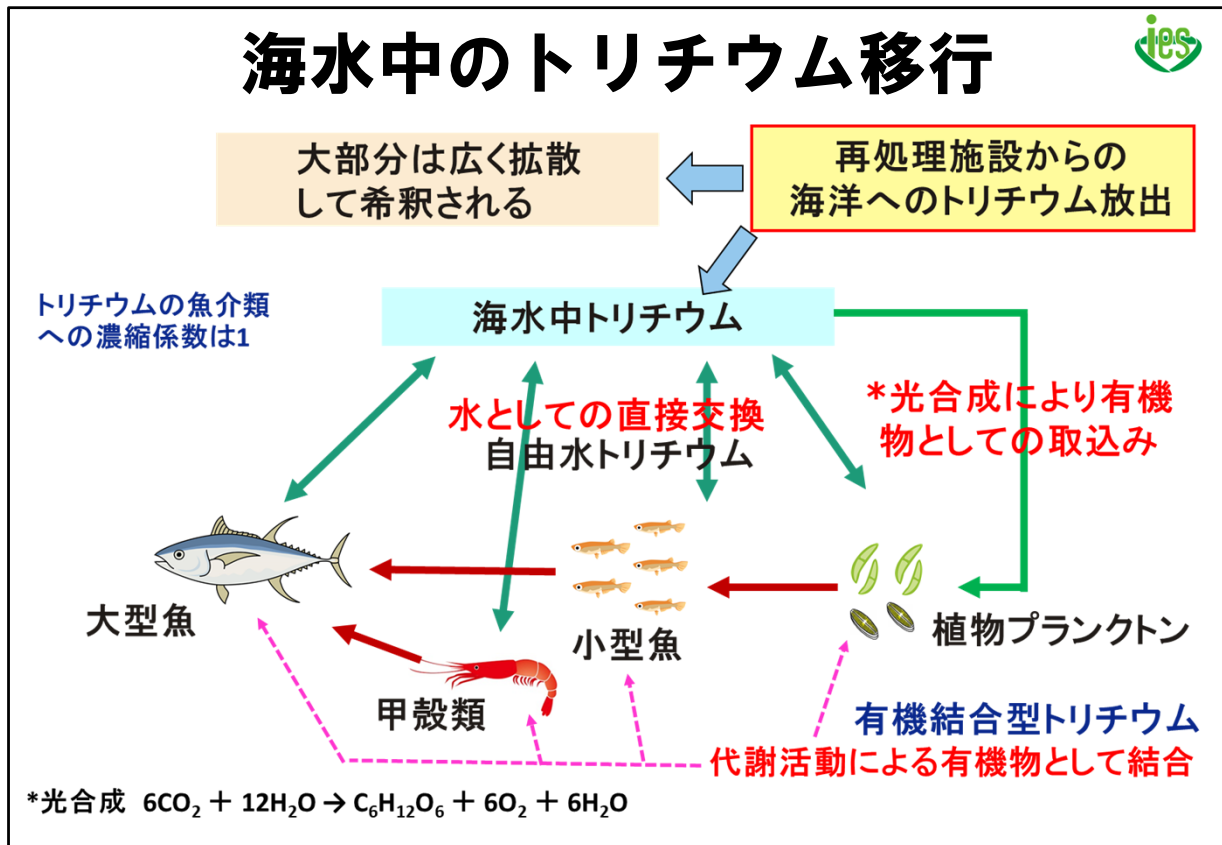
HT: トリチウムガス, HTO: トリチウム水, OBT: 有機結合型トリチウム



—要点—

1. 環境中のトリチウムは、主に、トリチウムガス（HT）、トリチウム水（HTO）、有機結合型トリチウム（OBT）などの形態で存在する。
2. 放出されたトリチウムは大気や水の流れに従って拡散し、一部は、大気や水から土壌へ、土壌から植物へと移行したり、土壌から再度大気中へ戻ったりする。
3. 植物等の生体に取り込まれると、生体内の有機物組織と結合した有機結合型トリチウムになり、生体内での滞留時間が水の形態と比べて長くなる。

海水中のトリチウム移行

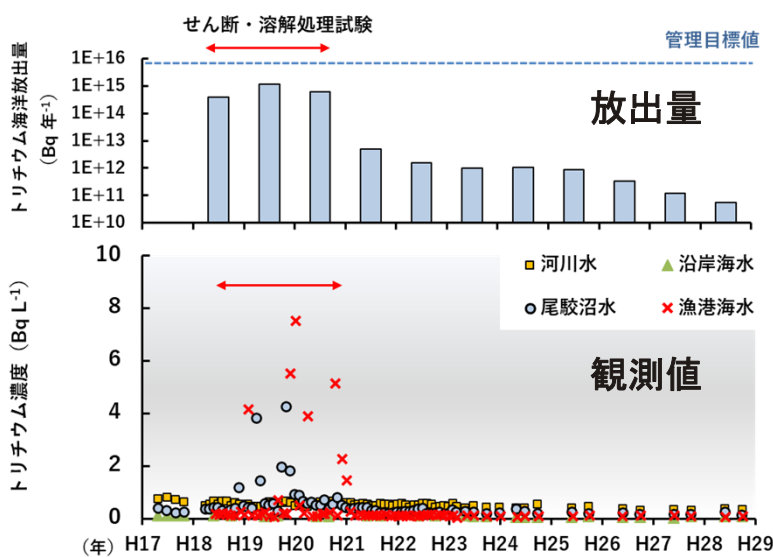


—要点—

1. 海洋中に放出されたトリチウムは海流に従って移流拡散する。
2. 海水中のトリチウムは魚介類と直接交換し、同じ濃度になる。水から生物へトリチウムの生体濃縮は起こらないので、濃縮係数*は1である。
3. 植物プランクトンなどの一次生産者は光合成によって有機物としてトリチウムを取り込む。
4. 植物プランクトンから魚までの食物連鎖によって生体内に有機結合型トリチウムとして取り込む。

*濃縮係数とは、海産生物が一定の濃度の海水に長期間置かれた場合の、海産生物中の濃度と海水中の濃度の比率を表したもので、大きいほど濃縮されることを意味する。

陸水・海水中のトリチウム濃度の観測値



再処理施設のせん断・溶解処理試験時に周辺で採取した環境水試料において試験前の水準と比べて一時的に上昇が認められた。

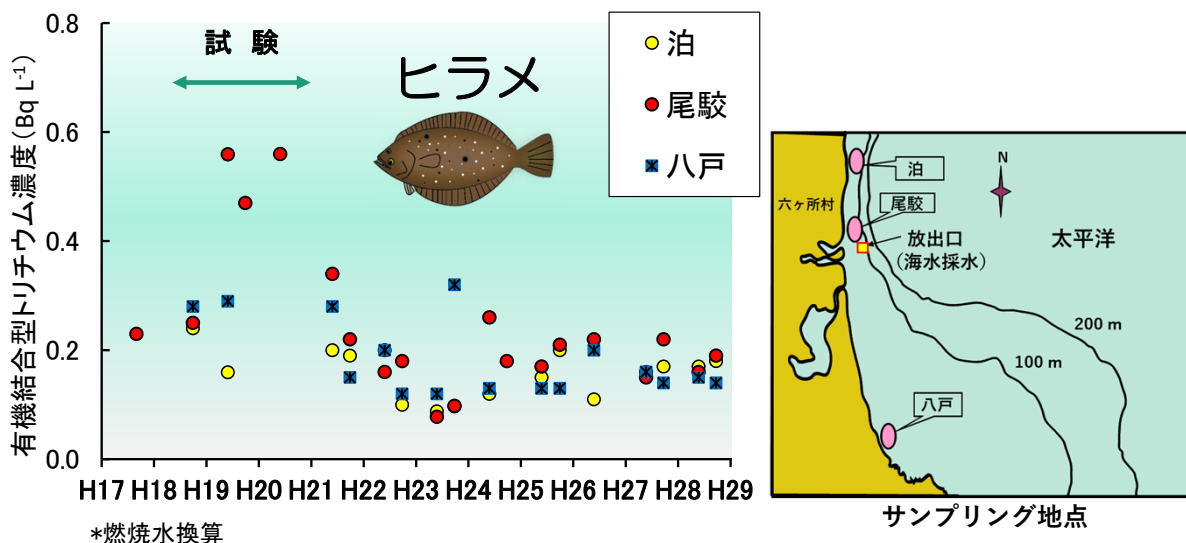
—要点—

1. 環境研では、再処理施設周辺において様々な環境試料中の放射性核種濃度の測定を継続的に行っている。
2. 平成18年3月から平成20年10月の期間、再処理施設のせん断・溶解処理試験が行われ、処理水が管理放出された。この時に周辺で採取した湖沼水・漁港海水におけるトリチウム濃度（最大7.5ベクレル/リットル）は試験前の水準と比べて一時的にわずかな上昇が認められた。試験が止まると、速やかにもとの水準に戻った。
3. 湖沼や漁港などの水が滞留しやすい場所では、トリチウムが一旦流入すると、排出されにくいため、試験前の水準より高い濃度が検出されたと考えられる。

*再処理工場で年間800 t・Uの再処理を行った場合、海水における施設寄与分の予測値は年平均300ベクレル/リットルと見積もられている。（青森県：六ヶ所再処理工場の操業と線量評価について）

また、国の原子力発電所のトリチウム排出濃度基準値は、1リットルあたり6万ベクレルである。（JNES「原子力施設運転管理年報」）

魚のトリチウム濃度の観測値



再処理施設のせん断・溶解処理試験時に尾駁沿岸で採取したヒラメの有機結合型トリチウムが試験前の水準と比べて一時的に上昇した。

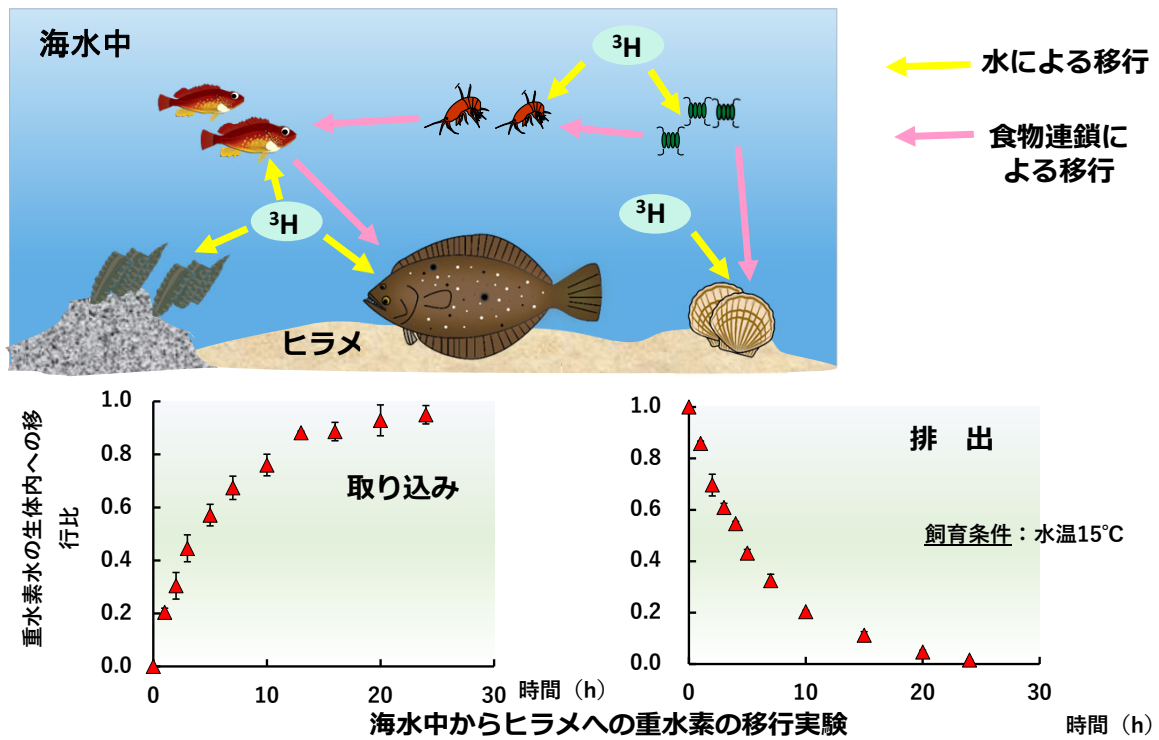
なお、試験時に施設周辺で採取された農畜水産物試料等を用いて評価したヒトへの被ばく線量は、国が定めている年線量限度1 mSvを十分下回るものであった。

—要点—

1. 太平洋側沿岸のヒラメ試料中のトリチウム濃度の測定を継続的に行っている。
2. アクティブ試験時には、六ヶ所沿岸のヒラメ中の有機結合型トリチウムが試験前の水準と比べて一時的に上昇したが、青森県の報告*しているフル操業による予測値300ベクレル/kgと比べて極めて低く、また試験後は速やかに試験前の水準に戻った。 *出典：「六ヶ所再処理工場の操業と線量評価について」
3. 魚中の有機結合型トリチウムは自由水トリチウムと比べて生物学的半減期**が長いため、排出されるまで時間を要する。
4. アクティブ試験時のヒトへの被ばく線量は国が定めている年線量限度1ミリシーベルト (mSv) を十分下回るものであった。

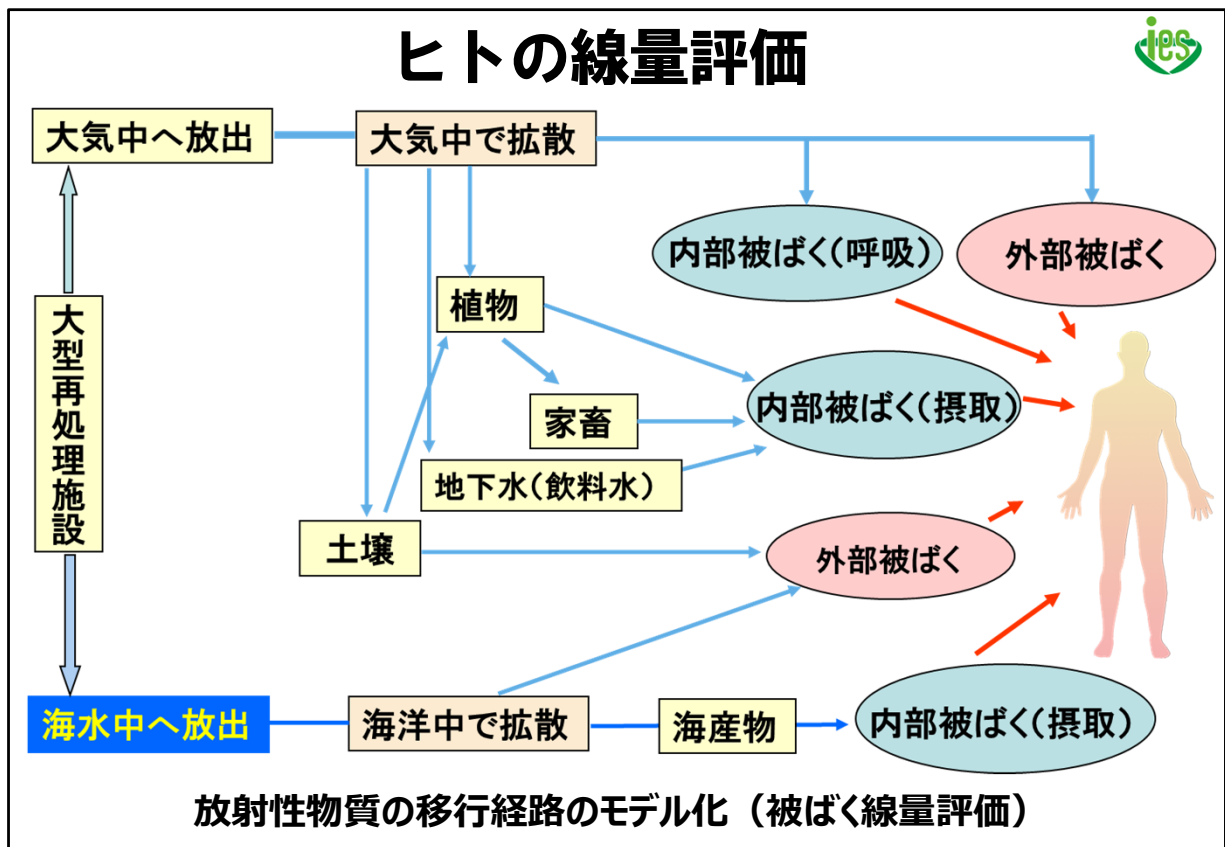
**生物学的半減期とは、生体中の特定の組織、器官に存在する放射性物質の量が代謝や排せつ等により、最初の量の半分に減少する時間である。

海産生物へのトリチウムの移行実験



—要点—

1. 海洋に放出されたトリチウムは魚介類にどのように移行するのか？、この疑問に対し定量的に説明できるように、青森県の県魚であるヒラメを対象に、トリチウムの代わりに放射性同位元素及び安定同位元素をトレーサとして取り込ませる飼育実験によりトリチウムの移行データを取得した。
2. ヒラメは、重水素を添加後24時間で概ね平衡になり、重水素を添加していない通常の水に入れると、24時間後にすべて入れ替わった。
3. ヒラメのほか、ウスメバル、マナマコ、アワビ、アナアオサ、ヨコエビについても実験を行った。



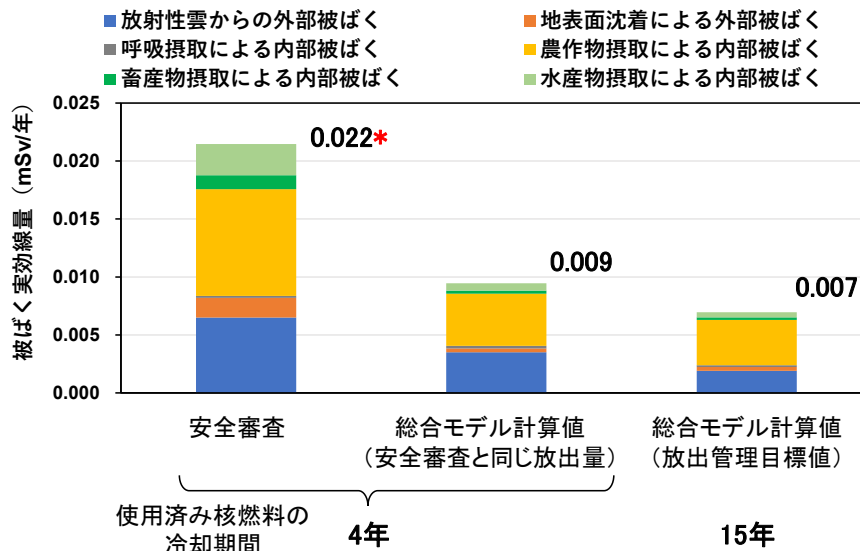
—要点—

1. 再処理施設から排出される放射性核種による実態に即した被ばく線量を評価するため、線量評価モデルを開発した。
2. モデルは、大気拡散や水の流れなどを計算するための各サブモデルで構成され、施設からの放出量や気象及び海流などのデータを入力することで、人への実効線量を求めることができる。

モデルによる被ばく線量評価結果



大型再処理施設から排出が予定される放射性物質による被ばく線量を計算し、安全審査の値より低い結果を得た。



*自然放射線による青森県民の平均被ばく線量(1.4 mSv/年)の $\frac{1}{60}$

—要点—

1. 再処理施設から排出された放射性物質による被ばく線量を計算し、安全審査の値より低くなるという結果を得た。
2. 冷却期間4年の燃料を想定した安全審査の実効線量は、0.022ミリシーベルト/年であるが、安全審査と同じ放出量で行った環境研の線量評価モデル計算値では0.009ミリシーベルト/年と小さくなった。
3. 新規制基準の15年冷却の管理目標値を用いたモデルの計算結果は0.007ミリシーベルト/年とさらに小さくなる。
4. 総合モデルでは、安全審査の申請書で利用された大気拡散の計算方法と異なり、より実態に即した地形や仮想粒子を用いた拡散計算により評価しているといった違いにより、評価値が異なると考えられる。

30年間のまとめ

- 大型再処理施設からの排出放射性核種について、**稼働前の水準及びアクティブ試験時の濃度変動**、並びに分布を解明
- 放射性核種環境移行と線量評価に関する**モデルを開発**
- 青森県内の特産農水産物及び人体内代謝に関する**実際のデータを取得**
- 県内の牧草地土壌を用いた**影響低減化手法**の基礎情報の取得
- **福島第一原子力発電所事故について**、環境試料等の観測と測定で貢献



今後の課題

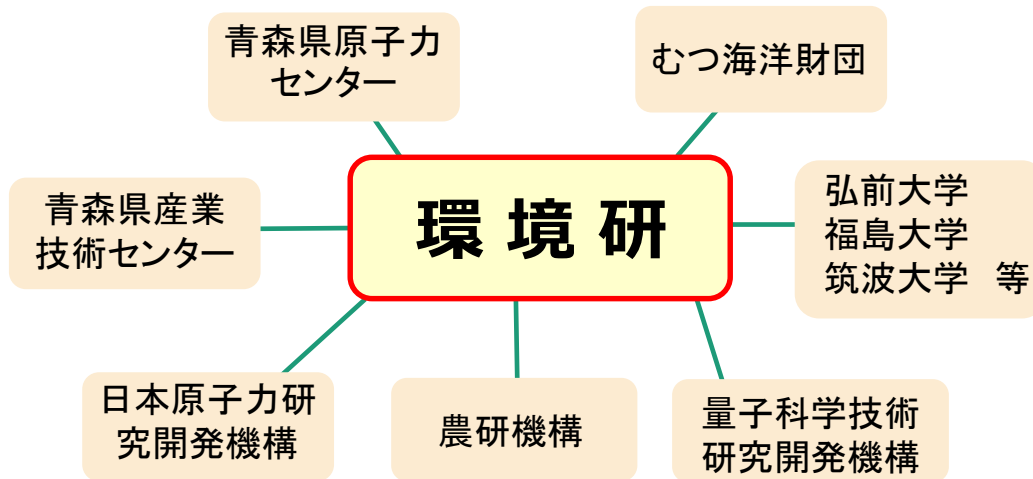
- **本格操業後の施設周辺環境における放射性物質の挙動把握**
- **万が一の事故**により放出される放射性物質の環境中移行予測及び作物への移行低減化手法開発
- **社会的に関心の高いトリチウムの生体への影響評価**

—要点—

1. 大型再処理施設からの排出放射性核種の影響を評価するため、稼働前の水準及びアクティブ試験時の濃度変動、並びに分布を明らかにした。
2. 排出放射性核種の環境移行、及びそれによる線量評価を行うためのシミュレーションモデルを開発した。
3. 青森県内の特産農水産物を対象とし、排出放射性物質の移行パラメータ、及び人体内代謝パラメータを取得した。
4. 県内各地域の牧草地土壌における放射性セシウムの牧草への移行要因及び低減化手法の実験スケールでの基礎情報を取得した。
5. 福島原発事故後、環境試料の放射性セシウムの測定と福島県内での放射性セシウムの動態調査で貢献した。
6. 本格操業後の施設周辺環境における放射性物質について挙動の解明を行っていく。
7. 万が一の事故により放出される放射性物質の環境中移行予測及び作物への移行低減化対策を行い、農業従事者への不安解消に努めていく。
8. ALPS処理水で社会的に関心の高いトリチウムの生体への影響に関して研究を進めていく。
9. 得られた成果は、科学的な評価と適切な情報発信を行い、大型再処理施設の稼働にあたっての住民にへの理解醸成に努めていく。

包括的な研究連携

大型再処理施設から排出される放射性物質の影響に関し、環境研のみではなく、県内外の大学・研究機関と連携を取り、包括的な研究を進めて行く



—要点—

1. 大型再処理施設から排出される放射性物質の影響に関し、環境研一研究機関ではなく、県内外の大学・研究機関と連携を取り、包括的な研究を進めて行く。
2. 環境研でも、これまでに培った環境動態研究の知見や人材、設備の有効活用を図るとともに、ネットワーク研究の推進による研究の進展をより一層進めるため、令和4年度より放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点へ参画を予定している。

これまでの約30年の研究でわかったこと
—放射線と放射性物質の話



②弱い放射線の生物影響について

(公財)環境科学技術研究所
生物影響研究部部長
小村 潤一郎

環境研 調査研究の2つの柱



排出放射性物質影響調査



—要点—

1. この発表では、先ほどの「環境中の放射性物質」に関する発表において最初の方で示された図の「生物影響研究部」の部分の説明をする。
2. 生物影響研究部では、低線量率の放射線が生物に及ぼす影響を探る研究をしており、この“低線量率”について次のスライド以降で説明をする。

低線量率とは



低線量：被ばくする放射線の総線量が少ないこと

高線量：被ばくする放射線の総線量が多いこと

低線量率：少しずつ放射線を被ばくすること

高線量率：短時間にたくさん放射線を被ばくすること

$$\text{総線量} = \text{線量率} \times \text{時間}$$

- 総線量と線量率、低線量と低線量率は、関連はあるが全く同じではない
- 現在、特に重要と考えられているのは、低線量率放射線被ばくの影響の理解

一要点

1. 低線量率被ばくとは、少しずつ（一般的には長期にわたり）放射線を被ばくすること。
2. 今回の発表では、低線量率放射線の生物への影響について主に説明する。
3. 総線量の単位は、グレイ* (Gy) あるいは、シーベルト** (Sv)。ここでは、グレイとシーベルトはほぼ同じと考えてよい。

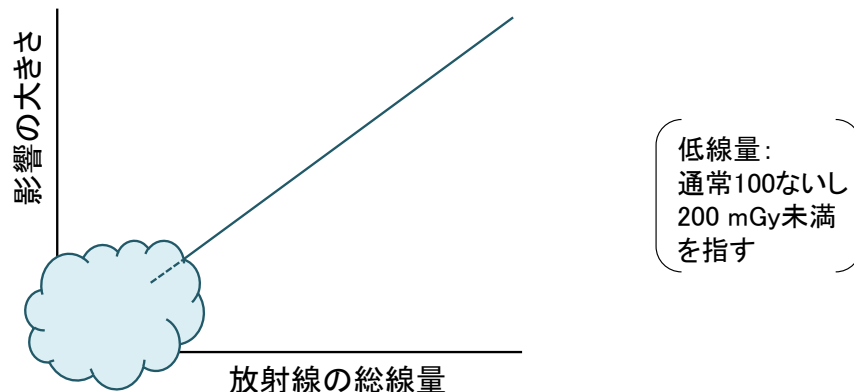
*グレイ：吸収線量。放射線の物理学的な量を示す単位。ジュール (J) /kgとも表され、放射線を受けた物質1kgあたりに吸収された放射線のエネルギーを示す。

**シーベルト：放射線のヒトへの健康リスクを表す単位。吸収線量に放射線加重係数（放射線の種類により異なる）や組織加重係数（放射線が当たった体の部位により異なる）を乗じて求める。ガンマ線（放射線加重係数：1）が体全体に均等に当たった時（組織加重係数：1）は、グレイとシーベルトは同じ値になる。

放射線の影響についてよくわかっていないこと： ies

①総線量が小さい場合（低線量）の影響

放射線の総線量と影響の大きさの関係



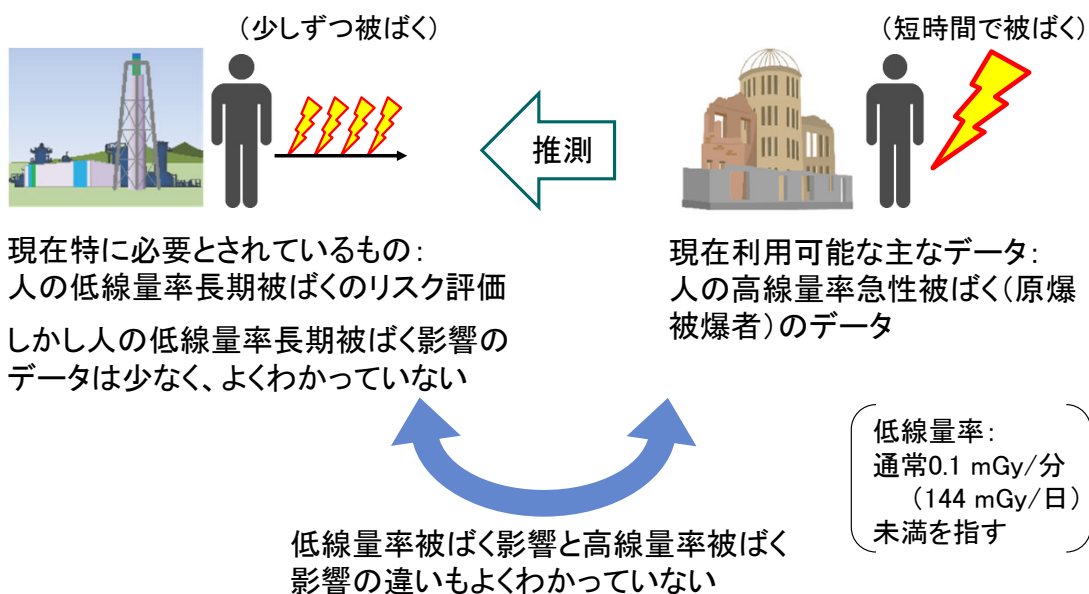
被ばくする放射線の総線量が小さくなると、その影響は小さくなり、検出が難しく、よくわかっていないことが多い。

—要点—

1. 放射線の生物への影響について「よくわかっていないこと」：まず一つ目に、総線量が小さい場合（低線量）の影響。被ばくする放射線の総線量が小さくなると、その影響は小さくなり、検出が難しく、よくわかっていないことが多い。
2. 環境科学技術研究所では、このよくわからないところ（雲マーク）、総線量が小さい時の影響を調べている。
3. “雲マーク”で示されたところでは、影響が全然ないのか、実はちょっとあるけれども見えないくらい小さいのか、区別が難しい場合が多い。そのような場合、リスク評価上は影響は全然無いのではなく、少しはあるとして計算が行われている（リスクを過小評価しないため）。
4. 線量率が低い場合、一般的には総線量も小さくなることから、ここでは、「総線量が小さくなると」を、「線量率が低くなると」に変えても、基本的には差し支えない。

放射線の影響についてよくわかっていないこと： ies

②線量率が低い場合（低線量率）の影響



—要点—

1. もう一つの「よくわかっていないこと」：線量率が低い場合（低線量率）の影響。例えば、再処理施設由来の放射線の影響を考える場合、「低線量率」（少しずつ）で長い間被ばくするとき（低線量率放射線長期被ばく）のリスクを検討することになる。
2. 人が短時間に多量の放射線を被ばくするとき（高線量率放射線急性被ばく）の影響については原爆被爆者のデータがあり、かなりよくわかっている一方、低線量率放射線長期被ばく影響のデータは少なく、よくわかっていない。
3. そこで現在、低線量率放射線長期被ばくのリスク評価は、高線量率放射線急性被ばくのデータを用いて推測する形で行われている。しかし、低線量率と高線量率放射線の被ばく影響に違いがあることが知られており、また、その違いがよくわかっていないという問題がある。
4. そこで環境科学技術研究所では、低線量率放射線の被ばく影響（少しずつ被ばくしたとき）と高線量率放射線の被ばく影響（短時間で被ばくしたとき）の違いも調べている。

環境科学技術研究所における 生物影響研究の目的



実験動物(マウス)を用いて、

低線量率(あるいは低線量)放射線被ばくの
影響を明らかにする。

また、低線量率放射線被ばく影響と高線量率
放射線被ばく影響の違いを明らかにする。



—要点—

1. ここまでの話をまとめると、環境科学技術研究所では、放射線の線量率が低い時(低線量率)あるいは総線量が小さい時(低線量)の影響を調べている。
2. また、低線量率放射線被ばく影響(少しずつ被ばくしたときの影響)と高線量率放射線被ばく影響(短時間に被ばくしたときの影響)の違いを調べている。
3. ただし、人では実験ができないので、実験動物(マウス)を用いて調べている。

これまで調べてきた主なこと

放射線を少しずつ長期にわたって被ばくしたマウスでは、

寿命はどうなるの？

胎児が被ばくするとどうなるの？

どんな病気になるの？
がんが増えるの？

どれだけ被ばくしたかわかるの？

遺伝子に影響があるの？

影響は子孫に伝わるの？

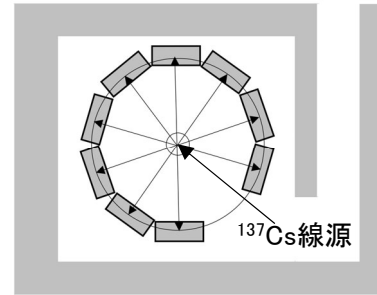
もし悪い影響があるなら、その影響を打ち消すことはできるの？



—要点—

1. これまで約30年間にわたり、調べてきた主な内容。
2. 低線量率放射線の被ばく影響はどのようなものかということ、いろいろな観点から調べてきた。

環境科学技術研究所の低線量率ガンマ線連続照射室



照射室を上から見た図



マウス飼育ケージ

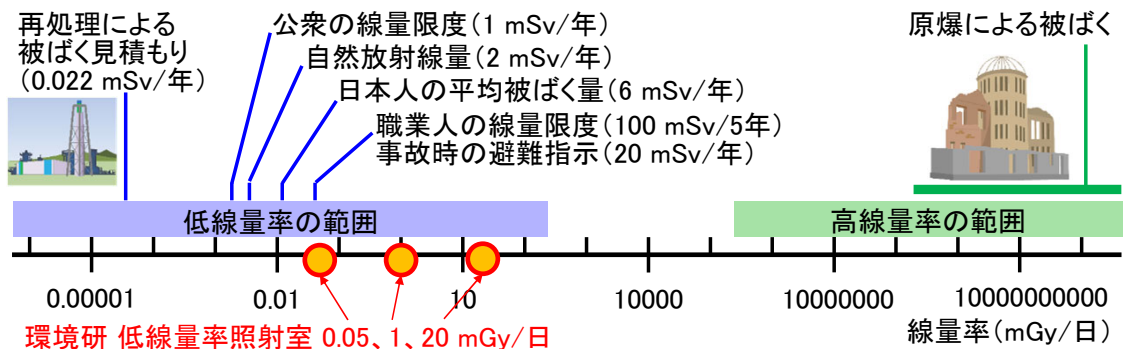
放射線を少しずつ長期にわたって多くのマウスに照射し、そのわずかな影響を調べる。

—要点—

1. 環境科学技術研究所の生物影響研究に関する研究施設を紹介する。
2. 写真のような実験動物（マウス）に放射線を照射する照射室が5つある。部屋の中心に放射性セシウムの放射線源があり、それをマウスのケージが同じ距離で取り囲む形になっている。
3. このようなタイプの照射室では、1室あたり300匹以上のマウスに対して、放射線を少しずつ長い期間にわたって照射することが可能である。

[右下] ケージ（かご）の中で飼育されているマウスの様子。左側には、運動用の廻し車があり、右側には、餌がある。

環境研の実験で主に使用している低線量率と総線量



	線量率	400日間照射した場合の線量	
低線量率	0.05 mGy/日	20 mGy	<ul style="list-style-type: none"> ・自然放射線レベルの約10倍 ・職業人の年平均線量限度に相当
	1 mGy/日	400 mGy	<ul style="list-style-type: none"> ・自然放射線レベルの約200倍 ・宇宙ステーションでの放射線レベルに相当
	20 mGy/日	8000 mGy	<ul style="list-style-type: none"> ・自然放射線レベルの約4000倍 ・発がん等の影響が確実に現れると予測される ・この線量をいちどきに高線量率で照射すると、マウスは短時間で死亡する

—要点—

1. 環境科学技術研究所の実験で主に使用している低線量率と総線量について説明する。上の直線は線量率を示していて、左側が低い線量率、右側が高い線量率になり、ひと目盛りが10倍の違いを示している。
2. 自然放射線の線量率（1年に2ミリシーベルト）や、職業人の被ばくや事故時の避難の基準（1年間に20ミリシーベルト）に比べて、原爆の場合の線量率は、桁が全く異なる（10桁以上異なる）。
3. 環境科学技術研究所の低線量率ガンマ線連続照射室の線量率は、ここに示してある3種の低線量率である。
4. 一番低い1日あたり0.05ミリグレイは、標準的な実験照射日数である400日（およそ1年）では総線量20ミリグレイ（20ミリシーベルト）となり、自然放射線の約10倍、職業人の線量限度・事故時の避難指示の基準に相当。
5. その20倍にあたる1日1ミリグレイは、400日では400ミリグレイ（400ミリシーベルト）になり、自然放射線レベルの約200倍、宇宙ステーションでの放射線のレベルに相当する。
6. さらにその20倍にあたる1日20ミリグレイは、低線量率の範囲ではあるものの、やや高いもので、400日では、8000ミリグレイ（8000ミリシーベルト）になり、自然放射線レベルの約4000倍。この8000ミリグレイという線量をいちどきに高線量率で照射すると、マウスは短時間で死亡する。

最初の実験：寿命試験（1995～2002年）



（当時は、低線量率被ばくの影響についてはほとんどわかっておらず、低線量率被ばくでは寿命が長くなるなどの意見もあった。）

非照射群(非照射で死ぬまで飼育)



B6C3F1マウス
オス・メス 各500匹

終生飼育→

照射群(3種類の低線量率のガンマ線を400日間連続照射し、その後非照射で死ぬまで飼育)

0.05 mGy/日 × 400日 =	20 mGy	オス・メス 各500匹
1 mGy/日 × 400日 =	400 mGy	オス・メス 各500匹
20 mGy/日 × 400日 =	8000 mGy	オス・メス 各500匹



400日間

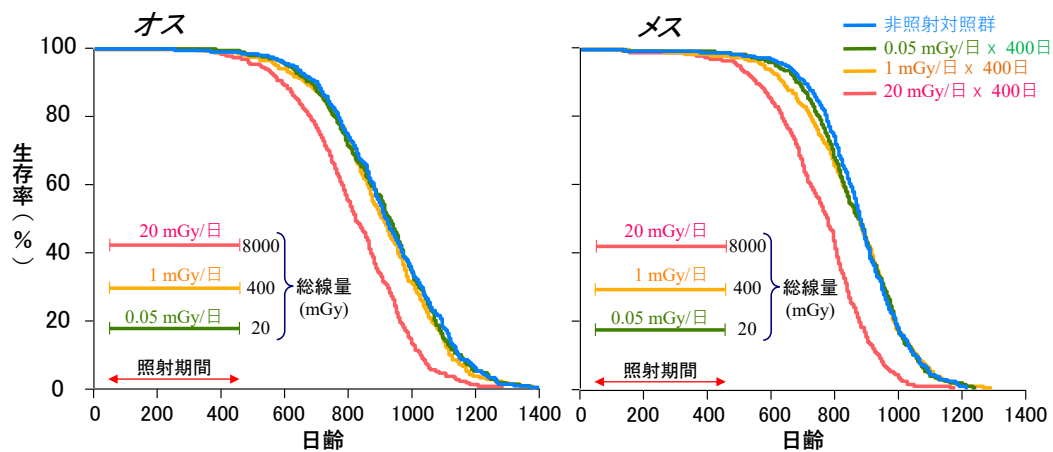
終生飼育→

3つの異なる低線量率の照射群で、非照射群と比較して寿命は短くなるか？

—要点—

1. 環境科学技術研究所で最初に行った生物影響に関する実験を紹介する。
2. 当時、1990年代には、低線量率放射線被ばくの影響についてはほとんどわかっておらず、低線量率被ばくでは寿命が長くなるなどの意見もあった。
3. この実験では、1グループ500匹のマウスにガンマ線を少しずつ（低線量率で）長期にわたって照射し、照射後もずっと飼育して寿命を調べた。
4. マウスの寿命は約3年であり、照射は生後56日目（大人になったばかり）から400日間（中年になるまで）、連続で行った。
5. マウスへの放射線の照射は以下の3つの条件（前頁を参照）。
 - 線量率が1日あたり0.05ミリグレイで総線量が20ミリグレイ
 - 線量率が1日あたり1ミリグレイで総線量が400ミリグレイ
 - 線量率が1日あたり20ミリグレイで総線量が8000ミリグレイ

最初の実験：寿命試験（1995～2002年）



低線量率放射線被ばくでも、線量率がやや高めで、総線量が多いと、明確な寿命短縮が認められる(20 mGy/日オスメス、1 mGy/日メス)。線量率が低くなり、基準値程度(0.05 mGy/日≒20 mSv/年)になると、影響は検出できなくなる。



その後、様々な指標を用いて低線量率放射線の生物影響を調べた。

—要点—

1. 実験の結果は以下の通りであった。

- 線量率が1日あたり0.05ミリグレイで総線量が20ミリグレイ
明確な（統計学的に有意な）影響は見られなかった。この条件は、福島における避難指示基準（20ミリシーベルト/年）や職業人の被ばく限度（100ミリシーベルト/5年=20ミリシーベルト/年）にほぼ相当。
- 線量率が1日あたり1ミリグレイで総線量が400ミリグレイ
メスのみで寿命短縮が見られた（-21日）。
- 線量率が1日あたり20ミリグレイで総線量が8000ミリグレイ
オス、メス両方とも、寿命短縮が見られた（オス：-100日、メス：-120日）。

2. なお、どの条件でも照射による寿命延長は認められなかった。

環境研のマウス実験で明らかになった 低線量率放射線長期被ばく影響



線量率 (400日照射の場合の総線量)		0.05 mGy/日 (20 mGy)	1 mGy/日 (400 mGy)	20 mGy/日 (8000 mGy)
指 標	寿命	—	メスのみ短縮	短縮
	悪性腫瘍	—	—	増加
	抗腫瘍免疫	—	—	低下
	卵母細胞減少/閉経	実施せず	加速	加速
	遺伝子変異(染色体異常)	—	増加	増加
	遺伝子変異(DNA変異)	—	—	増加
	遺伝子発現	わずかな変化あり	わずかな変化あり	変化あり
	子孫への影響(寿命)	—	—	オスのみ短縮
	子孫への影響(遺伝子変異)	—	—	増加
	胎児被ばく影響(18日間照射)	—	—	—
影響のまとめ		影響は検出が難しいレベル	一部の指標で影響を明確に検出	多くの指標で障害・影響は明らか

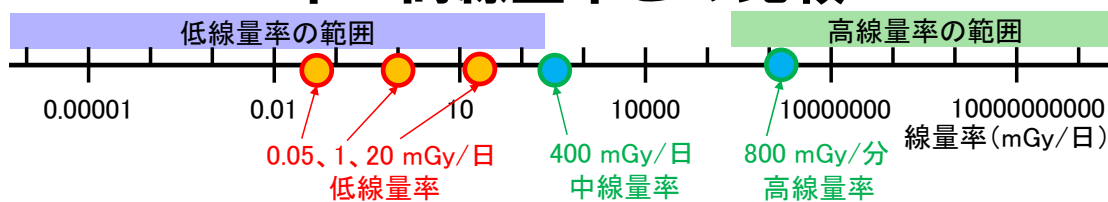
—: 検出されず

—要点—

1. 寿命以外に、様々な指標を用いて解析を行った結果である。

- 線量率が1日あたり0.05ミリグレイで総線量が20ミリグレイ
影響を明確に（統計学的に有意に）検出するのは難しい。
- 線量率が1日あたり1ミリグレイで総線量が400ミリグレイ
一部の検出感度が高い指標（寿命、卵母細胞減少、染色体異常）では影響が明確に認められるが、他の指標では検出するのが難しい。
- 線量率が1日あたり20ミリグレイで総線量が8000ミリグレイ
多くの指標で障害や影響が明確に認められる。

中・高線量率との比較



	線量率	400日間照射した場合の総線量	
低線量率	0.05 mGy/日	20 mGy	<ul style="list-style-type: none"> ・自然放射線レベルの約10倍 ・職業人の年平均線量限度に相当
	1 mGy/日	400 mGy	<ul style="list-style-type: none"> ・自然放射線レベルの約200倍 ・宇宙ステーションでの放射線レベルに相当
	20 mGy/日	8000 mGy	<ul style="list-style-type: none"> ・自然放射線レベルの約4000倍 ・発がん等の影響が確実に現れると予測される ・この総線量をいちどきに高線量率で照射すると、マウスは短時間で死亡する
中線量率	400 mGy/日		<ul style="list-style-type: none"> ・より大きな影響が推測される
高線量率	800 mGy/分		<ul style="list-style-type: none"> ・影響がすでによく調べられている

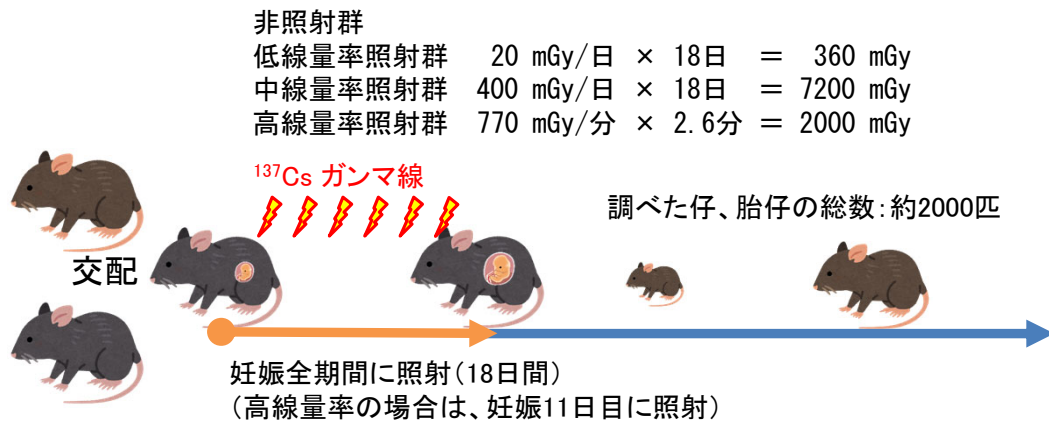
—要点—

1. 一部の実験では、低線量率の範囲よりも高い線量率の放射線の影響との比較も行っている。
2. 高線量率としては、1分あたり約800ミリグレイを用いている（1日当たりにすると、約100万ミリグレイ）。
3. 低線量率と高線量率の中間の線量率（中線量率と呼んでいる）として、1日あたり400ミリグレイを用いている。

胎児（母体内）被ばく影響



低、中、高線量率のガンマ線を胎児期に照射し、その後いろいろな時期に影響を調べる



—要点—

1. 胎児に、低線量率、中線量率、高線量率放射線を照射して影響を調べた結果を紹介する。
2. マウスは妊娠期間が約20日と短いので、照射期間が成体での実験よりも短い。したがって総線量は少ない。

胎児（母体内）被ばく影響



線量率 (総線量)		低線量率 20 mGy/日 (360 mGy)	中線量率 400 mGy/日 (7200 mGy)	高線量率 800 mGy/分 (2000 mGy)
指 標	外表奇形	—	—	奇形発生
	骨化(成長)	—	遅延	遅延
	生殖細胞減少	—	ほぼ消滅	(実施せず、ただし報告あり)
	寿命	—	短縮	(実施せず、ただし報告あり)

—: 検出されず

外表奇形の例



・一部の影響(例えば外表奇形)は、線量率が高い場合にのみ起こる(線量率にしきいがある)可能性も考えられる。

—要点—

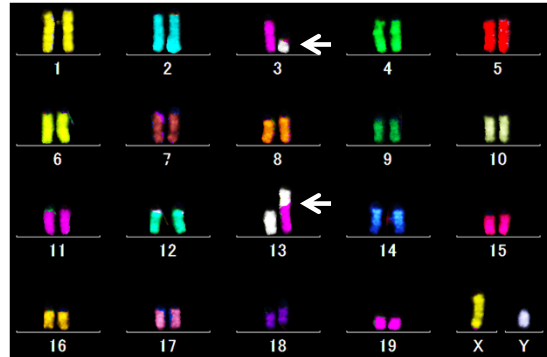
1. 低線量率(20ミリグレイ/日)では、照射期間が短く線量が少ないこともあり、様々な指標を調べても影響はほとんど検出されない。
2. 外表奇形については、高線量率でのみ影響が認められた。
3. 高線量率放射線被ばくによる奇形誘発は、線量が100ミリグレイ以上でのみ認められる(線量にしきいがある)とされている。
4. この指標については線量率、線量の両方に関してしきいがある(ある線量率、ある線量以下では影響がない)可能性も考えられる。

染色体異常頻度

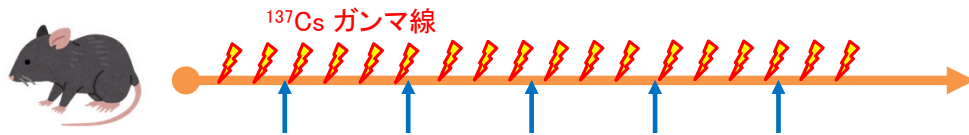


低、中、高線量率のガンマ線を様々な総線量で照射したマウスの脾臓のリンパ球の染色体異常を検査(多色FISH法(染色体ペインティング))

非照射群
低線量率照射群 1 mGy/日
低線量率照射群 20 mGy/日
中線量率照射群 400 mGy/日
高線量率照射群 890 mGy/分



(3番染色体と13番染色体の転座型染色体異常の例)

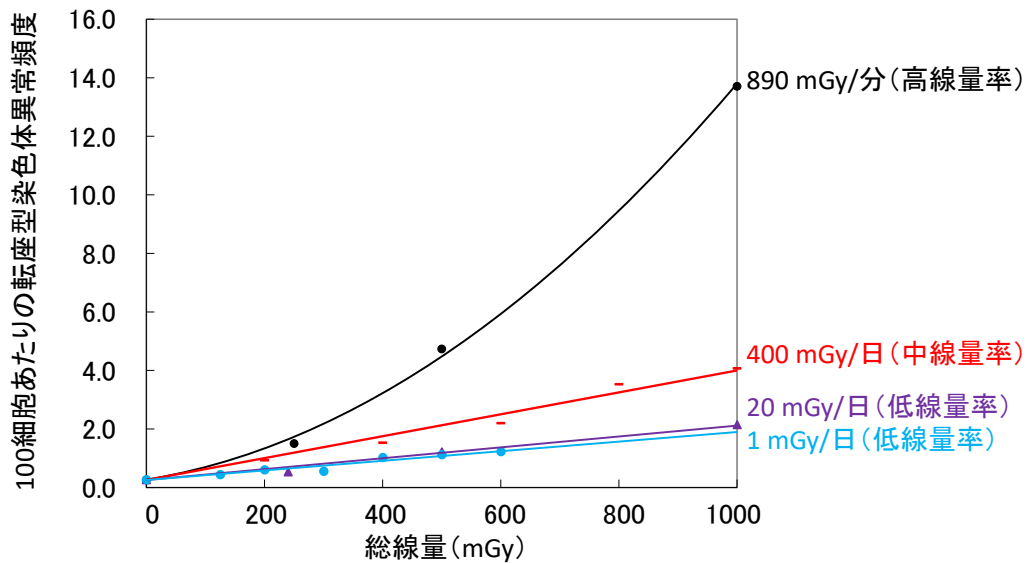


放射線を照射し続け、様々な総線量になった時に1000個以上のリンパ球を検査

—要点—

1. 染色体異常誘発に関して、低線量率、中線量率、高線量率の放射線影響の比較を行った結果を紹介する。
2. 染色体は細胞の中にある遺伝子の入れ物であり、マウスの場合20対(40本)ある。染色体はそれぞれ番号が付けられており、特別な染色技術を使うと、色分けして区別することができる。
3. スライドの矢印で示した染色体(3番と13番)は、元の染色体が放射線で切れた後に、間違ってつながれてしまった「転座型染色体異常」と呼ばれる異常である。
4. このような異常を数えた結果を次に示す。

染色体異常頻度を指標とした線量率効果



線量率が高線量率から中線量率、低線量率と低くなるにつれ、同じ総線量により誘発される染色体異常の頻度が小さくなる。このように、線量率が低いと影響が小さくなることを、線量率効果と呼ぶ。

—要点—

1. 横軸は放射線の総線量、縦軸は100細胞あたりの転座型染色体異常の数を示した結果である。
2. 4つの異なる線量率の場合の異常誘発頻度が示されている。
3. 線量率が高線量率から中線量率、低線量率と低くなるにつれ、同じ総線量により誘発される染色体異常の頻度が少なくなることが明らかとなった。
4. このように、線量率が高いと影響が大きく、線量率が低いと影響が小さい場合があり、このような傾向を「線量率効果」と呼ぶ。

まとめ



- ◆低線量率放射線であっても、自然放射線レベルの4000倍程度である場合、寿命の短縮や悪性腫瘍の増加が認められる。しかし、線量率、総線量が小さくなると、影響は小さくなっていく。職業人や事故時避難の基準値程度の線量率(1年に20ミリシーベルト)になると寿命の短縮や悪性腫瘍の増加は検出されない。
- ◆一部の影響(奇形など)に関しては、線量率がある程度高くないと影響がみられない可能性も考えられる。
- ◆一部の影響(染色体異常など)に関しては、線量率が低いと、線量率が高い場合と比較して、総線量が同じでも影響がより小さい。

これから新たに調べること（赤字）



放射線を少しずつ長期にわたって被ばくしたマウスでは、

寿命はどうなるの？

胎児が被ばくするとどうなるの？

どんな病気になるの？
がんが増えるの？

こどもが被ばくするとどうなるの？

遺伝子に影響があるの？

食べた物から被ばくとどうなるの？

影響は子孫に伝わるの？

どれだけ被ばくしたかわかるの？

もし悪い影響があるなら、その影響を打ち消すことはできるの？

—要点—

1. 今後、子どもの被ばくの影響、トリチウム（水素の放射性物質）を体内に取り込んだ時の影響についても研究を行っていく予定である。

**これまでの約30年の研究でわかったこと
—放射線と放射性物質の話**

③海における放射性物質の 動きについて

**(公財) 日本海洋科学振興財団
むつ海洋研究所
中山 智治**

これまでに六ヶ所村沖合海洋放射能等調査で得られた成果から、
「海における放射性物質の動き」について、調査結果と合わせて簡単に紹介します。

公益財団法人日本海洋科学振興財団

故日高孝次先生（初代の東京大学海洋研究所長）により昭和46年（1971）に設立された日高海洋科学振興財団を前身として、日本海洋科学振興財団は設立された財団です。

平成7年10月（1995.10） 日本海洋科学振興財団 発足
日高海洋科学振興財団の名称及び寄付行為の一部を変更
平成25年4月（2013.4） 公益財団法人化



財団の目的

- ・海洋科学及び技術研究の振興を図ること
- ・海洋科学及び技術に関する調査、研究等を行うこと
- ・我が国の海洋に関わる科学技術の発展に寄与すること
- ・.....

主な事業

- ・「日本海洋学会日高論文賞」の副賞授与
- ・若手研究者への海外渡航費の援助
- ・海洋に関する調査研究 ⇒ **六ヶ所村沖合海洋放射能等調査事業**
- ・「むつ科学技術館」の管理運営、イベント等開催
(日本原子力研究開発機構からの受託事業)



—要点—

日本海洋科学振興財団は故日高孝次先生（初代の東京大学海洋研究所長）により設立された日高海洋科学振興財団を前身として、日本海洋科学振興財団は設立された財団です。財団の目的は海洋科学及び技術研究の振興を図り、また、自ら調査・研究を行うことにより海洋科学の発展に寄与することです。そのために、これらの事業を行っています。

六ヶ所村沖合海洋放射能等調査の目的

<http://www.aomori-hb.jp/index.html>

再処理工場から周辺海域に管理排出される放射性物質が海洋の中でどのように動くかをできるだけ正確に把握する

⇒ 青森県民の安心・安全につなげる

海洋中の物質の動きを把握するためには

- ・海を理解すること（観測）
- ・物理・化学に知識を使い、拡散モデルを構築

- 実際に本事業では
六ヶ所村沖合で海洋観測を行い（海を知る）、得た知識を使って
 - ・海水の流れを計算する
 - ・海洋中で物質の動きを計算することを行なっています

—要点—

調査・研究事業の一つとして行っている六ヶ所村沖合海洋放射能等調査は、再処理工場から周辺海域に排出される放射性物質が海洋の中でどのように動くかをできるだけ正確に把握し、県民の安心・安全に繋げることを目的としています。そのために必要なのは、まず観測を通して六ヶ所沖合の海を理解すること、それから得た知識を用いて放射性物質の輸送モデルを構築することです。具体的には、六ヶ所沖合で観測を行い、それらの結果を用いて流れや物質の動きを計算することです。

六ヶ所村沖合海洋放射能等調査

六ヶ所村沖合海洋放射能等調査は、再処理工場から排出される放射性物質による周辺海域への影響について、できるだけ排出実態に即した条件設定や気象及び海象の変動をきめ細かく把握することにより、施設から排出される放射性物質に起因する周辺住民等の被ばく線量をより現実的に評価し、県民の安心感の醸成に寄与する。

1. バックグラウンド環境の把握

1-1. 海洋に関する環境情報の収集

(1) 下北半島周辺海域の海洋構造、流動に関する知見の収集

1-2. 放射性物質に関わる環境情報の収集

(1) 海水

(2) 堆積物

(3) 懸濁粒子・沈降粒子

2. 排放射能物質の希釈状況等の把握

2-1. シミュレーションモデル（固有モデル）の開発

2-2. アクティブ試験時の評価

(1) モニタリング結果の検討

(2) 放出実績に基づいた拡散状況の推定

(3) ^3H 濃度水平分布の観測

2-3. シミュレーションモデル（固有モデル）の高度化

(1) 海水循環モデル

(2) 核種移行モデル

2-4. 運用システム構築に向けた固有モデルの高精度化

(1) 放出口周辺の詳細計算

(2) パラメータの最適化

(3) 生物中濃度推定機能

3. 運用システムの整備

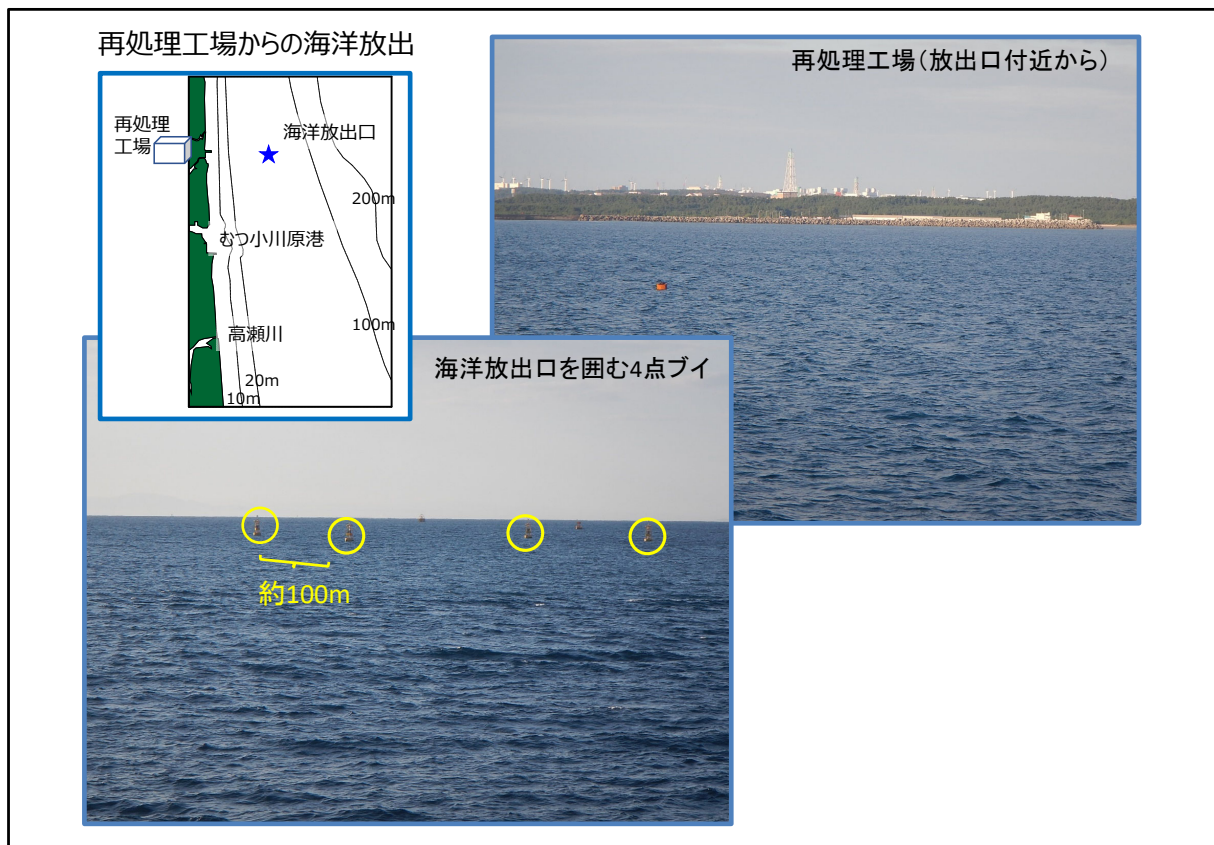
4. 調査事業の成果利用・発信



図 海洋放出口のある六ヶ所村沖合周辺の海況

—要点—

六ヶ所村沖合海洋放射能等調査でこれまでに進めてきた調査内容。



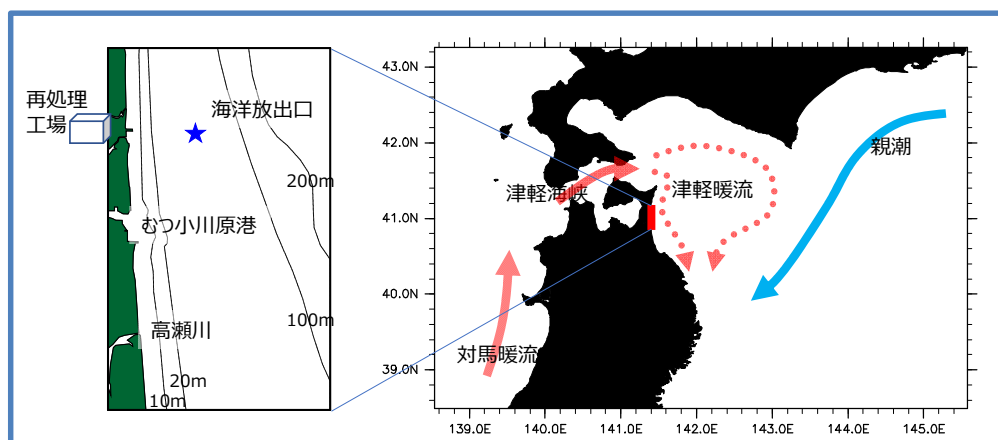
—要点—

海洋放出口は岸から約2km、水深約45mの場所にあります。

本日のお話

- ①下北半島周辺海域の海洋構造、流動場（バックグラウンド環境）の把握とシミュレーション（海水循環モデル）
- ②排出放射性物質の希釈状況等の把握として実施した排出放射性物質の拡散シミュレーション（核種移行モデル）

①下北半島周辺海域の海洋構造、流動場の把握
下北半島周辺海域の流れ

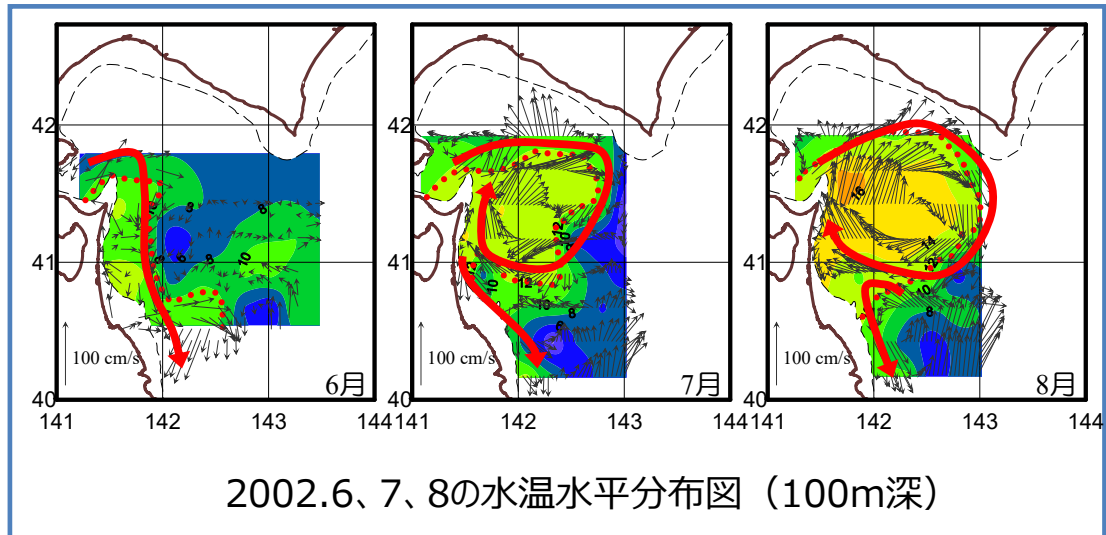
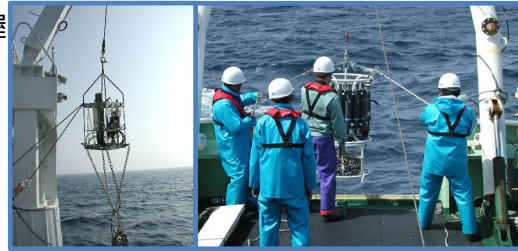


海洋放出口の位置と周辺海域の流れ

—要点—

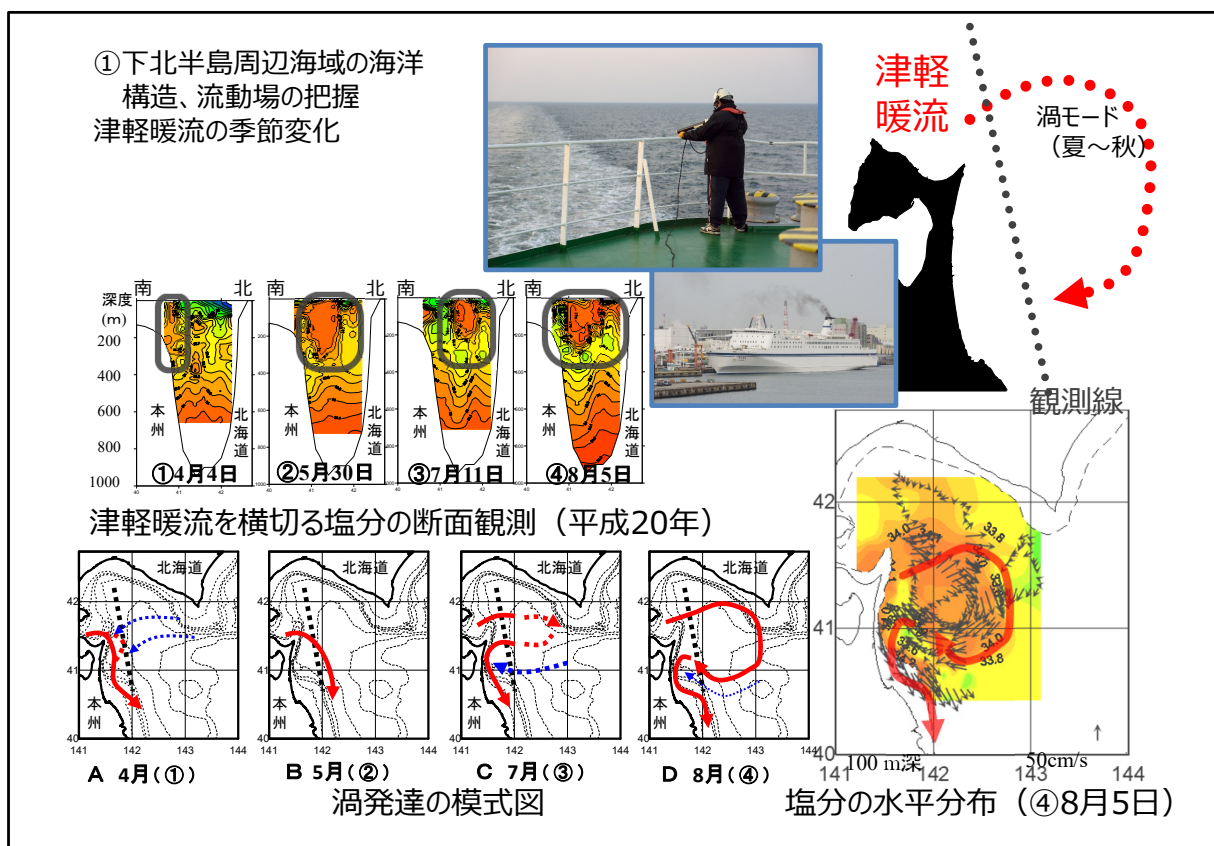
海洋放出口には津軽暖流や親潮などの流れが影響します。

①下北半島周辺海域の海洋構造、流動場の把握
津軽暖流の季節変化



—要点—

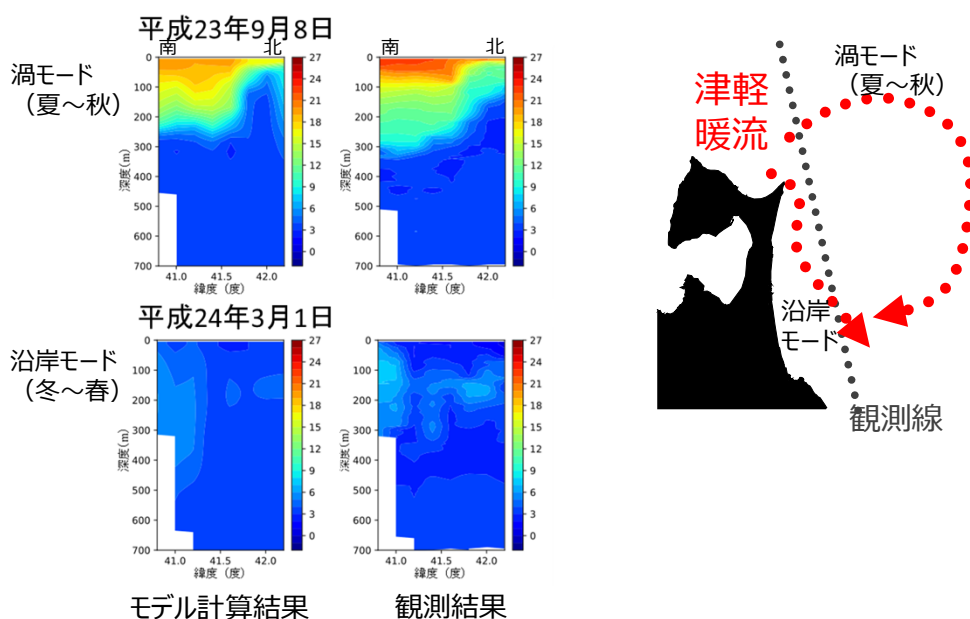
図は2002年6月～8月に下北半島東方の海域で観測を実施した結果です。
津軽暖流による暖水渦が徐々に発達する様子が観測されています。



—要点—

1. 平成20年4月4日～8月5日における津軽暖流を南北に横切る塩分の断面図 (4回)、渦の発達過程を示す模式図、8月5日の塩分の水平分布図です。
2. 津軽暖流を横切る塩分の断面において、0 m深～200 m深に分布する相対的に塩分の高い海水 (黒線囲み) が津軽暖流にあたります。4月 (①) では津軽暖流が本州側に分布し沿岸モードであることが推定され (模式図ではA)、5月 (②) では徐々に津軽暖流の分布域が広がります (模式図ではB)。7月 (③) では津軽暖流の分布域が北海道側に偏り、渦の発達が始まり (模式図ではC)、8月 (④) では津軽暖流の分布域が広くなり渦が発達したことを示しています (模式図ではD)。
3. ④8月5日では渦全体の観測も実施しており、渦が発達する際に下北半島沿岸で南向きの強い流れが生じており、このような特徴を海洋モデルでも再現する必要があります。

①下北半島周辺海域の海洋構造、流動場の把握
シミュレーションモデル（海水循環モデル）の検証
津軽暖流を横切る水温鉛直断面の比較



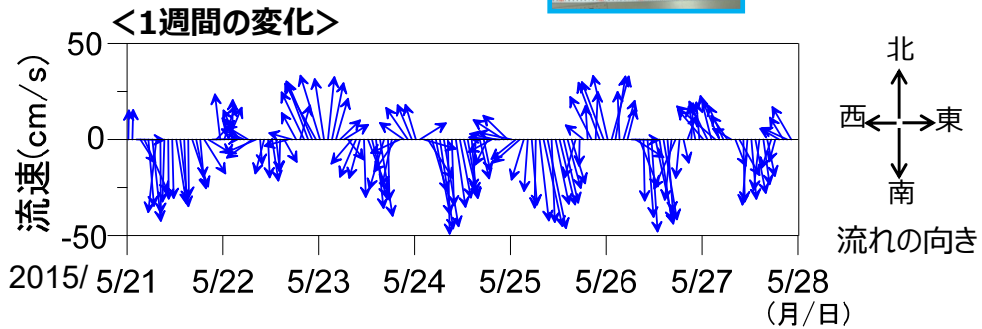
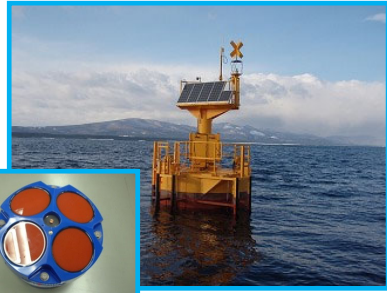
—要点—

シミュレーションモデル（海水循環モデル）の検証として、モデル計算結果と観測結果を比較しました。

夏～秋には暖かい海水が広く分布して、渦モードを再現しています。

冬～春には暖かい海水が岸寄りに分布して、沿岸モードを再現しています。

①下北半島周辺海域の海洋構造、流動場の把握
六ヶ所村沿岸の流れ



- ・岸に沿った南北方向の流れが主
- ・約1日周期の変動がある（大きさは時期により変化） ……潮流の影響

—要点—

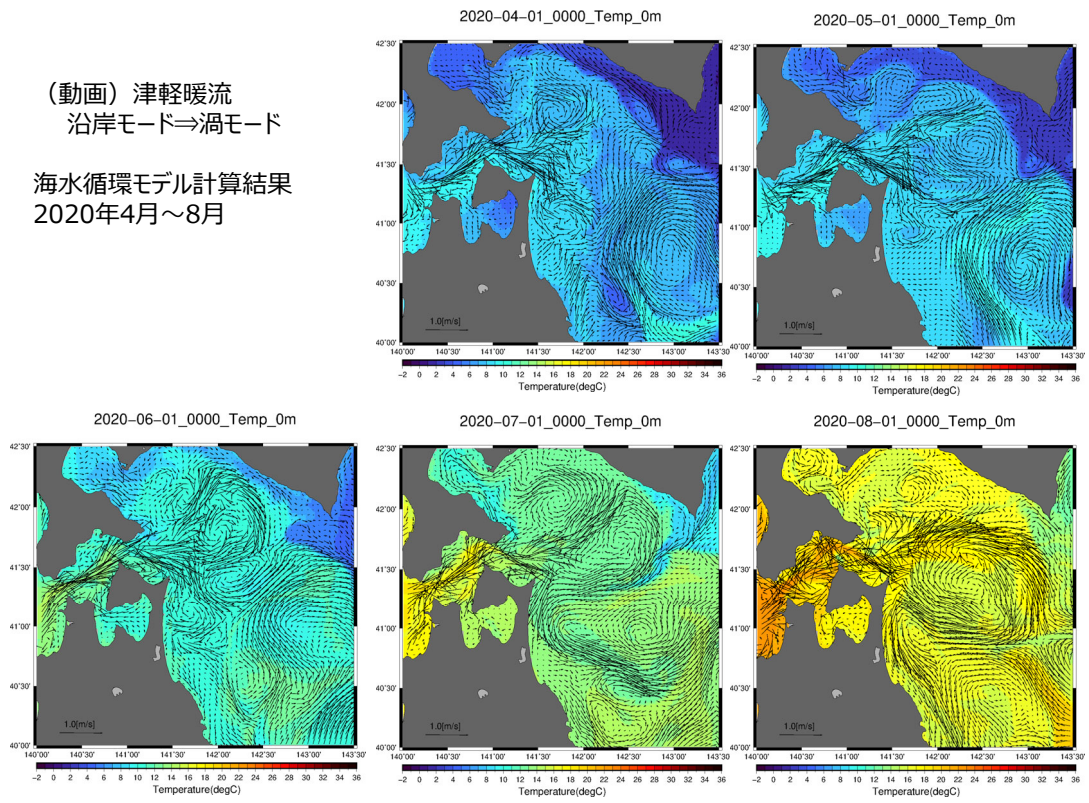
六ヶ所村沿岸、尾駁漁港から沖合2kmぐらいで観測している流れになります。流れの向きを矢印の向き、流れの大きさを矢印の長さで示し、5/21からの1週間でどう変わっていったかを図にしています。

流れの特徴は地形に沿った南北方向が主となっており、東西方向の流れはそれよりも小さいということが挙げられます。

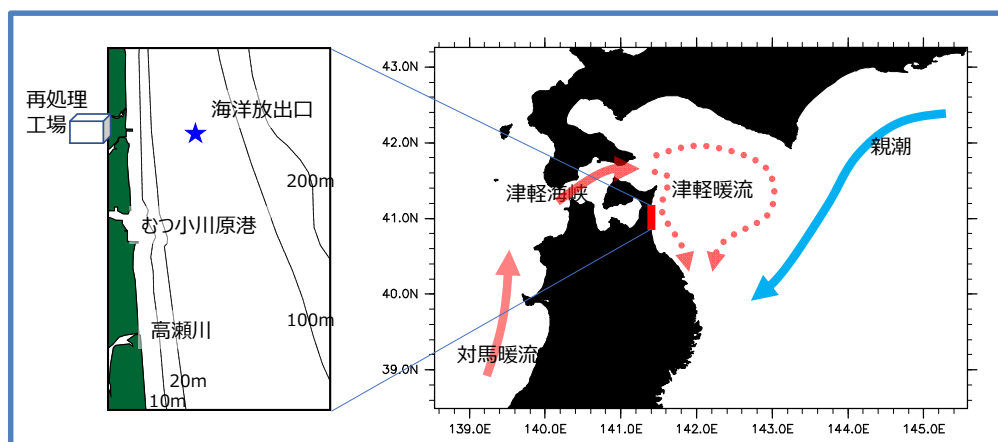
また、流れには約1日周期での変動が見られます。これは、津軽海峡の潮流の影響を受けているものと考えられます。

(動画) 津軽暖流
沿岸モード⇒渦モード

海水循環モデル計算結果
2020年4月～8月



②排出放射性物質の希釈状況等の把握
海洋における物質の拡散

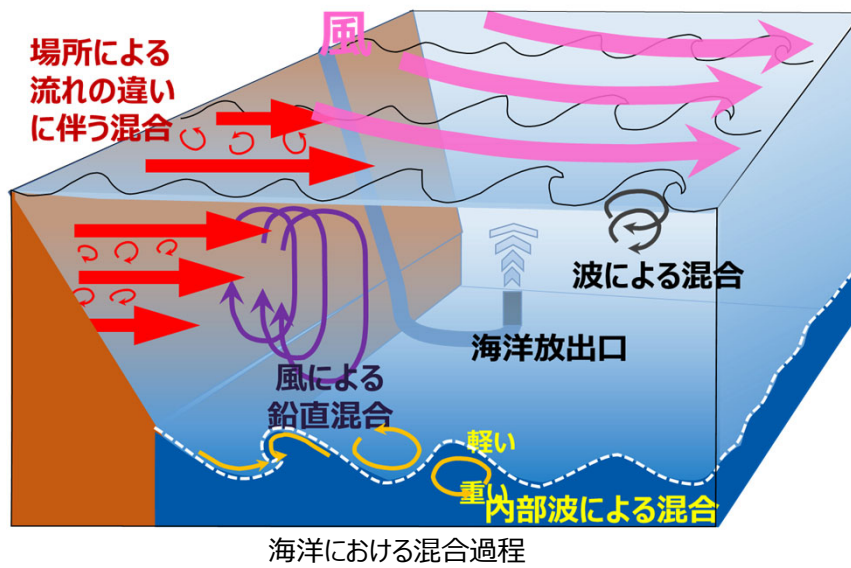


海洋放出口の位置と周辺海域の流れ

—要点—

海洋放出口には津軽暖流や親潮などの流れが影響します。

②排出放射性物質の希釈状況等の把握
海洋における物質の拡散



—要点—

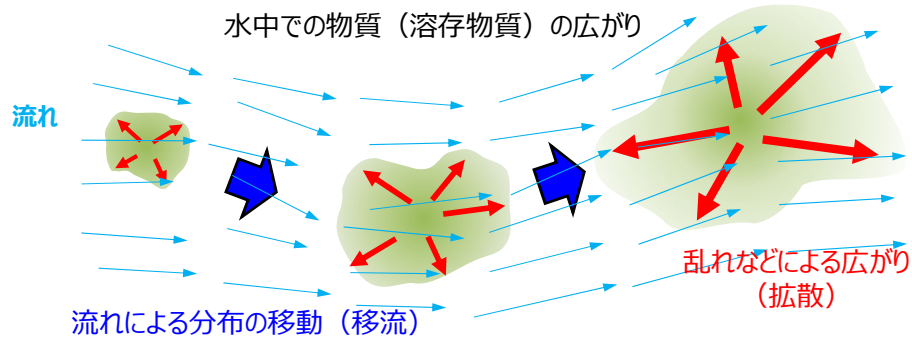
津軽暖流、親潮、潮流のような流れ以外にも、比較的短時間の変動も拡散に寄与します。

隣り合う2地点で流れの違いがあると、その間の流れに乱れが生じて混ざり合います。

風が吹くと波が立ちます。波が大きくなると波頭が崩れ（砕波する）、それによって表層付近が大きく攪拌されます。

風によって海表面に発生する流れや、大気によって海水が冷却されて重くなることなどによって上層と下層の水が混ぜられます。

②排出放射性物質の希釈状況等の把握
海洋における物質の拡散



海洋に放出された放射性物質がどのように広がり、希釈されて行くかをシミュレーションによって解析・評価するには、

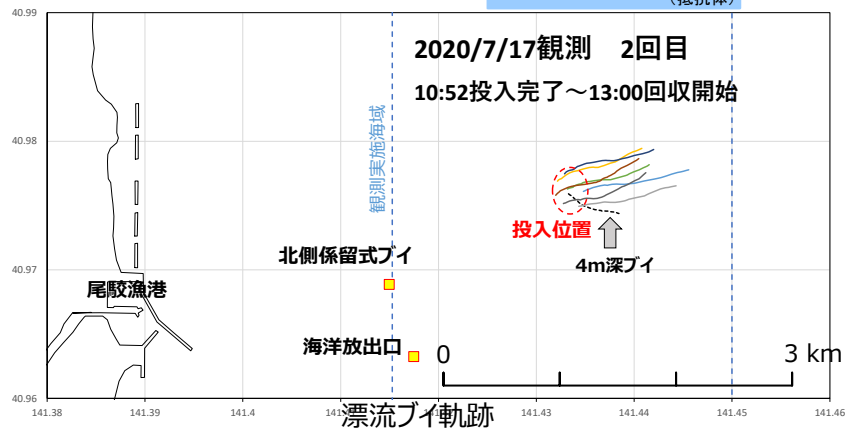
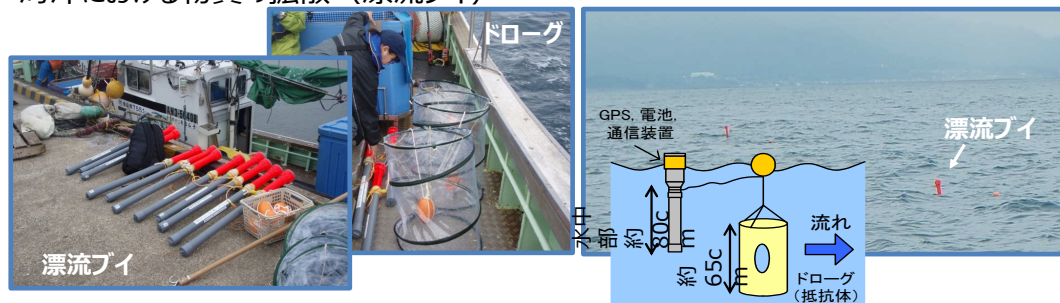
- ・海洋の流れを正しく再現する ⇒ 移流
- ・風や波による流れの乱れなど、拡散に寄与する諸現象の影響を正しく見積もることが必要 ⇒ 拡散

—要点—

海洋に放出された放射性物質の動きをコンピュータシミュレーションによって再現するとき、

- ①津軽暖流、親潮、潮流のような流れを正しく再現する。
- ②風や波のように拡散に寄与する諸現象の影響（拡がりやすさ）を正しく見積もる。

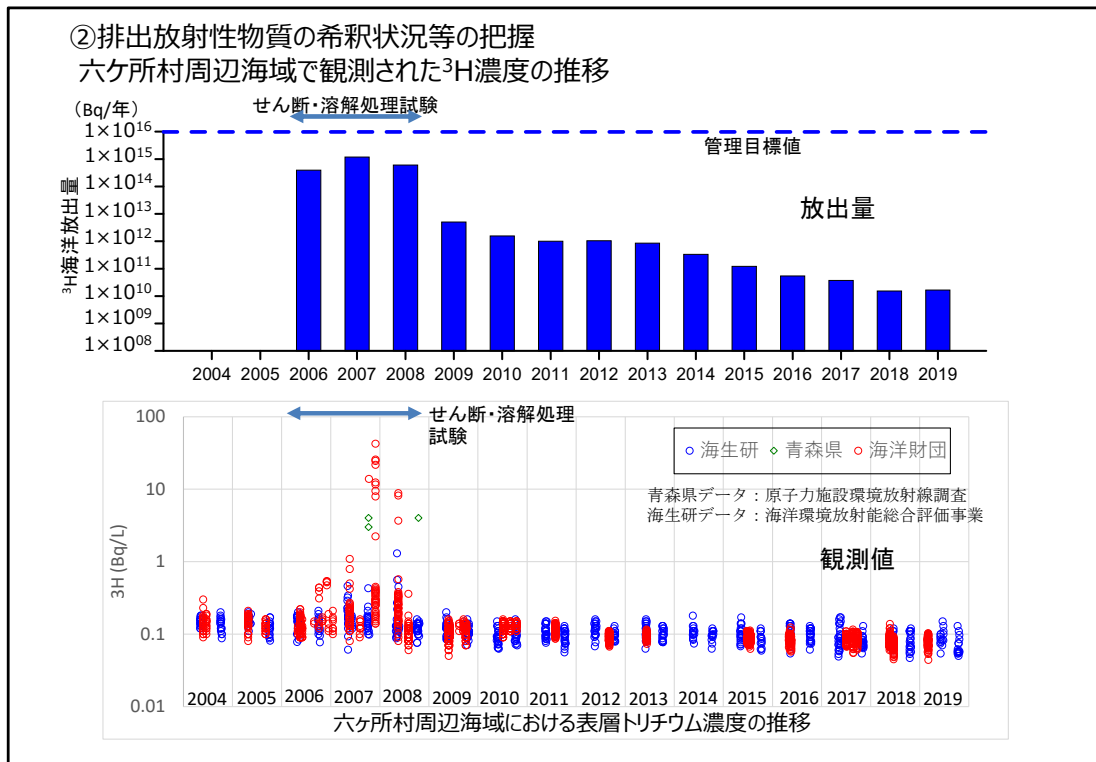
②排出放射性物質の希釈状況等の把握
海洋における物質の拡散（漂流ブイ）



—要点—

漂流ブイを複数流すことで、海洋における拡散のしやすさ（拡散パラメーター）を検討します。

拡散パラメーターを修正することで、計算精度の向上を図ります。



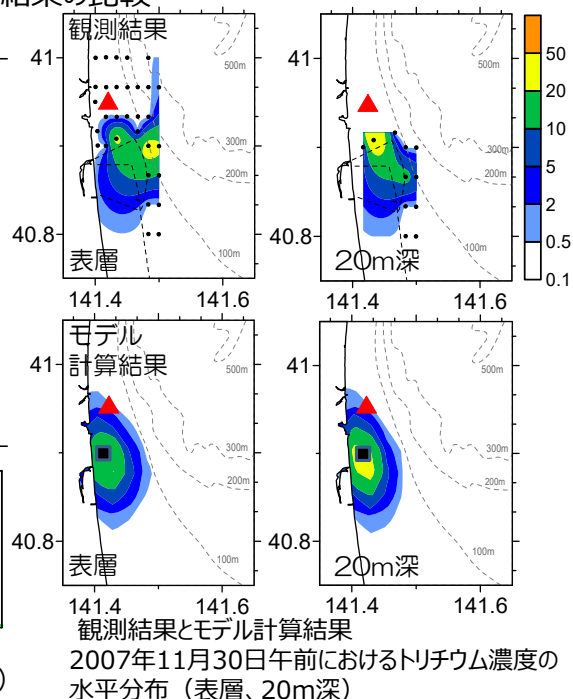
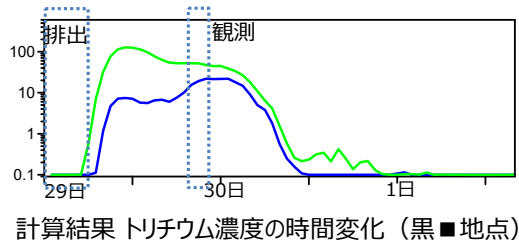
—要点—

2006年3月から2008年10月の期間、再処理工場のせん断・溶解処理試験が行われました。周辺海域におけるトリチウム濃度（最大約40ベクレル/リットル）は試験前の水準と比べて一時的に上昇が認められましたが、試験後、速やかにもとの水準に戻りました。

*再処理工場では年間800 t・Uの再処理を行った場合、海水における施設寄与分の予測値は年平均300ベクレル/リットルと見積もられている。（青森県：六ヶ所再処理工場の操業と線量評価について）

②排出放射性物質の希釈状況等の把握
シミュレーションモデル（核種移行モデル）の検証
アクティブ試験時の観測結果とモデル計算結果の比較

表 計算条件	
計算期間	平成19年11月28日～12月3日
鉛直拡散係数	$10 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
水平拡散係数	南北： $10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 東西： $10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
放出核種	トリチウム
放出日	11月29日
放出量	$3.1 \times 10^{13} \text{ Bq}$
噴流効果	あり 放出深度：44 m
流速	京大海洋モデル計算結果 (解像度：1/54度×1/72度)



—要点—

観測結果とモデル計算結果の比較です。

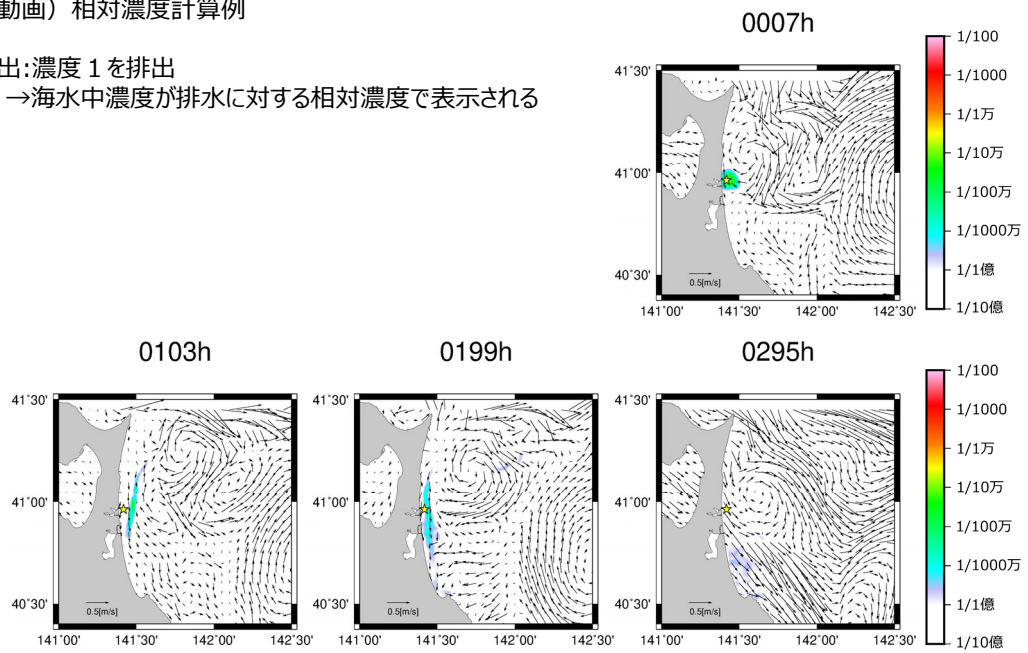
パラメータ等を調整することで、表層、20m深とも観測結果と計算結果で濃度レベル、分布範囲が概ね再現することができました。

トリチウム濃度の時間変化（計算結果）では、一時的に濃度は上昇しますが、その後拡散によって濃度が低下することが計算されています。

しかしながら、この比較はあくまでも一例であり、再処理工場稼働後にデータを取得して検証することが重要です。

(動画) 相対濃度計算例

放出:濃度 1 を排出
→海水中濃度が排水に対する相対濃度で表示される



まとめ

海洋における放射性物質の挙動について

- ①バックグラウンド環境の把握
- ②排出放射性物質の希釈状況等の把握

今後

再処理工場稼働に備えて、準備を進める。
稼働後データに取得して、シミュレーションモデルの修正を行う。

報告内容等の問合せ先 : 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駁字家ノ前 1 番 7
公益財団法人 環境科学技術研究所
総務部 企画・広報課
TEL 0175-71-1240