

解説： 放射性炭素の大気放出と環境中移行に関する総合的研究

エネルギー需要の増大や地球温暖化問題を背景に、今後、特にアジア地域の新興経済国を中心に原子力施設の建設・稼働が増加することが予想されます。そのため、原子力施設の定常運転に伴う放射性核種の放出とそれによる環境・公衆への影響が一層注目されています。

放射性炭素（ ^{14}C ）は、核燃料サイクルに起因する公衆の被ばく線量評価において最も重要な核種です。 ^{14}C は、核燃料中の窒素の原子炉内での中性子捕獲反応により生成し、主に使用済み核燃料の再処理に伴って一部が環境中に放出されます。原子力施設から放出された ^{14}C は、生態系の炭素循環に組み込まれ、化学形態を変えながら複雑かつ動的に環境中を移行し、食物摂取を経て公衆の被ばくをもたらします。したがって、 ^{14}C の原子力施設からの放出とその後の環境中における移行挙動の全容の解明と、その知見に基づいた信頼性の高い環境影響評価手法の確立が強く求められていました。

本研究では、 ^{14}C の原子力施設からの放出実態と環境中における移行挙動を詳細に解明するための様々な研究手法を考案・開発し、国内初の核燃料再処理施設である東海再処理施設をモデルケースとした包括的な調査を実施することで、 ^{14}C の放出から環境中移行、公衆影響までを短期的・長期的両視点に立って総合的に解明することに初めて成功しました。本研究の内容と成果は以下のとおりです。

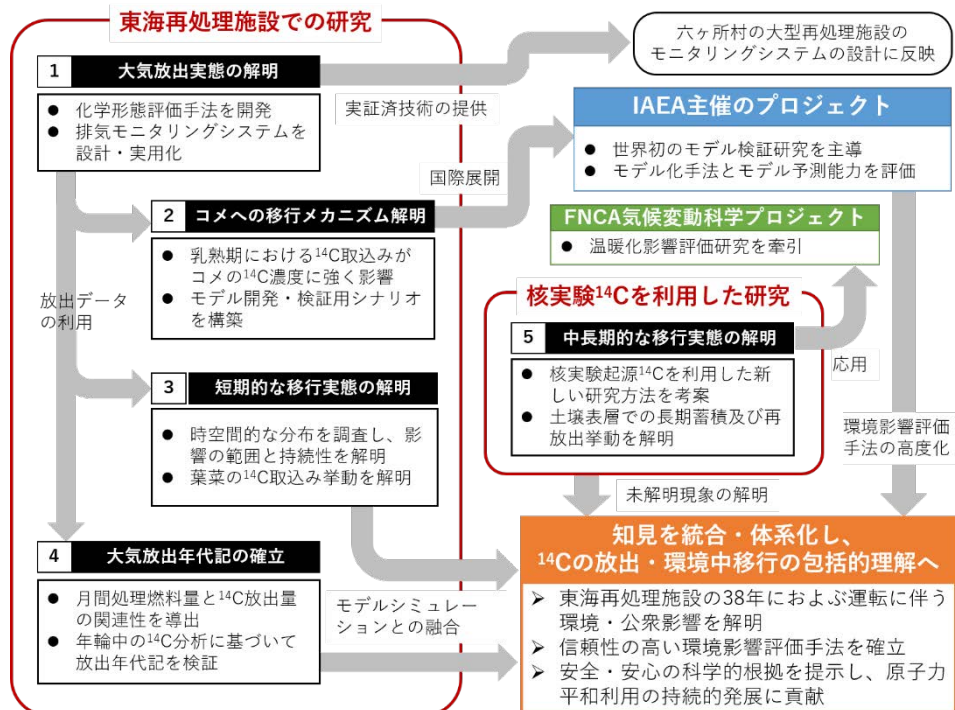


図1. 研究内容及び成果の全体像

(1) 大気放出実態の解明

原子力施設の排気中に含まれる ^{14}C の化学形態を評価する手法を開発し（図2）、東海再処理施設から大気中へ放出される ^{14}C の97%以上が CO_2 の形態、すなわち植物に容易に取り込まれる形態で放出されていることを明らかにしました。排気中放射性核種濃度の定量法に関する各種検討を経て、実規模施設で利用可能な高信頼性・高効率・低コストの排気モニタリングシステムを設計・実用化し、東海再処理施設の運転を通じた実証済みの技術として、六ヶ所村の大型再処理施設の排気モニタリングシステムの設計に反映されました。

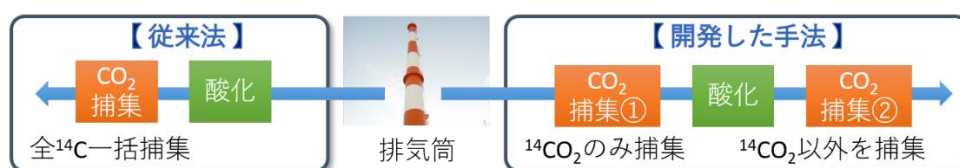


図2. 新たに開発した排気中 ^{14}C の化学形態を評価する手法

(2) コメへの移行メカニズムの解明

コメを主食とするアジア地域においては、特に ^{14}C の水稻への取り込みとコメ（可食部）への移行を解明することが公衆の被ばく線量を評価する上で重要である（図3）。東海再処理施設の周辺で収穫したコメの ^{14}C 濃度と施設からの月間の ^{14}C 大気放出量の10年間にわたるデータの解析により、水稻の出穂後の乳熟期（9月）における ^{14}C 放出が収穫時のコメの ^{14}C 濃度に強く影響を及ぼすことを明らかにし、農作物の成長段階を考慮した原子力施設の排気放出管理によって公衆の被ばく線量を低減できることを示しました。これらのデータ及び知見を利用したモデル開発・検証シナリオを構築し、国際原子力機関（IAEA）主催の国際的なプロジェクト（EMRAS（Environmental Modelling for Radiation Safety）Project）において ^{14}C 環境移行モデルの開発・検証研究をシナリオリーダーとして世界で初めて実施し、モデル化手法を集約するとともに様々なモデルを開発し、その予測能力を評価しました（図4）。

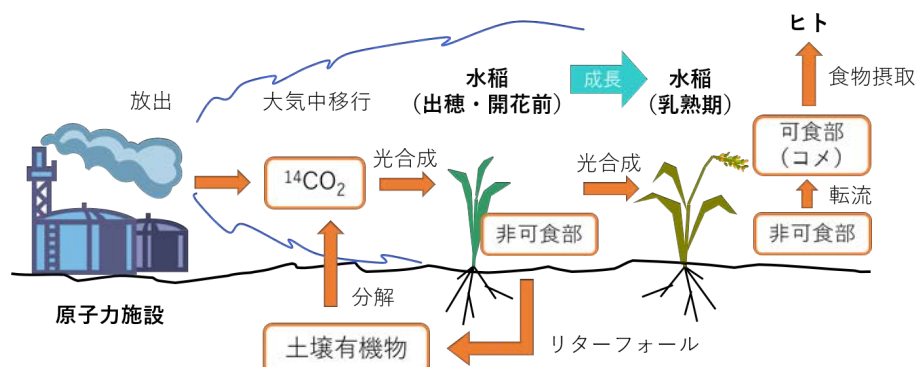


図3. ^{14}C の大気放出とその後の環境中移行（コメへの移行）の概念図

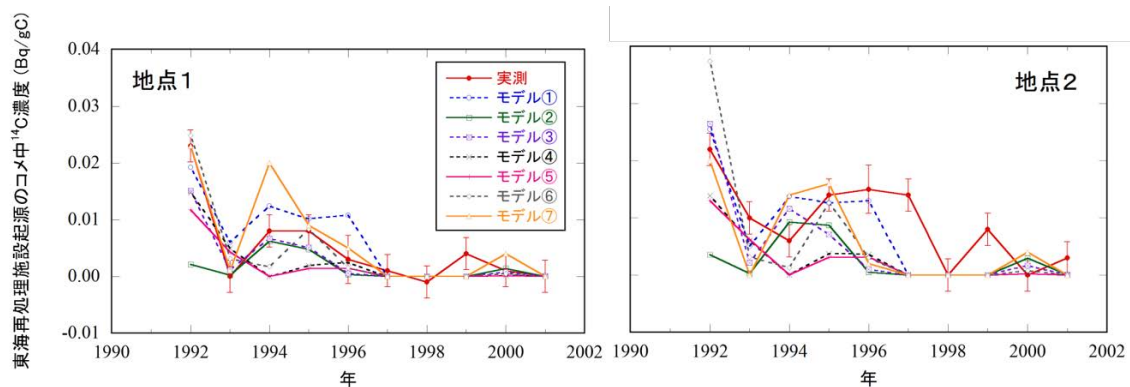


図4. 東海再処理施設の周辺2地点におけるコメの ^{14}C 濃度増加の実測値と様々なモデルによる予測結果

(3) 環境中における短期的な移行実態の解明

原子力施設からの ^{14}C 放出の影響の範囲や持続性を適切に把握するために、東海再処理施設周辺において多様な環境試料（大気 CO_2 、コメ、葉菜類、ヨモギなど）中の ^{14}C 濃度の時間的・空間的分布を調査し、放出源情報や局所気象観測データを活用することで、 ^{14}C の放出によって生じた濃度増加の影響範囲や持続性を明らかにしました。放出された ^{14}C による施設周辺における大気中 CO_2 の ^{14}C 濃度増加は一時的であり、ベースラインの濃度はバックグラウンドと同程度のレベルであること、キャベツやハクサイなどの葉菜は、コメの場合と異なり、大気中 CO_2 の ^{14}C 濃度の上昇に比較的速やかに応答することなどを明らかにし（図5）、農作物ごとに ^{14}C の移行過程を考慮する必要があることを示しました。

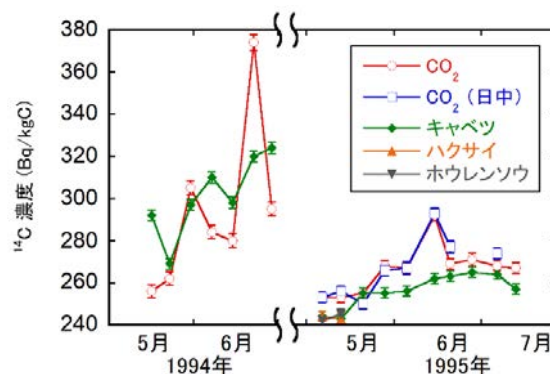


図5. 東海再処理施設周辺における大気中 CO_2 と葉菜の ^{14}C 濃度の変化

(4) 大気放出年代記の確立と施設運転に伴う環境・公衆影響の評価

東海再処理施設において、 ^{14}C 大気放出量のモニタリングを開始した1991年10月以降の月間の使用済み燃料処理量と ^{14}C 大気放出量のデータを解析することで両者の明確な関連性を導出し、その関係を用いて、1977年の運転開始以来の ^{14}C 大気放出量を月ごとに推

定しました。これにより、東海再処理施設における ^{14}C 大気放出の年代記を初めて確立しました（図6）。その放出量と ^{14}C 環境移行モデルを用いたモデル計算結果（図6）、施設周辺の木の年輪が記録する過去の大気中の ^{14}C 濃度の分析結果、ならびにコメや葉菜類、ヨモギの ^{14}C 濃度の時間的・空間的分布データ等によって得られた知見を統合し、東海再処理施設の38年間にわたる運転に伴う ^{14}C に起因した公衆の被ばく線量が年間線量限度の0.12%以下であることを立証しました。

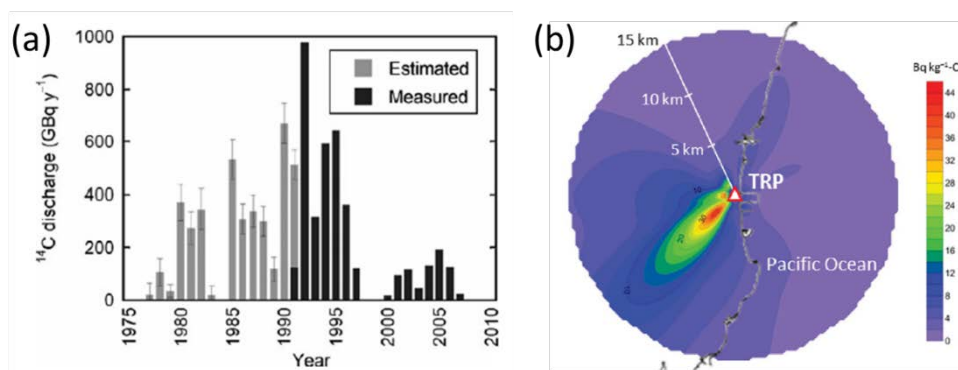


図6. 東海再処理施設における ^{14}C 大気放出年代記（左図）と、放出年代記を用いたモデルシミュレーションによって評価した施設周辺環境中の ^{14}C 濃度増加（右図）

（5） 環境中における中長期的な移行実態の解明

1950～60年代前半に行われた大気圏核実験を起源とする ^{14}C の環境挙動を追跡するという新しい研究手法を考案・導入することで、環境中に放出された ^{14}C は主に土壌表層に有機物として長く蓄積するが、一部は数年～数十年の時間スケールで大気中へ再放出されて植物に再利用されるなどの ^{14}C に関する環境中における中長期的な蓄積・循環挙動を解明することに成功しました（図7）。

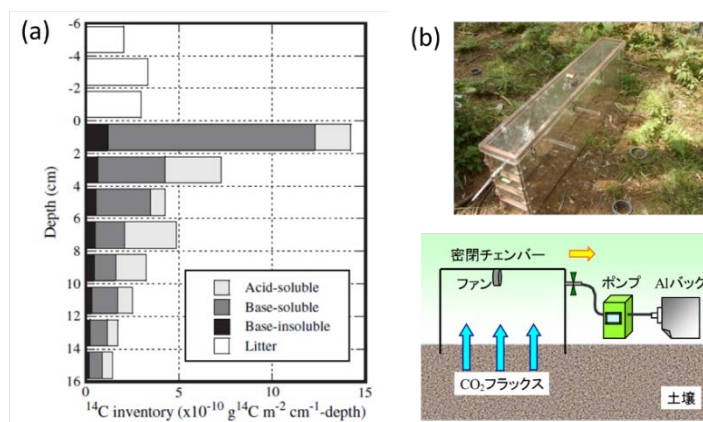


図7. 2001年（核実験終了から約40年後）における核実験起源 ^{14}C の表層土壌中の有機物形態別蓄積状況（左図）と、 $^{14}\text{CO}_2$ の地表面からの放出量を測定する手法（右図）

以上により、 ^{14}C の原子力施設からの放出とその後の環境中における移行挙動の全容を解明し、その知見に基づいた信頼性の高い環境影響評価手法を確立することができました。さらに、本知見を活用して、土壌の炭素貯留能力を解明することができる新しい研究手法等の開発を進めてきており、本成果は、炭素循環研究への応用により気候変動の仕組みの解明にも寄与することが期待されています。



図 8. 新聞等に掲載された、 ^{14}C を利用した気候変動科学研究の成果の例（左図：毎日新聞 2008 年 11 月 3 日 2 面、右図：子供の科学 2009 年 1 月号誠文堂新光社）

主要論文：

- Koarashi J. et al., Chemical composition of ^{14}C in airborne release from the Tokai reprocessing plant. *Radiation Protection Dosimetry* 114, 551-555 (2005).
- Koarashi J. et al., A simple and reliable monitoring system for ^3H and ^{14}C in radioactive airborne effluent. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 268, 475-479 (2006).
- Koarashi J. et al., Carbon-14 transfer into rice plants from a continuous atmospheric source: observations and model predictions. *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 1671-1679 (2008).
- Koarashi J. et al., Diverse monitoring approaches reveal ^{14}C dispersion pattern and its impact on the environment around the Tokai reprocessing plant. *Journal of Nuclear Science and Technology* 48, 120-129 (2011).
- Koarashi et al., Atmospheric discharge of ^{14}C from the Tokai reprocessing plant: comprehensive chronology and environmental impact assessment. *Journal of Nuclear Science and Technology* 53, 546-553 (2016).
- Koarashi et al., Estimation of $^{14}\text{CO}_2$ flux at soil-atmosphere interface and distribution of ^{14}C in forest ecosystem. *Journal of Environmental Radioactivity* 60, 249-261 (2002).
- Koarashi et al., Radiocarbon and stable carbon isotope compositions of chemically

fractionated soil organic matter in a temperate-zone forest. *Journal of Environmental Radioactivity* 79, 137-156 (2005).

Koarashi et al., Quantitative aspects of heterogeneity in soil organic matter dynamics in a cool-temperate Japanese beech forest: a radiocarbon-based approach. *Global Change Biology* 15, 631-642 (2009).

Koarashi et al., Dynamics of decadally cycling carbon in subsurface soils. *Journal of Geophysical Research* 117, G03033 (2012).

研究グループのホームページ：

[原子力基礎工学研究センター 環境・放射線科学ディビジョン 環境動態研究グループ](#)