

放射性核種の簡易・迅速な分析法の検討に関する

福島県と IAEA との間の 協力プロジェクト

最終報告書

(2016 年 10 月～2021 年 3 月)

【福島県提案プロジェクト】

2022 年 12 月

福島県

内容

要旨	1
目的	1
実施内容	2
(1) 電解濃縮装置を使用した低濃度トリチウムの分析	2
ア 電解濃縮装置の導入	2
イ 測定バイアルの検討	3
ウ 標準試料を用いた分析試験	4
エ 環境試料を用いた分析試験(IAEA との相互比較分析)	5
オ トリチウム分析情報管理システム「TRIMS」の導入	7
カ 検出限界と分析時間	7
キ 今後の課題	8
(2) 有機結合型トリチウム (OBT) の分析	8
ア 有機結合型トリチウム分析の概要	8
イ 環境試料を用いた分析試験	10
ウ 今後の課題	10
(3) ICP-MS を用いたストロンチウム 90 (Sr-90) の測定	11
ア 測定手法の概要	11
イ 検量線の作成	12
ウ 環境試料を用いた分析試験	13
エ 検出限界と分析時間	13
オ 今後の課題	13
まとめ	13
参考文献等	14
付属資料	15

表題. FIP7 放射性核種の簡易・迅速な分析法の検討

要旨

福島県において、東京電力(株)福島原子力第一発電所事故が環境に与えた影響をより詳細に調査するため、モニタリング事業では実施していない新たな分析法を福島県に導入し、研究部において、分析技術の確立のための技術習得及び新たな分析精度の評価を開始した。

本報告においては、電解濃縮装置を使用した低濃度トリチウムの分析、有機結合型トリチウムの分析及び ICP-MS を使用したストロンチウム 90 (Sr-90) の測定について、分析手法の検討状況を報告する。

目的

福島県では、原子力発電所の立地県であることから、従来より環境中の放射性物質の分析を行ってきた。とりわけ 2011 年 3 月に発生した東京電力(株)福島原子力第一発電所事故の後、放射性物質が環境中に飛散したことを受け、緊急時モニタリング計画等に基づき、緊急性の高い放射性 Cs 等を中心に放射性物質の分析体制を強化し、分析結果の公表を行っている。

現在、事故から 10 年以上が経過し、除染等の影響により県内の放射線量や放射性物質濃度は低下してきている一方、東京電力(株)福島原子力第一発電所の敷地内のタンクには、技術的に除去が難しいトリチウムを含む水が多量に貯蔵されており [1, 2]、環境への影響の有無を継続して調査していく必要がある。また、Sr-90 については、放射性 Cs と比較すると環境への放出量は少ないとされている [3, 4] もの、骨を中心に人体に留まりやすい性質があり、内部被ばく評価上重要な核種となっている。

しかしながら、純 β 線放出核種であるトリチウムや Sr-90 については、詳細な分析には非常に時間がかかることに加え、分析操作が複雑であること等から、放射性 Cs と比較して分析の事例が少なく、分析手法の簡易化・迅速化が求められている。一方で、これら核種の環境中濃度は、福島原子力第一発電所のごく近傍等一部除いて非常に低く、これを詳細に分析するには、より高度な技術を使用し、時間をかけて分析を行う必要がある。

このことから、住民の安全・安心に寄与するためのモニタリング体制を維持しつつ、環境中の放射性物質の状況をより迅速に、あるいは詳細に調査することを可能にするため、本プロジェクトにおいて、IAEA のアドバイスのもと、今後必要になると見込まれる分析手法のとして、電解濃縮装置を使用した低濃度トリチウムの分析、有機結合型トリチウム(OBT)の分析及び ICP-MS を使用した Sr-90 の迅速分析法について検討を行うこととした。

実施内容

(1) 電解濃縮装置を使用した低濃度トリチウムの分析

ア 電解濃縮装置の導入

福島県における環境中水、特に福島県沿岸の海水のトリチウム濃度は、事故直後に一時的に上昇したものの、時間経過に伴って低下傾向にあり、現在は、福島県が調査している地点において、モニタリングの際に使用している分析手法 [5] では、検出が難しいレベルとなっている [6]。原子力発電所事故やその後の対応等により環境中に放出されるトリチウムの影響を調査するため、特に海水中トリチウム濃度の詳細な分析を目的として、トリチウム電解濃縮装置を導入することとした。

福島県では、高いサンプル処理能力でトリチウム分析が可能なシステムの確立を目指していたが、市販されている装置では1バッチで1サンプルしか処理を行うことができなかった。そこで、導入する装置は、IAEAの協力を得て、IAEA 同位体水文学研究室が開発したトリチウム電解濃縮装置、Tritium Enrichment Unit (nTEU)とした [7, 8]。

機器導入は2017年度に行い、IAEA 職員立会のもと、装置組立及び試運転を実施した(写真1)。また、IAEA 同位体水文学研究室にて機器の操作実習を受け、福島県環境創造センターにおいて、電解濃縮装置の運用を開始した(写真2)。装置の概要を図1に示す。

濃縮の原理は金属電極を用いたアルカリ電解濃縮法を利用するものであり、一度に1サンプルあたり最大2L、1バッチあたり最大10サンプルを分析可能である。電解濃縮装置には、一般的に金属電極を用いたアルカリ電解濃縮法と固体電解膜を用いたものの2種類が知られており、アルカリ電解濃縮法は、固体電解膜を用いる手法と比較して、濃縮に時間を要するが、トリチウムの濃縮効率は高いことが知られている [9]。



写真1 電解濃縮装置の導入



写真2 福島県における電解濃縮装置の運用



装置の概要	
開発元	IAEA(Isotope Hydrology Section)※
濃縮原理	金属電極を用いた電気分解 (Cathode : Mild steel、Anode : Stainless steel)
同時処理サンプル数	最大10サンプル
最大投入液量	1セルあたり2L(2Lガラスボトルによる自動充填)
濃縮後最終液量	10 - 20 mL程度(調整可能)
濃縮時間(最大電流で濃縮した場合)	500 mL → 10 mL まで 約7日
トリチウム濃縮率(2Lを濃縮した場合)(文献値)	>100 (検出限界 < 0.05TU ≒ 0.006 Bq/L)
外形寸法重量	W1,300×D575×H1,910 mm/ 約300 kg

図1 トリチウム電解濃縮装置(nTEU)の概要

イ 測定バイアルの検討

日本で行われている液体シンチレーションカウンターを使用したトリチウム分析では、検出下限値を低くするために、供試料量を多くできる 100 mL テフロンバイアルを使用することが多いが、導入した電解濃縮装置は標準の回収液量が 10 - 20 mL となるため、20 mL バイアルを使用した測定について検討した。

検討にあたって、福島県で使用している液体シンチレーションカウンターLSC-LB7のメーカー(日立製作所)が販売している 20 mL 低カリウムガラスバイアルに加え、IAEA 専門家等のアドバイスを受け、ガラスバイアルよりもバックグラウンド(BG)計数率が低く抑えられると言われているプラスチック製の低拡散ポリエチレンバイアル(PerkinElmer)を比較した。

はじめに、各バイアルについて、日本アイソトープ協会から購入したトリチウム標準溶液(5.009×10² Bq/g、10 mL)と液体シンチレータUltima Gold LLT(PerkinElmer)を用いてクエンチングレベルの異なる標準試料のシリーズを作成し、LSC-LB7の機能によりバイアルの種類毎にクエンチング補正曲線(効率曲線)を作成した。異なる濃度の標準溶液の希釈系列を作成し、作成した効率曲線を適用してトリチウム濃度の分析を行い、効率曲線の妥当性を確認した。

各バイアルを使用した際のBGと検出限界値について検証するため、無トリチウム水(日本分析センターより提供)を蒸留により精製したものとUltima Gold LLTを1:1の割合で混合し、LSC-LB7で500分間計測を行った。各バイアルを使用して、無トリチウム水の計測を行った結果と、その際の検出限界値を表1に示す。低拡散ポリエチレンバイアルでは、ガラス製のバイアルと比較してBG計数率が低く、検出限界値が低くなることがわかった。各バイアルの検出限界値を表1に示す。

表1 バイアル毎のバックグラウンド値の比較

	低カリウムガラス バイアル(Hitachi)	低拡散ポリエチレン バイアル (PerkinElmer)	テフロンバイアル (Hitachi)(参考)
バイアル容量(mL)	20	20	100
BG 計数率(cpm) ^a	13.01±0.161	1.071±0.0463	2.236±0.0669
計数効率(%)	23.75	23.28	27.64
検出限界値(Bq/L) ^b	4.87	1.47	0.353

a : 500分計測×3回の平均±標準偏差、 b : BG計数率と計数効率から計算した値

この結果を受けて、実試料の分析に当たっては、プラスチックバイアルを使用することとした。また、小容量(20 mL)のバイアルの使用は、試料調整後の化学クエンチング等の影響を軽減し、測定前の静置時間を短くすることで、結果的に分析にかかる時間を短縮できるという利点も存在している。

ウ 標準試料を用いた分析試験

電解濃縮装置を用いたトリチウム分析の基礎的なパラメータを取得するとともに、分析結果を評価するため、トリチウム標準溶液を分析した。トリチウム標準溶液は、日本アイソトープ協会より購入した溶液を希釈したものを分析試料とし、この溶液を電解濃縮して、トリチウム濃度を測定した。

試料水 250 mL を 13 mL 程度まで濃縮した。電解濃縮は開始ステップとして約 1 時間 3.0 A の定電流で運転したのち、電流を 6.5 A に上げ約 5 日間濃縮を行った。終了直前の約 15 時間は 3.0 A に電流を下げて運転した。積算電流値 700 Ah に到達したところで電解濃縮を終了した。濃縮した試料は、中和、蒸留処理を行った後、試料水 10 mL と Ultima Gold LLT 10 mL を混合し、測定機器の中で 4 時間以上静置した後、トリチウム濃度の測定に供した。この分析において、トリチウム濃縮率等を計算した結果を表 2 に示す。試料濃縮率等の計算には、トリチウム-スパイク法を使用した。

表2 トリチウム濃縮率等の計算

Cell No.	供試料量 (mL)= V_i	濃縮後液量 (mL)= V_f	体積減少率 $= (V_i/V_f) = N$	濃縮後トリチウム濃度 (Bq/L)= T_f	濃縮前トリチウム濃度 (Bq/L)= T_i	トリチウム濃縮率 $= (T_f/T_i) = Z$
1	251.00	13.65	18.39	128.3	9.88	12.99
10	250.59	12.97	19.32	130.1	9.88	13.17
	残留率= $(Z/N) = R$		R の平均値	分離係数(β) ^a		β の平均値
1	0.71		0.69	8.37		8.05
10	0.68			7.72		

a. $\beta = (\log(V_f/V_i))/((\log(T_f \times V_f) - \log(T_i \times V_i))) = \log(1/N)/\log R$ より計算

求めた濃縮率を標準試料を分析したセルに適用して、濃縮前の試料のトリチウム濃度を計算した。分析結果の詳細は表3のとおりであった。このときの検出限界値は0.108 Bq/L となった。

表3 標準溶液の分析結果

サンプル名	供試料量 (mL)= V_i	濃縮後液量 (mL)= V_f	体積減少率 $= (V_i/V_f) = N$	濃縮後トリチウム濃度 ^{a,c} (Bq/L)= T_f	濃縮前トリチウム濃度 ^{b,c} (Bq/L)= T_i	参照値 (Bq/L) ^d
標準溶液	249.98	12.09	20.68	13.5±0.69	0.941±0.048	1.00±0.028

a. 液体シンチレーションカウンタで分析した値 b. $T_i = T_f/N/R$ により算出した値

c. 分析値±計数誤差(1 σ) d. 参照値±不確かさ(k=1)

エ 環境試料を用いた分析試験(IAEA との相互比較分析)

電解濃縮装置を用いた環境試料の分析を見据え、福島県内で採取された地下水について、試験分析を行った。

地下水試料については、約400 mLを減圧蒸留し、300 mLを電解濃縮に供した。電解濃縮は開始ステップとして約1時間2.9 Aの定電流で運転したのち、電流を7.0Aに上げ約6日間濃縮を行った。終了直前の約15時間は2.9 Aに電流を下げて運転した。積算電流値847 Ahに到達したところで電解濃縮を終了した。濃縮した試料は、中和、蒸留処理を行った後、試料水10 mLとUltima Gold LLT 10 mLを混合し、測定機器の中で4時間以上静置した後、トリチウム濃度の測定に供した。その分析結果を表4に示す。この分析において、トリチウム-スパイク法を用いて求めたトリチウム残留率Rは0.61、トリチウム分離係数 β は6.51であった(いずれも2本のCellの平均値)。このとき、無トリチウム水の

分析結果から得られた検出限界値は 0.115 Bq/L であった。なお、地下水試料については、IAEA でも同一の試料の分析を行っており、両者を比較したところ、一部の試料で福島県の分析結果の方が分析値が小さかったが、概ね IAEA に近い分析結果が得られた(図 4)。

福島県の 2 つの試料 (FK-14 と -33) の結果は、IAEA の結果よりもわずかに低いトリチウム濃度を示した。しかし、これらの結果は、 2σ または 3σ の範囲では、互いに一致する程度の違いであった。この若干の相違の理由を検証することで、福島県の分析方法をさらに改善することに貢献すると考えられる。

表 4 地下水の分析結果及び IAEA との相互比較結果

サンプル名	供試料量 (mL)= V_i	濃縮後液量 (mL)= V_f	体積減少率 $= (V_i/V_f) = N$	濃縮後トリチウム濃度 ^{a,c} (Bq/L)= T_f	濃縮前トリチウム濃度 ^{b,c} (Bq/L)= T_i	IAEA 分析結果 (Bq/L)
FK-6	300.40	13.13	22.9	5.02 ± 0.695	0.345 ± 0.038	0.313 ± 0.015
FK-13	300.39	12.48	24.1	5.17 ± 0.745	0.335 ± 0.036	0.332 ± 0.017
FK-14	300.40	12.70	23.7	3.30 ± 0.709	0.217 ± 0.035	0.264 ± 0.015
FK-22	300.48	12.89	23.3	6.90 ± 0.751	0.460 ± 0.037	0.451 ± 0.019
FK-33	300.30	12.84	23.4	7.48 ± 0.762	0.500 ± 0.038	0.608 ± 0.020

a. 液体シンチレーションカウンタで分析した値 b. $T_i = T_f / N / R$ により算出した値

c. 分析値±計数誤差(1σ)

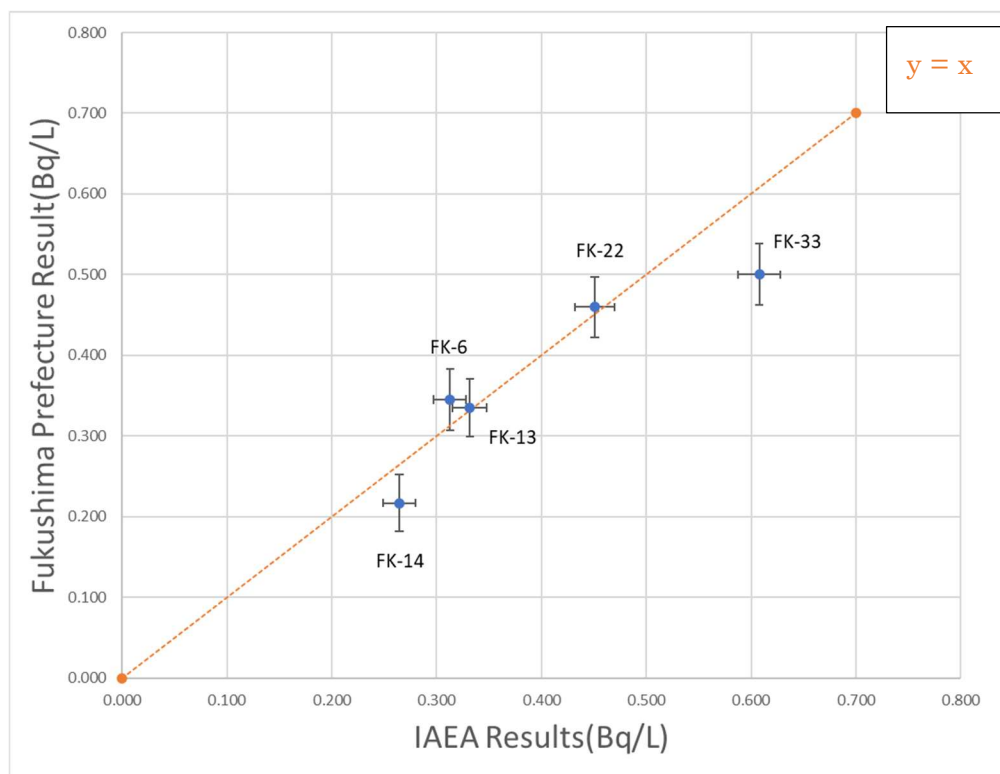


図 4 福島県と IAEA の地下水の分析結果の比較

オ トリチウム分析情報管理システム「TRIMS」の導入

これまでの結果から、福島県は、FIP7 実施の過程で、特に水試料からの低濃度トリチウムの分析能力を身につけたと言える。次に、FIP7 の最終ステップは、適切なサンプルの取り扱いとデータの評価、そして継続的な分析を行うためのデータ管理環境の確立である。この目的を達成するため、IAEA が開発したトリチウム分析情報管理システム「TRIMS(Tritium Information Management System)」を導入し、IAEA の協力により使用方法のレクチャーを受けた。なお、このレクチャーは、新型コロナウイルスの影響を受けて、オンラインで全 13 回に渡って行われた。

本ソフトウェアは、マイクロソフトのデータベース管理ソフトウェア Access 上で駆動するシステムであり、あらかじめ分析に係る情報を登録しておくことで、電解濃縮を含めたトリチウム分析の進捗管理及び分析結果の計算をシステム上で行うことができる。TRIMS の操作画面の一例を図 5 及び図 6 に示す。

このオンラインレクチャーにより、福島県は TRIMS の基本的な使用方法を習得した。

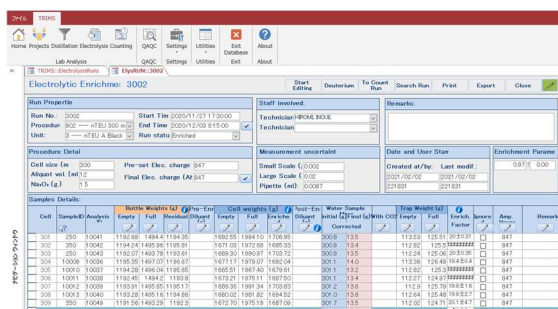


図 5 電解濃縮パラメータ入力画面

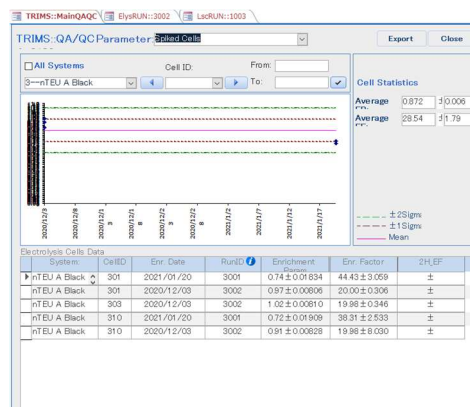


図 6 分析のクオリティ確認画面

カ 検出限界と分析時間

電解濃縮装置を使用したトリチウムの分析は、従来法よりも低濃度のトリチウムを測定できるという利点があるが、より低濃度の分析を目指して供試料量を多くすれば、その分、分析に時間がかかる。本プロジェクトの中で、電解濃縮を行った場合の検出下限値及び分析にかかった時間を図 7 にまとめた。なお、測定前静置時間については、過去の経験より、100 mL バイアルを使用する場合は 7 日、20 mL バイアルを使用する場合は 1 日とした。各分析は、試料数 10、分析機器は各 1 台、担当者 1 名で行われた。

海水試料に適用する場合、近年の報告にある 0.05 Bq/L 程度 [10] を分析すると仮定すると、供試料量は 1,000 mL が適当であり、電流値 7.0 A で電解濃縮を行ったとき、分析にかかった時間は約 35 日(前処理約 5 日、濃縮・後処理約 20 日、測定約 10 日)となった。

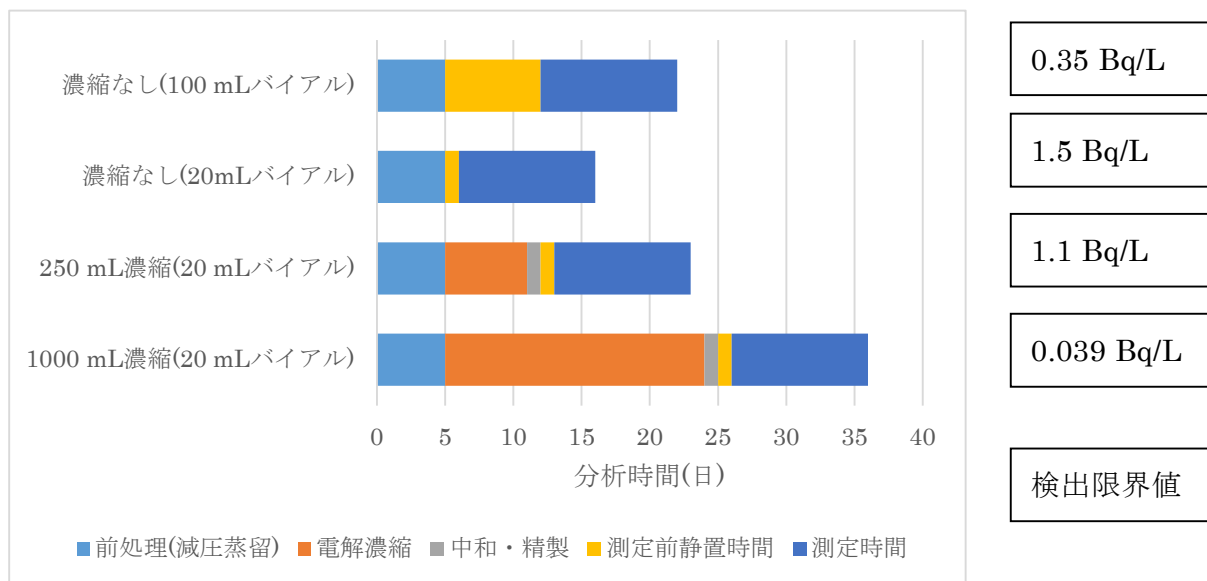


図7 各手法におけるトリチウム分析にかかる時間と実験により得られた検出限界値

キ 今後の課題

他機関との相互比較分析を継続し、分析精度を担保するとともに、必要に応じて、分析手法（重水素濃縮率を利用したトリチウム濃縮率の決定方法等）や分析条件（電流値の設定等）について検討していく必要がある。

(2) 有機結合型トリチウム (OBT) の分析

ア 有機結合型トリチウム分析の概要

環境中に存在するトリチウムのうち、有機物に取り込まれたものを、有機結合型トリチウム (Organically Bound Tritium、OBT) と呼ぶ。OBT は、大気中水分等に含まれるトリチウムから、植物の光合成等を通じて、有機物として生物体内に取り込まれ、その後食事や代謝等を通じて生物体内と環境の間を行き来する。OBT の移動の模式図を図8に示す。生物体内への取り込み、体内における残留時間等は、トリチウムが取り込まれている有機物の性質に依存すると考えられる。OBT は生物の体を構成する有機物に取り込まれていることから、生物への影響を評価する際に重要であると考えられている一方、分析が難しく、手間と時間がかかるため、世界的にも実施している機関は非常に少ないのが現状である。

しかしながら、原子力発電所の事故の影響等、福島県内の環境を詳細に調べるため、OBT の分析を行うことは重要である。

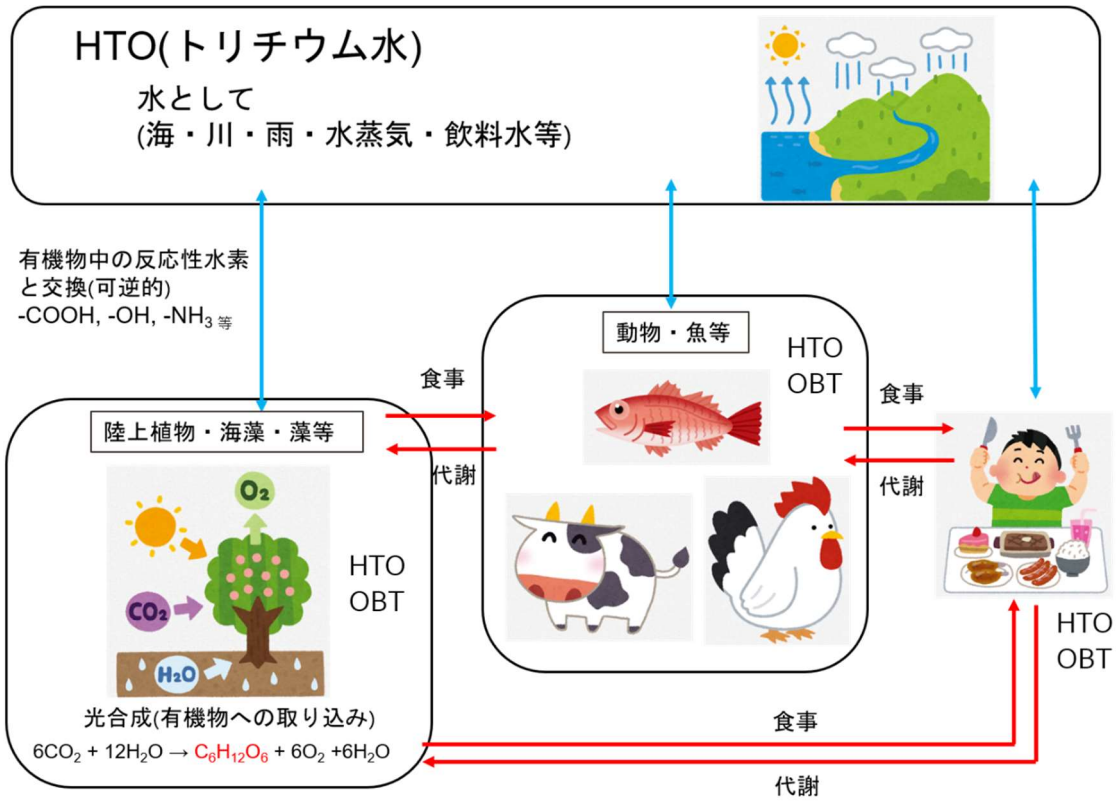


図8 有機結合型トリチウムが生じる経路の例

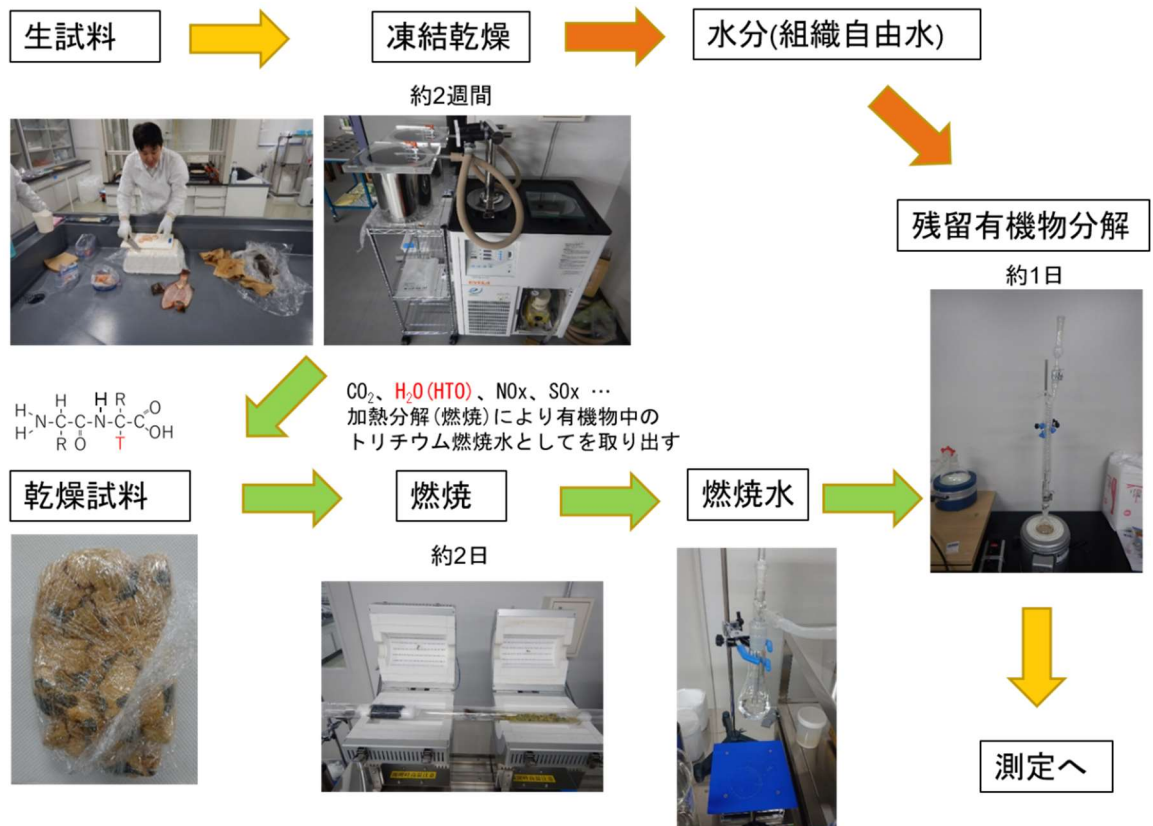


図9 OBT の分析フロー

イ 環境試料を用いた分析試験

福島県環境創造センターに、凍結乾燥機や温度と酸素圧力を制御して試料を燃焼させる管状炉など、OBT 分析に必要な試料処理に必要な機器を設置し、IAEA の協力の元、分析が実施できる環境が整った。OBT の分析フローを図 9 に示す。

海外専門家より、他機関で過去に分析され、分析値が分かっている試料(植物の葉)の提供を受け、図 9 の分析フローに従って分析を行った。その結果を表 5 に示す。

海外専門家より、福島県の分析結果は、過去の国際的な相互比較分析プログラムにおける各研究室間の分析値の幅と比較して、十分許容できるとのコメントがあった。

表 5 濃度既知試料(OBT)の分析結果

福島県の分析結果	他機関の分析結果
23.7 ± 1.04 Bq/L	14 ± 2 Bq/L

ウ 今後の課題

本プロジェクトの会合において、海外専門家より、特に OBT 分析には、時間、手間、人手がかかるほか、分析精度の担保のため、他分析機関との連携が重要であるとの助言をいただいた。これを踏まえ、国内外の研究、分析機関との連携を図りつつ、今後も継続的に OBT 分析や、精度管理が可能な体制を整備していく必要がある。

(3) ICP-MS を用いたストロンチウム 90 (Sr-90) の測定

ア 測定手法の概要

原子力発電所の事故で放出された核種のうち、Sr-90 は、純 β 核種(β 線のみを放出する核種)であり、セシウム等と比較して分析が難しい。モニタリングで通常使用する測定法は、非常に感度が高く、優れた検出限界値をもつものの、操作は複雑であり、4～6週間程度の時間を要する [11]。

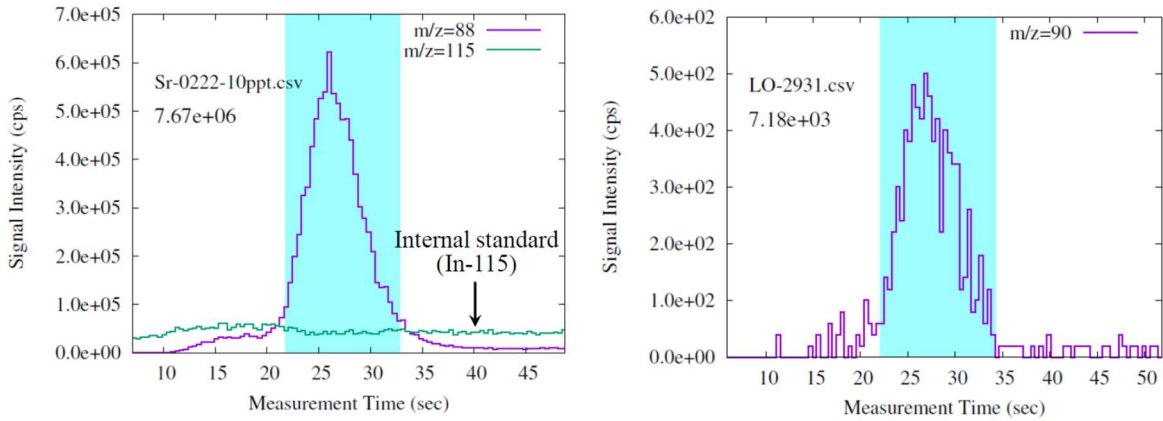
Sr-90 は被ばく評価の上で重要な核種であることから、特に緊急時には、迅速な分析・測定と情報提供が求められる。そこで、福島県では、ICP-MS を使用した Sr-90 の測定法を導入し、検討を進めてきた (写真3)。なお、福島県が導入した測定手法は、福島大学の高貝らによって開発されたものである [12]。



写真3 ICP-MS を使用した Sr-90 分析装置の外観

この手法を用いることで、検出限界値は従来法と比較して高くなってしまふものの、データの検証を含め、分析にかかる時間を1日～2日程度に短縮できることが見込まれる。

導入した測定手法を用いて Sr-90 の標準試料を分析したところ、Sr-90 に由来する測定シグナルを得ることができた。分析結果を図 10 に示す。また、得られたシグナルから Sr-90 の放射能濃度を自動で計算するプログラムを作成し、分析の妥当性の検証を進めた。

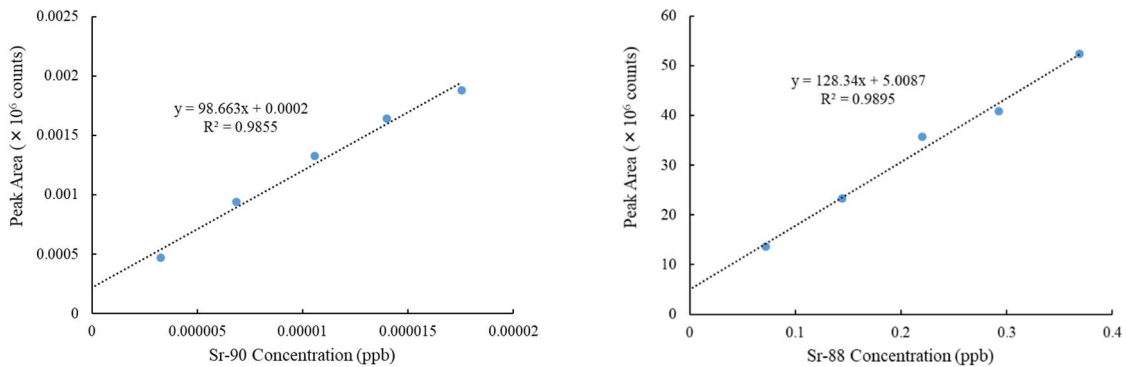


左：安定 Sr の検出 右：Sr-90 の検出

図 10 ICP-MS により得られた Sr 由来のスペクトル

イ 検量線の作成

日本アイソトープ協会より購入した Sr-90 標準溶液(4.061 Bq/g, 50.3 g)を用いて、濃度の異なる Sr-90 溶液のシリーズを作成し、検量線を作成した。また、本分析手法においては、安定 Sr 溶液で作成した検量線を用いて、Sr-90 の定量を行った知見があり、安定 Sr を用いた検量線の有効性が示唆されている [12]。そこで、福島県においても、安定 Sr 溶液を用いた検量線を作成し、Sr-90 溶液を用いた検量線と比較検証した。その結果を図 11 に示す。



左：Sr-90 標準溶液を使用した検量線 右：安定 Sr 溶液(Sr-88)を使用した検量線

図 11 ICP-MS を用いて作成した検量線

両者の検量線の傾きを比較すると、Sr-88 で作成した検量線の傾きが 30%大きかった。安定 Sr で作成した検量線を利用して Sr-90 を定量すると、23%の過小評価となる。

機器の電圧の設定等を変更することで、傾きが一致する可能性があり、今後検証を継続していく必要がある。

定量には、Sr-90 標準溶液を用いた検量線を使用する方が、測定する対象に則した計算が可能であるが、安定 Sr を使用した検量線を用いることで、放射能標準溶液を取り扱う必要がないというメリットがある。

ウ 環境試料を用いた分析試験

環境試料を用いた分析を想定し、水試料として上水の分析を行った。ただし、現在の福島県内の上水には、Sr-90 は含まれていたとしてもごくわずかであり、本手法での検出は難しいと考えられたため、上水に Sr-90 標準溶液を添加し、添加回収試験として実施した。

検量線は Sr-90 溶液を用いて作成し、分析を行った。試料水の導入量は 50 mL とした。その結果を表 6 に示す。

表 6 添加回収試験の結果

試料	添加濃度(Bq/L)	測定結果(Bq/L)	回収率(%)
上水	0	ND	-
上水+Sr-90 溶液	292	254	87

エ 検出限界と分析時間

上水を分析した際、分析時間は 1 試料あたり約 20 分、BG 計数値から計算された検出限界値は 0.9 Bq/L であった。

なお、Sr-90 濃度が 0.9 Bq/L の水を 1 日 2 L 摂取した場合、1 年間の内部被ばく線量は 0.02 mSv であり、追加被ばく線量の基準である 1 mSv/y を十分下回るレベルの Sr-90 を検出可能であることから、本手法は緊急時の Sr-90 モニタリングに適用できるものである。

オ 今後の課題

今後は、分析精度を向上させるとともに、分析可能な環境試料の幅を増やすため、土試料及び大気浮遊じんフィルターの分析について検討していく。

まとめ

電解濃縮を使用した低濃度トリチウムの分析、有機結合型トリチウム(OBT)の分析、ICP-MS を使用した Sr-90 の分析の 3 つの分析技術について、IAEA からの技術的支援を受け、福島県の研究室が単独で分析を実施できる見込みとなった。

確立した分析手法については、環境動態分野等への活用を想定した、福島県内の環境試料の

詳細な分析や、緊急時のモニタリング手法等として活用していくことを想定している。

また、実試料の分析に向けた具体的な課題を抽出し、課題の解決、分析の精度向上及び効率化に向けて、今後も IAEA と協力していくことを確認した。

参考文献等

- [1] 多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会報告書(2020. 2)
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/takakusyu/report.html>
- [2] 東京電力処理水ポータルサイト
<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/>
- [3] 文部科学省による、①ガンマ線放出核種の分析結果、及び②ストロンチウム 89、90 の分析結果（第 2 次分布状況調査）について
<https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/7000/6213/view.html>
- [4] Determination and Comparison of the Strontium-90 Concentrations in Topsoil of Fukushima Prefecture before and after the Fukushima Daiichi Nuclear Accident.
M. Konno *et al.* ACS Omega 2018, 3, 12, 18028-18038
- [5] 文部科学省 放射能測定法シリーズ 9 「トリチウム分析法」
https://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/main_pdf_series_9.html
- [6] 福島第一原子力発電所周辺海域におけるモニタリング
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/genan208.html>
- [7] The installation and operation of the compact Tritium Enrichment Unit (TEU)
<http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/TEU-tutorial/index.html>
- [8] A compact tritium enrichment unit for large sample volumes with automated re-filling and higher enrichment factor
B. Kumer *et al.*, Applied Radiation and Isotopes 118(2016)
- [9] 環境分析のためのトリチウム電解濃縮(プラズマ・核融合学会誌)
Electrolytic Enrichment Technique of Tritium in Water for Environmental Analysis J. Plasma Fusion Res. Vol.92, No.1 (2016) 26-30 Kakiuchi
- [10] 平成 31 年度原子力施設等防災対策等委託費（海洋環境における放射能調査及び総合評価）事業 事業調査報告書(1)
<https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/16000/15017/view.html>
- [11] 文部科学省 放射能測定法シリーズ 2 「放射性ストロンチウム分析法」
https://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/main_pdf_series_2.html
- [12] Sequential inductively coupled plasma quadrupole mass-spectrometric quantification of radioactive strontium-90 incorporating cascade separation steps for radioactive contamination rapid survey.
Y. Takagai *et al.* Anal. Methods, 2014, 6, 355

付属資料

IAEA 協力プロジェクト(FIP7)に係る活動の概要

実施年月日	場所	概要
2016/06/29-30	福島県	実施取決め締結に係る事前協議
2016/10/23-27	ウィーン	ラボ見学・実施取決め締結に係る協議
2016/10/25	—	実施取決め締結・プロジェクト (FIP7) 開始 ※期限：2018/10/25 まで(2年間)
2017/04/17-21	福島県	IAEA 専門家の協力によるトリチウム電解濃縮装置組上げ作業
2017/06/05-18	ウィーン	電解濃縮装置の操作研修
2017/07/03-07	福島県	IAEA 専門家の協力による電解濃縮装置最終組上げ・動作確認
2018/05/15-18	福島県	有機結合型トリチウム(OBT)分析法、ICP-MS を用いたストロンチウム(Sr-90)分析法に係るミッション 国内外の専門家による技術指導・助言
2018/10/01-05	福島県	OBT 分析法に係るミッション
2018/10/07-13	ウィーン	電解濃縮法に係るミッション 地下水採取法の見学
2018/10/22	—	プロジェクト延長手続き(1回目) ※期限：2020/12/31 まで
2018/12/17-18	福島県	電解濃縮法、OBT 分析法、ICP-MS を用いた Sr-90 分析法に係るミッション 国内外の専門家による技術指導・助言
2019/07/03-05	福島県	電解濃縮法、OBT 分析法に係るミッション 国内外の専門家による技術指導・助言
2020/12/21	—	プロジェクト延長手続き(2回目) ※期限：2021/03/31 まで
2020/11/17 - 2021/03/10	Web 会合(計 13 回)	トリチウム分析情報管理システム(TRIMS)の導入・操作研修等
2021/03/17	Web 会合	FIP7 最終会合
2021/03/31	—	FIP7 終了