

<報告>

透析用水処理装置内の膜特性における放射性ヨウ素及び  
放射性セシウムの挙動について

西勝光紀

公益財団法人湯浅報恩会寿泉堂クリニック臨床工学科

Behavior of radioactive iodine and radioactive cesium in a property of  
membrane in a water treatment system for hemodialysis

Mitsunori SAIKATSU

The Department of Clinical Engineering, YUASA Foundation Jusendo Clinic

抄録

**目的：**血液透析では水道水や井戸水から透析用水処理装置（以下、RO装置）を用いて透析用水を作成する。本報告では東日本大震災・東京電力第一原子力発電所事故以後に、RO装置内に装備されているフィルター類やRO装置透過後の水から放射性物質の濃度を測定し、RO装置内でフィルターにより除去される放射性物質の挙動について明らかにした。

**方法：**原発事故直後から1年間使用していた、RO膜が1段タイプの第1世代型RO装置内のフィルター類と、1年後に更新したRO膜2段タイプの第3世代型RO装置内のフィルター類及びRO装置透過後の水について放射性物質濃度の測定を行った。測定期間については、第1世代型は廃棄時に取り出したフィルター類を測定（1回のみ）し、第3世代型は装置設置から1年間（3か月ごと4回）とした。

**結果：**フィルター類からは、測定したプレフィルター全てから放射性セシウムが検出された。RO膜については第1世代型および第3世代型RO装置の前段のRO膜から放射性セシウムが検出されたが、第3世代型後段のRO膜からは放射性物質が検出されなかった。RO装置透過後の水からは放射性物質が検出されなかった。

**結論：**RO装置では、装置内に設置されているフィルター類により、放射性物質が除去され、透析用水の放射性物質は除去されている。

**キーワード：**血液透析, RO装置, フィルター, 透析用水, 放射性物質

**Abstract**

**Objective:** Hemodialysis usually uses a water treatment system (hereinafter referred to as "RO system") for producing water for hemodialysis from tap water or ground water. This report makes clear the behavior of removing radioactive substances in a RO system which measures the concentration of radioactive substances from the equipped filter(s) in a RO system and from RO treated water, after the Great East Japan Earthquake, the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster of the Tokyo Electric Power Corporation.

**Method:** To measure the concentration of radioactive substances of filters in a first generation RO system (RO membrane is one-step type) used one year from the nuclear accident and in the third

連絡先：西勝光紀

〒963-8002 福島県郡山市駅前1丁目5-7

1-5-7 Ekimae, koriyama-shi, fukushima-ken 963-8002, Japan.

Tel: 024-939-4616 (代)

E-mail: touseki@jusendo.or.jp

[平成27年12月25日受理]

generation RO system (RO membrane is two-step type) and treated water after the nuclear accident. Measurement period of the first generation type was one time at the disposal of filters and the third generation type was four times in every three months (one year one month). During the period, it is April, 2013 from March, 2012.

**Results:** Radioactive cesium was detected in all pre-filters and RO membranes of first generation and third generation. However, from the second stage RO membrane of the third generation RO system radioactive substances were not detected, and also from the RO treated water radioactive substances were not detected.

**Conclusion:** RO system could remove radioactive substances by equipped filters and radioactive substances were remove in treated water used for hemodialysis.

**keywords:** hemodialysis, RO system, filter, water for hemodialysis, radioactive substances

(accepted for publication, 25th December 2015)

## I. はじめに

筆者の所属するクリニックの透析床は49床で、大震災発生当時は日中、午後、夜間透析合わせて133名の腎不全患者の透析を行っていた。透析液の作成には郡山市の水道水を用い、透析用水処理装置（以下：RO (Reverse Osmosis) 装置）を通して一旦透析用水（以下：RO水）タンクに蓄え、A剤（電解質溶剤）粉末自動溶解装置、B剤（アルカリ化剤）粉末自動溶解装置、（多人数用）透析液供給装置、個人用透析患者監視装置に供給する方式を取っていた。平成23年3月12日の原発事故により放射性プルームの通過で、福島県浜通り、中通り地方を中心に、放射性ヨウ素・放射性セシウム等が降り注ぎ、郡山市の浄水場も汚染されるに至った。しかし郡山市からは水道水の飲水禁止令は発せられず（震災当時、郡山市は放射性ヨウ素が、100 Bq/kgを超えたため、乳児に対しての摂取制限及び広報は行われた。現時点では既に、解除済み。）、水道水を透析液として使用することに一抹の不安を感じながら透析を続けていた。

平成23年4月に（公財）日本臨床工学技士会が関東圏の2施設（施設名は未公表）の協力でRO装置透過後の水の放射性物質の濃度を調査し、結果を公表した。その結果を表1に示す [1]。ここで原水がRO装置を透過した

後のRO水は、放射性ヨウ素、放射性セシウムともに検出限界値以下（ここでの検出限界値：1 Bq/Kg未満）となることを示している。この結果を踏まえて安心して水道水利用の透析を続けることが出来た。

日本臨床工学技士会の調査では、RO装置を透過する水の放射性物質については調査を行っているが、RO装置内のどの部分で放射性物質の除去が行われるかという点については、詳細な調査は行われてはいない。

平成24年3月、筆者のクリニックでRO装置の更新を行った。大震災時に使用していたRO装置は廃棄されるため、廃棄前にRO装置からフィルター類を取り出し、フィルター類によって捕捉された放射性物質の状況を調査したところ、放射性物質の存在が確認出来た。併せて更新後のRO装置のフィルター類及びRO装置透過後の各ポイントの水の放射性物質の測定を行い、それぞれの膜特性を明らかにすることとした。引き続き更新後のRO装置のフィルター類及びRO装置透過後の各採取ポイントの水の放射性物質の測定を行い、装置設置から1年間（平成24年3月～平成25年4月）調査したので、その結果を報告する。

## II. 郡山市における事故発生後の水道水中放射性物質

平成23年3月12日、東日本大震災後に発生した東京電力第一原子力発電所の水素爆発（以下：原発事故）では、福島県を中心に各地域への放射性物質（放射性ヨウ素・放射性セシウム等）の飛散があり、環境水や土壌等が汚染された。

大震災当時、福島県郡山市の郡山市水道局は、4ヶ所の浄水場と4ヶ所の簡易水道を管轄していた。（平成25年より1ヶ所が統合され、現在、浄水場は3ヶ所となっている。）図1は、郡山市が公開した4ヶ所の浄水場で測定した放射性ヨウ素の値を示したものである [2]。浄水場は平成23年3月21日から、簡易水道は4月5日より放射性ヨウ素（以下：I-131）、放射性セシウム（以下：Cs）のモニタリングを開始している。I-131はモニタリ

表1 水質分析計量結果  
（日本臨床工学技士会発表関東圏2施設）

A施設	原水 (Bq/kg)	活性炭 濾過器後 (Bq/kg)	RO膜後 (Bq/kg)
I-131	73	58	N.D.
Cs-134	4.1	N.D.	N.D.
Cs-137	5.6	N.D.	N.D.
B施設	原水 (Bq/kg)	活性炭 濾過器後 (Bq/kg)	RO膜後 (Bq/kg)
I-131	100	87	N.D.
Cs-134	4.1	7	N.D.
Cs-137	3.3	7	N.D.

検出限界値（1 Bq/kg 未満）

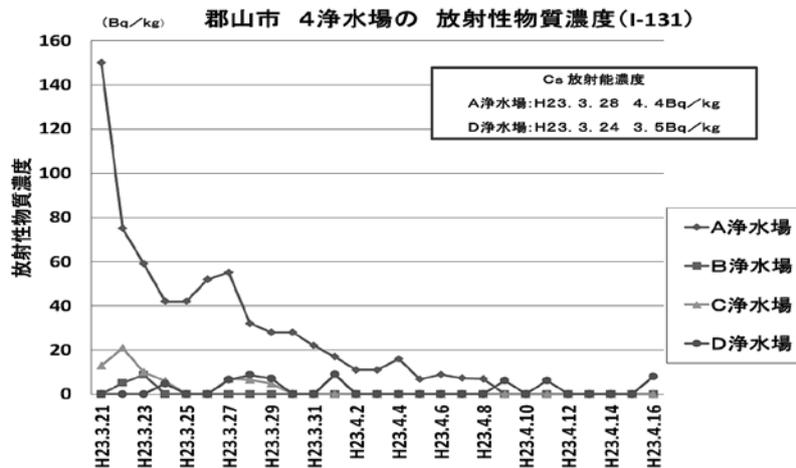


図1 郡山市に水道水を供給している各浄水場の放射性物質の結果

ング開始初日に、A浄水場で最大値150 Bq/kgを示し、その後は徐々に減衰し、平成23年4月16日で測定された8 Bq/kgを最後に、4月17日以降は検出限界値以下（検出限界値：1 Bq/kg未満）を継続している。又、Csの測定もI-131と同時期に開始しており、I-131が検出されていた平成23年4月16日までの間で、A浄水場、D浄水場で各1回ずつ測定されており、A浄水場は4.4 Bq/kg、D浄水場は3.5 Bq/kgであった（図1の枠内に表示）。

### III. RO装置の構成と各フィルターの特徴

#### 1. RO装置の構成

RO装置は、装置内にそれぞれの分離性能を持った膜を設置し、その膜を透過させ原水を処理している。原水中に含まれる物質を除去する1次プレフィルター（以下：1次PF）とポンペ内に充填された陽イオン交換樹脂で原水中の硬度成分のイオン交換を行った後、再生工程（後に説明する）において除去する軟水装置を組み込んでいる。因みに、主に除去される硬度成分は、カルシウムイオン（以下： $\text{Ca}^{2+}$ ）とマグネシウムイオン（以下： $\text{Mg}^{2+}$ ）である。当クリニックのRO装置に充填されている陽イオン交換樹脂の量は84 Lである。また、原水中に含まれ逆浸透膜（以下：RO膜）の早期劣化の原因となる遊離塩素やクロラミン等を、ポンペ内に充填された活性炭の吸着能力を利用し除去する活性炭濾過装置がある。この2つの装置はRO膜の長期維持目的に設置されている。当クリニックのRO装置の活性炭濾過装置は粒状活性炭（直径1～3 mm）を使用している。活性炭充填量は、陽イオン交換樹脂と同量の84 Lである。軟水装置と活性炭濾過装置を合わせて前処理部や前処理ユニットという総称で呼ばれる。そして、軟水装置・活性炭濾過装置から流れ出た粒子（装置から流れ出た微量の活性炭等）を除去する2次プレフィルター（以下：2次PF）、RO膜の順に透過させ、最終的にRO水を製造する [3]。

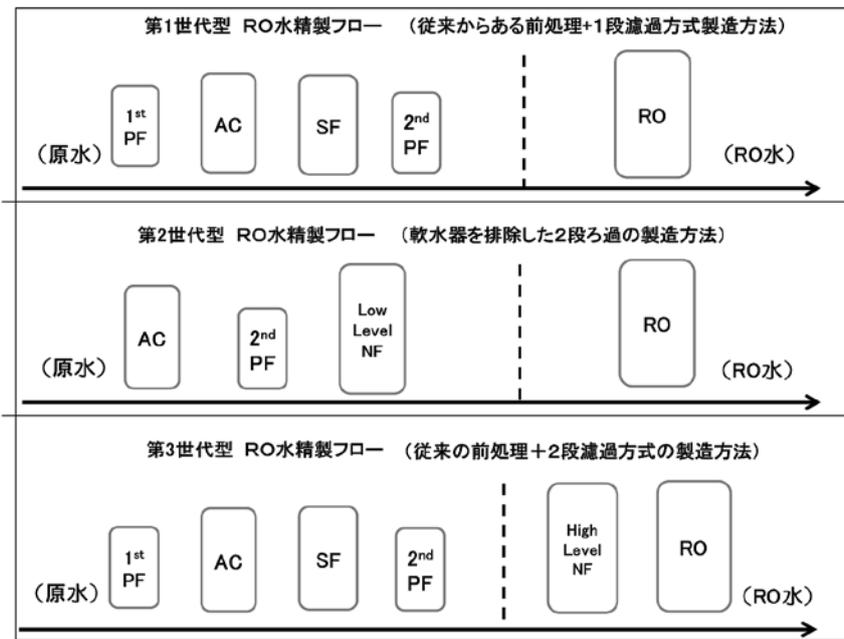
筆者のクリニックで採用したRO装置のメーカーが、市販しているRO装置には3つのタイプがある（図2）。クリニックでは、第1世代型と第3世代型を採用した。第1世代型は1次PF、活性炭濾過装置、軟水装置、2次PF、RO膜の順番で構成されており、第3世代型では第1世代型における2次PFとRO膜の前にナノフィルター（以下：NF膜）を加え、2段階の処理を行っている。この3種類のRO装置には、呼び名が付けられていない。第1世代型及び第3世代型という呼称は、当クリニックで採用しているRO装置のメーカーが、対外的な製品説明等で使用しているものであり、今回この呼称を使用することとした。

#### 2. 第1世代型と第3世代型RO装置の比較

第1世代型のフローを図3に示す。この第1世代型のフロー図がRO装置の原型といえる。RO水を作成する際に、RO膜からは、RO水以外に二酸化ケイ素を含む濃縮排水を排出している。

図4は第3世代型のフローを示す。第1世代型と比較して、2次PFとRO膜の間にNF膜を追加し、いわゆるRO膜レベルの処理を2段階で行う（ダブルフィルトレーション）形式の装置である。第3世代型の場合、濃縮排水の工程はNF膜だけで行われる。NF膜後のRO膜を透過する水の状態は、RO水と同等程度の水質になっている。

第3世代型では、フロー図のRO膜部分に示しているRO膜側より排水された水をメーカーでは、「回収水」という名で呼んでいる。この回収水は、排水という表現を使用しているが、先に示したように、第3世代型での濃縮排水の排出は、NF膜で行っているため、実質的には、RO水を2つの経路で使用している。回収水は、原水の流入部や原水タンク（原水の貯留タンク）に戻して、原水の使用水量を抑える目的と原水による膜負担を低下させる目的がある。この機構によって、第3世代型は第1世代型と比較し、原水の使用水量を約30～35%抑えるこ



1st PF : 1次プレフィルター    2nd PF : 2次プレフィルター  
 AC : 活性炭濾過装置    SF : 軟水装置  
 NF : NF膜    RO : RO膜  
 ※ 矢印は、水の流れ。

図2 3種類のRO装置 簡易RO水製造フロー

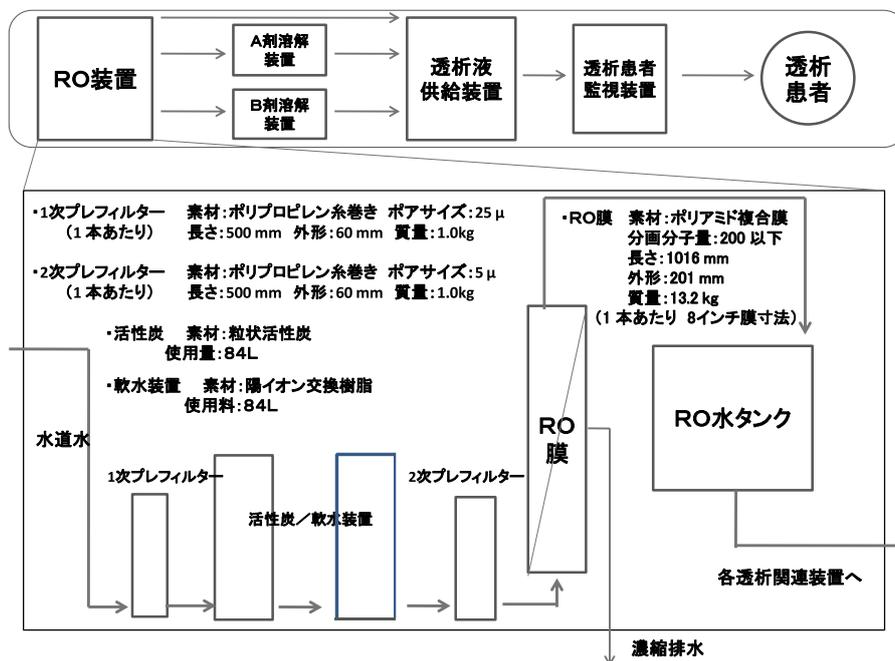


図3 透析装置全体と第1世代型内部構成

とが可能となる。又、原水の使用水量を抑えることで、1次PFのRO装置内の役目として、原水内に含まれる物質(水道配管内の鉄錆等)の捕捉負担も軽減出来ること

から、第3世代型の1次PFは第1世代型の1次PFより、使用本数は同じだが(3本使用)、長さは半分になっている。

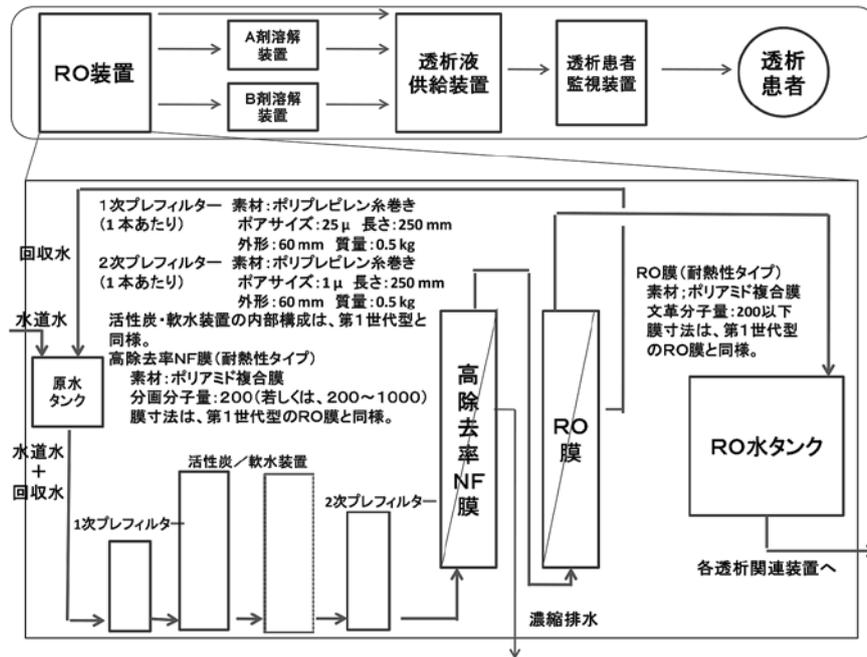


図4 透析装置全体と第3世代型内部構成

表2 NF膜とRO膜の特徴

項目	NF膜	RO膜
膜素材	ポリアミド複合膜	ポリアミド複合膜
最高使用圧力 (Mpa)	4.2	4.2
最高給水温度 (非耐熱 $^{\circ}$ C)	45	45
pH範囲 (最大)	1~12	1~12
NaCl除去率 (%)	5~93	93~99
耐塩素性	一般的に弱い	
耐バクテリア性	バクテリアの侵食を受けないが、 バイオフィウリングによる膜目詰まりの可能性がある。	

一般社団法人 膜分離技術振興協会「透析用水ガイドブック」より引用

### 3. 各フィルターの特徴

#### (1) 1次PF及び2次PF

プレフィルターは、ポンプ部や膜エレメントの損傷の原因となる原水中の粗い粒子から保護する膜である。1次PFは原水中の鉄錆や砂等、2次PFは活性炭濾過装置から漏出する活性炭粒子を除去する。筆者のクリニックで使用していたRO装置の場合、1次PFの膜孔サイズは第1世代型・第3世代型ともに25 $\mu$ である。2次PFの膜孔サイズは、第1世代型で5 $\mu$ であり、第3世代型では1 $\mu$ の2次PFを使用している。

#### (2) NF膜

膜素材は、RO膜と同様のポリアミド複合膜である。原水中の硬度成分を低減させ、RO膜の負荷を下げる目的で使用される。NF膜は、RO膜と同様の素材を使用しているが、RO膜より性能は劣る。最近では、装置内消毒として、80 $^{\circ}$ C以上の熱水消毒を行う装置もあるため、耐熱対応のNF膜も使用されている [3]。

#### (3) RO膜

膜表面に存在する緻密な分離層とそれを支持する多孔質な支持層から成る膜である。表面の緻密層は水中のイオンや有機物を分離する機能を持っている。RO水の作成を目的とするRO膜は、耐バクテリア性等の観点から、分離層の素材として架橋ポリアミドを用いた複合膜(ポリアミド複合膜)が一般的に用いられている。NF膜同様、耐熱タイプも使用されている。

NF膜の項で、熱水消毒を行う装置のことを記したが、第3世代型では、NF膜・RO膜共に耐熱対応タイプを使用しているため、クエン酸等の薬品洗浄の他に(クエン酸以外に、ホルマリンや過酢酸を使用)、第1世代型の装置洗浄モードには無い熱水消毒を追加している。筆者のクリニックの場合、週3回、180分の熱水消毒を行っている。因みに、装置更新時まで使用していた第1世代型は、薬品洗浄しか施行出来ないため、RO膜は非耐熱タイプを使用していた。NF膜とRO膜の特徴を表2に示す [3]。

## IV. 調査方法と測定結果

### 1. RO装置

本調査では、フィルター類については、第1世代型と第3世代型を対象とした。第1世代型については、更新時に取り出したフィルター類のみの放射性物質を測定した。水の放射性物質の測定結果は、第3世代型だけを対象とした。図5に第3世代型の水の採取箇所と測定したフィルター類を示す。

フィルターの放射性物質の測定は、第1世代型の場合、装置廃棄時に取り出し測定したため、1回のみデータとなった。第1世代型の1次PF、2次PFは、平成23年12月～24年3月に使用したものである。第3世代型の1次PFと2次PFは、3ヶ月毎に取り出して測定を行った。又、第3世代型のNF膜、RO膜は1年間使用後に、それぞれ流入部の膜を1本ずつ取り出し測定を行った。

### 2. 放射性物質測定方法

フィルター類と水の放射性物質の測定は、厚生労働省の「緊急時における食品の放射能測定マニュアル [4]」に準じ、ゲルマニウム半導体を用いたGeガンマ線スペクトロメトリーによる核種分析を行った。RO装置内のフィルター類は交換直後すぐに梱包し検査会社へ送ることとした。又、原水及び各フィルター透過後の水も同時に採取した。フィルター類は、2 Lマリネリ容器（又は、U-8容器）に入れ、123分検出を行った。検出限界は、概ね1 Bq/kg未満であった。原水と各フィルター透過後の水も同様に、2 Lマリネリ容器（又は、U-8容器）に入れ、60分検出を行った。

1次PFと2次PFについては、定期交換時（3ヶ月毎）に取出し、NF膜及びRO膜については、それぞれ入口部

の1本を1年後に取り出し、前述と同様に測定した。

### 3. 測定結果

#### (1) 1次PF

表3に第1世代型、図6に第3世代型の1次PFの測定結果を示す。I-131は半減期が8日と短いため、双方の装置のいずれの試料からも検出されなかった。第1世代RO装置の1次PFにおいて、Csは、セシウム134（以下：Cs-134）で1104 Bq/kg、セシウム137（以下：Cs-

表3 第1世代型1次PFにおける放射性物質濃度

	I - 131 (Bq/kg)	Cs - 134 (Bq/kg)	Cs - 137 (Bq/kg)
H24.3	N.D.	1104	1530

検出限界値（1 Bq/kg 未満）

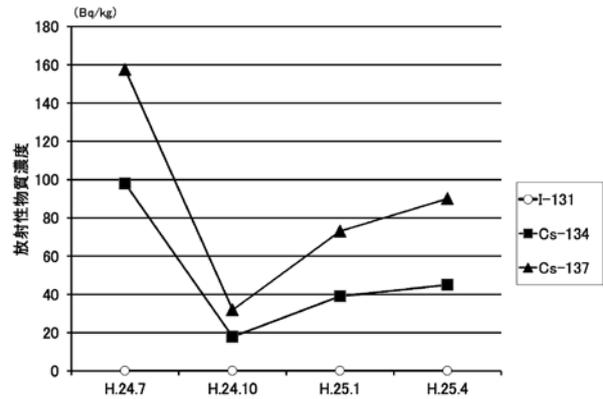


図6 第3世代型 1次PF放射性物質測定結果

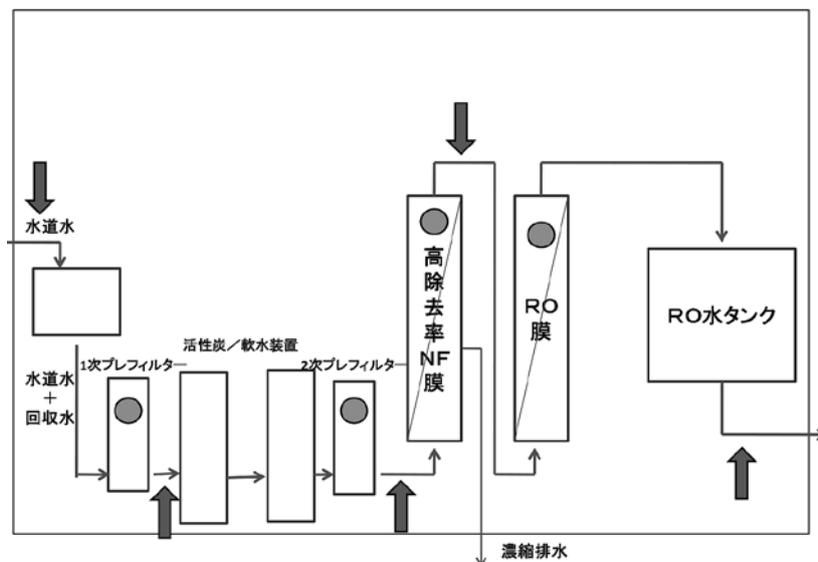


図5 水の採取ポイント（矢印部分）と測定したフィルター類（●部分）

137) で1530 Bq/kgと、1000 Bq/kgを超えて検出された。

第3世代型の1次PFのCsについては、平成24年7月が最も高くCs-134が100 Bq/kg、Cs-137が160 Bq/kgであった。この数値は、第1世代型と比較すると約10分の1程度になる。平成24年10月以降、第3世代型での1次PFで100 Bq/kgを超える放射能を示すものはなかった。

(2) 2次PF

表4に第1世代型の2次PF、図7に第3世代型の2次PFの測定結果を示す。I-131については、1次PFの測定結果と同様で検出されなかった。Csは第1世代型でCs-134が5.9 Bq/kg、Cs-137が28 Bq/kgと1次PFに比べ低値を示した。第3世代型においても、Cs-134、Cs-137ともに低下していた。

(3) NF膜とRO膜

表5に第1世代型のRO膜と第3世代型のNF膜及びRO膜の測定結果を示す。1次PFと2次PFは、3ヶ月毎での放射能測定を行ったが、NF膜とRO膜については、1年間使用した段階で測定している。NF膜とRO膜は、水の流入入口部に設置していた膜を測定した。通常、RO膜の定期交換は、第1世代型では、メーカー推奨により2年である。第3世代型の場合、NF膜は第1世代型のRO膜の交換年数と同様である。これは、装置内の

膜設置順が第1世代型のRO膜と同じで、2次PFの後にNF膜が設置されており、膜負担の状況がほぼ同じであるためである。第3世代型のRO膜の定期交換は、メーカー推奨で7年となっている。この交換年数は、NF膜後にRO膜が設置されており、NF膜透過後の水がRO水レベルに近い場合、RO膜の膜負担が軽減出来ることで交換期間が長い。

第1世代型のRO膜でCs-134が205 Bq/kg、Cs-137が304 Bq/kg検出された。図2に示したように、2次PF後段にRO膜があるが、2次PFの5μmの膜孔サイズでもCsは除去しきれず、RO膜でもCsが検出された可能性がある。

第3世代型の膜孔のサイズは1μmで、第1世代型の2次PFより小さい。第3世代型の2次PF後のNF膜からもCsが検出されているが(Cs-134が9.5 Bq/kg、Cs-137が17 Bq/kg)、原水の使用水量が第1世代型より少ないこと、又、膜孔が小さくなったことから、第3世代型の2次PF後のNF膜に捕捉されるCsの値は、第1世代型の2次PF後のRO膜と比較すると低値となった。後段膜のRO膜からCsは検出されなかった。これは、前段のNF膜の膜孔が、RO膜と同レベルの膜孔サイズであり、CsがNF膜を透過出来ず、後段のRO膜では確認されなかったものと考えられる。

(4) RO装置透過後の水質分析計量結果

第3世代型の透過後の水からは、I-131、Cs-134、Cs-137はいずれも検出されなかった。全ての水質分析計量結果は、検出限界値以下(検出限界値：1 Bq/kg未満)であった。

表4 第1世代型2次PFの放射性物質濃度

	I - 131 (Bq/kg)	Cs - 134 (Bq/kg)	Cs - 137 (Bq/kg)
H.24.3	0	5.9	28.0

検出限界値 (1 Bq/kg 未満)

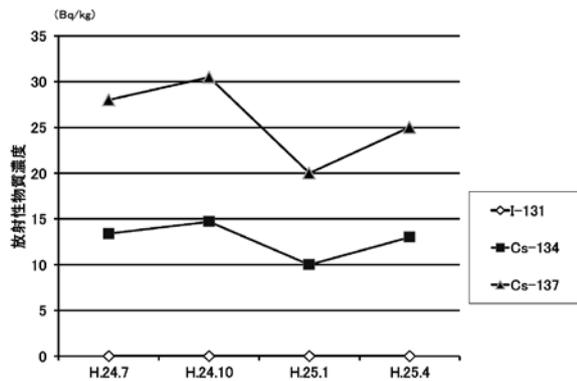


図7 第3世代型 2次PF放射性物質測定結果

表5 RO装置内RO膜及びNF膜放射性物質濃度

	第1世代型 RO膜 (Bq/kg)	第3世代型 NF膜 (Bq/kg)	第3世代型 RO膜 (Bq/kg)
I-131	N.D.	N.D.	N.D.
Cs-134	205	9.5	N.D.
Cs-137	304	17	N.D.

検出限界値 (1 Bq/kg 未満)

V. 考察

原発事故後に厚生労働省が行った「水道水における放射性物質対策検討会」の資料「放射性物質の浄水処理性について」では、Csの挙動について、水道水中での放射性セシウムはセシウムイオン(以下:Cs<sup>+</sup>)の状態が存在しているとされている[5-7]。

RO装置には、2次PFの前段に軟水装置がある。軟水装置は、陽イオン交換樹脂を用いて、原水中の硬度成分を吸着後、ナトリウムイオン(以下:Na<sup>+</sup>)に置換し除去、いわゆる再生工程(以下:再生)する装置である。再生の工程フローを図8に示す。軟水装置内で行う再生は、陽イオン交換樹脂の充填層に原水を通すことで、軟水を製造する。陽イオン交換樹脂はCa<sup>2+</sup>やMg<sup>2+</sup>を吸着するが、その状態が継続したままだと交換能力が失われるため、再生が必要となり、この工程で吸着されたCa<sup>2+</sup>やMg<sup>2+</sup>を除去する。再生は、再生剤(塩水)を用いて行う。以下に軟水装置内で行われている工程は[3]、

1) 通水(軟水化)

原水をタンク上部から、下向流で流してイオン交換を行い、軟水を製造する工程。

2) 再生

①逆流

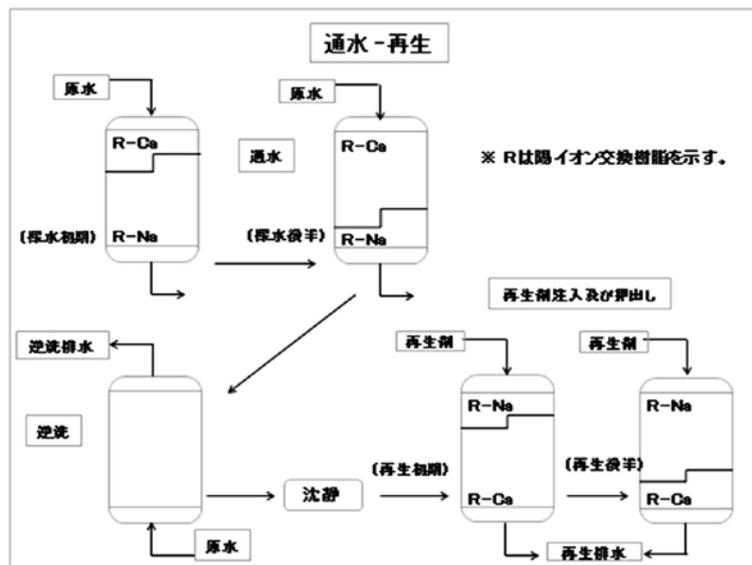


図8 通水 - 再生工程フロー  
 一般社団法人 膜分離技術振興協会「透析用水ガイドブック」より引用

通水を行うと、陽イオン交換樹脂層中に、原水の懸濁物が沈着するので、懸濁物を洗い流すため、樹脂層の密着を解すため、タンク下部から上向流で原水を流す。この時の原水の流速は、樹脂層のみかけ体積が、50～80% 増加する。逆流は、10～20分間行われる。

②沈静

原水の注入を止めて、陽イオン交換樹脂をタンク内で、自然沈降させる工程。

③再生剤注入

再生剤をタンク上部より注入する。再生剤の濃度は、10%程度の濃度で行う。再生剤は、樹脂層を均一に分散するので、陽イオン交換樹脂との接触時間を十分に確保する必要がある。

④押出し

再生剤注入後、陽イオン交換樹脂と未反応となった再生剤を洗い流すため、タンク上部から、原水を通水し洗い流す。

⑤水洗

押出し後、樹脂層に残留している再生剤を洗い流す。筆者の所属するクリニックの場合、日曜日以外の全ての曜日で、この工程を施行している。

原発事故によって放出されたCsは、水との反応性が良いため、空気中に放出されると同時に水蒸気と反応し、水酸化セシウムとなり、その後、空気中の炭酸ガスと反応して炭酸セシウムに変化し、雨や雪によって環境水に溶け込み、浄水場で水道水から検出されるCsは、Cs<sup>+</sup>の状態となっている。先の2次PFの項でも説明したが、原水中に溶け込んだCs<sup>+</sup>は陽イオンであるため、陽イオン交換樹脂に吸着され、再生によって排出される。又、軟水装置を用いる理由としては、

- (1) RO膜性能の長期維持（硬度成分による膜ストレスを回避する）。
- (2) RO膜劣化時の硬度成分リークに対してリスクの低減ができる。

ということで前処理として装備されている [3]。陽イオンとして存在するCs<sup>+</sup>は、この陽イオン交換樹脂に吸着されると考えられる。1次PFと比べ2次PFの測定値が低下していることを考えた場合、再生によるNa<sup>+</sup>との交換と硬度成分を除去し排液する工程が、Cs<sup>+</sup>をも大量に除去する作業として働いているものと考えられる。2次PFにおけるCs<sup>+</sup>の陽性反応は、原水中に存在するCs<sup>+</sup>の含有量に対して、陽イオン交換樹脂の吸着能を超えた結果、2次PFへ移行したためと考えられ、2次PFに捕捉されたCs<sup>+</sup>は、再生工程前に捕捉されたと考えられる。

1. フィルター類の放射性物質濃度に関する考察

今回の調査により、RO装置内のフィルター類の放射性物質の除去状況から、その挙動を解明できた。又、RO装置の種類の違いによる原水の処理能力（第1世代型と第3世代型の構造の違い）から、その除去状況に差が生じる事も解った。第3世代型の装置構造については、図3の装置フローで示したように、RO膜から排出される回収水の利用で原水の使用量を減量している。このことから、原水の素となる環境水からの放射性物質のフィルター類への影響が、第1世代型よりも低値となったと考えられる。

第3世代型の1次PFの測定結果については、交換時期により放射性物質濃度の変動がみられた。この要因として、使用水量の変動と原水中の濃度変動が考えられる。まず使用水量について考えると、東日本大震災直後は、

福島第一原子力発電所周辺の透析患者の方々が避難したことで、筆者のクリニックの患者総数が一時的に増加したが、除染による空間放射線量の減少や地元地区（浜通り地方）の透析施設の再開によって転院する等、福島県郡山市から、患者の方々は移動している。平成24年5月末日で157名の患者が通院していたが、データ収集期において患者数はほぼ変動していない。このため、1次PFの放射性物質の濃度変動は、患者数の増減による使用量変化とは考えにくい。

次に、貯水場所（ダム等）の貯水量の増減によって、貯水された環境水内のCs<sup>+</sup>等の含有状態が変化したのではないかと考える。福島県郡山市の水道水の水源は、猪苗代湖である。その猪苗代湖は、安達太良山、吾妻連峰、磐梯山等からの水を得ている長瀬川が主な水源となる。現時点でも、山間部においては、除染作業の遅れがあり、この研究の放射性物質濃度の測定時には、山間部の除染作業は行われていなかった。つまり、原発事故から、1年後に行った調査の時点でも、そのまま除染をされていない手付かずの状態、降雨や雪解け水となって環境水へ流入しており、その影響を受けやすい春期に、濁質に吸着したCsが、環境水中に流入することで、環境水中のCs濃度が上昇する可能性が大きいと考えられる。夏期の場合、山間部から環境水中の流入の他に、梅雨時期の降雨量の影響等、Cs濃度の上昇する要因もあるが、それらの影響を与えない程の日照時間が長くなることによる気温上昇（蒸発による環境水量の減少）で、Cs濃度が低下傾向になったと考えられる。又、原発事故発生当時、空間中にI-131、Cs-134、Cs-137が浮遊している状態であったが、原発事故1年後からの調査開始のため、空間中のI-131、Cs-134、Cs-137は低下していると考えられ、原発事故直後より影響が低いと考える。そして、原発事故直後より、福島第一原子力発電所においては、放射性物質の飛散を防止する処置も取られていることから、

今研究期間中に測定したCs濃度は、原発事故直後に飛散したCsと考えられ、今後Cs濃度は、低下する可能性が考えられる。

環境水は、季節ごとの特有の気候変化が関与して春期と夏期でCs濃度が変動し、環境水中のCe濃度に影響を与え、さらに貯水場所の貯水量の変化が加わり、Cs濃度が変動したものと推測される。

文部科学省では、事故前から47都道府県それぞれで、約1ヶ所ずつ約100Lの試料を濃縮して上水（水道蛇口水）の低濃度の放射性物質のモニタリングを実施してきた。平成24年1月以降は、原子力規制委員会で集計を行っており、福島県では福島市のデータが示されている [8]。これによると、平成24年1月～3月には、Cs-134、Cs-137がそれぞれ0.0045 Bq/kg、0.0063 Bq/kg検出され（図9）、（ここでの検出限界値は、I-131、Cs-134、Cs-137全て、0.0001 Bq/kg未満）その後、7月にはいずれも半分減少していた。その後、Cs-134は半減期（2年）から予測される値より早く減少しているが、Cs-137については、ほぼ横這いであった。郡山市と水源が異なるが、フィルター中の濃度変化を説明しうるほどの違いは見られなかった。

その他考えられるものに、水処理装置のRO膜における温度の影響がある。

一般的に、RO膜では、塩類の浸透圧に対して、より高い圧力を加えることで脱塩する現象（逆浸透）によって、RO水の製造を行う。各イオンの浸透圧は温度により変化し、また膜面を通過する供給水の圧力損失等は水温により変化する。このため、膜面での圧力の変動や粘度が変化することによる流量変動が起こる事や、膜のCs<sup>+</sup>の除去能が温度により影響を受ける可能性も否定できない。今回の調査中の水温は14～27℃であり、水処理条件としてはあまり変化がない範囲であったが、Cs<sup>+</sup>の除去能については十分な知見が得られなかった。

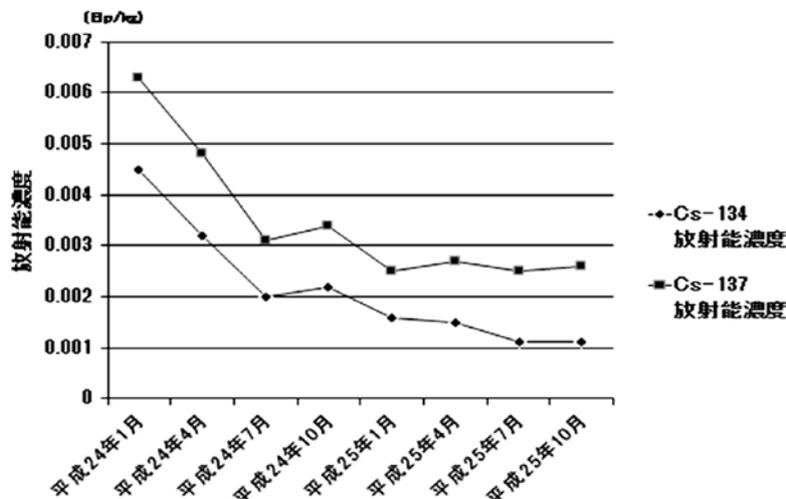


図9 福島県福島市における水道水中の放射性物質濃度

表6 第1世代型と第3世代型の放射性物質の収支試算

	第1世代型RO装置		第3世代型RO装置	
装置稼働時間 (1週間)	123 h/週		138 h/週	
1次PF通過前の通水原水量 (1週間) (a)	480×10 <sup>3</sup> L/週		340×10 <sup>3</sup> L/週	
3ヶ月間の通水量 (12週間換算) (b=a×12)	5800×10 <sup>3</sup> L/3ヶ月		4100×10 <sup>3</sup> L/3ヶ月	
放射性物質名	Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
震災当時(福島市)の水道水中放射性物質濃度 [7] (公表値) (c)	0.0045 Bq/kg	0.0063 Bq/kg	0.0020 Bq/kg	0.0031 Bq/kg
1次PFへの推定負荷量 (d=b×c)	26×10 <sup>3</sup> Bq	37×10 <sup>3</sup> Bq	8×10 <sup>3</sup> Bq	13×10 <sup>3</sup> Bq
1次PFの放射性物質実測値 (e)	1104 Bq/kg	1530 Bq/kg	98 Bq/kg	157 Bq/kg
1次PF重量 (3本分) (f)	3.0 kg		1.5 kg	
1次PF捕捉量 (g=e×f)	33×10 <sup>3</sup> Bq	46×10 <sup>3</sup> Bq	0.15×10 <sup>3</sup> Bq	0.24×10 <sup>3</sup> Bq

## 2. 放射性物質の収支に関する試算について

概算になるが、RO装置では1時間あたりのRO水の作成量と回収率がパネルに表示される。このことにより、RO水作成量と回収率から、第1世代型と第3世代型の1時間あたりの原水量を算出することができる。第1世代型は、回収率63.5%、RO水2,450 L/h、原水3,858 L/h、第3世代型は、回収率83.6%、RO水2,048 L/h、原水2,480 L/hとなる。それぞれの装置はRO水を作成し、A剤・B剤粉末自動溶解装置、透析液供給装置等へ供給するが、原水使用量の差はRO装置の性能差による。

第1世代型と第3世代型の放射性物質の収支を試算した結果を表6に示す。第1世代型では、平成24年1月のデータより、1次PFへの推定負荷量Dと1次PFにおける捕捉量Gを比較した場合、ほぼ近い数値で有り、ほぼ全量が1次PFに捕捉されていたことになる。一方で、第3世代型については、平成24年7月のデータから、1次PFへの推定負荷量Dとそれ1次PFにおける捕捉量Gを比較すると、GはDの概算で、Cs-134、Cs-137共に2%に過ぎず、一部の放射性セシウムを捕捉したものと考えられ、その他の部分は、後段の陽イオン交換樹脂を含む軟水装置や、NF膜、RO膜で取り除くことができたと考ええる。尚、先に述べたように、筆者のクリニックでは、日曜日以外、軟水装置内で頻繁に再生されているため、今般の放射性物質濃度の測定を行うことはできなかった。又、第1世代型と第3世代型の1次PFのCs濃度の差は、先に示した1時間あたりの原水使用量の差(第1世代型:原水3,858 L/h、第3世代型:原水2,480 L/h)によるものであり、さらに第3世代型における1次PFを透過する水の性質(原水+回収水)による違いによるものである。

## 3. その他の核種について

小坂ら [8] は、各放射性物質の浄水プロセスにおける挙動について様々な考察を行っており、放射性ストロンチウム(以下: Sr)についても、「Csと同様に陽イオンのため、陽イオン交換樹脂(Sr-89の陽イオン交換樹脂での除去は、99.1%～99.8%の高い除去率を報告している)と分子イオンとしてRO膜で処理できると考えられる。」と述べている。Srは測定が非常に困難であるため、今般データを取得してないが、Cs濃度に比例してごく

低濃度で存在するとされており、今回の調査範囲の程度であれば、RO装置内の軟水装置で除去されたと考えられる。

## 4. 原水中の放射性物質濃度測定結果の取扱いについて

当クリニックでの原水及びRO装置内を透過した水については、放射性物質の値は全て検出下限以下であった。原水については一般的に、浄水場の浄水処理で、I-131と共にCs-134、Cs-137を除去できる可能性が指摘されていたが [5, 6]、その指摘とも整合する結果であった。国は平成23年3月に、水道水中の放射性物質の指標を、Iを300 Bq/kg(乳幼児の摂取は、100 Bq/kg)、Csを200 Bq/kgと定めたが、24年4月に水道水の新指標として、Iの数値は指標より削除され、Csについては、10 Bq/kgに変更された。

血液透析に携わる臨床工学技士は、日本臨床工学技士会透析液等ワーキンググループ(Ver.2.00以降は、透析液等安全委員会)が発行している「透析液清浄化ガイドライン」[9](東日本大震災当時は、Ver.1.07、平成23年10月5日よりVer.2.00、平成26年3月11日よりVer.2.01に改訂)に沿って透析用水管理を行っている。我々は、水道事業者が水道法第4条及び第20条に沿って毎月行っている水質検査結果について把握(検査結果の保存・保管)しなければならない [9]。私見であるが、原水中の放射性物質濃度の検査は、福島県郡山市の場合、現在でも水道局により実施されており、その結果に基づき一貫して管理することが必要であると考えられる。

原発事故発生直後は、事故及び津波災害による避難患者の対応等に追われていたため、今回のRO装置内の水質分析は、原発事故1年後から開始せざるを得なかった。このため、原発事故直後のRO装置内の水質状況とフィルター類の状況について、完全に把握できたわけではない。しかし今回の調査により、原発事故後、1年間の福島県郡山市の放射性物質の汚染状況の場合、水道水を原水としてもRO装置により放射性セシウムが除去されることが明らかになった。実際、RO装置透過後の水から放射性セシウムは検出されておらず、血液透析による内部被曝の可能性は低かったと考えられる。

## 5. 今後の課題

RO装置を使用することで透析液中の放射性物質は検出されなかったが、放射性物質を捕捉しているフィルター類の「廃棄」については検討が必要と考える。

RO装置は、水に含まれる硬度成分等を吸着・除去するのが本来の役目なので、医療機器分類に属しておらず、フィルター類の廃棄の場合、家庭用浄水器のフィルターのように一般廃棄物として廃棄する場合と、「血液透析で使用する水」という観点から医療廃棄物として廃棄するなど、統一した廃棄方法が無いのが現状である。高濃度放射性物質に汚染された場合、その廃棄・処理方法については放射性物質汚染対処特措法の下で行われている。同特措法には放射性物質の付着した廃棄物についての廃棄方法や国・地方自治体が講ずべき措置について記されているが、今回のフィルター類のように、低濃度で汚染された場合について、具体的な廃棄方法は示されていない[11]。医療分野では、RO装置のフィルター類が唯一、放射性物質の直接的な影響を受けている。このため、廃棄方法については、例えば、臨床工学技士が水管理で使用している「透析液浄化ガイドライン」[9]等に、明記することを検討すべきと考える。

福島県郡山市の場合、放射性物質は低濃度であり、この状況下にあっては、血液透析の施行が可能であった。しかし、大震災時の原発事故で拡散した放射性物質に汚染された環境水から水道水を製造することを考えた場合、第1世代型RO装置でも今回の郡山市レベルの放射性物質は除去できるが、第1世代型より原水使用量の低減が可能で、RO装置に流入する放射性物質の量の低下が実現できる第3世代型RO装置を、放射性物質に対する安全確保のためにも、普及することに期待したい。

## VI. まとめ

RO装置及び水中の放射性物質濃度を調べるため、原発事故後の第1世代型RO装置のフィルター類と、第3世代型RO装置のフィルター類及びフィルター類透過後の水の放射性物質濃度の測定を行い、RO装置内の放射性物質の挙動を調査した。

その結果、フィルター類から放射性物質が検出され、特に前処理部の1次PFで、大部分の放射性物質が捕捉されていた。フィルター類透過後の水について放射性物質の検出はなかった。又、NF膜、RO膜を2段に用いた形式の第3世代型RO装置では、後段のRO膜からの放射性物質が検出されず、より確実に放射性物質が除去されていた。

## 謝辞

放射性物質を含む水の浄化方法など、様々な知識とア

ドバイスをいただきました国立保健医療科学院生活環境研究部水管理研究分野浅見真理上席主任研究官、島崎大上席主任研究官に感謝申し上げます。尚、本研究は、三菱レイヨン・クリンスイ株式会社の協力を得て測定を行いました。担当の方々にお礼を申し上げます。本研究は、第58回日本透析医学会学術集会・総会企業共催セミナーにて、「RO膜のダブルフィルトレーションシステムによる節水効果と物質除去効果」という演題名で発表しており、掲載したデータ類については、その一部であります。

## 参考文献

- [1] 公益社団法人日本臨床工学技士会. 日臨工透析液等WG:放射性物質の水処理装置における阻止テスト(第3報). 日臨工東北地方太平洋沖地震関連情報Web. <http://jacet.net/info/> (accessed 2015-12-24)
- [2] 福島県郡山市. 2011年水道水のモニタリング結果. [http://www.city.koriyama.fykushima.jp/485000/shinsai/documents/2061\\_suidou120331.pdf](http://www.city.koriyama.fykushima.jp/485000/shinsai/documents/2061_suidou120331.pdf) (accessed 2015-12-24)
- [3] 一般社団法人膜分離技術振興協会. 透析用水ガイドブック. 東京:一般社団法人膜分離技術振興協会; 2014.
- [4] 厚生労働省. 緊急時における食品の放射性測定マニュアル. <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001558e-img/2r98520000015cfn.pdf> (accessed 2015-12-24)
- [5] 浅見真理. 放射性物質の浄水処理性について. 厚生労働省水道水における放射性物質対策検討会(第2回検討会)資料. <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001eaf3-att/2r9852000001eao.pdf> (accessed 2015-12-24)
- [6] 浅見真理, 秋葉道宏. 水道水中の放射性物質の概要と課題. 保健医療科学. 2011;60(4):306-313.
- [7] 原子力規制委員会. 放射線モニタリング状況. <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/194/list-1.html> (accessed 2015-12-24)
- [8] 小坂浩司, 島崎大, 浅見真理, 秋葉道宏. 浄水プロセスにおける放射性物質の除去性能に関するレビュー. 水道協会雑誌. 2011;80(4):70-85.
- [9] 公益社団法人日本臨床工学技士会. 透析液浄化ガイドライン. <http://www.ja-ces.or.jp/ce/?p=2921> (accessed 2015-12-24)
- [10] 厚生労働省健康水道課. 地方公共団体向け水道水中の放射性物質モニタリング Q&A. <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000018s3u-img/2r98520000018sc1.pdf> (accessed 2015-12-24)
- [11] 小寺正一. 放射性物質の除染と汚染廃棄物の課題—福島第一原発事故とその影響・対策—. 調査と情報. 2012;743:1-13.