

〔特集〕震災を経て考える液体清澄化の新技術と普及の課題

放射能を含んだ水処理と地中固定化埋設

古市 光春*

1. はじめに

東日本大震災（2011年3月11日）により被災した福島第一原子力発電所の1～3号機のタービン建屋や坑道には10万m³近い放射能汚染水がある。この汚染水の処理および原子炉を安定して継続するための冷却水の継続的な処理が緊急の課題となっている。原子力発電所事故における放出された放射能対策として、田中俊一氏がいち早く発表した資料「福島における放射能除染のあり方について、2011年7月25日付け」¹⁾が放射能対策についての全体を理解するのに非常に参考になる。この報文後に新しい汚染水処理法もいろいろ提案されている。本稿では水処理技術者の立場から放射能汚染水の処理および付随する発生した放射能汚染物の地中埋設処理までの一連の技術について新しく提案されている技術も含めて述べる。

2. 放射能汚染水の処理

放射能汚染水の処理の場合では汚染レベルにより処理法は異なる。水処理法だけでなく使用する部材の放射線による劣化および保守点検管理、部材交換法も考慮し、システムには回転体をなるべく含まず、簡素な方法で実績のある、トラブルを生じない、またシステムから廃棄されるスラッジなどの排出量も極力少なくなるシステムとすることが必要となる。

2-1. 高濃度塩類汚染水（海水など）の処理

汚染された海水として福島原発には数万m³がある。この海水に含まれるセシウム除去を中心とした処理を行う。

塩類濃度が高いためイオン除去性が高いRO膜処理あるいはイオン交換処理は行えない。セシウムを

選択的に吸着除去するゼオライトが初期話題に上ったが、セシウム以外の多量にあるイオン類によりすぐ飽和してしまい、セシウム吸着量が少なく、再生利用ができないために長期間の処理には不適となる。

セシウムを選択的に吸着するフェロシアン化鉄法では汚染海水にフェロシアン化鉄を入れ、凝集沈殿あるいはフィルタでの連続ろ過する方法²⁾、さらに第二塩化鉄を添加して磁性化して磁石で除去する方法³⁾およびフェロシアン化鉄を微細粒子化して吸着材として使用する方法⁴⁾などが提案されている。

これらの方法のうちフィルタでのろ過法では添加するフェロシアン化鉄の添加量が2,000mg/lと多いためさらに減らすような検討が必要である。日本での上述のような提案が出る前にフランスのアレバ社はフェロシアン化ニッケルを使用した沈殿法を提案し、東電に採用されている。

鉄塩に比べニッケル塩のほうがコスト的にも高くなるなどの問題があるが、沈殿処理は技術的にも確立されており、一般の処理法として広く普及しているトラブルの少ないシステムであるため、沈殿法を採用していることは評価できる。最終的には鉄塩を使用した沈殿処理法がコスト的にも適している。

図1に海水を含んだ放射能汚染水の処理フローを示す。汚染海水を取水し、スクリーンで大きな夾雜物を除去した後、フェロシアン化鉄を添加してセシウムを吸着し、凝集促進剤を添加して凝集沈殿処理を行う。沈殿槽の上澄水を加圧式二層ろ過器でろ過し、微細な粒子も除去する。ろ過器逆洗排水は原水側に戻し、再び処理する。原水槽および処理水槽には放射線モニターを取り付ける。原水の放射線量に応じて添加量を自動制御する。処理水側では放射能がないことを確認して放流する。処理水で放射能を検出した場合は原水側にリターンして再処理を行う。加圧式二層ろ過器の後にUF膜あるいはMF膜システムをさらに設置する安全性を十分高めたシステム

*MITUHARU FURUICHI, 古市技術士事務所 技術士事務所代表

E-mail : mitsuharu.furuichi@gmail.com

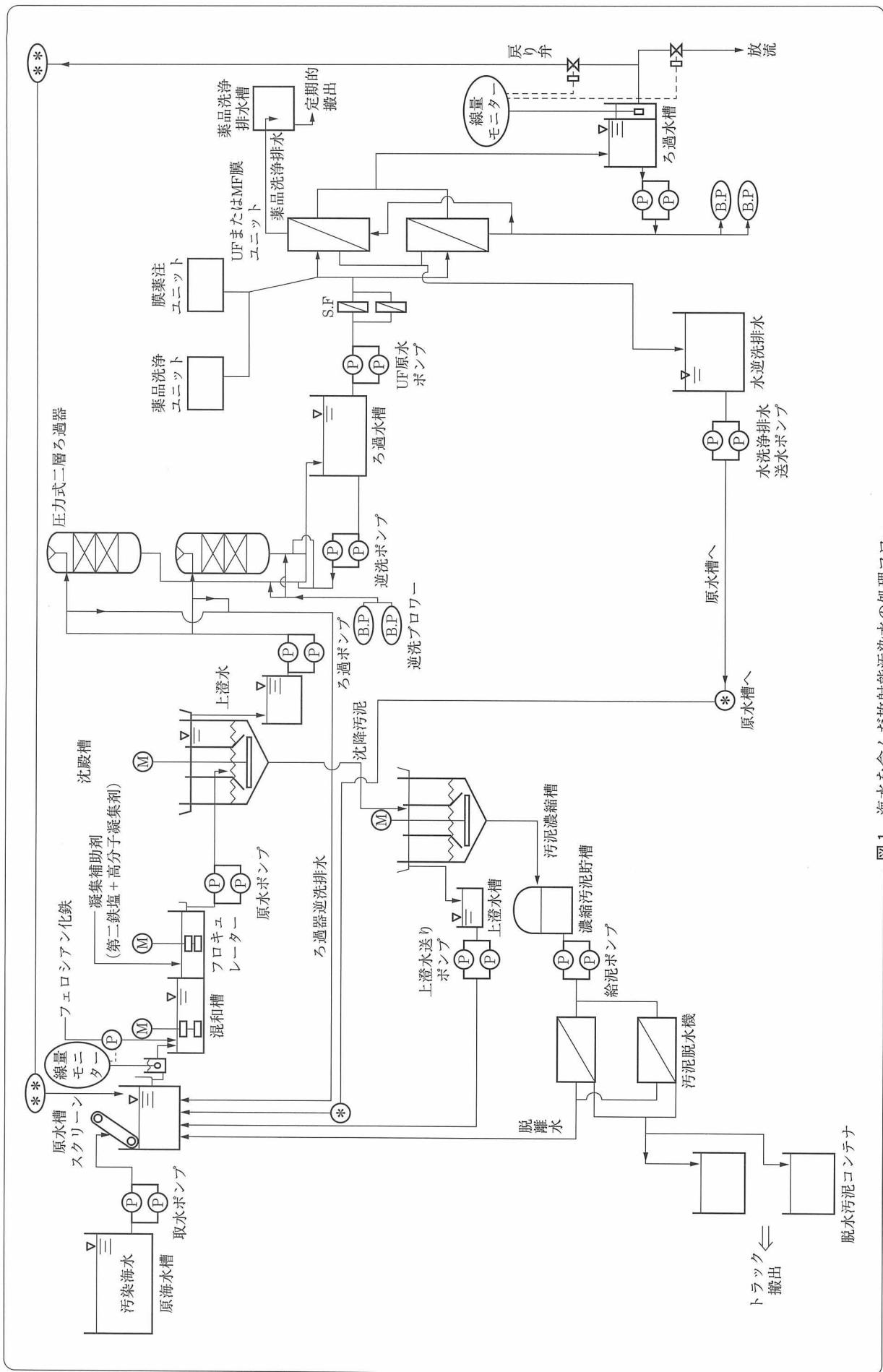


図1 海水を含んだ放射能汚染水の処理フロー

が望まれる。

処理規模はなるべく短時間でシステムを設置、処理が行えるように $1,000\text{ m}^3/\text{日} \times 2$ 系列程度とすることにより 10 万 m^3 ある汚染水は50日程度で処理は可能になる。システムは必ず2系列とし、トラブルあるいは保守点検が十分できるようにする。システム設置に6ヶ月、水処理に2ヶ月、計8ヶ月程度で処理は終了することになる。沈殿池から出るセシウムを吸着したスラッジは汚泥濃縮槽で濃縮後、脱水機で脱水した後、処分場に搬出する。

2-2. 塩類濃度の低い放射能汚染水の処理

原子力発電所の冷却水として使われているレベルの塩類濃度で放射能汚染している場合である。この場合も最終廃棄物は極力少なくなる方式とした。

図2に低塩類での放射能汚染水処理フローを示す。汚染冷却水をスクリーンでろ過し、大きな夾雑物を除去する。第二鉄塩（ポリ硫酸鉄あるいは塩化第二鉄など）の凝集剤を添加して圧力式二層ろ過器でろ過する。次にUF膜あるいはMF膜ユニットで処理し、RO膜ユニットに供給する。RO膜処理の前処理に相当する二層ろ過器あるいはUF、MF膜ユニットでの水回収率は95～98%と高く設定し、RO膜ユニットでの水回収率は90%程度まで高め、濃縮水の排出量を極力少なくする。RO膜処理水は再び冷却水として使用する。RO膜濃縮水は連続イオン交換装置⁵⁾で脱塩処理しRO膜処理水系に混合する。連続イオン交換装置の再生廃液はセシウムを含むが原水由来の塩類のみになる。

連続イオン交換装置再生廃液は再生可能な銅塩系フェロシアン化物坦持複合体（レドックス型無機イオン交換体）⁶⁾カラムに通水し、セシウムを選択的に除去する。セシウムを吸着飽和したカラムは処理再生専用工場で再生を行う。ROの前処理にUF膜まで使用するのはRO膜の汚染を防止し、膜洗浄等の作業を少なくするためである。膜の汚染はUF膜工程でほとんどを止めることができるので、維持管理は容易になり、膜コストも安くなる。また、処理系内の生物による膜汚染を防ぐために、従来の次亜塩素酸ソーダに替わるRO膜の性能を劣化は生じさせないスライム防止剤の添加を行う。ただし、RO、UF、MF膜などは高分子有機物であり、放射線による劣化⁷⁾が生じるので定期的（1回/2～3年）に交換することをはじめから計画に織り込み、交換も半日程度で完了する自動化システムとする。廃棄されるRO膜等は粉碎、焼却処分することにより減容化が図れる。

脱塩用に使用するRO膜はNTR 759 HR（日東电工）、SU 720（東レ）、FT-30（ダウ・ケミカル）など日東电工、東レ、ダウ・ケミカル製のいずれの膜でも問題ない除去性を示す。NaCl 2,000 mg/l濃度で99.5%以上を示すRO膜であれば問題なく使用できる。

有機高分子のUF、MF膜は放射線により架橋型あるいは崩壊型（切断）劣化が生じる。テフロン、セルロース、ポリカーボネートなどは崩壊型高分子、ポリアミド、PVA、PVDF、ポリエチレンは架橋型高分子に属する。RO膜では芳香族ポリアミド膜、UF、MF膜ではPVDF、ポリエチレンなどが使用できる対象となる。

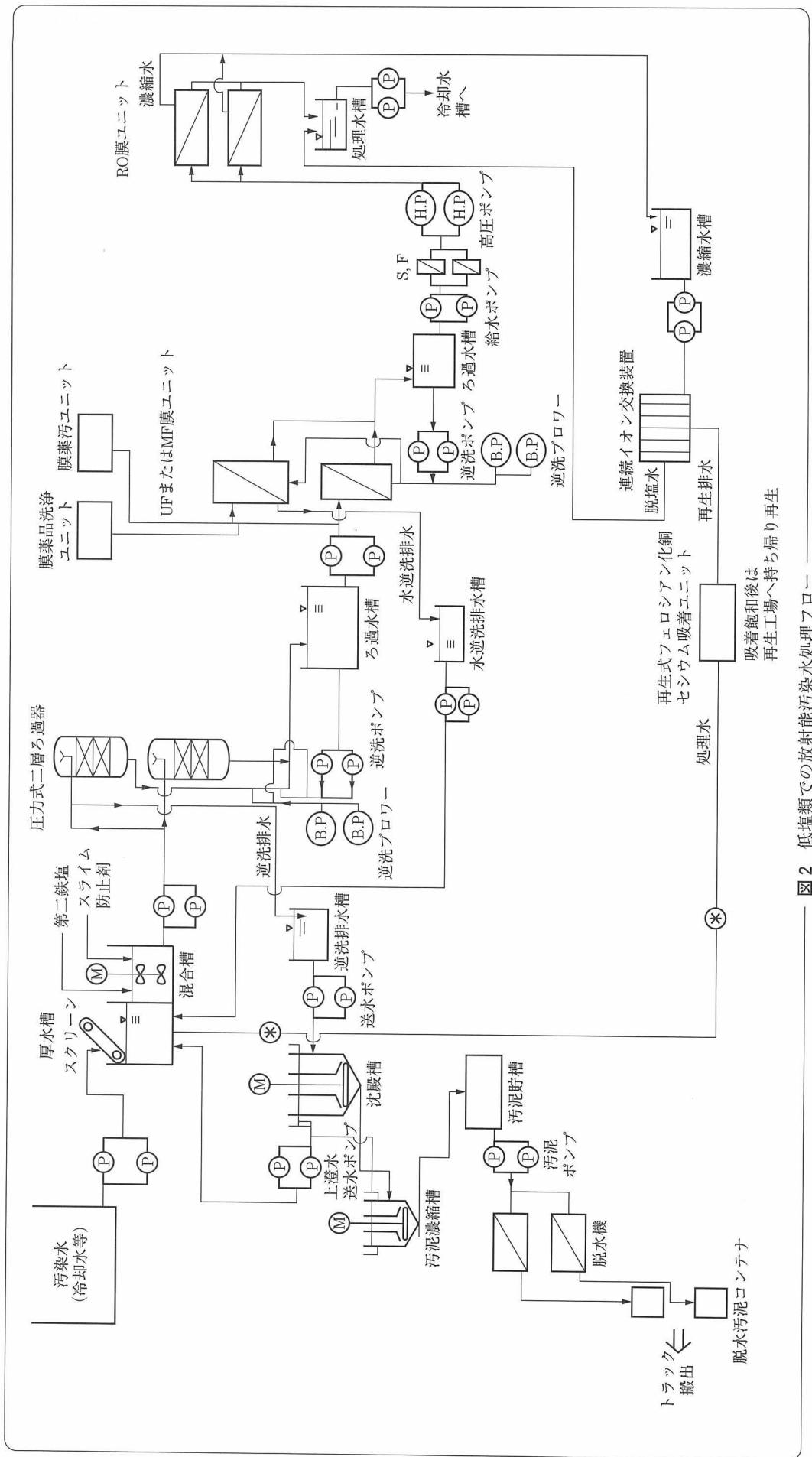
RO膜は放射線による劣化が顕著になる前に2～3年の短期間で交換することになると予測され、交換は2～3時間程度で交換できる設備仕様としておく必要がある。

膜の交換はまず、系内をよく水洗浄して放射性セシウムを洗い出した後、短時間で膜モジュールなどを交換する。RO膜処理能力としては冷却水量によるが、RO膜ユニット処理能力として $1,000\text{ m}^3/\text{日}$ を1系列とし、最低2系列を設置する。定期メンテナンス、故障時の対応もできるようになる。また、処理設備からの漏水がすでに2件発生している（2012年3/26、4/5）。設備は放射性物質を処理するので基本的には漏水検知まで設置した仕様にするのが基本であり、冬季の凍結対策など含め本格的な配管設備行うなどの十分な考慮が必要となる。

2-3. 土壤洗浄廃水処理⁸⁾

放射能で汚染された土壤を除去することが今後長期にわたって必要になる。また、汚染された葉、木材の処理も同じである。これらの廃棄物の減容化は保管場所などの点から必ず必要になる。これらの廃棄物の減容化にはまず、吸着しているセシウムを水で洗浄除去することが行われる。図3に土壤洗浄廃水の処理フローを示す。

土壤を振動篩分けし、水で洗浄する。洗浄水にフェロシアン化鉄と凝集剤を添加して凝集沈殿処理する。凝集沈殿槽の代わりに沈殿槽より小型化できる加圧浮上システムの導入も可能と思われる。沈殿槽上澄水あるいは加圧浮上処理水は圧力式ろ過器でろ過処理する。原水槽および処理水槽には線量計を取り付ける。放射線量の高いものは再度原水槽に戻して処理する。沈殿槽汚泥は汚泥濃縮をした後、脱水機で処理し処分場へ搬出する。ここで、ろ過工程では膜ろ過などのコストも高く、膜交換などが必要と



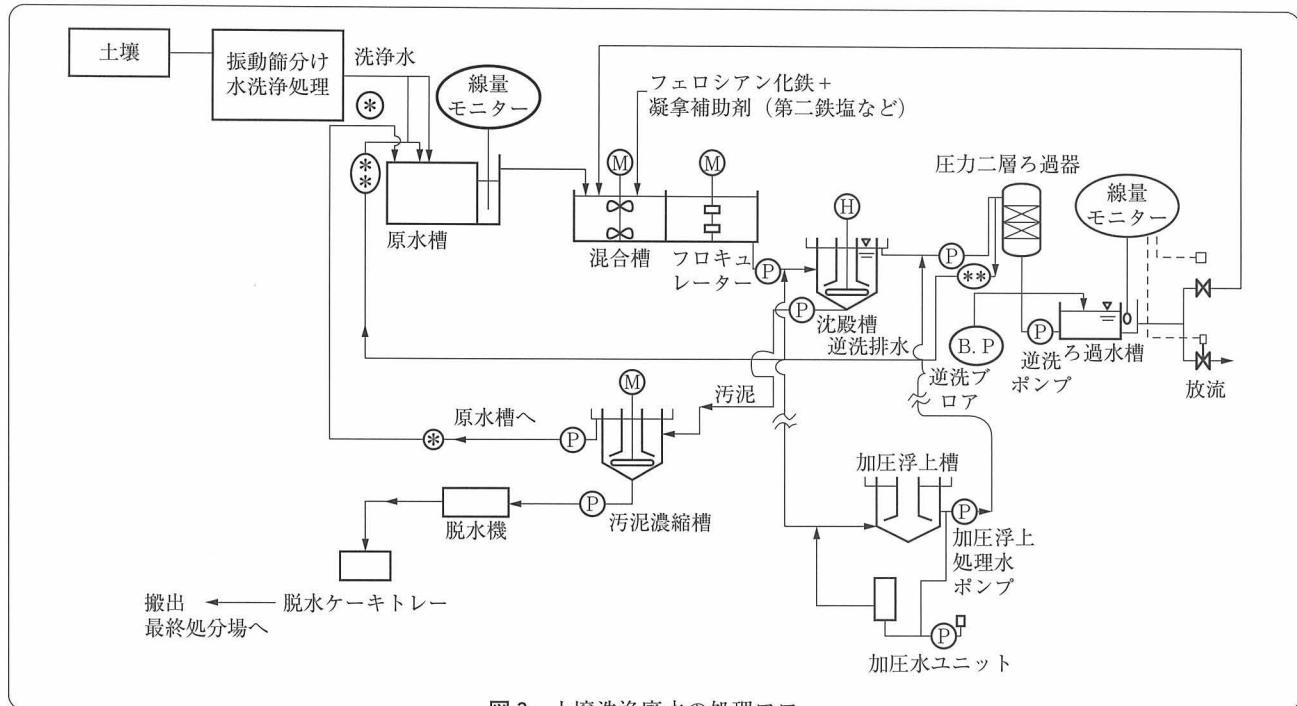


図3 土壤洗浄廃水の処理フロー

なるシステムは使用せず、運転実績が多く、運転に専門知識もそれほど必要なく、運転管理が容易で故障の少ないメンテナンス費用も掛からないシステムを導入することが重要である。被害対象地区のから持ち込まれた土壤を処理する大型の固定したシステムからトラックで運搬ができる小型のシステムが必要となる。

2-4. 飲料水の処理

成長期の乳幼児、子供への放射能の影響は大きいため、水の安全と安心を求めてボトル水を利用する人が増えている。特に原子力発電所周辺では今後元の居住地への帰還が増えるにつれてさらに切実な問題となると思われる。水に含まれる放射能の除去は基本的には水に溶解している放射能のないイオンと同様に扱うことができる。表1にセシウム、ストロンチウムのRO膜による除去率⁹⁾、半減期およびベクレル／シーベルト換算値¹⁰⁾を示す。いずれのイオンもRO膜による除去率は99%以上の高い値を示しており、水道水、井戸水をRO膜で処理することにより安全な飲料水が確保できる。

原水としては水道水、井水のどちらでも使用可能であり、処理寿命は原水の残留塩素除去用の活性炭の飽和した時点となる。飽和した活性炭、前処理用の保護フィルタおよびRO膜の交換が定期的に必要となる。活性炭、フィルタは原水の水質によるが1回/年、RO膜は1回/2~3年の交換頻度となる。10

表1 放射性核種の特性

核種	RO 除去率 [%]	半減期	実効線量係数 (ICRP Publ. 72)	
			経口摂取 [Sv/Bq]	吸入摂取 [Sv/Bq]
Sr ⁹⁰	99.9 以上	29.1 年	2.8×10^{-8}	1.6×10^{-7}
Cs ¹³⁷	99.1% 以上	30.3 年	1.3×10^{-8}	3.9×10^{-8}

L/日、毎日使用したとした場合でも1.5~2年で初期設置費用は回収できる価格である。1回/年のメンテナンスおよび活性炭、フィルタ交換を含め約10,000円/程度を見込むことで長期間安定した飲料水の確保ができる。現在いろいろなものが回っているが、規格をクリアーした確実なものを購入することが重要となる。

2-5. 放射性廃棄物の固体化処理と埋設

放射性物質の固体化はガラス固体化が知られている。しかしながらCs¹³⁷、などの放射性セシウムはガラス固体化する際に揮発しやすく、また、浸水時のガラス固化体（ホウ酸ガラス固化体）から溶出を完全に抑えることが難しいと言われている¹¹⁾。熱科学的な安定な結晶体としてチタン酸カリウム（K₂O·nTiO₂ n=1~8）を用いて、半減期が長く発熱性や透過性の強い危険な核種を固形化処理する方法¹²⁾が提案されている。完全に固体化したものは使用済み核燃料貯造設備に厳重に保管する。

廃棄土壤の埋設保管する施設としては一般的にすでに実用化されているゴミ焼却灰貯留場が参考になる。処分場の底部にはゴムシートなどの遮水シート、

その下に地下水集排水管を敷設。遮水シートの上にはベントナイトを敷設し、万が一に漏れ出した放射性物質を捕捉する。ベントナイトの上にさらに保有水等集排水管を敷設する。集水管で集められた浸出水および地下水集排水管出口には放射能捕捉用のセシウム選択吸着用のキレート樹脂および活性炭設備を設置する。放射能監視モニターで常時監視する方式とする。

〈資料〉

1) 放射性物質とは

Cs^{137} (30年) および Sr^{90} (29年) は半減期が長く、幸いなことに Sr^{90} は拡散性が低いために汚染範囲は限られ発電所以外で問題になるのは Cs^{137} となる。

セシウムは食品を通じて体内に取り込むとほぼ100%が腸管から吸収され、体全体に均一に分布し、血中に入って腸管内で再分泌、再吸収を繰り返すサイクルをとる。

ストロンチウムは骨に吸収されなかったものはすぐに排出されるが、カルシウムと同様に骨に集まつた場合は骨形成の盛んな成長期の子供には大きな問題となる。

2) 連続イオン交換装置

図4に連続イオン交換装置の原理図を示す。陽イオン交換膜と陰イオン交換膜の間に、陽イオンと陰イオン交換樹脂が挟まれている。原水のイオンは、まず、イオン交換樹脂に吸着され純水が製造される。吸着されたイオンはイオン交換膜の両側に掛けられた電場によりイオン交換樹脂中を移動し、イオン交

換膜側から濃縮水として排出される。

通常の電気透析と異なり、イオンの移動は主としてイオン交換樹脂の中を通して行われるため、移動速度は速く、また、塩が脱塩されても電気抵抗の増加もなく、電気的にイオン交換樹脂が再生される。電気量はイオン量に比例するため、イオン量の少ない水にもこの方式が適用することができ有利である。また、再生薬品を使用しないため、再生廃液の処理が容易になる最大の特長を持ち、さらに、メンテナンスフリー、電圧調整により処理水質を任意に調節できるなどの特長があり、放射性廃液の処理には適している方式である。

3) 再生可能型イオン交換担持複合体

フェリシアン化銅を多価陽イオンが存在しない希薄硝酸酸性下で還元処理し、複塩型のフェロシアン化物の $\text{A}_2\text{Cu}[\text{CuFe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_2$ となる。この塩を酸化するとフェリシアン化銅となる。Aは1価の陽イオンを示し、このAの部分がセシウム Cs とイオン交換してセシウムを吸着する。酸化還元反応によりイオン交換を行う方法であり、セシウム選択性が極めて高く、吸着セシウムの脱着性能とイオン交換体の再生能に優れている。

このイオン交換体を放射能汚染水のセシウム吸着に用いることにより最終廃棄物の低減化ができる。放射能セシウムを含む汚染水を長期にわたり処理が必要となる原子力発電所内の低塩類放射能汚染水の処理系には適したシステムとなる。

再生処理は専用工場で行い、処理現場と再生処理工場との間はカートリッジ式のカラムの吸着体を往復させる。再生専用工場から排出されるセシウムは最終的には別に固体化処理を行い貯蔵する。

〈参考文献〉

- 田中俊一, 原発事故により放出された放射能とその対策「福島における放射能の除染のあり方について」, 2011年7月25日
- フェロシアン化鉄配合吸着凝集沈殿剤を使用した放射能汚染水浄化システムの実証, 国立大学法人東京工業大学原子炉工学研究所, 平成24年12月
- セシウム(安定同位体)の連続分離プロセスの開発, JNC(株)ホームページ, 研究開発と技術
- ナノ微粒子化したブルシャンブルーでセシウム吸着向上, 独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ, ナノシステム研究部門, 2011年8月24日, 31日
- 古市光春, 超純水製造, 供給技術, 材料技術, 12, Vol. 8, No. 10(1990)
- 谷原紘一, 再生可能なレドックス型無機イオン交換体によるセシウムの選択的分離, 平成9年度国立機関原

