

放射線源分布の可視化に関する研究

Visualization of radioactive source distribution derived from its measured radiation field

中村 裕明 (Hiroaki Nakamura)* 松岡 由了 (Yoshinori Matsuoka)*
津高 良和 (Yoshikazu Tsutaka)†

要約 原子力発電所において、放射線源の位置および量に関する情報を直接的に運転保守要員に提供し、放射線管理や機器の状態監視に資するため、容器および配管の外表面の放射線量率連続分布測定に基づいて、内部の線源分布を推定する技術ならびに推定結果をCRT表示する技術を開発した。

この技術は、放射線量率をシンチレーションファイバーによって測定し、このファイバー上の放射線量率分布から、機器内部における線源の空間密度が一様であるとの仮定のもとにSPM (Sampled Pattern Matching) 法を使用し線源空間分布を推定し、得られた線源分布を直ちにCRT上に表示する技術である。

発電所においては、イオン交換樹脂の取替え時、強い放射線源である廃樹脂を配管系を通して貯蔵タンクに移送する時に、樹脂の系統中の動きを効率的にモニタリングする技術の開発に対する要望が強い。このため、放射線源分布の可視化表示する対象を廃樹脂系統とし研究を進めた。

今回開発した技術については実際の移送作業実施中にフィールドテストを行い、良好な結果を得ている。

キーワード 放射線源分布, 放射線量率分布, シンチレーションファイバー, SPM法, 可視化, 廃樹脂

Abstract A technical method has been developed for estimating distribution of radioactive materials inside tanks and pipes from radiation field outside. The outside radiation field distributions are measured by means of a scintillation fiber monitor. The source distributions are derived from the field distributions by using an unfolding technique called SPM method, on the assumption that the spacial density of source intensity is uniform inside the pile of radioactive material, and immediately visualized on a CRT display.

Feasibility tests of this new visualization technique have been carried out in one of the commercial nuclear power plants: Distributions of spent ion-exchange resin in transfer pipes and storage tanks were estimated from radiation field distributions which were provided by a scintillation fiber monitor. The results obtained were satisfactory and complied with the strong requirement of the power plant site.

Keywords distribution of radioactive materials, radiation field, scintillation fiber monitor, unfolding technique, SPM method, visualization, spent ion-exchange resin

1. はじめに

発電所内においては、機器の状態の監視および放射線管理の目的からプロセスモニタやエリアモニタが設置されている。これは放射線量率の変動を常時モニタリングし、変動の大きさから異常を検知しようとするものである。モニタが常設されていない個

所では適時、ポータブルなモニタにより、放射線量率を測定している。この放射線量率の変化は関連する機器内部の放射性物質の量が変化することにより生じるものである。従って、もし機器内部の放射性物質、すなわち放射線源の位置や量の変動の状況を知ることができればより直接的に機器の状態を監視できることになり、運転保守対応にも便利となる。

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

† 三菱電機 (株) 産業システム研究所

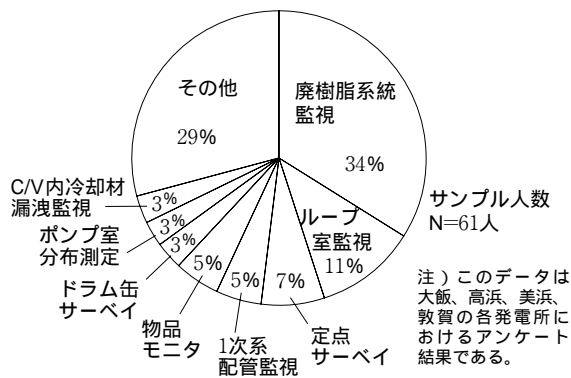


図1 光ファイバー放射線モニタのニーズ調査結果

このような観点で各発電所において調査を行った結果、中でも廃樹脂系統における廃樹脂移送作業は強い放射能を有する廃樹脂を取り扱うことより、放射線源の位置や量の変動を直接監視できればという要望が、図1に示すごとく、強いことがわかった。

この要望に応えるため、容器および配管の外表面の放射線量率連続分布測定に基づいて、容器および配管内の線源分布を推定し、推定結果を直ちにCRT表示する新しい技術を開発することとした。

2. 廃樹脂系統

粒状の樹脂を入れた脱塩塔を通して一次冷却材等を流すことで樹脂が放射性不純物を吸着、除去する。

これらの樹脂は使用時間が長くなれば、除染能力が低下するので定期的に交換される。使用済の樹脂は水と共に脱塩塔から配管を通過して次段の貯蔵タンクへ移送される。

この作業については被ばく低減と作業の効率化に関して発電所には以下の様な強い要望がある。

- (1) 樹脂の動きをモニタすることで廃樹脂の脱塩塔からの送り出しと使用済樹脂タンクへの受け入れを確認したい。
- (2) 樹脂は1mm以下の細かい粒子であるので配管内部に付着して残りやすい。高線量率の廃樹脂が配管内に滞留するとホットスポットとなるので放管員がサーベイメータで樹脂の滞留の有無をチェックする必要があるが、チェック作業は手間がかかる上に作業時の被ばくに注意しなければならない。

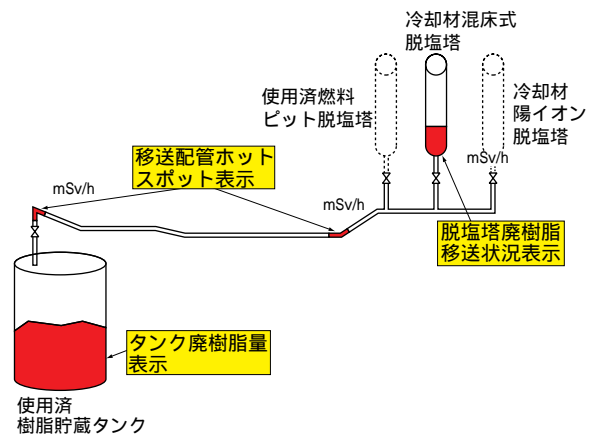


図2 廃樹脂移送系統監視システム概念図

以上の要請に基づき、技術開発の対象として廃樹脂移送系統監視を選定し、そのシステムのコンセプトを図2のように決定した。脱塩塔から使用済樹脂貯蔵タンクまでの系統中の樹脂の動きを、また、貯蔵タンクに対しては、内部の樹脂の堆積の状況をモニタリングするシステムの技術開発をすることとした。

3. 放射線源の空間分布を推定するためのアルゴリズム

3.1. 光ファイバー放射線モニタの測定原理

本研究では、放射線検出器として光ファイバー放射線モニタを用いた。光ファイバー放射線モニタの構成を図3に示す。放射線検出部はシンチレータをファイバー化したものである。放射線がシンチレーションファイバーのある位置に入射するとパルス状の蛍光が発生する。ファイバー内に閉じこめられた光パルスはファイバーの両端に向かって伝搬し、両端に設置された光検出部で検出される。光パルスが発生してから光検出部に到達するまでの時間は放射線がファイバーに入射した位置に依存する。すなわち、ファイバー内における光の伝搬距離に依存する。

従って、光パルスの両光検出部への到達時間差を測定することにより放射線の入射位置が得

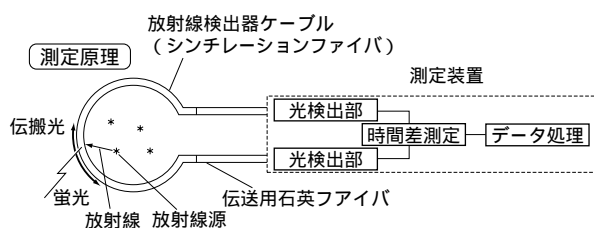


図3 光ファイバー放射線モニタの構成

られる。また、光パルスの量から放射線の強度がわかる。(1)(2)

3.2. 放射線源の空間分布推定方法

まず、廃樹脂移送配管監視については配管に沿って表面にシンチレーションファイバーを布設し、内部滞留樹脂からの放射線量率分布を測定すれば、この分布はこのモニタの測定原理よりして配管に沿った内部放射線源の分布にほぼ等しいとすることができる。このことは脱塩塔の様な細長い容器の場合も同等である。一方、使用済樹脂貯蔵タンク内樹脂の堆積状況を把握する場合は3次元的な推定を必要とする。

このため、その推定アルゴリズムの開発が必要となる。

3.3 線源の空間分布を推定するアルゴリズム

線源を光ファイバー放射線モニタで囲み、シンチレーションファイバー上の放射線レベルの空間分布を測定し、その結果を用いて線源の空間分布を推定するアルゴリズムとして、SPM法（Sampled Pattern Matching）による逆推定アルゴリズム⁽³⁾を採用し、プロトタイプ機を開発した。SPM法とは逆問題解法の一つであり、場の分布が与えられたときに、その場を生じさせているソース（源）の位置の分布パターンを逆推定する方法である。まず、対象区域を要素分割し、放射性物質の堆積の推定存在位置の要素に単位放射線源を仮定する。そして、測定された場の分布に最も近い分布パターンを与える線源分布を逐次近似的に探索するのである。パターン的一致度は実際に検出器から得られた測定分布パ

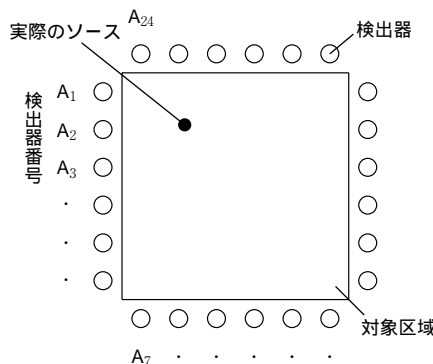


図4 実際の測定

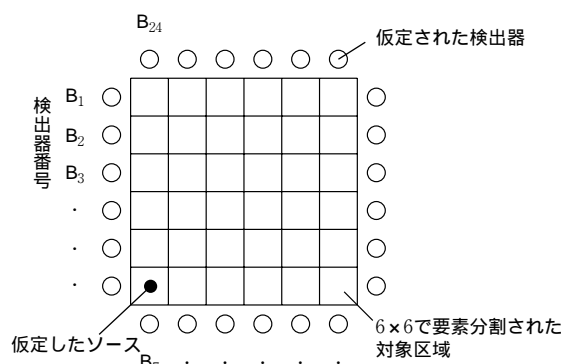


図5 SPM法ステップ1

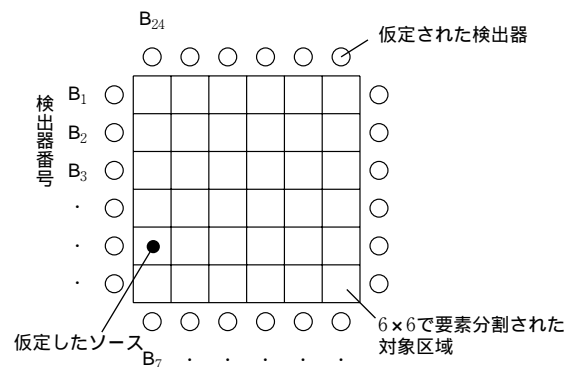


図6 SPM法ステップ2

ターンベクトルAと仮定したソースから計算により得られた分布パターンBのなす角度で評価する。

具体的にはパターン一致度は次式により定義される。

$$= \cos \theta = A \cdot B / (|A| |B|) \quad (1)$$

ここで $A \cdot B$ は内積、 $|A|$ はベクトルの大きさを示す。

すなわち、検出器から得られた n 個のデータ列 $A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$ に最も近い分布パターン $B = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$ が得られる箇所に線源を仮定する。

測定の手順を図 4 ~ 図 6 に示す。図 4 のように線源が置かれているときの検出器 $A_1 \sim A_{24}$ の出力を $a_1 \sim a_{24}$ とし、この時の測定データベクトルを $A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_{24})$ とする。図 5 のように対象区域を要素分割し、得られた測定データベクトルに近づくように単位線源の位置を仮定する。図 5 のような位置に線源を仮定した場合、実際の検出器と同様の位置に置かれた仮想検出器 $B_1 \sim B_{24}$ での放射線強度を計算により求める。この計算により求められた仮想検出器の分布パターンベクトルを $B = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_{24})$ とする。

このベクトル B を求めた後、パターン一致度を式 (1) より求める。次に、仮定する単位線源の位置を図 6 のようにずらして同様の計算からパターン一致度を求める。

この手順を繰り返すと仮定する線源の位置と実際の線源の位置が近づくにつれ、 ρ の値は 1 に近づく。

この手順を分割した全要素について繰り返し行った後、 ρ の値が最も高くなる線源の位置を解とする。

最初の解が確定するとその位置に線源を固定し、残りの要素について上記の処理を行い、2 番目の線源の位置を検索する。以下、対象領域内の全要素に線源の存在が確定するまで繰り返す。全要素が確定した後、 ρ の値が最も高かった線源位置の組み合わせが対象領域内の線源の分布の解である。

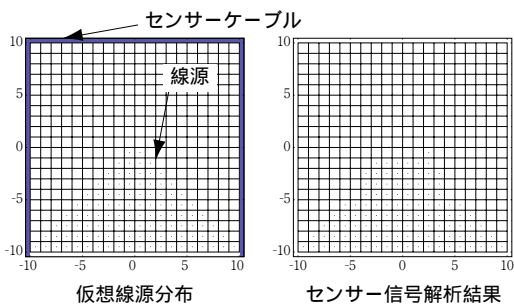


図7 2次元放射線分布の解析結果

4. 2次元空間分布のアルゴリズム

まず、2次元空間内に線源を分布させたモデルの数値シミュレーションによってSPM法を用いた推定アルゴリズムの評価検討を行い、妥当性を確認⁽⁴⁾した。センサーは周囲3辺に設けて計算した。図7に結果の1例を示す。

次に2次元空間分布を模擬した容器内に線源を吸着させた樹脂を分布させて計測を行い、SPM法を用いた2次元空間分布推定アルゴリズムの評価検討を行った。

実験体系の諸元は次の通りである。

- a. アクリル容器 : 寸法は、800 x 800 x 50(mm), 板厚8mmとした。
- b. シンチレーションファイバー : 長さは3mとした。
- c. 使用樹脂 : 三菱化成 ダイヤイオン SKN1
これは実際にイオン交換樹脂として使用されている。
- d. 樹脂の体積 : 11リットル(アクリル容器の約半分)
- e. 核種および放射能 : Co-60 2.7MBq

実験は(財)放射線計測協会で行った。3種類の樹脂形状、すなわち平坦型、谷型および山型のそれぞれについてシンチレーションファイバーからの出力データを採取した。

データ解析においては、1点照射の場合におけるシンチレーションファイバー出力の広がり considering、出力データにデコンボリューション¹を施した。また、樹脂の遮蔽効果を考慮して解析を行った。

表1 解析結果

樹脂形状	実際の形状との比較	
	面積比 (%)	標準偏差 (mm)
平坦	91.5	19.6
谷型	103.0	19.6
山型	100.0	29.2

¹ デコンボリューションはコンボリューションの逆変換。コンボリューション：重畳積分

分割要素数は 20×20 とした．すなわち1要素の面積は $40 \times 40\text{mm}^2$ である．

解析結果の評価は，樹脂量と形状に対して行った．樹脂量に対しては実際の樹脂と解析結果の面積比にて，形状に対しては実際の樹脂表面の形状との誤差（長さ）のばらつきを標準偏差にて評価した．

それぞれの形状に対する解析結果を表1に示す．

但し，標準偏差については樹脂上面の形状のみを比較した．表に示した通り面積比においては $\pm 10\%$ 以内の精度を得ることができた．標準偏差は $\pm 30\text{mm}$ となったが，1要素の寸法が $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ であることを考慮すれば，1要素以内の誤差に収まり，形状に対しても良い精度が得られている．

山型形状の場合について，シミュレーションの結果とモデル実験の結果を面積に対する誤差で比較すると表2のようになり，十分な精度が得られている．

表2 山型形状に対するシミュレーションと実験比較

シミュレーション結果 面積誤差（％）	モデル実験結果 面積誤差（％）
1.8	0.0

5. 3次元空間分布のアルゴリズム

5.1 3次元アルゴリズムの解析モデル

2次元空間分布推定アルゴリズムから3次元空間分布アルゴリズムへの拡張に当たり以下の点について考慮して解析モデルを開発した．

(1) 要素の形状

貯蔵タンクを模擬するため，シミュレーションでは円柱容器を仮定した．この円柱容器を計算領域とし，複数の要素に分割する．更に各要素内の全線源が重心に集中して存在すると仮定した．この時，線源からの放射線は等方的に放射されるため，線源を模擬している各要素の重心間隔が等しいのが良い．

一方，線源は連続的に分布していることから，連続的に均一に分布するよう要素の形を選ぶのが良い．そこで，容器を六角柱形状の要素に分割することとした．（図8参照）



図8 六角柱要素

(2) シンチレーションファイバーの配置

3次元空間分布を推定するためには，測定対象である円柱容器の周囲の連続放射線強度分布を測定することが必要である．しかし，測定対象の周囲全体の連続放射線強度分布を測定することは困難である．そのためシンチレーションファイバーの配置を工夫した．線源が堆積していることから容器底面での放射線強度分布は測定しない．そこで，シンチレーションファイバーは円柱容器上面の中央から逆U字型に垂らす配置とした．次に，これと同様に円柱容器の軸を中心に回転した位置の数箇所（等間隔）以上にファイバーを配置して容器の周囲の放射線強度分布を測定した．図9に示したように，逆U字型に設置したシンチレーションファイバーを3箇所（等間隔）以上配置すれば容器内の線源の分布形状を再現できることをシミュレーションで確認した．

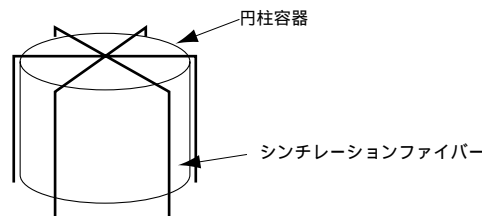


図9 シンチレーションファイバー配置

5.2. 3次元シミュレーション

関西電力(株)の代表的な使用済樹脂貯蔵タンクに合わせ，高さと直径の比を4対3とした．円柱容器内に山形状，平坦形状および僅かに窪みのあるおわん形状の場合についてシミュレーションを行った．ただし，樹脂による自己吸収，容器の遮蔽等は考慮していない．

解析結果の形状例を図10に，精度を表3に示す．

表の体積比は仮定した線源の体積に対する解析結果で得られた体積の比を示している．体積比の最大

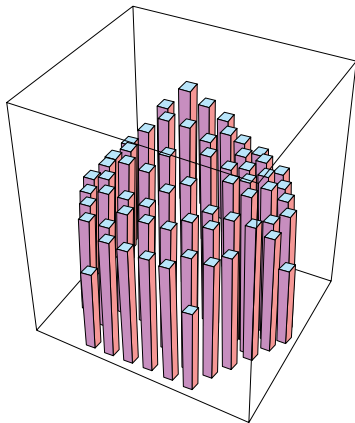


図10 解析結果（山形状）

表3 シミュレーションの精度

	体積比	標準偏差
山形状	97.95 %	1要素以内
平坦形状	105.74 %	1.5要素以内
おわん形状	99.68 %	1.5要素以内

誤差は6%以内で高い精度が得られている。また、標準偏差は線源の上面の分布形状を評価する指数であり、底面から上面までの高さの差の標準偏差である。解析に用いた要素1個の高さが30.6mmであるから、最大誤差は1.5要素以内に収まっている。解析精度は要素分割数を増やすことにより向上する。

以上の結果により線源による自己遮蔽効果のない理想的な体系においてSPM法が線源の3次元空間分布解析に有効であることが確認できた。

5.3. 模擬容器による実験

貯蔵タンクを模擬するため、ステンレス製で高さ397mm、直径310mmの模擬容器を製作した。模擬廃樹脂は冷却材混床式脱塩塔で用いられているイオン交換樹脂（三菱化成ダイヤイオン SKN 1）に、主な線源であるCo-60を吸着させたものを用いた。シンチレーションファイバーはシミュレーションと同じく逆U字型に3本配置した。山形状、おわん形状、平坦形状および平坦形状に水を満たした形

状の4種類の線源について実験を行った。

また、密封型の貯蔵タンクでは廃樹脂の固化を防止するために、定期的な攪拌が行われるために放射線源の強度が同様であると考えられるので、模擬実験においても同条件とした。

5.4. 結果の比較

実体系には、樹脂、水および容器の遮蔽とビルドアップがあるので、以下の式を用いてシミュレーションの結果に補正を加えた上で、実験結果と比較した。

$$I = I_0 B \exp(-\mu t) \quad (2)$$

$$B = 1 + C \mu t \exp(D \mu t) \quad (3)$$

ただし、 I は線強度、 I_0 は線強度（初期値）、 B はビルドアップ係数、 μ は線減衰係数、 t は遮蔽層の厚さ、 C および D はBergerの式⁽⁵⁾の係数である。

また2次元の場合と同様の理由により、データ解析の際にデコンボリューションを施した。

山形状の廃樹脂堆積についての解析精度は表4に示すように良好な成績を収めた。他の形状についても同様であった。

表4 解析精度

体積比	82.82 %
標準偏差	2要素以内

6. 画像表示技術

6.1 画像モデル

廃樹脂移送システムを、放射線の3次元空間分布推定および画面上への表示技術の研究対象モデルとした。廃樹脂移送システムの監視機能として、以下のものを設計し最適な表示方法を検討した。

(1) 脱塩塔監視画面

脱塩塔の線量率のリアルタイムな分布状態と、時間と共に変化する状況を図11に示すようなトレン

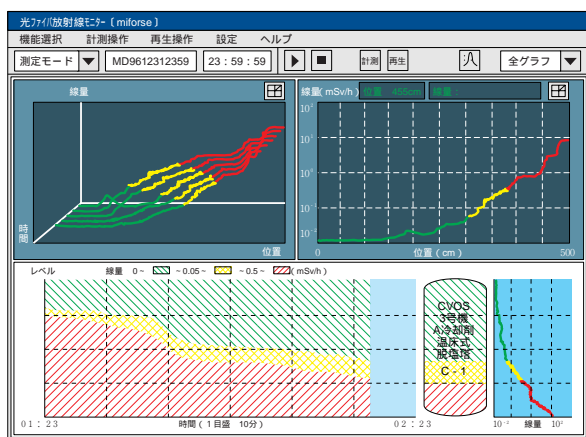


図 11 脱塩塔監視画面

ドグラフで表示する．この画面により，脱塩塔内の樹脂量の変化を監視する．

(2) 移送配管系統監視画面

移送配管の系統図とその系統図上に線量率のリアルタイムな分布状態を図 12 に示すような画面に表示する．この画面により，移送系統全体の移送状況および移送後の樹脂の付着状況を監視する．

(3) ホットスポットトレンド監視画面

配管の要所や樹脂付着が予想される場所等の線量率を図 13 に示すようなトレンドグラフで表示する．

この画面により，ホットスポットの状況を重点的に監視する．

(4) 移送前後監視画面

配管の要所および樹脂付着が予想される場所等における移送開始前の線量率と現在の線量率を図 14

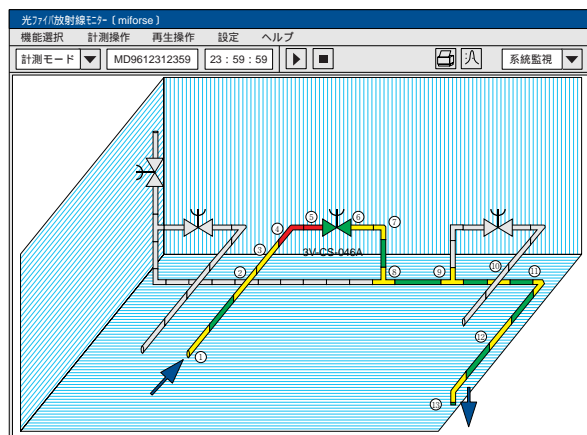


図 12 移送配管系統監視画面

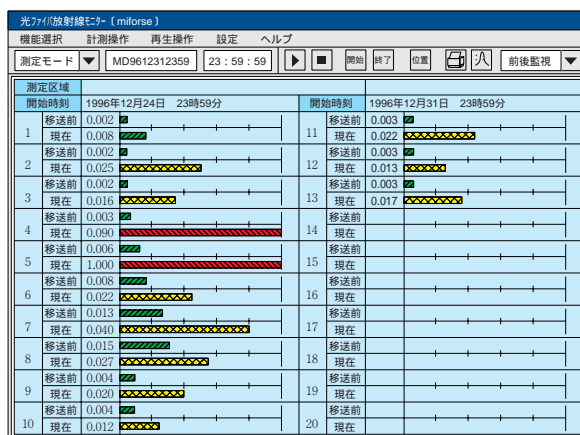


図 14 移送前後監視画面

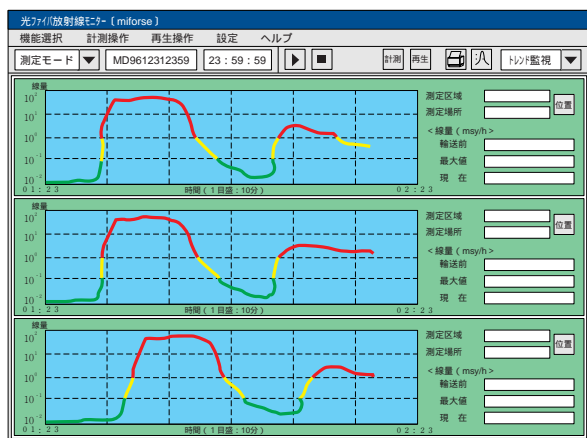


図 13 ホットスポットトレンド監視画面

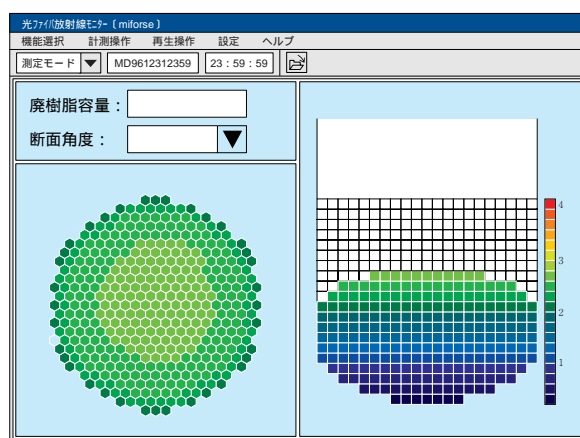


図 15 使用済樹脂タンク監視

の画面に比較表示する。この画面により、線量率が移送前の状態にまで戻ったかどうかを監視し、移送の完了を判断する。

(5) 使用済樹脂タンク監視

使用済樹脂タンク内部の廃樹脂の状態を、図 15 のように上から見た図および断面図の形で表示する。この画面により、使用済樹脂タンク内部の廃樹脂の量を監視する。

6.2. 画像モデルの適用

画像モデルの製作にあたっては、前項で設計した画像モデルを発電所に提示し、実地の運用面からの発電所の意見を収集し、下記の事項を設計に反映した。

- (1) 系統監視画面では弁名称や廃樹脂の流れる方向も表示する。
- (2) ホットスポットは定点に加え、計測中に任意

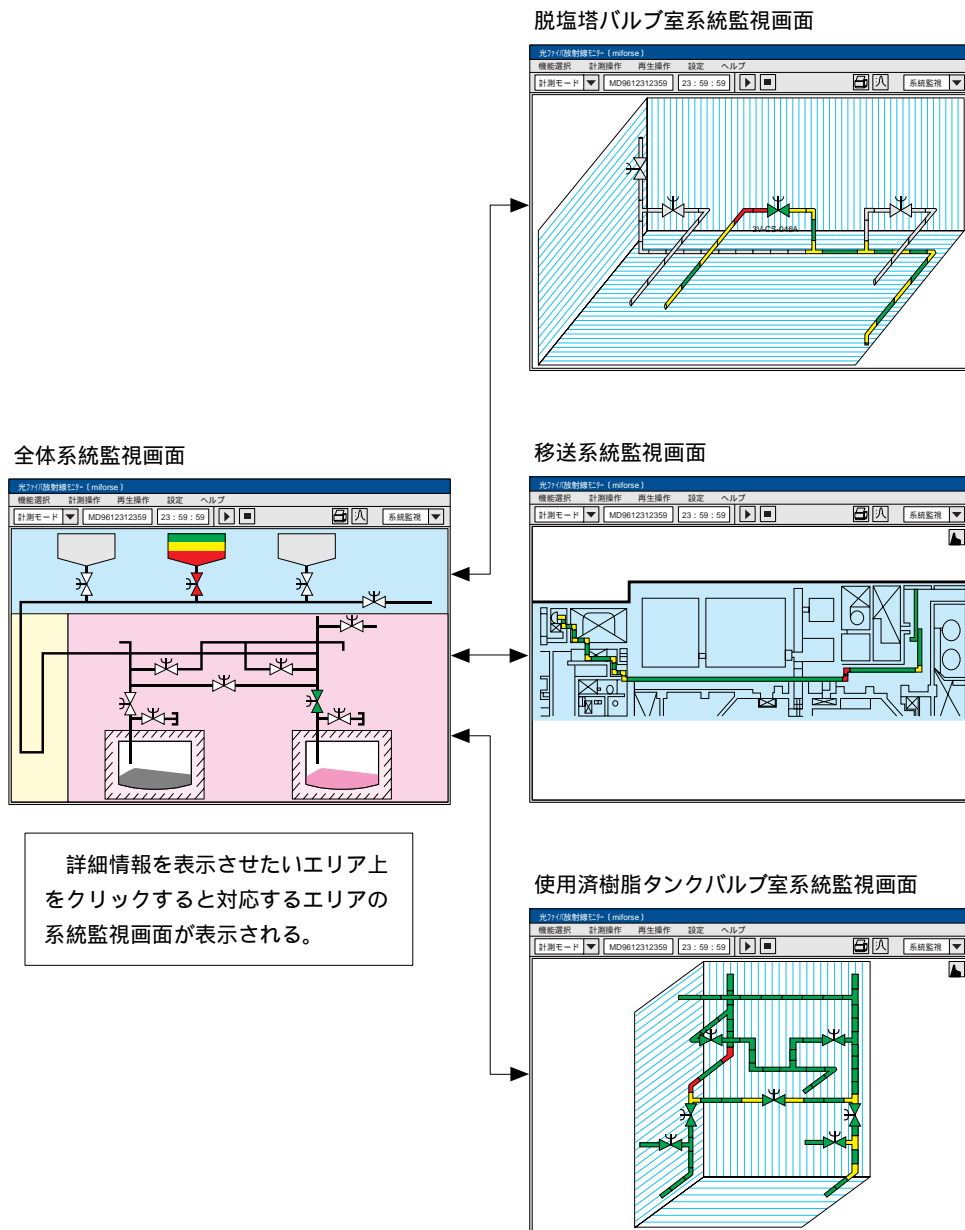


図 16 系統監視画面の階層化

のポイントを追加できるようにする。

- (3) 使用済樹脂タンク内部の廃樹脂の量の計算結果を表示する。
- (4) 使用済樹脂タンク内部の断面図は、縦断面の位置を切り替えられるようにする。

6.3. 表示方法の検討

- (1) 図16に示したように、廃樹脂の移送時には移送システム全体の表示を、移送後の樹脂付着に対する処理ではホットスポットの重点的な表示を、また移送完了判定では移送前の線量率との比較表示を、目的に合わせて切り替えることができるようにした。また、CRT画面1つで広域かつ複数の監視画面を表示するため、画像表示を全システム画面とエリア別システム画面に階層化することにより使い易いものとした。
- (2) 3次元空間の線量分布は、3次元表示にすると視点を移動しない限り分布状態を把握できないので、横断面図と縦断面図の表示で線量分布が一目で把握できるようにした。

7. プロトタイプ機の試作と性能評価

7.1 フィールドテストの計画

線源分布の測定技術を確立するために、廃樹脂移

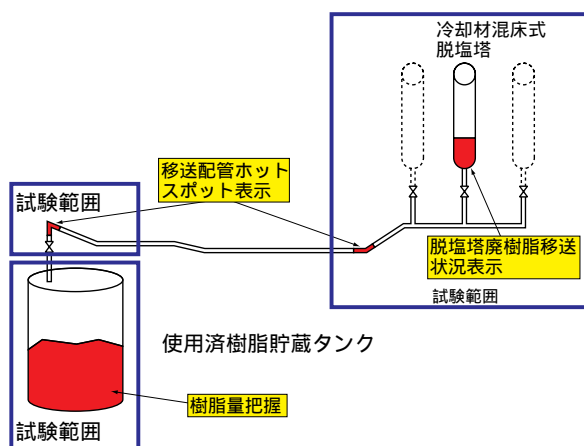


図17 フィールドテストの対象

送システムの脱塩塔、使用済樹脂貯蔵タンクおよび配管について代表機器を選定し、プロタイプ機として測定システムを設計した。フィールドテストの対象を図17に示す。

7.2 試作

測定範囲、エネルギー範囲、検出長（シンチレーションファイバーの所要長さ）測定点数等を発電所で調査した結果に基づいてプロトタイプ機を設計、製作した。その諸元を表5および表6に示す。

表5 プロトタイプ検出器の諸元

	a. 低レンジ	b. 中間レンジ	c. 高レンジ
製作数	2本	1本	2本
測定範囲	1 ~ 10 ³ μ Sv/h 但し、照射範囲が1m以内の場合最大値は10 ⁴ μ Sv/h	10 ² ~ 10 ⁵ μ Sv/h	10 ⁴ ~ 10 ⁶ μ Sv/h
測定対象線種	線	線	線
エネルギー範囲	600keV ~ 1.3MeV	600keV ~ 1.3MeV	600keV ~ 1.3MeV
検出長	20m	20m	20m
全長	60m	60m	60m
直径	15mm	15mm	15mm
重量	15kg	15kg	15kg

表6 プロトタイプ測定装置

	a. ラック式	b. 一体式
台数	1台	1台
計測内容	<ul style="list-style-type: none"> ・脱塩塔内樹脂分布 ・脱塩塔バルブ室配管内樹脂分布 ・使用済樹脂貯蔵タンクバルブ室配管内樹脂分布 ・脱塩塔, 脱塩塔バルブ室配管及び使用済樹脂貯蔵タンクバルブ室配管線量率トレンド 	同左
表示画面	10インチカラー液晶	10インチカラー液晶
寸法	縦777mm × 横540mm × 奥行820mm	縦540mm × 横600mm × 奥行300mm
重量	50kg	30kg
電源	AC100V	AC100V

表7 プロトタイプ検出器の目標仕様

	a. 低レンジ検出器	b. 中レンジ検出器	c. 高レンジ検出器
用途	脱塩塔出口配管, 使用済樹脂貯蔵タンク入口配管の移送前後でのバックグラウンド, ホットスポット位置測定用	使用済樹脂貯蔵タンクの樹脂量測定用	脱塩塔の樹脂量測定, 脱塩塔出口配管, 使用済樹脂貯蔵タンク入口配管の樹脂移送時の高線量測定用
指示誤差	±40%以内(作業員の被ばくに関わるため, JIS規格相当のエリアモニタ並とする.)	±20%以内(各発電所でのアンケート結果によると, 期待する容量精度は約10%との意見が多かったため, 精度10%を目安とする. 検出器の出力はそれぞれの線源との距離の2乗に反比例するため, 位置誤差は出力誤差の平方根に影響する. 従って, 容量精度10%の誤差に留めるには, $1.1 = \text{SQRT}(1.21)$ より, 指示誤差約20%を目安の値とした.)	±40%以内(相対的な線量変化がわかれば良いため誤差を規定できないが, JIS規格相当のエリアモニタ並とした.)
位置精度	±30cm(ホットスポットの位置の確認上問題ないレベル.)	±30cm(ばらつき幅がタンク高さの10%(約70cm)以内)	±30cm(脱塩塔高さの10%(約30cm)以内)
エネルギー特性	0.6MeV ~ 1.3MeV(廃樹脂の主な放射線源がCs-137, Co-60であるため.)	0.6MeV ~ 1.3MeV(廃樹脂の主な放射線源がCs-137, Co-60であるため.)	0.6MeV ~ 1.3MeV(廃樹脂の主な放射線源がCs-137, Co-60であるため.)

表8 プロトタイプ検出器の校正試験

	a. 低レンジ検出器	b. 中レンジ検出器	c. 高レンジ検出器
指示誤差	±12%(Co-60 238 μSv/h, 2.29 mSv/hにて)	±22%(Co-60 238 μSv/h, 2.29 mSv/hにて)	±6%(Co-60 200 mSv/hにて)
位置精度	±30cm	±30cm	±30cm
エネルギー特性	0.6MeV ~ 1.3MeV	0.6MeV ~ 1.3MeV	-

7.3 特性試験

(1) 検出器の目標仕様

プロト機の検出器について特性試験を行った。目標仕様を表7に示す。

(2) 検出器の校正試験

プロト機について確認した特性を表8に示す。なお、高レンジ検出器のエネルギー特性についてはCo-60での校正試験のみを行なった。これは構造が他レンジのケーブルと同等であるため、同様な特性が得られると考えられるためである。

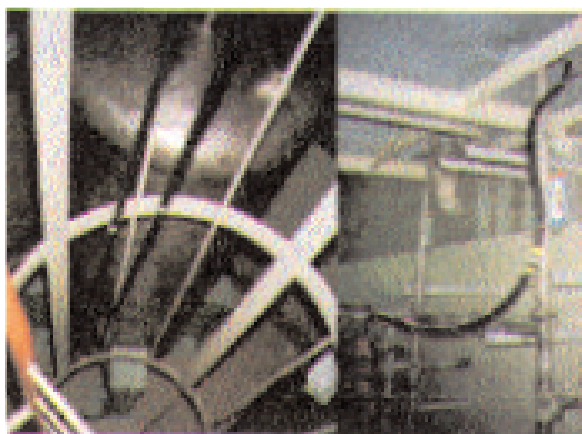


図18 脱塩塔，移送配管センサ敷設状況

7.4. フィールドテスト

大飯発電所3号機冷却材混床式脱塩塔の廃樹脂移送に際して廃樹脂系統にセンサを仮設して、機能試験を行った。センサー敷設状況例を図18に示す。

脱塩塔移送は、樹脂移送と配管洗浄の操作に分かれる。樹脂移送時は、脱塩塔内の樹脂の固着を解き移送しやすくする「逆洗」操作、脱塩塔内の樹脂を使用済樹脂貯蔵タンクに移送する「樹脂移送」操作および移送完了後に脱塩塔「樹脂エレメント洗浄」

操作を行う。樹脂移送時は、脱塩塔表面、脱塩塔出口配管および使用済樹脂貯蔵タンク入口配管の線量率が高いので、「高レンジ検出器」にて測定した。

一方、配管洗浄は樹脂移送後に配管に付着した樹脂を洗浄する操作であり、ライン毎に洗浄する。この操作時の配管表面の線量率は低いので「低レンジ検出器」にて測定した。また、使用済樹脂貯蔵タンクは、線量率が低レンジと中間レンジ両方の測定範囲内であったので、指示誤差の少ない低レンジ検出器で測定した。

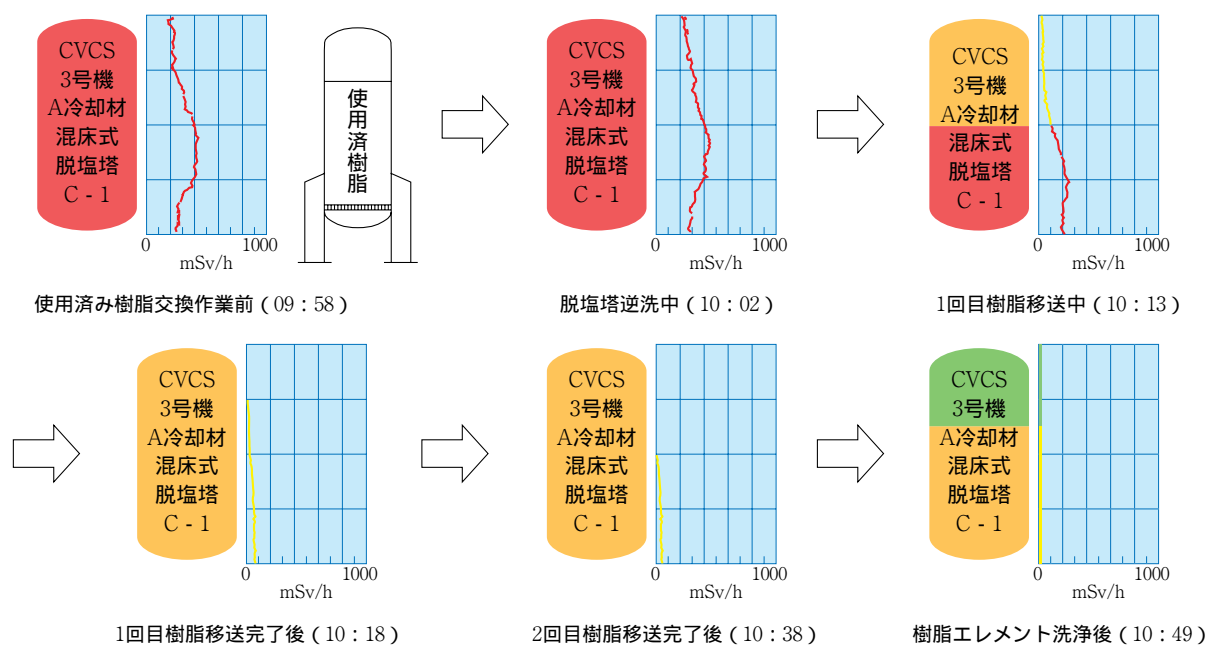


図19 脱塩塔内の樹脂分布状況

(1) 脱塩塔内樹脂の垂直分布

脱塩塔内の樹脂分布を移送前、移送中、移送完了後について図19に示す。同図には脱塩塔内の樹脂充填状態と脱塩塔表面の線量率をも示す。脱塩塔内の樹脂充填状態をタンク模式図に色で表示した。赤色は充填していることを示し、緑色は、廃樹脂がないことを示す。黄色はそれらの中間の充填、すなわち充填量は少なくなっているがなくなっていない状態、であることを示す。脱塩塔表面の線量率が充填量に比例するので設定値²を設けて赤、黄、緑に分けて表示した。

a. 使用済樹脂移送前

脱塩塔表面線量は使用済樹脂が充填している位置で高くなっていることがわかる。

b. 脱塩塔逆洗中

逆洗によって脱塩塔内の樹脂が攪拌されると予想

されるが、線量分布変化はなく樹脂の大きな移動はない。

c. 1回目脱塩塔移送中

移送により、脱塩塔上部の線量率は低下し、樹脂が減っていることが確認できる。

d. 1回目脱塩塔移送完了後

ほとんどの樹脂が移送されたことが確認できる。脱塩塔下部に樹脂が残っている。

e. 2回目脱塩塔移送完了後

脱塩塔下部の線量が低下し、下部の樹脂が移送できた。ただし、脱塩塔下部の樹脂エレメント付近で線量が高く、ここに少しの樹脂が残留していることがわかる。

f. 脱塩塔樹脂エレメント洗浄後

脱塩塔全体の線量率が通常レベルまで下がり、移送が完了したことが確認できる。

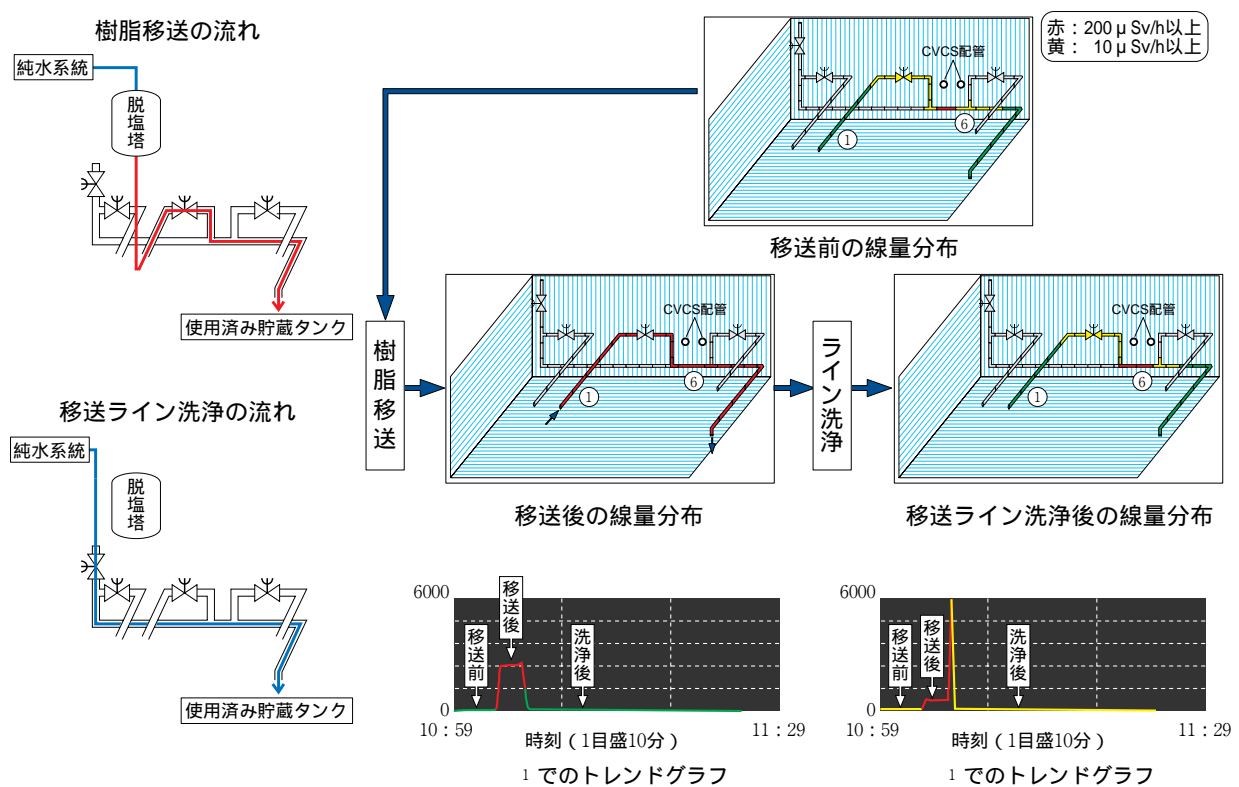


図20 脱塩塔バルブ室内配管での廃樹脂移送状況

² 高線量レベル (赤色で表示) は、100mSv/h以上、中線量レベル (黄色で表示) は、0.2mSv/h以上100mSv/h未満、通常線量レベル (緑色で表示) は、0.2mSv/h未満と設定した。

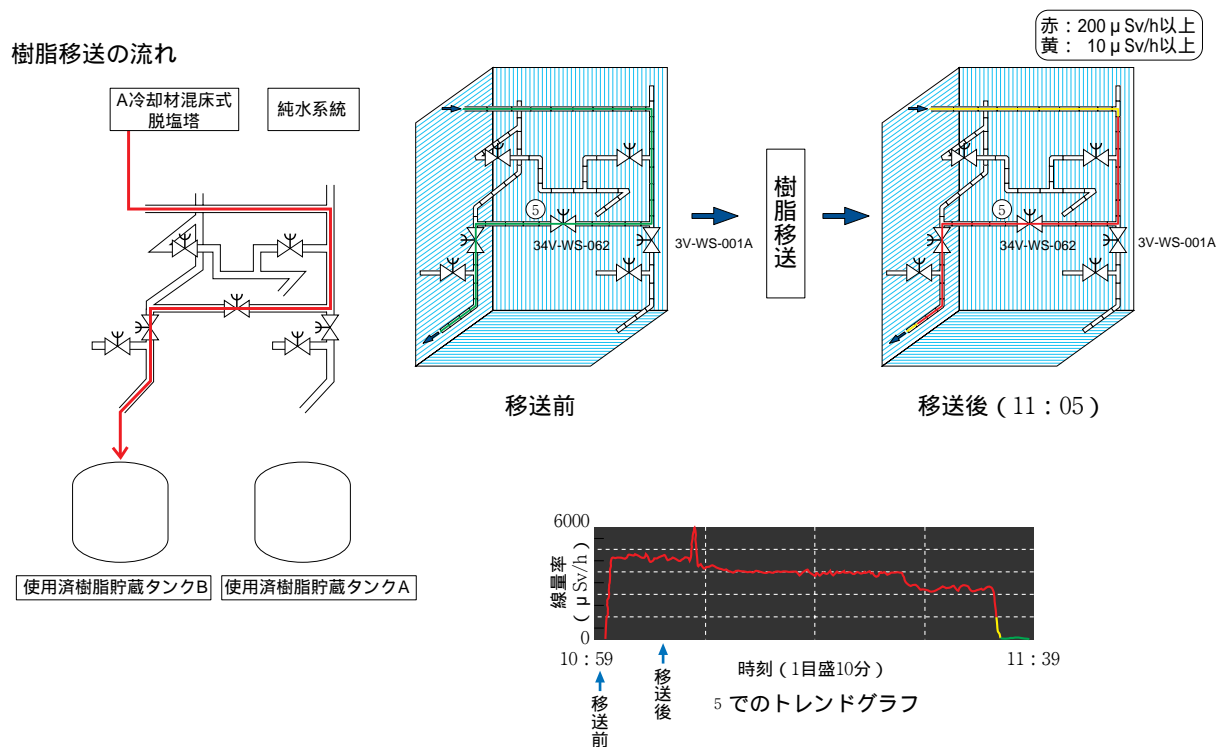


図21 使用済樹脂貯蔵タンクバルブ室内配管樹脂移送前後

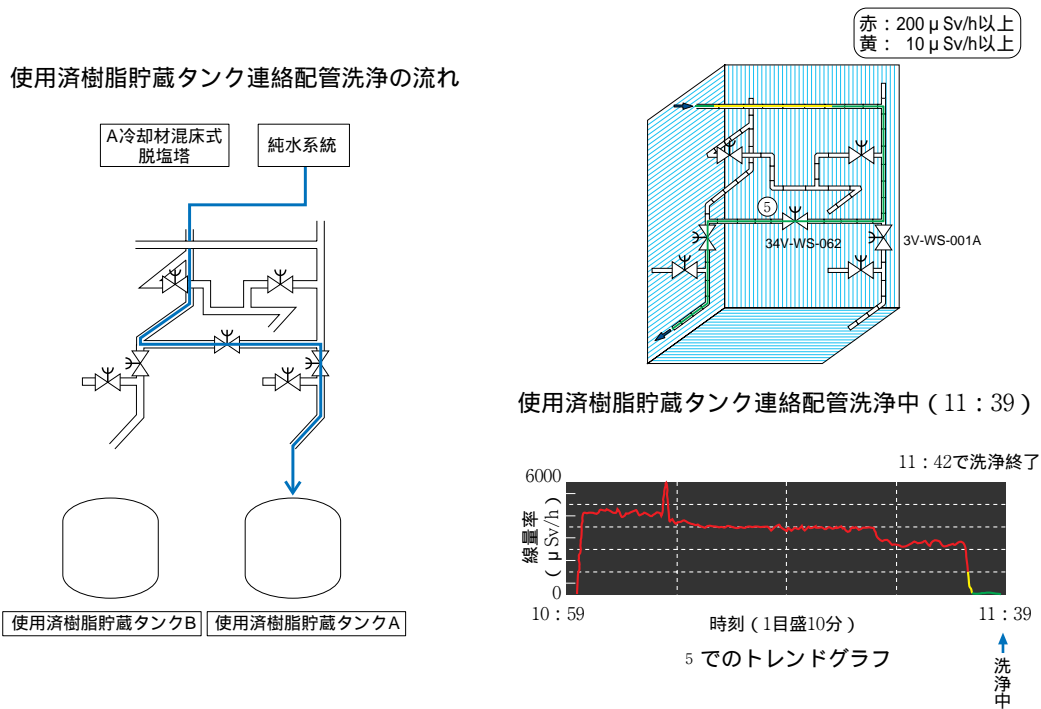


図22 使用済樹脂貯蔵タンク連絡配管洗浄

(2) 脱塩塔バルブ室内配管での洗浄状況

脱塩塔バルブ室内配管での樹脂移送状況と測定結果を図20に示す。配管表面の線量率を色³で示す。

- 移送前から配管の位置での線量が近くのCVCS配管を流れる放射性物質の影響で高くなっている。
- 樹脂移送後、配管内に樹脂が残留していることがわかる。
- 脱塩塔を介さず直接脱塩塔出口配管を純水で洗浄する。洗浄の結果、移送前の線量分布に戻り、樹脂の残留がないことが確認できた。
- トレンドグラフからすぐに洗浄できたことがわかる。

(3) 使用済樹脂貯蔵タンクバルブ室内配管での洗浄状況

使用済樹脂貯蔵タンクバルブ室内配管での洗浄結果を図21、図22に示す。配管表面の線量率を色⁴で示す。

a. 図21

移送前は、配管表面の線量率は通常レベルである。樹脂移送後に配管内に樹脂が残留していることがわかる。

b. 図22

前項で残った樹脂を洗浄するために、洗浄システムを変えた。この様にどの位置に樹脂が残っているのかわかるので、適切な洗浄システムを選ぶことができる。

(4) サーベイメータとの線量率比較

脱塩塔バルブ室内配管および使用済樹脂貯蔵タンクバルブ室内配管での今回使用のセンサとサーベイメータとの測定結果を比較した結果、ほぼ一致した値を示した。サーベイメータによる測定も、このセンサによる測定も移送後は、移送前の線量率に復帰しており、残留樹脂がないことを示しており、サーベイメータによる管理をこのセンサで置き換えることができる。

³ 高線量レベル（赤色で表示）は、 $200\mu\text{Sv/h}$ 以上、中線量レベル（黄色で表示）は、 $10\mu\text{Sv/h}$ 以上 $200\mu\text{Sv/h}$ 未満、通常線量レベル（緑色で表示）は、 $10\mu\text{Sv/h}$ 未満と設定した。

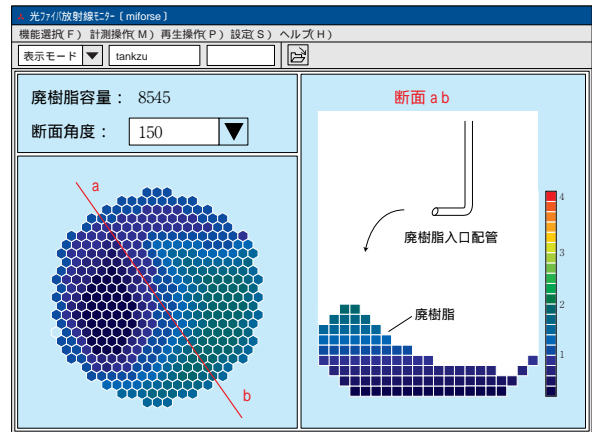


図23 使用済樹脂貯蔵タンク内樹脂分布

(5) 使用済樹脂貯蔵タンク内樹脂分布

得られたタンク内の分布形状を図23に示す。

フィールド試験で対象とした使用済樹脂タンクでは、定期的な樹脂の攪拌を行わないため、廃樹脂入口配管の位置から樹脂が偏った分布をしていると推定される。樹脂の容量の解析結果は、 8.545m^3 であった。なお、1要素の大きさは、 0.007m^3 である。移送樹脂総量から予想される使用済樹脂貯蔵タンク内貯蔵量と比較すると、83.4%となった。

脱塩塔からの樹脂移送が平成5年5月より定期的に行われており、移送時期の異なる線源が層状に重なっていることが予想される。そのため崩壊により減衰がおこり線源強度が均一ではない。（初回に移送された内、主な線源と考えられるCo-60は3年で約67%まで減衰する）

従って、線源強度を均一とするこの解析手法を直接適用することができない。そのため、線源強度が分布しているが層状であることを考慮したアルゴリズムによって樹脂の形状と樹脂量を推定した。

使用済樹脂タンク内で樹脂の固着防止のために攪拌している密封型のタンクには今回開発したアルゴリズムが直接適用でき、今回のフィールドテストより優れた結果が期待できる。

⁴ 高線量レベル（赤色で表示）は、 $200\mu\text{Sv/h}$ 以上、中線量レベル（黄色で表示）は、 $10\mu\text{Sv/h}$ 以上 $200\mu\text{Sv/h}$ 未満、通常線量レベル（緑色で表示）は、 $10\mu\text{Sv/h}$ 未満と設定した。

7.5. 結果の評価

現状は、放管員と運転員が放射線管理区域の現場で操作手順を踏んで、共同作業している。放管員は線量率測定による移送完了、配管洗浄完了の判断を下し、次の操作ステップへの移行を運転員に連絡する。運転員は、バルブ操作による移送、洗浄操作を行う。放管員の線量率測定の手間を削減し、測定による被ばくも削減できかつ運転員が放管員の支援を受けず操作毎の判断することで、作業時間の低減が期待できる。図24に廃樹脂移送作業の短縮効果を示す。

(1) 樹脂移送完了確認

脱塩塔内の樹脂量がリアルタイムでわかり、廃樹脂移送完了を確認することができた。わかりやすいグラフィック表示であるので運転員が移送完了を確認することが出来る。現状は放管員が移送前後にテレクタ(約1～4mに伸縮する長尺の検出器)で脱塩塔表面線量率を測定し、移送完了を判断し運転員

に次の操作ステップに進むよう連絡している。特に、燃料ピット脱塩塔は、スラッジが多く樹脂が固着してなかなか樹脂が流れきらず、移送完了の判断に線量率測定の手間と時間がかかっている。

(2) 配管洗浄確認

ホットスポットの位置を検出することができ、適切な洗浄ラインを運転員が判断することができた。

このため効率的な洗浄を行うことができ除染時間を短縮できる。現状は放管員が配管に沿ってサーベイメータで線量率を測定し、ホットスポットの位置を検出する時間がかかっている。

(3) 線量率指示

センサの指示値は、サーベイメータと良く一致した値を示し、サーベイメータの代用の検出器として使用できる。このため、放管員のホットスポットを調べる手間が削減できる。

(4) 測定データの管理

実機適用時に測定装置に次の機能を設けることで、作業を合理化できる。

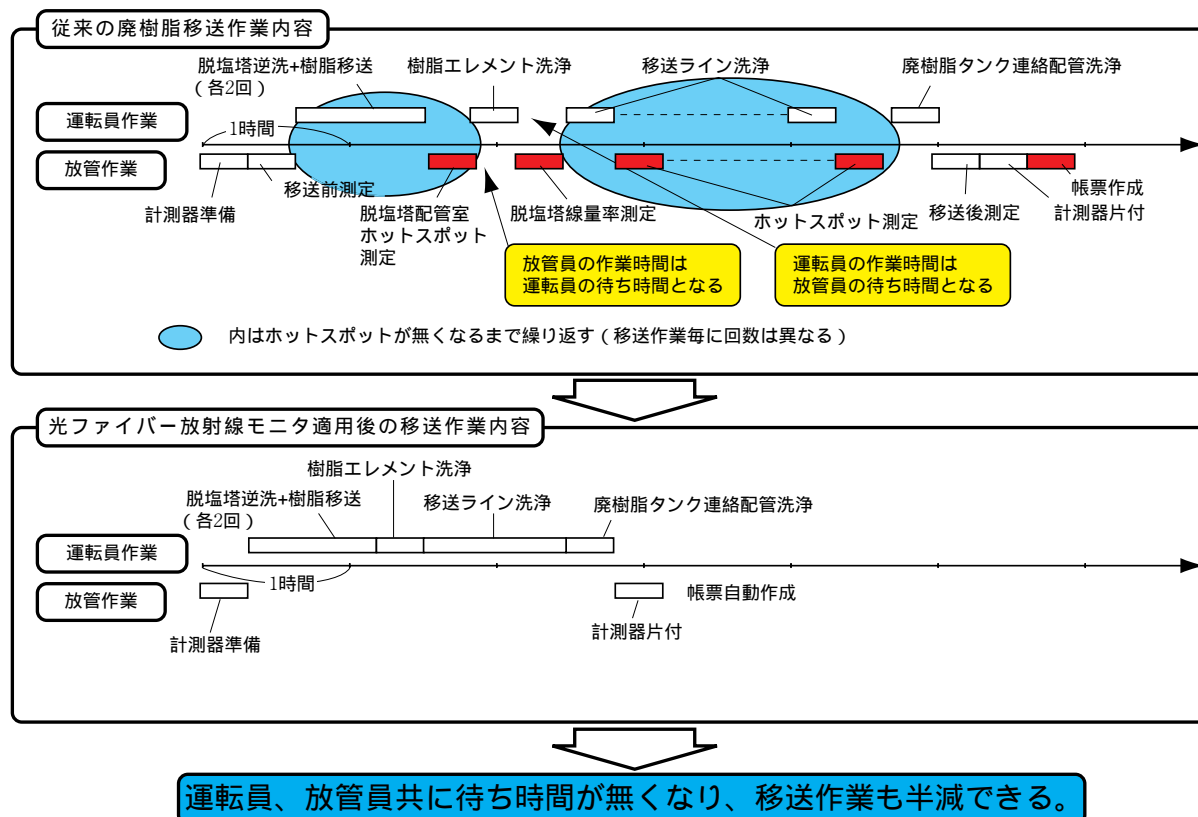


図24 光ファイバー放射線モニタ適用による廃樹脂移送作業の短縮

- a . 作表機能を設けることで管理書類の自動作成ができる .
- b . 通信機能を設けイントラネットに接続すれば、放管室で管理することができる .

(5) 使用済樹脂貯蔵タンク内樹脂分布

現在、使用済樹脂貯蔵タンクに貯蔵されている樹脂は高線量率であるため堆積状況を直接的に把握する手段がないが本システムの使用により移送作業後の樹脂の貯蔵状況を直接的に把握できるためタンク容量の有効利用等貯蔵管理に資することができる .

8. むすび

本研究で開発した技術は、廃樹脂系統の他に廃樹脂処理系統等高線量率の系統にも活用できるものと考えられる .

また、本研究では、放射性物質の堆積した閉じた系内に線源が一様な空間密度で連続的に分布しているというモデルを用いて廃樹脂系統に適したアルゴリズムの構築に成功した . 線源強度が一様でない密度で分布する、より一般的な対象に適用するためには、更に研究を進めることが必要である . アルゴリズムを一層高度化して強度の異なる線源が連続的のみならず離散的に分布するモデルにも適用できるようになれば、適用用途が更に拡大できることが期待される .

なお、本研究を遂行するにあたり、関西電力(株)大飯発電所第二放射線管理課の方々には特にお世話になった . ここに記して感謝の意を表する .

参考文献

- (1) S. Soramoto, M. Notani, Y. Fukano, S. Imai, T. Iguti and M. Nakazawa : KEK Proc.93-8, 171-173(1993)
- (2) T. Emoto, T. Torii, T. Nozaki and H. Ando, Radiation Detectors and Their Uses, KEK Proc. 94-7, 119(1994)
- (3) Y. Saito, E. Itagaki and S. Hayano : A formulation of the inverse problems in magnetostatic field and its application to source position searching of the human eye fields, J. Appl. Phys., Vol.67, No.9, May 1990, pp.5830-5832
- (4) K. Yoda, T. Oka, Y. Tsutaka, T. Usami, H. Nakamura and Y. Umeda : Shape Estimation of Radioactive Spent Resins in a Storage Tank Using the Sampled Pattern Matching, IEEE Trans. Nuclear Science, Vol.44, No.3, June 1997, pp1469-1473
- (5) 社団法人日本アイソトープ協会編集, アイソトープ便覧, p-418, 丸善株式会社