

福島復興に向けた新技術の開発

Development of New Technology for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Reconstruction

木下 博文 田山 隆一 米谷 豊
Kinoshita Hirofumi Tayama Ryuichi Kometani Yutaka
浅野 隆 可児 祐子
Asano Takashi Kani Yuko

東京電力株式会社福島第一原子力発電所における事故以降、福島復興に向けては、高い放射線環境下での対応が必要であり、従来になかった新たな技術が求められている。これらを達成するには、遠隔操作ロボット、放射線計測技術、水処理技術などの各要素技術の開発とともに、これらを組み合わせて機能させる複合化が必要である。

この作業には、現場を調査（放射線計測、状況視認、アクセスルートの確認など）し、これに基づいた障害物撤去・除染による環境改善計画を策定して、具体的な作業を遠隔操作で進める必要があり、また、原子炉冷却から生じる汚染水の処理（放射性物質の除去）も同様に高度化が不可欠である。

1. はじめに

現在、東京電力株式会社福島第一原子力発電所では、高い放射線環境下において遠隔操作で環境調査・測定などを可能とするロボット、放射線計測器に加え、がれきの撤去を行うロボットの適用が進められている。また、計測データに基づく除染計画支援、環境改善のための除染作業へ各種システムやロボットの適用が必要と考えられる。

このような災害現場でのニーズに対し、日立グループは、放射線計測技術、遠隔除染装置「Arounder」、無線通信技術を適用した遠隔操作モニタリングロボットシステム、小型双腕重機型ロボット「ASTACO-SoRa」を開発し、現場調査からがれき撤去、環境改善へと災害現場復興に向けた対応を可能とする開発を進めている。また、原子炉冷却から生じる汚染水の処理技術についても同様に開発を行い、環境改善への貢献を進めている。

ここでは、これまでに開発し適用した放射線計測技術、除染技術、遠隔操作ロボット技術、および汚染水処理技術について述べる。

2. 放射線計測技術の開発

福島第一原子力発電所における事故により、主に原子炉建屋内の壁、床、天井などが放射性物質によって汚染された状態である。廃止処置などに向けた作業を円滑に進めるには、汚染箇所の除染が必要不可欠である。除染は主に(1)放射線計測による汚染状況の把握、(2)除染計画の立案、(3)除染、(4)除染効果の確認、(5)除染廃棄物の運搬・保管の5つのプロセスから成る。除染を効率的かつ効果的に進めるための放射線計測技術として、汚染状況を面的に可視化するガンマカメラ、および空間線量当量率を線的に測定するPSF (Plastic Scintillation Fiber) を、またこの放射線計測技術で得られる膨大なデータを用いた除染計画の立案を支援するソフトウェアRaF-MAP (Radiation Field MAP) を開発した。

2.1 放射線計測技術の開発

2.1.1 ガンマカメラ¹⁾

車載型ガンマカメラの外観を図1に示す。原子炉建屋内の高放射線環境下での測定を可能とするため、従来装置に

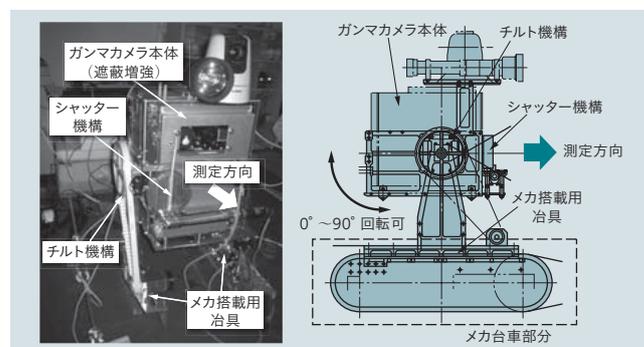


図1 | 車載型ガンマカメラの外観

ガンマカメラ本体、チルト機構、シャッター機構、および搭載用治具で構成される。チルト機構により、垂直方向90°までの測定が可能であり、シャッター機構により測定精度を向上させている。

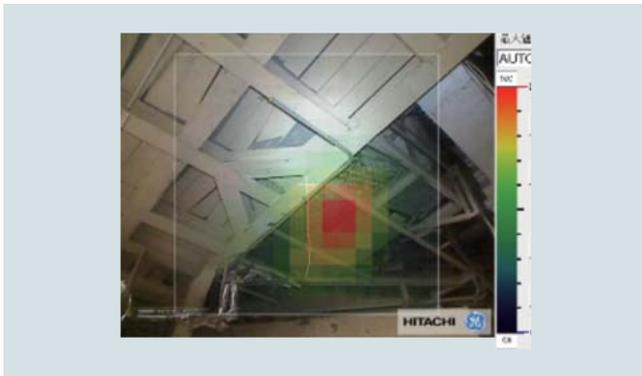


図2 | ガンマカメラによる撮像画像例

3号機の原子炉建屋内の大物搬入口近傍から、格納容器外面を撮像した結果を示す。ホットスポット（格納容器の貫通口）が検知できている。

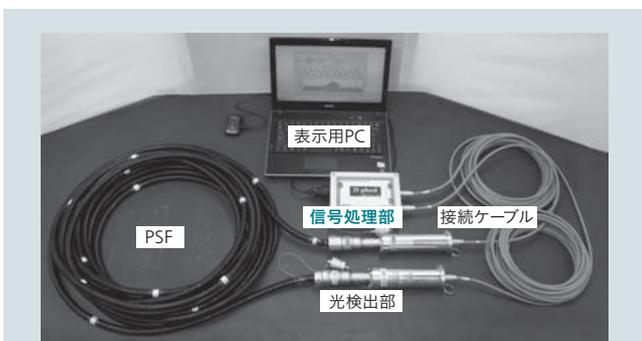
比べ放射線バックグラウンド低減強化（ガンマカメラ本体遮蔽の増強，シャッター機構の追加），無人で測定が可能な遠隔操作機能，さらには建屋内の汚染状況を正確に把握するためのチルト機構を追加している。

ガンマカメラによる撮像は1号機から3号機の原子炉建屋内においてそれぞれ5か所程度の場所で行った。今回の撮像におけるカメラ設置位置の空間線量当量率は10 mSv/hから100 mSv/h程度の範囲であり，そのすべての位置において図2に示すようなホットスポットの検出が可能であった。

2.1.2 PSF²⁾:「D-phod」

PSFを用いた空間線量当量率測定システムD-phodの外観を図3に示す。D-phodの特徴は，ファイバに沿った放射線分布を一回の測定で，かつシンチレーション式サーベイメータと同等の時間，精度で測定できることである。D-phodは，PSF，光検出部，信号処理部，測定結果表示用PC（Personal Computer），および接続ケーブルで構成され，従来の装置に比べ，高感度化，小型軽量，剛性，省電力化が図られている。

約80×60（m）の敷地内の建物周辺，駐車場，および庭など計31か所の表面線量当量率を，D-phodを用いて測定



注：略語説明 PC（Personal Computer），PSF（Plastic Scintillation Fiber）

図3 | D-phodの外観

PSF，光検出部，信号処理部，表示用PC，および接続ケーブルで構成される。屋外で，かつ発電がなくても使用できる。



図4 | D-phodによる線量当量率測定例

D-phodで測定したデータを電子地図上に表示することで，汚染状況を正確に把握でき，除染を効率的かつ効果的に進めることが可能となる。

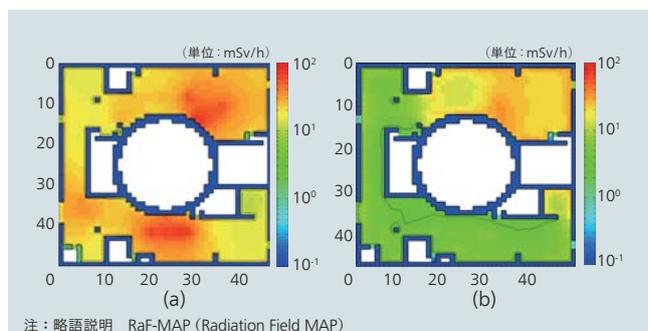
した。可視化システムで表示した放射線マップから，汚染の状況を直観的に理解することが可能である（図4参照）。

高放射線環境下での測定を可能とするための改良を行い，原子炉建屋内の壁，床，天井の表面線量当量率測定への適用を計画中である。

2.2 除染計画支援技術³⁾: RaF-MAP

RaF-MAPは，あらかじめ三次元モンテカルロコード（MCNP5：Monte Carlo N-Particle Transport Code 5）を用いて評価した放射線の空気，コンクリート中の減衰データ，測定により得られた壁，床，天井などの表面線量当量率，ガンマカメラによって確認したホットスポットなどのデータを基に，任意の空間位置における線量当量率を短時間で算出し，線量当量率分布図を作成する計算システムである。また，除染や遮蔽体設置による空間線量当量率の低減効果を予測できることが最大の特徴である。

RaF-MAPで評価した福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋内の線量当量率分布図を図5（a）に，壁，床を除染し，かつ局所的に遮蔽体を設置した場合の線量当量率分布図を図5（b）に示す。このように，汚染状況の把握，除染効果の予測が容易であり，目標とする線量当量率を満足する除染計画の提案が可能となる。



注：略語説明 RaF-MAP（Radiation Field MAP）

図5 | RaF-MAPによる建屋内の線量当量率分布（a）と除染の効果予測（b）
RaF-MAPは，実測線量率を入力し，任意位置における空間線量率を計算して線量率分布図を作成するプログラムである。

3. 除染技術の開発

原子力災害現場での除染作業の実施に対し、作業員の被ばく低減の必要性から、遠隔除染装置「Arounder」の開発を行った。

3.1 遠隔除染装置Arounder⁴⁾の概要

Arounderは、原子炉建屋内での除染作業に対し、広範囲な汚染形態に適用可能な高圧水による遠隔除染を実現している。システム構成および外観を図6に示す。

開発したArounderは、建物の床・壁表面の放射性付着物を洗浄し、同時に回収する機構を有する。除染後の汚染水拡散を防止しながら、建屋内環境の改善を可能としている。また、原子炉建屋内での広範囲な除染作業を可能とするため、除染装置本体を小型化するとともに、高圧水を噴射/回収するためのヘッド部を、アーム機構で床・壁面へ押しつけ可能な機構を実現した。

3.2 Arounderの特徴

(1) 水圧制御による使い分け

この除染装置は、供給水圧を25 MPa～200 MPaで調整可能なシステムであり、現場での除染対象面において、表面洗浄/塗装剥離/はつりの使い分けが可能である。したがって、表面堆積物を取り除くことで除染可能な表面汚染

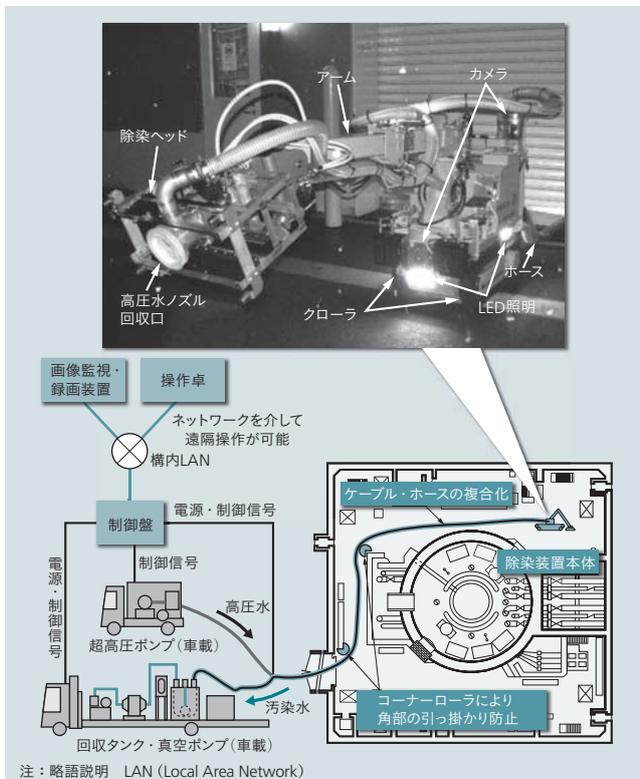


図6 | Arounderのシステム構成および外観

遠隔操作室から、現場に配置されるポンプを含めた除染装置を操作できる。Arounderは、供給される高圧水を噴射と同時に回収しながら床・壁面の除染を行う。

状態から、コンクリート内部に汚染が浸透している状態など、幅広い現場の状況に対応できる。

(2) 汚染水を漏らさず回収可能

この除染装置は、高圧水の噴射と回収を同時に実施可能な除染ヘッド部を有する。除染ヘッド部は、内部で高圧水が噴射されるが、ヘッド周りに取り付けられたブラシの最適化により、除染水(供給高圧水)と汚染水を漏らさず回収することができる。

これにより、除染作業時の汚染拡散は防止され、確実な除染作業を可能としている。

4. 遠隔操作ロボット技術の開発

福島第一原子力発電所の作業は、現場情報の収集結果をその後の作業計画などへ反映しながらの対応が進められる。また、災害現場においては、高い放射線環境となるため、情報収集や建屋内での作業に対して遠隔操作型ロボットの適用を求められる。

4.1 調査用モニタリングロボットシステム⁵⁾

このような遠隔操作ロボットの適用ニーズに対し、日立グループでは、無線通信技術を活用した遠隔操作モニタリングロボットシステムの開発および適用を進めている。

4.1.1 システム構成

遠隔操作モニタリングロボットシステムの構成を図7に示す。このシステムは、1台の操作コンソールから3台の遠隔操作ロボットを操作可能である。また、3台のロボットは相互に無線中継を可能としている。このような無線中継技術の適用により、災害現場における通信インフラのない状況で、かつ建屋内で通信困難な環境においても、作業員の立ち入りが困難な高線量領域での調査対応が可能となる。

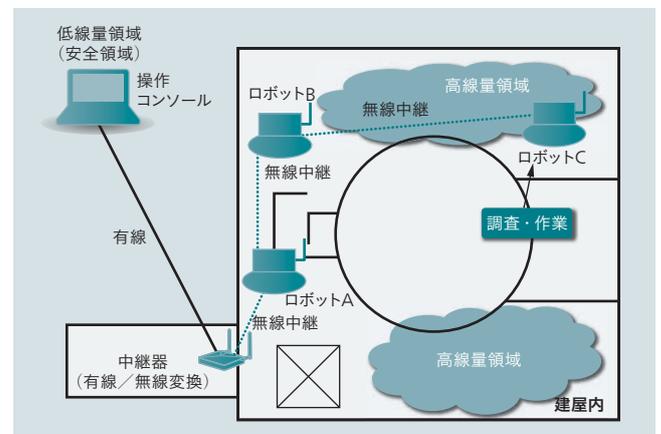


図7 | 遠隔操作ロボットシステムの構成

遠隔操作による3台の移動ロボットが相互に無線通信することで、通信インフラが未整備な状況でも、建屋内の深部で調査対応が可能なシステムを構築できる。

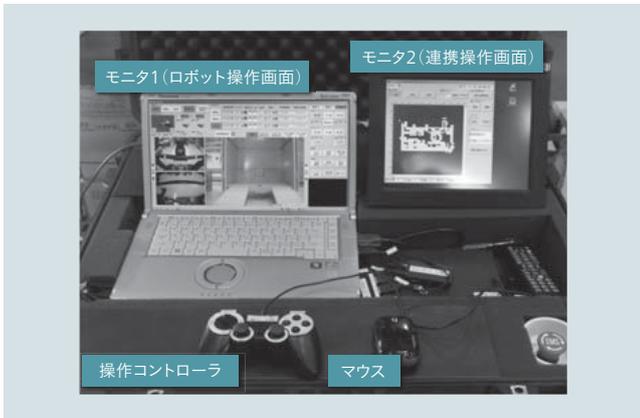


図8 | 操作コンソールの外観

3台のロボットを1台のコンソールで操作可能なシステム構成である。地図画面(連携操作画面)に、周辺干渉情報とロボットの現在位置を表示できる。

4.1.2 ロボットシステムの特徴

(1) 複数のロボットを1台のコンソールで操作

このシステムの操作コンソールを図8に示す。ロボット操作画面では、操作対象のロボットを切り替えられ、選択されたロボットの調査用カメラ映像と前後の俯瞰(ふかん)カメラ映像などが映し出される。モニタ上に、ロボットに搭載の複数のカメラから運転操作に必要なカメラ映像を選択でき、運転員のロボット操作をサポートする。また、3台のロボットに搭載したセンサー情報(放射線線量、温度、湿度)を常時表示し、現場状況のモニタリングを可能としている。

(2) 地図機能の活用

このシステムの移動ロボットは、レーザセンサーを搭載し、移動中の周辺状況の計測を行うことで、自己位置を把握している。自己位置データを周辺地図情報と連携することで、障害物との干渉防止、ロボットどうしの衝突防止を可能としている。

地図情報は、操作コンソールの連携操作画面に表示される地図にメッシュを区切り、各メッシュに走行可否情報を登録することで、ロボット位置や、障害物の状況把握をサポートし操作員の負担軽減に寄与する。

4.2 小型双腕重機型ロボット「ASTACO-SoRa」⁶⁾

災害現場での遠隔操作ロボットの適用ニーズに対し、日立グループでは、原子力災害対応用小型双腕重機型ロボットASTACO-SoRaを開発し適用を進めている。

4.2.1 ASTACO-SoRaの概要

今回開発した双腕重機型ロボットASTACO-SoRaは、幅980mmのコンパクトなボディに2本のアームを搭載することにより、建屋内での自由度の高い作業を可能とした。2本のアームは高さ約2.5mまで到達でき、アーム1本当たり150kg、両アームで合計300kgの重量を持ち上げる



図9 | ASTACO-SoRaの外観

2本のアーム先端のアタッチメントは個別に選択でき、片方で掴みながら他方で切断するなど、2本のアームを有効に活用した丁寧な作業を実現可能とした。

ことができる。

さらに、アーム先端のツールを交換することで、より広汎な作業に対応可能とした。ASTACO-SoRaの2本アームでの作業状況を図9に示す。

ASTACO-SoRaは、原子炉建屋内でののがれき撤去などの作業への対応を想定して、遠隔無線操作が可能な設計としている。

また、遠隔操作においては、運転操作員をサポートする機能を充実させ、高い操作性を実現した。

4.2.2 ASTACO-SoRaの特徴

(1) 先端ツールが交換可能

ASTACO-SoRaの2本のアーム先端には、広範な作業に対応するため、つかみ具、切断具、回転具、カメラ付き長尺アームの装着を可能としている。

各ツールは、遠隔での交換が可能であり、現場の状況に応じてフレキシブルに対応できる。

2本のアームを搭載し、さらにそれぞれのアーム先端に異なるツールを装着できるようにしたことで、現場でののがれき撤去などの作業において、1本のアームでつかみ、他方のアームで切断作業を行うなど、建屋内でののがれき撤去、解体作業にも丁寧な対応が可能である。

(2) 現場環境測定に対応

本体にはカメラのほかに放射線線量計、温度・湿度計、酸素・水素濃度計、および赤外線カメラを搭載している。これらのセンサー情報は、遠隔操作盤へ常時表示され、本体周辺の建屋内環境をモニタリング可能とした。

(3) 遠隔操作のサポート機能

ASTACO-SoRaの運転操作は、遠隔操作盤から無線で行う。遠隔操作盤は、ロボットに搭載した6台のカメラ映像を切り替えながら、同時に5つのモニタに表示可能である。また、6台のカメラには、それぞれLED(Light Emitting Diode)照明を搭載しており、暗闇となる災害現



図10 | ASTACO-SoRa遠隔操作盤の外観

ASTACO-SoRaの操作は中央の4本のジョイスティックで実施する。ASTACO-SoRaに搭載する6台のカメラから5台を選択して同時に表示可能である。

場である原子炉建屋内でのがれき撤去作業などへ対応可能とした。遠隔操作盤の外観を図10に示す。

5. 汚染水処理技術の開発

福島第一原子力発電所では、タービン建屋などに滞留している高レベル放射性汚染水から放射性Cs（セシウム）を除去し、さらに原子炉の腐食抑制のため、海水由来の塩分を除去する水処理設備が稼働している（図11参照）。日立グループは、RO（Reverse Osmosis：逆浸透）膜装置、蒸発濃縮缶の現地据付け工事を担当するとともに、その後のRO膜装置の安定稼働に貢献してきた。

一方、現行設備はCsしか除去していないことから、主にSr（ストロンチウム）を対象とする除去技術を開発することにした。震災直後の原子炉冷却における海水注入や海

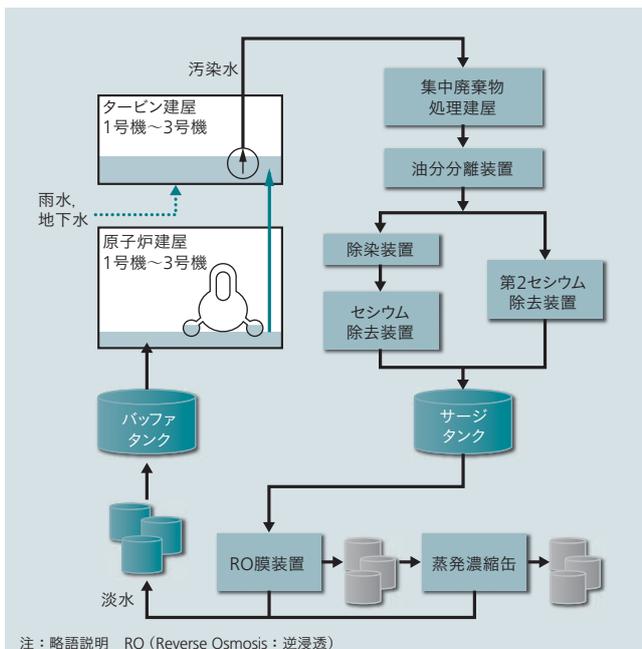


図11 | 高レベル放射性汚染水の処理設備

津波や炉心冷却水などの流入により原子炉建屋やタービン建屋などに滞留した高レベル放射性汚染水を処理し、原子炉に残留する核燃料物質の崩壊熱を除去するための原子炉注水に再利用している（2011年6月27日に稼働開始）。

水を含んだ地下水の建屋への流入により、福島の汚染水には、海水由来の非放射性Srが放射性Srに比べ桁違いに高濃度で含まれている（海水中のSr濃度は約8 ppm）。このためSr除去に利用する吸着剤には、海水由来のSrまで吸着可能とする高い吸着容量が必要となる。

5.1 Cs・Sr同時吸着剤の開発

日立GEニュークリア・エナジー株式会社と日立研究所は福島の汚染水に適用可能な高いSr吸着容量を持つCs・Sr同時吸着剤を開発した⁷⁾。

CsとSrはそれぞれアルカリ金属とアルカリ土類金属に属し、水溶液中でのイオン価数やイオン半径が異なっている。このため従来はCsとSrの両者を除去するためにCs選択吸着剤とSr選択吸着剤という2種類の吸着剤を用いる必要があった。この吸着剤を用いれば1種類の吸着剤で済み、除去設備の簡素化が可能となる。

以下では、この開発品の吸着容量をCs選択吸着剤やSr選択吸着剤と比較するため、一例として分配係数（ K_d ）について記す。

人工海水にCs-137やSr-85を添加した溶液に吸着剤を浸漬し、以下の式を用いて K_d を求めた。

$$K_d = \frac{C_0 - C_t}{C_t} \times \frac{V}{m}$$

この数式では、 C_0 は浸漬前の溶液中のCs-137濃度、 C_t は1週間浸漬後の溶液中のCs-137濃度、 V は試験溶液体積、 m は吸着剤重量である。したがって、 K_d が高いほど吸着容量が高いことを意味する。

この開発品、Cs選択吸着剤およびSr選択吸着剤の K_d をグラフに示す（図12参照）。この開発品以外のデータは日本原子力学会有志チームの報告値⁸⁾である。同図の横軸

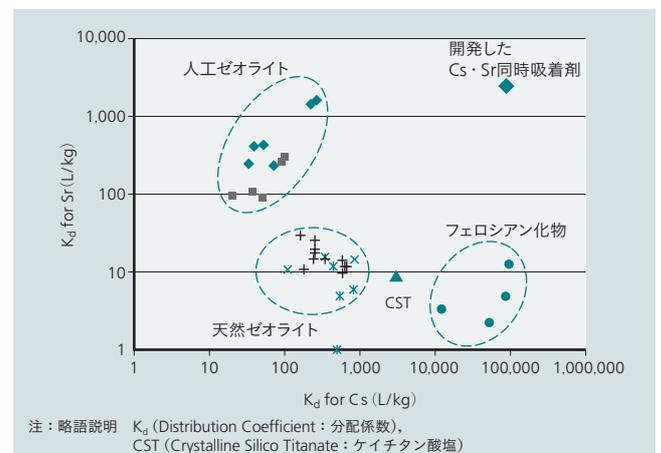


図12 | 開発したCs・Sr同時吸着剤の性能

模擬海水に核種を添加して測定された分配係数 K_d の図を示す。横軸はCs（セシウム）、縦軸はSr（ストロンチウム）に対する K_d を表しており、 K_d が高いほどそれぞれの吸着能力が高い。比較のため代表的な吸着剤についても表示している。

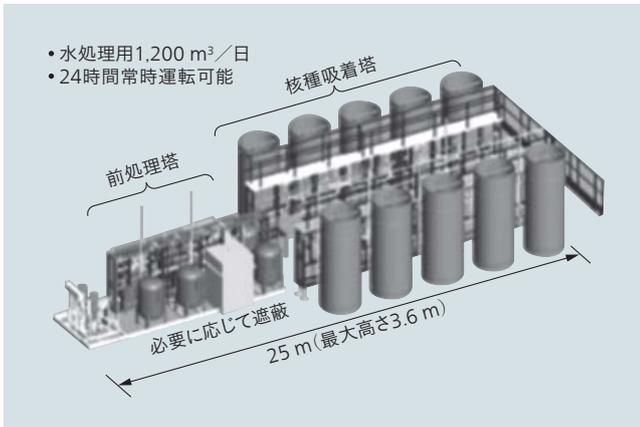


図13 | サブドレン水浄化システム

汚染水に含まれている核種に応じてさまざまな吸着剤を利用できるように複数の吸着塔を設置している。開発したCs・Sr同時吸着剤の採用ならびに前処理設備（土砂などの粒子やコロイドを除去するフィルタ）を工夫したことで吸着塔の少ないコンパクトな核種除去システムを構築できた（2014年9月に稼働予定）。

はCs、縦軸はSrに対する K_d を表している。吸着剤を構成する化合物や形状により、吸着剤の K_d は吸着剤ごとに固有の値となる。この開発品の K_d は、CsとSrの両者に対して高い値を示し、Cs・Sr同時吸着剤として利用できる。

5.2 汚染水処理システムの開発

汚染水処理へのCs・Sr同時吸着剤の適用例としてサブドレン水浄化システムについて述べる。

建屋周囲に設置されているサブドレン水にはCsやSrのほかアンチモン（Sb-125）が確認されている。このほかに、サブドレン水に含まれる可能性のある放射性核種が除去対象に追加されても対応可能なように、この開発品を含め、複数の吸着剤を用いたシステムを採用している（図13参照）。また、吸着剤以外の特徴として前処理設備に通常のろ過フィルタのほかにコロイド除去可能なフィルタを採用したことが特徴である。この設備により、サブドレン水の核種濃度を、排水中の核種濃度限度以下とすることができる。ここで述べたサブドレン水浄化設備と、既存設備の安定稼働維持を通じて、福島第一原子力発電所の汚染水処理に貢献していく。

6. おわりに

ここでは、除染活動に必要な不可欠な放射線計測技術、除染計画支援技術、遠隔除染装置として開発したガンマカメラ、D-phod, RaF-MAP, およびArounderを紹介した。これらの技術は、除染前の汚染状況の正確な把握、除染すべき箇所を選定、遠隔除染作業、除染後の除染効果確認に至る除染活動の高効率化、高精度化に大きく寄与するものと期待される。また、福島第一原子力発電所における遠隔技術として、調査用モニタリングロボットシステム、双腕

重機型ロボットの開発を行い、建屋内調査からがれき撤去といった環境改善作業への対応準備を進めてきた。

さらに、汚染水処理技術開発としてCs・Sr同時吸着剤と汚染水処理システムについて開発を進めてきた。

今後は、これまで開発した技術の福島第一原子力発電所への適用を進めるとともに、復興に向けた対応を継続していく。

参考文献など

- 1) 上野, 外: ガンマ線強度分布を可視化するガンマカメラの開発, 日立評論, 95, 6-7, 472~478 (2013.7)
- 2) Gamo H., et al.: Development of a PSF-detector for contaminated areas, Prog. Nucl. Sci. & Tech. (to be published)
- 3) Takahashi T., et al.: Development of a new simulation software system to evaluate radiation doses and facilitate decontamination tasks in reactor buildings, Prog. Nucl. Sci. & Tech. (to be published)
- 4) 日立GEニュークリア・エナジー株式会社, ニュースリリース, 高圧水による遠隔除染装置「Arounder」を開発 (2013.3)
<http://www.hitachi-hgne.co.jp/news/2013/20130308.html>
- 5) 日立ニュースリリース, ネットワークロボット技術を活用した「調査モニタリングシステム」を開発 (2013.2)
<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2013/02/0218a.html>
- 6) 株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービス, ニュースリリース, 原子力災害対応用小型双腕重機型ロボット「ASTACO-SoRa」を開発 (2012.12)
http://www.hitachi-hes.com/news/data/news20121207_ASTACO-Sora.pdf
- 7) 日立ニュースリリース, 放射性セシウムと放射性ストロンチウムを99%以上同時に除去できる吸着剤を開発 (2013.4)
<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2013/04/0404.html>
- 8) 日本原子力学会バックエンド部会: 福島第一原子力発電所内汚染水処理技術のための基礎データ収集, <http://www.nuce-aesj.org/projects/clwt:start>

執筆者紹介



木下 博文

1984年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 チーフプロジェクトマネージャ
現在, 福島第一原子力発電所の廃炉に関わる研究開発に従事



田山 隆一

1985年日立エンジニアリング入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力プラント部 プラント総合計画グループ 所属
現在, 原子力発電所の遮蔽設計業務に従事
博士(工学)
日本原子力学会会員(放射線工学部会運営委員)



米谷 豊

1990年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力設計部 原子力メンテナンス機器設計グループ 所属
現在, 福島第一原子力発電所への遠隔機器適用に関する設計業務に従事



浅野 隆

1988年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 燃料サイクル部 所属
現在, 福島第一原子力発電所の水処理設備の開発に従事
日本原子力学会会員



小見 祐子

1999年日立製作所入社, 日立研究所 エネルギー環境研究センター 原子力システム研究部 所属
現在, 福島第一原子力発電所の水処理設備の開発に従事
理学博士
日本原子力学会会員, 米国原子力学会, 日本化学会会員, 放射化学会会員