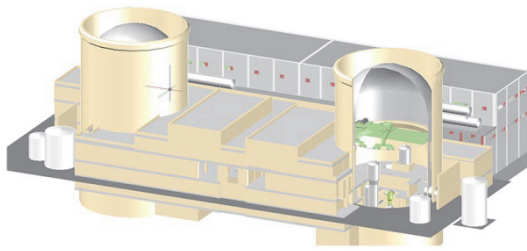


原子力施設の合理的な廃止措置へ向けた取組み

Activities to Rational Decommissioning for Nuclear Facilities



谷内 俊範^{*1}
Toshinori Taniuchi

谷口 優^{*2}
Masaru Taniguchi

小室 敏也^{*3}
Toshiya Komuro

黒川 登^{*3}
Noboru Kurokawa

新田 義一^{*4}
Yoshikazu Nitta

勝部 隼也^{*1}
Toshiya Katsube

三菱重工業(株)は、加圧水型原子力発電所を始めとする各種原子力施設の建設、保守を通して得られた経験を基に、長年にわたって商業用原子力発電施設を中心とした原子炉等の廃止措置に関わる技術開発に取り組んできている。廃止措置に必要な技術としては、計画段階でのシステムエンジニアリング・残存放射能評価技術、本格工事段階での除染・解体技術ならびに発生する廃棄物に対して必要となる廃棄体化(放射性廃棄物を埋設処分するために容器に固化化する等の処理をすること)・放射能測定技術の各技術があり、本報では、これらの各技術に対する最新の取組状況を紹介する。

1. はじめに

三菱重工業(株)(以下、当社)における廃止措置に関する技術は、PWR(加圧水型軽水炉: Pressurized Water Reactor)モデルプラントを対象にした廃止措置の検討を1979年に実施したことを始めとして、現在までハード、ソフト両面の技術について電力会社との共同研究、(旧)(財)原子力発電技術機構、(財)エネルギー総合工学研究所、及び(国研)日本原子力研究開発機構などの機関からの委託研究及び当社の社内研究により開発を進めてきている⁽¹⁾⁽²⁾。本報では、各技術を使用した、軽水炉の合理的な廃止措置への当社の取組み状況について述べる。

2. 廃止措置における当社の取組み

日本の廃止措置の計画は、“解体準備期間”、“原子炉周辺設備解体撤去期間”、“原子炉領域解体撤去期間”、“建屋等解体撤去期間”の4段階に主に大別され、概ね30～40年程度の期間を有する状況(図1)となっている。

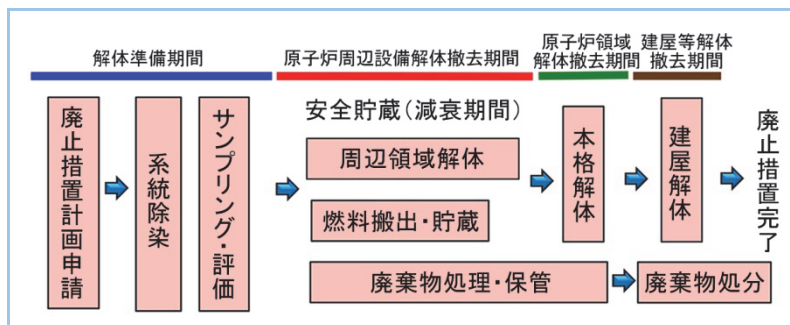


図1 廃止措置の計画工程の例

*1 原子力セグメントデコミプロジェクト室

*2 原子力セグメントデコミプロジェクト室 室長

*3 原子力セグメントデコミプロジェクト室 主席技師

*4 原子力セグメントデコミプロジェクト室 主席プロジェクト統括

当社としては、解体準備～建屋解体の各段階における合理的かつ確実な廃止措置にあたり、必要な技術(図2)を用いて支援しており、以下にその概要を紹介する。



図2 原子力施設の廃止措置に求められる技術

2.1 放射能評価技術

2.1.1 放射能インベントリの評価

廃止措置計画の策定に当たっては機器に残存する放射能濃度(放射能インベントリ)を適切に評価する必要がある。放射能インベントリは、放射化によるものと二次的な接液汚染によるものがあるが、本章では、至近の取組みである3次元中性子輸送計算コード(MCNP コード)を用いた放射化評価手法を示す⁽³⁾。

廃止措置にあたり、放射能濃度を詳細に評価し、放射能濃度から処分区分を精度良く把握することによって、処分費用の低減につなげることができる。現状の許認可評価では2次元中性子輸送計算コードに基づく評価を実施しているが、2次元コードを使用する場合、複雑形状部位は評価モデルを単純化させ保守性を持たせることが必要となる。一方で、3次元中性子輸送計算コードを使用する場合は、実機プラント構造を詳細にモデル化した評価が可能となるが、中性子束の変化が大きい巨大な体系を計算する場合は、計算時間を要するという課題がある。

この課題に対しては、評価対象の領域に対して適切なモデルにより効率よく計算することで、従来1週間以上要していた計算を、数時間で計算することが可能となった。

原子炉容器(Reactor Vessel, 以下 RV)内上部炉内構造物の中性子束評価、及び主要な放射化核種である Co-60 の放射能濃度の3次元計算結果を2次元コードによる計算結果と比較すると、図3に示すとおり、3次元評価の方が放射化範囲をより合理的に評価できていることが確認された。

現在、評価対象領域を原子炉格納容器内に展開済みであり、計算結果と炉内外のサンプリングにより得られる分析値とを比較することによる検証を実施中である。次項にてサンプリングについて紹介する。

2.1.2 サンプリングによる評価の精緻化⁽⁴⁾

原子力規制委員会の定めた“発電用原子炉施設及び研究用等原子炉施設の廃止措置計画の審査基準”に基づき、計算結果、測定結果等により放射能濃度分布を適切に評価する必要がある。そこで、実機より採取したサンプルの分析結果等を用いて炉内の放射能濃度分布を

評価するため、放射能濃度の高い L1/L2^(注1)領域について炉内サンプリングを実施している。放射能濃度評価に係る一連の検討フローを図4に示す。

(注1) L1: 低レベル廃棄物のうち、比較的放射能レベルの高いもの、L2: 低レベル廃棄物のうち、放射能レベルの低いもの。更に低レベルの区分として、L3、クリアランスレベルがある。

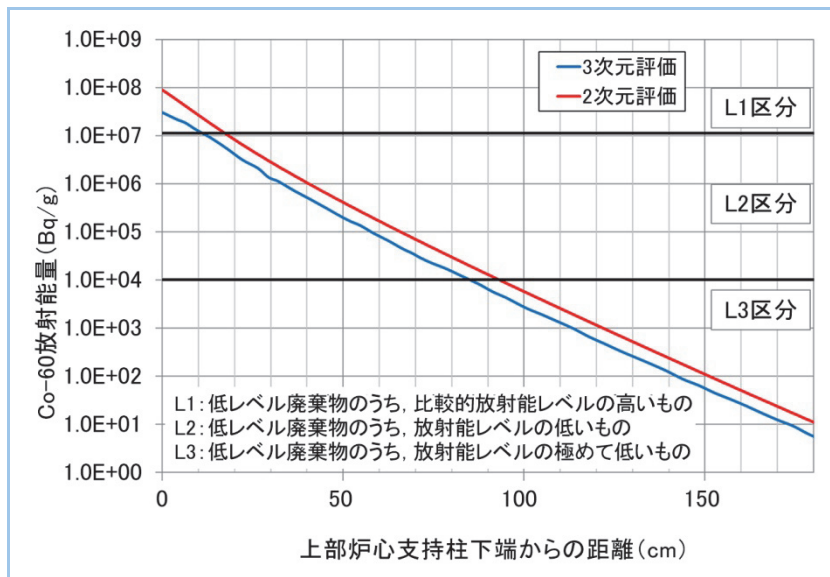


図3 放射能インベントリの評価結果

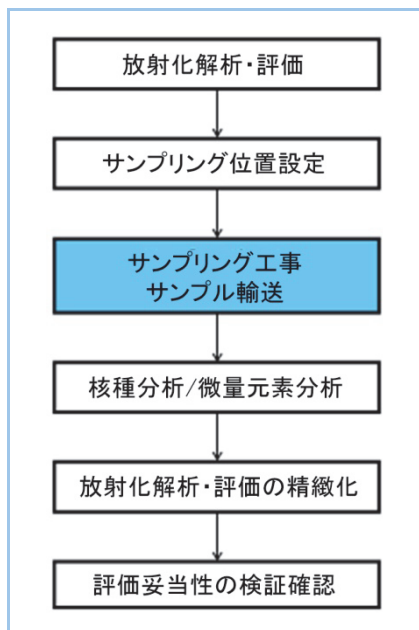


図4 残存放射能濃度の評価フロー

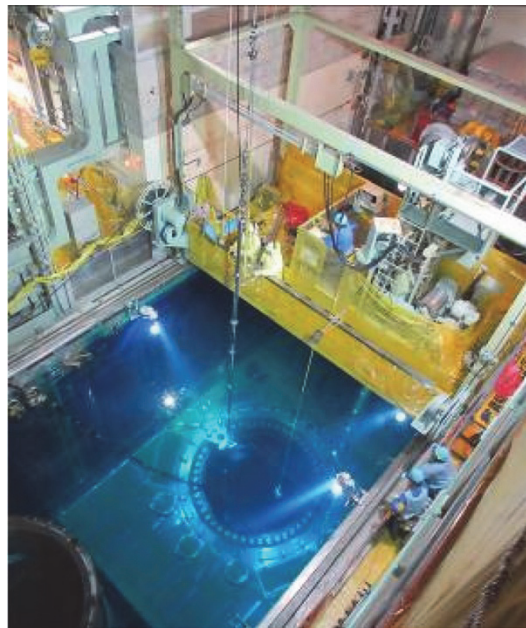


図5 美浜発電所第1号機でのサンプリング状況

関西電力(株)美浜発電所第1, 2号機(2018年9月に2号機, 同年11月に1号機), 九州電力(株)玄海原子力発電所第1号機(2019年3~4月), 及び四国電力(株)伊方発電所第1号機(2019年10~11月)において炉内サンプリング工事を実施した。ここでは、国内初となったPWRのRV内サンプリング工事(美浜発電所第1, 2号機)について概要を報告する(図5)。

RV内からのサンプリングは、放射化評価の放射能濃度に影響を与えるパラメータである中性子束、元素組成、放射化断面積及び照射履歴を考慮して位置や数を決定しており、美浜発電所第2号機においては、L1/L2領域から12サンプルを採取している。

美浜発電所第2号機からのサンプル分析結果に基づき、放射能濃度評価方法を確立し、後続プラントについては、同評価手法を用いることにより、サンプリング数量の合理化を図り、6サンプルに低減することができている(図6)。

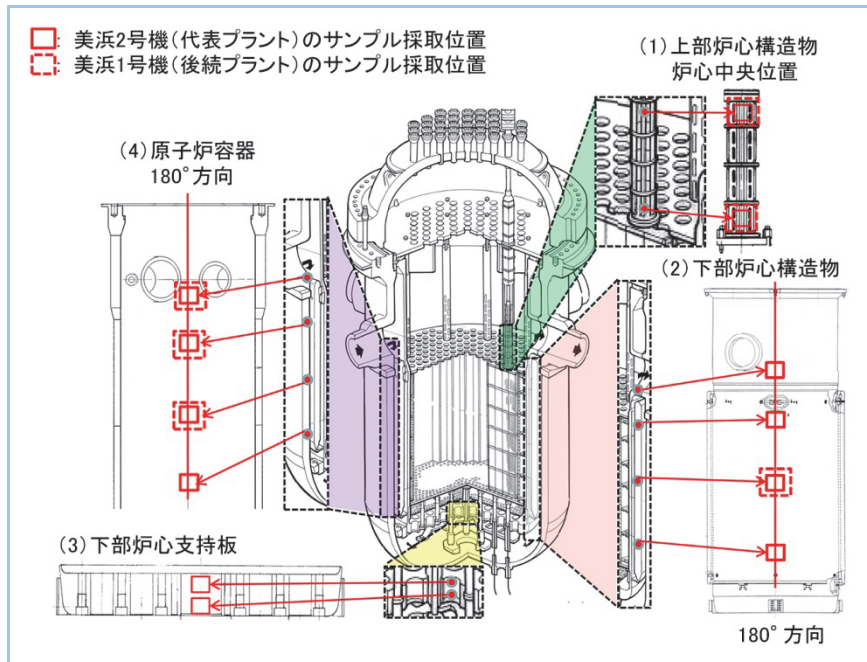


図6 美浜発電所第1/2号機のサンプル採取位置

(1) サンプルング装置の概要

サンプルング工法は、①材質（SUS・低合金鋼）を問わずに加工が可能であること、②機械加工に比べて切削反力が少なく小型化が可能であること、③過去の保全工事において実績のある技術であり信頼性が高いこと、を考慮して放電加工を選定した。また、装置の位置決め、ハンドリングにあたっては、現地での作業性と遠隔での位置決めを考慮し、連結ポールを組み上げて位置決めする構成とした。

なお、前述したサンプル数量の低減に加え、サンプルング装置を各発電所間で持ち回ることにより、発電所ごとの装置費用を抑える取組みを実施している。

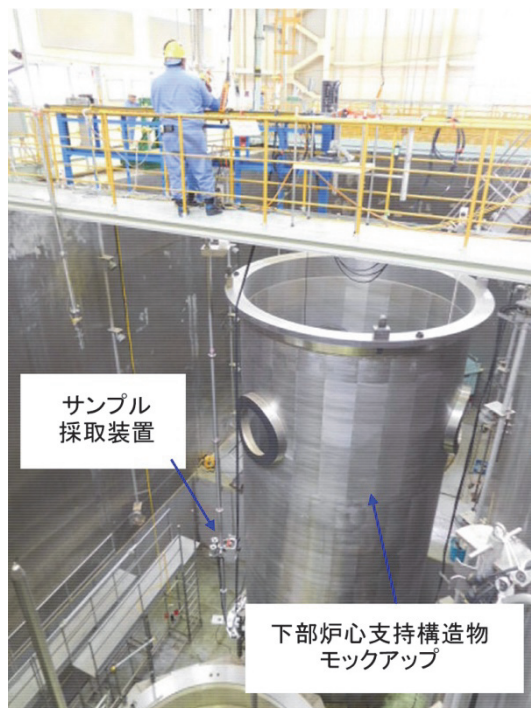


図7 炉内サンプルング工事のモックアップトレーニング状況

(2) サンプルング工事の事前準備

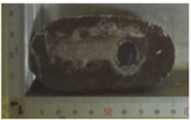
サンプルング工事へ向けた事前準備として、当社の所有する総合保全訓練センターにて、サ

サンプル採取装置のモックアップを用いた検証、実機を模擬した設備でのトレーニングを実施している。特に、装置は、10mを超える長尺物のポールを扱い、水中カメラにて確認しながらの設置が必要となることから、実物大のモックアップを用いてトレーニングした。図7にトレーニング状況を示す。

(3) サンプリング工事の結果

RV 内のサンプリング工事で採取したサンプルを表1に示す。放射能濃度分布の評価に必要なサンプルを計画通りに採取することができた。これらのサンプルは高放射性物質の輸送容器(A 型輸送容器)に収納した後、サンプルの分析を行うため、当社の関連会社であるニュークリア・デベロップメント(株)へ輸送し、放射性核種の濃度を測定する。

表1 採取したサンプルの寸法と重量(例)

採取機器	試料寸法(mm)			採取試料重量(g)	形状(写真)
	幅	× 長さ	× 厚さ		
原子炉容器	約 30	× 約 90	× 約 20	約 300	
下部炉心構造物	約 25	× 約 50	× 約 5	約 30	
上部炉心構造物	φ 17.5	× 約 120		約 90	
下部炉心支持板	約 30	× 約 60	× 約 5	約 30	

2.2 除染技術⁽⁵⁾

関西電力(株)美浜発電所第1, 2号機(1号機は 2017 年8月, 2号機は 11 月下旬~12 月下旬)及び九州電力(株)玄海原子力発電所第1号機(2018 年6~7月)において系統除染工事を実施した。ここでは、美浜発電所第1, 2号機の系統除染工事の概要を報告する。

系統除染工事は、系統中に循環させた薬品による化学的作用を利用して、機器の内表面に付着した放射性物質を除去する工事であり、将来の機器解体時の作業環境改善(作業員の被ばく低減)、放射性廃棄物の放射能レベルの低減のために廃止措置第1段階(解体準備段階)で実施した。

2.2.1 系統除染工事の計画

(1) 系統除染範囲

放射性物質は1次冷却材に接液する機器の内表面に多く残存しているため、系統除染工事の対象範囲は、運転期間中に1次冷却材が主に循環する原子炉冷却系統、化学体積制御系統、余熱除去系統とした(図8)。

系統除染範囲の容積及び表面積を表2に示す。表2に示すように系統除染範囲の表面積は、約 80%をニッケル基合金が占めており、このニッケル基合金の殆どは蒸気発生器(Steam Generator, 以降 SG)伝熱管である。そのため、PWR での系統除染工事は、SG 伝熱管の除染効果を考慮した工法選定が必要となる。しかし、ニッケル基合金はクロムやニッケルを多く含有しており、他の金属材料(ステンレス鋼等)と比較して、除染効果が得難い材料である。美浜発電所第1, 2号機の SG 伝熱管に使用されている 690 系ニッケル基合金に対する系統除染工事は、世界初の化学除染であった。

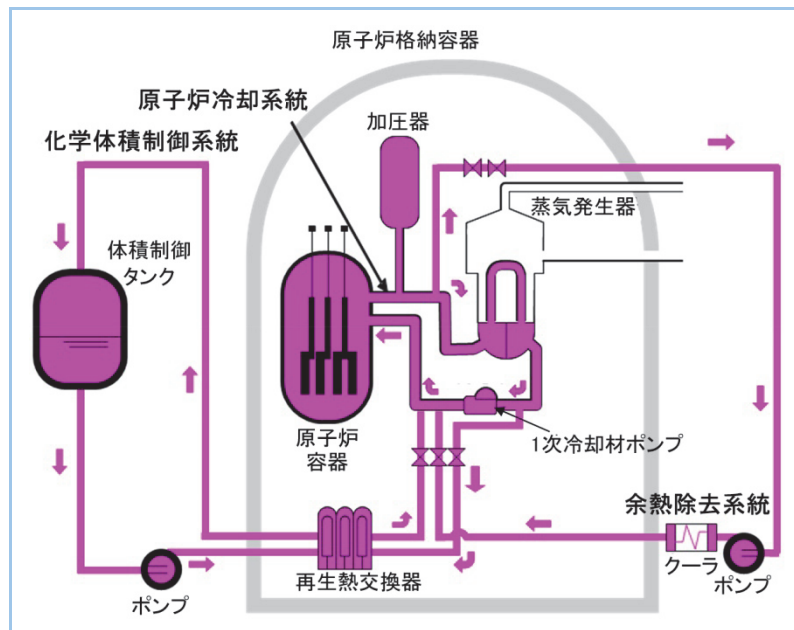


図8 システム除染範囲

表2 美浜発電所第1/2号機のシステム除染範囲の容積並びにステンレス鋼とNi基合金の表面積

プラント	容積 [m ³]	表面積 [m ²]	
		ステンレス鋼	Ni 基合金
美浜1号機	約 180	約 1470	約 6250
美浜2号機	約 220	約 1930	約 8080

(2) システム除染工法

システム除染範囲の面積の約80%を占めるSG伝熱管の除染効果が期待できること、除染による二次廃棄物量が少ないこと、除染で使用する薬品等が発電所内の設備で処理できること等を考慮して、美浜発電所第1,2号機のシステム除染工事では、海外でのPWRプラントに対するシステム除染工事において豊富な実績を持つFramatome社のCORD法(Chemical Oxidation Reduction Decontamination)を採用した。

CORD法では、①酸化工程、②除染工程、③分解工程、④浄化工程を1サイクルとし、複数サイクル繰り返すことで、目標の除染効果を得る。1サイクルの施工期間は約1週間前後である。

(3) システム除染設備

システム除染工事は、プラント設備を有効活用しており、除染液の循環や温度維持、圧力調整等をプラント設備にて実施し、薬品の注入等を仮設設備にて実施する(図9)。

システム除染工事においても、サンプリング工事と同様に工事機材を各発電所間で持ち回ることによる合理化に取り組んでいる。

プラント設備では、1次冷却材ポンプは温度維持のための熱源及び除染液の循環、充てんポンプ周辺設備は1次冷却材ポンプへの封水注入及び除染液の循環、余熱除去系統設備は温度維持のための冷却及び除染液の循環、アキュムレータは圧力制御として使用するが、国内PWRプラントにおけるCORD法でのシステム除染は初めてとなるため、各除染工程における各設備の運転要領やシステム操作要領については、プラントメーカーとしての知見を踏まえて詳細に検討を行い、最適化した。

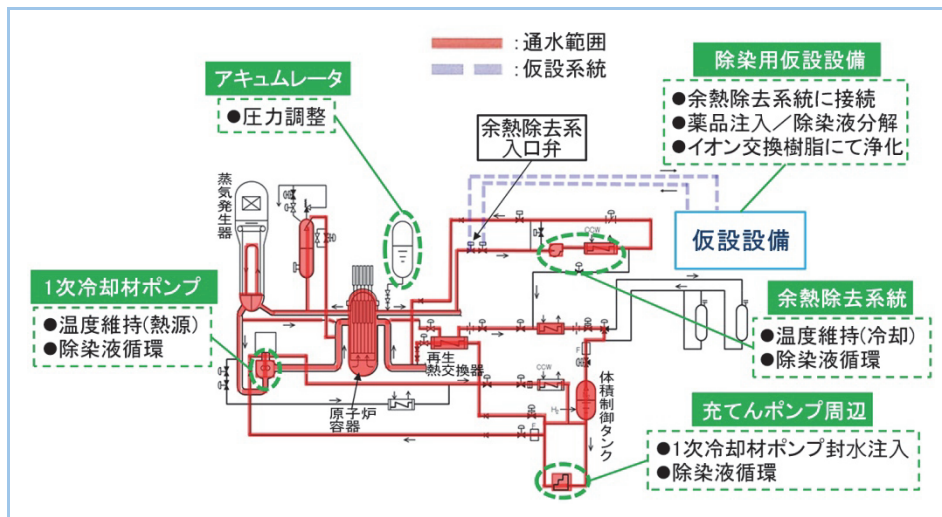


図9 美浜発電所第1/2号における系統除染工事の概要図

2.2.2 系統除染工事の結果

今回の系統除染工事で得られた除染効果を表3に示す。除染効果は、当初の目標であった将来的な機器・配管解体時の作業員被ばくを考慮した除去率 90%以上(除染係数 10 以上)を達成しており、系統除染前の線量当量率が比較的低い1次冷却材系統配管他については0.05mSv/h 以下も達成した。また、今回、世界初の化学除染となる690系ニッケル基合金のSG伝熱管についても、目標の除去率を達成し、線量当量率も系統除染前後で二桁程度低減することができた。

これにより、将来のプラント解体時の作業員の被ばくを大幅に低減できるとともに、解体時に発生する放射性ダストの減少による作業員の内部被ばくのリスク低減にも十分寄与できた。

表3 美浜発電所第1/2号機での系統除染工事における除染効果

部位	美浜1号機			美浜2号機		
	除染係数 ^{*1} 平均値	(参考) 代表部位の線量率 [mSv/h]		除染係数 ^{*1} 平均値	(参考) 代表部位の線量率 [mSv/h]	
		除染前	除染後		除染前	除染後
蒸気発生器伝熱管	89	36	0.43	174	20	0.36
蒸気発生器胴部 ^{*2}	140	0.21	0.001	67	0.11	<0.001
1次冷却材系統配管他	32	1.7	0.025	30	0.7	0.015

※1: 除染係数 = (除染前の機器の表面線量率) / (除染後の機器の表面線量率)

※2: 蒸気発生器胴部自体は除染していないが、蒸気発生器伝熱管の除染により胴部の線量率も低下。

2.3 システムエンジニアリング技術

廃止措置においては、安全に工事を行うことは当然ながら、供用期間中にも増して電力会社の費用負担を低減することが課題であり、廃止措置工事費用並びに廃止措置期間における維持設備の管理費用の低減(解体の合理化、代替設備の設置等)に取り組んでいる。

2.3.1 蒸気発生器の解体合理化による廃棄物保管エリアの創出

発電所で使用し取替えられたSGは発電所構内に保管されているが、保管中のSGを解体・処分することができれば、SG保管庫を廃棄物の一時保管エリアとして利用できる可能性がある。SGは、大型でかつ低レベル廃棄物とクリアランス物が混在しており、合理化に向けてはそれらを分離解体/減容することが望ましい。当社では、SGの解体については多数実績のある海外施設での処理も選択肢の1つとして検討中である。

2.3.2 使用済燃料の冷却停止による海水系維持不要化

プラント設備で冷却を要する機器は、補機冷却海水系(以降、海水系とする)を最終冷却源として維持されていることが大半であるが、廃止措置時の補機冷却については、冷却対象補機

の熱負荷が供用期間中と比較して減少しているため、海水系は過剰な容量となっている。海水系の維持は大規模・広範囲であるため、電力会社の費用負担の観点で合理的に廃止措置を進めるためには、海水系の負荷となっている既設の各機器を、海水冷却を使用しない機器へと代替することにより、海水系を維持不要化することが望ましい。

特に、廃止措置における海水系の主たる冷却対象は使用済燃料の冷却であるが、使用済燃料の熱量に応じて、自然放熱による冷却や、エアフィンクーラを海水系の代替冷却手段として適用することも、当社では選択肢の1つとして検討中である。

2.3.3 廃炉統合盤導入による維持費用低減

廃止措置では供用期間中と比較し、長期の廃止措置期間中に段階的に維持すべき機能が縮小していくという特徴がある。

しかしながら、各制御盤に、維持機能が散在し、高経年化するという状況にあるため、建屋解体などの廃止措置の進展に対応して、散在する維持機能を集約した計装制御統合盤の適用を検討している。

2.4 解体技術

放射線量が高い炉内構造物、原子炉容器、生体遮蔽等解体作業においては、従事者の被ばく防止の観点から遠隔での操作が基本となる。これらの遠隔操作を効率的に実施するためには、高度な作業機能を備えた遠隔装置(ロボット)が必要となる。

当社では、PWR プラントの保全工事(管台内面肉溶接、管台内面溶接部残留応力改善、他検査作業等)にて、マニピュレータ(図 10)を用いた多数の遠隔作業実績があり、これらの実績を基に、廃止措置で高放射線量機器の解体に取り組んでいく予定である。

また、当社では機器解体に重要な切断技術についても、廃止措置に向けての適用性の確認を行っており、実工事に向けては、これらの熱的/機械的切断技術を主とした切断技術を適宜、組合せて合理的な解体を行うことを考えている。

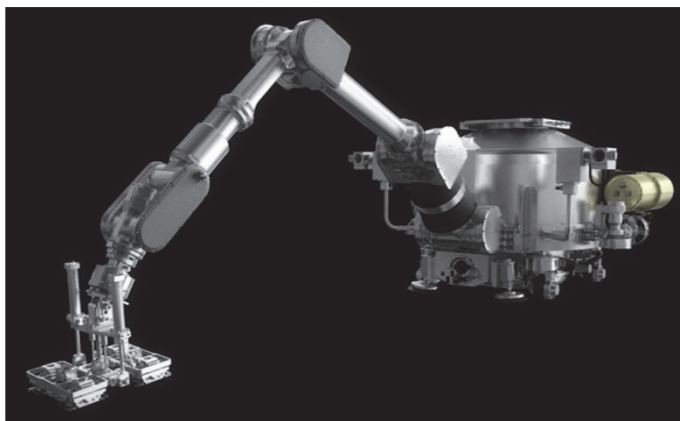


図 10 遠隔装置のマニピュレータ例

2.5 廃棄物処理技術

廃止措置で発生した放射性廃棄物は、その放射能濃度に基づき、L1, L2, L3 に区分のうえ処分される。この内、L1, L2 廃棄物については、1.6m×1.6m×1.6m程度の角型処分容器に収納し、砂もしくはモルタルで固定化のうえ、蓋を設置し、検査したうえで処分場に搬出されることが一例として考えられている。これらの一連の作業を行う設備は、現時点ではいずれの原子力発電所にもないことから、各設備解体時には考慮しておく必要がある。

当社では、廃棄物処理/廃棄体化に係るフロー並びに本設備の概念を検討するとともに、ボルトによる蓋の遠隔締付け等の技術の確立を図り、合理的な廃棄物処理/廃棄体化設備の設置に向けた準備を進めている(図 11, 図 12)。

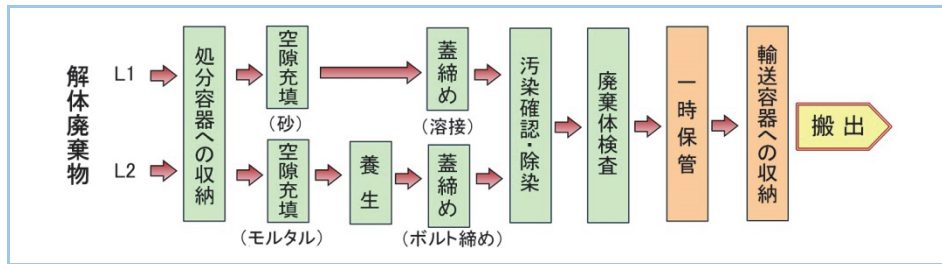


図 11 低レベル放射性廃棄物 廃棄体化処理の手順

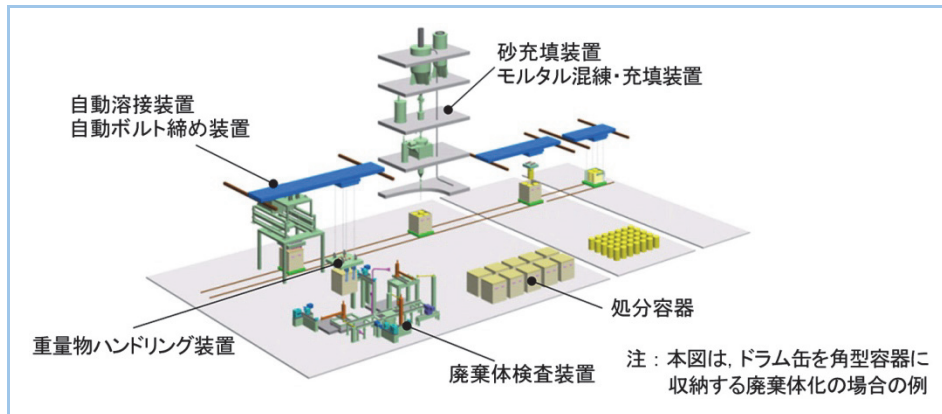


図 12 低レベル放射性廃棄物 廃棄体化処理設備イメージ

2.6 放射線測定技術

放射性廃棄物を最終処分するためには廃棄物中に含有される放射性核種の濃度を測定し、これが基準を下回ることを確認する必要がある。確認が必要か、あるいは、必要になると想定される核種は、廃棄物の種類ごと(発電所廃棄物、クリアランス廃棄物)で異なっているが、何れの廃棄物も直接測定できる核種と直接測定が困難な核種がある。測定装置が目指すべきものは、適切な時間で良好な精度にて直接測定できる核種の濃度を得ることにある。

放射能濃度が極めて低く、放射性物質として扱う必要のない廃棄物を一般産業廃棄物と同様に扱えるようにするクリアランスの仕組みが 2005 年度に制度化されたが、当社は、1999 年以来、クリアランスを判断するために、自然界より低いレベルの放射線を測定する装置を開発し、その開発成果を基にトレイ型とボックス型のクリアランス専用測定装置を製品化してきた。トレイ型装置と比較して多量の廃棄物の測定に適し、効率的にクリアランスを判断できるボックス型装置の外観を図 13 に示す。

放射性廃棄物量低減の観点からクリアランスレベル測定装置を始めとした放射能測定装置の各廃止措置プラントへの適用を提案していく。



図 13 ボックス型のクリアランスレベル測定装置外観

3. まとめ

以上のように、当社は、関係各位のご指導、ご協力を頂きながら、軽水炉の廃止措置に総合的に取り組んできた。今後も、PWR メーカーとしての経験を活かして、電力会社並びにその関係会社とも協調を図り、安全かつ合理的な廃止措置推進に取り組んでいく考えである。

参考文献

- (1) 小室敏也ほか、三菱重工業の原子炉廃止措置技術、デコミッショニング技報 No.49 2014
- (2) 小室敏也ほか、三菱重工業の原子力施設廃止措置に対する取り組み、デコミッショニング技報 No.60 2019
- (3) 廣本和朗ほか、PWR プラントの3次元炉内放射化評価手法の開発(1)、日本原子力学会 2017 年秋の大会
- (4) 永田亮ほか、PWR 廃止措置における炉内サンプリング工事について、保全学会 第 16 回学術講演 2019 年7月
- (5) 沖村浩司ほか、国内初の PWR 廃止措置系統除染工事について、保全学会 第 15 回学術講演 2018 年7月