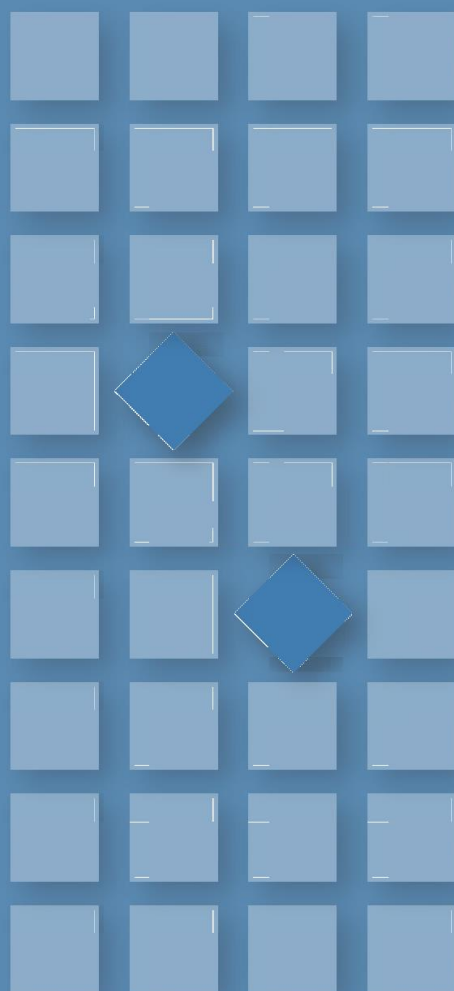


厚生労働省委託事業

「東電福島第一原発廃炉等作業における被ばく低減対策の強化事業」

放射線管理計画等 作成者用テキスト

【第9版】



令和5年11月

放射線管理計画書等作成者用テキスト

はじめに	1
1. 作業場所の放射線環境の測定・評価に関する知識	2
(1) 放射線の単位	2
(2) 被ばく防護の原則	3
(3) 放射線環境の測定・評価の方法	4
(4) 線源位置の測定	11
(5) ガンマ線の遮へい効果推定のための事前測定	12
(6) 遮へい効果の算定方法	14
2. 無人化工法や遠隔操作による工法に関する知識	18
(1) 無人化工法や遠隔操作に関する基礎知識	18
(2) 遠隔操作ロボットの基礎知識	24
(3) 無人化・遠隔操作ロボットの例	25
(4) 福島第一原子力発電所で活用されたロボット	26
(5) 遠隔操作機器の耐放射線性	33
(6) 遠隔操作機器の開発	34
3. 作業開始前の高線量箇所の除染等（線源除去）に関する知識	35
(1) 移動・回収が可能な線源となっている物品・機器	35
(2) 分離切断が可能な線源となっている機器・部位	36
(3) 除染による線源の除去	38
(4) 汚染の固定による線源の飛散防止	40
4. 高線量箇所（線源）から作業場所までの離隔距離確保、及び作業時間短縮の方法	41
(1) 離隔距離確保のための検討事項	41
(2) 作業時間短縮のための検討事項	41
5. 高線量箇所（線源）に対する遮へい工事に関する知識	45
(1) 遮へいに関する基礎知識	45
(2) ガンマ線の遮へい計画での考慮点	47
(3) ベータ線の遮へい計画での考慮点	48
(4) 遮へい設置方法	49
(5) 作業場所の遮へい設置例	51
6. 休憩所等の整備	52
(1) 休憩所の設定	52
(2) 熱中症予防に関する基礎知識	53
7. 休憩場所から作業場所への移動動線の設定に関する知識	57
(1) 1Fサイト内運用区分管理状況	57
(2) 各エリアと装備交換所の設置箇所	58
(3) 運用区分管理の基本事項	59
(4) 各エリアの防護装備	59
8. 労働者の集団線量及び個人線量に係る計画線量の設定に関する知識	60
(1) 個人被ばく線量の管理	60
(2) 個人線量に係る計画線量の設定	65
(3) 労働者の集団計画線量設定	67
9. 内部被ばくの防止	77
10. まとめ	91
参考資料	92
(1) 化学防護服の分類	92
(2) 発生源となる設備・場所の密閉・囲い込みに関する基礎知識	93
(3) 汚染拡散防止、汚染防護対策に関する知識	95
本テキストにおける用語の定義	97

はじめに

東京電力福島第一原子力発電所における廃炉作業等を着実に進めるに際して、作業に従事する労働者の安全と健康を確保するため、合理的に達成可能な被ばく低減対策を立案し確実に実施されるよう、厚生労働省は「東京電力福島第一原子力発電所における安全衛生管理対策のためのガイドライン」（平成27年8月26日付け基発0826第1号）を制定しています。

これは、国際放射線防護委員会（ICRP）の1977年勧告、「すべての被ばくは社会的、経済的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能な限り低く抑えるべきである（As Low As Reasonably achievable: ALARA）」の基本原則に基づいたものです。

そのため、工事の計画段階からの効果的な被ばく低減対策を立案するため、以下の事項に関する知識や考え方を理解しておくことが必要です。

- ①無人化や遠隔操作による工法の促進
- ②作業開始前の高線量箇所の除染等（線源の除去）の実施
- ③高線量箇所（線源）から作業場所の離隔距離の確保、作業時間の短縮
- ④高線量箇所（線源）に対する遮へい工事
- ⑤休憩所等の整備
- ⑥休憩所等から作業場所への移動動線（時間）の最短化

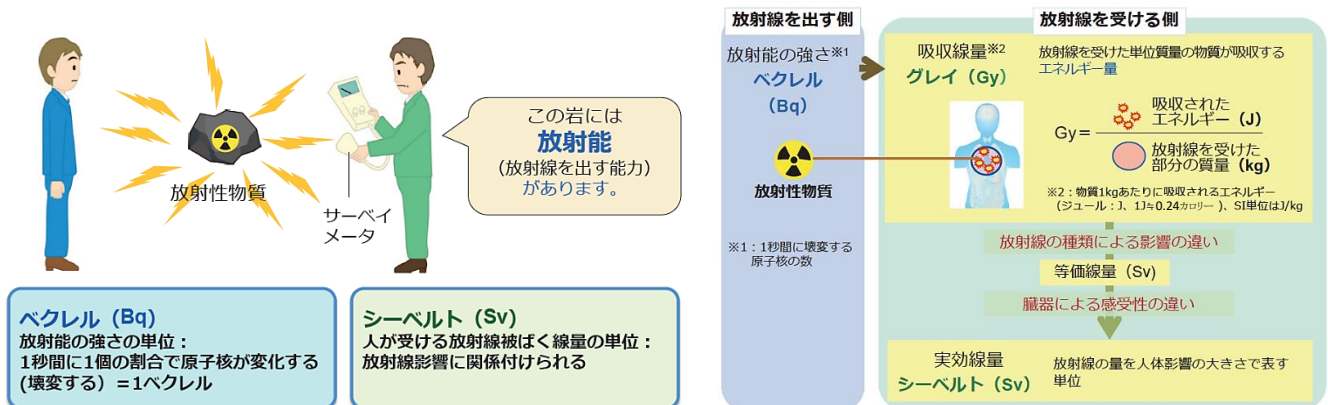
東京電力側でも、施工計画を立案する際には工学的な対策（遠隔操作・遮へい設置・線源除去等の物理的な低減対策）、管理的な対策（作業手順・教育訓練・時間管理、低線量エリア管理等の運用面での低減措置）を検討する方針です。

本テキストは、厚生労働省「東京電力福島第一原子力発電所における安全衛生管理対策のためのガイドライン」に基づき、現場での被ばく低減対策を含む作業計画の作成時に参照できるように、これまでの経験、知見等を踏まえ、必要な情報をまとめたものです。

作業場所の放射線環境の測定・評価に関する知識

(1) 放射線の単位

放射能の単位はベクレル (Bq) です。下図に示すように放射性核種が1秒間に何個、他の原子核に変わる (崩壊、あるいは壊変という) 能力を表します。似た言葉に放射性物質があります。たとえば、放射能は能力ですので「放射性物質2kgの放射能は100ベクレル (Bq) で、その濃度は50Bq/kgですと」のように使います。「放射能で汚染した」、「放射能が漏れた」との使い方は正しくありません。「放射性物質が漏れた。漏れた放射性物質の放射能は100Bqです」というのが正確な使い方です。



出典：環境省「放射線による健康影響等に関する統一した基礎資料（平成29年度版）」より

放射性物質から周囲に放射するのが放射線です。放射線にはアルファ (α) 線、ベータ (β) 線、ガンマ (γ) 線等があります。透過力が強く外部被ばくの主な原因になるのはガンマ線です。

被ばくに関する放射線の単位をまとめると下表になります。大きく分けると物質が放射線を受けて吸収したエネルギーを表す吸収線量と人体への影響を表す等価線量及び実効線量です。吸収線量は人でも物でも使われる物理量ですが、実効線量は人のガンや遺伝的影響等の確率的影響を表すための単位です。詳細は、60ページの解説A「実効線量」を参照ください。

	単 位	定 義
放射能の単位		
	ベクレル Bq	原子核が1秒間に壊変する数 (個/秒)
被ばくに関する単位	吸収線量 グレイ Gy	物質が放射線を浴びて吸収するエネルギー量。 1kg当たり1ジュール (J) のエネルギーを吸収すると1Gy
	等価線量 シーベルト Sv	組織・臓器の被ばく影響を評価するための組織、臓器ごとの線量。 等価線量=吸収線量×放射線加重係数
	実効線量 シーベルト Sv	臓器、組織の等価線量に組織の違いによる組織加重係数を乗じ合算した値。人体全体に対するガン等の確率的影響を評価するための線量 実効線量=Σ (等価線量×組織加重係数)

(2) 被ばく防護の原則

外部被ばくの低減

外部被ばくを少なくするためには、以下の被ばく防護の4原則を知っておくことが大切です。

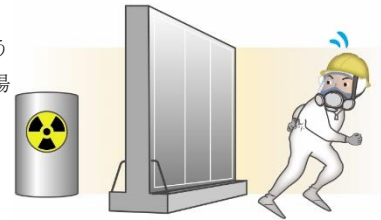
原則1 放射線源を除去する

線源になっている物を移動したり、配管内部の線源を洗い流す（フラッシング）ことです。



原則2 放射線源から距離をとる

線源から少しでも離れ、不必要に近づかないようにすることです（待機場所も知っておくこと）。



原則3 遮へいをする

線源となる機器、配管等を鉛毛マットや鉛板等の遮へい材でおおうことです。



原則4 作業時間を短くする

作業前の打ち合わせや工具の点検等事前の準備を十分にして、作業をスムーズに進めることです。



内部被ばくの防止

内部被ばくを少なくするためには、以下の被ばく防護の3原則を知っておくことが大切です。

原則1 汚染源を封じ込める

- ① 隔離前室、隔離扉等の設置
隔離機能（バウンダリー）を維持して、負圧管理をする。
- ② 汚染物の対応
汚染物の梱包、容器封入する。

前室
防護服等の脱衣



原則3 体内に取り込まない

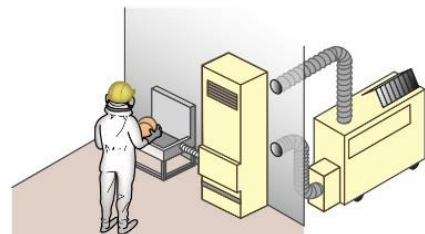
- ① 保護具等を着用する
決められた装備を着用し、呼吸用保護具は漏れが無いよう正しく装着する。
- ② 身体汚染の防止
防護具（マスク、防護服、手袋等）を身体または下着等に付着させないように脱着する。
- ③ 退域する
けがをしたら迅速に非汚染区域へ退域する。

手袋・タイバックを脱ぐ

原則2 汚染を拡大させない

- ① 汚染区域を明確にする
汚染区域を明確に区画し、作業員と物品の出入りの管理をする。
- ② 機材を活用する

粉じんが舞い上がる作業では、仮設ハウスやフィルタ付局所排風機を活用する。区域境界で、身体または下着等に汚染が付着していないことを体表面モニタ等で汚染検査する。



(3) 放射線環境の測定・評価の方法

外部被ばくを低減化させるためには、あらかじめ作業環境の放射線を測定し、作業に伴う個人線量を予測する必要があります。一般的には、外部被ばくに係る個人線量は下記の式で予測できます。

$$\text{予測個人線量 (mSv)} = \text{平均空間線量当量率 (mSv/h)} \times \text{滞在時間 (h)} \times \text{個人線量換算係数}$$

個人線量換算係数は、空間線量当量を個人線量に換算するための係数です。厳密には、サーベイメータ等の放射線測定器で測定された1cm線量当量 ($H^*(10)$) とTLD (熱ルミネッセンス線量計) やガラス線量計等の個人線量計で測定された1cm線量当量 ($H_p(10)$) には違いがあります(62ページ【解説A】「実効線量」参照)。しかし、他の変動要因が大きいので、局所被ばくのおそれが無い限り、計画段階では「1」として構いません。

作業場所における空間線量当量率※は、同じ場所でも異なっていることが多いため、単に部屋の空間線量率を測定するだけではなく、作業の姿勢を考慮するとともに配管等の放射線源に接近した位置での測定も必要です。空間線量当量率の分布から平均値(平均空間線量当量率)を算出しますが、単に作業場所の平均値だけではなく作業の種類ごとに算出することが望まれます。この平均空間線量当量率をもとに作業ごとの予測個人線量を算出、合計し全作業の予測個人線量を評価します。

$$\begin{aligned} \text{予測個人線量} &= A \text{ 作業予測個人線量} + B \text{ 作業予測個人線量} + C \text{ 作業予測個人線量} + \dots \\ &= \sum (i \text{ 作業予測個人線量}) \end{aligned}$$

作業者が複数で、作業場所の空間線量当量率が作業内容に応じて異なる場合や作業者が交代する場合は、作業者、作業場所ごとに予測被ばく線量を算出する必要があります。実際の作業環境では、作業姿勢や作業内容により平均空間線量当量率が大きく変わることがあります。そこで、作業計画を立案する際は、最も予測個人線量が多いと評価された作業者に基づいて被ばく線量を管理することが望まれます。計画段階では、予測個人線量を可能な限り低く抑えるよう作業計画を立案することが重要です。ただし、予測個人線量はあくまで目安ですので、作業後の実際の個人線量の測定値と比較し、被ばく管理が適切に行われたかどうかを検証し、類似の作業の被ばく管理に生かすことが重要です。このため、作業計画の立案時に被ばく低減対策を検討する際は、計画されている作業場所において、次に示すような放射線環境について事前に把握することが大切です。

- ① 作業者位置の空間線量当量率の分布
- ② 作業場所の空間線量当量率に寄与している線源の強度と位置
- ③ 放射線源となっている放射性核種の種類
- ④ 作業場所の空間線量当量率の線源寄与率
- ⑤ 作業場所のガンマ線の実効エネルギー
- ⑥ ベータ線線量当量率とガンマ線線量当量率の比率

これらの測定方法及び被ばく低減対策がどのように利用できるかについて説明します。

※) 注) 空間線量率とも呼ばれる。ここでは1cm線量当量率での測定であることを明確にするため、以下、空間線量当量率と表記する。62ページ【解説A】実効線量参照。

放射線測定器の種類と特徴

線量当量率測定用サーベイメータ

種類		特徴
1) γ 線測定用検出器	シンチレーション検出器 NaI (Tl) など	検出感度が高く低線量レベルの測定に使用 エネルギー補償式の場合はエネルギー特性が優れている
	GMサーベイメータ	検出感度は中間位だが、エネルギー特性が余り良くない キャップを使って β 線の寄与を除去する
	電離箱式サーベイメータ	検出感度が低いので高線量レベルの測定に使用 キャップを使って β 線の寄与を除去する
	Si半導体式サーベイメータ	応答時間が他のものより早く素早い測定が可能、小型で持ち運びが楽な利点がある
2) 中性子測定用検出器	レムカウンタ	^3He 比例計数管の周りに10cm厚近くのポリエチレン減速材を巻いたもの 検出感度は高いが、ポリエチレンのために重量が10kg程度と重い
	軽量レムカウンタ	有機混合ガスを用いてポリエチレン減速材を使用しないかごく薄くしたもの 検出感度は少し低い、重量が3kg程度と軽くて持ち運びが楽な利点がある
3) 広領域モニタ	ホットスポットモニタ	GM計数管が先端についており引き延ばして高線量のホットスポットを離れた場所から測定できる
	水中モニタ	シリコンダイオード検出器を使用し、耐水性で水深80mまでの高線量の γ 線を測定する
4) ガンマカメラ	ピンホールカメラ	検出器周辺を遮へいして先端にピンホールを開けてそこから入射する γ 線を測定して、 γ 線源の位置を同定する。遮へい体のため重い
	コンプトンカメラ	検出器を前方と後方の2か所に設置して、コンプトン散乱により γ 線源の位置を同定する
5) 核種同定用放射線検出器		核種同定ができる γ 線スペクトル表示ができて線量が測定できる測定器

ダスト測定用放射線検出器

種類	特徴
1) ダストサンプラ	空気中放射性物質濃度を測定するための試料採取に用いる ろ紙に吸着して採取する
2) 連続ダストモニタ	空気中の放射性物質を連続採取し、放射性物質濃度を測定する

個人被ばく評価用放射線検出器

種類	特徴
電子式線量計	γ 線用、 β 線用、中性子用があるが、すべてシリコン線量計が用いられている 中性子用には熱中性子用にボロンラジエータ、速中性子用にポリエチレンラジエータが用いられている

表面汚染測定用放射線検出器

種類		特徴
1) β 線測定用検出器	GMサーベイメータ	大面積GM管の使用により β (γ) 線の汚染検査に最適 見やすい大形メータとデジタル表示が採用されている
	電離箱式サーベイメータ	キャップのあるなしの差し引きで測定する
	プラスチックシンチレーション サーベイメータ	薄いプラスチックシンチレーションを使用して γ 線感度を下げている
2) α 線測定用検出器	ZnS (Ag) シンチレーション サーベイメータ	感度が高いがシンチレーションの厚さが薄いので α 線だけに感度がある
	大面積シリコン半導体式 サーベイメータ	α 線と β 線を識別して同時測定可能

管理区域入退室での管理

種類	特徴
1) ハンドフットクロスモニタ	プラスチックシンチレーション検出器を用いた手足と衣服の汚染を調べるモニタ
2) 物品モニタ	物品を入れる容器の周りにプラスチックシンチレータを配置して、携行品の表面汚染を検知する
3) ホールボディカウンタ またはゲートモニタ	プラスチックシンチレーション検出器あるいはNaI (Tl) 検出器を用いて、全身の放射能汚染をチェックする 椅子に座る方式のチェアカウンタもある

測定器例

測定器の種類	外 観	仕様例
電離箱式サーベイメータ (出典：株式会社応用技研)		30keV以上の光子エネルギーに対してエネルギー特性が良好で精度の高い測定が可能
ハンディサーベイメータ 半導体式 (出典：富士電機株式会社)		ハンディタイプ 検出器はシリコン半導体を採用 測定範囲 0.01 μ Sv/h \sim 99.9mSv/h 表示単位は自動切り替え
広帯域ガンマ線 CSP テレスコピックプローブ (出典：ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社)		0.1 μ Sv/h \sim 10Sv/hのガンマ線線量当量率 (H* (10)) 測定 エネルギー補償型ガイガーミュラー検出器 最大約4mの遠隔測定
携帯型放射性核種識別装置 D3S-ID (出典：仁木工芸株式会社)		ガンマ線スペクトル機能を有し、核種同定が可能
携帯型ガンマ線 イメージングシステム (ガンマカメラ) (出典：ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社)		遮へい体が不要な設計のため軽量 コーデッドマスク方式により、近接したホットスポットを分離識別可能 (空間分解能：2.5° \sim 6.0°)
超高線量ガンマ線プローブ (耐水性) (出典：ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社)		測定範囲：最大1000Sv/h ガンマ線1cm線量当量率 (H* (10)) 測定 防水仕様：水深80mまで (IP68 防塵防水) 検知素子：シリコンダイオード50mケーブル付

作業場所のモニタリングの種類

作業場所のモニタリングは、目的に応じて以下のように分類できます。

①特殊モニタリング

特殊モニタリングは、作業を計画するに際して十分な放射線環境に関する情報が得られていない場合に行うものです。放射線管理上の問題を明確にし、今後の作業並びに管理手順を確立するために必要となる詳細な情報を得ることが目的です。なお、本モニタリングは実施時期と明確な目的をもって行う必要があります。例えば、作業計画場所の線源位置や線量当量率分布（線量当量率勾配）の把握や、被ばく低減対策の有効性等を評価する等の目的です。

②作業モニタリング

作業モニタリングは、作業工程に合わせて変化する放射線環境を段階的にチェックし、必要であれば作業進行の速やかな決定を下すための根拠を与えるのが目的です。

③日常モニタリング

日常モニタリングは、作業環境が継続作業に対して満足であること、及び作業方法の再評価を必要とする変化が生じていないことを確認するのが目的です。

線量当量率分布の測定方法

①ファースト測定

作業を予定している現場の放射線環境に関する情報がほとんどない場合、ファースト測定を実施します。人が立ち入っての無計画な測定を行うと、測定者の過剰な被ばくを引き起こすおそれがあるため、対象場所の線量が非常に高いことが予想される場合、ファースト測定は無人ロボットによる調査や、線量当量率の低い場所からの遠隔調査等の方法を選択することが必要です。また、線源付近の最大線量当量率の測定を行う場合、線源近くでは急激な線量当量率の上昇が予想されるため、検出部を伸ばすことのできる測定器を用いることで、測定者の過剰な被ばくを防止します。

②詳細測定

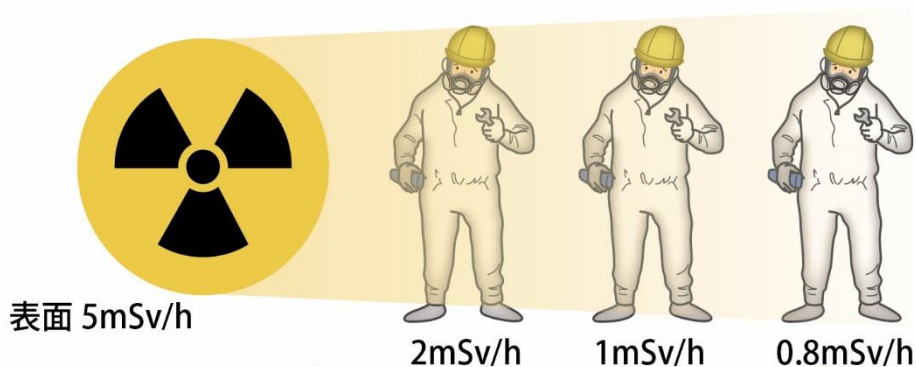
作業を計画している作業範囲全体の放射線環境を把握する目的で実施します。作業者が滞在することが予想される場所を中心に、作業者の姿勢を考慮した高さで、電離箱式サーベイメータ等を用いて線量当量率分布を測定します。一般的には、立ち上がった姿勢では作業床から1m、座った姿勢では30～50cmの高さで測定します。また線源付近で作業する場合、作業位置のわずかな違いで被ばく線量が大きく異なったり、不均等被ばくが生じることがあるので、線源からの距離等測定位置を明確にする必要があります。

線源の大きさや線量当量率分布の特徴

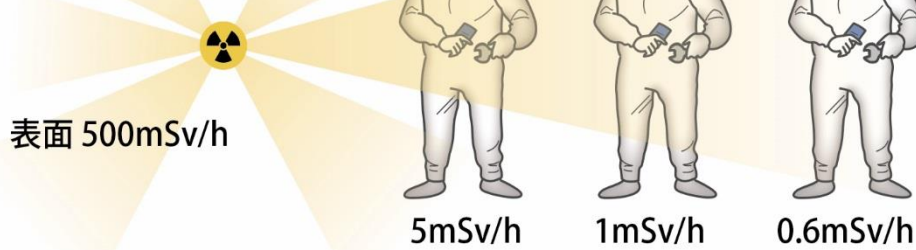
線源が一つの場合、線源の大きさによって周辺の作業場所の線量当量率の変化が異なります。線源が小さくて強い場合、少しの位置の違いで線量当量率が大きく異なることがあるので注意が必要です。そのため、作業者が位置すると想定される場所は、あらかじめ線量当量率分布を詳細に把握しておくことが大切です。

例えば、均一な円盤状の線源の大きさと線源からの距離による線量当量率の変化は、右図のような特徴があります。これらは、線源の形状によっても異なります。点状の線源の場合は、距離が離れると線量当量率は距離の2乗に従って減少します。しかし、広がりのある（面上）線源の場合は、距離が離れても減少率は少ないので、外部被ばく防護計画の立案には注意を要します。

線源 大きい



線源 小さい



作業場所の線源寄与率の測定

特定の作業場所の空間線量当量率がどの方向からどの程度寄与しているかを測定すると、被ばく低減対策の立案やその効果の推定に大いに役立ちます。コリメータ付の検出器で全方向をスキャンして測定することもできますが、現場でできる最も簡単な方法を紹介します。

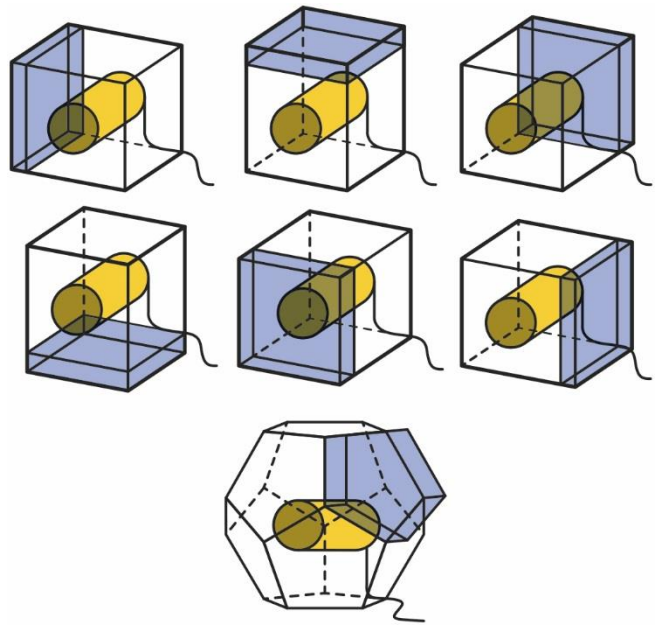
①6方向放射線寄与率の測定

②12方向放射線寄与率の測定

【方法】立方体（6面体）若しくは12面体形状の枠体を用意し、それぞれのいずれか1面に2cm厚の鉛板を取り付け、放射線を測定する検出器をその中心に位置するように設置します。

次に、評価したい位置に検出器を置き、遮へい面を回転させて線量当量率を読み取った後に、同じ位置で遮へい体を外した状態で測定した線量当量率との差を見ます。それぞれの方向で差の比率

が、その方向からの線源寄与率と考えることができます。線源寄与率を用いてどちらの方向に遮へいを設けるか、どちらの方向にある線源を除去するのが効果的かをおおよそ判断することができます。



ベータ線線量当量率の推定

一般に1cm線量当量率に加え、3mm線量当量率及び70 μ m線量当量率を測定できる薄膜入射窓平行平板型電離箱式サーベイメータを用います。Sr-90及びY-90による汚染が予想され、ベータ線による被ばくが想定される場合、作業場所（作業位置）の1cm線量当量率並びに70 μ m線量当量率を測定し、70 μ m線量当量率が1cm線量当量率の10倍を超えているかどうかを確認します。10倍を超えるおそれがある場所では、皮膚の等価線量を評価し実効線量に加算するため、作業者は70 μ m線量当量を測定できる個人線量計を装着する必要があります。



ビルドアップキャップカバー 3種類

左からH* (10) 用、H' (0.07) 用、H' (3) 用



(出典：株式会社応用技研ホームページより)

ガンマ線線量当量率との比の評価

高エネルギーのベータ線（例．Y-90、Sr-90のベータ線等）が存在する場所でガンマ線線量当量率を推定する場合、線量計がベータ線の影響で高い値を示します。※

このような場合には、1cm線量当量率測定壁厚に加えプラスチック等のキャップを重ねて、測定壁厚をベータ線の最大飛程を超える厚さにすることにより、ベータ線をカットしガンマ線線量当量率のみを分離して測定します。

これらの線量当量率情報を踏まえた上で、ガンマ線及びベータ線に対する被ばく低減対策を検討する必要があります。



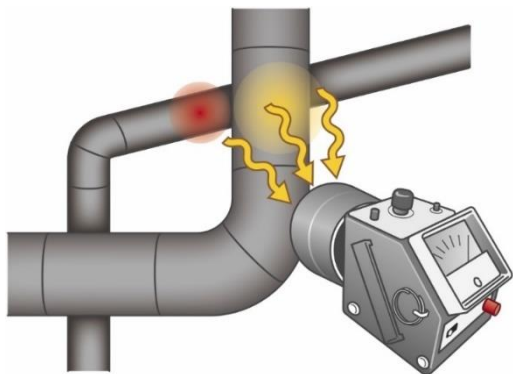
（出典：株式会社応用技研 ホームページより）

※Cs-137のガンマ線の1cm線量当量率で校正されている線量計は、ベータ線の影響で高い値を示すことがあります。

(4) 線源位置の測定

除染や遮へい等の被ばく低減対策を計画するためには、作業場所の空間線量当量率の上昇に寄与している線源の位置と強度を測定することが欠かせません。ここでは、まず線源位置の具体的な測定方法について紹介します。

【方法①】サーベイメータ等で表面線量当量率を測定する方法



サーベイメータ等を用いて、線量当量率の高い場所、機器の表面をスキャン測定し、線源となっている場所と最大線量当量率を特定します。ある機器の表面線量当量率が高くて、線源となっている機器がその裏もしくは近接して存在していることもあるので注意が必要です。

【方法②】ガンマ線イメージングシステム（ガンマカメラ）を使用する方法

光学画像上に、放射線の強度分布を重ねて表示することができます。線源となっているホットスポットを発見し、汚染範囲を区分します。

ガンマカメラには測定原理の異なる複数の方式があり、それぞれ特性（分解能・感度・計測時間等）が異なりますので、用途に応じた選定が必要です。



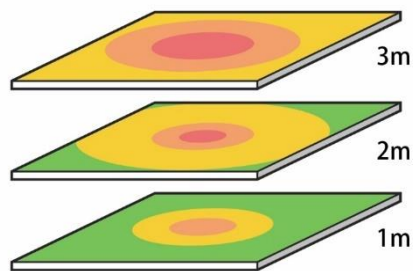
放射性廃棄物を格納したドラム缶内のホットスポット

(出典：ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ(株) / 東芝エネルギーシステムズ(株) / 『日立評論2012年9月号』)

【方法③】線量分布図を作成し、線源位置と強度を推定する方法

作業空間の線量当量率分布を格子状に測定し、線量当量率分布図を作成し、主な線源となっている場所を特定する方法です。【方法①】の表面線量当量率測定と合わせて行うことができます。線量当量率は3次元分布を持ちますので、一定の高さごとの分布図を作成すると、より明確になります。

測定に用いる測定器は、一定の高さに複数の検出器を設置し、同時に記録できる機器を用いると、容易にデータを取ることができます。



(例) 上部が線源となっている場合

(5) ガンマ線の遮へい効果推定のための事前測定

作業場所は様々な方向からの放射線が飛び交い、多くの散乱線が混在していることから、特定の場所の遮へい効果を計算によって正確に求めることは難しいといえます。したがって、遮へいによる被ばく低減対策を立案するにあたり、事前に作業場所での遮へい材による遮へい効果を試験的に測定しておくことが有効です。遮へい効果を算定するための、いくつかの測定方法を紹介します。

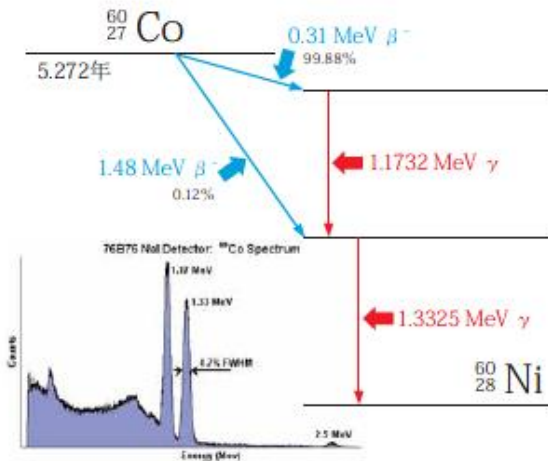
【方法①】ガンマ線のエネルギースペクトル測定

線源となっている放射性物質の核種を同定するため、ガンマ線スペクトル分析機能付きのサーベイメータで作業場所を測定します。核種を同定することにより、放射線のエネルギーと放出比を知ることができます。主たる放射線源がCs-137と考えてよいとされている場合、改めて測定する必要はありません。



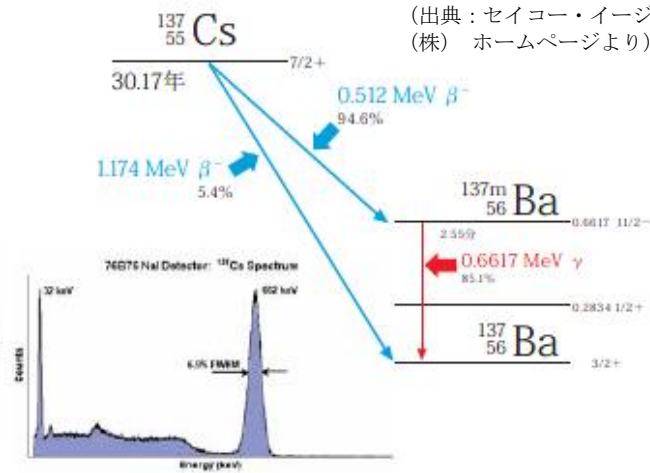
(出典：セイコー・イージーアンドジー(株) ホームページより)

●コバルト-60の崩壊図



(出典: Amptek, Incホームページ)

●セシウム-137の崩壊図



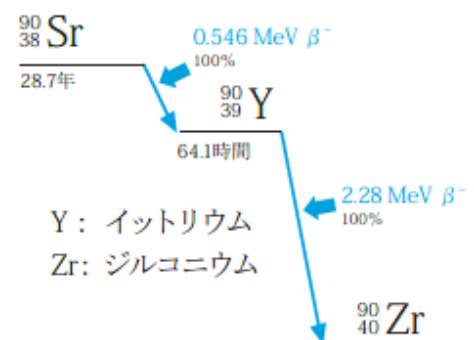
(出典: Amptek, Incホームページ)

【方法②】実効エネルギー評価のための測定方法

遮へい体の設置を計画する場合、作業場所の放射線の実効エネルギーを測定し、その実効エネルギーによって、実質的な遮へい効果を計算することができます。測定しようとする場所にサーベイメータを置き、サーベイメータの検出器全体を10mm以上の厚さを持つ鉛板で覆い、遮へいによる低減率を算出します。鉛の厚さと、低減率からガンマ線のおおよその実効エネルギーを求めることができます。算出方法は次頁に示します。

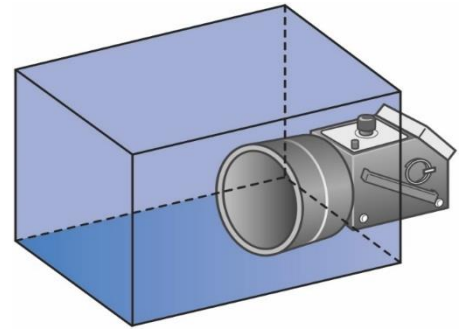
実効エネルギーがわかると、遮へい厚を変化させた場合の遮へい効果や、ガンマ線遮へい防護衣の低減効果を算出することができます。

●ストロンチウム-90の崩壊図

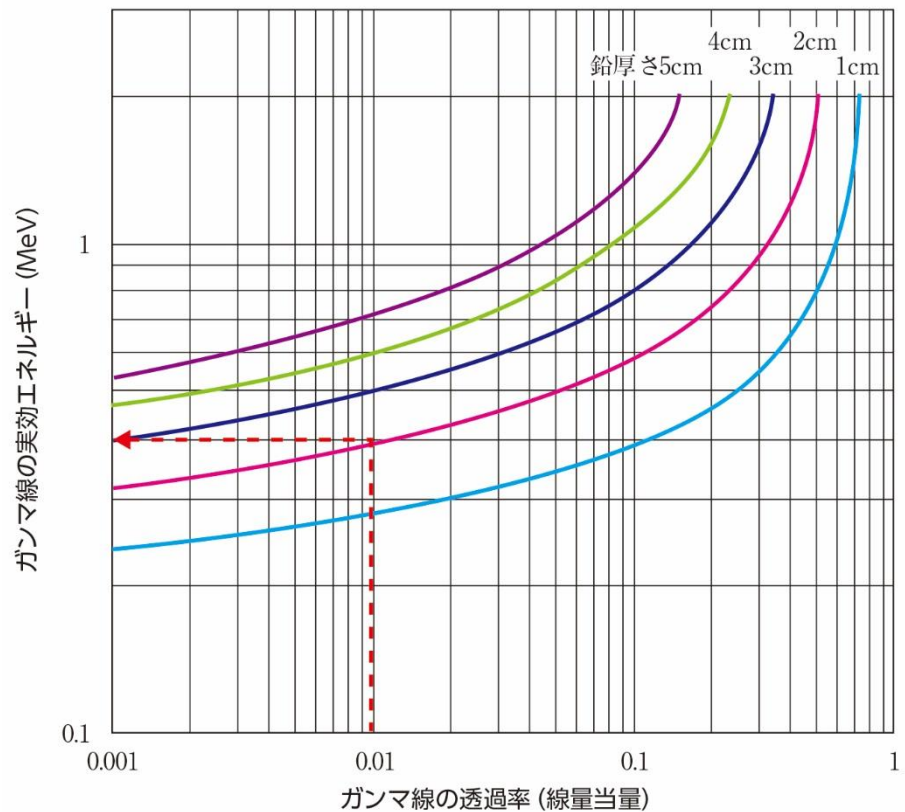


実効エネルギーとは

広がったエネルギースペクトルをもつ放射線のビームを、それと同じ相互作用をする単一エネルギーのビームとして取り扱うことが可能とき、このエネルギーを実効エネルギーといいます。したがって、一般に実効エネルギーとは、スペクトルで重み付けされた平均エネルギーと同じではありません。



右のグラフで、鉛板による線量の透過率から、その場所の遮へいに関するおおよそのガンマ線の実効エネルギーを求めることができます。例えば、鉛2cmで遮へいしたとき、線量透過率が0.01であった場合、ガンマ線の実効エネルギーはおおよそ0.4MeVとなります。



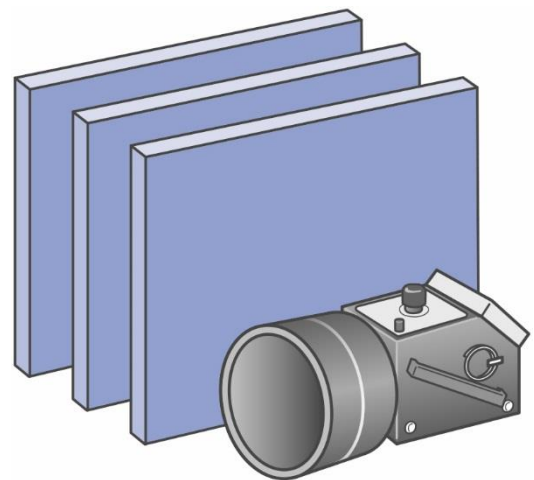
【方法③】遮へい体材料による試験

作業場所のある方向に鉛板等を並べて壁状に設置し遮へいしようとする場合、設置前にその効果がどの程度得られるか、現地で簡単な試験を行うことが重要です。線源が各所に点在している場合は、それぞれの方向からの放射線が合わさって作業場所の線量当量率となっています。その場合は、ある面だけを遮へいしても、目的とする遮へい効果は得られないことがありますので、いくつかの方向で遮へい材を用いて効果を確認する方法があります。

試験方法

線量当量率を低減させたい作業場所で、サーベイメータを設置し、サーベイメータの検出部が十分隠れる大きさの遮へい体を用意します。その厚さを順次変えながら、線量当量率の変化を読み取り記録します。

いくつかの方向で試験を行い、その結果をグラフに描きます。低減率のグラフを内・外挿することにより、遮へい厚を変えた場合の低減効果を求めることができます。



(6) 遮へい効果の算定方法

【方法①】 半価層から遮へい体の遮へい効果を算定する

遮へい体の厚さを増やしていったときに、遮へい後の放射線量が遮へい前の半分になる遮へい体の厚さを、半価層といいます。Cs-137からのガンマ線の場合、遮へい材質によって下の図のようになります。例えば、鉛であれば0.7cmの厚さで放射線量が半分になり、2倍の1.4cmあれば、 $(1/2) \times (1/2) = 1/4$ と計算します。3倍の厚さでおおよそ1/8、4倍でおおよそ1/16となります。

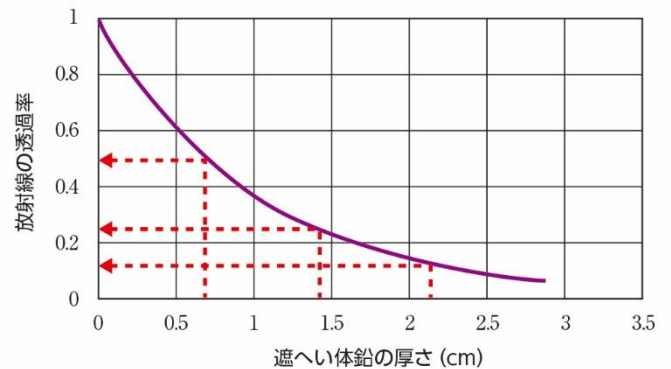
大幅に減衰したγ線の広いビームに対する、およその半価層と1/10価層値

遮へい材	ウラン		鉛		鉄		コンクリート	
	半価層	1/10価層	半価層	1/10価層	半価層	1/10価層	半価層	1/10価層
²⁴ Na	0.9	3.0	1.7	5.6	-	-	-	-
⁶⁰ Co	0.7	2.2	1.2	4.0	2.0	6.7	6.1	20.3
¹²⁴ Sb	-	-	1.4	4.5	-	-	7.0	23.0
¹³¹ I	-	-	0.7	2.4	-	-	4.6	15.3
¹³⁷ Cs	0.3	1.1	0.7	2.2	1.5	5.0	4.9	16.3
¹⁸² Ta	-	-	1.2	4.0	-	-	-	-
¹⁹² Ir	0.4	1.2	0.6	1.9	1.3	4.3	4.1	13.5
¹⁹⁸ Au	-	-	1.1	3.6	-	-	4.1	13.5
²²⁶ Ra	-	-	1.3	4.4	2.1	7.1	7.0	23.3

(出典：ICRP Pub. 21.)

体外線源からの電離放射線に対する防護のためのデータより引用)

遮へいの厚さと放射線の透過率の変化



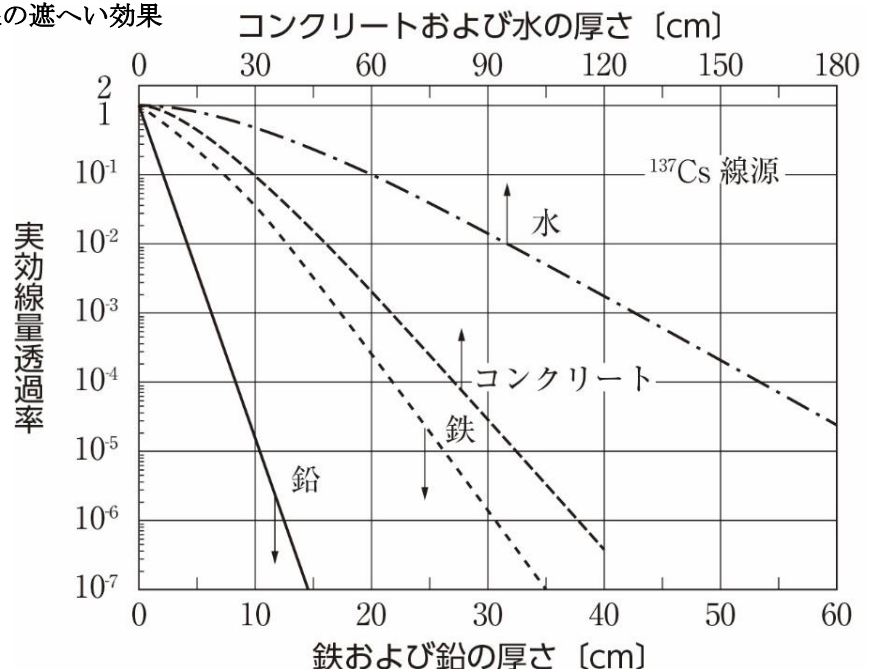
(出典：ICRP Pub. 21.)

体外線源からの電離放射線に対する防護のためのデータより作成)

【方法②】 点線源Cs-137からの直接線の遮へい効果

点線源Cs-137からの直接線の遮へい効果は、グラフから読み取ることができます。

現場の状況は線源が点線源であるとは限らないため、必ずしも正確な値とはなりませんが、線源に近い場所での計画ではこの値を用いることができます。ガンマ線スペクトル測定で、主要核種がCs-137以外の場合は、その線源のエネルギーに対する実効線量透過率の表から低減率を読み取ります（アイソトープ協会発行アイソトープ手帳12版等に掲載されています）。



(出典：日本原子力研究開発機構 JAERI-Data/Code 2000-044 より引用)
(日本アイソトープ協会「アイソトープ手帳 12版」にも掲載)

【方法③】実効エネルギーと遮へい効果

実効エネルギーの算出例

鉛板による線量の透過率のグラフ（P. 12）から読み取った実効エネルギーを計算によって求めてみます。厚さ2cmの鉛板で線量計を遮へいした場合、減衰率は0.01であったとする実効エネルギーは何MeVであるかを算出します。測定場所のガンマ線の実効エネルギーに対する質量減衰係数 μ_m は、次式で求めることができます。

$$\mu_m = -\ln(E/E_0) / \rho t$$

ρ : 鉛の密度 (g/cm³)

t : 鉛板の厚さ (cm)

$t = 2$ cmの場合、線量当量率の低減率が $E/E_0 = 0.01$ なので、

$$\mu_m = -\ln(0.01) / (11.35 \times 2)$$

$$= 0.203 \text{ (cm}^2/\text{g)} \text{ となります。}$$

実効エネルギーは鉛の質量減衰係数のグラフ（下図）から、0.41MeVと見つけることができます。この実効エネルギーを用い、実効線量透過率の表から、任意の遮へい厚の遮へい効果を算定することができます。

遮へい効果の算出例

実効エネルギーが0.41MeVである場合、線源となっている機器に厚さ50mmの鉛で遮へいした場合の遮へい効果を求めます。

鉛の質量減衰係数は、0.41MeVの時、0.203cm²/gです。鉛の厚さ50mmでの μt の値は、

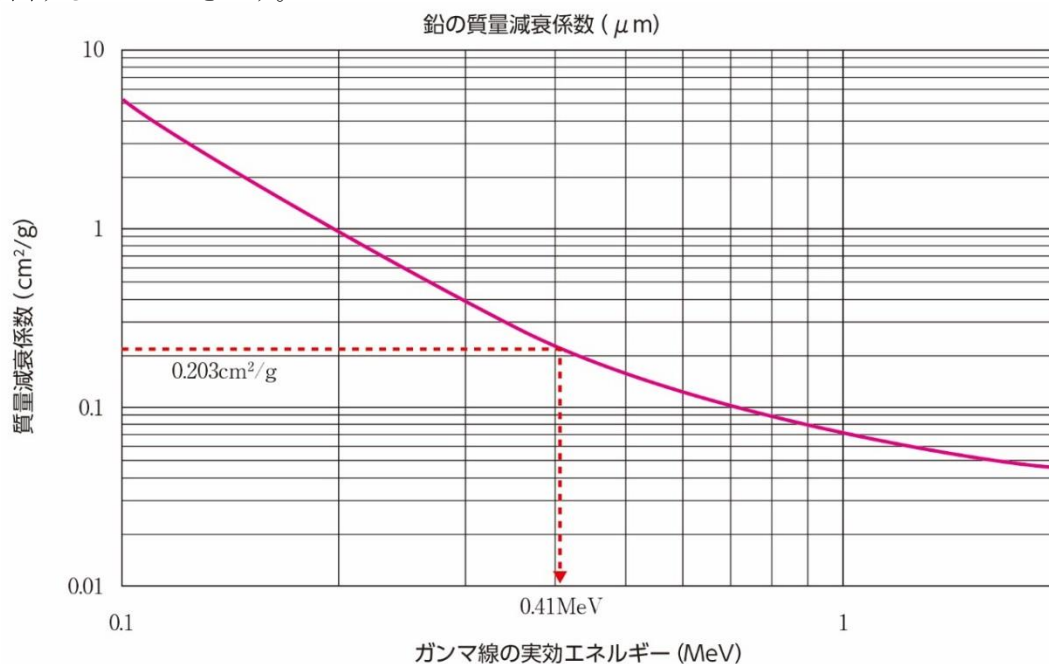
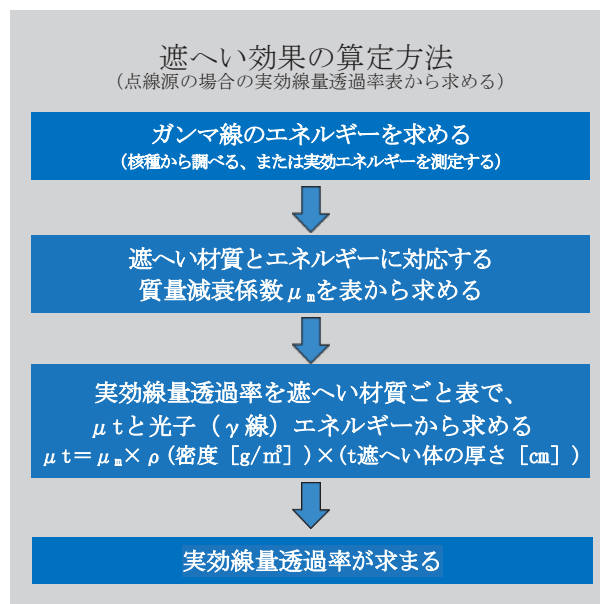
$$0.203 \times 11.35 \times 5 = 11.5 \text{ (mfp)}$$

実効線量透過率は、エネルギー0.41MeV、 $\mu t = 11.5$ の時、対数内挿法により1.88E-5と計算できます。

（エネルギー Linear-log透過率、mfp log-log透過率、補間式により求める）

μ : 光子の線減衰係数 t : 遮へい体の厚さ (cm)

鉛以外の遮へい材についても同様に、アイソトープ手帳（11版）等に掲載されている実効線量（AP）透過率の表から算出することができます。



実効線量 (AP) 透過率 (鉛)

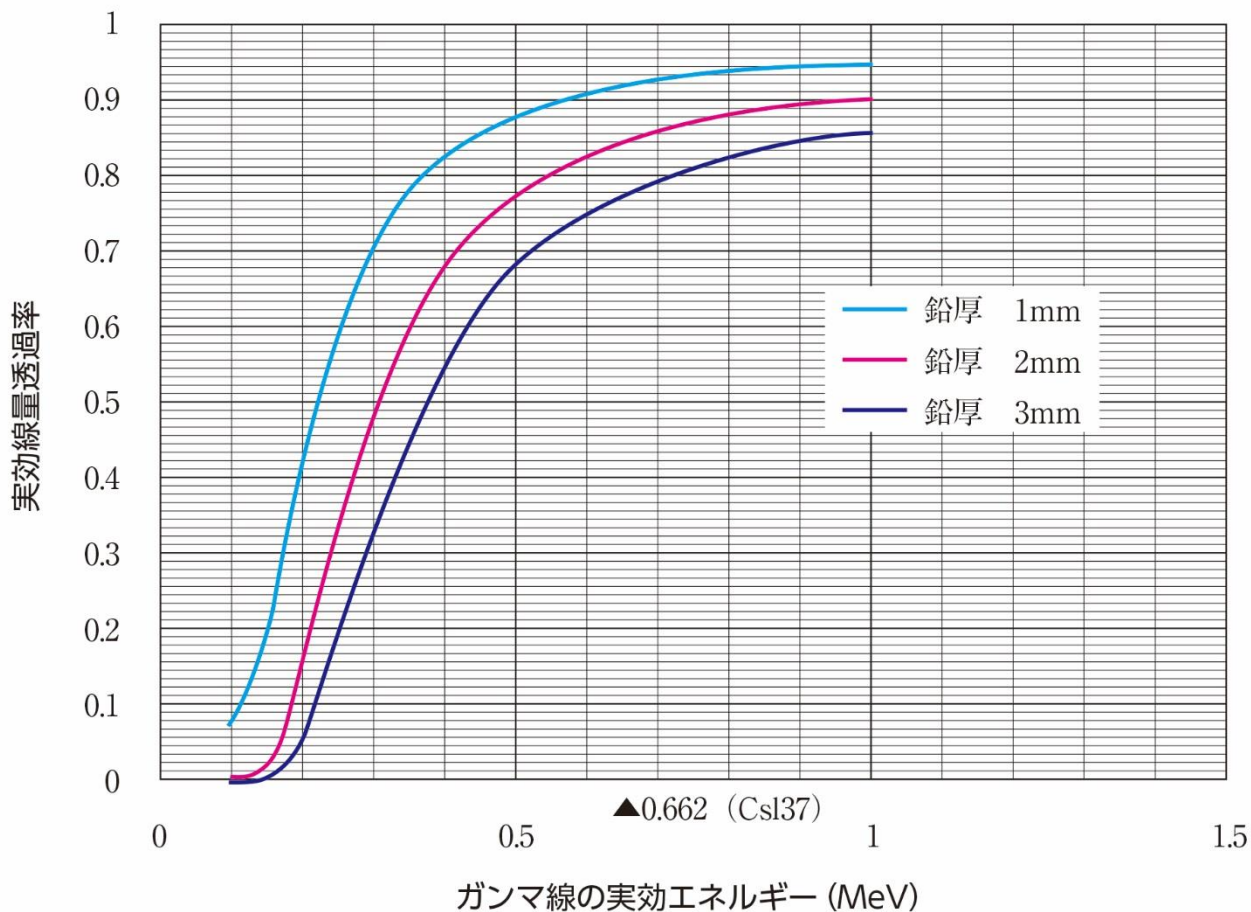
AP : 前方照射。 μ : 光子の線減衰係数 [cm^{-1}]、質量減衰係数 [cm^2/g] と遮へい材の密度 [g/cm^3] から求められる。 t : 遮へい体の厚さ [cm]

JAERI-Data/Code 2000-044より引用

入射光子 エネルギー (MeV)	μt															
	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	35	40
0.015																
0.02																
0.03	6.09E-01	3.70E-01	1.37E-01	1.03E-02	1.815E-02	6.82E-03	2.51E-03	9.24E-04	3.40E-04	4.61E-05	3.11E-07	2.10E-09	1.42E-11	9.56E-14	6.45E-15	4.35E-18
0.04	6.12E-01	3.72E-01	1.38E-01	1.08E-02	1.87E-02	6.90E-03	2.54E-03	9.35E-04	3.44E-04	4.68E-05	3.16E-07	2.14E-09	1.44E-11	9.76E-14	6.59E-16	4.45E-18
0.05	6.18E-01	3.77E-01	1.40E-01	5.17E-02	1.91E-02	7.04E-03	2.59E-03	9.57E-04	3.52E-04	4.79E-05	3.24E-07	2.20E-09	1.49E-11	1.01E-13	6.79E-16	4.59E-18
0.06	6.20E-01	3.80E-01	1.41E-01	5.23E-02	1.93E-02	7.15E-03	2.64E-03	9.74E-04	3.60E-04	4.89E-05	3.33E-07	2.26E-09	1.54E-11	1.04E-13	7.04E-16	4.76E-18
0.08	6.29E-01	3.89E-01	1.46E-01	5.44E-02	2.02E-02	7.50E-03	2.78E-03	1.03E-03	3.81E-04	5.21E-05	3.58E-07	2.45E-09	1.67E-11	1.14E-13	7.74E-16	5.26E-18
0.1	9.22E-01	7.56E-01	4.64E-01	2.83E-01	1.78E-01	1.16E-01	7.70E-02	5.09E-02	3.23E-02	1.36E-02	1.81E-03	2.80E-04	4.73E-05	8.38E-06	1.52E-06	2.79E-07
0.15	7.76E-01	5.34E-01	2.24E-01	8.83E-02	3.41E-02	1.30E-02	4.95E-03	1.88E-03	7.11E-04	1.02E-04	8.05E-07	6.36E-09	5.02E-11	4.12E-13	3.51E-15	3.14E-17
0.2	7.14E-01	4.54E-01	1.72E-01	6.44E-02	2.40E-02	8.90E-03	3.31E-03	1.23E-03	4.56E-04	6.26E-05	4.35E-07	3.00E-09	2.06E-11	1.41E-13	9.61E-16	6.55E-18
0.3	6.74E-01	4.27E-01	1.66E-01	6.35E-02	2.40E-02	9.04E-03	3.40E-03	1.27E-03	4.76E-04	6.63E-05	4.72E-07	3.31E-09	2.30E-11	1.59E-13	1.09E-15	7.53E-18
0.4	6.81E-01	4.42E-01	1.78E-01	6.96E-02	2.68E-02	1.03E-02	3.93E-03	1.49E-03	5.65E-04	8.05E-05	5.98E-07	4.33E-09	3.08E-11	2.17E-13	1.52E-15	1.05E-17
0.5	6.93E-01	4.58E-01	1.89E-01	7.59E-02	2.98E-02	1.16E-02	4.49E-03	1.73E-03	6.60E-04	9.58E-05	7.38E-07	5.49E-09	3.98E-11	2.85E-13	2.02E-15	1.42E-17
0.6	7.00E-01	4.70E-01	1.99E-01	8.11E-02	3.23E-02	1.27E-02	4.97E-03	1.93E-03	7.43E-04	1.09E-04	8.59E-07	6.46E-09	4.73E-11	3.41E-13	2.43E-15	1.72E-17
0.8	7.19E-01	4.94E-01	2.17E-01	9.09E-02	3.70E-02	1.49E-02	5.91E-03	2.33E-03	9.09E-04	1.37E-04	1.12E-06	8.72E-09	6.55E-11	4.81E-13	3.49E-15	2.50E-17
1	7.30E-01	5.09E-01	2.28E-01	9.77E-02	4.05E-02	1.65E-02	6.65E-03	2.65E-03	1.05E-03	1.61E-04	1.37E-06	1.09E-08	8.38E-11	6.26E-13	4.60E-15	3.34E-17
1.5	7.27E-01	5.11E-01	2.36E-01	1.04E-01	4.43E-02	1.86E-02	7.70E-03	3.15E-03	1.27E-03	2.05E-04	1.93E-06	1.69E-08	1.39E-10	1.11E-12	8.53E-15	6.44E-17
2	7.38E-01	5.17E-01	2.39E-01	1.07E-01	4.64E-02	1.97E-02	8.30E-03	3.44E-03	1.41E-03	2.32E-04	2.30E-06	2.08E-08	1.77E-10	1.45E-12	1.16E-14	8.98E-17
3	7.46E-01	5.15E-01	2.35E-01	1.05E-01	4.59E-02	1.98E-02	8.45E-03	3.56E-03	1.49E-03	2.53E-04	2.74E-06	2.67E-08	2.44E-10	2.12E-12	1.78E-14	1.45E-16
4	7.38E-01	5.04E-01	2.27E-01	1.01E-01	4.40E-02	1.90E-02	8.17E-03	3.47E-03	1.46E-03	2.56E-04	2.99E-06	3.20E-08	3.20E-10	3.06E-12	2.82E-14	2.53E-16
5	7.61E-01	5.21E-01	2.32E-01	1.03E-01	4.48E-02	1.95E-02	8.40E-03	3.60E-03	1.53E-03	2.75E-04	3.50E-06	4.12E-08	4.60E-10	4.91E-12	5.06E-14	5.07E-16
6	7.66E-01	5.26E-01	2.35E-01	1.04E-01	4.58E-02	2.01E-02	8.74E-03	3.79E-03	1.64E-03	3.02E-04	4.21E-06	5.53E-08	6.94E-10	8.38E-12	9.82E-14	1.12E-15
8	7.89E-01	5.57E-01	2.58E-01	1.18E-01	5.36E-02	2.43E-02	1.10E-02	4.94E-03	2.22E-03	4.44E-04	7.71E-06	1.29E-07	2.07E-09	3.24E-11	4.95E-13	7.38E-15
10	7.78E-01	5.58E-01	2.73E-01	1.31E-01	6.30E-02	3.01E-02	1.43E-02	6.75E-03	3.18E-03	7.04E-04	1.56E-05	3.35E-07	6.93E-09	1.39E-10	2.72E-12	5.21E-14

ガンマ線遮へい用防護服を想定して、実効エネルギーの違いによる遮へい効果（透過率）の計算結果の例を下図に示します。ガンマ線の実効エネルギーが異なると、遮へい効果が大きく異なることがわかります。その他の材質や厚さによる遮へい効果は、アイソトープ手帳（12版）等の実効線量透過率の表が示されていますから、その表から効果を読み取ることができます。

実効エネルギーに対する実効線量透過率

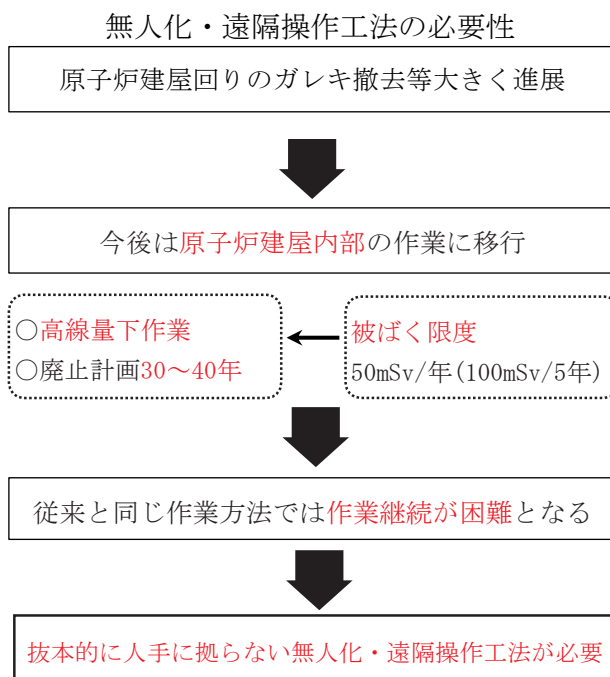


2

無人化工法や遠隔操作による工法に関する知識

廃炉作業における被ばく低減対策工事は、遮へいや線源の除去といった工事自体に人手を要し、建屋内部等の高線量下で狭隘なエリアでは、多量の被ばくを伴うことが多くなります。そのため、被ばく低減対策として、抜本的に人手に拠らない技術開発が必要となっています。放射線量が強く、人が近づくことの困難な環境下で様々な調査や作業を行うことができるロボットや遠隔操作機器の導入は、廃炉の現場に不可欠となっています。

本項目は、ロボット・遠隔操作機器がどのような現場で使われているかを把握し、今後、新たな現場でロボットを含めた無人化工法の導入について検討を促すことを目的としています。



(1) 無人化工法や遠隔操作に関する基礎知識

自然災害が多い日本で、二次災害の危険が懸念される災害復旧作業における有効な技術として、無人化施工技術が開発され活用されています。無人化施工技術の普及を進めている建設無人化施工協会のホームページ等から、関連する基礎知識について紹介します。

①無人化工法の構成

無人化施工では建設機械とその周辺にカメラを搭載または設置し、撮影した映像を遠隔操作室まで無線伝送します。遠隔操作室では伝送された映像を見ながら建設機械を遠隔操作します。近距離の場合は直接目視による操作も可能です。

近距離の場合



目視操作の例

遠距離の場合



操作室

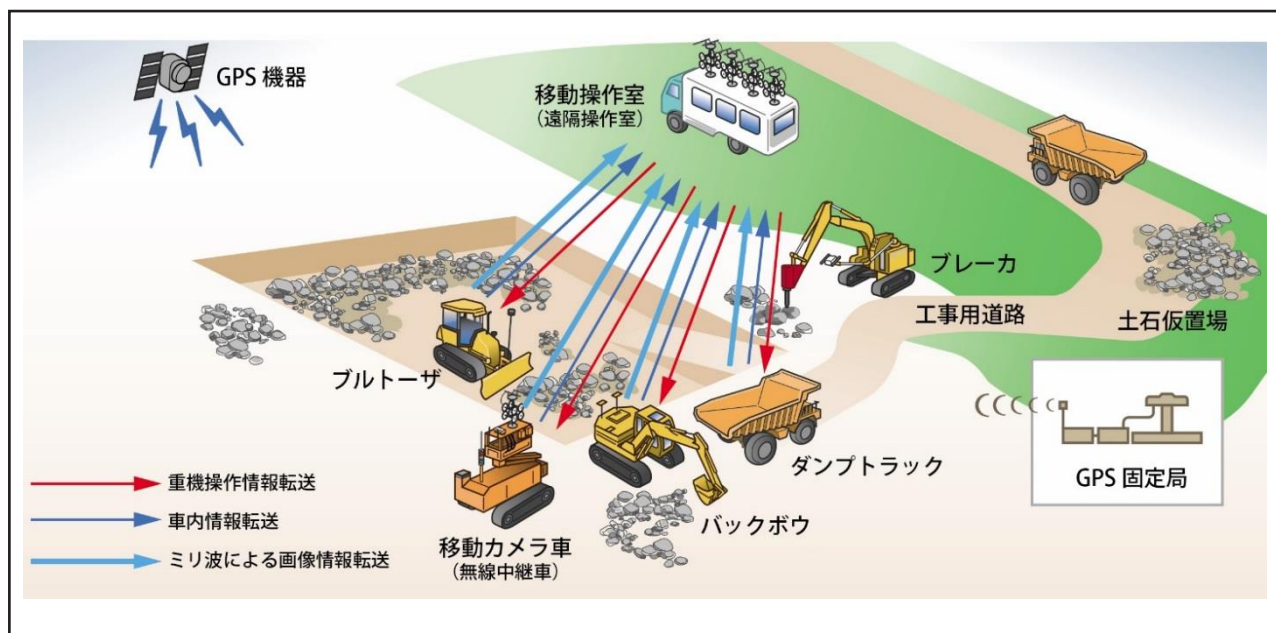


操作画面の例

(出典：建設無人化施工協会 ホームページより)

②無人化施工システムの構成

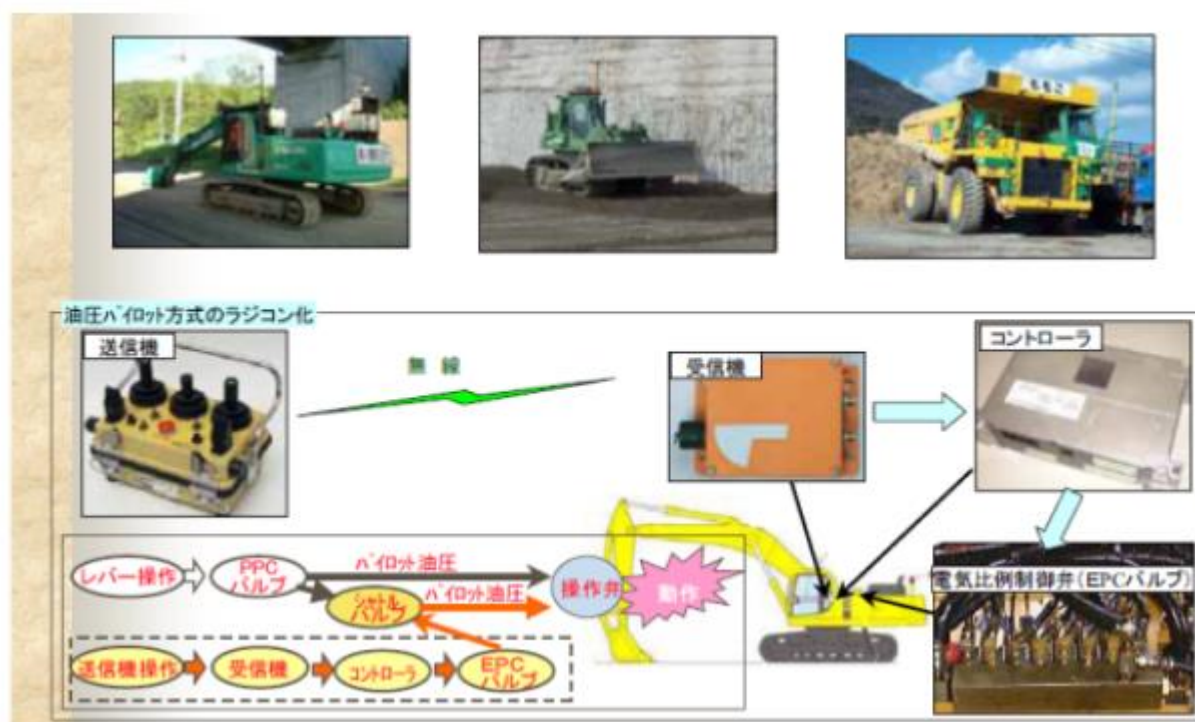
無人化施工における遠隔操作システムは、安全な位置で操作するための移動操作室（操作盤と映像モニター類）と、カメラと伝送用無線機を搭載した遠隔操作付建設機械から構成されます。また、施工現場及び建設機械の作業状況を監視する移動カメラ車や超遠隔のための無線中継車等が、必要に応じ追加されます。



無人化施工システム図（出典：建設無人化施工協会 ホームページより作成）

③遠隔操作付建設機械の構成

遠隔操作付建設機械は、無線を発信するための送信機、無線を受けるための受信機、制御信号を作るためのコントローラ、油圧を調整するための制御バルブで構成されます。汎用の建設機械に遠隔操作装置を組み込んだ構成となっています。

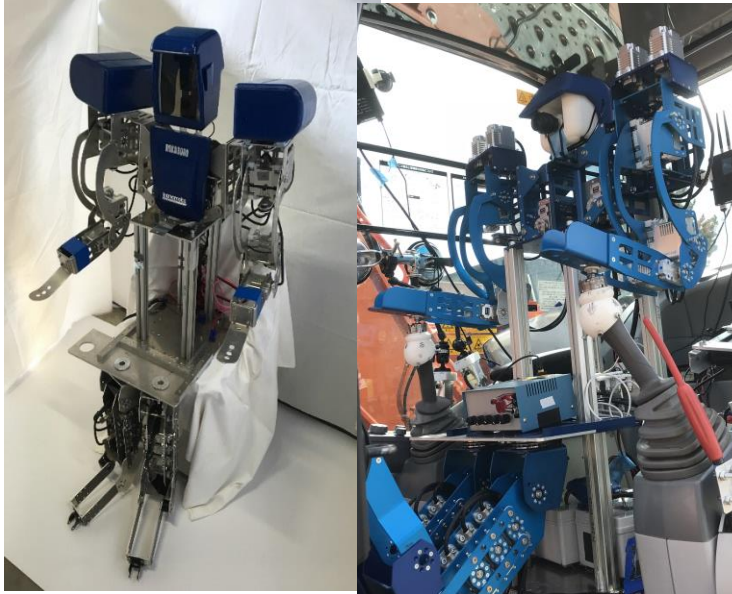


（出典：建設無人化施工協会 ホームページより）

既存の建設機械を改造なしで遠隔操作化する技術

様々な作業への用途に応じた専用の機械ではなく、既存の装置を遠隔操作による人型ロボットに操作させることによって活用しようとするものです。人が操作する構造の機械の場合、様々な汎用機械を遠隔操作することが可能となります。

人型ロボットによる建設機械操縦システム（Kana Robo）



Kana Robo仕様書	
本 体	リモコン
身長	卓上リモコン
150cm	専用リモコン
体 重	4画面によるリアルタイム画像
約18kg	
材 質	
ジュラルミン及びアルミ	
カ メ ラ	
HDカメラ1個～4個	
サーボモーター	
19個 自由度11	
機 能	
操作レバー操縦・エンジン始動停止	
エンジン回転調整・照明	
クラクション・ワイパー他	
排土板操作・ブレイカー等操作	
搭載可能建機メーカー（実績）	
KOMATSU・CAT・HITACHI	
コベルコ・ヤンマー・住友建機他	
搭載可能機種	
0.25m以上	
	コクピット①
	実機の操縦装置を利用
	4画面によるリアルタイム画像
	オプション
	コクピット②
	実機の操縦レバーを利用
	パラレル制御（3D）
	大型3画面湾曲モニター
通 信	
操縦回路周波数	
特定小電力1.2GHz・Bluetooth	
WiFi・5G	
映像回路周波数	
5.6GHz 4回線	
安全装置	
2.4GHz	
通信距離	
見通して200m程度	

（出典：カナモト（株） 資料）

④遠隔操作に使用される無線の種類

遠隔操作には、主に以下3種類の無線が使用されています。

■特定小電力無線

- ・出力が10mW以下で通信距離は1km程度であるが、無線局の免許、登録が不要
- ・簡単に使用できるので至近距離の遠隔操作に有効だが、通信容量が小さく映像は送れない

■簡易無線

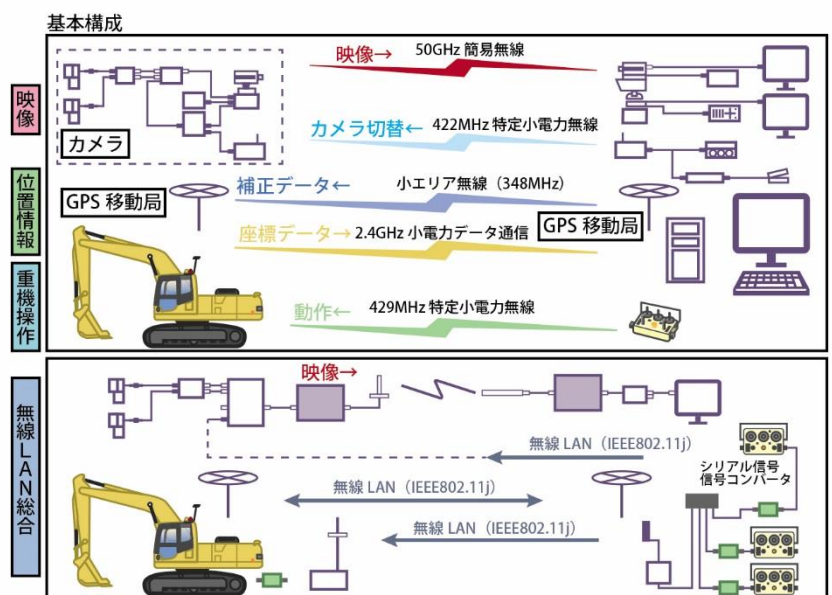
- ・出力30mW以下（50GHz帯）で通信距離は数km程度、無線局の免許が必要
- ・特定小電力無線では通信距離が不足する場合や映像を送る場合に使用される

■無線LAN（Wi-Fi）

- ・米国電子電気学会の国際規格でLAN通信に使用、免許不要で
使用できるものは出力が小さく
通信距離は数十m程度
- ・多くの情報を送れるので近年多くのロボットで使用されている

⑤無線の基本構成


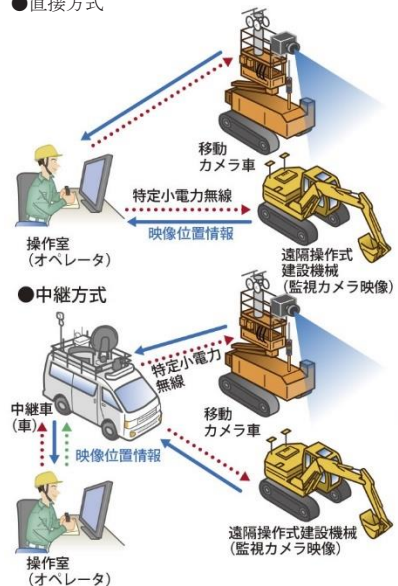
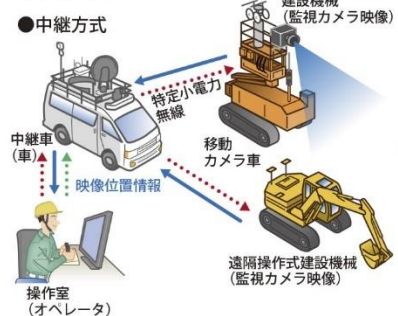
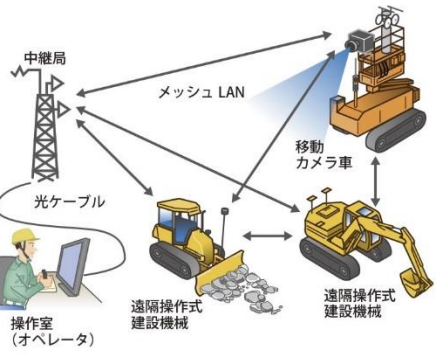
建設機械を遠隔操作するためには、映像信号、位置信号、動作信号等の信号を伝送する必要があり、伝送する信号の特性に応じた無線方式が採用されます。



（出典：建設無人化施工協会 ホームページより作成）

⑥無人化施工システムの実施方式

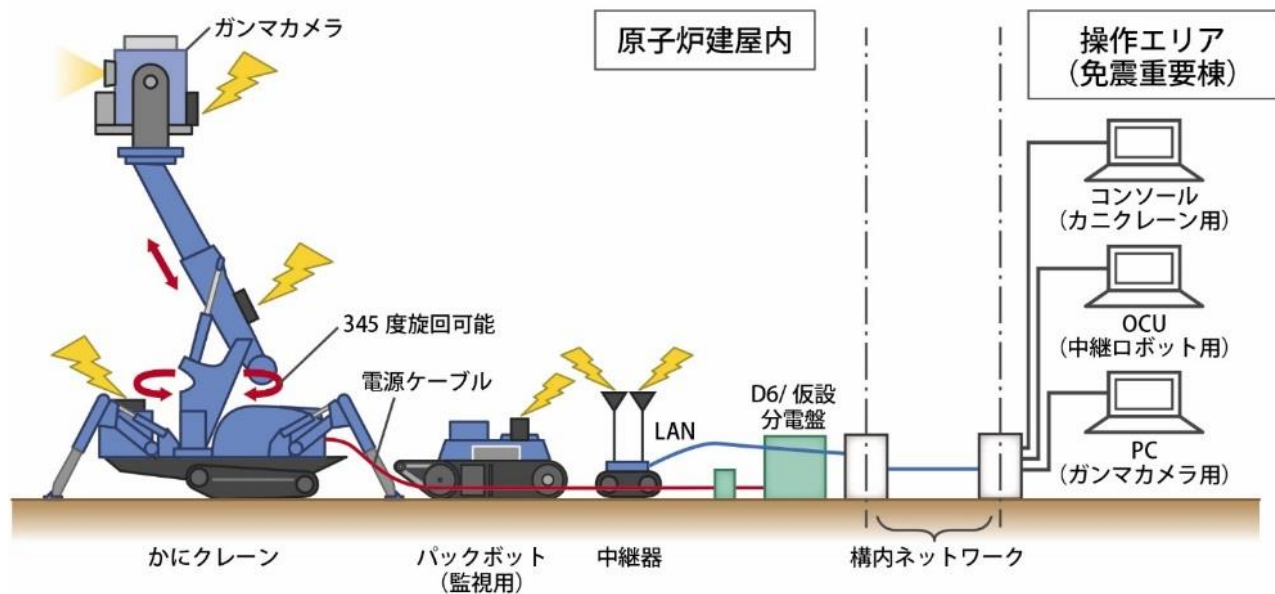
実施方式は、直接目視による方式と映像伝送による方式に大別されます。映像伝送による方式では多量の情報を送れる通信方法が採用されます。ネットワークを使用すると色々なデータを共有しながら遠隔操作することができます。

大別	直接目視による無人化施工	映像伝送システムを用いた無人化施工	
施工方式	直接操作方式	モニター操作方式	ネットワーク型操作方式
システムイメージ		<p>●直接方式</p>  <p>●中継方式</p> 	
適用の目安	操作距離が0～50mかつ直接目視操作が可能	<ul style="list-style-type: none"> ・直接方式の場合 操作距離が50～300mかつ障害物がない場合 ・中継方式の場合 操作距離が0～50mかつ直接目視操作が不可能 操作距離が50～300mかつ障害物がある 操作距離が300～600m 	<ul style="list-style-type: none"> ・操作距離が600m以上 ・数10kmでも対応可能
主な操作電波及び免許	特定小電力無線 <ul style="list-style-type: none"> ・無線局免許…不要 ・無線従事者免許…不要 		<ul style="list-style-type: none"> ・5GHz帯無線LAN (IEEE802.11j) ※操作信号と映像信号をひとつの電波で受信する無線局免許…必要 (無線登録) 無線従事者免許…必要 (第三級陸上特殊無線技士以上)
主な映像伝送電波及び免許		50GHz簡易無線 (現在、製造中止) 無線局免許…必要 無線従事者免許…不要	<ul style="list-style-type: none"> ・25GHz帯無線LAN (IEEE802.3準拠) ※操作信号と映像信号をひとつの電波で送信する。指向性が強い為、固定間通信に利用。 伝送距離…最大9.9km 伝送速度…最大56Mbps (全二重) 無線局免許…不要 無線従事者免許…不要

(出典：建設無人化施工協会 ホームページより作成)

⑦遠隔操作システムの事例

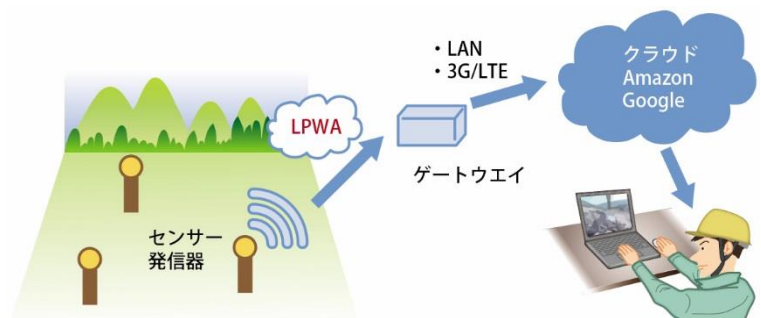
複雑な建屋の内部では、無線や有線LANを組み合わせることで遠隔操作します。無線を使用する場合は、中継器を設置して通信距離を延ばす等の工夫が行われます。



⑧IoT技術の活用

IoT (Internet of Things) 技術を使用すると、遠隔機器の操作や作業状況の監視が容易にできます。特に、IoT用通信技術 (LPWA: Low Power Wide Area) を使用すると、微弱な電波で長距離通信が行えます。

- 「IoT」とはあらゆる「モノ」がインターネットにつながる技術のことで、第4次産業革命の基盤技術として急速に普及しつつある



IoT用通信技術 (LPWA) の特徴

- 低電力で数kmの通信が可能
- 障害物に強く、低コスト
- 通信速度は遅いが、機器の操作・状態把握は可能

通信方式	小電力無線	無線LAN	3G/4G	LPWA
通信距離	数百m	数十m	長距離	数km
周波数	2.4GHz	2.4/5GHz	数GHz	<1GHz
通信速度	0.1Mbps	数百Mbps	数Mbps	0.01Mbps
消費電力	中	大	中	小
その他	免許不要	免許不要	費用発生	免許不要 費用少額

IoTの使用例

- 通信システム費用は従来の1/10以下
- ネットワークに繋げてデータ処理可能
- アイデア一つで色々な応用が考えられる
- IoTボタン (amazon)



■スマートメーター

【従来の電力量計】

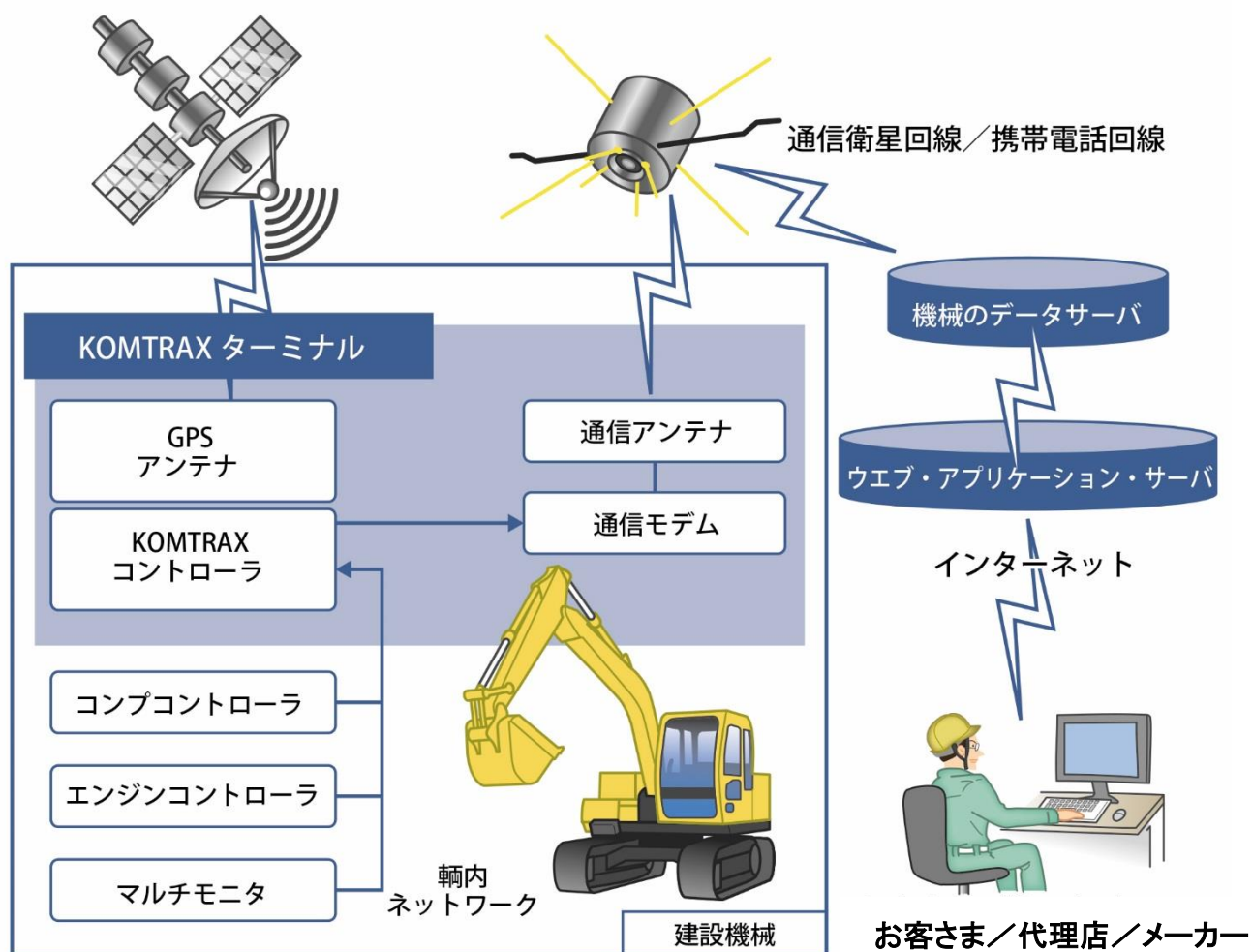


【スマートメーター】



(出典：東京電力パワーグリッド株式会社)

■KOMTRAX (Komatsu Machine Tracking System) の構成

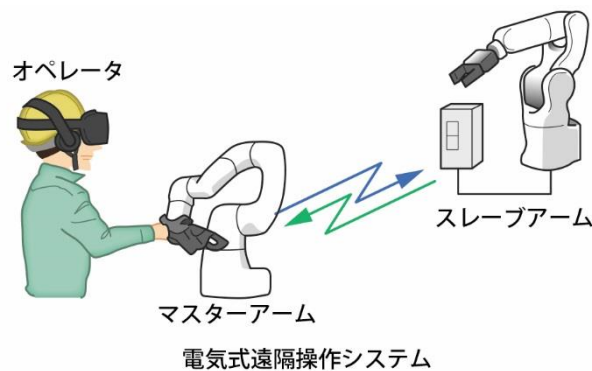
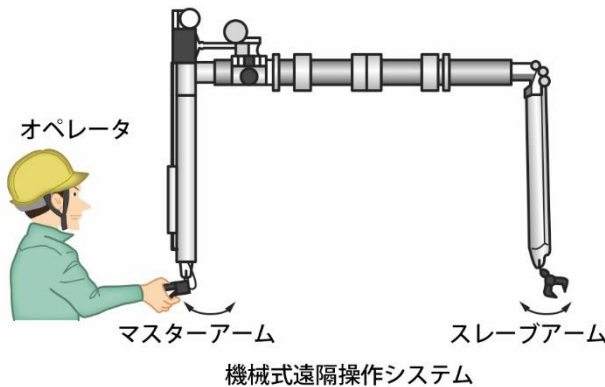
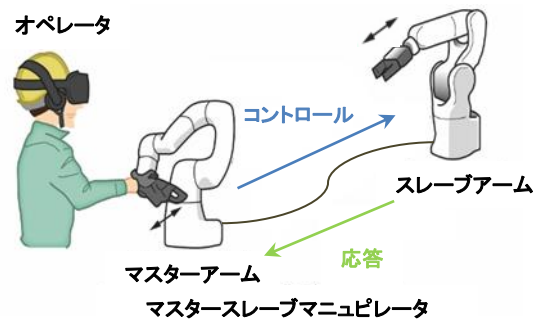


(出典：(株) 小松製作所 ホームページより作成)

(2) 遠隔操作ロボットの基礎知識

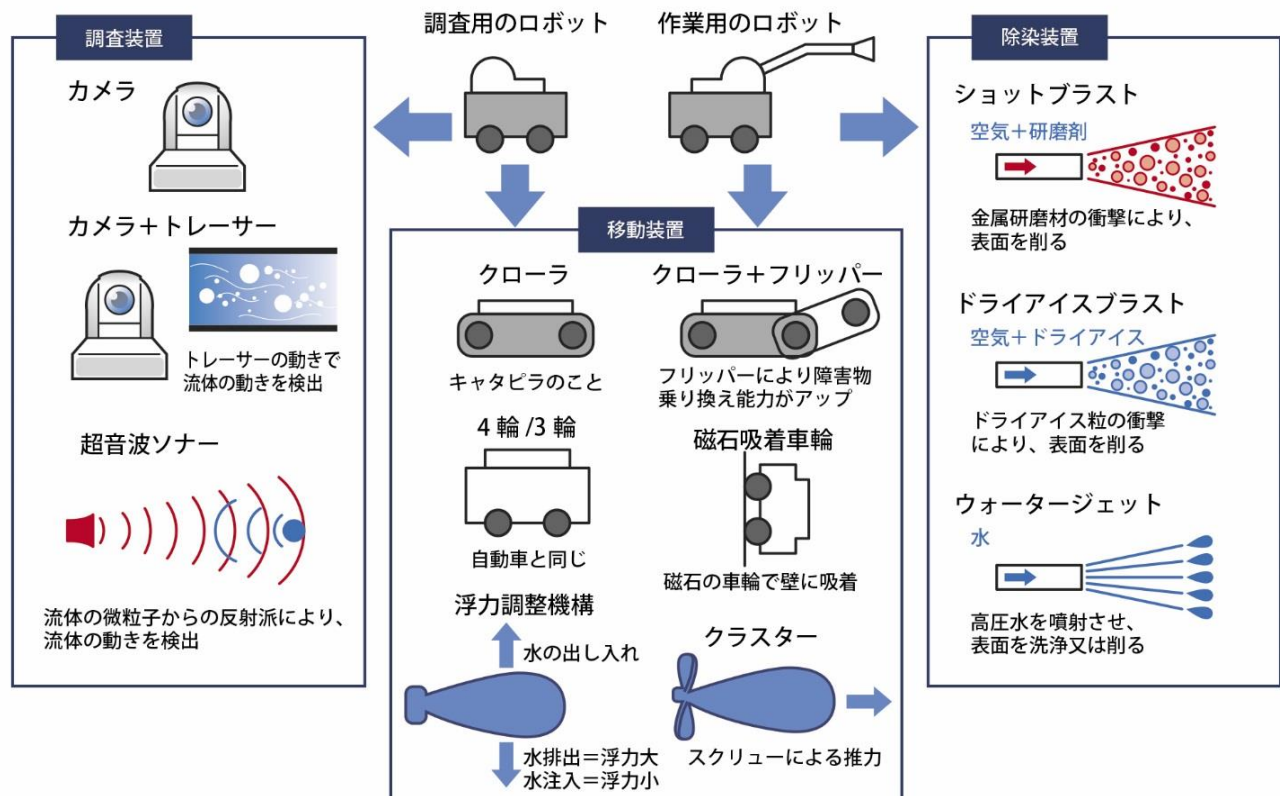
①ロボットの遠隔操作の方法

電気信号等を利用して、機器・装置から離れた場所から操作します。工場のプラントの操作や鉄道の進路制御等で行われている。なお、最も遠距離から行われています。



②遠隔操作作業ロボットの主な機能と名称

作業ロボットは、移動装置、調査装置、作業装置で構成されます。移動装置には現場に合った機構が採用され、悪路の場合には主にクローラ型が採用されます。調査装置として、モニターカメラ、レーザ距離計、線量計等が搭載されます。作業装置として、除染装置、撤去装置等目的に合った装置が搭載されます。これらの組み合わせで色々な作業を行うことができます。

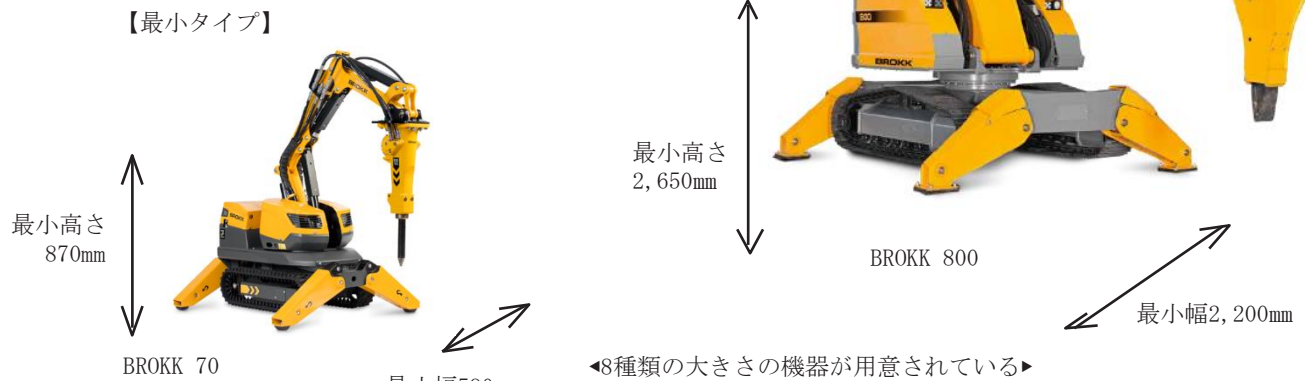


(出典:国際廃炉研究開発機構 福島第一原子力発電所の廃炉作業をひとにかかわって支援するロボットたち カタログ資料より一部変更して作成)

(3) 無人化・遠隔操作ロボットの例

遠隔解体ロボット BROKK

スウェーデン製の遠隔操作による電動油圧駆動の自走式ロボット (ROV: Remote Operating Vehicle) です。狭隘・密閉空間や劣悪な作業環境での安全・効率的な作業に適しています。全世界で約6,000台が稼働しており、特に近年では、高放射線下での作業が必要な原子力施設の除染・解体・廃止措置等で多くのBROKKが活用されています。2011年の東日本大震災の直後に、5台のBROKKが福島で使用されました。



(出典：ガデリウス・インダストリー(株) ホームページより)

BROKKのアタッチメント



(出典：ガデリウス・インダストリー(株) ホームページより)

BROKKの原子力施設への適用例



スキャブラによるハツリ除染



高放射線施設の解体



カメラ監視の完全遠隔操作



水中10数mの作業

(出典：ビーイージー ホームページより)

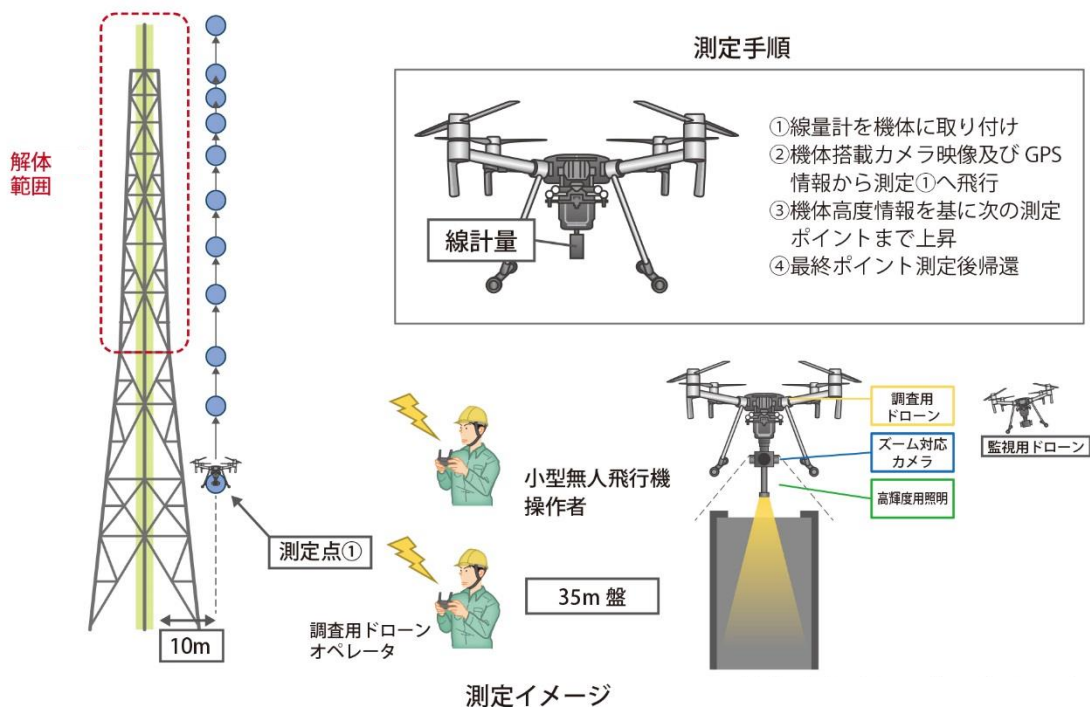
(4) 福島第一原子力発電所で活用されたロボット

事故直後から、放射線の線量率が高く人が容易に近寄れない場所の調査や復旧作業に、多くのロボットが活用されてきました。今後、建屋内の調査及び作業に当たっては、さらに多くのロボットの活用が考えられます。

これまで、活用されてきた各種ロボットについてまとめました。

①排気筒周辺の線量測定に用いられた小型無人飛行機（ドローン）

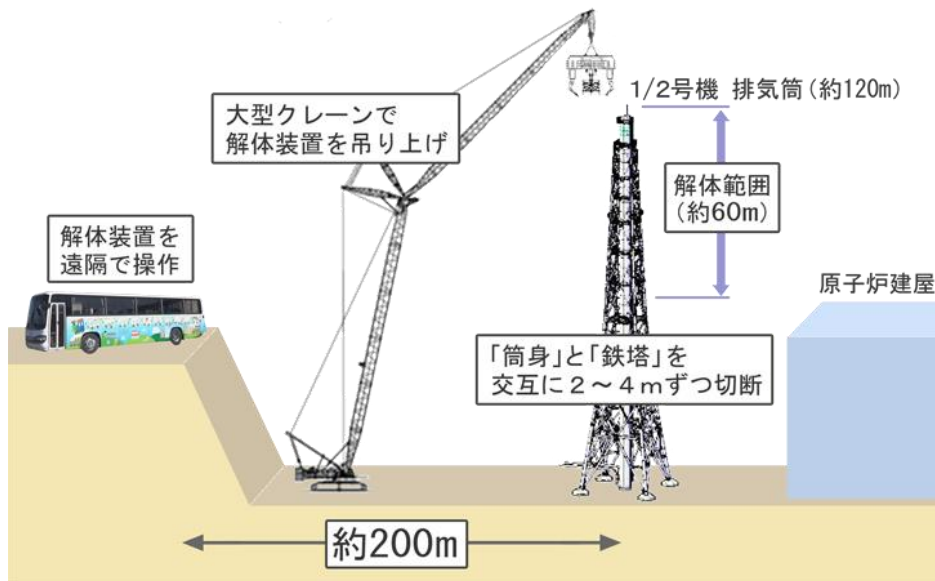
線量計を取り付けたドローンを使用し、有人作業が想定される箇所の線量状況を把握することを目的に、排気筒周辺の線量率を調査しました。



(出典：東京電力ホールディングス(株) ホームページより作成)

②排気筒解体に用いられた遠隔操作ロボット

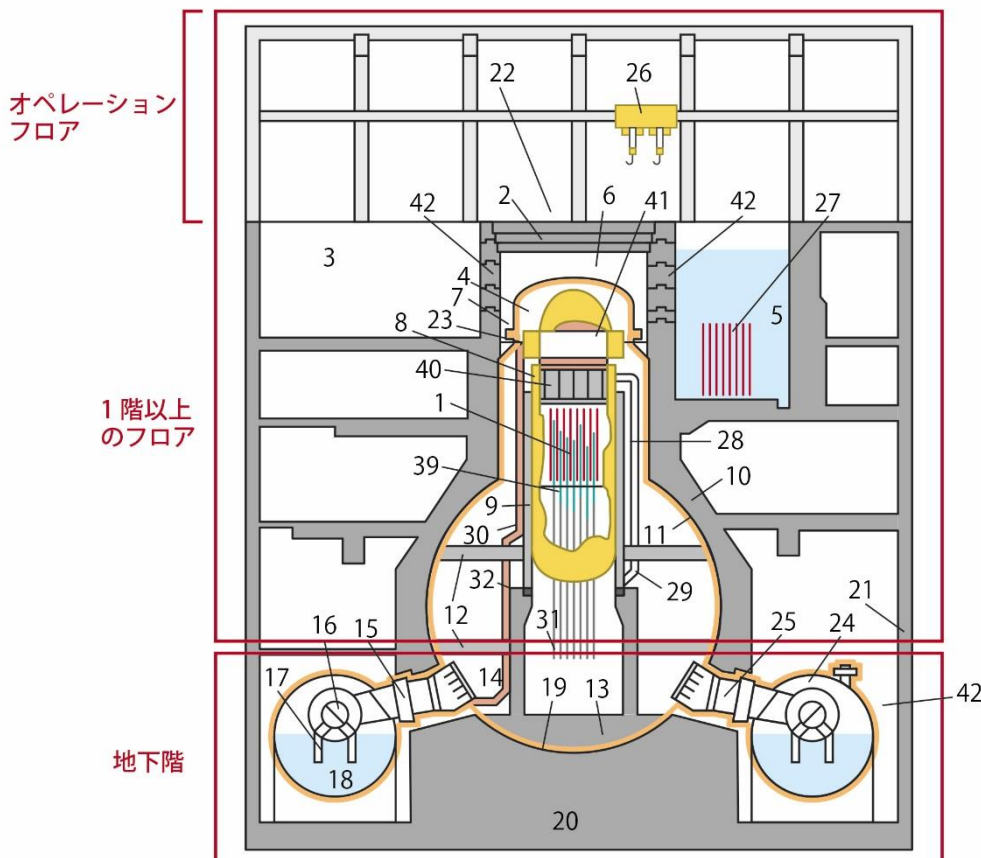
遠隔操作によるロボットシステムを利用することにより、作業被ばくを抑えた解体作業を実施しました。



【解体作業中の様子】

(出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより)

福島第一原子力発電所 1～4号機 原子炉建屋内部構造



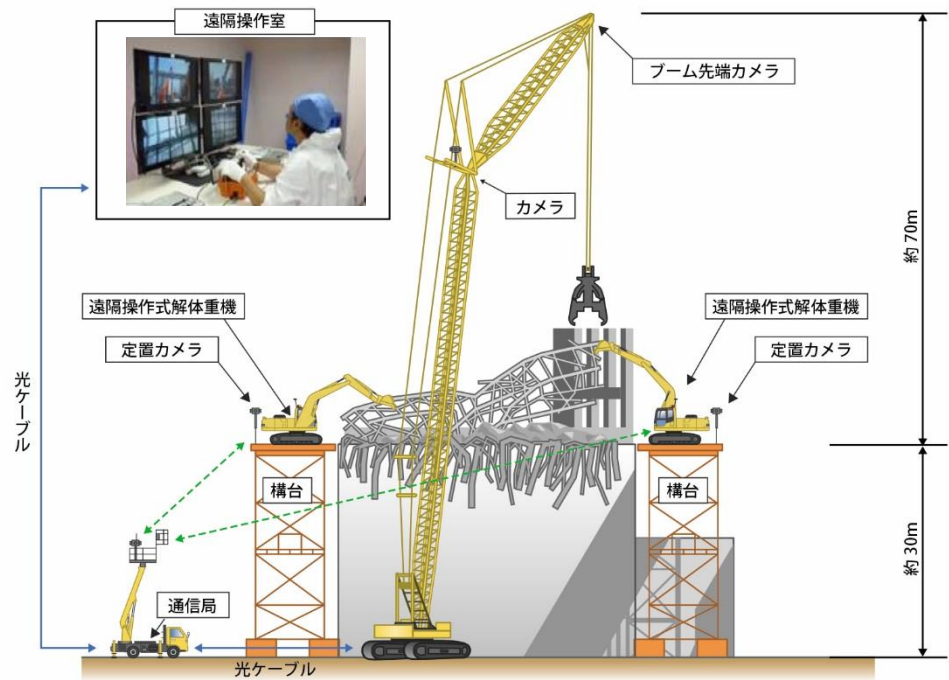
- | | | |
|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 1. 原子炉本体 | 12. ビーム (Radial beam) ・グレーチング | 24. 圧力制御室 (サブプレッションチェンバ) |
| 2. コンクリート遮へいプラグ | 13. コンクリート埋込部 | 25. ベントバルブ |
| 3. 気水分離器ピット | 14. ジェットデフレクタ | 26. クレーン |
| 4. PCV ヘッド | 15. 拡張ベローズ | 27. 使用済燃料 |
| 5. 使用済燃料貯蔵プール | 16. ベントヘッダー | 28. スロットプラグ |
| 6. 原子炉ウエル | 17. ダウンカマー | 31. 制御棒駆動機構 |
| 7. PCV フランジ | 18. 水 (ウェットウエル) | 39. 制御棒 |
| 8. 原子炉圧力容器 | 19. シェル接合領域 | 40. 気水分離器 |
| 9. 生体遮へい | 20. 土台基盤 | 41. 蒸気乾燥器 |
| 10. コンクリート遮へい壁 | 21. 原子炉建屋 (側壁) | 42. トーラス室 |
| 11. 立鋼 (Free standing Steel)
ドライウエル | 22. オペレーションフロアー | |
| | 23. バルクヘッド | |

(出典：Wikipedia「福島第一原子力発電所事故の経緯」より一部変更し作成)

③-1 原子炉建屋オペレーションフロアで活用実績のあるロボット／建屋上部のガレキ撤去

大型クレーン、ブルドーザ等の建設重機を遠隔操作できるように改造し（無線、光通信）、離れた建屋の操作室から遠隔操作しました。







■解体重機遠隔操作システムイメージ



(出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより作成)

③-2 原子炉建屋オペレーションフロアで活用実績のあるロボット

ガレキ撤去作業に関して以下のように活用しました。

ガレキ集積装置	小ガレキ吸引装置	切削・吸引装置	高圧水切削・吸引装置	ガレキ回収
	 			 
小ガレキの集積作業	小ガレキや粉じん等の吸引除去作業	コンクリート表層の切削・吸引除去作業	高圧水による床表層の切削除去 金属部の洗浄	ガレキの回収や切断作業

※吸引装置の排気はフィルタで除じんしてダストの飛散抑制を行っている。

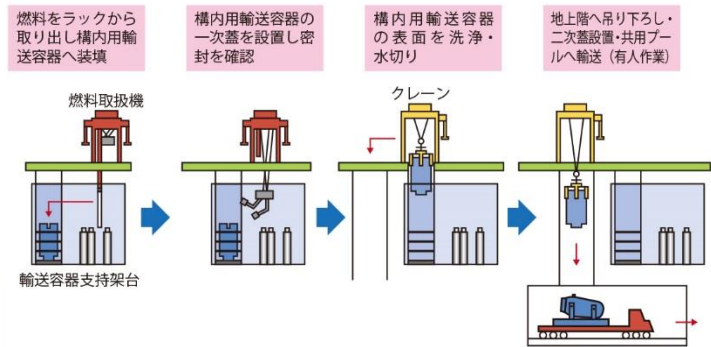
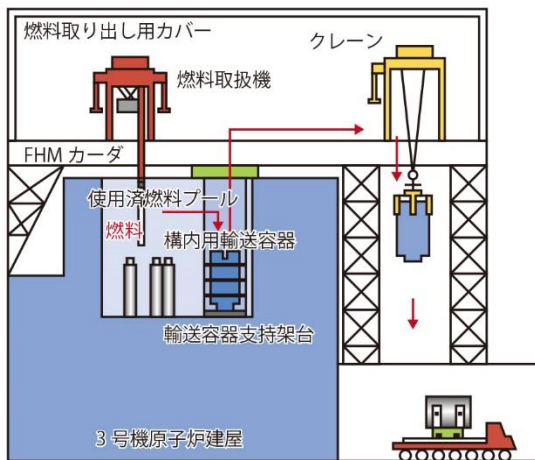
(出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより)

③-3 原子炉建屋オペレーションフロアで活用実績のあるロボット

■3号機使用済燃料プールの燃料取出し設備

使用済燃料プールの燃料取扱設備を遠隔で操作し、燃料上部ののがれきを撤去し、燃料を構内輸送容器に入れて敷地内の供用プールへ輸送

3号機原子炉建屋



(出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより作成)

④-1 主に1階以上のフロアで活用実績のあるロボット／建屋調査

主に、災害対策用ロボットとして開発されたクローラ型ロボットにカメラや線量計等の調査機器を搭載して使用しました。クローラ型は悪路に強く、階段も登ることができます。

■PackBot

(パックボット)



[Photo credit to FLIR Systems]

◎クローラ+マニピュレータ
(512×690×178mm、28kg)

●原子炉建屋内の各種調査



■レーザスキャン搭載ロボット

[協力：日立GE]

◎クローラ+3Dレーザスキャン装置

●建屋の3Dデータ取得作業

■Quince 1, 2, 3 (クインス)

[協力：千葉工業大学]

◎クローラ（前後）+アーム+線量計（1280×493×250mm、47kg）

●原子炉建屋内オペレーションフロア等の調査



■高所調査用ロボット

[提供：Honda, 産業技術総合研究所]

◎クローラ+伸縮ロッド+小型アーム+線量計
(1760×830×1800～7030mm、1100kg)

●原子炉建屋1階の高所狭隘部の調査

(出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより)

④-2 主に1階以上のフロアで活用実績のあるロボット／格納容器内調査

目的に応じて専用のロボットが開発されました。ペネトレーションの穴から挿入するため小型化を図り、耐放射線性を高めています。無線が使用できないため通信ケーブルを使用しています。

■原子炉格納容器内部調査装置

(形状変化型ロボット) [協力：国際廃炉研究開発機構 (開発元：日立GE)]



◎クローラ＋変形機構＋線量計 (φ100×300mm)

●1号機原子炉格納容器内のグレーチング上の調査
(円筒形状で走行し、その後「コの字」型に変形する)

■水中ロボット (ミニマンボウ)

[協力：国際廃炉研究開発機構 (開発元：東芝)]



◎スラスタ5基 (φ130×300mm)

●3号機原子炉格納容器内の水中調査

■釣りざお型ロボット

[出典：国際廃炉研究開発機構 (開発元：東芝)]



◎伸縮パイプ＋カメラ (1000Gy)、
線量計 (φ110×400mm、パイプ長1800mm)

●2号機原子炉格納容器内の燃料デブリ調査

■格納容器内堆積物調査装置

[協力：国際廃炉研究開発機構 (開発元：東芝)]



(出典：東芝エネルギーシステムズ ホームページ)

◎調査ユニット

(φ約300mm、全幅約100mm、重量約1kg)

●2号機の原子炉格納容器内堆積物の調査
(カメラ、照明、フィンガ、線量計、温度計、
耐放射線性約1000Gy)

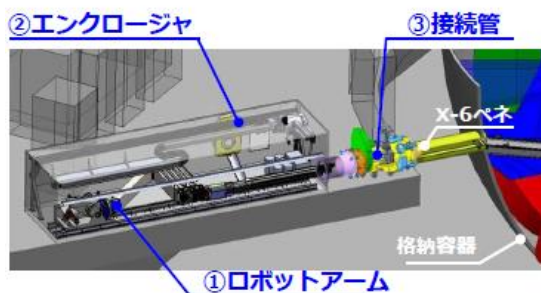
(出典：東京電力ホールディングス (株) ホームページより)

■燃料デブリの試験的取出し装置

[東京電力ホールディングス (株) 資料より]

格納容器の側面からロボットアームで燃料デブリにアクセスし、金ブラシや真空容器回収装置により、粉状の燃料デブリ (1g程度) を回収する予定です (2023年度後半)

●IRID (三菱重工担当)、英国VNS社で開発中
(長さ約22m、縦40cm×幅約25cm、重さ約4.6t、耐放射線性約1MGy)



④-3 主に1階以上のフロアで活用実績のあるロボット／撤去作業

主にクローラ型の移動台車にマニピュレータを取り付けて遠隔運転しました。線量が高い場所で人が搭乗する場合は、運転席に遮へいを行います。

■遮へいブロック撤去装置 (TEMBO)

[協力：国際廃炉研究開発機構
(開発元：三菱重工業)]



◎走行台車+マニピュレータ

■ASTACO-SoRa (アスタコ ソラ)

[協力：日立GE]



◎クローラ+双腕 (2500×1280×1500mm、2500kg)
●原子炉建屋内1階ガレキ撤去作業

(出典：東京電力ホールディングス (株) ホームページより)

④-4 主に1階以上のフロアで活用実績のあるロボット／除染作業

主にクローラ型の移動台車に除染装置（ブラスト、高圧水、ドライアイス）を取り付けて遠隔運転しました。

■吸引・ブラスト除染装置 (MEISter)

[協力：国際廃炉研究開発機構 (開発元：三菱重工業)]



◎独立4クローラ+除染装置
(1250×700×1300mm、480kg)
●ショットブラストによる除染、
回収システムによる粉じんの回収
(写真提供：三菱重工業 (株))

■高圧水除染装置 (Arounder)

[協力：国際廃炉研究開発機構
(開発元：日立GE)]



◎クローラ+除染装置
●高圧水 (ウォータージェット) による除染

(出典：東京電力ホールディングス (株) ホームページより)

⑤主に地下階で活用実績のあるロボット／サブプレッションチェンバー・トーラス室の調査

サブプレッションチェンバーやトーラス室を調査するための専用ロボットが開発されました。水中では無線が使用できないため、有線方式を使用しています。

■サブプレッションチェンバー上部調査装置

(テレランナー)

[協力：国際廃炉研究開発機構（開発元：日立GE）]



◎クローラ＋伸縮アーム＋カメラ（509×550×826mm、70kg）

●サブプレッションチェンバー上部、トーラス室壁面の調査

■サブプレッションチェンバー

下部外面調査装置（SC-R0V）

[協力：国際廃炉研究開発機構（開発元：東芝）]



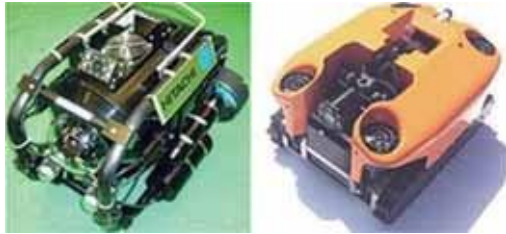
◎磁石吸引車輪（280×300×90mm）

●サブプレッションチェンバー外面の調査

■水中遊泳ロボット（げんごROV）

床面走行ロボット（トライダイバー）

[協力：国際廃炉研究開発機構（開発元：日立GE）]



◎げんごROV：スラスター4（420×480×375mm、22kg）

トライダイバー：スラスター6＋クローラ
（480×650×350mm、40kg）

●原子炉建屋とタービン建屋の壁面貫通部の水中調査

■水上ボート

[（開発元：日立GE）]



◎スラスター（900×330×293mm、27kg）

●格納容器からの漏えい状況の調査

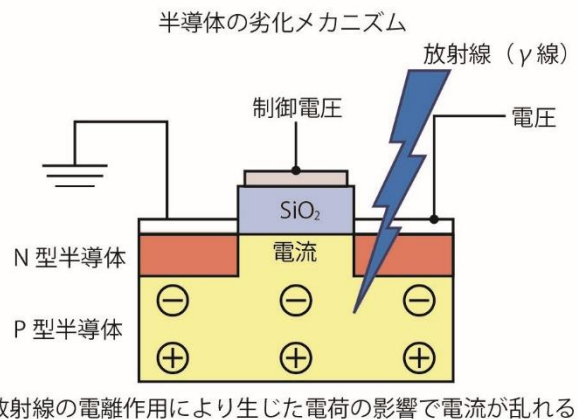
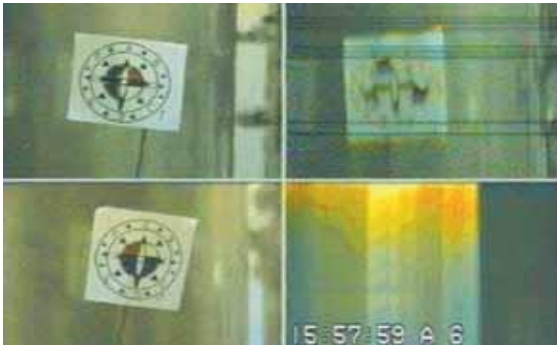
（出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより）

(5) 遠隔操作機器の耐放射線性

遠隔操作機器は、数多くの半導体部品で構成されており、放射線を受けると誤動作する可能性があります。廃炉作業で使用する遠隔操作機器では、トータルドーズ効果等について考慮する必要があります。

- トータルドーズ効果（ γ 線）……………放射線の電離作用で半導体の特性が劣化する
- はじき出し損傷効果（電子線・陽子線）……半導体の原子がはじき出され欠陥を形成する
- シングリイベント効果（1個の重粒子線）…高密度の電荷が流れ、一時的、定常的な故障が生じる

CCDカメラ異常（異常発生時：積算線量190Gy）



（出典：経済産業省「汎用重機やロボットにおける耐放射線性評価と管理方法の基本的な考え方 第1版」）

遠隔機器の耐放射線性の事例

遠隔機器を線量率の高い場所で使用する場合には、機器の耐放射線性能を把握し、使用可能時間を予測する必要があります。

- ◎今後の廃炉作業に使用できる様々な遠隔操作機器が開発されています。
- ◎遠隔操作機器の使用によって、今後の放射線による被ばくを大きく低減できる可能性があります。
- ◎作業計画の立案に際しては、遠隔操作機器の活用について検討ください。

電子部品（民生用）の耐放射線性

部 品	耐性 (Gy)
ノートパソコン	～50
マイコン	～100
CCDカメラ	～100
モータドライバ	～200
通信・センサ	～10

原子炉建屋の線量率（参考）

- ◎建 屋 内 部：～数10mSv/h
- ◎格納容器内部：～10Sv/h
(2号機グレーチング近辺)

- ◎一般的な民生用機器の耐放射線性は50～200Gyと推定
- ◎耐放射線性が100Gyの機器を、10Sv/hの環境で使用する場合は、10時間使用可能
- ◎実際の使用にあたっては、更に安全率を見込む必要がある。

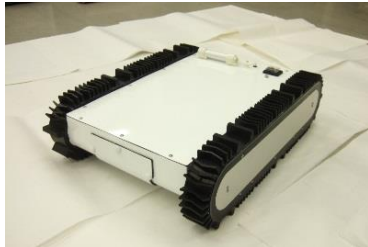
注1：使用実績から推定される概略値。耐放射線性の高い部品が開発されつつあります。

注2：1Gy＝1Sv（ γ 線）

(6) 遠隔操作機器の開発

①遠隔操作機器のプラットフォーム

高度な遠隔操縦機器を開発しなくても、市販の安価な移動装置（台車）を購入し、作業に応じた装置（カメラ、線量計、ハンド等）を取り付ければ作業に適した遠隔操作機器を製作することができます。近年、様々な仕様の移動装置が開発されており入手することができます。



クローラ型モジュール（トピー工業）
（全長480×全幅364mm、積載重量10kg）



追従運搬ロボット
（日本電産シンボ）
（長さ940×幅600×高さ455mm、積載重量120kg、レーザによる追従）

水中ドローン

(Blue Robotics Inc.)

（全長457×全幅338×高さ256mm、
重量10kg、最大水深100m、
スラスター8機）



ドローン（エンルート）

（幅（軸間）730×高さ347mm、重量3.2kg、
積載重量1.3kg、飛行時間20分、自動航行機能）

②遠隔操作機器を使用する際の注意事項

遠隔操作機器の使用に当たっては、事前の計画評価が重要です。計画が不十分だと、期待した被ばく低減効果が得られないばかりか、予期しないトラブルが発生して逆に被ばくが増えることも考えられます。

被ばく低減の評価 事前の被ばく低減効果の評価が重要です。機器の使用により削減できる作業、機器の使用で新たに発生する作業を抽出して被ばく線量の低減効果を総合的に評価します。

適用技術の明確化 最先端技術を多用すると、トラブルが発生する可能性が高くなります。現場でも確実に動作する、信頼性のある技術を組み合わせます。

耐放射線性の評価 線量率の高い環境では、放射線の影響で電子部品が劣化します。耐放射線性が確認された部品を使用するか、不明な場合は耐放射線性試験により事前に評価します。

通信技術の評価 無線を使用する場合は、電波の減衰やノイズにより電波障害が発生する可能性があります。予め作業場所の無線状況の調査を行います。

バッテリー容量の確保 ロボットにバッテリーを搭載する場合、作業中に交換が発生しないようバッテリー容量に余裕を持たせます。

メンテナンスの考慮 機器調整、バッテリー交換、トラブル対応等のメンテナンスで予期しない被ばくが発生します。メンテナンスを行う場合は、低線量エリアを確保して行います。また、汚染の拡散防止、機器の除染にも配慮が必要です。

事前訓練の実施 机上教育では不十分です。モックアップ訓練等で確実に操作を習得します。

異常時の対応 現場でトラブルの発生を想定し、発生した場合の対処方法を事前に検討します。

回収方法の検討 作業終了後の、ロボットやデータの回収方法を検討します。

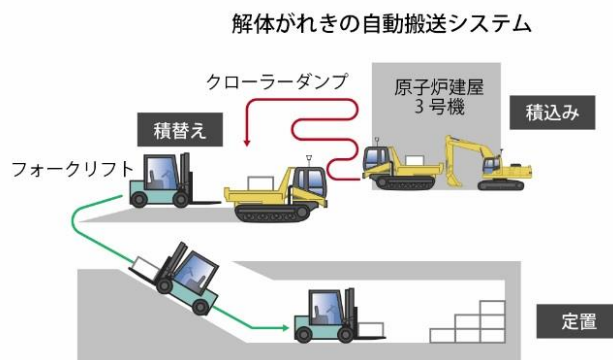
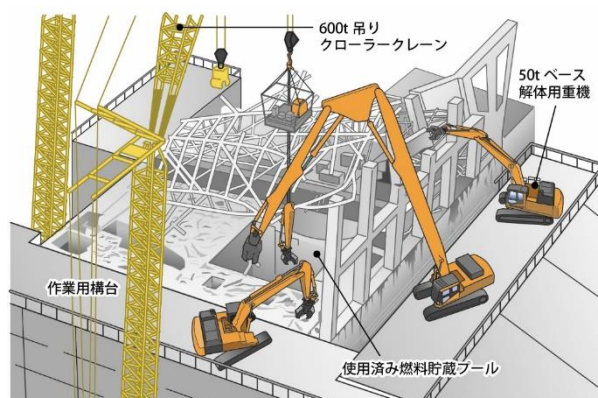
除染方法の検討 機器を再利用する場合は、剥離性塗料等を活用した保管場所を検討します。

作業開始前の高線量箇所の除染等（線源除去）に関する知識

被ばく防護4原則の一つに、線源を除去することが挙げられています。線源を除去することによって、その近傍作業場所の空間線量当量率を低減し、作業に伴う被ばく線量を低減することができます。これまで発電所建屋周辺の線源となっていたガレキの撤去や、汚染土壌の剥ぎ取り等によって、敷地内の空間線量当量率の低減が図られてきました。建屋内部については、ガレキのほか、配管、ダクト、その他構造物に付着した放射性物質により、高線量当量率を示す場所も多くあります。それらの線源物質を除去することにより、作業者が作業できるまで空間線量当量率を低減することが必要となります。

ここでは、線源となっている物品や、機器の基本的な除去方法、除染方法について説明します。

（１）移動・回収が可能な線源となっている物品・機器



遠隔操作システムによる原子炉建屋上部のがれき解体・撤去イメージ

（出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより作成）

建屋内部のロボットによるガレキ、粉じんの回収・除去

建屋内は高線量当量率の場所が多く、人手により線源となっているガレキや粉じんの回収は困難なため、無人化ロボットによる回収が試みられています。線源は、床だけでなく高所のダクトやケーブルトレイにも存在するため、3次元で回収除去を行う必要があります。

掃き集めによる回収の例



吸引による粉じん回収の例

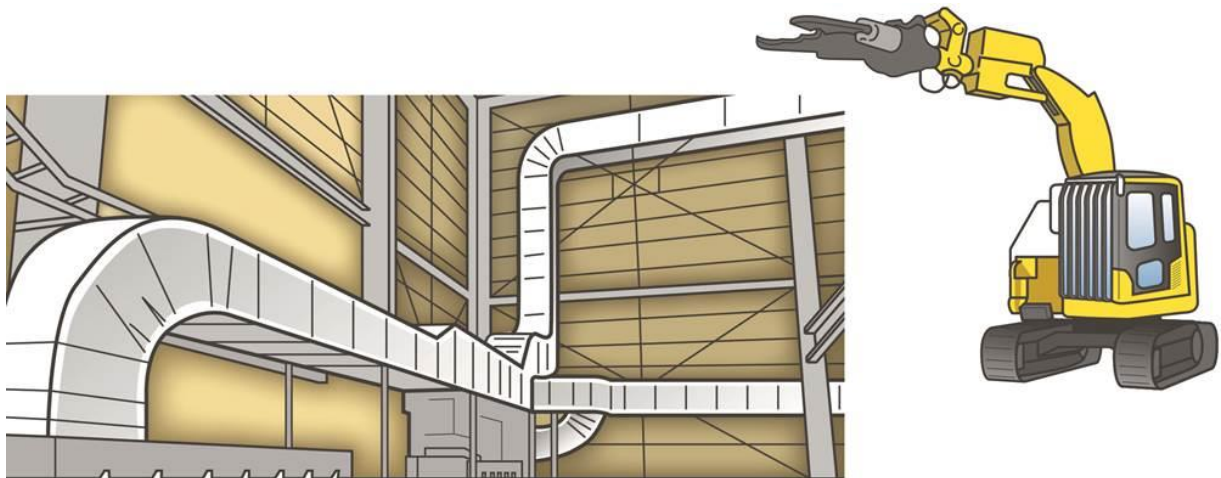


（写真提供：吸引による粉じん回収の例：三菱重工業（株））

(2) 分離切断が可能な線源となっている機器・部位

車両系建設機械（解体用）によるダクト等の除去

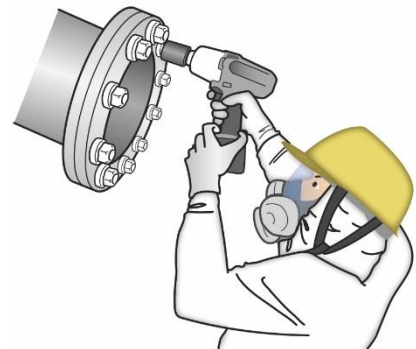
撤去が可能な線源となっているダクト等は、人手又は遠隔操作の重機によって解体撤去を検討します。



分解による設備等の分離

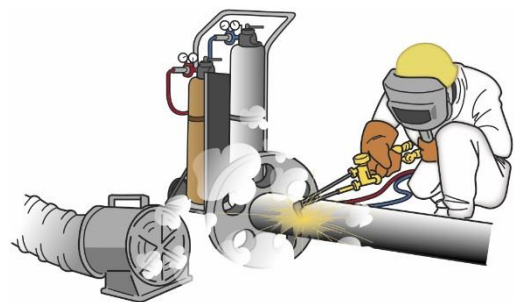
線源となっている設備や機器で、分解が可能なものについては、線量当量率によって人手によるか、ロボットによるか検討が必要です。人手による場合、線源に作業者が近づくことになりますので、できるだけ自動式の機器・工具の採用を検討します。

例えば、ボルト緩めの場合、自動レンチを取り付けることにより、その場をすぐに離れることができると被ばく線量を少なくすることができます。



切断による線源となっている設備の分離除去

切断によって線源部分を分離し撤去する場合、切断方法の検討が重要です。切断対象の材質によって切断方法は異なりますが、大きく機械切断と熱的切断があります。また、切断方法の選択に際しては、放射線防護上の課題を考慮する必要があります。



切断法の特徴と放射線防護上の課題

分類	切断方法	切断対象と特徴	放射線防護上の課題等
熱的切断	ガス切断	○炭素鋼が対象。鋳鋼は種類によるが通常～30mm厚程度	○粉じんが発生するため、仮設ハウスで覆う等拡散防止対策が必要である
	プラズマ切断	○ステンレス鋼のほか炭素鋼、低炭素鋼、アルミ合金鋼等を溶融して切断 ○切断肉厚が大きいと困難	○微粒子であるヒュームが多量に発生、このヒュームはフィルタを短時間で目詰まりさせる原因となる ○オゾン、窒素酸化物の発生に注意する
	レーザ切断	○炭素鋼、ステンレス鋼、その他特殊鋼～30mm厚 ○肉厚が厚くなると、高出力の装置が必要となる	○ガス、プラズマ切断法に比べて、粉じんの発生量は少ない
機械切断	バンドソー・ワイヤーソー・メタルソーによる切断	○切断対象の材質に合わせて刃を選択する ○対象物と切断機を固定する必要がある	○粉じんの発生が少ない ○火災の危険が少ない ○切断のための準備に時間を要する場合があり対象が限られる
	ディスクサンダーによる切断	○手持ちの回転工具 ○切断対象の材質に合わせて砥石を選択	○手持ちでは作業者の被ばく線量が高い

大型機器除却に使用されている大型バンドソーの例

汚染水フランジタンクの切断に使用します。



- 縦型切断ユニット（左）
- 横型切断ユニット（右）

（出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより）

(3) 除染による線源の除去

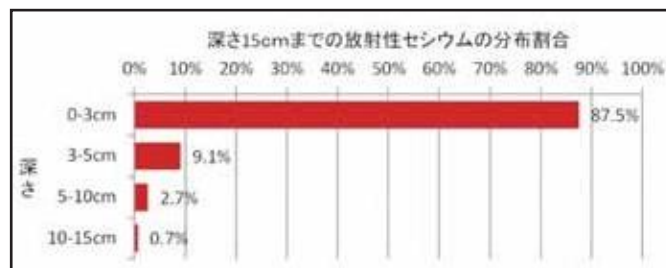
敷地内の除染

敷地内は舗装面や草地、林等があり、主に飛散した放射性セシウムによって汚染しています。農地の深さ方向の放射能調査では、未耕作地で3～5 cmまでの深さに、ほとんど吸着されていることがわかっています。

したがって、深さ5 cm程度の表層土壌をはぎ取ることにより、線源となっている土壌を除去することができます。また、舗装面は高圧吸水洗浄が効果的です。

これまで、広範囲の汚染エリアでは除染作業が行われており、敷地内の線量当量率は大きく低減しています。

未耕作農地での深さ方向の放射性セシウムの分布（例）



（出典：農林水産省 ホームページより）



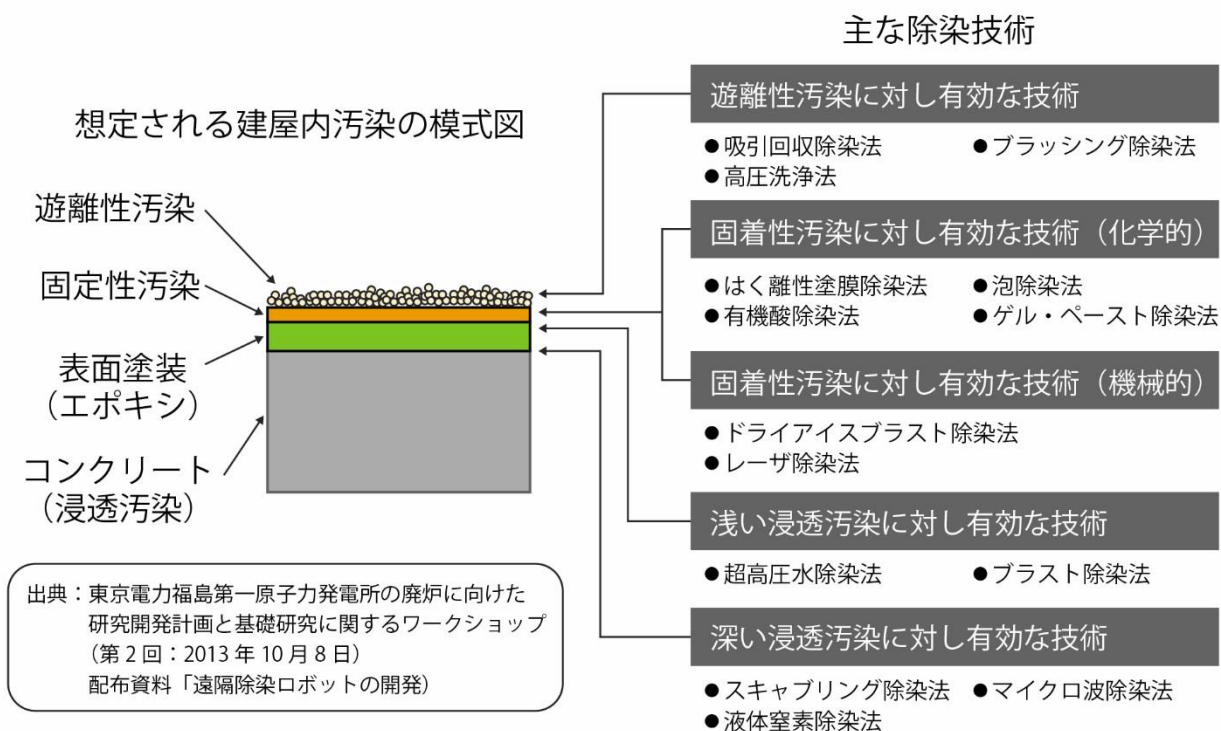
表土剥ぎ作業

高圧吸水洗浄

（出典：日本環境調査研究所 ホームページより）

建屋内の除染

建屋内は構造物内外に放射性物質が付着しており、想定される汚染の状況と主な除染技術は以下の通りです。



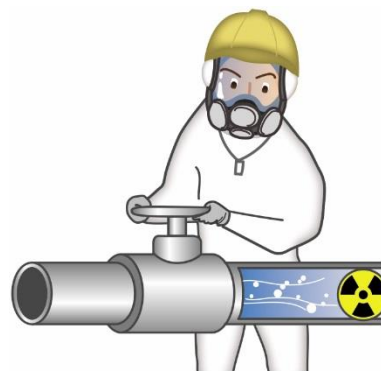
主な除染法の特徴と課題

除染の種類	方法	特徴	適用上の課題
高圧（吸）水洗浄	高圧の水（温水）を、対象面に吹き付け、汚染を浮かして廃液とともに回収する	<ul style="list-style-type: none"> ○ 回転ノズルや吸引装置を付加することにより、効果的な除染が可能である ○ 廃液処理が必要となる 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 廃液の回収を同時に行うと、対象面をカバーする必要がある ○ カバーすると非接触除染のメリットが生かせない
剥離塗膜	剥離塗膜を対象面に塗布し、乾燥過程で化学的に汚染を遊離させ、塗膜内に取り込ませる。乾燥後、塗膜を剥離する	<ul style="list-style-type: none"> ○ 遊離性の汚染は確実に除去できる ○ 固着した汚染は状況に合わせて物理化学的に遊離させる必要がある 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 自動化が困難である ○ 必要塗膜厚を確保しないと剥離できない場合がある ○ 塗布品質管理が重要である
ドライアイスブラスト	ペレット状のドライアイスを高圧の気体で吹き付けることにより汚染物質を遊離させ、回収する	<ul style="list-style-type: none"> ○ やや固着した汚染や狭隘部の汚染除去も可能である ○ 二次廃棄物が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 結露水の凍結や静電気の発生、粉じんの飛散対策が必要である ○ 固着程度により効果が異なる ○ 酸欠の可能性はある
ブラスト	汚染除去に有効な種類のメディアを高圧の気体で吹き付け汚染物質とともに回収する	<ul style="list-style-type: none"> ○ 必要な厚さの研削ができ浸透した汚染の除去も可能である ○ 二次廃棄物が多い 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 他の除染法と併用し、本法を浸透汚染場所に使用することにより、効果が期待できる
液体窒素	塗装されたエポキシ樹脂に液体窒素を吹きかけ、塗膜の脆化とコンクリートと塗膜の熱収縮率の違いで塗装を剥離する	<ul style="list-style-type: none"> ○ 物理的な力を必要としない ○ 除染法としてシステム化された例が見当たらない 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 実績がなく、実証試験が必要である

配管内のフラッシング/配管内除染

配管内に線源となっているスラッジ等が堆積している場合、配管内を水や空気を流して、移動させることにより放射線量の低減を図ることができます。

配管内面に酸化状態で汚染物質が固着している場合は、化学薬品を流入させて、酸化物を溶解除去することができます。しかし、対象物の材質、汚染の性状等の条件や廃液の処理方法等について、総合的な計画が必要です。



(4) 汚染の固定による線源の飛散防止

線源となっている汚染物表面から放射性物質が空気中に粉じんとなって飛散することがあります。体表面に付着したり、体内に取り込まれると身体汚染や内部被ばくの原因となります。そのため、ガレキや作業場所の汚染が飛散しないよう汚染の囲い込みや封じ込めによって固定するのが有効な方法です。汚染物にカバーをかけたり、ポリ袋に入れて密閉するのも一種の囲い込みです。封じ込めに用いる飛散防止剤には、浸透型や皮膜を形成するタイプのものがあります。除染機能を有するストリッパブル型の塗料や、ベータ線の遮へい機能を有する塗料といった特殊な封じ込め材等が開発されています。



◎アスベスト撤去作業に於ける飛散防止剤の散布


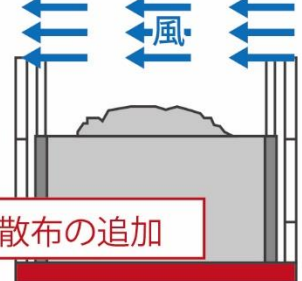



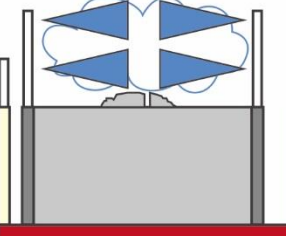
◎養生用シートにも飛散防止剤を散布し、その後撤去する



◎ストリッパブル塗料による封じ込め、及び除染

1号機 飛散抑制対策実施例 1号機のオペレーションフロアのガレキ撤去作業では、建屋カバーによる囲い込みや飛散防止剤等によって汚染物質を固定する対策等が行われています。

目的	ダストの固着	風の流入抑制	風の流入抑制
方法	飛散防止剤の散布	壁パネル	バルーンの設定
時期	1回/月、強風予想時	常時	H26.6 設置済み
予防			

目的	ダストを叩き落とす
方法	緊急散水
時期	警報 発報時
緊急	



飛散防止剤を散布することによって、ガレキに付着している汚染を固定し、風等による飛散を防止した。また、風の流入抑制対策や緊急時の噴霧による鎮じん対策などを行っている

(出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより作成)

4

高線量箇所（線源）から作業場所までの離隔距離 確保、及び作業時間短縮の方法

建屋内は、作業者が立ち入ることのできない高線量当量率の場所から、比較的低線量当量率の場所があります。作業計画を立案するにあたっては、作業場所となる区域の空間線量当量率の環境をあらかじめ把握する必要があります。さらに、工事の目的を達成しつつ作業場所の変更や、無人化での作業の可能性、高線量下での作業を短時間にするための工夫、線源から離れて作業できる機器や工具の採用、各要素作業を合理化し、モックアップ訓練によって後戻りのない作業を行えるようにする等、あらゆる立場から被ばく線量の低減方法を検討する必要があります。

離隔距離確保のための検討事項としては以下のような項目があります。

- ①高線量場所での作業の必要性の再検討
- ②遠隔無人化工法による作業への置換
- ③高線量場所の区画、立ち入り規制
- ④線源からの距離を取れる工具、機器の採用

作業時間短縮のための検討事項としては以下のような項目があります。

- ①高線量場所での作業量の低減化
- ②新たに持ち込む工具・機材等の事前養生
- ③要素作業の区分による作業の合理化
- ④モックアップ訓練の実施
- ⑤線量当量率が変化する場所での監視と対応

（１）離隔距離確保のための検討事項

①高線量場所での作業の必要性の再検討

高線量場所での作業が計画されている場合、別の場所に変更できないか、その作業をやめられないか等を検討します。例えば、

- ◎配管・ケーブル・ホースの敷設経路を変更する。
- ◎高線量エリアを通らない作業者の移動ルートを確保する。
- ◎遮へいや除染作業後で線量が低くなってから実施する等、工程の変更が可能か検討する。
- ◎毎日の作業での準備片付け作業を合理化できないか考える。連続作業の場合、高線量場所での作業量が少なくなる場合もある。

②遠隔無人化工法による作業への置換

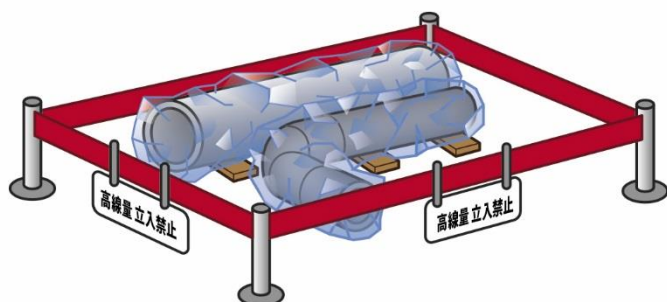
遠隔操縦ロボット機器等の採用により、作業者は、高線量場所から離れて操縦等を行います。



(出典：ガデリウス・インダストリー(株) ホームページより)

③高線量場所の区画、立ち入り規制

過剰被ばくが懸念される場所は、無意識に立ち入れない明確な仕切りや標識を設置します。線量の低い待機場所を明確にし、作業場所までの安全通路を定めます。



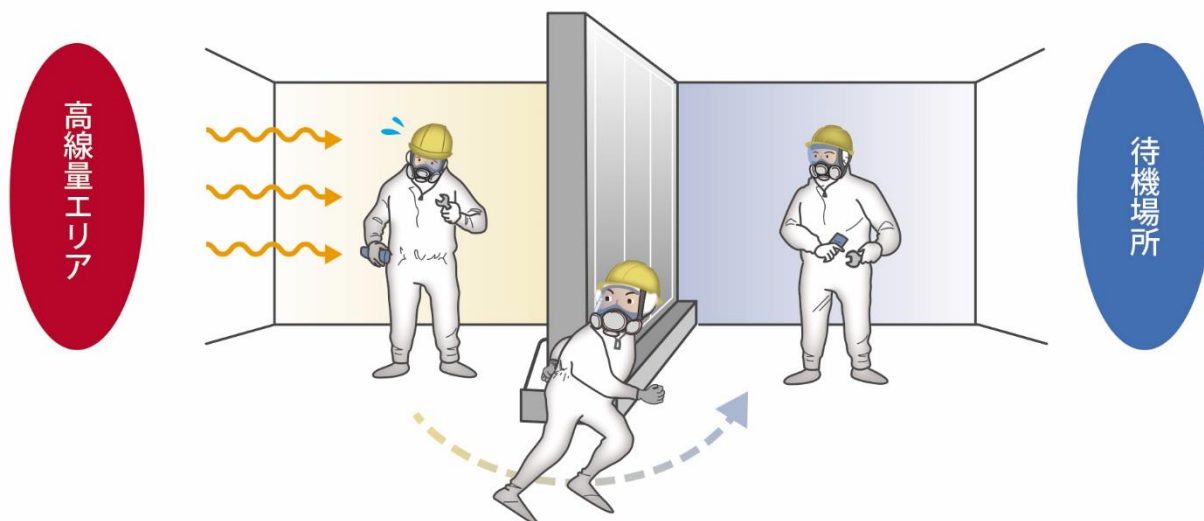
標識の例

警告 高線量

表面 MAX10mSv/h
2m 以内 立入禁止

高線量注意

表面 MAX1mSv/h
近づかないで下さい



④線源からの距離を取れる工具、機器の採用

専用の吊り具や運搬台車等を用い、線源となっている機器等の運搬時に、少しでも近づかないで作業ができるように工夫します。



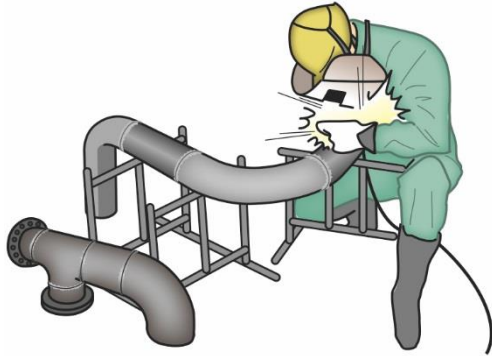
高線量物品は抱え込まないで、台車等を利用する

(2) 作業時間短縮のための検討事項

①高線量場所での作業量の低減化

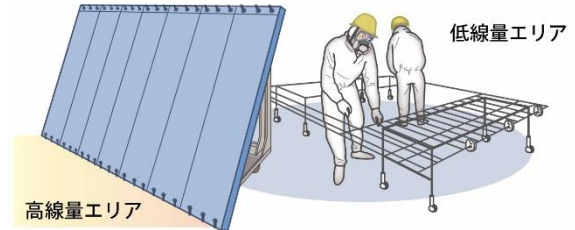
■新たに設置する機器等のプレハプ化

新たに設置する機器等は、現場での作業時間を極力短くするために、事前に加工、組み立てが可能な部分の作業を行います。設置に要する時間的なロスを徹底的に軽減することを考えます。



■低線量エリアへの移動による作業（移動可能機器）

高線量場所を使用するロボットや機器等を修理・点検する場合は、できるだけ低線量当量率エリアに移動してから作業を行います。



②新たに持ち込む工具・機材等の事前養生

新たに持ち込む工具や機材は、持ち込み前にシートや剥離型塗料で養生し、汚染の付着防止を行います。使用後は養生を剥がすだけで余計な除染作業がなくなり、作業時間の短縮となります。

Strippabule Coat (ストリップブルコート)

「塗る」・「剥がす」作業だけ。

不定形な対象物に、エアレススプレーやローラー刷毛塗りで塗布し、養生撤去は塗膜を剥がします。

SC-AD (アドバンス)

設備機器・床壁ラスの保護



発電機への適用

SC-AR (アンチラスト)

資材・鉄鋼面等の防錆



鉄鋼材への適用

PEELING TYPE PAINT・・・剥離型塗料

- ・防錆・防水性があり、仕上げが綺麗
- ・吹付により機器の細部、凹凸まで保護
- ・屋外での使用は12ヶ月間の保護可能（屋内使用は24ヶ月間の保護可能）

Skudo HT

滑らかな床面、コンクリート等の凹凸面に対しても、養生効果を発揮できます。



床面養生への適用例としてスクードシールドが適用されています。

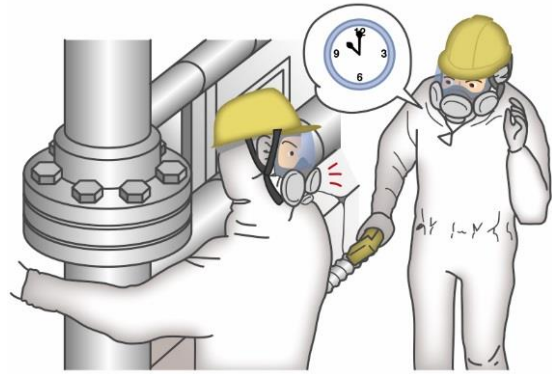
※水性剥離型塗料…液体塗料を塗って、乾燥すると剥離が可能な養生材



(出典：日本環境調査研究所 ホームページより)

③要素作業の区分による作業の合理化

作業を要素作業に区分し、それぞれの作業者の作業分担、作業ステップ、動作等を事前に検討し、高線量場所での作業の最短化を図ります。



④モックアップ訓練の実施

事前に十分検討した作業手順に基づき、モックアップ訓練を実施し、現場での作業を確実かつ短時間に行えるように準備します。補助員の要否、役割、トラブル時の対応等、詳細にわたって準備することが必要です。



⑤線量当量率が変化する場所での監視と対応

汚染水の移送や線源の移動等で作業場所の線量当量率の変化が予想される場合、エリアモニタ等を用いた連続的な線量当量率の監視が必要な場合があります。短時間でアラームが鳴動する等の異常が認められた時は、すぐに待機場所へ移動し状況を確認します。



異常に気付いたら、すぐ待機場所へ移動
(出典：日本レイテック（株） カタログより)

5

高線量箇所（線源）に対する遮へい工事に関する知識

（１）遮へいに関する基礎知識

①ガンマ線の遮へいに用いられる主な材料

発電所内の主な放射性物質であるCs-137から放出されるガンマ線は、比較的能量が高いため、重量や比重の大きな材料が用いられます。

材質	比重	遮へい材として供給される形状	特徴等
鉛	11.35	鉛板/硬鉛板/成型ブロック/鉛合板鉛板積層/鉛毛マット（～5mmPb） 鉛毛、鉛球（0.3～0.5mmφ）、粉体	○同じ重量厚さ（g/cm ³ ）で鉄と比べると遮へい効果が大きい ○加工しやすい
タングステン	19.1	樹脂タングステンシート（～3mm厚） フロアマット、タングステンベスト（9～12kg）	○樹脂にタングステンの粉を添加して作られる ○同じ重量厚さでは鉛とほぼ同等の効果がある
鉄	7.86	鉄板/炭素鋼球/ステンレス鋼球	○使用しやすい材料である ○遮へいを兼ねた機器・構造物を製作できる
コンクリート	2.1～3.5	コンクリートブロック/パネル/ ボックスカルバート/L型擁壁 他各種製品	○高比重骨材を混合することにより高密度化も可能である ○容易に厚さが得られるため、必要な遮へい効果が得られやすい
含鉛プレートガラス	—	プレート/ブロック 鉛当量～3mmPb	○視界を確保する場合に使用する ○視認性と遮へい効果はトレードオフ関係にある
多量の水	1.0	高線量機器取扱プール/線源保管用水槽	○水深を深くすることで、高線量物を扱える ○Cs-137に対して鉄の8倍厚で同等の効果が期待できる

②ガンマ線の遮へいに用いられる主な資機材 ～遮へい材に用いられる資材例～

鉛遮へい材	タングステン遮へい材	コンクリート製品
 <p>左上から 鉛板 鉛ブロック 鉛毛 鉛線</p> <p>右上から 鉛粒 鉛マット (出典: ヨシザワLA (株))</p>	 <p>タングステンシート (出典: 下西技研工業(株))</p> <p>樹脂 タングステン (出典: 岳石電気(株))</p> <p>タングステンベスト (出典: 信越化学工業(株)・日本特装(株))</p>	 <p>L型擁壁 (出典: A & K ホンシュウ (株))</p> <p>ボックスカルバート (出典: インフラテック (株))</p> <p>ブロック (出典: (株) 竹中工務店)</p>

③主な遮へい材の遮へい効果

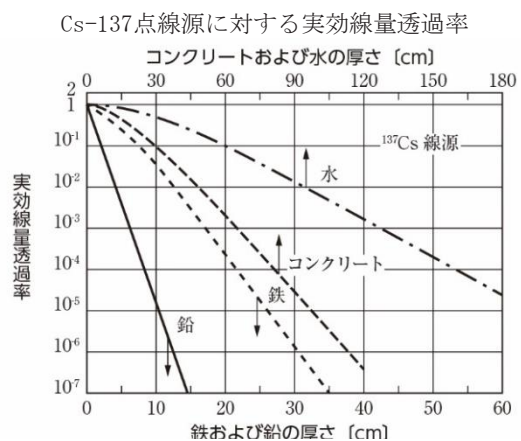
Cs-137からの放射線が半減する遮へい体の厚さ (半価層)

大幅に減衰した γ 線の広いビームに対する、およその半価層と1/10価層値

遮へい材	ウラン		鉛		鉄		コンクリート	
	半価層	1/10 価層	半価層	1/10 価層	半価層	1/10 価層	半価層	1/10 価層
^{24}Na	0.9	3.0	1.7	5.6	-	-	-	-
^{60}Co	0.7	2.2	1.2	4.0	2.0	6.7	6.1	20.3
^{124}Sb	-	-	1.4	4.5	-	-	7.0	23.0
^{131}I	-	-	0.7	2.4	-	-	4.6	15.3
^{137}Cs	0.3	1.1	0.7	2.2	1.5	5.0	4.9	16.3
^{182}Ta	-	-	1.2	4.0	-	-	-	-
^{192}Ir	0.4	1.2	0.6	1.9	1.3	4.3	4.1	13.5
^{198}Au	-	-	1.1	3.6	-	-	4.1	13.5
^{226}Ra	-	-	1.3	4.4	2.1	7.1	7.0	23.3

(出典: ICRP Pub. 21.

体外線源からの電離放射線に対する防護のためのデータより引用)



(出典: 日本原子力研究開発機構 JAERI-Data/Code 2000-044 より引用)
(日本アイソトープ協会「アイソトープ手帳 12版」にも掲載)

(2) ガンマ線の遮へい計画での考慮点

ガンマ線の遮へいに際しては、作業計画場所の線量当量率の寄与方向や線源の位置・形状等の考慮が必要です。例えば、線源位置が明確な場合は以下の方法が挙げられます。

- ①線源を直接覆い遮へいする
- ②低線量待機場所を確保する
- ③作業者防護用の遮へい体を設ける

作業場所での放射線の方向や寄与率を測定（推定）し、効果的な遮へいを行います。貫通孔等から放射線が漏洩（ストリーミング）する場所への注意も必要です。線量の漏洩がある貫通部への遮へい強化や、散乱線に有効な必要遮へい体の厚さを計画することができます。

遮へい効果は、遮へい材の材質と厚さ、形状、位置等場所によって複雑な要因が関係するため、できるだけ事前の試験により効果を確認しておきます。

線源からの直接線又は散乱線の量により、同じ遮へいでも効果が異なります。予め作業場所におけるガンマ線の実効エネルギー値を調査しておく、効果算定の精度を改善できます。

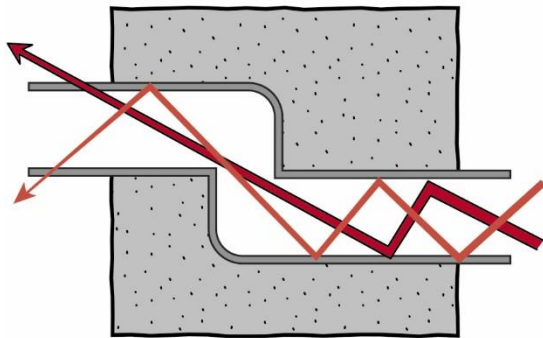
遮へい効果を算定する際の考慮すべき点

各線源からの寄与率を考慮する

- ①方向性
- ②ストリーミング

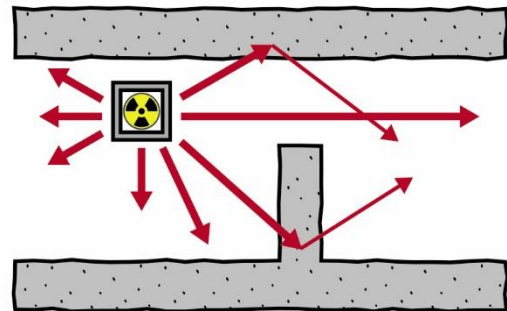
遮へい効果に影響する要因

- ①ガンマ線のエネルギー分布
- ②線源の形状・大きさ
- ③遮へい体の材質、形状、厚さ
- ④線源と遮へい体の位置関係



貫通孔等からのストリーミング

遮へいとなっている構造物にダクトや配管等の貫通孔がある場合、直接反対側が見えなくても、放射線は散乱しながら出てくることがあります。これをストリーミングといいます。



放射性核種からの直接線と散乱線

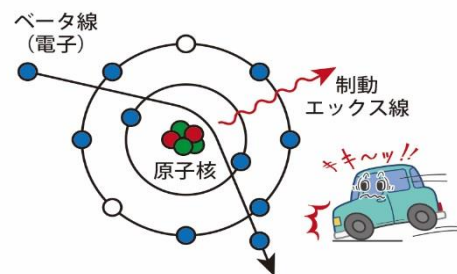
建物内等で線源から離れている場所や、遮へいとなる機器等が存在する場合、ガンマ線はコンクリートや機器、遮へい材料に当たり、それらの物質との相互作用によりエネルギーの低くなった散乱線が大半を占めていると考えられます。

(3) ベータ線の遮へい計画での考慮点

ベータ線による被ばくに対する対策が必要となるのは、主としてSr-90及びY-90によって高密度に汚染された場所で作業を行う場合です。

ベータ線のエネルギーは、最大値を持つ連続スペクトル分布を示すため、最大エネルギーの飛程に相当する厚さの遮へい材で汚染源を覆うことで完全に遮へいすることができます。

遮へい材の選定で注意が必要となるのは、大きな原子番号の元素の素材を用いると、制動放射線（制動エックス線）が発生し、線量当量率が上昇する点です。樹脂と重金属粉体との複合素材の場合は、制動放射線が発生しにくい傾向がみられます。作業員の防護衣によって、ベータ線の被ばくを防止することも可能です。



ベータ線からの制動放射線

ベータ線からの制動放射線

ベータ線は電子の粒子であり、電気的な性質により物質中では電離、励起等によりエネルギーを失い、容易に停止します。

鉛や鉄等の原子番号の大きな物質内で、急激にベータ線が阻止されると、エネルギーの一部が制動エックス線として放出されるため、線量当量率が上昇することがあります。そのため、ベータ線を遮へいする際は、できるだけ原子番号の小さな材料を用いるとよいことになります。

ベータ線の遮へい計画で考慮すべき点

汚染場所の範囲と強度を明確にする

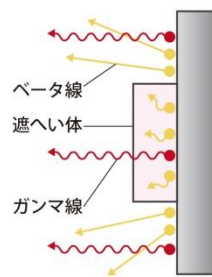
ガンマ線線量当量率に対して、ベータ線線量当量率の割合が10倍以上である場合、防護対策を考える

遮へい材の選定

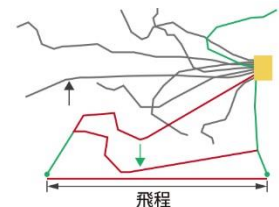
- ①Sr-90及びY-90の場合、遮へい材材質は低密度材料（樹脂、プラスチック、ゴム）を用いる
- ②ベータ線の最大飛程相当（ $1\text{g}/\text{cm}^2$ ）の厚さで十分に遮へいが可能である
- ③樹脂と重金属（鉛、タングステン）との複合材料の場合、制動放射が起きにくい

防護衣着用の選択

作業内容、作業性、被ばく量を考慮して、ベータ線防護衣の着用の有無を決定する



ベータ線の遮へい効果



物質中のベータ線の飛跡例
停止するまでの全行程が飛程

ベータ線の遮へい効果

放射平衡状態のSr-90及びY-90から放出されるベータ線の最大エネルギーは2.28MeVであり、アルミニウム中の最大飛程は約 $1200\text{mg}/\text{cm}^2$ です。

そのため、アルミニウムやゴムマット、プラスチック等を最大飛程程度の厚さで用いることで、ベータ線をほぼ100%遮へいすることができます。

(4) 遮へい設置方法

線源が比較的限定された部位である場合、線源を覆い被せるように遮へいすることは最も効果があります。作業場所の状況、線源の大きさ、位置等によって対応は異なりますが、いくつかの例を挙げます。

①線源部分を遮へいする方法

配管が線源となっている場合の対策例

ベルト付きの遮へいマットを直接配管に巻き付ける方法です（写真①）。マット内部には鉛毛又は積層鉛板が入っており、大きさは600×300mm、鉛当量10mm、重量は1枚当たり20kgとなっています。

本方法を採用する場合は、鉛遮へい体の重量がすべて配管に掛かるため、事前に耐荷重や耐震上問題がないか検討しておくことが必要となります。



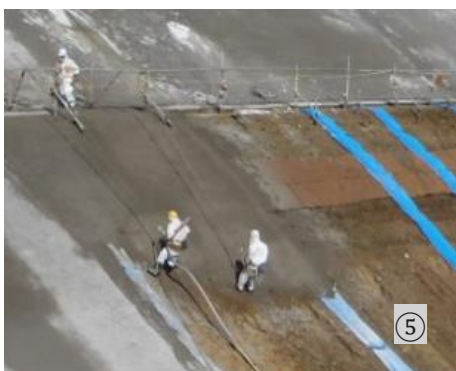
線源となっている配管の上部に、常設の取り付け用ハンガーパイプを取り付け、遮へいマットを連結して、カーテン状に吊り下げた遮へい設置の例です（写真②）。必要により、遮へい体を折りたたんだり、部分的に取り外すことができます。

写真②：必要により、遮へい体を折りたたんだり、部分的に取り外すことができます。



機器が線源となっている場合の対策例

写真③・④は、1号機タービン建屋地下で線源となっているヒータドレン配管やピット、開口部を衝立を立てる等して鉛マットで遮へいした例です。遮へい対象場所は高線量率なので、短時間で遮へい体を運搬し設置できる作業方法を検討し実施しています。この遮へい体の設置により、その後に実施された工事作業員の被ばく低減が図られました。



野外で線源となっている地面への対策例

構内の地表面をモルタルで覆うフェーシングと呼ばれる工法です（写真⑤）。広範囲を覆うことで、周辺の空間線量当量率を低減させることができます。また、雨水が地下に染み込むのを防ぎ、建屋に流入する地下水を減らす効果も期待されています。

出典 写真①②：日本環境調査研究所 ホームページより
写真③④：H29 被ばく低減対策好事例集
写真⑤：ライト工業株式会社

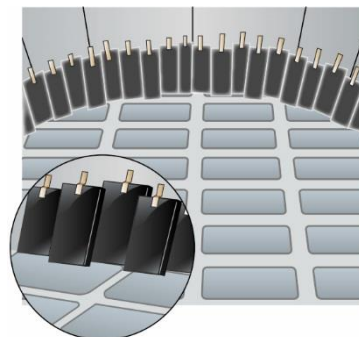
②ベータ線源部分を遮へいする方法

ベータ線による外部からの被ばくは体表面の組織（皮膚と眼の水晶体）に限られ、これらの組織は法的に等価線量として線量限度が定められています。Sr-90及びY-90等の高エネルギーのベータ線放出核種で広範囲が汚染されている場合、作業場所全体にベータ線が飛び交う状況になり、ベータ線被ばくが大きくなる場合があります。

対策として、それらの汚染面をゴムマットやベニヤ板、プラスチック等、原子番号の小さな材料で覆うことにより遮へいすることが効果的です。

汚染水タンク内の汚染面への対策例

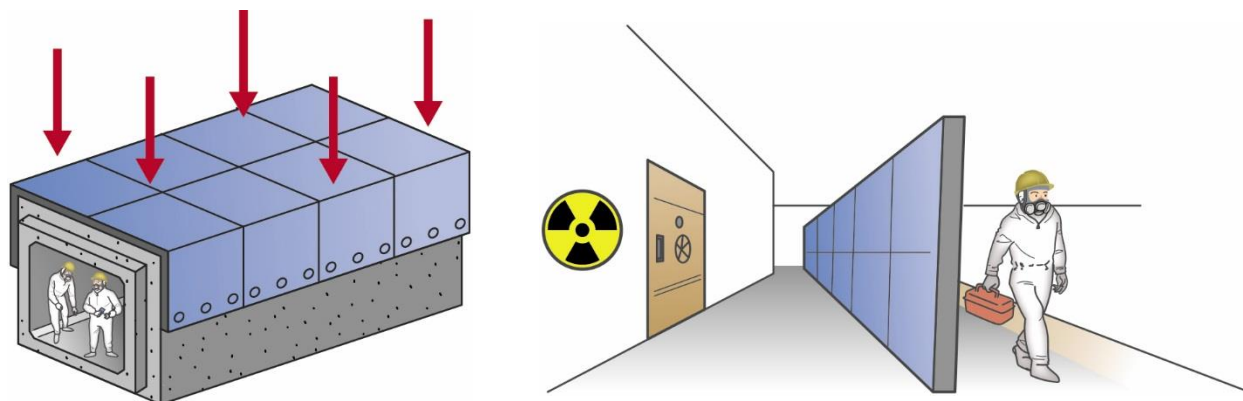
Sr-90及びY-90で汚染しているタンク底面を、2～3mmの厚さのゴムシートを必要な枚数用意し覆うことで、ベータ線を遮へいしています（右図）。壁面はコンパネ（12mm）を用いて、汚染の高い下部面を覆い遮へいしています。これらの対策により90%以上の遮へい効果が得られています。



③低線量待機場所を確保する方法

線源を直接遮へいできない場合の対策として、遮へいした低線量エリアを確保し、直接作業していない場合はそこに避難することで被ばく線量の低減を図ることができます。遠隔操作者や、監視員等比較的長時間滞在しなければならない場合等に適用した例があります。

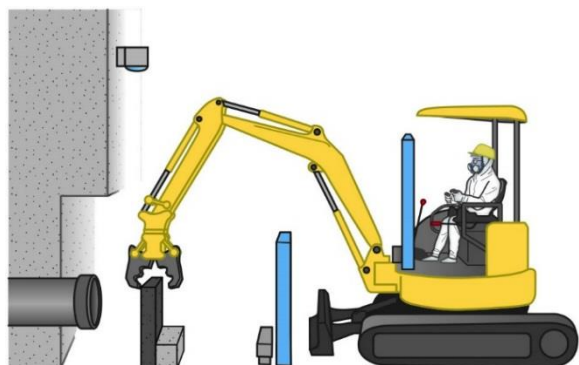
重機を使用できる場所では、コンクリート製のボックスカルバート等が用いられています。重機が入らない場所では、鉛マット等で遮へいされた小屋や壁等を作製し、低線量場所を確保しています。



④作業者防護用の遮へい体を設ける方法

高線量当量率の作業環境で、かつ、重機等の操作等で同じ場所に長時間いなければならない時に、その箇所を限定的に遮へいすることが効果的な場合があります。

下図は、2号機1階X-6ペネ部の遮へいブロックを撤去した際に用いられた遮へい体の例です。また、運転座席自体に遮へい効果を持たせることが提案されています。シート後部並びに前面遮へい体により、体幹部の被ばく線量を低減することができます。



（出典：東京電力ホールディングス（株） ホームページより作成）

放射線シールドシート概要

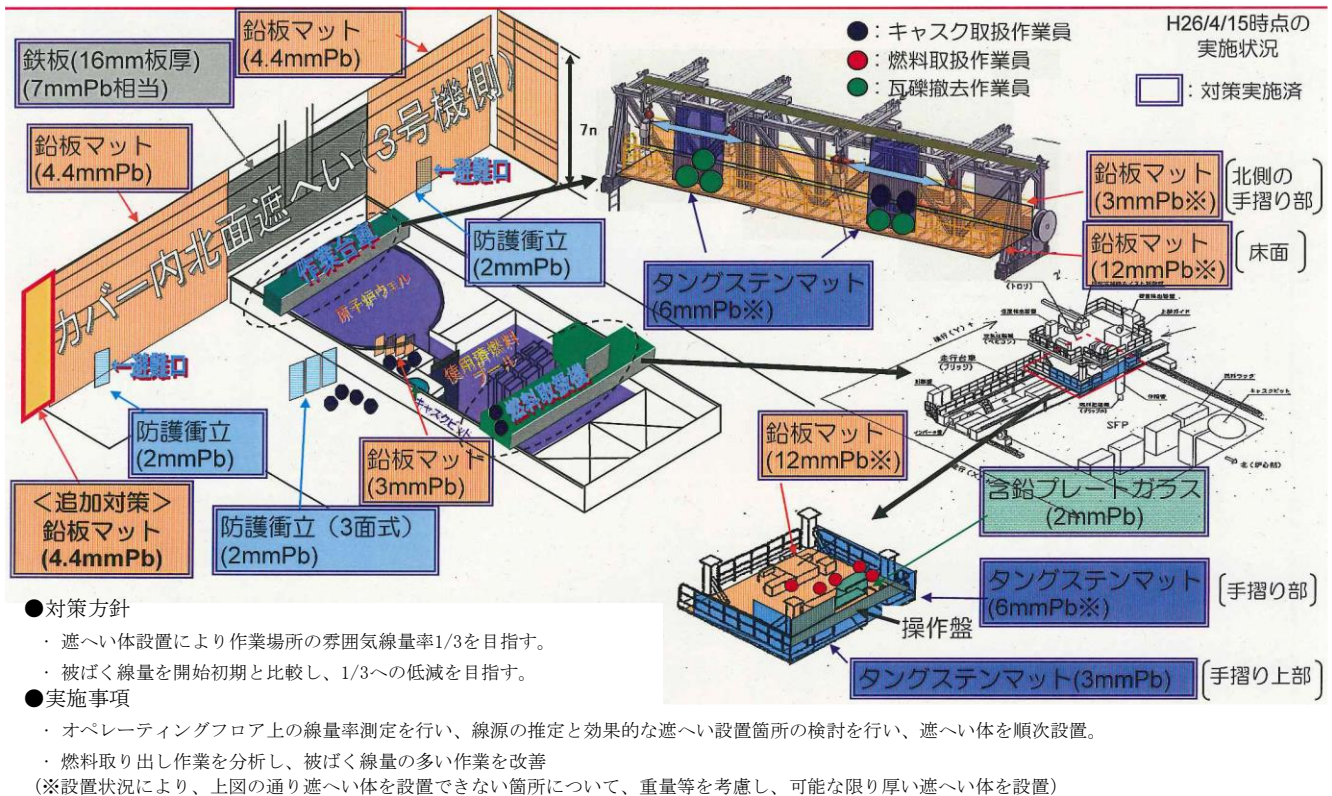


※CGIによるイメージ図であり実物とは異なります。

（出典：三菱重工業（株） ホームページより）

(5) 作業場所の遮へい設置例

4号機燃料取り出し作業時における遮へい体の設置概要を示します。作業者の作業場所並びに線源方向に遮へい体を設置し、被ばく低減を図った例です。



主な場所の低減効果

燃料取扱機トロリ上
38～60%低減
0.055→0.022mSv/h
0.08→0.05mSv/h

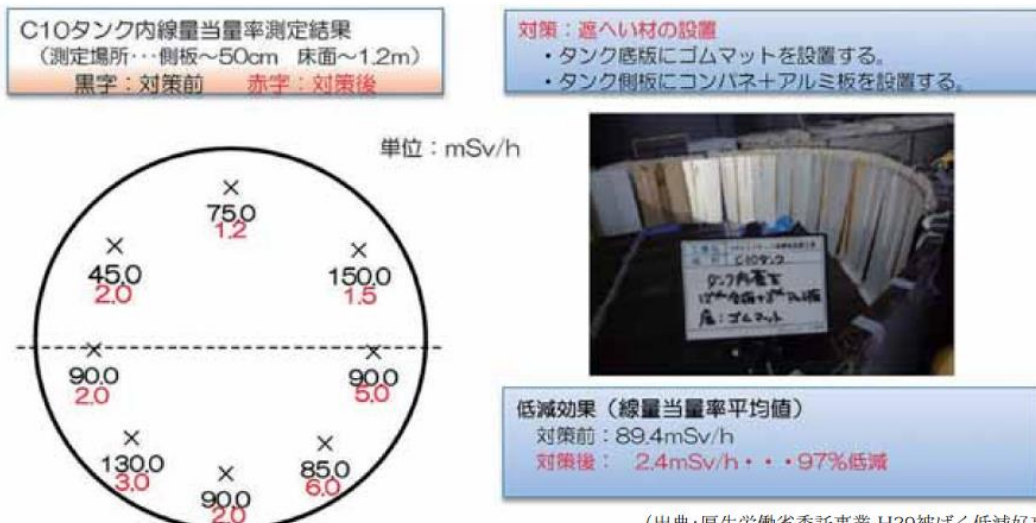
オペレーティングフロア上の
主要作業エリア
33%低減
0.09→0.06mSv/h

作業台車上
69%低減
0.09→0.028mSv/h

(出典：東京電力ホールディングス（株）ホームページより)

ベータ線の遮へい設置例

ヤードフランジタンク解体エリアで実施されたベータ線遮へいの例です。タンク内に作業が入る際、タンク内ベータ線を遮へいするため底板はゴムマット、側板はコンパネ+アルミ板で遮へいが施されています。平均で89.4mSv/hが2.4mSv/hまで遮へいされました（97%低減）。



(出典：厚生労働省委託事業 H29被ばく低減好事例集)

6

休憩所等の整備

(1) 休憩所の設定

ガイドラインでは熱中症予防対策として、休憩所の設置に関して以下の要件を定めています。

- ①作業に従事する者の人数、作業場所からの距離等も考慮の上、労働者の休憩に必要な休憩施設を適切に設置すること。
- ②休憩所には冷房、トイレを配置するとともに、労働者が水分及び塩分を補給できるようにすること。
- ③身体冷却のための保冷材、心拍計、体温計等、緊急時の対応も想定した機器を配置すること。
- ④作業内容に応じ、作業場所の近傍に車両等を用いた簡易な休憩施設を設置すること。

※内部被ばくを防止するため、出入口を二重にして靴の履き替え等による汚染を室内に持ち込まないようにすることが重要です。なお、出入口を二重にできない場合は、入り口付近を天井からビニールシートで区画し簡易的な風除室を設けるのも良いです。また、サーベイメータ等の測定器を常設し、入室に際しては汚染検査を実施することも重要です。

※定期的な休憩所内の床等をスミヤ法による表面汚染検査、空気中放射性物質濃度の測定をするとともに、清掃や床シートの張替え、粘着マットの活用等による清浄度の維持につとめることが重要です。

※昨今の新型コロナウイルス感染症対策としては、手指消毒液を設置し、消毒に努めます。休憩所内では、3密（密閉空間、密集場所、密接場所）を避けるとともに、サージカルマスクを着用することも重要です。

その他、一般的な事項として以下の対策を実施します。

- ①緊急時の対応のための必要項目（救急医療室の電話番号、連絡事項、応急の措置の方法等）を、休憩所入り口に掲示します。
- ②休憩所内に応急処置に必要な救急用具（法定）を備え、その保管場所、使用方法を作業者に周知します。可能であればAEDも備えます。
- ③休憩所内に喫煙室を設ける場合は、受動喫煙を防止するためにタバコの煙が休憩所内に流入しないよう、専用の排気装置を設けた「喫煙専用室」とし、喫煙専用室の空気が休憩室に漏れ出さないようにする必要があります。厚生労働省ガイドラインでは、喫煙専用室の出入口において、室外から室内に流入する空気の気流が0.2メートル毎秒以上であることが求められています。なお、空気中放射性物質は、タバコのエアロゾル粒子に付着すると肺に取り込みやすくなり、内部被ばくのおそれが高まります。
- ④東京電力に区域区分変更または休憩所設定に関する申請が必要です。
- ⑤運用中は毎日サーベイメータ等での測定が必要です。
- ⑥非管理区域や休憩所等の汚染のおそれがない管理対象区域以外での飲食は禁止です（厚労省、職場における受動喫煙防止のためのガイドラインより作成）



休憩所の局所換気装置



休憩所収納スペース



大型休憩所休憩スペース

(出典：東京電力ホールディングス ホームページ)

(2) 熱中症予防に関する基礎知識

①熱中症とは

熱中症とは、高温多湿な環境下において、体内の水分及び塩分（ナトリウム等）のバランスが崩れたり、体内の調整機能が破綻する等して発症する障害の総称で、以下のような症状が現れます。

めまい・失神

「立ちくらみ」のこと。「熱失神」と呼ぶこともあります。

筋肉痛・筋肉の硬直

筋肉の「こむら返り」のこと。「熱痙攣」と呼ぶこともあります。

大量発汗・頭痛・気分の不快・吐き気・嘔吐・倦怠感・虚脱感

体がぐったりする、力が入らない、等。従来「熱疲労」と言われていた状態です。

意識障害・痙攣・手足の運動障害

呼びかけや刺激への反応がおかしい、ガクガクと引きつげがある、真直ぐに歩けない、等。

高体温

体に触ると熱いという感触があります。従来「熱射病」等と言われていたものが相当します。

(出典：厚生労働省パンフレット「熱中症を防ごう」より)

②WBGT値（暑さ指数）活用について

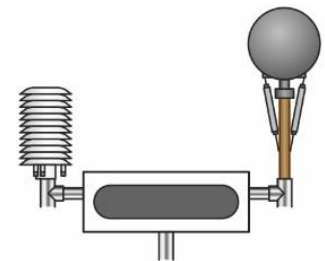
WBGT値とは暑熱環境による熱ストレスの評価を行う暑さ指数で、次式により算出されます。

①屋内、屋外で太陽照射のない場合（日かげ）

$$\text{WBGT値} = 0.7 \times \text{自然湿球温度} + 0.3 \times \text{黒球温度}$$

②屋外で太陽照射のある場合（日なた）

$$\text{WBGT値} = 0.7 \times \text{自然湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度}$$



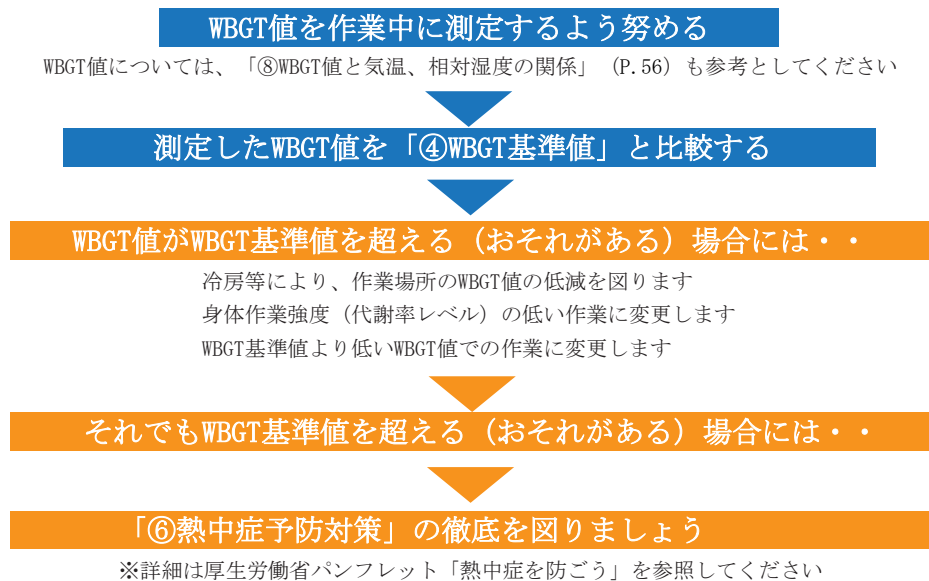
WBGT 値測定器（例）

自然湿球温度	強制通風することなく、輻射（放射）熱を防ぐための球部の囲いをしない環境に置かれた濡れガーゼで覆った温度計が示す値
黒球温度	以下の特性を持つ中空黒球の中心に位置する温度計の示す温度 (1)直径が150mmであること (2)平均放射率が0.95（つや消し黒色球）であること (3)厚さができるだけ薄いこと
乾球温度	周囲の通風を妨げない状態で、輻射（放射）熱による影響を受けないように球部を囲って測定された乾球温度計が示す値

(出典：厚生労働省パンフレット「熱中症を防ごう」より)

③WBGT基準値（暑さ指数）に基づく評価について

作業場所におけるWBGT値がWBGT基準値を超えるおそれがある場合には、熱中症を発症する可能性が高くなりますので、以下のフローチャートに基づいて対策を講じてください。



④身体作業強度等に応じたWBGT基準値（暑さ指数）

区分	身体作業強度（代謝率レベル）の例	WBGT基準値			
		熱に順化している人（℃）		熱に順化していない人（℃）	
0 安静	・ 安静	33		32	
1 低代謝率	・ 楽な座位 ・ 立位 ・ 軽い手作業 ・ 小さい力の道具機械	30		29	
2 中程度代謝率	・ 断続した頭と腕の作業（釘打ち） ・ 腕と脚の作業（建設車両操縦） ・ 腕と胴体の作業（しっくい塗り、中重量材料持ち、草むしり）	28		26	
3 高代謝率	・ 重い材料を運ぶ ・ 大ハンマー作業 ・ 草刈り ・ コンクリートブロックを積む ・ シヤベルを使う ・ のこぎりをひく ・ 掘る	気流を感じないとき 25	気流を感じるとき 26	気流を感じないとき 22	気流を感じるとき 23
4 極高代謝率	・ 最大速度の速さでとても激しい活動 ・ おのを振るう ・ 階段を登る、走る、7km/hより早く歩く	23	25	18	20

※詳細は厚生労働省パンフレット「熱中症を防ごう」を参照してください

⑤衣類の組み合わせによりWBGT値（暑さ指数）に加えるべき補正值

汚染区域内では、防護装備を着用しますので、算出されたWBGT値に補正值を加える必要があります。

一般に以下のような補正值が示されています。

（赤字は東京電力ホールディングス（株）統一ルール）

衣服の種類	作業服 (長袖シャツ) とズボン	布（織物）製 つなぎ服	二重の布 (織物) 製の服	SMSポリプ ロピレン製つな ぎ服	ポリオレフィン 布製 つなぎ服	限定用途の蒸気 不浸透性 つなぎ服
WBGT値に 加えるべき 補正值（℃）	0	0	3	0.5	カバーオール 1	アノラック 11

※補正值は、一般にレベルAと呼ばれる完全な不浸透性防護服に使用しないでください。

※重ね着の場合に、個々の補正值を加えて全体の補正值とすることはできません。

具体的な評価例

アンサンブル	単層のタイベック® ソフトウェア製つなぎ服		Microporous製つなぎ服		単層の溶剤保護つなぎ服	
衣服補正係数	2		6		11	
対象例	デュポン™ タイベック® ソフトウェア		BizTex® Microporous 透湿防水性 素材		デュポン™ タイケム® 9000	

「防護服着用により、作業者の暑熱ストレスはどのくらい増加するか？」 梶原 裕（九州大学教授 科学研究費助成事業 2013～2015）より
（出典：旭・デュポン フラッシュスパン プロダクツ株式会社）

⑥熱中症予防対策

1 作業環境管理

- (1)WBGT値の低減（屋根の設置 通風・冷房設備の設置等）
- (2)休憩場所の整備（冷房を備えた休憩場所 水分・塩分の補給等）

2 作業管理

- (1)作業時間の短縮（連続作業時間の短縮 作業強度が高い作業を避けること等）
- (2)熱への順化（計画的に、熱への順化期間を設ける）
- (3)水分・塩分の摂取（定期的な水分・塩分の摂取を指導する）
- (4)服装（クールジャケット等、透湿性・通気性の良い服装の着用等）
- (5)作業中の巡視（作業者の健康状態に異常はないかを確認する）

3 健康管理

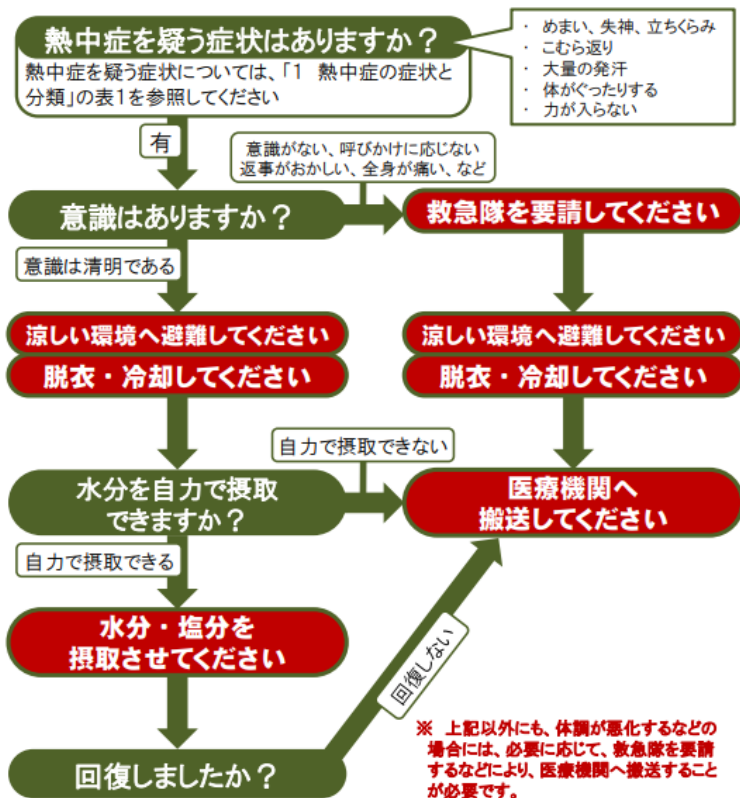
- (1)健康診断結果に基づく対応（医師の意見に基づく就業上の措置等）
- (2)日常の健康管理等（日常の健康管理について指導する）
- (3)労働者の健康状態の確認（作業開始前・作業中の労働者の健康状態を確認する）
- (4)身体の状態の確認（熱へのばく露を止めることが必要とされている兆候を見逃さない）

4 労働衛生教育

- (1)熱中症の症状 (2)熱中症の予防方法 (3)緊急時の救急処置 (4)熱中症の事例

※詳細は厚生労働省パンフレット「熱中症を防ごう」を参照してください

⑦熱中症の救急処置（現場での応急処置）



⑧ WBGT値（暑さ指数）と気温、相対湿度との関係

		相対湿度(%)																	
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
気温(℃) (乾球温度)	40	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	
	39	28	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37	38	39	40	41	42	43	
	38	28	28	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37	38	39	40	41	42	
	37	27	28	29	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37	38	39	40	41	
	36	26	27	28	29	29	30	31	32	33	34	34	35	36	37	38	39	39	
	35	25	26	27	28	29	29	30	31	32	33	33	34	35	36	37	38	38	
	34	25	25	26	27	28	29	29	30	31	32	33	33	34	35	36	37	37	
	33	24	25	25	26	27	28	28	29	30	31	32	32	33	34	35	35	36	
	32	23	24	25	25	26	27	28	28	29	30	31	31	32	33	34	34	35	
	31	22	23	24	24	25	26	27	27	28	29	30	30	31	32	33	33	34	
	30	21	22	23	24	24	25	26	27	27	28	29	29	30	31	32	32	33	
	29	21	21	22	23	24	24	25	26	26	27	28	29	29	30	31	31	32	
	28	20	21	21	22	23	23	24	25	25	26	27	28	28	29	30	30	31	
	27	19	20	21	21	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	30	
	26	18	19	20	20	21	22	22	23	24	24	25	26	26	27	28	28	29	
	25	18	18	19	20	20	21	22	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28	
	24	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22	23	24	24	25	26	26	27	
	23	16	17	17	18	19	19	20	20	21	22	22	23	23	24	25	25	26	
	22	15	16	17	17	18	18	19	19	20	21	21	22	22	23	24	24	25	
	21	15	15	16	16	17	17	18	19	19	20	20	21	21	22	23	23	24	
WBGT値		注 意 25℃未満			警 戒 25℃～28℃			厳 重 警 戒 28℃～31℃			危 険 31℃以上								

（ここで、28℃～31℃は、28℃以上31℃未満の意味）

（日本生気象学会「日常生活における熱中症予防指針」Ver.1 2008.4 から）

※危険・厳重警戒等の分類は、日常生活上での基準であって、労働の場における熱中症予防の基準には当てはまらないことに注意が必要です。

（出典：厚生労働省パンフレット「熱中症を防ごう」より）

休憩場所から作業場所への移動動線の設定に関する知識

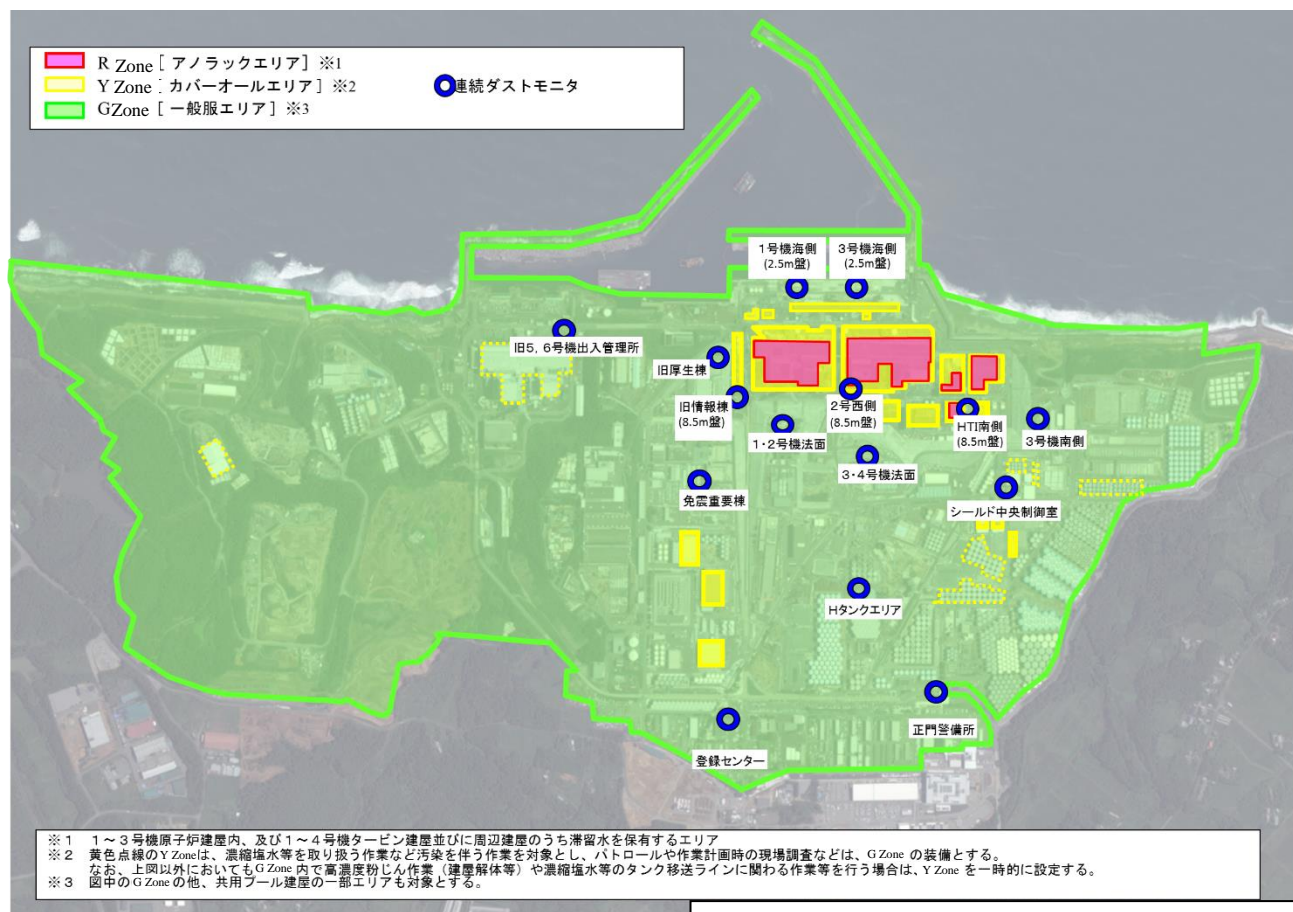
(1) 1Fサイト内運用区分管理状況

区分		防護装備
Red α Zone (アノラック エリア)	アルファ核種の表面汚染密度が法令に定める表面密度限度の10分の1を超えている、または超える恐れのある作業エリア	<ul style="list-style-type: none"> ・全面マスク ・カバーオール1重 and アノラック ・作業靴 (R Zone 専用) ・ヘルメット (R Zone 専用) ・綿手+ゴム手袋 ・靴下
Red Zone (アノラック エリア)	<ul style="list-style-type: none"> ・1～3号機原子炉建屋内 ・滞留水 (水位安定エリアに貯留する滞留水及び建屋に貯留する滞留水) を保有する原子炉建屋やタービン建屋地下などのエリア、滞留水の除染エリア、汚染水を直接取り扱う作業を行うエリア 	
Yellow β Zone (カバーオール エリア)	<ul style="list-style-type: none"> ・水処理設備を含む建屋内 ・濃縮塩水/ストロンチウム処理水を内包するタンク内やタンク移送ラインに関わる作業 ・70μm線量当量率 ($\gamma + \beta$) /1cm線量当量率 (γ) が4倍以上のエリア 	<ul style="list-style-type: none"> ・全面マスク ・カバーオール1重and アノラック ・作業靴 (Y Zone 専用) ・ヘルメット (Y Zone 専用) ・綿手+ゴム手袋 ・靴下
Yellow Zone (カバーオール エリア)	<ul style="list-style-type: none"> ・1～4号機周辺建屋内および建屋周辺 ・高濃度粉じん作業や汚染水等を取り扱う作業を行うエリア ・作業環境に応じて随時設定するエリア 	<ul style="list-style-type: none"> ・全面マスク ・カバーオール ・作業靴 (Y Zone 専用) ・ヘルメット (Y Zone 専用) ・綿手+ゴム手袋 ・靴下
Green Zone (一般服エリア)	<ul style="list-style-type: none"> ・空气中放射性物質濃度がマスク着用基準を超えるおそれがないエリアで、「White Zone」, 「Yellow Zone」, 「Yellow β Zone」, 「Red Zone」, 「Red α Zone」以外のエリア 	<ul style="list-style-type: none"> ・DS2マスク ・一般作業服 ・作業靴 (G Zone 専用) ・ヘルメット (G Zone 専用) ・綿手+ゴム手袋または軍手 ・靴下
White Zone	<ul style="list-style-type: none"> ・恒久的に設定している各休憩所, 免震重要棟及び事務本館 (1～4号出入管理所) ・地下水バイパス一時滞留水タンクフィルタユニット内 ・一時的に設定している各休憩所 	

※1 濃縮塩水等を取り扱わない作業、タンクパトロール、作業計画時の現場調査、視察等は除く。

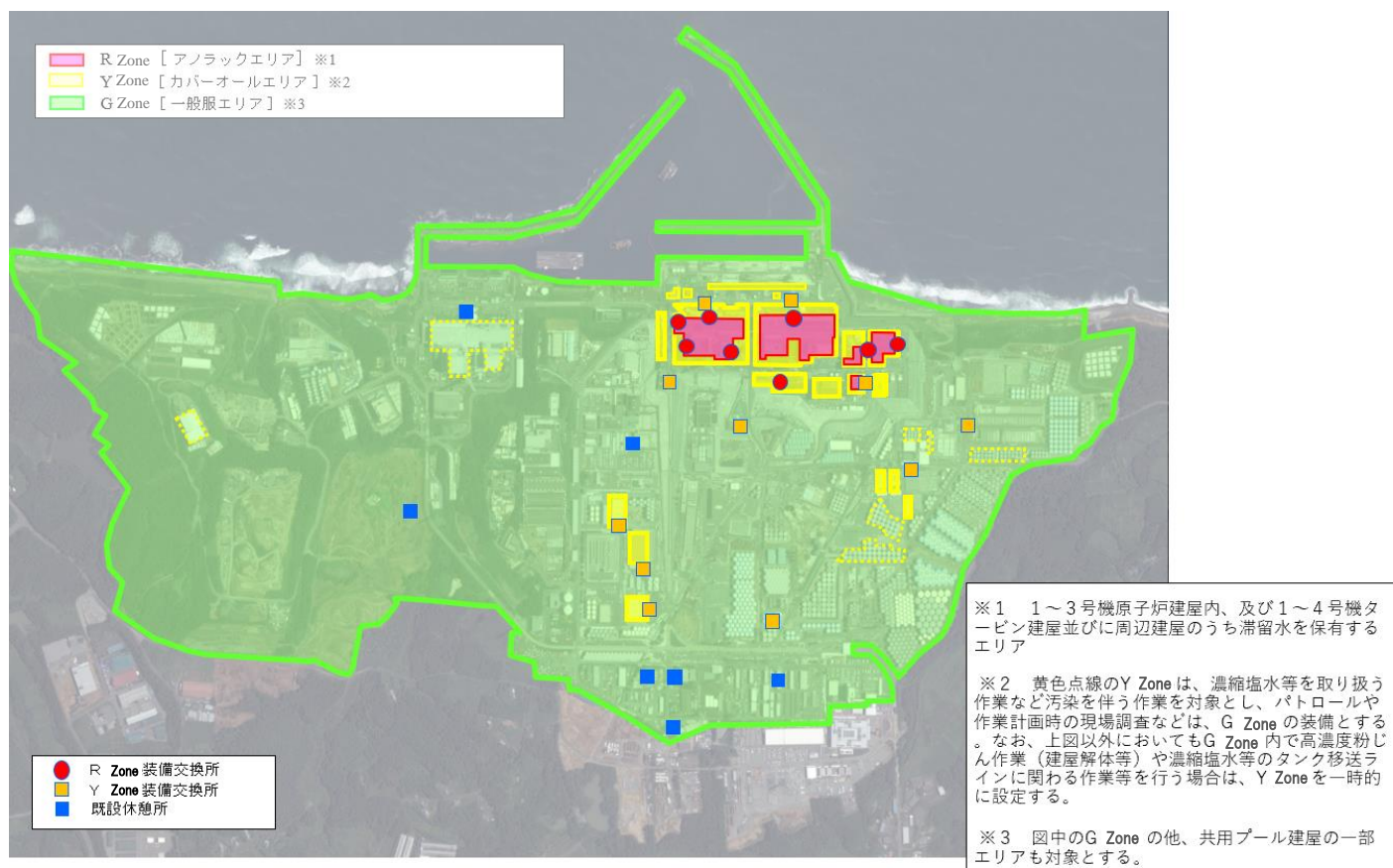
※2 特定の軽作業 (パトロール、監視業務、構外からの持ち込み物品の運搬等)

(出典：東京電力ホールディングス (株) ホームページより)



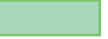
提供：日本スペースイメージング（株），©DigitalGlobe

(2)各エリアと装備交換所の設置箇所



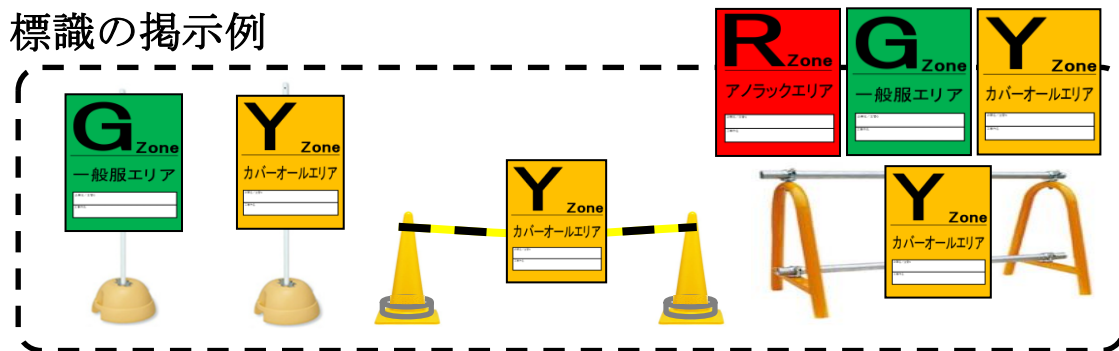
(出典：東京電力ホールディングス（株）提供資料より)

(3) 運用区分管理の基本事項

 R Zone (アノラックエリア)	<p>アルファ核種の表面汚染密度が法令に定める表面密度限度の10分の1を超えている、または超える恐れのある作業エリア</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 1～3号機原子炉建屋内 ・ 滞留水（水位安定エリアに貯留する滞留水及び建屋に貯留する滞留水）を保有する原子炉建屋やタービン建屋地下などのエリア、滞留水の除染エリア、汚染水を直接取り扱う作業を行うエリア
 Y Zone (カバーオールエリア)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水処理設備を含む建屋内 ・ 濃縮塩水／ストロンチウム処理水を内包するタンク内やタンク移送ラインに関わる作業 ・ 70μm線量当量率（$\gamma+\beta$）/1cm線量当量率（γ）が4倍以上のエリア
 G Zone (一般服エリア)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1～4号機周辺建屋内および建屋周辺 ・ 高濃度粉じん作業や汚染水等を取り扱う作業を行うエリア ・ 作業環境に応じて随時設定するエリア
	<p>・ 空气中放射性物質濃度がマスク着用基準を超えるおそれがないエリアで、「White Zone」, 「Yellow Zone」, 「Yellow β Zone」, 「Red Zone」, 「Red α Zone」以外のエリア</p>

境界の識別 Yellow zone や Green zone 等の境界には、作業員が容易にエリアを識別できるよう、右の標識を掲示する。

標識の掲示例



(4) 各エリアの防護装

R zone (アノラックエリア)	Y zone (カバーオールエリア)	G zone (一般服エリア)
<p>全面マスク</p> 	<p>全面マスク 又は 半面マスク ※1※2</p>  	<p>使い捨て式防じんマスク</p> 
<p>カバーオールの上に アノラック</p> 	<p>カバーオール</p> 	<p>一般作業服</p> 

※1 水処理設備（多核種除去装置等を含む建屋内の作業(視察等を除く)は、全面マスクを使用する。

※2 濃縮塩水、Sr処理水を内包しているタンクエリアでの作業（濃縮塩水等を取り扱わない作業、パトロール、作業計画時の現場調査、視察等を除く）時及び移送ラインにかかわる作業時は、全面マスク着用とする。

（出典：東京電力ホールディングス（株）提供資料より）

労働者の集団線量及び個人線量に係る計画線量の設定に関する知識

工事の計画に当たり、個人の被ばく線量をできる限り低く管理するとともに、工事に伴う総被ばく線量を合理的に達成しうる限り低く保つ対策が必要です。計画立案に当たり、作業者の集団線量及び個人線量に係る計画線量の設定に関する考え方について、本項で取り上げます。

(1) 個人被ばく線量の管理

①法律に定める被ばく限度と個人管理

個人の線量限度は、電離放射線障害防止規則等で定められています。この線量限度を超えないように管理する必要があります。

◎放射線業務従事者の5年間線量限度の集計は、法令により平成13年4月1日を始期とした5年間とし、以後5年間ごとの線量を集計することとなっています。今期は令和3年度～令和7年度の5年間の線量です。

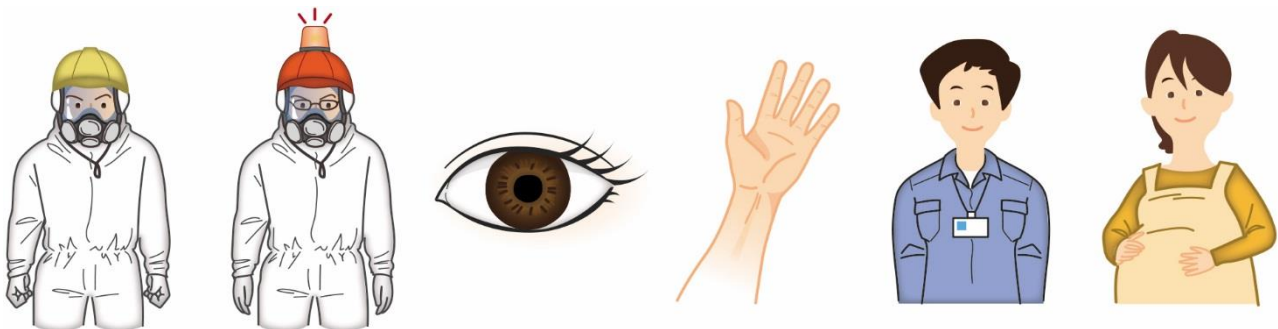
◎1年間の線量限度の1年間とは、4月1日を始期とする1年間です。

◎女子の被ばく限度は、妊娠不能と診断された者、妊娠の意志のない旨を使用者等に書面で申し出た者及び妊娠中の者を除きます。女子の3月とは、4月1日、7月1日、10月1日及び1月1日を始期とする各3月間です。妊娠中の女子の限度は、妊娠と診断されたときから出産までの間について管理します。

なお、個人線量計の装着部位は、男子は胸部に、女子は原則としては腹部に装着します。

線量限度

放射線業務従事者の線量限度は、電離放射線障害防止規則等により以下のように定められています。



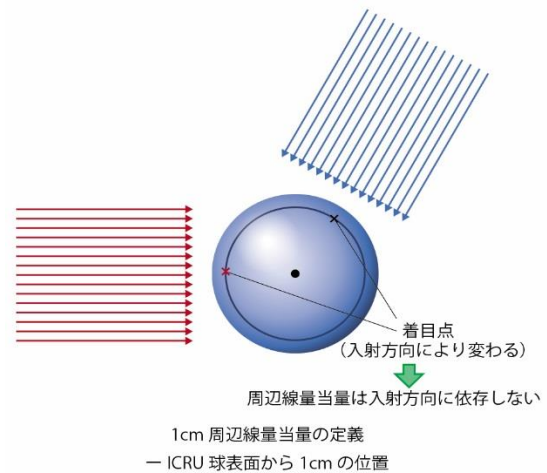
通常作業	緊急作業	眼の水晶体	皮膚	女子	妊娠中の女子
100mSv/5年 50mSv/年 実効線量管理	100mSv (特例緊急:250mSv) 実効線量管理 眼の水晶体： 300mSv 皮膚：1000mSv 等価線量管理	令和3年3月まで 150mSv/年 令和3年4月より 50mSv/年 100mSv/5年 等価線量管理	500mSv/年 等価線量管理	5mSv/3月 実効線量管理	内部被ばく 1mSv 実効線量管理 腹部表面 2mSv 等価線量管理

実効線量

実効線量とは、人体の各組織・臓器の吸収線量に放射線加重係数・組織加重係数を乗じた値の総和です。個人線量管理では、放射線による人体の総合的な影響の度合いを測るために使用します。単位はシーベルト（Sv）です。しかしながら、この値を実際に求めるのは非常に困難であるため、実用的な観点から採用された量が1cm線量当量（H1cm：1センチメートル線量当量）であり、以下のように法令で定義付けされています。

（均等被ばくの場合）1cm線量当量 \simeq 実効線量

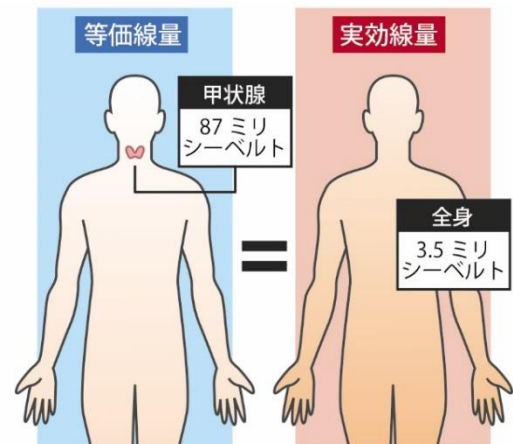
通常的环境放射線を測るSv単位表示のサーベイメータは、この1cm線量当量に相当する指示値を示すように校正されています（62ページ【解説A】「実効線量」参照）。



等価線量

等価線量とは、人体の各組織・臓器の吸収線量に放射線加重係数を乗じて求めた値です。個人線量管理では、各組織の受ける影響の度合いをはかるために使用します。単位はシーベルト（Sv）です。

放射線防護上、着目しなければならない組織は、皮膚と眼の水晶体及び女子腹部があります。この値を実際に求めようとするのは困難であるため、実用的な手法はないかという考えのもとに採用された量が70 μ m線量当量（H70 μ m：70 マイクロメートル線量当量）です。よって、以下のように法令で定義付けされています。



70 μ m線量当量 = 皮膚の等価線量

放射線を放出する同位元素の数量等を定める件（平成12年10月23日科学技術庁告示第5号）第20条第1項1号

発電所で使用されているサーベイメータは、フィルタを取り換えることによって、この70 μ m線量当量を測定できるように校正されています。

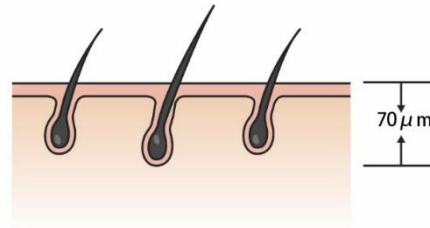
眼の水晶体の等価線量については、令和2年度までは1cmと70 μ m線量当量を比較して大きい方を眼の水晶体の等価線量としてきましたが、法令改正に伴い、令和3年度からは3mm線量当量が導入され、目の水晶体測定用の線量計の着用が必要になる場合もあることから、作業環境での眼の被ばくに注意が必要です。頭部や眼の被ばくが体幹部の被ばくより大きくなるおそれがある場合は、遮へい効果の高い物質を含んだ防護メガネ等により防護します。特に高線量区域における線量限度に近い不均等被ばくのおそれがある場合には、あらかじめ作業場所の空間線量率の分布を測定し、遮へいする等不均等被ばくを起こさないように防護装備や作業計画を定めることが望ましいです。また、眼の不均等被ばくが避けられない場合は、体幹部の個人線量計とは別に眼付近に3mm線量当量の測定を実施し、水晶体の等価線量限度を超えないように管理することが必要です。（63ページ【解説B】「眼の水晶体の等価線量限度の改正」参照）

個人被ばく線量測定における線量評価部位

1cm線量当量



70 μ m線量当量



【解説A】実効線量

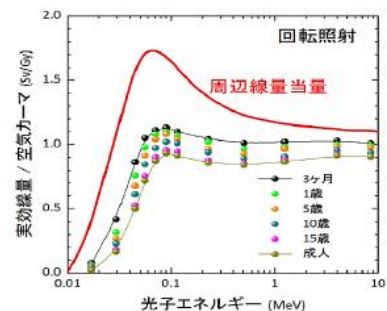
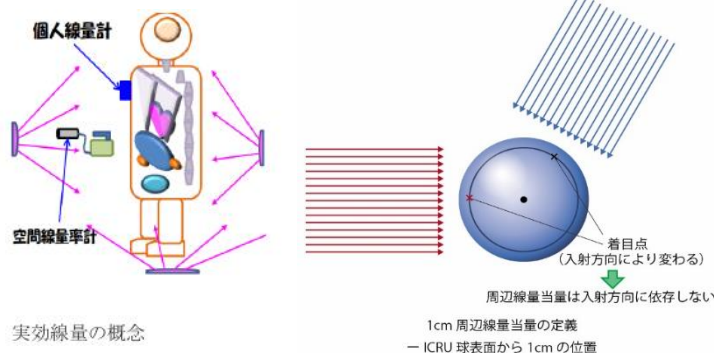
人が放射線を受けた時に生じるガンや遺伝的影響のリスクを表す量です。人が放射線を受けた時の感受性は、肺や肝臓、腸等の臓器や組織によって違いがあります。臓器ごとの放射線を受けた量（吸収線量）に組織の感受性を表す係数（組織加重係数）を乗じ、全ての臓器、組織について足し合わせた量が実効線量（単位：Sv）です。なお、ガンマ線やベータ線、中性子線等、放射線の種類によっては同じ量の放射線を受けても影響が異なります。これを補正するための係数が放射線加重係数です。ちなみにガンマ線の放射線加重係数は1です。また、臓器、組織ごとの吸収線量に放射線加重係数を乗じたものを等価線量（単位：Sv）と呼んでいます。

しかし、体内の臓器の配置は左右、前後、均等ではありません（下左図）。外部被ばくの場合、前から照射された場合と後ろから照射された場合では、身体自身の遮へい効果や臓器の形等により臓器が吸収するエネルギー量が変わります。つまり身体の向きで実効線量も変わってしまいます。またガンマ線のエネルギーの違いによっても変わります。身体の向きやガンマ線のエネルギーによって実効線量が変わるのであれば、測定器で直接測ることは困難です。

そこで、実効線量を間接的に評価できる測定方法が、国際放射線単位測定委員会（ICRU）で考えられました。下右図のような人体組織と同じ成分でできた30cmの球体を考えます（ICRU球）。あらゆる方向から球体に入射する放射線を仮に図のように平行に整列させたとして、球体の表面から1cm深さの吸収線量を求めることとします。なぜ1cmかというと、ガンマ線が物質（身体）に入射すると人体との相互作用（コンプトン散乱、電子対生成、光電効果）により新たな二次電子等を発生させます。このため吸収線量は、表面より1cm程度深いところが高くなるのです。この値を1cm線量当量と呼んでいます。また、この球体が集まって身体を作っていると仮定します。空間線量当量率を測定するサーベイメータ等の測定器は、この1cm線量当量率を表示するように校正されています。

なお、個人線量当量を測定する個人線量計は、厳密には30cmの球体ではなく30cm×30cm×15cmの直方体（ICRUスラブファントムと呼ばれています）の1cm深さの線量当量率を用います。このため場所の1cm線量当量はH*（10）、個人線量当量の1cm線量当量はHp（10）と区別して表記されます。

法令上、被ばくの限度は実効線量と等価線量で定められていますが、下記のグラフに示すように1cm線量当量（空気カーマ≒1cm線量当量）は実効線量に比べ過大になりますので、サーベイメータや個人線量計の測定値を実効線量として取り扱って良いとされています。



サーベイメータで測定される周辺線量当量は、様々な体格、あらゆる被ばく状況に対して、実効線量を過小に見積もることなく評価している

出典：遠藤章, 放射線防護で用いられる線量について
第9回原子力委員会資料第1号（平成24年3月13日）

【解説B】眼の水晶体の等価線量限度の改正

眼の水晶体の等価線量限度が令和2年3月18日付けで、下記のとおり改正されました。（適用は令和3年4月1日）

【原子力規制委員会告示第七号】

第5条 規則第10条第1項第1号の原子力規制委員会の定める線量限度は、等価線量について次のとおりとする。

眼の水晶体については、第1条第3項に規定する5年間に付き100mSv及び一年間に付き50mSvとする。

これまで眼の水晶体の線量限度は、等価線量で年間150mSvでした。これが等価線量として年間50mSv及び5年間に100mSvに低減化したことにより、通常の個人線量計で測定した1cm線量当量もしくは皮膚に係る70μm線量当量が線量限度に達しないのに、眼の水晶体の等価線量が線量限度を超える状況が増加する可能性が生じました。

眼の水晶体の等価線量は3mm線量当量で測定することとされていますが、発電所等での外部被ばくの形態では、1cm線量当量又は70μm線量当量の測定結果が線量限度を超えなければ、3mm線量当量で測定せず1cm線量当量又は70μm線量当量での測定値のいずれか高い方を眼の水晶体の等価線量としてもよいとされていました。

しかし、眼の水晶体の線量限度の引き下げにより、遮へい壁や遮へい板の内と外、のぞき窓等局所的に放射線の分布が大きく異なっている作業環境では、頭部や眼の水晶体の3mm線量当量の値が、体幹部の1cm線量当量や70μm線量当量より大きくなるおそれが高まりました。またガンマ線よりベータ線が多い高線量率の作業環境では、体幹部の線量当量測定値が限度を超えないのに眼の水晶体の3mm線量当量の値が限度を超える可能性があることが分かりました。この場合は、眼の近傍に追加の個人線量計を装着することが必要となります。ただし、個人線量計を眼の近傍に追加する場合は、作業員への負担及び放射線管理者の個人線量計管理の手間等を考慮することも望まれます。

まずは、事前に空間線量率やベータ線の分布を測定、把握し、不均等被ばくを起こさないような、遮へい等の作業環境の改善が望まれます。また、作業員は、防護マスク、ゴーグル等の防護具により、ガンマ線、ベータ線を遮へいし、眼の水晶体の被ばくを低減化することが望まれます。

参考文献：一般社団法人日本保健物理学会、眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン（2020年7月）

<http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/news/page.cgi?id=203>

②東京電力福島第一原子力発電所における個人被ばく管理

発電所構内で作業する全作業員は、作業に従事する前に発電所での放射線業務従事者として登録されます。放射線管理手帳及び除染作業も含めた前歴線量の確認を行い、健康診断受診の確認、電離放射線障害防止規則に基づく特別教育を経て、放射線業務従事者として登録されます。東京電力では、線量管理のために全放射線業務従事者の登録時の前歴線量をシステムに入力しています。

これらの前歴線量を含めて、期間ごとの線量限度管理がなされていますが、元請企業を通して、以下の情報が東京電力の管理システムから提供されます。

【年度線量の限度確認】

実効線量または眼の水晶体の等価線量における年間の累積線量が12mSv（線量限度は50mSv、5年間累積線量の年平均値は20mSv）に達した時点、又は達するおそれがある事が判明した時点で状況を確認し、以降の線量管理方法について関係者と協議。東京電力で定める社内上限値（20mSv/年）を超えない管理を実施。

【5年線量の限度確認】

ブロック5年の累積線量をシステムで管理、80mSv（線量限度は100mSv）に達した時点で状況を確認し、以降の線量管理方法等について関係者と協議

【元請企業へのデータ提供】

元請企業での線量管理を支援するため、毎日、電子式個人線量計（APD）の実績データを提供

（出典：「福島第一原子力発電所の被ばく線量管理について」2013年12月3日東京電力ホールディングス（株） 資料より）

(2) 個人線量に係る計画線量の設定

作業者の累積被ばく線量は、工事の実施計画書で法令の定める線量限度を下回るように定めます。また、労働者の被ばくする実効線量が1日につき1mSvを超えるおそれがある作業を行う場合は、富岡労働基準監督署長に「福島第一原子力発電所における放射線作業届」を提出することとされています。最大個人線量の設定に当たっては、1日につき1mSv以上の管理とすることが必要があるか、それ以下に設定できるかを検討します。

個人の1日の計画被ばく線量は、

- ①作業場所の線量当量率
- ②作業に従事できる作業人数
- ③個々の作業者の累積線量 (残線量)
- ④必要な作業時間
- ⑤作業に必要な熟練度と対応可能メンバー等を総合的に検討し決定する必要があります。

ベータ線被ばくの評価

ガイドライン別紙1には、ベータ線による被ばく管理の方法について以下のように規定されています。

発電所長及び元方事業者は、次に掲げる事項を実施すること。

- (1) ベータ線による被ばくがガンマ線による被ばくの10倍以上になるおそれがある場合は、電離放射線障害防止規則第8条第3項第1号に定める部位に装着する測定器は、1cm線量当量及び70μm線量当量を測定できる測定器とすること。
- (2) (1)に加え、処理済み廃液を取り扱う場合等、同条同項第3号に該当する場合は、最も多く放射線を被ばくするおそれのある部位に70μm線量当量を測定できる測定器を装着して測定を行うこと。
- (3) ベータ線による被ばく線量の実効線量への加算について
 - (1)によって測定された日ごとの70μm線量当量が日ごとの1cm線量当量の10倍以上ある場合であつて、以下のア又はイで算定された値が積算線量計の測定下限値（0.1mSv）以上となる場合は、それぞれの場合に応じ、ア又はイの値を月間の累積1cm線量当量に加算して月間の実効線量を算定すること。
 - ア (2)の測定が行われていないときは、(1)で測定された月間の累積70μm線量当量に皮膚の組織加重係数（0.01）を乗じた値
 - イ (2)の測定が行われた場合は、(1)の測定器と(2)の測定器でそれぞれ測定された月間の累積70μm線量当量を皮膚の面積で加重平均した値に皮膚の組織加重係数（0.01）を乗じた値

不均等被ばく時の評価について

遮へい用防護衣を着用することにより、不均等被ばくが生じている場合は、遮へいされた身体の部位の全身の表面積に占める割合に応じ、前項「ベータ線被ばくの評価(3)」に定める実効線量への加算を行う必要があります。

眼の水晶体の線量管理の新たな取り組み

国際放射線防護委員会〔ICRP〕は、最新の疫学的知見を踏まえた結果、白内障（視力低下）のしきい線量をそれまでの1.5Gy程度から0.5Gy程度に見直すとともに、眼の水晶体の等価線量限度を150mSv/年から50mSv/年、100mSv/5年に改定しました。東京電力は本勧告を自主的且つ段階的に取り入れました。

(管理値の変更)

- ◎眼の水晶体の等価線量限度として年間50mSv及び5年間に100mSv（法令限度）
- ◎2018年4月から眼の水晶体の管理値を「50mSv/年」に自主運用として変更
- ◎2019年4月から同管理値に「5年平均20mSv/年」も追加
- ◎2020年3月18日 法令改正（適用は2021年4月1日）

個人線量計の種類

個人線量計は、測定値を直読できるアクティブ形と測定後に読取装置にて指示値を読み取るパッシブ形の2種類に分類されます。

■アクティブ形

直接指示値が読み取れるもので、主に電子式個人線量計を指します。電子式個人線量計は、主に検出器には半導体検出器を使用しています。また、警報機能を持ったものもあり、あらかじめ設定された積算線量値を超えると警報音で知らせます。



警報付個人線量計
(個人線量計)

■パッシブ形

パッシブ形の個人線量計はある一定期間の積算線量を測定するのに使用されます。その場で積算線量を読み取ることはできません。パッシブ形の線量計は電池交換が不要、小型・軽量で、1ヶ月間または3ヶ月間の積算線量の記録に適した線量計です。



ガラスバッジ



ルミネスバッジ
(個人線量計)

■個人線量の算定に用いる測定器

福島第一原子力発電所では受動形個人線量計と電子式個人線量計を併用していますが、2023年10月のRI法施行規則の改正に伴い、個人線量の算定に用いる測定器に「信頼性を確保するための措置」が義務化されます。東京電力では、法令改正に向けて2023年4月より認定機関による認定を受けた測定サービス事業者が提供する受動形個人線量計（パッシブ形）を個人線量の算定に用いることとし、電子式個人線量計（アクティブ形）は作業管理用及び日々の線量管理用として用いています。

■眼の水晶体用線量計

IAEAから発行されているガイドラインでは、眼の水晶体の評価に対し、可能な限り眼の近くに線量計を装着し、3mm線量当量を測定するように推奨されています。眼の水晶体用の線量計は眼のすぐ近くに装着でき、各種防護眼鏡にも対応しています。



(装着治具)



(マスク内装着イメージ)

■眼の水晶体の等価線量50mSv/年の管理方法（2018年4月～：全所共通）

眼の水晶体の等価線量が15mSv/年度を超えた場合、又はそのおそれがある場合、その後の線量計画について確認し、原則、眼の近傍（額又は首の位置）の測定を追加します。なお、ベータ線主体の作業においては、等価線量が管理値を超えるおそれがある場合等必要に応じて、等価線量が15mSvを超えたかどうかにかかわらず、眼の近傍（全面マスク内の額の位置）の測定を開始します。

■眼の水晶体の等価線量5年平均20mSv/年の管理方法（2019年4月～：全所共通）

眼の水晶体の等価線量が15mSv/年度を超える可能性がある場合に、眼の近傍（頭頸部）で測定を開始します。

■改正法令適用に伴う管理方法の変更（2021年4月～：全所共通）

眼の水晶体の近傍（頭頸部）で測定を開始する値を、15mSv/年度から12mSv/年度に変更。

(3) 労働者の集団計画線量設定

① 放射線管理計画書の作成

ガイドラインでは、総計画線量が1人・シーベルトを超えるおそれのある放射線業務に係る施工計画を作成するに当たっては、以下の事項に関する基本的な考え方を示した「被ばく低減仕様書」等に基づき、放射線管理計画書を作成し、施工計画に盛り込むこととなっています。なお、放射線管理計画書は、放射線業務を開始する日の14日前までに富岡労働基準監督署に提出することとされています。

- ①無人化工法や遠隔操作による工法の促進
- ②作業開始前の高線量箇所の除染等（線源の除去）の実施
- ③高線量箇所（線源）から作業場所の離隔距離の確保
- ④高線量箇所（線源）に対する遮へい工事
- ⑤休憩所等の整備
- ⑥休憩所等から作業場所への移動動線（時間）の最短化

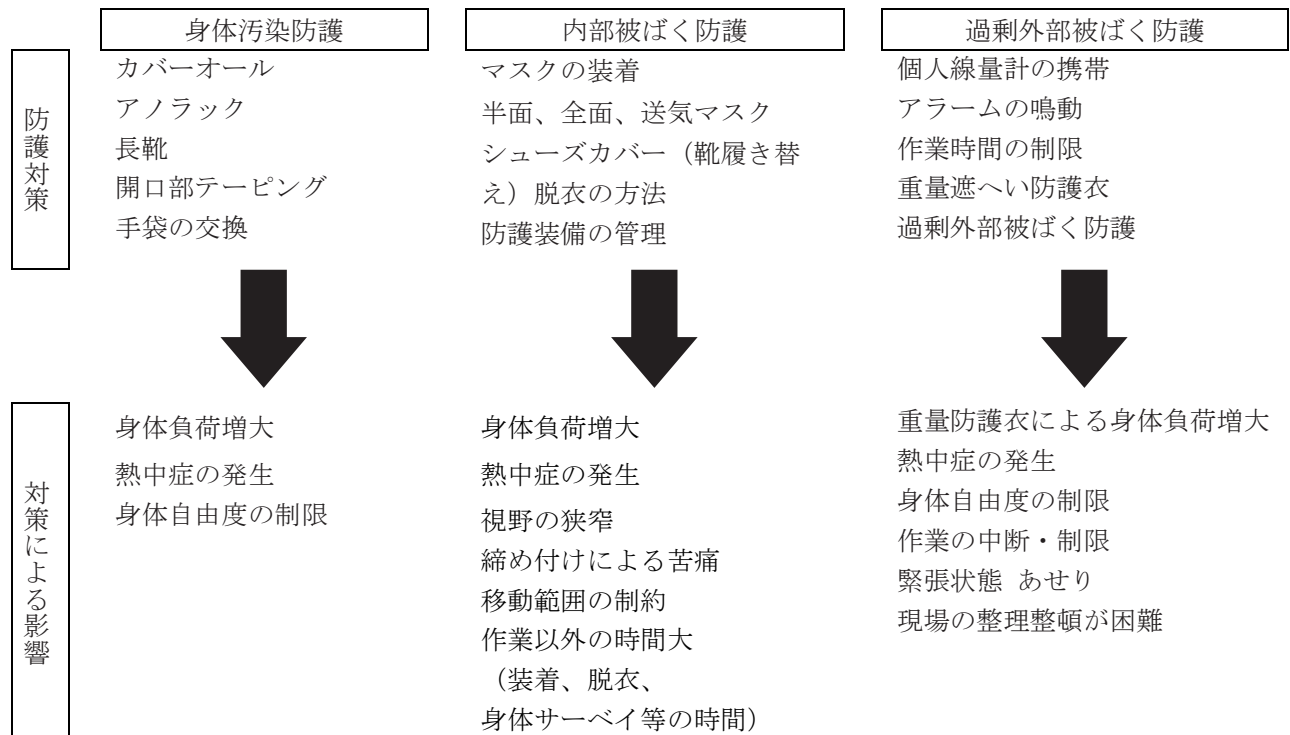
② 被ばく低減対策検討時のリスクアセスメント

ガイドラインでは、「放射線業務または各種工事に係るリスクアセスメントを行い、その結果に基づく措置を実施すること」とされています。

留意点として、放射線の被ばく低減措置（防護マスクの着用、作業時間の制限等）は、放射線以外の危険性又は有害性の低減対策の実施にあたっての障害となる場合があります。このため、放射線被ばく低減対策とその他の危険又は健康障害防止対策が両立するよう、最適な方策を検討する必要があります。

本項目では、放射線下作業で生じるリスクについて考えます。

放射線下作業における特有の対策と影響



リスクアセスメントの5つのステップ

実施事項	注意事項等	関係請負人	
		店社	現場
ステップ 1 危険性又は有害性の特定	・前年度の災害発生状況等により工種ごとに施工計画、作業標準、作業手順に基づき、必要な単位で分類、特定	○	○
ステップ 2 リスクの見積りと優先度の決定	・危険性又は有害性により発生するおそれのある負傷又は疾病の重篤度と災害の発生の可能性の度合いで見積る。 ・店社が定期的に行う調査であっても重篤度と可能性等の尺度は可能な限り区分し数値化する ・リスク低減措置内容の優先度を決める	○ ○	○
ステップ 3 リスク低減措置内容の検討	・リスク低減効果の高い措置を優先的に実施、本質安全化の推進 ・リスク低減措置の社内基準化	○ ○	○ ○
ステップ 4 リスク低減措置内容の実施	・リスク低減措置が著しく合理性を欠く場合を除き、低減措置の実施 ・リスク低減措置の確実な実施の確認	○	○ ○
ステップ 5 実施内容の記録	・リスクアセスメント及び対策等実施内容の記録	○	○

(建設業 職長のためのリスクアセスメント 建設業労働災害防止協会より)

放射線下作業におけるリスクアセスメント作業例

重量物（150kg）のモータを、階段を使ってR/B 1 階から 2 階に運搬する。

気温30℃・湿度60%

以下の3つの条件で、それぞれ検討してみる。

条件①／通常の工場

条件②／汚染が高いが線量率は低い 全面マスク着用 アノラック装備
＋身体負荷増大 熱中症の発生 視野の狭窄 締め付けによる苦痛

条件③／汚染も線量も高く、1人の作業時間は10分程度に制約される
＋身体自由度の制限 作業の中断・制限 緊張状態 あせり



ステップ 1：危険性又は有害性の特定

作業手順の主なステップから特定（例 1）

	主なステップ	危険性または有害性	災害・事故の型
1	台車の荷をレールに載せる	台車をレールにはめるとき、載せられず荷崩れして	荷に挟まれる
2	荷を押し上げる	荷を押し上げるとき、作業者の人数が少なく、途中で上げられなくなり台車が降下して	荷に挟まれる
3	荷を踊り場に仮置きする	台車を踊り場に仮置きするとき、台車が踊り場に載り切る前に手を離し	荷が落下して、下敷きになる

過去の災害から特定（例 2） 危険性または有害性特定時の作法「～とき、～して（なので）、～になる」と表現する

作業名	危険性または有害性
重量物運搬作業	運搬中、荷のバランスを崩し挟まれた

安全衛生パトロールからの特定（例）

指摘事項	危険性または有害性
重量物取扱に慣れていない	荷崩れ、落下等により激突・挟まれる

ステップ2：リスクの見積りと優先度の決定（例）

「可能性の度合い」の区分例

災害発生の可能性の度合い	判断基準	点数
ほとんどない	注意しなくてもほとんど負傷しない	1
可能性がある	注意していないと負傷する	2
確実又は可能性が極めて高い	よほど注意力がないと負傷する	3

「重篤度」の区分例

重篤度	判断基準	点数
軽微	表面的な傷害、軽い切り傷、打撲傷、頭痛等の不快感等	1
重大	裂傷、火傷、振動障害、重篤な捻挫、難聴、皮膚炎、喘息	2
極めて重大	腕・足等の重大切断、指等の切断、重症中毒、致死外傷	3

リスクの見積り（加算法）

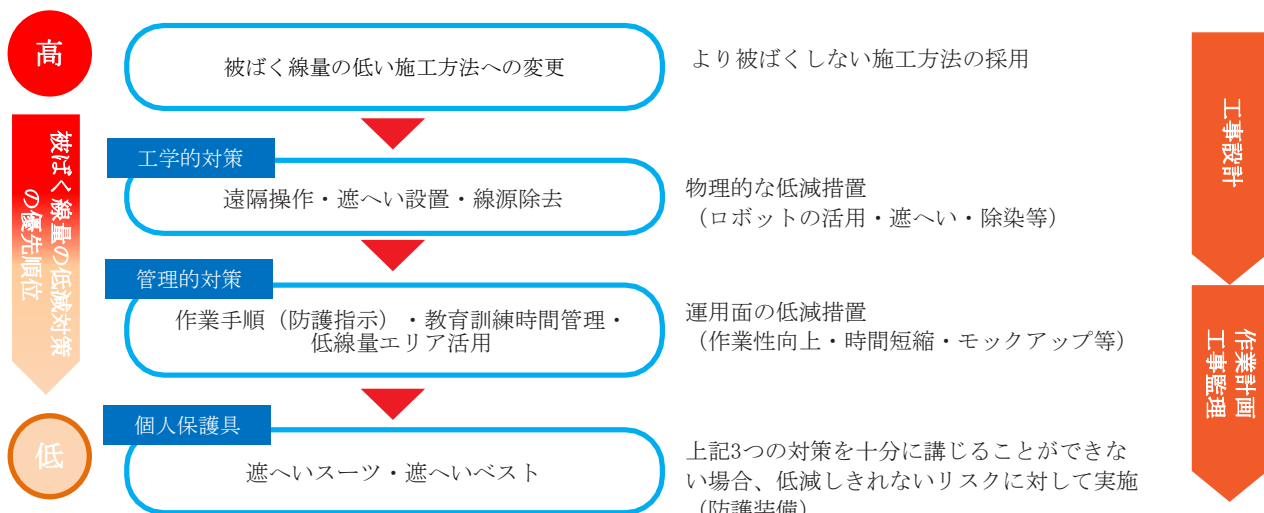
重篤度 可能性の度合い	軽微 (不休災害) (1点)	重大 (休業災害) (2点)	極めて重大 (死亡・障害) (3点)
ほとんどない (1点)	2 (1+1) (問題は少ない)	3 (1+2) (多少問題がある)	4 (1+3) (かなり問題がある)
可能性がある (2点)	3 (2+1) (多少問題がある)	4 (2+2) (かなり問題がある)	5 (2+3) (重大な問題がある)
確実又は可能性が極めて高い (3点)	4 (3+1) (かなり問題がある)	5 (3+2) (重大な問題がある)	6 (3+3) (直ちに解決すべき問題がある)

リスクの見積りと優先度の対応表

リスクの見積り値	評価	優先度 (リスクレベル)	判定
6	直ちに解決すべき問題がある	5	直ちに対策が必要
5	重大な問題がある	4	抜本的対策が必要
4	かなり問題がある	3	何らかの対策が必要
3	多少問題がある	2	現時点では必要なし
2	問題は少ない	1	対策の必要なし

ステップ3・4：リスク低減措置内容の検討及び実施

危険性又は有害性見積りの結果、必要とされる優先度の高いものに対して実施します。被ばく低減の対策は、以下のような優先順位です。



(出典：東京電力ホールディングス（株） 資料より)

ステップ5：実施内容の記録

記録は、わかりやすく、理解しやすいものとし、だれでも閲覧可能で、次回に反映させなければなりません。そのために記録を保管して活用することによって、以下の効果があげられます。

- ①自由に閲覧できることによって、リスクアセスメントに対する共通の理解、認識ができる。
- ②毎日の危険予知活動等の災害防止活動に活用できる。
- ③企業の財産として社員が共有できる。
- ④作業員教育の教材として活用できる。



以下のものに反映します。

作業打ち合わせ書

作業手順書

機械・設備等の具体的改善策

③工程ごとの被ばく線量低減対策と計画線量設定

被ばく低減対策の効果を評価するためには、作業工程ごとに対策を実施しない場合に想定される総計画線量と、対策を実施した場合の総計画線量を比較することが有効です。放射線管理計画の策定に当たり、以下の検討を行い、その結果を同計画書に盛り込む必要があります。

○対策を実施しない場合に想定される総被ばく線量

○対策を実施した場合に想定される総被ばく線量

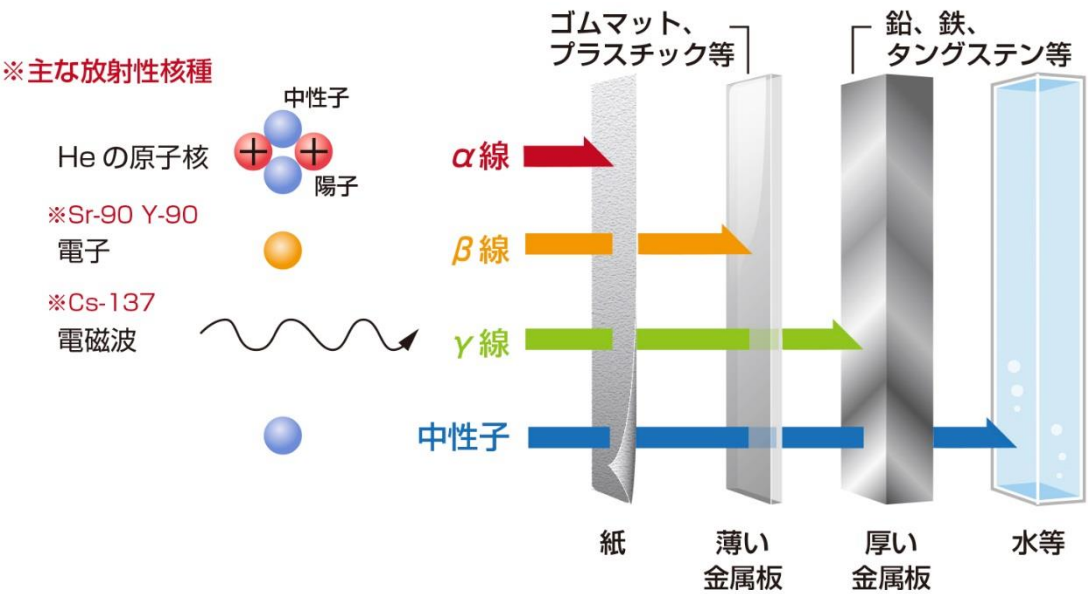
○対策を踏まえた労働者ごとの計画線量設定（1日当たりの平均個人線量、作業工程、作業期間ごとの平均・最大の個人線量）

	被ばく低減対策なし		被ばく低減対策実施
作業工程 A	被ばく線量 A	<	被ばく線量 A
作業工程 B	被ばく線量 B	>	被ばく線量 B
作業工程 C	被ばく線量 C	>	被ばく線量 C
	未対策総線量	>	対策総線量

遮へいの設置、防護衣の採用を検討する際に知っておくべき情報をまとめて示します。

放射線の種類と遮へい材料

放射線の種類によって、物質中の透過特性は大きく異なります。遮へい用防護衣の着用により外部被ばくの低減を考慮するのは、ベータ線とガンマ線です。



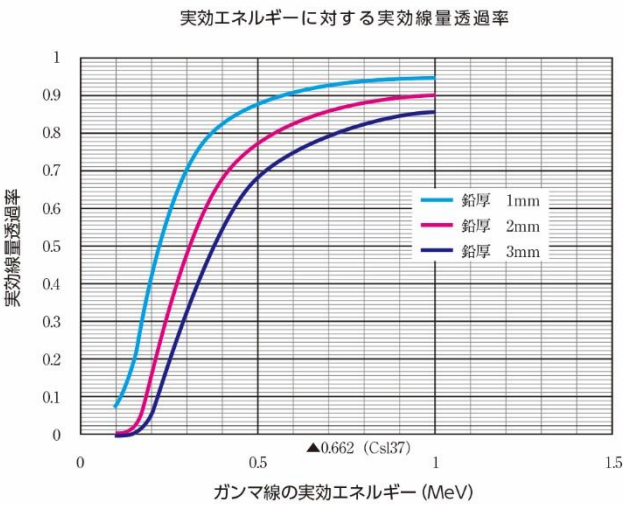
ガンマ線用遮へい防護衣の着用効果

発電所におけるガンマ線に対する防護衣の遮へい効果は、着用する装備の重量に比してあまり高くありません。作業性を考慮し、採用するかどうかを検討します。

作業場所のガンマ線は、Cs-137からの直接線が主体である場所と、建屋内の構造物や躯体で放射線が散乱して実効エネルギーが低くなっている場所があります。グラフは、実効エネルギーから防護衣の遮へい厚さ（鉛当量）による遮へい効果を示しています。



ガンマ線遮へい用防護衣例

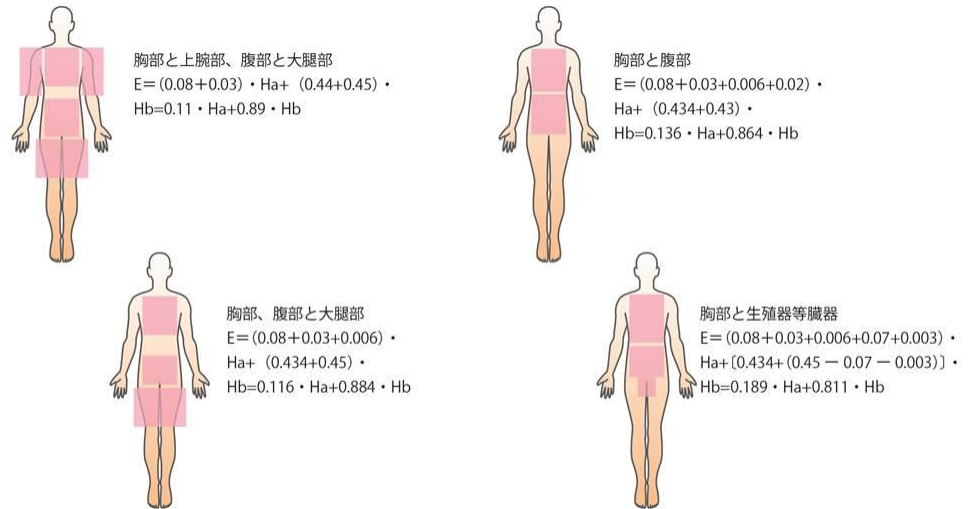


防護衣の鉛当量 (mm)	実効エネルギーに対する低減率 (例)	
	散乱線として 0.44MeV	Cs-137 0.66MeV
1	15%	8%
2	25%	15%
3	38%	22%

(出典：カンテック株式会社 ホームページより)

実効線量への換算評価の方法（ガンマ線による不均等被ばく）

タングステンベスト等ガンマ線遮へい防護衣を装着した場合は、全身を覆えませんが、不均等被ばくが生じます。遮へい防護衣の内外に装着した個人線量計の値から、防護部位ごとに次式により評価することとなります。また、遮へい用防護衣を着用した場合、実効線量と眼の水晶体の等価線量に乖離が生じる場合がありますため、注意が必要です。



Ha：体幹部（※）で遮へい用防護衣の外側に着用した個人線量計の1 cm線量当量

Hb：体幹部で遮へい用防護衣の内側に着用した個人線量計の1 cm線量当量

※体幹部…頭部及び頸部、胸部及び上腕部、腹部及び大腿部

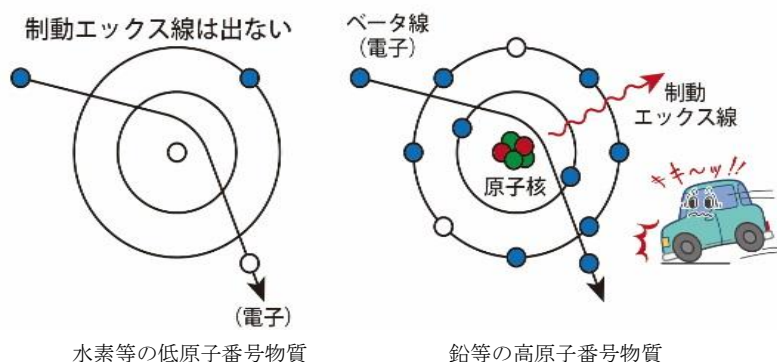
（参考）遮へい用防護衣を着用した場合の不均等被ばく評価方法について 東京電力ホールディングス（株） ホームページより作成

ベータ線の遮へい防護衣

ベータ線による外部被ばくは、眼の水晶体及び皮膚について、等価線量が問題となります。作業者の被ばくが、ガンマ線に比してベータ線が10倍以上になるおそれがある場合、ベータ線による等価線量を測定できる測定器を装着することとされています。

ベータ線による被ばくは、Sr-90及びY-90等の高エネルギーのベータ線放出核種で、広範囲が汚染されている場合が問題となります。対策として、それらの汚染面をゴムマットやベニヤ板、プラスチックで覆うことにより、遮へいすることができます。作業者が、ベータ線用の遮へい防護衣の装着は、汚染面の遮へい対策がなされていない場合に限られます。

Sr-90及びY-90から放出されるベータ線の最大飛程はアルミニウム中で約1200mg/cm²です。この厚さの遮へいにより完全に止めることができます。注意点としては、鉄や鉛等重たい金属で直接遮へいすると、制動放射線（エックス線）により線量当量率が上昇してしまうことがありますので注意が必要です。



ベータ線用の遮へい防護衣の例



（出典：山本化学工業（株） ホームページより）

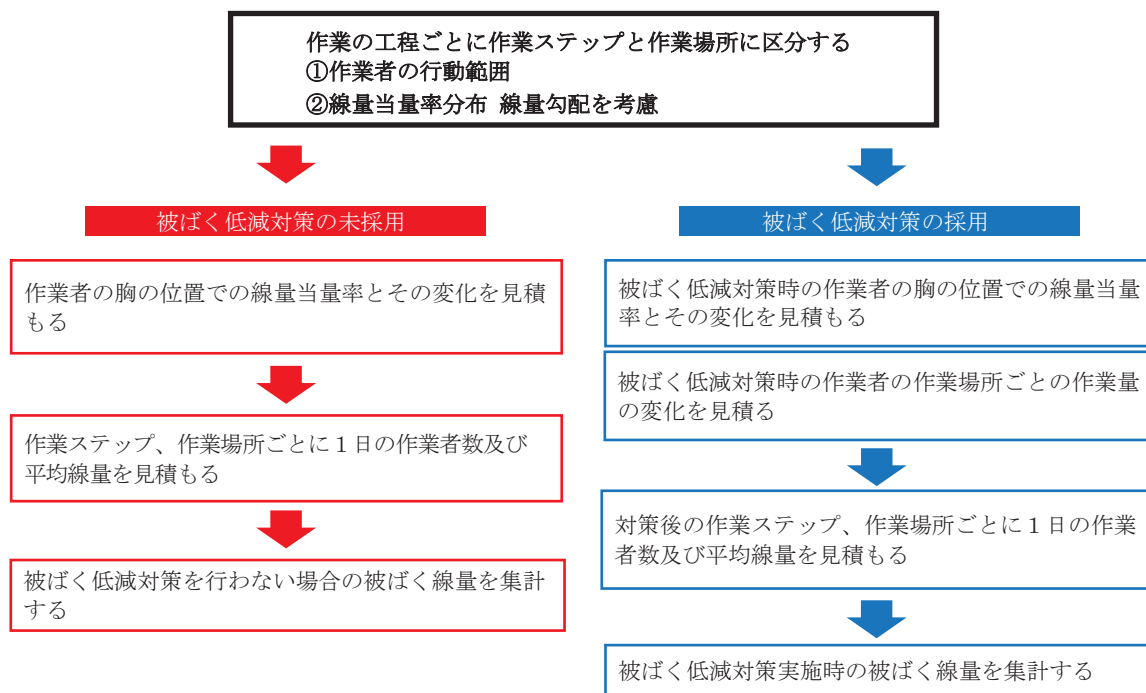
③-1 被ばく線量低減効果の試算及び計画線量設定の例

ここで、ある架空の工事を想定し、ガイドラインで求められている被ばく線量低減効果の試算及び計画線量設定について考えてみましょう。まずは、被ばく低減対策を実施しない場合の工程ごとの被ばく線量の算定手順は以下の通りです。

- ◎計画されている作業の工程を作業ステップごとに細分化し、さらに作業ステップごとに作業を行う作業場所を区分します。
- ◎作業場所は、作業内容、作業者の行動範囲、線量当量率の高低、急激な線量当量率勾配の有無等を考慮して区分します。線量当量率にあまり変化がない場合は、その場所を大きな作業場所とすることができます。急激な線量当量率勾配がある場合は、作業者の姿勢も考慮して作業場所を区分します。
- ◎各作業場所は、作業者の胸（女子は腹）の位置での線量当量率を十分把握する必要があります。作業の進展により線量当量率が変化することが予想される場合は、その値を見積もります。
- ◎各作業ステップ、作業場所ごとに、予定される作業時間と線量当量率から作業者の1日当たりの平均線量を想定します。類似環境での管理経験値に基づくのが实际的です。
- ◎最大個人線量は、作業者の1年及び5年間の累積線量を考慮して決めます。長期で従事する作業者の場合、1日の最大線量は低く設定する必要があります。
- ◎延べ作業者数と平均線量から作業ステップ、作業工程ごとの計画被ばく線量を集計します。

③-2 被ばく線量低減効果の試算及び計画線量設定の例

工程ごとの被ばく線量低減対策と計画線量設定の流れは以下の通りです。



③-3 被ばく線量低減効果の試算及び計画線量設定の例

被ばく低減対策前の工程ごとの被ばく線量見積もりの例

工程	作業ステップ	作業場所	平均線量率 (mSv/h)	1日の作業 時間（時）	延べ作業者数 (人日)	1日の平均 個人線量 (mSv/人日)	最大個人線量 (mSv/日)	被ばく線量 (人・mSv)	工程ごとの 被ばく線量 (人・mSv)
準備作業	準備(1)	a	0.35	1.1	50	0.4	0.5	20	87
		b	0.2	1.0	100	0.2	0.5	20	
	準備(2)	a	0.35	1.1	100	0.4	0.5	40	
		d	0.1	1.0	70	0.1	0.5	7	
本作業	本作業(1)	a	0.5	0.7	300	0.35	0.5	105	1,535
	本作業(2)	b	0.2	1.0	850	0.2	0.5	170	
		c	0.6	0.7	500	0.4	0.8	200	
		d	1	0.6	1,300	0.6	0.8	780	
	本作業(3)	a	0.35	1.1	700	0.4	0.5	280	
片付け作業	片付け(1)	b	0.2	1.0	100	0.2	0.5	20	100
		c	0.6	0.7	200	0.4	0.8	80	
						総被ばく線量			1,722

③-4 被ばく線量低減効果の試算及び計画線量設定の例（例1）

【例1】被ばく低減対策Aの実施

当該作業における被ばく低減対策を考えます。対策Aでは、本作業(2)の作業場所dの線源を遮へいする対策を行うこととします。

◎遮へい設置作業を作業ステップ準備(2)で実施します。設置作業に100人の延べ作業者数を予定します。

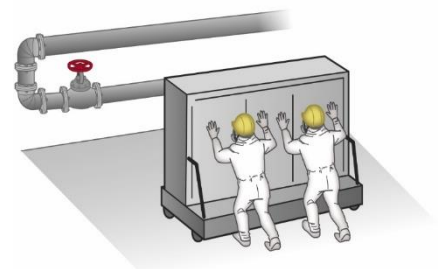
この被ばく線量は増加線量となります。

◎遮へいによる作業場所の平均線量当量率の低減率は遮へい効果の計算結果から50%と見積もります。

◎空間線量当量率の低減により本作業(2)作業場所dで延べ作業者数が30%削減し、線量当量率低減による作業効率の改善により、1日の平均個人線量を0.6から0.5と見積もります。

以上の点を表に反映し、塗りつぶしを行ったセルの値を変えて再計算します。本遮へいによる被ばく低減対策の実施の結果、以下のような効果が見積もられました。

◎準備作業では、遮へい設置作業で87から97人・mSvと10人・mSvに増加しますが、本作業では1535から1210人・mSvに低減するため、総線量で1722人・mSvから1407人・mSvになり、315人・mSv、率にして19%の被ばく低減が可能となります。



【例1】被ばく低減対策Aの実施後の工程ごとの被ばく線量見積もり

工程	作業ステップ	作業場所	平均線量率 (mSv/h)	1日の作業 時間（時）	延べ作業者数 (人日)	1日の平均 個人線量 (mSv/人日)	最大個人線量 (mSv/日)	被ばく線量 (人・mSv)	工程ごとの 被ばく線量 (人・mSv)
準備作業	準備(1)	a	0.35	1.1	50	0.4	0.5	20	97
		b	0.2	1.0	100	0.2	0.5	20	
	準備(2)	a	0.35	1.1	100	0.4	0.5	40	
		d	0.1	1.0	170	0.1	0.5	17	
本作業	本作業(1)	a	0.5	0.7	300	0.35	0.5	105	1,210
	本作業(2)	b	0.2	1.0	850	0.2	0.5	170	
		c	0.6	0.7	500	0.4	0.8	200	
		d	0.5	1.0	910	0.5	0.8	455	
	本作業(3)	a	0.35	1.1	700	0.4	0.5	280	
片付け作業	片付け(1)	b	0.2	1.0	100	0.2	0.5	20	100
		c	0.6	0.7	200	0.4	0.8	80	
						総被ばく線量			1,407

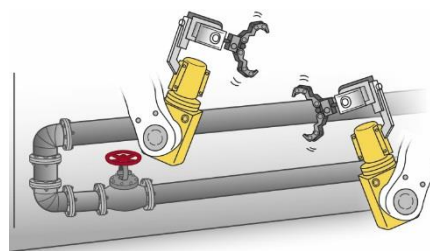
③-5 被ばく線量低減効果の試算及び計画線量設定の例（例2）

【例2】被ばく低減対策Bの実施

被ばく低減対策のため、本作業(2)の作業場所c、dの作業を遠隔無人化装置により主たる作業を行うことを計画します。

遠隔無人化装置による工法変更により、本作業(2)作業場所bでの延べ作業人数が300人増え、c、dの延べ作業人数がそれぞれ300、500人減ると見積もります。作業場所の平均線量当量率、1人当たりの平均被ばく線量は変わらないとします。この遠隔無人化装置採用による被ばく低減対策の実施の結果、以下のような効果が見積もられました。

◎本作業で、高線量場所での延べ作業人数が減少し、低線量場所が増加したが、総線量で1722人・mSvから1362人・mSvになり、360人・mSv、率にして21%の被ばく低減が可能になります。



【例2】被ばく低減対策Bの実施

工程	作業ステップ	作業場所	平均線量率 (mSv/h)	1日の作業 時間 (時)	延べ作業者数 (人日)	1日の平均 個人線量 (mSv/人日)	最大個人線量 (mSv/日)	被ばく線量 (人・mSv)	工程ごとの 被ばく線量 (人・mSv)
準備作業	準備(1)	a	0.35	1.1	50	0.4	0.5	20	87
		b	0.2	1.0	100	0.2	0.5	20	
	準備(2)	a	0.35	1.1	100	0.4	0.5	40	
		d	0.1	1.0	70	0.1	0.5	7	
本作業	本作業(1)	a	0.5	0.7	300	0.35	0.5	105	1,175
	本作業(2)	b	0.2	1.0	1,150	0.2	0.5	230	
		c	0.6	0.7	200	0.4	0.8	80	
		d	1	0.6	800	0.6	0.8	480	
	本作業(3)	a	0.35	1.1	700	0.4	0.5	280	
片付け作業	片付け(1)	b	0.2	1.0	100	0.2	0.5	20	100
		c	0.6	0.7	200	0.4	0.8	80	
						総被ばく線量			1,362

④-1 作業工程ごとの進捗状況の管理と事後の検証

被ばく低減対策を継続的に改善していくためには、計画線量と実際の被ばく線量（実績線量）を比較することが必要です。このため、東京電力及び元方事業者は、作業工程ごとに計画線量と実績線量を比較し、実績線量が計画線量を上回った場合はその原因を究明し、必要に応じ、当該作業工程より後の放射線管理計画（作業工程ごとの被ばく低減対策を含む）を見直すこととされています。

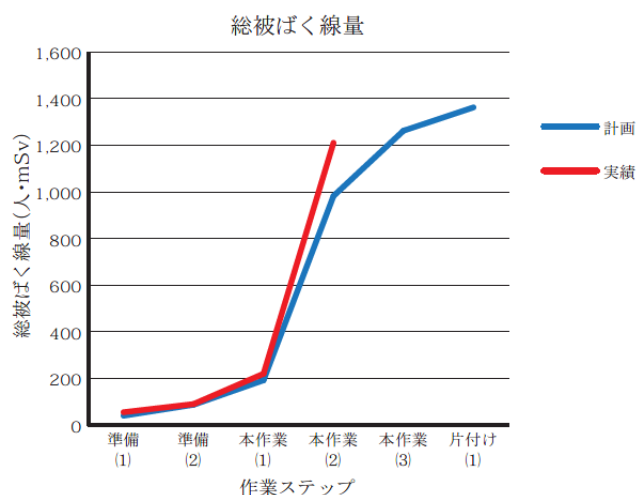
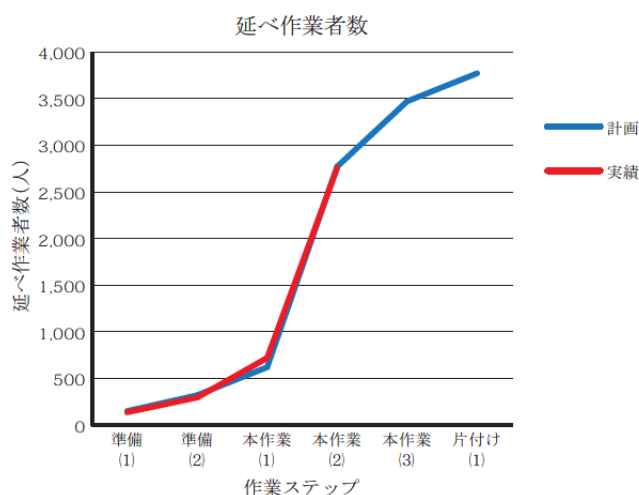
作業工程ごとの詳細な計画線量を設定した場合、実際の被ばく線量を作業と並行して集計します。より詳細な分析を行うには、作業員1日ごとの作業ステップと作業場所、被ばく線量を区別して集計します。そのためには、作業ステップと作業場所をコード化してデータを収集するのが有効です。

④-2 作業工程ごとの進捗状況の管理と事後の検証

作業ステップごとに実績を集計し、計画と累積値で比較します。被ばく低減対策Bの作業を実施した例の場合、延べ作業員数はほぼ計画値とありますが、総被ばく線量は本作業(2)が終了した段階で累積値が計画値に対して23%増加しています。実績値が計画値を超えた場合、その原因を探ることになります。本例では、本作業(2)の作業場所dでの延べ作業員数及び被ばく線量が増加していることが主たる原因と思われます。以上の手順により、その原因を究明し、必要に応じ、当該作業工程より後の放射線管理計画（作業工程ごとの被ばく低減対策を含む。）を見直すこととなります。

被ばく低減対策Bの作業を実施した場合の実績管理の例

工程	作業ステップ	作業場所	延べ作業者数（人・日）		被ばく線量（人・mSv）		工程ごとの被ばく線量 （人・mSv）	
			計画	実績	計画	実績	計画	実績
準備作業	準備(1)	a	50	55	20	22.3	87	90
		b	100	82	20	32.4		
	準備(2)	a	100	78	40	30.0		
		d	70	80	7	5.5		
本作業	本作業(1)	a	300	425	105	130.0	1,175	1,197
	本作業(2)	b	1,150	833	230	330.0		
		c	200	222	80	100.0		
		d	800	980	480	637.2		
	本作業(3)	a	700		280			
片付け作業	片付け(1)	b	100		20		100	
		c	200		80			
					総被ばく線量		1,362	1,287



9

内部被ばくの防止

放射性物質の体内への取り込みの経路と内部被ばくの原理

放射性物質が体内に取り込まれると、放射性物質から放出される放射線（ α 、 β 、 γ 等）により体内の組織や臓器が長期間に渡って照射されます。この被ばくを「内部被ばく」と呼んでいます。

放射性物質が体内に取り込まれる経路には、

- (a) 口からの経口摂取
- (b) 呼吸による吸入摂取
- (c) 浸透性核種（トリチウム等）の皮膚経由
- (d) 傷口等からの侵入

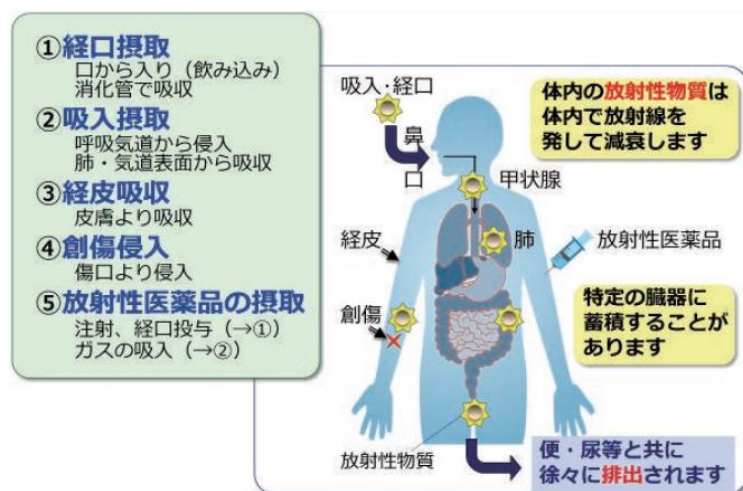
が主な経路です。

内部被ばくも外部被ばくと同様に実効線量で評価されます。しかし、内部被ばくは、外部被ばくと異なり放射性物質が体内に取り込まれたときから体外に排出されるまで、または半減期により減衰し体内からなくなるまでの期間、放射性物質が各組織間を代謝により移動しながら、その臓器及び周辺の臓器に放射線を照射し続けます。このため内部被ばくによる実効線量は、体内に取り入れたときから排出されるまでの合計の被ばく線量として評価します。放射性核種の中では、トリチウム（H-3）のように約10日で半分になる核種もありますが、ストロンチウム-90（Sr-90）のように約18年で半分になる核種もあります。特にプルトニウム（Pu-239）は約20年と長期にわたります。

このため内部被ばくに係る実効線量をあたかも将来に預託された被ばくということで、預託実効線量と呼んでいます。（78ページ【解説C】「預託実効線量とは」参照）

法令に定める被ばくの限度は、外部被ばくに係る実効線量と内部被ばくに係る預託実効線量の合計で評価することから、ウラン、プルトニウム等の α 線を放出する核種のように単位摂取量あたりの預託実効線量が大きくなる核種については、内部被ばくをしないように防護マスク、防護衣の選定等、作業計画を立案する際に考慮することが重要です。

※職業被ばくの場合、体内の臓器または組織が摂取後の50年の期間に受ける等価線量をいいます。



出典：環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和4年度版）」より）

	H-3 トリチウム	Sr-90 ストロンチウム 90	I-131 ヨウ素131	Cs-134 セシウム134	Cs-137 セシウム137	Pu-239 プルトニウム 239
出す放射線の種類	β	β	β, γ	β, γ	β, γ	α, γ
生物学的半減期	10日 *1 *2	50年*3	80日*2	70日～100日*4	70日～100日*3	肝臓:20年 *5
物理学的半減期	12.3年	29年	8日	2.1年	30年	24,000年
実効半減期 (生物学的半減期と物理学的半減期から計算)	10日	18年	7日	64日～88日	70日～99日	20年
蓄積する器官・組織	全身	骨	甲状腺	全身	全身	肝臓、骨

実効半減期：（関連ページ上巻P27「内部被ばくと放射性物質」）

実効半減期は、生物学的半減期の表中に記載した蓄積する器官・組織の数値から計算。

*1：トリチウム水、*2：ICRP Publication 78、*3：JAEA技術解説2011年11月、*4：セシウム137と同じと仮定、*5：ICRP Publication 48

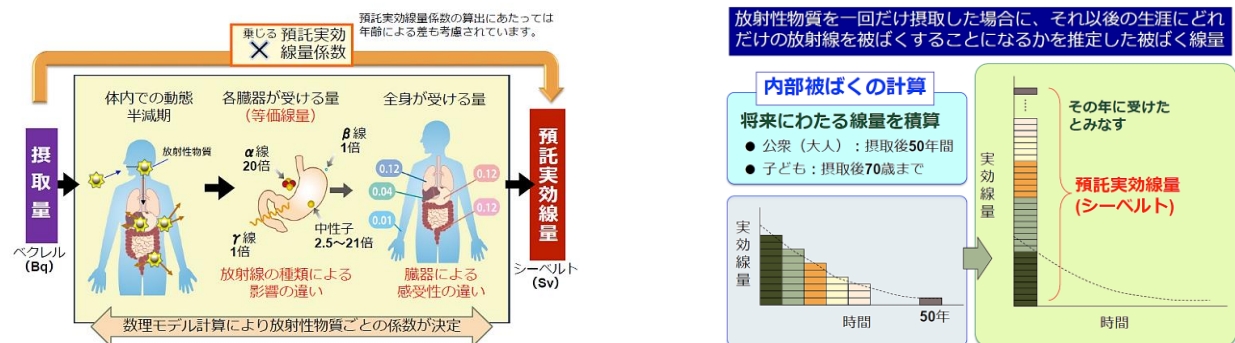
出典：環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和4年度版）」

【解説C】 預託実効線量とは

放射性物質摂取後の将来の被ばくを評価するために、国際放射線防護委員会（ICRP）は組織、臓器、器官や核種ごとの代謝経路、代謝速度を定義した標準人を定め、核種ごと、吸入か経口かの摂取経路ごとの預託実効線量への換算係数（実効線量係数、DF）を定めています。核種や化学形ごとに体内での移行や排出のスピードは異なりますが、ICRPの計算においては、核種によらず一律に、成人では体内に取り込んでから50年間を積算するとしています。ちなみに、子供は70歳になるまでの線量を積算します。外部被ばくは放射線を受けている間しか被ばくしません。これに対して内部被ばくは、摂取した時から減衰や排出等により体内から無くなるまで被ばくが続きますので、将来も含めた被ばくとして合計します。このため預託実効線量と呼ばれています。預託実効線量は、下式で算出することができます。

$$\text{預託実効線量 (mSv)} = \text{摂取した核種の放射能 (Bq)} \times \text{経路別の実効線量係数 (mSv/Bq)}$$

なお、預託実効線量の集計は、内部被ばくが生じたときに将来の50年間分の線量を一度に受けたとして当該年度の実効線量として加算します（下右図）。科学的には、1年目の内部被ばく分、2年目の内部被ばく分として扱うことが正しいのですが、一度取り込んだ放射性物質は容易に排出させられない、また年度ごとに報告する個人線量の集計が非常に煩雑になることから、50年間分の内部被ばくを1度の摂取で受けたとしています。



出典：環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和4年度版）」より

上式の実効線量係数は、ICRPが世界各国の最新の研究成果に基づき報告書として発刊され、各国は法令に取り入れており、日本では放射線を放出する同位元素の数量等を定める件（線量告示）の別表第2に示されています。別表第2の第2欄は、吸入摂取した場合、第3欄は経口摂取した場合の実効線量係数を示しています。

別表第2（第7条、第14条及び19条関係）

放射性同位元素の種類が明らかで、かつ、一種類である場合の空气中濃度限度等

第一欄		第二欄	第三欄	第四欄	第五欄	第六欄
放射性同位元素の種類		吸入摂取した場合の実効線量係数	経口摂取した場合の実効線量係数	空气中濃度限度	排気中又は空气中の濃度限度	排液中又は排水中の濃度限度
核種	化学形等	(mSv/Bq)	(mSv/Bq)	(Bq/cm ³)	(Bq/cm ³)	(Bq/cm ³)
³ H	元素状水素	1.8×10 ⁻¹²		1×10 ⁴	7×10 ¹	
³ H	メタン	1.8×10 ⁻¹⁰		1×10 ²	7×10 ⁻¹	
³ H	水	1.8×10 ⁻⁸	1.8×10 ⁻⁸	8×10 ⁻¹	5×10 ⁻³	6×10 ¹
³ H	有機物（メタンを除く）	4.1×10 ⁻⁸	4.2×10 ⁻⁸	5×10 ⁻¹	3×10 ⁻³	2×10 ¹
⁶⁰ Co	酸化物、水酸化物、ハロゲン化物及び硝酸塩	1.7×10 ⁻⁵		1×10 ⁻³	4×10 ⁻⁶	
⁹⁰ Sr	チタン酸ストロンチウム以外の化合物	3.0×10 ⁻⁵	2.8×10 ⁻⁵	7×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁶	3×10 ⁻²
²³⁹ Pu	硝酸塩〔経口摂取〕		5.3×10 ⁻⁵			4×10 ⁻³
²³⁹ Pu	不溶性の酸化物〔経口摂取〕		9.0×10 ⁻⁶			4×10 ⁻³
²³⁹ Pu	不溶性の酸化物以外の化合物	3.2×10 ⁻²		7×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁹	
²³⁹ Pu	不溶性の酸化物	8.3×10 ⁻³		3×10 ⁻⁶	8×10 ⁻⁹	

放射性物質の内部被ばくにつながるリスク要因と作業環境の改善

作業現場で起こり得る「内部被ばくにつながるリスク要因」は、

- ①作業環境中に放射性物質が浮遊して放射性物質の濃度が上昇する
- ②呼吸用保護具（防護マスク）の密着性が悪い時、又は、フィルタの緩みによりマスクの隙間等から汚染した空気を吸引する
- ③防護マスクの取り外し時に、保護衣等に付着した浮遊性の放射性物質（粉じん）を吸引する

「①」の対策は、現場の作業内容によって対策は異なりますが、作業環境中の空气中放射性物質濃度を可能な限り下げ、作業者への負担を軽減することです。このためには下記のことを実施することが望ましい。

◎作業環境の放射性核種の種類の確認と空气中放射性核種濃度、表面汚染密度を事前に測定または評価する。

◎床、壁、装置表面における非固着性汚染を、洗浄、ふき取り等で可能な限り除去（除染）する。

◎除染が困難な場合は、非固着性汚染をビニールシート等で養生、またはストリップابلペイント等により飛散しないように固定する。これらにより作業中の放射性物質の舞い上がりを抑える。

◎放射性核種の吸入による実効線量係数（Sv/Bq）及び防護係数（PF）を考慮した防護マスク、防護衣、防護靴、ゴム手袋、トング、ピンセット等の使用について検討する。

◎Pu-239、U等、実効線量係数が大きな核種の飛散のおそれがある場合は、全面マスク等のろ過式のマスクではなく、エアラインマスクや自給式呼吸器等を検討する（80ページ【解説D】「内部被ばく防護における考え方」参照）。

呼吸用保護具（防護マスク）による内部被ばくの防止

呼吸用保護具（防護マスク）による内部被ばくの防止について検討します。

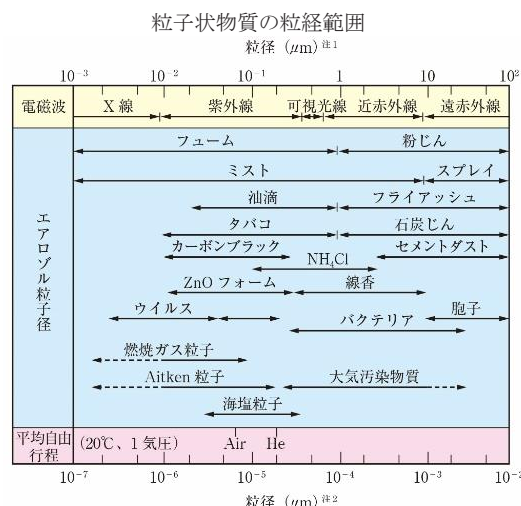
⇒呼吸用保護具の使用は有効な防護対策ですが、作業環境、特に放射性核種の種類や空气中放射性物質濃度、表面汚染密度や現場の物理的な状況等に応じて適正なマスクの選択が必要です。

⇒また、十分な性能を有するマスクでも装着の状態が悪いと、接顔部に隙間が生じ必要な性能が得られなくなります。

⇒厚生労働省が実施した「全面形の防じんマスク」の漏れ率試験では、マスク装着指導を行わなかった場合、1.1～56.0%（平均17.4%）の高い値の漏れ率を示しています。適切な指導の結果、漏れ率が5%未満と改善されました。呼吸用保護具の正しい装着が如何に大事かがわかります。作業場所及び状況に応じた「適切な呼吸用保護具」の選定と、「正しい装着」が大事です。

呼吸によって体内に入る粉じんの大きさ

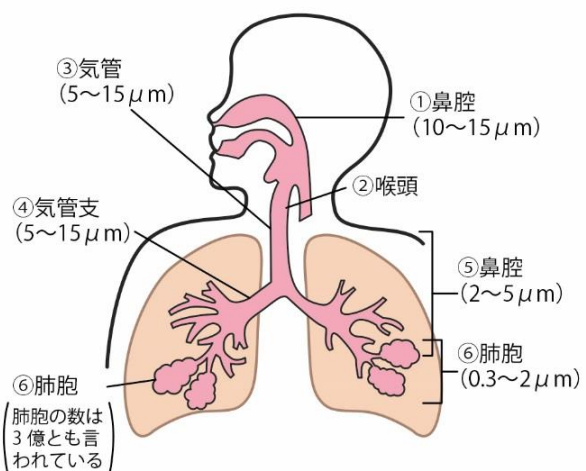
花粉のような大きな粒子は粘膜に衝突して鼻やノドに付着しますが、小さな粒子ほど沈降作用によって気管内に入り込み、ナノ粒子の様に小さい粒子はガス拡散作用によって肺胞まで到達することを示しています。現場では、放射性のフュームやミストに特に注意する必要があることがわかります。



注1 μm単位の電磁波対比参考値

注2 cm単位の平均自由行程対比参考値（出典：原子力百科事典「ATOMICA」より作成）

吸入粒子の肺到達部位



【解説D】 内部被ばく防護における考え方

防護マスクには様々な種類があります。また、防護マスクは、空気中の放射性物質がどの程度取り除くことができるかの性能を示す防護係数（PF）があります。

$$\text{防護係数 (PF)} = \frac{\text{空气中濃度}}{\text{吸気中濃度}}$$

防護係数が100のマスクは、空气中放射性核種濃度をおおよそ100分の1にできるということを示しているにすぎず、空气中の放射性物質をすべての取り除けるということではありません。空气中の放射性物質濃度が基準の100倍以上ある高濃度の作業環境でこのマスクを使用するということは、マスクを付けても基準を超える濃度の空気を吸入してしまうことを意味します。

したがって、マスクを選択する場合は、作業環境中の放射性核種の種類ごとの実効線量係数（Sv/Bq）と空气中放射性核種の濃度、呼吸率及び作業時間を用いて、内部被ばくに係る預託実効線量を予測することが重要です。これにより適切な防護マスクを選択します。

ただし、作業中の会話、発汗、不適切な装着により、顔と面体との隙間からの漏洩が生じると防護係数は低下しますので、余裕のある選択が必要です。

吸入摂取の実効線量係数は、Pu-239（不溶性の酸化物以外）が 3.2×10^{-2} （mSv/Bq）、Co-60（酸化物） 1.7×10^{-5} （mSv/Bq）と約1880倍違います。同じ空气中濃度のPu-239が存在する作業場所で防護係数100のマスクを付けたとしても、Co-60のマスク無しでの作業に比べ約19倍も大きな内部被ばく（預託実効線量）を受けることになります。

Pu-239等、実効線量係数が大きな核種が存在する場合は、全面マスク等のろ過式のマスクで内部被ばくの防護が十分にできるかを慎重に判断する必要があります。例えば、ろ過式ではないエアラインマスクや自給式呼吸器等を検討することも必要でしょう。エアラインマスクは、外部から新鮮な空気が供給されるので時間の制限はありませんが、肉体的負担が大きいことと、及びホースの引き回しのため必ず補助者をつけることが必要です。また、自給式呼吸器は空気ボンベの容量が限られているため長時間の作業には向かないとともに、使用制限時間を作業員以外が管理することが必要です。防護マスクを装着した作業は呼吸が荒くなり、想定より短い時間で空気が消耗するので十分に注意する必要があります。

放射線を放出する同位元素の数量等を定める件 平成12年10月23日号外 科学技術庁告示第5号

別表第2（第7条、第14条及び第19条関係）

放射性同位元素の種類が明らかで、かつ、一種類である場合の空气中濃度限度等

第一欄		第二欄	第三欄	第四欄	第五欄	第六欄
放射性同位元素の種類		吸入摂取した場合の実効線量係数	経口摂取した場合の実効線量係数	空气中濃度限度	排気中又は空气中の濃度限度	排液中又は排水中の濃度限度
核 種	化学形等	(mSv/Bq)	(mSv/Bq)	(Bq/cm ³)	(Bq/cm ³)	(Bq/cm ³)
⁶⁰ Co	酸化物、水酸化物、ハロゲン化物及び硝酸塩	1.7×10^{-5}		1.10×10^{-3}	4×10^{-6}	
²³⁹ Pu	不溶性の酸化物以外の化合物	3.2×10^{-2}		7×10^{-7}	3×10^{-9}	

空気中の放射性物質濃度に関する限度

作業員が呼吸する空気中の放射性物質の濃度は、1週40時間の作業につき1mSvの実効線量に相当する濃度以下とする空气中濃度限度が定められています。

核種及び化学形等ごとの空气中濃度限度

核種	化学形等	空気中の放射性物質の濃度に関する限度 (Bq/cm ³)
³ H	水	8×10^{-1}
	有機物（メタンを除く）	5×10^{-1}
	上記を除く化合物	7×10^{-1}
⁹⁰ Sr	チタン酸ストロンチウム以外の化合物	7×10^{-4}
	チタン酸ストロンチウム	3×10^{-4}
¹²⁵ Sb	酸化物、水酸化物、ハロゲン化物、硫化物及び硫酸塩以外の化合物	1×10^{-2}
	酸化物、水酸化物、ハロゲン化物、硫化物及び硫酸塩	6×10^{-3}
¹³⁴ Cs	すべての化合物	2×10^{-3}
¹³⁷ Cs	すべての化合物	3×10^{-3}
¹⁴⁴ Ce	酸化物、水酸化物及びフッ素化物以外の化合物	9×10^{-4}
	酸化物、水酸化物及びフッ素化物	7×10^{-4}

放射性物質の核種が不明な場合の空气中濃度限度

アルファ線放出の区分	物理的半減期の区分	空气中濃度限度 (Bq/cm ³)
アルファ線を放出する放射性物質	物理的半減期が30日以上のもの	3×10^{-8}
アルファ線を放出しない放射性物質	物理的半減期が30日以上のもの	1×10^{-5}

(参考資料：電離放射線障害防止規則の解説 中央労働災害防止協会編 平成13年厚生労働省告示第91号 別表第1及び別表第2をもとに作成した)

呼吸用保護具の選択と脱装時の注意事項

建屋内の作業では、各所に堆積または付着した高濃度の放射性物質が作業にともなって飛散・拡散することが考えられます。呼吸用保護具（防護マスク）は、種類によって期待される防護係数が定められています。現場の汚染核種の種類によって、適切な防護係数を有する呼吸用保護具を選択します。さらに、呼吸用保護具は装着の仕方でも漏れ率が高くなることがあります。正しい装着の方法を訓練し、フィッティングテストを行なって漏れがないことを確認することも大切です。

また、防護装備の脱装時に、放射性物質の内部取り込みの危険性が高まるため、装脱着の手順もよく学び訓練しておきましょう。



呼吸用保護具の種類ごとの指定防護係数

呼吸用保護具の種類		面体・フィルタの種類	防護係数	面体の漏れ率(%)	フィルタ透過率(%)	防護の対象物質
エアラインマスク ろ過式呼吸用保護具 複合式	プレッシャデマンド形・防じん機能付き防毒マスク	①全面形	1000	0.1	－	Cs134、Cs137 ダイオキシンの粒子
空 気 呼 吸 器	プレッシャデマンド形	②全面形	5000	0.02	－	
ろ過式呼吸用保護具	電動ファン付き 防じんマスク	③全面形 PL3、PS3	1000	0.1	0.03	Cs134、Cs137 ダイオキシンの粒子
		④フード形 PL3、PS3	1000	0.1	0.03	
	防じんマスク	⑤全面形 RS3、RL3	50	2	0.1	
		⑥半面形 RS3、RL3	10	10	0.1	
	使い捨て式防じん マスク	⑦半面型 DS2、DL2	6.7	－	5	



(参考資料：除染廃棄物等の処分に従事する労働者のための呼吸保護具の選択基準 2012年12月10日 公益社団法人産業安全技術協会)
(出典：①興研株式会社 ②～⑦株式会社重松製作所 カタログより)

呼吸用保護具の漏れ率改善の対応策(例)

発電所の復旧作業に携わる現場監督者の「呼吸用保護具（全面形マスク）」の装着時の漏れ率の計測をおこなった結果、漏れを生じさせていた原因は以下の点でした。（平均17.4%の漏れ）

- ①眼鏡の着用、綿帽子又は前髪が呼吸用保護具の接顔部にはさまれ、すき間を生じさせた
- ②顔の形状や大きさが、使用していた呼吸用保護具と不一致であった

この原因を踏まえ、以下の対応策を行うことにより漏れ率が5%未満に改善されました。

- ①眼鏡用シールピースを用いて眼鏡のつと呼吸用保護具のすき間を埋める
- ②綿帽子や前髪を呼吸用保護具の接顔部に挟み込まない
- ③顔の形状や大きさに合った呼吸用保護具を選択する
- ④新規入場者に対する呼吸用保護具の教育内容（漏れテスト）を改善する



【厚生労働省ホームページ「報道発表資料」より抜粋】

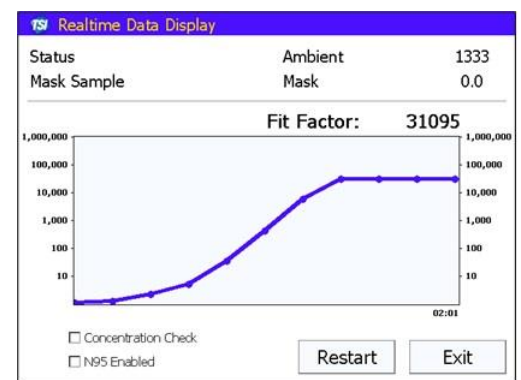
マスクのフィットテスト

高性能なマスクでも、漏れが生じると十分な防護効果が期待できません。欧米では、年に1度のフィットテストの実施が、マスクの装着と併せて義務付けられています。右の写真で紹介している装置では、マスク内の微粒子数とマスク外の微粒子数の比から、フィット係数（漏れ率）が算出されます。マスクサイズの不適合や、締め付けの偏り、メガネのツル、顔ひげの影響等によりフィット係数（漏れ率）が変わることがあります。

福島第一原子力発電所でも、使用するマスクのフィットテストを定期的実施するよう定めています。



フィットテストの状況



PortaCount Pro Model 8030/8038の表示例

（出典:TSI ホームページより）



顔ひげのガイドライン

放射性物質（汚染）拡散の防止対策

保護衣等に付着した汚染は、軽く叩くだけで粉じんが舞い上がります。そのため、粉じんを可能な限り撒き散らさないように保護衣の脱装時には十分な注意が必要となります。



保護衣に付着した粉じんの拡散状況
（画像提供：新日本空調株式会社）

拡散防止の手順（例）

過去の事例をみると、皮膚汚染、吸入被ばくがもっとも起こりやすいのは、汚染された防護マスクや防護衣を脱ぐときです。身体サーベイにより汚染が確認された場合は下記の方法で脱ぎます（脱装ともいいます）。

- ・ 脱衣前に、二重目の汚染手袋を裏返すように静かに外した後、一重目手袋の汚染検査を行います。
- ・ 保護衣、マスク等の汚染検査を行い、付着した汚染はふき取り除去又はテープ固定します。
- ・ 粉じんを舞い上げないように保護衣を裏返して脱ぎ、手袋の汚染検査のあとで最後にマスクを外します。
- ・ なお、汗で下着や皮膚がかなり濡れており、脱衣中に汚染を皮膚等に付着させるおそれが多い場合は、補助者が作業者の防護衣（タイベックスーツ）等をハサミで切り、汚染面を内側に巻き込むようにしながら脱がせることも有効です。
- ・ 汚染した防護衣や防護マスク、フィルタ等は、ビニール袋等に作業者の名前を記載して保管します。もし作業者に内部被ばくが確認された場合は、この防護衣をGe検出器等で核種分析し、核種及び核種間の比率等を確認することによって内部被ばくに係る預託実効線量の評価に用います。特に注意すべきことは、袋内の空気を安易に抜かないことです。ビニール袋の空気を抜くために袋を手で圧縮したところ内部の汚染された空気が噴出し顔にあたって二次汚染（内部被ばく）を発生させた事例があります。

（注）万一、マスクや皮膚に汚染があった場合、マスクを外す時に吸入の可能性があります。

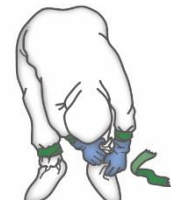
防護具の脱衣方法（アスベスト）



①石綿粉じんの事前除去



②防じんマスクに付着した石綿粉じんの除去



③シューズカバーのテープピングを外し、シューズカバーを脱ぐ



④防じんマスクと防護服（保護衣）のテープピングを外す



⑤手袋のテープピングを外す



⑥防護服（保護衣）の脱衣



⑦保護手袋の脱衣



⑧エアシャワーを浴びる

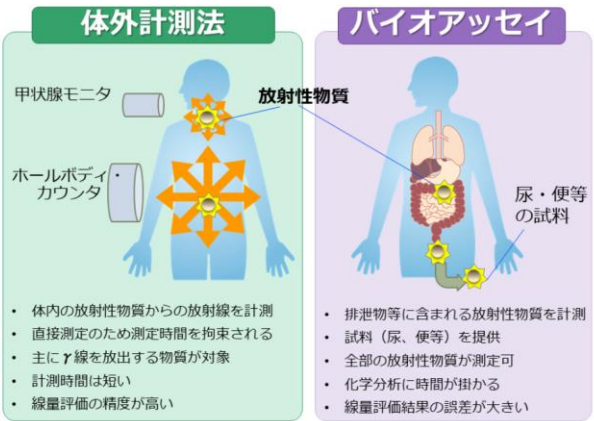
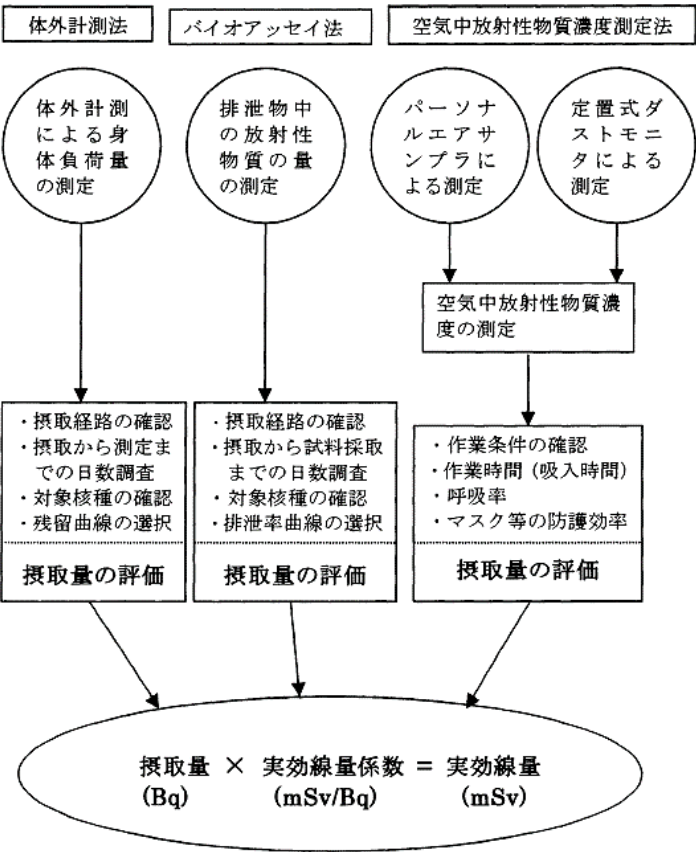


⑨防じんマスクの脱衣

（旭・デュポン フラッシュスパンプロダクツ（株） 石綿除去 保護衣・保護具マニュアルより作成）

内部被ばくの測定・評価

内部被ばくのおそれが発生した際の検査方法には、下図に示すように大きく分類すると（a）体外計測法、（b）バイオアッセイ法、（c）空气中放射性物質濃度測定法に分けられます。それぞれの方法で測定された計数値から摂取した放射エネルギー（Bq）を求め、預託実効線量を算出します。



出典：環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和4年度版）」より

出典：山口武憲，被ばく線量の測定・評価マニュアル-内部被ばくについて-，保健物理，36（1），11～17（2001）

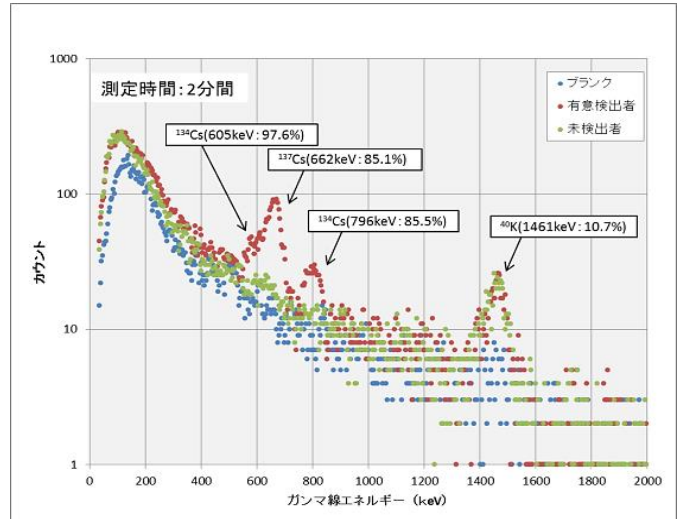
(a) 体外計測法

体の中に存在する放射性核種が放出する放射線を体の外から直接測定する方法です。このため透過性の強いガンマ線放出核種に対して用いられます。代表的な対外計測器は、全身カウンタ、ホールボディカウンタ（WBC）が上げられます。写真は、立ったまま測定することができるホールボディカウンタ（WBC）の例です。

ホールボディカウンタ（WBC）はNaI（Tl）シンチレーション検出を用いています。下右図はスペクトルの測定例です。有意検出者にはCs-134及びCs-137のピークが見えます。なお、K-40は天然の放射性核種なので未検出者、有意検出者、全ての人に検出されます。



立位型ホールボディカウンタ（WBC）



ホールボディカウンタ（WBC）で測定されたスペクトル例

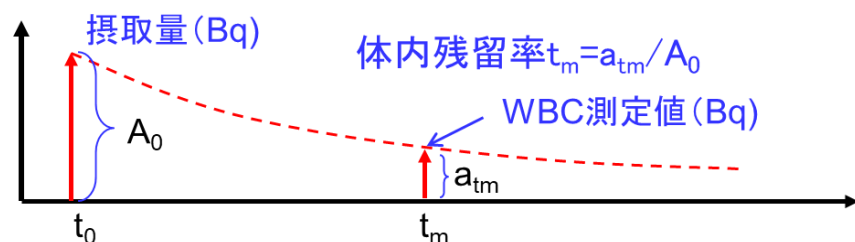
出典：武石 稔、三枝 純、江尻 明、山崎 巧、吉田 直昭、富田 剛、本多 英次、小沼 良一、永作 克彦、廣原 武臣、塩谷 崇、9-1 (3) 被ばく評価 ― 全身カウンタ（WBC）による測定と結果の評価 ―，東京電力㈱福島第一原子力発電所事故に係る廃止措置及び環境回復への原子力機構の取組み（2015年版），106，<https://fukushima.jaea.go.jp/report/document/pdf/fukushimaR&D2015.pdf>

預託実効線量は摂取した放射性核種の放射能（Bq）を求め、摂取量（Bq）に吸入または経口摂取に係る線量係数（実効線量係数）を乗ずることで求められます。

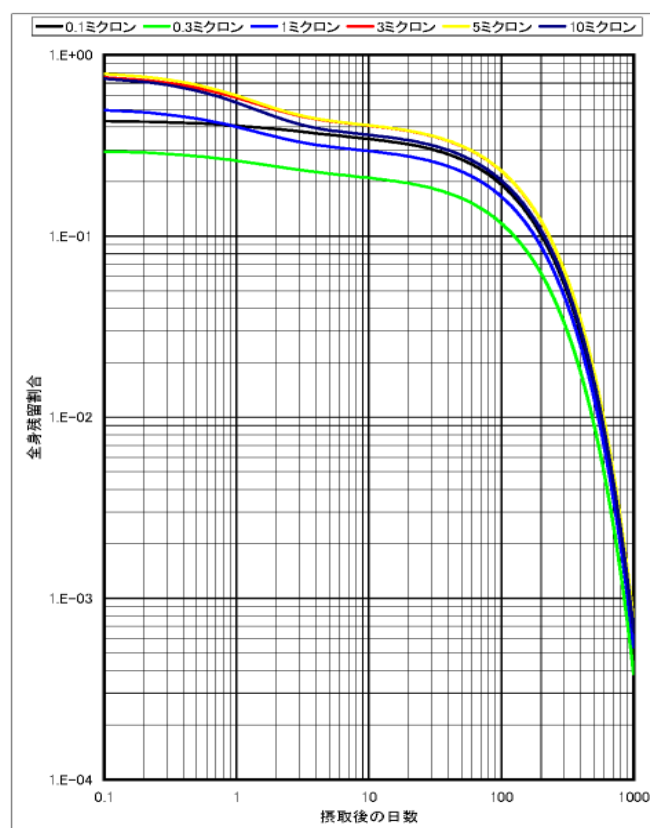
$$\text{預託実効線量 (mSv)} = \text{摂取量 (Bq)} \times \text{実効線量係数 (mSv/Bq)}$$

しかし、ホールボディカウンタ（WBC）で測定した時点では、下図のように通常は摂取から時間が経っているのが普通で、代謝、排泄等により減少しています。このため、測定値から摂取した時点までの摂取量にもどす必要があります。このため摂取時点 t_0 からホールボディカウンタ（WBC）で測定した時点 t_m までの経過時間を用いて体内残留率で割り戻し摂取量を求めます。

$$\text{摂取量 (Bq)} = \frac{\text{体内放射性核種WBC測定値 (Bq)}}{\text{体内全身残留率 } t_m}$$



体内残留率は、ICRPが標準人について核種、化学形ごと、また吸入摂取では粒径ごとに算出しており、計算コードとしても発行されています。右図はCs-137、タイプFに係る全身残留曲線の例を示します。



- 注1) 摂取量：吸入、または、経口で摂取した化学形別の放射性核種の量
 注2) 線量係数：ICRP Publication 72（年齢別の経口摂取、吸入摂取換算係数）
 注3) 体内残留率：ICRPの代謝モデルに基づく摂取後の体内残留率。

【解説E】ホールボディカウンタ（WBC）



全身立位型
ホールボディ
カウンタ



全身臥位型
ホールボディ
カウンタ

全身いす型
ホールボディ
カウンタ



甲状腺モニタ



ホールボディカウンタ（WBC）には様々な種類があります。感度や検出下限値、またスペクトル分析により核種を同定できるものもあります。できれば遮へい体を設置し、周囲のバックグラウンドを低下させることが望ましいです。

出典：環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和4年度版）」より

(b) バイオアッセイ法

α 線放出核種（U、Pu、Am、Cm等）、 γ 線を放出せず β 線のみを放出する核種（Sr-90、トリチウム（H-3））等、WBCでの測定が難しい核種による内部被ばくの検査方法です。被験者の尿や便を化学分析して、身体から排泄される放射性核種の放射能を測定し、摂取量を求めます。

内部取り込みがあった日から毎日数日間程度、尿や便を一日毎の全量を採取した場合、下式に示すように毎日の試料の測定値 $M_1 \sim M_n$ （Bq）から内部取り込み時の摂取量を、排泄率 $m(t)$ を用いて算出し、実効線量係数を乗じて預託実効線量を求めます。分析は、硝酸やイオン交換等を用いた化学分析で放射化学分析と呼ばれています。しかし、【解説F】「バイオアッセイ分析」に示すように多くの化学処理工程があり、また専門の分析技術者が必要となります。なお、最近は誘導結合プラズマ質量分析器（ICP-MS）を用いた迅速分析法も検討されています。

$$I = \frac{(M_1 + M_2 + \cdots M_n)}{m(1) + m(2) + \cdots + m(n)}$$

$$E(50) = I \times e(50)$$

バイオアッセイ測定値（Bq）

I : 摂取量（Bq）

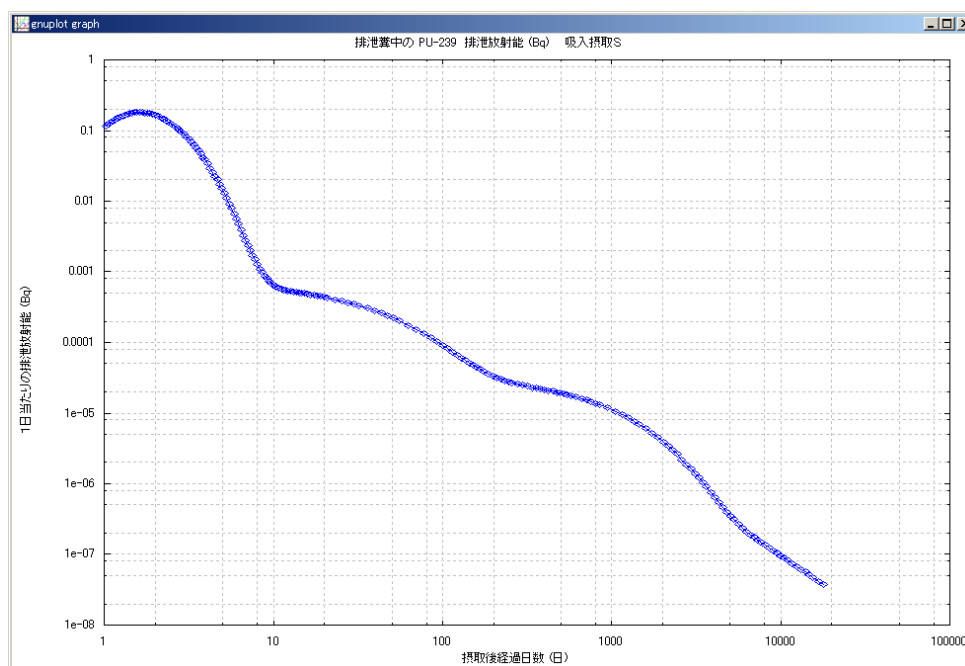
M_n : n 日目の排泄物中の放射能（バイオアッセイ測定値（Bq））

$m(t)$: t 日目の排泄率（Bq/Bq: 単位摂取量あたりの排泄物中の放射能）

$E(50)$: 預託実効線量（Sv）

$e(50)$: 預託実効線量（Sv/Bq）

吸入摂取時の便中プルトニウムの排泄率曲線
(便、プルトニウム239+240、吸入摂取、タイプS、AMAD:5 μ m)

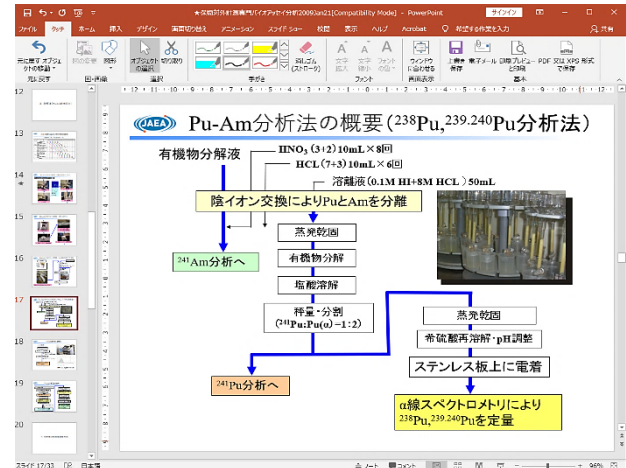
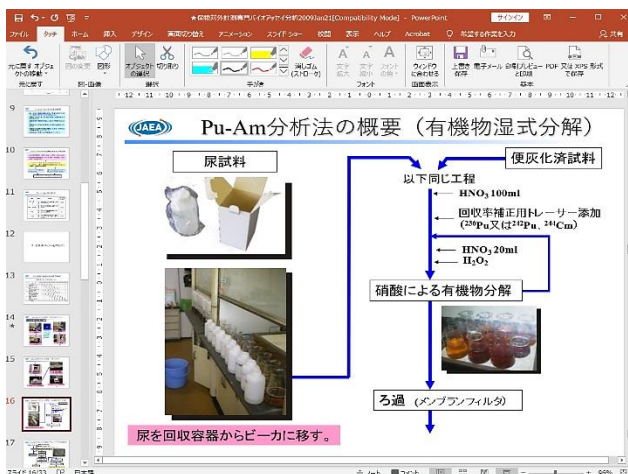
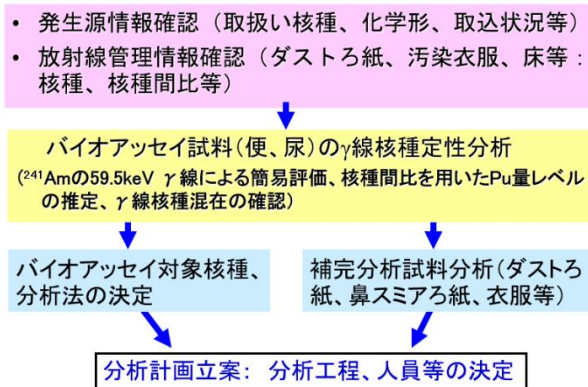


【解説F】 バイオアッセイ分析

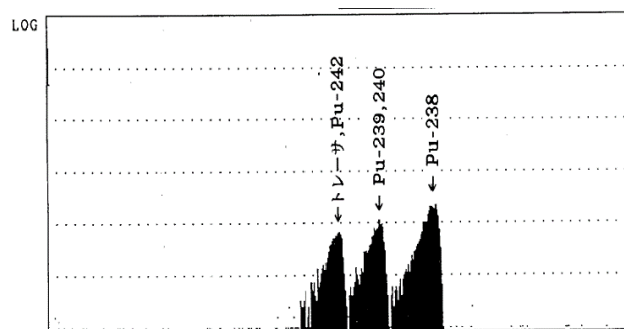
便、尿等の人体から排泄された生物学的試料を化学的に分析することにより、体内に取り込まれた放射性核種量を評価するための分析法です。一般的に体外計測法では測定が困難なアルファ線、あるいはベータ線のみしか放出しない核種に適用します。バイオアッセイ分析結果から予測実効線量を求めるためには、吸入摂取、経口摂取の区別、化学形、粒径、他の核種との放射能比はどのくらいかを知る必要があります。このため、発生源情報、放射線管理情報等を得ることも重要です。

また、内部取り込みから便中に排泄されるまでには時間を要します。通常、5日分程度の便を採取して分析します。尿についても排泄の都度、全量採取します。

便及び尿中Pu-239+240のバイオアッセイ分析フローの例



内部被ばく時の便中プルトニウムのアルファ線スペクトル例



（原子力発電所のPuは燃焼度が高いので、通常Pu-238がPu-239+240と同等検出されます。）

出典：武石，内部被ばく線量評価のためのバイオアッセイに関する放射能評価方法について，日本保健物理学会シンポジウム「内部被ばく評価のための体外計測器に関する標準校正方法」，（2008）東京

(c) 空气中放射能測定結果からの評価

放射性核種ごとの空气中放射性物質濃度に作業時間及び作業者の呼吸率を乗じて、放射性核種ごとの吸入摂取量を求め、全ての核種について預託実効線量を積算する方法です。呼気中の放射性核種濃度は、マスクの防護係数や空气中濃度測定地点と作業地点の濃度の違い等、多くの不確かさ、変動要因があります。また、呼吸率も軽作業、重作業及び個人差で違いがあるため、計画段階での評価に用いることは有効ですが、内部被ばくが起きてしまった後での事後評価には用いない方が望ましいです。

$$\text{預託実効線量 (mSv)} = \text{摂取量 (Bq)} \times \text{吸入摂取に係る実効線量係数 (mSv/Bq)}$$

$$\text{摂取量 (Bq)} = \text{呼気中の放射性核種濃度 (Bq/cm}^3\text{)} \times \text{呼吸率 (cm}^3\text{/h)} \times \text{作業時間 (h)}$$

$$\text{呼気中の放射性核種濃度 (Bq/cm}^3\text{)} = \text{空气中放射性核種濃度 (Bq/cm}^3\text{)} \times \text{呼気換算係数}$$

$$\text{呼気換算係数} = \text{マスクの防護係数} \times \text{空气中測定地点から作業地点への換算係数} \times \dots$$

ただし、個人用の小型のダストサンプラー（パーソナルダストサンプラ）を携帯し、その測定結果からの預託実効線量の評価は、定常的な作業管理の手法の一つとして活用できます。

10

まとめ

東京電力福島第一原子力発電所における廃炉作業等を着実に進めるためには、作業に従事する労働者の安全と健康の確保が必要です。このためには、合理的に達成可能な被ばく低減対策を立案し確実に実施することが重要です。放射線管理計画等作成者は、放射線に関する知識、作業環境の放射線状況を事前に十分に把握し被ばく低減のための作業方法を検討し、作業者に必要なスキルや資格及び教育を実施するとともに、作業者の被ばく管理方法、防護具の選定、作業手順、作業管理、一般安全、異常時の対応方法等を確実にし、予め定める作業計画書に反映させる等、計画作成に積極的に参画することが最も重要です。

以下、本テキストの内容をまとめます。

1. 作業場所の放射線環境の測定・評価に関する知識
 - ・放射線の単位や性質、被ばく防護の原則に基づき、作業環境を適切な放射線測定器を用いて測定します。
 - ・作業における予測個人線量を評価し、外部被ばく管理の方法を検討します。
 - ・特に被ばくの大きな高線量率環境においては、遮へいに係る知識を用いて適切な遮へいを実施し被ばく要因を少なくします。
2. 無人化工法や遠隔操作による工法に関する知識
 - ・高線量率下での作業は、最新の無人化工法や遠隔操作技術を活用し、作業者の被ばくを低減することが重要です。
3. 作業開始前の高線量箇所の除染等（線源除去）に関する知識
 - ・作業開始前には、高線量箇所の除染やガレキの撤去を行います。高圧洗浄、非固着性汚染のストリップパブル型の塗料での固定、ドライアイスブラスト等、様々な除染技術を活用し、線量を低下させます。これらの作業には最新のロボット技術の活用を図ることが望ましいです。
4. 高線量箇所（線源）から作業場所までの離隔距離確保、及び作業時間短縮の方法
 - ・高線量箇所からの離隔距離の確保及び作業時間の短縮に努めます。そのためには、作業の必要性、事前のコールドモックアップ等により、作業手順の確認と習熟、被ばく管理の方法等を事前に検討することが重要です。
5. 高線量箇所（線源）に対する遮へい工事に関する知識
 - ・ガンマ線、ベータ線の遮へいの原理を習得し、遮へい材の種類、遮へい材の活用と設置方法等を検討し被ばく低減を図ります。
6. 休憩所等の整備
 - ・休憩所の設置や休憩所内の汚染の防止対策、受動喫煙の防止等の管理方法、熱中症の知識と防止対策を実施し、作業者の健康と安全を保ちます。
7. 休憩場所から作業場所への移動動線の設定に関する知識
 - ・1Fサイト内運用区分管理状況や運用区分管理の基本事項を理解した上で移動動線を設定します。
8. 労働者の集団線量及び個人線量に係る計画線量の設定に関する知識
 - ・個人線量の管理方法、線量限度、実効線量、眼の水晶体の限度に係る法令改正、1Fの個人線量管理方法、個人線量に係る計画線量の設定、集団計画線量の設定方法及び設定例等について学び、被ばく低減に活用します。
9. 内部被ばくの防止
 - ・内部被ばくには吸入被ばく、経口被ばく等の被ばく形態があります。
 - ・防護マスクを選択するときは、作業環境中の核種、濃度に応じた防護マスクの防護性能を有するマスクや防護装備を選択することが重要です。
 - ・内部被ばくは預託実効線量で評価され、内部被ばくが発生した場合はホールボディカウンタ（WBC）による体外計測法、バイオアッセイ法等が用いられます。

本テキストは、被ばく低減対策の最小限の知識と考え方をまとめたものです。本テキストで習得した知識を作業現場の放射線管理計画作成に活用してください。

【参考資料】

(1) 化学防護服の分類

放射性物質に対する防護服には、不織布カバーオールやアノラック等が使用されています。関連する分野として、化学物質からの防護を目的とした化学防護服は、「JIS T 8115」で分類され性能等についての規定が定められています。より厳重な防護が求められる場合、この基準が参考になります。

化学防護服の分類 (JIS T 8115:2015)

「JIS T 8115」では、対象とする危険物質や防護服の構造に応じて、化学防護服を複数のタイプに分けて規定しており、タイプごとの素材と構造上のバリア性能について、「透過」や「浸透」等の試験を行うことを要求しています。

区 分	分 類	名 称	内 容
気密服 <small>身体の全部または大部分を防護する化学防護服</small>	タ イ プ 1a	自給式呼吸器内装形気密服	自給式呼吸器を服内に装着する気密服
	タ イ プ 1b	自給式呼吸器外装形気密服	自給式呼吸器を服外に装着する気密服
	タ イ プ 1c	送気形気密服	服外から呼吸用空気を取り入れる構造の気密服（呼吸用保護具併用形を含む）
密閉服 <small>身体の一部を防護する構造の化学防護服。</small>	タ イ プ 2	陽圧服	手、足及び頭部含め全身を防護する服で、外部から服内部を陽圧に保つ呼吸用空気を取り入れる構造の非気密形全身化学防護服
	タ イ プ 3	液体防護用密閉服	液体化学物質から着用者を防護するための構造の全身化学防護服
	タ イ プ 4	スプレー防護用密閉服	スプレー状液体化学物質から着用者を防護するための構造の全身化学防護服
	タ イ プ 5	浮遊固体粉じん防護用密閉服	浮遊個体粉じんから着用者と防護するための構造の全身化学防護服
	タ イ プ 6	ミスト防護用密閉服	ミスト状液体化学物質から着用者を防護するための構造の全身化学防護服
部分化学防護服 <small>身体の一部を防護する構造の化学防護服</small>	タイプ PB (3)	液体防護用部分化学防護服	エプロン、フットウェアカバー、ガウン、フード、ジャケット、実験衣、腕カバー、スモック等がある
	タイプ PB (4)	スプレー防護用部分化学防護服	
	タイプ PB (6)	ミスト防護用部分化学防護服	



タイプ1a気密服



タイプ1c準抛 気密服



タイプ3, 4, 5 密閉服



タイプ3, 4, 5, 6 密閉服



タイプ3, 4, 5 密閉服

(出典：株式会社重松製作所 カタログより)

(2) 発生源となる設備・場所の密閉・囲い込みに関する基礎知識

有害物質による粉じん飛散防止については、これまで多くの検討や対策が行われています。今後の放射性物質の発生源に対する防止対策にも、これまでの知見が役立つと考えられます。いくつかの基礎的な知識や経験をまとめて紹介します。

密閉構造

密閉構造というのは、多少内部が加圧状態になっても有害化学物質が外に漏れ出さない構造をいいます。

例) 集塵機下設置用のスクリーコンベア



(出典: フルード工業株式会社 ホームページより)

包围構造

包围構造というのは、発散源をカバー等の構造物で囲い、内部の空気を吸引してカバーの隙間等に吸引気流を作って有害化学物質の漏れ出しを防ぐ構造です。

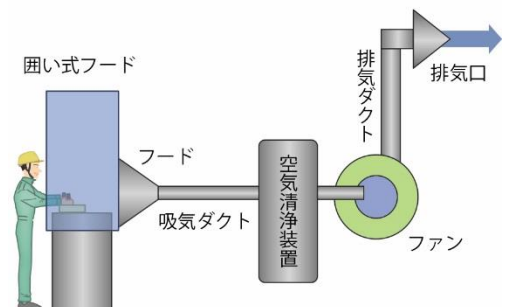


例) 粉じん発生場所のハウスによる包围

粉じん制御に用いられる局所排気装置／局所排気装置とは

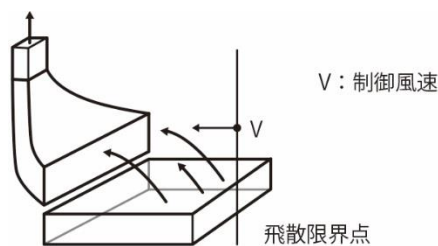
- 発生源に近いところに空気の吸い込み口（フード）を設けて
- 局部的かつ定常的な吸い込み気流を作り
- 有害物質が周囲に拡散する前に
- なるべく発散したときのままの高濃度の状態で吸い込み
- 作業者が汚染された空気に暴露されないようにするシステム

局所排気装置の構成

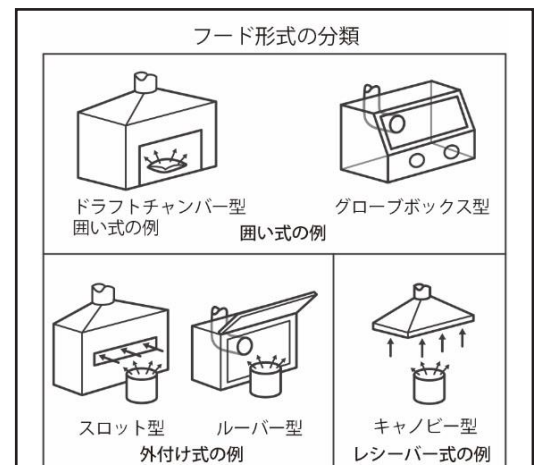


制御風速とは

有害物質を補足点でとらえて、完全にフードに吸い込むために必要な気流の程度のことです。気流を生じさせるかどうか、粉じん発生の飛散速度が速いかどうかによって、制御風速は異なります。



フード形式の分類



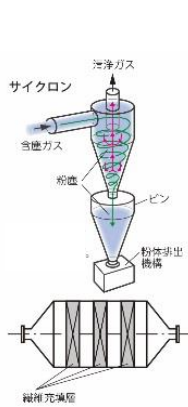
制御風速一覧表

発生条件	制御風速 (m/s)	作業の例
気流を生じない作業で飛散速度のほとんどない場合	0.25 ~ 0.5	液面からの蒸気、ガス、ヒューム
気流の少ない作業で飛散速度の低い場合	0.5 ~ 1.0	吹付と喪失、容器に粉末を入れる作業、溶接作業
気流の非常に大きい作業か飛散速度の速い場合	1.0 ~ 2.5	高圧吹付塗装室、容器に粉末材料を投入する場合
気流の非常に大きい作業か飛散速度の非常に速い場合	2.5 ~ 10	グラインダ作業、岩石研磨、粉碎作業、サンドブラスト

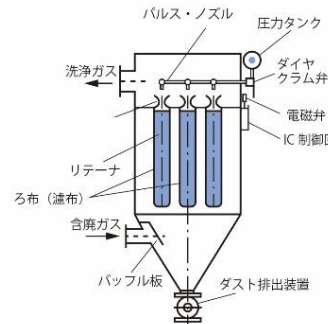
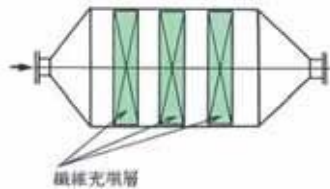
空気清浄装置（集じん機）

原子力施設で使用される集じん機は、対象粉じんの種類、発生量等によって、以下のような装置の組み合わせで構成されています。

サイクロン
多量の粉じん
に有効。プラ
スト材の回収。



ミストセパレータ
スプレーミスト等あ
らかじめ除去。



バグフィルタ

溶断溶接フェーム、
細かな粒径の粉じん
に対応。

HEPA/ULPAフィルタ

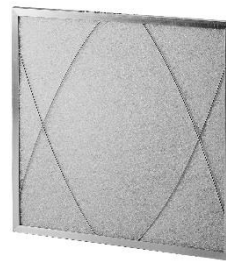
排気前にはHEPA又は
ULPAフィルタを設置
HEPA 99.97%以上
ULPA 99.9995%以上の
捕集率を有する



(出典：日本バイリーン株式会社
ホームページより)

プレフィルタ

粗じんを除去し
HEPA等を保護



原子力施設で使用されている局所排気装置例

発生粉じん等に対応した空気清浄装置

粉じん用

煙ヒューム用

コンクリートはつり用

ブラスト作業

溶剤用

囲い式フード

空気清浄装置



(3) 汚染拡散防止、汚染防護対策に関する知識

作業場所の隔離と負圧管理

- ①放射性粉じんを作業場から周辺に飛散させないために、ポリエチレンシート等を用いてグリーンハウス等を作製し他の場所から隔離します。
- ②隔離した作業場への作業員の出入り等の際に、放射性粉じんが作業場外へ飛散することを防止するため、出入口に前室を設け、外部から直接作業場へつながることがないようにします。
- ③作業場に設置したHEPAフィルタ付の集じん・排気装置を使用し、作業場及び前室の空気を排出することで両室が外部の気圧よりも低い状態を維持し、作業場を常時負圧に保ちます。環境省の大気汚染防止法における石綿飛散防止対策では、目安として1時間当たり換気回数を4回以上（作業場の1回換気時間を15分以下）とすることが必要とされています。ただし、作業場の気密性が悪いと換気回数を高める必要があります。集じん・排気装置を稼働させた状態で、微差圧計による測定、目視により空気の流れを確認すること等の方法が含まれます。

- ④異常が認められた場合の必要な措置として、集じん・排気装置の補修、集じん・排気装置の増設、集じん・排気装置の交換、作業場に係る隔離の不具合箇所の補修等、異常の原因を改善するための措置等を行い、それらの措置により作業場及び前室を負圧に保ちます。

アスベスト除去作業場所の隔離イメージ

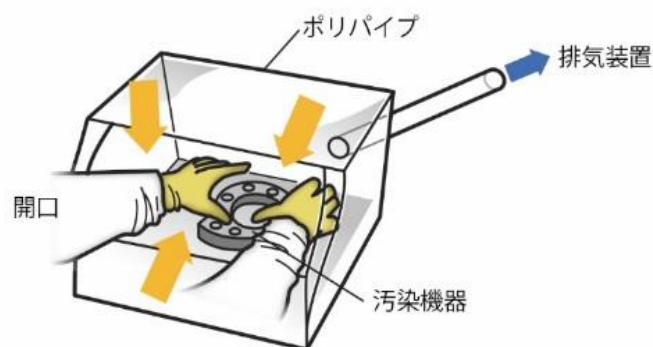


(出典:環境リスク.com ホームページより作成)

汚染発生箇所の隔離

- ①汚染発生源となる箇所を、グローブを取り付けられたプラスチックシート等で覆い密閉し、その箇所への作業は外からグローブを通して実施します。
- ②上記①で作業性が悪い場合は汚染発生源となる箇所を囲い、できるだけ少ない開口部を設けます。開口部の風速が制御風速を満足する十分な排気装置を接続して作業を行います。囲いの中で使用したグローブや袖カバーは脱ぎ、外部への汚染の持ち出しが無いようにします。

弁箱の手入れ作業に用いたフード



(出典：日本環境調査研究所 資料より)

汚染の固定

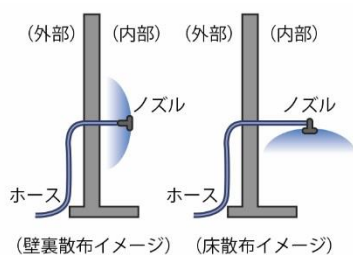
①封じ込め工法

水スプレー等で湿潤する方法は、最も良く使われる方法の1つです。水以外のものとして飛散防止剤が使用され、浸透型や皮膜を形成するタイプのものがあります。建築現場や造成地、石炭、コークス、アスベスト、鉱山向け等様々なものが製品化されています。原子力施設で使用されたものには、これらの飛散防止剤のほか、水性塗料や剥離性塗料等があります。

②囲い込み工法

汚染面はそのまま、シートで覆ったり、板状材料等で覆い密閉する方法です。

飛散防止剤の建屋外壁への散布状況



1F2 オペレーションフロアー
飛散防止剤散布イメージ
(出典：東京電力ホールディングス（株）
ホームページより作成)



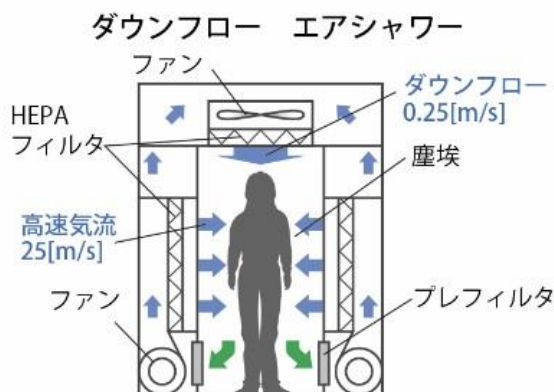
剥離性塗料による封じ込め及び除染状況

(出典：日本環境調査研究所 資料より)

気流による制御

一例として、プッシュプル型換気装置について説明します。同一ベクトルの集合流をプッシュフードから吹き出し、発生した有害物質を補足してプルフードから排気する換気装置です。吸引するだけの局所排気装置と比べて広範囲の発散源を補足することができ、さらに局所排気装置より少ない風量で換気ができます。

また、対象となる作業場の空間を仕切り等によって囲うことなく換気できるので、作業スペースを有効に使えます。開放式プッシュプル型換気装置は、労働安全衛生法の各規則において構造要件・性能要件が定められています。風等で気流が乱されない作業場所での汚染粉じんのコントロールや、防護衣の脱衣時の内部被ばく防止対策等への適用が考えられます。

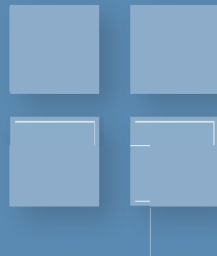


(出典：機械学会 ホームページより作成)

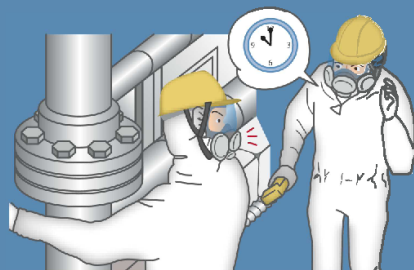
本テキストにおける用語の定義

用 語	定 義
放射線源	環境の放射線レベルを上昇させる原因となっている放射線の発生源のこと。発電所の場合、放射性物質が多く付着、滞留している場所が線源となっている。
線量当量	放射線の生物学的効果を共通の尺度で表す量。同じ吸収線量でも放射線の種類により生物体への影響が異なるために、放射線ごとに定められた放射線加重係数を吸収線量等に乗じて表わした被ばく線量のこと。
線量当量率	放射線被ばくによる人体への影響を単位時間ごとに示したもの。時間ごとの「線量当量」の値。
フェーシング	地面の表面をモルタルやコンクリートで舗装すること。周辺の空間放射線量を低減できるほか、雨水が地下に染み込むのを防ぐ効果がある。
HEPAフィルタ	JIS Z 8122 によって、「定格風量で粒径が $0.3\mu\text{m}$ の粒子に対して99.97%以上の粒子捕集率をもち、かつ初期圧力損失が245Pa以下の性能を持つエアフィルタ」と規定されている。
不均等被ばく	体幹部不均等被ばくとは、体幹部の3つの部位（手足を除いた部位を指し、それを頭頸部、胸部、腹部の3つ）のうち、基本部位である胸部（女子は腹部）よりも多くの放射線を受けるとされる部位が他にある場合を言う。体幹部上で防護衣による被覆部分と露出部分における線量値が明らかに異なる場合等が当てはまる。
モックアップ訓練	モックアップとは、実物とはほぼ同様に似せて作られた（または、類似の施設で）設備や機器を用いて、実際の作業を想定して練習、訓練すること。
APD	警報機能付き個人線量計「Alarm Personal Dosimeter」の略。警報を発生する機能を備えた個人線量計。
実効エネルギー	広がったエネルギースペクトルをもつ放射線を、それと同じ相互作用をする単一エネルギーの放射線として取り扱うことが可能なとき、このエネルギーを実効エネルギーという。
ガンマ線エネルギースペクトル	ガンマ線をエネルギーごとに区分して作成された度数分布のこと。
3mm線量当量	身体表面から3mmの深さの線量当量であり、目の水晶体の線量当量の指標として用いられている。特にベータ線あるいは40KeV未満のエネルギーを有するX線や γ 線のような透過力の弱い放射線を取り扱う場合に3mm線量当量の評価を考慮する必要がある。
1cm線量当量	放射線モニター等から得られた線量測定値と実効線量とを関連づけるため、国際放射線単位測定委員会（ICRU）が定めた、ある場所の放射線の量を表す物理量の1つ。人体組成を模擬した元素組成値をもつ直径30cmの球体（ICRU球）を放射線場に置き、その球表面から1cmの深さの点での線量の値を言う。
70 μm 線量当量	皮膚の線量当量（生物学的な被ばく影響を考慮にいれた被ばく線量）として、身体表面から70 μm の深さの組織の線量当量のこと。

用 語	定 義
質量減衰係数	高エネルギーの電磁波は物質中で指数関数的に減衰し、単位距離当たりでみた減衰係数を線減衰係数 μ 、これを物質の密度 ρ で割った減衰係数を質量減衰係数 $\mu_m (= \mu / \rho)$ という。（単位： cm^2/g ）
実効線量透過率	線源と測定点との間に遮へい体を置いた場合、遮へい体を透過してくる放射線の量を被ばく線量の単位で評価したときの透過率のこと。
離隔距離	主に安全性の観点から設定される、複数の対象の間に置かれるべき一定の距離を意味する語。
プレハブ化	設置物の一部又は全ての部材をあらかじめ工場等で製作し、現場での組み立てが容易になるようにすること。
放射平衡状態	逐次崩壊や系列崩壊において元の放射性同位体（親）が崩壊してできた次の核種（娘）との放射能の量的な関係が、時間的にほぼ一定の比率で推移する状態を指す。
ガイドライン	東京電力福島第一原子力発電所における安全衛生管理対策のためのガイドライン（制定：平成27年8月26日付け基発0826第1号、改正：令和5年4月17日付け基発0417第7号）のこと。
集団線量	集団をつくる放射線業務従事者一人一人が受けた放射線量を、その集団全体について合計したもの。



放射線管理計画等 作成者用テキスト



令和5年11月 第9版発行

「東電福島第一原発廃炉等作業における被ばく低減対策の強化事業」

受託者 一般財団法人 日本原子力文化財団