

東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた
機器・装置開発等に係る福島ワークショップ(第2回)

セッションⅡ：建屋内の遠隔除染技術の開発について

「建屋内の遠隔除染技術の開発」

2012年12月19日

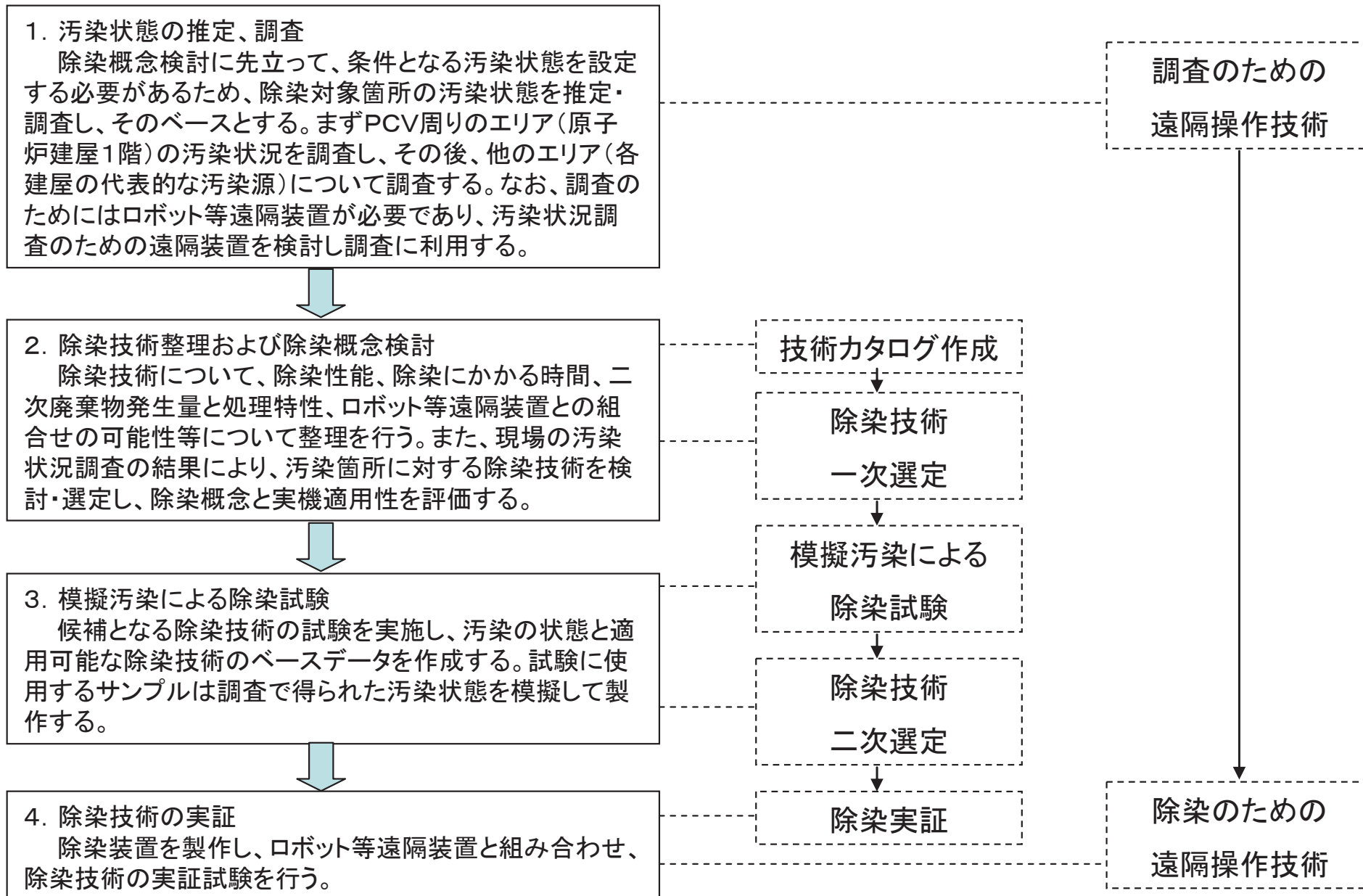
(株)東芝
日立GEニュークリア・エナジー(株)
三菱重工業(株)

- ・原子炉建屋表面の汚染状況に適した除染方法を選定するために汚染状況の基礎データを取得すること
- ・除染性能、適用性、被ばく、二次廃棄物処理特性等を総合的に評価して除染方法を選定すること
- ・模擬汚染除染試験により除染の適用性を評価すること
- ・原子炉建屋表面の遠隔除染装置を開発し、実証すること

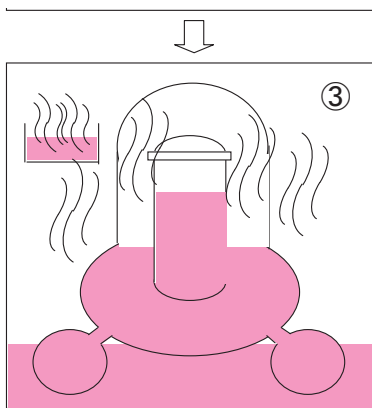
検討フロー

除染技術

遠隔操作技術



(1) 汚染状態の推定・調査/汚染経路の推定



③炉心の温度上昇、圧力上昇により、圧力的に脆弱な部位から蒸気が漏洩し、建屋内に拡散。水-ジルコニウム反応により水素が発生し、蒸気と同様に建屋内に拡散。また冷却のために注入した冷却材（海水、沢水）が地下に滞留

2号の原子炉建屋表面の状態（推定）

蒸気あるいは水素に随伴する揮発性の核種はCsが主であり、主にCsI、CsOHの形態あるいはCsイオンの状態と想定される。建屋表面においては、塩害による塩素、海水注入時のミスト等に含まれる塩素が存在しているため、一部はCsClとして建屋表面に存在すると考えられる。

コンクリートの床面がエポキシ塗装されており、汚染蒸気が表面で乾燥した状態



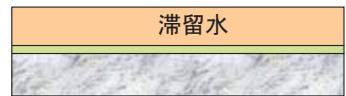
コンクリートの床面が無垢の状態であり、汚染蒸気が浸透した後乾燥した状態



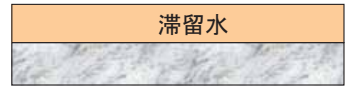
1, 2, 3号の原子炉建屋地下階の状態（推定）

滞留水には、Csだけでなく、Sr他種々の核種が含まれている。

コンクリートの床面がエポキシ塗装されており、滞留水が残留している状態

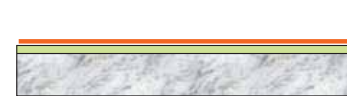


コンクリートの床面が無垢の状態であり、滞留水が残留している状態

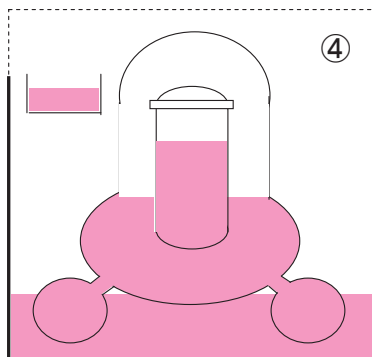


将来

コンクリートの床面がエポキシ塗装されており、滞留水移送後残渣が表面で乾燥した状態



コンクリートの床面が無垢の状態であり、滞留水が浸透した後乾燥した状態

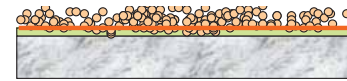


④水素爆発により建屋の上部が破壊され、コンクリート粉が建屋内の各部に堆積した。

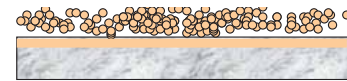
1, 3号の原子炉建屋表面の状態（推定）

堆積したコンクリート粉は上部階のコンクリートであるため、主要な核種はCsと推定される。

コンクリートの床面がエポキシ塗装されており、表面汚染の上にコンクリートの粉砕屑が表面に積もっている状態

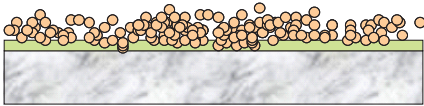
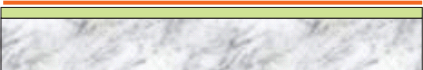
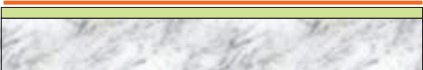
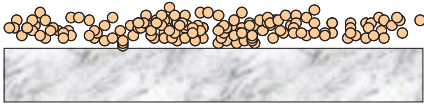




コンクリートの床面が無垢の状態であり、表面汚染の上にコンクリートの粉砕屑が表面に積もっている状態



(1) 汚染状態の推定・調査/汚染の種類のカテゴリ

- ・事故時の経緯から核種の移行経路を推定、想定汚染状態を6種類に分類。
- ・得られた知見で模擬汚染の作成や除染技術のカテゴリに繋げた。

	飛散した汚染の降り積もり	汚染蒸気にはく露	滞留水に浸漬
表面塗装あり	<p>エポキシ塗装されているコンクリート床面に、コンクリート破砕屑が降り積もり</p> 	<p>エポキシ塗装されているコンクリート床面が、汚染蒸気や凝縮水に接触しその後乾燥</p> 	<p>エポキシ塗装されているコンクリート床面に、滞留水が接触しその後乾燥</p> 
表面塗装無し (コンクリート面)	<p>無垢のコンクリート床面に、コンクリート破砕屑が降り積もり</p> 	<p>無垢のコンクリート床面が、汚染蒸気や凝縮水に接触しその後乾燥</p> 	<p>無垢のコンクリート床面に、滞留水が接触しその後乾燥</p> 

(1) 汚染状態の推定・調査/汚染の調査の概要

5

[オンサイト]線量率調査、線源調査、表面状態調査

1号機(5/14~5/18)、2号機(5/28~6/1)、3号機(6/11~6/15)で線量率調査、線源調査、表面状態調査を実施した。

<結果概要>

- ・雰囲気線量率への寄与は床面及び上部(天井あるいは上部機器)汚染が主で、壁面汚染の寄与は少ない

[オンサイト]汚染状況調査

1号機(6/7~6/15)、2号機1階面(6/13~6/19)2号機2階面、3階面、3号機1階面(6/28~7/4)のサンプル採取を実施した。

<結果概要>

- ・主要線源はCs-137,Cs-134
- ・放射能割合は概ねCs-137が60%、Cs-134が40%
- ・Sr-90/Y-90は建屋表面にはほとんど存在していない

[JAEA分析]汚染状況調査

採取したサンプルの一部をJAEAに輸送(第1回目のサンプル輸送を6/22に、第2回目の輸送を7/18に実施)し、詳細分析を実施中。

<JAEAでの分析のねらい>

- ・汚染のコンクリートへの浸透確認
- ・(オンサイト分析とあわせて)遊離汚染/固着汚染/浸透汚染の割合確認

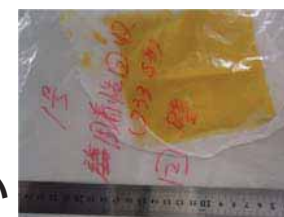


線量率、線源調査ロボット

線源調査結果の例



遊離性汚染サンプル



固着性汚染サンプル



浸透汚染サンプル

(2) 除染技術整理及び概念検討/技術カタログで提案された技術の整理

6

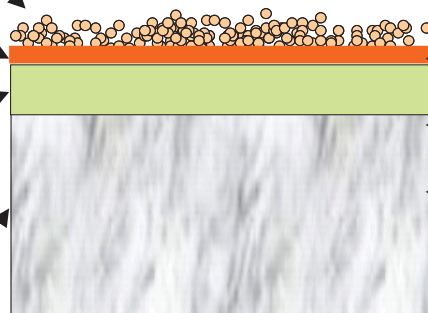
想定汚染の模式図

遊離性汚染

固着性汚染

表面塗装
(エポキシ)

コンクリート
(浸透汚染)



各除染技術について、遠隔機器への搭載性、狭隘部への適用性、ユーティリティ、消耗材の遠隔供給性、二次廃棄物量及び回収性、除染効果及び作業効率等を関係者で評価し、得点付けを実施

技術カタログで抽出された主な除染技術

遊離性汚染に対し有効な技術

- ・吸引回収除染法(14)
- ・高圧水洗浄法(12)
- ・ブラッシング除染法(8)

固着性汚染に対し有効な技術(化学的)

- ・はく離性塗膜除染法(13)
- ・有機酸除染法(11)
- ・泡除染法(10)
- ・ゲル・ペースト除染法(10)

固着性汚染に対し有効な技術(機械的)

- ・ドライアイスブラスト除染法(13)
- ・レーザー除染法(11)

浅い浸透汚染に対し有効な技術

- ・超高圧水除染法(12)
- ・ブラスト除染法(12)

深い浸透汚染に対し有効な技術

- ・スキャブリング除染法(11)
- ・液体窒素除染法(8)
- ・マイクロ波除染法(6)

(2) 除染技術整理及び概念検討/除染技術の選定

除染技術選定の考え方

- ・6種類の汚染に対し、有効な除染方法を網羅して選定する。
- ・各除染方法の有効性は、実機で検証されたわけではないので、現時点では各汚染に対して、複数の除染技術を選定する。
- ・複数の除染方法選定にあたっては、特徴の違うものを選定する。

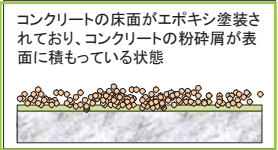
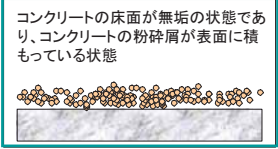
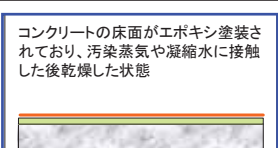
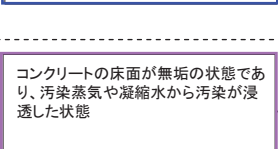
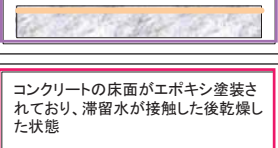
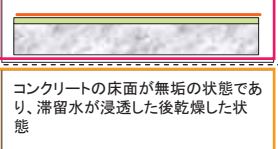
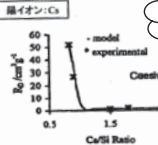
区分	工法の適用範囲(汚染状態)						評価内容			周囲への影響の小さい順番	
	水素塩化物に蒸着した汚染 エポキシ塗装コンクリート面に、コンクリート層が堆積物が堆積	汚染蒸気に蒸着された汚染 無垢コンクリート面に、コンクリート層が堆積物が堆積	エポキシ塗装のコンクリート面に、汚染蒸気が表面で乾燥	汚染蒸気に蒸着された汚染 無垢コンクリート面に、汚染蒸気が表面で乾燥	滞留水に浸漬された汚染 エポキシ塗装コンクリート面に、滞留水が付着後表面で乾燥	滞留水に浸漬された汚染 無垢コンクリート面に、滞留水が付着後表面で乾燥	表面の状態を保持(塗装を残した除染、コンクリートを平滑に保つ)	汚染物質のコントロール(回収、周囲機器への影響が無い)	要素技術開発(除染効果の把握、適用可否判断など)の裏付け		フェーズⅠでの採否
	遊離性汚染	遊離性汚染	固着性汚染	固着性汚染 浸透汚染(比較的深い)	固着性汚染 浸透汚染(可能性あり)	固着性汚染 浸透汚染(比較的深い)					
高圧水ジェット除染法	←→						◎ 表面の状態を保持したまま汚染物質の除去が可能	○ 除染に水を使用し回収が必要	◎ 除染能力の確認。装置化にあたってのパラメータサーベイが主目的の試験	○フェーズⅠで採用する。 対象は吸引回収法と重複するが、吸引回収法よりも高い除染効果が得られることが期待できる。吸引回収の次に現場投入を行う。	2
ウォータージェット(超高圧水)除染法			←→				△ 吹き付けパラメータ調整を行うことで塗装除去のコントロールが可能	○ 除染に水を使用し回収が必要	◎ 除染能力の確認。装置化にあたってのパラメータサーベイが主目的の試験	○フェーズⅠで採用する。 高圧水ジェットの能力拡大を図り、水の回収が必要であるが圧力などのパラメータ調整で広範な対象への適用を図る。	4
吸引回収除染法	←→						◎ 表面の状態を保持したまま汚染物質の除去が可能	◎ ユーティリティを使用せず容易に汚染回収が可能	◎ 除染能力の確認。装置化にあたってのパラメータサーベイが主目的の試験	○フェーズⅠで採用する。 最も簡単な除染法であり周囲への影響も無いことから、最初に現場に投入する。	1
ドライアイスプラスト除染法		←→		←→			△ 吹き付けパラメータ調整を行うことで塗装除去のコントロールが可能	◎ ユーティリティとなるドライアイスは昇華するため2次廃棄物として発生しない。	◎ 除染能力の確認。装置化にあたってのパラメータサーベイが主目的の試験	○フェーズⅠで採用する。 出力調整により対象表面の保持が可能で2次廃棄物も少なくなる効果がある。	3
プラスト除染法			←→				△ 吹き付けパラメータ調整を行うことで塗装除去のコントロールが可能	◎ 除染にプラスト材を使用し回収必要であり、また2次廃棄物増加する。	◎ 除染能力の確認。装置化にあたってのパラメータサーベイが主目的の試験	○フェーズⅠで採用する。 広範での汚染に対する適用が考えられるが、プラスト材使用による2次廃棄物増加、表面保持が難しいなどの影響あり、浸透しているため他工法で除去できないなどの場合に適用する。	5
スキャブリング除染法					←→		× 表面を穿つため、塗装表面の保持などは不可能	◎ ユーティリティを使用せず容易に汚染回収が可能	◎ 除染能力の確認。装置化にあたってのパラメータサーベイが主目的の試験	フェーズⅠでは採用しない。 深い浸透汚染が考えられる滞留水浸透汚染なども対象にしたフェーズⅡで採用可能性を検討する。	-
剥離性塗膜除染法	←→		←→				△ コンクリート表面の状態を保持は可能だが、塗装の保持については塗装に依存する	○ 除染に使用した塗膜は固化するためコントロール可能、ただし廃棄物発生。	◎ 固着性汚染・深い浸透汚染に対しての効果を確認する必要あり	フェーズⅠでは採用しない。 模擬汚染を使用した除染試験結果などを考慮しフェーズⅡで採用可能性を検討する。	-

フェーズⅠでの対象汚染範囲：原子炉建屋1階
粉じん付着、水蒸気などに基づく汚染

(1) 滞留水に浸漬された汚染以外のガレキ・粉じん付着状態の汚染、蒸気に蒸着した汚染についてそれぞれ塗装有無の合計4種類の汚染形態、複数の除染方法を組み合わせ4種類の汚染をカバーして対応。
 (2) 実機作業段階では汚染の調査・把握し除染工法を選定。なお、後々の工事への影響を少なくするため、可能な限り汚染のみを除去し、表面の塗装は残す、コンクリート面は平滑な状態を保つ、ことを優先する。脱離した汚染物質や使用した水などをコントロールし回収、周囲システムへの影響が無いことを優先する。
 (3) フェーズⅠ実証除染方法は、模擬汚染での除染試験において、除染可否といった要素技術の開発ではなく、一般的な知見として除染が可能であることの裏付けや、実証時の動作/パラメータ採取程度が目的になりうる除染方法を選択する。

(3) 模擬汚染による除染試験/模擬汚染試験片の作成

模擬汚染作成方法

推定している汚染状況	推定付着形態	模擬試験片の製作方法案
① コンクリートの床面がエポキシ塗装されており、コンクリートの粉砕屑が表面に積もっている状態 	乾性沈着	CsCl溶液とコンクリート粉末を混合した後、エポキシ塗装のコンクリート表面に付着させる。
② コンクリートの床面が無垢の状態であり、コンクリートの粉砕屑が表面に積もっている状態 	CsCl等 Cs化合物の固体	CsCl溶液とコンクリート粉末を混合した後、エポキシ塗装のコンクリート表面に付着させる。
③ コンクリートの床面がエポキシ塗装されており、汚染蒸気や凝縮水に接触した後乾燥した状態 	湿性沈着 CsCl等 Cs化合物の固体	エポキシ塗装のコンクリート片にCs溶液を滴下し乾燥させる。
④ コンクリートの床面が無垢の状態であり、汚染蒸気や凝縮水から汚染が浸透した状態 	浸透収着 コンクリート変質層に取り込まれる (Cs ⁺ 等)	コンクリート片にCsCl溶液を滴下し乾燥させる。
⑤ コンクリートの床面がエポキシ塗装されており、滞留水が接触した後乾燥した状態 	湿性沈着 CsCl等 Cs化合物の固体	エポキシ塗装のコンクリート片をCsCl溶液に浸漬した後、乾燥させる。
⑥ コンクリートの床面が無垢の状態であり、滞留水が浸透した後乾燥した状態 	浸透収着 コンクリート変質層に取り込まれる (Cs ⁺ 等)	CsCl溶液にコンクリート片を浸漬した後、乾燥させる。 劣化が促進されCs ⁺ 吸着される 

模擬汚染試験片



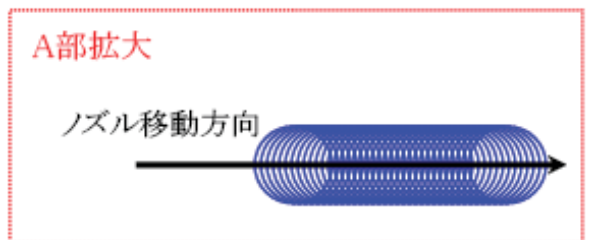
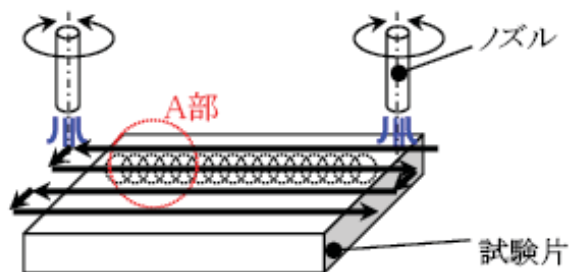
模擬汚染試験片の表面状態



(3) 模擬汚染による除染試験/高圧水ジェット洗浄試験

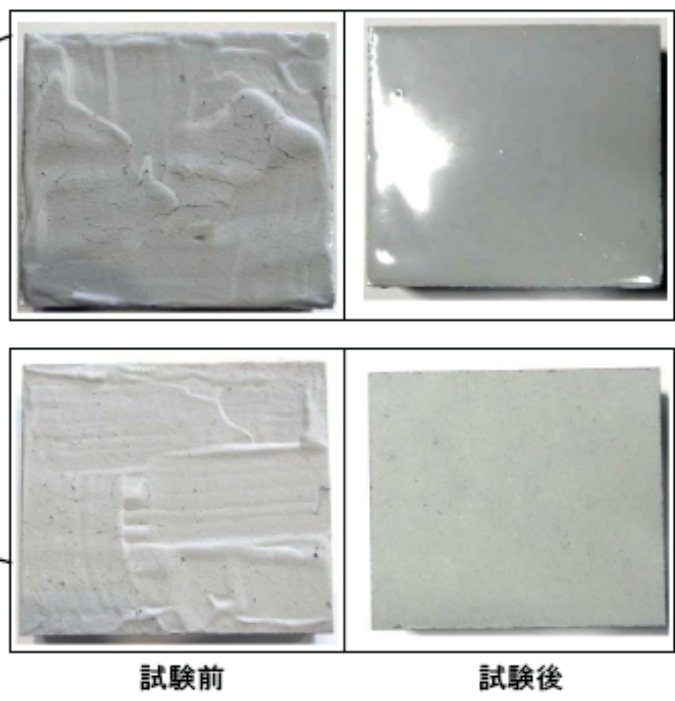
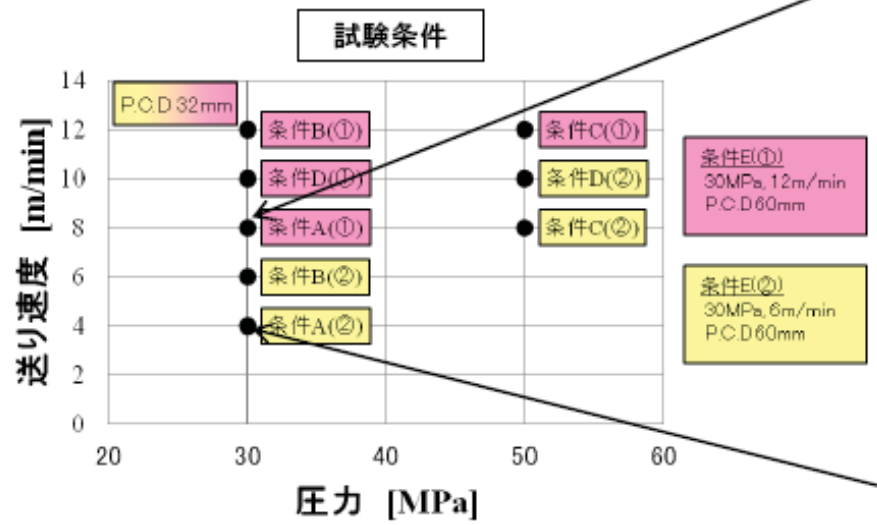
1. 試験方法

非放射性のCsを付着・浸透させた試験体(100×100×50mm)に対し、実機と同形状のノズルを用いて試験を実施し、高圧水の除染性能を確認する。



2.1 試験結果(形態番号①②)

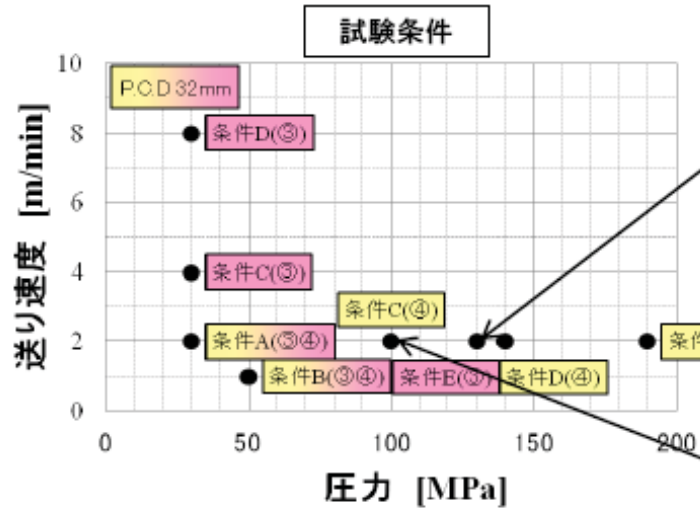
代表写真



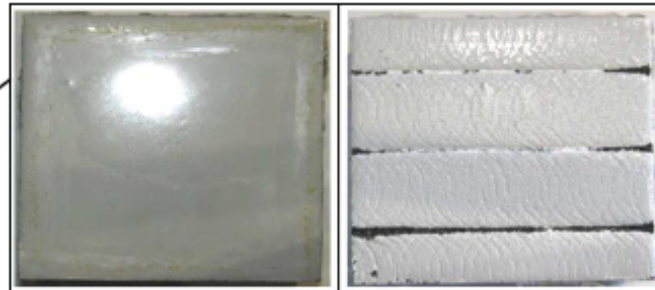
形態番号① 条件A
エポキシ塗装を傷付けることなく、付着したコンクリート粉のみを除去することができた。

形態番号② 条件A
無垢のコンクリート表面を傷付けることなく、付着したコンクリート粉のみを除去することができた。

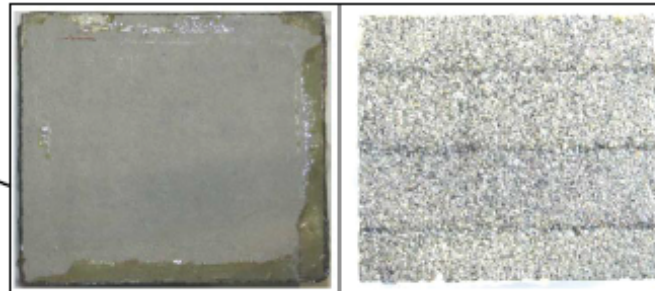
2.2 試験結果(形態番号③④)



代表写真



形態番号③ 条件E
エポキシ塗装の表面の
みを薄くはつることが
できた。(はつり深さ
約0.1mm)

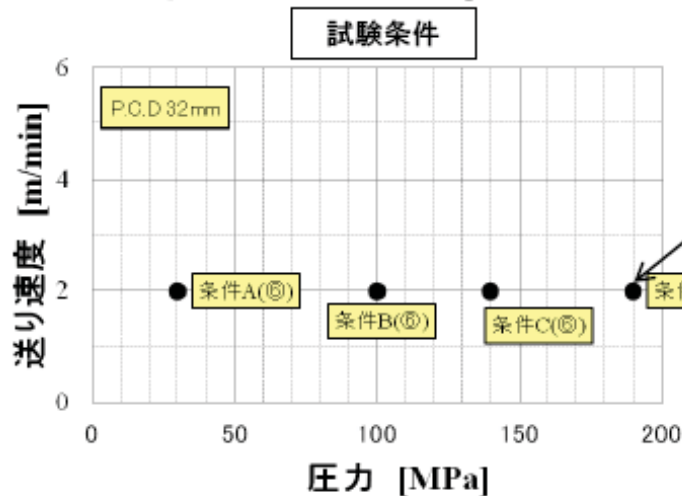


形態番号④ 条件C
無垢のコンクリート表面
を薄くはつることが
できた。(はつり深さ約
0.1mm)

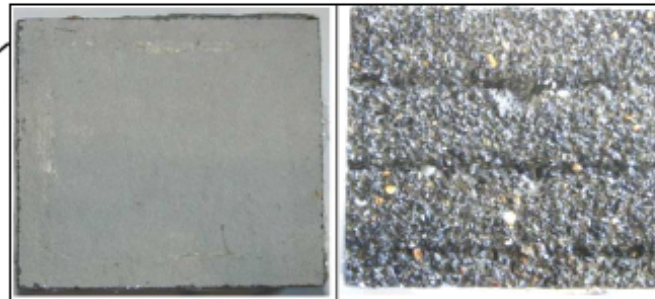
試験前

試験後

2.3 試験結果(形態番号⑥)



代表写真



形態番号⑥ 条件D
無垢のコンクリート表面
をはつることができ
た。(はつり深さ約
2mm)

試験前

試験後

(3) 模擬汚染による除染試験/ドライアイスブラスト除染試験

- (1)試験条件 ・試験体：汚染形態③、④、⑥(③、④はCs付着量2種. コンクリート中blank値の約10倍/100倍)
 ・除染条件：パラメータ ノズル移動速度 条件1=600, 条件2=300, 条件3=200 mm /min

その他固定条件：噴射圧力：～ 0.6 MPa、噴射流量：～ 0.9 Nm³/min、ノズルサイズ：20 × 1.5mm、ノズル距離：20 mm、ノズル角度：90°、
 ブラストホース：3/8B × 10 m、ペレットフィード量：～0.5 kg/min、ペレット粒径：供給元ペレット径120～200 μm

(2)試験体状況

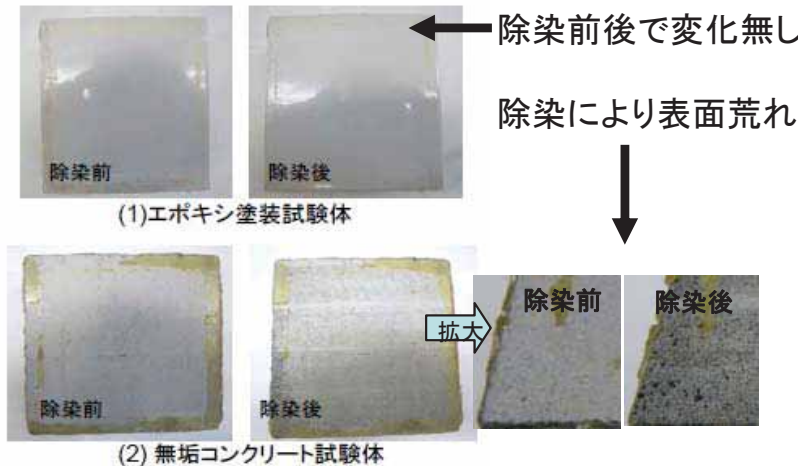


図2 除染試験前後の試験体外観

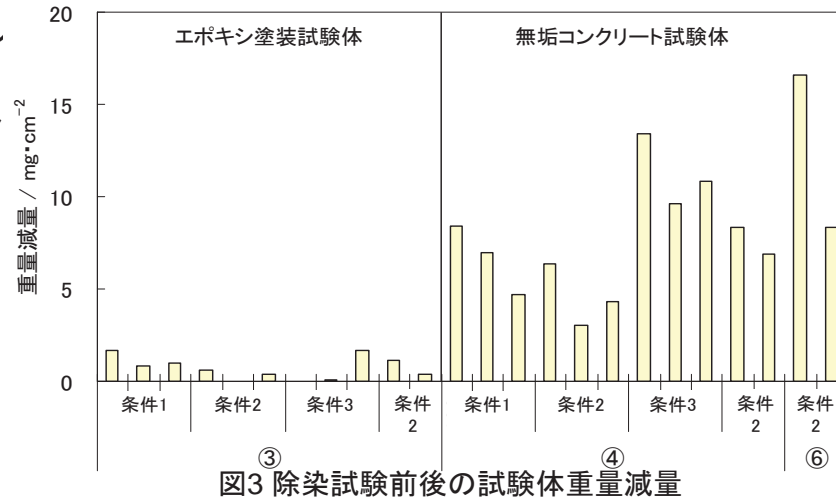


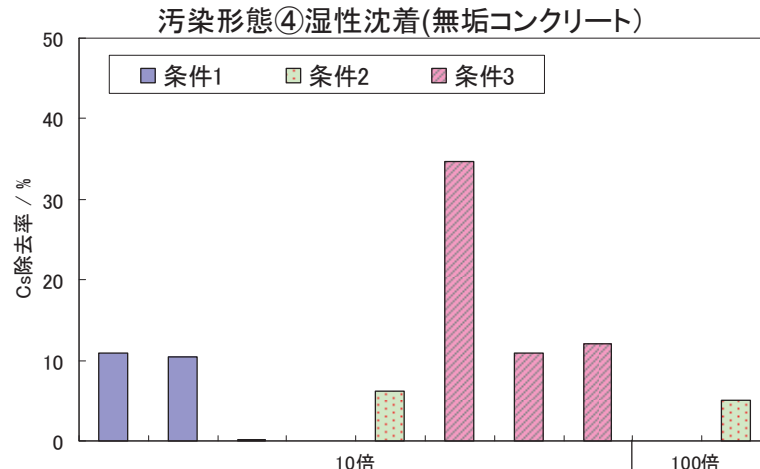
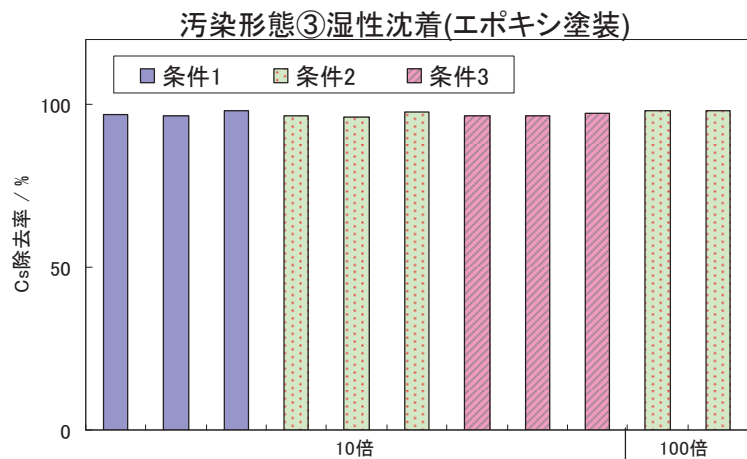
図3 除染試験前後の試験体重量減量



図1 試験状況

エポキシ塗装：除去されず
 無垢コンクリート：
 表面が若干除去される

(3)試験結果



- ・エポキシ塗装試験体では、除染速度、付着量に依存せずほぼ100%の除去率であった。エポキシ塗装下コンクリートにはCs検出されず。
- ・無垢コンクリートでは、試験体間でのばらつきが大きい概ね10%以下程度の除去率であった。除染速度と除去率に有意な相関性は見られなかった。参考試験として実施した汚染形態⑥については、Csの除去効果は見られなかった。

(3) 模擬汚染による除染試験/ブラスト除染試験

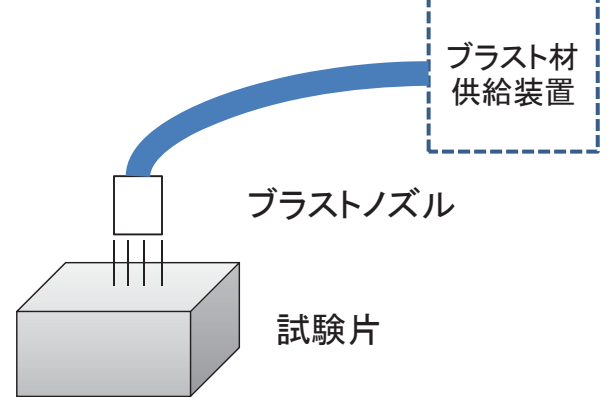
結果

塗装を有するコンクリート表面に対しては、高速では塗装を残したまま表面を薄く掘削、中速以下の速度条件で塗装を剥離可能である。
 また、塗装無の場合、掘削深さは移動速度におおよそ反比例する結果となった。

- ◆ 試験体：③湿性沈着(塗装有)
 ④湿性沈着(塗装無)
 ⑥浸透収着(塗装無)
 (⑤は、模擬汚染が付着/浸透しなかった為、試験は実施せず)

- ◆ 試験条件
 - ・条件1: 高速 (80mm/sec)
 - ・条件2: 中速 (20mm/sec)
 - ・条件3: 低速 (10mm/sec)
- ◆ ブラスト供給条件
 - ・ブラスト材 : スチールグリッド(TGE-50)
 - ・エア供給圧 : 0.6±0.1MPa
 - ・ノズル径 : φ6mm(TV-6)
 - ・ブラスト材流量 : 5±0.5kg/min (±10%)
 - ・ノズル角度 : 90°
 - ・ノズルサイズ : 6mm
 - ・噴射距離 : 200mm

各試験片表面に20mm程度の掘削幅で2回施工



	湿性沈着		浸透収着	
	③塗装有	④塗装無	⑤塗装有	⑥塗装無
除染前				
条件1 高速 (80mm/sec)				
※掘削深さ(mm)	0.07	0.64		0.70
備考	塗装を剥離させず、表面を薄く掘削	コンクリート表面を薄く掘削		コンクリート表面を薄く掘削
条件2 中速 (20mm/sec)				
※掘削深さ(mm)	1.12	3.32		3.08
備考	塗装の剥離が認められる	骨材が露出する程度に掘削		骨材が露出する程度に掘削
条件3 低速 (10mm/sec)				
※掘削深さ(mm)	3.37	6.28		5.59
備考	コンクリートの剥離が認められる	コンクリート表面を大きく掘削		コンクリート表面を大きく掘削

※掘削深さは、掘削幅を20mmとして、重量減量より算出

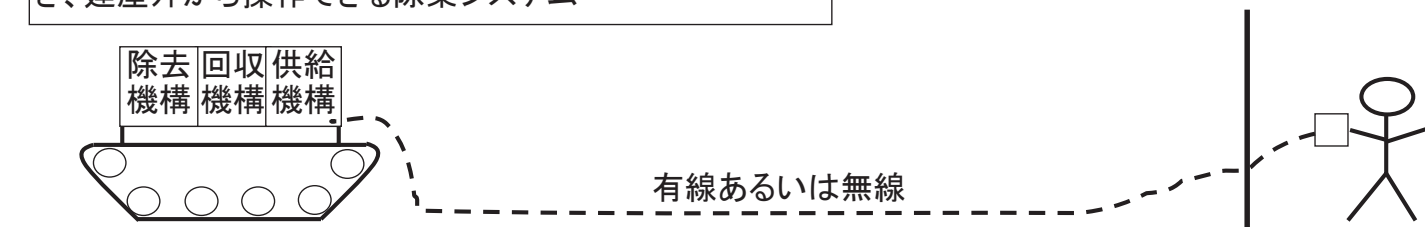
(4) 除染技術の実証/除染システムの要求仕様

13

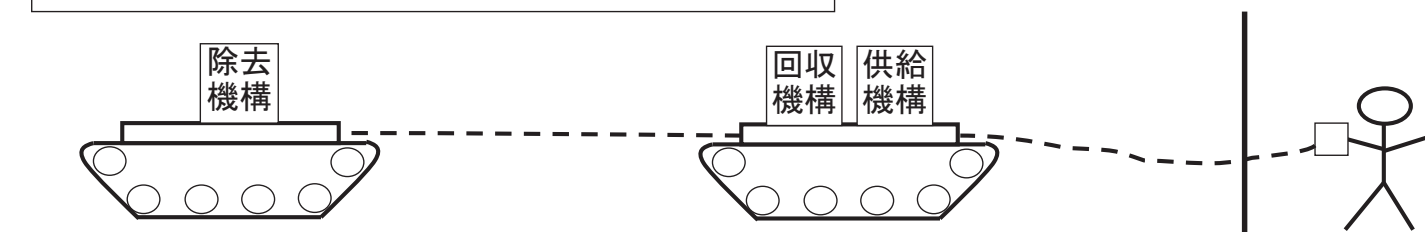
要求仕様: 遠隔操作装置に搭載できる除染システム

遠隔除染の実証を現場で実施するためには、メインとなる除去機構だけでなく、供給機構、回収機構もあわせた除染システム全体として遠隔操作できる必要がある。

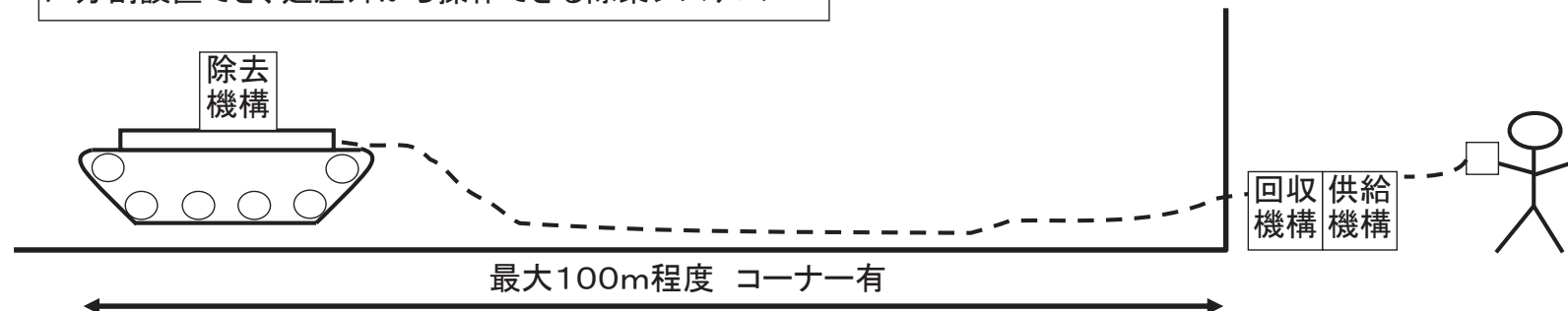
除去機構、供給機構、回収機構を遠隔操作装置に搭載でき、建屋外から操作できる除染システム



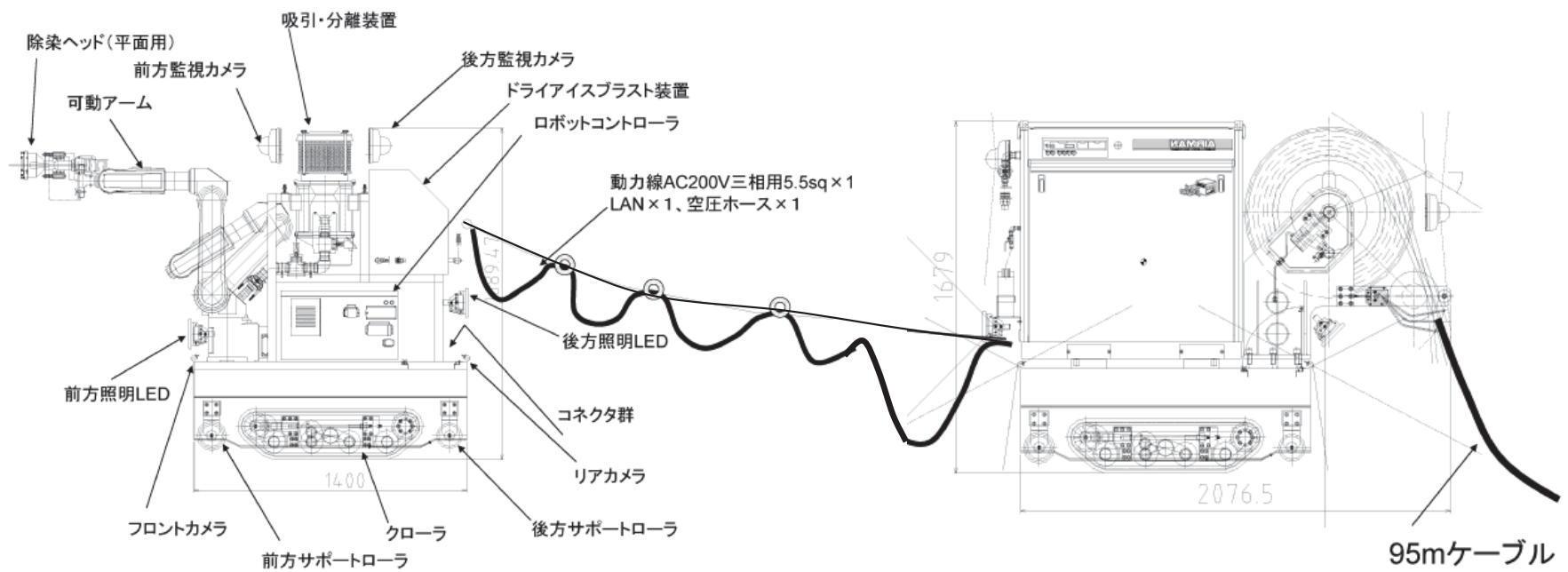
除去機構、供給機構、回収機構を2台の遠隔操作装置に搭載でき、建屋外から操作できる除染システム



除去機構、供給機構、回収機構を遠隔操作装置と建屋外に分割設置でき、建屋外から操作できる除染システム



(4) 除染技術の実証/ドライアイスブラスト除染装置



除染台車

車幅:730mm
全長:1400mm
全高:1690mm

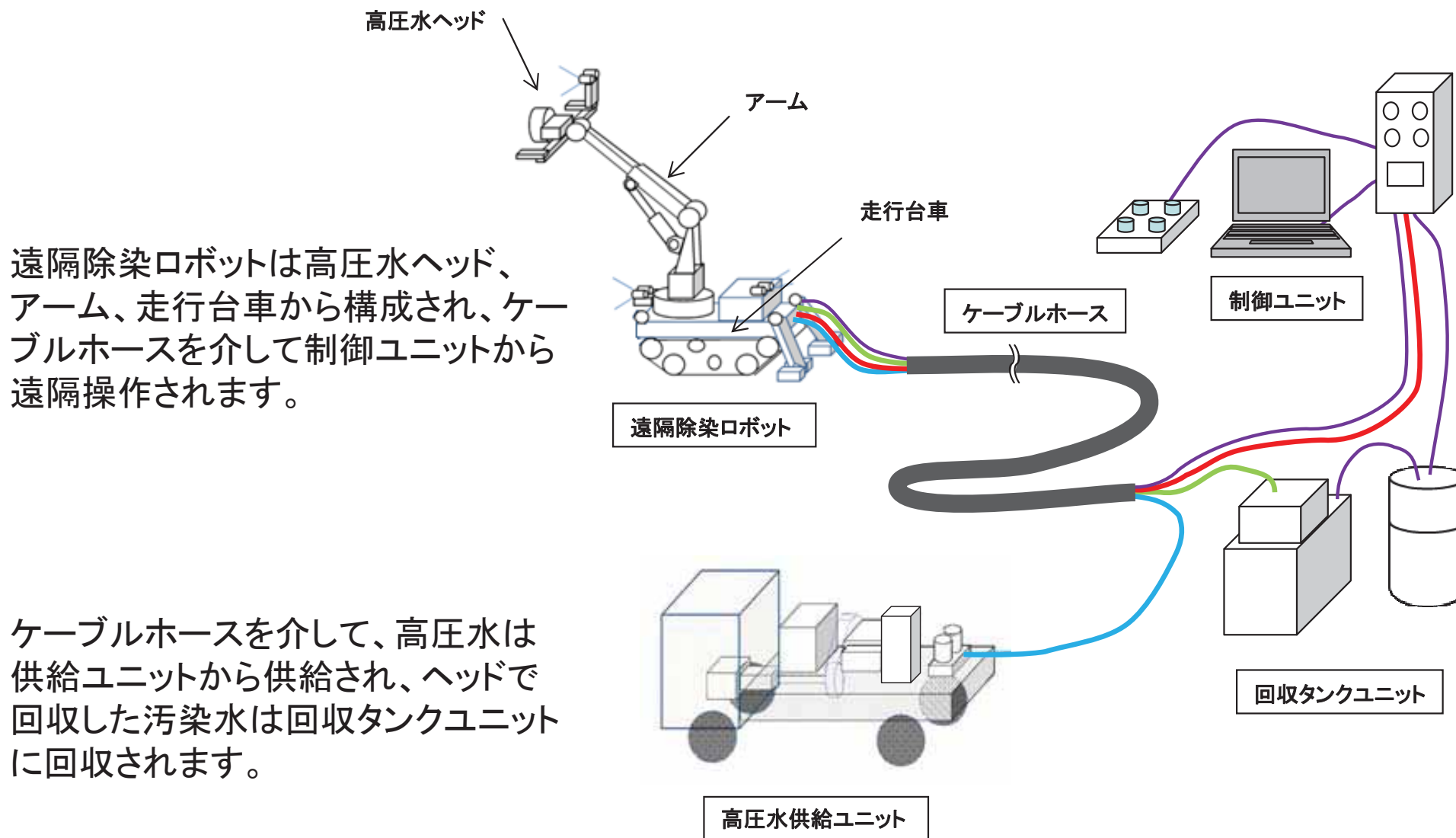
支援台車

車幅:730mm
全長:2080mm
全高:1680mm

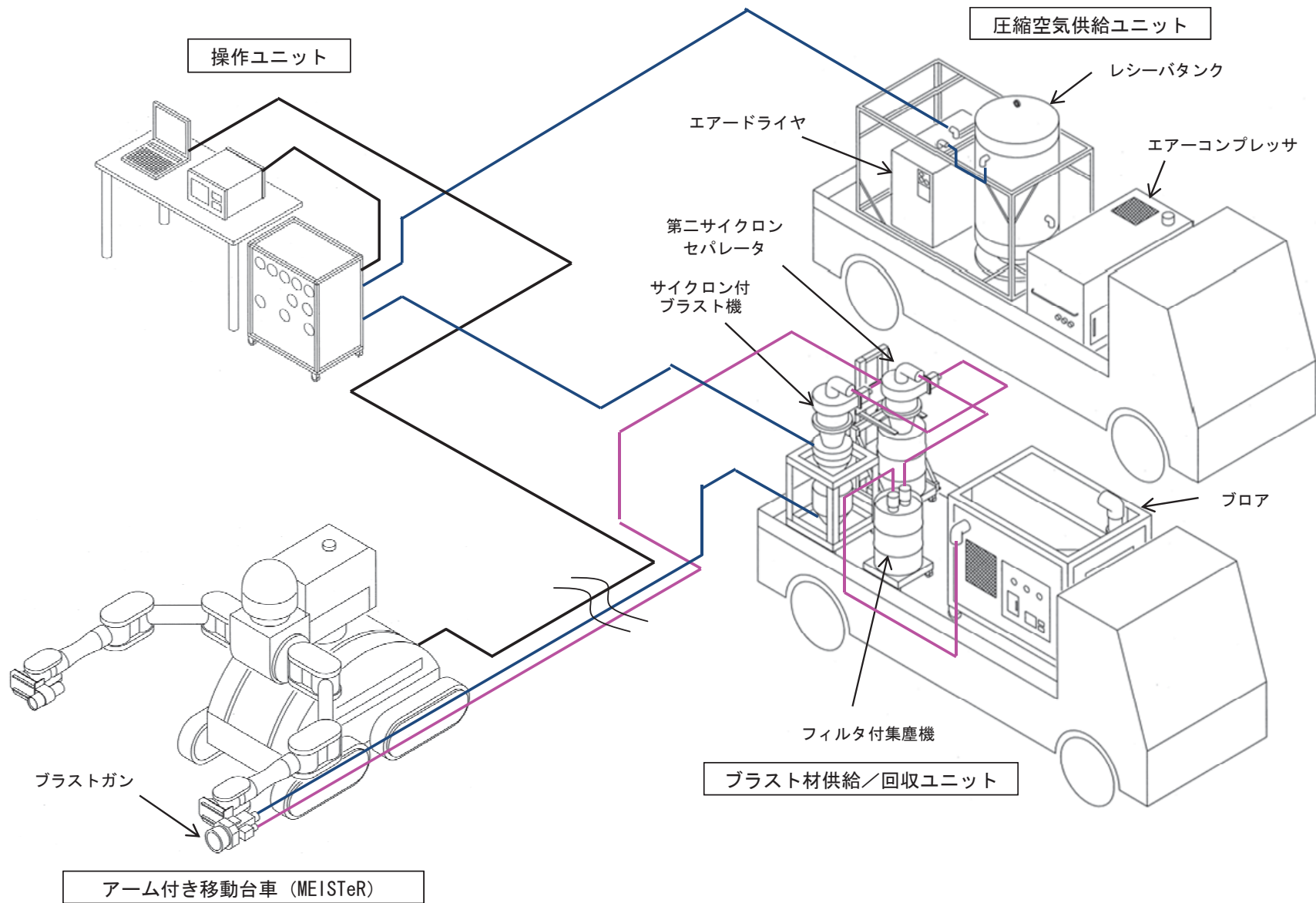
ドライアイスブラスト除染装置イメージ図

(4) 除染技術の実証/高圧水ジェット洗浄装置

15



(4) 除染技術の実証/ブラスト除染装置



吸引回収式ブラスト除染装置イメージ図

- ・研究開発に対する要素提案、システム提案
- ・現場作業への協力（例：資機材の配管、ポンプ、現場の状況に合わせた仮設遮蔽等の作成、メンテナンス）

技術的論点

- 1) 除染の対象箇所は高線量率であるため、遠隔操作できる除染装置が必要である。
- 2) 高線量率である雰囲気線量率に影響している放射線源は、建屋の表面の汚染だけではなく、PCVや機器からの直接線の影響の可能性も考えられる。このため、除染だけでなく、遮へいについても考慮する必要がある。

要求技術

- 1) 除染システムは以下の機能が要求される。
 - ・高除染効率
 - ・除染により発生する二次廃棄物が容易に取扱えること
 - ・除染システムが遠隔操作装置に搭載されていること
- 2) 遠隔除染装置は、除染システムを搭載し、除染作業を容易に実施できること