

上下水道施設の

コンクリート劣化と防食技術について



一般社団法人

日本コンクリート防食協会

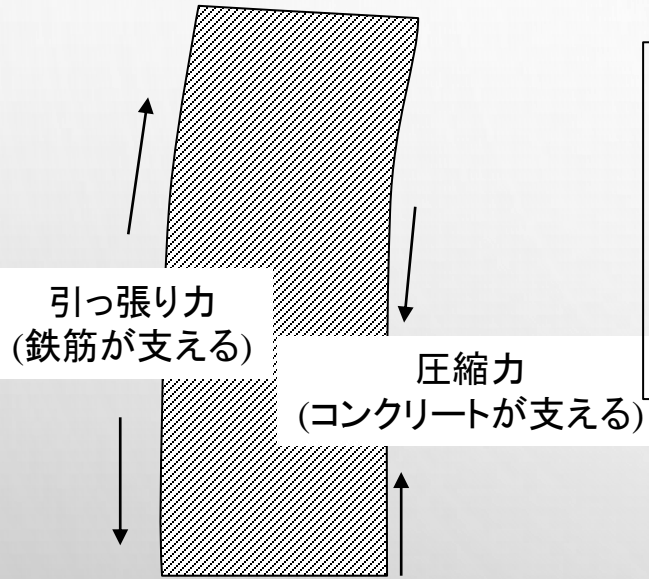
- 1. 下水道施設の劣化事例及び劣化機構**
- 2. 下水道施設における腐食対策**
- 3. 上水道施設の劣化事例及び劣化機構**
- 4. 上水道施設における腐食対策**
- 5. LCC向上対策（下水道編）**
- 6. LCC向上対策（上水道編）**
- 7. 保証書の条件整備**

The background features a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across the surface. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The text is centered horizontally in the middle of the page.

1. 下水道施設の劣化事例及び劣化機構

コンクリート劣化とは

鉄筋コンクリート造構造物

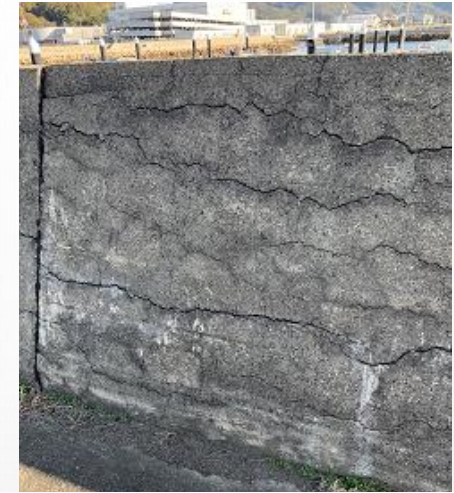


コンクリートの劣化

- アルカリ骨材反応
アルカリシリカゲルの吸水膨張ひび割れが発生
- 凍害
コンクリート中の水分の凍結による膨張圧によりひび割れが発生
- 化学的侵食
種々の酸により、セメント水和物が破壊され脆弱化

鉄筋の劣化

- 塩害
コンクリート中または海水等の塩分による鉄筋の錆び
- 中性化
鉄筋を保護するアルカリが失われることにより鉄筋が錆びる



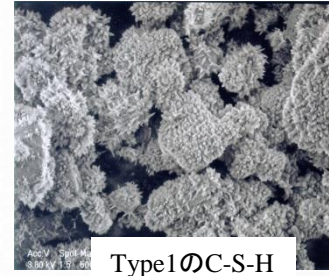
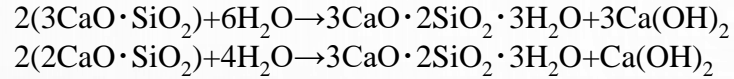
アルカリ骨材反応によるひび割れ
防波堤



凍害による崩壊
車止め

コンクリートの化学的劣化

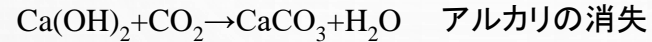
セメントの水和反応



Type1のC-S-H

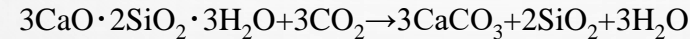
二酸化炭素との反応

中性化



鉄筋の腐食に関連

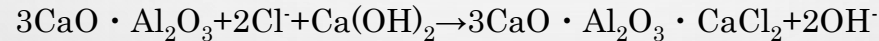
炭酸化



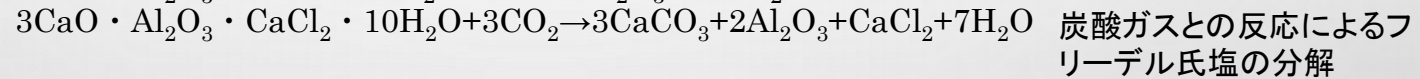
セメント水和物の分解

躯体表面の脆弱化

塩素イオンとの反応

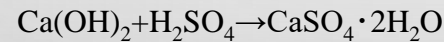


フリーデル氏塩の形成

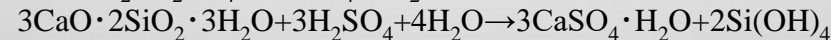


硫酸との反応

硫酸劣化

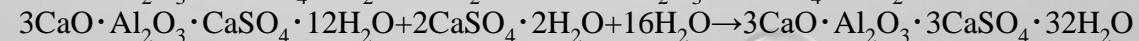
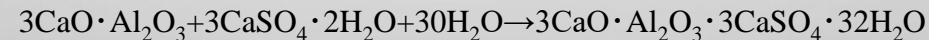


硫酸カルシウムの形成

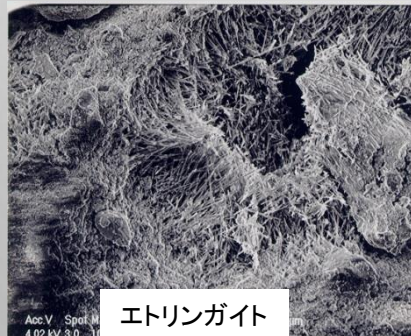


硫酸塩劣化

エトリンガイトの形成



コンクリートの膨張破壊



エトリンガイト



硫酸カルシウム

下水道施設の劣化事例



防食被覆層のしわ



防食被覆層の膨れ

有機酸腐食による防食被覆層劣化事例

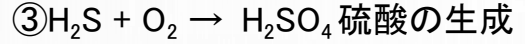
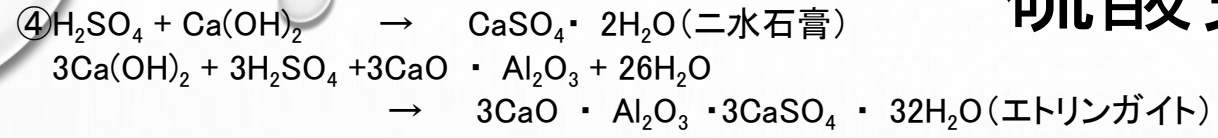
下水道施設の劣化事例



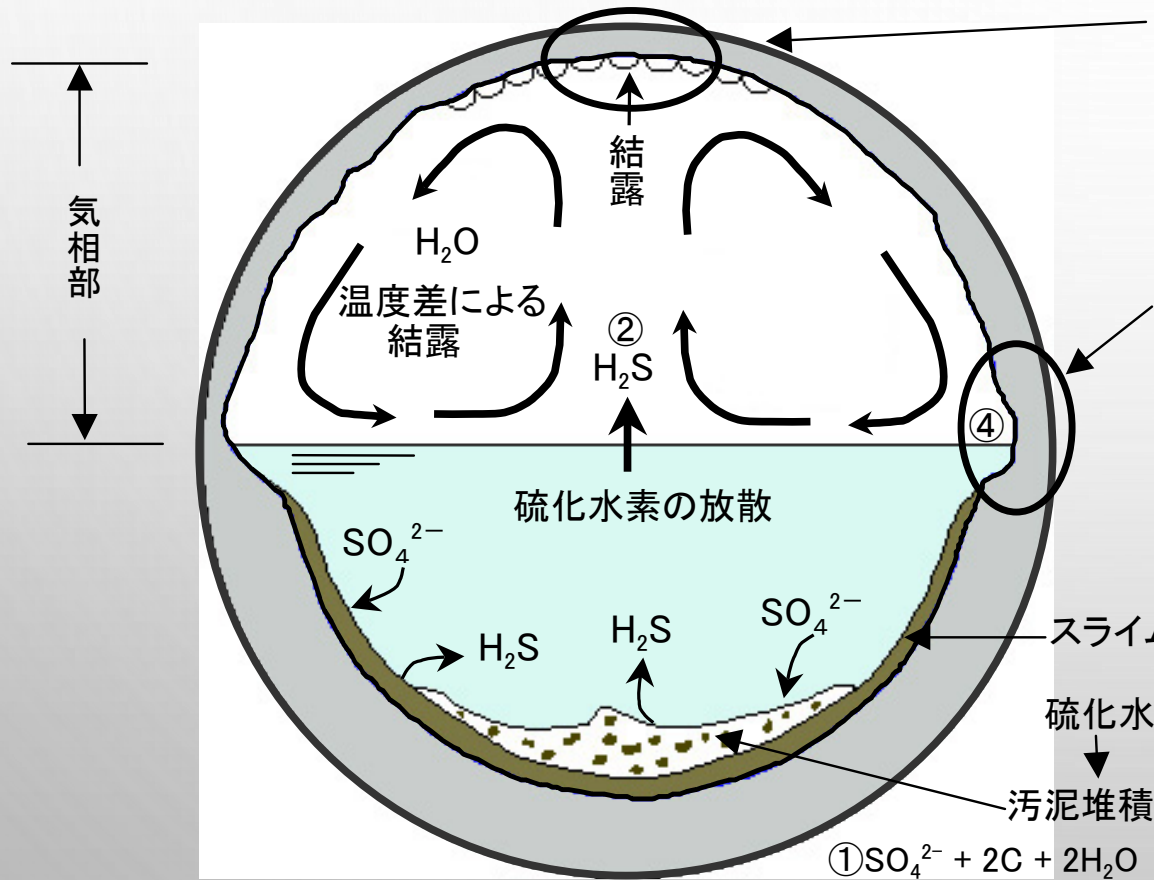
浸食性遊離炭酸による劣化事例（液相部）

1.1 下水道施設における硫酸腐食

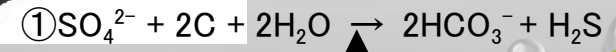
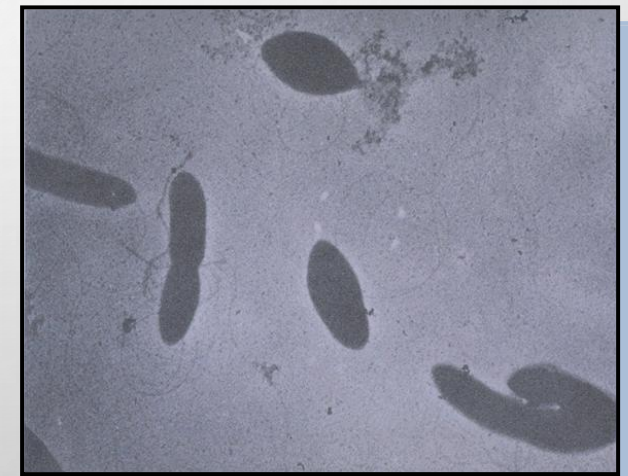
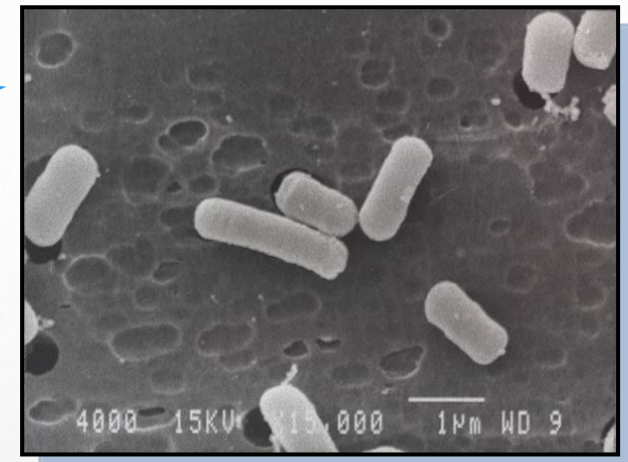
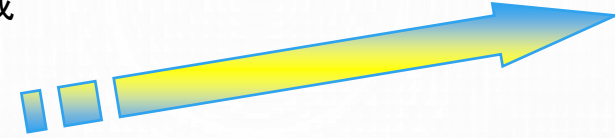
硫酸劣化の機構



硫黄酸化細菌



腐食・劣化が特に激しい部分

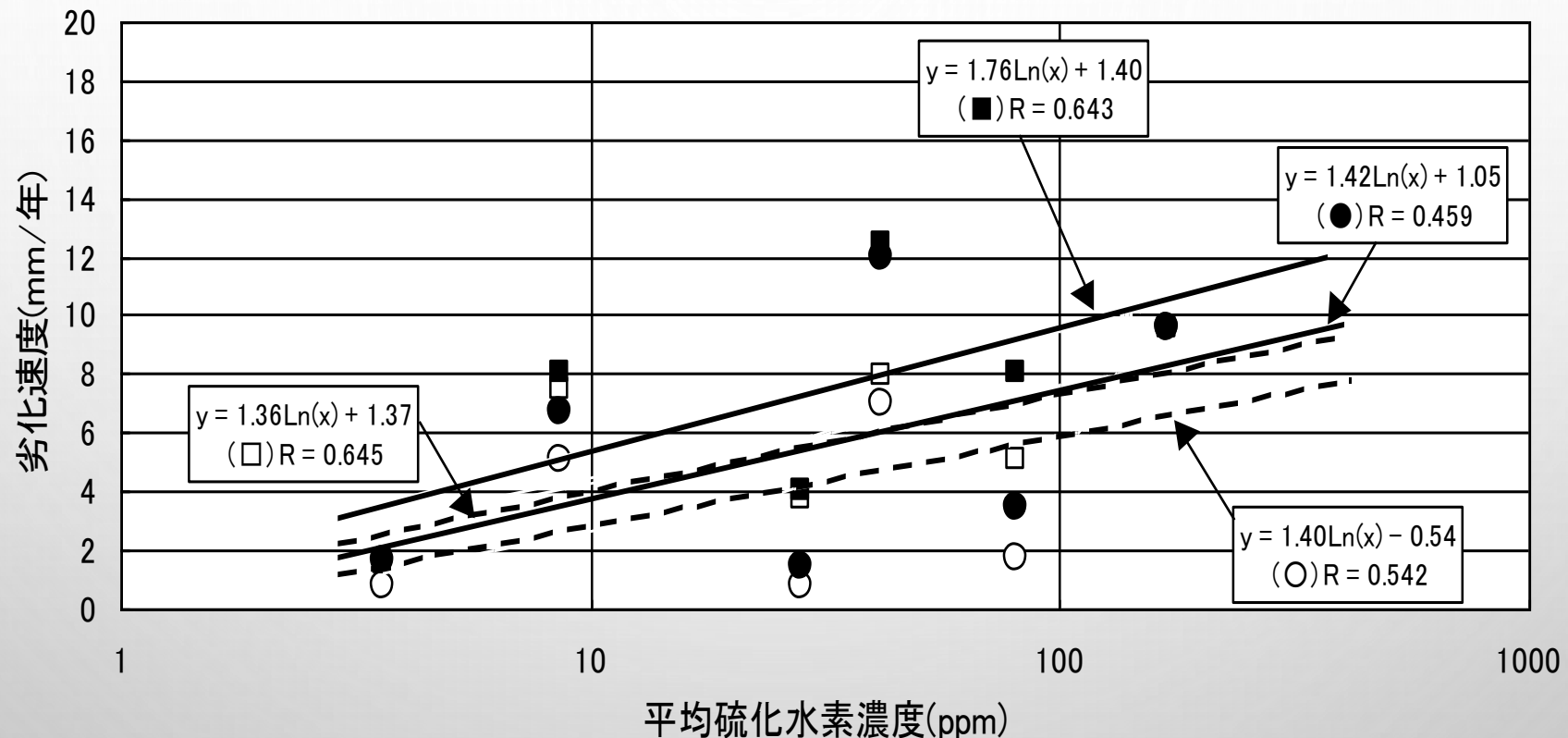


硫酸塩還元細菌



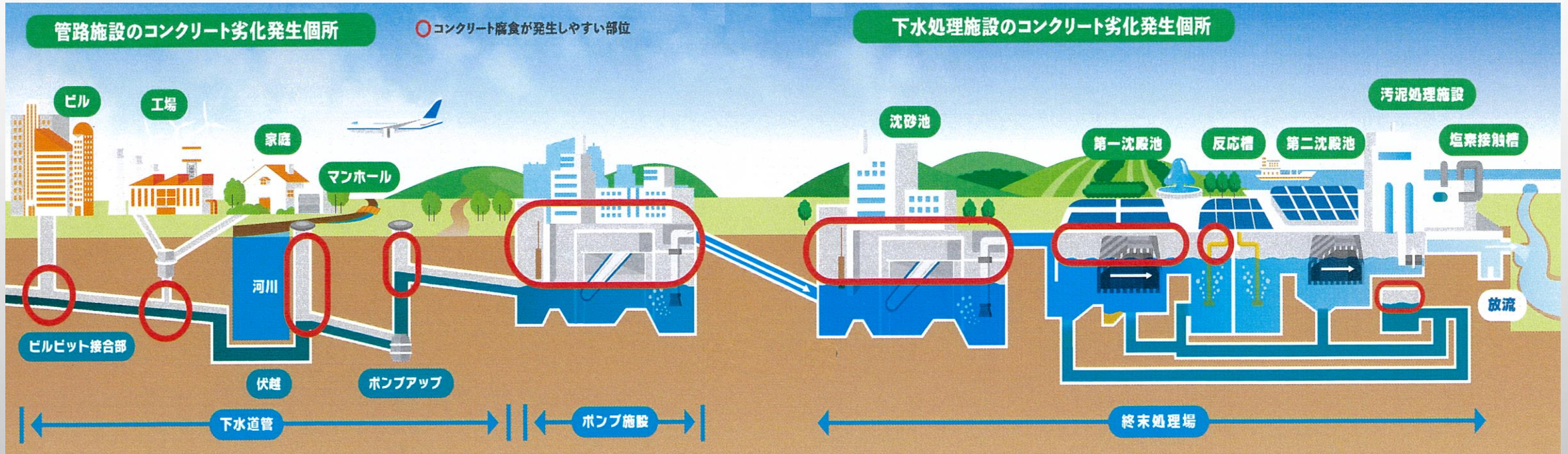
硫化水素濃度と劣化速度の関係

— JSマニュアルより —



- | | |
|----------------------|------------------------|
| ○ 腐食速度 | □ 硫黄侵入速度 |
| ● 腐食速度最大値(最大速度を基に換算) | ■ 硫黄侵入速度最大値(最大速度を基に換算) |

硫酸腐食の発生しやすい箇所



○ … 硫酸腐食が発生しやすい箇所

下水処理場における硫酸劣化事例



コンクリートの劣化・鉄筋腐食



設備機械の劣化

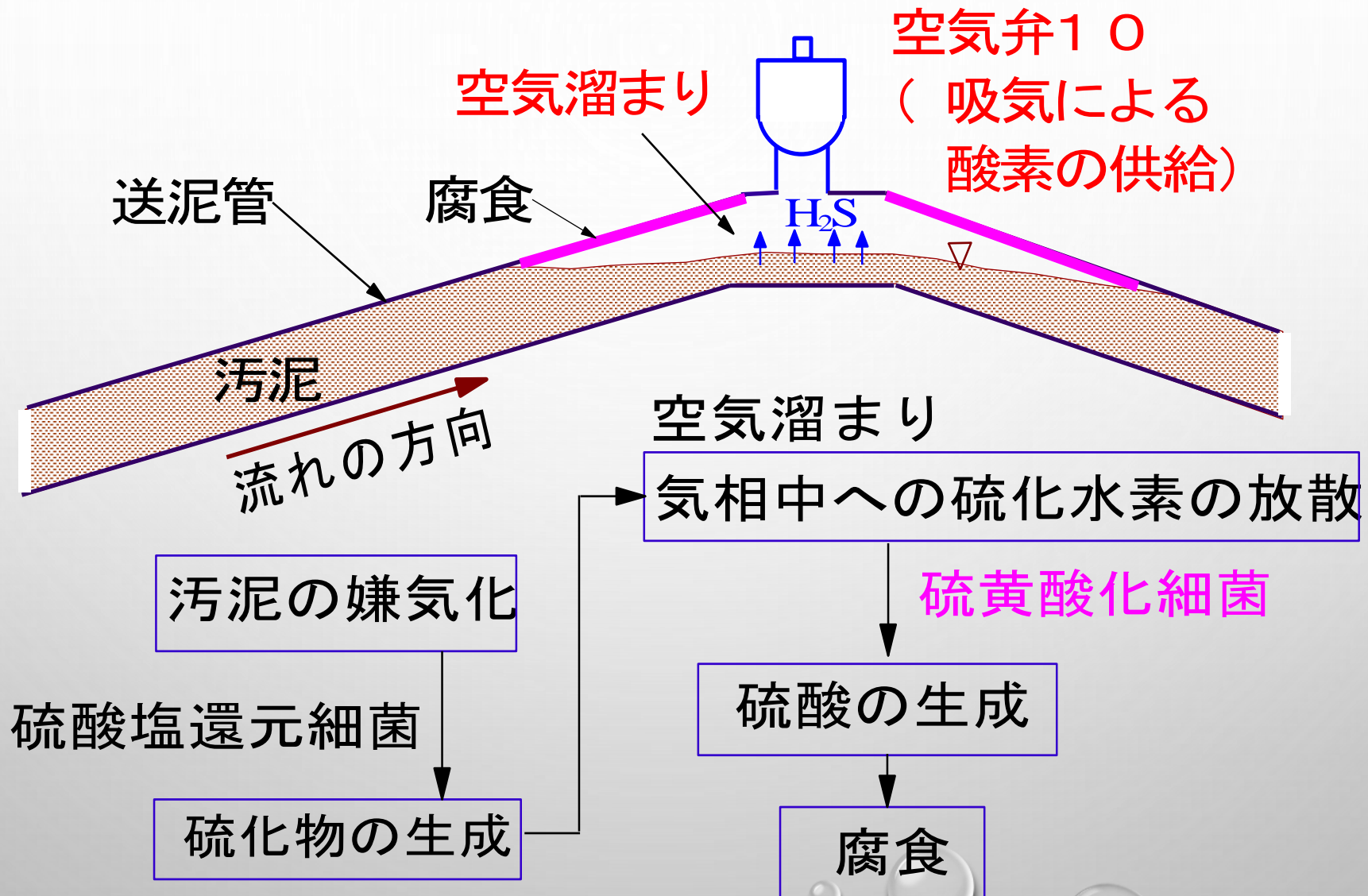


脱臭機のパイプからの漏水による劣化



設備機械の劣化

圧送管における硫酸劣化機構



下水管の劣化事例



鋳鉄管の破損事例



コンクリート管の破損事例

硫酸劣化により水位より上部が劣化し破損している。

The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The text is centered horizontally and vertically on the page.

1.2 下水道施設における有機酸腐食

有機酸劣化について

近年、汚水や汚泥の腐敗などにより、下水道処理施設やビルピットに硫酸腐食対策として施工された、塗布型ライニング工法に有機酸に起因する劣化が確認されているが、下水道施設における有機酸の発生箇所や濃度などの知見は十分ではない。

そのため、下水道研究発表会において下水道事業団から発表された「下水処理場における防食被覆層の劣化要因としての各所の有機酸濃度・組成の実態」を引用し、有機酸による劣化要因について説明を行う。

有機酸による 塗膜(エポキシ樹脂)の劣化事例



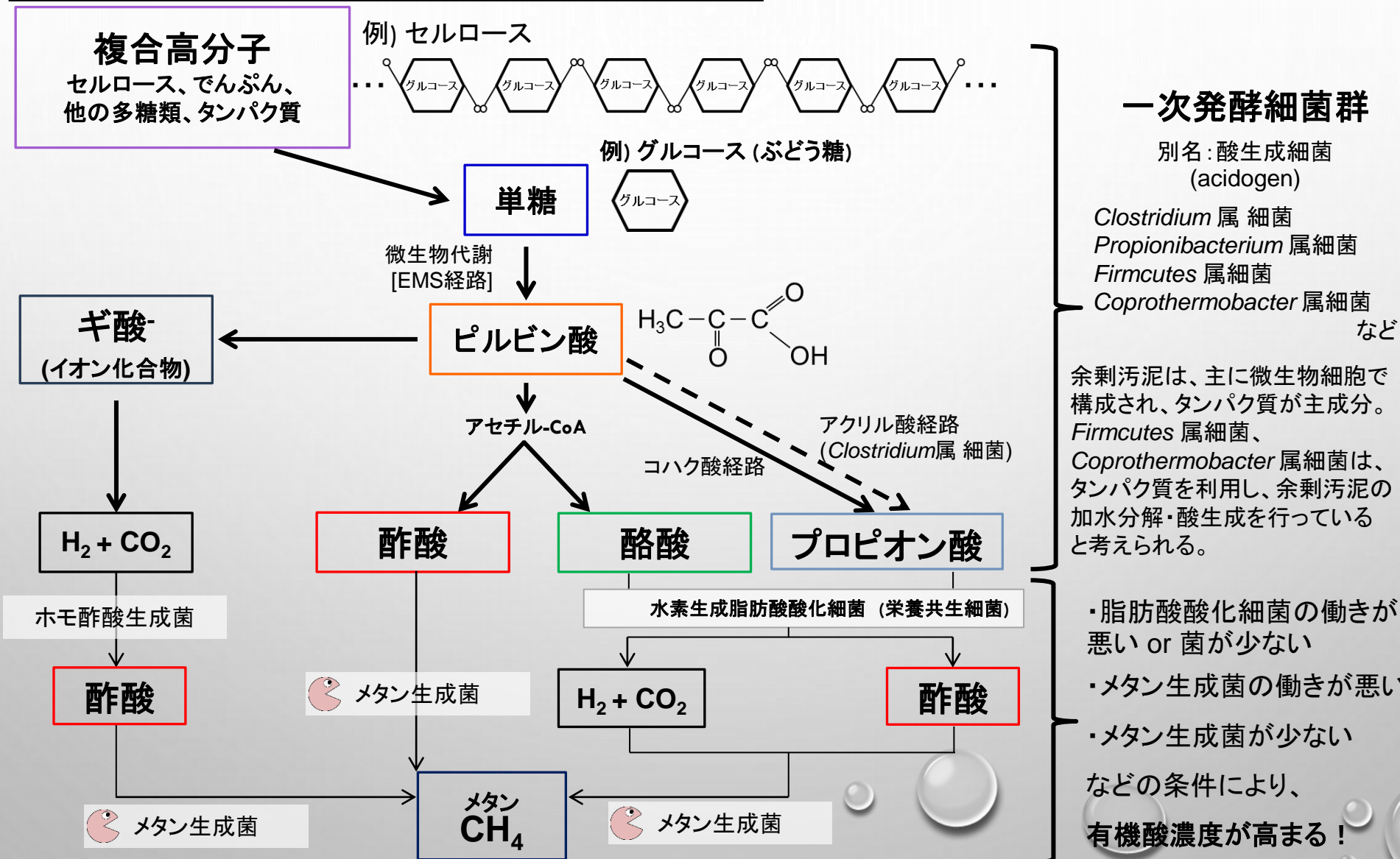
気相部塗膜の剥離
—水抜き点検時の乾燥により、範囲拡大—



液相部塗膜のふくれおよび剥離

汚泥からの有機酸発生プロセス

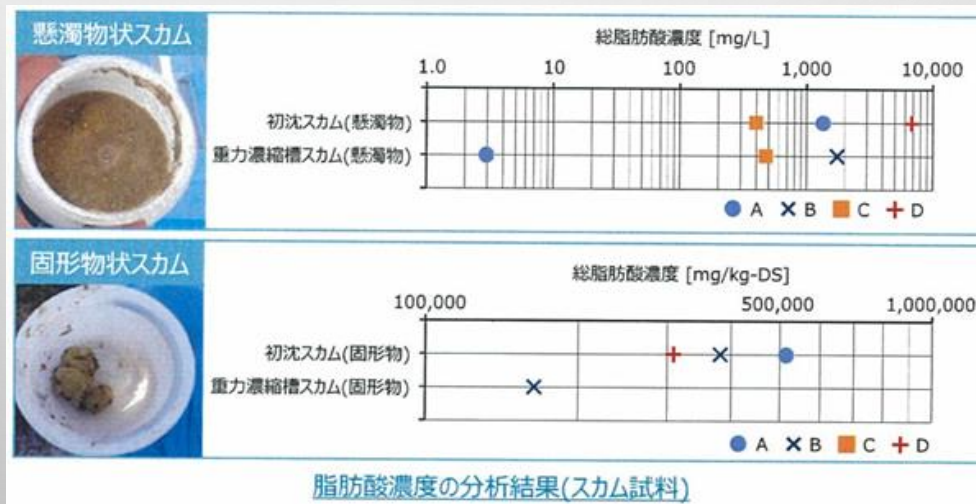
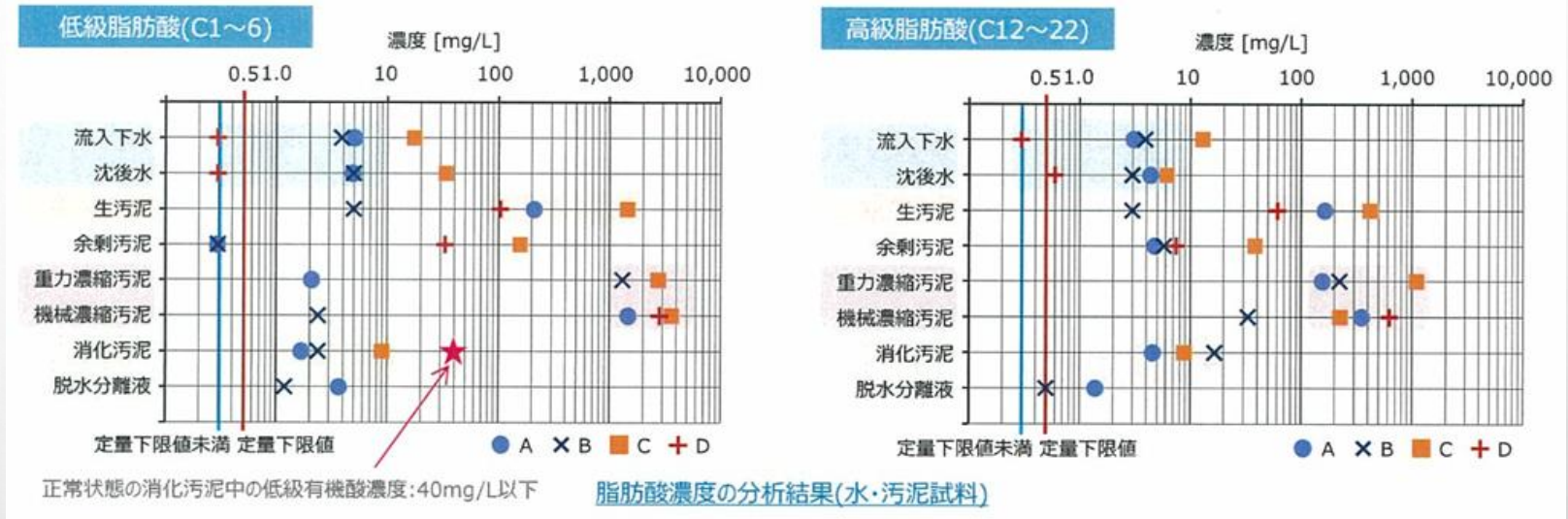
汚泥中の微生物による嫌気性分解の全体プロセス



下水処理場における防食被覆層の劣化要因としての各所の有機酸濃度・組成の実態

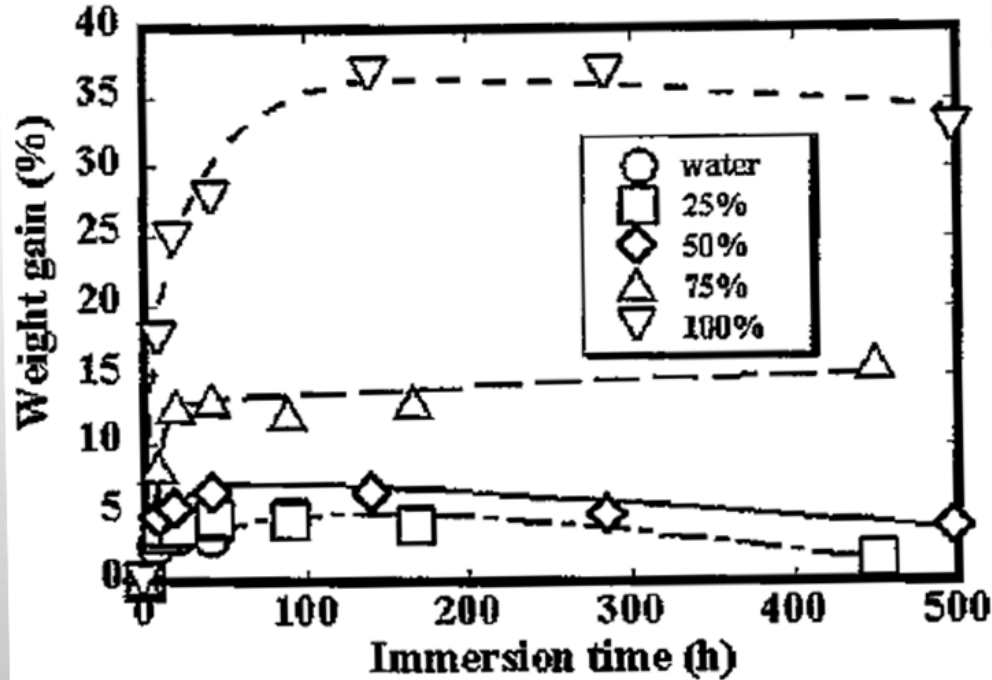
日本下水道事業団 令和3年研究発表資料 抜粋

- 有機酸の発生は汚泥系施設で確認される。
 - 特にスカム中には高濃度に検出されている。
- ↓
- 塗膜表面に付着したスカムによる影響が懸念される。



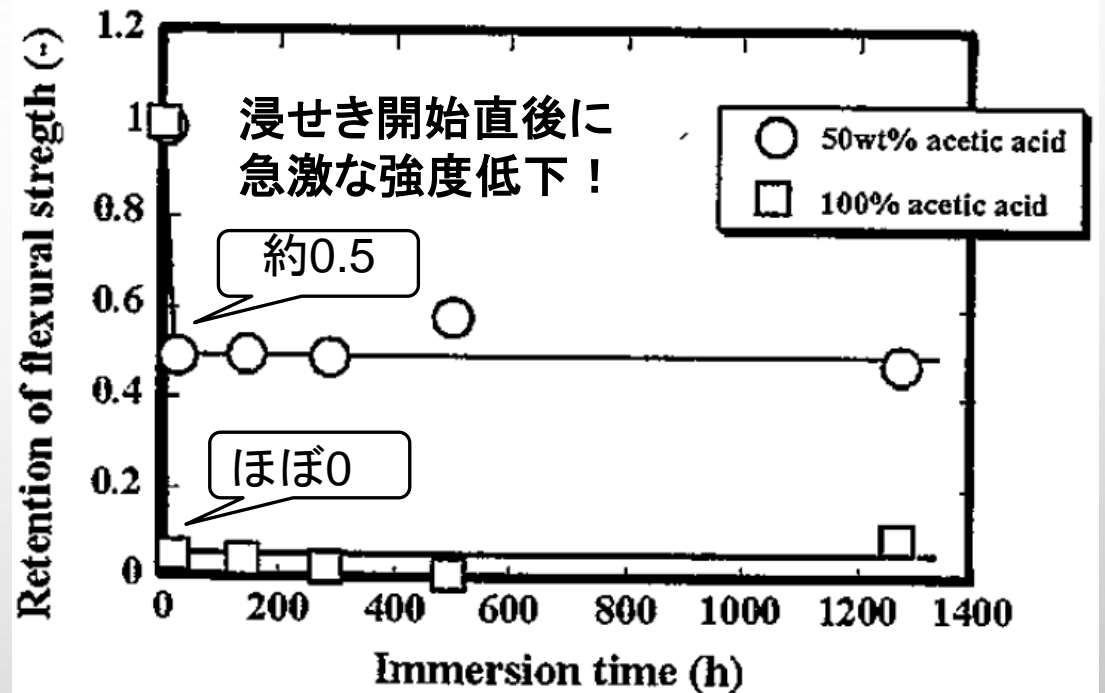
有機酸に起因する腐食劣化研究事例

ビスフェノールA型エポキシ樹脂
 主剤: アデカ製 4100-E 100 g
 硬化剤: アデカ製 EH-520 60 g



各濃度の酢酸水溶液浸せき 重量変化の結果

酢酸水溶液の濃度が増加すると
 樹脂の最大吸液量が大きくなる傾向を示した。



酢酸水溶液浸せき後、曲げ強度保持率の結果

赤外分光法にて表面分析を行った結果、大きな変化は見られなかった。樹脂内部における分子間の結合を弱め、結果として強度低下を引き起こすと考えられる。

有機酸に起因する腐食劣化研究事例

日本下水道新聞 第2335号 2016年12月7日 20面
 東京工業大学 物質理工学院 久保内 昌敏教授



濃度を変えた酢酸水溶液にエポキシ樹脂を浸漬したところ...

硫酸と同様に
 「時間の0.5乗」と「浸入深さ」が比例関係であった。

浸入深さ [μm]

$$\text{時間の0.5乗} = \sqrt{\text{時間}}$$

例) 25時間 $\Rightarrow \sqrt{25} = 5$

$$\text{「浸入深さ」} = \text{「浸入速度」} \times \text{「時間の0.5乗」}$$

浸せき時間 [h^{0.5}]

硫酸と酢酸の「浸入速度」を比較したところ...

「硫酸の浸入速度」 $\Rightarrow \sqrt{\text{濃度}}$ に比例して大きくなる。

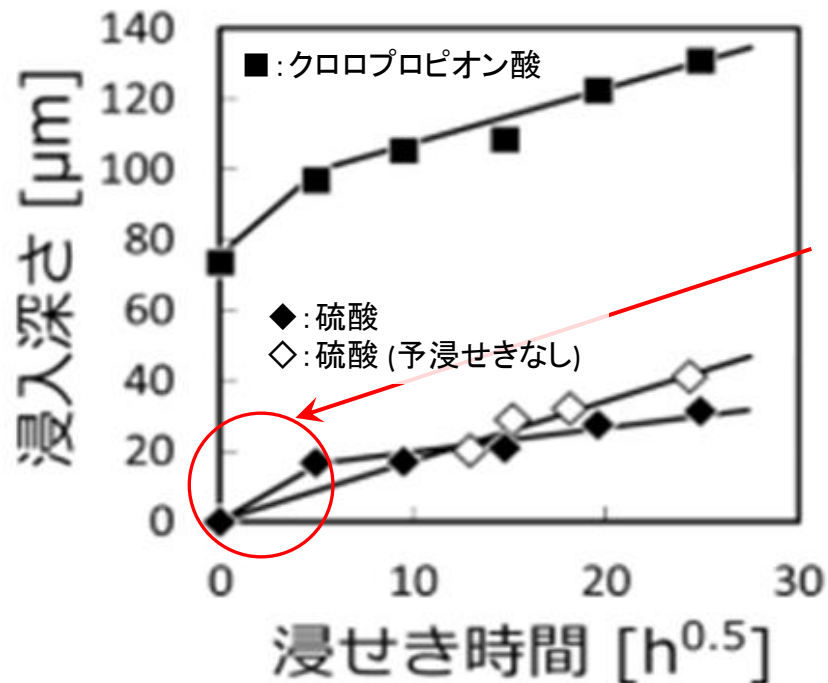
「酢酸の浸入速度」 $\Rightarrow (\text{濃度})^3$ に比例して大きくなる。

酢酸の浸入速度は、濃度依存性が硫酸よりはるかに大きい！

→ 酢酸濃度が高ければ高いほど、浸入速度は上がり、浸入深さも深くなる。

有機酸に起因する腐食劣化研究事例

有機酸存在下での硫酸浸入挙動実験の結果

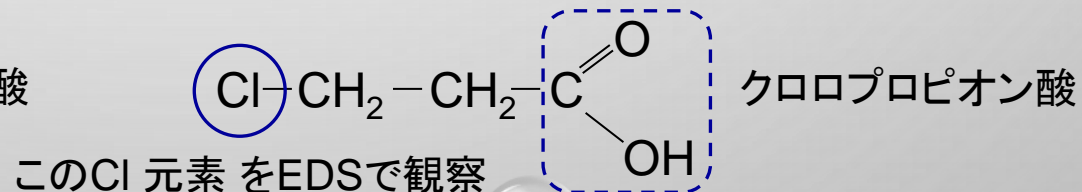
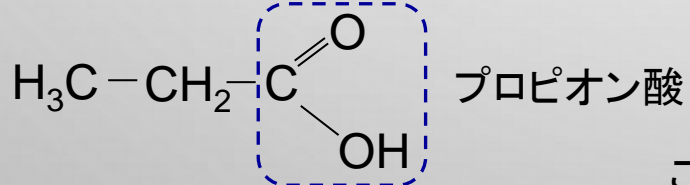


クロロプロピオン酸が予め浸入し膨潤している状態

クロロプロピオン酸が浸入した部分から約20 μmの深さまでは、単独の硫酸浸入の時と比べ、硫酸の速い浸入が見られた。

➡ 約20 μmの深さまでは、抵抗が小さい。

本実験では、エネルギー分散型X線分析装置(日本電子製 JSM-6510LA/JED-2300, 以下EDS)で観察するためプロピオン酸の代わりにクロロプロピオン酸を用いた。



【参考文献】

杉浦宏介、久保内昌敏、谷本那月：下水環境で用いるエポキシ樹脂ライニング材の硫酸／有機酸複合酸環境下における環境液の浸入挙動と劣化解析，全国上下水道エポキシ工事協会

有機酸による塗膜（エポキシ樹脂）劣化

- 有機酸が存在すると、塗膜の強度が低下・膨潤しふくれなどの発生が生じる。ふくれが広がることで、塗膜の剥離を生じる。
- 有機酸が浸透すると、硫酸の侵入速度が速くなり、遮断性が低下し、塗膜の耐久性が低下する。
- 透過した硫酸イオンは、硫酸となり下地コンクリート（素地調整材等）を劣化し、接着性を低下させ、ふくれ・剥離などを生じ、塗膜の機能を消失させる。

1.3 下水道施設における炭酸腐食

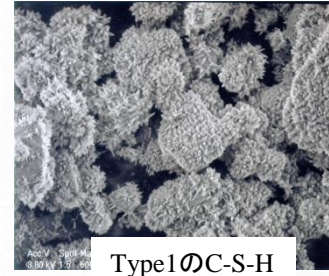
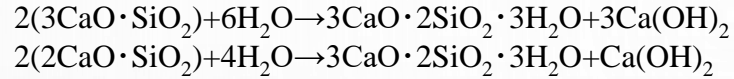
炭酸による劣化について

近年、下水処理場の反応タンクにおいて、生物反応によって生成される二酸化炭素によるコンクリートの劣化事例が確認されている。二酸化炭素は、気相部では炭酸ガス、液相部では浸食性遊離炭酸の形態でコンクリートの劣化を促進させることが知られているが、発生状況や炭酸劣化の進行状況等に係わる知見は少ない。

そのため、下水道研究発表会において下水道事業団から発表された「防食被覆層有機酸劣化及び炭酸劣化に関する調査」を引用し、炭酸による劣化要因について説明を行う。

コンクリートの化学的劣化

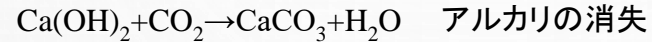
セメントの水和反応



Type1のC-S-H

二酸化炭素との反応

中性化



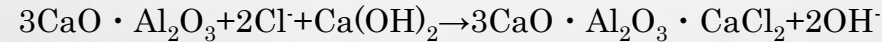
鉄筋の腐食に関連

炭酸化

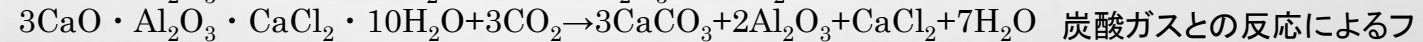


躯体表面の脆弱化

塩素イオンとの反応

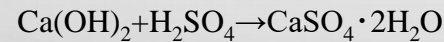


フリーデル氏塩の形成

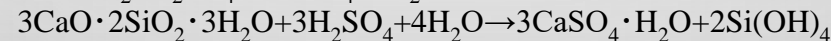


硫酸との反応

硫酸劣化

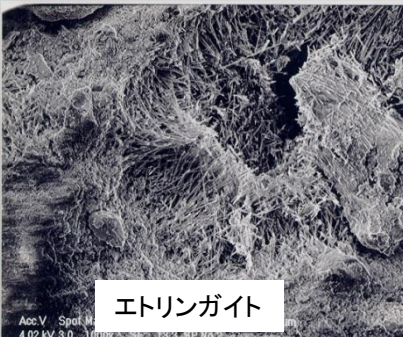
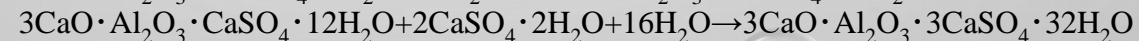
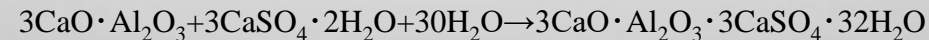


硫酸カルシウムの形成



硫酸塩劣化

エトリンガイトの形成



エトリンガイト



硫酸カルシウム

コンクリート腐食

コンクリートの膨張破壊

浸食性遊離炭酸

- 下水中などで有機物が分解され高濃度の二酸化炭素が液相中に排出される。特に酸素法では濃度が高い。
- 液相に溶存する全炭酸のうち、カルシウム、マグネシウムなど陽イオンと結合したものを除いたものを**遊離炭酸**と呼ぶ。
- 遊離炭酸の内、並行的に溶存するものを**従属性遊離炭酸**、その他を**浸食性遊離炭酸**と称する。

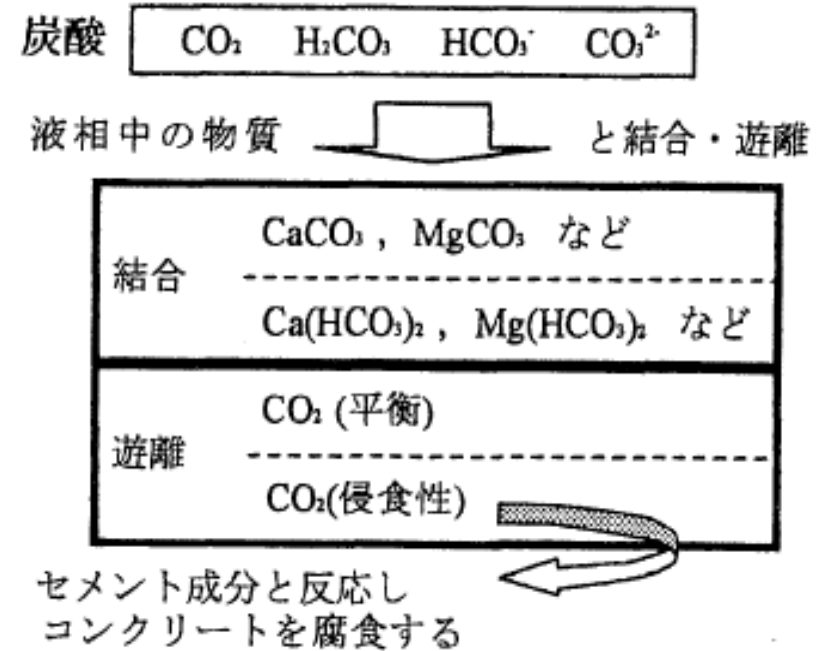


図-2 液相中の炭酸の形態と働き

炭酸による劣化

排水処理施設における、深層ばっ気処理槽・酸素曝気槽などで、有機物処理効率を向上させることで、高濃度の二酸化炭素ガスが発生する。

1. 気相部

高濃度の二酸化炭素ガスによる、中性化の進行

2. 液相部

高濃度の二酸化炭素ガスが溶解することで、遊離炭酸が発生し、コンクリートの溶脱を引き起こす。



防食被覆層有機酸劣化及び炭酸劣化に関する調査 日本下水道事業団 令和3年度研究発表資料 抜粋

- 気相部では、6施設中1施設を除き外観上変化は認められなかった。
- 液相部では、6施設の内4施設で表面脆弱化や骨材露出の外観変化が確認された。
- 気相部・液相部ともに、中性化深さの差異に規則性は確認できず、中性化深さと、二酸化炭素濃度、浸食性遊離炭酸濃度との関係性は認められなかった。

処理場ごとの平均中性化深さ等

処理場	処理場最大 中性化深さ 実測値 [mm]	中性化深さ 最大となっ た槽	供用年数 [年]	(槽平均) 炭酸ガス濃度 [ppm]
A	6.1	好気槽 上流	25	11,430
B	16.1	好気槽 下流	42	3,700
C	29.9	好気槽 上流	25	17,900
D	7.2	好気槽 下流	29	18,124
E	11.7	好気槽 下流	29	13,224
F	2.8	疑似嫌気槽	32	30,057

処理場ごとの最大中性化深さと外観状況

処理場	処理場最大 中性化深さ 実測値 [mm]	中性化深さ最 大となった槽	中性化深さ最 大となった 断面位置	浸食性 遊離炭酸濃度 [mg-CO ₂ /L]
A	9.8	好気槽 上流	浅相部	7
B	10.8	好気槽 上流	浅相部	5
C	16.6	好気槽 上流	浅相部	28
D	9.5	無酸素タンク	深相部	45
E	11.4	好気槽 上流	深相部	31
F	7.5	好気槽下流	深相部	1

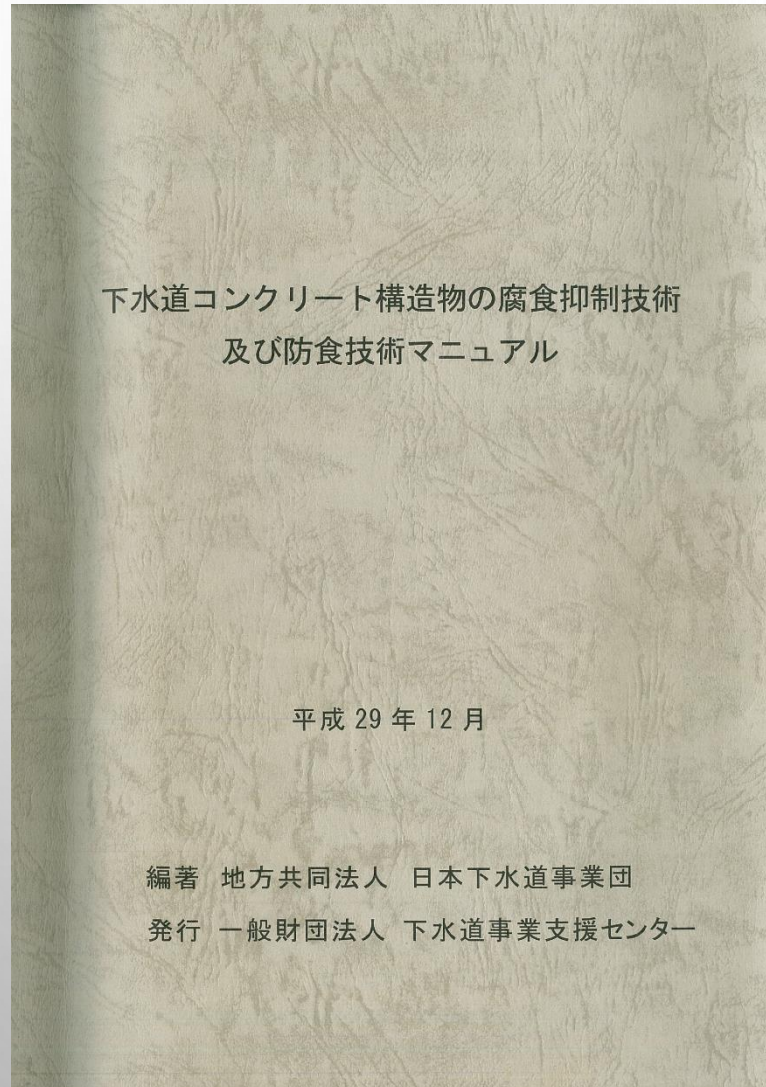
The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The text is centered horizontally in the upper half of the slide.

2. 下水道施設における腐食対策

The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The text is centered horizontally and vertically on the page.

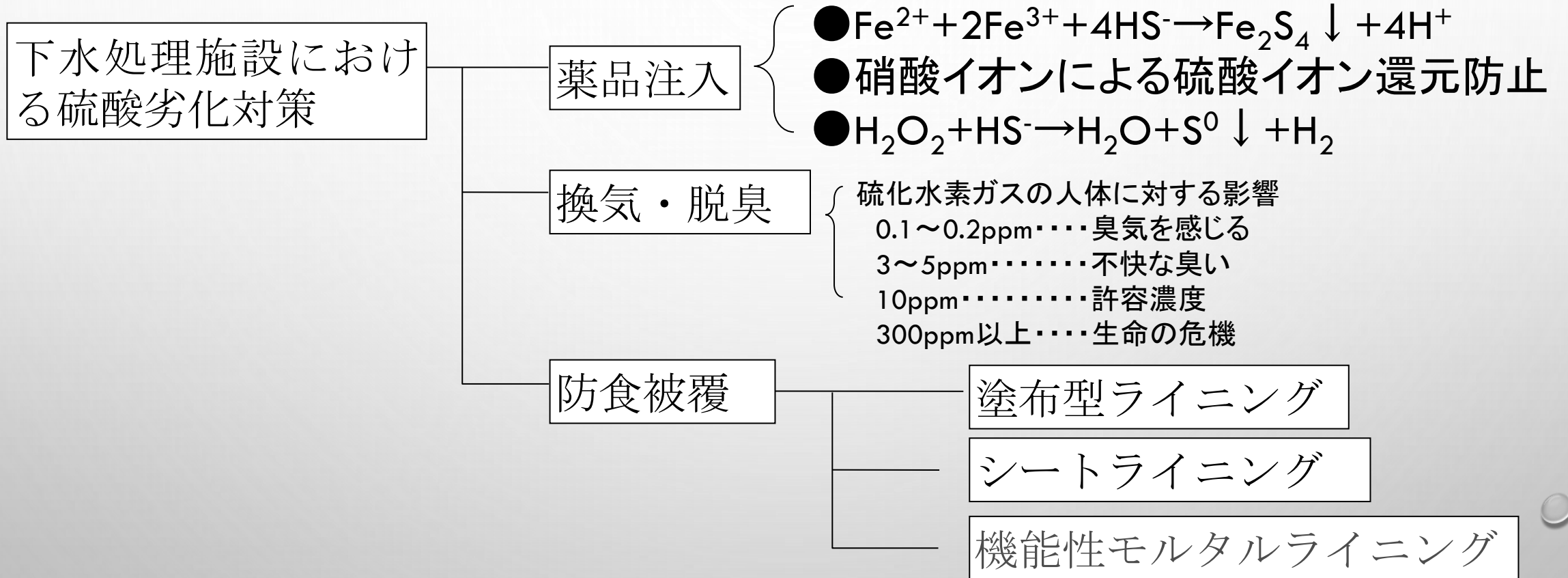
2.1 下水道施設における硫酸腐食対策

硫酸腐食への対策

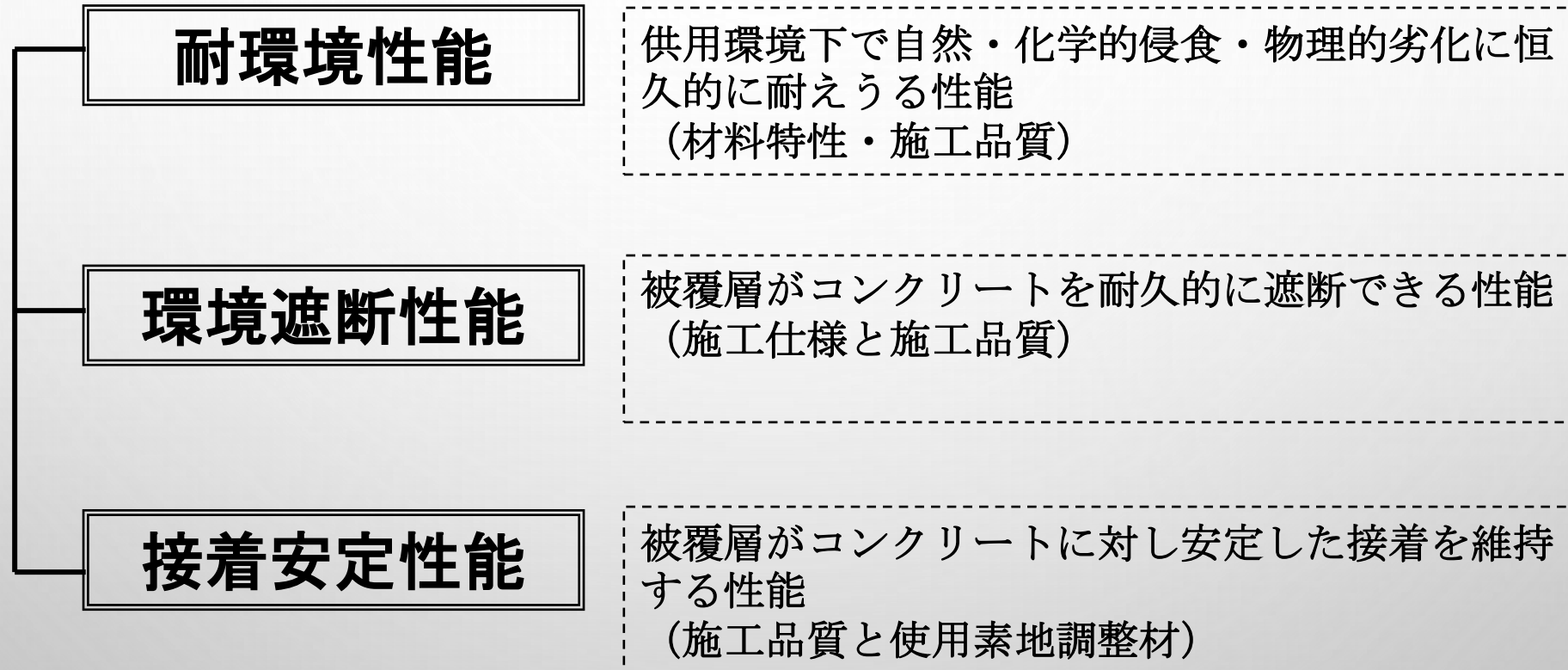


硫酸腐食への対策として、日本下水道事業団より「下水道コンクリート構造物の腐食技術及び防食技術マニュアル：平成29年12月」において、防食対策について詳細に規定されており、同マニュアルに準拠して選定及び施工を実施することが望ましい。

下水道処理施設の硫酸劣化対策



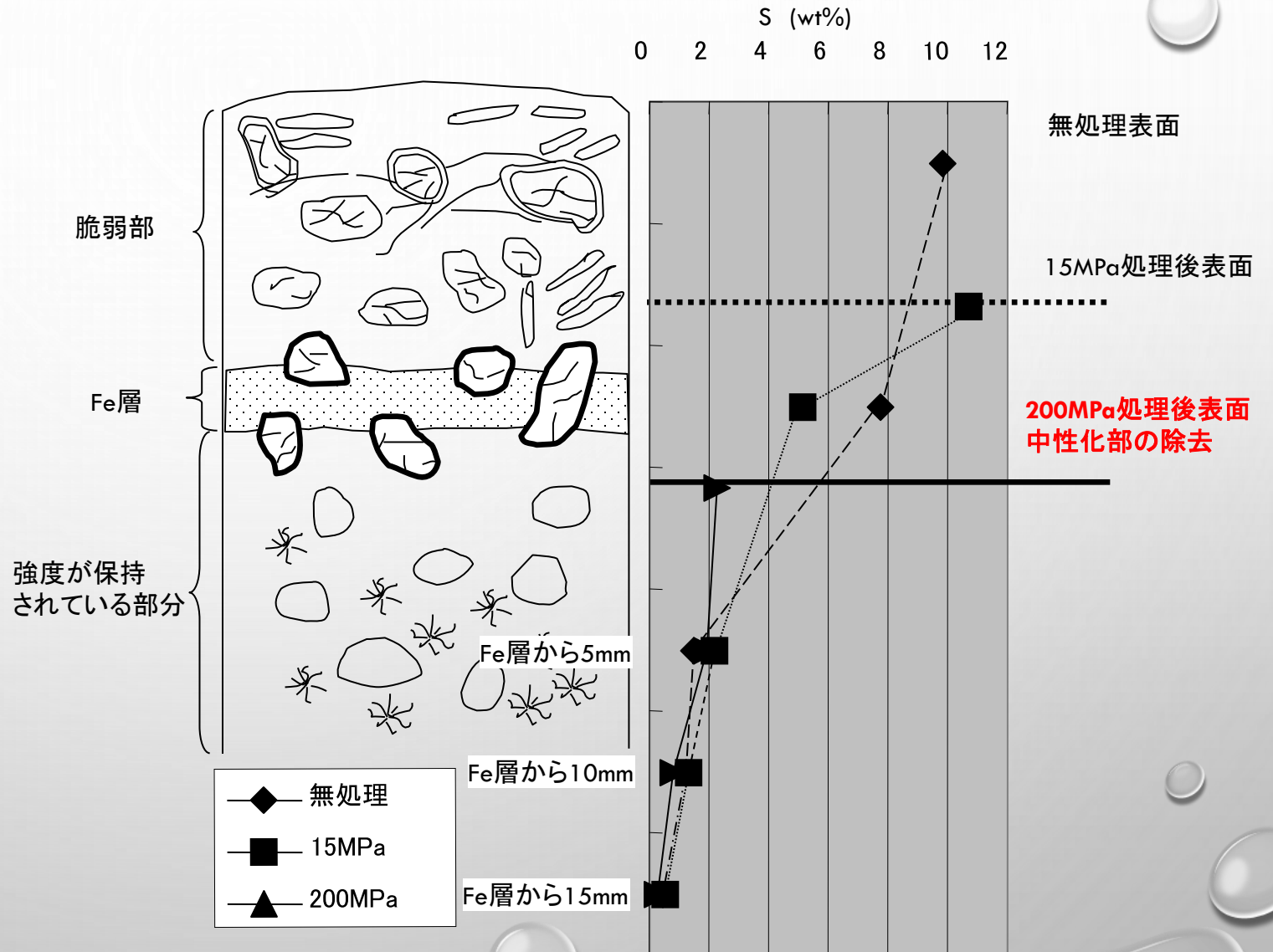
防食被覆工法に要求される性能



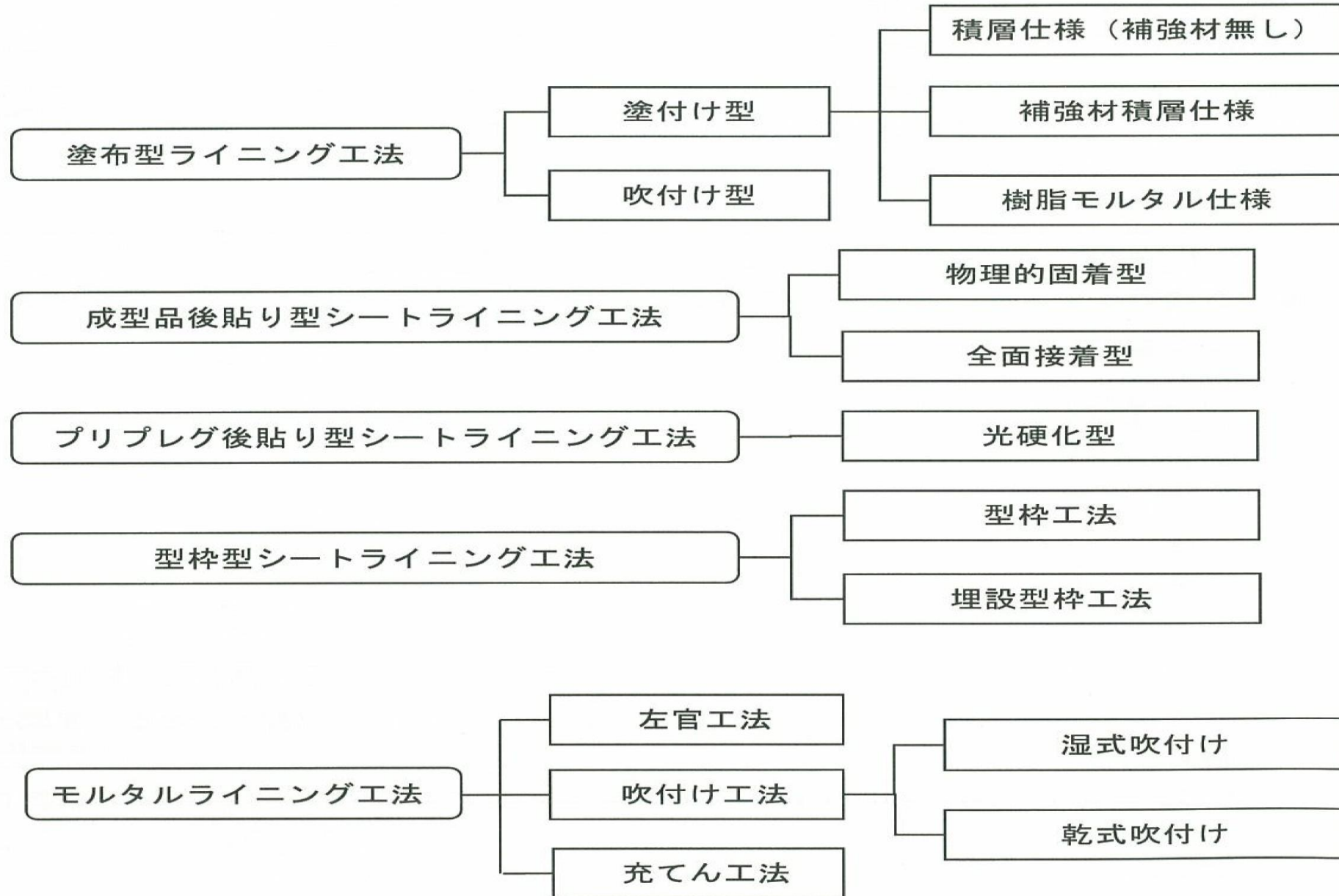
劣化部除去深さの概念図



Fe層



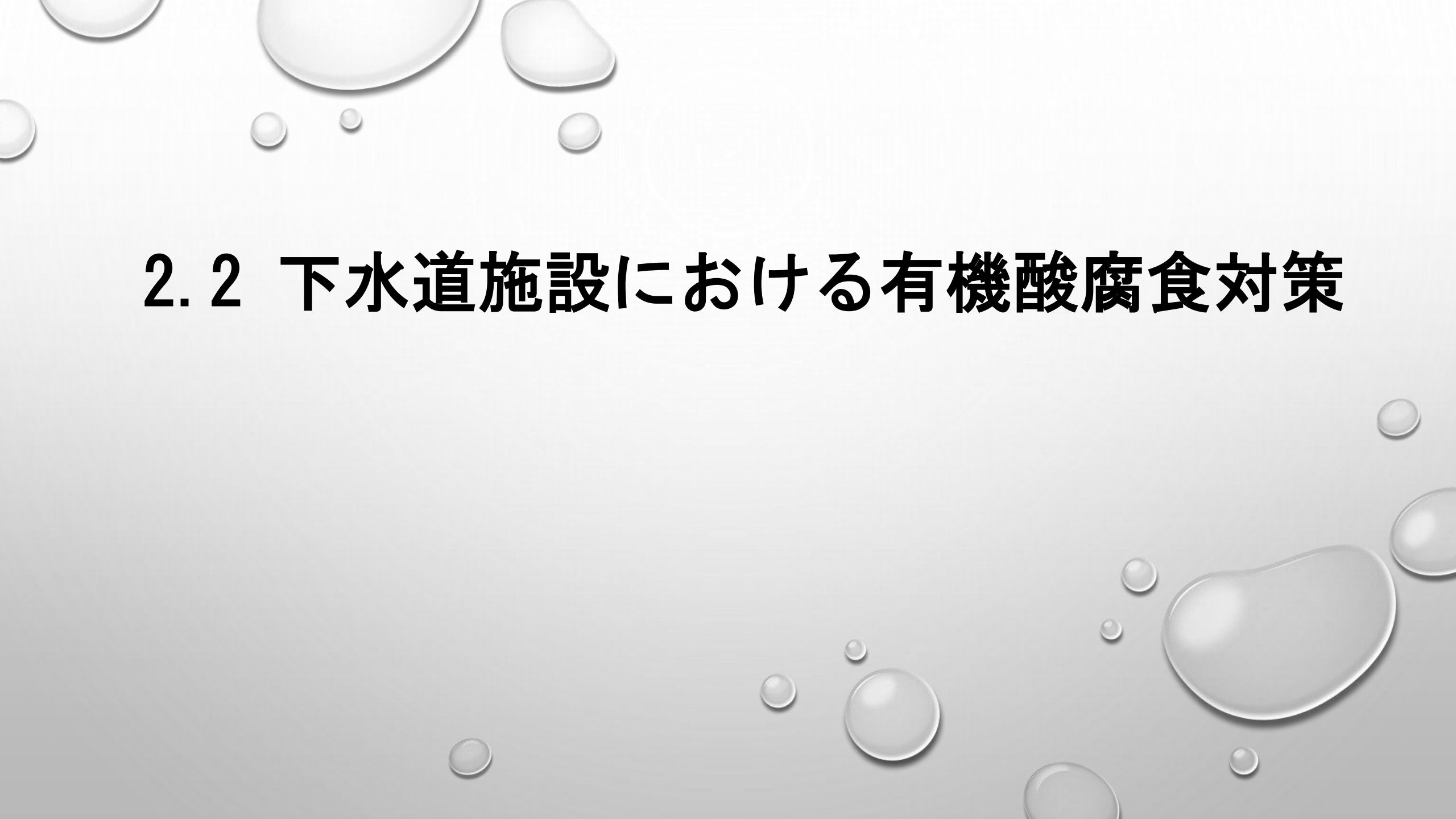
防食被覆工法の分類



防食被覆工法の比較

	塗布型ライニング工法			成形品後貼り型 シートライニング工法		プリプレグ後貼り型 シートライニング工法	型枠型 シートライニング工法	モルタルライニング 工法
	積層仕様	補強材積層仕様	樹脂モルタル仕様	物理的固着型	全面接着型			
工法規格への適用	A~D種 ◎	C~D種 ○	C~D種 ○	D種 ○	D種 ○	D種 ○	D種 ○	B~C種 ○
施設構造（形状）	問題なし ◎	問題なし ◎	問題なし ◎	困難となる工法あり ○	困難となる工法あり ○	困難となる工法あり ○	困難となる工法あり ○	問題なし ◎
施工規模	問わない ◎	問わない ◎	問わない ◎	問わない ◎	問わない ◎	問わない ◎	問わない ◎	問わない ◎
工期・工程 ※300㎡ 壁部 D種	約10日間 ◎	約12日間 ○	約10日間 ◎	約15日間 ○	約15日間 ○	約15日間 ○	— —	約10日間 ◎
供用までの養生期間 ※20℃	7日間 ○	7日間 ○	7日間 ○	不要工法あり ◎	不要工法あり ◎	7日間 ○	不要工法あり ◎	7日間 ○
施工環境温度	5℃以下作業中止 ○	5℃以下作業中止 ○	5℃以下作業中止 ○	問わない工法あり ◎	問わない工法あり ◎	5℃以下作業中止 ○	問わない工法あり ◎	5℃以下作業中止 ○
施工環境湿度	85%以上作業中止 ○	85%以上作業中止 ○	85%以上作業中止 ○	問わない工法あり ◎	問わない工法あり ◎	85%以上作業中止 ○	問わない工法あり ◎	50%未満作業中止 ○
密閉環境下の 作業安全性	有機則該当工法あり ○	有機則該当工法あり ○	問題なし ◎	有機則該当工法あり ○	有機則該当工法あり ○	有機則へ該当する ○	有機則該当工法あり ○	問題なし ◎
下地含水率の影響	問わない工法あり ◎	問わない工法あり ◎	問わない工法あり ◎	問わない工法あり ◎	問わない工法あり ◎	5%以下 ○	問わない工法あり ◎	問わない ◎
単価 ※300㎡以上 壁部 D種	約20,000円/㎡ ◎	約20,000円/㎡ ◎	約28,000円/㎡ ○	約80,000円/㎡ ○	約100,000円/㎡ ○	約50,000円/㎡ ○	約40,000円/㎡ ○	— —
接着安定性 ※標準状態	1.5N/mm2以上 ◎	1.5N/mm2以上 ◎	1.5N/mm2以上 ◎	0.24N/mm2以上 ○	1.5N/mm2以上 ◎	1.5N/mm2以上 ◎	0.24N/mm2以上 ○	1.5N/mm2以上 ◎

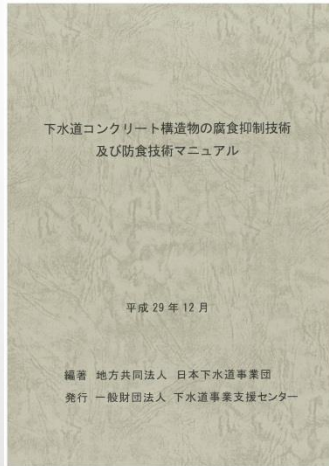
※代表的な防食被覆工法の一般的な比較

The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The text is centered horizontally in the upper half of the slide.

2.2 下水道施設における有機酸腐食対策

日本下水道事業団のマニュアルについて

日本下水道事業団「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル」平成29年12月



第5章 下水道施設のコンクリート防食設計 (P. 45~92)

5.2 腐食環境の特定 (P. 47~50)

5.7 塗布型ライニング工法の設計及び品質規格 (P.65~69)

5.8 成形品あと貼り型シートライニング工法の設計及び品質規格 (P. 70~72)

5.9 プリプレグ後貼りシートライニング工法の設計及び品質規格 (P.73~75)

5.10 型枠型シートライニング工法の設計及び品質規格 (P. 76~77)

付属資料4 防食被覆層・シーリング材の耐有機酸性の品質試験方法

(P. F28~F29)

上記項目に耐有機酸に関する文言および品質規格が記載されている。

ただし、大前提として目的は下記の通りとなっている。

「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル」は、下水道構造物の**硫化水素に起因する硫酸による**コンクリート腐食対策技術を示したものである。(中略)

また、硫化水素に起因する硫酸によるコンクリート腐食を防止するため、コンクリート表面に形成した防食被覆層が**通常使用環境下**において機能を維持することを目的とする。[第1章 総則 1.1 目的 (P. 1)]

日本下水道事業団のマニュアルについて

第5章 下水道施設のコンクリート防食設計 (P. 45~92)

5.7 塗布型ライニング工法の設計及び品質規格 (P.65~69)

5.8 成形品あと貼り型シートライニング工法の設計及び品質規格 (P. 70~72)

5.9 プリプレグ後貼りシートライニング工法の設計及び品質規格 (P.73~75)

5.10 型枠型シートライニング工法の設計及び品質規格 (P. 76~77)

(4) 防食被覆層に耐有機酸の品質規格を求める場合、(1)の品質規格に加えて、公的機関における試験において表5-10-2*の品質規格を満足しなければならない。試験方法は、付属資料4による。

表5-10-2* 耐有機酸性の品質規格

評価項目	品質規格
浸漬後の外観	5%の酢酸水溶液(23 °C±2 °C)に、60日間浸せきしても被覆にふくれ、割れ、軟化、溶出がないこと。 ただし、酢酸水溶液中の濃度は5%以上としてもよい。

*5.8~5.10では、表5-12-2と記載。内容は同一。

【解説】

(4)について

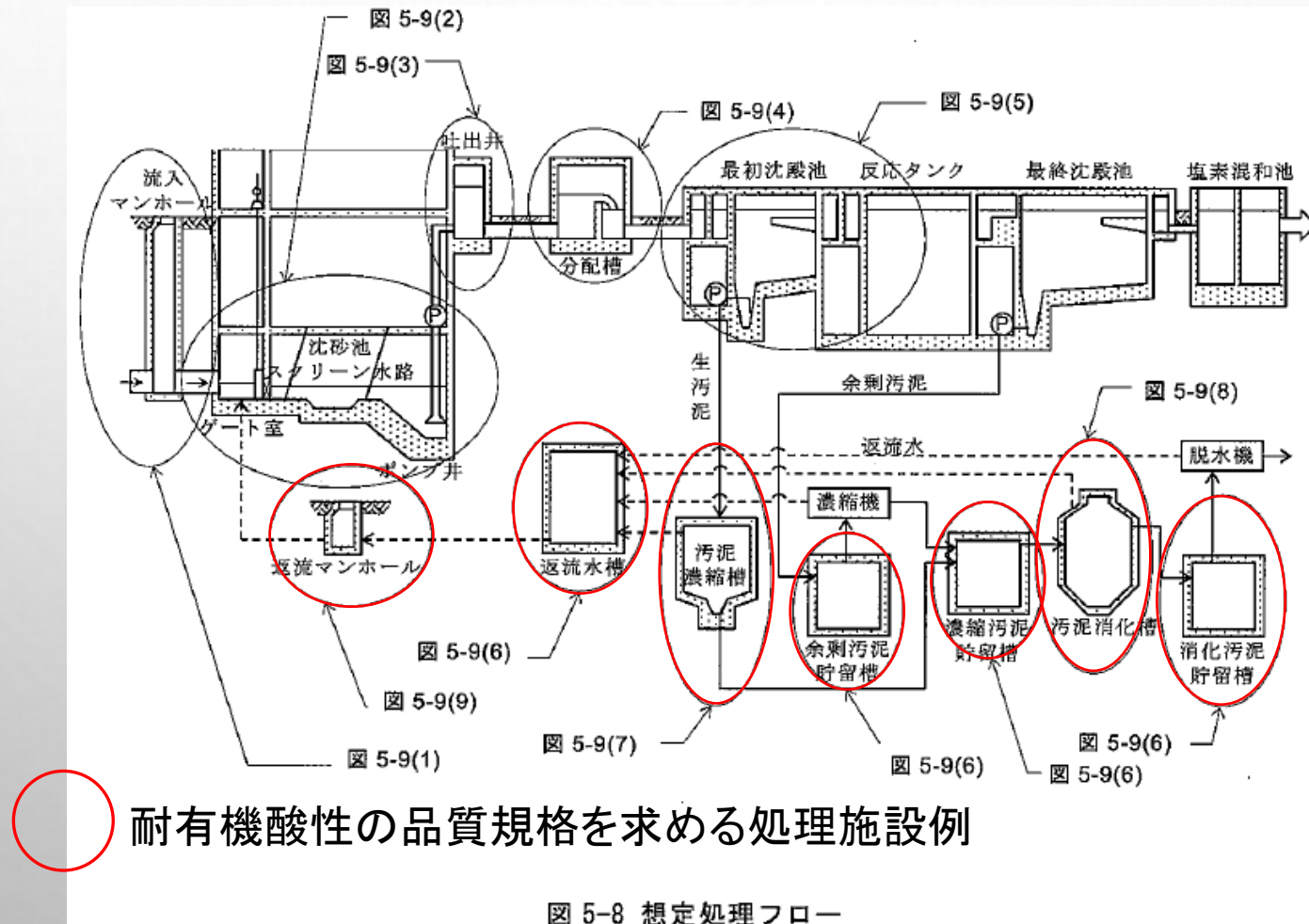
防食被覆層に耐有機酸の品質規格を求める場合、(1)の品質規格に加えて、耐有機酸性の品質規格を満足しなければならない。なお、使用材料の試験方法は、原則として付属資料4 防食被覆層・シーリング材の耐有機酸性の品質試験方法による。

日本下水道事業団のマニュアルについて

第5章 下水道施設のコンクリート防食設計 (P. 45~92)

【参考1】防食被覆範囲の例 (P.85~88)

ここでは、本マニュアル5.2の表5-3に示す各施設の腐食環境の分類例を基に、施設毎の腐食環境分類及び防食被覆範囲の例を示す。(以下、略)



The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The text is centered horizontally and vertically on the page.

2.3 下水道施設における炭酸ガス腐食対策

浸食性遊離炭酸腐食への対策

「防食被覆層有機酸劣化及びコンクリート炭酸劣化に関する調査」より抜粋

- JS防食マニュアルでは、硫酸によるコンクリート腐食部分の除去について、コンクリート構造物としての健全性を確保する観点から、フェノールフタレイン法により呈色しない中性化領域までの除去を規定している。
- 今回の調査によって、気相部・液相部ともに、炭酸による中性化が見られたことから、覆蓋を有する反応タンクにおいては、中性化深さの測定等による劣化状況の確認を行い、必要に応じて劣化部除去・断面修復を行うなどの対策を行うことが望ましいと考えられる。

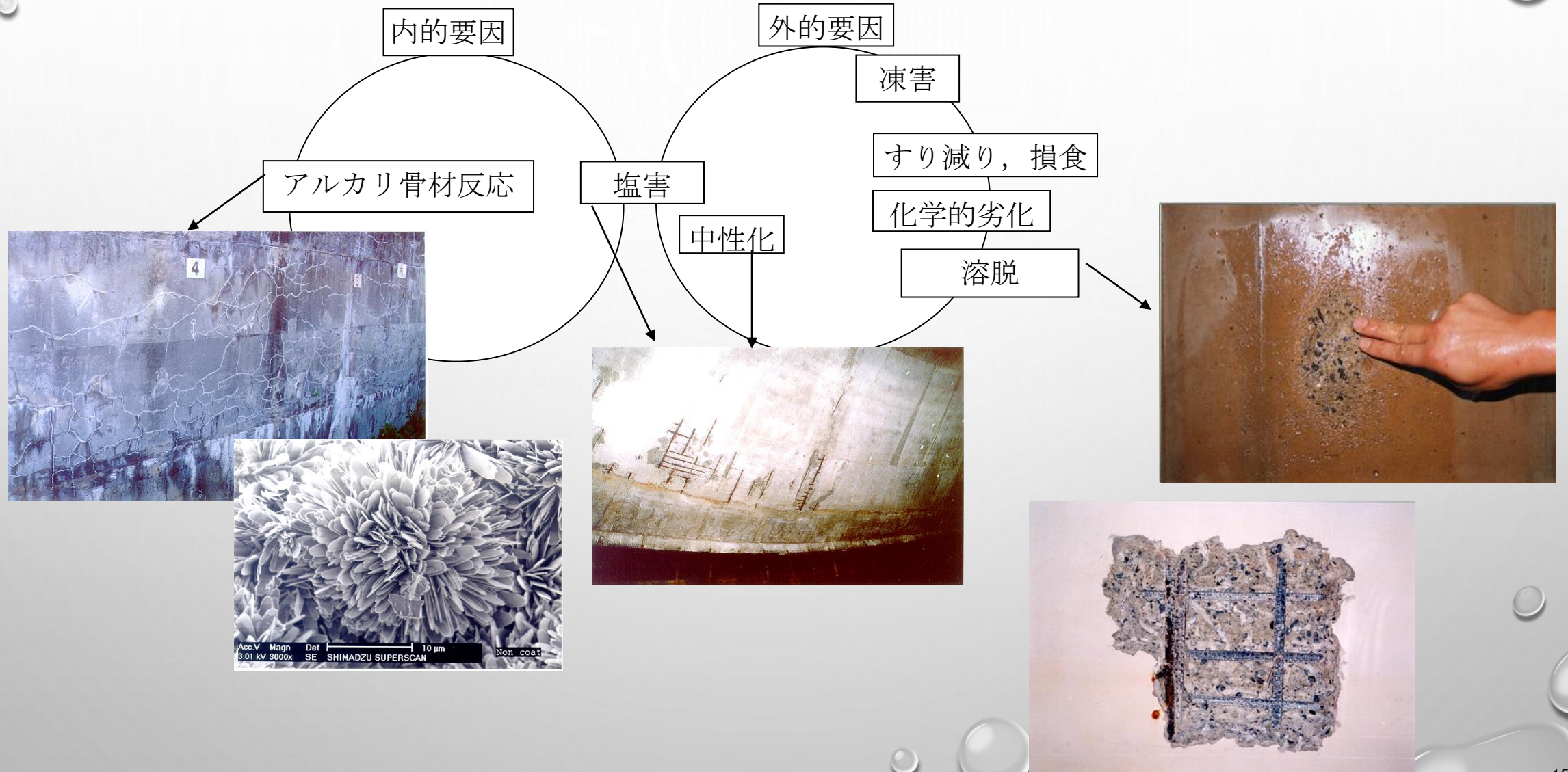
●樹脂ライニングによる対策が非常に効果的であったとの報告がある。

- 炭酸劣化に対しては、基本的に被覆工による対策が適用できると考えられる。
- 被覆工に求められる性能を参照に、材料および工法を選択する。

The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The text is centered horizontally and vertically on the slide.

3. 上水道施設の劣化事例及び劣化機構

コンクリートの劣化要因



コンクリートの溶脱現象の機構

- 細孔溶液と水和物の間で並行関係が成立している。
- 硬化体が淡水に接触すると、細孔溶液中の Ca^{2+} と OH^- が外部へ拡散する。
- 外部へ拡散した Ca^{2+} と OH^- に見合うだけの水和物が溶解し、細孔溶液中に供給される。
- 最初は溶解しやすい、 $Ca(OH)_2$ が溶解し、消失するとセメント硬化体のC-S-Hが溶解する。
- C-S-Hが溶解することで、空隙が増加し脆弱化する。

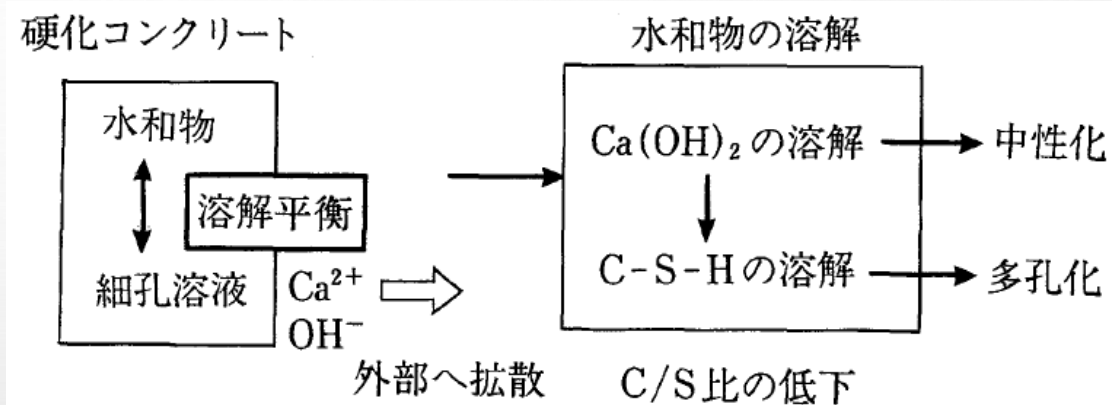


図-1 コンクリートの溶脱現象

溶脱による劣化現象について

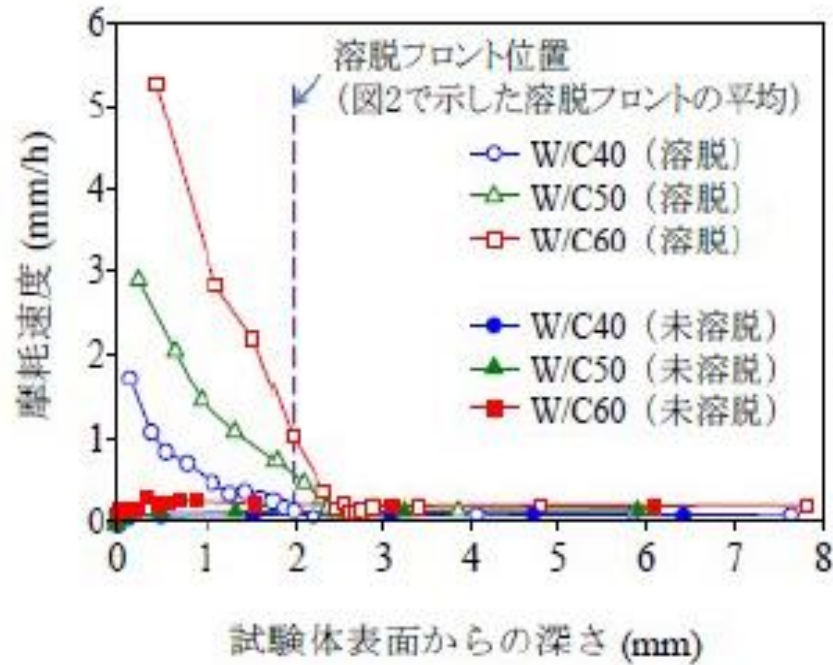


図3 深さと摩耗速度との関係

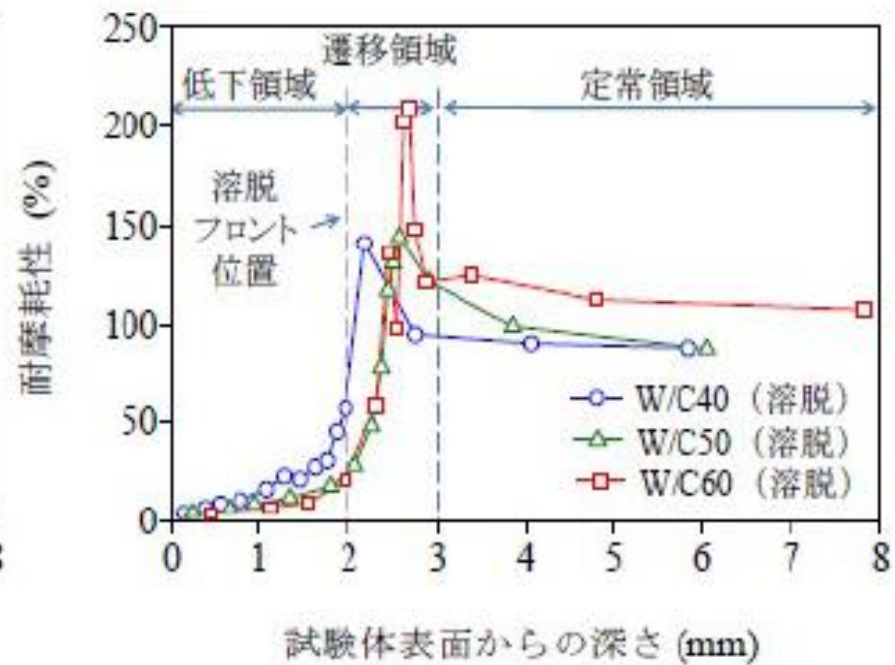
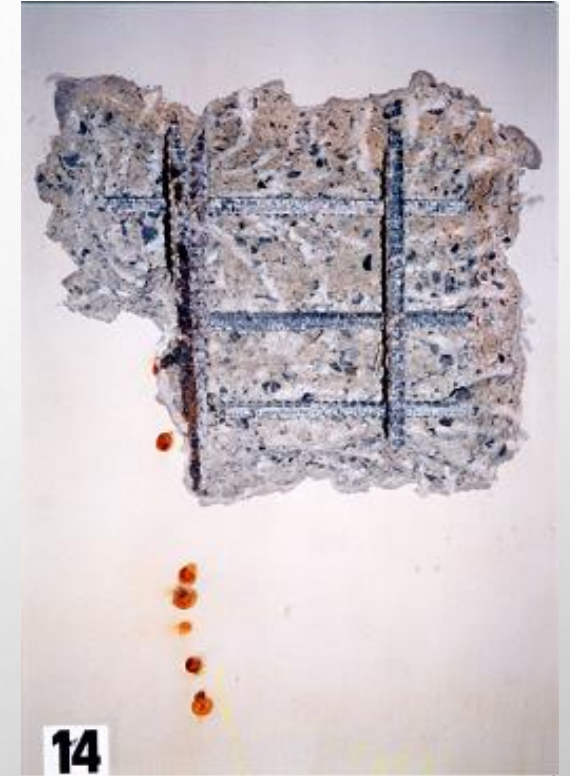
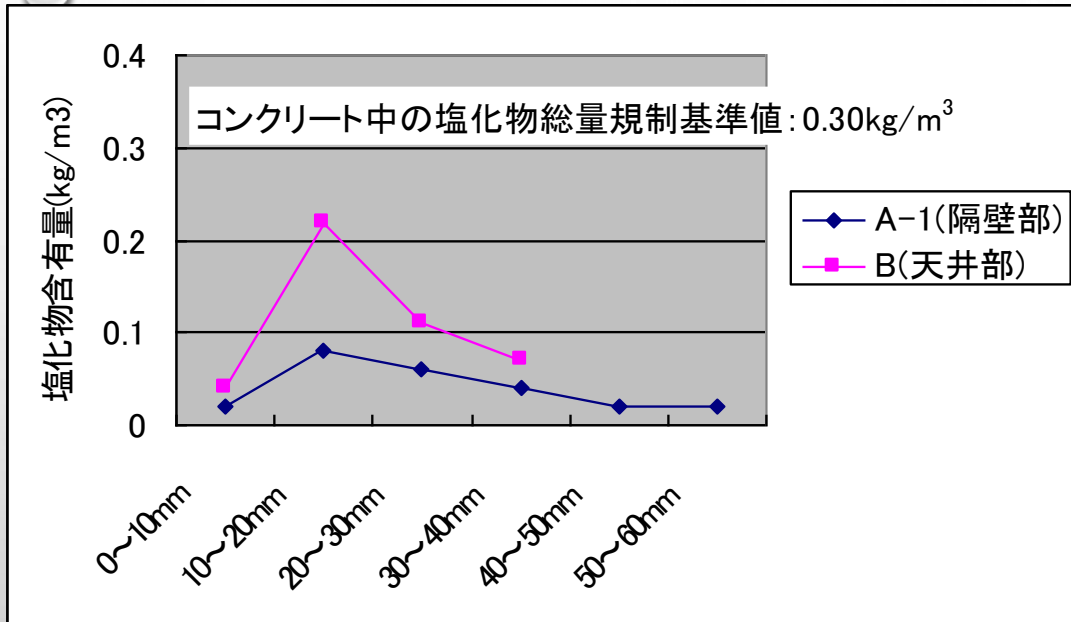


図4 深さと耐摩耗性との関係

農研機構 HP、農村工学研究所2010年の成果情報:カルシウムが溶脱したセメントペースト硬化体の耐摩耗性の低下、

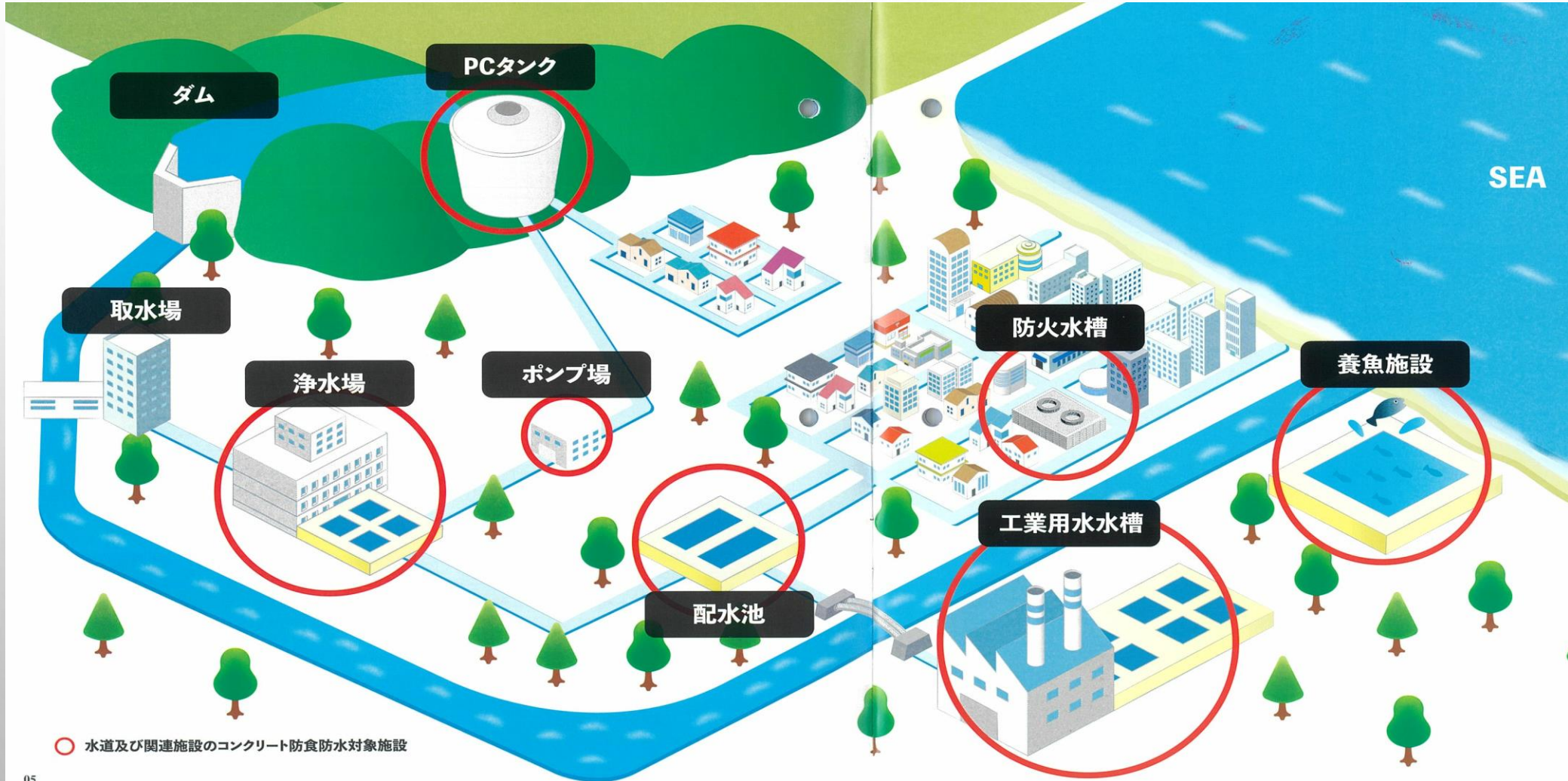
塩素による劣化現象について

- 約10年間供用した配水池コンクリート中の塩化物含有量測定結果



- 水中部での鉄筋錆は、表面に錆が溶出し、錆こぶが発生している。
- 塗膜下の鉄筋も、塩素の浸透により錆が発生している状況が確認できた。

上水道関連施設の劣化が確認される施設



○ … 劣化が確認される施設

The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The text is centered horizontally and vertically on the page.

4. 上水道施設における腐食対策

防水防食工の必要性

- ①水質の保護
水道法に基づいた材質の使用
(JWWA K143・K149／JWWA Z108／厚生省令)
- ②躯体の保護
中性化防止など
(炭酸水・塩素水等との接触・カルシウムの溶脱)
- ③防水性の向上
水密性の向上など
(漏水防止・クラック防止・鉄筋の保護)

防食防水工法の分類



各種防食被覆工法の長所と短所

材料名	長所	短所	備考
エポキシ樹脂	<ul style="list-style-type: none"> ・接着性が良い ・取り扱いに慣れている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・冬季の白華 ・耐候性が悪い 	
アクリルウレタン樹脂	<ul style="list-style-type: none"> ・柔軟性に優れる ・耐候性に優れる 	<ul style="list-style-type: none"> ・下地水分の影響を受けやすい ・柔軟なためふくれが発生しやすい 	
ポリウレア樹脂 ポリウレタン樹脂	<ul style="list-style-type: none"> ・柔軟性に優れる。 ・厚膜3mm以上によるひび割れ追従性。 ・施工後の養生期間が短い 	<ul style="list-style-type: none"> ・吹きつけ作業に熟練が必要 ・下地水分の影響を受けやすい 	
ビニルエステル樹脂 (FRP: Fiber Reinforced Plastic)	<ul style="list-style-type: none"> ・硬化性の調整が可能 ・取り扱いに慣れている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・臭気の残存 ・シンナーの使用 	
ポリエチレン	<ul style="list-style-type: none"> ・臭気がない ・水系樹脂 	?	情報が少ない

防食防水工法の比較

項目	エポキシ樹脂	ビニルエステル樹脂 ポリエステル樹脂	軟質ポリエステル樹脂	水性ポリエチレン樹脂	ポリウレタ樹脂	モルタル被覆
工法の概要	エポキシ樹脂をコンクリートに塗布し、常温で反応硬化して防水層を形成するものである。	ビニルエステル樹脂にガラスマットなどの補強材を組み込み、下地に塗布・硬化させることで積層強化された被覆防水層を形成するものである。	液状の軟質不飽和ポリエステル樹脂にガラスマットなどの補強材を組み込み、下地に塗布・硬化させることで積層強化された被覆防水層を形成するものである。	ポリエチレン樹脂に乳化剤と水を特殊製法で組合せた水性防食工法。コテまたは吹付けで塗布し、乾燥硬化して防水層を形成するものである。	イソシアネートとアミンの化学反応により形成されるポリウレタ樹脂をコンクリート表面に吹き付けて、防水・防食層を形成する。	プレミックスタイプの特種セメント系モルタルにより防水層を形成する無機質工法である。
工程数	3~5工程	5工程	5工程	4工程	3工程	2工程
膜厚	0.5mm	1.0~1.5mm	1.0~1.5mm	0.4mm	1.0~2.0mm	7mm以上
期待対応年数	設計耐用年数は10年とされており、15年程度で補修の検討が必要。	設計耐用年数は10年とされており、15年程度で補修の検討が必要。	設計耐用年数は10年とされており、15年程度で補修の検討が必要。	設計耐用年数は10年とされており、15年程度で補修の検討が必要。	設計耐用年数は10年とされており、15年程度で補修の検討が必要。	モルタル防水工の実績及び中性化深さ測定結果から30年程度の設計耐用年数が期待できる。
評価	○	○	○	○	○	◎
浮きの発生	硬質塗膜のため発生確率は低い。	硬質塗膜のため発生確率は低い。	軟質塗膜のため発生確率は高く、将来的な剥離につながる可能性がある。	軟質塗膜のため発生確率は高く、将来的な剥離につながる可能性がある。	軟質塗膜のため発生確率は高く、将来的な剥離につながる可能性がある。	硬質塗膜のため発生確率は低い。
評価	○	○	△	△	△	○
クラック追従性	クラックに対しての追従性はない。躯体のクラックは防水塗膜表面に現れることがある。 ※補強層を積層することで抵抗性を高めることが可能	補強層を積層しており、ひび割れに対する抵抗性が強い。被覆材料に伸縮性がなく、施工後に発生する表面ひび割れに対しては追従することはできない	塗膜に伸縮性があり、下地の動きに対して追従するため防水性は高いが、浮きが発生し塗膜剥離の要因となりやすい	塗膜に伸縮性があり、強度も低く、下地の動きに対して追従するため防水性は高いが、浮きが発生し塗膜剥離の要因となりやすい	塗膜に伸縮性があり、下地の動きに対して追従するため防水性は高いが、浮きが発生し塗膜剥離の要因となりやすい	クラックに対しての追従性はない。躯体のクラックは防水塗膜表面に現れることがある。
評価	△	△	△	△	△	△
湿度に対する影響	85%以上の場合施工不可	85%以上の場合施工不可	85%以上の場合施工不可	85%以上の場合施工不可	85%以上の場合施工不可	結露がない限り問題なし
評価	△	△	△	△	△	○
温度に対する影響	5℃以下の場合施工不可	5℃以下の場合施工不可	5℃以下の場合施工不可	5℃以下の場合施工不可	5℃以下の場合施工不可	0℃以下の場合施工不可
評価	△	△	△	△	△	○
湿潤面に対する接着性	躯体含水率に左右されない	含水率8%以上施工不可	含水率8%以上施工不可	含水率10%以上施工不可	含水率8%以上施工不可	躯体含水率に左右されない
評価	○	△	△	△	△	○
耐候性	紫外線により変色する	紫外線により変色する	影響なし	影響なし	紫外線により変色する	影響なし
評価	△	△	○	○	△	○
硬化特性	反応硬化型	反応硬化型	反応硬化型	乾燥硬化型 ※高湿度時や送風が当たらない箇所での未硬化の可能性あり	衝突混合型	反応硬化型
評価	○	○	○	○	○	○
施設に対する臭気等の影響	問題なし	臭気が残留することがある	臭気が残留することがある	問題なし	臭気が残留することがある 吹付け時のミスト対策が必要	問題なし
評価	◎	△	△	◎	△	◎
概算費用 ※新設時	約10,000円/㎡	約13,000円/㎡	約12,000円/㎡	約10,000円/㎡	約10,000円/㎡	約15,000円/㎡
評価	◎	△	△	◎	◎	△
概算費用 ※補修時	約24,000円/㎡ 劣化部除去工：9,000円 断面修復工：5,000円 防水防食工：10,000円	約27,000円/㎡ 劣化部除去工：9,000円 断面修復工：5,000円 防水防食工：13,000円	約26,000円/㎡ 劣化部除去工：9,000円 断面修復工：5,000円 防水防食工：12,000円	約24,000円/㎡ 劣化部除去工：9,000円 断面修復工：5,000円 防水防食工：10,000円	約24,000円/㎡ 劣化部除去工：9,000円 断面修復工：5,000円 防水防食工：10,000円	約24,000円/㎡ 劣化部除去工：9,000円 断面修復工：0円 防水防食工：15,000円
評価	○	△	△	○	△	○
LCC ※30年間共用時	24,000円/㎡×2回÷30年 1,600円/㎡/年	27,000円/㎡×2回÷30年 1,800円/㎡/年	26,000円/㎡×2回÷30年 1,733円/㎡/年	24,000円/㎡×2回÷30年 1,600円/㎡/年	24,000円/㎡×2回÷30年 1,600円/㎡/年	24,000円/㎡×1回÷30年 800円/㎡/年
評価	○	△	△	○	○	◎

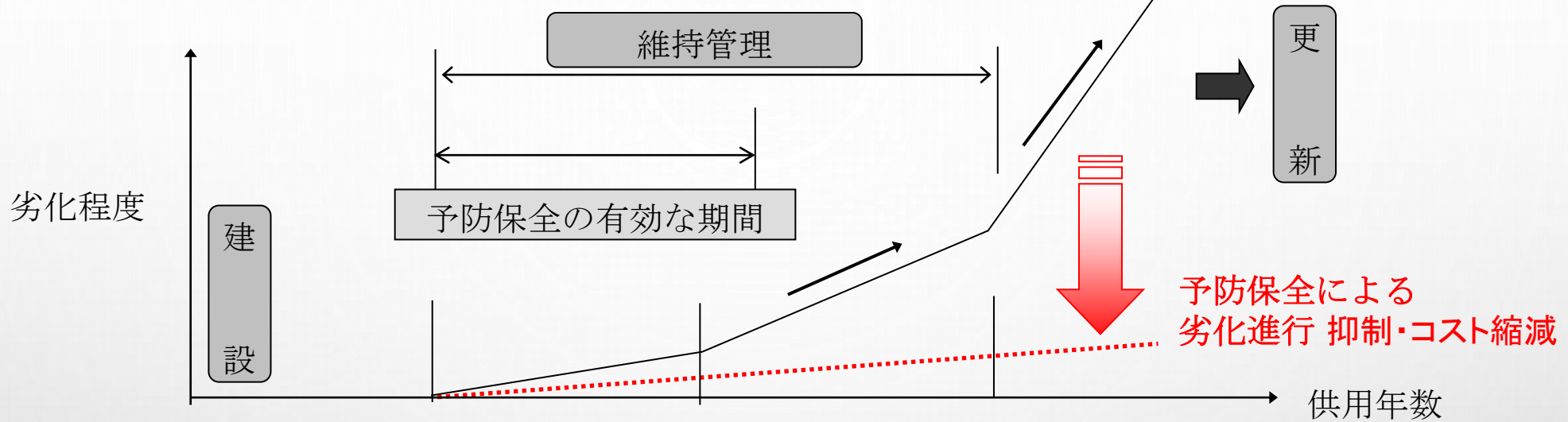
※ モルタル被覆の概算費用は10mm厚+断面修復厚5mmの15mmにて積算。

※ 概算費用（補修時）の断面修復工は5mm厚にて積算。

※代表的な防食防水工法の一般的な比較

5. LCC向上対策（下水道編）

鉄筋コンクリート構造物の維持管理



	I 潜伏期	II 進展期	III 加速期	IV 劣化期
硫酸劣化	硫酸の生成が始まっているが外観上健全	コンクリート表面のpHが低下し、硫酸カルシウムが形成され始める	コンクリートが劣化し粗骨材が露出する状態	劣化が鉄筋位置まで進行し、部材の耐荷力に影響を及ぼす状態
中性化	外見上の変状が見られない、中性化残りが発錆限界以上	外見上の変状が見られない、中性化残りが発錆限界以下、鋼材腐食が開始	鋼材腐食によるひび割れが発生、錆汁が見られる、部分的な剥離・剥落が見られる	鋼材腐食によるひび割れが発生、ひび割れ幅が大きい、錆汁がみられる、剥離・剥落が見られる、変位・たわみが発生している。
塩害	塩分による錆が発生しているがひび割れの発生はない。	部分的にひび割れが発生している	鉄筋腐食によるひび割れが発生している	
アルカリ骨材反応	ASRそのものは進行するものの膨張がまだ現れない	膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生する	ASRによるひび割れが顕著に現れ、ひび割れ幅・本数が増加している	
凍害	コンクリート表面部で相対動弾性係数が100%以上	コンクリートかぶり部で相対動弾性係数が60%以上	鉄筋位置のコンクリートで相対動弾性係数が60%以上	鉄筋位置のコンクリートで相対動弾性係数が60%以下

防食被覆工法の耐用年数

また、「下水道施設の改築について（平成 15 年 6 月 19 日付国都下事第 77 号）」において水処理施設や汚泥処理施設等における内部防食の標準的な耐用年数として 10 年間とされていることから設計耐用年数は 10 年間を標準とした。

ただし、実績が確認できる場合は、設計耐用年数を 10 年以上とすることができる。

この場合は、①使用実績を評価し、②腐食環境の調査結果や既設防食被覆層の耐久性に係る調査・診断結果に基づき、防食被覆層の基本的な要求性能である「耐硫酸性」「遮断性」「接着安定性」が確保できるかを十分に検討する。



**「耐硫酸性」「遮断性」「接着安定性」に対して
50年後の耐久性を検証した工法もある**

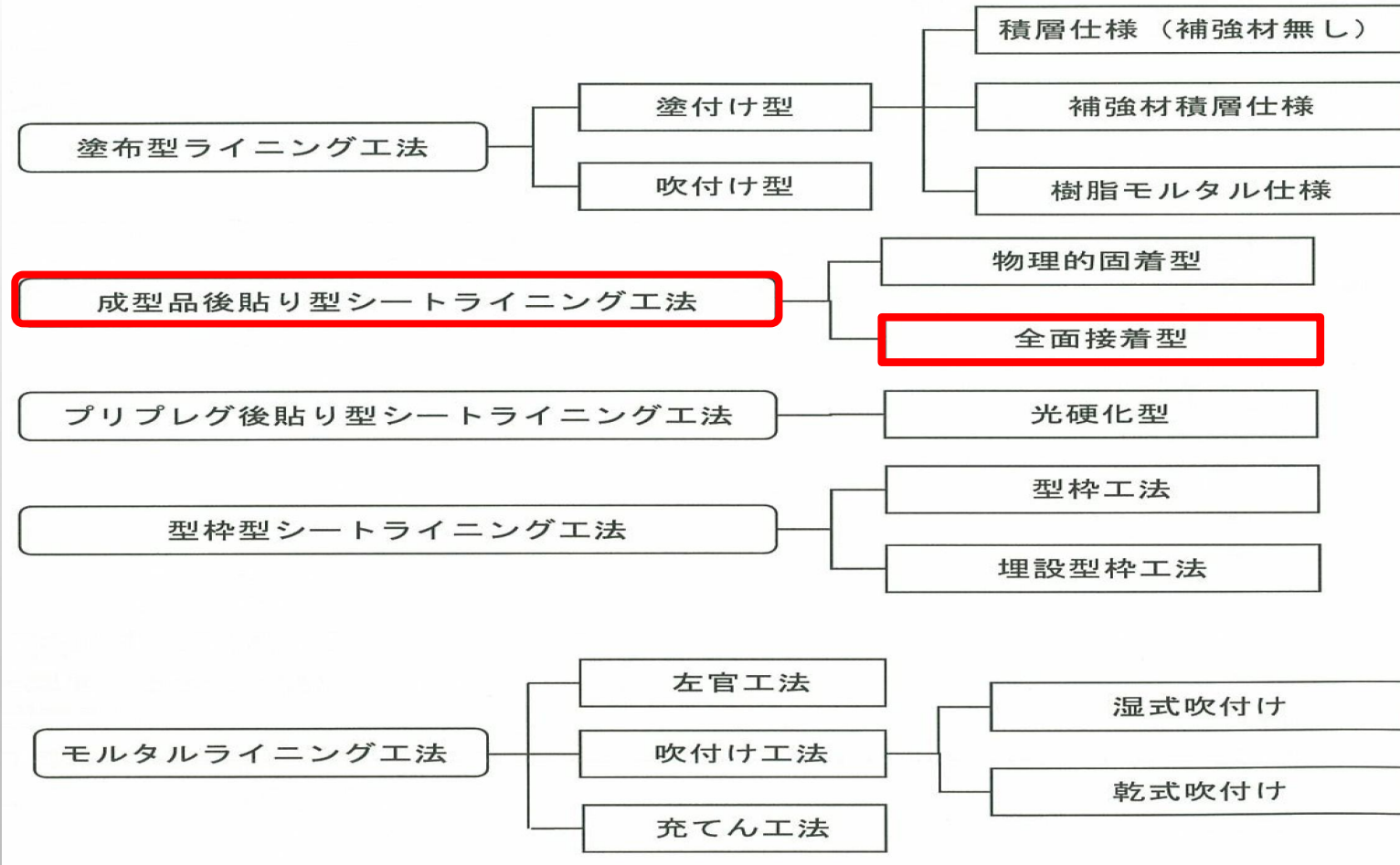
防食被覆の劣化事例



- 重力濃縮槽
- 供用期間:10年間
- 硫化水素ガス濃度:
最大59ppm・平均18.6ppm

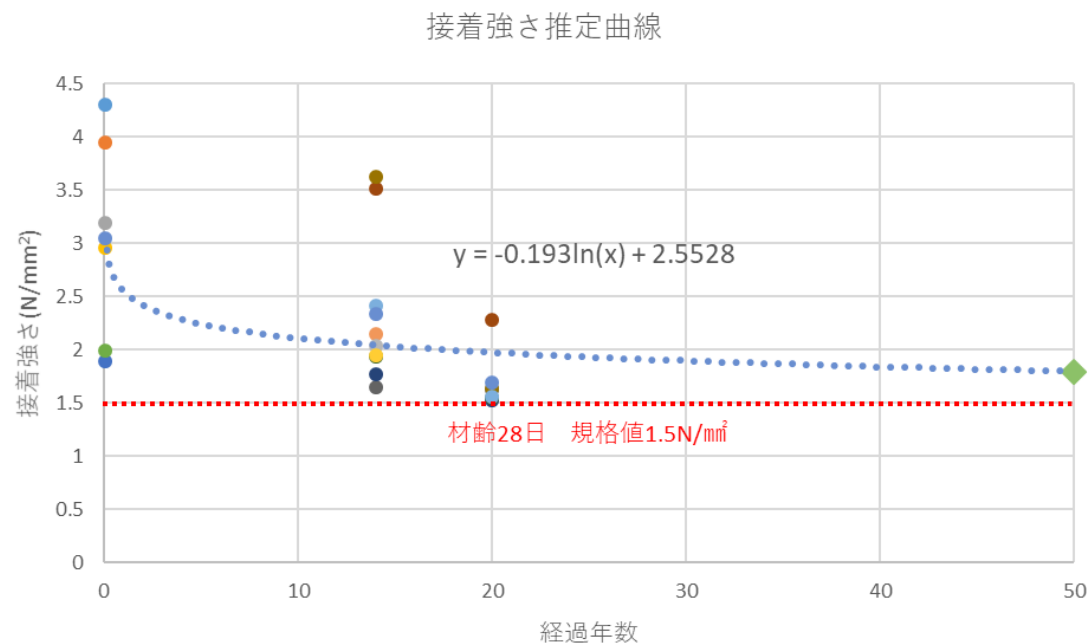
- 左記のコンクリート劣化部分の拡大。
- 被覆欠陥からの腐食生成物(二水石膏)

期待耐用年数 50年工法



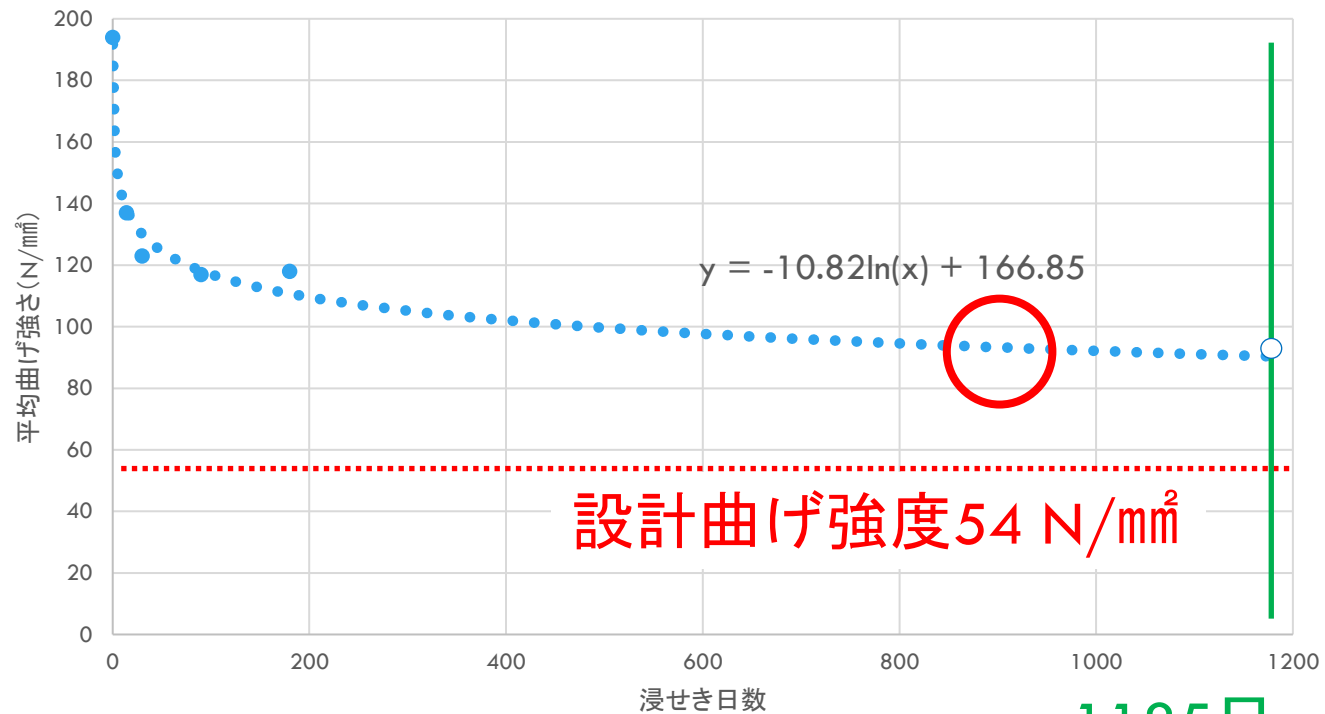
防食被覆工法の成形品後貼り型シートライニング工法（全面接着型）に分類される工法は、工場ですべて完全硬化したシートのため品質安定は当然であるが、全面接着機能を活かして、長期接着安定性能が確保できていることを証明し、期待耐用年数を50年と設定している工法もあり、LCC向上の検討を可能としている。

50年後の接着強さ予測 — 現地追跡調査より —



50年後の曲げ強度予測 — 促進試験より —

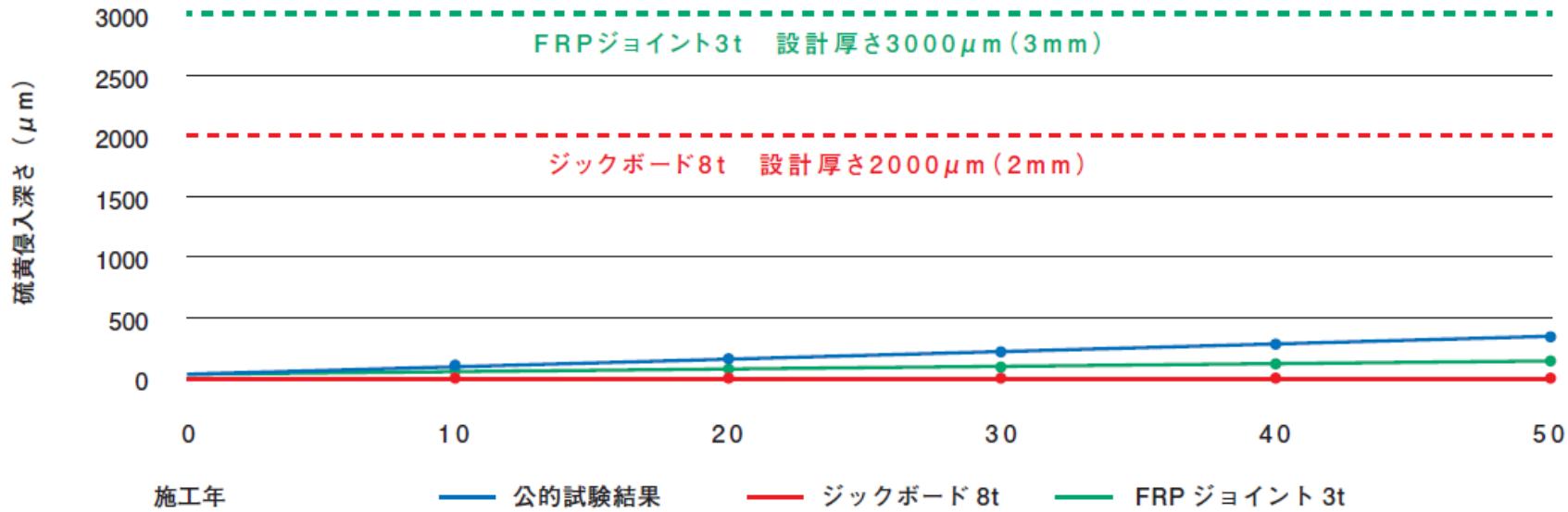
曲げ強度の推定



1185日
(50年相当)

50年後のイオウ浸透深さ 予測

硫黄侵入深さの推定



公益財団法人
日本下水道新技術機構より、
建設技術審査証明を取得

6. LCC向上対策（上水道編）

水道用コンクリート水槽の 防水・防食対策の現状

- ・有機質系材料による防水・防食対策

（有機質系材料：エポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂、ポリエステル樹脂、ポリウレタ樹脂、水性ポリエチレン樹脂等）

- ・古い施設では、過去に実施したモルタル防水

- ・防水・防食被覆対策が実施されていない

長期間供用後の劣化事例



配水池 気相部 鉄筋腐食



配水池 水中部 表面脆弱化



配水池 水中部 モルタル防水表面剥落



浄水池 水中部 有機質系被覆のフケレ



配水池 気相・水中部 有機質系被覆の白化



流出水路 屋外 有機質系被覆の被覆厚減少、消失

防食防水工法の耐用年数



防食防水工法は、左図の通り大きくは「有機系被覆工法」と「無機系被覆工法」に分けられる。

有機系被覆工法は、過去実績から耐用年数が10～15年程度といわれているが、無機系被覆工法のモルタル被覆工法は30年程度を耐用年数としている工法もある。

無塗装のPCタンクの耐用年数

○日本水道協会（H25 水道研究発表会）講演集より抜粋

- ・中性化深さと中性化期間は $y = b - \sqrt{t}$ が一般的に用いられており、内面無塗装のPCタンクを対象とした中性化深さ測定試験を実施し、その結果から50年後と100年後の中性化深さの予測値を求めている。
- ・調査結果で築後50年経過した時点の中性化深さは最大7.2mmであり、築後100年では10.2mmと予測している。（PC=高密度コンクリート）
- ・PCタンクのかぶり厚は水に接する部分は40mm以上、水に接しているが有効な保護層で保護されている部分は30mm以上と規定され、このかぶり厚10mmの差は100年後の最大中性化深さとほぼ一致している



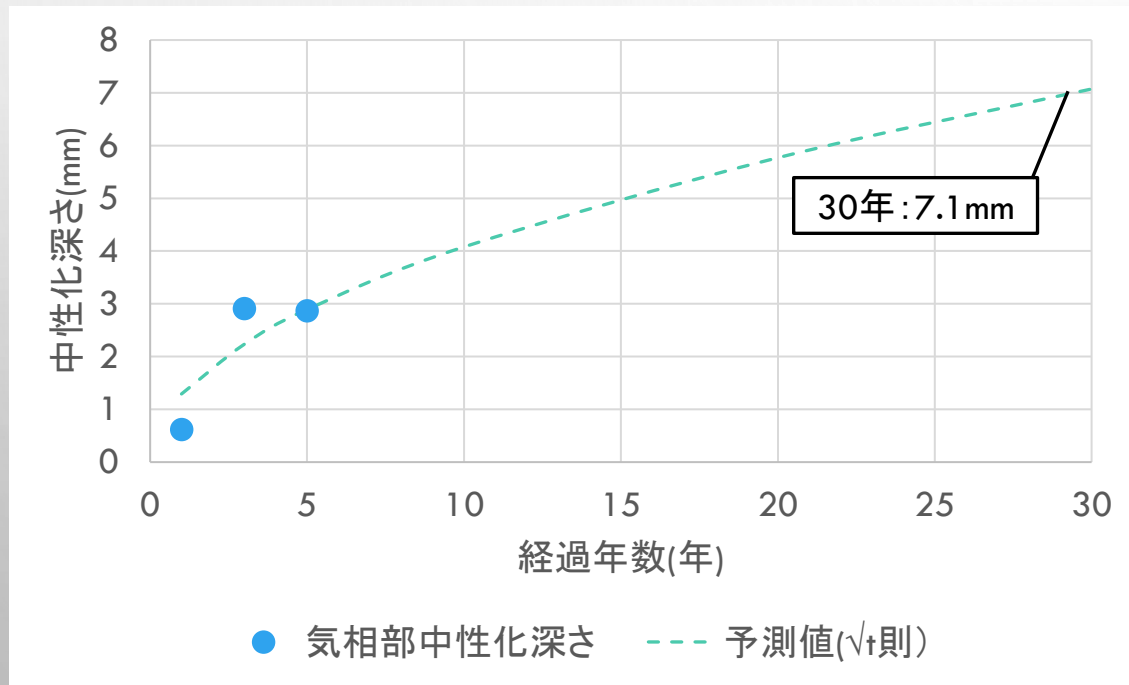
PCタンクを無塗装とする場合、かぶり厚を10mm以上大きくすれば鉄筋の防食機能を保持できるとまとめている。

（一般的PCタンクの配合⇒ $w/c = 42 \sim 45\%$ ・ 圧縮強度 = $35 \sim 45 \text{ N}$ ）

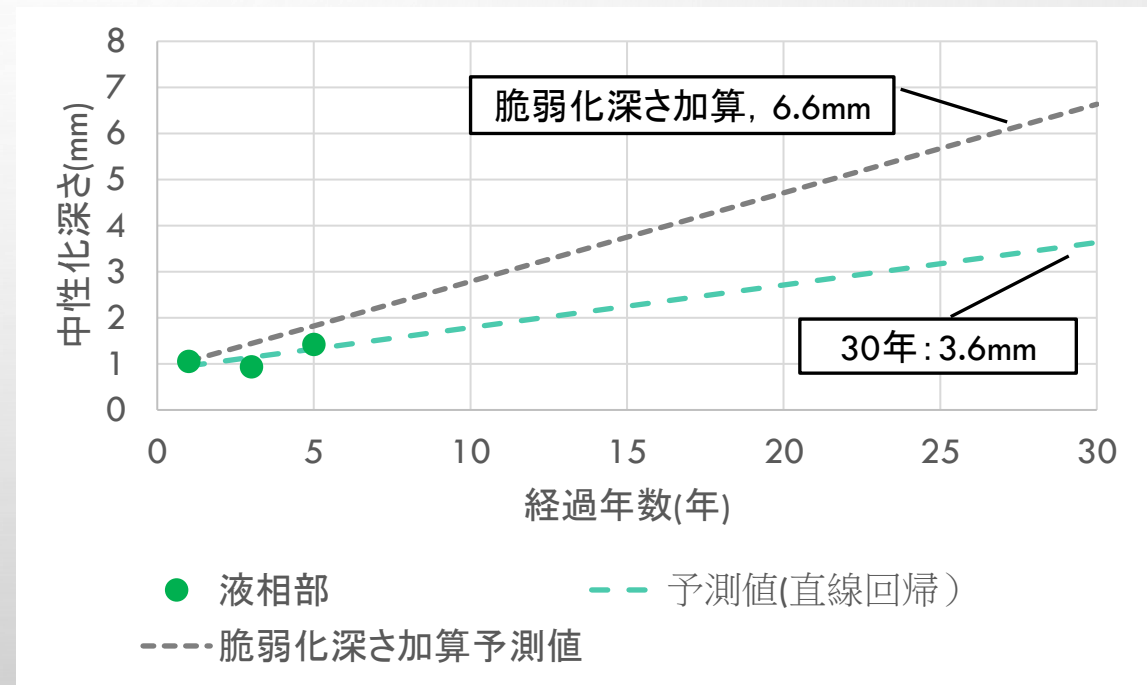
モルタル被覆工の耐用年数予測 —表面含侵工法＋無機系表面被覆工法—

○日本水道協会（R3年 水道研究発表会）講演集より抜粋

- 気中部の中性化予測結果（30年： \sqrt{t} 則，7.1mm）
- 水中部の中性化予測結果（30年：直線回帰，3.6mm、脆弱化深さ加算予測値，6.6mm）



気中部中性化深さ 予測結果



水中部中性化深さ 予測結果

The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The text is centered horizontally in the upper half of the slide.

7. 保証書の条件整備

保証書における不備事項

記載事項	記載概要（例）
工事名	発注図書記載のとおり
工事場所	発注図書記載のとおり
工期（施工期間）	防食被覆工法の工期
施工範囲	発注図書記載のとおり
施工仕様	材料製造業者の工法名
工法規格	A～D種の該当規格
保証期間	10年間
保証内容	① 性能保証期間内に防食被覆層が所定の劣化を抑制すること ② 当該期間内にコンクリートの劣化を進展させないこと、場合箇所の防食性能の回復を図ること
重要事項の説明	監督職員と協議の上、記載する
その他必要事項	必要事項は当事者間での協議により記載の有無を決める
受注者	総合的な請負責任と施工管理責任
施工者	施工責任
防食被覆材料製造業者 （又は材料製造業者・施工者が所属する協会・工業会等団体）	防食被覆工法の仕様設定責任と使用材料の品質責任

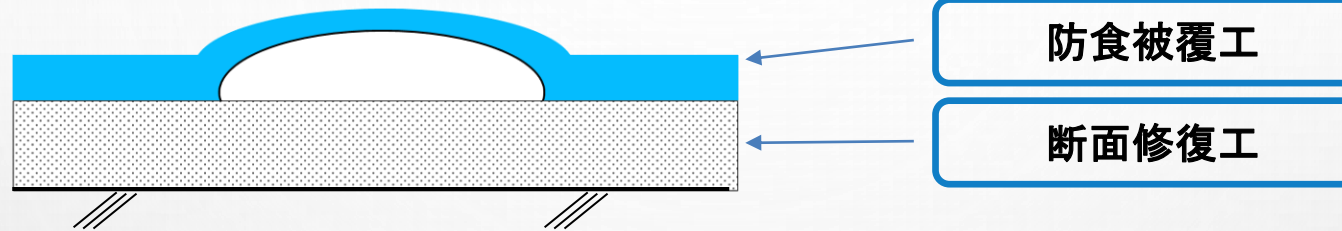
断面修復材の製造業者が保証者に含まれていない

受注者、施工者、防食被覆材料製造業者の責任とその分担を明確にするため3者連名とする

※性能保証の例 JSマニュアル P173より抜粋

保証書における不備事項

防食被覆工と断面修復工の界面にて剥離が発生



不備となる事例①

防食被覆工と断面修復工の界面にて剥離が生じた場合、**防食被覆工法と断面修復工法**の材料製造業者が違う場合、**剥離原因の究明が困難**となる。

不備となる事例②

不具合原因が断面修復材の製品不良であった場合、**保証を行う業者**がない。

保証書はあっても保証が履行されない…

保証書における不備事項

防食被覆工と断面修復工の界面にて剥離が生じた場合、**防食被覆工法と断面修復工法**の材料製造業者が違う場合、**剥離原因の究明が困難**となる。

不具合原因が断面修復材の製品不良であった場合、**保証を行う業者**がない。

上記2点を解決するには…

防食被覆工法と断面修復工法は同一メーカーを採用させたいえ、**材料保証は断面修復工を共に提出**させる

保証書における不備事項

記載事項	記載概要（例）	
工事名	発注図書記載の通り	
工事場所	発注図書記載の通り	
工期（施工期間）	防食被覆工法の工期	
施工範囲	発注図書記載の通り	
施工仕様	材料製造業者の工法名	
工法規定	1～3種の該当規格	
保証期間	10年間	
保証内容	①性能保証期間内に防食被覆層が所定の機能を抑制すること ②当該期間内にコンクリートの劣化を進行合箇所 の防食性能の回復を図ること	
重要事項の説明	監督員と協議の上、記載する	
その他必要事項	必要事項は当事者間での協議により記載の有無を決める	
受注者	総合的な請負責任と施工管理責任	受注者、施工者、防食被覆材料製造業者の責任と その分担を明確にするため3者連名とする。 なお、補修工事で断面修復材を用いる場合は、 断面修復材製造業者を併せ4者連名とする。
施工者	施工責任	
防食被覆材製造業者（又は材料製造業者・施工者が所属する協会・工法業会等団体）	防食被覆工法の仕様設定責任と使用材料の品質責任	

農集排の新指針(2020版)には記載されました

※性能保証の例 農集排指針 P96より抜粋

保証書における不備事項

保証書に記載されている業者が、倒産等で存在していない場合や、不具合原因が特定できない場合などは、保証事項が履行されないケースがある



コンクリート防食工事の「賠償責任保険制度」への加入を条件とする。

- ※請負金額500万円以上。1物件最大1億円まで補償
- ※コンクリート防食技士による施工管理が条件

参考資料

- ・下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル, 日本下水道事業団 平成29年12月版
- ・下水処理場における防食被覆層の劣化要因としての各所の有機酸濃度・組成の実態, 日本下水道事業団 令和3年研究発表資料
- ・久保内昌敏, 平元伸一郎, 鄭盛吉, 仙北谷英貴, 津田健: 有機酸水溶液環境下におけるアミン硬化エポキシ樹脂の劣化挙動および環境液の侵入挙動, 材料の科学と工学, Vol. 42, No. 4, pp. 35-41, 2005
- ・日本下水道新聞 第2335号 2016年12月7日 20面 東京工業大学 物質理工学院 久保内 昌敏教授
- ・杉浦宏介, 久保内昌敏, 谷本那月: 下水環境で用いるエポキシ樹脂ライニング材の硫酸／有機酸複合酸環境下における環境液の浸入挙動と劣化解析, 全国上下水道エポキシ工事協会
- ・川東達夫、鈴木宏伸、宮川豊章、藤井學: 酸素活性汚泥処理法を用いた下水施設におけるコンクリートの腐食メカニズム. 土木学会論文集, No.599/V-40, 23-39, 1998.8
- ・日本下水道事業団 JS研究報告会: 防食被覆層有機酸劣化及びコンクリート炭酸劣化に関する調査, R4.2
- ・坂井悦郎, 久田真, 杉山隆文: セメント・コンクリートからの微量成分の溶出と水和物の溶脱, コンクリート工学, Vol.41, No.12, pp.18-22, 2003.12
- ・農研機構 HP、農村工学研究所2010年の成果情報: カルシウムが溶脱したセメントペースト硬化体の耐摩耗性の低下
- ・河合真樹, 伊藤朋紀, 堅田茂昌: 内面防食塗装を省略したPCタンクの側壁内面のコンクリートかぶり厚の検討, 平成25年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp.402-403
- ・藤澤健一, 井上敬介: 表面含浸工法と無機系表面被覆工法のハイブリッド工法による水道施設での施工後の追跡調査による耐用年数の推定, 令和3年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp.298-299

ご清聴ありがとうございました