

歴史的建築物の 保存・修復

～ 鉄筋コンクリート造の現状と課題 ～



芝浦工業大学 建築学部
濱崎 仁

はじめに

世界遺産
(鉄筋コンクリート系)
の現況

鉄筋コンクリート造の世界遺産



ル・コルビュジェの作品群(2016)



軍艦島(2015)(明治日本の産業革命遺産)



シドニー・オペラハウス(2007)



ル・アールブルの再建都市(2005)

上野・西洋美術館 (Le Corbusier・1959)



パリ大学国際学生寮 (Le Corbusier)



スイス館 (1932)



ブラジル館 (1959)

パリ大学国際学生寮 (Le Corbusier)



Le Havre (Rebuild by Auguste Perret)

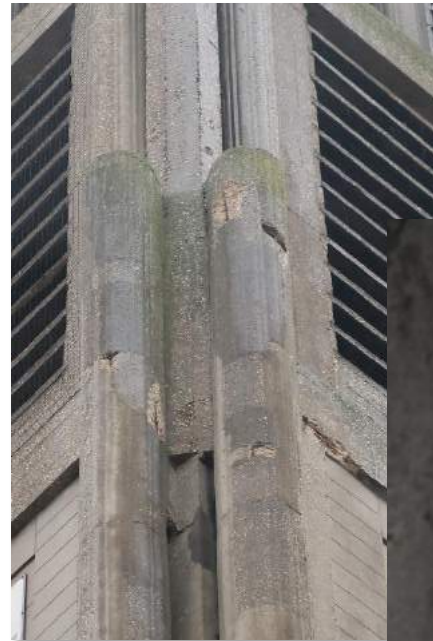


Saint-Joseph教会
(1956)



Le Havre市庁舎
(1958)

Auguste Perret (1874-1954)



Notre-Dame du Raincy (1923)

Auguste Perretの代表作

講演内容

鉄筋コンクリート(RC)系の歴史的建造物の現況

- 世界遺産に登録されている建築物
- 軍艦島の概要と建造物群の状況

RC造は長持ちか？

- RC造の寿命を決めるもの

軍艦島はどのようなのか？

- 劣化環境・劣化因子・劣化状況

どうやって残すのか？

- 歴史的建造物の保存・修復の難しさ
- 補修工法の考え方



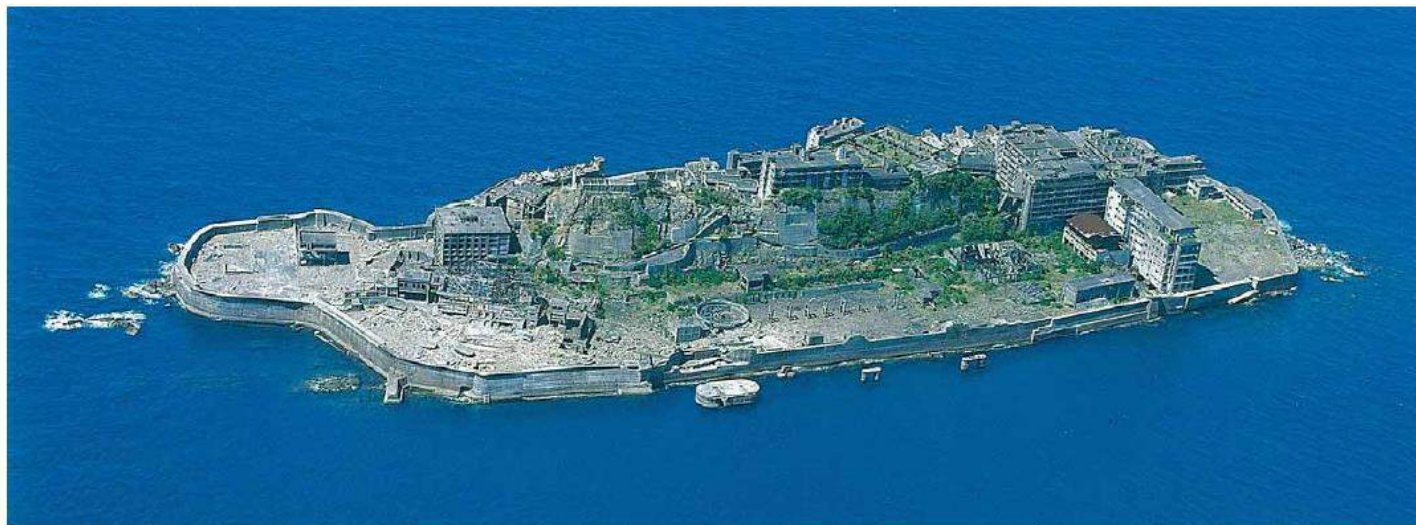
軍艦島の概要と 構造物群の状況

軍艦島の外観



北西側の航空写真

北西側軍艦島 (H16.10月撮影) 旧高島町資料より



南東側の航空写真

南東側軍艦島 (H16.10月撮影) 旧高島町資料より

軍艦島の状況(上空から)



建物の状況



30号棟外観(2018年)



30号棟外観(2021年)



地獄段(16号棟横・S40頃)




地獄段(現在)

建物の状況 _ 日給社宅内部



軍艦島16~19号棟 (日給社宅) 内部状況



鉄筋コンクリート造は
長持ちか？

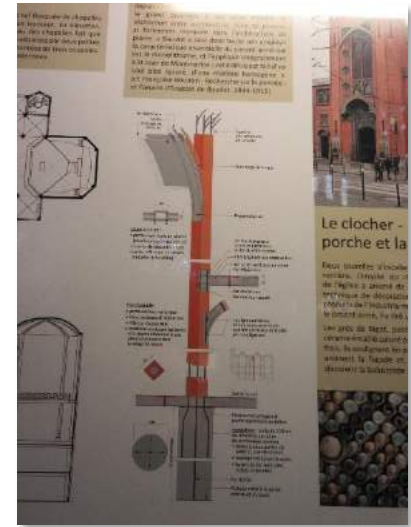
RC造の寿命を決めるもの

RC造は本当に長持ちか？

現存する日本最古のRC造建物は、軍艦島の30号棟(1916年)
現存する世界最古のRC造建物は、パリのサン・ジャン・ド・モンマルトル教会(1898年)

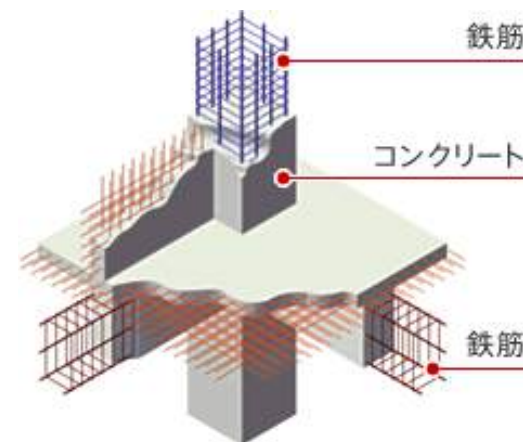
RC造建物の歴史はまだまだ100年ちょっと。

RC造は本当に長持ちなのか…？



RC造の寿命を決めるもの

鉄筋コンクリート造は、コンクリートが圧縮の力を負担し、鉄筋が曲げや引張りの力を負担することで成立



①コンクリート自体の強度の低下や崩壊

→コンクリートは、通常は100年後でも強度は伸び続けるが、何らかの作用で強度が低下する。

②コンクリート中の鉄筋の腐食(錆び)

→鉄は錆びると膨張して周辺コンクリートを破壊し、鉄筋コンクリートとしての性能がなくなる。

劣化の原因(劣化因子)

- 凍結融解作用(凍害)
- 骨材のアルカリシリカ反応
- 化学的侵食

① コンクリートの強度低下、組織の崩壊

- コンクリートの中酸化
- コンクリート中の塩分

② コンクリート中の鉄筋腐食



軍艦島ではこちらが問題！

コンクリートの硬化と中性化

セメントは石灰石 (CaCO_3 ・炭酸カルシウム) が主成分



セメントの主成分(約2/3)は CaO (酸化カルシウム)

セメントと水が反応して Ca(OH)_2 (水酸化カルシウム) が生成され、コンクリートが固まる。 Ca(OH)_2 は、強アルカリ性 (pH12~13)。



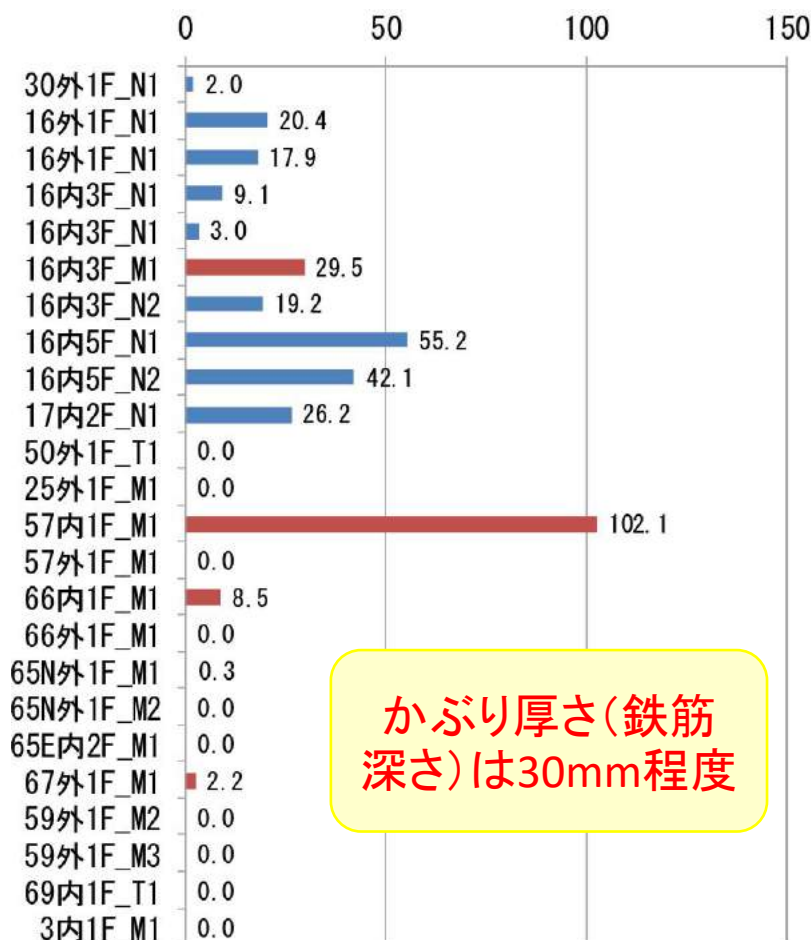
Ca(OH)_2 は空気中の二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムができる。このとき、コンクリートが アルカリ性から中性 (pH8~9程度) に変わる。



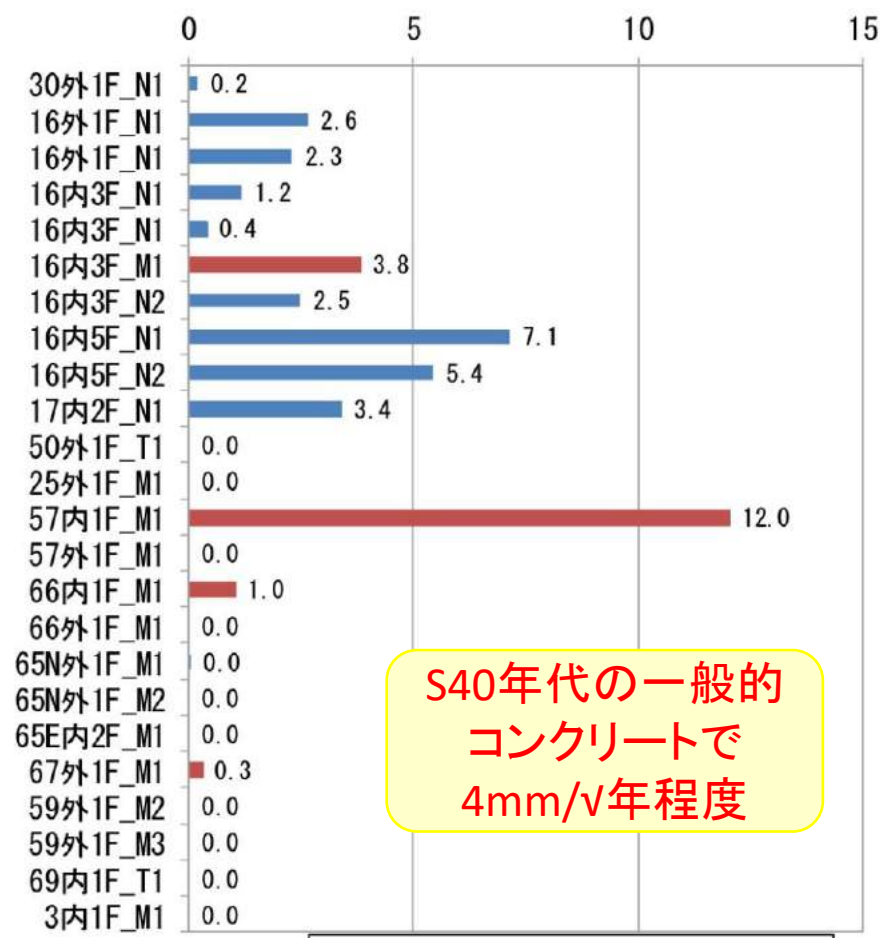
※ここでは、C-S-H等の他の水和生成物は省略

アルカリ環境下では鉄は錆びないが、
中性環境では鉄は錆びやすくなる

中性化深さの調査結果



かぶり厚さ(鉄筋
深さ)は30mm程度



S40年代の一般的
コンクリートで
4mm/v年程度

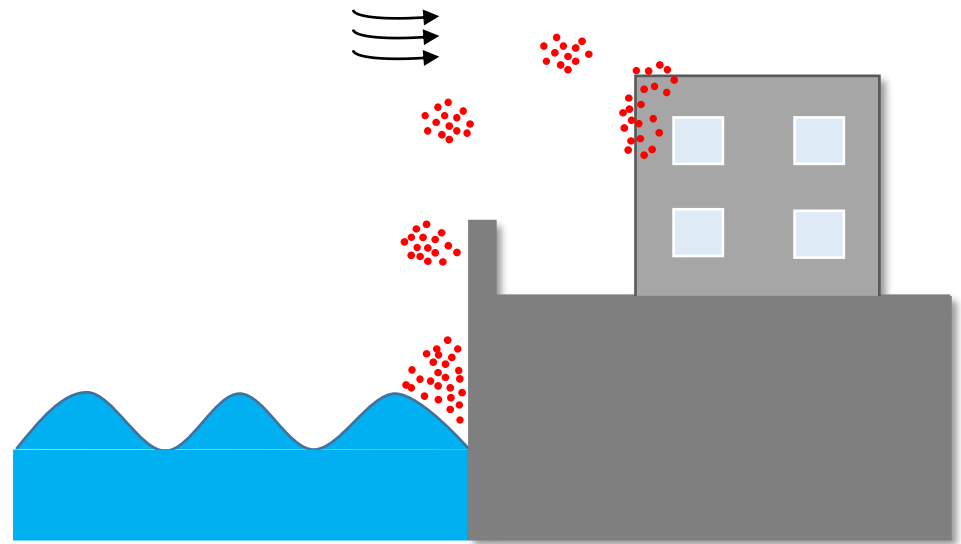
中性化深さ(mm)

中性化速度係数(mm/v年)

■ 打放し ■ モルタル仕上げ ■ タイル・テラゾー

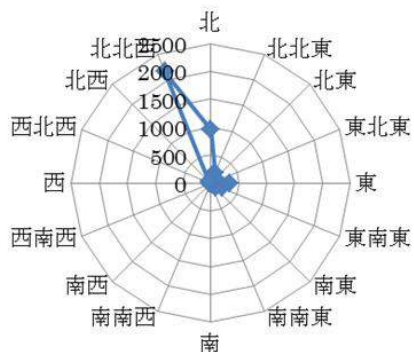
コンクリート中の塩分

アルカリ環境では鉄は錆びないが、**塩分が入ると別！**
一般にコンクリート1m³に1.2～2kg程度の塩分(Clイオン)
があると、中性化をしていなくても鉄筋は錆びる。
では、塩分はどこから？



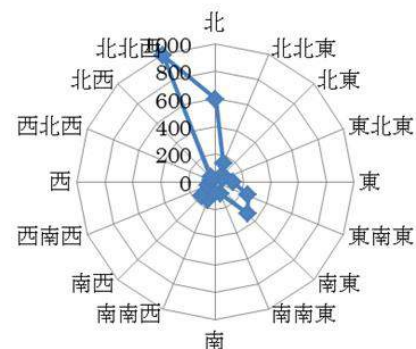
風況

2012年2月 各方位積算風量
($\times 3600(m)$)



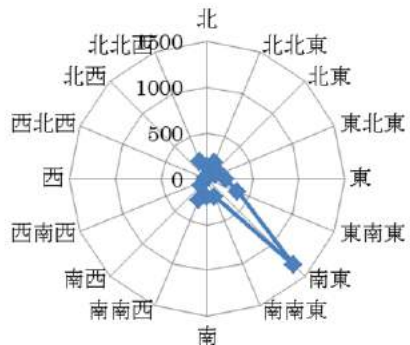
冬

2012年5月 各方位積算風量
($\times 3600(m)$)



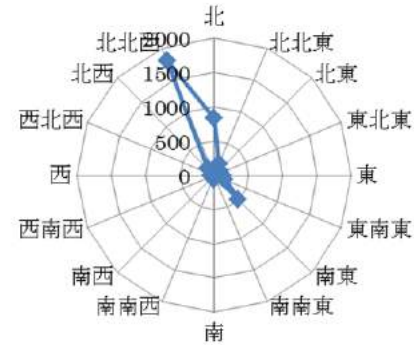
春

2012年8月 各方位積算風量
($\times 3600(m)$)



夏

2012年11月 各方位積算風量
($\times 3600(m)$)



秋

軍艦島における季節ごとの風況

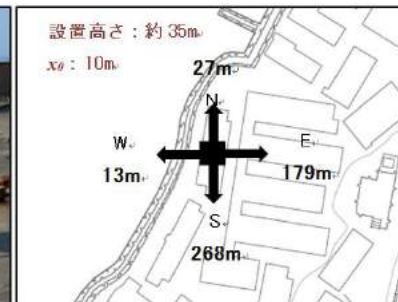
飛来塩分



飛来塩分捕集器

海岸までの距離

51号棟の1階付近



飛来塩分捕集器

海岸までの距離

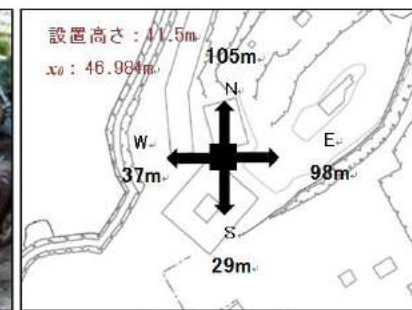
51号棟の屋上



飛来塩分捕集器

海岸までの距離

端島病院(69号棟)付近



飛来塩分捕集器

海岸までの距離

30号棟付近



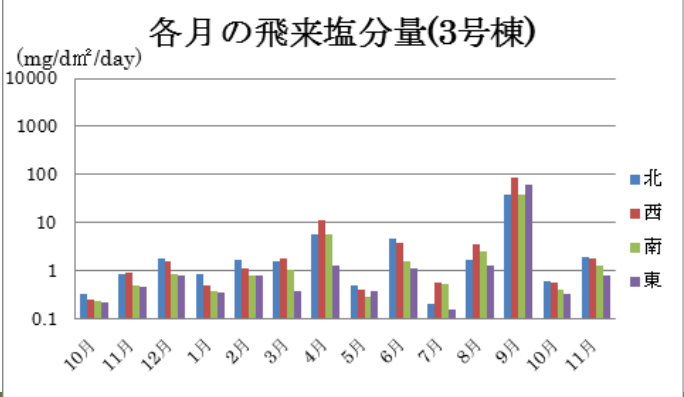
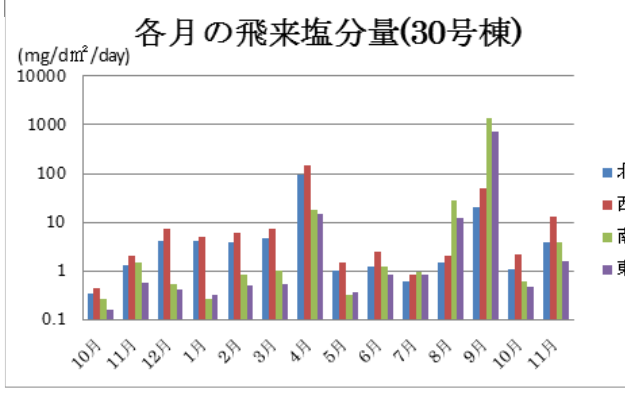
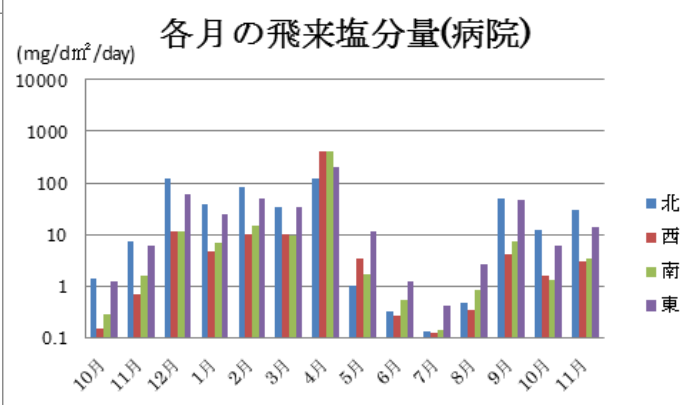
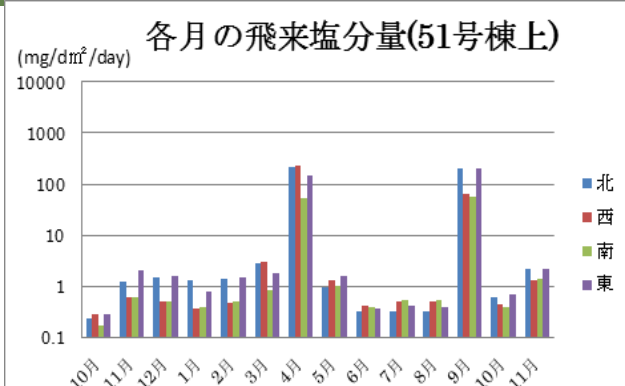
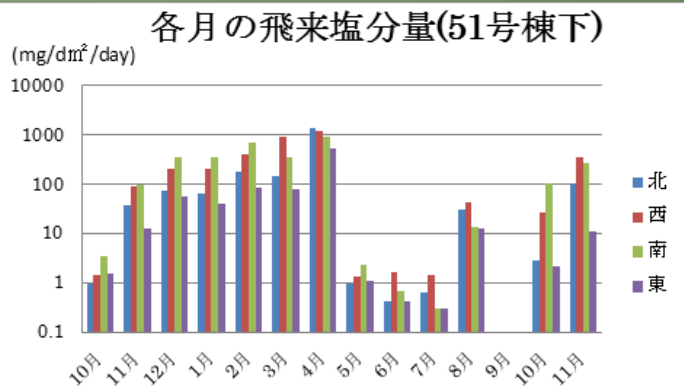
飛来塩分捕集器

海岸までの距離

3号棟の屋上

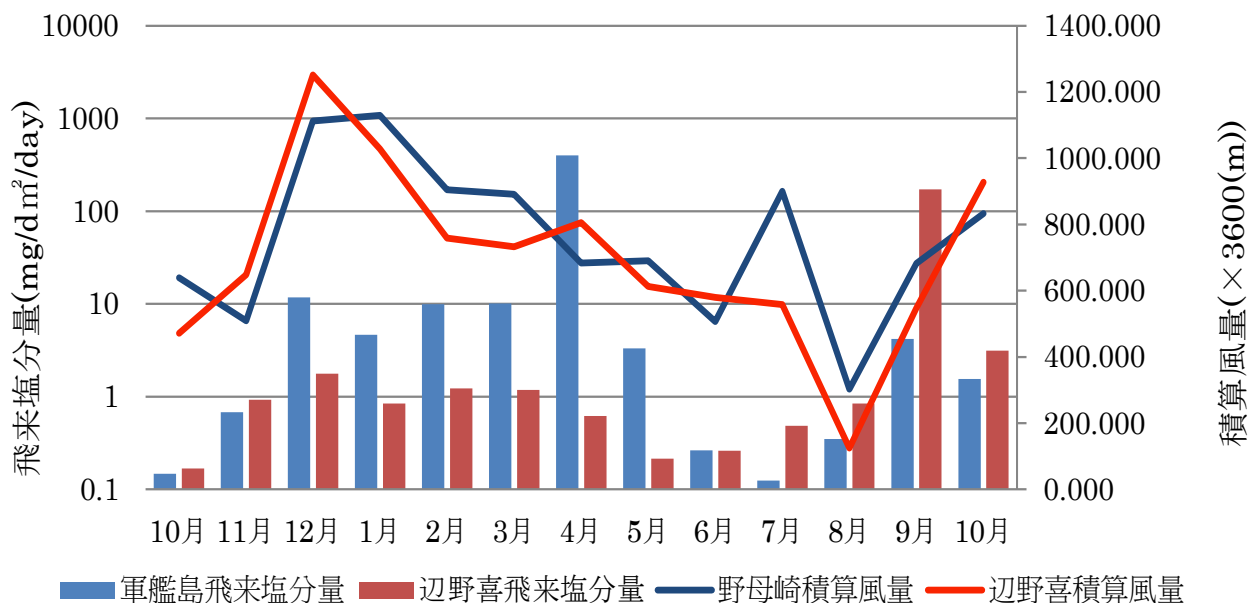


飛来塩分量



各地点での月毎の飛来塩分量

飛来塩分量の比較

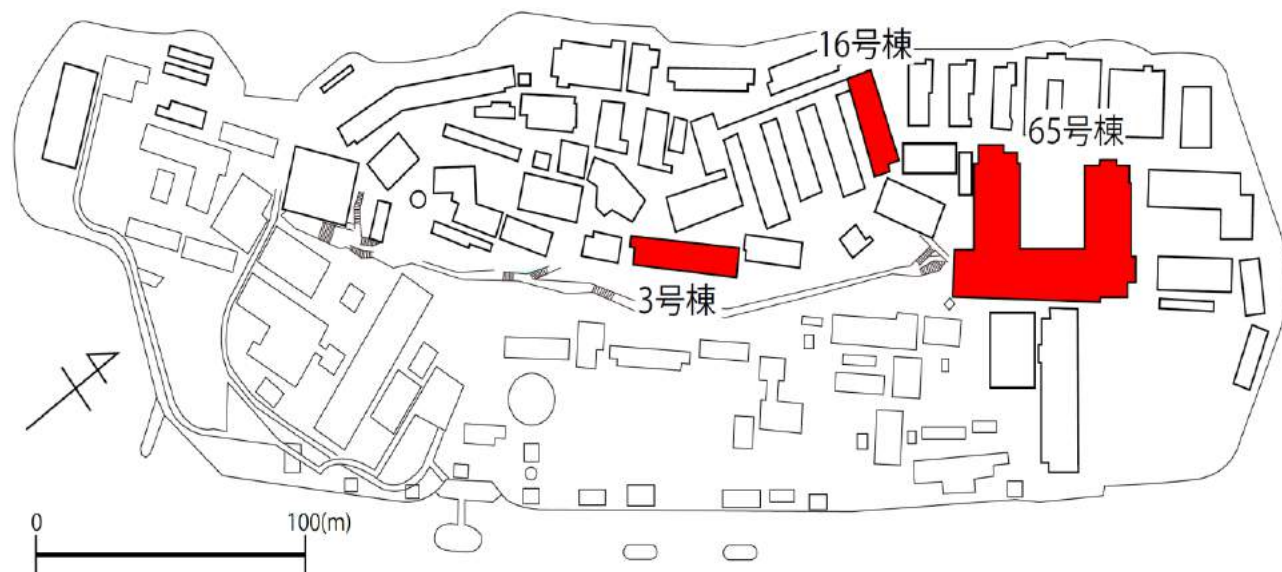


■ 軍艦島飛来塩分量 ■ 辺野喜飛来塩分量 — 野母崎積算風量 — 辺野喜積算風量
端島病院と辺野喜(沖縄)の飛来塩分量比較



軍艦島(左)と沖縄県辺野喜(右)の海岸の状況

塩化物イオン量の調査



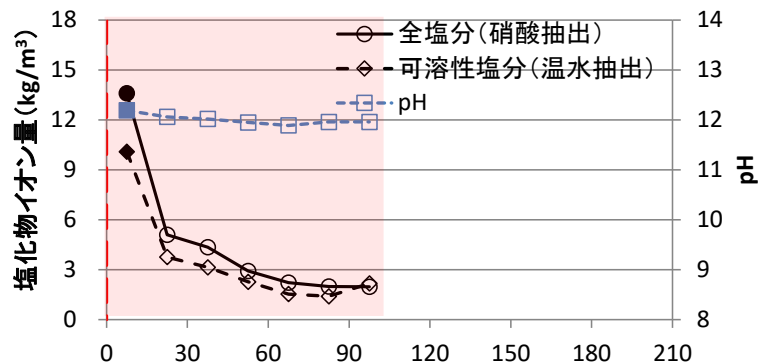
2017年時点で保存が検討されている住棟

- 3号棟 (1959年) ✓ 全塩化物イオン量
- 16号棟 (1918年) ✓ 可溶性塩化物イオン量
- 65号棟 (1945～1958年) ✓ 中性化深さ
- ✓ pH

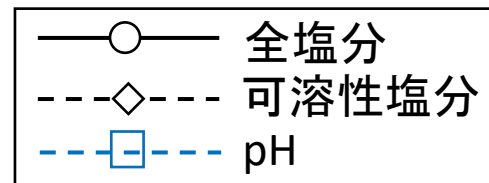
塩化物イオン量の調査結果

3号棟

屋外
モルタル



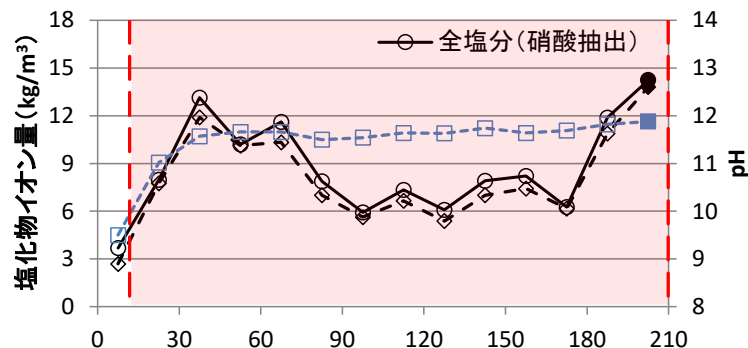
屋内
折り取り



各記号の中実の記号はモルタルを表す

16号棟

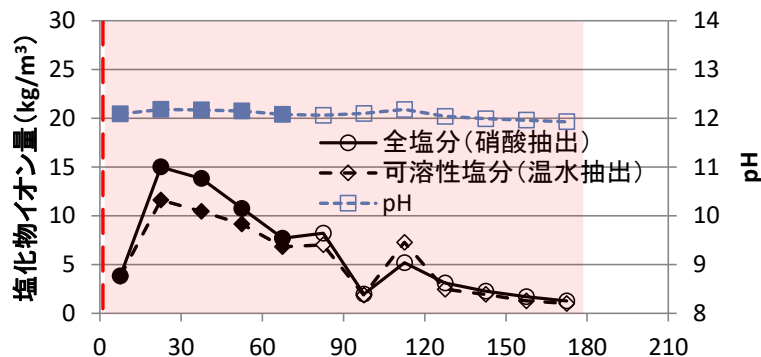
屋外
打放し



屋内
レンガ

65号棟

屋外
モルタル



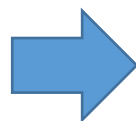
屋内
折り取り

屋外表面からの深さ(mm)

鉄筋腐食の進行



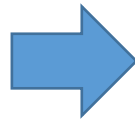
ひび割れの発生・さび汁



コンクリートの剥落・鉄筋の露出



腐食の進行・断面積の減少



鉄筋の切断・消滅

軍艦島での鉄筋腐食の特徴



左上：軍艦島30号棟内部
左下：軍艦島16号棟内部
右上：某集合住宅外壁

腐食生成物と錆びの成長メカニズム

コンクリート中で生じる主な腐食生成物:

- Fe_3O_4 (Magnetite)

アルカリ環境下で特に発生する黒色の腐食生成物。酸素欠乏環境下で生成しやすく、保護被膜としても働く。

- $\alpha\text{-FeOOH}$ (Goethite)

$\text{Fe}(\text{OH})_2$ の酸化による黄色の腐食生成物。アルカリ環境下において他の腐食生成物の溶解によって生じる。比較的安定なさび。

- $\beta\text{-FeOOH}$ (Akaganeite)

中性環境下かつ塩化物イオンが存在する環境下でのみ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ の加水分解により生じる淡褐色の腐食生成物。比較的不安定なさび。

- $\gamma\text{-FeOOH}$ (Lepidocrocite)

$\text{Fe}(\text{OH})_2$ が酸化することで生成する橙色の腐食生成物。塩化物が多い場合に生成量が増える。比較的不安定なさび。

中性化環境下での腐食の進行^{CO₂}

① コンクリートに二酸化炭素が侵入

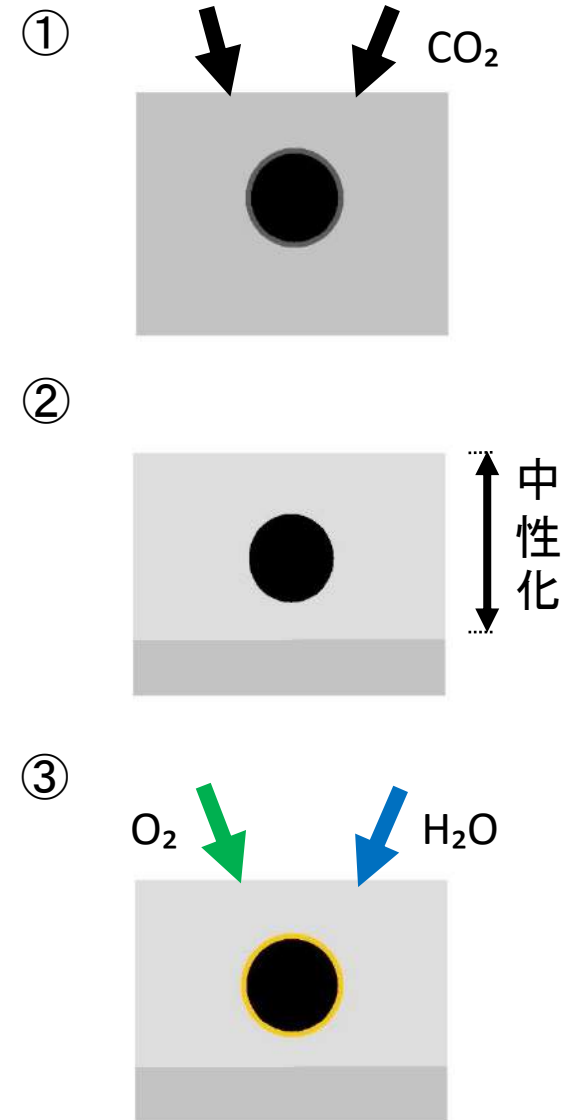
➡ アルカリ性のコンクリートが中性に

② 中性化により鉄筋の不動態皮膜が破壊

➡ 鉄筋が腐食しやすい状態に

③ 酸素と水の侵入により腐食

➡ **時間をかけて**緻密な錆に



中性化環境下では α -FeOOH(Goethite)と呼ばれる黄色の腐食生成物が主に析出する

塩害環境下における腐食の進行

① コンクリートに塩分が侵入

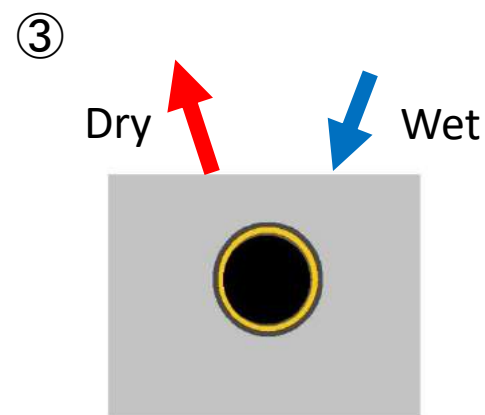
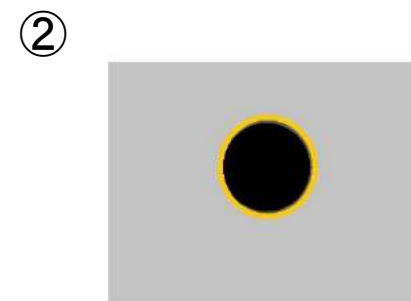
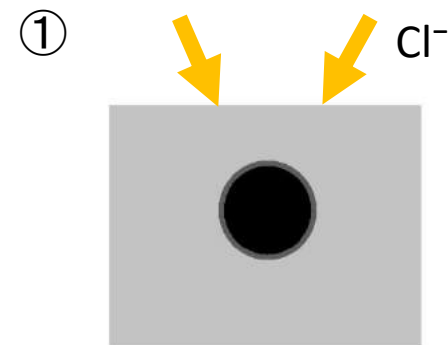
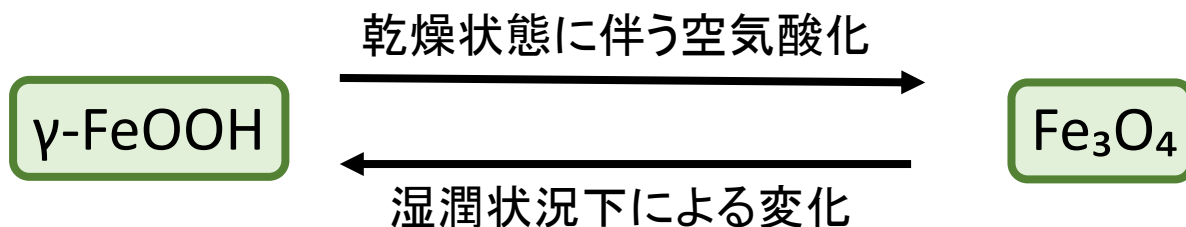
➡ 不動態皮膜が破壊される

② $\gamma\text{-FeOOH}$ (Lepidocrocite) や Fe_3O_4 (Magnetite) が発生

➡ $\gamma\text{-FeOOH}$ はアルカリ環境かつ塩害環境下で発生しやすい

➡ Fe_3O_4 はアルカリ環境かつ湿潤環境下で発生しやすい

③ 上記の2種のさびが乾湿に伴う酸化還元反応により層状に成長



補修方法の検討

- 歴史的建造物の補修の難しさ
- 屋外暴露試験の実施
- 補修工法の考え方

歴史的建造物の保存・修復の原則

ICOMOSの国際憲章(ヴェニス憲章)

歴史的建造物の保存・修復には、Authenticity (真正な価値)の確保が必要

保存におけるAuthenticity確保の考え方:

- ① 建設時と同じ材料・工法を用いること
- ② 形状や色などを変えないこと
- ③ 全体と調和させつつ、修復部分が明確に区別できること・取り外せること

これらの条件を考慮し、軍艦島のRC
建造物群に適用可能な補修方法を検討

木造の場合は？

木造では、木材をバラして痛んだ部分を矧ぎ木や根接ぎで補修したり、新材に交換して補修・復元。

ただし、木材は、同じ樹種・産地の木材を使うことが原則。



法隆寺(600年頃再建)
矧ぎ木
世界最古の木造建築物



根継ぎ

RC造の場合はどうするか？

日本建築学会の調査(2011~2012)の一環として、
軍艦島のRC構造物群の保存・補修方法を検討

- 厳しい塩害環境と内在塩分
- 経年による中性化の進行
- 歴史的構造物であるが故の制約



屋外暴露試験の実施

基材モルタル

W/C=70%・S/C=4.5・細骨材の10%を鉄粉で置換

Cl= 1.2kg/m³(内在塩分・飛来塩分が比較的少ない部位を想定)

10kg/m³(内在塩分・飛来塩分が比較的多い部位を想定)

基材モルタルの養生

材齢7日	標準養生
～材齢10日	50℃気中乾燥
～材齢31日	促進中性化(中性化深さ約19mm)
～材齢42日	補修施工
材齢56日	暴露試験開始

基材モルタルの形状・寸法

W×D×H=100×100×100mm

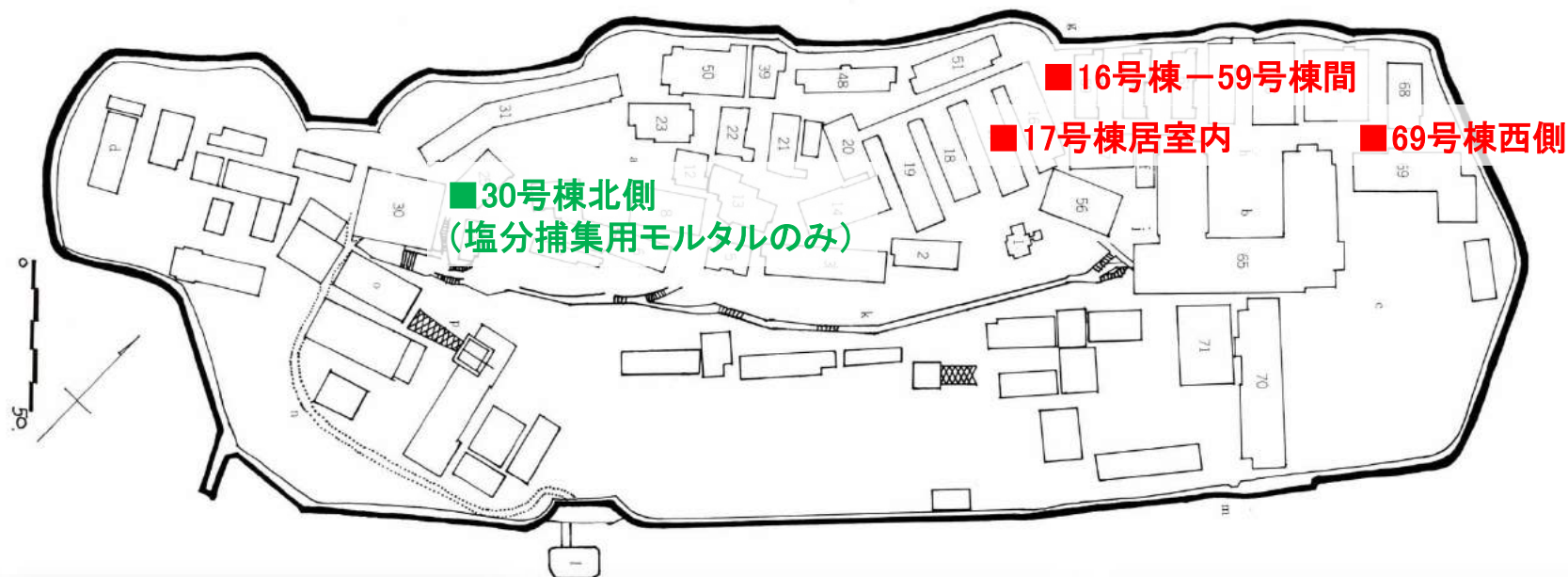
側面2面に補修を施し、残り4面を厚膜表面被覆材でシール



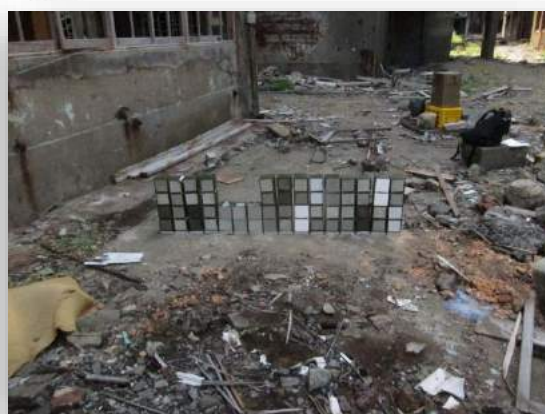
補修仕様の検討

分類	記号	仕様
補修なし	N	補修無し
LiNO ₂ 処理	LNP1	LiNO ₂ 表面塗布(400g/m ²)
	LNP2-1.2	LiNO ₂ 表面塗布224g/m ² (Cl-1.2kg/m ³ 用・モル比1.0)
	LNP2-10	LiNO ₂ 表面塗布1120g/m ² (Cl-10kg/m ³ 用・モル比0.6)
	LNIJ	LiNO ₂ 高圧注入処理(注入量:Cl-1.2kg/m ³ 用5cc/体、Cl-10kg/m ³ 用30cc/体)
	LNP+PCP	Li ₂ O ₃ Si系固化材表面塗布(200g/m ²)後LiNO ₂ 表面塗布(約280g/m ²)およびLiNO ₂ 混入ポリマーセメントペースト2mm塗付け
浸透性 吸水防止材	BP	シラン系浸透性吸水防止材塗布(600g/m ²)
LiNO ₂ +浸透性 吸水防止材	LNP1+BP	LiNO ₂ 表面塗布(400g/m ²)後、浸透性吸水防止材塗布(600g/m ²)
	LNIJ+BP	LiNO ₂ 高圧注入処理(上記参照)後、浸透性吸水防止材塗布(600g/m ²)
(比較用) 表面被覆工法	MC	アクリルゴム系塗膜防水材(JIS A 6021)
	WPE	防水形複層塗材E(JIS A 6909)
	CE	防水形複層塗材CE(JIS A 6909)

暴露試験の実施



16号棟—59号棟間
(飛来塩分の多い環境)



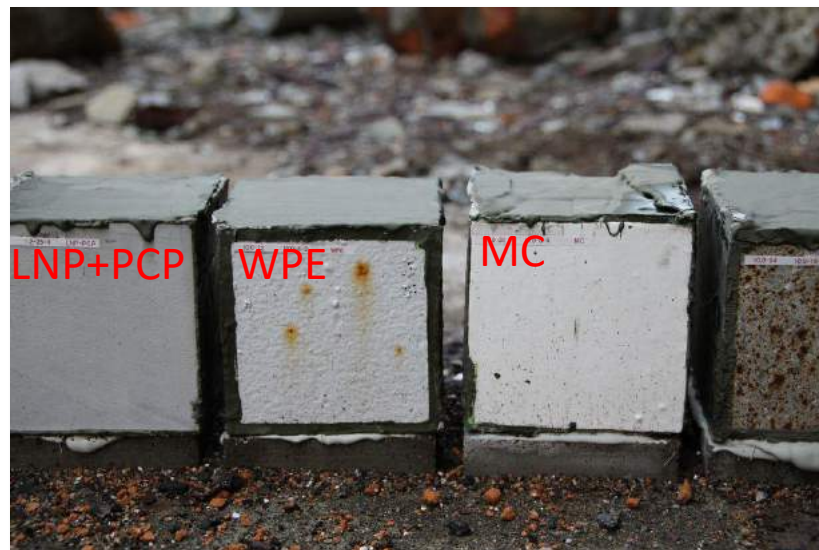
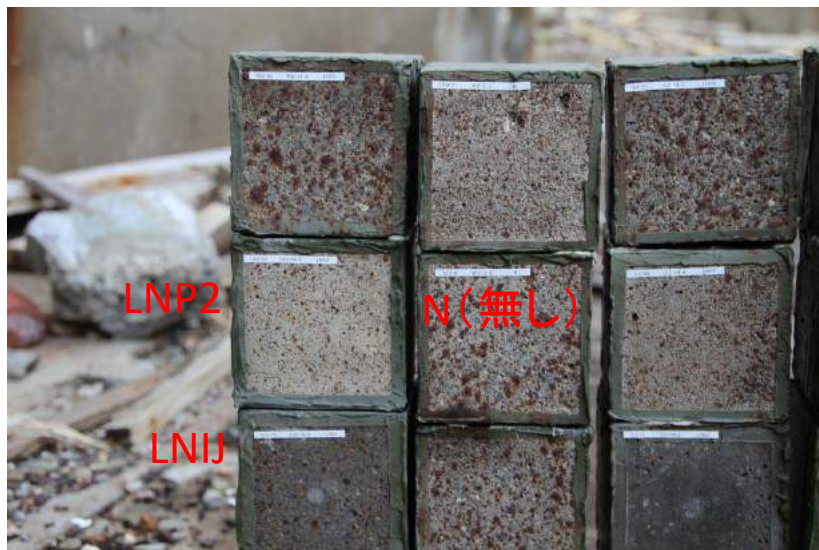
69号棟(端島病院)西側
(飛来塩分が中程度の環境)



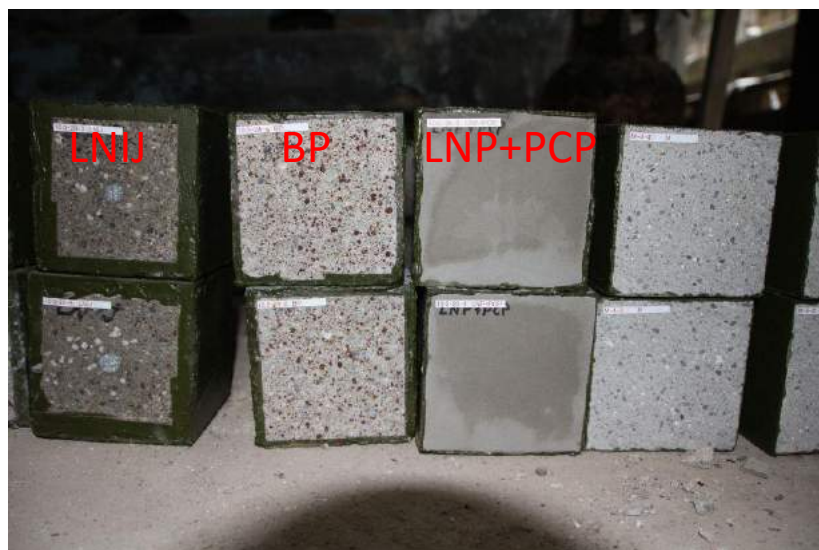
17号棟居室内
(飛来塩分がない環境)

試験体の状況の例 (約6年経過)


69
号棟
屋外



17
号棟
屋内



腐食状況の評価

グレード	状況	表面	断面
0	全くさびていない状態		
1	一部の鉄粉がさびている状態		
2	ほぼ全ての鉄粉がさびている状態		
3	一部の鉄粉が腐食・膨張し、さび汁が見られる		
4	ほぼ全ての鉄粉が腐食膨張し、さび汁が見られる		

腐食状況 $_{-1.2\text{kg}/\text{m}^3}$ 試験体

暴露場所	補修工法	海側			山側		
		表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
59号棟 屋外	N	4.0	3.3	1.3	1.8	4.0	3.8
	LNP1	3.3	3.8	1.8	1.5	3.8	4.0
	LNP2	3.5	3.8	2.3	1.8	4.0	3.5
	LNP1+BP	3.0	1.8	0.3	0.3	1.8	3.0
	LNIJ	3.0	1.8	0.3	0.3	0.5	1.0
	LNIJ+BP	3.0	1.5	0.5	0.0	2.0	2.0
	BP	2.0	1.5	0.3	0.0	1.5	4.0
	LNP+PCP	0.0	0.5	0.3	0.3	0.3	0.0
69号棟 屋外	N	3.3	3.0	1.0	1.5	3.0	3.0
	LNP1	4.0	3.8	1.8	1.8	3.8	4.0
	LNP2	3.5	4.0	1.3	1.5	3.3	3.0
	LNIJ	1.0	0.8	0.3	0.3	0.8	2.3
17号棟 屋内	N	1.3	1.5	0.5	0.5	1.5	1.3
	LNP1	1.0	0.8	0.3	0.3	0.8	1.3
	LNP1+BP	1.0	0.8	0.3	0.3	1.0	1.0
	LNIJ	0.0	0.8	0.0	0.3	0.5	0.0
	BP	2.0	1.5	0.3	0.3	1.5	1.0
	LNP+PCP	0.0	0.3	0.3	0.0	0.3	0.0

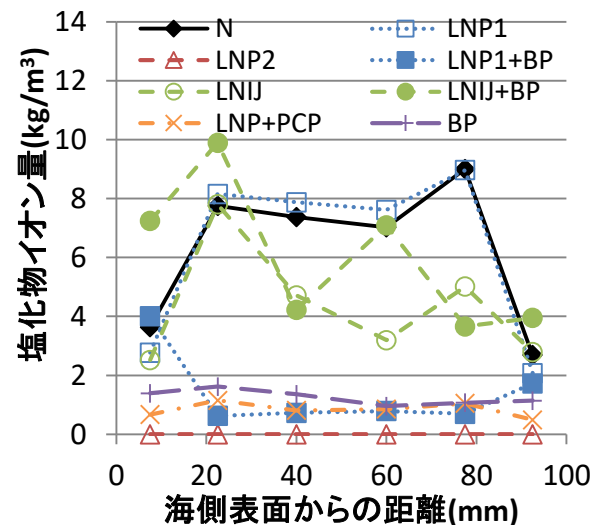


腐食状況 $_10\text{kg}/\text{m}^3$ 試験体

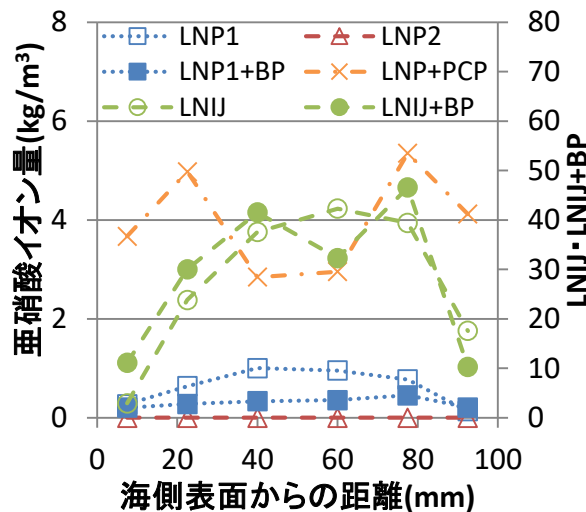
暴露場所	補修工法	海側			山側		
		表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
59号棟 屋外	N	3.8	3.3	2.0	1.8	3.8	3.8
	LNP1	4.0	3.0	0.8	1.0	4.0	4.0
	LNP2	4.0	3.3	1.0	1.0	3.5	3.8
	LNP1+BP	2.8	2.3	0.5	0.5	3.0	3.0
	LNIJ	3.8	2.5	0.3	0.8	2.8	3.8
	LNIJ+BP	3.8	2.0	0.8	1.0	1.8	2.3
	BP	3.8	2.3	1.0	1.8	2.5	3.8
	LNP+PCP	0.0	1.8	0.8	1.0	2.0	0.0
69号棟 屋外	N	2.8	3.0	2.3	2.3	3.3	3.3
	LNP1	3.3	3.3	1.5	1.5	2.5	4.0
	LNP2	4.0	2.5	0.8	0.8	3.3	3.8
	LNIJ	1.5	1.8	0.5	0.3	1.8	3.0
17号棟 屋内	N	2.3	2.5	2.5	2.3	2.8	2.3
	LNP1	2.0	2.5	1.8	2.0	2.3	2.0
	LNP1+BP	2.3	2.5	0.5	0.5	2.3	2.0
	LNIJ	0.8	1.5	0.5	0.5	2.0	1.0
	BP	2.5	2.8	1.0	0.5	2.8	1.8
	LNP+PCP	0.0	1.8	0.8	1.0	1.8	0.0



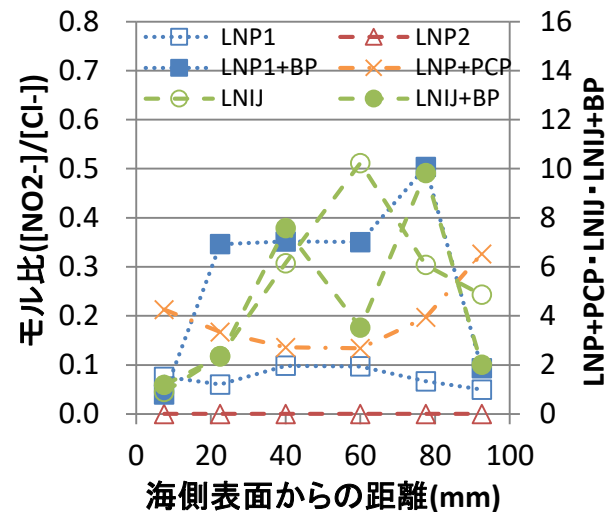
塩化物および亜硝酸イオンの分布



塩化物イオン分布
(温水抽出塩分)



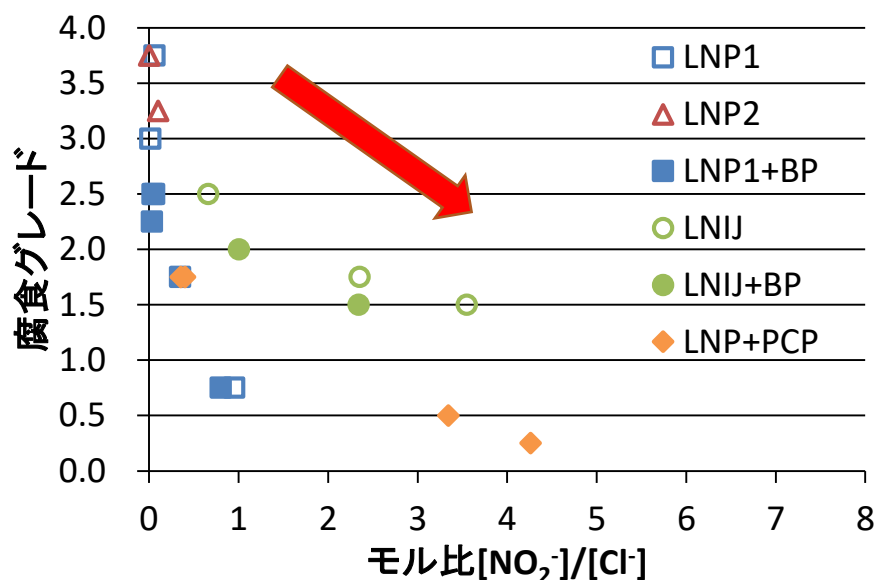
亜硝酸イオン分布



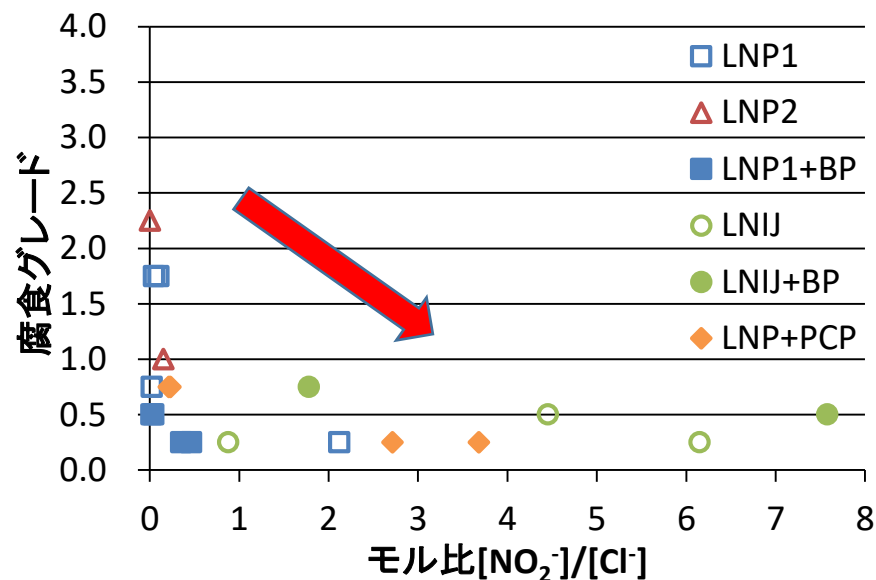
モル比分布
([NO₂⁻]/[Cl⁻])

16-59号棟屋外・Cl⁻=1.2kg/m³試験体

亜硝酸リチウムの必要量の検討



中性化部



未中性化部

モル比([NO₂⁻]/[Cl⁻])と腐食グレードの関係



補修工法の考え方（進展期まで）

場 所	内在塩分	見え掛かり	見え掛かりなし
屋内 (飛来塩分小)	小	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塗布含浸工法(ただし塗布量多め) ・ 注入工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塗布含浸(ただし塗布量多め) ・ ペースト塗布
	大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 注入工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ペースト塗布
屋外 (飛来塩分大)	小	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塗布含浸(塗布量多め) + 浸透性吸水防止剤 ・ 圧入工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 同左 + ペースト塗布
	大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧入工法(含浸量多め) + 浸透性吸水防止剤 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 同左 + ペースト塗布

亜硝酸リチウムの塗布量、注入量等は塩分量に応じて調整
塗布含浸については、より含浸出来る方法を要検討

鉄筋腐食が進行した状態(加速期以降)に対する補修方法

すでに劣化が進行した部材の補修・修復方法を検討するため、鉄筋腐食が進行した状態に対しての実験(屋外暴露試験)を実施中。見た目を変えずに、進行を止めることが求められる。

グレードⅠ	グレードⅡ	グレードⅢ
塩分量: $5\text{kg}/\text{m}^3$ 腐食促進なし	塩分量: $5\text{kg}/\text{m}^3 + \alpha$ 腐食ひび割れ発生	塩分量: $5\text{kg}/\text{m}^3 + \alpha$ かぶりコンクリート剥落
		

補修仕様

グレード	記号	補修の方針	補修仕様
I	1-1	高い防錆効果	LiNO ₂ 圧入＋けい酸塩系表面含浸材
	1-2	外観変化の抑制	LiNO ₂ 圧入
	1-3	施工の簡易性	LiNO ₂ 表面含浸
	N1	リファレンス	補修無し
II	2-1	高い防錆効果	LiNO ₂ 圧入＋けい酸塩系表面含浸材＋セメント系スラリーひび割れ注入
	2-2	外観変化の抑制	LiNO ₂ 先行注入＋セメント系スラリーひび割れ注入(表面未充填)
	2-3	施工の簡易性	LiNO ₂ 先行注入＋セメント系スラリーひび割れ注入
	N2	リファレンス	補修無し
III	3-1	高い防錆効果	LiNO ₂ 圧入＋けい酸塩系表面含浸材＋LiNO ₂ 入り塗料
	3-2	外観変化の抑制	鉄筋に直接LiNO ₂ を塗布
	3-3	施工の簡易性	鉄筋除錆後にLiNO ₂ 入りペーストで鉄筋を付着
	N3	リファレンス	補修無し








暴露試驗狀況



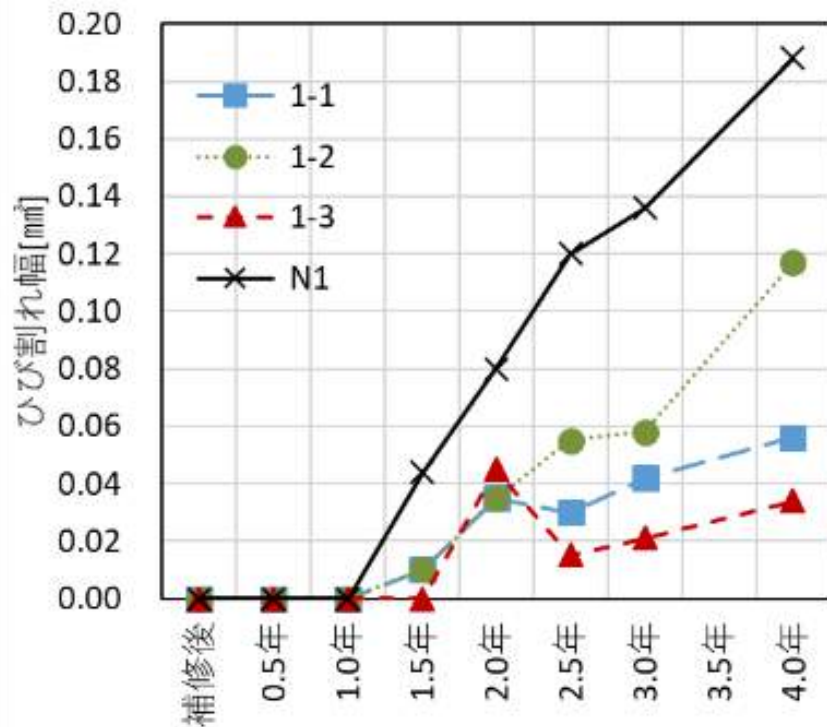
2016.10設置試驗體

2018.10設置試驗體

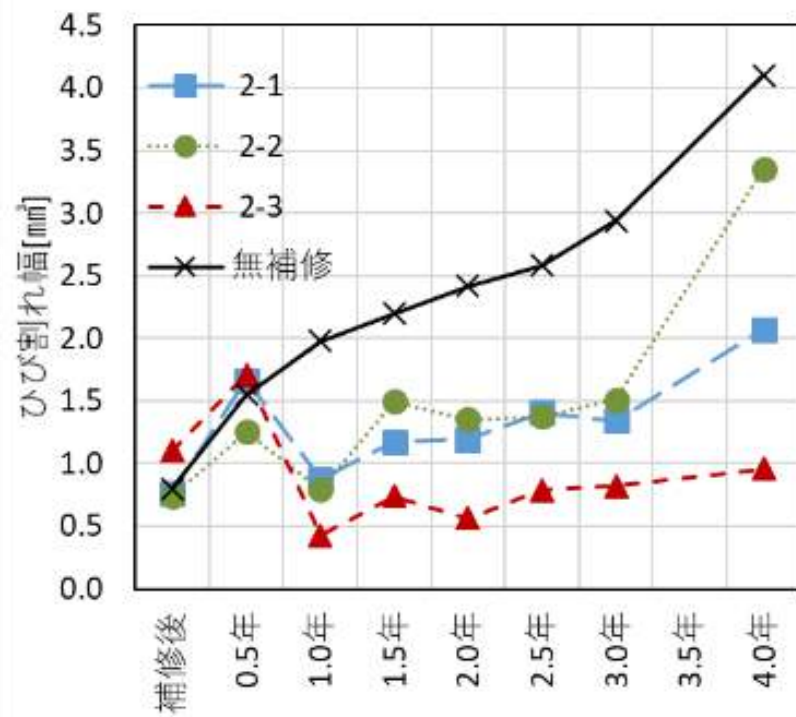
試験体の状況 _ 外観変化

グレードⅡ	補修無し	Ⅱ-1(腐食抑制)補修
補修前		
補修後	—	
1年後		
2年後		

ひび割れ幅の経時変化

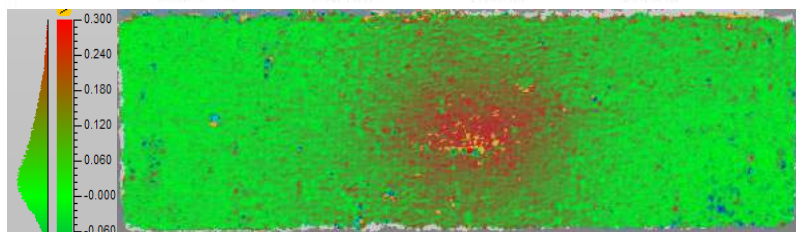
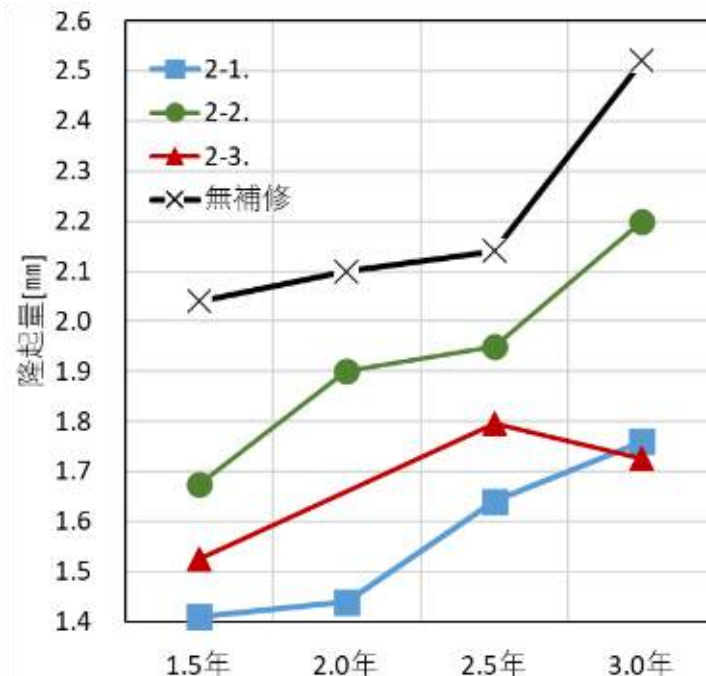
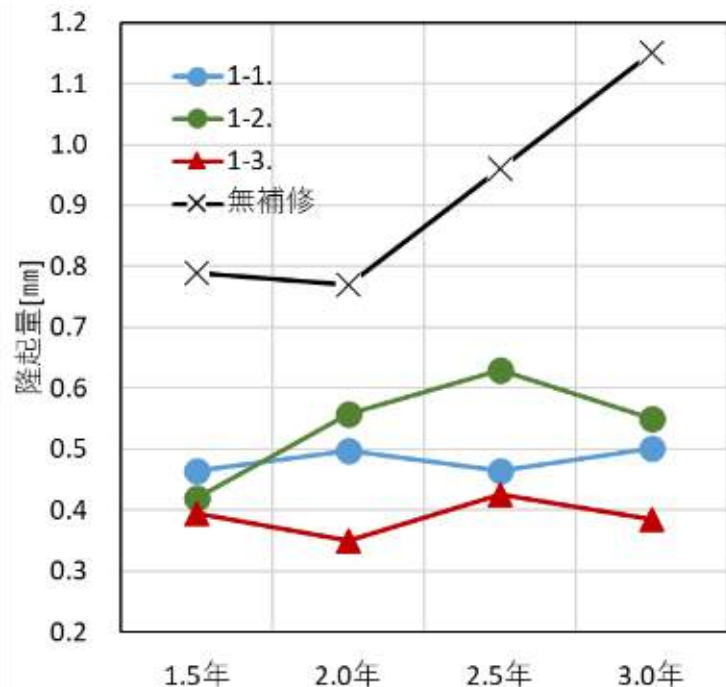


グレード I

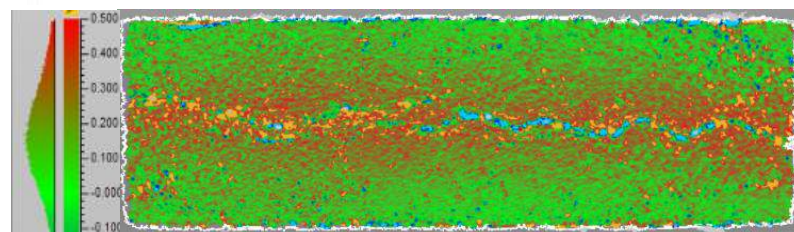


グレード II

表面隆起量の経時変化



グレード I



グレード II

3Dスキャナで鉄筋腐食による試験体の表面の隆起を計測

まとめ

軍艦島の建造物の現況と抱えている問題点

- ◆ 厳しい塩害環境（飛来塩分）
- ◆ 内在塩分（建設年代によって大量の塩分）
- ◆ 経年による中性化
↓
- ◆ 鉄筋腐食の進行 → 止まらない劣化
↓
- ◆ 部材性能（構造性能）に対する懸念 → 崩壊の危険

このような状況は、軍艦島だけの問題ではなく、
今後のRC系歴史的建造物の多くが抱える問題

歴史的建造物の保存・修復の難しさ

- ◆ オーセンティシティ
- ◆ 可逆性

RC系の歴史的建造物の補修・補強方法については、国内外を問わずコンセンサスが得られていない。

今後の技術開発が重要。

ご静聴ありがとうございました。