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 ～

芝浦工業大學
SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

芝浦工業大学　建築学部
濱崎　仁

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･コルビュジエの作品群(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）系の歴史的構造物の現況
- 世界遺産に登録されている建築物
- 軍艦島の概要と構造物群の状況

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

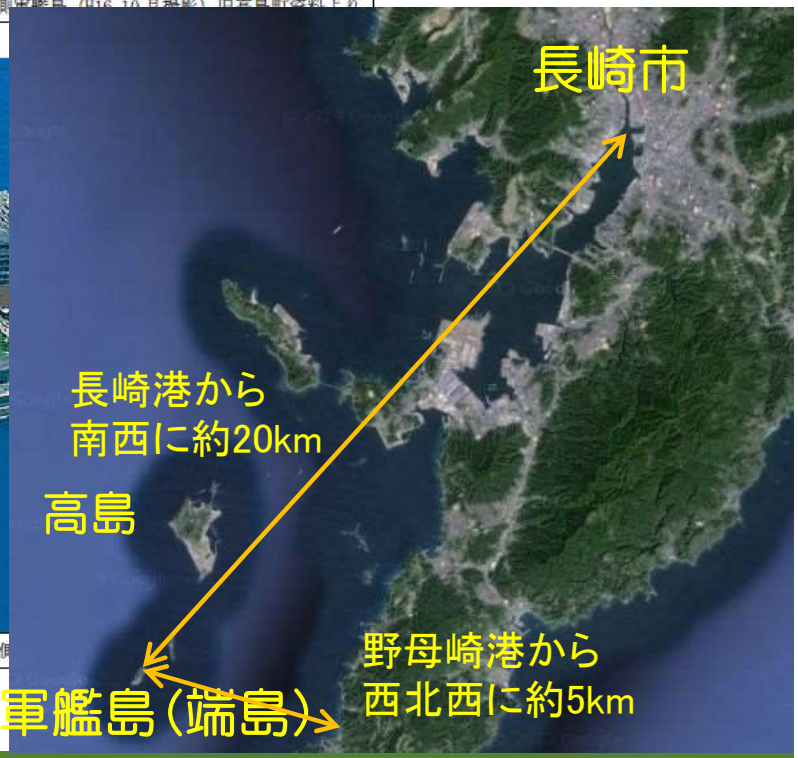
どうやって残すのか？
- 歴史的構造物の保存・修復の難しさ
- 補修工法の考え方

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

南東側の航空写真



軍艦島の状況（上空から）

軍艦島の状況（地上から）

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

鉄筋コンクリート造は長持ちか？

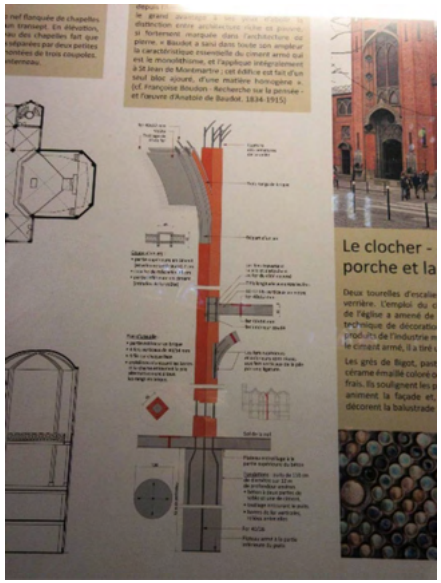
RC造の寿命を決めるもの

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）

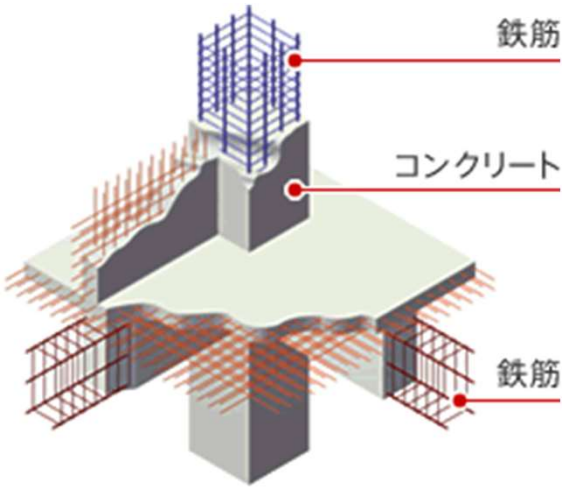
RC造建物の歴史はまだまだ100年ちょっと。

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、コンクリートが主に圧縮の力を負担し、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の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。

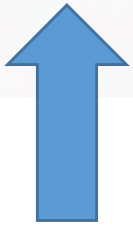
劣化の原因（劣化因子）

- 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

- コンクリートの中性化
- 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

$CaCO_3$（焼成）→ CaO ＋ CO_2↑

セメントの主成分（Nセメントの約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）。

$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$

$Ca(OH)_2$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。

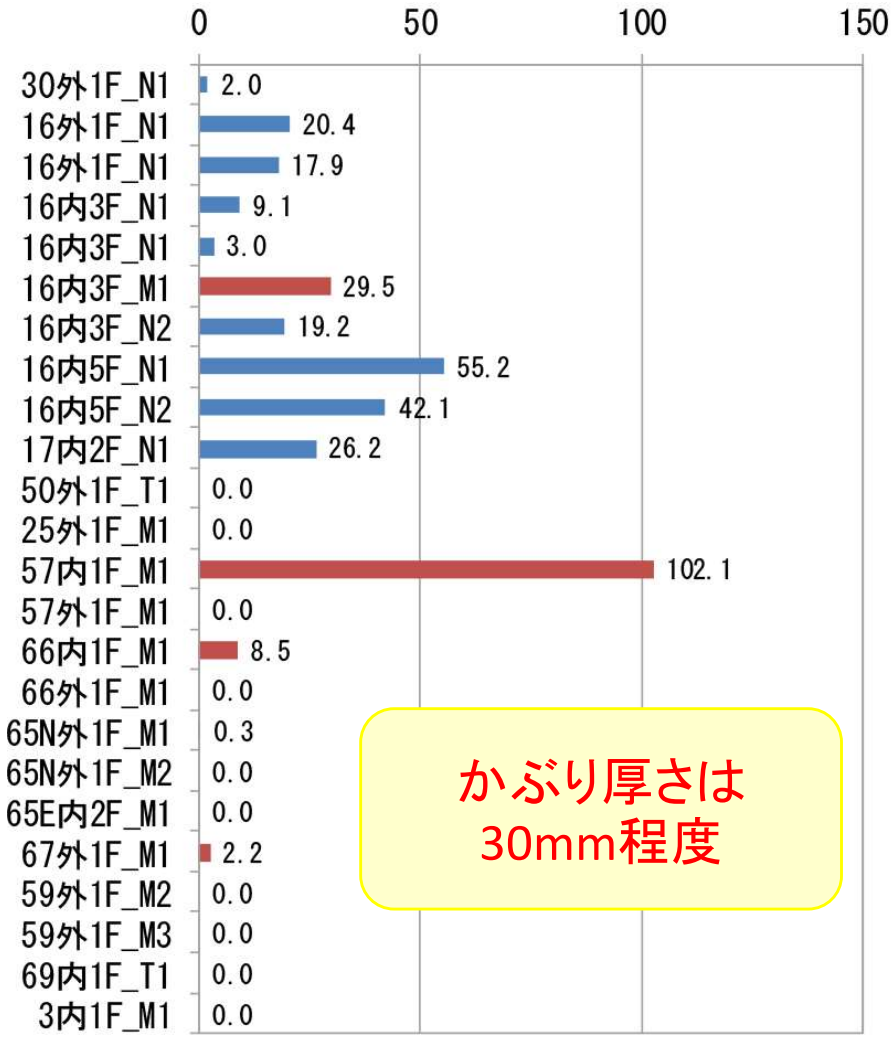
$Ca(OH)_2$（アルカリ性）＋ CO_2 → $CaCO_3$（中性）＋ H_2O

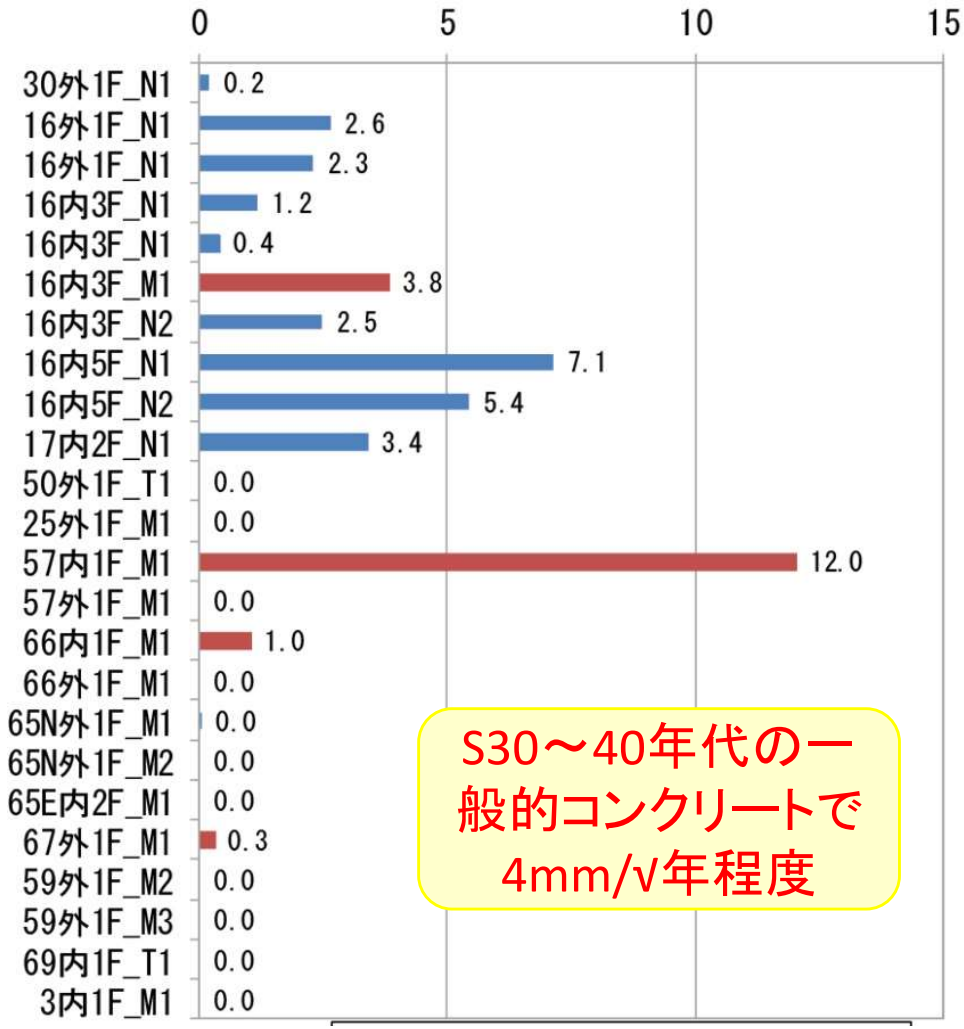
※ここでは、C-S-H等の他の水和生成物は省略

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





中性化深さ(mm)

中性化速度係数(mm/√年)

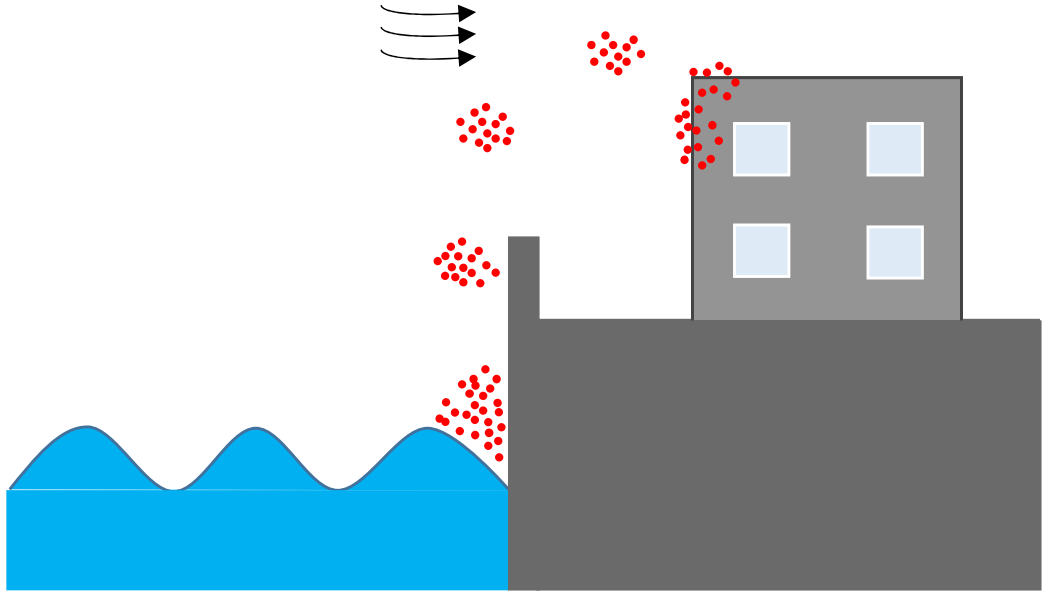
打放し　モルタル仕上げ　タイル・テラゾー

コンクリート中の塩分

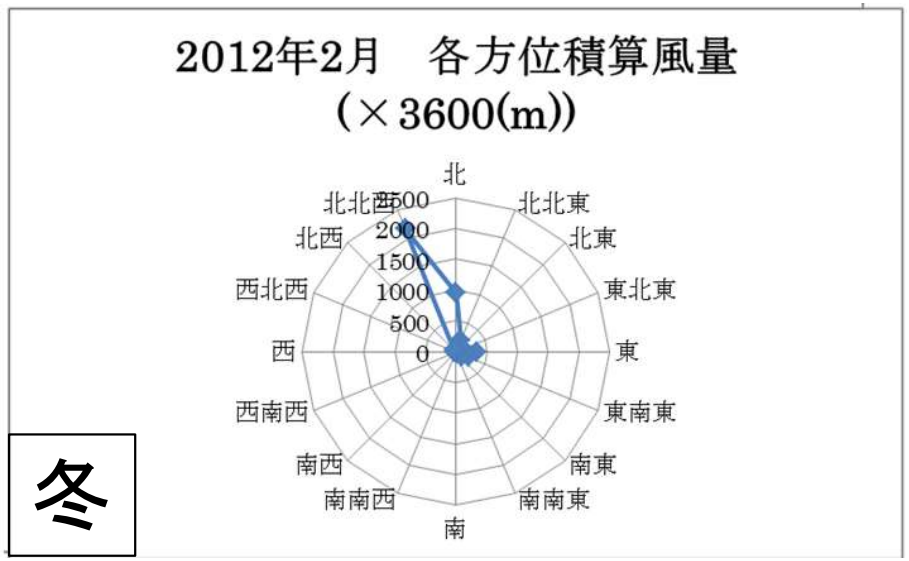
アルカリ環境では鉄は錆びないが、塩分が入ると別！

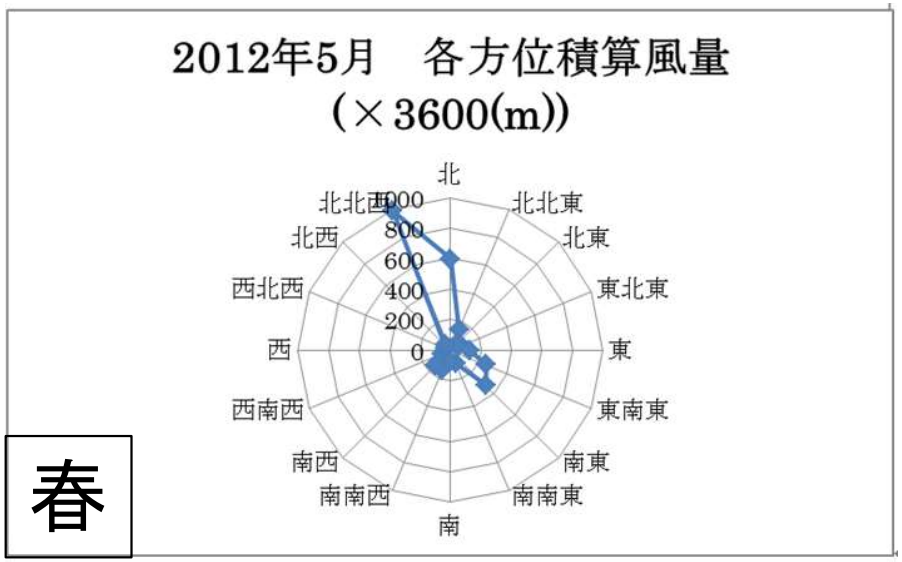
一般にコンクリート1m³に1.2～2kg程度の塩分（Clイオン）があると、中性化をしていなくても鉄筋は錆びる。

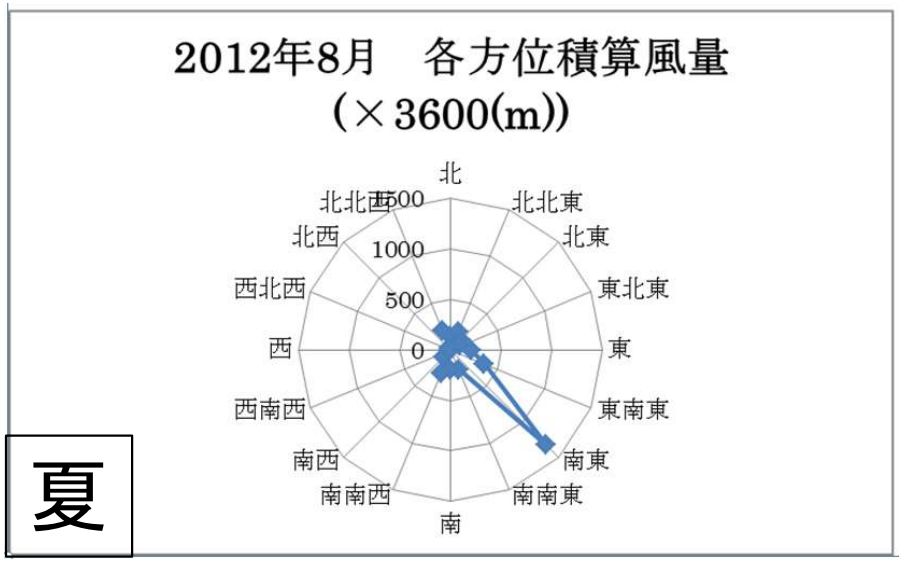
では、塩分はどこから？

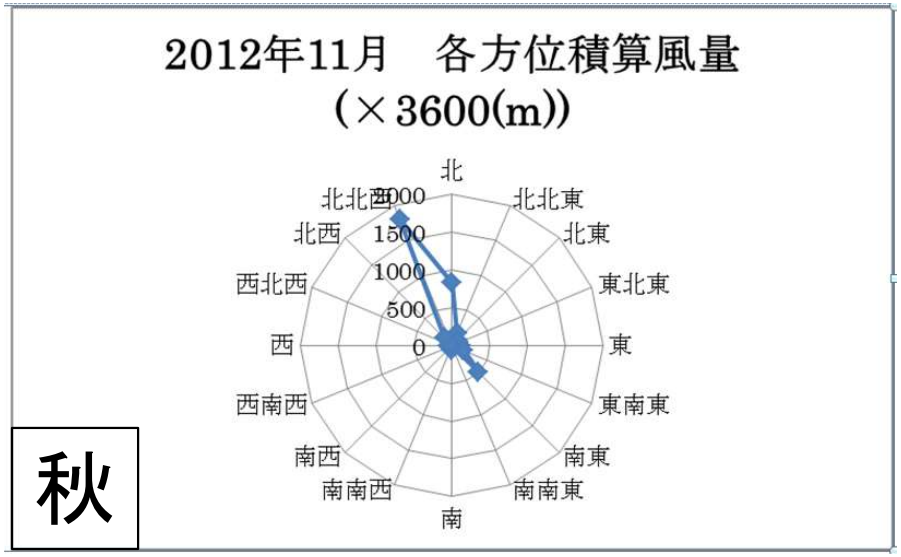


風況





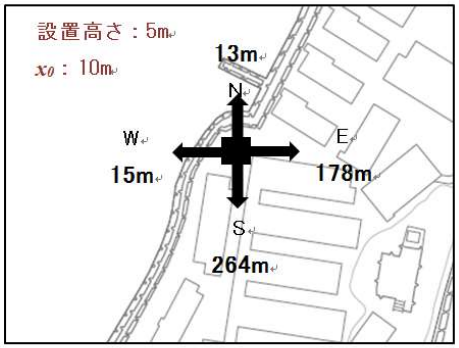




軍艦島における季節ごとの風況

飛来塩分

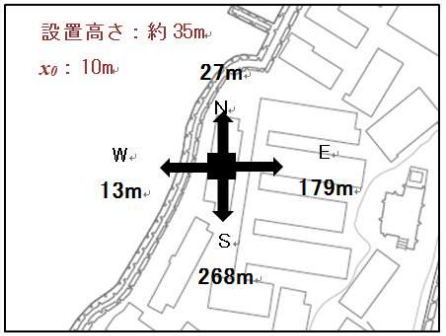
飛来塩分捕集器



海岸までの距離

51号棟の1階付近

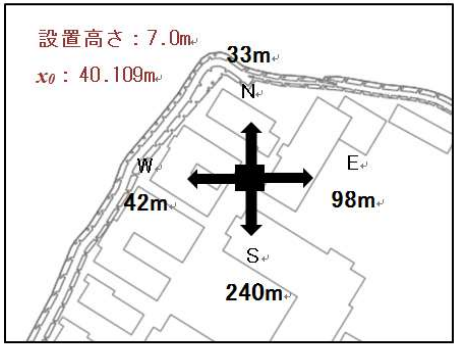
飛来塩分捕集器



海岸までの距離

51号棟の屋上

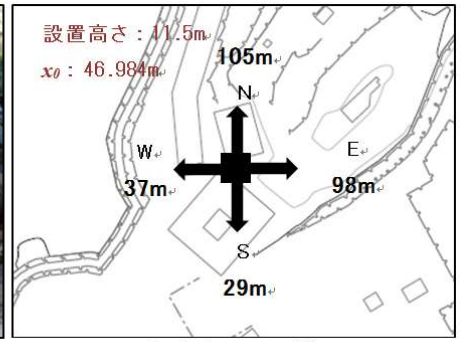
飛来塩分捕集器



海岸までの距離

端島病院（69号棟）付近

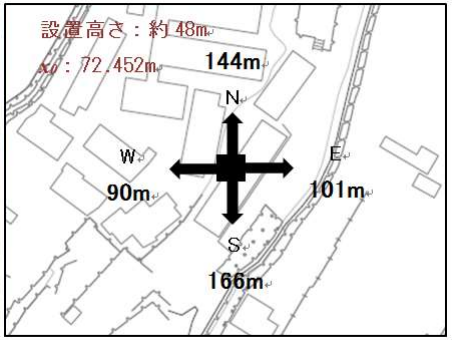
飛来塩分捕集器



海岸までの距離

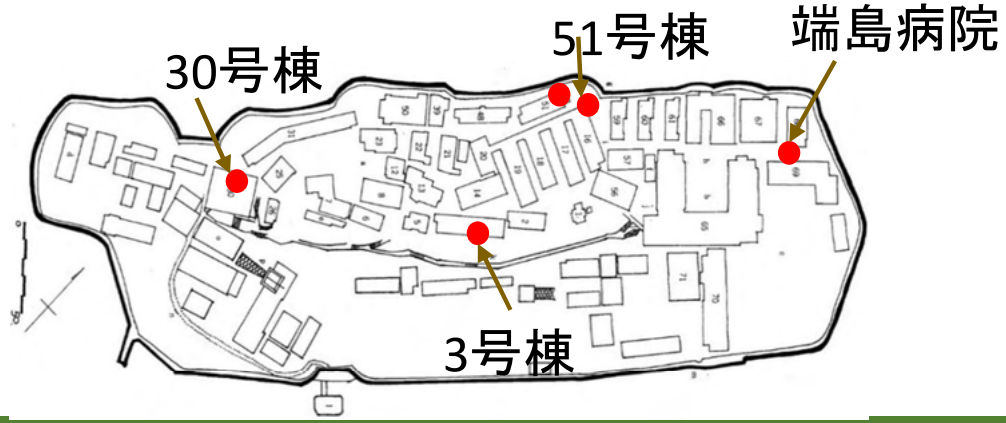
30号棟付近

飛来塩分捕集器

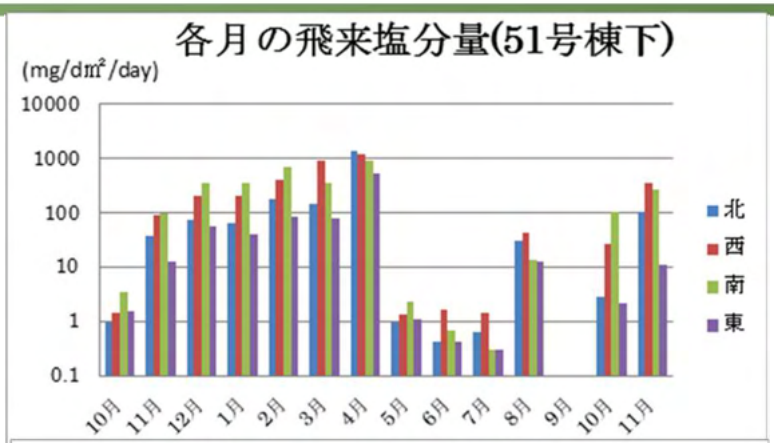


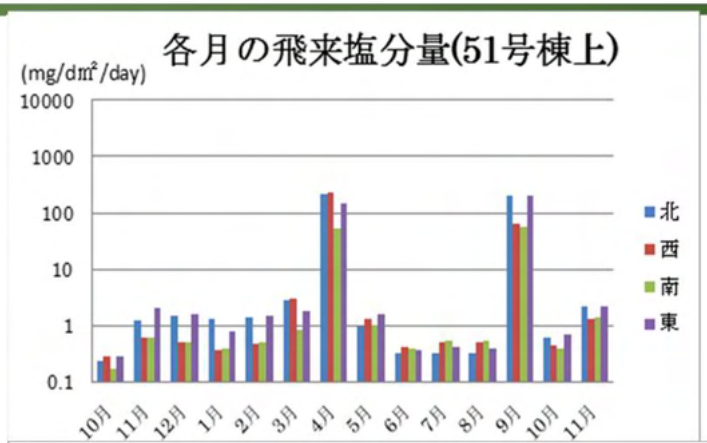
海岸までの距離

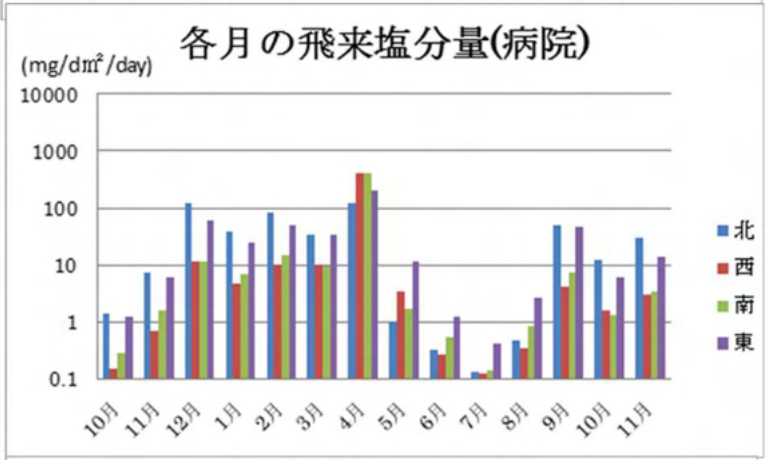
3号棟の屋上

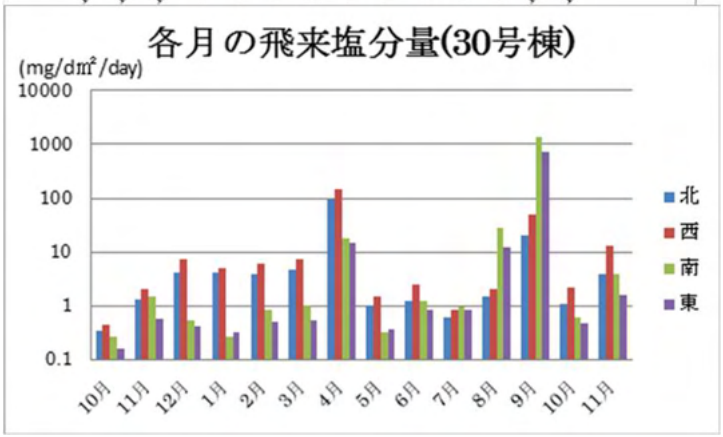


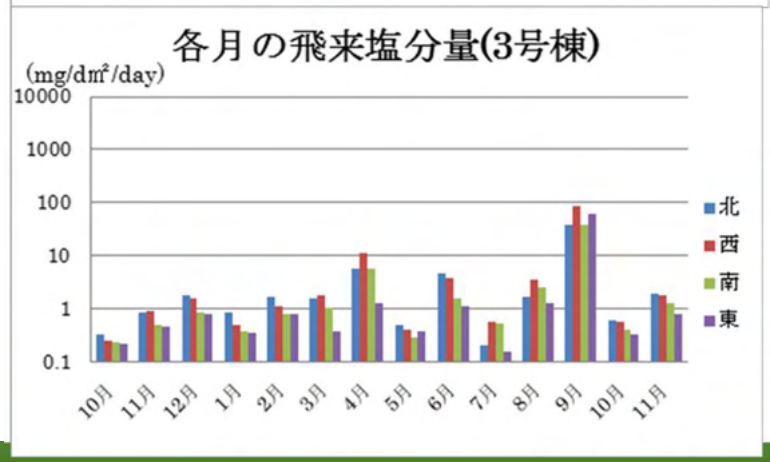
飛来塩分量





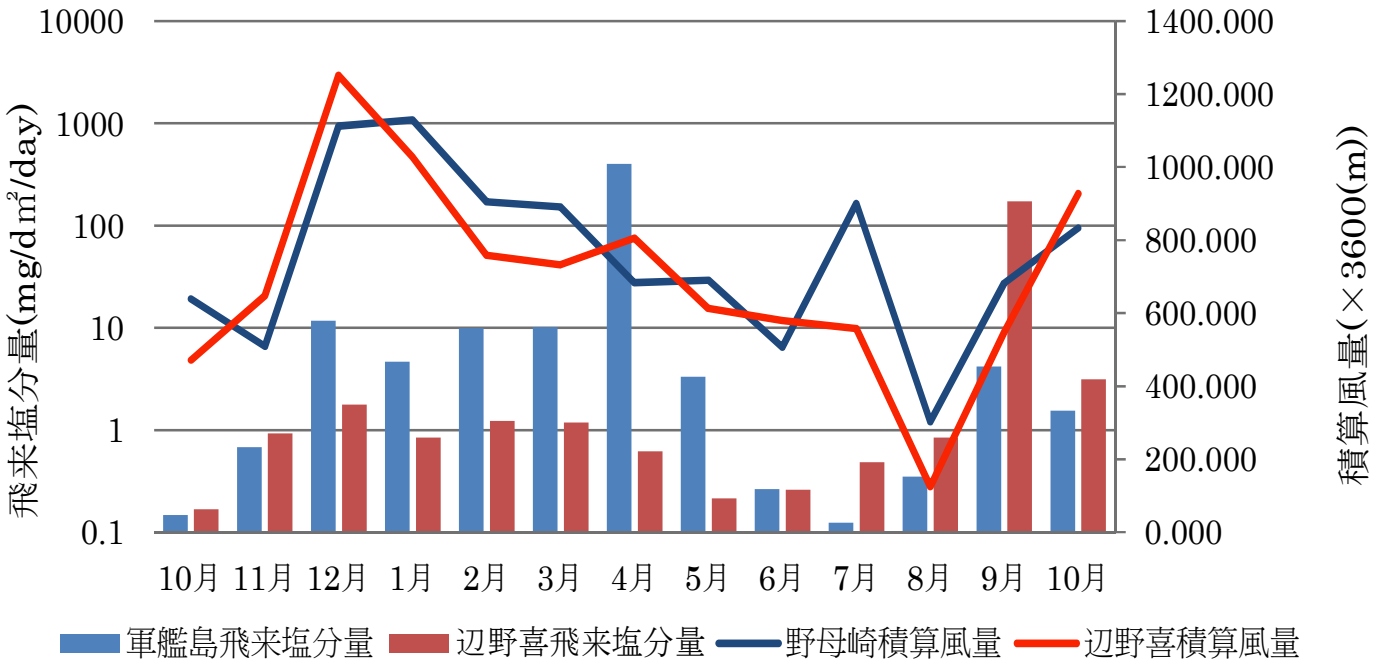






各地点での月毎の飛来塩分量

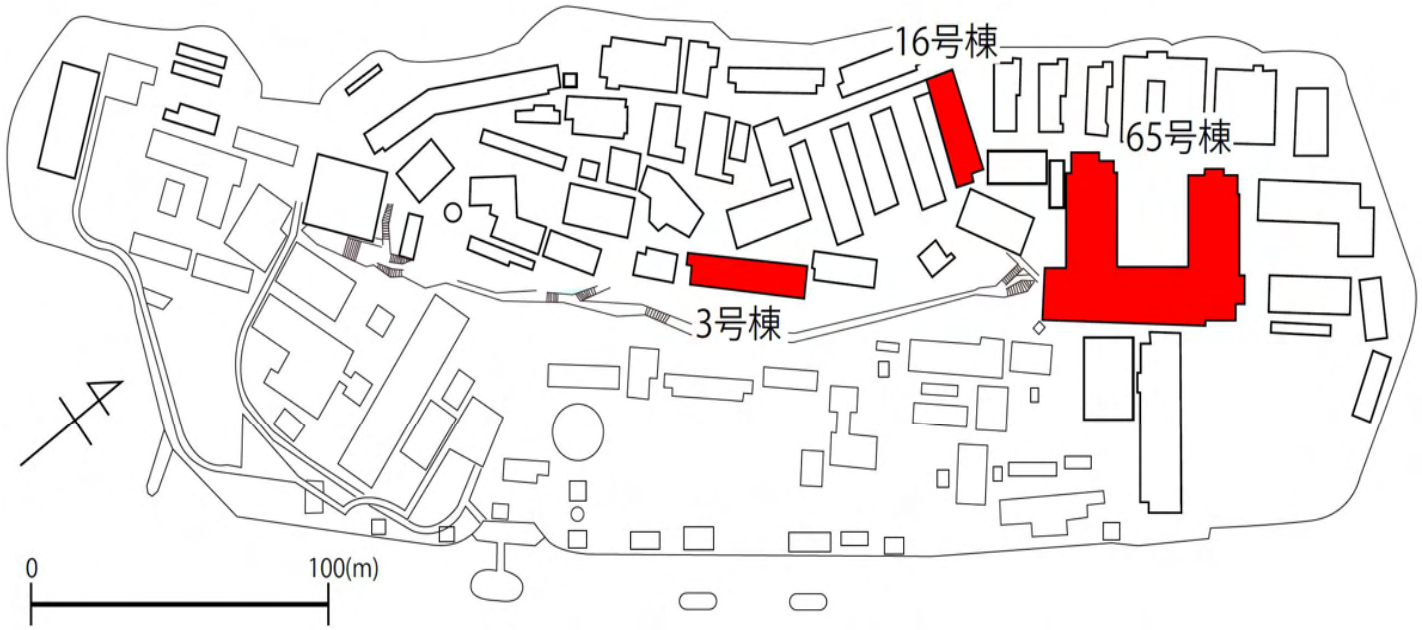
飛来塩分量の比較



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年時点で保存が優先的に検討されている住棟

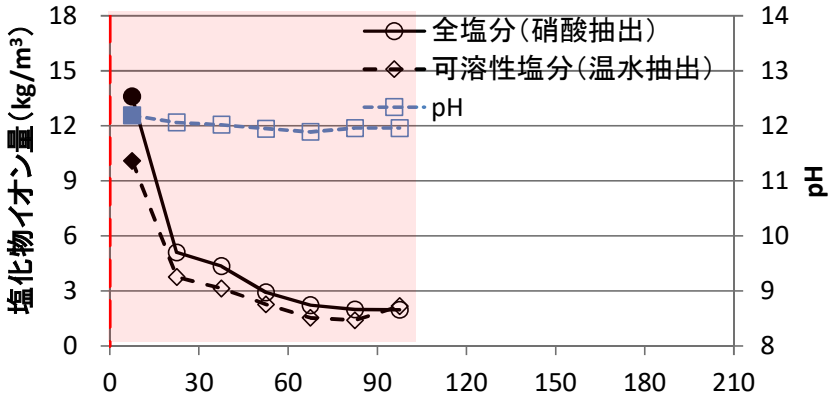
- 3号棟（1959年）
- 16号棟（1918年）
- 65号棟（1945～1958年）

- ✓ 全塩化物イオン量
- ✓ 可溶性塩化物イオン量
- ✓ 中性化深さ
- ✓ pH

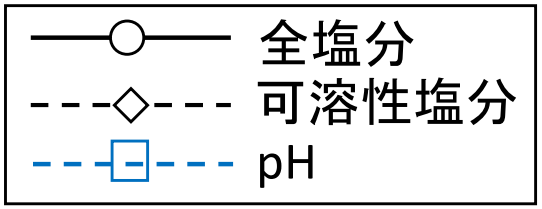
塩化物イオン量の調査結果

3号棟

屋外
モルタル



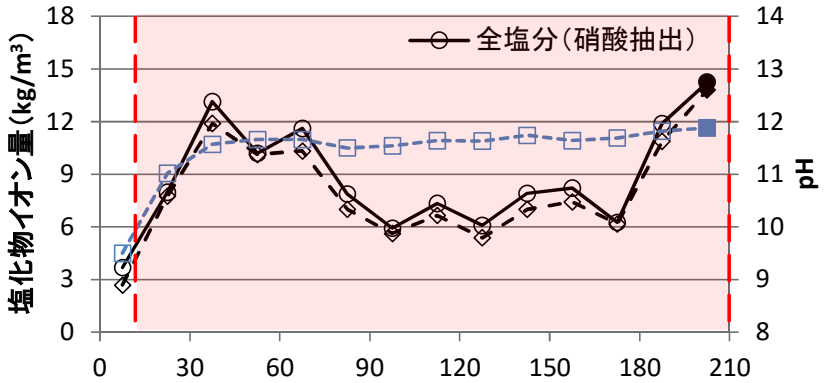
屋内
折り取り



各記号の中実の記号
はモルタルを表す

16号棟

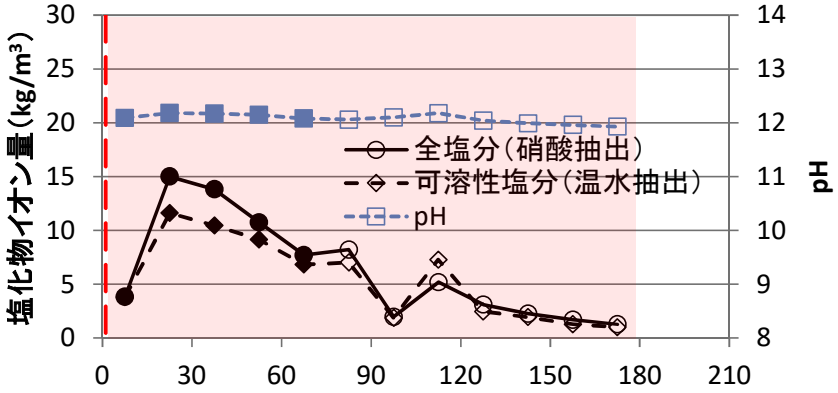
屋外
打放し



屋内
レンガ

65号棟

屋外
モルタル



屋内
折り取り

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。
- α-FeOOH（Goethite）
  $Fe(OH)_2$の酸化による黄色～橙色の腐食生成物。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。
- β-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$Fe(OH)_2$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。
- γ-FeOOH（Lepidocrocite）
  $Fe(OH)_2$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

① コンクリートに二酸化炭素が侵入

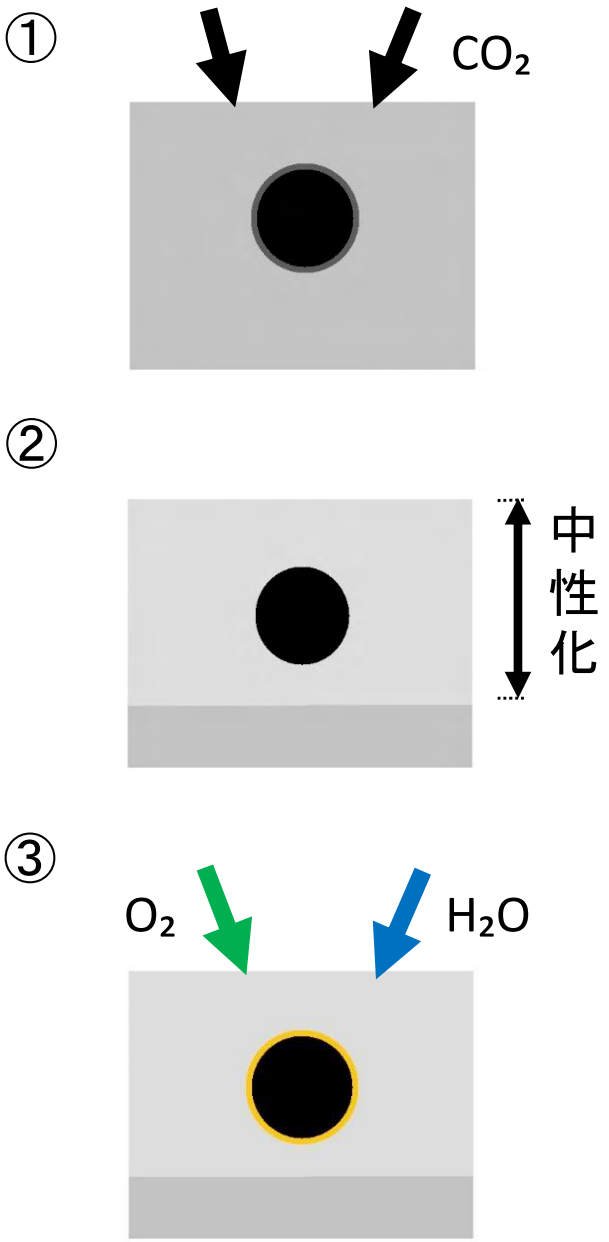
⇨ アルカリ性のコンクリートが中性に

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
（α-FeOOH → β-FeOOHなどが中心）



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 **γ-FeOOH(Lepidocrocite) やFe_3O_4(Magnetite)** が発生

⇨ γ-FeOOHはアルカリ環境かつ塩害環境下で発生しやすい

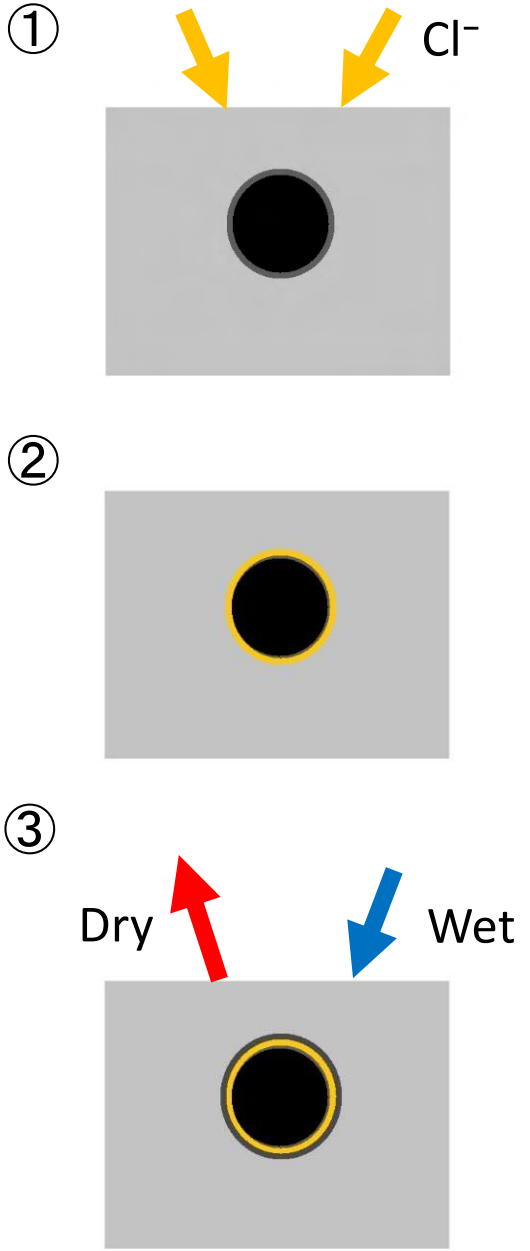
⇨ Fe_3O_4はアルカリ環境かつ湿潤環境下で発生しやすい

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

乾燥状態に伴う空気酸化

γ-FeOOH ⇄ Fe_3O_4

湿潤状況下による変化



補修方法の検討

- 歴史的構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

歴史的構造物の保存・修復の原則

ICOMOSの国際憲章（ヴェニス憲章・1964年）

歴史的構造物の保存・修復には、Authenticity（真正性・正統性）の確保が必要

ヴェニス憲章におけるAuthenticityの4つの側面：

① Material（材料）

② Workmanship（技術・工法）

③ Design（意匠）

④ Setting（環境・立地条件）

木造建築物については、「奈良ドキュメント（1994）」に拡張

歴史的構造物の保存・修復の原則

保存・修復における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
④ 取り外せること（可逆性）

これらの条件を考慮し、軍艦島のRC構造物群に適用可能な補修方法を検討

木造の場合は？

奈良ドキュメント・1994年

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。

矧ぎ木

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・補修方法を検討開始

- 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

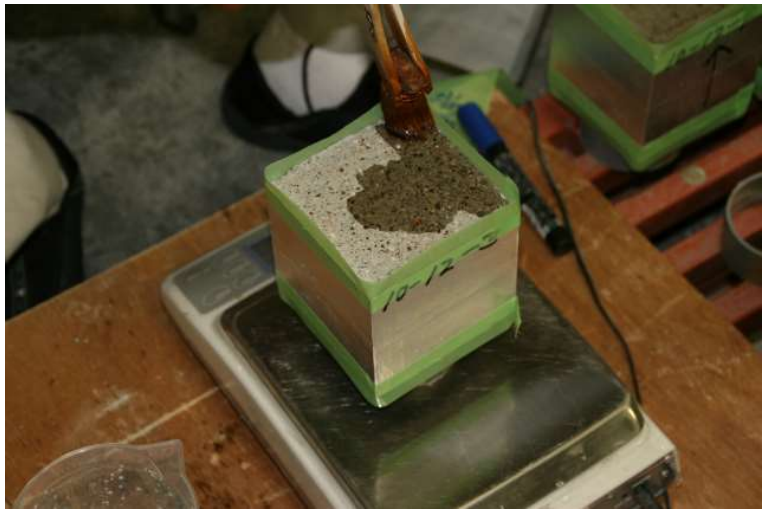
材齢7日	標準養生
～材齢10日	50℃気中乾燥
～材齢31日	促進中性化（中性化深さ約19mm）
～材齢42日	補修施工
材齢56日	暴露試験開始

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_2O_3Si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

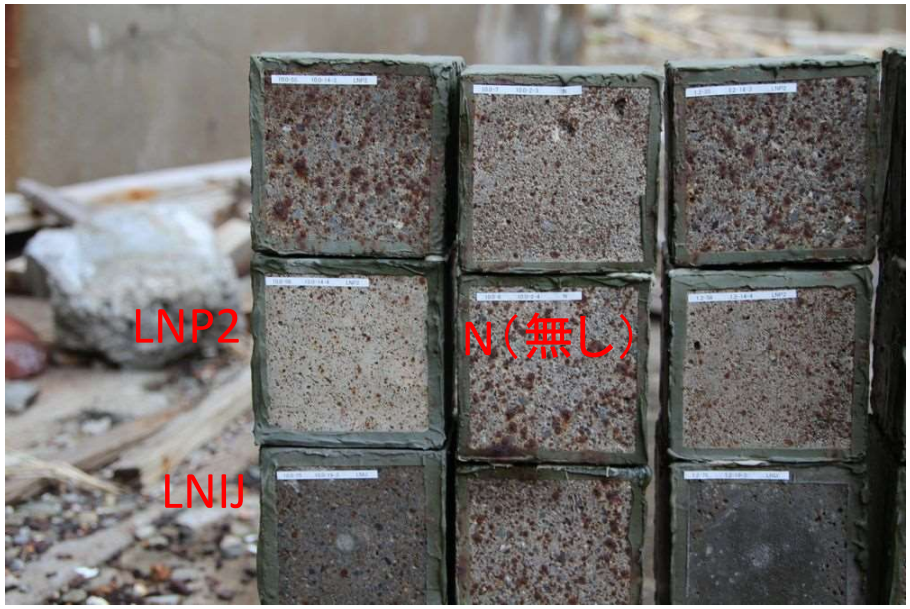
16号棟－59号棟間
（飛来塩分の多い環境）

69号棟（端島病院）西側
（飛来塩分が中程度の環境）

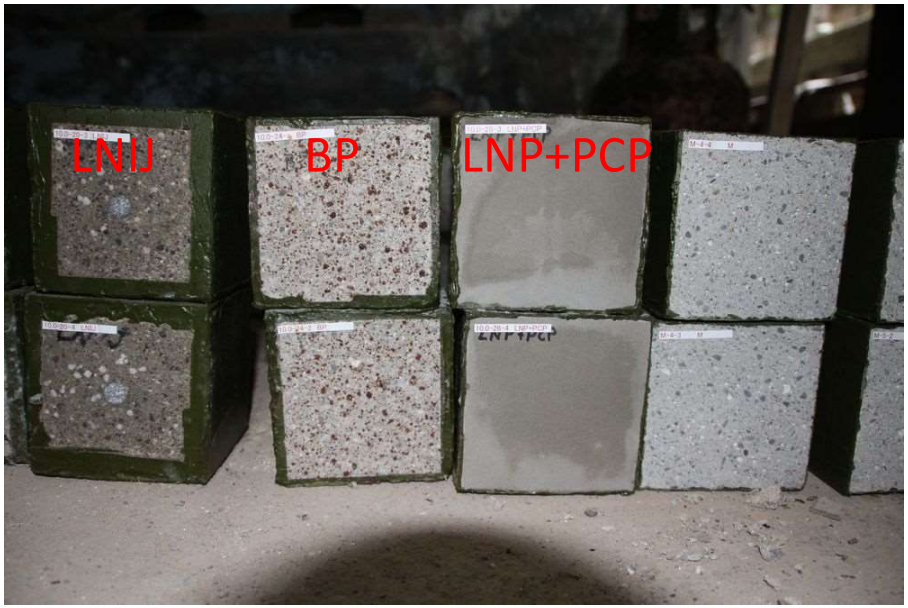
17号棟居室内
（飛来塩分がない環境）

試験体の状況の例（約6年経過）

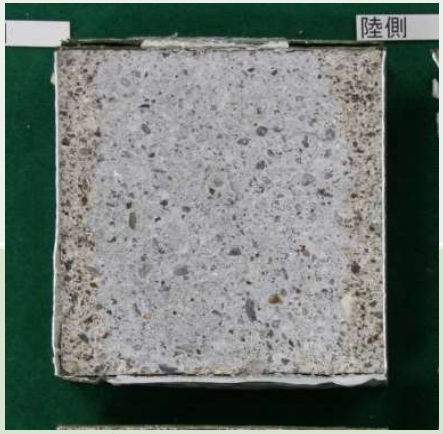
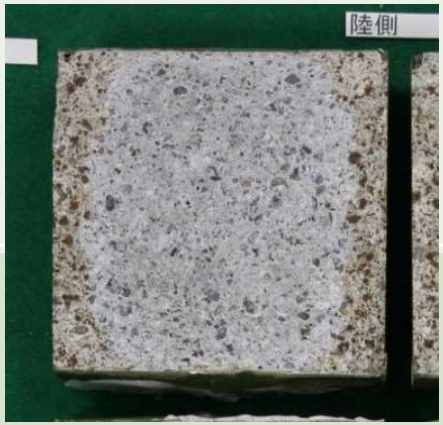
69
号棟
屋外



17
号棟
屋内

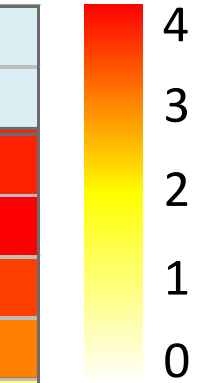


腐食状況の評価

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	グレード2の例	グレード2の例
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	グレード4の例	グレード4の例

腐食状況 _1.2kg/m^{3}試験体

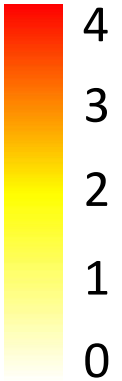
暴露場所	補修工法	海側			山側		
		表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
59号棟 屋外	N	4.0	3.3	1.3	1.8	4.0	3.8
	LNP1	3.3	3.8	1.8	1.5	3.8	4.0
	LNP2	3.5	3.8	2.3	1.8	4.0	3.5
	LNP1+BP	3.0	1.8	0.3	0.3	1.8	3.0
	LNIJ	3.0	1.8	0.3	0.3	0.5	1.0
	LNIJ+BP	3.0	1.5	0.5	0.0	2.0	2.0
	BP	2.0	1.5	0.3	0.0	1.5	4.0
	LNP+PCP	0.0	0.5	0.3	0.3	0.3	0.0
69号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



44

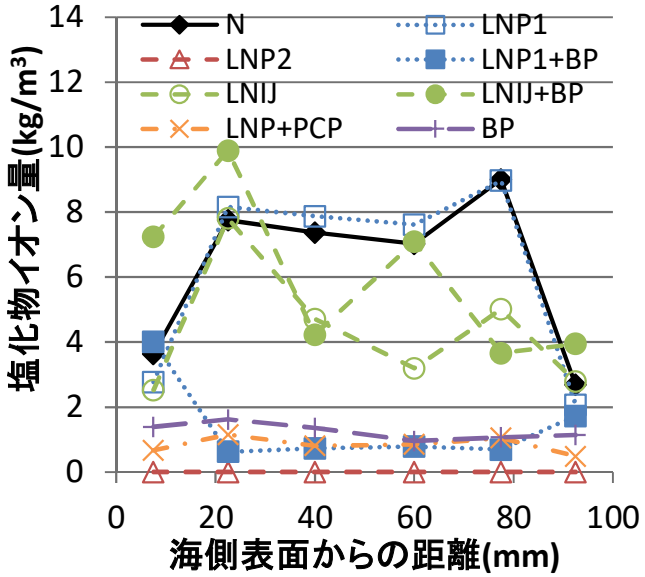
腐食状況 _10kg/m³試験体

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

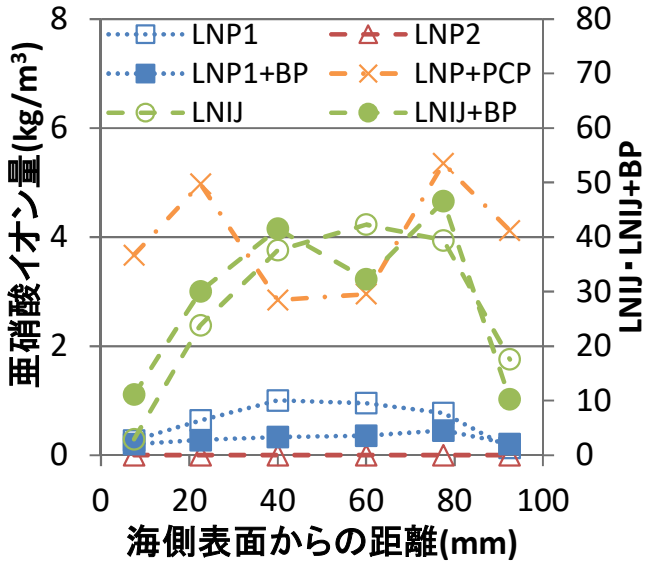


45

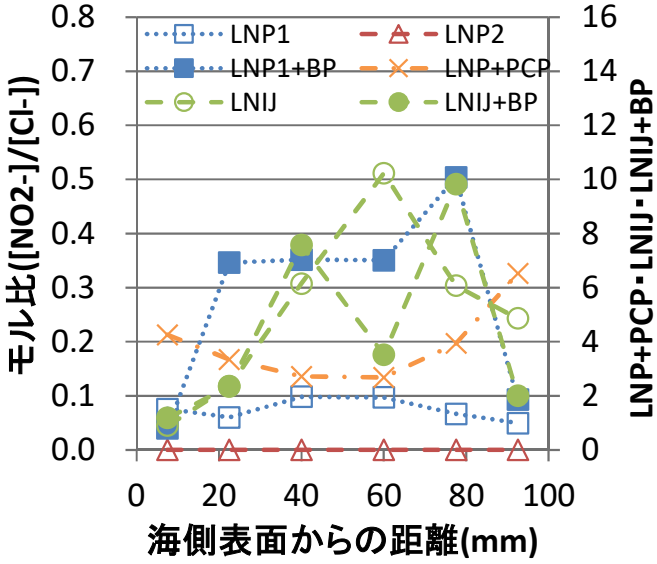
塩化物および亜硝酸イオンの分布



塩化物イオン分布
（温水抽出塩分）



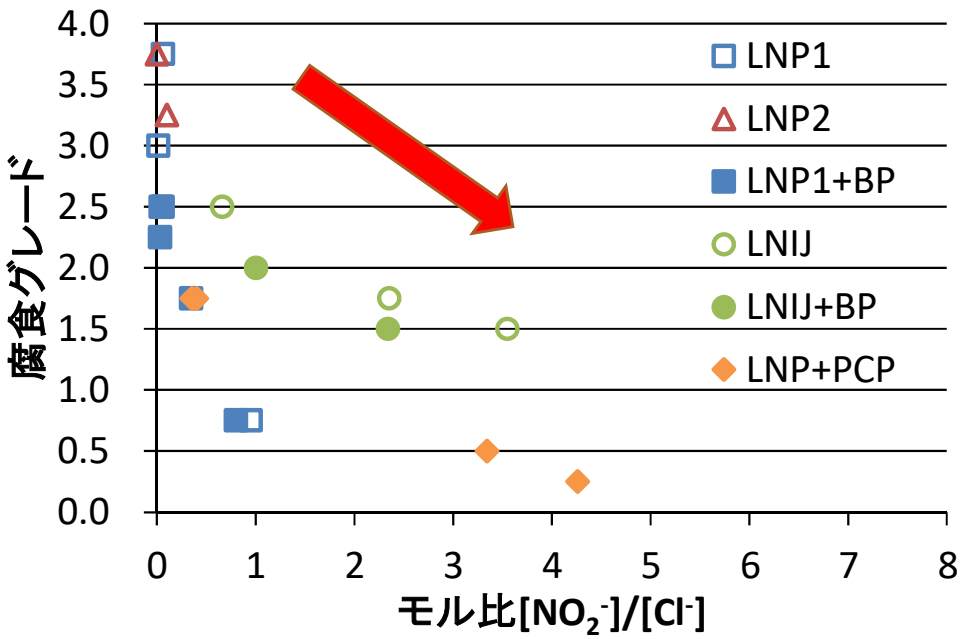
亜硝酸イオン分布



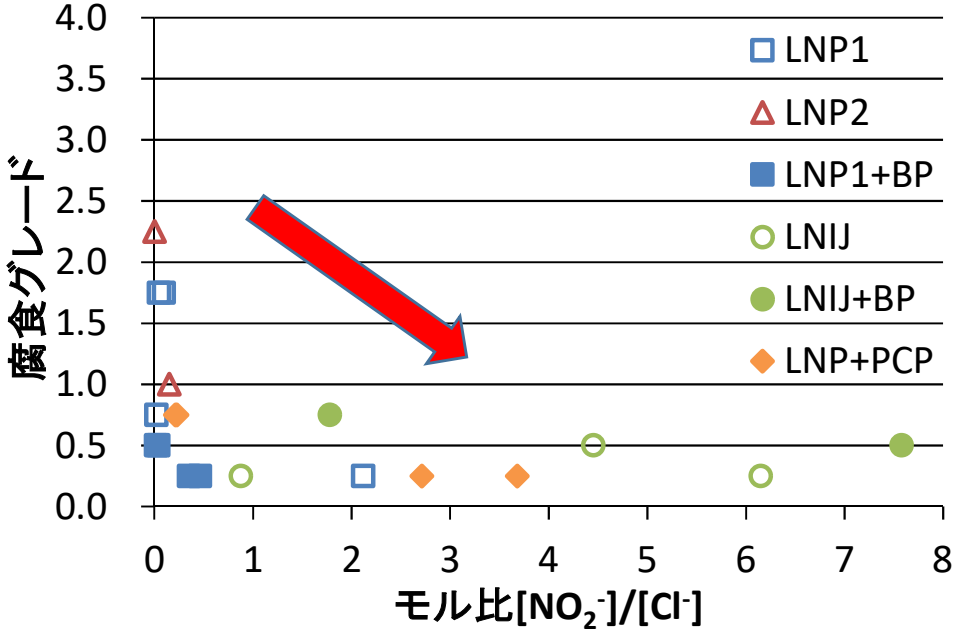
モル比分布
（$[NO_2^-]/[Cl^-]$）

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（[NO_2-]/[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	・塗布含浸工法（ただし塗布量多め） ・注入工法	・塗布含浸（ただし塗布量多め） ・ペースト塗布
	大	・注入工法	・ペースト塗布
屋外（飛来塩分大）	小	・塗布含浸（塗布量多め）＋浸透性吸水防止剤 ・圧入工法	・同左＋ペースト塗布
	大	・圧入工法（含浸量多め）＋浸透性吸水防止剤	・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：5kg/m³ 腐食促進なし	塩分量：5kgm³＋α 腐食ひび割れ発生	塩分量：5kg/m³＋α かぶりコンクリート剥落

JCI共通試験

参加企業・工法：

グレードⅠ	17社・19工法
グレードⅡ	9社・11工法
グレードⅢ	5社・5工法

適用された主な工法

グレードⅠ	グレードⅡ	グレードⅢ
・表面含浸工法（ケイ酸塩、シラン、シラン・シロキサン・亜硝酸リチウム） ・表面被覆工法（クリアシート、クリアエポキシ） ・電気防食工法（犠牲陽極、外部電源）	・表面含浸（シラン系） ・表面被覆（塩分吸着エポキシ） ・注入・圧入工法（エポキシ、亜硝酸系） ・電気防食工法（外部電源、電着） ・上記の組み合わせ	・圧入工法（亜硝酸リチウム） ・電気防食工法（外部電源、犠牲陽極） ・塗装（防錆塗料、クリア塗料）

補修仕様（亜硝酸系）

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

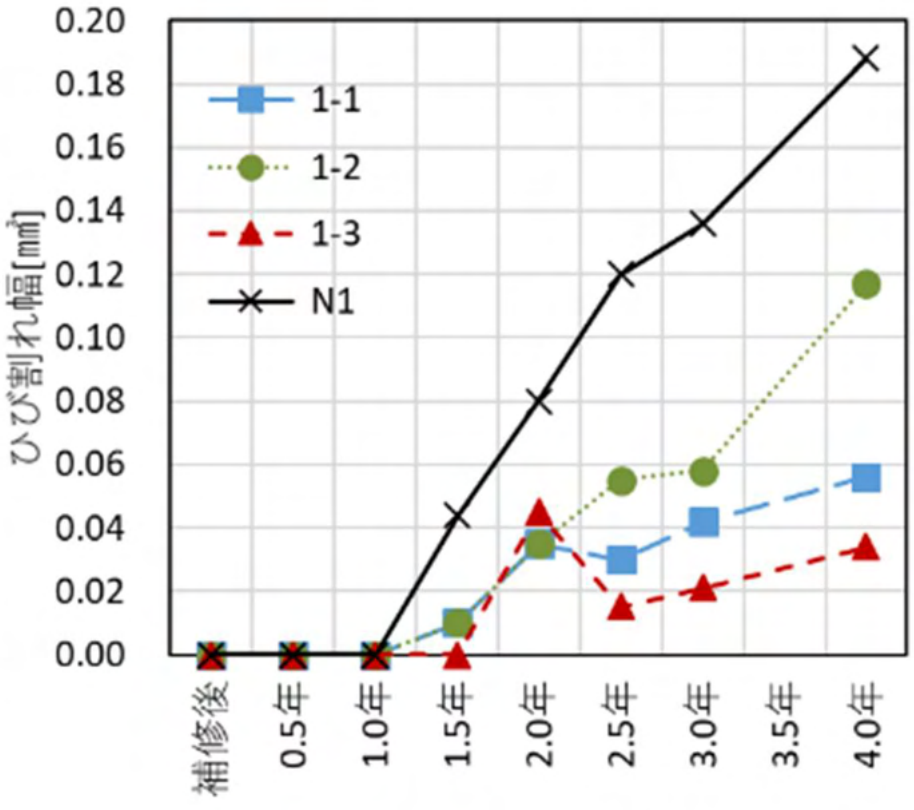
暴露試験状況

69号棟（端島病院）屋上から69号棟・65号棟前に移設

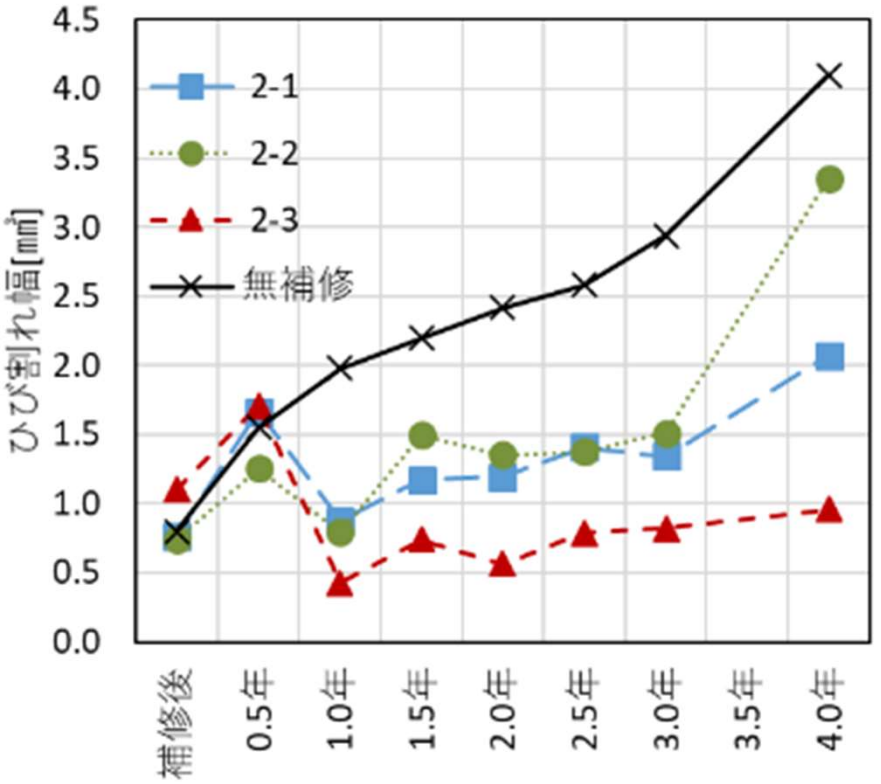
試験体の状況　_外観変化

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

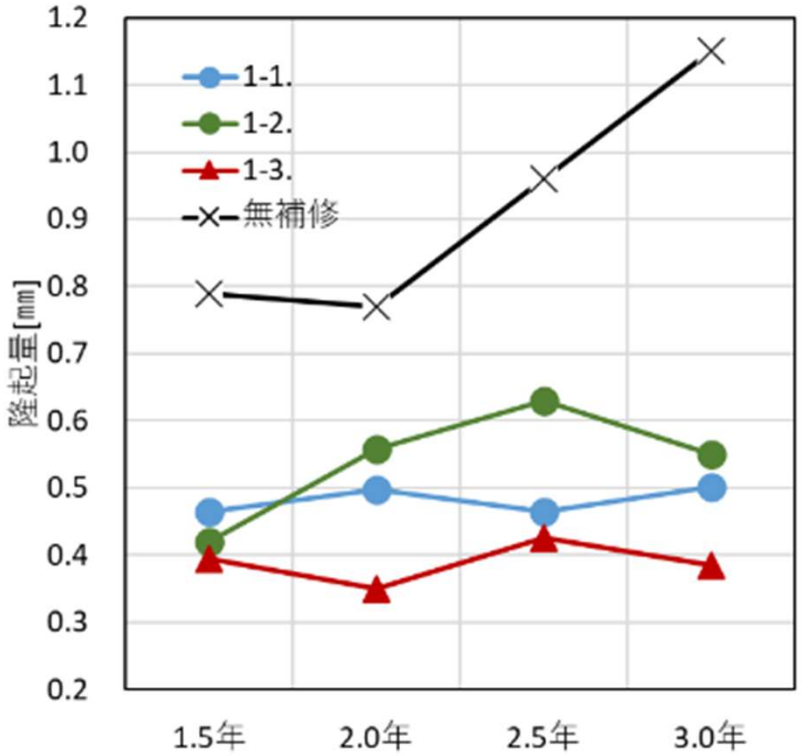


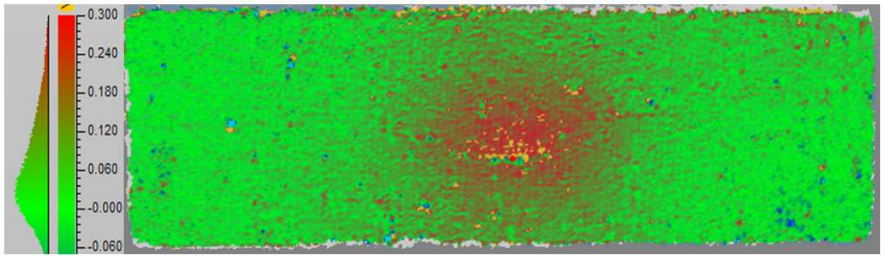
グレードⅠ



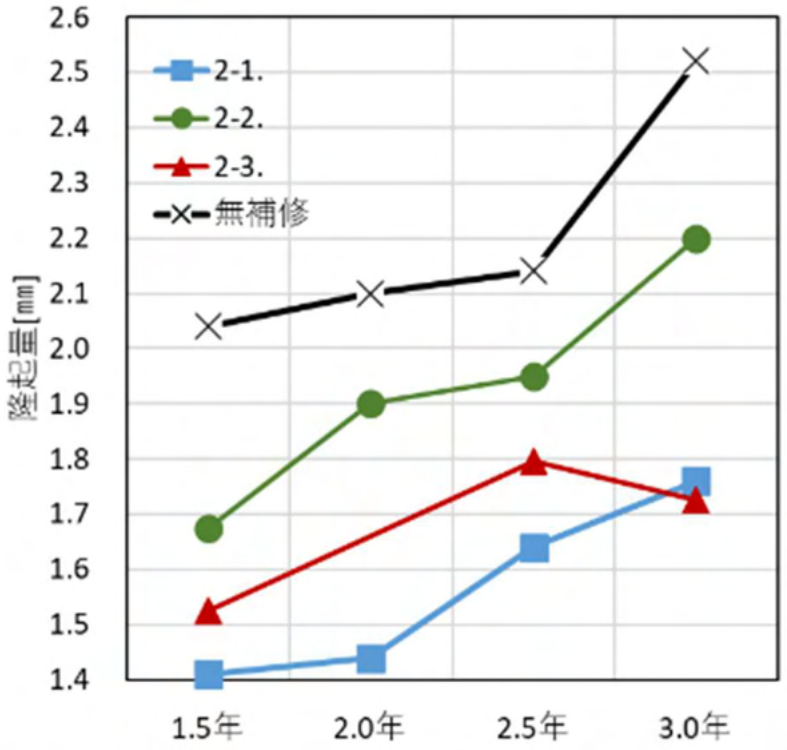
グレードⅡ

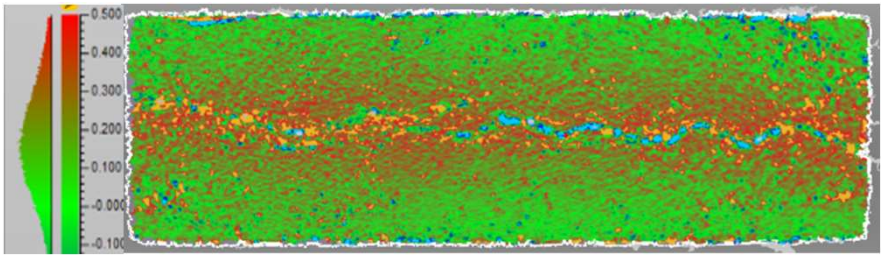
表面隆起量の経時変化





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系歴史的構造物の多くが抱える問題

まとめ

歴史的構造物の保存･修復の難しさ

◆ オーセンティシティ

◆ 可逆性

RC系の歴史的構造物の補修･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。