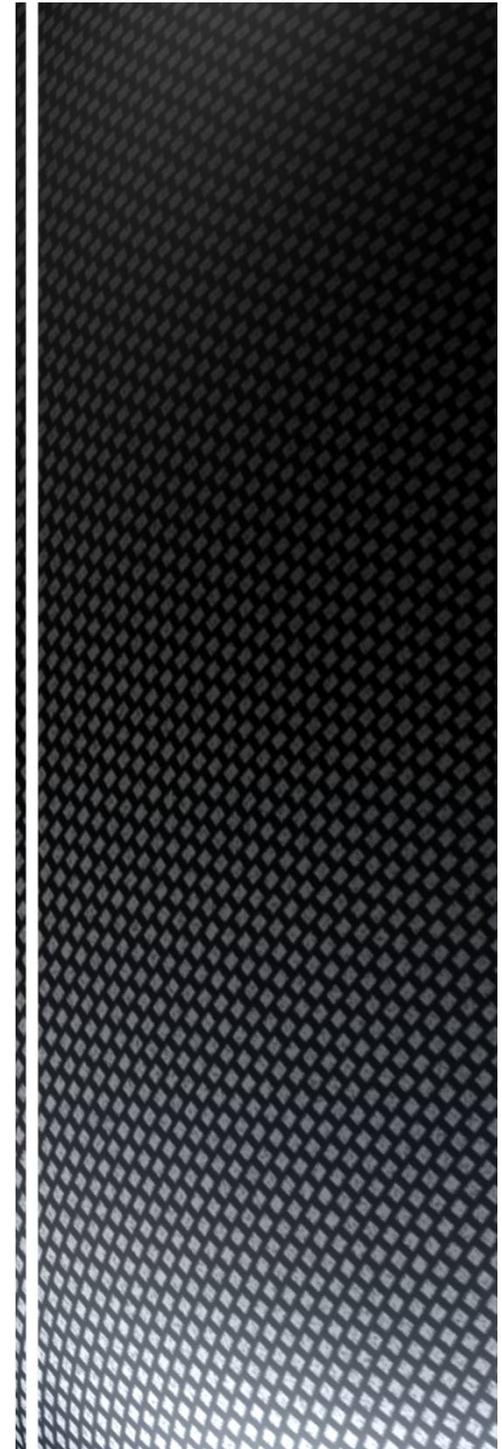


コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム 2018(大阪)  
19th Jun. 2018

# 軍艦島(端島)における RC建築物の状況と 保存・修復のための検討

芝浦工業大学  
建築学部建築学科  
濱崎 仁



# 講演の内容

- 調査の経緯・概要
- 軍艦島(端島)の概要と歴史
- 軍艦島の劣化外力
  - 温湿度・風況
  - 飛来塩分
- 目視による調査結果
  - 部材の損傷・鉄筋の腐食
- コンクリートの状況
  - 中性化深さ
  - 塩化物イオン量
- 補修方法の検討
  - 歴史的建造物の補修・補強の難しさ
  - 補修材料・工法検討のための屋外暴露試験

# 調査等の経緯

長崎市より日本建築学会に対して、長崎市端島(軍艦島)のコンクリート構造物群に対して、劣化・損傷状況の評価や将来予測、補修方法の提案などに関する調査委託。

(委託期間:2011~2013・2015~)

長崎市より日本コンクリート工学会に対して、端島の構造物の補修・補強方法およびそれらの施工方法などに関する調査委託。

(委託期間:2015~2016)

2014年1月:

「明治日本の産業革命遺産 九州・山口と関連地域」として、ユネスコに推薦書提出

2014年10月:

軍艦島炭鉱跡が、「高島炭鉱跡」として国史跡に登録

2015年7月:

ユネスコ世界文化遺産の構成要素の一つとして登録  
(建築物群については周辺要素の一つ)

# 建築学会における調査内容(全体)

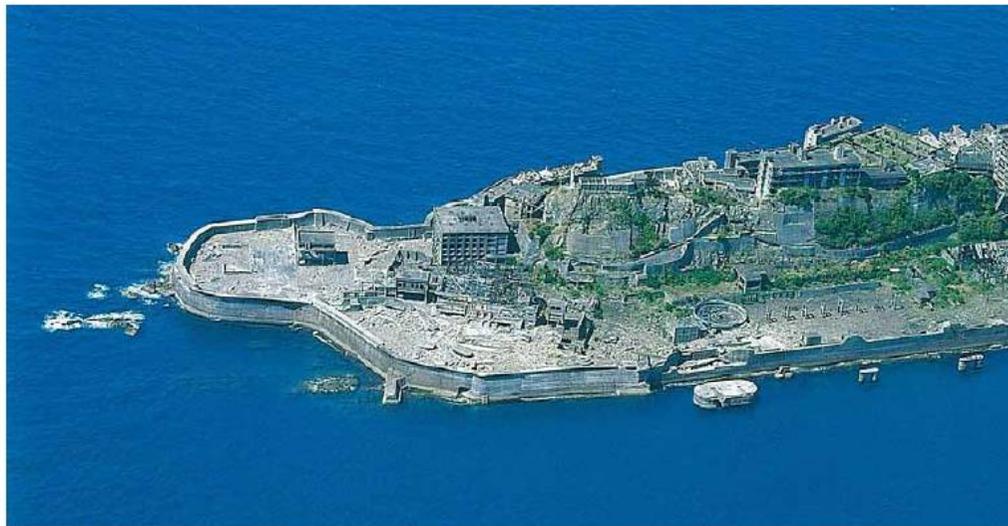
- 劣化外力の調査
  - 温湿度、風向
  - 飛来塩分量
- 材料に関する調査
  - 目視による劣化状況の調査
  - コンクリートの材料・調合(セメント、骨材、配合推定)
  - コンクリートの状態(中性化・塩化物イオン量)
  - 鉄筋の状態
  - その他の材料の状態
- 構造安全性の調査
  - 常時微動調査
  - 耐震性能評価(日給社宅16号棟)
- 護岸健全度調査
- 補修方法の検討

# 軍艦島(端島)

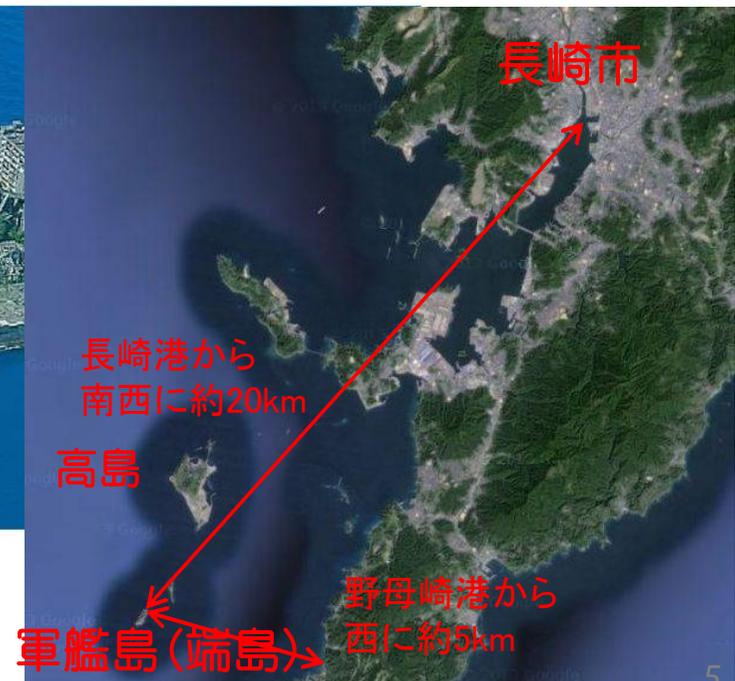


北西側の航空写真

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



# 歴史的経緯

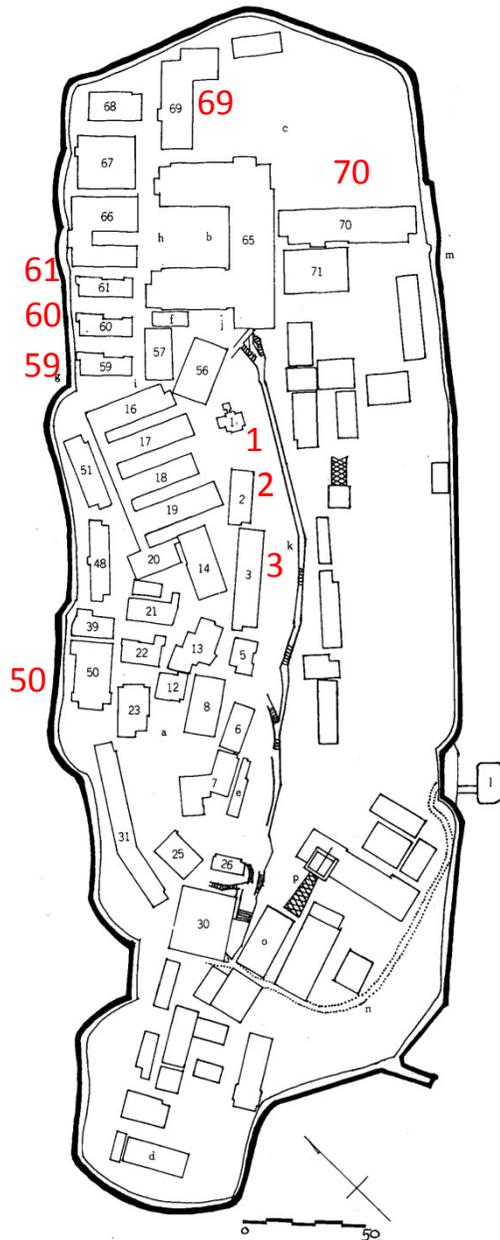
## 軍艦島の簡易年表

年	主な出来事
1810年(文化3)	端島で石炭が発見される
1890年(明治23)	三菱社が端島炭鉱を買収する
1891年(明治24)	出炭開始
1916年(大正5)	日本初の高層RC造アパート30号棟完成
1918年(大正7)	日給社宅(16~20号棟)完成
1941年(昭和16)	年間出炭数41万1100tの最高記録を達成
1945年(昭和20)	65号棟完成
1956年(昭和31)	台風9号襲来、甚大な被害を受ける
1959年(昭和34)	台風14号襲来、甚大な被害を受ける
1960年(昭和35)	人口が最高記録である5267人に達する
1970年(昭和45)	端島沖採炭工事中止を発表
1974年(昭和49)	端島砒閉山、無人島となる

埋め立て  
工事による  
地形変化



# 軍艦島の建造物群(住居系)



建物名	竣工年	構造	階数
1号棟	1935年以前	木造	1
2号棟	1950年	RC造	3
3号棟	1959年	RC造	4
5号棟	1947年以前	木造	2
6号棟	1936年	木造	3
7号棟	1953年	木造	2
8号棟	1919年	RC造・木造	
12号棟	1925年以前	木造	3
13号棟	1967年	RC造	3
14号棟	1941年	RC造	4
16号棟	1918年	RC造	5
17号棟	1918年	RC造	9
18号棟	1918年	RC造	9
19号棟	1918年	RC造	9
20号棟	1918年	RC造	7
21号棟	1954年	RC造	5
22号棟	1953年	RC造	5
23号棟	1921年	木造	2
25号棟	1931年	RC造	5
26号棟	1966年	プレハブ	2
30号棟	1916年	RC造	7
31号棟	1957年	RC造	6
39号棟	1964年	RC造	3
48号棟	1955年	RC造	5
50号棟	1927年	鉄骨造	2
51号棟	1961年	RC造	8
56号棟	1939年	RC造	3
57号棟	1939年	RC造	4
59号棟	1953年	RC造	5
60号棟	1953年	RC造	5
61号棟	1953年	RC造	5
65号棟	1945年	RC造	9
66号棟	1940年	RC造	4
67号棟	1950年	RC造	4
68号棟	1958年	RC造	2
69号棟	1958年	RC造	4
70号棟	1957年	RC造	7
71号棟	1970年	RC造	2

# 軍艦島の状況 \_見学コースより



見学通路



総合事務所跡



仕上工場跡

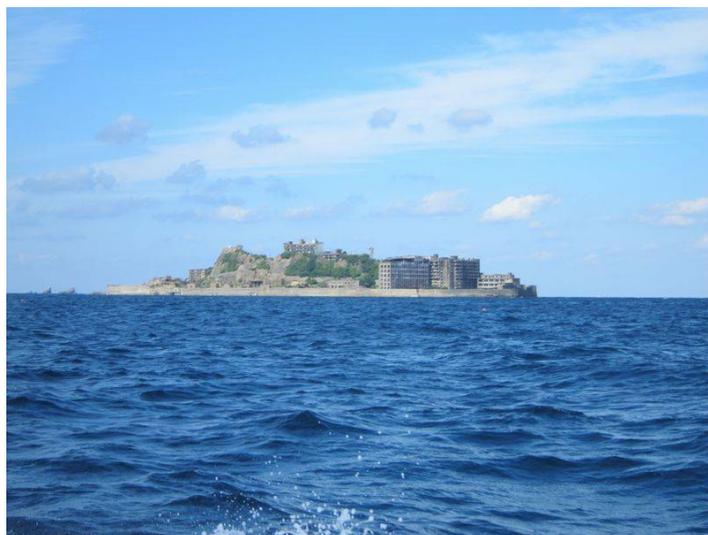
# 軍艦島へ



長崎港出港(三菱長崎造船所)



長崎港(女神大橋)



軍艦島遠景



軍艦島到着(70号棟下)

# 軍艦島の状況写真



台風時の様子



北西側護岸



70号棟外観



70号棟基礎

# 軍艦島の状況写真



30号棟外観



30号棟内観



地獄段(16号棟横・S40頃)



地獄段(現在)

# 軍艦島の状況(16～19号棟内部)



# 軍艦島の温湿度・風況の調査

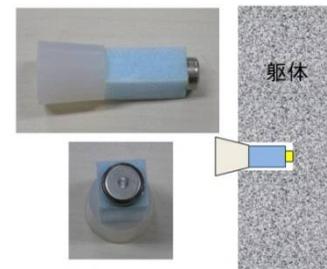


外気温湿度  
観測装置



おんどとり

コンクリート  
内部の温湿度  
観測装置



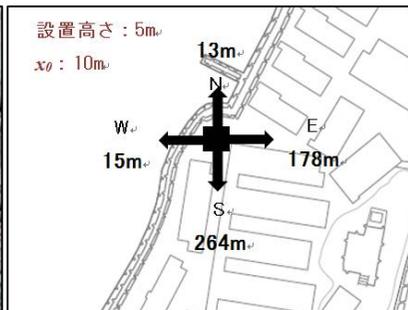
ハイグロクロン

\*コンクリート表面から  
5~6cm位置に設置

# 飛来塩分の調査



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

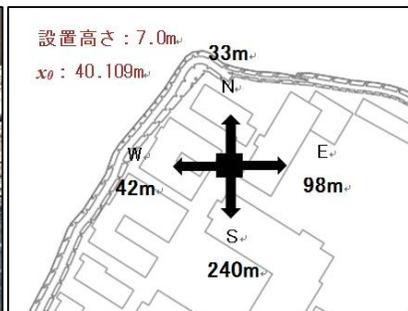


海岸までの距離

51号棟の屋上



飛来塩分捕集器

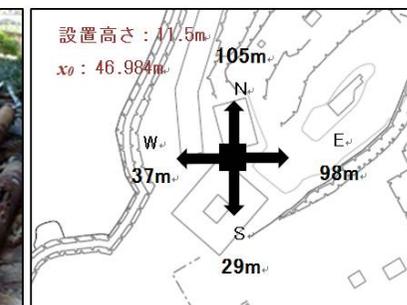


海岸までの距離

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



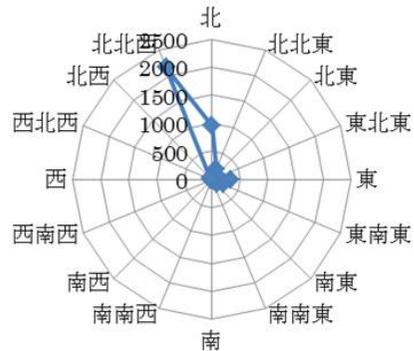
海岸までの距離

3号棟の屋上

各地点における飛来塩分  
捕集器の設置状況

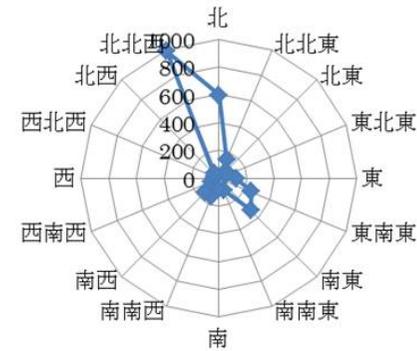
# 軍艦島の風況 (野母崎気象データより)

2012年2月 各方位積算風量  
(×3600(m))



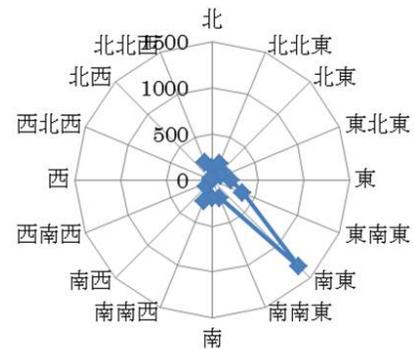
冬

2012年5月 各方位積算風量  
(×3600(m))



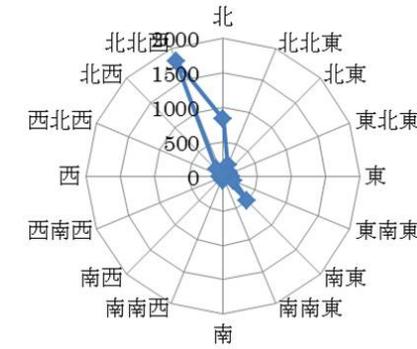
春

2012年8月 各方位積算風量  
(×3600(m))



夏

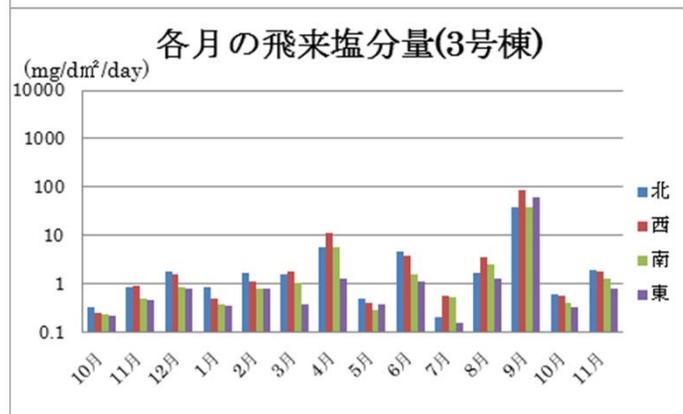
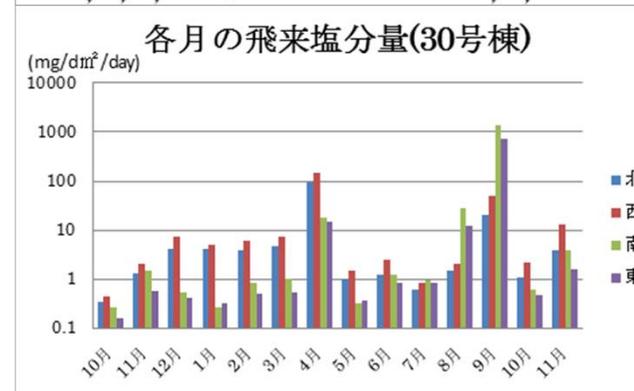
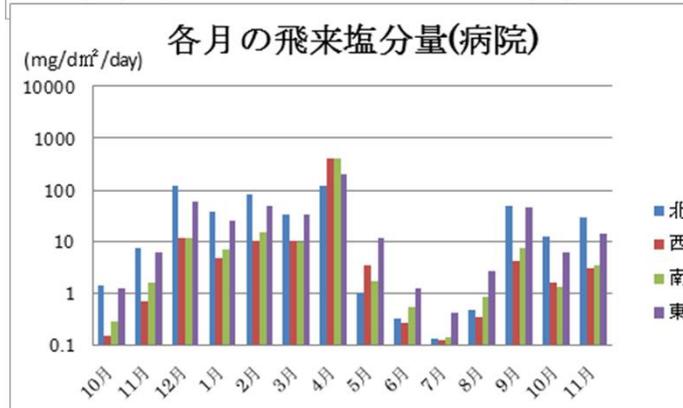
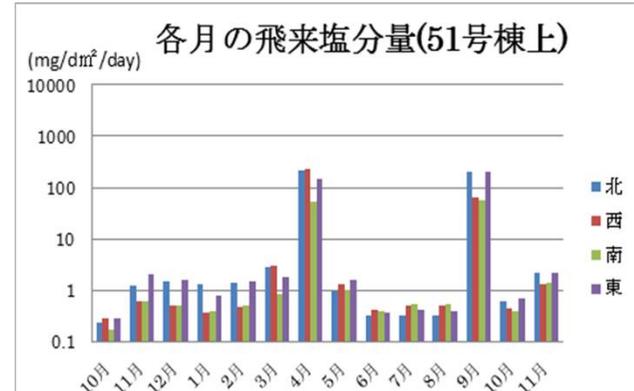
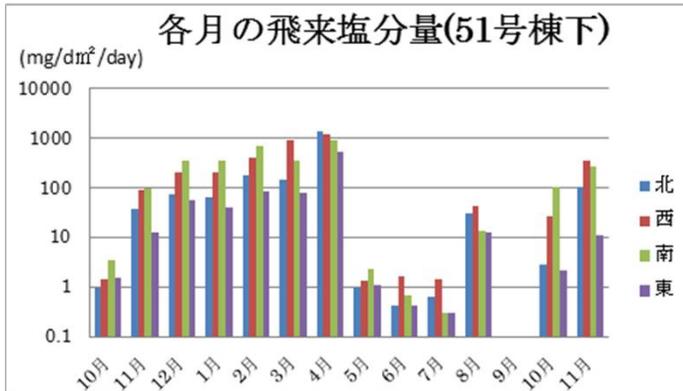
2012年11月 各方位積算風量  
(×3600(m))



秋

軍艦島における季節ごとの風況  
(琉球大学山田義智教授より提供)

# 飛来塩分量 (年間の傾向)

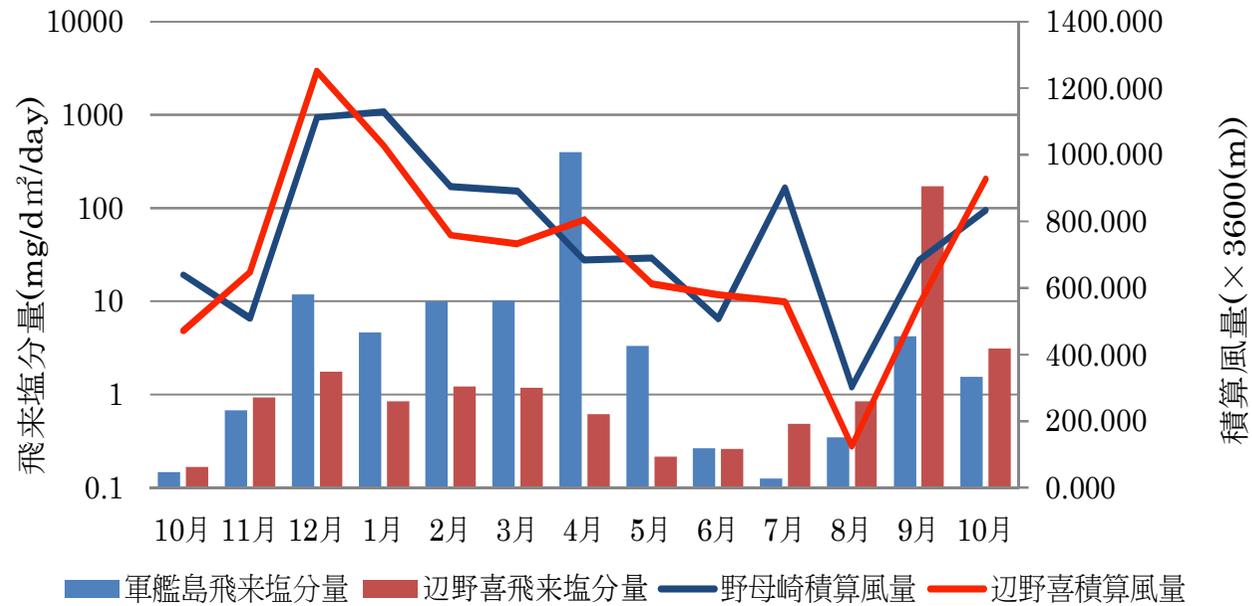


## 各地点での月毎の飛来塩分量



構造物による  
飛来塩分の回  
り込み概念

# 飛来塩分量の比較 沖縄(辺野喜)との比較

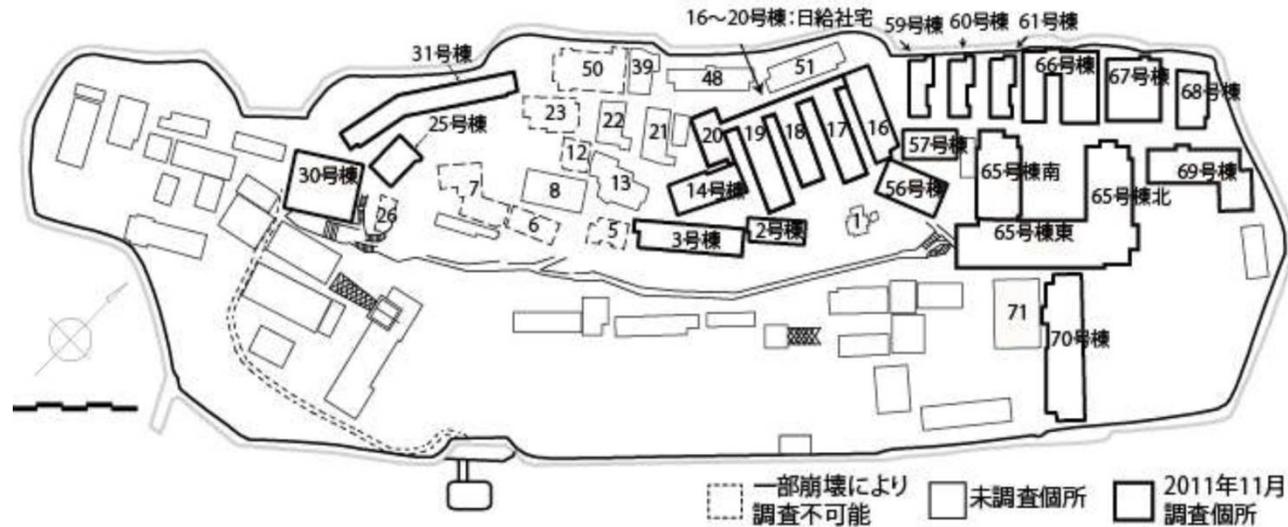


## 端島病院と辺野喜(沖縄)の飛来塩分量比較



軍艦島(左)と沖縄県辺野喜(右)の海岸の状況

# 目視による劣化状況



## 一般的な腐食(損傷)グレードの例 軍艦島での腐食(損傷)グレード

損傷度	損傷状況
無	損傷が認められない
I	ごく軽微なひび割れさび汁
II	ひび割れ、さび汁、はく離等が部分的
III	ひび割れ、さび汁、はく離、剥落等が連続的
IV	鋼材の露出や破断、コンクリートの断面欠損等

損傷度	損傷状況
I	表面のひび割れ+さび汁
II	(中間の状況)
III	腐食した鉄筋が露出
IV	(中間の状況)
V	鉄筋の痕跡はあるが朽ちている(存在しない)

# 腐食グレードの例



グレードⅠ



グレードⅡ



グレードⅢ



グレードⅣ

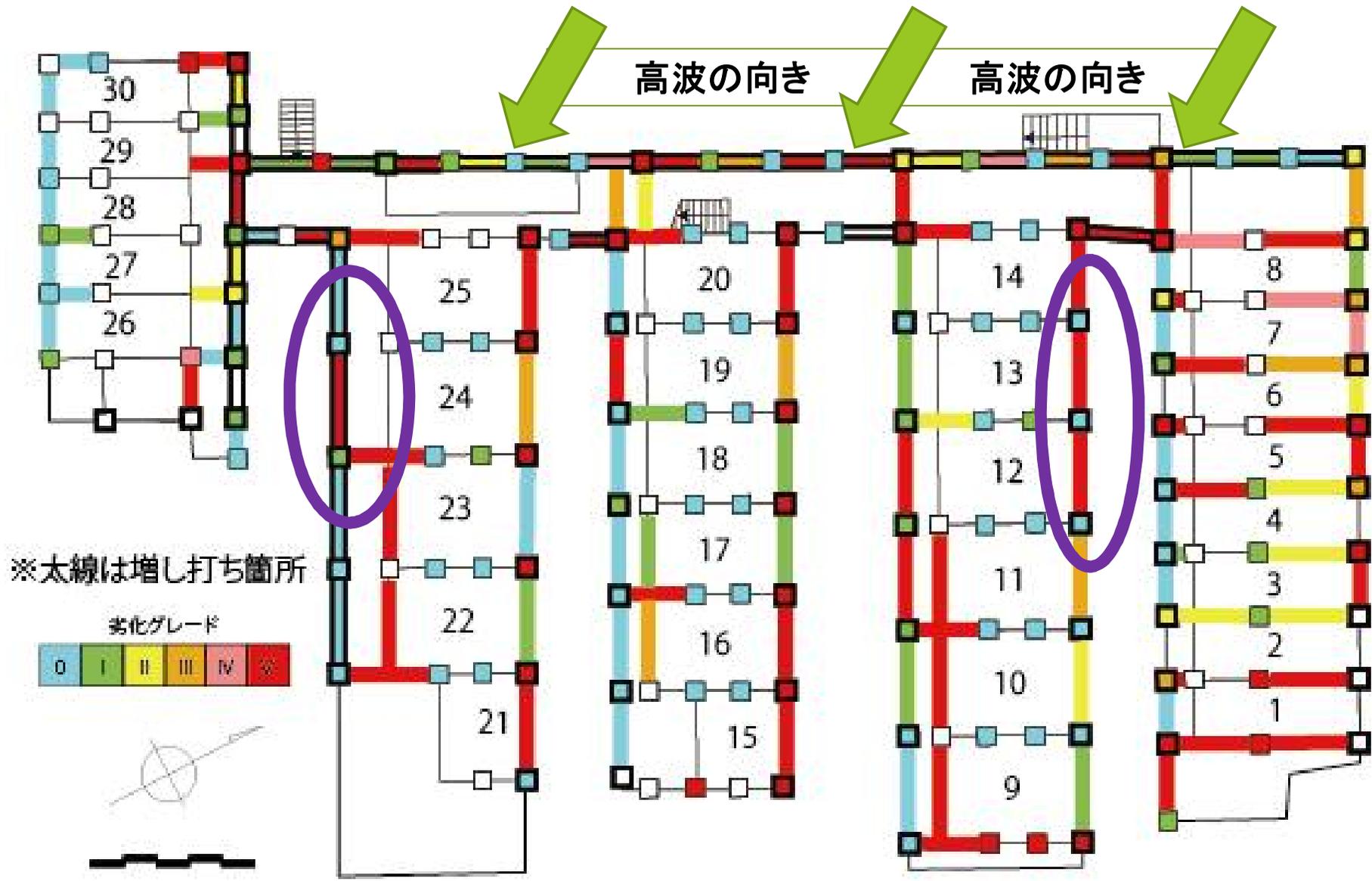


グレードⅤ

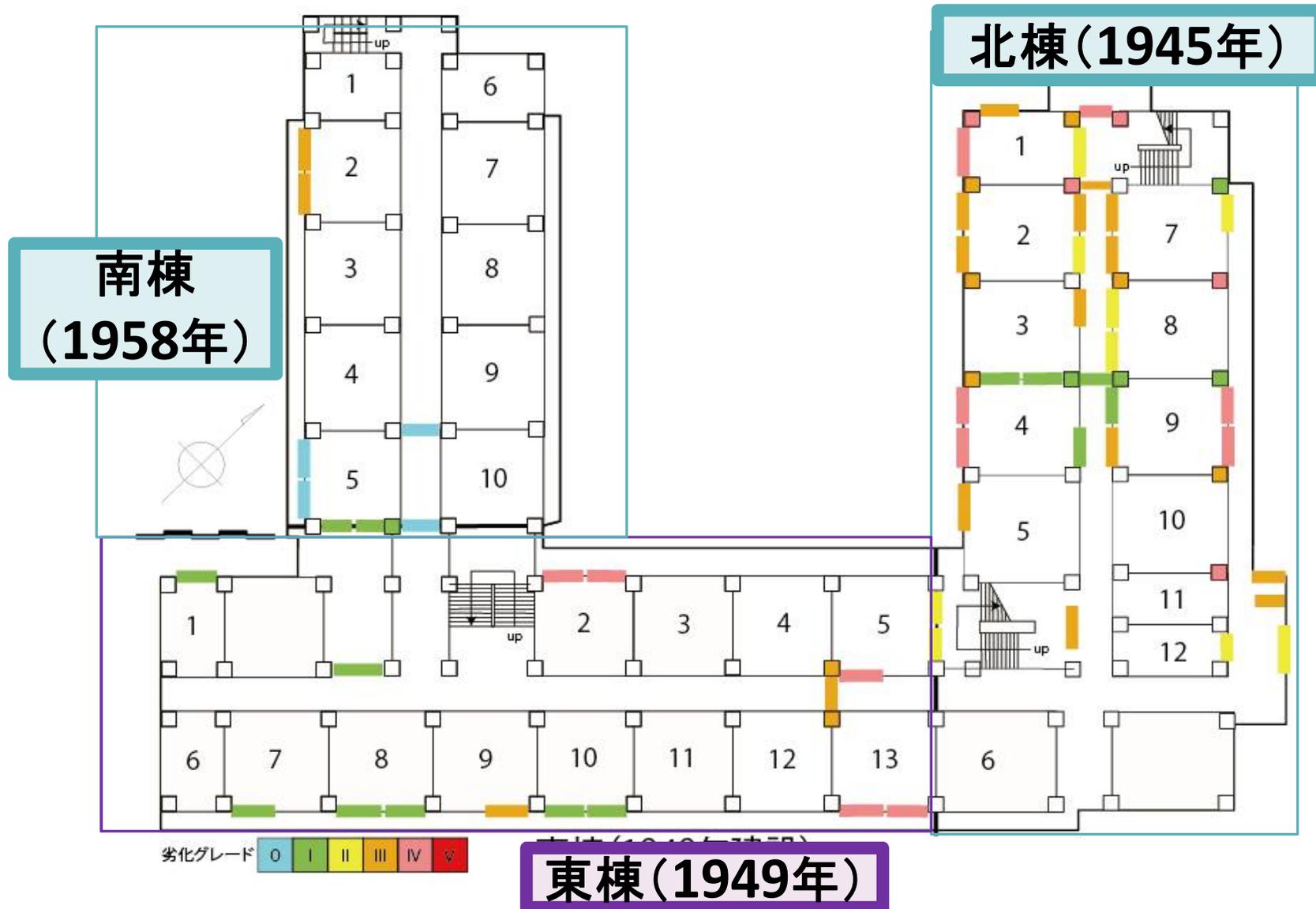


グレードⅤ

# 目視調査結果の例 日給社宅3階



# 目視調査結果の例 65号棟



# 構造性能低減率の評価 \_H27調査

## 部材の損傷状況のグレーディング

劣化度	劣化状況
0	劣化のない状態
I	若干のひび割れは見られるが、鉄筋が付着劣化しているとは考えられない状態 ひび割れ幅はおおよそ1mm以下
II	腐食により鉄筋とコンクリートが肌別れしはじめ、若干、付着劣化している状態
III片	片面のかぶりコンクリートが剥落し、鉄筋のかぶり側はほぼ肌別れしているが、鉄筋のコア側はまだ付着がある状態 コア部のコンクリートは健全で、鉄筋が全面に浮き錆び程度の状態
III両	両面のかぶりコンクリートが剥落し、鉄筋のかぶり側はほぼ肌別れしているが、主筋のコア側はまだ付着がある状態 コア部のコンクリートは健全で、鉄筋が全面に浮き錆び程度の状態
IV片	片面のかぶりコンクリートが剥落し、鉄筋とコンクリートが肌分かれし、付着力が殆どない状態 鉄筋の断面積は70%程度以上と判断できる状態、あるいは酸化鉄が表面のみと判断できる程度の状態
IV両	両面のかぶりコンクリートが剥落し、鉄筋とコンクリートが肌分かれし、付着力が殆どない状態 鉄筋の断面積は70%程度以上と判断できる状態、あるいは酸化鉄が表面のみと判断できる程度の状態
V	かぶりコンクリートが剥落し、コア部のコンクリートも欠落するほど完全に鉄筋とコンクリートが肌分かれし、付着力がない状態 鉄筋の断面積が70%未満と判断できる状態、あるいは鉄筋が層状に割裂している状態

# 部材の損傷状況評価 \_H27調査



劣化度Ⅰ(梁)



劣化度Ⅲ(梁)



劣化度Ⅳ(梁)



劣化度Ⅱ(柱)

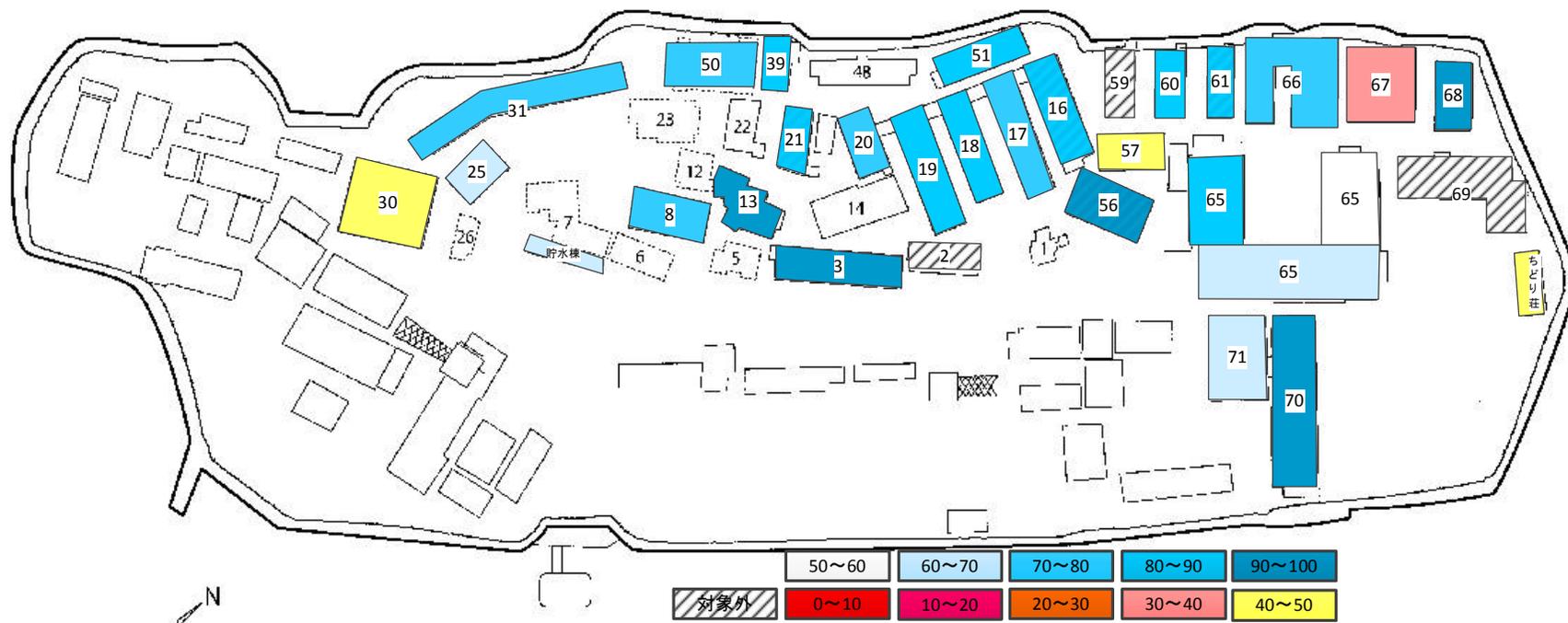


劣化度Ⅲ(柱)

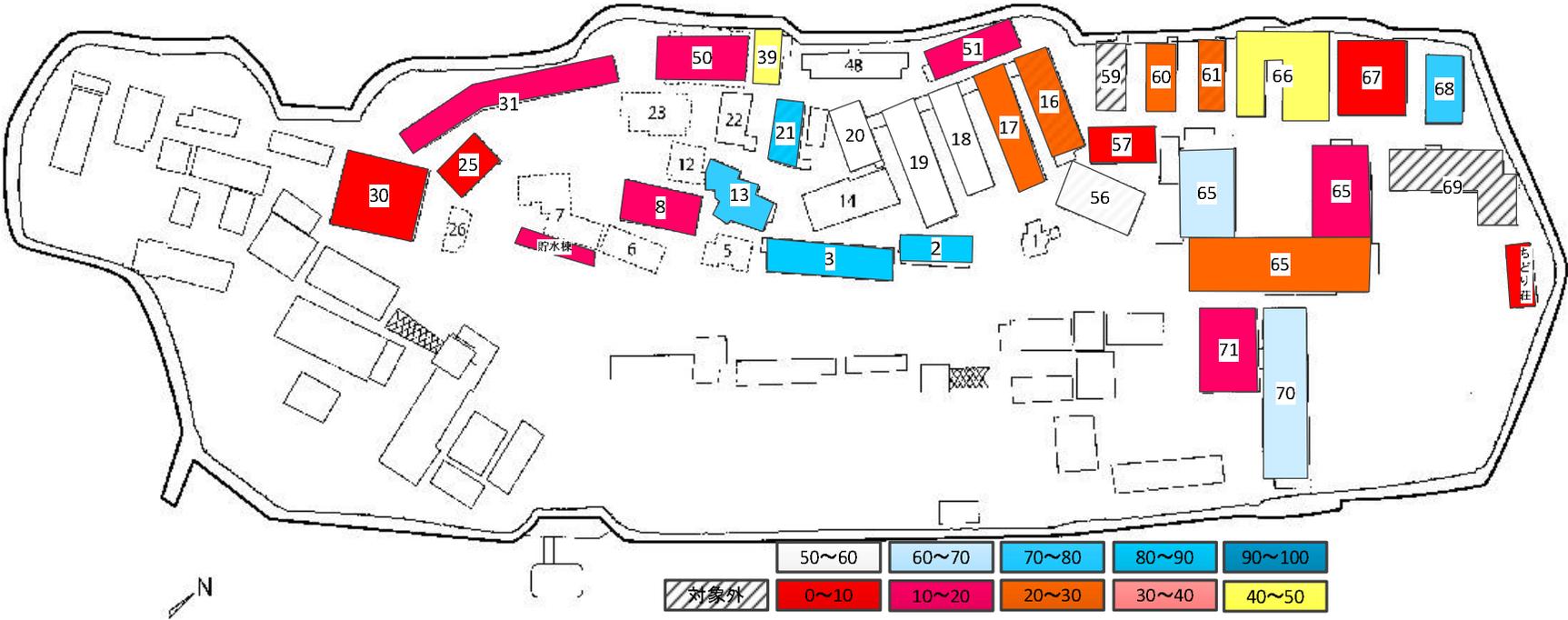


劣化度Ⅴ(柱)

# 長期性能(自重支持)の低減率



# 短期性能(耐震性)の低減率



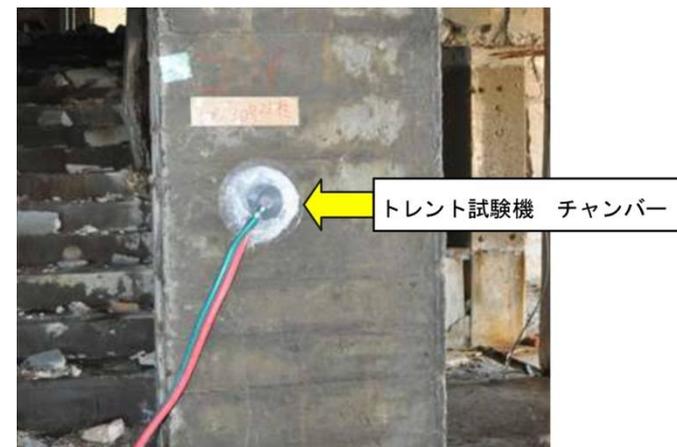
# コンクリート材料の調査

- 使用材料
  - セメントペーストの状態
  - 単位セメント量
  - 骨材の種類
- 圧縮強度
- 中性化深さ
- 塩化物イオン量

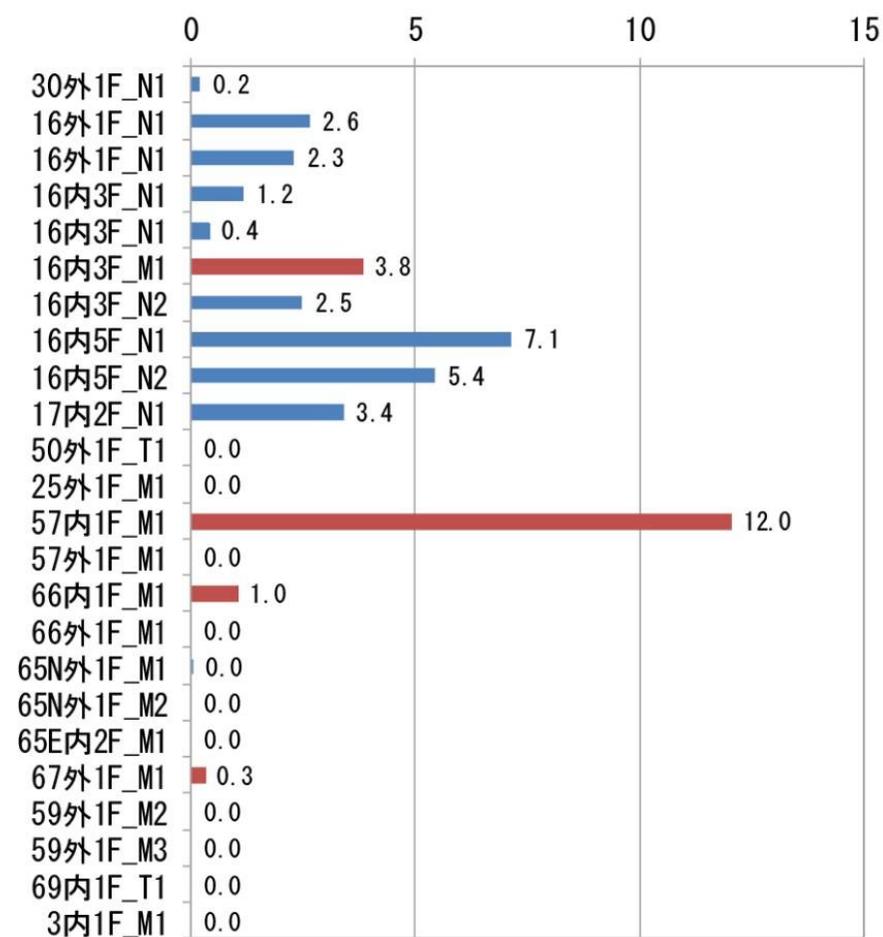
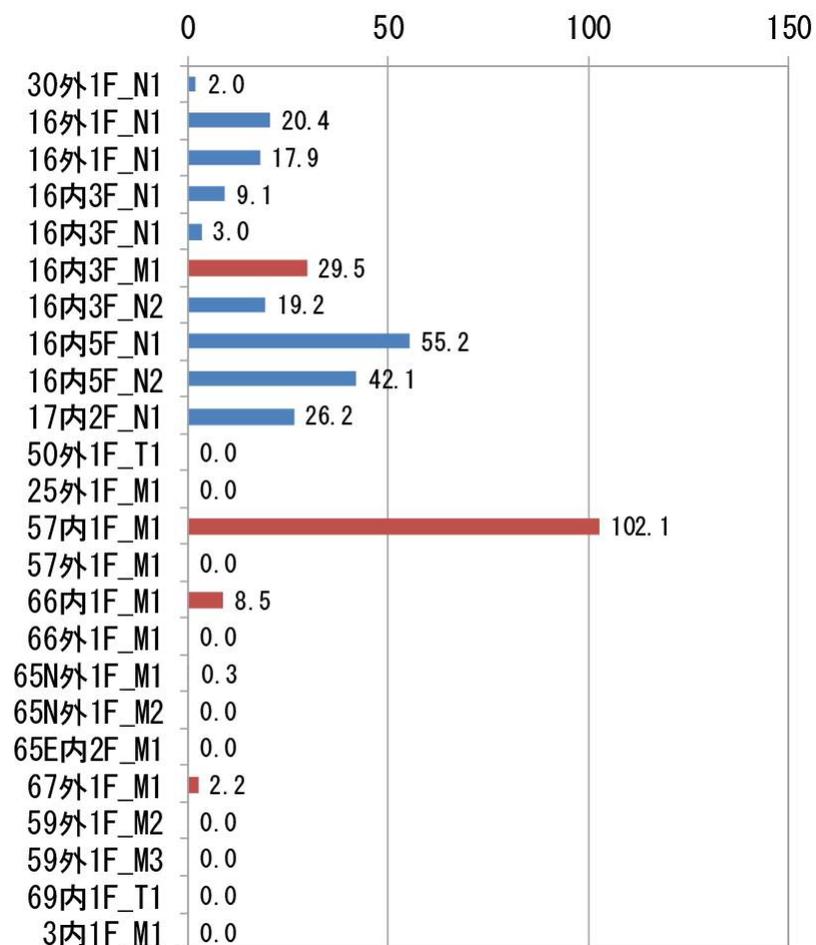
# 中性化深さの調査

調査方法:

- (1) JIS A 1152 (フェノールフタレイン法・コア側面による調査)
- (2) 透気試験 (トレント法)



# 中性化深さ試験結果

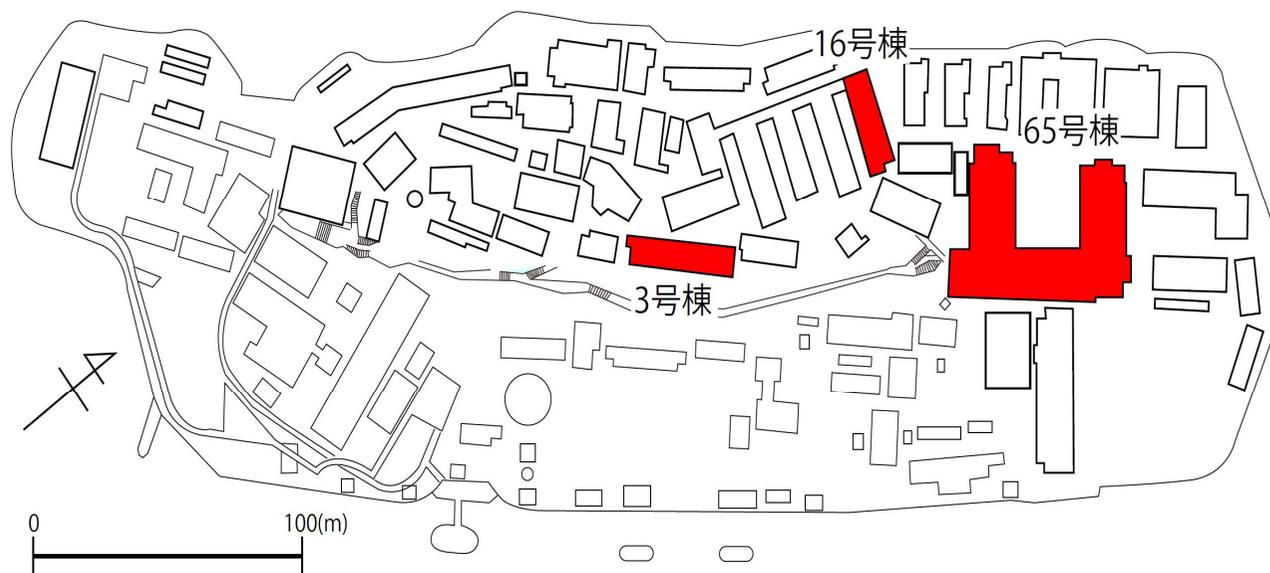


中性化深さ(mm)

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

# 塩化物イオン量調査(H28実施)

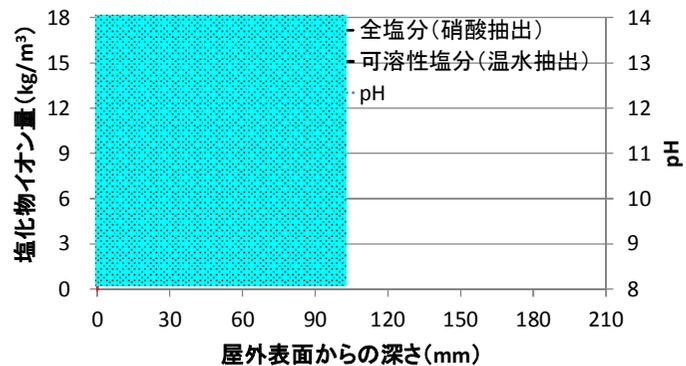


## 2017年時点で保存が検討されている住棟

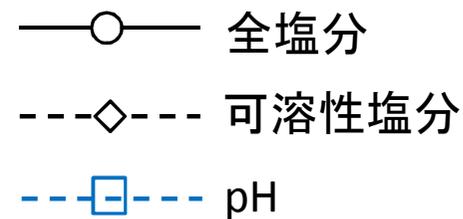
- 3号棟(1959年) ✓ 全塩化物イオン量
- 16号棟(1918年) ✓ 可溶性塩化物イオン量
- 65号棟(1945～1958年) ✓ 中性化深さ
- ✓ pH

# 3号棟

屋外  
モルタル

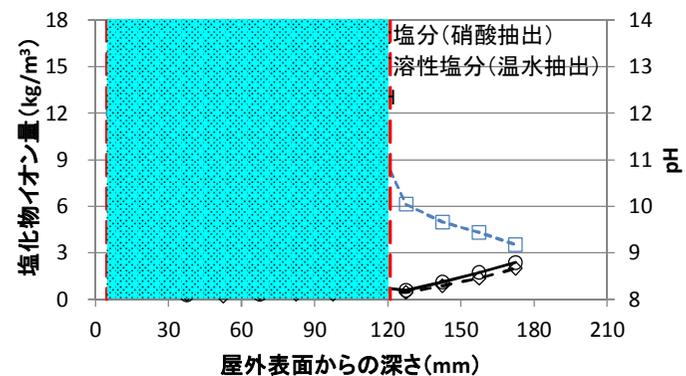


屋内  
折り取り



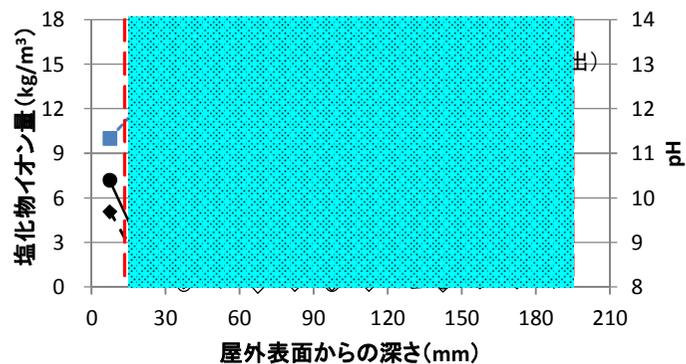
各記号の中実の記号は  
モルタルを表す

屋外  
モルタル



屋内  
打放し

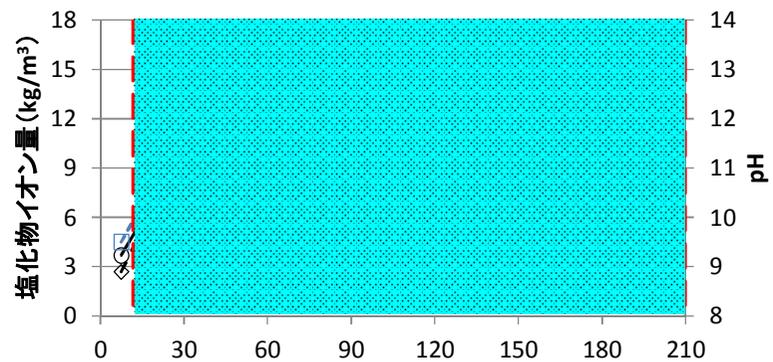
屋内  
モルタル



屋内  
打放し

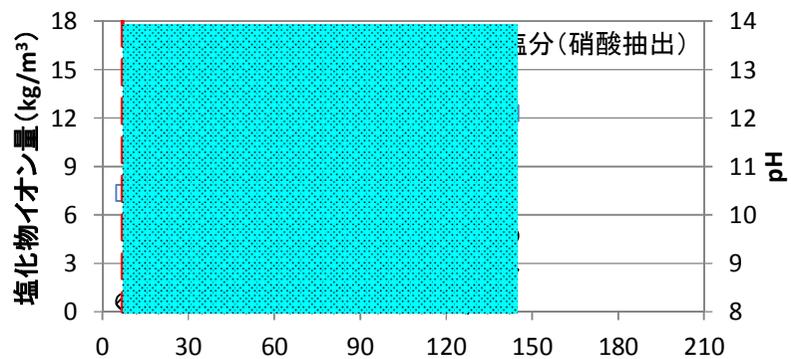
# 16号棟

屋外  
打放し



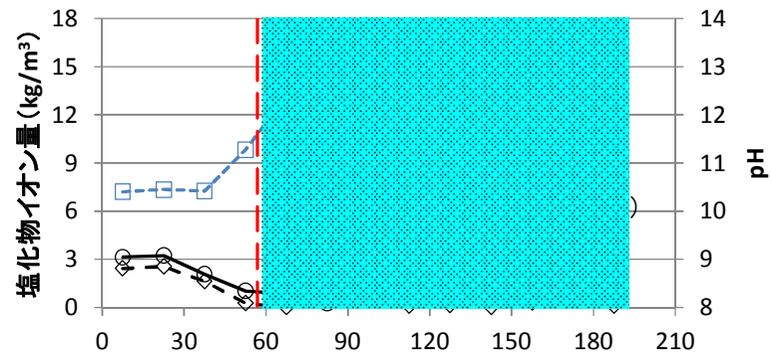
屋内  
レンガ

屋外  
打放し



屋内  
折り取り

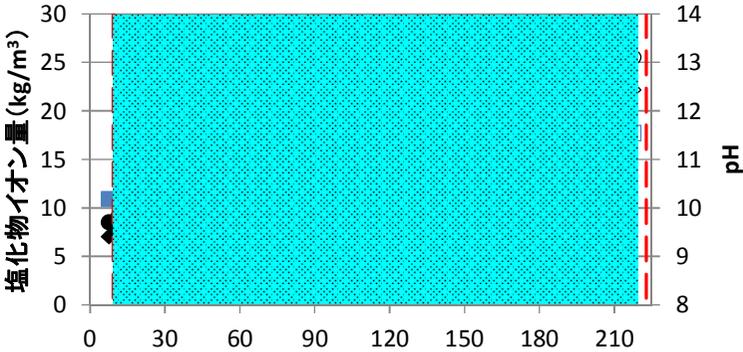
屋内  
打放し



屋内  
折り取り

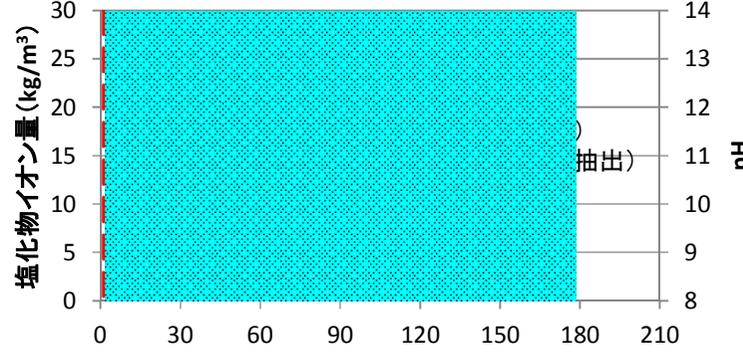
# 65号棟

屋外  
モルタル



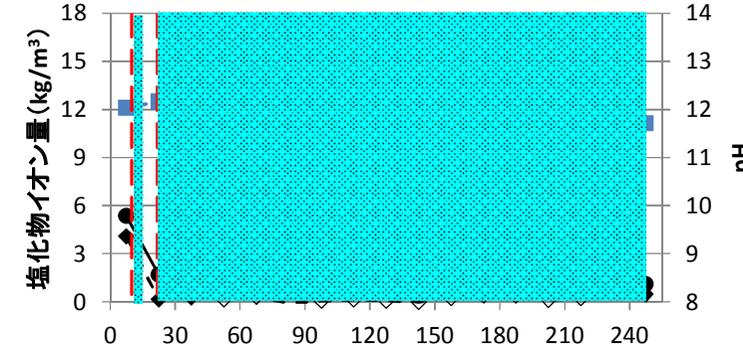
屋内  
繊維壁

屋外  
モルタル



屋内  
折り取り

屋内  
モルタル



屋内  
モルタル

# 暴露試験実施の背景・目的

日本建築学会（2011～2012）の調査の一環として、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

外観をできるだけ変えずに、鋼材腐食の進行を抑制



# 歴史的建造物の保存・修復

## 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

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

# 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<sup>-</sup> = 1.2kg/m<sup>3</sup>(内在塩分、飛来塩分が比較的少ない部位を想定)

10kg/m<sup>3</sup>(初期の建物、飛来塩分が比較的多い部位を想定)

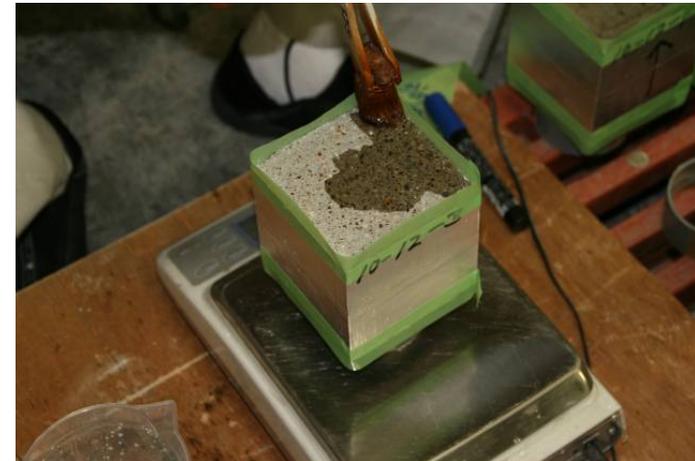
## 基材モルタルの養生

材齢2日	湿空養生
材齢7日(5日間)	標準養生
材齢10日(3日間)	50°C気中乾燥
材齢31日(21日間)	促進中性化(中性化深さ約21mm)
～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

100×100×100mm

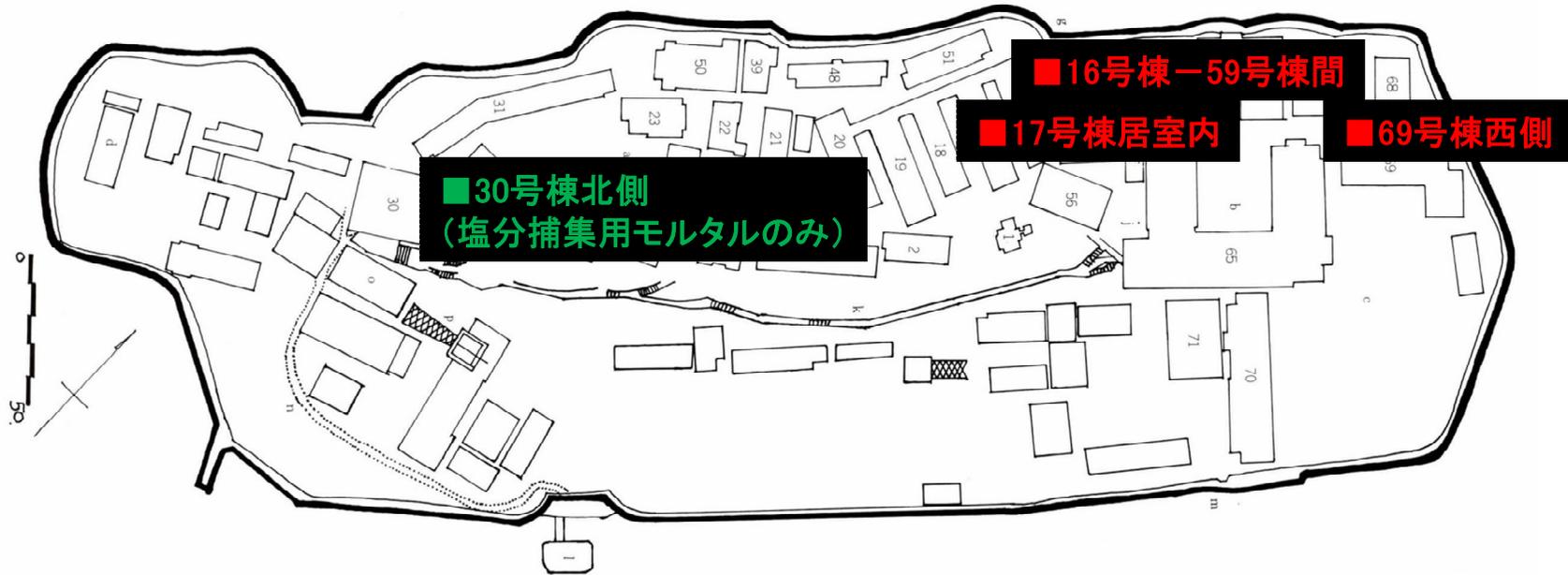
側面2面に補修を施し、残り4面を厚膜表面被覆材でシール



# 補修仕様

分類	記号	仕様
補修なし	N	補修無し
表面被覆	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)
LiNO <sub>2</sub> 処理	LNP1	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布 (400g/m <sup>2</sup> ) メーカー標準塗布量
	LNP2-1.2	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布224g/m <sup>2</sup> (Cl <sup>-</sup> 1.2kg/m <sup>3</sup> 用・モル比1.0)
	LNP2-10	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布1120g/m <sup>2</sup> (Cl <sup>-</sup> 10kg/m <sup>3</sup> 用・モル比0.6)
	LNIJ	LiNO <sub>2</sub> 高圧注入処理 (注入量 : Cl <sup>-</sup> 1.2kg/m <sup>3</sup> 用 5cc/体、Cl <sup>-</sup> 10kg/m <sup>3</sup> 用30cc/体)
	LNP+PCP	Li <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Si系固化材表面塗布 (200g/m <sup>2</sup> ) 後 LiNO <sub>2</sub> 表面塗布 (約280g/m <sup>2</sup> ) およびLiNO <sub>2</sub> 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 <sup>2</sup> )
LiNO <sub>2</sub> +浸透性 吸水防止材	LNP1+BP	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布 (400g/m <sup>2</sup> ) 後、浸透性吸水防止材塗布 (600g/m <sup>2</sup> )
	LNIJ+BP	LiNO <sub>2</sub> 高圧注入処理 (上記参照) 後、浸透性吸水防止材塗布 (600g/m <sup>2</sup> )

# 暴露試験の実施状況



16号棟—59号棟間  
(飛来塩分の多い環境)

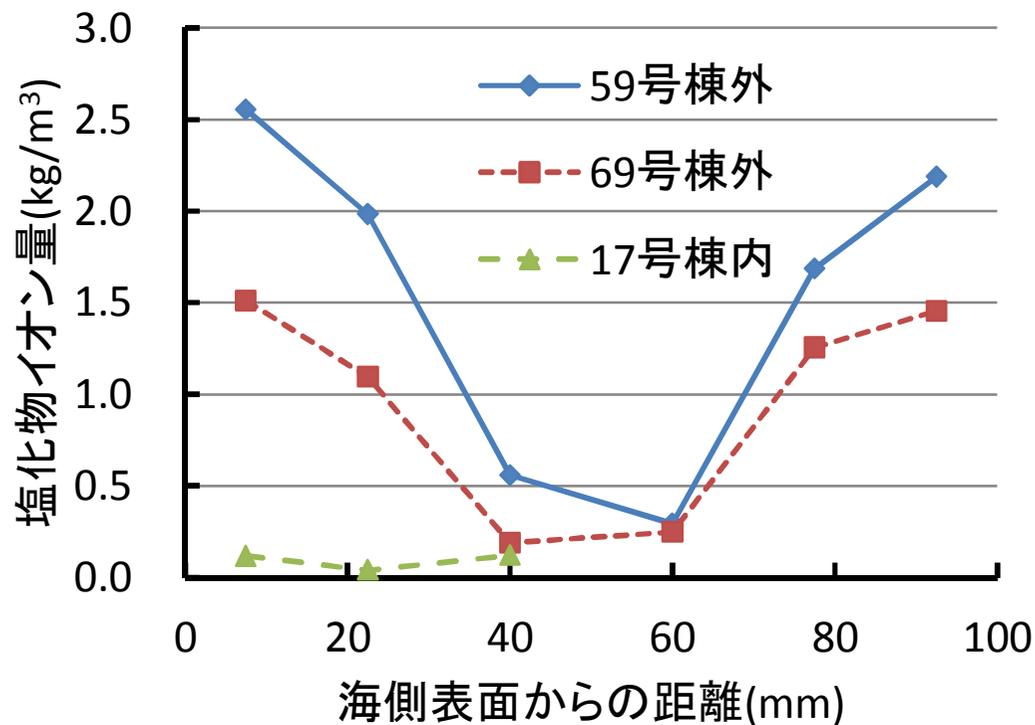


69号棟(端島病院)西側  
(飛来塩分が中程度の環境)



17号棟居室内  
(飛来塩分がない環境)

# 飛来塩分量（試験体による測定）

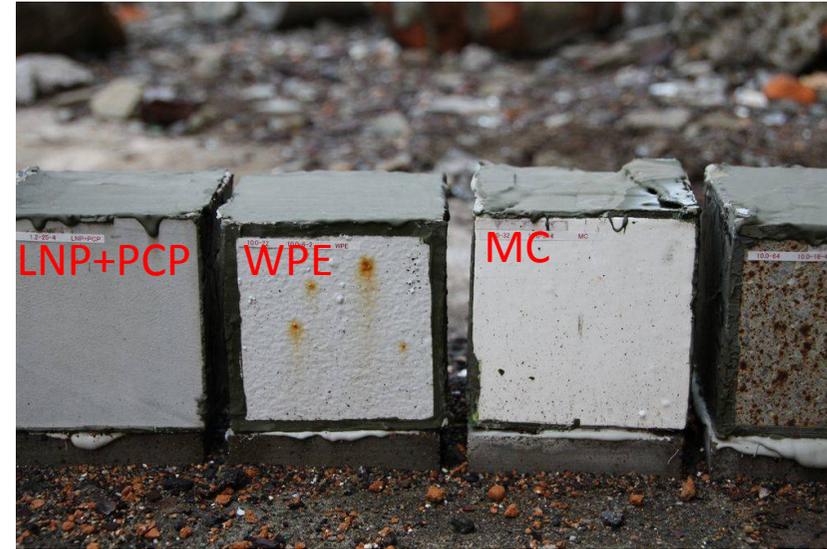
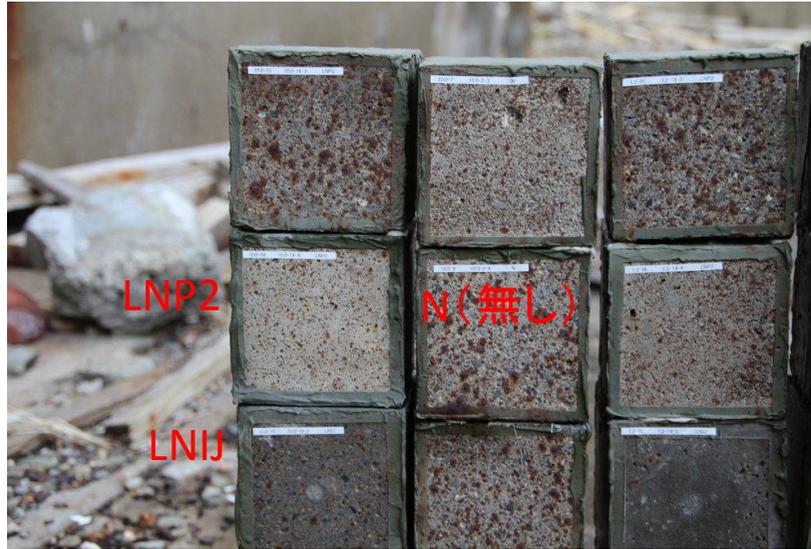


暴露場所	向き	表面Cl-量 (kg/m³)	見掛けの拡散係数 (cm²/年)
59号棟外	海側	3.24	0.17
	山側	2.86	0.20
69号棟外	海側	1.97	0.22
	山側	1.90	0.17

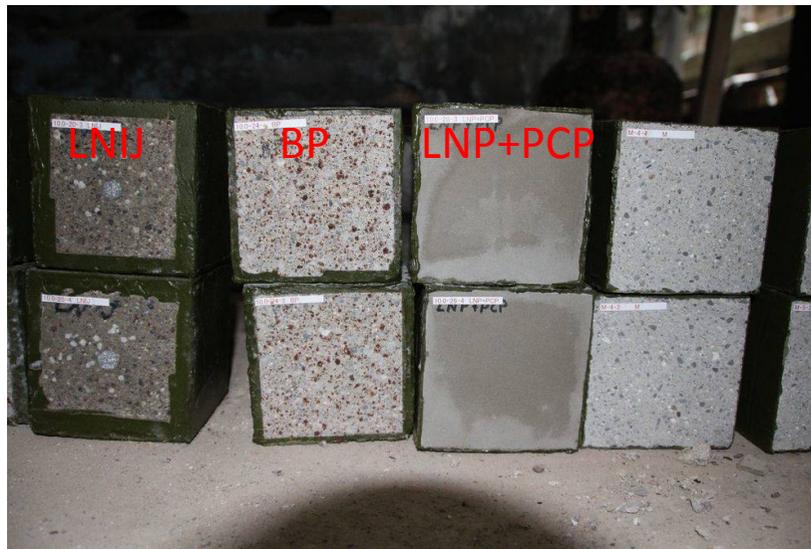
塩化物イオン量は、温水抽出塩分（イオンクロマトグラフで測定）

# 試験体の状況の例 (2016.10)

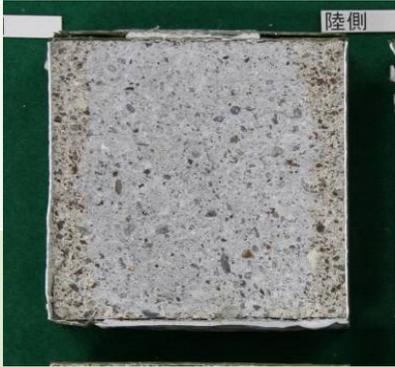
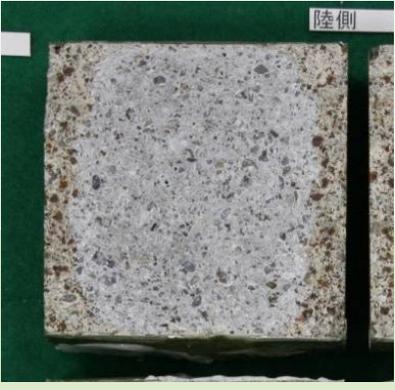
69  
号棟  
屋外



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		

グレード2の例

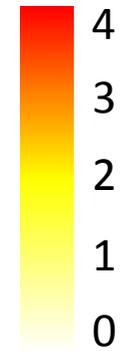
グレード2の例

グレード4の例

グレード4の例

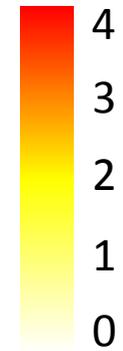
# 腐食状況 (Cl<sup>-</sup>:1.2kg/m<sup>3</sup>試験体)

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

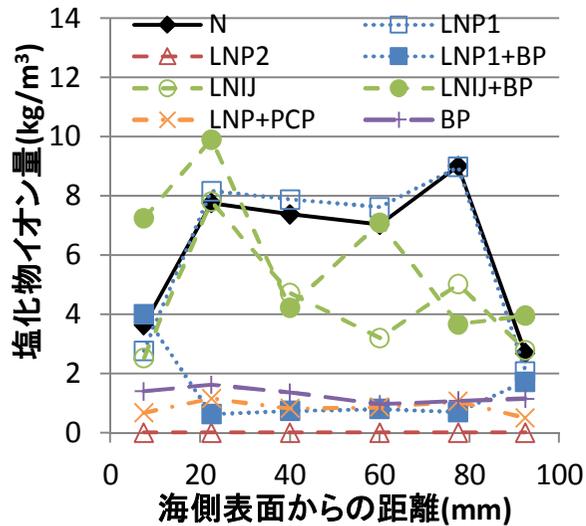


# 腐食状況 (Cl<sup>-</sup>:10kg/m<sup>3</sup>試験体)

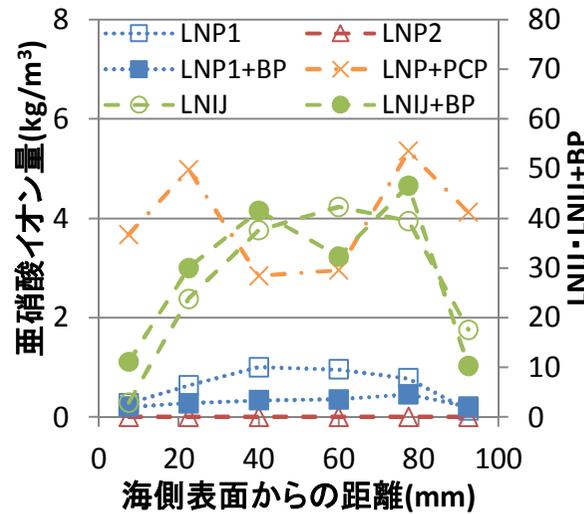
暴露場所	補修工法	海側			山側		
		表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
59号棟 屋外	N	3.8	3.3	2.0	1.8	3.8	3.8
	LNP1	4.0	3.0	0.8	1.0	4.0	4.0
	LNP2	4.0	3.3	1.0	1.0	3.5	3.8
	LNP1+BP	2.8	2.3	0.5	0.5	3.0	3.0
	LNIJ	3.8	2.5	0.3	0.8	2.8	3.8
	LNIJ+BP	3.8	2.0	0.8	1.0	1.8	2.3
	BP	3.8	2.3	1.0	1.8	2.5	3.8
	LNP+PCP	0.0	1.8	0.8	1.0	2.0	0.0
69号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



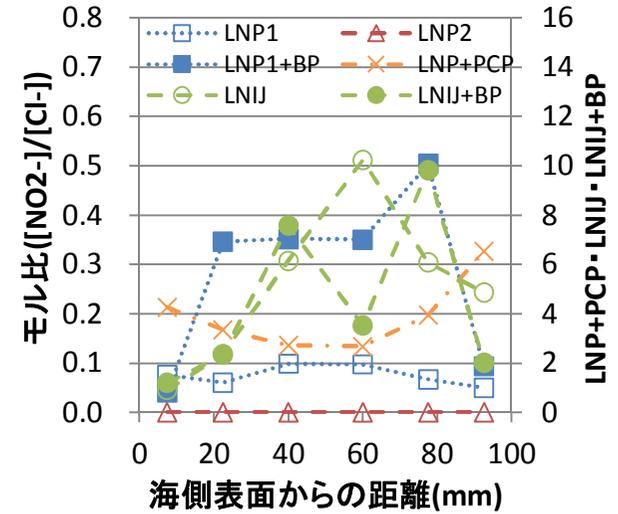
# 塩化物および亜硝酸イオンの分布の例



塩化物イオン分布  
(温水抽出塩分)



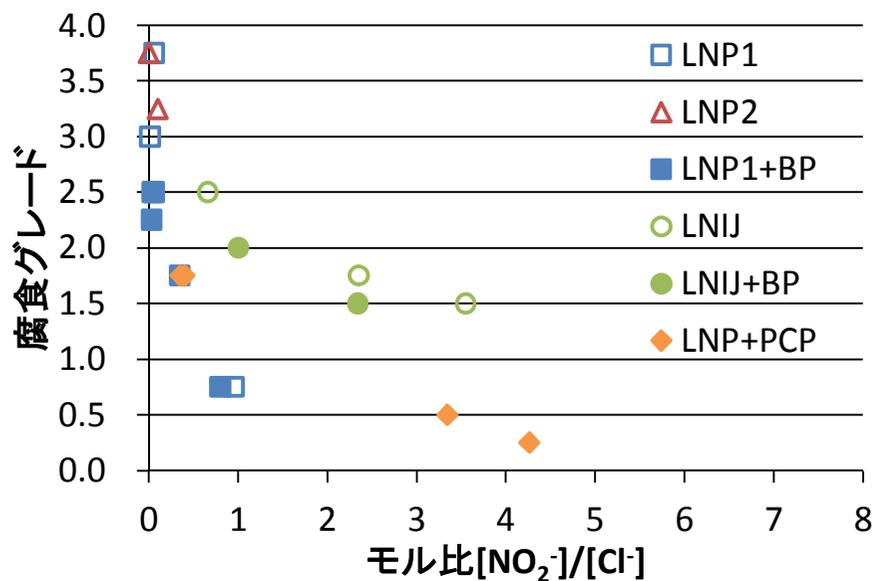
亜硝酸イオン分布



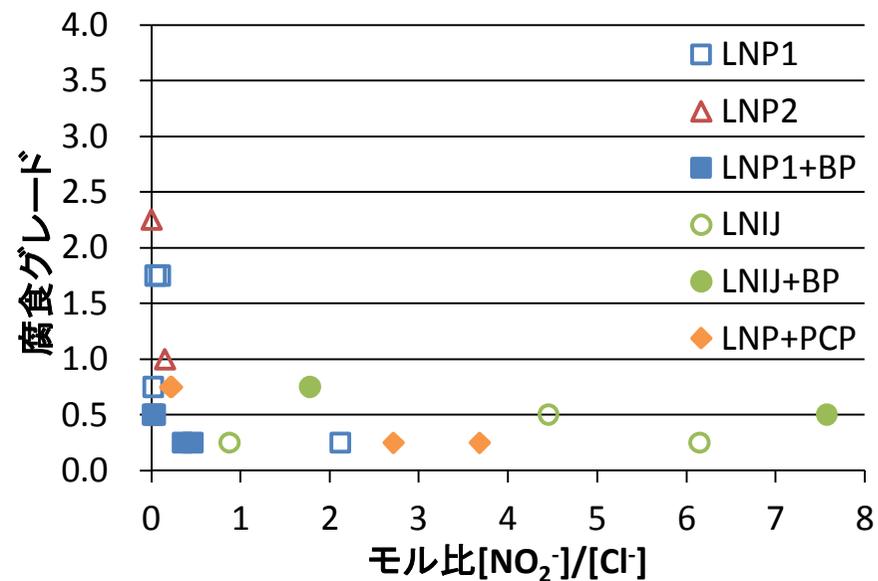
モル比分布  
([NO<sub>2</sub><sup>-</sup>]/[Cl<sup>-</sup>])

16-59号棟屋外・Cl<sup>-</sup>=1.2kg/m<sup>3</sup>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

# 補修工法の考え方の例

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"> <li>・ 塗布含浸(ただし塗布量多め)</li> <li>・ 注入工法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 塗布含浸(ただし塗布量多め)</li> <li>・ ペースト塗布</li> </ul>
	大	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 注入工法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ペースト塗布</li> </ul>
屋外 (飛来塩分大)	小	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 塗布含浸(塗布量多め) + 浸透性吸水防止剤</li> <li>・ 注入工法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 同左 + ペースト塗布</li> </ul>
	大	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 注入工法(塗布量多め) + 浸透性吸水防止剤</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 同左 + ペースト塗布</li> </ul>

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への補修

日本コンクリート工学会(JCI)の調査委員会において、  
鉄筋腐食が進行した状態に対して、現状を保存するための  
補修方法検討のための共通試験(屋外暴露試験)を実施中。

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
		

# 暴露試験の実施状況



# 亜硝酸リチウムを適用した工法提案

劣化 グレード	補修の狙い	補修材料・仕様
グレード Ⅰ	腐食抑制	LiNO <sub>2</sub> 裏面圧入＋ケイ酸塩系含浸材表面含浸
	外観重視	LiNO <sub>2</sub> 裏面圧入のみ
	簡易	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布
グレード Ⅱ	腐食抑制	LiNO <sub>2</sub> 裏面圧入＋ケイ酸塩系含浸材表面含浸＋LiNO <sub>2</sub> 混入スラリー注入
	外観重視	LiNO <sub>2</sub> 先行注入＋LiNO <sub>2</sub> 混入スラリー注入（表面未充填）
	簡易	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布＋LiNO <sub>2</sub> 混入スラリー注入（表面未充填）
グレード Ⅲ	腐食抑制	LiNO <sub>2</sub> 裏面圧入＋ケイ酸塩系含浸材表面含浸 ＋LiNO <sub>2</sub> 含有塗料塗布
	外観重視	LiNO <sub>2</sub> 裏面圧入＋ケイ酸塩系含浸材表面含浸 ＋LiNO <sub>2</sub> 混入スラリー注入（表面未充填）
	簡易	鉄筋を外して裏面のさびを除去し、LiNO <sub>2</sub> ペースト塗布
	断面修復	腐食部にLiNO <sub>2</sub> 塗布後ポリマーセメントモルタルで断面修復

# まとめ

## 軍艦島の建築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系歴史的構造物が抱える問題

# 歴史建造物の保存・保全のための課題

## 残すべき価値は？

- Authenticityの理解・解釈
- 保存・保全のための優先順位

## 残すための方法は？

- 外観保持・可逆性・コスト
- 亜硝酸リチウムを適用した補修工法