

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)

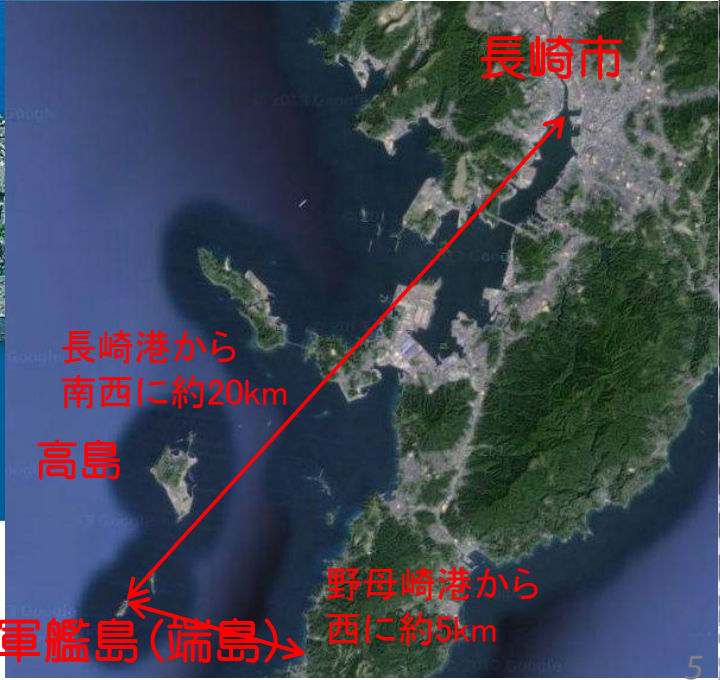


北西側の航空写真

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

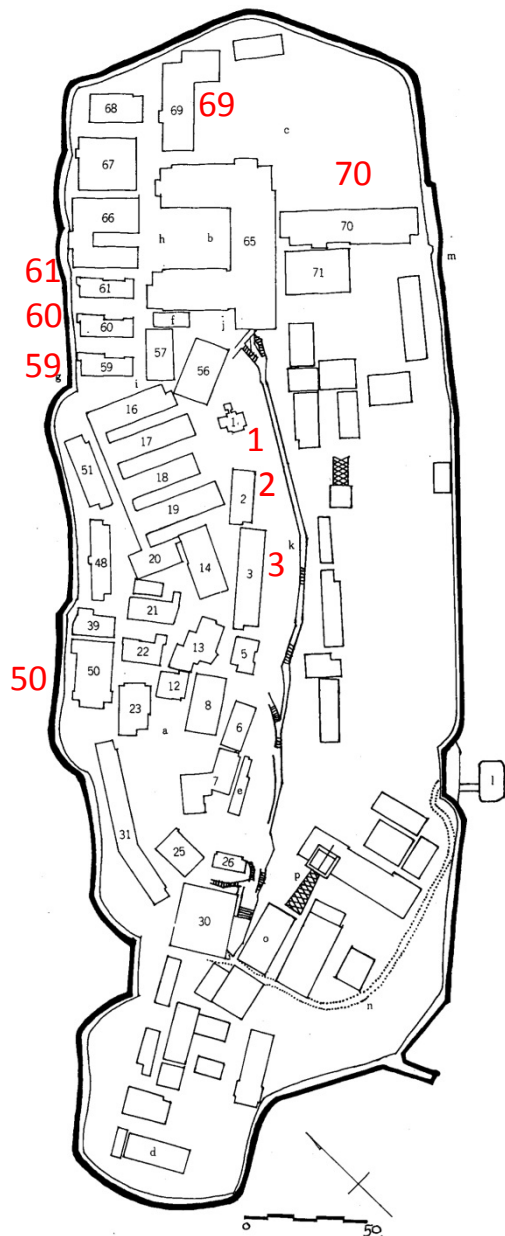
軍艦島の簡易年表

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

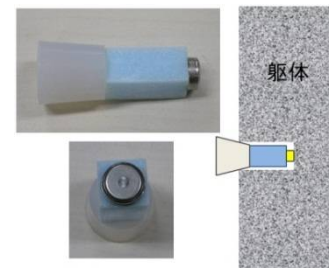


外気温湿度
観測装置



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

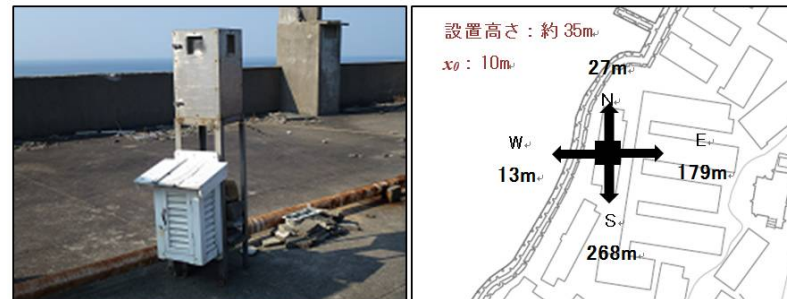
飛来塩分の調査



飛来塩分捕集器

海岸までの距離

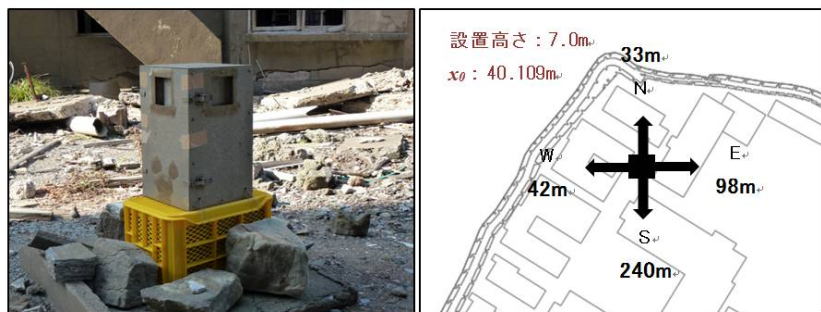
51号棟の1階付近



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

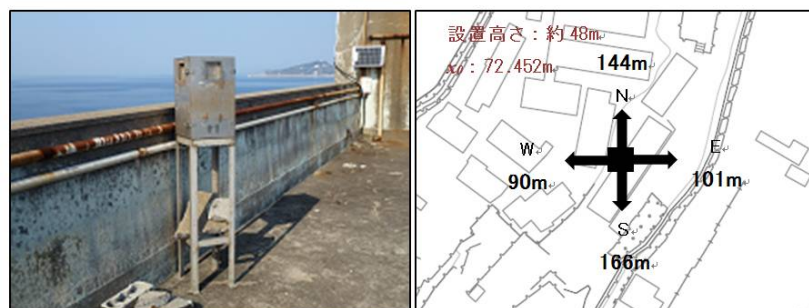
端島病院(69号棟)付近



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

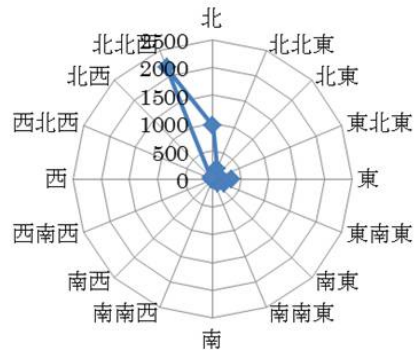
海岸までの距離

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

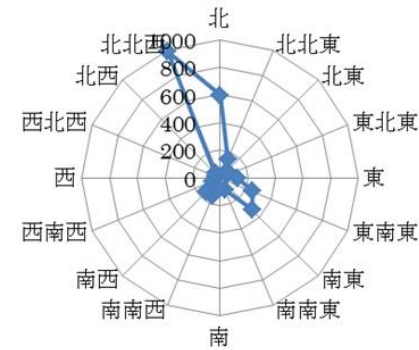
軍艦島の風況 (野母崎気象データより)

2012年2月 各方位積算風量
(×3600(m))



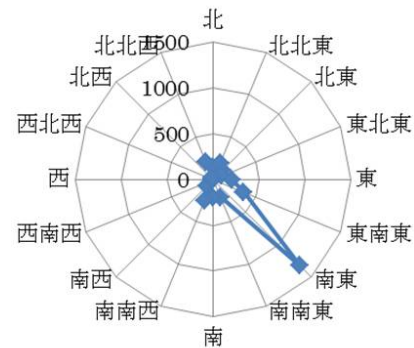
冬

2012年5月 各方位積算風量
(×3600(m))



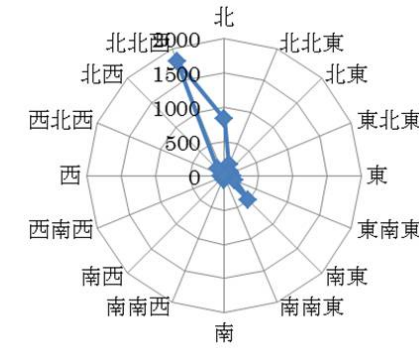
春

2012年8月 各方位積算風量
(×3600(m))



夏

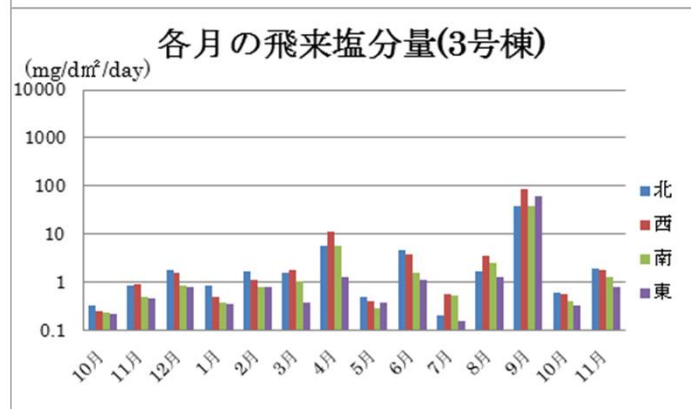
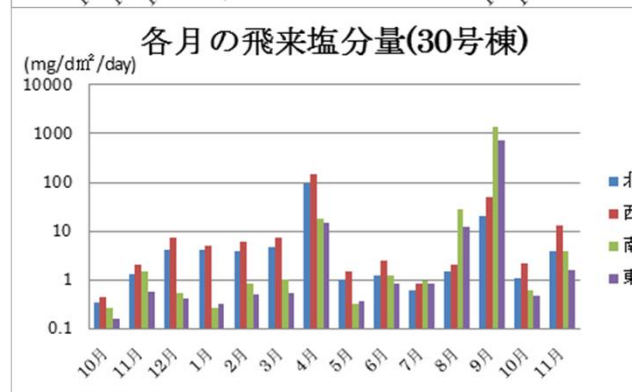
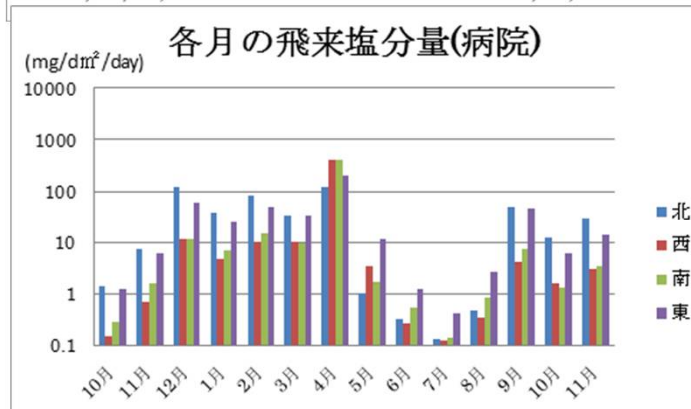
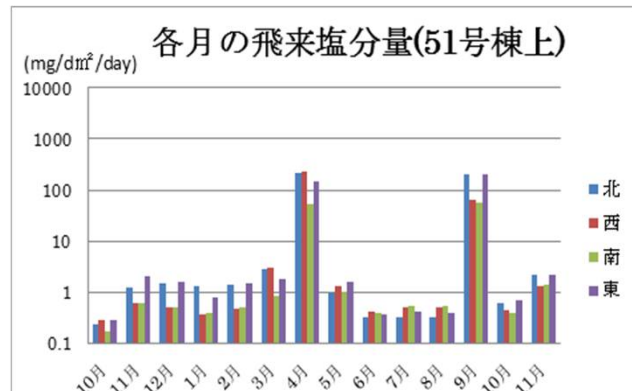
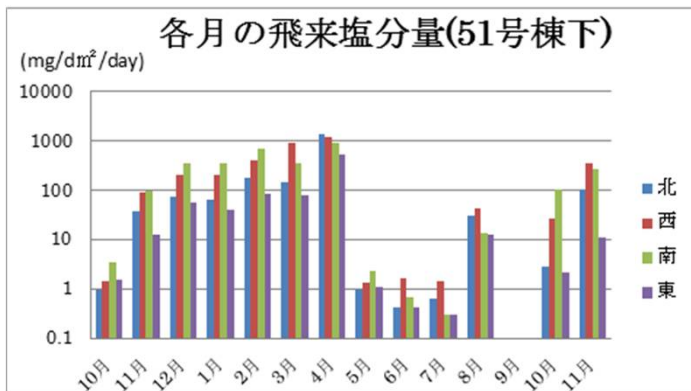
2012年11月 各方位積算風量
(×3600(m))



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)

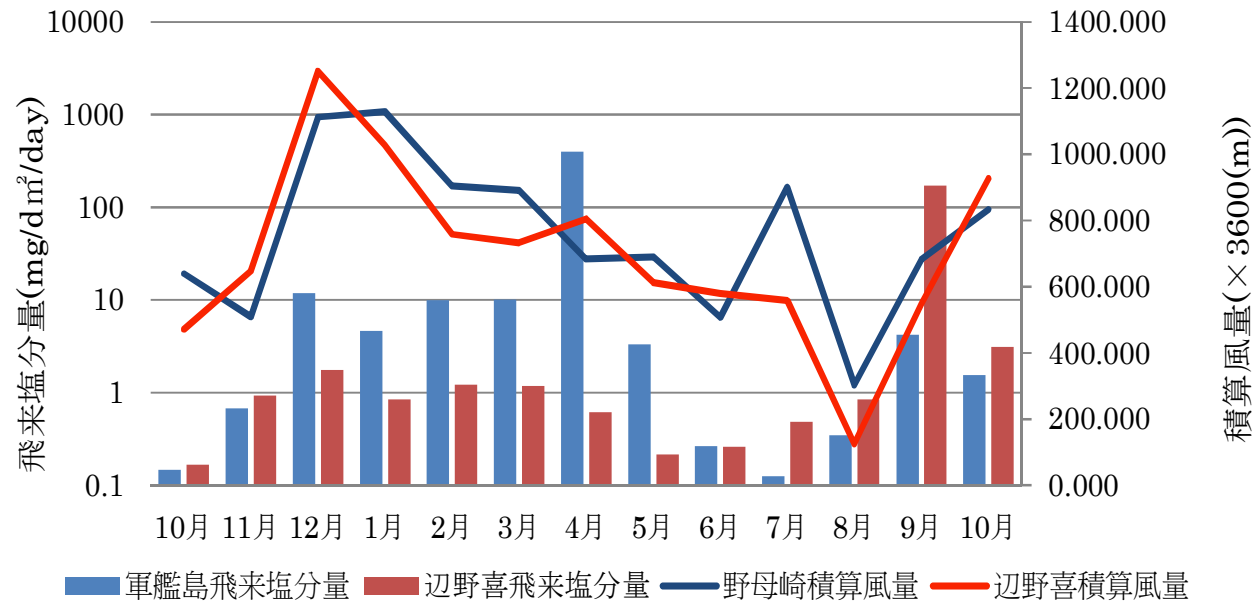


各地点での月毎の飛来塩分量



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

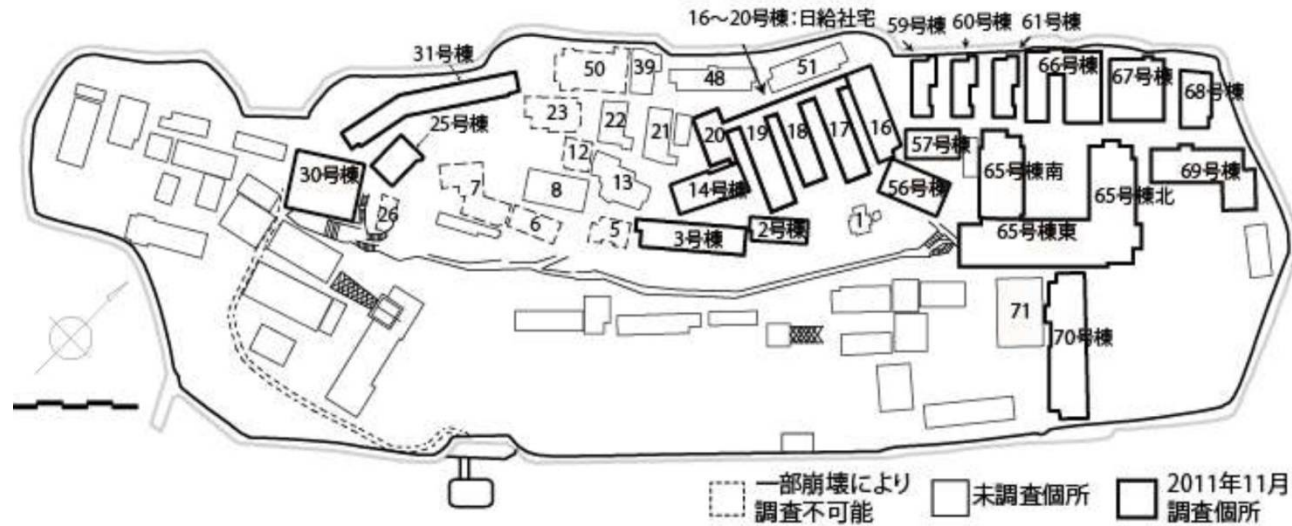


端島病院と辺野喜(沖縄)の飛来塩分量比較



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

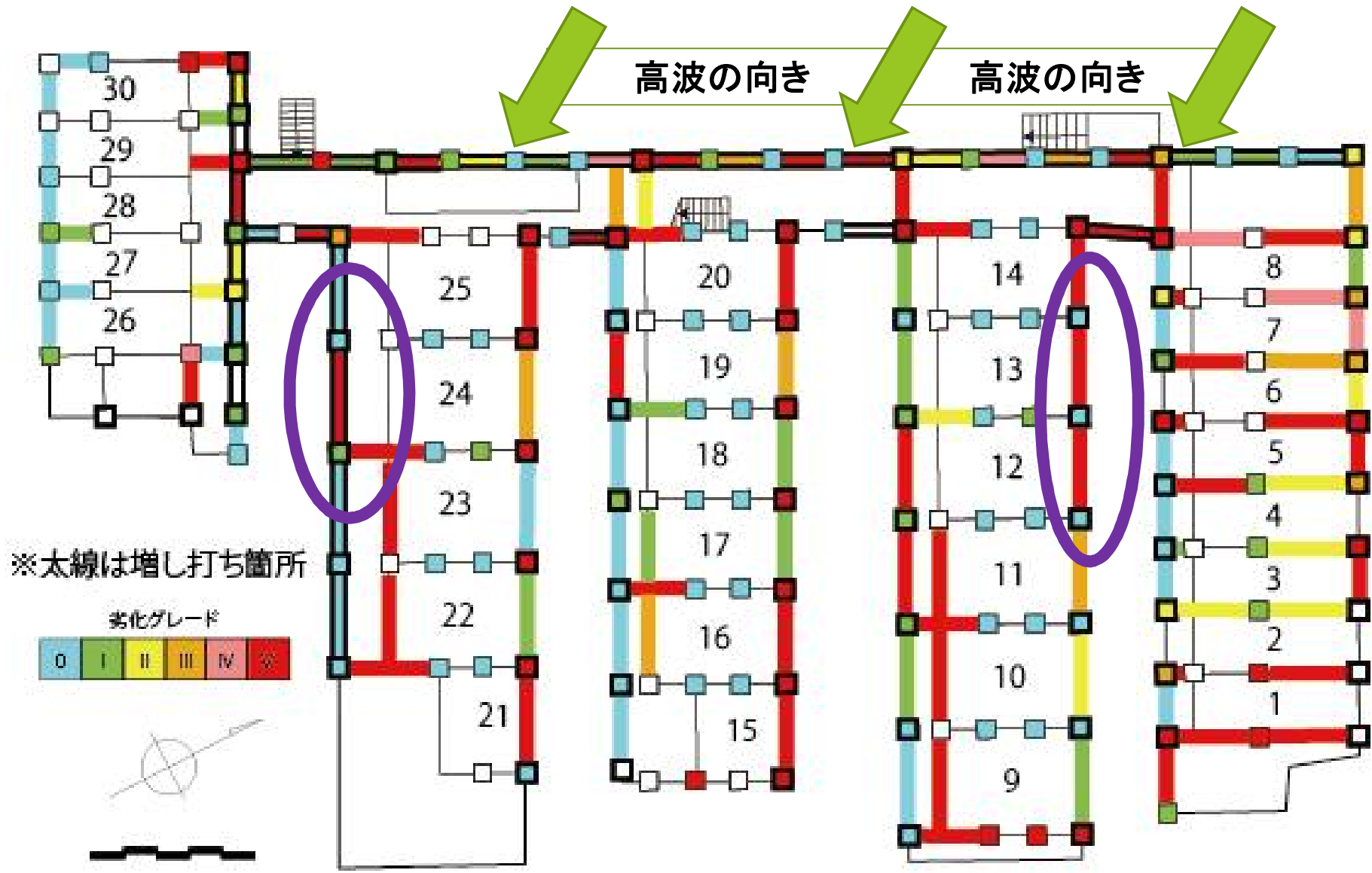


グレードⅤ

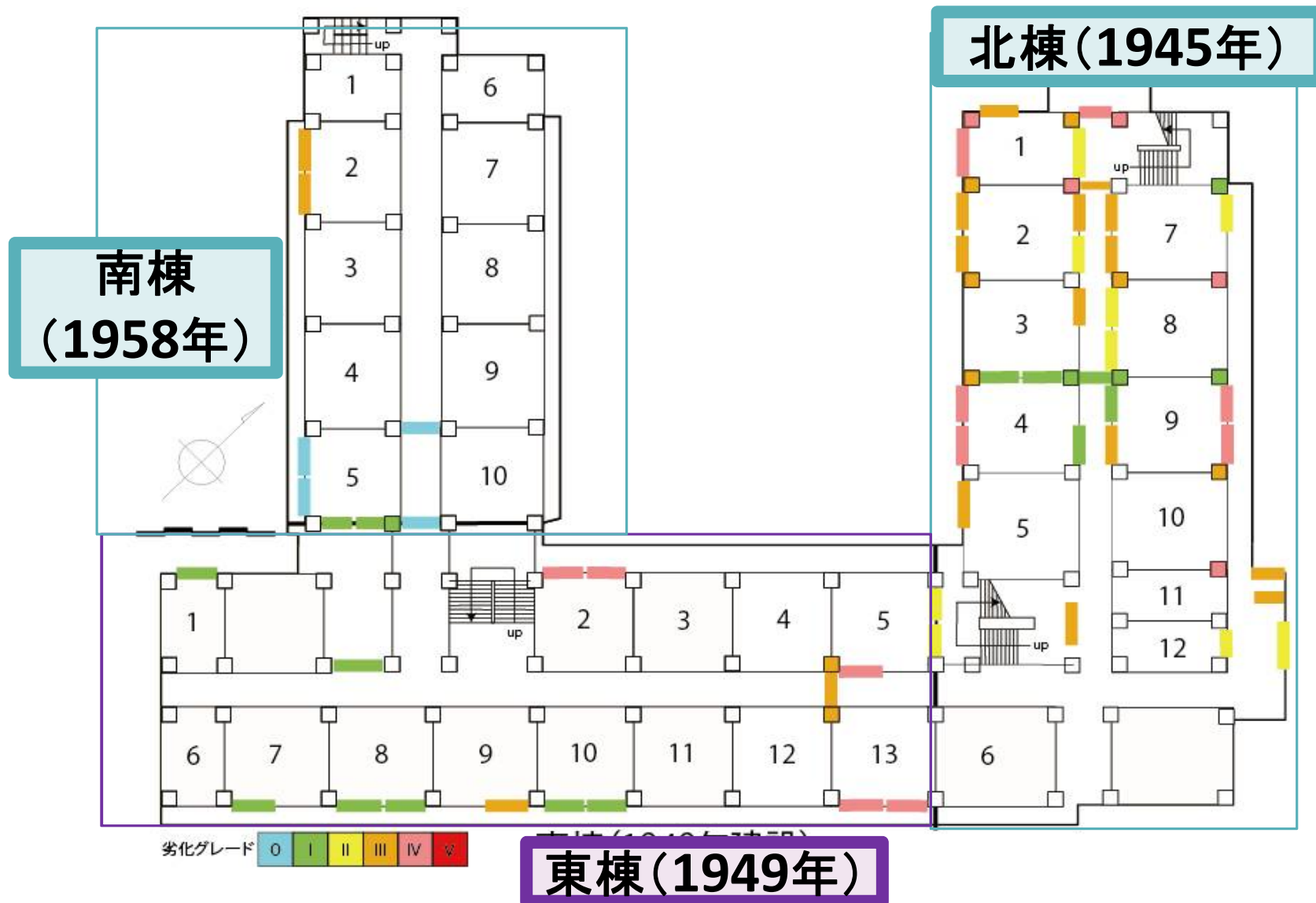


グレードⅤ

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)

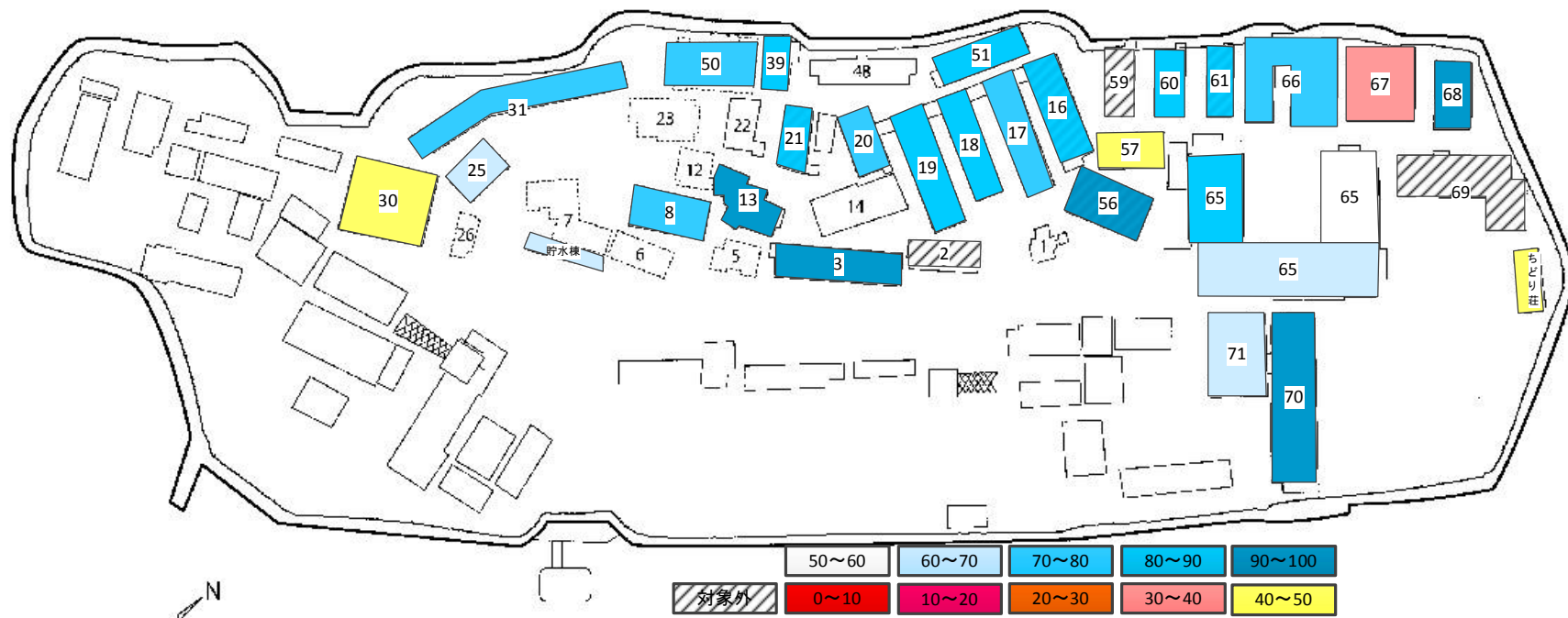


劣化度Ⅲ(柱)

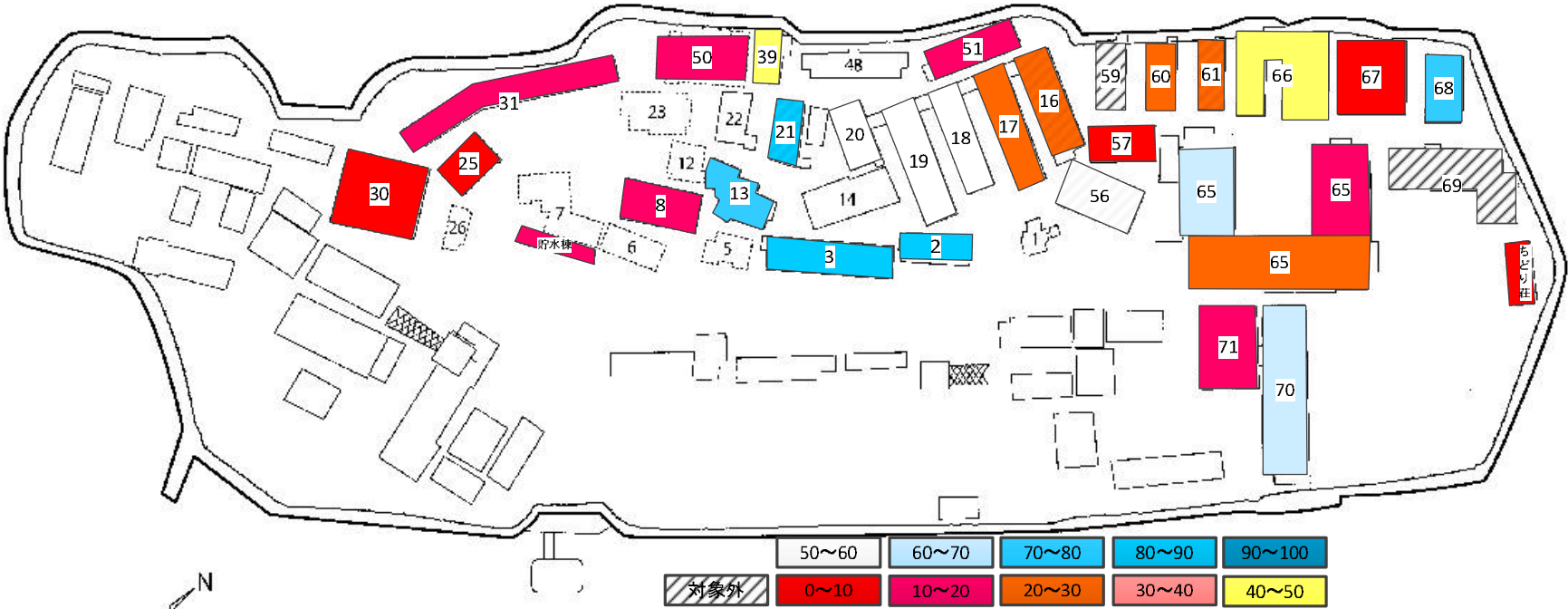


劣化度Ⅴ(柱)

長期性能(自重支持)の低減率



短期性能(耐震性)の低減率



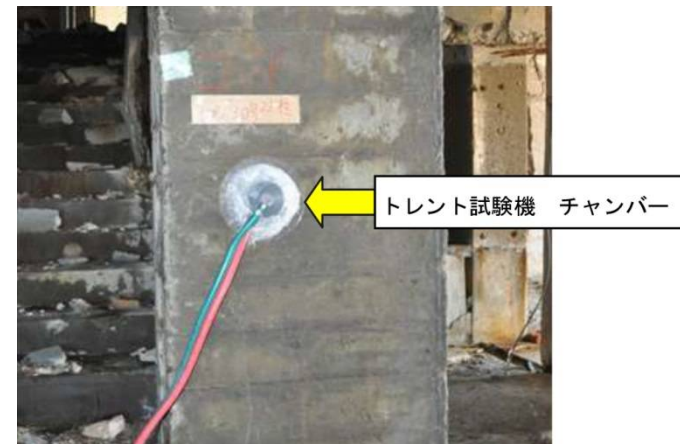
コンクリート材料の調査

- 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

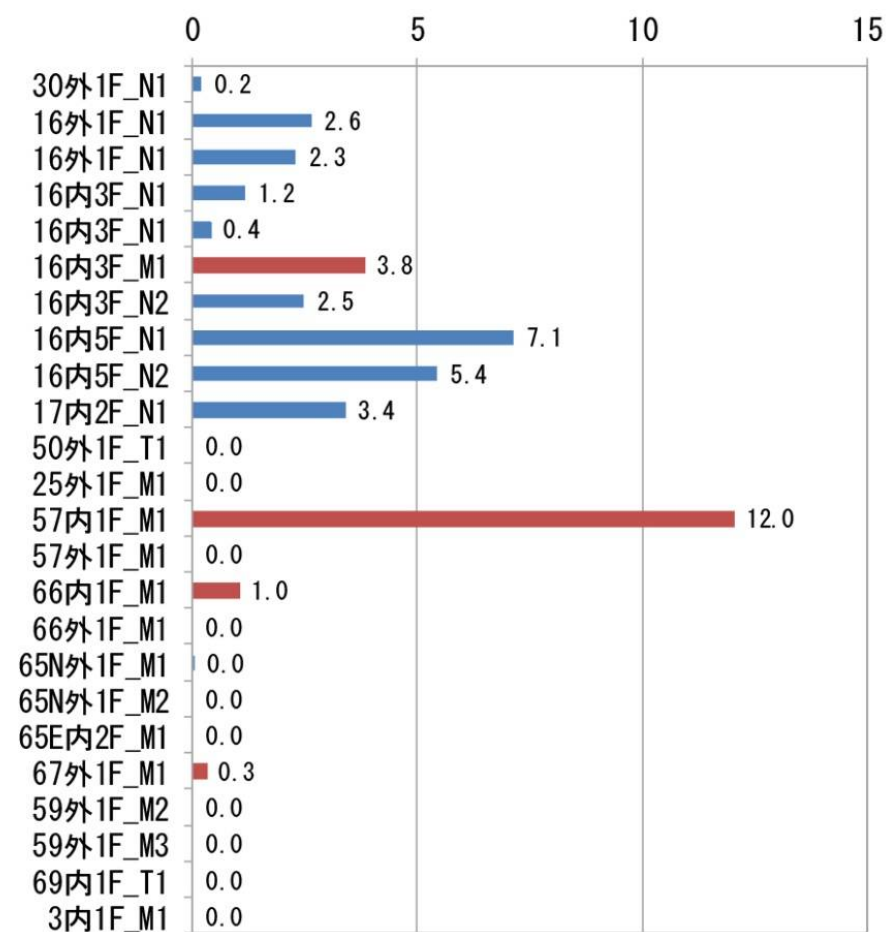
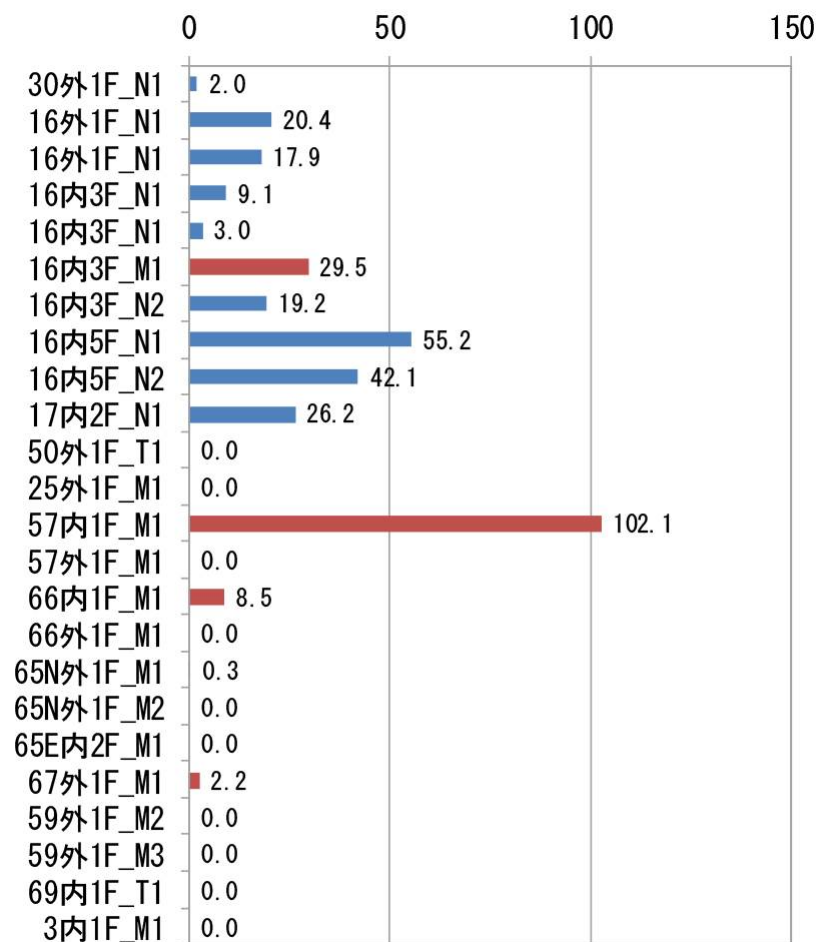
中性化深さの調査

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

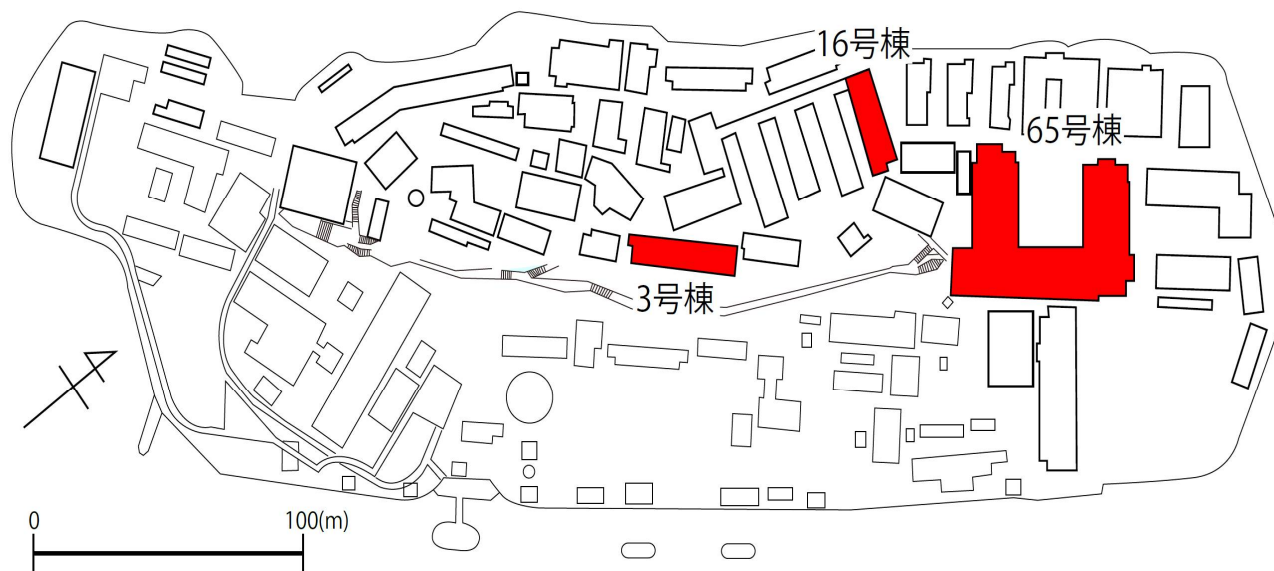


中性化深さ(mm)

中性化速度係数(mm/√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）

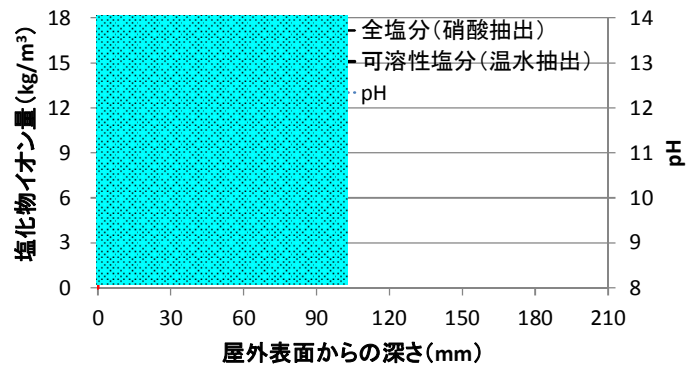


2017年時点で保存が検討されている住棟

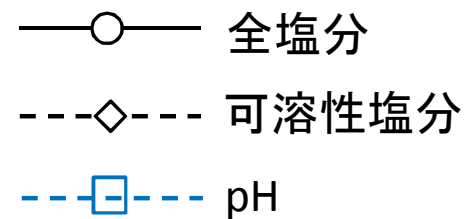
- 3号棟（1959年）
 - ✓ 全塩化物イオン量
- 16号棟（1918年）
 - ✓ 可溶性塩化物イオン量
 - ✓ 中性化深さ
- 65号棟（1945～1958年）
 - ✓ pH

3号棟

屋外
モルタル

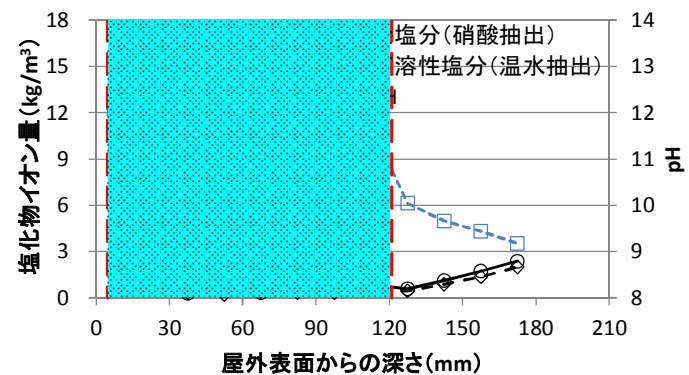


屋内
折り取り



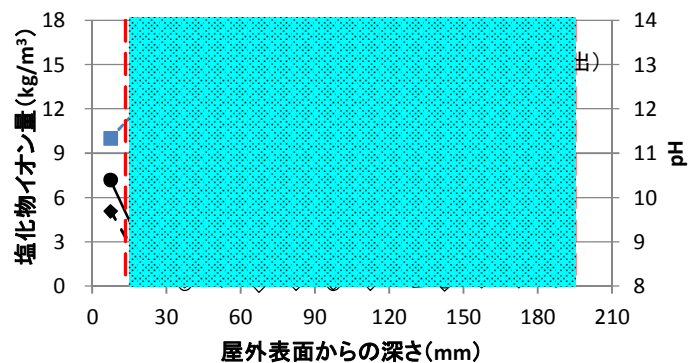
各記号の中実の記号は
モルタルを表す

屋外
モルタル



屋内
打放し

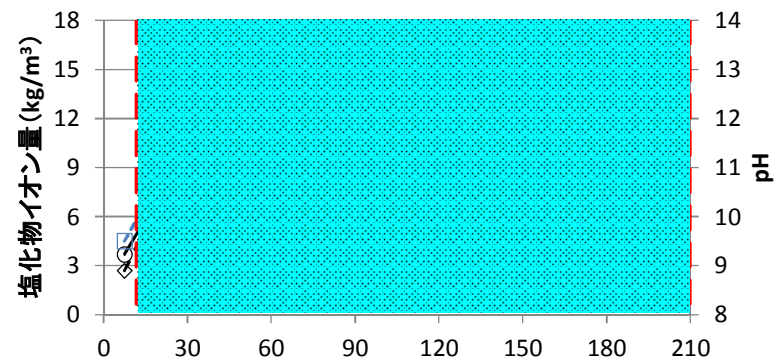
屋内
モルタル



屋内
打放し

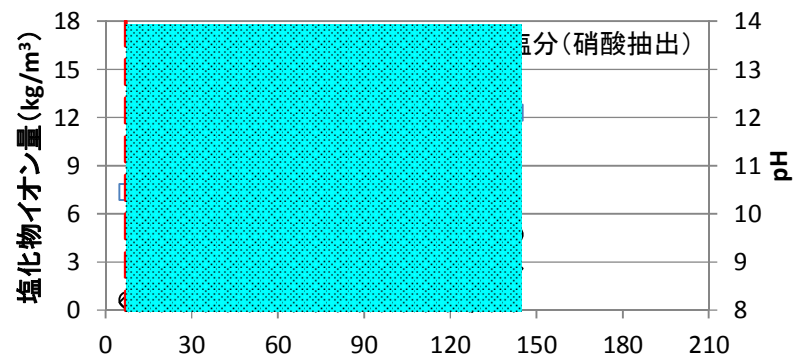
16号棟

屋外
打放し



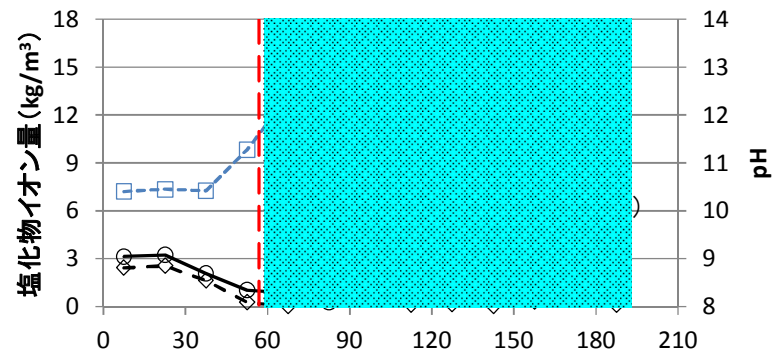
屋内
レンガ

屋外
打放し



屋内
折り取り

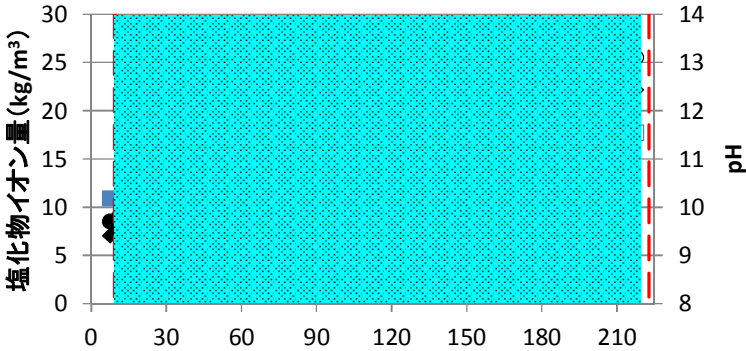
屋内
打放し



屋内
折り取り

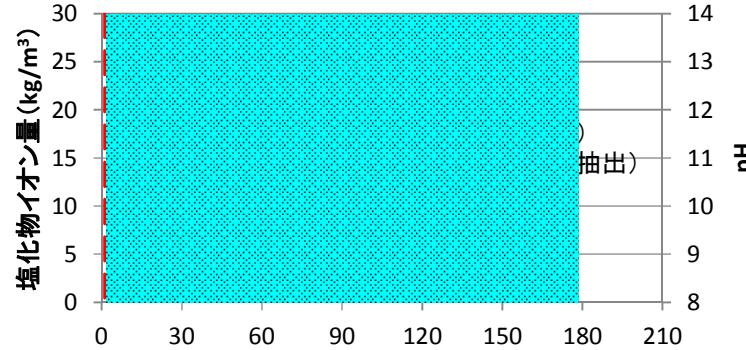
65号棟

屋外
モルタル



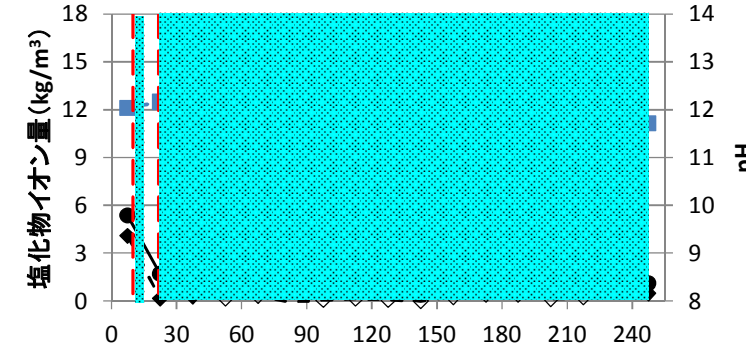
屋内
繊維壁

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、
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⁻ = 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(初期の建物、飛来塩分が比較的多い部位を想定)

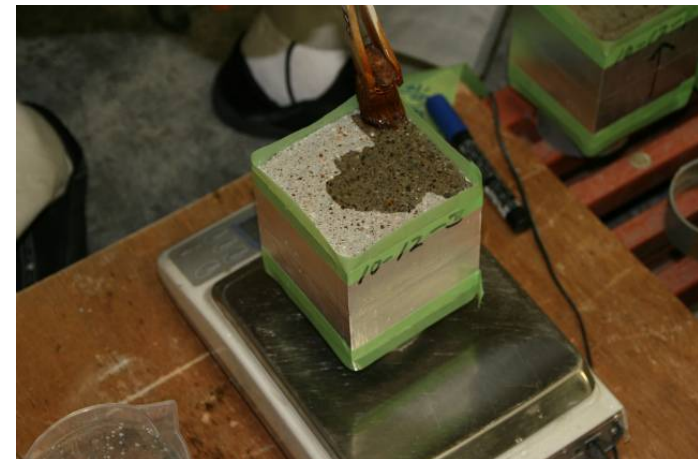
基材モルタルの養生

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

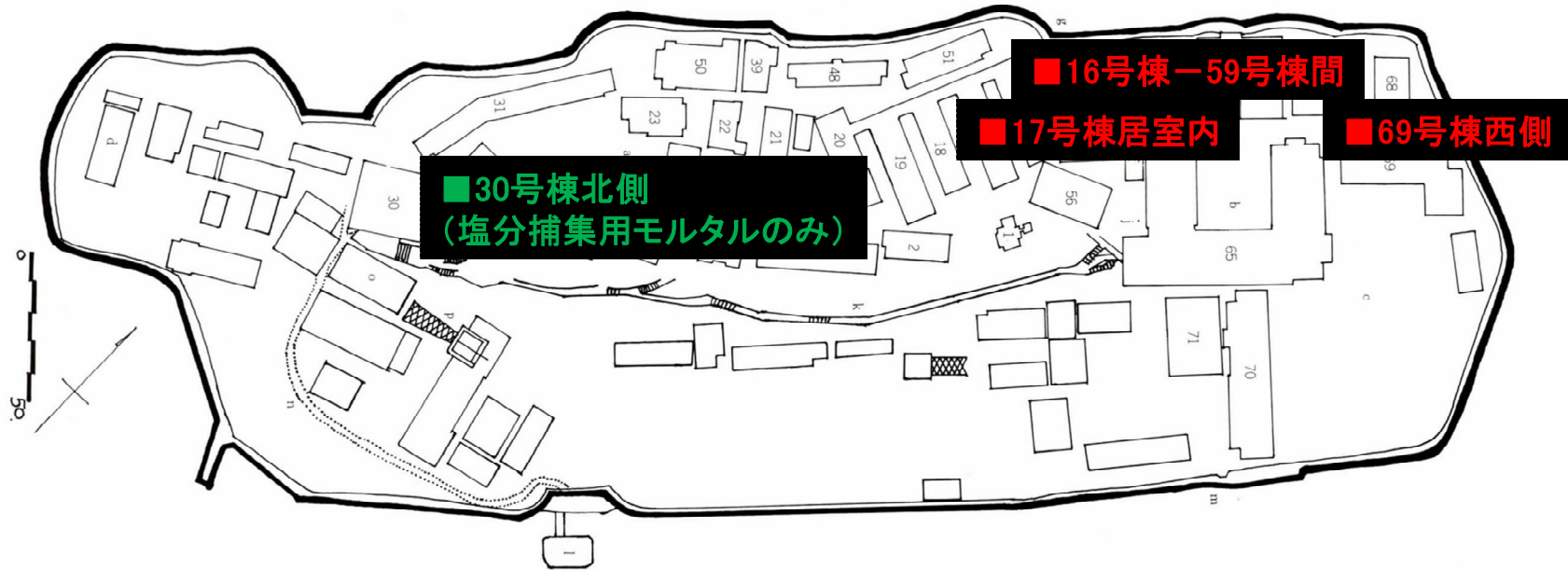
側面2面に補修を施し、残り4面を厚膜表面被覆材でシール



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 ₂ 処理	LNP1	LiNO ₂ 表面塗布 (400g/m ²) メーカー標準塗布量
	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)

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)

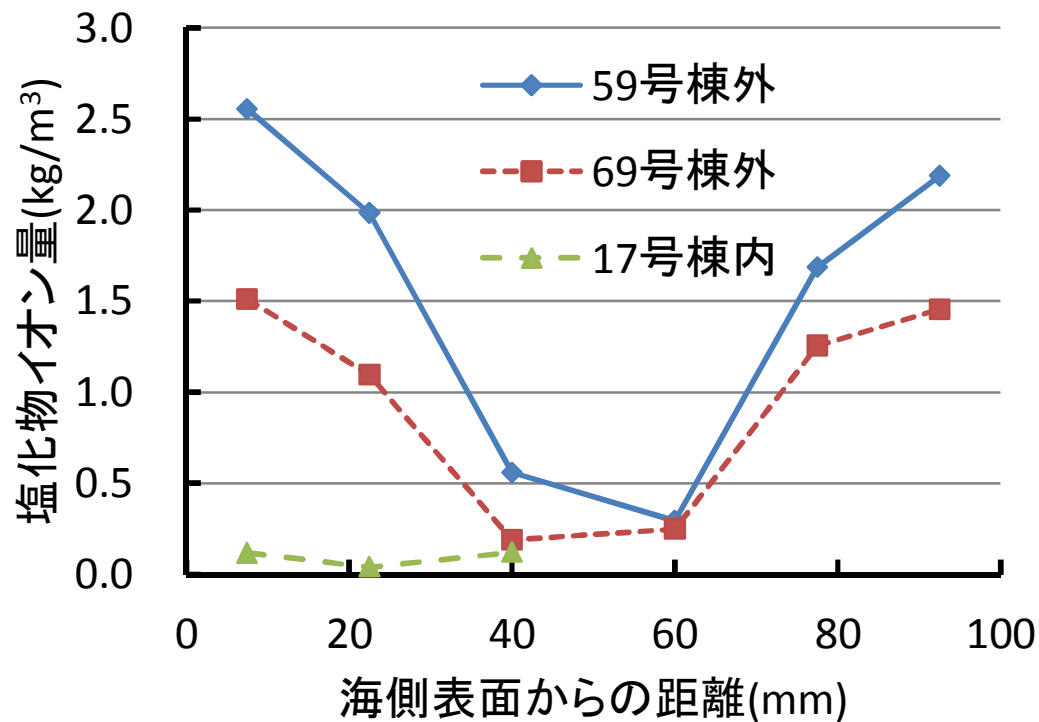


69号棟(端島病院)西側
(飛来塩分が中程度の環境)



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）

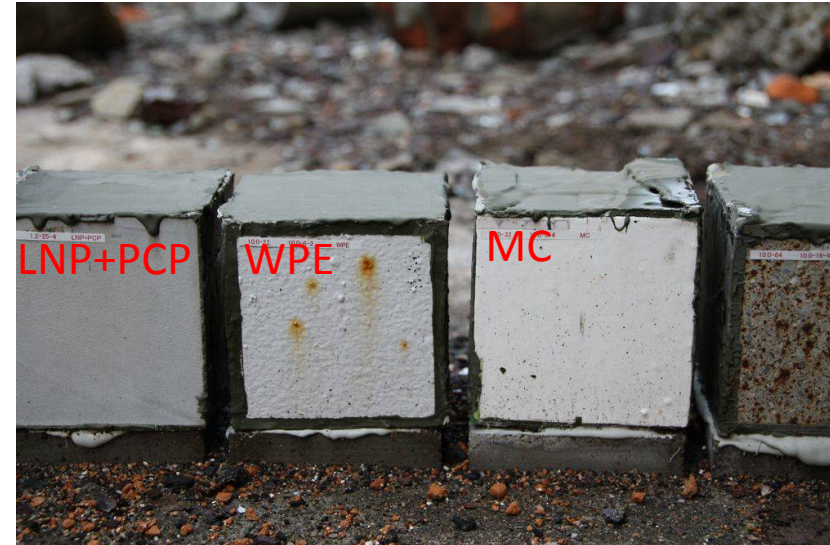
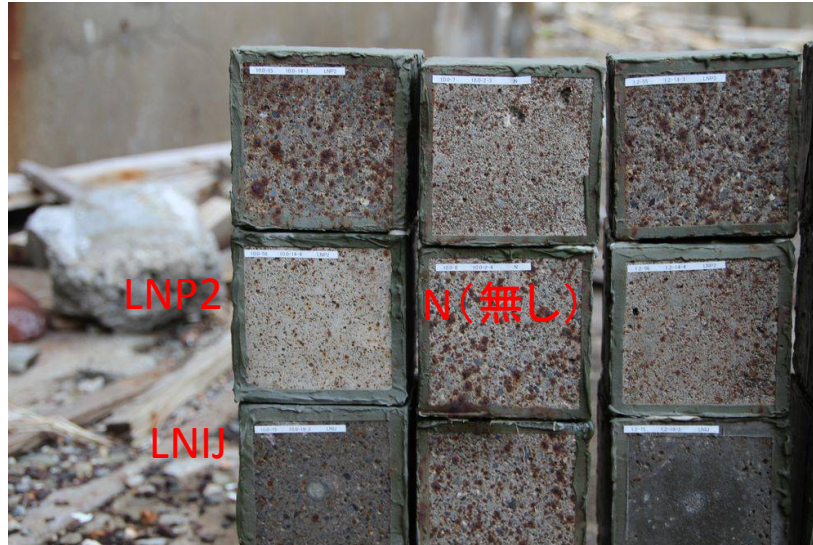


暴露場所	向き	表面Cl-量 (kg/m³)	見掛けの拡散係数 (cm²/年)
59号棟外	海側	3.24	0.17
	山側	2.86	0.20
69号棟外	海側	1.97	0.22
	山側	1.90	0.17

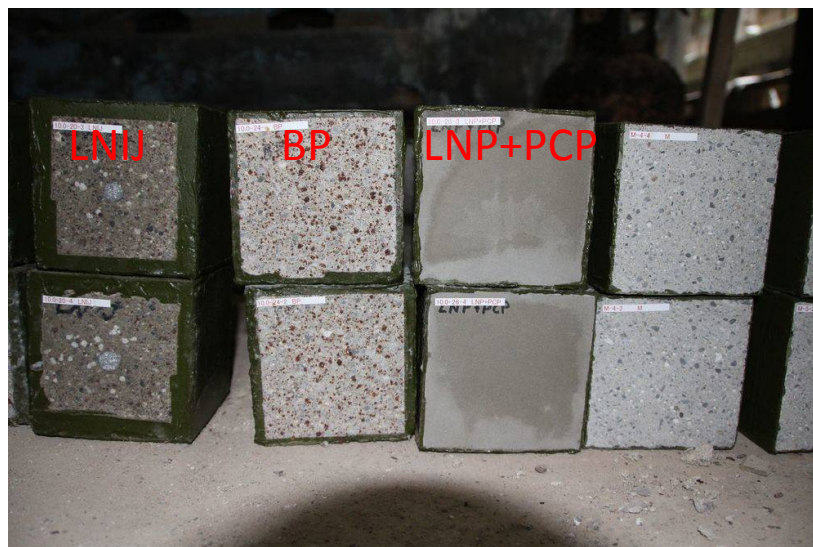
塩化物イオン量は、温水抽出塩分（イオンクロマトグラフで測定）

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

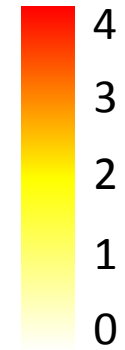
グレード2の例

グレード4の例

グレード4の例

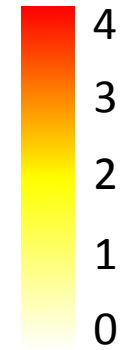
腐食状況 (Cl⁻:1.2kg/m³試験体)

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	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

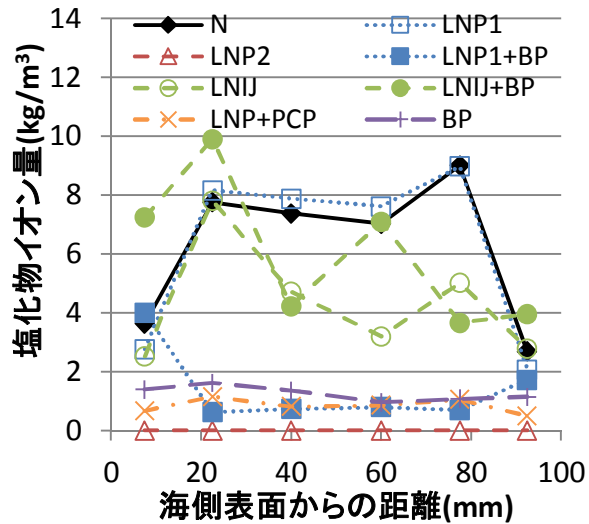


腐食状況 (Cl⁻:10kg/m³試験体)

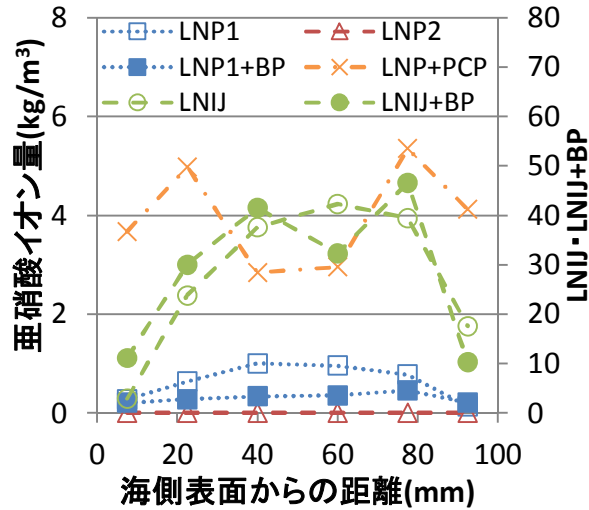
暴露場所	補修工法	海側			山側		
		表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
59号棟 屋外	N	3.8	3.3	2.0	1.8	3.8	3.8
	LNP1	4.0	3.0	0.8	1.0	4.0	4.0
	LNP2	4.0	3.3	1.0	1.0	3.5	3.8
	LNP1+BP	2.8	2.3	0.5	0.5	3.0	3.0
	LNIJ	3.8	2.5	0.3	0.8	2.8	3.8
	LNIJ+BP	3.8	2.0	0.8	1.0	1.8	2.3
	BP	3.8	2.3	1.0	1.8	2.5	3.8
	LNP+PCP	0.0	1.8	0.8	1.0	2.0	0.0
69号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



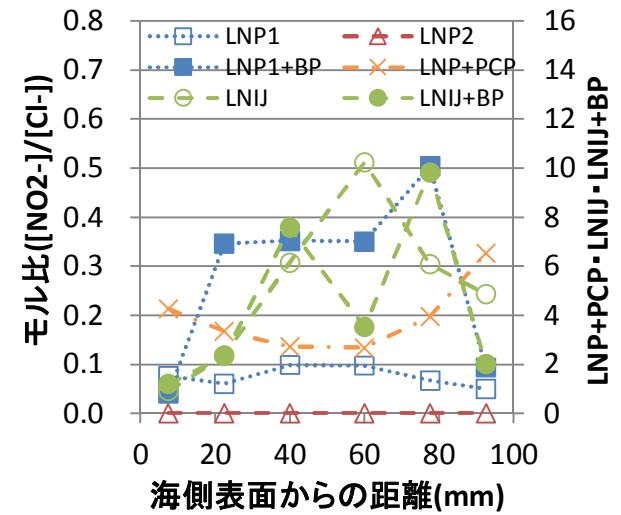
塩化物および亜硝酸イオンの分布の例



塩化物イオン分布
(温水中抽出塩分)



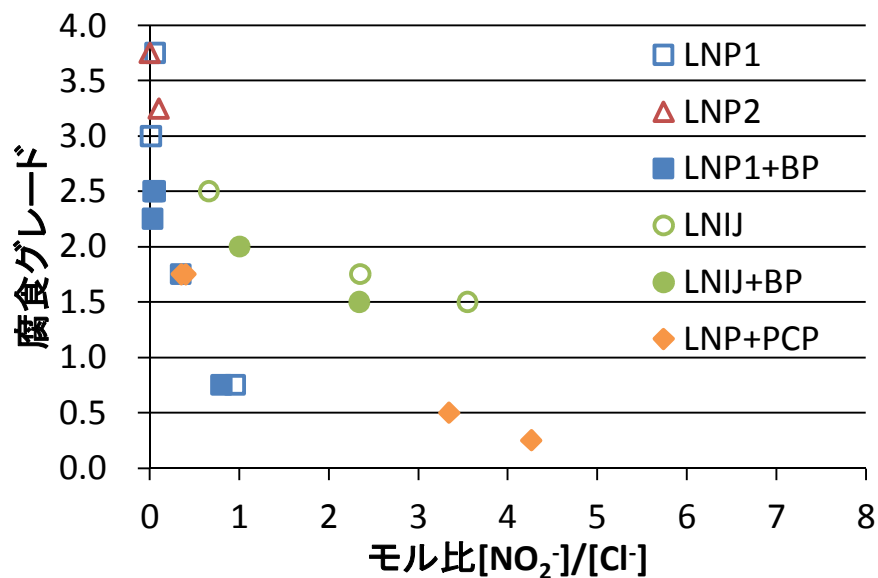
亜硝酸イオン分布



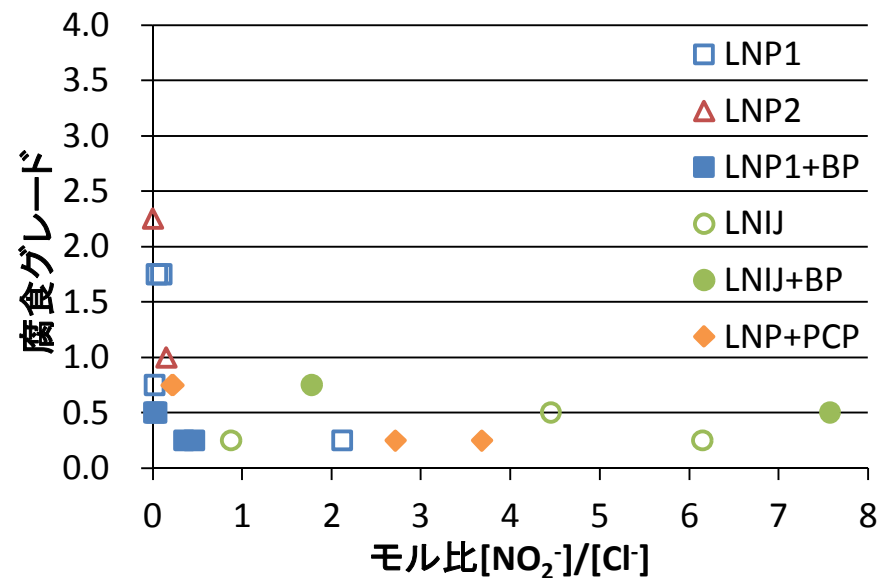
モル比分布
([NO₂⁻]/[Cl⁻])

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"> ・ 塗布含浸(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 ・ 注入工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 同左 + ペースト塗布
	大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 注入工法(塗布量多め) + 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 ₂ 裏面圧入＋ケイ酸塩系含浸材表面含浸
	外観重視	LiNO ₂ 裏面圧入のみ
	簡易	LiNO ₂ 表面塗布
グレード Ⅱ	腐食抑制	LiNO ₂ 裏面圧入＋ケイ酸塩系含浸材表面含浸＋LiNO ₂ 混入スラリー注入
	外観重視	LiNO ₂ 先行注入＋LiNO ₂ 混入スラリー注入（表面未充填）
	簡易	LiNO ₂ 表面塗布＋LiNO ₂ 混入スラリー注入（表面未充填）
グレード Ⅲ	腐食抑制	LiNO ₂ 裏面圧入＋ケイ酸塩系含浸材表面含浸 ＋LiNO ₂ 含有塗料塗布
	外観重視	LiNO ₂ 裏面圧入＋ケイ酸塩系含浸材表面含浸 ＋LiNO ₂ 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 ₂ ペースト塗布
	断面修復	腐食部にLiNO ₂ 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