

# 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  
SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

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)

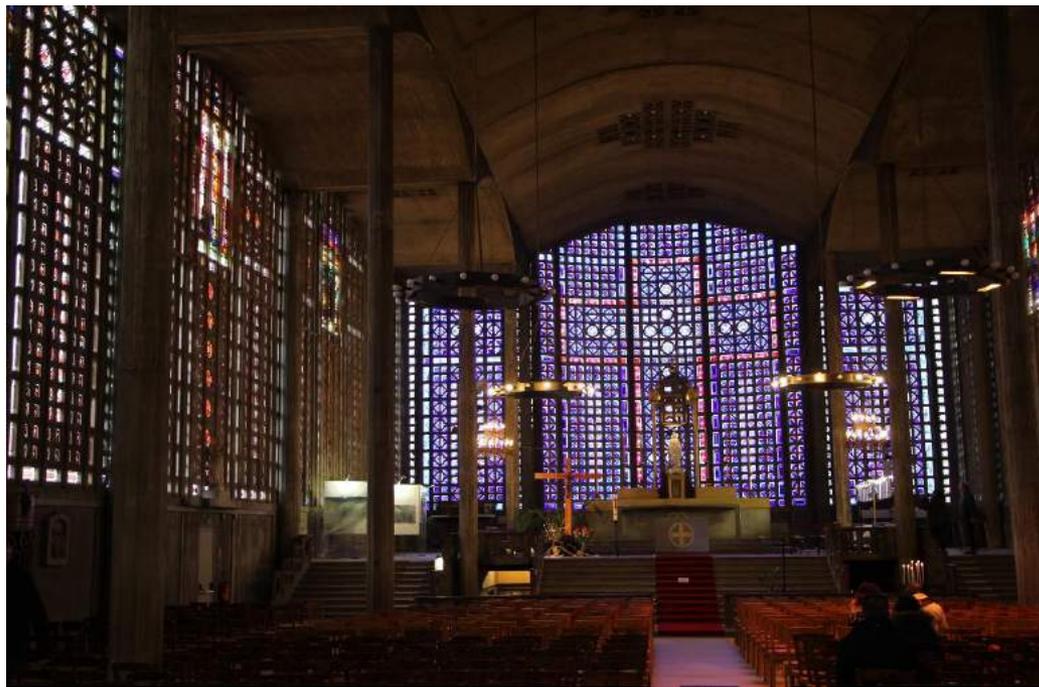


フランクリン街のアパート  
(1903・世界最古のRC造集合住宅)



ル・ランシーのノートルダム  
(1923)

# Auguste Perret (1874-1954)



## Notre-Dame du Raincy

鉄筋コンクリート造ゆえの空間(壁からの解放)

# 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

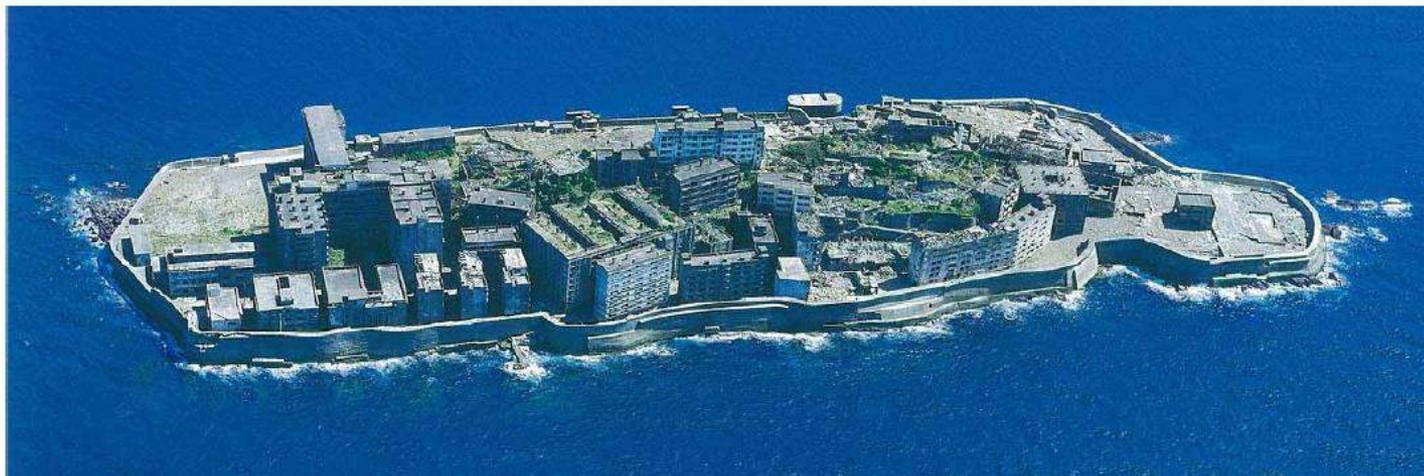
## どうやって残すのか？

- 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



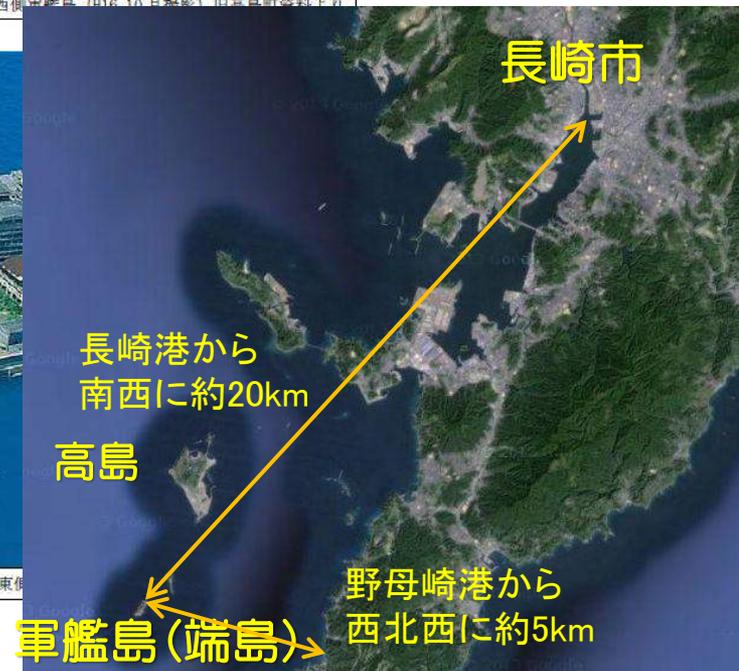
北西側の航空写真

北西側軍艦島 (1916.10.10撮影) 旧高島町資料より



南東側の航空写真

南東側



# 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
1897年(明治30)	出炭実績で高島を抜く。第1次埋め立て工事
1899年(明治32)	第2次埋め立て工事
1900年(明治33)	第3次埋め立て工事
1901年(明治34)	第4次埋め立て工事
1907年(明治40)	第5次埋め立て工事
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
1931年(昭和6)	第6次埋め立て工事
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



# 軍艦島の状況



見学通路



総合事務所跡



仕上工場跡

# 建物の状況



30号棟外観(現在)



30号棟内観(現在)



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？

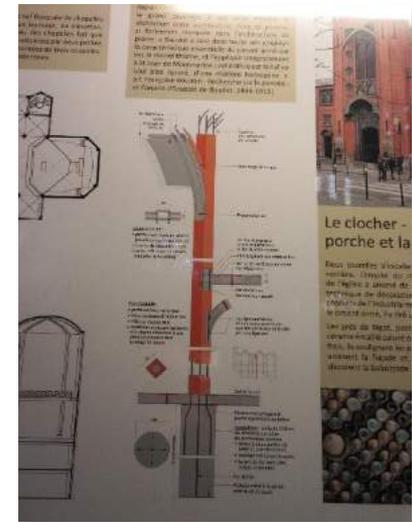
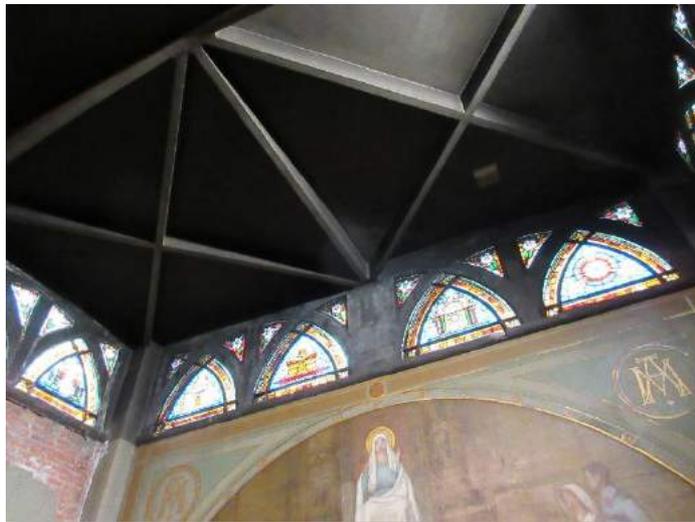
RC造の寿命を決めるもの

# 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)

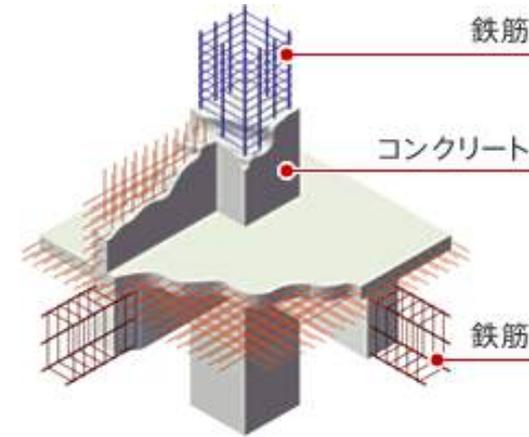
RC造建物の歴史はまだまだ100年ちょっと。

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のコクリートを破壊し、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 ( $\text{CaCO}_3$ ・炭酸カルシウム) が主成分



セメントの主成分(約2/3)は $\text{CaO}$ (酸化カルシウム)

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



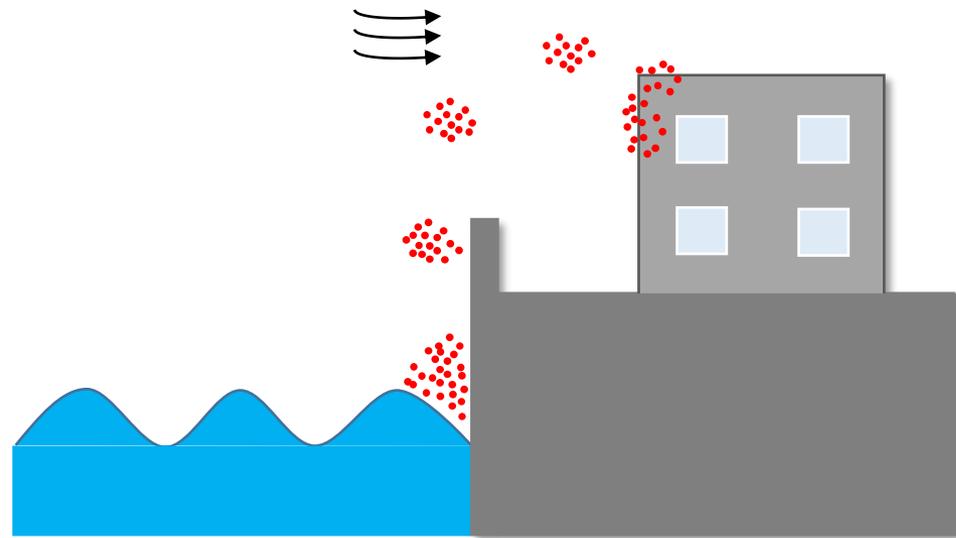
$\text{Ca(OH)}_2$ は空気中の二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムができる。このとき、コンクリートがアルカリ性から中性に変わる。



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

# 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1m<sup>3</sup>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？



# 塩化物による構造腐食の予測

塩害の寿命予測は、Fickの拡散方程式(第2法則)を用いて、**ある深さのある年数**の塩化物イオン量を予測し、腐食限界塩化物イオン量(1.2~2kg/m<sup>3</sup>)と比較して腐食の可能性を評価する。

## Fickの拡散方程式(第2法則)

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) + C_i$$

$C(x,t)$  : 深さ $x$ (cm), 経過時間 $t$ (年)における塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)

$C_i$  : 初期内在塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

$C_0$  : 表面における塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

$D$  : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)

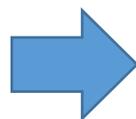
$\operatorname{erf}$  : 誤差関数(Excelでも計算可能)

$C_0$ は環境(海からの塩分の供給)によって決まる。 $D$ はコンクリートの品質によって決まる。

# 鉄筋腐食の進行



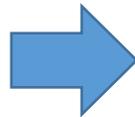
ひび割れの発生・さび汁



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

- 劣化環境  
風況  
飛来塩分
- 劣化因子  
中性化  
塩化物イオン量

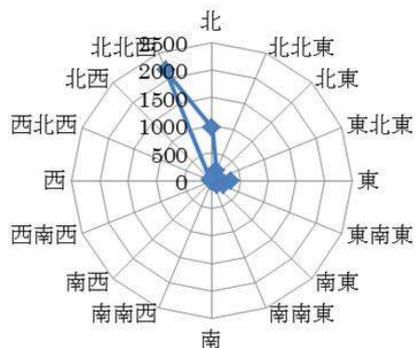
# 環境調査の重要性

建物の耐久性や寿命、補修方法を考える場合は、建物が曝(さら)される環境を知ることが重要。

- 温度環境(寒冷地・山間地、亜熱帯環境など)
- 水分環境(降水量、雨がかりなど)
- 空気環境( $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 濃度など)
- 風向・風速・飛来物
- 日射量・紫外線量
- 土壌(温泉地、汚染物質など)

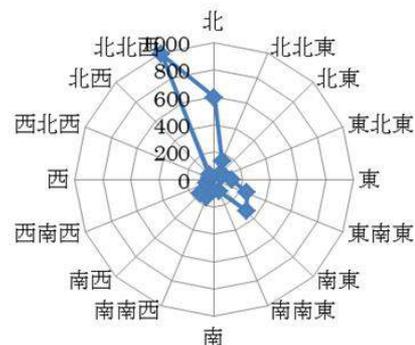
# 風況

2012年2月 各方位積算風量  
(×3600(m))



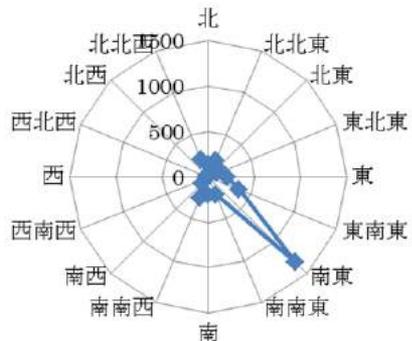
冬

2012年5月 各方位積算風量  
(×3600(m))



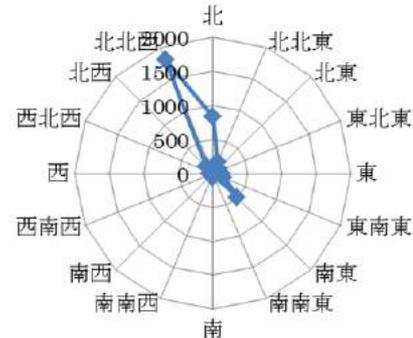
春

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

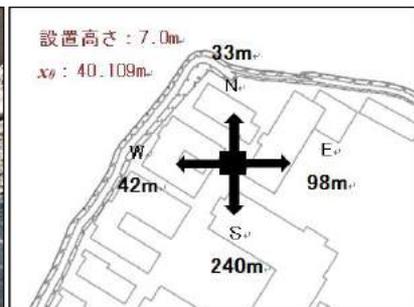
# 飛来塩分



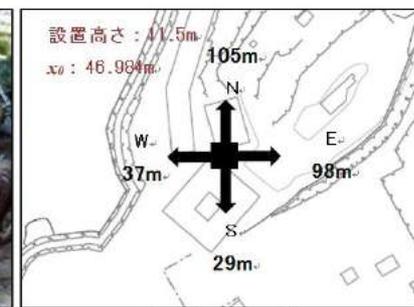
飛来塩分捕集器  
51号棟の1階付近  
海岸までの距離



飛来塩分捕集器  
51号棟の屋上  
海岸までの距離



飛来塩分捕集器  
端島病院(69号棟)付近  
海岸までの距離



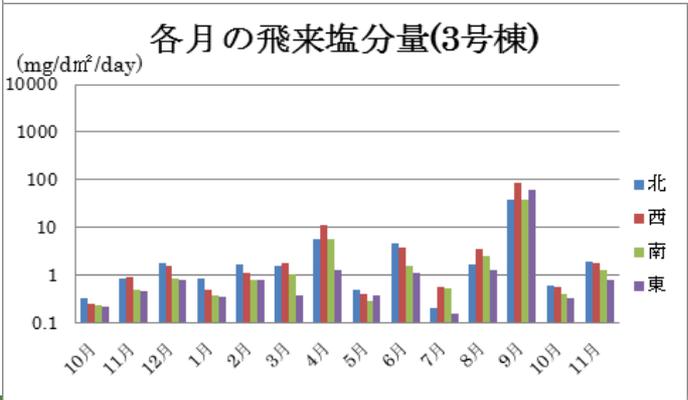
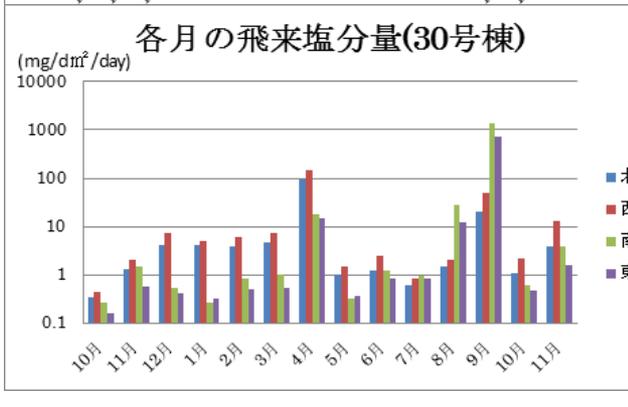
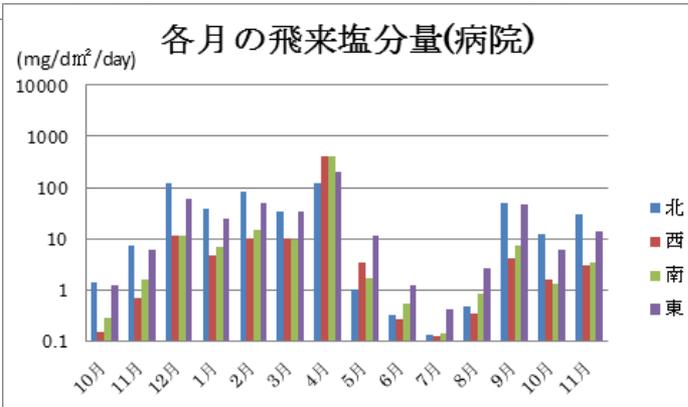
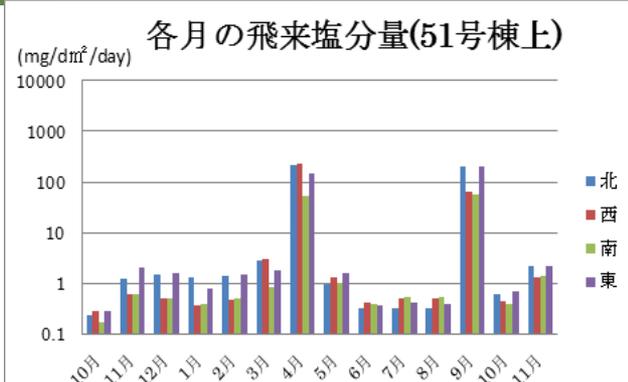
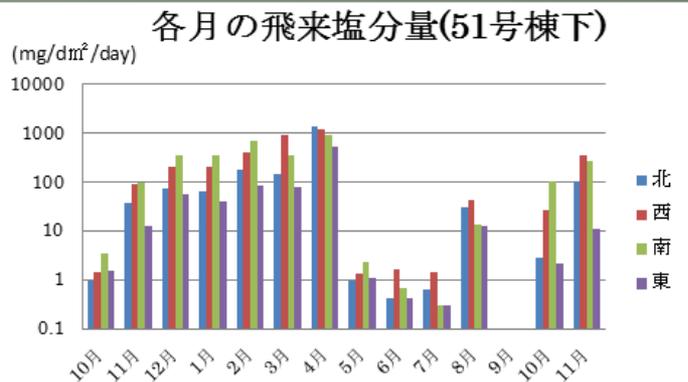
飛来塩分捕集器  
30号棟付近  
海岸までの距離



飛来塩分捕集器  
3号棟の屋上  
海岸までの距離

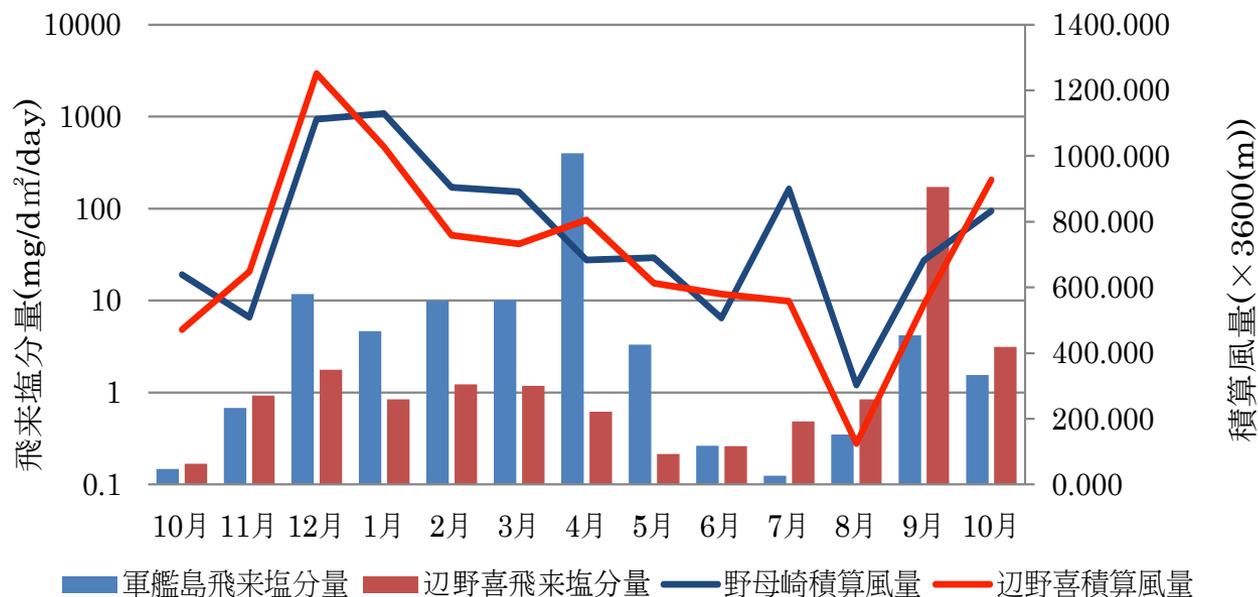


# 飛来塩分量



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**

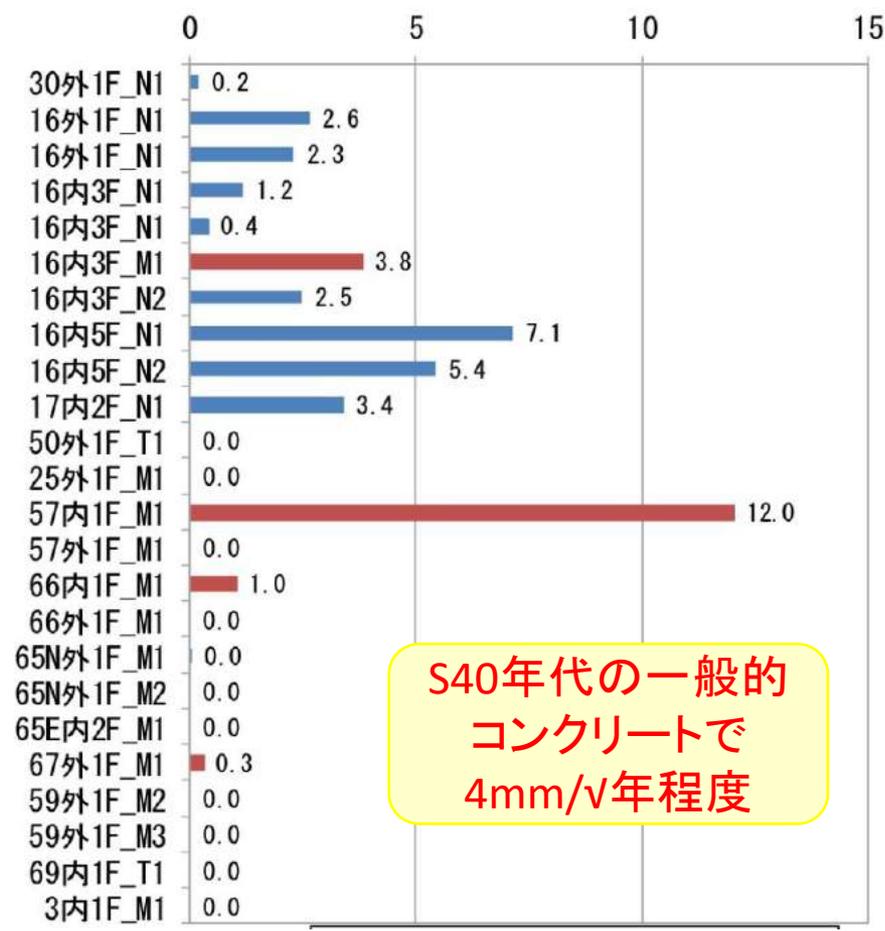


**軍艦島(左)と沖縄県辺野喜(右)の海岸の状況**

# 中性化深さの調査結果



かぶり厚さ(鉄筋  
深さ)は30mm程度



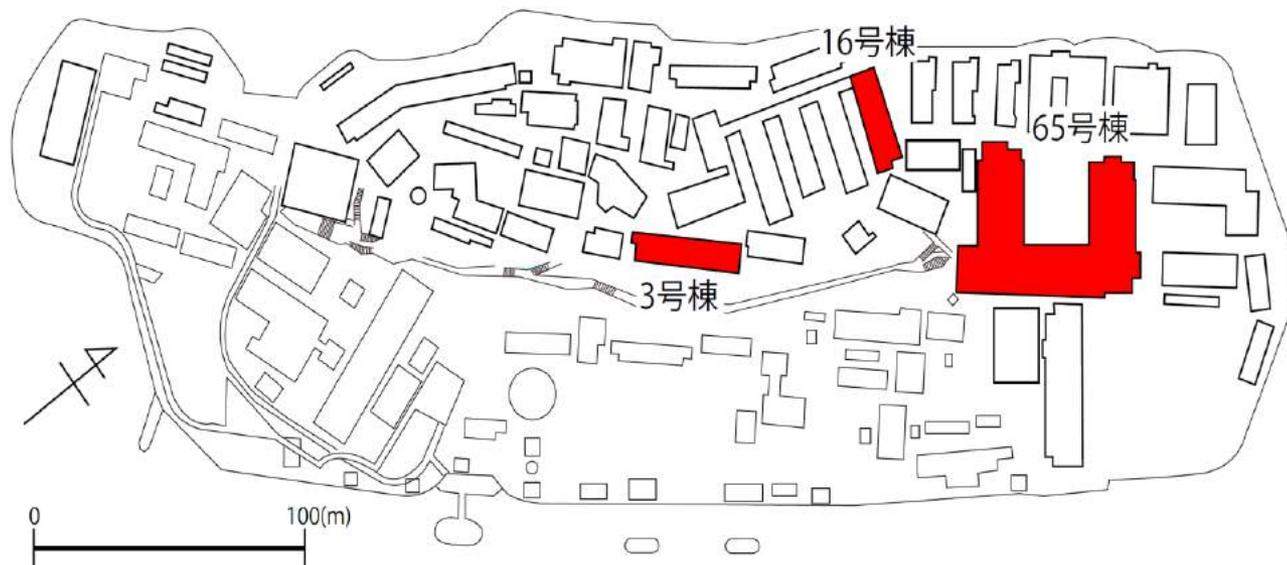
S40年代の一般的  
コンクリートで  
4mm/√年程度

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



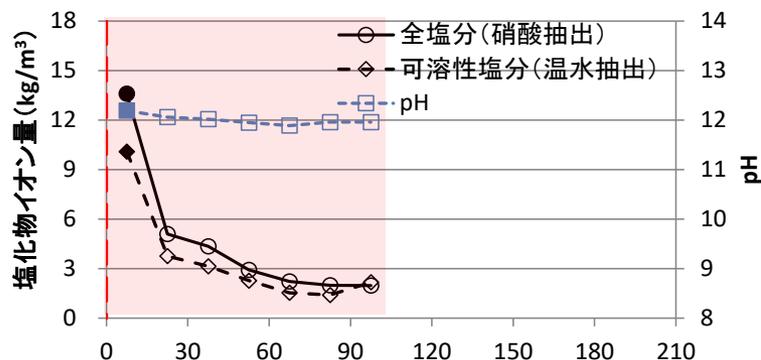
## 2017年時点で保存が検討されている住棟

- 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

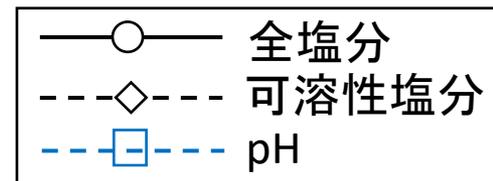
# 塩化物イオン量の調査結果

3号棟

屋外  
モルタル



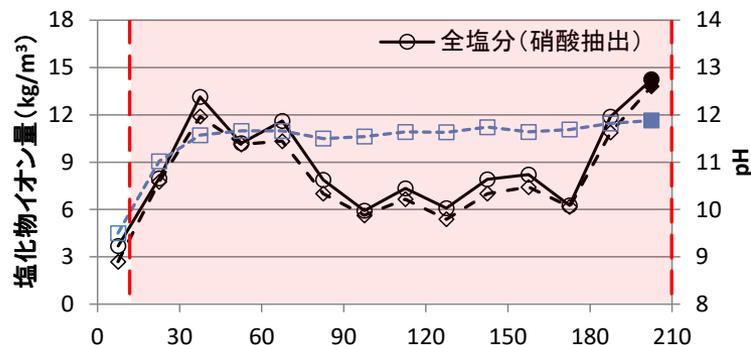
屋内  
折り取り



各記号の中実の記号  
はモルタルを表す

16号棟

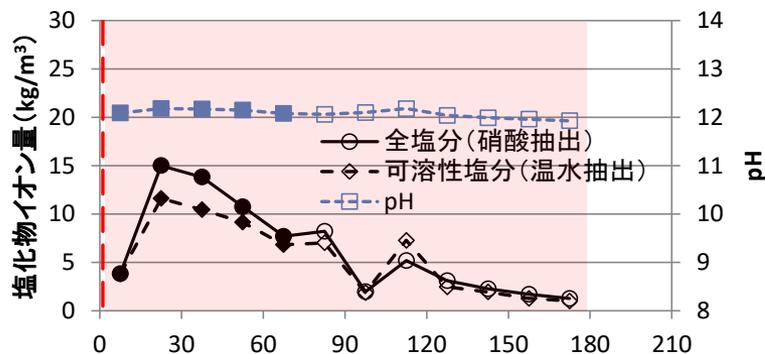
屋外  
打放し



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)



# 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

# 原爆ドーム(広島)



# 原爆ドーム



# 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/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>(内在塩分・飛来塩分が比較的多い部位を想定)

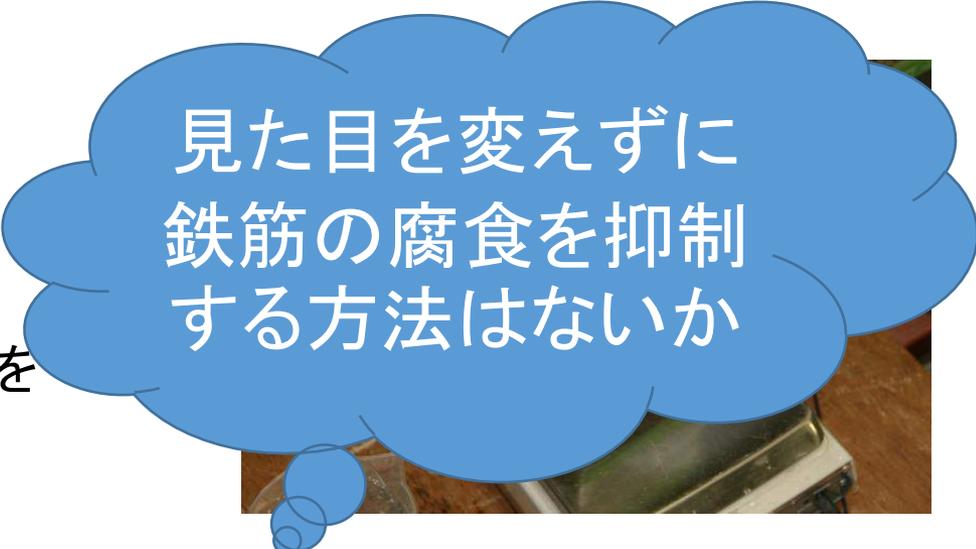
## 基材モルタルの養生

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



見た目を変えずに  
鉄筋の腐食を抑制  
する方法はないか

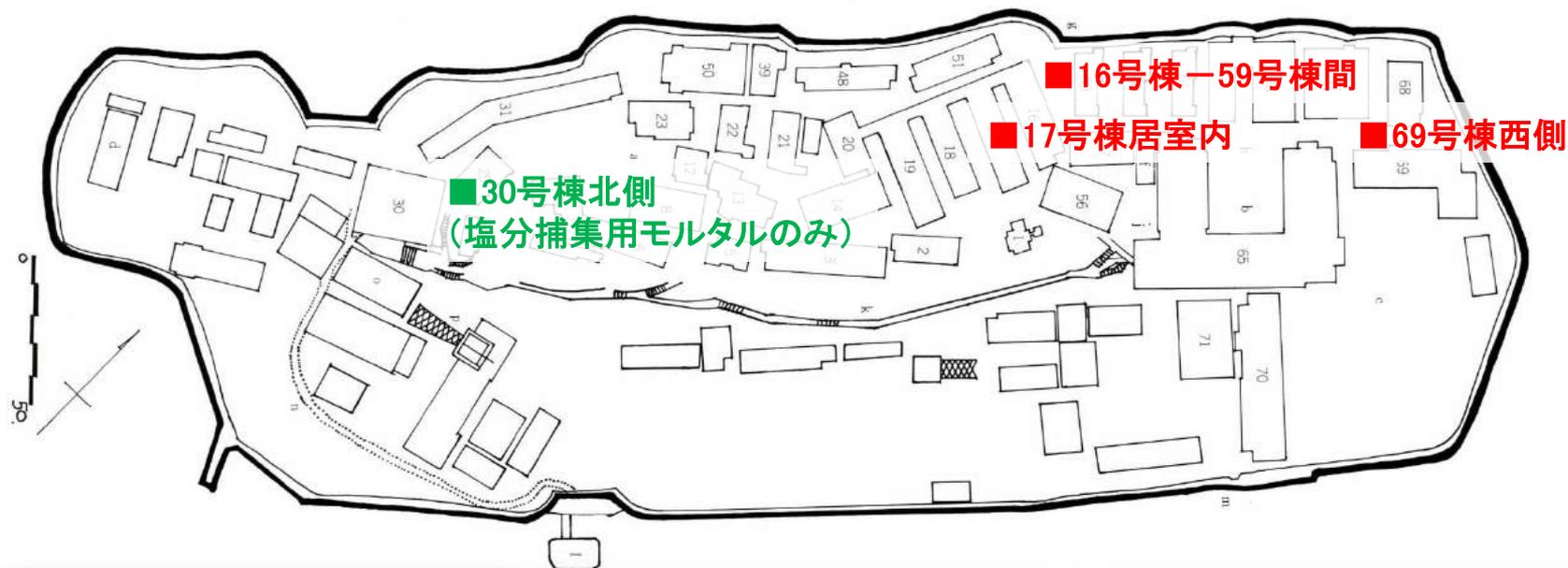
# 補修仕様の検討

分類	記号	仕様
補修なし	N	補修無し
LiNO <sub>2</sub> 処理	LNP1	LiNO <sub>2</sub>
	LNP2-1.2	
	LNP2-10	LiNO <sub>2</sub>
	LNIJ	LiNO <sub>2</sub> 高圧注入 (1.2MPa) 用5cc/体、Cl-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 (60g/m <sup>2</sup> )
LiNO <sub>2</sub> + 浸透性 吸水防止材	LNP1+BP	LiNO <sub>2</sub> (280g/m <sup>2</sup> ) + シラン系浸透性吸水防止材塗布 (60g/m <sup>2</sup> )
	LNIJ+BP	LiNO <sub>2</sub> (高圧注入) + シラン系浸透性吸水防止材塗布 (60g/m <sup>2</sup> )
(比較用) 表面被覆工法	MC	アクリル系樹脂被覆
	WPE	防水形複層被覆工法
	CE	防水形複層塗材 (CE-100 A 6909)

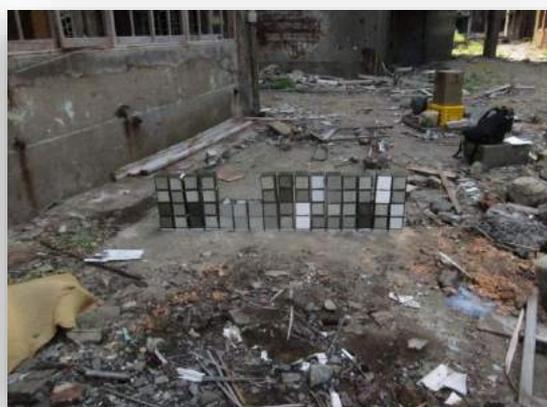
見た目の変化が少ない  
様々な補修工法を検討

亜硝酸リチウム (LiNO<sub>2</sub>)  
の還元作用により、鉄筋  
の不動態被膜を再生する  
作用を応用

# 暴露試験の実施



16号棟—59号棟間  
(飛来塩分の多い環境)



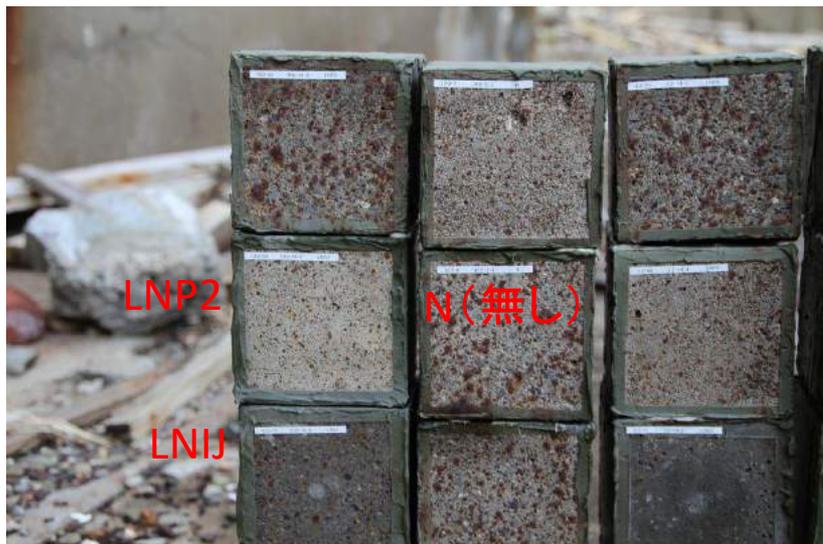
69号棟(端島病院)西側  
(飛来塩分が中程度の環境)



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)

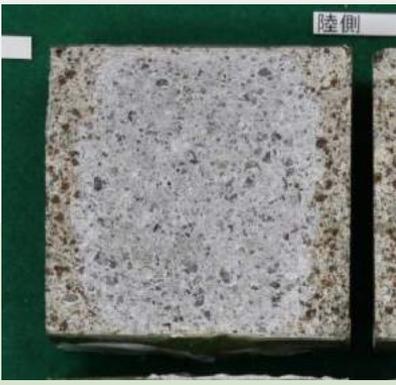
69  
号棟  
屋外



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		

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 $_{-1.2\text{kg}/\text{m}^3}$ 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

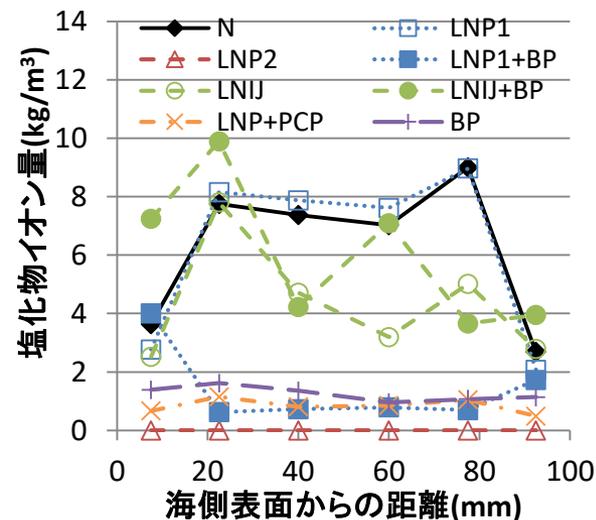


# 腐食状況 $\_10\text{kg}/\text{m}^3$ 試験体

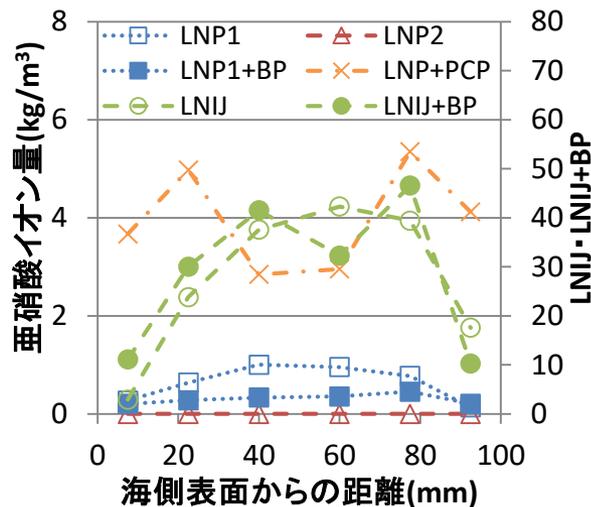
暴露場所	補修工法	海側			山側		
		表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
59号棟 屋外	N	3.8	3.3	2.0	1.8	3.8	3.8
	LNP1	4.0	3.0	0.8	1.0	4.0	4.0
	LNP2	4.0	3.3	1.0	1.0	3.5	3.8
	LNP1+BP	2.8	2.3	0.5	0.5	3.0	3.0
	LNIJ	3.8	2.5	0.3	0.8	2.8	3.8
	LNIJ+BP	3.8	2.0	0.8	1.0	1.8	2.3
	BP	3.8	2.3	1.0	1.8	2.5	3.8
	LNP+PCP	0.0	1.8	0.8	1.0	2.0	0.0
69号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



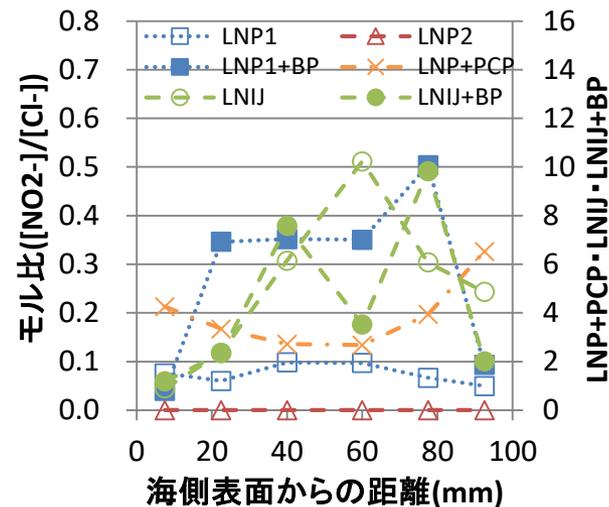
# 塩化物および亜硝酸イオンの分布



塩化物イオン分布  
(温水抽出塩分)



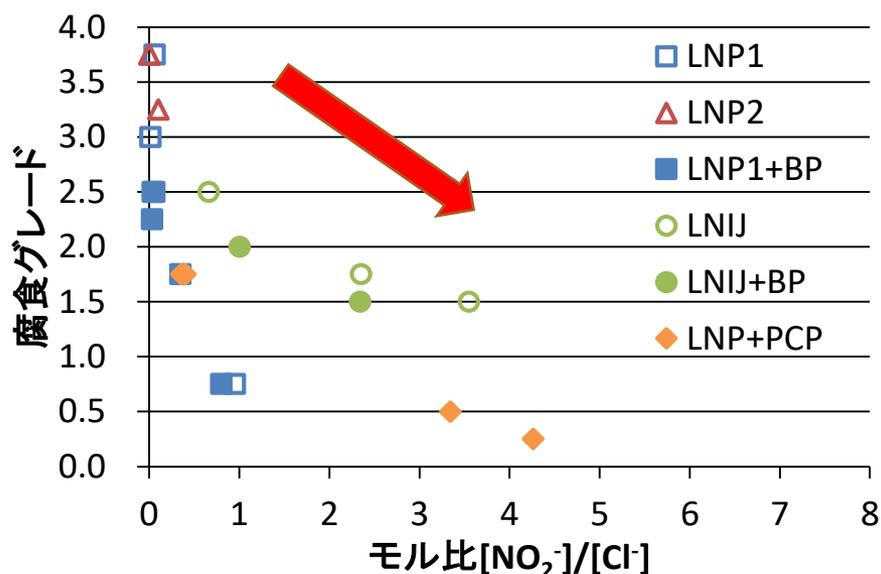
亜硝酸イオン分布



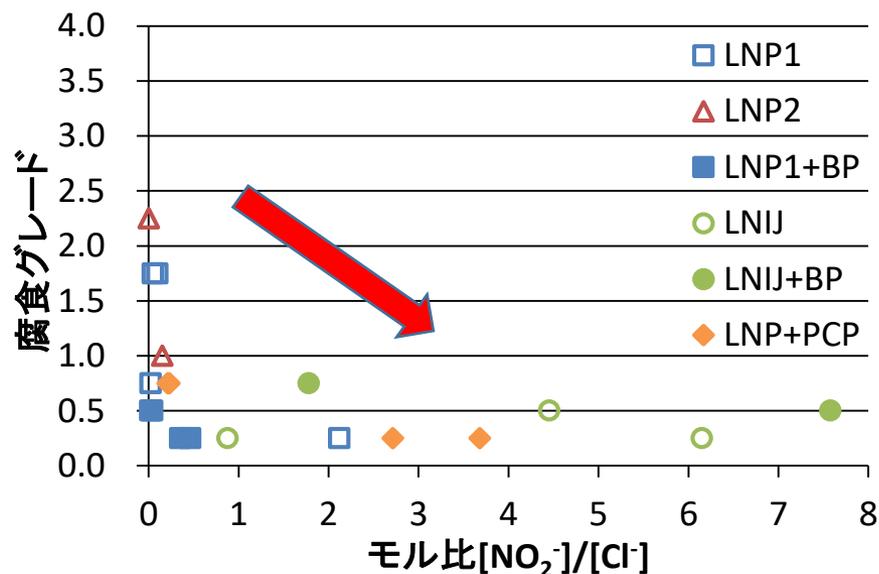
モル比分布  
([NO<sub>2</sub><sup>-</sup>]/[Cl<sup>-</sup>])

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<sub>2</sub><sup>-</sup>]/[Cl<sup>-</sup>])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"> <li>・ 塗布含浸工法(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>・ 圧入工法</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>・ 圧入工法(含浸量多め) + 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(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
		

# 共通試験概要

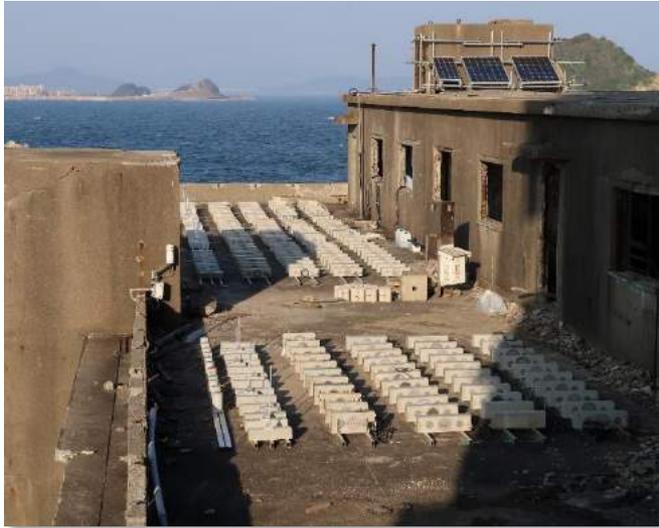
## 参加企業・工法:

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15体

## 適用された主な工法

グレードⅠ	グレードⅡ	グレードⅢ
<ul style="list-style-type: none"><li>・ 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)</li><li>・ 表面被覆工法(クリアシート、クリアエポキシ)</li><li>・ 電気防食工法(犠牲陽極、外部電源)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 表面含浸(シラン系)</li><li>・ 表面被覆(塩分吸着エポキシ)</li><li>・ 注入・圧入工法(エポキシ、亜硝酸系)</li><li>・ 電気防食工法(外部電源、電着)</li><li>・ 上記の組み合わせ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 圧入工法(亜硝酸リチウム)</li><li>・ 電気防食工法(外部電源、犠牲陽極)</li><li>・ 塗装(防錆塗料、クリア塗料)</li></ul>

# 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		

# 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系歴史的建造物の多くが抱える問題

ご静聴ありがとうございました。