

# 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

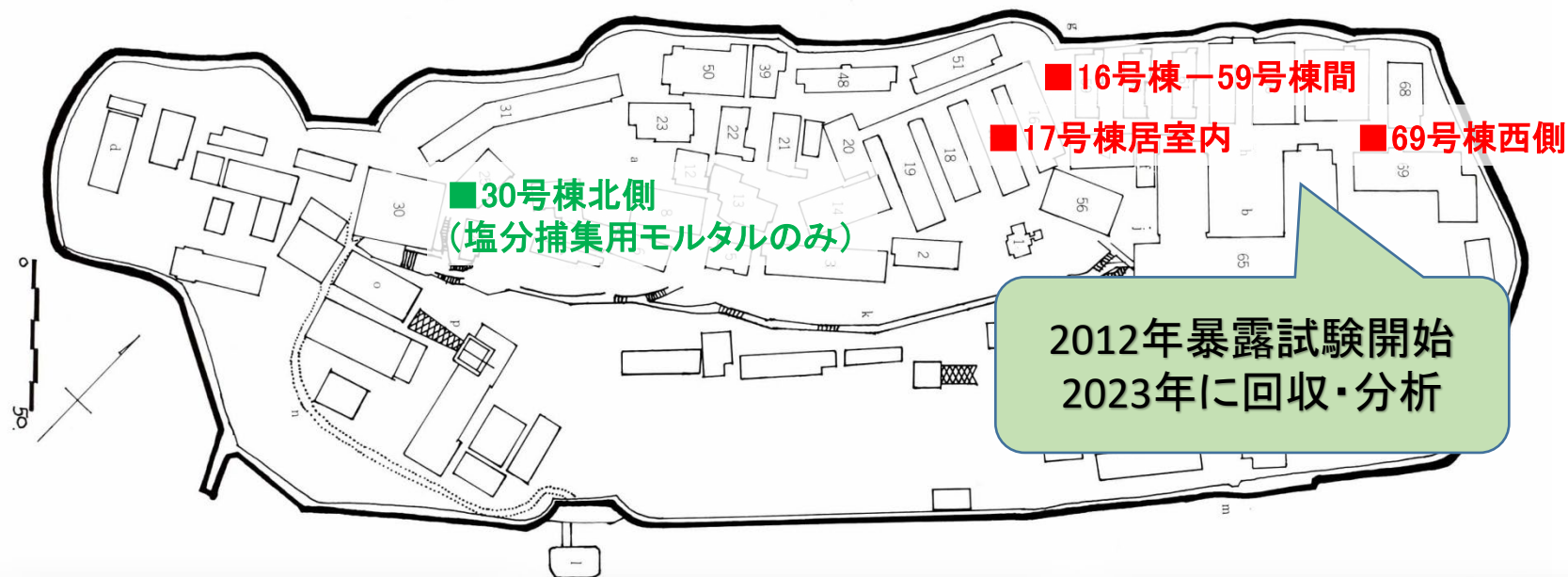
# 補修仕様の検討

| 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  | Li                                                                                                                                                     |
|                                 | LNIJ     | LiNO <sub>2</sub> 高圧注入（圧入圧10MPa、注入量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<br>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<br>吸水防止材 | LNP1＋BP  | LiNO <sub>2</sub> （280g/m <sup>2</sup> ）＋BP（60g/m <sup>2</sup> ）                                                                                       |
|                                 | LNIJ＋BP  | LiNO <sub>2</sub> （280g/m <sup>2</sup> ）＋BP（60g/m <sup>2</sup> ）                                                                                       |
| （比較用）<br>表面被覆工法                 | MC       | アクリル系樹脂被覆材（MC-100）                                                                                                                                     |
|                                 | WPE      | 防水形複層被覆材（WPE-100）                                                                                                                                      |
|                                 | 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)



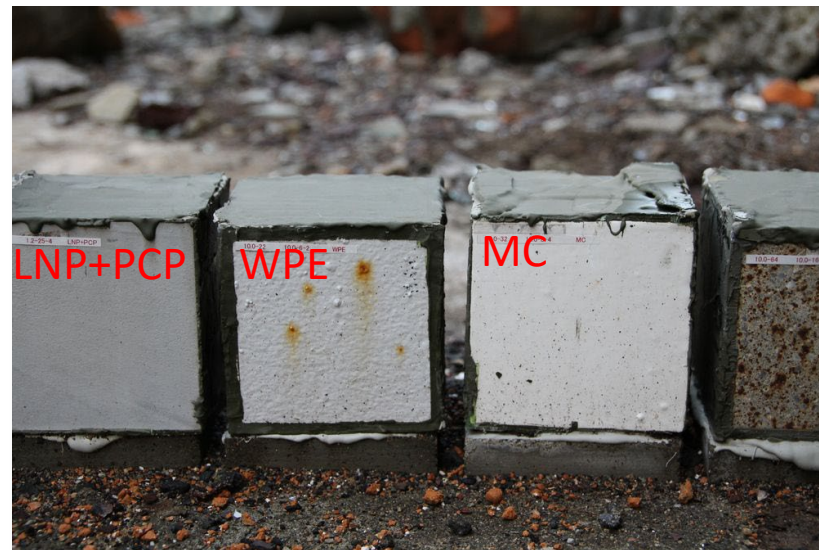
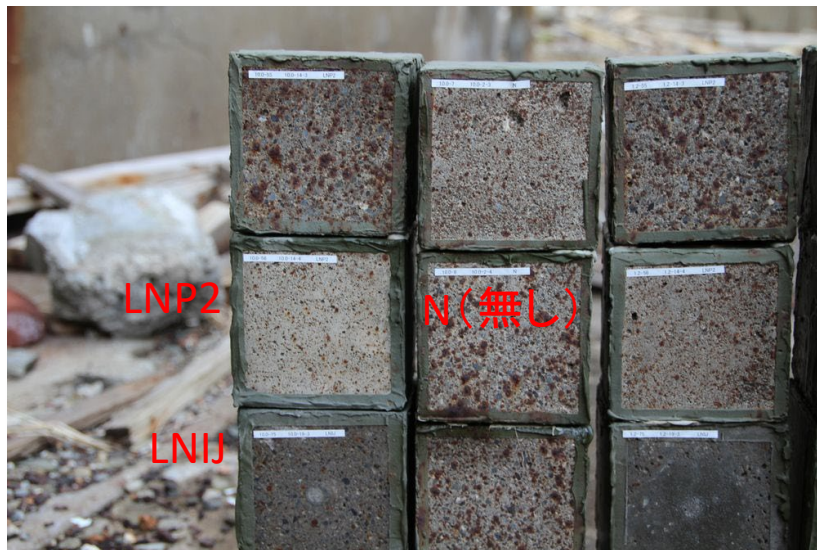
69号棟(端島病院)西側  
(飛来塩分が中程度の環境)



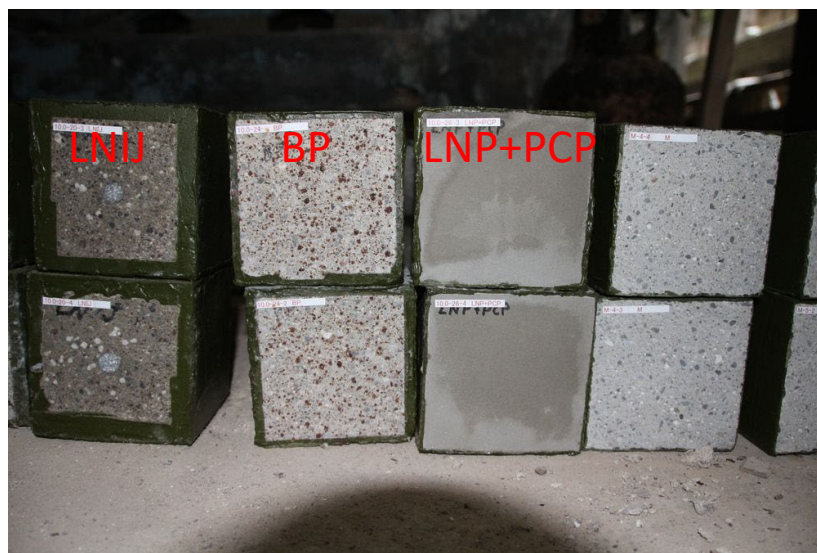
17号棟居室内  
(飛来塩分がない環境)

# 試験体の状況の例（約6年経過）

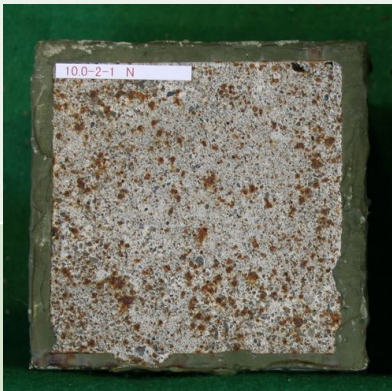
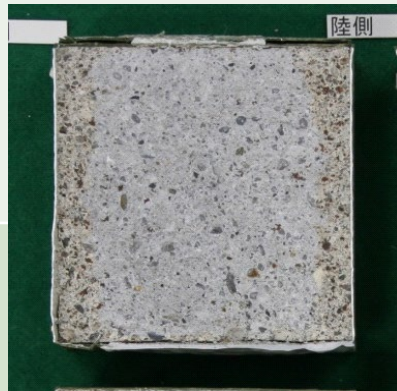
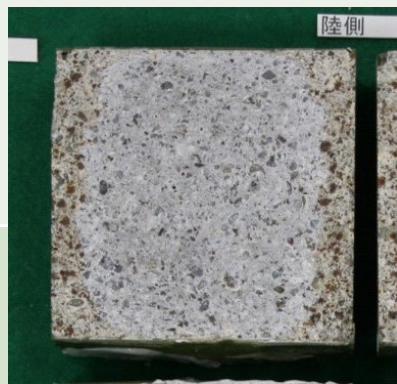
69  
号棟  
屋外



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 |  |  |

# 腐食状況 \_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<br>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<br>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<br>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 |



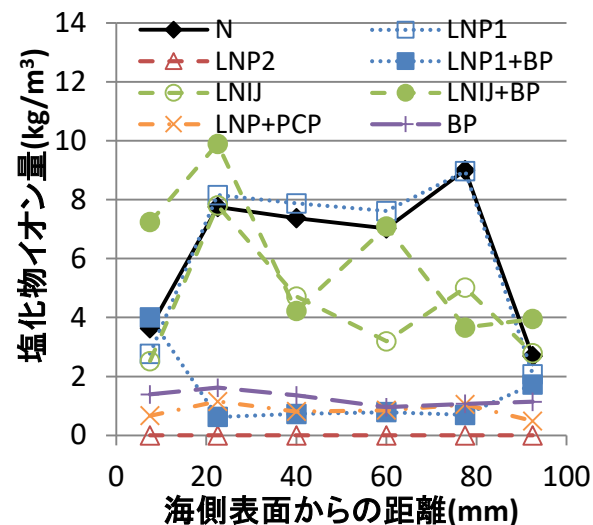
# 腐食状況 \_10kg/m<sup>3</sup>試験体



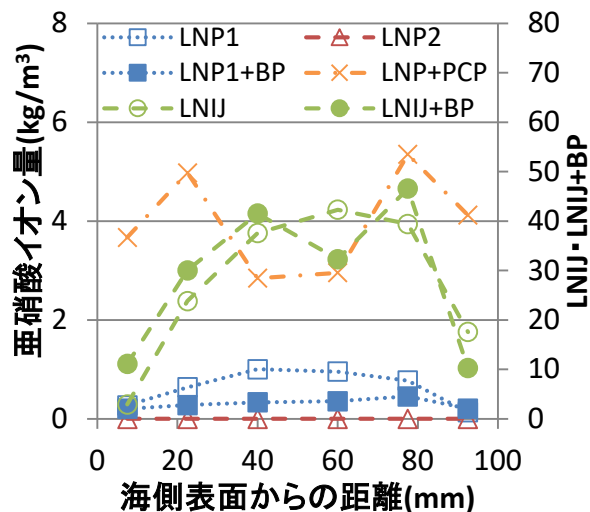
| 暴露場所       | 補修工法    | 海側  |     |      | 山側   |     |     |
|------------|---------|-----|-----|------|------|-----|-----|
|            |         | 表面  | 中性化 | 未中性化 | 未中性化 | 中性化 | 表面  |
| 59号棟<br>屋外 | N       | 3.8 | 3.3 | 2.0  | 1.8  | 3.8 | 3.8 |
|            | LNP1    | 4.0 | 3.0 | 0.8  | 1.0  | 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<br>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<br>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 |



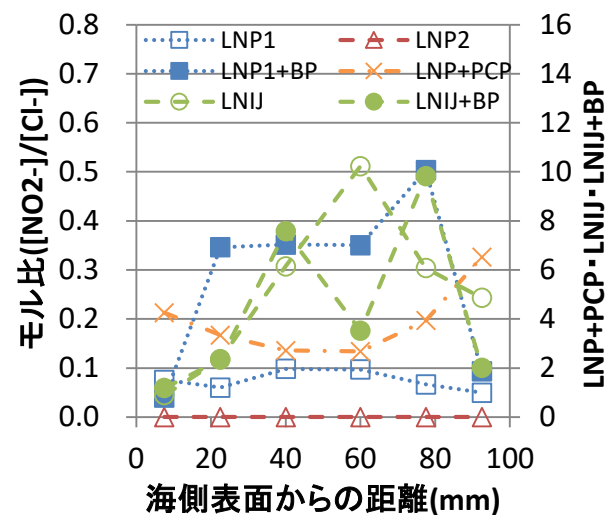
# 塩化物および亜硝酸イオンの分布



塩化物イオン分布  
(温水抽出塩分)



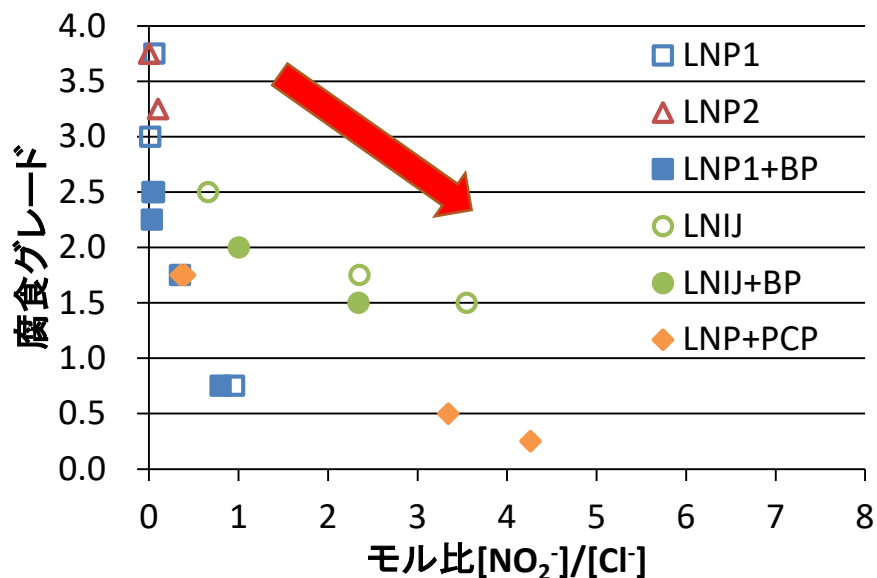
亜硝酸イオン分布



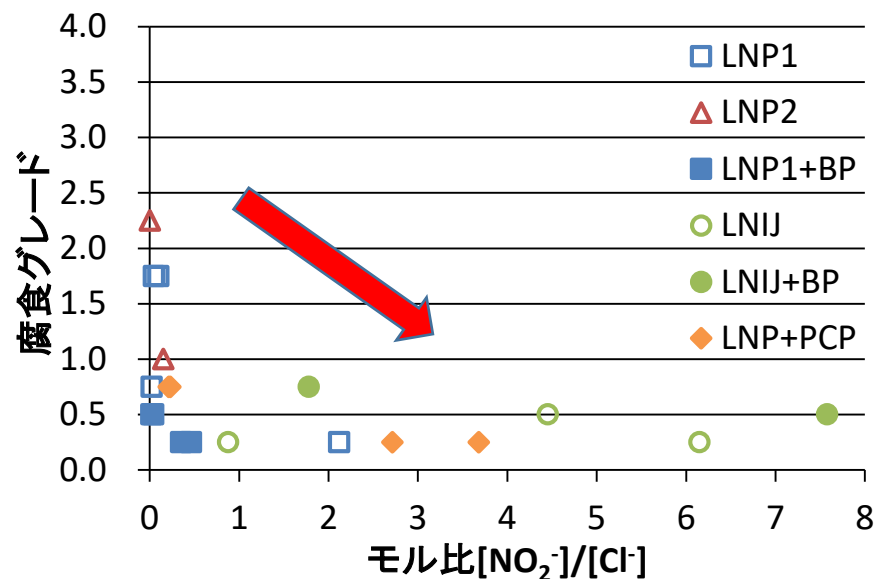
モル比分布  
([NO₂⁻]/[Cl⁻])

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 $([\text{NO}_2^-]/[\text{Cl}^-])$ 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<br>(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<br>(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

# LINI圧入工法の改良・検証

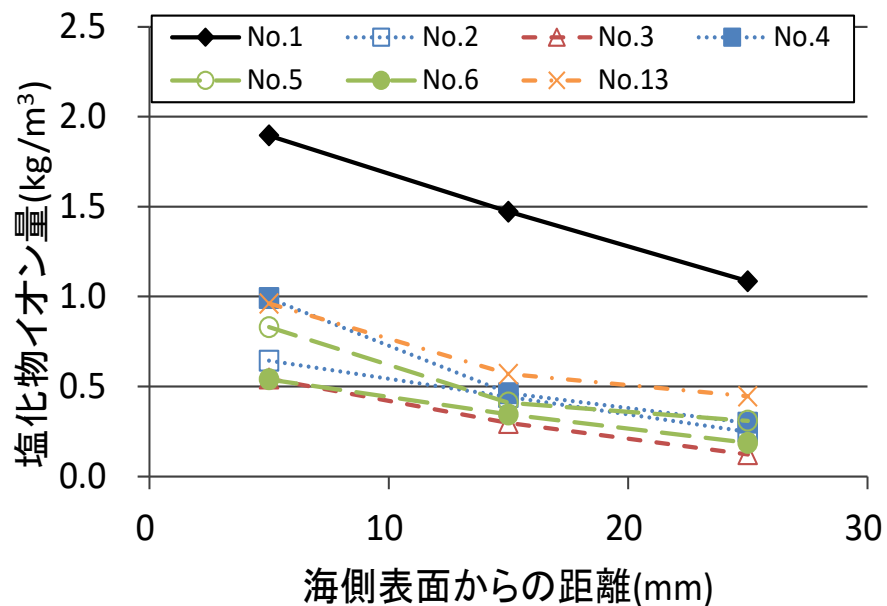
これまでの暴露試験の結果から、外観変化の少なさ、腐食抑制効果とその持続性の観点から、亜硝酸リチウムの圧入と表面含浸材の組み合わせが最も有効であると判断。

下記の組み合わせで検証実験を実施。

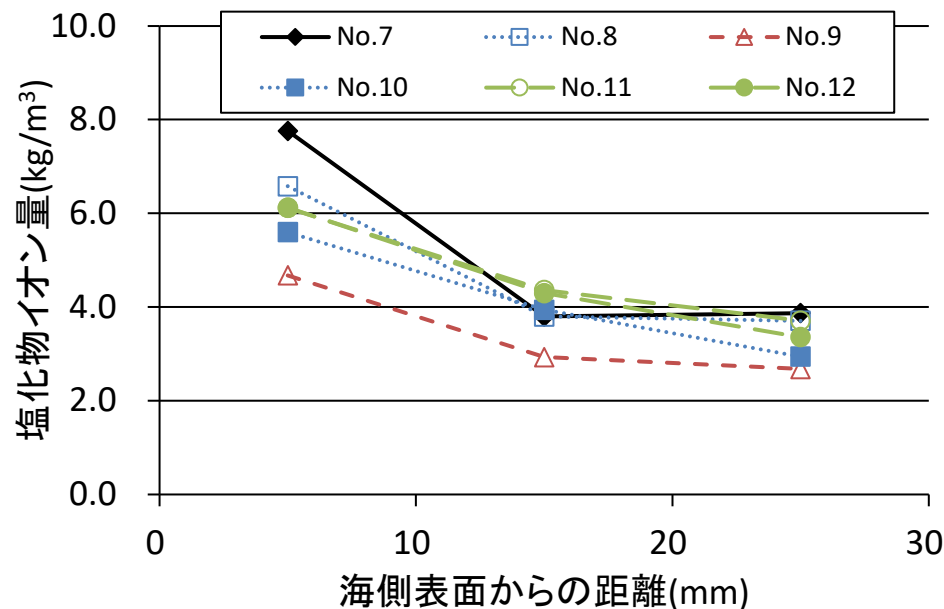
| 内在塩分量0kg/m <sup>3</sup> ・ひび割れ無し |            |                                  | 内在塩分量5kg/m <sup>3</sup> ・ひび割れあり |            |                                  |
|---------------------------------|------------|----------------------------------|---------------------------------|------------|----------------------------------|
| No.                             | 表面含浸材      | 亜硝酸リチウム                          | No.                             | 表面含浸材      | 亜硝酸リチウム                          |
| No.1                            | なし         | 18kg/m <sup>3</sup><br>(180cc/体) | No.7                            | なし         | 18kg/m <sup>3</sup><br>(180cc/体) |
| No.2                            | なし         |                                  | No.8                            | なし         |                                  |
| No.3*                           | シラン・シロキサン系 |                                  | No.9*                           | シラン・シロキサン系 |                                  |
| No.4                            | ケイ酸リチウム    |                                  | No.10                           | ケイ酸リチウム    |                                  |
| No.5                            | ケイ酸塩系      |                                  | No.11                           | ケイ酸塩系      |                                  |
| No.6                            | シラン＋ケイ酸塩系  |                                  | No.12                           | シラン＋ケイ酸塩系  |                                  |
| No.13*                          | シラン・シロキサン系 |                                  |                                 |            |                                  |

\*: No.3・No.9は表面含浸材を先行塗布、No.13はLINI圧入後に塗布

# 塩化物イオンの分布

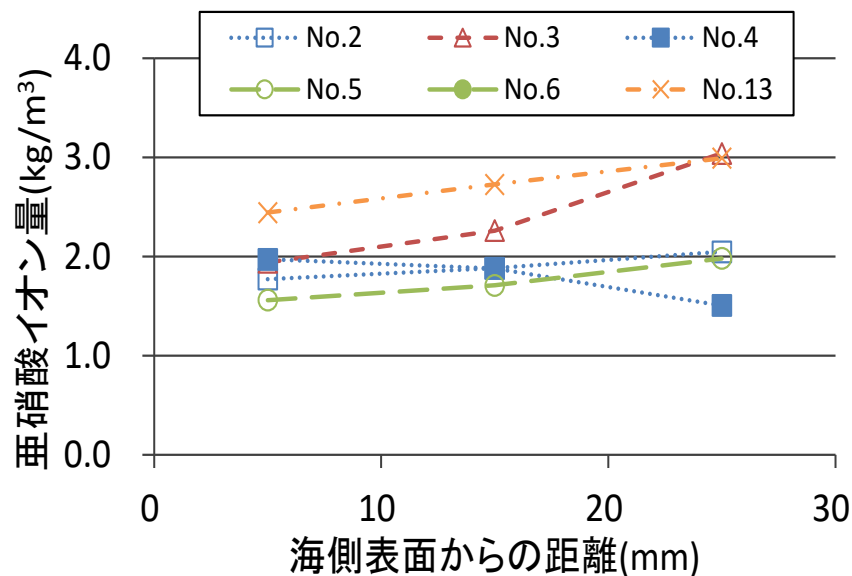


Cl: 0kg/m³試験体

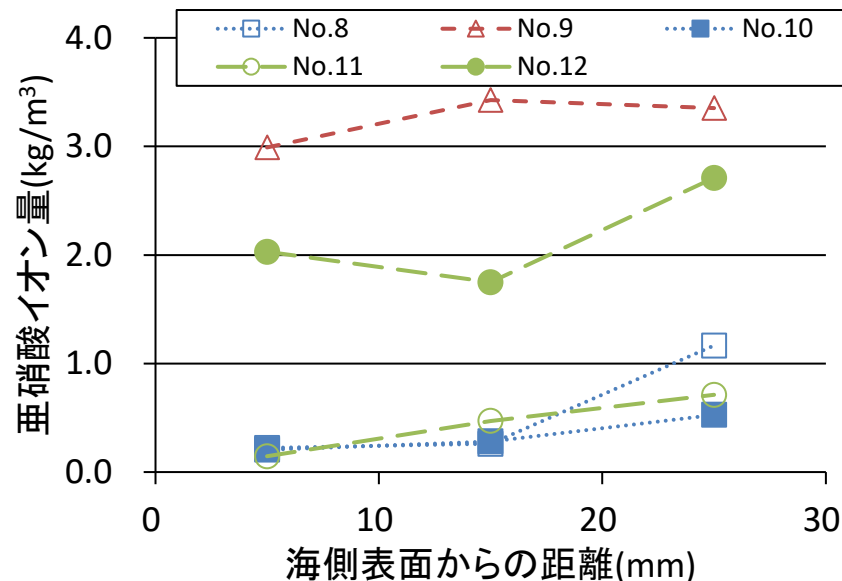


Cl: 5kg/m³試験体

# 亜硝酸イオンの分布

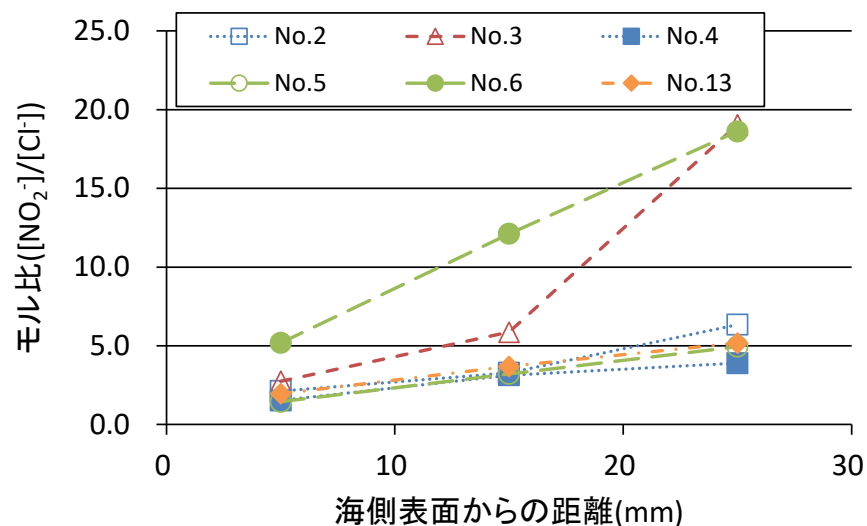


Cl: 0kg/m³試験体

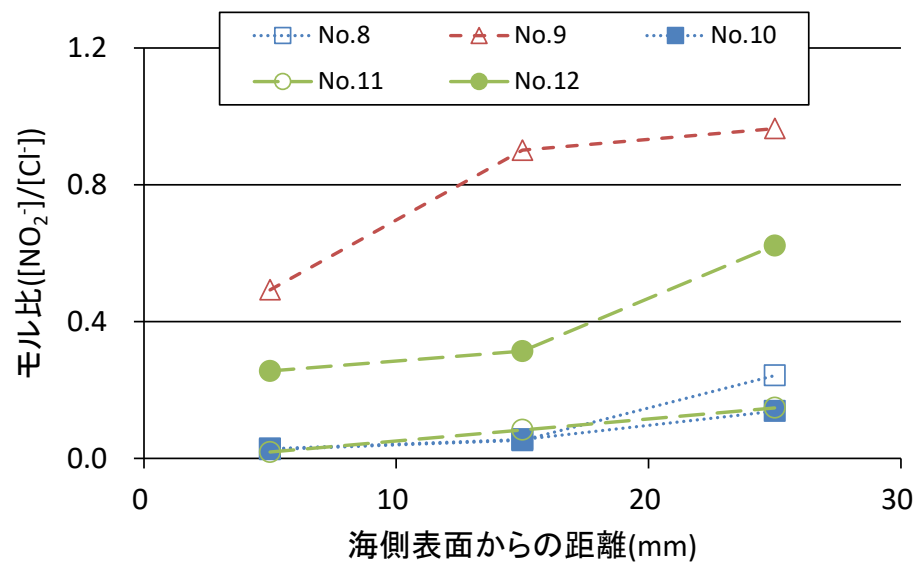


Cl: 5kg/m³試験体

# モル比 $[\text{NO}_2^-]/[\text{Cl}^-]$ 分布w



Cl: 0kg/m<sup>3</sup>試験体



Cl: 5kg/m<sup>3</sup>試験体

# 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。見た日を変えずに、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: $5\text{kg}/\text{m}^3$<br>腐食促進なし                                            | 塩分量: $5\text{kg}/\text{m}^3 + \alpha$<br>腐食ひび割れ発生                                   | 塩分量: $5\text{kg}/\text{m}^3 + \alpha$<br>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                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <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> |

# 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 <sub>2</sub> 圧入＋けい酸塩系表面含浸材                        |
|      | 1-2 | 外観変化の抑制 | LiNO <sub>2</sub> 圧入                                   |
|      | 1-3 | 施工の簡易性  | LiNO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 圧入＋けい酸塩系表面含浸材＋LiNO <sub>2</sub> 入り塗料 |
|      | 3-2 | 外観変化の抑制 | 鉄筋に直接LiNO <sub>2</sub> を塗布                             |
|      | 3-3 | 施工の簡易性  | 鉄筋除錆後にLiNO <sub>2</sub> 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

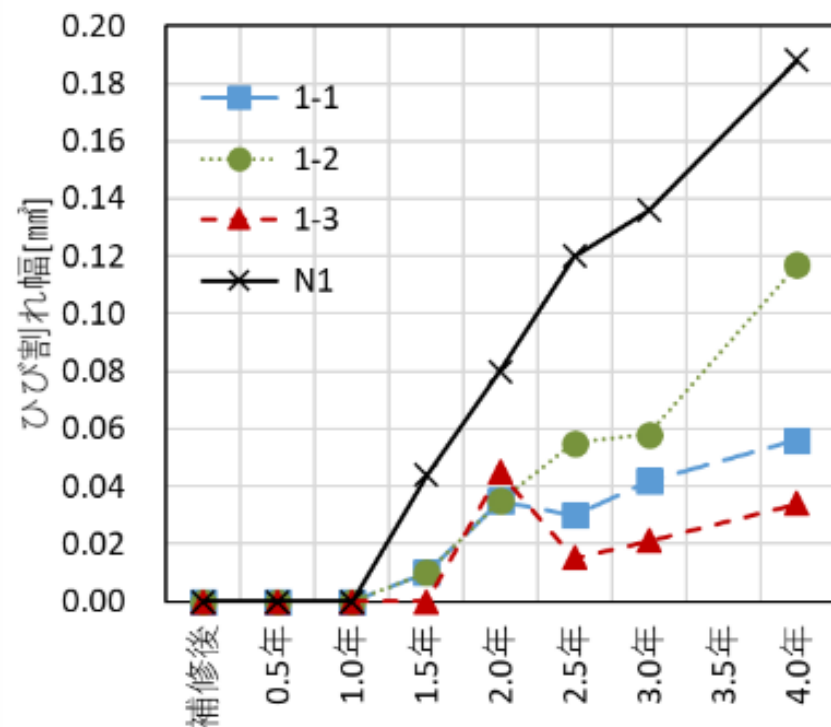


69号棟(端島病院)屋上から69号棟・65号棟前に移設

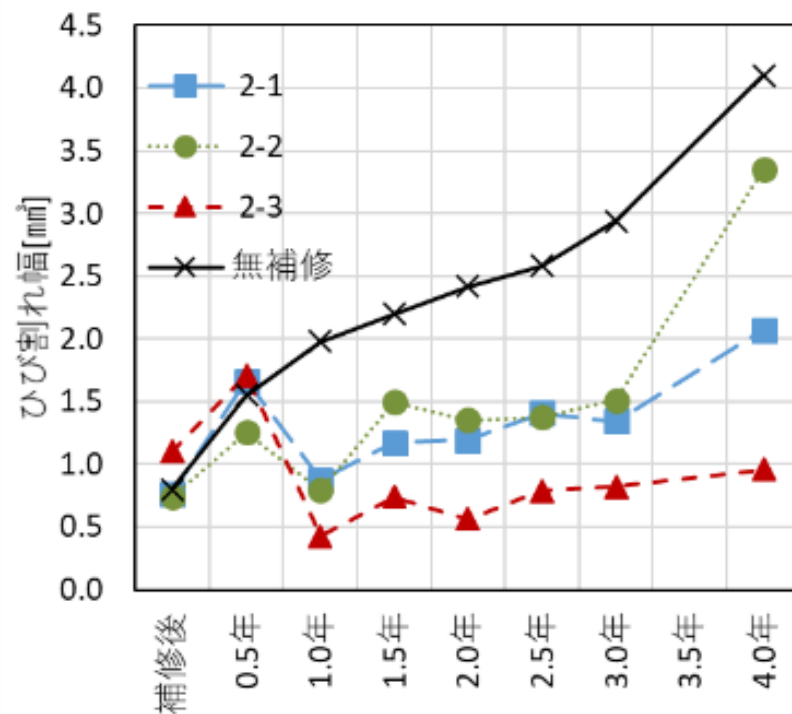
# 試験体の状況 \_外観変化

| 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

# 70号棟試験施工

## 補修試験施工の目的

- ・ 島内のRC構造物の延命を期待できる補修工法の確立
- ・ 補修後の外観(視認性)への影響評価
- ・ 補修材の除去可能性(可逆性)の評価

## 補修候補の選定基準

- ・ これまでの端島における補修工法共通試験で得られた知見を基に選定(長崎市・JCI設置の委員会で評価)
- ・ 以下の効果を評価項目とする
  - ①劣化因子の浸透抑制
  - ②部材形状の維持
  - ③防錆効果(各種防錆材、電気化学的補修等)

# 試験施工参加企業

| No. | 企業・団体名         | 工法                              | 実施箇所  |
|-----|----------------|---------------------------------|-------|
| 1   | シーカ・ジャパン       | 浸透性吸水防止剤塗布                      | 1F壁   |
| 2   | 東興ジオテック        | 電気化学的補修(チタン陽極挿入)                | 3F柱   |
| 3   | ショーボンド建設       | 増粘型浸透性防錆材(LiNO <sub>2</sub> )塗布 | 2F梁   |
| 4   | SGエンジニアリング     | 特殊エポキシ樹脂注入                      | 1F柱・梁 |
| 5   | タフネスコート技術研究会   | ポリウレア樹脂被覆                       | 3F梁   |
| 6   | 千代田ビル管財        | ポリウレア樹脂被覆                       | 3F柱   |
| 7   | 日本躯体処理         | ケイ酸塩系含浸材                        | 3F壁   |
| 8   | 五洋建設           | アクリル透明被覆シート                     | 3F柱   |
| 9   | ベルテクス          | パネル被覆・ポリウレア樹脂被覆                 | 3F柱   |
| 10  | 菊水化学工業         | 断面修復工法(塩分吸着・LiNO <sub>2</sub> ) | 3F梁   |
| 11  | コンクリートメンテナンス協会 | 防錆剤(LiNO <sub>2</sub> )内部圧入     | 2F梁   |
| 12  | コンステック         | 防錆剤入りペースト塗布                     | 1F柱   |

※今後1社追加予定

# 施工前後の状況(左:施工前・右:施工後)



No.1 シーカ・ジャパン



No.2 東興ジオテック



No.3 ショーボンド建設



No.4 SGエンジニアリング



No.5 タフネスコート



No.6 千代田ビル管財

# 施工前後の状況(左:施工前・右:施工後)



No.7 日本躯体処理



No.8 五洋建設



No.9 ベルテクス



No.10 菊水化学工業



No.11 コンクリートメンテナンス協会



No.12 コンステック

# 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。

# お知らせ

## JCI(日本コンクリート工学会)主催 「コンクリート分野における電磁波の高度利用 に関するシンポジウム」のご案内

日時：令和8年9月17日(木) オンラインとのハイブリッド開催

場所：法政大学市ヶ谷田町校舎 5階マルチメディアホール  
(東京都新宿区市谷田町2-33)

内容：電磁波レーダ、テラヘルツ波、近赤外線などの電磁波について、  
従来の鉄筋探査に留まらない新しい利用技術(内部状態、塩化物  
イオン量、鉄筋腐食、凝結硬化過程の評価等)に関する研究委員  
会報告＋最新の論文発表を行うシンポジウムです。

詳細・参加申し込みはJCIホームページから

[https://www.jci-net.or.jp/j/events/symposium/20260917\\_b.html](https://www.jci-net.or.jp/j/events/symposium/20260917_b.html)

対面用申し込みサイト



オンライン用申し込みサイト

