

# コンクリート中における 鉄筋腐食のメカニズムと防食方法

京都大学大学院工学研究科  
社会基盤工学専攻 構造材料学研究室  
高谷 哲

2019年5月16日

# 自己紹介

---

# 略歴

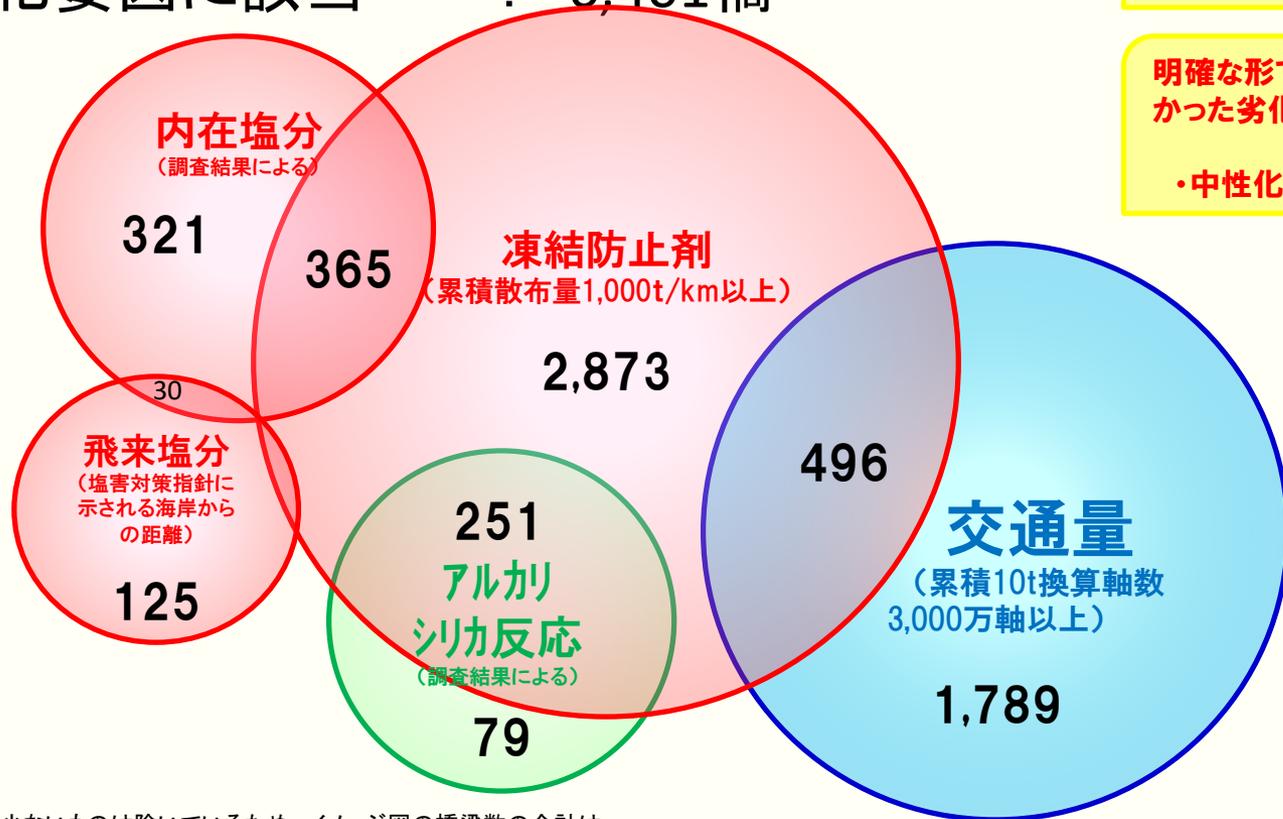
1999年3月	大分県の高校を卒業 京都大学農学部を受験. . . 不合格
2000年4月	福岡での1年間の浪人生活を経て. . . 京都大学工学部地球工学科入学
	建築雑誌にはまり建築学科に行きたくなる
2003年4月	構造材料学研究室（宮川研）配属
2009年3月	社会基盤工学専攻博士課程修了 「鉄筋腐食膨張圧によりかぶりコンクリートに生じるひび割れの発生・進展予測に関する研究」
2009年4月～	現職 「赤外線サーモグラフィを用いた剥落時期予測手法」 「鉄筋腐食のメカニズム（腐食生成物の環境依存性）」 「防せい剤の腐食抑制メカニズムや効果」 最近では、ラマン分光分析を用いたASRや有機系塗膜の評価なども

はじめに

---

# 鉄筋コンクリート床版の主な劣化要因

全橋梁数 : 13,154橋  
下記の劣化要因に該当せず : 6,753橋  
下記の劣化要因に該当 : 6,401橋



初期欠陥

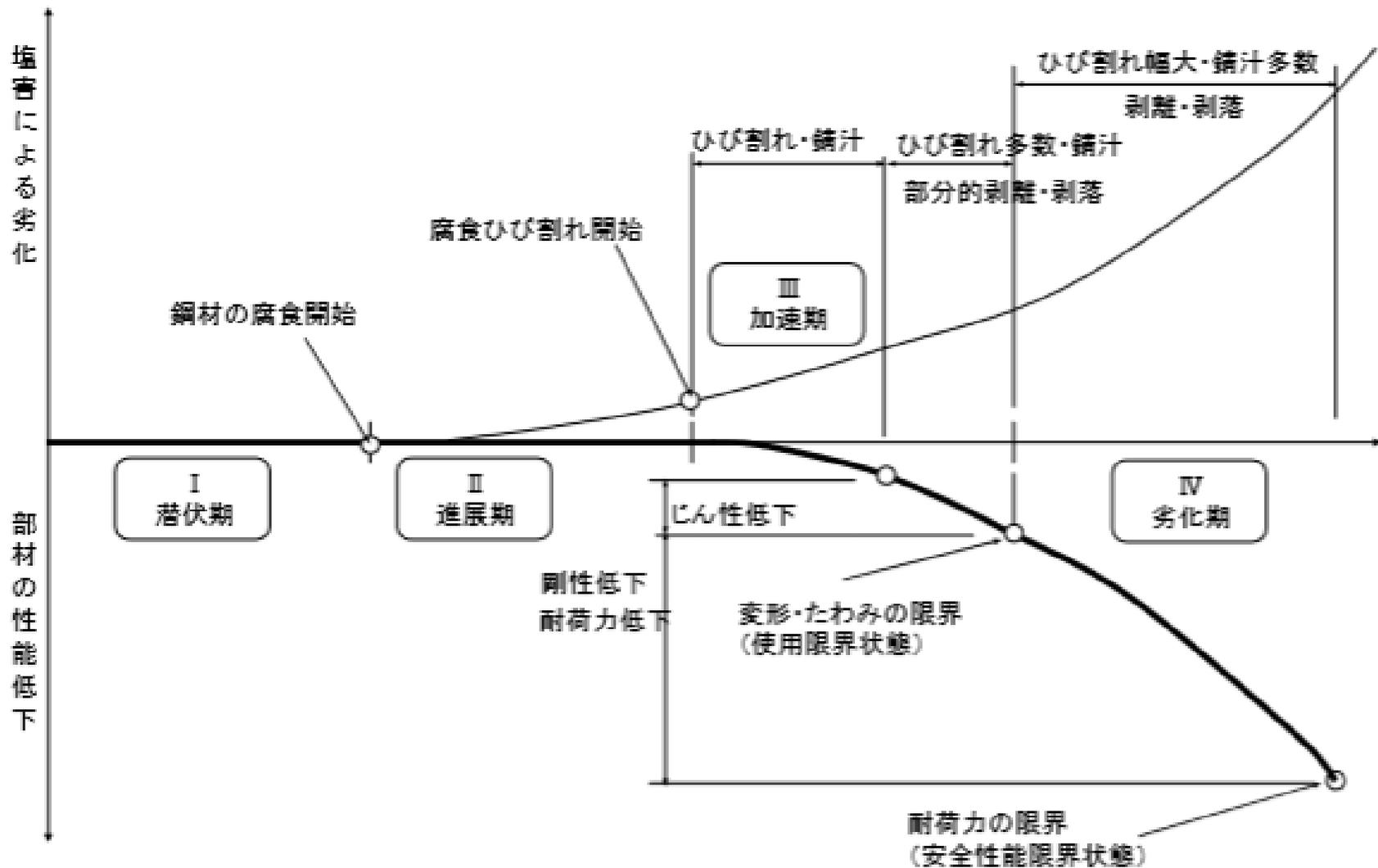
- ・かぶり不足
- ・豆板等

明確な形では考慮しなかった劣化

- ・中性化

※劣化要因の組合せ数が少ないものは除いているため、イメージ図の橋梁数の合計は劣化要因に該当する橋梁数と一致しない。

# コンクリート中の鉄筋が腐食すると

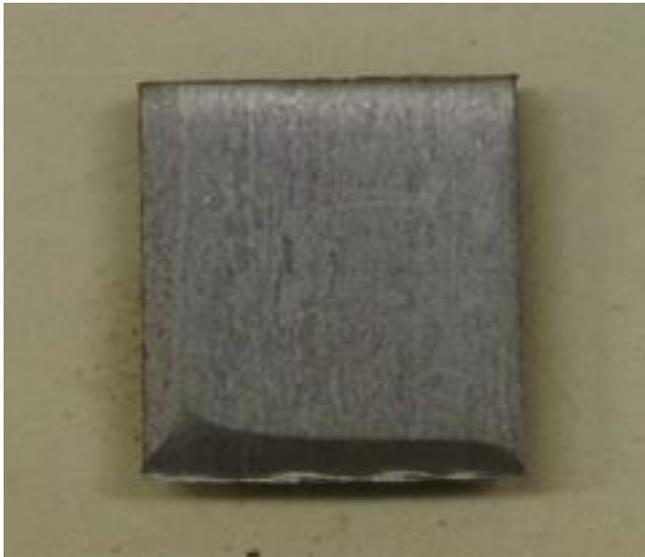


# アルカリ環境下における不働態皮膜

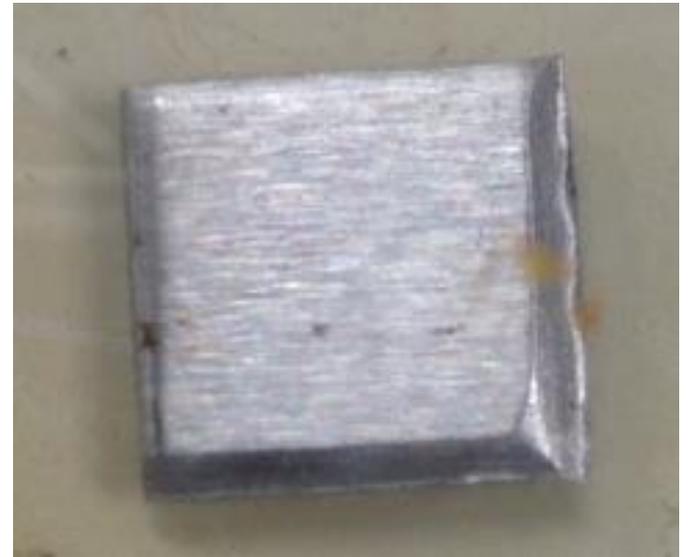
---

# 酸性とアルカリ性の違い

HNO<sub>3</sub>浸漬  
(60%)

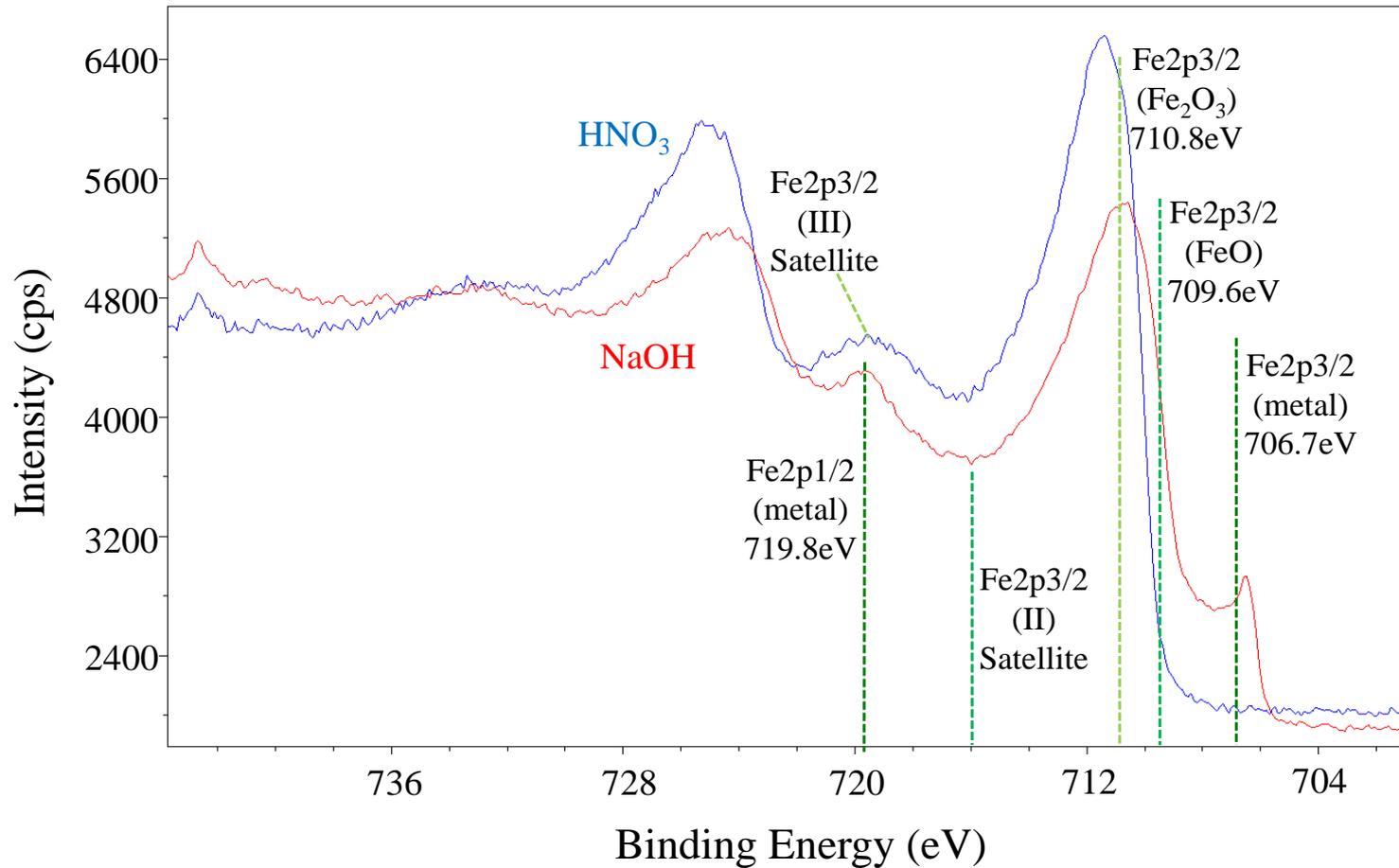


NaOH浸漬  
(pH=13.0)



M. Faraday ; 1884年に濃硝酸中で鉄が不動態化することを報告

# 酸性とアルカリ性の違い (XPS)



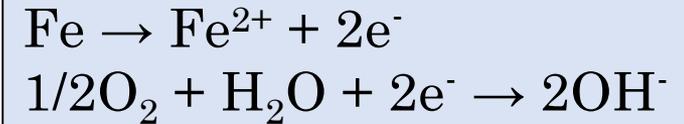
酸性では $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, アルカリ性ではFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>  
ただし鉄筋は黒皮がアルカリ環境で安定なだけ  
→不働態皮膜は形成しない

# 腐食生成物の環境依存性

---

# 塩化物イオンはなぜ悪い？

## 鉄の腐食反応



- 電気抵抗(溶液抵抗)を下げる
- 活性化エネルギーを下げる  
→活性錯体が $\text{Fe}^{2+}$ の拡散を促進する働きも
- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の結晶性(安定性)を損ねる

# 腐食生成物に与えるpH・Cl<sup>-</sup>の影響

塩化物イオン量

少ない

多い



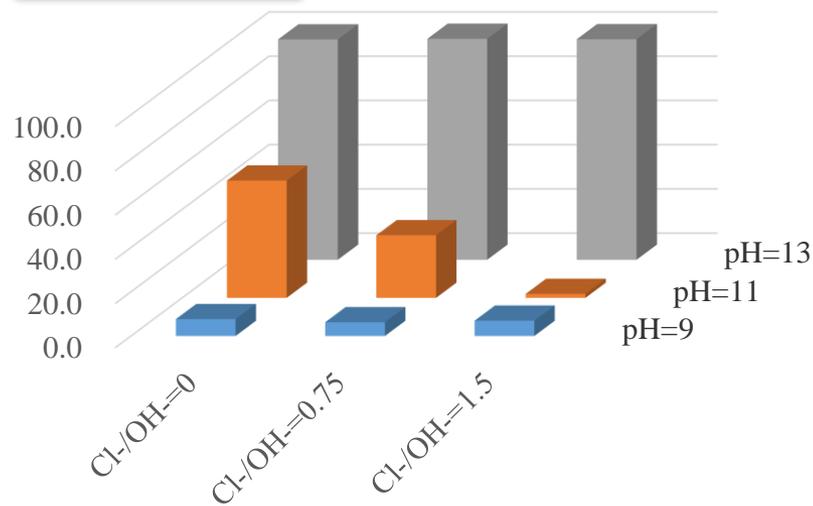
高い

pH

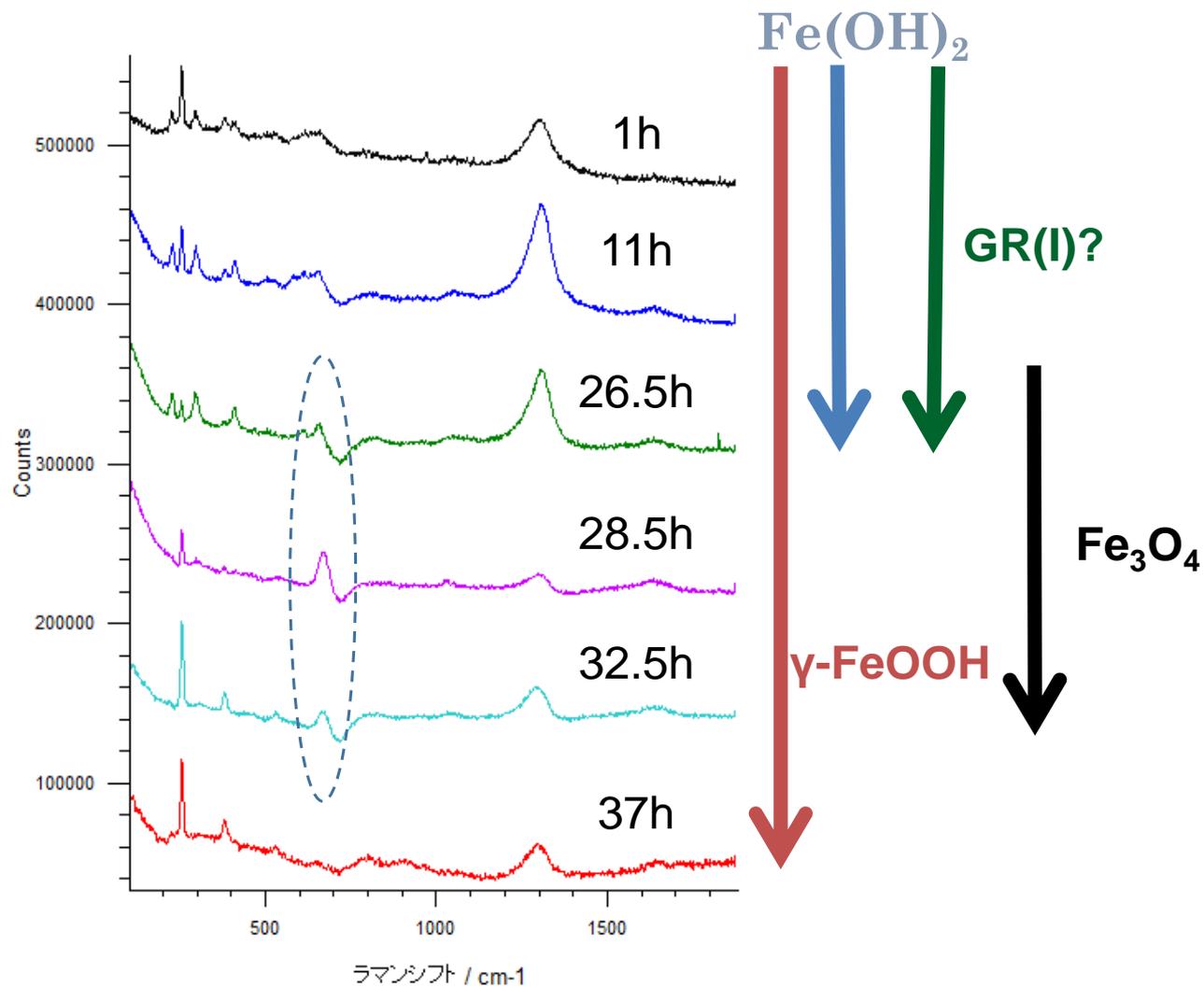
低い

	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup> =0	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup> =0.75	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup> =1.5
pH=13			
pH=11			
pH=9			

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の割合

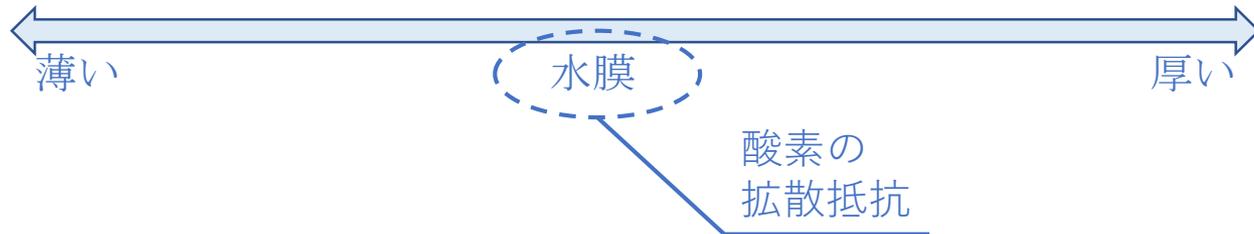


# 腐食生成物に与える溶存酸素の影響



# 腐食生成物に与える溶存酸素の影響

	18%RH	40%RH	74%RH	90%RH
NaCl 3%				
NaCl 0.005%				



# コンクリート中の鉄筋の腐食環境

---

# 実構造物における腐食生成物

塩化物イオンや中性化によるpHの低下は腐食の起点にはなるが、その後の腐食の進行を決めるのは水と酸素

環境条件	さびの状態	腐食速度	体積膨張倍率	さびの状態
湿潤 (酸素欠乏)	<ul style="list-style-type: none"><li>鉄筋表面に薄い黒さび層が形成 (一部赤さびが混じることもある)</li></ul>	小さい	2.5倍程度	
湿潤 (酸素十分)	<ul style="list-style-type: none"><li>生成した赤さびが溶出する</li><li>孔食が生じることがある</li></ul>	大きい	溶出	
乾燥	<ul style="list-style-type: none"><li>鉄筋表面に薄い赤さび層が形成</li></ul>	小さい	3.1倍程度	
乾湿繰返し	<ul style="list-style-type: none"><li>黒さび層状さびが形成 (さび層表面には赤さびが生成していることも多い)</li></ul>	大きい	2.1倍程度	

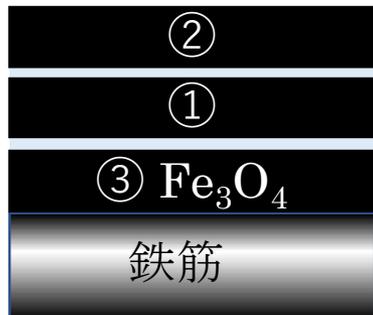
# 乾湿繰返しによる腐食進展メカニズム



湿潤状態でFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>が生成



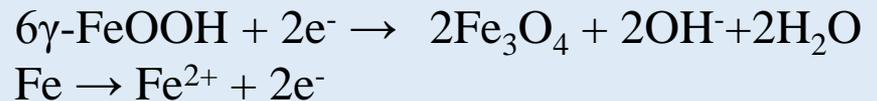
乾燥状態で空気酸化によりさび層表面にγ-FeOOHが生成



湿潤状態でさび層表面のγ-FeOOHがFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>に還元

↓  
下地の鉄が酸化されてFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>が生成

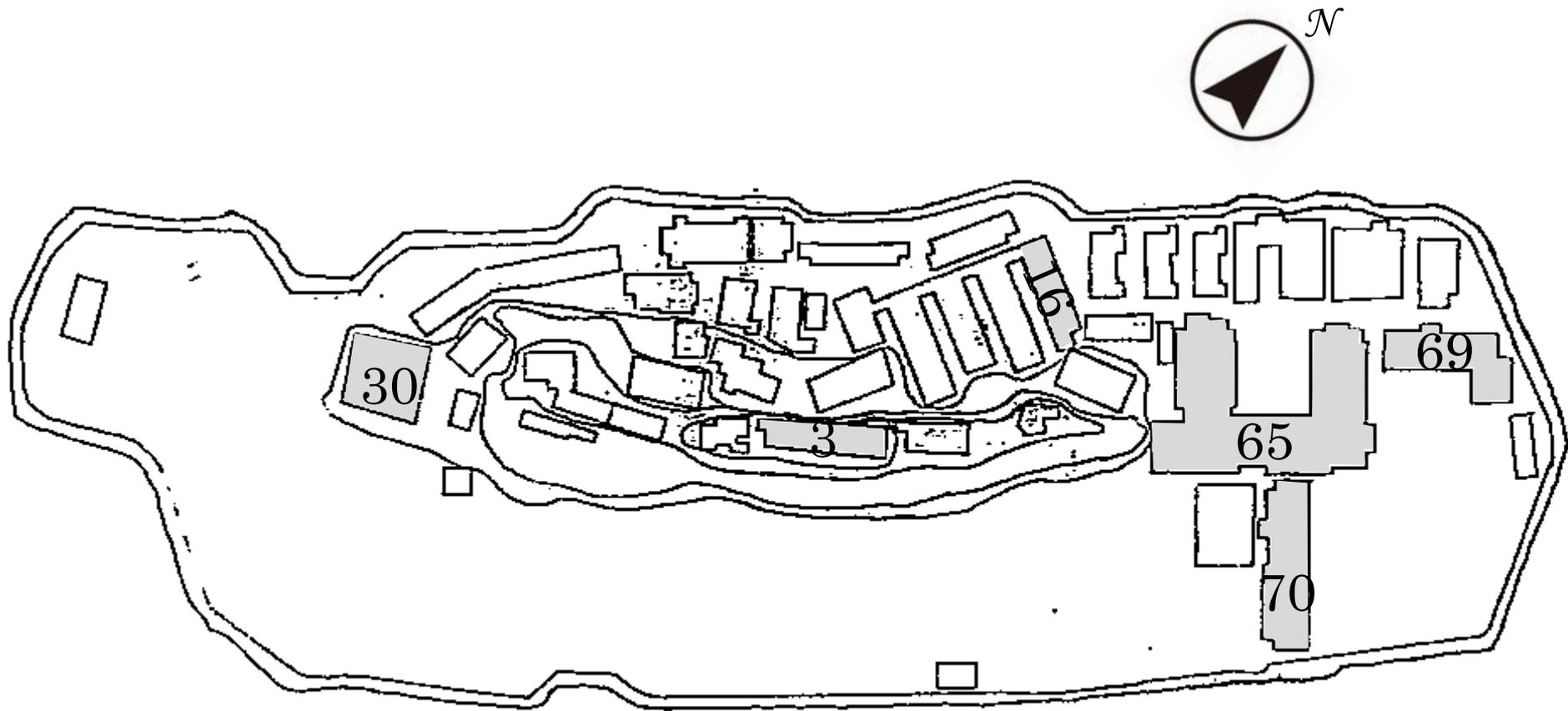
酸化還元反応



# 軍艦島における鉄筋の腐食

---

# 調査構造物



# 鉄筋の腐食状況

軍艦島において腐食が進行した原因は「乾湿繰返し」

乾湿繰り返しによる  
層状さび



層状さびの下に形成した  
保護性さび



# 鉄筋の腐食状況

A：保護性さびが形成し、ある程度断面が残っている



B：保護性さびが形成しているが断面はほとんど残っていない



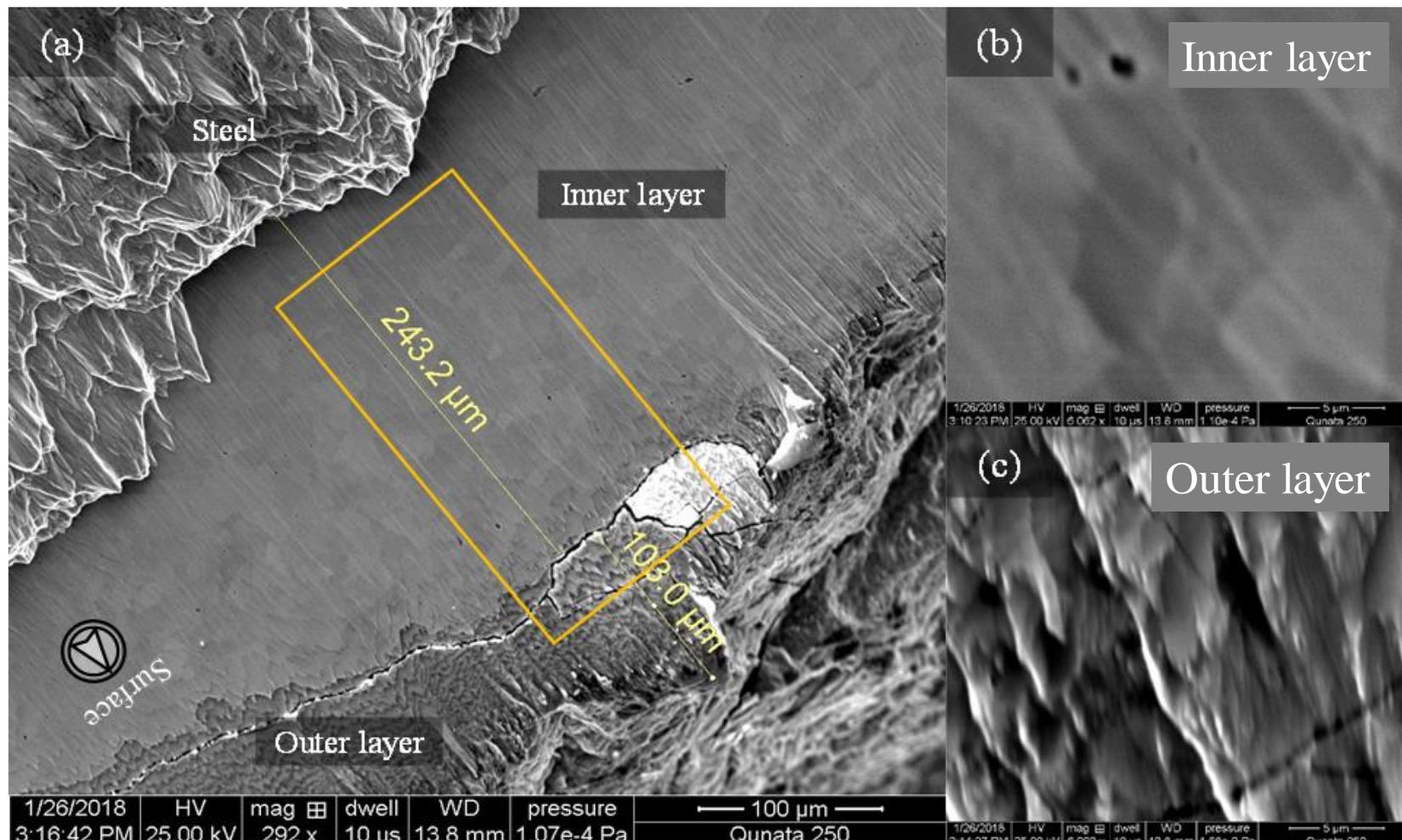
C：乾湿繰返しによる腐食が進行している



D：すでに断面が残っていない



# 保護性さびの微細構造



# 鉄筋の防食

---

# 防食のポイント

- 水や酸素，塩化物イオンを防ぐ  
被膜防食，含浸材，緻密なコンクリート
- 不動態被膜，防食被膜を作る  
ステンレス鋼，防せい剤
- 鉄の電位を下げる  
電気防食（カソード防食）
- 保護性さびを作る  
研究中

# 被膜防食

## メリット

最も基本的な防食方法で、鋼を環境から遮断する働きを有する。

塗膜内にも水や酸素などの腐食性物質が浸透はするが、近年は塗膜内にガラスフレークなどを加えて、腐食性物質の浸透経路を長くて耐食性を高めている。

## デメリット

適切な塗膜の選定、施工を行わなければ十分な効果は得られない。

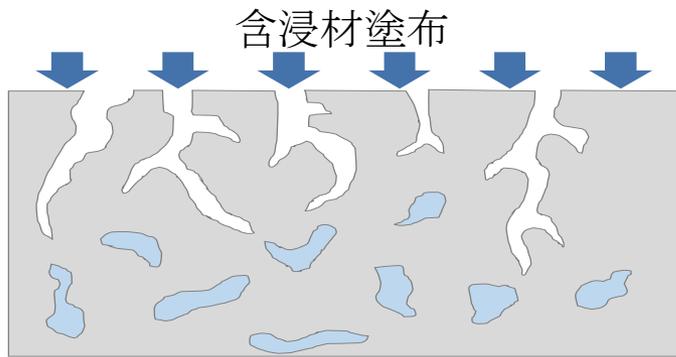
短期的に、美観・防食面で問題はなくても、長期的には点錆や塗膜の膨れ、糸状腐食などが起こる場合もある。

また、有機系の塗膜は紫外線劣化し、白亜化（チョーキング）することが知られている。

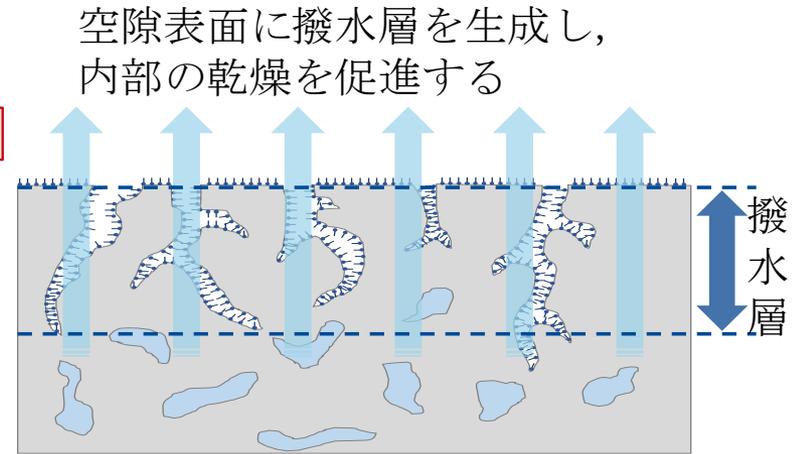
塗膜の塗り替えコストを考えると、重防食塗装などにより、耐久性を高めるなどの工夫が必要。

# 表面含浸材

STEP 1



STEP 2



# 防せい剤

## 防せい剤の種類

### ・吸着型インヒビター

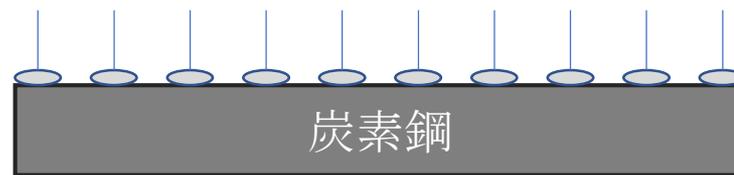
金属表面に吸着して単分子膜を形成することにより，金属の溶解を抑える。

### ・アノード型インヒビター

酸化剤として金属表面に作用し，不働態化させる．クロメート（現在は使用禁止）や**亜硝酸塩**，モリブデン酸塩が代表的

### ・カソード型インヒビター

カソード反応で生成した $\text{OH}^-$ と反応して，金属表面に沈殿を析出する．ポリリン酸塩やホスホン酸塩が代表的。



(a)吸着型インヒビター



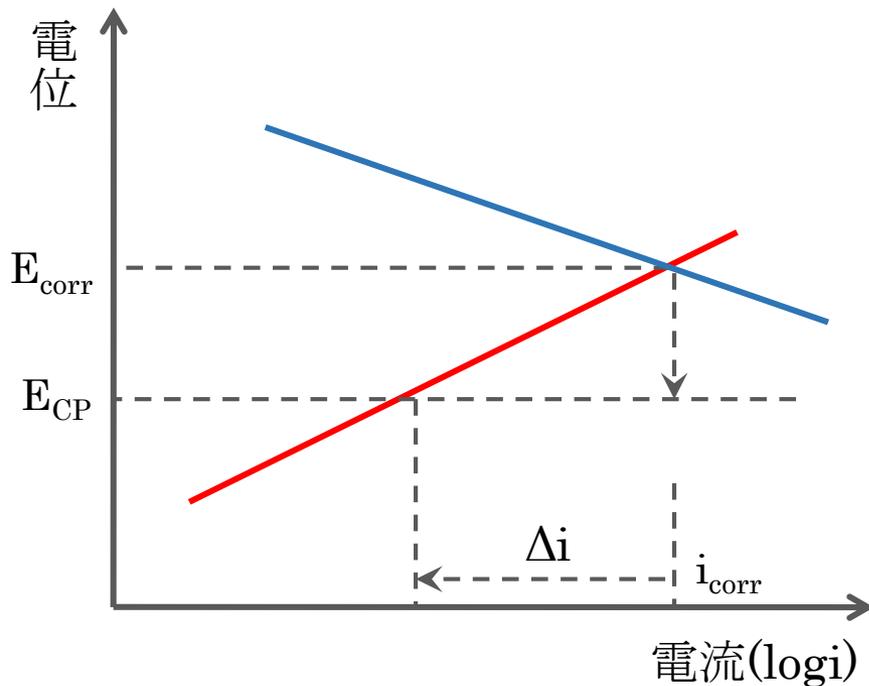
(b)アノード型インヒビター



(c)カソード型インヒビター

# 電気防食

カソード防食とは、鉄の電位を  $E_{\text{corr}} \rightarrow E_{\text{CP}}$  に低下させることであり、カソード防食電位  $E_{\text{CP}}$  は鉄の平衡電位に相当する。腐食電流に相殺する電流を外部から印加し、腐食電流を減らす方法とも言える。



金属の溶解に伴って発生する電流によって、被防食体である鉄をカソードに保持する流電陽極方式と、PtやTiのような不溶性のアノードを用いて外部電源から防食電流を供給する外部電源方式がある。

$\mathcal{F}$

$I$

$\mathcal{N}$

ご清聴ありがとうございました