



HOKKAIDO
UNIVERSITY

原子力施設の経年劣化と 建設材料の耐久性評価

原子力規制人材育成事業
「外部ハザードとその対応」
セメント・コンクリートの長期的挙動と維持管理

Associate Professor **Katsufumi HASHIMOTO**
Faculty of Engineering, Hokkaido University

橋本勝文 准教授 北海道大学大学院工学研究院
環境機能マテリアル工学研究室

2-1 セメントの水和機構と化学的変質

セメント水和物の生成と劣化因子の反応を伴う長期変質挙動

2-2 コンクリートの空隙構造と物質移行性

空隙構造モデルとイオン移動および拡散シミュレーション

2-3 鉄筋コンクリートの力学特性と性能評価

環境作用に伴う耐力低下とひび割れ発生機構に基づく構造物の性能評価

2-4 劣化メカニズムに基づく対策と設計

供用環境における各種劣化機構と補修・補強と性能評価の考え方

2-5 維持管理シナリオ

点検・調査・診断の在り方と維持管理シナリオの策定

2-1 セメントの水和機構と化学的変質

セメント水和物の生成と劣化因子の反応を伴う長期変質挙動

2-2 コンクリートの空隙構造と物質移行性

空隙構造モデルとイオン移動および拡散シミュレーション

2-3 鉄筋コンクリートの力学特性と性能評価

環境作用に伴う耐力低下とひび割れ発生機構に基づく構造物の性能評価

2-4 劣化メカニズムに基づく対策と設計

供用環境における各種劣化機構と補修・補強と性能評価の考え方

2-5 維持管理シナリオ

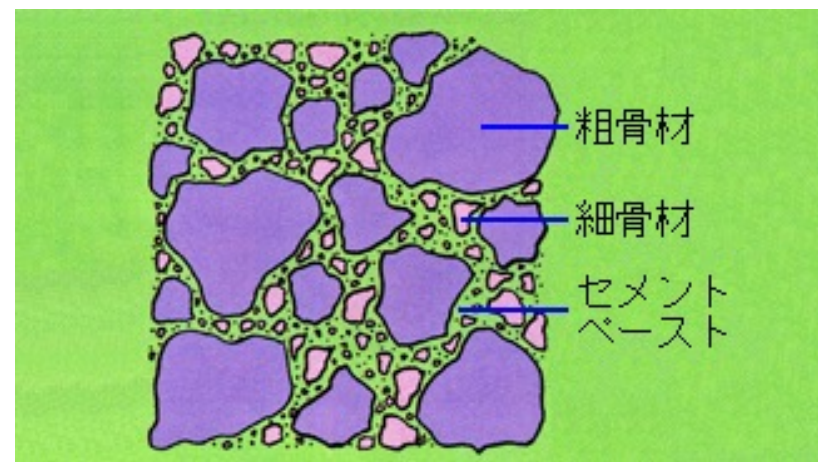
点検・調査・診断の在り方と維持管理シナリオの策定

セメント
水
細骨材
粗骨材

混和材料(混和材および混和剤)

混和材は、使用量が比較的多く、その容積が
カウントされるものであり、混和剤は、使用量
が少なく、薬品としての取り扱いをするもの

【1】



コンクリート

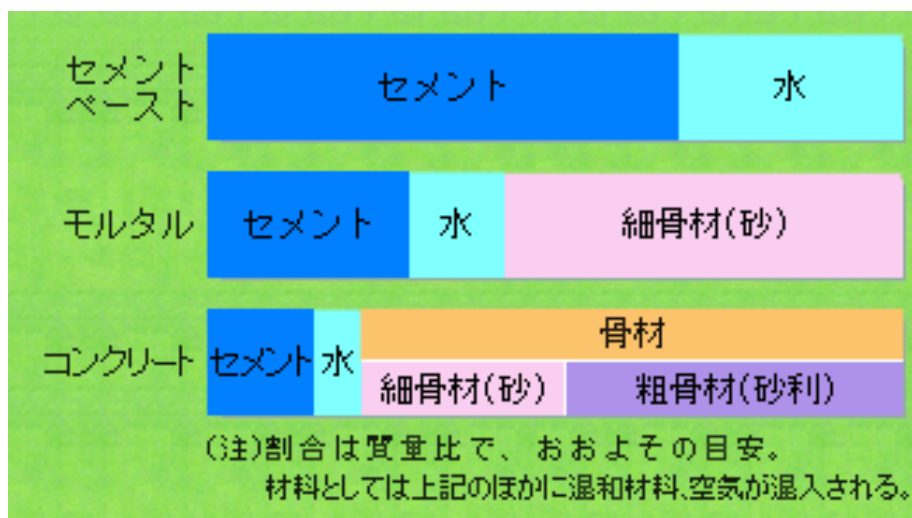
=セメント+粗骨材+細骨材+水

モルタル

=セメント+細骨材+水

セメントペースト

=セメント+水



【2】

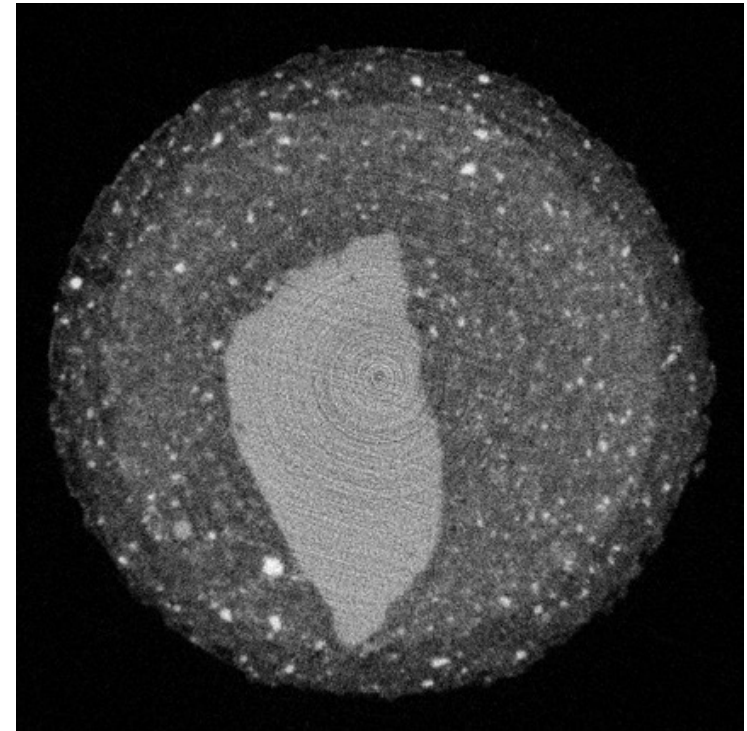
1.セメントマトリクス

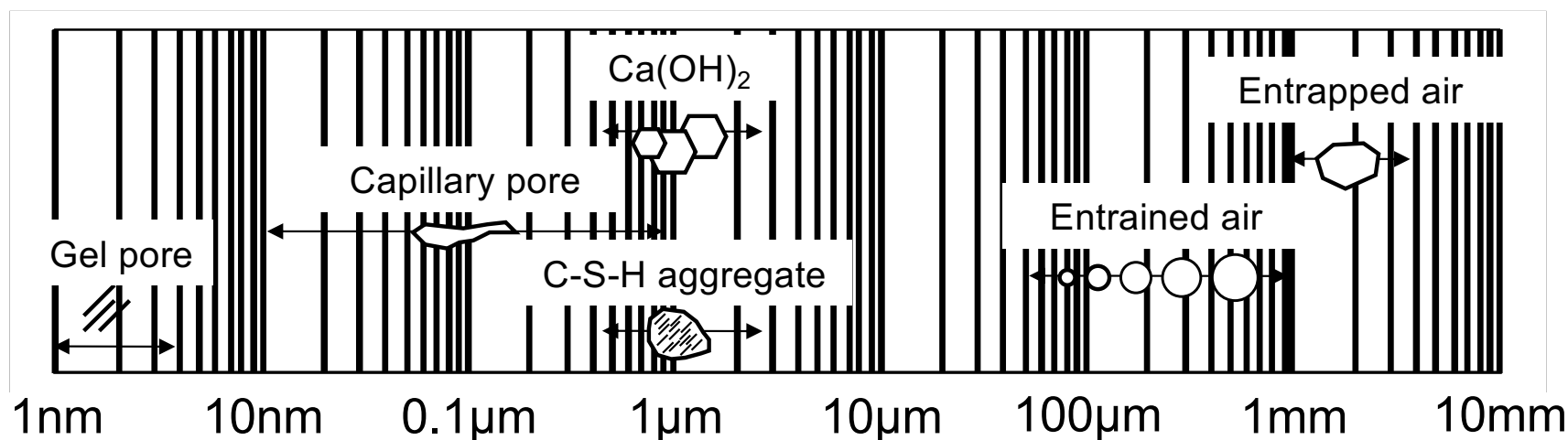
- Ca水和物(カルシウムシリケート水和物や Ca(OH)_2 等)

2.骨材

- 寸法、形状、密度、強度、弾性係数、吸水率
- 化学的・鉱物学的性質

3.境界相・遷移帯(Interfacial Transition Zone)





エントラップドエア(Entrapped air)

自然に含まれる不規則な形状の空隙.

エントレインドエア(Entrained air)

AE剤により連行された独立球状の空隙. 耐凍害性上重要となる.

毛細管空隙(Capillary pores)

練混ぜ水が占めていた空間で水和物で占められなかった空隙.

ゲル空隙(Gel pore)

水和物中の空隙(水和物で占められなかった空隙).

水和生成物

$\text{Ca}(\text{OH})_2$

- C_3S および C_2S の水和、化学的な安定性は低い

C-S-H (ケイ酸カルシウム水和物)

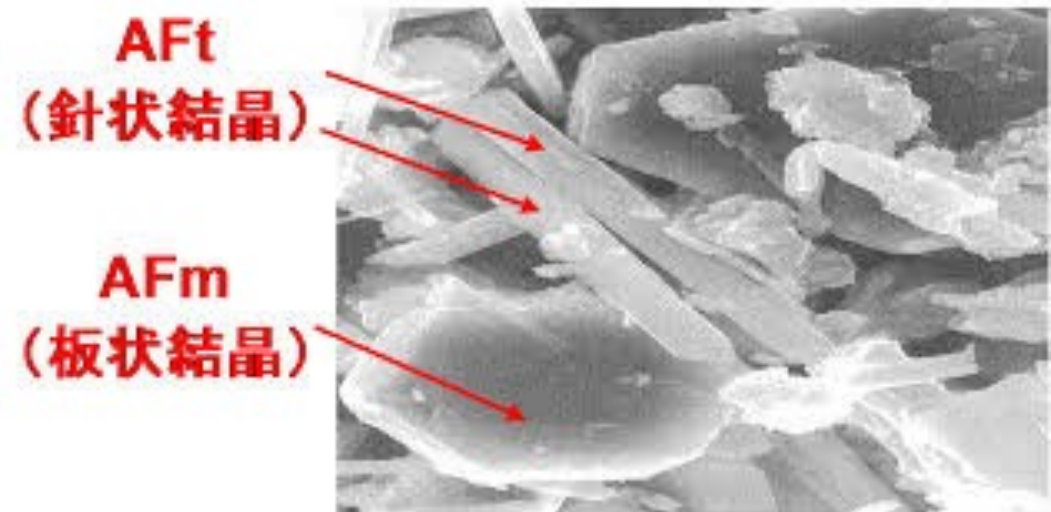
- C_3S および C_2S の水和、無定形(非晶質ゲル)で化学的安定性が高い
モノサルフェート

- 塩化物イオンの**固定化**(フリーデル氏塩の生成)

エトリンガイト

-硫酸イオンの浸入による

-**膨張破壊**



【3】

混合セメント

- 高炉セメント JIS R 5211

A種(スラグ分量:5~30%)、B種(スラグ分量:30~60%)、C種(スラグ分量:60~70%)

- 高炉スラグ微粉末 JIS A 6206

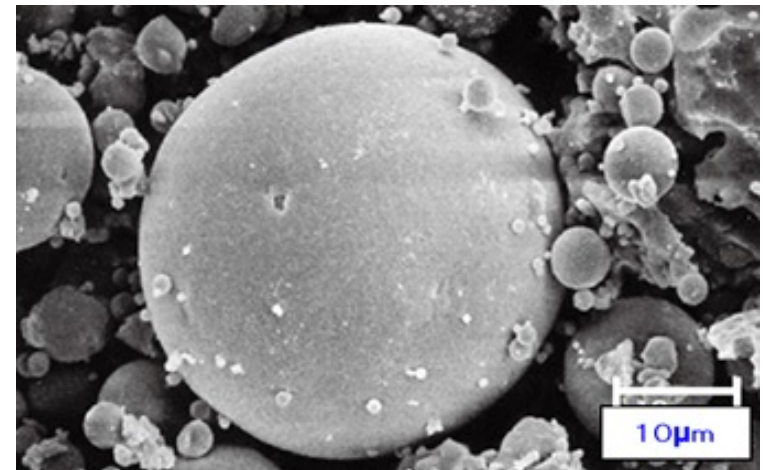
4000、6000、8000:比表面積(cm^2/g)等で規定

- フライアッシュセメント JIS R 5213

A種(フライアッシュ分量:5~10%)、B種(フライアッシュ分量:10~20%)、C種(フライアッシュ分量:20~30%)

- フライアッシュ JIS A 6201

I種、II種、III種:比表面積等で規定



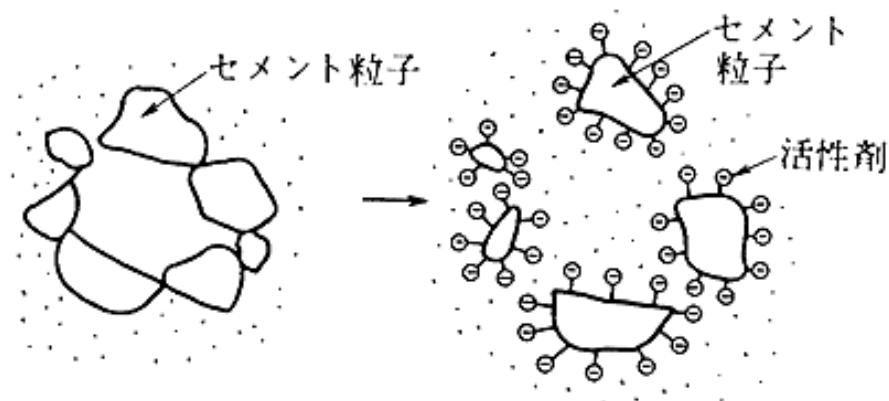
混和剤

AE剤：独立微細気泡の連行

多くの独立した微細な**空気泡**を一様に連行し、**ワーカビリティ**および**耐凍害性**を向上させるために用いる**界面活性剤**の一種

減水剤：セメント粒子の分散

セメントに対する**分散作用**により**流動性**を改善したり強度を増大する**界面活性剤**の一種



【5】

その他：遅延剤、促進剤、急結剤、水中不分離性混和剤・増粘剤

2-1 セメントの水和機構と化学的変質

セメント水和物の生成と劣化因子の反応を伴う長期変質挙動

2-2 コンクリートの空隙構造と物質移行性

空隙構造モデルとイオン移動および拡散シミュレーション

2-3 鉄筋コンクリートの力学特性と性能評価

環境作用に伴う耐力低下とひび割れ発生機構に基づく構造物の性能評価

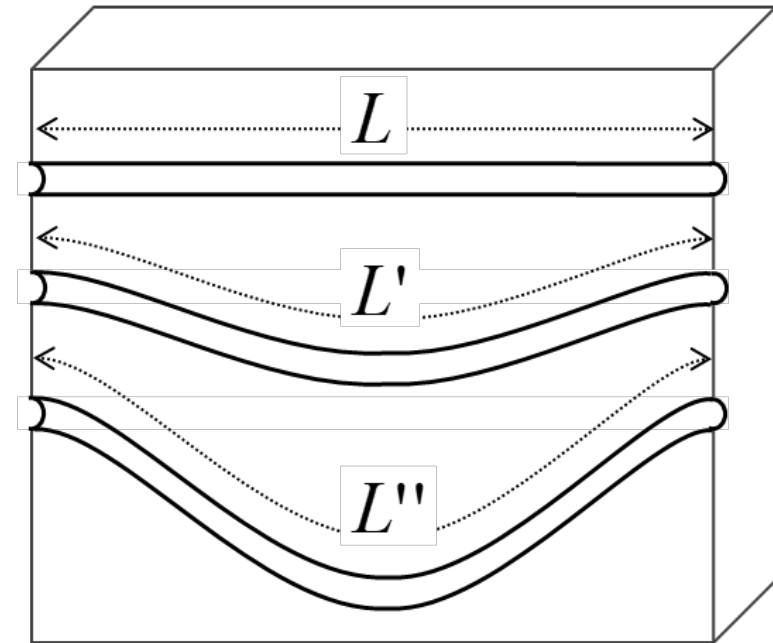
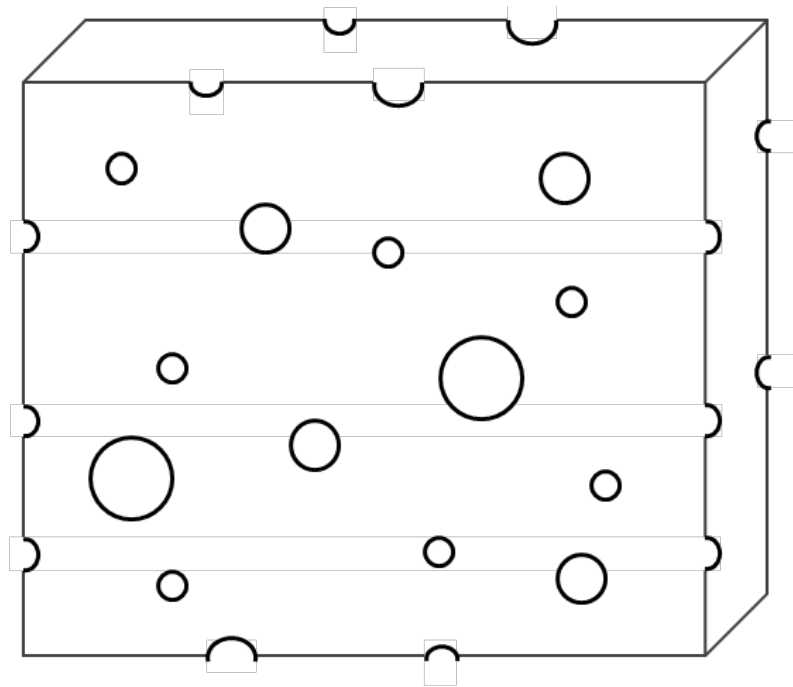
2-4 劣化メカニズムに基づく対策と設計

供用環境における各種劣化機構と補修・補強と性能評価の考え方

2-5 維持管理シナリオ

点検・調査・診断の在り方と維持管理シナリオの策定

物質透過性（浸透抵抗性）



Deterioration of concrete mainly occur due to ...

1. Mass transfer



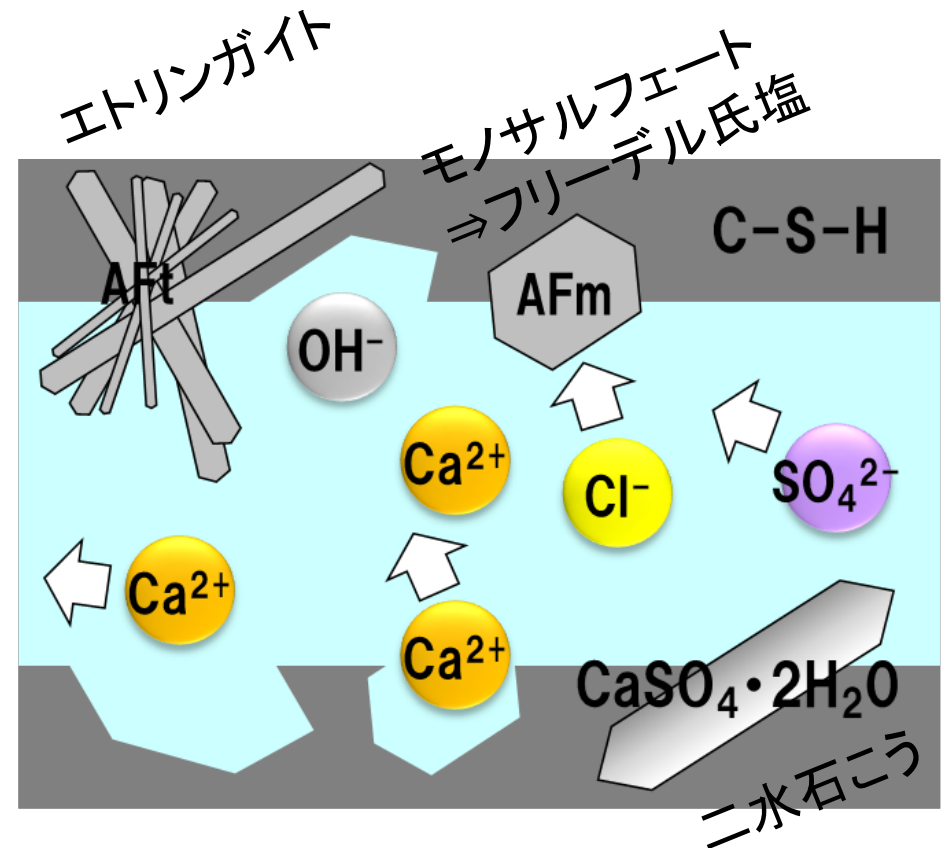
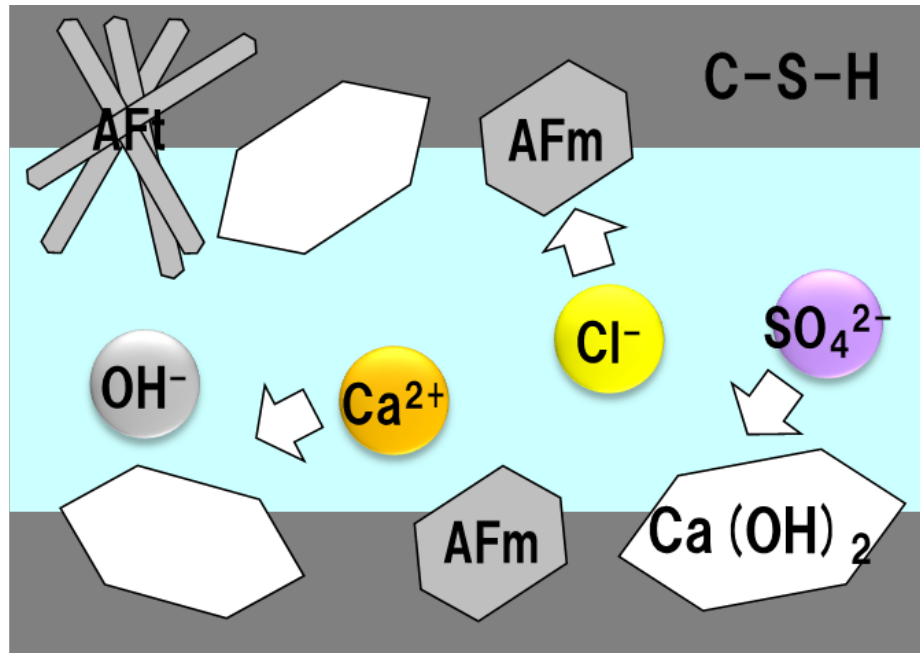
Pore structure

2. Chemical reaction



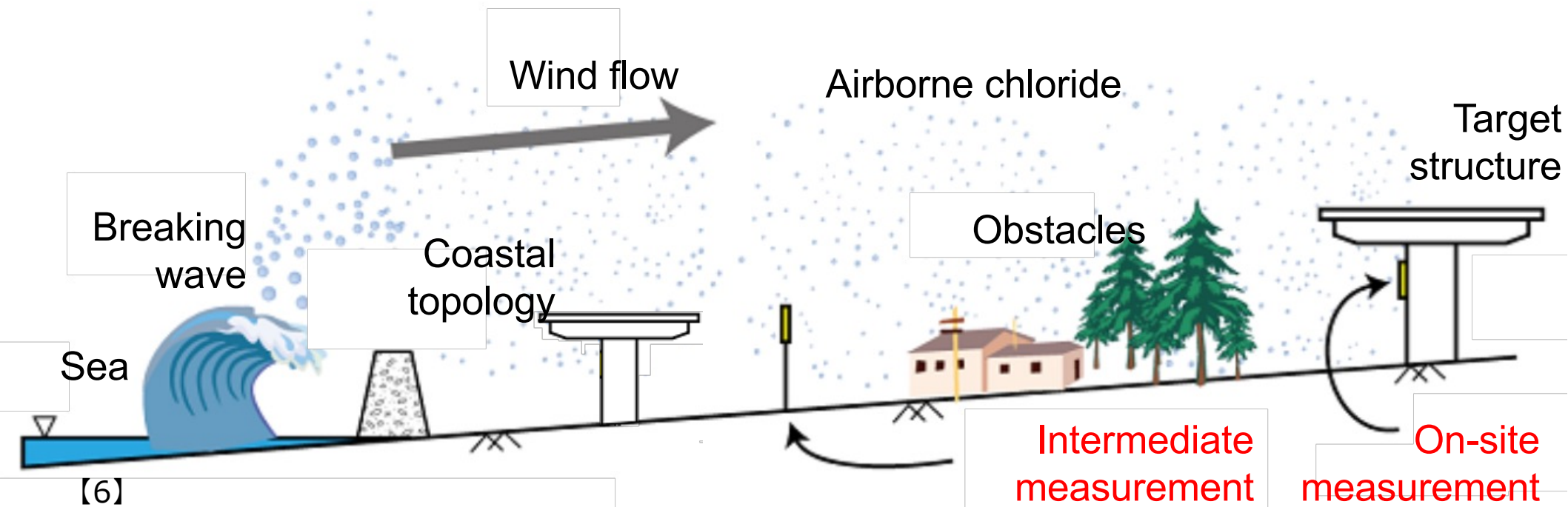
Hydration products

物質透過性（浸透抵抗性）

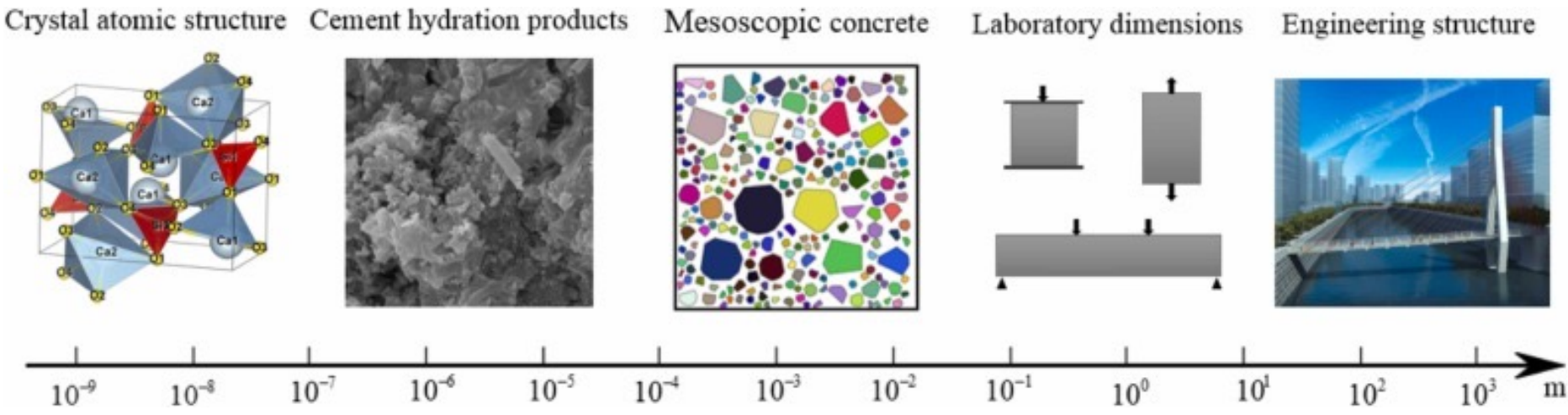


Deterioration of concrete mainly occur due to ...

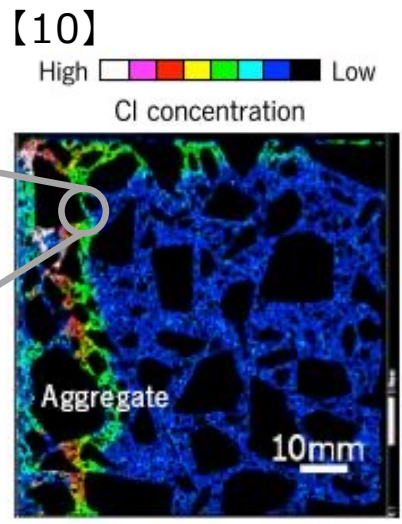
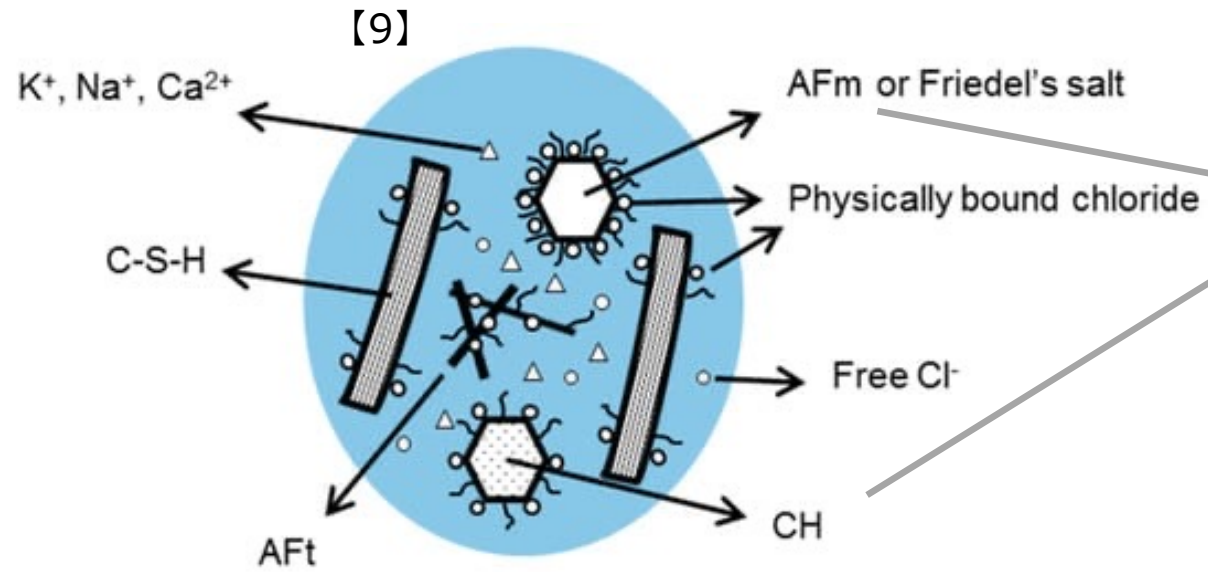
1. Mass transfer ➡ Pore structure
2. Chemical reaction ➡ Hydration products



【7】



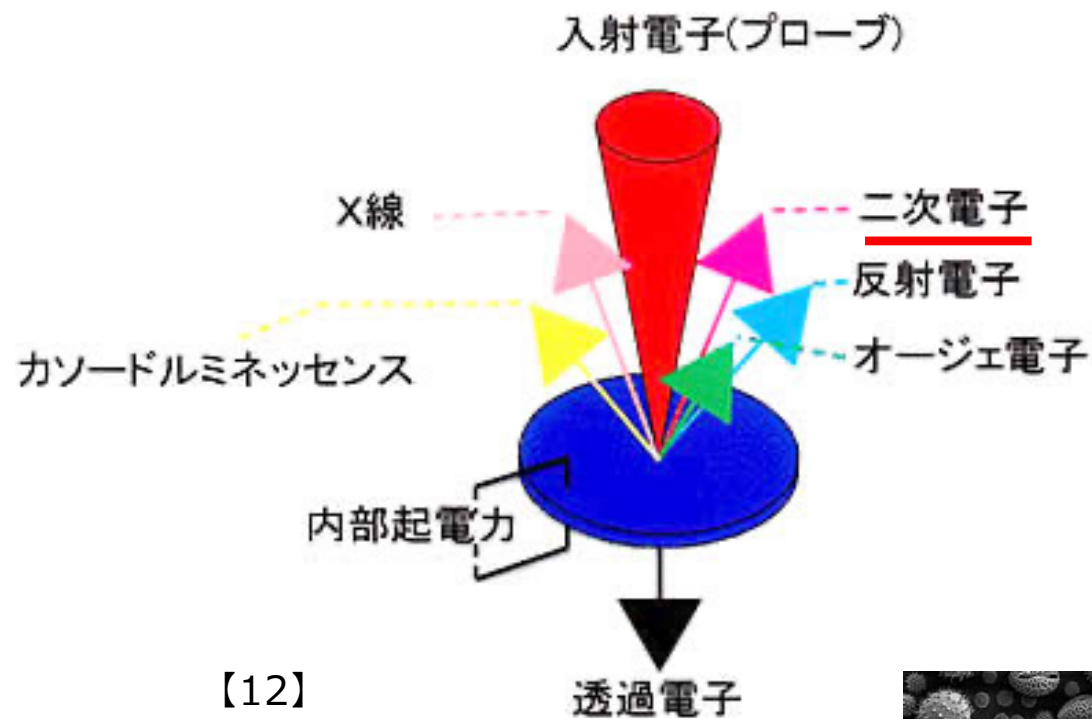
【8】



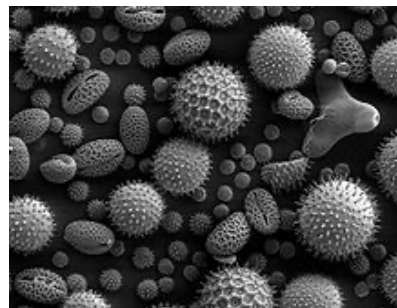
物理的変質に関する測定

SEM(Scanning Electron Microscope)

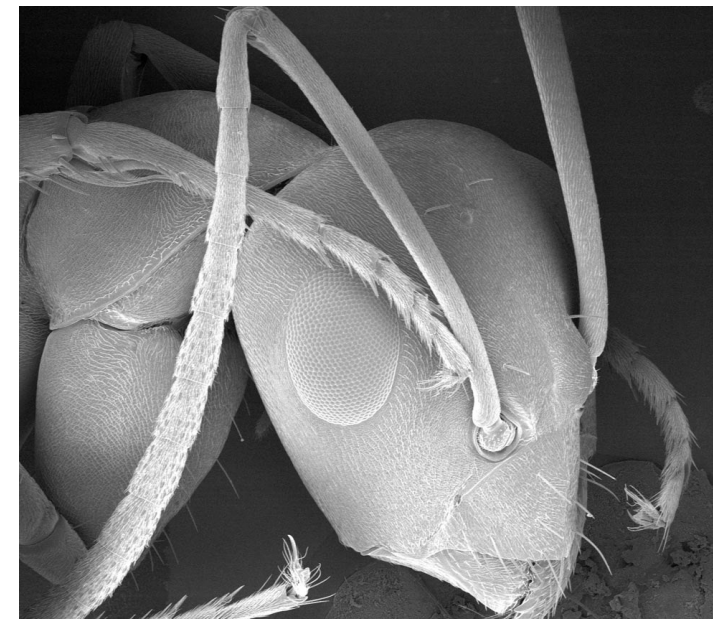
走査型電子顕微鏡



【11】



【13】



【14】

Mechanism of penetration and transportation of chloride ion in concrete are very complex.

Ex. Modeling of Cl⁻ penetration

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} = \varepsilon D_{ea} \left(\frac{\partial^2 c_a}{\partial x^2} + c_a \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) + \frac{D_w}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} \frac{\partial c_a}{\partial x} + c_a \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_w}{\rho_w} \left(\frac{\partial \rho_w}{\partial x} \right) \right) + f_a(c_{a=1,\dots,\mathfrak{R}}, c_{b=1,\dots,\mathfrak{T}})$$

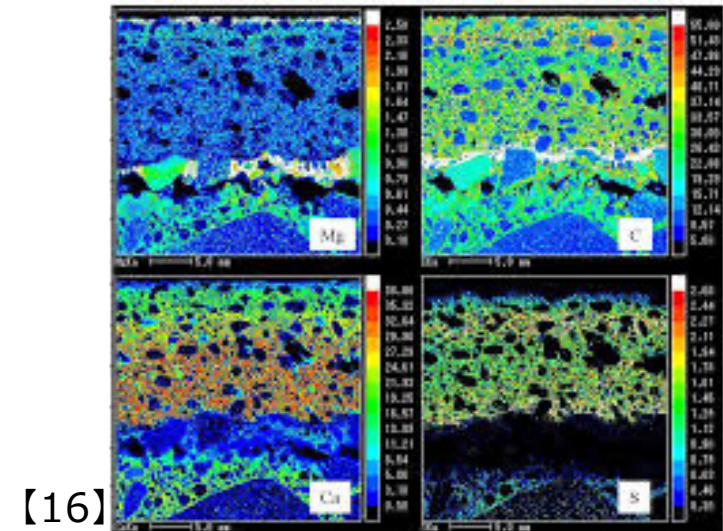
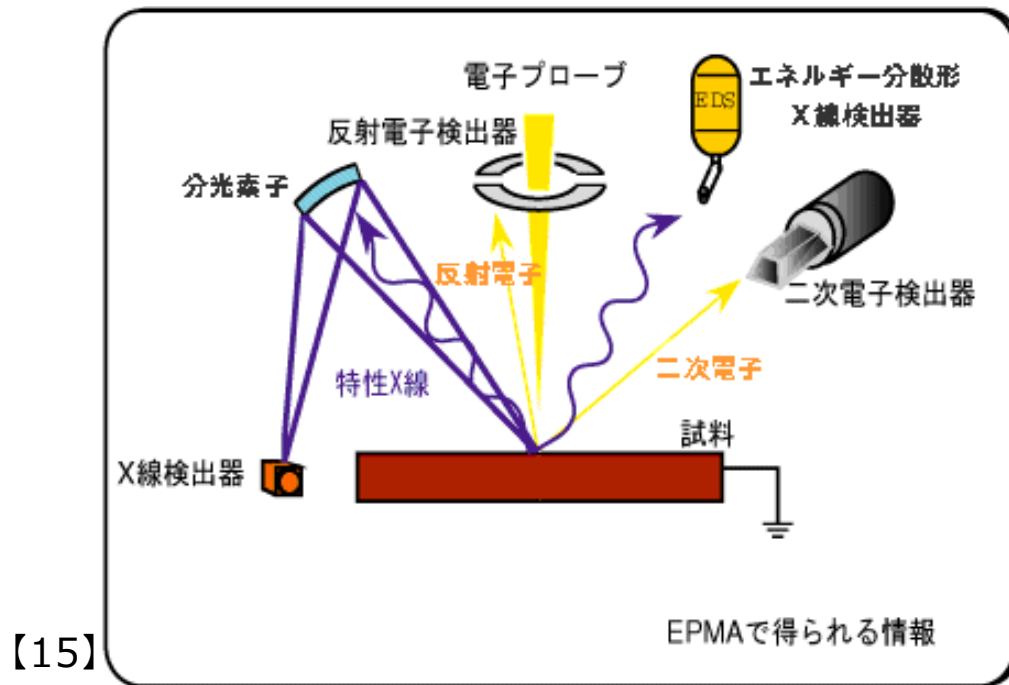
Diffusion due to concentration gradient
 Electro-migration of ions due to electrical potential gradient
 Water transport
 Condensation due to water dissipation
 Generation and disappearance by chemical reaction

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

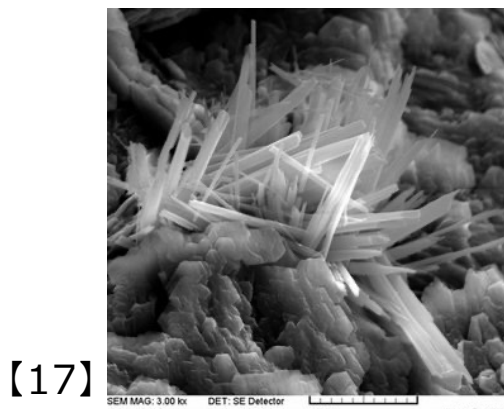
Fick's second law: フィックの第二法則
 濃度が時間とともに変化する非定常拡散現象
 適当な初期条件および境界条件のもとで
 解けば、経過時間ごとの濃度分布を得られる。

化学分析 (その1)

EPMA・EDX EDX (EDS): Energy Dispersive X-ray Spectroscopy



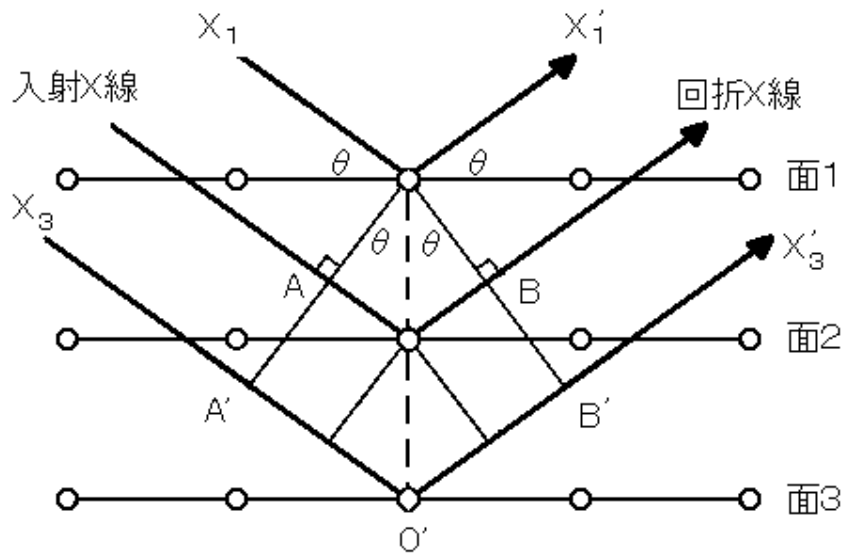
Wavelength spectrum



SEM and BSE: Scanning Electron Microscope and Backscattered Electron Image

化学分析 (その2)

X線回折(XRD)



【18】

ブラッグの法則

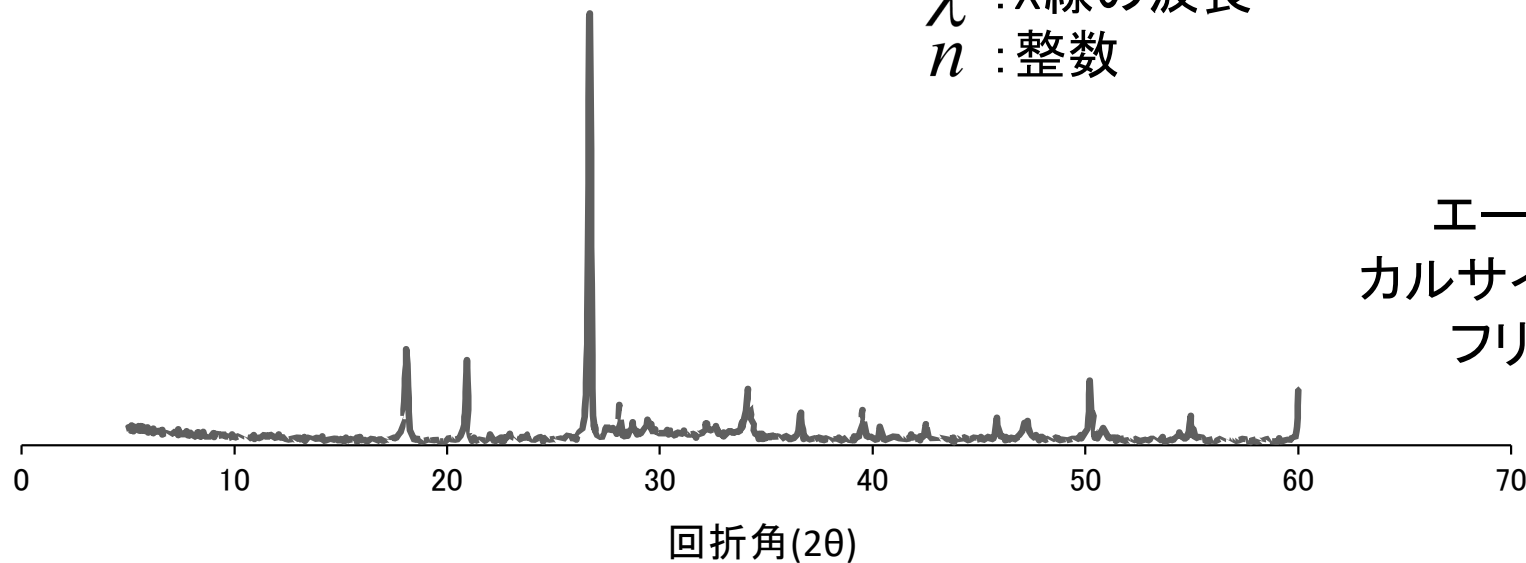
$$2d \sin \theta = n\lambda$$

d : 周期構造の幅

θ : 結晶面-X線間の角度

λ : X線の波長

n : 整数



エトリンガイト: 9.1°

エーライト: 51.6、51.9°

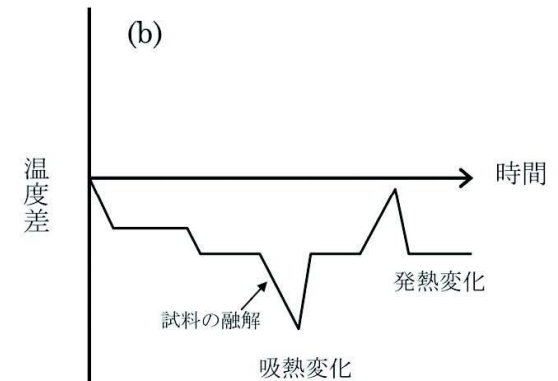
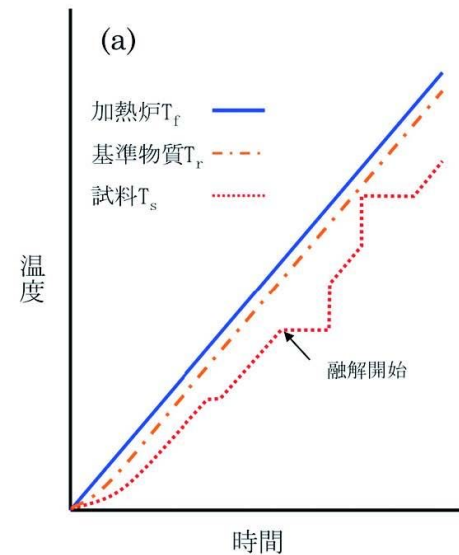
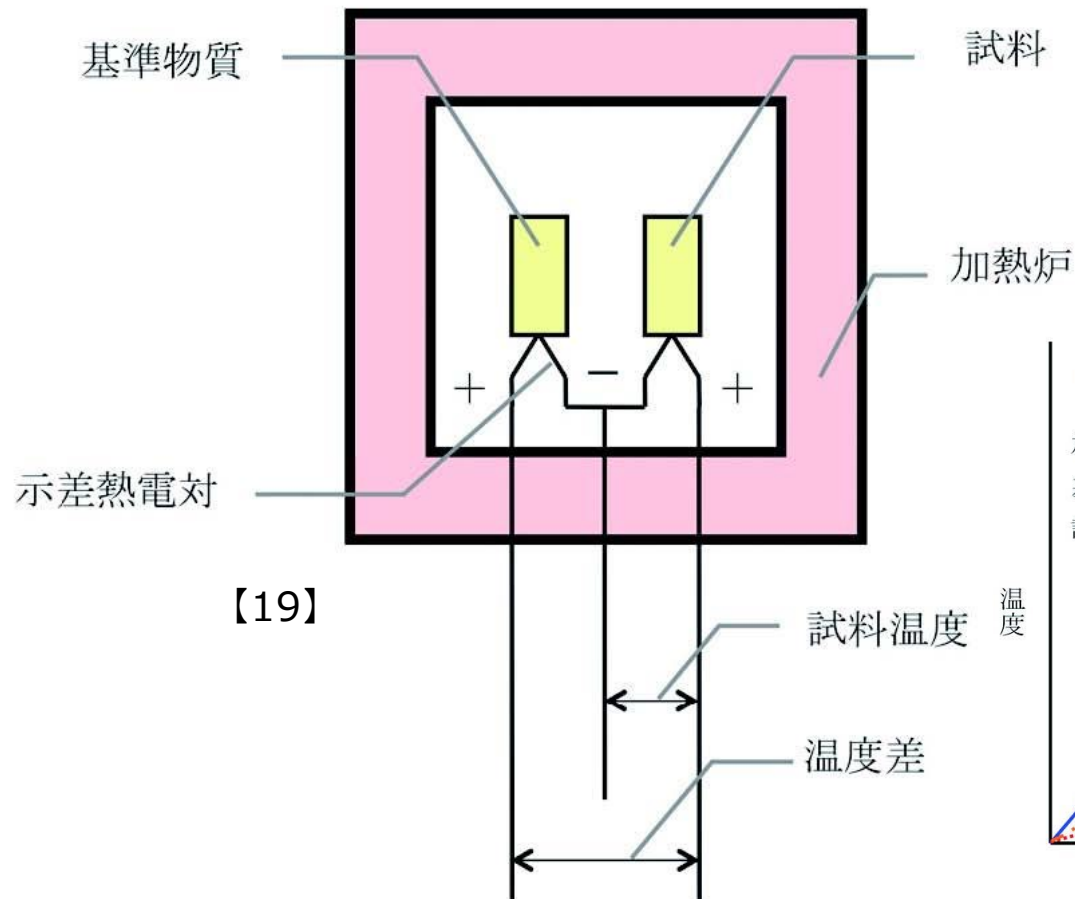
カルサイト(CaCO_3): 48.5°

フリーデル氏塩: 11.3°

...

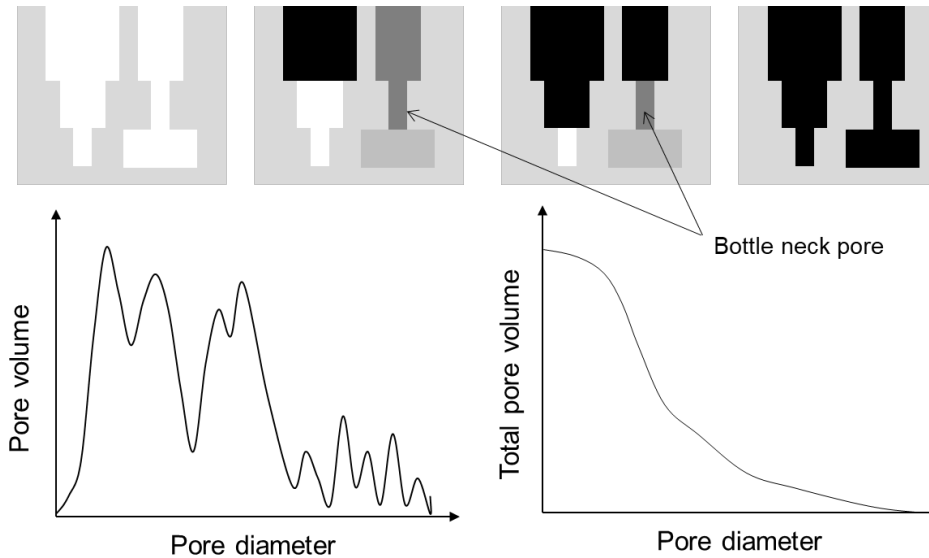
化学分析 (その3)

熱分析(TG-DTA)

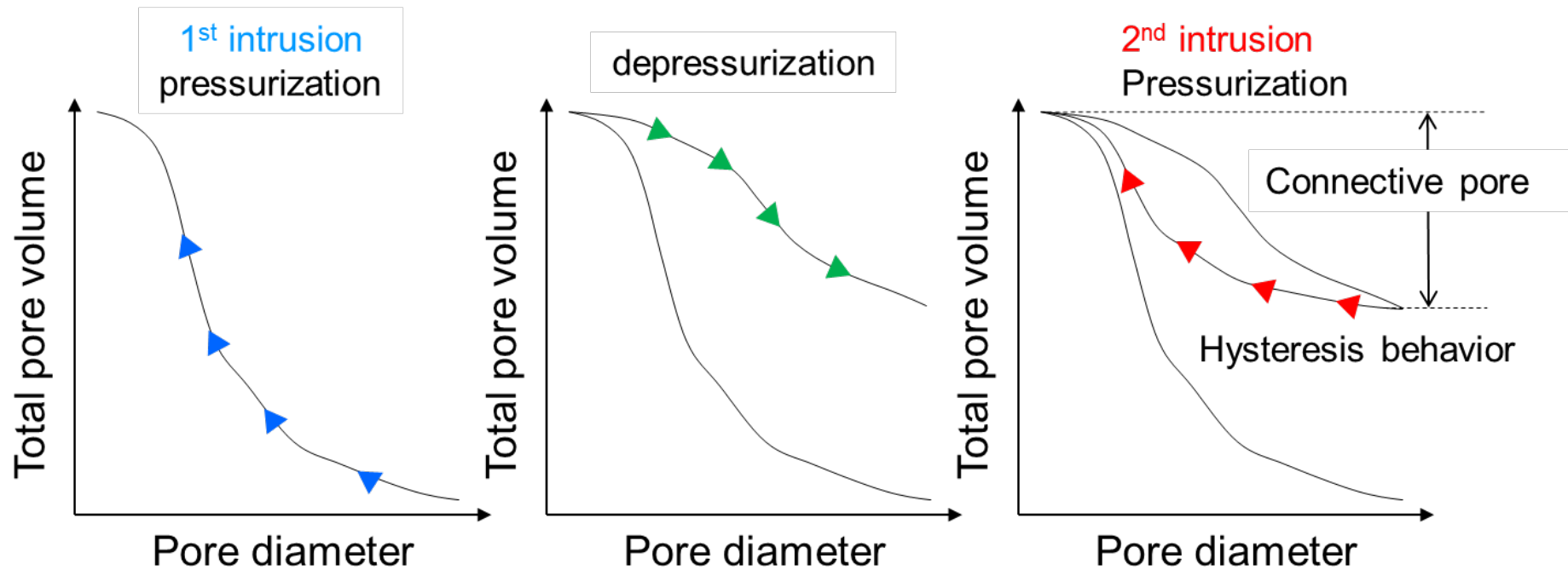
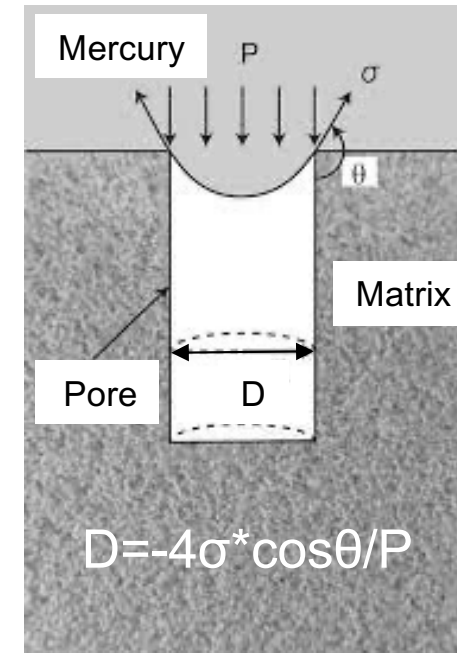


【20】

水銀圧入法による空隙構造の評価

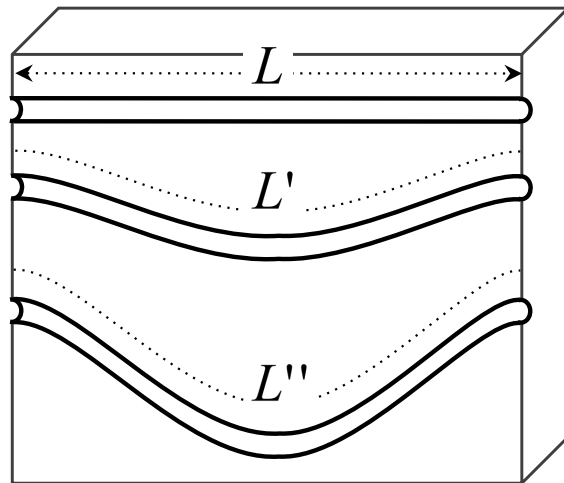


[21]



屈曲度 (Tortuosity)

材料の拡散係数は空隙特性によって表現することが出来る。



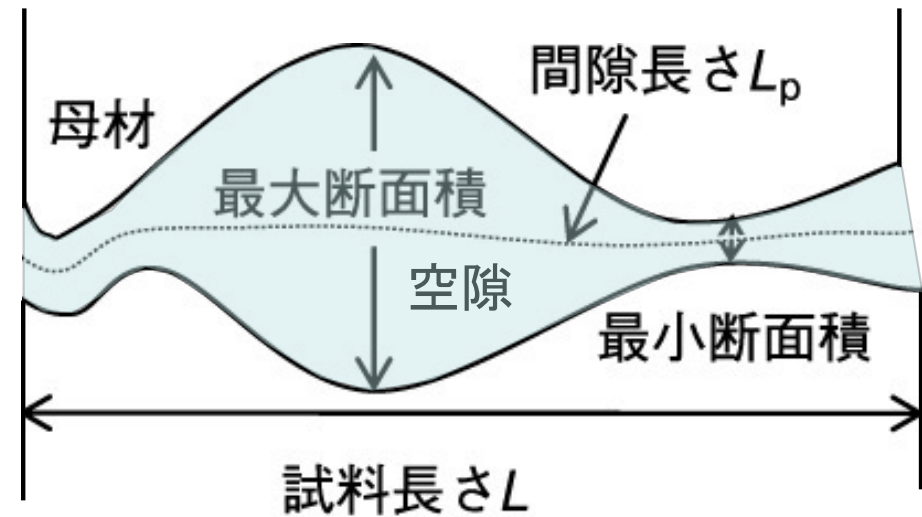
D_e : 実効拡散係数[m²/sec]

D_f : 自由水中の拡散係数[m²/sec]

δ : 空隙の連結度

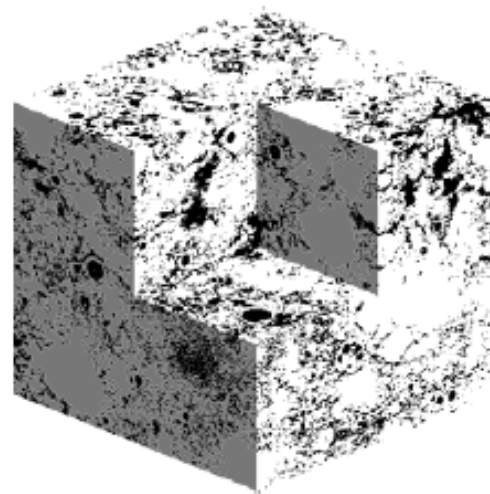
τ : 屈曲度

θ : 空隙率

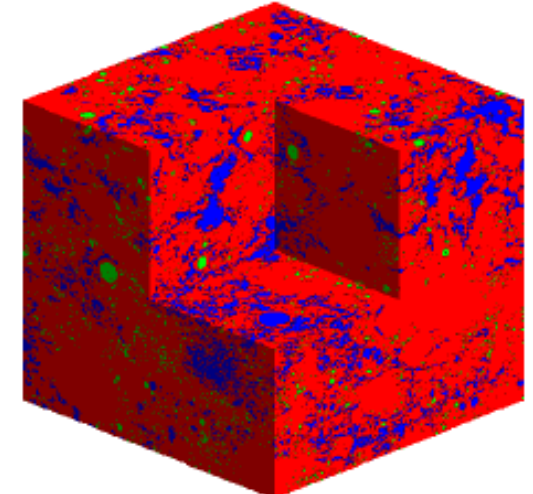


$$\tau^2 = (L_p/L)^2$$

$$\delta = \frac{(\text{最大断面積} \times \text{最小断面積})^{1/2}}{\text{平均断面積}}$$



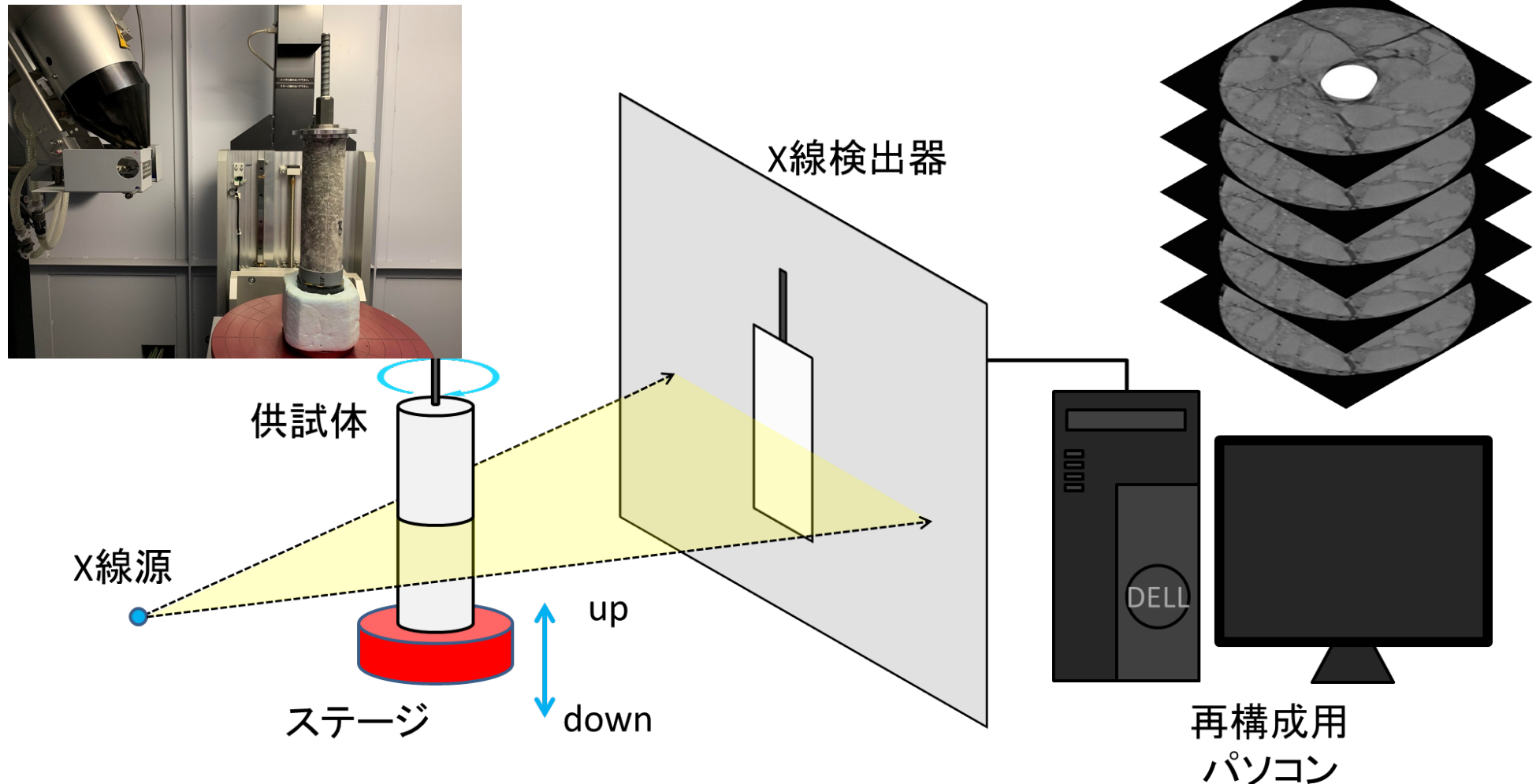
3次元画像における全空隙

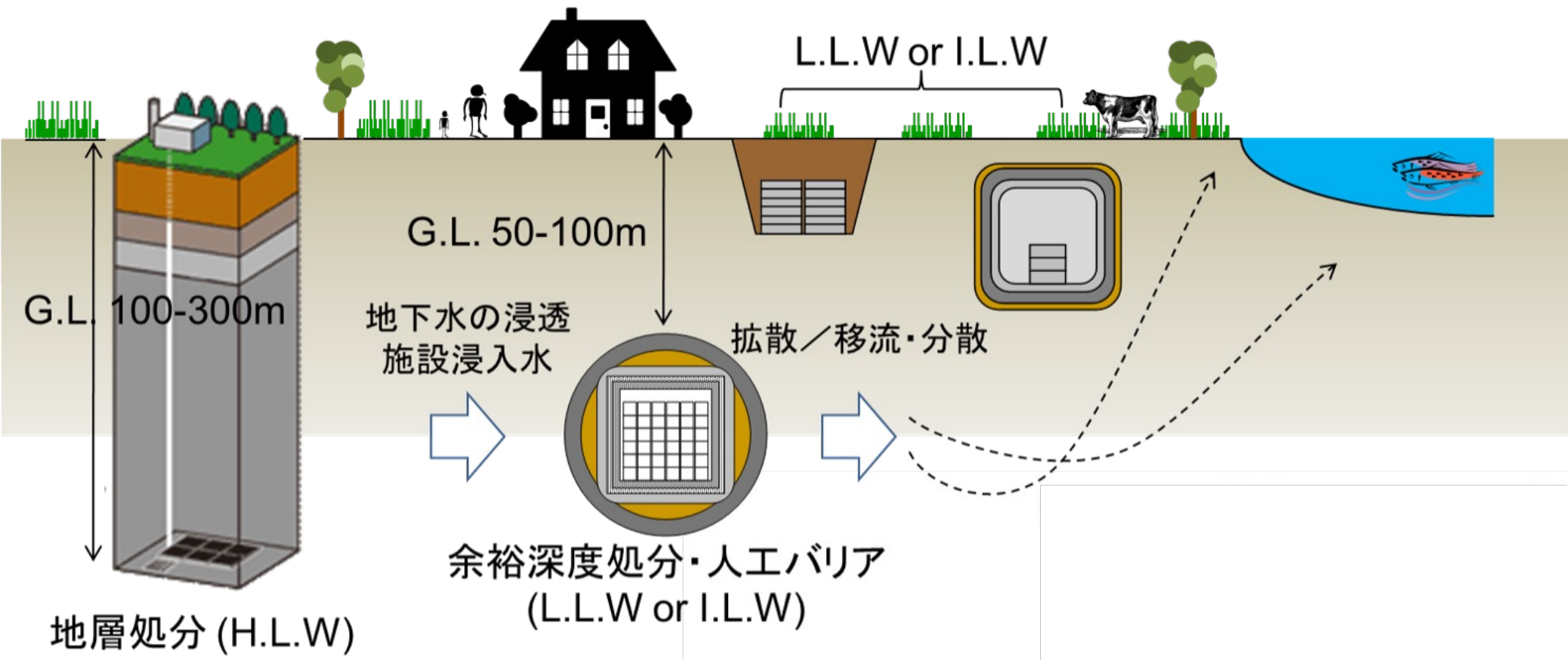


3次元画像における連続空隙

X線CT法:

X線源から照射されたX線の物体透過前後のX線減衰比から**物体内部の構造を非破壊で可視化**する。数値データであるCT値（輝度値 \propto 密度）を扱うことで定量的な評価が可能となる。

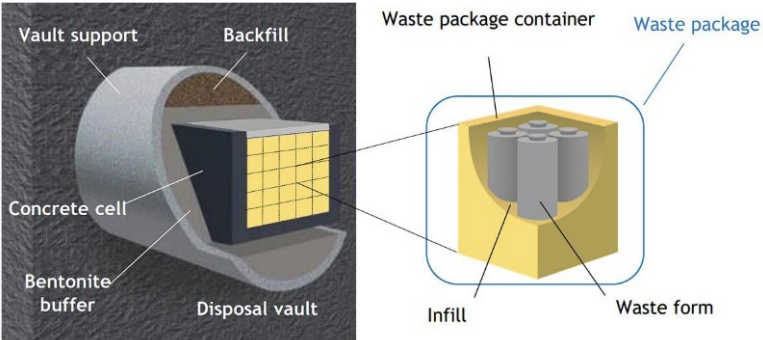




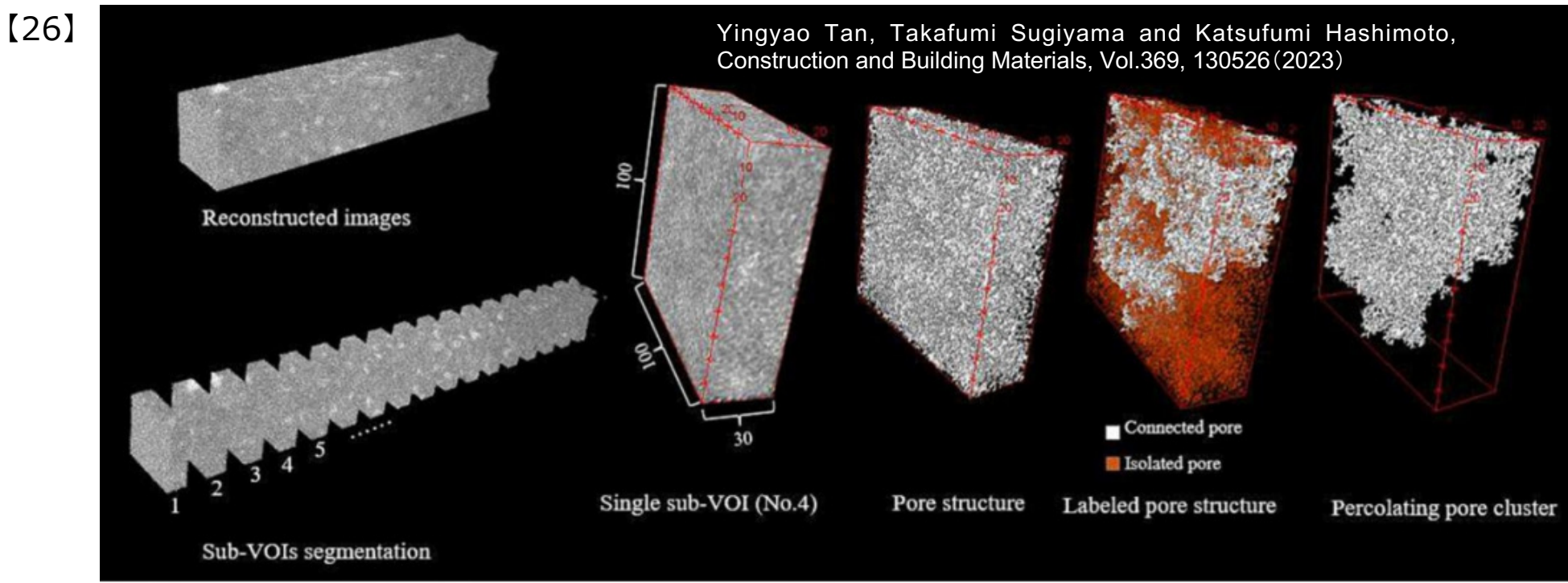
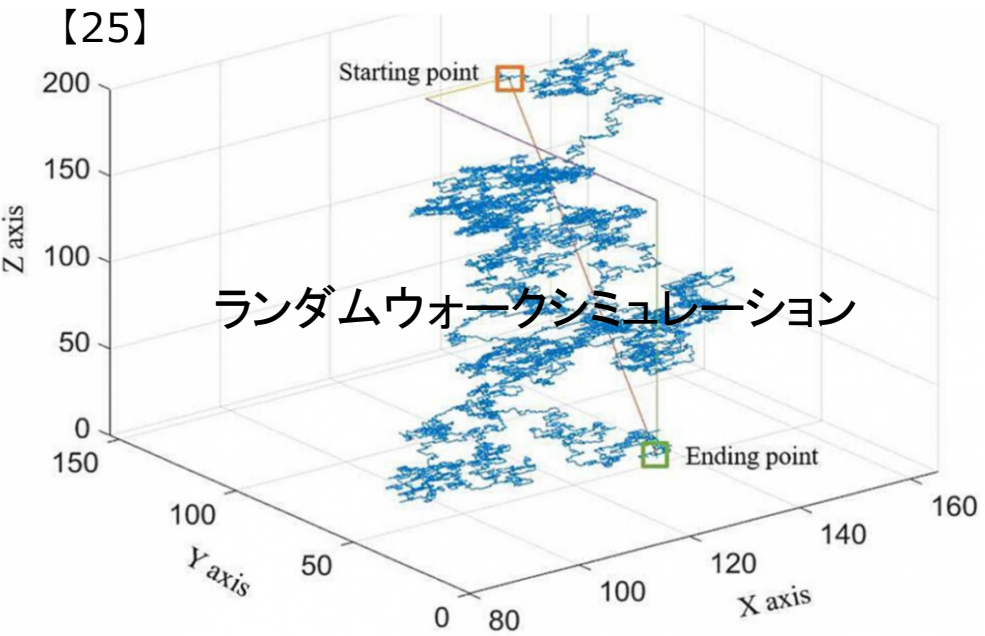
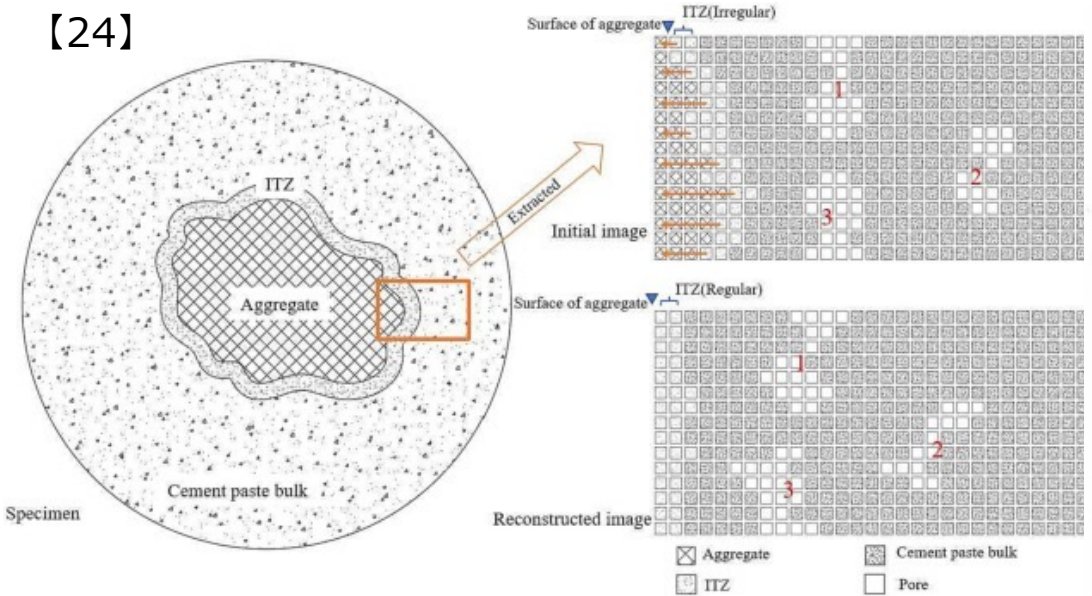
【22】

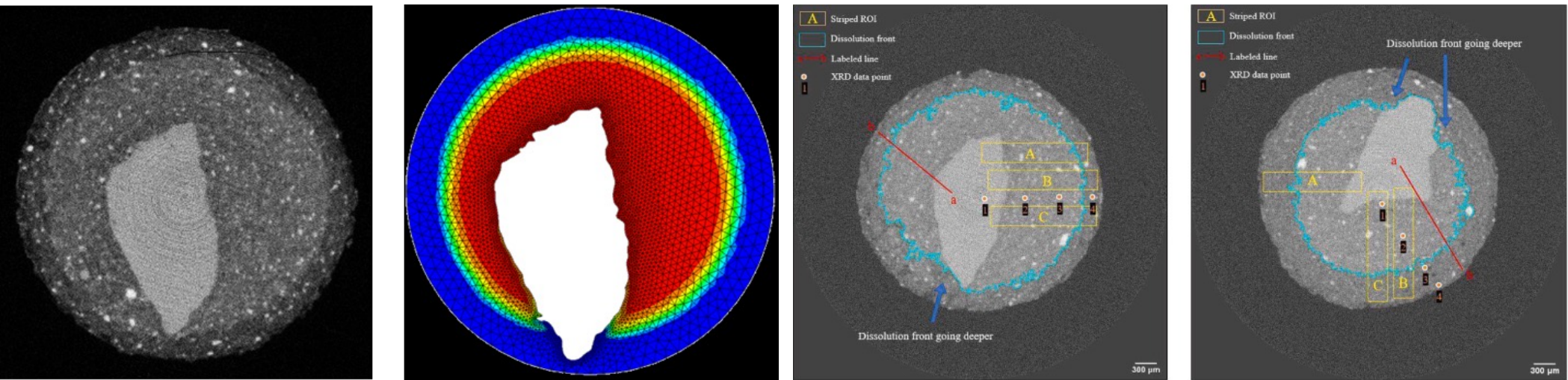


【23】

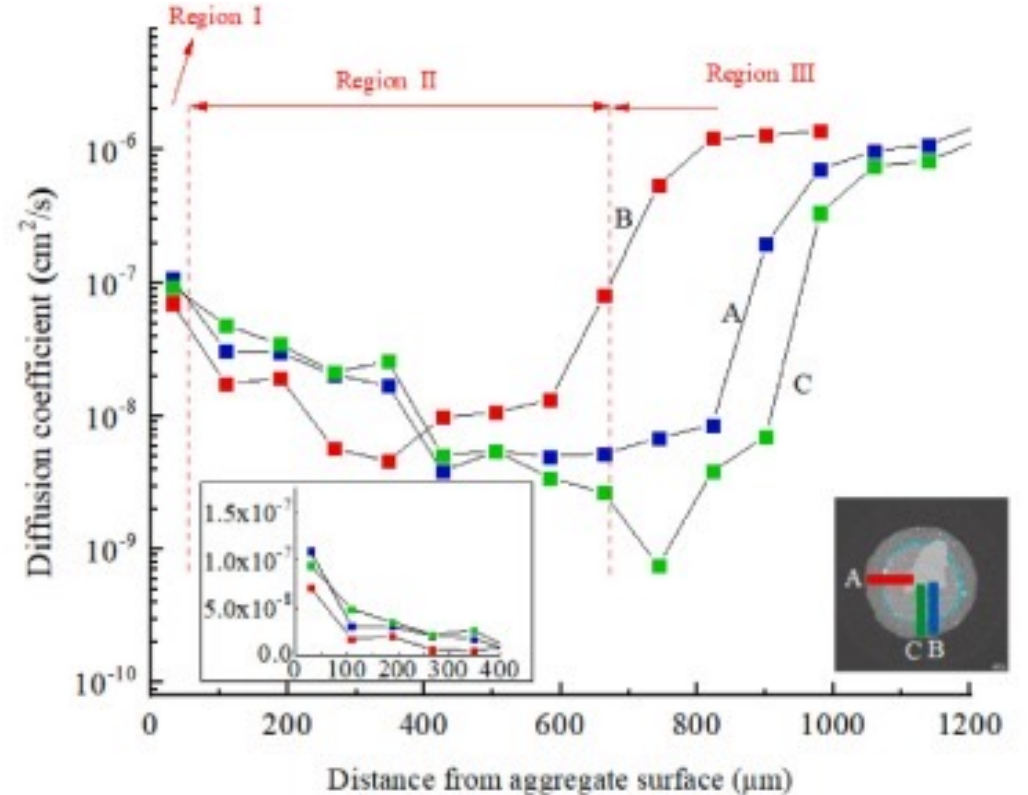
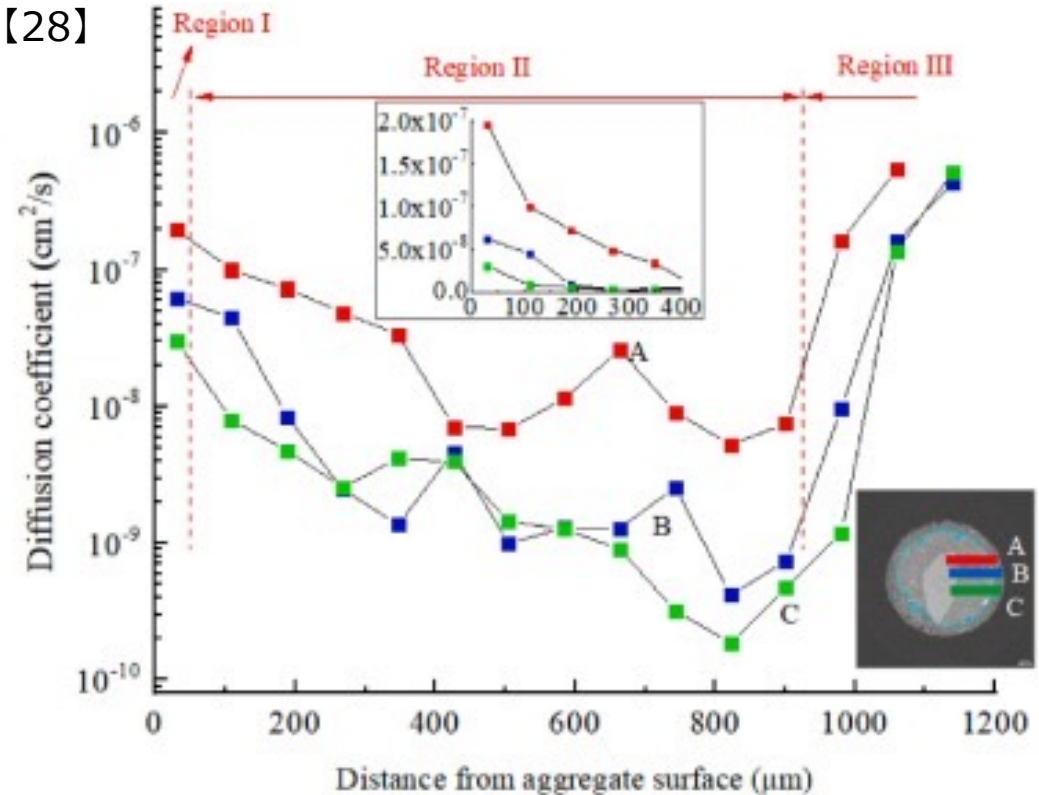


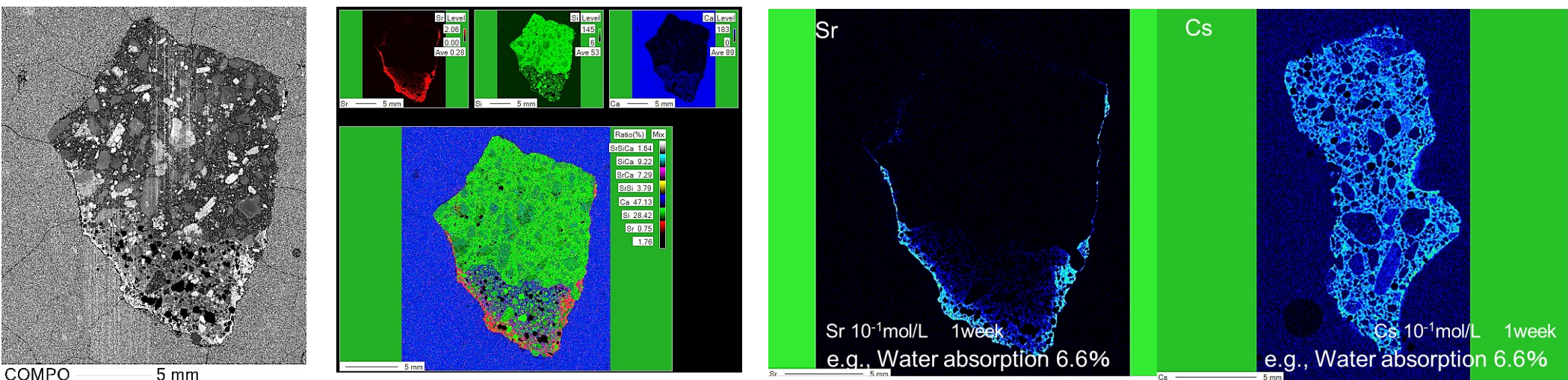
コンクリート中の空間=物質の移動経路



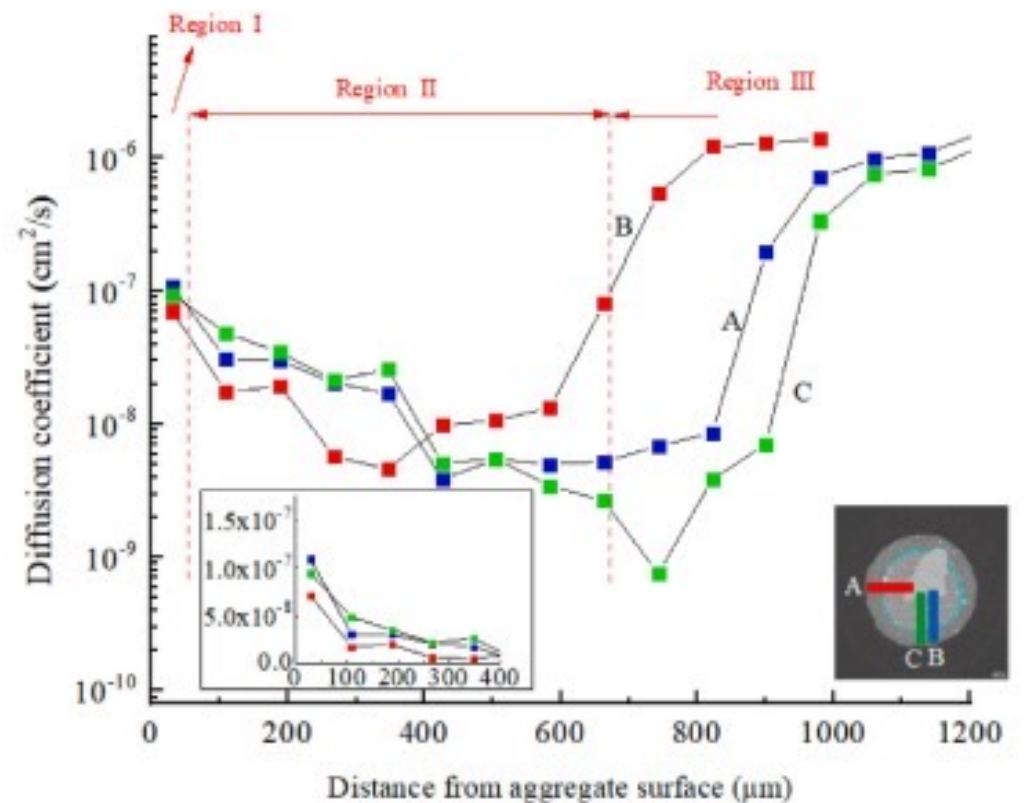
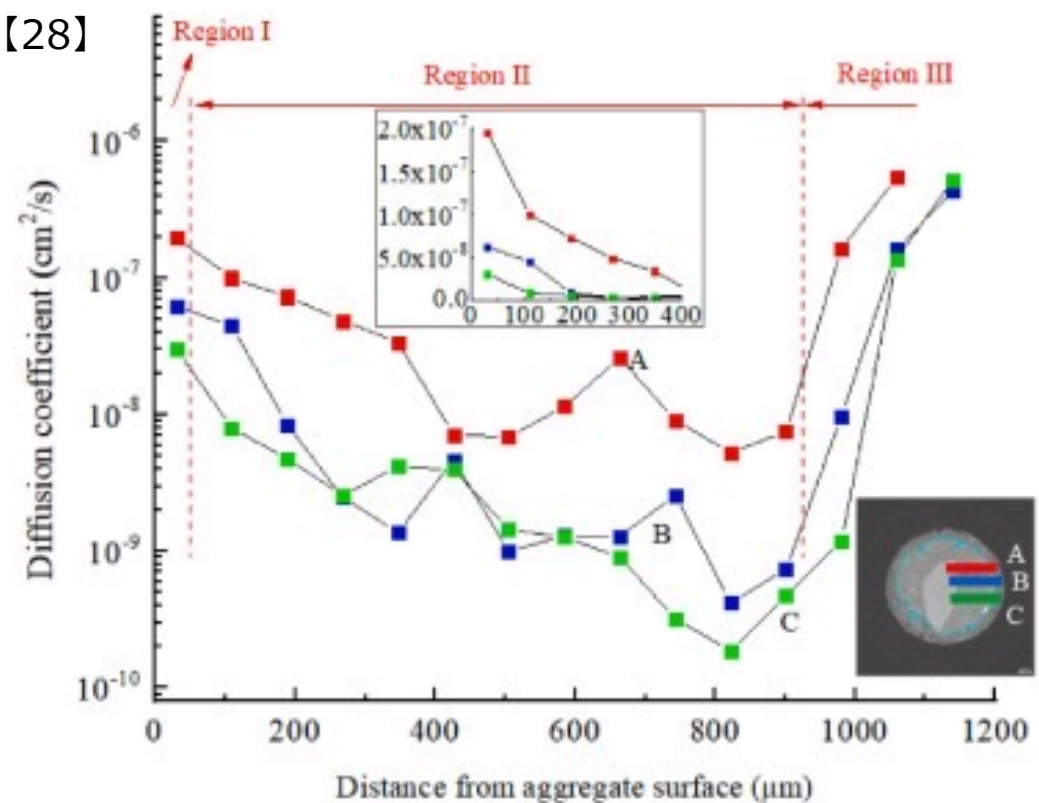


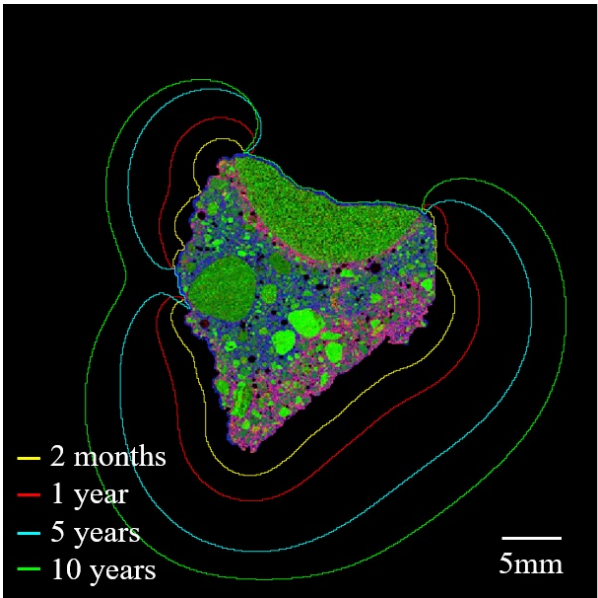
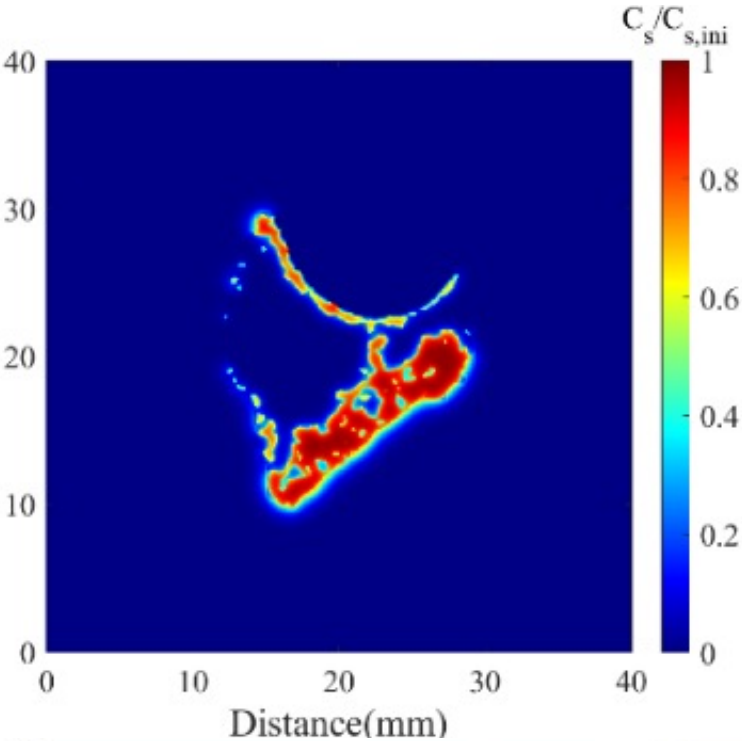
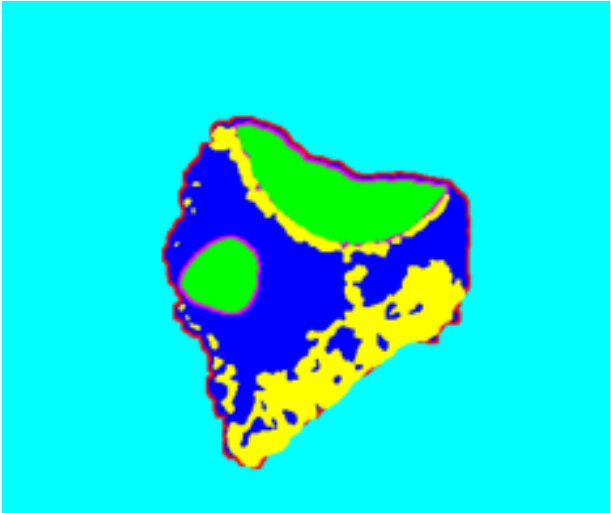
表層部における溶脱とITZにおける拡散係数の増大(Ca²⁺) [27]











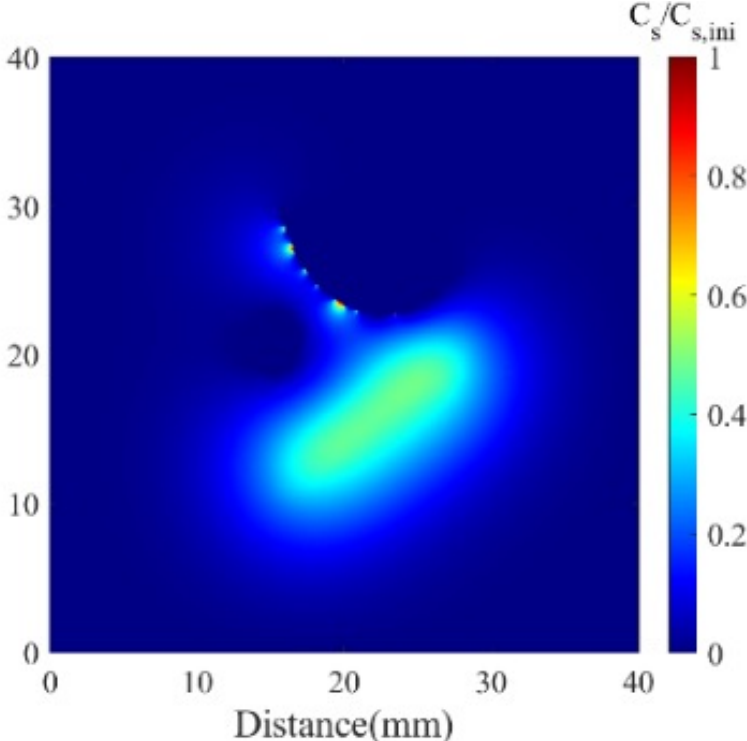
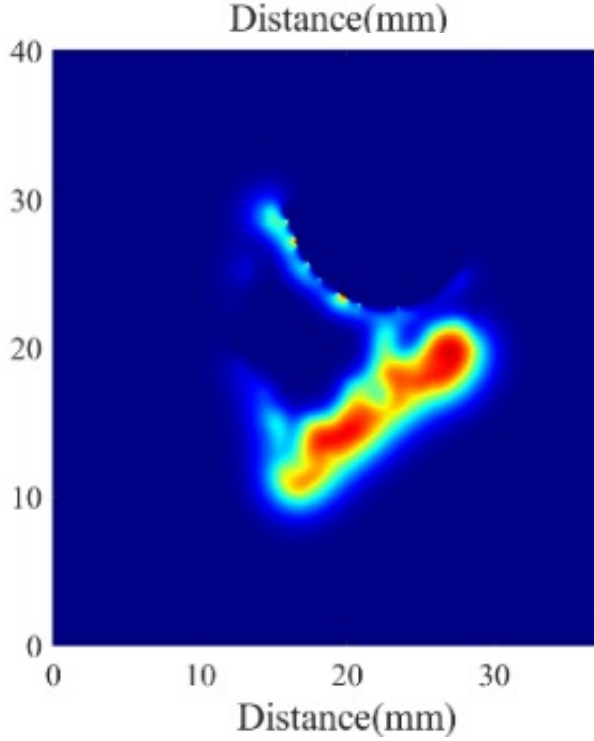
イオン種による拡散挙動の差異(SrとCs)





Property	
	Encapsulated cement paste
	Natural aggregate
	Attached mortar
	New ITZ
	Old ITZ
	Contaminated part*

*Property is specified as those of attached mortar.



2-1 セメントの水和機構と化学的変質

セメント水和物の生成と劣化因子の反応を伴う長期変質挙動

2-2 コンクリートの空隙構造と物質移行性

空隙構造モデルとイオン移動および拡散シミュレーション

2-3 鉄筋コンクリートの力学特性と性能評価

環境作用に伴う耐力低下とひび割れ発生機構に基づく構造物の性能評価

2-4 劣化メカニズムに基づく対策と設計

供用環境における各種劣化機構と補修・補強と性能評価の考え方

2-5 維持管理シナリオ

点検・調査・診断の在り方と維持管理シナリオの策定

【29】



凍結防止剤の散布

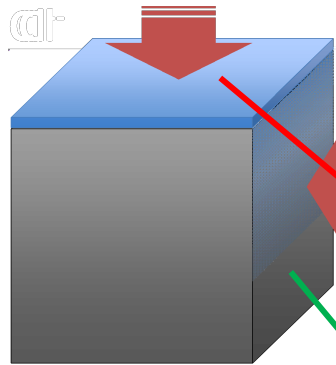
【30】



鉄筋腐食

橋台上面：水分の滞留・結氷有
複合作用

側面：滞留なし・結氷無
塩害のみ

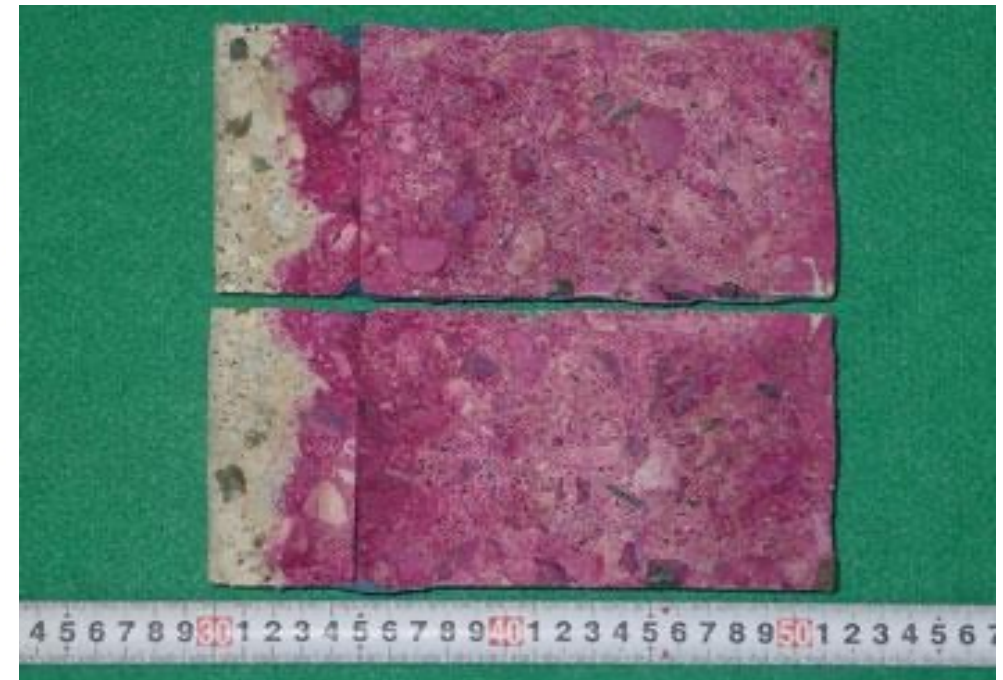
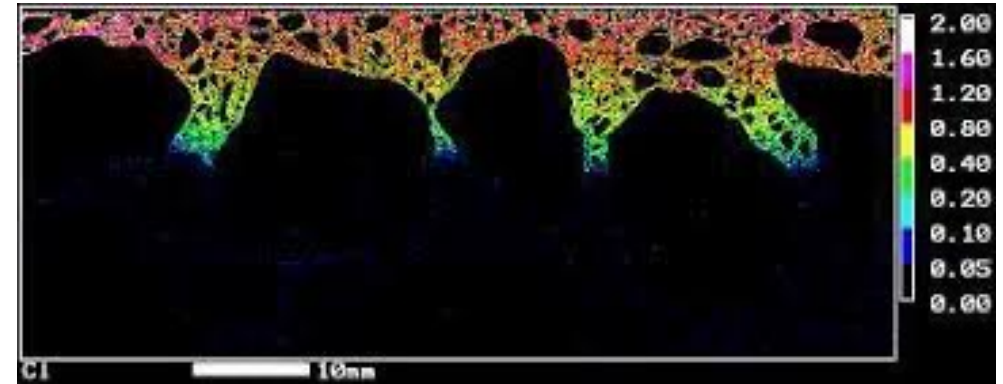
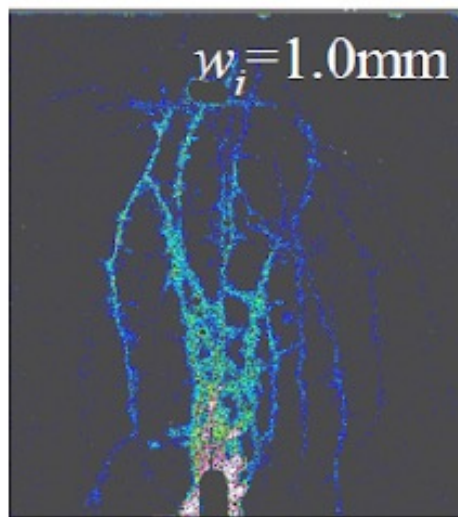
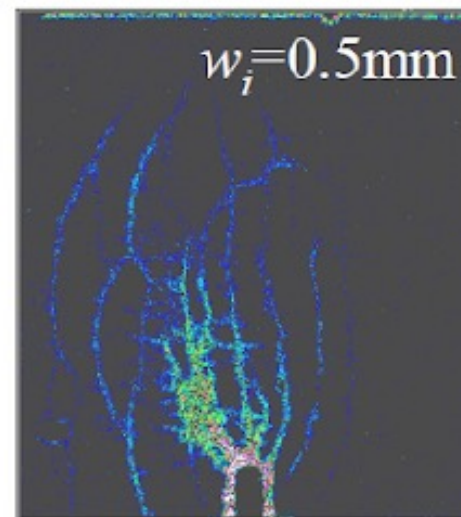
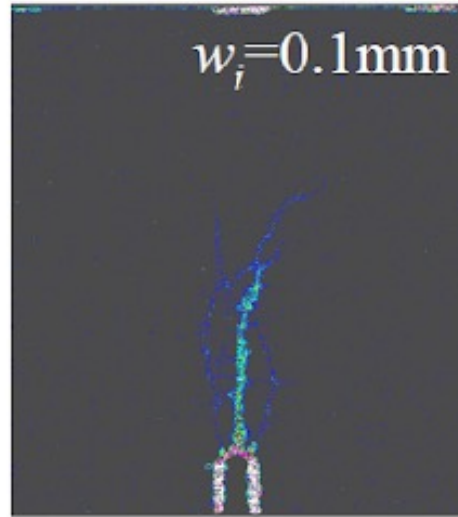
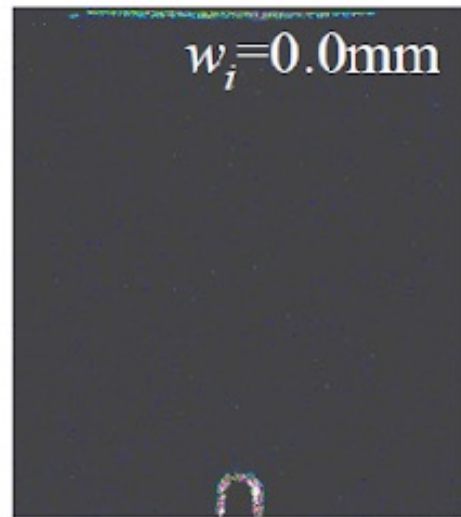


【32】

【31】

実環境では方向によって塩化物イオンの浸透性状が異なる例が多くみられる。

【33】

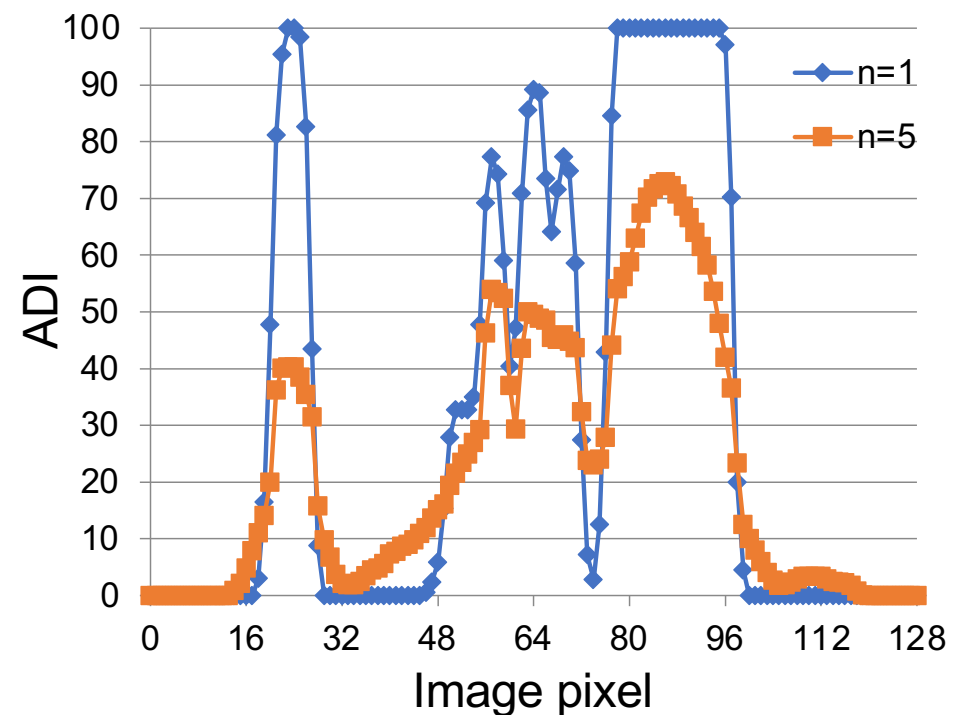
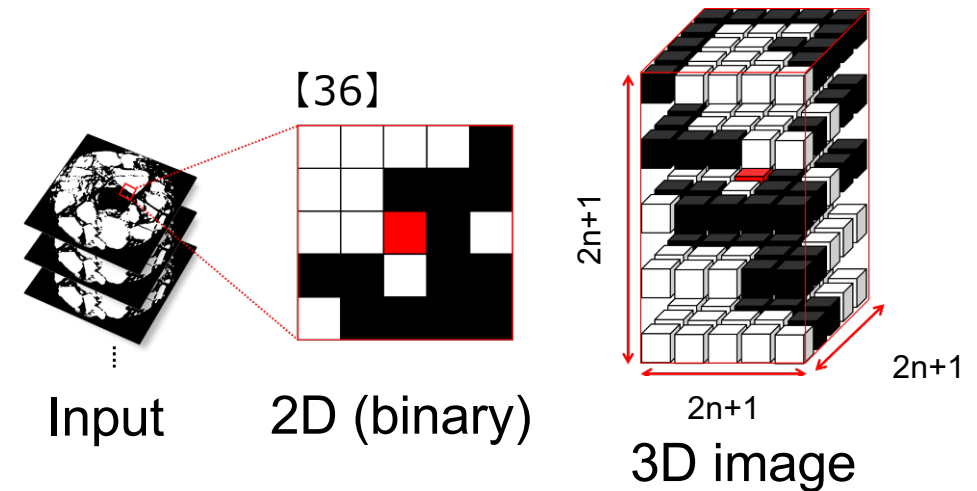
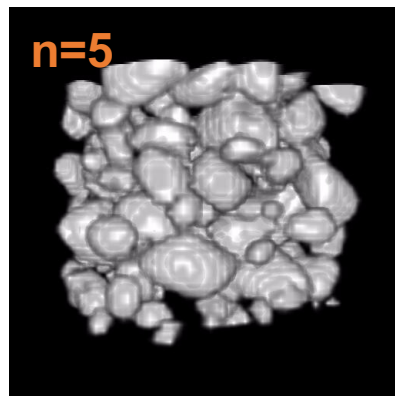
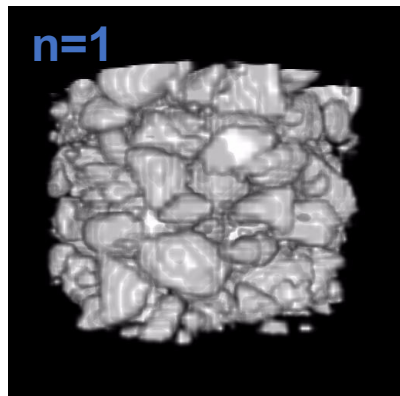
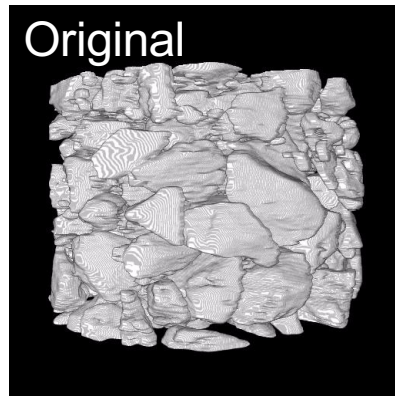
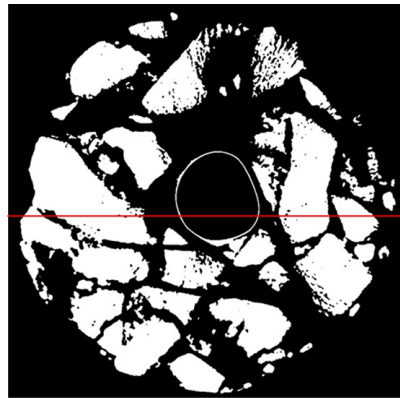


【34】

3D Aggregate Distribution Index (ADI)

輝度値を示す画像の三次元配列化による骨材配置の不均質性評価

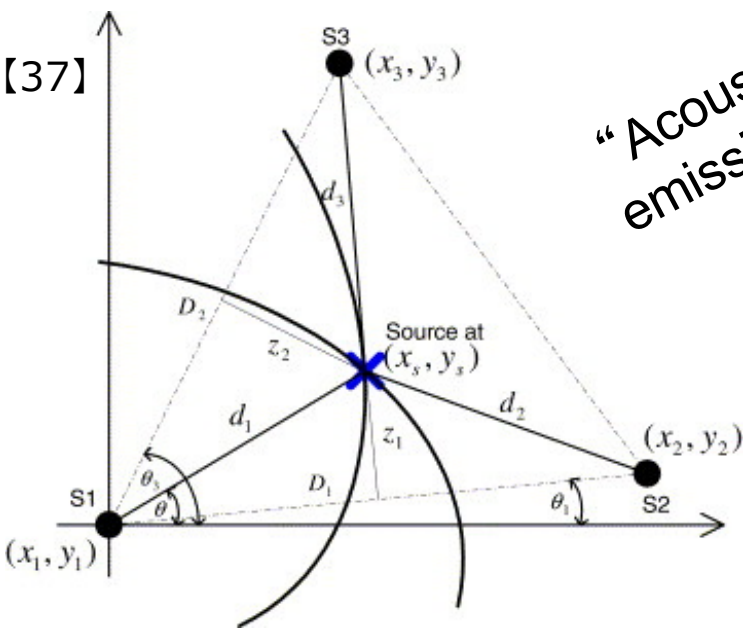
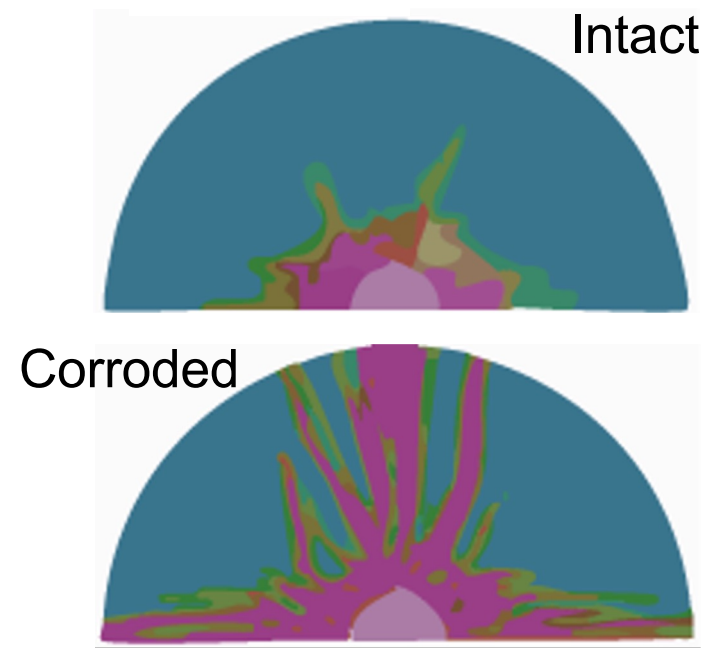
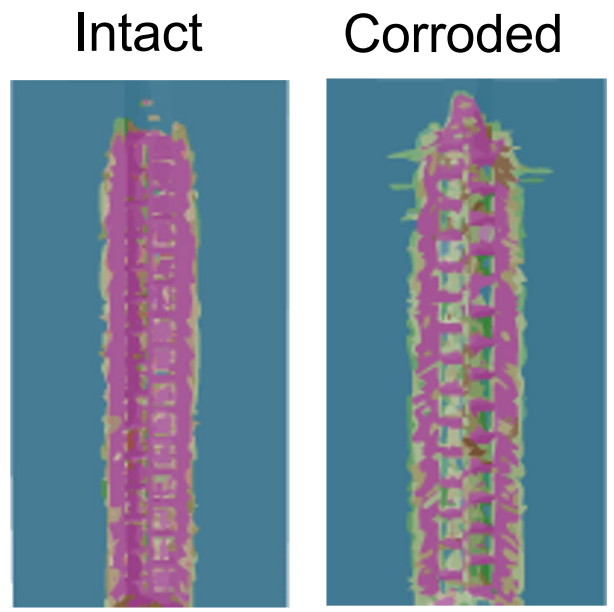
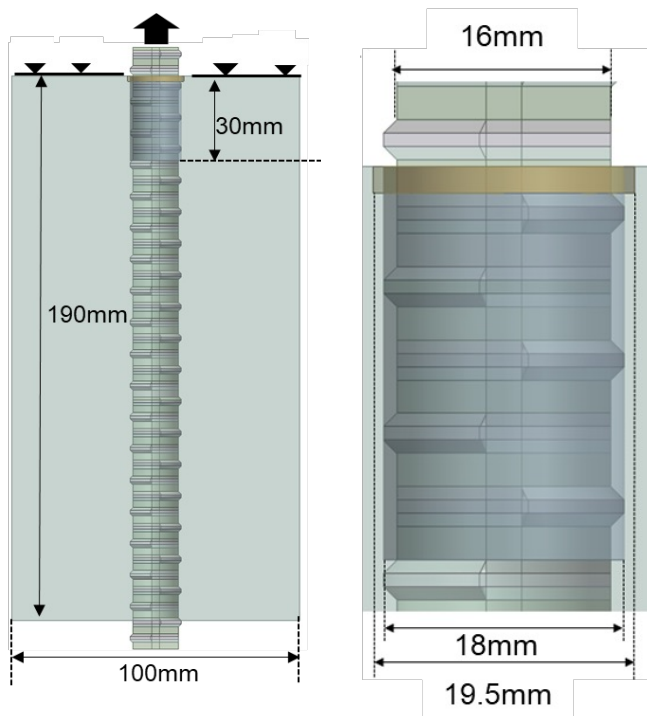
【35】



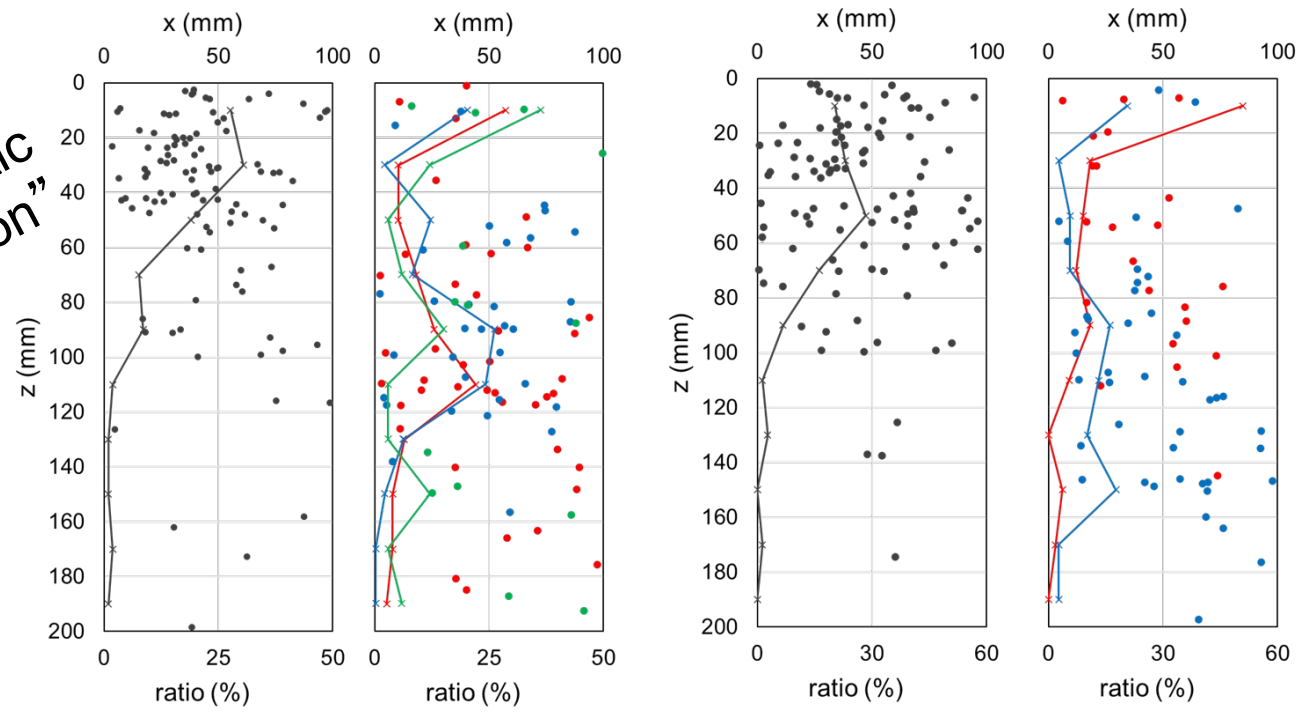
中瀬皓太、富樫佑介、橋本勝文、杉山隆文、齊藤亮介、コンクリート内部の粗骨材分布に関するX線CT画像の三次元画像解析手法の構築、日本材料学会、2022

粗骨材の配置および鉄筋腐食の影響
による鉄筋近傍の応力-ひずみ分布

⇒ 引抜き荷重 80kN



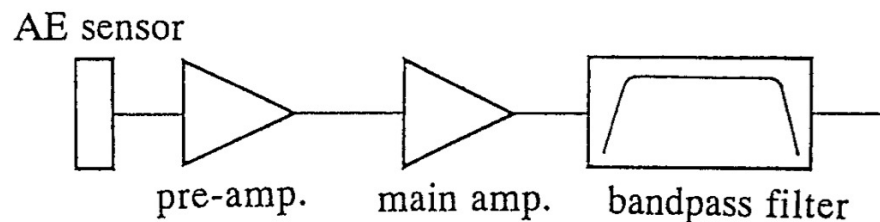
“Acoustic emission”



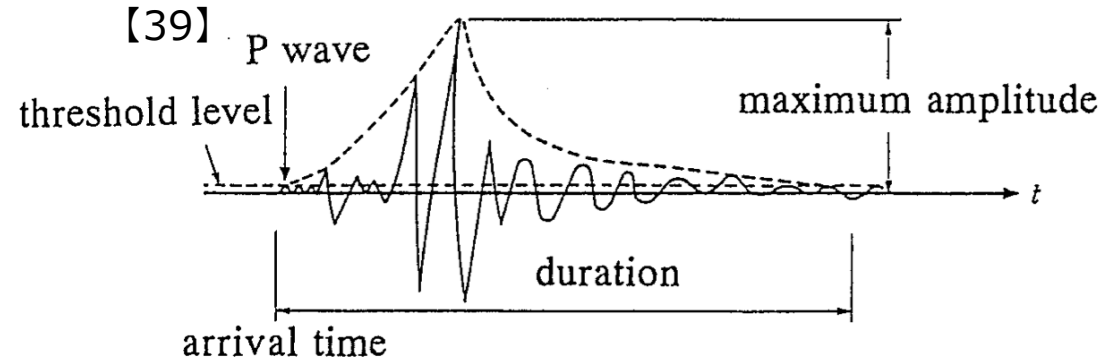
What is acoustic emission?

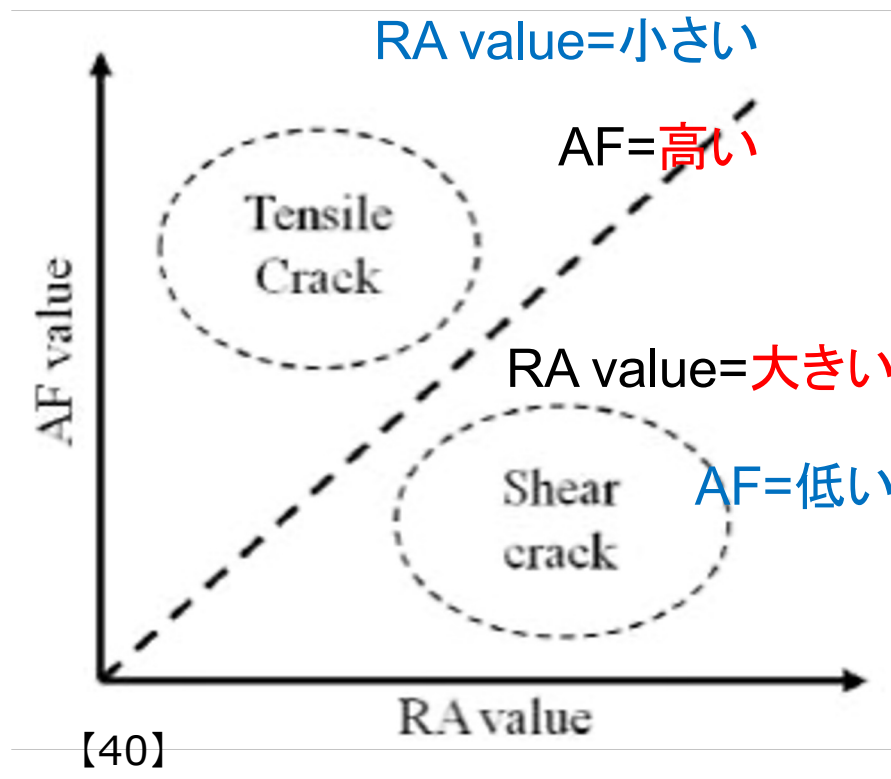
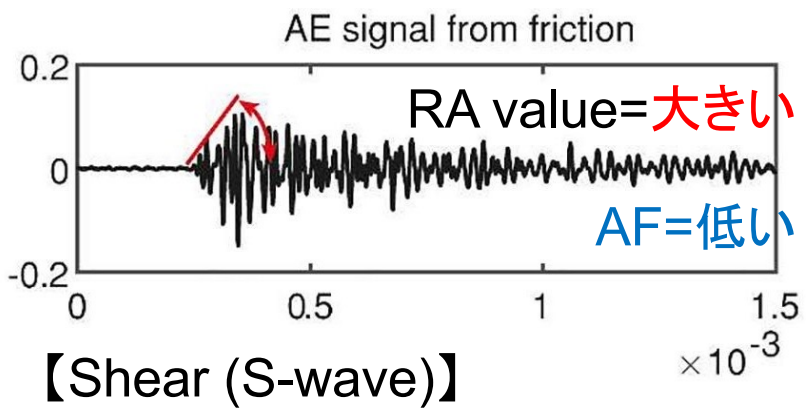
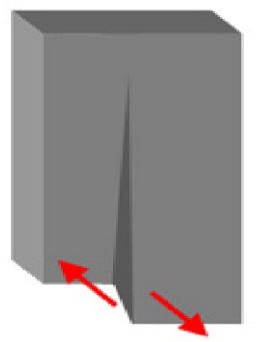
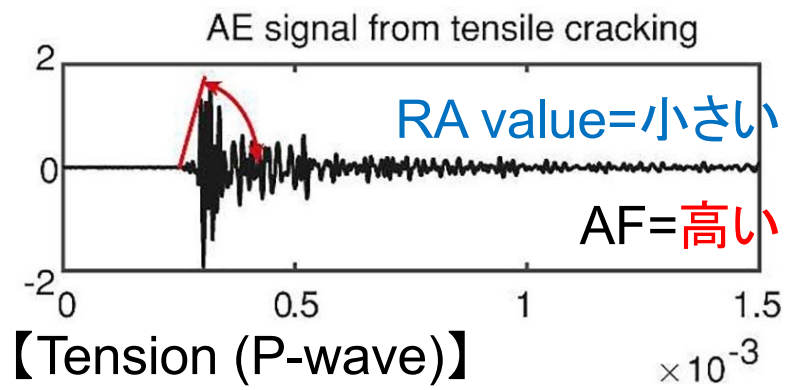
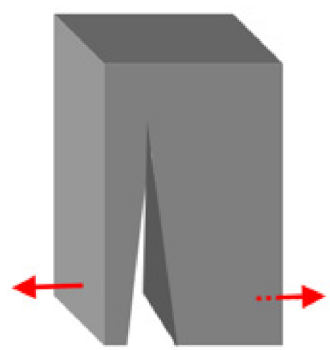
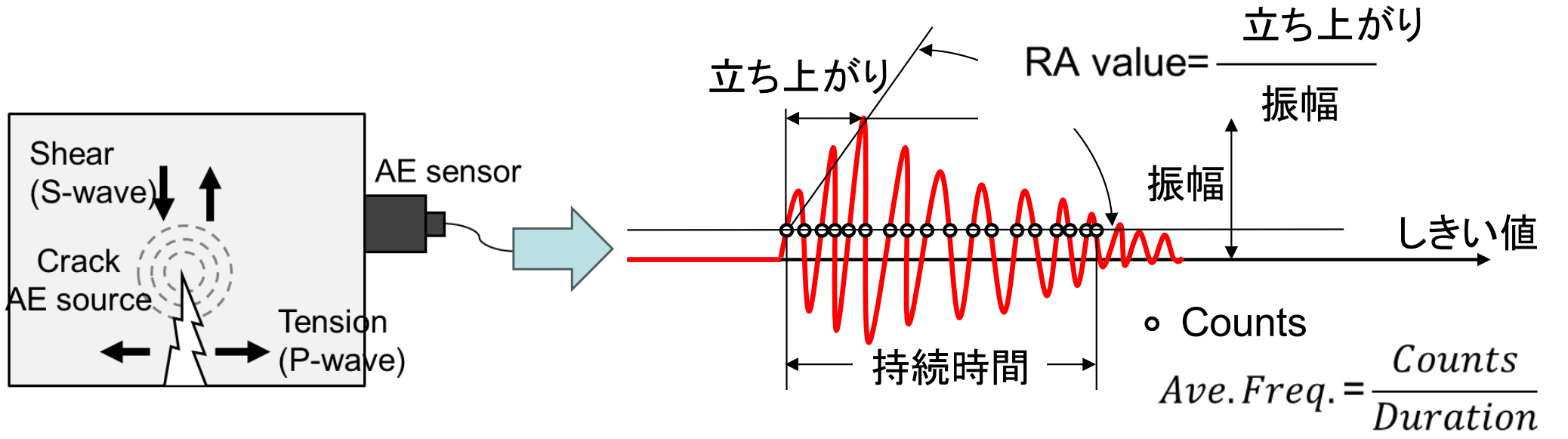
材料が変形あるいは破壊する際に、内部に蓄えていた弾性エネルギーを波動現象(弾性波、AE波)として放出する現象であり、コンクリート中のひび割れ発生位置や破壊特性を評価できる。

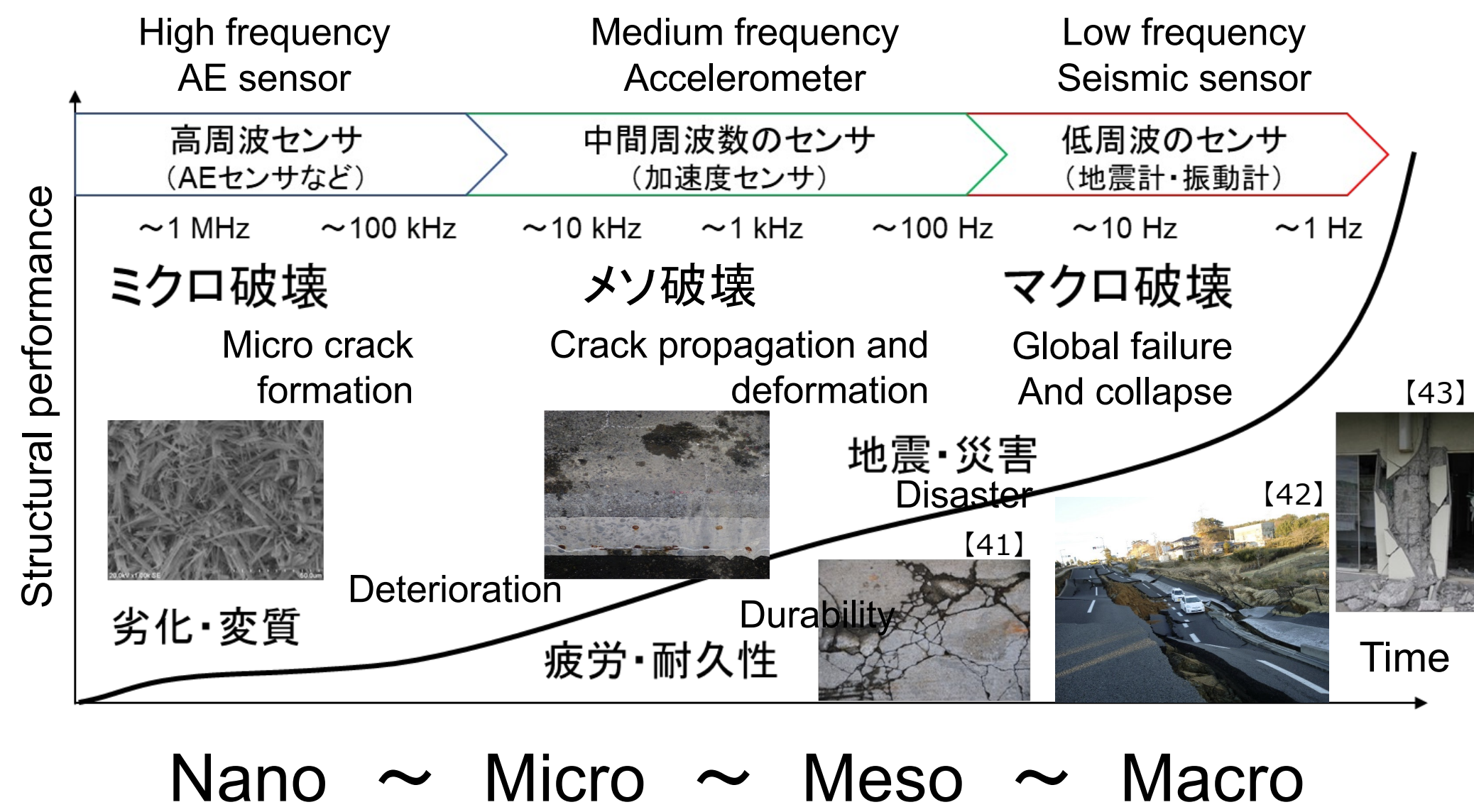
【38】

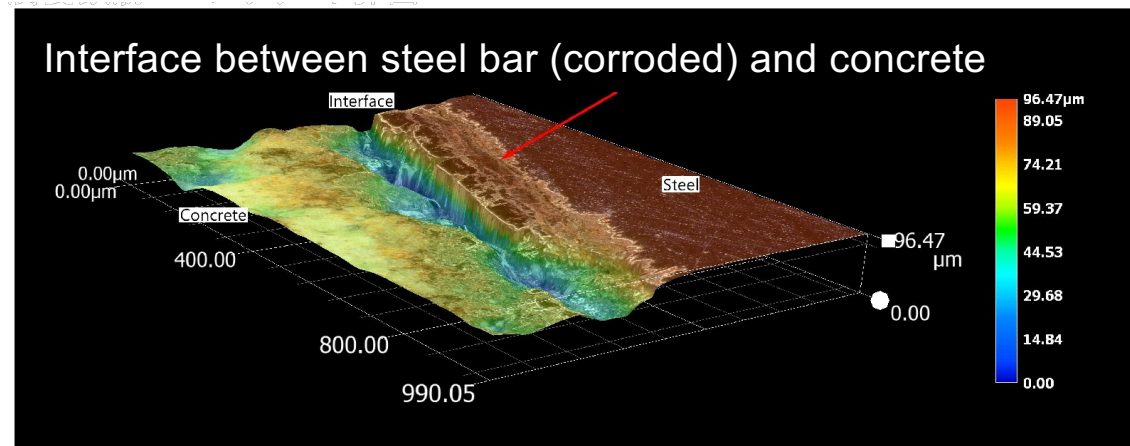
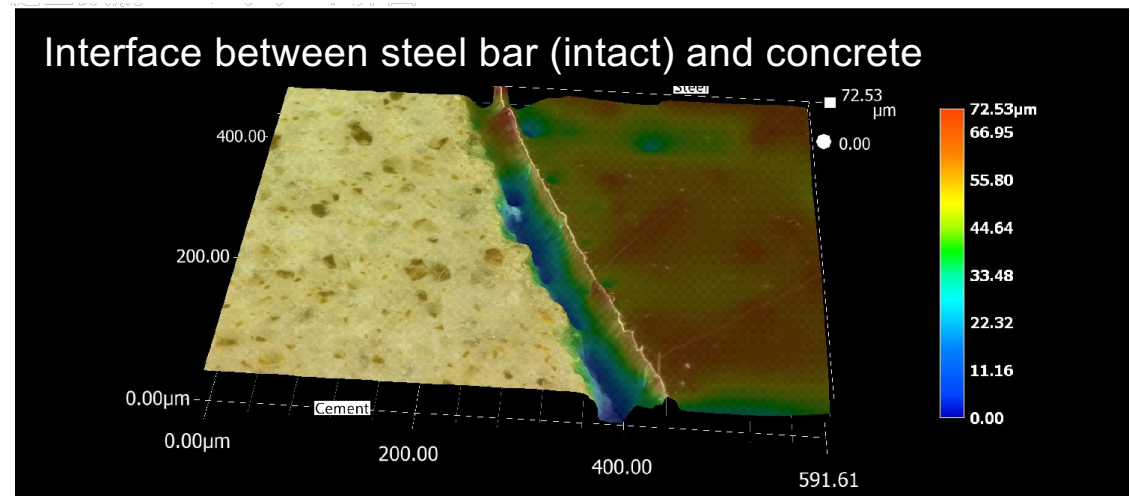
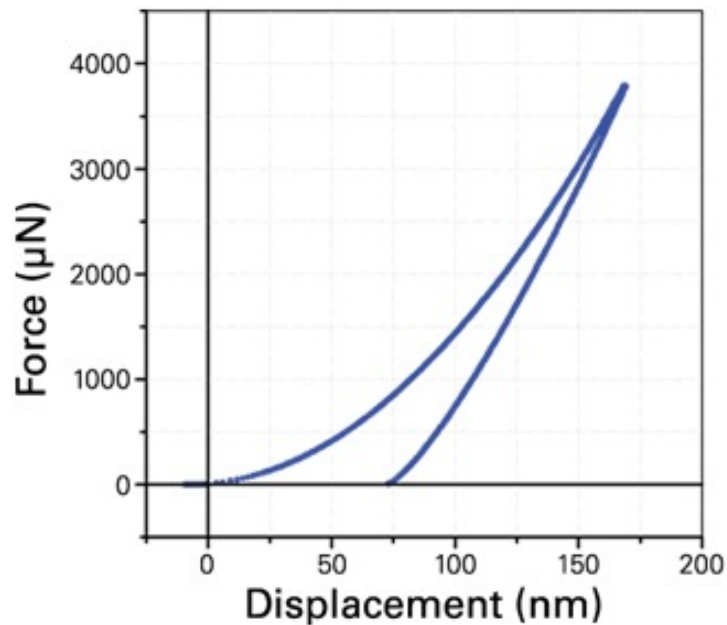
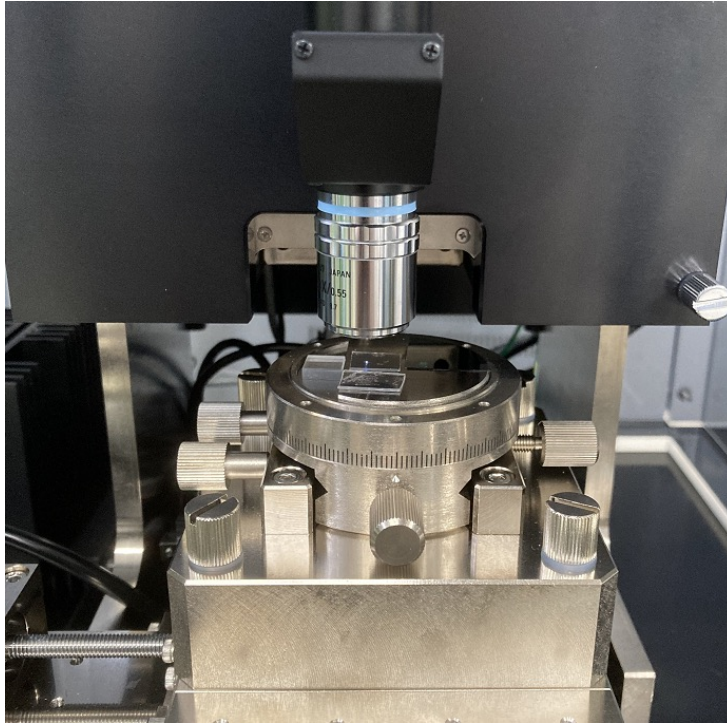


【39】









ナノインデントー（ナノインデンテーション）は、超小型圧子を押込んで、その材料の荷重-変位曲線を求め、硬さやヤング率を測定できる。

材料界面の物性値を取得することに有用であり、ナノスケールでの情報が取得できる。

2-1 セメントの水和機構と化学的変質

セメント水和物の生成と劣化因子の反応を伴う長期変質挙動

2-2 コンクリートの空隙構造と物質移行性

空隙構造モデルとイオン移動および拡散シミュレーション

2-3 鉄筋コンクリートの力学特性と性能評価

環境作用に伴う耐力低下とひび割れ発生機構に基づく構造物の性能評価

2-4 劣化メカニズムに基づく対策と設計

供用環境における各種劣化機構と補修・補強と性能評価の考え方

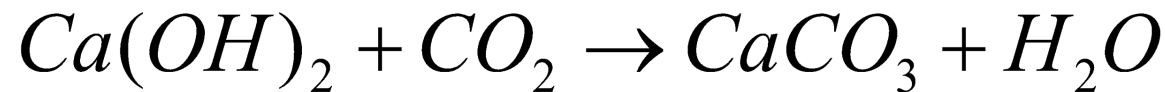
2-5 維持管理シナリオ

点検・調査・診断の在り方と維持管理シナリオの策定

中性化

不動態皮膜(主として $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ という水和酸化物)は低pH環境において不安定となり破壊される。

空気中の二酸化炭素によって生じる、鉄筋コンクリートの劣化のひとつ。主生成物である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ によりアルカリ性であるが、外部からの炭酸ガスの侵入によって中性(pH11程度以下)になると鋼材の不動態被膜が失われ、耐腐食性が低下する。



中性化速度係数

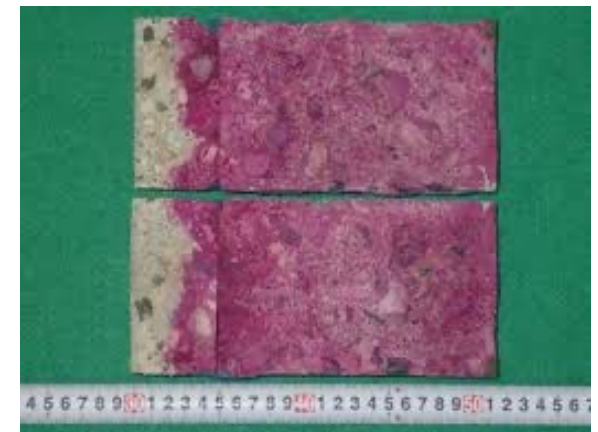
$$y = b\sqrt{t}$$

y : 中性化深さ(mm)

t : 中性化期間(年)

b : 中性化速度係数(mm)

【44】



物質浸透

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

$C(x,t)$: 塩化物イオン量(kg/m³)
 C_0 : 表面塩化物イオン量(kg/m³)
 D_{ap} : 見かけの拡散係数(cm²/年)
 erf : 誤差関数
 x : 曝露面からの距離(cm)
 t : 曝露期間(年)

塩分分類モデル

$$C_{fixed} = \alpha_{fixed} \cdot C_{tot} \quad C_{free} = C_{tot} - C_{fixed} \quad \alpha_{fixed} = f(C_{tot})$$

C : wt% of Cl to cement

In case of OPC

$$\alpha_{fixed} = 1$$

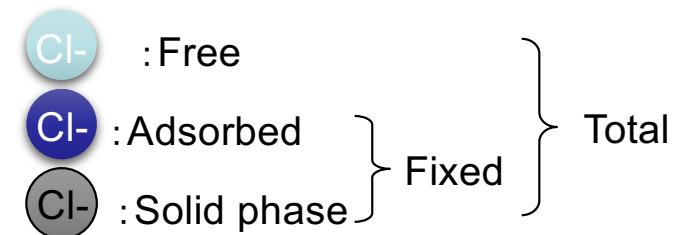
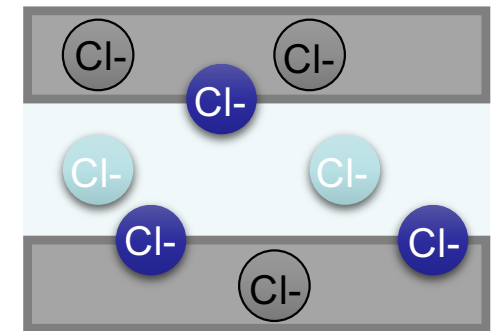
$$\alpha_{fixed} = 1 - 0.5 \cdot (C_{total} - 0.5)^{0.39}$$

$$\alpha_{fixed} = 0.141$$

$$C_{total} \leq 0.5$$

$$0.5 \leq C_{total} \leq 4.5$$

$$4.5 \leq C_{total}$$

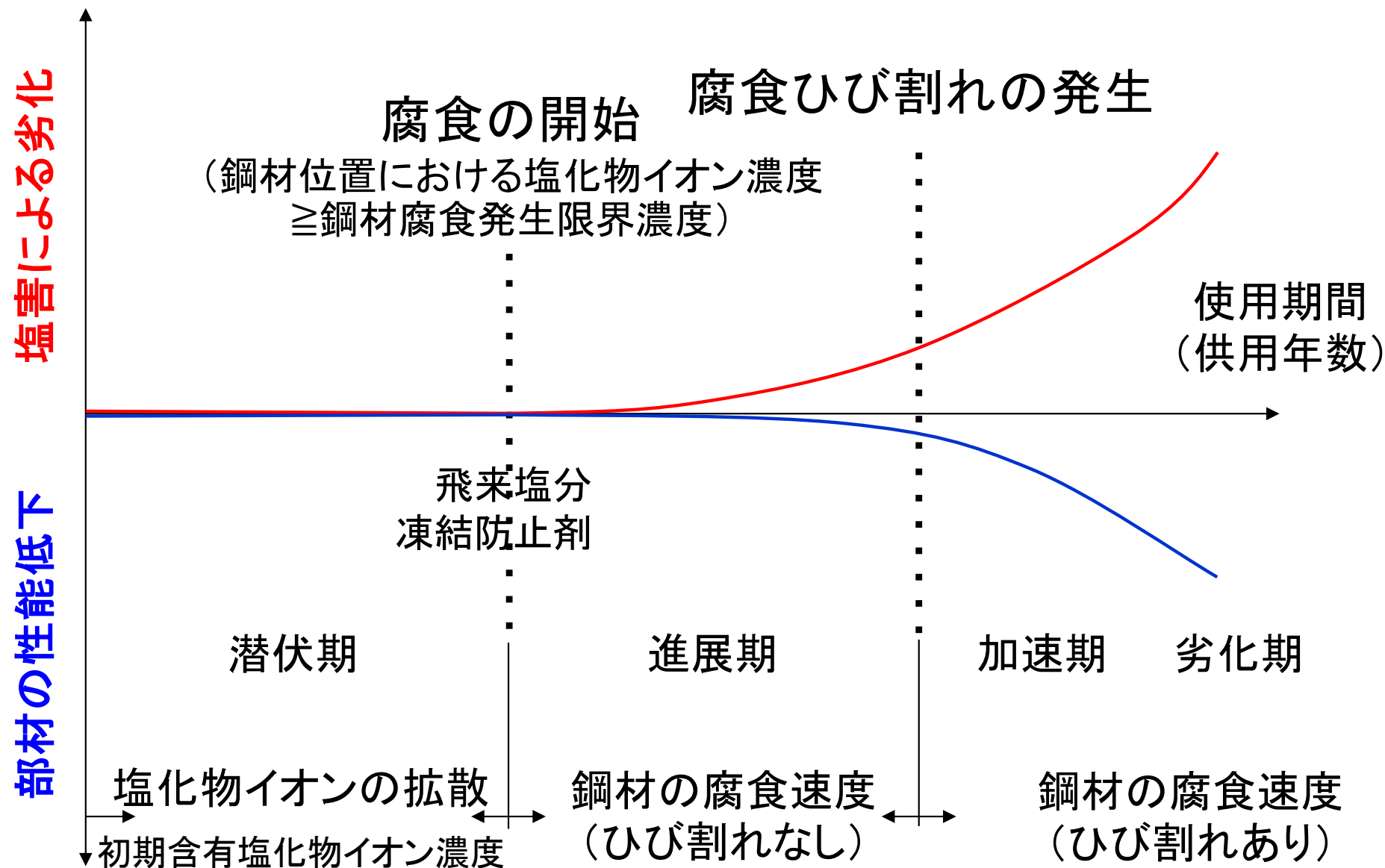


コンクリート中の塩分は

- ①自由塩分(塩化物イオン)、
- ②吸着塩分(水和物表面への物理的吸着)、
- ③固相塩分(フリーデル氏塩、化学的)。

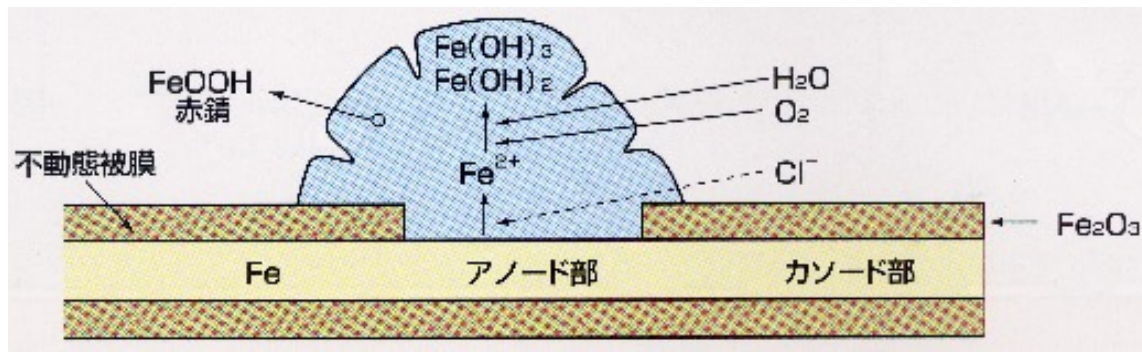
塩害(その1)

不動態皮膜(主として $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ という水和酸化物)は塩化物イオンに弱く、腐食されやすいため、塩化物イオンの侵入により、鉄筋の腐食リスクが高くなる。



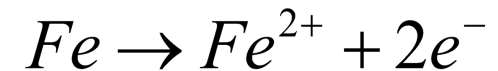
塩害(その2)

コンクリート中の鉄筋腐食は、鉄の酸化還元反応であり、pH、酸素や水の供給条件により腐食反応の進行メカニズムは非常に複雑になる。

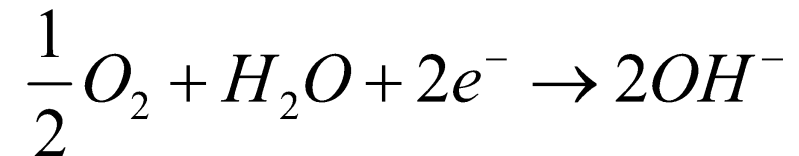


【45】

アノード(Anode)反応



カソード(Cathode)反応



海洋構造物

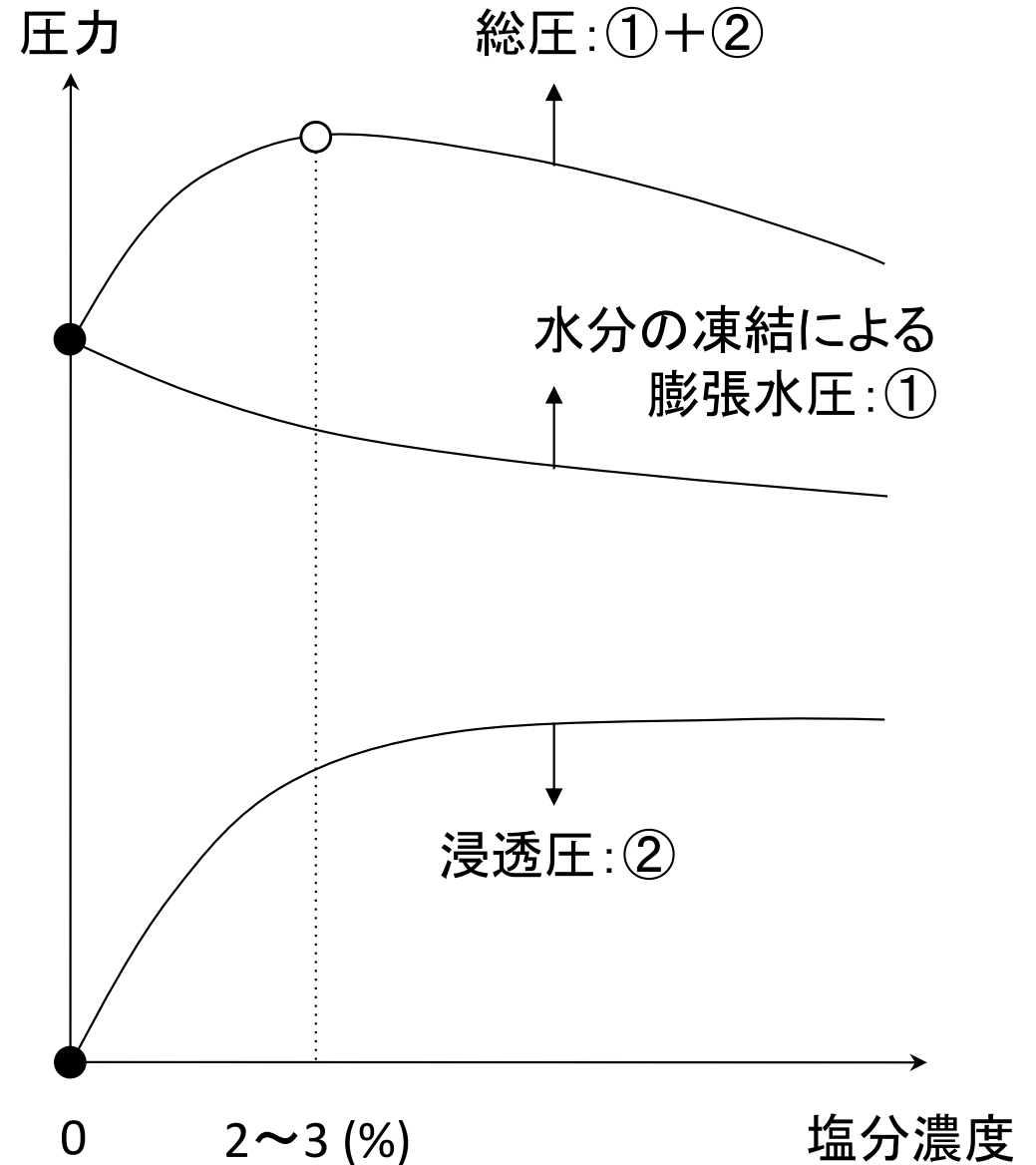
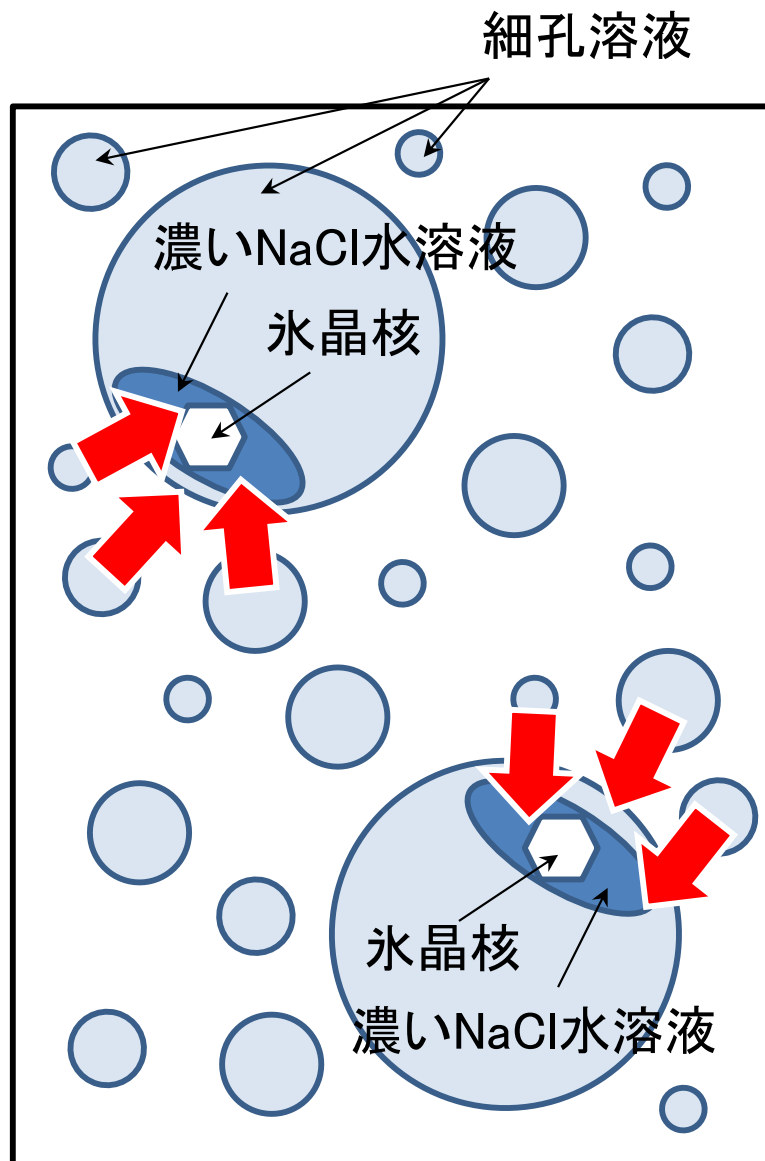
- 海中: 塩化物イオンの供給は多い、酸素の供給は十分でない.
- 海上大気中: 酸素の供給は多い、塩化物イオンの供給は十分でない.
- **飛沫帯** (Splash Zone): 乾湿繰返し作用があり、塩化物イオンおよび酸素の両者の供給が十分

塩害(その3)

コンクリートと鉄筋の間で電池回路が形成されるため、電子の受け渡しがどのように起きているか(電子の移動がどこで発生するか)に大きく影響を受ける。

欠陥	なし	あり
腐食形態	ミクロセル	マクロセル
特長	アノードは全面的	アノードが局所化
腐食速度	遅い	速い
概念図		

凍害(その1)



凍害(その2)

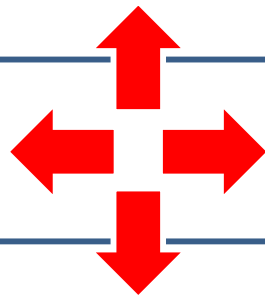
コンクリート表面→
凝結層→

①凍結防止剤の散布

未凍結層

凝結層→
コンクリート表面→
凝結層→

②凍結の遅延進行

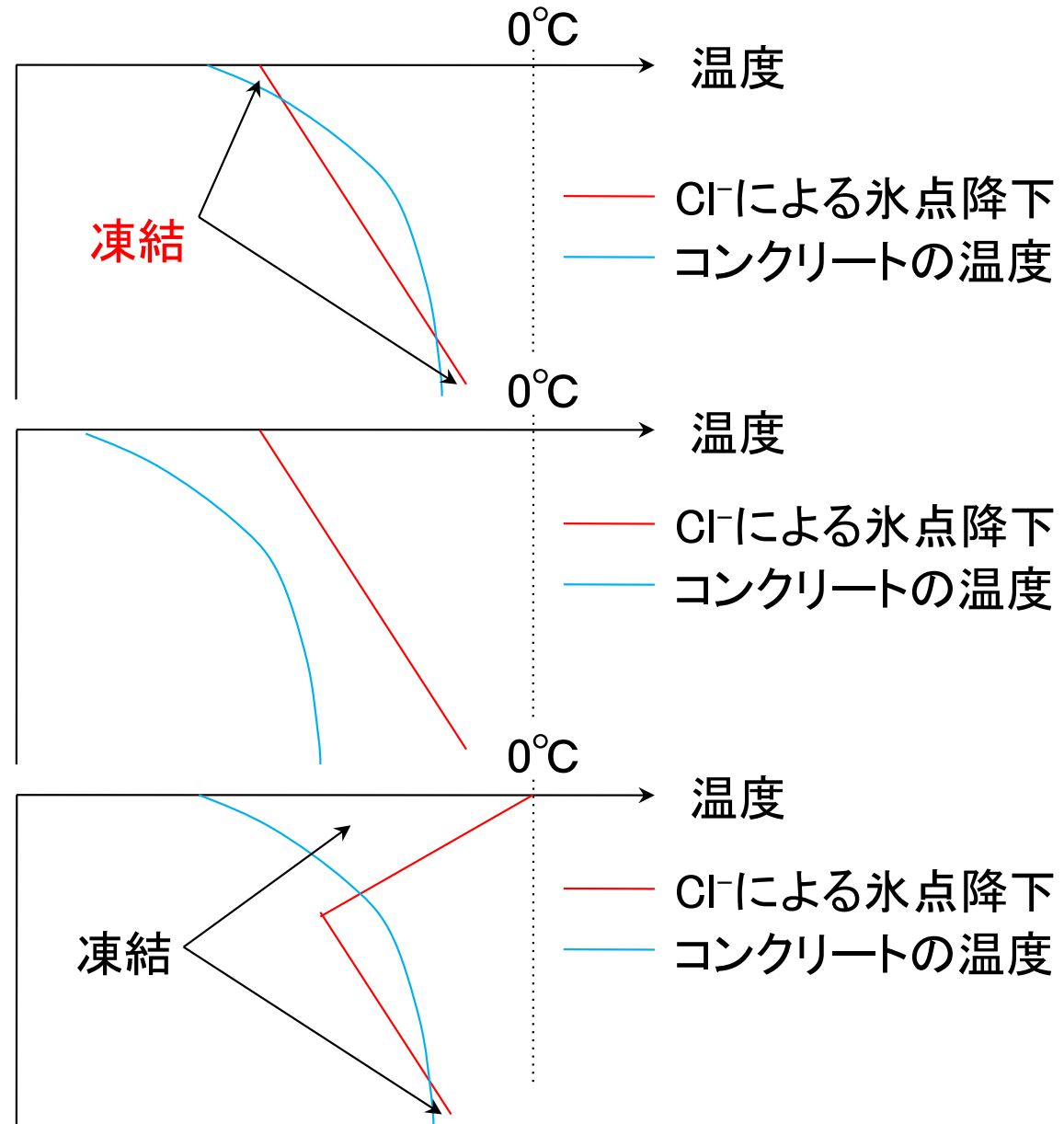


凝結層→
コンクリート表面→
凝結層→

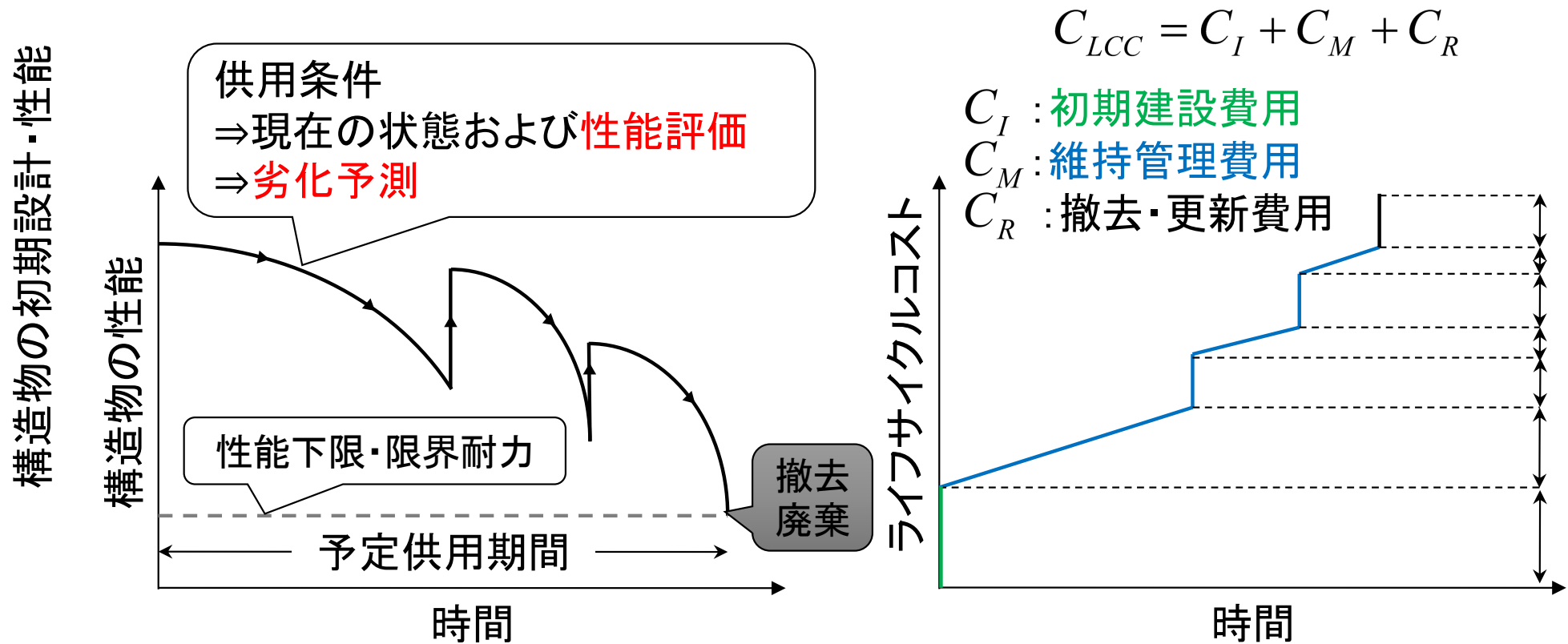
③凍結防止剤の消失

未凍結層

凝結層→



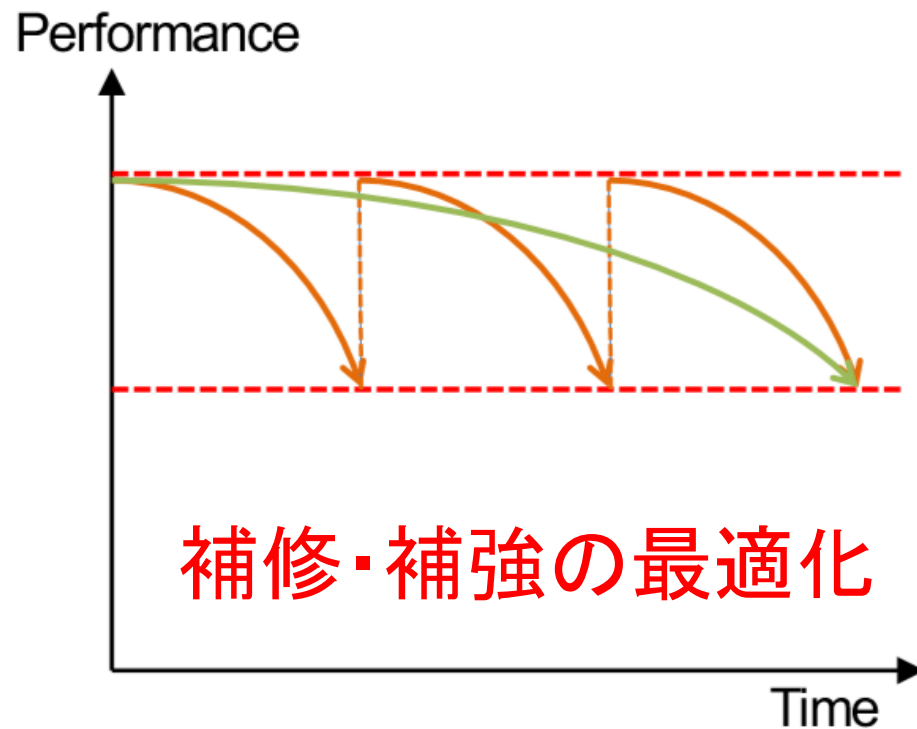
構造物の性能低下およびライフサイクル



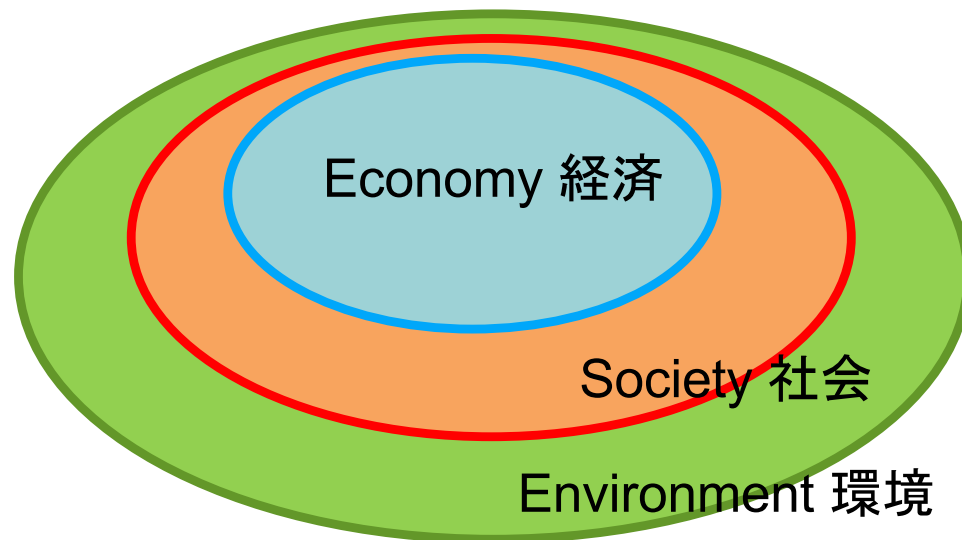
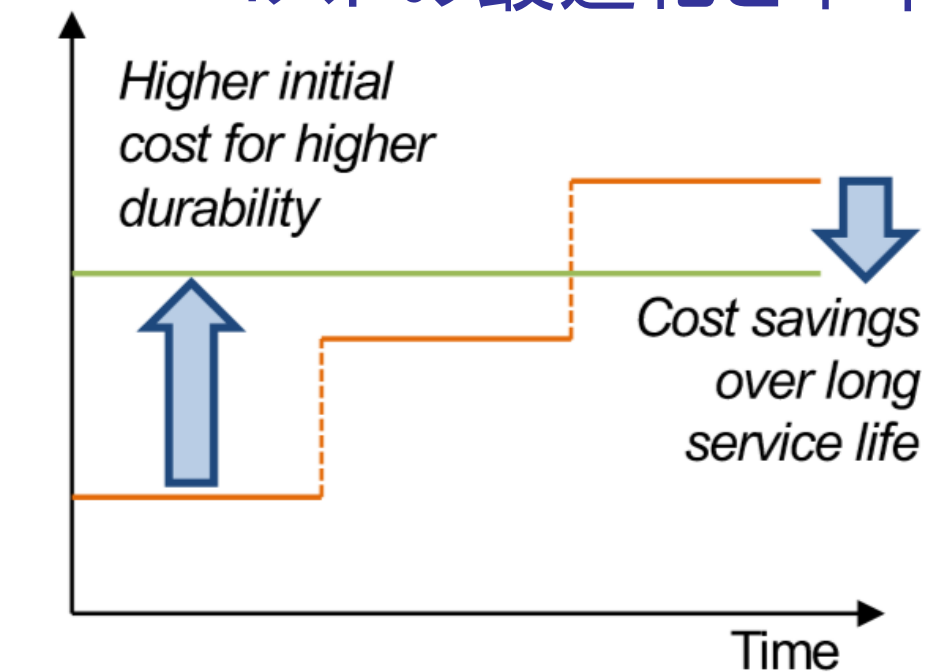
材料劣化および劣化に伴う力学特性の変化に基づく
合理的な耐久性設計

各種作用(環境＋力学)に対する化学特性、空隙構造、力学特性
の変化を連続的に評価する維持管理

構造物の性能低下およびライフサイクル



コストの最適化と平準化



Sustainable development 持続可能な開発

計画段階でインフラの重要性や必要性をそれぞれ(社会、経済、環境など)の観点から考慮する必要がある。

環境への影響を考えた上、社会貢献できる安全・安心なインフラ構造物を構築する。

2-1 セメントの水和機構と化学的変質

セメント水和物の生成と劣化因子の反応を伴う長期変質挙動

2-2 コンクリートの空隙構造と物質移行性

空隙構造モデルとイオン移動および拡散シミュレーション

2-3 鉄筋コンクリートの力学特性と性能評価

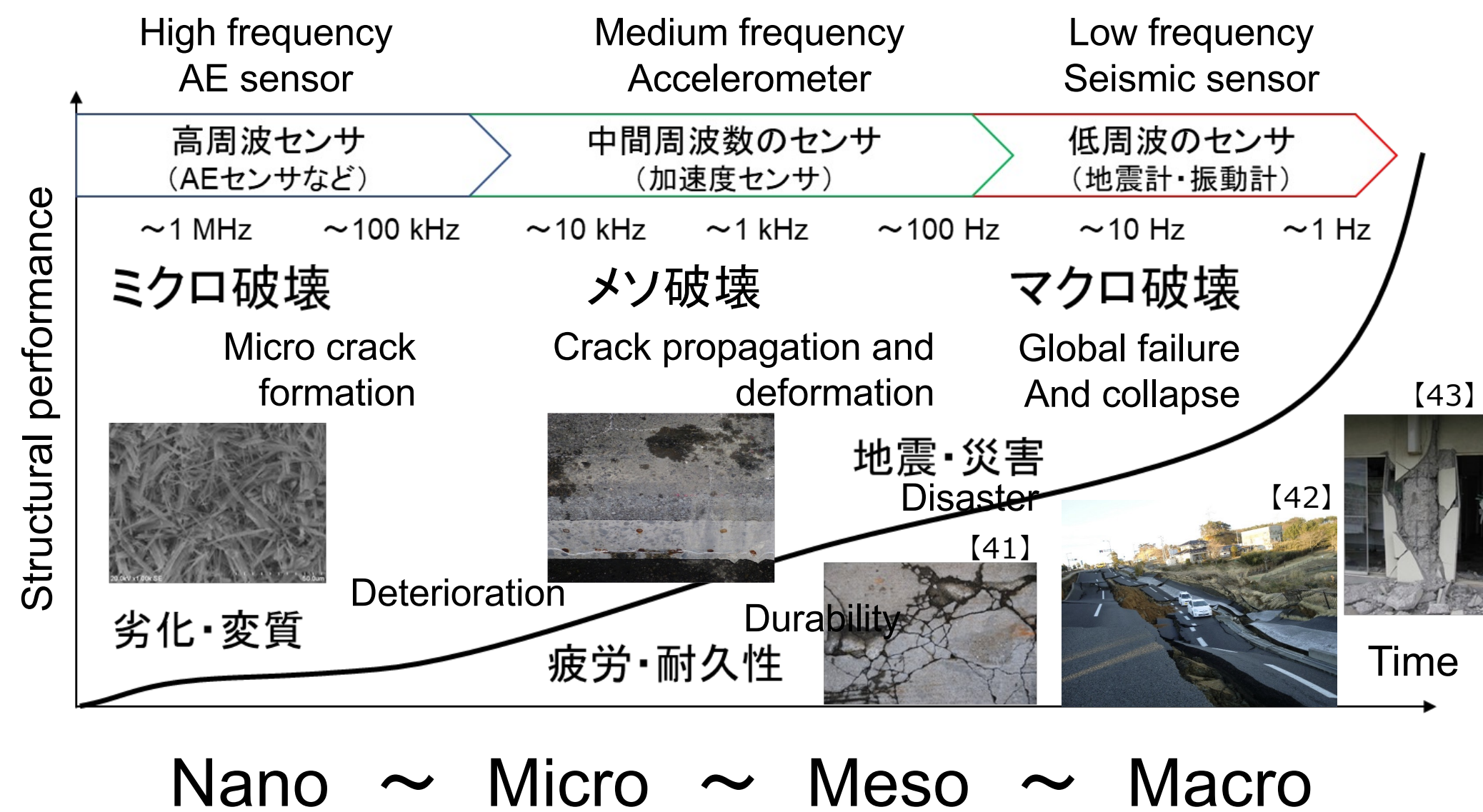
環境作用に伴う耐力低下とひび割れ発生機構に基づく構造物の性能評価

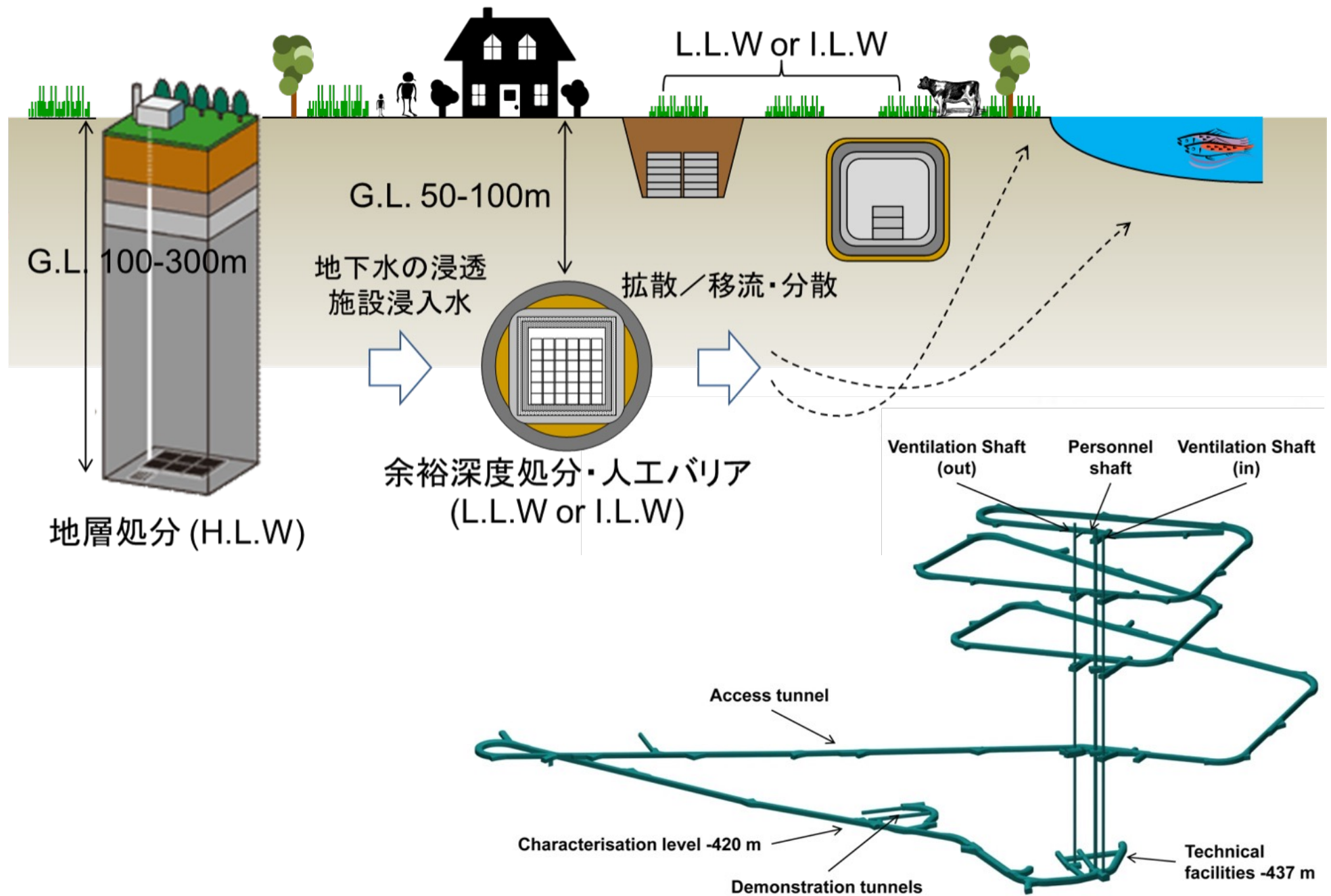
2-4 劣化メカニズムに基づく対策と設計

供用環境における各種劣化機構と補修・補強と性能評価の考え方

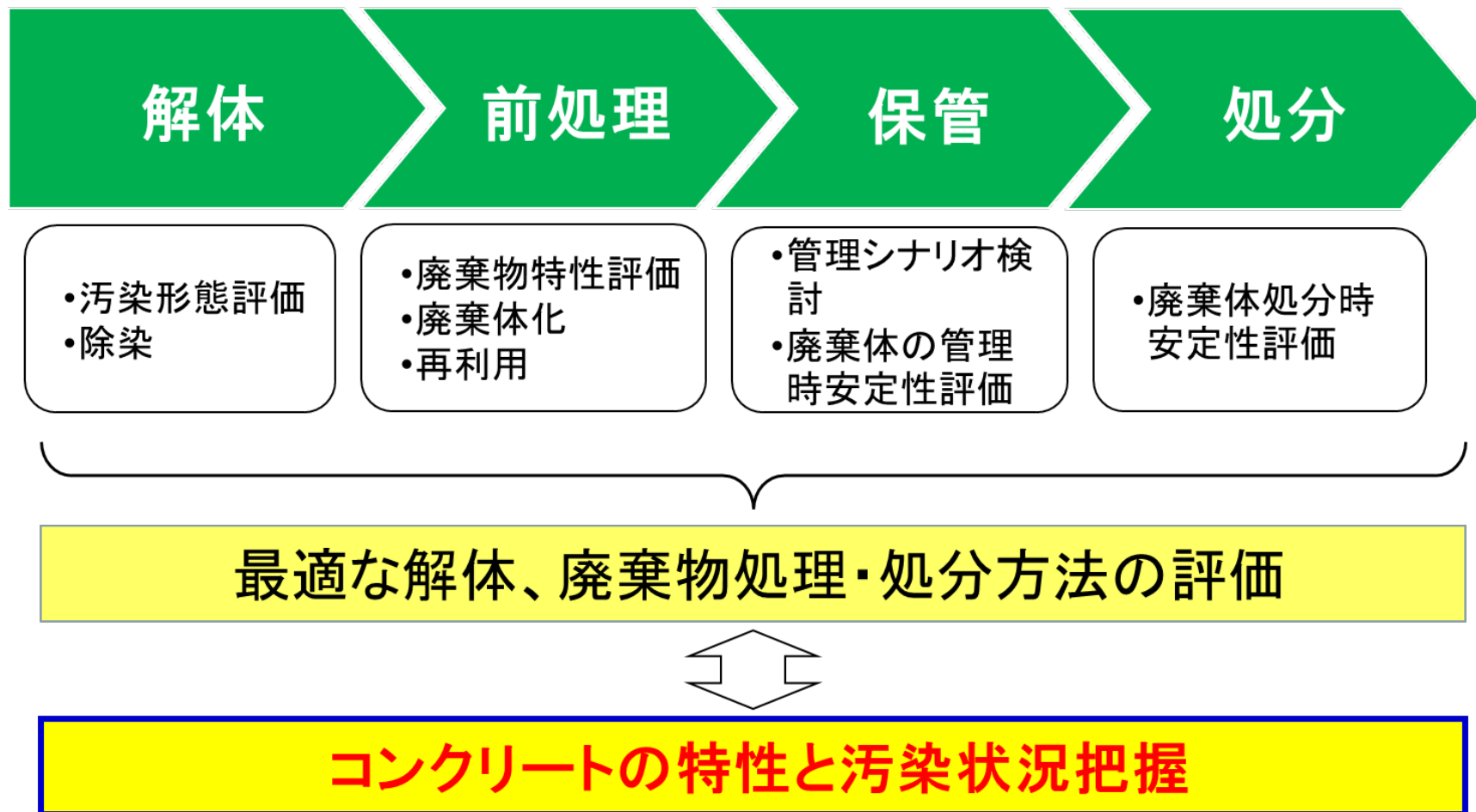
2-5 維持管理シナリオ

点検・調査・診断の在り方と維持管理シナリオの策定





福島第一原子力発電所のコンクリート廃棄物



原子力事業においては、発電所施設を構成する構造物の耐久性および廃炉と廃棄物処分の諸問題に対し、コンクリート工学に関連する知識が非常に重要となる。

2011年 福島第一原子力発電所事故

【47】



【48】



廃炉に向けた課題が未だ多く残っている。

- ・増え続ける汚染水
- ・廃棄物処分用地の確保
- ・燃料デブリの取出 技術的な課題

放射性廃棄物推定総量 780万トン

既にある放射性固体廃棄物:54万m²



原子炉建屋等解体後

事故が発生した1～4号機
放射性コンクリート廃棄物
推定総量 **81万トン**¹⁾



同規模軽水炉 通常解体時の80倍相当

【49】

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	†	(一社) セメント協会
【2】	†	(一社) セメント協会
【3】	†	資源エネルギー庁ウェブサイト (https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2016/28fy_tru_1i.pdf)
【4】	†	日本コンクリート工学会：コンクリートにおける未利用資源の利用拡大に関する特別委員会報告書, 2016.8, p.20, 図-3.1.10 フライアッシュの性状と利用用途
【5】	†	コンプロネット コンクリート用混和材料の常識
【6】	†	Nattakorn B., Kokubo S. and Nasu S., Measurement of Airborne Chloride Particle Sizes Distribution for Infrastructures Maintenance, 2011, vol.7, issue1
【7】	†	港湾空港技術研究所提供
【8】	†	Reprinted from Construction and Building Materials, Vol.415, Dingshi Chen et al., Mesoscopic characteristics and spatiotemporal variability of chloride transport in concrete, Pages No.2, 2024, with permission from Elsevier [OR APPLICABLE SOCIETY COPYRIGHT OWNER].
【9】	†	Pargar, F.; Koleva, D.A.; Van Breugel, K. Determination of Chloride Content in Cementitious Materials: From Fundamental Aspects to Application of Ag/AgCl Chloride Sensors. Sensors 2017, 17, 2482. https://doi.org/10.3390/s17112482
【10】	†	太平洋セメント株式会社ホームページ (https://www.taiheiyo-cement.co.jp/english/rd/taikyusei/merit/index.html)

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【11】		Olaboy / Scanning Electron Microscope / CC BY-SA 2.5
【12】	†	提供：日本電子株式会社
【13】		Gbiten~commonswiki/http://remf.dartmouth.edu/imagesindex.html
【14】	†	提供：新潟大学 電子顕微鏡共同研究室
【15】	†	提供：日本電子株式会社
【16】	†	コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016,P711-716, 論文 コンクリート水路に施工された無機系補修材の中性化とその要因, 図-8 B工法底版のEPMA分析結果
【17】		Pospíšil, K., A. Frýbort, A. Kratochvíl, and J. Macháček. 2008. "Scanning Electron Microscopy Method as a Tool for the Evaluation of Selected Materials Microstructure." Transactions on Transport Sciences 1(1):13-20.
【18】	†	メルコセミコンダクタエンジニアリング株式会社
【19】	†	一般社団法人日本分析機器工業会の許可を得て転載（2025年3月6日）
【20】	†	一般社団法人日本分析機器工業会の許可を得て転載（2025年3月6日）

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【21】	†	林 為人, 高橋 学, 佐東 大作, 葉 恩肇, 橋本 善孝, 谷川 亘, 水銀圧入法による岩石の空隙寸法分布測定, 応用地質, 2016, 57巻, 5号, p201-212
【22】	†	東京電力ホールディングス
【23】	†	「The NUMO Pre-siting SDM-based Safety Case」 【NUMO-TR-21-01】 P.4-12 Figure 4.2-3 TRU waste engineered barriers
【24】	†	Reprinted from Construction and Building Materials, Vol 369/130526, Author(s), Evaluation of transport properties of deteriorated concrete due to calcium leaching with coupled CT image analysis and random walk simulation / 2.2. CT imaging and in-situ XRD measurement, P4, 2023, with permission from Elsevier.
【25】	†	Reprinted from Construction and Building Materials, Vol 369/130526, Author(s), Evaluation of transport properties of deteriorated concrete due to calcium leaching with coupled CT image analysis and random walk simulation / 4.3. Tortuosity and diffusion coefficient, P7, 2023, with permission from Elsevier.
【26】	†	Reprinted from Construction and Building Materials, Vol 369/130526, Author(s), Evaluation of transport properties of deteriorated concrete due to calcium leaching with coupled CT image analysis and random walk simulation / 4.2. Extraction of pore structure, P7, 2023, with permission from Elsevier.
【27】	†	Reprinted from Construction and Building Materials, Vol 369/130526, Author(s), Evaluation of transport properties of deteriorated concrete due to calcium leaching with coupled CT image analysis and random walk simulation / 4.1. Leaching region and non-leaching region, P5, 2023, with permission from Elsevier.
【28】	†	Reprinted from Construction and Building Materials, Vol 369/130526, Author(s), Evaluation of transport properties of deteriorated concrete due to calcium leaching with coupled CT image analysis and random walk simulation / 4.3. Tortuosity and diffusion coefficient, P8, 2023, with permission from Elsevier.
【29】	†	まこりげ / photoAC
【30】	†	寒地土木研究所

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【31】	✚	miho_e / PIXTA(ピクスタ)
【32】	✚	寒地土木研究所
【33】	✚	コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015, P283-288, 論文 初期ひび割れを通じて海水作用を受ける超高強度繊維補強コンクリートの力学特性と組成変化 図-10 海水浸漬12ヵ月間でUFC(W/B=13.2%)の初期ひび割れから浸入したCl-の濃度分布
【34】	✚	株式会社太平洋コンサルタントHP
【35】	✚	中瀬 皓太, 富樫 佑介, 橋本 勝文, 杉山 隆文, 齊藤 亮介, コンクリート内部の粗骨材分布に関するX線CT画像の三次元画像解析手法の構築, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 Proceedings of the Concrete Structure Scenarios, JSMS / 日本材料学会 編 22:2022.10
【36】	✚	Yoshihara, R.; Nakase, K.; Hashimoto, K.; Sugiyama, T.; Honda, Y. Evaluation of Aggregate Distribution Heterogeneity in 3D Printed Concrete by Means of X-ray CT. Buildings 2024, 14, 1132. https://doi.org/10.3390/buildings14041132 を元に作成
【37】	✚	Reprinted from Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.21, P. Nivesrangsang, J.A. Steel, R.L. Reuben, Source location of acoustic emission in diesel engines, Pages No.1105, 2007, with permission from Elsevier [OR APPLICABLE SOCIETY COPYRIGHT OWNER].
【38】	✚	大津政康, コンクリート工学におけるアコースティック・エミッション (AE) 研究の歴史と現状, 土木学会論文集, 1994, 496号, P9-19
【39】	✚	大津政康, コンクリート工学におけるアコースティック・エミッション (AE) 研究の歴史と現状, 土木学会論文集, 1994, 496号, P9-19
【40】		Du, F., Pan, S., & Li, D. (2018). Damage evaluation and failure mechanism analysis of steel tube confined reinforced-concrete columns by acoustic emission technology. Latin American Journal of Solids and Structures, 15, e136. / CC BY 4.0

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【41】	✦	masa92 / PIXTA(ピクスタ)
【42】	✦	震災伝承ネットワーク協議会
【43】	✦	国立研究開発法人建築研究所ホームページ (https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html)
【44】	✦	株式会社太平洋コンサルタントHP
【45】	✦	コンクリートメンテナンス協会 (https://www.j-cma.jp/?cn=102632)
【46】		CC-BY-SA 3.0 / Fosco Lucarelli
【47】	✦	東京電力ホールディングス
【48】	✦	東京電力ホールディングス
【49】	✦	東京電力ホールディングス