



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」
コンクリートを中心とした建設材料の基礎

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

橋本勝文 準教授 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

1-1 社会基盤施設と建設材料

インフラ構造物の建設：コンクリートと鋼材

1-2 セメントコンクリートの基礎

セメントとコンクリートの材料特性に関する基礎知識

1-3 鉄筋コンクリートの基礎

鉄筋コンクリート構造物の設計・施工・維持管理

小樽港 北防波堤

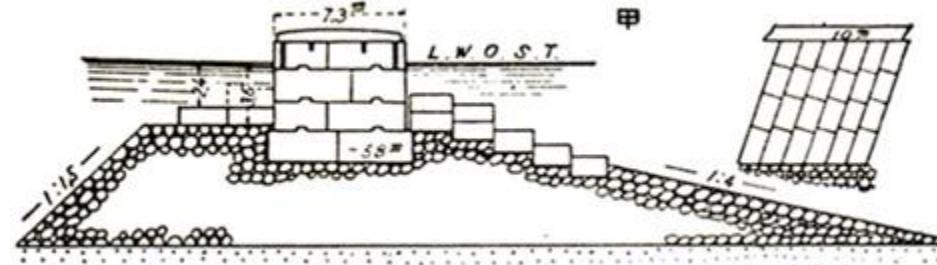


明治41年（1908年）竣工

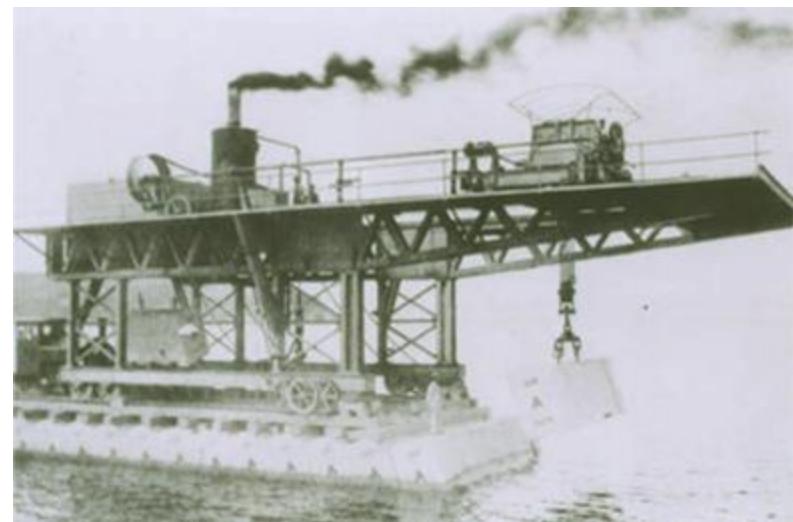
【1】出典：国土交通省ウェブサイト



【2】パブリックドメイン



【4】出典：高崎哲郎, 評伝「山に向いて目を挙ぐ—工学博士・広井勇の生涯」, 鹿島出版会, 2003, 281p



【5】出典：小樽港築港工事報文



【6】出典：小樽開発建設部ウェブサイト



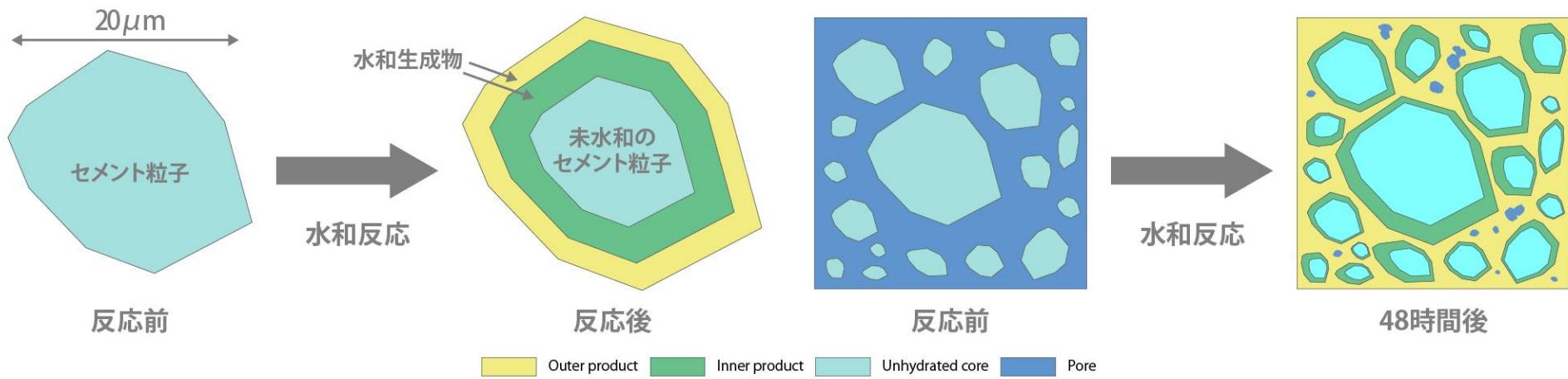
【7】 ぱりろく／PIXTA(ピクスタ)



【8】 提供：コンクリートメンテナンス協会



【9】 JackF／PIXTA(ピクスタ)



セメントの製造

クリンカ



【10】出典：（一社）セメント協会

主原料である石灰石、粘土、珪石、鉄滓（てっさい：鉱石から鉄を精錬する際、溶けて分離した鉄以外の鉱石の成分）などを調合して、予熱機から最高1450°Cの巨大なロータリーキルン（回転窯）に投入し、高温焼成した後、空気で急冷するとセメントクリンカを製造する。

クリンカー化合物を構成している主な成分は CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 であり、すなわちこれらがクリンカーの主要成分となる。

セメント



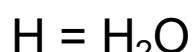
【11】出典：（一社）セメント協会

クリンカをさらに粉碎し、せっこうを加えることでセメントが完成する。主原料の石灰石は100%国内調達されており、このような工業製品は日本ではまれ。廃棄物や副産物を原料や熱エネルギーの一部として取り込むことが可能であり、持続可能な資源の循環を実現する主要な産業である。

珪酸三カルシウム $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ （エーライト）、珪酸二カルシウム $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ （ビーライト）、アルミニン酸三カルシウム $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ （アルミネート）、鉄アルミニン酸四カルシウム $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ （フェライト）が主要な構成化合物である。

セメントの水和反応

水和反応には物質の変化、エネルギーレベルの変化、反応速度がある。



C_3S (alite): けい酸三カルシウム

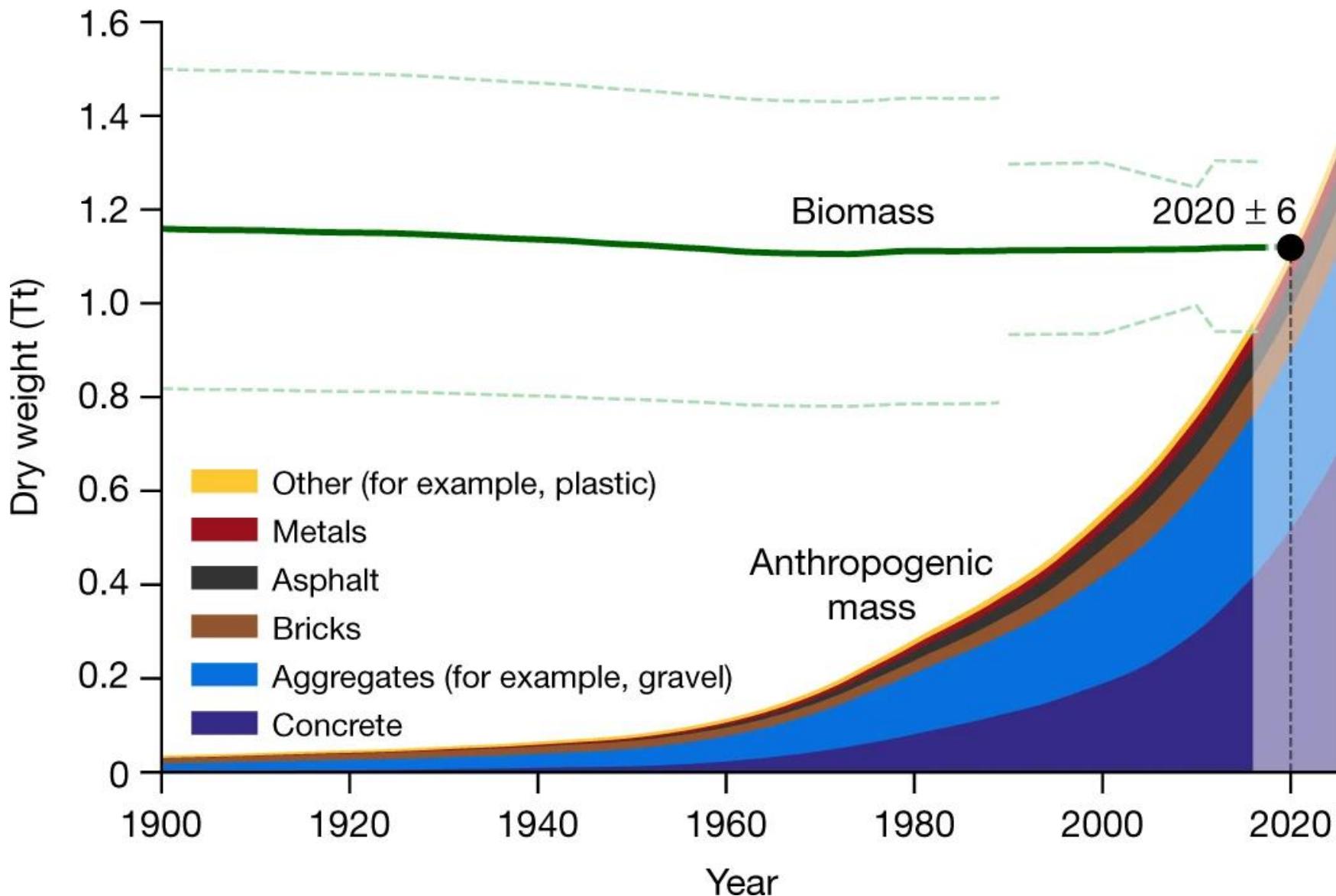
C_2S (belite): けい酸二カルシウム

C_3A (aluminate): アルミニン酸三カルシウム

C_4AF (ferrite): 鉄アルミニン酸四カルシウム

	反応式	反応熱 (J/g)
C_3S	$C_3S + 2.65H \rightarrow C_{1.7}SH_{1.35} + 1.3CH$	519.0
C_2S	$C_2S + 1.65H \rightarrow C_{1.7}SH_{1.35} + 0.3CH$	260.0
C_3A	$C_3A + 3\bar{CSH}_2 + 26H \rightarrow C_3A \cdot 3\bar{CS} \cdot H_{32}$	1453.0
	$2C_3A + C_3A \cdot 3\bar{CS} \cdot H_{32} + 4H \rightarrow 3C_3A \cdot \bar{CS} \cdot H_{12}$	996.3
	$C_4AF + 3\bar{CSH}_2 + 27H \rightarrow C_3(AF) \cdot 3\bar{CS} \cdot H_{32} + CH$	419.0
C_4AF	$2C_4AF + C_3(AF) \cdot 3\bar{CS} \cdot H_{32} + 6H \rightarrow 3C_3(AF) \cdot \bar{CS} \cdot H_{12} + 2CH$	276.0

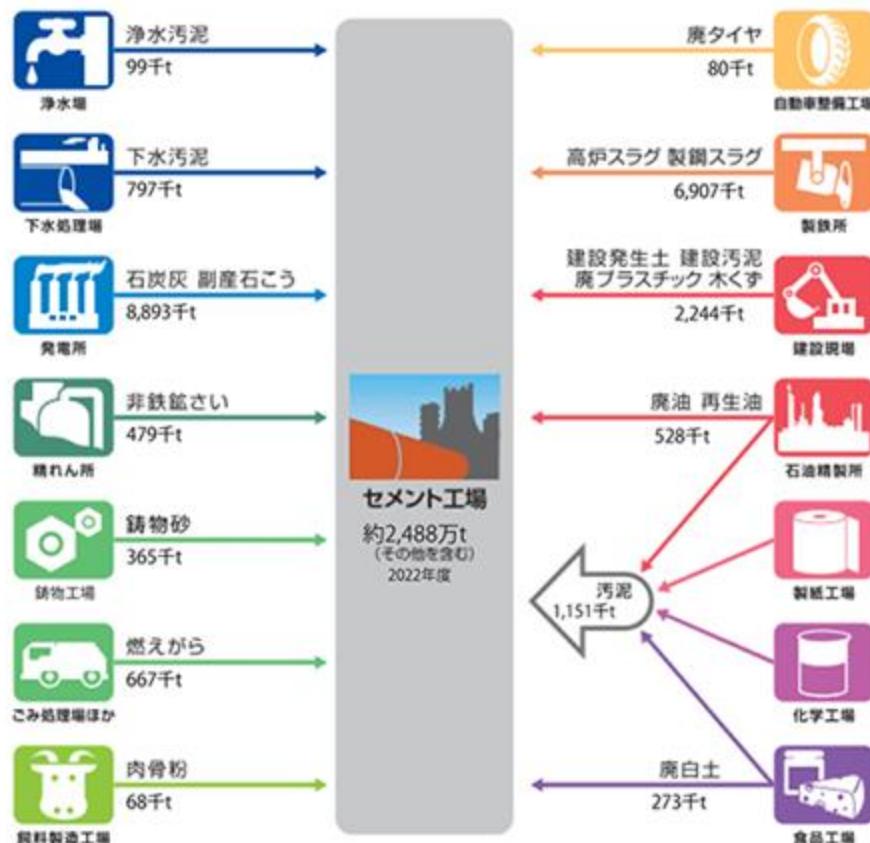
主要な水和物は、 $C-S-H$: けい酸カルシウム水和物と、 $Ca(OH)_2$: 水酸化カルシウムである。水酸化カルシウムが生成されることでコンクリート中の飽和環境においてはpHが高いため（12～13）、内部に配置した鉄筋の耐腐食性を維持する。



【12】出典 : Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J. et al. Global human-made mass exceeds all living biomass. Nature 588, 442–444 (2020).

セメント製造における廃棄物利用

由来	品目	成分			
		酸化カルシウム (CaO)	二酸化けい素 (SiO ₂)	酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)	酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)
天然原料	粘土	~ 5%	40~80%	10~30%	3~10%
廃棄物	石炭灰	5~20%	40~65%	10~30%	3~10%
	焼却灰	20~30%	20~30%	10~20%	~10%
	下水汚泥	5~30%	20~30%	20~50%	5~10%



天然の粘土と、いくつかの廃棄物の組成を比較すると類似しており、これらを粘土の代替として利用できることが分かる。

環境省の「令和5年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書」によれば、わが国は1年間に約5億1900万tの廃棄物等が発生し、2億1600万tが循環利用されている(FY2020)。このうち、約2490万tの廃棄物等をセメント製造に活用されており、循環利用量の約11%に相当する。



空気

Air: 5%

セメント

Cement: 10%

水

Water: 20%

細骨材

Sand: 25%

砂

粗骨材

Gravel: 40%

砂利

(体積比)



【14】 CC BY-NC-ND 4.0／Müller, Matthias

コンクリートの配合（単位体積当たりの質量（kg/m³））

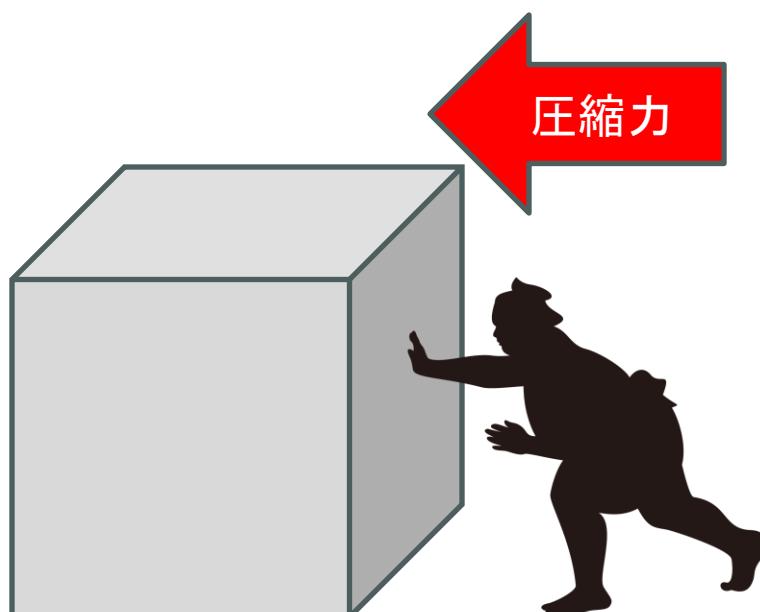
水：170 セメント：340 砂（細骨材）：800 砂利（粗骨材）：900



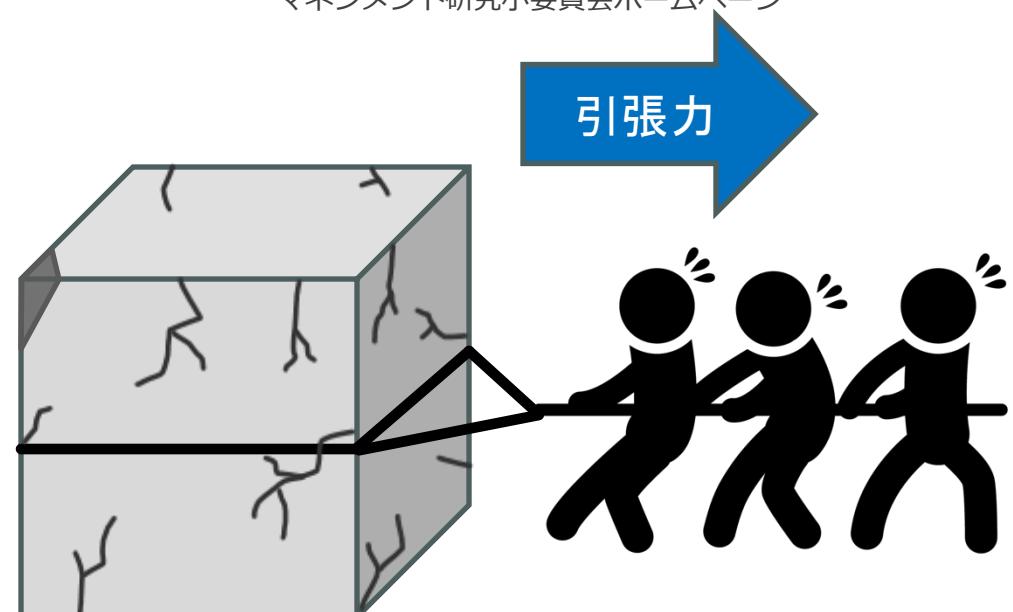
【15】maikopowerpad／PIXTA(ピクスタ)



【16】出典：土木学会構造工学委員会 土木構造物のライフサイクルマネジメント研究小委員会ホームページ



強い



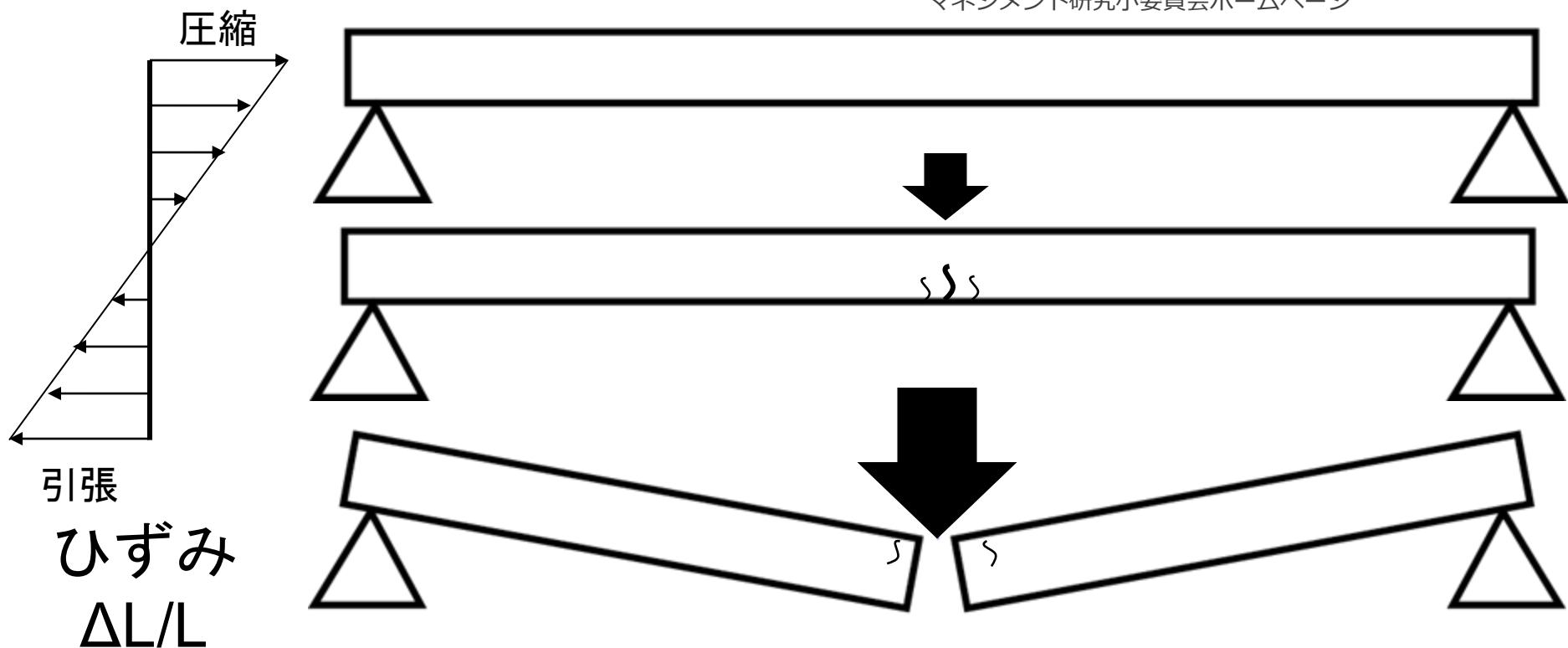
弱い



【15】maikopowerpad／PIXTA(ピクスタ)



【16】出典：土木学会構造工学委員会 土木構造物のライフサイクルマネジメント研究小委員会ホームページ

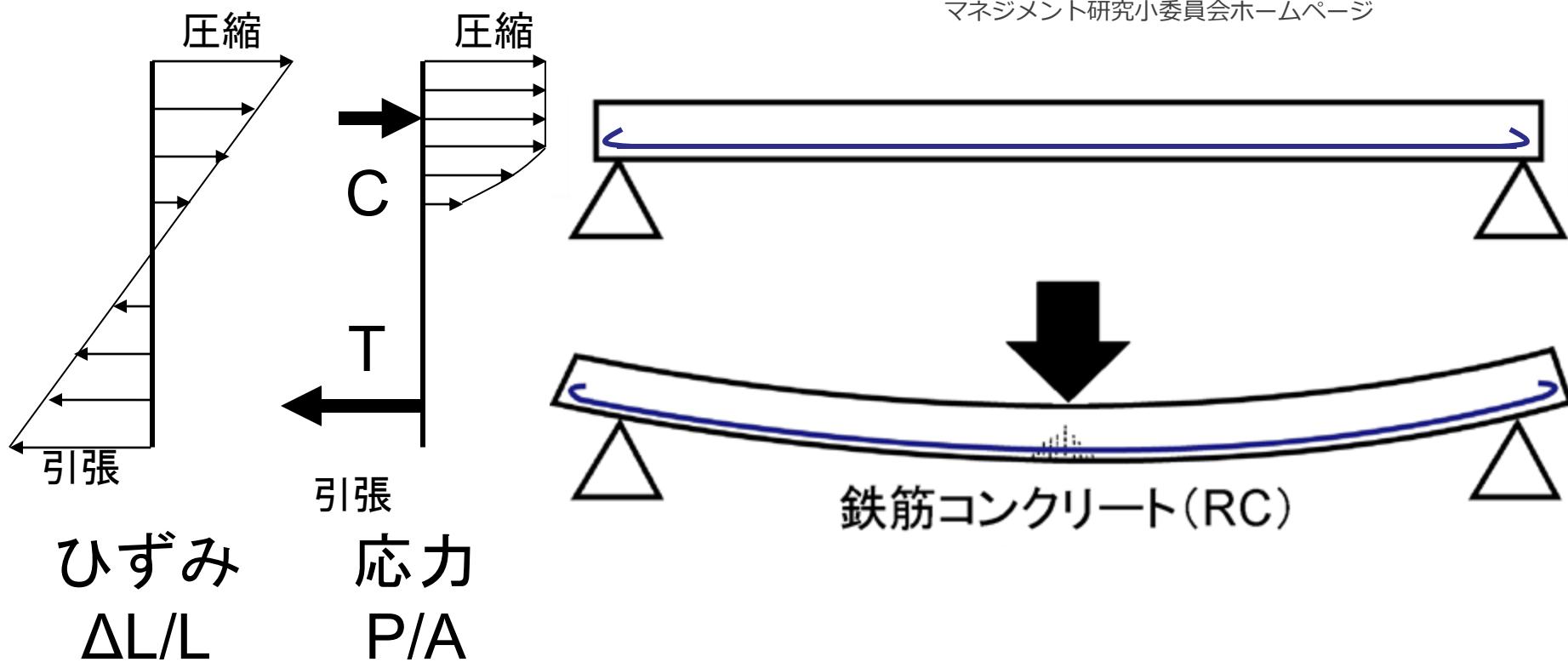




【15】maikopowerpad／PIXTA(ピクスタ)



【16】出典：土木学会構造工学委員会 土木構造物のライフサイクル
マネジメント研究小委員会ホームページ



鉄筋コンクリートの環境中の劣化



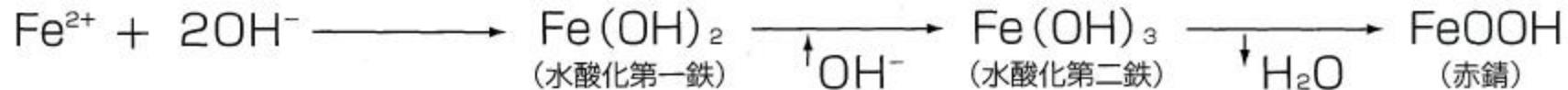
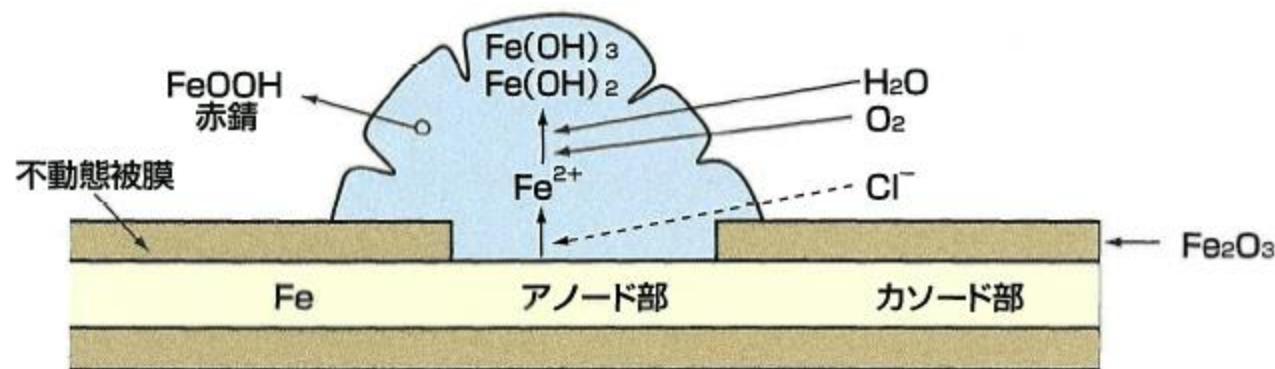
【17】出典：コンクリートメンテナンス協会
(<https://www.j-cma.jp/?cn=102632>)



【18】提供：塞地十木研究所

左) 塩害によるコンクリート 内部の鉄筋腐食

右) 凍害 (水分の凍結融解)
によるコンクリートの劣化



鉄筋腐食反応の模式図

【19】出典：コンクリートメンテナンス協会 (<https://www.j-cma.jp/?cn=102632>)

ゲル空隙：水和物で占められなかった空隙

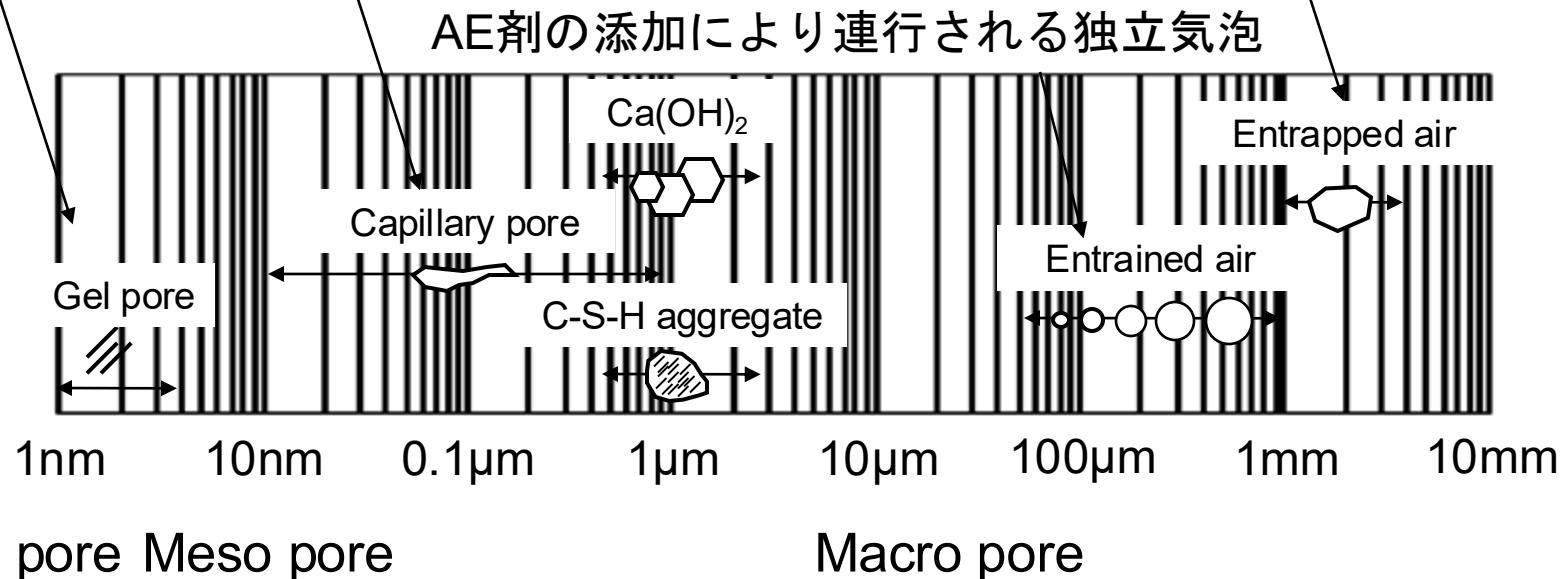
毛細管空隙：水和物で占められなかった空隙

エントレインドエア：

AE剤の添加により連行される独立気泡

エントラップドエア：

混練された不規則な空隙



X-ray CT : 10μm~

Mercury intrusion method : 10nm~20μm

Gas (N₂、H₂O) adsorption method : 0.1~500nm

◆ 鉄筋腐食

- 塩害

主にコンクリート構造物の内部に侵入した塩分（主に塩化物イオン）によって、鉄筋の腐食が進行する。

- 中性化

コンクリート内部のアルカリ性（pH 12～13）が、二酸化炭素（CO₂）との反応によって低下（pH 9以下）し、鉄筋の腐食が進行する。

◆ 凍害

コンクリート内部および表面の水分が凍結と融解を繰り返すことで、劣化や損傷が進行する。

◆ 化学的侵食

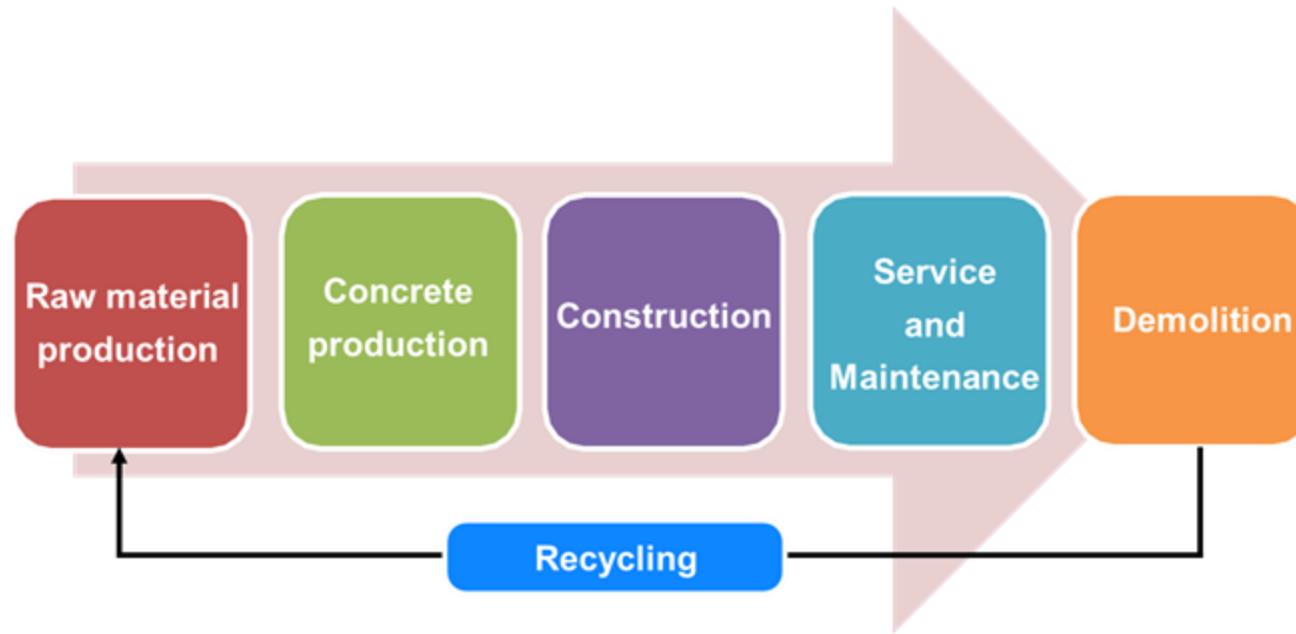
◆ アルカリ骨材反応

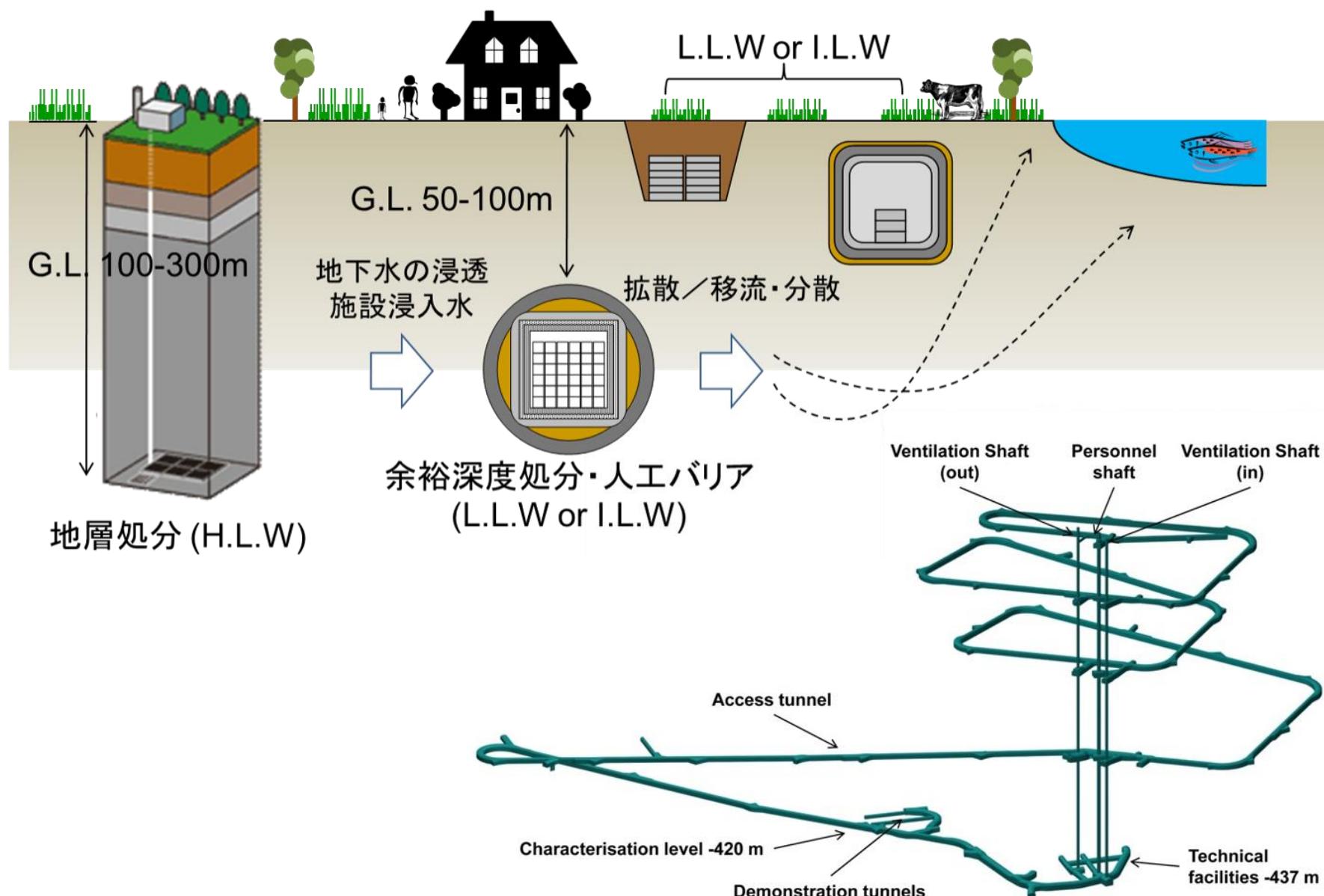
耐久性とは

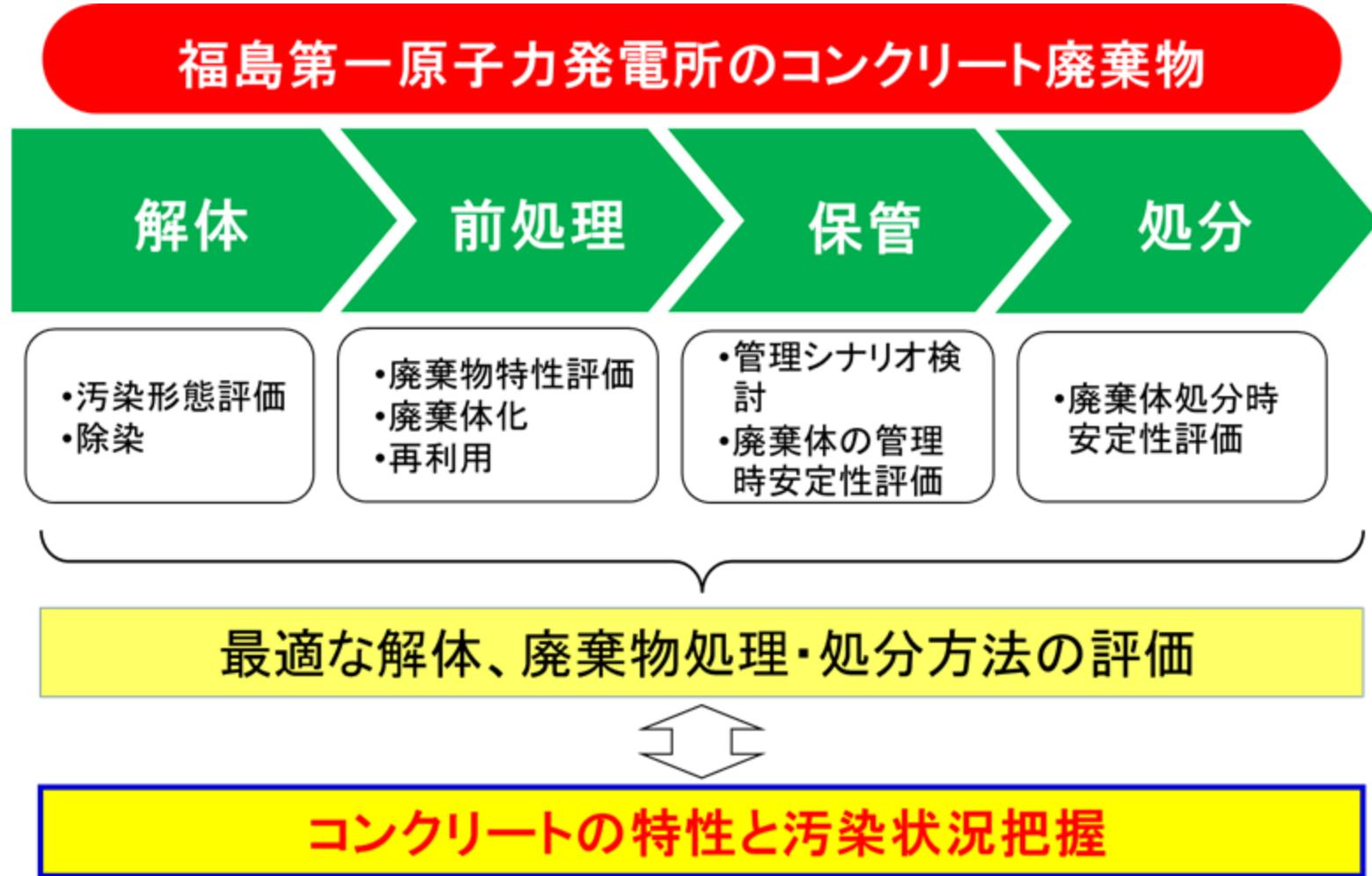
構造物中の材料の劣化により生じる性能の経時的な変化に対して、構造物が有する抵抗性のこと。

耐久性能とは

構造物の要求性能を供用期間内に維持する性能のこと。同一の耐久性であっても、予定供用期間あるいは設計耐用期間が短ければ（長ければ）、耐久性能は十分（不十分）ということになり得る。







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。

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	‡	国土交通省ウェブサイト (https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/infratourism/infralist/hokkaido/index05.html)
【2】	PD	パブリックドメイン
【3】	‡	小樽開発建設部ウェブサイト (https://www.hkd.mlit.go.jp/ot/tikkou/vu2tjq0000000tct.html)
【4】	‡	高崎哲郎, 評伝 山に向いて目を擧ぐー工学博士・広井勇の生涯, 鹿島出版会, 2003, 281p
【5】	‡	小樽港築港工事報文
【6】	‡	小樽開発建設部ウェブサイト (https://www.hkd.mlit.go.jp/ot/tikkou/vu2tjq0000001lau.html)
【7】	‡	ばりろく／PIXTA(ピクスタ)
【8】	‡	JackF／PIXTA(ピクスタ)
【9】	‡	写真提供：コンクリートメンテナンス協会
【10】	‡	(一社)セメント協会

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【11】	‡	(一社)セメント協会
【12】	‡	Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J. et al. Global human-made mass exceeds all living biomass. Nature 588, 442–444 (2020).
【13】	‡	(一社)セメント協会 (2025年2月28日確認)
【14】	 CC BY-NC-ND 4.0／Müller, Matthias	
【15】	‡	maikopowerpad／PIXTA(ピクスタ)
【16】	‡	土木学会 構造工学委員会 土木構造物のライフサイクルマネジメント研究小委員会ホームページ
【17】	‡	コンクリートメンテナンス協会 (https://www.j-cma.jp/?cn=102632)
【18】	‡	提供：寒地土木研究所
【19】	‡	コンクリートメンテナンス協会 (https://www.j-cma.jp/?cn=102632)
【20】	 CC-BY-SA 3.0／Fosco Lucarelli	