



コンクリート構造物の補修・補強で 持続可能な未来を -シナリオデザイン-



京都大学 名誉教授
宮川豊章

- 内容 -

- **丈夫で、美しく、長持ち**
- **AIにはわからない“意味” = 劣化
塩害、アルカリシリカ反応、
グラウト問題**
- **時空間シナリオデザイン**
- **今、何が？**

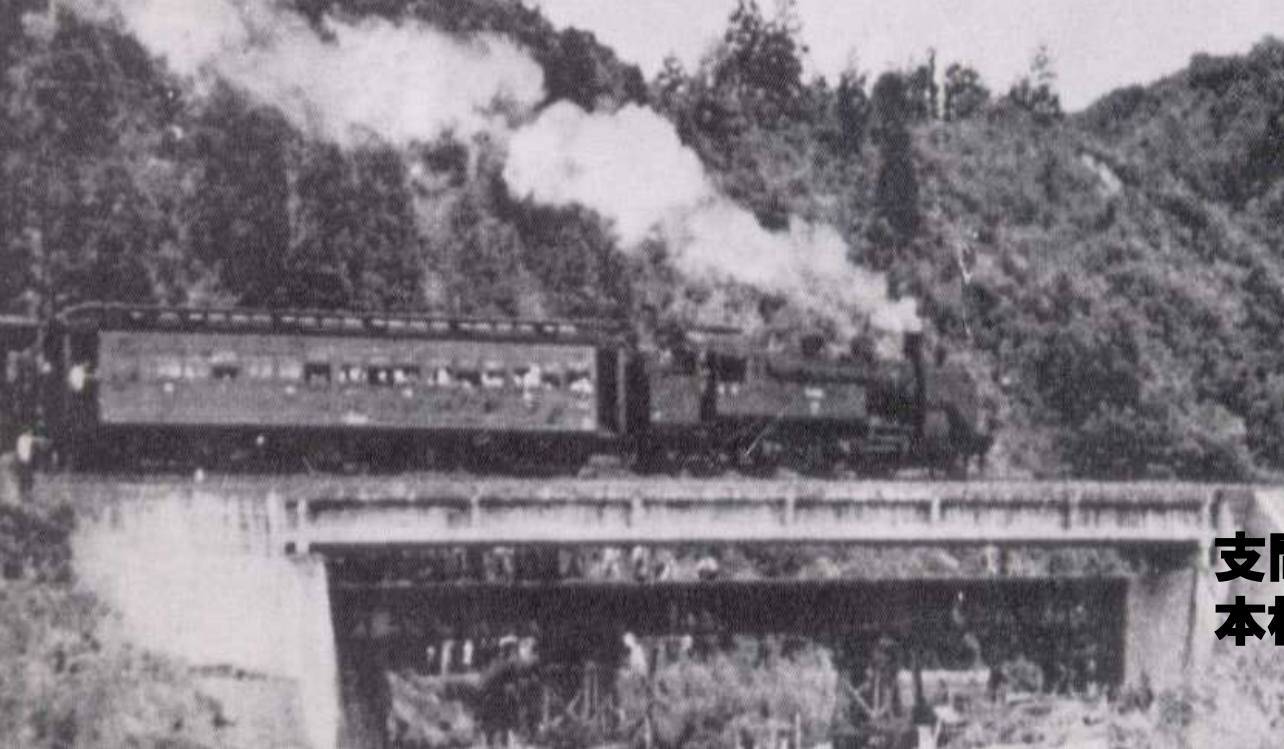
- **丈夫で、美しく、長持ち**



日／岡第11号橋

(1903)京都府・日本初の鉄筋コンクリート橋

設計者 田辺朔郎



支間30m

本格的ポストテンション橋梁

第一 大戸川橋 (1954) 滋賀県



インフラは今

二つの制約条件のもと

- ・ 地球温暖化

環境変動、緩和策(CO_2)と適応策(強靱化)

- ・ 人口減少社会

人手と予算

大きな目的を

- ・ 増大する高齢構造物を含めて、

⇒丈夫で美しく長持ちするインフラ、市民社会

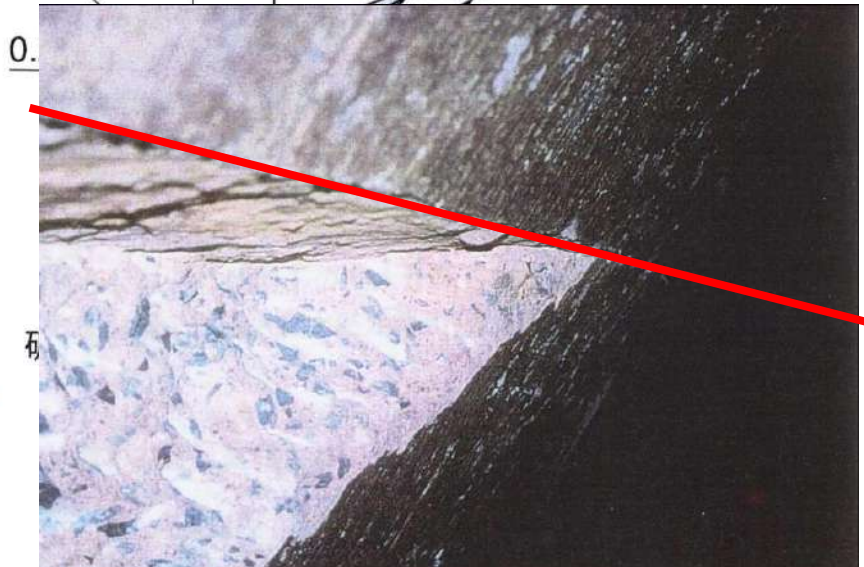
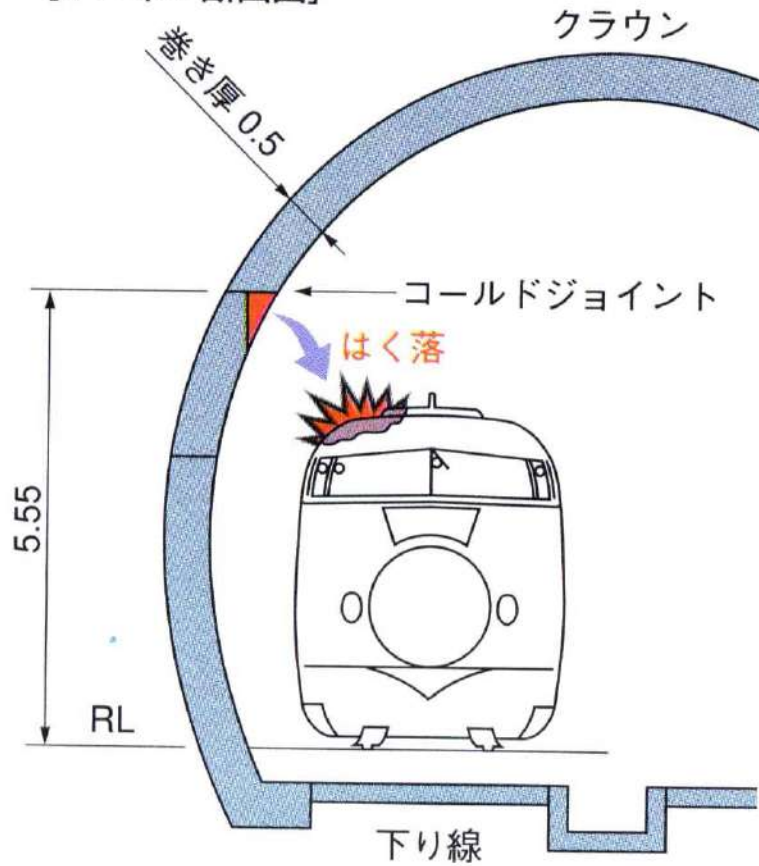
＝持続可能な未来

LCC & LCCO_2 を満足させるシナリオ

山陽新幹線福岡トンネル壁面コンクリート塊落下事故1999.6

●コンクリートはく落部分の概要

[トンネル断面図]





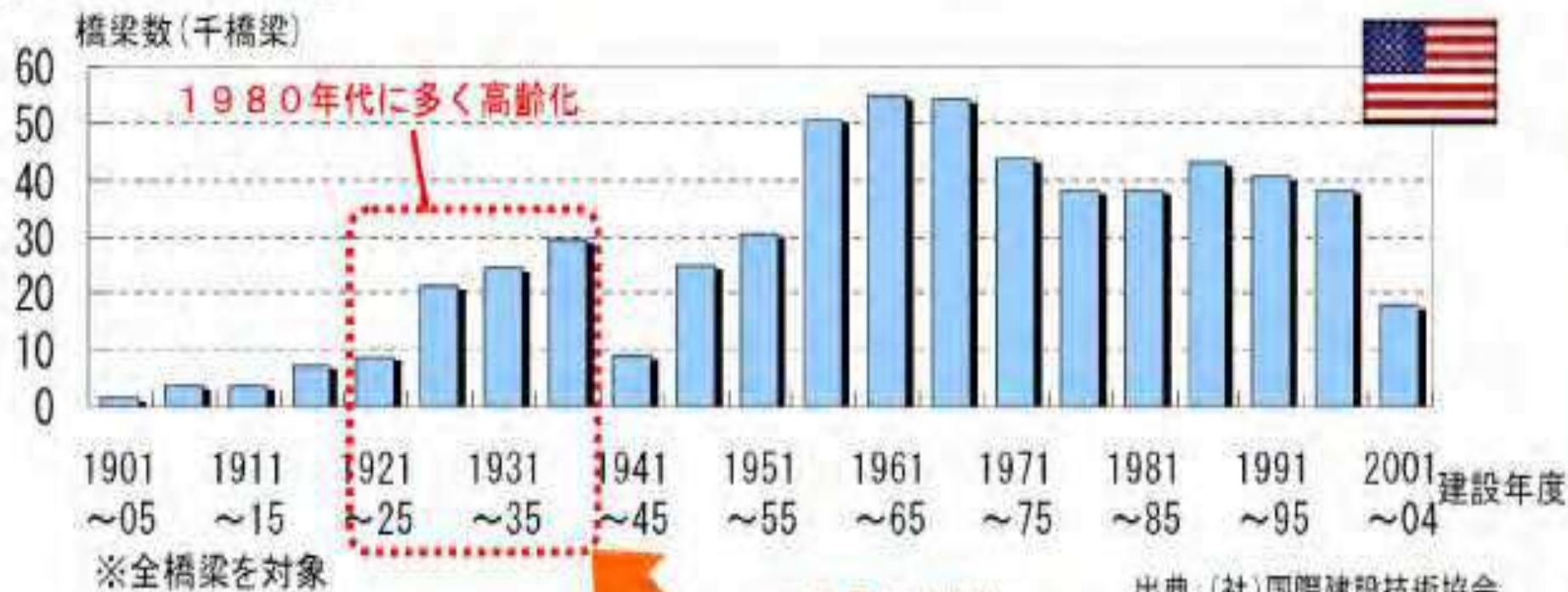
内的塩害(複合劣化)

床版下面コンクリートの剥落

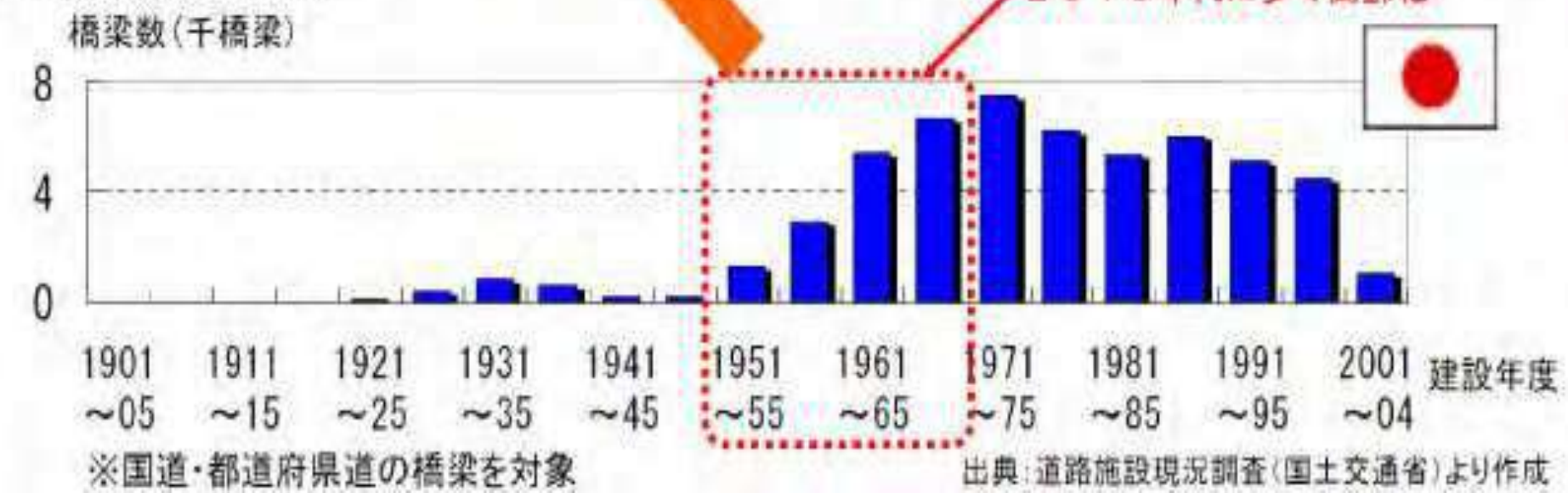


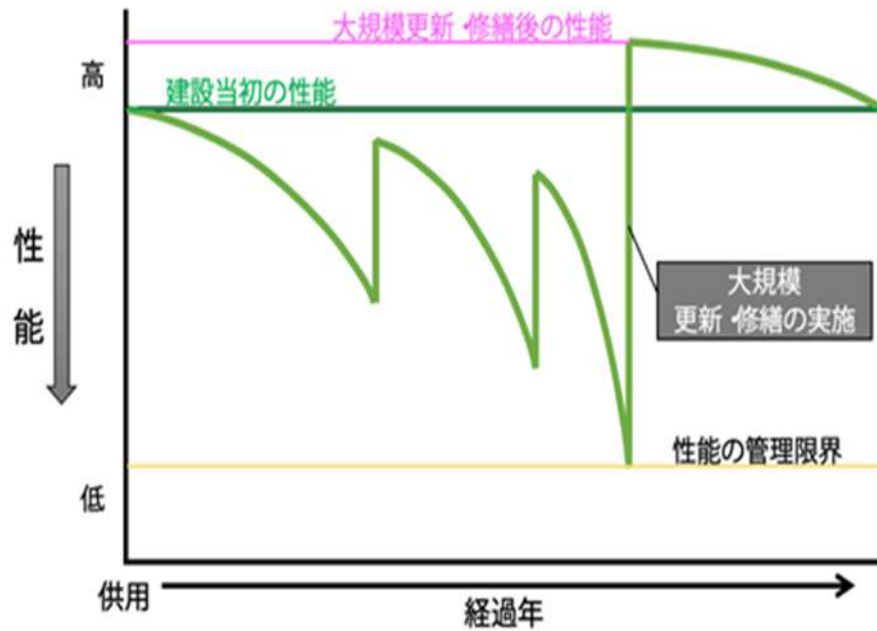
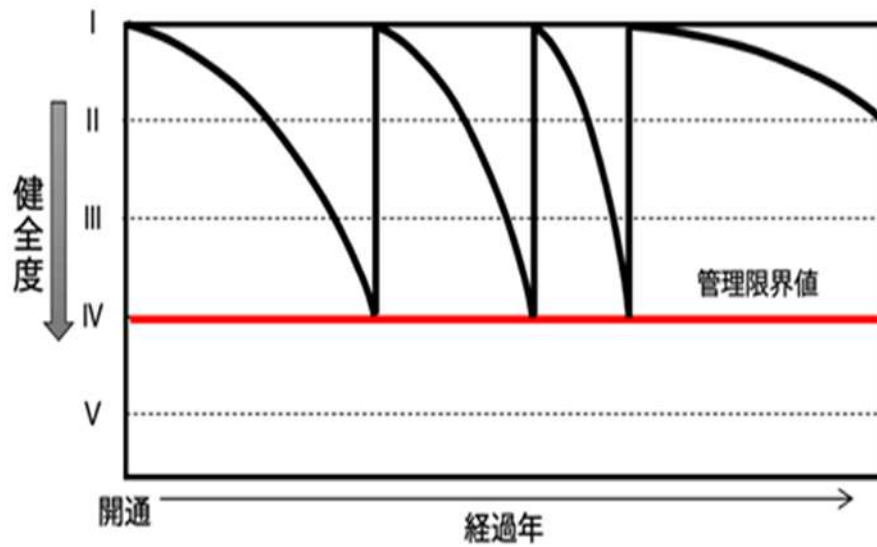
笹子トンネル天井板落下事故 2012.12

【米国の橋梁の建設年】



【日本の橋梁の建設年】





例：橋梁(鉄筋コンクリート床板等)

性能に関する新たな概念

ドイツの大規模更新例

- 1960–80年頃に建設されたアウトバーンのPC橋
水素脆化を起こしやすい熱処理鋼線使用
＋老朽化 & 重交通 ⇒ いつ落橋しても・・・
- 補修補強 ⇒ 爆破解体＋更新(5年以内)
- 全約40000橋のうち10％程度を更新
目標400橋/年(ただし、2022年は約100橋)
- 日本ではほとんど用いられていない
⇒ 地域・国によって事情は違う！
- 日本では補修・補強で対応可能

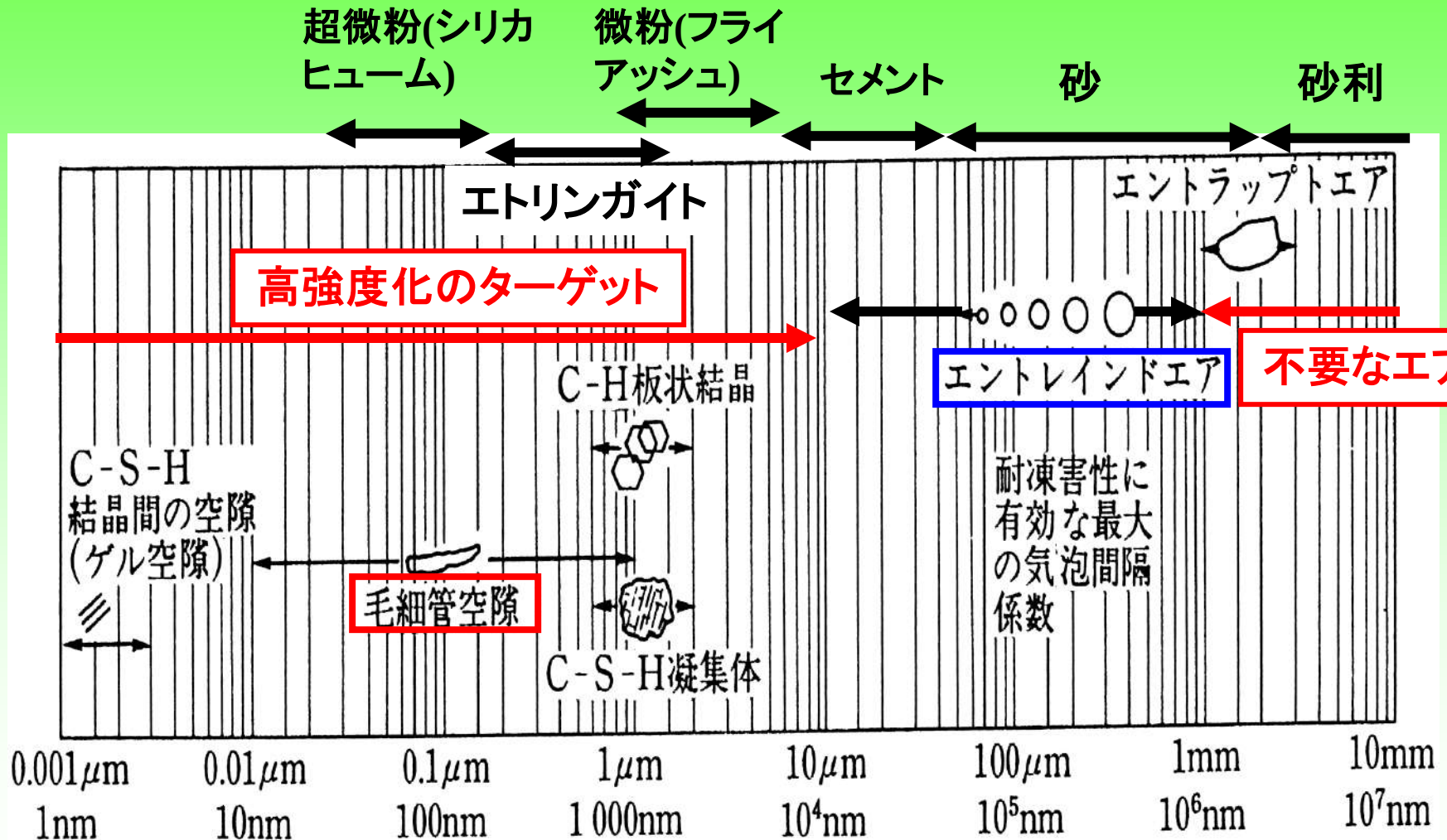
• 劣化⇒耐久性

: AIにはわからない！“意味”

材料～構造

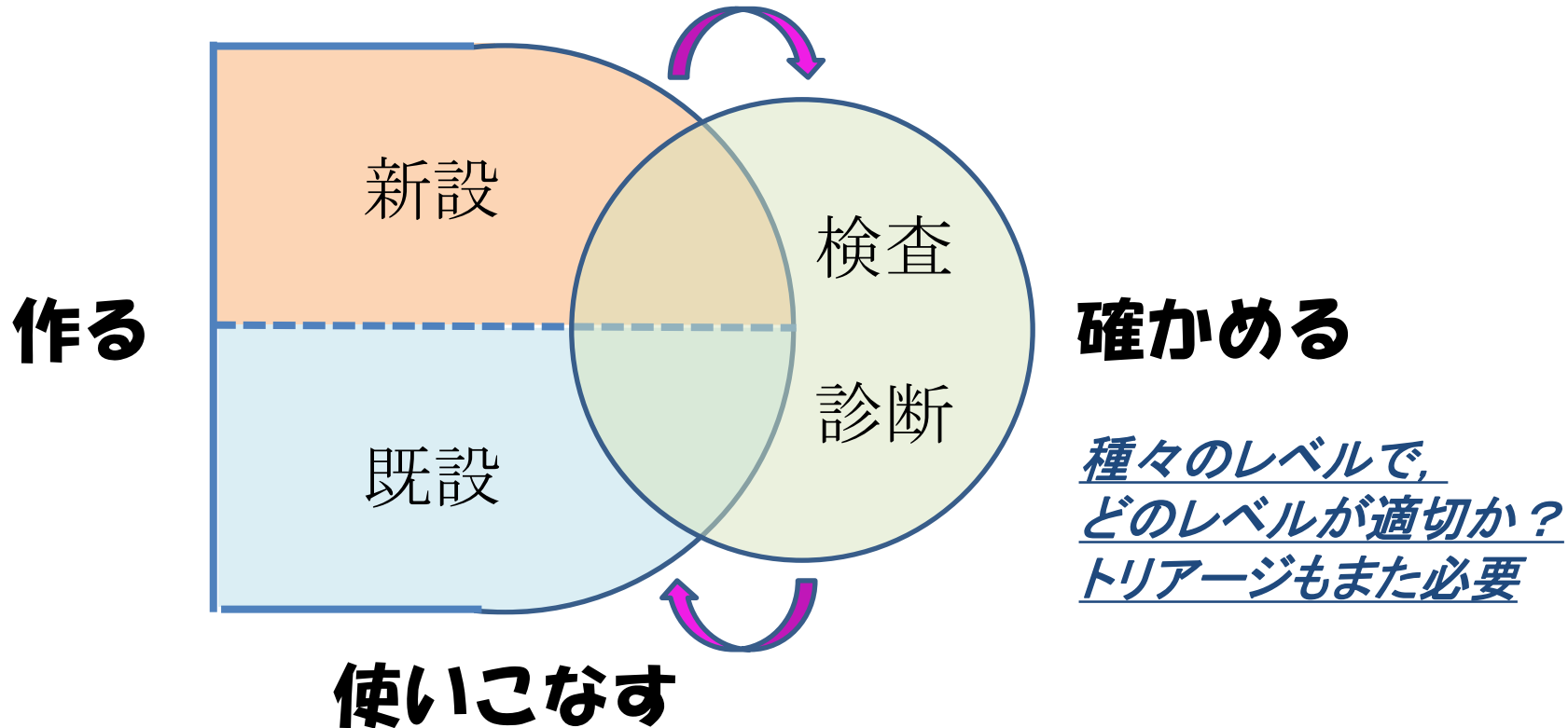
- 材料の性質の成り立ちと構造物への影響！
- 要素のつながり＝結合：強さ・変形の基本、耐久性、欠陥があると？
- 鉄鋼：金属結合、転位(降伏)、腐食
- 高分子：樹脂・ゴム・繊維⇒
共有結合(鎖構造)、ファン・デル・ワールス結合(ガラス転移温度)
- セメント：水和反応⇒イオン＋ファン・デル・ワールス結合
コンクリート：大小の隙間、拡散、施工(W/C、空気量)

コンクリート中の空隙(欠陥)～耐久性



技術の二本柱

造りこなす



時空間シナリオに基づいた維持管理
破棄から予防保全までを技術者が提案

東日本大震災における津波被害 2011.3



笹子トンネル天井板落下事故 2012.12 17

作用と保有性能

古い基準で設計

新幹線

ラーメン橋脚被災

新しい基準で設計

被災なし

東北本線



劣化（≡古い基準）と耐震・耐荷性能

地震で壊れるのではなく、地震をきっかけに劣化で壊れる！



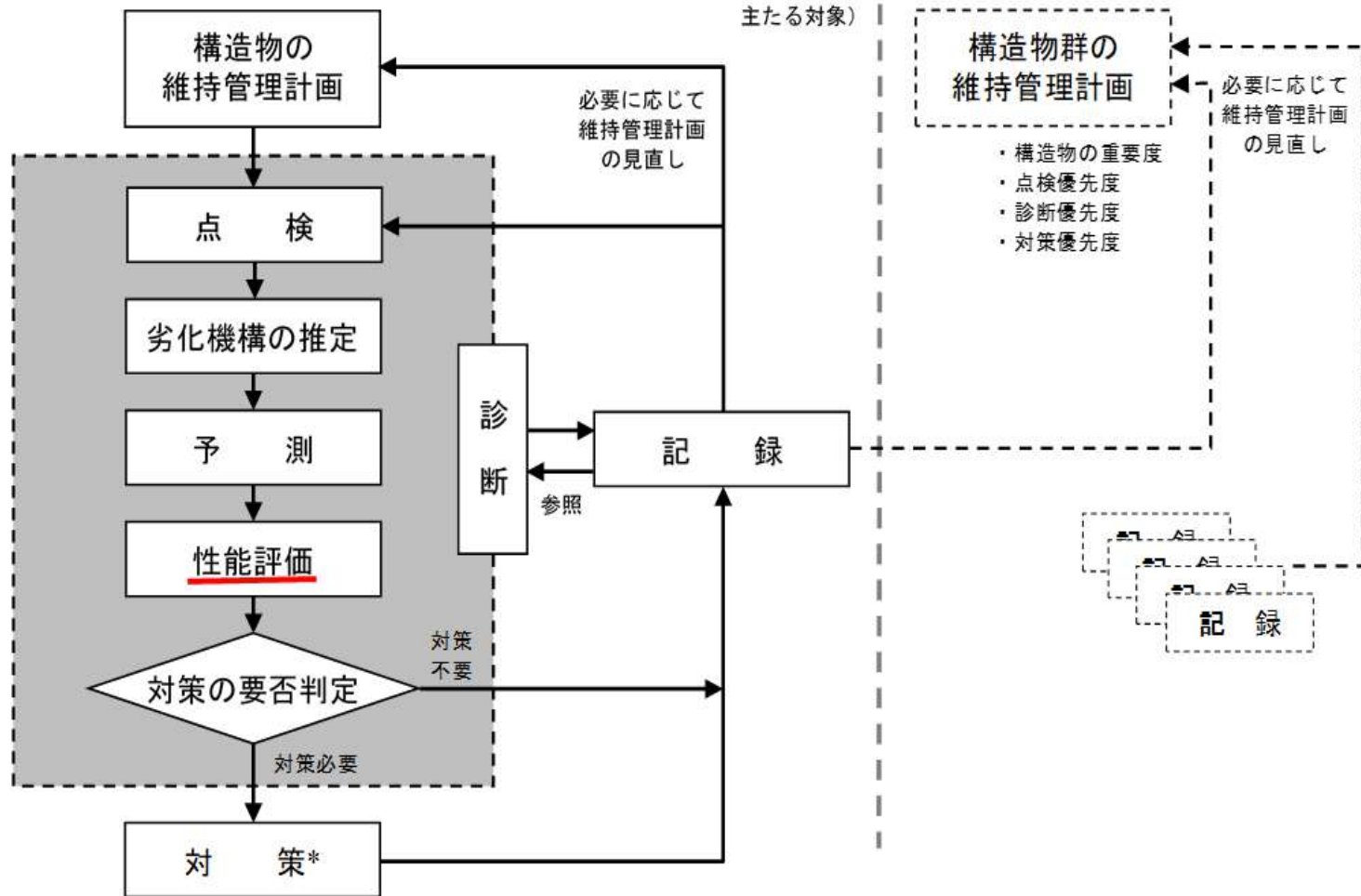
ピンポンなやがま

市民は何が欲しいのか？



2001土木学会[維持管理編]

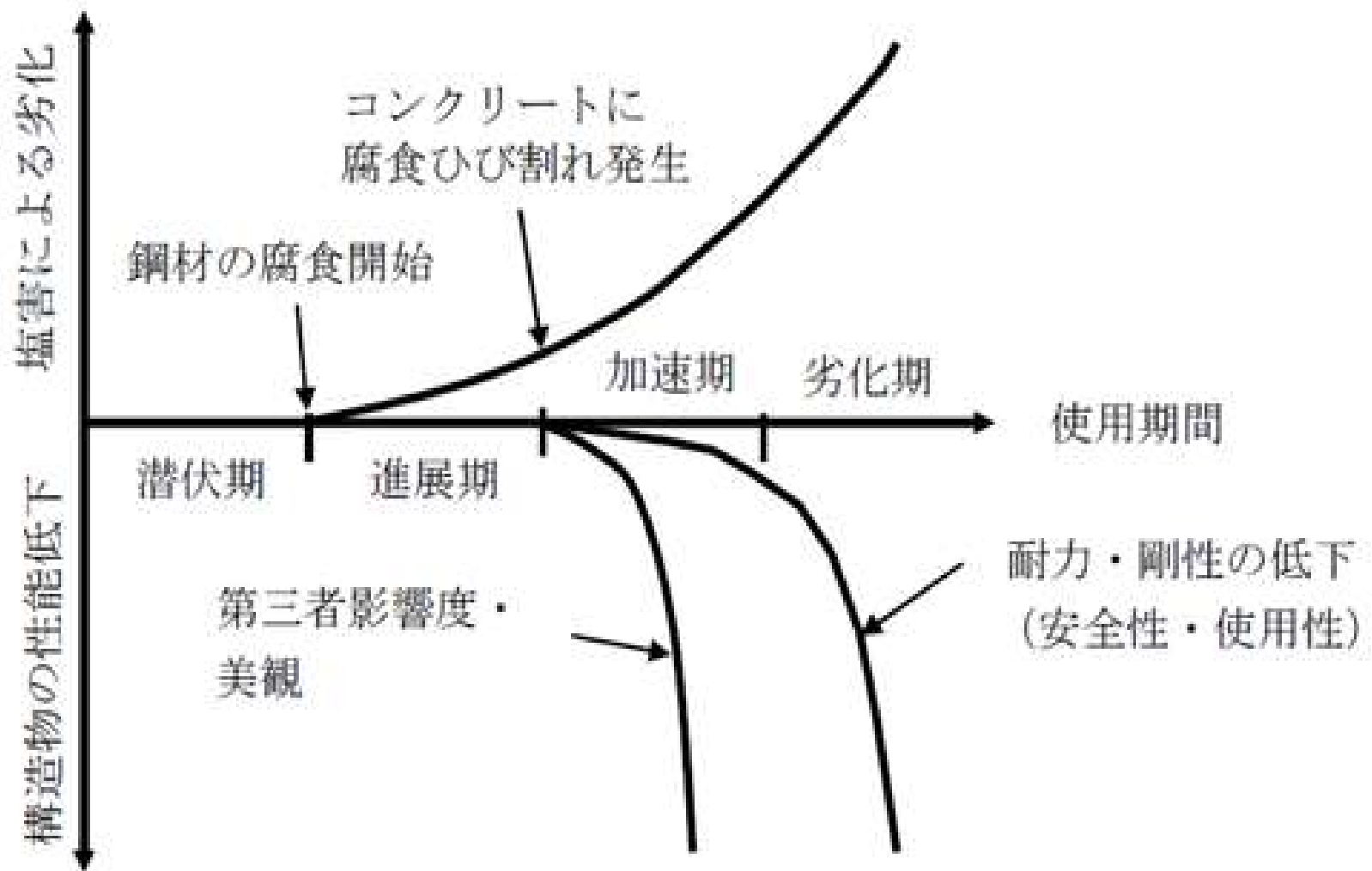
- ・ 性能開示+性能照査 = 性能規定型
- ・ 劣化機構に基づく、今は？(劣化度(期))と
これからは？(平衡論+速度論)
- ・ 設計規格≠維持管理規格
- ・ ライフサイクルを単なる計算結果ではなく技術者の思想に基づいて描く(シナリオデザイン)
⇒ LCC & $LCCO_2$
- ・ 「花の建設、涙の維持管理」⇒維持管理を日の当たる場所に + マーケットの成立



*) 対策として解体・撤去が選択された場合には、記録を行った後に終了する。

維持管理の流れ

- **塩害**



塩害による劣化進行過程の概念図の一例

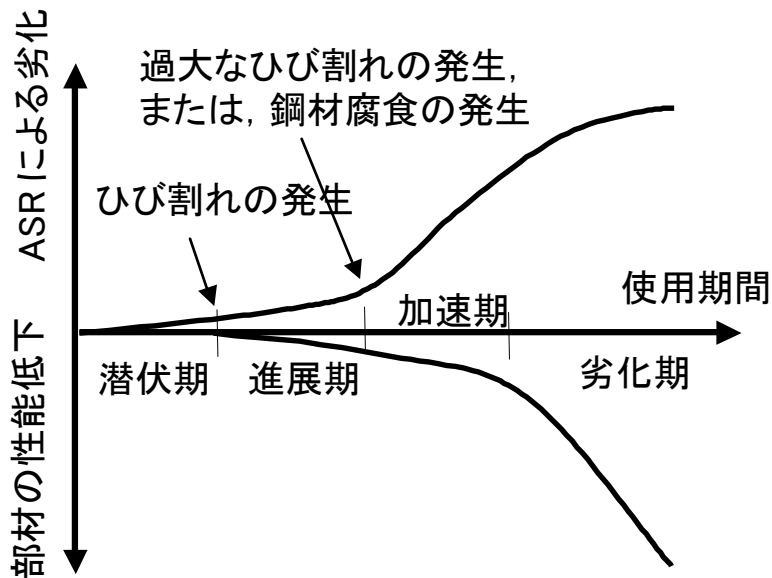
内的塩害(複合劣化)



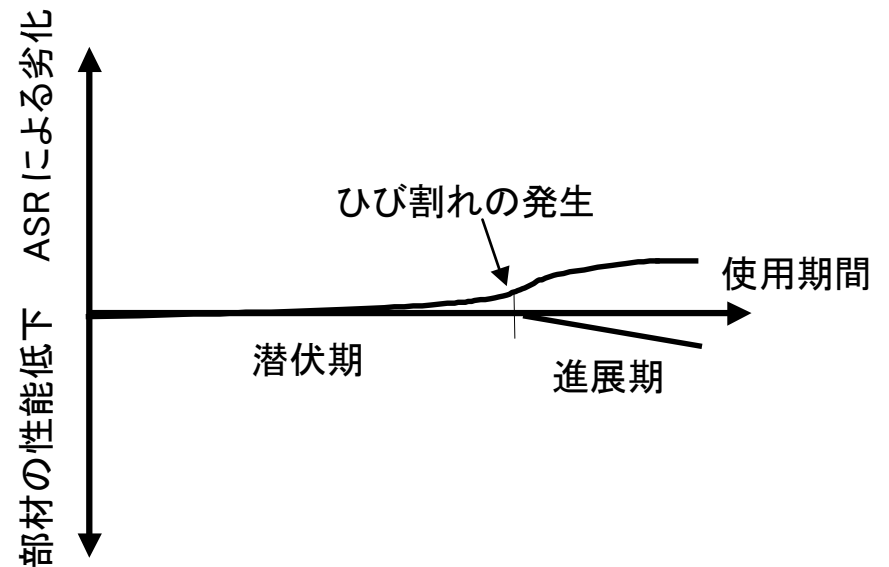
外的塩害



- **アルカリシリカ反応**



(a) コンクリートが有する膨張性が大きい場合



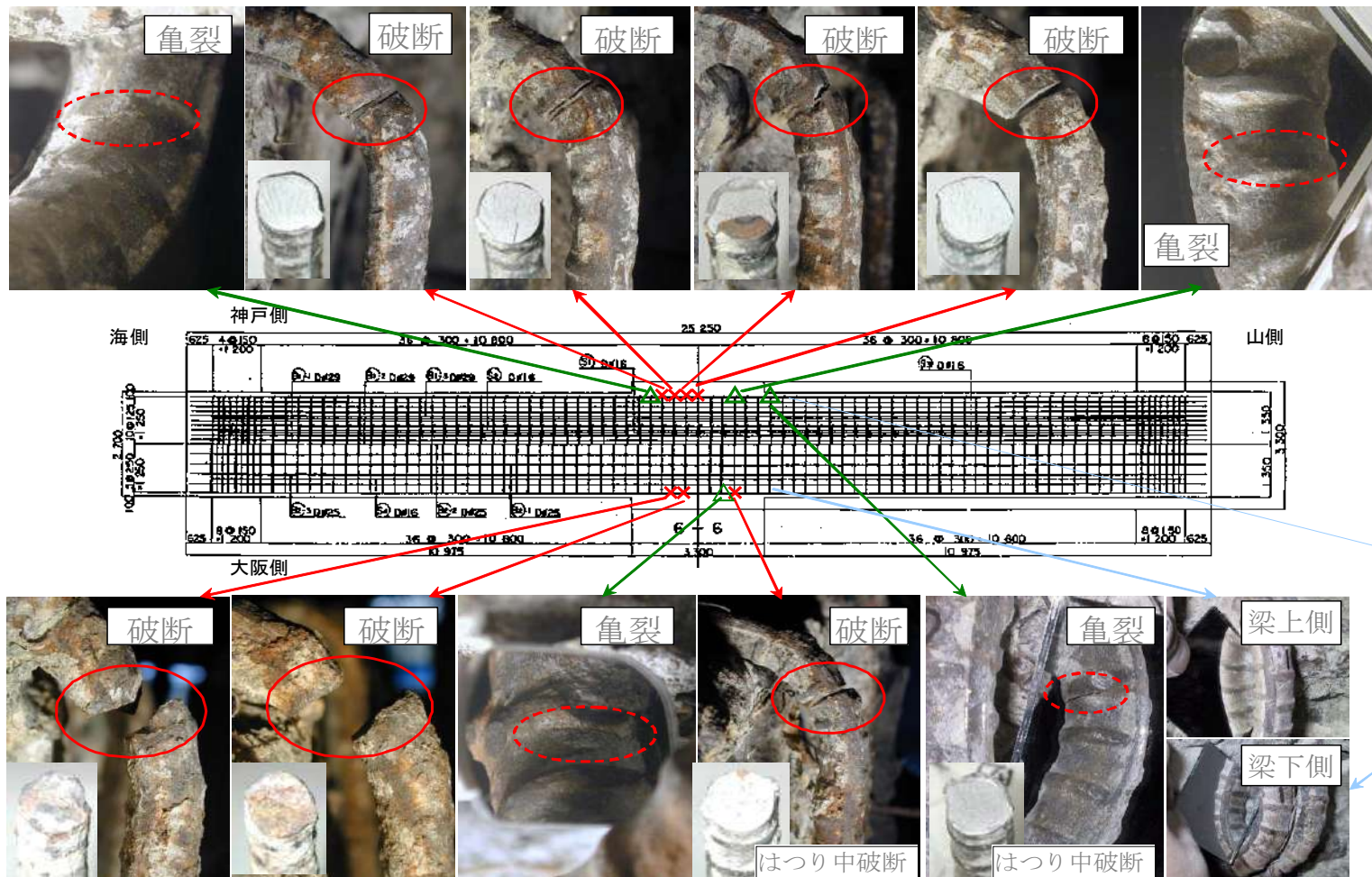
(b) コンクリートが有する膨張性が小さい場合

ASRによる劣化進行過程の概念図の一例

A close-up photograph of a concrete bridge pier. A prominent, jagged horizontal crack runs across the middle of the frame, indicating structural damage. The concrete surface is weathered and shows signs of aging.

**阪神高速道路T型橋脚梁部
ひび割れ**

(阪神高速道路)



鉄筋破断の事例 (橋脚梁部)



カナダ ASRダムのPS補強



日本



ブラジル



スペイン

ASRによる鉄筋破断の例

P2橋脚

P2橋脚 (P1橋脚側)

打撃

Z
-2.5
0

P2橋脚 (P3橋脚側)

センサ

Y
1.8
0

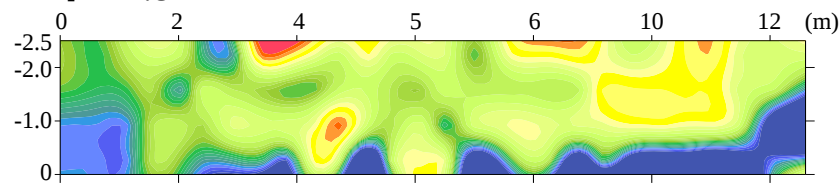
X

12.6

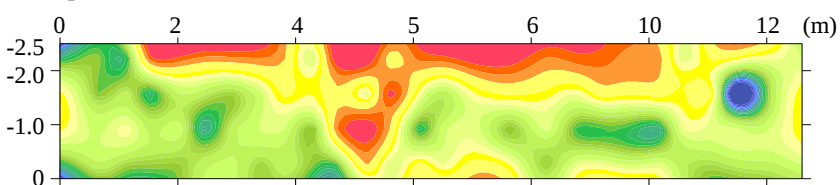
打撃(ハンマサイズφ100)

水平断面図

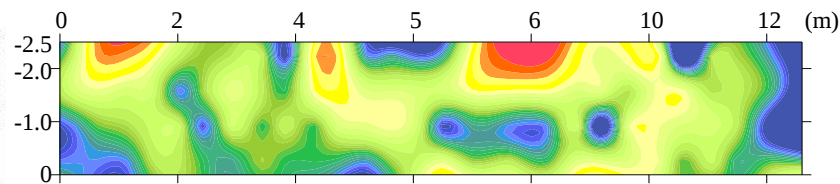
Y 1.8



Y 0.9



Y 0



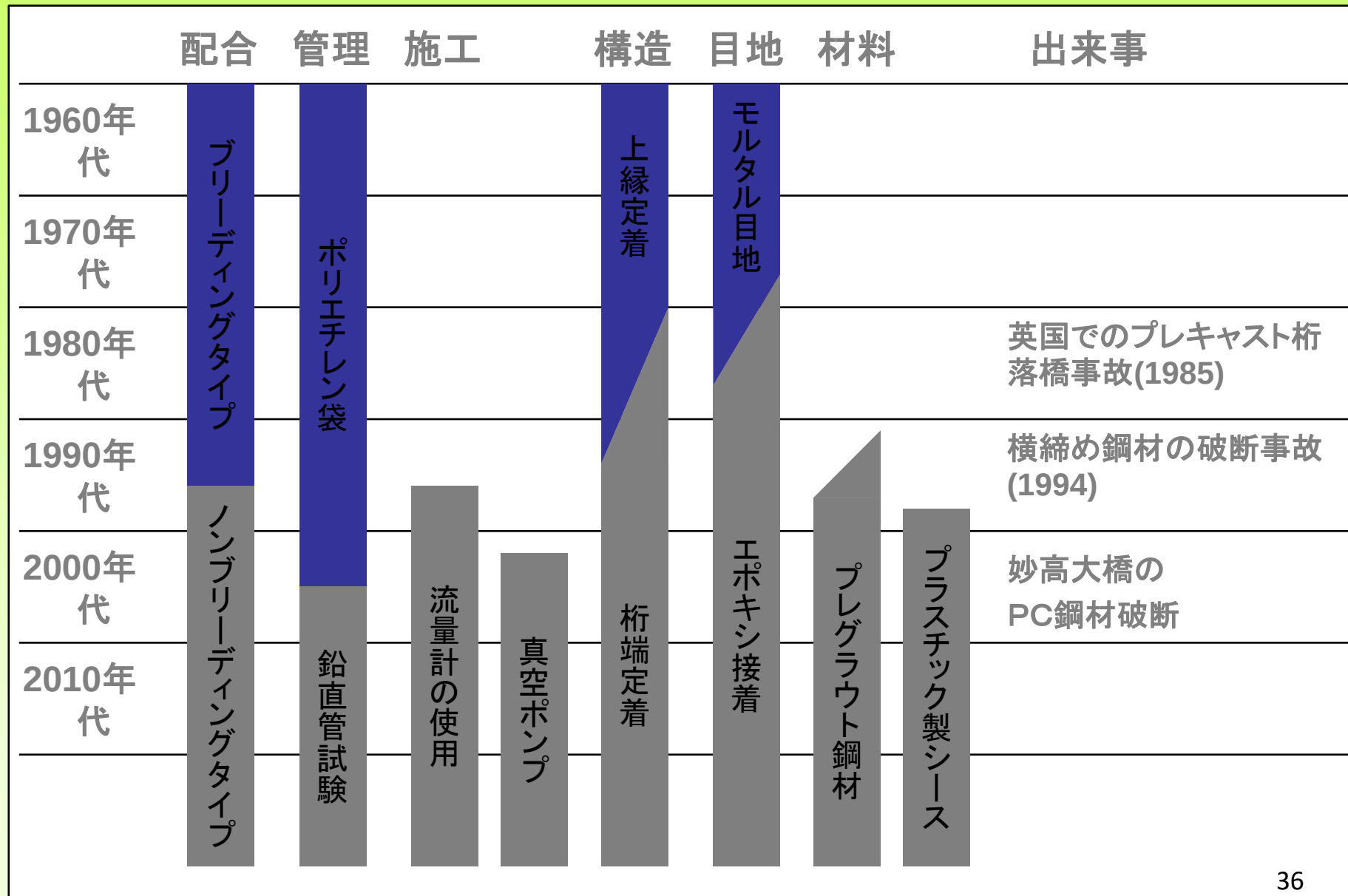
- 全体的に低い速度構造となる
- 大きなき裂が見られているところで特に低い速度構造が見られる
- 中央部 (x:4-5 m, y:0.9 m, z:0.5—2) に特徴的な低速度領域が見られる

- **グラウト問題**

PC橋のPC鋼材破断が懸念

イギリスでの落橋(1985年)

グラウト技術の変遷





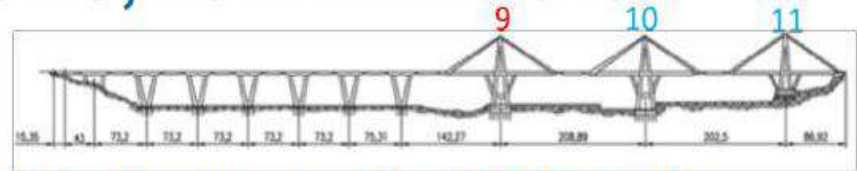
落橋前



落橋後 (2018)

Polcevera (Morandi) viaduct (1964)

SERVICE LIFE: INSPECTIONS, 2011 AND 2013



Frame 9 and 10:

2016 Report of the Italian Ministry of Infrastructure regarding inspections and tests performed in 2011 and 2013

(Journal Espresso, 13 September 2018; espresso.repubblica.it)

Stays:

- Inspected ducts and wires corroded
- Loss of pretension in the wires
- No injection in the inspected ducts

Girder:

- Inspected ducts and wires corroded
- Loss of pretension in the wires
- No injection in the inspected ducts
- Some wires broken



Stay of Frame 9



Girder

General:

Increase of deterioration with respect to 2003 and 2008 inspections

緊張材の防食

西湘バイパス 滄浪橋(神奈川県)

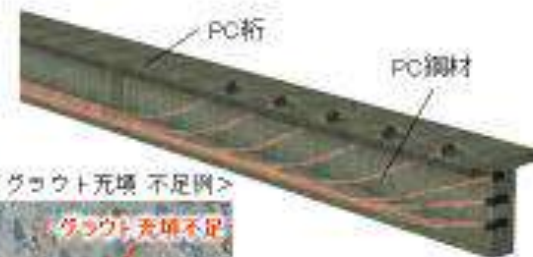
【国府津IC～橋IC間下り線、橋長5,685m、S46(1971)年開通、50年経過】



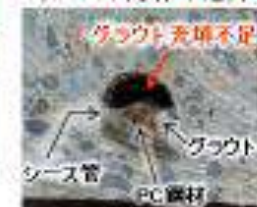
損傷状況



飛来塩分の浸透による
コンクリートの剥離



＜グラウト充填 不足例＞



これまでの点検・補修状況

防水塗装や電気防食などの補修を繰返し実施

- H3(1991)年 部分的補修*(1回目)、防水塗装
- H20(2008)年 部分的補修(2回目)、電気防食
- H27(2015)年 近接目視において補修箇所の再劣化を確認、部分的補修(3回目)

* コンクリートが剥離した箇所を補修するもの



補修済箇所の劣化進行
(H20年補修箇所がH27年に再劣化)



PC鋼材の著しい腐食

西湘バイパス滄浪橋の劣化

・時空間シナリオデザイン

軍艦島



長崎市の特別な許可を得て掲載

塩害



長崎市の特別な許可を得て掲載

定期点検や更新事業の実施等により得られた新たな知見

長期保全メニュー	定期点検や更新事業の実施等により得られた新たな知見	劣化写真
中空床版等の路面陥没等への対応	➤ 橋梁舗装補修の影響により、床版上面にひび割れが発生。交通荷重の影響により、ひび割れから床版の陥没に進展。また、ひび割れから水が床版内に浸透し、滞水することで床版下面まで損傷。	
PC鋼材の腐食及びグラウト充填不足への対応	➤ 海岸からの水分・飛来塩分がコンクリート内に浸透しており、特にグラウトの充填不足の範囲ではグラウトによる防食効果が無いため、桁やPC鋼材が著しく劣化。 ➤ 防水塗装、電気防食などの補修を繰返し実施しているが、架橋から約50年が経過し、これまでの補修方法では劣化が抑制できず、剥離、PC鋼材の著しい腐食が発生。	
舗装路盤部の疲労破壊への対応	➤ 交通荷重の繰返しにより、上層路盤下面からひび割れが発生し表層まで貫通。 ➤ 舗装表面からの水が下層路盤まで浸透した結果、下層路盤の強度が低下し、舗装構成全体にたわみを伴う変形が発生。路盤の変形が戻らないため、表層・基層を補修しても短期間で新たなひび割れが発生。	
地すべり対策をしても変状が収まらない切土のり面への対応	➤ 大規模な断層や地山の亀裂に雨水が浸透することにより、切土のり面のすべり面の風化が進行し、地山の地すべりが長期的に進行。 ➤ これまでグラウンドアンカー等による補強を繰り返しているが、のり面全体の変状が止まらない状況。	
火山堆積物地質における路面陥没への対応	➤ 盛土に浸透した降雨等により、空隙を有する火山堆積地層である原地盤へ、盛土内の細粒分が流出し、路面陥没や沈下が繰返し発生。 ➤ 空洞の充填、遮水シート等の設置、排水溝の漏水防止対策などの補強、補修を繰返し実施しているが、建設から約35年が経過し、これまでの補修方法では発生を抑止することが困難。	

■ 建設業界をとりまく環境 ■ つまり・・・

- インフラストックの増大（数的に、高齢化、大規模化、複雑・複合化）
- ベテラン技術者の高齢化・引退と若年・初級技術者の（早期）技量引上げ
- 維持管理業務の質的・量的な増大と高度化、業務遂行のスピードupの社会的要請

■ ソフト「橋の匠」のターゲット ■

○ 若年・初級（経験少ない）技術者向け

- 維持管理業務の支援用に
 - 維持管理の各種シミュレーション用に
 - 維持管理の自己啓発用に
- 「Digital 参考書」を提供しましょう！

× 終了

橋の匠

最適延命化方策選定システム

Selection System for Bridge Life Saving Method

最適調査方法
選定プログラム

最適補強方法
選定プログラム





一般社団法人

橋梁延命化シナリオ研究会

<https://bridge-scenario.or.jp/>

・今、何が？

2050・カーボンニュートラル

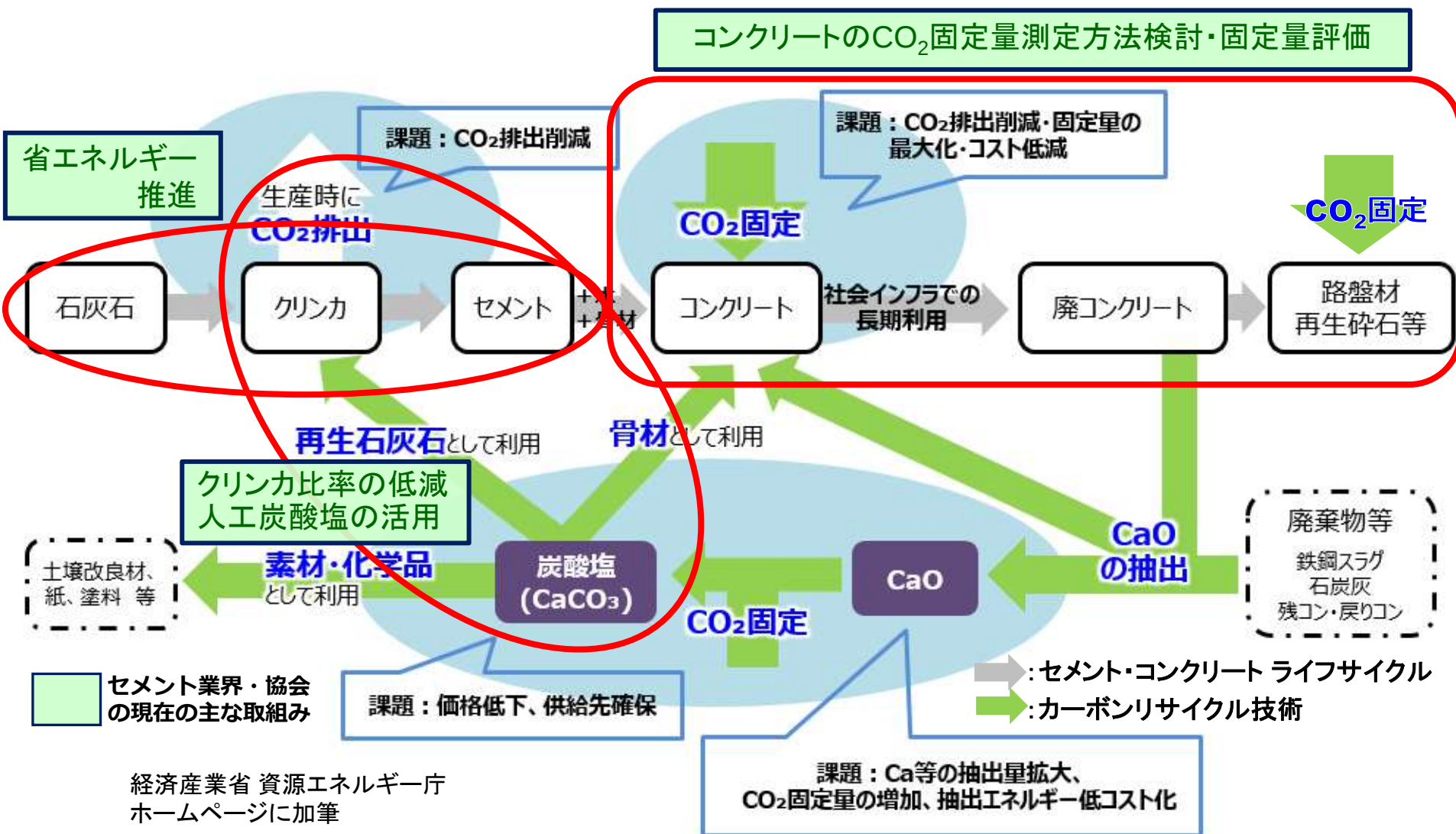
- ・ 環境対策ではなく、産業・社会構造の変革。
 - ・ エネルギー消費を減らし、エネルギー当たりのCO₂排出原単位を小さくすること。⇒働き方改革&賢すぎるAI
 - ・ コンクリート:混和材の利用、CCU材料の利用、コンクリート中へのCO₂吸収+ α (工期など)
- 注)CCU=Carbon capture and utilization
- ・ 全体システムとして最も有効な対策は⇒丈夫で美しく長持ち！
 - ・ + 急激に増大するEVへの無線給電⇒道路発電

⇒ 三つのポイント!

コンクリートに要求されるもの

- **SGD' S・脱炭素化:CO₂排出量の削減、CO₂吸収・固定量の向上、評価方法の確立とルール化、適切な価値体系の創出**
- **自己治癒型材料、補修補強材料、自己診断型材料、ロボット施工用材料、3Dプリント用材料、フレキャスト製品用材料**
 - **フレキャスト製品は、地方整備局単位で具体的な検討**
- **測量、緊張管理、鉄筋の結束や溶接、コンクリートの表面仕上げや吹付、資材搬送、清掃などの自動化・ロボット化**
- **人工知能(AI)の利用:意味は分からない!**
 - **結果を評価し判断する人間以上の成果は出せない**

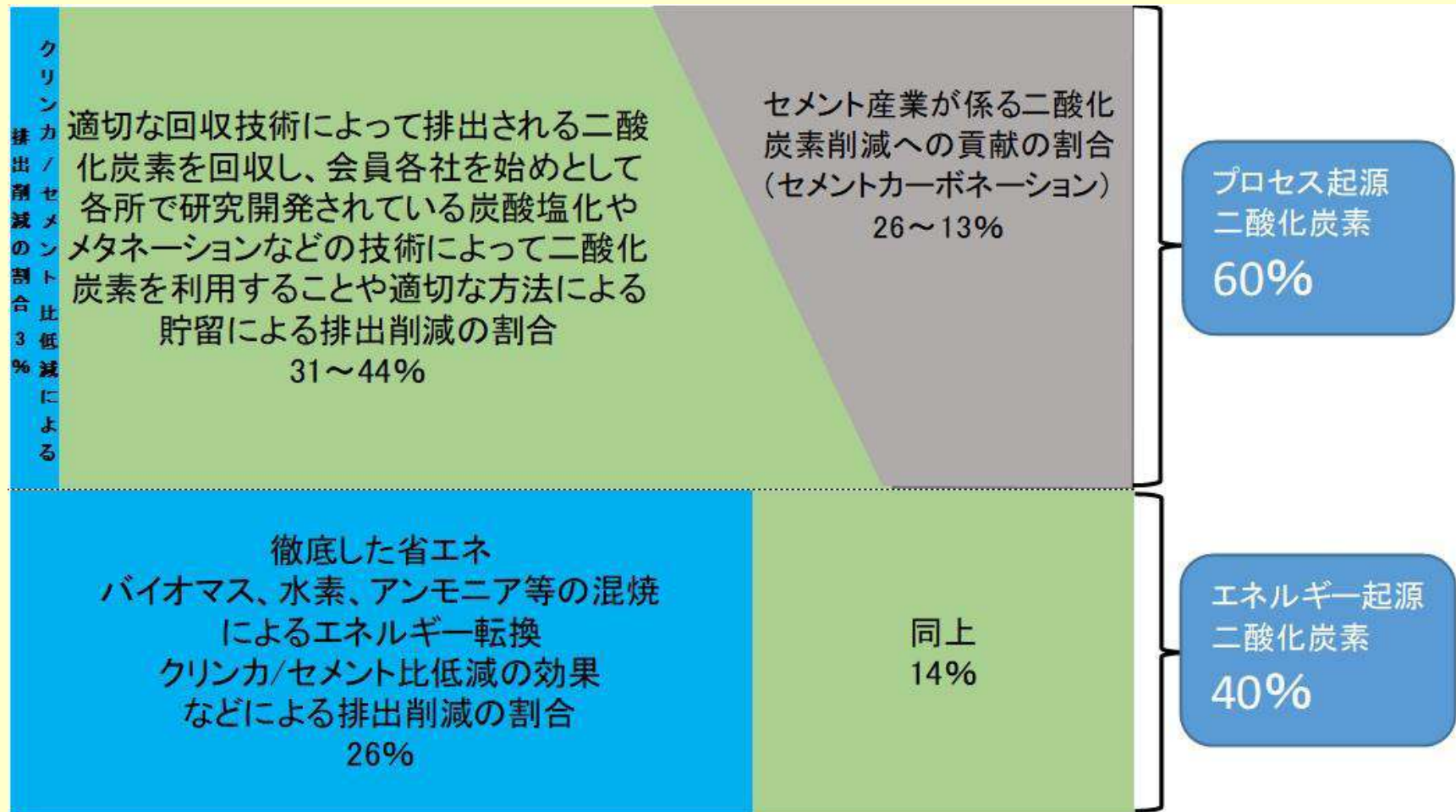
セメント・コンクリートのライフサイクルとカーボンリサイクル



2050年カーボンニュートラル実現のカギを握る「カーボンリサイクル」技術

セメント産業の2050年カーボンニュートラルの絵姿

5.2 セメント産業の2050年カーボンニュートラルの絵姿



- セメント産業からの排出削減の割合
- 二酸化炭素の回収・貯留・利用によるセメント産業からの排出削減の割合
- セメント産業に係る二酸化炭素削減への貢献の割合（強制的に吸収させる二酸化炭素は除く）

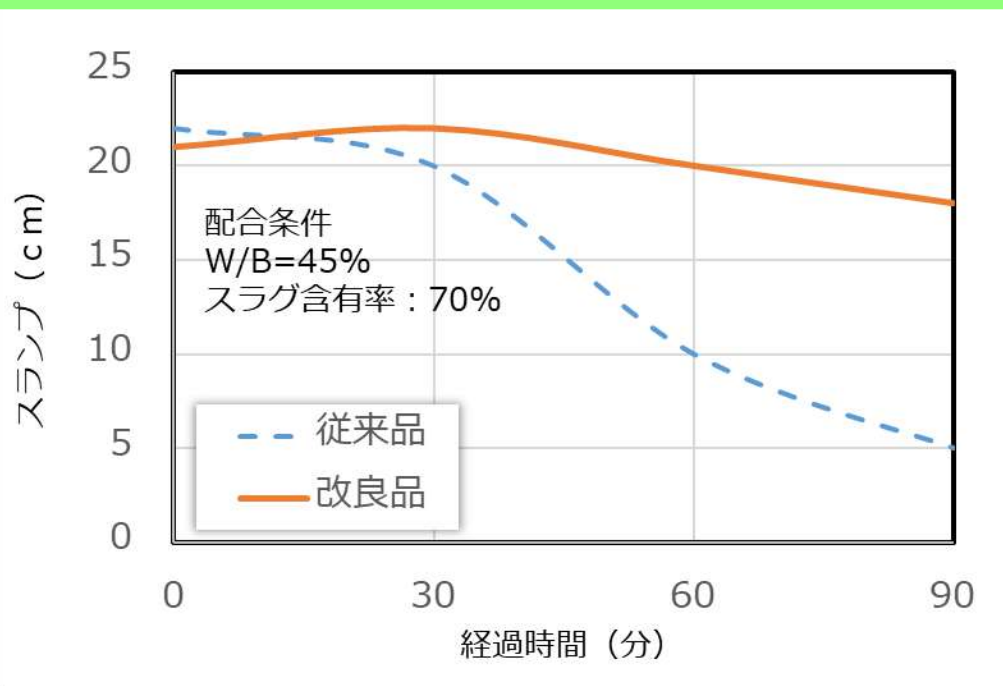
セコンクリート用化学混和材の対応の例

□ 低炭素型混和剤について

- 現在、低炭素型混和剤の規定がない背景で、混和剤メーカー各社は、コンクリート業界の関係会社と連携して、低炭素型混和剤の開発を行っている
- 二酸化炭素排出量の削減や環境負荷低減を目的として高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を高含有するコンクリートでは、混和剤の使用量が減少して短時間でスランプが低下する問題を抱えている
- JIS A 6204の高性能AE減水剤やAE減水剤の規格に適合した低炭素型コンクリート用の化学混和剤が開発されている
- 高炉スラグ微粉末を70%以上置換しても良好な経時安定性を確保し、また、凝結時間や強度発現性も従来の高性能AE減水剤と同等の性能が得られる

セコンクリート用化学混和材の対応の例

□ 低炭素型混和剤のスランプ保持性の概念図



スラグ置換70%の条件で、改良品である低炭素型の混和剤を用いることで、従来品で問題となっていたスランプロスを解消

1. ニューノーマル：コロナ以降の世界

- ・ **非接触・非対面で社会活動を進めるため、様々な分野でデジタル技術。デジタルトランスフォーメーション(DX)が市民社会に浸透し始めた。⇒サイバー空間での作業増大**
- ・ **新型コロナ対策ではなく本来進む方向にコロナが加速(DXによって、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステム⇒Society 5.0)。**
- ・ **点検にドローンやロボットをはじめとする器具、結果をAIで解釈しARなどで確認し、診断に。**
- ・ **そのためには、技術者が現場で技能を磨くことは必須。**

⇒今こそ本来の人間の知恵の出番！

2. 知のネットワーク化

- ・ 離散したデータから連携したデータに
- ・ 時間軸の必要性⇒時空間挙動の把握
- ・ データとシミュレーションを使って予測することによって事前に対策を設定できる。
- ・ 技術者として“どうなるかではなく、どうすべきか”
- ・ シナリオ提案！
- ・ 狩猟・農耕・工業・情報・データ駆動型(Society 5.0)
- ・ 実行できる技術者の必要性。

⇒ 本当の技術者の重要性！

3. サイバーとフィジカル

- ・サイバーインフラモデル、デジタルツイン
- ・「国土交通データプラットフォーム」 BIM/CIM と3次元点群データの表示・検索・ダウンロード
- ・先進的な計測・点検・シミュレーション技術 + 人間センサ (スマホ)⇒ サイバーモデルさらにはメタバース
- ・教育にも
- ・しかし、AIには「意味」が分からない！
- ・現場(フィジカル)に裏打ちされたサイバー⇒ 足が地面についた仮想空間を…

⇒新たなメンテナンス・シナリオを！

補修・補強の結論めいたもの

- 従来の延長線上にあり定食である新設に対し、今市民が欲しがっている一品（逸品）料理！
身近な簡単なテーマから思いっきり腕をふるえる困難なテーマまで。新しさと古さを両立させる世界。
＝面白くて役に立ち、技術者冥利に尽きる。
- 推進するためには、フィジカルなサイバーを！
足が地面についた仮想空間を...
- 三つの不足はあるものの、大ベテランなどが若手の足を引っ張りさえしなければ大丈夫！



9784909523037



1923051025008

ISBN978-4-909523-03-7

C3051 ¥2500E

定価2,500円

(本体2,273円+税10%)

橋梁通信社

コンクリート構造 の維持管理 ・耐久性の歴史

コンクリート橋

丈夫で美しく長持ち

宮川 豊章

橋梁通信社

コンクリート橋

丈夫で美しく長持ち

宮川 豊章

橋梁通信社

CM



補修・補強で持続可能に...

シナリオデザイン