

地球温暖化時代のコンクリート技術

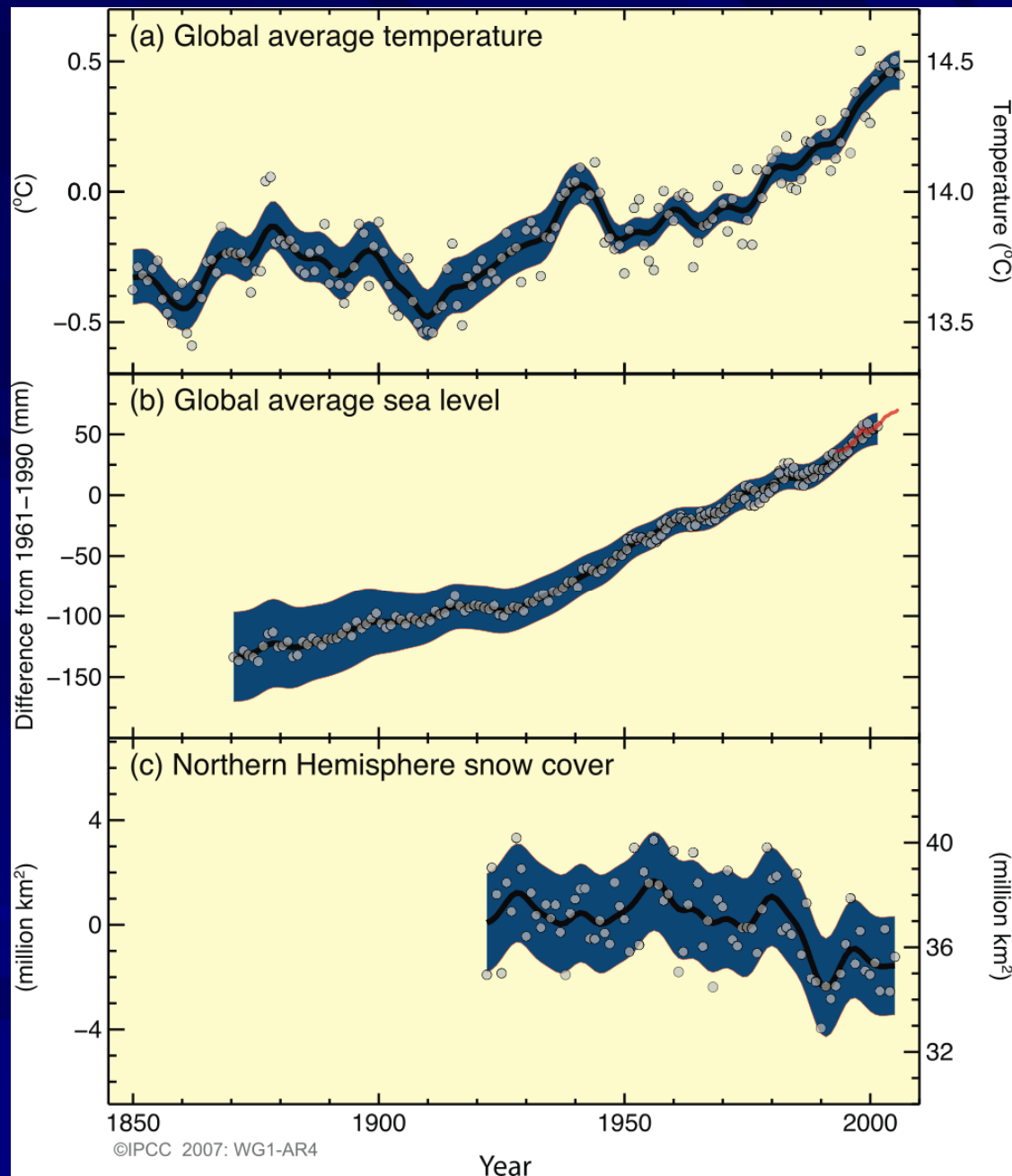
— 荒廃する日本とならないために —

岡山大学大学院環境学研究科・教授

阪 田 憲 次

1、地球温暖化 (IPCC統合報告書)

- **地球温暖化**は、確実に進行している。
1906～2005年における気温上昇は 0.74°C
- **海面水位の上昇**は温暖化と整合性がある。
1961年以降、 1.8 mm/年 , 1993 年以降、 3.14 mm/年 の速度で上昇している。
- **雪氷面積**が縮小している。
北極の年平均海氷面積は、1978年以来、10年当たり 2.7% 縮小した。



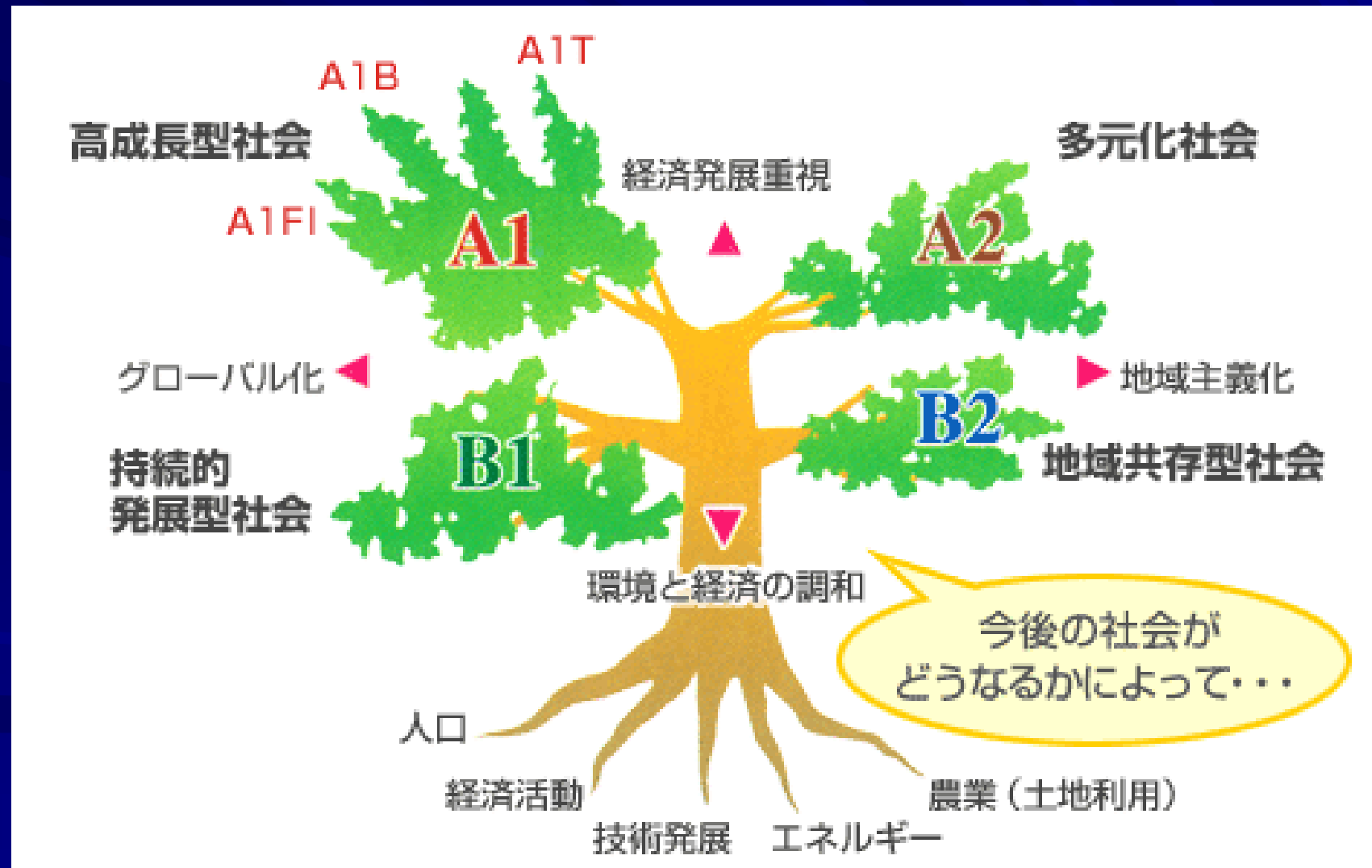
平均気温の変化

平均海面水位の変化

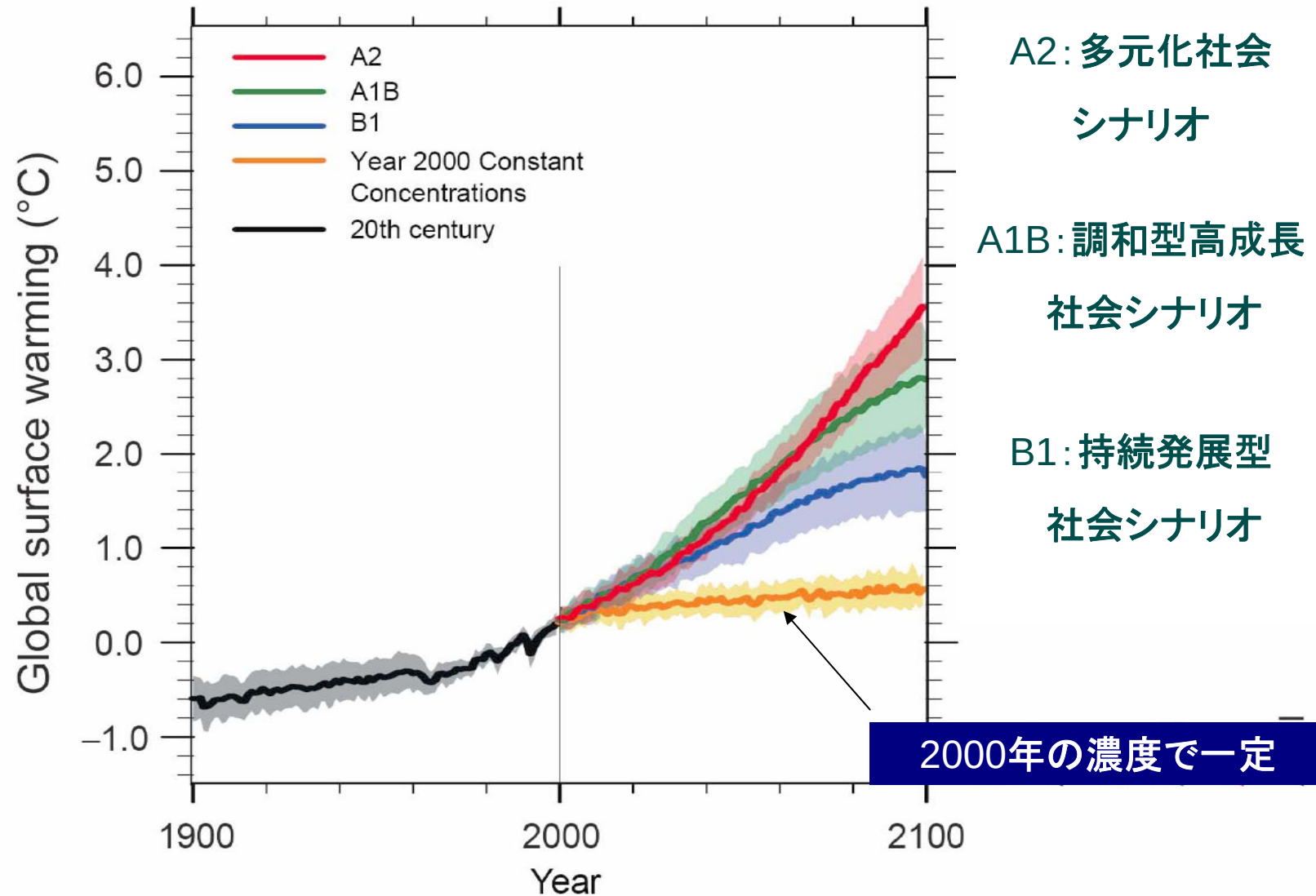
北半球の積雪面積

1961-1990の間の平均値からの隔たり (IPCC Synthetic Report より)

SRES 排出シナリオ ((独)環境再生保全機構ホームページより)



地表平均気温の上昇幅 (IPCC Synthesis Report より)



2000～2100年までの温室ガス排出シナリオ

■ A2: 多元化社会シナリオ

地域の独自性が強く、人口は急増、経済成長や技術の進歩は遅い。環境への関心は低い。(3.4 °C)

■ A1B: 調和型高成長社会シナリオ

高い経済成長と技術開発が進む。すべてのエネルギー源のバランスを重視する。(2.8 °C)

■ B1: 持続発展型社会シナリオ

物質志向は減少し、クリーンな省資源の技術が導入され、経済発展も続く。(1.8 °C)

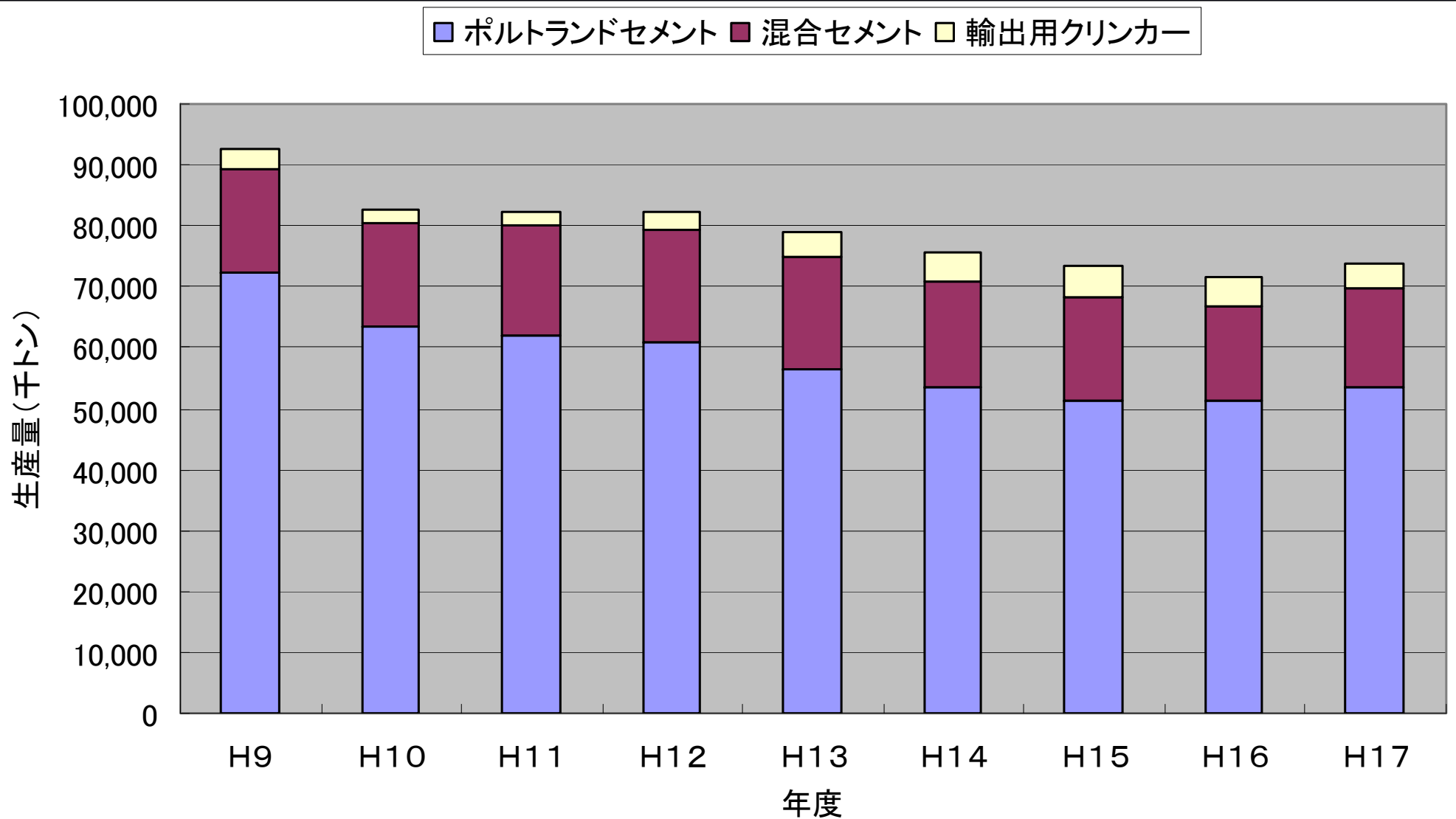
将来展望：緩和と適応

- 予想される気候変化による悪影響は、**緩和**により減少遅延、回避することができるが、**今後20～30年間の緩和努力**とそれに向けた投資が重要である。
- **適応**能力は社会や経済の発展と密接に結びついていますが社会間や社会内に等しくあるわけではない。
- 適応策と緩和策のどちらも、その一方だけでは全ての気候変化の影響を防ぐことはできないが、両者は互いに補完しあい、気候変化のリスクを大きく低減する。

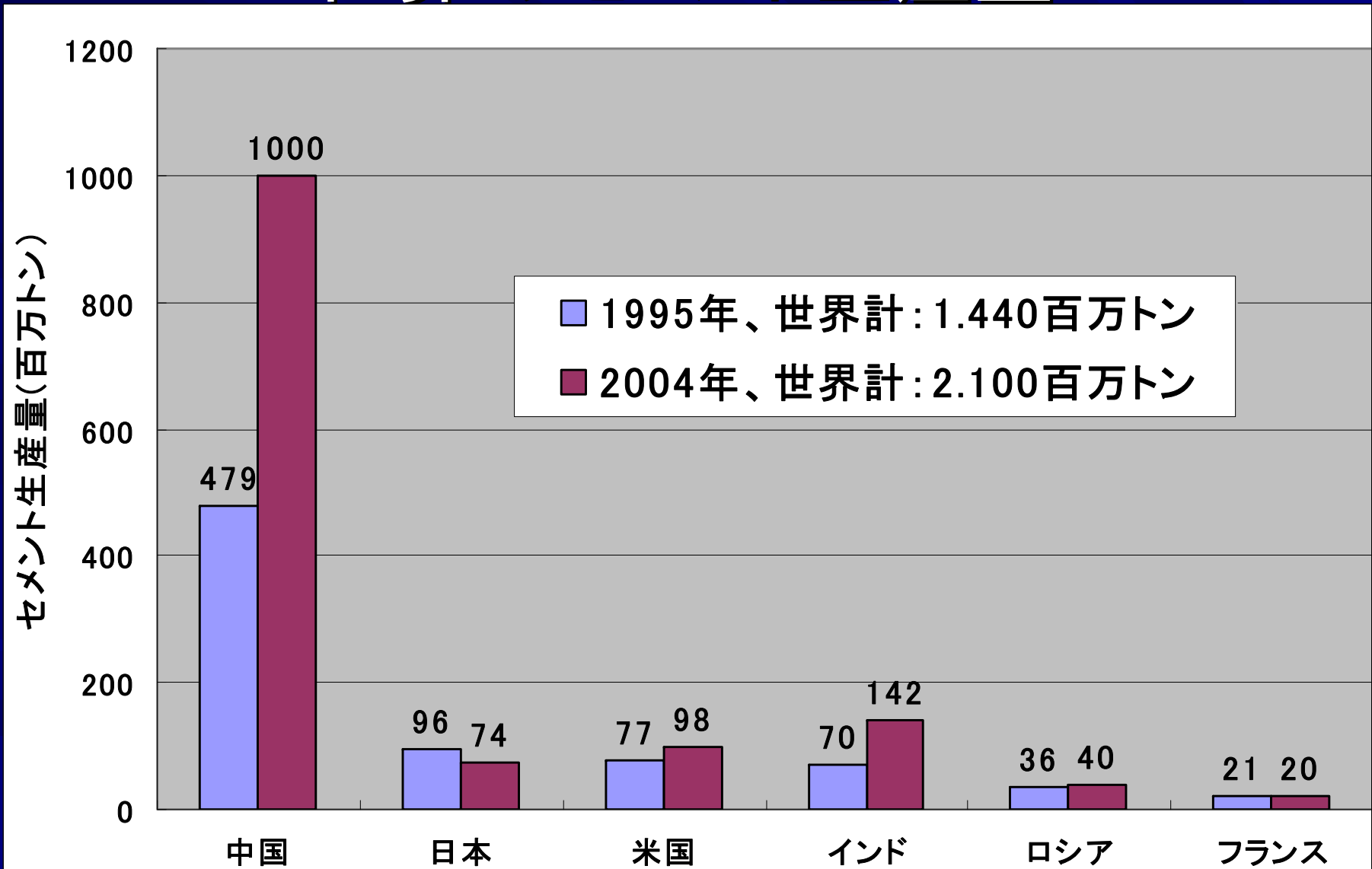
2、コンクリート



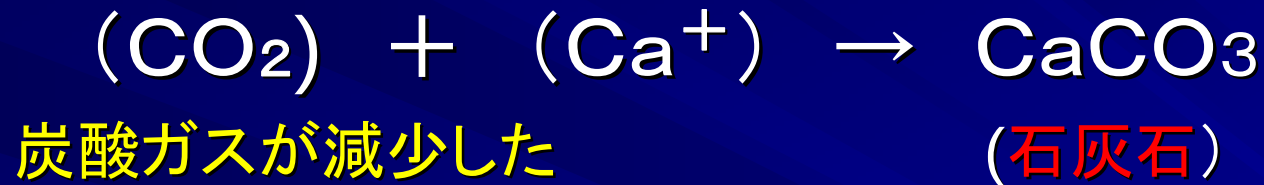
セメント生産量(セメント協会ホームページより)



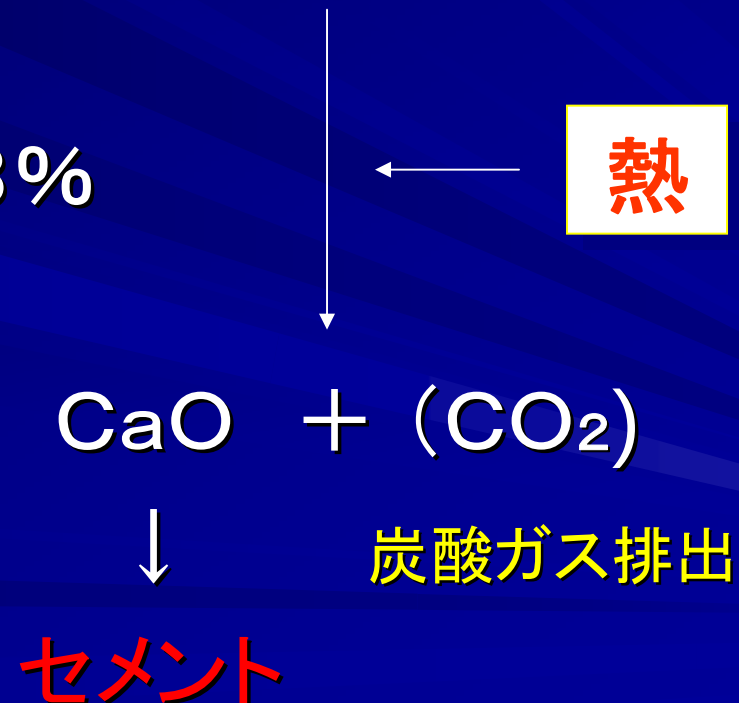
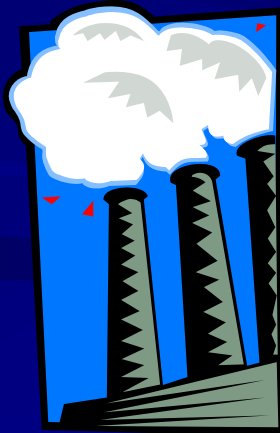
世界のセメント生産量



原始初期: CO₂濃度 89%



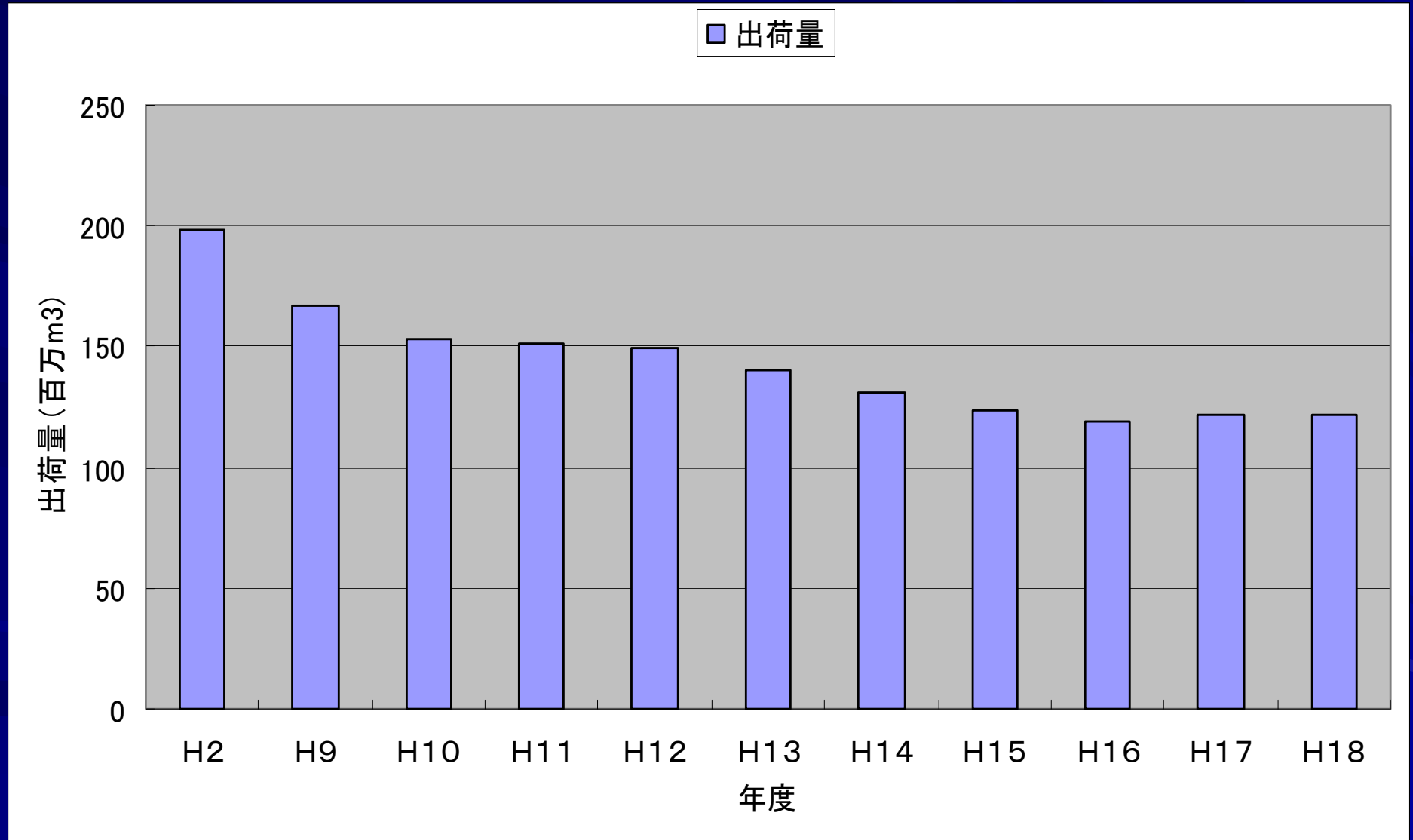
現在: CO₂濃度 0.03%



セメント製造とCO2排出

- セメントクリンカー1 tonを製造するとき、約1 tonのCO2を排出する。
- 2004年のセメント生産量: 21億 ton
↓
- CO2 全排出量の5%を占める。

生コン出荷量の変遷(全生工組連ホームページより)



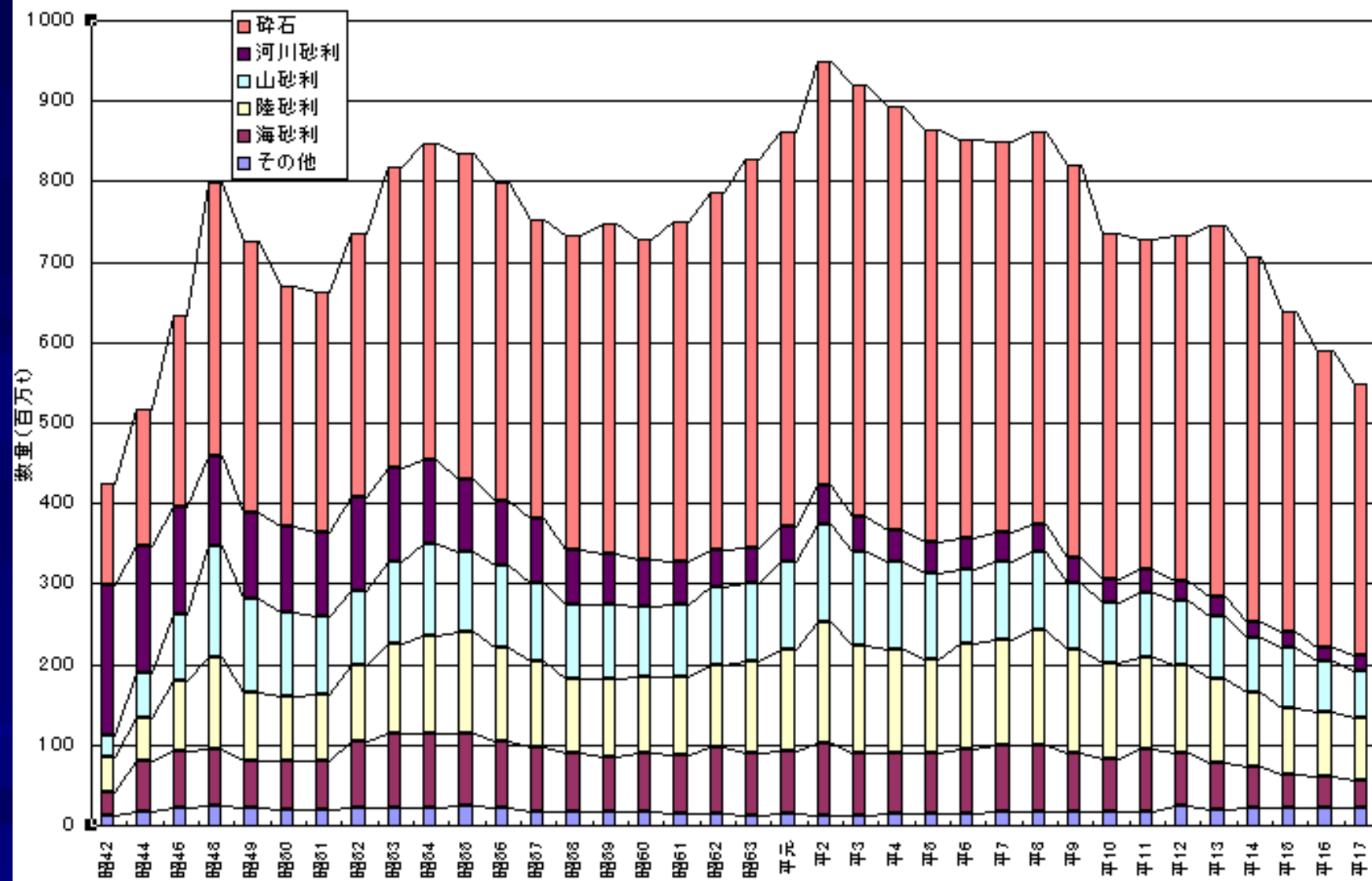
コンクリート用骨材の現状と課題

■ コンクリートの品質は、容積の約70%を占める骨材の品質に支配されやすい。

■ コンクリート用骨材

- 1) 天然骨材: 川砂・砂利、海砂・砂利、陸、山
- 2) 砕石、砕砂
- 3) 高強度フライアッシュ人工骨材
- 4) 軽量骨材(人工、天然、副産)
- 5) スラグ骨材(高炉、フェロニッケル、銅、電気炉酸化)
- 6) 再生骨材(H,M,L)
- 7) 溶融スラグ

骨材供給構造の推移



日本砕石協会ホームページより

コンクリート構造物の早期劣化

「コンクリートクライシス」(NHK 1984)

1970年代後半

- ・ 建設ラッシュ →
 - ・ 大量にコンクリートを使用
- ・ 河川産骨材の枯渇 →
 - ・ 海砂、碎石の利用（骨材の低品質化）
- ・ 設計条件・環境条件の悪化
- ・ コンクリート構造物建設の分業化 →
 - ・ 管理体制の崩壊、
 - ・ 部分的最適化が全体の最適化につながらない。

アルカリシリカ反応 (JCI, コンクリート診断技術'07より)



3、ホリスティック・アプローチ

- Holistic Approachとは？
- いくつもの部分から成る複合体や複合組織は、その個々の構成要素を足した和を超えた存在であるとする理論「ホリズム(全体論)」に由来する言葉
- Holistic: 全体論的な、総合的な
- Holistic Approach: 包括的、全体的な解決を考える戦略

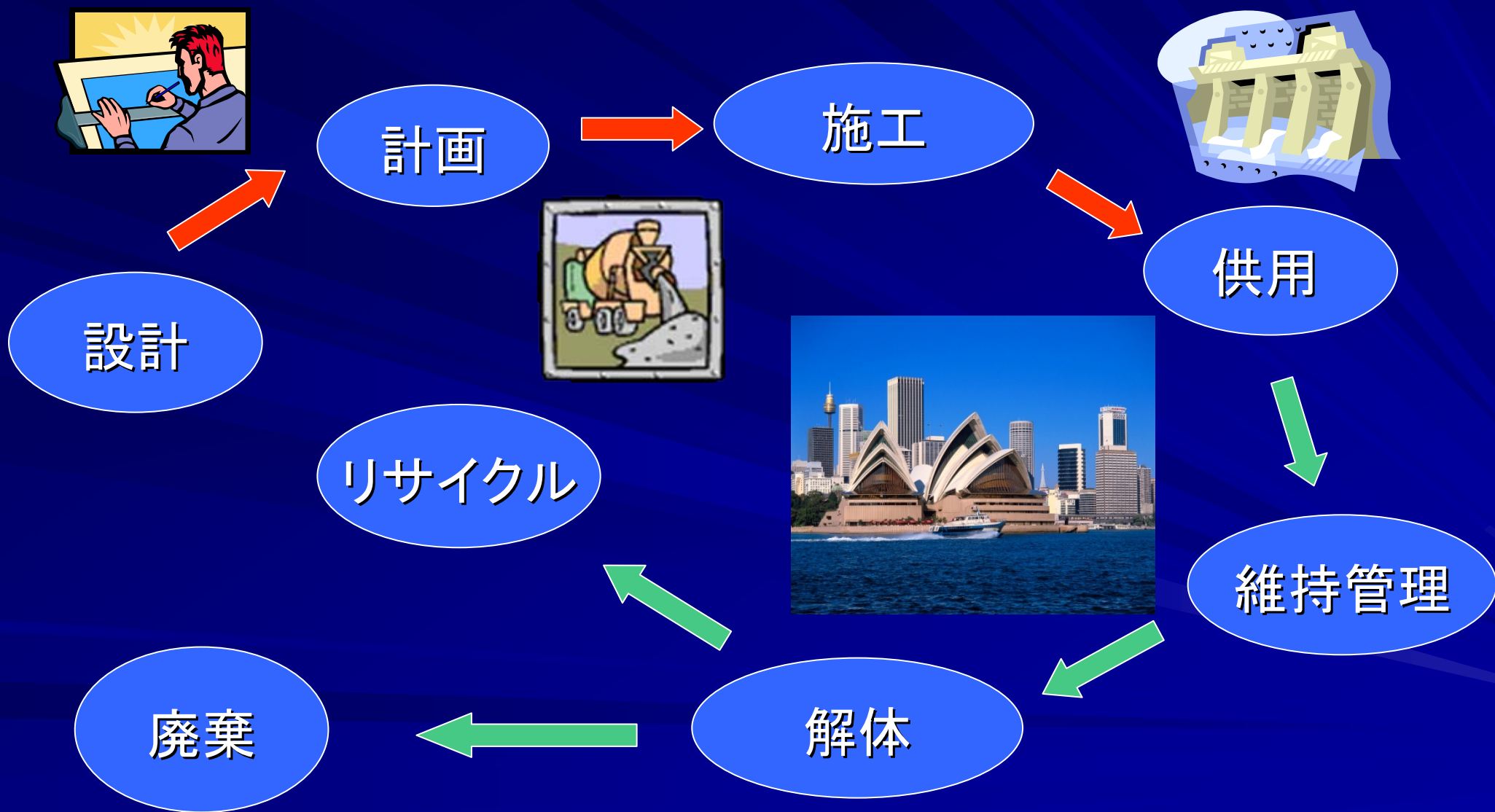
Holistic Approach（江崎玲於奈）

- 20世紀に科学が偉大な進歩を遂げた原動力の一つにミクロの解析手法が挙げられる。特に「還元論」と呼ぶ手法が大きく寄与した。還元論とは基本的な構成要素に還元して説明することで、例えば「遺伝子の性質がわかれば生命体も生命現象もミクロの立場からとらえることができる」というアプローチだ。20世紀にノーベル賞受賞対象となった主要な研究成果を見ると、還元論的な手法で創造性が発揮されてきた傾向が強い。
- 還元論に対して、組織化された全体に意義を求める解析手法を「全体論」と言う。例えば医師が患者を診断する場合、個別の器官だけでなく、体全体をシステムとしてとらえて処置するやり方だ。21世紀は全体論の時代だ。人類が直面する環境や資源・エネルギーなどの問題は全体論のアプローチでとらえるべきだ。

Holistic Approach (P. K. Mehta)

- The holistic approach has its roots in the idea that the whole exists before the parts.
- Holistic approach would consider society as a whole, and the concrete industry as a part of the whole. Therefore, in addition to **providing a low cost building material**, the concrete industry must assume **responsibility for other society needs** – for example, conservation of the earth's natural resources and safe disposal of polluting wastes produced by other industries.

4、コンクリート構造物のライフサイクルと環境設計



コンクリート構造物の設計

構造物の要求性能

安全性

使用性

耐久性

環境性



設計

構造物の性能照査

力学的性能

耐久性能

環境性能

環境側面

1) 地球環境

温室効果ガスの放出
資源・エネルギーの消費
廃棄物の排出

2) 地域環境

大気汚染
土壌汚染
水質汚染
廃棄物排出

3) 作業環境

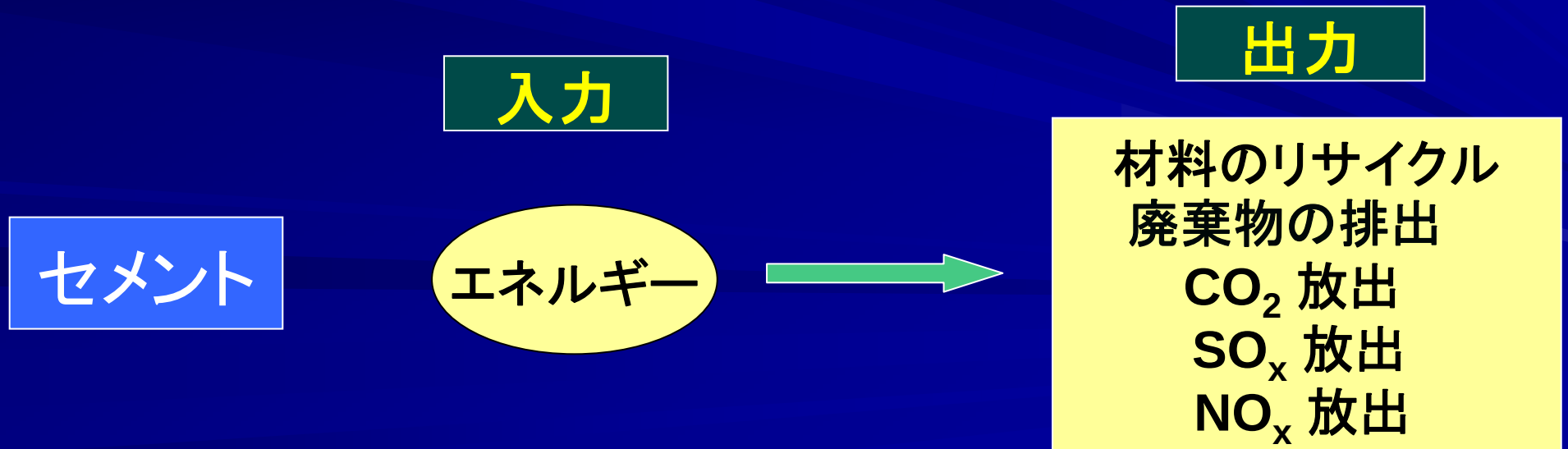
騒音および振動

環境性能の評価法

- 温室効果ガスの放出、資源・エネルギーの消費、廃棄物の排出、大気汚染物質の放出の評価には**LCA手法**を用いる。
- 水質・土壌汚染における原因物質の特定、含有量などの定量評価には適当な**試験・測定方法**を用いる。
- 騒音・振動などの環境性能に対する評価は、**直接、測定を行う方法や信頼できる予測手法**あるいは両者の組み合わせによるものとする。

インベントリー分析

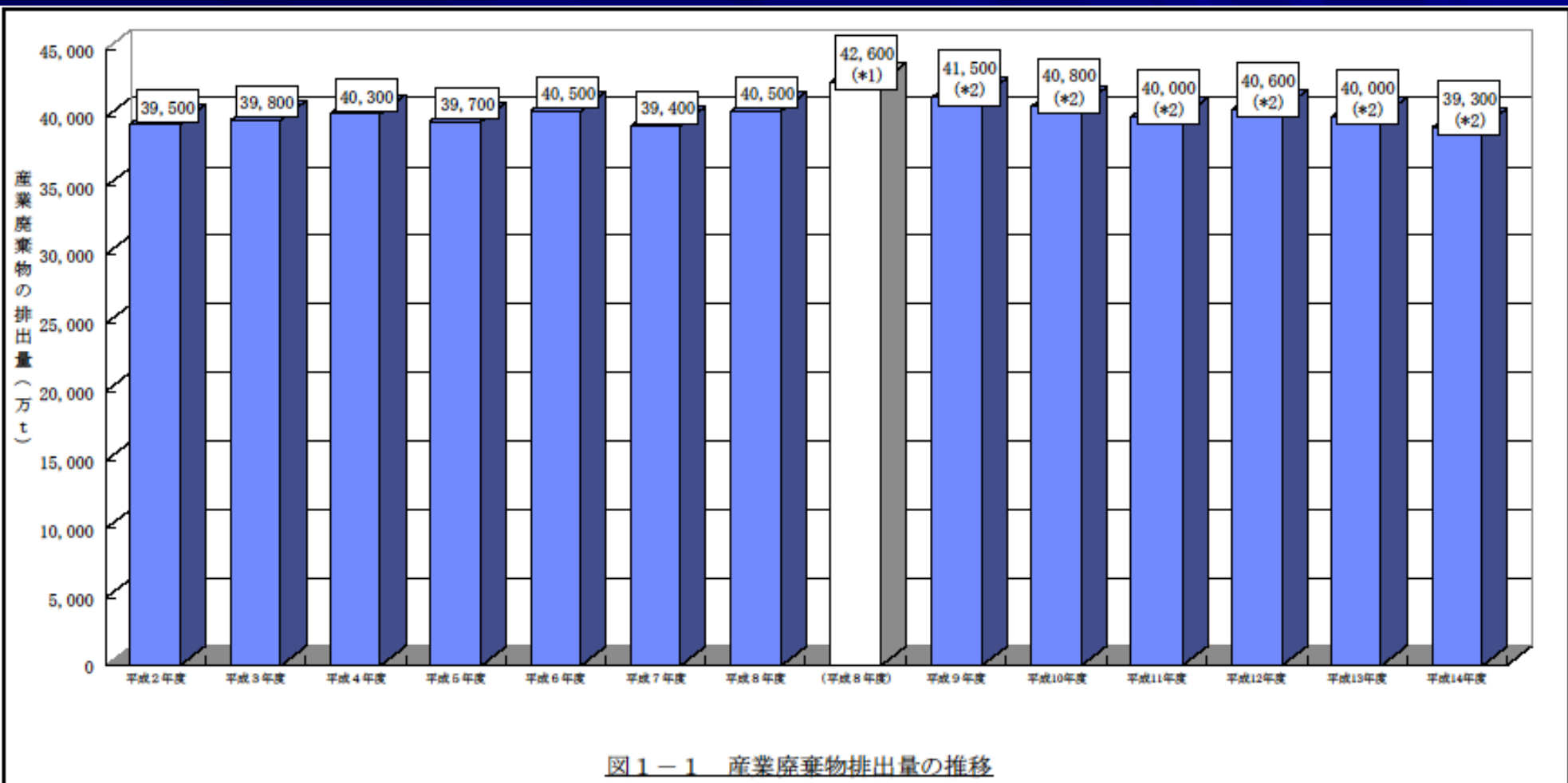
- ライフサイクルインベントリー分析とは、対象とする製造システムに対する、ライフサイクル全体を通しての入力および出力のまとめ、ならびに定量化を行うライフサイクルアセスメントの構成段階と定義される (ISO 14040)



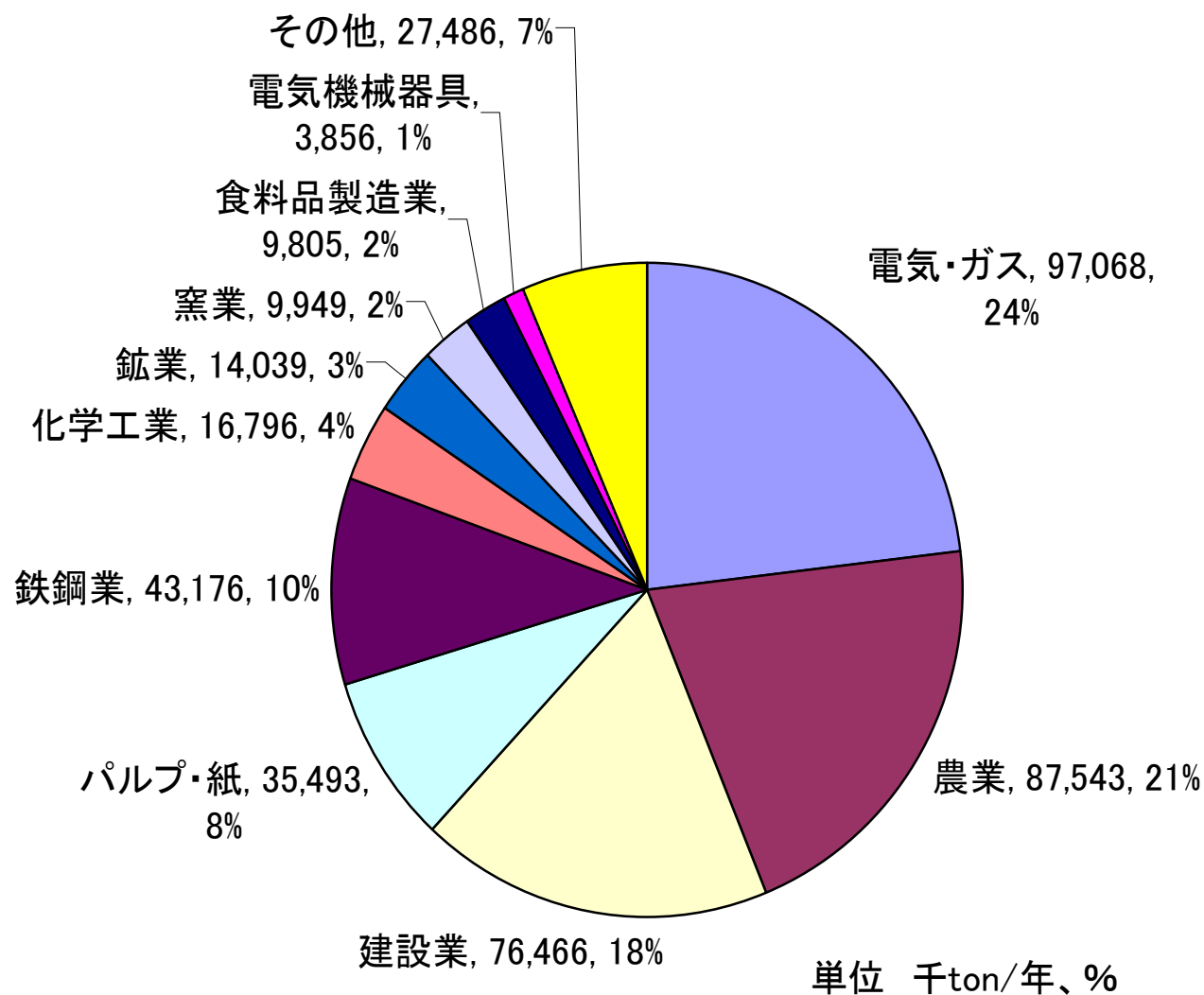
5、廃棄物およびリサイクル

- 産業廃棄物
- 建設廃棄物
- コンクリートのリサイクル
- 廃棄物のコンクリート材料としての利用

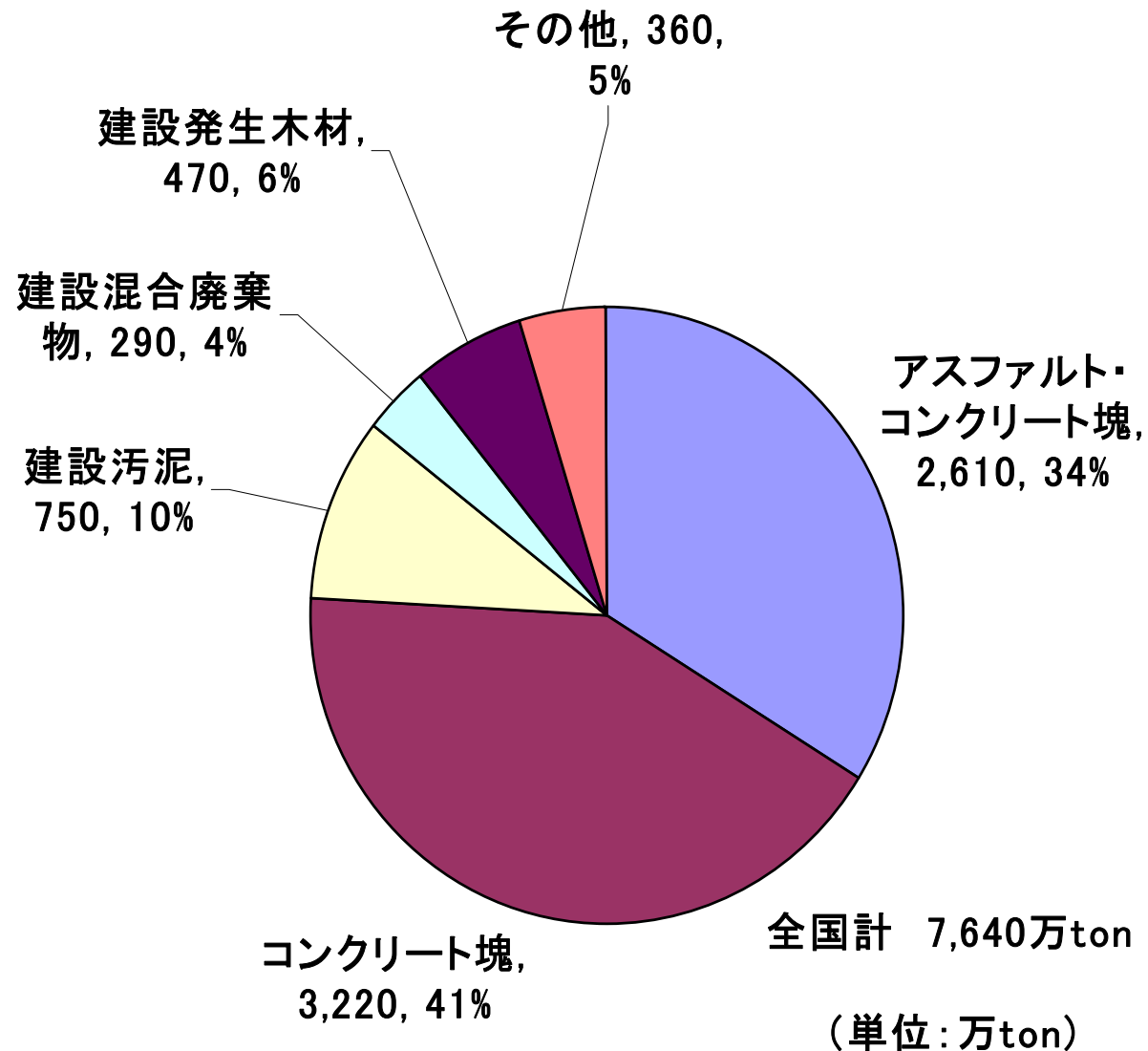
産業廃棄物(出展:環境省調査)



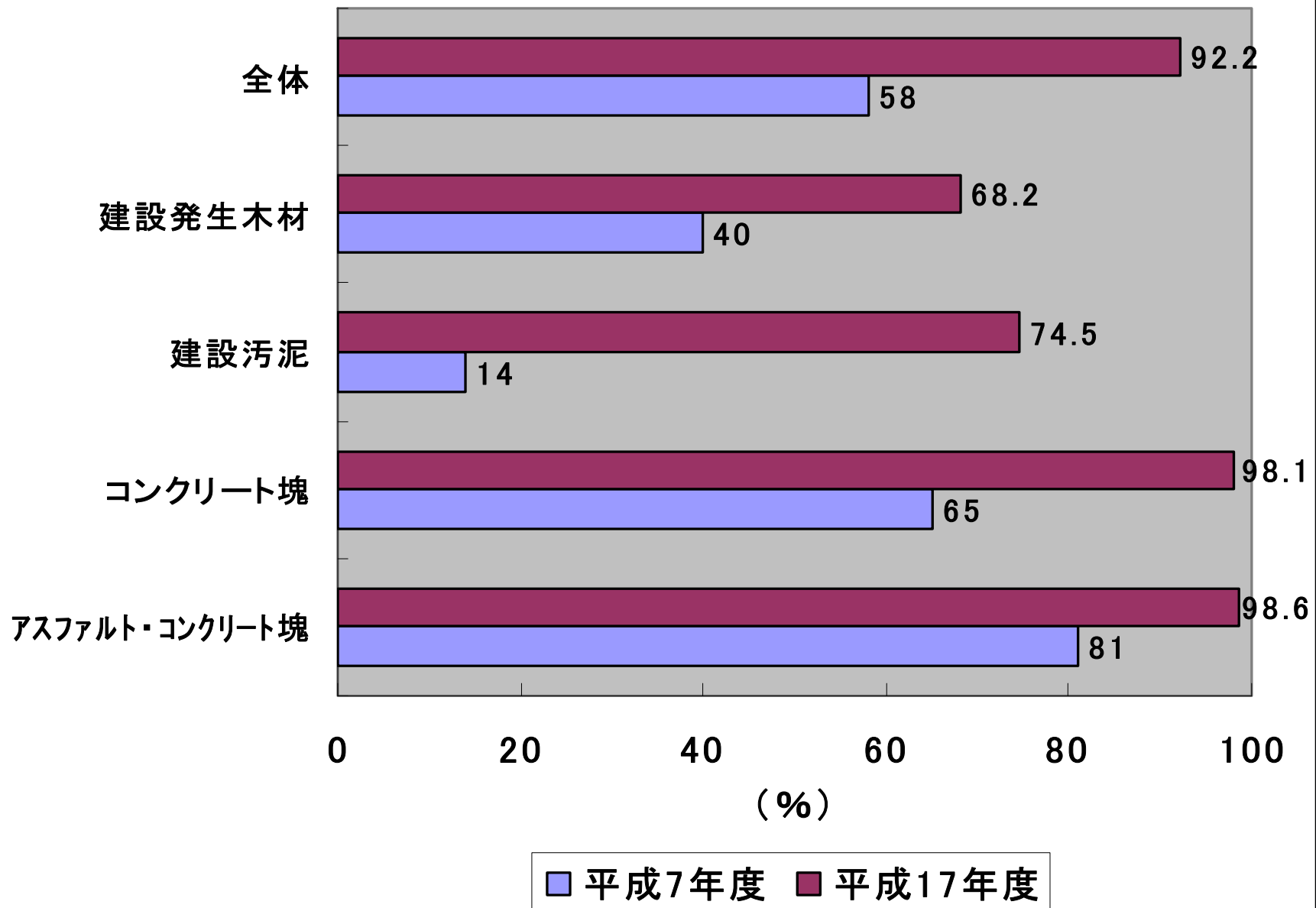
産業廃棄物の種類別排出量(平成17年:総計4億1、700万トン)



建設廃棄物種類別排出量(平成17年)



建設廃棄物のリサイクル比率



コンクリートのリサイクル



建設廃棄物: 7, 640万トン(平成17年度)
コンクリートがら: 全体の41%を占める。

再資源化率(平成17年度)

建設廃棄物全体: 92.2%

コンクリートがら: 98.1%

その他廃棄物のコンクリート用材料 としてのリサイクル(土木学会全国大会)

- 鉄鋼スラグ、電気炉酸化スラグ、ごみ熔融スラグ
- 帆立貝、牡蠣殻
- 瓦、陶器廃材
- 廃石膏ボード
- 発砲スチロール
- ゴム
- 木材
- 電化製品プラスチック

6、コンクリート構造の持続可能性

- コンクリート材料の保全
- コンクリートにおける廃棄物・産業副産物の利用
- コンクリート構造物の耐久性改善
- コンクリート構造物の維持管理

コンクリート材料の保全

骨材：リサイクル骨材、代替骨材、低品質
骨材の利用

セメント：単位セメント量の低減
フライアッシュや高炉スラグ等
の産業副産物の利用

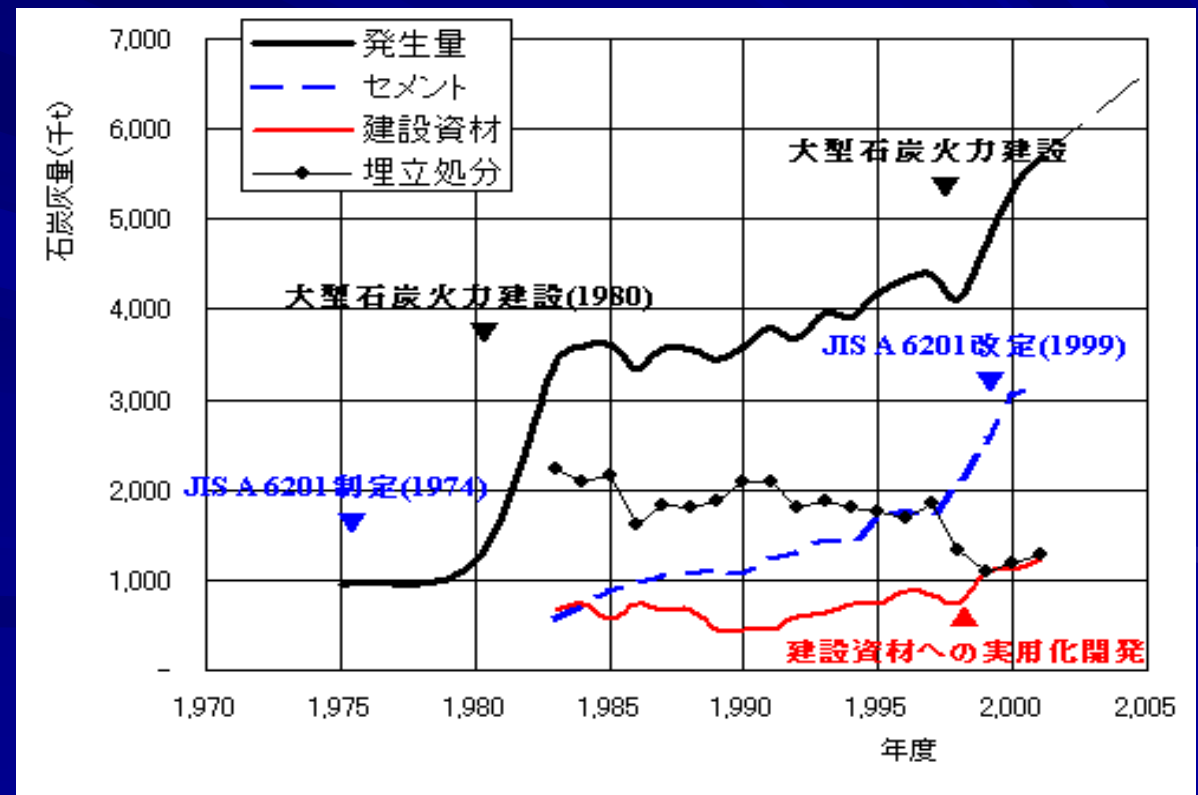
コンクリートにおける廃棄物・産業副産物の利用

■フライアッシュ(石炭灰)

■高炉スラグ

■もみがら灰

■リサイクル
コンクリート



コンクリート構造物の耐久性向上 (長期効用)

- 高強度コンクリートの開発
 - ・高性能AE減水剤を用いた水セメント比の低減
 - ・シリカフューム、高炉スラグ微粉末、分級フライアッシュ等による水和物量の増大とマイクロフィラー効果による高密度化
- 水密性の向上(有害物質の侵入を防止)
- ひび割れ防止
- 耐久性照査型示方書

耐久性照査型示方書における 耐久性の照査

- ・設計の段階で耐久性を保証する

予測式 ← コンクリートの配合条件等



(安全係数) × (劣化現象の設計値) ≤ (制限値)



実験、実績

中性化の照査

構造物係数:1.0 (重要構造物1.1)

$$\gamma_i \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1.0$$

中性化深さの設計値 = $\gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t}$

$$\alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$$

α_k : 中性化速度係数の特性値

β_e : 環境作用の程度を表す係数

γ_c : コンクリートの材料係数

鋼材腐食発生限界深さ = $C - C_k$

C : かぶりの期待値: 設計かぶり

C_k : 中性化残り

通常環境10mm

塩分環境下10~25mmとするのがよい。

中性化に対する
耐用年数 (年)

各種係数等予測値

- 中性化速度係数 : $\alpha_p = 3.57 + 9.0 \cdot W/B$
- 塩化物イオンに対する拡散係数 :
普通ポルト ; $\log D_p = -3.9 (W/C)^2 + 7.2 (W/C) - 2.5$
高炉、シリカ ; $\log D_p = -3.0 (W/C)^2 + 5.4 (W/C) - 2.2$
- 相対動弾性係数 : 試験 JIS A 1148 (A法) で求めてよい。
最大 W/C を表で与える。
- 耐化学的侵食性 : 最大 W/C を表で与える。
- コンクリートの透水係数 : 試験で求める。
 $\log K_p = 4.3 (W/C) - 12.5$

コンクリート構造物の維持管理

「荒廃するアメリカ」

1981年: Pat Choate博士
アメリカの公共施設への投資
の縮小のため欠陥橋梁が占
る割合が45%にも上る状況
に警鐘を鳴らした。



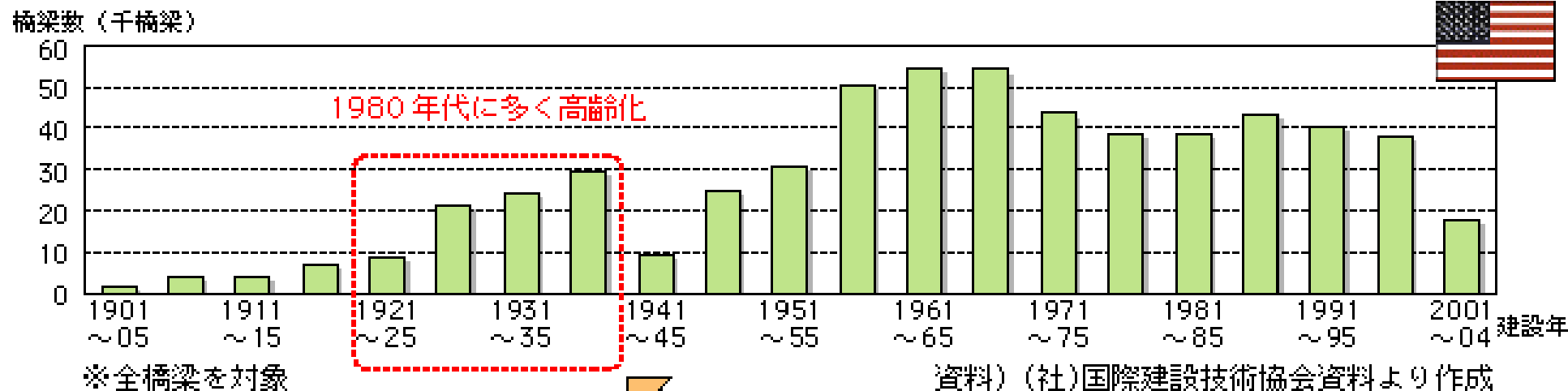
'60~'75: ヴェトナム戦争

傷病兵の為の社会福祉予算

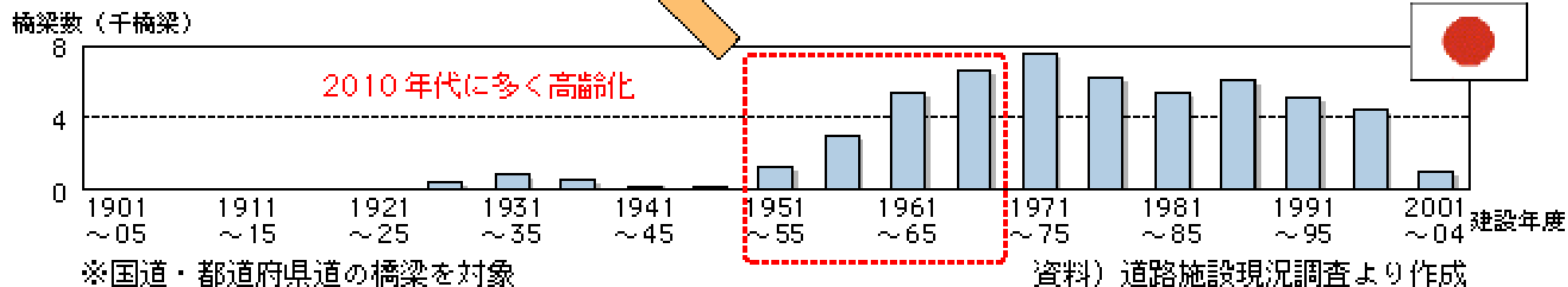
橋梁の劣化状況

日米の橋梁の建設年の比較

【米国の橋梁の建設年】



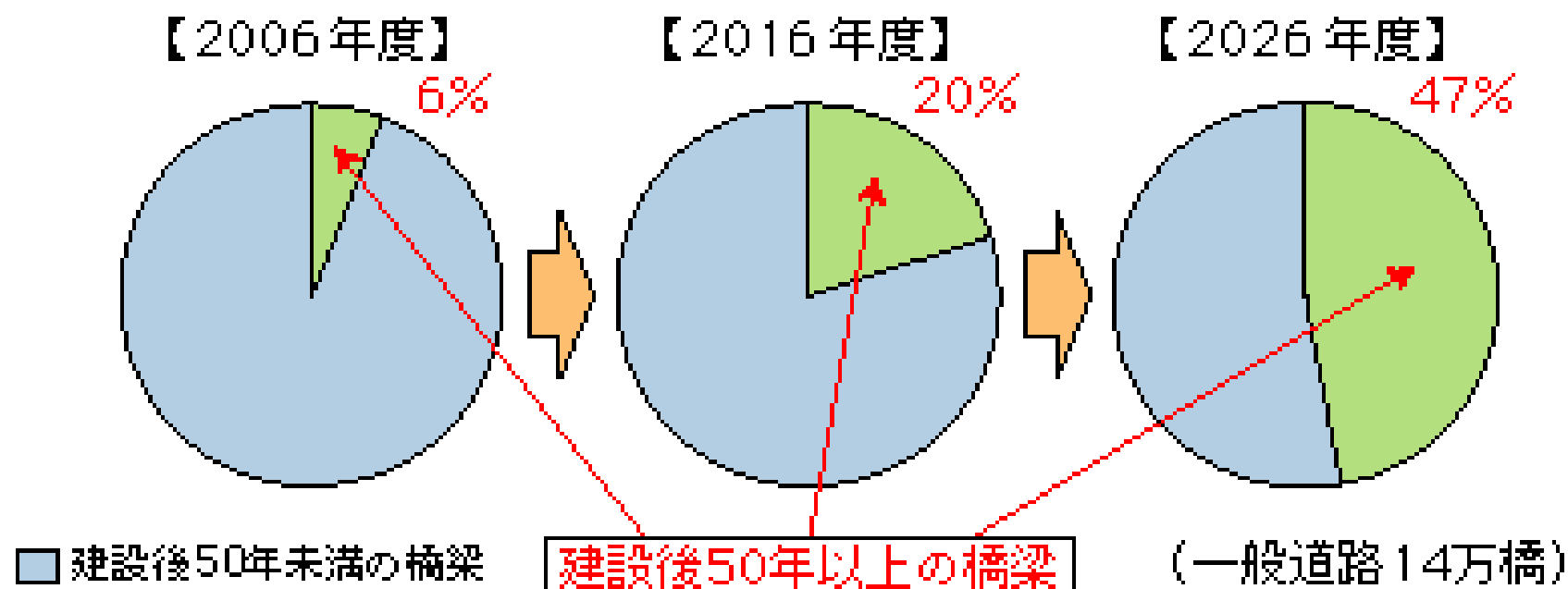
【日本の橋梁の建設年】



30年早く高齢化

わが国の橋梁の今後

建設後50年以上の橋梁の推移



資料) 道路統計年報より作成

「厳しい選択」(連邦議会合同経済委員会報告)

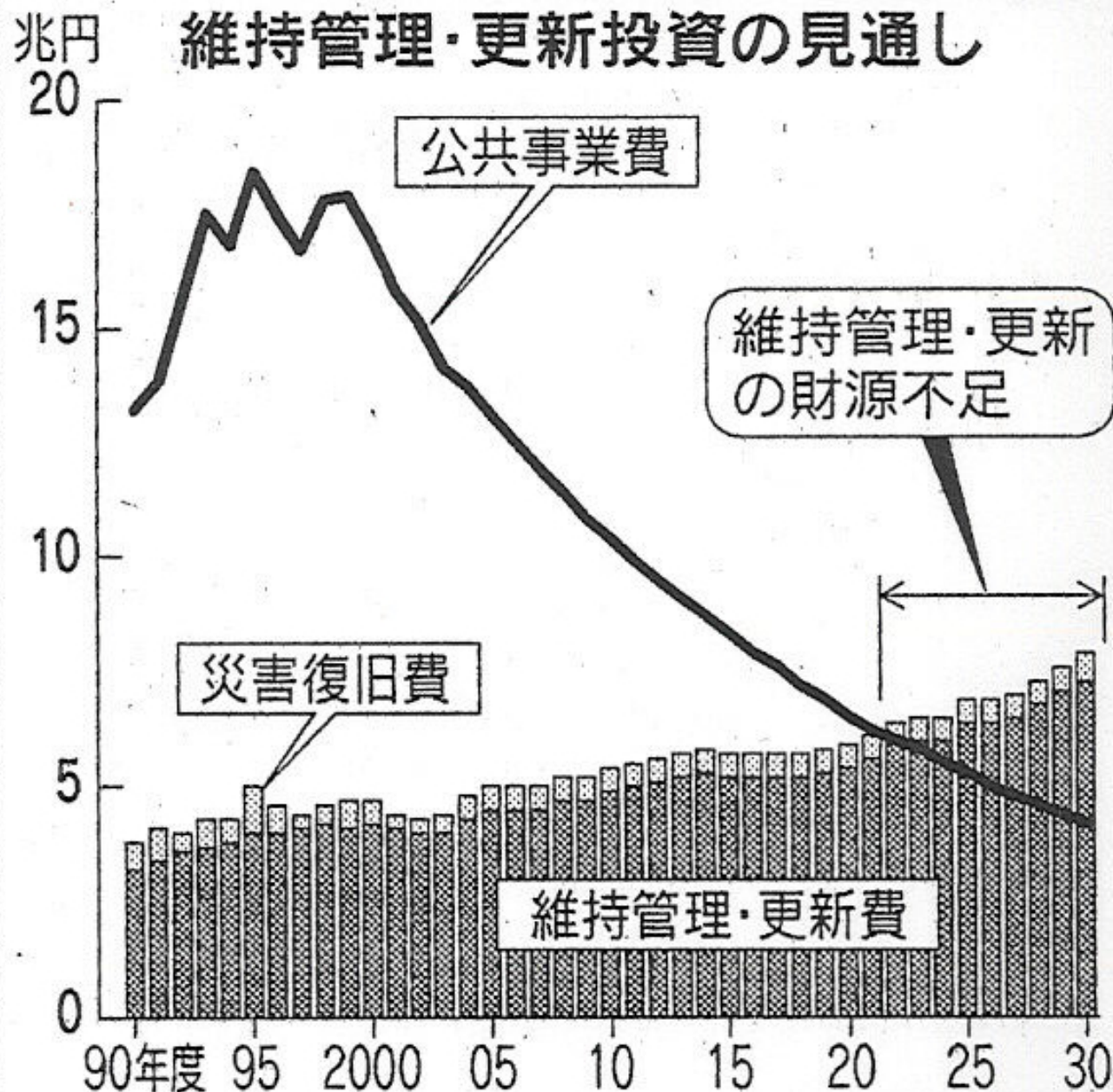
1984年

- 議会による徹底した調査の上に立った体系的な政策の提案
- 社会資本の充実に向けての大胆な政策提言
 - ・全米橋梁点検基準の策定
 - ・点検員の資格及び点検員養成の制度化
 - ・ガソリン税の税率引き上げによる道路財源の確保
 - ・21世紀交通最適化法による道路整備財源の確保

ミネアポリス (I-35W) 落橋事故



維持管理・更新投資の見通し



(注) 国交省推計、公共事業の削減(国が前年度比3%、地方が同5%)が続いた場合

コンクリート構造物の維持管理

社会基盤（インフラ）の長寿命化・長期効用
（千年ダム、1万年コンクリート）



維持・管理の時代



- * 維持管理システムの構築
- * 専門技術者の資格認定、確保
- * 補修・補強技術の開発
- * 財源の確保

おわりに

コンクリートは、今後も、鋼とともに主要な建設材料である。地球温暖化に対する緩和策および適応策として、社会基盤の長期効用が叫ばれている昨今、コンクリート構造物の持続可能性を支えるため、コンクリート材料の保全およびコンクリートの耐久性の向上を図る必要がある。また、維持管理システムの構築、専門技術者の資格認定と確保および補修・補強技術の開発が望まれる。コンクリート構造物と環境負荷についても、そのライフサイクル全体にわたり、検討しなければならない。