

開催日 : 2021.10.08

# CO<sub>2</sub>固定の性能評価から 長期安定性までの課題と提言

株式会社コベルコ科研  
部署 材料評価技術部  
氏名 田邊 誠

1  
©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

コベルコ科研

## 温室効果ガス排出量 (CO<sub>2</sub>) の報告義務化 (算出方法)

地球温暖化対策の推進に関する法律(温対法)に基づき、平成18年4月1日から、温室効果ガスを多量に排出する者(特定排出者)に、自らの温室効果ガスの排出量を算定し、国に報告することが義務付けられた。(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFC、PFC、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>)

$$\text{温室効果ガス排出量} = \text{活動量} \times \text{排出係数}$$

表1 算定方法・排出係数一覧(抜粋)

排出活動	区分	単位	値
固体燃料	一般炭	tCO <sub>2</sub> /t	2.33
	コークス	tCO <sub>2</sub> /t	3.17
液体燃料	ガソリン	tCO <sub>2</sub> /k l	2.32
	ジェット燃料油	tCO <sub>2</sub> /k l	2.46
	A重油	tCO <sub>2</sub> /k l	2.71
気体燃料	液化石油ガス(LPG)	tCO <sub>2</sub> /t	3.00
	液化天然ガス(LNG)	tCO <sub>2</sub> /t	2.70
	天然ガス	tCO <sub>2</sub> /1,000Nm <sup>3</sup>	2.22
	高炉ガス	tCO <sub>2</sub> /1,000Nm <sup>3</sup>	0.33
	転炉ガス	tCO <sub>2</sub> /1,000Nm <sup>3</sup>	1.18

燃料(C)の発熱量×燃料(C)の使用排出係数×44/12

出典:環境省 <https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/>

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 温室効果ガス排出量 (CO<sub>2</sub>) の報告義務化 (算出方法)

表2 アンモニア製造に関する排出係数(別表3)

排出活動	区分	単位	値
アンモニアの製造	石炭	tCO <sub>2</sub> /t	2.3
	石油コークス	tCO <sub>2</sub> /t	2.8
	ナフサ	tCO <sub>2</sub> /k l	2.2
	液化石油ガス(LPG)	tCO <sub>2</sub> /k l	3.0
	石油系炭化水素ガス	tCO <sub>2</sub> /1,000Nm <sup>3</sup>	2.3
	液化天然ガス(LNG)	tCO <sub>2</sub> /t	2.7
	天然ガス	tCO <sub>2</sub> /1,000Nm <sup>3</sup>	2.2
	コークス炉ガス	tCO <sub>2</sub> /1,000Nm <sup>3</sup>	0.85

表3 エネルギー起源二酸化炭素(排出係数) 抜粋

排出活動	算定方法	単位生産量等当たりの排出量(排出係数)		
		区分	単位	値
セメントの製造	セメントクリンカー製造量 ×単位製造量当たりの排出量	—	tCO <sub>2</sub> /t	0.502
生石灰の製造	使用量 ×単位使用量当たりの排出量	石灰石	tCO <sub>2</sub> /t	0.428
		ドロマイト	tCO <sub>2</sub> /t	0.449

出典:環境省 環境省 <https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc>

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

### 1. CO<sub>2</sub>の固定

### 2. コンクリート

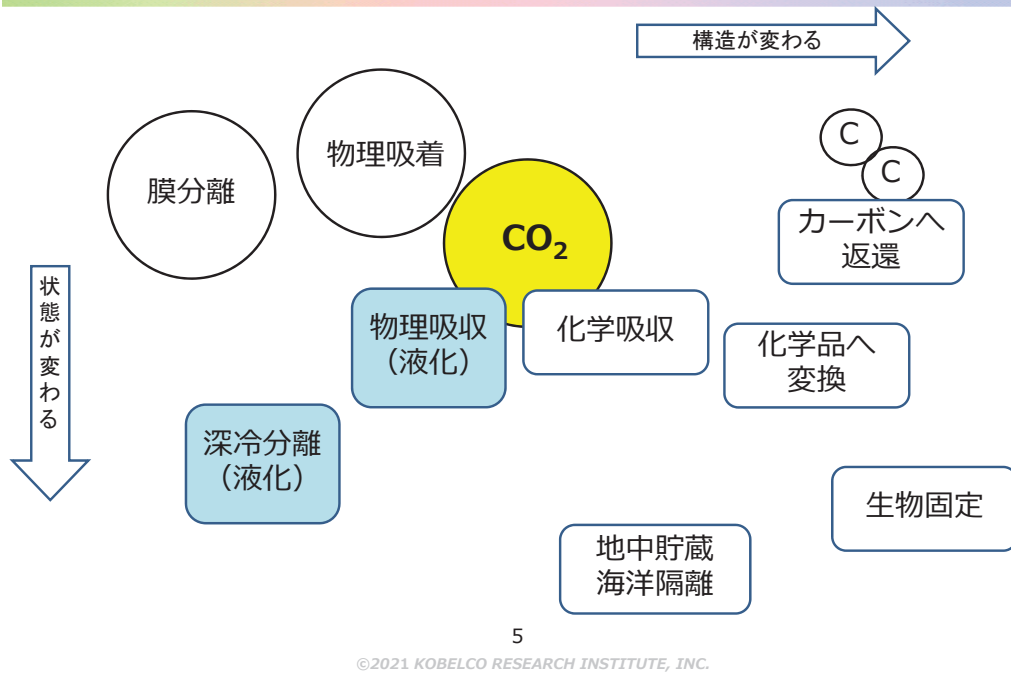
フライアッシュ(アンモニア混焼)

大型建造物の評価

### 3. 長期安定性の評価

CO<sub>2</sub>の継続的固定能力

# 1. CO<sub>2</sub>の固定技術



## 1.1 CO<sub>2</sub>の固定 (地中への注入)

- (1) 地中への圧入  
石油の増進回収法 ⇒ CO<sub>2</sub>ガス圧入法
- (2) CO<sub>2</sub>の鉱物化固定  
超苦鉄質、苦鉄質岩石とCO<sub>2</sub>の反応⇒炭酸塩鉱物  
CO<sub>2</sub>は 水に溶けやすい  
岩層の空隙を満たした水 (深部塩地下水、地層水) に急速に溶解  
溶解により、CO<sub>2</sub>の流動性の低下 (停滞性)  
CO<sub>2</sub>⇒HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、⇒ CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (解離/酸性化)  
酸性雰囲気での岩石中の鉱物と反応 (鉱物固定minieraltrapping)

引用文献  
奥山 康子 岩石-水相互作用からみ見る二酸化炭素地中貯蔵」岩石鉱物化学38,81-89,2009  
産業技術総合研究所 地層資源研究環境研究部門  
二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 産業構造審議会産業技術環境分科会 報告書

# 1. CO<sub>2</sub>の固定

## 2. コンクリート

高炉スラグ  
フライアッシュ (アンモニア混焼)

### 大型構造物の評価

## 3. 長期安定性の評価 CO<sub>2</sub>の継続的固定能力

## 2 コンクリート

### 1. セメント製造(焼成)時にCO<sub>2</sub>が放出される

主 : CaCO<sub>3</sub>→CaO + CO<sub>2</sub>↑ 微量 : MgCO<sub>3</sub>→MgO + CO<sub>2</sub>↑

原料	石灰石	粘土	珪石	石膏	混合材
成分組成	CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ・ nSiO <sub>2</sub> ・mH <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	CaSO <sub>4</sub>	高炉スラグ フライアッシュ 天然シリカ
工程	焼成(400°C→1450°C)・急冷			添加物	
通称	クリンカ			-	

製造量 × 単位製造量当たりの排出量 (排出係数 = 0.502)

### 2. コンクリートとセメントの違い

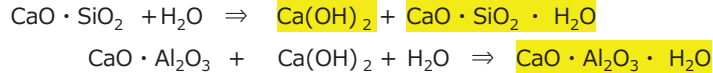
	水	セメント	空気	細骨材 (砂)	粗骨材 (砂利)	鉄筋	添加剤
セメント	-	○	○				
モルタル	○	○	○	○			
コンクリート	○ 15-18%	○ 8-15%	○ 3~6%	○ 25~35%	○ 35~40%		○
鉄筋コンクリート	○	○	○	○	○	○	○

## 2.1 コンクリートの反応（セメントの水和反応）

### (1)クリンカ

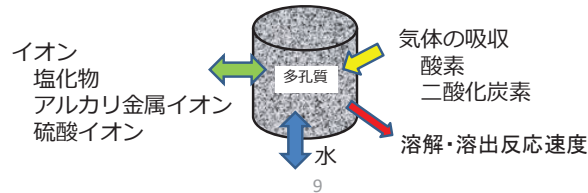
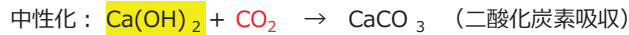
ケイ酸三カルシウム	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
ケイ酸二カルシウム	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
カルシウムアルミネート	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
カルシウムアルミノフェライト	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

### (2)セメントの水和反応（硬化）



※水和反応は長期間  
強度：材齢7日～14日（著しい）、28日～91日（安定）、1年以上（微増）

### (3)コンクリートは多孔質（物質の移行がある）



©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 2.2 コンクリートの反応（劣化 耐久性の低下）

### (1)中性化・・・鉄筋の腐食（膨張）

アルカリ性のコンクリートが二酸化炭素の侵入によって、中性化する反応。表層からの中性化が進み、鉄筋と接すると鉄筋の腐食速度が速くなる。

**CO<sub>2</sub>削減には、吸収する方が良い**

### (2)塩害・・・鉄筋の腐食（膨張）

コンクリート中に存在する塩化物イオン（Cl<sup>-</sup>）、酸素、鉄筋（鋼材）の反応

### (3)アルカリシリカ反応（アルカリ骨材反応 / ペシマム量）・・・膨張

コンクリートの細孔溶液中の水酸化物と骨材中の反応性珪物との化学反応  
水酸化物：KOH、NaOH  
反応性珪物：非石英質系のシリカ珪物（トリジマイト、クリストバライト）  
シリカガラス  
潜晶質、隠微晶質、微晶質の石英

### (4)凍害・・・表面劣化 強度低下 ひび割れ

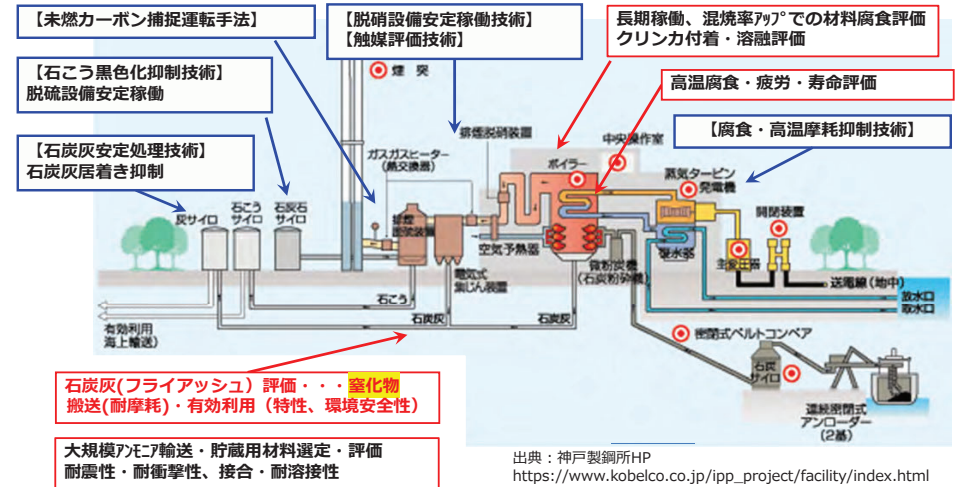
コンクリートの細孔中に含まれる水分が凍結し、凍結膨張が起こる反応。

### (5)乾燥・・・収縮割れ

10

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 2.3 フライアッシュの評価（アンモニア混焼）



アンモニア混焼等に関する研究課題解決を支援します。

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 2.4 コンクリート構造物への課題

高炉スラグ等の原料の見直し  
CO<sub>2</sub>を吸収するコンクリート

中性化でも腐食し難い鉄筋



CO<sub>2</sub>固定化材の利用課題は 石炭灰（フライアッシュ等）の利用の研究の変遷が有用  
一般財団法人 石炭エネルギーセンター編 「石炭灰混合材料有効利用ガイドライン」

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 2.5 要求される仕様の違いによる試験評価の違い

製品	使用環境	リスク	試験評価
盛土材 埋立材 地盤改良材	屋外気中 地中	溶出 透水性	材料試験
雨水枡 縁石	屋外気中	塩害 すり減り	材料試験
テトラポット (海洋構造物)	海水中	塩害 すり減り	材料試験
マンション (建築物)	屋外気中	ASR 鉄筋腐食 耐震性	構造試験
ヒューム管 (地下構造物)	地中	ASR 土圧 水密性	構造試験
橋脚 (土木構造物)	屋外気中	ASR 鉄筋腐食 耐震性	構造試験



経年劣化に対して  
土木・建設構造物  
耐用期間:100年

13

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

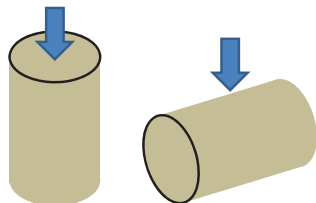
## 2.6 評価 (素材)

高炉スラグ  
フライアッシュ

- ・物性  
強熱減量  
透水係数
- ・強度特性  
圧縮強さ  
せん断抵抗角
- ・環境安全品質基準  
重金属の溶出  
JIS K 0058

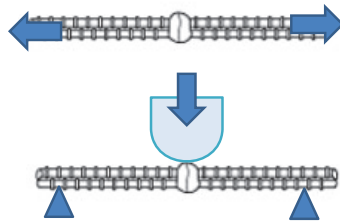
コンクリート

- ・圧縮強度試験
- ・割裂引張試験
- ・圧縮疲労試験
- ・中性化深さ測定
- ・塩分定量試験
- ・アルカリシリカ反応性試験
- ・膨張率試験



鉄筋

- ・引張強度試験
- ・曲げ試験
- ・溶接継手強度試験
- ・機械式継手性能試験
- ・疲労試験 (S-N取得)
- ・腐食促進・腐食量測定
- ・溶接継手のマクロ試験



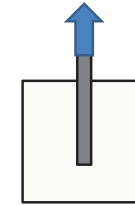
14

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 2.7.1 実構造物評価

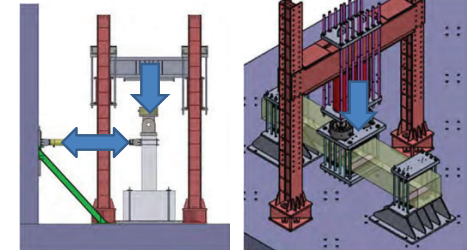
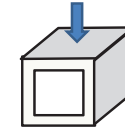
鉄筋コンクリート要素試験

- ・引抜き試験
- ・環境(腐食促進)試験



鉄筋コンクリート構造物試験

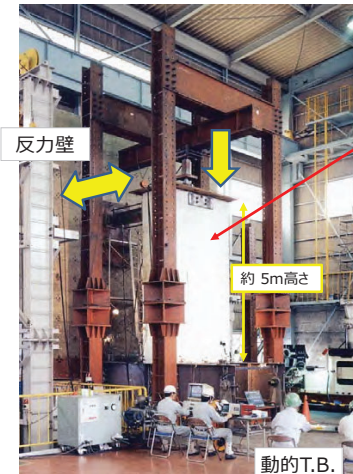
- ・曲げ試験
- ・軸方向・水平方向負荷試験
- ・L字継手の強度試験
- ・外力試験



15

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 2.7.2 実構造物評価の事例



反力壁: 8m × 9m × 1.5m  
鉄筋コンクリート製



揺れを模擬  
した水平変位  
を付与  
(漸増载荷)

動的テストベット: 13m × 20m × 1.5m (鉄筋コンクリート)  
大型試験機 : 3MN 構造物試験機  
30MN 引張試験機

16

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.



# 1. CO<sub>2</sub>の固定

# 2. コンクリート

# フライアッシュ（アンモニア混焼）

# 大型構造物の評価

# 3. 長期安定性の評価

# CO<sub>2</sub>の継続的固定能力

17

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 3. 環境模擬安定性

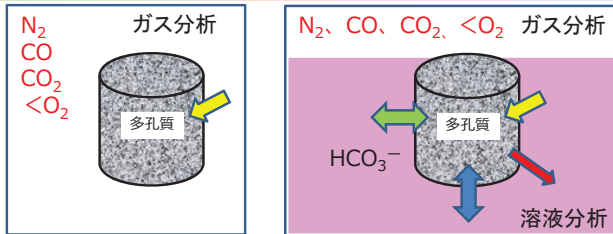


図3-1 密閉、ガスフロー環境

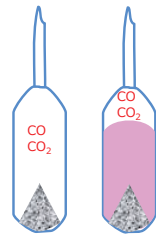


図3-2 アンプル

表3-1 環境模擬 長期安定性評価 CO<sub>2</sub>の吸収能力

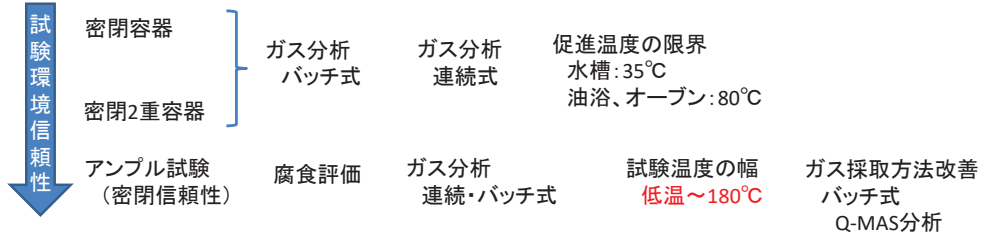
	環境配慮型 コンクリート 原料(セメント)	既存 コンクリート 経年劣化品	CO <sub>2</sub> 低減対策廃棄物	
			高炉スラグ	NH <sub>3</sub> 混焼フライアッシュ
吸収速度(ガス分析)	CO <sub>2</sub> の吸収、放出 中性化速度	CO <sub>2</sub> の吸収、放出 中性化速度	CO <sub>2</sub> の吸収、放出 中性化速度	CO <sub>2</sub> の吸収、放出 中性化速度
カーボンマイナス	構造物の有効表面積×CO <sub>2</sub> の吸収速度×時間⇒吸収総量			
環境安全品質基準 溶液中の溶出金属	炭酸イオン、pH、溶出金属			
鉄筋の腐食	鉄筋の腐食 (ガス分析:水素、酸素、重量、皮膜厚さ)			

18

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 3.1 長期安定性評価（保有技術の紹介）

長期安定性評価技術の変遷



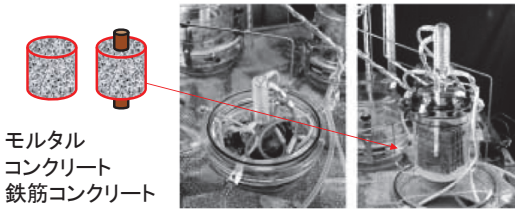
用途(今後の提案)	1990	2000	2010	2020
冷媒フロン	R22	R134a		NH <sub>3</sub> 、CO <sub>2</sub>
地層処分 長期安定性評価	炭素鋼		Ti Zr	
水素富化試験 材料の評価 (水素、アンモニア発電への転用)			SUS316LN、Ti	
カーボンマイナス 吸着剤の評価(吸収性能、環境安定化性能)への転用				
プラスチック 分解性評価(海洋中、生物分解性、新素材)への転用				

19

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

## 3.2 ガスの計測による長期安定性の評価（フロー式）

CO<sub>2</sub>を固定化したコンクリート、石炭灰等の試験体を、環境下での長期安定性の評価（使用時の吸収・放出ガス：CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>）を評価します。



モルタル  
コンクリート  
鉄筋コンクリート

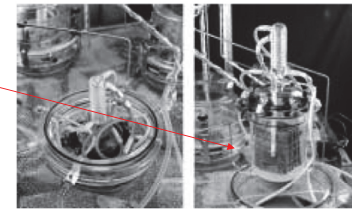


図3 試験容器の外観

図3.2-1 ガスフロー式試験

表1 大気圧イオン化質量分析装置 (APIMS) の仕様

Item	Description
Sample gas	N <sub>2</sub> , Ar, He, H <sub>2</sub> , etc. <b>CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub></b>
Ions	Positive
Mass range	m/Z = 3~360
Resolution	S/N ≥ 1 000 O <sub>2</sub> peak in N <sub>2</sub> gas
Resolving power	M/ΔM = 2M
Ion source	Atmospheric pressure ionization
Mass spectrometer	Quadrupole mass spectrometer
Analysis scanning time	0.06~8sec/mass
Ion monitoring	Simultaneous monitoring of 16 separate peaks

他の試験との関係  
組織観察  
分析  
強度(もろさ)  
溶出金属  
鉄筋との耐食性

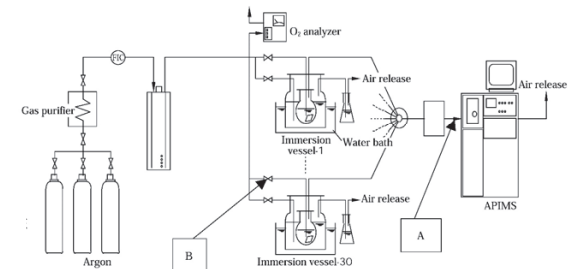


図3.2-2 連続ガスモニタリング試験

出典:西村等 地層処分における金属腐食に伴う水素ガス発生評価 神鋼技報 vol.53, No.3 2003

©2021 KOBELCO RESEARCH INSTITUTE, INC.

### 3.3 ガスの計測による長期安定性の評価（密閉式）

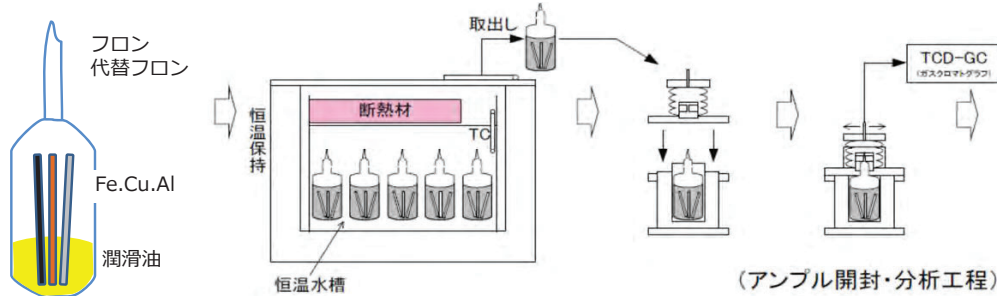


図3.3-1 アンプル試験

図3.3-2 アンプル試験

JIS K 2211 冷凍機油  
附属書B  
シールドチューブテスト

環境を模擬した促進試験を実施し、長期間を通して、基礎データの取得をお手伝いします。

CO、CO<sub>2</sub>の吸収、放出、累積変化量  
溶出物の評価（環境安全品質基準）

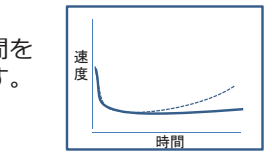
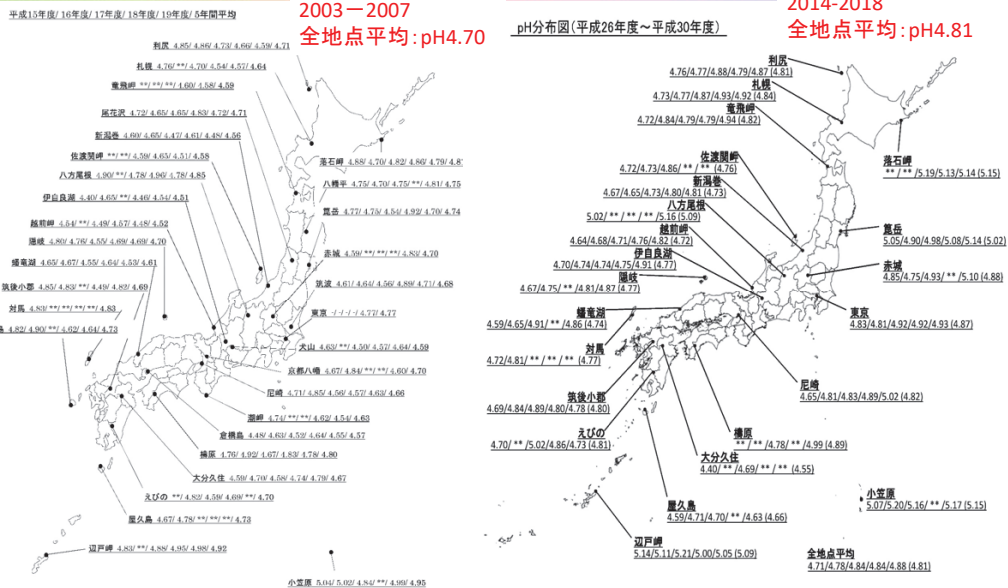


図3.3-3 各種環境と長期安定性のイメージ

温度加速試験（実績：180°C）

数値化による  
計算シミュレーションを用いた長期評価

### 3.4-1 霧困気の選定 酸性雨（環境省）



出典：環境省 水・大気環境局 酸性雨長期モニタリング（平成15年～平成18年）  
環境省 水・大気環境局 酸性雨長期モニタリング（平成26年～平成30年）  
環境省 水・大気環境局 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング報告書（平成25～平成29年度）

### 3.4-2 霧困気の選定 大気環境（環境省）

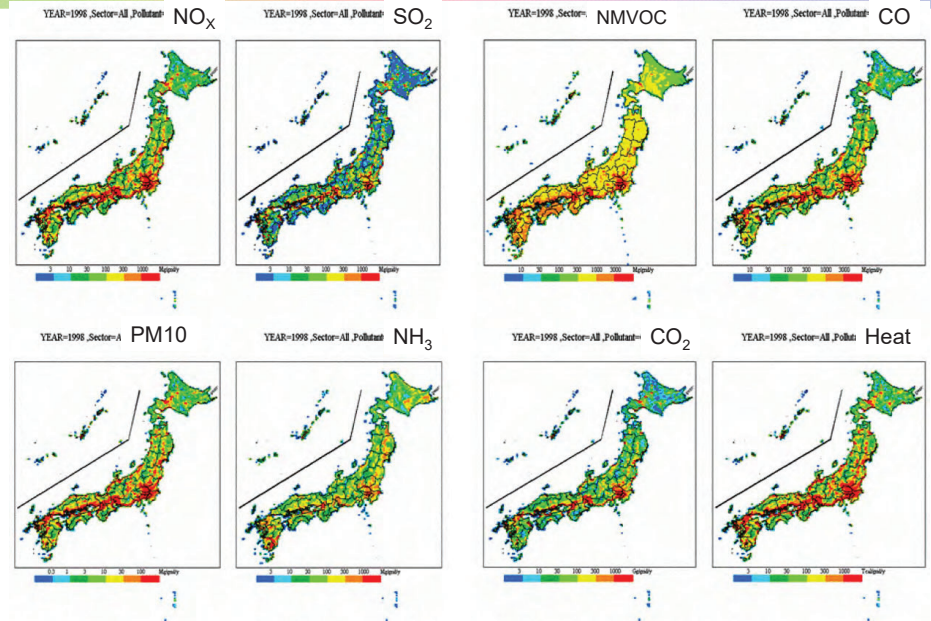


図4-5-2 排出インベントリーによる10kmグリッド分布図（沿岸航路の排出は表示していない）

### 3.5 長期安定性評価のまとめ

密閉容器やアンプル試験方法で、試験前後のガス量や溶液中の炭酸イオンを計測することで、性能評価をします。  
また、長期間の試験では、外部霧困気(大気)の影響を受けることがあり、密閉二重容器やアンプル試験を用いることで、外部影響を排除した試験を提供します。

CO、CO<sub>2</sub>等ガスの吸収、放出性能（速度）  
溶液中の炭酸イオンを計測（溶出量）  
溶出物の評価（環境安全品質基準）

実験によって数値化し、計算シミュレーションを用いた長期安定性評価のお手伝いをします。

## 4. まとめ

