汚染焼却飛灰等の保管に用いるコンクリート容器の耐久性実証試験

コンクリート容器耐久性研究会

本日の報告内容

- コンクリート容器の耐久性実証試験
  ・・・回覧中の資料
- コンクリート容器技術要件(案)
  ・・・配布資料

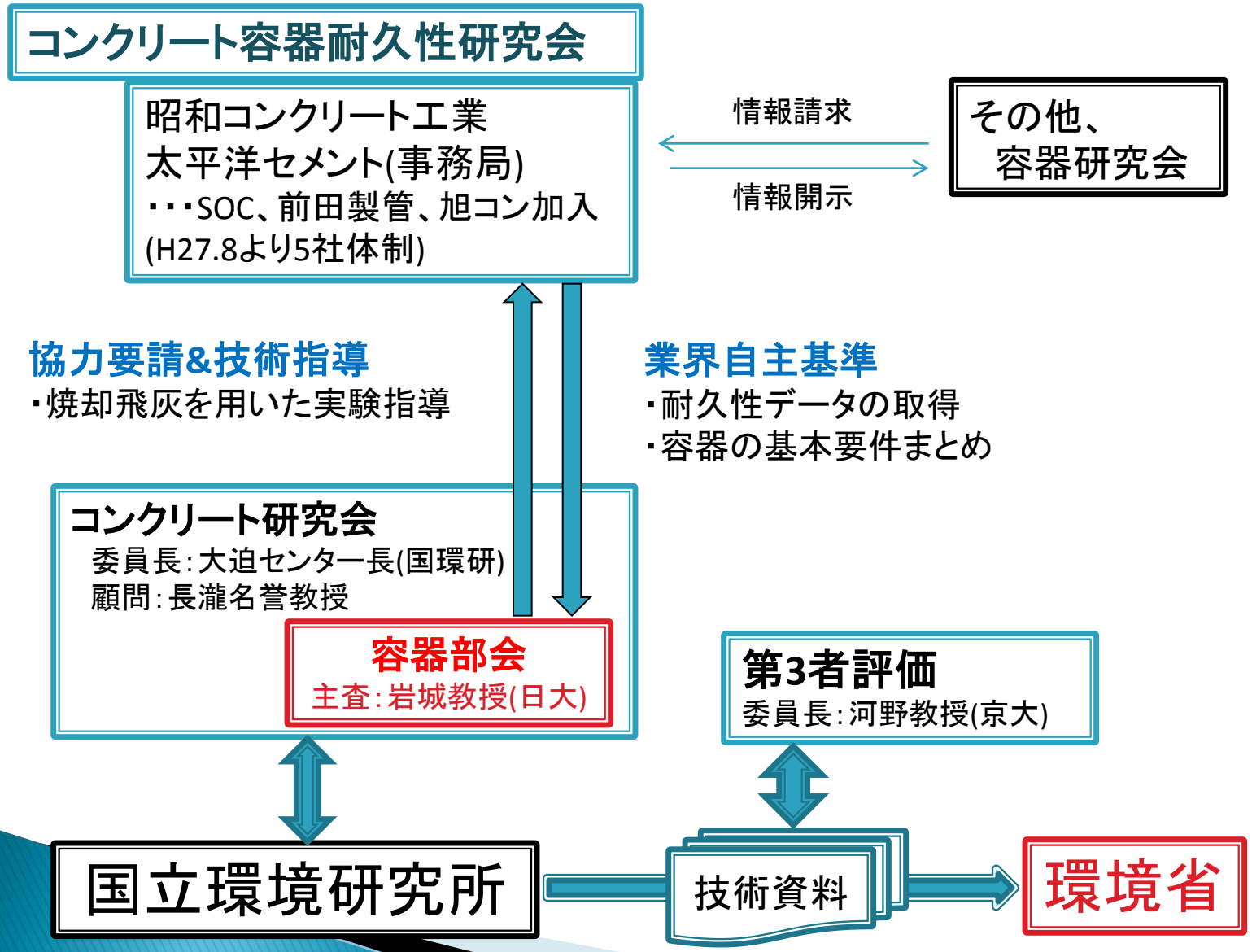
コンクリート容器耐久性研究会とは

- 汚染焼却飛灰等の保管に用いるコンクリート容器の耐久性実証に特化した研究団体
  - 会員5社(コンクリート製品会社3社、セメントメーカー2社)

- 放射性物質により汚染された各種の災害廃棄物(以下、汚染廃棄物等)を安全に保管するコンクリート容器の研究・開発を通じ、生活全般の安全性快適性を追求し、もって社会に貢献することを目的とする

(会則　第2条)

研究・開発スキーム


コンクリート容器耐久性研究会
昭和コンクリート工業
太平洋セメント(事務局)
・・・SOC、前田製管、旭コン加入
(H27.8より5社体制)
情報請求
情報開示
その他、
容器研究会
協力要請&技術指導
・焼却飛灰を用いた実験指導
業界自主基準
・耐久性データの取得
・容器の基本要件まとめ
コンクリート研究会
委員長：大迫センター長(国環研)
顧問：長瀧名誉教授
容器部会
主査：岩城教授(日大)
第3者評価
委員長：河野教授(京大)
国立環境研究所
技術資料
環境省

これまでの活動

- 2014.8　研究会発足　2社体制
- 　(昭和コンクリート工業、事務局TCC)
- 2014.11　暴露試験スタート
- 2015.4　公開見学会
- 2015.6　暴露6ヶ月計測
- 2015.8　総会　3社入会承認　5社体制
- 　(旭コンクリート工業、SOC、前田製管)
- 2015.11　暴露1年目計測
- 2016.2末　報告書とりまとめ
- 2016.3末　国環研会合

※検討会を計7回開催

実物大容器暴露試験

- 概要：実物大の容器に加水した焼却飛灰を投入し、最も過酷な条件下でコンクリートの耐久性を評価

- コンクリート容器：計5体
  - 容器仕様2種類
  - コンクリート2種類
    （普通コンと**FAコン※**）

※FA30%置換、膨張材使用

＜水準＞

仕様	投入灰	普通コン	FAコン
a	乾燥飛灰	－	○
	湿潤飛灰	○	○
b	湿潤飛灰	○	○

- 処理対象物：焼却飛灰
  - 調整飛灰を容器に投入、蓋を被せて屋外(福島県内)へ暴露

- 試験項目
  - 容器内壁の観察、容器内温湿度、コンクリート・鉄筋ひずみの変化、塩分浸透・鋼材腐食の評価、劣化解析、採取コア分析、表面透気係数

焼却飛灰の特性

- 福島県一般ごみ焼却施設
  - H7竣工、燃焼ストーカ炉(120t/日)

- 提供飛灰の分析結果
  - 密度2.22g/cm^3，湿分18.6%
  - 可溶性塩類

ストーカー炉飛灰の平均的な$CaCl_2$含有量は約20mass%

含有量※ (mass%)		
NaCl	KCl	$CaCl_2$
10.2	8.54	12.9

※水/飛灰=0.5のペースト抽出液の分析から算出

- 化学組成(酸化物換算)

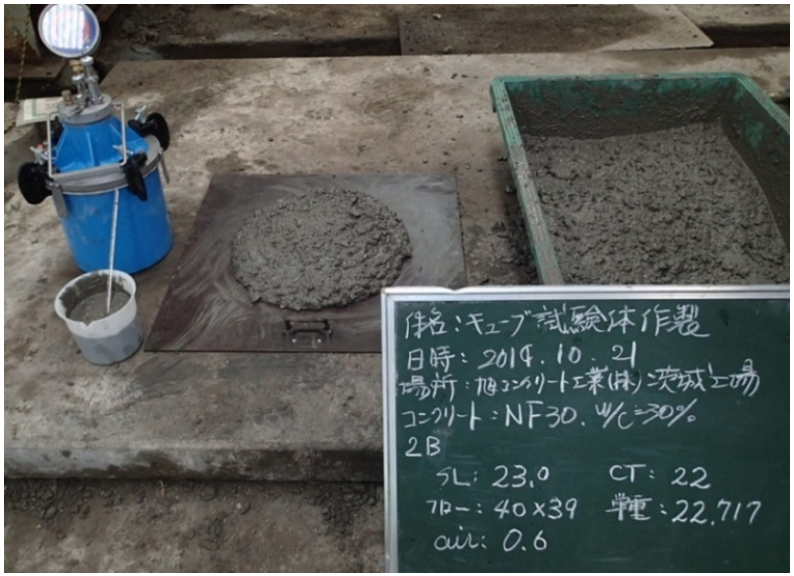
(単位: mass%)

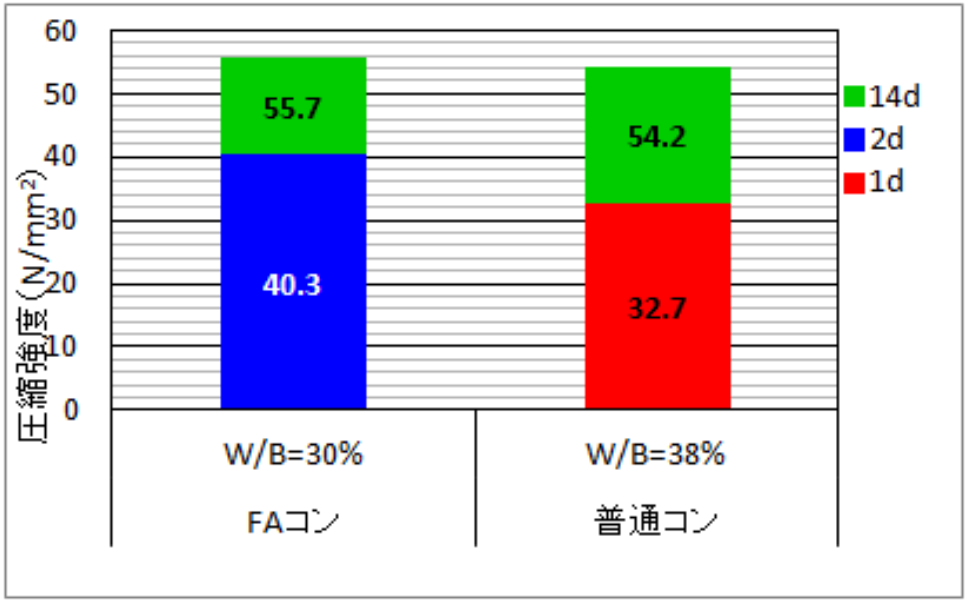
Ig-loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Cl
7.28	5.18	2.66	0.50	38.1	1.38	5.87	8.38	5.23	21.9

- 放射性セシウム Cs-137 1800Bq/kg

コンクリート配合

- FAコンクリート：フライアッシュ30%置換、膨張材使用
- 使用材料および配合設計
  - FAはJIS Ⅱ 種灰(能代産)、膨張材はNEX(C内割)
  - 設計基準強度40N/mm^2(蒸気養生下、14d管理)、Non-AEコン

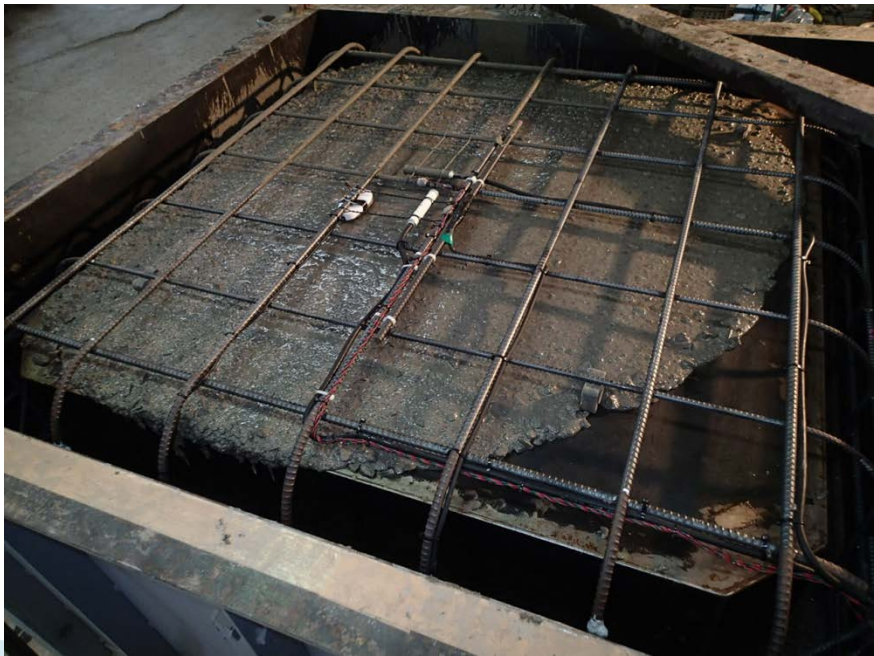




種類	W/B	s/a	SL	Air	単位量(kg/m^3)						
	(%)	(%)	(cm)	(%)	W	C	FA	NEX	S	G	SP
FAコン	30	45	22±2.5	1.5±1	170	377	170	20	723	884	5.39
普通コン	38	40	8±2.5	1.5±1	150	370	0	25	744	1116	4.63

コンクリート容器の製造

- 専用型枠(容器、蓋)、逆打ち製造
  ⇒脱型後に反転
- 常圧蒸気養生
  - 前置き3～4h、昇温20℃/h
  - 最高温度65～85℃、3h以上保持
- 後養生：スプリンクラー散水7日間



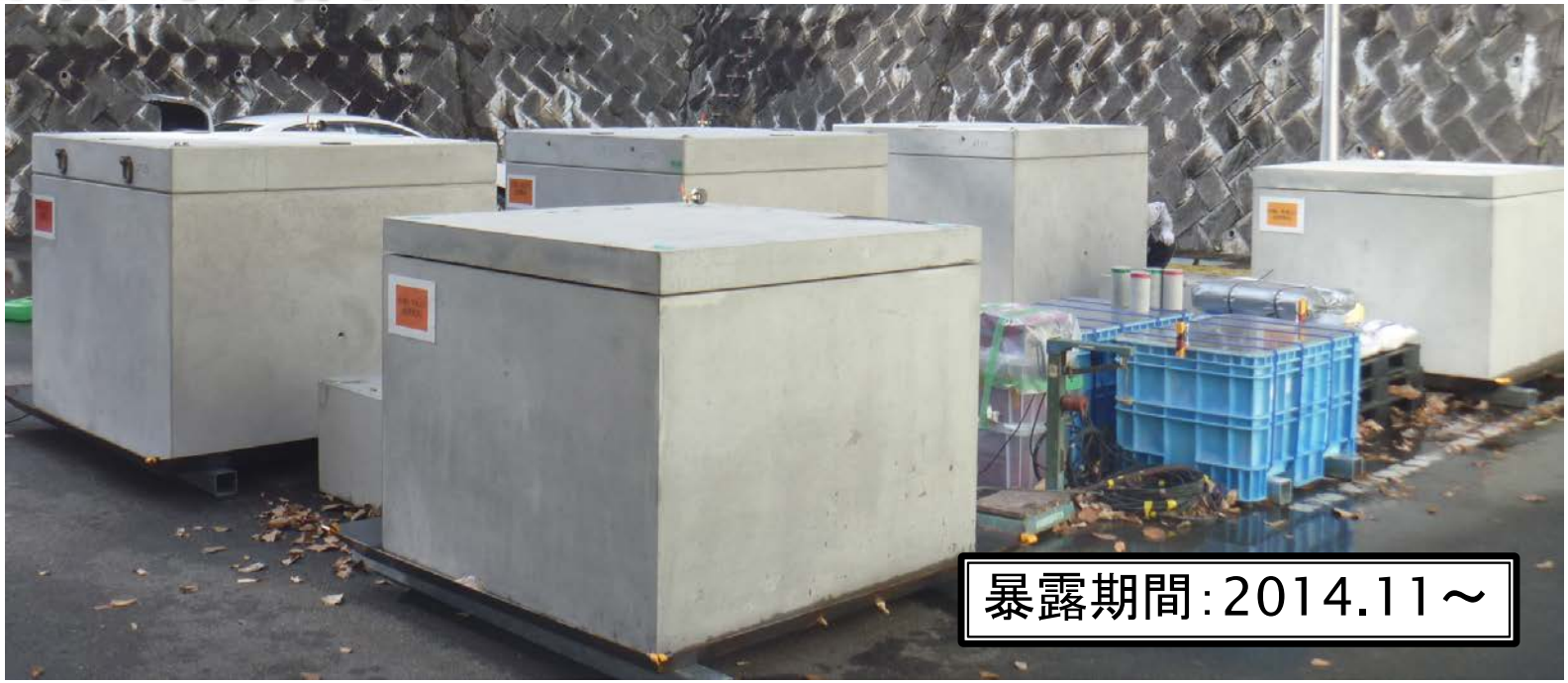
湿潤飛灰の調整

＜灰ペースト配合＞

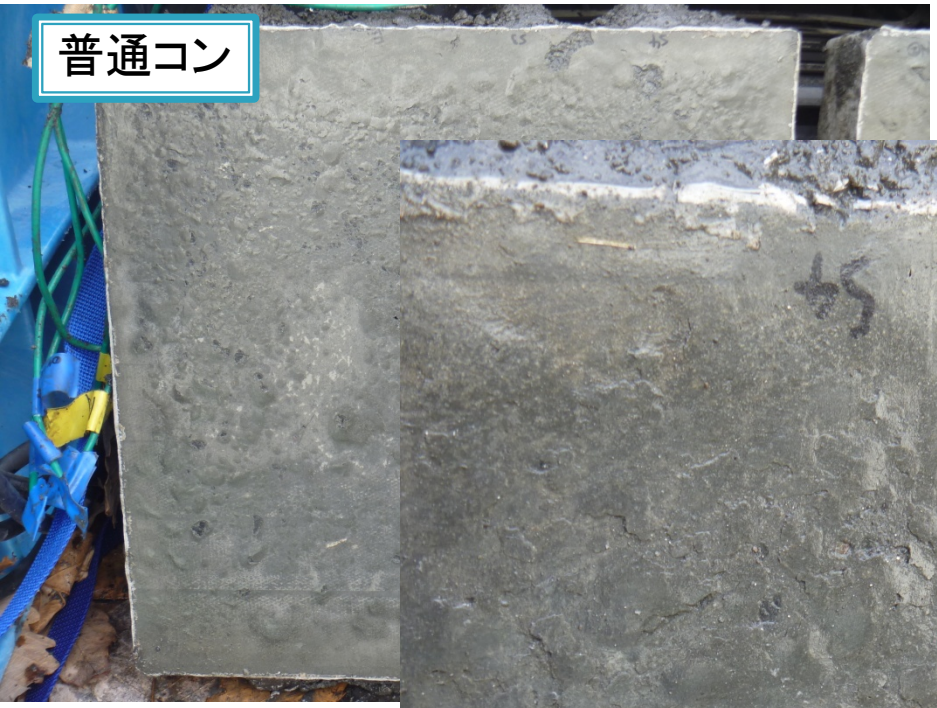
$CaCl_2$ /乾燥灰	水/焼却灰(有姿)	(kg/バッチ)		
		水	融雪材	飛灰
0.2	0.5	20	8	100

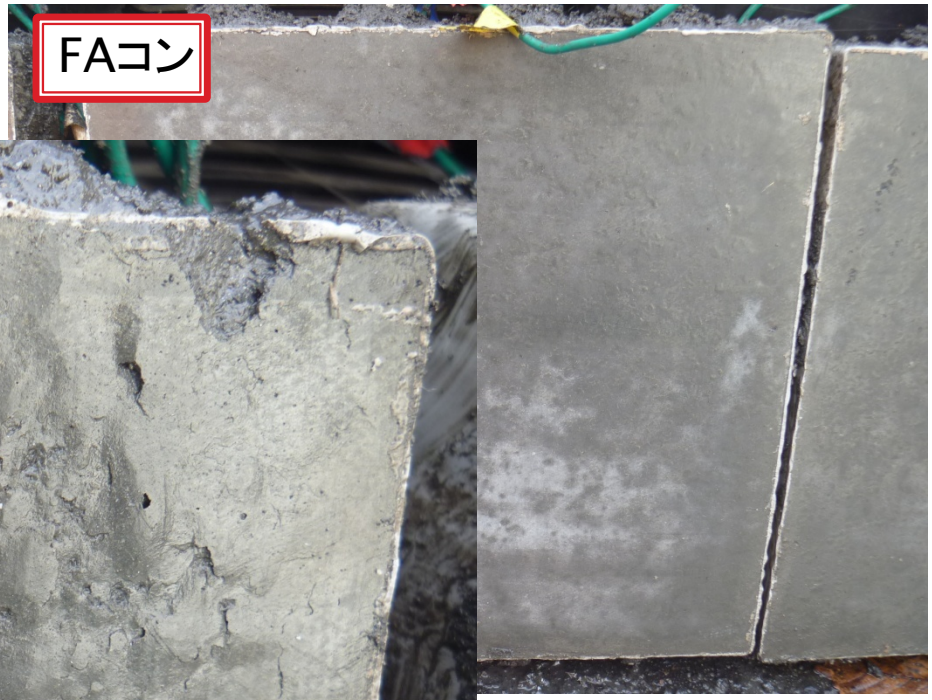
※融雪材はフレーク状、塩カル2水塩

容器暴露状況



平板供試体の劣化状況(暴露1ヶ月)





- 普通コンには、表面モルタルに浮きや剥離
- **FAコンには、変状が認められず**

※小型供試体は仕様bと同一配合、同一養生

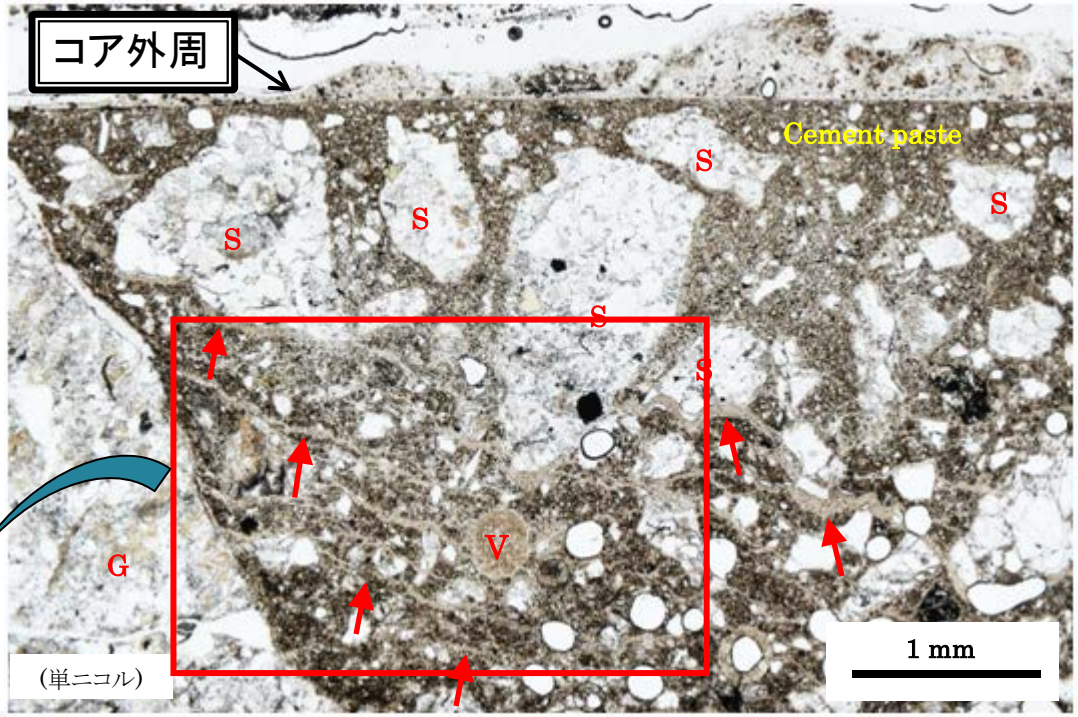
内壁コンクリートの劣化状況(暴露4ヶ月)

- 普通コン(仕様b):湿潤飛灰に接した内壁のほぼ全面に浮き・剥離
- **FAコン(仕様aとb)には、変状が認められず**

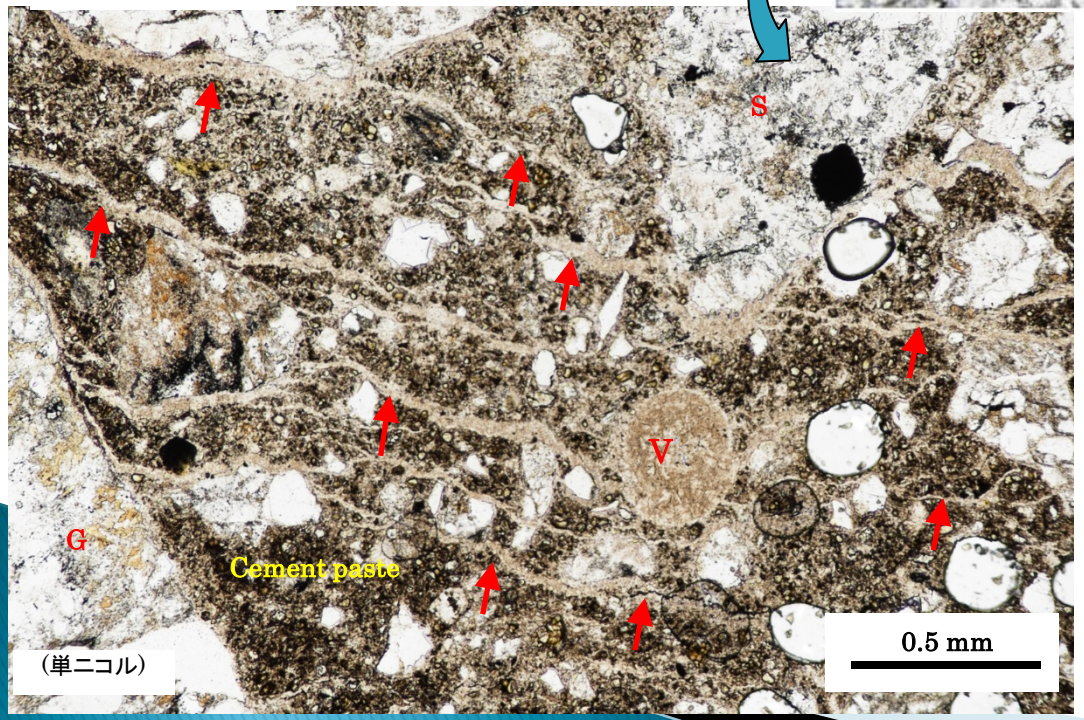
☆原因究明！！・・・凍害？硫酸塩劣化？塩類劣化？

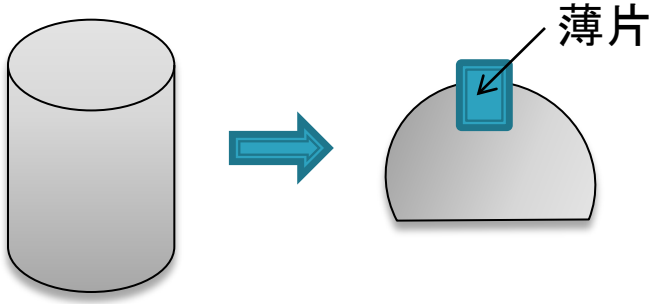
普通コン劣化解析

- ✓ 供試体φ10×20cmの外周を含む薄片(2cm角)を作製
- ✓ 偏光顕微鏡観察
  ⇒ひび割れ形態確認



＜拡大写真＞



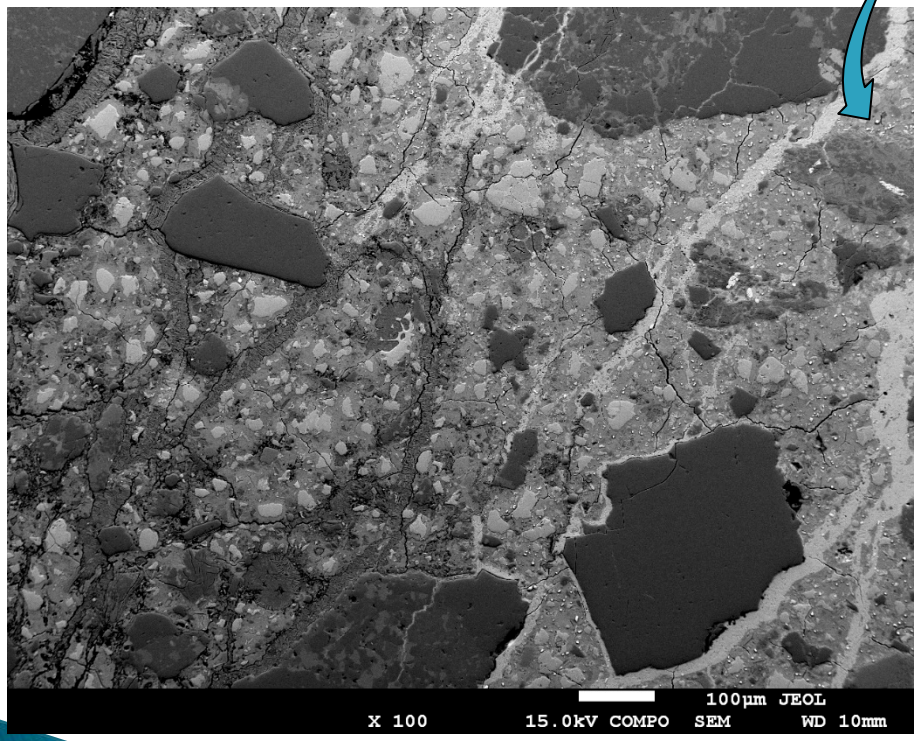


✓ 深さ2～3mmに層状ひび割れ多数、骨材は迂回

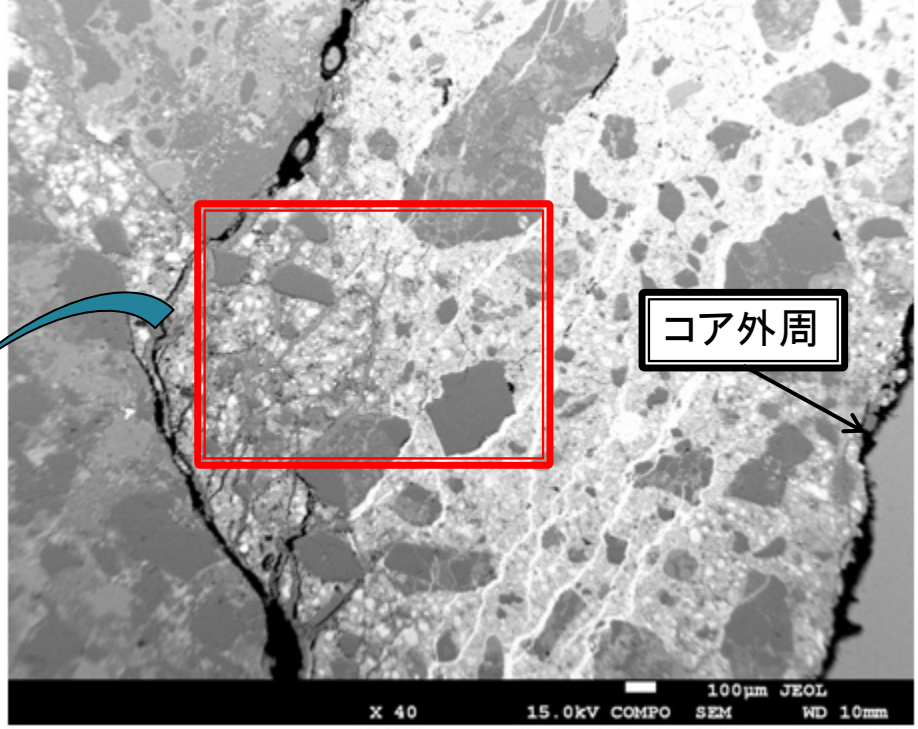
✓ ひび割れ内と空隙内に析出物有り

SEM/EDS分析

- ✓ ひび割れ内析出物のEDS分析
  ⇒組成確認、物質同定



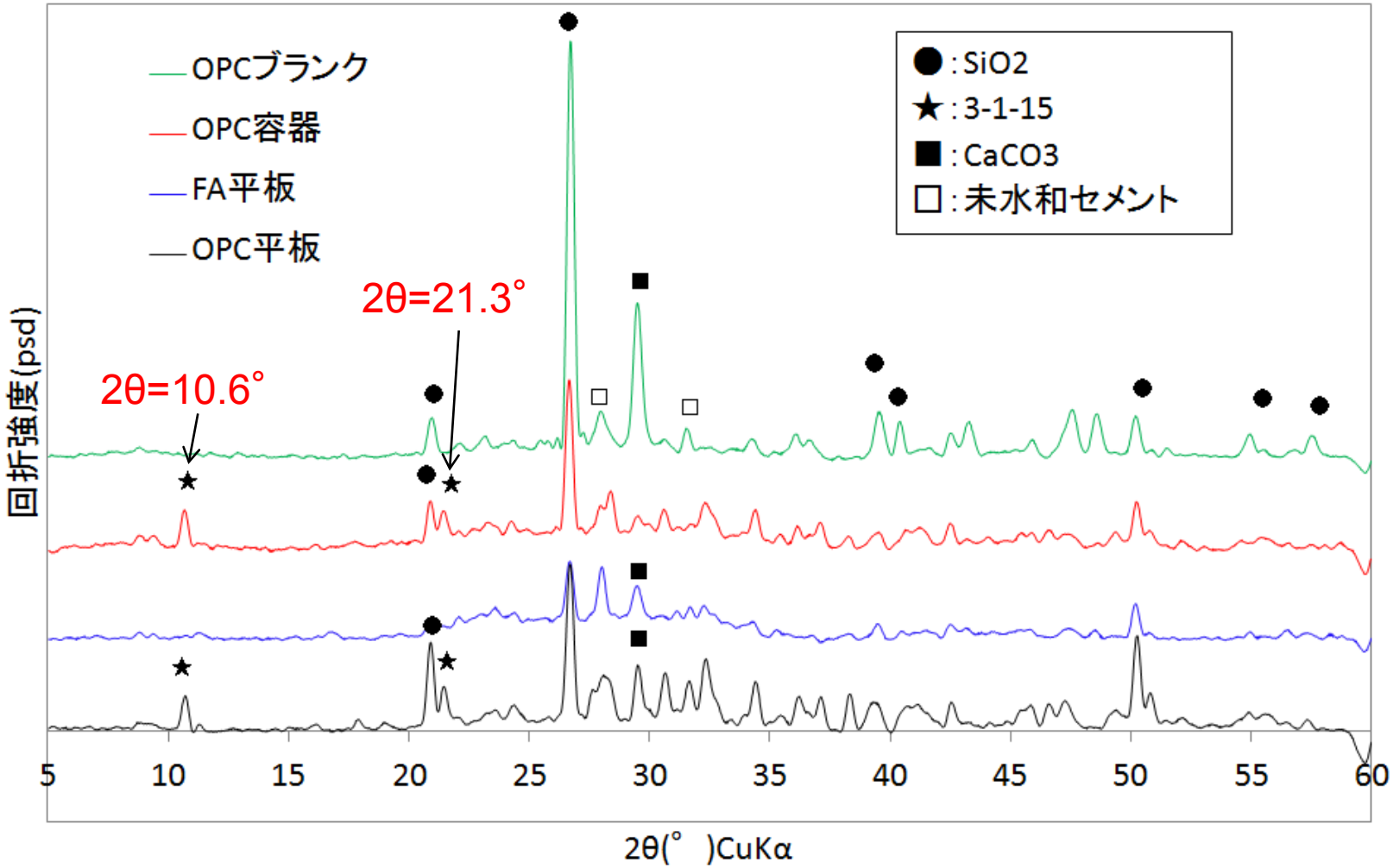
＜反射電子像(BEI)＞



- ✓ 析出物質の輝度高い、Ca/Cl=2.0
  ⇒ XRD分析で検出された複塩
  $3CaO \cdot CaCl_2 \cdot 15H_2O$※の組成に合致
- ✓ AlやSの集積無し(硫酸塩劣化はない)

※セメント硬化体中の水酸化カルシウム($Ca(OH)_2$)と塩化カルシウム($CaCl_2$)の反応で生成する複塩

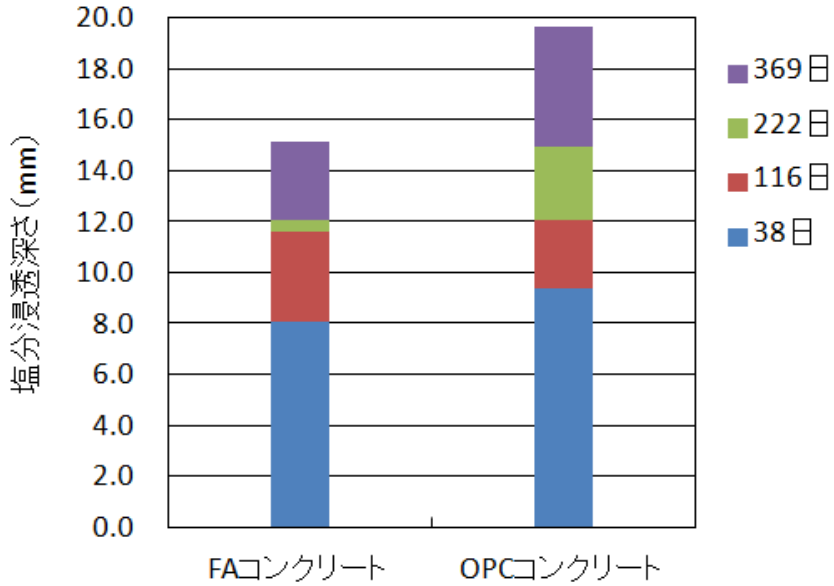
XRDによる複塩の同定



3CaO·$CaCl_2$·15H_2Oの主要な回折ピーク確認！

塩化物イオン浸透性

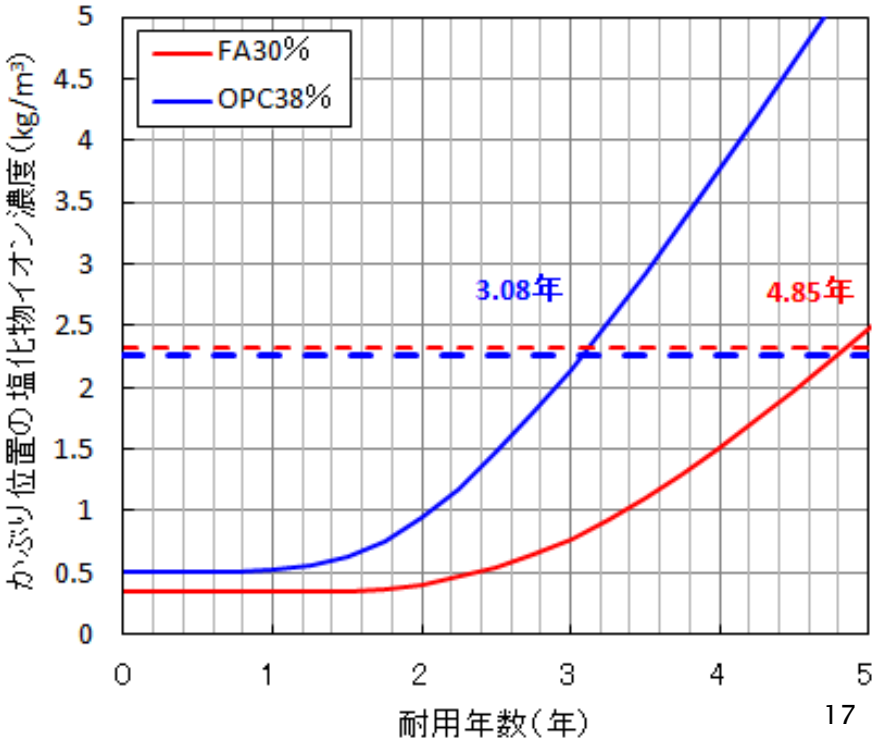
- ✓ 約6ヶ月間、湿潤飛灰に埋設した供試体φ10×20cm
- ✓ EPMAによる面分析
  ⇒以下の特性値を実測



	普通コン	FAコン
見掛けの拡散係数(D_d)	0.726	0.486
表面全Cl^-濃度(C_0)	40.5	39.9
初期含有全Cl^-濃度(C_i)	0.51	0.34

鋼材かぶり位置(45mm)で腐食発錆限界濃度に達する年数

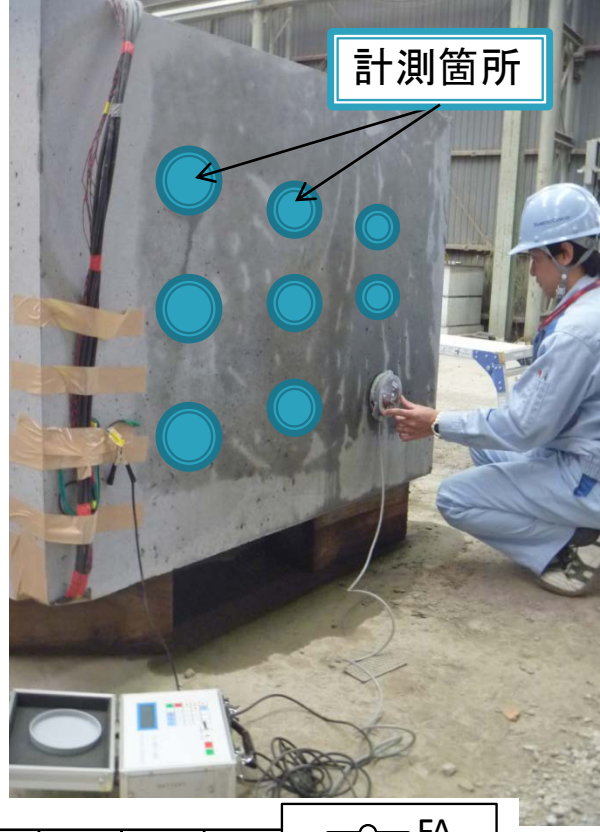
- ・普通コン⇒3.08年
- ・FAコン　⇒4.85年



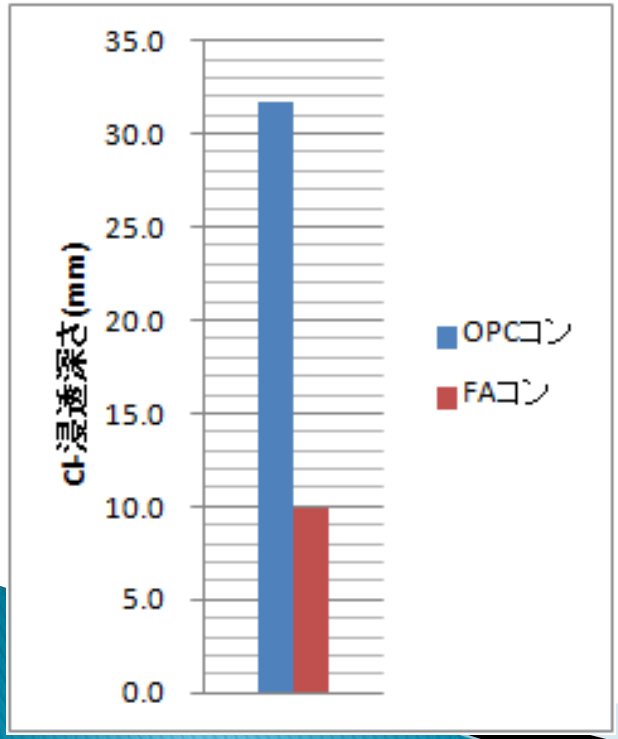
実物大容器での鋼材腐食評価

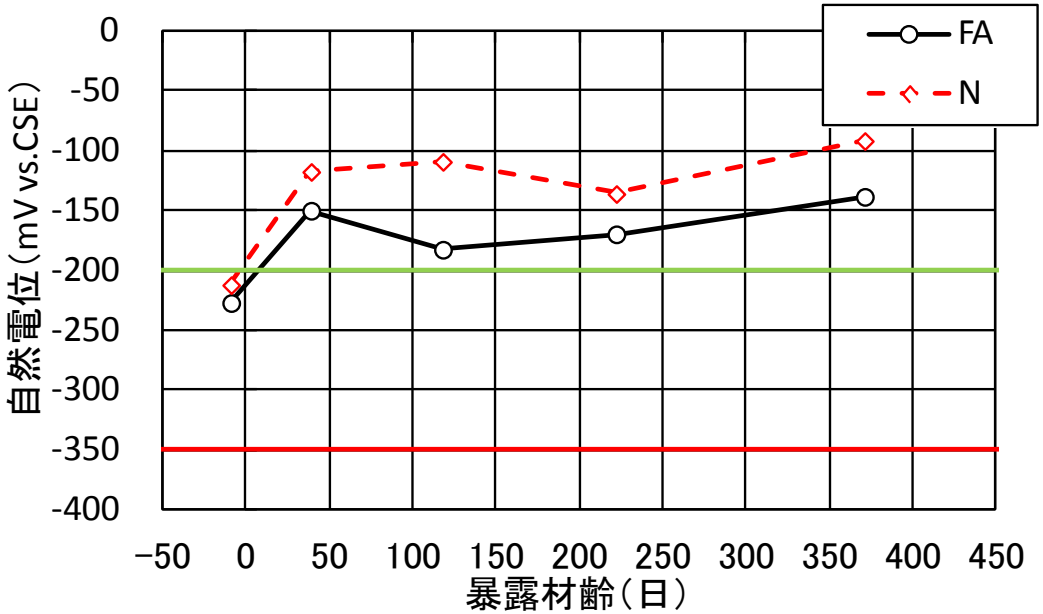
- 自然電位は、ASTM基準の腐食可能性が無い領域を推移
- 暴露1年でCl^-は鉄筋位置に到達せず

(鉄筋かぶりは容器壁の高さ中央で45mm)



＜コア分析、硝酸銀法＞

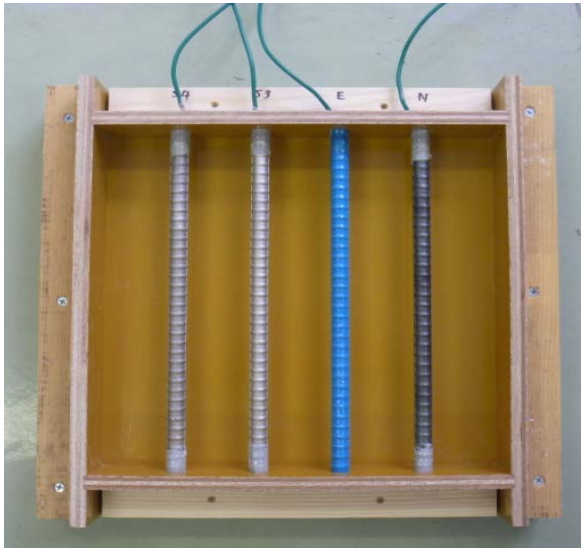


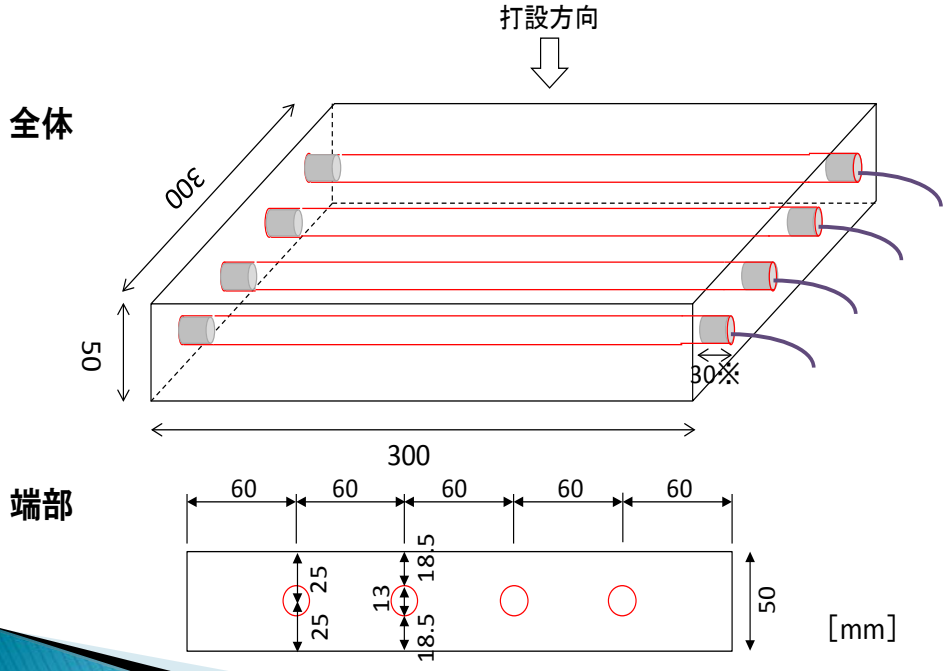


平板供試体による鋼材腐食評価

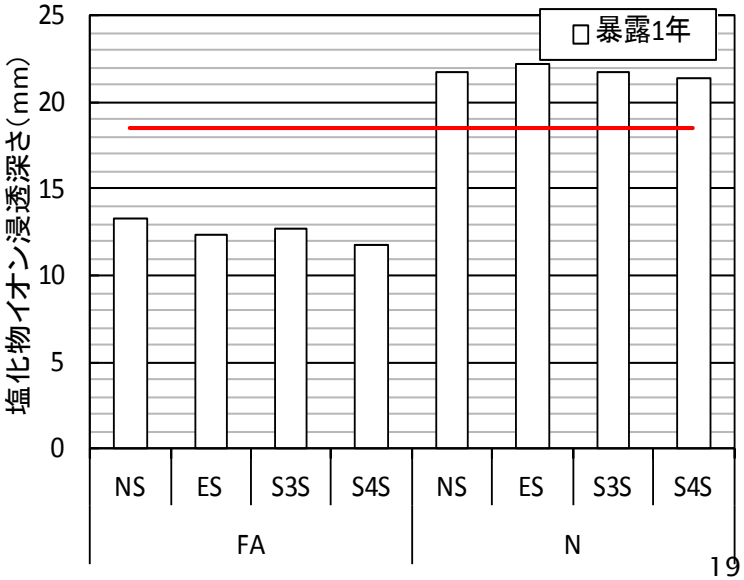
- 自然電位および分極抵抗は、数値が不安定
- 暴露1年の解体調査より

⇒普通コンに埋設した普通鉄筋は腐食、SUS410は点錆、SUS304とエポ筋は腐食無し。FAコンはCl^-が鉄筋位置に到達しないため腐食無し



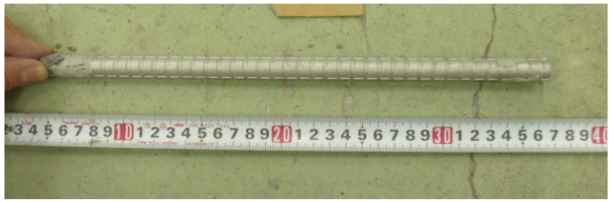


※鋼材は10mm露出させエポキシ樹脂を30mm被覆。



		FAコン	普通コン
普通鉄筋 SD295A-D13	水準		
	暴露材齢	12ヶ月	12ヶ月
	写真		
	備考	錆なし	錆点在

エポキシ樹脂塗装鉄筋	水準	FA-ES	N-ES
	暴露材齢	12ヶ月	12ヶ月
	写真		
	備考	腐食なし(樹脂の変質なし)	腐食なし(樹脂の変質なし)

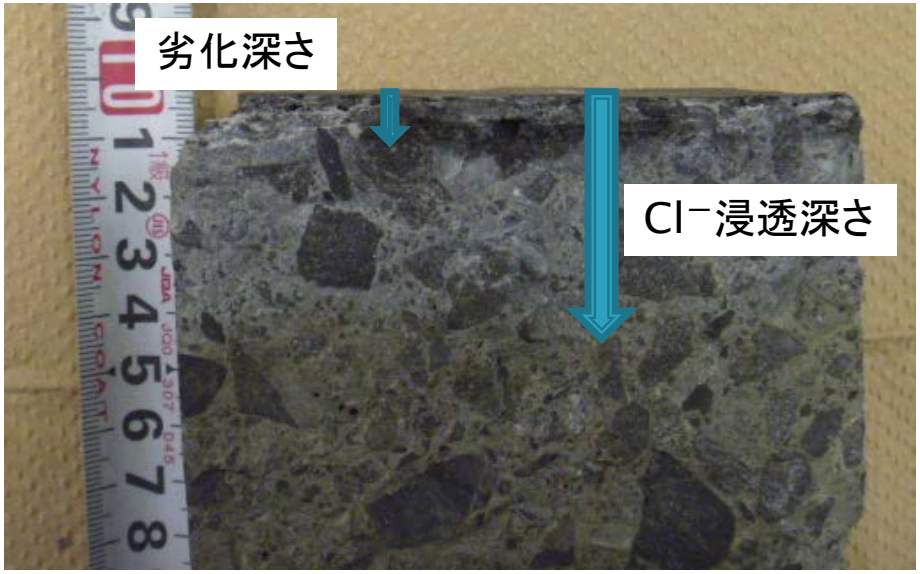
ステンレス鉄筋 SUS304	水準	FA-S3S	N-S3S
	暴露材齢	12ヶ月	12ヶ月
	写真		
	備考	腐食なし	腐食なし

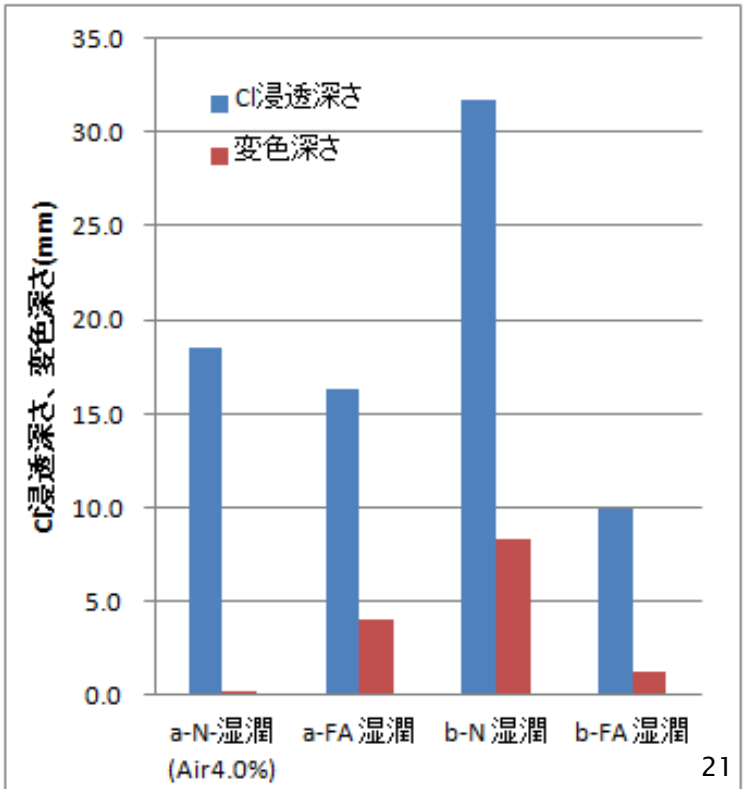
ステンレス鉄筋 SUS410	水準	FA-S4S	N-S4S
	暴露材齢	12ヶ月	12ヶ月
	写真		
	備考	腐食なし	点錆数箇所

容器コアの分析(1年時)

- 飛灰接触部コアを割裂して、硝酸銀噴霧

⇒Cl^-浸透深さと劣化深さ



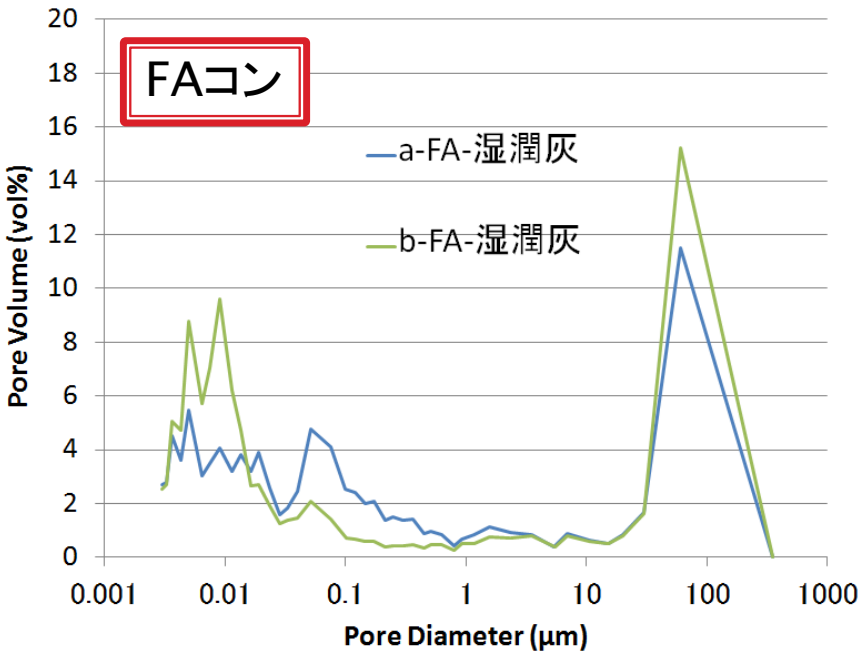


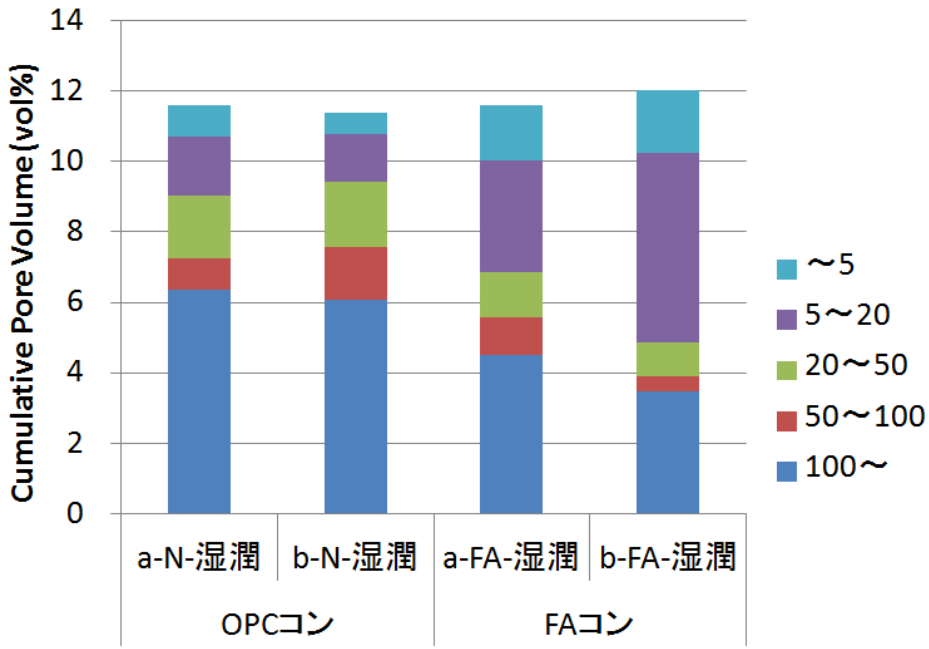
＜各容器コアの劣化状況(目視)＞

仕様 / 種類	a	b
普通コン	小(AE連行の為？)	劣化大
FAコン	中	軽微

コンクリートの空隙構造評価

- 飛灰非接触部コアからモルタル片を採取
⇒水銀圧入式ポロシメーターによる測定





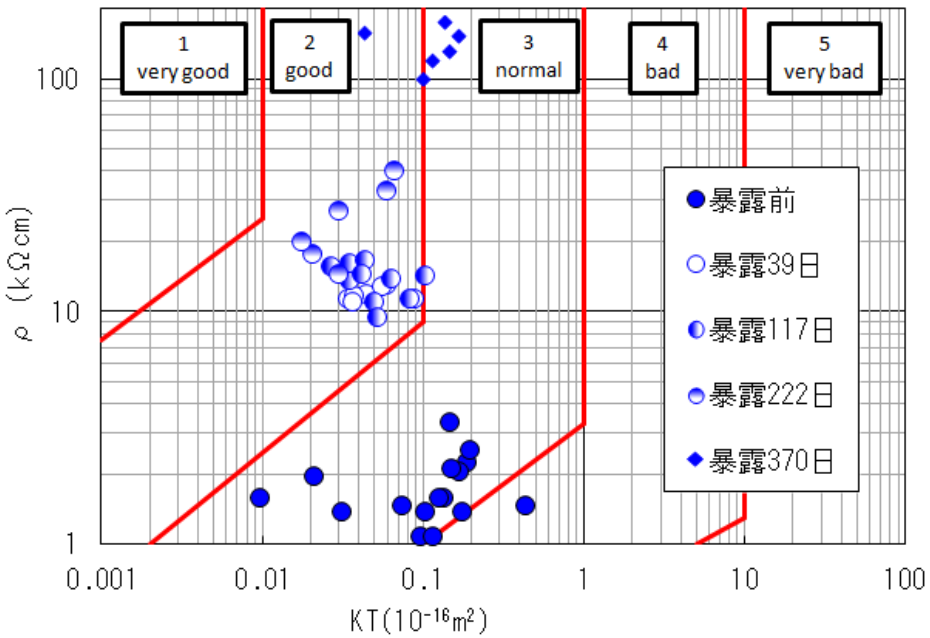
- FAコンは仕様によって空隙径分布に大きな差
(仕様bでは養生温度の上昇⇒緻密化)

表面透気係数とコンクリート抵抗値の関係

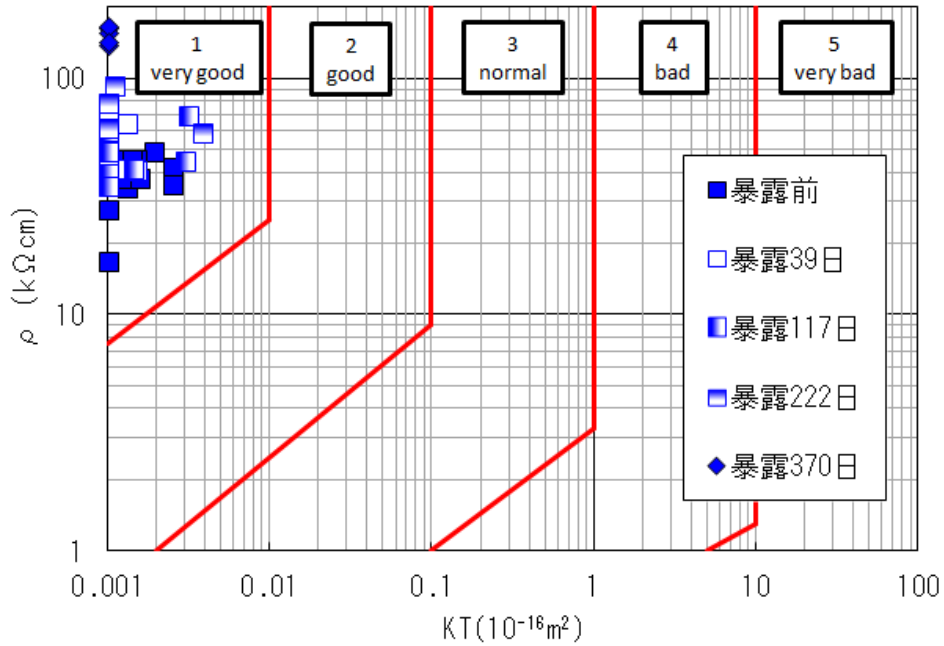
- 実物大FAコンクリート容器の壁外側中央

⇒トレント法による表面透気係数を比較

FAコン(仕様a)



FAコン(仕様b)



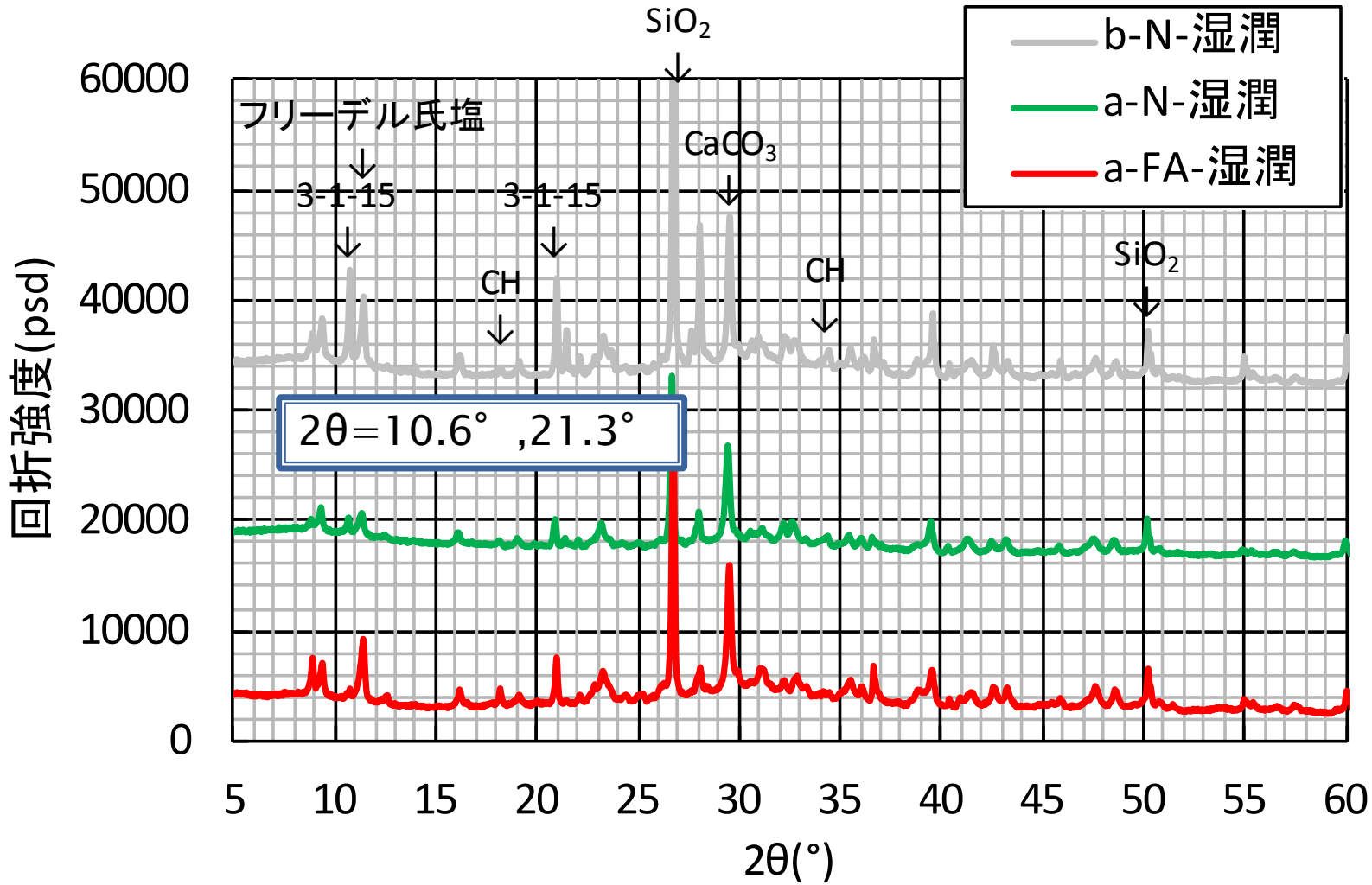
- 仕様bは暴露前から表面透気係数が極めて小さい

⇒ Cl^-浸透が少なく、塩類劣化が抑制された

XRDによる複塩の同定

- 飛灰接触部コアからモルタル片を採取し、XRD分析

⇒最も劣化が激しかった仕様bの普通コンクリートで3–1–15検出



暴露試験まとめ

- コンクリートが焼却飛灰に接触する場合、塩化物イオンの浸透は予想以上に早い

  ⇒容器でのかぶり確保は困難な可能性
- 容器内壁に劣化が生じた普通コンクリートでは、複塩($3CaO \cdot CaCl_2 \cdot 15H_2O$)生成を確認。広範囲に浮きや剥離発生。複塩生成時の体積膨張に起因

  ⇒部材断面欠損に繋がり、塩分浸透促進のおそれ
- FAコンクリートでは、塩分浸透と塩類劣化は抑制される傾向。仕様による差有り。

  ⇒FA性能を引き出すには養生が重要

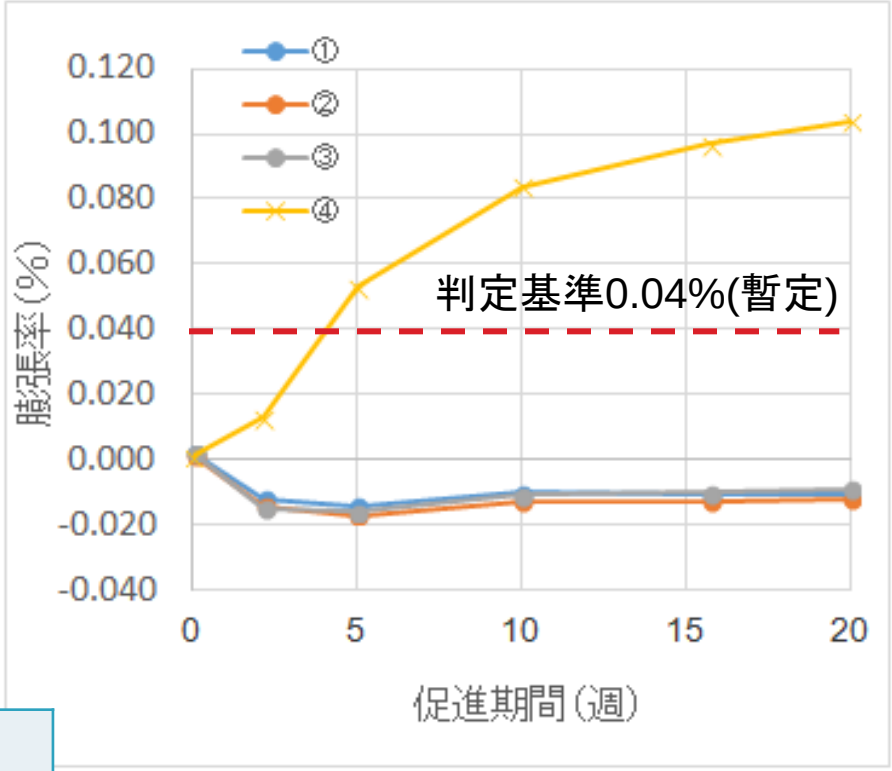
要素実験

- ASR促進試験(小型コンクリートプリズムを用いたASR促進試験)
- 凍結融解試験
- 透水試験
- 自己収縮、乾燥収縮特性

CPTによるASR促進試験

- 「小型コンクリートプリズムを用いたASR促進試験方法(案)」JCI-TC115FS
  - ✓ 寸法75×75×250mm、60℃湿潤環境
  - ✓ 実配合のコンクリートを使用
  - ✓ 試験期間中のアルカリ溶脱を抑制

  (アルカリ溶を含む不織紙とラップで覆う)



＜水準＞

記号	コンクリート種類	アルカリ添加量 (kg/m³)
①	FA30コン W/B=0.33	無し
②		2.5
③		4.5
④	普通コンW/C=0.38	4.3

←FA中のアルカリ量(1%に仮定)を考慮

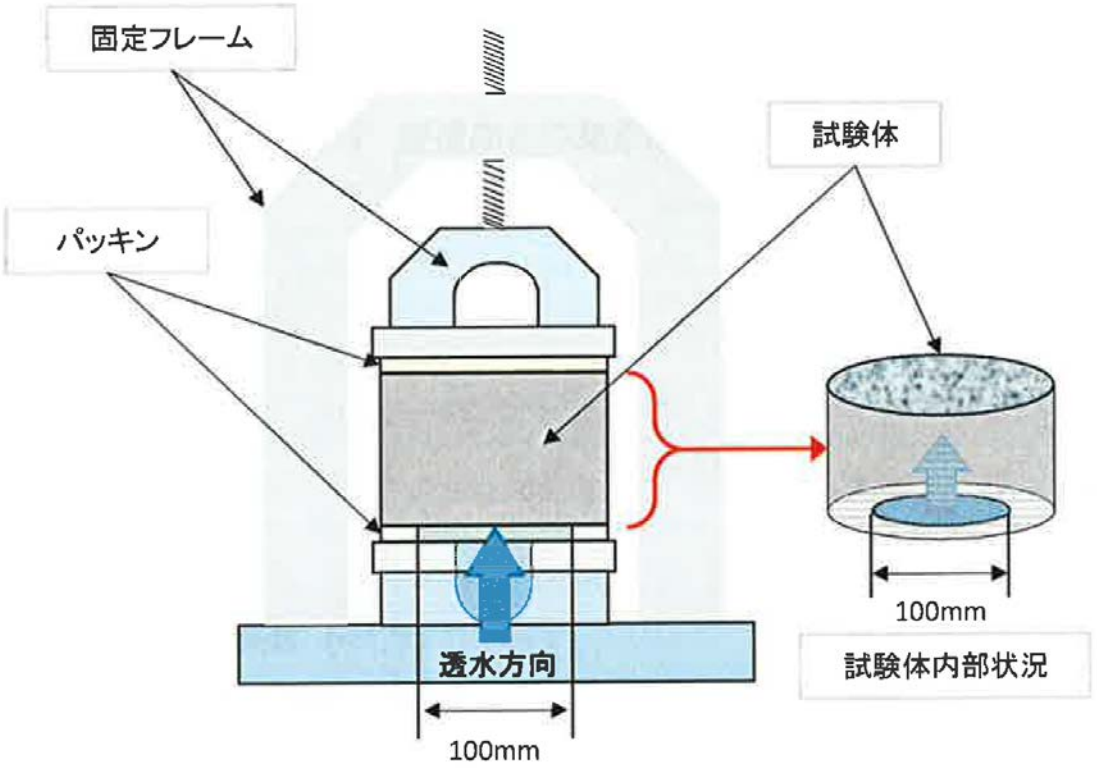
←アルカリ総量5.5kg/m³

透水試験

- 環境省告示の特措法に示される水密性に関する要件への適合性を評価する
  - ✓ 一定期間水圧を作用させ、水の浸透深さを測定(インプット法)
  - ✓ 強度レベル25N/mm²との比較

＜水準＞

記号	種類	強度レベル	実強度
N25	普通コン	25	30.8
N40蒸気	普通コン	40	50.1
FA40蒸気	FAコン	40	57.1



円板供試体：Φ15×10cm
設計水圧：P=0.5N/mm²
試験期間：2ヶ月または3ヶ月

透水試験結果

- 浸透深さを測定し、拡散係数β^2を以下の式で算出

$$B^2 = \alpha(D_m{}^2)/(4t\zeta^2)$$

D_m：平均浸透深さ(mm)、t：時間(t)、α,ζ：係数

記号	拡散係数β^2	浸透深さ(cm)		
		10年	50年	100年
N25	7.8×10^{-8}	11.0	17.4	21.2
N40(S)	8.5×10^{-9}	3.6	5.7	7.0
FA40(S)	3.3×10^{-9}	2.3	3.6	4.4

- 以下、補足資料

フライアッシュの特性

- 能代産 JIS Ⅱ種灰
  - 密度2.24g/cm^3，湿分0.1%，ブレーン比表面積3730cm^2/g
  - フロー値比109，活性度指数88(28d)，109(91d)
- 化学成分(XRF)

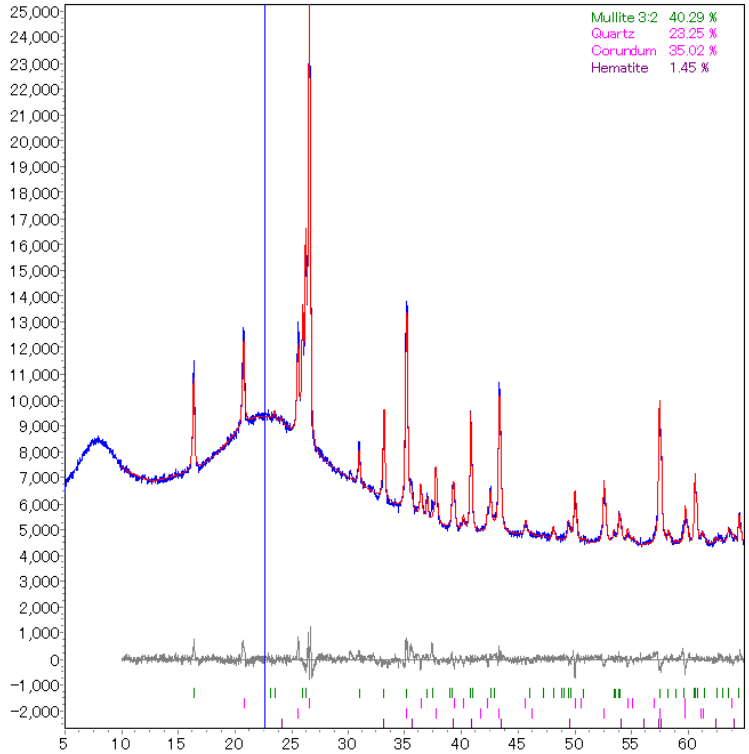
(単位: mass%)

Ig-loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Cl
1.30	57.1	25.6	4.97	3.71	1.23	0.35	0.7	1.15	<0.001

- 鉱物組成(XRD/リートベルト法)

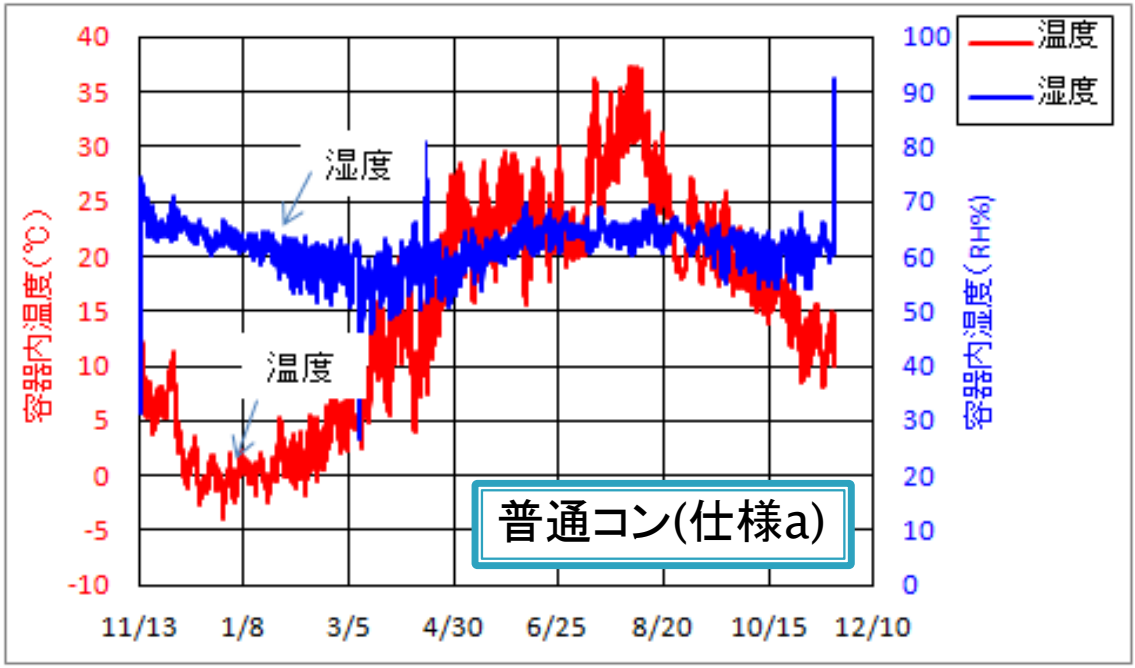
(単位: mass%)

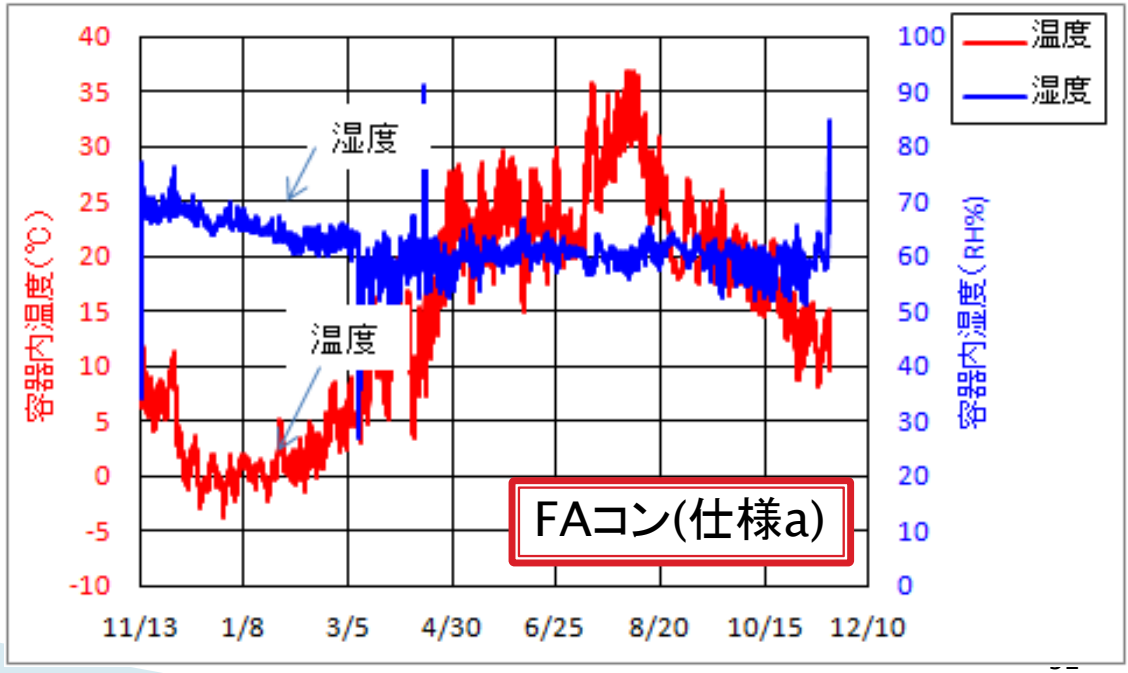
石英	ムライト	ヘマタイト	マグネタイト	非晶質
6.64	11.5	0.414	0	81.4



容器内の温湿度

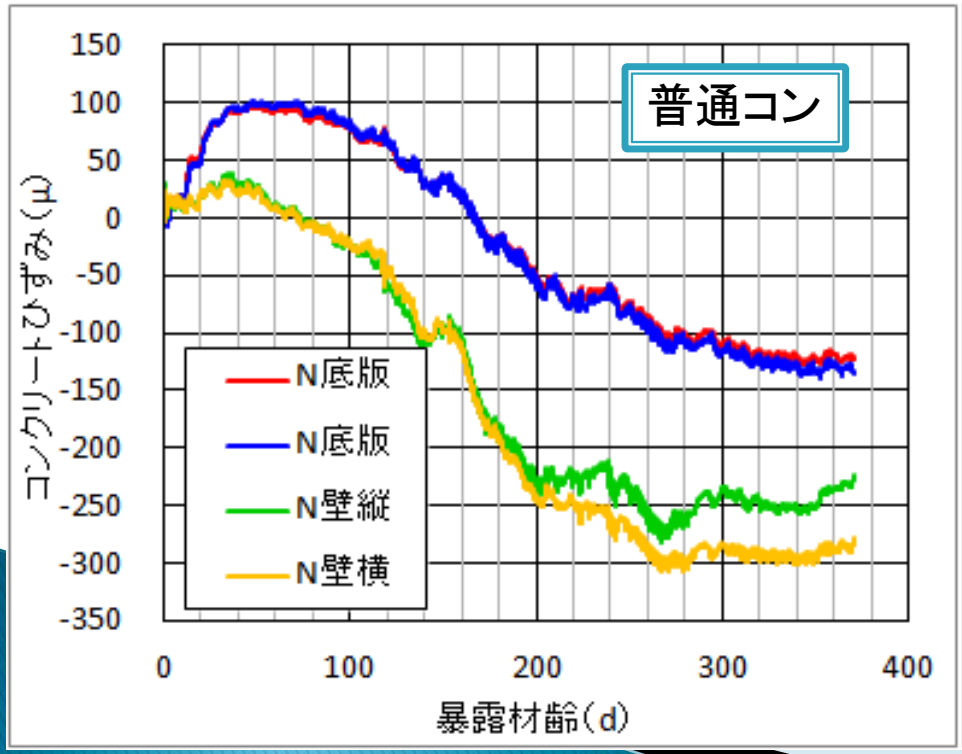
- 温度は外気温に連動
- 湿度は以下に落ち着く
  湿潤飛灰⇒R.H.60%
  乾燥飛灰⇒R.H.50%
- コンクリート種類の差は無い。仕様bは温湿度の日変動が大きい

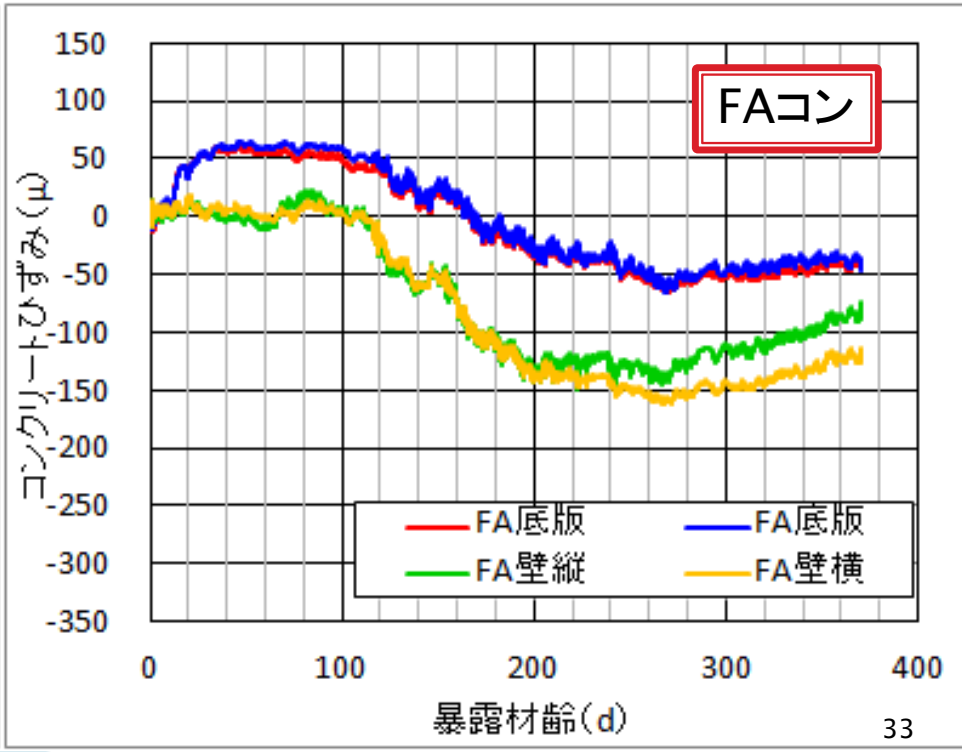




コンクリートひずみ

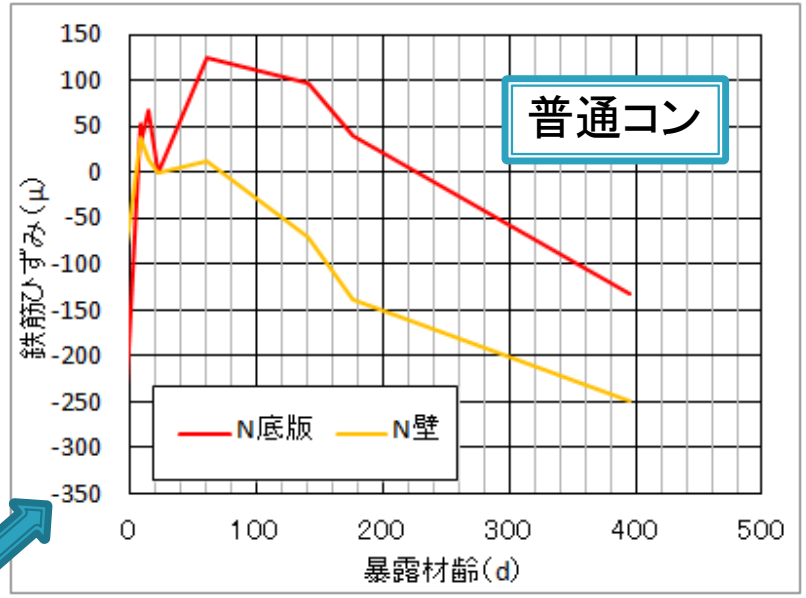
- コンクリートひずみは外気温に連動
(夏期は収縮進行、冬期は停滞)
- 底版は初め膨張側を推移、全収縮量小さい
(乾燥の影響受け難い)
- FAコンの方が収縮は小さい傾向
⇒FA反応による緻密化(透気性、空隙構造)

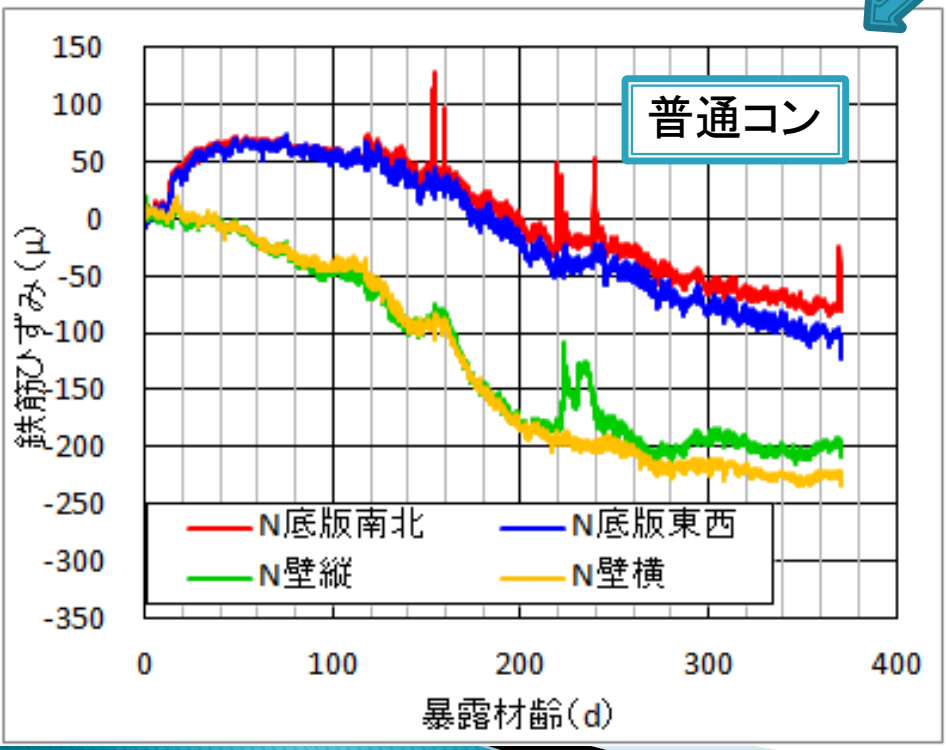


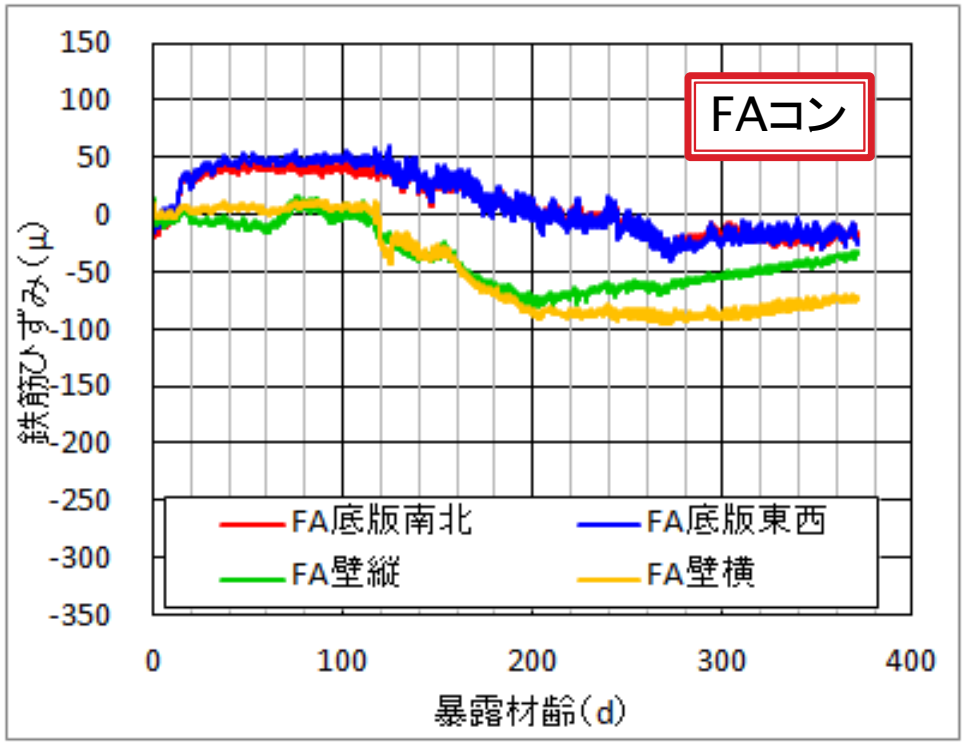


鉄筋ひずみ

- コンクリートひずみと同じ挙動
- RFIDひずみセンサの計測結果は、鉄筋ゲージの測定結果と概ね対応

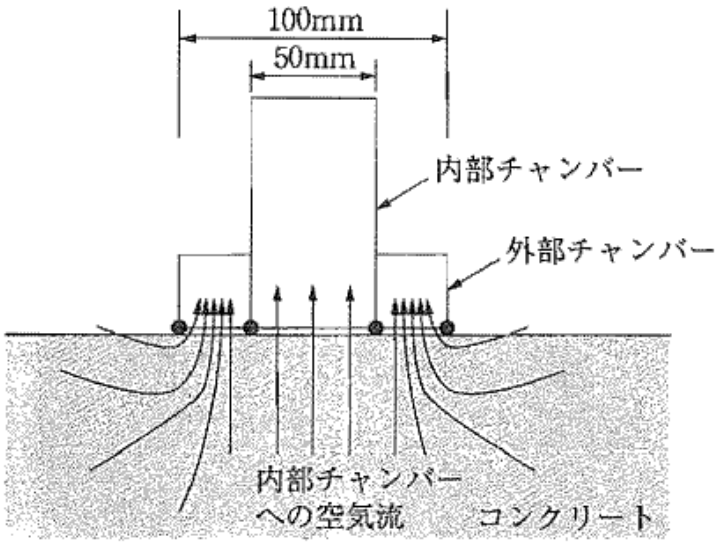




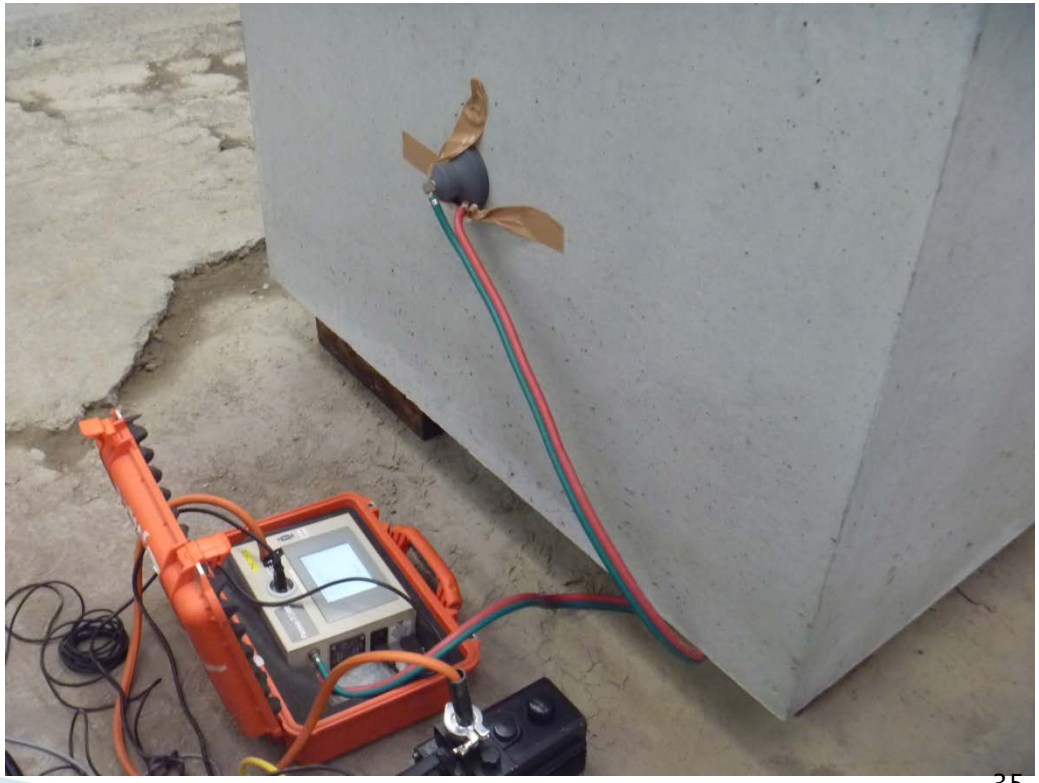


容器コンクリートの表層品質評価

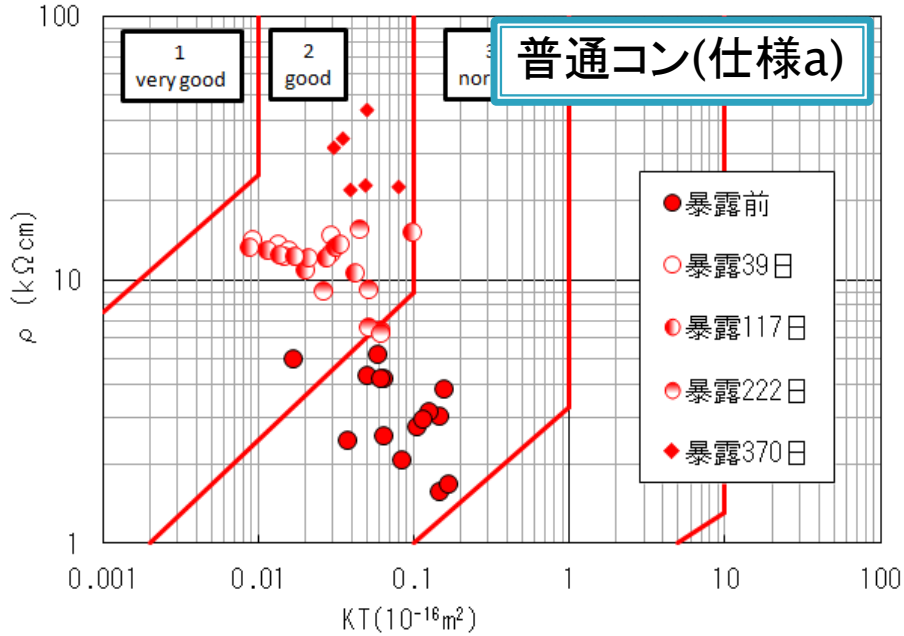
- トレント法：コンクリート構造物の表層品質を評価する非破壊試験
  - ✓ 耐久性を支配するかぶりコンクリートの密実さを評価
  - ✓ スイスではコンクリート構造物の竣工検査に活用

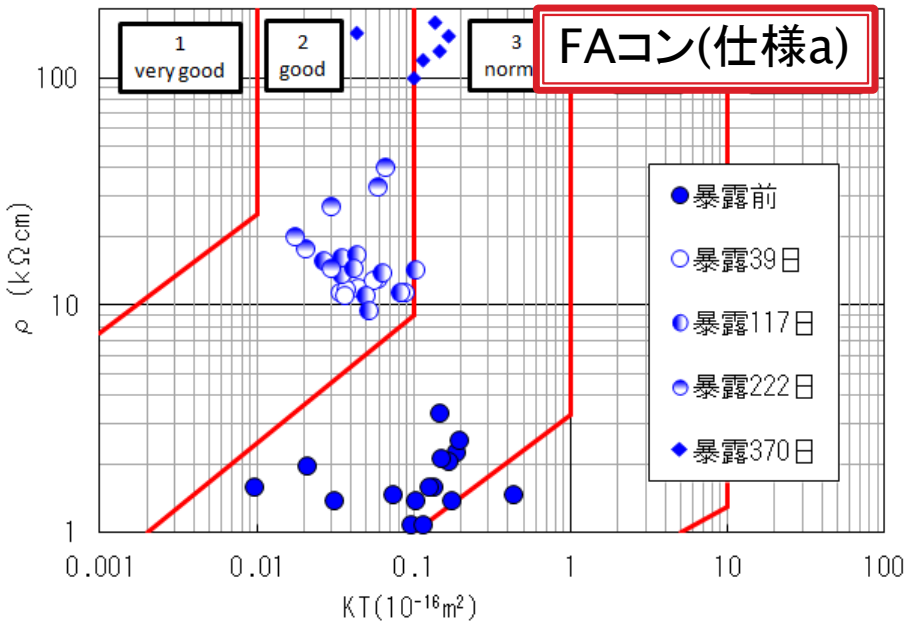


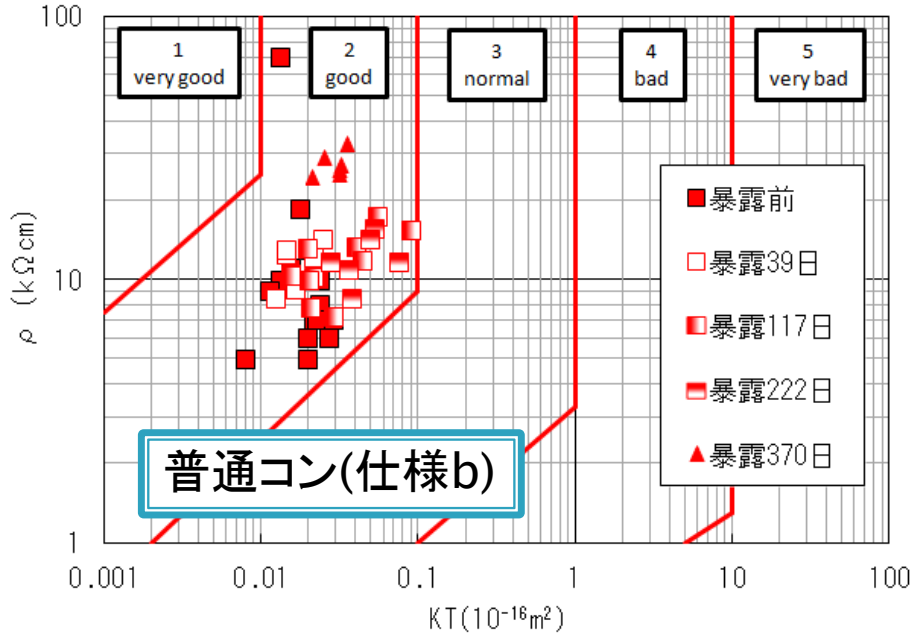
＜ダブルチャンバー方式＞

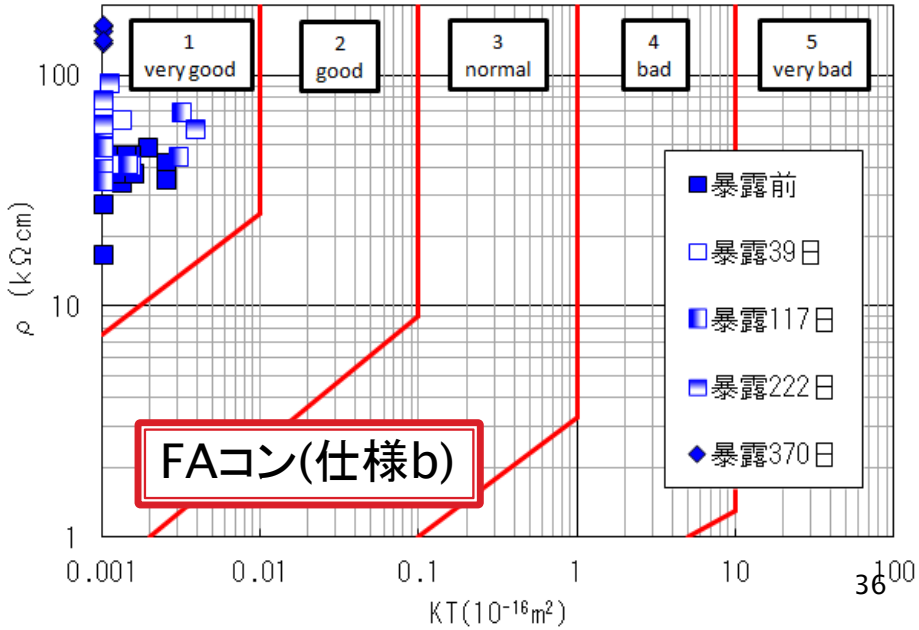


表面透気係数とコンクリート抵抗値の関係









視察見学の受入れ

日時:　2015年4月15日（水）　午後
内容:　暴露試験の見学、飛灰の長期保管に関する意見交換討論
主催:　国立環境研究所コンクリート研究会
　　（顧問　長瀧重義　東京工業大学名誉教授）
見学者:　国立環境研究所コンクリート研究会、国や県の行政関係者、研究機関関係者等など

- ここから、
  コンクリート容器の技術要件

コンクリート容器の技術要件(案)

- はじめに
- 1章　コンクリート容器に求められる性能と区分
- 2章　コンクリート容器の設計
- 3章　容器製造に用いるコンクリートの耐久性照査
- 4章　コンクリート容器の水密性の照査
- 5章　コンクリート容器の製造
- 6章　コンクリート容器の維持管理上の留意点

対象物に応じた容器区分の考え方を示し、
容器製造に用いるコンクリートの耐久性照査方法を提示する

1章　コンクリート容器に求められる性能

p.4参照

要求性能		対策例
●放射線遮蔽性		
		コンクリート密度を高くする(重量骨材)
		部材厚さを大きくする
●物質漏洩防止性		
・容器仕様(遮水対策)		逆蓋構造、止水材
		防水塗装、遮水シートなど
・コンクリートの水密性	透水性	水セメント比を下げる、混和材使用
	乾燥収縮	膨張材、収縮低減剤の使用
・コンクリートの耐久性	鋼材腐食	混和材使用、耐食性鉄筋の使用
	塩類劣化	混和材使用、空気連行など
	ASR	混和材使用
	凍害	適正空気量の確保
●耐荷性		
・吊上げ時、段積み時		コンクリート強度、配筋
・衝撃に対して(IP-2型輸送物)		本体と蓋の接合構造、配筋
・地震時		金物やPC鋼材による連結など

p.6参照

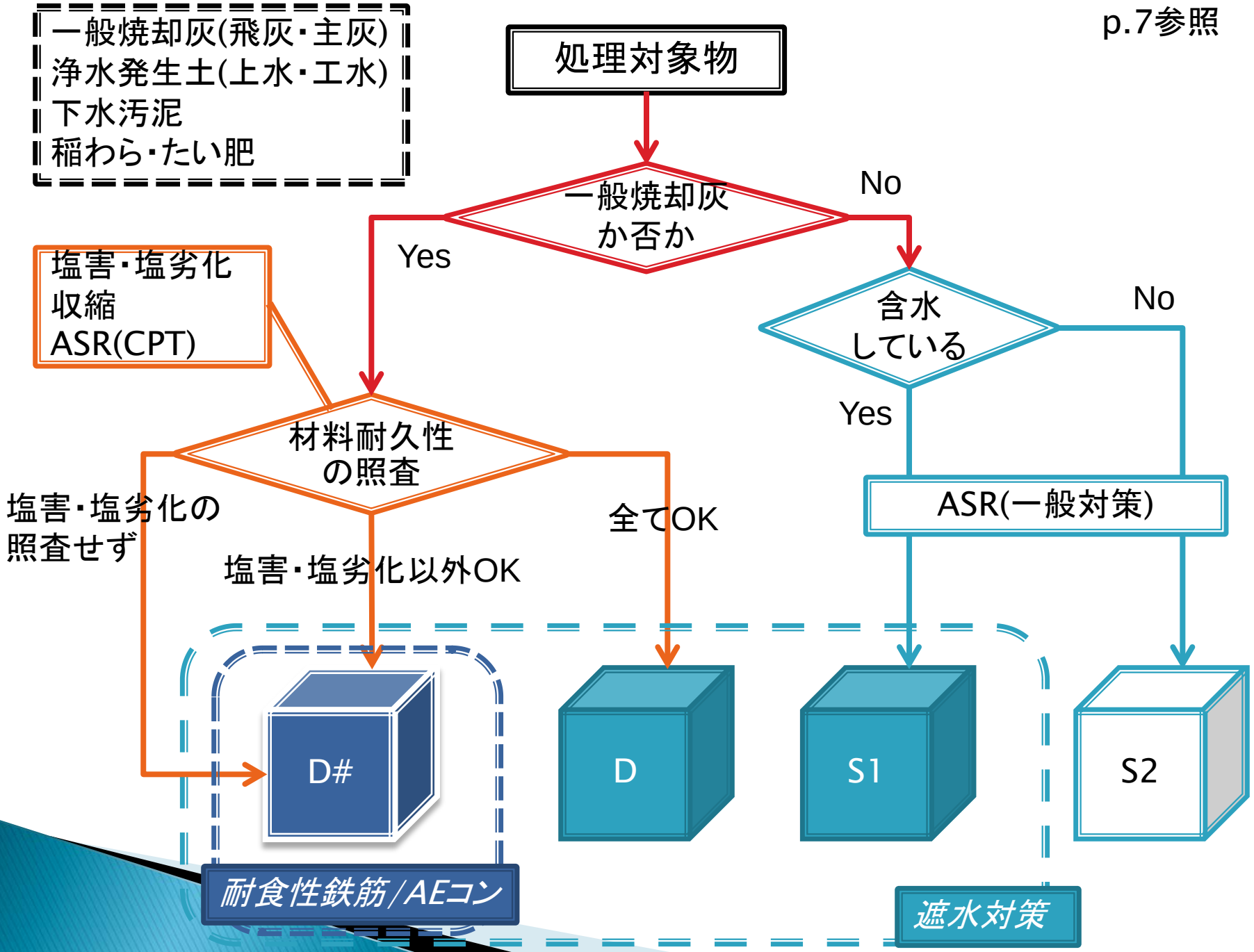
1章　容器区分および要求性能

区分	記号	処理 対象物	遮水 対策	追加 対策※	材料耐久性の照査			
			仕様	仕様	塩害	塩劣化	ASR	収縮
高耐久仕様	D#	一般焼却灰	有り	有り	○	○	○ (CPT)	○
	D	一般焼却灰	有り	無し	○	○	○ (CPT)	○
標準仕様1	S1	上記以外 含水有り	有り		×	×	○ (通常)	×
標準仕様2	S2	含水無し	無し		×	×	○ (通常)	×

○：照査が必要　　×：照査は不要

※：塩害・塩劣化の照査をクリアできない、あるいは照査しない場合の対策で、耐食性鉄筋を使用し、かつAEコンクリートとする。

なお、中性化と凍害は、2012制定コンクリート標準示方書[設計編]の方法による


一般焼却灰(飛灰・主灰)
浄水発生土(上水・工水)
下水汚泥
稲わら・たい肥
処理対象物
一般焼却灰か否か
Yes
No
塩害・塩劣化
収縮
ASR(CPT)
含水している
No
Yes
材料耐久性の照査
塩害・塩劣化の照査せず
全てOK
塩害・塩劣化以外OK
ASR(一般対策)
D#
D
S1
S2
耐食性鉄筋/AEコン
遮水対策

p.7参照

p.8参照

2章　コンクリート容器の設計

- 放射線遮蔽性
  - コンクリート密度と部材厚
- 物質漏洩防止性
  - 容器仕様(遮水対策)：逆蓋、止水材、防水塗装、遮水シート
  - 水密性：透水性に関する法的要件(環境省、特措法)、乾燥収縮ひび割れ(4章)
  - **コンクリートの耐久性**(3章)
- 耐荷性
  - 吊上げ時、段積み時
  - **衝撃に対して**(文科省、放射性輸送物基準、IP-2型輸送物相当)
  - 地震時

3章　容器コンクリートの耐久性照査～塩害に対する照査

p.11参照

＜高耐久仕様(Dグレード)の容器に用いるコンクリートの耐久性照査＞

- 遮水対策(防水塗装または遮水シート)は必須
- 一般焼却灰の場合、2012制定コン示方書[設計編]の方法で照査を実施
  - 容器製造に用いるコンクリートを対象
  - **飛灰への埋設、浸漬試験等で定めた特性値**(Cl拡散係数、表面Cl濃度)を用いる
- 照査をしない又は所要性能を満足しない場合、
  ⇒耐食性鉄筋(ステンレス鉄筋またはエポキシ鉄筋)
  ⇒**D#グレード**

3章　容器コンクリートの耐久性照査～塩劣化に対する照査

p.12参照

＜高耐久仕様(Dグレード)の容器に用いるコンクリートの耐久性照査＞

- 遮水対策(防水塗装または遮水シート)は必須
- 一般焼却灰の場合、2012制定コン示方書[設計編]の化学的侵食の方法を参考に行う
  - 容器製造に用いるコンクリートを対象
  - **飛灰への埋設、浸漬試験等で定めた特性値**を用いる
- 照査をしない又は所要性能を満足しない場合、

  ⇒AEコンクリートとする

  ⇒**D#グレード**

3章　容器コンクリートの耐久性照査 ～アルカリ骨材反応

p.13参照

- JCI　ASR診断の現状と有るべき姿研究委員会報告書「小型コンクリートプリズムを用いたASR促進試験方法(案)」に準じて行う
  - コンクリート実配合、アルカリ量5.5kg/m^3、60℃環境
  - **促進期間20週における膨張量0.04%以下**
- 焼却飛灰からのアルカリ(Na,K)でASRが促進される可能性がある
  - フライアッシュ置換率30%程度を推奨

p.11-12参照

3章　容器コンクリートの耐久性照査 ～ 3.1.1中性化、3.2.1凍害

- 2012制定コン示方書[設計編]の方法
  - 容器製造に用いるコンクリートを対象
  - 照査に用いる特性値は試験による

4章　コンクリート容器の水密性照査 ～4.1乾燥収縮ひび割れ

p.14参照

- JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」による
  - 容器製造に用いるコンクリートを対象
  - 材齢14日から乾燥開始し、**材齢6ヶ月において800×10^{-6}以下**(JASS 5 では計画供用期間長期に相当)
- 混和材使用により、自己・乾燥収縮が大きくなる可能性がある
  - 膨張材を標準量20～25kg/m^3使用を推奨

4章　コンクリート容器の水密性照査～4.2水密性

p.14参照

- 2012制定コン示方書[設計編]の方法
  - 容器製造に用いるコンクリートが対象
  - **透水試験(インプット法)で定めた特性値(拡散係数)**を用いる
- 設計水圧に対して、設計耐用年数の期間中、容器厚さを水が透過しないことを確認する

5章　コンクリート容器の製造～養生

p.17参照

- 常圧蒸気養生を行う場合、
  - 前置き時間：2～3時間
  - 最高温度：65～75℃
    (強度だけでなく、所定の耐久性が得られるように設定)
  - 後養生：脱型後、***適切な後養生※***を行うと良い

※後養生として、水中養生、スプリンクラーによる散水、容器内に水を溜める等の方法がある。フライアッシュ等の混和材を使用する場合は、環境温度に留意する。低温環境条件では、**期間を延長**する、あるいは**温水を使用**するのが望ましい。

p.19参照

6章　コンクリート容器の維持管理

- 目視による点検を定期的に行い、雨水の侵入の有無、ひび割れ等コンクリートの劣化、内容物の漏洩等が無いことを確認する
- 何らかの変状があれば、直ちに内容物を取り出し、別の容器に入れ替える

まとめ

- コンクリート容器が遭遇する最も過酷な条件を想定した暴露試験により、焼却飛灰を保管する場合に想定されるリスクを把握した
- 様々な処理対象物に応じた容器区分の考え方を提示した
- それぞれの区分の容器に必要な対策および材料耐久性の面から特に考慮すべき項目とその照査方法を示した
- 焼却飛灰を保管する容器には、多重防護の考えから、高い材料耐久性を有するコンクリートを用いた上で、塩害・塩類劣化に対する追加対策を行うこととした

- 御清聴ありがとうございました