

不燃系等減容化・コンクリート技術適用プロジェクト報告

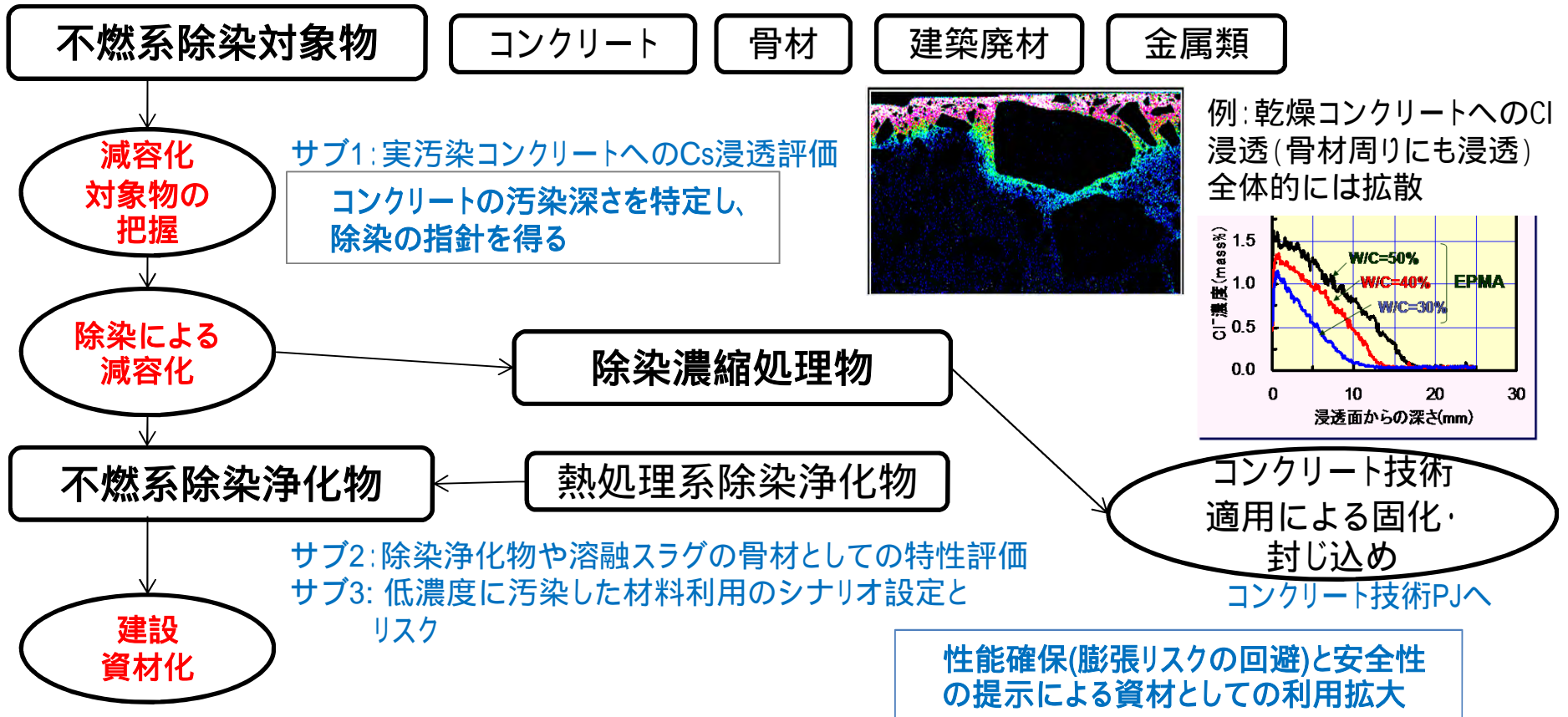
資源循環・廃棄物研究センター
山田一夫

不燃系等減容化プロジェクト

目的及び達成目標

- 1) 不燃系除染対象物のうち、土壌について量の多いコンクリートについて除染目安を得ることを目的に、実コンクリートのへのCs浸透状況を把握する。遮断型処分場設計にも応用する。
- 2) 熱処理系除染浄化物の再利用による廃棄物減容化を目的に、除染浄化物のコンクリート用骨材としての適性をアルカリ骨材反応の観点から評価する。
- 3) コンクリートがら、骨材、除染浄化物などがクリアランス物とはならない場合でも利用促進を目的に、その安全性を簡易に理解するツールを開発する。

研究概要



不燃系等減容化プロジェクト

H23年度の研究成果まとめ

- H24年度から検討開始

H24年度の研究成果まとめ

- 汚染コンクリートの除染の基礎データを得ることを目的に、汚染深さを検討した。
 - 3～4割は高圧水洗浄で除去できるほこりなどとして付着
 - 空間線量率と比例的にコンクリートの表面線量率も増へ、環境への沈着量の約1/10が存在
 - ウォータージェットによる研削では、コンクリート品質によらず一定時間で除染
 - コンクリートから水ではCs溶出なし 1N-KClやNH₄Clでは25%が溶出
 - 表面汚染濃度と浸透深さ(β線ラジオグラフ)は対数の関係
- 溶融法と焼成法による除染浄化物はアルカリ骨材反応の観点から骨材に適合
- クリアランス、指定廃棄物の放射能濃度下限値、下層路盤材の濃度限度などの検討過程を整理 代表的なシナリオごとの被曝量把握の簡易ツール作成

山田一夫、高井伸一郎、大迫政浩、ウォータージェットによるコンクリートへのCs浸透深さ測定、コンクリート工学年次論文集、2013(印刷中)

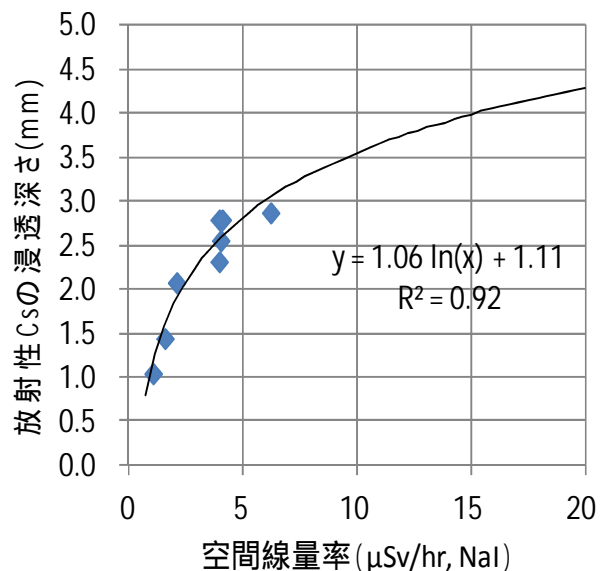
山田一夫、竹内幸生、高田光康、大迫政浩、緑川猛彦、実コンクリートへの事故由来の放射性Csの浸透状況、環境放射能除染学会第2回研究発表会、2013

別府克俊、丸山一平、半井健一郎、山田一夫、放射性セシウムによって生ずるコンクリート外壁の汚染とその評価に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、2013(印刷中)

不燃系等減容化プロジェクト

H24年度の研究内容及び成果

実コンクリートのサンプリング
(空間線量率7 μ Sv/hr)

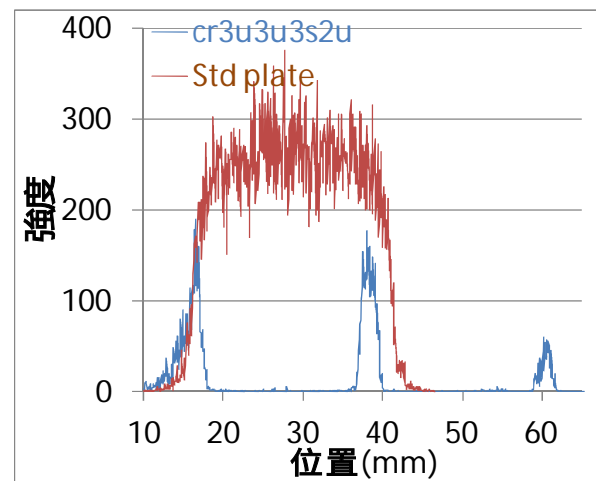
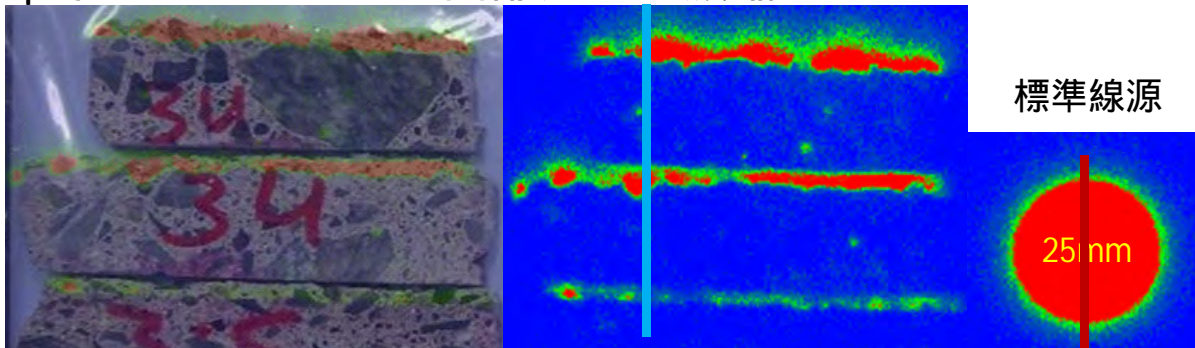


7 μ Sv/hrの環境で33Bq/cm³の沈着(降下量の1/10)
空間線量率vs.放射性Cs浸透
= 対数関係

高線量地域でも浸透深さは限定的
骨材微粒分の影響は大？

濃度プロファイルは拡散に見えない。

W20L40T2mmへの加工
 β 線ラジオグラフ 表面部分への濃縮



粉碎コンクリートからのCs溶出 ・水:N.D. ・1N-KCl, 1-NNH₄Cl: 25%溶出

不燃系等減容化プロジェクト

H24年度の研究内容及び成果

既存規制値(IAEAとJAEAのクリアランス100Bq/kg、埋立処分8kBq/kg、下層路盤3kBq/kg)の検討シナリオの整理とDB化

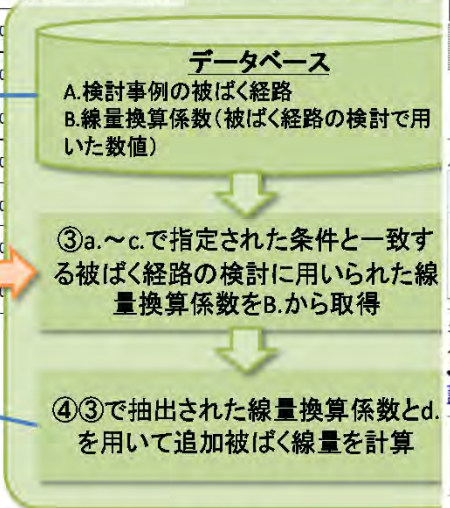


理解促進のための簡易検索ツール

経路群	対象者	被ばく経路	ID	IAEAのSARFety		埋立処分灰等の濃度の目安として示された		上限(コンクリート等)の目安となる濃度	
				mSv/y per Bq/g		mSv/y per Bq/g		mSv/y per Bq/g	
				Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
処分場での選	その他の作業(eg.トラック運転手)	装置又はトラックの積荷からの外部被ばく(積み込み作業)	#001	6.3E-03	2.4E-03				
	その他の作業(eg.トラック運転手)	装置又はトラックの積荷からの外部被ばく(輸送作業)	#002	1.4E-02	5.3E-03				
	その他の作業(eg.トラック運転手)	装置又はトラックの積荷からの外部被ばく(下ろし(金属))	#003						
	その他の作業(eg.トラック運転手)	装置又はトラックの積荷からの外部被ばく(スクラップ輸送運搬(金属))	#004						
可燃物の運搬作業	可燃物の取り扱い作業	装置又はトラックの積荷からの外部被ばく(スクラップ輸送運搬(金属))	#005						
	可燃物の取り扱い作業	装置又はトラックの積荷からの外部被ばく(スクラップ輸送運搬(金属))	#006						
	可燃物の取り扱い作業	装置又はトラックの積荷からの外部被ばく(スクラップ輸送運搬(金属))	#007						

埋立処分場跡地で生活する方にはどのようなリスクが想定されているか?

- a. 作業内容選択
 - b. 滞在場所選択
 - c. 線源選択
 - d. 汚染濃度入力
- ②a.~d.を画面から設定



被ばく経路理解促進ツール

Step1 行動の選択 > Step2 場所の選択 > Step3 線源の設定 > Step4 計算実行

居住する > 完成道路の周辺 > 再生資材(道路・下層路盤材のみ)

設定いただいた情報を元に計算を実行しました。

行動	場所	線源
居住する [子ども]	完成道路の周辺	再生資材(道路・下層路盤材のみ) CS-134: 0 [Bq/Kg] CS-137: 3000 [Bq/Kg]

年間追加被ばく線量予測結果
334.803 [μSv/y]

[詳細な情報を見る](#) (PDF文書を表示します)

<< 始めからやり直す < 前Stepに戻る

※このシステムの評価結果は、参考値です。

☐ : ユーザーの操作

⑤算出結果を画面に表示

汚染廃棄物等処理への成果活用 / その他行政(国・自治体)への支援

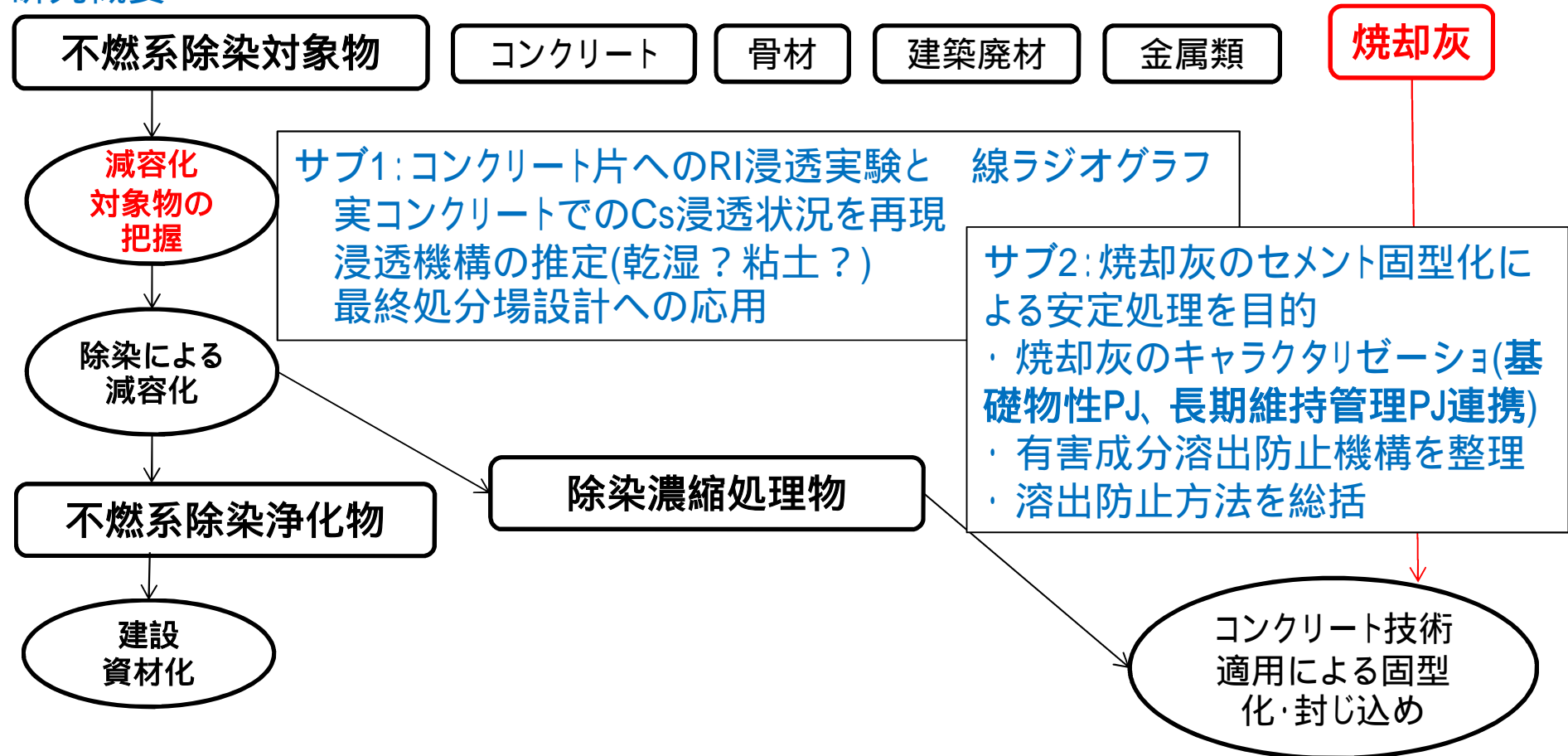
成果活用 : 今後発生する高濃度汚染地域でのコンクリート除染の目安。
 汚染材料の資材化時(最終処分場負担系減、資材不足対応)の安全性評価の参考。
行政支援 : クリアランス物以外の資材及び廃棄物の有効利用の安全性評価の考え方に関して、がれきコンソーシアム(代表: 東北大学久田教授)や学会活動(日本建築学会、日本コンクリート工学会)等で適切な情報発信。

不燃系等減容化プロジェクト

H25研究計画概要

- 1) Cs浸透は拡散プロファイルではない? コンクリートへのRIを用いたCs浸透実験
- 2) 焼却灰セメント固型化物の再利用開始 焼却灰の構成相と固型化物の安定性解析

研究概要

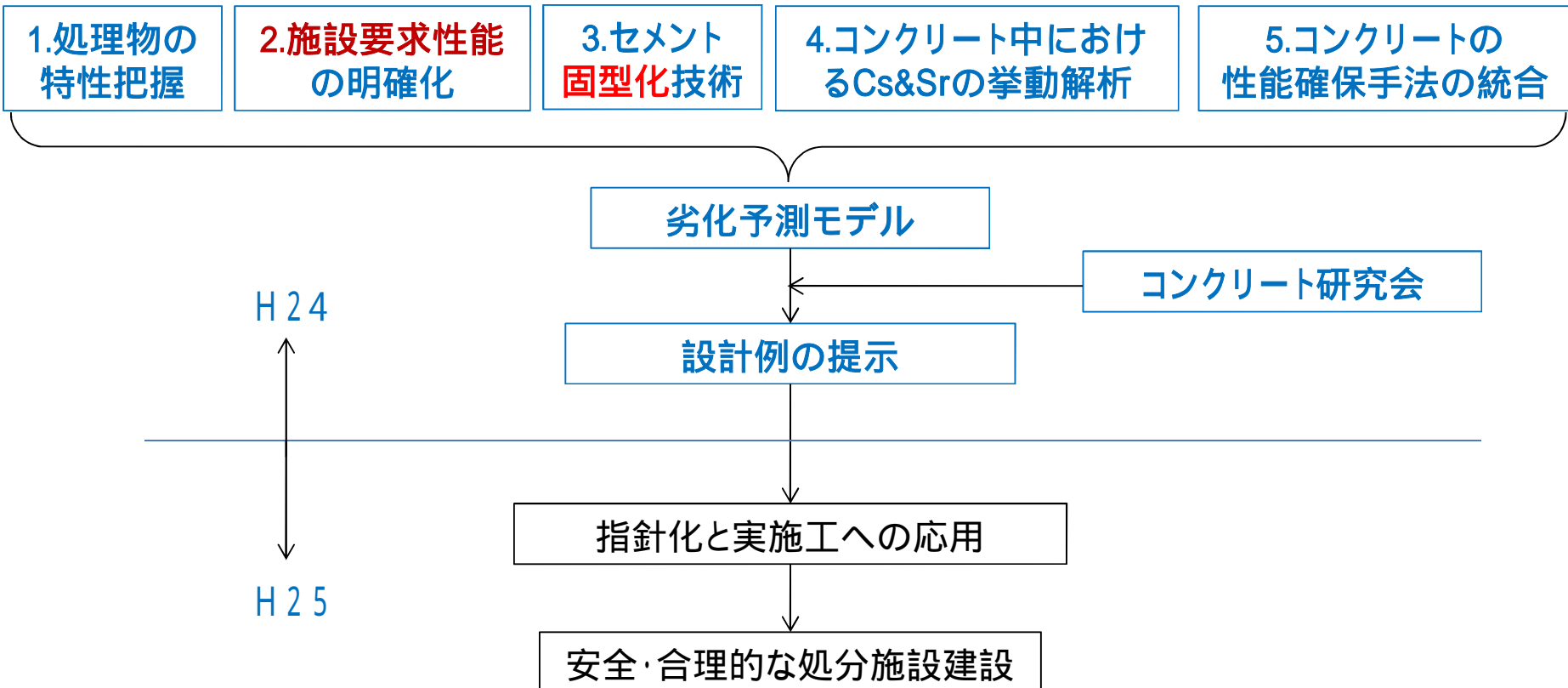


コンクリート技術適用プロジェクト

目的及び達成目標

高い放射能レベルの廃棄物の保管(固型化・安定化、封じ込め・遮蔽)へ、セメント・コンクリート技術を適用し、汚染廃棄物の安全かつ合理的な処理・処分に資する。

研究概要



コンクリート技術適用プロジェクト

H23年度の研究成果まとめ

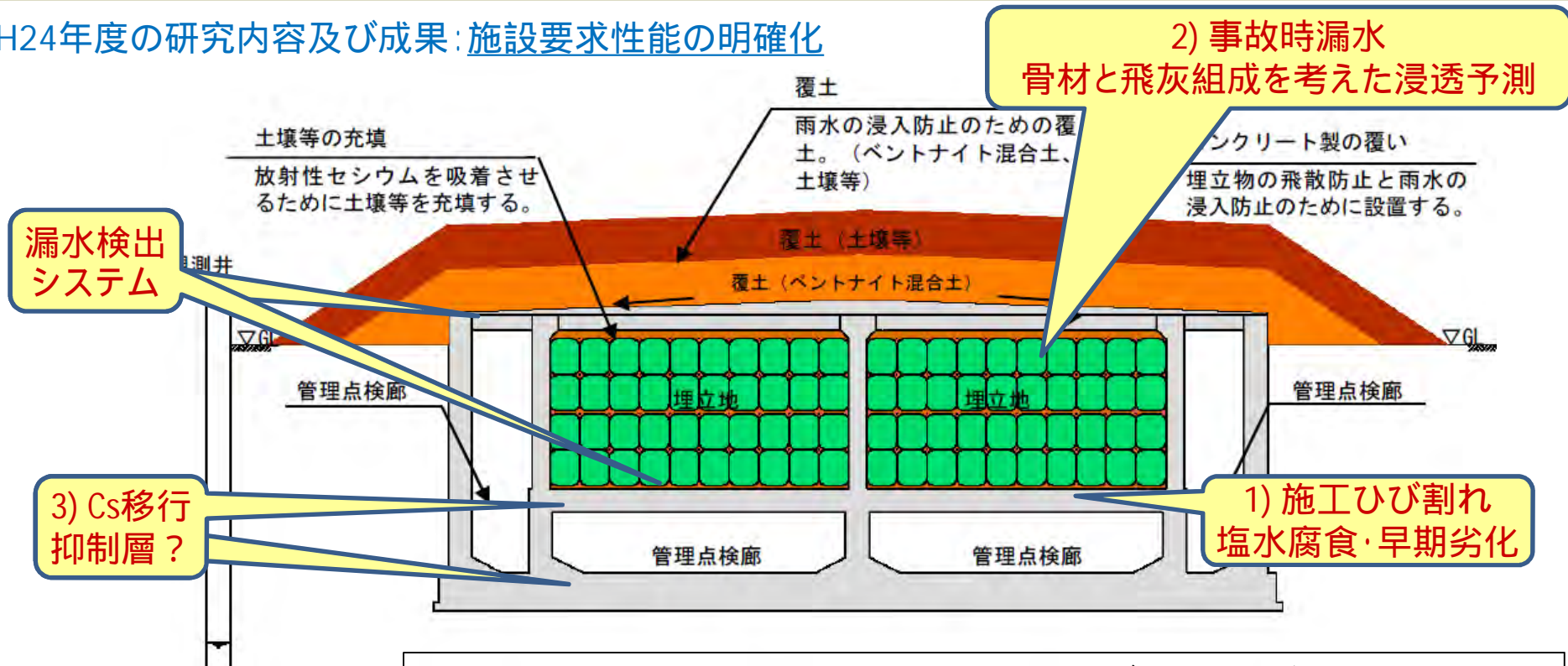
- H24年度から開始

H24年度の研究成果まとめ

- 可溶性Csを含有する一般可燃物の焼却飛灰の処分が問題と認識
 - 飛灰: $\text{CaCl}_2=20\%$ (5-30%), NaCl , $\text{KCl}=\text{数} \sim 10\%$ (各々), 可溶性安定Cs=0.1-10ppm, 他
 - CaCl_2 による潮解が湿潤環境で懸念 フレコン密封でほぼ解決
- セメント固型化: 緻密化で溶出遅延、シリカ系材料で溶出半減、ゼオライトも効果的
- 最終処分場の事故時シナリオの想定とコンクリートの対応
 - シナリオ: 遮水工の不備 飽和塩水発生 鉄筋コンクリートの修復困難な劣化
 - CsとClのコンクリート中の浸透予測
 - アルカリ浸透によるアルカリ骨材反応加速の予測
 - 「汚染廃棄物等最終処分場へのセメント・コンクリート技術適用に関する研究会」
(略称: 汚染廃棄物処分用コンクリート研究会) 最終処分場試設計・設計施工指針の提案に向け検討中

コンクリート技術適用プロジェクト

H24年度の研究内容及び成果: 施設要求性能の明確化



コンクリートの機能

- ✓ 第1監視期間: 周辺公衆の追加被ばく線量が $10\mu\text{Sv}/\text{y}$ を下回るまで点検通路の確保
- ✓ 第2監視期間: バリア機能を前提としない

技術的
検討課題

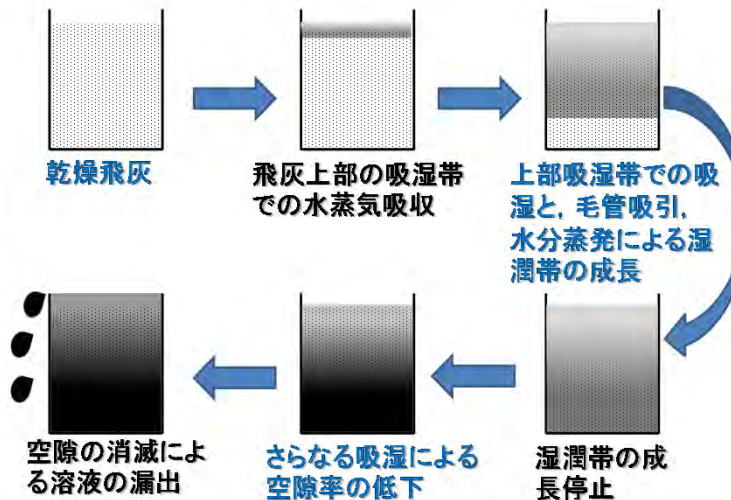
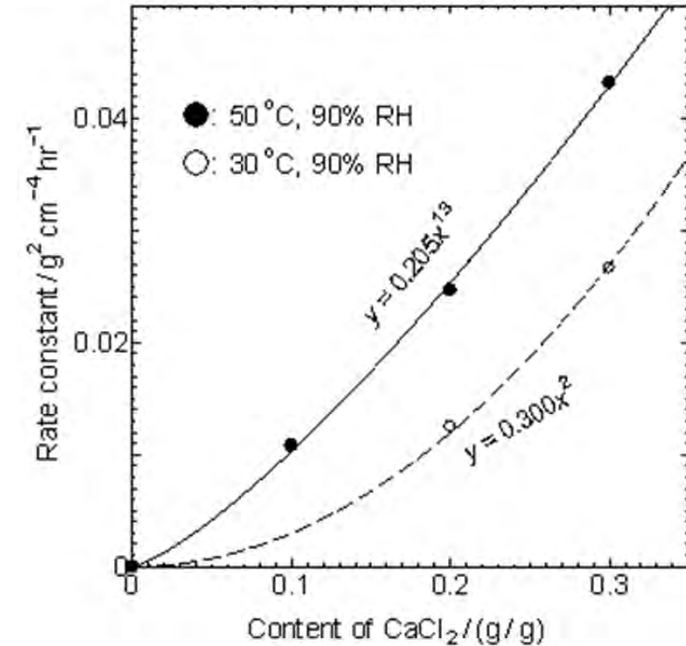
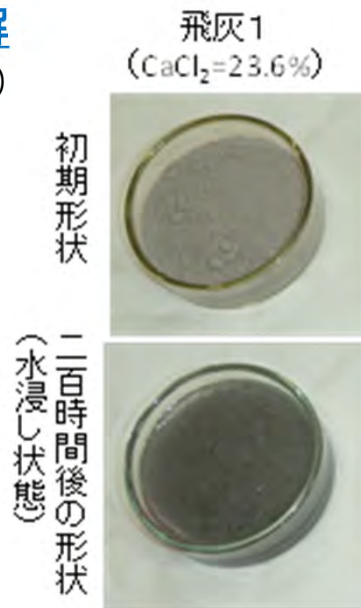
- 1) 汎用コンクリートでは施工直後からひび割れ 漏洩のリスクは小さいが住民の安心の視点から改善が必要
 - 2) 事故時・耐久性の限界 浸水 飽和塩水 コンクリート早期劣化 外部から修復困難
 - 3) 第2監視期間でコンクリートの健全性が担保されれば飛躍的に安全性は改善
- コンクリート工学の課題:** ひび割れ制御(ASR、乾燥)の定量化、Cs浸透予測

コンクリート技術適用プロジェクト

H24年度の研究内容及び成果: CaCl_2 の潮解

市川恒樹客員研究員(北海道大学名誉教授)

含有元素	飛灰1(ストーカ炉)	
	mass%	可溶性量
Ca	23.3	8.5%、 CaCl_2 として23.6%
K	4.0	3.6%、 KCl として6.8%
Na	3.2	2.3%、 NaCl として5.8%
Cl	25.2	19.5%
Al	2.3	
Si	7.7	
Cs	2.7ppm	



- 単位面積当たりの飛灰の吸湿量は(時間)^{1/2}則に比例
- 吸湿で生じる溶液が飛灰の空隙を満たすと、溶液流出
- 飛灰の吸水量は、その後の吸湿の速度定数に影響無
- 吸湿の速度定数は CaCl_2 含有量と温度とRHに依存以上より、吸湿の速度定数 k が決まれば、保管された飛灰からCs-137の流出が始まるまでの時間が計算可能。

$$T = (LV)2/k \quad (1)$$

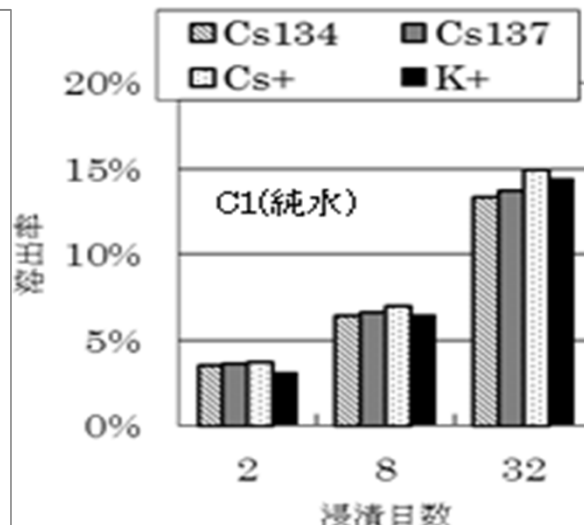
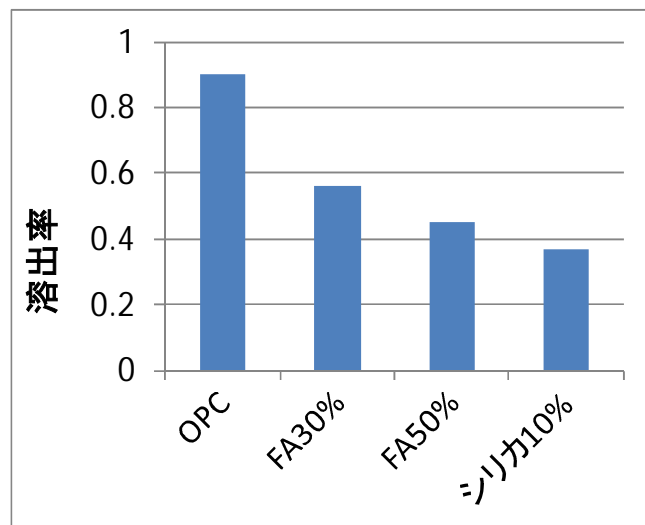
湿潤帯長さ L cm、飛灰空隙率 V 、漏出が生じる時間 T

条件: $V=60\%$ 、2ヶ月/年が30、90%RH、フレコンシート内、飛灰高さ50cm

湿潤帯の成長が途中で止まらない限り、吸湿による飛灰からのCs-137の漏出は100年後

コンクリート技術適用プロジェクト

H24年度の研究内容及び成果: セメント固化



- 普通セメント、高炉スラグではCs固定は出来ない。
- シリカ系材料では半減。
- ただし、セメント固型化により溶出速度は低減可能
- モルデナイトを多量に使用すれば1桁減
- CsはKと水和半径が類似しているが、モルデナイトにはCs選択性がある (Cs/Cs)/(K/K)

固型化体粉末からの溶出 環告13号法

タンクリーチング(高炉セメント固型化体)

廃棄物適正処理処分研究室長 山田正人

飛灰 /g	固型化剤	添加材	水 /g	(抽出)/(初期)濃度比		
				K/K	Cs/Cs	(Cs/Cs)/(K/K)
15	OPC 5g		7.0	0.87	0.92	1.06
15	OPC 5g	高炉スラグ 5g	8.4	0.83	0.77	0.92
15	OPC 5g	モルデナイト 5g	9.0	0.53	0.08	0.15
15	シオホリマ- 11.5g		9.8	0.34	0.32	0.96
15	シオホリマ- 11.5g	高炉スラグ 5g	14	0.68	0.41	0.60

コンクリート技術適用プロジェクト

H24年度の研究内容及び成果:コンクリートへのCs、Cl浸透予測

遮断型最終処分場におけるリスク: 予期せぬ原因で地表部の土壌とベントナイト混合土、コンクリート天板(遮水性を期待するにはプレストレスト構造が必須)、および遮水工による外部からの水分遮断が機能しなかった場合、フレコン内の飛灰から飽和塩水(Cs含有)が発生し、コンクリート床版に作用。コンクリートを浸透し、点検通路まで漏洩する可能性を想定する。

対処: コンクリートの遮塩性を高め、鉄筋へのCl浸透を抑制する。このために、フライアッシュセメントを用いるが、その効果を定量化する。また、CsとClの浸透を比較する。

コンクリート: 粗骨材と砂をポルトランドセメントと水で固めたもの。セメントは珪酸Caを主体とし、珪酸Ca水和物(C-S-H)を生成し、硬化する(乾くから固まるのではない)。

検討

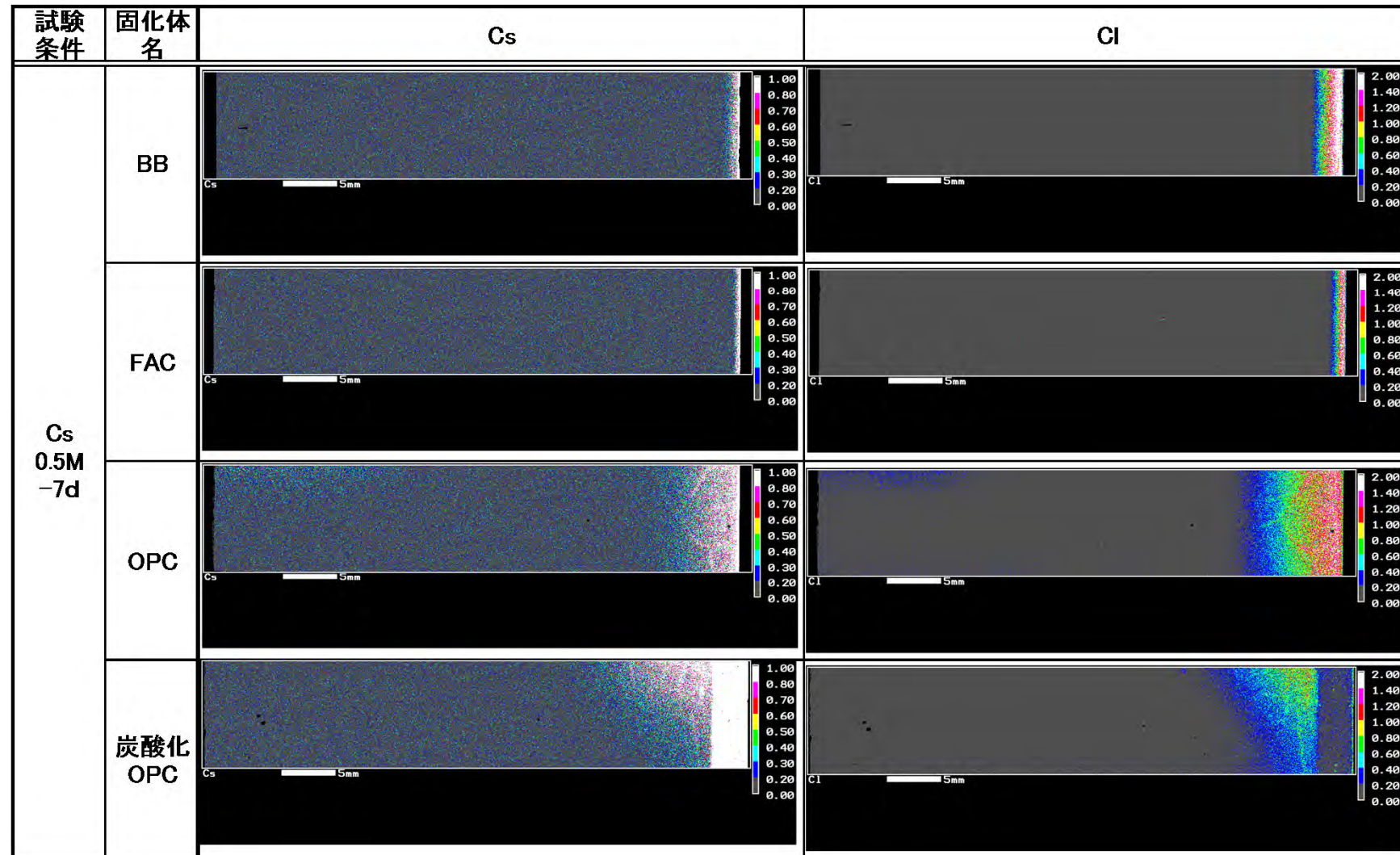
1. 高濃度CsCl溶液で、浸透実験を行い、浸透概要を調べる。
2. 既存の物質移動シミュレーションコードDuCOM(東大開発)で再現(広大半井准教授)。
3. Ca/Siの異なるC-S-Hを合成し、Cs吸着等温線を求める。
4. 相平衡物質移動モデルにより長期期間の浸透予測

結論

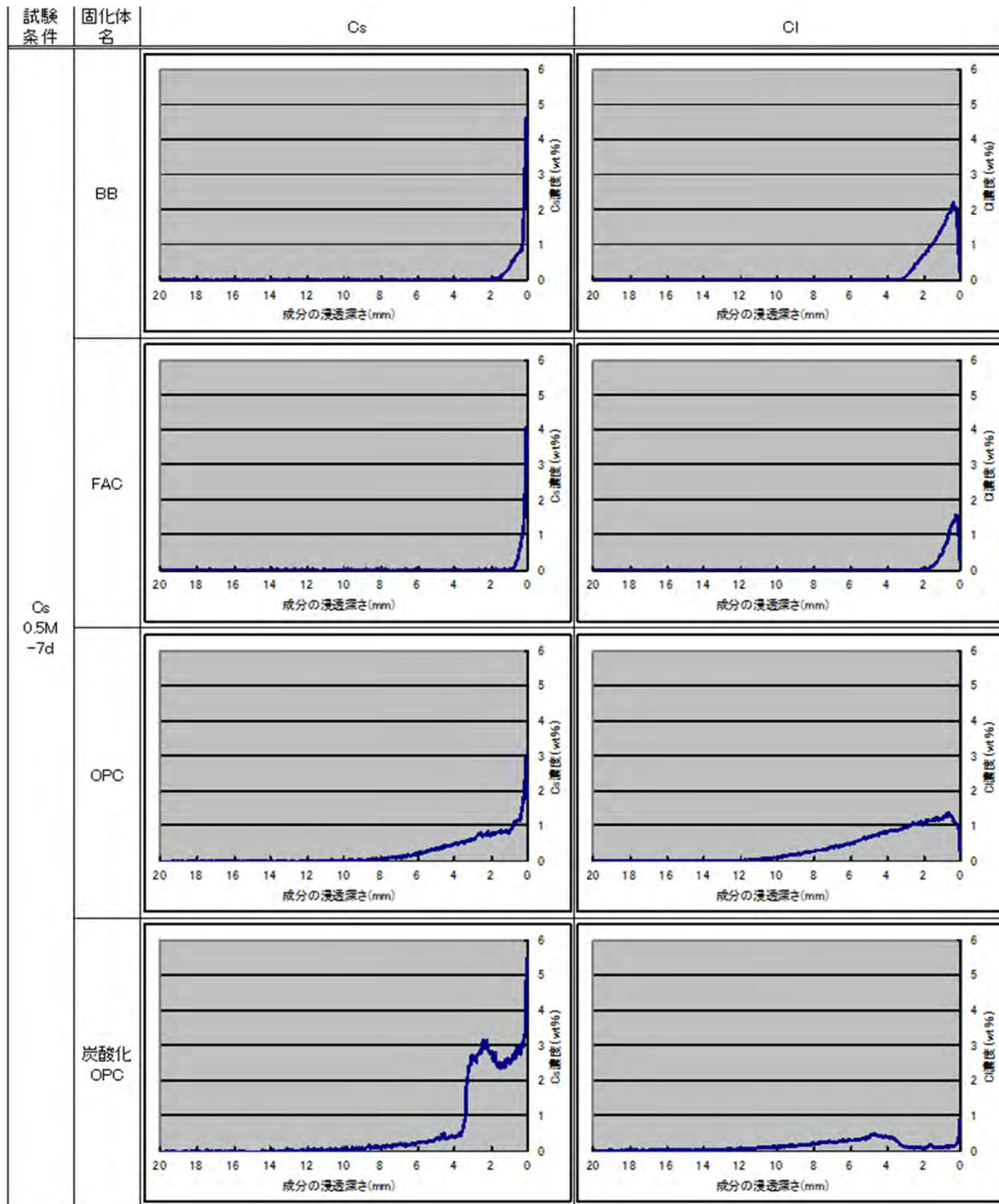
- CsとClには約1万倍の濃度差があり、Clに比較し、Csの浸透は限定的である。
- 塩害を抑制できれば(鉄筋コンクリートの健全性確保に必要)、Cs漏洩は起こらない。
- 耐塩害の定量予測は従来技術及び先進的モデルにより可能。

セメント水和物とCsの相互作用を考慮した浸透予測

(1) CsCl溶液へのセメントペースト浸漬

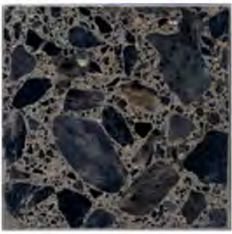
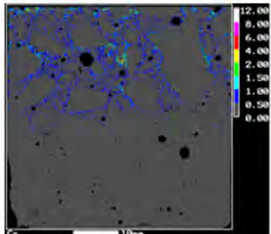
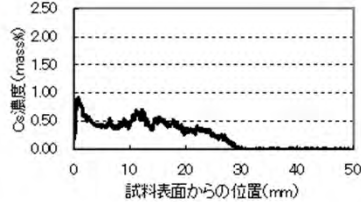
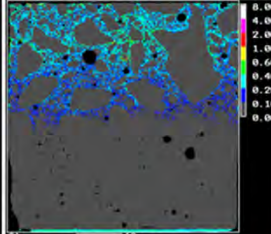
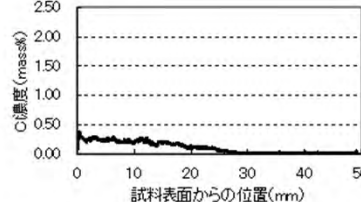
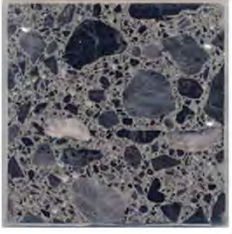
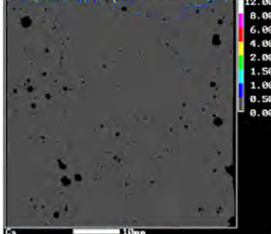
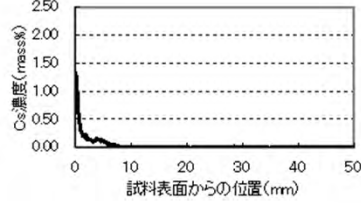
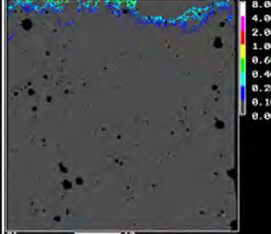
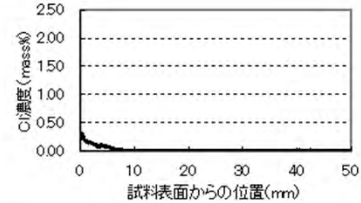
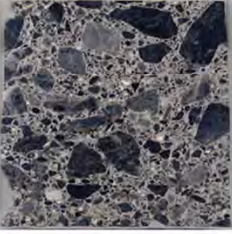
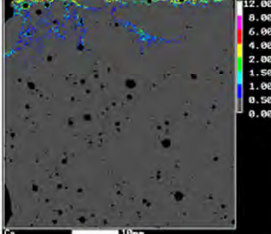
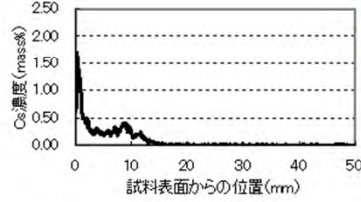
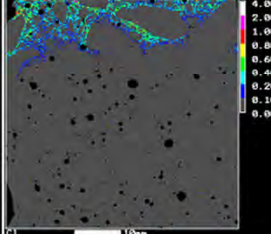
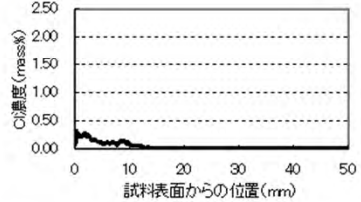
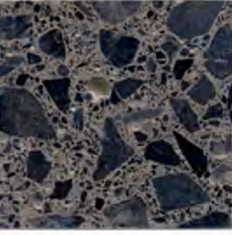
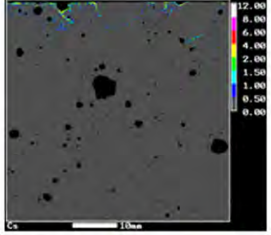
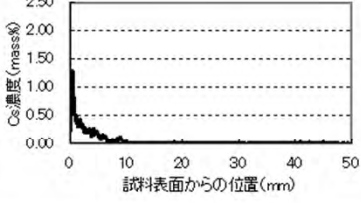
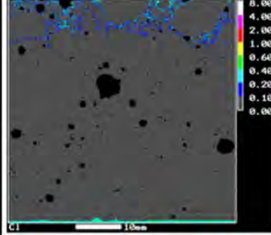
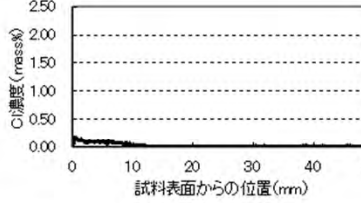

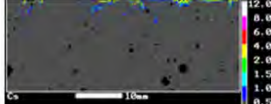
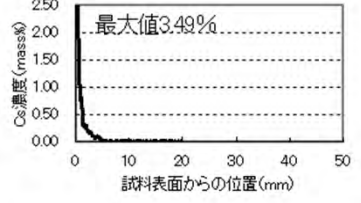
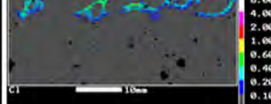
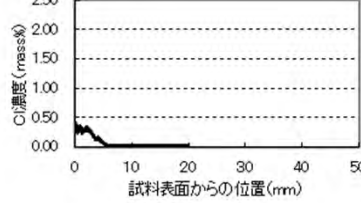


OPC:普通ポルトランドセメント、BB:高炉セメントB種、FAC:フライアッシュセメント
0.5MのCsCl溶液にセメントペーストを7日間浸漬



- 普通セメントに比べ、高炉セメントやフライアッシュセメントで、Cs浸透深さは激減し、表面Cs濃度は増加する。
- 炭酸化領域でCsが高濃度化し、Clが低濃度化する。しかし、浸透深さ自体は変化しない。
- CsClでは、Cs浸透深さはCl浸透深さよりもやや小さい。

(2) 調湿(乾燥)コンクリートへのCsCl浸透(6時間)

No.	内容	湿度条件	分析面	セシウム濃度分布		塩素濃度分布	
				面分析	濃度プロファイル	面分析	濃度プロファイル
1	OPC W/C45	20%					
2	OPC W/C45	60%					
3	OPC W/C60	60%					
4	炭酸化 OPC W/C45	60%					
5	FAC 一般骨材 W/C45	60%					

(3)飽水コンクリートの浸漬

OPC45%-28d

OPC60%-28d

OPC60%-7d

炭酸化
OPC45%-28d

FAC45%-28d

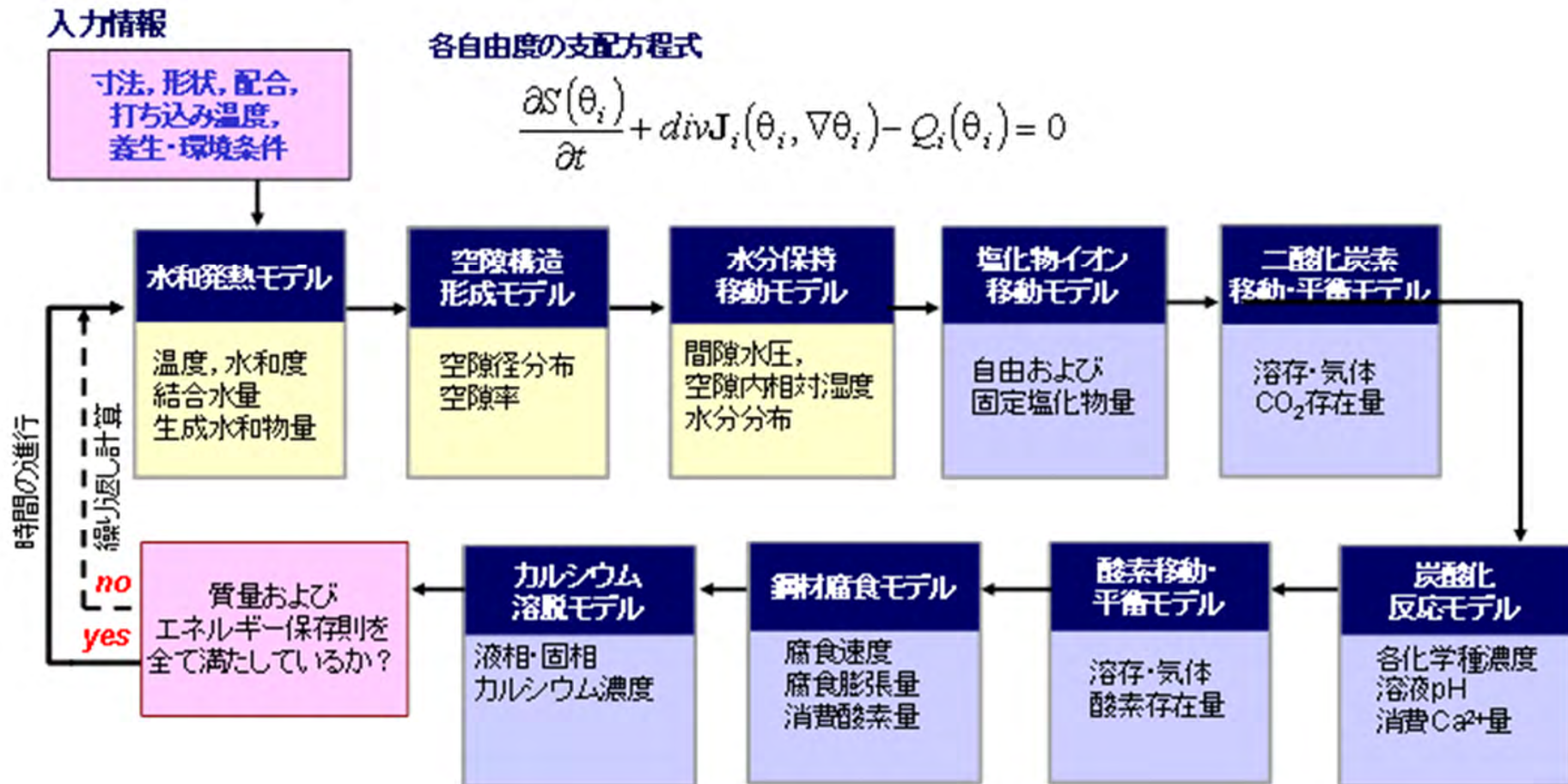
宮城骨材
OPC45%-28d

宮城骨材
FAC45%-28d

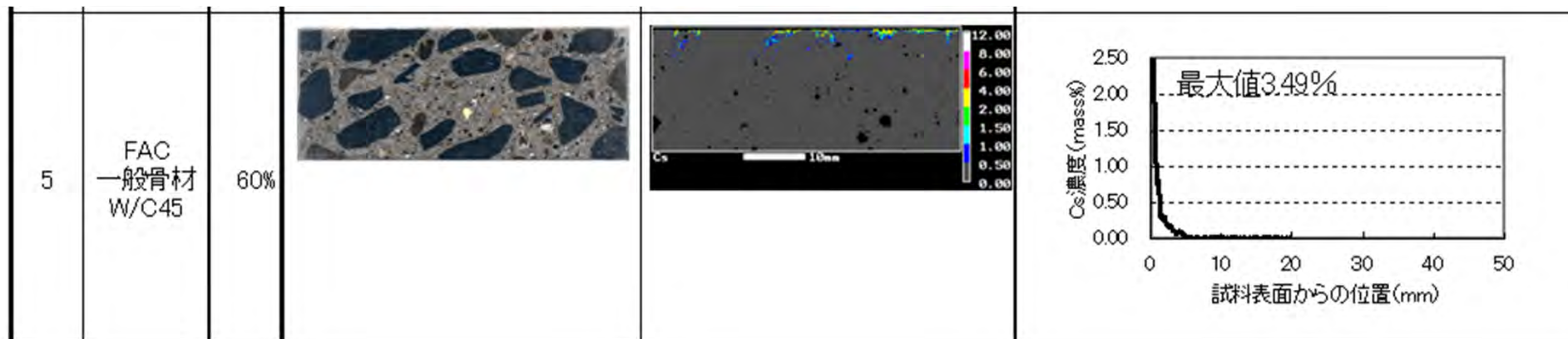
No.	内容	湿度条件	分析面	セシウム濃度分布			塩素濃度分布		
				面分析	濃度プロファイル	面分析	濃度プロファイル		
1	OPC W/C45 28d	飽水							
2	OPC W/C60 28d	飽水							
2'	OPC W/C60 7d	飽水							
3	炭酸化OPC W/C45 28d	飽水							
4	FAC W/C45 28d	飽水							
5	OPC 一般骨材 W/C45 28d	飽水							
6	FAC 一般骨材 W/C45 28d	飽水							

(4)熱力学連成解析システムDuCOMによるコンクリートへのCs浸透解析

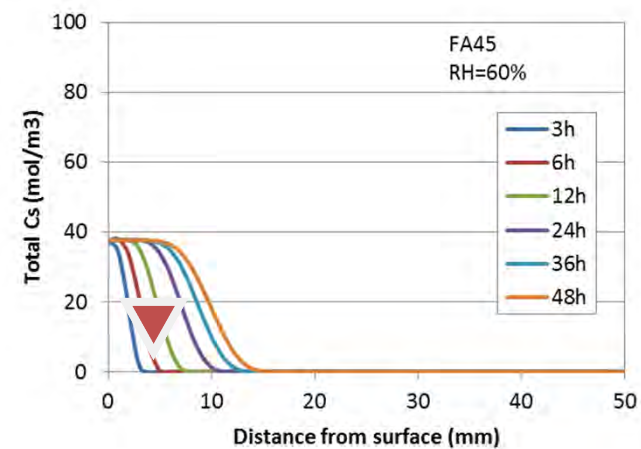
広島大学半井健一郎准教授



計算結果

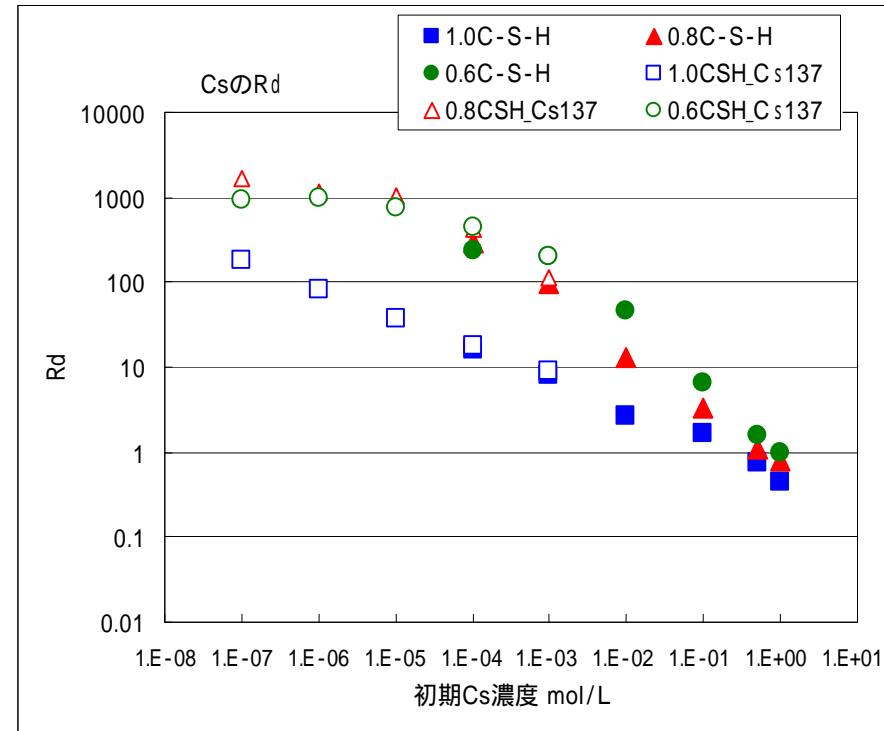
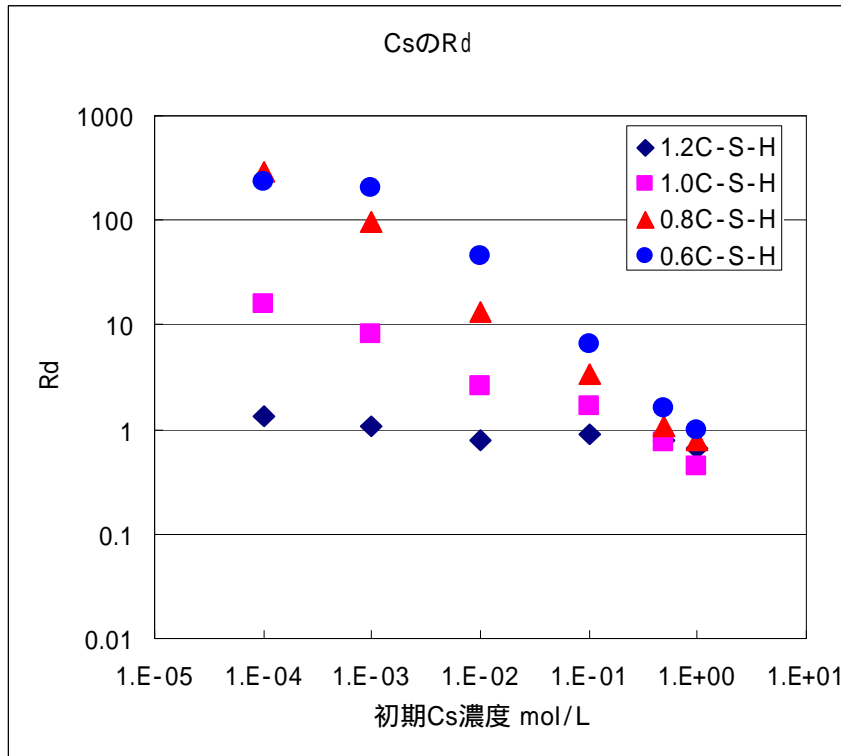


乾燥状態からの非定常状態の水分移動に伴うCs移動を再現可能



セメント水和物とCsの相互作用を考慮した浸透予測

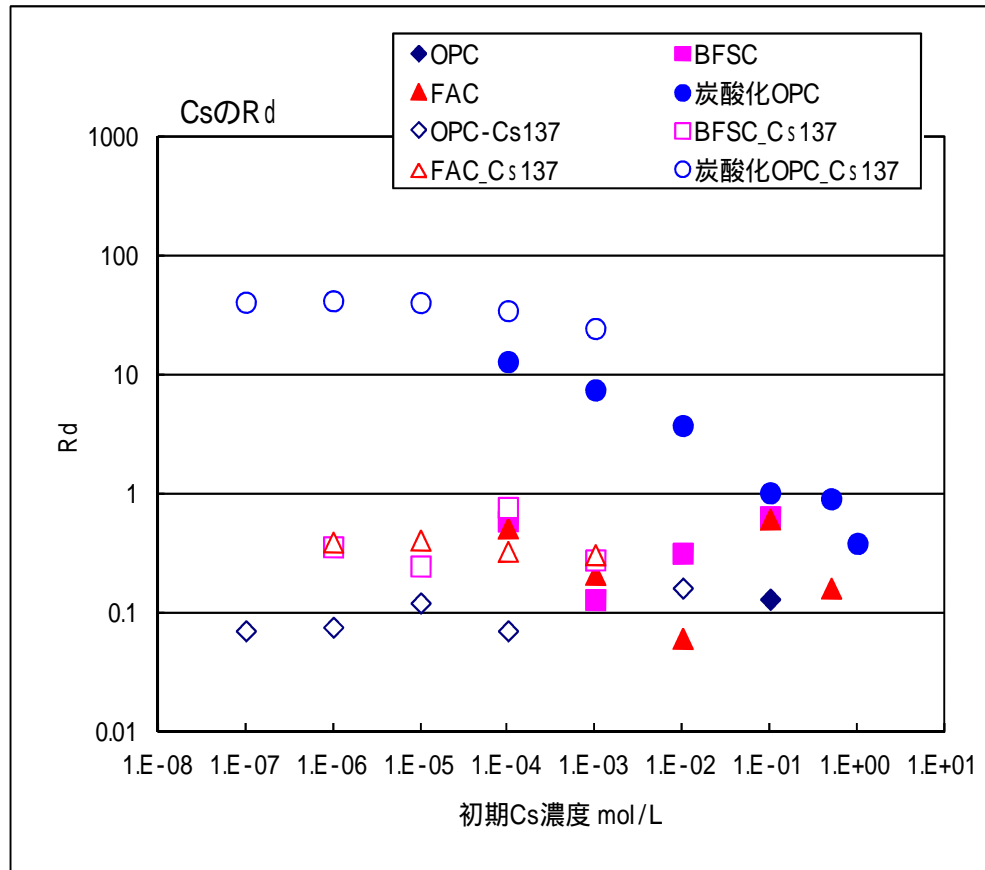
(1) セメント水和物(C-S-H)への収着挙動



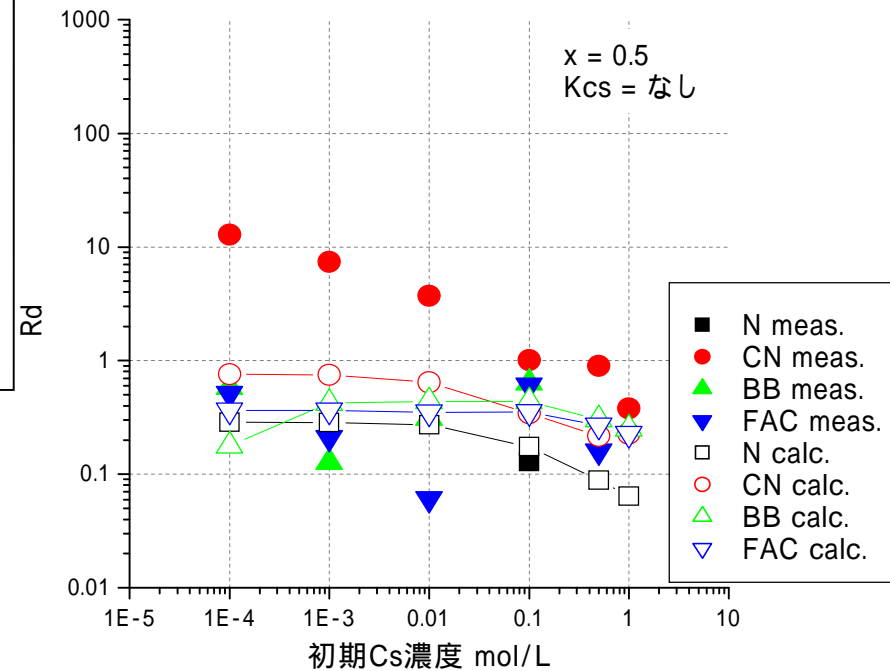
飛灰中のCs濃度: 1 ~ 10ppm
 液固比1の場合: 1e-8 ~ 1e-7mol/L

セメント硬化体の主成分である珪酸Ca水和物(C-S-H)のCa/Si比が低下すると、Cs収着は増加する。低濃度域での収着係数Rdが大きい。

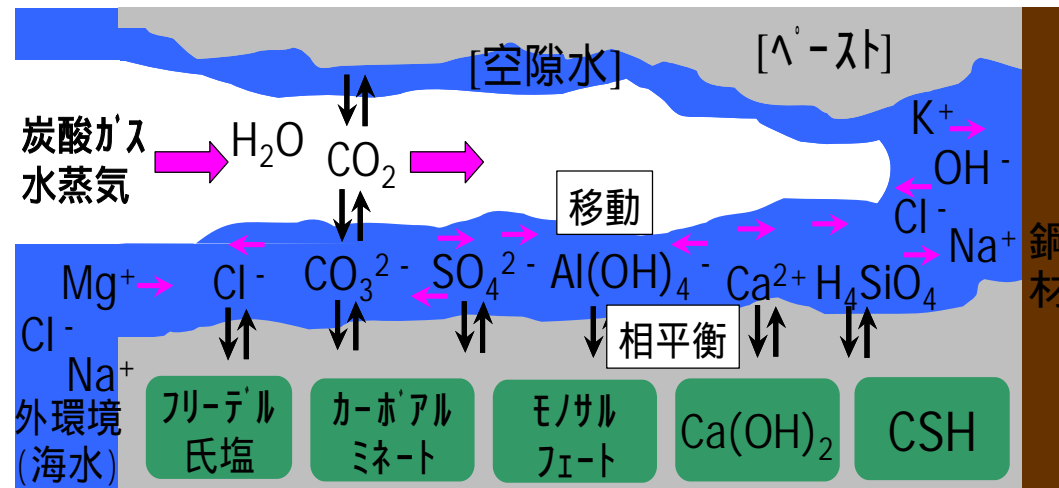
セメントペーストの場合



- 普通セメントはCs収着しない
- ポゾラン添加も効果なし
- 炭酸化により収着増加
- 熱力学的相平衡モデルへおおよそのフィッティング可能
ただし、低C/S条件では低精度



相平衡物質移行計算コードによる解析



物質移動モデルにおける各種液相化学種の液相中での移動は、Nernst-Planck式に基づく質量保存則の式、ならびに、液相化学種の移動に伴い生じる静電ポテンシャルに関するPoisson方程式従うものとした。

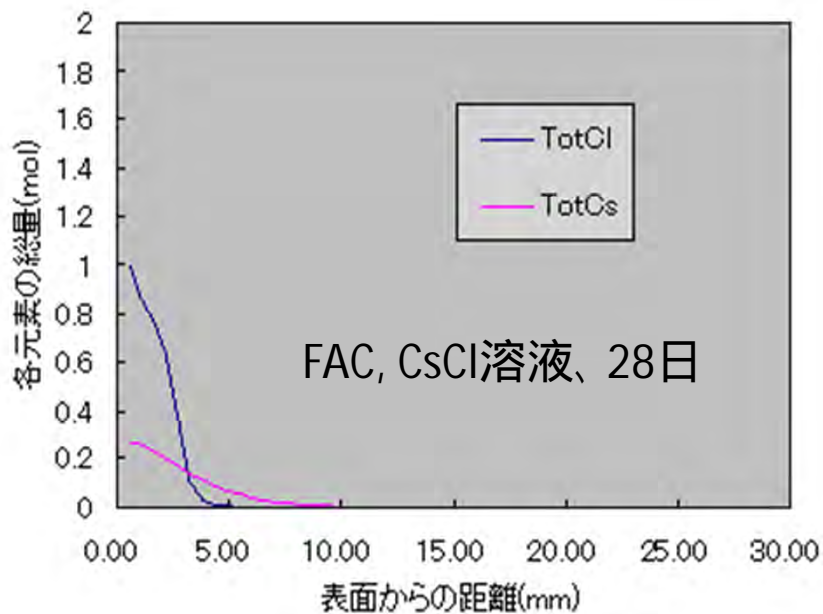
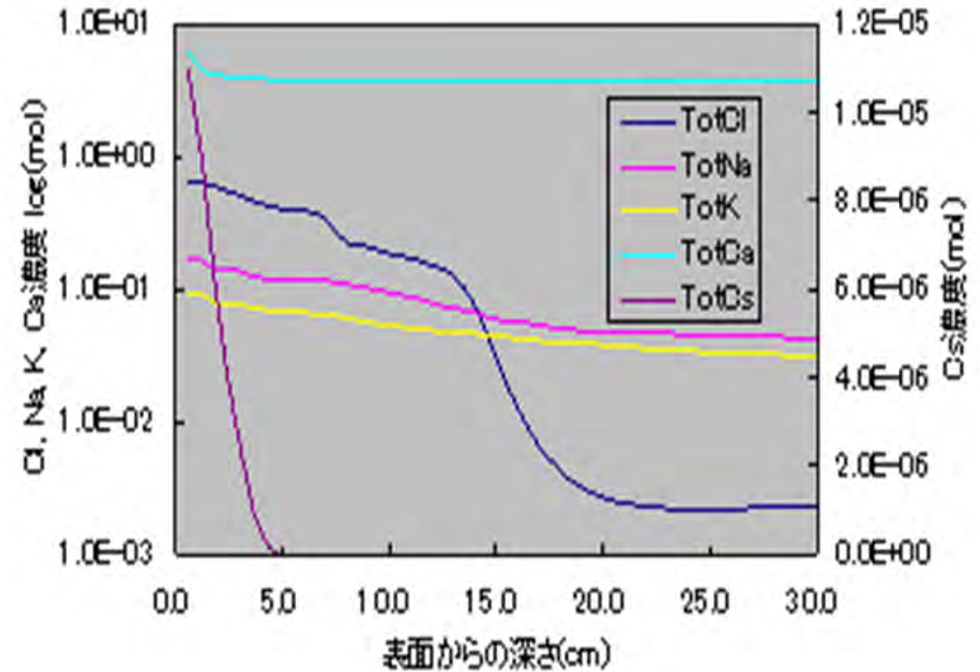
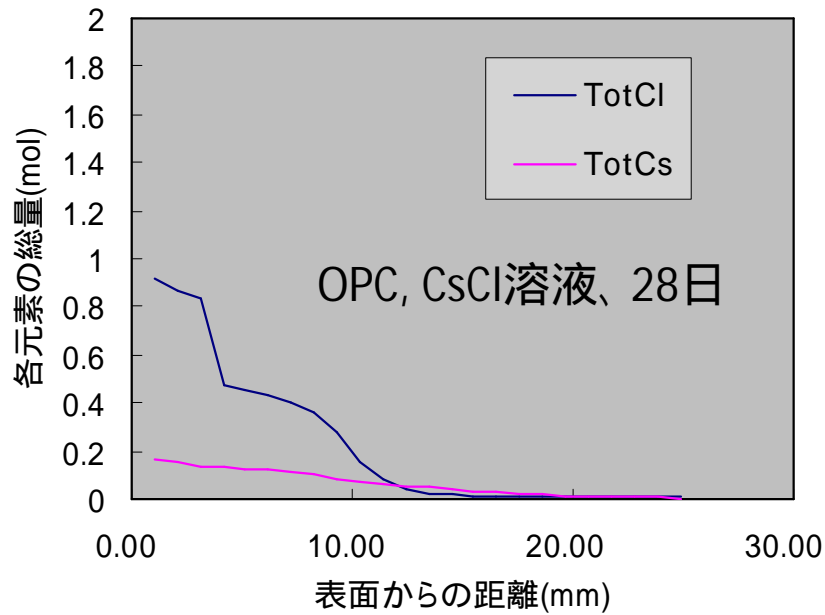
$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\delta_i D_i^0}{\tau^2} \cdot \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + \frac{\delta_i B_i^0}{\tau^2} c_i z_i \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + q_i$$

$$\varepsilon_w \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \varphi \sum_i z_i c_i$$

ここに、 i : 液相化学種、 t : 時刻、 x : 深さ、 c_i : 濃度、 D_i^0 : 自己拡散係数、 B_i^0 : 絶対移動度、 τ : 空隙の屈曲度(tortuosity)、 δ_i : 空隙の収斂度、 z_i : 価数、 q_i : 生成・消滅項、 ε_w : 水の誘電率、 φ : Faraday定数

解析結果

OPC, 飛灰抽出液、30年



- OPCとフライアッシュセメントFACの差は表現可能。
- 実験で得られた表面近傍のピークは認められなかった。
- 飛灰抽出液からの浸透はCsとClの濃度差により、 $Cs \ll Cl$ となった。

コンクリート技術適用プロジェクト

H24年度の研究内容及び成果: コンクリートの性能確保(加速倍率推定の考え方)

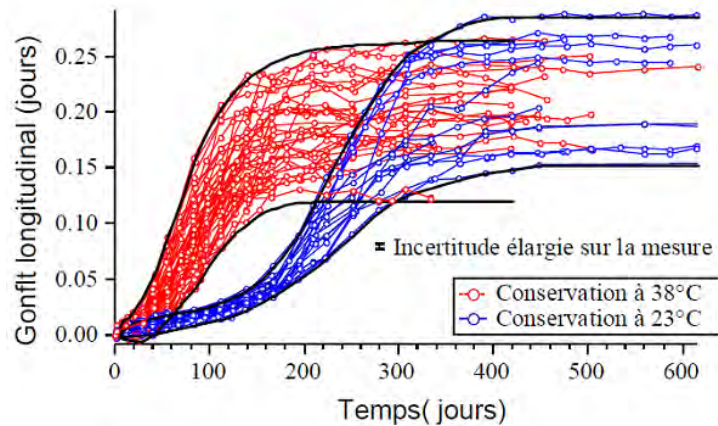
アルカリ骨材反応(ASR): コンクリート中の高いpH(鉄筋防錆に効果的)による骨材の膨張

JISの抑制対策: 反応性試験による骨材の有害度判定、アルカリ総量規制、混和材使用

課題: **現行抑制対策が不完全**であり、**有効期間が不明**

対策: 実使用コンクリートについて**加速膨張試験**を実施し、**加速倍率から抑制期間を推定**。

加速膨張試験: 温度60℃、アルカリ量5.5kg/m³(通常、1.5-3.0kg/m³)

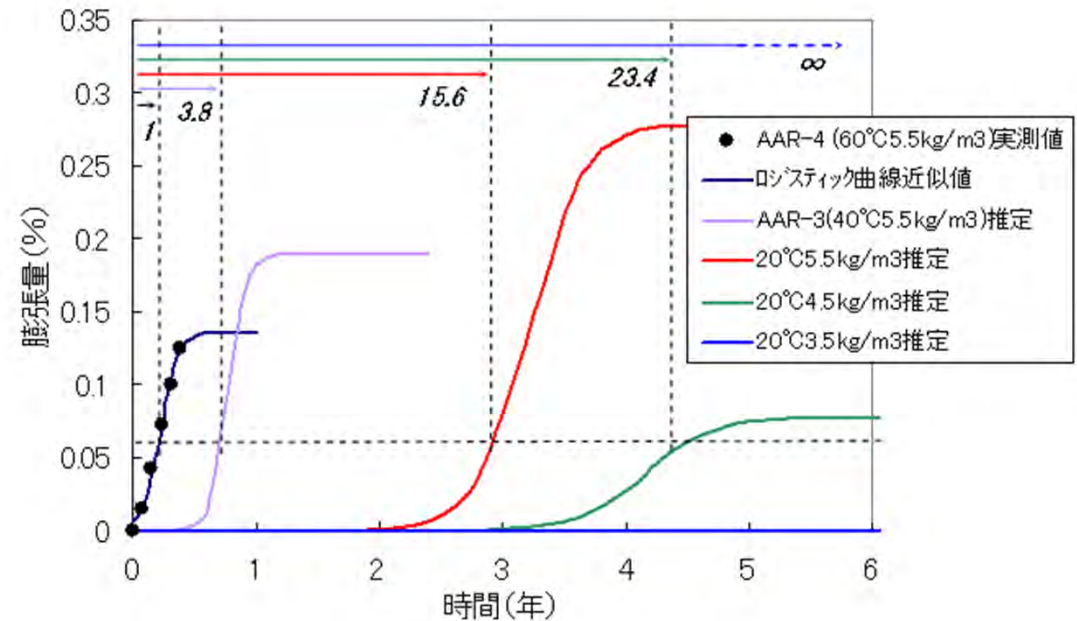


$$L = \frac{L_{\infty}}{(1 + e^{-b(t-c)})}$$

データへフィッティング
 終局膨張: L_{∞}
 傾き: b
 立上り時期: c

各パラメータの
 温度依存性
 アルカリ濃度依存性

促進試験結果から
 現実の膨張速度を推定



コンクリート技術適用プロジェクト

H24年度の研究内容及び成果: コンクリートの性能確保(実データへの適用)

1. 回帰式を設定

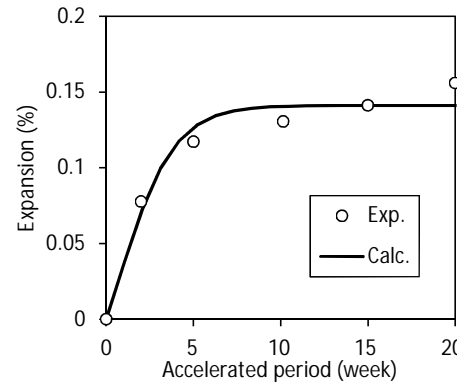
$$\varepsilon_t = \varepsilon_{\infty} \frac{1 - \exp(-t/\tau_C)}{1 + \exp\{-(t - \tau_L)/\tau_C\}}$$

ε_t : 時間 t における膨張量 (%)

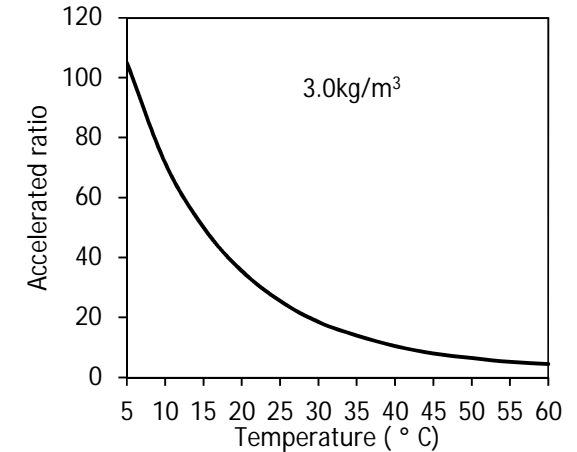
ε_{∞} : 最終膨張量 (%)

τ_C, τ_L : 時間を表すパラメータ (年)

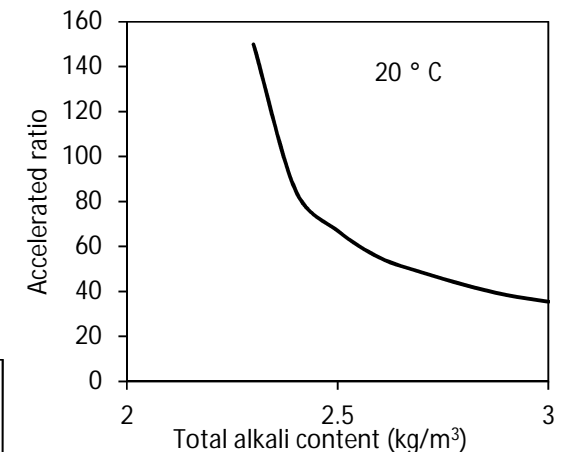
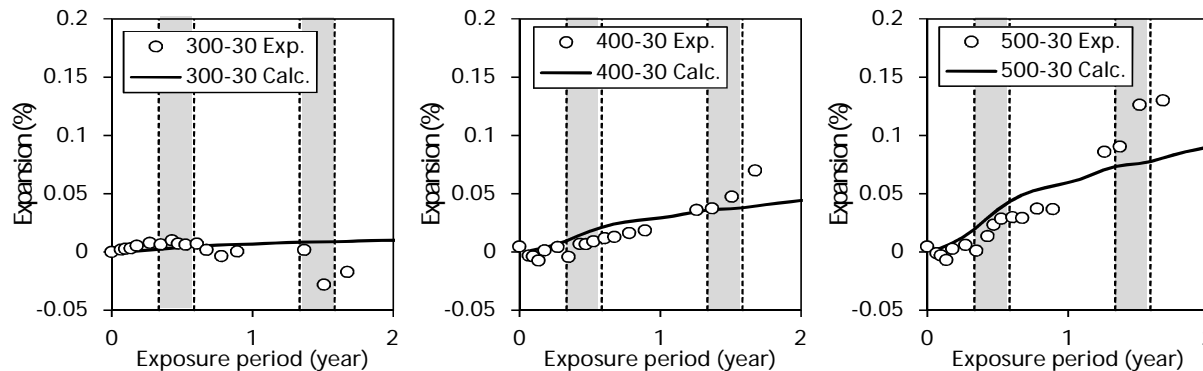
2. 加速試験へフィッティング



3. 加速倍率を算定



4. 暴露試験体へ適用



コンクリートのCPTの**加速倍率**は、15°C、アルカリ総量2.5kg/m³のコンクリートに対して**90倍**

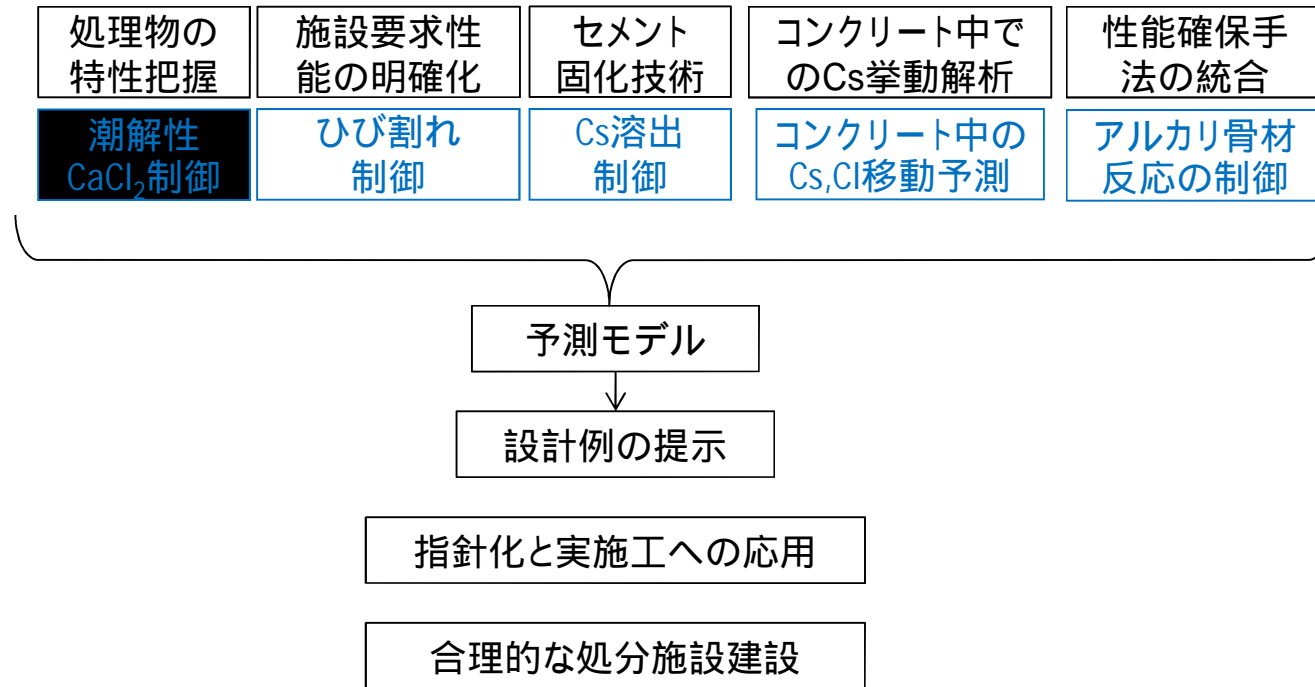
川端 雄一郎、山田一夫、小川彰一、大迫政浩、加速コンクリートプリズム試験を用いたコンクリートのASR膨張予測に関する試み、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集 第13巻、2013(投稿中)

川端雄一郎、山田一夫、小川彰一、佐川康貴、加速コンクリートプリズム試験を用いたASR膨張の簡易予測、セメントコンクリート論文集、2013(投稿中)

コンクリート技術適用プロジェクト

H24年度の研究内容及び成果

コンクリートによる封じ込め技術の開発



汚染廃棄物等処理への成果活用 / その他行政(国・自治体)への支援

成果活用：セメント固型化とコンクリートによる封じ込めへ先端的セメント・コンクリート技術を応用し、100年オーダーの耐久コンクリートの設計。

行政支援：

指定廃棄物の最終処分場、中間貯蔵施設を念頭に置いた試設計、設計・施工指針の提示。

コンクリート技術適用プロジェクト

今後の課題

- 個別課題
 - ✓ 飛灰のばらつきの把握と保管状態の実態
 - ✓ 耐久性から決まる構造要件を考慮したピット構造の力学的挙動
 - ✓ 遮水構造の再検討と事故時漏水検出システム・補修方法の再考
 - ✓ 温度応力・乾燥収縮によるひび割れ制御対策(フライアッシュコンクリート・膨張材)の有効性の実証
 - ✓ 加速膨張試験の加速倍率の異なる骨材での検証
 - ✓ 骨材影響を考えた飛灰浸出液からのCsとCl浸透実験と予測の高度化
 - ✓ ベントナイト混合土の耐アルカリ性の考え方
 - ✓ コンクリート容器の適用可能性の取りまとめ
- 取りまとめ
 - ✓ 上記を統合した試設計
 - ✓ 試設計を通した設計指針案の策定
 - ✓ 材料調達と使用材料の特性を考慮した実施工指針案の策定

コンクリート技術適用プロジェクト

H25研究計画概要

鉄筋コンクリート製遮断型最終処分場の一層の安全性確保を目的に、**汚染廃棄物等最終処分場コンクリート研究会**を中心に活動し、設計・施工指針案を提示する。

研究概要

鉄筋コンクリート製遮断型最終処分場
平常時及び事故時の想定シナリオの整理と要求性能の明確化

処理物の
特性把握

市川客員
北大名誉教授

構造的
健全性

斉藤:山梨大

ひび割れ制御:温度
応力及び乾燥収縮

丸山:名大

ひび割れ
制御:ASR

川端:港空研
佐川:九大

Cs&Clの
浸透解析

半井:広大

遮水層・構造
の総合的検討

入江:JNES

設計例の提示:従来方法との対比(蔵重:電中研)
構造:コンクリートピット、コンクリート容器(長瀧:東工大名誉教授)
材料候補:W/C=40%、フライアッシュ30%セメント(設計材齢91日)、膨張材、エポ筋

設計・施工指針の提示(国環研技術資料)

安全・合理的な処分施設建設

(敬称略)