

GI基金プロジェクト

提案プロジェクト名： コンクリートにおけるCO₂固定量評価 の標準化に関する研究開発

[研究開発項目 2] CO₂排出削減・固定量最大化コンクリートの品質管理・固定料評価手法に関する技術開発

提案社名：国立大学法人 東京大学
代表名：教授 丸山一平

目次

0. コンソーシアム内における各主体の役割分担

1. ~~事業戦略・事業計画~~

- ~~-(1) 産業構造変化に対する認識~~
- ~~-(2) 市場のセグメント・ターゲット~~
- ~~-(3) 提供価値・ビジネスモデル~~
- ~~-(4) 経営資源・ポジショニング~~
- ~~-(5) 事業計画の全体像~~
- ~~-(6) 研究開発・設備投資・マーケティング計画~~
- ~~-(7) 資金計画~~

2. 研究開発計画

- (1) 研究開発目標
- (2) 研究開発内容
- (3) 実施スケジュール
- (4) 研究開発体制
- (5) 技術的優位性

3. ~~イノベーション推進体制（経営のコミットメントを示すマネジメントシート）~~

- ~~-(1) 組織内の事業推進体制~~
- ~~-(2) マネジメントチェック項目① 経営者等の事業への関与~~
- ~~-(3) マネジメントチェック項目② 経営戦略における事業の位置づけ~~
- ~~-(4) マネジメントチェック項目③ 事業推進体制の確保~~

4. その他

- (1) 想定されるリスク要因と対処方針

2. 研究開発計画



 (1) 研究開発目標

本事業は、[研究開発項目2] **CO₂排出削減・固定量最大化コンクリートの品質管理・固定料評価手法に関する技術開発**のうち、「**コンクリートにおけるCO₂固定量評価の標準化に関する研究開発**」として、2030年までに、CO₂排出削減・固定量最大化コンクリートの品質管理手法(CO₂固定量の計測・評価方法)を確立するとともに国際標準化を実現する。

- 本事業では、実験的事実と科学的基盤に基づき、CO₂固定化量評価方法ならびに品質管理方法について、以下の項目について実施する。

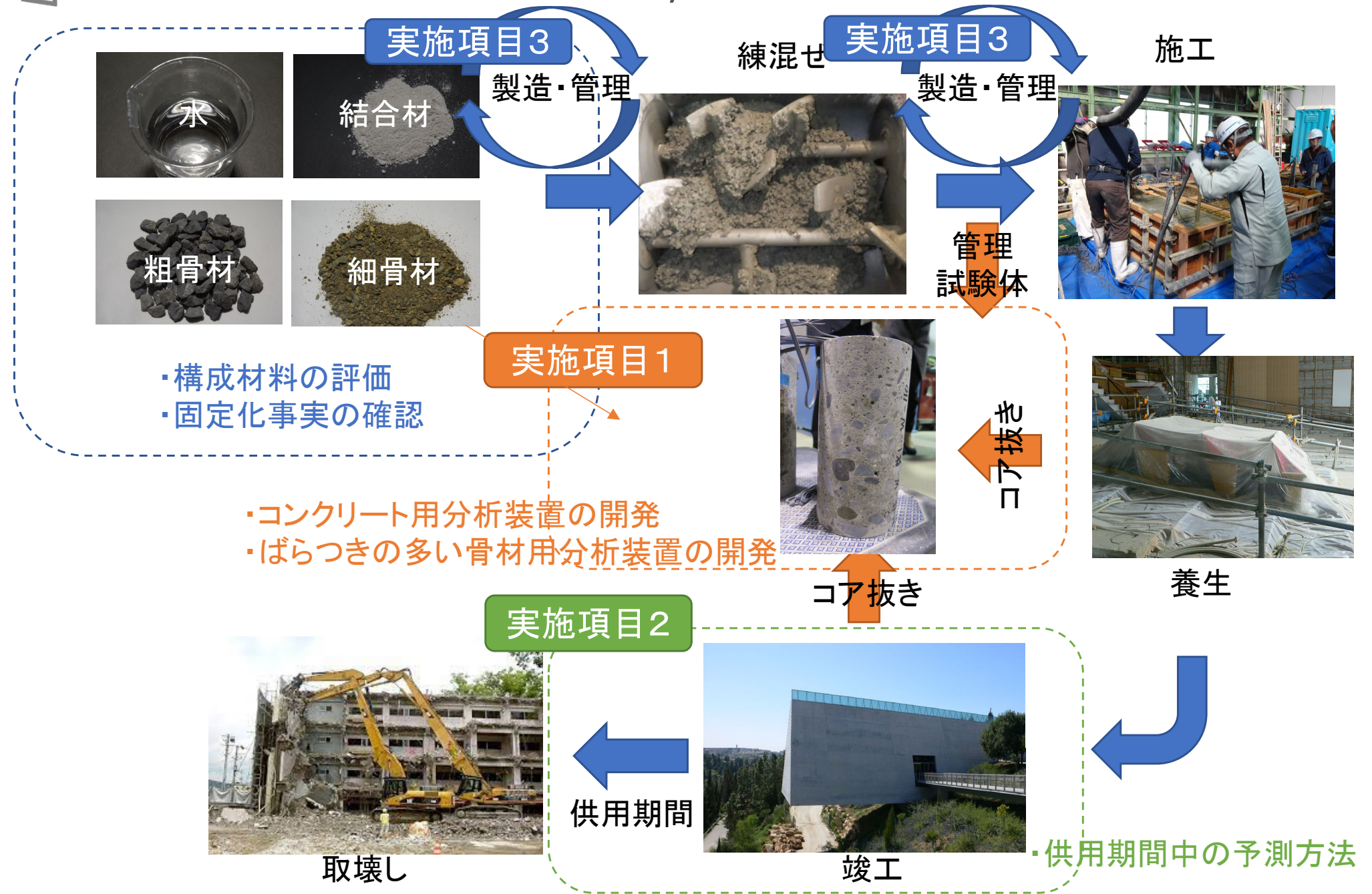
1)コンクリート用材料・コンクリートのCO₂固定量評価方法の開発

2)構造物供用中にCO₂固定する材料について固定量を保証する枠組みの開発

3)CO₂の固定に関する品質評価・管理方法に関する技術開発

- 本事業では、JIS およびISO となることを目標として、国内・国際的に受け入れ可能なような適切なステークホルダーとの会合を持つ。
- JIS化、ISO化に向けたスケジュールについては、標準化に関する会議体において、適切な時期にJIS 案を出せるよう見直しを図りつつ、本事業をすすめるとともに、国際ジャーナル等への投稿も含めて戦略的に行う。

建物の一生とコンクリート，プロジェクトの関係



採択条件に対する対応（1）

JIS化・ISO化に向けたスケジュールの見直しを図る実施計画とすることとし、実施計画書に記載すること

- JCI主催のカーボンリサイクル評価方法のJIS原案作成委員会の委員として参画した。
- その中で、JIS素案検討WG主査となり、JIS素案をとりまとめることとなった。この中で、過年度までに実施したJCI委員会で実施した内容をもとに今年度中に一部分のJIS素案をとりまとめることとなった。本事業の観点からは、実施事項について非公開データをもとに議論を行い、適切に成果を反映することとする。
- 一方で、JIS案については、国際的動向をにらみながら、適宜できるところを反映させる戦略とすることをJCI委員化委員長である野口貴文教授に確認し、適宜反映することとした。
- そのため、実施計画書において、JIS提案のタイミングを選定、記載は可能であるが、プロジェクト計画に大きな変更はない。

採択条件に対する対応（2）

研究開発項目2で採択された他の事業さと連携し、一体となって検討を進めること

- GIコンクリート系交流会を野口貴文東大教授のお声かけで立ち上げた。6月7日、7月11日に会合をもった。初回、丸山は海外出張のため不参加だったが、PPTを野口貴文東大教授に代理発表していただき、本プロジェクトの他の事業からの活用について検討を依頼した。世界的動向、研究事例等、可能な範囲での意見交換を進める。
- NEDO主導でワーキングの立ち上げを行う。予備会合をNEDOと持ち、今後、実施内容を含む知見交換、協働体制を構築する。

 単独応募の研究機関等の取組状況

- 大学内においては、プロジェクトは全学的なサポートをうけられる状況となっている。
- 体制を強化するための研究員の雇用をすすめている。（10月に1名、3月にもう一名の予定。）3月からの雇用は研究プロジェクト全体の対応を想定。
- 実験スペースを含めて、建築学専攻からのサポートを受けられることを確認済み。

2. 研究開発計画 / (2) 研究開発内容

実施項目 1 コンクリート用材料・コンクリートのCO₂固定量評価方法の開発

- ✓ 国内外の既存研究や動向を調査の上、いくつかのCO₂評価手法を用いて各種試料を測定し、測定結果の再現性、ばらつきを確認し、手法を絞り込む。コンクリート用材料、コンクリート試料のCO₂量を測定し、手法の簡便さや精度を比較して、研究開発項目1で採択された他の事業者と連携し最適な測定手法を検討する。本検討では既存の装置を利用した標準化案の策定を行う。また、代表性を確保できる前処理方法やサンプリング手法なども検討して標準化を目指す。
- ✓ 一方、既往装置の原理を応用して、φ10×20cmの大型試験体まで測定可能な装置の開発を行い、その性能評価を行うとともに、前処理方法やサンプリング方法も含めコンクリートにおけるCO₂固定量の評価手法を選定ならびに開発し、その適用性についても評価する。
- ✓ なお、有機材料(ファイバー、混和剤)における素材中カーボン量は比較的均一な材料であることが想定されており、全炭素分析などを通じて測定可能と考えられるのでここでは適用範囲外とする。

 現況の変化について：

- JCI主催のカーボンリサイクル評価方法のJIS原案作成委員会の委員として参画した。
- その中で、JIS素案検討WG主査となり、JIS素案をとりまとめることとなった。この中で、過年度までに実施したJCI委員会で実施した内容をもとに今年度中に一部分のJIS素案をとりまとめることとなった。本事業の観点からは、実施事項について非公開データをもとに議論を行い、適切に成果を反映することとする。
- 一方で、JIS案については、国際的動向をにらみながら、適宜できるところを反映させる戦略とすることをJCI委員化委員長である野口貴文教授に確認し、適宜反映することとした。
- そのため、実施計画書において、JIS提案のタイミングを選定、記載は可能であるが、プロジェクト計画に大きな変更はない。

📁 実施項目 1

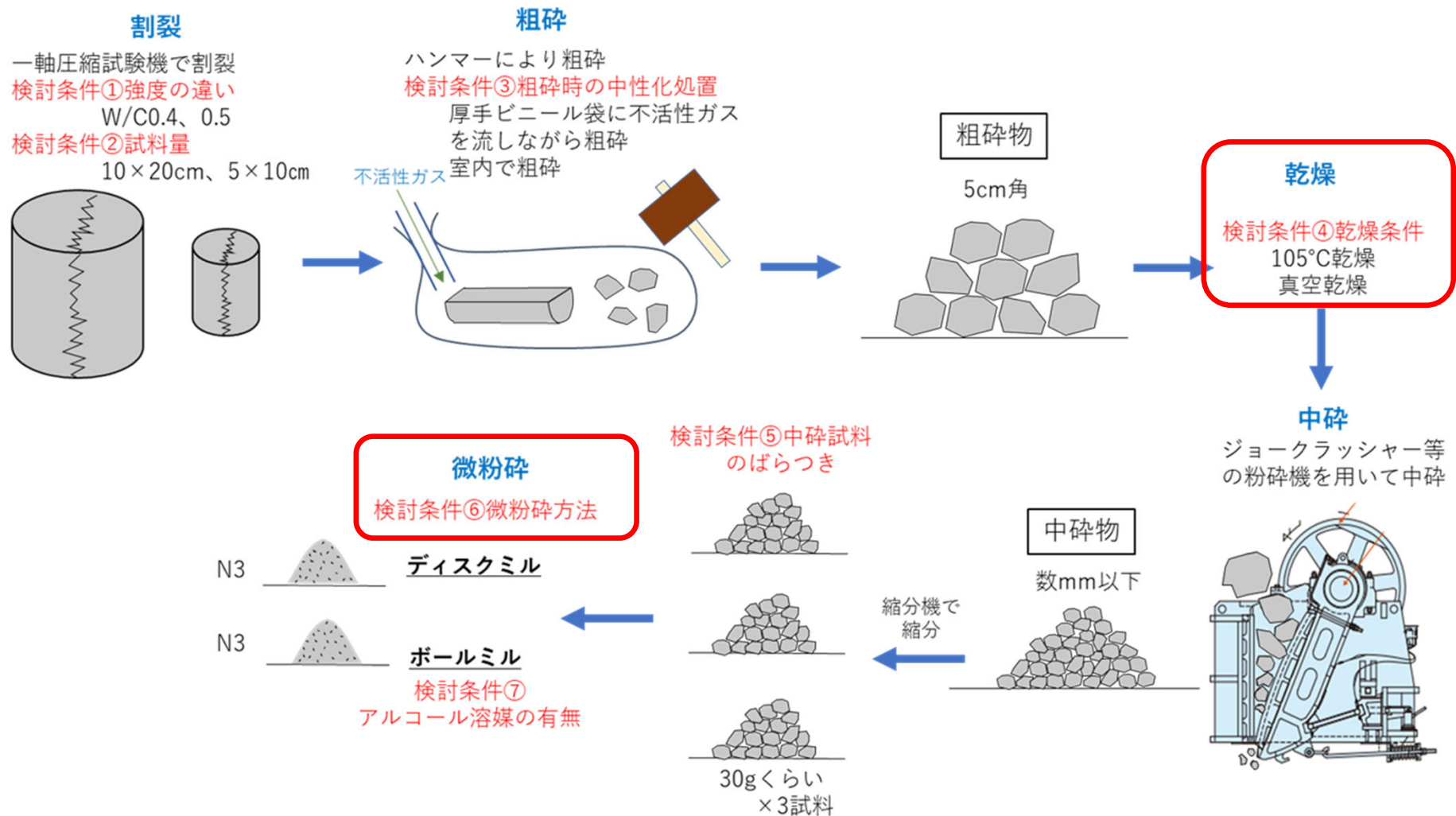
① 各種の測定方法によるCO₂評価量の再現性、ばらつきの確認

測定方法	検討/確認事項	これまでに得た知見	今後の対応
1) 湿式分析 (JIS R 9101)	<ul style="list-style-type: none"> 高CO₂含有試料への適用性検討 再現性(ばらつき) 	<ul style="list-style-type: none"> 高CO₂含有試料では標準偏差がやや大きいですが、適用可能と判断 	<ul style="list-style-type: none"> 混合セメント中の混和材の影響(現在確認中)
2) TG-DTA/MS	<ul style="list-style-type: none"> 他手法との整合性 再現性(ばらつき) 	<p><TG-MS></p> <ul style="list-style-type: none"> CO₂定量の手法を検討し、他手法との整合性が得られた ばらつきは他手法よりやや大きめ → 再現性に課題 	<ul style="list-style-type: none"> TG-DTAによるデータの拡充(データ取得中)
3) TC	<ul style="list-style-type: none"> 他手法との整合性 再現性(ばらつき) 粒度の影響 有機炭素影響 	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼温度を2段階とする/酸処理することで、試料中の有機炭素定量が可能であることを確認 湿式分析との整合性はあり、再現性も良好 	<ul style="list-style-type: none"> 混合セメント中の混和材の影響(現在確認中)

実施項目 1 コンクリート用材料・コンクリートのCO₂固定量評価方法の開発

②各種コンクリート用材料の代表サンプル測定方法 (THC・東大)

セメントペースト試料を用いて、**前処理方法の一部を検討**

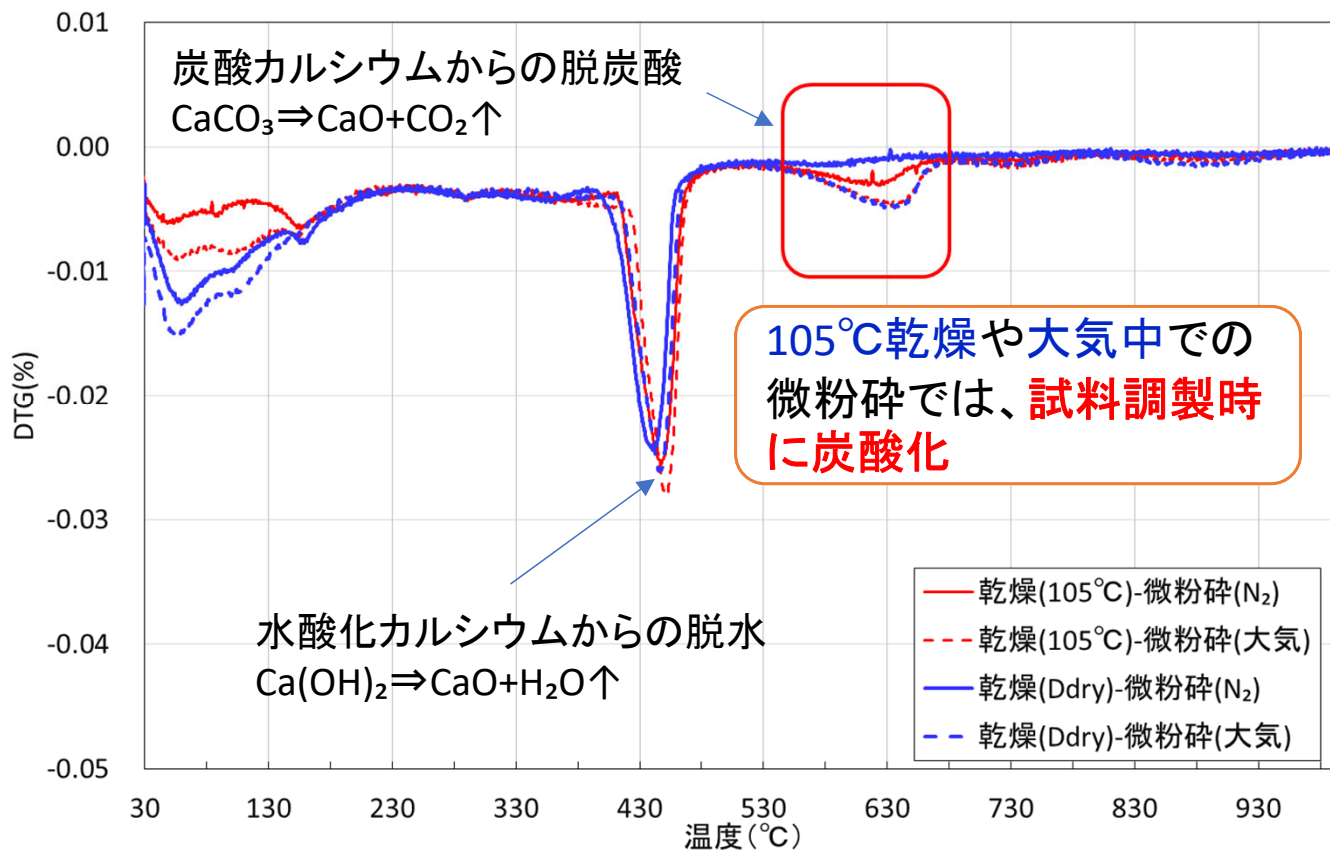


実施項目 1 コンクリート用材料・コンクリートのCO₂固定量評価方法の開発

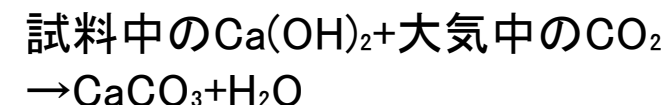
②各種コンクリート用材料の代表サンプル測定方法 (THC・東大)

● 前処理方法の検討

〈セメントペースト試料のTG-DTA測定結果〉
(水酸化カルシウム、炭酸カルシウム量定量)



前処理条件によっては、
試料が炭酸化する可能性あり

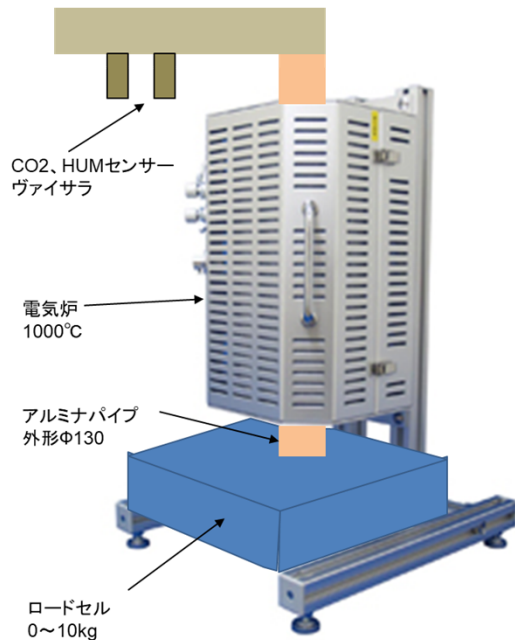


JIS化においては、
CO₂定量時の前処理についても
言及する必要あり

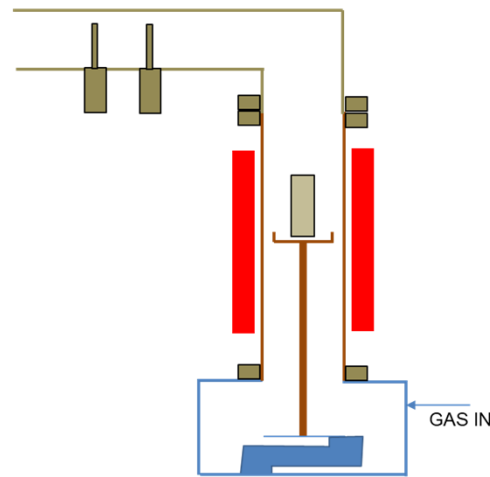
実施項目 1 コンクリート用材料・コンクリートのCO₂固定量評価方法の開発

④バルクコンクリート試験体(Φ10x20cm, Φ5x10cm, 骨材群)を測定可能な装置の開発 (リガク)

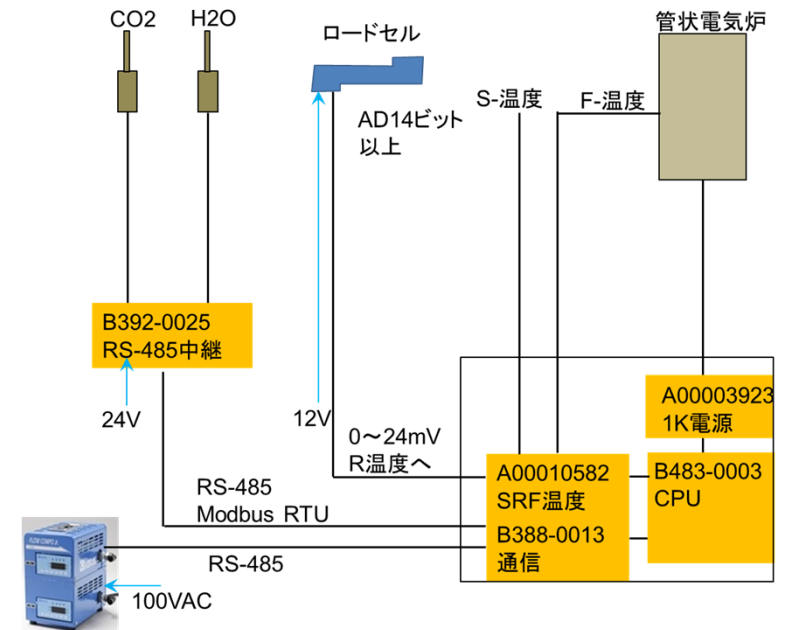
[目的] 既存の熱重量一質量分析装置の考え方を踏襲し、
コンクリート試験体レベルでのCO₂固定量の装置を開発する。



装置外観概念図



装置断面概念図



制御系試案

2. 研究開発計画 / (2) 研究開発内容

実施項目2 構造物供用中にCO₂固定を実施する材料について保証する枠組みの開発

竣工後の供用期間を含めてCO₂を固定化する素材について、事前の促進試験に基づき、建物立地環境・素材・仕上げの状態を考慮して、供用期間中の固定量を評価する枠組み、ならびにモニタリング手法を提案する。

- ✓ 供用期間中に空気中のCO₂を固定化する素材については、材料特定・立地環境・仕上げの状態などを入力値として将来予測をした上で供用期間中の固定量を保証する枠組みが必要となる。本検討では適切な促進試験とその促進試験の結果を用いて、供用期間中の建物ならびに部材の固定量評価の枠組みを提案する。また、同時にモニタリングする手法も併せて提案し、開発した材料の適切な運用を支援する枠組みを構築する。
- ✓ 従来のコンクリートの炭酸化に関する評価は、鉄筋腐食の観点からのpHの変化に注目しており、CO₂固定の観点からの評価はなされていなかった。また、促進試験で高濃度CO₂を用いる場合の細孔溶液中のpHの変化、それによって生ずる無機炭酸化反応の変化、空隙構造の変化、および水分発生速度の変化が炭酸化進行に及ぼす影響について科学的な知見は十分でない。これらに関連する情報を取得するとともに、建物立地環境・素材・仕上げの状態の影響について科学的知見を拡充するとともに、実施工における制度レベルでの運用が可能な簡便な評価方法の枠組みを構築する。

実施項目 2 構造物供用中にCO₂固定を実施する材料について保証する枠組みの開発

[全体像]

二酸化炭素固定量 $C_i^{ti} = \left(\sum_i d_i \cdot A_i \cdot c_i \right) f_{cem}^{clinker} \cdot f_{clinker}^{CaO} \cdot \gamma \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}$

非破壊モニタリング方法の提案

- ✓ ラマンマッピング
- ✓ IRマッピング
- ✓ ハイパースペクトルカメラ
- ✓ LIBS

北大

炭酸化メカニズムの検討

- ✓ 炭酸化度
- ✓ 温湿度条件
- ✓ 二酸化炭素濃度

琉球大

- C_i^{ti} : 供用中の二酸化炭素固定量
- d_i : 炭酸化深さ
- A_i : 構造物の断面積
- c_i : コンクリート中のセメント量
- $f_{cem}^{clinker}$: セメント中のクリンカー量
- $f_{clinker}^{CaO}$: クリンカー中のCaO量
- γ : 炭酸化度
- M_{CO_2} : CO₂の分子量
- M_{CaO} : CaOの分子量

表層部の影響評価

- ✓ 塗装仕上げ
- ✓ 表層ひび割れ

広島大

現場での検証

炭酸化深さ $d_i = A\sqrt{t} + R^2 - R$

促進試験方法の提案

$A = k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3$

- ✓ 現状の促進試験方法の課題整理
- ✓ 促進試験と実構造物の対応評価

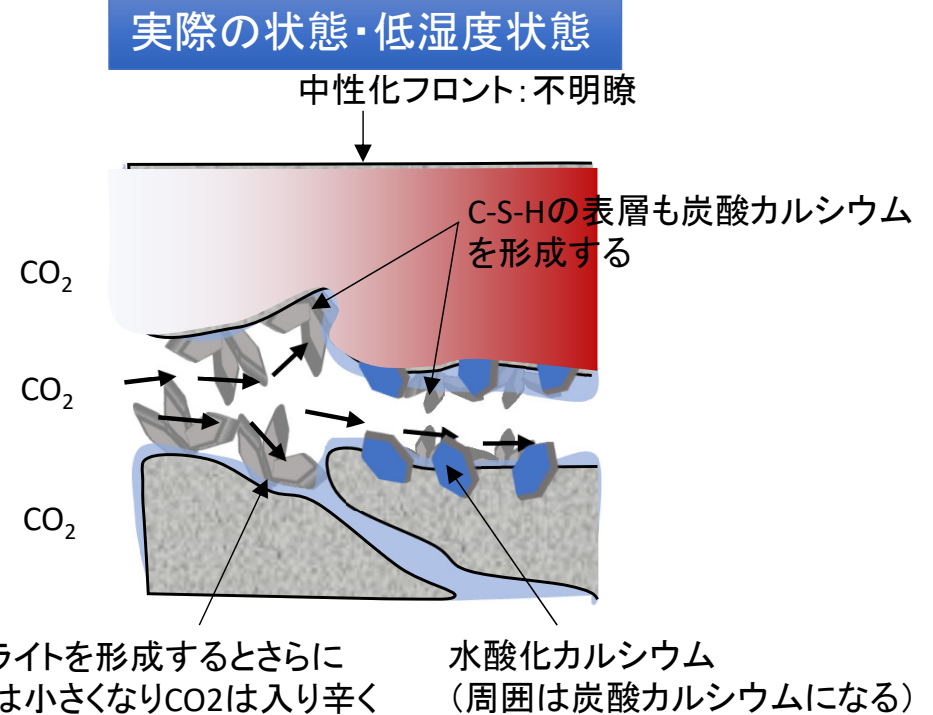
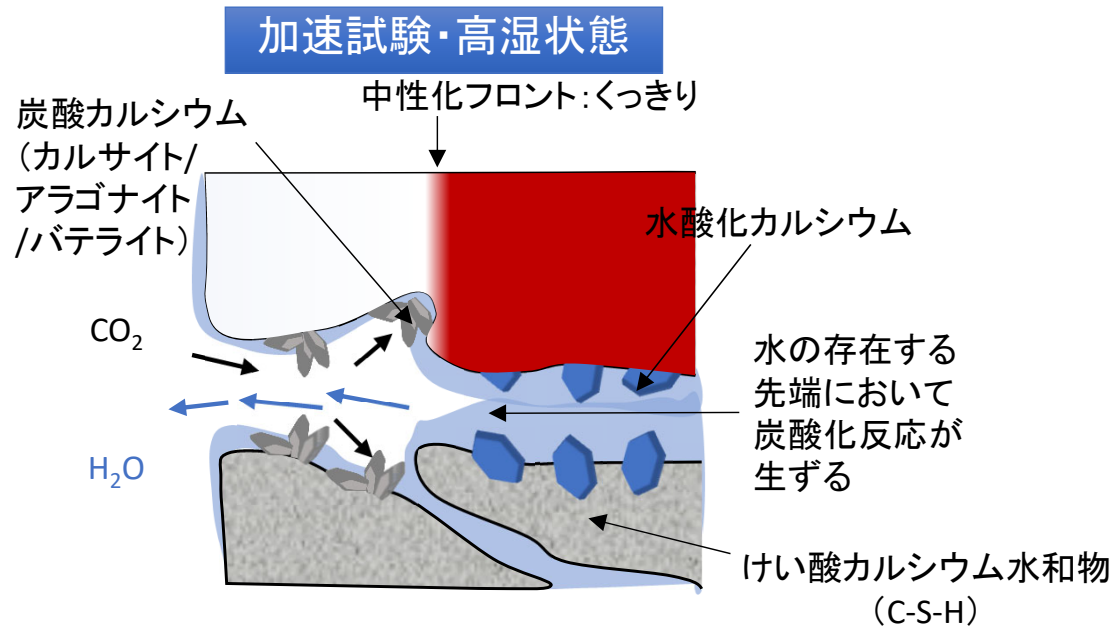
- α_1 : コンクリートの種類 (骨材) による係数
- α_2 : セメントの種類による係数
- α_3 : 調合 (水セメント比) による係数
- β_1 : 気温による係数
- β_2 : 湿度およびコンクリートに作用する水分の影響による係数
- β_3 : 二酸化炭素濃度による係数

千葉大・東大

実施項目 2 : 適切な促進試験方法の提案

現在までにわかっているCO2濃度と炭酸化現象

→メカニズムを考慮した合理的な前処理、炭酸化促進環境湿度の検討



- 炭酸化フロントは水分の脱水速度に律速される
- CO₂濃度が高いので炭酸化した箇所での水分発生量が多い
- 水酸化カルシウムなどは水が多いと溶解・析出があるので、炭酸化が継続する。
- C-S-Hなどの炭酸化の反応は水に覆われているので遅くなる。
- バテライト (密度低い) などの不安定相はカルサイト (密度高い) に変化する可能性が高い。
- 溶解・析出も大きいので、炭酸化収縮が大きく、骨材等のまわりにひび割れも入り安い。
- CO₂分圧が高いので、pHが低くなり、平衡相が変化する。特にC-S-HからのCaイオンの溶解も生じやすい。

- 中性化反応よりもまず、脱水・乾燥が先行する。
- 乾燥しているとC-S-H表層などではバテライトが生成しやすい。
- バテライトが生成すると空隙は少なくなり、CO₂が入りにくくなる。
- 乾燥していると、CO₂は奥の方まで浸透し、比較的広い範囲で中性化が同時に進行する。
- CO₂分圧が低く、比較的pHが高いところで反応が進む。
- 大気CO₂濃度での炭酸化収縮データは少ない。

実施項目 2 ①新しい促進試験方法と将来の炭酸化固定量保証の枠組みの検討

(千葉大・東大)

●異なる湿度条件下での炭酸化速度測定検討

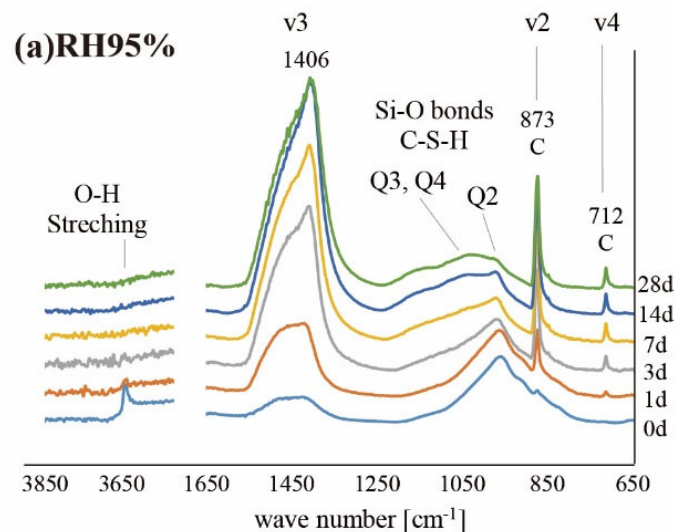


図1 95%RH下での IRスペクトルの経時変化

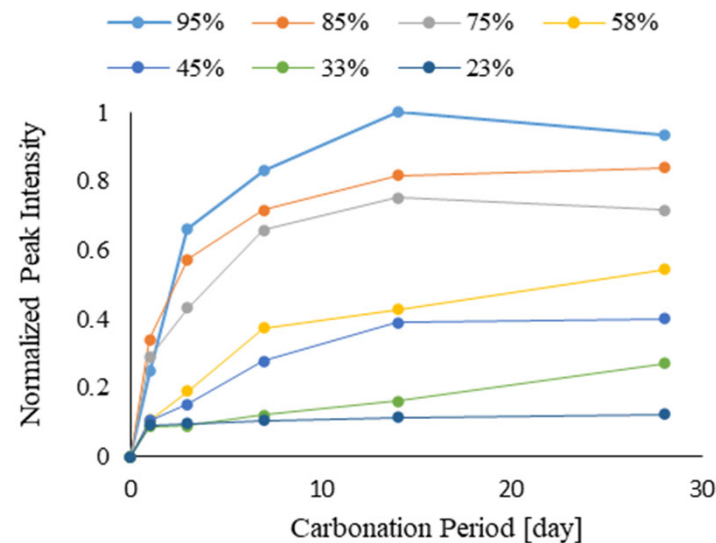


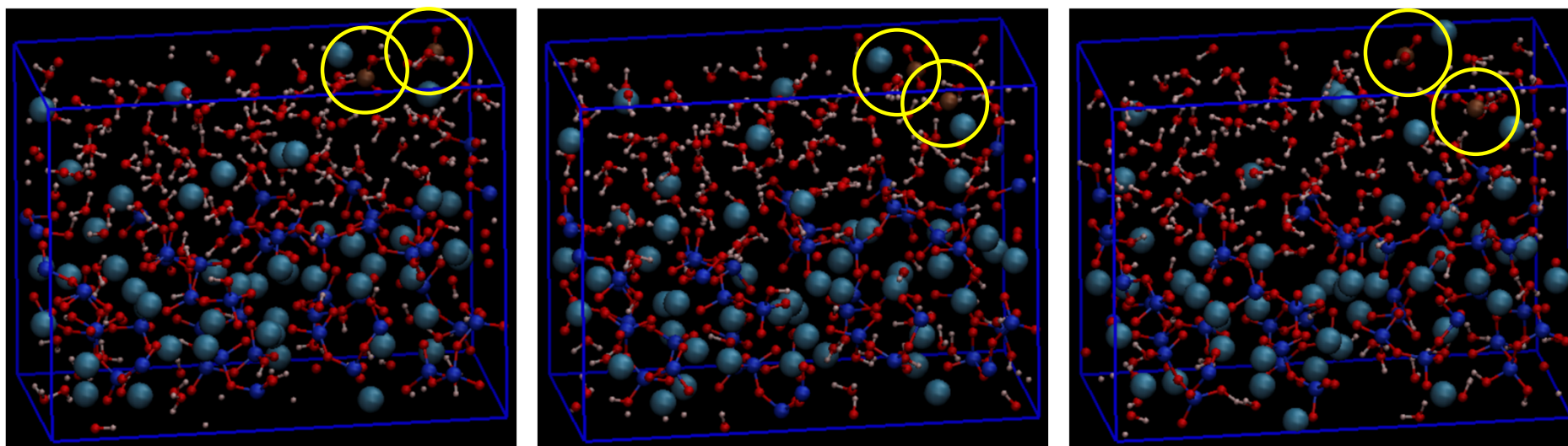
図2 カルサイトピークによるカルサイト量の経時変化

- 粉末のセメントペーストについて前処理乾燥を行ったのちの炭酸化プロセスを予備試験として実施。反応速度の湿度依存性を確認できることを明らかにした。
- 現在、X線粉末回折による定量結果との対応確認を実施中。

実施項目 2 ①新しい促進試験方法と将来の炭酸化固定量保証の枠組みの検討 (千葉大・東大)

● C-S-H + 水系 + CO₃²⁻の第一原理MD

- 炭酸イオンを含むC-S-H + 水系のMD計算を行う準備として、600原子系でCO₃²⁻を2つ含む系の第一原理MDを行った。
- スーパーコンピュータ上（約300コアの並列計算）で、自作コードによる第一原理MD計算を行い、300 K、500 K、700 K、900 Kで平衡構造を得た。
- MD計算のための力場開発の教師データとなる系のエネルギーと力のデータを取得した。



0 ps

15 ps

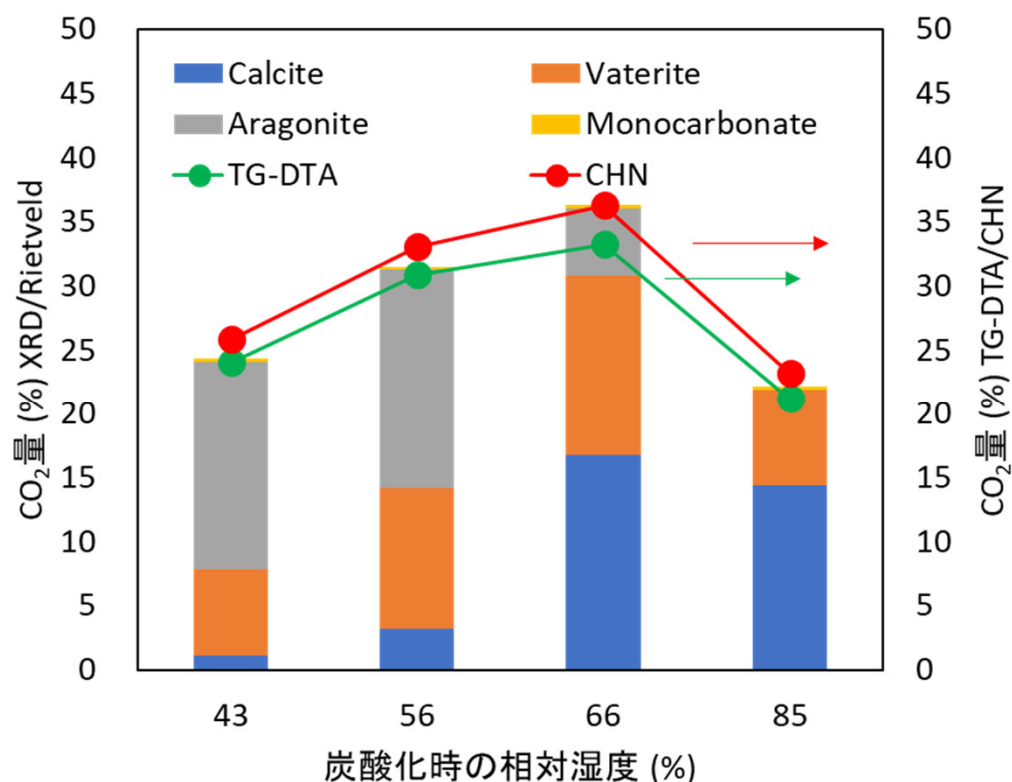
30 ps

C-S-H + 水系でのCO₃²⁻の回転と並進運動

実施項目 2 ②CO₂固定における温湿度影響評価 (琉球大)

1) CO₂固定量の定量手法の検討

XRD/Rietveld法により結晶性の炭酸塩鉱物(カルサイト、アラゴナイト、バテライト、モノカーボアルミネート水和物)を定量し、XRD/Rietveld法と各測定手法(TG-DTA、CHN)から得られたCO₂固定量を比較した。



- XRDとTG-DTAの結果は概ね一致した。
- CHNのCO₂固定量はXRDよりも1.4%~2.8%程度多い結果となった。



非晶質炭酸カルシウムの可能性?

※Rietveld法の結果
各鉱物の定量値から化学組成に基づきCO₂量を求めている

- 各種分析方法によりCO₂固定量を評価できることを確認した。
- 今後はCHNを基本のCO₂固定量の定量手法とし、TG/DTAおよびXRD/Rietveld法も併用しながら、詳細な炭酸化の評価(水和物の炭酸化進行)を実施する。

2. 研究開発計画 / (2) 研究開発内容

開発項目3 CO₂の固定に関する品質管理方法に関する技術開発

排出したガス等のCO₂源からCO₂を無機塩として固定したことを確認できる手法を明らかにする。

- ✓ 今後、炭素税などの導入により偽装した炭酸塩含有材料等が生じうるため、品質管理、およびCO₂固定のトレーサビリティ確保のため、用いたガス(空気、工場排ガス、など)と固定した炭酸塩におけるCO₂中の炭素同位体(¹⁴C)の含有率を用いて、ガス固定を実施したかどうかの確認を行う手法を提案する。



図: 名古屋大学・宇宙地球環境研究所
タンデトロン年代測定研究グループ所有の
炭素同位体測定装置

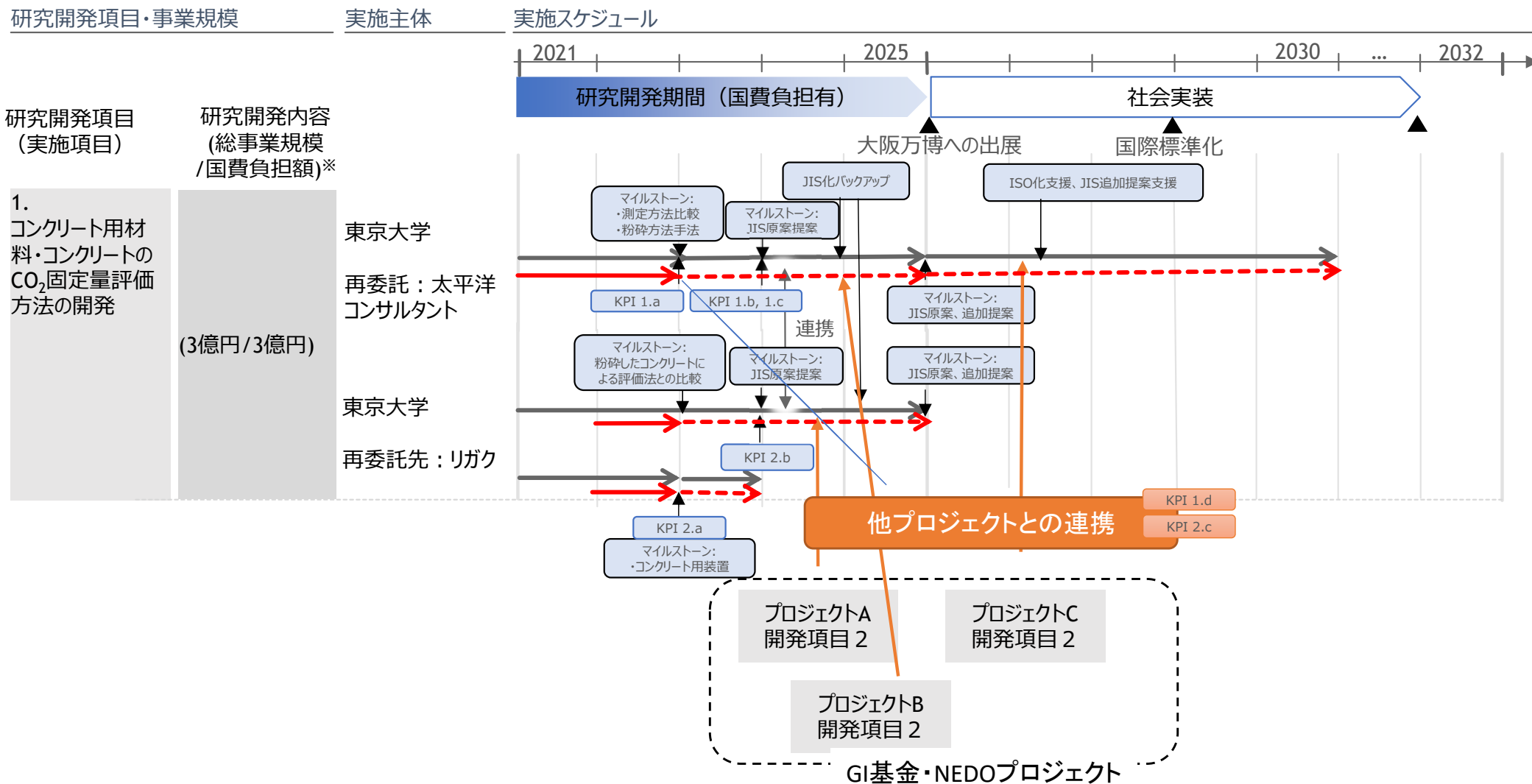


実施項目 3 CO₂の固定に関する品質管理方法に関する技術開発

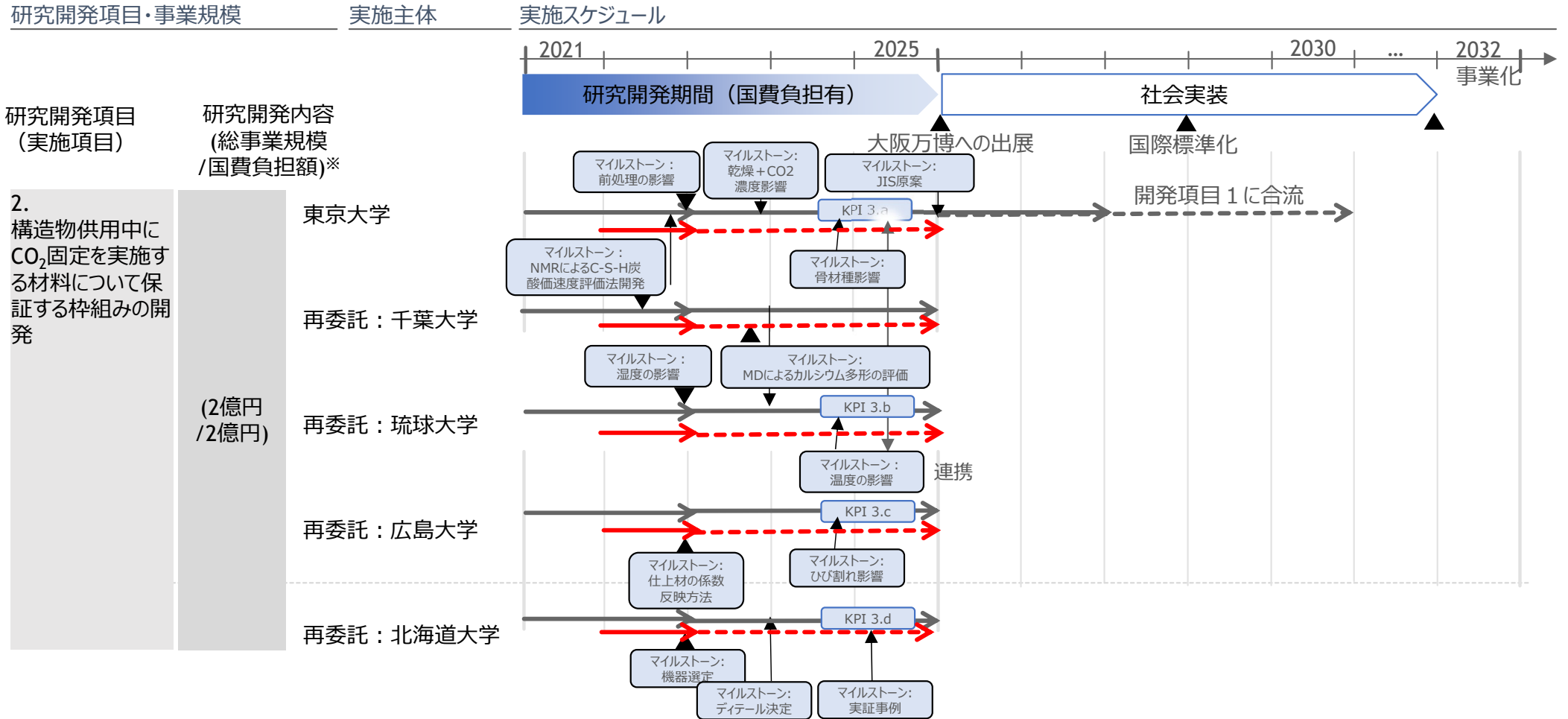
文献調査: 水和前の鉱物と炭酸化に確認された相、ならびに分析技術の一覧

Mineral	Sample type	Reaction conditions	Description of products after carbonation	Technique
C3S	compacted mortar, w/s = 0.125	50%RH, 1-4 atm	C-S-H-like gel; calcite	QXRD, SEM
	paste, w/s = 0.025-0.4	9-79.5%RH, 1 atm	firstly C-S-H and calcite, eventually silica gel and calcite	QXRD, SEM
	dry powder	100%RH, 5% CO ₂ , 1 atm	amorphous calcium silicate hydrocarbonate; mainly calcite, little aragonite and vaterite	QXRD, TGA-MS
	paste, w/s = 0.4	T= 23-55 °C, 1 atm	firstly C-S-H, eventually Ca-modified silica gel; aragonite and calcite	TGA, SEM, FTIR
β-C ₂ S	compacted mortar, w/s = 0.125	50%RH, 1-4 atm	C-S-H-like gel; calcite	QXRD, SEM
	paste, w/s 0.025-0.4	9-79.5%RH, 1 atm	firstly C-S-H and calcite, eventually silica gel and calcite	QXRD, SEM
	dry powder	100%RH, 5% CO ₂ , 1 atm	amorphous calcium silicate hydrocarbonate; mainly aragonite, little calcite and vaterite	QXRD, TGA-MS
	paste, w/s = 0.1	2 atm	fully polymerised silicate; calcite	XRD, TGA, SEM, NMR
	compacted paste, w/s = 0.15	2 atm	C-S-H; calcite	FTIR, NMR, QXRD, TGA
	paste, w/s = 0.4	T= 23-55 °C, 1 atm	firstly C-S-H, eventually Ca-modified silica gel; aragonite and calcite	TGA, SEM, FTIR
Y-C ₂ S	paste; compacted mortar, w/s=0.202	1-55 atm	low lime C-S-H, calcite, vaterite	QXRD, SEM, TGA
	dry powder	100%RH, 5% CO ₂ , 1 atm	amorphous calcium-silicate-hydrocarbonate binding phase	QXRD, TGA-MS
	compacted paste, w/s = 0.15	2 atm	polymerised silicate; calcite, vaterite	QXRD, TGA, NMR, FTIR
	paste, w/s = 0.4	T= 23-55 °C, 1 atm	firstly C-S-H, eventually Ca-modified silica gel; aragonite and Calcite	TGA, SEM, FTIR

研究実施スケジュール

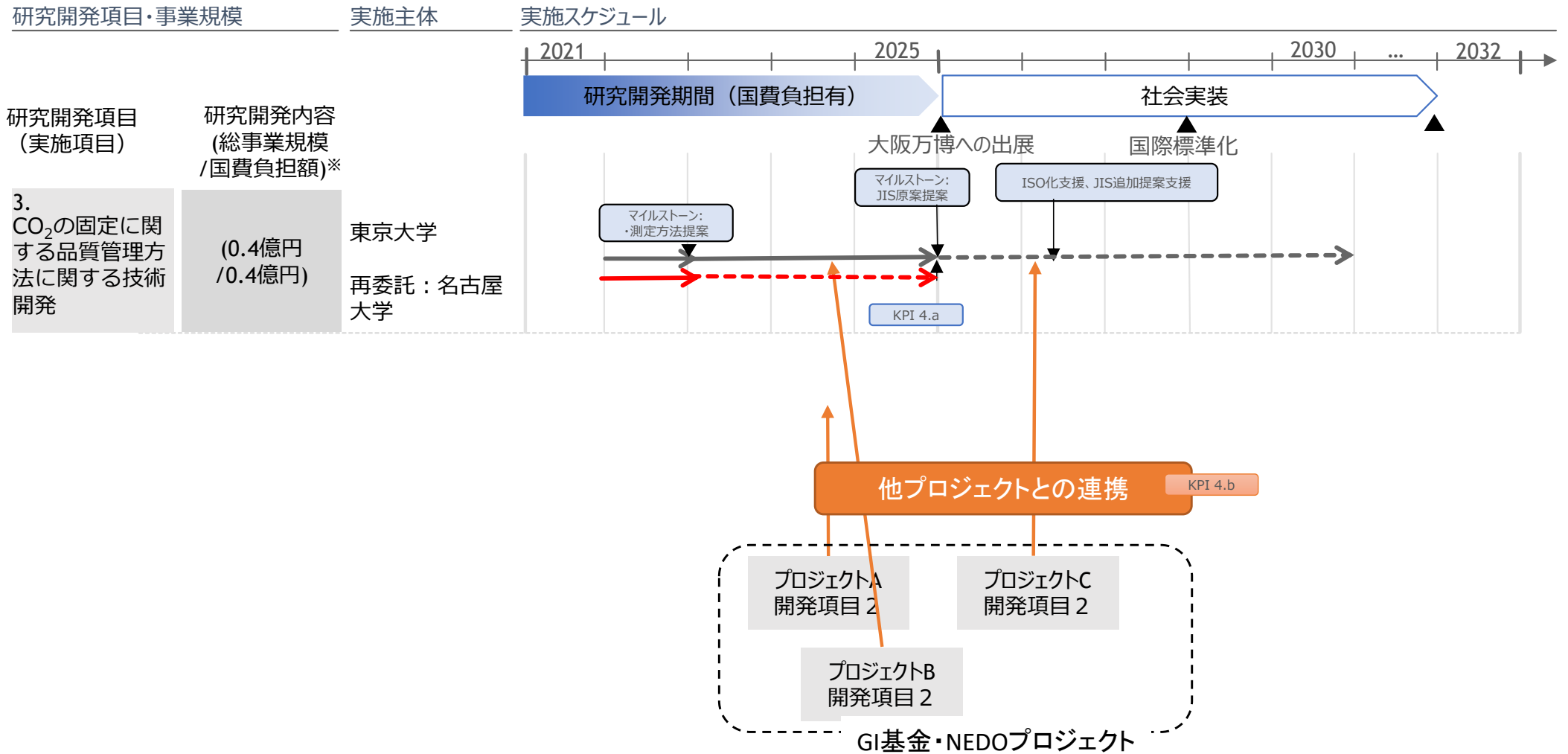


研究実施スケジュール

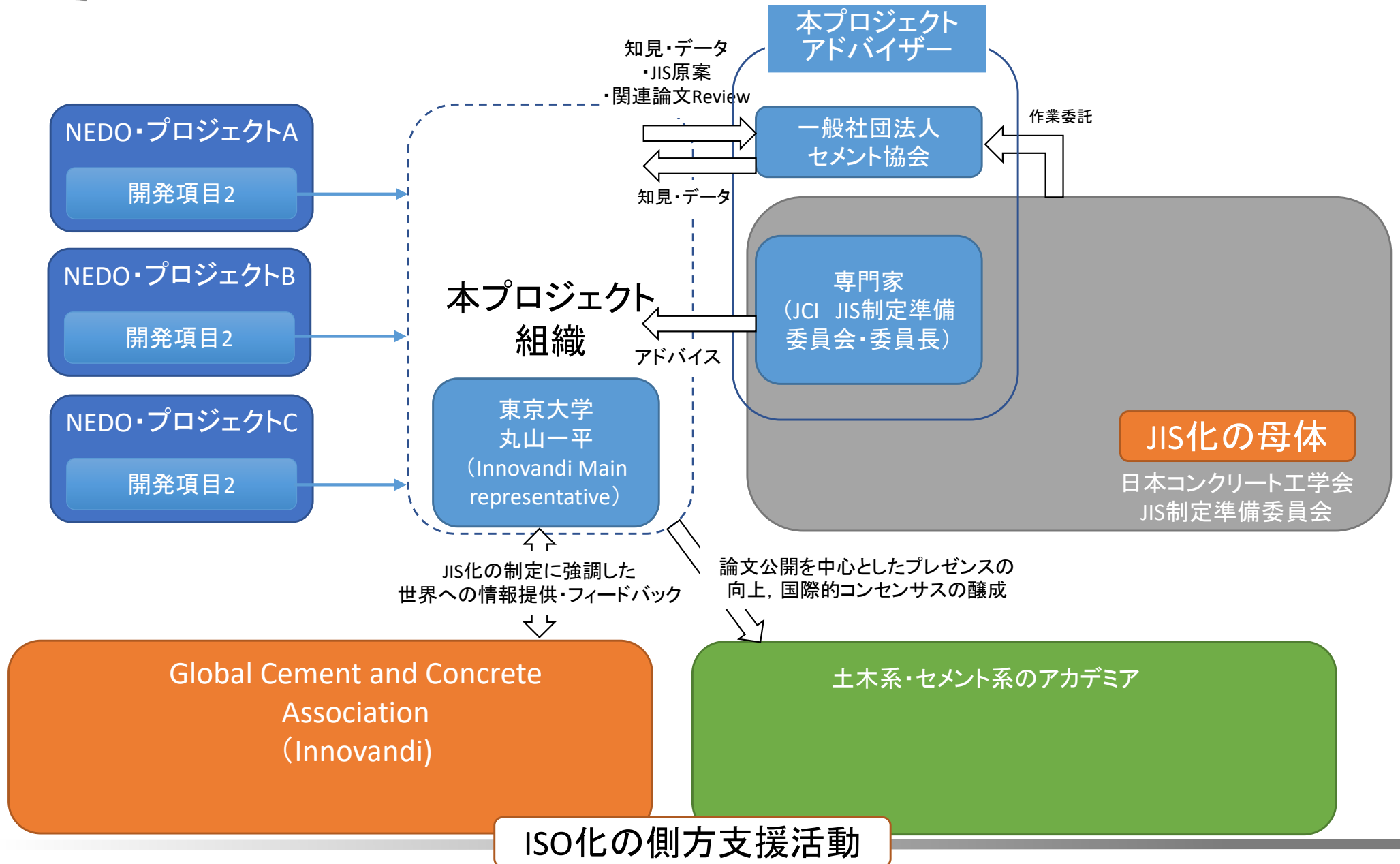


研究実施スケジュール

実績



2. (4) 研究開発体制（ゴール達成に向けた枠組み）



4. その他 / (1) 想定されるリスク要因と対処方針

研究開発（技術）におけるリスクと対応

- 研究担当をするポスドクのCOVID-19による来日遅延
 - 受託開始直後からの作業の開始
 - 事前のリクルーティング名簿の活用
 - 博士課程人材の活用
- 部品性能によるリスク
 - 代替部品選定を実施する
 - 計測手法を複数用意する（ガスセンサー及びロードセルによる重量計測を実装する）
- 世界的な部品入手困難によるリスク
 - 複数代替部品選定を実施する
 - 事業実施タイミングの遅延（NEDOとの協議による）

社会実装（経済社会）におけるリスクと対応

- 他社特許によるリスク
 - 事前調査を実施

その他（自然災害等）のリスクと対応

- 大学被災によるリスク
 - 複数拠点での研究の実施
 - 研究設備の冗長性確保
 - 頻繁な情報交換，データの保管
- 工場被災によるリスク
 - 被災レベルに応じてグループ内他工場における開発生産を実施



- 事業中止の判断基準（リガクにおける開発業務について）：災害による本社工場機能停止。部品入手が完全に不可な状況。

事業の継続性担保：

● 研究開発責任者が継続困難となった場合に対して，東京大学大学院建築学専攻が事業継続の支援を行う。建築学専攻の研究者・教員が本プロジェクトに参画し，定期的な情報交換，知見交換を行うことで，継続的な研究実施を担保する。また，雇用予定のポスドク研究員の継続雇用により個別開発項目と全体責任者の橋渡しは円滑となるようにする。