

3RF-2101

JPMERF20213R01

【重点課題⑩】地域循環共生圏形成に資する廃棄物処理システムの構築に関する研究・技術開発
研究実施期間：令和3年～5年度

廃棄物処理における未利用熱を近隣産業 で回生する蓄熱輸送技術の出熱過程実証

東京大学 未来ビジョン研究センター 特任助教
(研究代表) 藤井 祥万

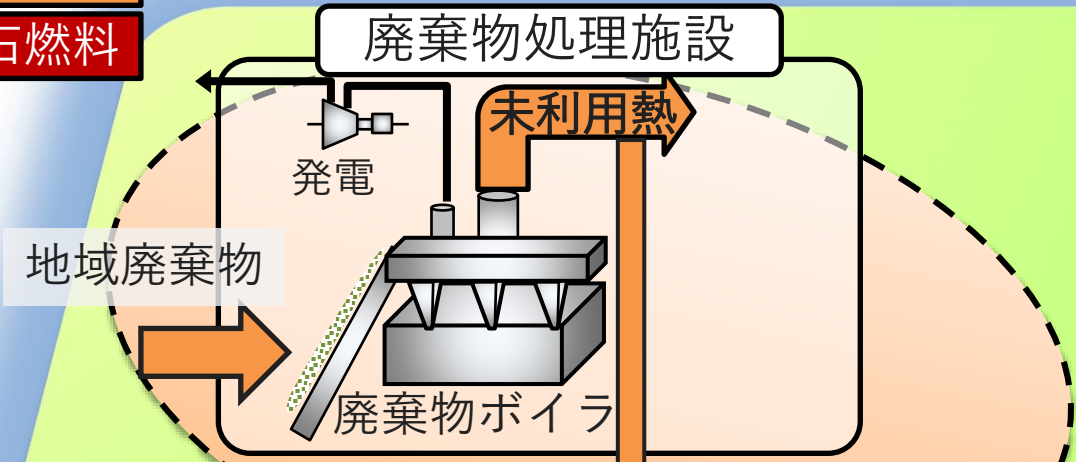
shoma.fujii@ifi.u-tokyo.ac.jp



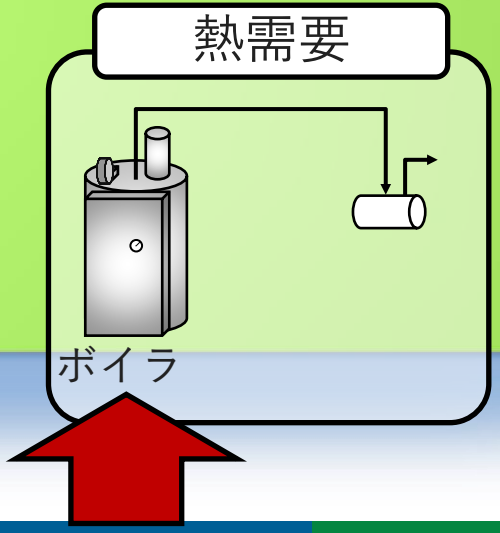
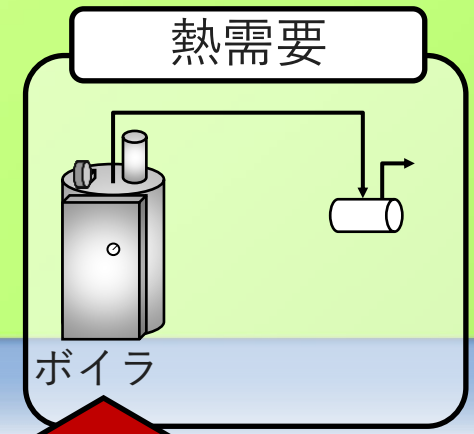
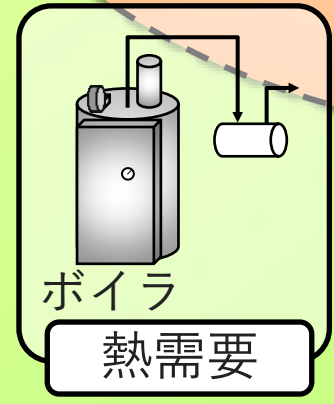
東京大学未来ビジョン研究センター
Institute for Future Initiatives, The University of Tokyo

研究背景：廃棄物処理における熱利用の問題点

域内地域資源
域外化石燃料

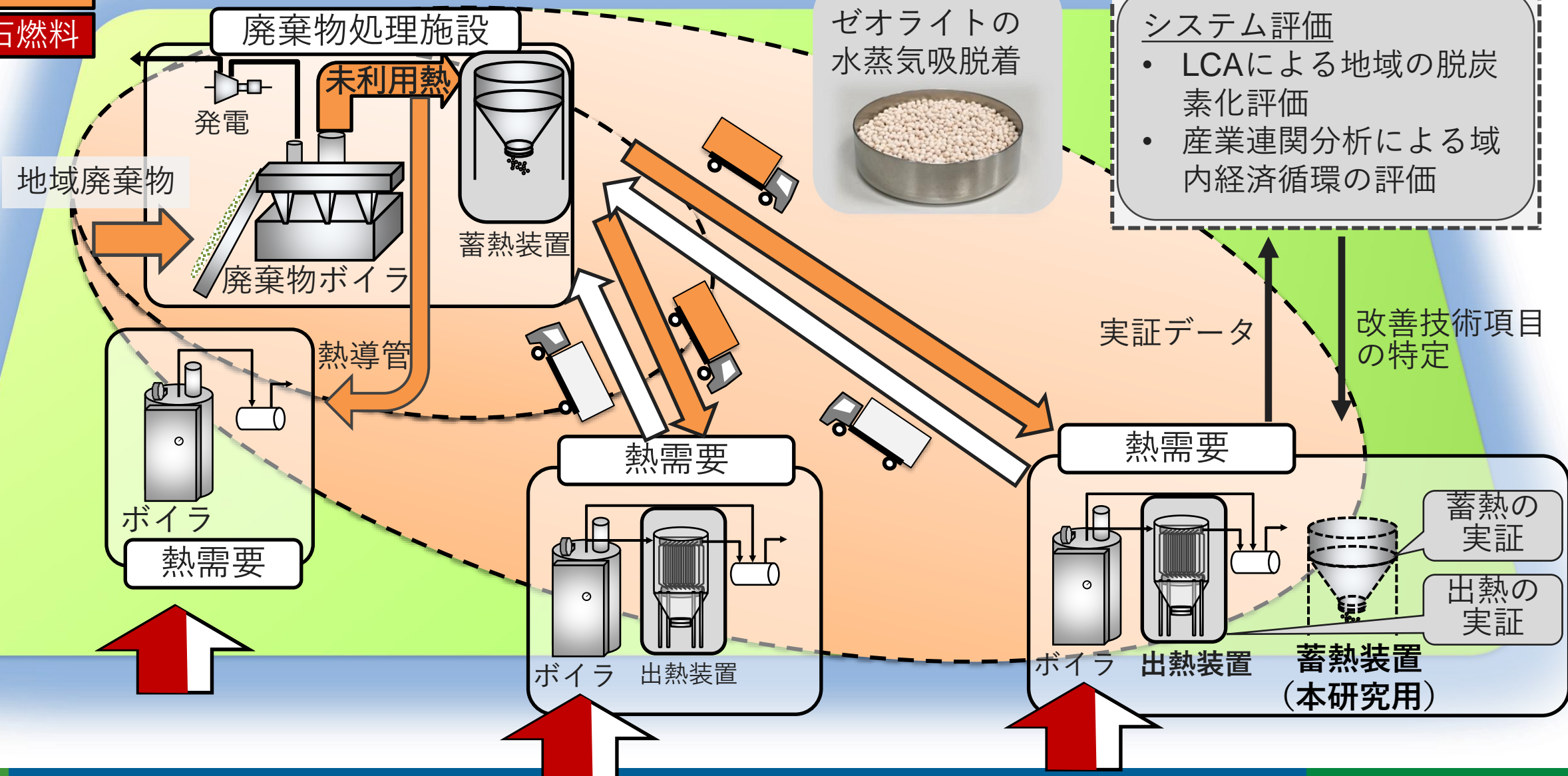


地域熱供給が未発達の日では熱需要が隣接していない限り、熱の融通は難しい

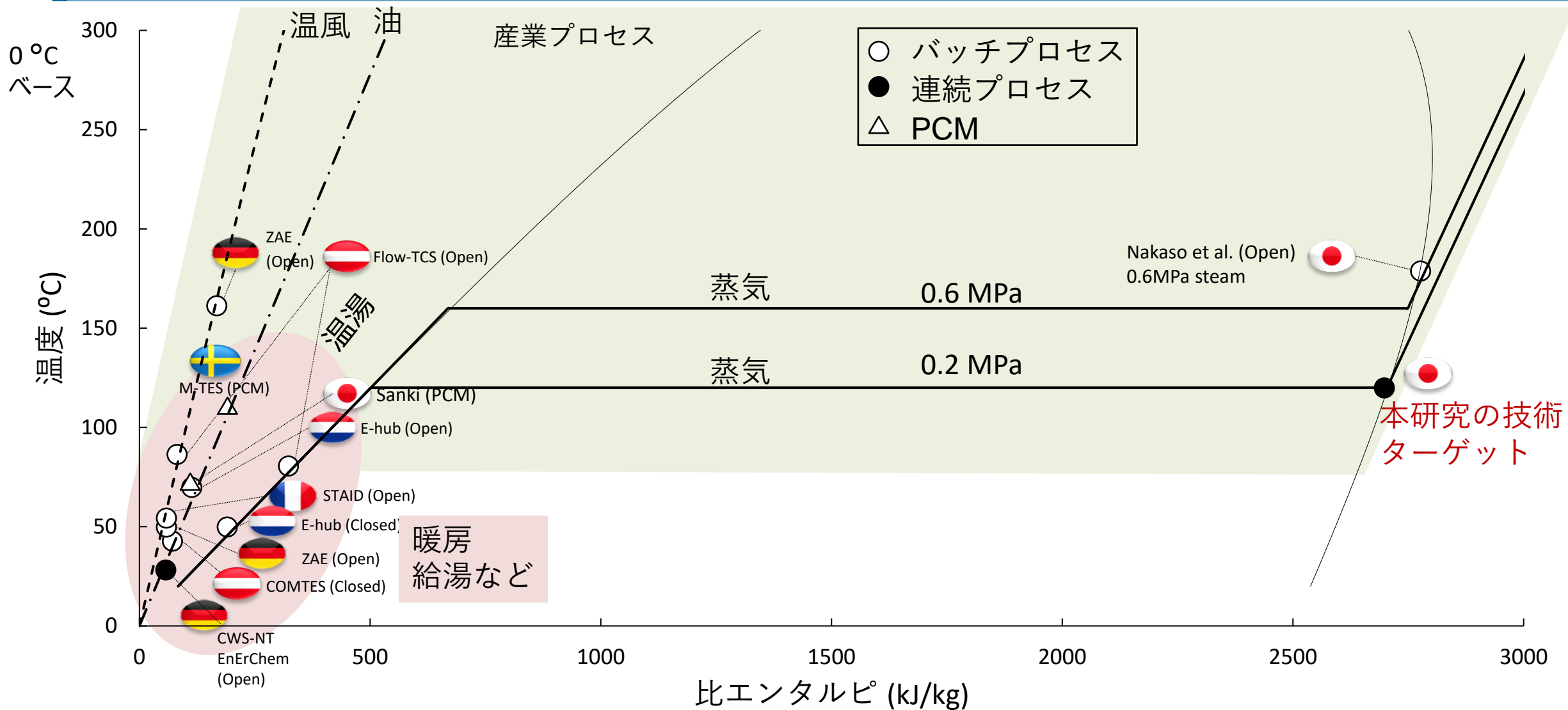


研究目的：蓄熱による地域の廃棄物処理未利用熱の回生

域内地域資源
域外化石燃料



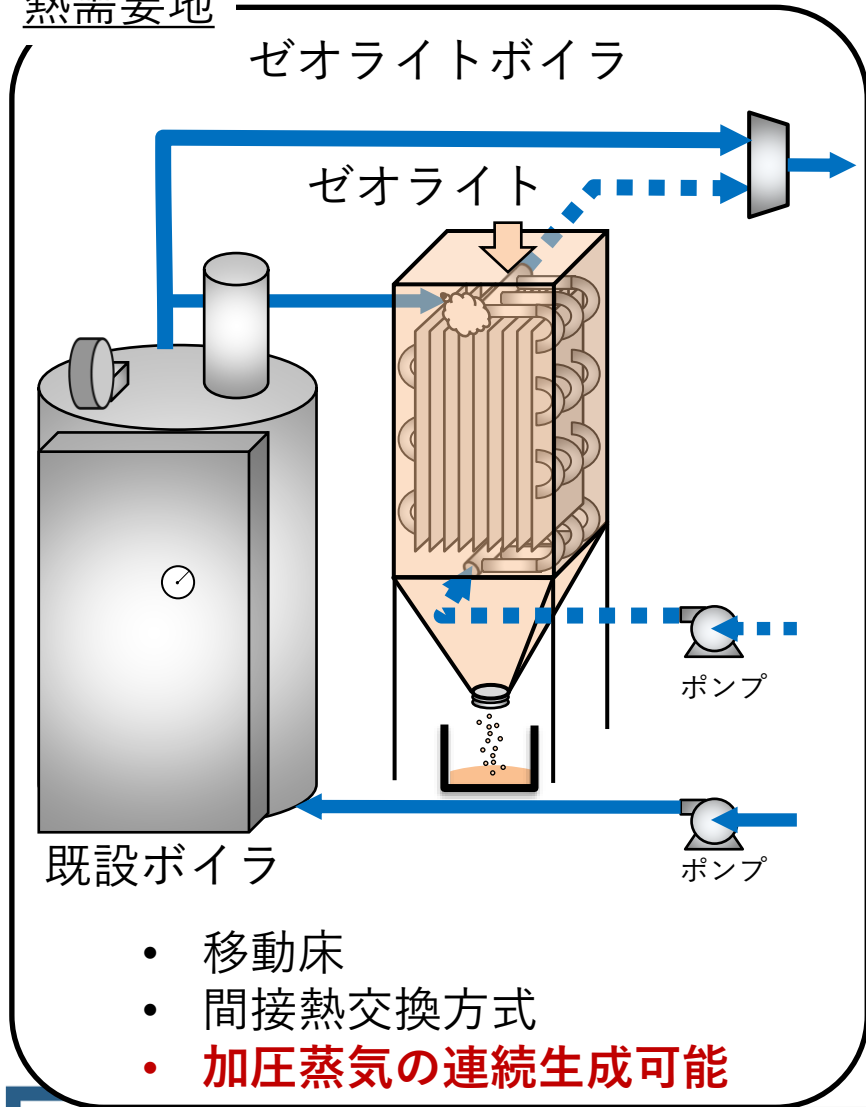
研究の立ち位置



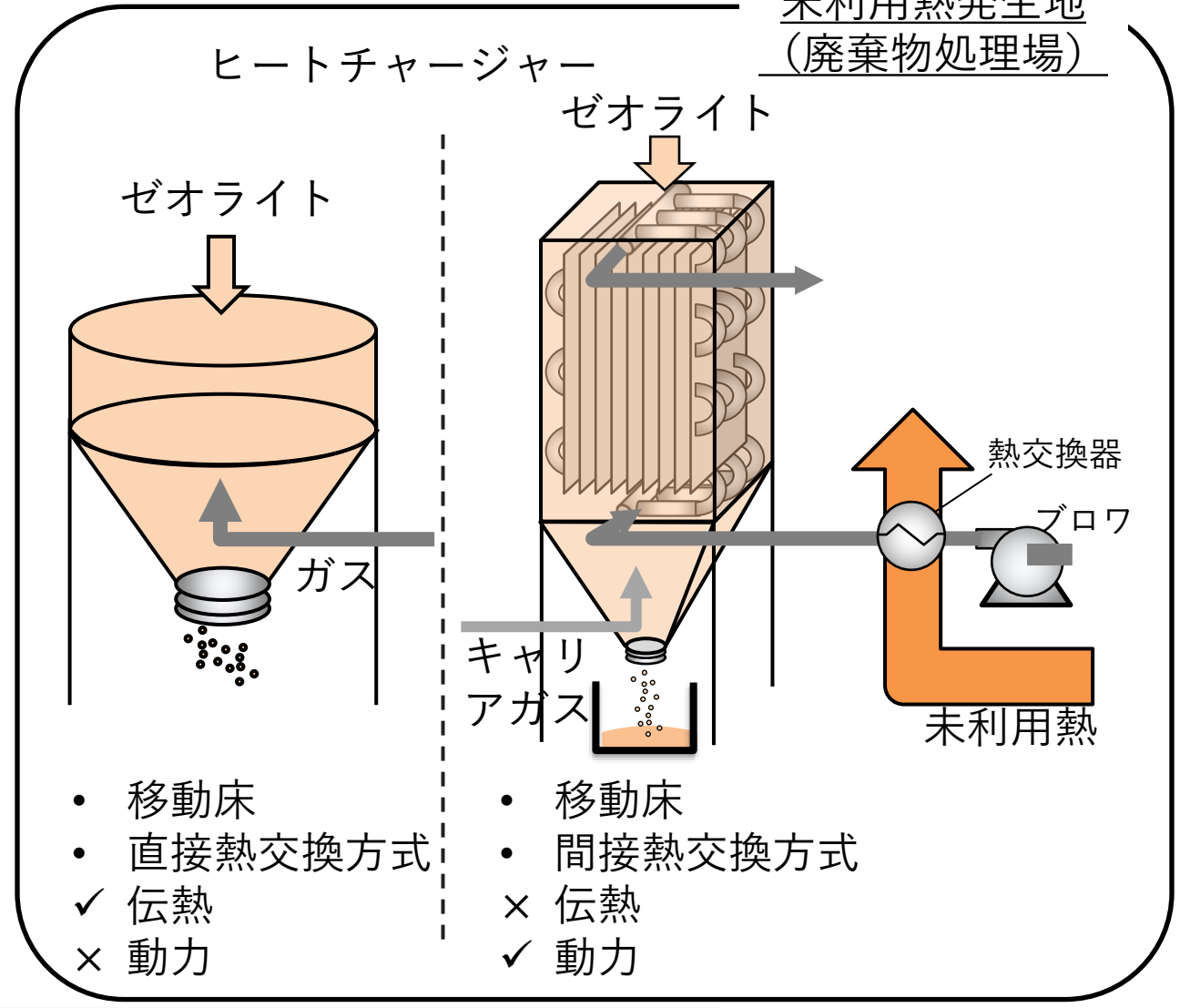
産業用途に耐えうる加圧蒸気連続生成の社会実証は世界初

ゼオライトを用いた蓄熱輸送システムの構成装置

熱需要地



未利用熱発生地
(廃棄物処理場)



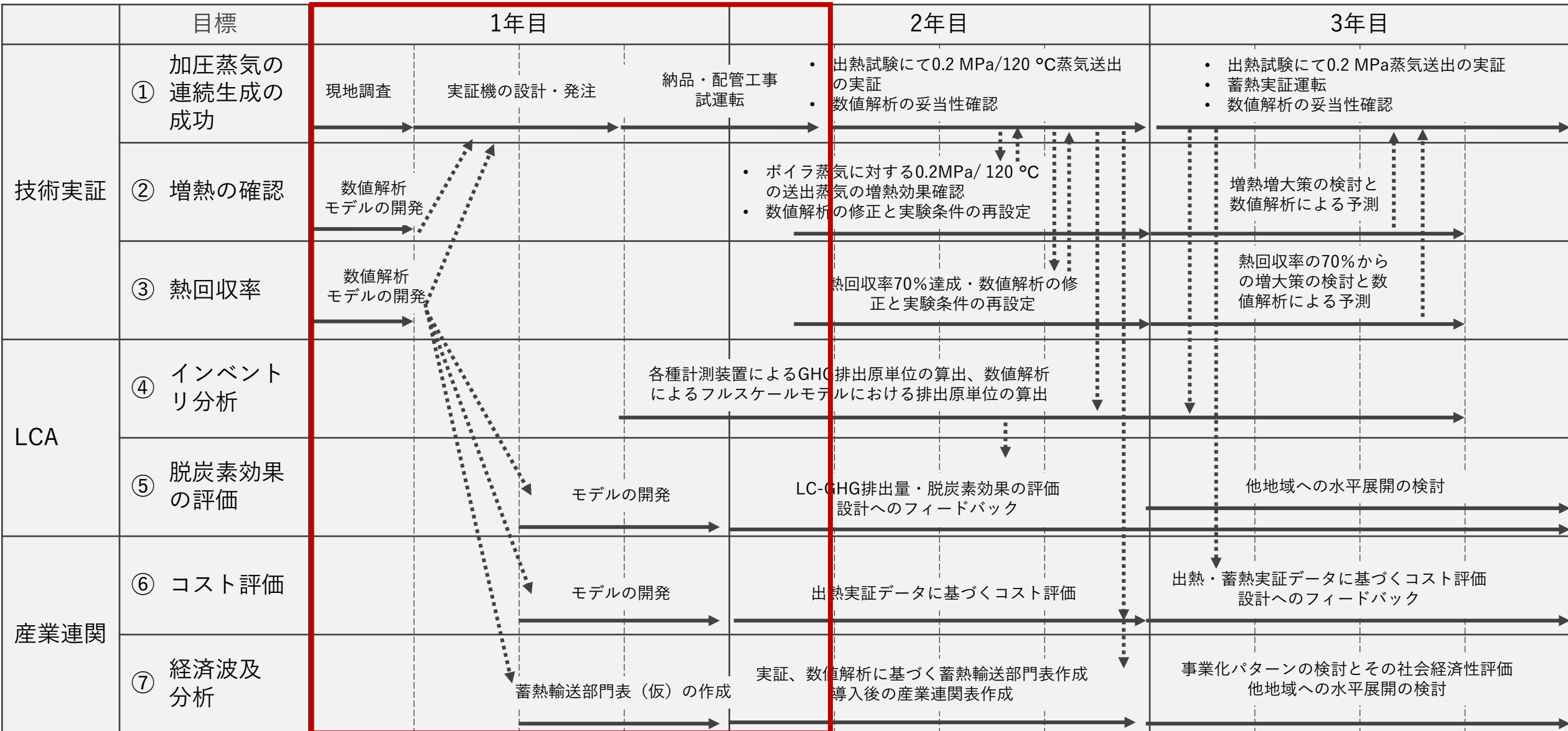
産業用途に耐える加圧蒸気連続生成の社会実証は世界初



7つの研究目標

- ① **（加圧蒸気の連続生成の成功）** 実証試験では、移動床・間接熱交換型を採用した出熱装置を用いることで、最大0.2 MPa/120 °C の飽和蒸気（熱需要の蒸気条件に合わせる）の連続的な送出に成功する。
- ② **（増熱の確認）** 既設ボイラから導入する0.6 MPa/160 °Cを減圧した0.1 MPa・140 °Cの過熱蒸気の導入熱量に対して、出熱装置が送出する0.2 MPa/120 °Cの飽和蒸気の熱量が増大していることを実証する。
- ③ **（熱回収率）** 事業化規模においてゼオライトの発熱ポテンシャルに対する熱回収率約70%で、オペレーションベースにおいて経済循環を考慮しない場合の運用コストが重油価格と同等以下になることを見込んでおり、熱回収率70%達成が技術的な目標地点となる。
- ④ **（インベントリ分析）** 実証試験中に電力計などを用いて蓄熱・出熱装置の運転に必要な補助動力を算出し、実証データに基づくGHG 排出原単位を求める。
- ⑤ **（脱炭素効果の評価）** 事業化規模レベルにおける装置の建設時に発生するGHGや蓄熱材輸送時のトラックが消費する軽油由来のGHG、熱需要地において削減可能な化石資源由来のGHG などを考慮したライフサイクルGHG 排出量を評価し、蓄熱輸送システム導入における脱炭素効果を示す。
- ⑥ **（コスト評価）** システムの評価として、実証試験結果に基づき事業化規模での各装置の性能を予測し、各種運用コストを見積もり、オペレーションベースで運用可能であることを示す。
- ⑦ **（経済波及分析）** 地域エネルギーシステムの導入による社会経済的影響を分析するために、種子島地域の経済構造を対象に調整された種子島産業連関表を用い、蓄熱輸送システムの複数の事業化パターンの社会経済効果を分析する。

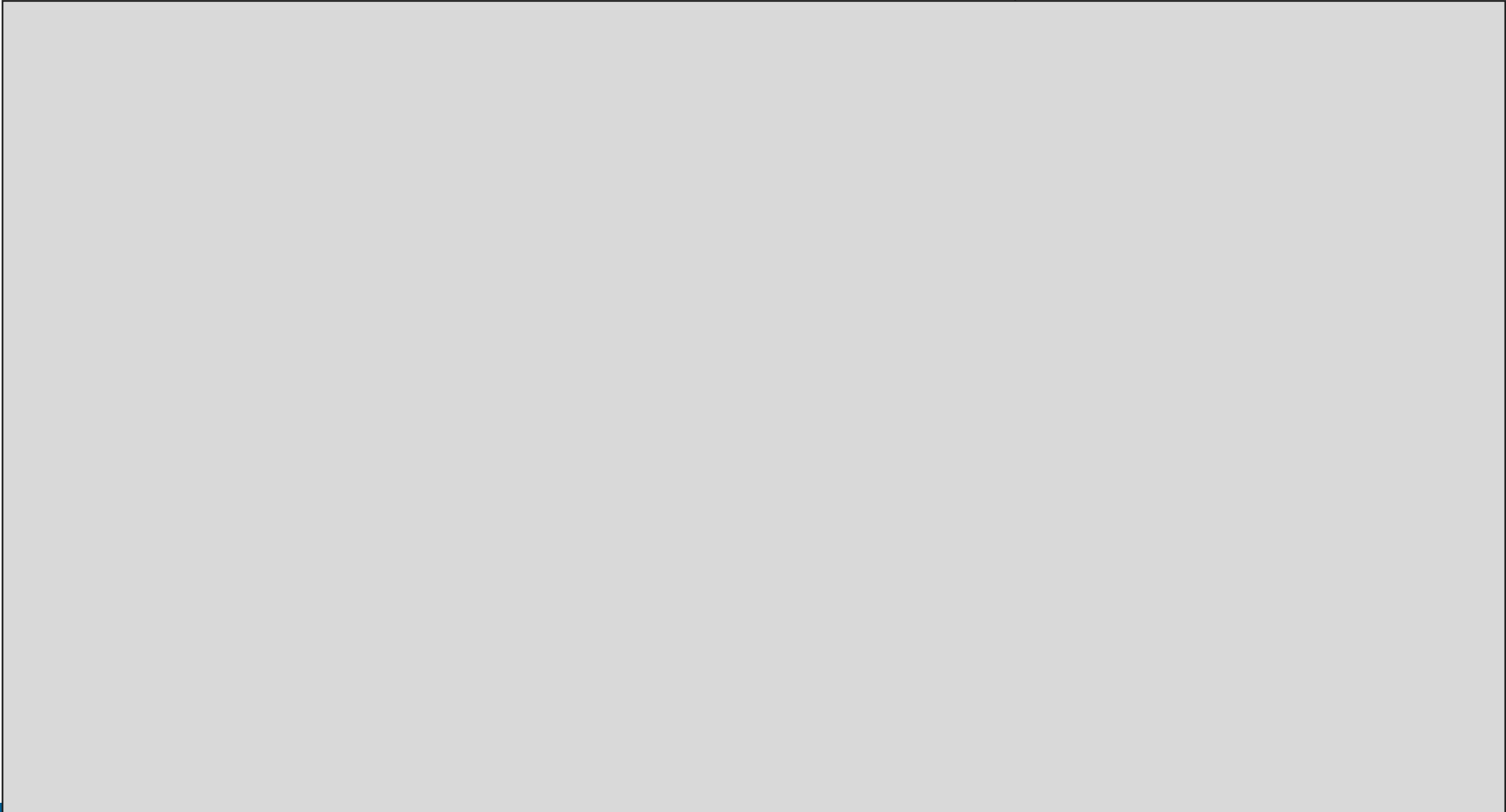
研究計画



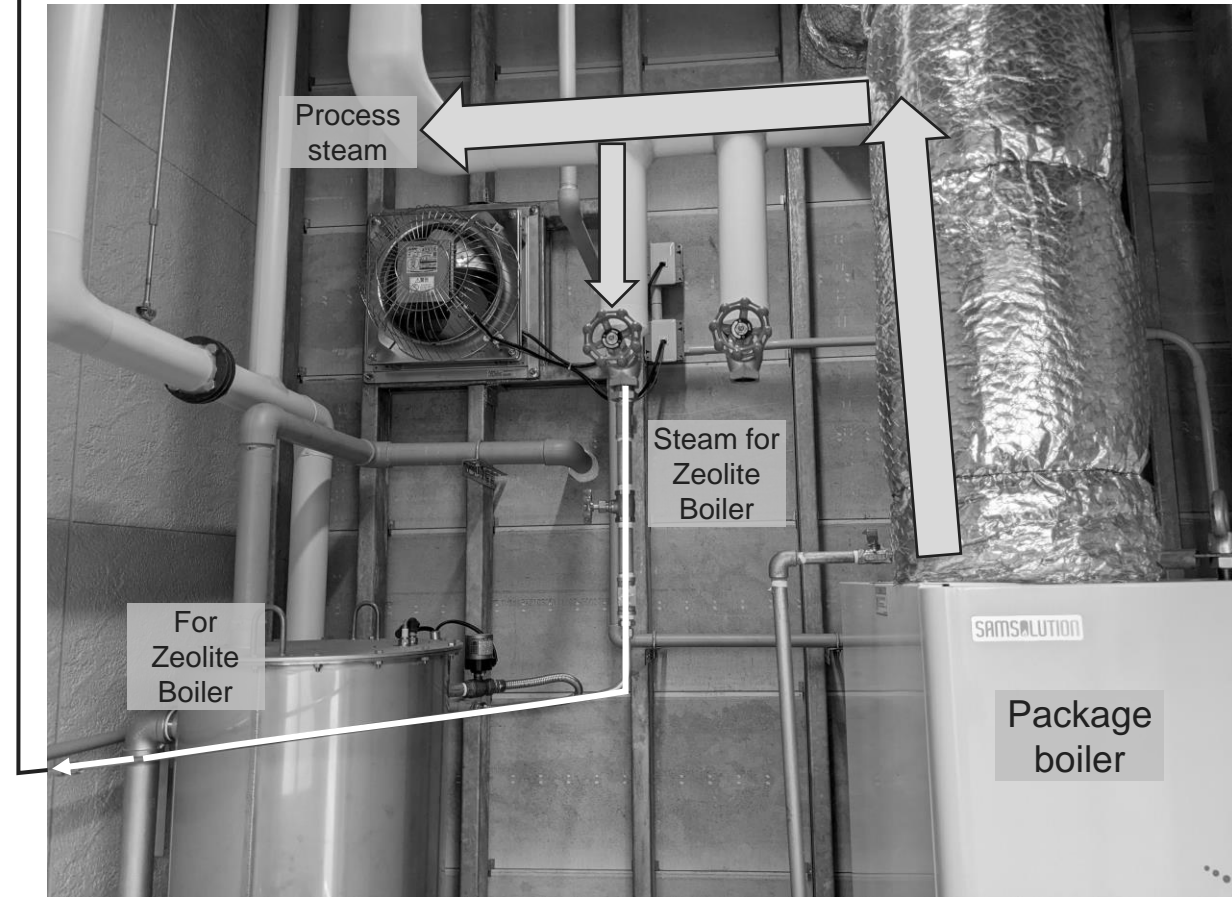
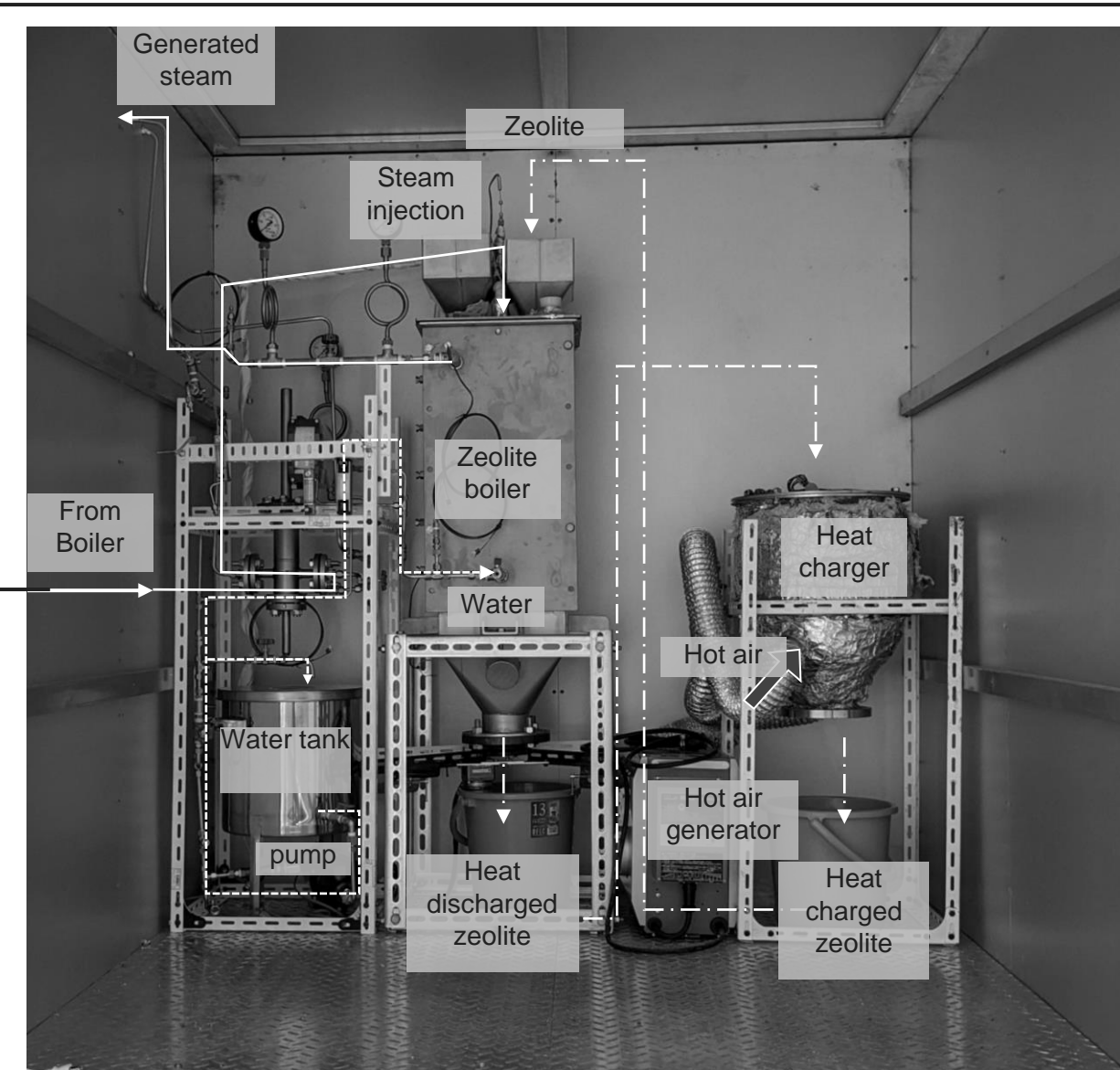
7つの研究目標

- ① **（加圧蒸気の連続生成の成功）** 実証試験では、移動床・間接熱交換型を採用した出熱装置を用いることで、最大0.2 MPa/120 °C の飽和蒸気（熱需要の蒸気条件に合わせる）の連続的な送出に成功する。
- ② **（増熱の確認）** 既設ボイラから導入する0.6 MPa/160 °Cを減圧した0.1 MPa・140 °Cの過熱蒸気の導入熱量に対して、出熱装置が送出する0.2 MPa/120 °Cの飽和蒸気の熱量が増大していることを実証する。
- ③ **（熱回収率）** 事業化規模においてゼオライトの発熱ポテンシャルに対する熱回収率約70%で、オペレーションベースにおいて経済循環を考慮しない場合の運用コストが重油価格と同等以下になることを見込んでおり、熱回収率70%達成が技術的な目標地点となる。
- ④ **（インベントリ分析）** 実証試験中に電力計などを用いて蓄熱・出熱装置の運転に必要な補助動力を算出し、実証データに基づくGHG 排出原単位を求める。
- ⑤ **（脱炭素効果の評価）** 事業化規模レベルにおける装置の建設時に発生するGHGや蓄熱材輸送時のトラックが消費する軽油由来のGHG、熱需要地において削減可能な化石資源由来のGHG などを考慮したライフサイクルGHG 排出量を評価し、蓄熱輸送システム導入における脱炭素効果を示す。
- ⑥ **（コスト評価）** システムの評価として、実証試験結果に基づき事業化規模での各装置の性能を予測し、各種運用コストを見積もり、オペレーションベースで運用可能であることを示す。
- ⑦ **（経済波及分析）** 地域エネルギーシステムの導入による社会経済的影響を分析するために、種子島地域の経済構造を対象に調整された種子島産業連関表を用い、蓄熱輸送システムの複数の事業化パターンの社会経済効果を分析する。

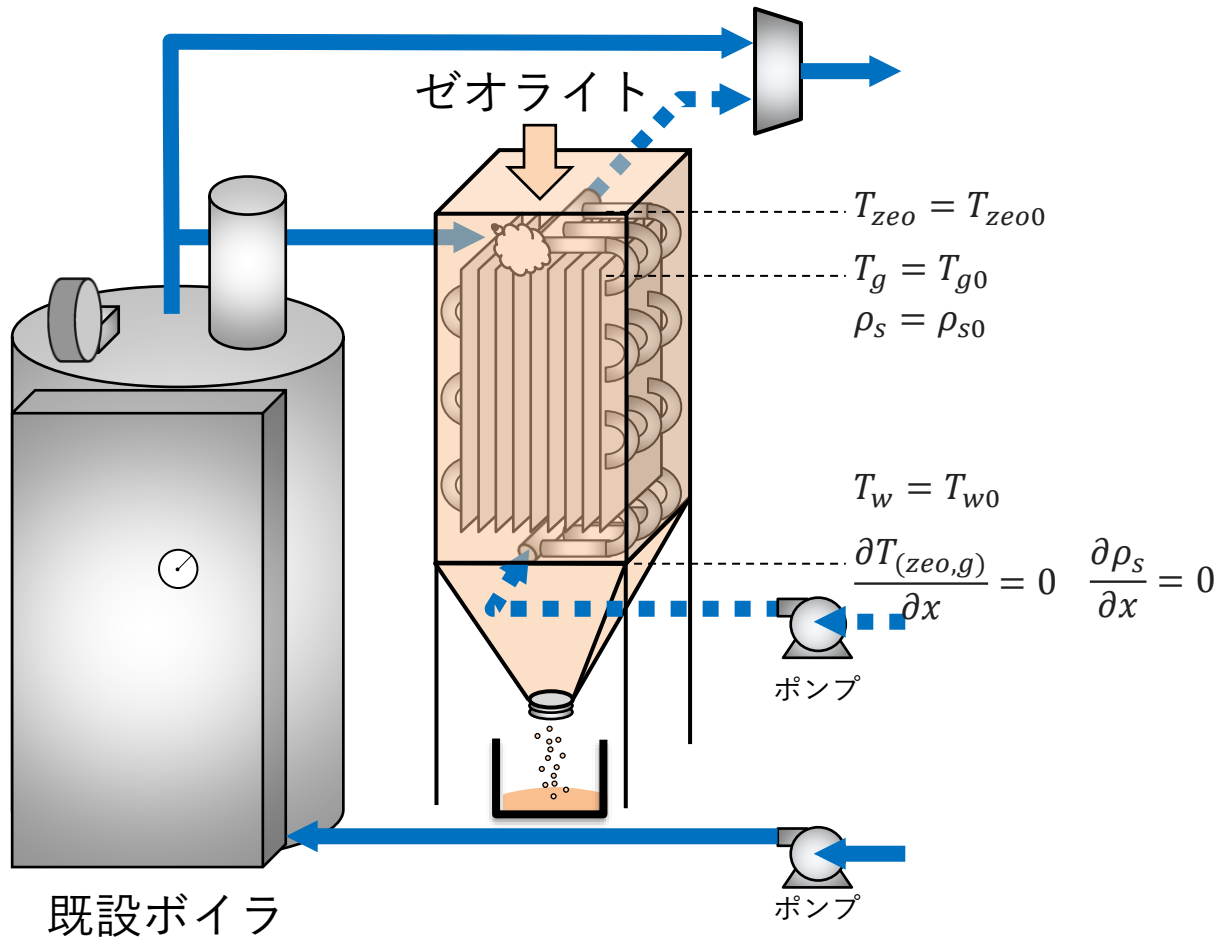
【技術実証】 目標①～③：ゼオライトボイラ試験設備の設計 ～配管・電気系統図～



【技術実証】 目標①～③：ゼオライトボイラ試験設備



【技術実証】 目標①～③：性能を予測する熱・物質移動を連成した数値解析モデル開発



Mass conservations

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_{zeo} u_{zeo}) = \rho_{zeo0} r_{ad} \quad \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u_g) = -\rho_{zeo0} r_{ad}$$

Steam conservation

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_s u_g) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ax} \frac{\partial \rho_s}{\partial x} \right) - \rho_{zeo0} r_{ad}$$

Momentum conservation

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_s u_g^2}{\varepsilon_b} \right) = -\varepsilon_b \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{150(1-\varepsilon_b)^2 \mu_g}{d_p^2 \varepsilon_b^3} u_g \varepsilon_b - \frac{1.75(1-\varepsilon_b)}{d_p \varepsilon_b^3} \rho_g |u_g| u_g \varepsilon_b$$

Energy conservations

(Zeolite)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{zeo} u_{zeo} c_{p-zeo} T_{zeo}) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eff-zeo} \frac{\partial T_{zeo}}{\partial x} \right) - \alpha_{g-zeo} \sigma_{g-zeo} (T_{zeo} - T_g) - \alpha_{zeo-w} \sigma_{zeo-w} (T_{zeo} - T_w) \\ & \quad - \alpha_{zeo-amb} \sigma_{zeo-amb} (T_{zeo} - T_{amb}) + \rho_{zeo0} r_{ad} \Delta H \end{aligned}$$

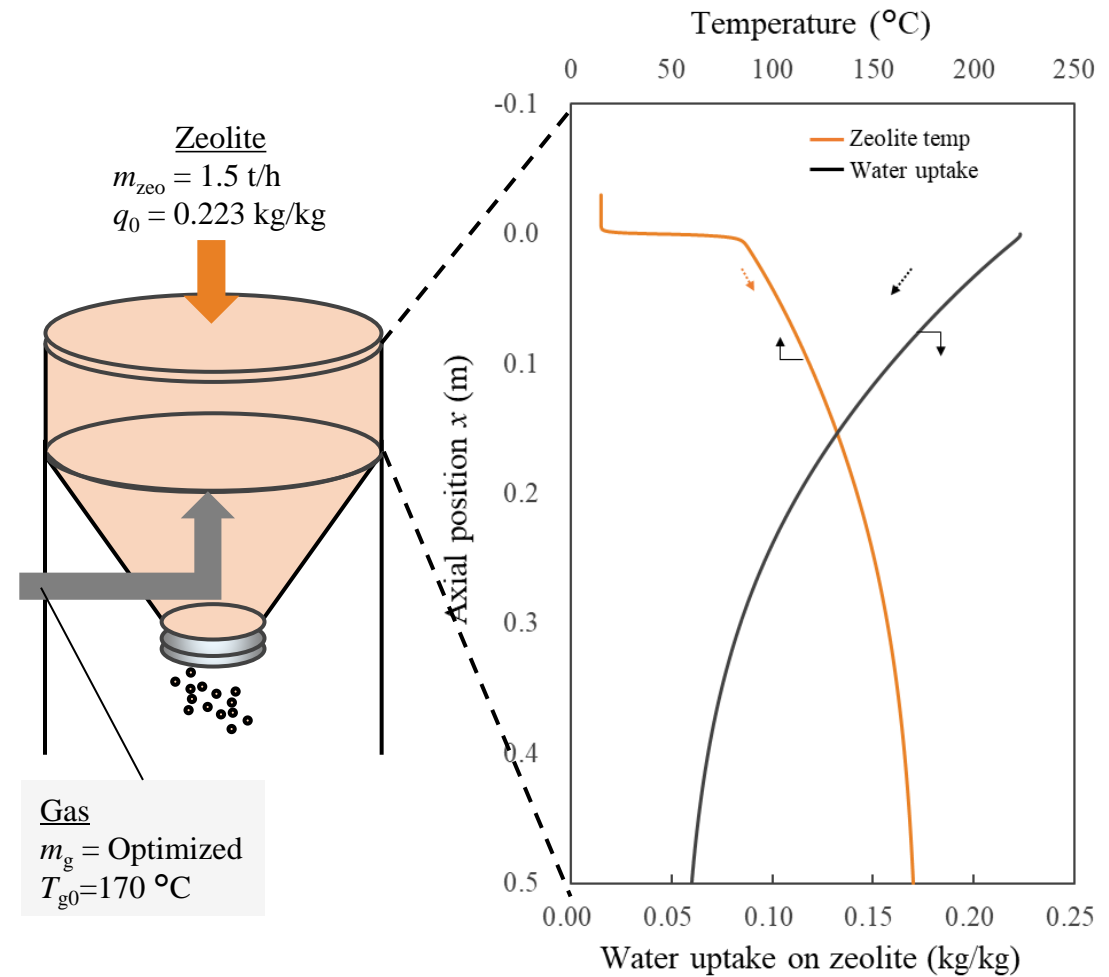
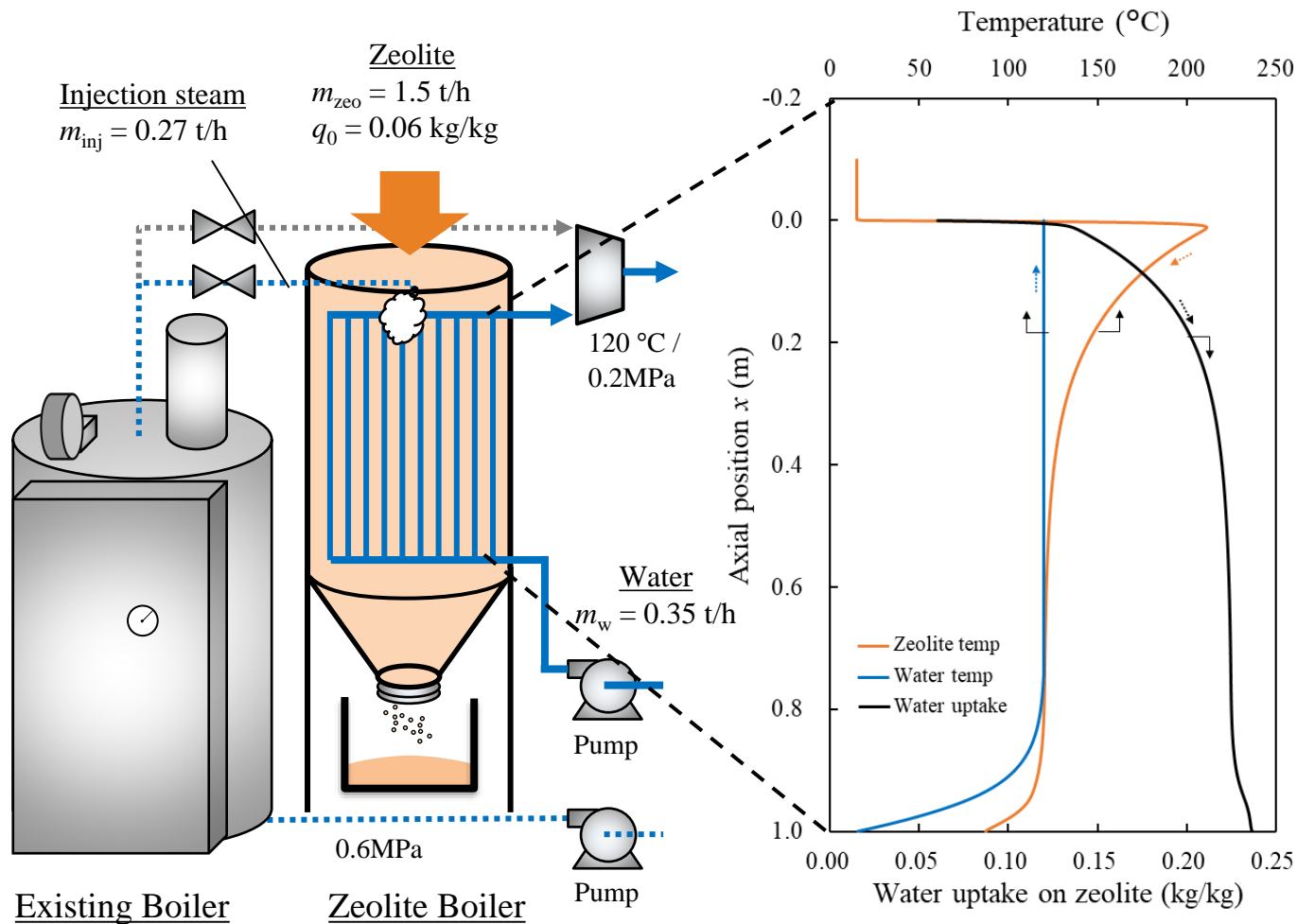
(Gas)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u_g c_{pg} T_g) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{g-ax} \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) - \alpha_{g-zeo} \sigma_{g-zeo} (T_g - T_{zeo}) - \alpha_{g-w} \sigma_{g-w} (T_g - T_w) - \alpha_{g-amb} \sigma_{g-amb} (T_g - T_{amb}) \end{aligned}$$

(Water)

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho_w u_w h_w) = \alpha_{zeo-w} \sigma_{zeo-w} (T_{zeo} - T_w) + \alpha_{g-w} \sigma_{g-w} (T_g - T_w)$$

【技術実証】 目標①～③：フルスケールの性能予測を実施

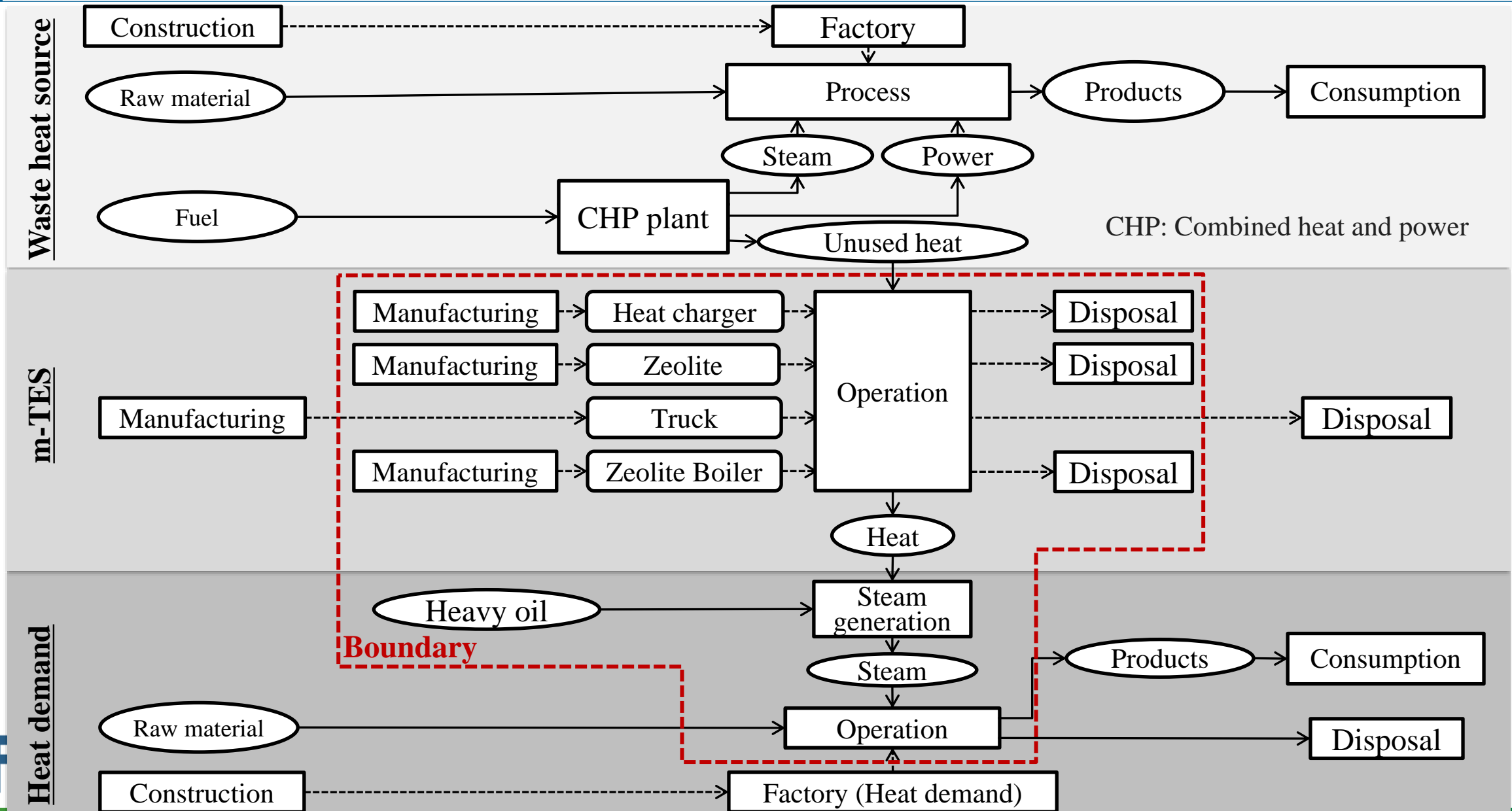


熱回収率約75%
 →今後の実証による妥当性確認

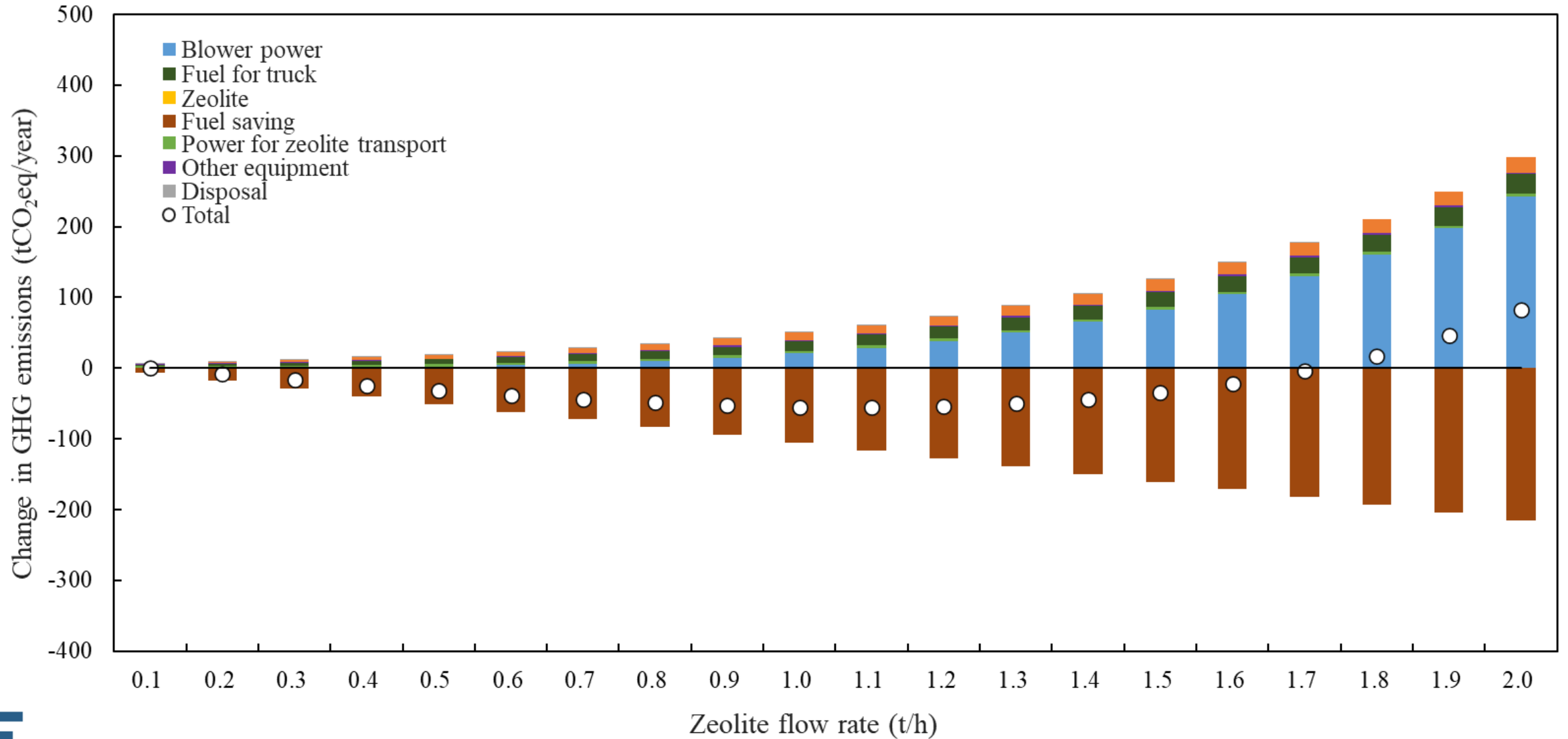
7つの研究目標

- ① **（加圧蒸気の連続生成の成功）** 実証試験では、移動床・間接熱交換型を採用した出熱装置を用いることで、最大0.2 MPa/120 °C の飽和蒸気（熱需要の蒸気条件に合わせる）の連続的な送出に成功する。
- ② **（増熱の確認）** 既設ボイラから導入する0.6 MPa/160 °Cを減圧した0.1 MPa・140 °Cの過熱蒸気の導入熱量に対して、出熱装置が送出する0.2 MPa/120 °Cの飽和蒸気の熱量が増大していることを実証する。
- ③ **（熱回収率）** 事業化規模においてゼオライトの発熱ポテンシャルに対する熱回収率約70%で、オペレーションベースにおいて経済循環を考慮しない場合の運用コストが重油価格と同等以下になることを見込んでおり、熱回収率70%達成が技術的な目標地点となる。
- ④ **（インベントリ分析）** 実証試験中に電力計などを用いて蓄熱・出熱装置の運転に必要な補助動力を算出し、実証データに基づくGHG 排出原単位を求める。
- ⑤ **（脱炭素効果の評価）** 事業化規模レベルにおける装置の建設時に発生するGHGや蓄熱材輸送時のトラックが消費する軽油由来のGHG、熱需要地において削減可能な化石資源由来のGHG などを考慮したライフサイクルGHG 排出量を評価し、蓄熱輸送システム導入における脱炭素効果を示す。
- ⑥ **（コスト評価）** システムの評価として、実証試験結果に基づき事業化規模での各装置の性能を予測し、各種運用コストを見積もり、オペレーションベースで運用可能であることを示す。
- ⑦ **（経済波及分析）** 地域エネルギーシステムの導入による社会経済的影響を分析するために、種子島地域の経済構造を対象に調整された種子島産業連関表を用い、蓄熱輸送システムの複数の事業化パターンの社会経済効果を分析する。

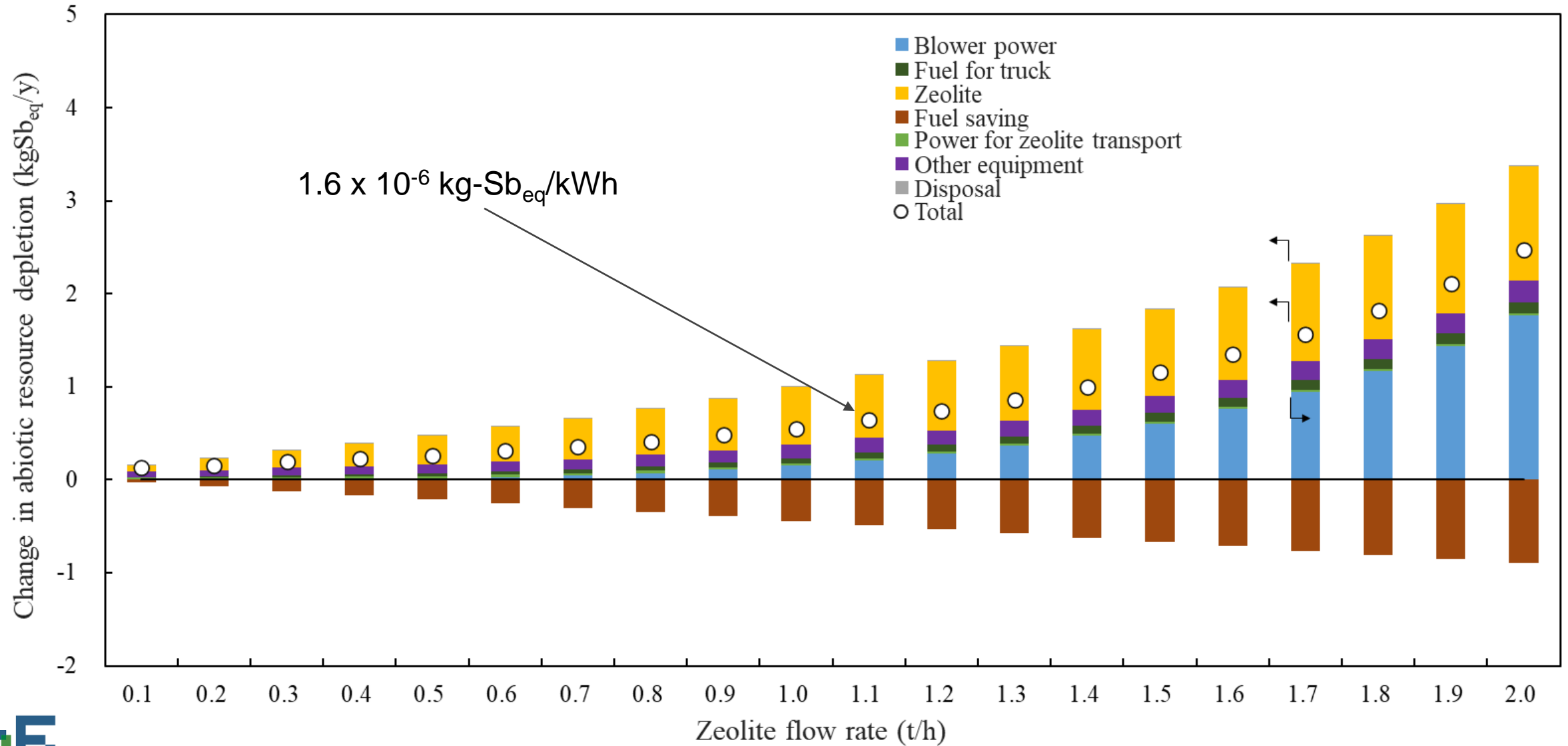
【システム】 目標④～⑦：ライフサイクルバウンダリの設定



【システム】 目標④～⑦：ライフサイクルアセスメントの結果（GHG排出量）

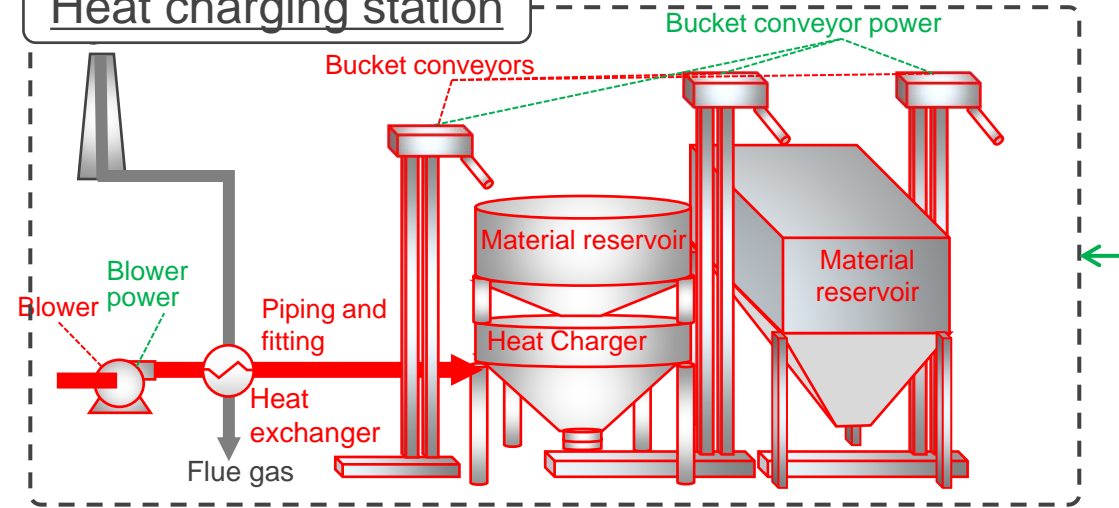


【システム】 目標④～⑦：ライフサイクルアセスメントの結果（資源消費）



【システム】 目標④～⑦：コスト構造解析

Heat charging station

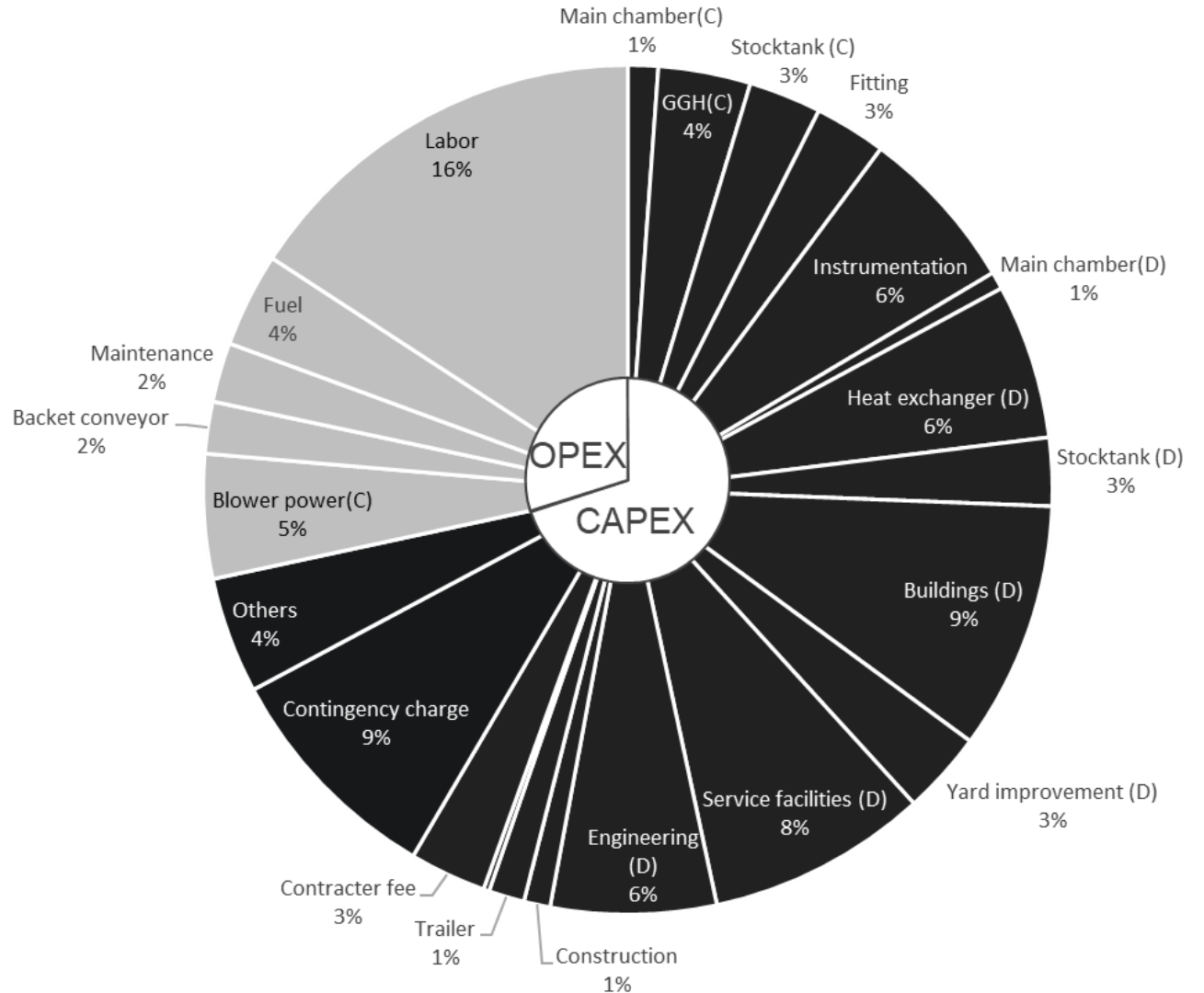
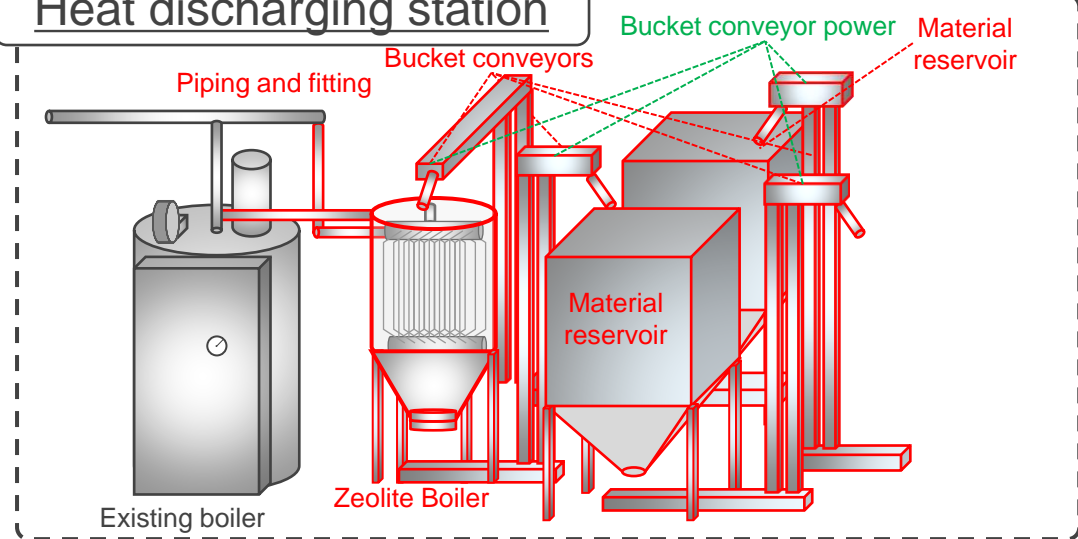


CAPEX
OPEX

Transportation
(Labor, Fuel)



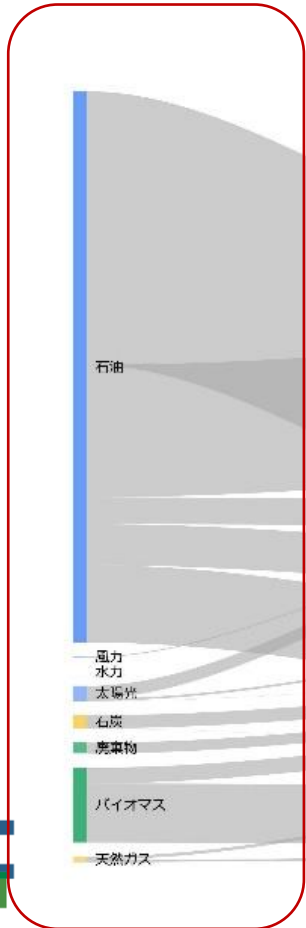
Heat discharging station



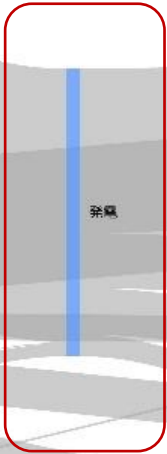
数値解析と連動したコスト構造解析が可能
→産業連関分析における「蓄熱輸送」部門の投入係数表

【システム】 目標④～⑦：基礎自治体レベルのエネルギーフロー

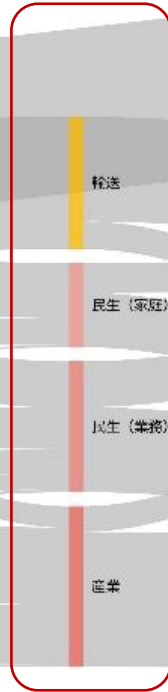
1次エネルギー供給



発電



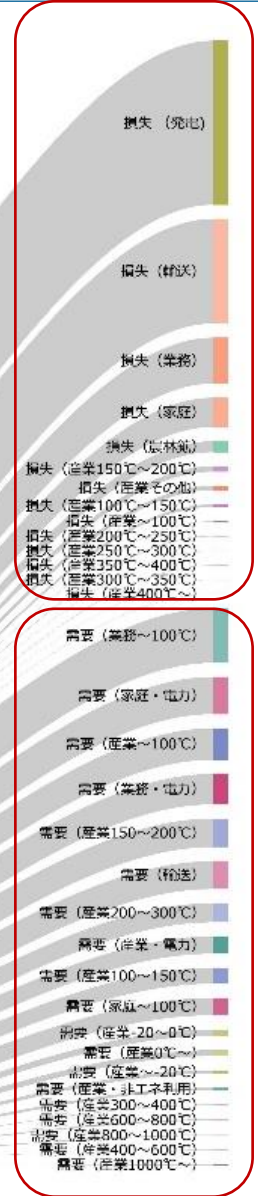
消費 (産業、業務、 家庭、輸送)



損失



需要



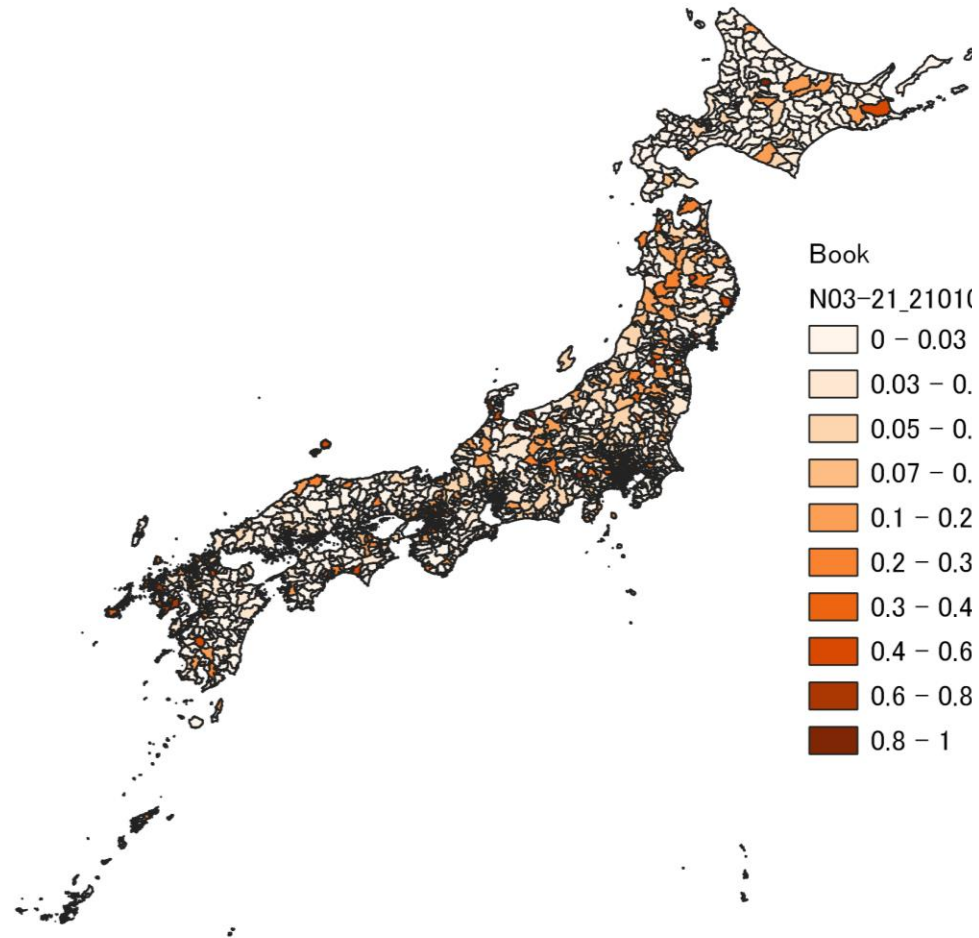
温度別 排熱

温度別 需要

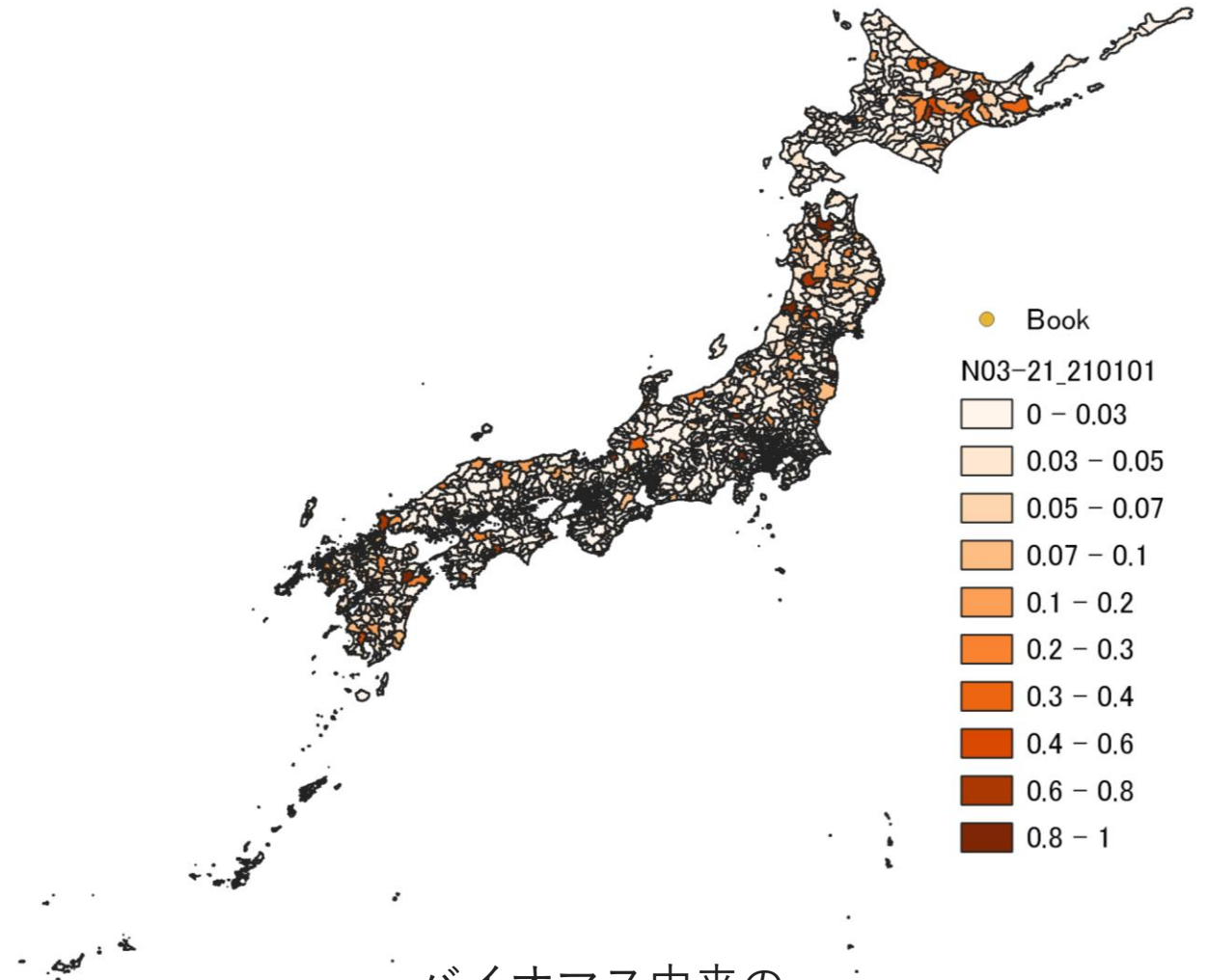


【システム】 目標④～⑦：排熱の蒸気回生ポテンシャル

排熱を150℃まで回収とし、蓄熱効率、出熱効率を乗じ、自治体内での蒸気回生ポテンシャルを算出



一般廃棄物処理施設由来の
排熱の蒸気回生ポテンシャル



バイオマス由来の
排熱の蒸気回生ポテンシャル

進捗状況

【計画以上の進展がある】

	目標	1年目	2年目	3年目
技術実証	① 加圧蒸気の連続生成の成功	現地調査	実証機的设计・発注	納品・配管工事 試運転
	② 増熱の確認	数値解析 モデルの開発		・ ボイラ蒸 の送出蒸 ・ 数値解析
	③ 熱回収率	数値解析 モデルの開発		
LCA	④ インベントリ分析		各種計測装置によるGHG によるフルスケールモデ	
	⑤ 脱炭素効果の評価		モデルの開発	LC-G
産業連関	⑥ コスト評価		モデルの開発	出
	⑦ 経済波及分析		蓄熱輸送部門表(仮)の作成	実証、数値

技術実証：目標①～③に対応
【計画通り進展している】

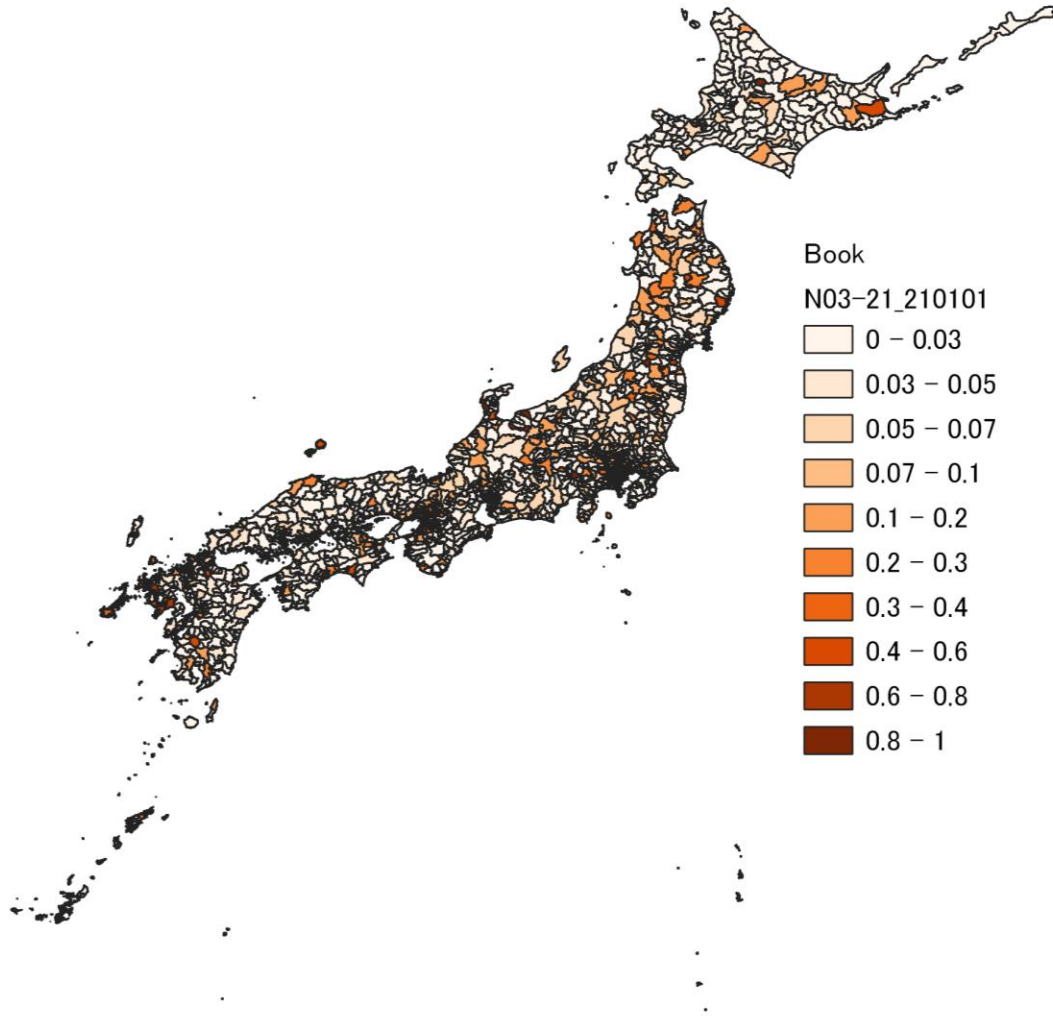
- 試験準備完了、予備試験開始
- 数値解析による商用機の性能予測と最適設計(1,2,3,4)

システム：目標④～⑦に対応
【計画以上の進展がある】

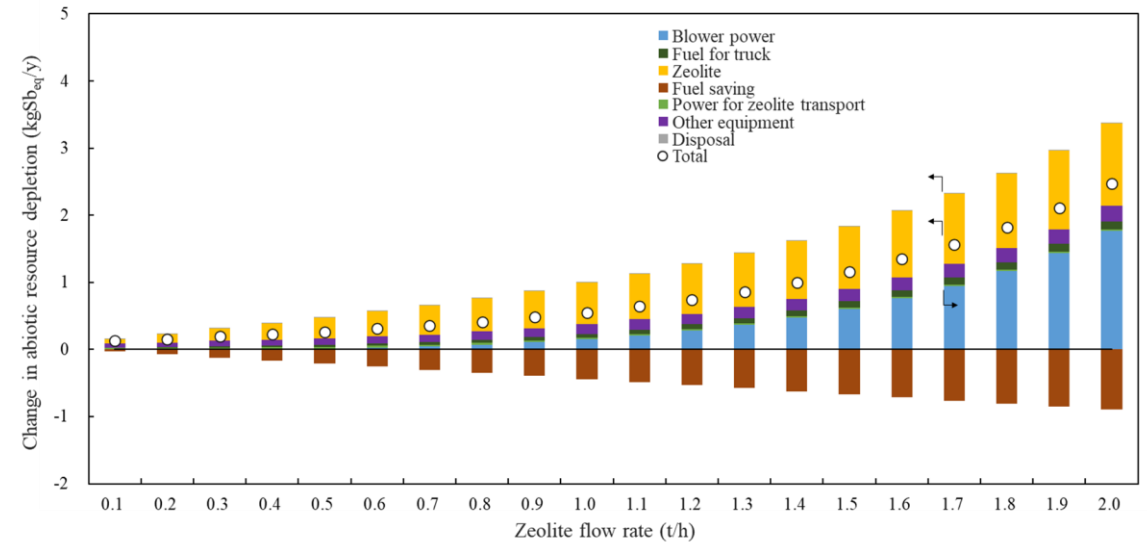
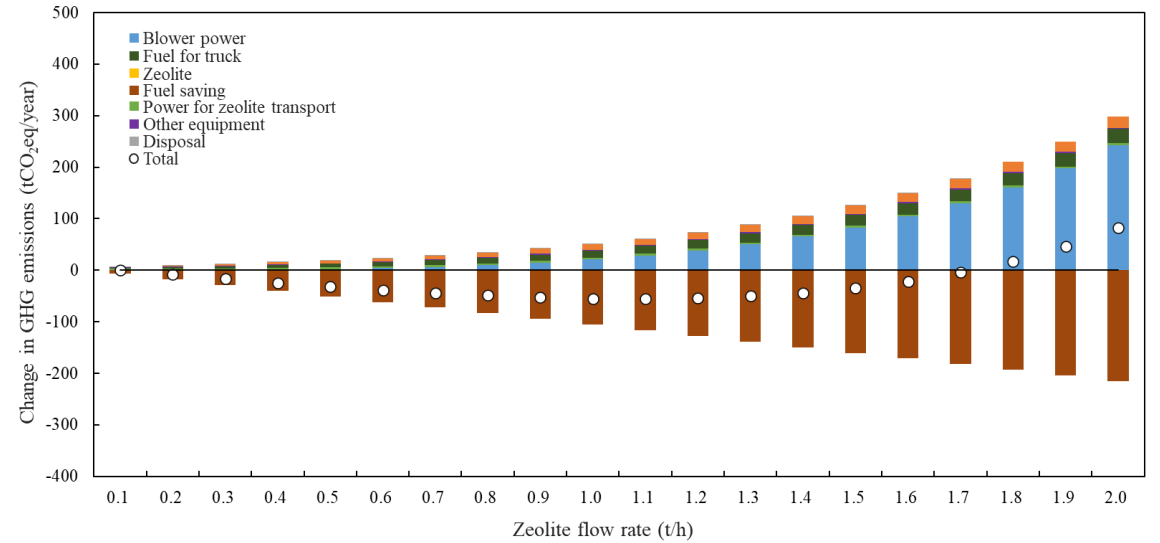
- 数値解析に基づくLCA⁽³⁾
- 数値解析に基づくコスト構造解析
- 排熱の蒸気回生ポテンシャル定量化^(5,6)

環境政策等への貢献

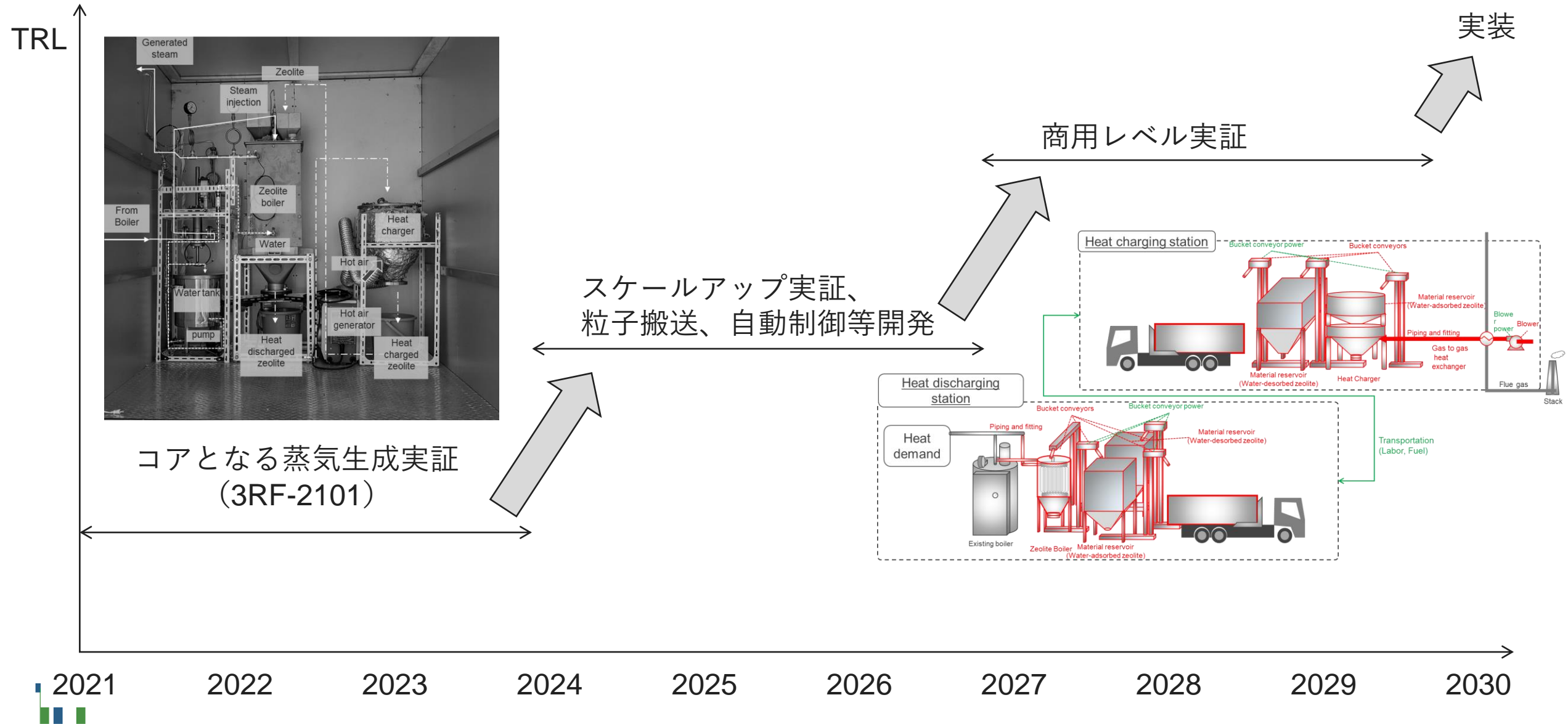
① 廃棄物処理施設由来排熱の蒸気回生ポテンシャル



② 低資源消費でGHGを削減する蓄熱輸送システム



(参考) 研究の展開について



研究成果の発表状況(1)

(1) < 論文 (査読あり) >

1. 藤井祥万、宮川大河、中垣隆雄、兼松祐一郎、菊池康紀、濱田洋輔：化学工学論文集、47, 6, 191-199 (2021)、製糖工場の未利用エネルギーを蓄熱する向流接触式ヒートチャージャーのベンチスケール実証試験と設計 (IF : 0.422)
2. S. FUJII, Y. KANEMATSU, Y. KIKUCHI and T. NAKAGAKI, J. Energy Storage, 51, 104495 (2022), Effect of bagasse drying on thermal energy storage utilizing zeolite water vapor ad/desorption at a sugar mill (IF: 8.907)
3. S. FUJII, Y. KANEMATSU, T. NAKAGAKI, and Y. KIKUCHI, J.Clea.Prod., 365, 132592 (2022), Prospective life cycle assessment for designing mobile thermal energy storage system utilizing zeolite (IF: 11.072)
4. S. FUJII, Y. KANEMATSU and Y. KIKUCHI, Comput.Aided.Chem.Eng., accepted, Polygeneration from sugarcane industries enhanced by functionalizing novel cultivars and excess thermal energy
5. S. FUJII, Y. KANEMATSU and Y. KIKUCHI, Comput.Aided.Chem.Eng., accepted, Integration of experimental study and computer aided design: A case study in thermal energy storage

(2) 口頭発表 (学会等)

6. 藤井祥万、中垣隆雄、兼松祐一郎、尾下優子、菊池康紀：第26回動力・エネルギー技術シンポジウム (2022)、基礎自治体レベルのエネルギーフローを用いた脱炭素に向けた熱融通の役割の検討

研究成果の発表状況(2)

(3) 知的財産権

1件、ゼオライトボイラの燃料削減最適化運転方法に関して、出願準備中

(4) 国民との科学・技術対話

7. エコプロonline2021（主催：日本経済新聞社、（一社）サステナブル経営推進機構、2021年11月25日～12月17日 来場者数54885名）「熱を時空間的に輸送する蓄熱輸送技術」にて研究内容を展示
8. 東京都私立淑徳巣鴨高等学校・スポンサー講座「持続可能な社会の創造に求められる人材とは」（2021年8月31日、参加者約81名）にて研究事例の紹介
9. 鹿児島県立国分高等学校・舞鶴最先端サイエンス研修「エネルギー変換と熱」（2022年1月31日、聴講者約15名）にて研究事例の紹介

