

NEDO脱炭素技術分野成果報告会2025

プログラムNo.15

ケミカルルーピング燃焼ポリジェネレーション 技術開発

(カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/
次世代火力発電基盤技術開発/ CO₂分離・回収型
ポリジェネレーションシステム技術開発)

発表：2025年07月17日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 齊藤 知直

団体名 (一財) カーボンフロンティア機構、大阪ガス(株)、JFEエンジニアリング(株)、(国)新潟大学、
(私)中央大学、(国)東京科学大学、(国)群馬大学

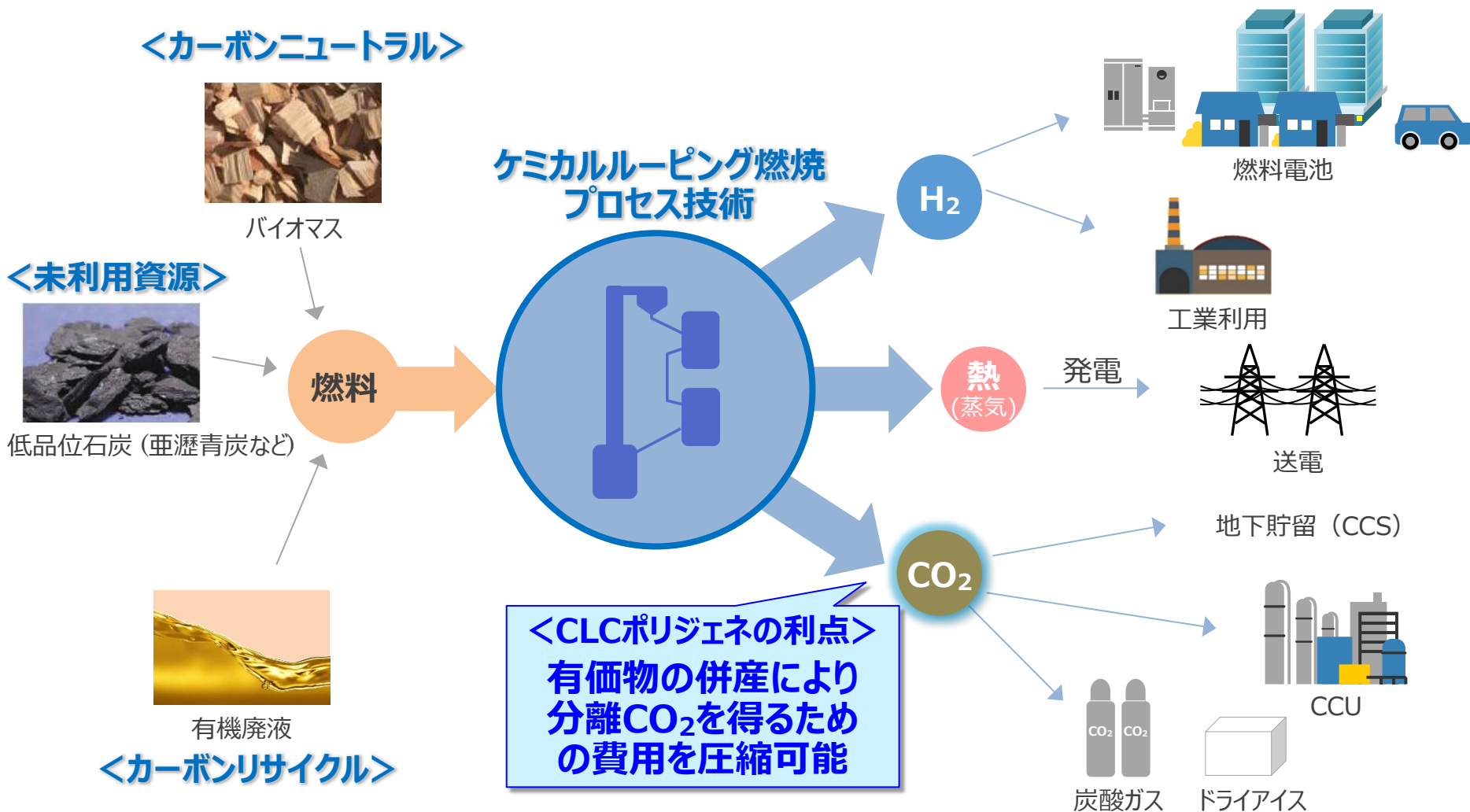
問い合わせ先 (一財) カーボンフロンティア機構 技術連携戦略センター

E-mail: t-saito@jcoal.or.jp TEL:03-6402-6101

1. 目的

【用語説明】 CLC …… "ケミカルルーピング燃焼ポリジェネレーション"の略語

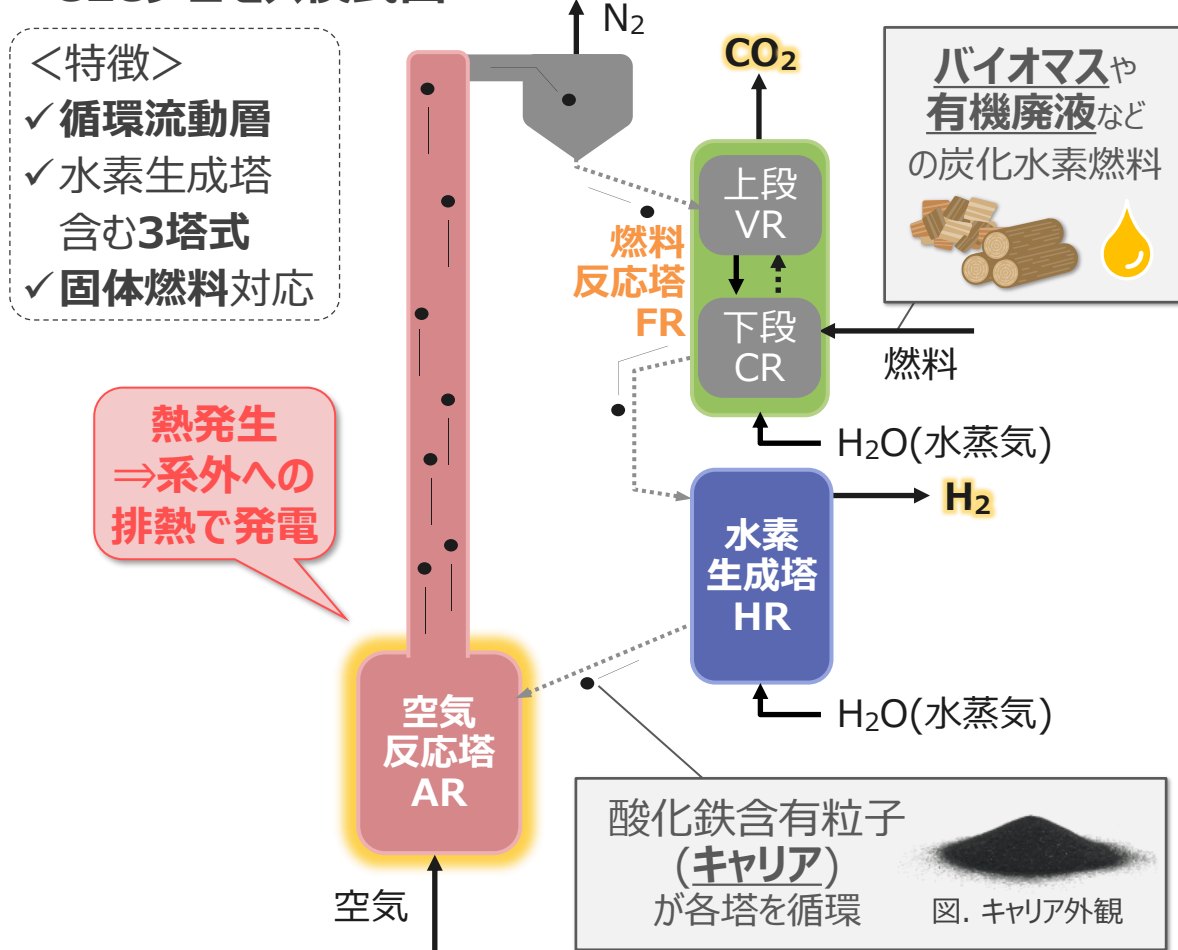
経済性の高いCCUSの実現に向け、電力・H₂・CO₂を効率良く併産するCLC技術を開発する



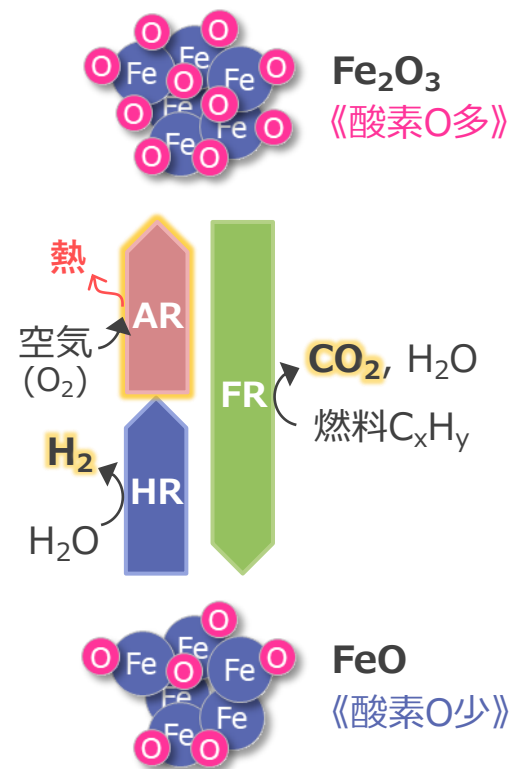
2. 本事業で取り組むCLC技術の特徴

酸化鉄含有粒子(**キャリア**)を反応媒体とした循環流動層型のプロセスであり、固体バイオマスや有機廃液を燃料とし、**発電しながら、CO₂分離・回収、水素製造を同時に行える**特徴を有する

■ CLCプロセス模式図

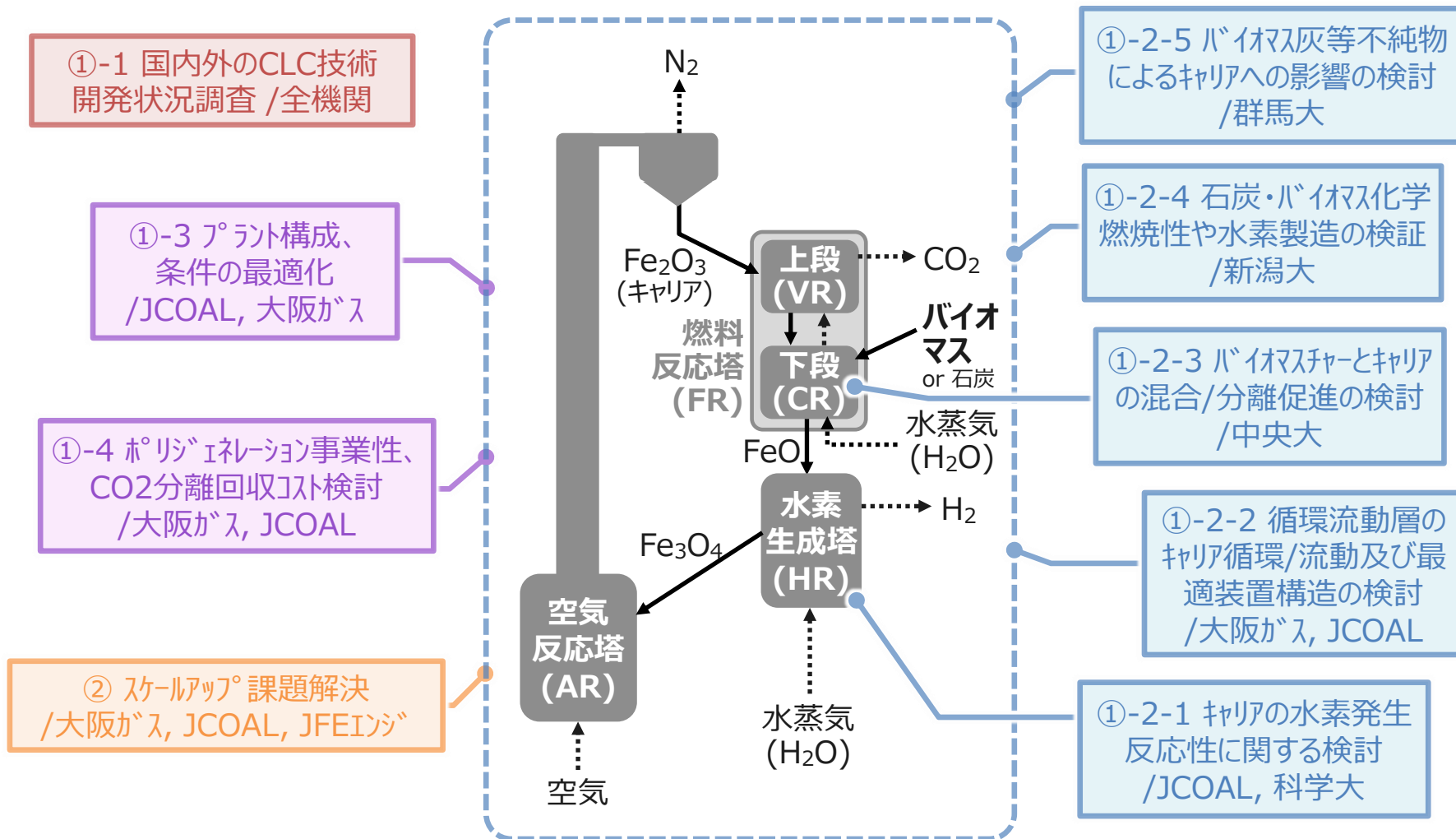


<CLCプロセス内での キャリアの化学変化>



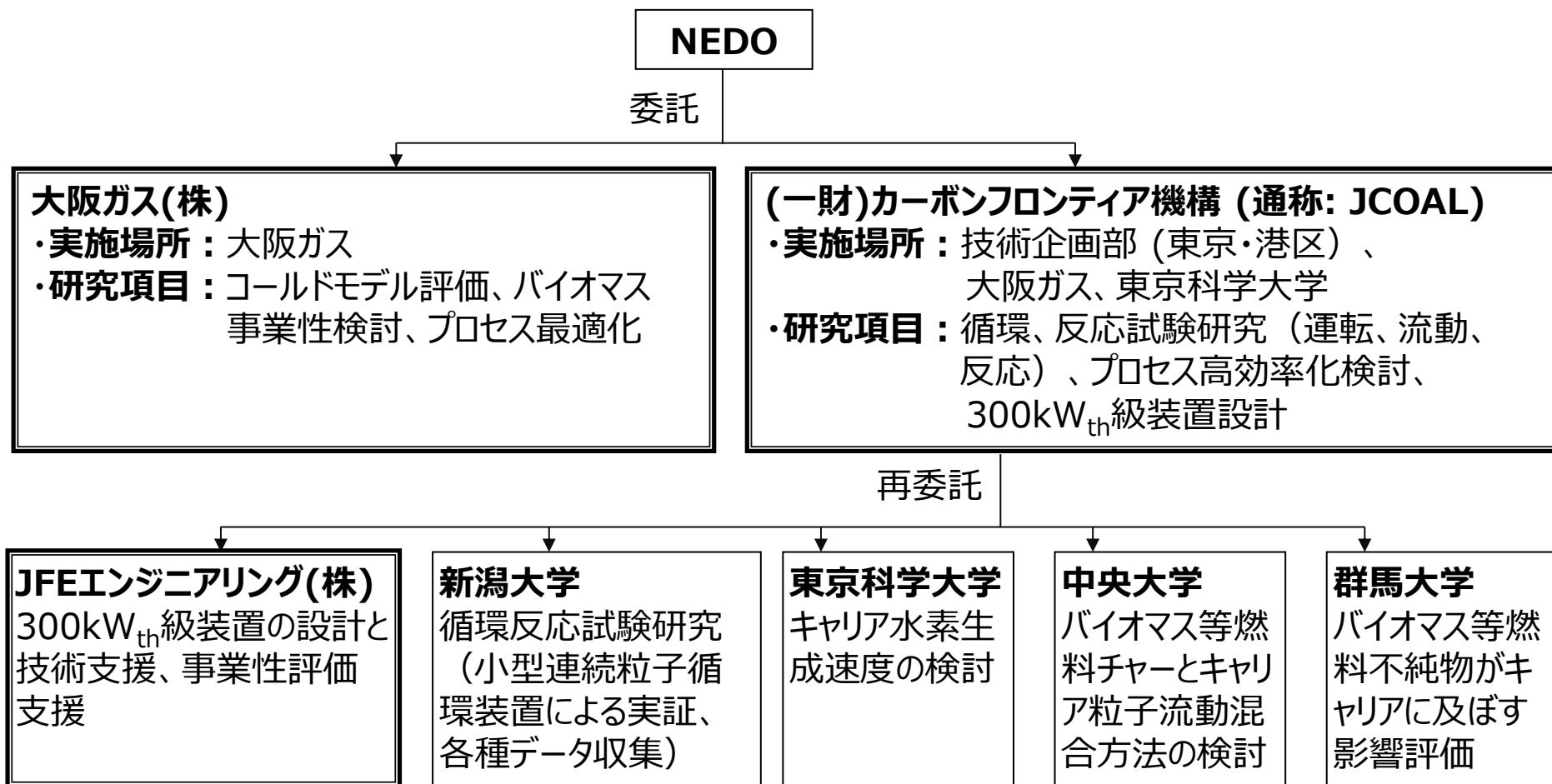
3. 事業目標

CO₂分離・回収コスト1,000 円/t-CO₂ を見通せるケミカルルーピング燃焼ポリジェネレーションシステムの設備設計技術に目途をつける



4. 実施体制

「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電基盤技術開発／
CO₂分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発
／ケミカルルーピング燃焼ポリジェネレーションシステム技術開発」実施体制



5. 研究開発の工程

2020～2024年度の5年間で、①要素技術研究開発（キャリア選定、原理実証、設計知見獲得）、②CLC装置設計を中心とした取組みを実施

開発項目		開発スケジュール				
		2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度
① 要素技術 研究開発	1. 国内外のCLC技術開発状況調査（全機関）	—				→
	2. 要素技術研究開発、バイオマス燃焼性検討					
	-1. キャリアの水素発生反応性に関する検討（科学大、JCOAL）	—		→	ベンチ設計補完研究	
	-2. 循環流動層のキャリア循環/流動及び最適装置構造の検討（大阪ガス、JCOAL）	—		→		
	-3. バイオマスチャーとキャリアの混合/分離促進の検討（中央大、JCOAL）	—		→		→
	-4. 石炭・バイオマス化学燃焼性や水素製造の検証（新潟大、JCOAL）	—		→		
	-5. バイオマス灰等不純物によるキャリアへの影響の検討（群馬大、JCOAL）	—		→		
	-6. ワーキング会議（事務局:JCOAL / 全機関参加）	-----				-----→
	3. プラント構成、条件の最適化（大阪ガス、JCOAL）	—				→
	4. ポリジェネレーション事業性、CO ₂ 分離回収コスト検討					
② スケールアップ 課題解決	-1. バイオマスを燃料とした水素・CO ₂ ・電気製造に係る事業性検討（大阪ガス、JFEE）		—			→
	-2. その他燃料の適用（JCOAL、JFEE）		—			→
	5. 技術検討委員会（事務局:JCOAL / 関連機関参加）	-----				-----→
	300 kW _{th} 級装置設計 （JCOAL、大阪ガス、JFEE）			概念・基本設計	→	詳細設計
				専用設計・製作調達された 構成部材・機器の機能確認	→	→

6-1. 主要成果 (1) ～CLC技術実証動向～

- 中国のグループ、米国のグループが、 MW_{th} 級の実証～商用化検討を推進中
- 我々はスケール面で遅れを取っているものの、中国と比べ**水素を生成**できる点、米国と比べ**固体燃料まで使用可能**な点で優位性・独自性の高い技術と言える

表. 清華大らのグループ、OHIO州立大らのグループのCLC開発との比較

項目 \ プロジェクト	OG/JFE/JCOAL CLCポリジェネ	清華大・東方ボイラ 社(EU共同)	OHIO州立大・B&W 社
用途	H ₂ /CO ₂ /発電 ポリジェネ	CO ₂ /発電	H ₂ /CO ₂ /発電 ポリジェネ
燃料	バイオマス/亜瀝青炭 等/液体燃料	褐炭/石油コークス	シンガス (バイオマス/褐炭ガ ス化ガス)
酸素キャリア種	イルメナイト、他	イルメナイト、他	人エイルメナイト
現段階開発規模	300kW _{th} ホット建設	5MW _{th} (運転実績値) 運転中	250kW _{th} 試験終了 60MW _{th} 計画発表
反応器形式	循環流動層	循環流動層	移動層 + ライザ循環
FR(燃料反応塔) 形式	二段バブリング流動 層 (VR+CR)	一段バブリング 流動層	移動層
カーボンストリッ パー	検討中	FR内に設置	なし
HR (水素発生塔)	バブリング流動層	なし	移動層



図. 清華大らの実証装置外観

場所：四川省徳陽市、東方ボイラ試験場
規模：4MW_{th} (現時点、世界最大)
高さ：総高さ48m (16階建物相当)

【用語説明】 kW_{th} …… 燃料投入量を高位発熱量基準で表記したもの

6-2. 主要成果 (2) ～キャリア評価～

- イルメナイトへのアルカリ灰の作用を調査している最中、カリウムが活性化に寄与することを見出した
- 他候補と比較して、水素生成性能・サイクル耐久性・コストの総合評価が最高との結論を得た

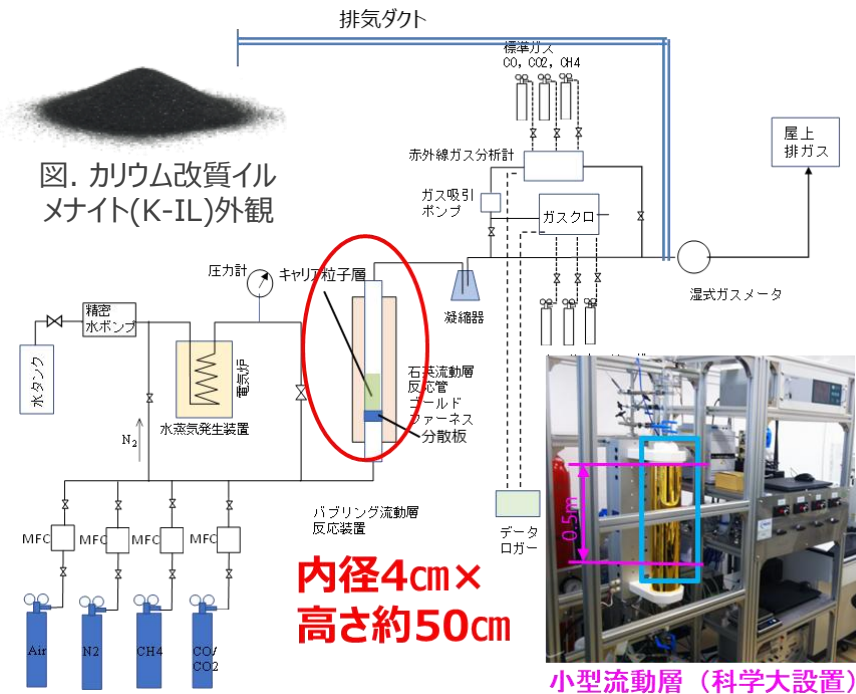


図. 小型流動層装置装置の概念

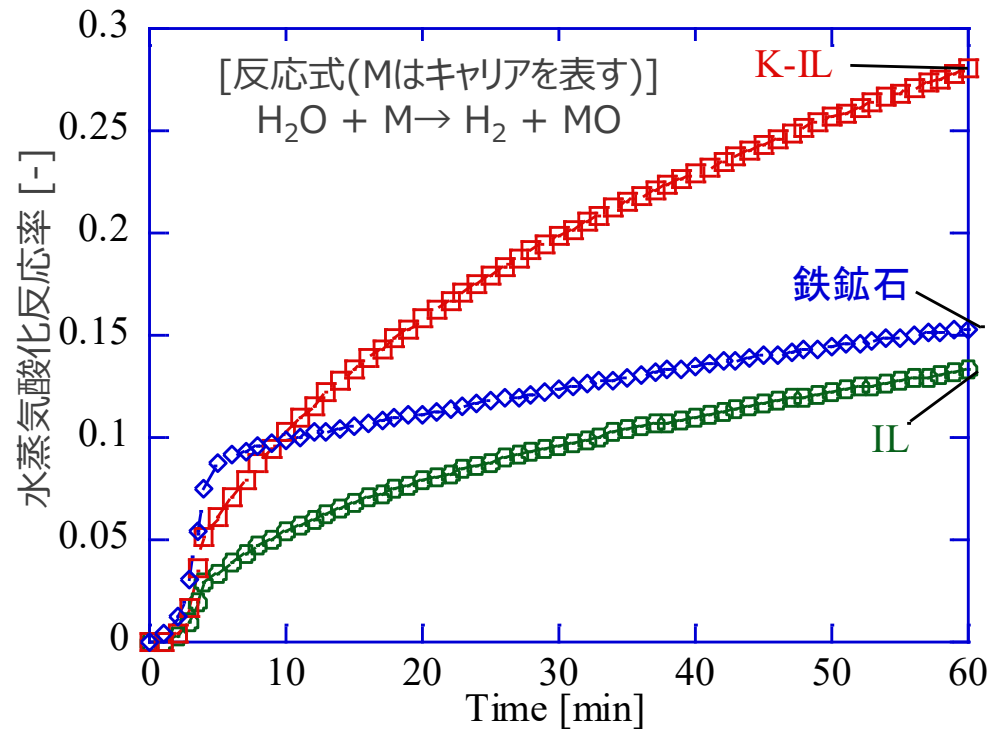


図. 小型流動層装置での水蒸気酸化試験結果
 (水蒸気流速、層高を合わせた評価。還元性ガスで前処理)

6-3. 主要成果 (3) ～タール分解性能、チャー滞留時間検証～

- 酸素キャリア（イルメナイト）によるバイオマスタールの分解性能を研究し、酸素キャリアの格子酸素により重質タールが軽質タールとガスに変換されることを確認
- コールドモデル装置を用いた、模擬チャーの粒径と滞留時間の関係を研究し、操作条件、反応器構造により滞留時間をコントロールできることを確認

◆燃料中灰分等不純物がキャリア循環/流動、及び反応へ及ぼす影響(群馬大)

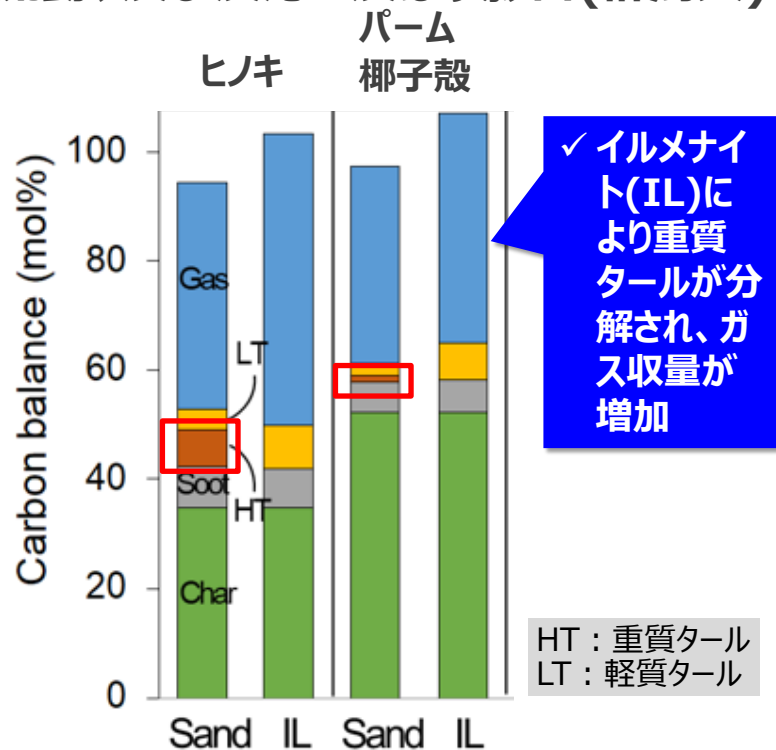
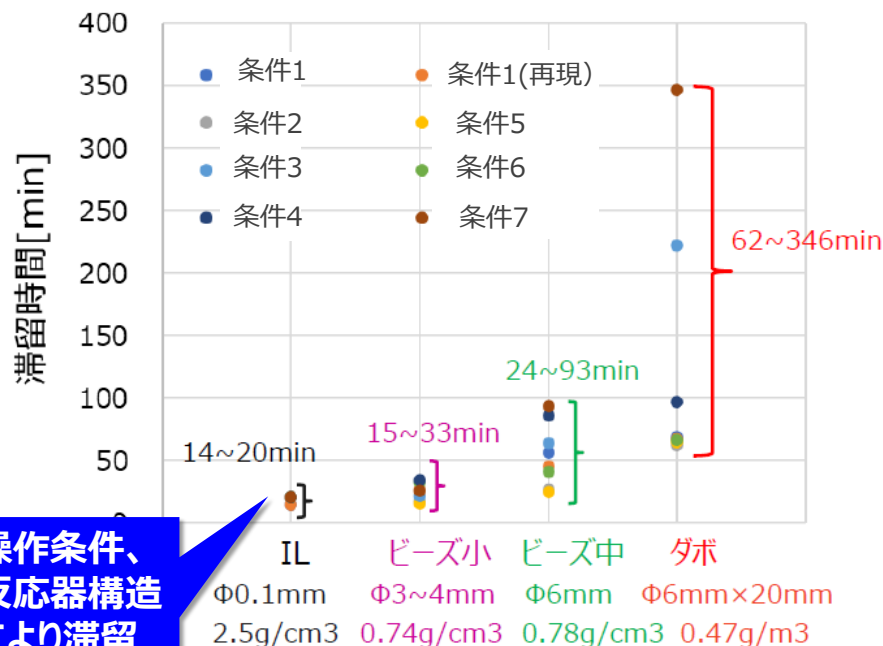


図. 水蒸気タール分解試験における炭素収支

◆コールドモデル試験(大阪ガス、JCOAL)

●粒径と滞留時間の関係



✓ 操作条件、
反応器構造
により滞留
時間を制御
可能

図. コールドモデルでの滞留時間検証

6-4. 主要成果 (4) ～バイオマスガス化、キャリア反応性評価～

- バイオマスは30分で95%、40分でほぼ100%ガスに変換することを確認
- 揮発分もキャリアと反応し、CO₂に変換することを確認

◆固体バイオマスによるキャリア還元反応性の検討(JCOAL・科学大)

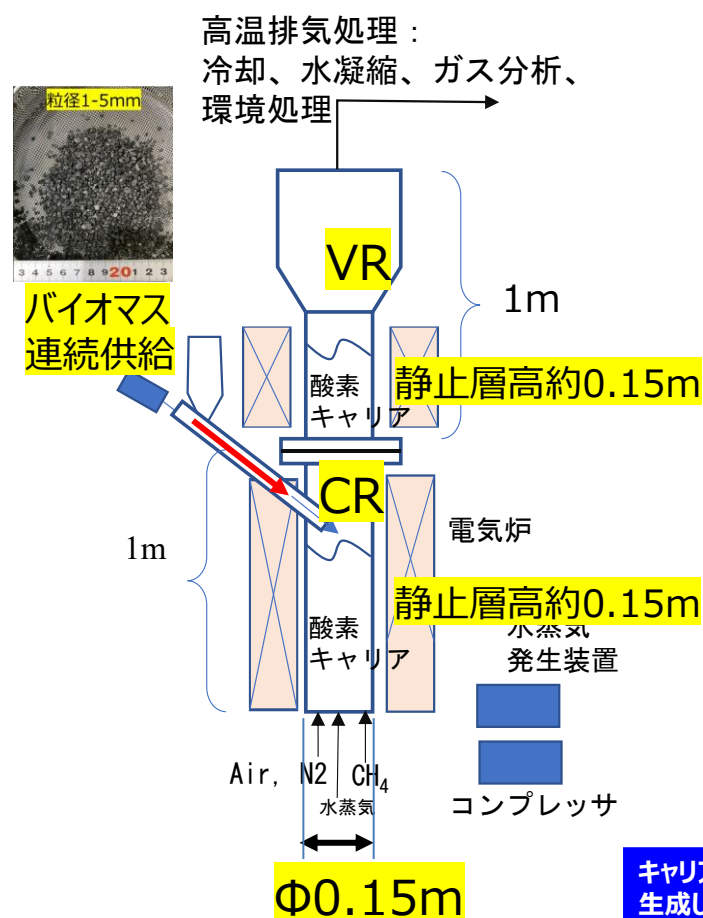
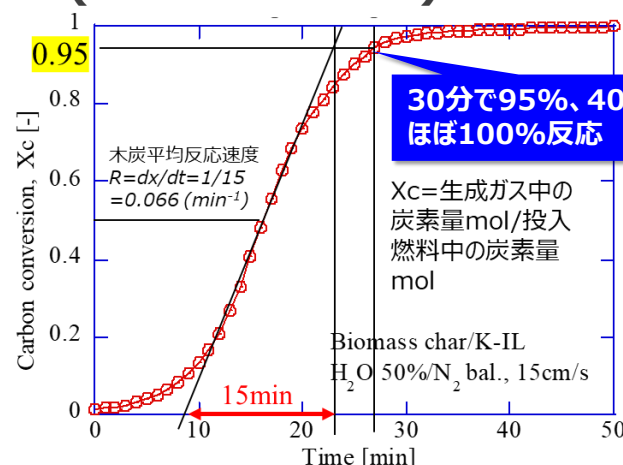
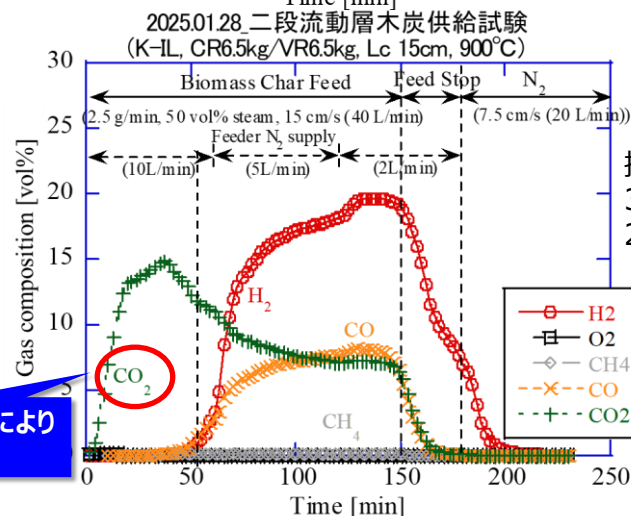


図. 二段流動層反応装置概念 (科学大設置)



チャーとキャリアの反応：
 ① $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$
 ② $2Fe_3O_4 + 2H_2 \rightarrow 6FeO + 2H_2O$
 ③ 総括反応式
 $C + 2Fe_3O_4 \rightarrow 6FeO + CO_2$

図. 木炭供給試験結果 (炭素転換率)



揮発分とキャリアの反応：
 $3Fe_2O_3 + CO(or H_2) \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2(or H_2O)$

図. 木炭供給試験結果 (生成ガス組成)

6-5. 主要成果 (5) ～ラボスケールCLC装置での原理実証～

- 3塔式CLC試験ベンチスケール装置にて液体燃料(灯油)、木片それぞれの運転で水素発生⇒水素生成ありCLC反応原理の成立を確認 (ARを出た酸化鉄をFRでFeOへ還元、HRで水蒸気酸化)

◆バイオマス等の化学燃焼性や水素製造の検証(新潟大)

<主な研究課題>

- ① バイオマスでFeOまで還元可能か
- ② HRでH₂以外のガスは生成しないか

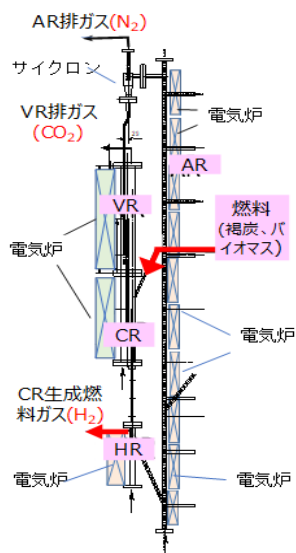
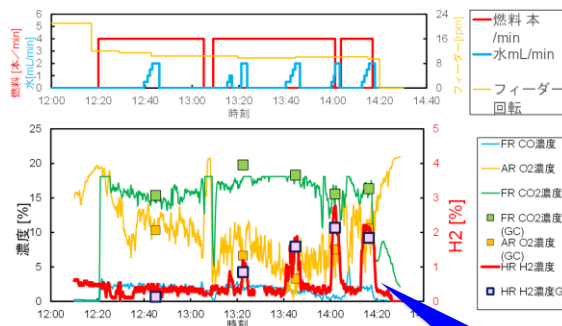
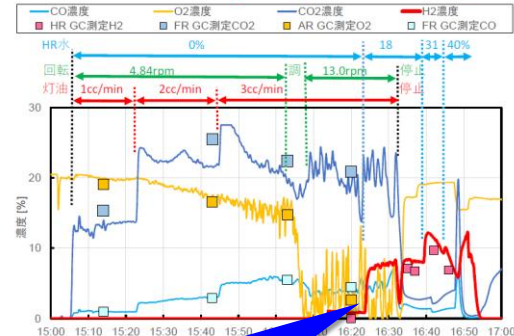


図. (上)模式図 (右)写真

<木片での運転結果>



<灯油での運転結果>



✓ 水素発生(赤線グラフ)を確認

図.3塔式CLC試験ベンチスケール装置での運転結果

6-6. 主要成果 (6) ～300 kW_{th}級装置設計～

- 要素研究とASPEN Plusによるプロセス計算の結果を踏まえ、内部反応熱のみで昇温し（熱自立）、反応させる最小規模の試験装置（300 kW_{th}級装置）を設計した
- 本技術の実用化に向けては、このような装置の建設・評価を通じて、物質・熱収支、長期信頼性、安全・安定運転制御に係る知見を収集し、スケールアップを推し進めていくことが必要

表. 研究成果の装置設計への反映

	研究成果	300 kW _{th} 級装置への反映
研究成果	水素生成試験結果から、反応に必要な滞留時間を把握	左表のとおり、滞留時間設計に反映
	コールドモデル模擬燃料試験結果から、CR内の構造、ガス流量分布の重要性を把握	CR内部構造の一部、流動化ガス流量分布を可変とし、柔軟性を確保
	K-ILを前提としたプロセス計算 見直しに伴う仕様調整	VR/CR、HRサイズ変更 (塔高増加) キャリア循環量見直し

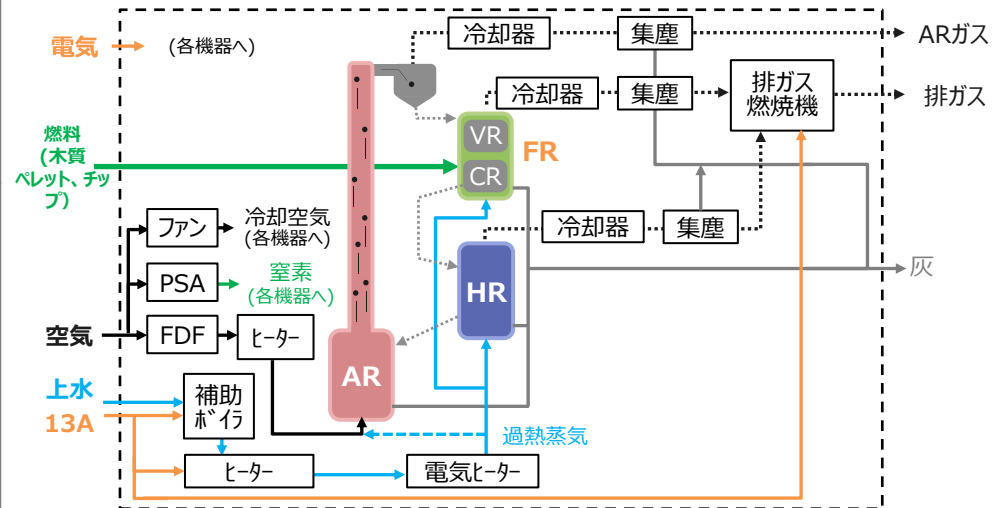


図. 300kW_{th}級装置のブロックフロー

6-7. 成果まとめ（成果と新たに見出された課題）

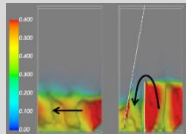
- 要素研究知見を様々得て、木片からの水素生成も成功（外部加熱式）
- 熱自立可能な300 kW_{th}級装置などを用いた、物質・熱収支、長期信頼性、安全・安定運転制御に係る知見収集およびスケールアップ検討が課題

要素研究

反応、キャリア流動、燃料滞留時間など、**要素ごとに切り分けて単純化し、各種の実験やシミュレーションを実施**



図① バブリング小型流動層反応装置 (JCOAL、科学大)



図② 燃料滞留計算例 (中央大)



図③ 3塔式コールドモデル (JCOAL、大阪ガス)

3塔式CLC試験ベンチスケール装置

新潟大に設置した本装置では**反応が狙い通り進むか**の確認を実施。内部の反応熱で昇温する実機とは異なり、**外部加熱式**

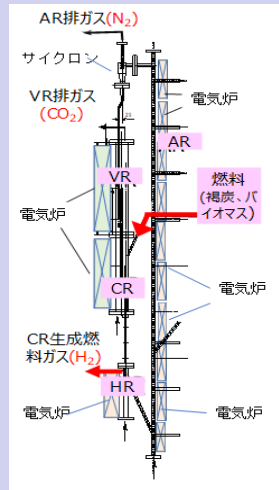


図. (上)模式図 (右)写真



(今後) 300 kW_{th}級装置

内部の反応熱のみで昇温し（**熱自立**）、反応させる装置。熱自立で実証できる最小規模（これ以上小さいと放熱ロスが大きいため温度を維持できない）。

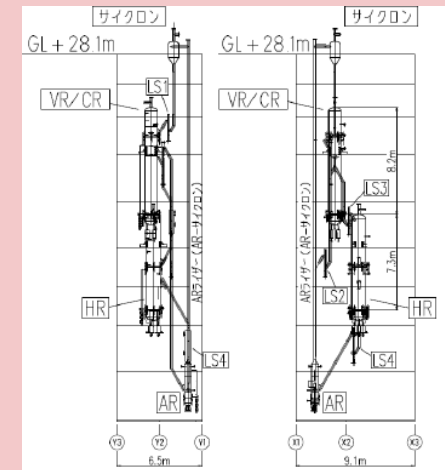


図. 300 kW機 立面図（主機のみ）

- 水素生成に適したキャリア種類・温度を把握（①）
- 燃料滞留時間、キャリアとの混合具合への構造に対する影響把握（②）
- 搬送用ガス量・構造とキャリア循環量の関係把握（②、③）

- バイオマス(木片)を燃料として利用し、水素が生成することを確認
- 予備試験で、灯油、メタノールでも運転できることを確認 ⇒ 液体燃料にも対応
- ✗ 物熱収支は測定不能（放熱ロス過多）

- 装置はおおよそ設計済み（**液体燃料も対応**）
 - 物熱収支の確認
 - 長時間連続運転によるキャリアの繰返し反応性やバイオマス灰の影響の確認
 - 安全・安定運転制御確立
- 用途拡大への追加課題
成果を踏まえた追加課題

7. 特許出願、論文発表成果

年度	特許	論文	学会発表
2020	0件	0件	0件
2021	1件	2件	6件
2022	1件	1件	14件
2023	1件 (国際特許出願)	2件	9件 (うち 1 件 国際学会で Best Paper Award)
2024	1件	2件 (内、投稿中1件)	10件
通算	4件	7件	39件

8. 結論

- 本技術開発により、ケミカルルーピング燃焼ポリジェネレーション技術開発のプロセス性能を左右する酸素キャリアの評価、選定が行われ、その性能評価・プロセス解析に基づくCO₂分離・回収コストの目標値である1,000円台/t-CO₂以下となる見通しを得た。さらに、感度分析により、各種入力条件値とCO₂分離・回収コストの相関を明らかにすることができた。
- 300 kW_{th}級装置については、研究成果を反映し、熱自立を前提に、長時間運転、高温での運転、広範な制御範囲に対応するように詳細結果を実施した結果、フレキシビリティの高い、様々な試験条件を試せる装置を設計することができた。
- 今後、助成事業にて、2027年度まで、300 kW_{th}級装置の建設評価に取り組んでいく。