

# 冷熱を利用した大気中二酸化炭素 直接回収の研究開発

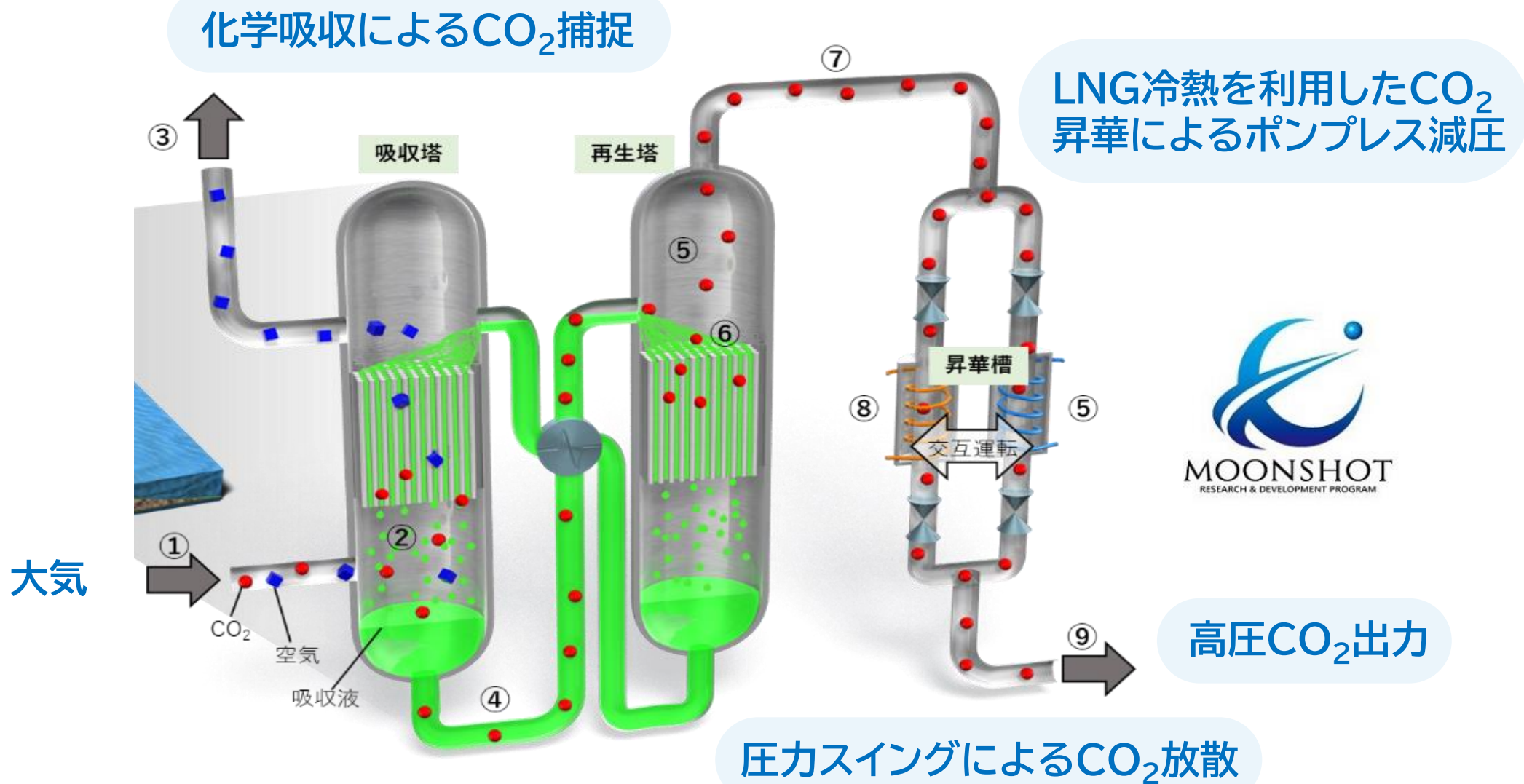
名古屋大学・東邦ガス・東京理科大学・東京大学・中京大学・日揮



PM 則永行庸(名古屋大学)



# 冷熱利用大気CO<sub>2</sub>直接回収 Cryo-DAC<sup>®</sup>



LNG冷熱を利用した「CO<sub>2</sub>冷却固化減圧再生型化学吸収式DAC」

# Cryo-DAC<sup>®</sup>研究開発体制



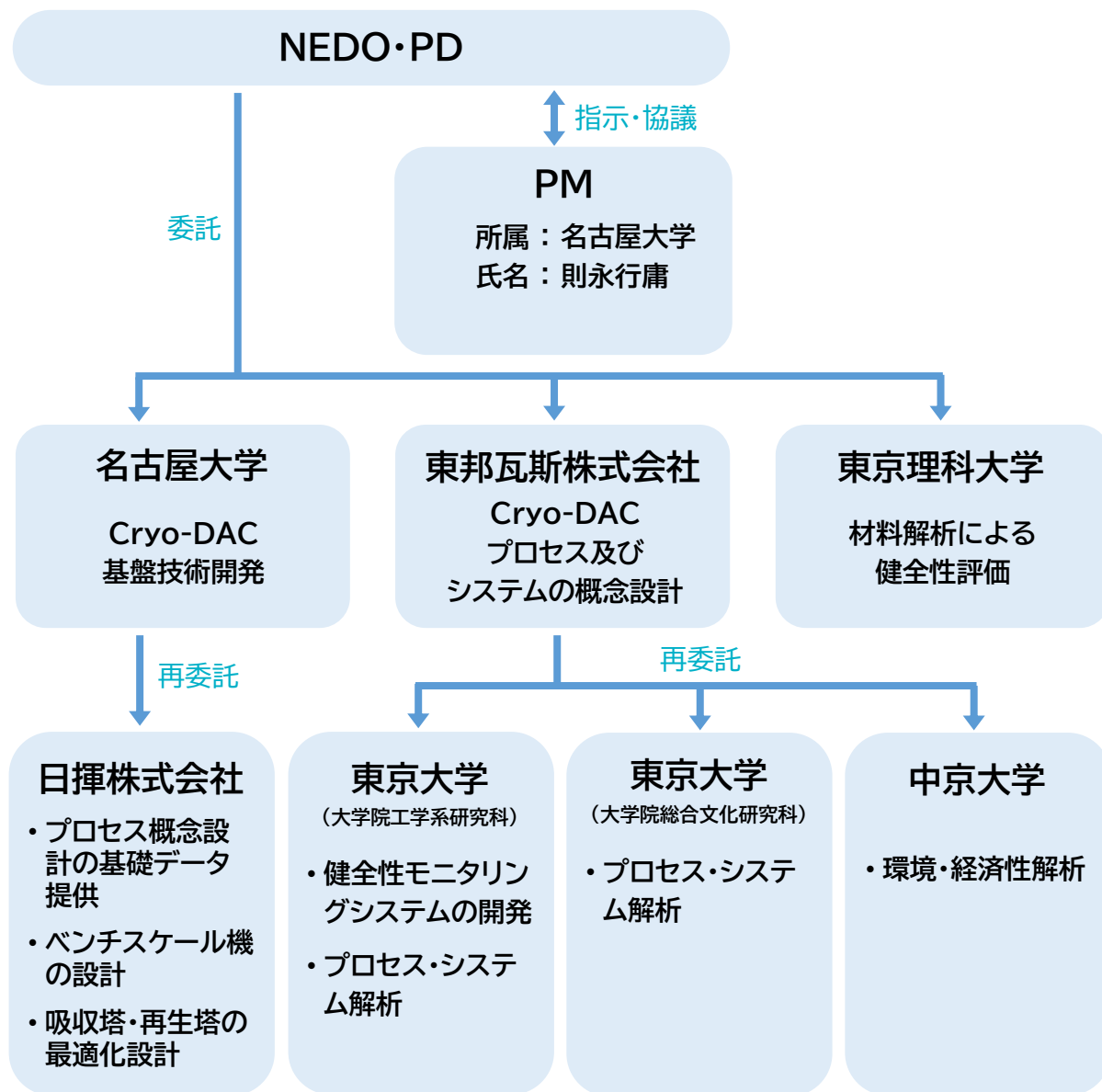
冷熱を利用する  
大気中二酸化炭素  
直接回収技術

基盤技術を担う「学」

+

社会実装を担う「産」

ユーザー・エンジ



# 二酸化炭素冷却固化による吸収液からの二酸化炭素回収



液体窒素をチューブ内部に供給



ドライアイスが生成し、シエル側とそれと連結した吸収液容器内の圧力が下がる

# Cryo-DAC<sup>®</sup>特徴

- 圧カスイングによる再生
- LNG冷熱を利用したCO<sub>2</sub>ドライアイス化による減圧
- ドライアイス復温による液化CO<sub>2</sub>/高圧CO<sub>2</sub>出力


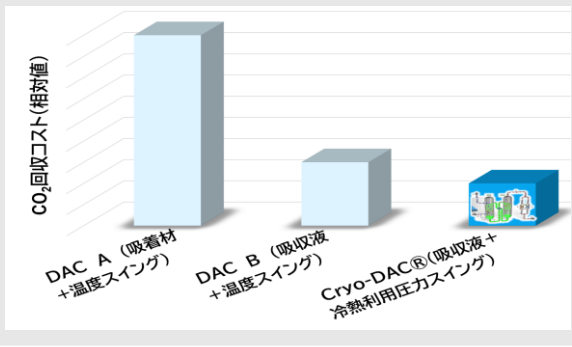
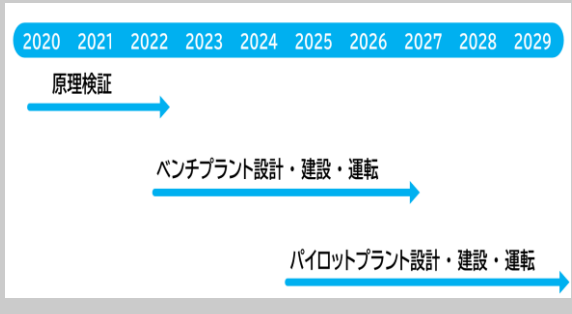
熱エネルギー削減

ポンプ動力削減

圧縮機動力削減

 コスト競争力のあるDACへ

# プロジェクト目標、研究開発の状況

目標	研究開発内容	進捗																						
<p>超低濃度大気中CO<sub>2</sub>を確実にキャッチし、常温・減圧再生可能な新規吸収液の開発</p>	<p>低濃度領域での平衡吸収量のハイスループット評価法を確立、吸収液探索に活用</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高いローディング差(&gt;0.1)、低蒸気圧(0.5Pa@25℃)の吸収液を開発済み(NU-01)</li> <li>● DAC条件で、CO<sub>2</sub>は吸収するが、水は吸収しない撥水性吸収液を開発中</li> </ul>																						
<p>提案プロセスCryo-DACの実現性を見極め</p>	<p>NU-01 を用いた際のプロセスシミュレーションにより、投入エネルギーやCO<sub>2</sub>回収コストを評価</p>  <table border="1"> <caption>CO<sub>2</sub>回収コスト(相対値)</caption> <thead> <tr> <th>プロセス</th> <th>相対コスト</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DAC A (吸着材 + 温度スイング)</td> <td>高</td> </tr> <tr> <td>DAC B (吸収液 + 温度スイング)</td> <td>中</td> </tr> <tr> <td>Cryo-DAC® (吸収液 + 冷熱利用圧力スイング)</td> <td>低</td> </tr> </tbody> </table>	プロセス	相対コスト	DAC A (吸着材 + 温度スイング)	高	DAC B (吸収液 + 温度スイング)	中	Cryo-DAC® (吸収液 + 冷熱利用圧力スイング)	低	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 技術競争力を有する見通し</li> <li>● 大気中水分対策検討中</li> <li>● 撥水性吸収液の適用検討中</li> </ul>														
プロセス	相対コスト																							
DAC A (吸着材 + 温度スイング)	高																							
DAC B (吸収液 + 温度スイング)	中																							
Cryo-DAC® (吸収液 + 冷熱利用圧力スイング)	低																							
<p>CO<sub>2</sub>吸収、液再生、CO<sub>2</sub>昇華回収、高純度CO<sub>2</sub>生産の一貫システムの開発</p>	<p>ベンチプラント(1t-CO<sub>2</sub>/y)詳細設計</p>  <table border="1"> <caption>プロジェクト進捗スケジュール</caption> <thead> <tr> <th>年</th> <th>主要な活動</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2020</td> <td>原理解証</td> </tr> <tr> <td>2021</td> <td>原理解証</td> </tr> <tr> <td>2022</td> <td>原理解証</td> </tr> <tr> <td>2023</td> <td>原理解証</td> </tr> <tr> <td>2024</td> <td>ベンチプラント設計・建設・運転</td> </tr> <tr> <td>2025</td> <td>ベンチプラント設計・建設・運転</td> </tr> <tr> <td>2026</td> <td>ベンチプラント設計・建設・運転</td> </tr> <tr> <td>2027</td> <td>ベンチプラント設計・建設・運転</td> </tr> <tr> <td>2028</td> <td>パイロットプラント設計・建設・運転</td> </tr> <tr> <td>2029</td> <td>パイロットプラント設計・建設・運転</td> </tr> </tbody> </table>	年	主要な活動	2020	原理解証	2021	原理解証	2022	原理解証	2023	原理解証	2024	ベンチプラント設計・建設・運転	2025	ベンチプラント設計・建設・運転	2026	ベンチプラント設計・建設・運転	2027	ベンチプラント設計・建設・運転	2028	パイロットプラント設計・建設・運転	2029	パイロットプラント設計・建設・運転	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 設置場所、仕様、製作、納品スケジュールを策定済み</li> <li>● 世界初となるCO<sub>2</sub>昇華回収プロセス技術開発中</li> </ul>
年	主要な活動																							
2020	原理解証																							
2021	原理解証																							
2022	原理解証																							
2023	原理解証																							
2024	ベンチプラント設計・建設・運転																							
2025	ベンチプラント設計・建設・運転																							
2026	ベンチプラント設計・建設・運転																							
2027	ベンチプラント設計・建設・運転																							
2028	パイロットプラント設計・建設・運転																							
2029	パイロットプラント設計・建設・運転																							

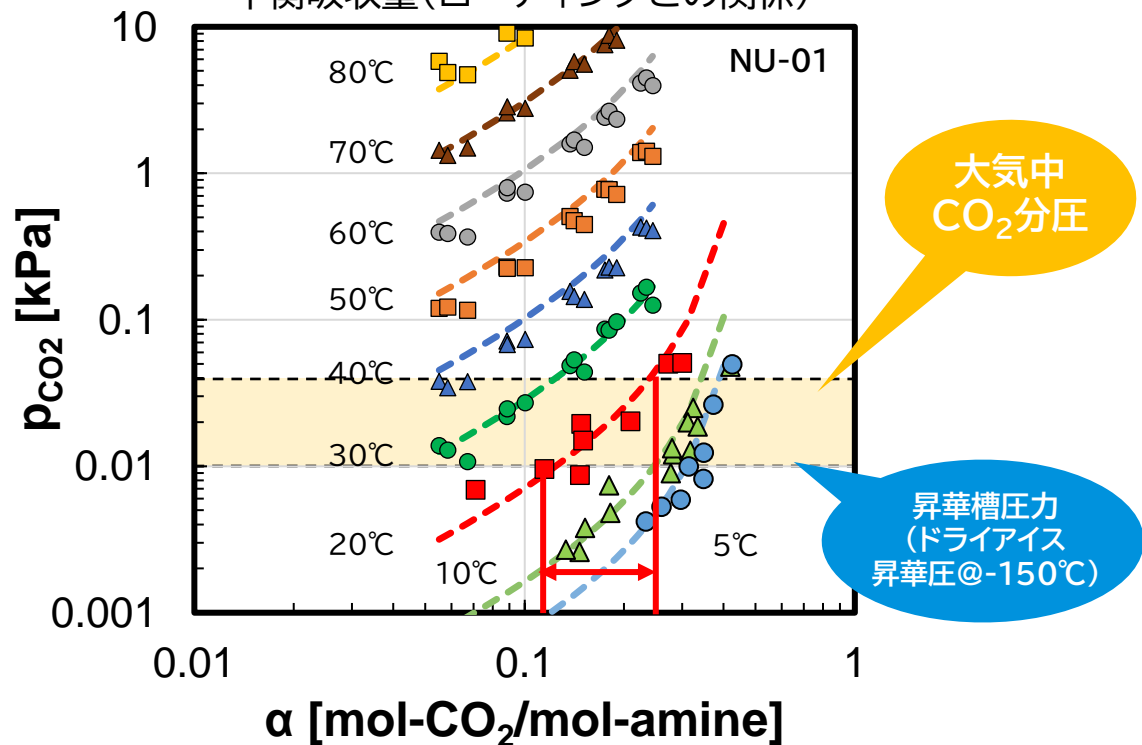
# 成果報告内容

項目	主な内容
吸収液開発	実大気流通下での吸収塔試験、撥水性吸収液
プロセス設計	最適化、回収エネルギー・コスト評価
LCA	商用プラント総重量、金額ベースでのLCCO <sub>2</sub> 評価
ベンチスケール機開発	開発スケジュール確定

# 吸収液開発

プロセス実現の鍵を握る「吸収液(NU-01)」を開発

各温度でのCO<sub>2</sub>分圧と  
平衡吸収量(ローディングとの関係)



- ローディング差 > 0.1、低蒸気圧(0.5Pa)  
➡ 提案プロセスを駆動可能

## ■ NU-01 非水系

親水性溶媒のため大気中水分を吸収  
水分の除去、排水処理が課題

■ 撥水性(疎水性)吸収液

## ■ WATER LEAN NU-01

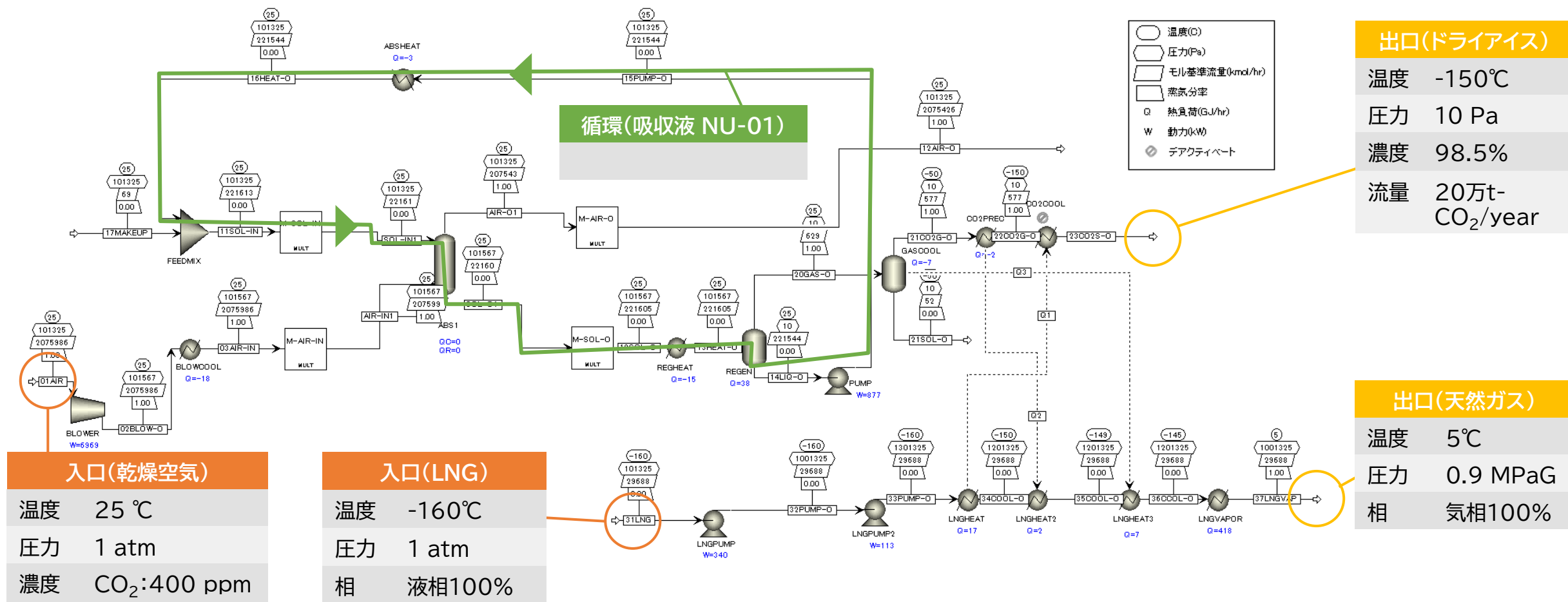
飽和水量相当の水をNU-01に加えたもの(湿度60%であれば15-18wt%)

大気中の水分のCyro-DACシステムへの取り込みはなくなる



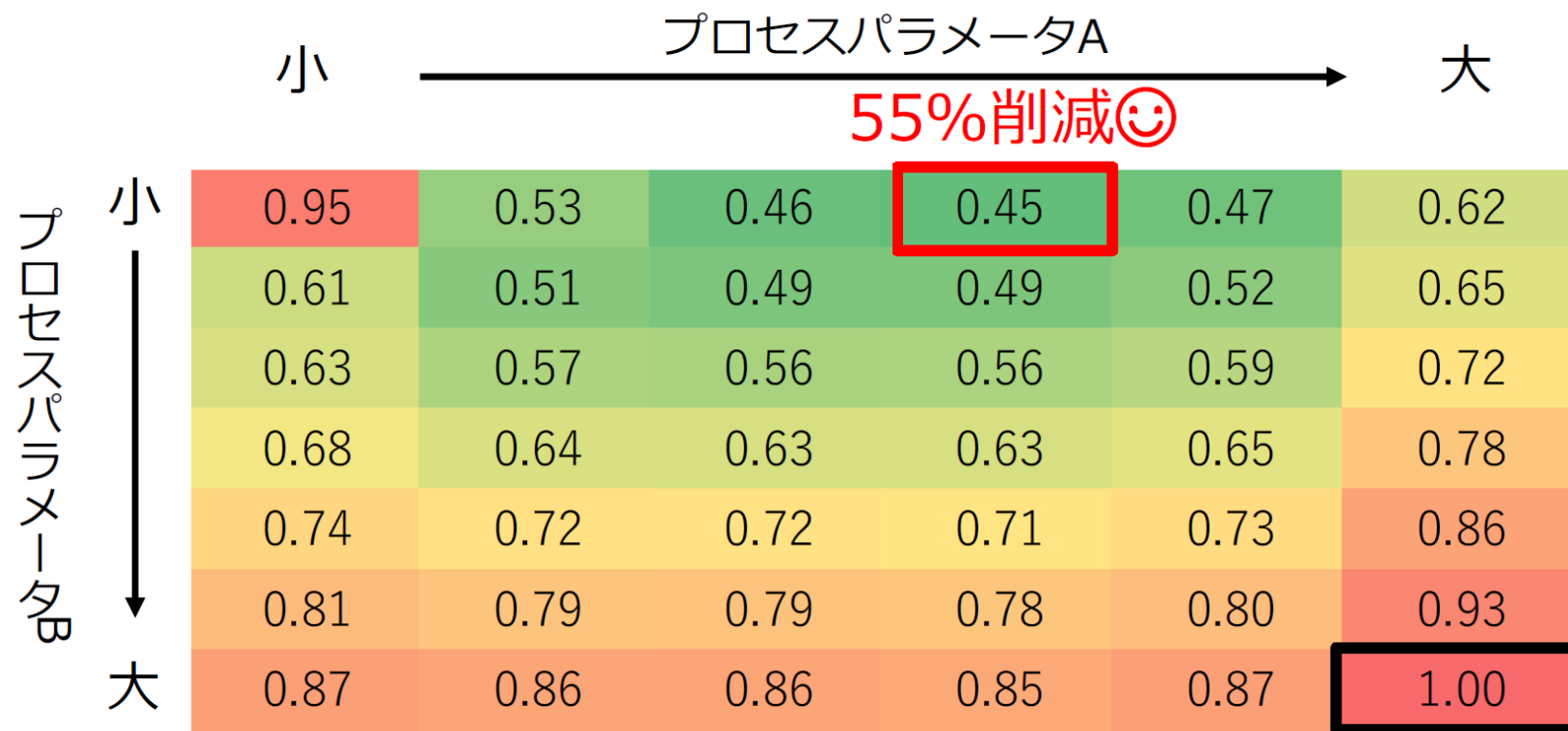
# プロセスシミュレーションモデルの構築とDAC性能把握

- **Cryo-DACプロセスに加えてLNGシステムもモデル化**し、LNG基地への実装を想定したプロセスのエネルギーとコストを評価するためのプロセスシミュレーションモデルを構築。
- 平衡論での計算により、**常温再生に加え、CO<sub>2</sub>回収率68.4%・CO<sub>2</sub>純度98.5%**とのDAC性能を得た。



# 感度解析による適切な条件範囲の検討

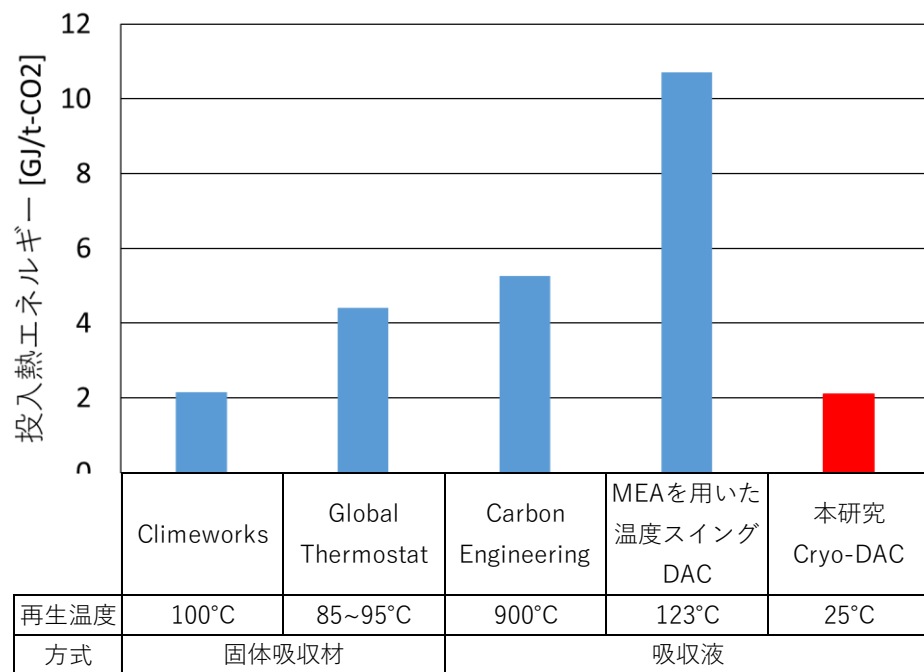
- 各種プロセスパラメーターの影響調査を行い、CO<sub>2</sub>回収コスト最小化する条件範囲を探索



この条件でのCO<sub>2</sub>回収コストを1とした場合の相対値

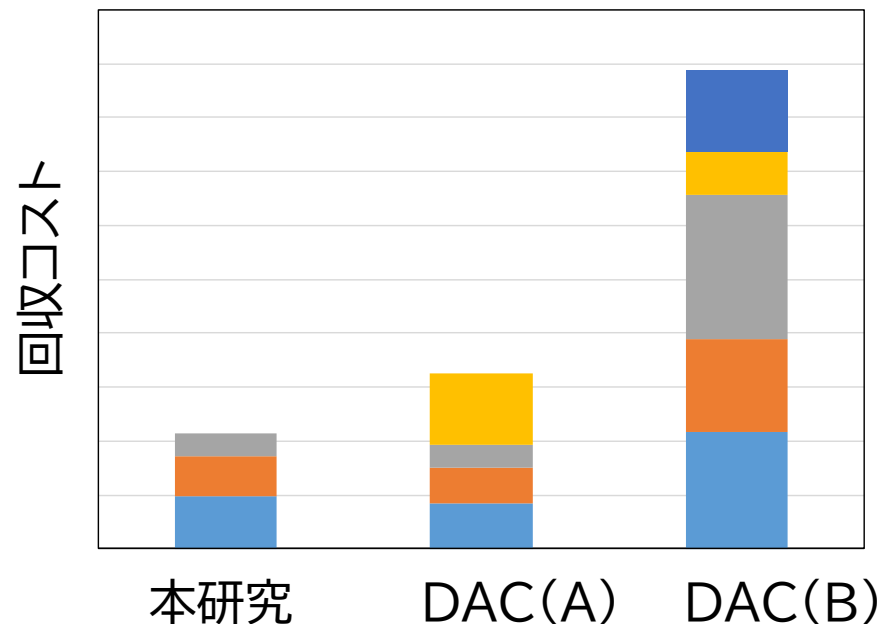
# エネルギー・コストの競合他社との比較

- 感度解析で見出したベストケースについて、エネルギー・コストの競合他社との比較を行った。
- Cryo-DACの投入熱エネルギーは、海外DACメーカーと比べて遜色ない水準であることが明らかとなった(左図)。
- また、必要な熱の温度レベルは常温(25℃)でよく、実機においては周囲環境の熱を活用することで、事実上、燃料投入レスを実現し得るポテンシャルもある。この場合、燃料費が不要な結果、コスト的にも優位性がある(右図)。



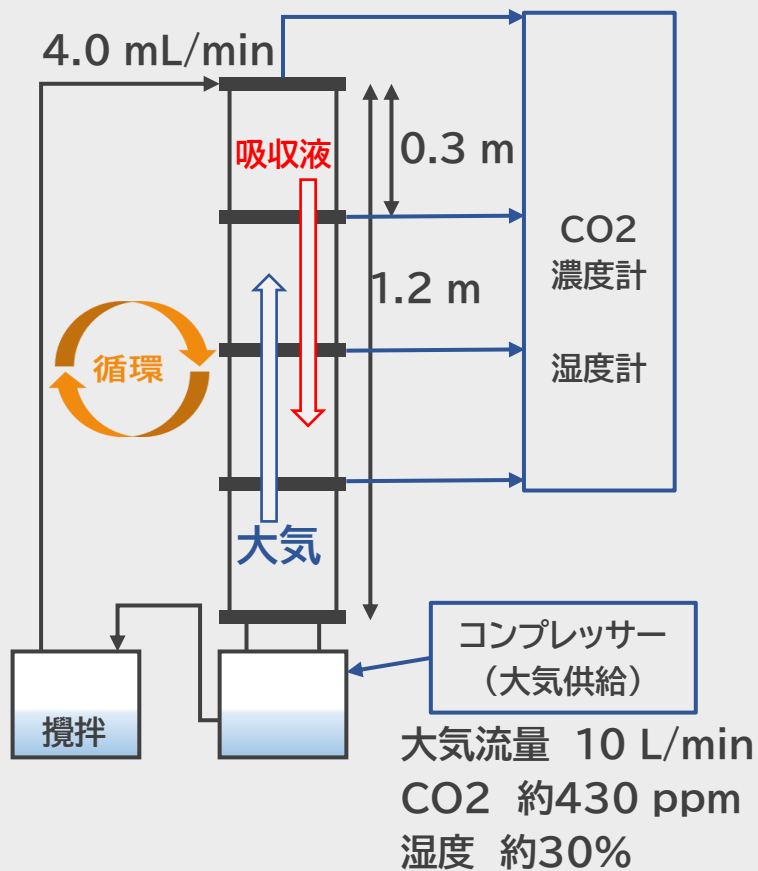
※フィード空気:ドライ

Fasihi, M et al., J. Clean. Prod., 224, 957-980 (2019)  
Kiani, A et al., Front. Energy Res., 8, 92 (2020)

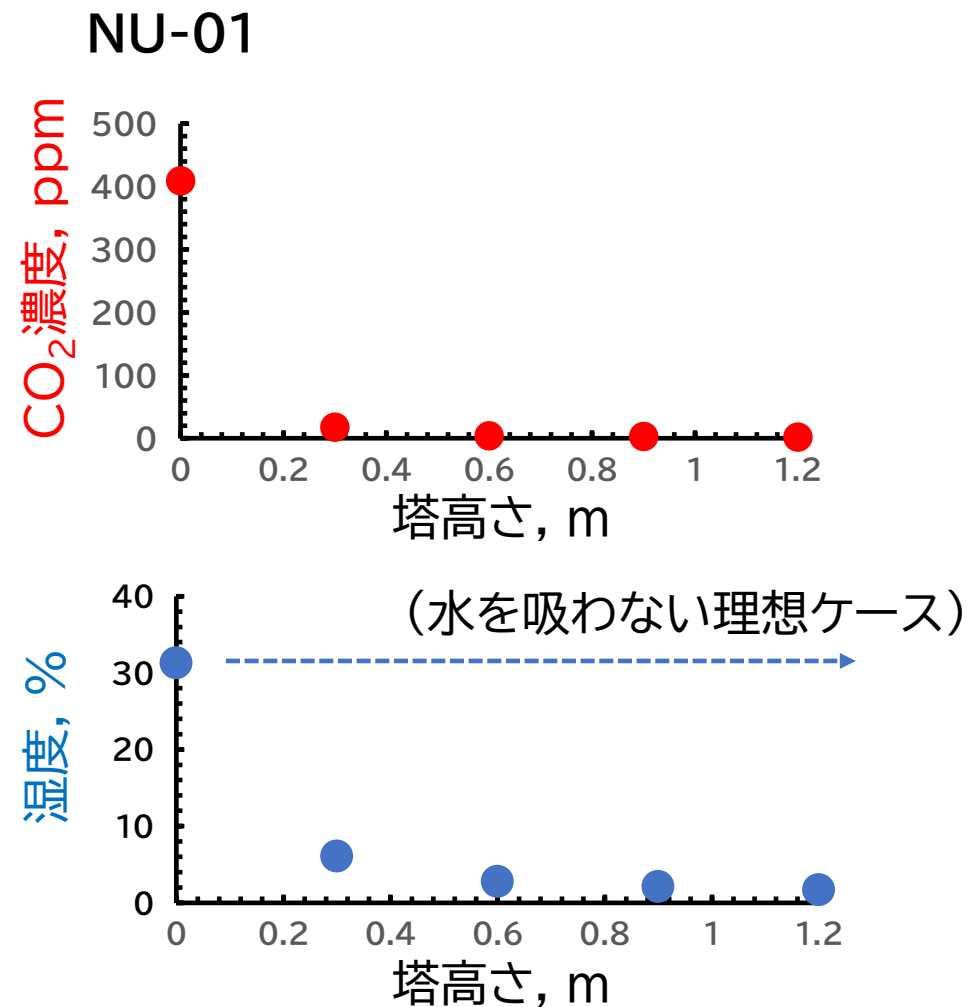


※フィード空気はドライ。Cryo-DAC再生塔での入熱には環境熱を利用できると仮定し、燃料費はカウント外  
※JSTの文献をもとにCryo-DAC条件(回収量20万t/year)に合わせて先行DACにおける回収コストを試算  
・二酸化炭素のDirect Air Capture(DAC)法のコストと評価  
・二酸化炭素のDirect Air Capture(DAC)法のコストと評価(Vol.2)ー吸着分離プロセスー

# 実大気流通下での吸収塔試験



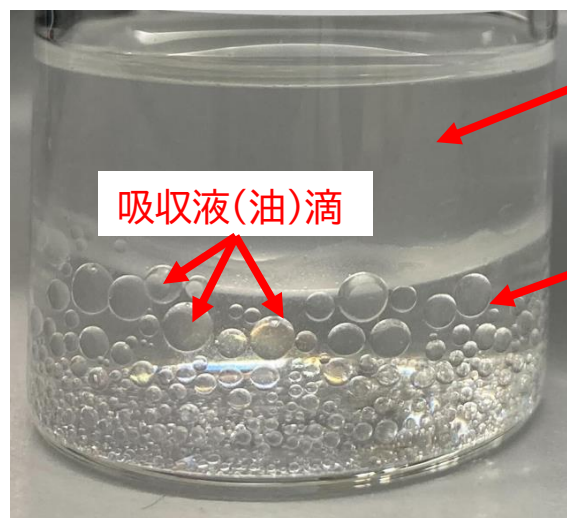
吸収液 : NU-01  
 充填層 : 1.2 m  
 塔径 : 0.03 m  
 充填物 : ディクソンパッキング(3mm)



- 現行の候補液の場合、CO<sub>2</sub>も吸収するが、水も吸収
- プロセス面での水分対策必要

# 撥水性吸収液開発

吸収液とほぼ同量の水を混合後静置



吸収液(油)相

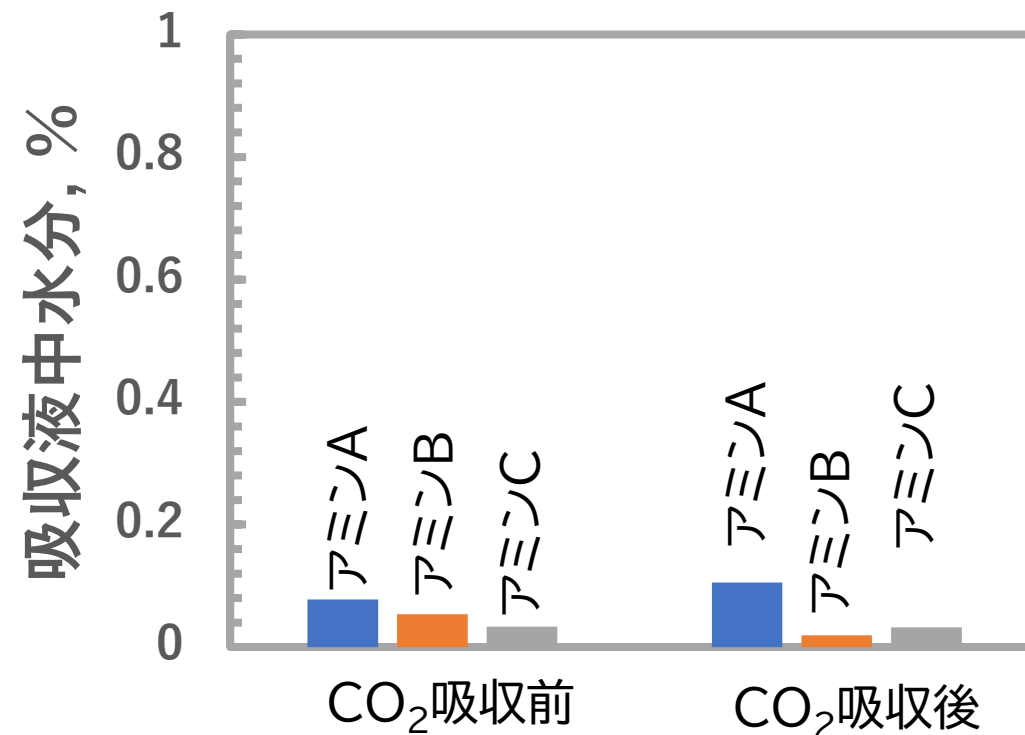
と

水相に液液分離

吸収液(油)滴

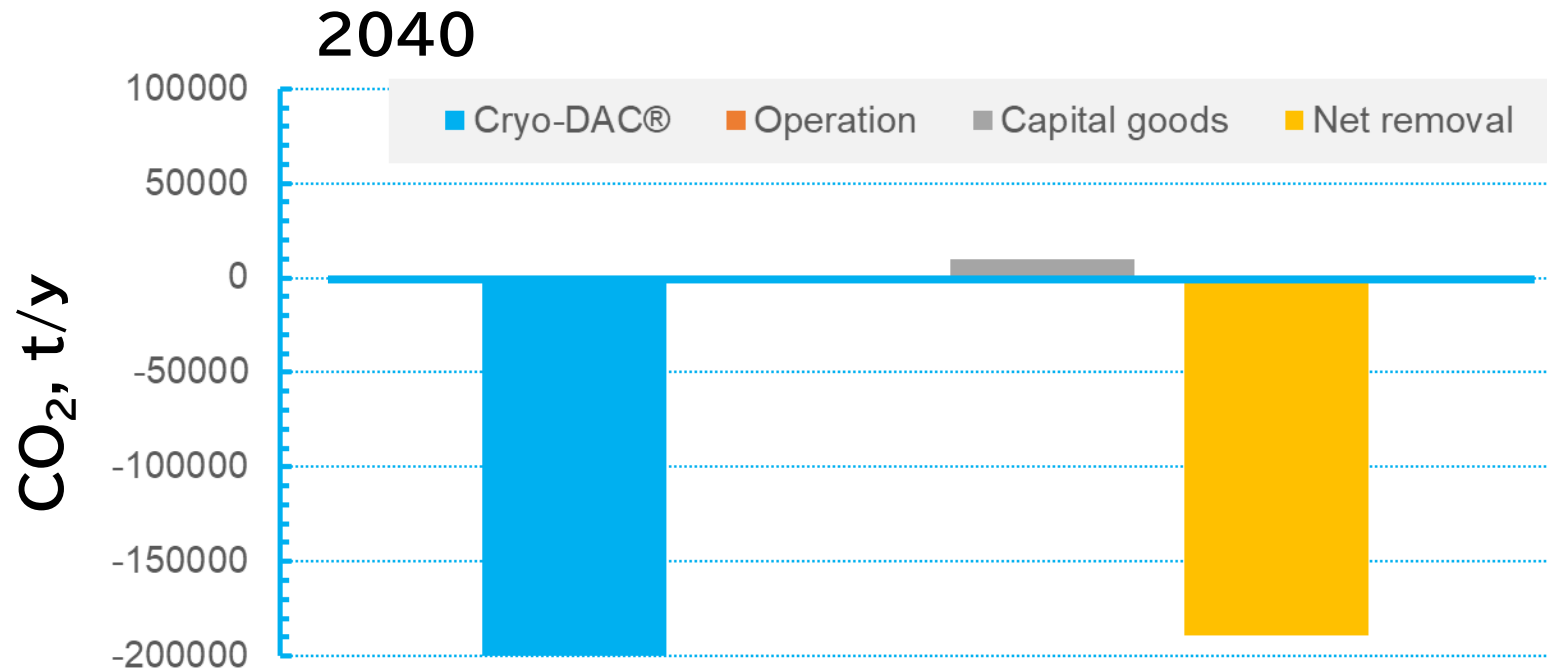
再生時の水の蒸発潜熱不要

↓  
省エネ化！



- 撥水性液体とアミンを混合した吸収液を検討
- 含水率0.1%以下
- DACレンジでの適用を目指したアミン探索を含む液開発を続行

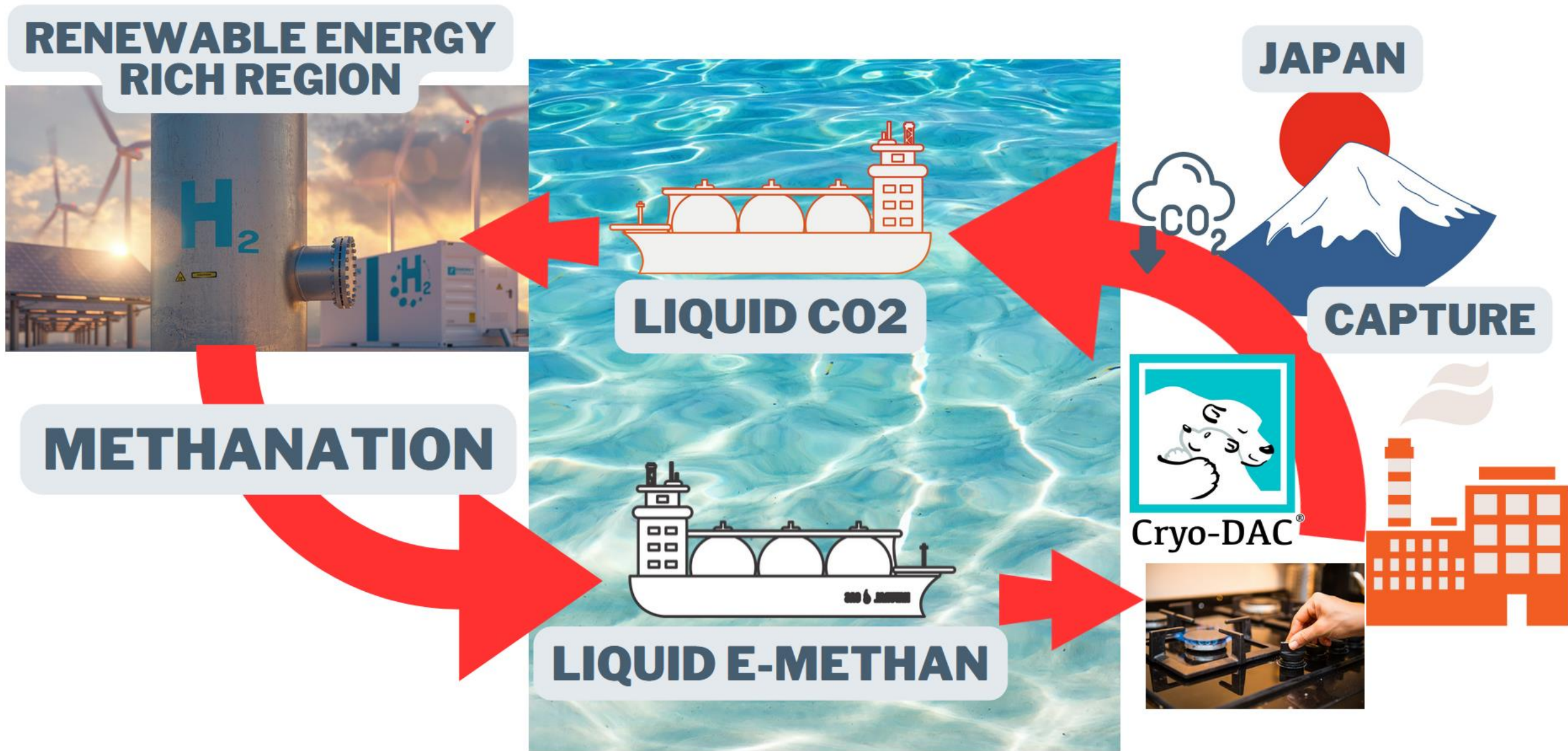
# ライフサイクルアセスメント(Cryo-DAC商用スケール)



- Cryo-DACの商用スケール (200,000 t-CO<sub>2</sub>/y)を想定したライフサイクルでのCO<sub>2</sub>排出量を試算
- 資本財からのCO<sub>2</sub>排出量は、プロセスシミュレーターASPENと国立環境研究所の「産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)」に基づいて試算
- CO<sub>2</sub>排出係数は、NEDO推奨値を使用
- 資本財由来のCO<sub>2</sub>排出量は約20万トン、年あたり(プラント寿命20年)約1万トンとなる

Year	kg-CO <sub>2</sub> /kWh
2020	0.506
2030	0.158
2040	0.00665

# Cryo-DAC<sup>®</sup>とメタネーションによる炭素循環システム



# Cryo-DACとメタネーションによる炭素循環システム

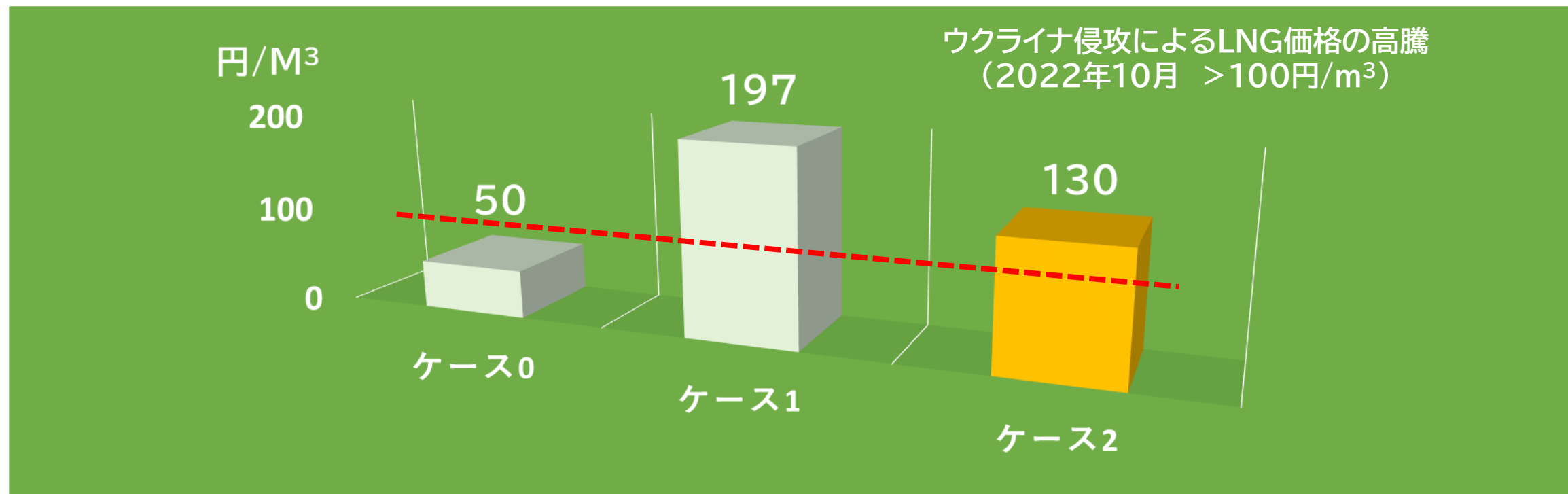
	国内CO2回収・海外CNメタン
水電解(水素製造)	海外
水素輸送	—
CO <sub>2</sub> 回収 (回収方法)	日本 (Cryo-DAC/分離回収)
CO <sub>2</sub> 輸送	日本 → 海外
メタネーション $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	海外
合成メタン輸送	海外 → 日本
備考	中東など



# e-methane with Cryo-DAC<sup>®</sup> のコスト

中京大学経済学部 山田光男名誉教授

ケース0	現行のLNG
ケース1	Cryo-DAC <sup>®</sup> によるDACやポイントソースからCO <sub>2</sub> を回収、これを海外に輸送して、現行のLNGの100%をe-methaneに置き換え 水素価格として30円/Nm <sup>3</sup> (2030年政府目標)、CO <sub>2</sub> 回収コストとして現行到達可能レベルを想定
ケース2	ケース1から水素価格を20円/Nm <sup>3</sup> (2050年政府目標)に、CO <sub>2</sub> 回収コストを5~6割削減に変更



# Cryo-DAC<sup>®</sup> 開発スケジュール



2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029

開始

原理検証

中間評価

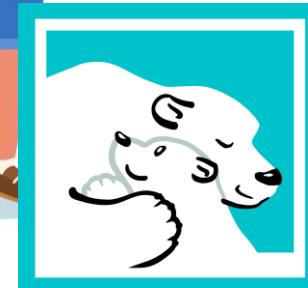
現在

ベンチプラント設計・建設・運転

パイロットプラント設計・建設・運転

Cryo-DAC<sup>®</sup>

原理検証、中間評価を経て、大気から年間数～数十トンのCO<sub>2</sub>を直接回収可能な連続試験を予定（～2029）



8月8日・火曜日 2023年（令和5年）

## CO<sub>2</sub>直接回収に LNG未利用冷熱

日揮ホールディング 他社との差別化要因に  
ス(HD)は名古屋大学 なる。(戸村智幸)  
と共同で、液化天然ガ  
ス(LNG)受け入れ基  
地の未利用冷熱を活用  
し、大気中の二酸化炭  
素(CO<sub>2</sub>)を直接回  
収する技術「DAC」  
の開発を進めている。  
社会全体でDACが確  
立していない中で、設  
計・調達・建設(EP  
C)を得意とするLN  
G関連設備と組み合わ  
せて実用化できれば、

### 日揮 × 名大

後、受け入れ基地で海  
水をかけて気体に戻  
す。その際に周囲の熱  
を奪うことで冷熱が発  
生するが、利用されて  
いない。  
日揮HDの国内事業  
会社の日揮(横浜市西  
区)は、名大院工学研  
究科の則永行庸教授が  
開発した技術を活用  
し、共同で実用化に取  
り組んでいる。  
CO<sub>2</sub>回収で一般的  
なアミン吸収液による  
化学吸収法がベース  
で、吸収塔、再生塔、  
昇華槽という機器を用  
意する。最終工程の昇  
華槽にLNGの未利用  
冷熱を活用するのが特  
徴だ。

### 圧力差利用でエネ消費抑制

CO<sub>2</sub>を冷熱で冷や  
して固体(ドライアイ  
ス)にすることで回収  
する。各機器の圧力差  
を利用し、エネルギー  
消費を抑えられるのが  
利点だ。

日揮の藤本高義プロ  
シエクトソリユーショ  
ン本部エネルギーソリ  
ユーシオン部プロジェ  
クトマネージャは  
「DACが確立できて  
いない中で、当社が貢  
献できないかと思っ  
ていたと明かす。

今後の計画では、ベ  
ンチプラントを名大に  
設置し、2024年度  
後半にも稼働させる。

27-28年度には年50ト  
回収するパイロットプ



ラントを稼働し、29年 画だ。名大院の則永教  
度には商用プラントの 授は「大気中のCO<sub>2</sub> 地だ。  
概念設計を完了する計 は低濃度なので、効率  
は低濃度なので、効率

よく回収す 技術総合開発機構(N  
る設備が必 EDO)の事業で取り  
要になる」 組んでおり、東邦ガス  
と今後を展 も参画しているため  
望する。 だ。

商用化に 日揮HDは国内外で  
向けては、CO<sub>2</sub>の回収・貯留  
パイロット (CCS)設備を建設し  
プラントの た実績があり、実証中  
設置先の確 の案件も多い。これら  
保が不可欠 は天然ガス精製、LN  
だが、ある Gプラントなど上流向  
程度めどが けだ。

ついでい LNG受け入れ基地  
る。東邦ガ という下流向けの今回  
CO<sub>2</sub>吸収 技術を実用化できれ  
・再生ラポ ば、LNGの一連の商  
の試験装置 流にCO<sub>2</sub>回収ビジネ  
の実験 スを展開できる。

- LNG冷熱を利用した「CO<sub>2</sub>冷却固化減圧再生型化学吸収式DACおよびCO<sub>2</sub>回収技術」の開発を、実用化時の担い手となる産(ユーザー、エンジ、化学)と連携し、進めている
- コア技術(吸収液等)を開発し、プロセスシミュレーションに基づく所要熱エネルギー、回収コストの試算により、本技術のポテンシャルを確認
- 現在、ベンチスケール連続試験装置を製作中、次年度後半の稼働@名大を計画

ご清聴有り難うございました。

