

# CO2 パイプラインの技術的ガイドラインに関する調査

## 報 告 書

令和 6 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会



# CO2 パイプラインの技術的ガイドラインに関する調査 報告書

## 目 次

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 1. はじめに.....                               | 1  |
| 2. CO2 パイプラインに関する国外の技術指針等の調査.....          | 2  |
| 2.1 概要.....                                | 2  |
| 2.2 技術指針等の構成.....                          | 3  |
| 2.2.1 国際標準規格 ISO 27913:2016.....           | 3  |
| 2.2.2 民間技術指針 DNV-RP-F104.....              | 3  |
| 2.2.3 英国規格 BSI PD 8010-1:2015+A1:2016..... | 5  |
| 2.2.4 米国法規 49 CFR Part 195.....            | 8  |
| 2.3 各技術指針等の比較対照.....                       | 16 |
| 3. CO2 パイプラインに関する技術的ガイドラインに関する情報整理.....    | 18 |
| 3.1 概要.....                                | 18 |
| 3.2 海外事故データベース等からの CO2 パイプライン事故事例の調査.....  | 18 |
| 3.2.1 海外パイプライン事故データベース.....                | 18 |
| 3.2.2 データ分析.....                           | 18 |
| 3.2.3 CO2 パイプライン事故事例 – Denbury 社事故.....    | 21 |
| 3.2.4 Denbury 社事故後の米国規制動向.....             | 26 |
| 3.3 CO2 パイプライン事故を想定した海外の実験・解析事例の調査.....    | 29 |
| 3.3.1 概要.....                              | 29 |
| 3.3.2 CO2EUROPIPE.....                     | 30 |
| 3.3.3 COOLTRANS.....                       | 39 |
| 3.3.4 COSHER <sup>1)</sup> .....           | 45 |
| 4. おわりに.....                               | 52 |

添付 1 国外 CO2 パイプライン技術指針等対照表



## 1. はじめに

2020 年 10 月、菅義偉総理（当時）は 2050 年カーボンニュートラル（CN）の実現を目指すことを宣言し、また、2021 年 4 月には、2050 年 CN 目標と整合的で野心的な目標として、2030 年度に温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することを目指すこと、さらに、50%の高みに向け挑戦を続けることを表明した。この大きなチャレンジを円滑に実現するためには、足元で必要な石油・天然ガス等の安定供給を確保しつつ、2050 年 CN 社会の実現に向けた移行期に加え、CN 社会実現後においても利用が見込まれる化石燃料の脱炭素化のための技術を導入・拡大するための方策が必要である。また、2050 年 CN 目標達成に向けては、電化や水素化等による脱炭素化を最大限進めても排出される CO<sub>2</sub> について、これを回収し、地下に貯留する「CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage)」の活用が不可欠と考えられる。

CCS において、分離回収した CO<sub>2</sub> の主要な輸送手段としてパイプラインの使用が想定されているが、本邦には現状、CO<sub>2</sub> パイプラインに関する技術的な知見が十分に蓄積されているとは言い難い。今後の円滑な CCS の推進に向けて、CO<sub>2</sub> パイプラインの技術標準化と保安の確保を図る必要がある。

本調査は、国外における CO<sub>2</sub> パイプラインの技術的指針、ガイドライン、事件事例等の調査を行うものである。

## 2. CO2 パイプラインに関する国外の技術指針等の調査

### 2.1 概要

調査対象とした国外技術指針（法規、技術規格）を以下に列記する。

#### 1) 国際標準規格 ISO 27913:2016, Carbon dioxide capture, transportation and geological storage -

##### Pipeline transportation systems

適用対象： 液相/超臨界相、気相 CO2 パイプライン

選定理由： CO2 パイプラインに関する国際標準規格。現行版は液相/超臨界相が主体だが、改訂作業中の新版は気相に関する記述が拡充される予定。

#### 2) 民間技術指針 DNV-RP-F104, Design and operation of carbon dioxide pipelines

適用対象： 液相/超臨界相、気相 CO2 パイプライン

選定理由： ISO 27913:2016 が策定されるまで、前版の DNV-RP-J202 が国際的に唯一の CO2 パイプライン技術指針であった。

#### 3) 英国規格 BSI PD 8010-1:2015+A1:2016, Pipeline systems - Steel pipelines on land

適用対象： 石油、ガス、CO2（気液）、および危険物質の陸上パイプライン

選定理由： 2015 年に CO2 を追加して全面改訂された。

#### 4) 米国の法規 49 CFR Part 195, Transportation of Hazardous Liquids by Pipeline

適用対象： 液相/超臨界相 CO2 など危険液体パイプライン（気相 CO2 は対象外）

選定理由： CO2 パイプラインが広く普及している米国の連邦法規である。

なお、国外のパイプライン技術指針等としては、このほかにも以下のようなものがある。これらは CO2 パイプラインにも適用されるが、CO2 に関する記述はさほど詳しくないため、本調査の対象外とする。

#### カナダ規格 CSA Z662:23, Oil and gas pipeline systems

適用対象： 石油、ガスパイプライン（CO2 含む）

発行元： CSA Group

#### オーストラリア規格 AS 2885, Pipelines - Gas and liquid petroleum

適用対象： 石油、ガスパイプライン（CO2 含む）

発行元： Standards Australia

## 2.2 技術指針等の構成

### 2.2.1 国際標準規格 ISO 27913:2016

ISO 27913 は、国際標準化機構（International Organization for Standardization）により、2016 年 11 月に初版がリリースされた。現在、技術委員会 ISO/TC265 により改訂作業が進められており、間もなく改訂版がリリースされる予定である。

適用対象は、液相/超臨界相、および気相の陸上・海洋 CO<sub>2</sub> パイプラインであるが、相対的に気相についての記述は少ない。改訂版では、気相に関する記述が大幅に拡充される見込みである。また、Normative references（他基準参照）として以下の 2 規格が挙げられており、従来の一般的な石油ガスパイプラインに関する要求事項はこれら既存規格を参照するものとし、本規格では CO<sub>2</sub> パイプラインに特化した技術内容を中心に述べている。

ISO 3183:2012, Petroleum and natural gas industries - Steel pipe for pipeline transportation systems

ISO 20765-2, Natural gas - Calculation of thermodynamic properties -

Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application

表 2.2-1 に ISO 27913:2016 の構成を示す。内容的に、後述の DNV-RP-F104 を参考に行っているものと推察される。

### 2.2.2 民間技術指針 DNV-RP-F104

DNV-RP-F104 は、ノルウェー・オスロに本部を置く国際的第三者認証機関 DNV AS が発行する、CO<sub>2</sub> パイプラインに関する Recommended Practice（推奨規範）である。作成・改訂履歴を以下に示す。

2010 年 4 月 DNV-RP-J202, Design and Operation of CO<sub>2</sub> Pipelines 発行

2017 年 11 月 内容改訂。文書番号を RP-J202 から RP-F104 に変更

2019 年 9 月 RP-J202（July 2017 edition）の廃止に伴う再発行

2021 年 2 月 部分改訂

2021 年 9 月 社名変更に伴う文書番号変更（DNVGL-RP-F104 から DNV-RP-F104 へ）

適用対象は、液相/超臨界相、および気相の陸上・海洋 CO<sub>2</sub> パイプラインであるが、相対的に気相についての記述は少ない。これは、本指針作成当時の欧州における CO<sub>2</sub> パイプラインが、ノルウェーの Snøhvit 海底パイプライン（2008 年運開、8"×153 km、圧力 150 bar、液相）のみであったことも理由の 1 つであると推察される。

表 2.2-2 に DNV-RP-F104 の構成を示す。

表 2.2-1 ISO 27913:2016 の構成

| Part    | 大項目                                                                                                                                                                                                                        | 小項目                                                                        |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Scope<br>適用対象                                                                                                                                                                                                              |                                                                            |
| 2       | Normative references<br>他基準の参照                                                                                                                                                                                             |                                                                            |
| 3       | Terms and definitions<br>用語と定義                                                                                                                                                                                             |                                                                            |
| 4       | Symbols, abbreviated terms and units<br>記号、略語、単位                                                                                                                                                                           |                                                                            |
| 5       | Properties of CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> streams and mixing of CO <sub>2</sub> streams influencing pipeline transportation<br>パイプライン輸送に影響を与える CO <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> ストリームおよび CO <sub>2</sub> ストリーム混合物の特性 | CO <sub>2</sub> 物性、熱力学、化学反応と腐食                                             |
| 6       | Concept development and design criteria<br>コンセプト形成と設計基準                                                                                                                                                                    | 安全思想、設計基準、CO <sub>2</sub> PL の信頼性と可用性、短期貯蔵、第三者アクセス、システム設計の原則、脱水、流量保証、レイアウト |
| 7       | Materials and pipeline design<br>材料とパイプライン設計                                                                                                                                                                               | 内面腐食、ラインパイプ材質、管厚計算、追加措置                                                    |
| 8       | Construction<br>施工                                                                                                                                                                                                         | 試運転準備                                                                      |
| 9       | Operation<br>運用                                                                                                                                                                                                            | 試運転、検査・監視・試験                                                               |
| 10      | Re-qualification of existing pipelines for CO <sub>2</sub> service<br>既存パイプラインの CO <sub>2</sub> 転用のための再認可                                                                                                                  |                                                                            |
| Annex A | (informative) Composition of CO <sub>2</sub> streams<br>(参考) CO <sub>2</sub> ストリームの組成                                                                                                                                      |                                                                            |
| Annex B | (informative) CO <sub>2</sub> characteristics<br>(参考) CO <sub>2</sub> の特性                                                                                                                                                  | CO <sub>2</sub> の偶発的な流出、流出速度、拡散モデル                                         |
| Annex C | (informative) Internal corrosion and erosion<br>(参考) 内面腐食とエロージョン                                                                                                                                                           | 内面腐食の最小化対策、不純物の影響、内面腐食制御、エロージョン最小化対策                                       |
| Annex D | (informative) Use of the modified Battelle Two-Curve Model<br>(参考) 修正 Battelle Two-Curve モデルの使用                                                                                                                            |                                                                            |
| Annex E | (informative) Data requirements for an integrity management plan<br>(参考) 健全性管理計画のデータ要件                                                                                                                                     |                                                                            |
|         | Bibliography<br>参考文献                                                                                                                                                                                                       |                                                                            |

表 2.2-2 DNV-RP-F104 の構成

| Section    | 大項目                                                                                  | 小項目                                                               |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1          | General<br>概要                                                                        | 前書き、目的、取扱い範囲、適用対象、参照規格、定義と略語                                      |
| 2          | Specific properties of CO2<br>CO2 の特性                                                | 純粋 CO2 の物理的性質、CO2 ストリームの組成                                        |
| 3          | Safety philosophy<br>安全思想                                                            | リスクの体系的レビュー、設計におけるリスクの基本、安全性評価                                    |
| 4          | Concept development and design premises<br>コンセプト形成と設計前提                              | 設計コンセプトの形成、設計前提、設計原則                                              |
| 5          | Materials and pipeline design<br>材料とパイプライン設計                                         | 材料選定、非金属材料、腐食、管厚設計、高速延性破壊の抑止設計、疲労、水素脆化                            |
| 6          | Construction<br>施工                                                                   | プレコミ（試運転準備）                                                       |
| 7          | Operation<br>運用                                                                      | 試運転、健全性管理システム、緊急時対応計画、運転管理と手順、リスク評価と健全性管理計画、検査・監視・試験、健全性評価活動、対応活動 |
| 8          | Re-qualification of existing pipelines to CO2 pipelines<br>既設パイプラインの CO2 パイプラインへの再認可 | 既設パイプラインの CO2 パイプラインへの再認可の基本、再認可プロセス                              |
| 9          | Bibliography<br>図書目録                                                                 |                                                                   |
| Appendix A | Cross references to pipeline standards.<br>パイプライン規格の相互参照                             |                                                                   |

### 2.2.3 英国規格 BSI PD 8010-1:2015+A1:2016

英国規格協会（British Standards Institution, BSI）が発行するパイプライン技術規格 PD 8010 シリーズは、次のような構成となっている。

|                        |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PD 8010-1:2015+A1:2016 | Pipeline systems - Steel pipelines on land. Code of practice<br>陸上鋼製パイプライン                                                                                                                                                                               |
| PD 8010-2:2015+A1:2016 | Pipeline systems - Subsea pipelines. Code of practice<br>海底パイプライン                                                                                                                                                                                        |
| PD 8010-3:2009+A1:2013 | Pipeline systems - Steel pipelines on land. Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammables. Supplement to PD 8010-1:2004<br>陸上鋼製パイプラインのリスク評価適用指針 |
| PD 8010-4:2012         | Pipeline systems - Steel pipelines on land and subsea pipelines. Code of practice for integrity management                                                                                                                                               |

## 陸上および海底の鋼製パイプラインの健全性管理

PD 8010-5:2013

Pipeline systems - Subsea pipelines. Guide to operational practice  
海底パイプラインの運転指針

※ Code of practice：実施規準、実施規則 Guide：指針

このうち PD 8010-1 は、従来は石油・天然ガス等を対象流体とするものであったが、2015 年に National Grid plc（旧 British Gas を併合した会社）が実施した COOLTRANS（CO<sub>2</sub>Liquid pipeline TRANSPORTation）研究プログラムの成果を取込み、CO<sub>2</sub> が追加された。現在の適用範囲は次のとおりとなっている。

- ・ 鋼製陸上パイプラインシステムの設計、選定、仕様、使用材料、ルート、用地取得、建設、設置、試験、運用、保守、廃棄に関する推奨事項とガイダンス。
- ・ 海底パイプラインは適用範囲外（PD 8010-2）。
- ・ 石油、ガス、二酸化炭素、および爆発性、可燃性、毒性、反応性、または人や環境に害を及ぼしやすい性質を持つ危険なその他の物質。温度 -25～+120 °C。

表 2.2-3 に、PD 8010-1 の構成を示す。

なお、英国においては、BSI PD 8010 シリーズのほか、次のようなパイプライン技術基準があるが、現状では CO<sub>2</sub> には対応していない。

IGEM (Institution of Gas Engineers and Managers) TD (Transmission and Distribution)/1 Edition 6,  
Steel pipelines for high pressure gas transmission

- ・ 最新版は 2021 年 11 月発行。
- ・ 適用範囲は天然ガス大規模輸送用陸上鋼管パイプラインおよび関連設備の建設、運営、保守。

European Standard BS EN 14161:2011+A1:2015,  
Petroleum and natural gas industries. Pipeline transportation systems

- ・ 2003 年に、BS 8010-1:1989, BS 8010-2.8:1992, BS 8010-3:1993 が廃止され、その代替として初版リリース。
- ・ 石油および天然ガス産業で輸送に使用されるパイプラインシステムの設計、材料、構造、テスト、運用、保守、廃止。
- ・ 陸上および海底の鋼製パイプラインを対象。

表 2.2-3 PD 8010-1 の構成

| Section | 大項目                                                                        | 小項目                                                                                                                        |
|---------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Scope<br>適用範囲                                                              |                                                                                                                            |
| 2       | Normative references<br>他基準の参照                                             |                                                                                                                            |
| 3       | Terms, definitions, symbols and abbreviations<br>用語、定義、記号、略語               |                                                                                                                            |
| 4       | Health, safety and assurance<br>健康、安全、保証                                   | 健康・安全・環境、性能保証、品質保証、設計・建設・試運転の保証、運用と廃棄の保証、計画と図面                                                                             |
| 5       | Design - System and safety<br>設計 - システムと安全性                                | システム定義、物質の分類、パイプラインプロセス設計、公共の安全と環境の保護、パイプラインシステムの設置場所、ルート選定                                                                |
| 6       | Design - Mechanical integrity<br>設計 - 機械的健全性                               | 設計基準、荷重、強度、安定性、架設パイプライン、耐震解析、その他の活動、横断と障害物、トレンチレス技術、不利な地盤条件、セクション隔離バルブの位置、健全性の監視、漏洩検知、製作部材 - スラッグキャッチャー、サポートとアンカー、アンカーブロック |
| 7       | Design - Stations and terminals<br>設計 - ステーションとターミナル                       | 場所の選定、レイアウト、セキュリティ、安全性、建物、機器、配管、緊急停止システム、電気、冷暖房ステーション、計測・通信システム、監視・通信システム                                                  |
| 8       | Design - Materials and coatings<br>設計 - 材料と塗装                              | ラインパイプ、パイプライン部材、バルブ、ピグトラップ・閉止蓋、絶縁継手、パイプ継手、その他の耐圧部材、コーティング                                                                  |
| 9       | Design - Corrosion management<br>設計 - 腐食管理                                 | 内面腐食の評価、内面腐食の軽減、外面腐食の評価、外面腐食の軽減、監視プログラムと方法、腐食管理図書                                                                          |
| 10      | Construction - Fabrication and installation<br>施工 - 製作と敷設                  | 安全計画と手順、施工計画、他の周辺施設工事、装置と機器、資材の輸送と取り扱い、施工監理、作業期間、現場管理、環境問題、ルートの準備、パイプラインの敷設、横断、パイプラインマーカ、クリーニングと測定、タイイン溶接、施工後の塗装調査、弧状推進、記録 |
| 11      | Construction - Testing<br>施工 - 試験                                          | 安全性、装置、耐圧試験、試験の種類とレベル、試験手順、合否基準、試験後の手順、試験時損傷の修復、耐圧試験されていない接合溶接部（ゴールドデン溶接部）、事前試験、試験の文書と記録、試験後のパイプラインの保護、健全性気密試験             |
| 12      | Pre-commissioning and commissioning<br>プレコミ（試運転前作業）と試運転                    | パイプライン内容物の廃棄、クリーニング、乾燥、輸送物の導入、運転中パイプラインへの接続、機器やシステムの機能試験、図書と記録                                                             |
| 13      | Operation, maintenance and integrity assurance management<br>運用、保守、健全性保証管理 | 管理体制、運転、健全性保証管理、設計条件の変更                                                                                                    |

| Section | 大項目                                                                                                                                                          | 小項目      |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 14      | Abandonment<br>廃止                                                                                                                                            | 廃止の手配、記録 |
| Annex A | (informative) Extent of pipeline systems for conveying oil and gas that are covered by this part of PD 8010<br>(参考) PD 8010 の本パートでカバーされる石油・ガス輸送パイプラインシステムの範囲 |          |
| Annex B | (normative) Quality assurance<br>(規範)品質保証                                                                                                                    |          |
| Annex C | (normative) Records and document control<br>(規範) 記録と図書の管理                                                                                                    |          |
| Annex D | (informative) Hazards in pipeline design<br>(参考) パイプライン設計における危険性                                                                                             |          |
| Annex E | (normative) Safety evaluation of pipelines<br>(規範) パイプラインの安全性                                                                                                |          |
| Annex F | (normative) Pipeline route selection<br>(標準) パイプラインルートを選定                                                                                                    |          |
| Annex G | (normative) Loads<br>(標準) 荷重                                                                                                                                 |          |
| Annex H | (informative) Buckling<br>(参考) 座屈                                                                                                                            |          |
| Annex I | (informative) Planning and legal<br>(参考) 計画と法務                                                                                                               |          |

#### 2.2.4 米国法規 49 CFR Part 195

連邦規則集 (the Code of Federal Regulations, CFR) は、アメリカ合衆国の連邦政府により連邦官報の中で公布される、一般的かつ永続的な規則・規定を集成した法典である。アメリカ合衆国の行政法として位置づけられることもある。発行元は、アメリカ国立公文書記録管理局連邦官報事務局 (Office of the Federal Register) である。Title 1 から Title 50 ままで構成され、そのうち Title 49: Transportation (49 CFR と表記) は米国運輸省 Department of Transportation の所管となっている。

49 CFR の構成を表 2.2-4 および表 2.2-5 に示す。このうち Subtitle B Chapter I : Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Department of Transportation が、運輸省パイプライン危険物安全局 (PHMSA) が所轄する規則である。

49 CFR Subtitle B Chapter I の中で、49 CFR Part 195 : Transportation of Hazardous Liquids by Pipeline (195.0 – 195.591) において、CO<sub>2</sub> (液相、超臨界) 輸送の保安関連規制が定められている。

なお、天然ガス等のガスの輸送についての保安規制は、49 CFR Subtitle B Chapter I の中で 49 CFR Part 192 : Transportation of Natural and Other Gas by Pipeline: Minimum Federal Safety Standards (192.1 – 192.1015) に示されているが、CO<sub>2</sub> についての記載は腐食防止関連で数か所現れるのみであり、気相の CO<sub>2</sub> 輸送について特有の保安規制は見当たらない。

表 2.2-4 49 CFR Subtitle B の構成

| Subtitle/Chapter | Title                                                                                | Part / Section |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Subtitle A       | Office of the Secretary of Transportation                                            | 1 – 99         |
| Subtitle B       | Other Regulations Relating to Transportation                                         | 100 – 1699     |
| Chapter I        | Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Department of Transportation | 100 – 199      |
| Chapter II       | Federal Railroad Administration, Department of Transportation                        | 200 – 299      |
| Chapter III      | Federal Motor Carrier Safety Administration, Department of Transportation            | 300 – 399      |
| Chapter IV       | Coast Guard, Department of Homeland Security                                         | 400 – 499      |
| Chapter V        | National Highway Traffic Safety Administration, Department of Transportation         | 500 – 599      |
| Chapter VI       | Federal Transit Administration, Department of Transportation                         | 600 – 699      |
| Chapter VII      | National Railroad Passenger Corporation (Amtrak)                                     | 700 – 799      |
| Chapter VIII     | National Transportation Safety Board                                                 | 800 – 999      |
| Chapter X        | Surface Transportation Board                                                         | 1000 – 1399    |
| Chapter XI       | Research and Innovative Technology Administration, Department of Transportation      | [Reserved]     |
| Chapter XII      | Transportation Security Administration, Department of Homeland Security              | 1500 – 1699    |

表 2.2-5 49 CFR Subtitle B Chapter I の構成

| Chapter/Part  | Title                                                                                      | Part / Section      |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Chapter I     | Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Department of Transportation       | 100 – 199           |
| Subchapter A  | Hazardous Materials and Oil Transportation                                                 | 100 – 110           |
| Subchapter B  | Oil Transportation                                                                         | 130                 |
| Subchapter C  | Hazardous Materials Regulations                                                            | 171 – 185           |
| Subchapter D  | Pipeline Safety                                                                            | 186 – 199           |
| Parts 186–189 |                                                                                            | [Reserved]          |
| Part 190      | Pipeline Safety Enforcement and Regulatory Procedures                                      | 190.1 – 190.411     |
| Part 191      | Transportation of Natural and Other Gas by Pipeline: Annual, Incident, and Other Reporting | 191.1 – 191.29      |
| Part 192      | Transportation of Natural and Other Gas by Pipeline: Minimum Federal Safety Standards      | 192.1 – 192.1015    |
| Part 193      | Liquefied Natural Gas Facilities: Federal Safety Standards                                 | 193.2001 – 193.2917 |
| Part 194      | Response Plans for Onshore Oil Pipelines                                                   | 194.1 – 194.121     |
| Part 195      | Transportation of Hazardous Liquids by Pipeline                                            | 195.0 – 195.591     |
| Part 196      | Protection of Underground Pipelines from Excavation Activity                               | 196.1 – 196.211     |
| Part 197      |                                                                                            | [Reserved]          |
| Part 198      | Regulations for Grants to Aid State Pipeline Safety Programs                               | 198.1 – 198.63      |
| Part 199      | Drug and Alcohol Testing                                                                   | 199.1 – 199.245     |

Part 195: Transportation of Hazardous Liquids by Pipeline の構成を表 2.2-6 に示す。§ 195.1 に記載のとおり、本パートの対象となるのは、「大陸棚外（Outer Continental Shelf）のパイプライン施設を含む、州間または外国の事業用、またはそれらに影響を及ぼすパイプライン施設およびそれらの施設に関連する危険液体または CO2 の輸送」である。定義上、気相 CO2 は適用対象外である。

表 2.2-6 49 CFR 195 の構成

| Section   | 英語タイトル                                                                                                    | 和訳                                       |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Subpart A | General                                                                                                   | 一般                                       |
| 195.0     | Scope.                                                                                                    | 適用範囲                                     |
| 195.1     | Which pipelines are covered by this Part?                                                                 | どんなパイプラインがこのパートの対象となるか?                  |
| 195.2     | Definitions.                                                                                              | 定義                                       |
| 195.3     | What documents are incorporated by reference partly or wholly in this part?                               | どのような文書が参照によりこのパートに部分的または全体的に組み込まれているか?  |
| 195.4     | Compatibility necessary for transportation of hazardous liquids or carbon dioxide.                        | 危険な液体または二酸化炭素の輸送に必要な適合性                  |
| 195.5     | Conversion to service subject to this part.                                                               | このパートに従うサービスへの変換                         |
| 195.6     | Unusually Sensitive Areas (USAs).                                                                         | 極めて敏感なエリア (USAs)                         |
| 195.8     | Transportation of hazardous liquid or carbon dioxide in pipelines constructed with other than steel pipe. | 鋼管以外で建設されたパイプラインによる危険液体または二酸化炭素の輸送       |
| 195.9     | Outer continental shelf pipelines.                                                                        | 外縁大陸棚（領海外大陸棚）パイプライン                      |
| 195.10    | Responsibility of operator for compliance with this part.                                                 | このパートを遵守するための事業者の責任                      |
| 195.11    | What is a regulated rural gathering line and what requirements apply?                                     | 規制された周辺部のギャザリングラインとは何か?またどのような要件が適用されるか? |
| 195.12    | What requirements apply to low-stress pipelines in rural areas?                                           | 周辺部の低応力パイプラインにはどのような要件が適用されるか?           |
| 195.13    | What requirements apply to pipelines transporting hazardous liquids by gravity?                           | 危険な液体を重力で輸送するパイプラインにはどのような要件が適用されるか?     |
| 195.15    | What requirements apply to reporting-regulated-only gathering lines?                                      | 報告規制のみのギャザリングラインにはどのような要件が適用されるか?        |
| 195.18    | How to notify PHMSA.                                                                                      | PHMSA に通知する方法                            |
| Subpart B | Annual, Accident, and Safety-Related Condition Reporting                                                  | 年次、事故、および安全関連の状況報告                       |
| 195.48    | Scope.                                                                                                    | 適用範囲                                     |
| 195.49    | Annual report.                                                                                            | 年次報告書                                    |
| 195.50    | Reporting accidents.                                                                                      | 事故の報告                                    |
| 195.52    | Immediate notice of certain accidents.                                                                    | 特定の事故の即時通知                               |
| 195.54    | Accident reports.                                                                                         | 事故報告                                     |
| 195.55    | Reporting safety-related conditions.                                                                      | 安全関連の状況を報告する                             |

| Section   | 英語タイトル                                                 | 和訳                    |
|-----------|--------------------------------------------------------|-----------------------|
| 195.56    | Filing safety-related condition reports.               | 安全関連の状態報告書の提出         |
| 195.58    | Report submission requirements.                        | レポート提出要件              |
| 195.59    | Abandonment or deactivation of facilities.             | 施設の放棄または停止            |
| 195.60    | Operator assistance in investigation.                  | 事業者の調査支援              |
| 195.61    | National Pipeline Mapping System.                      | 全国パイプライン マッピング システム   |
| 195.63    | OMB control number assigned to information collection. | 情報収集に割り当てられる OMB 管理番号 |
| 195.64    | National Registry of Operators.                        | 事業者の国家登録簿             |
| 195.65    | Safety data sheets.                                    | 安全データシート              |
| Subpart C | Design Requirements                                    | 設計要件                  |
| 195.100   | Scope.                                                 | 適用範囲                  |
| 195.101   | Qualifying metallic components other than pipe.        | パイプ以外の金属部品の認定         |
| 195.102   | Design temperature.                                    | 設計温度                  |
| 195.104   | Variations in pressure.                                | 圧力の変化                 |
| 195.106   | Internal design pressure.                              | 内部設計圧力                |
| 195.108   | External pressure.                                     | 外部圧力                  |
| 195.110   | External loads.                                        | 外部荷重                  |
| 195.111   | Fracture propagation.                                  | 破壊の伝播                 |
| 195.112   | New pipe.                                              | 新しいパイプ                |
| 195.114   | Used pipe.                                             | 使用済みパイプ               |
| 195.116   | Valves.                                                | バルブ                   |
| 195.118   | Fittings.                                              | 継手                    |
| 195.120   | Passage of internal inspection devices.                | 内部検査装置の通過             |
| 195.122   | Fabricated branch connections.                         | 組み立てられた分岐接続           |
| 195.124   | Closures.                                              | クロージャーク               |
| 195.126   | Flange connection.                                     | フランジ接続                |
| 195.128   | Station piping.                                        | 設備配管                  |
| 195.130   | Fabricated assemblies.                                 | 組み立てられたアセンブリ          |
| 195.132   | Design and construction of aboveground breakout tanks. | 地上ブレイクアウトタンクの設計と建設    |
| 195.134   | Leak detection.                                        | 漏洩検知                  |
| Subpart D | Construction                                           | 施工                    |
| 195.200   | Scope.                                                 | 適用範囲                  |

| Section | 英語タイトル                                                                                                                     | 和訳                                         |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 195.202 | Compliance with specifications or standards.                                                                               | 仕様または規格への準拠                                |
| 195.204 | Inspection-general.                                                                                                        | 検査 - 一般                                    |
| 195.205 | Repair, alteration and reconstruction of aboveground breakout tanks that have been in service.                             | 運用中の地上ブレイクアウトタンクの修理、改造および再建                |
| 195.206 | Material inspection.                                                                                                       | 材料検査                                       |
| 195.207 | Transportation of pipe.                                                                                                    | パイプの輸送                                     |
| 195.208 | Welding of supports and braces.                                                                                            | サポートとブレースの溶接                               |
| 195.210 | Pipeline location.                                                                                                         | パイプラインの場所                                  |
| 195.212 | Bending of pipe.                                                                                                           | パイプの曲げ                                     |
| 195.214 | Welding procedures.                                                                                                        | 溶接手順                                       |
| 195.216 | Welding: Miter joints.                                                                                                     | 溶接: マイタージョイント                              |
| 195.222 | Welders and welding operators: Qualification of welders and welding operators.                                             | 溶接工および溶接事業者: 溶接工および溶接事業者の資格                |
| 195.224 | Welding: Weather.                                                                                                          | 溶接: 天候                                     |
| 195.226 | Welding: Arc burns.                                                                                                        | 溶接: アーク燃焼                                  |
| 195.228 | Welds and welding inspection: Standards of acceptability.                                                                  | 溶接および溶接検査: 許容基準                            |
| 195.230 | Welds: Repair or removal of defects.                                                                                       | 溶接: 欠陥の修理または除去                             |
| 195.234 | Welds: Nondestructive testing.                                                                                             | 溶接: 非破壊検査                                  |
| 195.246 | Installation of pipe in a ditch.                                                                                           | 溝へのパイプの設置                                  |
| 195.248 | Cover over buried pipeline.                                                                                                | 埋設パイプラインを覆う                                |
| 195.250 | Clearance between pipe and underground structures.                                                                         | パイプと地下構造物との間の隙間                            |
| 195.252 | Backfilling.                                                                                                               | 埋め戻し                                       |
| 195.254 | Above ground components.                                                                                                   | 地上コンポーネント                                  |
| 195.256 | Crossing of railroads and highways.                                                                                        | 鉄道と高速道路の横断                                 |
| 195.258 | Valves: General.                                                                                                           | バルブ: 一般                                    |
| 195.260 | Valves: Location.                                                                                                          | バルブ: 位置                                    |
| 195.262 | Pumping equipment.                                                                                                         | ポンプ装置                                      |
| 195.264 | Impoundment, protection against entry, normal/emergency venting or pressure/ vacuum relief for aboveground breakout tanks. | 地上ブレイクアウトタンクの貯留、侵入に対する保護、通常/緊急排気または圧力/真空解放 |
| 195.266 | Construction records.                                                                                                      | 工事記録                                       |

| Section   | 英語タイトル                                                                                          | 和訳                                        |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Subpart E | Pressure Testing                                                                                | 耐圧試験                                      |
| 195.300   | Scope.                                                                                          | 適用範囲                                      |
| 195.302   | General requirements.                                                                           | 一般要件                                      |
| 195.303   | Risk-based alternative to pressure testing older hazardous liquid and carbon dioxide pipelines. | 古い危険な液体および二酸化炭素のパイプラインの耐圧試験に代わるリスクベースの代替案 |
| 195.304   | Test pressure.                                                                                  | 試験圧力                                      |
| 195.305   | Testing of components.                                                                          | コンポーネントの試験                                |
| 195.306   | Test medium.                                                                                    | 試験媒体                                      |
| 195.307   | Pressure testing aboveground breakout tanks.                                                    | 地上ブレイクアウトタンクの耐圧試験                         |
| 195.308   | Testing of tie-ins.                                                                             | タイインのテスト                                  |
| 195.310   | Records.                                                                                        | 記録                                        |
| Subpart F | Operation and Maintenance                                                                       | 運用および保守                                   |
| 195.400   | Scope.                                                                                          | 適用範囲                                      |
| 195.401   | General requirements.                                                                           | 一般要件                                      |
| 195.402   | Procedural manual for operations, maintenance, and emergencies.                                 | 運用、保守、緊急時の手順マニュアル                         |
| 195.403   | Emergency response training.                                                                    | 緊急対応訓練                                    |
| 195.404   | Maps and records.                                                                               | 地図と記録                                     |
| 195.405   | Protection against ignitions and safe access/egress involving floating roofs.                   | 浮き屋根を伴う発火および安全な出入りに対する保護                  |
| 195.406   | Maximum operating pressure.                                                                     | 最高使用圧力                                    |
| 195.408   | Communications.                                                                                 | 通信                                        |
| 195.410   | Line markers.                                                                                   | ラインマーカー                                   |
| 195.412   | Inspection of rights-of-way and crossings under navigable waters.                               | 航行可能水域における通行権および交差点の検査                    |
| 195.413   | Underwater inspection and reburial of pipelines in the Gulf of Mexico and its inlets.           | メキシコ湾とその入り江におけるパイプラインの水中検査と再埋設            |
| 195.414   | Inspections of pipelines in areas affected by extreme weather and natural disasters.            | 異常気象および自然災害の影響を受ける地域におけるパイプラインの検査         |
| 195.416   | Pipeline assessments.                                                                           | パイプラインの評価                                 |
| 195.417   | Notification of potential rupture.                                                              | 破裂の可能性に関する通知                              |
| 195.418   | Valves: Onshore valve shut-off for rupture mitigation.                                          | バルブ: 破裂を軽減するための陸上バルブの遮断                   |
| 195.419   | Valve capabilities.                                                                             | バルブの機能                                    |
| 195.420   | Valve maintenance.                                                                              | バルブのメンテナンス                                |

| Section   | 英語タイトル                                                                                                               | 和訳                                |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 195.422   | Pipeline repairs.                                                                                                    | パイプラインの修理                         |
| 195.424   | Pipe movement.                                                                                                       | パイプの動き                            |
| 195.426   | Scraper and sphere facilities.                                                                                       | スクレーパーとスフィアの設備                    |
| 195.428   | Overpressure safety devices and overfill protection systems.                                                         | 過圧安全装置と過充填防止システム                  |
| 195.430   | Firefighting equipment.                                                                                              | 消火機器                              |
| 195.432   | Inspection of in-service breakout tanks.                                                                             | 稼働中のブレイクアウトタンクの検査                 |
| 195.434   | Signs.                                                                                                               | 兆候                                |
| 195.436   | Security of facilities.                                                                                              | 施設のセキュリティ                         |
| 195.438   | Smoking or open flames.                                                                                              | 喫煙または裸火                           |
| 195.440   | Public awareness.                                                                                                    | 国民の意識                             |
| 195.442   | Damage prevention program.                                                                                           | 被害防止プログラム                         |
| 195.444   | Leak detection.                                                                                                      | 漏洩検知                              |
| 195.446   | Control room management.                                                                                             | コントロールルームの管理                      |
| 195.450   | Definitions.                                                                                                         | 定義                                |
| 195.452   | Pipeline integrity management in high consequence areas.                                                             | 重大影響エリアにおけるパイプラインの健全性管理           |
| 195.454   | Integrity assessments for certain underwater hazardous liquid pipeline facilities located in high consequence areas. | 重大影響エリアにある特定の水中危険液体パイプライン施設の健全性評価 |
| Subpart G | Qualification of Pipeline Personnel                                                                                  | パイプライン要員の資格                       |
| 195.501   | Scope.                                                                                                               | 適用範囲                              |
| 195.503   | Definitions.                                                                                                         | 定義                                |
| 195.505   | Qualification program.                                                                                               | 資格プログラム                           |
| 195.507   | Recordkeeping.                                                                                                       | 記録の保存                             |
| 195.509   | General.                                                                                                             | 一般事項                              |
| Subpart H | Corrosion Control                                                                                                    | 腐食制御                              |
| 195.551   | What do the regulations in this subpart cover?                                                                       | このサブパートの規制は何をカバーしているか?            |
| 195.553   | What special definitions apply to this subpart?                                                                      | このサブパートにはどのような特別な定義が適用されるか?       |
| 195.555   | What are the qualifications for supervisors?                                                                         | スーパーバイザーの資格にはどのようなものがあるか?         |
| 195.557   | Which pipelines must have coating for external corrosion control?                                                    | 外部腐食防止のためにコーティングが必要なパイプラインはどれか?   |
| 195.559   | What coating material may I use for external corrosion control?                                                      | 外部腐食防止にはどのようなコーティング材を使用できるか?      |

| Section    | 英語タイトル                                                                                                 | 和訳                                                  |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 195.561    | When must I inspect pipe coating used for external corrosion control?                                  | 外部腐食防止に使用されるパイプのコーティングはいつ検査する必要があるか?                |
| 195.563    | Which pipelines must have cathodic protection?                                                         | どのパイプラインに陰極防食が必要か?                                  |
| 195.565    | How do I install cathodic protection on breakout tanks?                                                | ブレイクアウトタンクに陰極防食を取り付けるにはどうすればよいのか?                   |
| 195.567    | Which pipelines must have test leads and what must I do to install and maintain the leads?             | どのパイプラインにテスト リードが必要か? リードの設置と保守には何を必要とする必要があるか?     |
| 195.569    | Do I have to examine exposed portions of buried pipelines?                                             | 埋設されたパイプラインの露出部分を調査する必要があるか?                        |
| 195.571    | What criteria must I use to determine the adequacy of cathodic protection?                             | 陰極防食の適切性を判断するにはどのような基準を使用する必要があるか?                  |
| 195.573    | What must I do to monitor external corrosion control?                                                  | 外部腐食制御を監視するには何をしなければならないか?                          |
| 195.575    | Which facilities must I electrically isolate and what inspections, tests, and safeguards are required? | どの施設を電氣的に絶縁する必要があるか? また、どのような検査、試験、安全対策が必要か?        |
| 195.577    | What must I do to alleviate interference currents?                                                     | 干渉電流を軽減するにはどうすればよいのか?                               |
| 195.579    | What must I do to mitigate internal corrosion?                                                         | 内部腐食を軽減するにはどうすればよいのか?                               |
| 195.581    | Which pipelines must I protect against atmospheric corrosion and what coating material may I use?      | どのパイプラインを大気腐食から保護する必要があるか? また、どのようなコーティング材料を使用できるか? |
| 195.583    | What must I do to monitor atmospheric corrosion control?                                               | 大気腐食制御を監視するには何をしなければならないか?                          |
| 195.585    | What must I do to correct corroded pipe?                                                               | 腐食したパイプを修復するにはどうすればよいのか?                            |
| 195.587    | What methods are available to determine the strength of corroded pipe?                                 | 腐食したパイプの強度を判断するにはどのような方法があるか?                       |
| 195.588    | What standards apply to direct assessment?                                                             | 直接評価にはどのような基準が適用されるか?                               |
| 195.589    | What corrosion control information do I have to maintain?                                              | どのような腐食管理情報を維持する必要があるか?                             |
| 195.591    | In-Line inspection of pipelines.                                                                       | パイプラインのインライン検査                                      |
| Appendix A | Delineation Between Federal and State Jurisdiction—Statement of Agency Policy and Interpretation       | 連邦管轄と州管轄の境界線 - 政府機関の方針と解釈の声明                        |
| Appendix B | Risk-Based Alternative to Pressure Testing Older Hazardous Liquid and Carbon Dioxide Pipelines         | 古い危険液体および二酸化炭素パイプラインの耐圧試験に代わるリスクベースの代替手段            |
| Appendix C | Guidance for Implementation of an Integrity Management Program                                         | 健全性管理プログラムの実施に関するガイダンス                              |

## 2.3 各技術指針等の比較対照

国外技術指針、規格類では、CO<sub>2</sub> やパイプラインに関する専門の用語が使用されている。このうち、特に注意を要する用語の補足説明を表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 英語用語の定義と訳語

| 英語用語                   | 定義、訳語                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub> stream | ISO 27913: stream consisting overwhelmingly of carbon dioxide<br>DNV-RP-F104: consisting overwhelmingly of carbon dioxide with a limited fraction of other chemical substances<br>一定程度の不純物成分を含む実用上の CO <sub>2</sub> の流れ。本書では「CO <sub>2</sub> ストリーム」と記載する。                                                                                        |
| critical point         | ISO 27913: highest temperature and pressure at which a pure substance (e.g. CO <sub>2</sub> ) can exist as a gas and a liquid in equilibrium. For a multicomponent fluid mixture of a given composition, the critical point is the merge of the bubble and the dew point curves.<br>純物質において、気相－液相間の相転移が起こりうる温度および圧力の上限点。混合物においては、沸騰線と凝縮線の接続点。    |
| dense phase            | ISO 27913: CO <sub>2</sub> in its liquid or supercritical phases<br>DNV-RP-F104: collective term for CO <sub>2</sub> in its liquid or supercritical phases<br>液相 CO <sub>2</sub> と超臨界相 CO <sub>2</sub> の総称。本書では「濃密相」と記載する。                                                                                                                       |
| ductile fracture       | ISO 27913: mechanism which takes place by the propagation of a crack or stress-raising features, linked with a considerable amount of plastic deformation<br>材料に応力を加えたとき、塑性変形を伴って破壊に至る現象。延性破壊。<br>(塑性変形を伴わない破壊を脆性破壊という)<br>パイプラインの一部が損傷して内部流体が噴出した際、き裂伝播速度が流体の減圧波の進行速度より大きければ、き裂はパイプ長手方向に進展して大規模なバーストに至る。これをパイプラインの高速延性破壊という。                    |
| in-line inspection     | DNV-RP-F104: inspection of a pipeline from the interior of the pipe using an ILI tool. The tools used to conduct ILI are known as pigs, smart pigs, or intelligent pigs.<br>検査ピグによるパイプライン内部走行検査。本書では、「ピグ検査」と記載する。                                                                                                                                |
| MAOP<br>または MOP        | maximum (allowable) operating pressure<br>最高使用圧力                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| operator               | DNV-RP-F104: party ultimately responsible for the concept development, design, construction, and operation of the pipeline. The operator may change between phases.<br>PD 8010: person or organization having control over the conveyance of fluid through a pipeline system at any time during all stages of its life cycle<br>本書では、「事業者」と記載する。 |
| pre-commissioning      | 試運転前における耐圧試験や脱水などの手順や準備。本書では、「プレコミッショニング」「プレコミ」と記載する。                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

上述した 4 種類の国外技術指針等について、設計、施工、保安等の項目別に表 2.3-2 に示す比較項目に沿って整理した。

表 2.3-2 国外技術指針等の比較項目

|                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 適用範囲                                                                                                                                                     |
| 2. CO <sub>2</sub> の特性<br>単成分 CO <sub>2</sub> の性質<br>不純物を含む CO <sub>2</sub> ストリームの特性                                                                        |
| 3. 安全思想<br>リスク管理<br>流体の分類<br>ロケーションクラス<br>安全性評価<br>CO <sub>2</sub> の危険性<br>品質保証                                                                             |
| 4. システム設計<br>設計容量（輸送能力）<br>圧力・温度条件<br>水分、不純物濃度の上限設定<br>設置場所・離隔・ルート選定<br>運転制御・安全システム<br>漏洩検知システム<br>脱水設備<br>区間分割・遮断弁<br>放散設備<br>ポンプ・コンプレッサステーション<br>ピグステーション |
| 5. 材料設計<br>ラインパイプ材料<br>コーティング<br>非金属材料<br>腐食対策<br>管厚計算と強度                                                                                                   |
| 6. 施工<br>プレコミッショニング・耐圧試験                                                                                                                                    |
| 7. 運用・保守<br>試運転・初期充填<br>健全性管理システム<br>緊急時対応計画<br>運転管理と手順<br>リスク評価と健全性管理計画<br>点検・健全性監視<br>健全性評価<br>補修                                                         |
| 8. 既存のパイプラインの CO <sub>2</sub> パイプラインへの再認可                                                                                                                   |

### 3. CO2 パイプラインに関する技術的ガイドラインに関する情報整理

#### 3.1 概要

国外の CO2 パイプライン技術指針のほか、CO2 パイプラインに関する技術的ガイドラインに関する情報を整理する。具体的には、国外の CO2 パイプライン事故事例や対策に係る情報、本邦の既往のパイプライン関連技術基準を対象とする。

#### 3.2 海外事故データベース等からの CO2 パイプライン事故事例の調査

##### 3.2.1 海外パイプライン事故データベース

石油およびガスのパイプラインについては、複数の機関からパイプライン事故のデータベースが公開されている。公開元としては、米国運輸省パイプライン危険物安全局 (PHMSA: Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration)、米国運輸安全委員会 (NTSB: National Transportation Safety Board)、欧州ガスパイプライン事故データグループ (EGIG: European Gas pipeline Incident data Group)、英国陸上パイプライン運営者協会 (UKOPA: the United Kingdom Onshore Pipeline Operators' Association)、英国安全衛生庁 (HSE: Health and Safety Executive) などがある。この中で、米国の PHMSA は、石油、ガスおよび危険液体 (CO2 含む) パイプラインに関する事故のデータを収集している。米国以外では、CO2 パイプラインの運用実績は限られているため、PHMSA のデータベース (<https://catalog.data.gov/dataset/pipeline-accident-incident-reports-hazardous-liquid-accident-data-january-2010-to-present-/resource/53111181-e64b-4dbe-bbfe-7205f8f628d0>) が事実上、唯一の CO2 パイプライン事故データベースといえる<sup>1)</sup>。

PHMSA は、パイプラインによる危険物の安全な輸送を保証するための米国国家規制プログラムを管理している。パイプラインの安全規制 (49 CFR 191/195) によれば、事業者はパイプライン事故発生から 30 日以内に事故報告書を通じて通知する必要がある。対象が、有害な液体または二酸化炭素の放出では、49 CFR 195.50 の規定に該当した以下の場合に事故報告書が必要になる<sup>2)</sup>。

- ・ 事業者 (または運用者、運営者) が意図的に設定していない爆発または火災
- ・ 5 ガロン (19 リットル) 以上の危険な液体または二酸化炭素の放出。パイプラインの保守活動から生じる 5 バレル (0.6 立方メートル) 以上の放出
- ・ 死亡者、入院を必要とする人身傷害
- ・ 50,000 ドルを超える、清掃および回収の費用、紛失した製品の価値、および事業者または他者、またはその両方の財産への損害を含む推定財産損害

##### 3.2.2 データ分析

PHMSA によると、1968 年から 2022 年までに米国で 8,667 km の陸上 CO2 パイプラインが設置され、そのほとんどが石油増進回収 (EOR) 用途である。PHMSA では、2004 年から 2023 年までの米国の CO2 パイプラインの総延長距離の推移が km 単位で報告されている。米国では、CO2 を輸送するために最初にパイプラインが建設されたのは 1963 年に遡るが、インフラの大部分は

---

<sup>1</sup> V.Matteo ら、Statistical analysis of incidents on onshore CO2 pipelines based on PHMSA database

<sup>2</sup> <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-D/part-195/subpart-B/section-195.50>

1980 年から 1990 年の間に建設された。2004 年以前のデータがデータベースから取得できないため、図 3.2-1 には 2004 年からの CO2 パイプラインの延長距離の推移を示す。

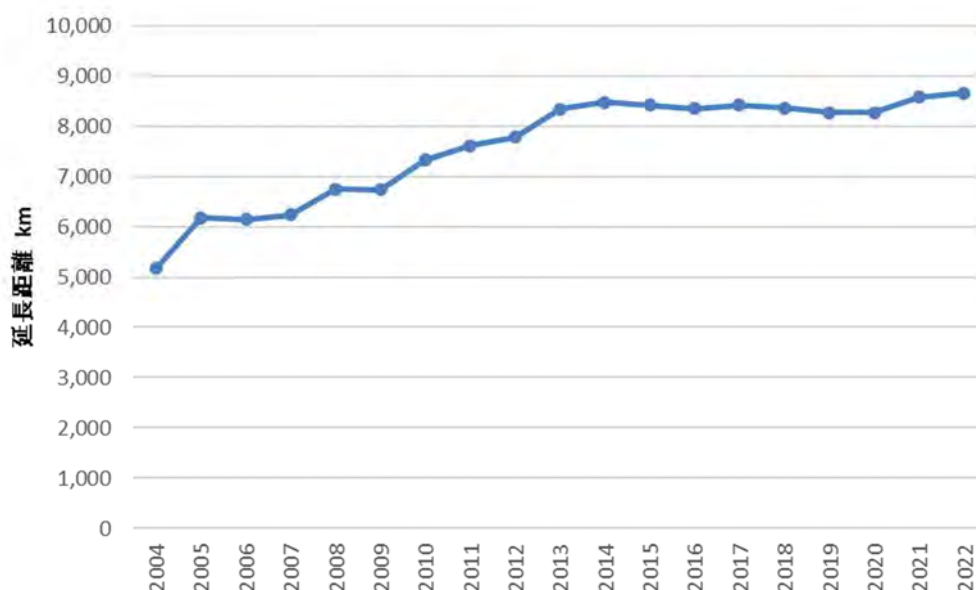


図 3.2-1 米国の CO2 パイプライン総延長距離の推移<sup>3)</sup>

CO2 パイプラインに関連して記録された事故に関しては、1994 年から 2023 年の間に合計 119 件の事故が PHMSA データベースに記録された。図 3.2-2 は、1994 年から 2021 年までの期間に記録された CO2 パイプラインの事故数を示している。合計は、120 件で、平均は、4.0 件/年であった。負傷者、死亡者はなかった。

PHMSA データベースは、1986 年～ 2001 年 1 月（63 項目）、2002 年 2 月～ 2009 年（259 項目）、2010 年以降（648 項目）の 3 期間で、収集しているデータ項目の見直しが行われている。後の期間になるほど、多項目のデータ収集が行われており、事故と原因に関する詳細な分析が可能となっている。

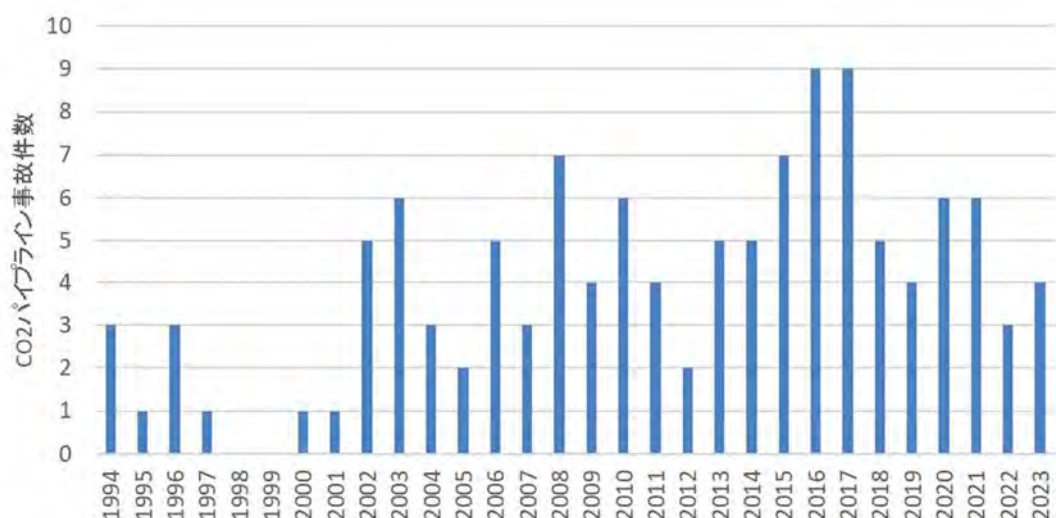


図 3.2-2 CO2 パイプライン事故件数の推移

<sup>3</sup> <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/annual-report-mileage-summary-statistics>

PHMSA データベースでは、事故原因が、「設備故障」、「パイプや溶接部の損傷」、「腐食」、「誤操作」、「その他の外力による損傷」、「自然による損傷」、「掘削による損傷」、および「その他の事故」の8項目に分類されている。図 3.2-3 に CO2 パイプラインの事故原因の割合を示す。

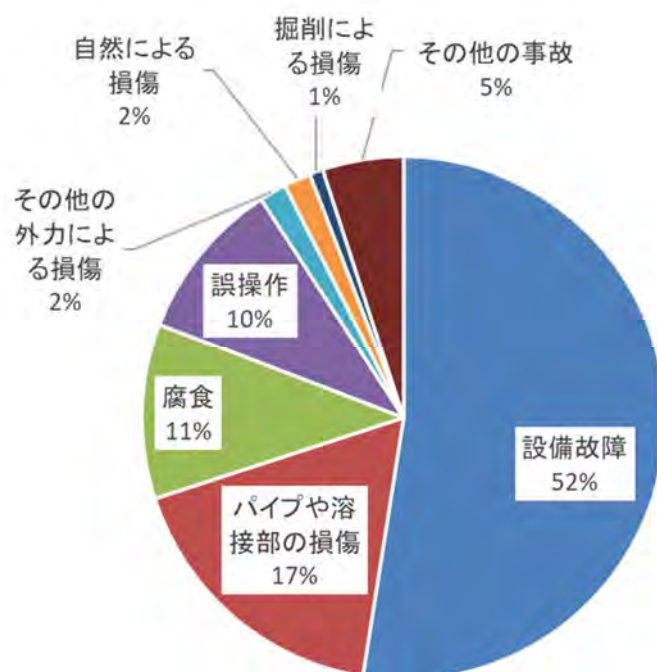


図 3.2-3 CO2 パイプラインの事故原因の割合 (1994~2023 年)

事故原因でもっとも多いのは「設備故障」の 52%であった。その内容としては、リリースバルブ関係とねじ以外の継手が多いことが、2010 年以降のデータ期間から分かった。2 番目に多いのは、「パイプや溶接部の損傷」の 17%であった。詳細情報のある 2010 年以降のデータ期間では、9 件中で溶接部 3 件、溶接部以外 6 件であった。3 番目の「腐食」は 11%であった。詳細情報のある 2010 年以降のデータ期間では、7 件すべてが外面腐食であった。

損傷の形態については、詳細情報のある 2010 年以降のデータ期間について整理を行った。図 3.2-4 に損傷の形態別割合を示す。リークは、全体の 84%であった。破裂は 3%で、周方向と長手方向のものが 1 件ずつあった。その他には、被害額が大きかった 2020 年のミシシッピ州 Satartia の大雨による土砂崩れで、パイプラインが破断し CO2 が放出された事故が含まれている。

また、表 3.2-1 に形態別の被害額と表 3.2-2 に非意図的放出量を示す。この区分では、破裂の最大値はリークを上回っているわけではない。その他には、2020 年のミシシッピ州 Satartia の事故が含まれており、この件が最大値となり、同時に平均値にも影響を与えている。ここで、放出量としては、事故発生時の非意図的放出量を使用した。2010 年以降のデータ期間では、事故後の設備復旧のための意図的な CO2 の放散量を分けて集計されている。

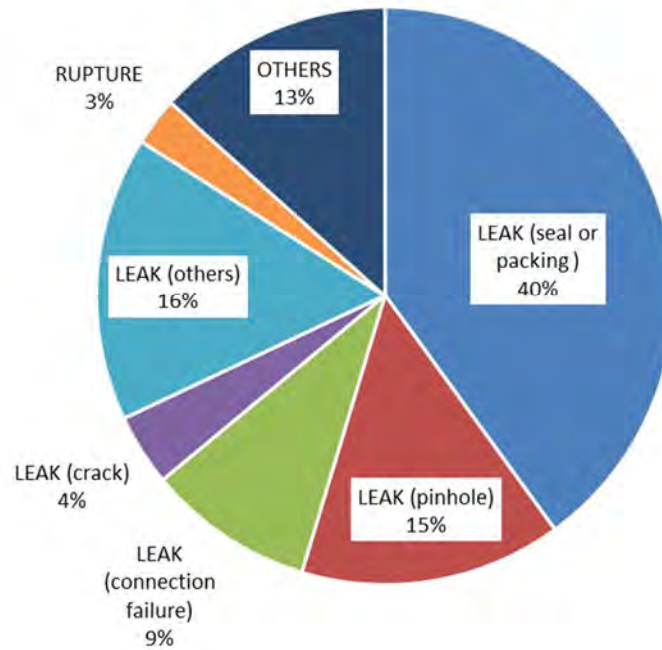


図 3.2-4 CO2 パイプライン事故における損傷の形態 (2010 年以降)

表 3.2-1 損傷の形態別被害額 (2010 年以降) : 単位米ドル

|     | 合計        | 最大        | 最小     | 平均      |
|-----|-----------|-----------|--------|---------|
| リーク | 1,332,151 | 359,466   | 1      | 21,145  |
| 破裂  | 216,927   | 180,151   | 36,776 | 108,464 |
| その他 | 4,224,766 | 3,947,009 | 600    | 422,477 |

表 3.2-2 損傷の形態別非意図的 CO2 放出量 (2010 年以降) : 単位バレル

|     | 合計     | 最大     | 最小 | 平均    |
|-----|--------|--------|----|-------|
| リーク | 9,012  | 2,530  | 0  | 143   |
| 破裂  | 281    | 281    | 18 | 149   |
| その他 | 55,484 | 41,177 | 0  | 5,548 |
| 合計  | 64,777 |        |    |       |

### 3.2.3 CO2 パイプライン事故事例 — Denbury 社事故

PHMSA パイプライン事故データベースのうち最大規模である、2020 年 2 月にミシシッピ州 Yazoo 郡 Satartia で発生した Denbury 社 CO2 パイプライン事故事例を、PHMSA の事故調査報告書<sup>4)</sup>を元に

<sup>4</sup> <https://www.phmsa.dot.gov/news/phmsa-failure-investigation-report-denbury-gulf-coast-pipelines-llc>

紹介する。事故発生前対応と事故後対応に不十分な点が報告されており、最後に指摘事項としてまとめた。これらの内容が、その後の PHMSA による規制動向に反映されている。

#### (1) 事故発生 CO2 パイプライン

名 称 : Delhi Pipeline  
運 営 : Denbury Gulf Coast Pipelines LLC  
用 途 : 陸上油田の石油増進回収 (EOR) 用  
材 質 : API 5L X80  
製造方法 : ERW (電縫管)  
口径、管厚 : 外径 24 インチ (609.6 mm) × 厚さ 0.540 インチ (13.7 mm)  
圧 力 : 設計圧力 14.9 MPa、事故当時の運転圧力 9.7 MPa

図 3.2-5 に事故発生地点の地図を示す。Delhi Pipeline は、Jackson Dome を起点として、Delhi までの 77 マイルである。Jackson Dome には天然 CO2 ガス田があり、EOR のために CO2 が輸送されている。事故発生地点 (星印) に最も近い遮断弁 (MLBVs: mainline block valves) は、Satartia と Tinsley にあり、その区間は約 9.55 マイルであった。図 3.2-6 に事故発生地点の近傍の地図を示す。Delhi パイプラインは緑の線、バッファゾーンは赤線の内側であり、事故発生地点 (星印) は Satartia の中心から 1 マイルのところにある。

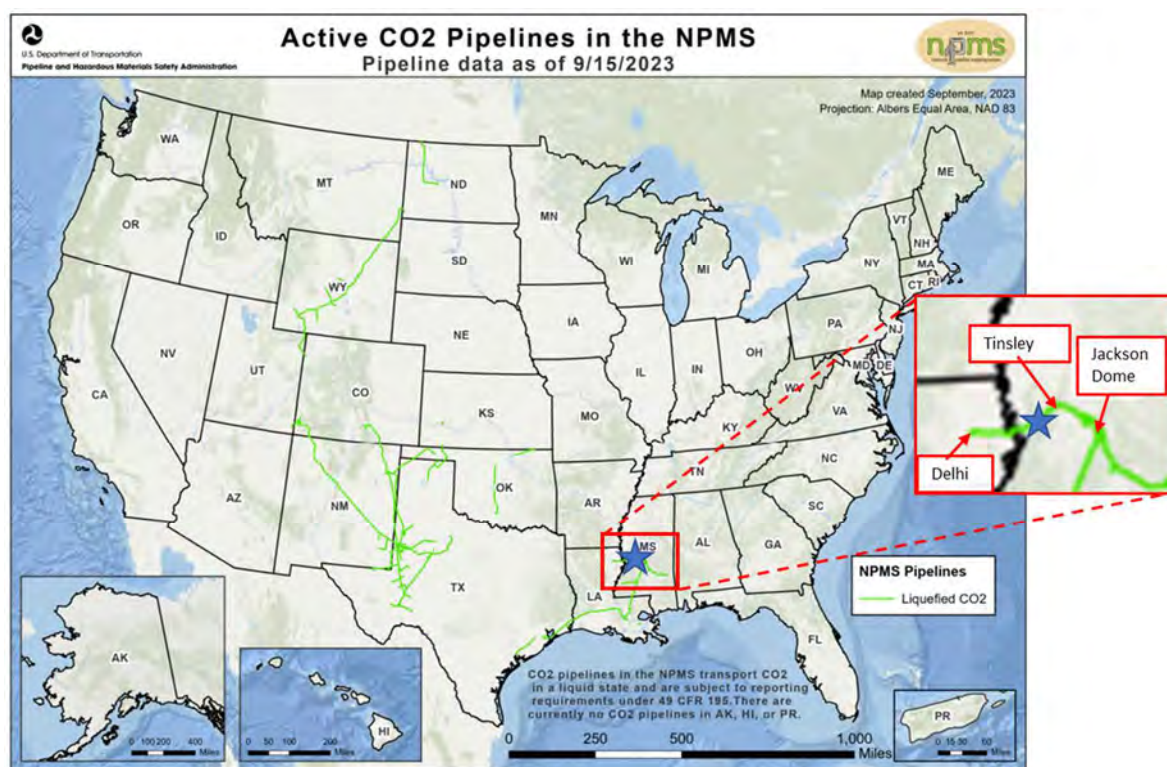


図 3.2-5 事故発生地点の広域地図<sup>5)</sup>

<sup>5)</sup> [https://www.npms.phmsa.dot.gov/Documents/NPMS\\_CO2\\_Pipelines\\_Map.pdf](https://www.npms.phmsa.dot.gov/Documents/NPMS_CO2_Pipelines_Map.pdf) に加筆



図 3.2-6 事故発生地点と Delhi パイプライン、バッファゾーン、Satartia の地形図

## (2) 発生状況

- ・ 2020 年 2 月 22 日 19:06<sup>6</sup>、ミシシッピ州 Satartia の南東約 1 マイルにあるハイウェイ 433 号線に隣接する法面で豪雨により地滑りが発生し、パイプラインの軸方向の歪みが生じ、周溶接部の破損が生じた。
- ・ 破断部位撤去後の観察では、鋼管自体や溶接部には原因となるような欠陥は観察されていない。破断面の外観からは延性破壊と脆性破壊の両方の可能性がみてとれる。漏洩が始まり、液体 CO<sub>2</sub> の気化に伴う温度降下により脆性破壊に至った可能性がある。
- ・ その後、CO<sub>2</sub> の放出により土砂が飛散しクレーターが形成された。CO<sub>2</sub> 放出時の液相から気相への相変化による冷却作用により、その付近は氷の層で覆われた。クレーターの深さは下流（ハイウェイ 433 号線）側で推定 40 フィート、上流側で約 4 フィートであった。
- ・ パイプラインは閉鎖されたが、パイプライン内の残りの CO<sub>2</sub> は数時間にわたって大気中に放出され続けた。CO<sub>2</sub> は空気より重くクレーターの中に留まったが、排出量が増加すると、CO<sub>2</sub> を分散させるほどの風が吹かなかったため、CO<sub>2</sub> はクレーターからあふれ出して西に移動し、谷に流れ込み、Satartia に到達した。

図 3.2-7 および図 3.2-8 に事故発生地点の状況を示す。自動車はハイウェイ 433 号に停車している。白く見えるのは CO<sub>2</sub> 放出で発生した氷結土壤部で、中央に破断したパイプが見える。ハイウェイ 433 号下の埋設深さは 9m 以上あった。青の矢印は北を示す。左下に横方向からの拡大写真を示す。パイプ径の 1/3 程度の隙間と左右方向に数インチのオフセットが見られる。

<sup>6</sup> 米国中部標準時間（CST : Central Standard Time）

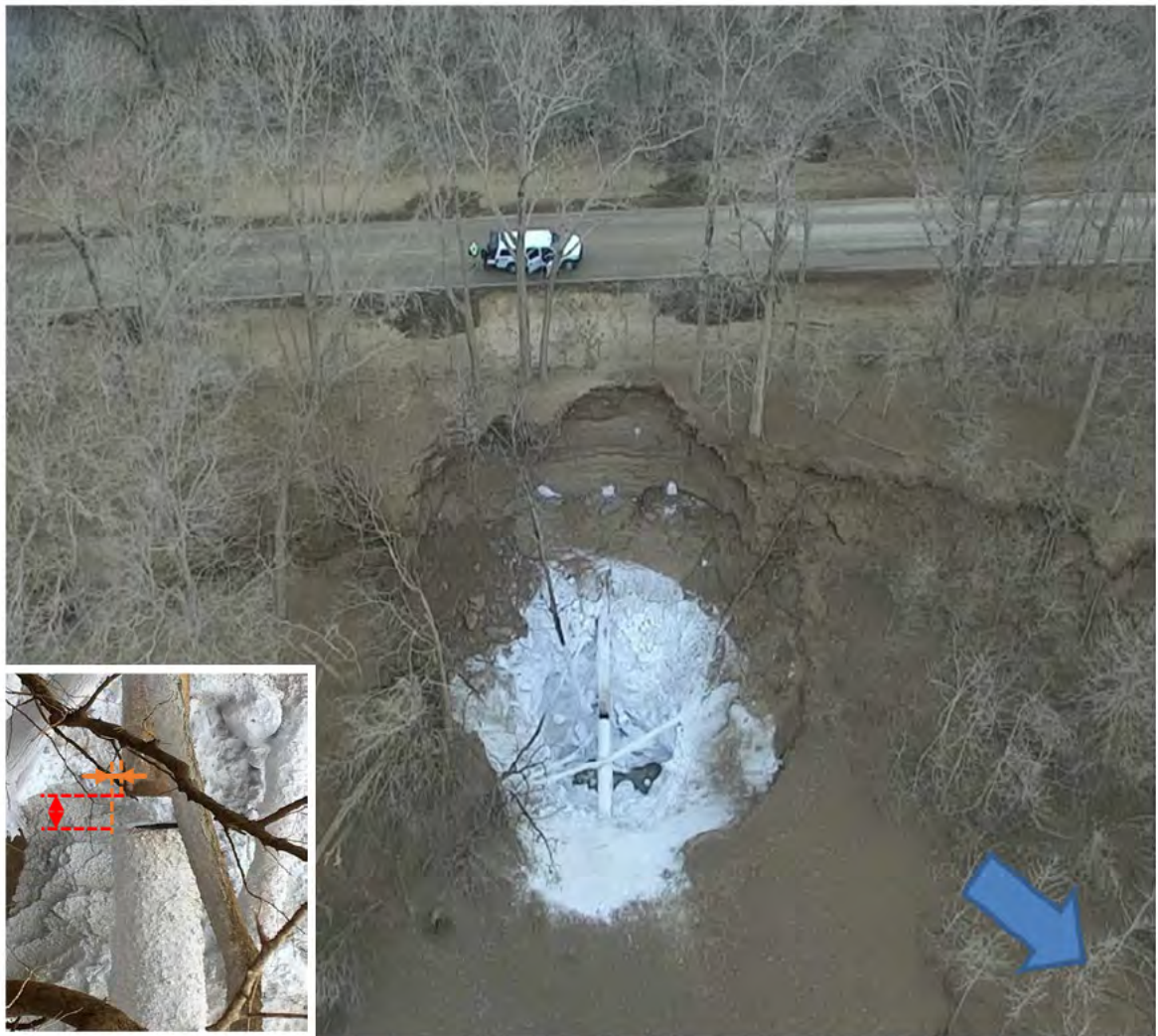


図 3.2-7 事故発生地点（ドローンによる空中撮影、ミシシッピ緊急管理局の提供）



図 3.2-8 パイプライン破断箇所（白い箇所）と周囲の地滑り部<sup>7</sup>

<sup>7</sup> <https://www.citact.org/ccs-indiana>

### (3) 対応状況

- ・ CO2 パイプライン破裂後、Denbury 社制御室では、監視制御およびデータ収集システム (SCADA) により、パイプラインの圧力低下の警報を得て、19:14 にメインライン遮断バルブで破裂部分を遠隔で閉鎖した。
- ・ 塩素ガス漏れの可能性から、ハイウェイ 433 号線閉鎖を地元当局が命令した。その後、ガス放出の音を聞いたという情報があり、CO2 と硫化水素の放出の可能性への取組に変更した（当該 CO2 には硫化水素が含まれていた）。
- ・ Yazoo 郡危機管理室は、国立気象局のブルームモデルにより、Satartia 住民に避難を指示した。
- ・ 現場に向かった消防署長は事故指揮官 (Incident Commander) として CO2 パイプラインが破裂したことを確認し、Denbury 社に連絡した。
- ・ Denbury 社の最初の担当者が、メインライン遮断バルブの閉鎖確認後、パイプライン破裂現場近くに到着した。
- ・ Denbury 社 Plano 事業所の代表者が、国家対応センター (NRC: National Response Center) に事故の報告を電話で行った (21:06)。

### (4) 被害状況

- ・ 住民 200 名が避難し、45 名が病院に搬送されたが入院者はいなかった。
- ・ 死亡者は報告されていない。
- ・ 当該パイプライン中の CO2 は、天然 CO2 ガス田から採掘されたものであり、硫化水素が含まれていた。初期段階の被害者の症状は、硫化水素の吸引による体調不良であった<sup>8)</sup>。病院へ搬送された人の中に初期対応者も含まれていたとの記事も見られる<sup>9)</sup>。
- ・ 推定合計 31,405 バレル (約 3,745 m<sup>3</sup>) の CO2 が放出された。

### (5) 指摘事項

- ・ Denbury 社の O&M 手順は、地盤変状のリスクに関する以前の経験と知識があるにもかかわらず、土壌の不安定性によるパイプライン損傷の可能性に対処していなかった。
- ・ Denbury 社の健全性管理マニュアル IMP (Integrity Management Program) は、完全性の脅威の特定や地盤災害の評価、予防策や軽減策については言及していない。
- ・ Denbury 社の空中パトロールでは、事故前の崩壊箇所には地殻災害は確認されていなかった。
- ・ Denbury 社の CO2 分散モデルは、放出によって影響を受ける可能性のある潜在的な影響地域を過小評価していた。その結果、当該パイプライン区間は HCA (High Consequence Area)

---

<sup>8</sup> PHMSA の Denbury 社への通知文では「Meanwhile the Yazoo County Office of Emergency Management (Yazoo County OEM) began receiving reports around 7:15 p.m. CST of a foul smell along Highway 433 and an individual having a possible seizure.」とあり、異臭により病院搬送者が発生としている ([https://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports/enforce/documents/42022017NOPV/42022017NOPV\\_PCO%20PCP\\_0526022\\_\(20-176125\).pdf](https://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports/enforce/documents/42022017NOPV/42022017NOPV_PCO%20PCP_0526022_(20-176125).pdf))。

また PHMSA の事故調査報告書では 45 人が病院に搬送されたが被害はなく (p24)、「As the potential for residual hydrogen sulfide (H2S) resided in the line and complaints of an odor were received,」と H2S の異臭を訴えたとしている (p254)。

<sup>9</sup> <https://www.citact.org/ccs-indiana>

の「影響を与える可能性がある」区分とは指定されず、Satartia は Denbury 社の PAP (Public Awareness program) には含まれなかった。

- ・ Denbury 社は、事故の可能性について地元の対応者に通知していなかった。地元の対応担当者は破裂から約 40 分後に Denbury 社に連絡した。これにより、緊急事態に関連する状況を理解する際に混乱が生じ、初期対応者や地域住民が緊急事態を安全に対処する能力が妨げられた。

### 3.2.4 Denbury 社事故後の米国規制動向

#### (1) 概要

PHMSA は、事故調査結果を公表したホームページで<sup>10)</sup>

- ・ 近隣地域社会に脅威を確実に周知するための National Response Center へのタイムリーな連絡が欠けていた
- ・ 通常業務と同様に、運転要員が適切に緊急事態に対応するための緊急事態対応者との連絡についてのガイドラインなど、文書化された実施手順が無かった
- ・ パイプラインの安全な操業に脅威を与える可能性のある施設周辺環境の状況について、より良い理解を深めることができたであろうパイプライン敷設ルートの定期的な検査を実施しなかった

等を指摘している。また PHMSA は、CO<sub>2</sub> パイプラインの安全性向上のための規則改正案を 2024 年に示す予定とされている<sup>11)</sup>。PHMSA では、改正案は CO<sub>2</sub> の気相、超臨界相などすべての相について、操業と保守の保安課題を対象とするとしている<sup>12)</sup>。

通常行われている天然ガス等パイプラインの防食に関する技術的内容の通知とは別に、事故発生時の当局への連絡が不適切であったと指摘されていることと、パイプラインの破断が鋼管の防食や溶接部の品質に起因するものではなく地滑りによるものであったことからと想定される、以下の改正等が行われている。

#### (2) 2022 年 4 月 8 日付け改正<sup>13)</sup>

パイプライン規制 49 CFR のうち、§192.615 Emergency plans<sup>14)</sup>を改正し、適切な公的安全対応機関（911 等）連絡体制を確立し維持すること、緊急停止など必要な対応をとること、適切な公的機関に情報を提供することなどの修正と、§192 の複数の条文の修正により<sup>15)</sup>、Rupture mitigation valve（遠隔操作弁、自動遮断弁など）の導入を義務化した。

---

<sup>10)</sup> <https://www.phmsa.dot.gov/news/phmsa-announces-new-safety-measures-protect-americans-carbon-dioxide-pipeline-failures>

<sup>11)</sup> <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IN/IN12169>

<sup>12)</sup> <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/latest-news/new-rules-for-co2-pipelines-under-review-in-the-united-states/>

<sup>13)</sup> RIN 2137-AF06, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2022-04-08/pdf/2022-07133.pdf>

<sup>14)</sup> 49 CFR 192.613 Emergency plans, <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-D/part-192/subpart-L/section-192.613>

<sup>15)</sup> 49 CFR 192.179 Transumission line vales, 192.634 Transmission lines : Onshore valve shut-off for rupture mitigation 等

(3) 2022 年 5 月 26 日付け advisory bulletin 更新<sup>16)</sup>

地盤変状による事故として 2016 年～2022 年に起きた 18 件の事例を紹介し、概略以下のよう  
な勧告を行った。18 件のうちに CO2 パイプラインの事故は、Denbury Gulf Coast Pipelines, LLC の  
事故 1 件が含まれている。

1. 斜面の不安定性、地盤の沈下、凍上、浸食、地震その他の動的状況など、安全上の危険  
性をもたらす大規模な地盤の動きを生じやすい周辺状況の特定
2. 土壌の強度特性、地下水と表流水、土壌の浸食、洗掘、地震、凍上の傾向の考慮
3. 地表の地理的条件等がパイプライン健全性に及ぼす危険（パイプライン新設時）
4. 監視計画に含める関連条項
5. 特定された場所についての被害低減方法の作成
6. 環境条件や天候変動の監視と情報収集
7. 地滑り等の地盤変状についての情報収集
8. 適切な研究プロジェクトやレポートの考慮
9. サイト固有の条件に基づく被害低減手法

(4) 2022 年 8 月 24 日付け改正<sup>17)</sup>

パイプライン規制 49 CFR のうち、§192.613 Continuing Surveillance<sup>18)</sup>を改訂し、以下のパラグラ  
フ(c)が追加された。

(c)パイプライン周囲の土壌の洗掘や移動、あるいはパイプライン自体の移動によって、パイ  
プライン施設に損害を与える可能性のある異常気象または自然災害（例えば、大規模な熱帯  
低気圧やハリケーン；パイプライン区域内の河川、海岸線、または小川の堤防を超える洪  
水；パイプライン区域内の地滑り；パイプラインの区域内の地震）の後には、事業者は、影  
響を受けた可能性のあるすべての陸上輸送パイプライン施設を検査し、安全な操業に悪影  
響を及ぼしうる状況を検出するようにしなければならない。

(1) 事業者は、損傷程度や(c)(1)で求められる追加評価の必要性を検討することを目的とし  
た初期検査を適切な方法で実施するために、事象の性質と物理的特性、操業条件、地域、  
そして影響を受けたパイプラインのそれまでの履歴を評価しなければならない。

(2) 事業者は、影響を受けた領域に要員や資機材が安全に到達できるようになったと合理的  
に判断し、また、(c)(1)で必要と判断された検査を実施するために求められる要員と資機  
材が利用可能となってから、72 時間以内に(c)で求められる検査を開始しなければならない

<sup>16)</sup> "Pipeline Safety : Potential for Damage to Pipeline Facilities Caused by Earth Movement and Other Geological Hazards", <https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2022-05/PHMSA%20Land%20Movement%20Advisory%20Bulletin.pdf>

<sup>17)</sup> RIN 2137-AF39, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2022-08-24/pdf/2022-17031.pdf>

<sup>18)</sup> 49 CFR 192.613 Continuing Surveillance, <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-D/part-192/subpart-L/section-192.613>

い。

(3) 事業者は、(c)で求められる検査を実施した結果得られた情報に基づきパイプラインの安全な操業を確実にするために、以下を含む迅速かつ適切な復旧活動を行わなければならない。

(i) 操業圧力の低減またはパイプラインの停止

(ii) 損傷を受けたパイプライン施設の変更、修理、置換

(iii) パイプライン敷設路線 (right-of-way) 上の不安全状態の防止、緩和、解消

(iv) 追加パトロール、探索、試験、検査の実施

(v) 連邦、州、または地域住民の緊急時対応の実行

(vi) 影響をうける地域社会への、公衆安全確保のために実施される段階的内容についての情報提供

#### (5) 影響範囲 (PIR)

PHMSA は漏洩事故による人や財産に重大な影響を与える範囲としてパイプライン両側に PIR (Potential Impact Radius) の距離を定義しているが、当該事故前後で変更は見られない。PIR はパイプラインの口径、圧力及びガス種により定まる係数を用いた簡易式により求められるものとしている<sup>19)</sup>。天然ガスについては式を示し、天然ガス以外のガスについては、ASME 31.8S "Managing System Integrity of Gas Pipelines" の評価式<sup>20)</sup>により求めなければならないとしている。ただし、ASME の評価式は熱影響を考慮したものと推定され、式中パラメータにガスの燃焼熱を用いるなど CO<sub>2</sub> の場合にはそのままでは適用できない (距離がゼロになるため)。

PIR に類似の内容として、API では影響を受ける範囲 (Affected Public Baseline Coverage Area) として、天然ガスパイプラインは 660ft 以上、CO<sub>2</sub> パイプラインは 330ft 以上としている<sup>21)</sup>。この値は CFR へは取り入れられておらず、CO<sub>2</sub> の場合の算定根拠は示されていない。影響を受ける一般住民等への周知については、表 3.2-3 に示す公報活動を規定している。

その他の規格では、パイプライン沿線地域への影響に関する CO<sub>2</sub> 特有の規定は見られない。ISO 13623 はパイプラインの最高使用圧力から管厚を計算する際に、パイプライン周囲の状況に応じて 5 段階に区分された Location class により異なる係数を用いて求めることとしている<sup>22)</sup>。CO<sub>2</sub> 特有課題について ISO 13623 を補完するためのものとされている<sup>23)</sup>ISO 27913 でも、付加的な CO<sub>2</sub> 特有の要件は加えていない<sup>24)</sup>。DNV では、影響範囲を検討する際の人口密度は ISO 13623 Annex B.3 に従うとするものの、CO<sub>2</sub> 特有の影響範囲が定義されて利害関係者が受け入れるまでは、拡散モデルを用いた検討を行うべきとしている<sup>25)</sup>。BSI では、パイプラインと建物等との離

<sup>19)</sup> 40 CFR 192.903 Potential impact radius (PIR)

<sup>20)</sup> ASME/ANSI 31.8S "Managing System Integrity of Gas Pipelines", section 3.2, Potential Impact Area

<sup>21)</sup> API RP 1162 "Public Awareness Programs for Pipeline Operators" 3rd Edition, August 2022

<sup>22)</sup> ISO 13623 "Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems" 3rd Edition, August 2017

<sup>23)</sup> Introduction

<sup>24)</sup> ISO 27913 "Carbon dioxide capture, transportation and geological storage - Pipeline transportation systems" First edition, November 2016

<sup>25)</sup> DNV-RP-F104 "Design and Operation of Carbon dioxide pipelines", 4.3.5 Pipeline routing

隔距離を、人口密度による **Location class**<sup>26), 27)</sup>と、外径、設計圧力、物質ごとの係数を用いた計算式により得られる最小離隔距離<sup>28)</sup>等によって求めることとしている<sup>29)</sup>。物質ごとの係数は、LNG の 1.25 に対して CO2 については参考値として、気体 CO2 は LPG 相当の 1.0、液体または超臨界 CO2 は気体 CO2 の 2 倍の 2.0 としている<sup>30)</sup>。

表 3.2-3 影響を受ける一般市民へのパイプライン事業者の公報活動（API RP1162）

| ステークホルダー                   | メッセージの種類                                                                                                                                                                                                                                  | 頻度                                                                                | 方法                                                                                                                                         |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| パイプライン沿いの住民と集会場所<br><br>基本 | <ul style="list-style-type: none"> <li>パイプラインの目的と信頼性</li> <li>危険に対する認識と予防措置</li> <li>被害防止への意識</li> <li>ワンコールの条件</li> <li>漏洩検知と対応</li> <li>パイプラインの位置情報</li> <li>追加情報の入手方法</li> <li>全国パイプラインマッピングシステム（NPMS）によるパイプライン事業者リストの入手可能性</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>2年ごと</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>印刷物の配布<br/>パイプラインマーカー（※5.5.2 Pipeline Markers で規定する標識。パイプラインの存在、形状・色・大きさ、輸送物、事業者名、電話番号等）</li> </ul> |
|                            | 補足 <ul style="list-style-type: none"> <li>事業者のマネジメント計画の情報・概要</li> <li>用地侵入防止</li> <li>計画されている大規模なメンテナンス／工事</li> </ul>                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>パイプラインや環境に応じて、追加の頻度や補足的な取り組みを行う</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>印刷物の配布</li> <li>個人的なコンタクトによる連絡</li> <li>電話</li> <li>グループ・ミーティング</li> <li>オープンハウス</li> </ul>         |
| 貯蔵施設やその他の主要操業施設の近くに住む住民    | <ul style="list-style-type: none"> <li>事業者のマネジメント計画の情報・概要</li> <li>製品または施設に適切な場合には、特別な事故対応の通知・避難措置</li> <li>施設の目的</li> </ul>                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>同上</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>同上</li> </ul>                                                                                       |

### 3.3 CO2 パイプライン事故を想定した海外の実験・解析事例の調査

#### 3.3.1 概要

欧州においては、CO2 パイプラインを対象とした様々な合同研究プロジェクト Joint Industry Project (JIP) が実施されており、主なものを表 3.3-1 に示す。

このうち、CO2EUROPIPE は初期に行われたプロジェクトで、大規模 CO2 パイプライン開発のために必要な検討項目を列記しているので、はじめに紹介する。また、大規模な実管破断実験を行った COSHER と、英国規格 BSI PD 8010-1 改訂のベースとなった COOLTRANS を紹介する。

<sup>26)</sup> PD 8010-1:2015+A1:2016 "Pipeline systems - Steel pipelines on land", 5.5.1 Classification

<sup>27)</sup> // 5.5.2 Population density

<sup>28)</sup> // 5.5.3 Proximity to occupied buildings

<sup>29)</sup> // 5.5 Location of pipeline systems

<sup>30)</sup> // 5.5.3 Proximity to occupied buildings

表 3.3-1 欧州における CO<sub>2</sub> パイプライン研究プロジェクト（文献<sup>31)</sup>）

|   | 名称                         | 期間                                     | 実験規模      | 目的                                                                                              |
|---|----------------------------|----------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | CO <sub>2</sub> SAFEARREST | 2016-2019                              | 実パイプライン規模 | バースト実験研究プログラム。2 回の実管（24 インチ、X65）規模の実験を埋設状態、CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> 混合物を使用して行う。          |
| 2 | COSHER                     | 2011-2015                              | 大規模       | CO <sub>2</sub> 放出・拡散時の安全領域/影響領域を決定するためにモデルを開発するためのデータを取得する。                                    |
| 3 | CO <sub>2</sub> PIPETRANS  | 2009-2015                              | 中規模／大規模   | DNV-RP-J202 において特定される知識のギャップを補ない、プロジェクトの結果を DNVGL-RP-F104 (2017)に反映する。                          |
| 4 | COOLTRANS                  | 2011-2015                              | 大規模       | 英国における陸上 CO <sub>2</sub> パイプラインの安全なルート選定、設計、敷設、運転に関連する重要な問題を特定し、解決方法を提案する。                      |
| 5 | CO <sub>2</sub> PIPEHAZ    | 2009-2013                              | 小規模／大規模   | CO <sub>2</sub> 放出によって引き起こされる危険性についての理解を深める。                                                    |
| 6 | CO <sub>2</sub> QUEST      | 2013-2016                              | 小規模／中規模   | 貯留と輸送における CO <sub>2</sub> 純度の影響を研究する。                                                           |
| 7 | CATO <sup>32)</sup>        | 2004-2008<br>2010-2014<br>2015-ongoing | 小規模       | CCS の全工程（分離・回収、輸送、貯留）に関する網羅的な研究を含む国家プログラム。                                                      |
| 8 | CO <sub>2</sub> EUROPIPE   | 2009-2011                              | 実験はなし     | 大規模 EU <sub>CO2</sub> インフラの開発計画の項目に対するガイドラインの概要を作成する。                                           |
| 9 | CO <sub>2</sub> RISKMAN    | 2010-2013                              | 実験はなし     | 新興の CCU 産業において立案者やプロジェクトを支援する産業ガイドラインを開発する。そのために、CCS に伴う CO <sub>2</sub> 輸送の処理に関連する潜在的な危険を議論する。 |

### 3.3.2 CO<sub>2</sub>EUROPIPE

#### (1) 概要

<sup>31</sup> Risks and Safety of CO<sub>2</sub> Transport via Pipeline: A Review of Risk Analysis and Modeling Approaches for Accidental Releases ; Vitali, M. et al., Energies 2021, 14, 4601, <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/15/4601>

<sup>32</sup> <https://asmedigitalcollection.asme.org/IPC/proceedings-abstract/IPC2014/46100/V001T03A022/259925>

欧州で CO2 パイプラインを大規模に導入するための検討が、2009 年頃から行われた。その先駆けとして CO2EUROPIPE (Towards a transport infrastructure for large-scale CCS in Europe)があり、国境を越えた CO2 パイプライン実現のために組織的、財政的、法的、環境的、社会的および技術的障害について、総括的な調査が行なわれた。特に、ここで挙げられた技術的な課題は、この後行われた FP7 (the 7th Framework Programme for Research) や JIP (Joint Industry Project) などの CO2 パイプラインに関係した研究プロジェクトで取り上げられ、実験・解析を行うことで、基準やガイドラインに反映されている。

CO2EUROPIPE プロジェクトは、ゼロエミッションプラントからの CO2 の輸送と圧入のための大規模な欧州全土のインフラ整備に向けた道を開くことを目的とし、2009 年から 2011 年に行われた。このプロジェクトは、CO2 の回収、輸送、貯留の分野の主要な関係者とともに、初期の小規模で地域的な取り組みから、2020 年頃に開始される大規模な CO2 の輸送と貯留に向けた最適な移行に向けた準備を進めた。この移行と CO2 インフラの開発は、多くの現実的なシナリオでビジネスケースを展開することによって研究された。そして、このプロジェクトは、2020 年を欧州における大規模 CCS 開始の目標年とする、CO2 輸送インフラのロードマップを生み出すことになった。ロードマップは、技術から組織、財務、社会に至るまで、プロジェクトで考慮されるすべてのレベルに対して定義された<sup>33)</sup>。このプロジェクトでは実験は行われていない。

CO2EUROPIPE は、欧州の研究資金プログラム FP7 として、実施された。総予算は 241.9 万ユーロであり、表 3.3-2 に示す企業・組織が参加した<sup>34)</sup>。

## (2) 背景

2020 年までの欧州 CCS プロジェクトの実証段階では、CO2 輸送インフラは地域の費用対効果の高い Point-to-Point パイプライン（ネットワーク状ではない 1 対 1 接続のパイプライン）に限定されている。これらの実証プロジェクトの成功次第では、2020 年以降に電力分野で CCS が初めて大規模に導入される可能性がある。一方、理論的には、複数の発生源からの CO2 を輸送するのに十分な容量を備えたパイプラインを建設すると、投資家が規模の経済を活用できるため、輸送コストの削減につながる。ただし、欧州の多くの研究（CO2Europipe や GeoCapacity を含む）は、CCS が EU の CO2 削減目標をサポートする場合、多くの加盟国に十分かつ適切な貯蔵場所が存在しないため、国境を越えた CO2 輸送が必要になることを強調している。特に、北海の特定の地域で CO2 原油増進回収法（EOR）が実施される可能性により、複数の EU 諸国から相当量の CO2 需要が生み出される可能性がある。したがって、CO2 の国境を越えた輸送には多国間協定が必要であり、規制枠組みの調和に焦点を当てた EU のさらなる調整が求められている。

---

<sup>33)</sup> <https://www.co2europipe.eu/>

<sup>34)</sup> <https://cordis.europa.eu/project/id/226317>

表 3.3-2 CO2EUROPIPE 参加企業・組織

| 役割      | 名称                                                                           | 国                 |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| コーディネータ | Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek- TNO | オランダ              |
| パートナー   | Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland                                 | オランダ              |
| パートナー   | Etudes et Productions Schlumberger                                           | フランス              |
| パートナー   | Vattenfall Research & Development AB                                         | スウェーデン            |
| パートナー   | NV Nederlandse Gasunie                                                       | オランダ              |
| パートナー   | Linde Gas Benelux BV                                                         | オランダ              |
| パートナー   | Siemens AG                                                                   | ドイツ               |
| パートナー   | RWE Dea AG                                                                   | ドイツ               |
| パートナー   | E.ON Benelux NV                                                              | オランダ・ベルギー・ルクセンブルグ |
| パートナー   | PGE Polska Grupa Energetyczna SA                                             | ポーランド             |
| パートナー   | CEZ AS                                                                       | チェコ               |
| パートナー   | Shell Downstream Services International BV                                   | オランダ、英国           |
| パートナー   | CO2-Net BV                                                                   | オランダ              |
| パートナー   | CO2-Global AS                                                                | ノルウェー             |
| パートナー   | Nacap Benelux BV                                                             | オランダ              |
| パートナー   | Gassco AS                                                                    | ノルウェー             |
| パートナー   | Anthony Velder CO2 Shipping BV                                               | オランダ              |
| パートナー   | E.ON New Build and Engineering                                               | 英国                |
| パートナー   | Stedin BV                                                                    | オランダ              |

## (3) 目的

- ・貯蔵場所の圧入施設を含む、CO<sub>2</sub> の大規模輸送に必要なインフラを記述する。
- ・今後数十年間で徐々に廃止されると予想される、天然ガス輸送のための既存インフラの再利用の選択肢について記述する。
- ・大規模な CO<sub>2</sub> インフラの実現に対する組織的、財政的、法的、環境的、社会的障害を取り除く方法についてアドバイスを記述する。
- ・一連の現実的なシナリオのビジネスケースを開発し、初期 CCS プロジェクトと大規模な CCS インフラストラクチャーへのそれらの統合の両方を研究する。
- ・前述のビジネス事例の展開を通じて、CCS に関する国際協力の必要性を実証する。
- ・大規模な欧州 CCS インフラストラクチャーの開発を促進および最適化するために EU および各国政府がとるべき行動に関するすべての調査結果を要約する。

## (4) 調査結果

調査は表 3.3-3 に示す項目について行われ、まとめられた。

表 3.3-3 CO2EUROPIPE の調査項目<sup>35)</sup>

| 番号      | 項目                                                              |
|---------|-----------------------------------------------------------------|
| D 2.1.1 | CO2 輸送のための既存のインフラ                                               |
| D 2.2.1 | 欧州における大規模な CO2 輸送インフラの開発: 回収量と貯蔵可用性のマッチング                       |
| D 2.3.1 | 欧州における大規模な CO2 輸送インフラの開発: 関係者の見解                                |
| D 3.1.1 | 輸送ネットワークの設計と CO2 管理                                             |
| D 3.1.2 | CO2 の基準                                                         |
| D 3.2.1 | パイプラインを通る CO2 輸送のリスク特性評価と管理                                     |
| D 3.3.1 | CO2 パイプラインインフラストラクチャーの法的、財務的および組織的側面                            |
| D 4.1.1 | ロッテルダムからの CO2 輸送インフラの開発に関する報告                                   |
| D 4.2.1 | ライン - ルール地域の既存のパイプラインインフラストラクチャーと CO2 輸送のための既存のパイプラインの再利用に関する報告 |
| D 4.2.2 | CO2 輸送の実現可能化: ドイツのケース: ライン/ルール地域 (D) - ハンブルク (D) - 北海 (D、DK、NL) |
| D 4.3.1 | カルスト (Kårstø : ノルウェー) 沖合 CO2 パイプライン設計                           |
| D 4.3.2 | カルスト CO2 パイプライン プロジェクト: 欧州の事例への拡張                               |
| D 4.4.1 | ポーランドの CO2 貯蔵施設の環境への影響とリスク                                      |
| D 4.4.2 | ベルハトウ発電所 - テストケース                                               |
| D 4.4.3 | チェコ共和国の CO2 輸送ケース                                               |

## (5) ロードマップ

調査結果は、CCS の発展に有利な環境を作り出すための欧州政府および加盟国政府の行動に対する提言という観点からまとめられた。この提言とタイムラインのリストは、EU および加盟国政府の役割に関する CCS 開発のロードマップとして見ることができる。CCS 開発のロードマップとしてまとめて

表 3.3-4 に示す。

北海の地域で CO2 原油増進回収法 (EOR) が考慮されているために、船舶輸送も対象とされているが、主体は陸上濃密相 CO2 パイプラインである。今回の調査に関係する項目としては、CO2 ストリームの構成、安全性とリスク管理、知識のギャップなどがある。技術的問題としては、CO2 ストリーム中の不純物の挙動、正確なシミュレーションツールの開発、軟質材料、減圧中の騒音、長手方向き裂伝播、パイプラインの内部検査、既存インフラの再利用がある。

<sup>35)</sup> <https://www.co2europipe.eu/>

表 3.3-4 CO2EUROPIPE で策定された CCS 開発ロードマップ<sup>36)</sup>

| 項目                        | 提言                                                                                                                                                                               | 主体                                                      | タイムライン                                        |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 欧州のリーダーシップ : CCS のキープレーヤー | 欧州の主要企業は、CCS の開発においてリーダーシップを発揮すべきである。CCS のインフラ開発における初期および継続的な取り組みは不可欠であり、他の加盟国の開発を促進することになる。                                                                                     | 北海諸国 (ドイツ、英国、オランダ、ノルウェー)、ポーランドなどを含む CCS の主要プレーヤー        | 2012 ~ 2050 年                                 |
| ビジョンの提供:マスタープラン           | エネルギーインフラストラクチャーの一部として、貯留層の貯蔵適格性を含み、現場放棄、貯蔵適格性確認の時間、プロジェクト開発に関連する重要な決定時点に対処する、提案されている輸送および貯蔵ネットワーク用のマスタープランを作成する必要がある。これは、関係する業界にとって許容可能な資本利益率を達成し、社会にとって CCS コストを削減するという目標に役立つ。 | 欧州委員会エネルギー総局 (Directorate-General for Energy)、加盟国、業界関係者 | 2012 ~ 2020 年                                 |
| ストレージ容量は認定されている必要がある      | 加盟国は、CCS インフラ開発の初期段階で輸送ネットワークの計画と開発に十分な総容量を備えた国内の貯蔵容量の特性評価と適格性評価を積極的に支援すべきである。                                                                                                   | 加盟国                                                     | 2012 ~ 2025 年                                 |
|                           | 可能な限り詳細な基礎データを含む、理論上の保存オプションのオープンデータベースをセットアップする必要がある                                                                                                                            | DG Energy、加盟国                                           | 2012 ~ 2020 年                                 |
|                           | 貯蔵適格性評価方法 (CO2Qualstore など) の調和と標準化は、貯蔵適格性評価に必要な時間の短縮に役立つ。<br>異なる加盟国からの枯渇ガス田および油田に関する既存の情報は、適切な比較を可能にするために、同様の形式およびプロセスで表現されるべきである。                                              | 独立標準化機構、資源保有者                                           | 推奨慣行<br>2012 ~ 2015 年、<br>標準<br>2015 ~ 2030 年 |
| CO2 輸送産業のビジネスモデル開発        | インフラストラクチャーの高い稼働率を確保するために、国境を越えた輸送および保管インフラストラクチャー投資計画とそれに関連する投資決定を調整する専門機関を設立する。( 1) 電力会社における CCS の垂直統合、2) コモンキャリアモデルを使用するスタンドアロンの輸送会社を想定 )                                     | 北海海盆タスクフォース (NSBTF : North Sea member states)           | 2015 ~ 2020 年                                 |
| 規制環境の形成                   | 加盟国は、CO2 の国境を越えた輸送と海底貯留に関するロンドン議定書の修正案を批准すべきである。これにより、特に北海盆地における大規模な海上 CCS 輸送および保管活動が可能になる。                                                                                      | 欧州委員会と加盟国                                               | 2015 ~ 2020 年                                 |

<sup>36)</sup> Final Report Summary - CO2EUROPIPE (Towards a transport infrastructure for large-scale CCS in Europe) <https://cordis.europa.eu/project/id/226317/reporting> を元に作成

| 項目                     | 提言                                                                                                                                                                                           | 主体               | タイムライン        |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------|
| 安定した長期的な規制環境の構築        | より多くの CO2 が回収されるため、産業界の需要を満たす大規模で共通に使用可能なインフラを構築するには、民間投資家が、この将来需要を予測するためのインフラストラクチャーの構築を検討するのに先立って CCS に対する将来の要件と需要を示す効果的な安定した規制環境と組み合わせたマスタープランが不可欠である。                                    | 欧州委員会と加盟国        | 2015 ～ 2020 年 |
| 加盟国の CCS 制度の調和         | CO2 輸送とインフラ建設の分離に基づき、ガス・電力部門の規制、経験、プロトコル、ビジネスモデル、標準を利用して、欧州規模で第三者アクセス制度を導入する。この問題は、関係国間の二国間または多国間レベルで解決される可能性もある。                                                                            | 独立審査機関と連携した欧州委員会 | 2015 ～ 2020 年 |
|                        | すべてのユーザーに対する料金と課税の潜在的な規制に関する加盟国政府間の協定を可能にすることにより、マルチユーザー CO2 インフラストラクチャーの経済的に魅力的な財務、ビジネス、およびリスク軽減モデルの開発を支援する。                                                                                | 加盟国政府            | 2015 ～ 2020 年 |
| 陸上貯留                   | 加盟国は、CO2 の陸上貯留を許可することを検討すべきである。これにより、オフショアストレージのみと比較して大幅なコスト削減が実現され、オンショアパイプラインの需要が大幅に減少する。                                                                                                  | 加盟国              | 2015 ～ 2020 年 |
| CO2 ハブ機能をさらに精緻化する必要がある | CCS プロジェクト資金の選択と管理においては、2020 年以降の CCS インフラストラクチャーの必要とする迅速な開発をサポートするために、CO2 ハブなどの重要な統合ビジネス要素の価値が考慮され、適時に成熟することを保証すべきである。                                                                      | 加盟国              | 2015 ～ 2020 年 |
| CO2 ストリームの構成           | さまざまな回収技術から CO2 を輸送するために使用される場合のネットワークの信頼性を確保するために、新しい CO2 ネットワーク インフラストラクチャー（主に CCS 実証プロジェクトの学習に基づく）の CO2 品質を含む、設計と建設の最低基準に関する追加のガイドラインを提供する。（廃棄物またはその他の物質を処分する目的で、廃棄物またはその他の物質を追加してはならない。） | 欧州委員会および国際標準化機関  | 2015 ～ 2020 年 |
|                        | 技術的および規制/商業的な相互運用性のための協定と標準を作成する。                                                                                                                                                            | 国際標準化機関、加盟国      | 2015 ～ 2020 年 |
| 輸送および貯蔵された CO2 に対する責任  | 貯留された CO2 に対する責任は、国内（国内 CO2 貯留プロジェクトの場合）および加盟国間（国際プロジェクトの場合）で規制される必要がある。                                                                                                                     | 加盟国政府            | 2015 ～ 2020 年 |
| 船舶輸送                   | 輸送活動と輸送された CO2 のその後の計算（監視と報告）がチェーン全体でどのように考慮されるかを明確にする。                                                                                                                                      | 欧州委員会            | 2015 ～ 2020 年 |

| 項目                                    | 提言                                                                                                                                                                                                                  | 主体                                                  | タイムライン        |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------|
| 金融環境の形成                               | 追加資金の形で EU および加盟国政府の支援が追加プロジェクトの稼働に間に合うように発表されるべきである。                                                                                                                                                               | 欧州委員会                                               | 2015 ～ 2020 年 |
|                                       | 2020 年以降、エネルギーインフラの観点から CCS のための安定した長期的な規制および経済的枠組みを開発する必要がある。<br>業界と金融機関が望ましい目標を達成できるように、ビジョン、負担分担、規制、ビジネスモデルを明確にするためには、業界と社会全体にとって堅牢な政策ロードマップが不可欠である。                                                             | 欧州委員会、加盟国                                           | 2015 ～ 2025 年 |
| ガスおよび電力輸送会社の金融ベンチマーク                  | CO <sub>2</sub> 輸送インフラへの投資に対する加盟国による財政保証を EU がカバーできるようにするガイドラインを EU 指令に発展させるべき。<br>EIB*は商業銀行が補完するこうしたプロジェクトへの融資を担うべき。<br>このようなガイドラインが国の補助金や競争に関する規則と整合性があるかどうかを調査する必要がある。<br><br>※欧州投資銀行 (European Investment Bank) | DG-Energy                                           | 2012 ～ 2015 年 |
| CO <sub>2</sub> 開発全体における商業計画の調整       | 政府は民間部門と協力して、大規模な CCS 配備の可能性があれば回収プラントの段階的建設を見越して、余裕を持った能力でパイプラインを最初に建設できるようにする資金モデルを開発する必要がある。                                                                                                                     | DG-Energy                                           | 2012 ～ 2015 年 |
| CCS の商用オプション：<br>CO <sub>2</sub> -EOR | 北海油田の CO <sub>2</sub> ベースの EOR ノウハウと現場データは、更新および集約され、CCS 目標、EU のエネルギー政策、および電力業界、政府と EP 事業者の現在および潜在的な利害関係者との予測される CO <sub>2</sub> 輸送ネットワークに合わせて調整される必要がある。                                                           | 北海海盆タスクフォース<br>(NSBTF : North Sea basin task force) | 2015 ～ 2025 年 |
|                                       | 欧州、特に北海におけるインフラ計画に沿った CCS と CO <sub>2</sub> -EOR の協調開発を促進する政策を EU 指令に組み込む。                                                                                                                                          | 欧州委員会、DG-Energy、<br>NSBTF 関係者                       | 2012 ～ 2015 年 |
| CO-EOR プロジェクトにおける税と歳入の負担分担            | 北海海盆への EP 事業者、電力会社、運輸会社によるすべての CCS-CO <sub>2</sub> -EOR 関連投資を可能にするための収益と負担分担協定を可能にする一貫した租税条約を策定する。                                                                                                                  | 北海海盆タスクフォース<br>(NSBTF)                              | 2012 ～ 2015 年 |

| 項目                | 提言                                                                                                                                                                                                                      | 主体                                      | タイムライン        |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------|
| 安全性とリスク管理         | CO2Europipe は、CO2 パイプライン輸送の HSE リスクを判断するために、天然ガス輸送業界などで使用されているような正式な定量的リスク評価（QRA）手法の使用を推奨している。<br>この確率論的なアプローチは、リスクに伴う不確実性に適切に対処できる。                                                                                    | 欧州委員会、加盟国                               | 2011 ～ 2015 年 |
| 知識のギャップ           | CO2Europipe は、全欧州の CO2 パイプラインインフラストラクチャーの開発を可能にするために、（ベスト プラクティスの）調和と最終的な標準化を推奨している。<br>推奨される基準と実践には、DNV によって開発された基準とリスク管理に関する ISO3100 が含まれる（DNV、2010）。                                                                 | 欧州委員会、加盟国                               | 2012 ～ 2015 年 |
|                   | 故障頻度や経験を記録する CO2 データベースの構築。<br>例えば IGU レポートのガイドライン「天然ガス輸送パイプラインのインシデントデータベースの使用または作成」に沿って設定されたデータベース。                                                                                                                   | 欧州委員会、加盟国、業界                            | 2012 ～ 2015 年 |
| 技術的問題             | CO2 ストリーム中の不純物の挙動（特に水に重点を置く）を理解し、CO2 輸送システム間の将来の相互運用性が必要な場合には、そのような不純物の許容レベルを設定するために研究開発活動を実行する必要がある。<br>研究開発活動の結果は、理想的には CCS 実証段階へのインプットとして利用可能であり、そのような作業の一環として検証されるべきである。<br>これを達成するために、いくつかの関連する研究開発プロジェクトが開始されている。 | 既存の CCS 研究コンソーシアム、研究会社、大学               | 2015 ～ 2020 年 |
| 正確なシミュレーションツールの開発 | パイプライン内の CO2 の挙動に関する既存のシミュレーションツールを検証し、分散モデリングを改善するには、実験室条件と本格的なテストの両方からの実験データを適時に収集する必要がある。                                                                                                                            | CCS 実証プロジェクト、研究会社、大学                    | 2015 ～ 2020 年 |
| 軟質材料              | CO2 輸送システムでの使用に適したソフトマテリアルの認定基準は、考えられる広範囲のマテリアルでの経験を積むために開発されるべきである。                                                                                                                                                    | サプライヤ、研究開発機関                            | 2012 ～ 2015 年 |
| 減圧中の騒音            | CO2 輸送システムの減圧方法を評価する必要がある。これには、高圧、高速放出の概念だけでなく、低圧放出（大気中に入る前に閉鎖システム内で圧力が低下する）の概念も含まれるべきである。<br>このような方法は、CCS デモンストレーションフェーズの前に物理的にテストし（フルスケールまたは縮小スケールで）、デモンストレーションフェーズの一部として検証する必要がある。                                   | 既存の CCS 研究コンソーシアム、実証プロジェクト運営者、研究会社、大学   | 2012 ～ 2015 年 |
| 長手方向き裂伝播          | 破壊メカニズムに関する既存の仮定を検証するには、物理 的試験を実行する必要がある。これは、CCS デモ段階で計画されているパイプラインを設計する前に実行する必要がある。（CO2Pipetrans JIP プロジェクトの一環としてテスト実施。）                                                                                               | 既存の CCS 研究コンソーシアム（CO2Pipetrans）、研究会社、大学 | 2012 ～ 2015 年 |

| 項目          | 提言                                                                                                                                   | 主体                                    | タイムライン        |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| パイプラインの内部検査 | 技術認定プログラムは、CCS デモ段階を開始する前に、認定ツールが利用可能であることを実証するために、パイプライン検査ツールのベンダーによって実行される必要がある。                                                   | パイプライン検査ツールのベンダー                      | 2012 ～ 2015 年 |
| 既存インフラの再利用  | 元の用途とは異なる目的で再利用する必要があるパイプラインについては、パイプラインの整合性の評価を実行する必要がある。<br>DNV が推奨する実践文書「CO2 パイプラインの設計と運用」では、既存のパイプラインの CO2 使用の再認定に関する提案が提供されている。 | 記載なし                                  | 記載なし          |
| 船舶輸送        | CCS 実証段階に先立って、船舶からのオフショア荷降ろしシステムの技術認定プログラムを実施して、そのようなシステムの技術的（および経済的）実現可能性をさらに実証する必要がある。                                             | 既存の CCS 研究コンソーシアム、実証プロジェクト運営者、研究会社、大学 | 2011 ～ 2015 年 |

### 3.3.3 COOLTRANS

#### (1) 概要<sup>37)</sup>

COOLTRANS (CO<sub>2</sub> Liquid pipeline TRANSPORTation) 研究プログラムは、天然ガスパイプラインの安全な設計と運用のために 1970 年代と 1980 年代に得られた知識に基づいており、天然ガスと CO<sub>2</sub> を輸送するパイプラインの違いに対処することに基づいている。北米と英国の違いを考慮し、CO<sub>2</sub> パイプラインの設計と運用に関する北米の経験が必要に応じて組み込まれている。北米での CO<sub>2</sub> 輸送の実績は、主に石油増進回収 (EOR) に関連しており、一般的には純度の高い天然 CO<sub>2</sub> を輸送するパイプラインを過疎地に敷設したものである。英国の CCS では、さまざまな不純物 (特に水素 (H<sub>2</sub>)、窒素 (N<sub>2</sub>)、燃焼生成物) をかなりのレベルで含む CO<sub>2</sub> を輸送し、人口密度の高い英国内にパイプラインを敷設する必要がある。そのため、COOLTRANS は、濃密相 CO<sub>2</sub> を輸送する陸上パイプラインの安全な経路設定、設計、建設、運用に関する重要な問題を特定し、それらの対処や解決のために行われた。期間は 3 年間 (2011 年から 2014 年) で、予算は 800 万ポンドであった。一部 EU の補助金による支援を受けた<sup>38)</sup>。このプロジェクトの主体である National Grid は、英国のハンバーおよびノース・ヨークシャー地域で CO<sub>2</sub> パイプライン・ネットワークを開発し、この地域の主要産業排出源からヨークシャー海岸沖の塩性帯水層まで濃密相 CO<sub>2</sub> を輸送する計画を進めており、プロジェクトの結果の応用を目指していた。プロジェクトの参加企業・組織を表 3.3-5 に示す。参加企業・組織は、すべて英国に拠点を置いている。なお、ASME 10th International Pipeline Conference (2014)で成果の概要が報告されている<sup>39)</sup>。

表 3.3-5 COOLTRANS プロジェクトの参加企業・組織<sup>40)</sup>

| 役割                                             | 企業・組織名                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 管理                                             | National Grid                                                                                                                            |
| 濃密相 CO <sub>2</sub> の熱力学特性                     | Nottingham University、University College London、Leeds University、Kingston University、HSL (Health and Safety Laboratory)、GL Noble Denton※ |
| 定量的リスク管理<br>(QRA : Quantified Risk Assessment) | Newcastle University、GL Noble Denton                                                                                                     |
| き裂伝播                                           | Newcastle University、Atkins、Pipeline Integrity Engineers、Penspen                                                                         |
| 設計手法                                           | Newcastle University、University College London、GL Noble Denton※、MACAW Engineering、Pipeline Integrity Engineers                           |
| 環境社会学                                          | Nottingham University、Manchester University、Tyndall Centre                                                                               |
| 実験                                             | GL Noble Denton※、Spadeadam                                                                                                               |

※ 2013 年に DNV に吸収合併され、現社名 DNV GL

<sup>37)</sup> J.Barnett ら、The COOLTRANS Research Programme: Learning for the Design of CO<sub>2</sub> Pipelines、IPC2014-33370

<sup>38)</sup> R.Cooper ら、Pipelines for transporting CO<sub>2</sub> in the UK、Energy Procedia 63 ( 2014 ) 2412 – 2431

<sup>39)</sup> <https://asmedigitalcollection.asme.org/IPC/proceedings-abstract/IPC2014/46100/V001T03A022/259925>

<sup>40)</sup> <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/192398/global-status-ccs-2014-japanese.pdf> から作成

## (2) 背景<sup>41)</sup>

National Grid は、Yorkshire and Humber CCS パイプラインの設計に PD 8010-1:2004 を適用し、必要に応じて IGEM/TD/1 の要求事項で補足した。これらのコードは、当時 CO<sub>2</sub> を対象としていなかったため、濃密相 CO<sub>2</sub> パイプラインの設計に適用するにあたり、次のような特別な考慮が必要であった。

- (i) コードの要件は主に、熱による危険を引き起こす流体に適用される。
- (ii) 有害な危険性をもたらす濃密相 CO<sub>2</sub> には危険性カテゴリーがない。
- (iii) プロセス設計では流体の相変化を考慮する必要がある、濃密相 CO<sub>2</sub> 混合物の場合は状態図における沸点と露点の間の気液二相領域の把握が必要である。
- (iv) 材料の破壊停止じん性を評価する際には、濃密相 CO<sub>2</sub> の減圧挙動を考慮する必要がある。

上記の課題に対処する際、National Grid は、濃密相 CO<sub>2</sub> には最も高い流体危険カテゴリーが適用されるという慎重な仮定を置き、それに基づいて設計要件を設定した。

## (3) 目的<sup>42)</sup>

COOLTRANS の目的は、濃密相 CO<sub>2</sub> パイプラインの運用を技術的に確証するデータと情報を提供することと、英国における濃密相 CO<sub>2</sub> の陸上パイプラインの安全な設計と運用のために不可欠な技術基準を制定、精査、公開することである。

また、このプログラムの一部は、CO<sub>2</sub> 放出に関する、評価及び理解のための実験データを収集することである。実験プログラムには、さまざまな放散塔配置による計画的な放散に関するデータの収集と、埋設パイプラインからの偶発的な放出のシミュレーションが含まれている。

これら実験で得られたデータは、CO<sub>2</sub> 放出挙動の理解を深めるのに役立つだけでなく、COOLTRANS で並行実施された理論研究プログラムでも使用された。University College London、Leeds University、Kingston University による理論研究は、埋設 CO<sub>2</sub> パイプラインからの破裂や穿孔による放出などの放出実験を実施し、近隣および遠方への拡散モデルを検証した。最終的には、これらの研究成果を濃密相 CO<sub>2</sub> パイプラインからの放出モデルの開発に活用し、適切な定量的リスク評価（QRA）に取り込むことが目的である。

## (4) 実験内容<sup>43)</sup>

COOLTRANS の中心であり重要な部分は、衝撃波管、破裂、放出、ベント、およびフルスケールき裂伝播実験で構成される、大規模かつ統合的な実験プログラムである。これらの実験は、埋設パイプライン内で CO<sub>2</sub> がどのように挙動し、どのように漏えい・拡散するかを確認するために行われた。カンブリア州の Spadeadam 実験場では、100 を超える実験（さらに分散を測定する 50 を超える実験）が実施された。表 3.3-6 に実験の内容を整理した。

---

<sup>41)</sup> J.Barnett ら、The COOLTRANS Research Programme: Learning for the Design of CO<sub>2</sub> Pipelines、IPC2014-33370

<sup>42)</sup> D.Allason ら、EXPERIMENTAL STUDIES OF THE BEHAVIOUR OF PRESSURISED RELEASES OF CARBON DIOXIDE、Hazards XXIII

<sup>43)</sup> J.Barnett ら、The COOLTRANS Research Programme: Learning for the Design of CO<sub>2</sub> Pipelines、IPC2014-33370

表 3.3-6 COOLTRANS 実験内容

| 実験名                               | 内容                                                                                                   | 回数 |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 熱力学特性測定                           | 不純物を含む濃密相CO <sub>2</sub> の相平衡測定を行なう。                                                                 | —  |
| 衝撃波管実験                            | CO <sub>2</sub> とCO <sub>2</sub> 混合物の減圧波と分散の速度を測定する。                                                 | 33 |
| 放出実験                              | 他工事損傷や腐食を模擬することにより、埋設パイプラインからの放出挙動の詳細な視覚的証拠を提供する。<br>実行可能な場合には、流出と分散の測定値を取得する。                       | 8  |
| 破裂実験                              | 埋設されたパイプラインからの現実的な放出（破裂）の挙動の視覚的証拠を提供する。                                                              | 5  |
| 冷ガス放出実験                           | さまざまな形状（穴、スロット、き裂など）の漏れの周囲の局所的なパイプ壁の冷却を測定する。<br>数値流体力学（CFD）研究を検証し、実証テストにインプットを提供する。                  | 4  |
| West Jefferson 実験<br>（部分ガスバースト試験） | フルスケールのき裂伝播実験において長時間せん断破壊が発生する可能性を調査する。                                                              | 3  |
| フルスケールき裂伝播実験                      | 外径 914 mm、管厚 25.4 mm、濃密相（CO <sub>2</sub> ）混合物を使用した L450 グレードのパイプでのき裂停止を実証する。<br>き裂阻止じん性を推定する方法を検証する。 | 2  |
| ベント実験                             | 制御されたベント条件におけるCO <sub>2</sub> の分散挙動を調査する                                                             | 14 |
| 圧力下での溶接実験                         | 濃密相CO <sub>2</sub> を循環させたパイプの加圧下溶接作業を実施し、温度低下を測定する。<br>全周分割スリーブを装着して、フルスケール圧力下溶接実験を実施する。             | 29 |
| 実証実験                              | 局所的な冷却による漏れから破断（連続的な脆化の開始による）が発生する可能性があるかどうかを実証する。                                                   | 1  |

## (5) 実験結果

表 3.3-6 の実験から代表的なものを以下に紹介する。

### 1) 熱力学特性測定（濃密相 CO<sub>2</sub> 中の不純物の影響）

通常の運転中に流体が確実に単相に留まるようにするには、CO<sub>2</sub> を多く含む混合物の熱力学特性を理解することが必要である。不純物は流体の相変化に影響を与えるが、十分に理解されていなかった。流体の相変化は、その状態方程式（EoS）によって記述され、大気条件に放出された高圧での濃密相 CO<sub>2</sub> の相変化挙動を正確にモデリングするには、相変化条件を予測できる信頼性の高い EoS が必要である。これに対処するために、特定の混合物の実際の相境界を決定するために、Nottingham University によって多数の小規模な実験テストが実施された。

さまざまな EoS と比較した結果、既存の EoS では不十分で、非平衡流れを考慮した追加の方

程式を含む均一緩和モデル（HRM）が、University College London と Leeds University によって開発され、CFD ソフトウェアに組み込まれた。

図 3.3-1 に CO<sub>2</sub> および二元系 CO<sub>2</sub> 混合物の状態図の例を示す。5%水素の例では状態図は、沸点（上側の線）と露点（下側の線）の間が気液二相領域になっている。確実に液相（濃密相）でパイプライン輸送するためには上側の線以上の圧力に維持する必要がある、その圧力は純粋な CO<sub>2</sub> よりも高い圧力になる。

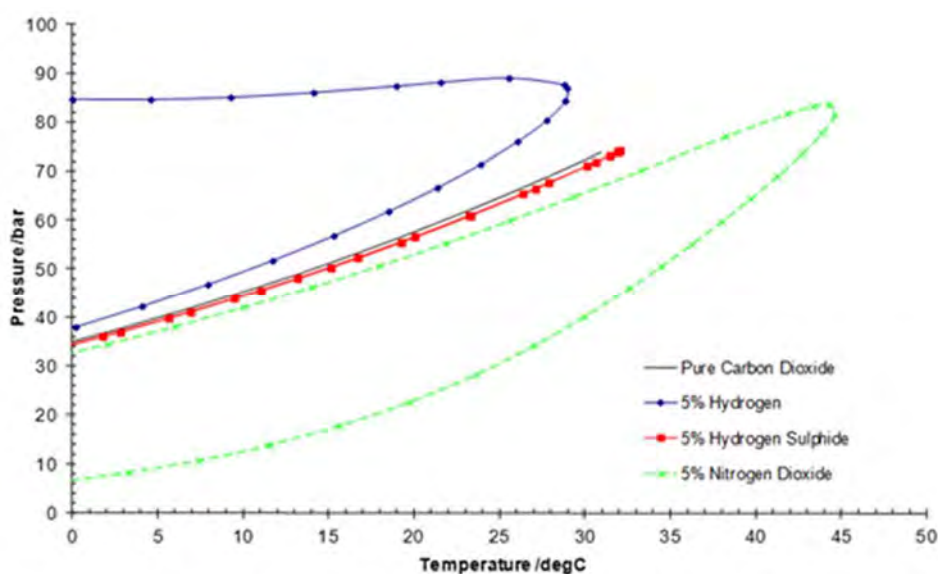


図 3.3-1 CO<sub>2</sub> および二元系 CO<sub>2</sub> 混合物の状態図の例

## 2) 衝撃波管実験

濃密相 CO<sub>2</sub> の減圧データを得るために、衝撃波管実験が行われた。濃密相 CO<sub>2</sub> の減圧挙動がリーングス（軽質天然ガス）やリッチガス（重質天然ガス）とは大きく異なり、非常に長いプラトー（圧力停滞域）が存在することを示した。また、リッチガスの相変化は気体から二相混合物であるが、濃密相 CO<sub>2</sub> の場合は液体から二相混合物であるという違いがある。図 3.3-2 に天然ガスと CO<sub>2</sub> の減圧挙動の比較を示す。

## 3) West Jefferson 実験（部分ガスバースト試験）

一般に、ガスパイプラインのバースト（内圧破壊）は長くて幅が広く、液体パイプラインのバーストは短くて狭いという違いがある。濃密相 CO<sub>2</sub> は高压の液体であるため、濃密相 CO<sub>2</sub> パイプラインでは液体としてき裂が始まり、ガスの泡が形成される飽和圧力まで急速に減圧されることになる。この場合液体あるいは気体どちらのバースト形状になるか、部分ガスバースト試験が行われた。その結果、CO<sub>2</sub> または CO<sub>2</sub> を多く含む混合物を輸送する大径高じん性のパイプラインでのバーストは、液体パイプラインの短くて狭いバースト、またはガスパイプラインの長くて幅が広いバーストのどちらの形状にもなる可能性が示された。実験結果を図 3.3-3 に示す。

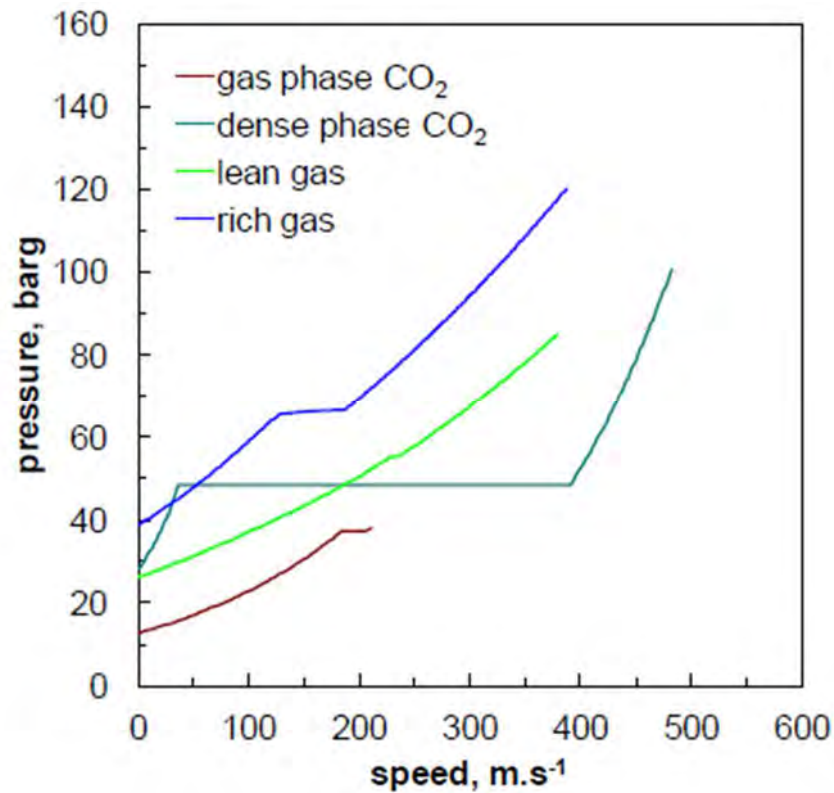


図 3.3-2 天然ガスと CO<sub>2</sub> の減圧挙動



図 3.3-3 West Jefferson 実験結果（左は液体として、右はガスとしてのバースト形状）

#### 4) フルスケールき裂伝播実験

フルスケールき裂伝播試験が 2 回行われた。CO<sub>2</sub> 中の不純物濃度が高いほど、液相から気液二相に遷移する飽和圧力が高くなるため、き裂伝播は阻止されにくくなる。実験の目的は、V ノッチ衝撃エネルギー（じん性）250 J の標準的なラインパイプで、どこまでの不純物レベルに対応できるかを確認することにあった。供試パイプは、CCS プロジェクトで使用される上限の直径、管厚、および材料グレードを想定し、外径 914 mm、管厚 25.4 mm、グレード L450 (X65) とした。1 回目のテストは 飽和圧力予測値 81 barg の流体条件で、2 回目のテストは 同じく 74 barg の流

体条件で行われた。どちらの実験でも、高速延性破壊はき裂の起点で想定どおり始まり、テストセクション内で停止した。実験結果を図 3.3-4 に示す。



図 3.3-4 初回、2 回目のフルスケールき裂伝播実験

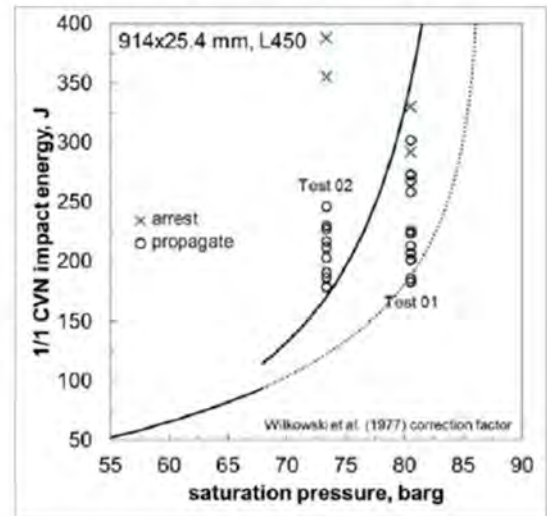


図 3.3-5 き裂伝播試験結果

この実験により、一般的な製品ラインパイプにおいて、破壊の伝播と阻止が発生する可能性があることが確認された。図 3.3-5 は、2 回の実験結果を破壊停止じん性の予測計算値に対してプロットしたものである。停止予測値以上でも伝播を続けているプロット点もあり、安全側の評価とは言えない。

従来、進展中の延性破壊を阻止するためにパイプ本体に必要なじん性を予測する手法として、TCM (Battele Two Curve Model : バッテル 2 カーブ法) が使用されてきた。しかしながら、2 つのフルスケールき裂伝播実験で、TCM を濃密相 CO<sub>2</sub> パイプラインに適用するのは適切ではないことが示された。したがって、現在の状況では、濃密相 CO<sub>2</sub> 混合物のパイプラインの破壊停止特性を評価するには、フルスケールテストによる実測が必要である。

## (6) 結論

COOLTRANS の下で完了した研究では、漂流する有害な cloud<sup>44</sup>から生じる危険は、天然ガスなどの可燃性流体と比較した場合、リスク曲線が異なる形状となることが示された。これを図 3.3-6 に示す。図 3.3-6 では、一般的な高圧天然ガスパイプラインと、直径が大きく管厚が大きい濃密相 CO<sub>2</sub> パイプラインについて、パイプライン両側の離隔距離に対してリスク値がプロットされている。ここで、天然ガスパイプラインは、熱的危険による人的リスク (individual risk) は高いものの、パイプラインからの限られた距離内でゼロに低下する一方、濃密相 CO<sub>2</sub> パイプラインは、人的リスクの絶対値は低いものの、パイプラインからかなりの距離に及ぶことを示している。

その結果、人的リスクと社会リスクのバランスは CO<sub>2</sub> パイプラインごとに異なる。また、リスクの絶対値は低いものの、危険な cloud がパイプラインから離れた人々に到達する可能性があるため、社会的リスクが高まる。

<sup>44</sup> CO<sub>2</sub> 気体とドライアイスの高濃度の塊、低温により水分が凝縮して霜を含むと白く見え、cloud (雲状) になる。地表に達した場合 blanket と呼ばれる。

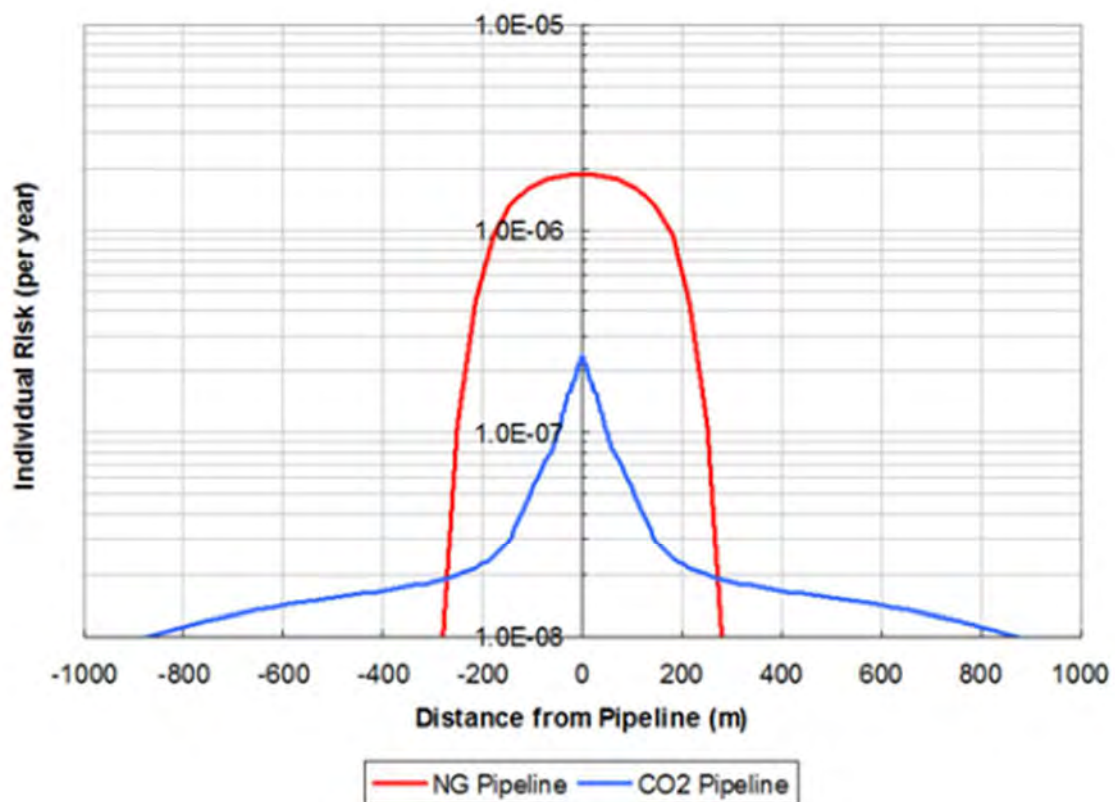


図 3.3-6 パイプラインからの距離による人的リスク

COOLTRANS 研究プログラムにおける基本的な CFD ベースのモデリング研究により、社会的リスクを含む問題に対処するために必要な理論的理解が得られた。さらに、より実用的なリスク評価モデルを適用して、上記の要因に対する結果の感度を調査し、CO2 パイプラインに必要な変更について提言がなされた。

英国では、高圧パイプラインの安全な敷設と設計に関して、技術標準 IGEM/TD/1 および実施基準 PD 8010-1 にて基本原則が規定されている。COOLTRANS の研究結果を踏まえて、これら従来の要求事項を CO2 パイプラインに拡張する提案が策定された。

### 3.3.4 COSHER<sup>45)</sup>

#### (1) 概要

COSHER JIP プロジェクト（CO2Safety, Health, Environment and Risk - Joint Industry Project）には、明確に規定された条件下での放出と拡散のデータを提供するための大規模実験の実施が含まれており、CO2 濃密相高圧埋設パイプラインの全断面破壊（full bore rupture）実験が行われた。収集されたデータは、モデルの開発と検証に役立つだけでなく、大規模な地下 CO2 パイプラインの破断によるリスクをより深く理解するのに役立たせることができる。

<sup>45)</sup> M. Ahmad ら、COSHER joint industry project: Large scale pipeline rupture tests to study CO2 release and dispersion

実験は、表 3.3-7 に示す参加企業・組織により共同実施され、英国カンブリア州の Spadeadam にある DNV-GL テストサイトで実施された。

表 3.3-7 COSHER プロジェクトの参加企業・組織<sup>46)</sup>

| 役割      | 企業・組織名      | 国     |
|---------|-------------|-------|
| コーディネータ | DNV         | ノルウェー |
| パートナー   | Kema        | オランダ  |
| パートナー   | Gasunie     | オランダ  |
| パートナー   | SatoilHydro | ノルウェー |
| パートナー   | NatonaGrid  | 英国    |
| パートナー   | Total       | フランス  |
| パートナー   | GDF Suez    | フランス  |
| パートナー   | Petrobras   | ブラジル  |
| パートナー   | Eni         | イタリア  |
| パートナー   | Enagas      | スペイン  |
| パートナー   | Gassco      | ノルウェー |
| パートナー   | 東京ガス        | 日本    |
| パートナー   | Air Liquide | フランス  |

## (2) 背景

CO<sub>2</sub> 輸送パイプラインの安全ゾーンを決定するためのモデルの開発をサポートするために、実験データを提供し、放出と漏洩の危険性についての理解を深めるための実験研究プログラムが開始された。これらのプログラムの 1 つに、濃密相 CO<sub>2</sub> パイプラインの安全な設計、建設、運用に関する知識のギャップに対処することを目的として、National Grid によって設定された COOLTRANS があった。このプログラムには、理論的研究だけでなく実験的研究も含まれていた。他にも複数の CO<sub>2</sub> の放出と拡散を調査する研究や出版された文献があるにもかかわらず、モデルの検証を可能にする現実的なスケールのパイプライン破断試験に基づく追加の信頼できるデータが入手できることは有用であり、そこで、COSHER が行われた。

## (3) 目的

実験施設は、液相の流出を可能な限り長く促進するように設計された。実験中、試験施設の流体圧力、流体温度、壁温度の測定と、分散ガス雲内の CO<sub>2</sub> 濃度等高線と温度の測定データを収集することで、濃密相 CO<sub>2</sub> パイプラインの安全な設計、建設、運用に関する知識のギャップに対処することを目的とした。

<sup>46)</sup> 世界の CCS の動向 2014、<https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/192398/global-status-ccs-2014-japanese.pdf>

#### (4) 実験内容

実験施設は、リザーバーとパイプラインループからなり、ループの中央に 4m の破断スプール (Rupture Spool) がセットされた。実験施設の概略図を図 3.3-7 に、パイプラインループの規格と寸法を表 3.3-8 に示す。

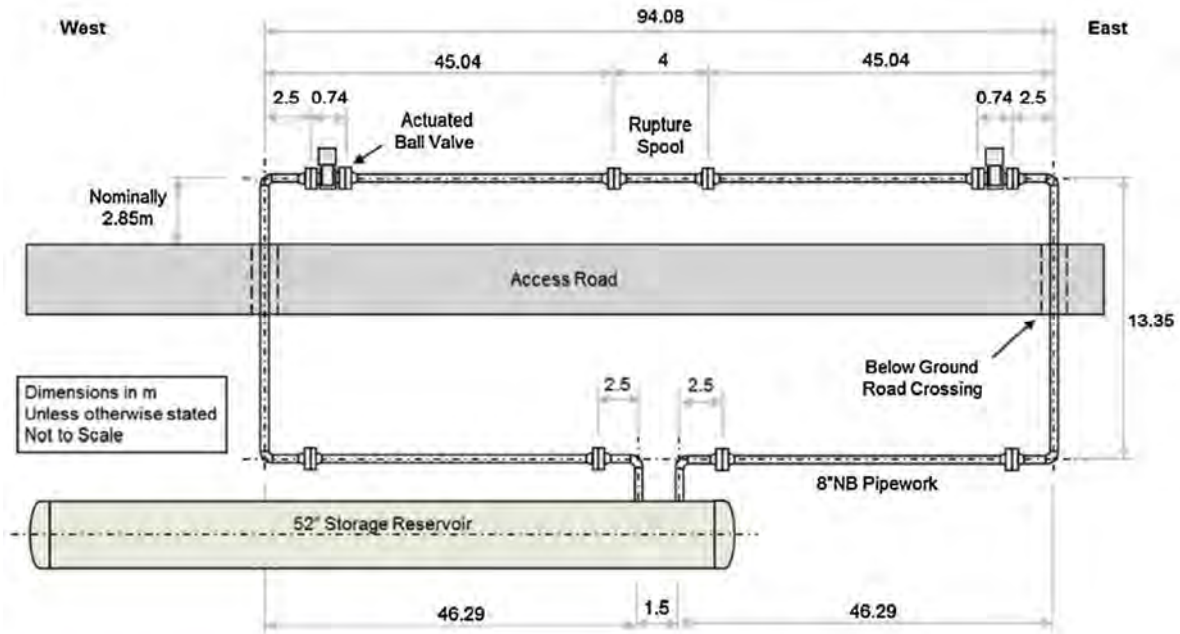


図 3.3-7 実験施設の概略図

表 3.3-8 パイプラインループの規格と寸法

|       | リザーバー                  | パイプラインループ            |
|-------|------------------------|----------------------|
| 鋼材    | API-5LX80              | A333 grade 6         |
| 外径    | 1320.8mm               | 219.1mm              |
| 管厚    | 25.8mm                 | 12.7mm               |
| 内径    | 1269.2mm               | 193.7mm              |
| 長さ    | 117.1 m(ドーム端部間)        | 226.6m               |
| 内容積   | 148.752 m <sup>3</sup> | 6.677 m <sup>3</sup> |
| 内容積合計 | 155.429 m <sup>3</sup> |                      |

パイプラインループは純粋な CO<sub>2</sub> (99.99%) で名目上 15 MPa まで加圧された。また、大気温度 17.4℃、リグ内の流体温度 13℃ の比較的低風条件（卓越風速約 2 m/s）で実施された。その時、実験設備の中には約 150 トンの濃密相 CO<sub>2</sub> が保持されていた。そして、破断スプールの頂部に配置された成型爆薬によって、き裂が誘発され、破断スプールの両側のパイプの全口径断面から濃密相 CO<sub>2</sub> が放出された。

#### (5) 実験結果

複数回行われた実験の一例として、実験条件を表 3.3-9 に示す。

表 3.3-9 実験条件

|              |            |
|--------------|------------|
| 実験装置内圧力      | 15.08 MPa  |
| リザーバー内流体平均温度 | 13.1 °C    |
| リザーバー外壁平均温度  | 14.2 °C    |
| 実験装置内貯留量     | 146,800 kg |
| 外気温度         | 17.4 °C    |
| 風速           | 1.9 m/s    |
| 風上方向         | ほぼ西        |
| 大気圧          | 99,700 Pa  |
| 相対湿度         | 71.5 %     |

破裂直後、CO<sub>2</sub> と土が空中に放出され、10 秒後 plume（視認可能な cloud）は高さ 50m、幅 125m に、20 秒後には最大高さ約 60m に達した。このとき、南北に噴出した plume は地上に落下し、南北と東に広がり始めた。約 1 分後、風上方向(西)にも広がった。目に見える cloud は、破裂位置から約 400m の風下まで到達した。リザーバーの出口部分の温度は 170 秒で約 -27°C になり、破裂両側のバルブを閉じた（閉鎖完了は 204 秒）。破裂時に形成されたクレーターは、直径約 5m、深さは最大 1.25m であった。図 3.3-8 に破裂後のパイプとクレーター、図 3.3-9 に破裂後の cloud を示す。



図 3.3-8 破裂後のパイプとクレーター



図 3.3-9 破裂 120 秒後の視認可能な cloud

リザーバー内及びパイプライン内の CO<sub>2</sub> の圧力、温度の測定値を図 3.3-10、図 3.3-11 に示す。

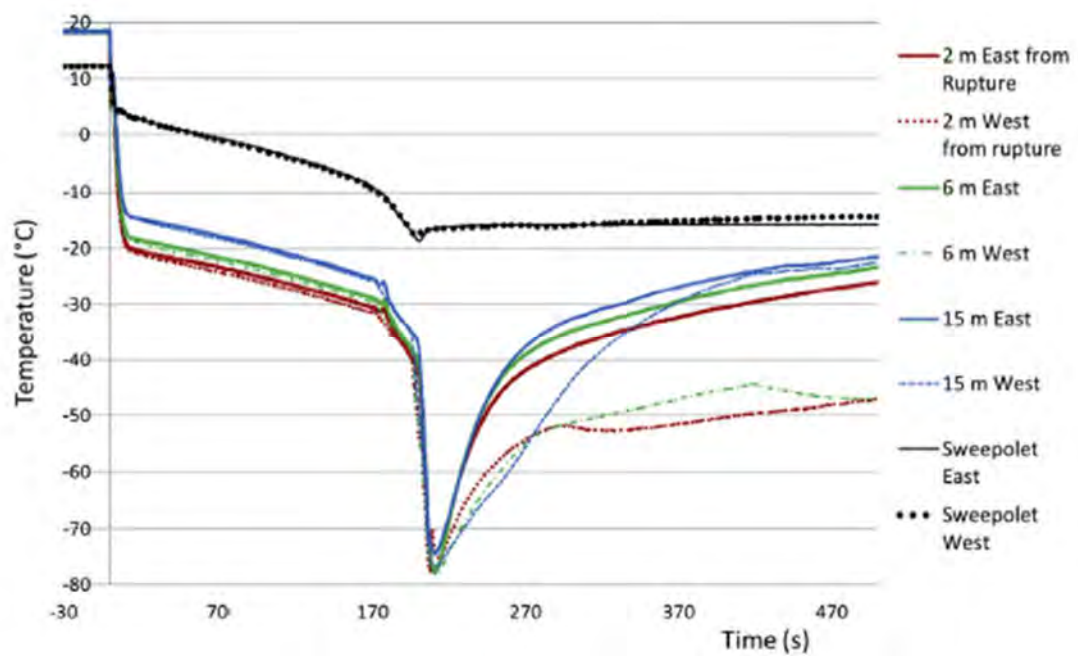


図 3.3-10 パイプライン内の CO<sub>2</sub> の温度変化

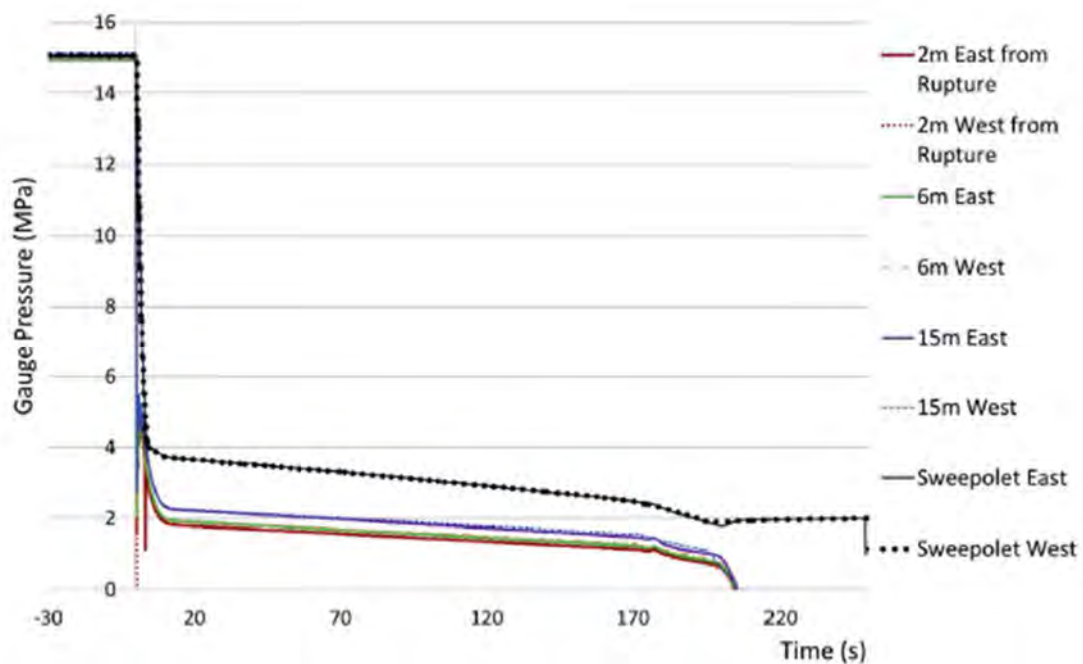


図 3.3-11 パイプライン内の CO<sub>2</sub> の圧力変化

温度はパイプライン破裂部の両側（East と west）で測定し、最低温度は破裂部から 2m の位置で約 $-78^{\circ}\text{C}$ であった。約 204 秒でバルブが閉じた時、sweepolet west はバルブによりリザーバー側になるので圧力が上昇している。図 3.3-12 に破裂位置からの放射線状の測定距離（地表 1m）における CO<sub>2</sub> 濃度の変化を示す。

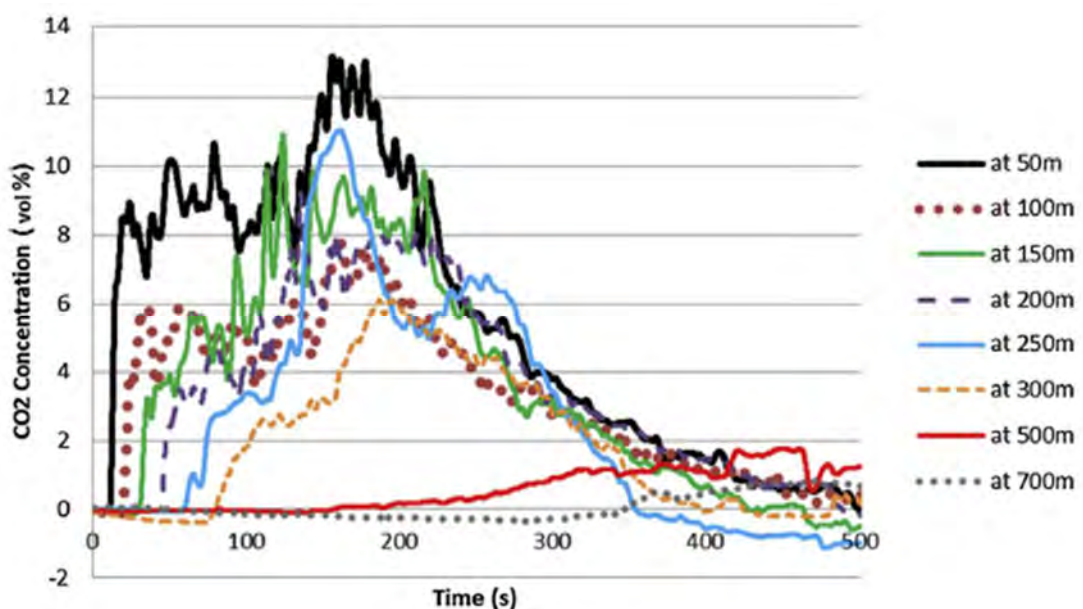


図 3.3-12 風下の CO<sub>2</sub> 濃度の変化

図 3.3-12 では、破断地点から 250m 地点までのデータでは、風速が約 2m/s であるのに CO<sub>2</sub> ガスが約 4m/s で移動している。この差は、クレーターから放出された後の冷たい CO<sub>2</sub> ガスの重力による下降によるもので、距離が離れると CO<sub>2</sub> ガス速度が遅くなる。

## (6) 結論

比較的低風条件（約 1.9 m/s）で大規模パイプライン破裂試験からのデータを収集することができた。この大規模実験は、さらなる排出および拡散モデルの検証、および CO<sub>2</sub> パイプラインのさらなるリスク分析に使用された。

#### 4. おわりに

2023 年 3 月に経済産業省が公表した「CCS 長期ロードマップ検討会」の最終取りまとめにおいては、2050 年時点で年間 1.2～2.4 億トンの CO<sub>2</sub> 貯留を可能とすることを目安に、2030 年までの事業開始に向けた事業環境を整備し、2030 年以降本格的な CCS 事業を展開するとの目標が示された。

「CCS 事業への政府支援」の一環として、2023 年 6 月に 7 つの「先進的 CCS 事業」が選定され、2030 年の事業開始に向けた取組みが進められている。

また、2024 年 1 月の総合資源エネルギー調査会資源・燃料分科会カーボンマネジメント小委員会と産業構造審議会保安・消費生活用製品安全分科会産業保安基本制度小委員会との合同開催による審議の中間とりまとめでは「2030 年事業開始の実現のためには、2026 年を目処に事業者による投資決定が行われる必要があるとの時間軸を踏まえ、支援制度の整備を進める」とされている。

本邦におけるカーボンニュートラルの実現に向けて、官民協調のもと、CCS 事業（特にそのうち CO<sub>2</sub> パイプライン輸送事業）が遅滞なくかつ円滑に立ち上がることを強く期待したい。

## 二次利用未承諾リスト

報告書の題名：C02パイプラインの技術的ガイドライン  
に関する調査

委託事業名：CO2パイプラインのガイドライン策定に向けた調査等業務

受注事業者名:一般財団法人エンジニアリング協会

[illegible]