

平成 26 年度環境配慮型 C C S 導入検討事業委託業務

報 告 書

平成 2 7 年 3 月

みずほ情報総研株式会社
独立行政法人産業技術総合研究所
株式会社東芝
千代田化工建設株式会社
日揮株式会社
株式会社クインテッサジャパン

目 次

要約	1
Executive Summary	3
1. 二酸化炭素分離・回収プロセスの環境負荷評価	5
1.1. 分離・回収プロセスの環境負荷の実態把握	5
1.1.1. 二酸化炭素吸収液の主剤として用いられる化学物質	5
1.1.2. 分離・回収プロセスからアミン類等の排出が想定される経路	6
1.1.3. アミン類の分解・劣化に影響を与える操業条件	7
1.1.4. 分離・回収プロセスの環境リスク評価事例	7
1.1.5. 分離・回収技術を保有する事業者へのヒアリング	9
1.1.6. 分離・回収設備を経由させることによる排ガス中の成分の排出状況の変化	11
1.2. アミン系吸収液からの放散試験	13
1.2.1. 高感度分析技術のベンチマーク	13
1.2.2. アミン放散に影響する因子	17
1.2.3. H27 放散試験に向けてのコンセプト検討	17
1.3. 環境リスク評価	19
1.3.1. 環境リスク評価の対象物質（暫定）	19
1.3.2. 有害性データの収集方針	22
1.3.3. 有害性データの収集状況	22
1.4. 排出抑制対策の検討	25
1.4.1. 排出抑制試験装置について	25
1.4.2. 排出抑制試験装置からのガスサンプリング	27
1.5. 二酸化炭素分離・回収実証試験に向けた予備設計	29
1.5.1. 二酸化炭素分離・回収設備概要	29
1.5.2. 二酸化炭素分離・回収設備設計に関わる調査	29
1.5.3. 二酸化炭素分離・回収設備基本計画	32
1.5.4. 今後の検討事項	34
1.6. 参考文献	36
2. シャトルシップによる二酸化炭素輸送・貯留システムの検討	40
2.1. 国内外における船舶輸送の動向調査	42
2.2. 輸送・貯留条件の抽出	44
2.2.1. 基本条件の設定	45
2.2.2. 輸送システム余裕能力（荒天休止への備え）の初期検討	45
2.2.3. 基本計画	46
2.2.4. 洋上オペレーション計画のための海象指標の策定	47

2.2.5.	船舶を用いた沖合 CCS のための物流シミュレータの開発.....	60
2.3.	輸送・貯留の要素技術及びトータルシステムの検討.....	68
2.3.1.	CO ₂ 液化・荷役システム.....	68
2.3.2.	想定されるモニタリング項目とコミュニケーションブイの役割.....	71
2.4.	船上直接圧入のための構成要素の基本設計等.....	72
2.4.1.	フレキシブルライザーパイプ(FRP)の構造設計.....	73
2.4.2.	波浪中運動解析.....	75
2.4.3.	FRP 準静的解析+動的挙動解析.....	76
2.4.4.	荷重条件の設定.....	79
2.4.5.	ピックアップ手順+操作内容+嵌合機構の考案.....	79
2.4.6.	フレキシブルライザーパイプ(FRP)の部材検討.....	89
2.4.7.	フレキシブルライザーパイプ(FRP)のピックアップ解析.....	110
2.4.8.	フレキシブルライザーパイプ(FRP)上端の遮断弁.....	117
2.5.	シャトルシップの基本設計.....	118
2.5.1.	船体.....	118
2.5.2.	DPS(自動船位保持システム).....	123
2.5.3.	CO ₂ 圧入設備.....	124
2.6.	緊急時の対応方法の検討.....	125
2.7.	シャトルシップ輸送・貯留実証試験に向けた検討.....	127
2.7.1.	ピックアップオペレーション試験の計画.....	128
2.7.2.	海底設備時に関する制約条件の調査.....	135
2.7.3.	液化 CO ₂ 流動試験.....	135
2.8.	参考文献.....	138
3.	CCS の円滑な導入手法の検討.....	140
3.1.	国内外の動向調査.....	140
3.1.1.	CCS に関する国内外の技術・制度及び関連動向調査.....	140
3.1.2.	長期的エネルギー及び電力需給分析による環境配慮型 CCS の優位性・課題の比較整理.....	142
3.2.	経済性等評価.....	148
3.2.1.	経済性評価.....	148
3.2.2.	ライフサイクル CO ₂ 評価.....	155
3.3.	社会受容性の検討.....	158
3.3.1.	ステークホルダの認識の把握.....	158
3.3.2.	CCS の社会受容性向上及び合意形成に向けた戦略の検討.....	161
3.4.	円滑な導入手法の検討.....	177
3.4.1.	CCS の導入に向けた課題の整理及び解決方策の検討.....	177

3.4.2.	副次的効果の検討.....	181
3.5.	海外展開の検討.....	186
3.5.1.	展開手法等の検討.....	186
3.5.2.	二国間クレジット制度の有効性や課題、解決方法についての整理.....	186
3.6.	参考文献.....	191
4.	実証試験の実施に向けた検討.....	194
4.1.	実証サイトの検討.....	194
4.1.1.	背景及び目的.....	194
4.1.2.	方法.....	194
4.1.3.	結果及び考察.....	194
4.2.	モニタリング手法の検討.....	213
4.2.1.	海底下地下におけるハイドレートバリア層の基礎特性試験.....	215
4.2.2.	海底下地下におけるハイドレートバリア層形成に関する数値シミュレーション	218
4.2.3.	複数計測点情報からのCO ₂ 漏出位置推定法の開発.....	223
4.2.4.	海底面漏出形態予測法の開発.....	227
4.2.5.	連続モニタリングシステムに係る技術動向調査および開発.....	231
4.2.6.	連続モニタリングセンサーの開発及び性能評価.....	235
4.3.	二酸化炭素回収・貯留一貫実証試験の実実施計画.....	240
4.3.1.	背景及び目的.....	240
4.3.2.	方法.....	240
4.3.3.	結果及び考察.....	241
5.	検討会等の開催.....	244
5.1.	検討会.....	244
5.2.	シンポジウム.....	247

表 目 次

表 1-1	二酸化炭素吸収液の主剤として用いられる典型的なアミン	6
表 1-2	調査対象文献と概要	8
表 1-3	分離・回収技術を保有する事業者へのヒアリングの概要	9
表 1-4	三川 CO ₂ 分離回収プラントに関する情報整理の概要	9
表 1-5	分離・回収技術を保有する事業者へのヒアリングの実施スケジュール	10
表 1-6	世界の代表的な研究機関/プラントで採用されている計測方法	14
表 1-7	世界の代表的な研究機関/プラントで採用されている分析装置の性能の比較 ..	15
表 1-8	アミンの放散量に影響する因子のまとめ	17
表 1-9	調査対象文献と概要	20
表 1-10	MEA 溶液を用いた分離・回収プロセスから排出される可能性のある化学物質	21
表 1-11	MEA 溶液関連の化学物質に関する有害性データの存在状況	23
表 1-12	MEA 溶液関連の化学物質に関する有害性データの一例	24
表 1-13	候補地調査結果	30
表 1-14	既設設備調査結果	31
表 2-1	国内外の CO ₂ 船舶輸送研究事例の比較	43
表 2-2	輸送システム余裕能力（荒天休止への備え）の初期検討	45
表 2-3	定常運航の所要時間と必要船舶数	46
表 2-4	シャトルシップ方式輸送・貯留システムの物流に関するパラメータ	61
表 2-5	所要時間モデル（暫定）	62
表 2-6	5年間の波浪データの代表値（地点 B の例）	64
表 2-7	戦略別の年平均大気放出量割合の推移	67
表 2-8	CO ₂ 液化・荷役システムの主要検討項目と検討内容及び検討方法	69
表 2-9	選定候補:CO ₂ を液体に保つために必要な条件	70
表 2-10	コミュニケーションバイに求められる観測・通信項目	72
表 2-11	FRP 設計条件	74
表 2-12	フレキシブルライザーパイプ(FRP)の構造案	75
表 2-13	FRP 静解析結果	77
表 2-14	近接位置 X=903m での動解析結果	78
表 2-15	遠方位置 X=973m での動解析結果	79
表 2-16	動解析結果まとめ	79
表 2-17	インターロック管の側圧試験結果	90
表 2-18	繊維補強テープ諸元	91
表 2-19	巻き付け条件	92

表 2-20	試験条件	93
表 2-21	繊維補強条諸元	97
表 2-22	高強度鋼線軸力補強条物性値	97
表 2-23	繊維補強条物性値	98
表 2-24	エンジニアプラスチックの比重と圧縮強さ[18]	103
表 2-25	FRP とピックアップワイヤーの構造	111
表 2-26	事前解析結果（潮流 0deg）	113
表 2-27	事前解析結果（潮流 180deg）	114
表 2-28	動解析結果（潮流 180deg、ワイヤー巻き上げ長 180m、浮体位置 1519m）	115
表 2-29	ピックアップ時の危険度の定義案	116
表 2-30	船体の設計の考え方	119
表 2-31	シャトルシップの主要目(preliminary)	121
表 2-32	本船型における波浪中運動解析の計算条件	122
表 2-33	嵌合位置における応答の短期予測結果（有義波高 3.0m）	122
表 2-34	海底設備の検討課題	135
表 2-35	試験結果	137
表 3-1	電力システム改革の経過等	143
表 3-2	一般電気事業者における火力電源入札の実施状況（平成 26 年度）	144
表 3-3	二酸化炭素排出削減に取り組む自主的枠組（電気事業連合会）	145
表 3-4	環境配慮型 CCS の要素と CCS プロセスとの関係性	147
表 3-5	超臨界圧石炭火力発電所の諸元	149
表 3-6	超々臨界圧石炭火力発電所の諸元	149
表 3-7	石炭ガス化複合発電所の諸元	150
表 3-8	天然ガス複合発電所の諸元	150
表 3-9	CCS 一貫配備の火力発電所の設備投資（億円）	151
表 3-10	発電技術別・輸送距離別の CCS コスト	152
表 3-11	シャトルシップ輸送と海底パイプライン輸送のコスト比較	154
表 3-12	CCS に関するステークホルダと現状の認識	159
表 3-13	合意形成を支援する方法論やツールとその概要	167
表 3-14	CCS に関連する制度論に対する論点	178
表 3-15	経済効果試算に用いた費用	182
表 3-16	経済効果試算結果（設備投資）	183
表 3-17	経済効果試算結果（操業費）	183
表 3-18	海洋に関する施策に関し、政府が総合的かつ計画的に講ずべき施策：海洋 に関する国民の理解の増進と人材育成	184

表 3-19	メキシコの回収・貯留プロジェクト概要	188
表 4-1	追加調査項目（案）	196
表 4-2	8 海域における諸元一覧表	211
表 4-3	実験の初期条件	221
表 4-4	実験に使用した砂の性状	228
表 4-5	pCO ₂ 及び pH センサーの情報	232
表 4-6	AUV の情報	233
表 4-7	影響因子の属性分類	241
表 4-8	実証試験計画の検討結果	243
表 5-1	環境配慮型 CCS 導入検討会 委員リスト	244
表 5-2	二酸化炭素分離・回収環境負荷評価分科会 委員リスト	245
表 5-3	シャトルシップ輸送・圧入技術分科会 委員リスト	245
表 5-4	環境配慮型 CCS 導入検討会 開催状況	245
表 5-5	二酸化炭素分離・回収環境負荷評価分科会開催状況	246
表 5-6	シャトルシップ輸送・圧入技術分科会開催状況	246
表 5-7	プログラム	248

目 次

図 1-1 二酸化炭素分離・回収プロセスの環境影響の概念図	5
図 1-2 アミンの一般構造式	6
図 1-3 分離・回収プロセスからの排出が想定され得る経路	7
図 1-4 アミン類の分解・劣化に影響を与える操業条件	7
図 1-5 文献2および文献3で考慮された曝露シナリオ	8
図 1-6 分離・回収設備を経由させることによる排ガス中の成分の変化[3]	12
図 1-7 ガス吸引速度(V_s)と配管内ガス速度(V_0)の関係模式図	14
図 1-8 排ガス配管から計測機器への導入イメージ図	16
図 1-9 MEA 吸収液を使用した際に、生成可能性のある化合物	18
図 1-10 排出抑制試験装置の設置場所	25
図 1-11 排出抑制試験装置概要	26
図 1-12 ガスサンプリング箇所と計測方法	27
図 1-13 ガスサンプリングにおける留意点	27
図 1-14 サンプリングポート上流/下流の直管長	28
図 1-15 二酸化炭素分離回収設備プラント構成案	30
図 1-16 二酸化炭素分離・回収プロセス	33
図 1-17 二酸化炭素分離・回収設備配置案	34
図 2-1 シャトルシップ・洋上圧入方式説明図	40
図 2-2 シャトルシップ方式におけるソース・シンク・マッチング	40
図 2-3 本業務の検討フロー	41
図 2-4 輸送・貯留条件の検討フロー	44
図 2-5 貯留候補海域の位置	45
図 2-6 定常運航のタイムテーブル例	46
図 2-7 閾値 2.5m における静穏率	49
図 2-8 閾値 2.5m における 7 日間静穏率	49
図 2-9 閾値 2.5m における再現期間 34 年最大連続荒天期間(日数)	50
図 2-10 海象データを考慮した CO ₂ 船舶輸送の 離散型事象シミュレーションのフロー ーチャート	53
図 2-11 作業限界波高(閾値)に対する未超過確率	54
図 2-12 作業限界波高に対する連続超過日数	54
図 2-13 4 か月間の有義波高のシミュレーション例	55
図 2-14 4 か月間の陸上タンク内貯蔵量のシミュレーション例	55
図 2-15 4 か月間の大気放散累積量のシミュレーション例	56
図 2-16 34 年間の大気放散累積量に対する Ns の影響	56

図 2-17	34 年間の大気放散累積量に対する H_{CR} の影響	57
図 2-18	34 年間の大気放散累積量に対する α の影響	58
図 2-19	34 年間の大気放散累積量に対する N_T の影響	58
図 2-20	$N_S=1.0, \gamma=0\%$ の場合に必要輸送システム余裕能力度	59
図 2-21	$N_S=1.0, \gamma=1\%$ の場合に必要輸送システム余裕能力度	59
図 2-22	$N_S=1.0, \gamma=3\%$ の場合に必要輸送システム余裕能力度	59
図 2-23	ERA-Interim による地点 B の波浪時系列	64
図 2-24	定常運転時の運航計画で戦略なしの場合のシミュレーション結果の例	65
図 2-25	出港戦略と増強戦略を採用した場合のシミュレーション結果の例	66
図 2-26	5 年間のシミュレーション期間中に大気へ放出された CO_2 の累積量の推移	67
図 2-27	大気放出量割合と作業限界波高超過確率の関係	67
図 2-28	トータルシステムの構成要素と検討対象	68
図 2-29	CO_2 液化・荷役システムの検討フロー	69
図 2-30	CO_2 液化・荷役システムにおける CO_2 フロー	69
図 2-31	CO_2 液化・荷役システム	70
図 2-32	船上直接圧入システムにおけるコミュニケーションブイ	71
図 2-33	シャトルシップ洋上圧入方式 CCS の全体説明図	72
図 2-34	船上直接圧入システムの検討フロー	73
図 2-35	FRP 解析モデル	76
図 2-36	FRP 解析条件	77
図 2-37	FRP の嵌合部の荷重算定フロー	77
図 2-38	FRP のカタナリー形状	78
図 2-39	ピックアップ嵌合装置の素案	80
図 2-40	ピックアップの手順	81
図 2-41	ピックアップフロートのシャックルの付け替え	82
図 2-42	ブイの格納機構	83
図 2-43	ピックアップワイヤーの入射角および接触回避策	84
図 2-44	円錐ガイドの固定方法	85
図 2-45	先端コーンと円錐ガイドの結合および取り外し機構	86
図 2-46	FBMA 方式のローディングアーム	87
図 2-47	ローディングアームと FRP 頂部の結合機構案 (水平アクセス方式)	87
図 2-48	ローディングアームと FRP 頂部の結合機構案 (誘導カップ方式)	88
図 2-49	インターロック管	89
図 2-50	インターロック管の曲げ試験	90
図 2-51	インターロック管の側圧試験方法	90

図 2-52	繊維補強テープ巻き付け後外観	92
図 2-53	試料外観及び防護容器内設置状況	93
図 2-54	圧力チャート	94
図 2-55	昇圧中の試料状況（捻れ+曲げ）	94
図 2-56	内圧破壊部	95
図 2-57	高強度鋼線試作品	96
図 2-58	PET 線試作品	96
図 2-59	繊維補強条試作品	97
図 2-60	軸力補強層の巻き付け状況	99
図 2-61	検証実験用プレフォーム加工性評価治具	100
図 2-62	プレフォーム加工性評価治具の検証実験状況	100
図 2-63	プレフォーム加工性評価治具	102
図 2-64	プレフォーム加工性評価状況	102
図 2-65	巻き付け性評価状況	103
図 2-66	疲労強度の保持率、比強度・比弾性率[20]	104
図 2-67	水中重量による動的影響の変化	106
図 2-68	FRP 末端の概算構造	107
図 2-69	従来構造末端モデル	107
図 2-70	末端モデル比較（左：従来構造、右：軽量化構造）	108
図 2-71	組み立て後の末端モデル（左：従来構造、右：軽量化構造）	108
図 2-72	末端モデルの引張試験状況	109
図 2-73	FRP 末端の改良構造	110
図 2-74	ピックアップ解析モデル	112
図 2-75	事前解析結果（潮流 0deg）	113
図 2-76	事前解析結果（潮流 180deg）	114
図 2-77	ピックアップ時の危険度マップ（潮流 180deg）	116
図 2-78	ピックアップ時のオペレーション方法案	117
図 2-79	本業務開始時点の想定船型	120
図 2-80	シャトルシップの概略配置図	121
図 2-81	推進システムの配置	123
図 2-82	通常の DPS の制御ロジック	124
図 2-83	本 DPS の制御ロジック	124
図 2-84	システム全体の緊急時の安全確保手順の検討フロー	126
図 2-85	ローディングアームおよびカプリングフランジ動作試験	129
図 2-86	円錐ガイド嵌合試験	130
図 2-87	FRP 上端部引き上げ試験	130

図 2-88	FRP 上端部引き上げ試験 BS 案	131
図 2-89	FRP 上端部引き上げ試験 BR 案	132
図 2-90	FRP 上端部引き上げ試験 Bend Stiffener + Bend Restrictor 案	132
図 2-91	ピックアップオペレーション洋上試験の概要	133
図 2-92	ピックアップオペレーション試験の作業船に搭載する装置	134
図 2-93	簡易試験のイメージ	136
図 2-94	試験装置	136
図 3-1	電力システム改革のロードマップ	143
図 3-2	二酸化炭素排出削減の近年の状況（電気事業連合会）	145
図 3-3	発電技術別・輸送距離別の CCS コスト	153
図 3-4	輸送距離別と発電技術別の CCS コスト構造	153
図 3-5	CCS 一貫配備の発電部門と CCS 部門の輸送距離別電力コスト	154
図 3-6	シャトルシップ輸送と海底パイプライン輸送のコスト比較	155
図 3-7	kWh（送電端）あたりのライフサイクル CO ₂ 排出量評価結果	157
図 3-8	CCS の社会受容性に対する意見	158
図 3-9	CCS に対する同僚たちの態度	159
図 3-10	サイエンスコミュニケーションの適用事例	168
図 3-11	エネルギー・環境の選択肢に関する討論型世論調査	169
図 3-12	ソフトシステムズ方法論	170
図 3-13	CCS Knowledge Base の構成	171
図 3-14	ESL における信頼性評価の算出方法	172
図 3-15	【経済産業省・NEDO】平成 25 年度二国間クレジット制度実現可能性調査 （FS）／MRV 適用調査／実証事業	187
図 4-1	適地調査の概要	195
図 4-2	反射法地震探査の断面例	197
図 4-3	V _p /V _s 比断面に見られる炭化水素兆候	198
図 4-4	メキシコ湾の海底扇状地における P 波インピーダンスと S 波インピーダンス	199
図 4-5	海底扇状地における砂岩泥岩含有率の変化	199
図 4-6	V _p /V _s 断面および低 V _p /V _s ゾーンと坑井での低 V _{sh} 値の比較	200
図 4-7	メタンハイドレート濃縮帯における P 波インピーダンスプロファイルと BSR	202
図 4-8	フルウェーブインバージョンによって得た V _p /V _s 断面	203
図 4-9	マイナーイベントの解釈と Wheeler ダイアグラム	204
図 4-10	マイナーイベントの出現パターン	205
図 4-11	3D-Wheeler ダイアグラムと等時間スライスの RGB 法による立体表示の例	

.....	206
図 4-12 周波数成分の RGB ブレンド法による表示例.....	207
図 4-13 マイナーホライゾン間の時間層厚の変化から前進平衡作用が解釈できる例	208
図 4-14 反射イベントの振幅に着目した選択的な表示の例.....	210
図 4-15 多変量解析による地震波岩相解析の例.....	210
図 4-16 モニタリング手法の検討における各課題の位置づけ.....	214
図 4-17 圧力容器内での温度上昇と差圧の時間変化に関する計算結果.....	221
図 4-18 二次元計算領域.....	224
図 4-19 各タイムステップにおける DIF の最小値の推移.....	224
図 4-20 図 4-18 内の各青点から計算された限界感度の差の二乗平均のコンター図	225
図 4-21 実験装置の概略図.....	227
図 4-22 代表的な砂による気泡サイズの流量依存性.....	228
図 4-23 気泡放出の様子.....	229
図 4-24 水中速度と航行距離、モニタリング間隔の比較.....	234
図 5-1 シンポジウムへの参加理由.....	250
図 5-2 シンポジウムの満足度.....	251