



二酸化炭素地中貯留
技術研究組合

Geological Carbon Dioxide Storage
Technology Research Association



CO₂ 地中貯留技術事例集

Phase 02

貯留サイト選定

第2章 貯留サイト選定

目次

第2章 貯留サイト選定.....	1
2.1 はじめに.....	1
2.2 貯留サイトの選定手順.....	1
2.2.1 広域地質評価.....	2
(1) CO ₂ 地中貯留における堆積盆地の意義.....	2
(2) 堆積盆地の性格.....	2
(3) 広域地質評価に必要な情報と評価.....	3
(4) 広域地質評価のための文献資料等の収集.....	7
2.2.2 サイト選定作業.....	20
(1) サイト選定のための地質的評価項目.....	21
(2) サイト選定のための非地質的評価項目.....	30
2.2.3 サイト候補ランキング.....	33
(1) ランキング要素.....	33
2.2.4 サイト選定でのその他の留意点.....	34
(1) 地質データが欠落した地域でのサイト選定.....	34
(2) パブリック・エンゲージメント（住民関与）の注意点.....	34
(3) RCSP からの教訓.....	34
2.3 地下孔隙の所有権とサイト探査許可.....	35
2.3.1 孔隙スペース保有権.....	35
2.3.2 孔隙の所有権と地下探査権.....	36
(1) 世界の現状.....	36
(2) 日本.....	42
2.4 QUEST プロジェクトのサイト選定事例.....	44
2.5 まとめ.....	47
参考文献.....	48

第2章 貯留サイト選定

2.1 はじめに

貯留サイト選定は、基本計画に示される CO₂ 地中貯留事業の最初のフェーズであり、ここでは計画通りの CO₂ 圧入レートや圧入量を満たす候補サイトを選定する。この段階では地下情報が必ずしも十分ではなく、貯留能力、安全性、経済性の評価においては不確実性が大きい。このため、貯留サイト選定においては、複数の候補サイトを選定する必要がある。なお、地下情報不足に起因する不確実性は次の特性評価フェーズで軽減していくことになる。

2.2 貯留サイトの選定手順

貯留サイト選定は、まず広域地質評価として、公開文献資料や地下調査データを基に対象の排出源から分離した CO₂ の排出量に適したサイトを選定しなければならない。現在操業中の米国、カナダ及びノルウェーの CO₂ 地中貯留事業では、年間 CO₂ 圧入量が約 100 万トンであり、事業計画期間が 20～30 年となっている。また、貯留サイトは排出源の近傍にあれば、CO₂ 輸送コストが低く、貯留事業の経済性の観点から望ましい。

図 2.2-1 は地中貯留事業における候補サイト選定の考えやプロセスを概念的に示している (NETL, 2017)。まずは排出源との距離を念頭に、既存資料 (主に地下情報) を基に潜在的な区域 (Potential Sub-Regions) に対してスクリーニングを実施し、見込みがあるエリア (Selected Areas) を複数抽出する。

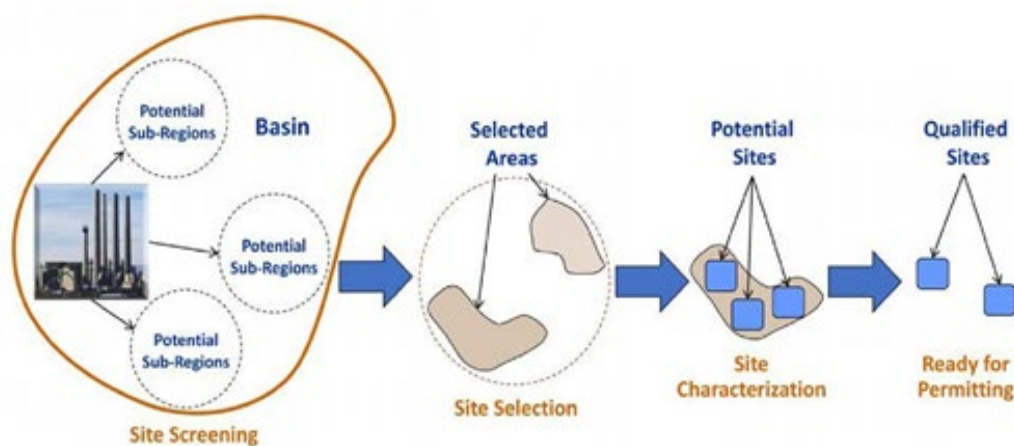


図 2.2-1 CO₂ 圧入サイト選定の概念図 (NETL, 2017)

次に、見込みがあるすべてのエリアから、追加の調査 (additional site-specific investigations) に値する複数の潜在的なサイト (Potential Sites) を特定する。これらの潜在的なサイトに対して、必要に応じて追加データを取得し、地中貯留事業に適した候補サイト (Qualified Sites) を決定する。

候補サイト選定に関しては、2017年に国際基準 (ISO 27914: 2017) が制定された。この国際規格は候補サイト選定のガイドラインとなるが、選定プロセスの具体的な評価基準 (criteria) は、

その国や地域の地質的特性を反映したものでなければならない。候補サイト選定時の評価基準には、地質学的地層構成 (geologic setting)、圧入対象層の貯留性能 (storage capacity, injectivity)、断層分布や地震活動 (faults, Earthquake activity)、CO₂ 分布予測やモニタリング (CO₂ plume size, CO₂ monitoring)、廃坑井分布などの項目が含まれる。

2.2.1 広域地質評価

(1) CO₂ 地中貯留における堆積盆地の意義

堆積盆地の規模はさまざまであり、その広がりには数百 km²、堆積物の厚さは 1,000m 以上に達する。また、一定の条件が満たされれば石油・天然ガス田が形成される。一般に石油・天然ガス鉱床の形成においては、根源岩の形成 (有機物の生産と保存)・熟成 (厚い堆積物による埋没) と生成・移動した炭化水素のトラップへの集積・保存が必要となる。これらの条件のうち、貯留層や遮蔽層も含めたトラップという地質条件は CO₂ 地中貯留にも共通するものであり、その意味で石油・天然ガス田が分布する堆積盆地は有利と言える。

(2) 堆積盆地の性格

堆積物の厚さが 1,000m 以上有する堆積盆地は地球表層の約 70% を占め、その数は約 600 個といわれている (図 2.2.1-1)。これらの堆積盆地の多くは、大陸プレート内部および縁辺部 (一部は大陸プレート間の衝突に伴う) に位置し、北米大陸中東部やユーラシア北部に分布する。一方、大陸プレート下への海洋プレートの沈み込み (subduction) に伴い形成される堆積盆地は、面積的には小さいものの、東アジアや東南アジアにおいて発達する。これらの地域は、自然地震が多い変動帯であるが、地質年代の若い堆積体が発達し、貯留層の孔隙率が大きく、地中貯留に有利な点もある。また沈み込みに伴い形成される島弧 (arc) の内側の背弧堆積盆 (例えば、日本の秋田-新潟堆積盆、インドネシアのスマトラ-ジャワ堆積盆) では、良好な根源岩の発達も相まって石油ガス鉱床が成立しており、地中貯留に好条件が揃っている。

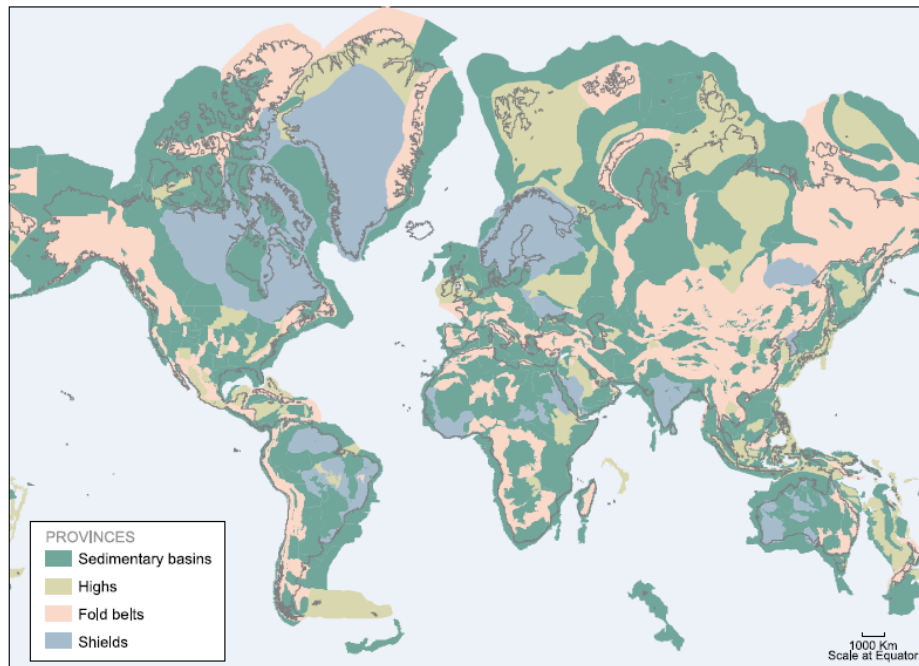


図 2.2.1-1 世界の主な堆積盆地の分布図 (IPCC, 2005)

(3) 広域地質評価に必要な情報と評価

サイト選定の初期段階では、広域的に地質条件などを評価し、堆積盆地の中で CO₂ 貯留に好条件の地域を抽出する。いくつかの CO₂ 地中貯留ガイドラインでは、この評価作業をスクリーニングと位置づけている。この段階では、国や地域で入手できる既存の広域地質調査文献資料を利用することが、効率的かつ経済的である。石油・天然ガス探鉱地域周辺の弾性波探査や坑井データがあれば、活用できる地下情報の精度が高く、対象範囲も広い。地下情報には層序、各層準の地下構造、各層準の厚さの変化などを示す図面も含まれることが多い。

以下では、米国イリノイ州の Decatur プロジェクト (CO₂ 圧入規模：500 万トン) 関連の公開情報を基に、広域地質評価の手順を示す。

① 層序の検討 (図 2.2.1-2)

各層準の岩質、地質年代、厚さなどの情報を基に貯留層と遮蔽層の組み合わせを選定する。選定対象地域が石油・ガス探鉱領域周辺であれば、貯留層の孔隙率、浸透率などの物性データも得られる可能性がある。

② 厚さ、広がり の検討 (図 2.2.1-3)

広域の等層厚線図に基づき、貯留層と遮蔽層の厚さの変化や水平的広がりを検討する。石油・ガス探鉱地域周辺においては弾性波探査や坑井データも多く、等層厚線図等の精度も高い。貯留層の厚さの水平的変化によっては、尖滅トラップなどの層位トラップの可能性を提示することもできる。可能ならば岩相変化も考慮のうえ、貯留層や遮蔽層としての適性を評価する。また、この段階で CO₂ 貯留量の概算も行うべきである。

③ 深度、構造の検討 (図 2.2.1-4)

特定層準 (貯留層上限/遮蔽層下限) の地下構造図 (structural map) や既存の地質情報を統合した広域の地質断面図に基づき、深度や構造の観点から貯留候補地域の適性を評価する。貯留効率や安全性の観点から、圧入 CO₂ の密度が比較的大きい超臨界状態を維持でき貯留効率の高い深度、一般的には 800m 以上の深度が望ましい。大深度では貯留層性状 (孔隙率、浸透率) 低下に伴い貯留性能も低下し、圧入コストが増加するため、深度には一定の制約がかかる。また深度の増加に伴い圧入に必要な動力も増加することから、やはりコスト面で圧入深度に制約がある。

貯留層圧力は、通常の対象深度では静水圧であり、超臨界条件になる深度は地下の温度に規制される。堆積盆地の平均的地温勾配は 1.5~5°C/100m 程度であるが、埋積する堆積物の年代が若い堆積盆地では地温勾配は 1°C/100m より小さくなることもある。一方、火山地帯、地熱地帯では 10°C/100m を超える場所もある。

地温勾配値は日本周辺では、グリーンタフ地域に代表される背弧盆地で高く、太平洋側の前弧盆地では低い傾向がある。地温勾配値を得るためには深部坑井で得られた温度情報が必要であり、日本では 300m 以深の 1,937 地点における坑井の温度データを使用して 1999 年に当時の地質調査所が「300 万分の 1 日本列島地温勾配図」を出版している。また、2004 年には「数値地質図 (CD-ROM) DGM P-5 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース」が出版されている。

SYSTEM	SERIES	LITHOLOGY	FORMATION				
PENNSYLVANIAN	DES MOINESAN		SPOON	Pennsylvanian coal seams			
	ADIRON		ABBOTT				
	MOYOKWAN		GASEYVILLE				
MISSISSIPPIAN	CHESTERIAN		KIRKCAD	Mississippian sandstone and carbonate oil reservoirs			
			DECOBA				
			CLONE				
			PALESTINE				
			BERNARD				
			WALTON				
			YONIA				
			TAR SPRINGS				
			DEB TIAN				
			HARDINGBURG				
	HAY						
	FRALLEYS						
	BEECH CREEK						
	CYPRESS						
FRIDENHOWER							
VULFERNAN		DOWNSCHEBELT					
		WARKLETOWN					
		BERNOLDT					
		AUX VASSES					
NEW ALBANYAN		STE. GENEVIEVE	New Albany Shale				
		ST. LOUIS					
		SALEM					
		ULLIN					
		FORT WAYNE					
		BORDEN					
		CHOUTEAU					
		DEVONIAN		MIDDLE		LINGLE	
						GRAND TOWER	
						CLEAR CREEK	
LOWER			BACKBONE				
			GRASSY KNOB				
			BAILEY				
SILURIAN	MAGNAN - CIVIGAN		MOCCASIN SPRINGS				
			ST. CLAIR				
	ALEXANDRIAN		SEXTON CREEK				
			EDGEWOOD				
ORDOVICIAN	DECATURIAN		MAGLICKETA (GROUP)	Maquoketa Shale			
			SALENA (GROUP)				
	CHAMPLAINIAN		PLATTEVILLE (GROUP)	St. Peter Sandstone			
			JOACHIM				
			DUTCHTOWN				
			ST. PETER				
			EVERTON				
	CAROLINIAN		SHANDREE				
			ONEIDA				
			EMNENCE				
CAMBRIAN		POTOSI	Eau Claire Shale				
		FRANCONIA					
		EAU CLAIRE					
		MT. SIMON					
PRE-CAMBRIAN				Granite			

図 2.2.1-2 層序表の実例 (Illinois 盆地) (NETL/DOE, 2013)

右側のコラムから、下部の Mt.Simon Sandstone が貯留層、その上位の Eau Claire Shale が遮蔽層として選定された。

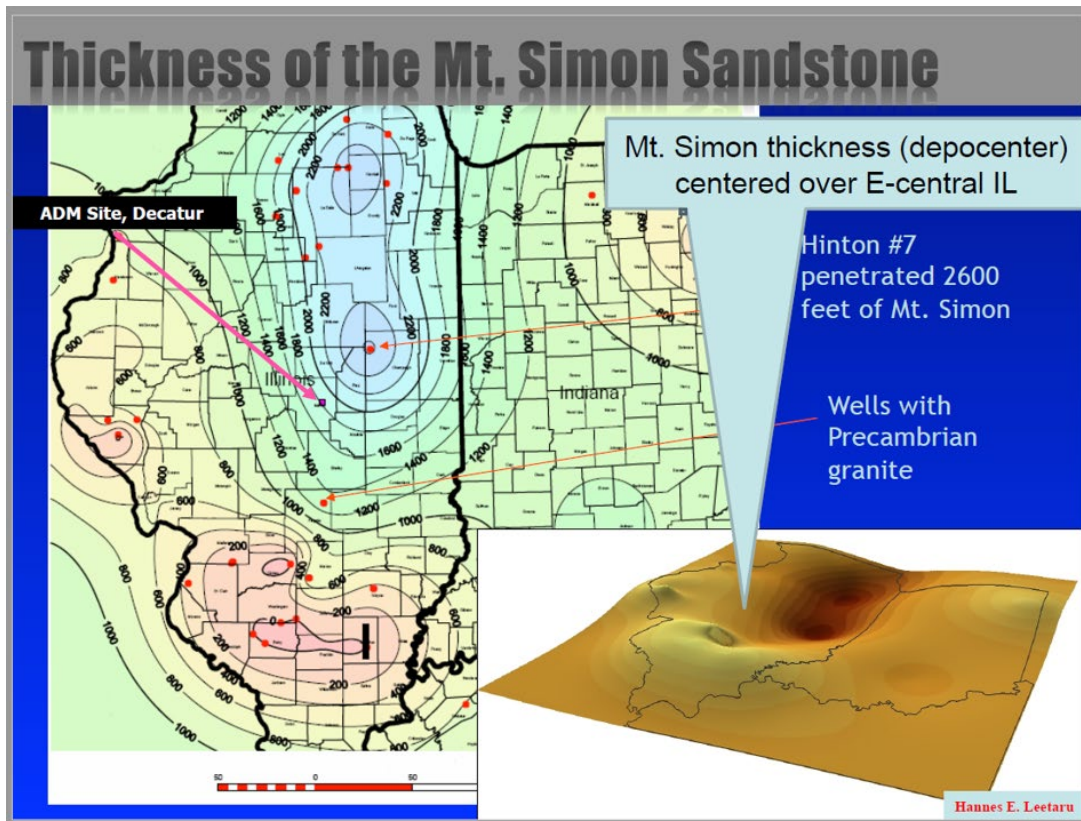


図 2.2.1-3 等層厚線図の例 (McBride et al., 2013)

堆積時の南西側の高まり (buried hills/青楯円領域) においては砂岩層が薄く候補からは除外され、北側の厚い領域が貯留に適すると評価された。

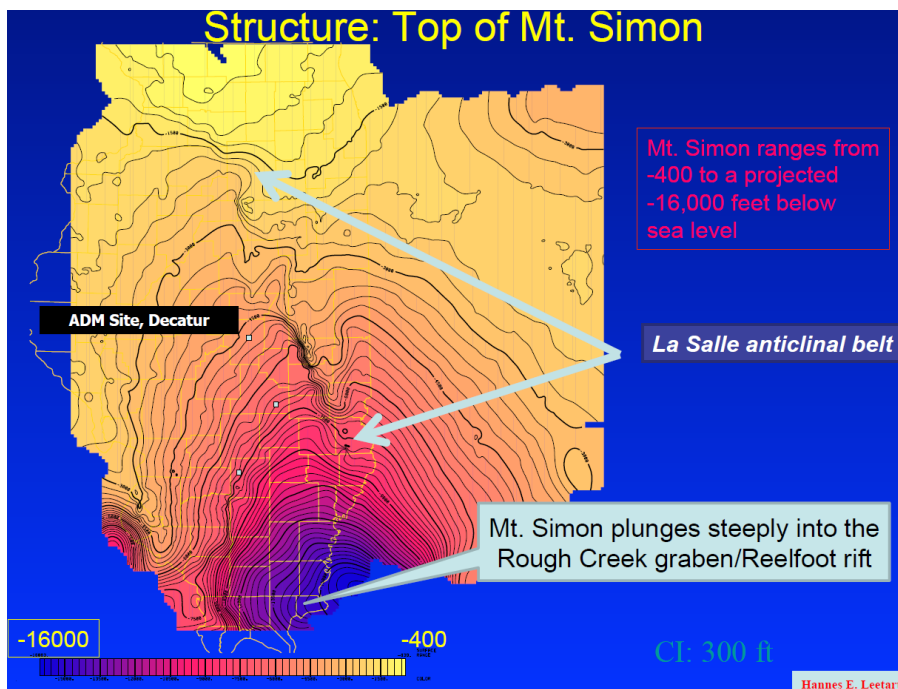


図 2.2.1-4 地下構造図の例 (McBride et al., 2013)

Decatur サイト周辺には、本図では表現されない中小規模の構造トラップが存在する。

④ トラップ等の検討

前述の地質構造的検討においては、深度に加えてトラップ構造等や断層との位置関係も検討対象に加える。排出源近傍にトラップ構造がなくても、圧入されたCO₂が緩傾斜領域を移動し、最終的に遠方のトラップ構造で止まるような形での貯留領域も選定対象となる。一方、CO₂漏洩や誘発地震のリスク低減のため、大規模断層の近傍は避けるべきである。

(4) 広域地質評価のための文献資料等の収集

広域地質評価段階では、最も基礎的なものとしては、公的地質調査機関、例えば、産業技術総合研究所/AIST（日本）の広域的な地質情報がある（図 2.2.1-5）。また、地下資源探査報告書やデータがあげられる。日本では国が実施した「石油・天然ガス基礎調査」において弾性波探査や坑井試掘調査も含めた詳細な地質情報が利用できる（図 2.2.1-6）。最近ではCO₂地中貯留可能量評価を目的とする広域資料が公表されている場合もある。

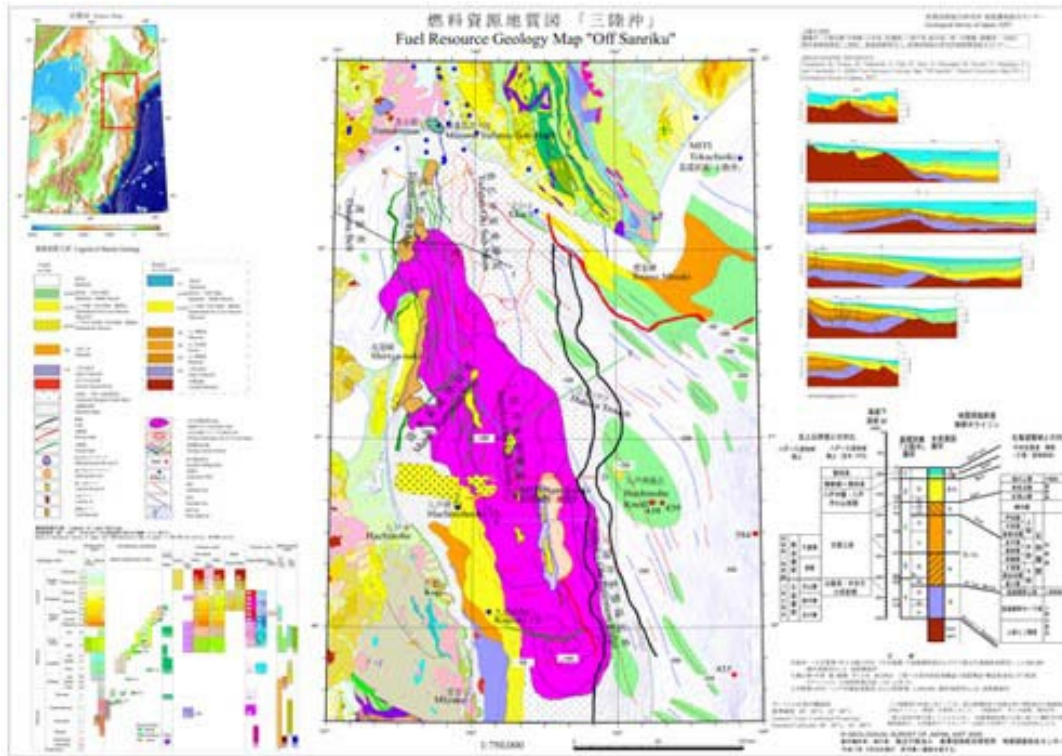


図 2.2.1-5 燃料資源地質図「三陸沖」(産総研、2005)

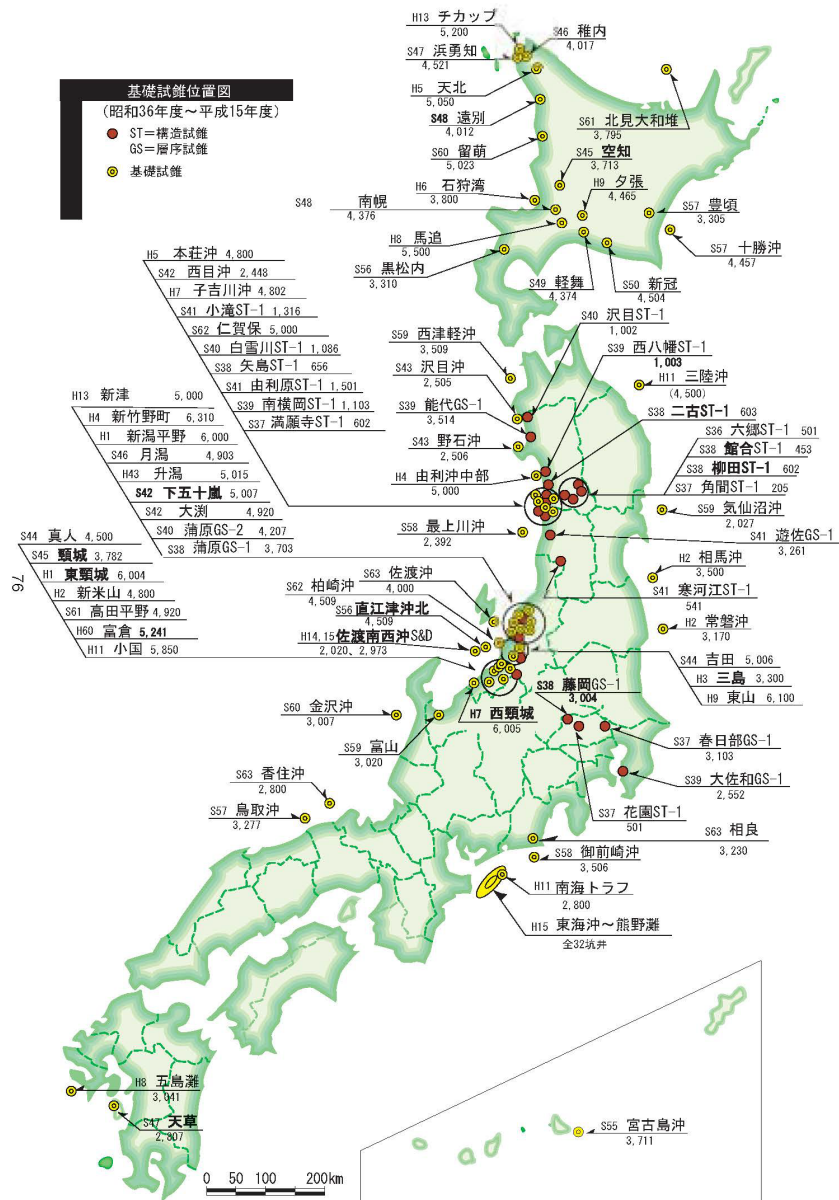
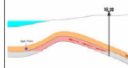
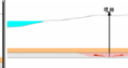


図 2.2.1-6 基礎試錐の実施場所(平成 15 年度以前) (石油公団, 2004)

① 日本における CO₂ 地中貯留可能量広域評価の事例

国内においては、RITEが1993年から2008年にかけて「全国貯留層賦存量検討」および「排出源近傍の貯留可能性検討」として、沿岸域の堆積盆を対象にCO₂地中貯留可能量評価を実施し、全国貯留層賦存量調査結果 (RITE, 2009) を公開している。

これらの調査では国により実施された基礎調査のデータを基に、貯留ポテンシャルのある層準すべて (原則として基盤岩類を除く) を対象とし、構造トラップの有無、地質データの量・質に基づいたカテゴリー分類を行い、合計1,461億トンの最大貯留可能量 (ポテンシャル) が得られている (図2.2.1-7)。

地質データ	カテゴリ-A 背斜-断層構造	カテゴリ-B 同斜構造	評価精度	貯留量
油・ガス田 坑井・弾性波データが豊富	A1(旧1)	B1(旧3)	高	中～小
基礎試錐 坑井・弾性波データあり	A2(旧2)		高～中	中
基礎物探 坑井なし・弾性波データあり	A3(旧4の一部)	B2(旧4)	中	大
貯留タイプ	Physical Trapping	Physical/ Residual Trapping	貯留期間: 1000年 対象は層状分布する砕屑性堆積物	
貯留概念図			地下200m以深、4,000m以浅 水深区間(200m、500m、1,000m) 断層の扱い(遮蔽・通路)	
貯留ポテンシャル	中	大	データ量・質により不確実性(貯留層性状・シール能力、CO ₂ 移動、断層)	

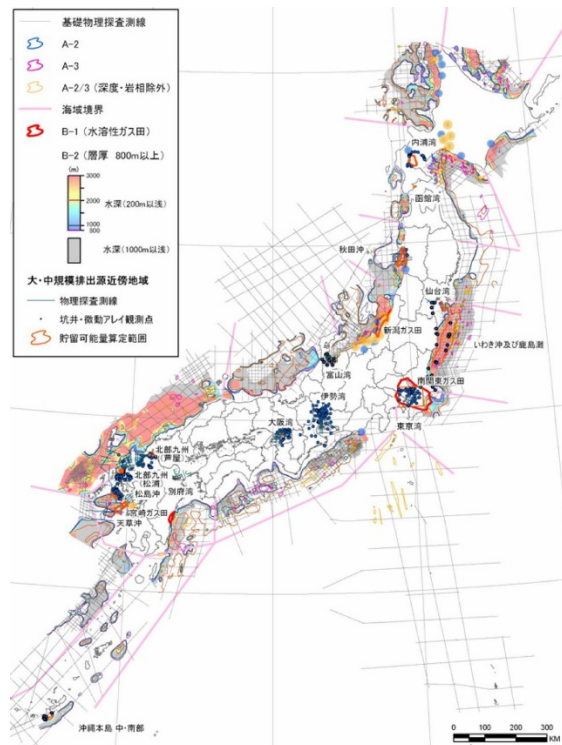


図 2.2.1-7 日本のCO₂貯留可能量の概算におけるカテゴリ分類 (RITE, 2006)
CO₂飽和率は50%と仮定。貯留可能量として、A1=34.9億トン、A2=52.0億トン、
A3=214.0億トン、B2=884.8億トン、B1=275.3億トン(計1,461億トン)と推定。

その後、「排出源近傍の貯留可能性検討」では、排出源ベースでの貯留可能性の検討と貯留量の概算も行われた。検討対象地域は、大規模排出源集中域近傍の「大阪湾地域」、「伊勢湾地域」、「北部九州地域」、「東京湾地域」のほかに中規模排出源近傍の23地域も検討対象に含まれていた(図2.2.1-8)。

このような広域地質評価は、日本列島周辺の背弧および前弧堆積盆全体の貯留ポテンシャル評価を目的としており、具体的なプロジェクト計画では、排出源の位置等も考慮しつつ、最適な地域を選定する必要がある。

- ・大規模排出源近傍の貯留可能性調査
平成17年度〔伊勢湾、大阪湾、北部九州、東京湾〕
- ・中規模排出源近傍の貯留可能性調査
平成18年度〔函館湾、仙台湾、富山湾、
相馬～鹿島沖(北)、別府湾、沖縄〕
平成19年度〔内浦湾、秋田沖、天草沖、松島沖〕
平成20年度〔八戸沖、能代沖、酒田沖、三隅沖〕

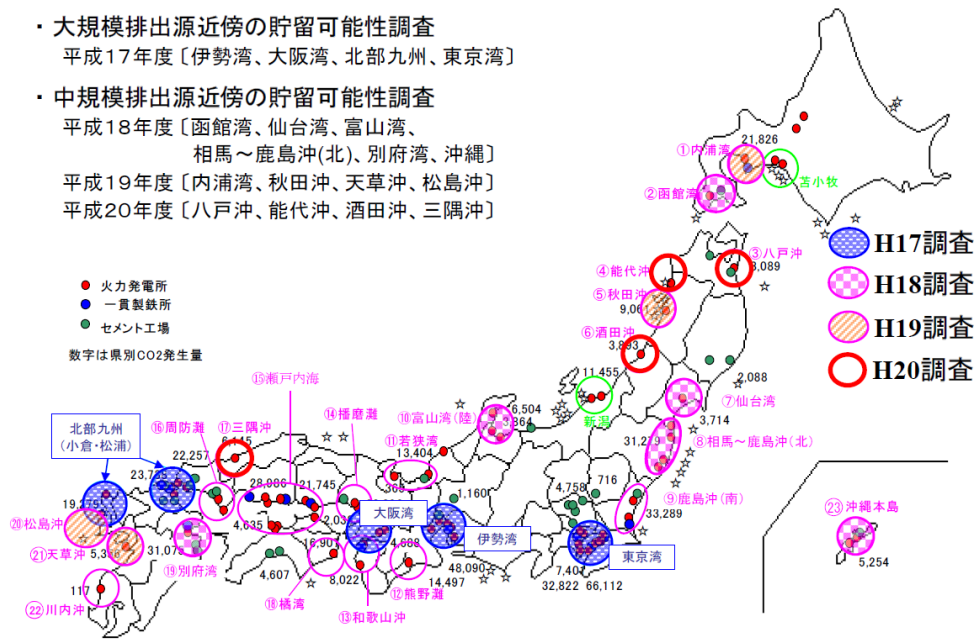


図 2.2.1-8 大規模・中規模排出源近傍の貯留可能性調査地域 (RITE, 2009)

② 海外の広域地質評価事例

a) 米国、カナダ

米国およびカナダでは、石油会社は油ガス田開発で得た地質データの一部を国に提出し、公開しなければならない。これらのデータは、CO₂地中貯留サイト選定に先立つ広域評価に利用されている。アメリカの陸域、海域には堆積盆が広く分布し、石油や天然ガスの埋蔵量が大きく、CO₂地中貯留ポテンシャルも高いと考えられている(図 2.2.1-9)。

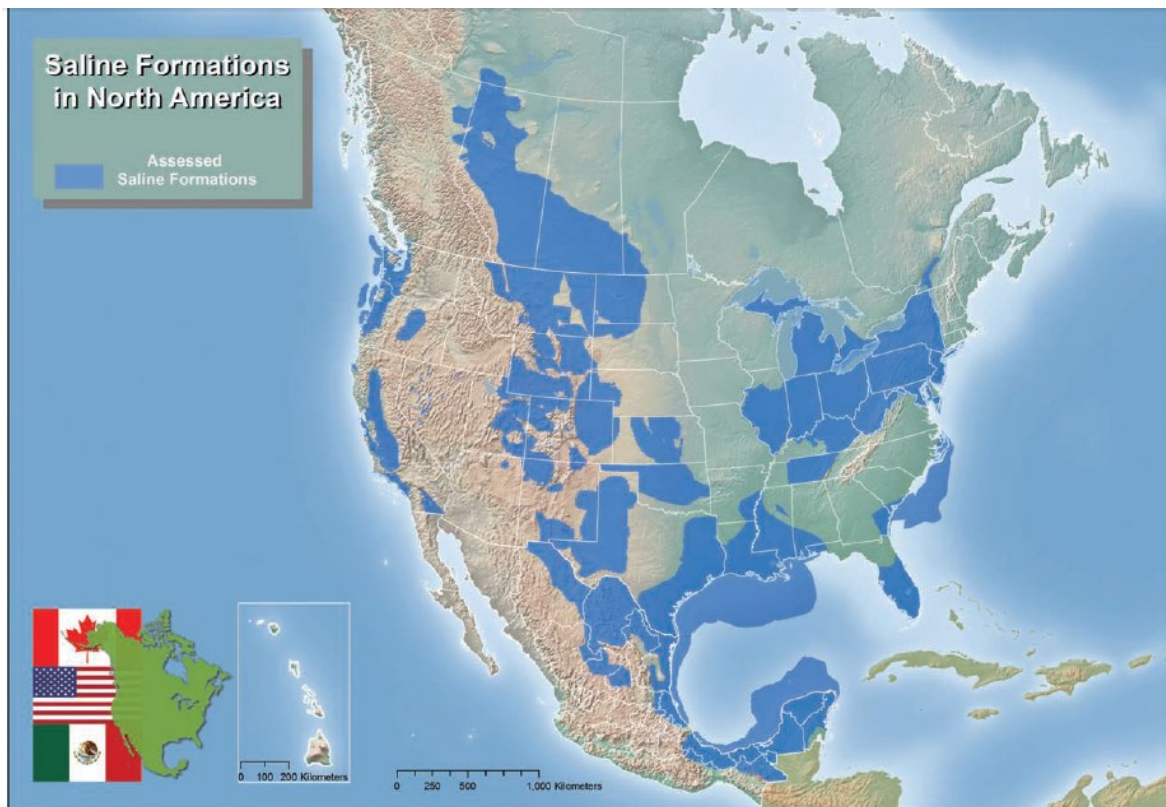


図 2.2.1-9 北米大陸における深部塩水層の発達 (Atlas Partnership (NACAP), 2012)

米国エネルギー省 (DOE) は 2003 年から CCUS 技術開発を支援するために、米国 (カナダの一部を含む) を 7 つの地域に分割し、Regional Carbon Sequestration Partnerships (RCSP) という炭素隔離パートナーシップ (プロジェクト) を展開してきた。RCSP は 3 つのフェーズから構成されている。第 1 フェーズは対象地域内の CO₂ 地中貯留ポテンシャル評価、第 2 フェーズは小規模実証試験、第 3 フェーズは深部塩水性帯水層あるいは油層への計 100 万トンの CO₂ 圧入実証試験となっている。

米国では RCSP の後継事業として、2016 年に CarbonSAFE イニシアティブ (Carbon Storage Assurance Facility Enterprise initiative) が計画され、官民共同出資により、5,000 万トン以上の商業規模の貯留事業が進められている (図 2.2.1-10)。

Carbon Storage Assurance Facility Enterprise (CarbonSAFE)

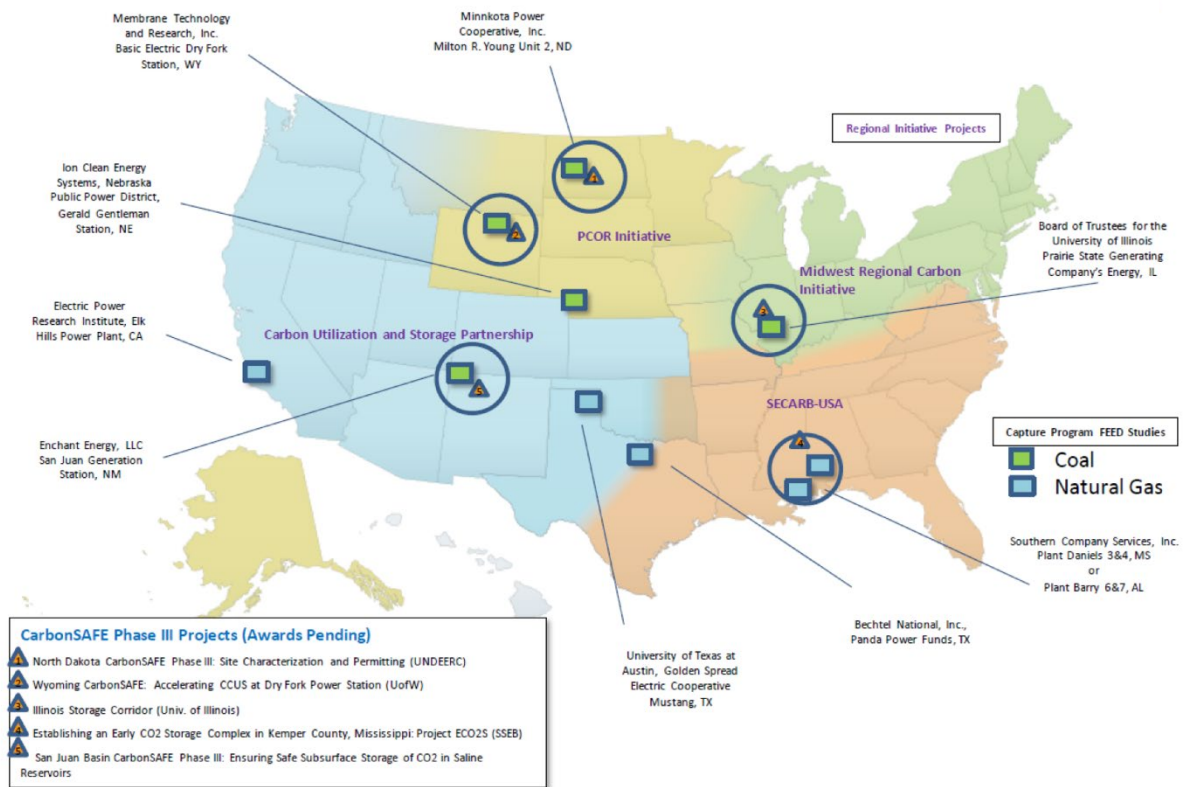


図 2.2.1-10 CarbonSAFE プロジェクト分布図(Quillinan, 2019)

CarbonSAFE プロジェクトを通じて、アメリカ陸域、海域における CO₂ 地中貯留ポテンシャル評価結果が公表されている。これらのうち、大陸棚を対象とした CO₂ 貯留ポテンシャル評価の進展が特に注目すべき点である。現在、メキシコ湾西部および中部など、面積比で 6% の連邦海域のみ石油・天然ガスの商業開発が認められている。しかし、内務省海洋エネルギー管理局 (BOEM) が 2019~2024 年の新 5 年計画において、米国内エネルギー資源の利用促進を目的に、メキシコ湾東部 (フロリダ沖) やカリフォルニア沖、大西洋沖 (1980 年代前半を最後に探鉱活動が停止し、現在も油ガスの生産活動がない) や北極圏など、ほぼ全ての連邦海域 (面積比で約 90%) で石油・ガスの海洋掘削を認め、アメリカ、カナダ大陸棚の CO₂ 地中貯留ポテンシャル評価も精力的に進行しつつあり、成果が公表されている (図 2.2.1-11)。広範囲連邦海域での海洋掘削が実現すれば、海底下 CO₂ 地中貯留もメキシコ湾東部、カリフォルニア大陸棚、大西洋大陸棚など大規模排出源に近接しており、地中貯留事業が一気に加速する可能性がある。

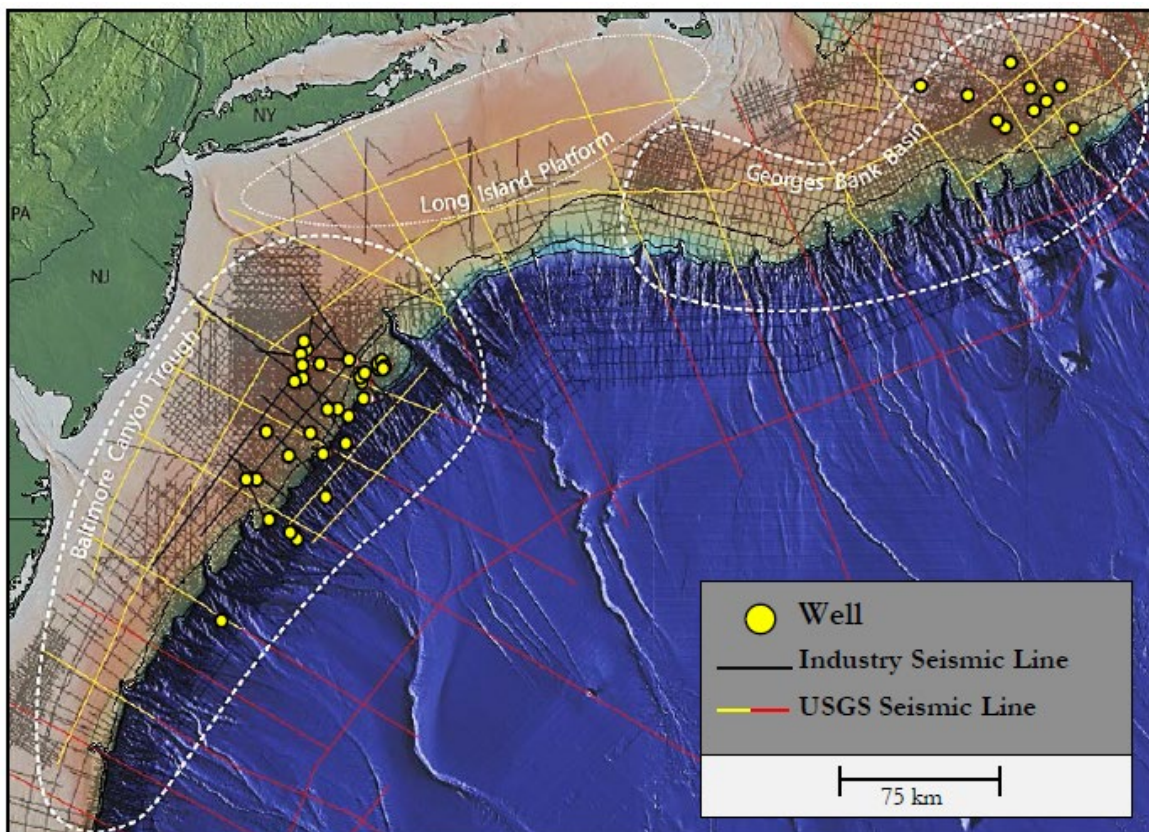


図 2. 2. 1-11 中部大西洋大陸棚、CO₂貯留ポテンシャル広域評価で利用されている坑井、弾性波探査データ (Gupta, 2017)

b) オーストラリア

オーストラリアでは、石油開発関連データの保存と民間企業が取得したデータを政府に提出することが義務付けられている。これらのデータを取り扱っている、オーストラリアの地質学、地形学に関する国家に対するアドバイザーの Geoscience Australia が中心となり、広域（堆積盆地規模）の層序関係レポートや石油地質学的評価レポートの公開も実施されている。これらの広域資料は地下情報の精度が高く、CO₂貯留サイト選定における広域評価に十分利用できる。図 2.2.1-12 は豪州国内陸域、海域の堆積盆地の貯留可能性（ランキング）を示しており、4,170 億トンと推定されている（Langford et al., 2013）。

有望とされる堆積盆地としては、Browse 盆地、Gippsland 盆地、Petrel盆地、Vlaming 盆地が挙げられている。これらの堆積盆地では石油・天然ガス探鉱、開発で膨大なデータが取得されている。このためオーストラリアでのCO₂貯留サイト選定は、効率的に実施できるといえる。

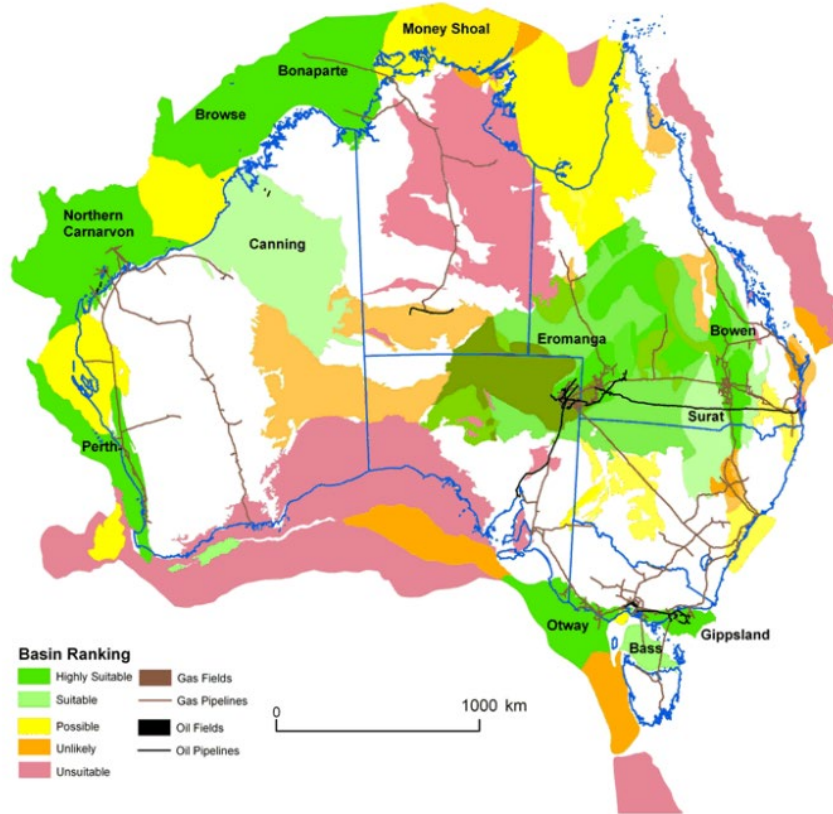


図 2. 2. 1-12 オーストラリアの堆積盆地に対する CO₂ 貯留可能性 (ランキング)
(Carbon Storage Taskforce, 2009)

< Vlaming 亜堆積盆地の広域評価例 (Borissova et al., 2015) >

Geoscience Australia は、Vlaming 亜堆積盆地で包括的な広域評価を実施した。西オーストラリア州 パース沖に位置する Vlaming 亜堆積盆地は、South Perth 盆地内の中生界堆積中心部である (図 2.2.1-13)。面積は約 23,000 km² で、最大 14 km の堆積物が存在する。貯留システムとしては、下部白亜系 Cretaceous Gage 砂岩 (貯留層) とその上位の South Perth Shale (遮蔽層) の組み合わせを主対象として想定している (図 2.2.1-14)。

・ 貯留層と遮蔽層の分布 / 堆積相

貯留層である下部白亜系 Gage 砂岩層は、弾性波探査解析結果に基づき、低海水準期の Lowstand Fan と推定され、堆積物の供給方向も含めた堆積システムの推定と共に貯留層の不均質性把握が可能となった (図 2.2.1-15)。同様に、遮蔽層である South Perth 頁岩についても、堆積システムおよび岩相分布情報を得ることができた (図 2.2.1-16)。

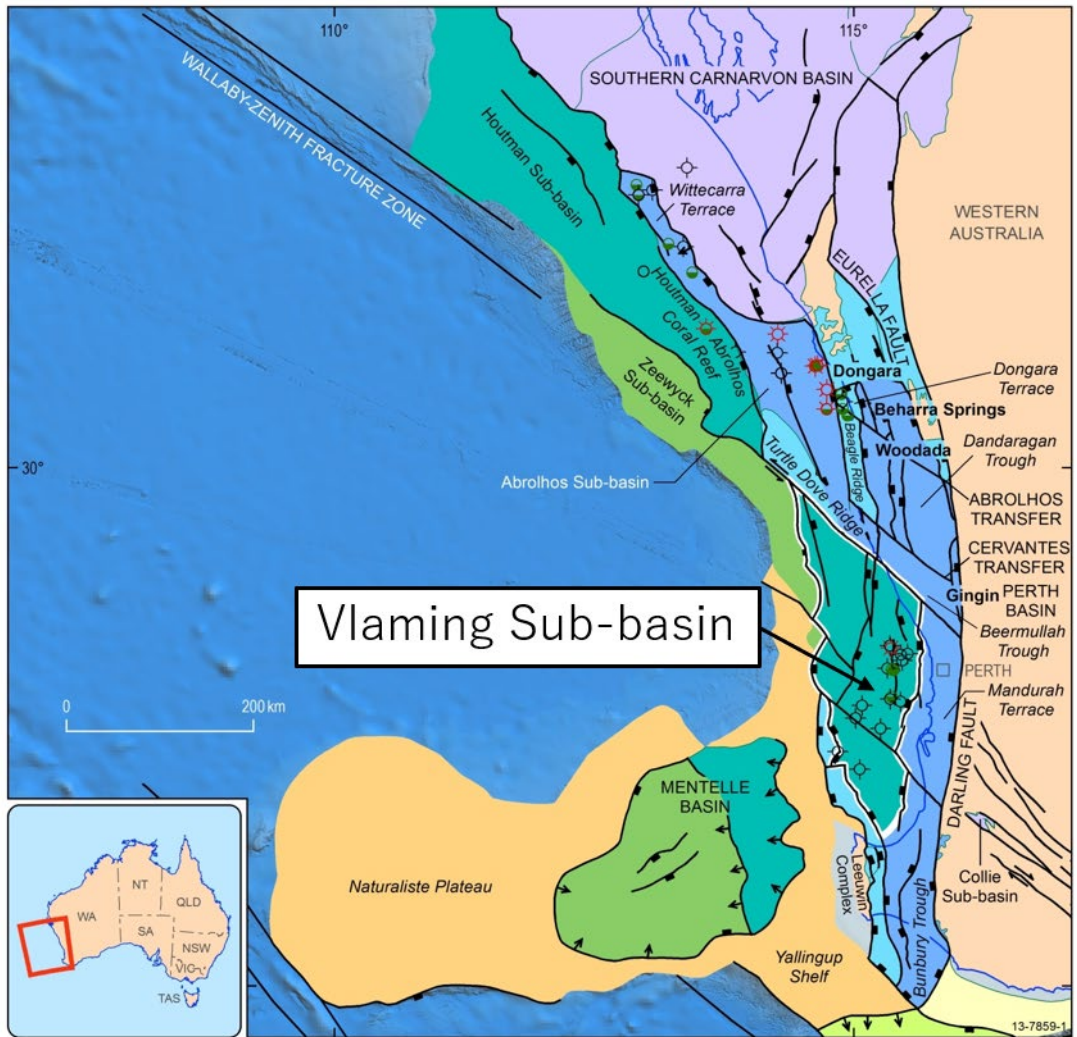
・ 遮蔽層 / 貯留システムの健全性

Gage 砂岩分布域において、概ね上位の South Perth Shale が分布し貯留システムは成立していると予想されるが、弾性波探査、海底地形調査および油ガス兆候に基づき断層の再活動度を評価し、CO₂ 圧入による断層安定性を分析した。また、Gage 砂岩層の下位の貯留層 (Charlotte 砂岩)

を通じたCO₂の移動の可能性も含め、様々な観点から貯留システムの健全性を評価した(図2.2.1-17)。

- ・貯留可能量評価と有望範囲

上記解析に基づき構築された地質モデルから、Gage砂岩層全体の貯留可能量は1億2600万トン(P90)、4億9300万トン(P50)、13億6000万トン(P10)と推定された。一方、良好な貯留岩と遮蔽層の組合せをベースに、貯留システムの健全性検討も併せて検討し、CO₂地中貯留に適した可能性のある範囲が特定された(図2.2.1-18)。



Well symbol information is sourced either from "open file" data from titleholders where this is publicly available as at 1 December 2012 or from other public sources. Field outlines are provided by Encom GPinfo, a Pitney Bowes Software (PBS) Pty Ltd product. Whilst all care is taken in the compilation of the field outlines by PBS, no warranty is provided re the accuracy or completeness of the information, and it is the responsibility of the Customer to ensure, by independent means, that those parts of the information used by it are correct before any reliance is placed on them.

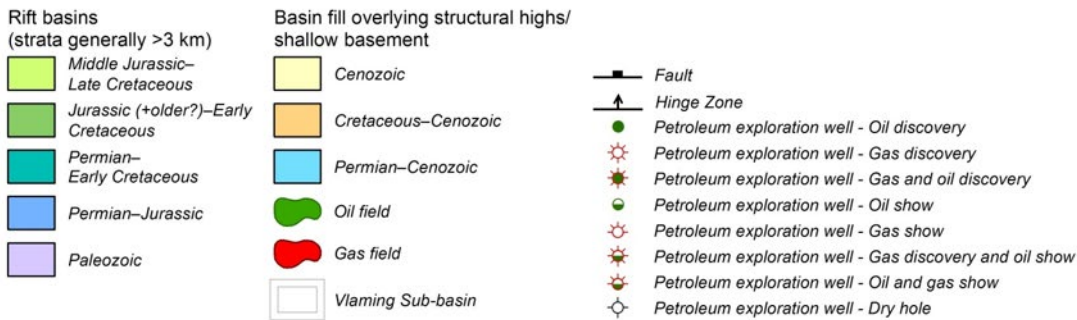


図 2.2.1-13 Vlaming 垂堆積盆の位置 modified after Borissova et al. (2015)

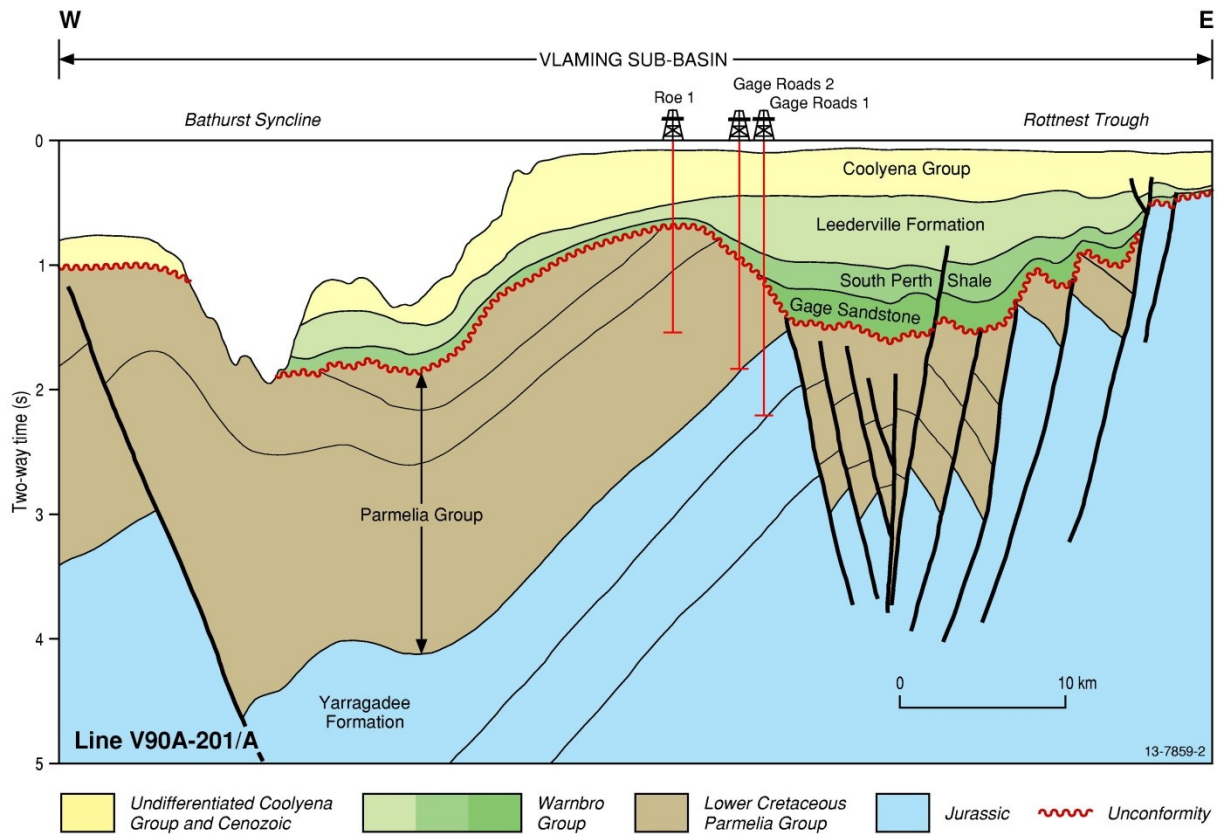


図 2. 2. 1-14 Vlaming 亜堆積盆の模式地質断面図 (Borissova et al., 2015)

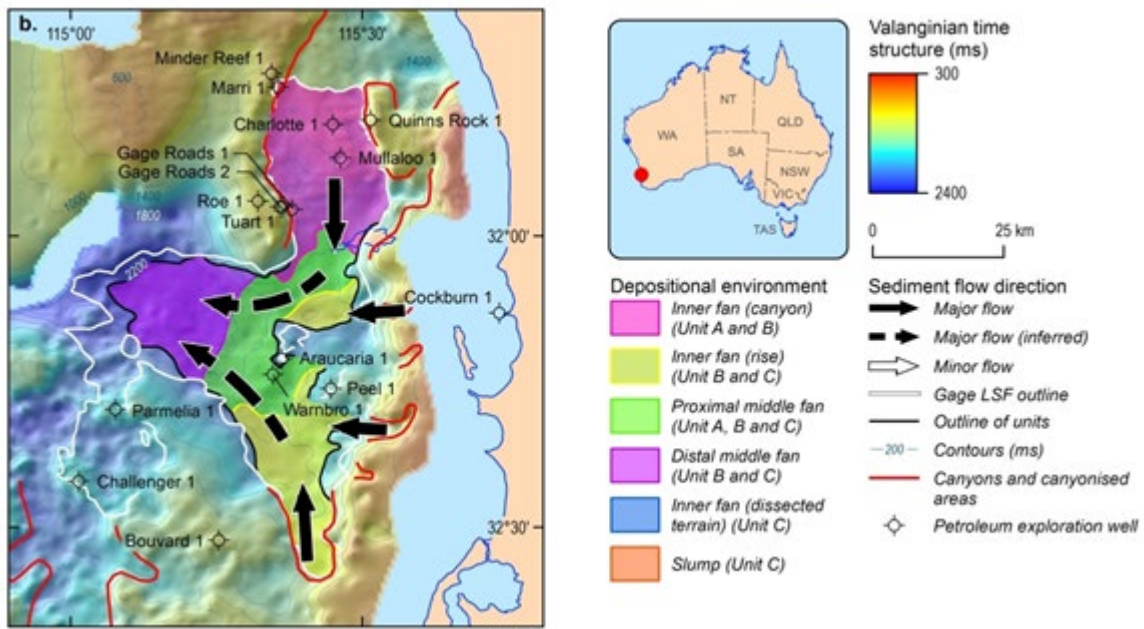


図 2. 2. 1-15 貯留層/Gage 砂岩の堆積システム推定例
modified after Borissova et al. (2015)

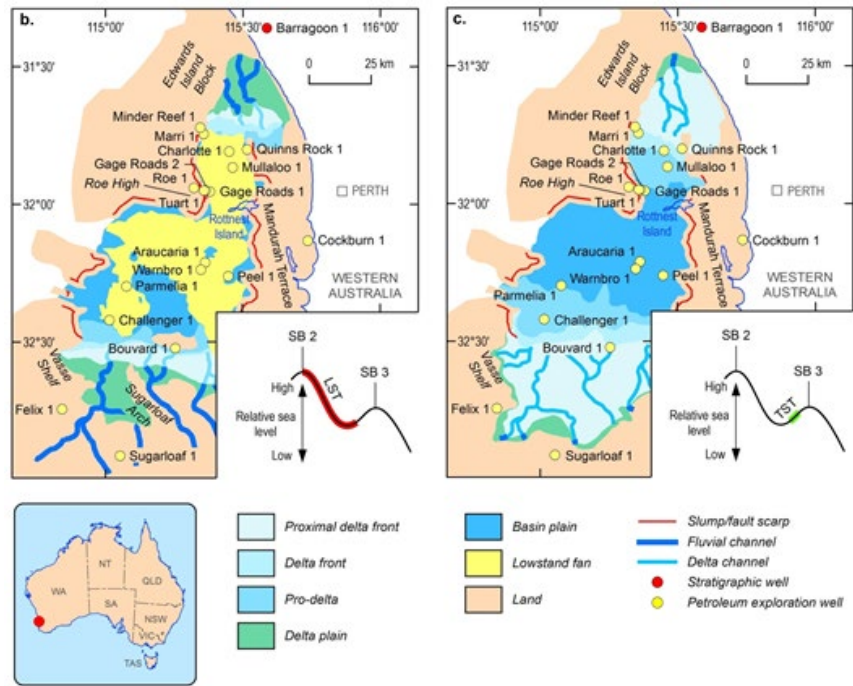


図 2.2.1-16 貯留層 (Gage 砂岩) および遮蔽層 (South Perth Shale) の堆積システムおよびシーケンス上の位置付け
modified after Borissova et al. (2015)

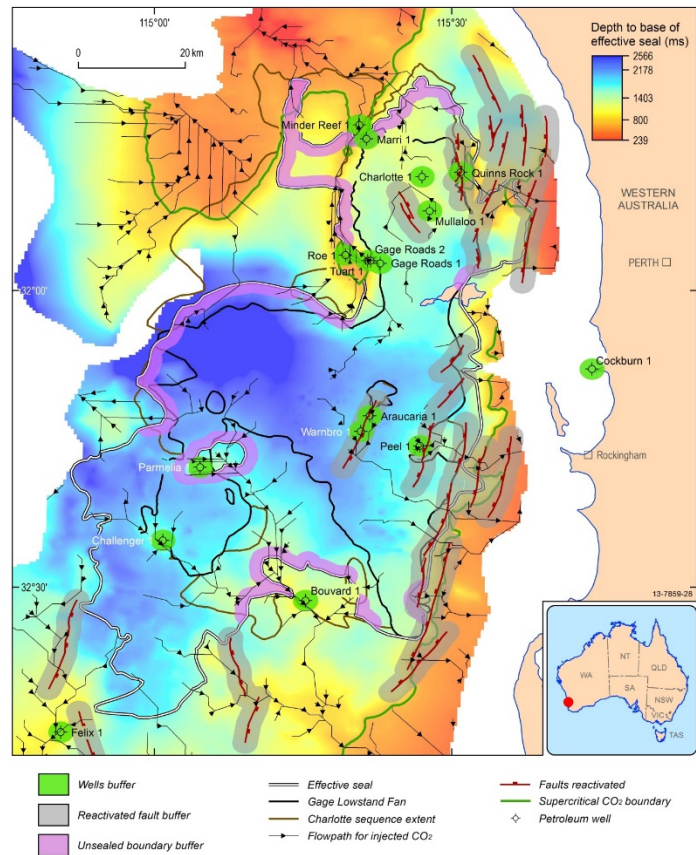


図 2.2.1-17 貯留システムに対する諸制約：再活動断層／既往坑井等
(Borissova et al., 2015)

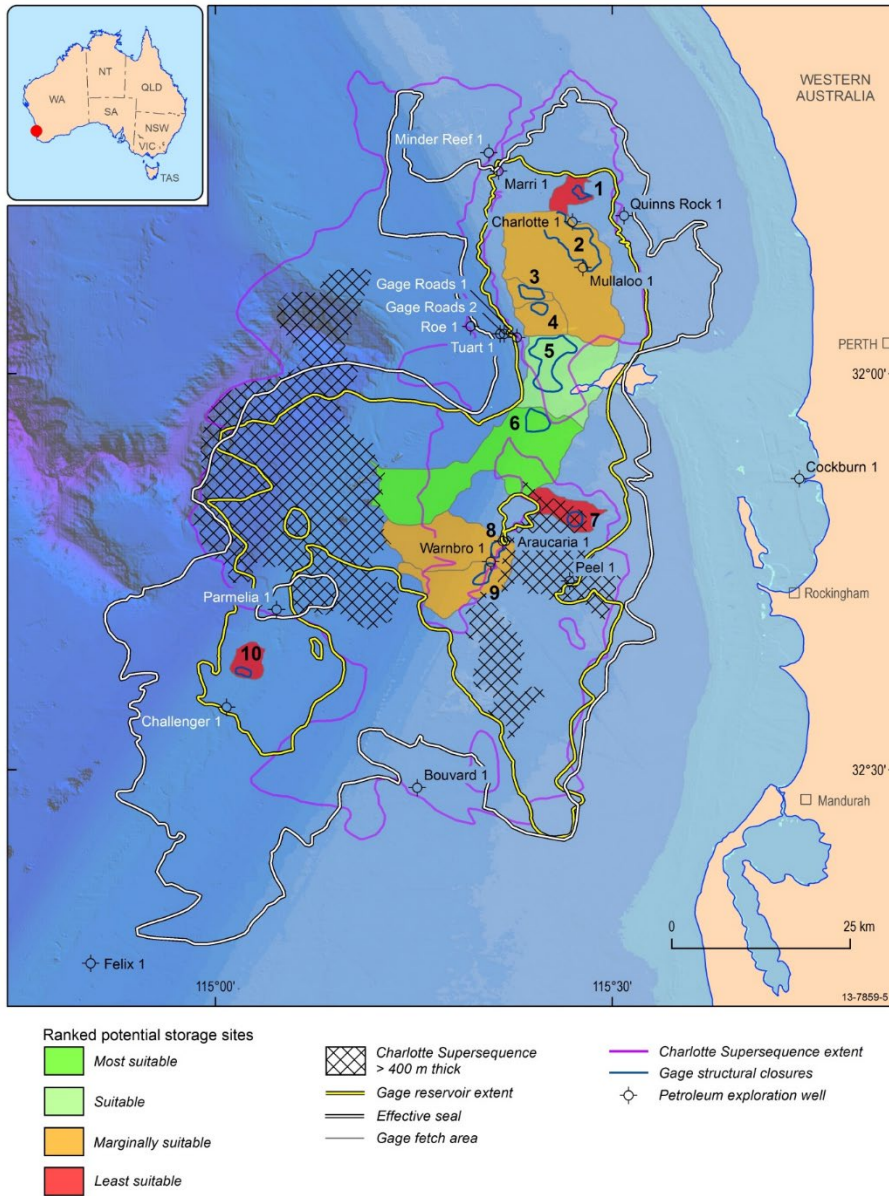


図 2.2.1-18 適性度ランキングに基づく貯留候補域 (Borissova et al., 2015)

c) 東南アジア各国

東南アジア諸国では、国の機関が堆積盆地単位、あるいはそれに準じる広域を対象とした広域地質評価レポートを公開しているところは少ない。堆積盆地の地質情報は、いくつかの石油コンサルティング会社が発行・販売している。販売会社によって、対象地域や内容は異なるが、堆積盆地の層序、テクトニクスや既存油田の層序・構造の概略などが記載されていることが多い。これらの情報はCO₂貯留サイト選定にとって地域の概要を知るための重要なソースとなる。

インドネシアでは Pertamina など国内資本の石油会社、外国資本の石油会社のデータは、基本的に国が管理している。それらはエネルギー鉱業省石油ガス総局（MIGAS）の下部組織である PND（Patra Nusa Data）が管轄し、ここから自由に購入することができる。例えば弾性波探査データは Post Stack Data を SEG-Y フォーマットで購入することが多いが、場合によっては再処理用に Raw Data が買えるケースもある。データの国外持ち出しは基本的にできないが、PND との交渉、契約で可能な場合もある。

タイやベトナムでは有料でデータ購入やデータ閲覧ができるが、データの持ち出しは不可となっている。

マレーシアでは自由にデータを購入できるシステムは無い。石油・天然ガス探査において通常は鉱区公開の際には、Petronas のデータルームを訪問して公開鉱区に関するデータが閲覧できる。

2.2.2 サイト選定作業

サイト選定対象地域（有望地域）を特定し、その範囲内でサイトの候補を抽出し、CO₂貯留サイトの要件に合致する候補サイトの絞り込みを行い、最終的に1つ、あるいは複数のサイトを選定する。CO₂を圧入、貯留できる貯留層が存在すること、CO₂の上方移動を防ぐ遮蔽層が存在すること、CO₂の長期地下滞留を可能にする地質構造が存在することがサイト選定の要件となっている。

サイト選定には以下のような情報が必要である。

- 図面類
 - ・ 地下構造図
 - ・ 等層厚線図（貯留層、遮蔽層）
 - ・ 岩相図あるいは古環境図（貯留層、遮蔽層）
 - ・ 地形図/水深図
- 弾性波探査記録
 - ・ 2次元探査データ、できれば3次元探査データ
- 坑井データ
 - ・ マッド・ロギング
 - ・ 物理検層（ガンマ線検層、比抵抗検層、音波検層、密度検層、中性子検層、できれば坑壁イメージング検層、核磁気共鳴検層、地層圧力・浸透率検層(MDT)）
 - ・ 掘削記録（リーク・オフ試験など）
 - ・ コア分析（孔隙率、浸透率、できれば相対浸透率、スレッシュホールド圧力）
- 石油・天然ガス田が近傍に存在する場合

- ・ 坑井試験記録（産出試験、生産試験、ステップ・レート試験など）
- ・ 炭化水素産出記録、貯留層圧力変化記録

以上のデータ類は、コンパイル、GIS化、フォーマット統一、また、特に弾性波探査記録は最新の技術による処理、解析を実施してサイト選定作業に使用される。

表 2.2.2-1 サイト選定に必要なデータと利用方法

データの種類	得られる情報	CO ₂ 地中貯留での利用	
石油・天然ガス生産記録	生産履歴	貯留層特性	
坑井	掘削記録	坑内状況	圧入井掘削の参考
	物理検層	岩質	貯留層、遮蔽層の特定
		地層の特性（孔隙率、浸透性…）	貯留量算定
		音波速度	弾性波探査解析
	地層圧力、温度	CO ₂ 溶解度、圧入圧力	
	リークオフテスト	地層破壊圧力	圧入上限圧力
	生産テスト	浸透率解析	圧入能力
	圧入テスト	浸透率解析	圧入能力、圧入圧力
ラボ試験	コア鉍物分析	鉍物組成	CO ₂ との反応性
	コア孔隙率	貯留層孔隙率	貯留可能量
	コア浸透率	貯留層浸透率	貯留能力
	コア毛細管圧力	貯留層毛細管圧力	最大ガス飽和率
	コアスレッシュホールド圧力	遮蔽層スレッシュホールド圧力	圧入上限圧力
	地層水分析	成分分析	CO ₂ 溶解度、反応性
物理探査	弾性波探査	地層構造、地層物性	トラップ
			貯留層、遮蔽層の広がり

(1) サイト選定のための地質的評価項目

① 貯留層と遮蔽層の組み合わせの存在

貯留層の上位に遮蔽層が発達していることが必要である。貯留層特性の不確実性や遮蔽層の不完全に備えるため、そのような地層の組み合わせが複数存在することが望ましい。

a) 貯留層

石油・天然ガス広域調査や CO₂ 貯留可能量調査資料を基に、層序表などの図表類より岩相、地層の厚さなどを参考に、貯留層候補を選定する。近傍に油ガス田が存在すれば、生産層の情報、特に孔隙率、浸透率などの基本物性が貯留層評価に利用できる。孔隙率は少なくとも 10%、浸透率は数 md 以上が望ましい。生産中、あるいは生産を終了した油ガス田があれば、そこでの生産履歴や生産記録は貯留層性能評価にとって大いに参考になる。一方、油ガス田がない場合は、近くの露頭観察による各層準の岩相確認や露頭サンプルの物性測定結果が手掛かりとなる。

貯留層の厚さに関しては、圧入量や貯留層の物性にもよるが、少なくともグロスで数 10m 以上、ネットで 10m 以上の厚さは必要である。坑井が掘削されていない場合、ネット層厚の把握は

困難である。

貯留層の広がりには大きい方が望ましい。岩相の変化が少なく、異方性や不均質性が少ないことも重要である。既存油ガス田において、貯留層のコンパートメント化が知られているような場合、十分な注意が必要である。大陸での風成層、大型河川の河口堆積物や、広い大陸棚の堆積物、海底扇状地堆積物は一般に良好な貯留層性状とともに大きな広がりを有している。広域等層厚線図が入手できればそのまま利用でき、入手できない場合でも弾性波探査データが入手できれば、それらの解釈によって評価できる。

貯留層を満たす地層水データが入手できると、溶解トラップを含めた追加的な地球化学的検討が可能になる。CO₂溶解トラップについては、塩分濃度が低い場合に有利となる(三戸ほか, 2008)。地球化学反応によるCO₂の鉱物固定は、CaやMgなどCO₂を炭酸塩鉱物として沈殿させる成分が多い方が有利である。塩分濃度が高い場合、CO₂圧入に伴うドライアウト効果により孔隙内に塩が析出した場合は、圧入性が低下することがカナダのQuestプロジェクトで確認されている(Smith et al., 2021)。

b) 遮蔽層

貯留層を覆う上位の泥質層など、物理的にCO₂を封じ込めることができる地層が遮蔽層となる。遮蔽性能が優れた代表的な岩相は蒸発岩と泥質岩である。特に蒸発岩は遮蔽層として非常に優れた特徴を有している。普遍的な蒸発岩としては、岩塩、石膏がある。

CO₂地中貯留では複数のトラップメカニズムが機能するため、長期にわたって安全なCO₂貯留が可能となる。これらのトラップは構造トラップ、層位トラップ、溶解トラップ、残留ガストラップ、および鉱物トラップに区分されるが、どのようなメカニズムにせよ、貯留層上位の遮蔽層の存在は必須である。遮蔽層の遮蔽能力は、遮蔽性能、遮蔽層形状、遮蔽層健全性として定義できる(IEAGHG, 2011)。

ア) 遮蔽性能

圧入された超臨界CO₂は地層水より密度が小さく、浮力により貯留層上部へ移動する。遮蔽層は貯留層の上位に広がる地層であり、CO₂の上方移動を妨げ、遮蔽層直下の貯留層内に滞留あるいは遮蔽層直下を低速度で側方への移動を可能にする。遮蔽性能とは、下位の貯留層に存在する浮力を持つCO₂に対して、上位の遮蔽層への侵入を妨げ、貯留層内に保持することのできる遮蔽層の能力である。遮蔽の原動力は遮蔽層の毛細管圧力である。したがって遮蔽能力として必要な物性的条件は、低浸透率と高毛細管圧力である。

遮蔽層において、毛細管圧による遮蔽能力を示す物性値としてスレッシュホールド圧力がある。しかし、油ガス田では遮蔽層の実サンプルを用いてスレッシュホールドが測定される場合は少なく、その値を既存資料として得ることは難しい。このため、サイト選定段階では、遮蔽層の孔隙率や浸透率などといった、一般的な物性データとの相関を利用して間接的にスレッシュホールド圧力を推定する場合もある(例えば、石油技術協会, 2013)。また、石油業界では核磁気共鳴検層の記録からスレッシュホールド圧力を推定したり、あるいは周辺の油ガス田で知られているサイト候補と同じ遮蔽層層準のオイル・コラム、ガス・コラムの高さから遮蔽能力を推定する手法も提案されている。このようにして得られるスレッシュホールド圧力の値を使って、どの程度のCO₂コラムまで、遮蔽で

きるかを評価する。

イ) 遮蔽層形状

遮蔽層形状とは、遮蔽層の構造上の位置、厚さ、面積のことである。これらは、弾性波探査、コアサンプル、坑井掘削、地域の地質特性より推定できる。

・遮蔽層の厚さ

遮蔽層の厚さに関して、理論的には、直下の貯留層中に圧入された CO₂ の浮力を上回るスレッシュホールド圧力さえ有していれば、どんな薄層でもかまわないことになる。しかし、以下の点である程度の厚さが必要である。

- ・遮蔽層が尖滅する可能性が少ない
- ・小規模のフラクチャーが生じても CO₂ 漏洩のリスクが少ない

石油・天然ガス業界の一部では、油ガスの遮蔽層として泥質岩の場合は 50m 以上、蒸発岩の場合は 10m 以上必要で、30m 以上が最良とされている (Warren, 2007)。

・遮蔽層の広がり

遮蔽層は、CO₂ プルーム（地中の CO₂ 分布範囲）を完全に被覆する平面的広がりを有していなければならない。遮蔽層の広がりを広域評価で検討する場合、層序的情報から遮蔽層の第 1 候補（地質条件が良ければ第 2、第 3 の候補）を選定し、遮蔽層としての物性評価と厚さの評価が行われる。広がりに関しては、層等厚線図によって層厚変化とともに評価されるが、堆積環境もまた、重要な評価要素である。蒸発岩は、スレッシュホールド圧力、延性などの岩石物性など遮蔽層の健全性から見て評価が高い。泥質岩の場合はその堆積環境、続成作用などの要因で、岩質、毛細管圧力、岩石物性、厚さ、広がりが大きく異なる。特に広がりに関する評価では後述のように堆積環境の検討あるいは古環境の検討は非常に重要となる。また、弾性波探査記録が入手できれば、遮蔽層層準の追跡により広がりが推定できる。

蒸発岩は、高温/乾燥下で湖や、外洋との海水の交換が自由に行われない閉鎖的な環境で、盛んな蒸発によって生成され、その分布は、泥質岩に比べて限定される。泥質岩は極めて細粒な碎屑物、有機物などよりなる堆積岩であり、構成粒子の大きさにより泥岩、頁岩、シルト岩などがある。また、含まれる鉱物により石灰質、珪質、凝灰質などと形容される。泥質岩は地球上のほぼ全ての堆積環境で堆積し、地球上の堆積盆地には間違いなく発達するが、その性状や厚さ、広がりなどの特徴は、堆積環境によって多様性が著しい。

ウ) 遮蔽層健全性

遮蔽層の健全性は、CO₂ 圧入によって生じる貯留層内での圧力増加と遮蔽層にかかる応力の変化に対する遮蔽層としての力学的安定性である。CO₂ 貯留での遮蔽層の健全性は、流体を透過させるフラクチャーの発達に深く関連する。さらに新しいフラクチャーの生成や以前に存在していた断層の再活動の可能性もある。この様に遮蔽層の健全性は、遮蔽層の岩質、既存の断層、地下応力などに関係する。

岩質に影響を受ける延性、圧縮性、脆性はフラクチャーの発達と関係する。蒸発岩や有機質頁

岩などは、最も延性と圧縮性に富む。延性岩石ではフラクチャーが形成される可能性が低いため、延性層は強度が比較的低くても、健全性の面からは望ましいと考えられる。図 2.2.2-1 は、さまざまな岩質の相対的な延性/圧縮性および強度/地震波速度特性を示している。健全性は図の左上に向かって向上する。延性/圧縮性は岩質の弾性波速度に反比例するため、この特性を利用して弾性波探査データや物理検層データから、遮蔽層の健全性を評価することが可能である。

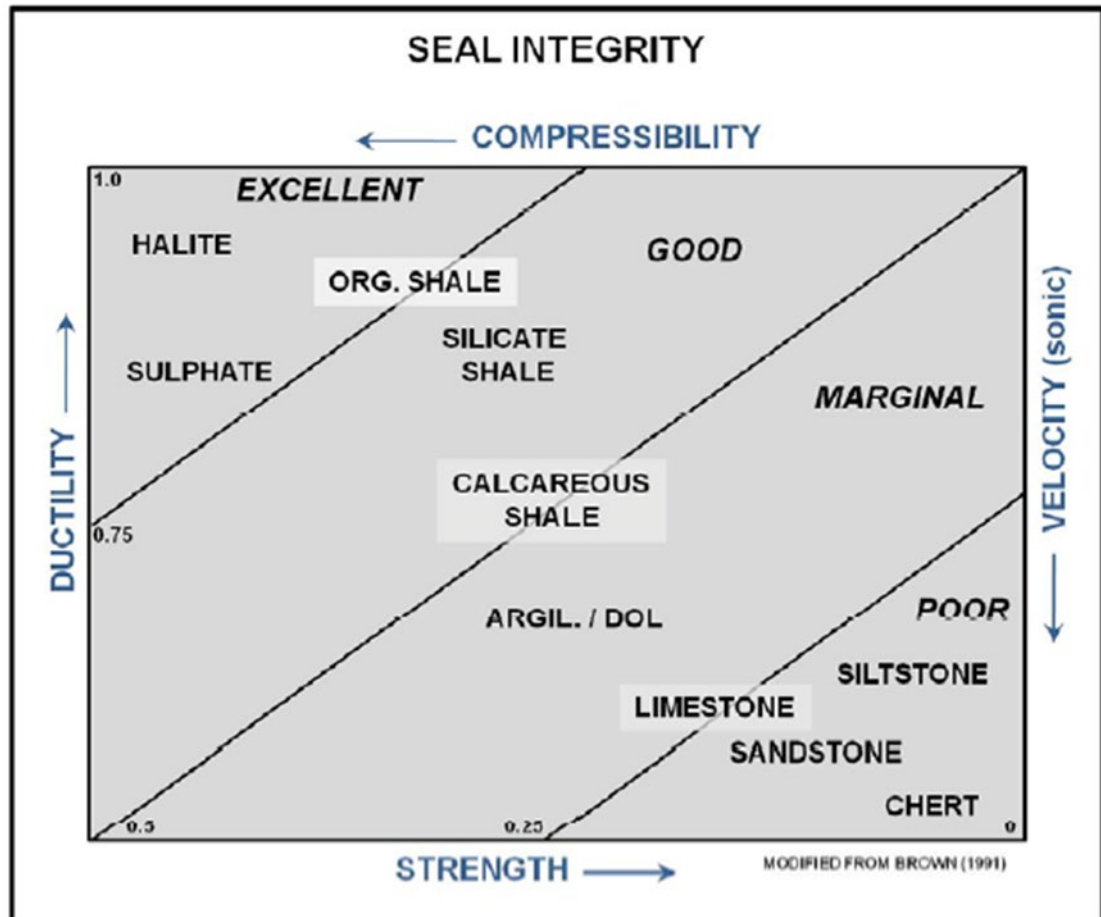


図 2.2.2-1 さまざまな岩質の相対的な延性と圧縮率対強度/弾性波速度を示す概略図 (IEAGHG, 2011)

② 貯留層・遮蔽層評価のための堆積学的手法

貯留層や遮蔽層の重要な要素の 1 つが、水平的広がり、水平的変化である。既存データが少ない場合、それらを推定するのは容易ではないが、貯留層、遮蔽層の尖滅のリスクを避けるため、堆積環境を知ることによって広がりを推定することが重要である。

既存の坑井データと弾性波探査データを用いて、シーケンス層序学 (sequence stratigraphy) 的な検討から、堆積環境と岩相分布を推定し、貯留層、遮蔽層を評価する手法もある。弾性波探査データやコア試料や物理検層データ等を利用して、1 回の海進・海退でつくられた地層のパッケージである堆積シーケンスを認定する。堆積シーケンス認定後、坑井データを用いて堆積シーケンスの中の砂層や泥層等の岩相分布を推定し、貯留層や遮蔽層に適しているかどうか判断で

きる。

③ 貯留可能量

地中に圧入された CO₂ は、多孔質砂岩層の隙間 (pore space) に貯留されるため、貯留可能量は対象層の隙間の体積を基に評価される。CO₂ 圧入前は隙間が砂層堆積過程の古海水で満たされているため、塩水性帯水層とも呼ばれている。CO₂ 圧入を開始すると、隙間中の古海水の一部が押し退けられ、CO₂ が占めることになる。どれぐらいの隙間に CO₂ が浸入できるか、どの程度古海水を押し退けるかは貯留可能量を大きく左右する。図 2.2.2-2 は貯留層に圧入された CO₂ が坑井から広がっていく様子を概念的に示している。

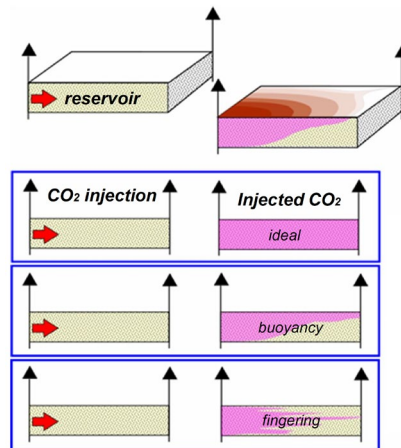


図 2.2.2-2 地中に圧入された CO₂ 挙動の概念図 (RITE 作成)

理想的には CO₂ が貯留層中のすべての孔隙に浸入し、貯留層を均一に埋めることが望ましい、CO₂ 密度が古海水より小さいため、両者の密度差に伴う浮力 (buoyancy) で、CO₂ は坑井から遠方へ広がる過程で上方に移動集積する。また、貯留層の不均質性によって、CO₂ は通りやすいところを選択的に流れる (fingering) こともある。これらの現象は CO₂ 貯留時の掃攻効率 (sweep efficiency) を低下させるほか、貯留可能量評価に不確実性をもたらす。

CO₂ 貯留可能量評価には、大きく「静的評価」と「動的評価」方法があり、「動的評価」とは、対象サイトの地質モデルと CO₂ 挙動シミュレーションを基に貯留可能量を推定する手法である。「静的評価」は容積法とも呼ばれる手法であり貯留可能量評価に用いることが多い。

a) 容積法

貯留層の隙間の体積を基に、次式より貯留可能量評価ができ、日本全体の貯留可能量が 1,461 億トンと試算されている (RITE, 2006)。

$$\text{地中貯留可能量} = S_f \times A \times h \times \phi \times S_g / B_g \text{CO}_2 \times \rho_o \quad (\text{式}2.2.2-1)$$

- S_f : 貯留係数
- A : 面積 (貯留可能域の面積)
- h : 有効層厚

- ϕ : 孔隙率
- S_g : CO₂飽和度
- $B_g\text{CO}_2$: CO₂の容積係数 (約0.003m³/m³)
- ρ_o : CO₂密度 (1.976kg/m³標準状態0°C, 1atm)

総面積 (A)、有効層厚 (h)、孔隙率 (ϕ) の項では、利用可能な孔隙の総容積を扱っている。CO₂ 飽和度(S_g)は、地層水を押し退けた後 CO₂ が占める割合を扱っている。CO₂ の容積係数 ($B_g\text{CO}_2$) と、CO₂ 密度 (ρ_o) は地表での CO₂ の容積と重さを扱っている。貯留率 (Sf) は、全体の孔隙容積のうち、圧入された CO₂ によって占められる容積の割合を示している (RITE 2006)。

上式のうち、貯留係数 Sf と CO₂ 飽和度 S_g は貯留可能量評価にとって重要であり、これらの積は貯留率係数とも呼ばれている。表 2.2.2-2 の通り、貯留率係数は国や地域の地質条件によって値が大きく異なる。日本の貯留率は長岡サイトで行われた小規模 CO₂ 圧入試験 (圧入量: 約 1 万トン) で得られた貯留係数 Sf と CO₂ 飽和度 S_g を参考に決定されたが、他の国や地域に比べてやや大きい。また、表 2.2.2-2 の貯留率係数はあくまでも代表値に過ぎず、個別のサイトの貯留層の規模や不均質性、貯留層の基本物性 (孔隙率、浸透率) 等の地質条件に大きく依存する。サイト選定時の貯留層基本物性は、弾性波探査や坑井掘削等の情報量によるため、貯留可能量評価には常に不確実性を含むことになる。このような不確実性は油ガス埋蔵量評価でも考慮されているが、CO₂ 地中貯留事業では油ガス田開発に比べて、経済性や安全性の観点で調査井掘削の本数が少ないため、貯留可能量評価の不確実性は高いと考えられている。

表 2.2.2-2 幾つかの国や地域の貯留率係数の比較 (Ogawa, 2011)

	Efficiency [*]	Comments [*]
Australia	19 %	Geodisc, Bradshaw et al., 2004
Japan	12.5 %	$S_f \times S_g \approx E(\text{DOE})$ or $C_c(\text{CSLF})$
Alberta	≈ 9 %	Bachu & Adams, 2003 (Dissolution)
USA	1 – 4 %	DOE Atlas, 2008 (Monte Carlo Simulation)
Norway offshore	≈ 4.4 %	Joule II, 1996

<参考> 米国エネルギー省の推奨 (DOE,2013)

サイト選定段階での深部塩水層における CO₂ 貯留可能量評価において、容積法が推奨される基準である。

$$G_{\text{CO}_2} = A_t \times h_g \times \phi_{\text{tot}} \times \rho \times E \quad (\text{式}2.2.2-2)$$

- G_{CO_2} : 塩水層CO₂貯留可能量の質量推定値
- A_t : CO₂貯留可能量計算のための面積
- h_g : Aにおける塩水層のグロス層厚

- ϕ_{tot} : 層厚 h_g での塩水層全体の平均孔隙率
 ρ : 貯留層の圧力と温度条件下で評価されたCO₂密度
E : CO₂によって満たされるか、接触のある総孔隙容積の割合を反映するCO₂貯留効率係数

式 2.2.2-1 と基本的には同様の考え方であるが、式 2.2.2-1 では「 $B_g CO_2 \times \rho$ 」と示された、地表と地下条件での体積変化および CO₂ 密度を反映した数値として、式 2.2.2-2 では「 ρ 」としている。また、式 2.2.2-1 の「 S_f : 貯留係数」、「 S_g : CO₂ 飽和度」に対して、式 2.2.2-2 では「 E : CO₂ 貯留効率係数」として表現している。掃攻効率 (sweep efficiency = 貯留層の総孔隙容積に対する圧入流体の接触した部分の容積比率) の概念に近く、対象面積のネットとグロスの比率、層厚のネットとグロスの比率、有効孔隙率と総孔隙率の比率を包含する (式 2.2.2-3)。

$$E = (A_n/A_t) \times (h_n/h_g) \times (\phi_e/\phi_{tot}) \times E_v \times E_d \quad (\text{式2.2.2-3})$$

- A_n/A_t : ネット対グロス面積
 h_n/h_g : ネット対グロス層厚
 ϕ_e/ϕ_{tot} : 有効孔隙率対総孔隙率
 E_v : 容積掃攻率 : (面積掃攻率) × (垂直掃攻率) × (重力・浮力掃攻率)
 E_d : 顕微鏡的置換効率 : 不動地層水に影響される掃攻率

b) CO₂挙動シミュレーションによる貯留可能量評価

一般的にサイト選定段階で利用できるデータの量や質が必ずしも十分ではないため、容積法が使われるが、十分な量と質のデータに基づいた地質モデルが構築されれば、シミュレーションによる貯留可能量算出が望ましい。貯留層中の隙間の体積を基に推定された貯留可能量は **static storage capacity** であり、貯留層地質モデルに基づく CO₂ 圧入シミュレーションで推定された **dynamic storage capacity** との比較検討がよく行われている。貯留層を覆う遮蔽層の破壊圧力等の制約条件を CO₂ 圧入シミュレーションに取り入れることによって、**dynamic storage capacity** が評価され、貯留可能量の信頼性が高くなるとも考えられている。制約条件の導入によって信頼性が向上することは理にかなうが、CO₂ 圧入シミュレーションにも貯留層モデルの完成度や相対浸透率曲線等に起因する不確実性を含むことを忘れてはならない。つまり、貯留可能量評価では種々の取り組みによって不確実性は低下するものの、完全に排除することはできず、地中貯留事業の潜在的リスクとしてマネジメントしていく必要がある。

④ トラップと構造的位相

圧入された CO₂ が貯留層中を構造上位方向に向かって移動し、最終的に構造的、層位的にトラップされると安全性が高まる。このため、構造的、層位的トラップの存在が望ましい。また、圧入された CO₂ が、構造的、層位的トラップの終点まで移動する間に残留トラッピング、溶解トラッピング、鉱物化が進行することから、CO₂ 貯留の安全性向上が期待できる。地層傾斜は 10° 程

度が良いと思われる。また、CO₂が貯留層中を構造上位に移動する場合、移動距離が長く、ゆっくり移動したほうがCO₂溶解等に有利である。

⑤ 断層

a) 漏洩/漏出経路¹

貯留サイトの想定CO₂プルームの範囲内あるいはその周囲に断層があり、貯留層、遮蔽層を切っている場合、漏洩/漏出のリスク評価が重要となる。断層に沿って温泉や地下水が湧出したりする例もあり、断層は地下流体の移動経路となり得る。しかし、石油・天然ガスの鉱床では、断層が地層流体（石油・天然ガス）の移動を妨げるバリアとして機能している実例も非常に多く知られており、断層トラップという名称も一般的である。石油・天然ガスの探鉱段階では、断層が地層流体の移動経路として、トラップに集積される方向で機能するケース、また、移動経路として一度集積した石油・天然ガスが漏洩するケースもある。

b) 誘発地震・活断層・断層の再活動の検討

廃水圧入などによる誘発地震に関し、地層の間隙水圧が上昇し、断層が再活動する、あるいは再活動の誘発原因になり得ると指摘されている(National Research Council, 2013)。この考えがCO₂地中貯留にも当てはまるとも言われているが、CO₂圧入サイトで有感地震観測事例は報告されていない。しかし、地震発生は地域社会や住民に多大な被害をもたらすため、社会受容性の観点からも、CO₂貯留サイト選定では周辺の断層には十分注意すべきである。

日本国内では活断層関連の調査資料が多く公開されている。例えば、日本列島やその周辺海域に分布する活断層あるいは活断層の可能性のあるリニアメントを抽出した資料としては、「新編日本の活断層」(活断層研究会編、1991)や地質調査所発行の「50万分の1活構造図」(例えば、寒川ほか、1984)が挙げられる。主要な活断層と海溝型地震を対象にした、地震の規模や一定期間内に地震が発生する確率などの評価結果は、「主要な活断層帯の長期評価」という形で国の地震調査研究推進本部が公開している(http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_danso.htm)。

海域地中貯留サイトの選定では、弾性波探査記録が有力なデータとなるが、断層による変位が海底面まで達しているかどうかによって、断層が活断層であるか否かを判断することにも利用できる。海底面調査データがあれば、海底地形データを基に、既知断層と海底面変位の比較により、断層の再活動を把握することも可能である。

西オーストラリア州パース沖のVlaming 亜盆地のCO₂地中貯留サイト選定における弾性波探査記録に基づく断層再活動評価事例が参考になる。Vlaming 亜盆地の北部地域では、リフト形成時に発生した断層が存在する(図 2.2.2-3)。これらの断層の再活動についてマルチビーム測深記録と比較して検討した。マルチビーム測深記録では、断層に対応する可能性のある2つのリニアメントが見いだされた(図 2.2.2-4)。東のリニアメント(図 2.2.2-4のF1)は、再活動したリフト形成断層(図 2.2.2-3のF1)の真上にある海底の1mの急崖に相当する。西のリニアメント(図 2.2.2-4のF2)は、炭酸塩岩のエッジと急崖の両方の特徴を持つが、これも再活動した断層(図

¹ 本事例集では、漏洩/漏出を以下のように定義する。

漏洩：CO₂貯留システム(貯留層と遮蔽層のセットから成り、CO₂を貯留できるトラップを形成している地質系)からシステム外へCO₂が漏れ出すこと。

漏出：CO₂が地下から地表面、あるいは海底面を通して大気中、もしくは海中に漏れ出すこと。

2.2.2-3 の F2) に対応している可能性がある。

このように、サイドスキャン・ソナーやサブボトム・プロファイラ、マルチ・ビーム・ソナーなどの広範囲、高解像度の海底地形データ記録が断層の再活動や海底地形のリニアメント解析に利用できる。海底地形のリニアメントは、弾性波探査から解釈された断層と比較され、深部構造との関連性が検討され、CO₂貯留サイト選定において断層の再活動評価に役立つ。

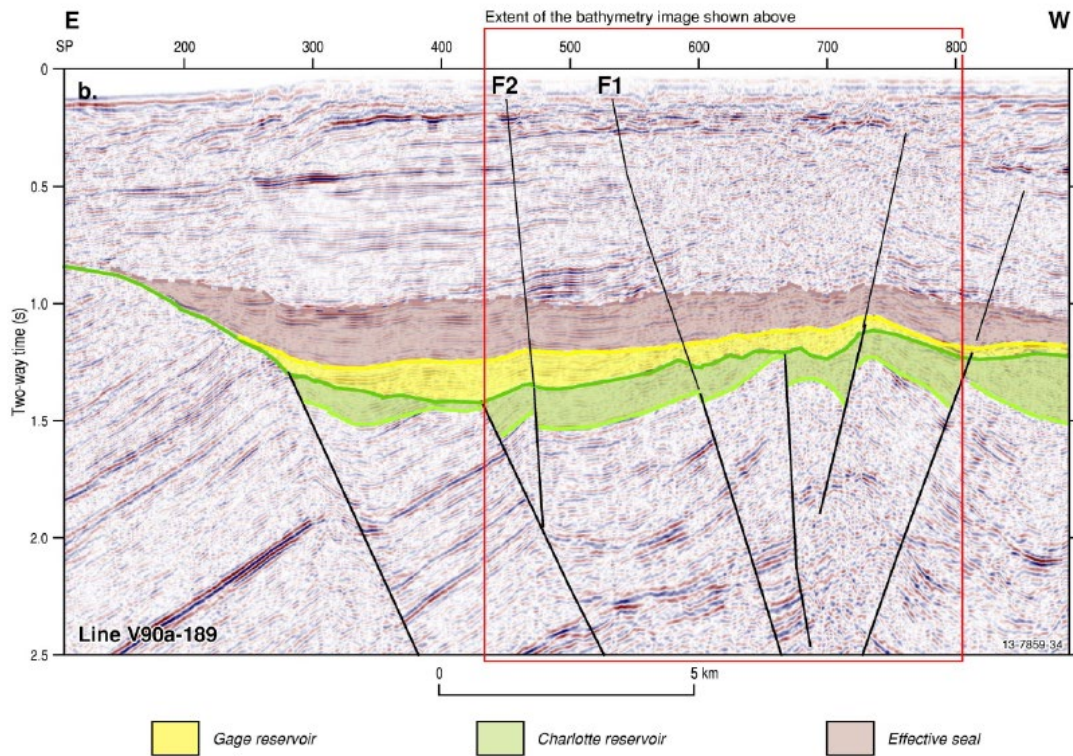


図 2.2.2-3 Vlaming 壱堆積盆地の弾性波探査記録。測線は図 2.2.2-4 に示される (Borissova, et al., 2015)

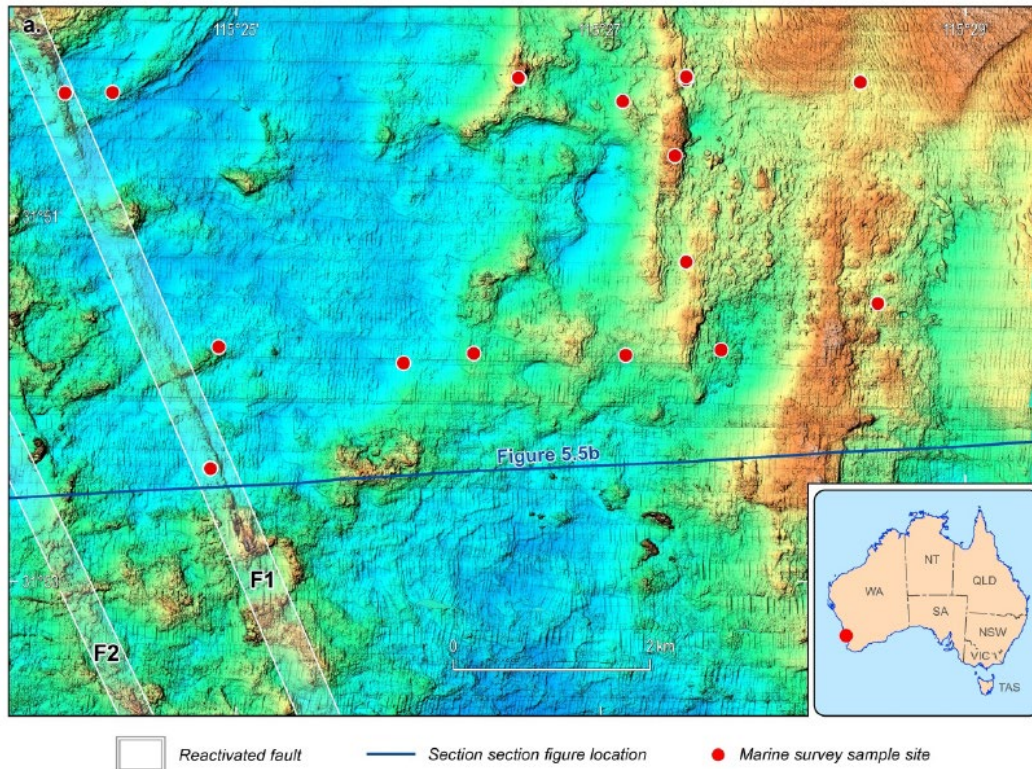


図 2.2.2-4 マルチビーム測深記録 (Borissova, et al., 2015)
 図 2.2.2-3 の F2, F1 に対応する線状の急崖が示される

(2) サイト選定のための非地質的評価項目

CO₂ 地中貯留プロジェクトは、安全性の他に採算性も求められており、経済性は事業成功の重要な要素である。経済性は技術面と密接に関係しているが、技術的側面のほか、非地質的要素も重要であり、サイト選定では次のような点も評価しなければならない。

① 排出源からの距離

貯留サイトと排出源の距離は、CO₂ 輸送方法の選定や輸送コストに大きく影響する。大規模CO₂ 地中貯留事業では、CO₂ 輸送方法がパイプラインか船舶利用（海域サイト、Hub and Cluster）に限定される。陸域の場合、地表や地形条件がパイプライン敷設の可否だけでなく、工事コストも大きく左右される。一方、海域の場合は水深や離岸距離もサイト選定要素として重要である。一般的傾向として、長距離ではタンカー輸送が効果的である（図2.2.2-5）。

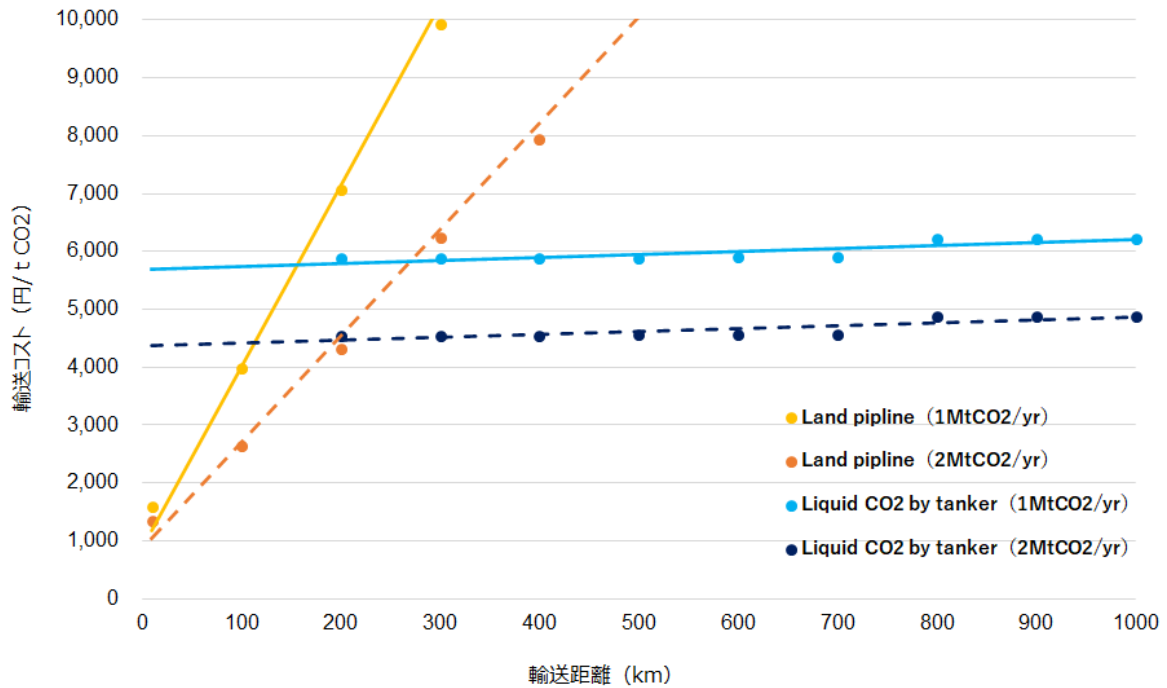


図2. 2. 2-5 CO₂輸送の距離とコスト (RITE試算)

② 貯留サイトの立地条件

貯留サイトの地表状況は、坑井掘削敷地確保や圧入施設建設関連コストに影響する。既存の地形図やWebを駆使して、地形や地表状況を入手することができる。また、公園や環境保護区などは避ける必要がある。さらに、モニタリングの容易さもサイトとして必要とされる要素である。

海底下地中貯留の場合、圧入施設をどこに建設するかが、CO₂貯留事業全体のコストを左右する。大きく分けると以下のような方法がある。

- Aー圧入井の坑口を陸域に設置、高傾斜井を海底下の貯留地点まで掘削し、陸域から圧入する。陸域でのCO₂貯留と同様な操業が可能である。
- Bー洋上固定式あるいは浮体式プラットフォーム上に圧入施設や圧入井坑口を設ける。既存プラットフォームの再利用が可能である。
- Cー海底に圧入井坑口を設置し、陸域からパイプライン輸送あるいは船舶輸送のCO₂を海底坑口から圧入する。

上記のうち、Cの方法は現在、世界各地の大水深海域での石油、天然ガス開発で使用され、実績が急速に増加しつつある。これには、海底仕上げが技術的に確立されたこと、300mを超える水深の海域では、従来の固定式海洋プラットフォームが経済的な限界に近づきつつあること、初期開発投資額が低い、固定式海洋プラットフォームによる開発を行う際、生産開始までのリード・タイムが長くなること、などの背景がある。

③ 社会基盤など

次の情報も可能な限り収集し、サイト選定の参考にする。

- ・社会的受容性 : ステークホルダー（利害関係者）の特定
- ・歴史的背景 : 過去から現在までの当該地域の社会的、経済的、政治的変遷
- ・気候／気象 : 気候、気象の記録
- ・自然災害 : 過去の自然災害記録、災害対策地域および危険地域等
- ・地域産業 : 産業構造
- ・社会基盤 : 道路（高速道路、主要道路、交通機関）、上下水道・電気・ガスの整備状況と供給ネットワーク、
- ・人口動態 : 人口推移／昼夜間人口、平日・休日人口
- ・各種施設 : 学校、商業施設、病院、工場、公園、災害時避難場所など

上記のような地域的、社会的特性は、Web などを通じても入手できる。日本の場合、各地方自治体のホームページが有力な情報源となる。また、気象庁のホームページからは気象に関する詳細な記録が閲覧できる。海域のサイト候補の場合は海上保安庁や各国の海洋関係機関、対象海域近傍の港湾のホームページが利用できる。地形や各種施設は Google Map や Google Earth も有力な調査手段となる。

④ 枯渇油ガス田

サイト周辺で石油・ガス開発が行われていた場合、既存地質データが豊富で、地質評価の参考になる。また、枯渇油ガス田の施設が再利用できる場合、コスト面からは CO₂ 地中貯留事業の経済性にもプラスになる。既存坑井の圧入井への転用、海底下地中貯留での既存プラットフォームの再利用、CO₂ 輸送のためのパイプラインの再利用など、再使用に耐えるかどうか、慎重に調査しなければならない。また、油ガス田の存在は地域社会による地下を対象とした事業に対する受容性が期待できる。

⑤ 既存坑井

既存坑井、または廃棄された古い坑井は、CO₂ が地表、海底面へ漏出する経路となり、CO₂ 漏洩／漏出リスクをもたらす可能性がある。国によっては公表地質図に坑井位置が記入されている場合もある。日本の場合、公表地質図に油田・ガス田の範囲が示されており、既存坑井／廃坑井に関する初期の判断材料にはなる。米国、カナダ、オーストラリアの場合、石油・天然ガス関係の公表資料が多く、また、飲料水用の坑井、廃棄物処理のための坑井に関する公表資料も多く入手できる。

⑥ 法律、規制

CO₂ 地中貯留に係る法律や規制の整備状況は国や地域によって多様である。オーストラリアやノルウェーでは CO₂ 地中貯留関連法が長年施行されてきた従来の石油・天然ガス関係法に組み込まれる形で成り立っており、地下を取り扱う事業としての両事業の整合性が特徴的である。一方、まだ CO₂ 地中貯留に関係する法律、規制が未整備な国も多く、事業の不確実性の要因ともなり、サイト選定にあたっては、法規制も考慮しなければならない。

日本においては、海域について環境省により海防法（第1章参照）が制定されているが、陸域あるいは圧入終了後／サイト閉鎖後については未整備の状態にある。

2.2.3 サイト候補ランキング

サイト選定の手順に沿って、各サイトにおいて様々な地質的、あるいは非地質的要素を評価して、最終的には、次フェーズ（サイト特性評価）に移行可能なサイト候補を絞り込むことである。そのためには、評価項目ごとにその結果の優劣を比較検討して、サイトとしての適格性の順位付けが必要である。以下では、サイト候補ランキングについて記述する。

(1) ランキング要素

① 貯留層と遮蔽層の組み合わせ

貯留層と遮蔽層の厚さは、対象層が厚いほど、また広がりに関しては、広範囲な分布ほどランクは高い。貯留層では孔隙率、浸透率が高いほど、また遮蔽層では、遮蔽能力の指標となるスレッシュホールド圧力が高いほどランクは高くなる。ランキングにおいては、これら物性値の優劣の他、分布の不均質性も評価すべきであり、詳細な検討ができない場合、広域的な堆積環境なども参考になる。また、貯留層と遮蔽層の組み合わせが複数存在することはプラスとなり、遮蔽層が複数発達することは安全性の向上につながる。

また、枯渇油・ガス田が候補となっている場合、貯留可能量などを別として、以下の点で最もランクが高くなる。

- ・長期間の遮蔽性が実証されている
- ・貯留層性状が一定以上である
- ・貯留層圧力が低下している
- ・構造的、層位的トラップが存在する

② 貯留可能量

操業や貯留の安全性を考慮すれば、余裕を持った貯留可能量を有するサイト候補ほどランクが高くなる。貯留可能量算出に係るデータの量と信頼性も考慮する必要がある。

③ トラップと構造的位

構造や層位などのトラップの存在は、貯留の安全性について、利害関係者に説明しやすく、ランクは高い。特に構造が緩傾斜なほどCO₂の移動距離が長くなり、残留、溶解、鉱物化トラップのメカニズムが機能するためランキングは高くなる。深度的には、掘削コストが高くなく、CO₂が超臨界状態を維持できる条件を有するサイトのランクが高くなる。

④ サイトの非地質的要素

一般に排出源からの距離は短い方が輸送コストが低く、経済性的観点から好ましい。また、地形や港湾の整備状況など社会環境、自然環境的にも有利なサイトほど上位にランクされる。海域地中貯留は、一般に陸域に比べコスト高になるため、圧入施設の設置方法、CO₂輸送方法もラン

キングに影響する。

競合する可能性のある地下資源の存在もサイト選定の要素であり、ランキングで参考にされる。近傍に非稼働あるいは稼働中の油・ガス田が存在する場合、地下地質データが豊富に入手できる可能性があり、貯留層システムの性状の精度・信頼性も高くなるが、既存坑井（廃坑井も）が潜在的な CO₂ の漏洩/漏出経路になることからランキングにはマイナス要素となる。

2.2.4 サイト選定でのその他の留意点

(1) 地質データが欠落した地域でのサイト選定

排出源のごく近傍の特定の場所で CO₂ 地中貯留を実施したいが、そこが堆積盆地の一部とされるものの広域評価資料が存在しない、あるいはサイト選定に資する程度の情報（地下深部の調査実績はなく、堆積物の厚さなどの情報）が存在しない場合がある。このようなケースでは、サイト選定のために最小限の調査実施が必要となる。堆積物の厚さを確認するための簡易的調査法として、MT 法（マグネト・テルリック-Magneto-Telluric）、微動アレイ探査が有力な手段となる。

(2) パブリック・エンゲージメント（住民関与）の留意点

CO₂ 地中貯留事業の円滑な実施に必要な要素にパブリック・エンゲージメントといった社会的側面がある。パブリック・エンゲージメントは CO₂ 地中貯留事業成功の鍵と言っても過言ではなく、この面での失敗が CO₂ 地中貯留事業中止の主要な理由になった事例も世界でいくつか知られている。サイト選定段階では、パブリック・エンゲージメント活動の対象を地域的に限定して実施する必要はないが、サイト特性評価フェーズでは、サイト候補地や周辺、想定される CO₂ 輸送ルート周辺を対象に、本格的なパブリック・エンゲージメント活動を早急に開始すべきであろう。その際、多くの利害関係者は以下のような点への明確な回答を求めるものと考えられる

（European CCS Demonstration Project Network, 2012）。

- ・ サイト選定の基準
- ・ 選定手順
- ・ サイト決定の理由

上記3点への明確な説明が可能な記録文書、参考資料などを取りまとめる必要がある。

(3) RCSP からの教訓

米国の Regional Carbon Sequestration Partnerships (RCSP) CO₂ 地中貯留実証プロジェクトでは、多くの面で実績を残し、知識の集積が進んだが、サイト選定には教訓もあった (NETL, 2017)。

・ Big Sky Carbon Sequestration Partnership (BSCSP) : 収集データ品質評価の重要性

BSCSP はアメリカ北西部における、主に玄武岩層での CO₂ 地中貯留に関する実証プロジェクトである。対象サイトの一つ、Kevin Dome Project サイトは未開発で他の油ガス田対象のプロジェクトに比較して既存データが少ないが、スクリーニングの段階では基本的な条件は満たしていると評価された。貯留層は 800m 以深であり、遮蔽層として厚い硬石膏が発達している。当該地域では人口密度が低く、浅部を対象とした石油天然ガス探鉱実績もある。サイト選定に移行した

段階で、入手可能なデータに基づく検討によると、ターゲット層準より深い坑井の検層データは取得されたが、検層手法が古く、データの質が良くなかった。また、坑井テストの結果も十分に整理されていなかった。さらに、対象地域がカナダ国境に近接しているため、地層名が混乱し、坑井位置や古い坑井の封鎖状況の記録に統一性を欠いていた。スクリーニングで使用したいくつかの坑井のデータは更なる調査で不正確であった。このような不正確性、特に Kevin Dome における古い坑井に関するデータの不正確さは、UIC Class VI が求める AoR(Area of Review=監視範囲)の設定や坑井の修復コストに重大な影響を及ぼす結果となった。サイト選定過程の早い時期に既存データの限界を知ること、データの不正確さを見極めること、およびプロジェクト責任者に対してデータの限界を伝えることは、サイト選定を進めるうえで非常に重要である。

・ Plains CO₂ Reduction (PCOR) Partnership : 地表地質調査の重要性

アメリカ中央部からカナダ南部の平原部での CO₂ 圧入実証プロジェクトである。地下深部の地質情報を推定することが困難なため、地下の広域的構造、堆積相、不均質性を推定するために露頭データを使用することは、複雑な貯留層検討のための重要なアプローチである。露頭で得られた同じ地層の情報とコア試料を対比させた後、3D 地質モデルの改良に用いた。対象となった Bell Creek 油田の貯留層に対比させるため 25 mile 離れたワイオミングの露頭を調査した。実際の Bell Creek 油田では貯留層が深度約 4,500 ft に存在するが、この露頭観察により貯留層の不均質性を十分理解することができた。本油田では膨大な坑井が存在するが、岩相変化の検討に利用できるコアデータが少なかった。このため、坑井情報に基づく高分解能の 3D 地質モデル構築に十分ではなかった。しかし、露頭観察により広域的構造や地質的不均質性を理解するために重要な上下、左右方向に広がる地質情報を得ることができた。

また、この露頭観察により露頭と地下のコアの間的美好な堆積学的対比を得ることができた。コアでは 3 層準と 5 岩相が記載されたが、露頭では同じ 3 層準と 5 岩相のうちの 4 つの岩相を観察することができた。対応する地表と地下の岩相の間の類似性によって、コアが十分入手できない場合、類似の露頭サンプルを使用した室内試験を行うことができた。露頭で収集されたデータにより、主要な空間統計学的なレンジ、孔隙率から浸透率への変換、岩石力学的多様性、貯留層と遮蔽層の確認などの把握の参考になり、3D 地質モデル構築での不確実性最小限化に寄与した。

2.3 地下孔隙の所有権とサイト探査許可

2.3.1 孔隙スペース保有権

油ガスや金属鉱物などの地下資源開発では、地下に存在する鉱物資源を誰が所有するかという鉱業権は法律で明確化されており、自由に採掘することができない。

アメリカやカナダでは、地下資源は賦存場所の直上の土地所有者に属している。地下資源採掘事業者は、土地所有者と地下資源採取権に関するリース契約を結んでから事業を行う必要がある。

地下資源開発分野の鉱業権と類似する地下孔隙所有権が CO₂ 地中貯留にも導入される動きがある。米国ではモンタナ、ワイオミング、ノースダコタの 3 州のみが明確に示す法律を制定している。また、カナダのアルバータ州は、国有地を除くすべての土地の地下孔隙所有権が州に帰属することを宣言している(GCCSI,2012)。

2.3.2 孔隙の所有権と地下探査権

孔隙所有権を踏まえて、いくつかの国や地域では、CO₂ 地中貯留の権利を法的に定めている。ヨーロッパ諸国では地下資源採掘権と同様、孔隙所有権も国によって保有されているため、事業者に対する CO₂ 地中貯留権の付与は、国によって行われる。オーストラリアでは、陸域と陸地に近い海域は州政府が、沖合の海域は連邦政府が孔隙所有権を保有しているため、CO₂ 地中貯留権の付与もそれぞれが行う。アメリカ陸域では地表権所有者が地下の孔隙所有権も保有するため、CO₂ 地中貯留事業者は、地表権所有者からリースし、貯留権を得ることになる。海域は陸地に近い海域は州政府により、また遠い海域、外縁大陸棚（Outer Continental Shelf）は連邦政府が事業者に対して貯留権をリースする。

石油、天然ガスなど地下資源の採取には、高い経済的効率が不可欠であり、最良の採取地点を選定するために事前の探査が極めて重要な位置を占めている。多くの国では資源探査、科学的調査かどうかに関わらず、試掘を伴わない探査であっても、許可の対象となっている。例えば、米国、オーストラリアそしてイギリス、ノルウェーなどのヨーロッパ諸国、日本、韓国、中国、ロシアでも資源探査は許可制になっている。入札制度がある場合、多くの国では財務的基盤や技術的能力を証明させる書類の提出を課しており、これらの能力を有していると評価できる場合に限り、権利を与えるとされている。CO₂ 地中貯留に関しても同様であり、多くの国では長期的に安全に CO₂ 地中貯留が可能なサイトを選定するための探査段階から一定の範囲を対象にいくつかの条件を満たす事業者に許可を与える法律が整備されている。

(1) 世界の現状

① アメリカ

・アメリカ陸域

私有地における CO₂ 地中貯留サイトの探査権は、事業者が土地所有者と契約（権利書取得）しなければならない。公共の土地における探査は、Federal Land Policy and Management Act に基づき、US Bureau of Land Management (BLM) に許可申請することにより CO₂ 地中貯留活動が可能となる(Global CCS Institute et al.,2009)。

・アメリカ海域

米国海域においては、海岸線から 3 nautical miles(5,556m)より沖合の大陸棚(OCS=Outer Continental Shelf)は連邦政府が管轄する。それより陸側は州政府の管轄となるが、例外としてテキサス、フロリダ州の場合、9 nautical miles(16,668m)、またルイジアナ州では 3 imperial nautical miles(5,559.5m)が境界となる。

Outer Continental Shelf Lands Act (OCSLA) により、内務省の Bureau of Ocean Energy Management (BOEM)、Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE) は、沖合の大陸棚での鉱業資源の開発を規制する以下の権限を持つ。

-既存の石油/ガス鉱区リースでの CO₂-EOR と地中貯留を許可する権限。

-陸上の石炭火力発電所で副産物として発生した CO₂ の地中貯留に限定して許可する権限。

これまでに許可された実績はない(Godec,2020)。

OCSLAに規定されるリース権 (Oil and Gas Lease) は石油・天然ガスに関して探査、試掘、開発、生産までを実施できる権利である。5か年リース計画(five year leasing plan)に基づいて鉱区のリース・セールを行い、5年間(大水深では10年間)のリース権を付与する。リース権者はリース権取得後4年以内に、掘削、探査の手法、調査井、試掘井の位置、流出事故対策、その他の地質・物理的情報などを含む探査計画(exploration plan)を提出する義務がある。また、環境報告書(environmental report) と、沿岸州からの許可証を添付する必要がある。このような大陸棚における石油・天然ガスの探査に関する規定は、大陸棚海底下CO₂地中貯留の探査にも適用されると考えられている。

② カナダ (アルバータ州)

CO₂地中貯留のためには、孔隙使用に関してはGovernment of Alberta Department of Energy とリースあるいは保有 (tenue) の契約が必要である。また、圧入操業実施のためにはAlberta Energy Regulator (AER)から許可取得が必要である。サイト評価作業、圧入試験や貯留層評価実施には評価許可(Evaluation permit)が必要である。評価許可もリースあるいはtenue契約の形式を取り、貯留層評価のための圧入テストを含む坑井を使用したサイト評価を行う権利を持つ。評価許可の期間は5年間で延長はできない(OECD/IEA,2015)。

③ EU, CCS 指令

CCS 指令は探査許可申請に関しての詳細は規定していない。しかし、第 5 条では以下の通り探査許可を取り扱っている。

- 貯留サイト候補地の探査には、探査許可が必要である。
 - ・ サイト選定のための情報収集に探査が必要と加盟国が決定した場合、探査許可なしには探査を実施することはできない。
- 圧入テストの監視が許可に含まれる可能性がある。
- 探査許可に対する条件は以下のとおり。
 - ・ 許可申請が、必要な能力を有する全ての事業体に開放されていること。加盟国は探査許可交付の手続きが能力を有する関係者すべてに対してオープンであること、許可は客観的、公にされ、非差別的であることを保証する。
 - ・ 許可の付与又は否認が、客観的で公表され、公平な基準に基づいていること
 - ・ 限定された地域に許可が与えられていること
- 許可期間は許可が付与された探査の実施に必要な期間である。
 - ・ 探査許可の有効期間は許可された探査を実施するために必要な期間を超えることはできない。ただし、加盟国が探査を完了するには規定された期間が不十分であり、許可に示された通りの探査が実行されている場合、許可の期間は延長される。
- 許可期間中、許可保持者に独占的な探査の権利がある。

CCS 指令によると、「探査」とは見込まれる貯留コンプレックス (貯留層と遮蔽層との組合せ)

内の地層に関する地質学的情報を得るための掘削、必要な貯留サイト特性解析のための圧入テストを実施するなどの活動を通じ、対象の貯留コンプレックスを評価することである。

また、実際に CO₂ 地中貯留事業を行うためには、各国当局から貯留許可を得ることが必要であるが、CCS 指令では貯留許可の付与には探査を完了した探査許可所有者が優先されることが規定されている。

④ イギリス

CO₂ 地中貯留に関して英国政府は、EU CCS 指令によって各加盟国が義務付けられている CO₂ 地中貯留許認可制度整備への対応として、許認可制度の詳細を示した規則となる **Storage of Carbon Dioxide (Licensing etc.) Regulations 2010** を定めている。英国の CO₂ 地中貯留事業の許認可制度は 4 つのステージ (stage) により構成されており、これまでの石油生産等の経験から貯留サイトに係る知見を有する既存の事業者と、地下探査等により貯留サイトの選定作業が必要な新規事業者とで必要となる許可が異なる (UK Government,2010, OECD/IEA,2015)。

・ステージ 1 (初期探査)

事前調査により貯留サイトの選定が必要となる新規事業者は DECC (Department of Energy & Climate Change) より石油法(Petroleum Act 1998)に基づく探査ライセンス(Exploration License)を取得する。このライセンスを取得した事業者は、弾性波探査、重力探査、磁気探査、コアサンプル採取及び 350m 以浅の掘削調査を行うことが可能となる。

・ステージ 2 (深部掘削調査及び圧入試験)

ステージ 1 での調査に加えて、圧入等の実証試験を行う事業者は、貯留ライセンス (Storage license) を DECC に申請する。事業者は、対象サイトを The Crown Estate (英国領を管理する議会の管轄下にある組織) よりリースするよう求められ、The Crown Estate との間でリース契約(Agreement for Lease=AfL)が締結される。AfL は、DECC から貯留許可を取得するなど、期間限定の排他的オプションを契約者に付与することになる。

・ステージ 3 (CO₂ 貯留)

貯留サイトが決定し CO₂ 貯留を開始する AfL を締結済みの事業者は、貯留許可 (Storage permit) を DECC へ申請する。既に石油生産等に従事し、貯留サイトの知見を有する事業者は、事前調査活動 (ステージ 1 及び 2) を経ることなく、貯留ライセンスの申請が可能となっている。

・ステージ 4 (サイトの閉鎖及び貯留許可の終了)

CO₂ 貯留事業が終了し、施設を閉鎖した事業者は、政府に長期責任が移行するまでの閉鎖後期間 (postclosure phase) にわたって、モニタリング等を実施する。なお、エネルギー法では閉鎖後期間の年数は明示されていないものの、目安として CCS 指令と同様の 20 年を例示している。

⑤ オーストラリア

オーストラリアでは、陸域と海岸から 3 海里 (5.6km) までの沿岸域は州と準州の管轄、また、海岸より 3 海里から大陸棚末端までの海域は連邦政府の管轄となっており、CO₂ 地中貯留でもこの

管轄が適用される。

2008年、連邦政府管轄海域におけるCO₂の海底下地中貯留のための権利システムおよび石油産業との調整が可能な権利システムの構築を目的として、従来の海域石油、天然ガス開発関連の法律(Offshore Petroleum Act 2006)を改正し、「Offshore Petroleum and Greenhouse Gas Storage Act 2006」(正式な法律名はPetroleum Exploration and Recovery, and the Injection and Storage of Greenhouse Gas Substances, in Offshore Areas Act)となった。本改正により、既存の連邦政府管轄の海域石油産業に適用されている鉱区設定方法が、CO₂地中貯留にも適用されることとなった。

・ 鉱区設定

CO₂地中貯留事業を行うための鉱区設定(Acreage Release)は、地質的評価の他、特に石油事業など他の事業との整合性、既存の産業構造への影響等に考慮して行われる。設定された鉱区は公開され、入札によって探査を行う事業者を決定する。探査許可(Assessment Permits)の入札は、企画競争入札(work-bid)か一般競争入札(cash bid)で行われ、落札者が指定された鉱区において温室効果ガスの圧入・貯留サイトの探査をする権利である探査許可を得ることができる。

CO₂地中貯留探査許可の公募は、鉱区設定の官報記載後、6ヶ月以内に開始することとしている。入札への応募を希望する事業者は、鉱区設定の官報記載後、管轄連邦大臣によって定められた期間内に申請書を提出しなければならない。探査許可の有効期間は原則6年間だが最大12か月の延長が可能である。探査の結果、CO₂地中貯留事業の開始が決定すれば、事業者は特定のサイトにおける温室効果ガスの圧入・貯留を実施する許可である圧入許可(Injection License)取得に向けて申請を行う。一方、探査の結果、CO₂地中貯留に適したサイトではあるが、CO₂圧入・貯留は将来的に実施すべきと判断された場合、将来的に温室効果ガス圧入・貯留許可への申請権を保持できる権利であるリース保有(Holding Lease)が当局によって認められる。この期間は5年間で最大5年更新可能である。さらに、CO₂地中貯留が石油・天然ガス事業に影響を与えると判断された場合には、特別リース保有(Special Holding Lease)として無期限でCO₂圧入、貯留の実施を延期できる。以上のフローを図2.3.2-1に示す(RITE,2009)。CO₂地中貯留事業に関連して付与される主な権利と石油生産のための権利との対照表を表2.3.2-1に示した。

表2. 3. 2-1 オーストラリアにおけるCO₂地中貯留事業と石油生産に対する主な権利
(RITE, 2009)

	CCS事業	石油生産事業
探査許可	Assessment Permit 指定された鉱区において、GHG貯留サイトの探査をする権利	Exploration Permit 指定された鉱区において、石油掘削の探査をする権利
リース保有権	Holding Lease (Special Holding Lease を含む) 将来的にGHG圧入が可能である場合に、圧入許可への申請権を保持できる権利	Retention Lease 将来的に石油生産が可能である場合に、生産許可への申請権を保持できる権利
圧入/ 生産許可	Injection License 特定のサイトにおけるGHGの圧入・貯留を許可する権利	Production License 特定のサイトにおける石油生産を許可する権利

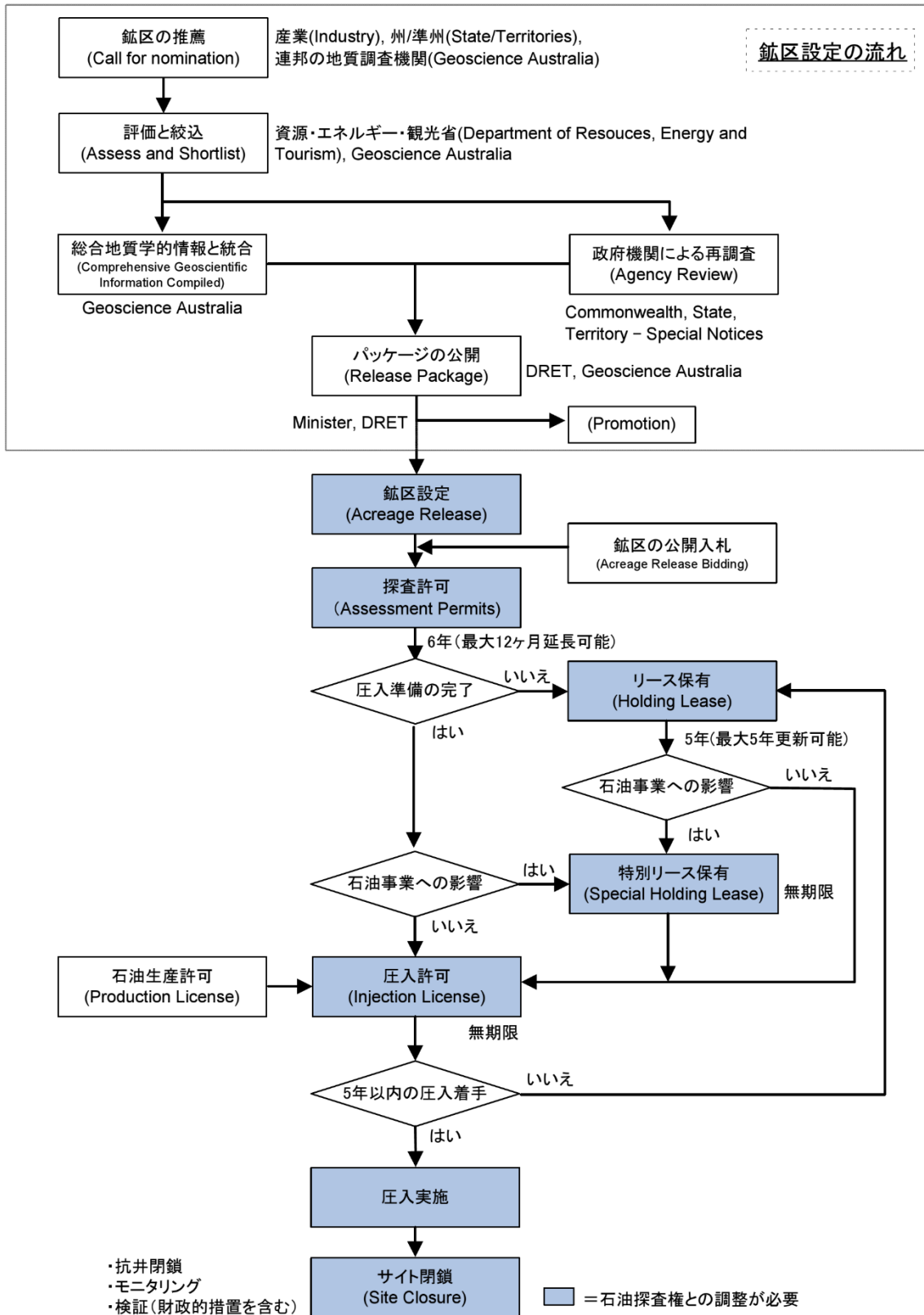


図2.3.2-1 CCS事業許可申請フロー (RITE, 2009)

⑥ ノルウェー

ノルウェーではCO₂地中貯留が石油・天然ガス事業の一部として法規制が制定されている。このためPetroleum ActとPollution Control Actに規制される。CO₂地中貯留に対する許認可システムは以下の通りである(Global CCS Institute ,2012)。

- ・ サイト選定のための概査許可 (Prospecting permit) : 概査実施のために必要であり、管轄省によって付与される。非独占的実施許可であり、サイト選定の次のステップである探査を実施する許可に対する優先権も有しない。
- ・ サイト選定のための探査許可 (Exploration Permit) : 国(King-in-Council)によって付与され、最長で10年間の独占的な許可である。
- ・ 貯留サイトの開発許可 (Exploitation permit) : 国(King-in-Council)によって付与される独占的許可である。圧入、貯留作業に係る開発、管理計画をはじめとするCO₂地中貯留事業の詳細かつ広範な実施計画が策定される。また、環境アセスメント実施も重要な内容である。
- ・ 貯留許可 (Storage permit) : 圧入開始のための許可。

⑦ オランダ

CO₂地中貯留サイト選定のための探査実施、主に調査井掘削のために探査許可 (Exploration permit) 取得が必要である。申請には探査実施計画、事業者の技術的、経済的ポテンシャルを示す書類などが必要である。ただし弾性波探査実施について許可は基本的に必要がない。

CO₂貯留のためには貯留許可 (Storage permit) が必要であるが、探査許可を得て探査・評価した結果、貯留サイトとして満足できる結果が得られた場合、探査許可を受けている事業者に貯留許可取得に対して優先権が与えられる (OECD/IEA,2015)。

⑧ デンマーク

CO₂貯留サイト選定のための探査実施にはMinister for Climate and Energyによる探査許可 (exploration permit) が必要である。独占的な許可であり、6年間有効であるが2年間延長でき、例外的に最大10年間まで延長可能である。探査許可は入札によって行われる (Global CCS Institute ,2012)。

⑨ フランス

CO₂貯留サイト選定のための探査実施には、鉱業担当大臣による許可が必要である。公報に入札公示された日から30日間での公開入札となる。探査許可は5年間有効であるが延長も可能である。当局によって示された義務作業を実施する技術的能力と財務的能力を有することが入札資格条件である。探査許可を得た場合、事業者は許可に示された範囲における排他的な探査権利を有することになる (Global CCS Institute ,2012)。

(2) 日本

日本においてはCO₂地中貯留のための鉱区設定は制度化されていない。貯留事業実施の権利に係る法律も存在しない。一方、CO₂地中貯留サイト選定を含む地下探査に関しては、許可が必要

とされている。

石油・天然ガスを含む鉱物資源の鉱業権は鉱業法によって定められており、試掘権（鉱物の有無、鉱量などを掘削によって調査、確認する権利。石油・天然ガスの場合、最大8年間）と採掘権（鉱区において登録された鉱物を採取する権利）に分かれている。しかし、2012年までは鉱業権の設定に際し、出願が早いものが権利を得るという先願主義を採用していた。また、出願された鉱区が重複する場合など一定の不許可要件は規定されていたが、開発主体の適格性に係る規定や、どのような場合に許可を行うかという許可要件の規定が存在しなかった。また、弾性波探査などの資源探査は、鉱業権（試掘権・採掘権）の設定に不可欠な開発準備行為であるが、鉱業法では一切規制が行われていなかった。

以上のような問題点を踏まえ2012年に改正鉱業法が施行され、特定区域制度や資源探査規制制度といった新たな制度の創設や鉱業権の許可基準の見直し等が行われた（資源エネルギー庁HP）。

改正前の鉱業法の先願主義に基づく出願手続きから、国による適正な管理の下で最も適切な主体が鉱業権の設定の許可を受ける出願手続きへ制度を見直した。国が区域を指定するだけでなく、事業者（日本国民又は日本法人に限る）が主体となって資源の存在又は存在可能性がある区域を提案することで、特定区域として指定することも可能となった。特定区域に指定された区域は、開発者を公募・選定し、経済産業大臣による鉱業権の設定を受けた適切な開発主体（特定開発者）により開発が行われることになる。特定開発者の選定にあたっては、経理的基礎や技術的能力等の適合審査や特定開発者を選定するための評価基準（例：過去の開発実績や開発計画の実施可能性等）に基づき選定することで、資源の合理的な開発を進めることになった(図2.3.2-2)。

また、目的の如何に関わらず、地震探鉱、電磁探査、集中的サンプリング探査による探査を行う場合、事前に経済産業大臣の許可を受けるよう、許可制度が新規に創設された。この制度では鉱物資源の開発、科学的調査などの目的の如何に関わらず、下記のような鉱業法に定める方法による探査を行う場合、改正鉱業法第100条の2に基づき、経済産業大臣に申請をし、許可を受ける必要がある。

- ・地震探鉱法：本事例集では弾性波探査と表現している。
- ・電磁法：電磁波を海底面近くで発生させ、生じた電磁場の変化を検知する方法。
- ・集中的サンプリング探査法：底質を収集する機器を用いて、底質を集中的に収集する方法。

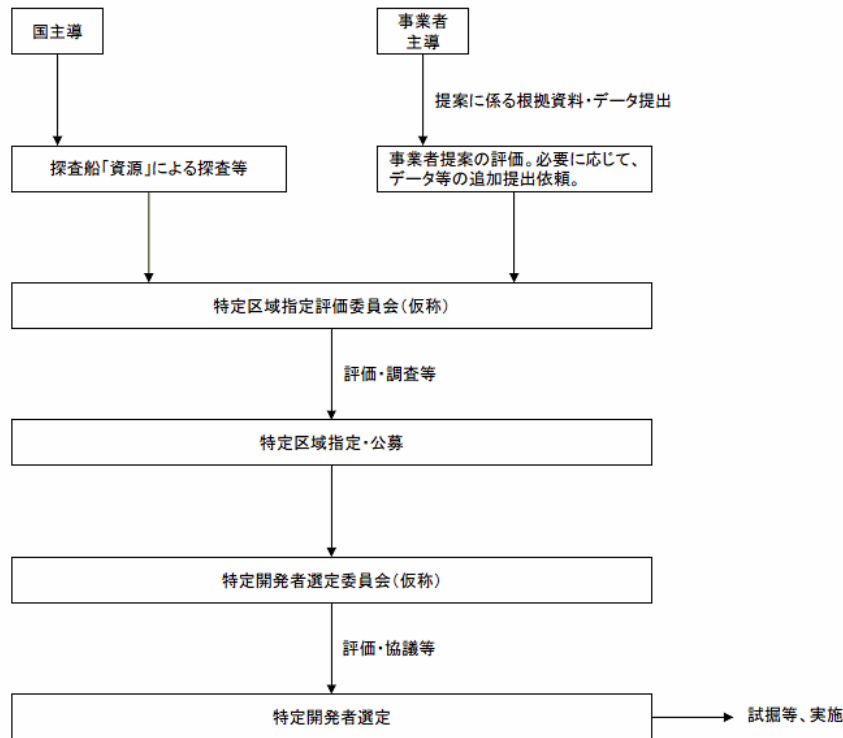


図2.3.2-2 石油・天然ガス鉱区取得手続きの流れ(資源エネルギー庁HP)

2.4 QUEST プロジェクトのサイト選定事例

カナダ、アルバータ州で現在、操業中の QUEST プロジェクトでは、オイルサンドから採取したビチュメンの改質プラント(Shell Canad 社, Scotford ビチュメン改質プラント)から排出される CO₂を年間 100 万トン以上、圧入している。操業開始は 2017 年で、2009 年頃から計画されてきた。オペレーターである Shell Canada 社は、2009 年には貯留層候補であるカンブリア系の Basal Cambrian Sands(BCS)や遮蔽層の性質を把握するためにプラントから半径 16 km 以内の場所に 2 坑の調査井を掘削した。通常のサイト選定プロセスと異なるが、同社にとって、同プロジェクトに対するアルバータ州政府からのファンド申請に必要な情報を得る、という事情があった。

Shell Canada 社はサイト選定にあたり、CO₂ 地中貯留に係る安全性と保安の観点から評価を実施したが、選定基準は Alberta Research Council による以下のような選定クライテリアを参考にした。

クリティカル・レベル (必須条件)

- ・ 貯留層/遮蔽層ペア：垂直的流動に対する広域かつ、適切なバリア
- ・ 地層圧力
- ・ モニタリング可能性
- ・ 地下水に対する影響

エッセンシャル・レベル (重要条件)

- ・地震活動
- ・断層、地層破壊強度
- ・水理システム

デザインブル・レベル（必要条件）

- ・深度
- ・褶曲帯に位置するか？
- ・続成作用
- ・地温勾配
- ・地層温度
- ・地層圧力
- ・貯留層の厚さ
- ・孔隙率
- ・浸透率
- ・遮蔽層の厚さ
- ・既存坑井密度

貯留層、遮蔽層に関する広域的地質資料検討、選定クライテリア評価の結果、Scotford 改質プラント周辺は、CO₂ 地中貯留の条件に恵まれていることが判明、具体的な貯留サイトの候補として 3 地域を選定、それらの比較検討がなされた(図 2.4-1)。

- ・候補 A - North of the North Saskatchewan River
- ・候補 B - South of the river some 16 km ESE from Scotford
- ・候補 C - North of river directly WNW from Scotford

貯留層の Basal Cambrian Sands は若干の泥質薄層を挟在する細粒～粗粒砂岩で孔隙率 17%、浸透率 1,000mD を示す。広域評価によれば改質プラント周辺では基底部の粗粒部分と最上部の細粒部分が良好な貯留層性状を示し、35～50m の厚さを有している。Basal Cambrian Sands 上位の遮蔽層は、中部カンブリア系の Middle Cambrian Shale（主遮蔽層）、下部デボン系の Lower Lotsberg Salt、Upper Lotsberg Salt（副次遮蔽層）、さらに中部デボン系の Prairie Evaporite が発達する（IEAGHG,2019）。

Scotford 周辺の他の地域は、3 つのサイト候補に比べ、重要な基準に関して著しく貧弱であるため、スクリーニングで除外された。つまり、Scotford の南西方地域は、広域的シールによる被覆が大幅に劣り、MMV の可能性を妨げる産業および住宅インフラに位置している。また、これら 3 つのサイトの東と北に位置する地域も、より遠くの貯留サイト候補へのパイプラインコストが著しく増加し、開発コストが高価であると考えられていたため、サイト選定基準を総合的に勘案してスクリーニングで除外された。

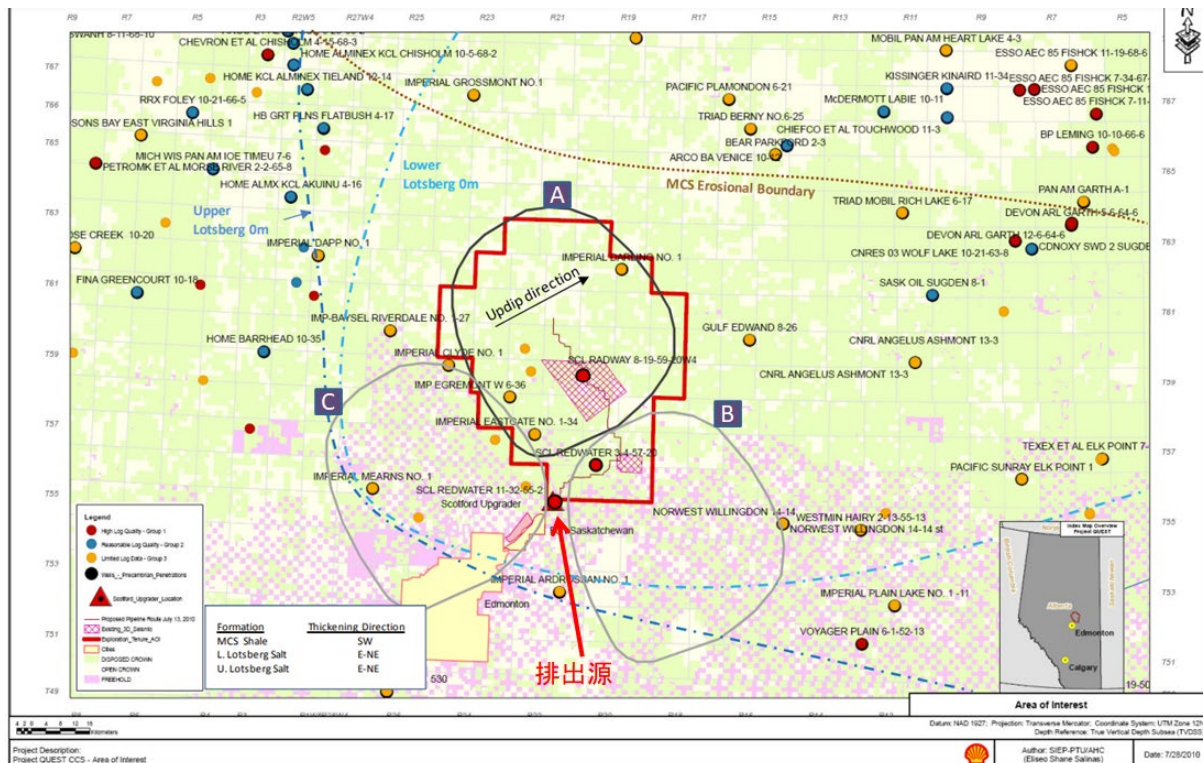


図 2.4-1 Scotford改質プラント周辺に選定された3つの貯留サイト候補(候補A, 候補B, 候補C)。主遮蔽層の分布は北部に示される<MCS Erosional Boundary>より南方、他の二つの副次遮蔽層の分布は図面北西部から図面南東部に至る2本の青い線の北東方に限定される (Shell Canada, 2011 一部改変)

選択した3つのサイト候補から以下のような項目に関して比較、評価し、ランキングを行った。

- ・ 貯留可能量
- ・ 圧入能力
- ・ 遮蔽能力
- ・ MMV 実施可能性
- ・ 孔隙スペースへのアクセス
- ・ コスト
- ・ 発展性

収集された情報に基づいて、3つのサイト間で最も特徴的な差別化が判明した基準は、遮蔽能力、孔隙スペースへのアクセス、コストと発展性であった。

貯留可能量

候補 A : 大きな差はない

候補 B : 大きな差はない

候補 C : 大きな差はない

圧入能力

候補 A : 候補 C と同等

候補 B：貯留層を切る断層と東方での浸透率バリアの可能性はあるが、リスクは小さい

候補 C：候補 A と同等

遮蔽能力

候補 A：副次的遮蔽層(デボン系)も想定されるプルームを広く、厚く被覆する。貯留層に達する既存坑井は候補 C より少ない。

候補 B：候補 A より副次的遮蔽層(デボン系)の分布が狭い。

候補 C：貯留層に達する既存坑井が多い。

MMV 実施可能性

候補 A：地表のインフラが最小。

候補 B：ある程度の地表インフラ。

候補 C：Redwater 油田が存在し、地表インフラが多い。油田の既存坑井に利用や将来的に油田と CO₂ 貯留を対象とした 3D 弾性波探査の共同実施といったシナジー効果の可能性も。

孔隙所有権へのアクセス

(サイト決定時には地層水を含む孔隙の使用権を付与するメカニズムが存在しなかったため、国有地の孔隙使用の権利が得やすいと考えられていた。)

候補 A：国有地が多く占めている。

候補 B：民有地が多く開発に煩雑さと遅れが危惧される。

候補 C：他社に掘削計画がある。

コスト

候補 A：排出源から最も遠く、パイプライン建設コストが他の候補より高い。

候補 B：候補 A より開発およびパイプライン建設コストが低い。

候補 C：候補 A より開発およびパイプライン建設コストが低い。

発展性

(アルバータ州政府が 2050 年までに 139 Mt/年の CCS を実施することを希望していることに鑑み、これを実現させる可能性がランキング基準として追加された)

候補 A：候補 B の方向、更に北方、北西方への展開に最良である。

候補 B：候補 A への方向、北東方へ展開できる。

候補 C：発展のためには候補 A, 候補 B へのパイプライン新設が必要となる。

3つのサイト候補のうち、「候補 A」は、CO₂ 排出源であるビチュメン改質プラントからの距離が最大でパイプライン建設コストの点で不利であった。しかし、主に主遮蔽層と副次的遮蔽層の発達状況、孔隙所有権へのアクセスおよび将来的発展性の面で他 2 候補より優れた特徴を有すると最高位にランクされ、図 2.4-1 の赤枠で示された範囲が CO₂ 貯留鉱区申請範囲と決定した。

2.5 まとめ

CO₂ 地中貯留はその歴史は浅く、また実績が少なく技術が確立しているとは言えない段階にあるが、地下深部で流体を取り扱うという点で石油・天然ガスの探鉱・開発・生産に係る技術と類

似している。しかし地質状況は極めて多様であり、地域による特殊性が際立っている。CO₂地中貯留事業にとって、必要とされる重要な点は、経済性を確保しつつ、計画されたCO₂量を、計画通りのレートで圧入し、長期的に安定して貯留することである。事業の過程で多くの技術的問題と技術的、非技術的不確実性を伴うことになるが、それらの低減への最良の鍵は、適切な方法による適切なサイトの選定である。このため、CO₂地中貯留実施にとって適切なサイトの選定は極めて重要なプロセスである。

本章では、基本計画によって、排出源や圧入量などの基本的な計画が立てられた後、基本計画で示された条件に合致し、しかも安全で確実なCO₂地中貯留サイトを選定する際に参考となる事項に関して記述している。最終的に1つ、あるいは複数のサイト候補が選定されれば、次のサイト特性評価フェーズで地質データの新規取得や、詳細な地質モデル構築とシミュレーションなどによるCO₂地中貯留サイトとしての技術的最終評価とともに経済性など他の要因も評価され、最終的にサイトが決定されることになる。

参考文献

- 1) Atlas Partnership (NACAP) (2012): North American Carbon Storage Atlas- First Edition, NETL/DOE, http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/refshelf/NACSA2012.pdf (2015/11 アクセス)
- 2) Borissova, I., Lech, M. E., Jorgensen, D. C., Southby, C., Wang, L., Bernardel, G., Nicholas, W. A., Lescinsky, D. L. and Johnston, S. (2015): An Integrated Study of the CO₂ Storage Potential in the Offshore Vlaming Sub-Basin, Results of the study undertaken as part of the NCIP program, GEOSCIENCE AUSTRALIA RECORD
- 3) Carbon Storage Taskforce 2009 (2009): National Carbon Mapping and Infrastructure Plan – Australia, Full Report, Department of Resources, Energy and Tourism, Canberra, [http://www.parliament.wa.gov.au/parliament/commit.nsf/%28\\$lookupRelatedDocsByID%29/518FAC2BBA6C246648257C29002DB8E6/\\$file/NCM_Full_Report.pdf](http://www.parliament.wa.gov.au/parliament/commit.nsf/%28$lookupRelatedDocsByID%29/518FAC2BBA6C246648257C29002DB8E6/$file/NCM_Full_Report.pdf) (2015/11 アクセス)
- 4) European CCS Demonstration Project Network (2012): Lessons learned from the Jämschwalde project, Summary report, Knowledge Sharing Event Cottbus, May 2012, European CCS Demonstration Project Network, <http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/77476/lessons-learned-janschwalde-project-summary-report.pdf> (2015/11 アクセス)
- 5) Global CCS Institute (2012): Property rights in relation to CCS, GCCSI <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/property-rights-in-relation-to-ccs/> (2013/10 アクセス)
- 6) Global CCS Institute, Baker & McKenzie, WorleyParsons (2009): Strategic analysis of the global status of carbon capture and storage. Report 3: policies and legislation framing carbon capture and storage globally, GCCSI, <http://hub.globalccsinstitute.com/publications/strategic-analysis-global-status-carbon-cap>

- ture-storage-report-3/1-executive-summary (2010/12 アクセス)
- 7) Godec, M. (2020): Characterizing Legal and Regulatory Frameworks, SECARB Offshore GoM & GoM Carb Annual Joint Partnership Meeting, New Orleans, Louisiana, March 25-27, 2020
 - 8) Gupta, N. (2017): Mid-Atlantic U.S. Offshore Carbon Storage Resource Assessment, Carbon Storage and Oil and Natural Gas Technologies Review Meeting, August 1-3, 2017, NETL/DOE HP, https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2017-12/Gupta-P2-FY17_MidAtlanticProjectTeam_DOE_FINAL.pdf (2018/11 アクセス)
 - 9) IEA Environmental Projects Ltd. (IEAGHG) (2011): Caprock Systems for CO₂ Geological Storage, IEAGHG
 - 10) IEAGHG (2019): "The Shell Quest Carbon Capture and Storage Project", 2019/04, September 2019
 - 11) IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
 - 12) Langford, R., Borissova, I., Chrinos, A., Henson, P., Heap, A. (2013): Pre-competitive Data Acquisition Program for CO₂ Storage in Australia, Energy Procedia 37(2013) 4968-4974, Elsevier, http://ac.els-cdn.com/S1876610213006528/1-s2.0-S1876610213006528-main.pdf?_tid=9025f4ce-08f1-11e5-a8fa-00000aab0f6b&acdnat=1433227110_6148bf66aced8ee7cf83d09d04282fdc (2015/11 アクセス)
 - 13) McBride, J. H., Leetaru, H. E., Keach II, R.W., McBride, E. I. (2013): Illinois Basin Basement and Structure, Midwest Geological Sequestration Science Conference, Midwest Geological Sequestration Consortium, http://www.sequestration.org/resources/PAGOOct2013Presentations/04-IL-Basin-Basement-Structure-McBride_PAG_Oct8-2013_FINAL_revised.pdf (2015/8 アクセス)
 - 14) National Research Council (2013): Induced Seismicity Potential in Energy Technologies, Washington DC: The National Academies Press, 1-262
 - 15) NETL/DOE (2013): BEST PRACTICES for Site Screening, Site Selection, and Initial Characterization for Storage of Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers in Deep Geologic Formations, 2013 Revised Edition, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy
 - 16) NETL/DOE (2017): Best Practices: Site Screening, Site Selection, and Site Characterization for Geologic Storage Projects, NETL (National Energy Technology Laboratory, Department of Energy
 - 17) OECD/IEA (2015): Carbon Capture and Storage: Legal and Regulatory Review-Edition 5.

International Energy Agency, Insights Series 2016

- 18) Ogawa, T., Nakanishi, S., Shidahara, Okumura, T., Hayashi, E. (2011): Saline-aquifer CO₂ sequestration in Japan-methodology of storage capacity assessment, , International Journal of Greenhouse Gas Control 5, 318–326
- 19) Quillinan, S. (2019): Carbon capture, utilization and storage, Joint Minerals Committee, May 16th and 17th,
<https://www.wyoleg.gov/InterimCommittee/2019/09-201905163-02QuillinanJointMinerals.pdf> (2020/8 アクセス)
- 20) RITE (2006) : 平成 17 年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書
- 21) RITE (2009) : 平成 20 年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書
- 22) Shell Canada (2011): Quest Storage Development Plan, October 6, 2011.
<https://open.alberta.ca/dataset/46ddba1a-7b86-4d7c-b8b6-8fe33a60fada/resource/5555eb2e-6d86-4419-97a3-8d3de7c5b702/download/storagedevelopmentplan.pdf> (2012/6 アクセス)
- 23) Smith, N., Paul, B., Oguntimehin, A., Gijs E., Guo, R., Reynolds, M, A. Friesen, L., Cano, M,C, O'Brien, S. (2021): Quest CCS facility: Halite Injectivity Damage Remediation in CO₂ Injection Wells, 15th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-15th March 2021 Abu Dhabi, UAE
- 24) UK Government (2010): 2010 No. 2221, ENVIRONMENTAL PROTECTION, The Storage of Carbon Dioxide (Licensing etc.) Regulations 2010
http://www.legislation.gov.uk/ukxi/2010/2221/pdfs/ukxi_20102221_en.pdf (2011/6 アクセス)
- 25) Warren, J. K. (2007): Evaporite: Sediments, Resources and Hydrocarbons, Springer,1035p
- 26) 活断層研究会(1991) : 新編日本の活断層—分布図と資料, 東京大学出版会
- 27) 国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター (2005) : 数値地質図 FR-1 燃料資源地質図「三陸沖」
- 28) 寒川旭, 衣笠義博, 垣見俊弘 (1984) : 50 万分の 1 活構造図, 地質調査所
- 29) 資源エネルギー庁 :
https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/strategy/mining_act/ (2022/3 アクセス)
- 30) 石油技術協会 (2013) : 石油鉱業便覧,石油技術協会
- 31) 石油公団 (2004) : 平成 15 事業年度財務諸表
- 32) 三戸彩絵子, 薛自求, 大隅多加志 (2008) : 二酸化炭素地中貯留における地球化学反応特性について— 長岡実証試験サイトの地層水分析例—, 地学雑誌, 117, 753



二酸化炭素地中貯留技術研究組合

Geological Carbon Dioxide Storage Technology Research Association

<http://www.co2choryu-kumiai.or.jp/>

「この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業の結果得られたものです。」

This document is based on results obtained from a project (JPNP18006) commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) and Minister of Economy, Trade and Industry (METI) of Japan.

〈禁無断複製〉

本書の全部または一部を無断で複製複製（コピー）、磁気または光記録媒体に入力することは、著作権上での例外を除き、禁じられています。本書からの複製を希望される場合は、当組合メールアドレス（inquiry@co2choryu-kumiai.or.jp）にご連絡ください。