

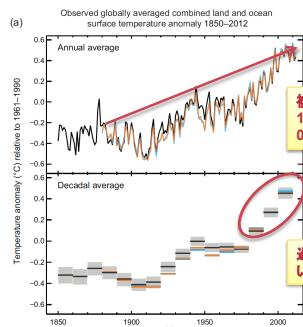
CO2地中貯留(CCS)の リスク評価と社会受容

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
 地図資源環境研究部門
 田中敦子

IPCC AR5地球温暖化:地球の平均表面温度

IPCC Climate Change Assessment Report, AR5, 2014

- ✓ 世界平均した気温データは、複数のデータセットが存在する1880-2012年の間で 0.85(0.65-1.06)°Cの上昇を示している。
- ✓ 過去30年の各10年間の地球表面の平均気温は、1850年以降のどの10年間よりも高温である。



複数の観測データのある
1880年から2012年の間に
0.85°Cの上昇

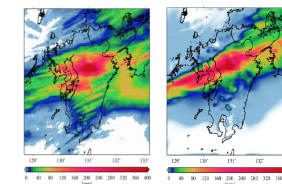
過去30年間の10年ごとの平均値、
いずれも前の10年より高い

Observed globally averaged combined land and ocean surface temperature anomaly 1850-2012 (IPCC AR5 WG1 SPM, 2014)

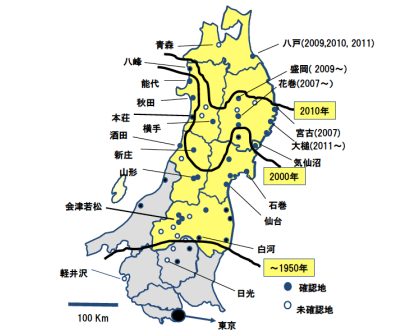
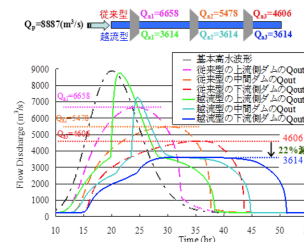
内容

1. 地球温暖化とCCS
2. Bio-CCSの基礎的なフィージビリティ評価
3. CCSの社会受容とリスクに関する研究の役割

日本で観測された温暖化の影響



ヒトシジマカの分布域の拡大(1998-2012)

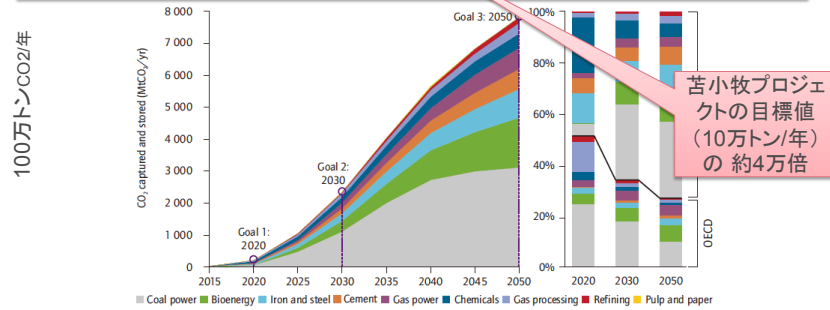


年平均気温が11°C以上の地域に定着し、分布域は温暖化によって北上する

環境省

2DS と CCS貯留量の目標

- COP21 パリ協定 (2015)
- ✓ 2DS: 21世紀末までの平均気温の上昇を2°C以内に納める
 - IEA Technology Roadmap, CCS in the power and industrial sectors in the 2DS (2013)
 - ✓ 2DS達成のために、2050年のCO2排出抑制に対して、CCSは17%の貢献、全期間において14%の貢献。
 - ✓ **2015年-2030年には 130億トンのCO2貯留が必要**
 - ✓ **OECD以外の国で70%のCCSが実施される必要がある。**



KEY POINT: the 2DS suggests a steep deployment path for CCS technologies applied to power generation and a number of industries. Over 70% of all CCS projects take place in non-OECD countries by 2050.

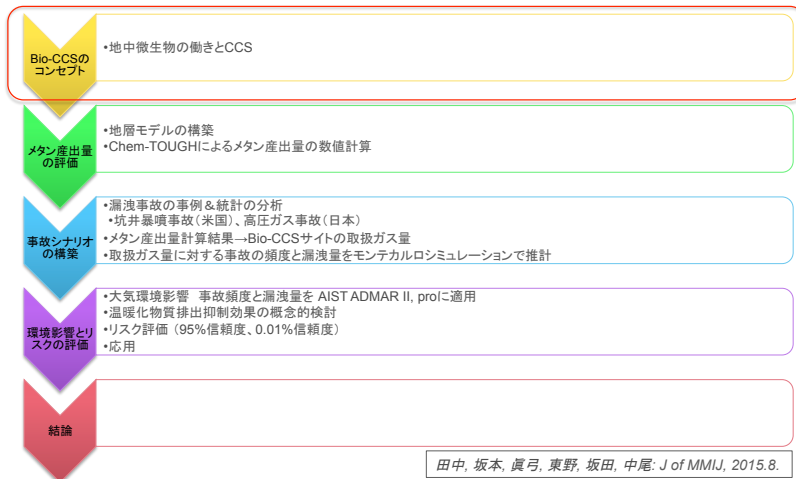
* 2DS: 2 degree Celsius scenario

IEA Technology Roadmap CCS 2013

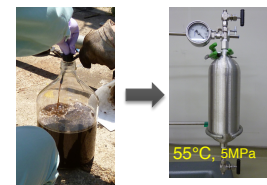
内容

1. 地球温暖化とCCS
2. Bio-CCSの基礎的なフィージビリティ評価
3. CCSの社会受容とリスクに関する研究の役割

Bio-CCSの基礎的なフィージビリティ評価 (産総研 戦略課題、2012.10-2015.3 実施)



地中微生物の働きとCCS -CO₂の分圧とメタン生成量-



Pic. サンプルングと高圧培養容器

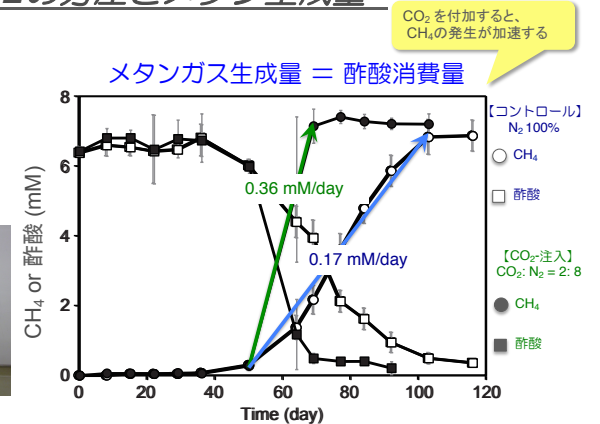
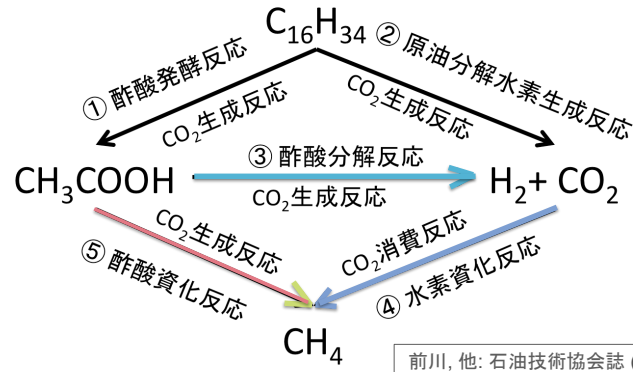


Fig. CO₂濃度とメタン発生量の関係

Mayumi et al., 2013, Nature Communications

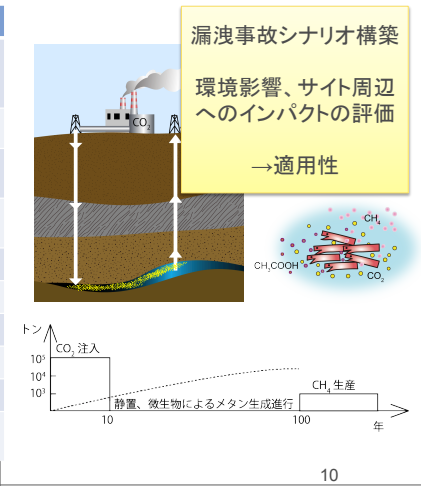
地中微生物の働きとCCS - 化学反応 -

- ③ 酢酸分解反応: $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2$
- ④ 水素資化性メタン生成: $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- ⑤ 酢酸資化性メタン生成: $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$

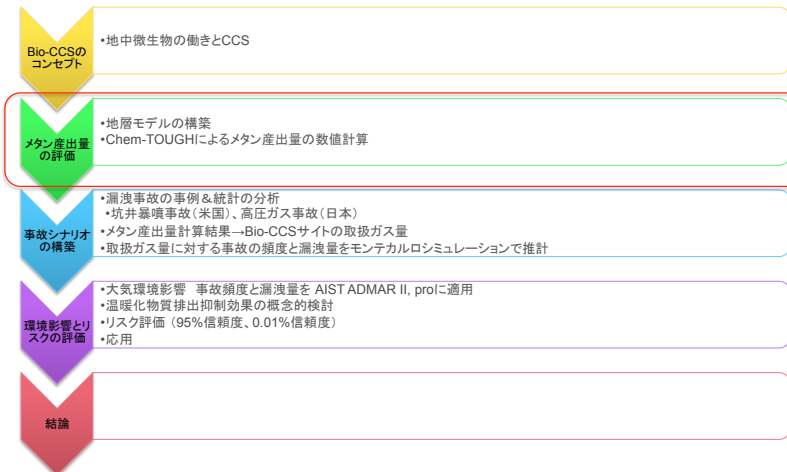


地中微生物の働きとCCSの適用性評価 - 仮想 'Bio-CCS' プラント -

項目	概要
貯留層	深さ: 1000 - 1300m 圧力: 5Mpa 地温: 55°C
CO ₂ 回収法	アミン法
CO ₂ 源	火力発電所、石油・天然ガス生産井
CO ₂ 輸送	ガスパイプライン 液体CO ₂ lq 陸上輸送
CO ₂ 注入レート	1 - 10 ⁵ ton /年
注入CO ₂ の状態	超臨界CO ₂
注入期間	10年
静置期間	90年
CO ₂ 生産開始	100年後
メタン生成レート*	0.36 ± 0.04 m mol/day/litter water

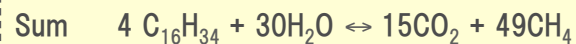
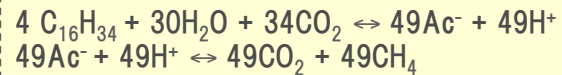


Bio-CCSの基礎的なフィージビリティ評価



メタン産出量の評価 - 微生物によるメタン生成反応のモデル化 -

- 油と層間水との間で反応が進む。岩石マトリックスは油や層間水と反応しない。
- 微生物によるメタン生成の主な反応経路においては、最初に酢酸イオン Ac⁻ が生成され、次に酢酸イオンからメタンが生成される。



- 初期モデルでは、貯留層内の微生物活動は定常的であると仮定し、微生物の分布むらや微生物の生死を含む世代交代は考慮しなかった。

メタン産出量の評価 - 層間水のモデル化 -

- 流体モデルは CO₂ガス、CH₄ガス、貯留層の層間水および溶解CO₂ (CO₂aq)、溶解メタン (CH₄aq)で構成した。
- ✓ 溶解メタン CH₄aq 濃度が、貯留層の温度と圧力で決定される溶解度を超えた場合、CH₄aq は CH₄gas に相変化する。このモデルは CO₂gas および CH₄gas を扱う。
- CO₂ 注入によって溶解した鉱物は、貯留層内の層間水に流入する。本モデルは SiO₂, Cl, S・SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺, Ac⁻ の溶解反応を扱った。

層間水

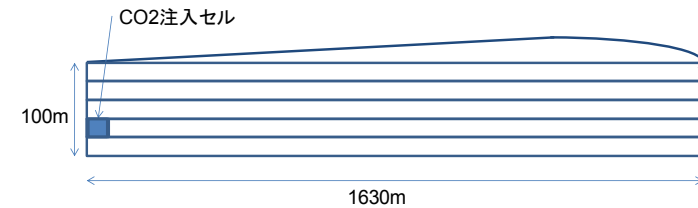
	m m o l
Na +	183
Cl -	132
Mg 2+	0.1
K +	0.8
Ca 2+	0.1
NH4 +	1.4
HCO3 -	39.6
SO4 2-	0.5

岩石マトリックス

Molecular weight	Chemicals	Minerals	Rate %
60.08	SiO ₂	Quartz	29.3
278.34	KAlSi ₃ O ₈	K-feldspar	13.5
278.21	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Anorthite	9.8
262.22	NaAlSi ₃ O ₈	Albite-low	20.2
366.04	Ca _{0.168} Mg _{0.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Ca-montmorillonite	29.2
100.09	CaCO ₃	Calcite	0.2
172.17	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Gypsum	0.1
258.16	Al ₂ (Si ₂ O ₅) ₂ (OH) ₄	Kaolinite	0.0

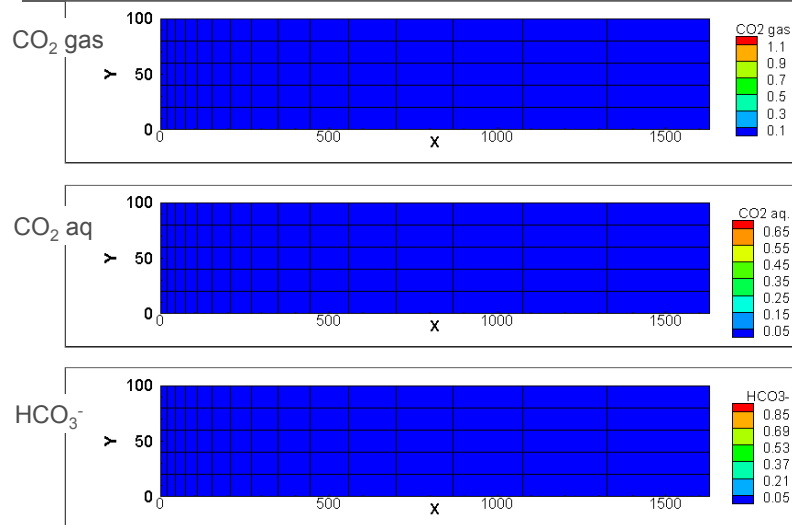
メタン産出量の評価 - 地層モデルの構築 -

- Industrial Research Ltd.(IRL), New ZealandのChemTOUGH数値シミュレータを利用した。
- ✓ ChemTOUGH は TOUGH2 を元にした地化学シミュレータである。1-3次元のモデルの反応を、時間経過と熱流動と関係付けて扱うことができる。
- ✓ ChemTouch は化学物質の種類の数と反応数の制限なく固体・流体・ガスを扱うことができる。また、鉱物の酸化還元反応、溶解、沈殿の過程を計算することができる。
- 予備シミュレーションでは2次元の円柱モデルを構築した。CO₂ を 10⁴ tons/年のレートで10年間注入し、その後90年間静置してするものとした。

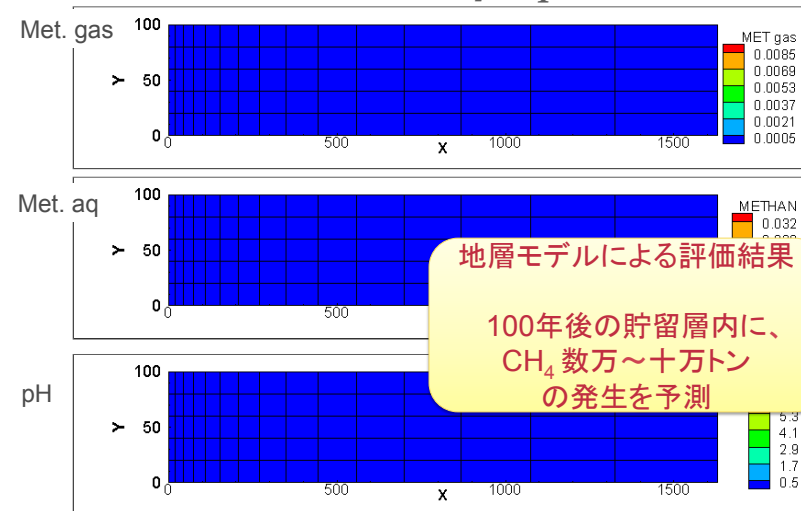


- 貯留層: 浸透率 1.0μm², 温度 55°C, 圧力 5 MPa

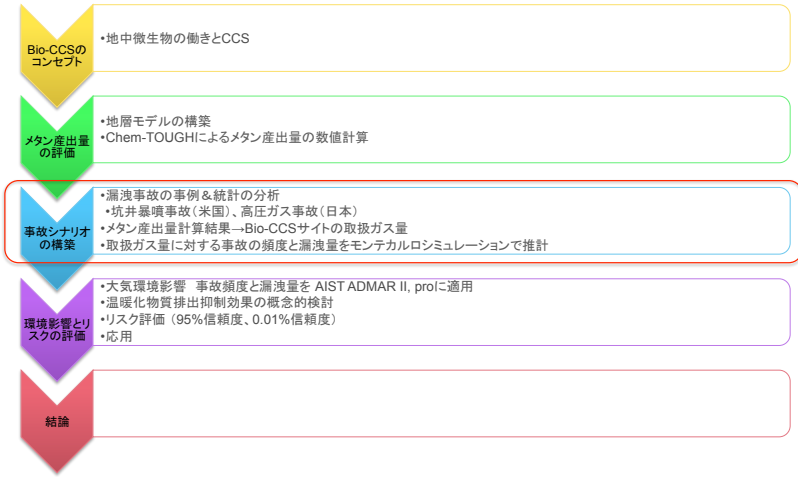
メタン産出量の評価- CO₂ & HCO₃⁻ の分布



メタン産出量の評価- CH₄ & pHの分布



Bio-CCSの基礎的なフェージビリティ評価

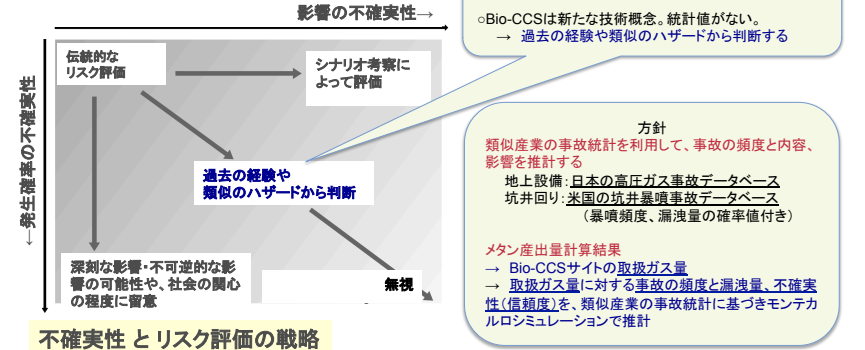


リスクシナリオの設定 -方法論-

$$\text{Risk} = f(H, F, V)$$

H: Hazard ハザード
F: Frequency 頻度
V: Vulnerability 脆弱性

例
漏洩リスク = f(漏洩量, 頻度, サイト周辺への影響)



事故率の予測に基づくリスクシナリオの設定

地上施設

地上施設のリスクシナリオ
・1年あたりの事故の発生頻度・負傷者数:ポアソン分布を用い、5000回試行のモンテカルロシミュレーションにより、95%信頼度で推計した。

Fig 1a. 事故原因と発生件数

Fig 1b. 漏洩事故の原因別発生件数

Fig 2. 漏洩事故の発生頻度推計
青棒: 95%信頼区間

Table1 Bio-CCSでのCO₂やCH₄のハンドリングに伴う事故率等の推計値
CO₂を年10万トンまたは、CH₄を年1千トンを扱う場合 (信頼度95%)

	件 / 年 / CO ₂ 10 ⁴ ton	件 / 年 / CH ₄ 10 ³ ton
事故率	0.5	0.0
(うち漏洩事故率)	(0.2)	(0.0)
死亡率	0.0	0.0
重傷率	0.0	0.0
軽傷率	0.0	0.0

坑井

坑井のリスクシナリオ
・1坑井あたりの暴噴発生確率: 事故統計の発生率から、95%信頼度で推計
・暴噴の継続時間・噴出ガス量: 事故統計値を、ガンマ分布を用い、5000回試行のモンテカルロシミュレーションにより、95%信頼度で推計した。

Fig 3a. 暴噴継続時間分布
横軸: 継続時間、縦軸: 確率分布

Fig 3b. 暴噴流量分布
横軸: 噴出量、縦軸: 確率分布

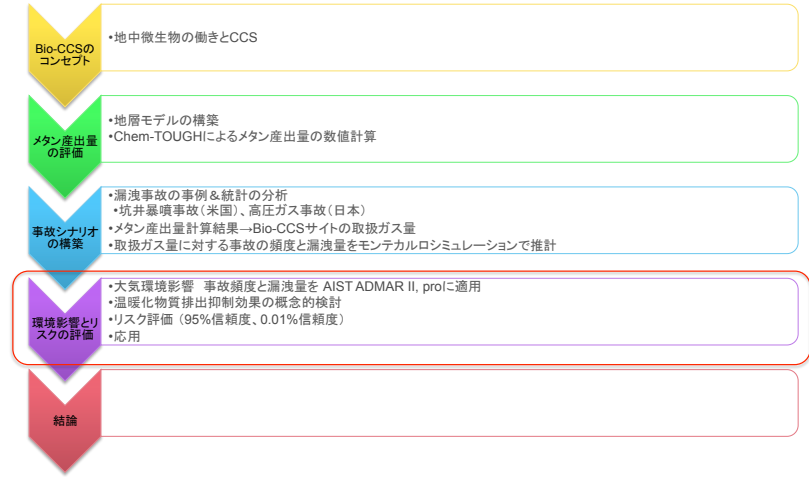
Figure3 坑井漏洩事故の頻度等に関する推計

Table2 Bio-CCSの坑井における暴噴事故の発生頻度、噴出時間、噴出量の推計値(信頼度95%)

	推計値
頻度	0.005 回/未満/坑井
噴出時間	5時間/1回の暴噴
噴出量	100トン/1回の暴噴

最もありそう なシナリオ (most likely)

Bio-CCSの基礎的なフェージビリティ評価



リスク分析結果 (1)

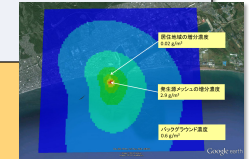
最もありそうなシナリオ(most likely) 信頼度95%

		Bio-CCSプロセス		
		CO ₂ 注入期間 (注入 10万吨/年)	静置期間	メタンガス生産期間 (生産 1千トン/年)
ハザード 事象	坑井周辺	緩慢な持続する漏洩 0/サイト 暴噴 0件/坑井 影響 なし		
	サイト周辺の 地上プロセス (CO ₂ 関連)	漏洩事故率 0.5件/年/サイト 漏洩量 数m ³ 程度/件 軽傷 0名/年		
	サイト周辺の 地上プロセス (CH ₄ 関連)		漏洩事故率 0.0/年/サイト 死傷 0.0/年 影響 なし	

リスク分析結果 (2)

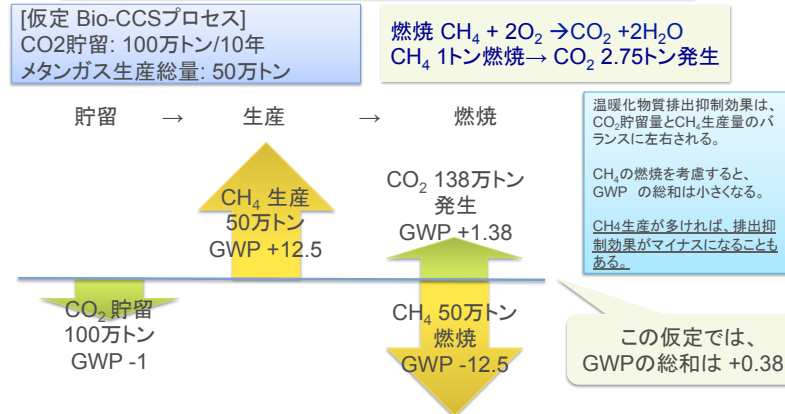
ごく稀なシナリオ(most unlikely) 信頼度0.01%

		Bio-CCSプロセス		
		CO ₂ 注入期間 (注入 10万吨/年)	静置期間	メタンガス生産期間 (生産 1千トン/年)
ハザード 事象	坑井周辺	緩慢な持続する漏洩 CO ₂ 注入量・メタン生成量に対する割合 10 ⁻⁴ 影響 特になし 暴噴 頻度 0.005未満/坑井 噴出時間 5時間/1回の暴噴 噴出量 100トン/1回の暴噴 防止対策: 鉱山保安法・高圧ガス保安法・坑井制御技術 暴噴の対応技術: 確立されているものとみなされる		
	サイト周辺の地上 プロセス(CO ₂ 関連)	漏洩事故率 5件/サイト 漏洩量 数m ³ 程度/件 軽傷 1名 周囲に与える影響はない。 防止対策: ヒューマンエラー対策、 設備メンテナンス		
	サイト周辺の地上 プロセス(CH ₄ 関連)		漏洩事故率 0.0件/年/サイト 死傷 0.0件/年 影響 なし	



Bio-CCSの温暖化物質排出抑制効果 概念的評価

GWP(Global warming potential index)、温暖化効果の指標
CO₂をGWP=1とした時、同量のメタンガスを GWP=25とする



Bio-CCS サイト評価 デモ・ツール

地下微生物で切り拓く資源動成炭素(CCS)技術

4. Bio-CCS

メタン生成量の試算

温度・圧力・面積・層厚・孔隙率
油の分子量・比重・飽和率
CO₂圧入量
→メタン生成速度と生成量

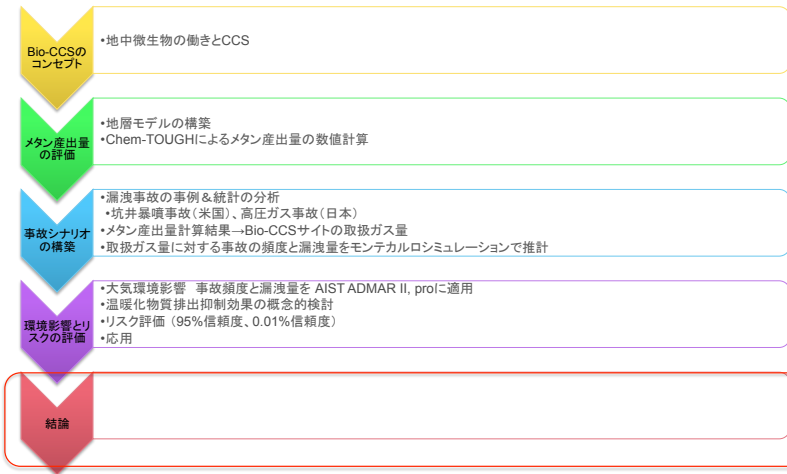
貯留層の特性

メタン生成速度の試算

メタンの生成速度 0.01 mmol/L/day

http://www.aist-georisk.jp/cgi-bin/aist/index.cgi

Bio-CCSの基礎的なフェージビリティ評価



Bio-CCSの基礎的なフェージビリティ評価 まとめ

枯渇した油ガス貯留層内にCO2を注入し、原位置の微生物の働きを活性化させてメタンを生成させる技術概念の基本的な便益の解明に資することを目的に、Bio-CCSプロセスの予備的リスク評価を実施した。Bio-CCSサイト地層モデルに対する数値シミュレーション計算の結果を参考に、『10年間で総計100万トンの超臨界CO2を単一坑井から注入して90年間静置し、100年後に50万トンのメタンが貯留層内に生成される』Bio-CCSサイトを想定した。文献調査等に基づいてハザードシナリオ構築し、仮定のBio-CCSプラントサイトに適用してリスク評価を行った。また、合わせて簡単な温暖化ガス抑制効果の評価を行った。その結果、Bio-CCS技術の基本的な安全性と有用性を確認することができた。

地層モデルを利用した予備数値シミュレーションにより、100年後の数万～十万トンのメタンガスの発生が予測された。

- A. 坑井回りの最も確からしい(most likely)シナリオ (信頼度95%)
 - CO2注入およびメタンガス生産ともに、緩慢で持続的な漏洩の頻度ゼロ、暴噴の頻度ゼロ。
- B. Bio-CCSサイト周辺の地上プロセスの最も確からしい(most likely)シナリオ (信頼度95%)
 - CO2漏洩事故率 0.5件/年/サイト、犠牲者ゼロ。
 - メタンガス漏洩事故率 0.0件/年/サイト、漏洩量ゼロ、犠牲者ゼロ。

BIO-CCSで産出されるメタンは少ないが、3代先へのちよつとしたギフトになり得る。

➢ 大気中への漏洩シナリオについて数値シミュレーターを用いて検討した結果、影響は無視できることが分かった。

➢ Bio-CCSプロセスでは油ガス層中に自然に存在する微生物の活性を利用するものである。油ガス層中に生息する微生物は嫌気性の古細菌であり、地表の大気中では死滅する。したがって、地表・地中どちらの生物的環境にも干渉が発生することはない。

➢ Bio-CCSプロセスの温暖化抑制効果の評価には、生産したメタン量を燃焼後のCO2量で置きかえて評価する工夫が必要である。

田中、坂本、眞弓、東野、坂田、中尾、J of MMIJ, 2015.8.

内容

1. 地球温暖化とCCS
2. Bio-CCSの基礎的なフェージビリティ評価
3. CCSの社会受容とリスクに関する研究の役割

現在までに、133の CCSプロジェクト

		計画/建設中 [31]	操作中 [30]	完了 [28]	中止・保留 [44]
北米 [39]	パイロット [10]		4	6	19
	発電所 [4]	1	1	2	
	発電所以外 [17]	7	8	2	
	商業的CCS* [8]	8			
ヨーロッパ [23]	パイロット [15]		3	12	21
	発電所 [4]	4			
	発電所以外 [4]		2	2	
	商業的CCS* [0]				
その他 [27]	パイロット [10]		8	2	4
	発電所 [7]	6	1		
	発電所以外 [8]	3	3	2	
	商業的CCS* [2]	2			

* 人為期限のCO2を利用したEOR

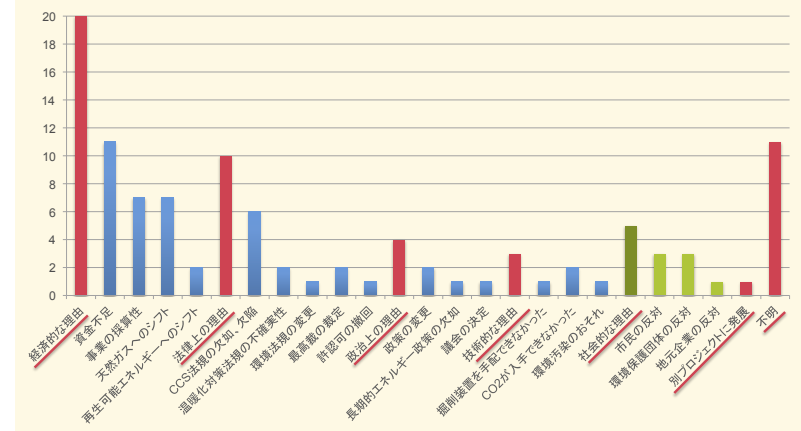
MIT CCS program 2016 データを元に集計

世界のCCSプロジェクトが直面したリスク

- 技術
 - 貯留性、モニタリング、環境モニタリング
 - 微小地震リスク、漏洩リスク、環境インパクト
- CO2回収とCO2貯留のコスト
 - シェールガス・新エネルギーとの競争
 - CO2価格、貯留コスト、電力料金
- 法律・規格
 - 産業廃棄物・鉱業・地下水利用・水質保護・環境保護・リスクマネジメント
 - CCS助成(補助金、税の軽減)
- 市民感情(肯定・否定の両面がある)
 - 理知的知識、技術的知識にかかわる疑問
 - 「不安」、「NIMB」Not in my backyard
 - エネルギーセクターに対する補助金、減税への反感
 - 温暖化に対する疑念
- 政治・行政の不確実性

プロジェクト 中止・保留の理由

中断は43 プロジェクト: (米国 15, カナダ 4, ヨーロッパ 17, ノルウェー 4, 他 3)



MIT CCS program 2016 データを元に集計

CCS実用と普及になし得る貢献

- 2DSは国際的に合意された目標である。
- ✓ 2DSの達成のために、
 - ✓ 2050年のCO2排出抑制に、CCSは17%の貢献。それまでの期間に、CCSは14%の貢献。
 - ✓ 2015-2030年期間では、130億トンのCO2 貯留が必要とされている
- ✓ 成し得る貢献
 - ✓ リスクと便益の評価フレームワークを利用した、CCSの「透明性と合理性に基づく、理解形成」支援
 - ✓ 便益とリスクの評価に基づく 判断データの提供
 - ✓ 世界のCCSの経験との比較に基づく 判断データの提供
 - CCSの受容の形成

まとめ

1. 地球温暖化とCCS
2. Bio-CCSの基礎的なフィージビリティ評価
3. CCSの社会受容とリスク研究の役割

謝辞

産総研 戦略課題「地下微生物を利用したメタンガス合成技術」(2012.10-2015.3) の研究をともに推進した、坂本靖英、坂田将、眞弓大介、東野晴行、鈴木昌弘、加野友紀、中尾信典他の各氏に深く感謝いたします。