
地中貯留技術の実用化における CO₂挙動モニタリングの役割

(公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE)
CO₂貯留研究グループ・主席研究員

せつ じきゅう

薛 自求



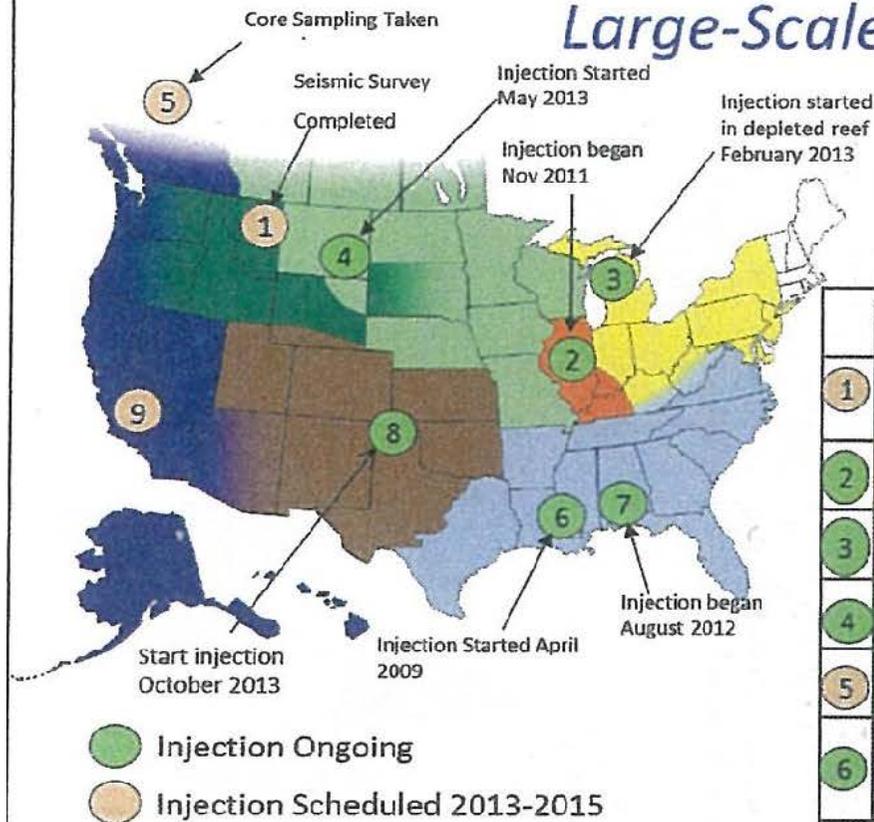
目次

- **大規模CCSプロジェクトの最新動向**
 - ✓ **米国 / DOE / NETL / RCSP**
- **CO₂地中貯留技術開発の現状**
 - ✓ **技術課題、法規制、社会的受容性**
- **安全性評価技術開発 の取り組み**
 - ✓ CO₂ 貯留メカニズム、地質モデリング、
CO₂挙動モニタリング技術

米国 RCSP* Phase IIIの概要

RCSP Phase III: Development Phase

Large-Scale Geologic Tests



- ✓ Large-volume tests
- ✓ Four Partnerships currently injecting CO₂
- ✓ Remaining injections scheduled 2013-2015

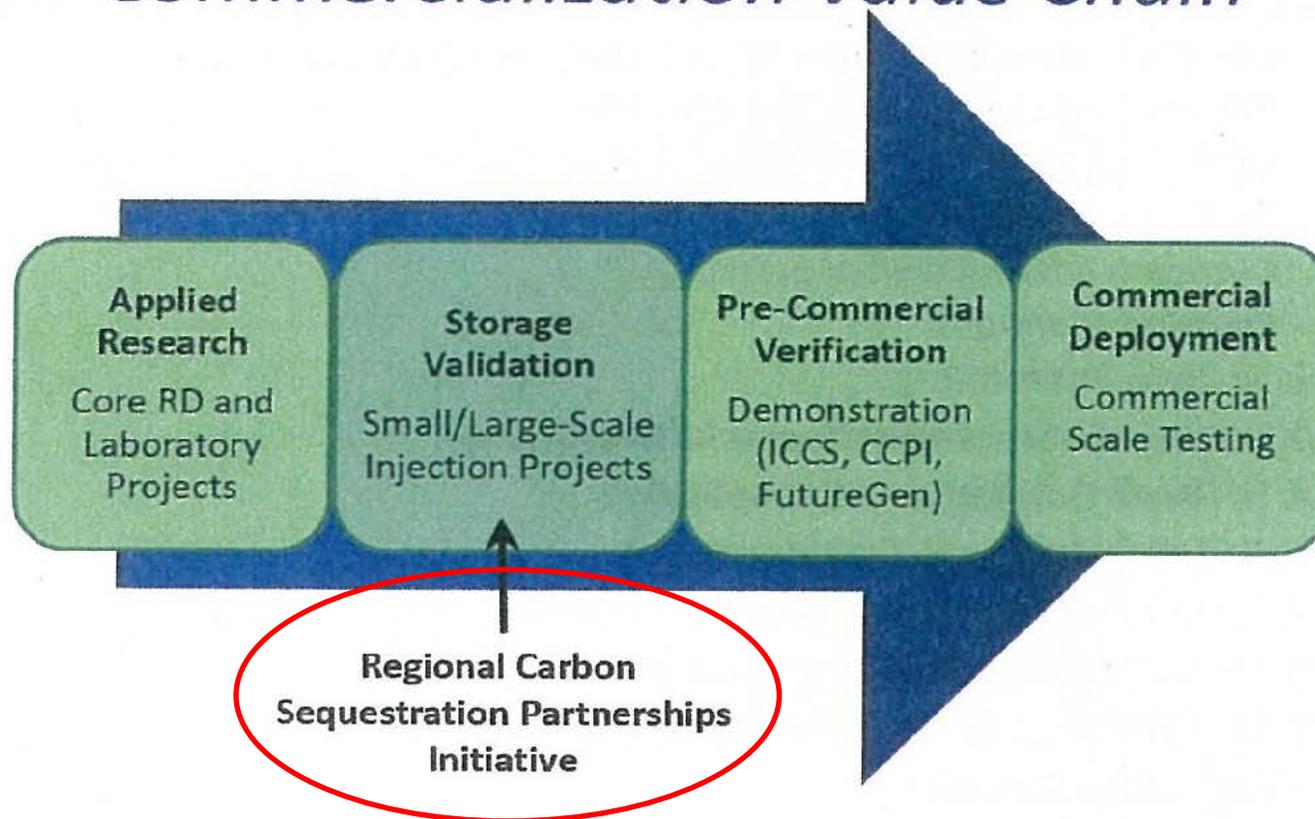
	Partnership	Geologic Province	Metric Tons Injected to Date
①	Big Sky	Kevin Dome- Duperow Formation	0
②	MGSC	Illinois Basin- Mt. Simon Sandstone	645,000
③	MRCSP	Michigan Basin- Niagaran Reef	151,000
④	PCOR	Powder River Basin- Muddy Sandstone	122,445
⑤		Horn River Basin- Sulfur Point Formation	0
⑥	SECARB	Gulf Coast – Cranfield Field- Tuscaloosa Formation	3,750,100
⑦		Gulf Coast – Paluxy Formation	100,000
⑧	SWP	Anadarko Basin- Morrow Formation	0
⑨	WESTCARB	Regional Characterization	

Note: Some locations presented on map may differ from final injection location

*RCSP: 地域炭素隔離プロジェクト

CCS商業化へのステップ@米国

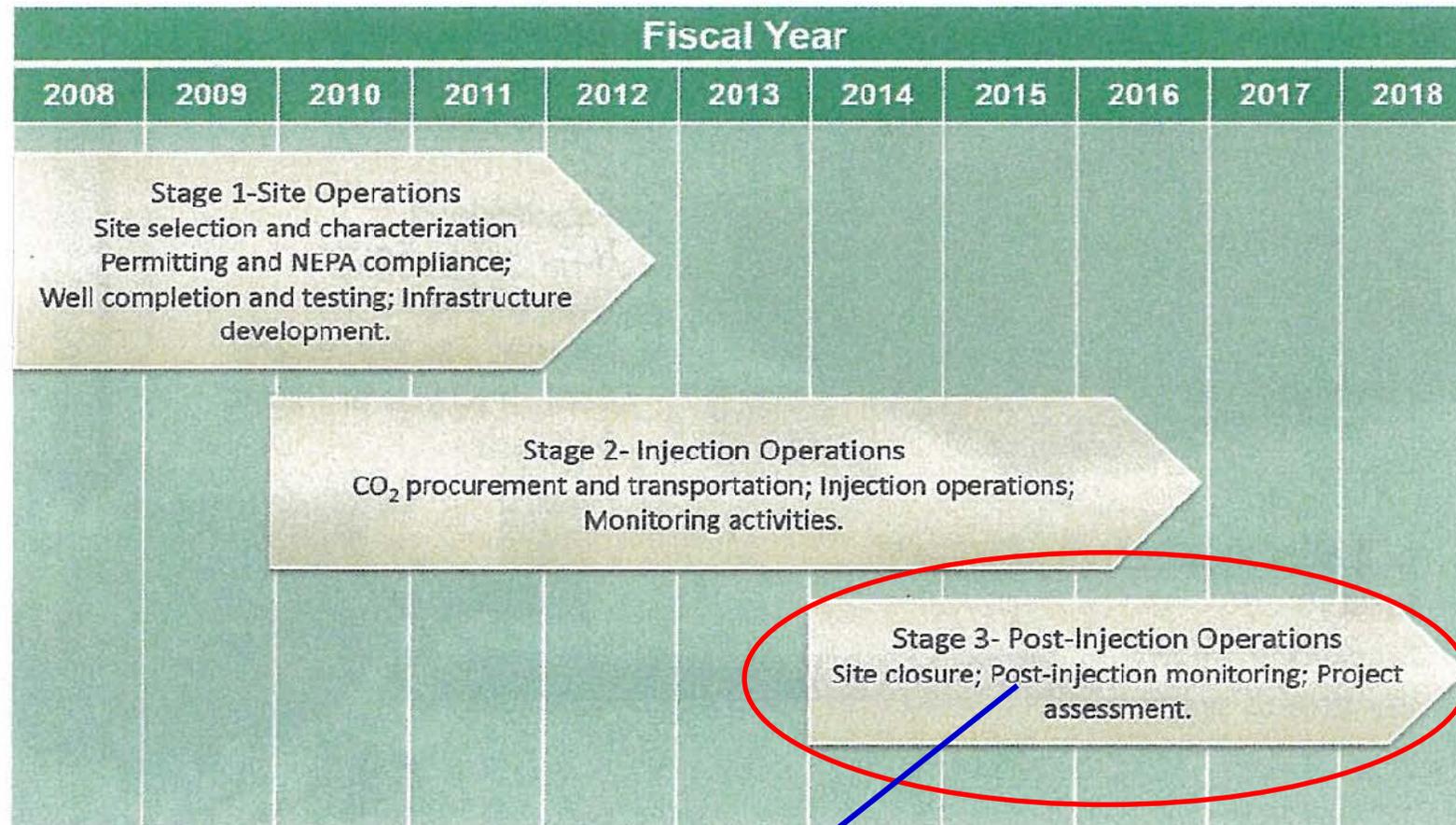
Geologic Storage Commercialization Value Chain



Advancing CCS through an Integrated Value Chain from Research to Commercial Deployment

米国 RCSPプロジェクトの現状 & 役割

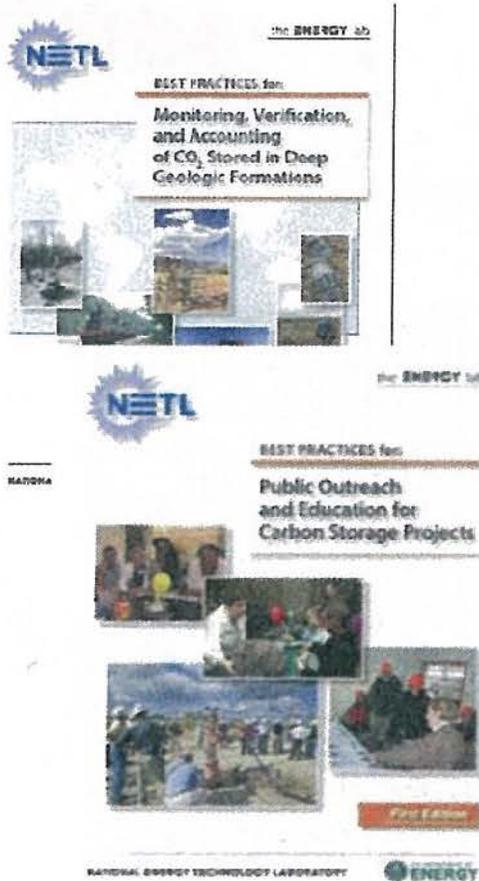
RCSP Phase III: Development Phase *Scaling Up Towards Commercialization*



圧入後のCO₂挙動モニタリング

CCS Best Practices Manuals

*Critical Requirement for Significant Wide Scale Deployment-
Capturing Lessons Learned*



Best Practices Manual	Version 1 (Phase II)	Version 2 (Phase III)	Final Guidelines (Post Injection)
Monitoring, Verification and Accounting	2009/ 2012	2017	2020
Public Outreach and Education	2009	2016	2020
Site Characterization	2010	2016	2020
Geologic Storage Formation Classification	2010	2016	2020
**Simulation and Risk Assessment	2010	2017	2020
**Carbon Storage Systems and Well Management	2011	2017	2020
Terrestrial	2010	2016 – Post MVA Phase III	

***Regulatory Issues are addressed within various Manuals*

http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/refshelf/refshelf.html



CO₂地中貯留技術開発@RITE



CCS技術課題のチャレンジ

➤ 貯留層評価 & 地質モデル構築

- ・油ガス田開発の技術応用できるが、高精度の貯留層評価要
- ・少ない地質情報を基に、信頼性の高い地質モデル構築

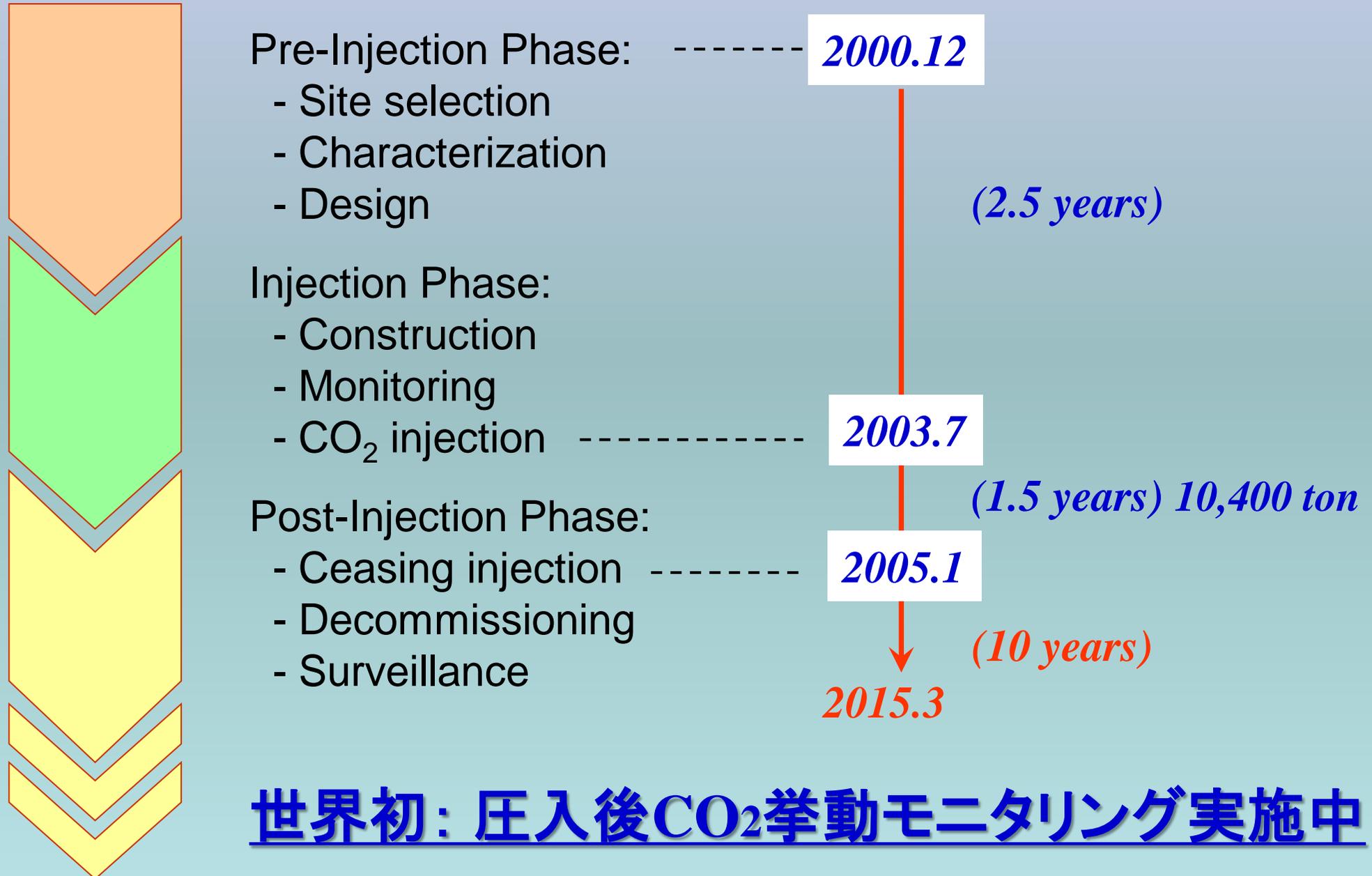
➤ 圧入後の長期挙動予測

- ・油ガス田が数10年に対し、CCSは1000年オーダー？
- ・油ガス田開発の技術応用できるが、地化学反応や力学とのカップリング(連成解析)が必要

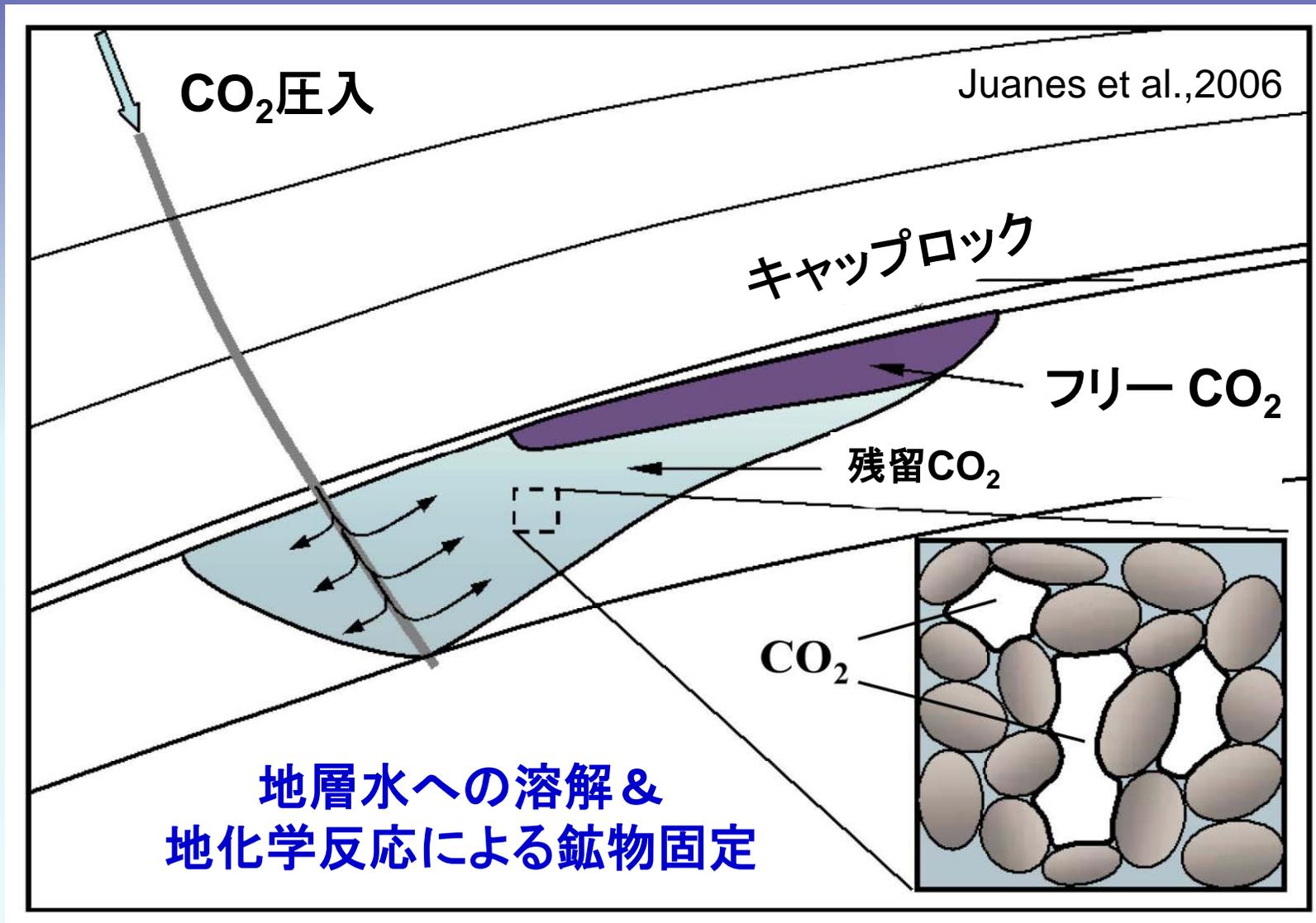
➤ 経済性や安全性の評価

- ・CO₂挙動モニタリングの頻度 & 継続期間(コスト低減)
- ・貯留ポテンシャル、圧入性(圧入井の本数)、地層安定性
- ・CO₂漏洩 & 海域環境(生物)影響、微小振動

Post-injection Monitoring @長岡サイト



圧入されたCO₂の長期挙動(概念図)



➡➡ **Permanently Sequestering CO₂ in the Subsurface**

CO₂挙動モニタリングの主な目的

➤ 圧入されたCO₂挙動監視や分布調査

(i) CO₂挙動監視: 貯留層内の移動 & 貯留層外への移動(漏洩)

(ii) CO₂分布調査: 貯留層(空間)の有効利用 & 局所(破砕帯)への異常集積

➤ CO₂貯留量の定量的評価

(iii) **M**onitoring, **V**erification, **A**ccounting

CO₂挙動モニタリング技術の現状

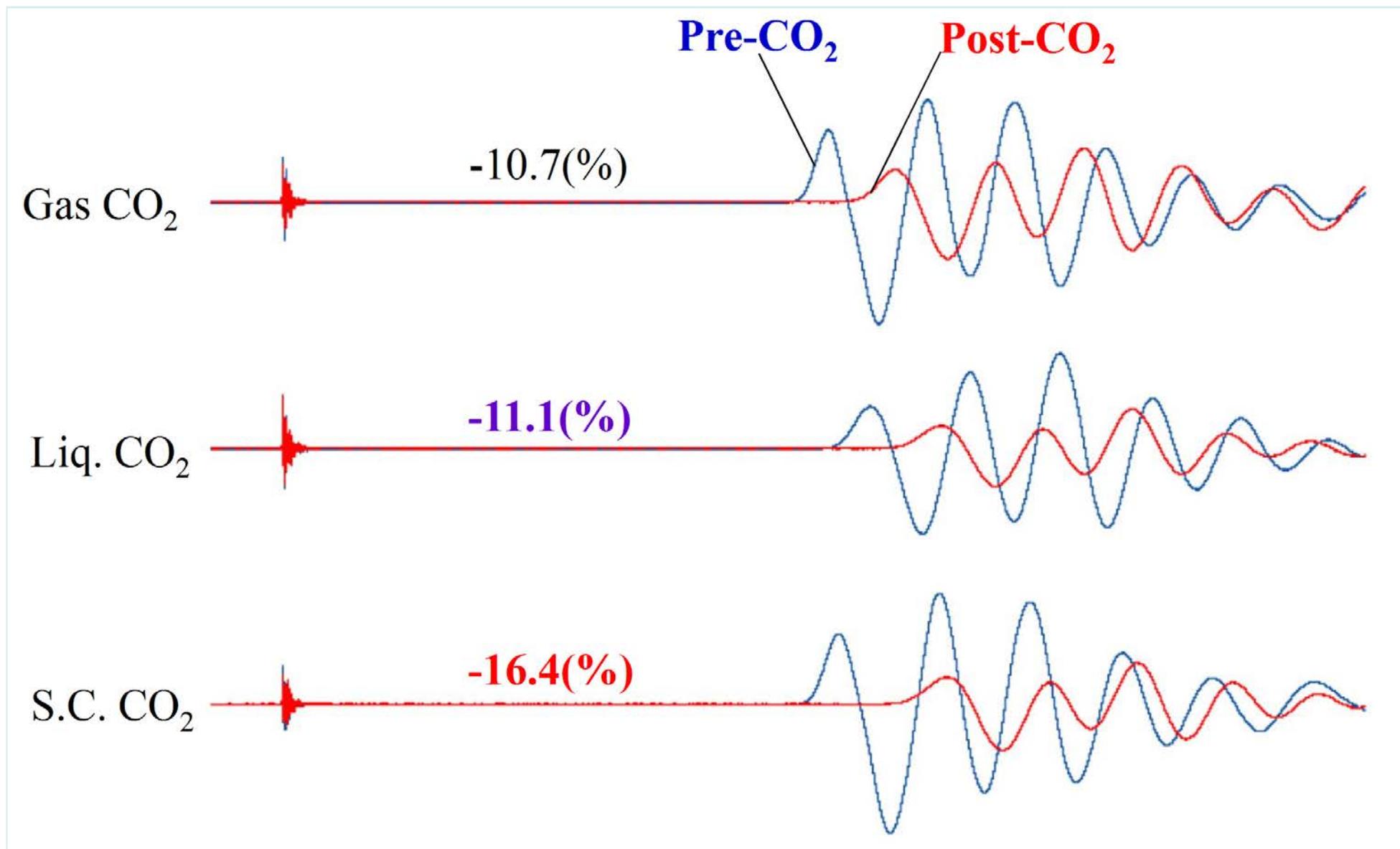
名称	国	貯留層の条件								地下(貯留層)のモニタリング								地表(付近)のモニタリング							
		貯留層の種類 操業開始(年)	地表条件	深度 (m)	層厚 (net pay)(m)	地質	透水係数 (mD)	間隙率 (%)	注入CO ₂ 量 (Mt/年)	注入CO ₂ 総量 (Mt) (計画を含む)	地震探査法				地震探査以外/孔内測定				地表(付近)のモニタリング						
											4D反射法 地表/海上	4D反射法 海底	2D反射法	VSP CWT モグラフィ	受動 /微小 地震	電気/ 電磁	重力	検層	孔内 流体	海底 地形等	地表 傾斜	リモート センシング	地球 化学的 調査	生物 学的 調査	
商業ベース	In salah	アルジェリア 枯渇ガス層 2004	陸	1850~ 1950	20	亀裂性 砂岩	10	13~20	1.2	2.5 (at 2008)	●			●	●				●		●	●	●	●	
	Sleipner	ノルウェー 帯水層 1996	海	1012	250(90)	砂岩	1000~ 3000	30~40	1	11 (at 2009)	●		●			●	●		●					●	
	Snohvit	ノルウェー 帯水層 2002	海	2550	60(50)	砂岩	450	13	0.7	23	●	●				●									
	Weyburn	カナダ 枯渇油田 2000	陸	1450	16~28	石灰岩 苦灰岩	50 10	10 29	10000t/ d	12 (at 2008)	●			●	●				●					●	
	Gorgon	オーストラリア 帯水層 2008	海陸	2500	200~500	砂岩	20~30	20	3.4	120	●		●	●											●
研究ベース	長岡	日本 帯水層 2000	陸	1100	60(12)	砂岩	(平均) 7	23	40t/d	0.0104	●			●		●		●	●						
	Frio	米国 帯水層 2004	陸	1500	24(7)	砂岩	2.5	24	160t/d	0.0016				●		●		●	●						●
	Ketzin (CO ₂ SINK)	ドイツ 帯水層 2008	陸	630~ 710	80	砂岩	0.02~ 5000	5~35	0.01~ 0.03	0.6	●			●		●		●						●	●
	Otway	オーストラリア 枯渇油ガス田 2005	陸	2000		砂岩				0.1	●	-		●	●				●	-					●
	Lost Hills	米国 枯渇油田 2000	陸	490~ 560		珪藻質 砂岩	0.1~ 20			125Mm ³ /d				●		●			●	-					
	Aneth	米国 枯渇油田 2007	陸	1700	60(12)	炭酸塩 岩	~10	5~30		0.136				●	●	●			●	-					●

- ◆ **弾性波(2D/3D反射法)**を用いたものが主流。油ガス田開発の実績が多く、技術の完成度が高い。
- ◆ 実証試験では坑井を利用した**弾性波/電磁波トモグラフィ**、VSP実施例が多い。
- ◆ 地球物理/地球化学(流体採取・分析:**地化学反応**)。
- ◆ **微小振動観測等(地層安定性監視)**

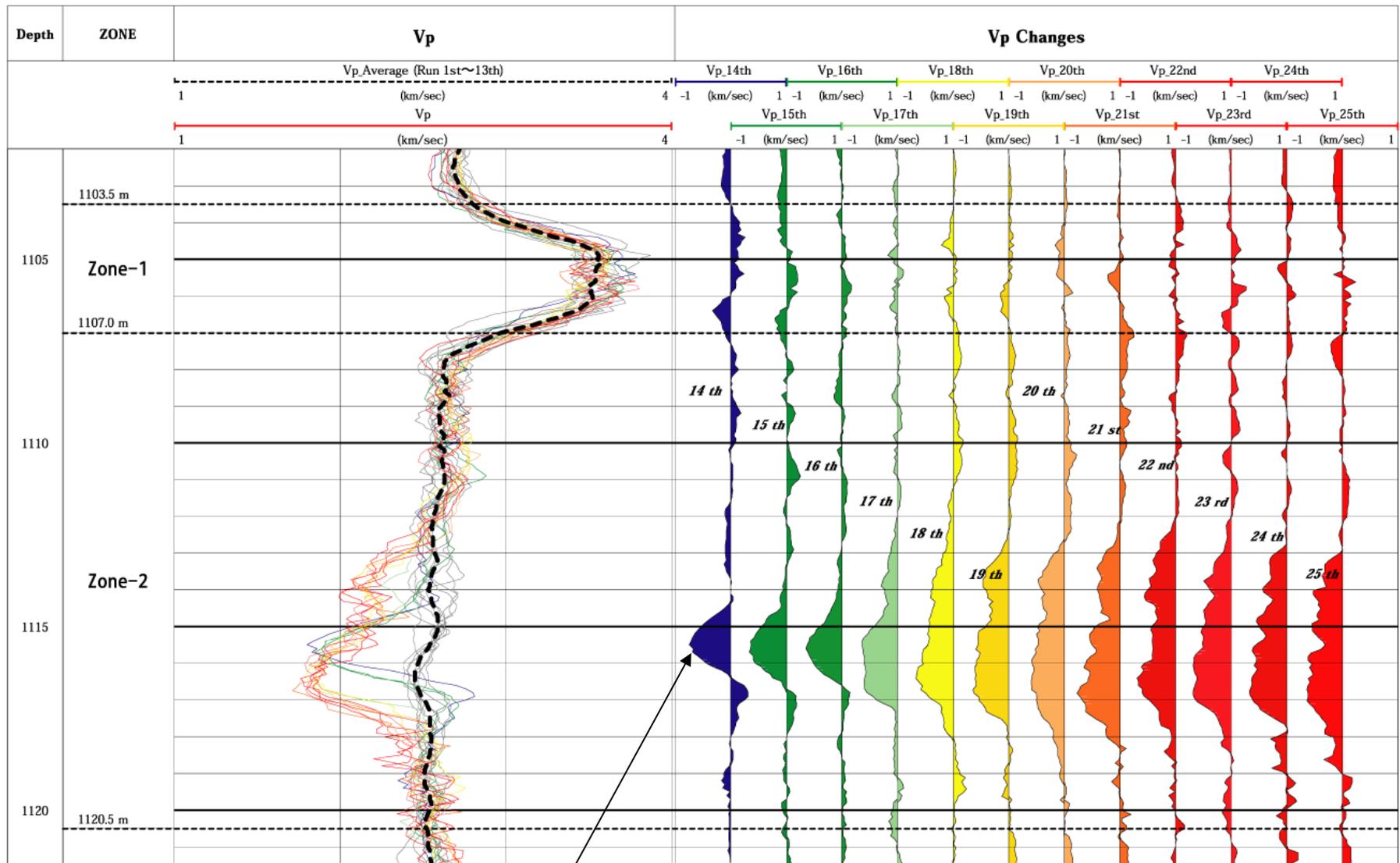
CO₂ 挙動モニタリングに利用されている 主な地球物理的手法

- Well Logging (point, **1D**) ----- 物理検層
- Crosswell Seismic & EM Tomography (**2D**)
----- 坑井間弾性波・電磁波トモグラフィ
- Vertical Seismic Profile (VSP) (**2D**)
- 3D Seismic Survey (**3D**) ----- 反射法弾性波探査

弾性波探査の有効性



音波検層の一例@長岡サイト



Vp: -23%

CO₂検出@観測井

長岡サイトのCO₂貯留状態調査

2000

サイト選定、圧入井&
観測井(OB-2, -3)掘削

2001

観測井(OB-4)掘削

2002

2003

CO₂圧入開始

2004

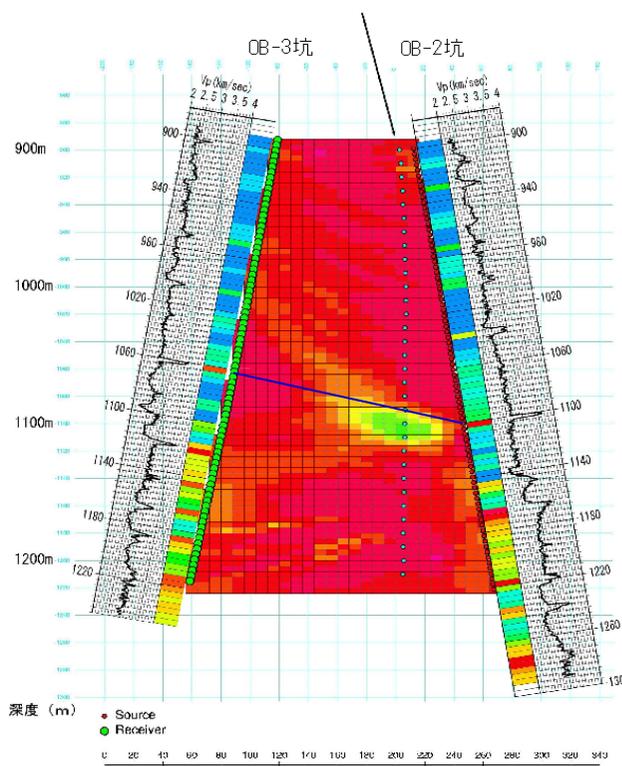
2005

CO₂圧入終了
(10,400 ton)

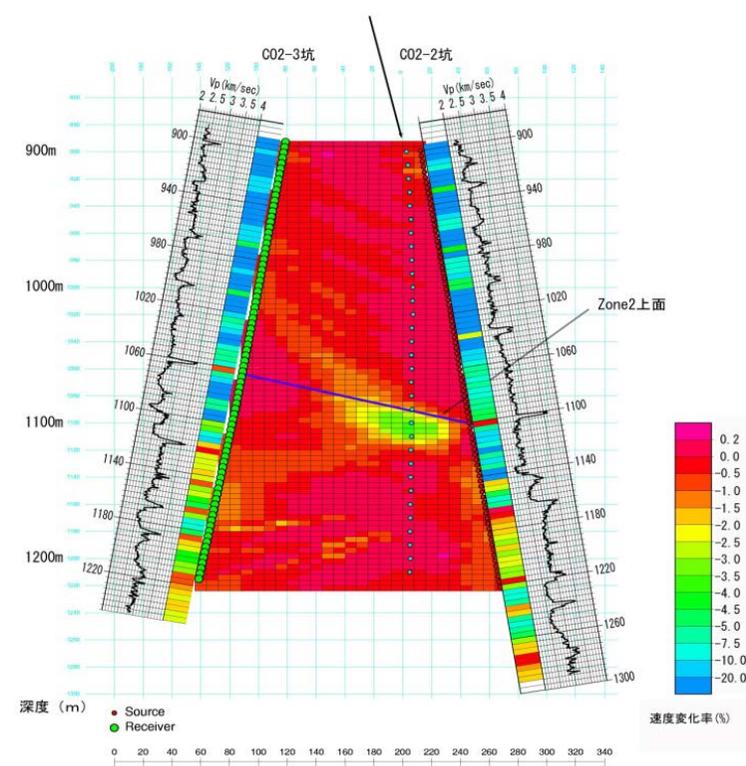
2010

2015

圧入終了後

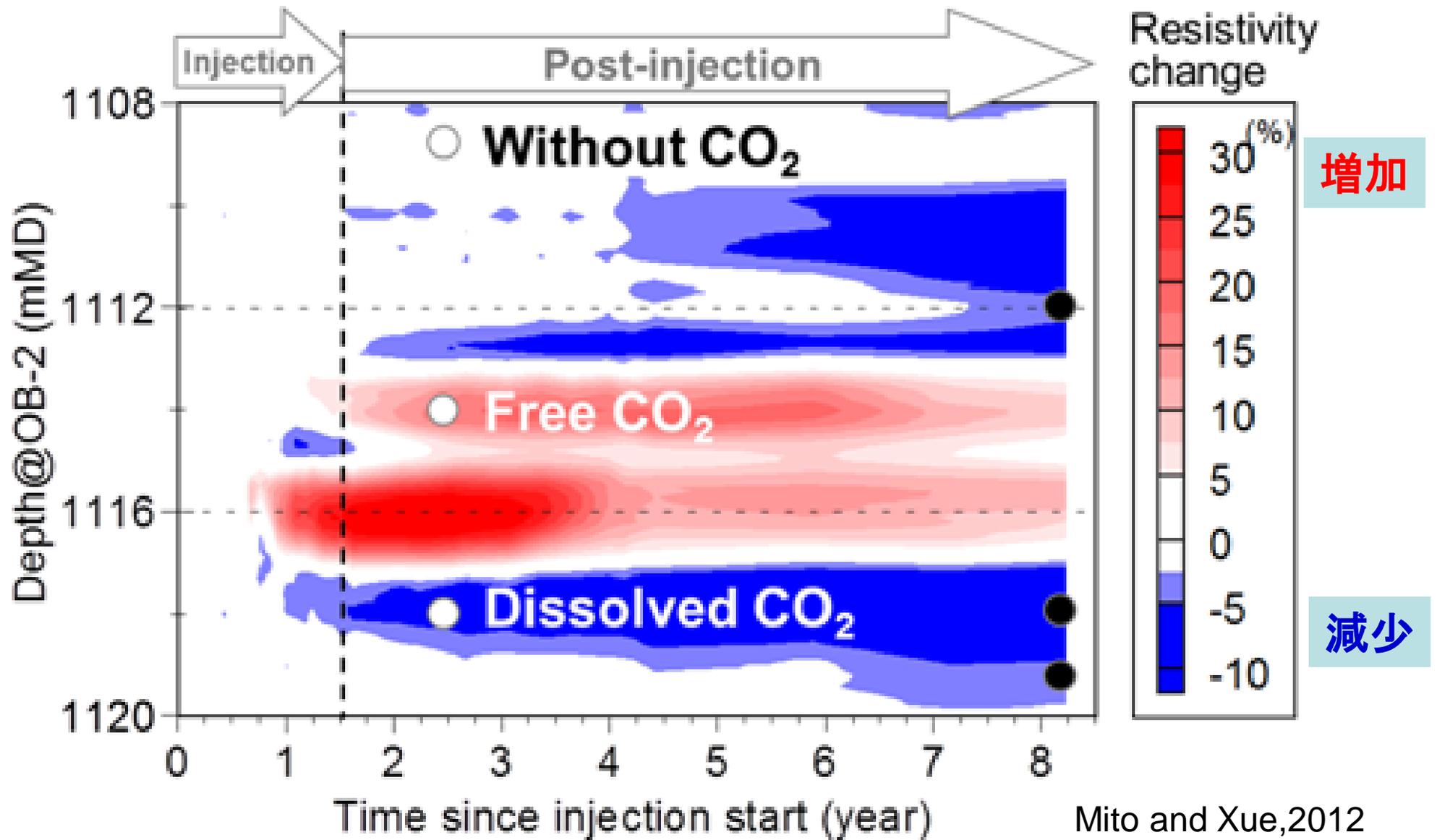


圧入終了
5年9ヶ月後



- 坑井間弾性波トモグラフィ測定結果より、CO₂は安全に貯留されていることが確認できた。
- 中越地震(2004)や中越沖地震(2007)の影響も受けていない。

比抵抗検層によるCO₂溶解域の検出



観測井OB-2近傍の比抵抗と経時変化(赤:CO₂分布域;青:CO₂溶解水分布域)

地球物理学データ

wave velocity, resistivity

**Inversion
problem**

岩石物性モデル

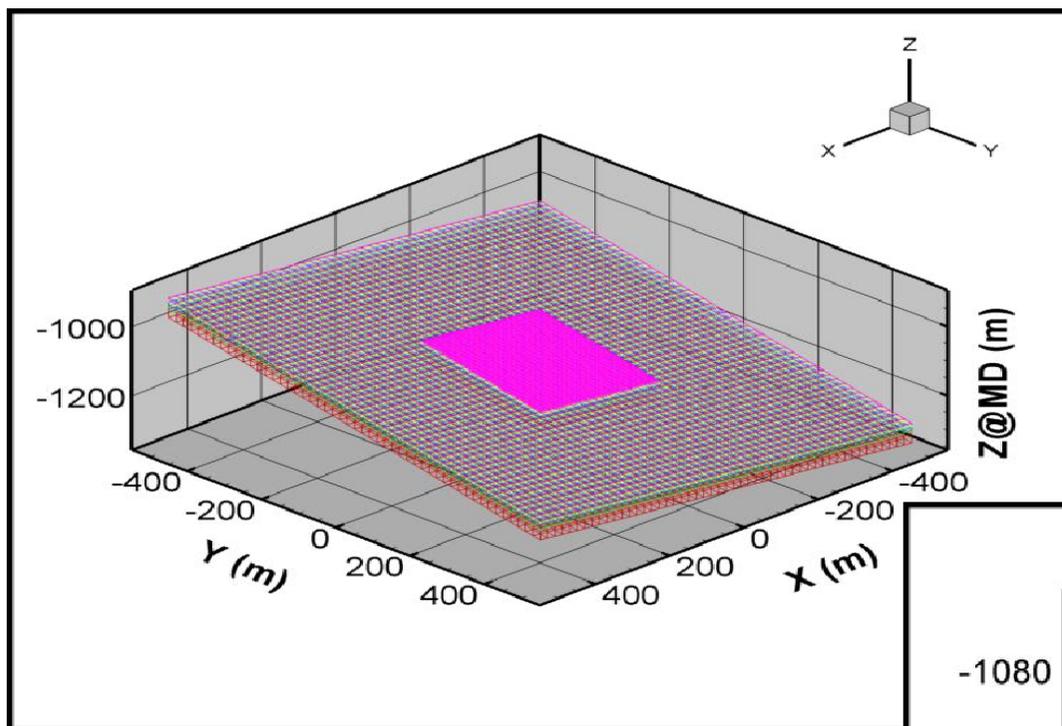
uncertainty

貯留層データ
fluid, gas saturations

CO₂挙動モニタリングの役割

- ✓貯留層地質モデルの高精度化（モニタリング結果に基づいた初期地質モデルのキャリブレーション）
- ✓CO₂モニタリング頻度の検討（マッチング結果を基に、モニタリング間隔を決定）
- ✓CO₂長期挙動予測手法の確立（短期の観測結果を基に、CO₂長期挙動を予測）

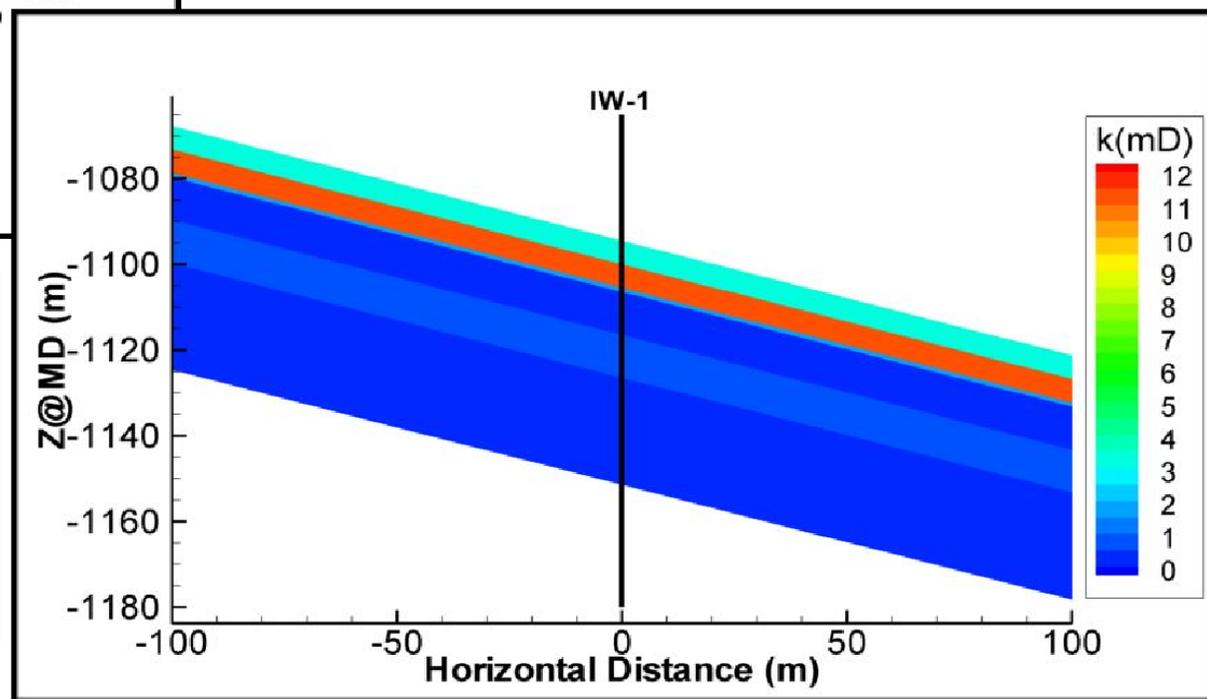
長岡サイトの地質モデル(I)



Area Name	Area Size (m ²)	Gridblock Size (m ²)
Outer Area	1000x1000	20x20
Inner Area	320x320	5x5

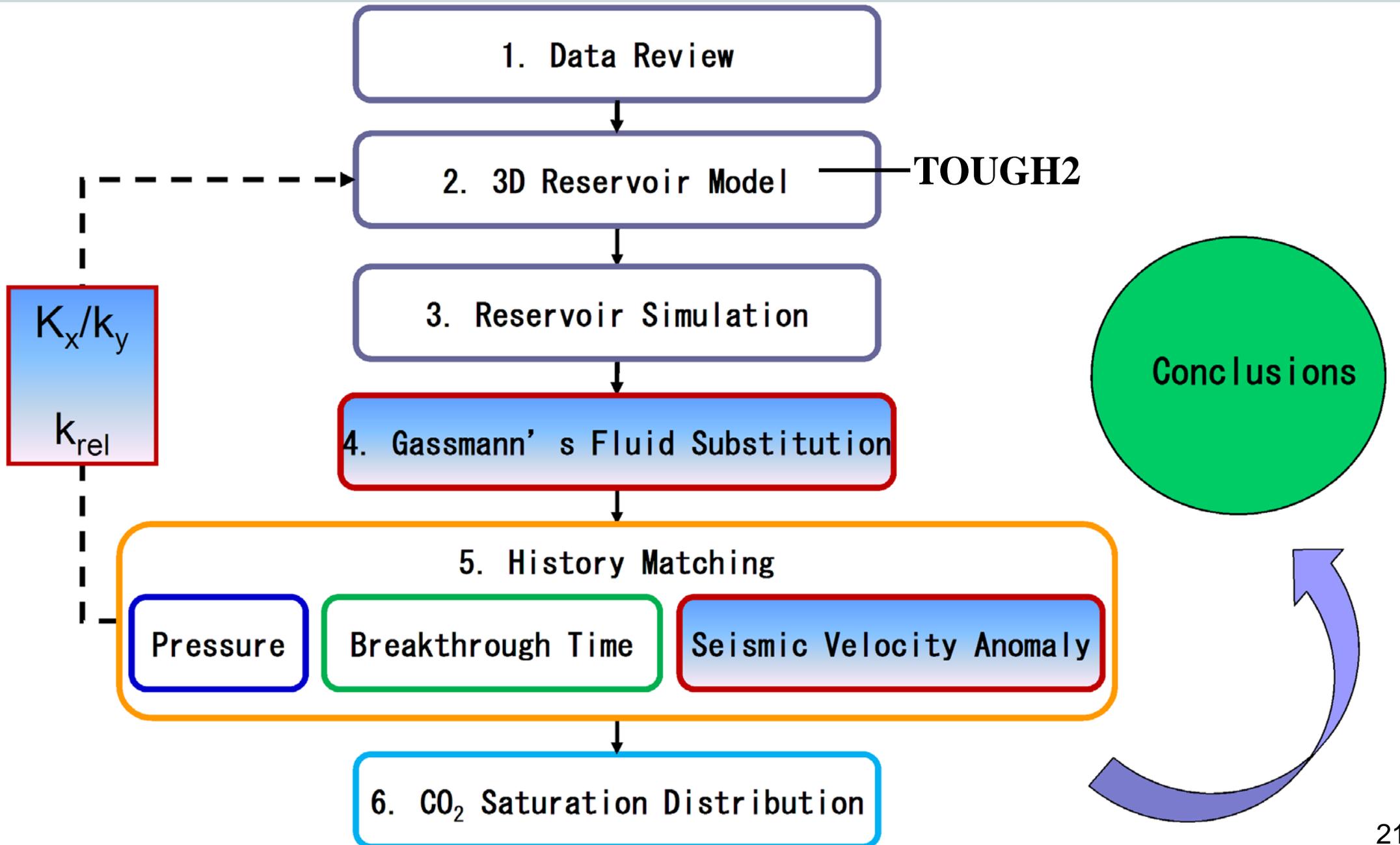
Layer	ϕ	Thick. (m)	Kh (mD)	kv/kh	β (1/Mpa)
Zone 2 U.	0.225	5.5	3.19	0.25	2.9×10^{-3}
Zone 2 M.	0.225	5.5	11.15	0.25	2.9×10^{-3}
Zone 2 L.	0.225	1.0	1.59	0.25	2.9×10^{-3}
Zone 3 U.	0.204	10.0	0.330	0.25	2.9×10^{-3}
Zone 3 L.	0.204	10.0	0.660	0.25	2.9×10^{-3}
Zone 4&5	0.234	25.0	0.460	0.25	2.9×10^{-3}

Ohkuma, H. (2008)

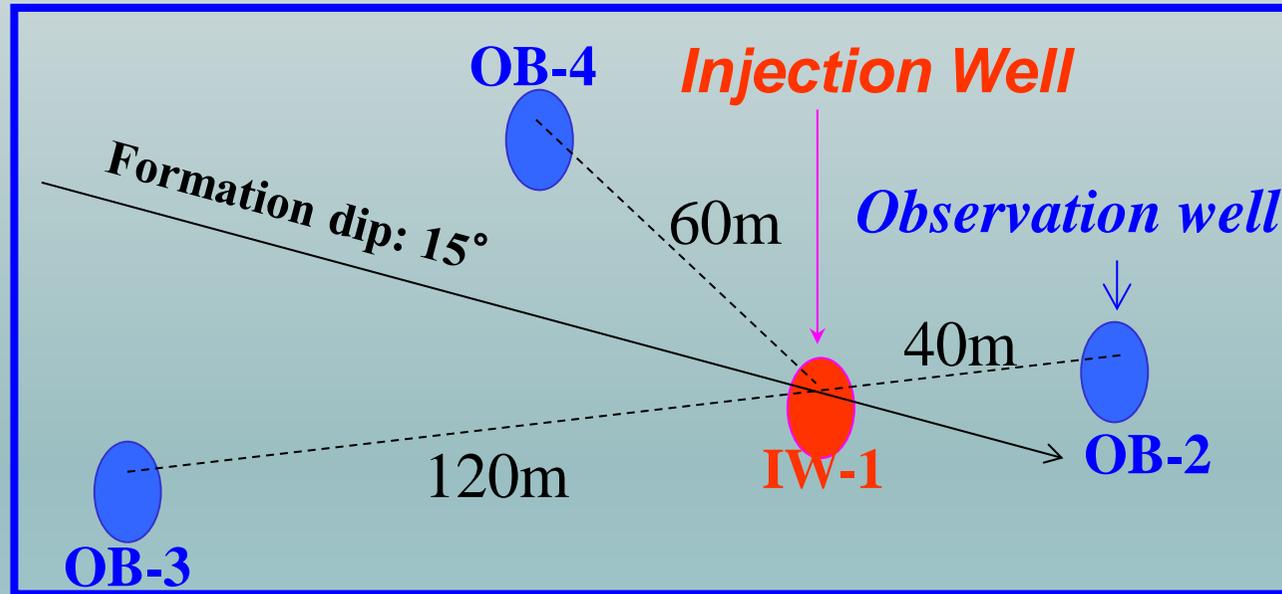


$$k_h = (k_x \cdot k_y)^{-0.5}, \quad k_y/k_x = 1.2$$

地質モデルの構築と改良について



CO₂到達時間のマッチング結果



Breakthrough time	Logging Data (Days)	Sim. RP1 (Days)	Sim. RP2 (Days)	Sim. RP3 (Days)
OB-2	232-259	154	200	234
OB-3	No detected	No detected	No detected	No detected
OB-4	325-359	201	259	342

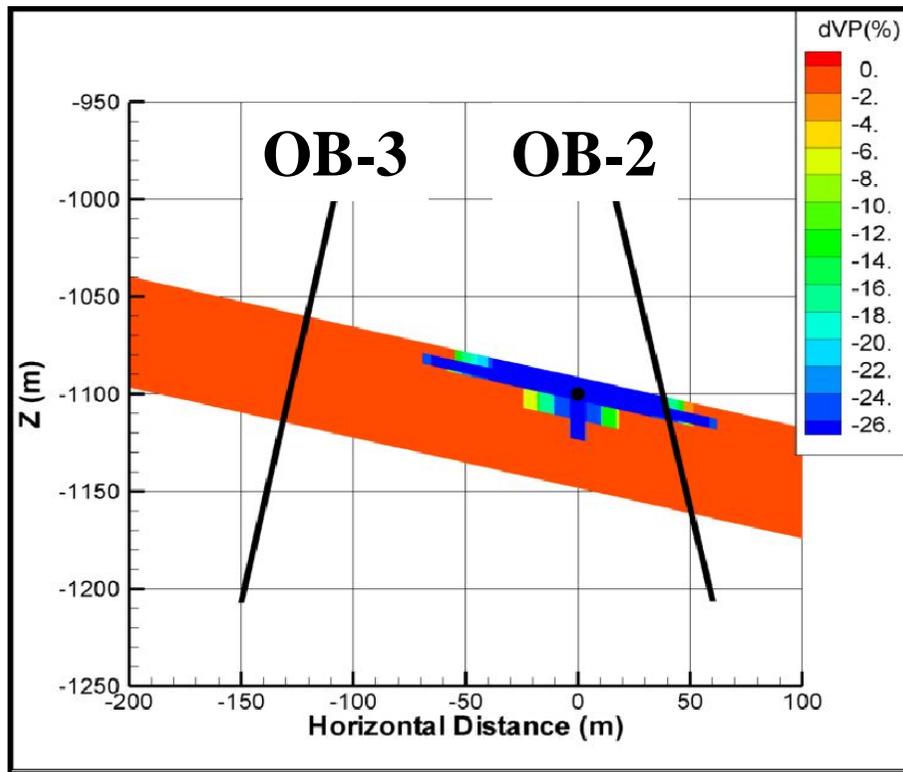
Good Match!

CO₂分布域の比較 (予測 vs 観測)

Ray paths : no travel time difference

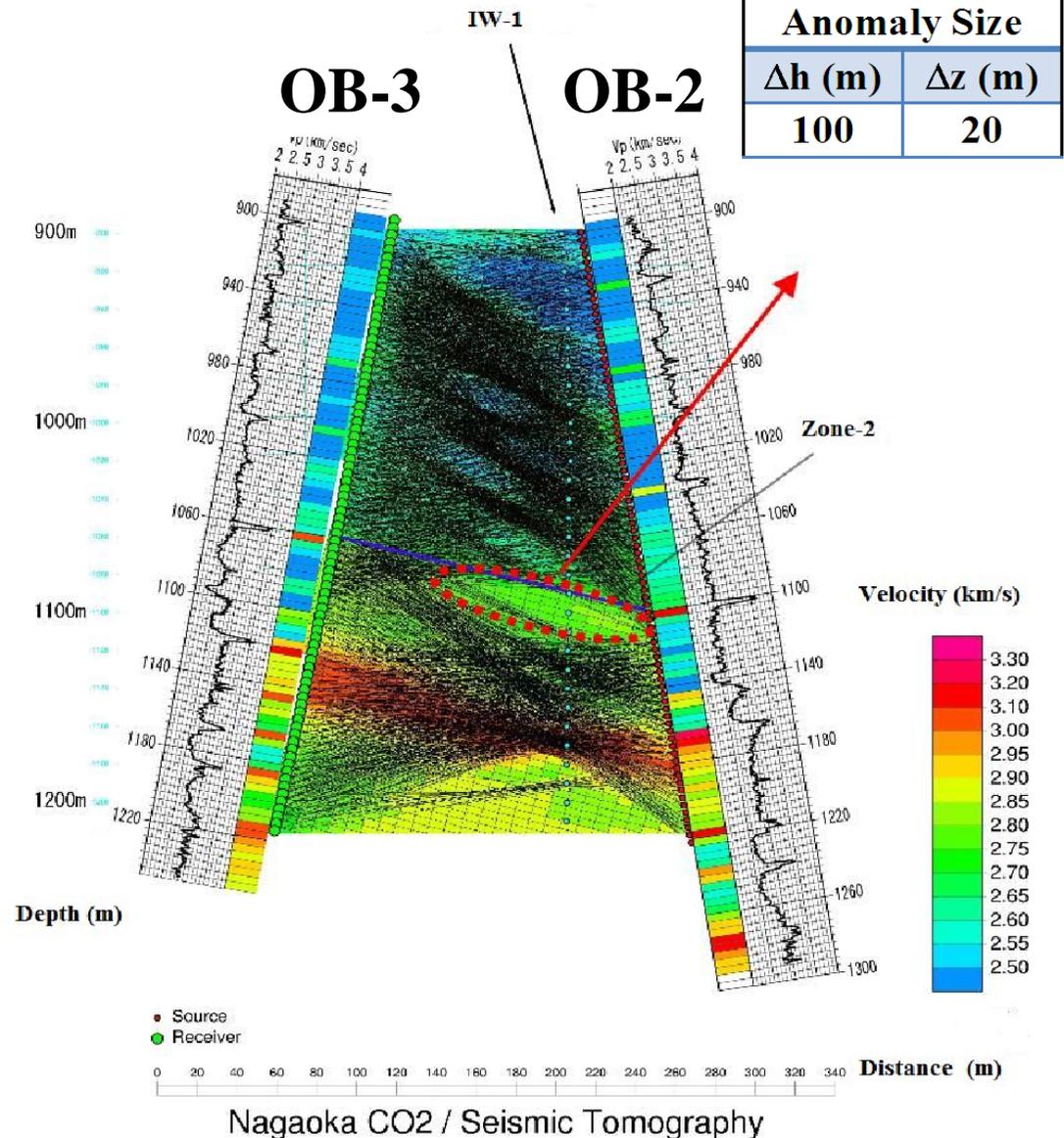
Simulation Results

Anomaly Size	
Δh (m)	Δz (m)
105	22



Garcia (2009)

Anomaly Size	
Δh (m)	Δz (m)
100	20



Nagaoka CO₂ / Seismic Tomography

予測と観測のヒストリマッチング

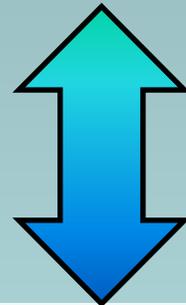
→→→地質モデル改良 →→→長期挙動予測

➤ Reservoir Model

→ CO2 Distribution Simulation

→ History Matching

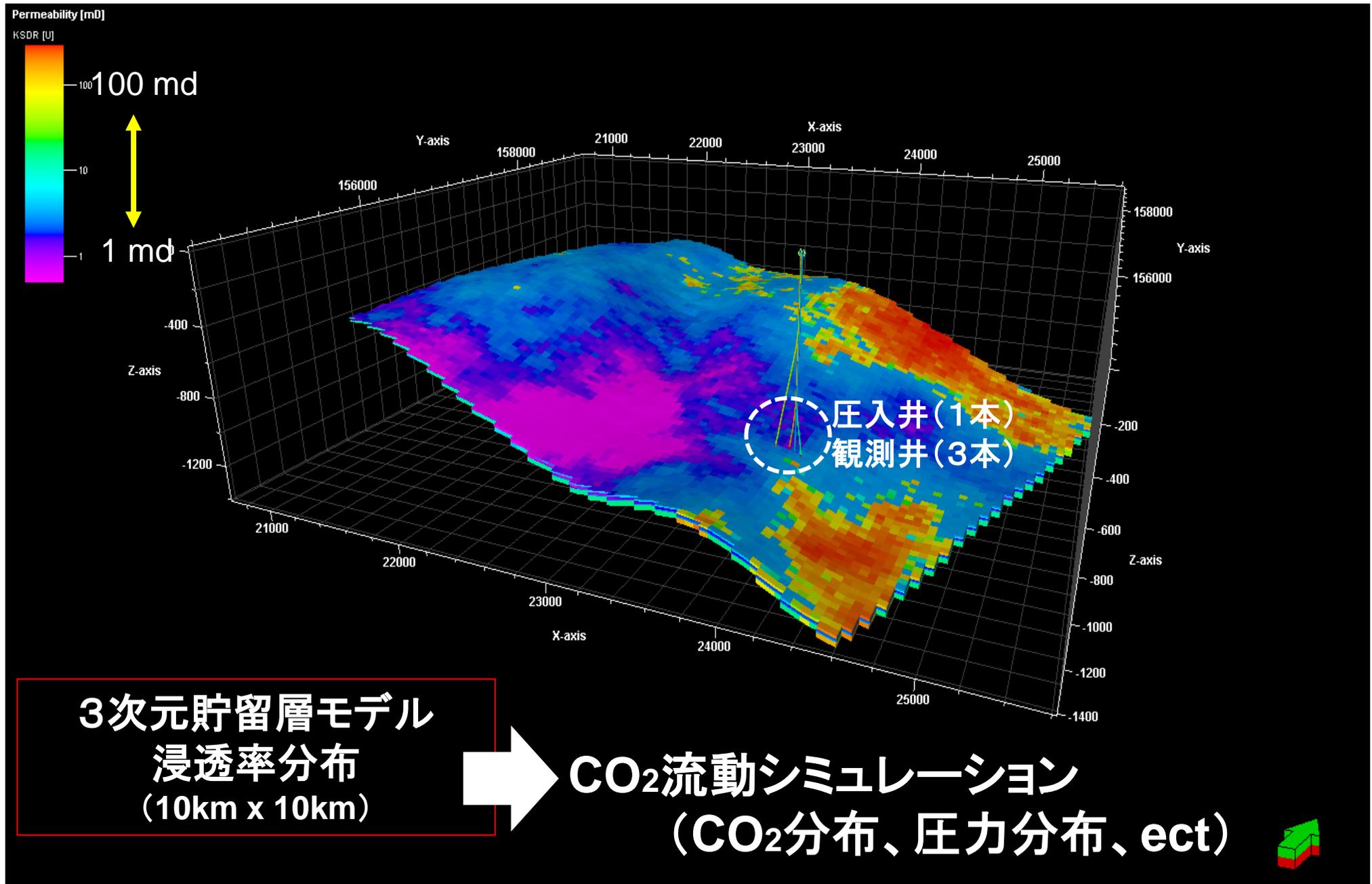
- Bottom hole pressure
- Reservoir pressure



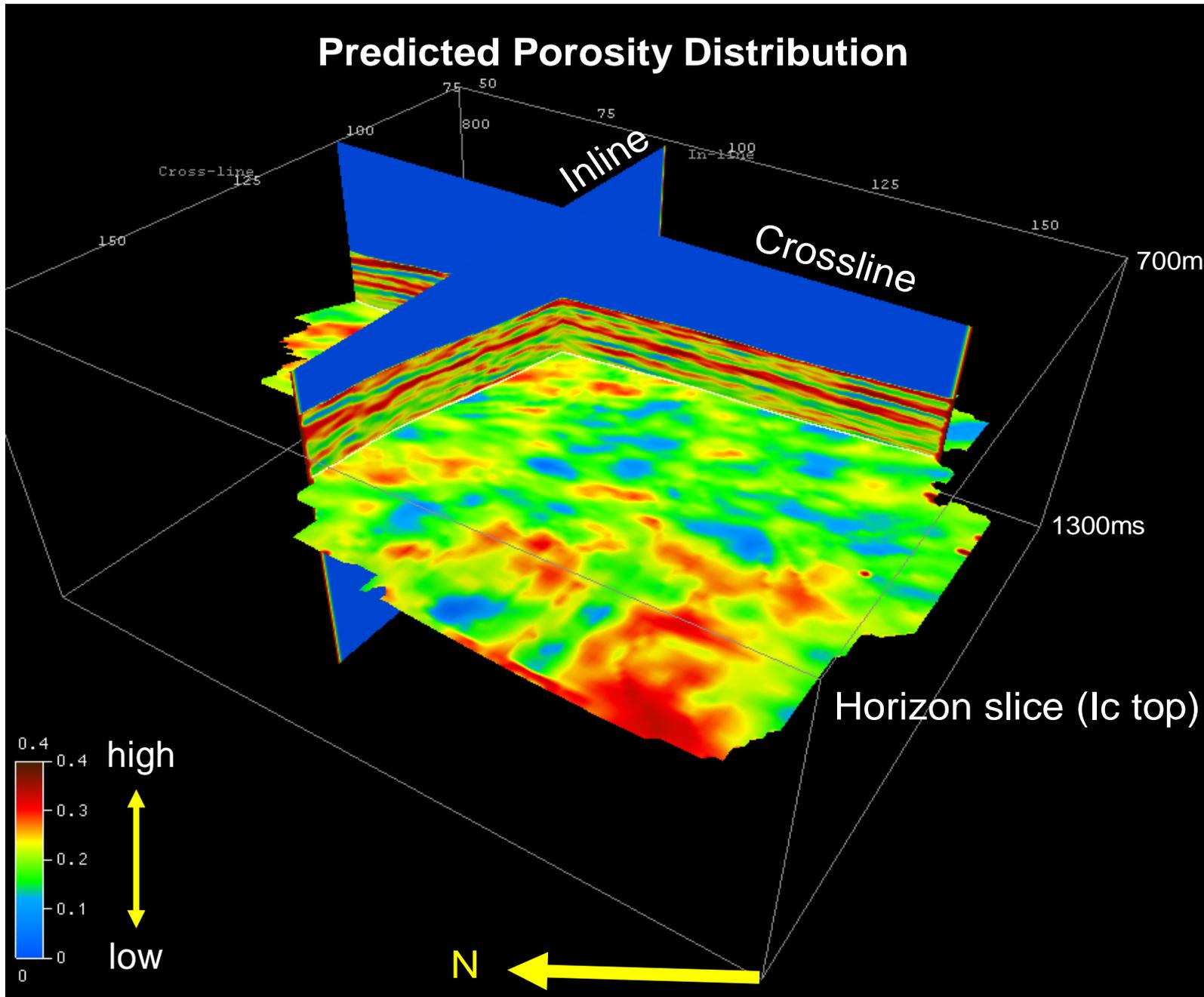
- CO2 Breakthrough time
- Seismic tomography

- ✓ Accurate Reservoir Model
- ✓ Anisotropic Permeability

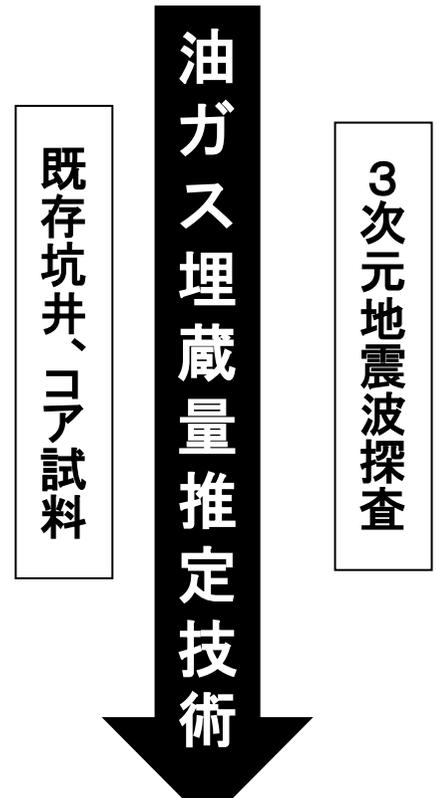
貯留層モデルをCO₂挙動解析へ



貯留層地質モデル構築：不均質性！



油ガス田開発に比べて
地質情報が少ない
(坑井数、物理検層)



**3次元貯留層モデル
孔隙率分布
(2km x 2km)**

まとめ

➤ CO₂挙動モニタリングの役割

- CO₂貯留状態の把握 (CO₂分布調査、貯留層外への移行: **地球物理** & **地球化学**の手法)
- 貯留層モデル構築&改良 (**ヒストリマッチング**
→→ **長期挙動予測**モデル構築)

➤ CCS実用化への貢献

- 社会的受容性の獲得、日本のCCS技術の海外展開