

# 二酸化炭素地中貯留技術研究組合による取り組み

*Research and Development of Safety Management  
Technology for Large-Scale CO<sub>2</sub> Geological Storage*

せつ じきゅう

薛 自求

(*xue @ rite.or.jp*)

*Geological Carbon Dioxide Storage Technology Research Association*

二酸化炭素地中貯留技術研究組合

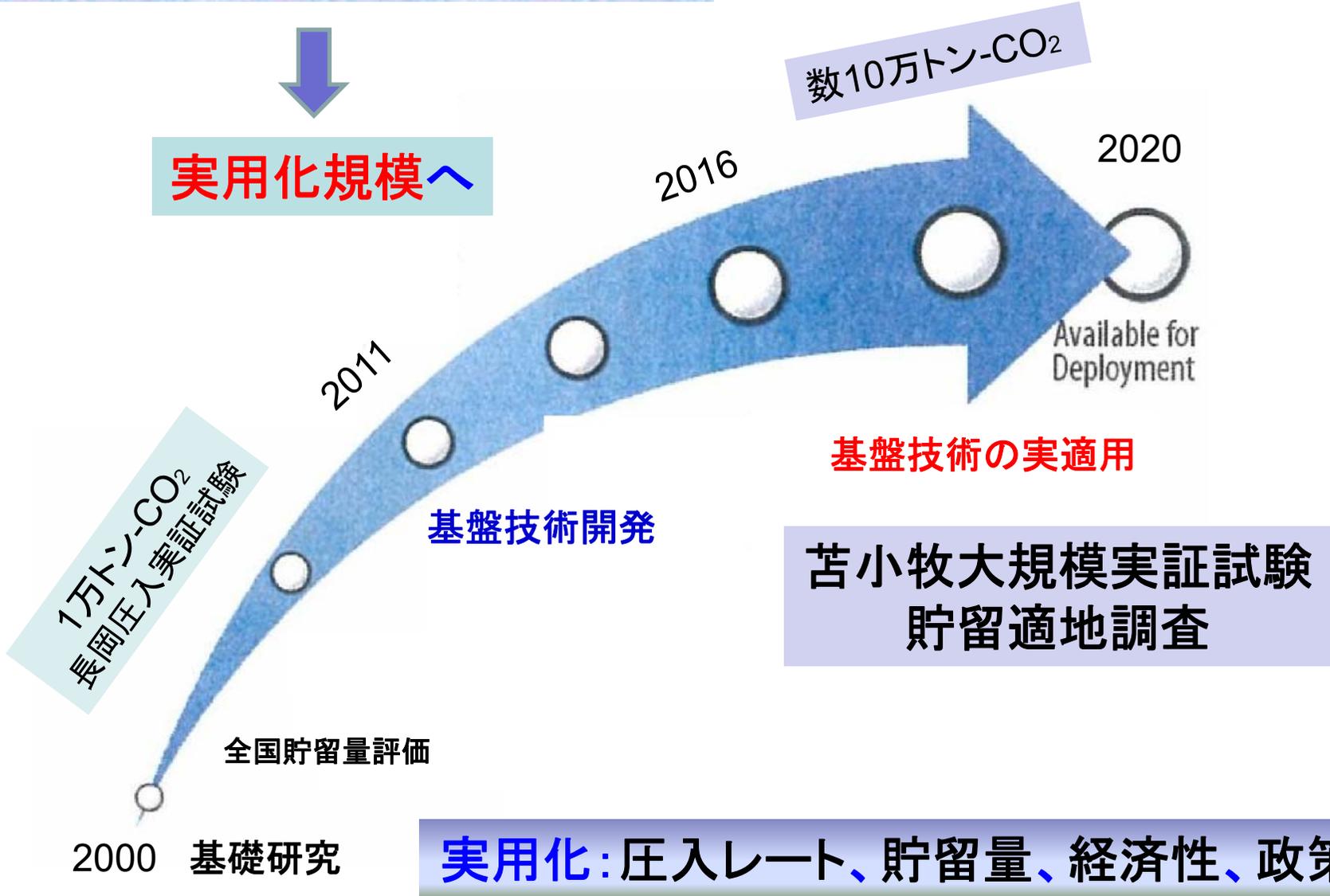
# 目次

- 国内の大規模貯留実用化に向けて
  - ✓ 長岡圧入実証試験(陸域)、苫小牧大規模実証試験(海域)、実用化(**Up-Scaling**)
- 海外の大規模CO<sub>2</sub>地中貯留から学ぶ
  - ✓ **QUEST(カナダ)** / **ICCS(米国)**
- 大規模地中貯留の安全管理技術開発
  - ✓ 技術研究組合の取り組み及び**その役割**

長岡サイト →→→ 苫小牧サイト



実用化規模へ



# 地中貯留技術開発の現状認識(米国／DOE)

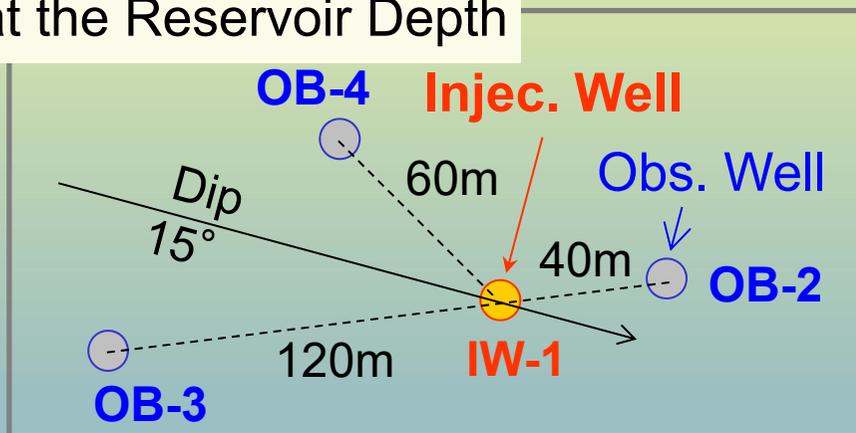
## *Much Progress on Carbon Storage, But Uncertainties Remain*

- If cost issues lie with capture, risk issues lie with storage
  - **Questions about scale up, liability, performance**
  
- Current program reflects progress made
  - Overall reduction from prior years
  - Emphasis on key areas (e.g., geomechanics)
  - Emphasis on integration (e.g., NRAP)

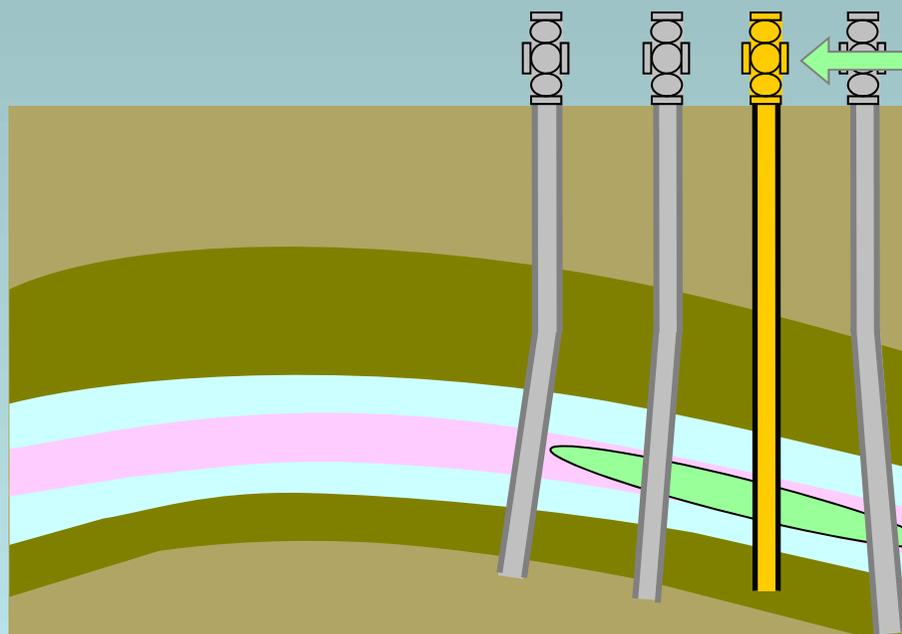
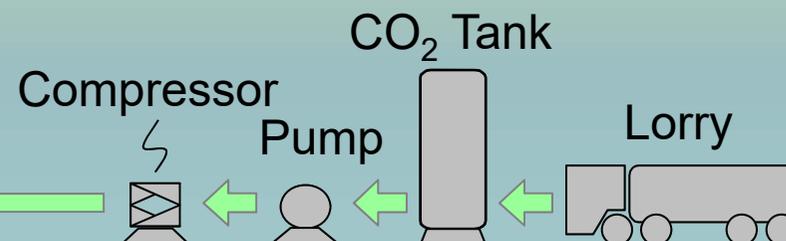
	<b>Then</b> CCS Program Initiated (1997)	<b>Now</b> Progress to Date	<b>Future</b> CCS Broad Commercial Deployment
<b>Storage R&amp;D</b>	• Little known	• Knowledge gained and <b>tools</b> being developed and tested	• “Commercial <b>toolbox</b> ” developed
<b>Infrastructure/Field Tests</b>	• Little known; Sleipner project initiated	• Increased visibility; Knowledge gained and lessons learned	• Potential realized; Frameworks in place for market deployment

# Nagaoka Siteから何を学んだか

Well Configuration  
at the Reservoir Depth



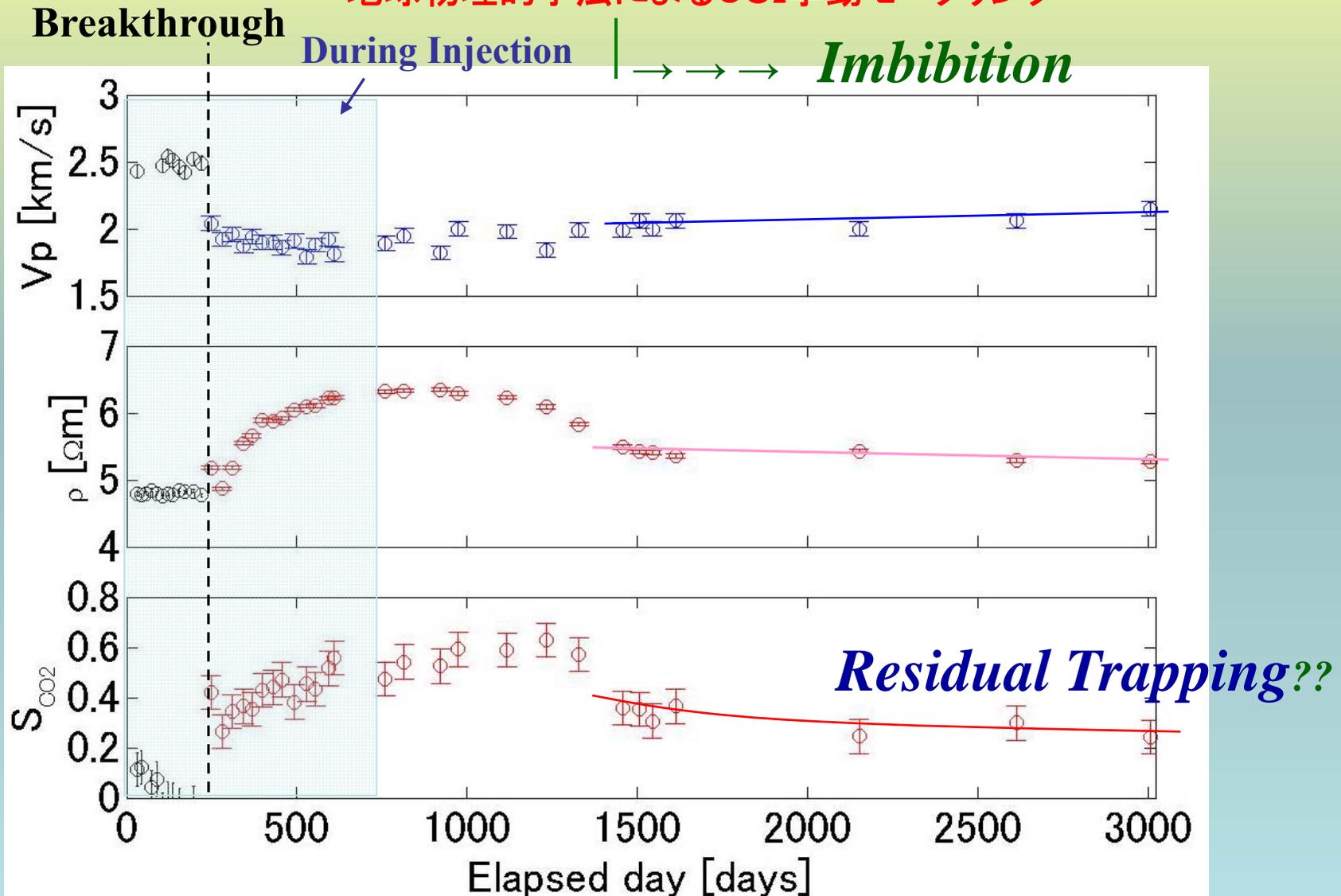
- Injec. Period; Jul. 2003~Jan. 2005
- Total amount; 10,400 ton CO<sub>2</sub>
- Rate; 20~40 ton/day



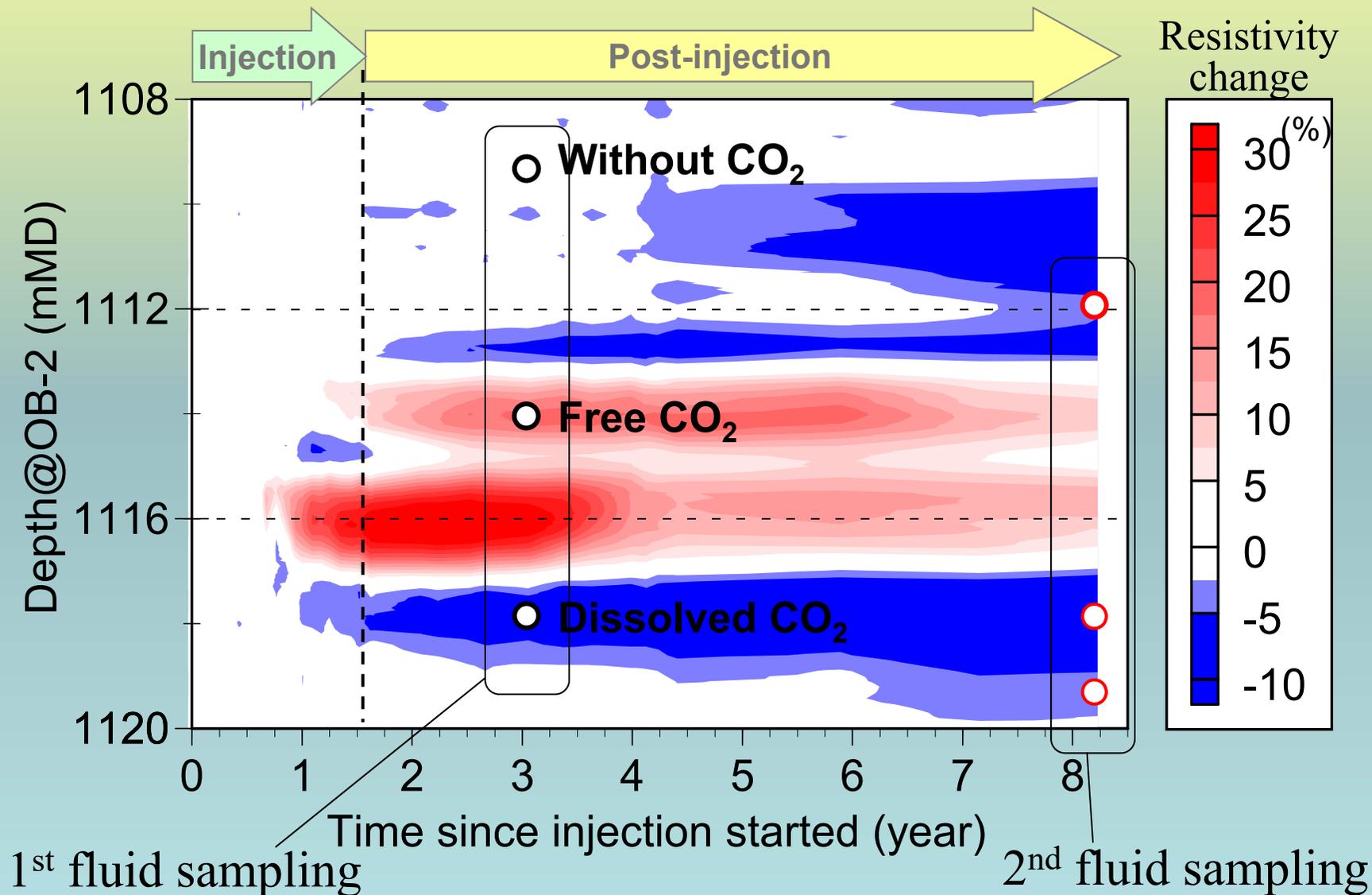
- Reservoir; Haizume Formation (Pleistocene Sand)
- Injec. Layer; Zone 2, 12m-thick
- Porosity; 23%
- Permeability; ave. 7mD (Pump-test)
- Conditions; 48°C, 11MPa

# Time-lapse Changes at (1116.0m @OB-2)

地球物理的手法によるCO<sub>2</sub>挙動モニタリング

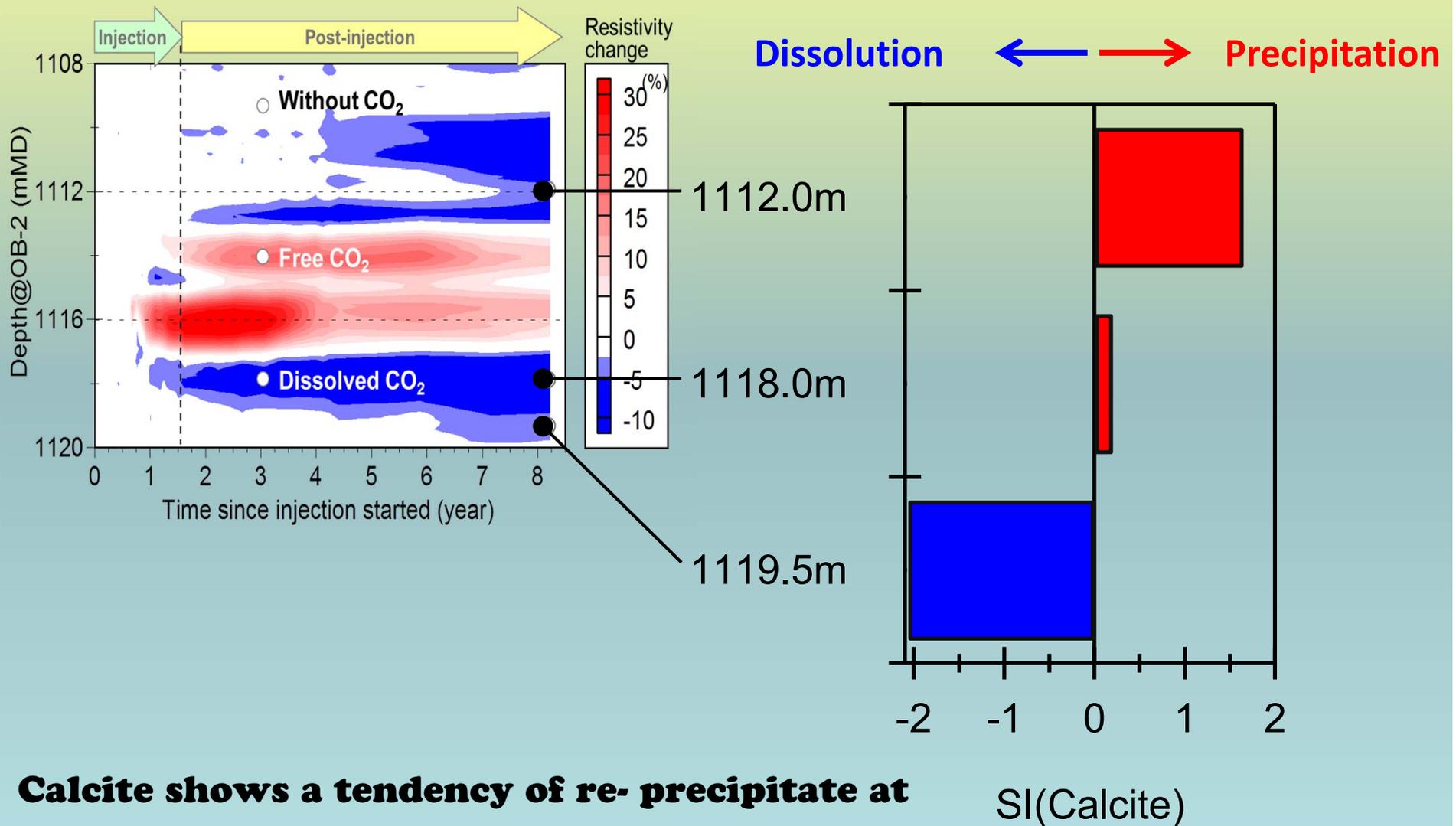


# Formation Fluid Sampling at OB-2



地球化学的手法によるCO<sub>2</sub>挙動モニタリング

# Saturation Index (SI) of Calcite ( $\text{CaCO}_3$ )



**Calcite shows a tendency of re-precipitate at 1118.0m. →→→ Mineral trapping of CO<sub>2</sub>?**

# CO<sub>2</sub> Trap Mechanisms Confirmed @Nagaoka Site

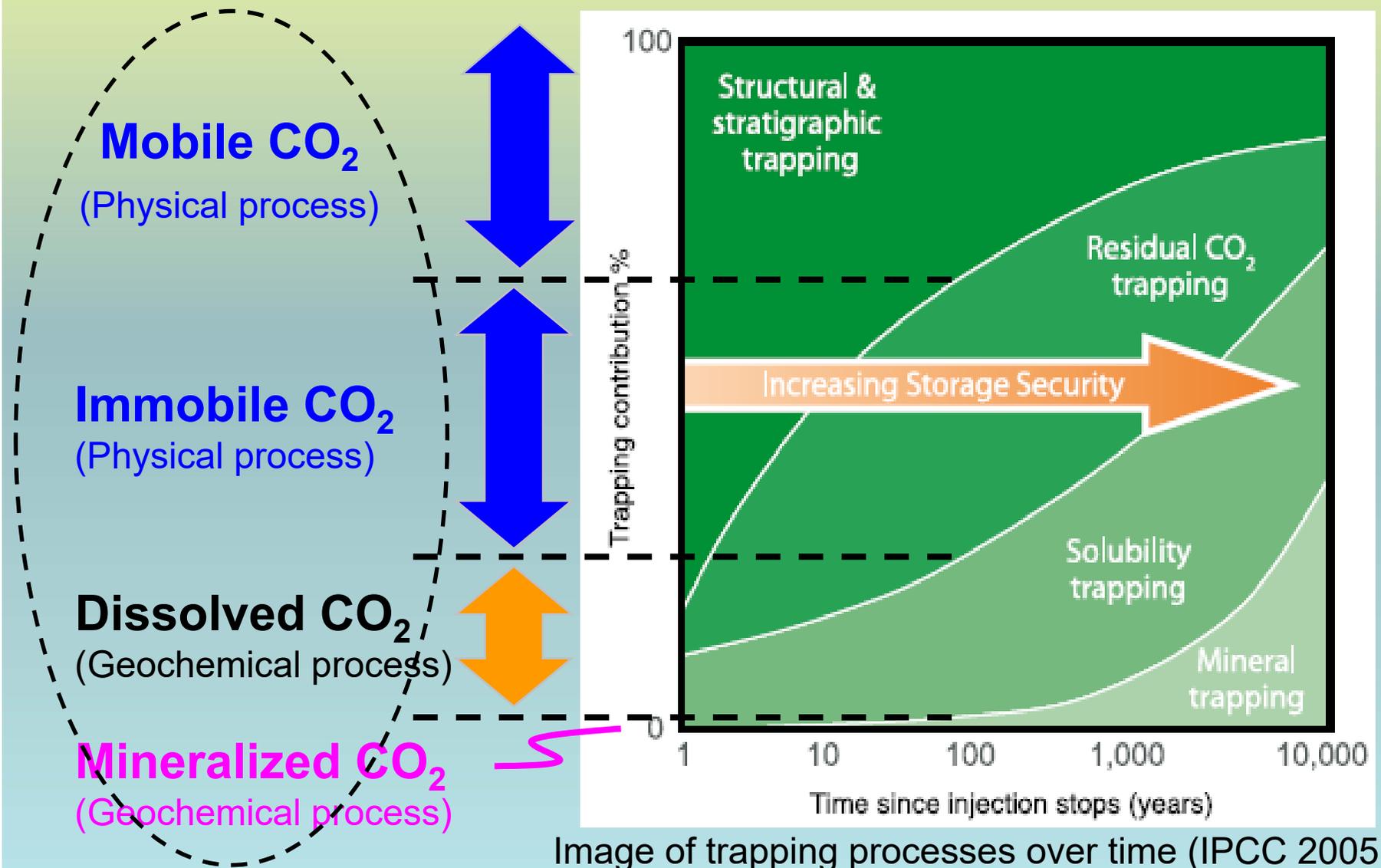
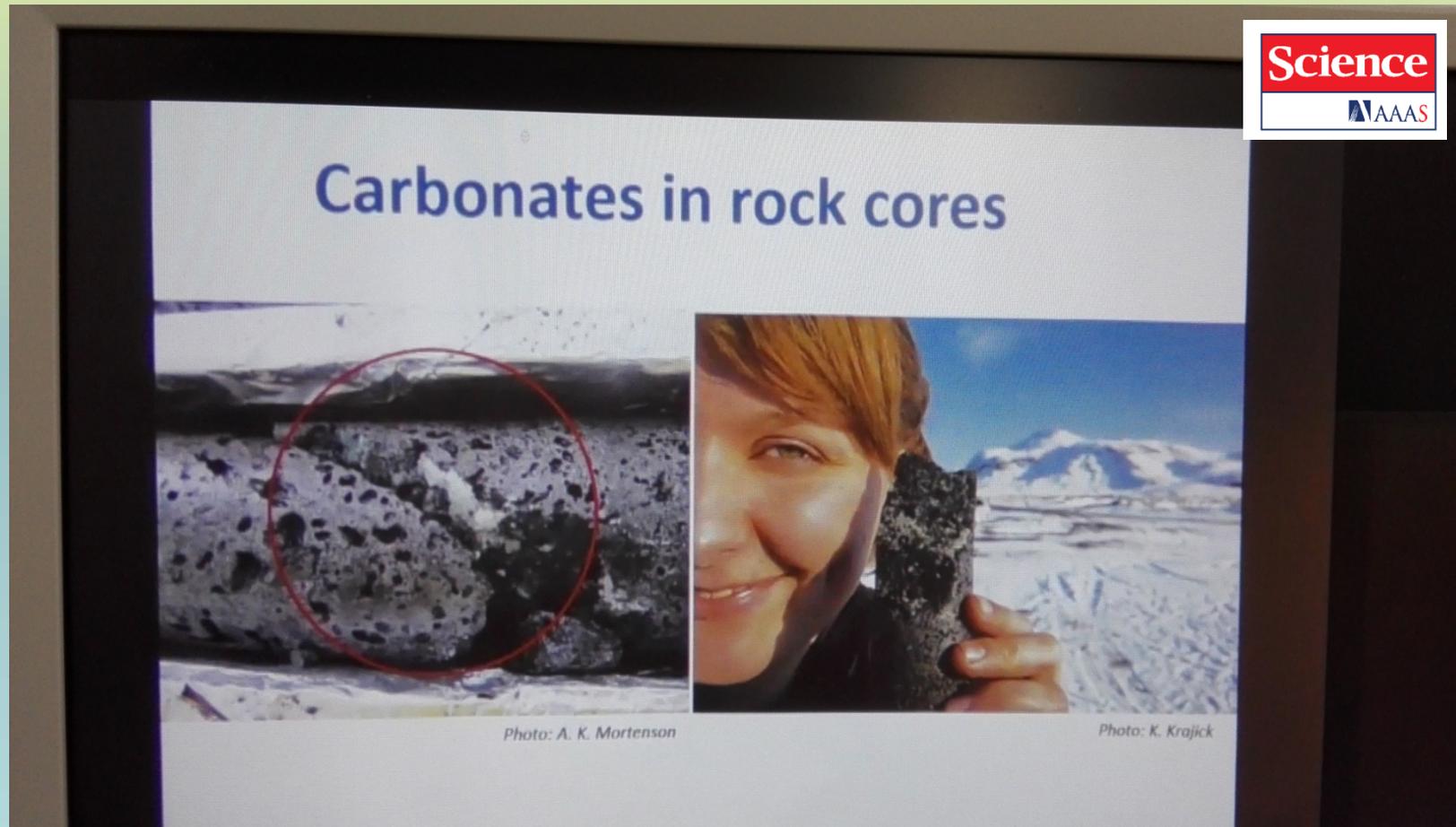


Image of trapping processes over time (IPCC 2005) 9

# Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions



Published 10 June 2016, *Science* **352**, 1312 (2016)  
DOI: 10.1126/science.aad8132

# 苫小牧大規模実証試験サイトから何を学ぶか



# Pilot → Demo → Practical

2000-

Onshore: 10 kt

Nagaoka Pilot Test



Site	: Nagaoka
Reservoir	: Saline Aquifer
Formation	: Sandstone
Injection	: 2003.7 ~ 2005.1
Total CO <sub>2</sub>	: 10,400 ton

2010-

offshore: > 100 kt/y

Tomakomai Large-Scale Demo

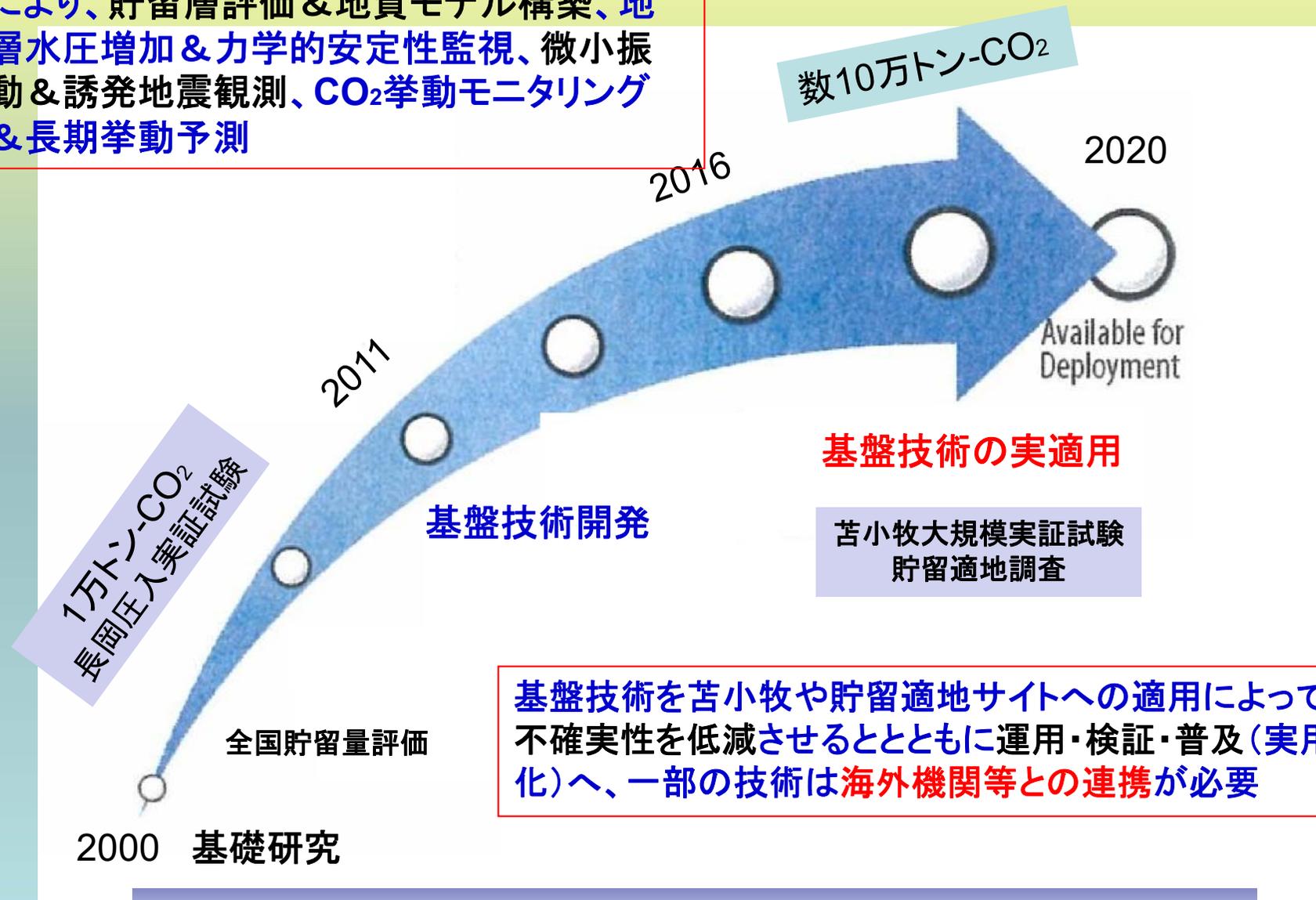


Site	: Tomakomai
Reservoir	: Saline Aquifer
Formation	: Sandstone (shallow), Volcanic Rocks (deep)
Injection	: 2016 ~ 2018
Total CO <sub>2</sub>	: > 300 kt (planned)

2020-

Practical Use  
(1 million t/y)

貯留層規模／CO<sub>2</sub>圧入規模のUp-scaling  
により、貯留層評価&地質モデル構築、地  
層水圧増加&力学的安定性監視、微小振  
動&誘発地震観測、CO<sub>2</sub>挙動モニタリング  
&長期挙動予測



絶対的にクリアすべき技術か、より良くする技術か

# 目次

- 国内の大規模貯留実用化に向けて
  - ✓ 長岡圧入実証試験(陸域)、苫小牧大規模実証試験(海域)、実用化(**Up-Scaling**)
- 海外の大規模CO<sub>2</sub>地中貯留から学ぶ
  - ✓ ICCS(米国)／**QUEST**(カナダ)
- 大規模地中貯留の安全管理技術開発
  - ✓ 技術研究組合の取り組み及び**その役割**

# Decatur(米国)： ICCS プロジェクト概要



事業者：エターノル製造会社

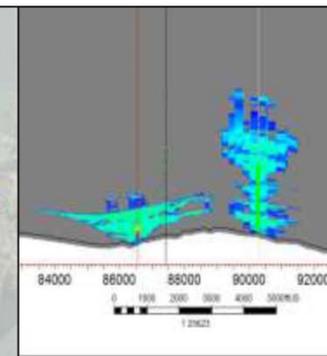
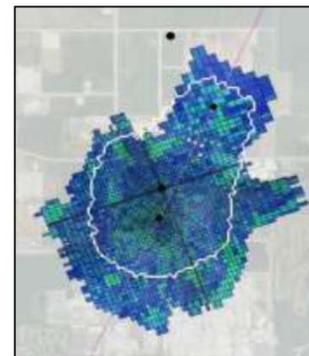
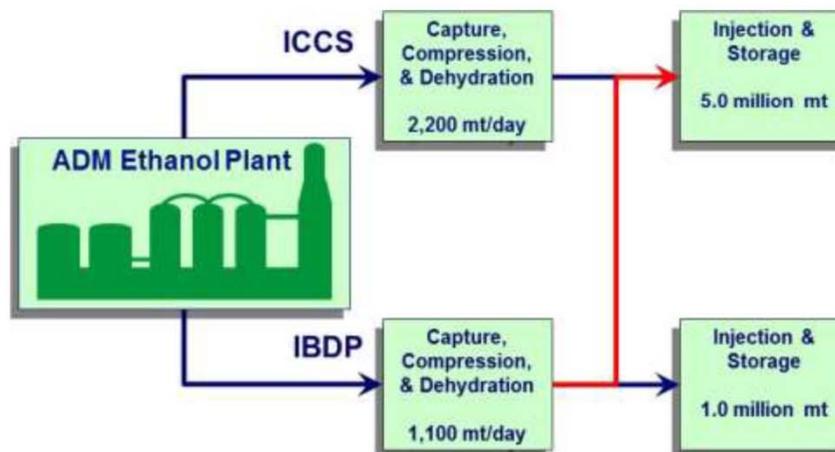


## Illinois Basin Decatur Project

- Large scale geologic test to inject 1.0 million mt of CO<sub>2</sub> over a three year period (1,000 MT/day).

## Illinois Industrial CCS Project

- Target & demonstrate advanced CCS technologies at industrial scale facilities.
- Inject and store 1.0 million mt CO<sub>2</sub> per year (3,000 tons/day).
- Study the interaction of two separate plumes.



# Decatur ICCS の挑戦: 圧入後監視期間

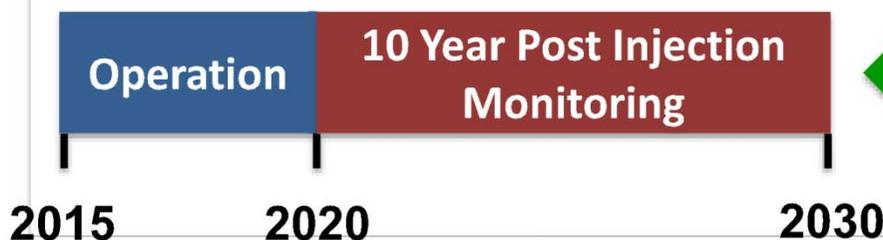


## Main Challenges

### Alternative PISC Timeframe

- Default PISC is 50 Years
- Applicant allowed to petition for an alternative timeframe
- ADM Proposed 10 Year PISC

- Reservoir Pressure Decline
- Plume Stabilization
- CO<sub>2</sub> Partitioning

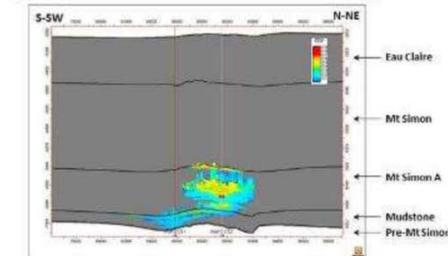
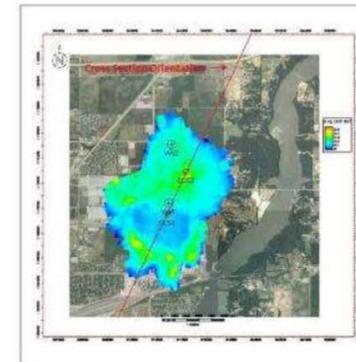


Demonstrate Non-endangerment

監視期間: 50年から10年に短縮

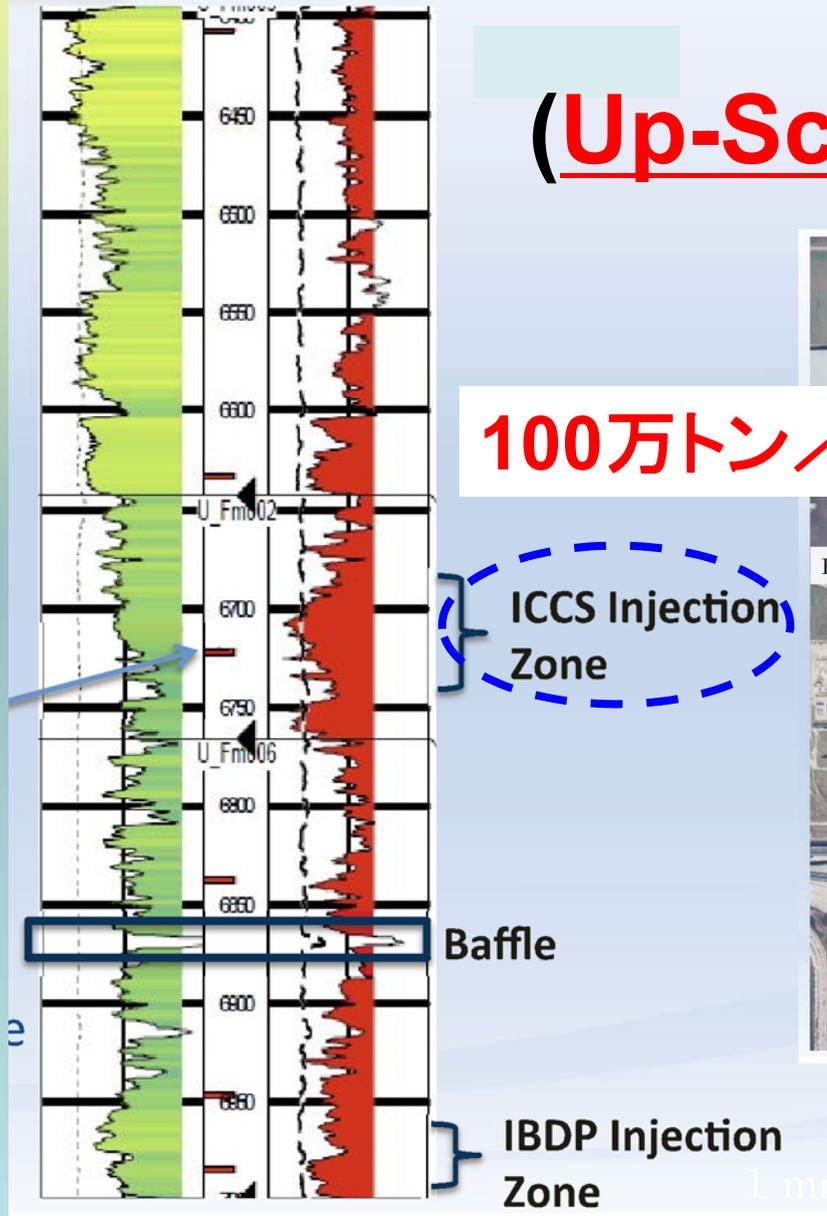


Extent of Plume & Saturation Cross Section  
January 1, 2030 [SCO<sub>2</sub> ≥ 1.0%]

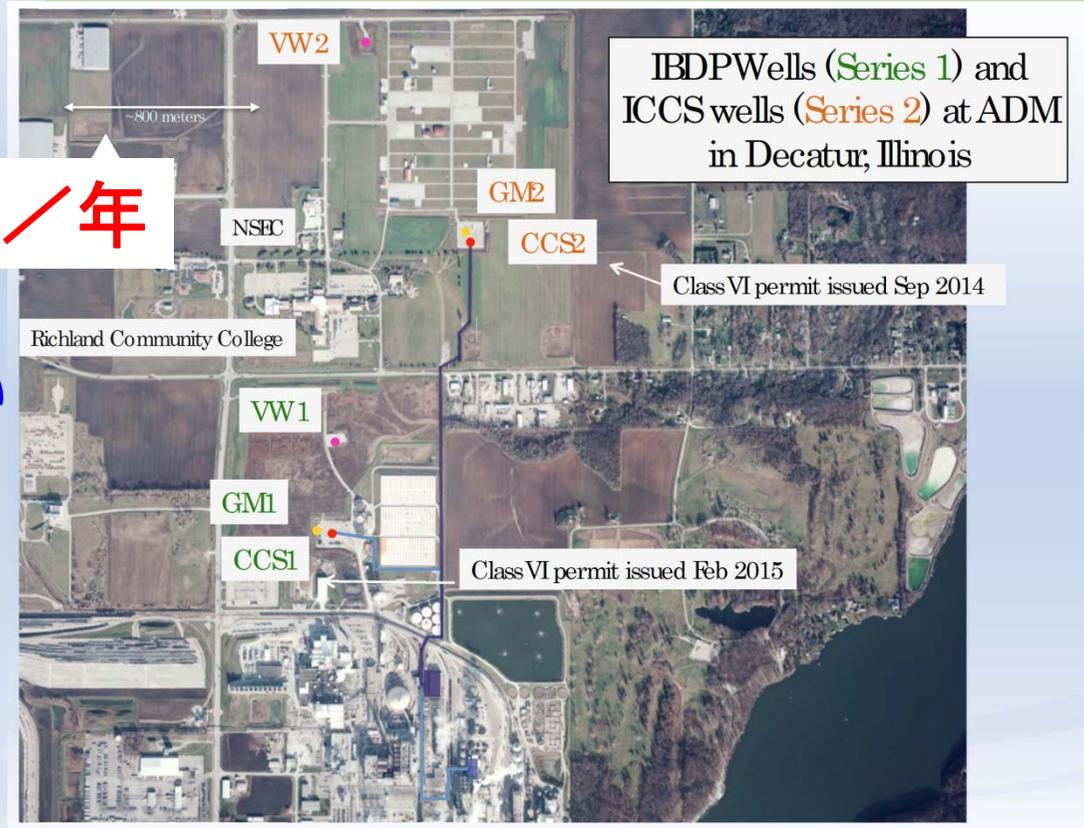


# Decaturから何が学べるか

## (Up-Scaling@日米CCS協力)



100万トン/年



約100万トン/3年間(圧入完了)

技術的・法対応・社会的

# QUESTプロジェクトの概要(1/3)

- ✓ 分離・回収
- ✓ 輸送 (pipeline)
- ✓ 貯留

オイルサンド改質



CO<sub>2</sub>貯留量:  
約100万トン／年 x 25年間



圧入井: 3本  
(複数坑井)

■ DNV - Storage & MMV plans certified

# QUESTプロジェクトの概要(2/3)

## 複数坑井

ある間隔で掘削された3本の圧入井



CO<sub>2</sub>回収量 & 地質特性



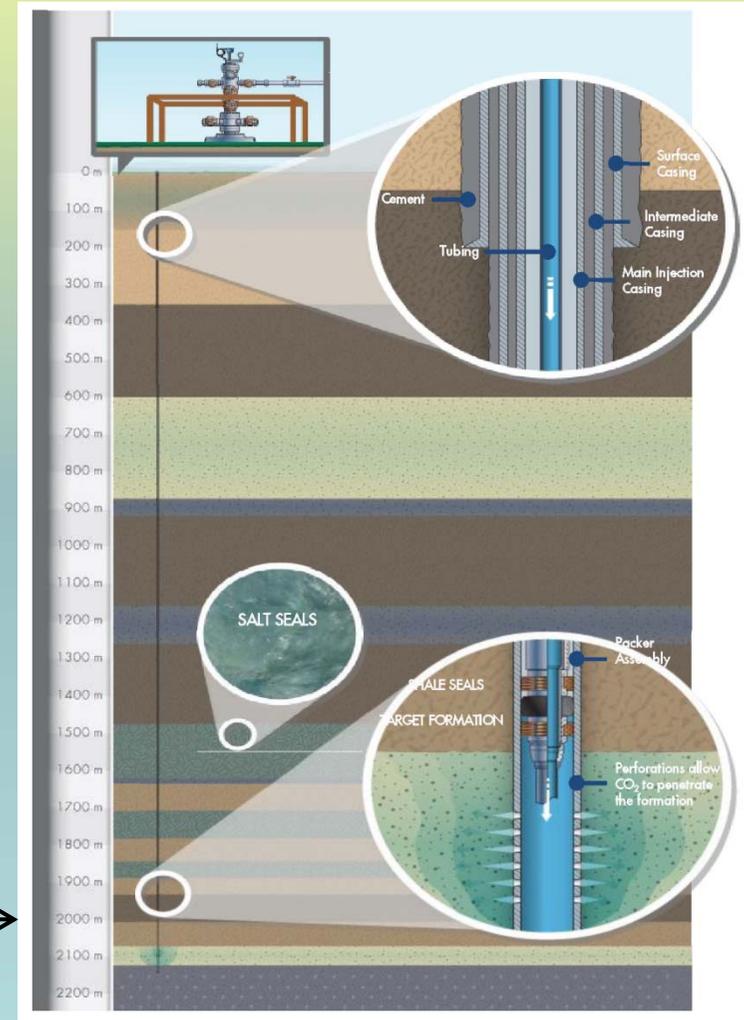
複数の圧入井



位置決め & 掘削時期

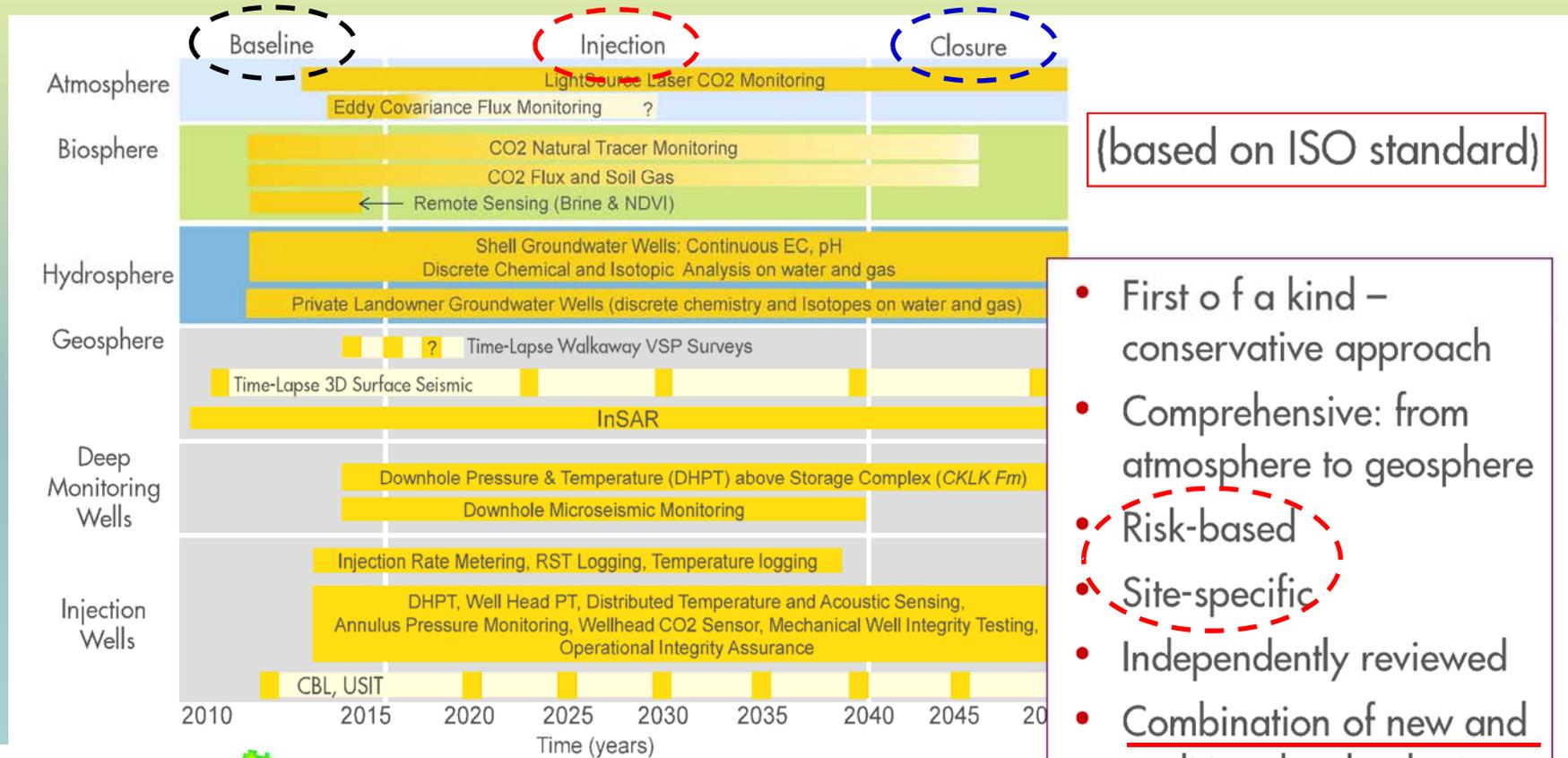
貯留層(多孔質砂岩)

深度: 約2,000m  
孔隙率: 約17%  
浸透率: 約1,000md



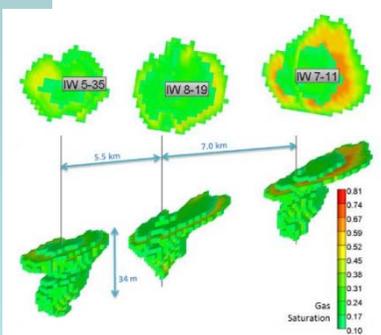
# QUESTプロジェクトの概要 (3/3)

## MMV: Measurement, Monitoring and Verification Plan



(based on ISO standard)

- First of a kind – conservative approach
- Comprehensive: from atmosphere to geosphere
- Risk-based
- Site-specific
- Independently reviewed
- Combination of new and traditional technologies
- Baseline data collected before start-up



### CO2分布予測

(地質モデルを用いた流動シミュレーション)

# 目次

- 国内の大規模貯留実用化に向けて
  - ✓ 長岡圧入実証試験(陸域)、苫小牧大規模実証試験(海域)、実用化(**Up-Scaling**)
- 海外の大規模CO<sub>2</sub>地中貯留から学ぶ
  - ✓ ICCS(米国) / **QUEST(カナダ)**
- 大規模地中貯留の安全管理技術開発
  - ✓ 技術研究組合の取り組み及び**その役割**

# 二酸化炭素地中貯留技術研究組合の概要

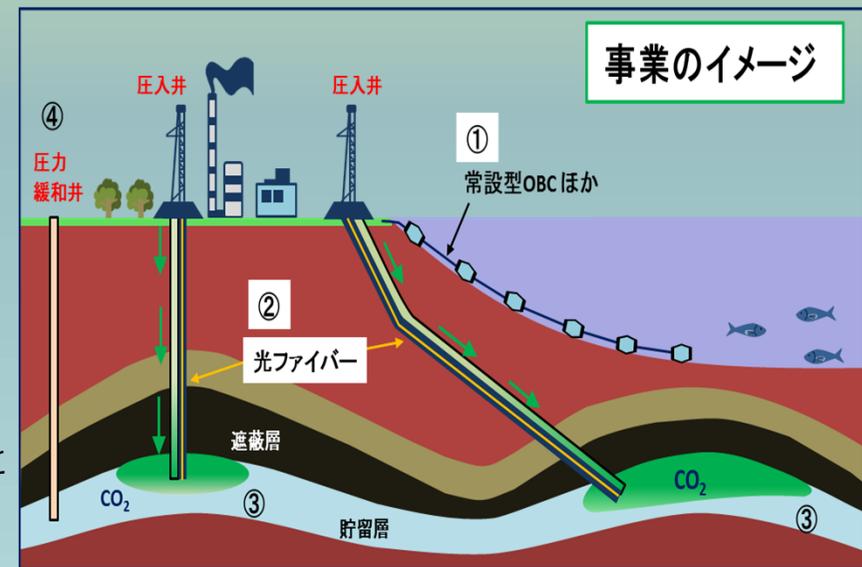
- **設立年月日**：平成28年4月1日
- **理事長**：山地憲治
- **組合員**：（4企業、1国立研究開発法人、1公益財団法人）  
石油資源開発（株）、大成建設（株）、国際石油開発帝石（株）、応用地質（株）、  
国立研究開発法人産業技術総合研究所、公益財団法人地球環境産業技術研究機構
- **所在地**：京都府木津川市木津川台9-2

## ○組合設立の目的

CCSは地球温暖化対策の重要な温暖化対策技術として、国内外に認識されているが実用化に当たっては、**安全かつ大規模・効率的**なCO<sub>2</sub>貯留技術の実現が必須である。当組合では我が国の貯留層に適した**実用化規模**（100万トン/年）でのCO<sub>2</sub>貯留技術を開発するとともに、CCSの**社会受容性の獲得**やCCS技術の**海外展開を志向**した研究開発を行う。

## ○実用化の方向性

エネルギー基本計画（H26年4月閣議決定）において、「2020年頃のCCS技術の実用化を目指した研究開発」等を推進することとされており、当組合では、**実証規模での研究成果をベース**とし、実用化規模へのup-scalingに係る**(1) CO<sub>2</sub>圧入・貯留の安全管理技術の確立**、**(2) 大規模貯留層有効圧入・利用技術の確立**、**(3) CCS普及環境整備・基準の整備**を行い、地球温暖化対策としてのCCS促進に寄与する。



- ① 自然地震や微小振動観測結果を基に、ATLSによる圧入安全管理
- ② 光ファイバーを利用した地層安定性や廃坑井の健全性監視
- ③ 圧入中のCO<sub>2</sub>挙動モニタリングを基に、圧入後の長期挙動予測
- ④ CO<sub>2</sub>圧入井や圧力緩和井の最適配置及び貯留率向上
- ⑤ CO<sub>2</sub>貯留安全管理プロトコル（IRP）の構築

# 技術研究組合の活動方針

- CCSの実用化に当っては、安全かつ大規模・効率的なCO<sub>2</sub>地中貯留技術の実現が必須である。当組合では我が国の貯留層に適した実用化規模（100万トン/年）でのCO<sub>2</sub>地中貯留技術を開発するとともに、CCSの社会受容性の獲得などを志向した研究開発を行う。
- 「2020年頃のCCS技術の実用化を目指した研究開発」の推進に当たって、当組合では、実証規模での研究成果をベースとし、実用化規模へのup-scalingに係る (1) CO<sub>2</sub>圧入・貯留の安全管理技術の確立、(2)大規模貯留層有効圧入・利用技術の確立、(3)CCS普及環境整備・基準の整備を行う。

# H28年度事業計画

研究課題		実施組合員
(1)大規模CO <sub>2</sub> 圧入・貯留の 安全管理技術 の開発	① <b>圧入安全管理システムの開発</b>	RITE、JAPEX、 INPEX
	② CO <sub>2</sub> 長期モニタリング技術の確立	AIST
	③ 大規模貯留層を対象とした <b>地質モデル構築、貯留層評価</b>	RITE、JAPEX、 応用地質
	④ 大規模貯留層に適したCO <sub>2</sub> 挙動シミュレーション、長期挙動予測手法の 確立	RITE、AIST、 大成建設、 応用地質
	⑤ <b>光ファイバー</b> を利用した <b>地層安定性</b> や廃坑井の健全性監視システムの 開発	RITE、AIST、 JAPEX、INPEX
	⑥ CO <sub>2</sub> 漏出検出・環境影響評価総合システムの構築	RITE
(2)大規模 貯留層の有効 圧入・利用技術 の開発	① CO <sub>2</sub> 圧入井や圧力緩和井の最適配置技術の確立	RITE、大成建設
	② CO <sub>2</sub> <b>溶解促進技術</b> の適用による貯留効率向上	RITE、JAPEX
(3)CCS普及 条件の整備、 基準の整備	① CO <sub>2</sub> 貯留安全管理プロトコル(IRP)の整備	RITE
	② 苫小牧実証データの提供による技術事例集の作成、海外機関との連携	RITE
	③ 社会受容性の向上、国際標準化との整合	RITE

# 二酸化炭素地中貯留技術研究組合

技術部長 薛 自求 (RITE)

## (1) 大規模CO<sub>2</sub>圧入・貯留の安全管理技術開発

### 技術研究グループ①

GL: 薛 自求 (RITE)  
場所: RITE京都本部

- ATLS安全管理技術開発: RITE、JAPEX、INPEX
- 地質モデル構築等: RITE、JAPEX、応用
- 長期挙動予測技術確立: RITE、AIST、大成、応用
- 地層安定性監視技術の開発等:  
RITE、AIST、JAPEX、INPEX

### 技術研究グループ②

GL: 徂徠 正夫 (AIST)  
場所: AISTつくば本部

- CO<sub>2</sub>長期モニタリング技術確立

### 技術研究グループ③ (実用化研究)

GL: 渡邊 貴大 (INPEX)  
場所: INPEX技術本部

- 地層安定性監視技術の実用化に向けた評価、検討

### 技術研究グループ④ (実用化研究)

GL: 山本 肇 (大成建設)  
場所: 大成建設技術センター

- 大規模貯留層に適したCO<sub>2</sub>挙動シミュレーション技術の実用化研究

成果・課題の共有

## (2) 大規模貯留層の有効圧入・利用技術の開発

### 技術研究グループ①

GL: 薛 自求 (RITE)  
場所: RITE京都本部

- 大規模貯留層を対象とした複数坑井最適配置技術の確立: RITE、大成
- CO<sub>2</sub>溶解促進技術適用による貯留率向上: RITE、JAPEX

### 技術研究グループ⑤ (実用化研究)

GL: 中野 正則 (JAPEX)  
場所: JAPEX技術本部

- 大規模貯留層の有効圧入・利用技術の実用化に向けた評価、検討: JAPEX

成果反映

## (3) CCS普及環境整備・基準の整備

### 技術研究グループ①

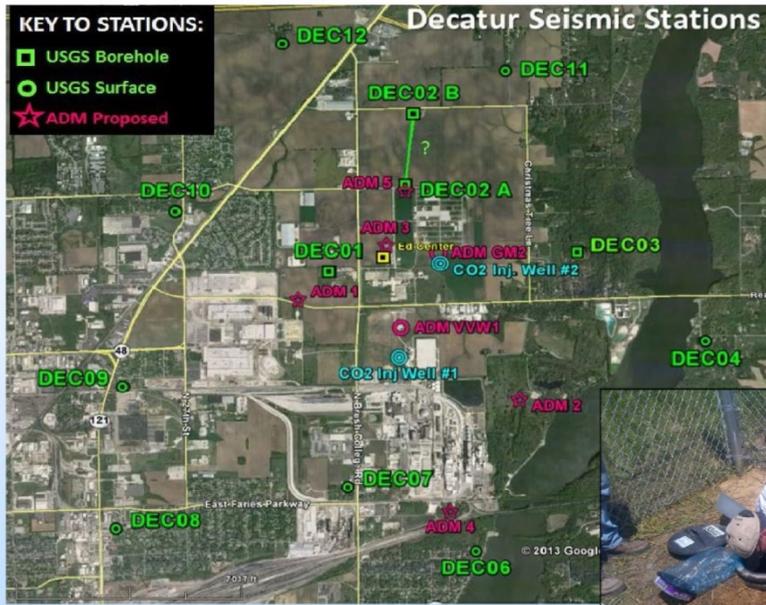
GL: 薛 自求 (RITE)  
場所: RITE京都本部

- 社会受容性向上、CO<sub>2</sub>貯留安全性管理プロトコル (IRP) の構築: RITE
- 技術事例集完備、海外連携、国際標準化との整合: RITE
- 実規模貯留プロジェクト管理システムの構築、苫小牧や適地調査サイトへの適用: RITE

連携

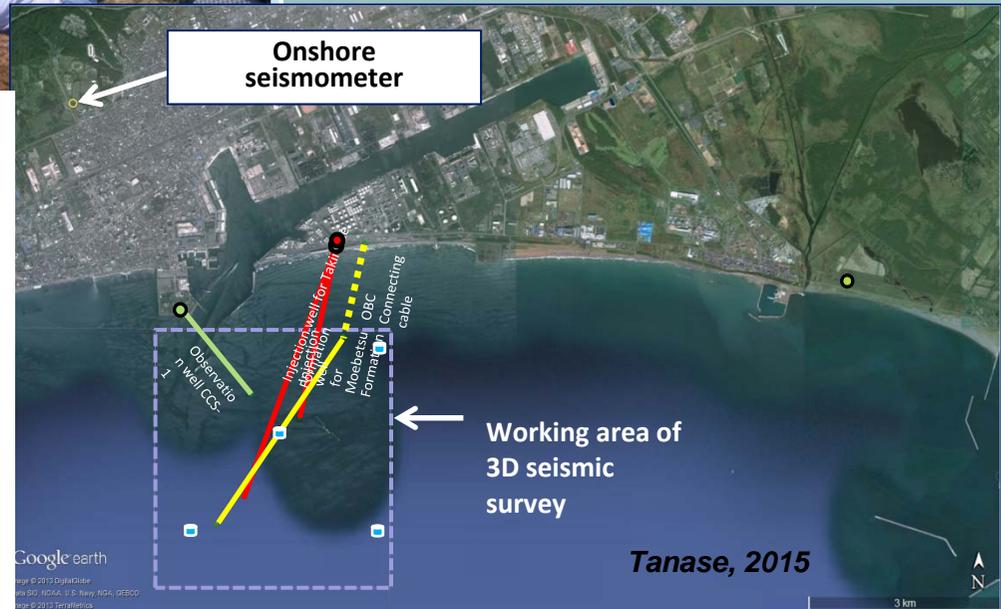
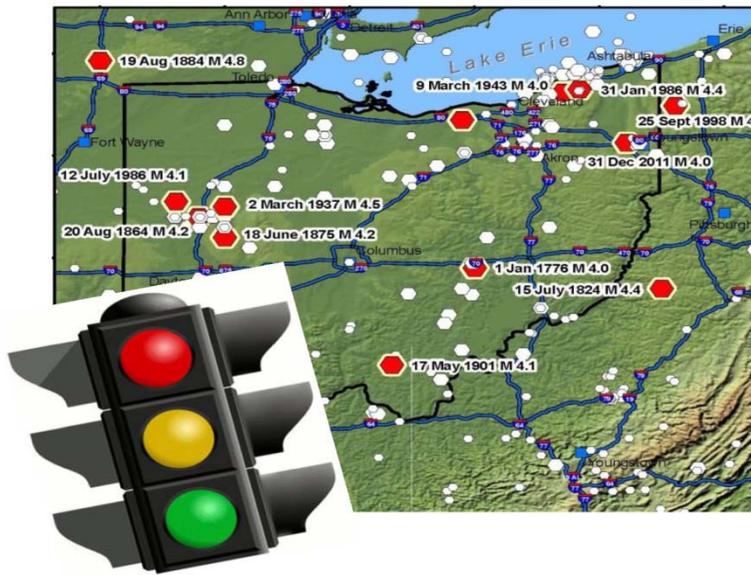
二酸化炭素削減技術実証試験事業 (苫小牧実証試験) 及び二酸化炭素貯留適地調査事業: 日本CCS調査 (株)

# 圧入安全管理システム(ATLS)の開発



Decatur との日米CCS協力関係構築  
 (圧入量増加によって、微小振動に違いはあるか)

苫小牧大規模実証事業 との緊密な連携  
 (日米の大規模圧入サイトから知見獲得)



ATLS: Advanced Traffic Light System

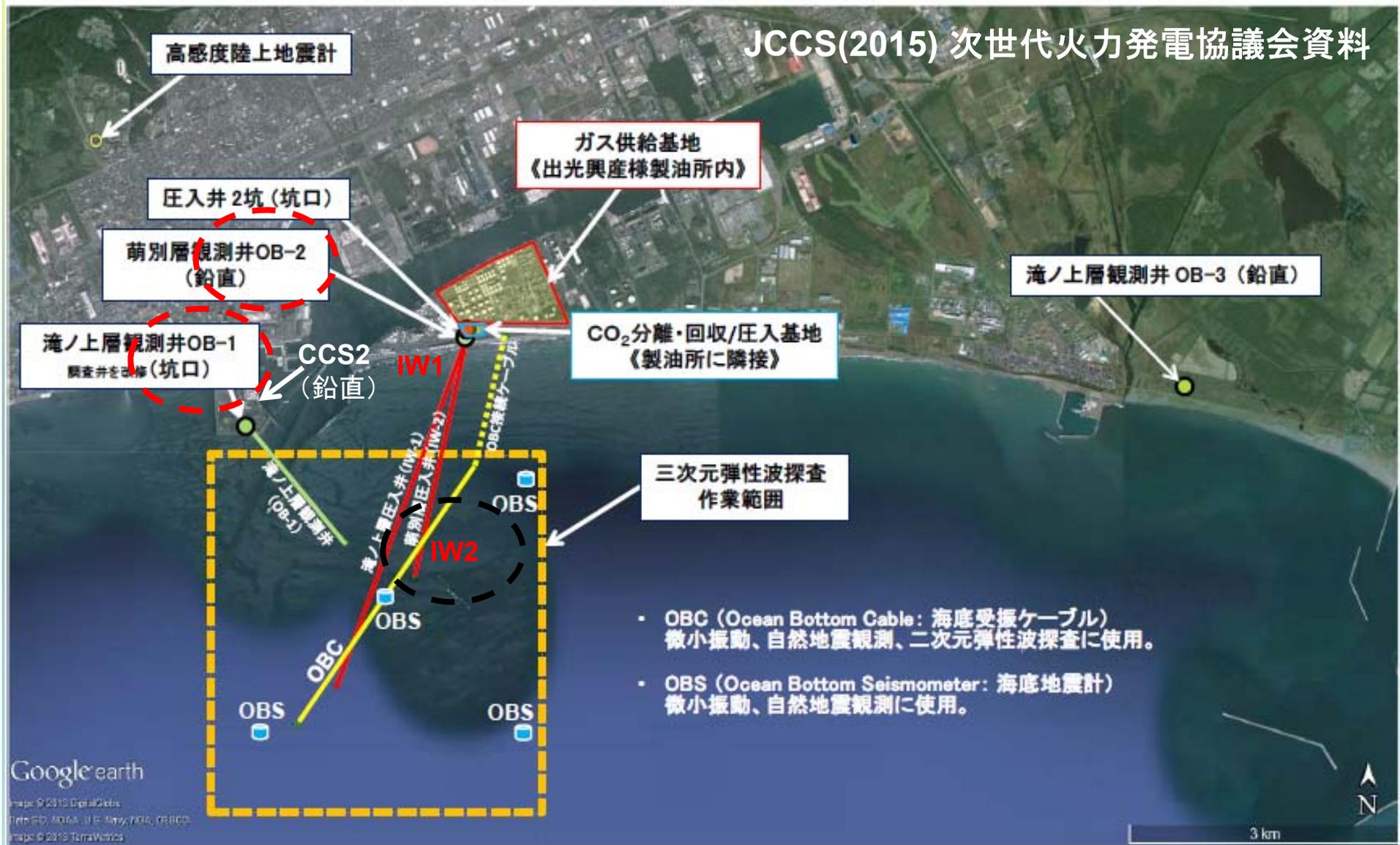
# 流体圧入、誘発地震及びリスクマネジメント

◆ It is of critical importance that **fluid injection-induced seismicity be better understood so that any potential hazards can be mitigated.**

- (1) the **site-specific factors** which can lead to induced seismicity, e.g., why some wells trigger earthquakes and the vast majority do not;
- (2) **how to predict** the maximum magnitudes and rates of potential induced seismicity;
- (3) **how can** fluid injection-induced earthquakes **be controlled**;
- (4) **how to estimate** the hazards posed by induced earthquakes;
- (5) **how to mitigate** the impacts of induced earthquakes.

One approach for direct mitigation of induced seismicity is a calibrated control system, dubbed the “traffic light” system.

# 大規模貯留層の評価 & 地質モデリング



坑井の検層データ(OB-1,-2; IW2) & 弾性波探査 →→→ 萌別層の物性・連続性

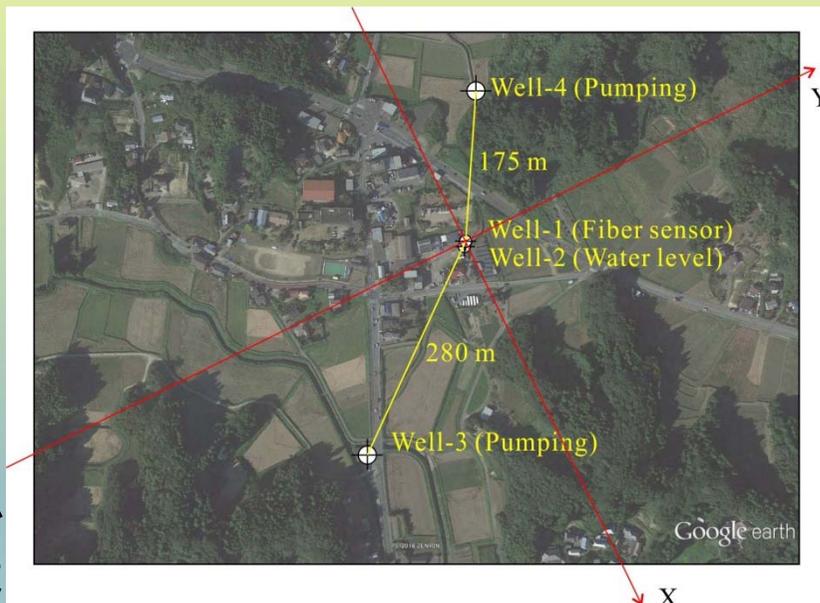
# QUEST プロジェクトにおける貯留層評価 (地質的不確実性)

## Uncertainty

- Insufficient permeability – will only become apparent with the well has been drilled
- Insufficient connectivity – the further away the greater the exposure to this risk

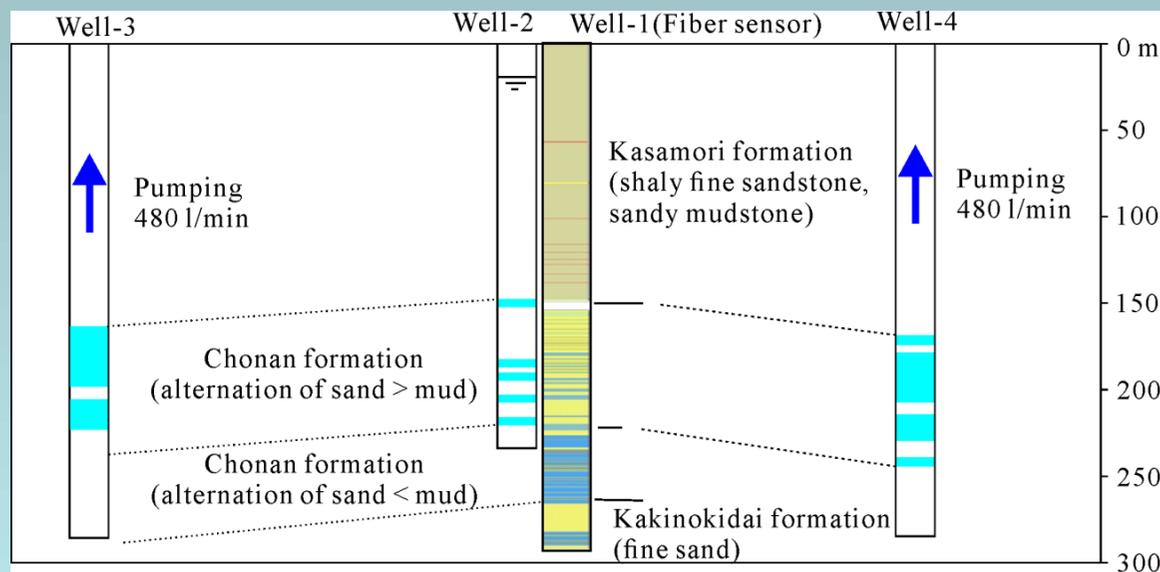
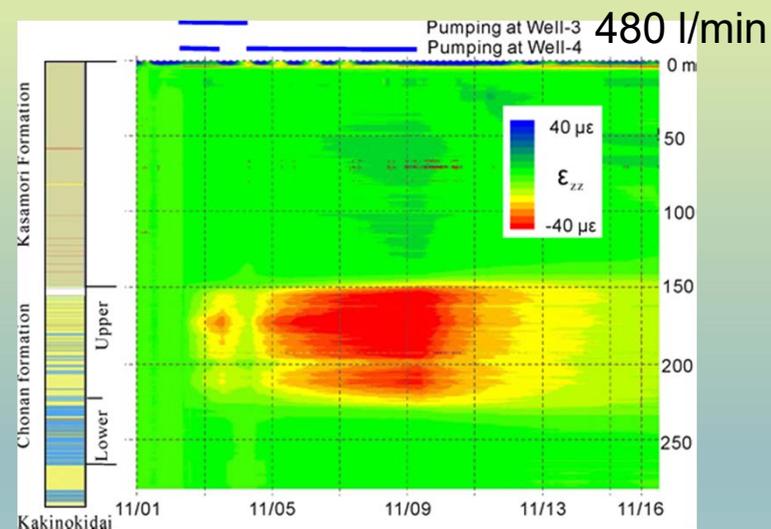
貯留層の浸透率(圧入性): 坑井掘削後に判明  
貯留層の連結性: 遠くほどよりリスクに現れる

# 光ファイバーを利用した地層安定性評価

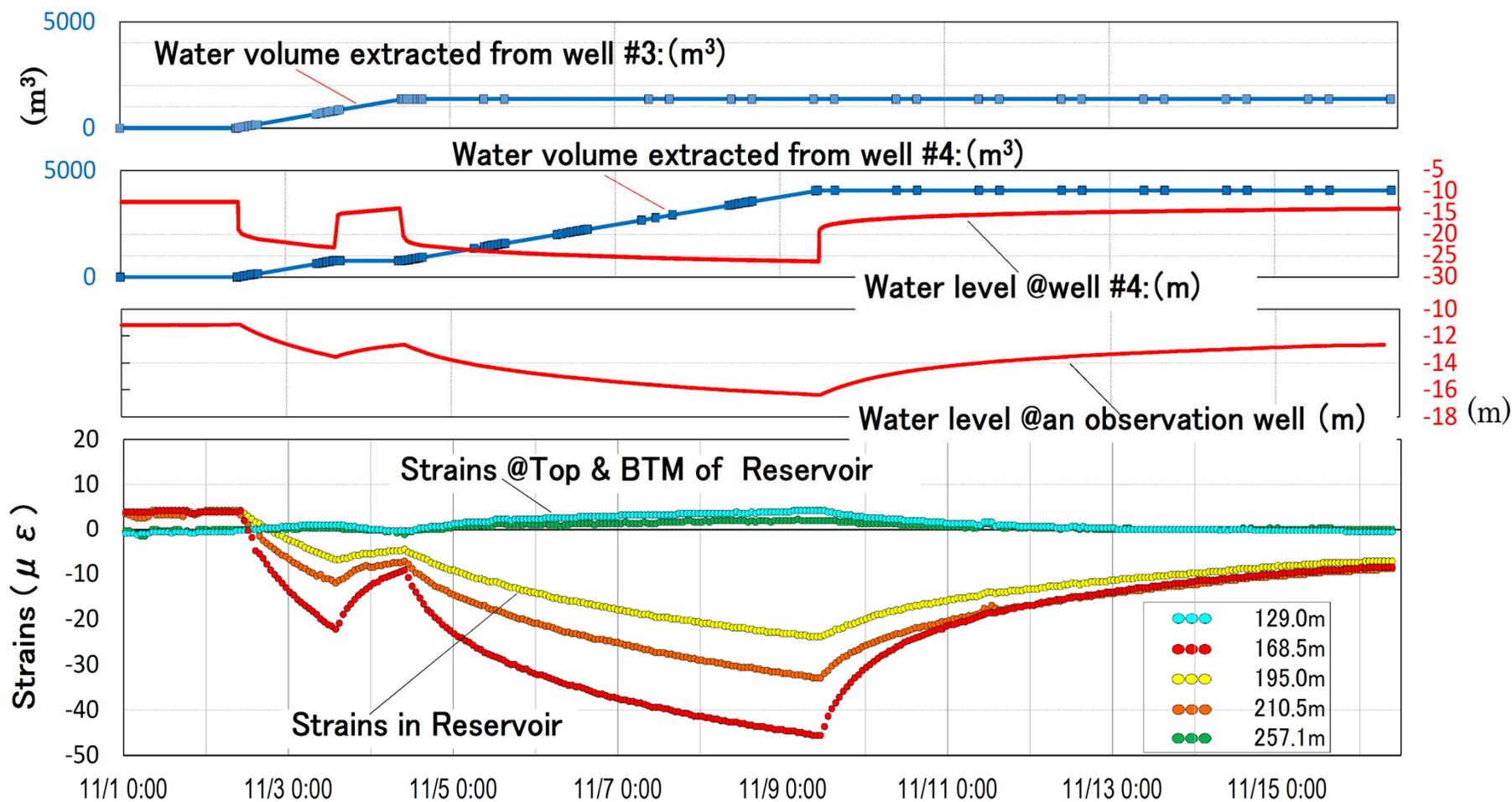


~2.5°

地層産状

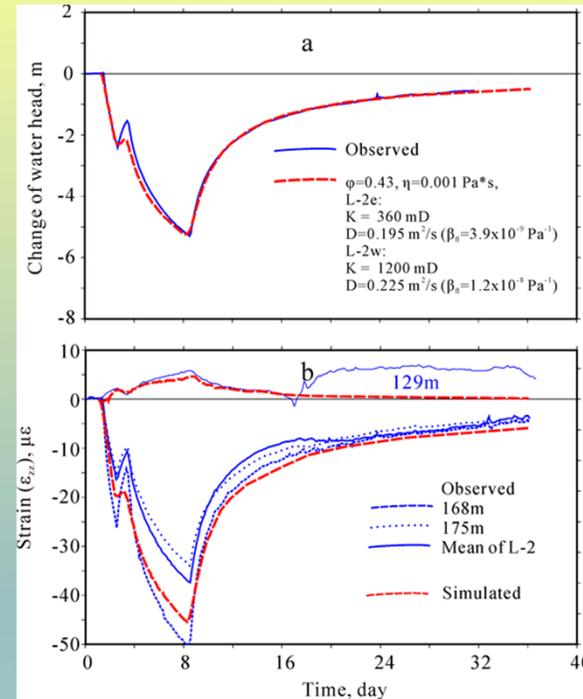
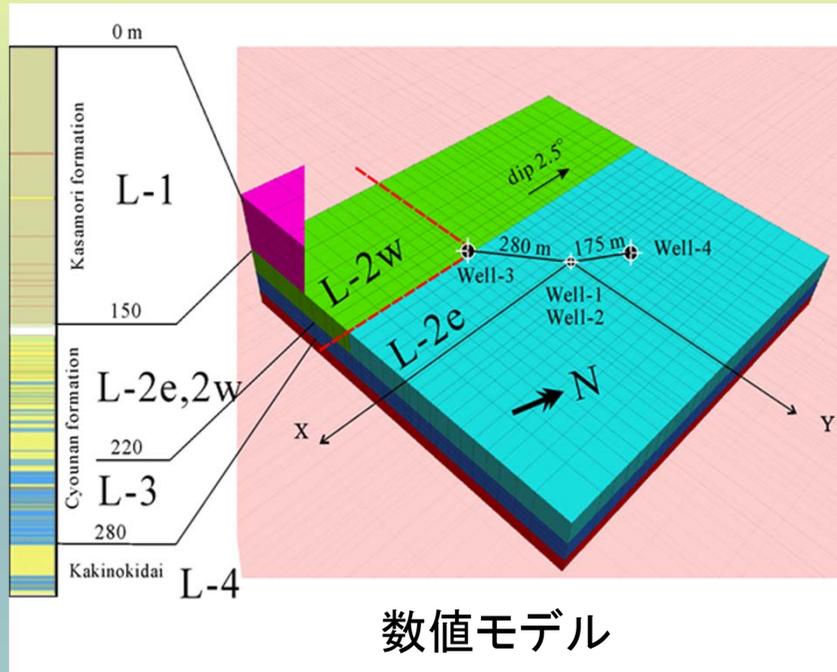


# 揚水試験時、光ファイバーによって測定された地層変形の一例



(Xue and Hashimoto, 2016)

# 揚水試験時の地層変形を対象とする ジオメカニクス解析



観測データ(水位・線歪)と  
シミュレーション結果との対比

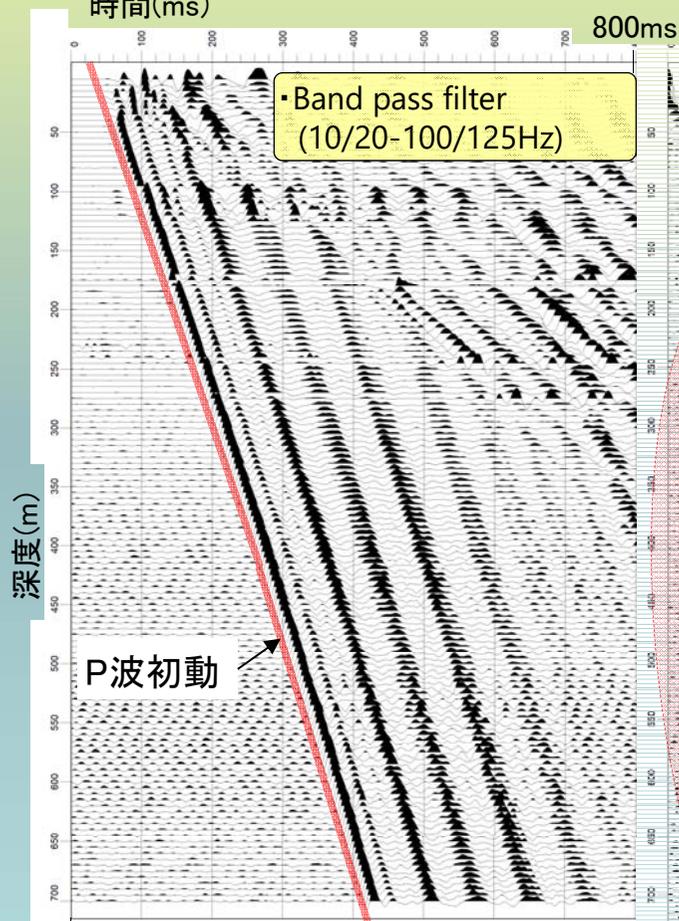
Table 1. Major hydraulic and mechanical properties

Property	L-1	L-2e	L-2w	L3	L4
Bulk modulus, (GPa)	0.4	0.6	0.6	0.7	0.6
Shear modulus, (GPa)	0.23	0.35	0.35	0.4	0.3
Pore compressibility ( $\beta_{pv}$ ), $\times 10^{-9} \text{Pa}^{-1}$	2.5	3.9	12	2.5	2.5
Biot's coefficient	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ini. Perm.(k0), (mD)	0.02	360	1200	10	1
$\beta$ , $K = K_0(1 + \beta\Delta\varepsilon_v)$	100	100	100	100	100
Porosity	0.15	0.43	0.15	0.15	0.15

# 光ファイバーによるDAS/VSP測定

ジオフォン (スタック1回)

時間(ms)

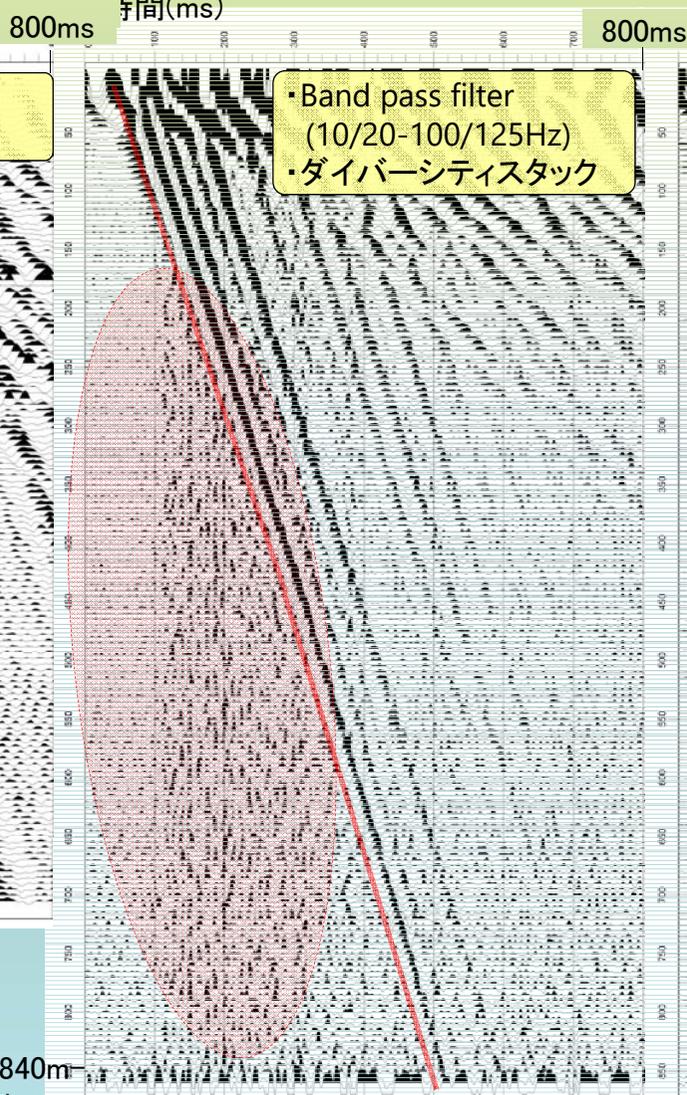


P波初動

光ファイバー (スタック36回)

昨年度

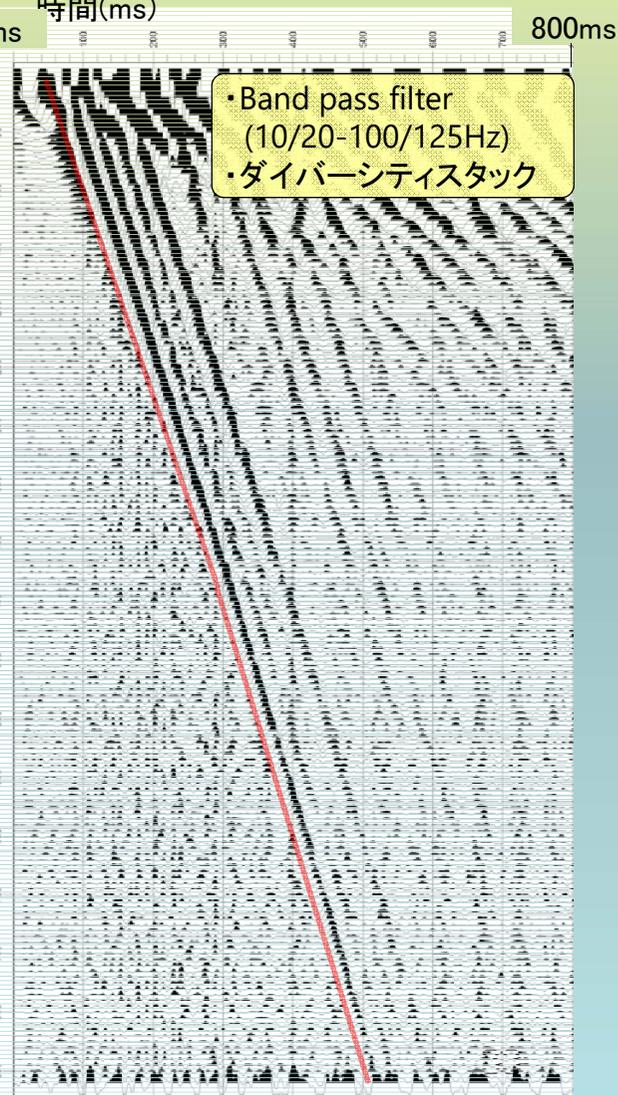
時間(ms)



光ファイバー (スタック36回)

信号処理改良後

時間(ms)



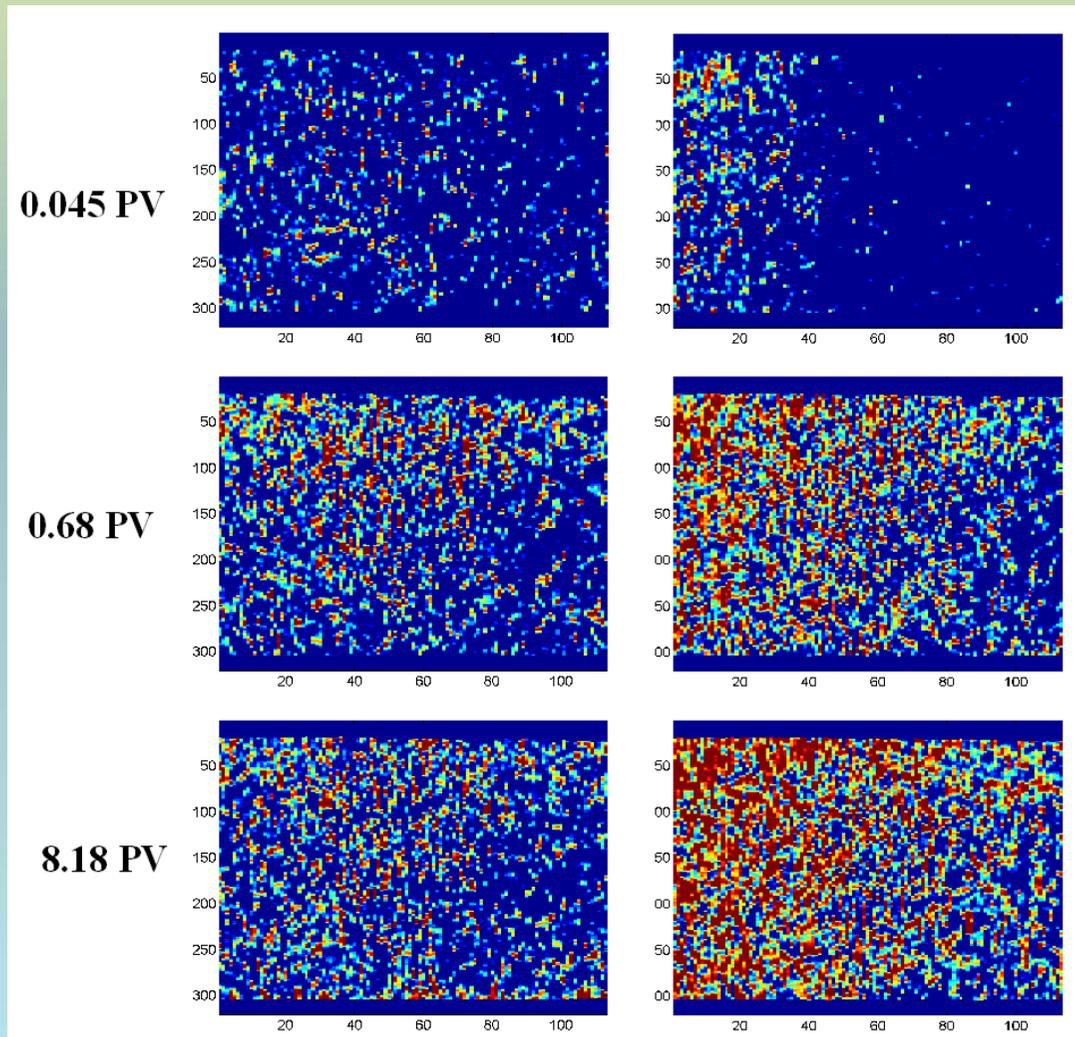
840m

840m

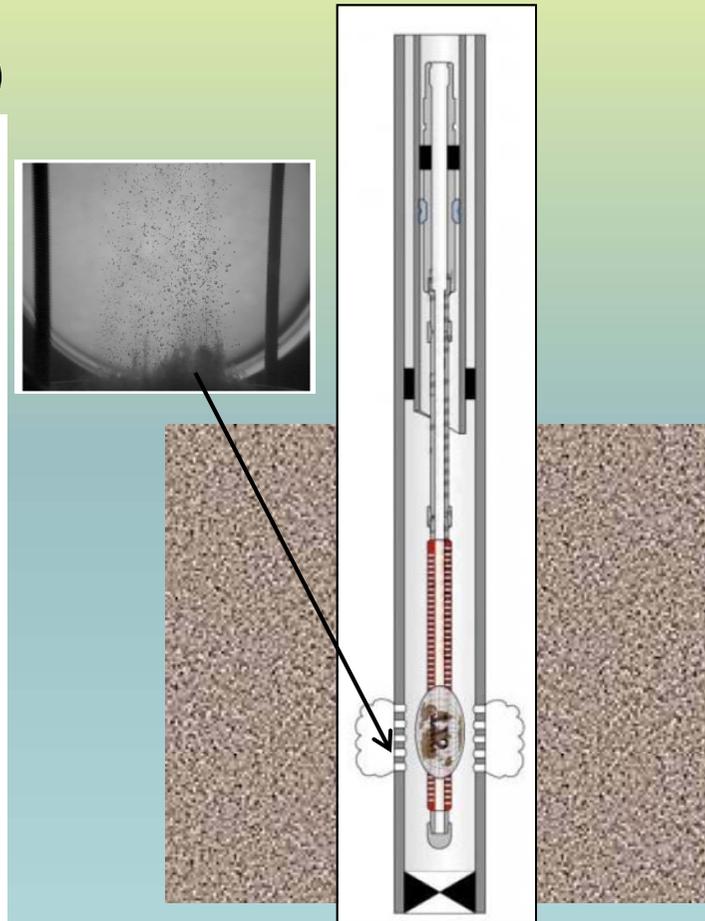
(Xue and Hashimoto, 投稿予定)

# マイクロバブルCO<sub>2</sub>圧入による溶解促進 & 貯留効率の向上

CO<sub>2</sub> distribution  
(left: grooved disc; right: special filter)

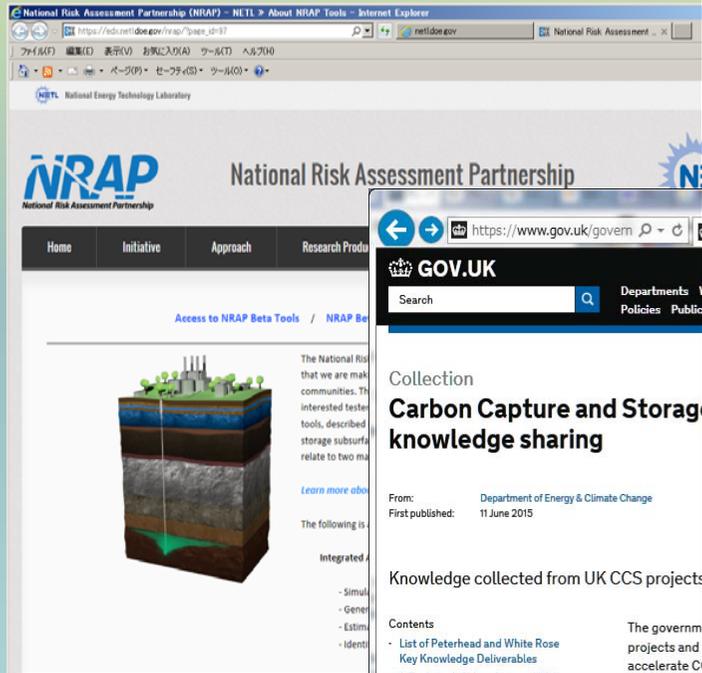


## 坑内ツールの開発

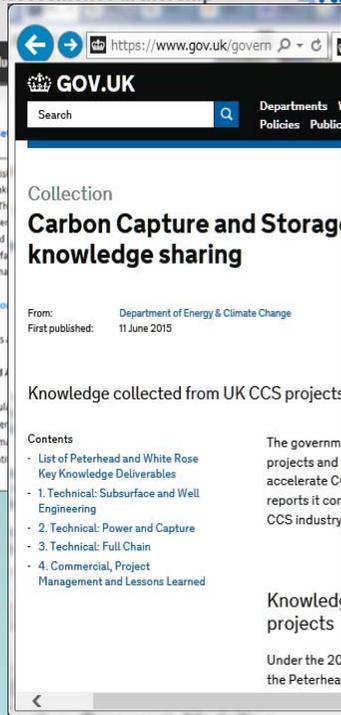


(Thru-Tubing Systems HP:  
<http://www.thrutubingsystems.com/>)

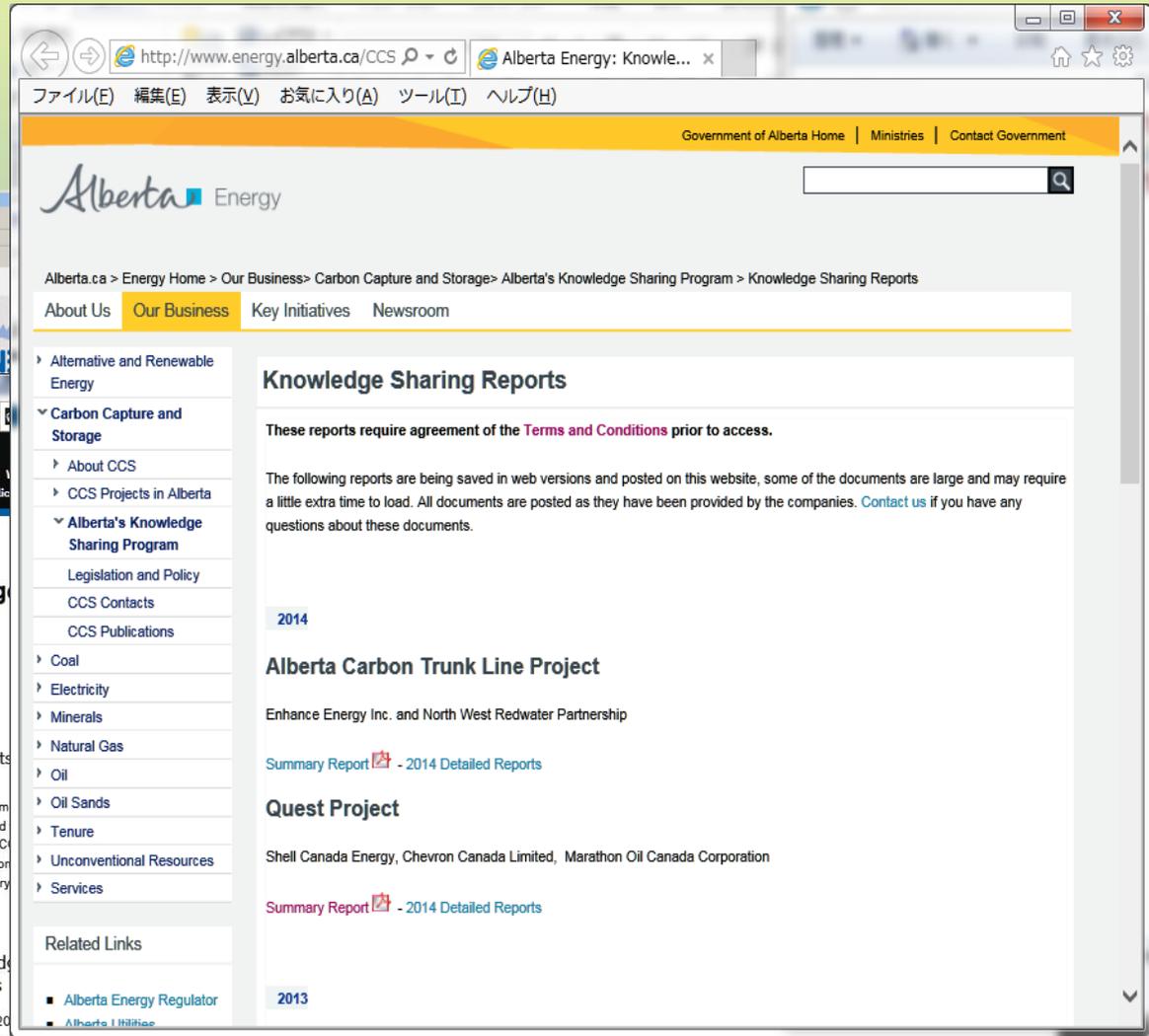
# CO<sub>2</sub>地中貯留におけるリスク評価



US (NRAP)



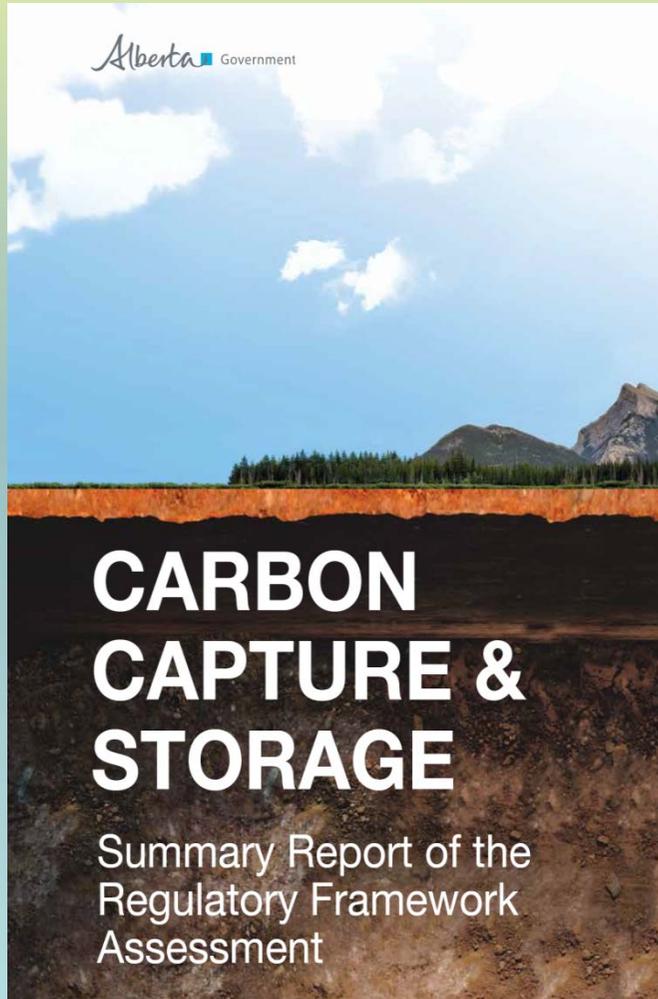
UK (CCS Competition等)



Alberta, CANADA (QUEST)

# Canada (Shell, QUEST)

操業に関するリスクを網羅的に評価  
貯留容量リスク、漏洩リスク・・・



## Quest CCS Project Capacity Risk and Uncertainty Review

Project	Quest CCS Project
Document Title	Capacity Risk and Uncertainty Review
Document Number	07-3-AA-6619-0001
Document Revision	02

## Quest CCS Project Containment Risk and Uncertainty Review

Project	Quest CCS Project
Document Title	Containment Risk and Uncertainty Review
Document Number	07-3-AA-6619-0004
Document Revision	02
Document Status	Issued for Approval

Owner / Author	
Issue Date	
Expiry Date	
ECCN	
Security Classification	
Disclosure	
Revision History	

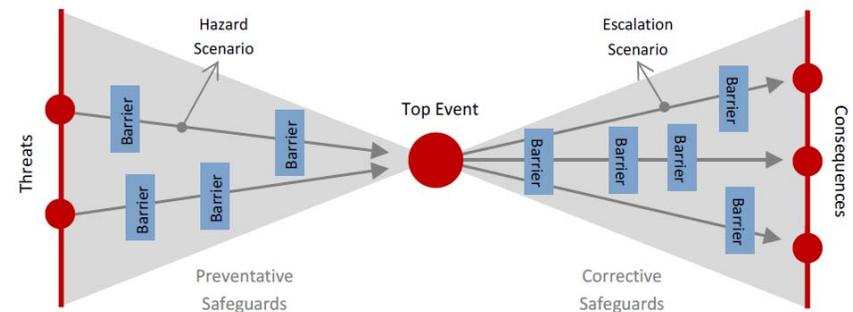
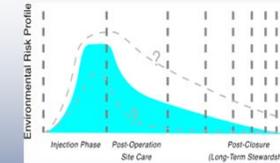
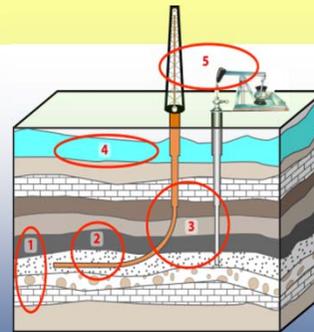
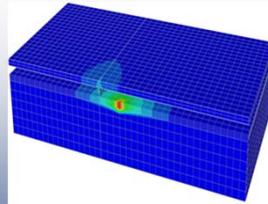
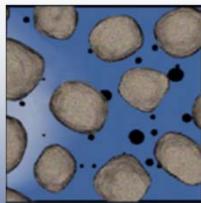


Figure 3-1 Schematic Diagram of the Bowtie Method



## National Risk Assessment Partnership

Leveraging DOE's competency in science-based prediction for engineered-natural systems to build confidence in the business case for CO<sub>2</sub> storage.

### Building toolsets and the calibration & validation data to quantify ...

- Potential impacts related to release of CO<sub>2</sub> or brine from the storage reservoir
- Potential geomechanical impacts due to injection of CO<sub>2</sub>

#### Technical Team



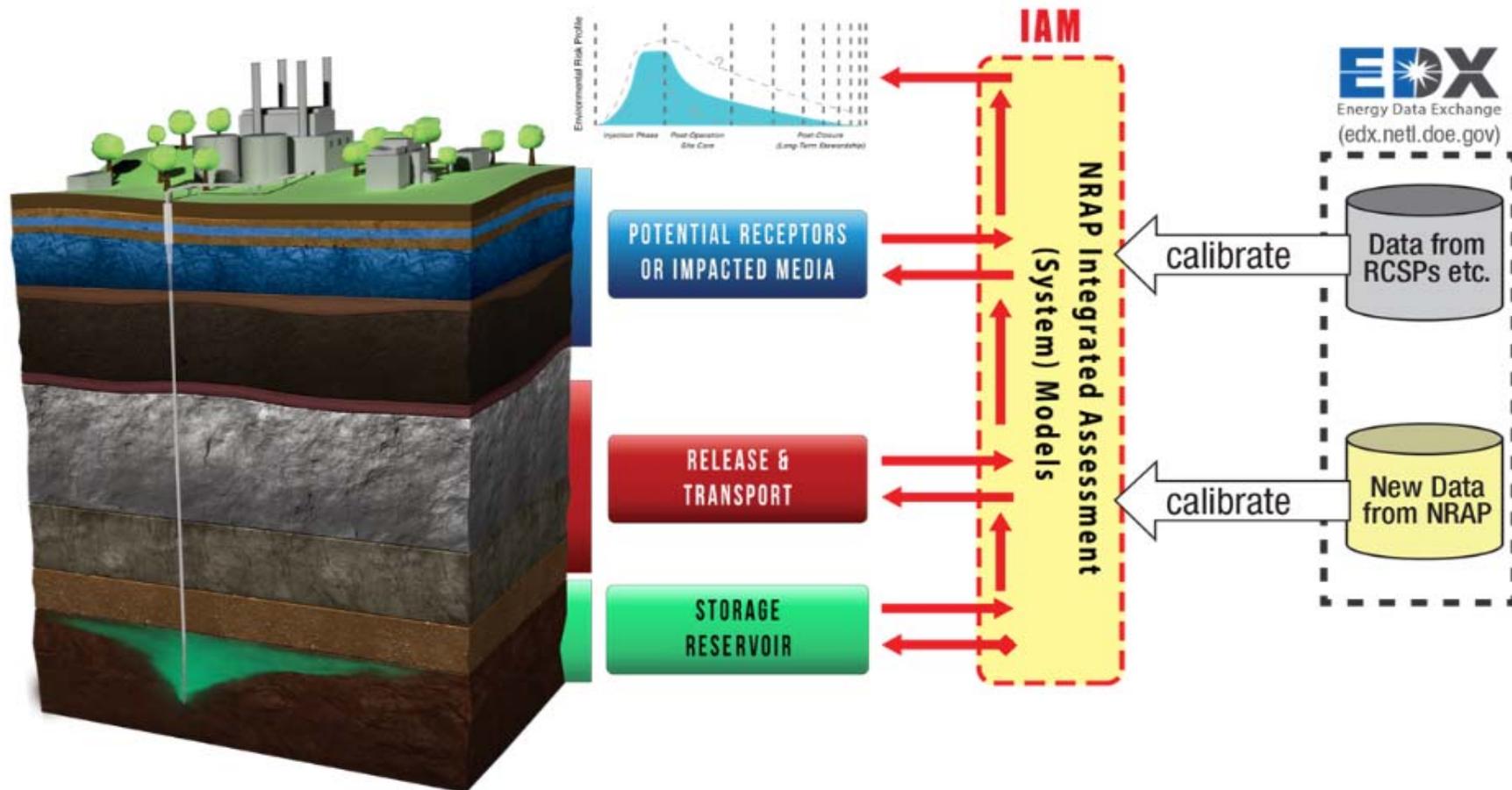
#### Stakeholder Group



# NRAP tools の評価&わが国への適用検討

## NRAP Approach

Assessing risks and quantifying uncertainties to remove barriers to full-scale geologic CO<sub>2</sub> storage deployment



# 万一のCO<sub>2</sub>漏出に対する環境影響評価

- **CO<sub>2</sub>拡散シミュレーション手法の開発**

- 数値モデルの開発 ⇒ 季節変動スケール以上の期間、CO<sub>2</sub>拡散範囲が数10kmスケールまでの計算可能なモデル

- **生物影響評価手法の開発**

- CO<sub>2</sub>の生物への影響調査: 生物影響データベース構築、微生物CO<sub>2</sub>曝露実験 ⇒ 生物影響閾値の提案 ( $\Delta p\text{CO}_2 = 200 \mu\text{atm}$ )
- 英国実海域CO<sub>2</sub>放出実験(QICS)への参加 ⇒ 実海域での生物影響研究

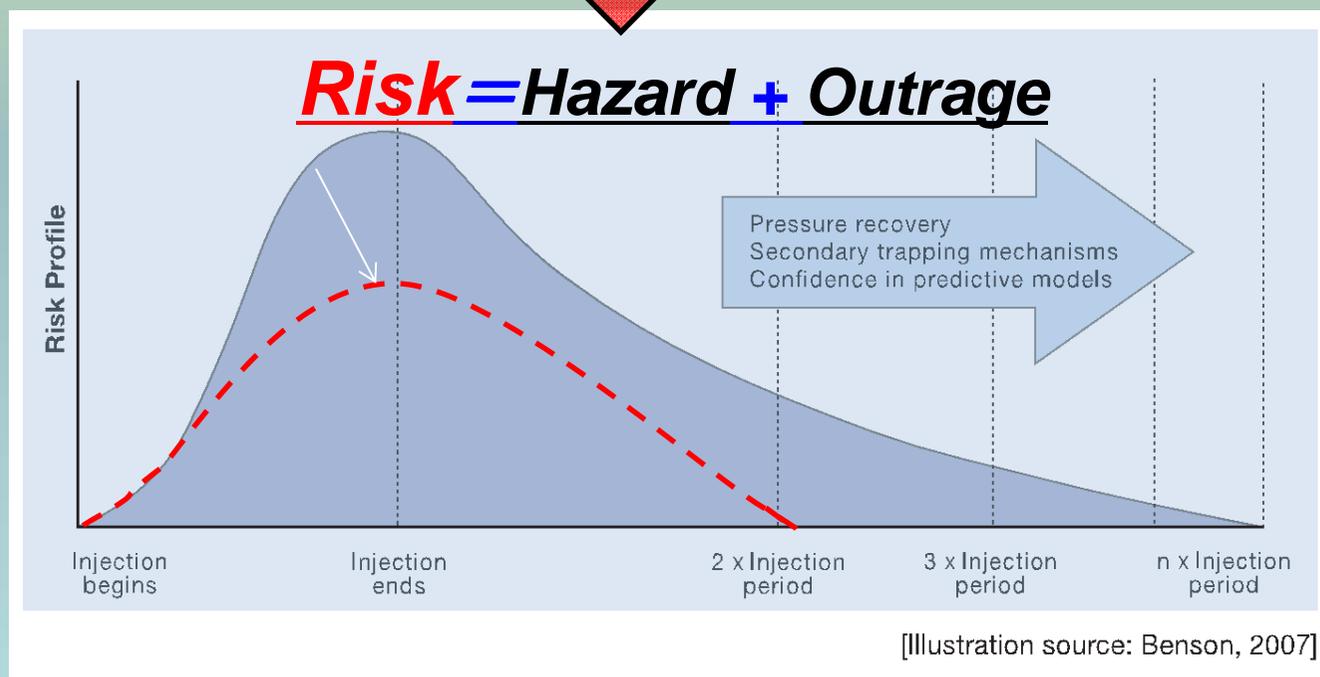
- **CO<sub>2</sub>漏出検知手法の開発**

- 気泡検知手法 ⇒ 音響探査機器による検知
- 溶存態CO<sub>2</sub>検知手法 ⇒ 溶存態CO<sub>2</sub>濃度と溶存酸素濃度による異常値(漏出の恐れ)の判定基準

# CO<sub>2</sub>圧入実証試験より、不確実性への理解を深め、 リスクマネジメントを学ぶ

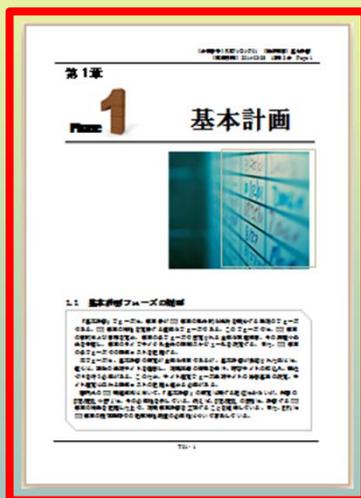
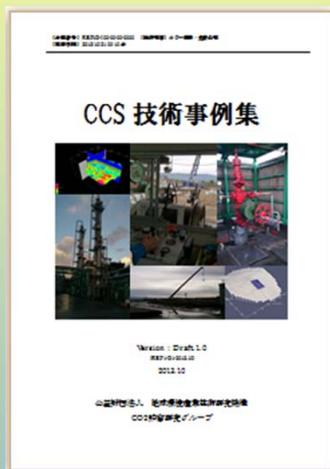
$$\text{Risk} = \text{Consequence Severity} \times \text{Probability}$$

Scientific Knowledge & Evidence-based Risk Communication

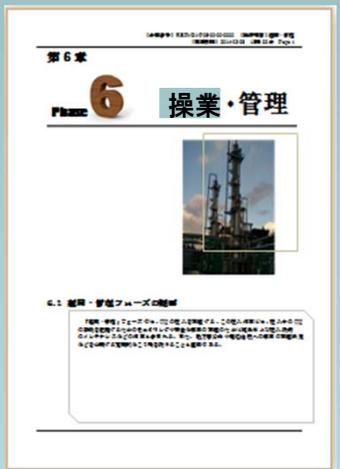
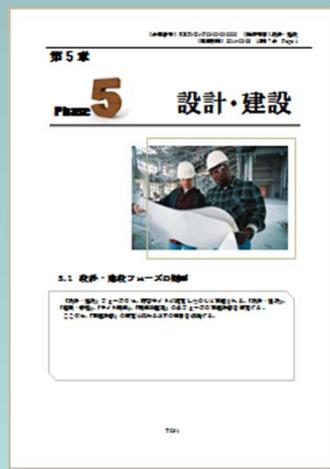


**Reducing Uncertainty / Mitigating Risks  
to the Manageable Levels !**

# CCS技術事例集の作成



長岡実証試験＋海外事例に基づき、Vol.1を完成



付録

- ・CCS技術事例のデータ
- ・CCSとは
- ・長岡実証試験事例
- ・用語集/略語集
- ・CCS技術の解説
- ・参考資料
- ・引用文献
- ・CCS事例データベース
- ・DB掲載資料の概要シート

苫小牧大規模実証試験や海外の新規事例を加え、平成32年度末までにVol.2を完成