



地球シミュレータ産業利用シンポジウム 2010

二酸化炭素地下貯留に関する 大規模シミュレーション技術の開発

大成建設（株）技術センター
山本 肇

1. 二酸化炭素の回収・貯留技術 CCSとは
2. 数値シミュレーションの役割
3. H21年度利用の成果
4. まとめ

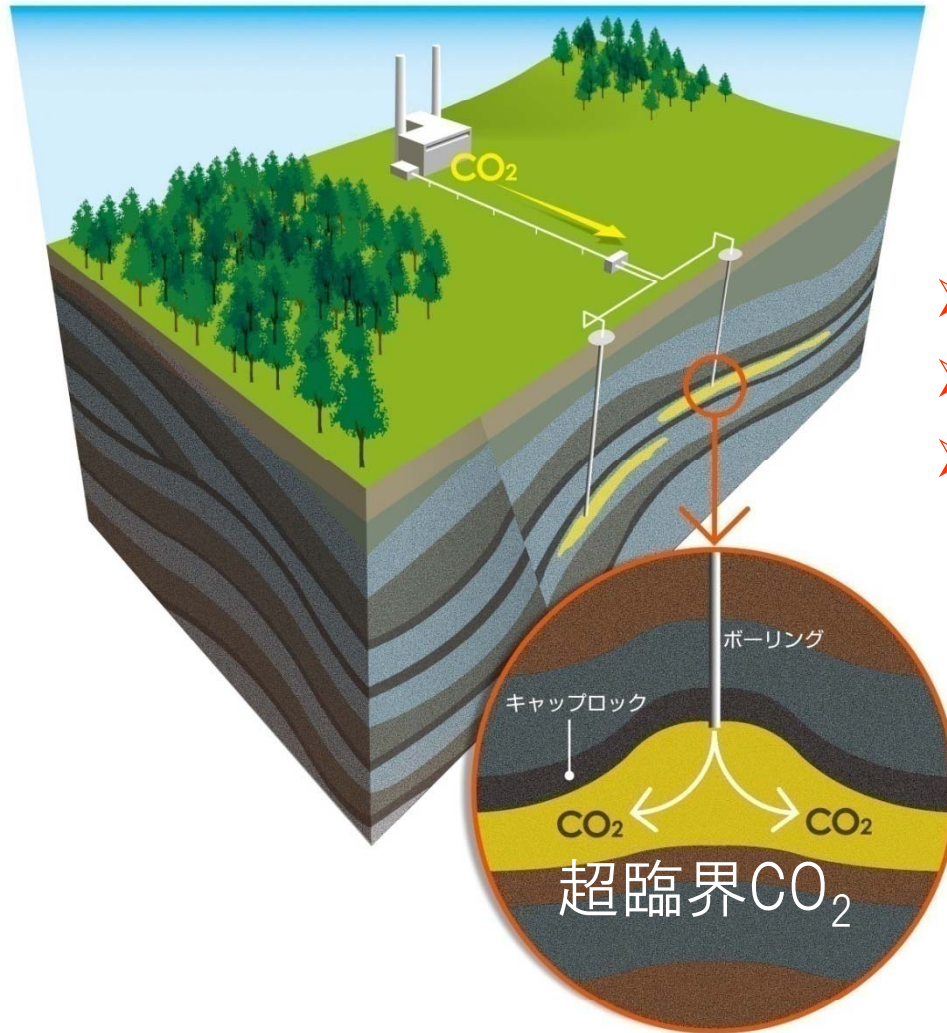
1. 二酸化炭素の回収・貯留技術 CCSとは

二酸化炭素の回収・貯留技術（CCS）

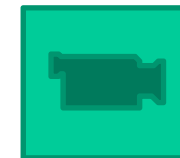
Carbon dioxide Capture and Storage

地球温暖化対策

- 火力発電所等の排ガスから分離・回収
- パイプラインなどを通じて輸送
- 地中（あるいは海洋）に貯留



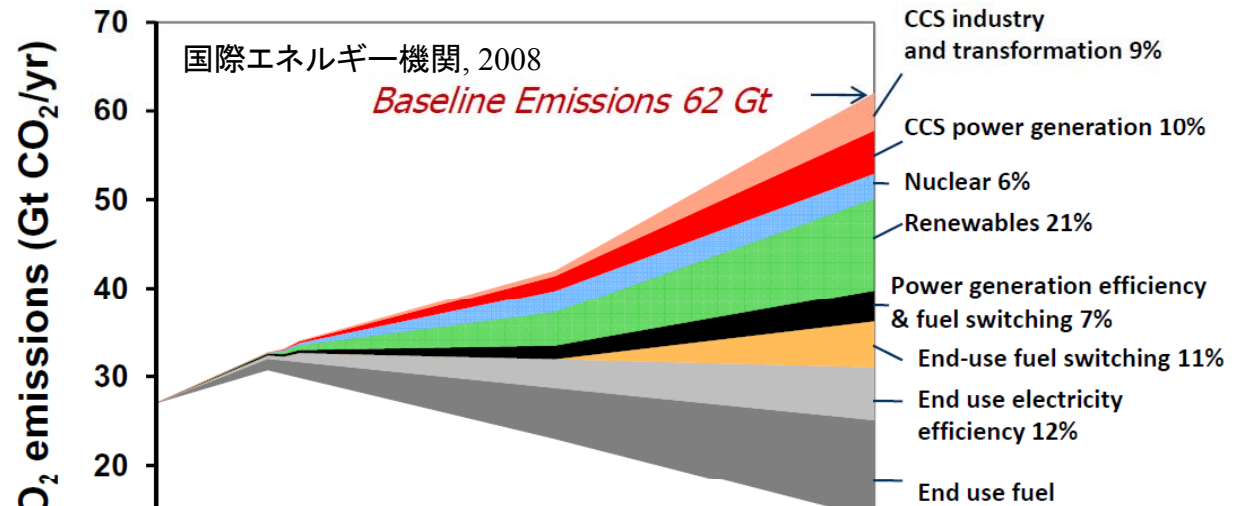
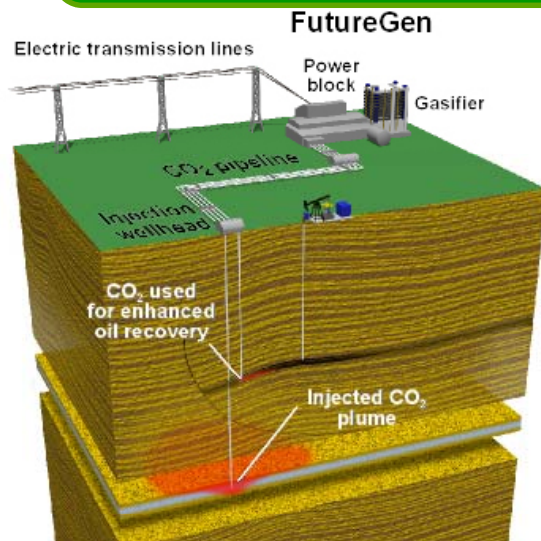
地中貯留



2050年までに現在レベルの50%に半減するには、
CCSを使って19%減らすことが必要である。



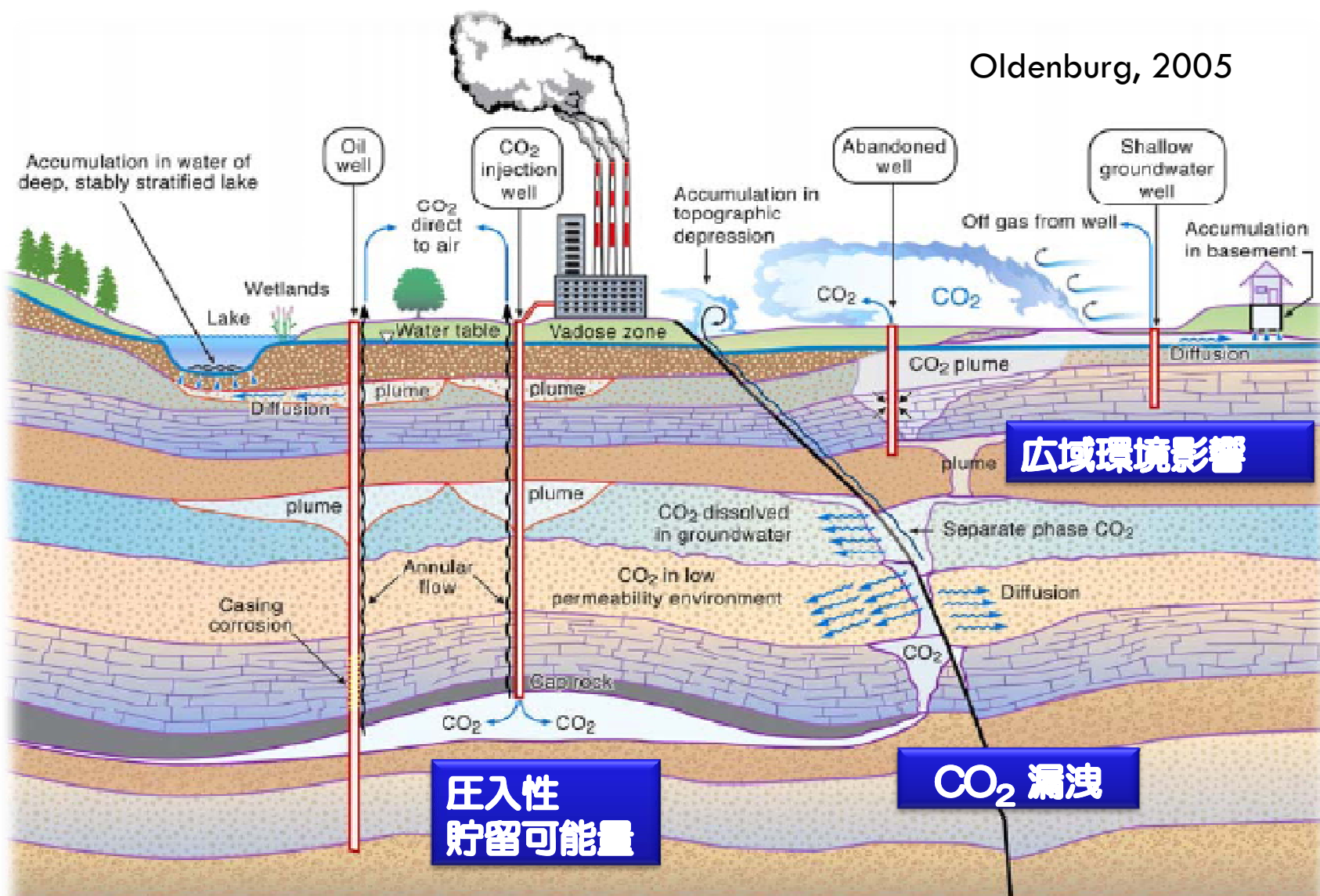
これからの火力発電にはCCSが必須
2020年までに100個、2050年までに3,400個のプロジェクトが必要



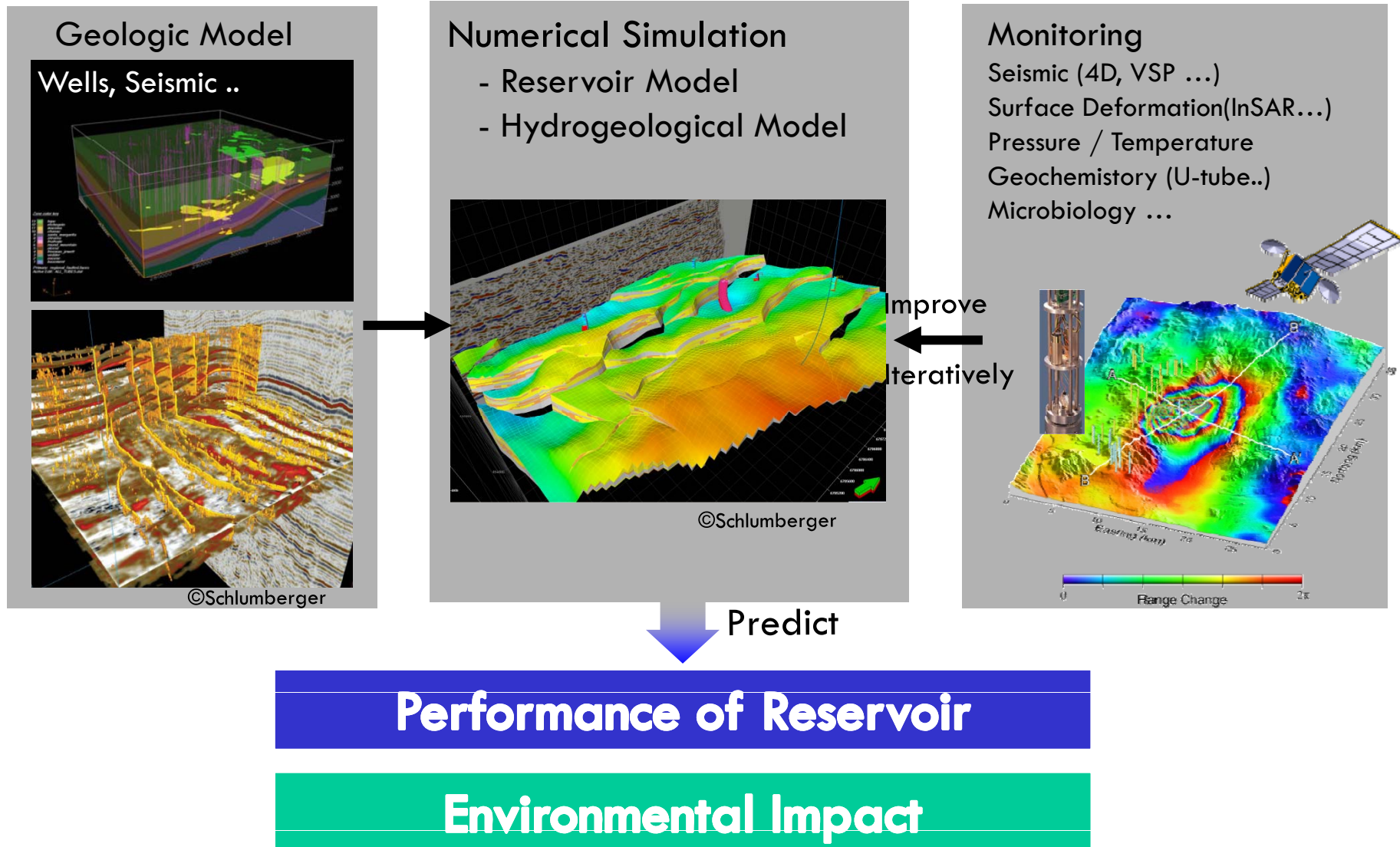
化石燃料を使いながら大規模な排出削減が可能な
低炭素社会実現までの "Bridging Technology"

2. CO₂地下貯留における 数値シミュレーションの役割

CO₂地下貯留におけるリスク



CO₂地下貯留の数値シミュレーション



支配方程式と数値解法(TOUGH2)

3成分(水、CO₂, NaCl)、3相(気相、液相、固相)

温度・圧力(支配方程式)

質量・エネルギー保存則

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n = \int_{\Gamma_n} \mathbf{F}^k \cdot \mathbf{n} d\Gamma_n + \int_{V_n} q^k dV_n$$

質量フラックス→拡張ダルシー則など

$$\mathbf{F}_\beta = \rho_\beta \mathbf{u}_\beta = -k \frac{k_{r\beta} \rho_\beta}{\mu_\beta} (\nabla P_\beta - \rho_\beta \mathbf{g})$$

物性(状態方程式など)

流体密度
流体粘性
比エンタルピー
溶解度

流体

流体飽和度
相対浸透率
毛管圧力
実効拡散係数

地層

数値解法—積分差分法(IFDM)

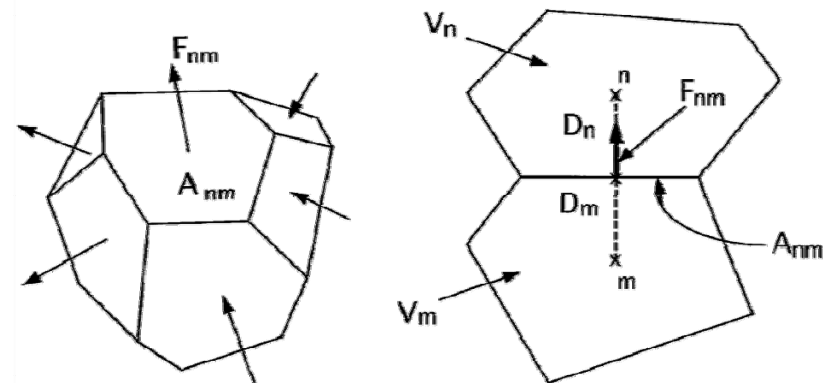
非線形代数方程式(残差形式)

$$R_n^\kappa(\mathbf{x}^{t+1}) = M_n^\kappa(\mathbf{x}^{t+1}) - M_n^\kappa(\mathbf{x}^t)$$

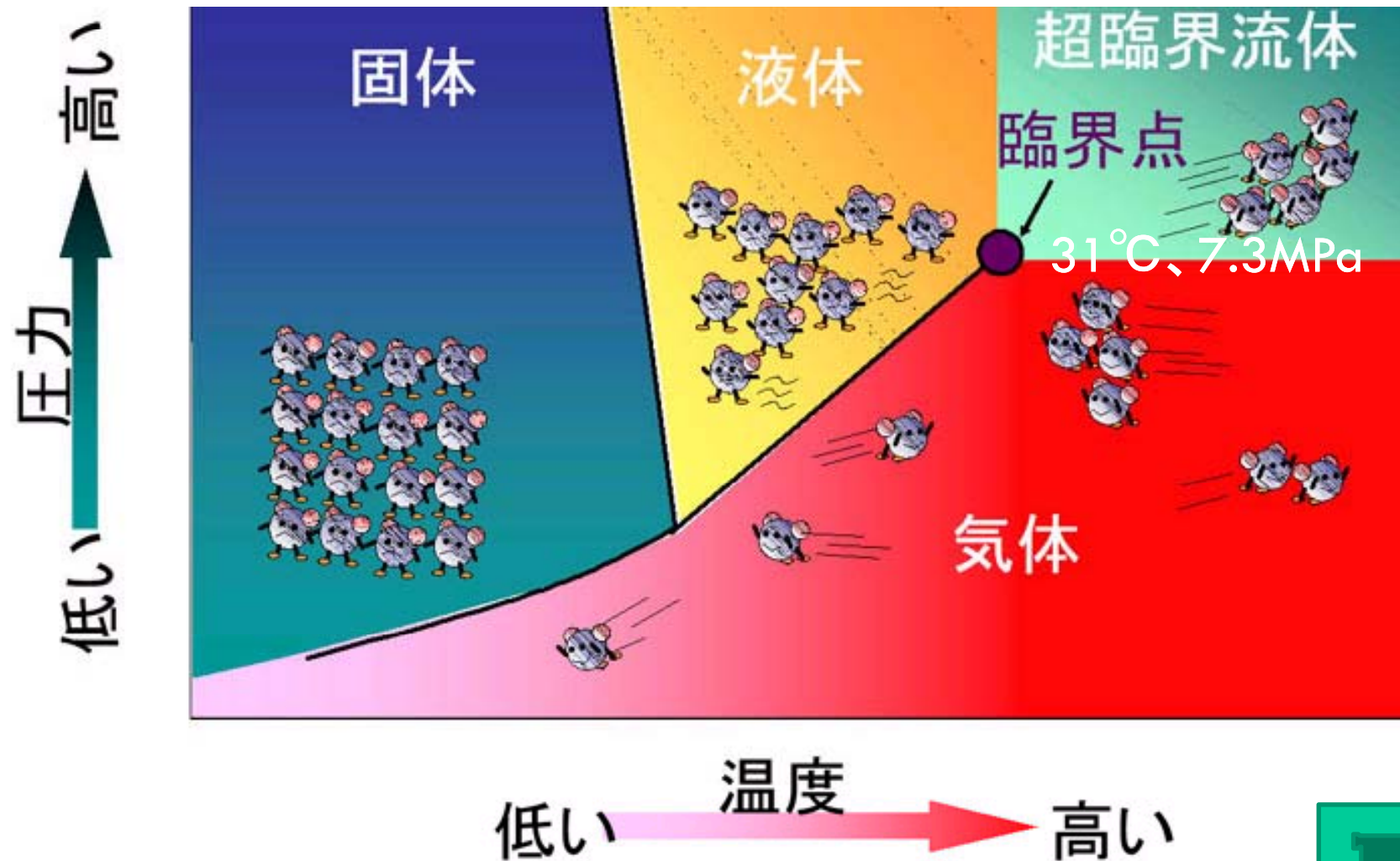
$$-\frac{\Delta t}{V_n} \left\{ \sum_m A_{nm} F_{nm}^\kappa(\mathbf{x}^{t+1}) + V_n q_n^{\kappa,t+1} \right\} = 0$$

ニュートン・ラプソン法

非線形性の強い計算



(Pruess et al., 1999)



東北大学工学研究科附属超臨界溶媒工学研究センターHPより

地球シミュレータなどの超並列計算機を使い 大規模なモデルを高速で数値解析する技術

- 多相流解析コードTOUGH2-MPを地球シミュレータ用にチューニング
…世界最速クラスのCO₂地下貯留シミュレーションが可能



The Earth Simulator2

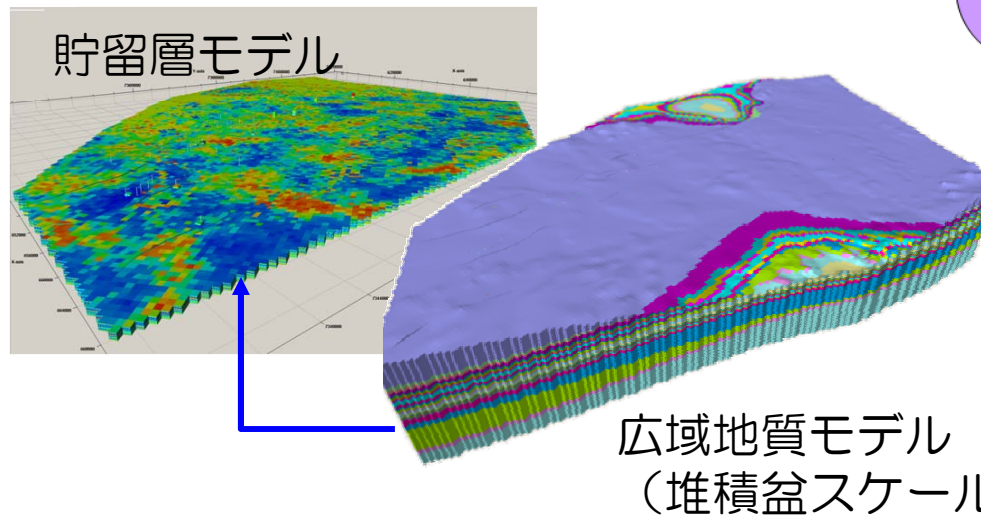
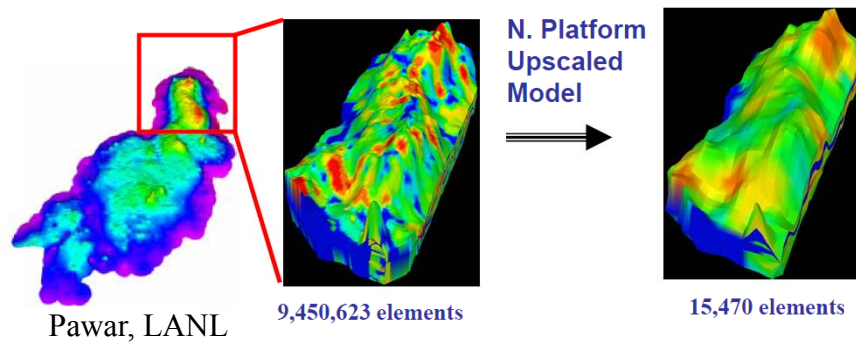
©JAMSTEC

1280 CPUs, 131 TFlops

- 貯留事業の経済性や安全性を評価
- 従来の100倍の高解像度の大規模解析が可能
 - 1000万節点の解析：世界初
- 地表～貯留層まで広域の環境影響を解析できる
- 高度に不均質な地層物性を考慮した解析が可能
- 地層変形や化学反応を含めた連成問題への対応
- 実証試験での実績（米国WESTCARB, 豪州ゼロジェンなど）

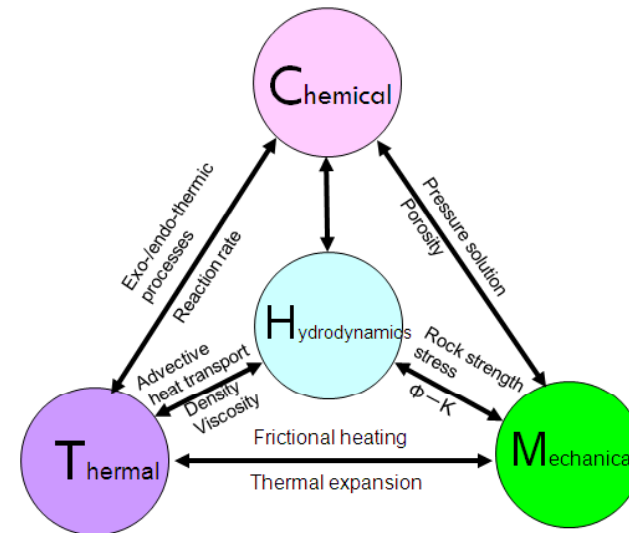
高解像度モデル

- ・ 詳細地質構造の表現
- ・ 数値分散の低減



多連成モデル

- ・ 温度-流体-力学-化学

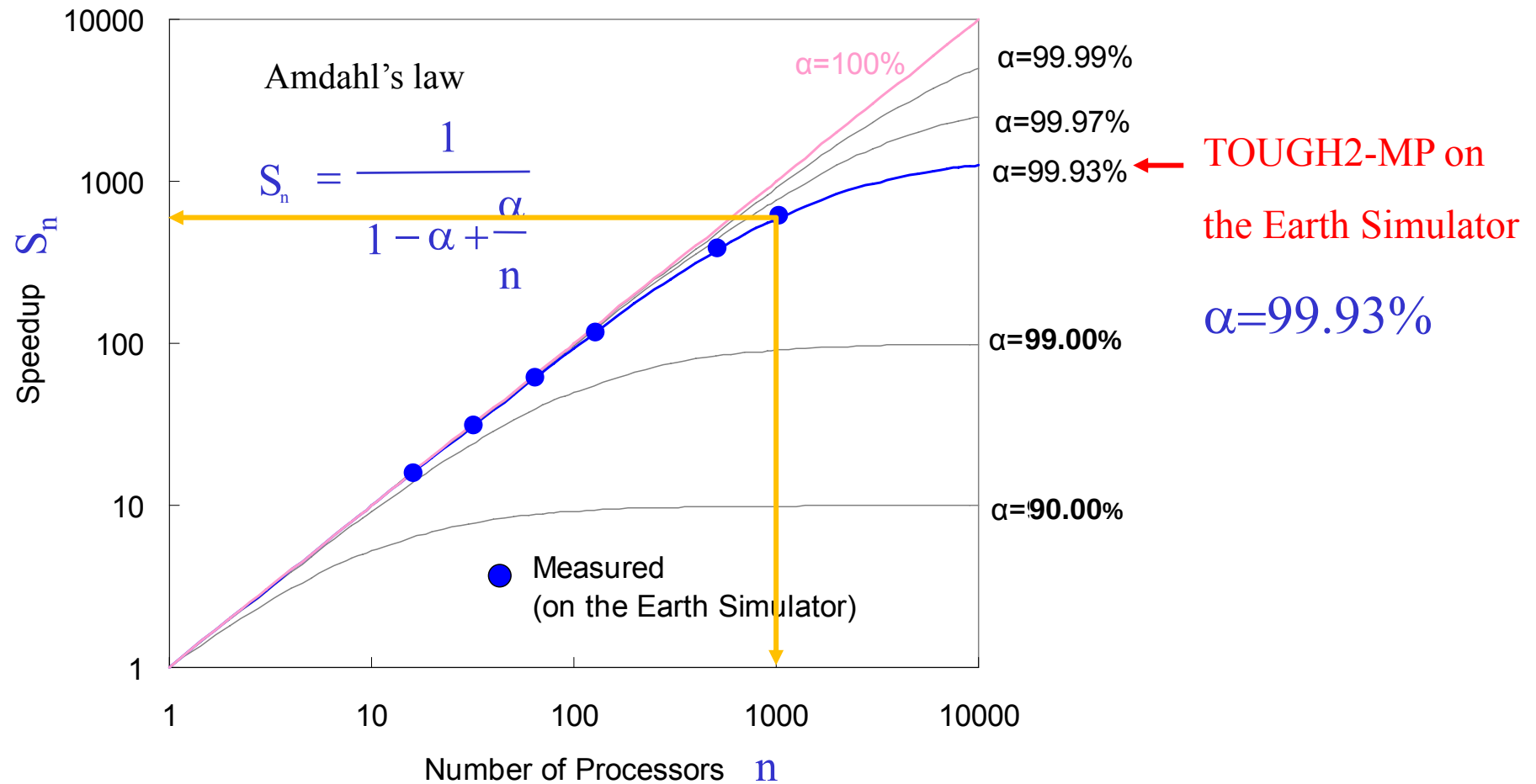


大規模モデル

貯留層～地表まで含めた
包括的な広域地質モデル

3. 平成21年度利用の成果

並列化効率 — 大規模並列計算の性能 —



ベクトル化ソルバーへの変更

Aztec (Sandia National Lab.)



HPCMW (東大 中島教授)

スカラー計算機用
ベクトル長が短く、VOR向上に限界
VBR形式

ベクトル化ソルバー
JDS (Jagged Diagonal Storage) 形式

ソルバーのベクトル化率の大幅向上

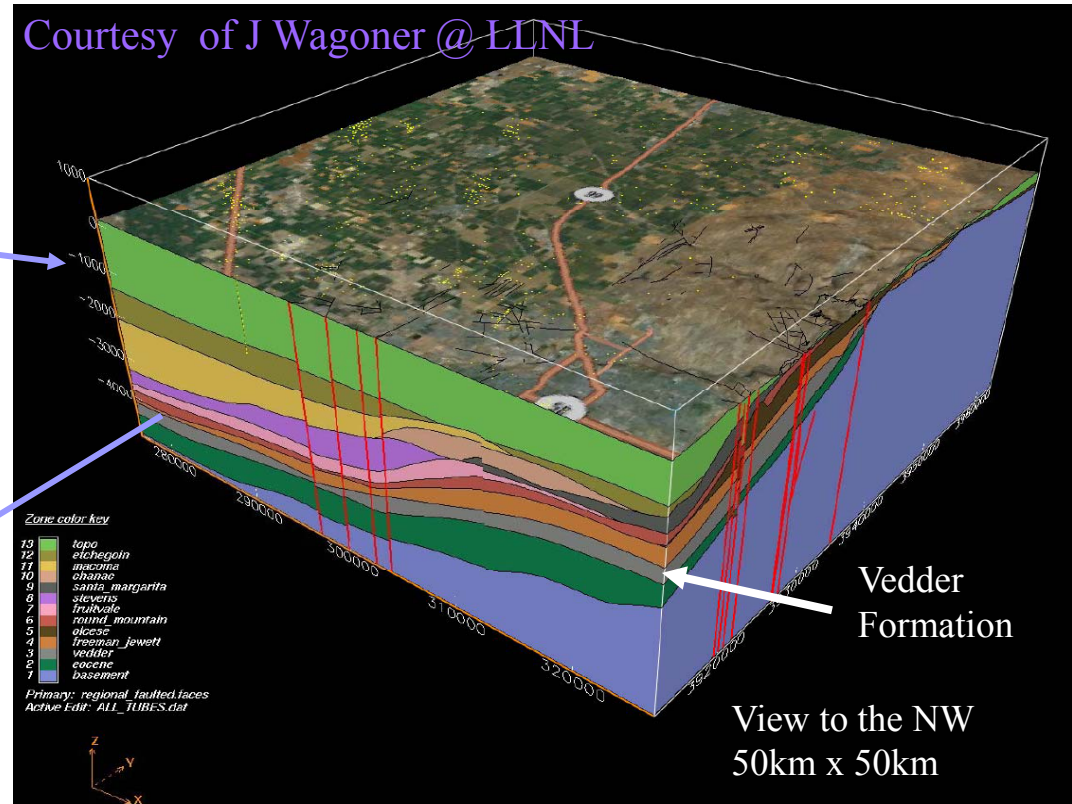
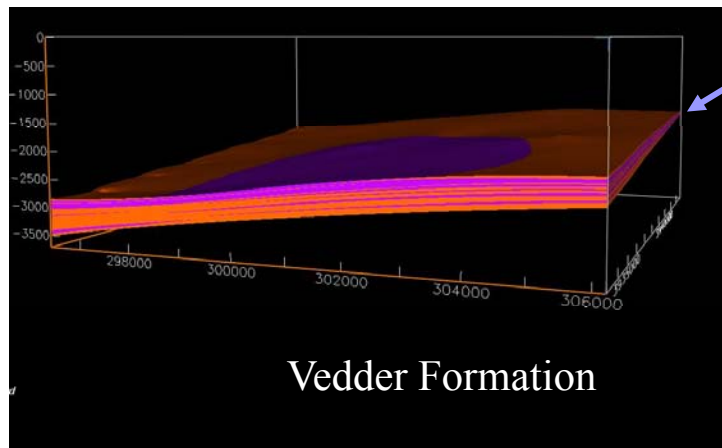
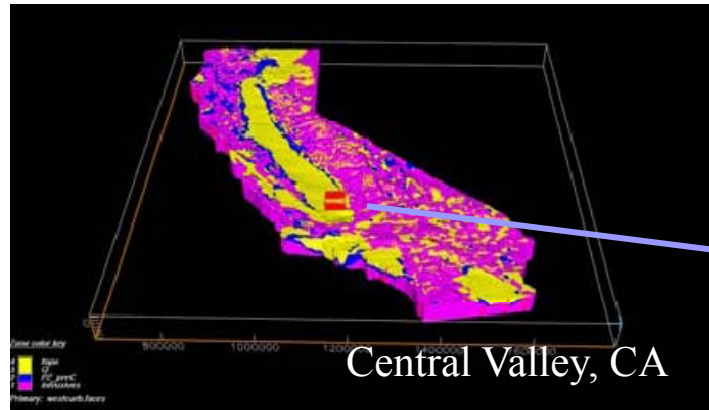


トータル性能: 当初より20倍以上の高速化

変更作業スタート: 2008年夏
JAMSTEC殿、NEC殿による
継続的支援

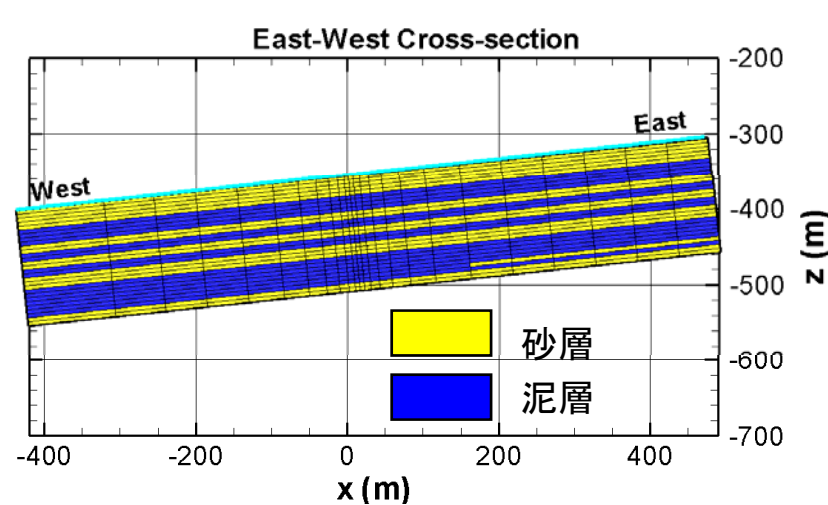
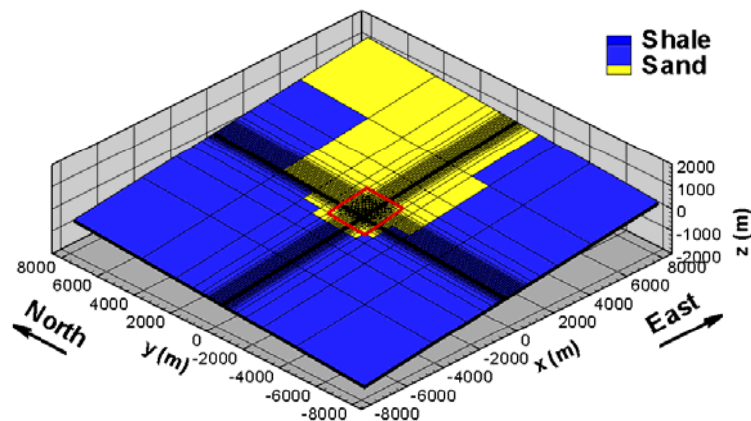
- ・行列格納形式の変更
- ・スケーリング処理の精度
など.....

米国の大規模CO₂貯留の実証試験 WESTCARB Phase III Kimberlina Pilot Test



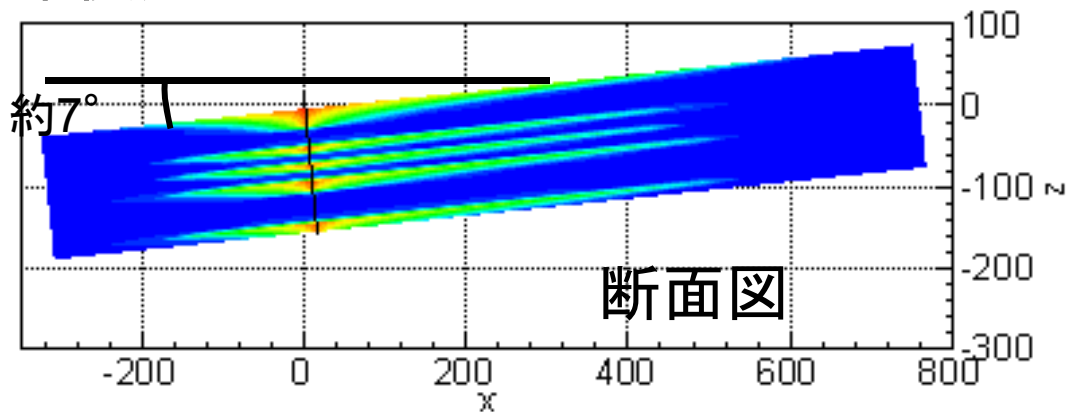
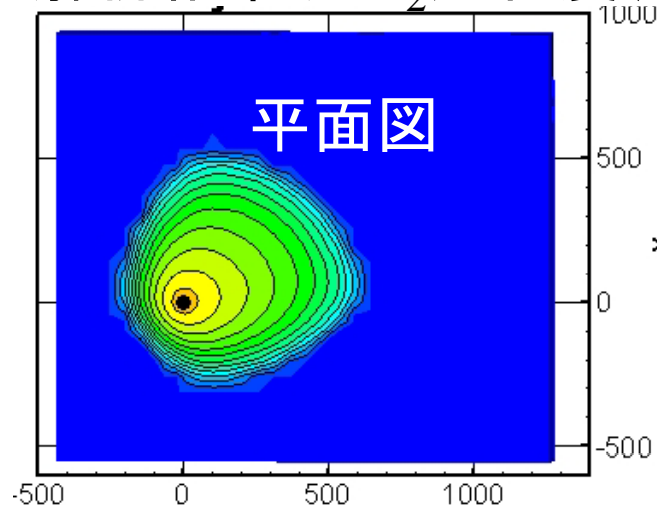
- 圧入量=25万 t/年（4年間連続圧入）
- 貯留層：深度2km, 砂・泥岩互層
- ✧ 厚さ150m、傾斜約7°
- ✧ 圧力 P=220 bars, 温度 T=81°C
- ✧ 浸透率：砂岩：kh/kv=200md/20md, n=28%
- ✧ 頁岩：kh/kv=0.1md/0.01md, n=15%

解析グリッド



粗い矩形格子を使用

解析結果(CO₂飽和度、4年後)



(Doughty, 2008)

CO₂ プリュームが既存井戸や断層と交差するか？

漏洩発生リスク = 確率 × インパクト

断層

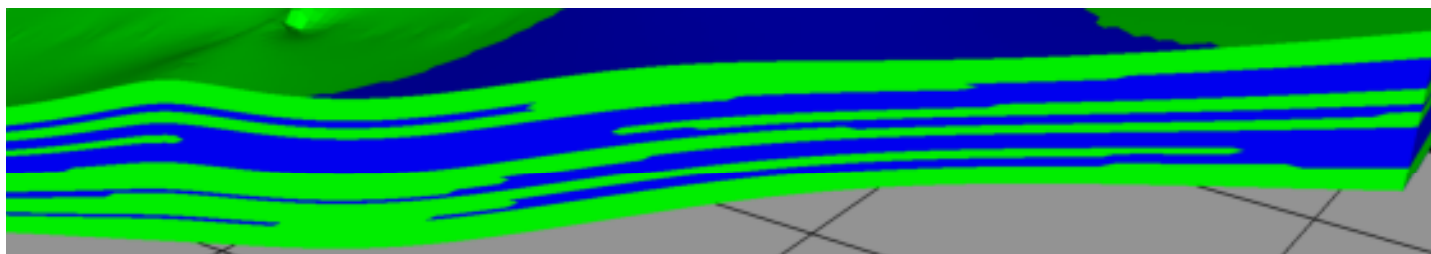


Source: Oldenburg (LBNL)

単純化された解析モデル

44 層 10万グリッド

PC-Cluster
レベル

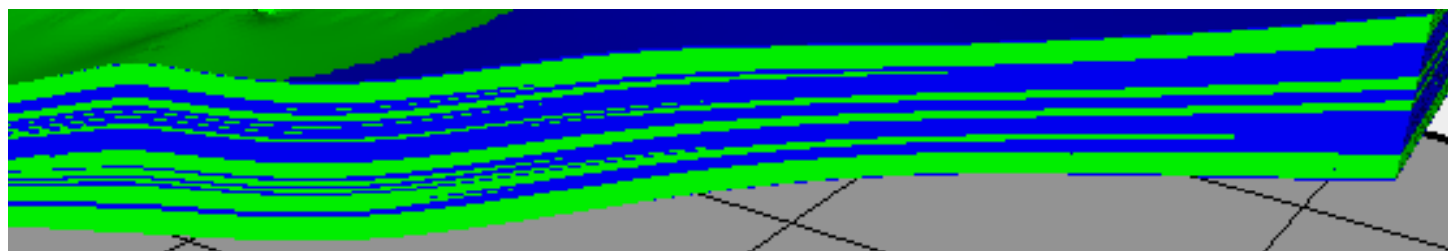


Up-scaling

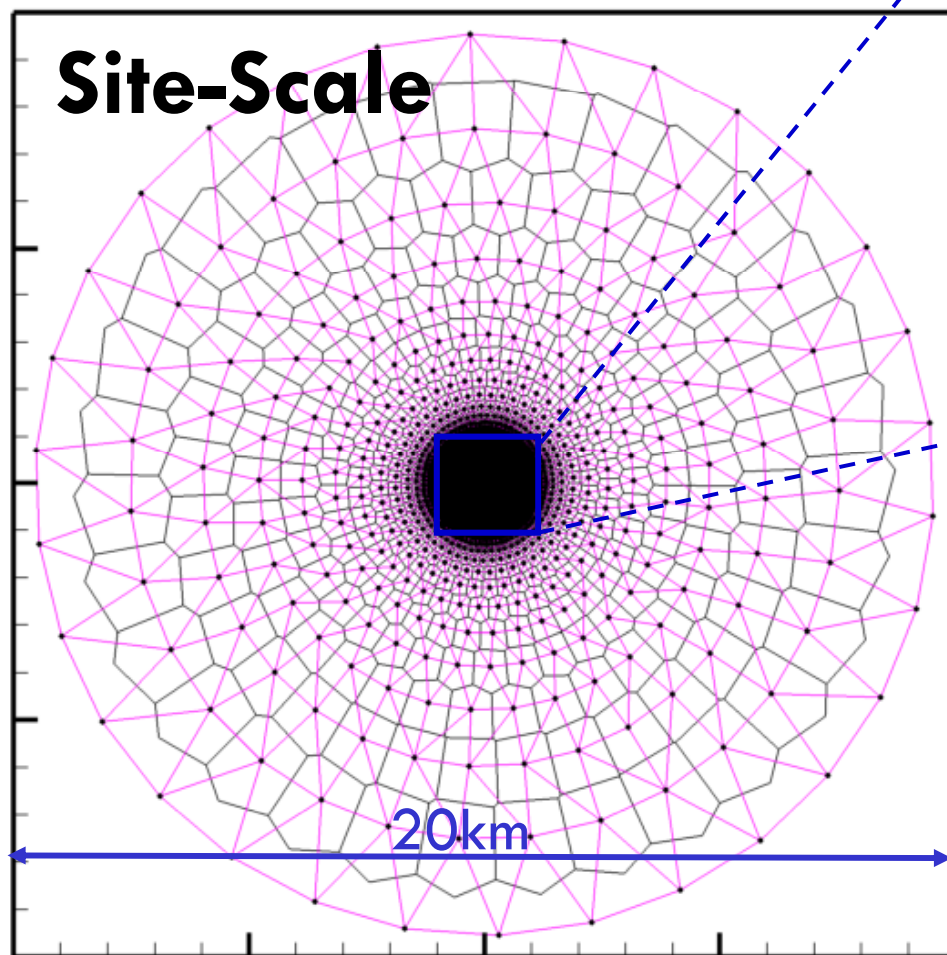
オリジナル地質モデル

2200 層 500万グリッド以上

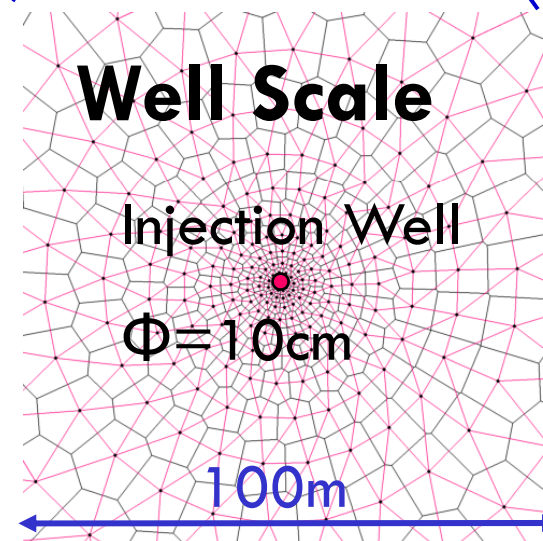
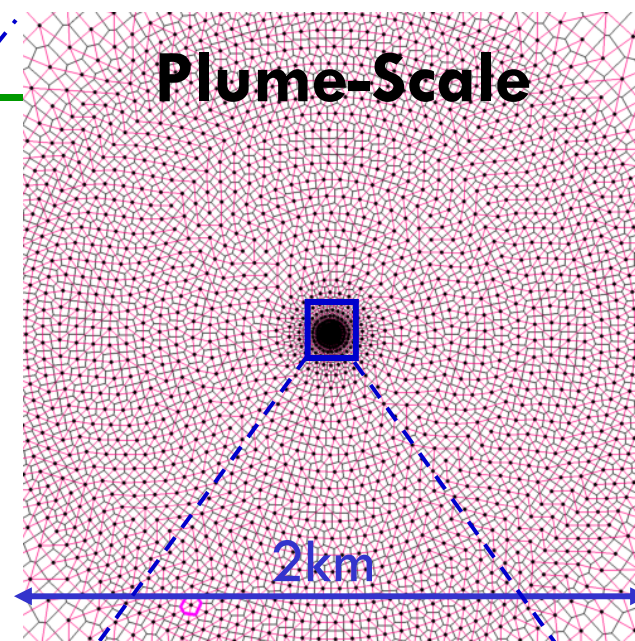
ESで
可能



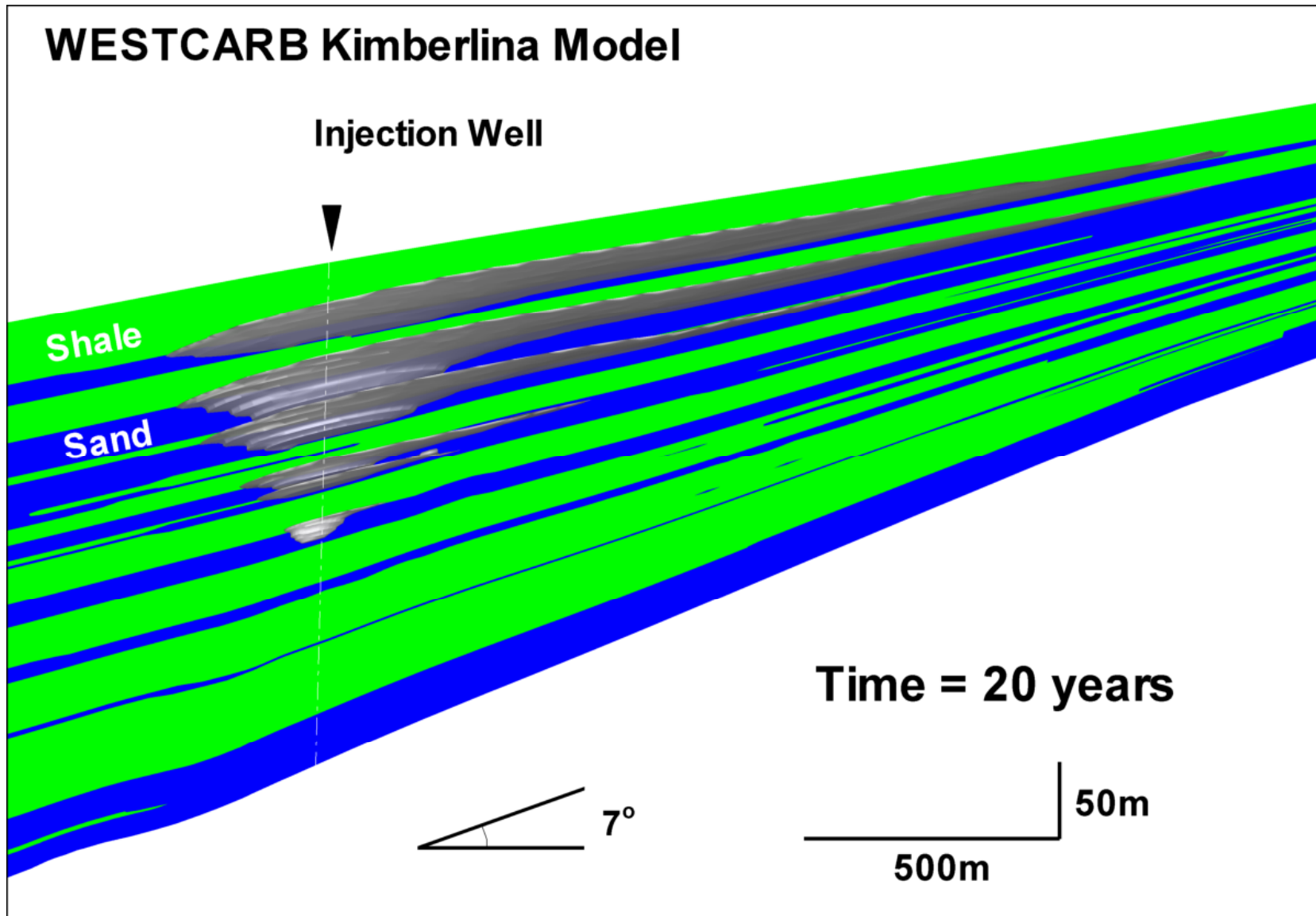
地球シミュレータを用いることにより、オリジナルの地質モデルをダイレクトに解析することが可能となる。



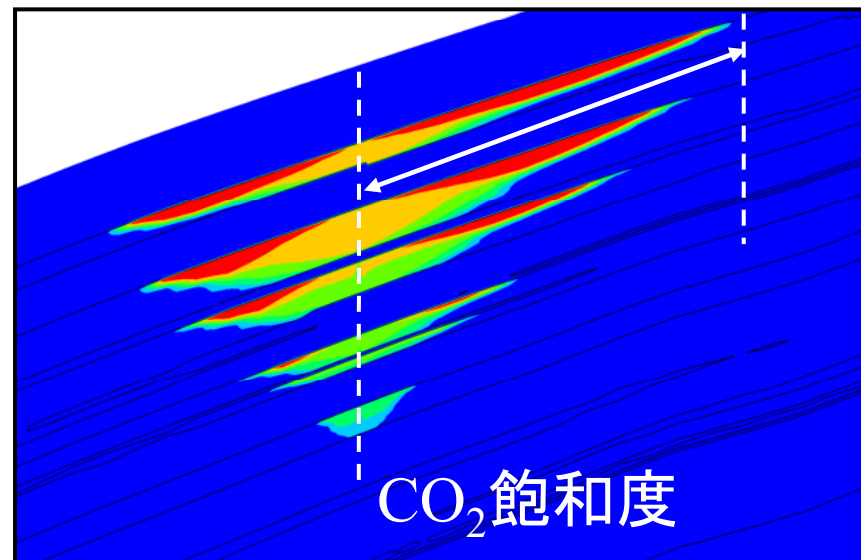
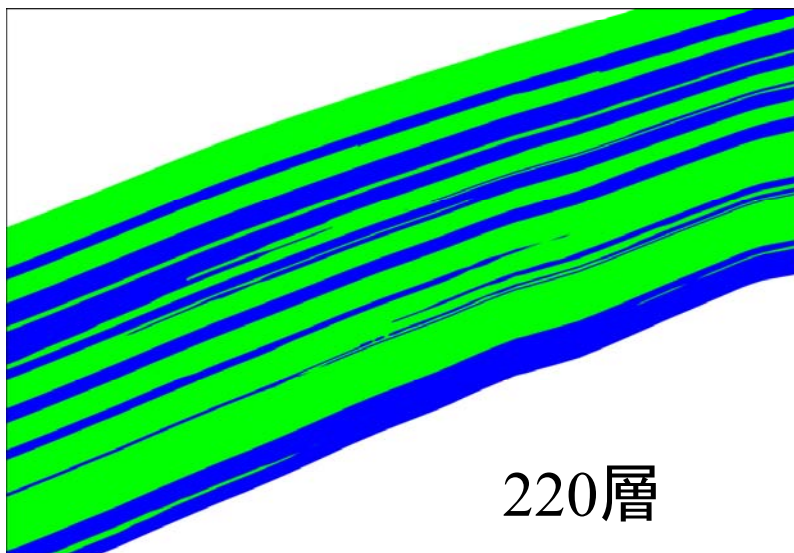
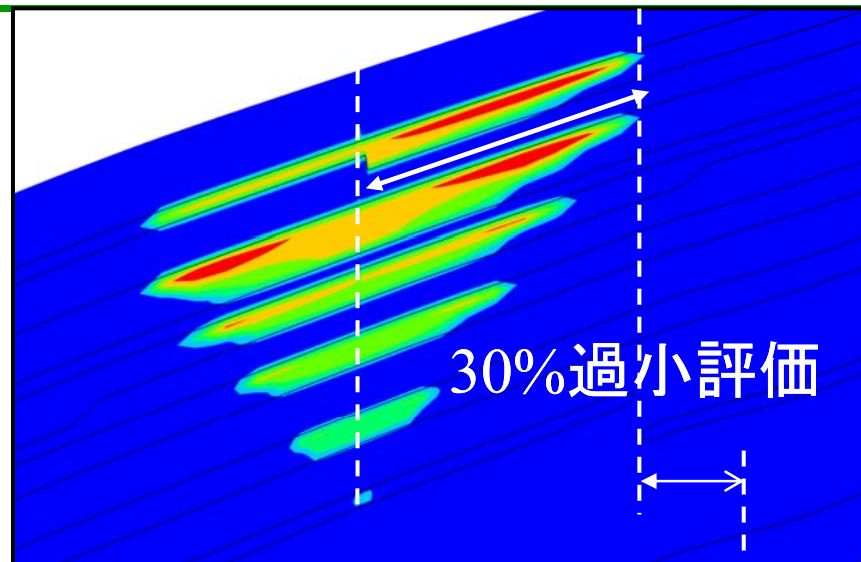
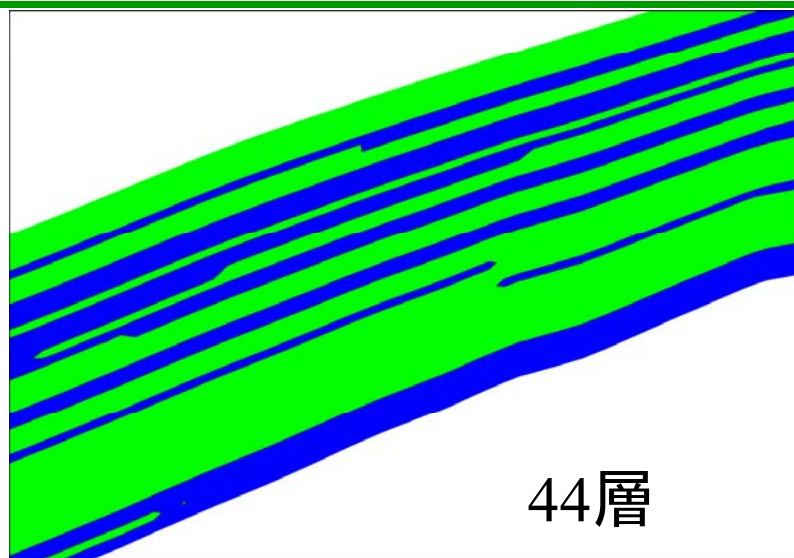
Voronoi Polygons



(Yamamoto & Doughty, 2009)



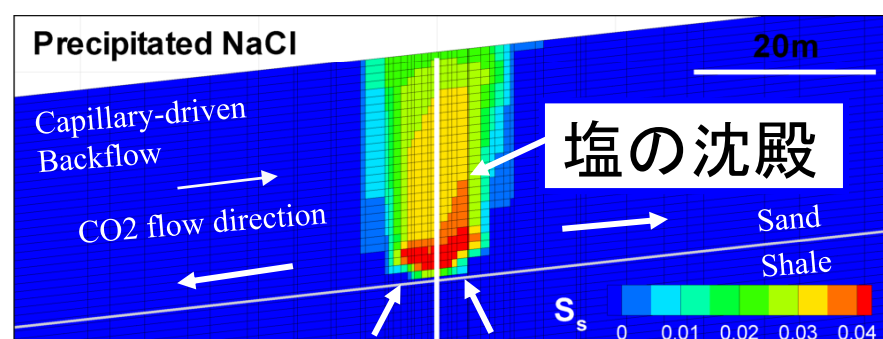
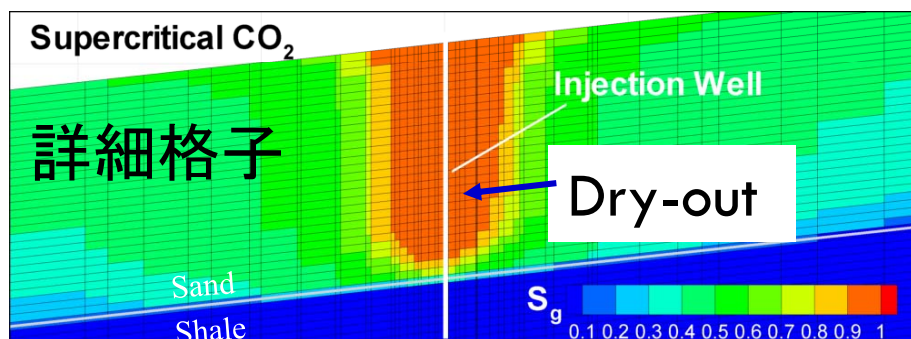
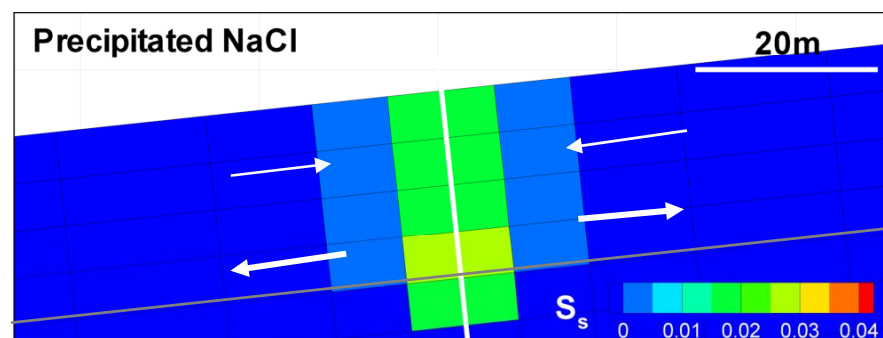
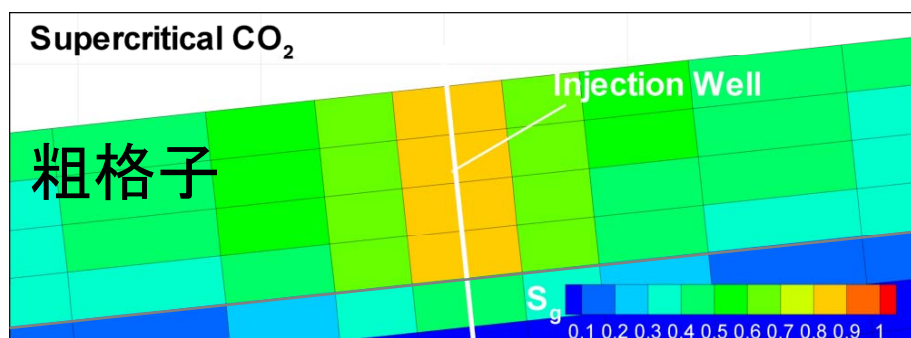
CO₂の最大移行距離一格子解像度による違い



圧入開始から4年後

- 塩水がCO₂ガス中に蒸発して塩析出
- Dry-out Zone → 塩沈殿 → 浸透率低下

⇒ 粗いグリッドでは過小評価



(Yamamoto & Doughty, 2009)

4. まとめ

- ・ ベクトル化ソルバーの移植
 - ベクトル計算用行列ソルバーへの変更により、当初より20倍以上の高速化が得られた。
- ・ 高解像度の大規模数値解析
 - 井戸周辺の詳細な挙動から堆積盆スケールまで、幅広いスケールを対象としたマルチスケール解析が可能である。
 - CO₂プルームの解析精度の向上や井戸周辺の詳細な挙動を計算する上で、高解像度シミュレーションの有効性が示された。

- ・ 3年目以降の段階的な料金設定について(最大50%負担)
 - － 予算制約から、チャレンジングな問題への積極的な利用がしにくい。
→ 画期的な成果が出にくくなる？
 - － 負担増加とともに、自社研究資金を確保してESを継続的に利用することが困難になる。→ ESに特化して開発した優れたソフト資産が使えなくなる。
- ・ 支援体制について
 - － 企業研究者と計算機科学のトップ専門家との実務交流の貴重な場であり、産業界でのHPC技術向上・利用促進や、人材の裾野を広げる人材育成効果も期待できる。
 - － 特に、ソルバー高速化(ベクトル化率向上)の支援は、ES利用効率の向上だけでなく、利用者の費用負担軽減の意味でも、非常に重要かつ有効である。

謝 辞

本研究は、文部科学省平成21年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラム「二酸化炭素地下貯留に関する大規模シミュレーション技術の開発」の一環として行われたものです。

主要プロジェクトメンバー(以下、敬称略)

大成建設(株) 技術センター 山本 肇、七井慎一

ローレンスバークレー国立研究所 Keni Zhang

地球シミュレータの利用では、次の方々に多大なるご指導・ご協力を賜りました。

(独)海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター

新宮 哲氏, 福井義成氏, 上原 均氏、西川憲明氏(主担当), 廣川雄一氏

東京大学 情報基盤センター 中島研吾 教授(ベクトル化ソルバーのご提供など)

NEC(株) 久保克維氏、緒方隆盛氏 他の皆さま(解析コードのチューニング・高速化など)

米国WESTCARBプロジェクトでの解析実施にあたり、次の方々にご協力いただきました。

ローレンスバークレー国立研究所 Christine Doughty, Curt Oldenburg

ローレンスリバモア国立研究所 Jeff Wagoner



御清聴ありがとうございました