

2021年度成果報告会

超臨界地熱発電技術研究開発／超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発／超臨界地熱貯留層T H M Cシミュレータの技術開発

(国研)産業技術総合研究所

(国)東北大学

大成建設(株)

(国)東京大学（再委託）

石油資源開発(株)（再委託）

日本オイルエンジニアリング(株)（再委託）

問い合わせ先

(国研)産業技術総合研究所

浅沼 宏

E-mail: h.asanuma@aist.go.jp

TEL: 029-861-6204

事業概要

1. 期間

開始：2020年6月

終了：2021年2月

2. 最終目標

超臨界地熱貯留層で起こりうるTHMC（熱・水・力学・化学）連成現象を考慮可能な貯留層シミュレータのコア機能を開発し、岩石力学挙動やシリカ溶解析出が貯留層の水理特性や抽熱性能に与える影響を定量的に評価する。また、超臨界水環境下での流体性状変化、水-岩石平衡反応を計算可能な地化学計算ツールを試作・評価する。さらに、超臨界地熱シミュレータの信頼性を評価するための標準ベンチマーク問題を6件以上策定する。

3. 成果・進捗概要

超臨界地熱貯留層で生じる基礎的なTHMC連成現象を考慮可能な2次元・3次元対応数値シミュレータを開発し、シリカの溶解析出が抽熱性能の長期的な変動に影響を与える可能性があること等を明らかにした。また、超臨界低密度領域における地化学計算を可能にするため、水の密度にもとづく熱力学データ拡張法を地化学計算ソフトSOLVEQ /CHIMに実装するとともに、ベンチマークテストを通じて同手法の実用性を示した。さらに、文献調査にもとづき、超臨界地熱シミュレータの信頼性を評価するための3レベル11ケースの標準ベンチマーク問題を策定した。

背景と目的

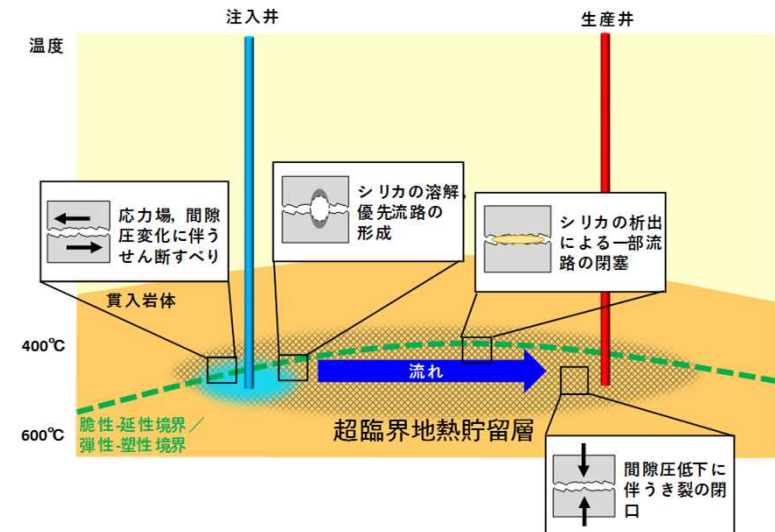
超臨界地熱開発において重要なステップである「調査井の試掘」フェーズでは、試掘地の地下の状態推定、流体性状評価、坑内試験計画立案・結果評価、環境影響評価等において実データとシミュレーションを統合させた推定・評価が必要であり、そのためには超臨界地熱システムの熱・水・力学・化学（THMC）連成現象を考慮可能なシミュレーション技術が不可欠である。

しかしながら、超臨界地熱システムTHMCシミュレーション技術の実現において、以下の課題があった。

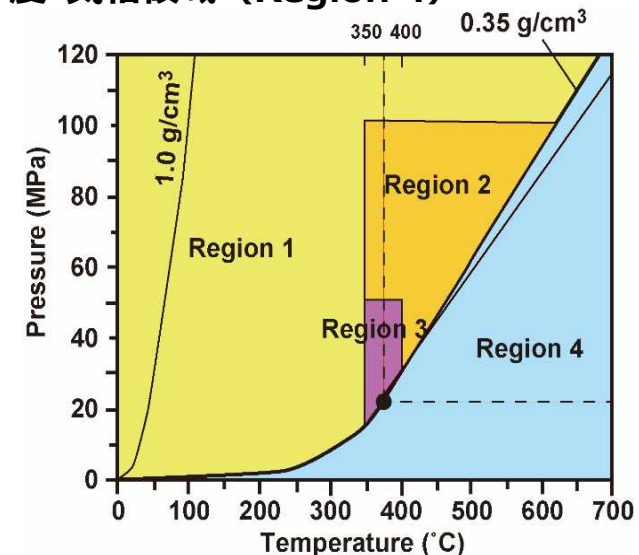
- * 超臨界地熱システムで生じるTHMC連成現象を考慮可能な貯留層THMCシミュレータが未開発
- * 超臨界水低密度領域における熱力学データセットの欠損等により、超臨界多成分系の地化学反応計算法が未確立
- * シミュレータの信頼性・妥当性検証方法が未確立

本事業では、上記の課題を解決するため、超臨界地熱システムTHMCシミュレーションのコア技術開発を実施した。

超臨界地熱貯留層内で生じる岩石力学応答やシリカ溶解析出による水理系への影響例



熱力学データセットが欠損している超臨界低密度・気相領域 (Region 4)



開発内容

①超臨界地熱貯留層THMCシミュレータのコア機能開発（○産総研、東北大）

- * 先行研究の成果等にもとづき、超臨界地熱貯留層内で生じる熱輸送、流体流動、岩石弾性変形、石英－水反応等の基礎的なTHMC連成現象を考慮可能な数値シミュレータを開発する
- * 室内実験により、高温高圧環境における花崗岩の物性データを拡充する
- * 開発シミュレータを用いて、抽熱時の超臨界地熱貯留層内THMC挙動をシミュレーションし、岩石力学挙動やシリカの溶解析出が貯留層の水理特性や抽熱性能に与える影響を検討する

②超臨界水環境での地化学計算法の設計（○東北大、石油資源開発）

- * 受託者らが提案した水の密度にもとづく熱力学データセットの拡張法にもとづき、超臨界地熱水環境における多成分系の地化学反応計算法を設計し、計算ツールを試作する
- * 地化学計算ツールの試作・評価を通じて、提案手法の性能、課題等を検討する

③超臨界地熱シミュレータ標準ベンチマーク問題の開発（○大成建設、東大、日本オイルエンジニアリング）

- * 文献調査にもとづき、超臨界地熱シミュレータの信頼性を評価するための標準ベンチマーク問題を策定する
- * 試掘ステージでの実践的利用を踏まえ、策定したベンチマーク問題の課題を抽出する

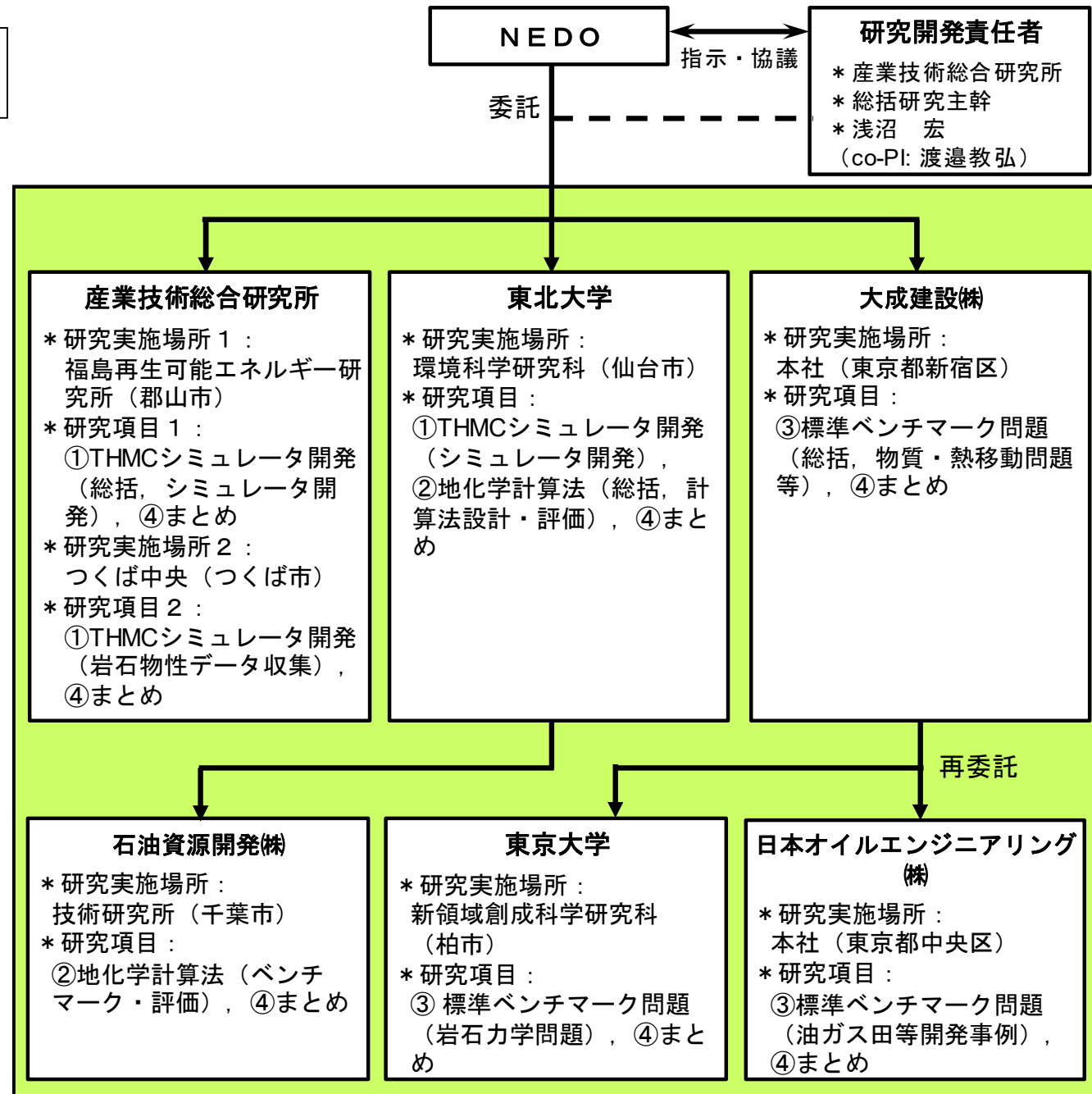
④まとめ（○産総研、東北大、大成建設、東大、石油資源開発、日本オイルエンジニアリング）

- * 本事業の成果を総括し、超臨界地熱システムTHMCシミュレーション技術開発の今後の方向性を検討する

開発スケジュール

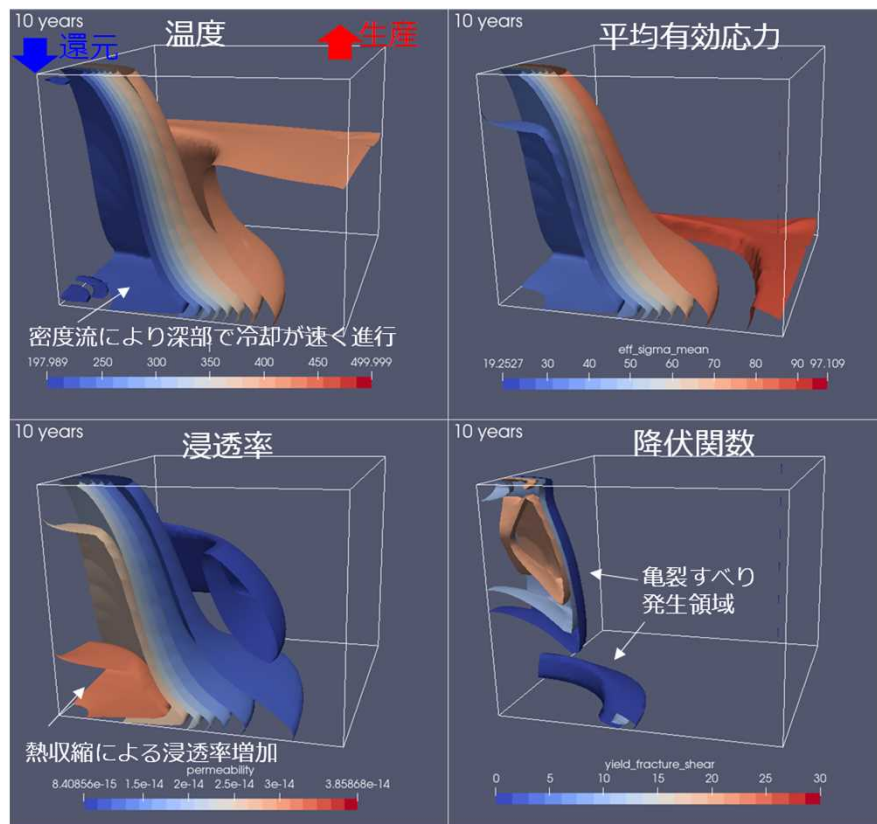
	FY2020			
	1Q	2Q	3Q	4Q
①超臨界地熱貯留層THMCシミュレータのコア機能開発		数理モデル導出・シミュレータ開発 高温高圧下における花崗岩物性データの収集	予察的評価	
②超臨界水環境での地化学計算法の設計		地化学反応計算法の検討、試作 ベンチマーク作成	手法の評価	
③超臨界地熱シミュレータ標準ベンチマーク問題の開発		ベンチマーク問題の作成	課題抽出	
④まとめ				全体まとめ

実施体制

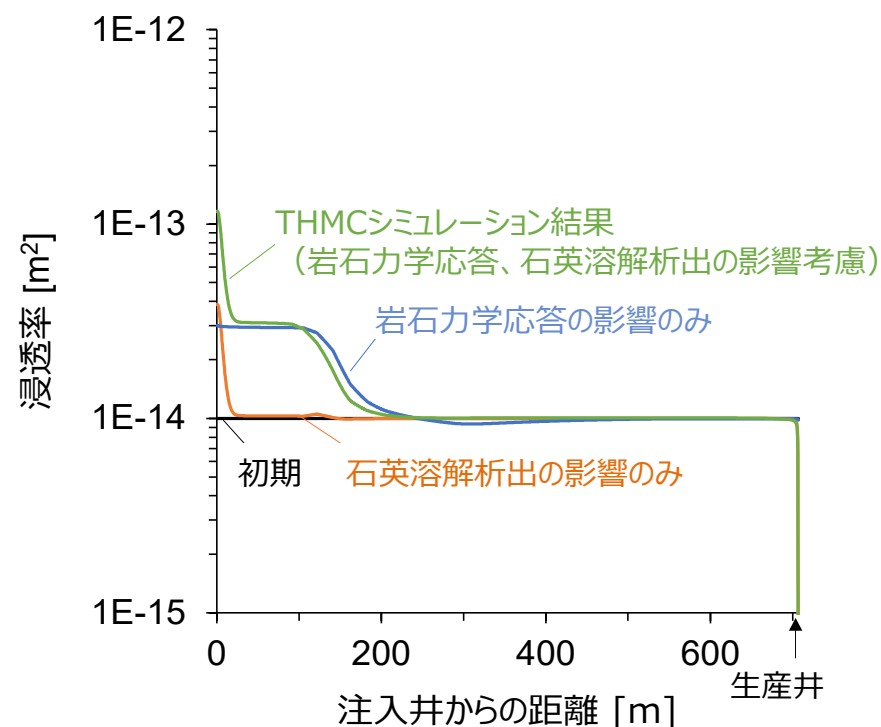


成果の例

開発シミュレータにより得られた抽熱時の貯留層内温度、浸透率分布、岩石力学応答の推定結果



抽熱開始5年後の岩石力学応答、石英溶解析出反応に伴う貯留層内浸透率分布の推定結果

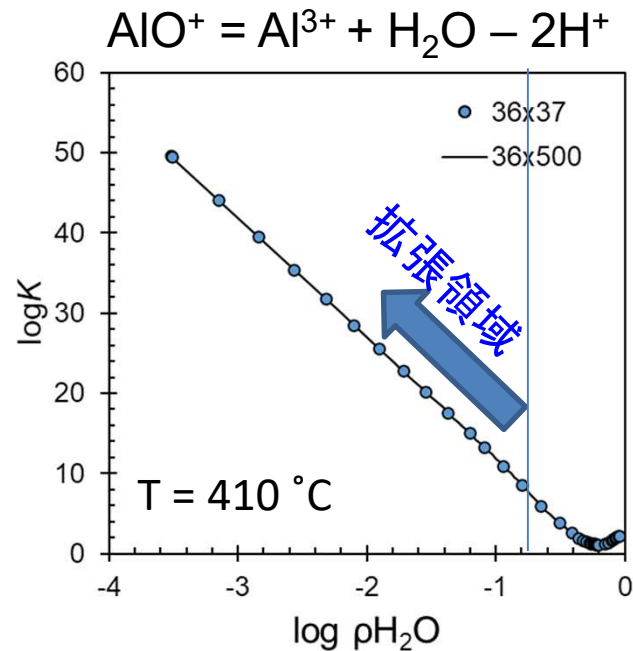


成果

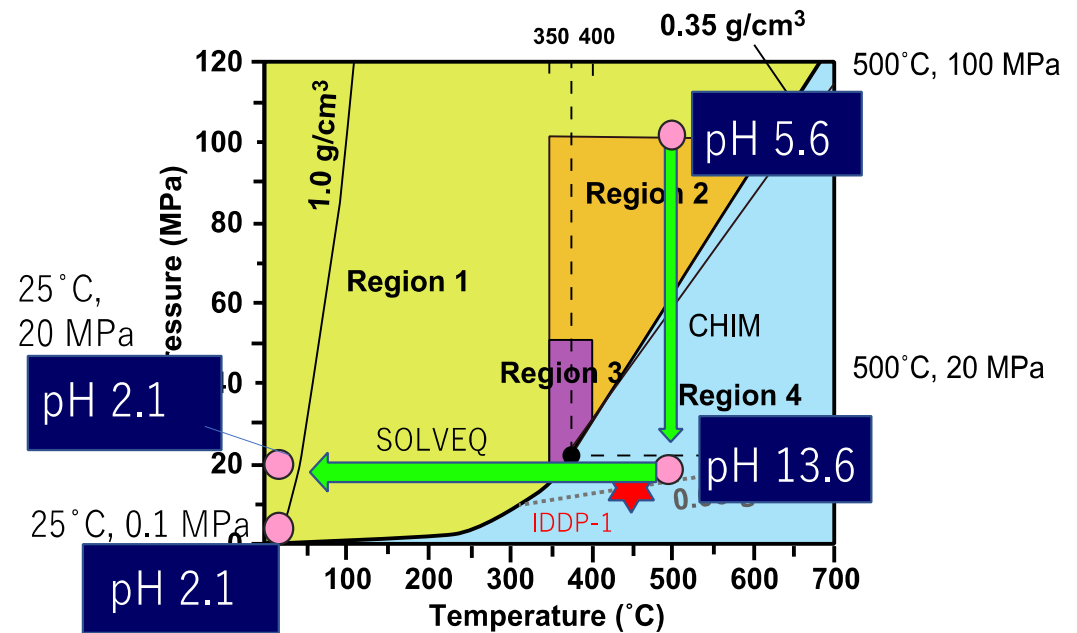
* 開発したTHMCシミュレータにより、超臨界地熱貯留層内で生じる基礎的な岩石力学挙動、石英溶解析出反応、及びそれらが浸透率、生産流量に及ぼす影響を評価することが可能になった。石英溶解析出反応が生産流量の長期的な変動に顕著な影響を与える可能性がある等の結果が得られた。

成果の例

先行研究で提案した水の密度を用いた
logKの超臨界低密度領域への外挿法



試作ツールを用いた深部超臨界流体の減圧→冷却過程における
性状変化の推定結果



成果

* 水の密度を用いたlogKの拡張にもとづく地化学計算法を開発し、超臨界低密度領域での地化学計算を可能した。これにより、深部地熱流体の減圧→冷却パスにおける流体性状の変化を評価できるようになった。

成果の例

文献調査をもとに策定した超臨界地熱シミュレータテストケースの一覧

分類	ケース	タイトル	超臨界	T	H	M	C	出典
L1	L1-1	水平、鉛直1次元系の非等温流体輸送問題	X	X	X			Wang, et al. (2020)
	L1-2	多孔質媒体の2次元弾性変形問題			X	X		Dassault Systèmes. (2010)
	L1-3	軸対称一次元系の模擬貯留層生産問題		X	X			Yano and Ishido (1998)
L2	L2-1	超臨界地熱貯留層－坑井連成問題	X	X	X			Xu (2020)
	L2-2	多孔質媒体中のシリカ析出－浸透率変化問題		X	X		X	Sutopo (2005)
	L2-3	亀裂性媒体中 “ “		X	X		X	White (2016)
	L2-4	多孔質弾性体の亀裂開口、せん断滑り問題		X	X	X		White (2016)
	L2-5	超臨界流体を対象とした5スポット問題	X	X	X			Magnusdottir et al. (2015)
	L2-6	理想化されたIDDP超臨界地熱貯留層問題	X	X	X		X	Sudarmadi et al. (2013)
L3	L3-1	人工貯留層生産・圧入問題	X	X	X	X	X	Taron & Elsworth (2009)
	L3-2	断層を含む超臨界地熱貯留層問題	X	X	X	X		Parisio et al. (2019)

レベル1：シミュレータの基本機能（線形ソルバーや境界条件等）の検証

レベル2：レファレンスモデルに含まれる個別のTHMC連成挙動の検証

レベル3：比較的複雑なTHMC連成挙動、浸透率変化に対する定性的な妥当性

成果

- * 文献調査にもとづき、超臨界地熱シミュレータの信頼性を評価するための3レベル11ケースのテストケースを策定した。同テストケースにより、超臨界地熱シミュレータの系統的な動作検証が可能になった。
- * 試掘ステージ以降でのシミュレータの実践的利用のためには、THMC連成解析事例の拡充、妥当性評価のための実験データ収集等が課題であることを明らかにした。

目標達成状況

研究開発項目	達成目標	成果	達成度
①超臨界地熱貯留層THMCシミュレータのコア機能開発	<ul style="list-style-type: none"> 開発したシミュレータを用いて、超臨界地熱環境での超臨界水流動、熱輸送、岩石力学変形、シリカ反応輸送等の基礎的なTHMC連成現象の3次元シミュレーションを可能にする。 開発したシミュレータを用いて、岩石力学挙動やシリカ溶解析出が貯留層の水理特性や抽熱性能に与える影響を定量的に評価する。 	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界地熱環境で生じる基礎的なTHMC連成現象を考慮可能にするため、有限要素法に基づく2D/3D貯留層THMCシミュレータを開発した。 開発シミュレータを用いて、抽熱時の貯留層挙動について予察的な評価を実施した。 	100%

目標達成状況

研究開発 項目	達成目標	成果	達成度
②超臨界水 環境での地 化学計算法 の設計	<ul style="list-style-type: none"> 初期条件400℃、20MPa以上の環境下における流体性状変化、水-岩石平衡反応を計算可能な地化学計算ツールを試作する。 室内実験、文献調査等にもとづき、5件のベンチマーク問題を策定し、試作ツールを用いて計算する。 	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界低密度領域における地化学挙動を計算するために、地化学計算ソフトSOLVEQ/CHIMのデータセットを拡張し、実装した。 室内の溶解平衡実験と析出実験の結果を元に、また文献をもとにした現実的な深部地熱モデル流体を用いて、7件のベンチマークテストを実施し、計算手法の評価を行なった。 	100%

目標達成状況

研究開発 項目	達成目標	成果	達成度
③超臨界地 熱シミュレー タ標準ベンチ マーク問題の 開発	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査等にもとづき、6件以上のテストケースを策定する。 2つ以上の既存シミュレータを用いてテストケースの試解析を実施し、①で開発するシミュレータと比較するためのデータセットを作成する。 	<ul style="list-style-type: none"> 全200件超の文献データベースを作成し、これに基づき3レベル11ケースのテストケースを策定した このうちレベル2の2ケースについて、既存の3つのシミュレータ（TOUGH3、iTOUGH、TOUGHREACT）による試解析を実施し、ベンチマーク問題のデータセットを作成した。 	100%

実用化にむけた課題・取組

試掘を見据え、今後 5 年間程度を目途に、本プロジェクトの成果にもとづき、超臨界地熱貯留層内で起こりうる THMC（熱・水・力学・化学）連成現象を対象にしたモデリング技術手法の拡張、改良を行う。

主な研究開発課題は以下の通り。

- 高温高圧下における科学的基礎データの拡充（岩石・流体物性データ等）
- 反応輸送シミュレーションの高度化（多成分系、高濃度塩水への対応等）
- 人工貯留層造成シミュレーションの高度化（3次元化、熱応力破壊の考慮等）
- 多変数・非線形問題の解を安定かつ高速に導出可能なソルバ技術の開発
- シミュレーションの妥当性評価法