

EGSについて

資料 7

(国研) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター
地圏資源環境研究部門 相馬 宣和



高温岩体発電雄勝実験場 (電中研, 2003)



肘折高温岩体実験場



バイナリ発電設備
(産総研, 2004)

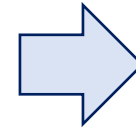
【目次】

- 在来型地熱発電とEGS
- EGSの歴史と分類
- 肘折高温岩体プロジェクトの実績と知見、今後の可能性
- 海外状況と新たな日本EGSに向けて

在来型地熱発電とEGS

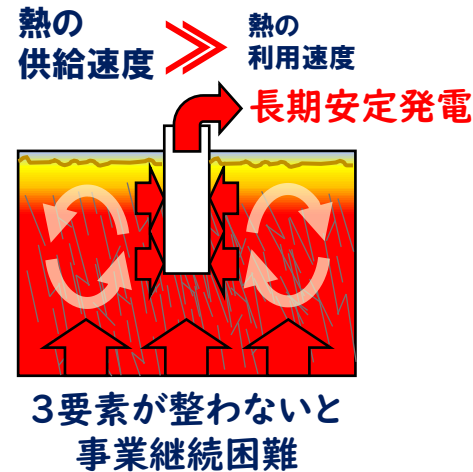
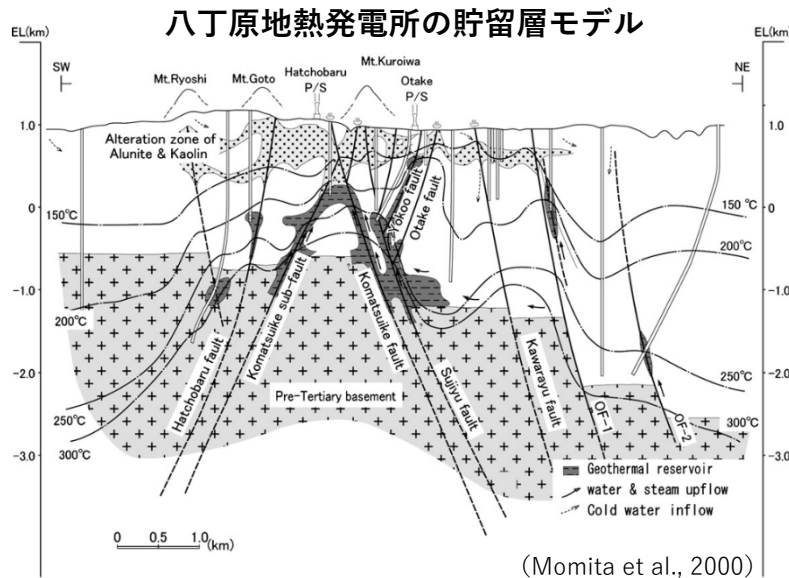
地熱の 3要素

熱 : エネルギー源、対流を励起
水 : エネルギーの輸送媒体
器(き裂や帽岩) : 貯留、流路、対流の場



3要素が不完全 (天然の地熱系以外) でも
熱エネルギー抽出ができないか?

= EGS : Enhanced Geothermal System
(または Engineered)



当初は「高温だが“き裂”や水に乏しい岩体に人工的にき裂を造成、2坑井以上で循環系を作って熱エネルギーを取り出すアイディア」

HDR : Hot Dry Rock

(Potter et al., 米国特許 3786858, 1972年出願)

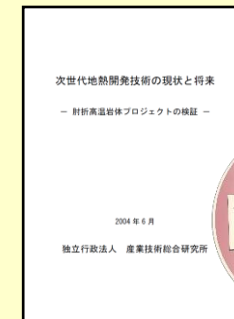
在来型地熱発電

= ベースロードも担える有用な国産エネルギー

★実用に足るEROI (エネルギー収支)

- ・ 18 (30年) @内山(1991)
- ・ 17 (1年) & 33 (30年) : 熱利用込み
@Atlason and Unnthorsson (2014)

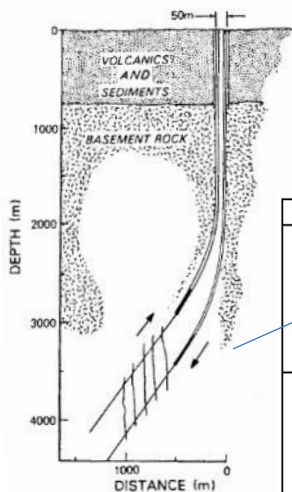
◎日本でも、1980年代～2000年代にかけて、
山形県肘折や秋田県雄勝にて、当時は**世界
トップクラスのHDRの研究開発**を展開した



最終レビュー報告書

「次世代地熱開発技術の現状と将来
- 肘折高温岩体プロジェクトの検証 -」
(産総研, 2004)

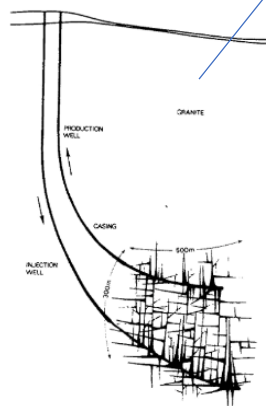
世界のEGSの経過年表



HDRの特許出願(1972)

ガイザースで
|人工涵養開始(1995)

↑
人工貯留層
コンセプト
の違い
↓



		1980					1985					1990					1995					2000					2005									
国名等	サイト名等	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004～							
米	Fenton Hill HDR	1971	フェーズ1				フェーズ2														→EGSに注力															
			・77 循環系形成 ・79 循環(288日)				IEA三国(日独米)共同研究				・85 循環系形成 ・86 循環(30日)								・92 LTFT(1st 112日) ・92 LTFT(2nd 55日) *LTFT: Long Term Flow Test, 長期循環試験																	
日	焼岳(工業技術院)	高温岩体発電のFeasibility Study																																		
	肘折(NEDO)	事前調査(工業技術院)				フェーズ1										フェーズ2																				
	秋の宮(電中研)											フェーズ1				フェーズ2				フェーズ3				フェーズ4												
	雄勝(電中研)																																			
	東八幡平／「計画(東北大学)											→下記HWRプロジェクトへ																								
英	Rosemanowes /Cornwall	フェーズ1				フェーズ2				フェーズ3										→下記Soultzプロジェクトへ																
						・82 Bulk water stimulation ・85 Viscous gel injection ・85年～90年 循環試験																														
仏	Le Mayet															→下記Soultzプロジェクトへ																				
EU	Soultz(仏国内)															フェーズ1										フェーズ2					フェーズ3					●
																・92 GPK-1掘削 ・93 GPK-1水圧破碎 ・95 GPK-2掘削 ・95 循環(4ヶ月)										・99 GPK-2増掘 ・00 坑井刺激					・02 GPK-3掘削 ・03 坑井刺激					
豪	Cooper Basin /Habanero HFR																																			
		・03 Habanero1掘削 ・03 水圧破碎																																		
スイス	Basel																																			
関連プロジェクト・関連研究																HWR																				
																HWRプロジェクト(東北大学) 湯の森/可採量増大プロジェクト(NEDO)																				

★以降の米国EGS

2008~ : Desert Peak, etc.

2010～ : Newberry

2012～ : Raft River

2016～ : **FORGE**

2023～ : **Fervo** [Project Red]
(3.5MWの発電)

2023～ : **Fervo** [Cape Station]

★ Soultz-sous-Forêts (14)

2007年から1.7MWeのバイナリ
発電を継続中

※生産井にダウンホールポンプを設置する方法。回収ロス無。

★ドイツ

2007年からLandauで3.8MW

バイナリ発電（縮小中）。

2007年からInsheimで4.8MW

バイナリ発電を継続。最近は
リチウム抽出PJも実施中。

2005～：Paralana, 豪

- ~2016 : Basel 中止

2016~2019 :
Pohang, 韓国 (中止)

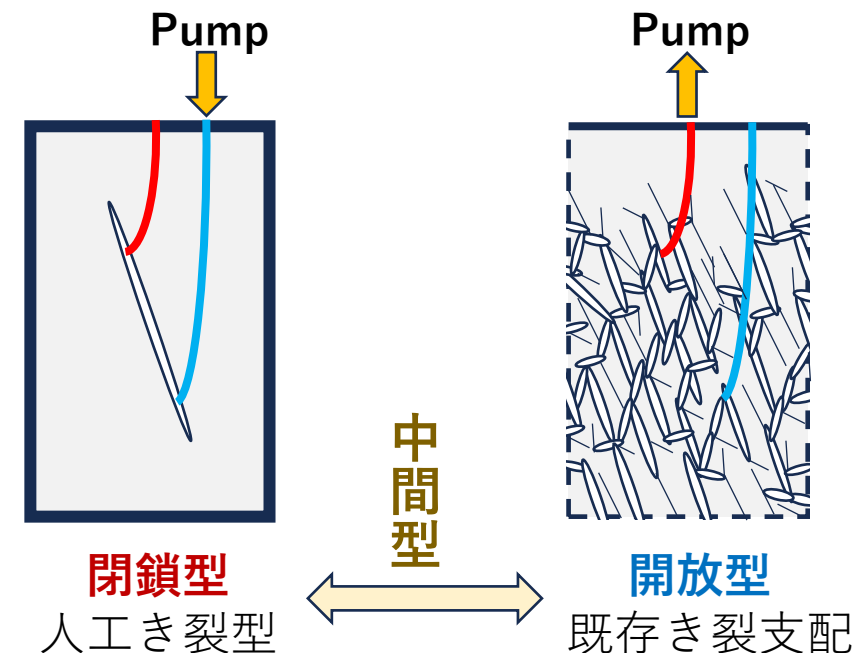
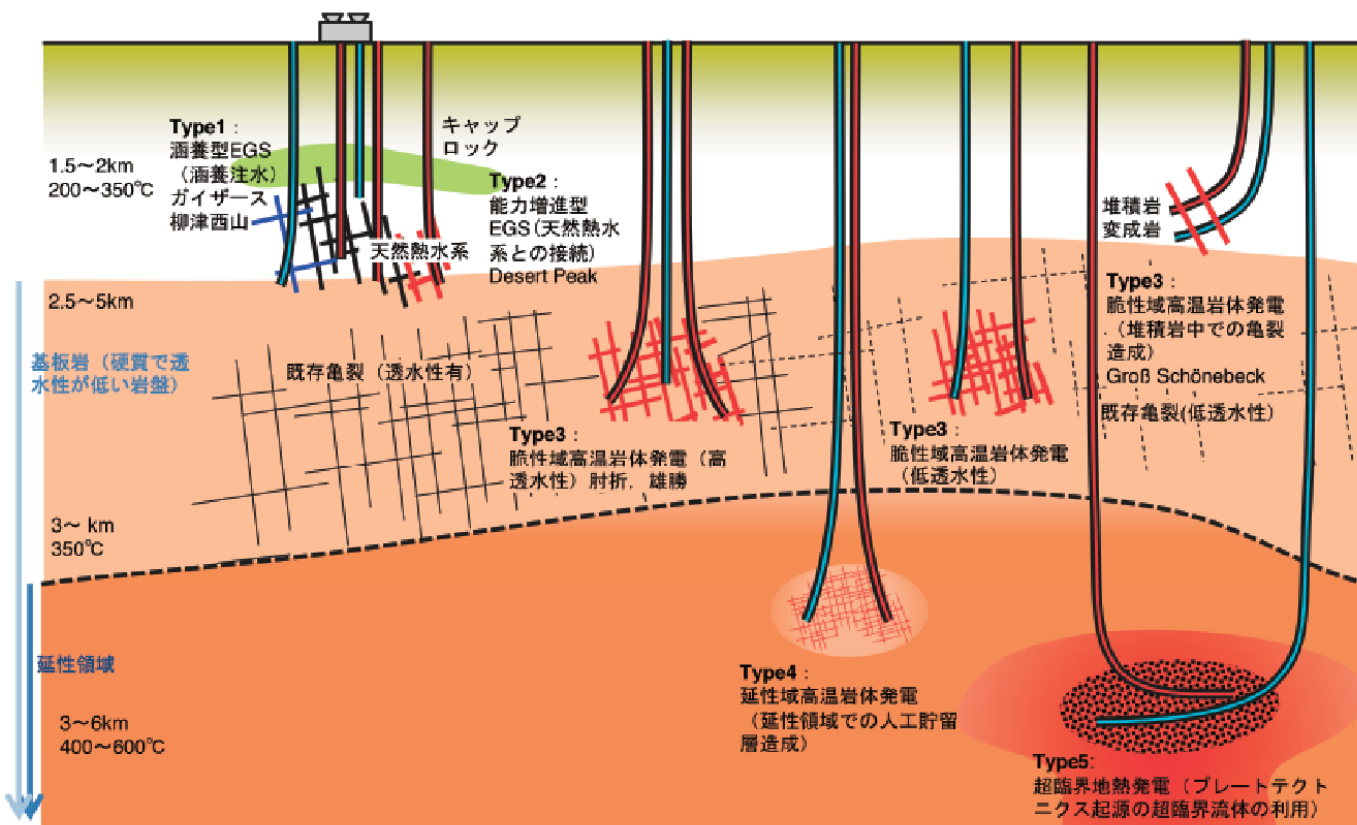
(産総研, 2004 を修正)

※有感地震/被害地震の誘発が海外EGSでの大問題

EGSの分類と定義

HDR（高温で“き裂”が無い岩盤（水も無い））
HFR（高温で“き裂”は一定量あるが水が乏しい岩盤）
HWR（高温で湿潤だが“き裂”の連結性の乏しい岩盤）
涵養型EGS（在来地熱地域での涵養注水）
．．．

= EGS



✓ EGSの本質は“技術”。特定の地熱資源条件や特定のシステム形態を指すのではない。

◎ 地熱の3要素（熱・水・器）が完備されていない全ての場所に適用可能

△ 長期安定的なエネルギー抽出には、3要素のうち“器”[貯留, 流路, 対流の場] が重要

肘折高温岩体プロジェクトの実施結果

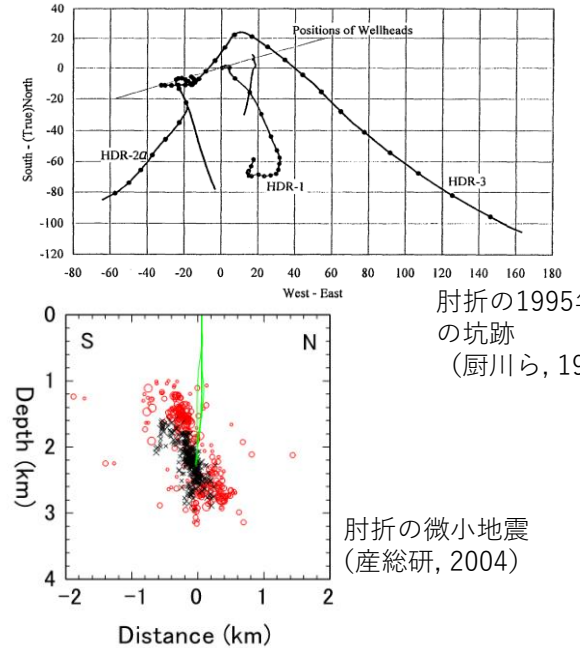
場所

- 山形県。肘折カルデラ南縁部。PJ以前に国や企業による地熱資源調査あり
- 約1.5km以深に基盤岩(花崗閃緑岩)が存在。高い地温勾配(254°C@深度1.8km)
- 高温(約270°C) & 天然地熱貯留層無し = HDRタイプEGSの適地と想定

坑井/貯留層造成と主な試験結果

- SKG-2(1.8km 注入), HDR-1(2.2km 注入), HDR-2(2.3km 生産), HDR-3(2.3km 生産)
- 浅部/深部の2段人工貯留層を造成。4坑井による1.5年間の長期循環テスト
- 世界で初めてHDRによる安定的な連続発電 (3か月間) に成功
(熱出力10MW、小規模バイナリ発電機50kW)

(産総研, 2004 を修正)



	深度約1800m、岩盤温度約250°C				深度約2200m、岩盤温度約270°C			
	1986年	1988年	1989年	1991年	1992年	1995年	1996年	2000~'02年
主な作業	SKG-2	HDR-1 SKG-2	HDR-2 HDR-1 SKG-2	HDR-2 HDR-1 SKG-2 HDR-3	HDR-2 HDR-1 SKG-2 HDR-3	HDR-2 HDR-1 SKG-2 HDR-3	HDR-2 HDR-1 SKG-2 HDR-3	HDR-2 HDR-1 SKG-2 HDR-3
	浅部水圧破碎 (全坑加圧法)	加圧試験 短期循環試験(2週間) HDR-1 増掘(2205m) PBR 設置	生産井 HDR-2 掘削 (1910m) 短期循環試験(29日間)	短期循環試験(90日間)	深部水圧破碎 (PBR 使用) HDR1 改修	短期循環試験(25日間)	導通改善循環試験 (30日間)	長期循環試験(総循環期間570日)
	・総注水量 1080m ³ ・戻り率35% ・最大流量 100kg/s	・最大流量 100kg/s ・回収率35% ・熱出力 1.3MW	・一時回収率 40% ・熱出力 4.5MW	・一時回収率 78% ・熱出力 8.5MW	・総注水量 2115m ³ ・戻り率15% ・最大流量 70kg/s	・回収率 40% ・熱出力 9MW	・循環パターン 変更による 導通性改善 ・回収率 31%→75%	・マルチ循環による 発電試験(回収率 55%、熱出力6MW) ・バイナリ-発電 50kWeの成功

- ✓ 複数坑井の配置で回収率約80%も達成
- ✓ 長期循環、連続発電の実現

要素技術R&Dとして成功

当初からHDRタイプを想定して実施された内容であり、商用発電システムには更なる検討が必要

肘折プロジェクトからの知見/課題と今後の可能性

知見：貯留層特性への影響因子の理解

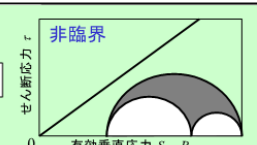
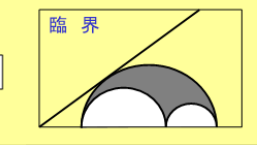
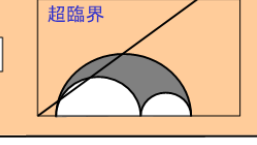
「天然き裂の配向・密度・連結性」「地殻応力」

「貯留層圧力・間隙水圧・既存き裂内の水圧」

→貯留層造成プロセスと貯留層特性の場合分けが実現。
エネルギーシステム利用方針も示唆が可能に

閉鎖型の貯留層 → 熱交換面積が相対的に少
高回収率 → **高温の場所**（一般に大深度）が必要

開放型の貯留層 → 大きな熱交換面積が期待
低回収率(DHP無し時) → **比較的低温度でも実現可能性**

	力学環境	水圧破碎 圧力	流動状態	伝熱面積	回収率(*)	具体例	定量化指標 R
閉鎖型		高	閉鎖的	小	高	フェントンヒル	-0.18
中間型		低	閉鎖的 @ 低圧 開放的 @ 高圧	中	高 @ 低圧 低 @ 高圧	ロゼマノウス & 肘折	+0.08 -0.04
開放型		低	開放的	大	低	ソルツ	+0.21

(*:最も単純な循環系(貯留層+2坑井)を造り、一方の坑井に水を圧入することで他方の坑井から貯留層内で加熱された水を押し出すとした場合に予想される、注入量に占める生産量の割合の比較。なお、この回収率が小さくともダウンホールポンプを使用することで増産可。) (産総研, 2004)

課題：合目的的な総合設計

各要素の繋ぎ合わせでは、実用発電システムは実現困難。
初めから商用規模の目標をもった総合設計(Overall System Design)が必要。各要素技術(広域調査、貯留層造成、抽熱、発電など)の目標設定に統一的な合目的性が要る。

課題：「貯留層の設計」の具体的な実現

総合設計にて仕様を定め、**広域調査、地殻応力、既存き裂計測**などを重視した「貯留層の設計」とその実現が必要。

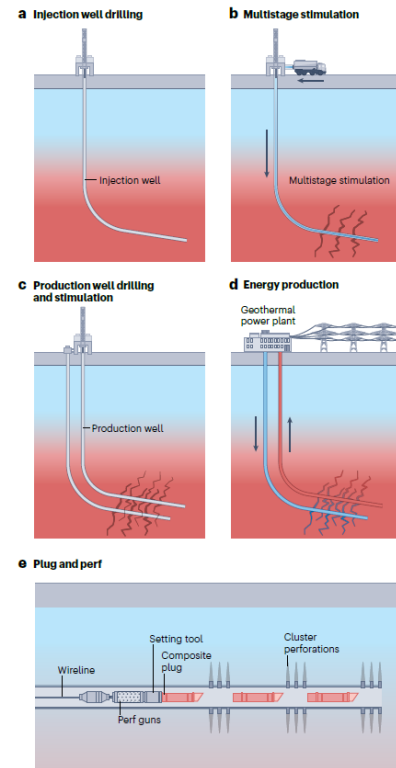
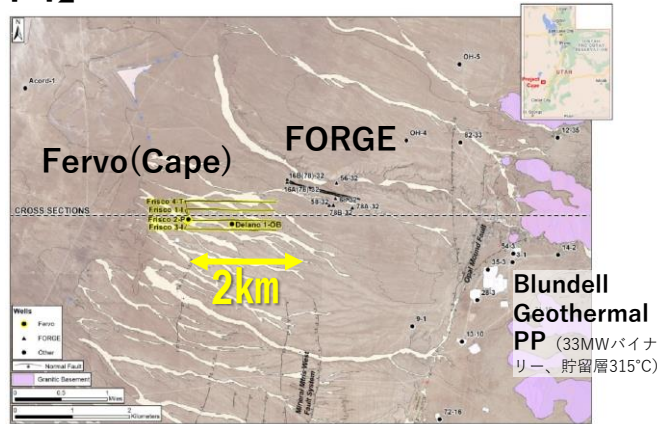
現在: 各種技術の進歩→EGSの可能性

- ✓ “EGS”概念の大幅な進歩
- ✓ バックキャスト思考でのPJデザイン
- ✓ 飛躍的に進歩した各種技術
情報統合化(DX/AI)、モデリング/シミュレーション、調査技術(DAS、高品質MT、微小地震、空中物理探査)、etc.

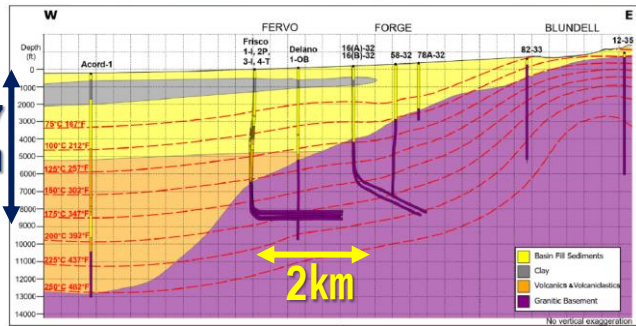
当時の不可能が“今は可能”に

海外EGSの状況と新たな日本EGSに向けて

【米国】



(Horne et al., 2025)



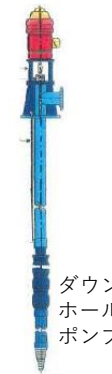
(Fercho et al., 2025のFig.1&2を修正加筆)

※上記例は、**閉鎖型の地質環境**でのPJ展開

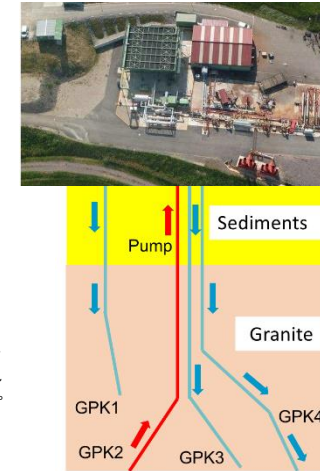
- ✓ 石油ガスの技術の積極導入
 - ・ 高温の結晶質岩での水平井掘削技術
 - ・ 多段階刺激 (plug-and-perf. design)
 - ・ プロパント (引張り裂の開口維持)
- ✓ Fervo**先行PJ(3.5MW)**は**電力供給中** (Google DC)。更なる大型化を構想
- ✓ 高回収率、約1年間の安定流体循環

※涵養注水や天然系改質のEGS実績もあり

【EU】



ダウン
ホール
ポンプ

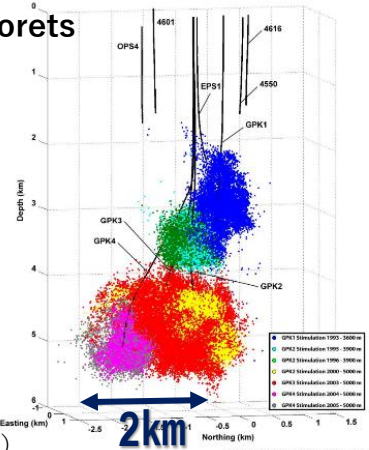


Soultz-sous-Forets

Power plant
Max 1,5MWe
Organic Rankine Cycle

Geothermal system
Production Well GPK2
26L/s @ 157°C 19bar

(Genter, 2012 を修正)



Soultzの微小地震

※中温度の**開放型の地質環境**に合わせた開発

- ・ 既存き裂刺激での“せん断滑り”による透水性改善
- ・ 生産井に**汲み上げ用ダウンホールポンプ**を設置

✓ 2007年から**20年近く商用発電を継続中**

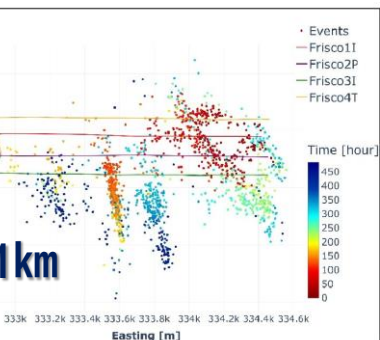
【新たな日本EGSへ】

- ◎比較的**浅い深度**で**高い温度**に到達できる
- ◎過去調査や既存地熱周辺など**地質情報と知見の蓄積は多**
- ◎物理探査やモデリング/シミュレーション等も**高技術水準**



- ✓ 貯留層造成前に綿密な調査・検討・設計を実施
- ✓ 長期安定操業を目指した最適化を導入, 等々

**日本の地質環境(主に中間型)で最適化EGSを実現
持続可能なEGS地熱システムの実用化と展開へ**



Fervo(Cape)の微小地震
(Mohammadi et al., 2025に加筆)

