

## 2021年度成果報告会

# 超臨界地熱発電技術研究開発／超臨界地熱資源へ の調査井掘削に資する革新的技術開発／ 革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発

(一財)エンジニアリング協会  
(一財)ファインセラミックスセンター  
(国)京都大学

問い合わせ先  
(一財):エンジニアリング協会  
E-mail:junz\_kshr@jf7.so-net.ne.jp  
TEL:080-5055-4897

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2018年8月

終了 : 2021年3月

## 2. 最終目標

- ① 人工震源及び自然地震を活用し、光ファイバーによるDAS計測技術を主体とする弾性波探査技術の有効性を確認し、深度5kmまで、かつ坑井周辺3km四方の物性またはその変化、貯留層の存在の有無等を把握可能な手法とする。
- ② 開発した光ファイバーが超臨界水環境下における要求性能を満たす耐水素性と耐食性を有することを実証し、経済性を評価する。

## 3. 成果・進捗概要

- ① 2020年度大沼地熱発電所における坑井を用い深度2,037mまでのDAS, DTS観測を行った。DAS記録から発電所の南西の位置に深さ2.8-3.0kmに広がる地震波の高反射ゾーンの存在が明らかとなった。既存データとも比較検討し、本観測技術の有効性が確認されたと考えられる。
- ② 全波形インバージョン(FWI)手法を用い、実試験フィールド、震源位置を仮定の上、DASと地表地震計を用いると仮定したシミュレーションを実施し、最適な解析手法の基礎を確立した。
- ③ 耐腐食性、水素遮蔽性に優れた素材を用いて熱応力を考慮したコーティングの積層構造を設計するとともに、その設計指針に従い作製した構造が超臨界環境下で維持することを検証した。また、既存品のコストをもとに開発品の経済性評価を行った。

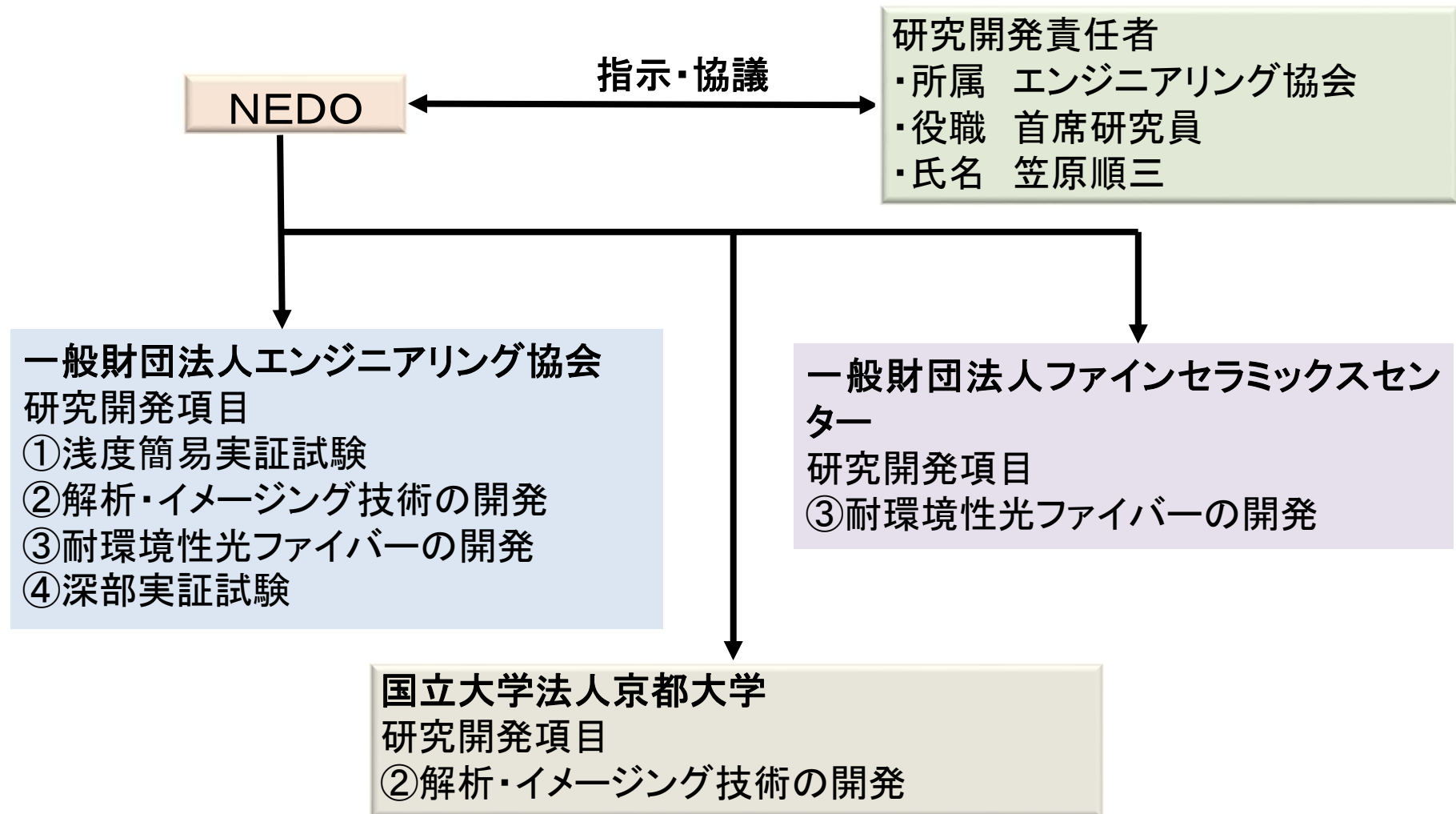
# 研究開発目標

研究課題	目標
①浅部簡易実証試験	地熱坑井内の比較的浅部にDAS(分布型地震計)を設置し、周辺で起きる地震あるいは人工震源の振動を坑井に沿って5-10m間隔で計測する。そして、坑井内におけるDASのS/Nを定量的に評価するとともに逆伝播を行う。 これらにより、DAS技術の有効性を確認し、課題を把握する。
②解析・イメージング技術の開発	全波形インバージョンでは地下100-500mブロック内の位置と形、物性の状態について観測結果とインバージョンを用い推定する。
③耐環境性ファイバーの開発	開発した光ファイバーが超臨界水環境下(374℃以上、22MPa以上)における要求性能を満たす耐水素性と耐食性を有することを実証し、経済性を評価する。
④深部実証試験	使用可能な地熱坑井深度と坑井内の状態、使用可能な光ファイバーなどを勘案しながら、地熱坑井内にDASを設置し超臨界水貯留域が存在する深さに可能な限り接近する。そこで、深さ5kmまでで、かつ坑井周辺3km四方の物性変化、貯留層の存在の有無等を明らかにできる手法を開発する。

# 実施内容

研究開発項目	進捗総括	2018年度	2019年度	2020年度
①浅部簡易実証試験	実際の地熱発電で使われ、使われなくなった坑井の利用や地表地震計での比較計測。本観測システムの基本的要素の確認	試験井調査 坑内DAS	能動的観測有効性の確認 課題抽出	
②解析・イメージング技術の開発	既存の井戸データ、周辺の地質データと合わせて、各実証試験で得られたデータを総合して、深部地下構造のイメージング手法などを開発	試験井	モデル化 DAS比較検討 タイムラプス	技術の開発
③耐環境性光ファイバーの開発	耐環境性光ファイバーの耐水素性と耐食性を向上させる方法について検討し、経済性を評価	ベンチマーク素材試験 耐環境構造設計 劣化損傷	評価試験	
④深部実証試験	光ファイバーの深さを深くし本観測技術を確立。三菱マテリアル大沼地熱発電所フィールドで実施	適地調査	協力・データ入手 坑内DAS計測準備	能動的測定・解析

# 研究開発実施体制



## 最終年度(2020年度)の課題

### ④深部実証試験、②解析・イメージング技術の開発

- 地熱フィールドが異なると、地質、温度構造、貯留層の深さと構造、物性、観測坑井の位置と形状が異なる。
- メディポリスで行った坑内DASによる地下地熱構造の地下探査が他の地熱フィールドでも有効な手法であることを実証する。
- 既知の地熱構造との整合性を確かめる。
- 震源の加震力を高め、重合時間を長くすることにより深部での深部地熱構造の推定精度を高める。
- 地熱フィールドに即した最適な解析手法を開発する。
- 2020年9月、深部実証試験フィールドとして大沼地熱発電所フィールドで実施した。

### ③耐環境性光ファイバーの開発

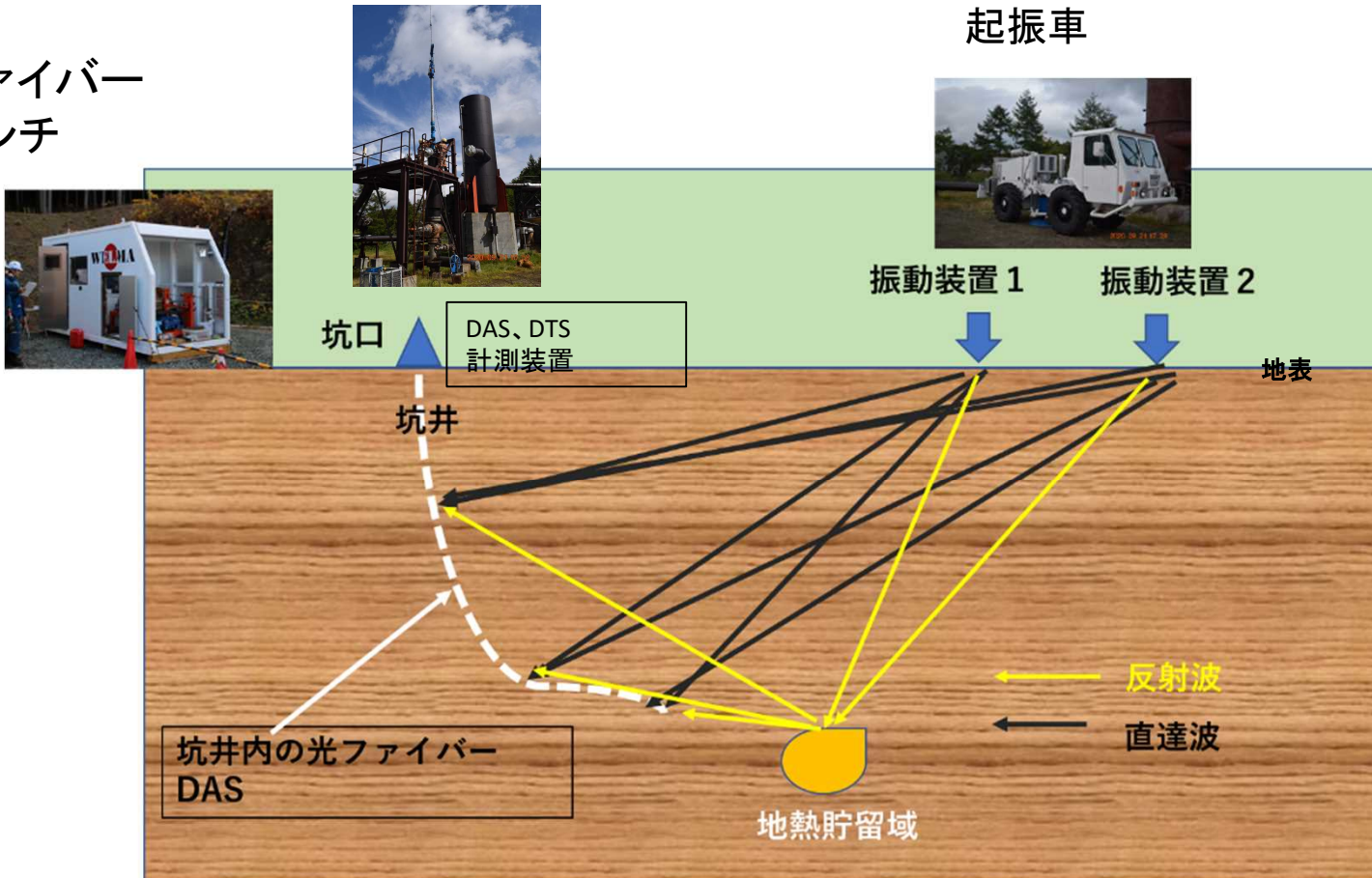
- 開発した光ファイバーが超臨界水環境下(374 °C以上, 22 MPa以上)における要求性能を満たす耐水素性と耐食性を有することを実証する。

## 深部実証試験の概要

- 2020年9月17日から10月4日まで大沼地熱発電所内のO-13R坑井を利用して光ファイバーを坑内に2,037m長(実深度1,971m)を設置した。
- DTSにより坑内の温度測定を行った。
- DAS—人工震源によるオフセットVSPを行った。
- IVI社中型エンバイロバイン(66kN)による加震を行った(8時間)
- 観測記録のスタッキングを行い雑音の21dBのS/N比低減を試みた。
- 各震源に対するマイグレーションイメージを作成した。
- 本方式によるメディポリスおよび大沼地熱フィールドの取得結果と既存地熱データとの総合化を検討した。

## 調査法の概要

光ファイバー  
ウインチ



坑井内に光ファイバーを挿入し、DAS(分布型振動計測システム)として起震車から出た地震波を計測する。これにより地下地熱貯留域から散乱される波群を解析する。

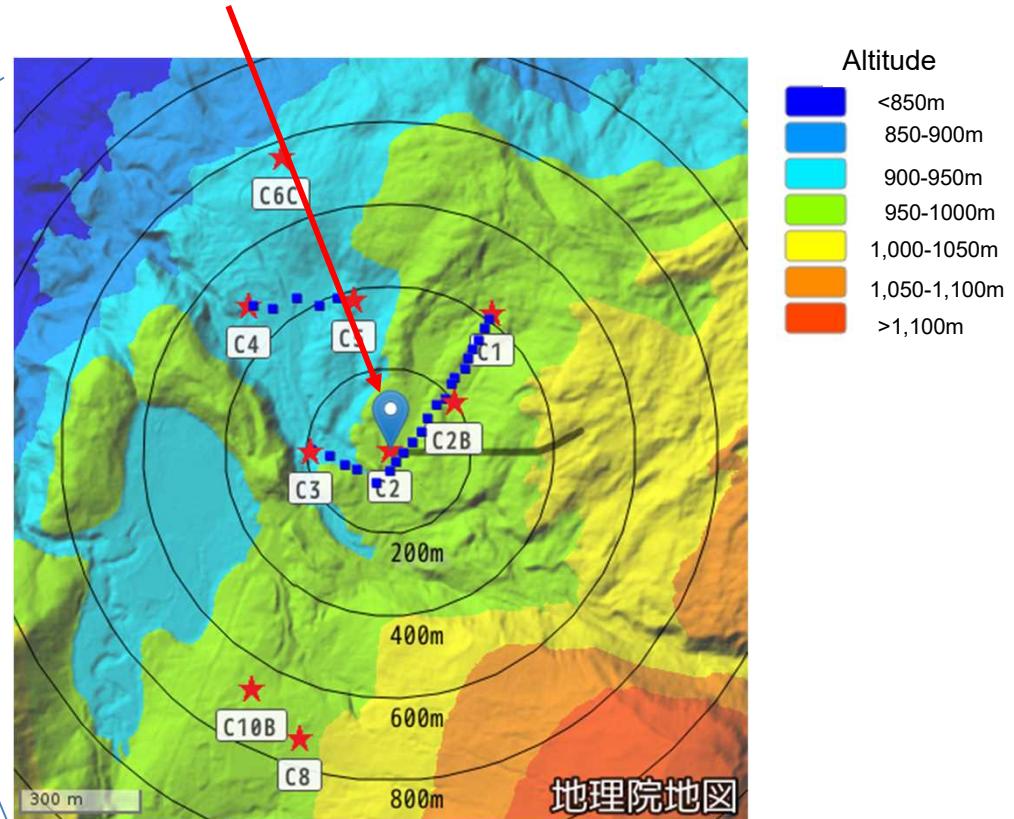


## 観測地点の図

### 大沼地熱発電所O-13R



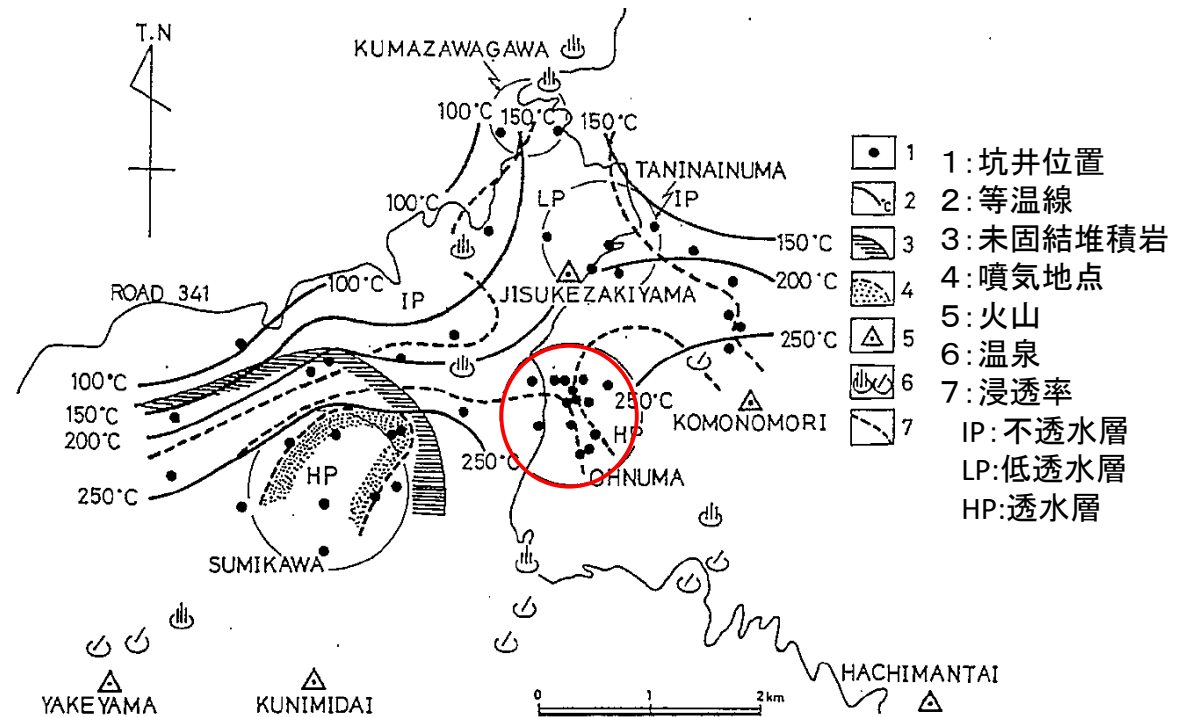
観測地点の配置を示す。青四角は地表地震計。同心円の中心が坑口。赤星印は9か所の震源位置。黒小円はO-13R内のDAS計測位置を示す。



## 大沼～澄川地熱フィールドの地熱環境の概要

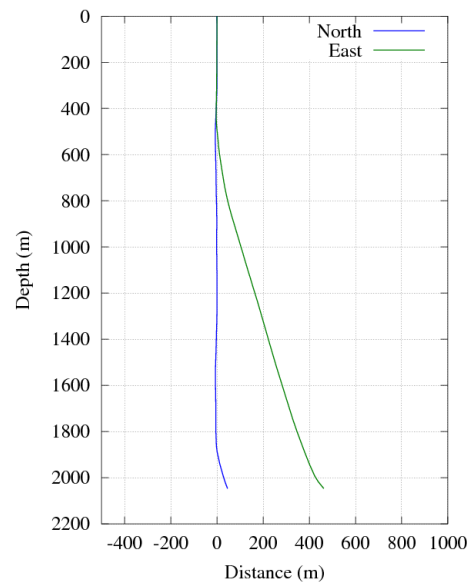
窪田他(1989)による大沼～澄川の地熱フィールドのまとめである。赤の円内は大沼地熱発電所である。多数の地熱井戸があり坑底温度は250℃に達している。また高浸透層となっている。

窪田他、1989, 1988.



## O-13Rの井戸の東西偏距

坑井の垂直断面を示している。  
坑井は東方向に500mほど偏距している。

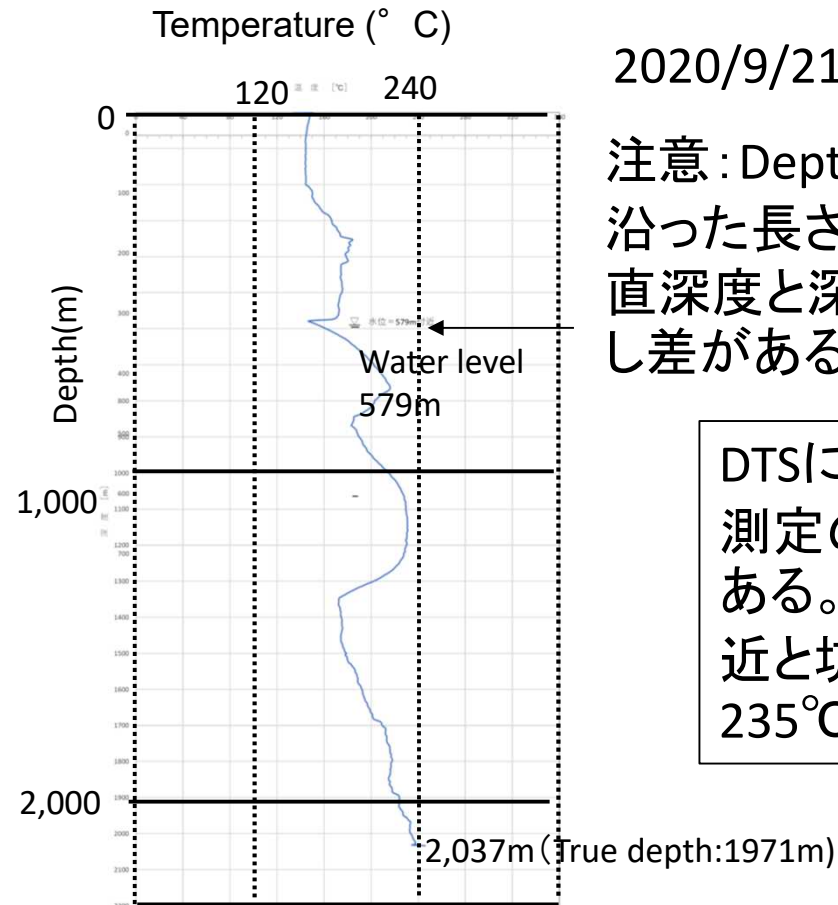


## DTS測定温度

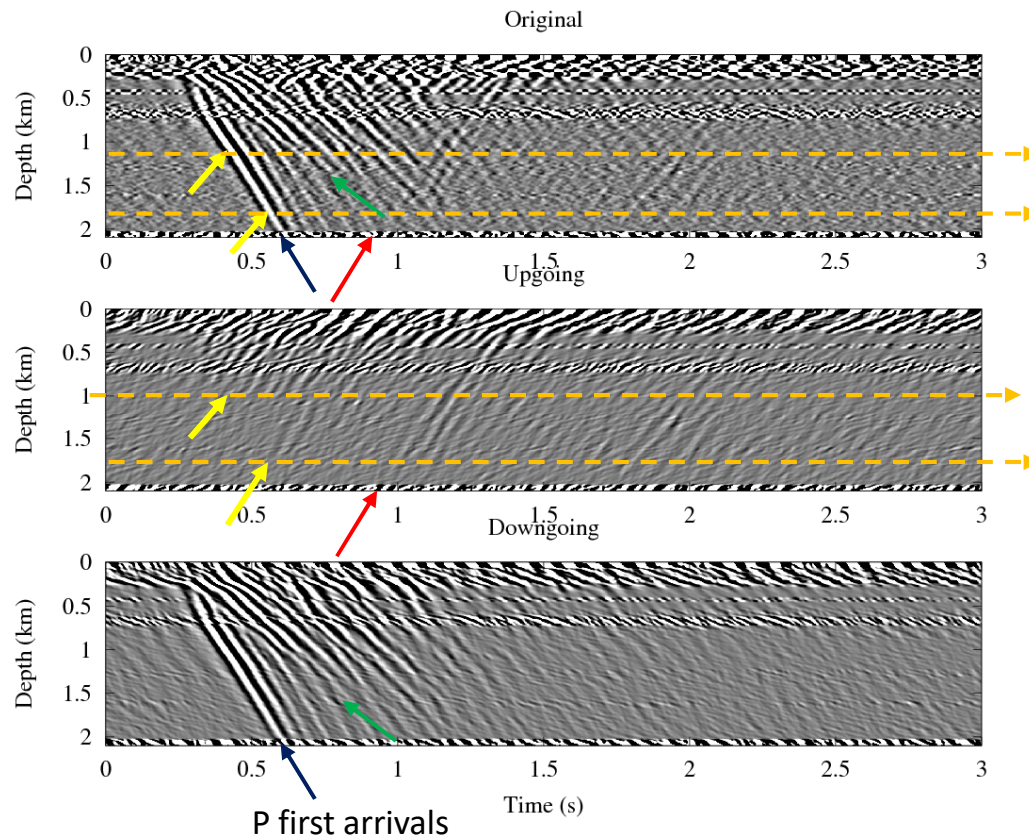
2020/9/21計測

注意: Depthは坑跡に沿った長さであり、垂直深度と深部では少し差がある

DTSによる温度測定の結果である。1,100m付近と坑底で235°Cである。



## DASの測定記録を上向き・下向きの波に分離 (C-4)

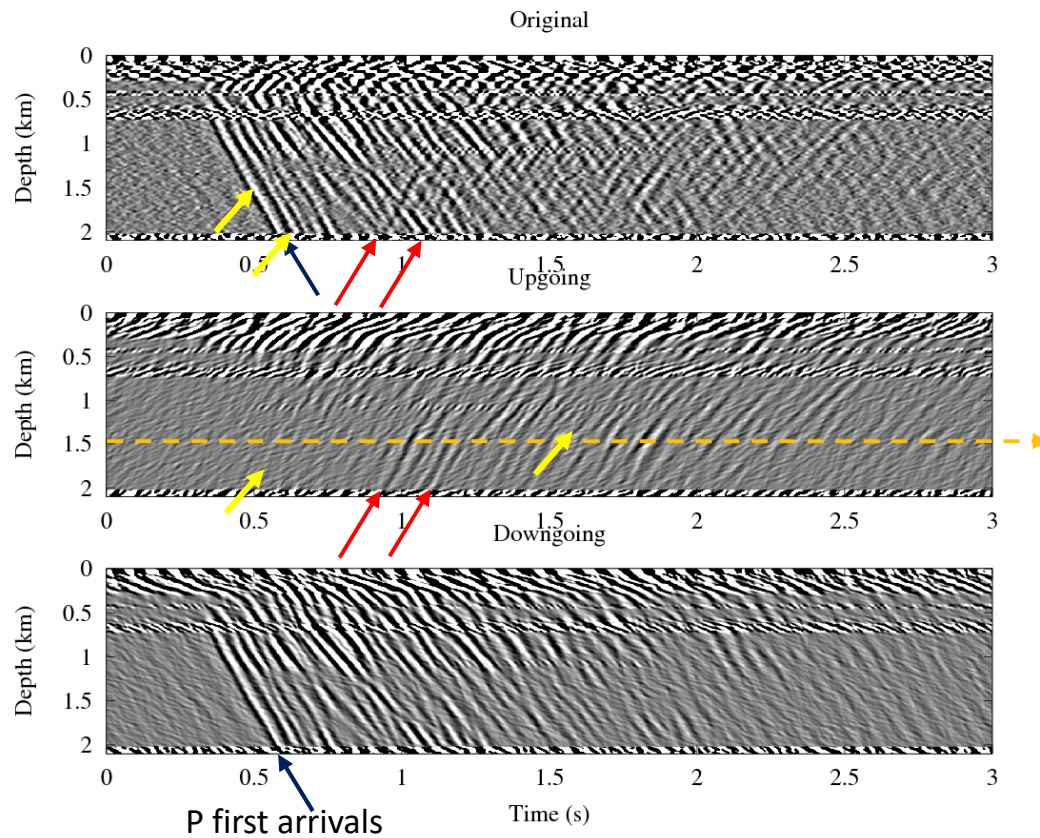


観測DAS元波形

上向き波群(反射波)

下向き波群(直達波)

## DASの測定記録を上向き・下向きの波に分離 (C-8)



観測DAS元波形

上向き波群(反射波)

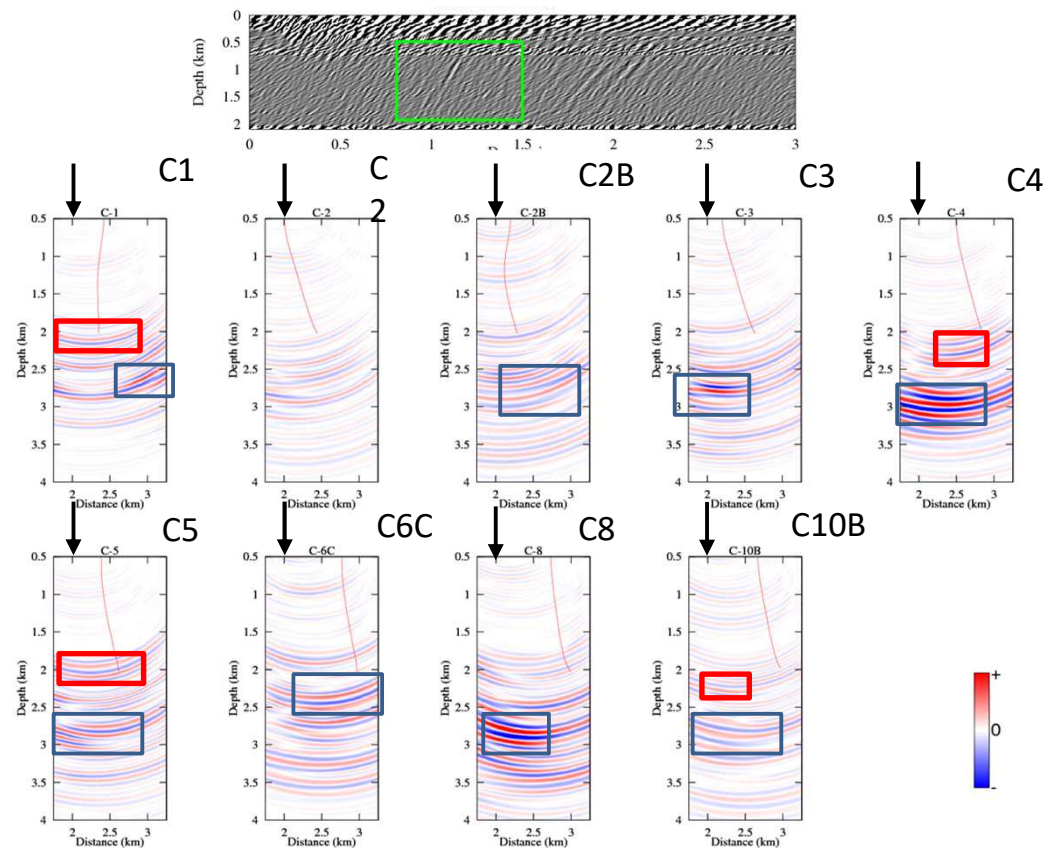
下向き波群(直達波)



# 観測波形のマイグレーション結果

- ・深さ500mから深さ4kmまでのマイグレーションの結果。
- ・深さC4、 C5、 C8、 C10Bにおいて2.8-3.0km付近に強い反射領域がある。C、C6Cでは2.5-2.6km付近と少し浅い。
- ・深さ2kmにも反射が見られる。

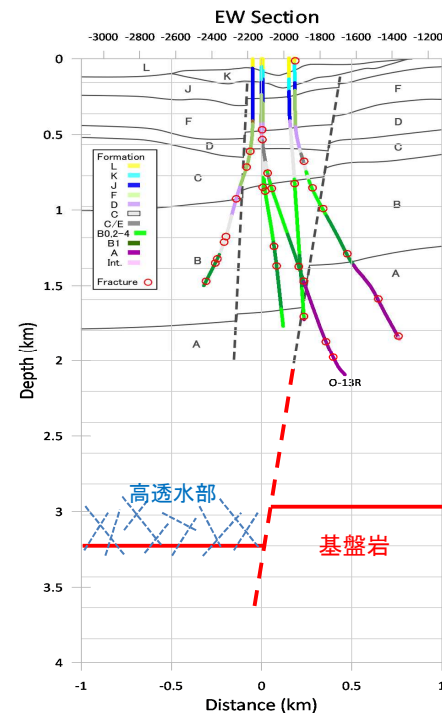
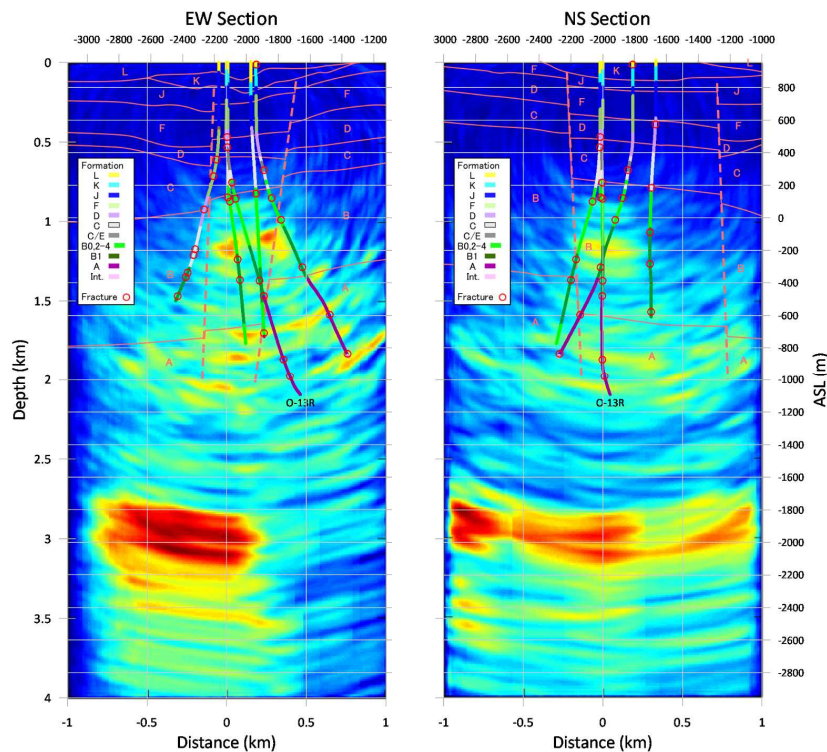
## マイグレーションの範囲(C3)



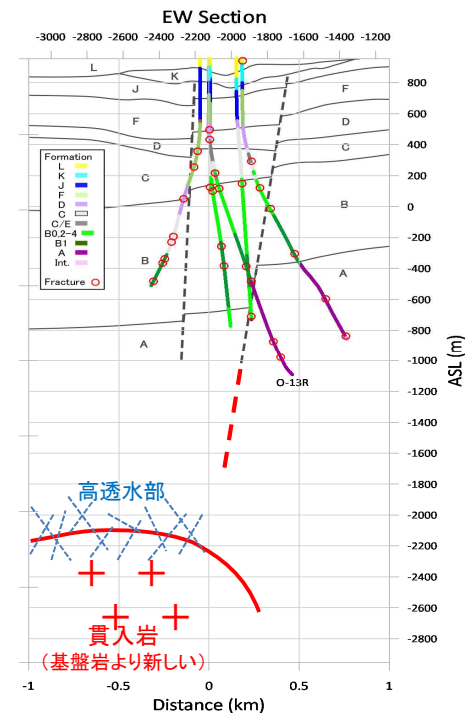
マイグレーションから得られた反射強度の分布を地図上に重ねると、反射強度の強い領域が坑口の南西側にあることがわかる。



# マイグレーション結果との比較、と深部反射体の推定



①基盤構造とそれに伴う高透水部の存在



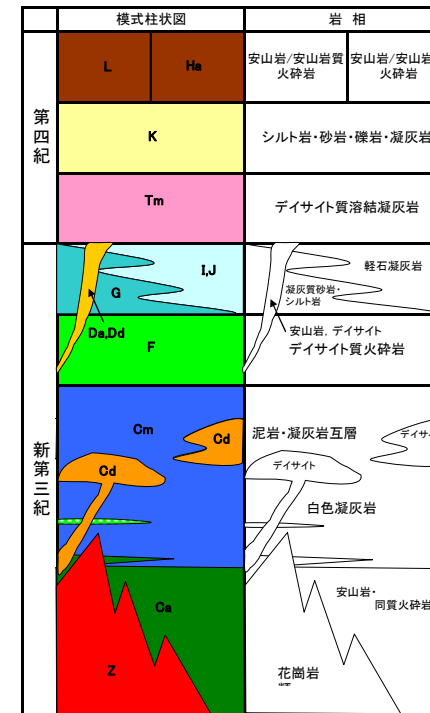
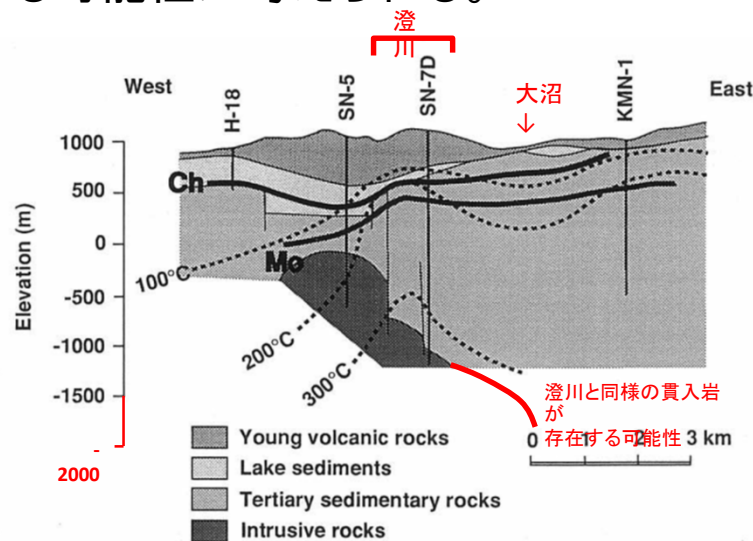
②貫入岩とそれに伴う高透水部の存在

- 浅部の反射は、地層境界深度と調和的。  
(C～B層, B層中のB1上面, B～A層)
- 地層境界付近にはフラクチャーが分布することが多く、その点では貯留層の分布を反映している可能性がある。
- 比較的落差の大きい断層が推定されているが、そうした構造が反映されているようにも見える。
- 深部の反射については、現状比較できる実測データが得られていないが、深部反射体が南北に連続性があるのに対し、東西では途切れた形状を示す点は、断層を想起させる。



# 深部反射体が貫入岩である可能性について

- 大沼地域の西に隣接する澄川地域では、深部に貫入岩の分布が確認されており、その周辺が主要な生産ゾーンのひとつとなっている。
- 同様の貫入岩の分布が、大沼の深部にも存在する可能性が考えられる。



澄川地域の岩相区分

Cm層: 大沼のC, C/E, B1以外のB層に相当  
 Ca層: 大沼のB1層に相当  
 Z層: 左図の貫入岩に相当, 大沼では未確認

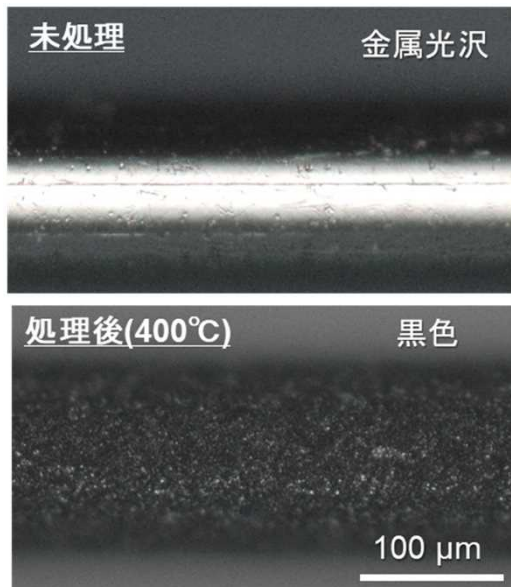
## 2020年度の深部実証試験のまとめ

- ・O-13R坑井へ深度2,037mまで光ファイバーを設置した。
  - ・DTSにより深度2,037mまでの温度記録が得られた。
  - ・9加震地点について坑底までのDAS記録を得た。
  - ・DAS観測記録を320回から480回のスタッキングを行った。
  - ・C3,C4,C5,C8,C10 で深度2.8-3km程度からの明瞭な波群が見られる。
  - ・反射波のマイグレーションを行った結果、深さ1km、1.5km、2.8-3.0kmに反射面があり、  
深さ1-1.5kmは生産ゾーンと一致する。深さ2.8-3.0kmは強い反射面となっており貯留層の可能性がある。深さの精度は高い。
  - ・本研究において行った解析結果と大沼地熱フィールド、メデイポリス地熱フィールドの既存地熱データとの整合性を議論しつつある。
- ・この手法が今まで明確になっていなかった地下貯留層の発見に有効な手法であることが確認できたと考える。

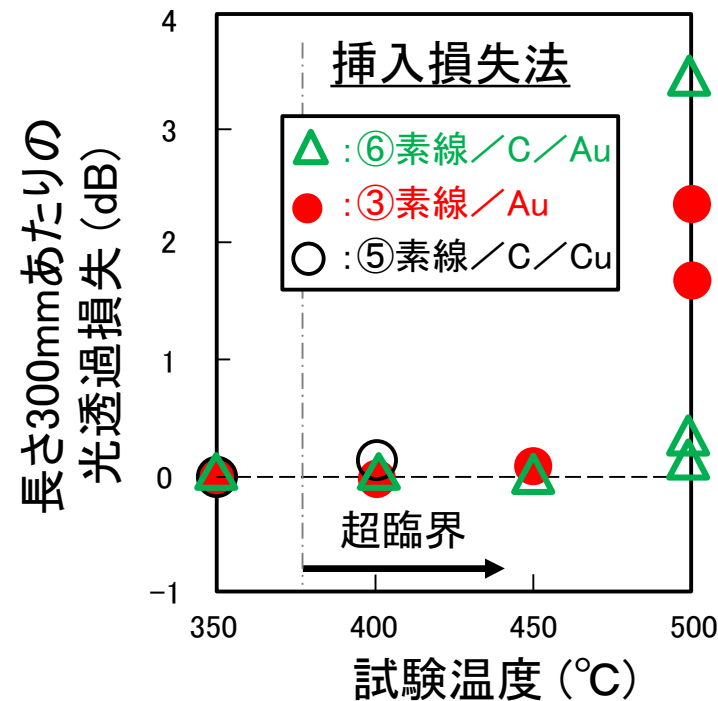
# 耐環境性光ファイバーの開発

**目標** 光ファイバーが超臨界水環境下(374 °C以上、22 MPa以上)における要求性能を満たす耐水素性と耐食性を有することを実証する。

## 既存の光ファイバー



400°C、25MPa下10h曝露  
素線/C/Cuの光学顕微鏡写真

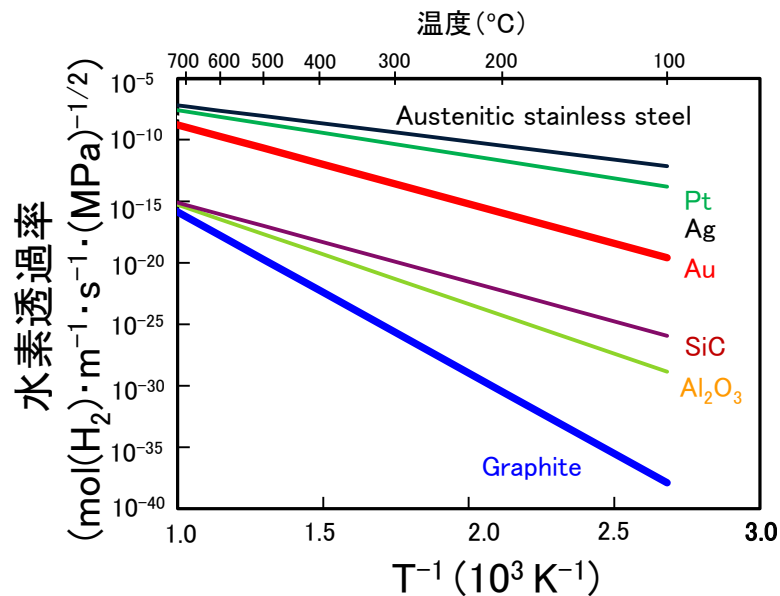


25 MPa下で10h曝露後(30cm)

- ・耐腐食性: Auコーティングは最高500°Cまでの熱水中において有効。
- ・耐水素性: Auコーティングは超臨界環境下(400°C), 10hで有効。

# 耐環境性光ファイバーの開発

## コーティング素材の水素遮蔽性

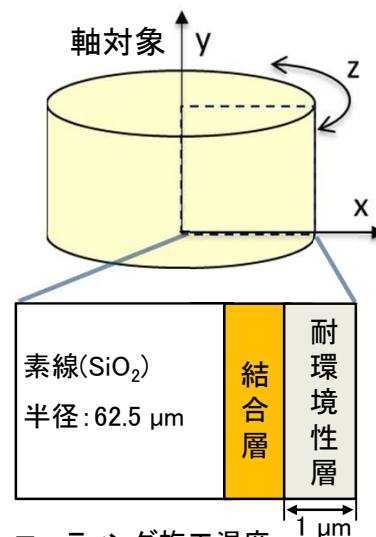


R. A. Causey et al.(2009) (DOI :10.1016/B978-0-08-056033-5.00116-6)

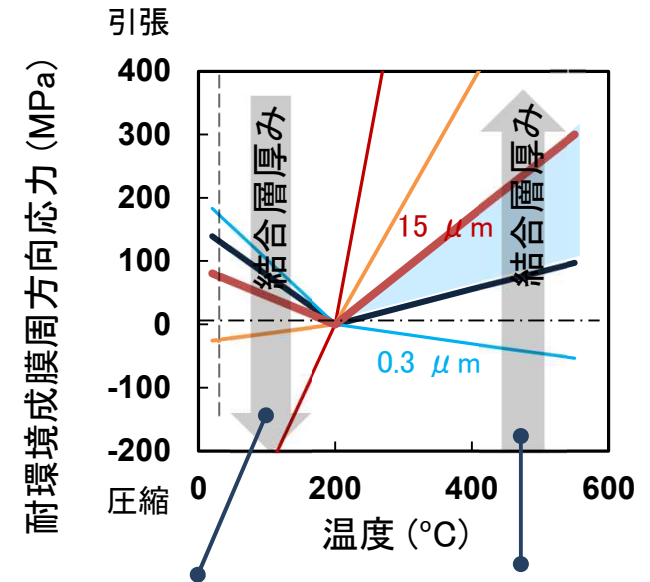
- ・耐水素透過性:カーボンが優れる
- ・課題:熱サイクル環境下で破壊しない膜構造の設計

## 熱応力解析による結合層の最適厚さ設計

### FEMモデル

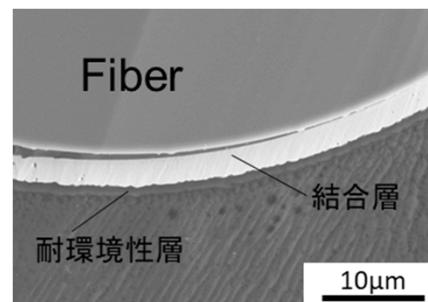


コーティング施工温度  
200°Cにおいて熱応力ゼロ



結合層が薄いほど  
冷却時に破壊しやすい

結合層が厚いほど  
高温時に破壊しやすい



## 腐食試験 による検証

(400°C, 25MPa, 10h)

- ・構造安定を確認
- ・挿入損失法による光透過性の評価: 有意な劣化なし

設計指針を基に施工した積層コーティングが超臨界環境下で構造を維持することを実証。

# 最終目標達成へのステップと達成度

研究課題	目標	達成度
① 浅部簡易実証試験	地熱坑井内の比較的浅部にDAS(分布型地震計)を設置し、周辺で起きる地震あるいは人工震源の振動を坑井に沿って5-10m間隔で計測する。そして、坑井内におけるDASのS/Nを定量的に評価するとともに逆伝播を行う。これらにより、DAS技術の有効性を確認し、課題を把握する。	メデイポリス地熱フィールド内のIK-4坑井において1540mまでの深度でDAS計測をおこなった。5-10mの計測を行った。長時間観測をおこないこれによるS/Nの改善を評価した。DAS技術が極めて有効であることを確認した。
② 解析・イメージング技術の開発	全波形インバージョンでは地下100-500mブロック内の位置と形、物性の状態について観測結果とインバージョンを用い推定する。	全波形インバージョンを実施しモデルの再現性を評価した。その結果、位置、形状、Vpの再現性は良かったが、Vs,密度の再現性はVp程では無かった。これは観測網の形状にも依存する。
③ 耐環境性ファイバーの開発	開発した光ファイバーが超臨界水環境下(374℃以上、22MPa以上)における要求性能を満たす耐水素性と耐食性を有することを実証し、経済性を評価する。	耐水素性、耐食性積層構造を設計し、それを実際に制作して超臨界環境下で構造を維持することを実証するとともに、経済性を評価した。
④ 深部実証試験	使用可能な地熱坑井深度と坑井内の状態、使用可能な光ファイバーなどを勘案しながら、地熱坑井内にDASを設置し超臨界水貯留層が存在する深さに可能な限り接近する。そこで、深さ5kmまででかつ坑井周辺3km四方の物性変化、貯留層の存在の有無等を明らかにできる手法を開発する。	1.971km深度まで坑井内にDASを設置した。超臨界水域としては浅すぎたが、メデイポリス地熱フィールドでは深さ3.6kmに超臨界層の可能性を示唆するゾーンの存在を見つけた。大沼地熱フィールドでは深さ2.8-3.0 kmに地震波反射ゾーンを見つけた。これは超臨界水域としては少し浅い。坑井周辺3km、深さ5kmの貯留層検出の可能性はほぼ達成できた。物性の評価も行った。短時間では変化は見られなかった。