



秋田大学
Akita University

化学工学会 超臨界流体部会
第21回サマースクール

エネルギー・環境問題に挑戦する超臨界流体・CO₂分離貯留技術

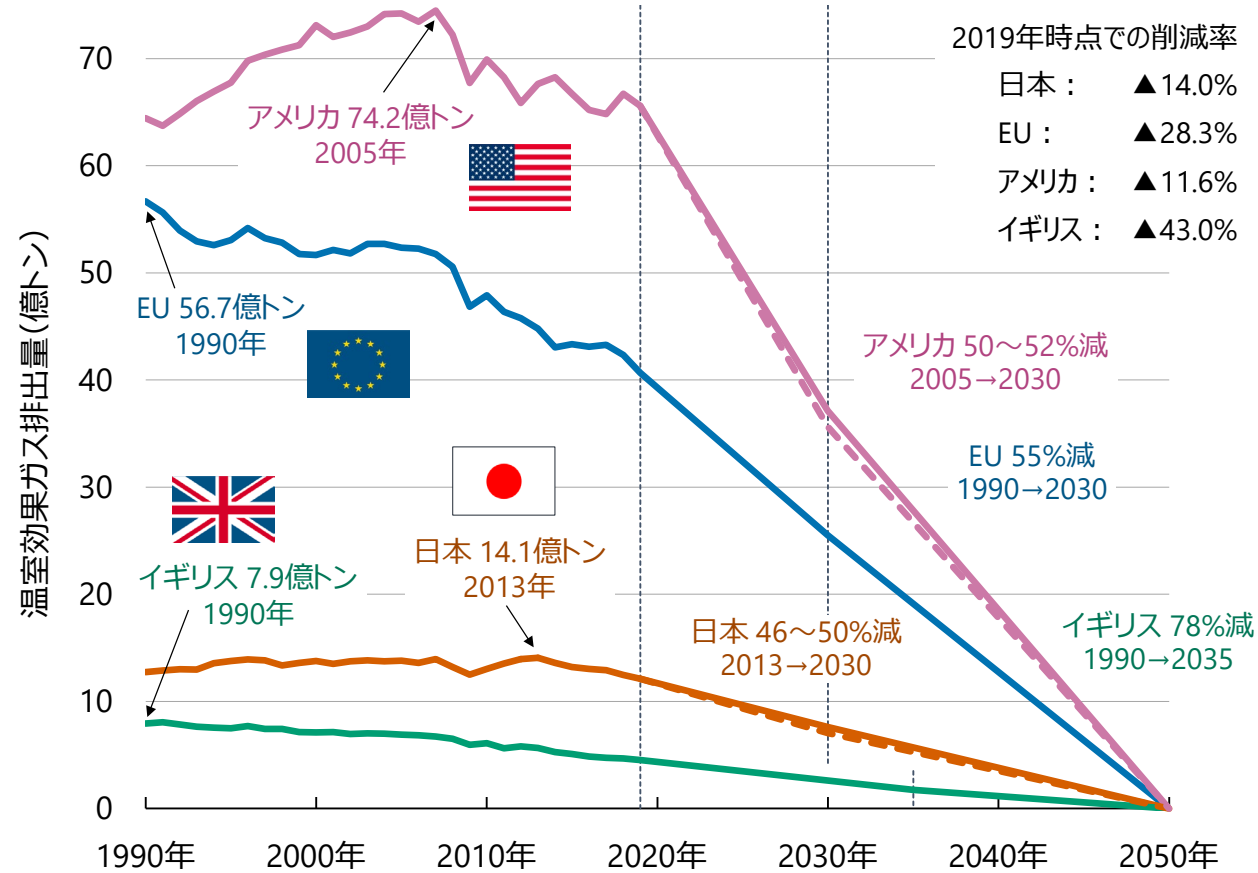
超臨界地熱資源開発における 技術的課題

2022年9月5日@東北大学東京分室会議室

秋田大学 大学院国際資源学研究科
長縄 成実(ながなわ しげみ)

2050年の温室効果ガス排出量ゼロに向けた目標

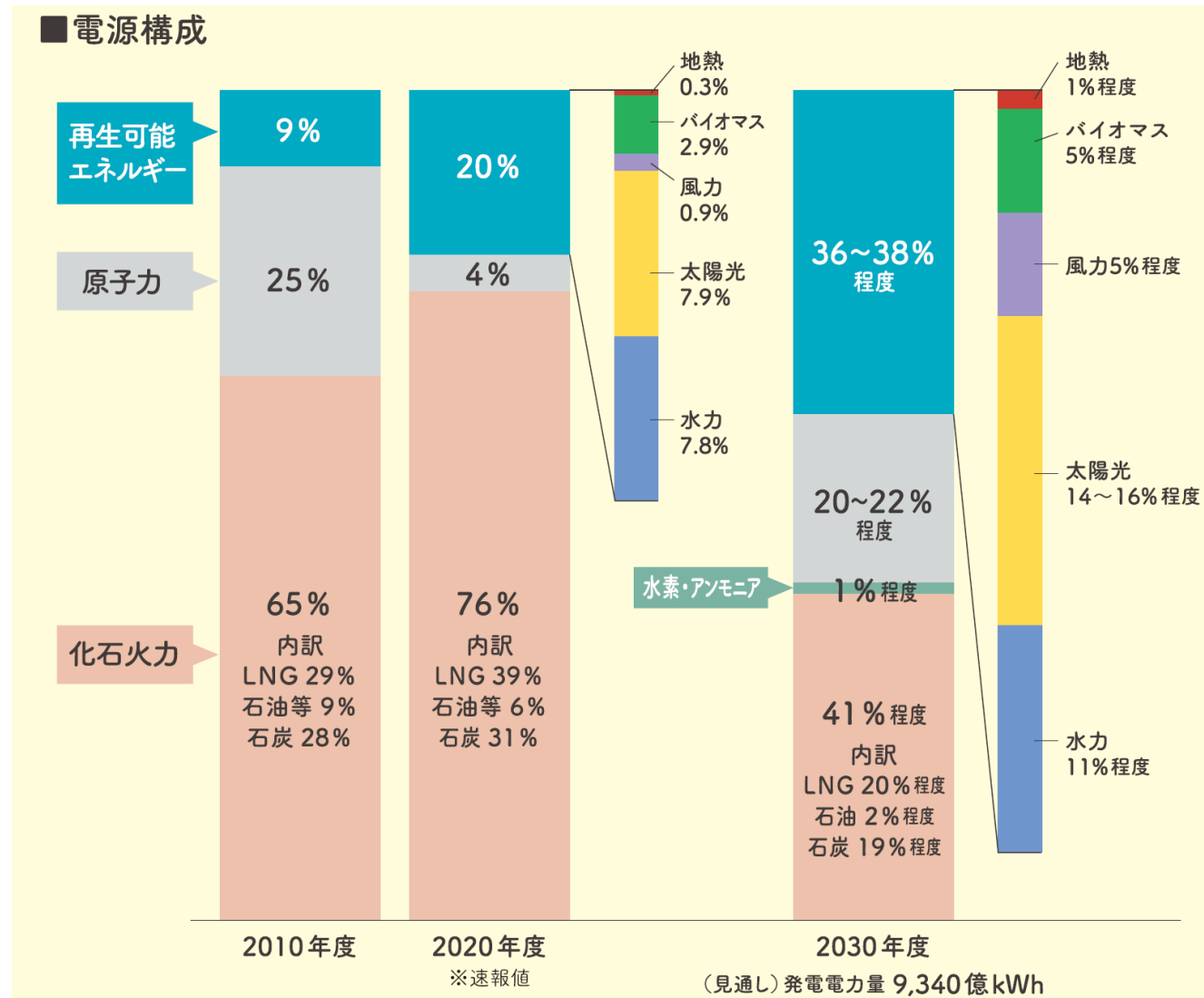
- **2050年に温室効果ガスをゼロ**にするために、温室効果ガス排出目標の京都議定書からの見直しが各国で行われた
 - パリ協定(2015、COP3)
 - IPCC 1.5℃特別報告書(2018)
 - 気候サミット(2021)
- 各国・地域の温室効果ガス排出量削減目標
 - **日本:2013年比、46%削減**を目指し、さらに50%削減に挑戦
 - EU:1990年比、55%削減
 - 米国:2005年比、50～52%削減
 - 英国:1990年比、2035年に78%減



※ 排出目標は各国・地域の排出量のピーク時からの削減量

脱炭素社会に向けた日本のエネルギーミックス

- 非化石燃料による発電比率を、現行の24%から2030年には59%に引き上げることが必要
- 2030年には再生可能エネルギー比率を36~38%に引き上げ
- 再生可能エネルギーの内訳
 - 太陽光: 14~16%程度
 - 風力: 5%程度
 - 地熱: 1%程度
 - 現状550MW⇒1.6GWへ
 - 水力: 11%程度
 - バイオマス: 5%程度
- 原子力発電は4%⇒20~22%

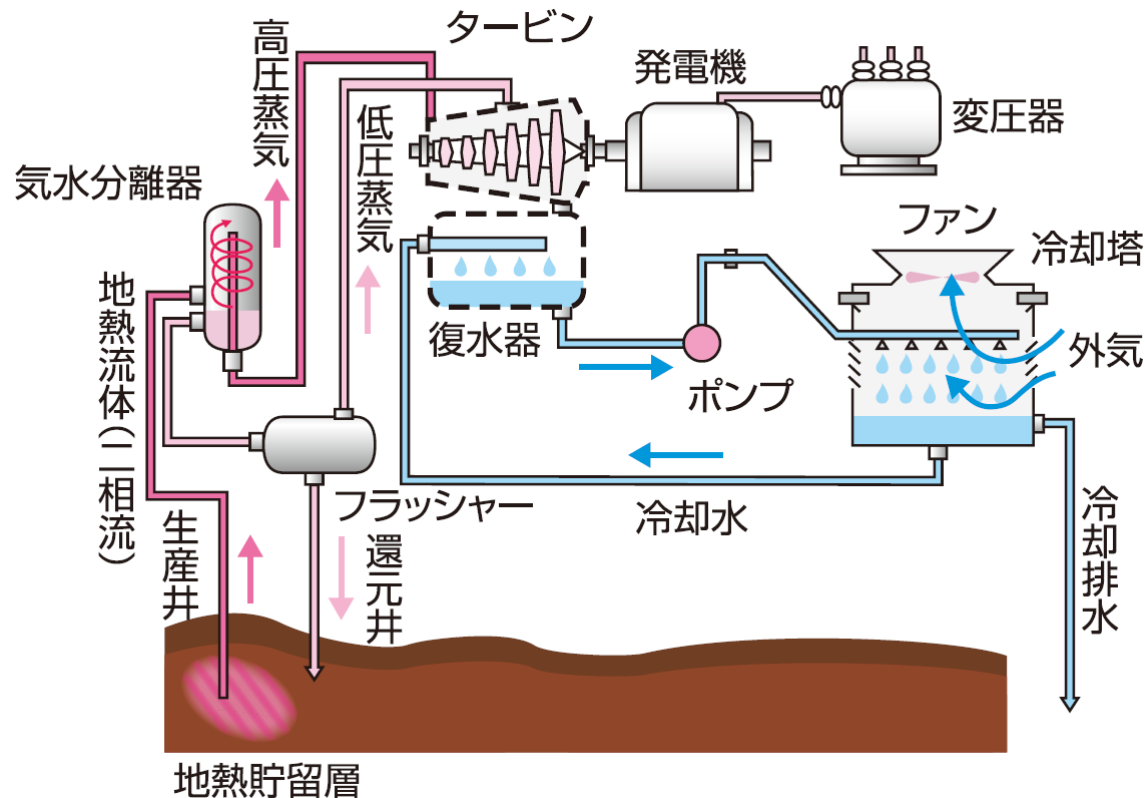


資源エネルギー庁ホームページより

地熱発電の仕組み

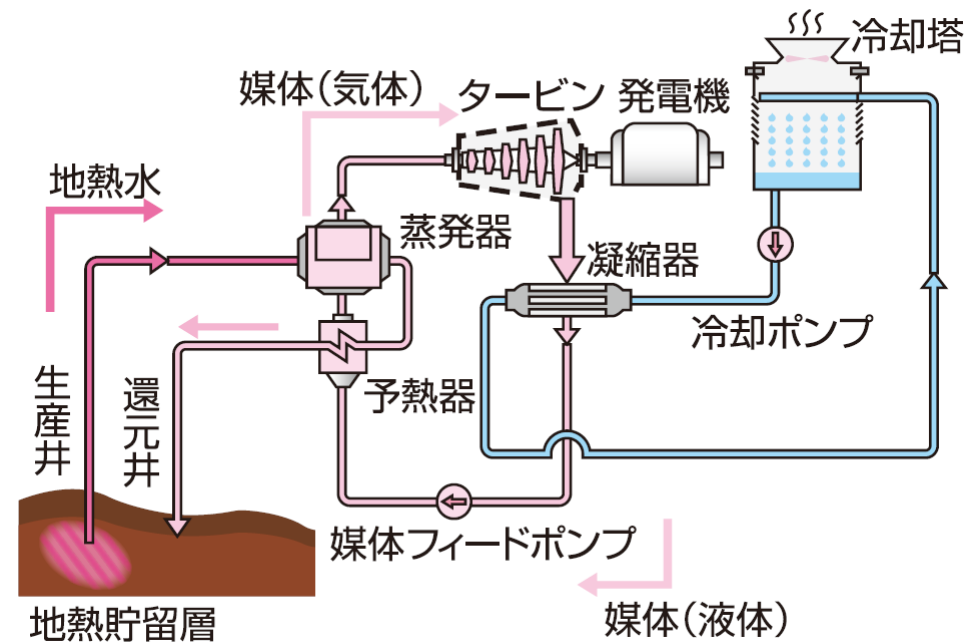
- 地下の**天然のボイラー**から取り出した高温・高圧(高エンタルピー)の蒸気でタービンを回して発電
- 150℃以上でフラッシュ発電、90℃以上でバイナリー発電

フラッシュ(蒸気)発電



JOGMECパンフレットより

バイナリー発電



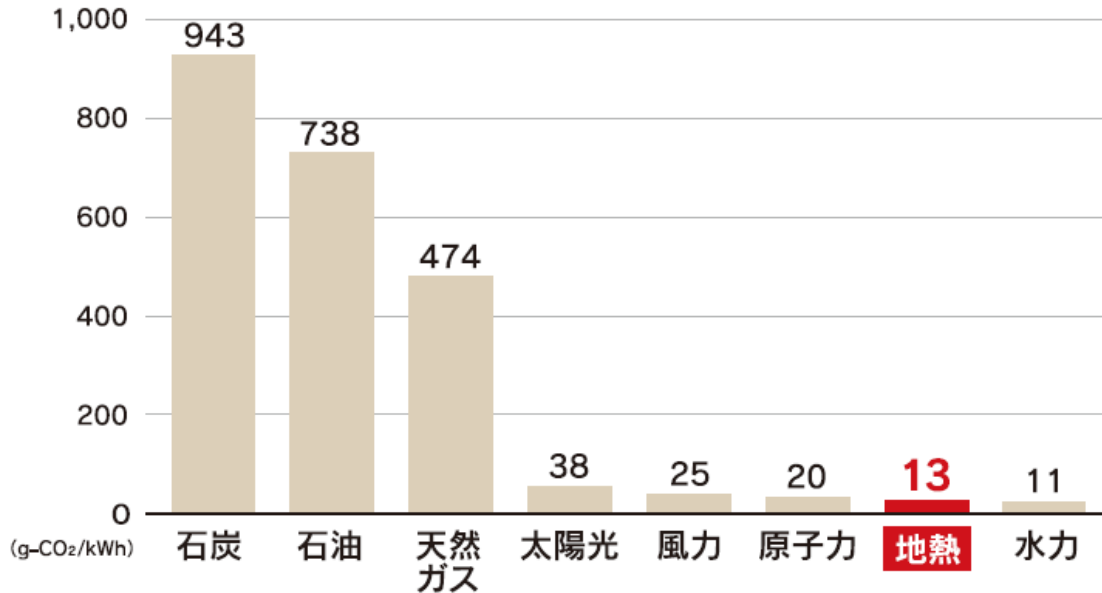
地熱発電は再生可能エネルギーの優等生

- 地熱発電はクリーンかつ安定なベースロード電源
- 再生可能エネルギーのなかでも、比較的発電コストが安い

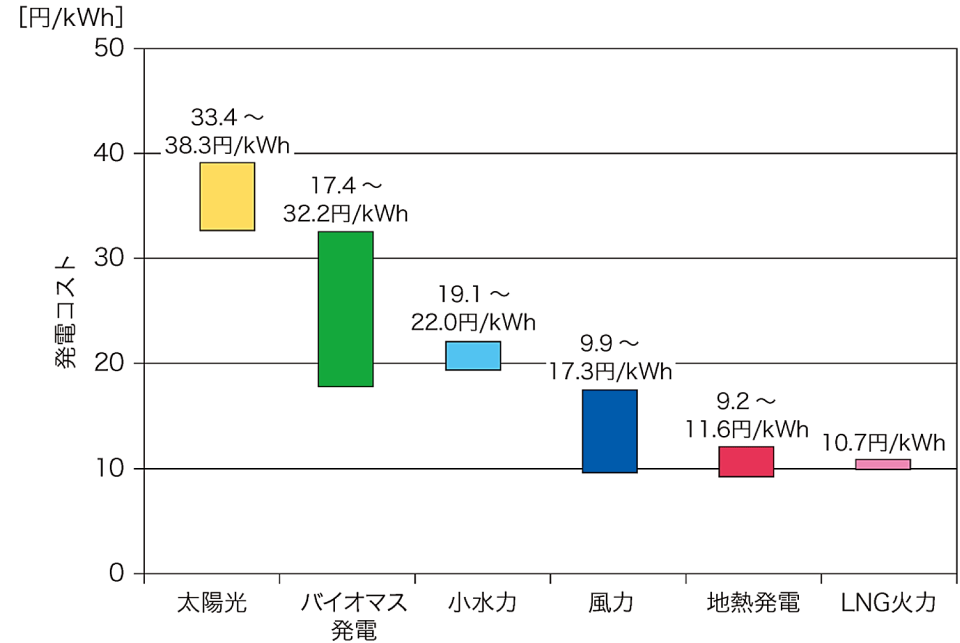
電源別の二酸化炭素排出量

出典：今村栄一・長野浩司、電力中央研究所報告 (2010年7月)

JOGMECパンフレットより

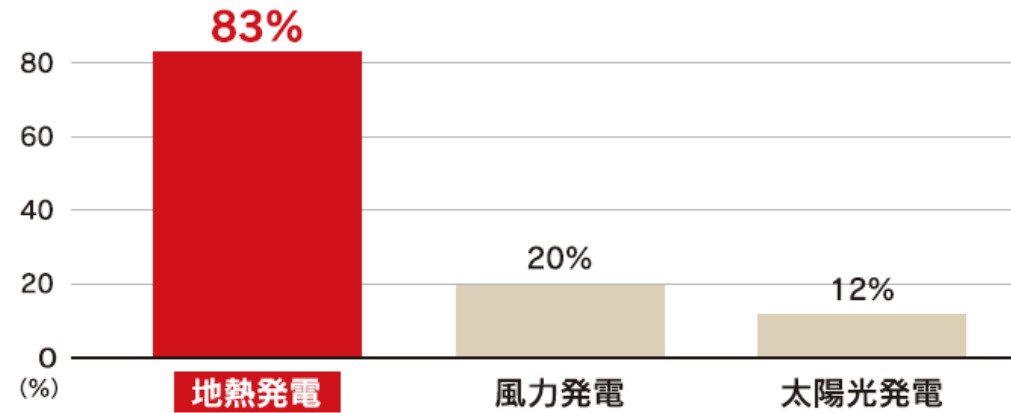


二酸化炭素排出量は、原子力発電よりもさらに少なく、水力発電なみ



設備利用率の比較

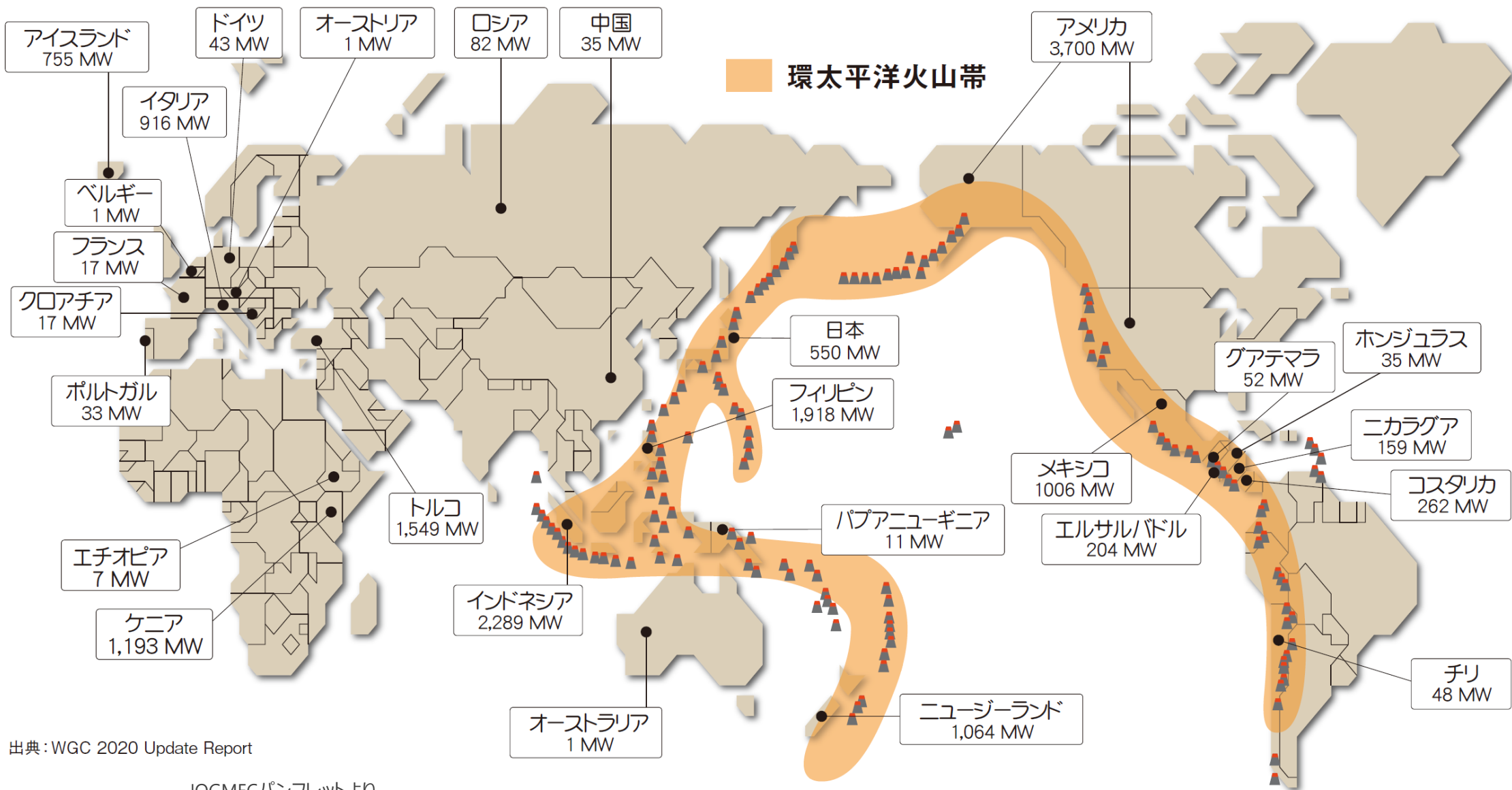
出典：資源エネルギー庁 (長期エネルギー需給見通し関連資料2015年7月)



太陽光発電や風力発電のような1日の間での発電量の変動が無く、安定したベースロード電源となり得る

世界の地熱資源開発の現状

世界各国の地熱発電設備容量

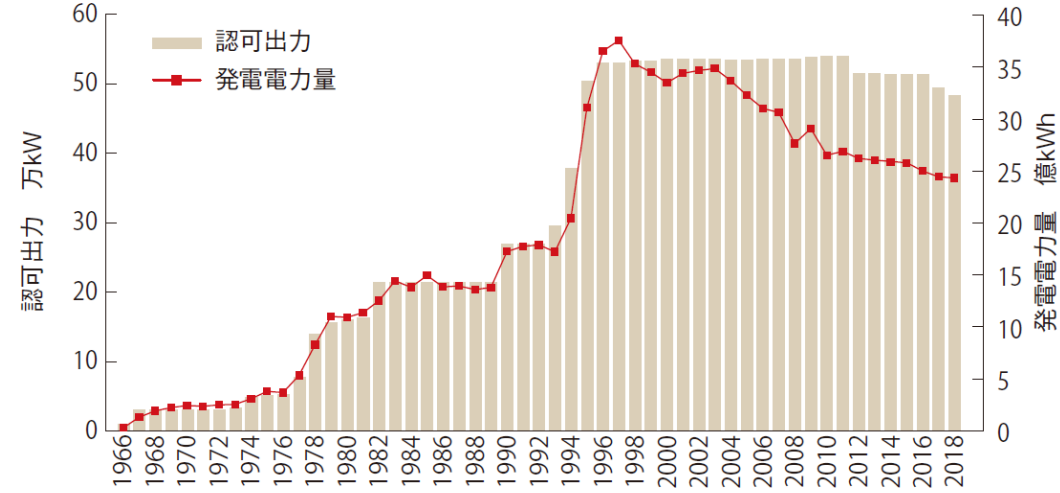


出典: WGC 2020 Update Report

JOGMECパンフレットより

地熱資源開発の問題点

- 火山国日本は世界第3位の地熱資源大国
- しかし、発電設備容量は世界第10位
- 1990年代半ば以降、開発が低迷
- 2011年の東日本大震災の後に再び注力



認可出力と発電電力量の年次変化

出典：一般社団法人火力原子力発電技術協会(地熱発電の現状と動向2019)より作成

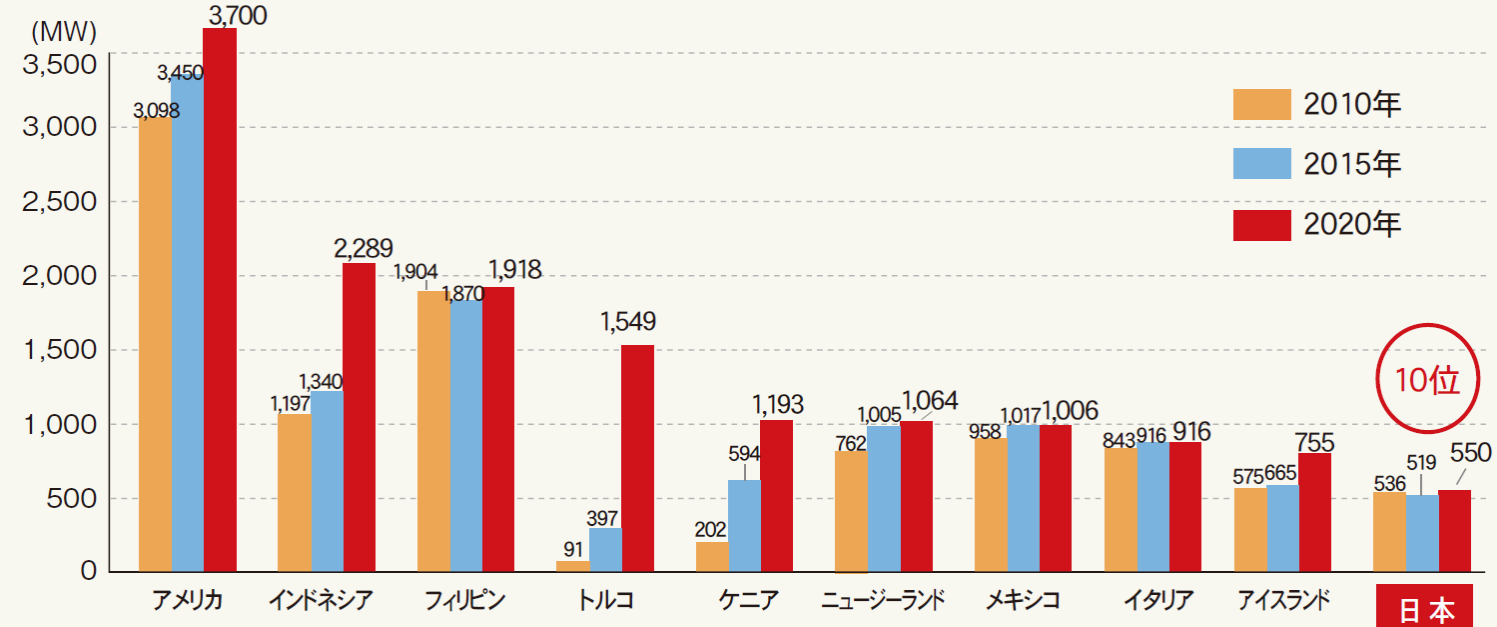
世界各国の主な地熱資源量

順位	国名	資源量(万kW)
1	アメリカ	3,000
2	インドネシア	2,779
3	日本	2,347
4	ケニア	700
5	フィリピン	600
6	メキシコ	600
7	アイスランド	580
8	ニュージーランド	365
9	イタリア	327
10	ペルー	300

※1万kW=10MW ※1MW=1,000kW

出典：資源エネルギー庁(総合資源エネルギー調査会資料 2016年6月)をもとに作成

地熱発電設備容量の変化



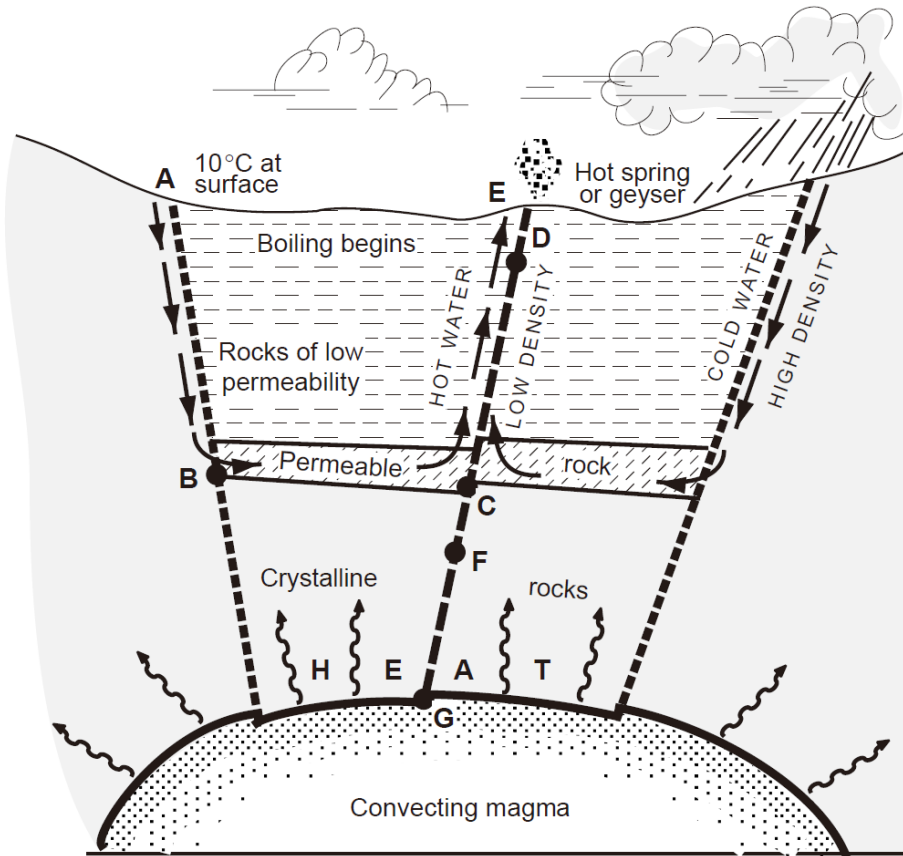
JOGMECパンフレットより

出典：WGC 2015 & 2020 Update Report

地熱貯留層はどのように形成されているか

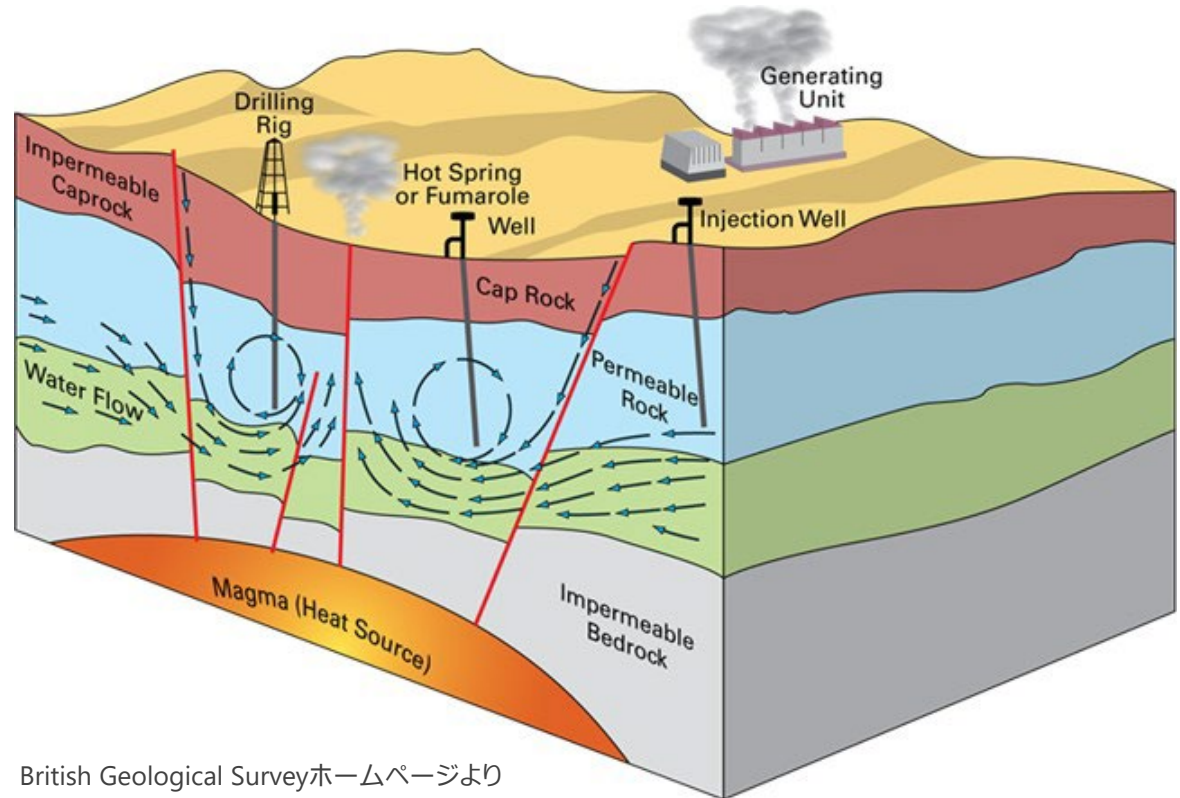
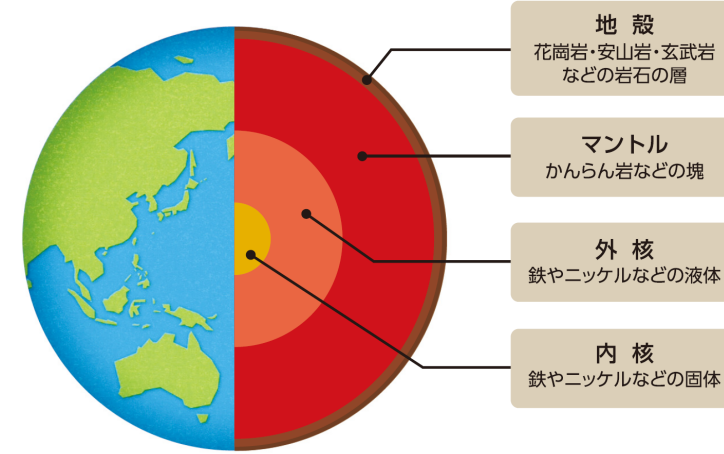
● 地熱貯留層

- 熱源(マグマだまり)
- 浸透性の高い帯水層
- 対流を促す地下構造(断裂帯、天然き裂、キャップロック)



■ 地球の内部構造

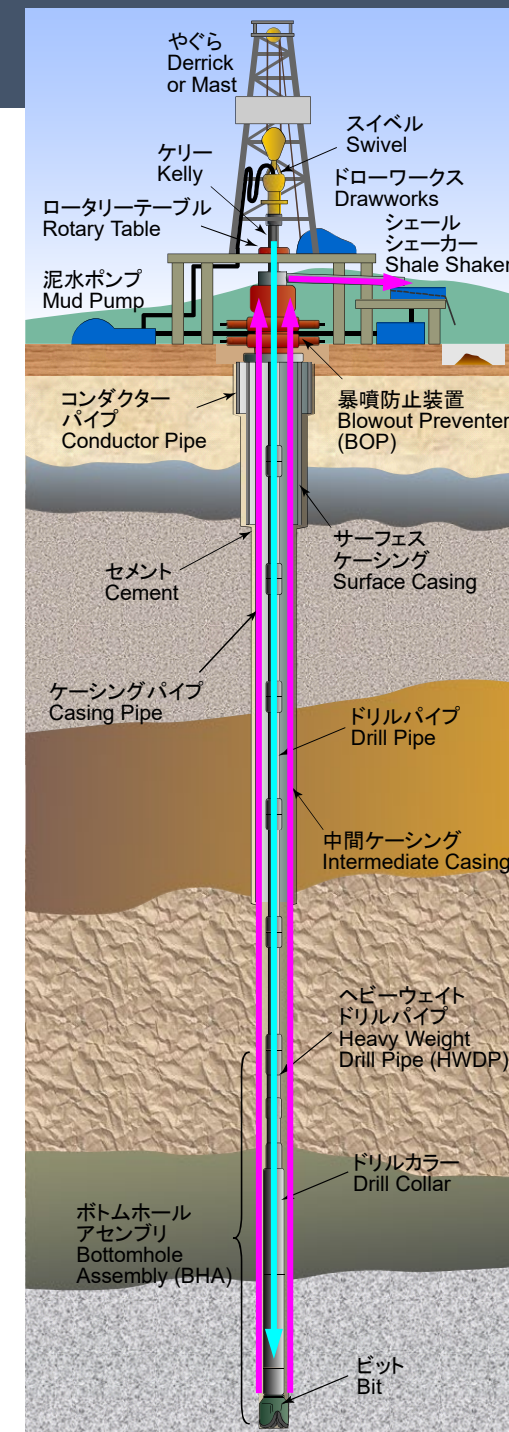
地球の内部は内核、外核、マントル、地殻から構成されており、中心部の温度は5,000°C以上と考えられています。マントルの上部で岩石が溶けてマグマが生じ、それが地殻を破って地表に達すると噴火が起こり、火山が形成されます。火山帯の地下数km~20kmにはマグマ溜まりがあり、温度は1,000°Cにも達します。



British Geological Surveyホームページより

坑井を掘削する(ロータリー掘削)

- ドリルstringの下端のビットで岩石を破壊
 - ドリルstringの自重を利用してビットに荷重を与える(10数トン)
 - ビットに回転を与える(100rpm前後)
 - ◆ ケリードライブ方式、トップドライブ
 - ◆ マッドモーター
- 岩石の掘屑を地上へ運搬
 - 掘削流体・泥水(でいすい)を坑内に循環させる
- 坑壁の保護・地層圧力の抑制
 - 循環泥水の圧力
 - 泥壁の形成
 - ケーシングの設置、セメンチング
- 噴出防止装置 BOP
 - 坑内流体の沸騰暴噴



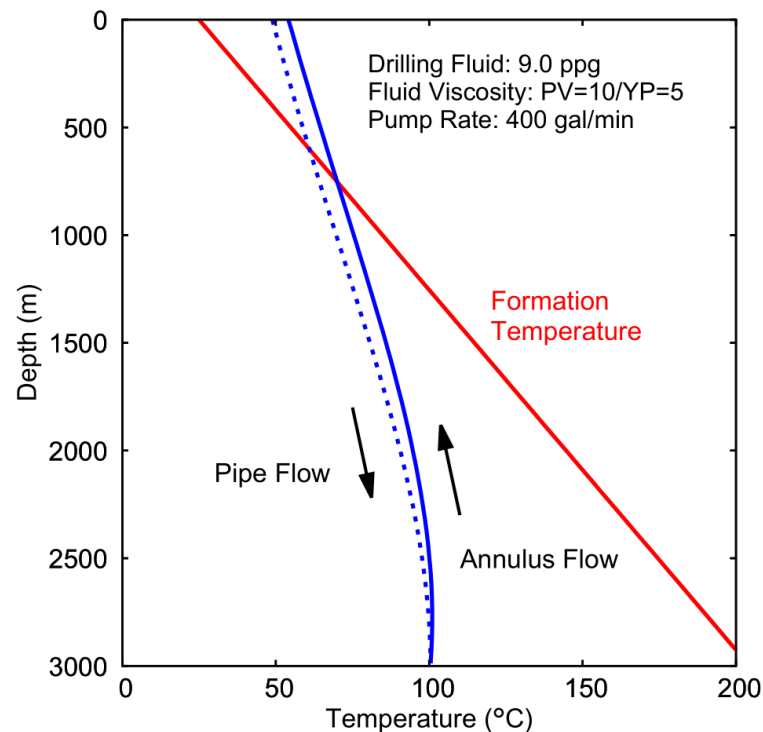
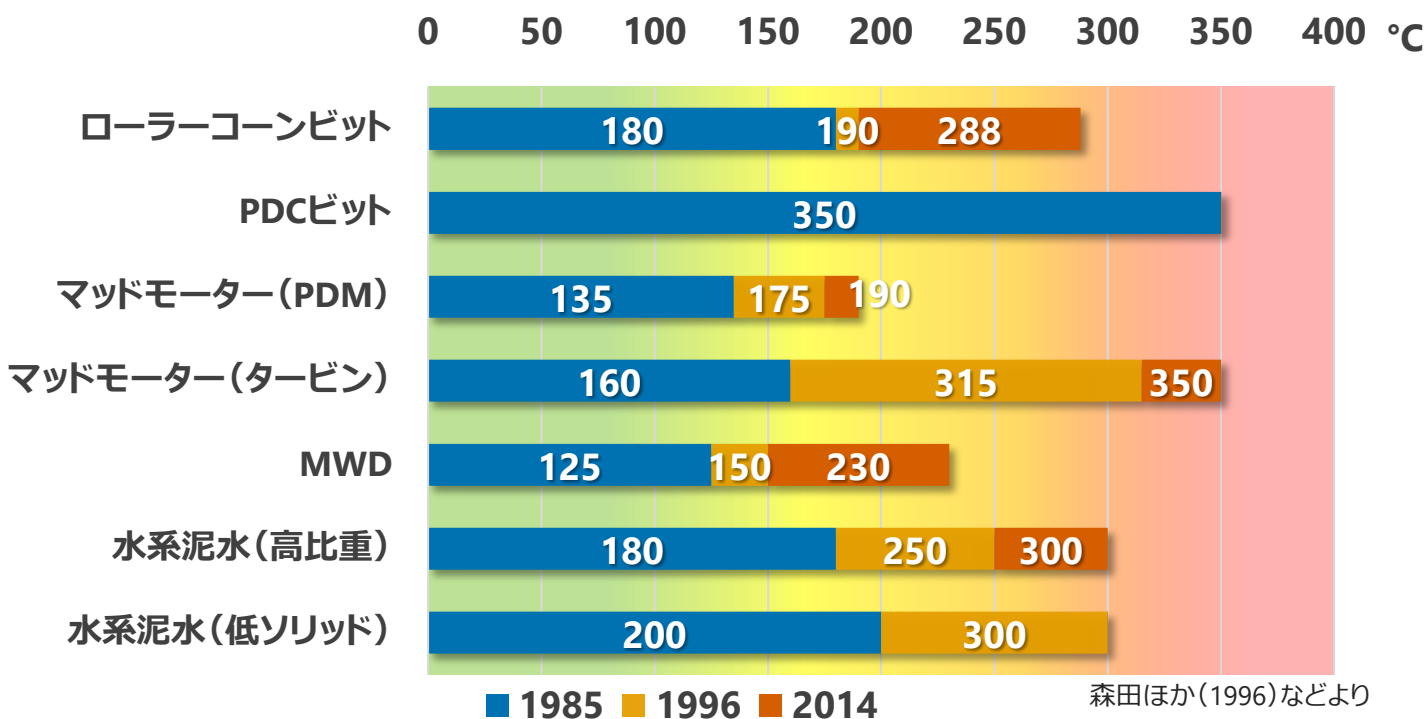
石油・天然ガス井掘削と地熱井掘削の相違点

- これから増えていくであろう大深度・高温地熱井の掘削は石油・天然ガス掘削に比べて決して技術的に容易ではない
- 石油・天然ガス井掘削とは異なる種類の多くの技術的困難に対処の必要あり
- 高温、硬質の火山岩 etc.

	石油・天然ガス	地 熱
地層温度	「高温」は高々200℃を少し超えたぐらい	深度1000~2000mでも250~350℃ ☞ 泥水循環による効果的な坑内冷却が必要
地層圧力	異常高圧(トラップ構造) ☞ 暴噴対策が必須	高温下での流体密度低下により低圧 ☞ 頻回の大逸泥、沸騰暴噴
地殻応力場	正断層型応力場であり垂直主応力(オーバーバーデン、地圧)が最大	堆積環境でも造山活動が活発な地域では応力場は複雑(逆断層型、横ずれ断層型もあり得る)
岩相	世界的には多くの貯留層は堆積岩(砂岩、泥岩、炭酸塩岩など)	基盤岩/火成岩(玄武岩, 安山岩, 花崗岩など) ☞ 非常に硬質、天然き裂や断裂帯
生産流体	可燃性炭化水素、フィールドによってCO ₂ and/or H ₂ Sガスを含有	CO ₂ and/or H ₂ Sガス、H ₂ S or HCl酸性熱水
仕上げ方法	穿孔仕上げ・チュービング生産(改修可能)	アンカー仕上げ・ケーシングフロー(大口径)

坑内機器および材料の耐熱性能

- 時代とともに坑内機器・材料の耐熱性能は向上し200℃を超える温度で使用可能な坑内機器・材料は現状でもいくつか存在するが、**総合的にみると坑内温度を200℃程度に抑える必要あり**
- 総合的にみれば175～200℃程度が安全に掘削できる温度限界か？
 - エラストマー材料の耐熱温度はフッ素系でも230℃程度まで(例えばデュポン製)
 - メタルシールを使用した機器の開発は摩耗等の課題がありハードルは非常に高い
- **掘削流体・泥水循環による効果的な坑内冷却が必須**



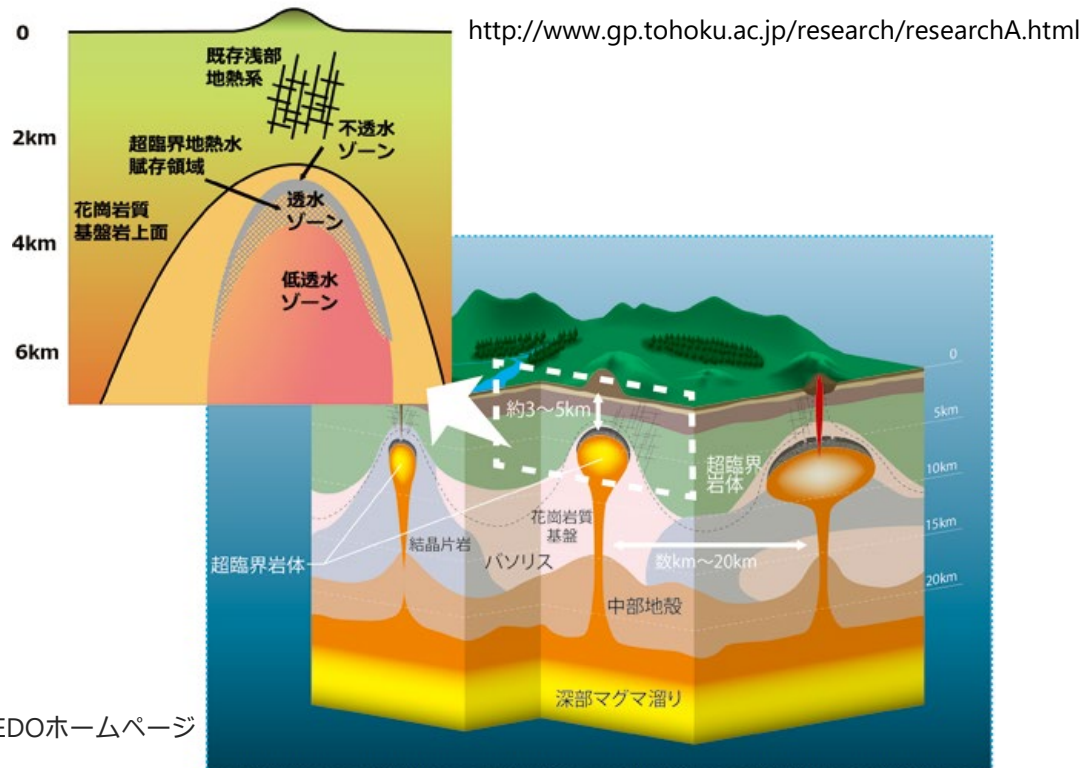
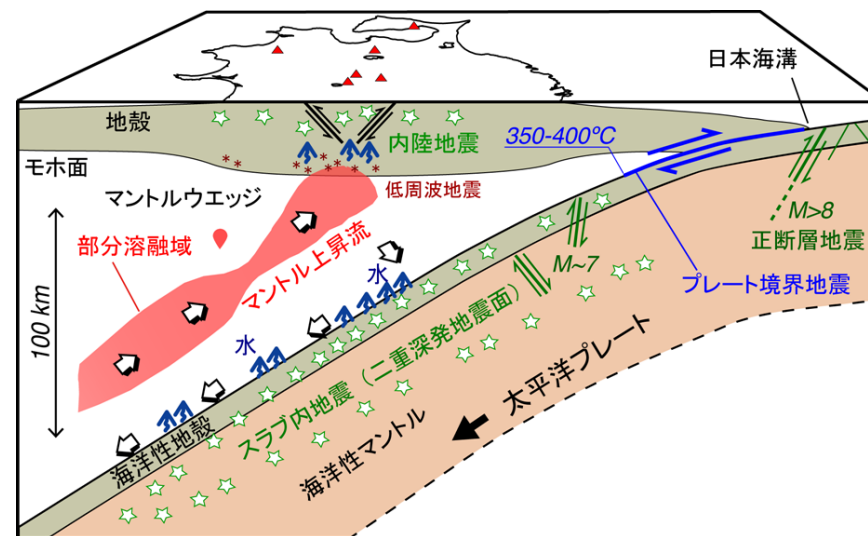
超臨界地熱資源とは

地熱発電

- 安定した出力が得られ、発電コストも安い再生可能エネルギー
- これからのカーボンニュートラル社会の実現に向けて今後重要な役割
- さらなる普及促進が必要

超臨界地熱発電

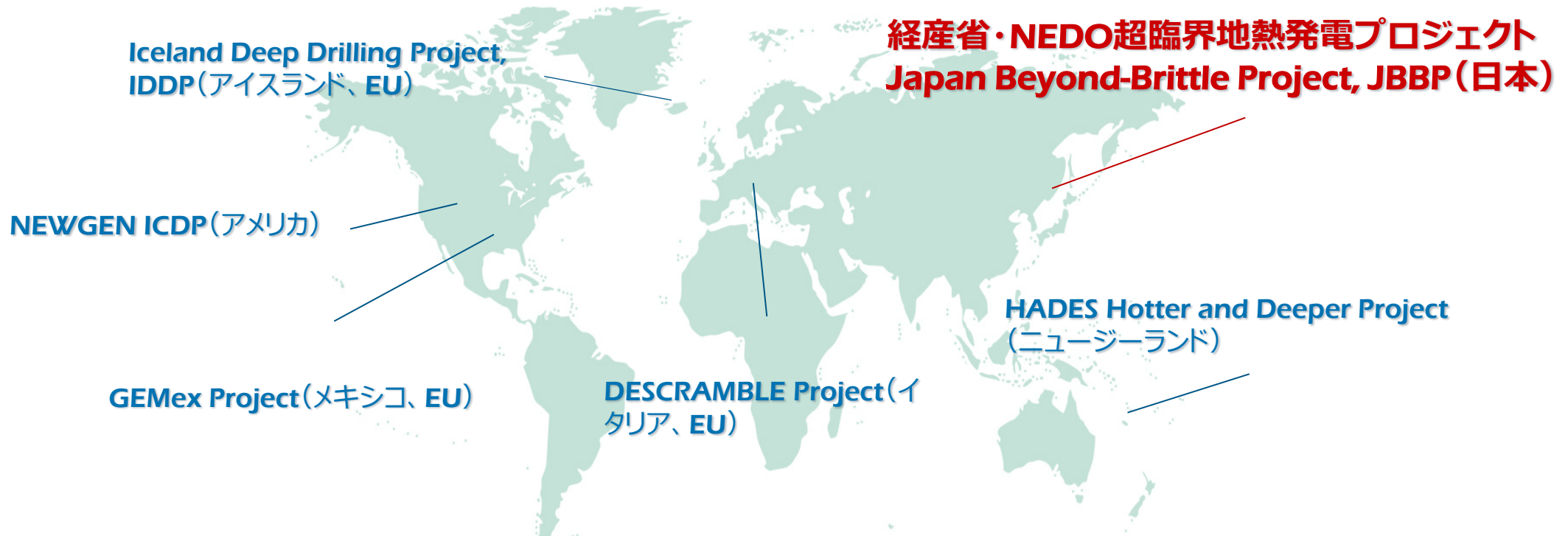
- 在来型地熱貯留層よりも深部に存在
- 地下環境において超臨界あるいは亜臨界状態にある地熱流体を利用
- 生産井1本あたりの蒸気生産能力は従来型地熱発電の数倍と推定
- 大規模・低環境負荷の地熱開発の加速が可能
- まさに、次世代の地熱発電技術



NEDOホームページ

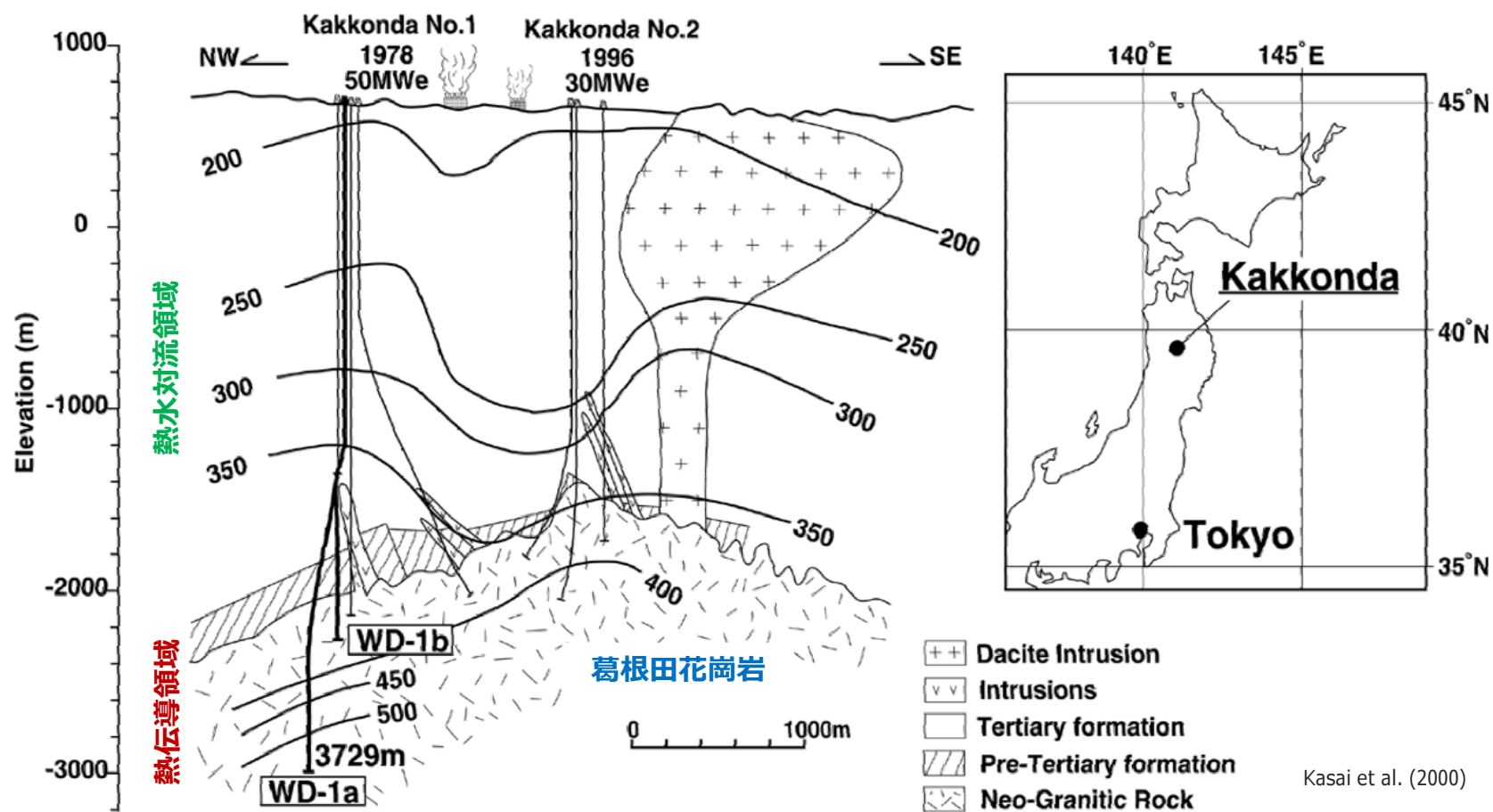
世界の超臨界地熱資源開発の動向

- 超臨界地熱資源 Supercritical Geothermal Resources
 - アイスランド IDDP-1, 2, 3: クラプラ、レイキャネスにそれぞれ1坑ずつ掘削済み
 - イタリア DESCRAMBLE: ラルデレロ地熱地帯に1坑掘削済み
 - メキシコ GEMex: ロス・ウメロス (Los Humeros) 地熱地帯
 - アメリカ NEWGEN ICDP: オレゴン州ニューベリー (Newberry) 火山
- 日本 JBBP (Japan Beyond-Brittle Project)



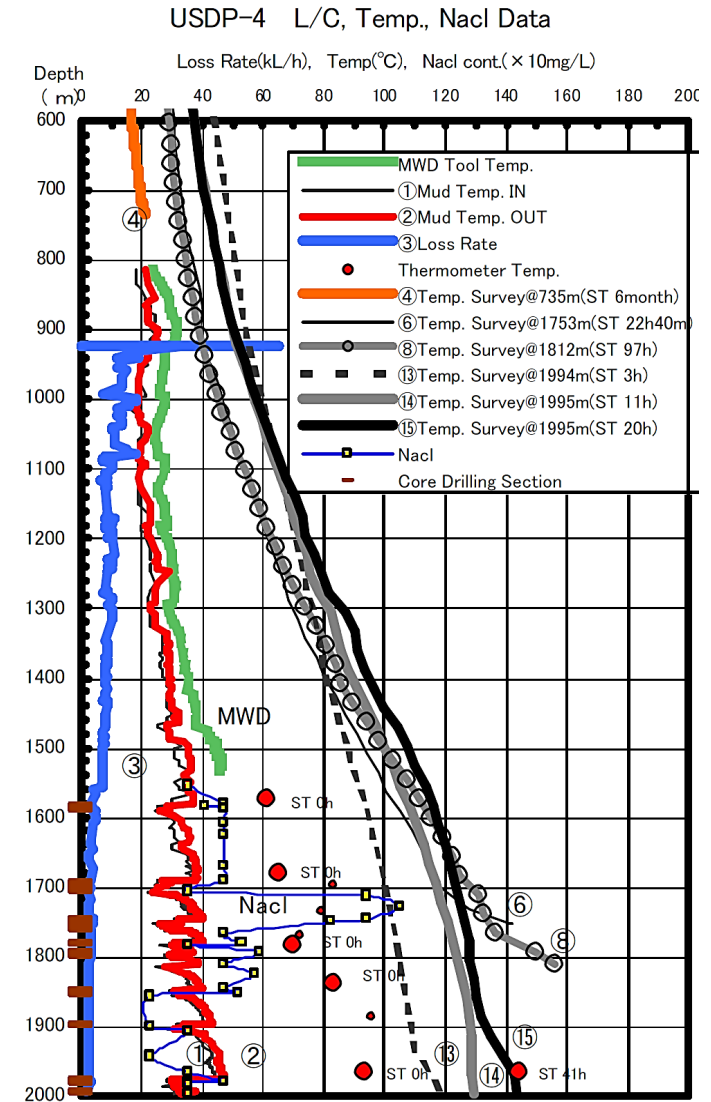
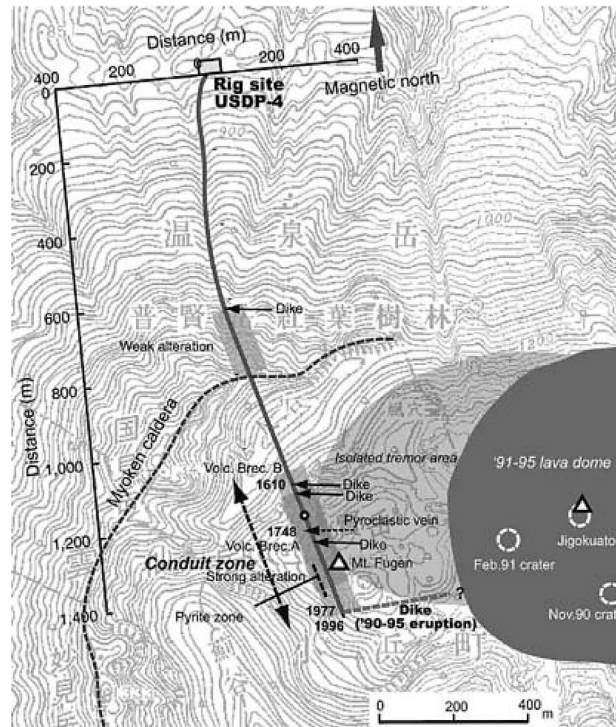
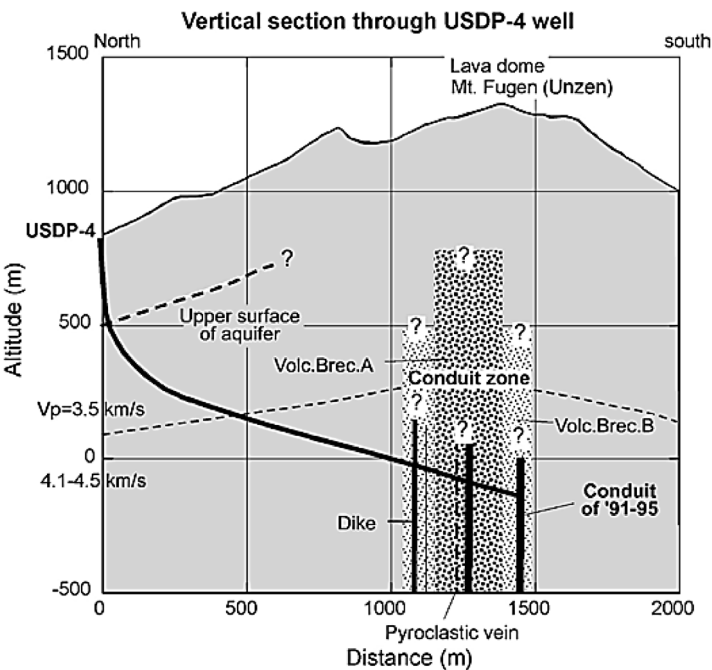
NEDO深部地熱調査井：葛根田WD-1a

- 葛根田WD-1a号井：新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の深部地熱調査井として1994～95年に掘削
- 当時としては最高となる**500℃を超える地層温度**を記録
- 深部超高温地熱資源量を評価するに足る噴出試験の実施には至らず



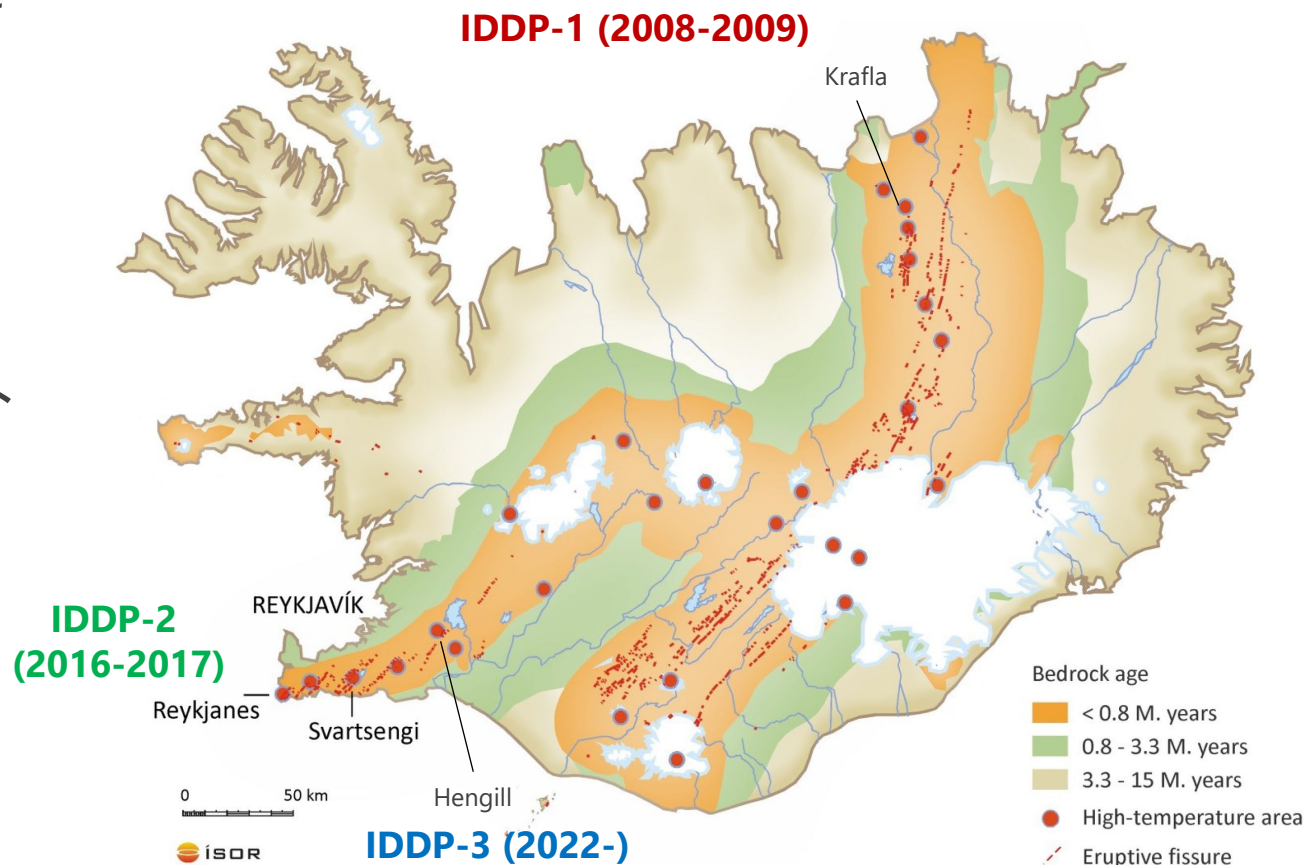
雲仙科学掘削：火道掘削USDP-4

- 3坑の事前掘削を経て、**雲仙火山の火道を貫く坑井**の掘削を計画
- 火道掘進時に600℃を想定したが、予想より火道付近の冷却が進んでおり200℃程度であった
- 80mという浅部でのキックオフを行ったが、逸泥および軟弱層のため穴替わりが頻発
- 45～60°の高傾斜区間においてホールクリーニング不良が発生



アイスランド深部掘削プロジェクト IDDP

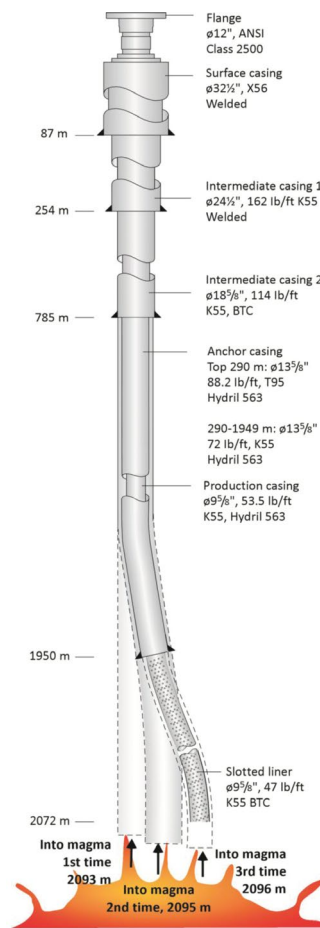
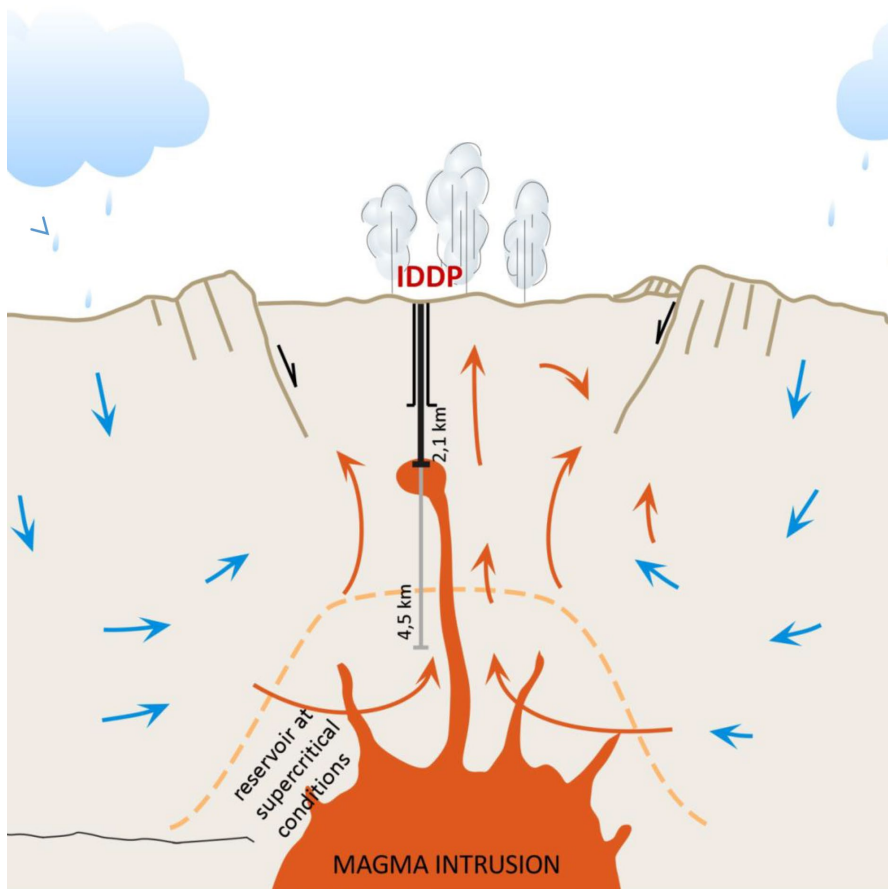
- アイスランドで実施中の超高温地熱掘削プロジェクト
Iceland Deep Drilling Project
- 大地溝帯・火山がアイスランド島を横切る
- 2001年からフィージビリティスタディが開始され2003年にその報告書がまとめられスタート
- 3カ所の掘削地点を選定
 - IDDP-1 クラフラ Krafla
 - IDDP-2 レイキャネス Reykjanes
 - IDDP-3 ヘインギットル Hengill
- IDDP-1は終了、IDDP-2は掘削は終了、IDDP-3はこれから



Proc. WGC (Ármansson et al., 2015)

アイスランド深部掘削プロジェクト:IDDP-1

- 2008～2009年にアイスランド北東部クラフラ(Krafla)地熱地帯でIDDP-1号井を掘削、垂直坑井TD 4500mを計画
- 実績は予期せぬマグマ岩脈に遭遇し、約2100mで掘止め
- 噴出試験により温度450℃、圧力14 MPaの過熱蒸気の噴出を確認



IDDP-1噴出試験の様子
熱水中のシリカの噴煙



© IDDP

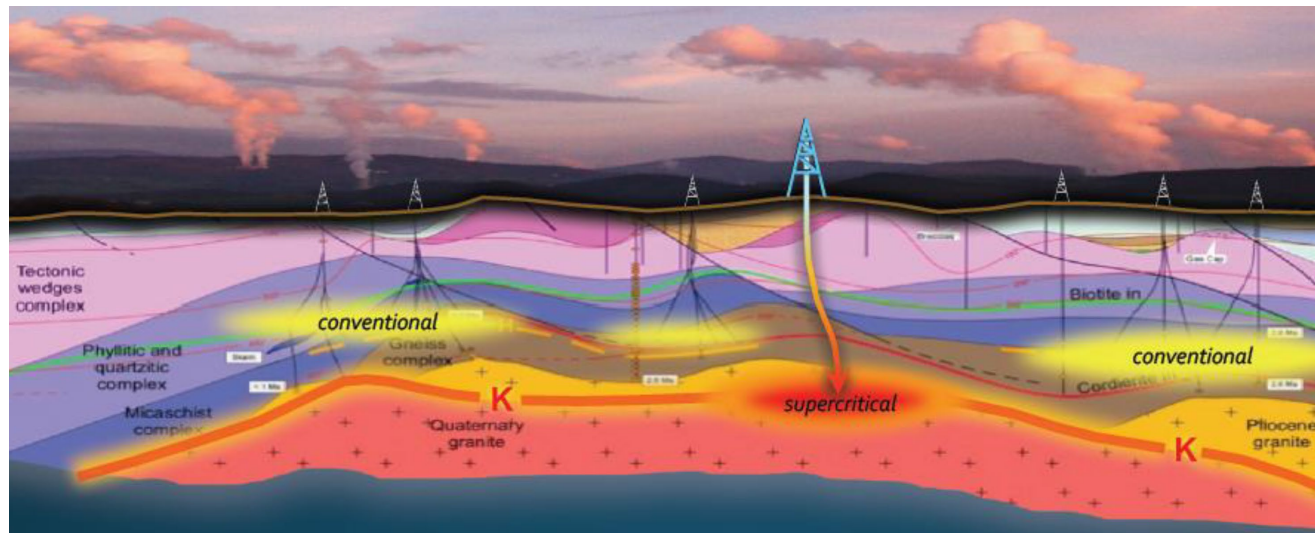
アイスランド深部掘削プロジェクト:IDDP-2

- アイスランド南西部レイキャネス (Reykjanes) 地熱発電所内の深度2500mの既存生産井RN-15を5000mまで傾斜掘りにより増掘
- 2016年8月11日開坑、2017年1月25日に深度4659mで掘り止め
- 3060mで全量逸泥となりセメントプラグ設置を試みたが成功せず、3000m以深は盲掘り
- **坑底温度427℃坑底圧力34MPaの超臨界地熱流体を確認**
- 2021年以降に噴出試験の実施を計画していたが、断念



イタリアDESCRAMBLEプロジェクト: Venelle-2

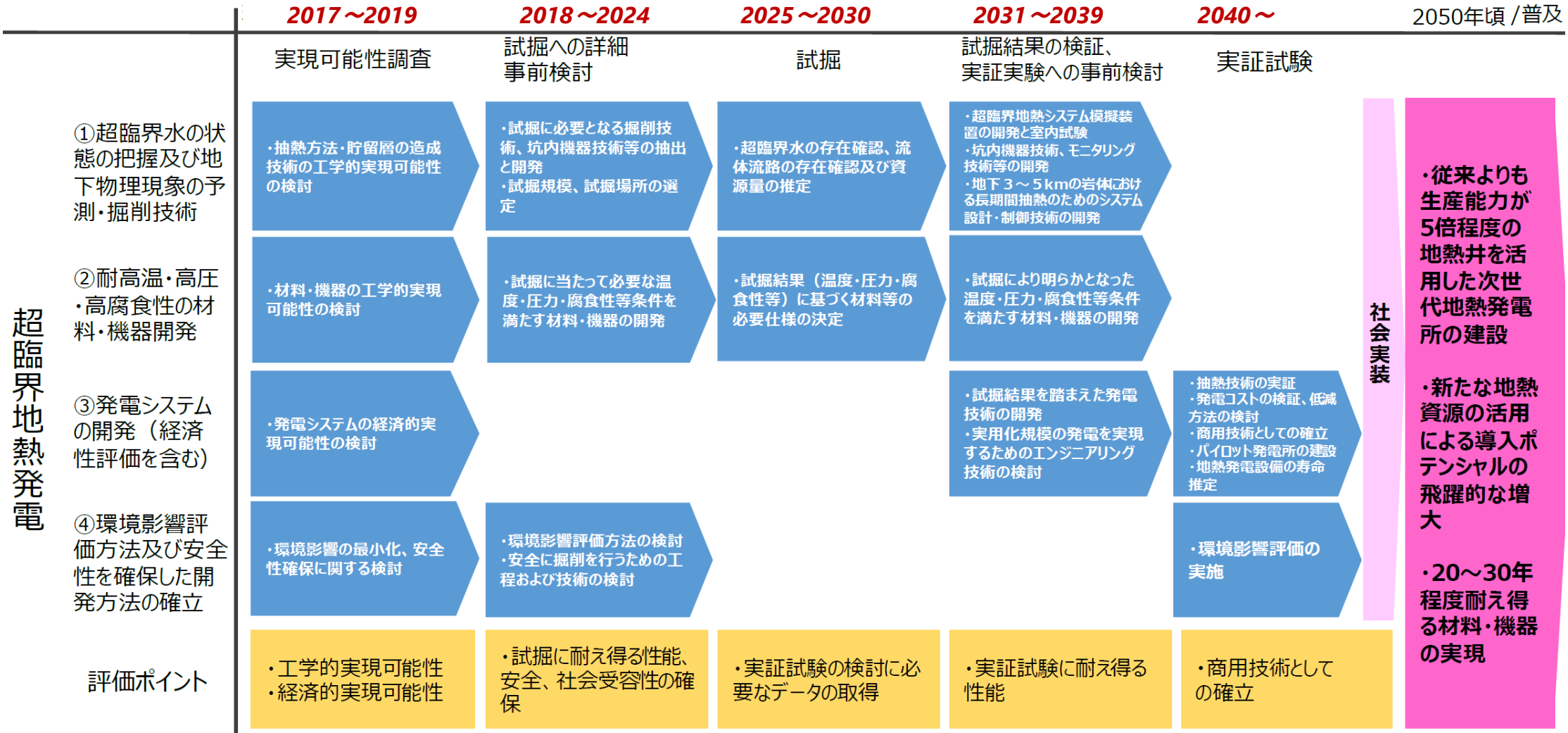
- DESCRAMBLEプロジェクト
Drilling in DEep, Super-CRITICAL AMBients of Continental Europe
- イタリアラルデレロ地熱地帯に2017年にVenelle-2坑井を掘削
- 深度2232mの既存坑井の裸坑部1054mからサイドトラックし、K-Horizonと呼ばれる超臨界地熱資源が予想される地層のある3000~3500mまで掘削する計画
- **深度2909mで掘止め、500°C以上の地層温度を記録**、超臨界地熱流体の存在は確認できず



国内の超臨界地熱発電技術研究開発の動向

- 東北大学らのグループが2012年に国際陸上科学掘削ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) に延性帯超臨界地熱系開発の実証を目的とした**JBBP (Japan Beyond-Brittle Project)**の掘削提案
- その後、NEDOの超臨界地熱発電研究開発事業へ
 - エネルギー・環境新技術先導プログラム「島弧日本のテラワットエネルギー創成先導研究」(2014～2015年度)
 - エネルギー・環境新技術先導プログラム「超臨界地熱開発実現のための革新的掘削・仕上げ技術の創出」(2015～2017年度)
- NEDO「天然・人工地熱システムを利用した超臨界地熱発電の発電量、経済性および安全性に関する詳細検討」(2017年度)
- **NEDO超臨界地熱発電技術研究開発(2018～2020年度)**
 - 超臨界地熱資源の評価と調査井に必要な仕様の詳細設計
 - 調査井の資材(ケーシング材及びセメント材)等の開発
 - 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発
 - 超臨界地熱資源への調査井掘削に資する革新的技術開発

エネルギー・環境イノベーション戦略に関するロードマップ (2017年9月6日策定)



2021年度からのNEDO超臨界地熱資源研究開発

- 2020年度までのNEDO研究開発の成果として、超臨界地熱資源量の評価や超高温下で使用可能な資機材(とくにケーシングやセメント)の検討、発電コストの試算等に関して有意義な知見が得られた

- **2021年度からNEDO「地熱発電導入拡大研究開発」プロジェクト開始**

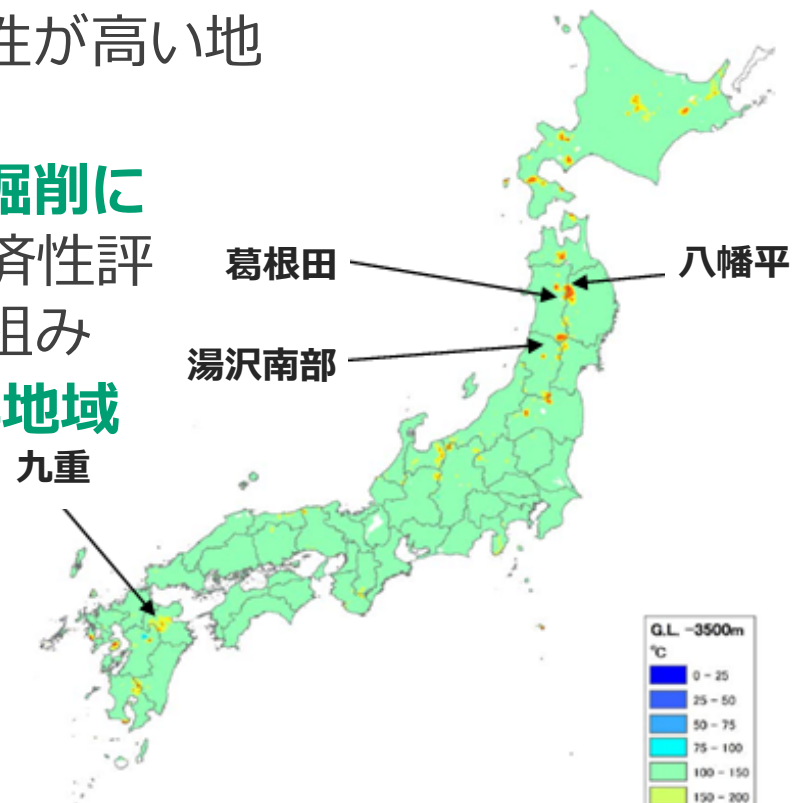
項目1-1「超臨界地熱資源技術開発(資源量評価)」

- 2020年度までに実施した「超臨界地熱発電技術研究開発」の成果を踏まえ、超臨界地熱資源が形成される可能性が高い地域で超臨界水の状態把握と資源量評価などを実施
- その資源量評価に基づき**2026年度以降の調査井掘削に向けた**仕様や安全衛生・環境保全対策の検討、経済性評価を実施し、将来の超臨界地熱発電の実現に取り組み
- 対象地域は、**八幡平、葛根田、湯沢南部、九重の4地域**

項目1-2「超臨界地熱資源技術開発(探査技術)」

項目2「環境保全対策技術開発」

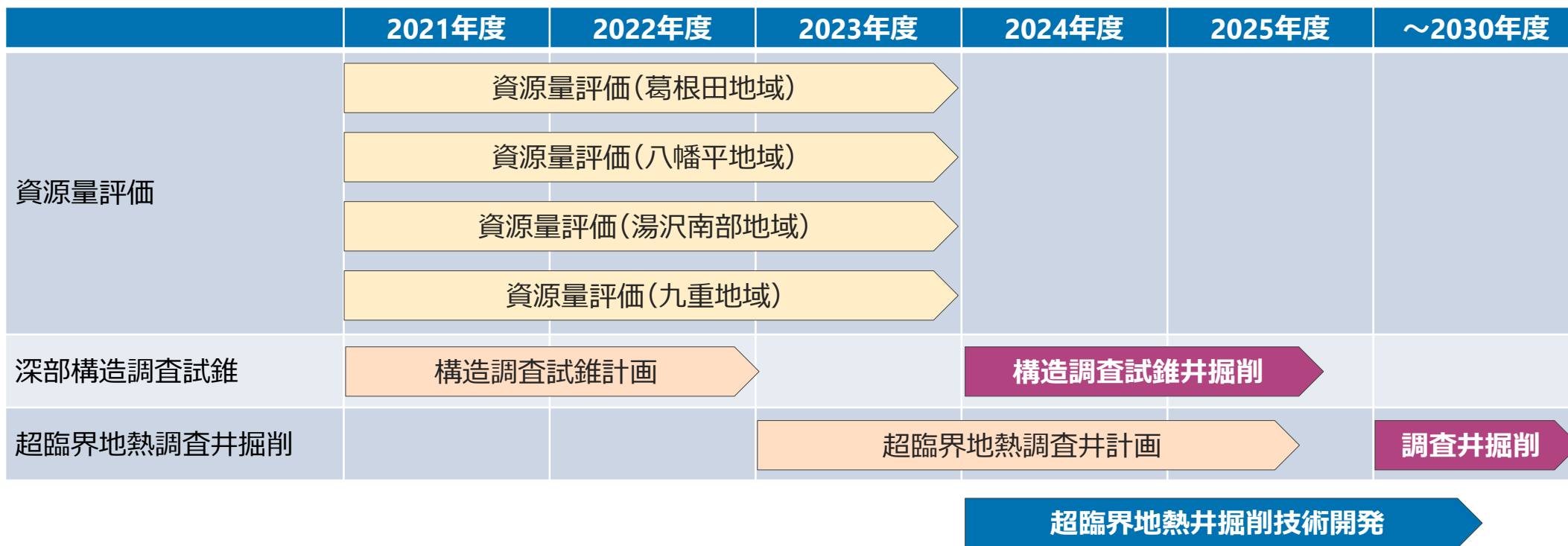
項目3「地熱発電高度利用化技術開発」



NEDOホームページ

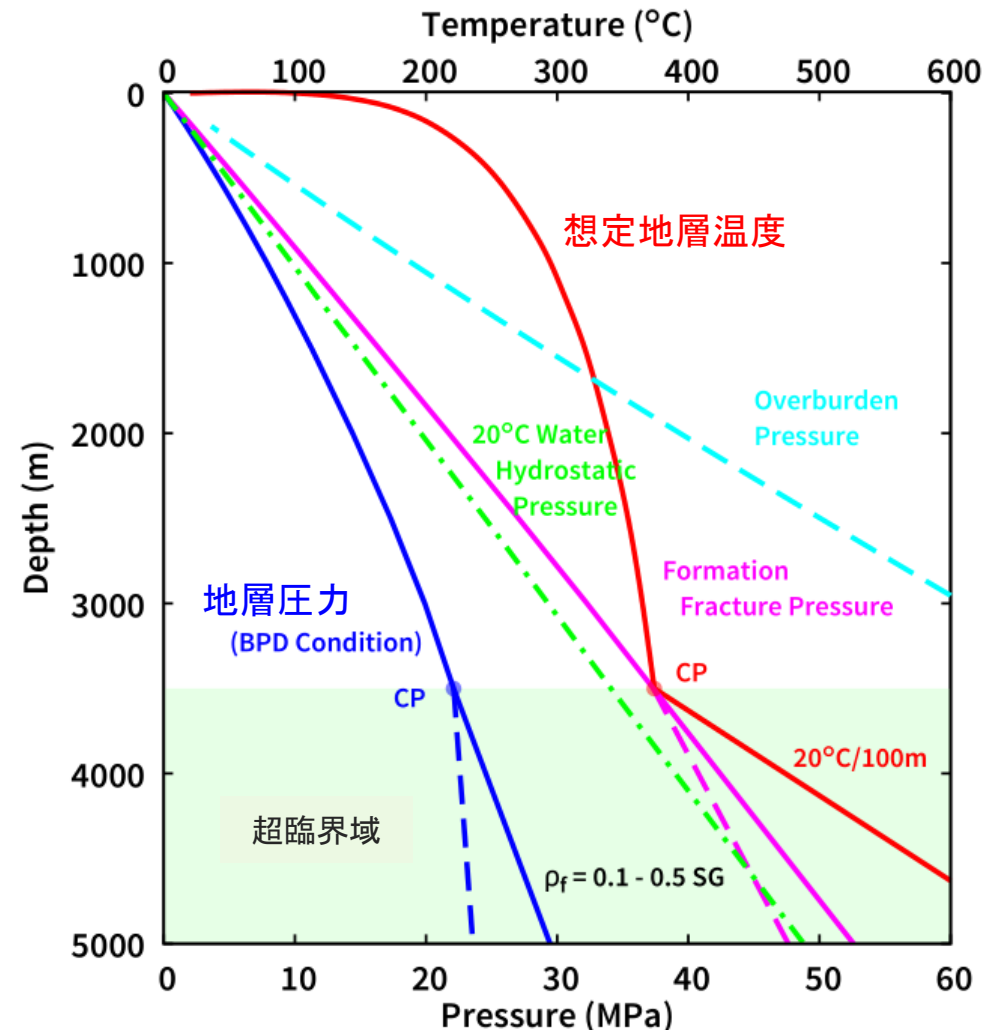
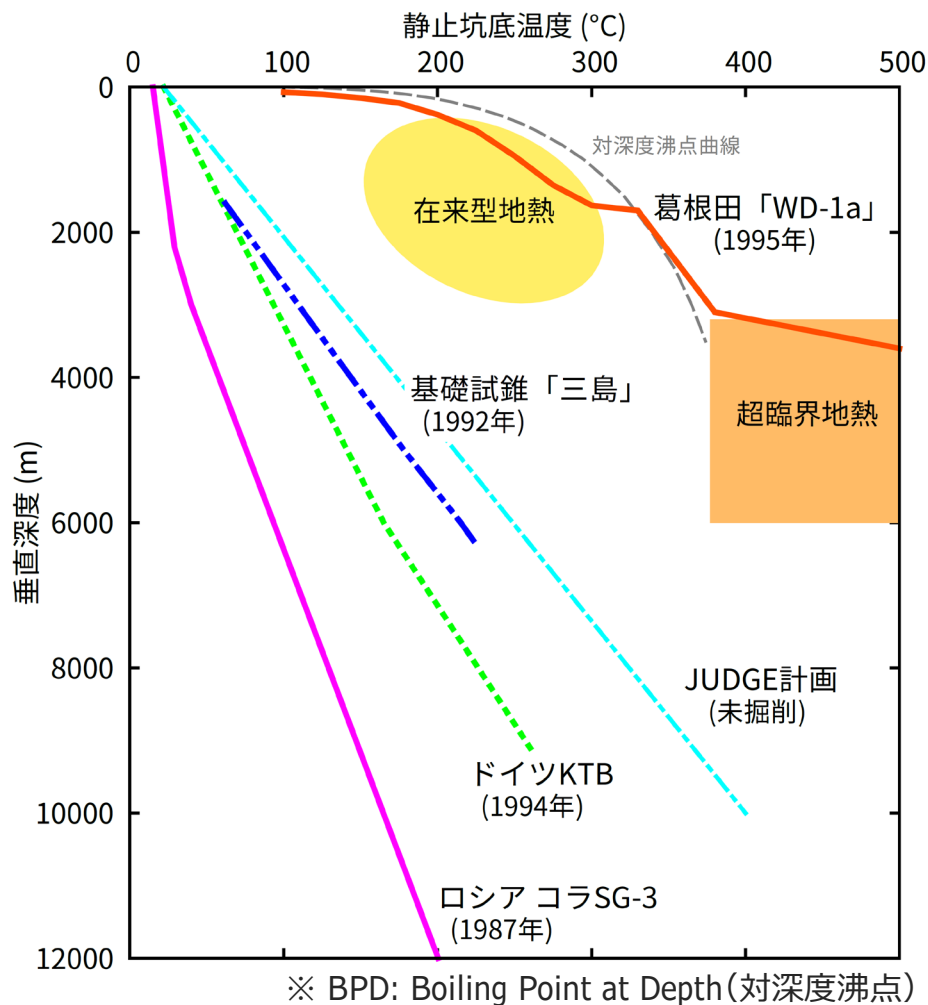
超臨界地熱調査井掘削までのロードマップの想定

- 2021～2023年度NEDOプロジェクト「地熱発電導入拡大研究開発／超臨界地熱資源技術開発(資源量評価)」では、4地点の資源量評価・地下モデル化
- 調査井掘削・噴気試験を成功させるために、**2024～2025年度に深部構造調査試錐井(パイロット坑)の掘削**を計画
- **2026年度以降の調査井掘削では、一定期間の噴出試験**を経て超臨界地熱資源量を評価することが目標



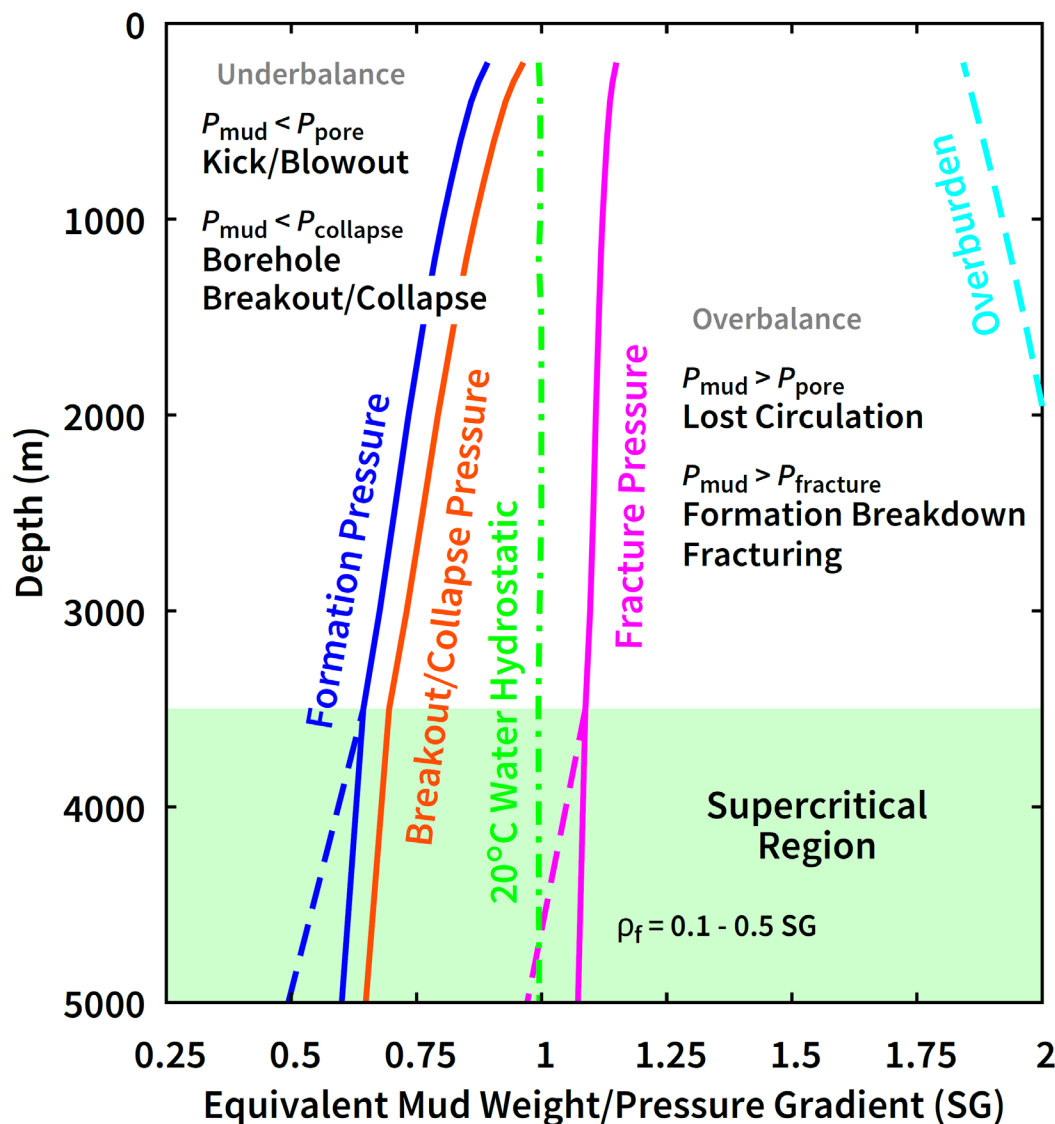
超臨界地熱井掘削の想定温度・圧力環境

- 浅部熱水対流領域では沸点曲線、超臨界熱伝導領域では $20^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の地温勾配を上限温度として想定
- 熱水対流領域では静水圧相当の間隙水圧を想定、**超臨界領域は不明**



地熱井掘削の泥水比重コントロール

- 地熱井掘削でのケーシングは逸泥対策・水止めが主目的
- 高地層温度のため地層圧や圧潰圧は小さく清水掘削でもオーバーバランスとなり、天然き裂・断裂帯があれば容易に逸泥
- 超臨界地層流体の密度が極端に小さいと、破壊圧も小さくなり、清水掘削でも超臨界地熱地層内では地層破壊(き裂発生)が起こり得る
- 超臨界地熱水領域の岩石・流体物性が不明
- 石油・天然ガス掘削とは違った概念・手法での掘削が必要ではないか？
 - Managed Pressure Drilling (MPD)
 - 空気混合泥水掘削 (Aerated Mud)
 - フォーム掘削 (Form Drilling)



鋼管類の腐食 (IDDP-2掘削後の注水作業に用いた掘管)

- グレードG-105の3-1/2" ドリルパイプを使用して4600mの坑底へ注水を実施
- 緑灰色に見える部分は腐食によって生成した硫化鉄、茶色は酸化鉄

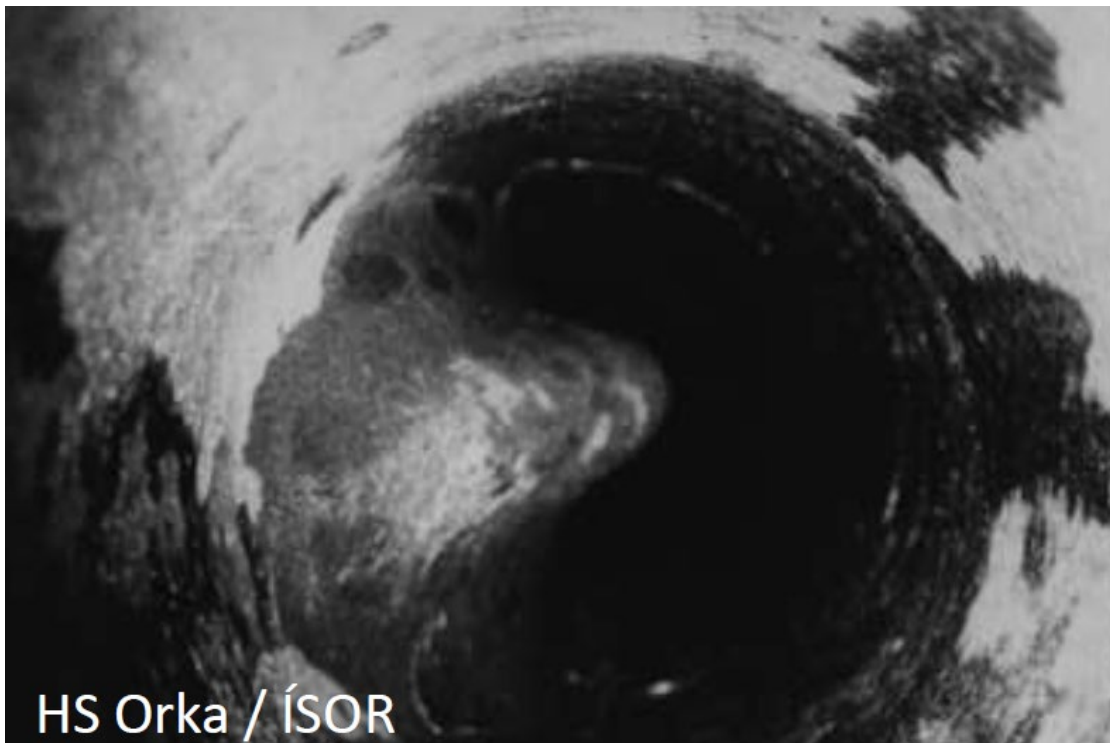


The injection pipe sections from different depth of the IDDP-2 well as well as un-used drill pipes for comparison (bottom of the photo).

出典:NACE-2019-13247

IDDP-2でのケーシングパイプの損傷事例

- IDDP-2掘削報告書より
 - 掘削終了後の注水作業中に、既存生産井RN-15の主フィードゾーン2360mの付近の深度2307～2380mの区間でプロダクションケーシングが損傷
 - 坑内検層の結果この深度でIDDP-2坑井内へ地層流体が漏洩していることが判明



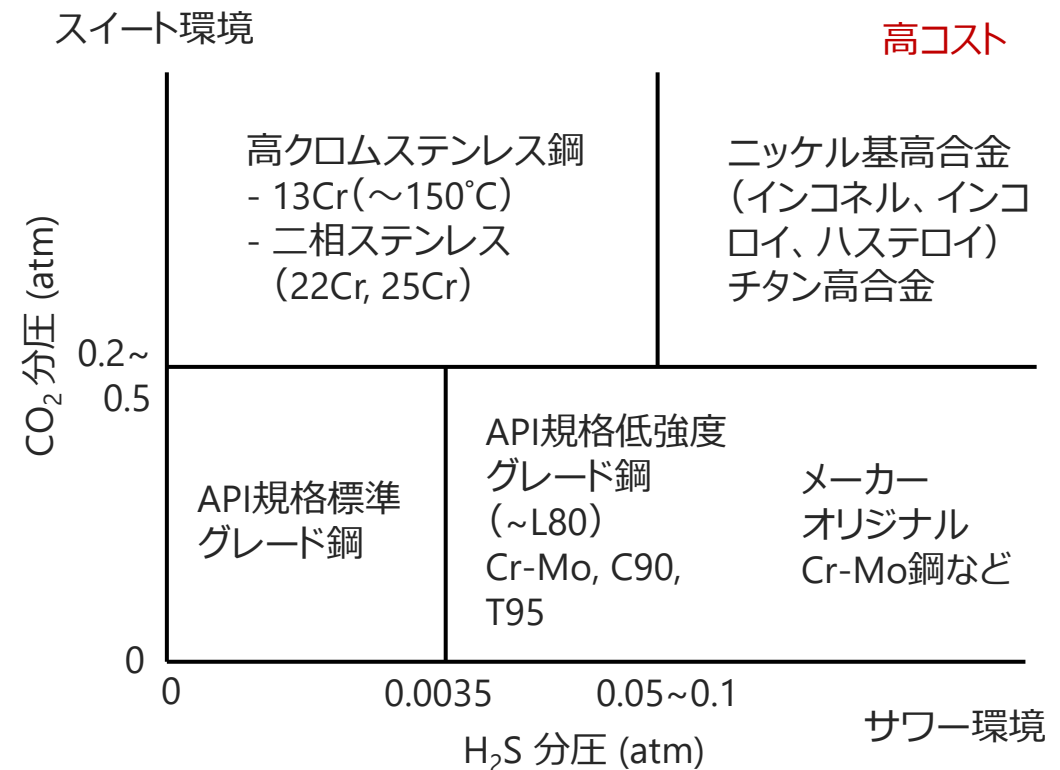
IDDP-2掘削が行われレイキャネス地熱地域で過去に発生した別の坑井のケーシング圧壊事例

セメンチング不良により生じたウォーターポケットが原因か？

鋼管の腐食対策および超高温井用セメント

- 超臨界地熱開発で予想される腐食環境は、pH=3程度のCO₂、H₂SあるいはHCl酸性環境、なおかつ400℃以上の高温
- 石油開発における腐食対策よりも困難
- 鋼管
 - 全面腐食に対しては耐硫酸・塩酸酸性材料を使用
 - 炭素鋼パイプの内面セラミックスコーティングも有効
 - 応力腐食割れ(SCC)、硫化物応力割れ(SSC)、耐摩耗(エロージョン)への対策も必要
- セメント
 - ポルトランドセメント+シリカ40%セメント(地熱井用セメントGWC)の実質的な耐熱温度は320℃ぐらいか？
 - ポルトランド系セメントは400℃以上での使用は困難
 - 超高温井用アルミナセメントを開発中

石油開発における耐腐食性鋼管材料の選定基準例



高温環境下耐腐食ケーシング材料の研究開発

- コストも考慮するとオーバースペックになりすぎない材料の選定が重要
- 全面腐食
 - 超臨界地熱調査井では腐食速度3.0mm/年以下、超臨界地熱商業生産井では0.3mm/年以下であることが必要
 - 2020年度「NEDO超臨界地熱発電技術研究開発／調査井の資材等の開発」において、超臨界地熱環境ではCr-Mo鋼(TN 110SS)および17Cr鋼を、亜臨界地熱環境ではCr-Mo鋼(TN 110SS)を超臨界地熱調査井候補材として選定
 - TIMET(Titanium Metal Corporation)社が坑井用のチタンケーシング・チュービングを開発・製品化(2008年ごろ)
- 局部腐食
 - 高強度鋼は応力割れの危険がある
 - 硫化物応力割れ(SSC, Sulfide Stress Cracking)は高H₂S環境でも高温下では起こりにくい
 - 高HCl、高残留酸素濃度環境では高温で応力腐食割れ(SCC, Stress Corrosion Cracking)の危険が大きくなる
 - 内面コーティングはドリルパイプの接触による摩耗(Erosion)が課題

超臨界地熱井掘削における技術的課題のまとめ

- **深度3500m程度(亜臨界領域)までなら既存技術での掘削は可能であるが、超臨界地熱貯留層を掘り抜き、生産用に仕上げるには更なる技術開発が必要**
- **高耐熱・高耐腐食資機材の開発**
 - ビット、傾斜掘りツール、MWD・LWD、セメンチング機器、パッカーなどの坑内機器を超高温化で使用可能にするメタルシール技術、シール機構・可動・摺動部を極力持たない機器の開発
- **泥水循環による坑内冷却技術**
 - 泥水循環やセメンチング作業、生産中の坑内温度変化のシミュレーション技術
 - 断熱ドリルパイプ、泥水冷却装置を使用したときの効果の評価
 - 泥水の選定・高温安定性の評価、高温高傾斜井のホールクリーニング
- **逸泥対策技術**
 - 熱超臨界地熱領域のジオメカニクスの解明
 - 逸泥対策技術(検知, 閉塞)、セメンチング不良対策技術(逆循環セメンチング法の評価など)
- **坑井の健全性**
 - 地熱発電ライフサイクルにわたる坑井健全性維持に要求される耐超高温・耐高腐食ケーシング材の選定、400℃以上で長期安定性を示し取り扱いが容易なセメント材料の開発
 - 坑内温度変化によるケーシングやセメントの変形・破壊の評価技術と坑井設計法の確立
- **仕上げ技術**
 - 革新的な仕上げ・熱水生産方法(チュービングフロー?)の開発
- **長期間にわたり安全に利用できる質の高い坑井(=生産性の高い坑井)の掘削は、石油・天然ガス井に比べて地熱井は安価にできるといえる根拠は存在しない**
- **問題はどこまでコストをかけられるか、許容できるか**

おわりに：超臨界地熱発電の実現に向けて

- いかにして優良な超臨界地熱貯留層を見つけるか
 - 優良な超臨界地熱貯留層とは、高温・高圧、高エンタルピーの超臨界熱水を含有した天然のボイラー
 - 十分な量の超臨界熱水の存在あるいは熱水の供給が無い場合には、水圧破砕による人工貯留層の造成も必要
- 材料の耐熱温度を超えるような超高温の地下に、いかにして**長期間健全性を維持できる坑井を安価にかつ安全に掘削**するか
 - 単に岩石に穴をあけるのではなく、ケーシングおよびセメントによって天然のボイラーとしての**完全な圧力容器となる坑井を地下に構築**する
 - ⇒掘削(Drilling)の日本語訳が「作井」である所以
 - 機器・材料等のハードウェア技術の向上のみでなく、坑内冷却技術の向上や作業工程の再構築が必要
- **高温であること以外には超臨界地熱地層の物理特性が不明であり、直接目で見たり触れたりすることのできない「自然」が相手である点が最大の困難**