



クローズド方式 地熱発電開発の現状

2023年度 第5回地熱発電・熱水活用研究会

2024年1月15日(月)

塩崎 功(ENAA)

若松 尚則(ENAA客員研究員)

佐々木 学(JGI)

和田 弘・大岡 政雄(OYO)

佐藤 真丈・大里 和己(GERD)

金子 正紀・下徳 悠介・松本 行弘(JOE)

森 康二(BES)

深田 利昭・中尾 吉伸・末永 弘(CRIEPI)

阿部 彩歌(JOGMEC)

革新的地熱発電の技術開発に関する委託業務 「クローズド方式の地熱発電計画策定調査」 JOGMEC 令和5年3月

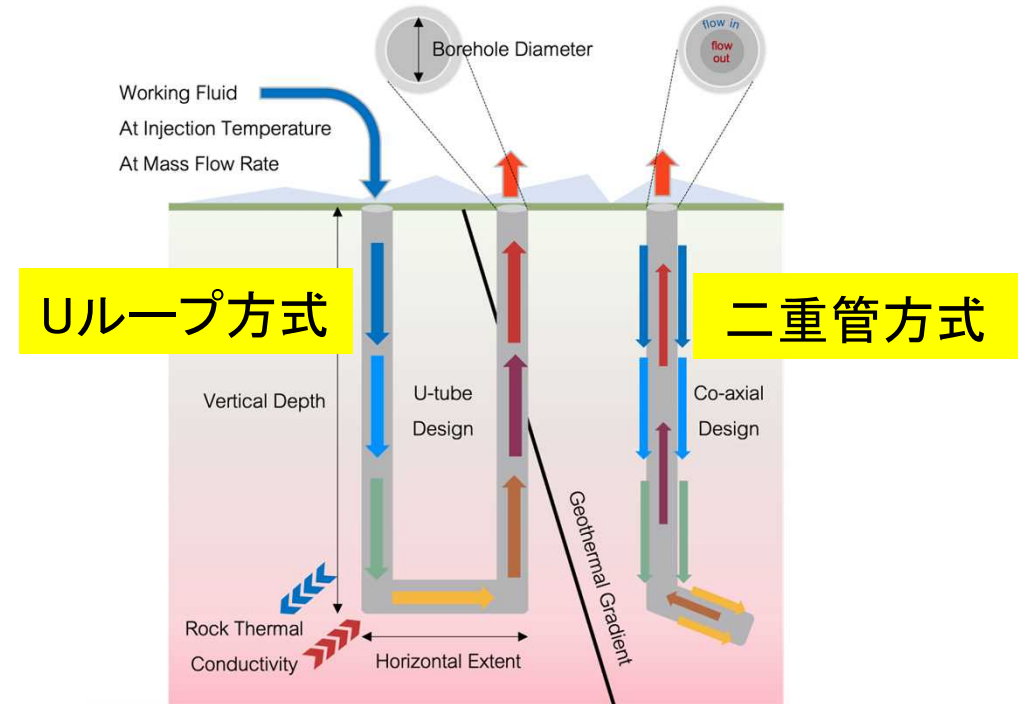
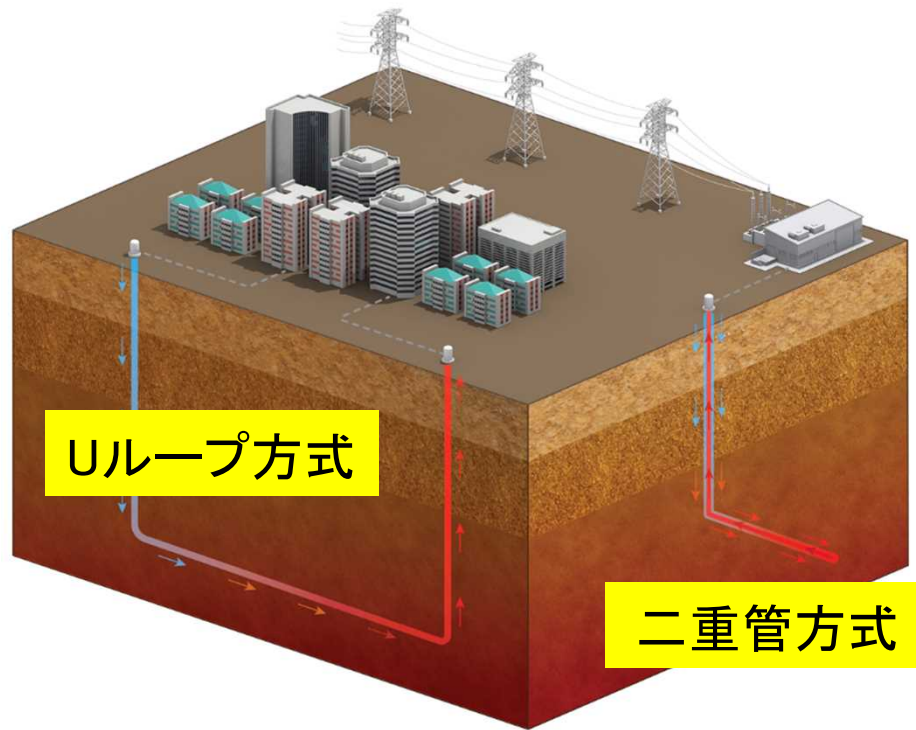
独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構(JOGMEC)は、令和3年度～令和4年度に「クローズド方式の地熱発電計画策定調査」をENAAに委託した。報告書は2023年8月に公開するとともに、成果の一部を2023年11月14日～16日に岐阜市で開催された日本地熱学会令和5年学術講演会で発表した。次ページ以降はその発表資料の一部を抜粋して加筆・修正したものである。

日本地熱学会学術講演会タイトル	著者名(○:発表者)
クローズド方式による地熱発電の技術的評価・発電コスト試算	○塩崎 功・若松 尚則(ENAA)・佐々木 学(JGI)・和田 弘・大岡 政雄(OYO)・佐藤 真丈・大里 和己(GERD)・阿部 彩歌(JOGMEC)
クローズド方式による熱回収量評価シミュレーション(その1)	○森 康二(BES)・深田 利昭・中尾 吉伸・末永 弘(CRIEPI)・塩崎 功(ENAA)・阿部 彩歌(JOGMEC)
クローズド方式による熱回収量評価シミュレーション(その2)	金子 正紀・○下徳 悠介・松本 行弘(JOE)・塩崎 功(ENAA)・阿部 彩歌(JOGMEC)

背景と概要

- 2050年のカーボンニュートラル達成にはCO₂排出量が少ない地熱発電のさらなる推進が必要である。
- 現在の熱水系を用いた地熱発電に加えて熱水系に頼らない革新的地熱発電の技術開発が求められている。
- 国内外で研究開発・実証・事業化検討が進められているクローズド方式による地熱発電は、地下に存在する高温岩体による熱資源のみを活用するものであり、熱水／蒸気の兆候が認められない地域においても発電事業として成立する可能性がある。
- 公表されているクローズド方式から代表的なUループ方式と二重管方式による地熱発電方式を選定し、技術的評価と発電コスト試算を実施した。

クローズド方式による地熱発電とは



【利点】

- ・高温の岩盤があれば、地上からの循環水で熱水を採取可能。
- ・地中への還元は不要。スケール付着による影響は小さい。
- ・温泉事業者の抵抗は小さい。

【欠点】

- ・得られる熱量が少ない(坑井周辺岩盤からの熱伝導による熱回収が主体)。
- ・Uループ方式では坑井のコントロール掘削技術・接合技術が必要であり掘削費用が高額となる。
- ・二重管方式では、坑井内に熱回収装置を挿入することから大口径の二重管の採用は不可能であり、採取できる熱量は限定的。

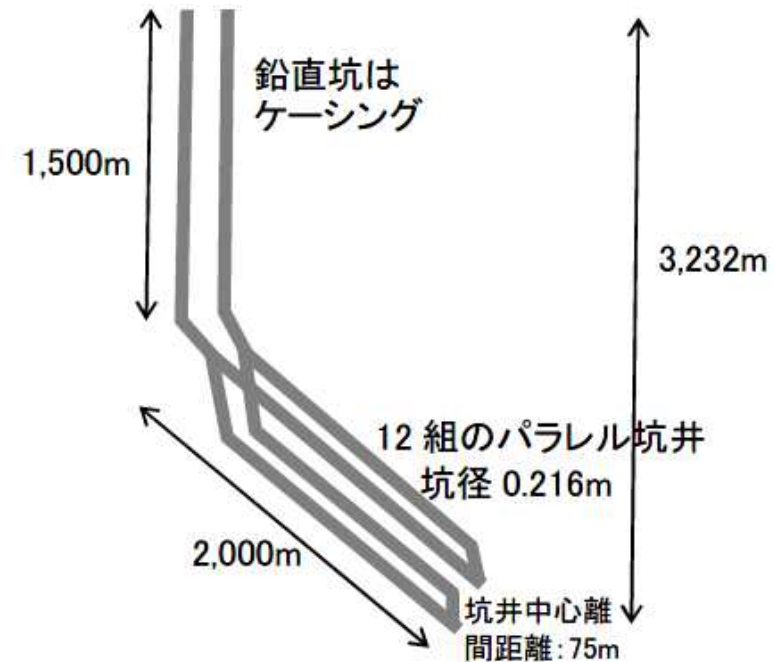
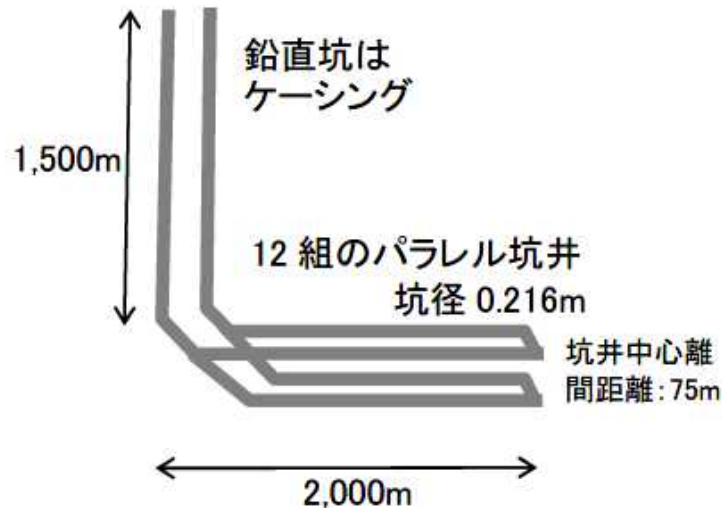
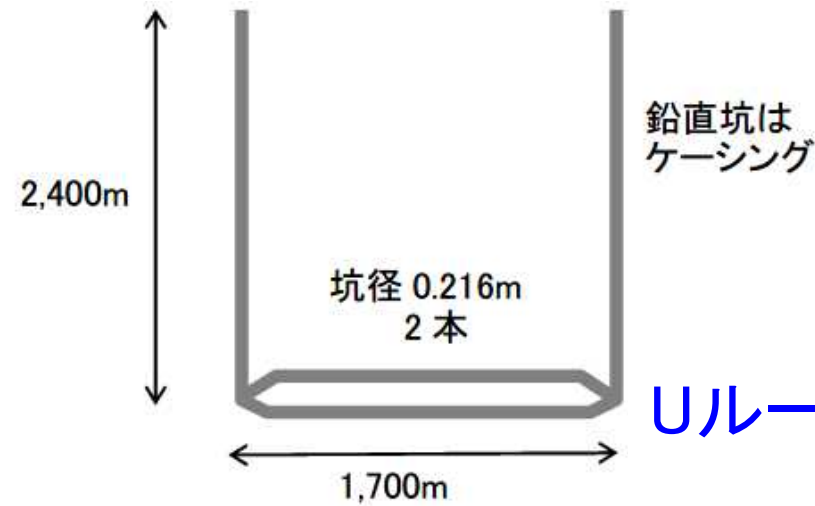
<https://geocluster.labworks.org/>

● 評価対象技術の選定

公開情報を基に、クローズド等方式に関するコンセプトを整理・分類し、評価対象技術を選定。

方式	坑井仕様	熱回収部ケーシングの有無	熱回収部坑井掘削方向	坑井条件	解析対象	費用算出対象	選定結果
U ル ー プ 方 式	複数坑井	裸坑	水平	非熱水系	●(水平2坑) (モデル検証用)		Uループ①
		ケーシング	水平	非熱水系			
		裸坑	水平 斜め	非熱水系	●(水平多坑) ●(斜め多坑)	●(同左) ●(同左)	Uループ① Uループ②
		ケーシング	水平・斜め	非熱水系			
同 軸 二 重 管 方 式	坑井内に 一重の断熱管を挿入 (ケーシングを外管)	裸坑	鉛直・斜め	非熱水系 熱水系			
		ケーシング	鉛直・斜め	非熱水系 熱水系	●(鉛直1坑)		同軸二重管①
	坑井内に 二重管を挿入	裸坑	鉛直・斜め	非熱水系	●(鉛直1坑)	●(同左)	同軸二重管②
			鉛直・斜め	蒸気卓越系			
		ケーシング	鉛直・斜め	非熱水系			
			鉛直・斜め	熱水系	●(鉛直1坑)	●(同左)	同軸二重管③

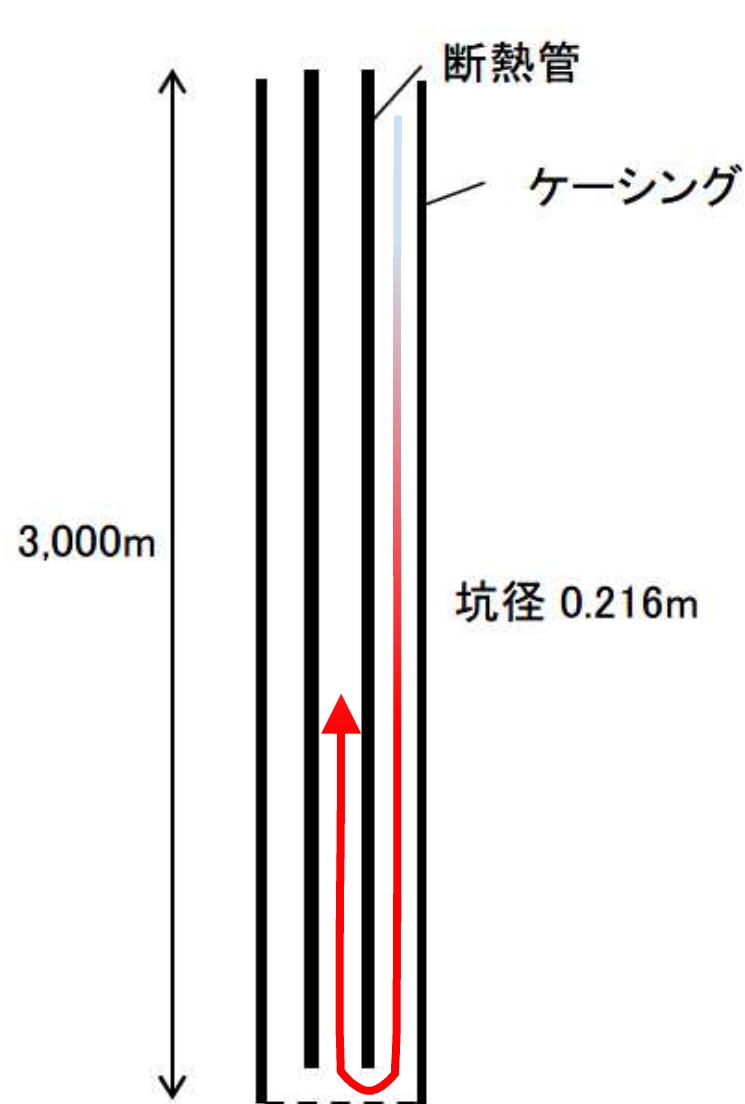
- 選定したクローズド方式の形状等を設定:Uループ



Uループ①(水平複数坑)

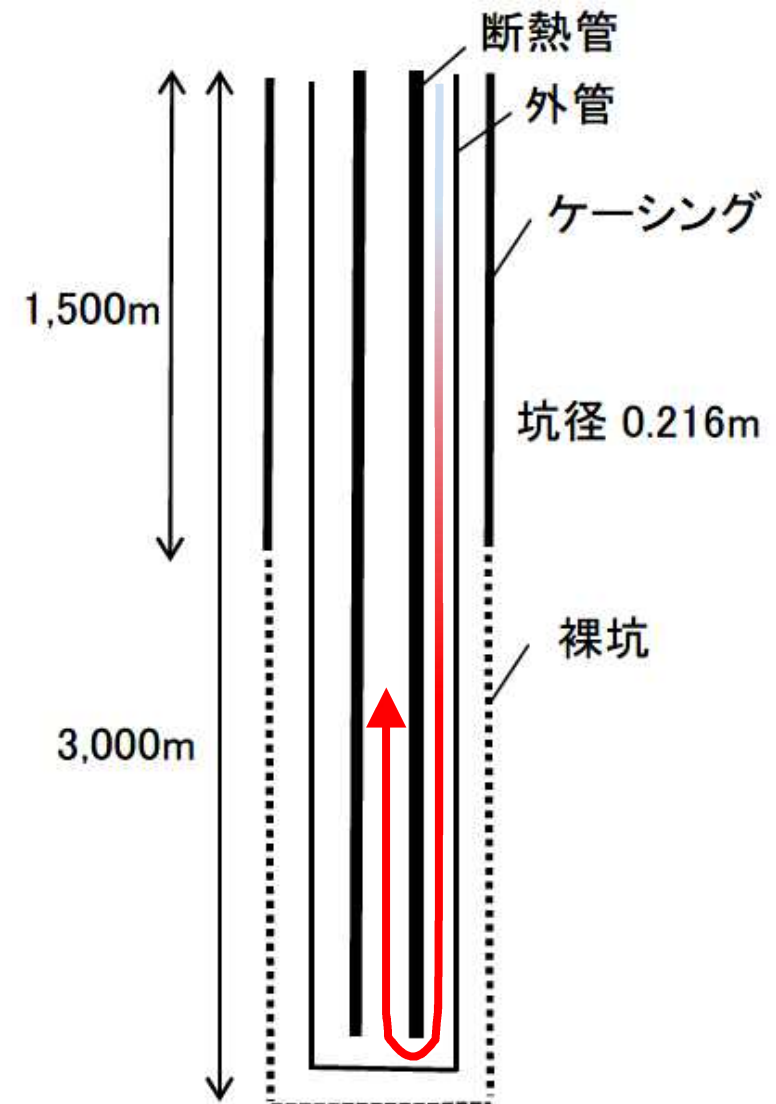
Uループ②(斜め複数坑)

- 選定したクローズド方式の形状等を設定：同軸二重管



同軸二重管方式（ケーシングと一重断熱管）

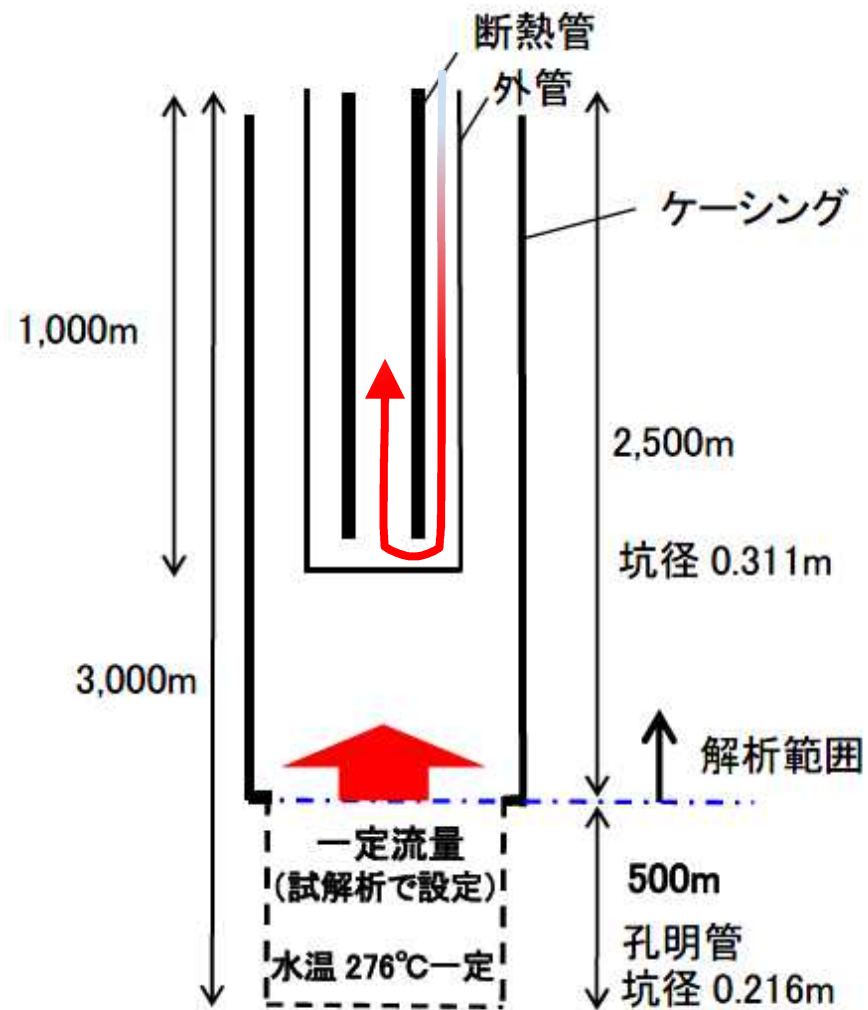
同軸二重管①



同軸二重管方式（二重管使用、非熱水系）

同軸二重管②

- 選定したクローズド方式の形状等を設定：同軸二重管



同軸二重管方式（二重管使用、熱水系）

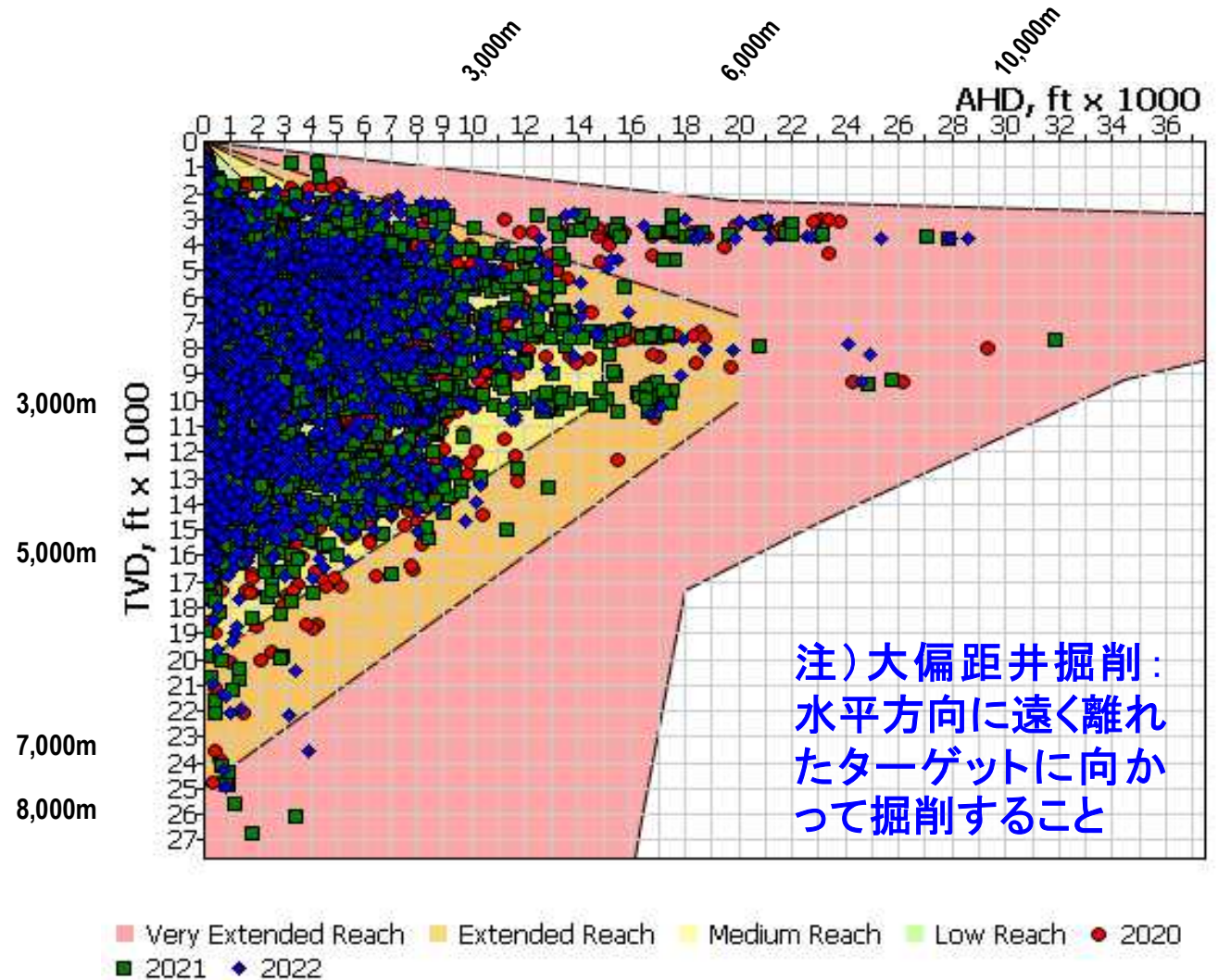
同軸二重管③

● 技術的評価：大偏距掘削(ERD)実績

長距離コントロール掘削および水平掘削の技術調査・実績調査

⇒海外での水平井・大偏距井掘削の実績は十分。国内実績はごく僅か。

- 最近10年でSLB社が傾斜掘サービスを提供した水平井・大偏距井ERDは世界で1,241坑。中東・アジア地域の水平井・大偏距井含むERD坑井数は761坑。
- 日本でのERD実績は、水平井5坑・大偏距井2坑。そのうちマルチラテラル坑井3坑。
- マルチラテラル坑井は、29か国で1,000を超える(2006年データ)。
- 国内ガス井では、掘削深度4,984m、偏距3,881mの実績(1994年：常磐沖-2号井、福島県磐城沖ガス田)あり。



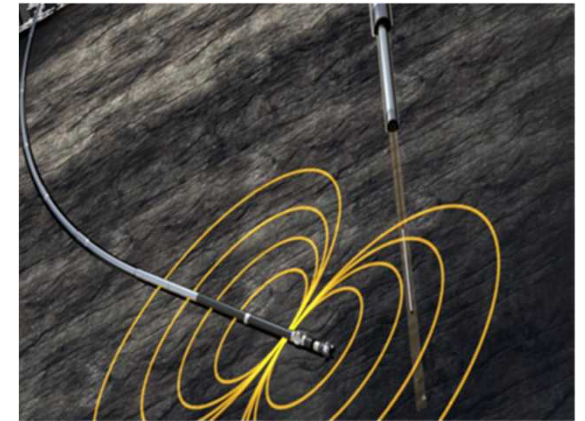
過去3年 中東・アジアのERD坑井実績
(水平偏距vs 垂直深度, SLB社)

● 技術的評価：坑井接合実績

高温下での地中での坑井接合の技術調査・実績調査

⇒海外での地中接合の実績は十分。国内でも1例あり(鬼首)。

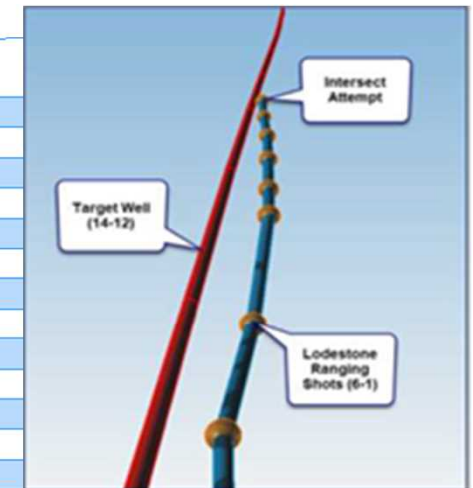
- 世界でレンジングによる坑井位置確認・坑井接合(Ranging & Intersection)サービスを提供する主なサービス会社は、Halliburton社とSDI社の2社であり、これまでに**8,000件以上の適用実績**がある。成功率は、ほぼ100%。日本での実績はSDI社のみ。
- **SDI社の2003年から19年間のRanging & Intersection実績である188件**からの抜粋を以下に示す。



Ranging & Intersection実績(2003-2022, SDI社)

No.	Month-Year	Country	Project Type	Technology
1	Jan-03	USA	P&A Intercept	MagTraC
2	Aug-03	USA	P&A Intercept	MagTraC
3	Oct-06	Indonesia	Relief well	MagTraC
4	Feb-07	USA	Relief well	MagTraC
5	Apr-07	Kazakhstan	Relief well	MagTraC
6	Jul-08	Canada	Open-hole Intercept	MagTraC
7	Jan-09	USA	P&A Intercept	MagTraC
8	Jan-09	USA	P&A Intercept	MagTraC
9	Feb-09	Venezuela	Relief well	MagTraC
10	Apr-09	Turkey	Vertical intercept	MagTraC
11	Apr-09	Argentina	Relief well	MagTraC
12	Jul-09	Qatar	Relief well	MagTraC
13	Jul-09	USA	P&A Intercept	MagTraC
14	Dec-09	USA	P&A Intercept	MagTraC
15	Jun-10	USA	P&A Intercept	MagTraC
16	Jul-10	USA	P&A Intercept	MagTraC
17	Jul-10	USA	P&A Intercept	MagTraC
18	Aug-10	USA	P&A Intercept	MagTraC
19	Aug-10	USA	P&A Intercept	MagTraC
20	Aug-10	USA	Geothermal re-entry	MagTraC
21	Oct-10	USA	Open hole sidetrack-reentry	MagTraC

171	Jul-20	USA	P&A Intercept	BlackShark
172	Jul-20	USA	P&A Intercept	BlackShark
173	Aug-20	USA	P&A Intercept	BlackShark
174	Aug-20	USA	P&A Intercept	BlackShark
175	Sep-20	USA	P&A Intercept	BlackShark
176	Oct-20	USA	P&A Intercept	BlackShark
177	Nov-20	USA	P&A Intercept	BlackShark
178	Nov-20	USA	P&A Intercept	BlackShark
179	Jan-21	USA	Intercept	Lodestone
180	Aug-21	USA	P&A Intercept	BlackShark
181	Sep-21	USA	P&A Intercept	BlackShark
182	Sep-21	USA	P&A Intercept	BlackShark
183	Feb-22	USA	P&A Intercept	MagTraC
184	Mar-22	USA	P&A Intercept	BlackShark
185	Mar-22	USA	P&A Intercept	MagTraC
186	May-22	USA	P&A Intercept	MagTraC
187	Jun-22	USA	P&A Intercept	BlackShark
188	Jul-22	Canada	Pass-by	Lodestone



Open hole Intercept

● 発電コスト試算

- 坑井掘削費用(熱回収装置を含む)算出、数値解析等による発電可能量試算、地熱発電所建設費用の算出を行い、発電コストを試算

■ 試算手順

- ① 坑井掘削費用の算出
- ② 複数の数値解析・理論解析結果から、温度と流量の標準値を設定
- ③ 設定した温度と流量を前提に、発電可能量、建設費用を算出(二重管②の発電可能量と発電所建設費用は下記の経験式と回帰式(右下)で算出)
- ④ 坑井掘削を含む発電所建設費用の総額を算出
- ⑤ KW当たりの発電コストを算出

熱源の流量・温度と発電可能量の経験式

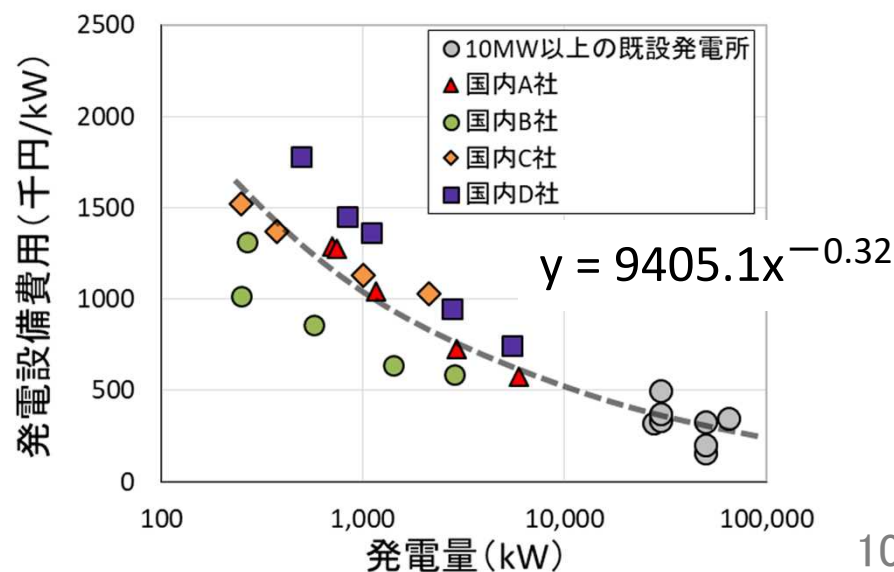
カーリーサイクル $P=Q \times 9.005 \times 10^{-6} \times T^{2.773}$

ランキンサイクル $P=Q \times 1.184 \times 10^{-7} \times T^{3.588}$

ただし、P：発電端出力 (kW)、Q：熱源流量 (t/h)、T：熱源温度 (°C)

出典：環境省(2014)：平成25年度 地熱発電に係る導入ポテンシャル精密調査・分析委託業務 報告書

発電量と発電設備費用の関係



➤ 坑井掘削費用算出

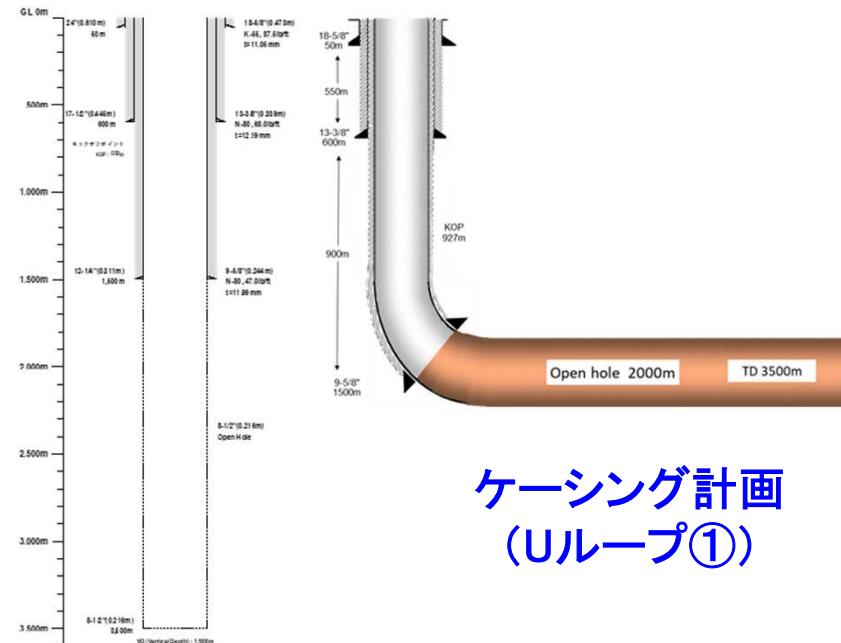
【算出手順】

- Uループ方式①、②と二重管方式②、③の掘削費用算出にあたり、算出基準となる「掘削基本計画」(ケーシング計画、傾斜掘計画・坑跡計画／オープンホールサイドトラック(Open hole sidetrack)計画、泥水計画、セメンチング計画、物理検層計画)を策定し、それに基づき、掘削費用算定のための「掘削概念計画」を作成。
- 「掘削基本計画」と「掘削概念計画」に基づいて「掘削日数算定」等を行い、掘削費用を算出。

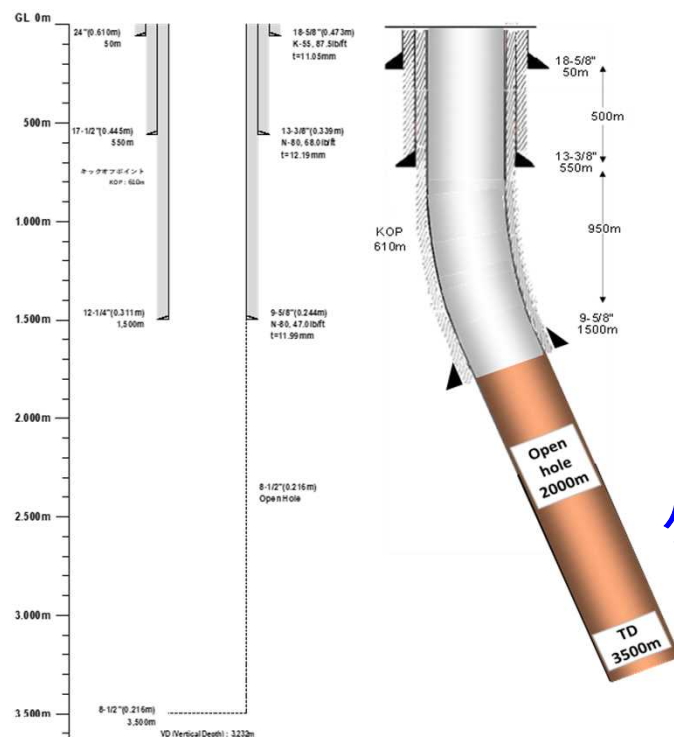
【温度条件】

- 現状、坑底温度175℃程度が坑内ツール(MWD, PDM, レンジングツール等)を安全に使用できる温度限界である。
- 泥水循環等による冷却効果を考慮し、175℃を超えないような対策を講じることにより、Uループ①では坑底温度220℃程度を温度限界に設定。
- Uループ②では、Insulated Drill Pipeの使用による冷却効果も期待して最大温度を300℃に設定。

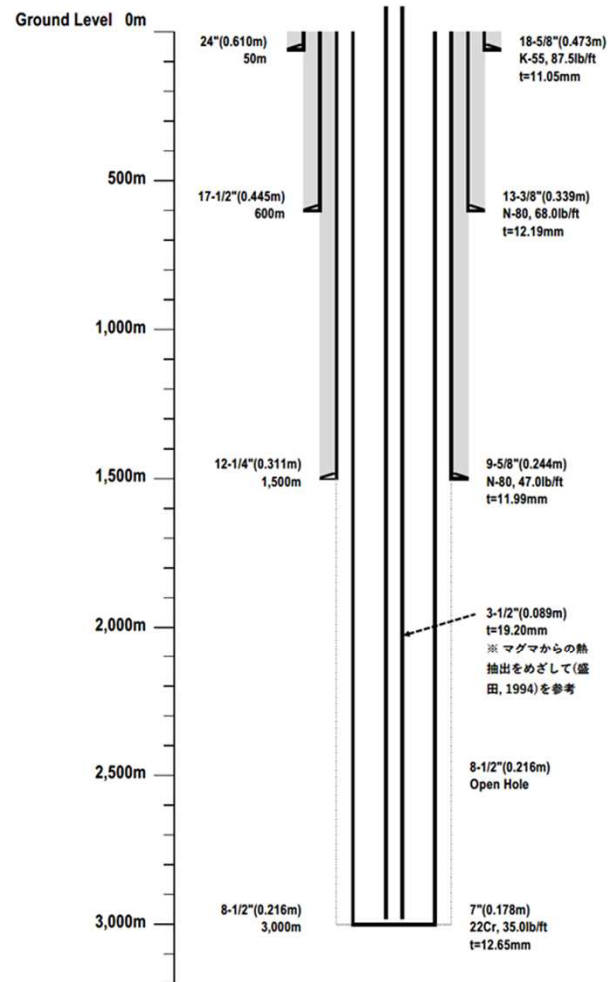
➤ 掘削基本計画の例：ケーシング計画



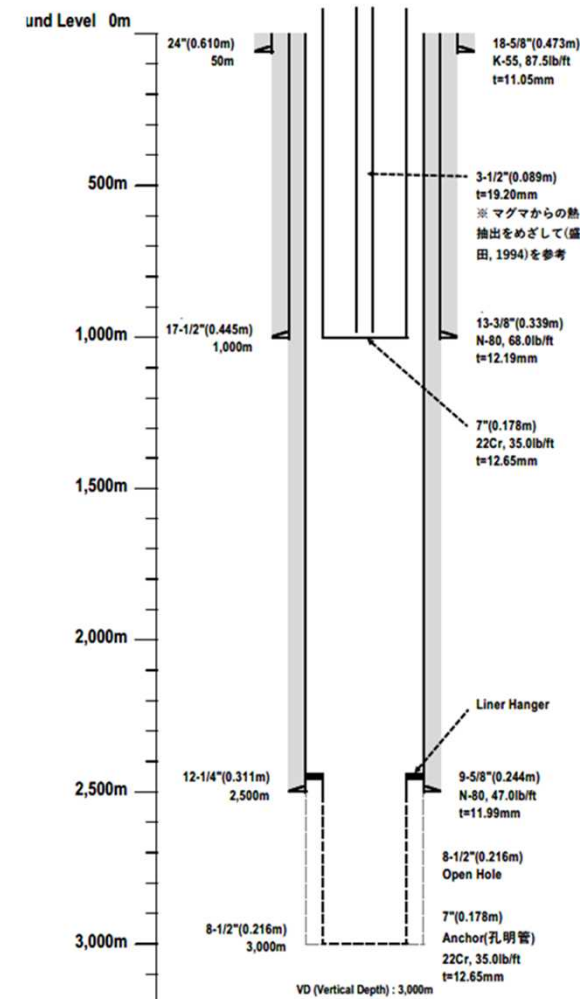
ケーシング計画
(Uループ①)



ケーシング計画
(Uループ②)

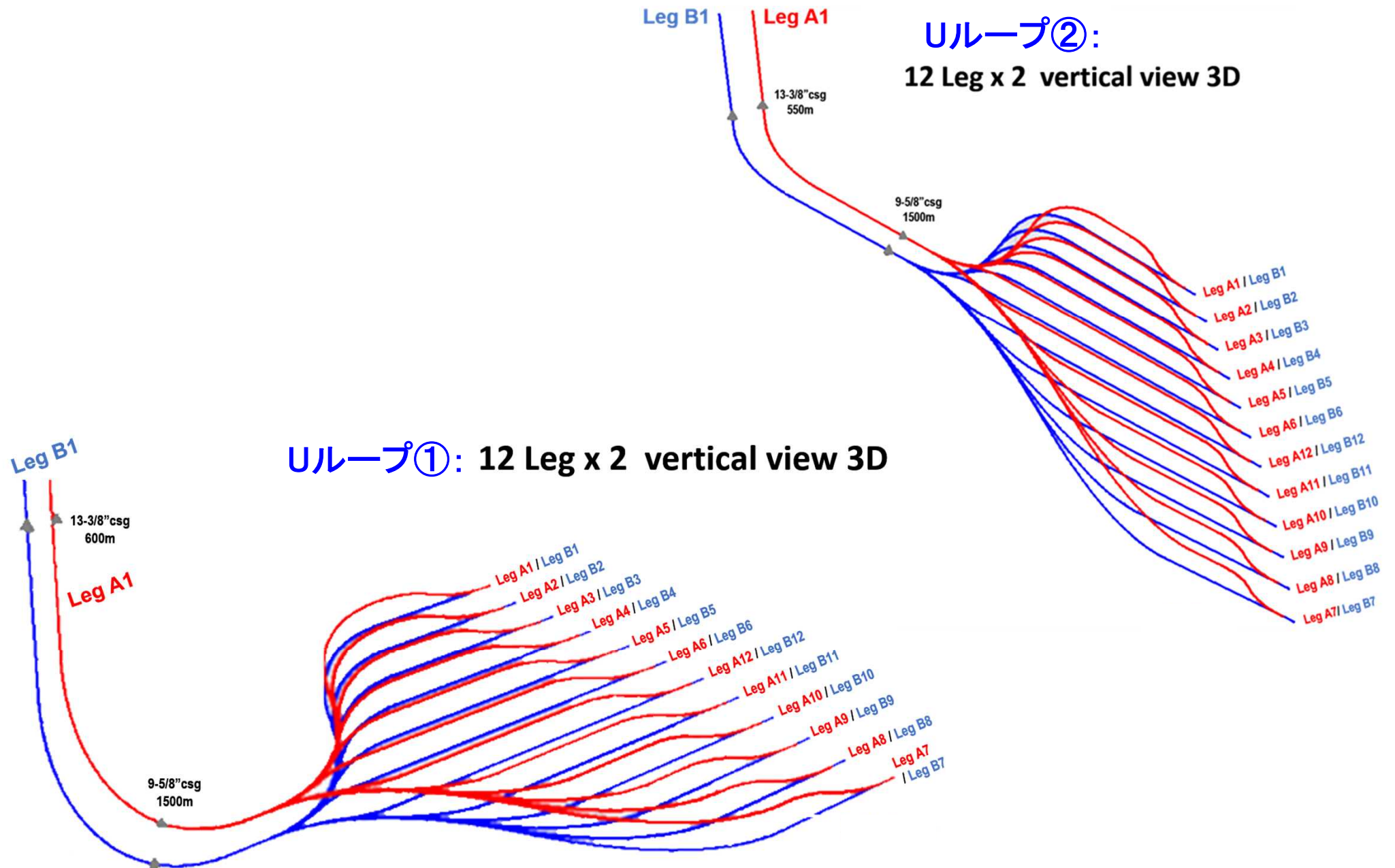


ケーシング計画
(二重管②)



ケーシング計画
(二重管③)

➤ 掘削概念計画の例：12Legsの立体図



➤ 掘削日数一覧(4方式)

【掘削日数の算出方法】

- 決定論的手法を適用し、P50(Most likely time)の日数を提示。
- 非生産的時間(NPT, Non-Productive time)等を考慮。
- Uループ方式の連続掘削では、掘削進展に伴う学習効果を考慮。

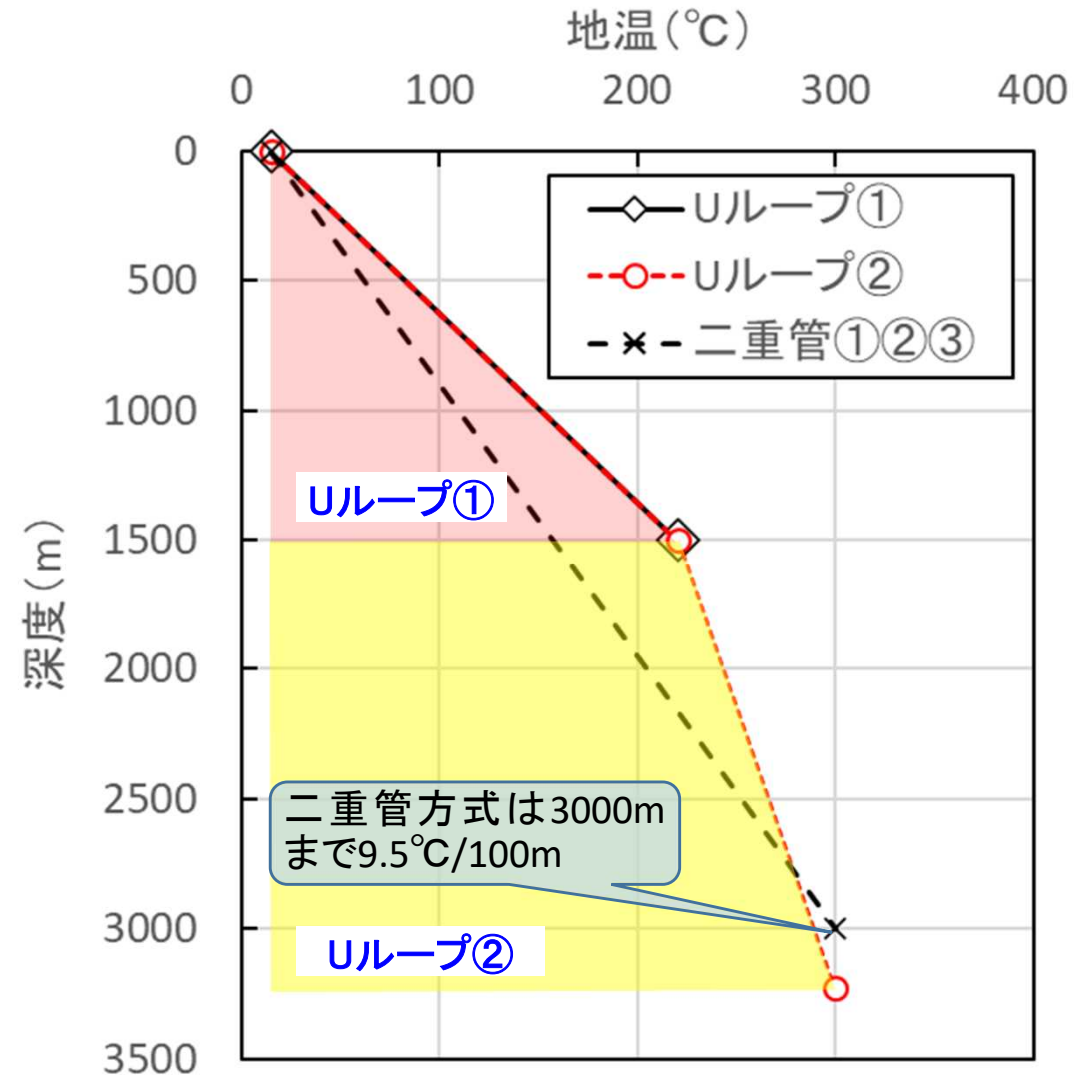
クローズド方式		合計 日数	第1段階	第2段階	第3段階	第4段階	坑井仕上
			24"坑掘削	17-1/2"坑掘削	12-1/4"坑掘削	8-1/2"坑掘削	
Uループ ①	Rig A 12坑 (Rig B 12坑)	414	Cased hole section 52 日			Open hole section	11
			5.2	14.9	32.2	351	
Uループ ②	Rig A 12坑 (Rig B 12坑)	463	Cased hole section 52 日			Open hole section	11
			5.2	14.1	32.9	399	
二重管②	1坑	97	掘削 87 日				10
			5.2	14.9	32.2	34.7	
二重管③	1坑	98	掘削 88 日				10
			5.2	20.6	48.8	13.6	

➤ 坑井掘削費用算出結果のまとめ

クローズド方式 (掘削総延長)	敷地造成・ 運搬道路建設費 敷地面積：8,000m ² (1地点) 道路延長：2,000m (1地点)	リグ運搬費 (新潟⇄九州南端 or 北海道北端)	坑井掘削費 (第1～4段階)	坑井仕上	掘削費用 合計
Uループ① (51,000m)	12.80 (2地点同時掘削)	4.70	166.44 (33万円/m)	3.95	187.89
Uループ② (51,000m)	12.80 (2地点同時掘削)	4.70	179.40 (35万円/m)	4.15	201.06
二重管② (3,000m)	6.4	2.35	12.12 (40万円/m)	6.76 (二重管設置を含む)	27.63
二重管③ (3,000m)	6.4	2.35	13.374 (45万円/m)	4.45 (二重管設置を含む)	26.58
・ 金額単位：億円 ・ すべて4,000m 級掘削リグの使用を前提					

➤ 発電コスト試算：複数の解析手法による熱回収量算出

- **Uループ①**：鉛直坑底で最大温度 **220°C** (13.7°C/100m、現状のレンジング可能上限)
- **Uループ②**：鉛直坑底から地温勾配 4.6°C/100m で **最大温度300°C** (将来的な技術開発目標としているレンジング可能上限)となる深度まで斜坑で掘削すると設定
- **二重管①, ②**：最深部地温 300°C (9.5°C/100m)
- **二重管③**：深度2500～3000mのケーシング区間の平均地温276°Cの熱水が深度2500mで坑井内に流入して上昇する設定
- 岩盤の熱伝導率*1
 - 第四紀火山岩 : 1.3W/mK
 - 新第三紀堆積岩 : 1.8W/mK



熱的条件(地温勾配)の設定

* 1 NUMO(2021): 包括的技術報告 わが国における安全な地層処分の実現, 付属書3-13, p.4

➤ 発電コスト試算：適用した解析手法・シミュレータ

名 称	概 要
STARS	・石油ガス業界の熱回収分野で使用実績の豊富な多成分型熱回収貯留層シミュレータ
GEOSIM	・ドイツで開発された地熱専用のボアホールシミュレータ
理論解析モデル	・Ramey（1962）の近似解と同様なアプローチで坑井の出口温度を推定するために国内M社が開発
COMSOL Multiphysics®	・複数の物理現象の連成解析機能を有するFEMベースの汎用シミュレータ
電中研プログラム	・NEDO事業「二酸化炭素循環型地熱発電システムの開発」（2020-2021年度）に適用した独自開発プログラム

STARS, GEOSIM, 理論解析モデル

• STARS

- 石油ガス業界において特に熱回収の分野で使用実績の豊富な多成分型熱回収貯留層シミュレータ
- 貯留層モデルと坑井モデルからなる
 - 貯留層モデル: 三次元グリッドシステム上での岩石中の流体流動と相互作用
 - 坑井モデル: 流体の生産または圧入、坑井内の流動
- 従来の貯留層シミュレータよりも複雑な坑井モデル(FlexWell)を備え、坑井内に複数のストリング(平行チューブストリングまたは同軸ストリング)が存在する坑井や複雑なマルチラテラル坑井の圧力損失と熱損失の計算が可能

• GEOSIM

- 高深度地熱プロジェクトにおける坑井内あるいは坑井近傍のプロセスを取り扱うシミュレータ
- モデルは圧入井、貯留層、生産井、地上施設の4つのサブモデルに分割して計算され、それらは一貫したインターフェースで相互にリンクされる

• 理論解析モデル

- 石油ガス開発の分野で、垂直坑井内の温度分布を予測する解析的な手法として知られるRamey (1962)の近似解と同様なアプローチで、熱伝達が地層から坑井内を流れる流体への準定常的な径方向熱伝導として扱えるという仮定のもと、水平坑井の出口温度を推定するために開発

シミュレータ	坑井内		貯留層内	
	定常流	非定常流	流体生産・圧入	自然対流
STARS	○	○	○	○
GEOSIM	○	○	○	×
解析モデル	○	×	×	×

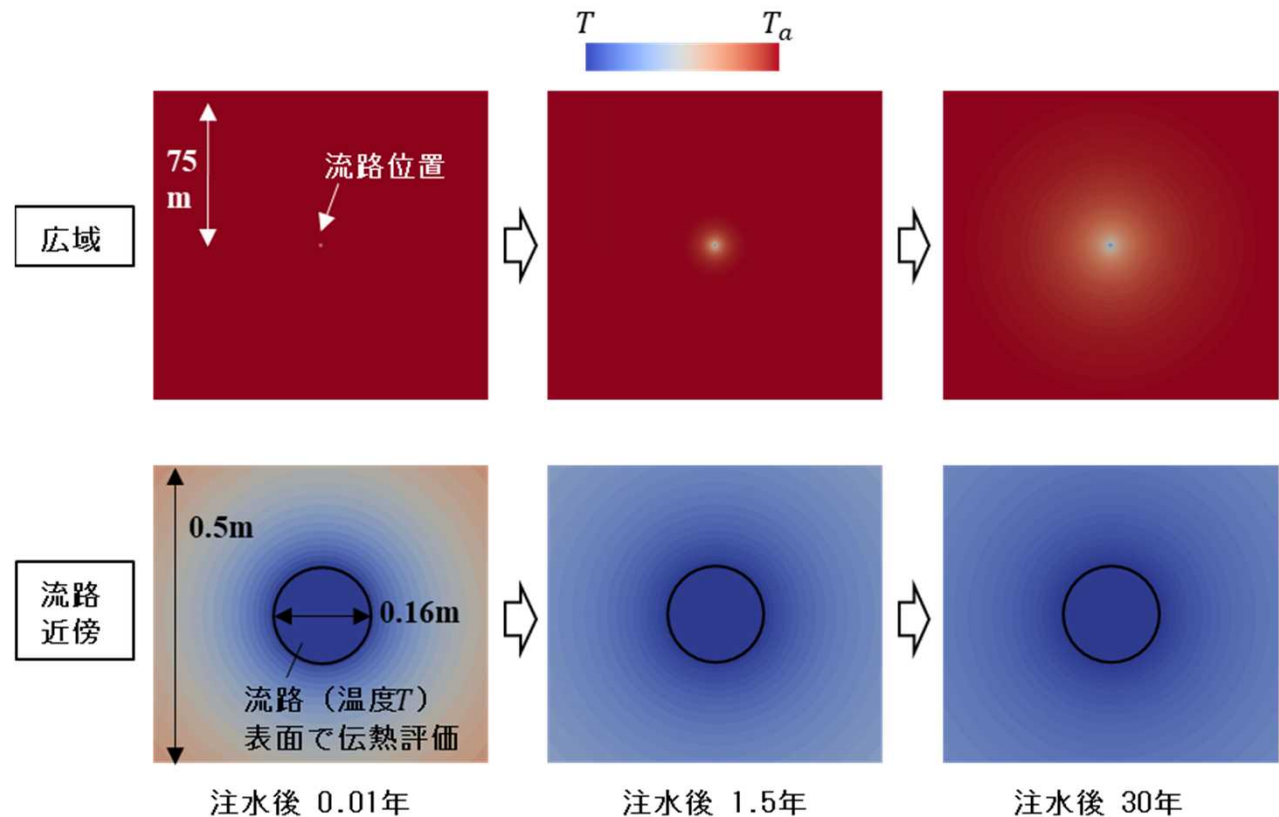
電中研プログラム

- 流路内の流れは一次元定常を仮定
- Uループ方式のラテラル坑の分岐は流量が等分配されるものとして、ラテラル坑のうち1本のみを解析する
- 流路を断面が一定となる領域毎に分割する
- 流路-岩盤間の伝熱は、壁面温度勾配に基づく熱流束を用いて与える
- この熱流束の時間変化を岩盤条件に応じて予め求めておき、異なる時間断面ごとに流路内を定常解析した結果をつなげることで、坑井内状態の時系列変化を予測した

質量保存則:
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0$$

運動量保存則:
$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} - F + \rho g \cos \theta$$

内部エネルギー保存則:
$$\frac{\partial(\rho u e)}{\partial x} = \frac{Q}{a} - p \frac{\partial u}{\partial x}$$



流路に垂直な断面内における岩盤温度変化の例

COMSOL Multiphysics

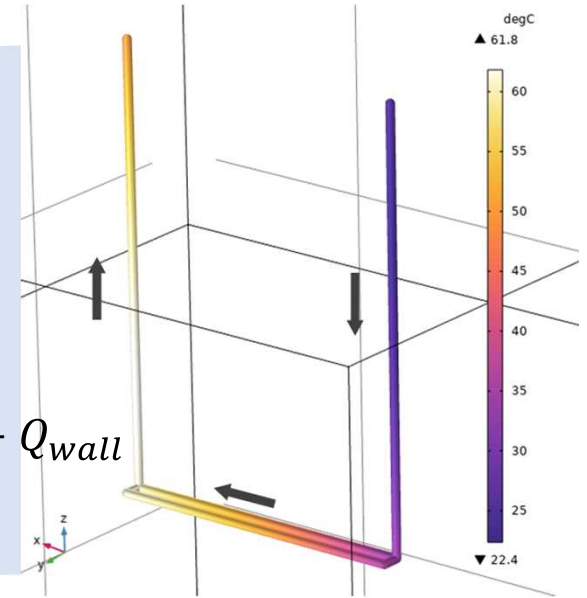
坑井を円管断面中の一次元流れ、周辺岩体をダルシー流れとし、運動量、質量及び熱量の保存式を連成した非定常数値解を求める

運動量保存式
$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\nabla_t p - f_D \frac{\rho}{2d_h} \mathbf{u}|\mathbf{u}| + \mathbf{F}$$

質量保存式
$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \nabla_t(A\rho\mathbf{u}) = 0$$

熱量保存式
$$\rho AC_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho AC_p \mathbf{u} \cdot \nabla_t T = \nabla_t \cdot A k_p \nabla T + f_D \frac{\rho A}{2d_h} |\mathbf{u}|^3 + Q_{wall}$$

$$Q_{wall} = hZ(T_{ext} - T)$$



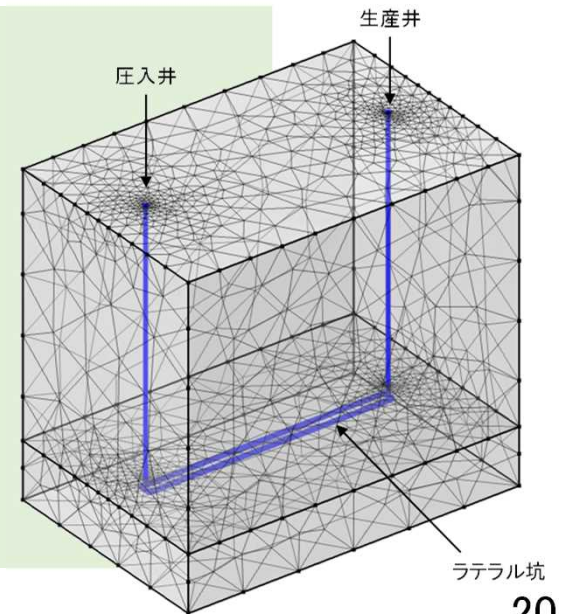
質量保存式
(単相流体系)

$$\frac{\partial(\varepsilon_p \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \left(-\frac{K}{\mu} (\nabla p + \rho_f g \nabla Z) \right) = Q_m$$

熱量保存式

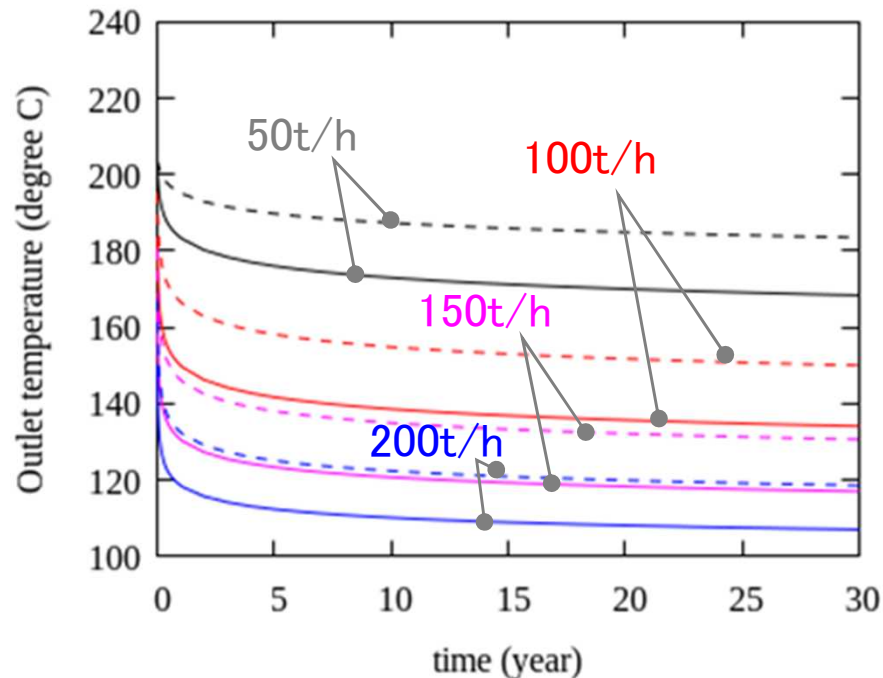
$$\left(\theta_s \rho_s C_{p,s} + \varepsilon_p \rho_f C_{p,f} + \theta_{imf} \rho_{imf} C_{p,imf} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k_{eff} \nabla T) = Q$$

$$k_{eff} = \theta_s \rho_s k_s + \varepsilon_p k_f + \theta_{imf} k_{imf} + k_{disp}$$

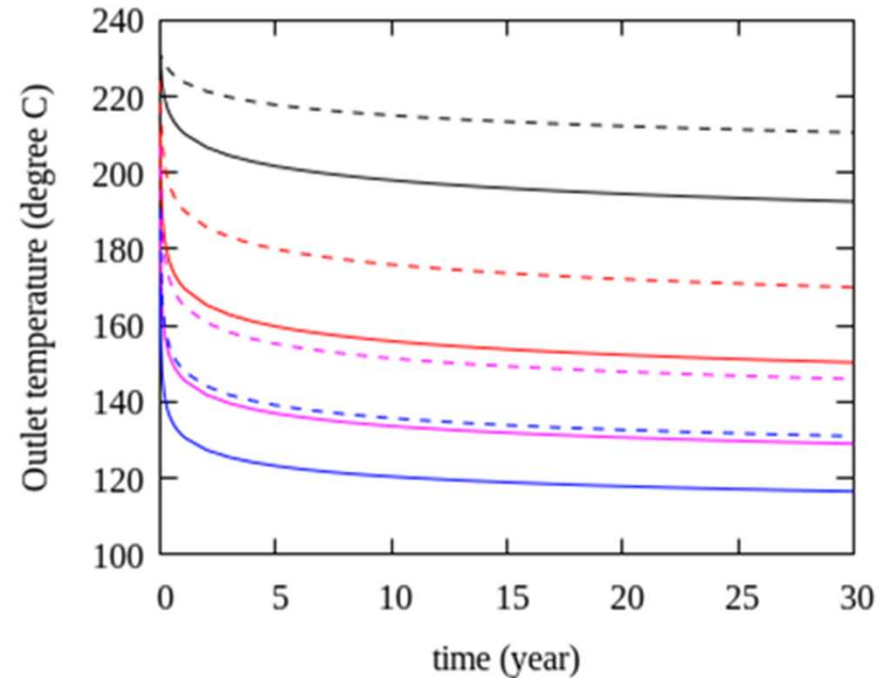


Uループ①②解析結果の例：電中研プログラム

- 循環流量、岩種の違いが生産温度に及ぼす影響
- 循環流量が小さく、かつ熱伝導率 λ が大きい堆積岩の方が生産井坑口温度が高くなる



Uループ方式①



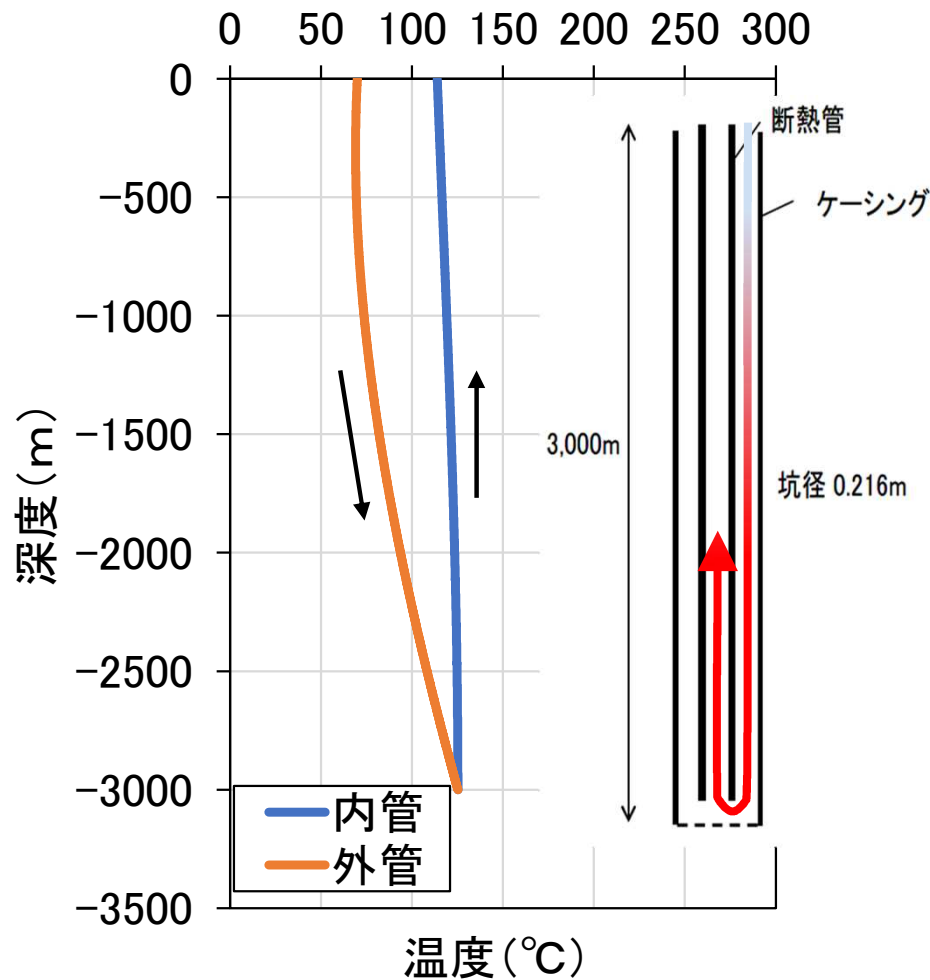
Uループ方式②

実線：火山岩($\lambda = 1.3 \text{ W/mK}$)、破線：堆積岩($\lambda = 1.8 \text{ W/mK}$)

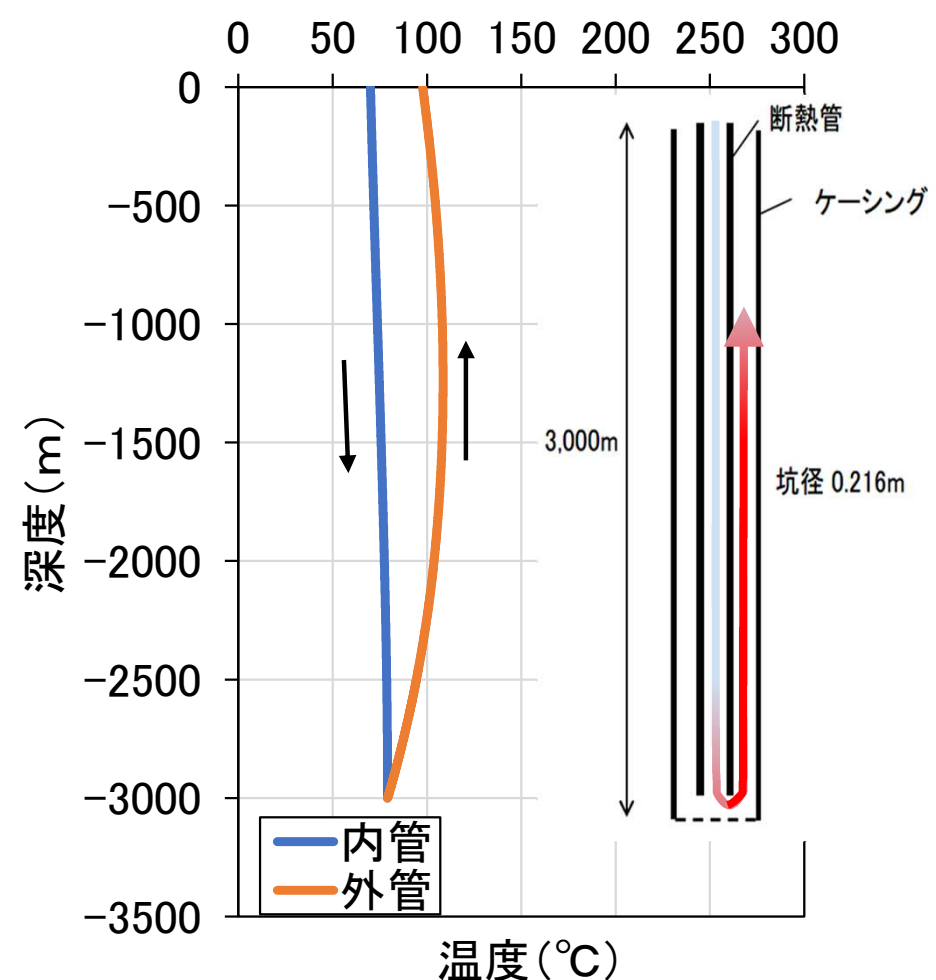
二重管①解析結果の例: COMSOL

坑井内温度プロファイル(流量5t/h、火山岩): 循環方式による違い

地上から入れた水を坑井内の外管(ケーシング)からの熱伝導で温度上昇させ、坑井下端から断熱性の高い内管で地上に上げる「外管→内管」循環の方が生産温度が高くなる。

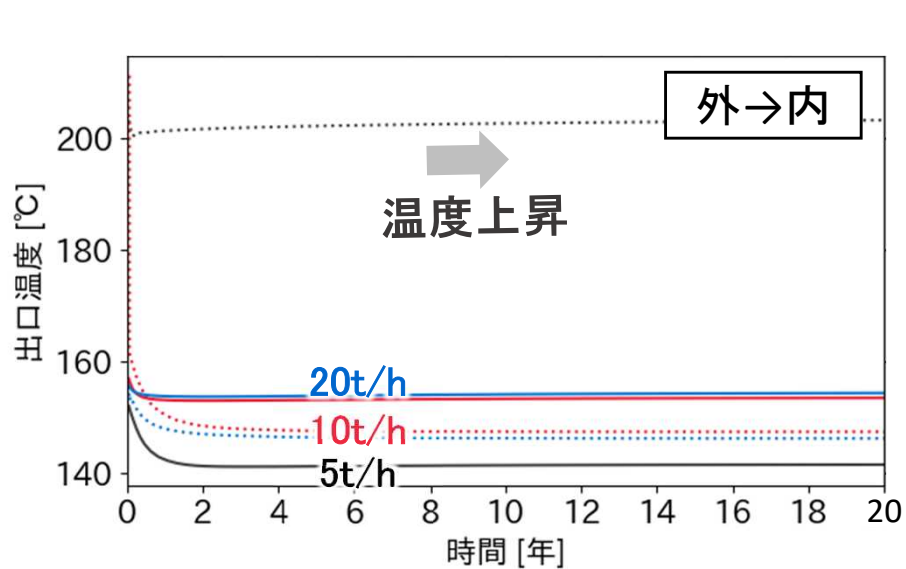


(a)外管→内管

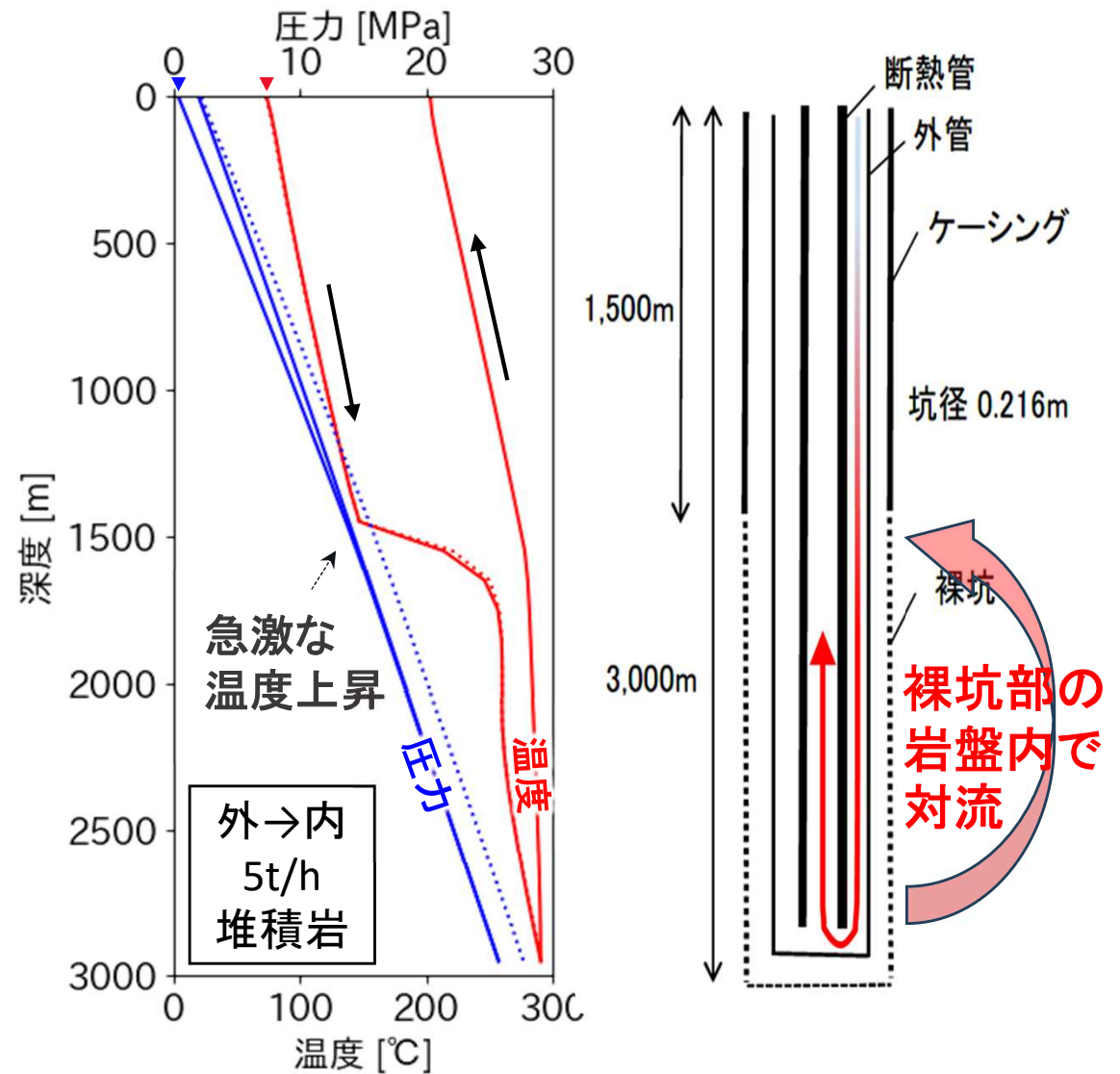


(b)内管→外管

二重管②解析結果の例: STARS



- ケースごとに一貫性のない挙動
- 熱源不在に関わらず長期的に温度が上昇するケースがある
- ケーシングパイプ下端付近で急激な温度上昇



実線: 二重管内
破線: アニュラス内

● 発電可能量の試算

➤ 解析結果に基づく温度と流量の設定（Uループ方式）

方式	流量 (t/h)	解析ツール	生産温度(°C) (15年後)	経験式による発電量(kW)		解析条件など
				カーナサイクル	ランキンサイクル	
Uループ①	50	プログラムN	186	885	823	・深度1,500mで水平平行坑井2,000m ・最大地温220°C ・地温勾配13.7°C/100m ・新第三紀堆積岩（熱伝導率1.8 W/mK）
	50	STARS	169	678	583	
	50	Analytical Model	186	887	825	
	50	GEOSIM	189	927	874	
	50	COMSOL	173	724	634	
	100	プログラムN	153	1030	817	Uループ①を想定した発電量と発電所建設費用算出条件(700～1,000kWクラス) ・流量: 100 t/h ・温度: 154°C (2023年1月11日時点の解析結果から設定)
	100	STARS	136	743	535	
	100	Analytical Model	153	1025	812	
	100	GEOSIM	155	1068	856	
	100	COMSOL	138	773	564	
	150	プログラムN	133	1047	741	
	200	プログラムN	121	1074	704	
	200	STARS	109	804	484	
	200	Analytical Model	121	1066	697	
	200	GEOSIM	122	1092	719	
	200	COMSOL	109	804	484	
	300	Analytical Model	106	1126	664	

➤ 解析結果に基づく温度と流量の設定（Uループ方式）

方式	流量 (t/h)	解析ツール	生産温度(°C) (15年後)	経験式による発電量(kW)		解析条件など
				カーナサイクル	ランキンサイクル	
Uループ②	50	プログラムN	213	1288	1338	・深度1,500から深度3,232mまで傾斜パレル坑井2,000m ・最大地温300°C ・地温勾配13.7°C/100m(1500mまで), 4.6°C/100m(1500m以深) ・新第三紀堆積岩(熱伝導率1.8 W/mK)
	50	STARS	204	1143	1146	
	50	Analytical Model	218	1375	1456	
	50	GEOSIM	215	1328	1391	
	50	COMSOL	239	1773	2023	
	100	プログラムN	174	1471	1296	Uループ②を想定した発電量と発電所建設費用算出条件(1,500kWクラス) ・流量: 100 t/h ・温度: 175°C (2023年1月11日時点の解析結果から設定)
	100	STARS	163	1235	1034	
	100	Analytical Model	176	1513	1344	
	100	GEOSIM	176	1513	1344	
	100	COMSOL	181	1641	1492	
	150	プログラムN	149	1435	1114	
	200	プログラムN	134	1426	1015	
	200	STARS	126	1203	815	
	200	Analytical Model	134	1428	1017	
	200	GEOSIM	135	1466	1052	
	200	COMSOL	135	1455	1042	
	300	Analytical Model	116	1430	904	

➤ 解析結果に基づく温度と流量の設定（同軸二重管方式）

方式	流量 (t/h)	解析ツール	生産温度（℃） （15年後）	経験式による発電量(kW)		解析条件など
				カリナサイクル	ランキンサイクル	
二重管①	5	プログラムN	132	34	24	・坑井深さ3,000m ・地温勾配9.5℃/100m(最大300℃) ・新第三紀堆積岩（熱伝導率1.8 W/mK） ・二重管の外側から注入 二重管①は生産温度が低いので、 発電量と発電所建設費用算出の対象外とした。
	5	STARS	125	29	20	
	5	GEOSIM（50年後）	134	36	25	
	5	COMSOL	115	23	15	
	10	プログラムN	107	38	23	
	10	STARS	105	36	21	
	10	GEOSIM（50年後）	107	38	23	
	10	COMSOL	96	28	15	
	15	プログラムN	96	42	23	
	20	プログラムN	90	47	24	
	20	STARS	91	49	25	
	20	GEOSIM（50年後）	89	46	23	
	20	COMSOL	85	40	20	
二重管②	5	プログラムN	130	33	23	・坑井深さ3,000m ・地温勾配9.5℃/100m(最大300℃) ・新第三紀堆積岩（熱伝導率1.8 W/mK） ・二重管の外側から注入 二重管②も生産温度は総体的に低い。 岩盤内での対流を考慮したSTARSの解析結果 と経験式、回帰式を使って費用算出 ・流量: 20 t/h ・温度: 146℃
	5	STARS	203	113	113	
	5	COMSOL	115	23	15	
	10	プログラムN	106	37	22	
	10	STARS	147	92	71	
	10	COMSOL	96	28	15	
	15	プログラムN	95	41	22	
	20	プログラムN	89	46	23	
	20	STARS	146	181	138	
	20	COMSOL	85	40	20	
二重管③	5	プログラムN	258	219	266	・深度2,500mから276℃の熱水が19t/hで坑内を上昇 ・地温勾配9.5℃/100m(最大300℃) ・新第三紀堆積岩（熱伝導率1.8 W/mK） ・二重管の外側から注入 二重管③を想定した発電量と発電所建設費用算出条件(750kWクラス) ・流量: 18 t/h ・温度: 252℃ (2023年1月11日時点の解析結果から設定)
	10	プログラムN	257	434	525	
	9	STARS	263	416	513	
	9	GEOSIM（50年後）	258	395	479	
	9	COMSOL	267	434	542	
	15	プログラムN	256	644	777	
	20	プログラムN	242	734	846	
	18	STARS	241	653	750	
	18	プログラムB（50年後）	264	841	1041	
	18	COMSOL	260	806	985	

➤ 設定した温度と流量に基づく発電可能量と発電所建設費用の算出

試算 ケース	熱源 流量 (t/h)	熱源温度 (℃)	経験式によ る想定発電 量(kW)	発電機メーカーが算出した発電端出力(kW)			
				N-ペンタン	代替フロン (HFC245fa)	代替フロン (HFC245fa)	カーリーナ*1 (アンモニア水)
①二重管③	18	252	750	700	250(1基)	—	494
②Uループ①	100	154	1,000	745	267(2基)	250(2基)	797
③Uループ②	100	175	1,500	1,150	567(3基)	375(3基)	1,037
				国内A社	国内B社	国内C社	国内D社

※1 試算ケース①のカーリーナサイクルは地熱で通常使用しているサイクル(kcs34g)では温度が高く適用できないため、別サイクル(kcs11)を適用。

発電コストの試算で使用

試算 ケース	熱源 流量 (t/h)	熱源温度 (℃)	経験式によ る想定発電 量(kW)	選定した発電機を含む発電所の建設費用(百万円)			
				N-ペンタン*1	代替フロン*2 (HFC245fa)	代替フロン*2 (HFC245fa)	カーリーナ*2 (アンモニア水)
①二重管③	18	252	750	(902)	254	—	878
②Uループ①	100	154	1,000	(949)	351	381	1,206
③Uループ②	100	175	1,500	1,199	488	513	1,502
				国内A社	国内B社	国内C社	国内D社

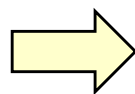
※1 発電設備の試運転完了までの費用(基礎工事・建設工事・配管設備を含む)。
括弧内の金額:A社では同規模のタービンを扱っていないため実際には対応が難しい。

※2 250kW級発電所における基礎工事・建設工事・配管設備等の過去の費用データを基に、各ケースの出力に応じて0.6乗則を適用した費用概算額を発電設備費用に上乗せした金額。

発電コストの試算で使用

➤ 発電コストの試算

- ・坑井設置費用
- ・熱回収量(解析)
- ・発電可能量
- ・発電所建設費用



30年間における発電コストの試算
(資本費＋運転維持費等)/(発電量)

使用した計算ツール

発電コスト試算シート(内閣官房国家戦略室 コスト等検証委員会)

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02_shisan_sheet.html

Microsoft Excelを用いた各種発電方式(火力、原子力、再エネなど)に対応した汎用計算ツール

入力項目

- ・発電量, 設備利用率, 稼働年数
- ・資本費: 建設費(坑井, 発電設備),
所内率, 固定資産税率, 設備廃棄費
- ・運転維持費 など

出力項目

- ・発電コスト (円/kWh)、その内訳

発電コスト計算表

方式	Uループ方式	発電コスト (結果)	
ケース	地熱 生産温度120℃		
環境条件(入力)		発電コスト	36.1 (円/kWh)
基準年度	2023	発電コスト内訳	
為替レート	(円/ドル)	資本費	22.4 (円/kWh)
割引率(金利)	3 (%)	資本費内訳	
発電コスト算定根拠 (入力)		減価償却費	20.0 (円/kWh)
出力	0.2 (万kW)	固定資産税	1.9 (円/kWh)
設備利用率	80 (%)	水利権利用料	0.0 (円/kWh)
稼働年数	30 (年)	廃炉費用	0.5 (円/kWh)
資本費諸元		運転維持費	13.7 (円/kWh)
建設費単価	305 (万円/kW)	運転維持費内訳	
燃料発熱量	(MJ/kg または MJ/l)	人件費・修繕費・諸費等の計	13.66859 (円/kWh)
熱効率	(%)	修繕費(上記に含む)	0.0 (円/kWh)
所内率	5.0 (%)	諸費(上記に含む)	0.0 (円/kWh)
固定資産税率	1.4 (%)	業務分担費(上記に含む)	0.0 (円/kWh)
水利利用料	(円/年)	燃料費	0.0
廃炉処理費用(設備の廃棄費用)	3.1 (億円)		
廃炉までの期間	(年)		
追加的安全対策費(原子力)	(億円)		
バイオマス(石炭混焼)時のバイオマス(木質)部の諸元(化石燃料分諸元)			
混焼率(重量比)	(%)		
燃料発熱量	(MJ/kg)		
運転維持費諸元			
人件費・修繕費・諸費・業務分担費	1.8 (億円/年)		
修繕費(上記に含む)	(%) : 建設費における		
諸費(上記に含む)	(%) : 建設費における		
業務分担費(上記に含む)	(%) : 直接費における		

➤ コスト計算の入力パラメータ

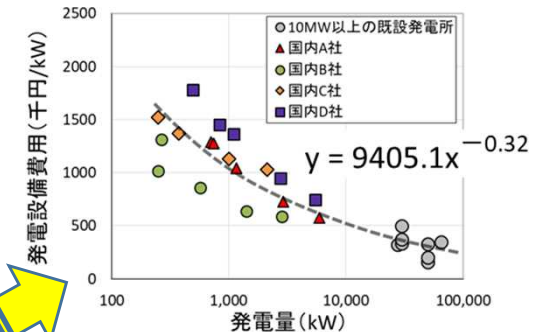
一般的なパラメータ: 過去の試算事例を参考に設定

稼働期間30年、設備稼働率80%、所内率10%、固定資産税率1.4%、
設備廃棄費用は建設費の5%、割引率(金利)3%

坑井掘削費: 掘削費見積りによる(本事業)

発電所建設費: A社による発電設備費(本事業)

(二重管②は発電量と発電設備費の関係式から算出)



発電量: A社による発電量(本事業)

(二重管②は経験式から算出)

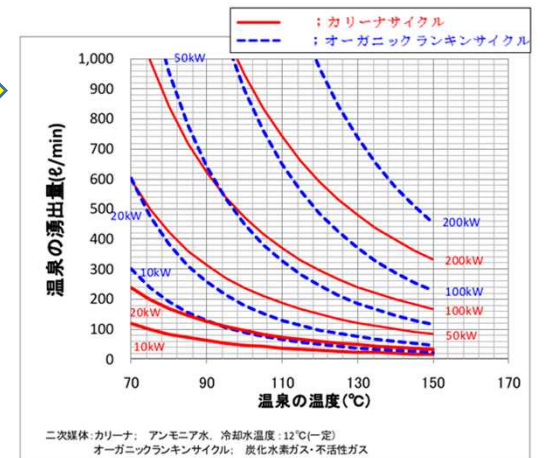
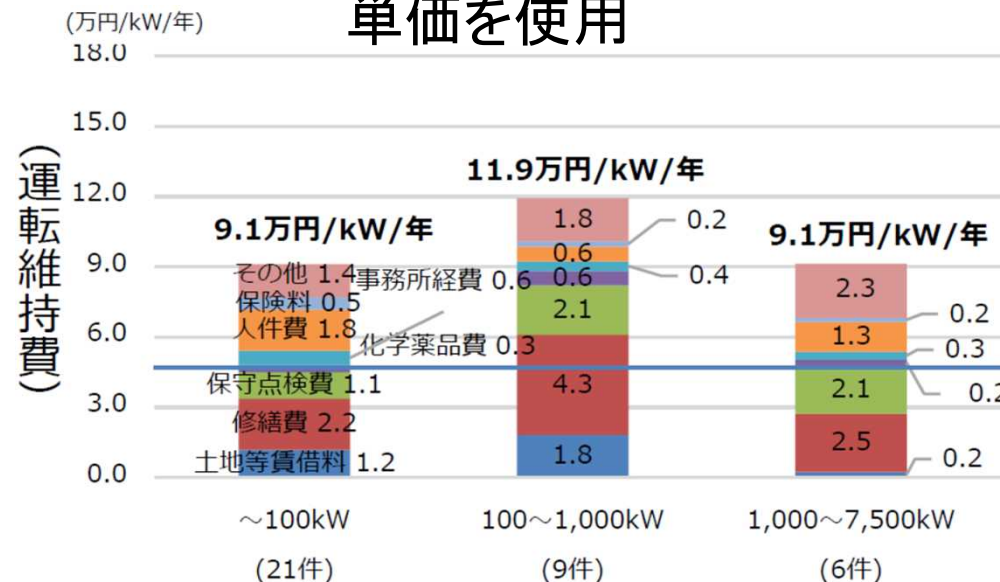


図 3-6 発電出力毎の温泉温度と湧出量の関係
(データ提供: 地熱技術開発株式会社)

運転維持費: 国内地熱統計資料による下記の経験的

単価を使用



運転維持費

出力100kW未満: 9.1万円/kW/年
出力100~1000kW: 11.9万円/kW/年
出力1000kW以上: 9.1万円/kW/年

JOGMEC(2013): 平成24年度 小規模地熱発電及び地熱水の多段階利用事業の導入課題調査 手引書

➤ 30年間の発電コスト試算結果

試算ケース	坑井建設費 (億円)	発電設備費用 (億円)	運転維持費* ¹ (万円/kW/年)	発電量 (kW)	発電コスト (円/kWh)
①二重管②	27.6	3.2* ²	11.9	181* ³	151
①二重管③	26.6	9.0	11.9	700	58
②Uループ①	187.9	9.5	11.9	745	224
③Uループ②	201.1	12.0	9.1	1,150	158

*1 国内地熱統計資料による経験的単価を使用

*2 二重管②の発電設備費用は、発電量と発電設備費用の回帰式により算出。

*3 二重管②の発電量は流量20t/hにおけるSTARSの熱回収解析結果146℃から経験式により算出。

【まとめ：技術的評価】

- Uループ方式の坑井を構築するために必要な坑井掘削・坑井接合技術は、石油掘削分野で培われた技術で概ね対応可能である。ただし、国内実績はごく僅かである。
- Uループ方式の水平坑井と斜め坑井は裸坑が前提であり、坑壁の長期安定性が大きな課題である。海外の岩盤で効果が確認された坑壁安定材は存在するが、亀裂の多い日本の高温岩盤に対する効果は確認されていない。

【まとめ：発電コスト試算】

- 現時点で適用可能な技術とコスト情報に基づいて発電コスト試算（サイト条件が決まっていない段階での概算コスト）。
- 同軸二重管②：151.0円/kWh、同軸二重管③：58.3円/kWh、Uループ①：224.4円/kWh、Uループ②：158.2円/kWh
- 同軸二重管②は発電量が小さいので同軸二重管③よりコストが増大（設定した熱的条件の違いによる）。
- Uループ方式のコストが二重管方式より高いのは、発電量が二重管方式より大きいものの坑井建設費が7～8倍と高コストになることによる。
- Uループ①の発電コストはUループ②の約1.4倍となる。これは発電量の違いによるものであり、対象深度と温度条件が異なることを反映している。