

環境ベテランズファーム Webセミナー (2023年6月)

講演テーマ: 地熱発電～その課題と展望

講師: 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構
(JOGMEC)

地熱技術部主任研究員 當舎 利行 様

(東京海洋大学海洋電子機械工学部門 博士研究員)

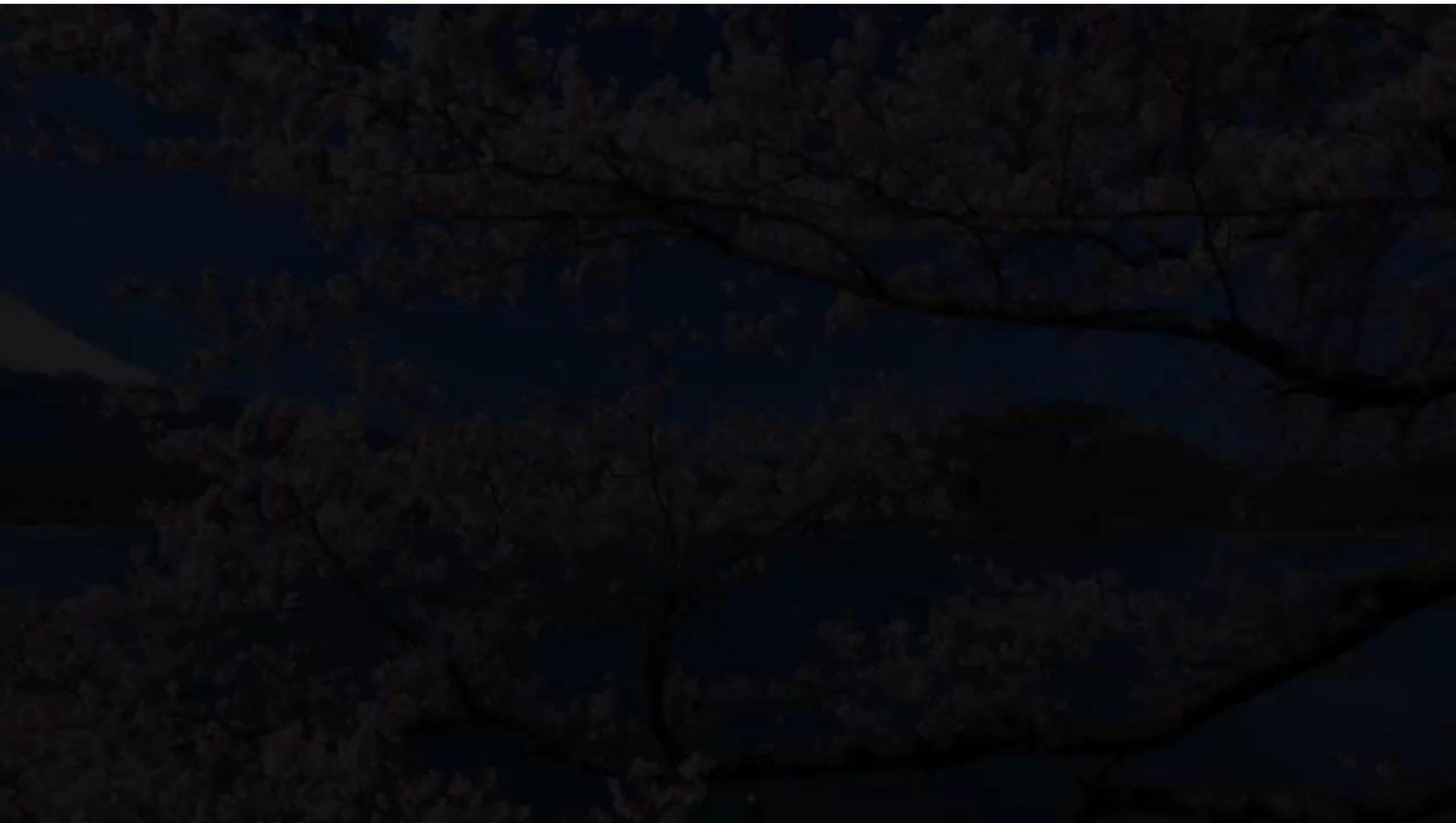
講師略歴:

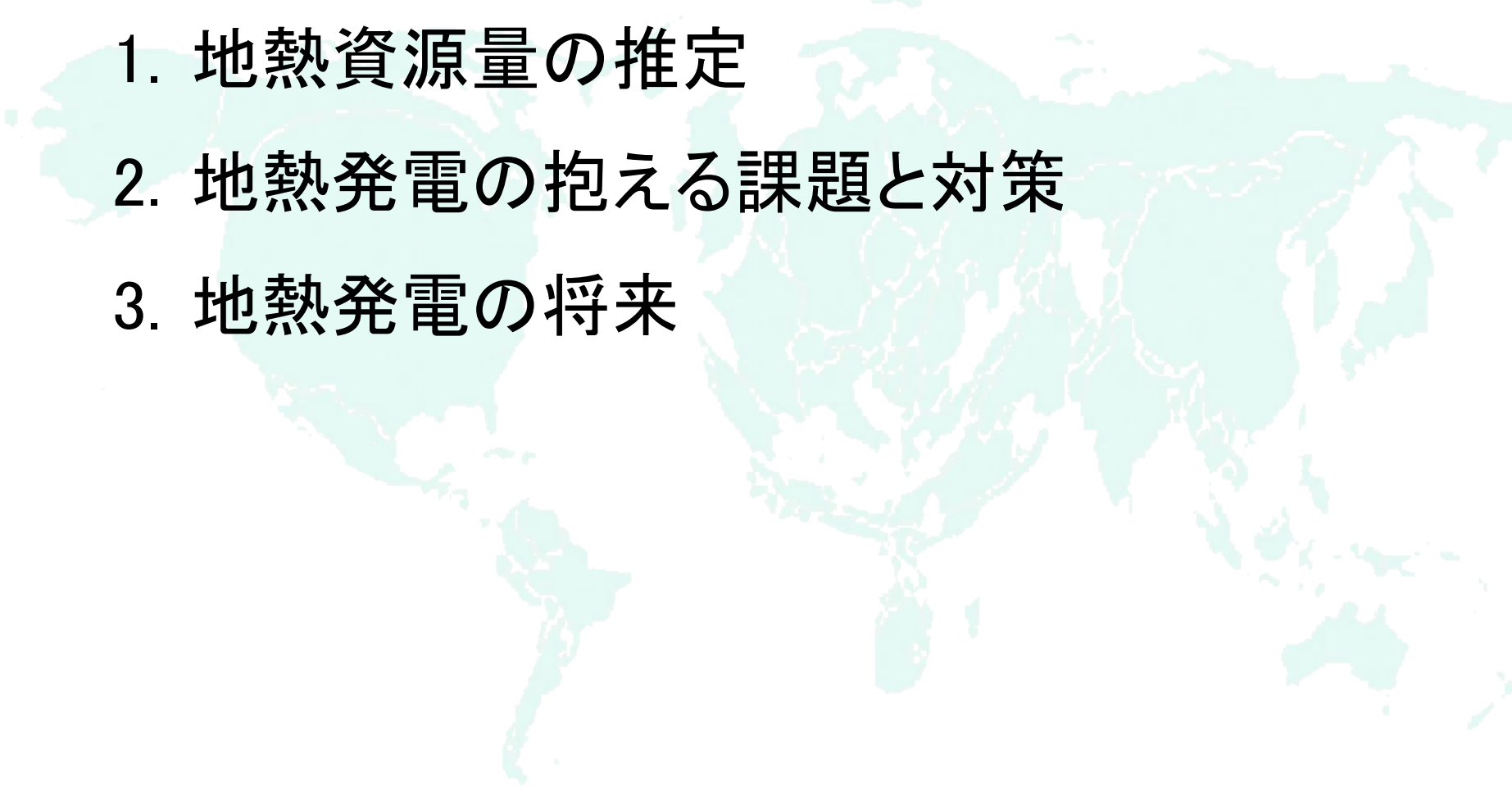
- ・ 1984年 東京大学大学院理学系研究科地球物理専攻終了 理学博士
- ・ 1985年 通商産業省工業技術院地質調査所地殻熱部 入所
(工業技術院サンシャイン計画推進本部併任、ニュージーランド在外 研究、NEDO地熱開発センター出向など)
- ・ 2002年 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門
- ・ 2013年 JOGMEC地熱部
- ・ 2015年 熊本大学大学院先導機構
- ・ 2019年より 現職

地熱発電～ その課題と展望



當舎利行(とうしゃ としゆき)



- 
1. 地熱資源量の推定
 2. 地熱発電の抱える課題と対策
 3. 地熱発電の将来

5

地熱資源量推定

再生可能エネルギー利用発電

太陽光発電
太陽熱発電
風力発電
水力発電

資源量を直接計測可能

地熱発電

地下資源のため資源量を推定

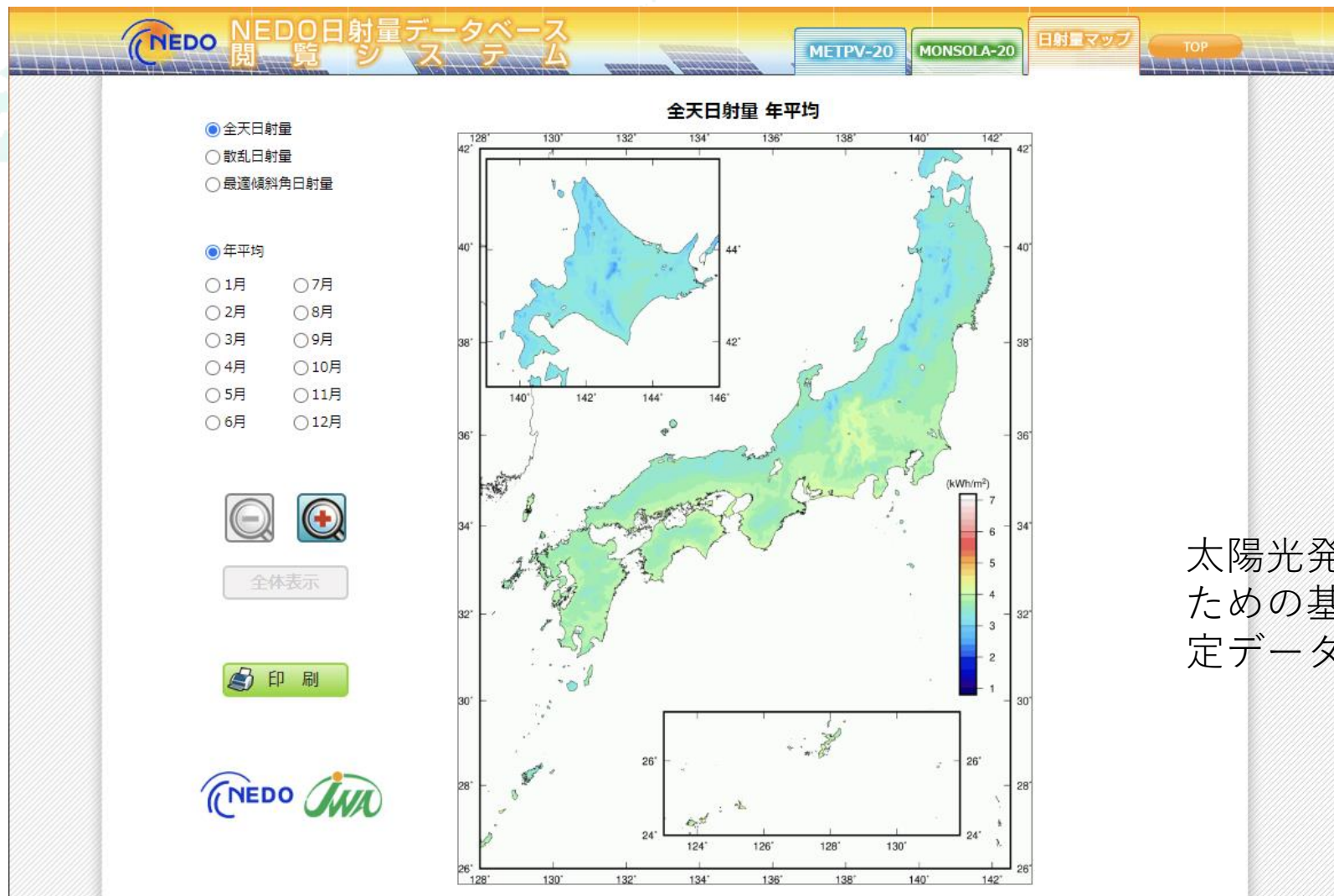


全国規模：容積法

適地規模：シミュレーション

6

日射量データベース(NEDO)



太陽光発電の
ための基礎測
定データ

7

容積法

(Brook et al., 1979)

[種々のバリエーションがある]

Q_{wh} : 地上に取り
出せる熱エネルギー

W_a : 機械的
エネルギー

E : 総発電量

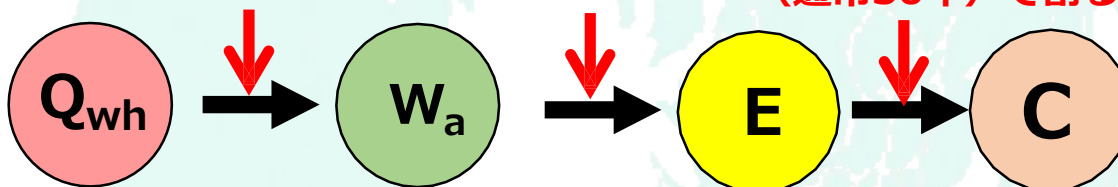
C : 発電容量(?)
(● kW・30年)

熱力学的な制約

発電効率

総発電量を発電期間
(通常30年) で割る

入力値やパラメータに
取りうる値の幅がある
場合は、モンテカル
ロ法計算により、曖昧
さを評価する。



回収率 →

Q_r : 地熱貯留層中の熱エネルギー
(均質な貯留層)

$Q_r [T, V]$

$$Q_r = \rho_c \times V \times (T - T_{ref})$$

ρ_c : (岩石+水) の比熱

V : 地熱貯留層の体積

$V = \text{貯留層平面積} \times \text{厚さ}$

T : 地熱貯留層の温度

T_{ref} : 基準温度

地中にある地熱貯留層の熱量を推定する

地熱貯留層：地熱資源のある地下の領域

8

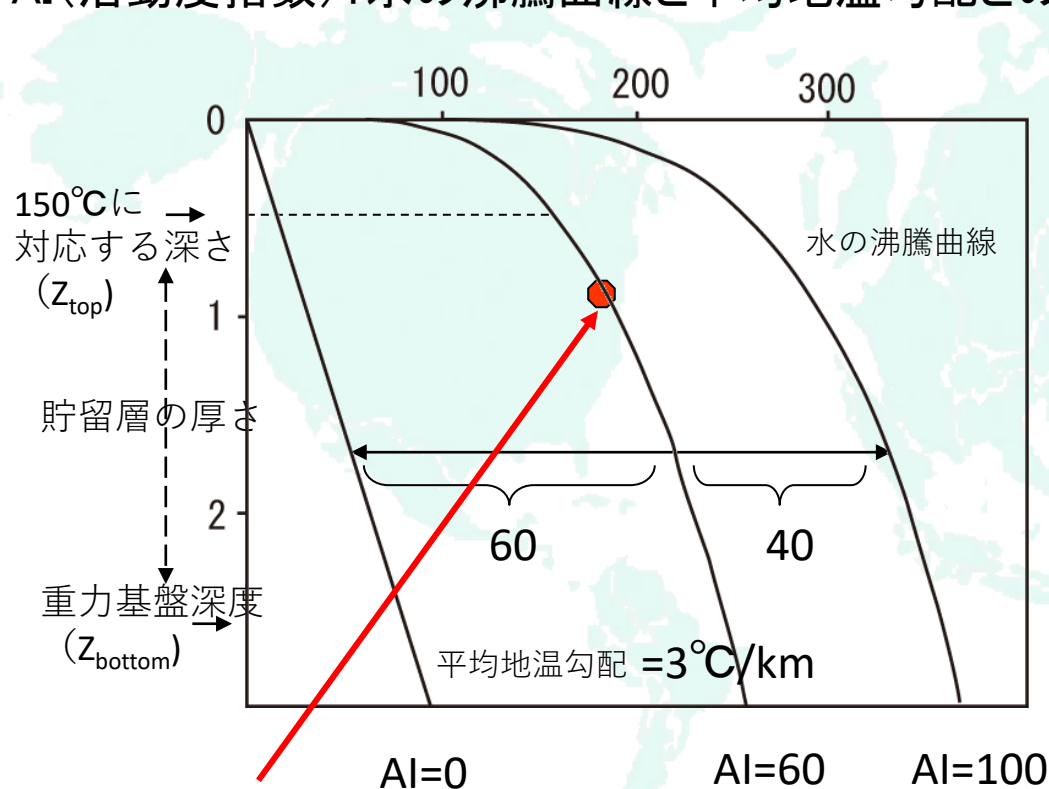
容積法の推定の手順

1. 全国を等面積で分割する(1km mesh)。
2. 温泉ないしは温度が測定されている坑井を抽出する。
3. その温度データを元にして地下の温度分布を推定する(AI法による)。
4. 資源を算定する温度(例えば、150°C)を決める。(これが、貯留層の上面になる)
5. 貯留層の下面は、重力探査より決める(重力基盤深度)

9

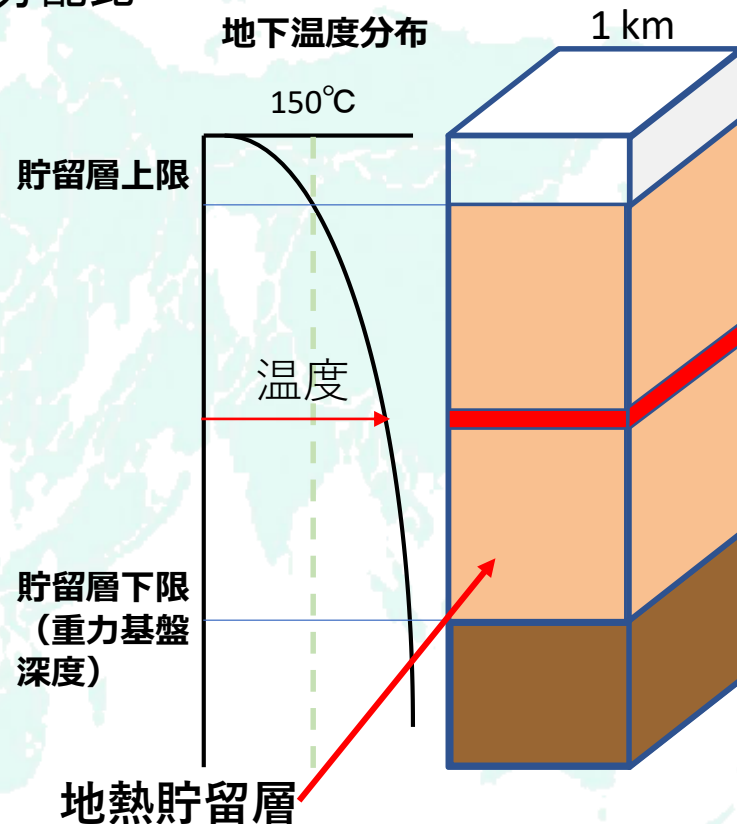
活動度指数(AI)の設定

AI(活動度指数): 水の沸騰曲線と平均地温勾配との分配比



坑井から推定
できる温度

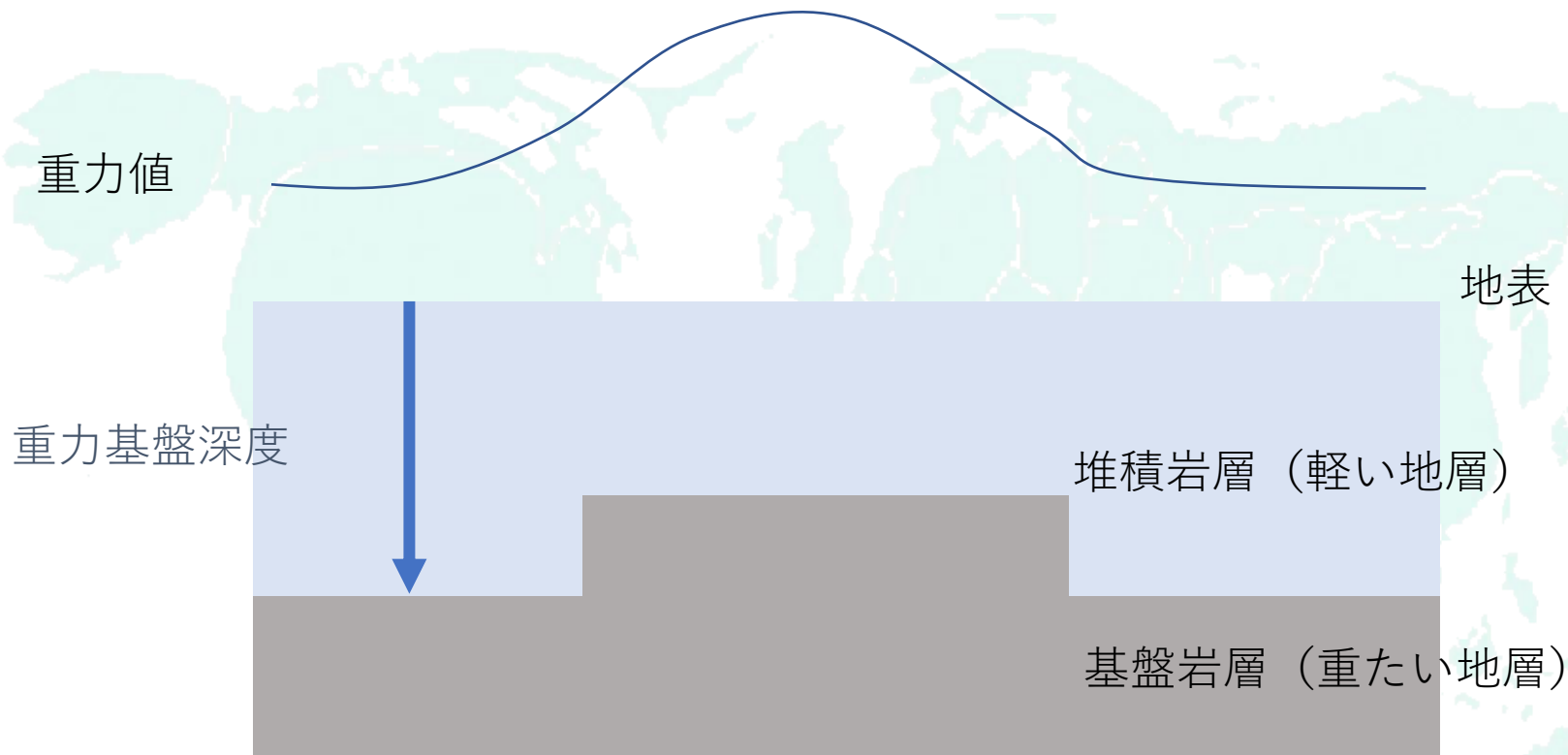
$$\phi = f \cdot C_v \cdot w \cdot \rho \int_{Z_{bottom}}^{Z_{top}} (T(z) - T_0) dz$$



C_v : 定積比熱
 f : 地熱回収率 (25%)
 w : 発電効率 (0.4)
 ρ : 空隙率 (15%)

10

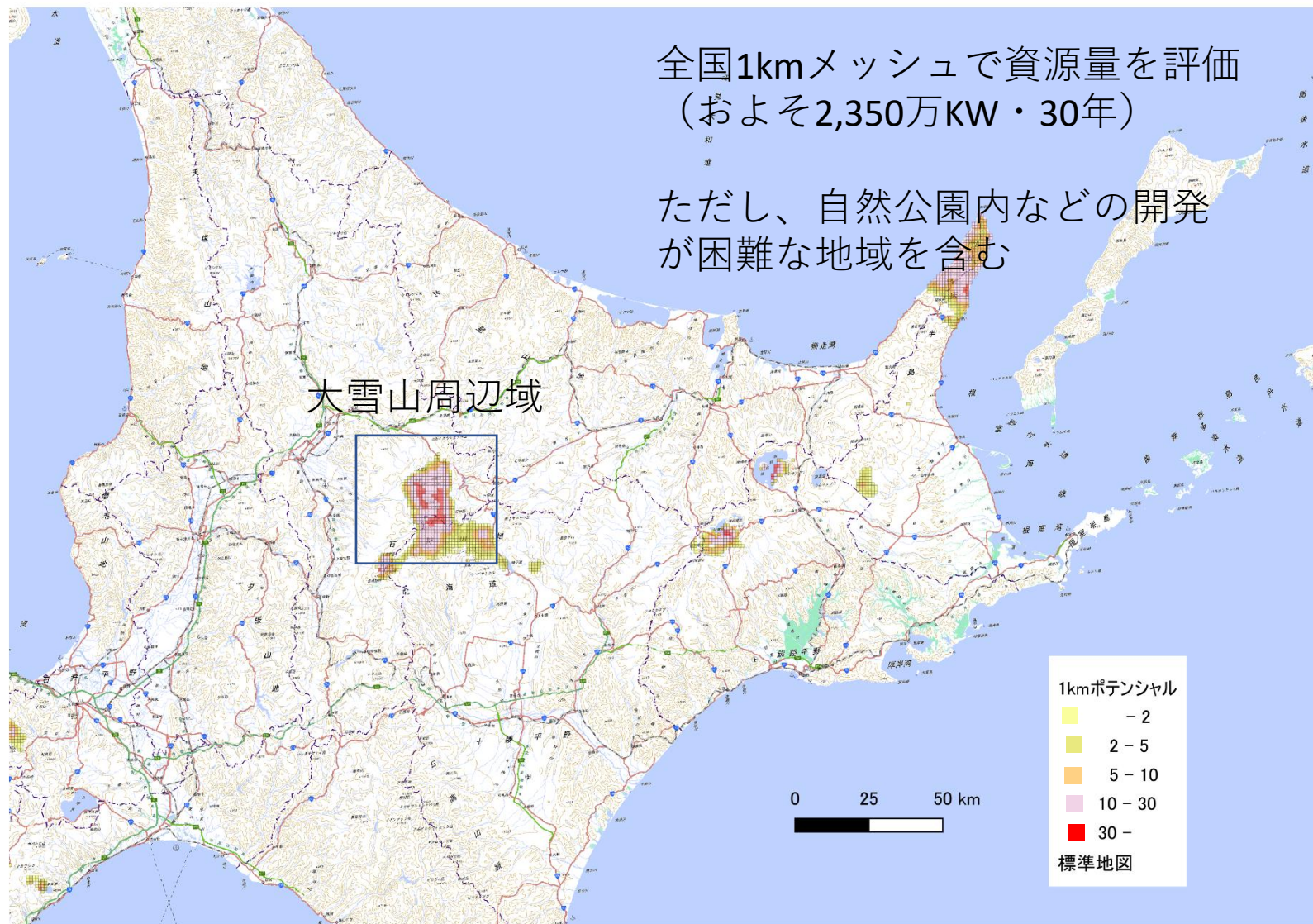
重力基盤とは



重力を測定すると、重たい基盤岩が浅いところに
まであると、重力が大きく観測される。

基盤岩：堅くて緻密（水を通さない）

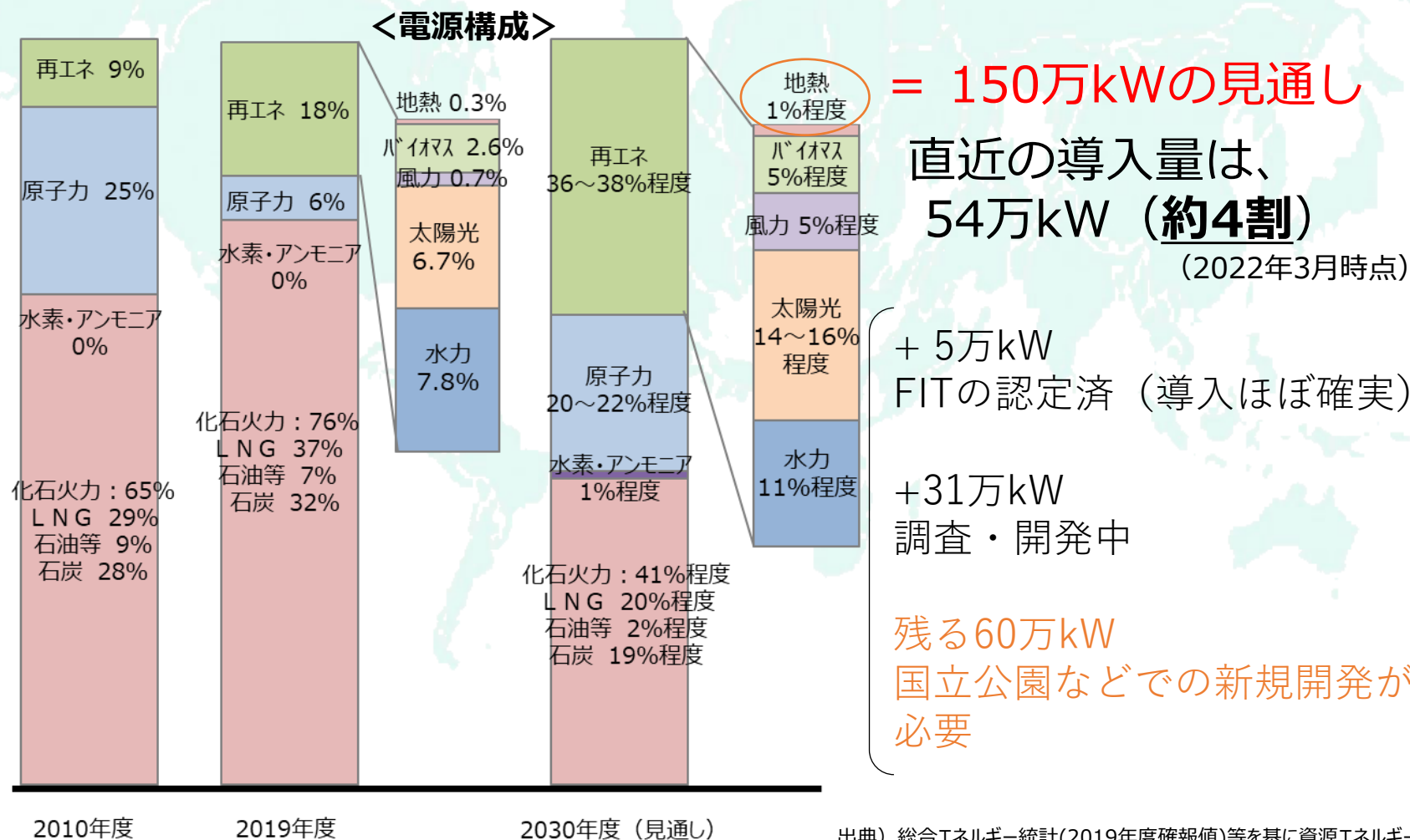
地熱資源が存在する地域の一例



12

地熱の位置づけ エネルギー基本計画(第6次)

- 2030年度の見通しでは、地熱発電の比率は1%（現在は、約0.3%）。
- 直近では、約4割の進捗率となっている。

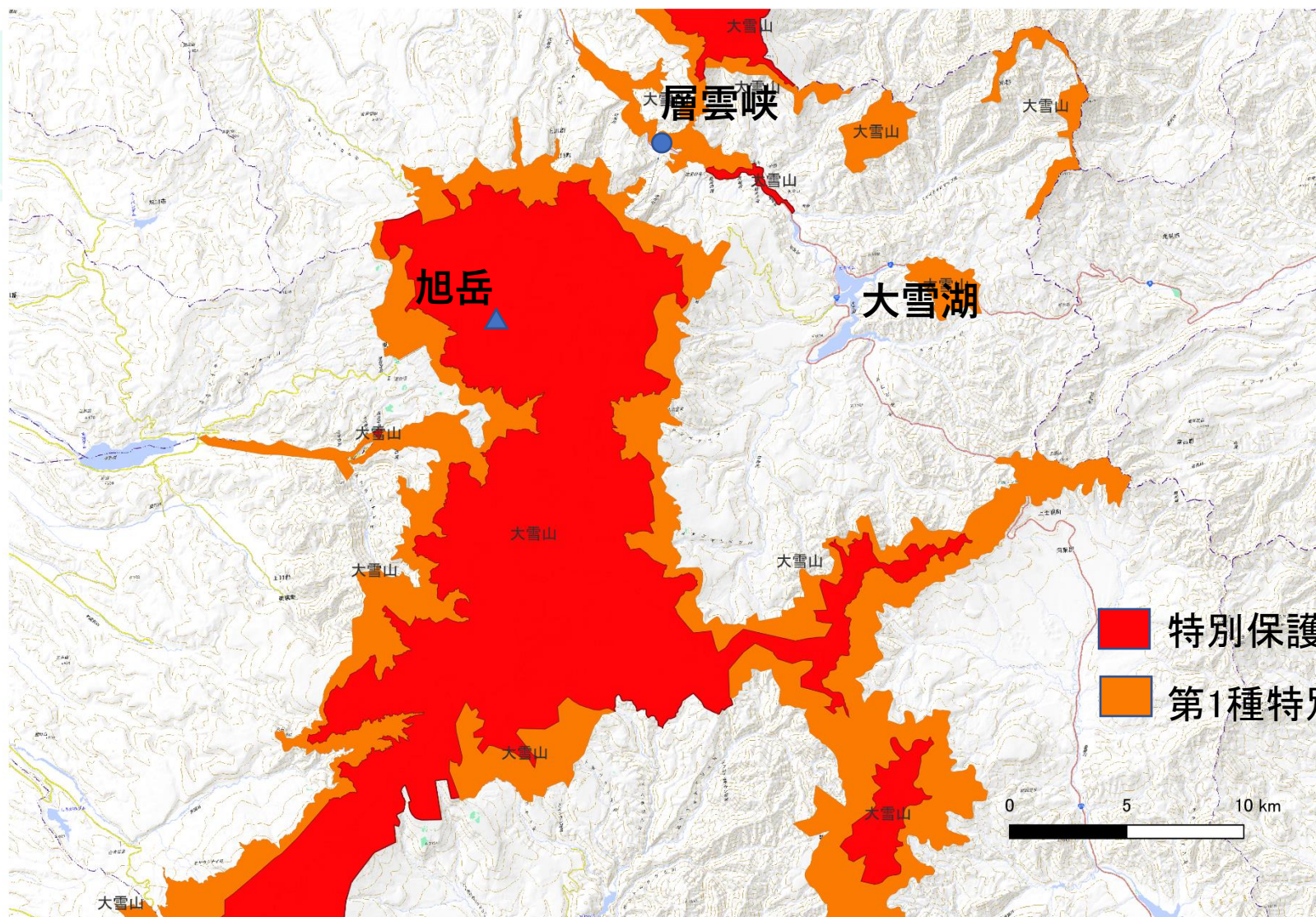


13

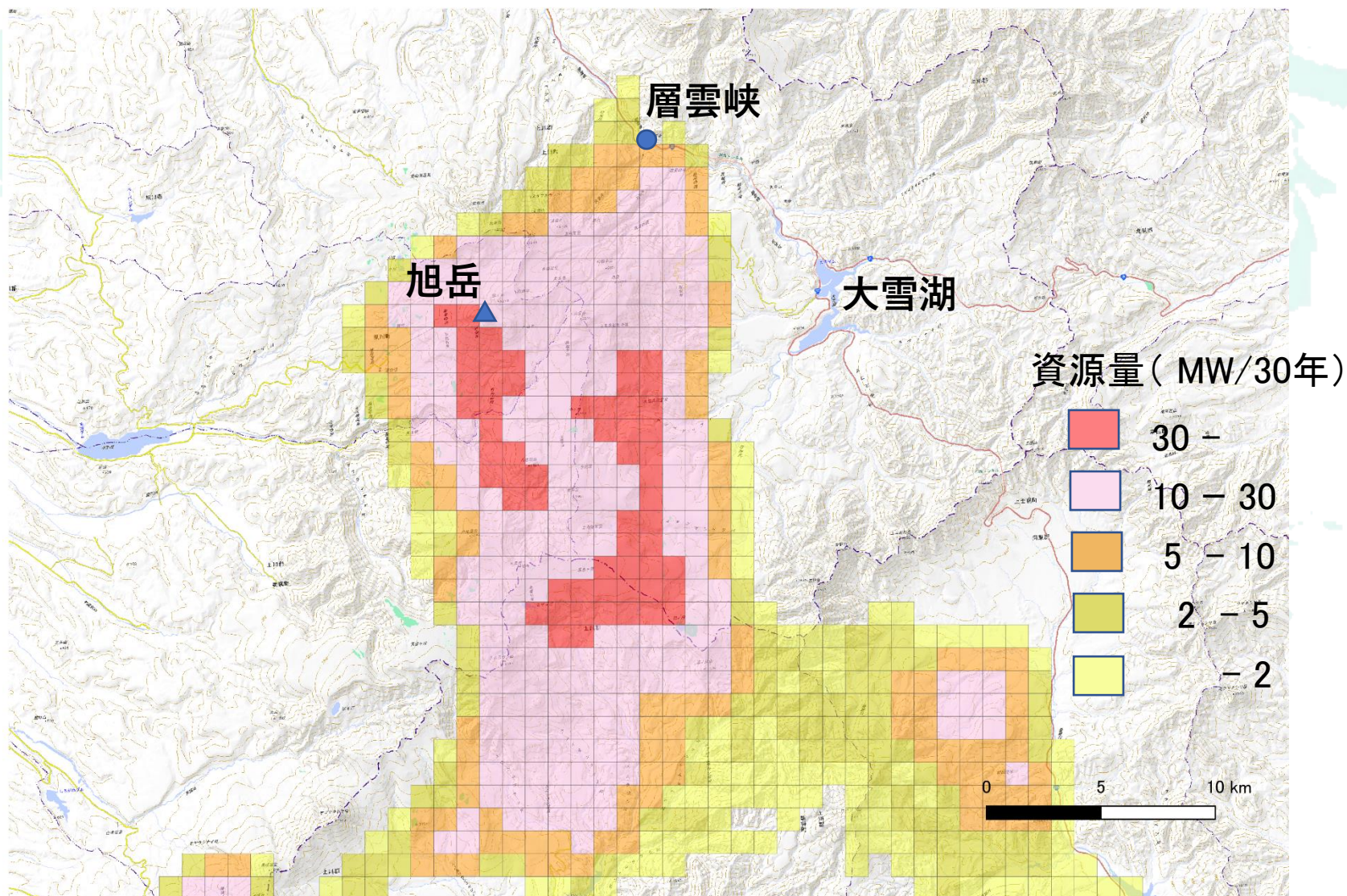
大雪山地域



自然公園の分布



地熱資源の分布



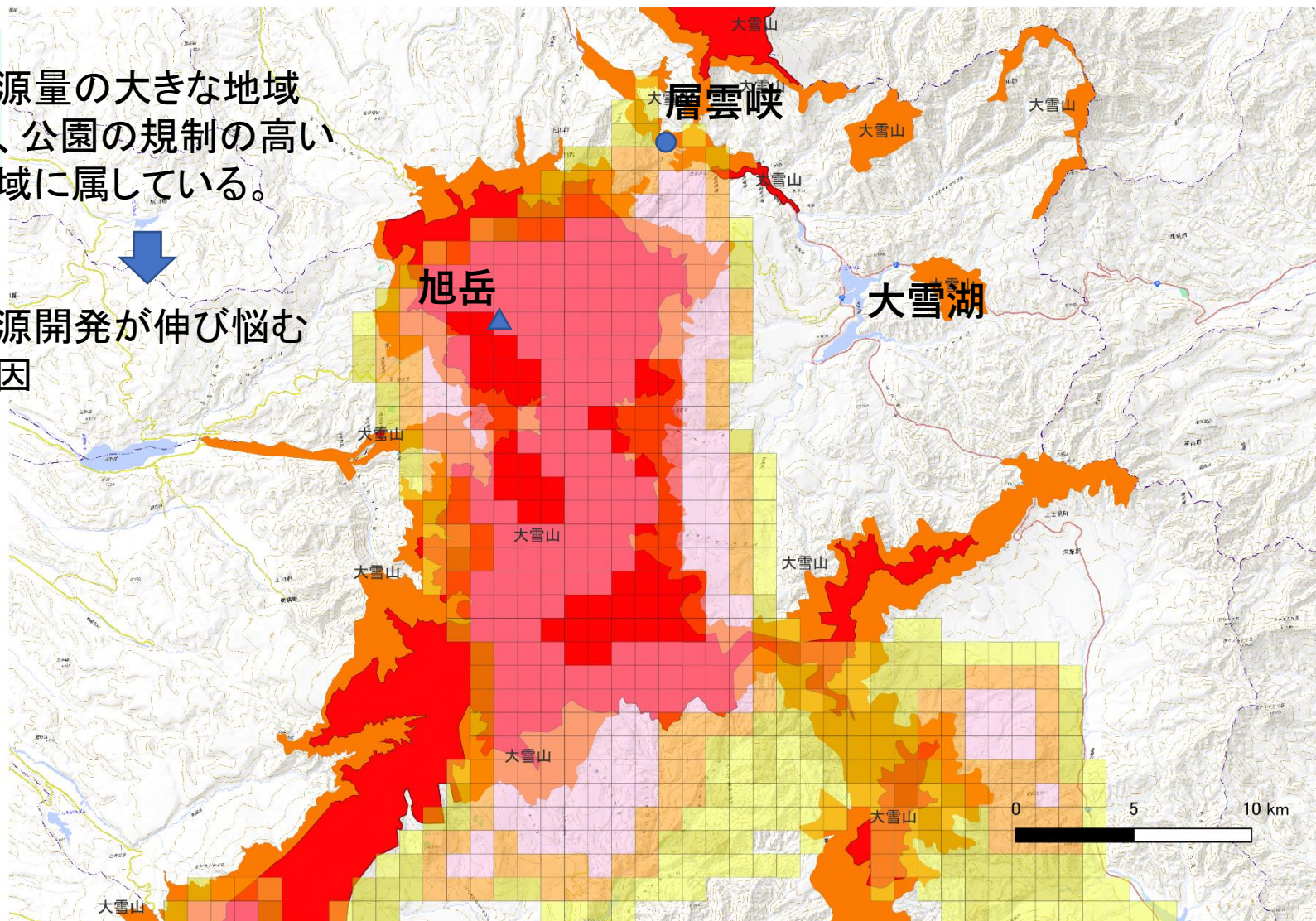
16

地熱と公園の分布

資源量の大きな地域
は、公園の規制の高い
地域に属している。



資源開発が伸び悩む
一因

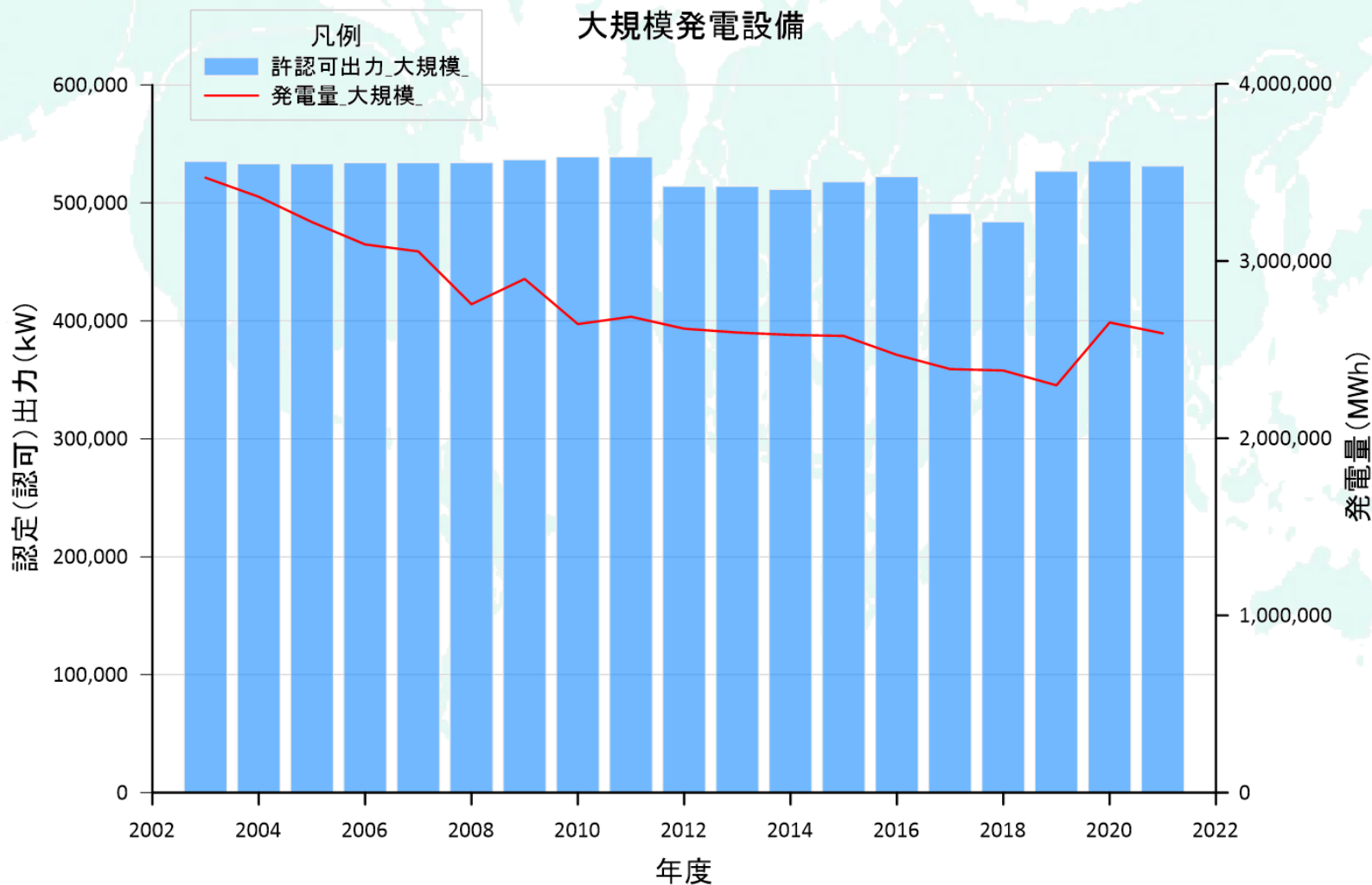


- 
1. 地熱資源量の推定
 2. 地熱発電の抱える課題と対策
 3. 地熱発電の将来

18

大規模地熱発電の推移

1,000kW以上の地熱発電設備の出力と発電量の推移

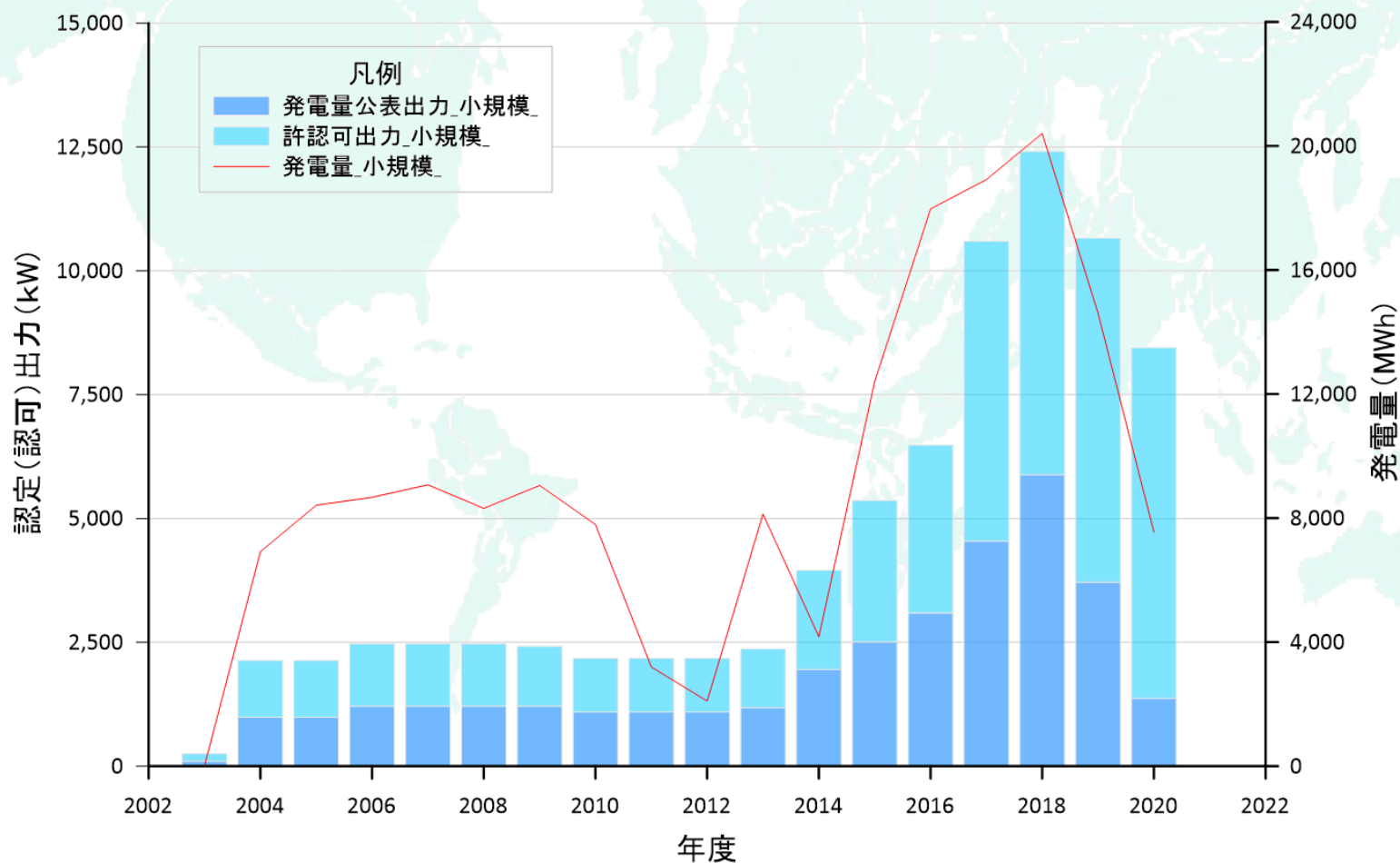


19

小規模地熱発電の推移

1,000kW未満の地熱発電設備の出力と発電量の推移

小規模発電設備



地熱発電の問題点

大規模地熱

- 地熱発電量の減衰（貯留層の減衰）
- スケールなどによる生産、還元障害
- 新規開発地点への地元理解、公園などの規制
- 開発までの長いリードタイム（10年以上）
- 電力網への接続

小規模地熱

- 小規模バイナリー発電機メーカーの撤退
- 既存小規模バイナリー発電機の維持管理が困難
- サポート体制の不備（バックとなる業界団体が不明）

21

地熱開発の流れ

(JOGMEC,2022)



資源リスク

投資規模

理解促進事業

 JOGMEC 制度
 METI 制度
 NEDO 制度

資源量調査事業
(助成金事業)

開発初期のコ
 スト負担の軽
 減措置

探査出資

蒸気量の確認のための井
 戸の掘削調査等を行う際
 の費用を出資

アセス迅速化

4年程度かかるアセ
 スをおおむね半減す
 るための実証事業

開発債務保証

発電に必要な井戸を
 掘削するための費用
 や発電設備設置費用
 等を債務保証

技術開発

地熱開発における政府の支援

JOGMEC

規制のため直上からの掘削が不可能な資源の開発のための、遠距離掘削技術
探査機器の小型化
坑井を用いた詳細な探査技術開発
開発にコストのかかる酸性熱水資源の探査技術
ヘリコプターを用いた広域の重力、比抵抗調査
助成金などの経済的支援 等

NEDO

(地熱開発促進調査 2008FY まで)

環境配慮型高機能地熱発電システムに係る機器開発
低温域でのバイナリー発電システム開発
環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する技術開発
発電所の高度利用に向けた技術開発
地熱エネルギーの高度利用化に向けた技術開発 等

JOGMEC助成金事業

助成事業の目的

エネルギー需給構造の多様化及びエネルギー自給率の向上のために、**純国産のエネルギー源である地熱資源の開発を促進することを目的**として、地熱資源の有望な地域において行う、**地表調査、坑井掘削調査（噴気試験を行うものを除く）**など、**リスクの高い初期調査について助成金を交付**支援

助成対象者

本邦法人（地熱資源開発事業者、又は地元の地熱関係法人等（※））

（※）地熱資源を直接利用して、地域活性化につながる発電事業を行う 本邦法人
地域活性化の具体的計画について、当該地元自治体の協力・了解を得ている事業に限ります。
具体的には、①当該法人の本社が「調査開発対象の地元（「市町村」単位）」に所在。

②「地熱関係法人等」とは、地元で3年程度以上事業実績を有する地元の法人

助成期間

* 助成対象事業の期間は、原則、当該助成事業の開始から6事業年度以内
（天変地異、許認可取得等により助成事業の期間延長の必要性が認められる場合、最大3事業年度に限り期間延長を認める）

24 助成、出資、債務保証

2012年度～2021年度
助成金交付及び出資・債務保証実績

支援実績	件数
★ 開発調査事業費助成案件	58
★ 開発調査事業費助成案件	26
● (地元の地熱関係法人等) 探査資金出資案件	1
○ 開発資金債務保証案件	6

- 79 由布市奥江地域
- 75 小国町北里南部地域
- 55 小平谷地域
- 56 野矢地域
- 57 宝泉寺温泉地域
- 58 野矢堀田地域
- 59 平治岳北部地域
- 60 小国町西里・北里地域
- 61 石松農園（小国地域）
- 62 豊札の湯（小国地域）
- 63 南阿蘇村阿蘇山西部地域
- 64 湯の谷地域

- 42 糸魚川大野地域
- 43 宇奈月温泉地域
- 44 立山温泉地域
- 45 立山山麓地域
- 46 白山ろく地域
- 89 奥飛騨温泉郷大棚周辺地域
- 47 坂巻温泉周辺地域
- 49 フスブリ山地域
- 74 糸魚川焼山北部地域
- 53 皆生温泉地域
- 54 有福温泉地域

- 9 ルスツ地域
- 10 阿女鱒岳地域
- 11 ニセコ地域
- 12 壮瞥町黄溪地域
- 13 壮瞥町蟠溪地域
- 14 洞爺湖温泉地域
- 77 長万部地域
- 15 八雲町鉛川地域
- 16 八雲町熊石地域
- 17 奥尻地域
- 26 岩木山嶽地域
- 27 岩木山地域
- 90 狐ノ森地域
- 35 小安地域
- 36 木地山・下の岱地域
- 37 山葵沢地熱発電所建設事業
- 40 磐梯地域
- 86 猿倉嶽地域

- 83 余市岳北西部地
- 8 越後地域
- 7 京極北部地域

- 1 美瑛地域
- 2 上川地域
- 3 足寄町地域
- 4 湯沼ーアトサヌブリ地域
- 5 羅臼地域
- 6 武佐岳地域
- 18 鹿部地域
- 19 南茅部地域
- 88 南茅部地域地熱資源開発事業
- 20 恵山地域
- 21 下風呂地域
- 22 むつ市燧岳地域

- 23 八甲田西部城ヶ倉地域
- 24 八甲田北西地域
- 25 黒石市沖浦・青荷川地域
- 76 安比地熱発電事業
- 28 松尾八幡平地域
- 29 松尾八幡平地域地熱資源探査事業
- 30 松尾八幡平地熱発電所建設事業

- 31 東八幡平地域
- 32 大松倉山南部地
- 33 網張地域
- 34 つなぎ温泉地域
- 72 大崎市高日向山地域
- 81 栗駒南麓地域
- 82 宮城県栗駒地域
- 38 鳴子温泉地域
- 91 蔵王地域
- 39 土湯温泉バイナリー地熱発電事業

- 41 川俣及び周辺地域
- 80 赤城山地域
- 87 丸沼地域
- 49 東伊豆町熱川温泉地域
- 51 下智茂地域

- 52 田辺市本宮地域
- 48 志賀高原地域
- 84 妙高山東麓地域
- 85 栄村秋山郷地域
- 69 山下池南部地域
- 70 涌蓋山東部地域
- 73 大分県九重町泉水山北東山麓地域
- 71 菅原バイナリー地熱発電事業

- 78 えびの市長江川地域
- 65 尾八重野地域
- 66 野々湯温泉地域
- 67 指宿ヘルシーランド周辺地域
- 68 指宿市東方地域

（JOGMEC成果報告会資料より）

- 
1. 地熱資源量の推定
 2. 地熱発電の抱える課題
 3. 地熱発電の将来

地熱発電の今後（私見）

- 現状においては、2030年の基本方針の達成は厳しい状況
- 熱水を用いない地熱資源の開発（温泉業者への理解促進）
- バイナリー発電設備の普及は限定的
（発電効率、日本のタービンメーカーの優位性、2次媒体の規制）
- 人員不測のため掘削事業のひっ迫（労働環境の改善のため、従来の掘削ペースが保てない）
- 純国産のエネルギー資源であるので幅広い活用（水素の製造、メタネーションなど）の検討
- 電力網の充実（容量ならびに接続地点）が緊急要件
- （いずれにしても）政府の支援は不可避

27

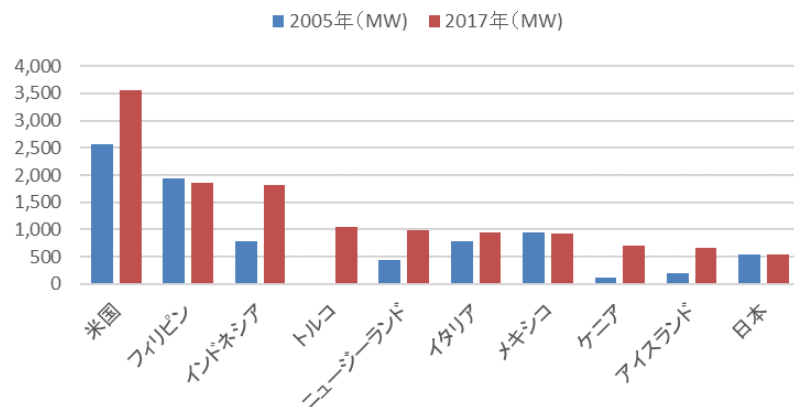
トルコとケニアの躍進 (2005～2017)

順位	国名	2005年 (MW)	順位	国名	2017年 (MW)
1	米国	2,564	1	米国	3,732
2	フィリピン	1,930	2	フィリピン	1,916
3	メキシコ	953	3	インドネシア	1,644
4	インドネシア	797	4	トルコ	1,064
5	イタリア	791	5	メキシコ	957
6	日本	535	6	ニュージーランド	933
7	ニュージーランド	435	7	イタリア	916
8	アイスランド	202	8	アイスランド	708
11	ケニア	170	9	ケニア	667
16	トルコ	15	10	日本	542
	その他	541		その他	
	合計	8,933		合計(2015年)	12,636

70倍

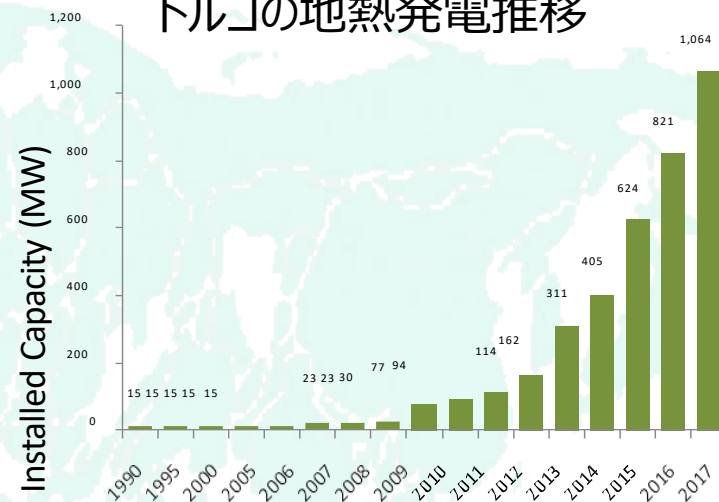
4倍

各国の地熱発電容量の伸び (2005-2017)

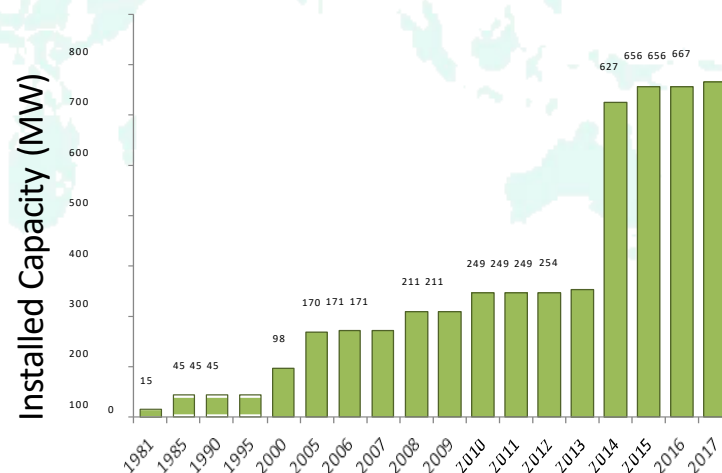


(出典) 2005年はRuggero Bertani, "Geothermal Power Generation in the World 2010-2015 Update Report, WGC 2015、2017年は各国データから西日本技術開発(株)まとめ

トルコの地熱発電推移



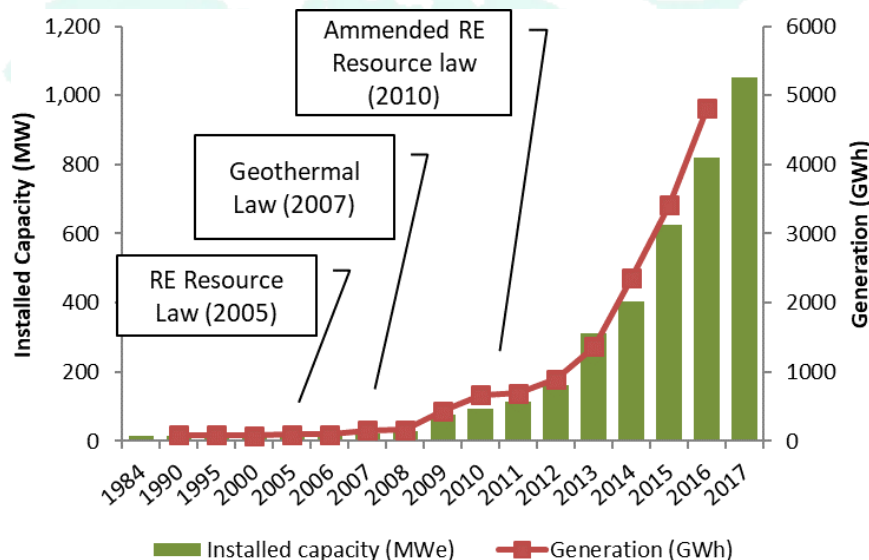
ケニアの地熱発電推移



(金子、2019)

トルコの成功要因(政府の関与)

トルコの地熱発電推移と再エネ政策



トルコのFIT価格 (2010年) (単位 US cent/kWh)

エネルギー源	買取価格	国産機器加算	合計
水力	7.3	2.3	9.6 (max)
風力	7.3	3.7	11.0 (max)
地熱	10.5	2.7	13.2 (max)
バイオマス	13.3	5.6	18.9 (max)
太陽光	13.3	9.2	22.5 (max)

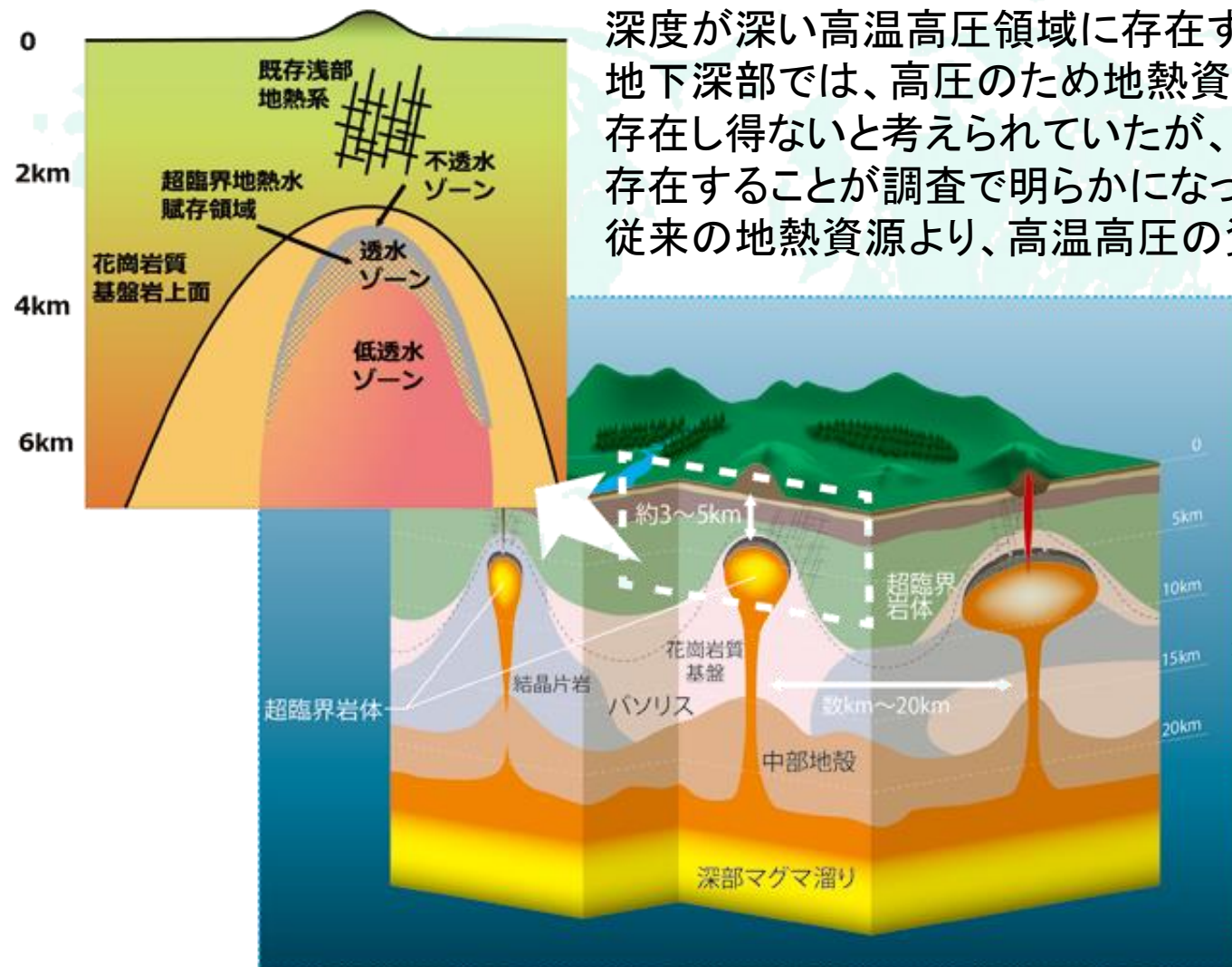
(注) 国産機器加算は機器ごとに設定されており、表の数字は最大に利用した場合を示す。

1. 政府の再エネ長期目標
2023年（トルコ建国100年）に、発電電力量の30%を再生可能エネルギーとする
2. 再エネ法の制定（2005年買取義務等）
小売り配電会社は供給電力の8%以上を再エネとすること、再エネ買い取り価格は5.0-5.5€ cent /kWhとすること、などを規定。
3. 再エネ法改定（2010年FIT設定）米ドル建てFIT価格の設定
4. 地熱法の制定（2007年）
地熱開発の法的枠組みの設定（探査期間3年（1年延長可）などの開発期限の明示）

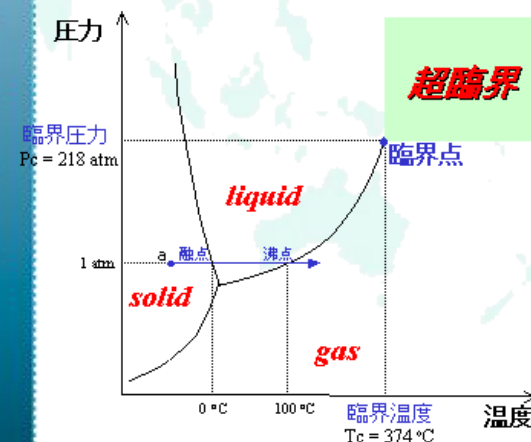
29

超臨界地熱資源開発

深度が深い高温高压領域に存在する地熱資源。
地下深部では、高压のため地熱資源が存在する間隙が存在し得ないと考えられていたが、電導性の高い地層が存在することが調査で明らかになった。
従来の地熱資源より、高温高压の資源が期待できる。



水の臨界温度圧力：
374℃、22.1MPa



超臨界状態とは

超臨界状態

温度が高いため分子が大きな運動エネルギーを持っている(分散力)という点では気体のようでもあり、
圧力が高いため分子同士が集まって安定化する力(凝集力)が働く点では液体のようでもある

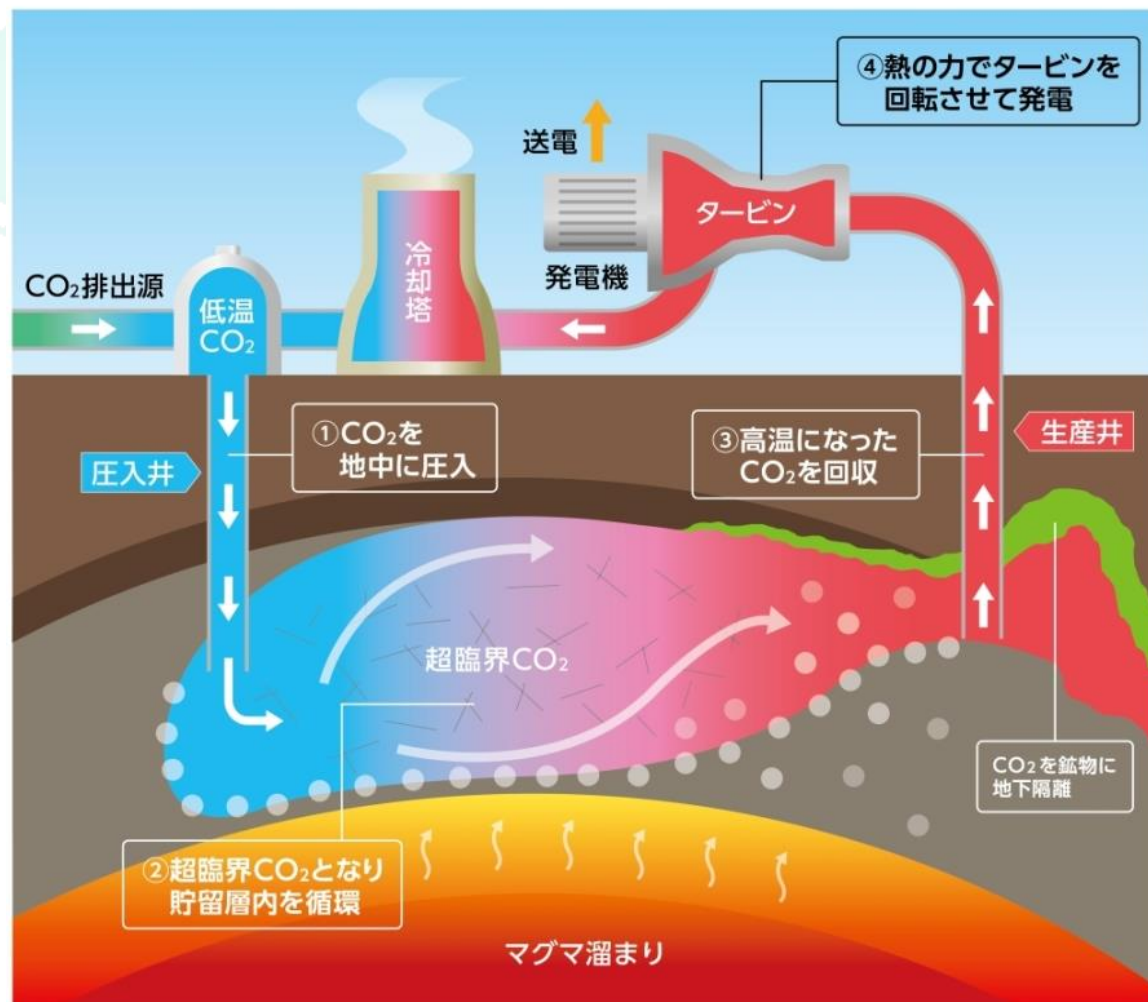
「密度の高い水蒸気」、あるいは「気体と液体の両方の性質、あるいは中間的な性質を持った流体」

状 態	気 体	超臨界	液 体
密度 [kg/m^3]	0.6 ~ 2	200 ~ 900	600 ~ 1600
粘度 [10^5kg/m/s]	1 ~ 3	1 ~ 9	20 ~ 300
拡散係数 [10^8m/s]	1000 ~ 4000	1 ~ 40	0.02 ~ 0.2
熱伝導率 [mW/m/K]	4 ~ 30	20 ~ 150	80 ~ 250

31

EGS技術（二酸化炭素利用）

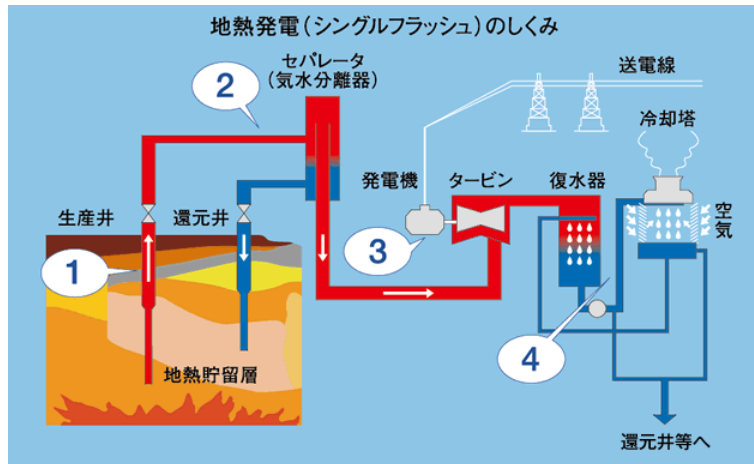
カーボンリサイクルCO₂地熱発電技術のしくみ



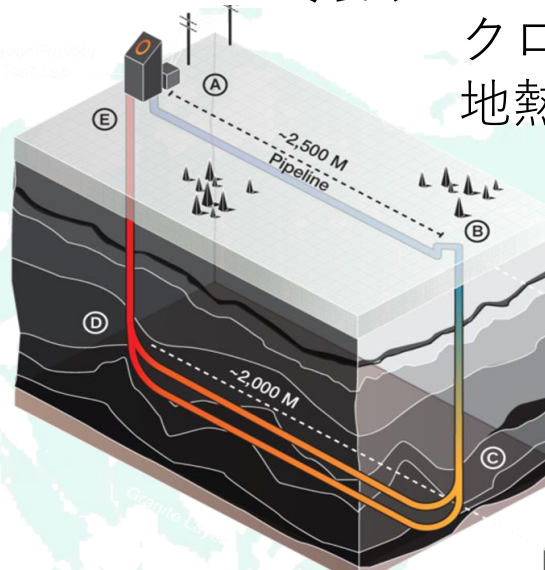
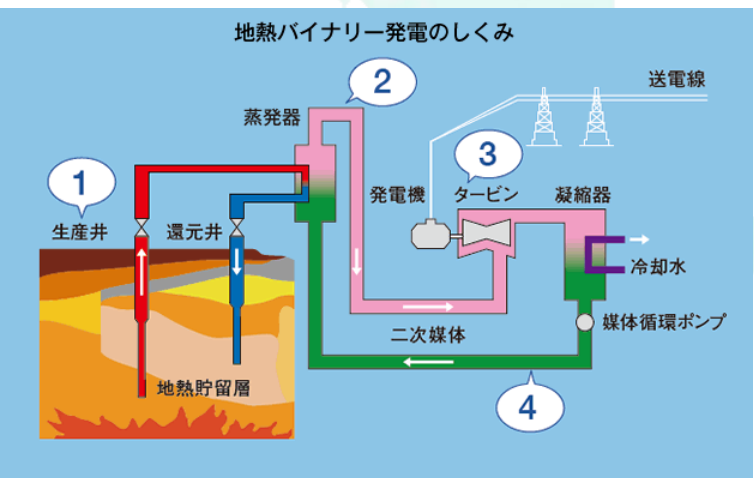
熱効率が高く、粘性が低くなる超臨界状態の二酸化炭素（臨界温度：31.1℃、臨界圧力：7.38MPa）を用いた地熱回収技術の開発。

クローズサイクル地熱

地熱発電（シングルフラッシュ）のしくみ



地熱バイナリー発電のしくみ



クローズド方式による
地熱発電

Uループ方式

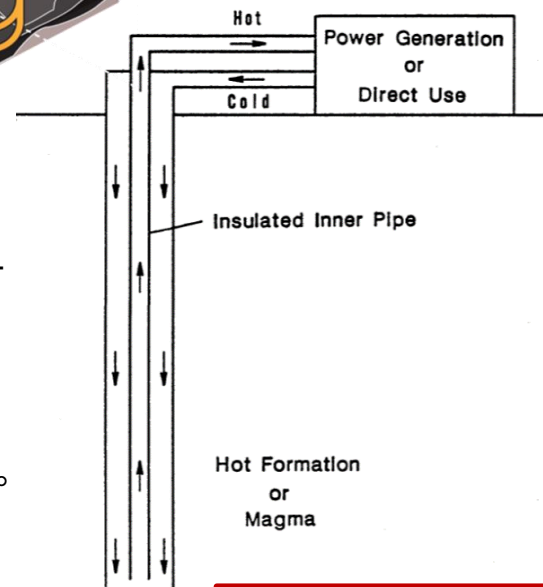
EAVOR社HP

<https://www.eavor.com/eavor-lite/>

【原理】③と④が地中にある。

【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。温泉事業者の抵抗は小さい。

【欠点】得られる熱量が少ない。Uループ方式では掘削費用が高額となるため、掘削技術の革新が必要。



二重管方式

(盛田ほか、1989)

日本地熱協会 <https://www.chinetsukyokai.com/information/index.html>

【利点】得られる熱量が多い。

【欠点】取り出した蒸気・熱水を地中に還元する必要がある。

まとめ

- 地熱資源は、温泉や坑井からの温度データと重力データから類推している。
- 資源量は豊富であるものの自然（環境）保護などの観点から開発可能域が限られている。
- 開発を促進するためには、貯留層の減衰の防止、遠方の資源を掘削する技術などの技術開発が必要である。
- 地熱の開発は、長期間のリードタイムが必要であることから、経済的な支援も必要とされる。
- JICAなどの国際支援を行っており、タービンメーカーのシェアの高さとともに世界からは期待されている。また、世界をリードする技術開発も行われている。
- 国内の開発を促進するためには、政府の関与が不可欠である。



よりよい地球環境を

當舎 利行（とうしゃ としゆき）

二酸化炭素排出
量に応じた国土
面積

ttosha0@kaiyodai.ac.jp