

世界の地熱利用・技術開発動向

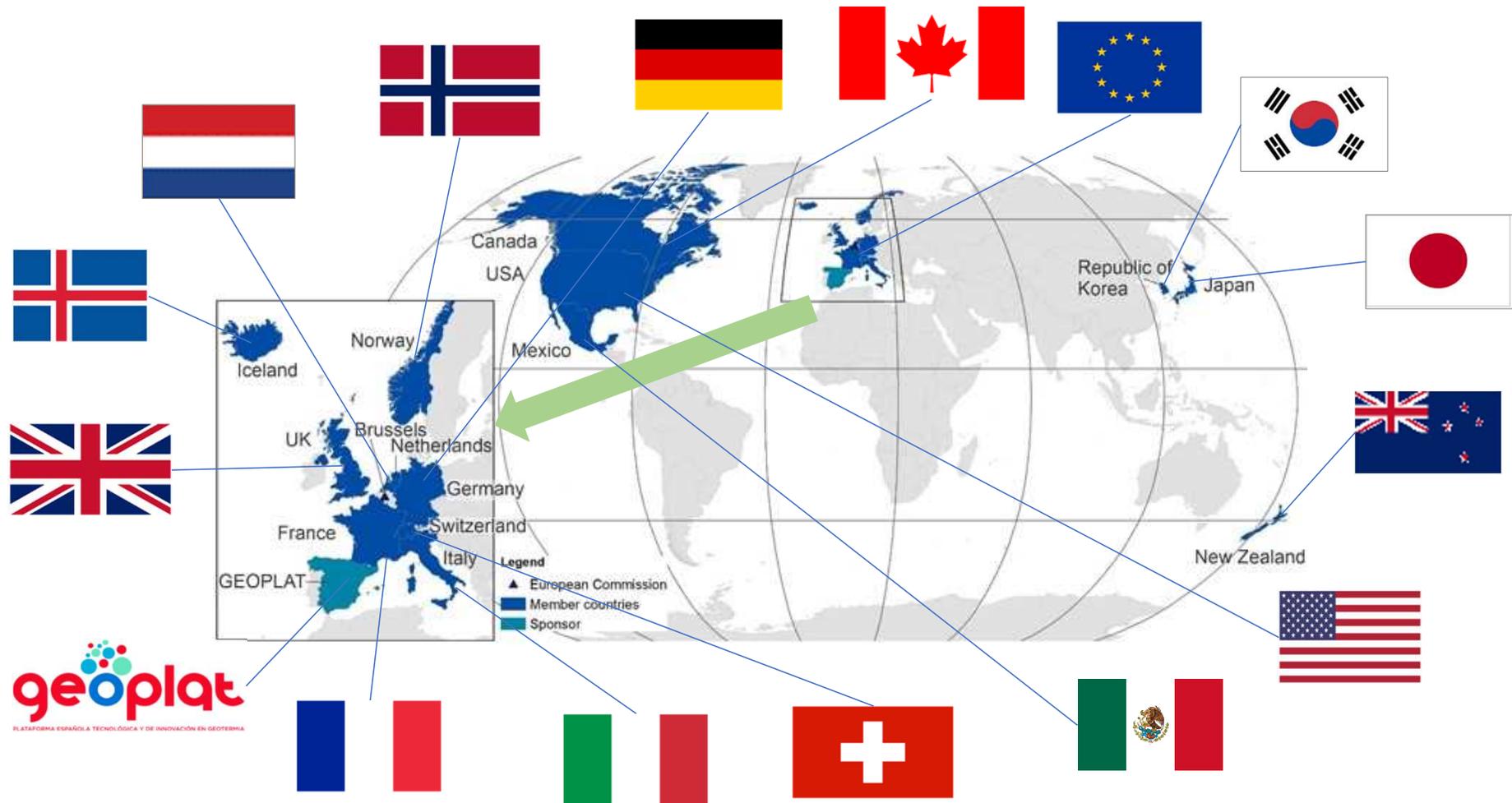
エネルギー・金属鉱物資源機構

安川 香澄

本日の内容

- IEA Geothermalのご紹介
- 世界動向：地熱発電と直接利用
- 各国の動向等
 - 米国
 - ドイツ
 - フランス
 - イギリス
 - オランダ
 - ハンガリー
 - スイス
 - アブダビ
 - 国際エネルギー機関（IEA）
- 日本での地熱利用を深めるために

IEA Geothermal (IEA地熱実施協定) のご紹介



- 国際エネルギー機関IEA傘下の技術協力部会Technical Collaboration Party (TCP)のひとつ。
- メンバーは、国メンバー（国を代表する地熱関係機関：エネルギー・環境関係の省庁、国立研究所、大学、エネルギー供給会社など）またはスポンサーメンバー（企業など）
- IEA本体と異なり、OECD非加盟国でも国メンバーとなることができる。
- 各種ワークショップやウェビナーの開催、技術報告書の作成などを行っており、そのために年2回の執行委員会ExCo会議を開催。開催地は国際的な地熱講演会等に合わせて決める。
- 欧州10か国とEUと1企業で12メンバーが欧州（他は北米3か国、アジア太平洋3か国）
→イタリア、アイスランド以外のヨーロッパでも、地熱がそれだけ重要になっている！

IEA Geothermal ExCo Members



Kasumi
Yasukawa



Jiri Muller



Manuela
Richter



Chris
Bromley



Lauren
Boyd



Tae Jong
Lee



Jose Manuel
Romo Jones



Florence
Bégué



Luca
Giovannelli



Virginie
Schmidle Bloch



Jónas
Ketilsson



Sara
Montomoli



Margarita
de Gregorio



Paul
Ramsak



Sarah
Robinson



David Ryan

Co-share Executive Secretary



Samantha Alcaraz



Brian Carey

IEA Geothermal (IEA地熱実施協定) のご紹介

技術協力（ワーキンググループ → タスクグループへ）

既存および過去のワーキンググループ（WG）

1. Environmental Impacts of Geothermal Energy Development
2. Shallow Geothermal Resources
3. Enhanced Geothermal Systems (EGS) →13
4. Deep Geothermal Resources →12
5. Sustainability of Geothermal Energy Utilization
6. Geothermal Power Generation Cycles
7. Advanced Geothermal Drilling Techniques →13
8. Direct Use of Geothermal Energy →14
9. Geothermal Market Acceleration
10. Geothermal Data and Information
11. Induced Seismicity →13
12. Deep Roots of Volcanic Systems →Superhot
13. Emerging Geothermal Technologies
14. Heating and Cooling

注) 黒字は継続中、灰字は未実施、青字は終了。

テーマは資源・探査・開発など地下の理学・工学側面が多く、“6.発電サイクル”、“9.地熱市場の加速化”といった地上設備や社会的側面は、執行委員会が必要と考えたものの実施者が居らず実施されなかった。

“13.新技術”は、探査、掘削、地上設備、EGS、誘発地震など多くのサブテーマを含む。その多くは終了し、まもなく掘削技術の報告書が完成すれば全体終了。

2025年4月の執行委員会で新たに承認されたタスクグループ（TG）

Wider System Benefits of Geothermal（英国）

- 地熱エネルギーが生産コストや炭素削減以外の側面に与える影響を調べる。風力や太陽光等の変動型再生可能エネルギーと比較したエネルギーシステムの相互作用に焦点を当て、エネルギー安全保障、柔軟性、貯蔵、送電網インフラアップグレードの回避といったメリットの定量化を図る。地熱エネルギーへの理解を深め、従来のエネルギー源に代わる現実的な代替エネルギー源としての地熱エネルギー推進を目指す。

Superhot Rock Geothermal（米国）

- 300°C超の高温下でのパイロットプロジェクトが世界各地で立ち上がる中、各プロジェクト情報を共有することで互いの成功と失敗から学びを深め、超高温岩体地熱技術開発の促進、コスト低減、商業化の道筋をつけることを目的とする。四半期ごとにWeb会議を開催し、プロジェクトごと、技術関係者グループごとに知見を共有。

近年「TGは実施者が提案する」という手順を明文化し、新たなTGを募った。社会的側面、超高温地熱資源のTGが提案され、今年4月に承認された。

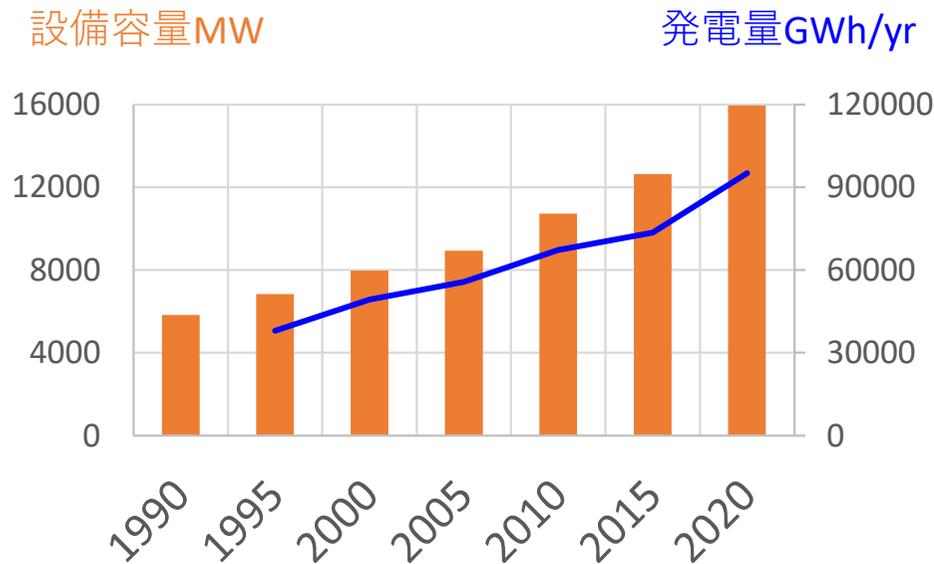
世界動向：地熱発電と直接利用

地熱発電と直接利用の世界動向

世界の地熱利用は進んでいる。とくに直接利用の伸び率が大きい。

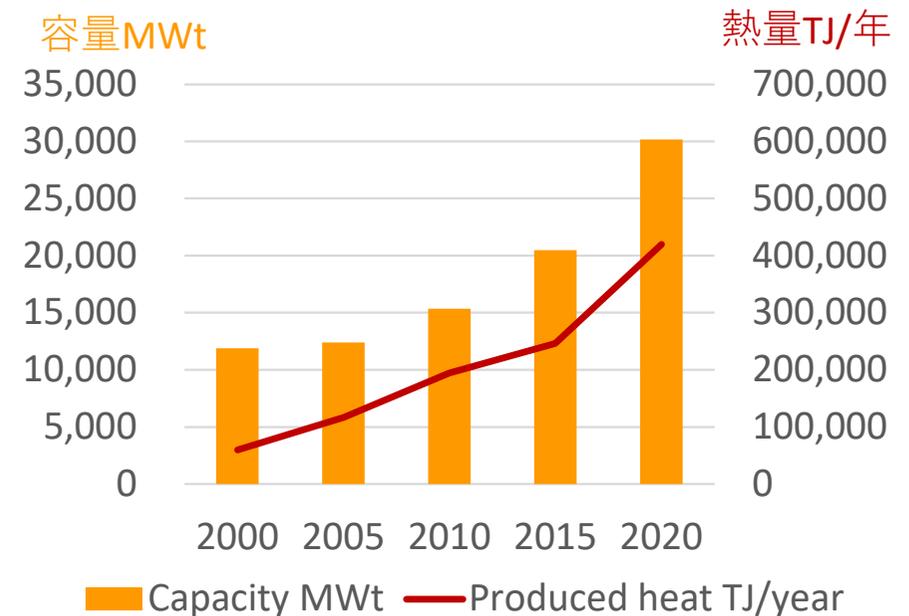
※直接利用とは、地熱を熱源として加温等に利用すること。ここでは、地中熱ヒートポンプを除く統計を示している。

世界の地熱発電の推移



Bertani (2015): Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report, Proc., WGC2015. と Hutterer (2020): Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report, Proc., WGC2020. を元に作図

世界の直接利用の推移 (地中熱HPを除く)

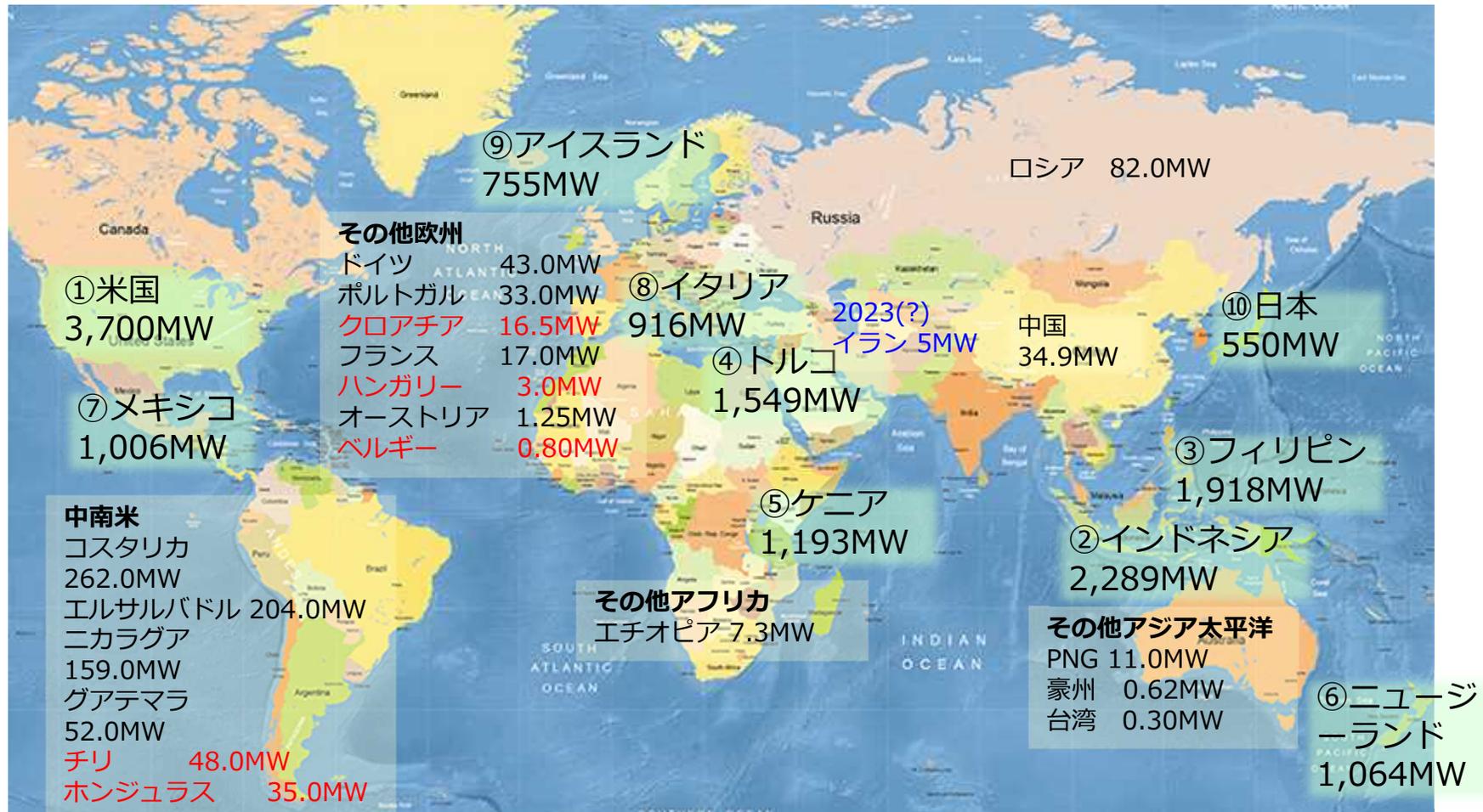


Lund and Toth (2020) と Lund et al. (2000, 2005, 2010, 2015) を元に作図

世界動向：地熱発電と直接利用

地熱発電を行っている国々

現在、世界約30か国で、地熱発電が行われている。CO₂削減効果や、安定電源などの優れた特徴のため、高温の地熱資源に恵まれていなくてもバイナリー技術の活用などにより、新たに地熱発電を開始する国が増えている。



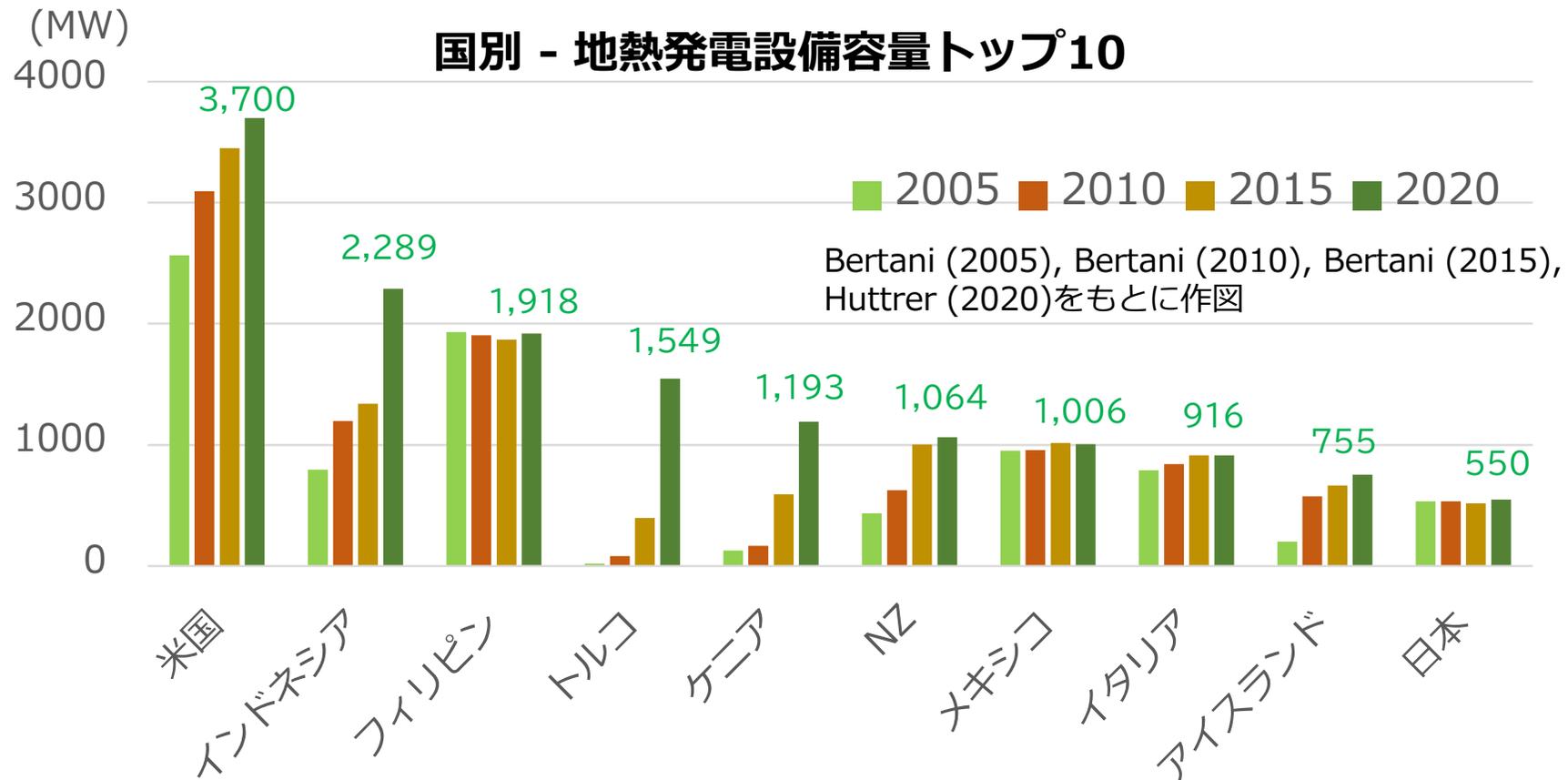
(Huttrer, 2020)より作成

- 赤字は、2015年以降に地熱発電を開始した国々
- 青字のイランは、2022.8月い運開予定との情報の後、2023年に延期との情報があり、その後の情報なし。

世界動向：地熱発電と直接利用

地熱発電 世界トップ10

日本は世界第3位の地熱資源を持つ、世界有数の地熱資源国だが、地熱発電設備容量は世界第10位。地熱発電が進んでいる国と、停滞している国がある。政府による探査、国営企業による開発、民間への助成（探査への助成金、高い買取価格、税制優遇など）などの政策支援がある国、政策支援があった期間に地熱開発が進むが、政策支援が無く民間任せになると地熱開発が進まないことは、世界共通。

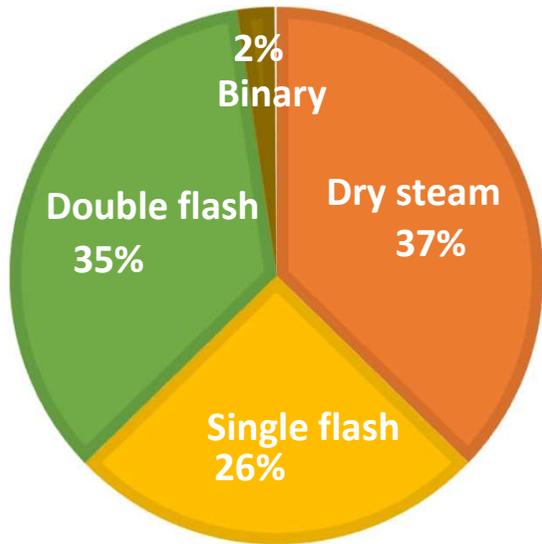


世界動向：地熱発電と直接利用

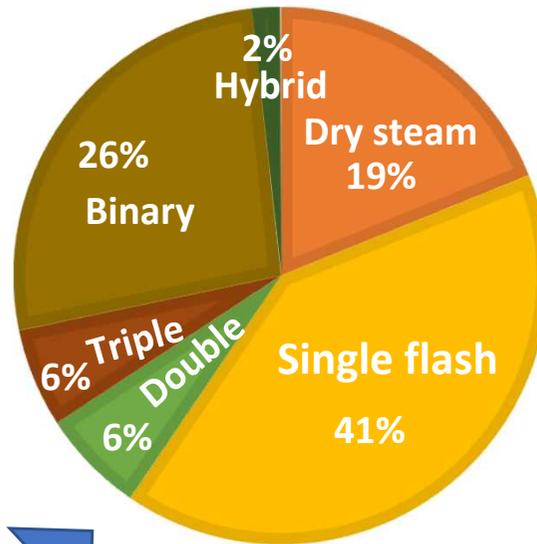
世界の地熱発電タイプの変遷：バイナリーの増加

10年間の新規設備容量の%

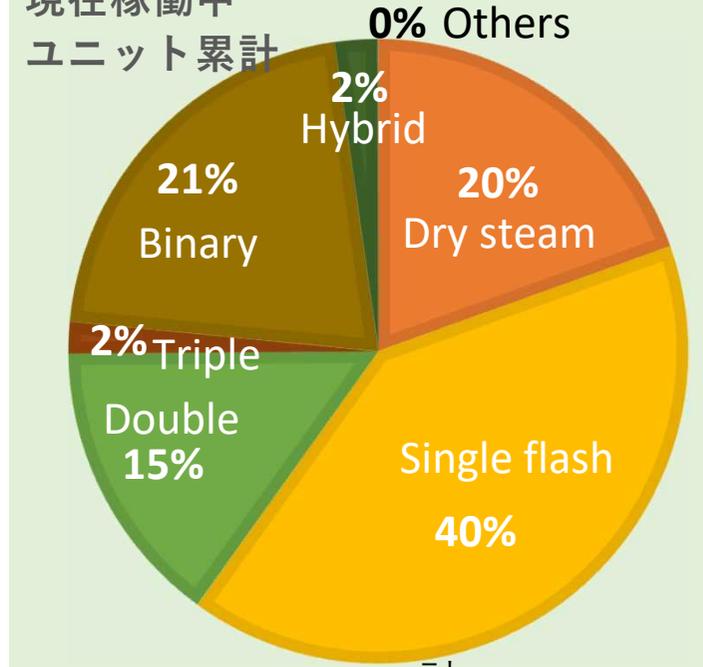
～1990年



2001～2010年



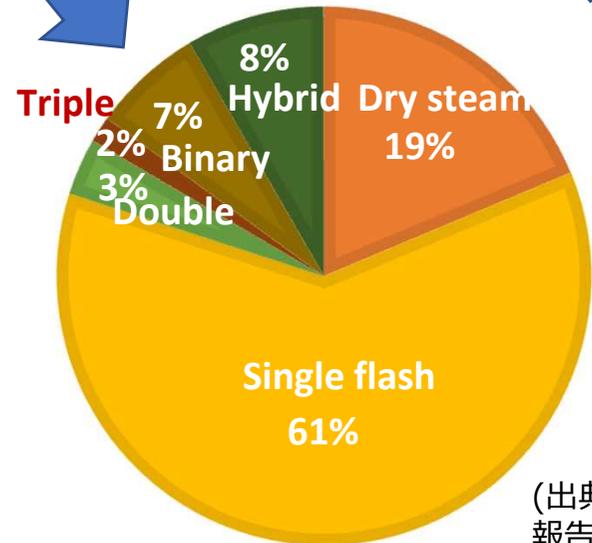
現在稼働中
ユニット累計



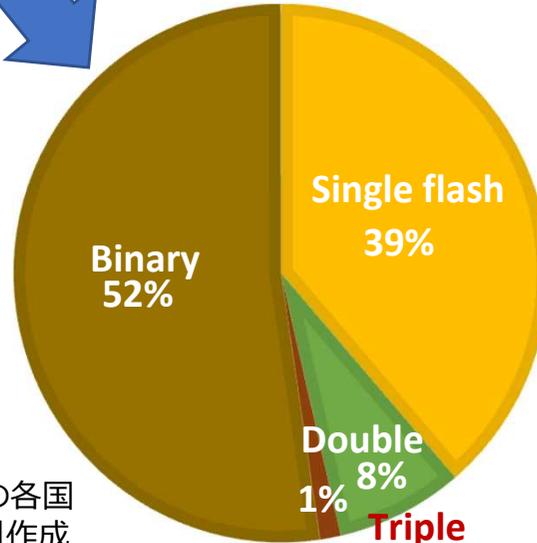
0% Others

計15,067MW

1991～2000年



2011～2020年

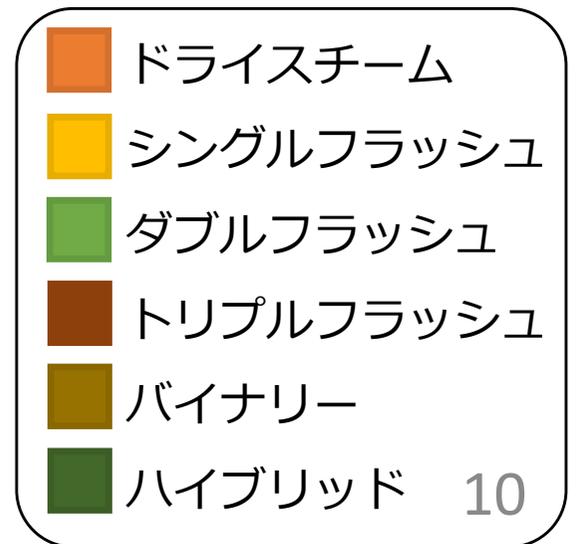
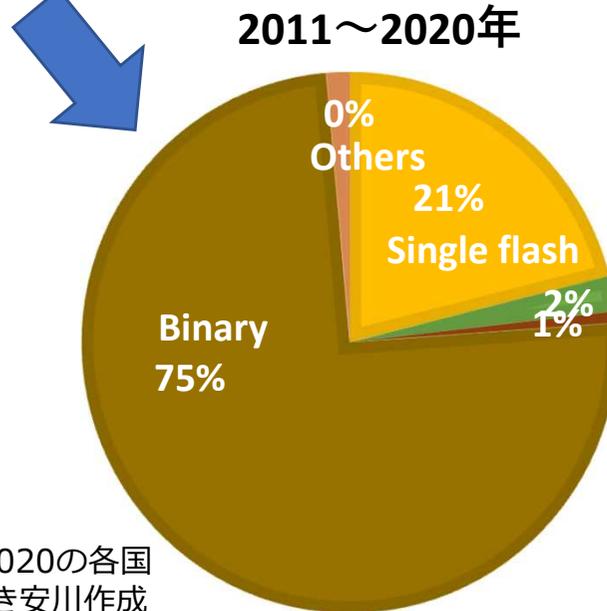
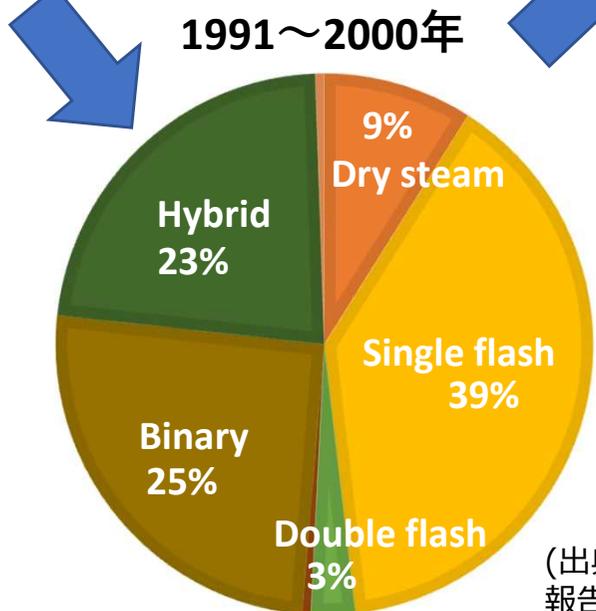
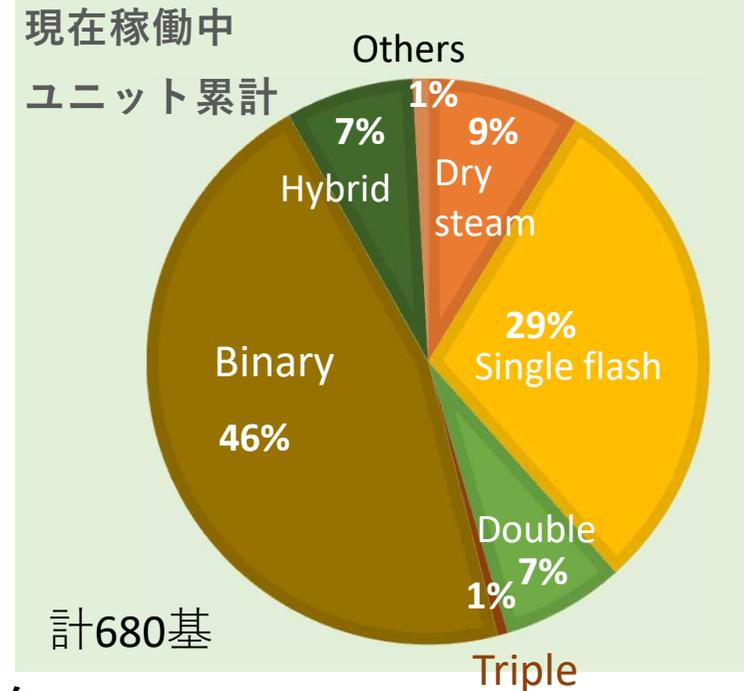
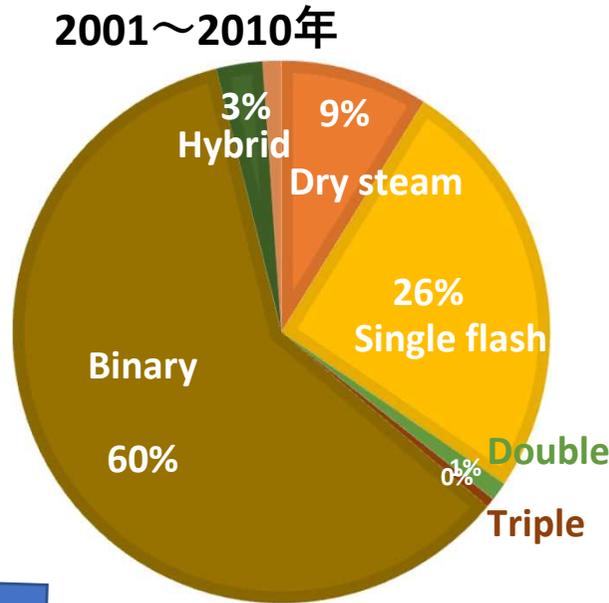
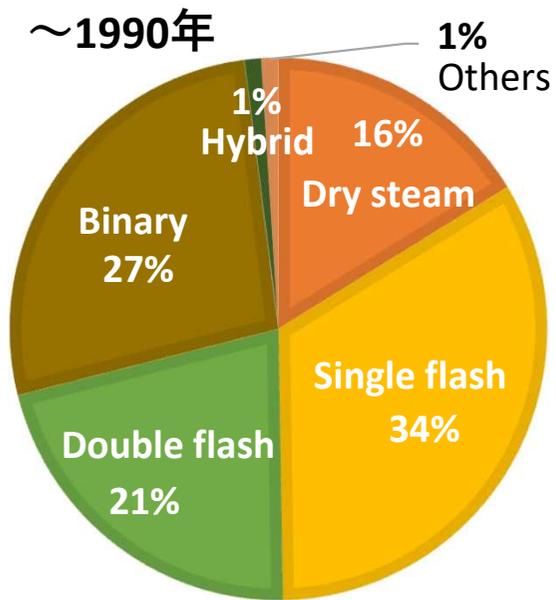


(出典) WGC2020の各国報告書に基づき安川作成

世界動向：地熱発電と直接利用

世界の地熱発電タイプの変遷：バイナリーの増加

10年間の新規ユニット数%



(出典) WGC2020の各国報告書に基づき安川作成

世界動向：地熱発電と直接利用

直接利用を行っている国々

Lund and Toth (2021)によれば、2020年現在、**従来型直接利用**を行っている国は81カ国。右の5地域を更に細分化した**世界の全地域に直接利用国が存在**。

右表でアフリカとオセアニアは直接利用国の割合が低いですが、これはアクセス上の制約から情報が得られていないだけで、実際には直接利用が行われている可能性が高い。

世界のほぼ全域で利用されていることが従来型直接利用の特徴で、地熱発電や地中熱HPと大きく異なる。

直接利用を行っている国の数 (ヒートポンプを除く)

| 地域 | 国数 | 直接利用国 | |
|-------|----|-------|-------|
| | | 数 | 割合 |
| アフリカ | 54 | 11 | 20.4% |
| アメリカ | 22 | 16 | 72.7% |
| アジア | 49 | 20 | 40.8% |
| ヨーロッパ | 54 | 31 | 57.4% |
| オセアニア | 16 | 3 | 18.8% |

従来型直接利用は、

- ・ 偏在性が比較的小さい低温資源を活用できる
- ・ 機械設備は必ずしも必要でない

ことから、各地域特性に応じた利用法が発達したのであろう。

世界動向：地熱発電と直接利用

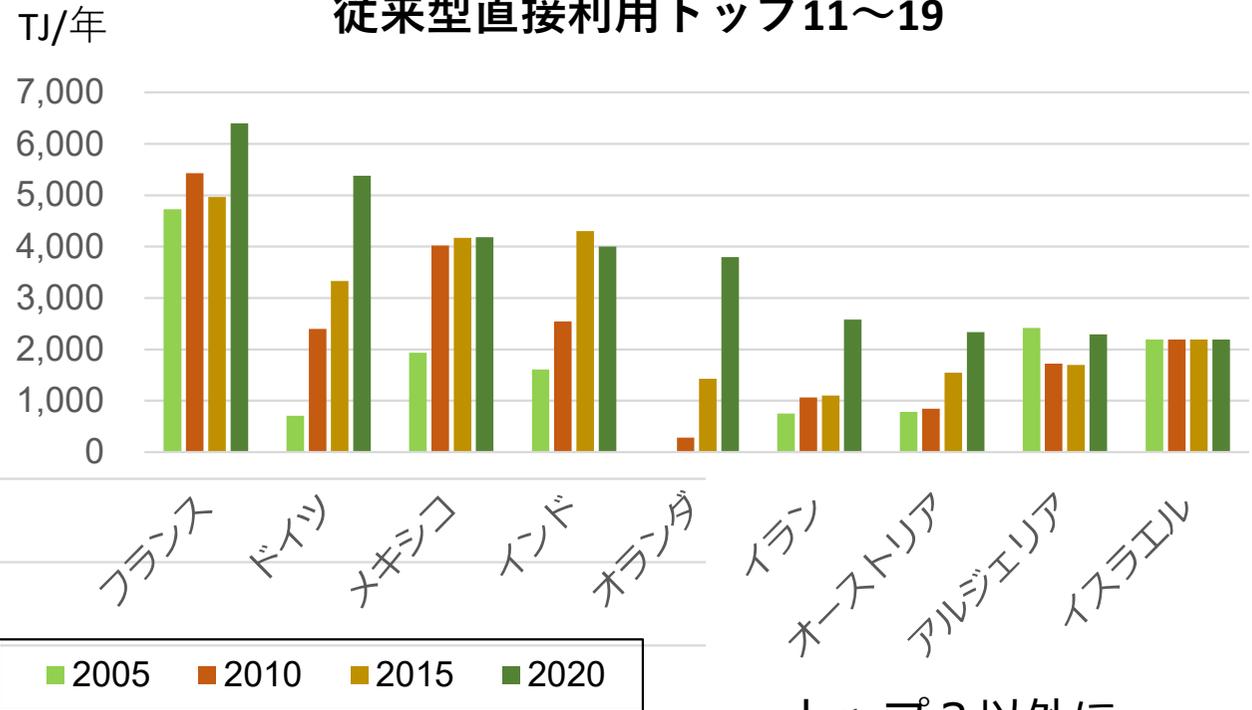
従来型直接利用 世界トップ10

トップ10の国を見ると、
トップ3以外では、とくに
近年伸びてはいない。

従来型直接利用：利用熱量Top10



従来型直接利用トップ11~19

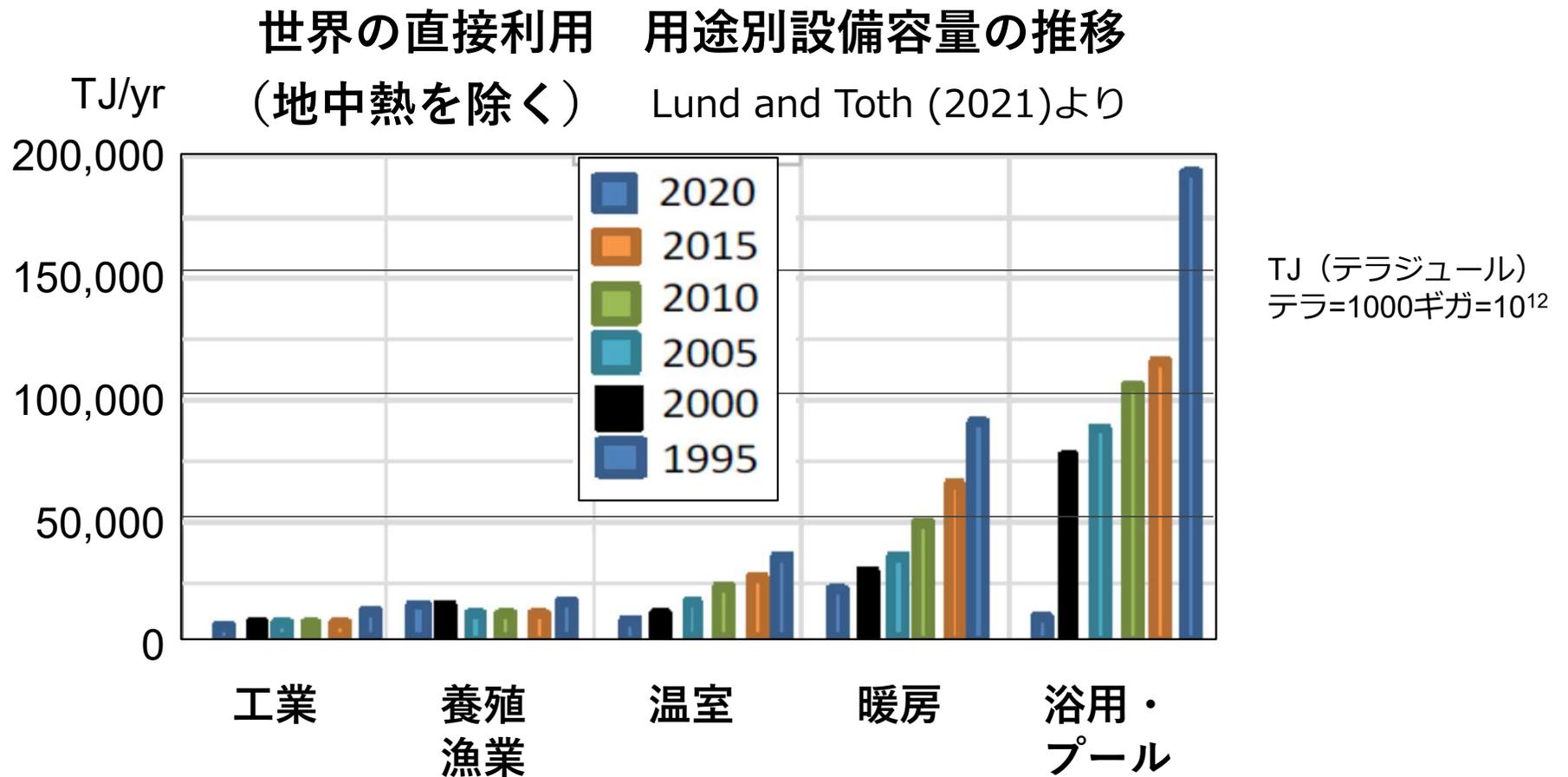


トップ3以外に、
トップ11~17で大
きく伸びている。

では、近年はどのような利用法が伸びているのか？

世界動向：地熱発電と直接利用

直接利用の用途別利用量の推移



利用方法として、浴用・プールが多く、暖房がそれに続く。

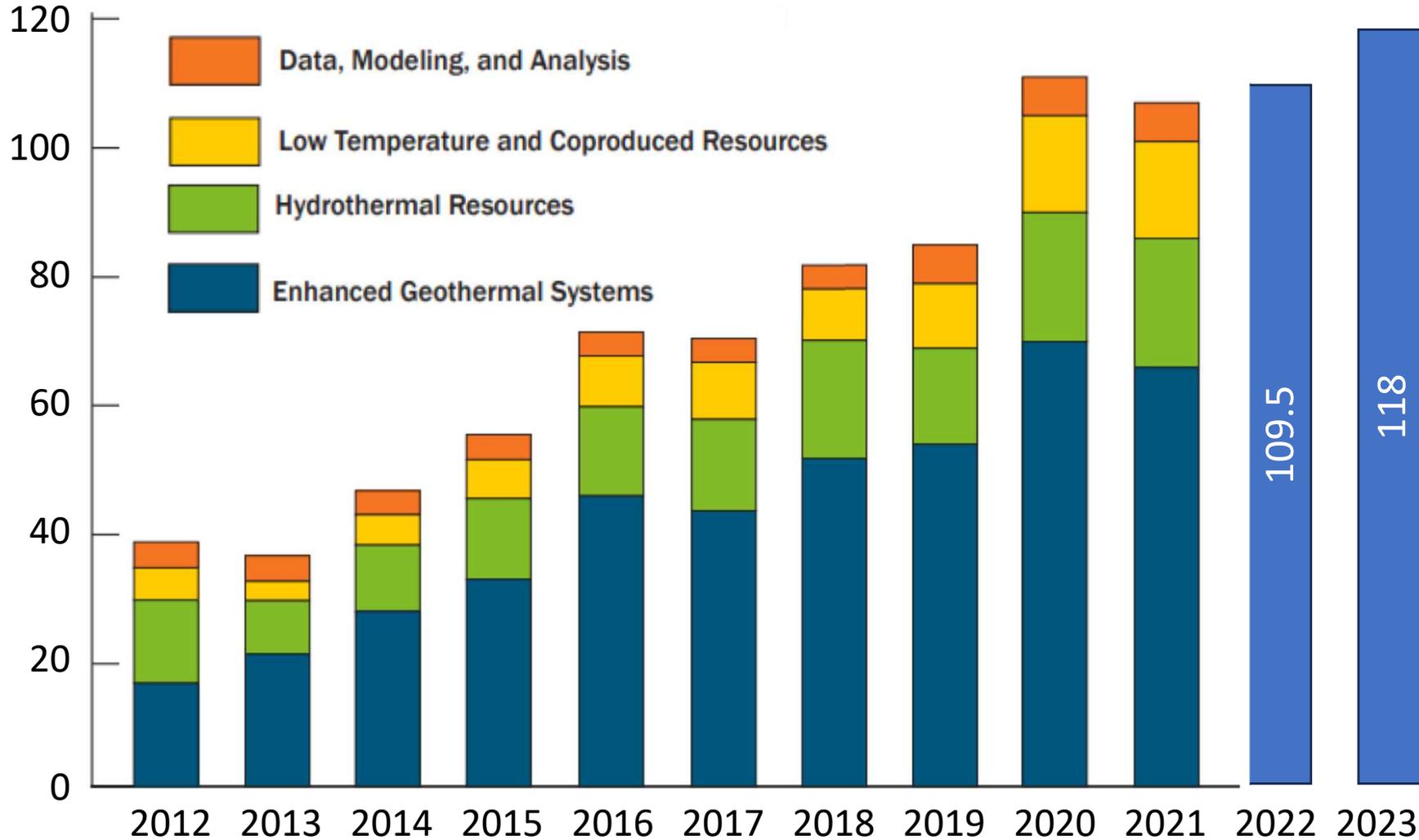
- 地熱発電時の、熱エネルギーから電気エネルギーの変換効率が高々40%。一方、熱として利用すればほぼ100%エネルギーを使え、CO₂削減効果大。
- ヨーロッパなどでは近年、暖房、温室栽培を目的とした地熱開発が盛ん。

各国の動向等：米国

米国エネルギー省US DOE地熱関連予算の推移



百万 \$



- US DOEのGeothermal Technology Office (GTO) が地熱の技術開発支援を行っている。
- 地熱関連予算は増減しつつ、長期的には増加傾向。
- 近年は、EGSの予算が6割以上を占める■。直接利用等の低温地熱資源への予算も増加■。

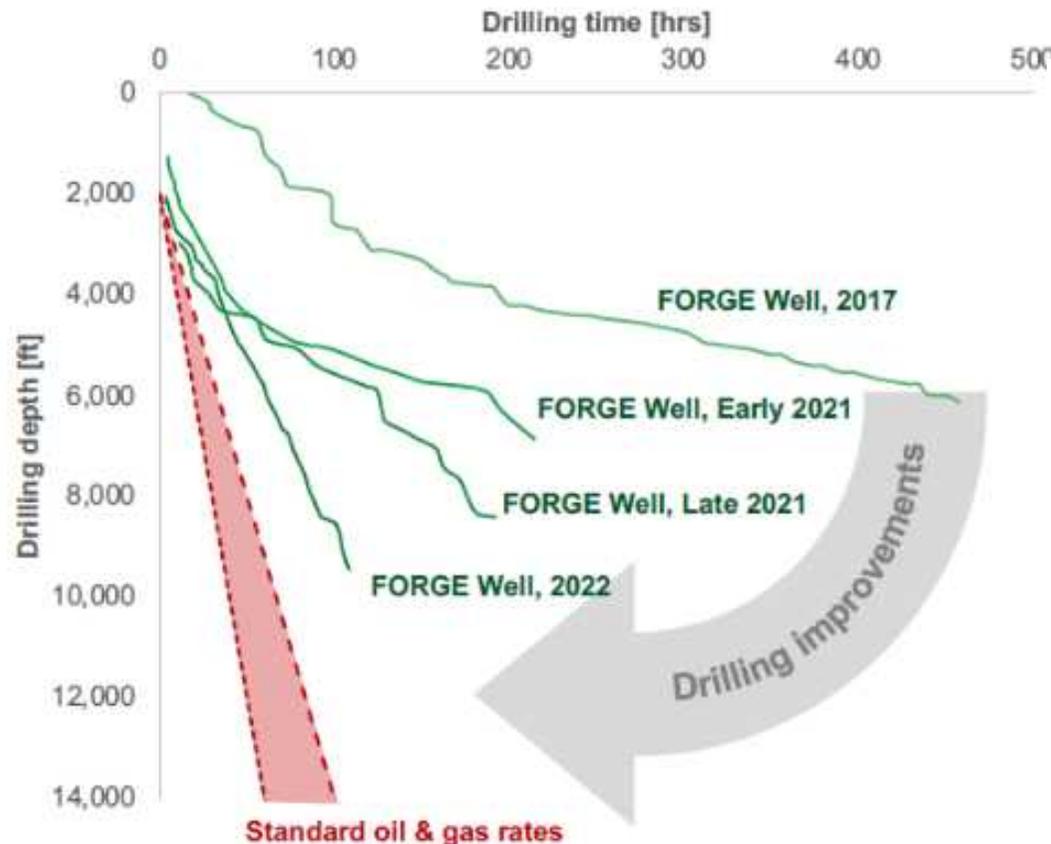
各国の動向等：米国



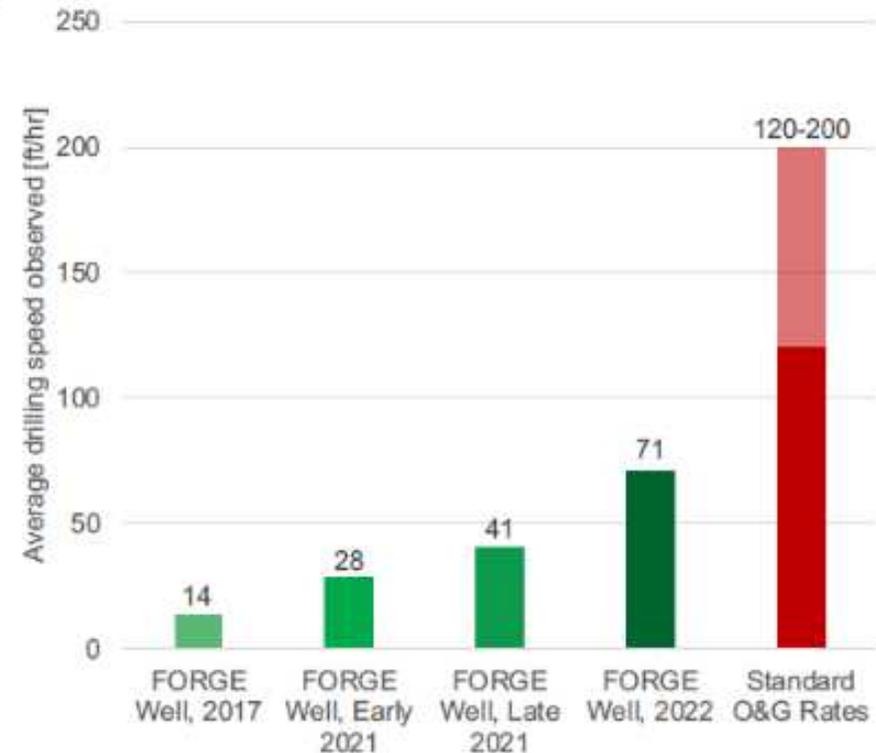
FORGEプロジェクト

- DOEのGTOは、さまざまなEGS技術開発プロジェクトを支援している。
- 多くは、ベンチャー企業の技術開発を大学や国研がサポートする形。
- その中で現在、最も注目されているのは、Fervo社がユタ州の実験場で行ったFORGEプロジェクト。
- 掘削時の地層・物性情報を次の坑井掘削時に有効活用することで、掘削時間を大幅に短縮。同じサイトで複数の坑井を掘削する場合には、大幅な掘削費低減が期待できる。
- Fervo社は、2GW (200万kW), 200万世帯以上の電力供給できるFervo Cape地熱プロジェクトをユタ州ビーバー県で計画しており、2024年10月、内務省土地管理局に承認された。

FORGE実験場における掘削時間の短縮



FORGE実験場における掘削速度 (掘進率) の増加

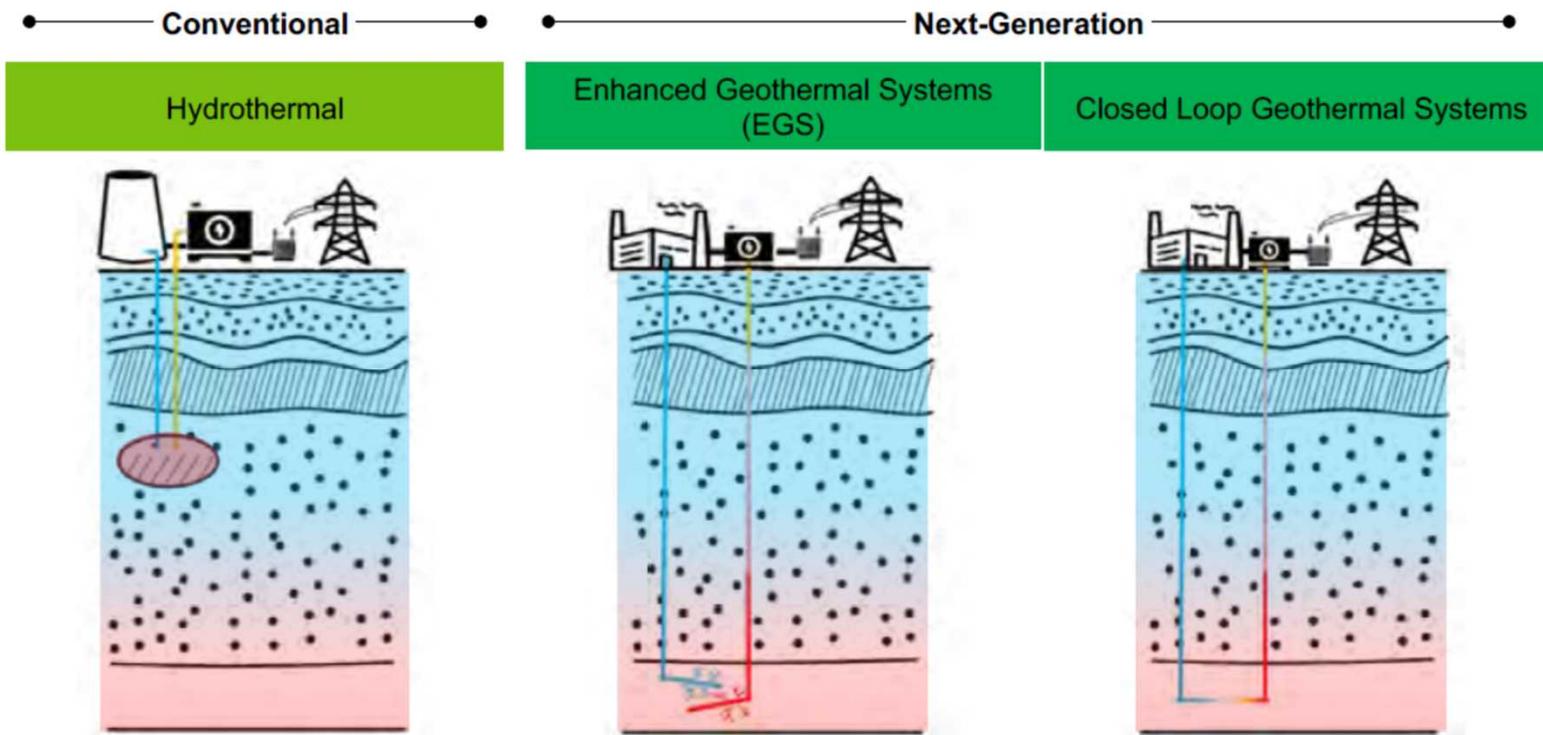
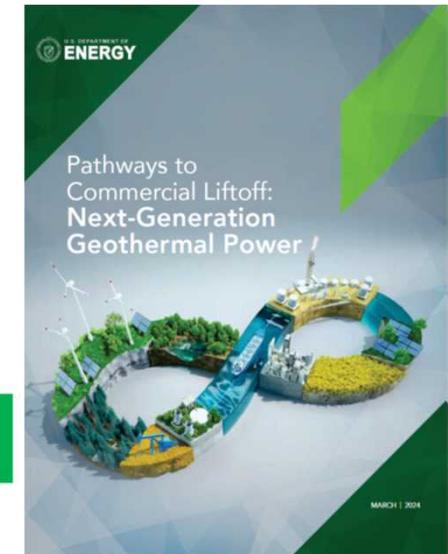


各国の動向等：米国



“Pathways to Commercial Liftoff: Next Generation Geothermal Power” (2024)

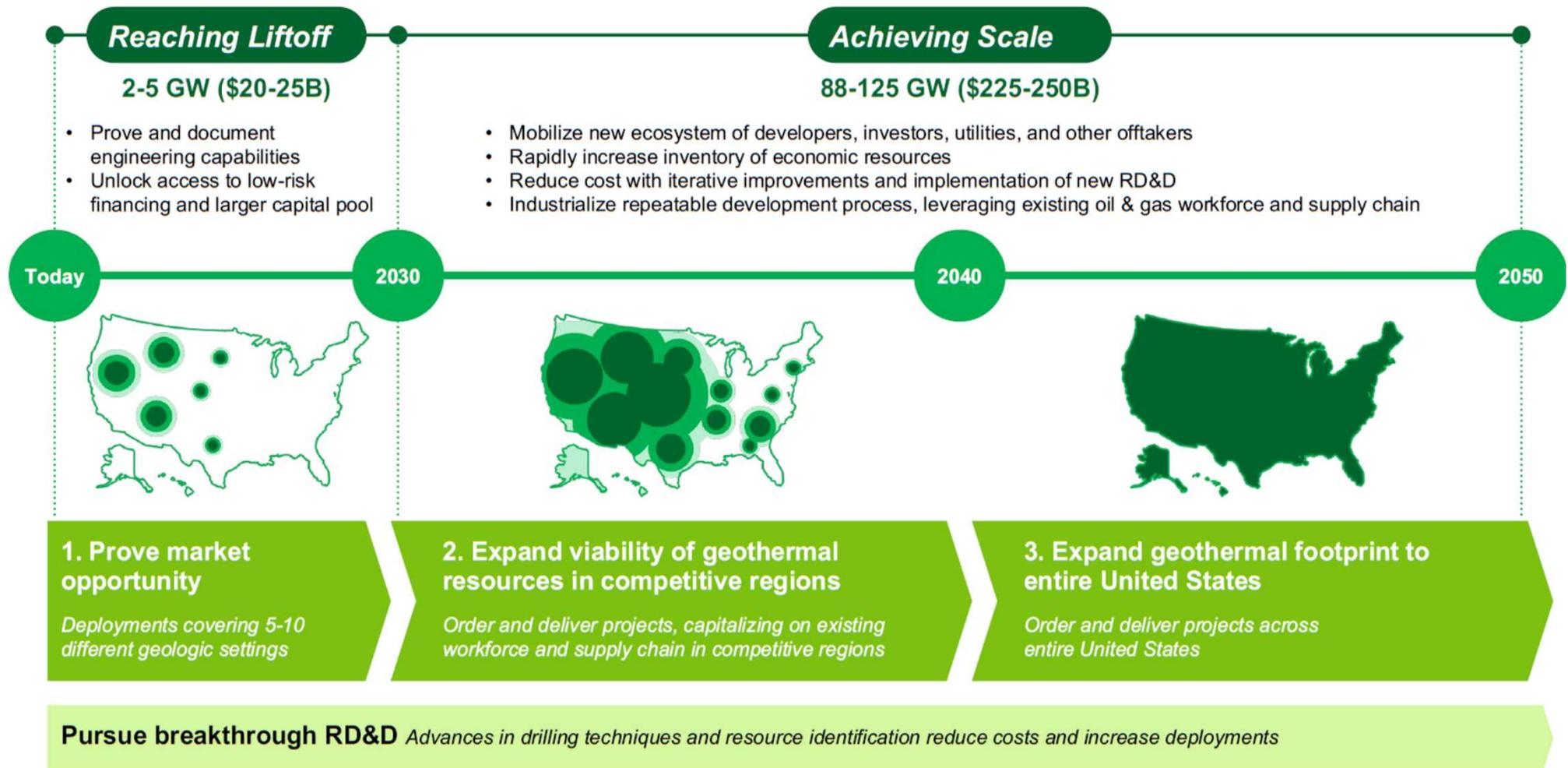
- **DOEの Loan Programs Office** は、GTOと共著で2024年3月、“Pathways to Commercial Liftoff: Next Generation Geothermal Power”という報告書を発表。
- この報告書は、次世代地熱が将来の再エネ戦略の中で重要となることを強調。
- 地熱資源をフル活用するための道すじとして、**土地の使用に関する規制緩和など、法制面で必要な措置等が記されている。**



次世代地熱とは？ 次世代地熱として、EGSやクローズドループが紹介されている。しかし、技術検証や技術開発の道すじへの言及はないことに注意して読むべき？

各国の動向等：米国

“Pathways to Commercial Liftoff: Next Generation Geothermal Power” (2024)



- 地熱資源を利用する地域が、2050年までに全米に拡大することを図示し地熱の将来性を強調。
- 加えて、2025年の動きとして、トランプ政権が再エネ政策全体を停止させる中、地熱だけは推進している。



地域暖房を主体とした熱電併給

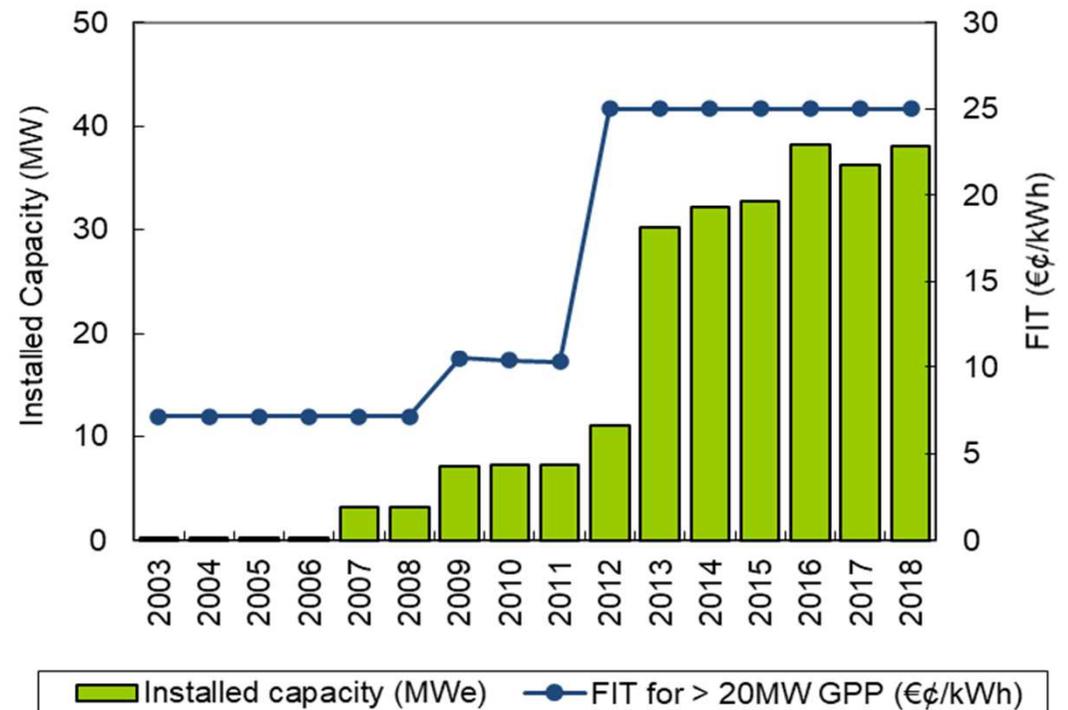
一般的な深部地熱利用は、地域暖房、熱電併給、温泉、暖房。2020年現在、約190のこういった設備が稼動している。

トラウンロイト

Traunreutの電力-熱供給プラント
(ThinkGeoEnergy websiteより)



ドイツの地熱FIT価格と地熱発電設備容量



Compiled by WJEC based on Geotis (Germany), etc.

最近のトピック

ゲレストリート

Geretstriedでは、Eavor社のクローズドループシステムによる地域熱供給システムが建設工事中。2024年に最初の熱供給ができ、2026年に完成する予定。地熱発電の計画もあり既に発電ユニットを購入。中部電力(株)が出資しているため、日本でも話題に。

各国の動向等：ドイツ

毎年開催の展示会と講演会： ヨーロッパの中心的活動

GEO THERM EXPO & CONGRESS

毎年2月頃、Offenburgで展示会と講演会が開催され、2025年は8,522人が来場(2024年は6,509人)。

展示者は、エネルギー供給、地熱資源開発、各種測定などのサービス会社、測定機器や設備のメーカー、大学、研究機関など。

講演会では「アジアセッション」のように世界の特定地域を対象としたセッションが毎年開催され、招待講演が行われる。



写真は <https://www.geotherm-offenburg.de/en> より



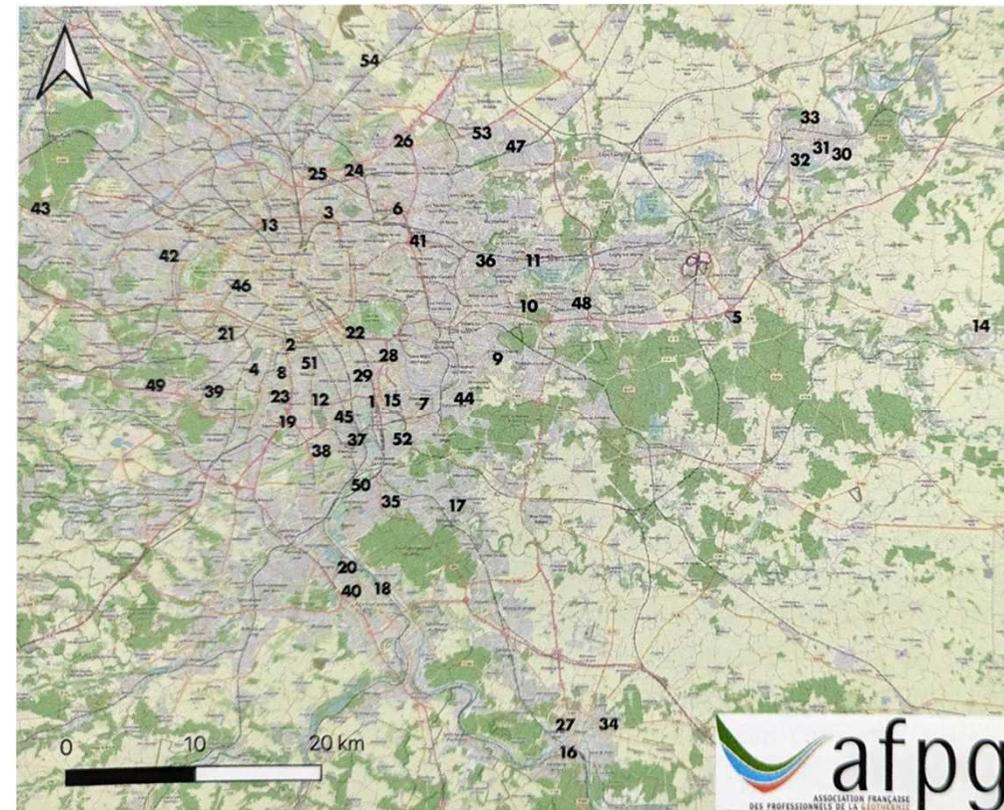
パリ盆地の地域熱供給・EGS

- フランスには2021年現在、74か所に直接利用の施設がある。うち55施設が地域熱供給で、 10MW_t 以上の大型施設はほとんどが地域熱供給（最大 35MW_t ）。46施設がパリ盆地にあり、パリ市と近郊の人口1,100万人のうち6~7%が地熱を利用（Boissavy et al., 2021）。パリ近郊に2024現在 $1.6\text{GW}_t \rightarrow 2030$ には 3.2GW_t に。

フランスの地熱発電

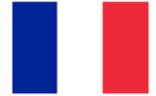
- アルザス地方のソルツSoultz-sous-Forets 1.7MW_e とグアダループ島のBouillante 15MW_e の2か所。
- ソルツはヨーロッパ全体のプロジェクトであり、世界初のEGSによる発電として有名。現在はLi回収の試みも。

パリ盆地の地熱による地域熱供給システム一覧



現在は50以上の地熱による地域熱供給施設がパリ周辺に。地熱の地域熱供給施設には、導入費の20%補助金が出る一方、データ公開の義務が。



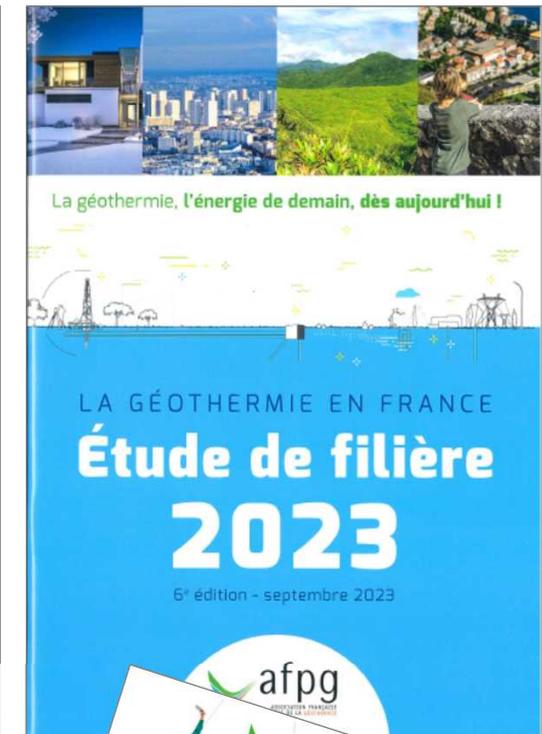
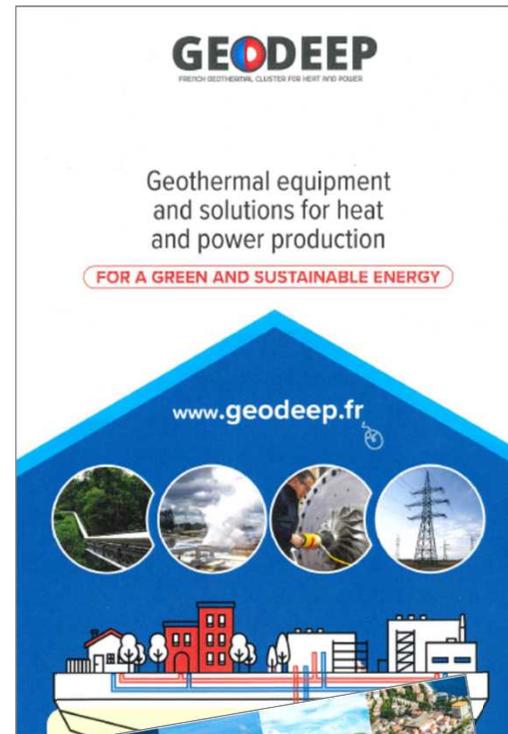


民間資金で運営されるAFPG

The French Geothermal Association of Professional (AFPG)が、フランス国内の地熱資源・利用状況の各種統計や、紹介パンフレット等を編纂・出版している。国プロ（技術開発）の運営管理や、国際地熱組織への代表参加を行っているが、AFPGは政府組織では無く民間資金で専門家を採用して運営。地熱関係の各種ワークショップを開催するほか、一般向けの地熱関連のデータ集や資料を発行しており、非常に活動的。



AFPGの専任スタッフ（専門家たち）



鉱山水地熱

Mine Water Geothermal

イギリスやドイツ等では、旧炭鉱跡などに溜まった天水を熱源として、**季節間蓄熱**を行い、地域冷暖房に利用するシステムが実用されている。

地中熱ヒートポンプを用いる場合が多いが、より深く高温の部分を用いることで、ヒートポンプ無しで熱供給を行う計画もある。

天然の帯水層と違い、構造等が把握できているので、詳細計画しやすい。

英国地質調査所の鉱山水地熱 オブザバトリー（グラスゴー）

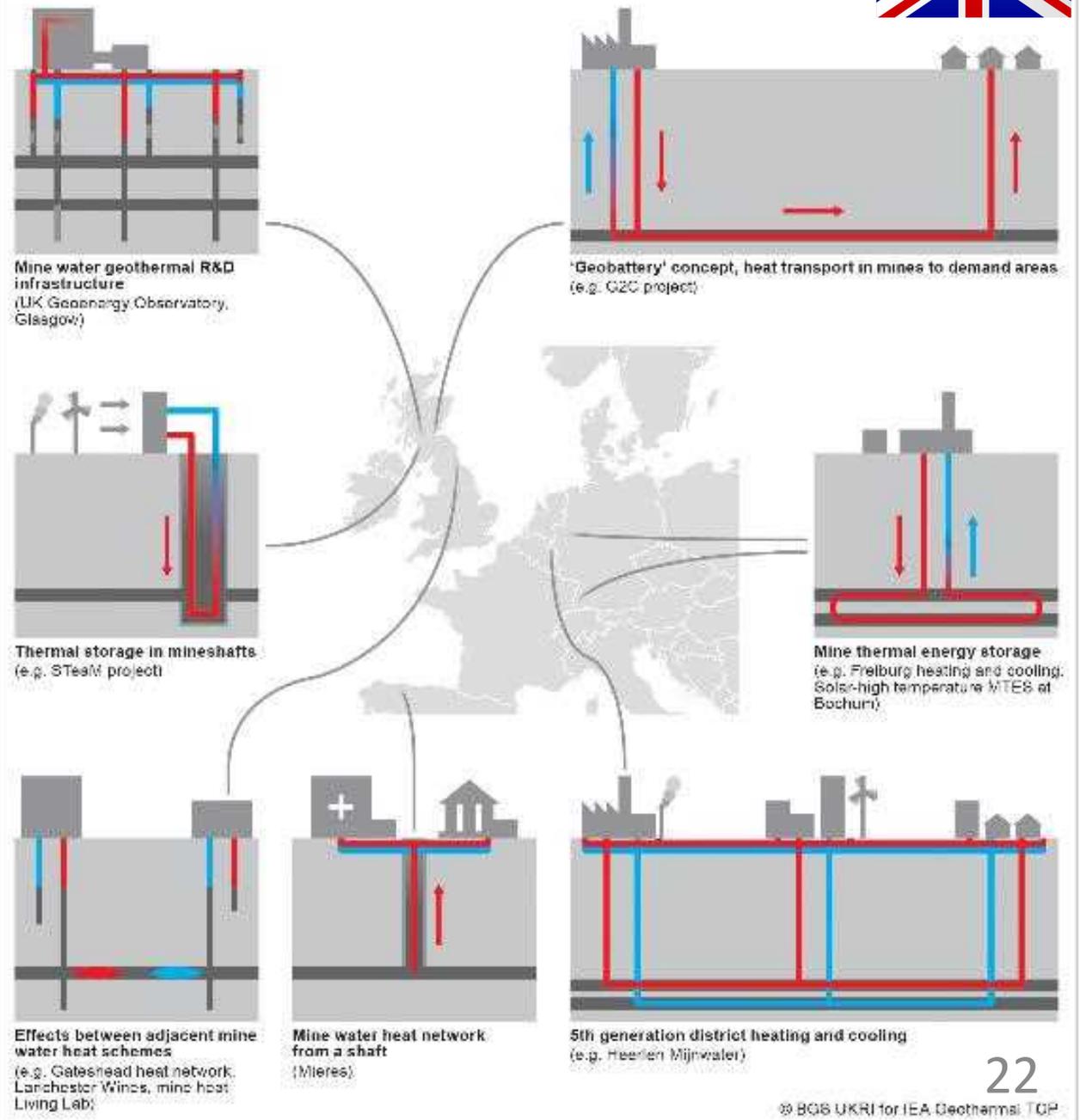


2024年4月、安川撮影

欧州における鉱山水地熱のプロジェクト一覧



Innovations and research directions in mine water energy in Europe in March 2024





EGSとリチウム回収

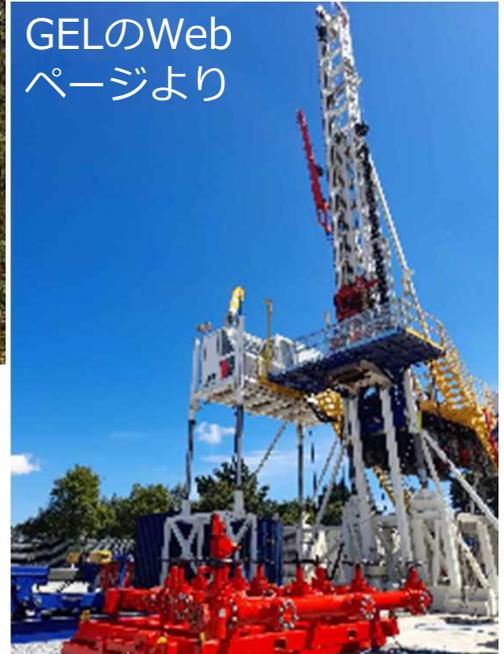
EGSによるバイナリー発電

GEL社は、2015年にEGSプロジェクトを開始して生産井5,275mと還元井2,393mを掘削、2020年までに循環試験を実施。2021年に運開予定だったが、コロナによる資材等供給遅延により、2024年3月ようやく建設開始、年内に3MWのバイナリー発電所運開の予定。英国初の地熱発電所となる。



2024年4月撮影

本地域は縦方向の断裂が卓越。
還元ゾーンは生産ゾーンのほぼ真上。



GELのWebページより



コーンウォール地域では古くから陶土の採掘がおこなわれていた他、1980年代から地熱研究が行われており、地下情報が豊富。



2024年4月撮影

地熱流体からLiを生産

GEL社は、Li生産事業を開始。ウルトラ・ローカーボン・リチウムとして国からの補助あり。濃度は300ppm未満と低いですが、Clなど他の成分濃度も低いため回収プロセス的に問題がなく経済的に生産。大量の水が出るため、この水も販売する方策を考案中。より低コストで回収するためのプロセス研究を継続中。

バイオーム：巨大な植物園

コーンウォールのEdenプロジェクト

もと陶土（[カオリナイト](#)）採掘場の再開発プロジェクト。

バイオームと呼ばれる自然環境を模したドーム型の巨大な植物園を、クローズドタイプの地熱井からの熱で保温している。一大観光施設となっている。将来的には、EGSによる電力供給も行う予定。



同軸二重管タイプの熱交換井
掘削長5277m、最大傾斜45°



2024年4月撮影

巨大なドーム状の温室の中に、世界中の植物が植えられている。

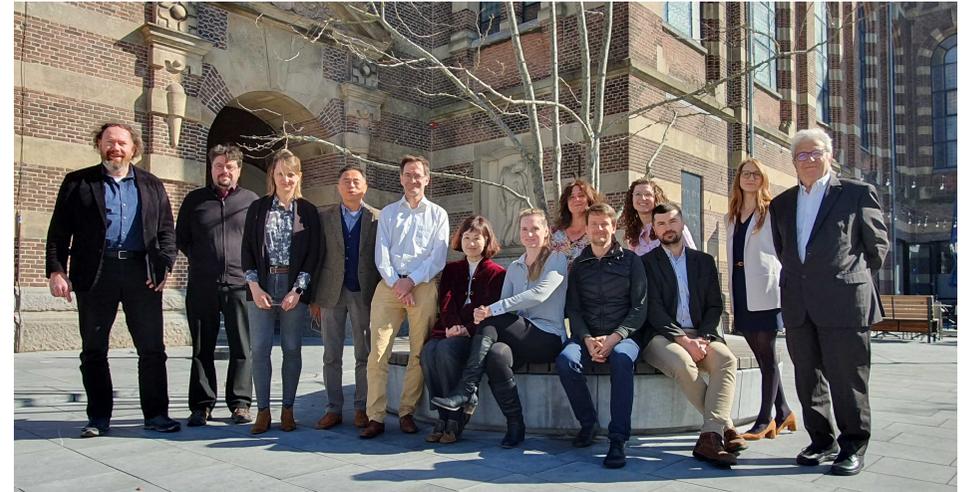


エネルギー貯蔵と熱ネットワーク

オランダではかつて天然ガス等を目的とした深部掘削が盛んで、地下の温度プロファイルデータが豊富。100°Cを超えるのは最浅2,100m、平均で2,900m程度。

- 現在のオランダの地熱利用はもっぱら**帯水層蓄熱** (Aquifer Thermal Energy Storage, **ATES**)

オランダは冷涼な気候なため→、高々30°Cの温水でも、経済的価値が非常に高い。通常は輸入に頼るパプリカやトマトを大量に栽培できるからである。ATESは、エネルギー貯蔵技術の一環として、重要な役割を果たしている。



4月下旬のホールン（オランダ）朝夕は真冬のコートを着用



2023年4月撮影

ルッテルヘースト地域：低温ATES 2組+高温ATES 1組を用いて、IT企業の巨大なデータセンターの冷房と広大な温室への熱供給を行っている。

高度な技術と、きめ細やかな政策支援



低温ATESと高温ATES

- 低温ATESは地中熱HPを用いた通常のATES。高温ATESは、夏期に太陽熱パネル等で得た温水を積極的に地下に蓄え、冬期に利用するもの（HPなし＝従来型の直接利用）。
- 深部帯水層の深度は2～3km，蓄熱温度は30～90℃。高温になった深部帯水層は人工地熱貯留層と呼ばれる。
- 微小地震観測や熱・流動シミュレーションなど，日本では大規模地熱発電開発に用いるような高度技術を投入。
- 地熱利用施設は大規模化しており、広域的な熱ネットワークの構築も視野に研究が進行中。



2023年4月、ルッテルヘースト地域で開催されたATESワークショップ

政策支援

- 深部の人工地熱貯留層は断層型貯留層であり，開発リスクがあるため，オランダ政府は地熱掘削リスクへの補償制度を整備。
 - オランダでフィード・イン・プレミアム（FIP）が採用された当初から，高温ATESはFIPの対象となっていたが，再エネ熱のカウント方法が不明確であった。
 - 2021年に，FIPのカウント方法が「生産したエネルギーkWh」から，「削減できたCO₂量」に変更されたことと，ガス採取と熱回収の2重目的の坑井もFIPの対象になったことが，地熱掘削リスクへの補償制度と共に，高温ATESの促進につながった。
- 再エネ熱の促進には、きめ細やかな制度設計が大切！

各国の動向等：ハンガリー

暖房費ほぼゼロの街

Hodmezovasarhely city

(ホードメゼーヴァーシャルハイ市)



ハンガリーでは地熱の直接利用が盛ん。歴史的には浴用主体だが、2000年以降は地域熱供給が急増。

地熱水を使った地域熱供給

<プスタ地域>

※この設備は2003年以降の第2期開発で屋内プールや農作物乾燥にも用いられる多目的利用施設に。2023年のNHKの番組では、コロナ禍で暖房費が高騰する欧州にあって**暖房費ほぼゼロの町**として紹介された。



Budapest Geothermal Energy Summit (2024.9.20)

- ハンガリーのCsaba Lantosエネルギー大臣の呼びかけにより、開催。
- 主なスポンサーはMOLGROUP（ガス・石油会社）。
- 2024年7月からハンガリーがEU議長となり、EU圏内の地熱事業の活性化を図っている背景で開催されたらしく、開催の辞はCsaba Lantos大臣。
- 主な来賓講演は、国際地熱協会（IGA）事務局長のMarit Brommer氏、European Geothermal Energy Council代表のMikros Antics氏、IEA-GIA議長の安川など。
- 参加者数は200名程度、ハンガリーのエネルギー関連会社、建設会社、金融機関等など。
- 来賓講演の他は、パネル討論多数。

ハンガリーの地熱に関して得られた情報

今後はバイナリー発電の計画がある。ブタンの超臨界ゾーンを狙い、6000m程度掘削して300℃を目指す。サイフォン式のクローズドループ（ポンプ無し）で300m/sの高速流を利用。枝分かれした坑井1本当たり25MW×16本＝400MWの予定。グリッドに繋がられない問題があり、電力は水素、アンモニア、合成天然ガス等の生産に利用。



本会合では、政府が全面的に地熱利用を推進するので民間投資を促すような大臣発言があった一方、現地参加者からは、実際には金銭的な政策支援策はなく民間だけでは難しいとの不満の声も。EU圏内の公的資金導入が狙いか。



地下の熱利用を最大化する、あくなき探求

- スイスは、国土面積当たりの地中熱ヒートポンプ利用量が、1980年頃から常に世界一という地中熱先進国。
- 高温の地熱資源には恵まれていないが、深く掘ることで熱を得ようという研究開発が、大学等を中心として進められており、ユニークな研究も（次頁）
- 中低温地熱の利用も（↓→）

スイスアルプスには長いトンネルが多く、トンネルは周囲の山々から大量の水を排出している。中には50°Cに達する水もあり、暖房、温室、浴用、養殖漁業などに利用している。



Lötschberg 付近のトンネルにあるトロッペンハウス “Tropenhaus Frutigen”
トンネル水の熱を利用して、暖房、熱帯植物の温室栽培、キャビアの養殖などを行っている。
(source: Tropenhaus Frutigen).

ETHのBedretto Underground Lab訪問

- 現在は使われていない補助トンネル（鉄道用トンネル工事の際に資材・人員運搬用に掘られたサイドトンネル）を活用して、チューリッヒ工科大学（ETH）のMarian Hertrich教授らが主にEUの研究資金を得て設置した実験施設。
- ベルンから列車で約2時間のAiroro駅から、車で15分程度の場所。
- ここで、深部地熱利用をターゲットとした各種実験を実施。



Marian Hertrich教授

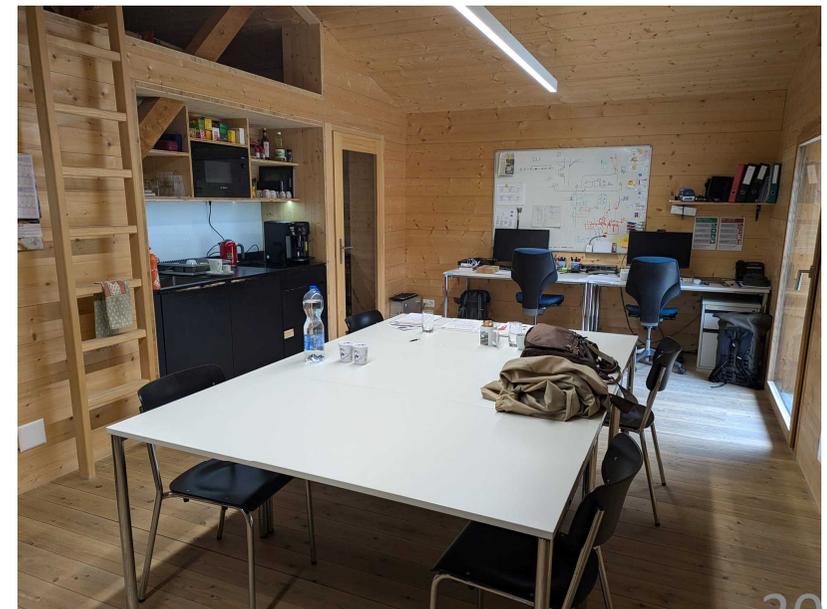
トンネル実験施設のメリット

- 山体へのトンネル内なので、地上ノイズの影響なく精密な観測が可能。
- 地下の温度・圧力条件下で実用規模の実験を行うことができる。
- トンネル内の側溝には常時、山体に浸透した大量の水が流下しており、それをタンクに溜めれば注水実験が容易。

トンネル入口の手前に作業用のキャビンが建てられている。管理人が常駐している他、ETHの学生・研究者等が毎日入れ替わり訪れて、半日～数日間滞在して、実験を実施。

外部訪問者は、この建物の中で安全上の注意事項のレクチャーを受け、安全服とヘルメットを装着し、建物の裏側から3人掛けの専用スクーターに乗ってトンネル内に入る。

報道関係者などの訪問客も多いという。



作業用キャビンの内部

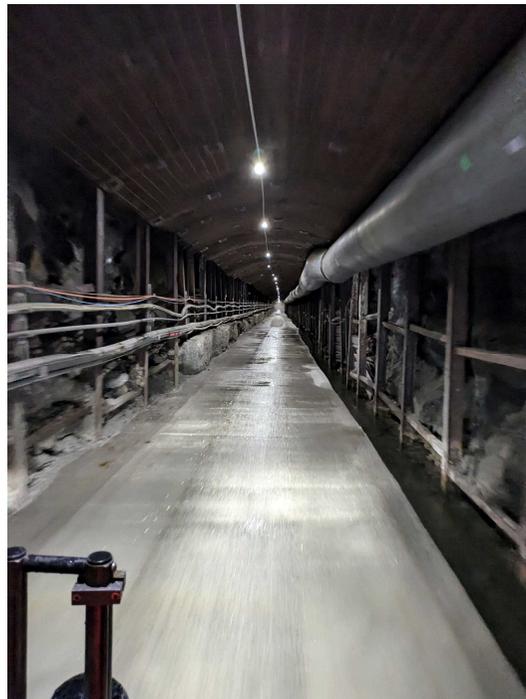
ETHのBedretto Underground Lab訪問



スクーター



トンネル入口



トンネル内の通路



側溝を地下水が流下

実験担当者含め必ず複数名で入ることになっている。2024年現在、3つの実験・観測が行われており、これらはいずれも、準備に2年ほどかかっているが、実験によっては数か月で終了するものもあるという。

トンネルは全長5km。入口から2.5km前後の付近に実験設備が複数ある。

入口と反対側は、現役の鉄道トンネルに繋がっており、その手前に非常用の空間が設けられ、入口側に逃れられない非常時の避難所となっている。

ETHのBedretto Underground Lab訪問



ETHのBedretto Underground Lab訪問

第1の実験設備：地熱を研究対象とした注水実験



注水実験

トンネル入口からスクーターで5分程行った場所。トンネル内から斜め下45°方向に注水井が掘削され、トンネル内の水をタンクで熱して80°Cにしたものを注水する実験が行われた。井戸周辺に温度、圧力、各種ガス分圧の測定装置が配置され、長期モニタリングを実施。

この地質は硬質なため、流路となるのは断層や断裂。

とくに主要な流路と推定される断層破砕帯に沿って温度、圧力センサを密に配置することで、断層内の流れを直接測定している。

これにより、断層破砕帯の中でも流路となる部分と逆にバリアとなる部分の違いなどを明らかにする。バクテリアなど微生物の種属の変化もモニタリング。



ETHのBedretto Underground Lab訪問

第2の実験設備：地熱を研究対象とした微小地震観測



これら全ての実験データは、チューリッヒのETHにリアルタイムでデータ転送されており、井戸のバルブなどはETHからでも、外のキャビンからでも開閉のコントロールができる。共同実験の提案があれば、いつでも受け付けるという。

また、スイスには、ベドレット以外にも二か所、廃坑を利用した地下実験設備がある。

第2の実験設備は注水実験からスクーターで1分程（約500m?）行った奥にあり、微小地震観測を行っている。自然地震の観測と共に、注水実験の際の変化を調べている。地震計の他に傾斜計も設置されており、両者とも地下にあるため極めてノイズが少ないのが特徴。

第3の実験はCCUSを対象が対象で、CO2注入とそのモニタリングを行う。こちらは、微小地震の観測よりも更に1分ほど奥にあり、現在は実験準備中。

ETHのBedretto Underground Lab訪問



実験以外のトンネル内観察と展示物



ETHのBedretto Underground Lab訪問

実験以外のトンネル内観察と展示物



褶曲

Pieghe
Folds

933 TM

Diagram illustrating the formation of folds. The top part shows a photograph of a rock face with a horizontal wooden beam for scale. Below it is a geological diagram showing the axial plane (Piano assiale della piega) and fold hinges (Inspessimento della piega). The diagram is labeled with NW and SE directions. Below the photograph is a schematic diagram showing the formation of folds. It includes a neutral surface, extension, and contraction zones. The diagram is labeled with (a), (b), (c), and (d). The text below the diagram reads: "Una piega è un insieme di superfici originariamente planari, come gli strati sedimentari, che vengono piegati o curvati durante una deformazione permanente." and "A fold is a stack of originally planar surfaces, such as sedimentary strata, that are bent or curved during permanent deformation."

Fig. a-d, Structural Geology: Fossen, 2016.

Scale bar: 0 to 4000 meters in the tunnel (TM)

ETH zürich

36

各国の動向等：アブダビ (UAE)

大規模な地域冷房（吸収式冷却）

ビルの冷房はアブダビの消費電力の70%に及ぶ。ADNOCは2兆3200億円をかけ、地熱水を利用した地域冷房施設を建設。2本の地熱井から供給される温水を利用した吸収式冷房で、マスタートールの冷房需要の10%を賄っている。通常の冷房に比べ50%の省エネ効果。

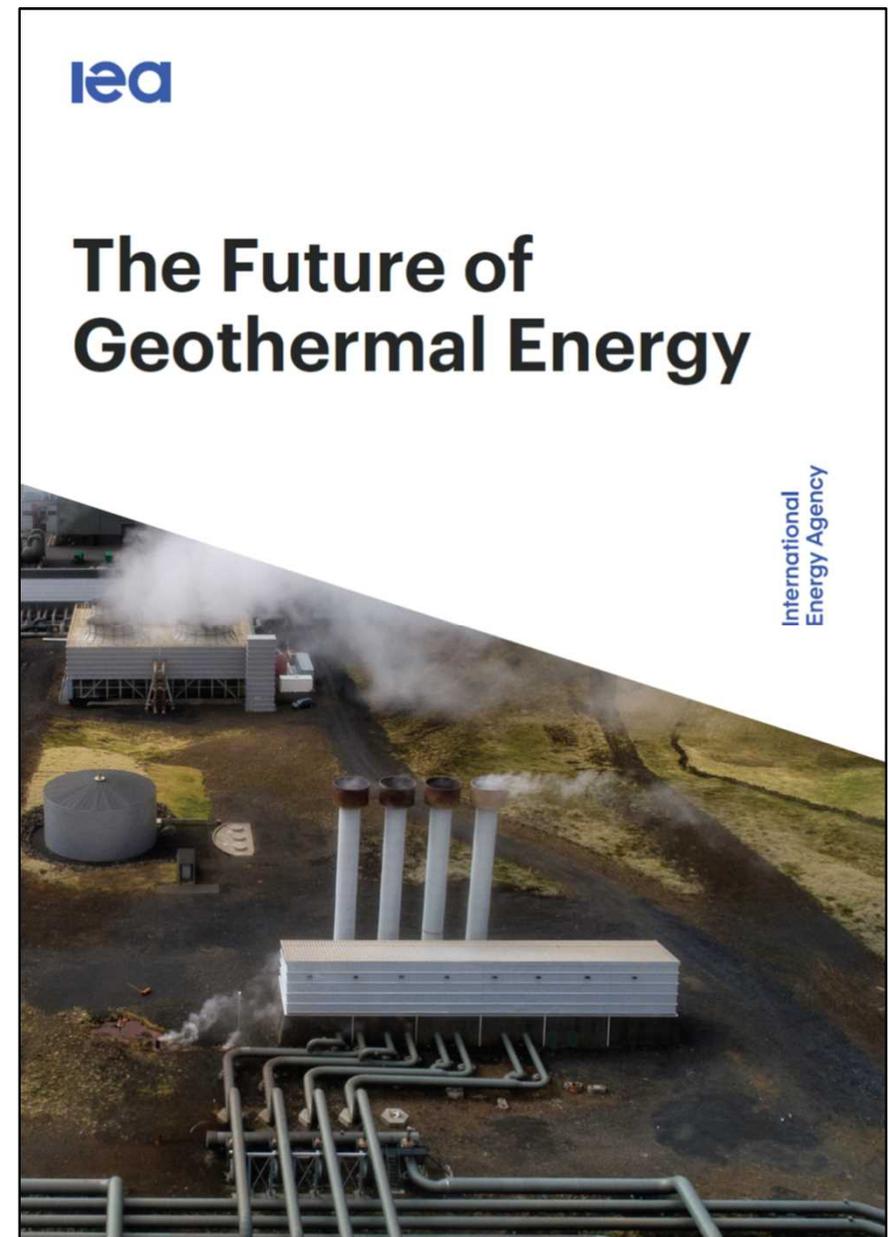
なお、地熱水を使った吸着式冷房は別府市の黒田や旅館にもある（90℃×10t/hの熱水を利用）。



IEA主催の地熱ワークショップと報告書

- パリにあるIEA本部は、2024年10月11日に地熱ワークショップを開催。
- 講演者には、中立的な地熱の専門家は少数で、政府関係者の他、新規参入企業などの発表が多数を占めた。
- IEAは、ワークショップの内容をまとめ現状分析等を追加した報告書 "The Future of Geothermal Energy" が、2024年12月13日（金）に発表。
- 2050年までの世界の電力供給量増加の15%を地熱が占める可能性があるとしている。
- 将来技術に関し、“石油業界の人材や技術の地熱業界への流入が期待される”ことが記されている。

世界的に地熱エネルギー利用への期待が高まるのは望ましいが、適切な技術評価がないまま、政策決定者側が企業の売り込みに踊らされる傾向が懸念される。また石油技術が投入されるだけで地熱の技術課題が解決されるわけでは無い。地熱専門家としては、動向を注視しつつ、必要に応じ各方面でコメントを発信していく必要がある。



各国の動向等：国際エネルギー機関 (IEA)

IEA Renewable Energy Working Party (REWP) 会合

- 年二回開催。毎年春にはパリにあるIEA本部で開催。
- 参加者はIEAの再エネ担当者およびIEA加盟国のエネルギー関係省庁の担当者、REWPに属する各TCP代表など。
- 議題は、IEAの活動報告、IEA加盟国からの年次報告、各TCPの年次報告や中間報告（各TCPには期限がある）、延長申請など。
- 近年はオンライン併用で開催させていたため、これまで現地参加経験が無かったが、今年3～4月に初めて現地参加した。



米国からは通常、DOEの再エネ担当者が出席しており、各報告に対して活発な質問を投げかけているが（地熱に関しても毎回鋭い質問あり）、今回、トランプ政権下で再エネの政策活動が止められ、DOEではなく外務省アタシェが出席。

今回のメインの議題“2025～2028年REWP戦略”について

IEA事務局より、メンバー各国で「2025～2028年REWP戦略」のドラフトを確認中であり、終了し次第とりまとめて今年6月のCERT（IEA内REWPの上部組織）会議で承認を得る予定との説明があった。すると米国から「トランプ政権は再エネを推進しないため、上記の戦略を確認できない。CERTへの提出を半年延期してほしい。」との意見があった。半年伸ばすことへの積極的な反対意見もなかったため、CERTに確認の上、半年伸ばすことになった。

＜IEA担当者の私信では、半年延期しても確認できる見込みがある訳ではなく困惑しているとのこと＞

各国の動向等：国際エネルギー機関 (IEA)

TCP coordination groups

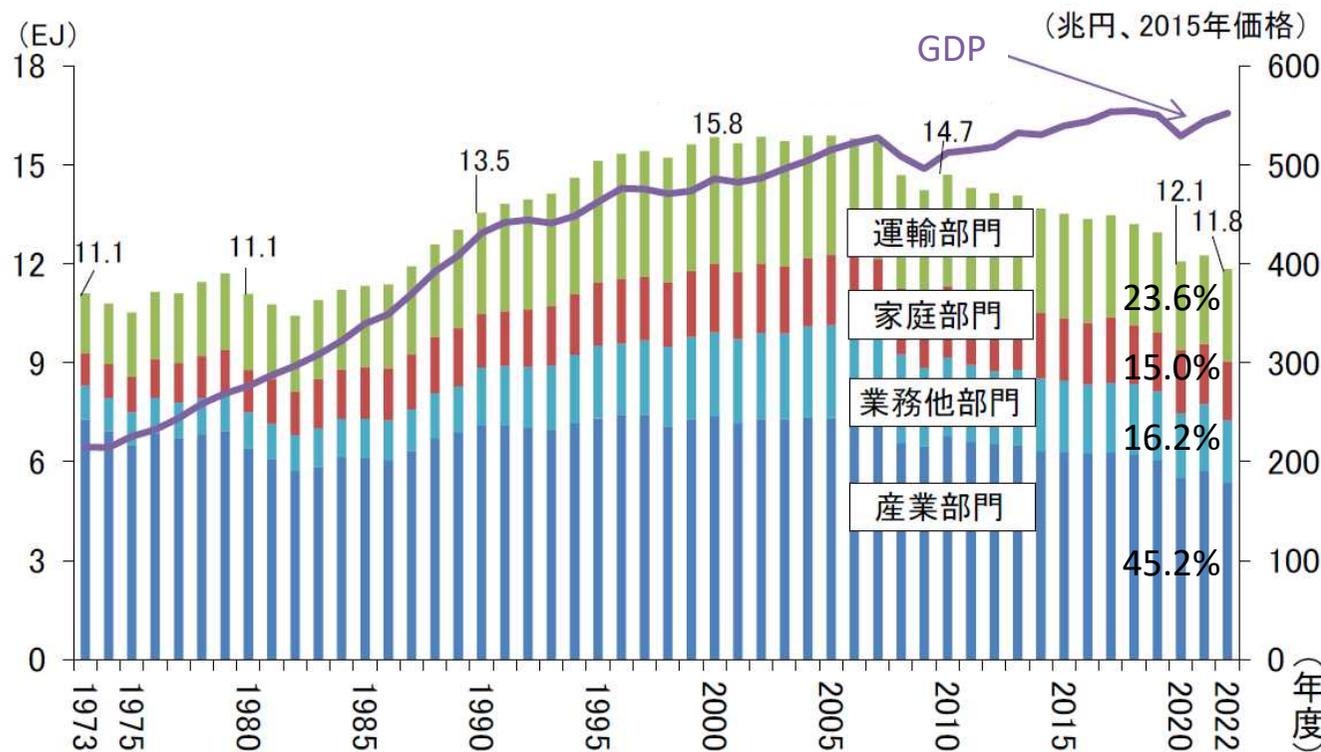
- IEAは、2023年10月のUniversal TCP Meeting以降、TCP間のコラボを推奨している。これを受けて、TCPやIEA担当者の提案により、2024年に下記の6つのグループが誕生した。地熱TCPは、このうち**Carbon Management**、**Critical Minerals**、**Heat Networks**に参加表明。**Heat Networks**が最も活発で報告書をまとめている。他の二つはWSへの案内が届く程度。

- **Carbon Management*** : どのような側面に関心が集まっているか現状をさぐり、知識のギャップをメンバー間で探る。
- **Critical Minerals*** : レアメタルの需要供給技術にかかる情報交換を行い、TCP間のコラボの可能性をさぐる。
- **Energy System Flexibility** : エネルギーシステムの柔軟性にかかるTCP間のコラボを強化し、政策決定者に対しこの分野への理解を深めることに努める。
- **Heat Networks*** : 再生可能熱または排熱とされた熱の利用技術をフォーカスし、熱ネットワークにより改善される熱資源ポテンシャル、ビジネスケースを検討する。
- **Heat Pump** : 建物、産業、地域暖房におけるヒートポンプ技術の潮流を調べ、TCP間のコラボによるイノベーションギャップの低減可能性をさぐる。
- **Hydrogen** : IEAのTCPにおける、水素に関わるあらゆる活動をまとめる。

Energy System Flexibilityへの参加

Energy System Flexibility coordination groupは、

日本のエネルギー需要に占める熱の割合は？

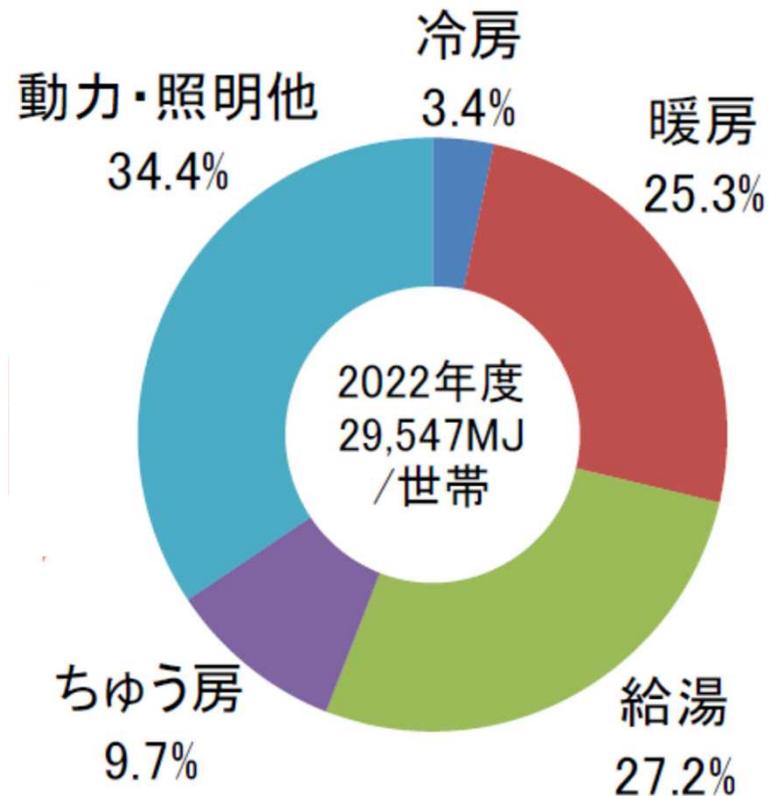


資源エネルギー庁の「エネルギー白書2024」によれば、日本のエネルギー需要に占める熱の割合は、**家庭部門の約63%**、**業務他部門の約47%**。

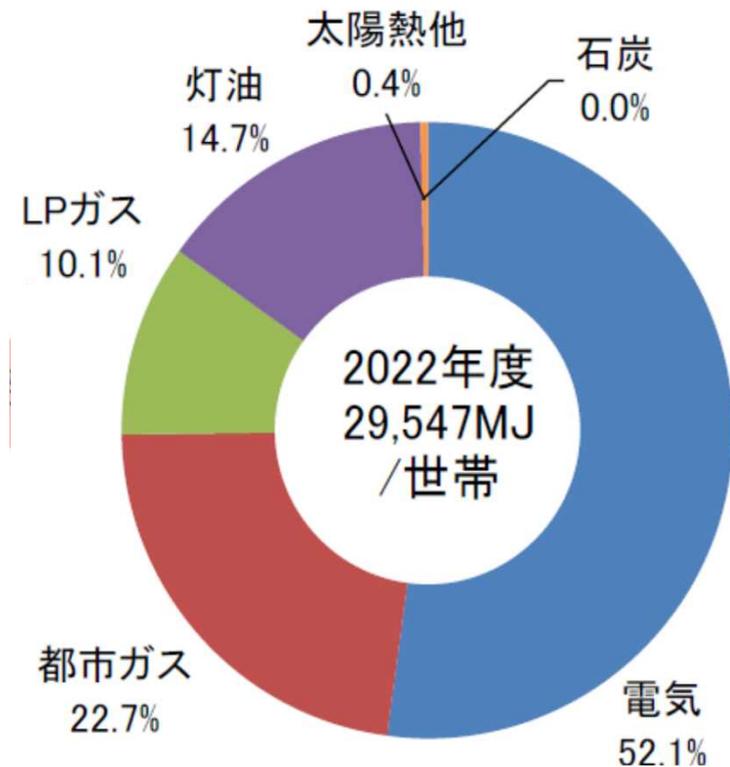
つまり、家庭やオフィスで必要となるエネルギーの半分は熱！

【第211-1-1】最終エネルギー消費（2022年度）＜エネルギー白書2024より＞

日本の家庭でのエネルギー利用の内訳は？



【第212-2-5】世帯当たりのエネルギー消費原単位と用途別エネルギー消費
<エネルギー白書2024より>

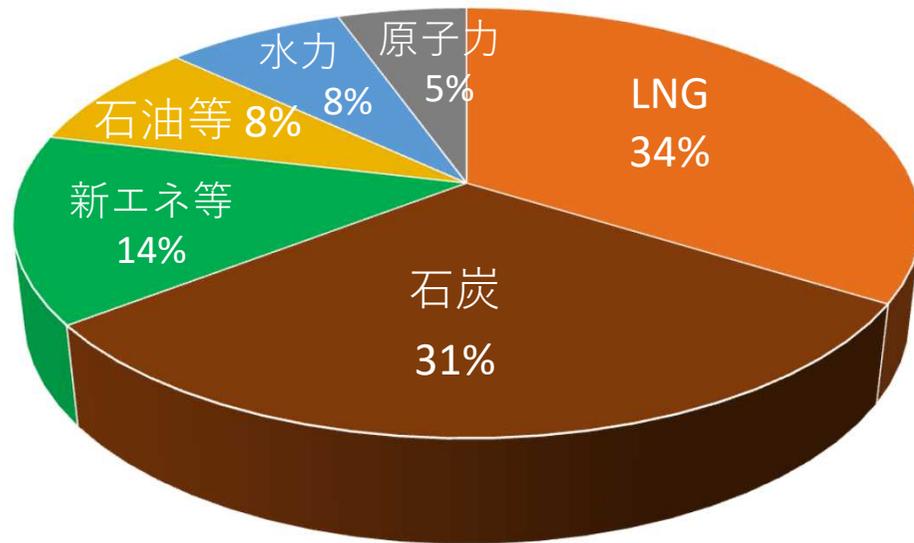


【第212-2-6】家庭部門のエネルギー消費（エネルギー源別）
<エネルギー白書2024より>

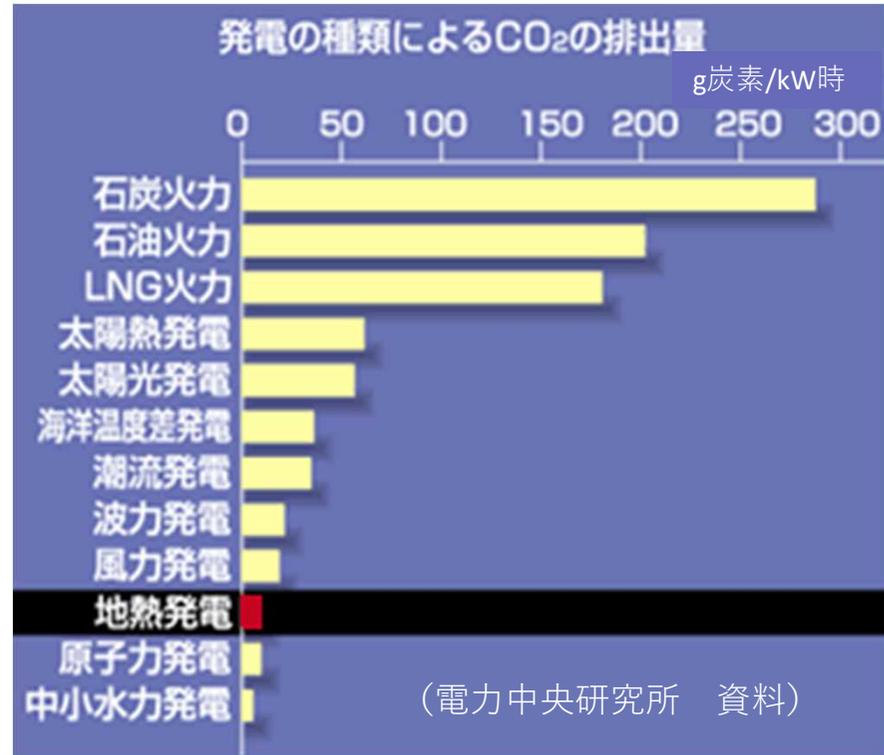
- 冷房・暖房・給湯と、家庭に必要なエネルギーの55%は室温±数10°C程度の熱需要であるのに、全国平均で52%が電力、残る48%はガス・灯油など「火力」として供給されている。
- たかがその程度の熱を得るために1000°C以上の「火力」を使う必要は無く、エネルギー形態として洗練された「電力」を使う必要はない。地熱や太陽熱などの再エネ熱で充分では？

電力はクリーン？

2022年度の日本の電源構成



<エネルギー白書2024より>



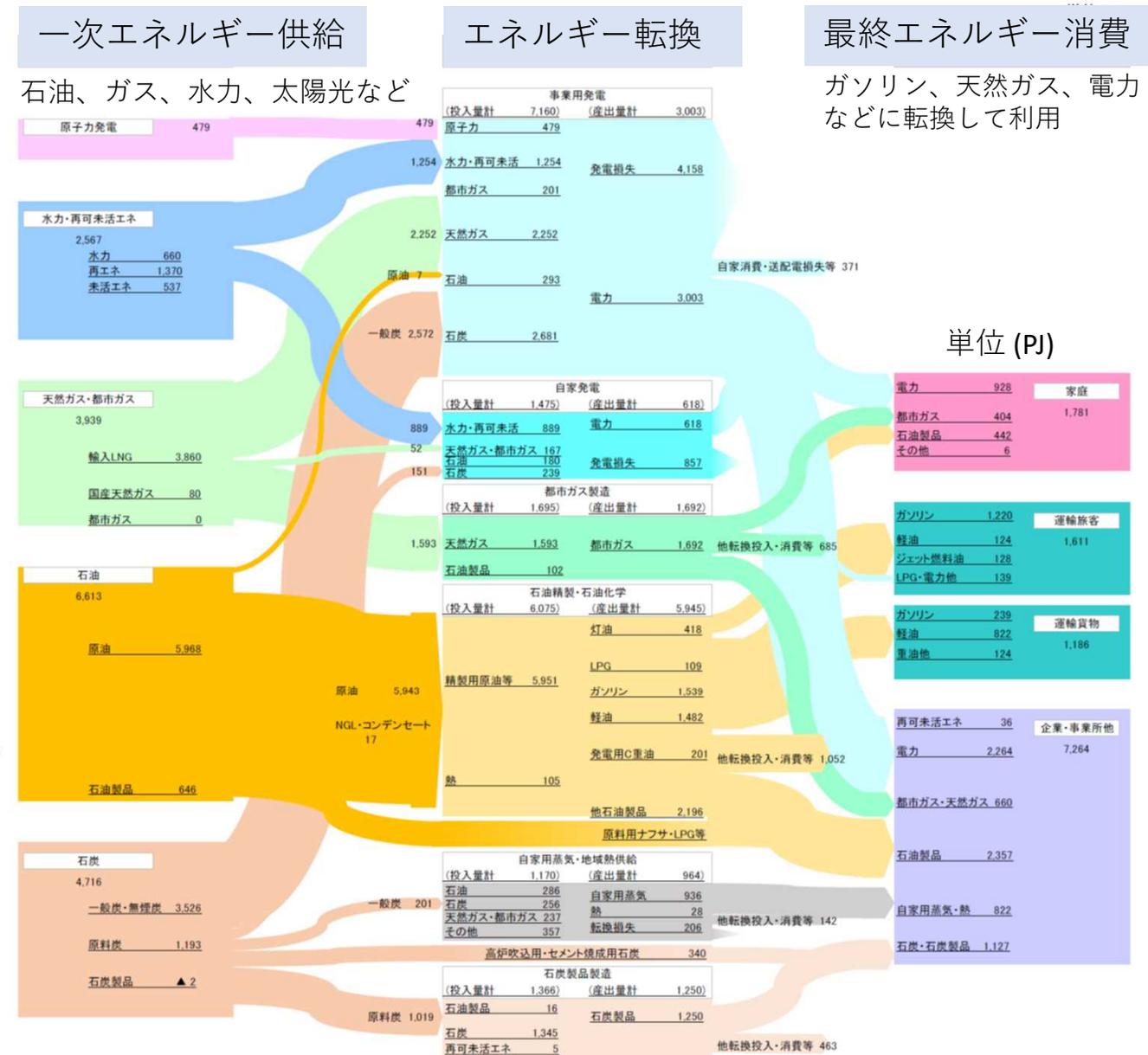
日本の電気（電力）は、LNG火力と石炭火力に頼っており、クリーンとは言えない。再生可能エネルギーによる発電を増やす努力が行われているが、すぐに転換できるわけではない。

それなら、電力消費を減らして、LNG火力と石炭火力を減らすべきでは？

電力は無駄がない？ No！

- 一次エネルギー供給100に対し、最終エネルギー消費として使えるのは約65。約35%が損失。なぜ？
- それは、発電および送電の段階でエネルギーが消失するため。
- 火力発電、原子力発電、地熱発電などの蒸気発電では、蒸気の持つ**熱エネルギー**に対する**電気エネルギー**への変換効率は高々40%。太陽光発電では、光エネルギーに対する発電効率は10~14%。また、送電による電力損失も大きい。
- そのようにして得た**貴重な電力**を、電力でしか作動しないパソコンやTVに使うのは結構だが、最終的に**熱**として使うのは、もったいない！
- 熱→電力→熱をやめて、熱→熱で100%のエネルギーを使おう！

【第211-1-3】日本のエネルギーバランス・フロー概要(2022年度)



これを実現しているのが、ヨーロッパ諸国など、地熱を熱として利用している国々。

まとめ

脱炭素の動きの中、**世界の地熱発電は着実に増加**している。バイナリー発電によって、高温の地熱資源に恵まれない非火山国でも地熱発電が可能となり、地熱発電を行う国が増加している。

また**直接利用は、世界的に地熱発電を上回る勢いで増加**している。直接利用は脱炭素効果が地熱発電以上に大きいこと、高温の地熱資源を有しない国でも利用できることから、中国と欧州を中心に利用が急増した。

地域暖房を主体とした熱電併給を行っているドイツ、パリ盆地などで地域熱供給を行っているフランス、鉱山水地熱を利用しているイギリス、エネルギー貯蔵と熱ネットワークを構築するオランダなど、吸収式冷却で地域冷房を行うアブダビなど、各地で特徴的な地熱利用が行われている。

米国DOEは、2024年3月に**次世代地熱に関する報告書**を出し、次世代地熱が将来の再エネ戦略の中で重要となることを強調しつつ、法制面で必要な措置等を示している。また、IEAは2024年12月に**地熱エネルギーの将来**に関する報告書を出し、2050年までの予測等を行っている。

このように、世界の潮流として、地熱の重要度が増していおり、そのための技術開発も行われている。