

2024年9月27日
京都大学技術職員研修(第49回)

新方式地熱発電の実現に向けて **GEEP** Geothermal Power Generation

京都大学大学院工学研究科

横峯健彦



地熱帯

地熱帯=熱源+貯留層+地熱流体

- **熱源**
 - 比較的浅部 (5～10 km) まで到達した非常に高温のマグマ性貫入岩 (600℃以上)
- **地熱貯留層**
 - 高温の透水性の岩石部分
 - 多くの場合、不透水性の帽岩 (キャップロック) に覆われて、地表の涵養域と連結
- **地熱流体 (水)**
 - その起源の大部分は天水 (雨水)
 - 液体 (熱水) あるいは気体 (水蒸気)
 - 水はいろいろな化学物質とともに、CO₂ や H₂S のようなガスも運ぶ

地熱発電事始め

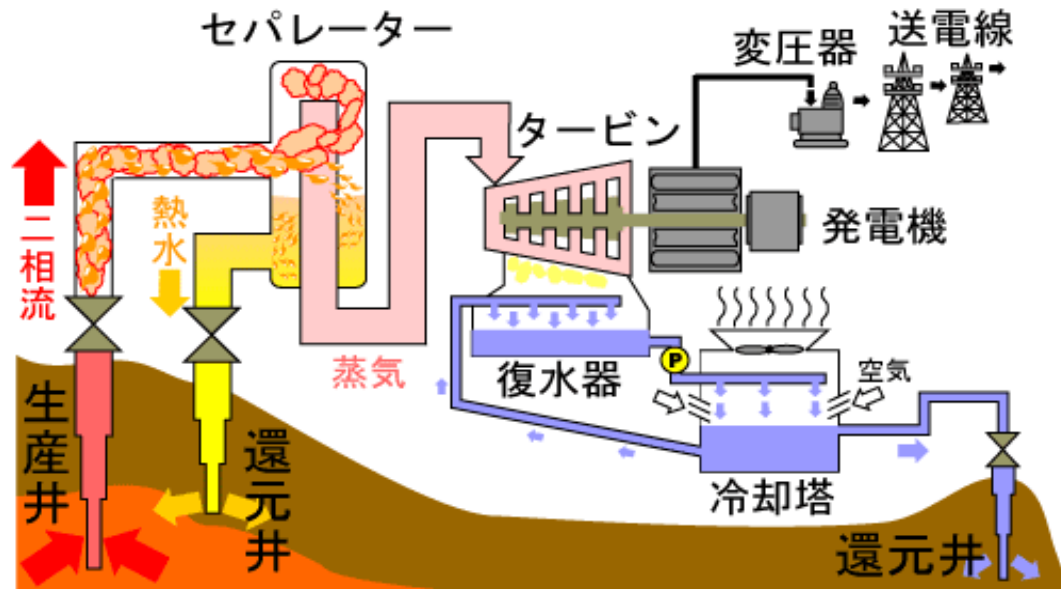
- 1904年 世界初の地熱発電 イタリア（5個の電灯）
- 1913年 世界初の地熱発電所 イタリア
ラルデレロ地熱発電所（250kW）
- 1925年 日本初の地熱発電 大分県別府（1.12kW）
- 1966年 日本初の地熱発電所 岩手県八幡平市
松川発電所（9,500kW）



一般的な地熱発電のしくみ

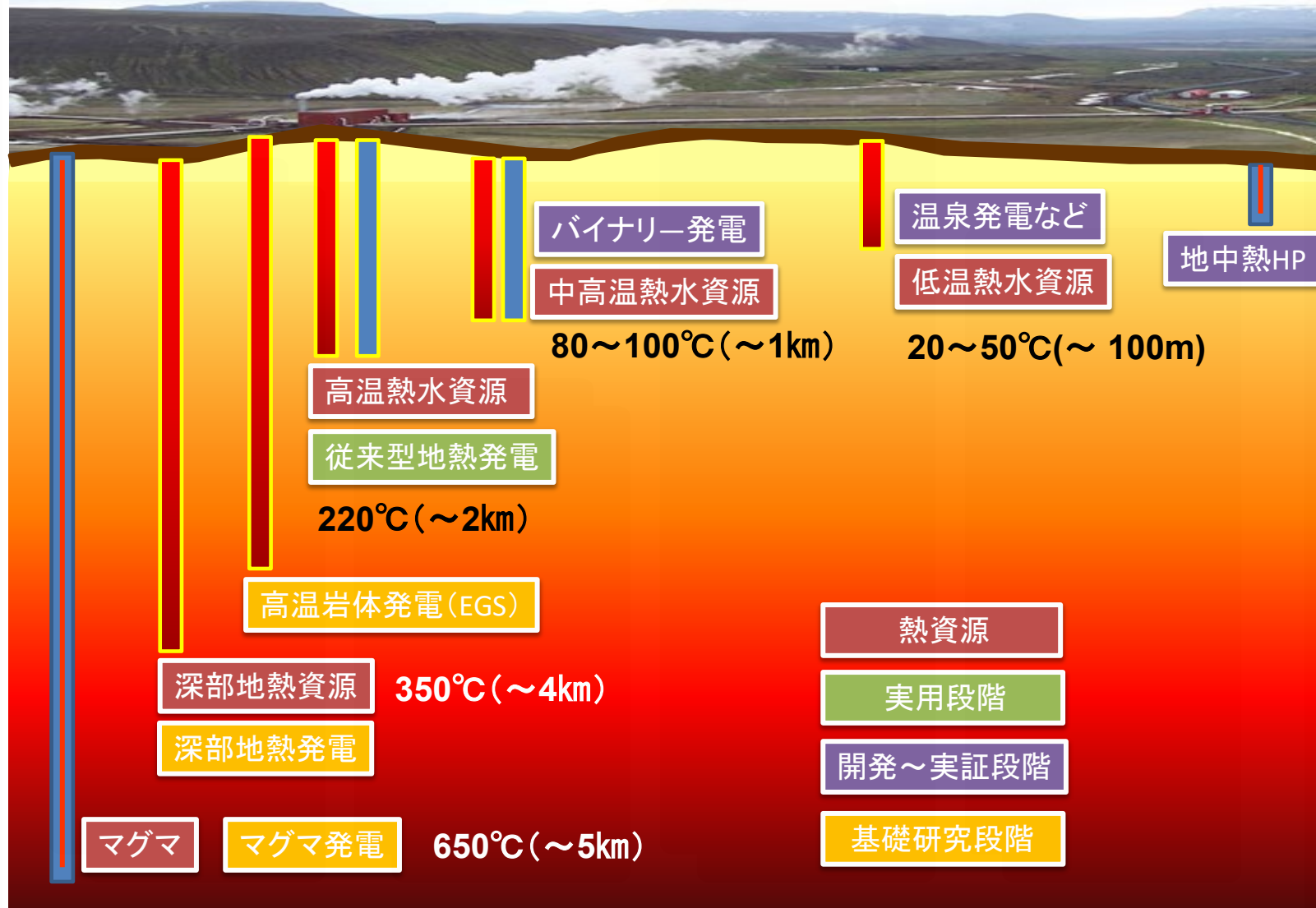
～蒸気フラッシュ型地熱発電～

- 地熱地帯をボーリング(生産井)し、地熱貯留層から出てきた熱水の中から、蒸気だけを分離して発電する
- 生産井から汲み上げられた熱水は、還元井により全量が地下に戻る
- 生産井・還元井の寿命は平均数年なので、補充井の掘削が必要



発電所名	所在地		発電		蒸気・熱水供給	設備容量(kW)	発電方式	運転開始日	FIT
森発電所	北海道	森町	北海道電力(株)			25,000	DF	1982.11.26	
松川地熱発電所	岩手県	八幡平市	東北自然エネルギー(株)			23,500	DS	1966.10.8	
松尾八幡平地地熱発電所			岩手地熱(株)			7,499	SF	2019.1.29	○
葛根田地熱発電所		雫石町	東北電力(株)	東北自然エネルギー(株)	30,000	SF	1996.3.1		
大沼地熱発電所		秋田県	鹿角市	三菱マテリアル(株)		10,000	SF	1974.6.17	
澄川地熱発電所	東北電力(株)			三菱マテリアル(株)	50,000	SF	1995.3.2		
上の岱地熱発電所	湯沢市		東北電力(株)	東北自然エネルギー(株)	28,800	SF	1994.3.4		
山葵沢地熱発電所			湯沢地熱(株)		46,199	DF	2019.5.20	○	
鬼首地熱発電所	宮城県	大崎市	電源開発(株)			14,900	SF	2023.4.2	○
柳津西山地熱発電所	福島県	柳津町	東北電力(株)	奥会津地熱(株)	30,000	SF	1995.5.25		
奥飛騨温泉郷中尾地熱発電所	岐阜県	高山市	中尾地熱発電(株)			1,998	DF	2022.12.1	○
わいた地熱発電所	熊本県	小国町	(同)わいた会			1,995	SF	2015.6.16	○
南阿蘇湯の谷地熱発電所		南阿蘇村	(株)南阿蘇湯の谷地熱			2,168	SF	2023.3.3	○
杉乃井地熱発電所	大分県	別府市	(株)杉乃井ホテル			1,900	SF	2006.4.1	
滝上発電所		九重町	九州電力(株)	出光大分地熱(株)	27,500	SF	1996.11.1		
滝上バイナリー発電所			出光大分地熱(株)		5,050	B	2017.3.1	○	
大岳発電所			九州電力(株)		13,700	DF	2020.10.5		
八丁原発電所					55,000	DF	1977.6.24		
			九州電力(株)		55,000	DF	1990.6.22		
					2,000	B	2006.4.1		
菅原バイナリー発電所			九電みらいエナジー(株)	九重町	5,000	B	2015.6.29	○	
大霧発電所	鹿児島県	霧島市	九州電力(株)	日鉄鉱業(株)	30,000	SF	1996.3.1		
山川発電所			九州電力(株)		30,000	SF	1995.3.1		
山川バイナリー発電所		指宿市	九電みらいエナジー(株)	九州電力(株)	4,990	B	2018.2.23	○	
メディポリス指宿発電所			(株)メディポリスエナジー		1,580	B	2015.2.18		

種々の地熱発電



地熱発電のイイところ

純国産 エネルギー

- 日本のエネルギー自給率はたった8.4%（2016年）
- 豊富な資源量の再生可能エネルギー（のはず）
- 枯渇の心配がない（はず）

安定電源

- 地下深くでは昼夜、天候、季節は関係ない
- 年間設備利用率 地熱72%、風力20%、太陽光12%

少ないCO₂ 排出量

- 石炭火力の1/100、太陽光の1/3、風力の1/2
- 水力と同じくらい
- 環境にやさしい

地熱発電のマズイところ

- 開発リスク(危険)が大きい
 - 地下のことは掘ってみないとわからない
 - 温度は高くても蒸気が出なけりゃ使えない(大体五分五分)
- 地熱資源の8割以上が国立公園内にあり、開発できない
- 温泉事業者の理解が得られない
- 発電開始まで時間がかかる
 - 10年～15年(調査-地元と折衝-環境影響-建設)
 - 原子力20～30年、火力10年、風力5年、小水力3年、メガソーラ1年

20年前から同じ言い訳

..... 本当にそれだけ？

何が地熱開発を妨げているのか

～従来型地熱発電に不可避の問題点1～

＜プラントに関する問題点＞

- ▶ 地熱流体（蒸気／熱水）は、火力発電プラントに比べると格段に高い濃度の不純物や不凝縮ガスを含む
 - ▶ 腐食損傷、スケール析出による配管、タービン閉塞、損傷
 - ▶ 耐腐食特殊加工配管、頻繁なメンテナンスと機器の短寿命化等によりコストがかさむ
- ▶ 地熱流体中の不純物、不凝縮ガスをタービン前段階で処理するため、処理液（硫酸系インヒビター）を大量に注入する必要がある
 - ▶ 地熱流体の大流量化に制限
 - ▶ 処理液のコストが大きい



引用：八丁原発電所

何が地熱開発を妨げているのか

～従来型地熱発電に不可避の問題点2～

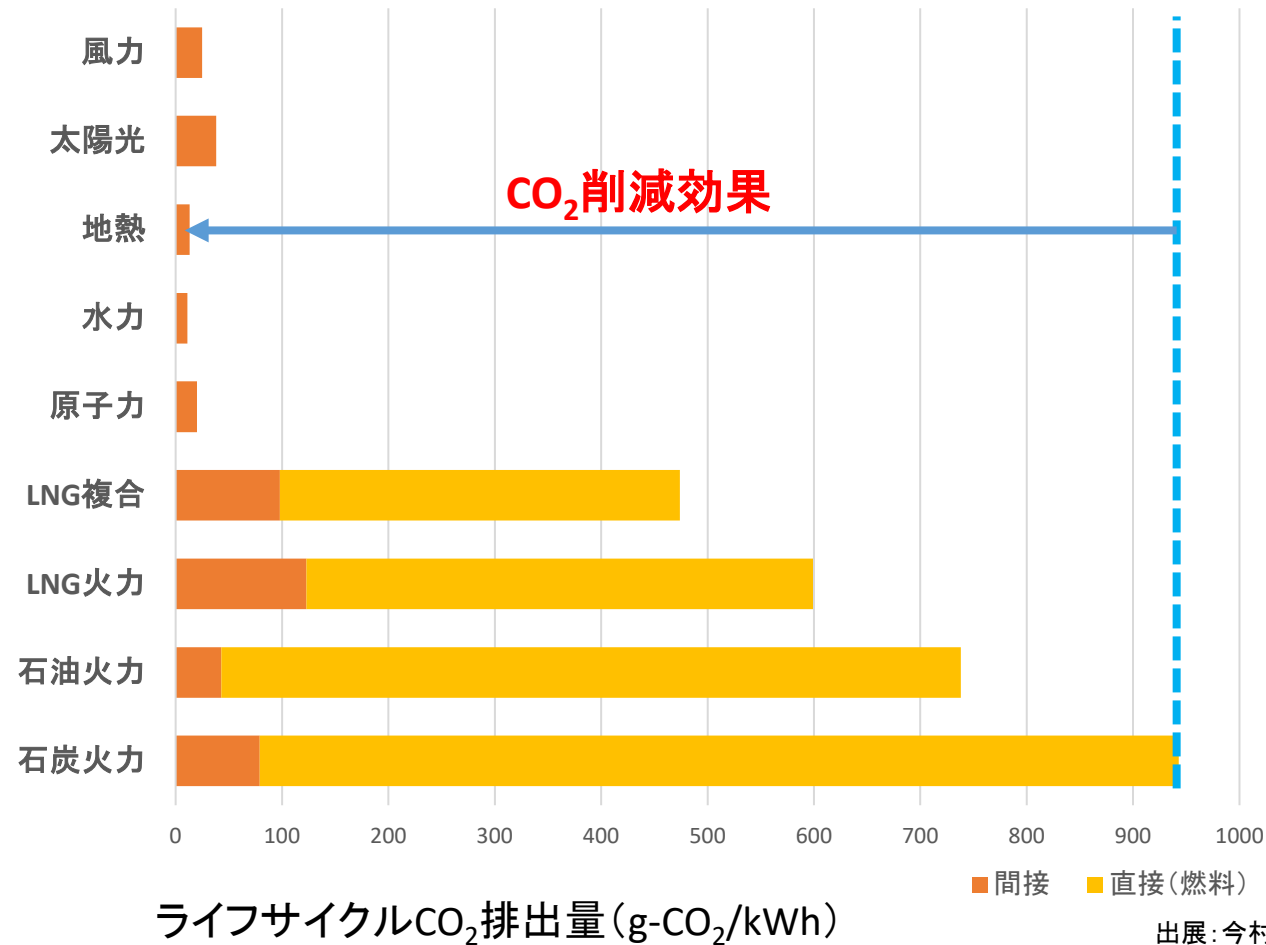
＜環境負荷に関する問題点＞

- ▶ 地熱流体中の硫化水素の環境放出（大気）
- ▶ 環境より温度の高い還元水の地中への大量放出（動植物系）
- ▶ 薬剤（インヒビター）混在の還元水の地中への大量放出（水系、土壌）
- ▶ 水銀、ヒ素、ボロン、塩化ナトリウム等を含有
- ▶ 水蒸気爆発
- ▶ 補充坑に環境影響評価不要

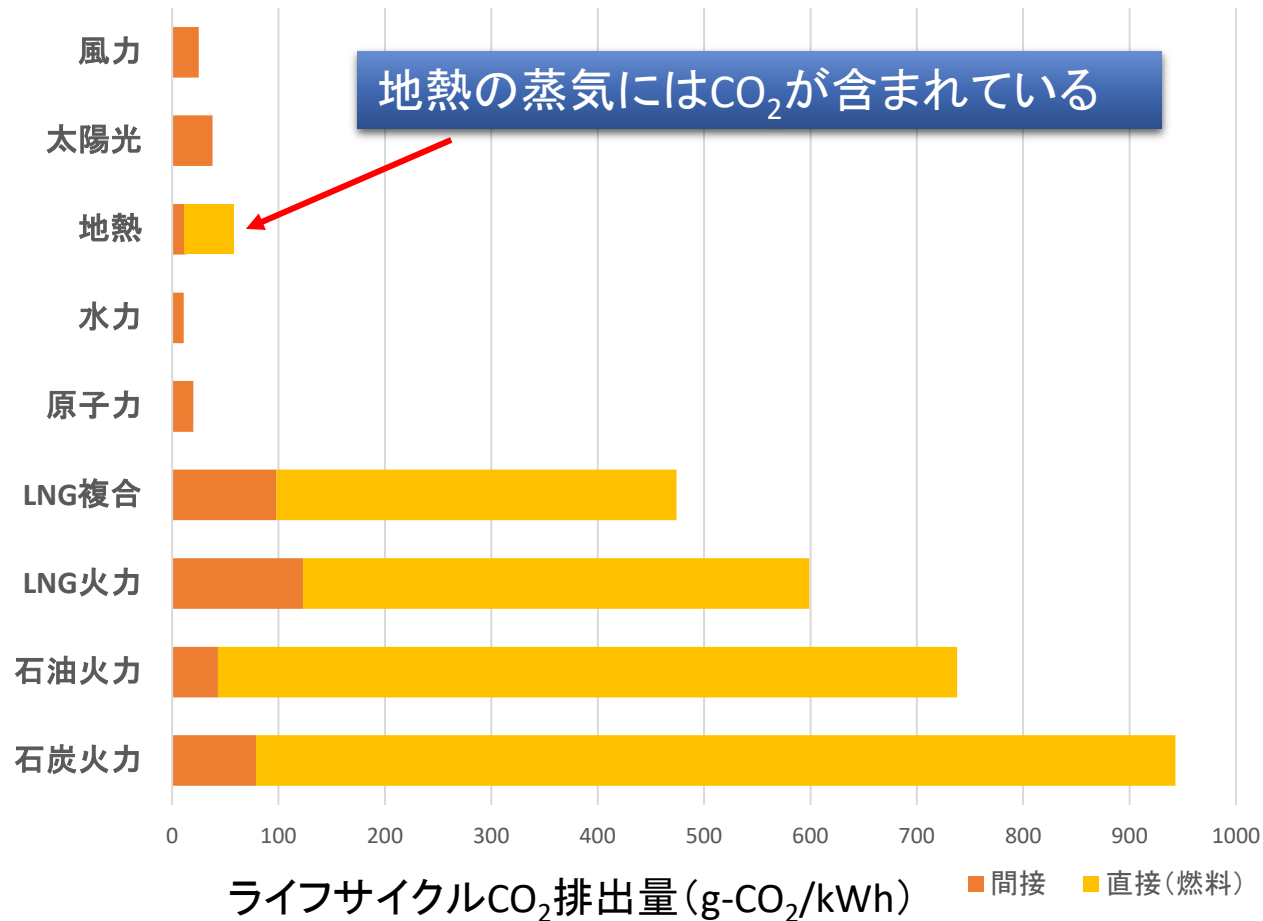
各発電のCO₂排出量

ライフサイクルCO₂・・・

単位発電量当たり発電所を作って寿命が来たら解体するまでに排出するCO₂の量
(燃料の燃焼、燃料の採掘、廃棄物処理も含む)



”地熱発電はあんまりCO₂を出さない” のはずだけど・・・



何が導入意欲妨げるのか

～従来型地熱発電に不可避の問題点3～

<導入に関する問題点>

- 経済性・開発リスク
 - 運転開始後に補充井の掘削等が必要(2.5年で1本)
 - 調査・開発段階で多数の坑井掘削が必要(初期投資の1/4)
 - 開発コスト・リスクの低減化技術の開発費用
- 系統連系リスク
 - リードタイムが短くて先行する電源による連携容量の占有
 - 変電所等設置に追加費用

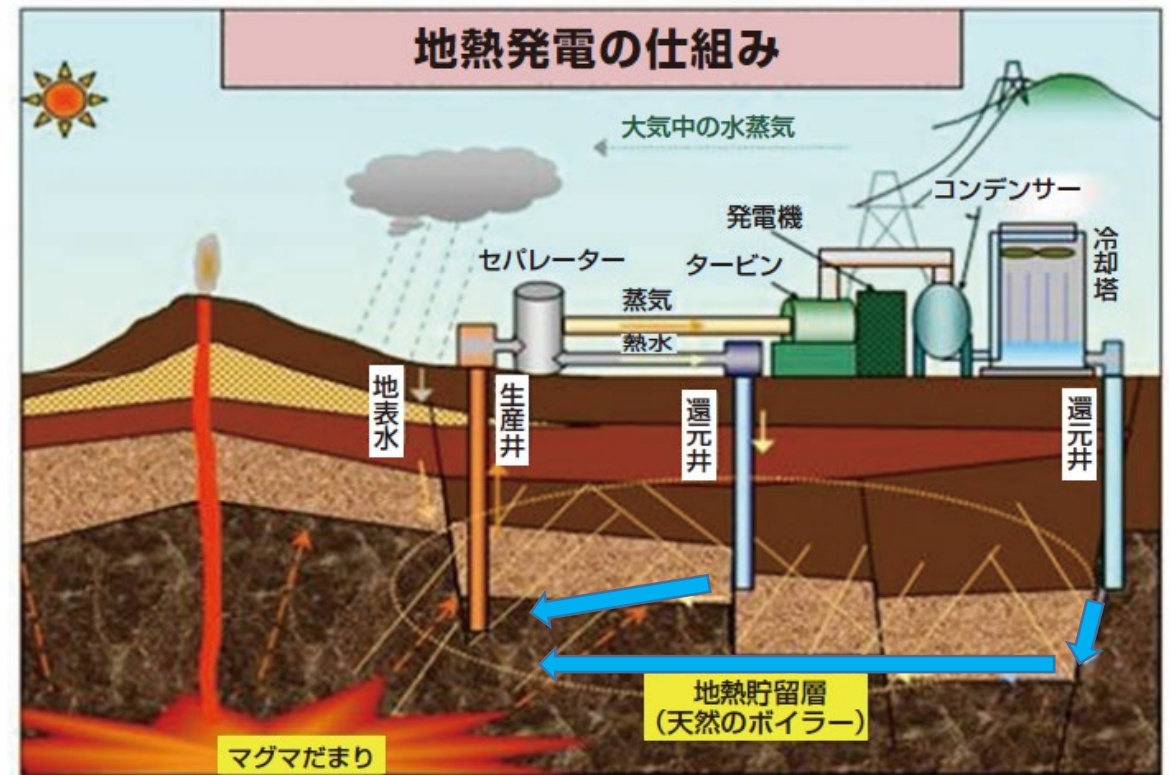
地熱発電は再生可能エネルギーなのか？

再生可能エネルギーとは、1度使うとなくなってしまう化石燃料に対する用語

- 地熱発電では、汲み上げた熱水・蒸気(地熱流体)を発電後、すべて地中に戻すので、再生可能エネルギー
- 戻す水は低温 → 熱水まで回復しなければならない
- 本当に地熱貯留層に戻ったのか、熱水に回復したのは、確認することができない
 - バイオマスと違うところ
- 地熱流体の回復の予測(シミュレーション)が難しい

→ 発電出力の初めから頭に入れておかなければいけないはずなのに

八丁原→7割運転



出所：日本地熱開発企業協議会、2011 より

従来型地熱発電ではどうしてもない問題点の 解決には

ほぼ全ての問題点
は、“地熱流体”を
用いることに起因

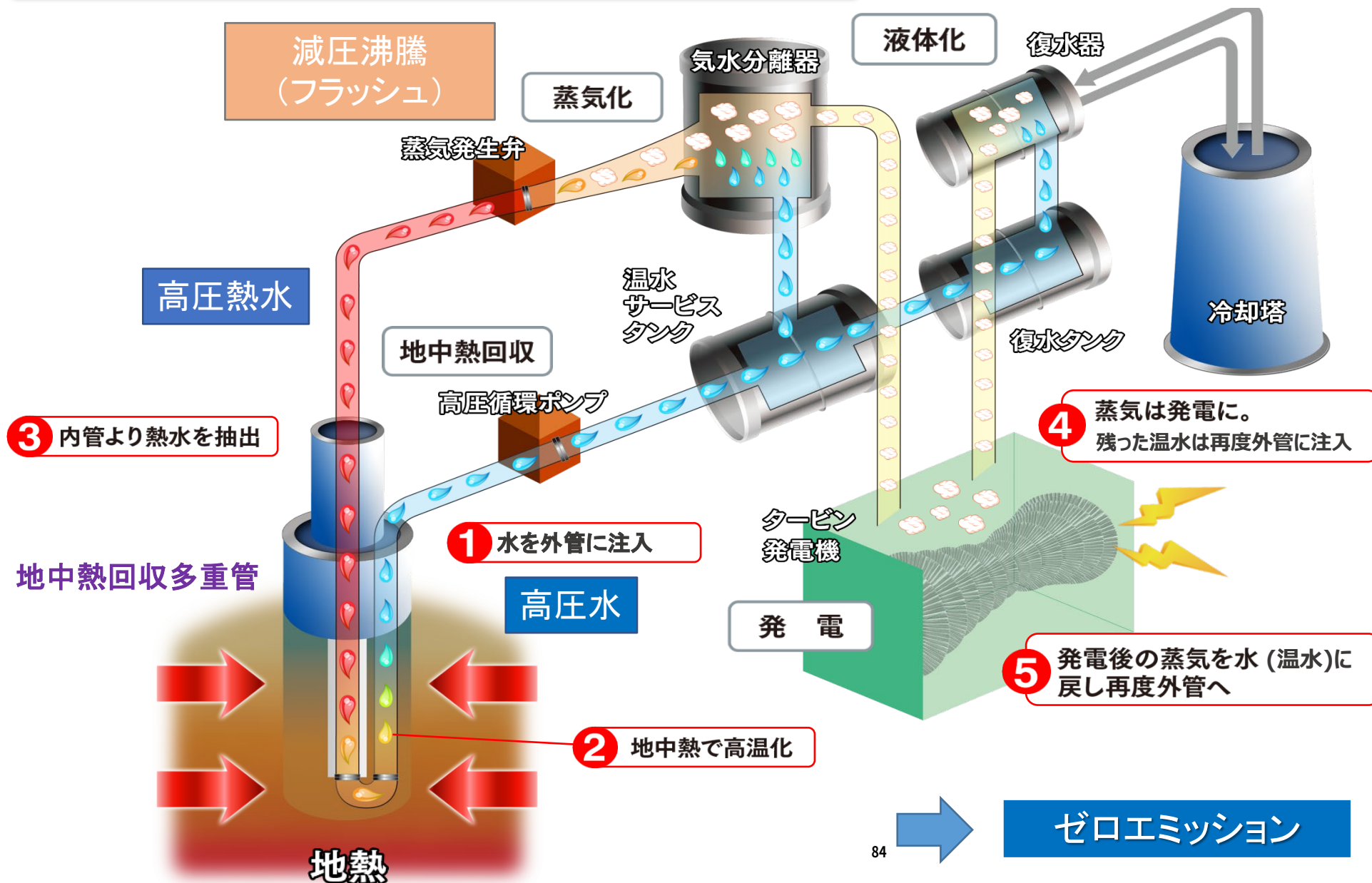
地熱流体を用いない
地熱発電が構成でき
ればば問題は大幅
回避できる？

地“熱”のみを利用し、
かつ、クローズドシス
テムにすることで“ゼ
ロエミッション”の地
熱発電の可能性

地熱流体: 高温で時に塩分を含み、鉱物に
富んだ液体もしくは蒸気

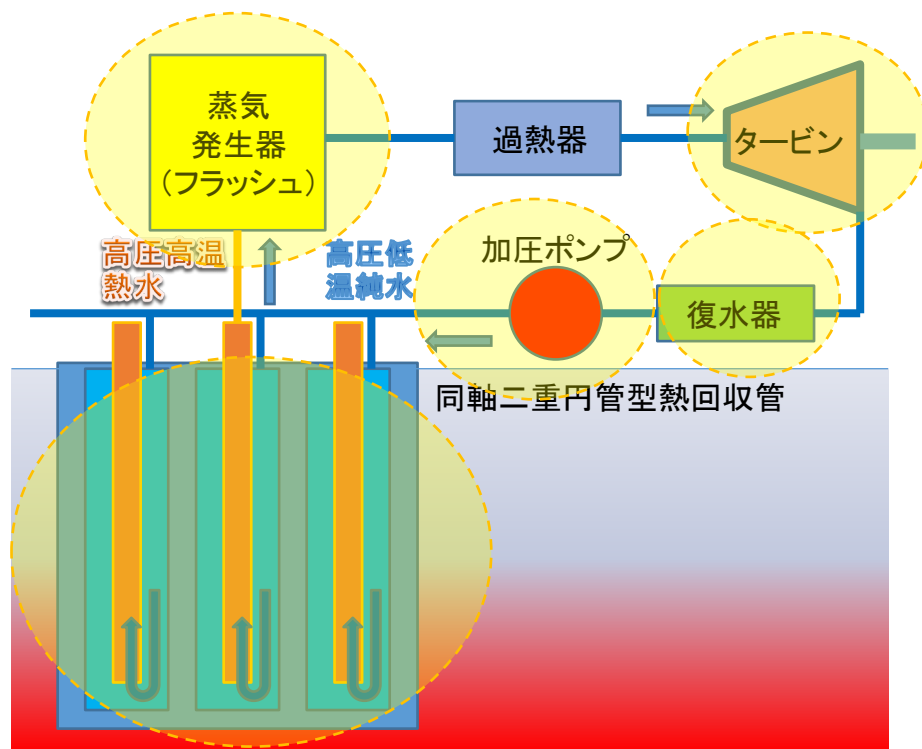
加圧水型地熱発電(GEEP)

Geothermal Energy Extraction system by Pressurized water



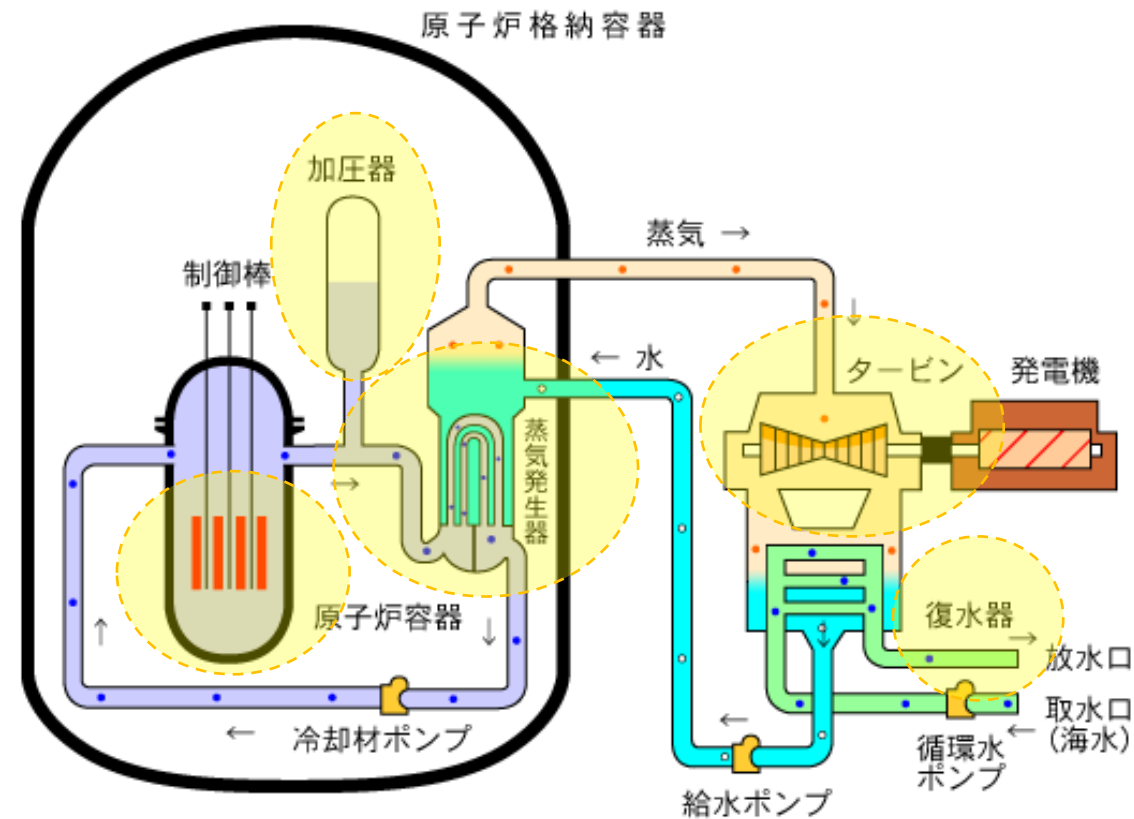
- ① 地上より高圧純水を地下坑に設置した地中熱回収多重管に導入
- ② 熱回収管外管を地熱により加熱されながら下降
- ③ 最下部で熱回収管内管を上昇。高圧熱水のまま地上へ戻る
- ④ 蒸気発生器で減圧沸騰後、蒸気として蒸気タービンへ導入、発電
- ⑤ 発電後は再び地下熱交換器へ

加圧水型地熱発電と加圧水型原子炉



加圧水型地熱発電

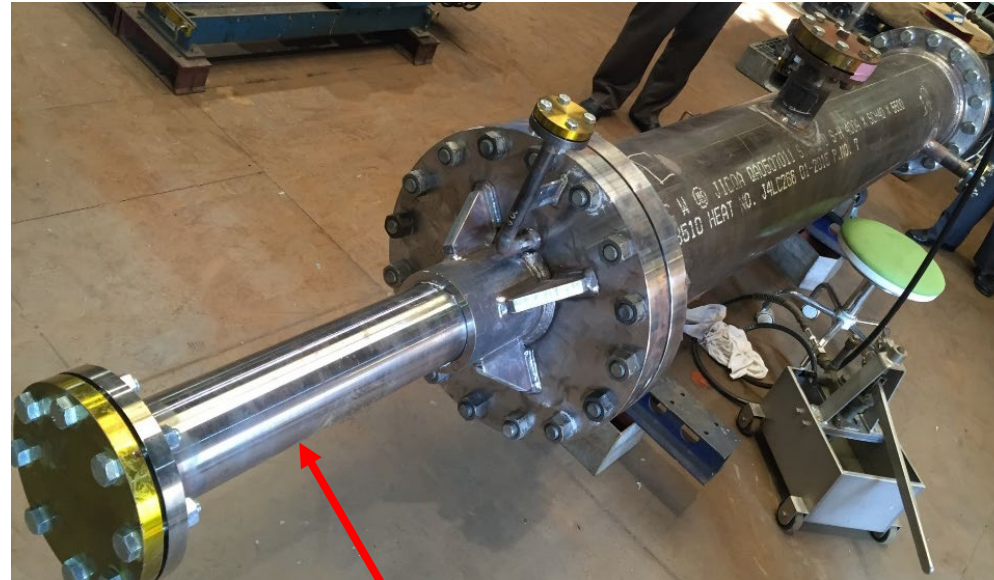
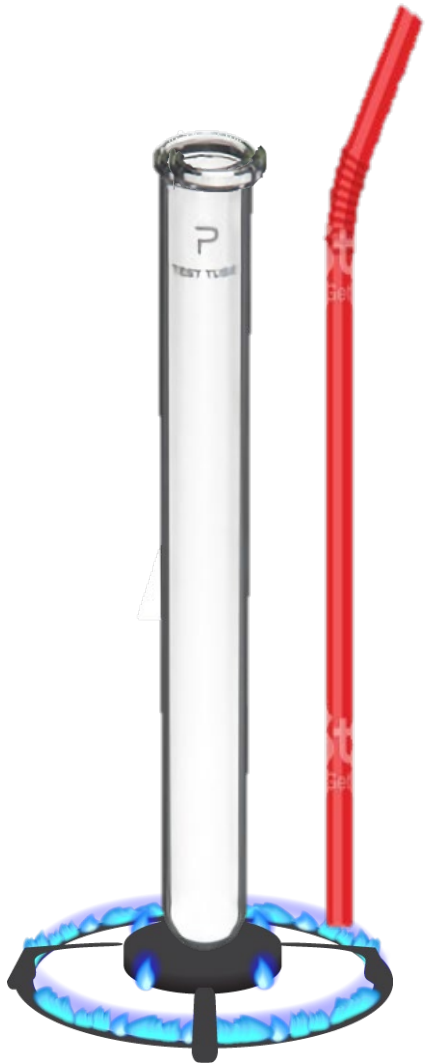
(**G**eothermal **E**nergy **E**xtraction system by **P**ressurized water, **GEEP**)



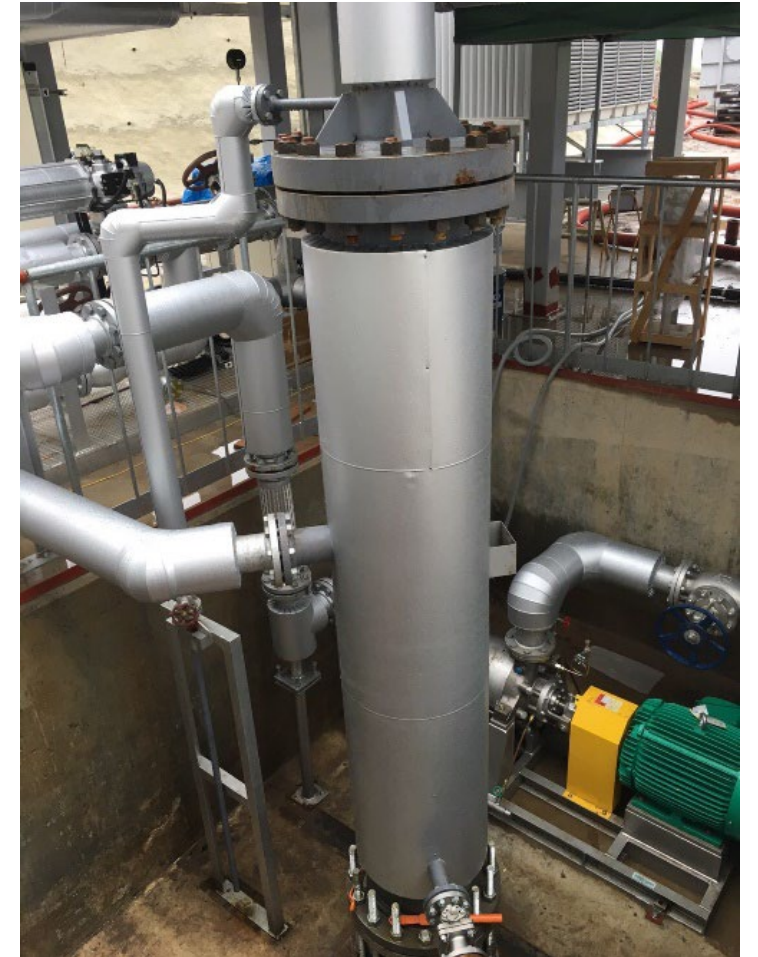
加圧水型原子炉

(**P**ressurized **W**ater **R**eactor, **PWR**)

同軸二重管熱回収管



地下最下部まで回収した熱を地上まで
輸送するために、内管は**高断熱性**が必要



加圧水型地熱発電によって産み出す優位性

- ◆モジュール化可能 **導入加速**
 - 大規模発電・分散電力いずれにも対応
- ◆スケール、腐食問題回避 **コスト(大幅)**
 - メンテナンス軽減・補充抗不要、通常配管・機器使用
- ◆環境影響(汚染、枯渇、変質)問題を劇的に緩和 **環境負荷** **導入加速**
- ◆加圧水型 **安全性** **コスト**
 - 二相流流動不安定性を排除、ポンプ動力低減、熱効率改善
- ◆既設の地熱発電施設の再利用・再生可能 **コスト(大幅)** **導入加速**
 - 休坑井・未使用坑井の利用(熱源としてのみ使用)・発電施設は併用
- ◆還元井掘削が不要 **コスト** **環境負荷**
- ◆国民が理解しやすい **導入加速**
 - 温泉水は使わない、化学物質は出さない、日本国が作るエネルギー
- ◆EGSへの拡張が容易
- ◆温泉法適用除外 **導入加速**



民間地熱第一案通過環評 宜蘭利澤將募百億資金

◎ 2017年04月19日 上稿編輯：陳文姿



本報2017年4月19日台北訊，陳文姿報導

歷經2年審查，台灣第一個民間開發的地熱發電廠「利澤地熱電廠」今（19）日通過環評。位於宜蘭縣五結鄉的利澤地熱電廠總裝置容量101MW，共11口地熱井，深度6公里，預計2025年完工後可提供每年8億度電。

「利澤地熱電廠」這是國內首次深層地熱開發，總經費100億。負責籌畫的蘭陽地熱資源公司董事長高成炎表示，將向民間募資，也會向政府綠色金融等單位開始談合作。希望今年就完成第一口試驗井，二年內先募到10億元。他說，利澤地熱的開發是現有技術的組合，並不擔心無法完成。



【專文】日本CEEG井取熱成功 台日印尼地熱發電可大發展

文 / 高成炎（台大資訊所教授、蘭陽地熱資源公司董事長） 2016-11-22 13:35



地熱能源。圖 / 取材自 pixabay (CC0 Public Domain)

在日本京都大學的網站上面，我們看到11月10日發布的一個消息 ([Successful demonstration of the world's first New Geothermal Power System carried out in Kokonoe, Oita Prefecture](#))。這個消息是報導日本京都大學工學院 Takehiko Yokomine 教授，與日本新能源公司 (J-NEC, Japan New Energy Corporation) 合作，10月21日在九州大分縣成功測試了深達1450公尺的地熱井的單管取熱技術的消息。內容摘要如下：

「使用地表水源注入系統中並循環使用，而非使用地下溫泉水，能夠解決結垢問題和免於設置回注井，上述兩個問題一直是過往地熱能源發電上的困擾。閉迴路循環系統的中心是一個

雙管式熱交換器，埋入地下深度1450公尺。水從地表注入外管後通過地熱加熱達到高溫，再由內管抽取高溫液態水，一旦液態水再次循環至地表將因解壓而轉變成蒸汽，即能推動蒸汽渦輪機並發電。」

日本CEEG井試驗成功 台灣環評卡住CEEG利澤地熱電廠開發案

看了這個消息，我心中五味雜陳。一則以喜、一則以怨、一則以憂。喜的是日本京都大學這一次的實驗，證實了我六公學已經推動4年的深層地熱技術可行，CEEG同軸套管等取熱，且口取熱不取水之深層地熱發電的技術，右

他に、台湾(台湾工業技術院)、米国(Greenfire Energy社、ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)、Geothex B.V.社、Geothermic Solution社など)

本システムの肝

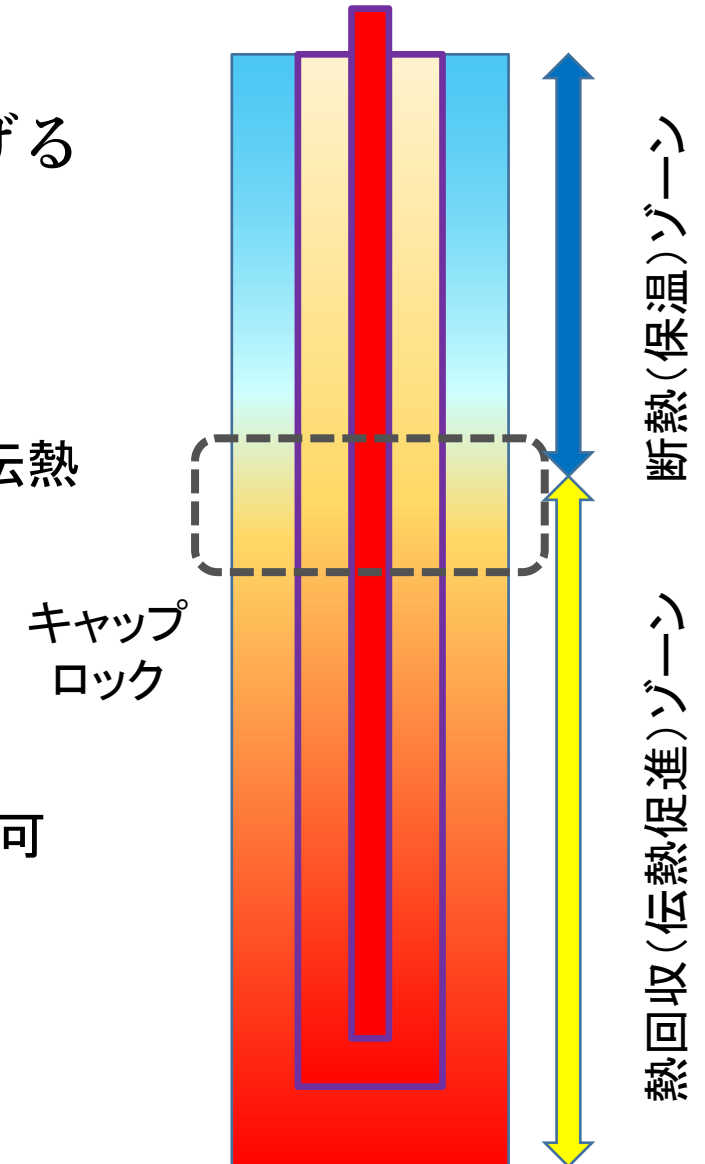
冷水を熱水に変えるのではなく、熱水の温度を上げる

- 熱交換器には地上から熱水を導入
- 熱交換器入り口温度より地熱が低い領域では、断熱(保温)
- 熱交換器入り口温度より地熱が高い時点で、地熱回収開始(伝熱促進)

→ 広く薄く地熱を回収

(高ポテンシャル地熱帯では)

- 地上の熱水(気水分離後熱水)からバイナリーによる熱回収も可能





新地熱発電システム実証試験

実証事業用地：大分県玖珠郡九重町
(100,000m²)

ジャパン・ニュー・エナジー株式会社略歴

平成25年12月：設立

平成26年 1月：京都大学との共同研究開始

平成26年 6月：NEDO助成事業採択

平成28年 3月：特許取得

平成28年10月：実証成功



ジャパン・ニュー・エナジー水分発電所(大分県玖珠郡九重町)
世界初のクローズドサイクルシステムによる地熱発電所完成



二重管型地中熱交換器
(地上部)



タービン・発電機



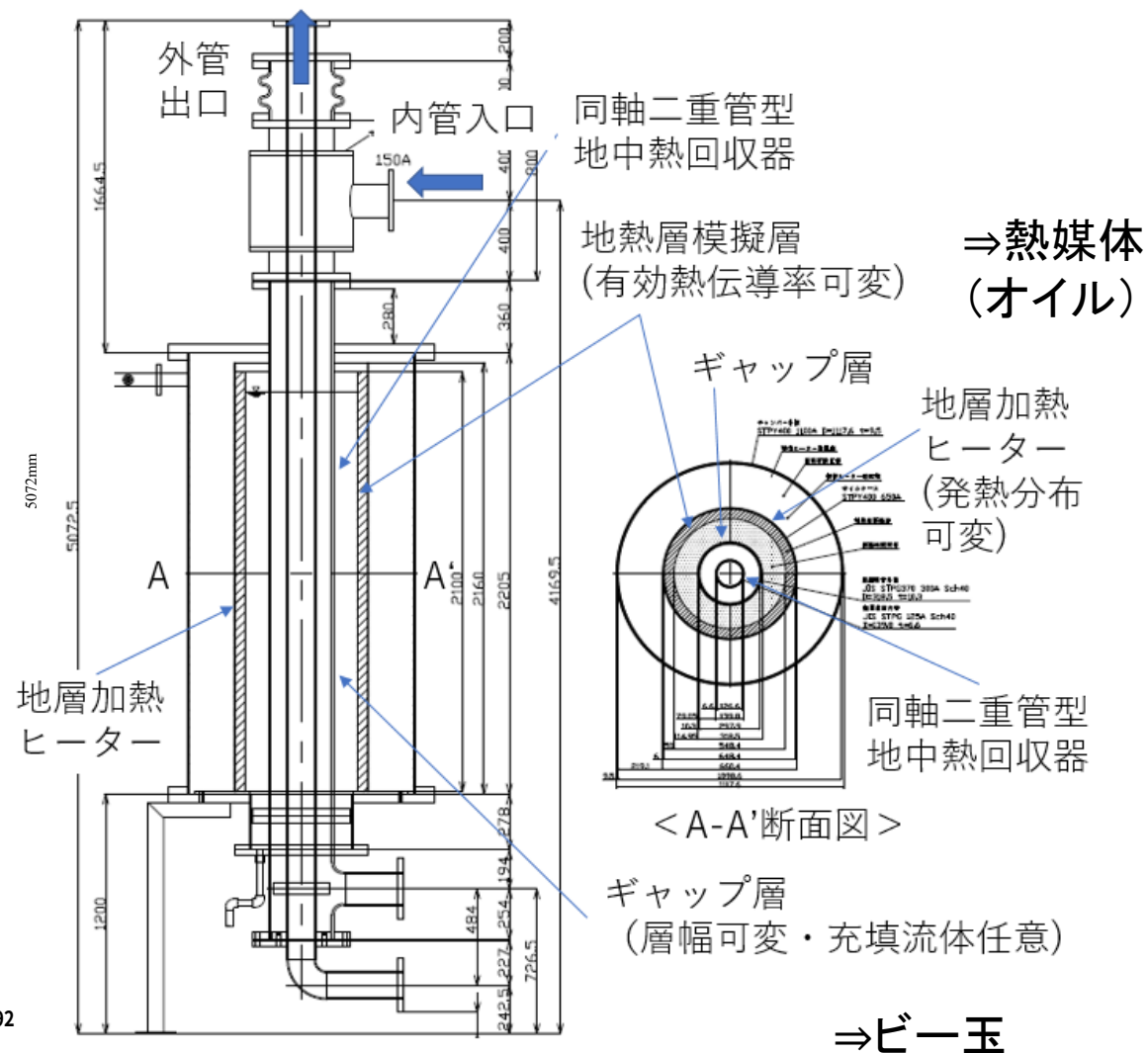
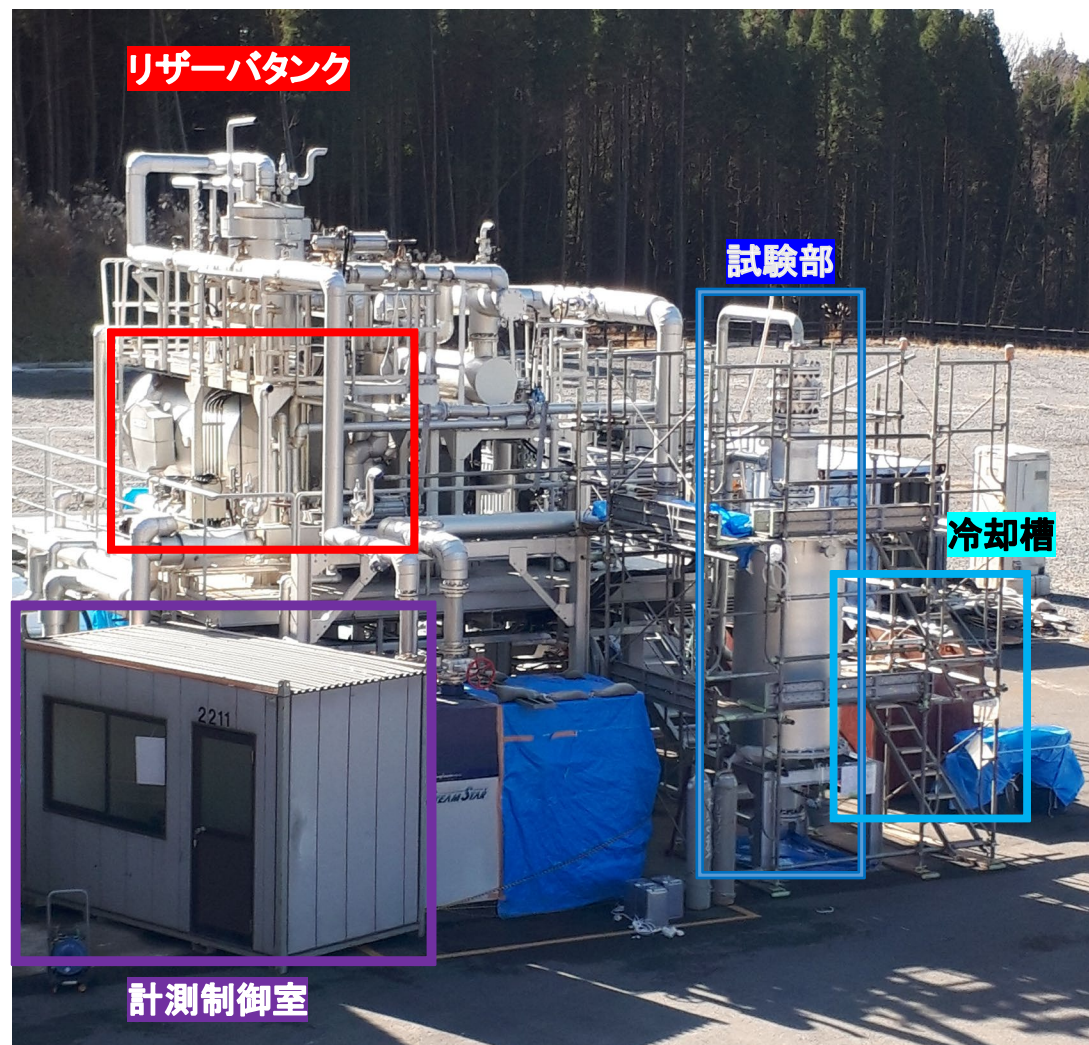
蒸気発生器



冷却塔

実証発電出力：10～20kW（最大45kW）

地熱シミュレーター@水分発電所



ライブ坑井実証@熱海

- ギャップ間地熱流体での自然対流発生の実証
- 大アスペクト比でのモデルの整合性実証

坑井口径: $\phi 100\text{mm}$ (裸坑: 300~514m)

静水位: 190.1m

孔底温度: 84°C

温泉源: 270mおよび415m付近

地中熱回収管

455m

外管50A 内管25A テフロン管 $\phi 22\text{mm}$

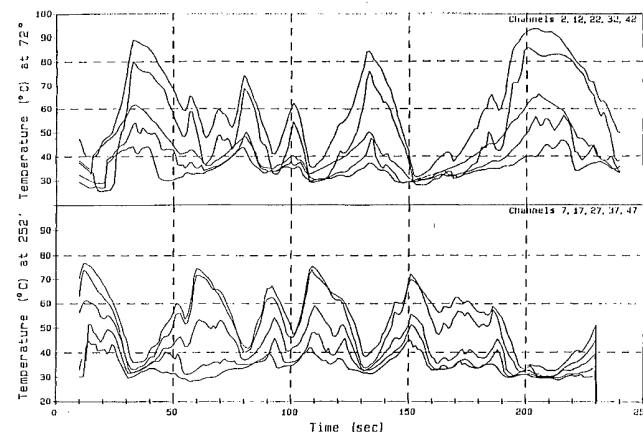
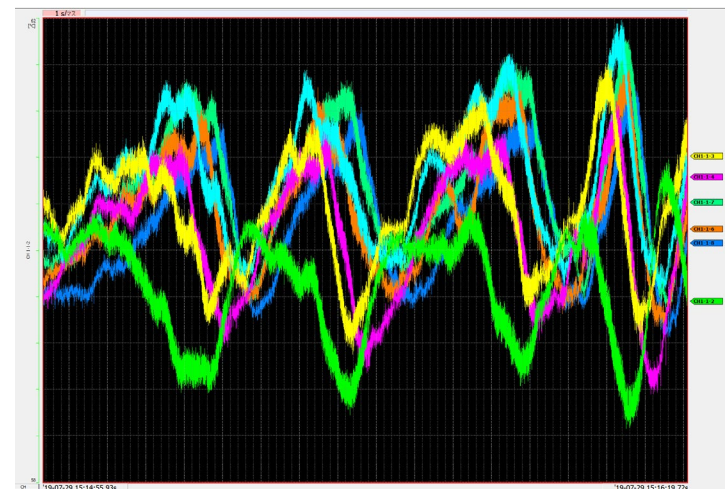


Figure 2 : Temperature fluctuations in two vertical planes simultaneously for 5cm annulus with 150°C base temperature



成功例を増やすには

- A) 国内既設地熱発電に組み入れる(大規模発電実証)
 - ▶ 補充抗、休抗井の再利用であれば、環境アセスは不要(大幅短縮)
 - ▶ 地熱発電市場の再構築
- B) 小規模発電事業を増やす(小規模発電実証)
 - ▶ 温泉ホテル 等
 - ▶ 実証後、即事業化(PPS)
- C) 自治体等による新規発電事業
 - ▶ 自治体(県企業局等)所有の地熱抗井を利用
- D) 海外展開で外堀を埋める

ビジネス展開戦略

1. リユース・リボーン(再利用・再生)

- 休止坑井、未使用(使用不可)坑井を用いた発電プラント
- 地熱帯調査、アセス不要
 - リードタイム大幅短縮
- 発電装置は既存施設を流用
 - コスト大幅カット
- 導入リスクを大幅軽減

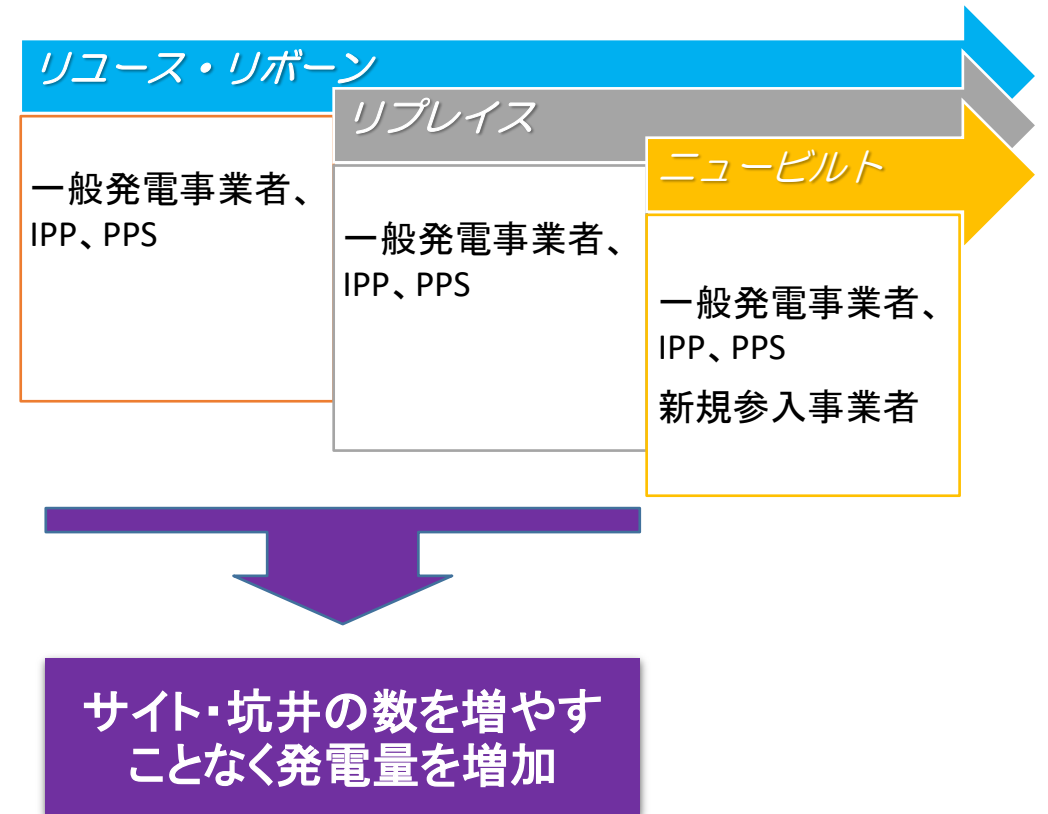
2. リプレイス

- 既存生産井のリプレイス → 生産井の長寿命化
- 従来型に比して坑井1本当たりの出力は低下(2割減程度)するが、寿命延長によって生産井の総発電量は大幅に増加

3. ニュービルト(新設)

- 安価な電気 < 安定な電気(ベースロード)

4. 海外展開



海外展開

- ▶ 地熱発電を国策とする国、地熱発電導入予定国には、通常の市場開拓
 - ▶ HRD,EGSへの展開も可能
- ▶ 地熱資源を有する地熱発電未開発国
 - ▶ 地熱を分散電源とみなし、その国情に合わせた利用提案
 - ▶ 地熱があるところに産業拠点があるところは少ない
 - ⇒ 環境適合分散エネルギー
 - ▶ ローテク