

# **最近のわが国の地熱発電の進展と 持続可能な地熱発電技術**

**江原幸雄**

**地熱情報研究所代表・九州大学名誉教授**

**東京地学協会・地学クラブ講演会**

**2019年3月15日(金)**

**地学会館(東京都千代田区)**

# 世界各地で異常気象(特に異常高温)

2018年7月24日付毎日新聞朝刊

2018/07/24 毎日朝刊

## 熱中症死の疑い93人

### 6日間 30都府県

日本列島は23日も猛烈な暑さに見舞われ、埼玉県熊谷市で午後2時23分、観測史上最高の41.1度を記録した。これまでに1位だった高知県四万十市の41.0度(2013年8月12日)を、約5年ぶりに更新した。

覆う「高気圧の2層構造」が続き、23日にも熱中症の疑い93人が発生した。熊谷市など関東地方の内陸部では、乾いた風が山から吹き下ろす際に熱を帯びて

また、毎日新聞の集計では、岐阜県多治見市で40.7度を観測した今月18日以降、23日までに全国で熱中症とみられる症状で亡くなったのは、少なくとも30都府県で93人上った。この猛暑は2週間ほど続く見通し。(3面にクローズアップ、スポーツ面に「酷暑と闘う」、7、8面、社会面に関連記事)

## 熊谷 41.1度 史上最高

気象庁によると、23日に全国で最高気温が40度を超えたのは、熊谷市▽東京都青梅市(40.8度)▽多治見市(40.7度)▽甲府市(40.3度)の4市。東京都内では観測史上初めての40度超えとなった。

また、この日は広島市安佐北区で36.0度、岡山県倉敷市で35.2度となるなど、西日本豪雨の被災地でも厳しい暑さが続いた。全

最高気温歴代トップ10

☆①埼玉県熊谷市	41.1度
(2018年7月23日)	
②高知県四万十市	41.0度
(2013年8月12日)	
③岐阜県多治見市	40.9度
(2007年8月16日)	
☆④東京都青梅市	40.8度
(2018年7月23日)	
山形市	
(1933年7月25日)	
⑥甲府市	40.7度
(2013年8月10日)	
☆⑦岐阜県美濃市	40.6度
(2018年7月18日)	
和歌山県かつらぎ町	
(1994年8月8日)	
浜松市天竜区	
(1994年8月4日)	
⑩山梨県甲州市	40.5度
(2013年8月10日)	

※☆は今年、気象庁調べ。観測所ごとに史上1位の値のみを使って集計

## 米・アフリカ 50度超

日本で記録的な猛暑が続く今夏、世界各地も異常な高温に見舞われている。世界気象機関(WMO)によると、米カリフォルニア州や北アフリカで50度以上を観測した。北欧の北極圏では30度超えを記録し、森林火災も発生した。

## 世界各地で異常高温

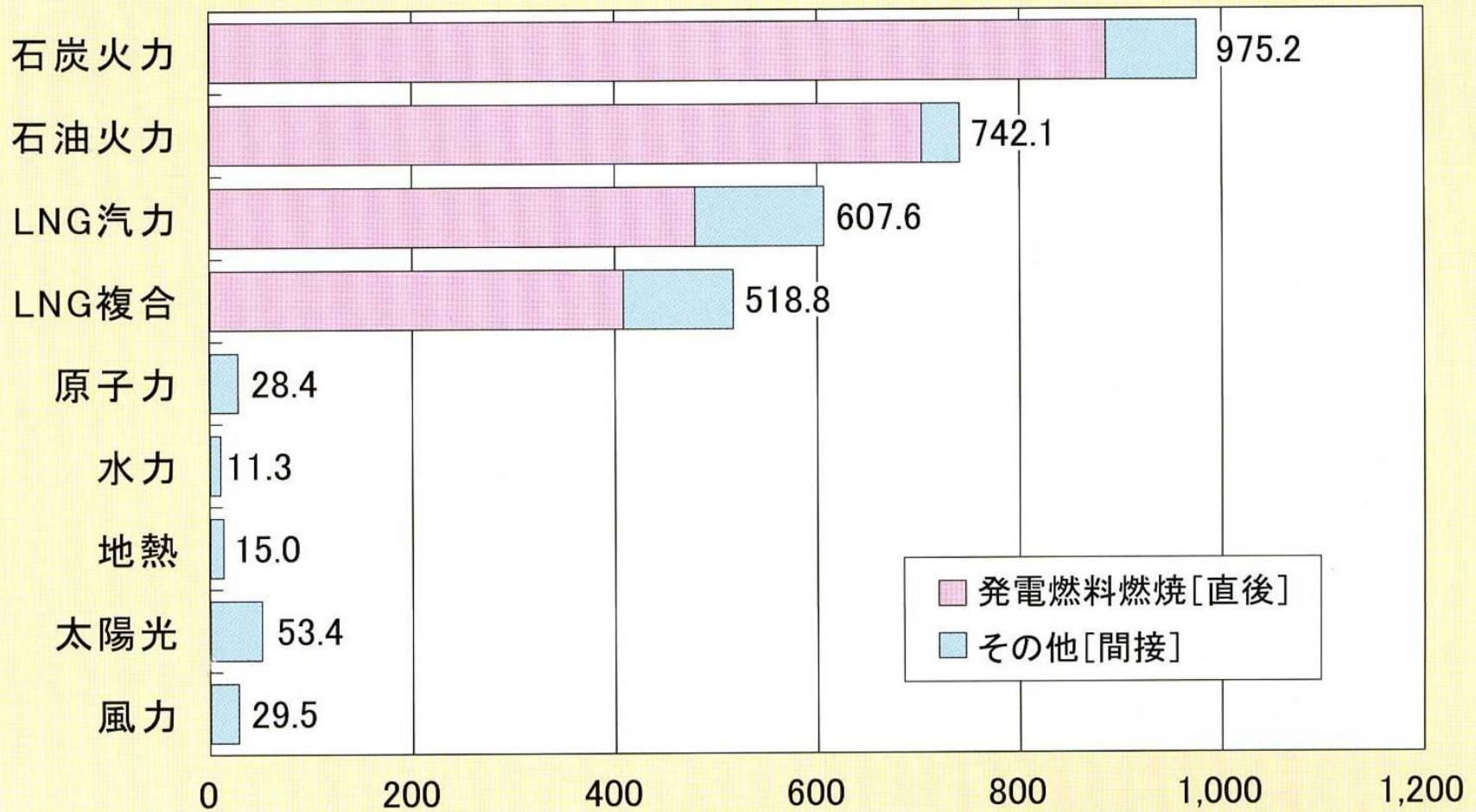
米国では7月、カリフォルニア州デスバレーで52度、ロサンゼルス近郊で48.9度に達した。アルジェリアのサハラ砂漠では51.3度を記録した。オマーンの首都マスカット近郊では6月、最低気温が42.6度までしか下がらなかった日があつた。

熱波はスカンディナヴィア半島の北極圏にも及んだ。ノルウェーのバルドゥフォスで33.5度、フィンランドのケボで33.4度を観測した。スウェーデンでは約50カ所の森林火災が報じられた。カナダでは、ケベック州で高温多湿により高齢者を中心に死者が相次いだ一方、水点下1度になったり雪を観測したりした地域もあった。

WMOは「温室効果ガスの濃度上昇に起因する長期的な傾向に合致している」と指摘した。

# 地熱発電の優れた特性

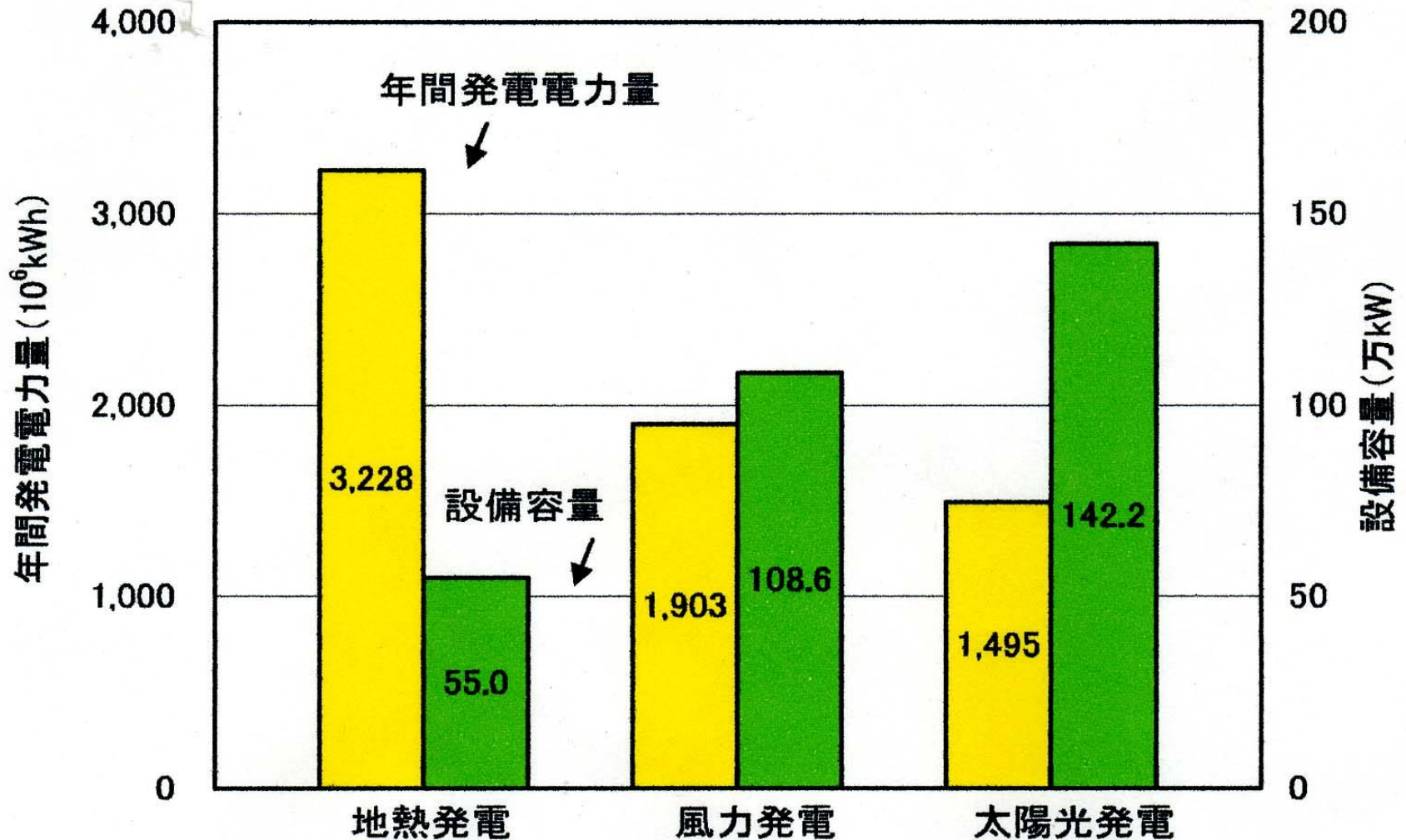
少ないCO<sub>2</sub>排出量(gCO<sub>2</sub>/kWh) 電力中央研究所(2000)



# 設備利用率の比較

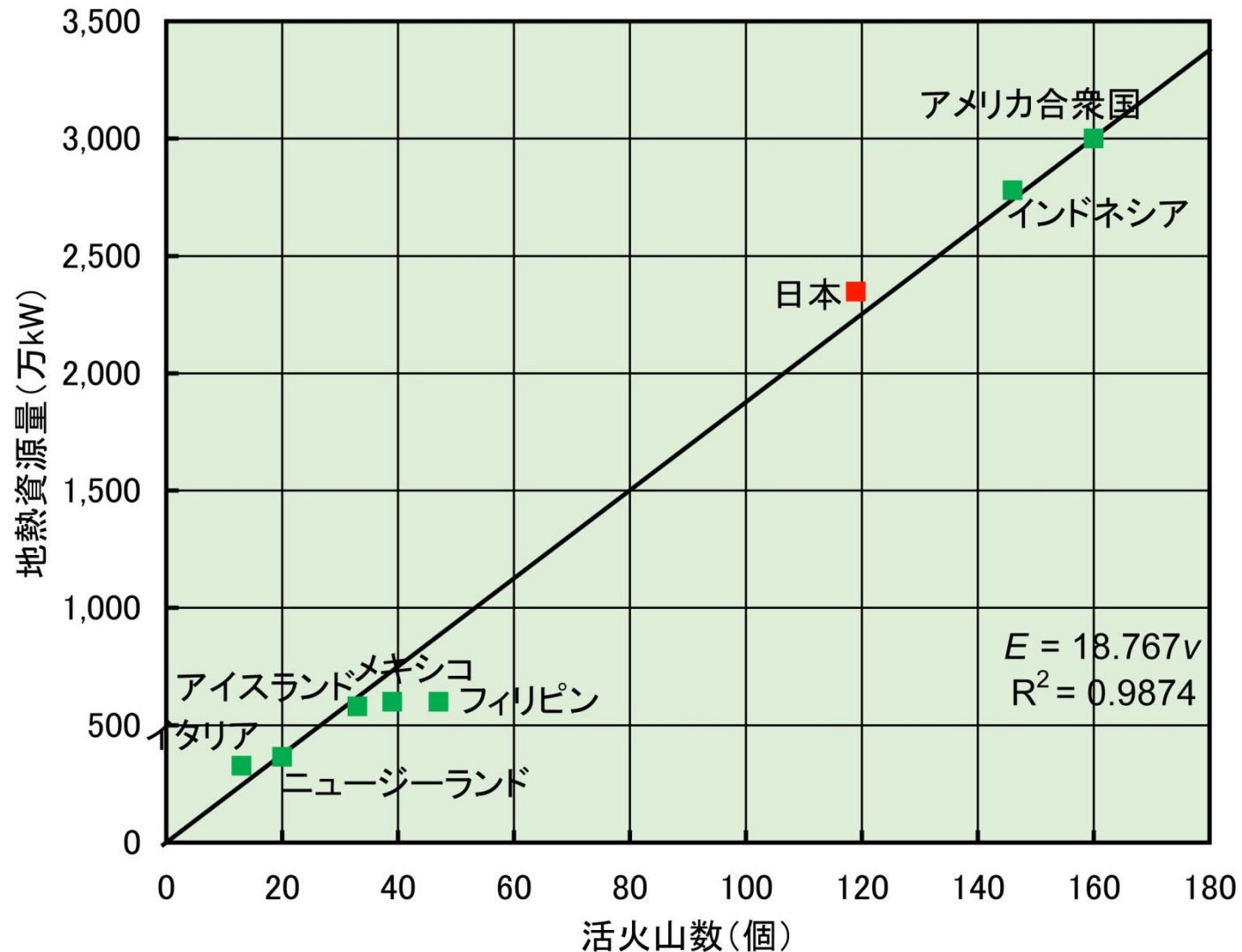
地熱発電(70%) >> 風力発電(20%) > 太陽光発電12%)

(地熱開発研究会,2008)



# 日本は世界第3位の地熱資源大国

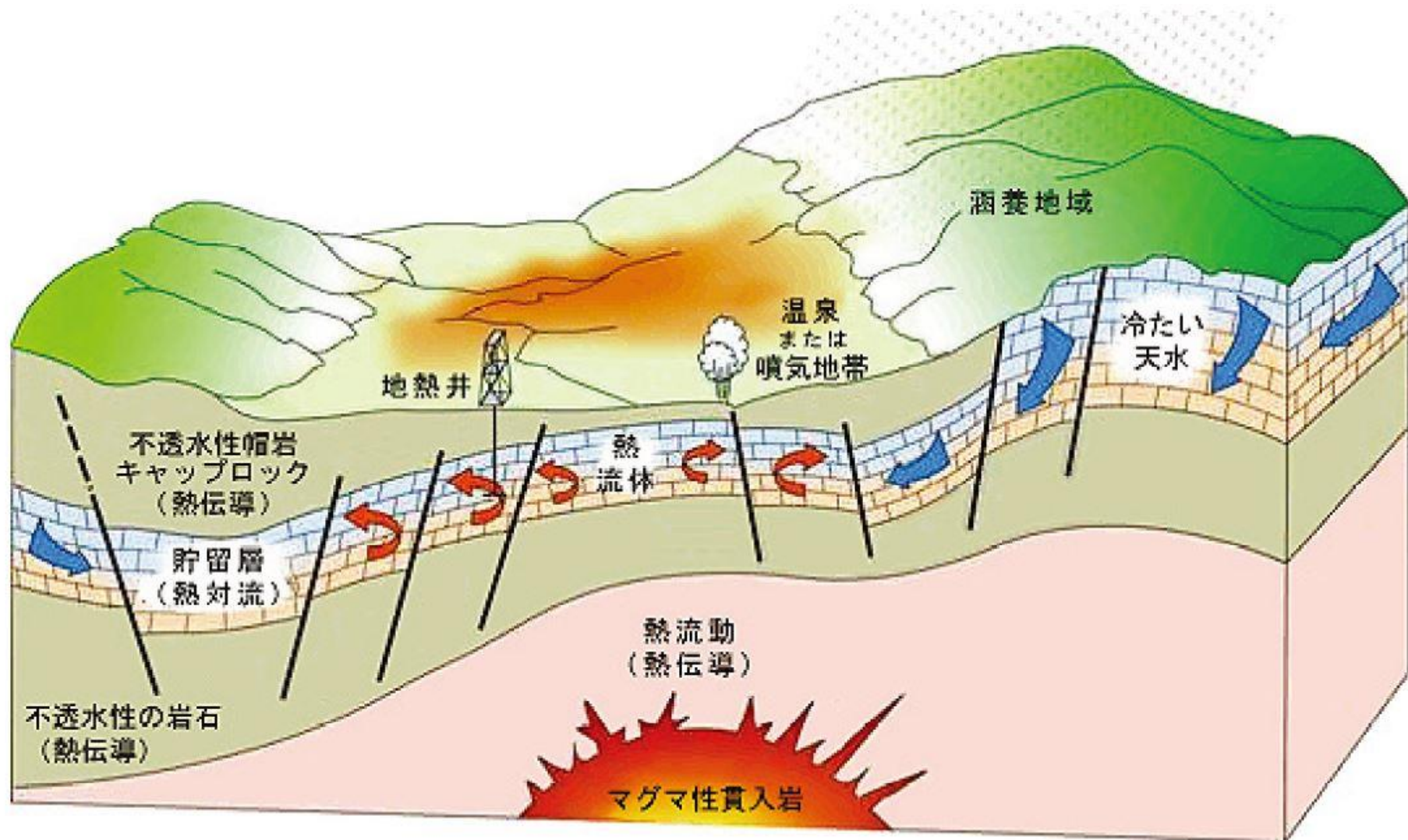
世界の発電換算地熱資源量と活火山の個数(村岡、2009)



# 地下の熱システム: マグマと地熱貯留層

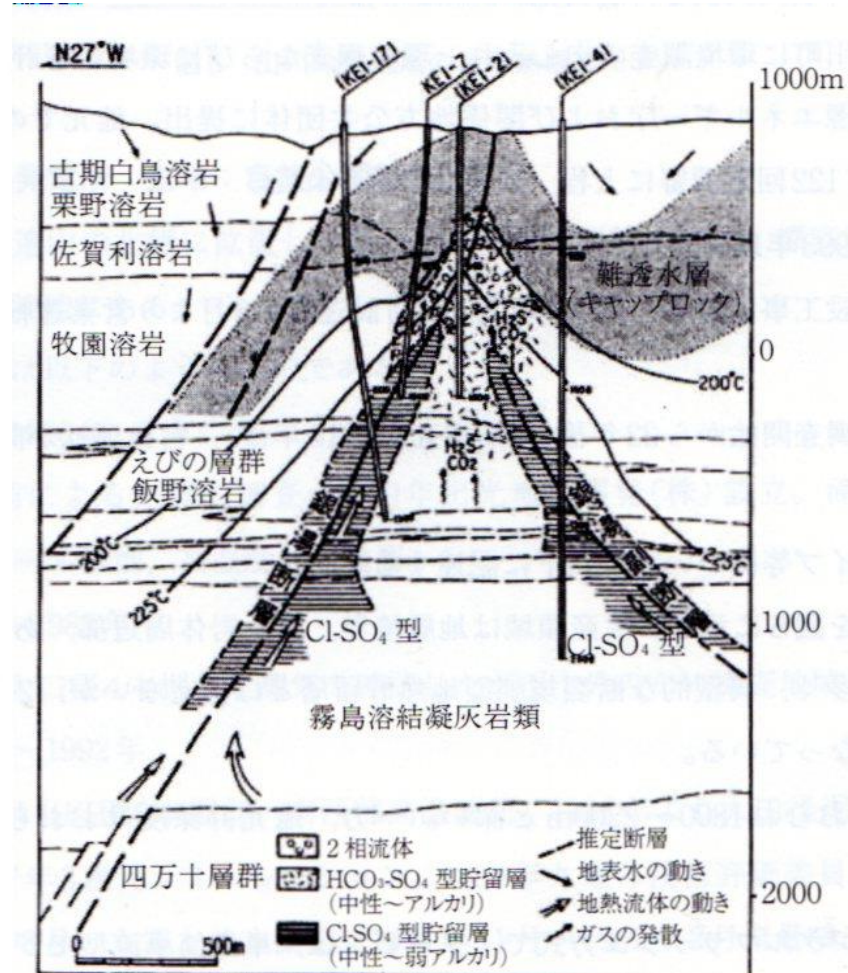
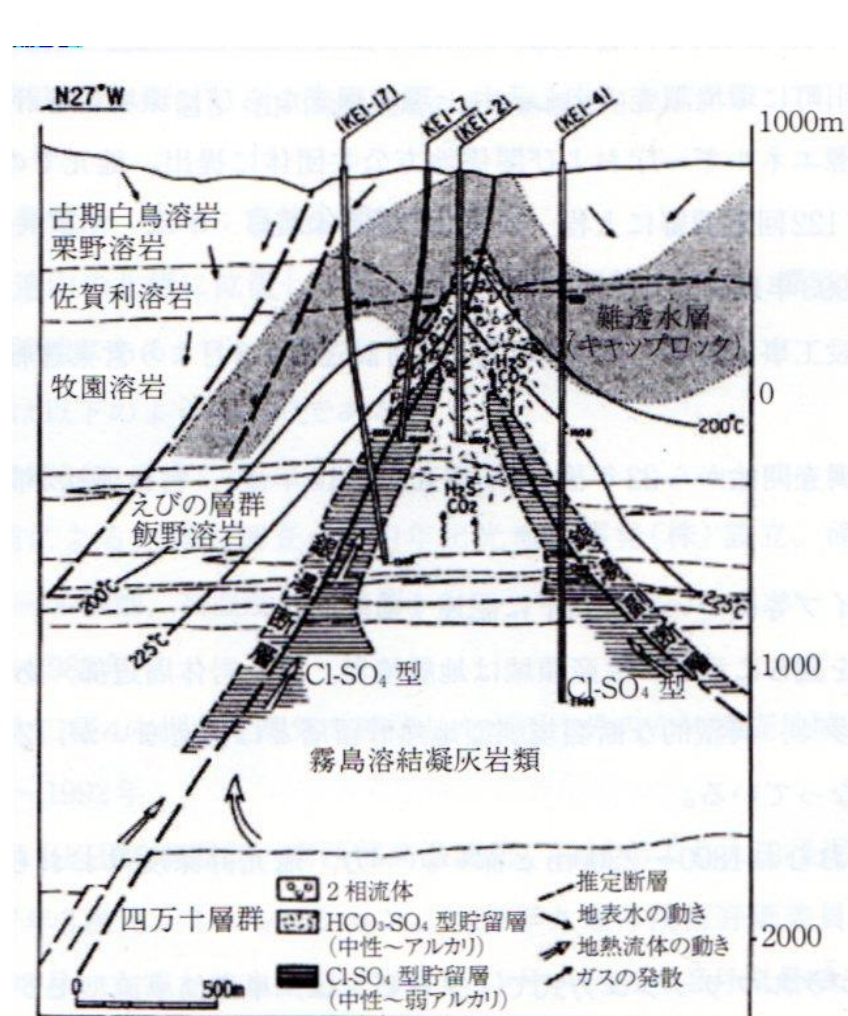
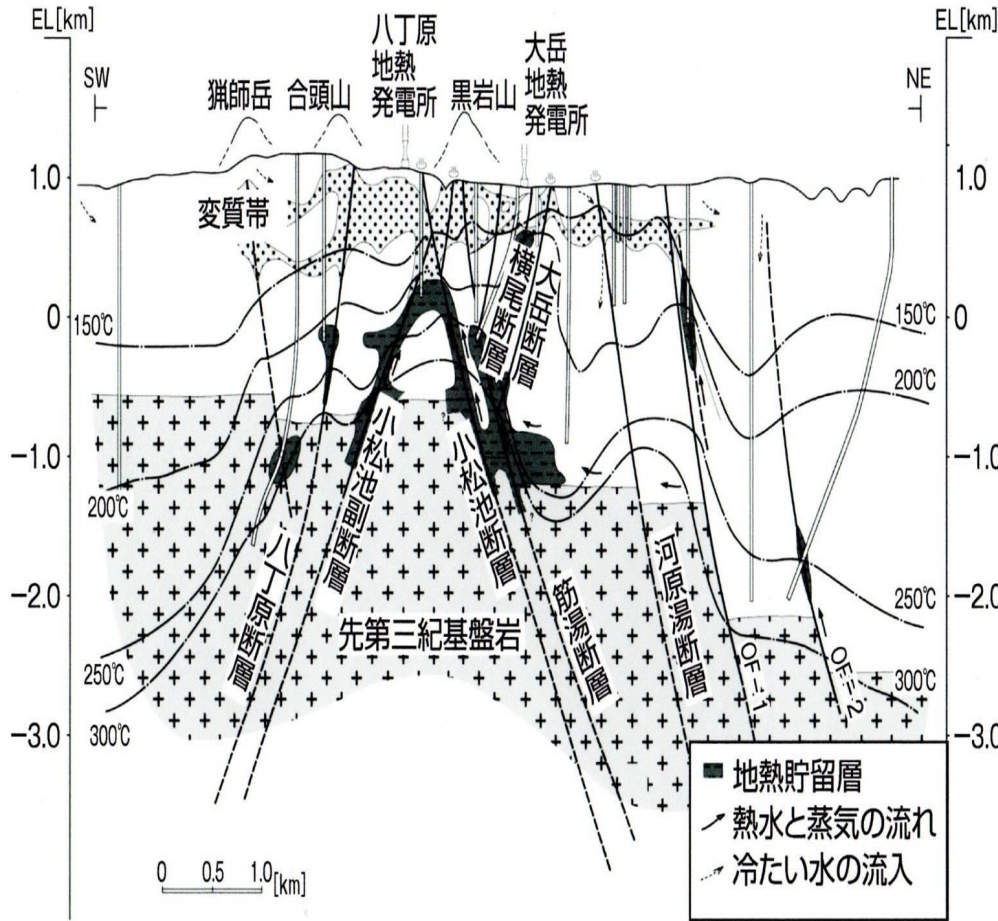
地下に浸透した雨水がマグマの熱によって温められ、上昇、深部の地熱貯留層形成

さらに浅部の温泉帯水層に貯められる (日本地熱学会IGA専門部会、2008)



# 地熱地域の地下構造と熱と水の流れの実際

左:大分県八丁原 (Momita et al.,2000) 右:鹿児島県大霧 (地熱調査会、2000)



# 地熱エネルギーの利用

1. 地熱発電(大・中・小規模)
2. バイナリー発電(中・小規模)
3. 直接利用(温泉だけでなく、農林水産業等多様)  
(地域の視点から特に重要)

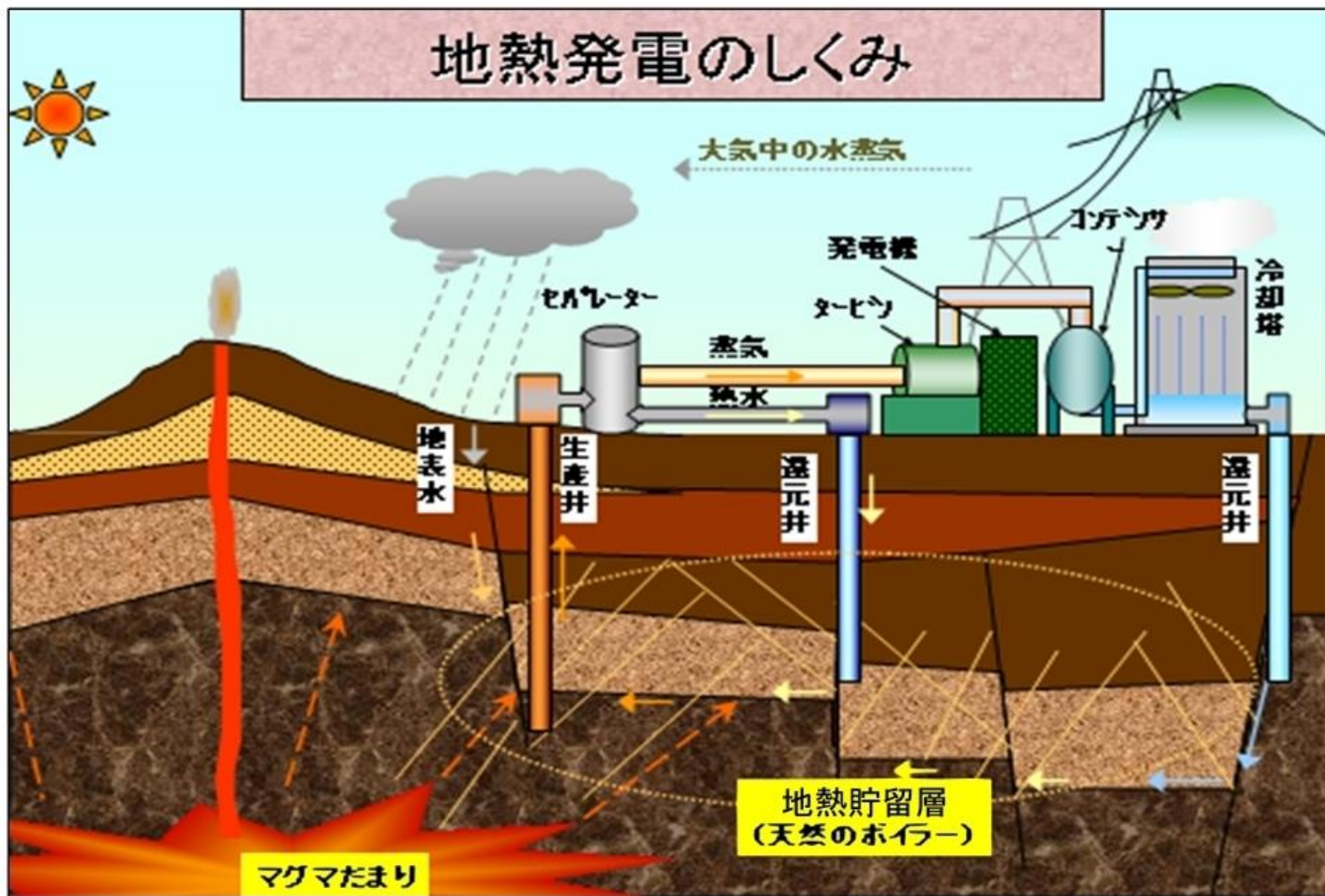


# 地熱発電システム

日本地熱開発企業協議会、2011

## 地熱発電とは

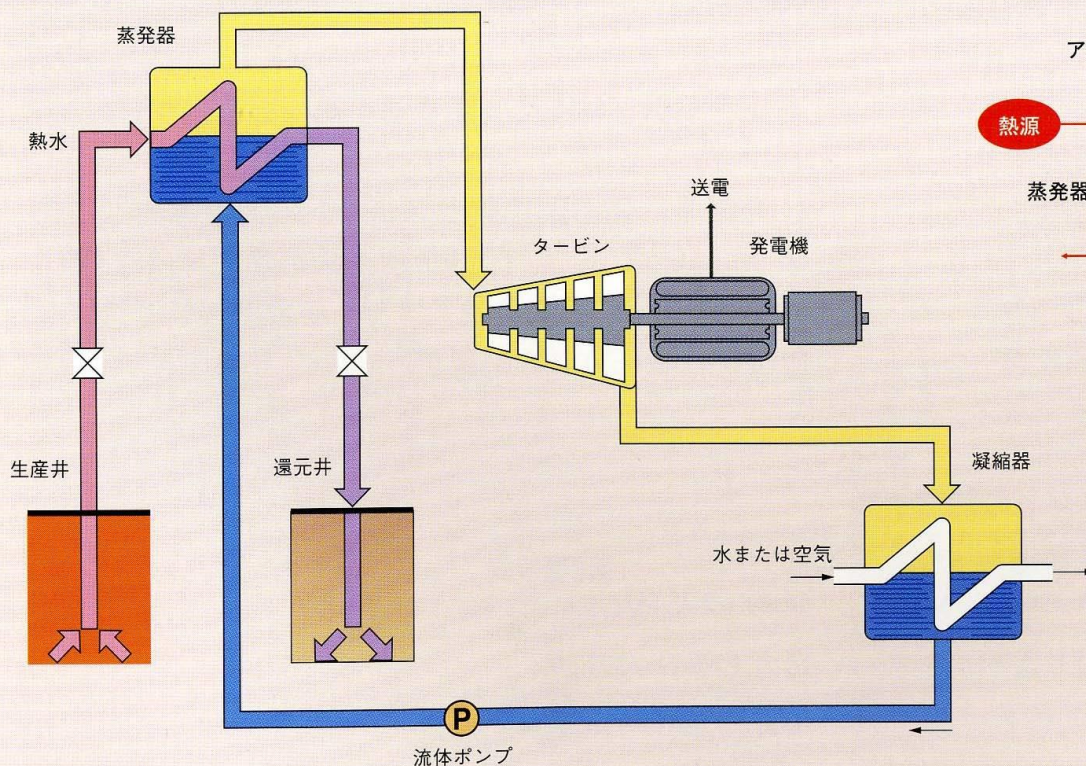
地熱発電とは、地中深くから得られた蒸気で直接タービンを回して発電するものです。一緒に出る熱水は還元井を使って再び地下に戻して再利用に役立っています。



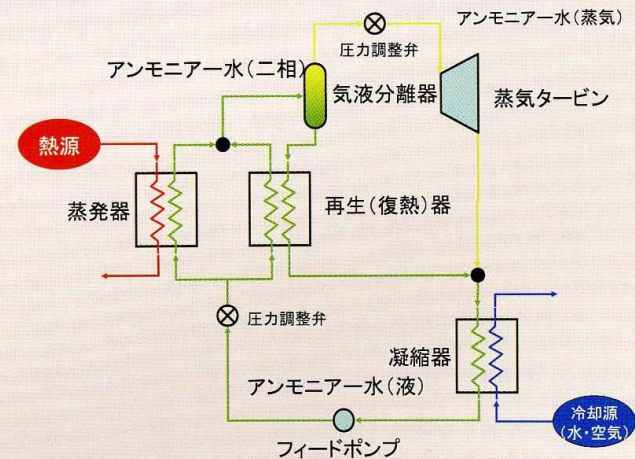
# 新しい発電方式：バイナリー発電

80℃の温泉水でも発電できる！ NEF(2007)

## ■ バイナリー発電



## カーリーナサイクル発電システムの例



カーリーナサイクル発電はバイナリー発電の一種で、吸収式ヒートポンプにタービン発電機を組み込んだものです。低沸点媒体としてアンモニア水が使用され、100℃以下の低温熱源でも駆動できるシステムです。

# 最近運開した小規模地熱発電所(100kWバイナリー)

小浜温泉バイナリー発電所(長崎県雲仙市)(洸陽電機)

敷地面積0.2万m<sup>2</sup>(30mX50m), 高さ5m (2013年4月運転開始)



# 最近運開した中規模地熱発電所(5000kWバイナリー)

菅原バイナリー発電所(大分県九重町) 九電みらいエナジー(2015)  
敷地面積3.4万m<sup>2</sup> (600mX800m), 高さ12m (2015年6月運転開始)



# 建設進む大規模地熱発電所(42000kWダブルフラッシュ)

山葵沢地熱発電所完成予想図(秋田県湯沢市)(湯沢地熱株式会社)

敷地面積=15.7万m<sup>2</sup>, 高さ<23m (2019年5月運開予定)



# 大・中・小規模地熱発電所の比較

パンフレットなどによる公表値(カッコ内は推定)

相当世帯数=(発電出力x年間日数x利用率)/(世帯当りの年間電力使用量)

	敷地面積 万m <sup>2</sup>	高さ m	年間売電額 億円	一般家庭相当数 世帯
<b>大規模</b> (山葵沢) 42000kW	15.7	(<23)	(116)	(80000)
<b>中規模</b> (菅原) 5000kW	3.4 (600mX800m)	11	12	8300
<b>小規模</b> (小浜) 100kW	0.2 (30mX50m)	5	0.32	200

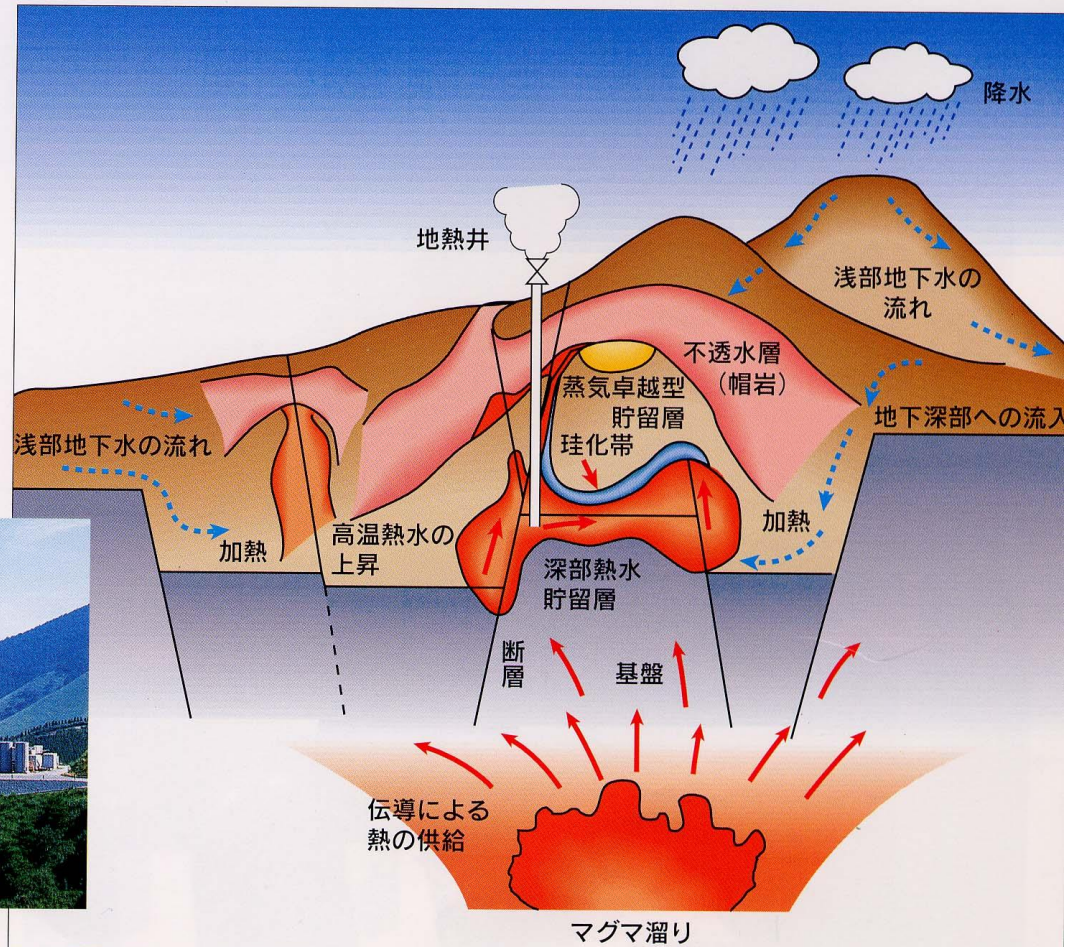
# 地熱発電所ができるまで

調査・概念モデル・数値モデルの作成→発電量予測(数年)  
+環境アセス等諸手続き(4年程度)+発電所建設(～2年程度)

⇒大規模地熱発電所:長いリードタイム(10年～)必要(短縮検討中)

なお、中小規模地熱発電所:～数年で運転開始が可能

■地熱構造概念図

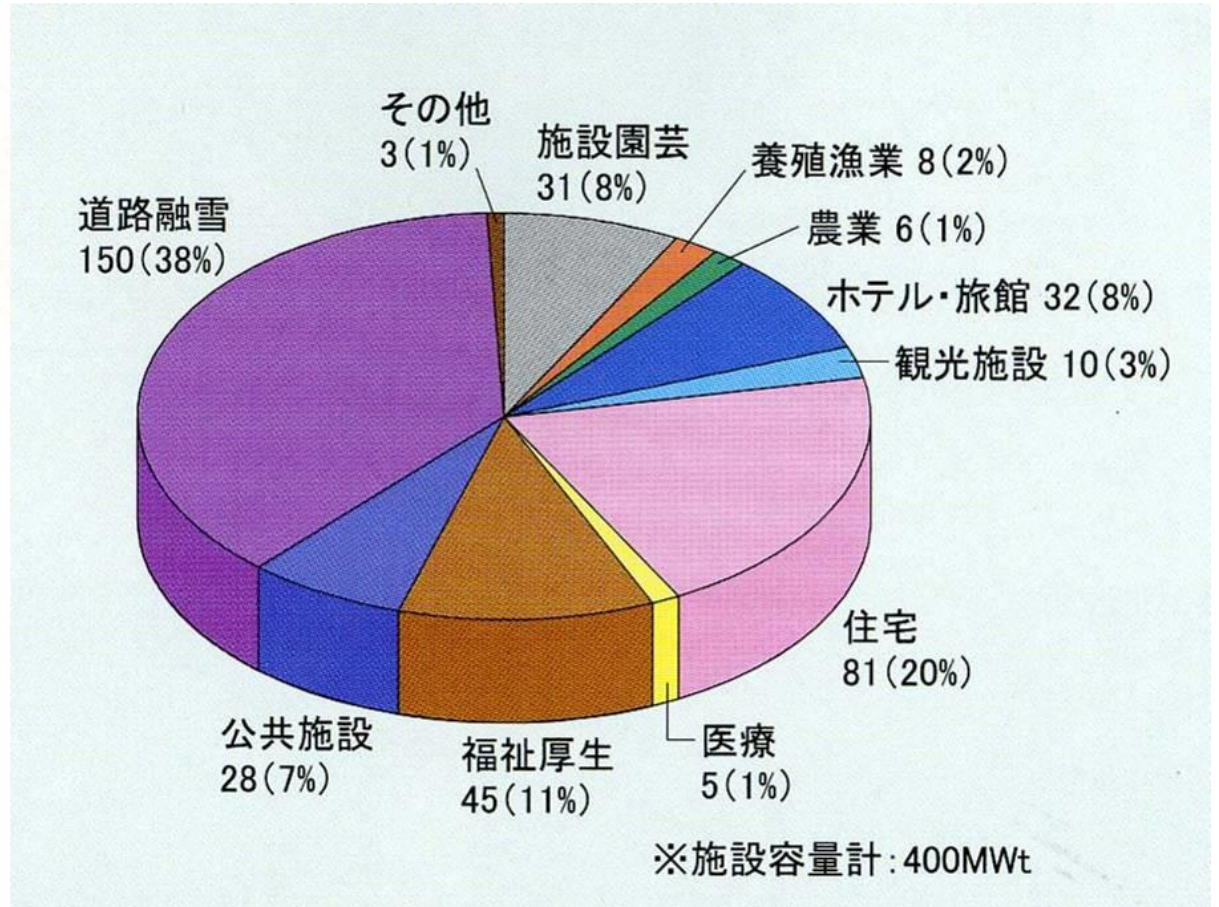
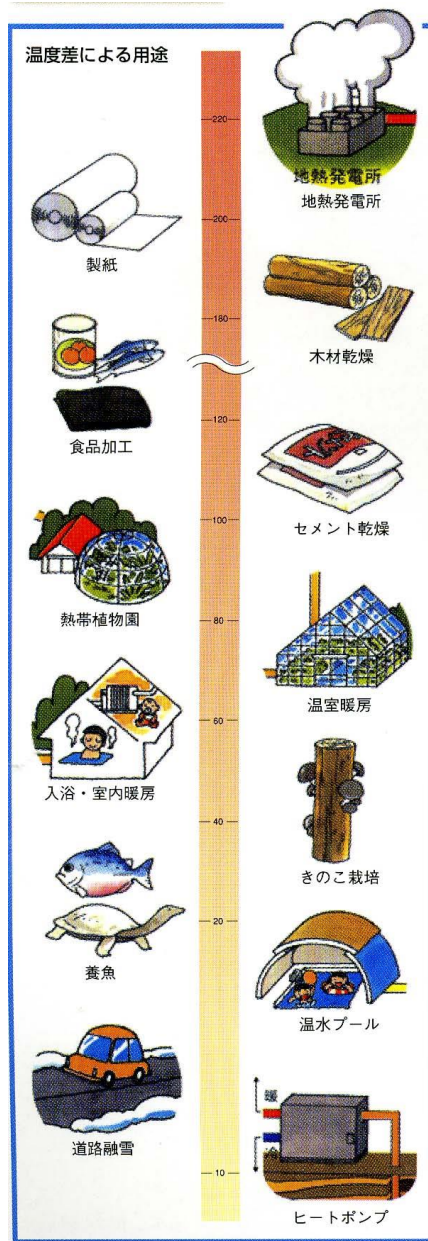


■蒸気井掘削状況



# 多目的に使われる地球の熱エネルギー(NEF,2007)

⇒地域振興の観点から特に重要  
農林水産物の付加価値を高める



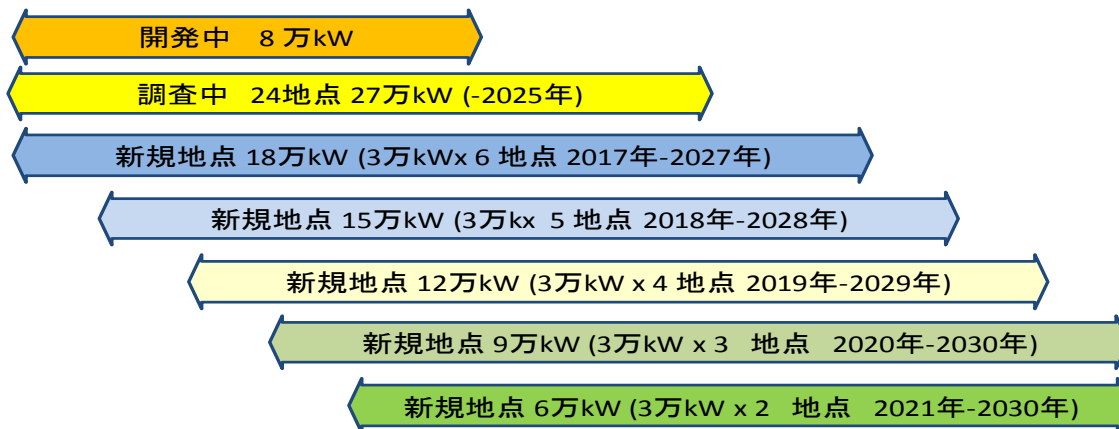
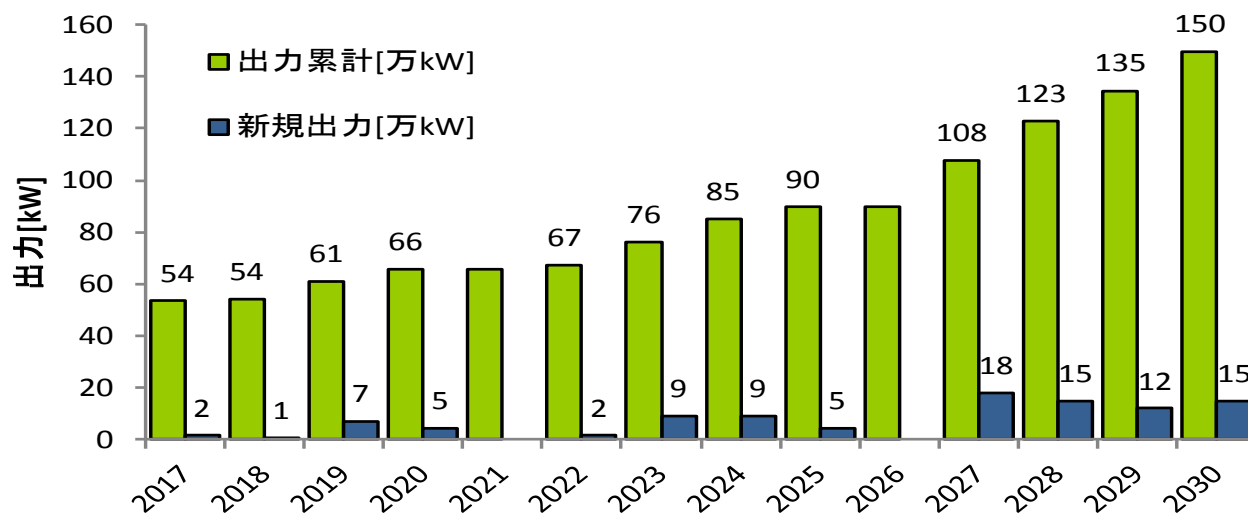


# 3.11以降の政府の地熱政策動向

- (1) 2011年7月以降、エネ庁 地熱発電推進へ転換  
(電力部電力基盤整備課⇒資源燃料部政策課)11月経産省:有識者との意見交換会  
2011年12月 エネ庁 地熱開発推進を明文化
- (2) 2012年4月以降内閣府規制改革会議・環境省検討会等の事業環境整備始まる
- (3) 2012年7月 **固定価格買取制度施行**、9月JOGMEC地熱部発足(支援策開始)  
.....(2013年1月以降、小規模地熱発電導入始まる)
- (4) 2014年4月 エネルギー基本計画 閣議決定 (4月以降、小規模導入増加)  
(12月以降、中規模導入開始)
- 2018年7月 エネルギー基本計画 改訂
- (5) 2015年7月 長期エネルギー需給見通し策定、2018年改定  
地熱発電の数値目標 **2030年度までに+100万kW 累積150万kW**
- (6) 2015~17年度 「地熱発電の推進に関する研究会」開催 課題の整理と方向性  
2016年4月、2017年4月 報告書公表(エネ庁HP)  
⇒⇒⇒ 「研究会」で整理された課題について、対応が始まっている。  
大規模開発重点化、第三者アドバイザー機関設立、若手技術研修制度開設、..  
⇒⇒⇒「エネ庁研究会」2018年度も継続再開。**近年毎年200億円以上の支援。**

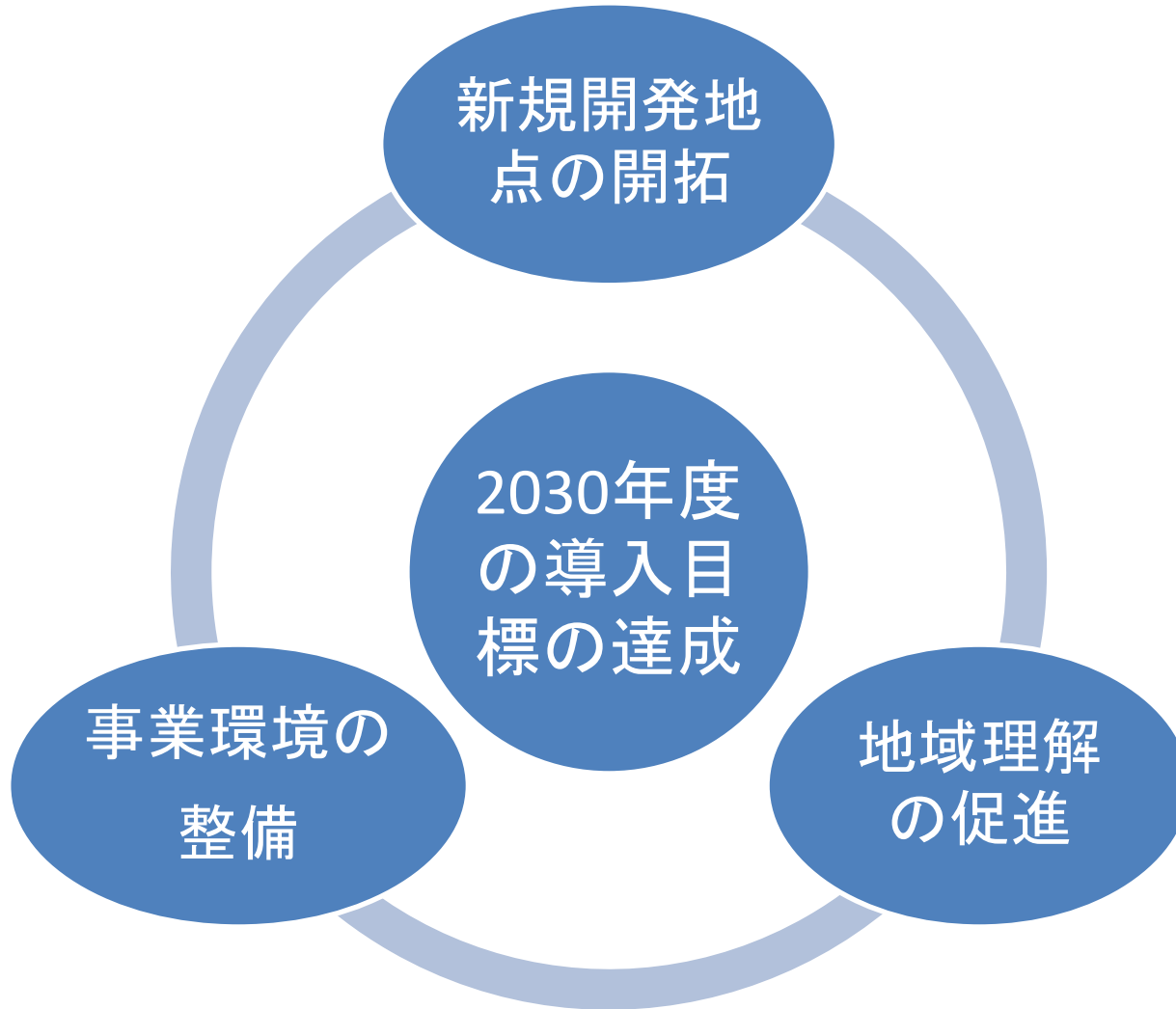
# 2030年度導入目標の達成に向けた開発シナリオ 現在の3倍、累積で150万kW(太陽光1000万kW相当)

平成28年度 地熱発電の推進に関する研究会(2016)



# 2030年度の導入目標達成

経済産業省・資源エネルギー庁 平成28年度 地熱発電の推進に関する研究会(2016～)



# 持続可能な地熱発電技術

現在多様な課題の解決がはかられており、その中で、地熱発電を安定して長期間継続するための技術として、持続可能な地熱発電技術が求められている。また、持続可能性は前出の三つの柱とも関係している。

# 持続可能な発電に関するまとめと その実用的判断

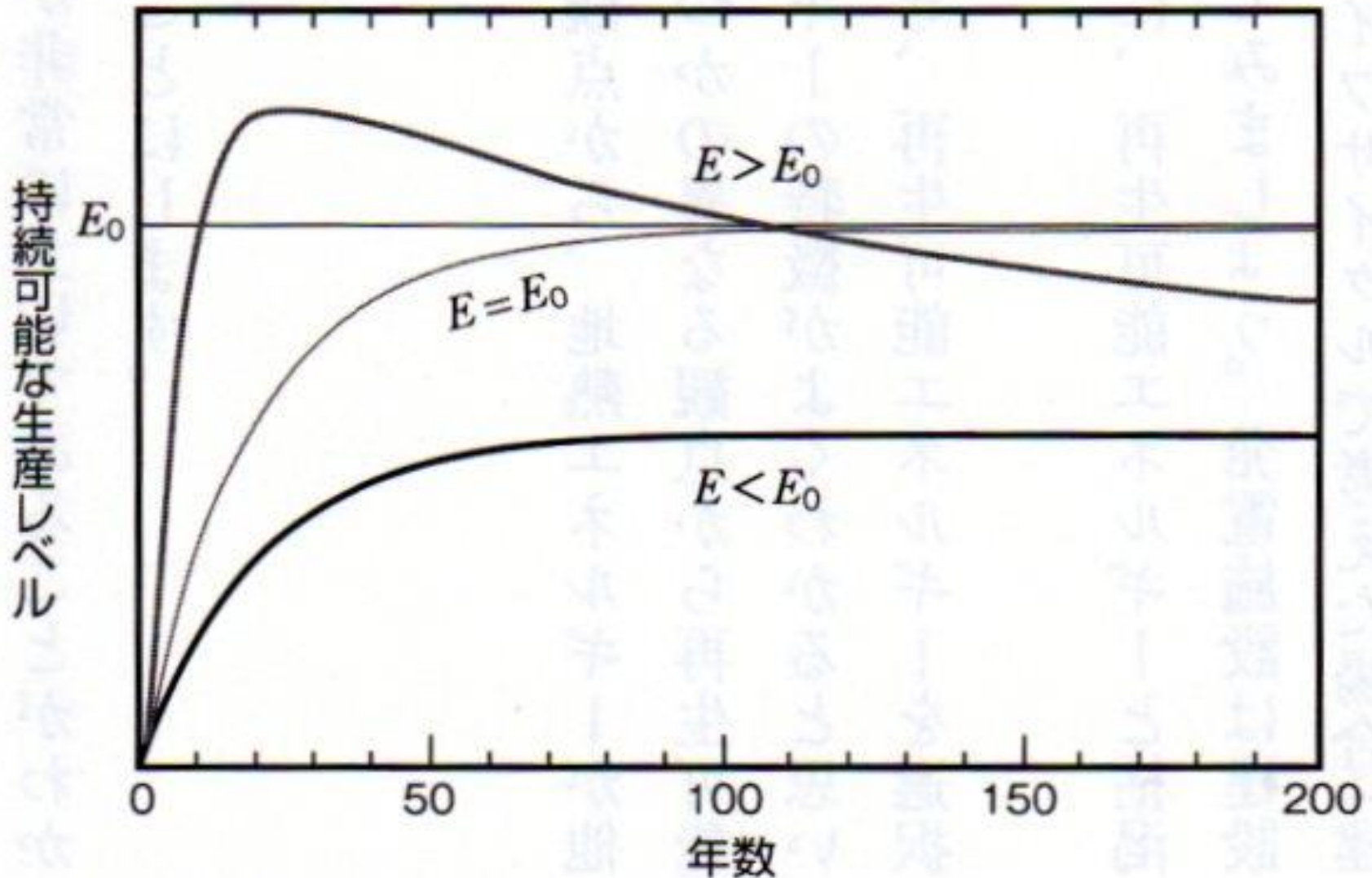
Rybach L. and Mongillo M. (2006) Geothermal Sustainability–A Review with Identified Research Needs–, GRC Transactions, Vol.30, 1083–1090.

- 自己世代だけでなく、後の世代も使えるようにする。
- 地域ごとに、地熱生産システムごとに、最大限利用できるエネルギーレベル(持続可能なレベル  $E_0$ )があり、それが長期間(100～300年)維持できること。
- 実際の補充(たとえば95%)が地熱生産システムの寿命と同オーダーの時間よりもかなり早く起こること。
- 投資資金をできるだけ早く回収するという考え方は取らない。  
→適切な持続可能な発電こそ長期的・総合的に見て経済的(仮説)

# 持続可能な地熱発電レベル $E_0$ 実現の必要性

$E > E_0$ : 過大  $E = E_0$ : 適切  $E < E_0$ : 不十分

(Axelsson et al., 2003)



# 八丁原における持続可能な発電

# 持続可能な地熱発電の好例

わが国最大の地熱発電所(設備出力112MW)

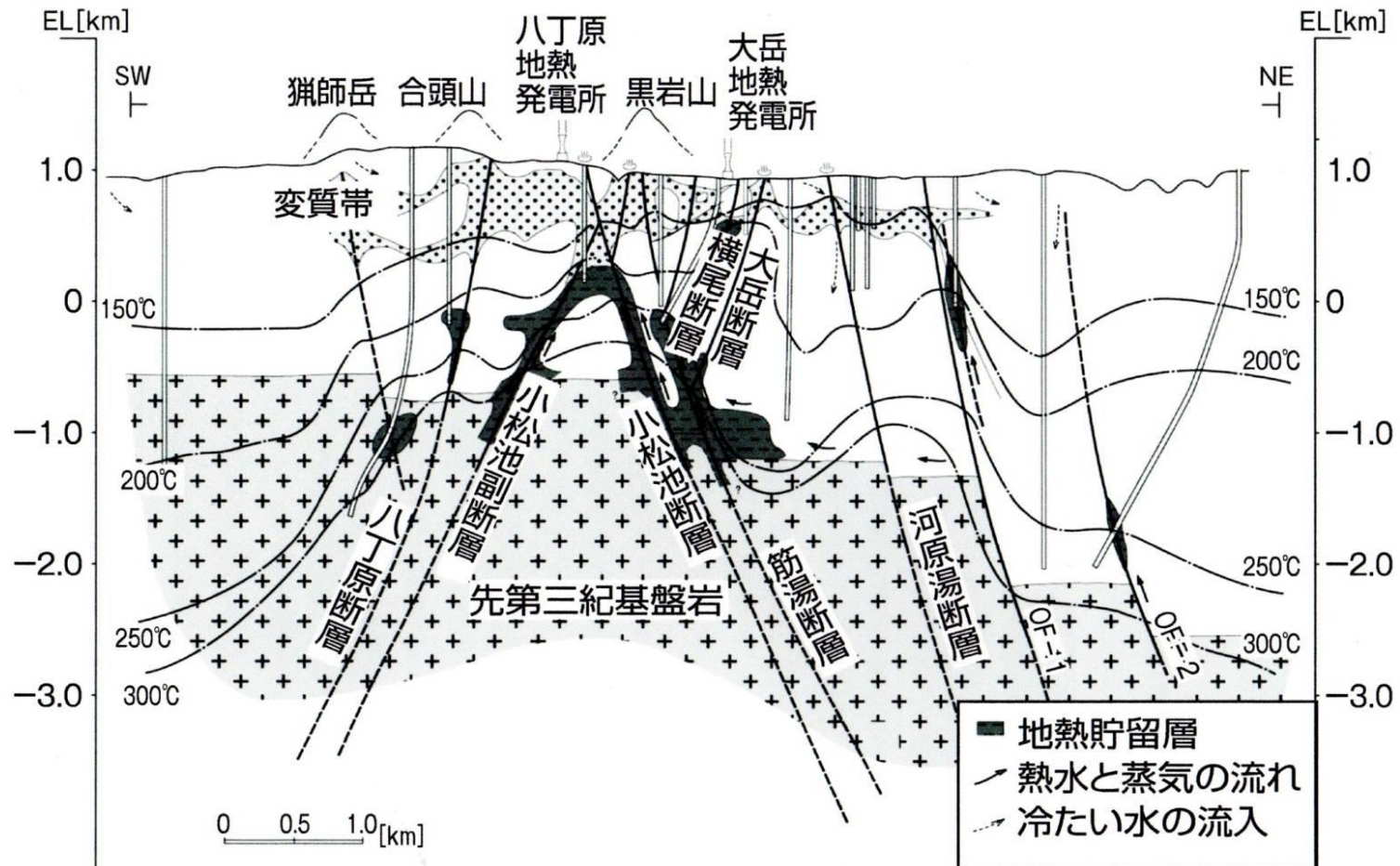
九州電力八丁原地熱発電所(大分県九重町)





# 八丁原地熱地域の熱水系概念モデル

熱水卓越型地熱系・断裂型地熱貯留層 (Momita et al,2000)



# 持続可能な(長期間安定な)発電を目指して

- 地熱エネルギーは再生可能であるが、地熱貯留層を適切に管理しないと、過剰生産が発生し、長期間(～200年間)の安定な発電(＝**持続可能な発電**)が保証されない(これは温泉利用も同じである)。
- 地熱エネルギーが他の再生可能エネルギーと伍して将来にわたって活用されていくためには「**持続可能な発電**」である必要がある。

→**地熱貯留層全体の適切な管理は技術的に可能**

「**繰り返し精密重力観測による地下流体質量監視技術**」

**重力による地下水量の監視:地下水量減少⇒重力減少**

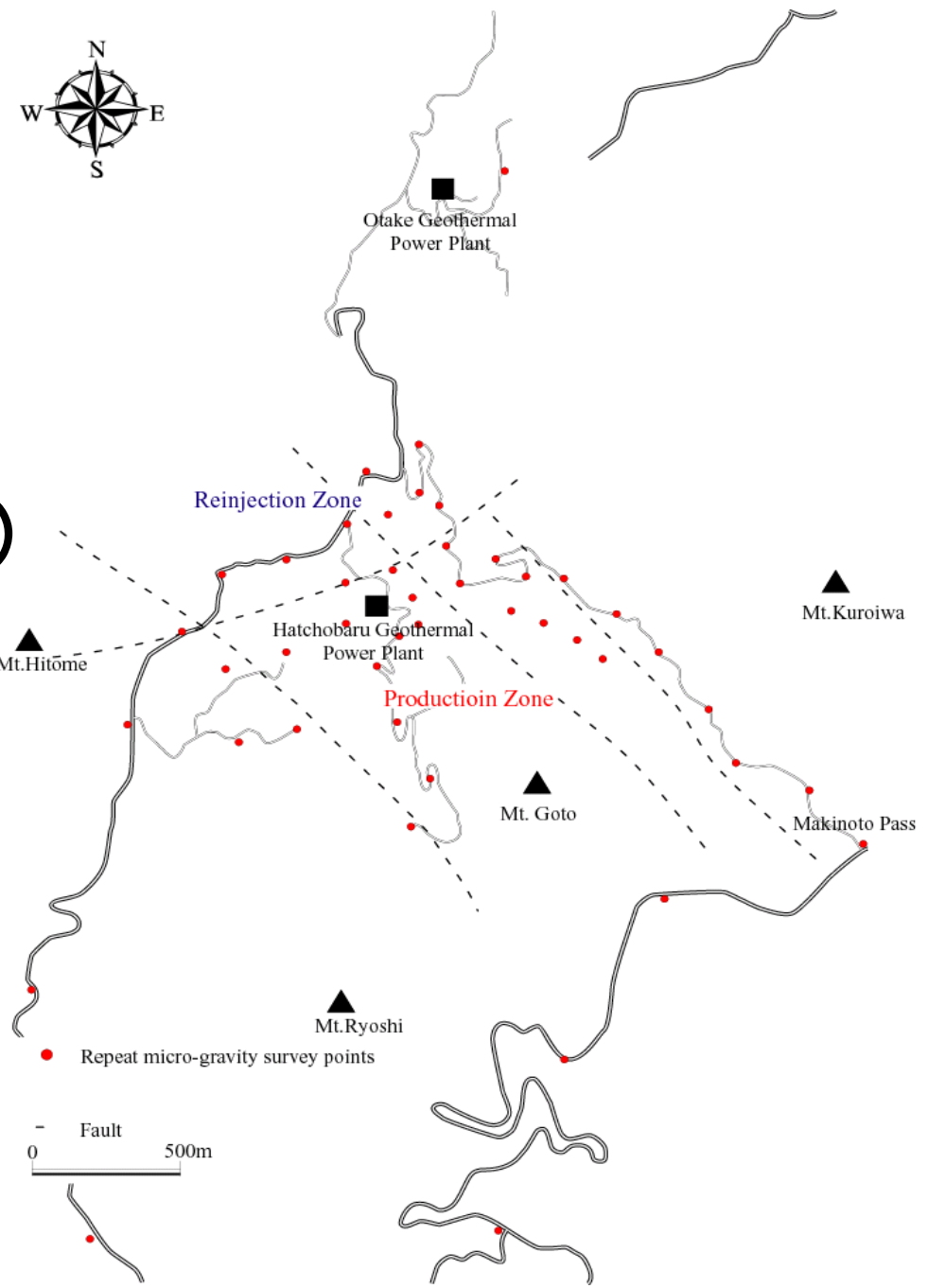
**:地下水量増加⇒重力増加**

# 現場での重力測定(九大/西技/九電共同研究)

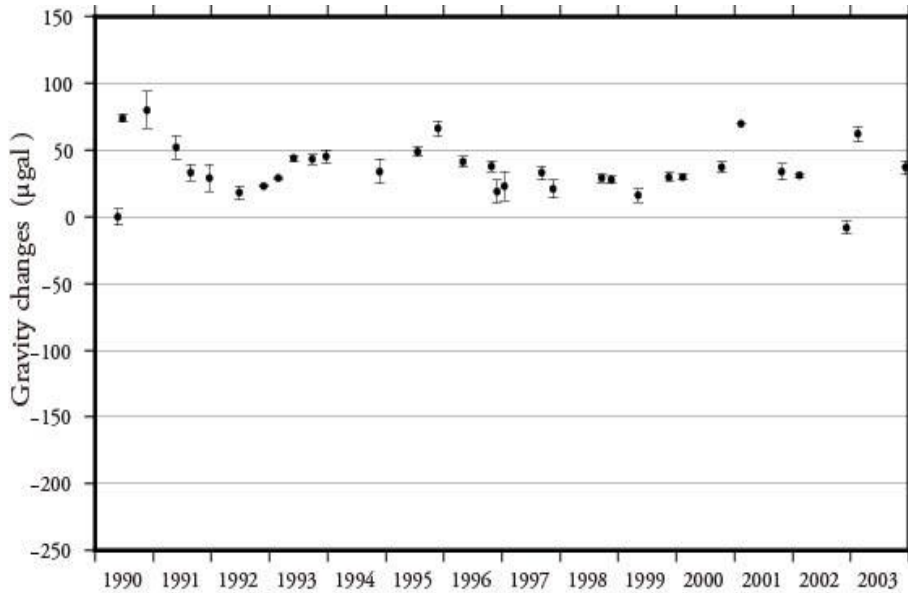
シントレックス重力計による地熱発電所構内での重力測定。地表に重力計を設置し、重力値を計り、記録紙に記録するとともに、内臓メモリーに記憶する。



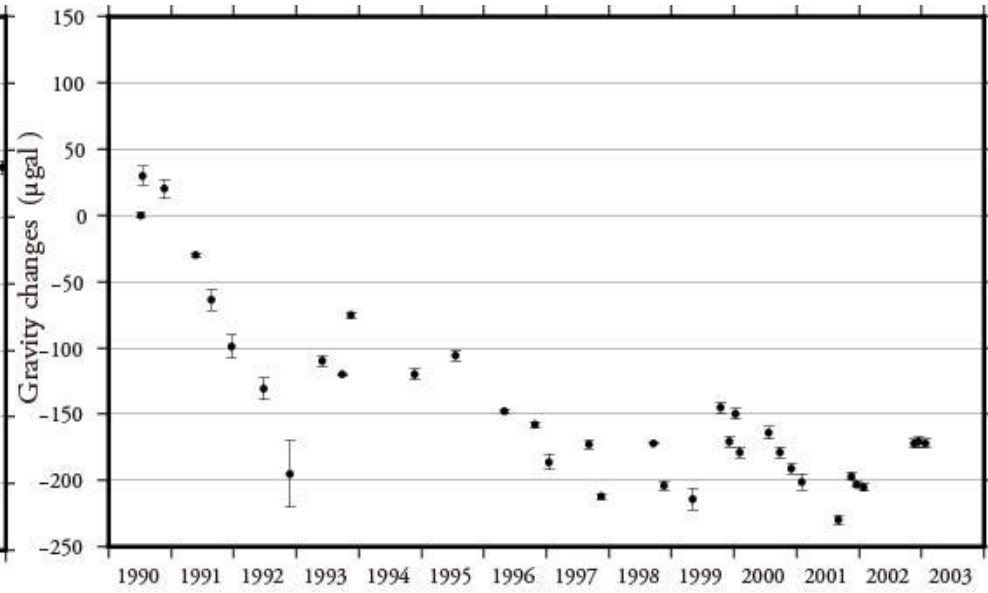
- 八丁原地熱地域における重力観測点
- 発電所建屋
- ▲ 火山ピーク
- 断層(地下深部)



# 還元ゾーン/生産ゾーンにおける重力変化例



還元ゾーン

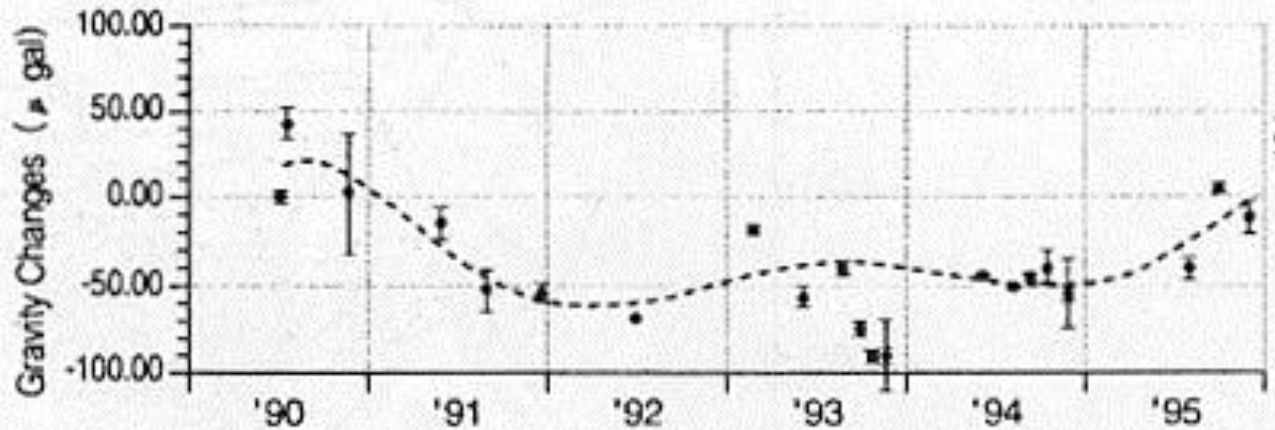
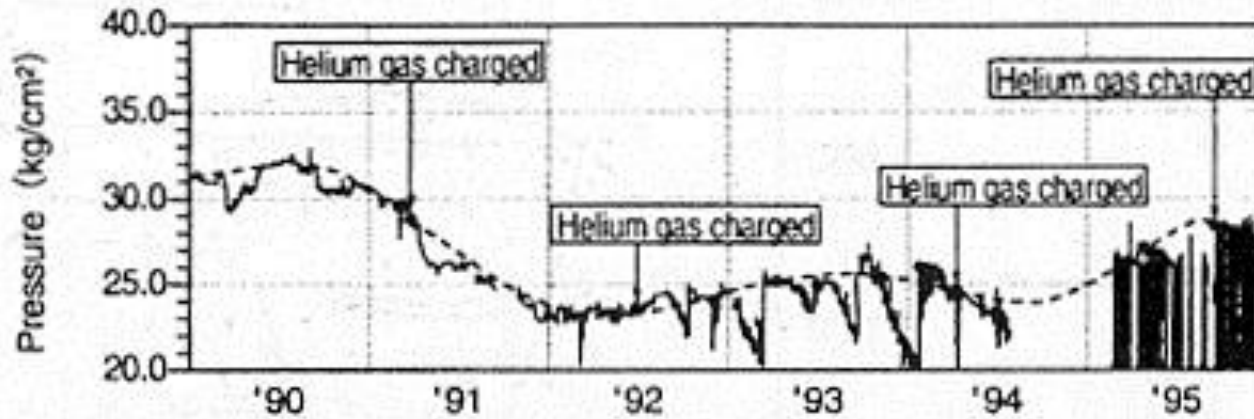


生産ゾーン

# 地熱貯留層の圧力変化(上)と 直上で観測された重力変動(下)のよい対応

A coefficient of correlation : 0.93

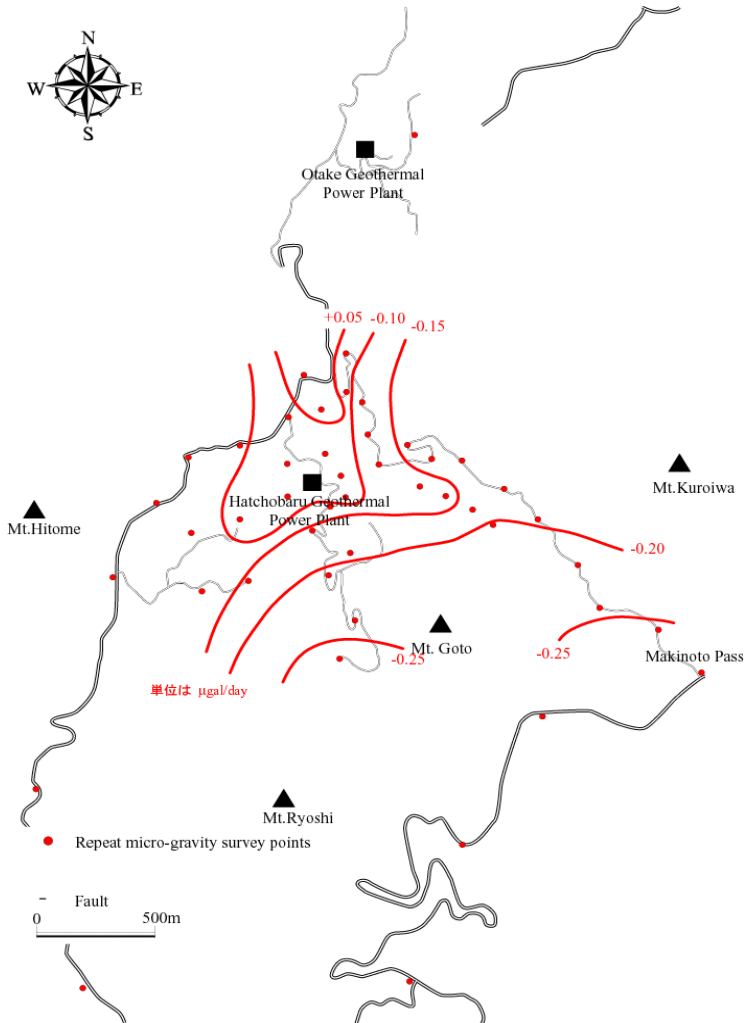
DEPTH=750m



# 重力変化(運転開始直後と10年後)

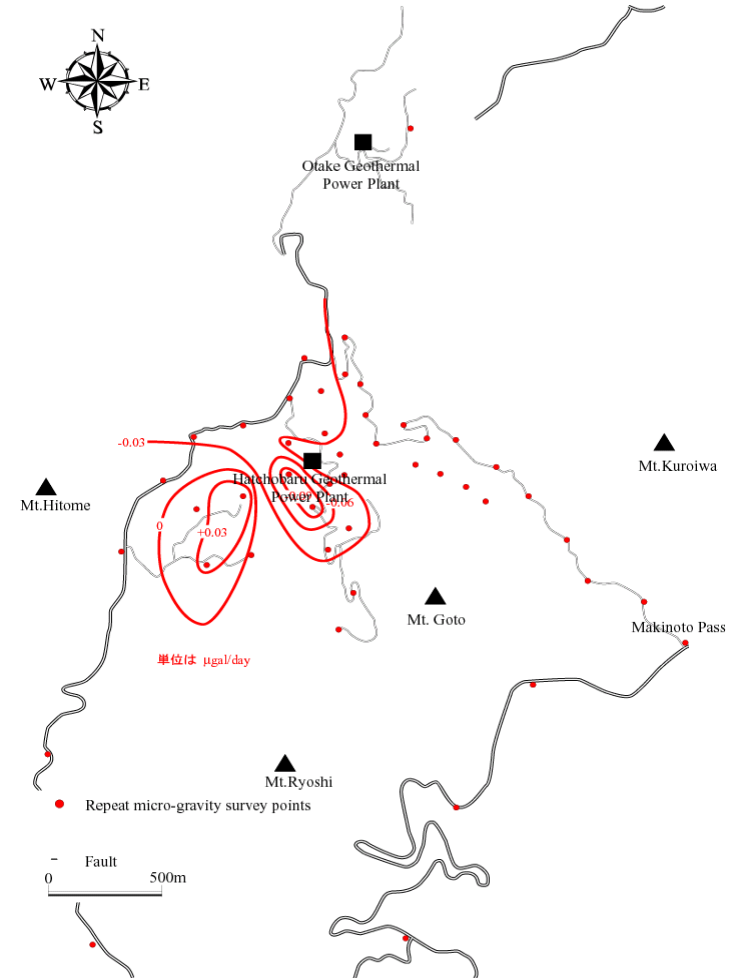
(1990年7月 から 1991年6月)

貯留層影響範囲～3km X 6km程度＝～18km<sup>2</sup>程度

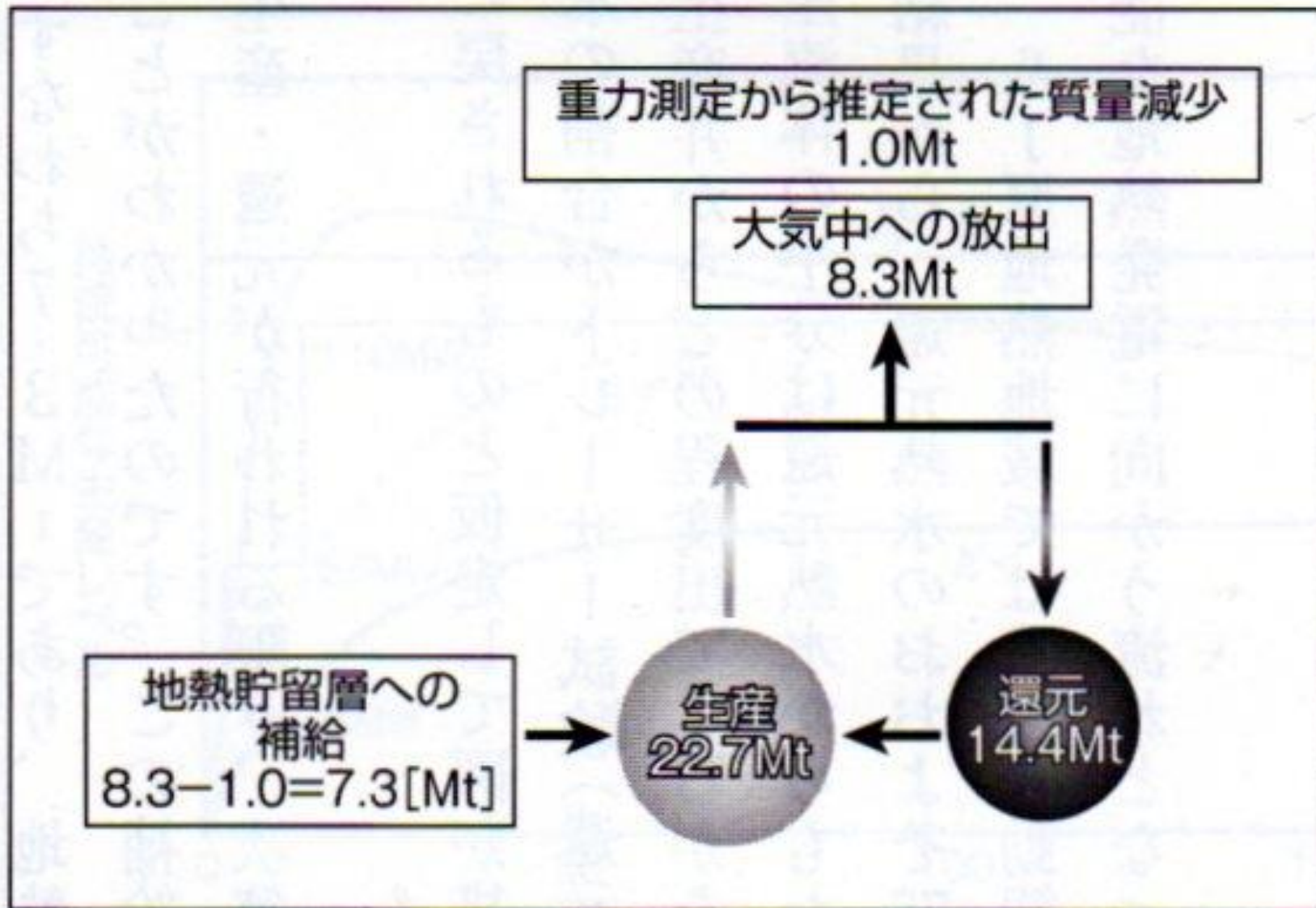


(2000年10月 から 2001年10月)

坑井影響範囲～500m X 800m程度＝～0.4km<sup>2</sup>程度



# 1999年10月から2000年10月における 地熱貯留層の水収支モデル





# 数値貯留層モデルから推定される貯留層への補給と 推定貯留相温度変化（鵜田, 2006）

生産地熱流体中に占める	自然涵養の割合	46%
	還元熱水の割合	48%
	合 計	94%

この割合は、還元熱水の還流率が75%とした場合の、重力変動観測結果と一致している。

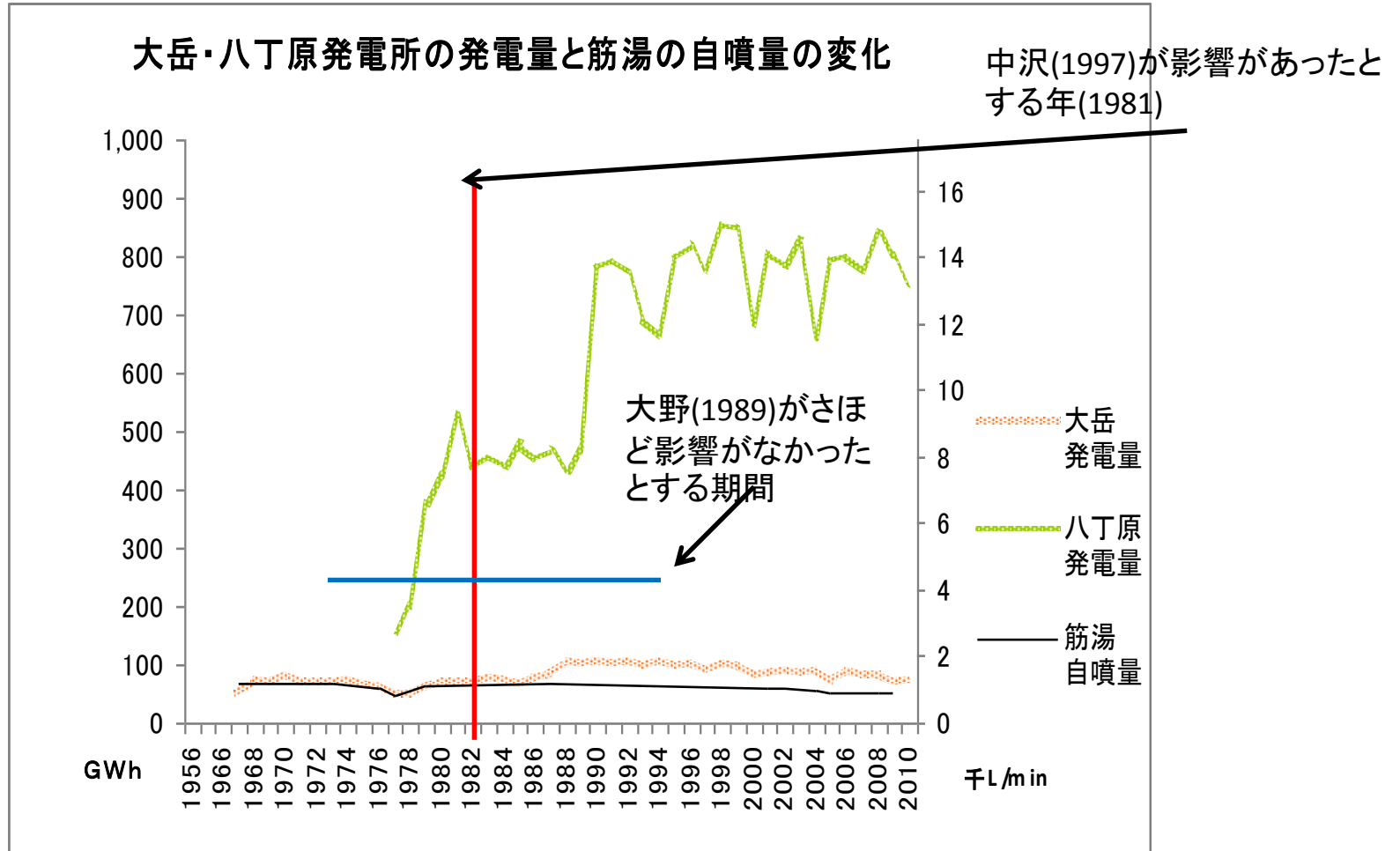
生産地熱流体の94%が地熱貯留層に補給されていることになり、水収支的にはほぼ持続可能な生産となっている。

一方、モデルから推定される貯留層温度変化として  
-0.8°C / 年が推定されている。

# 大岳・八丁原発電所の発電量と

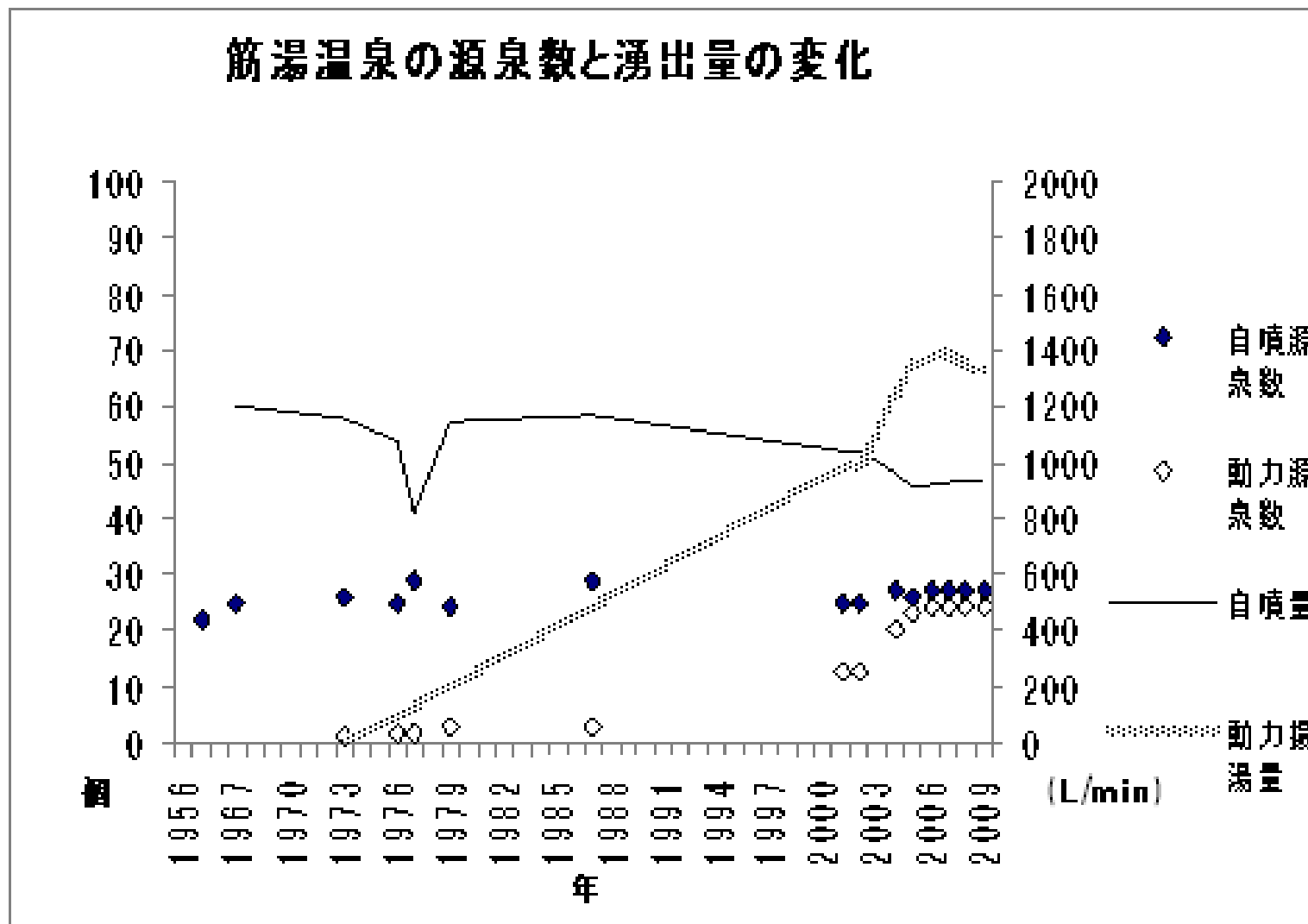
## 筋湯温泉の自噴量の変化(野田、2012)

八丁原地熱発電所運転開始による地熱流体の生産と筋湯温泉自噴量に相関は見られない。



# 筋湯温泉の源泉数と湧出量の変化(野田、2012)

自噴量の減少と動力源泉数・動力揚湯量の増加が良い対応



# 「持続可能な発電」は諸課題解決に必須技術

○長期間安定な発電⇒経済性に大きく貢献

○温泉への影響を最小化(地下流体のバランス維持)

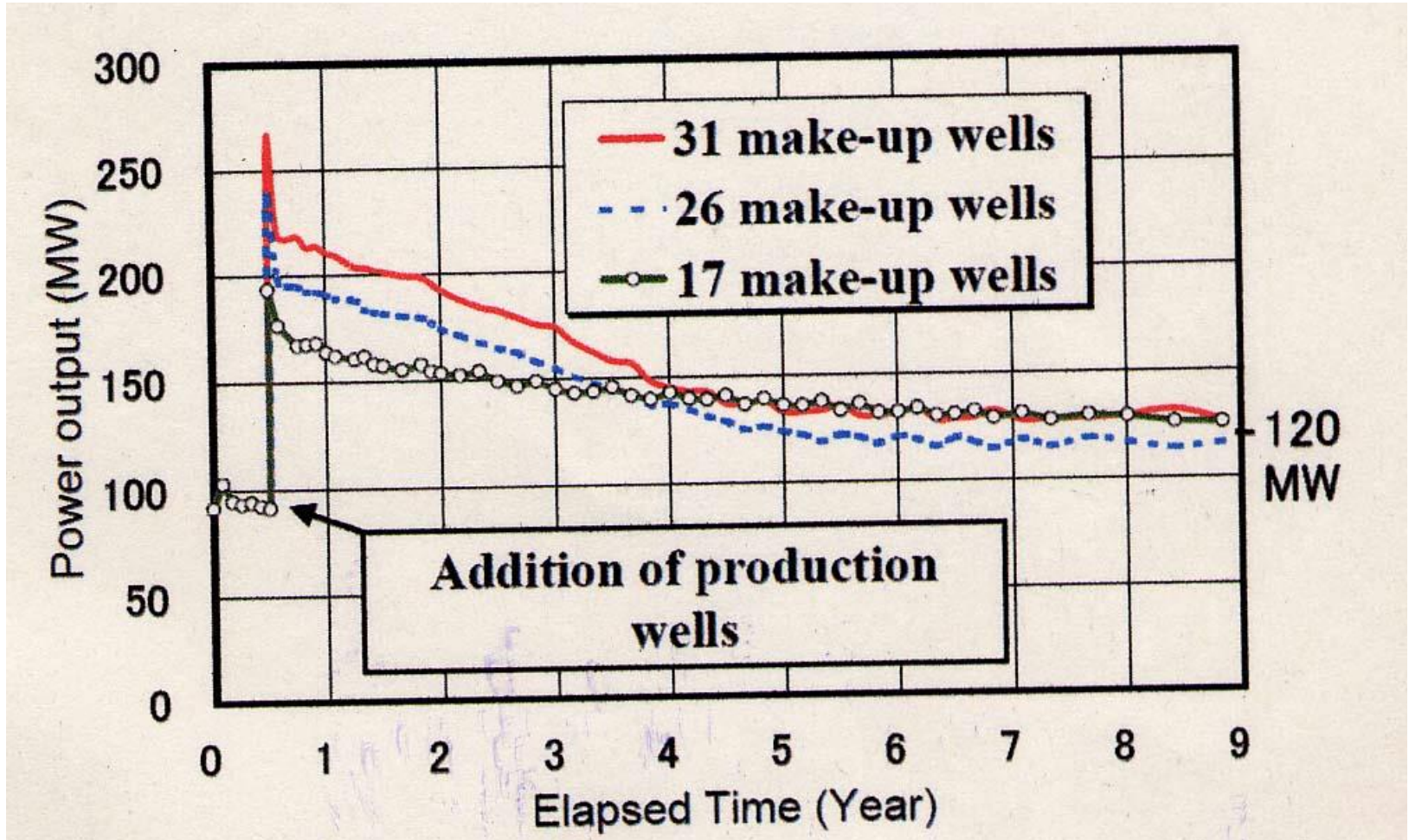
野田(2014)による定量評価:八丁原地熱電所運転の筋湯温泉への最終的影響  
温泉湧出量変化(-0.4~-1.3%)、泉温低下(-0.8~-2.4℃)

○最小限の補充井掘削(地表改変を最小化)

⇒持続可能な発電は、自然環境への影響を最小限にするとともに、長期間発電所を維持でき、経済性も最大限に高める。

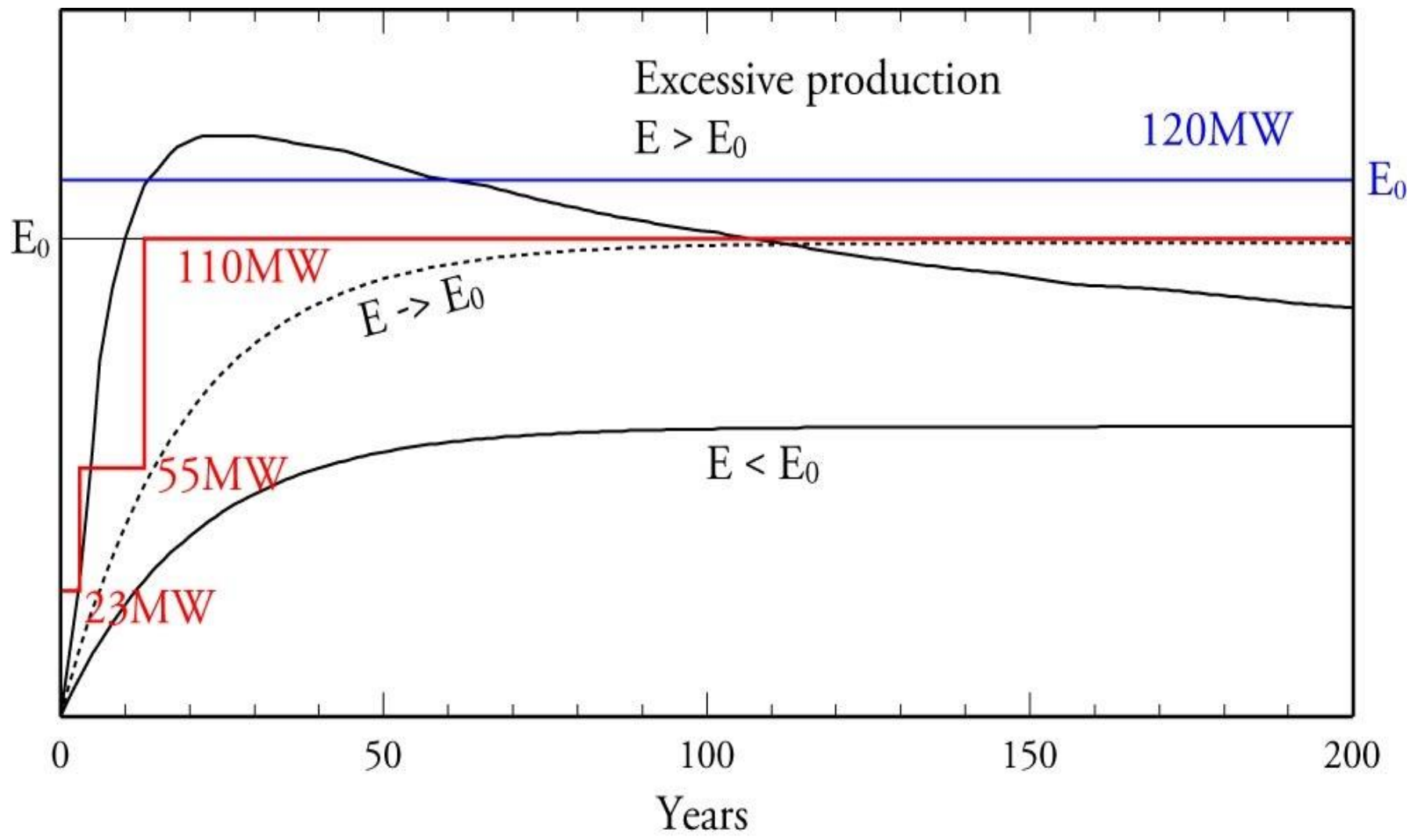
# さらに、八丁原地熱貯留層における 持続可能な発電の数値シミュレーション

(鵜田、2006)



# 段階的開発による持続可能な大規模地熱発電の実現 八丁原地熱発電所の例

小さく生んで、モニタリングとモデリングで大きく育て、長生きさせる！



# おわりに

## 持続可能な地熱発電に向けた キャッチコピー

質的にも、量的にも、経済的にも、  
環境的にも、地域共生的にも優れた  
「地熱発電」を目指します。

**みなさんのご理解・応援を期待します！！**