

# くらしとエネルギーを変える サーキュラーエコノミー

環境・社会理工学院 融合理工学系 分山達也



システム工学

地理情報システム  
GIS

機械学習

系統モデリング

線形計画法による  
需給モデリング

電力市場の限界費用分析

Modeling  
& Scenario  
analysis

Market  
design &  
community  
acceptance

エネルギー経済学  
環境政策論

空間計画  
土地利用計画

市場設計  
インセンティブ

系統運用ルール

地域合意形成・社会受容性

ゲーム理論・共有資源論

# Circular economy (ISO 59004)

サーキュラーエコノミーのISO国際規格による定義

資源の価値を回復、保持、付加しながら資源の循環的な流れを維持するための体系的なアプローチを用いて、持続可能な発展に資する経済システム

Circular economy: economic system that uses a systemic approach to maintain a circular flow of resources, by recovering, retaining or adding to their value, while contributing to sustainable development.

キーワード：経済と環境資源問題のデカップリング、廃棄物政策から経済政策へ

ISO (ISO59004):

[https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:59004:dis:ed-1:v1:en:~:text=3.1.1,resources\)%20from%20the%20economic%20system.](https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:59004:dis:ed-1:v1:en:~:text=3.1.1,resources)%20from%20the%20economic%20system.)

野田由美子（2025）サーキュラーエコノミー, 日経文庫

## Ellen MacArthur Foundation – Circular Economy Principles

### 廃棄物と汚染を設計段階で出さない

製品やシステムの設計段階から、廃棄物や汚染の発生を防ぐことを重視。長寿命設計、リサイクルしやすい素材の選定・しくみなどが含まれる。

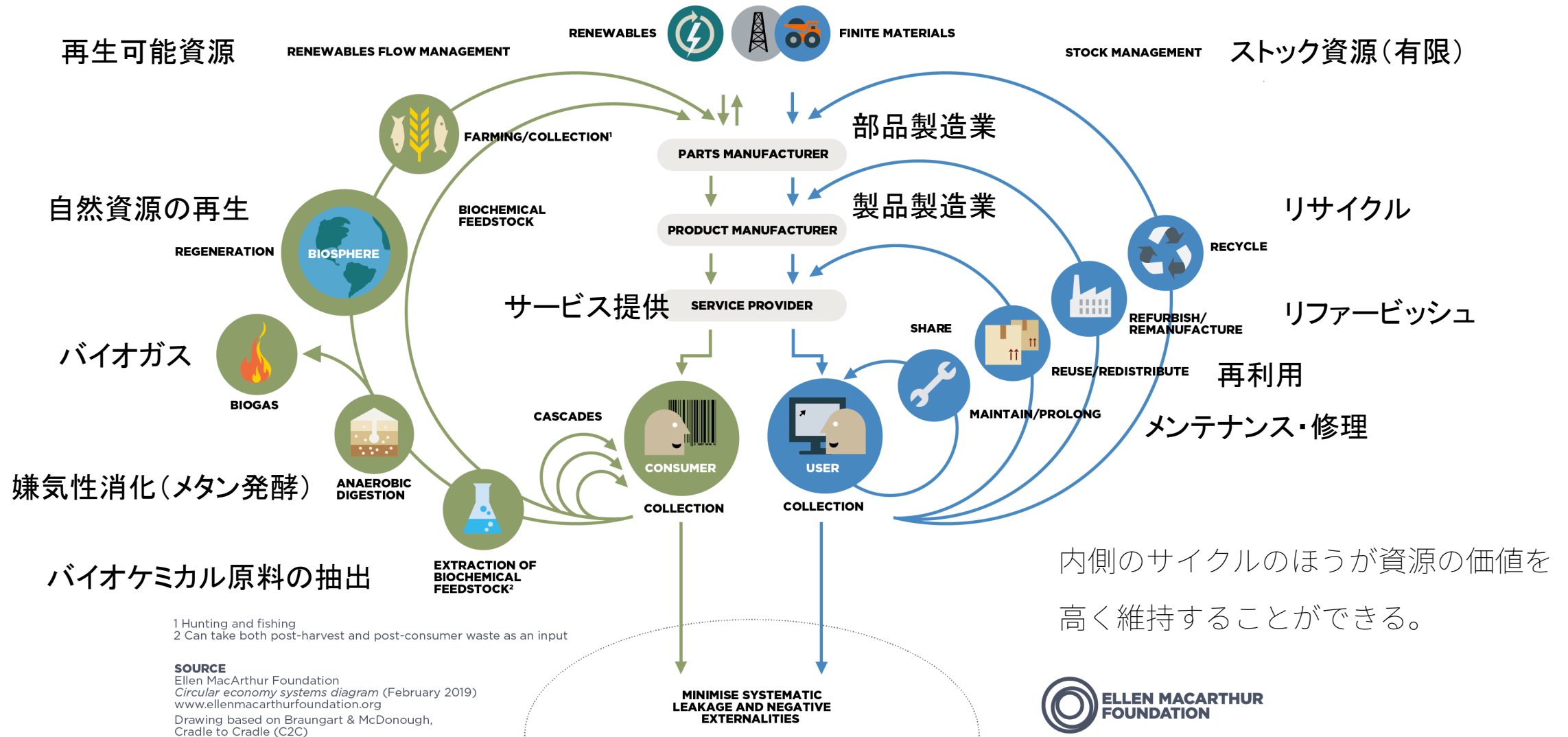
### 製品と資源を使い続ける

製品や資源を価値を最も高く保持させる形で循環させる。再使用、修理、再製造、リサイクルなどを通じて、価値を最大限に活用する。

### 自然のシステムを再生する

自然資本を保護・再生することを目指す。生物多様性の保全、土壌の回復などが含まれる。

# バタフライ・ダイアグラム



1 Hunting and fishing  
2 Can take both post-harvest and post-consumer waste as an input

**SOURCE**  
Ellen MacArthur Foundation  
Circular economy systems diagram (February 2019)  
www.ellenmacarthurfoundation.org  
Drawing based on Braungart & McDonough,  
Cradle to Cradle (C2C)



## オランダ

- 2050年までに完全な循環型経済の実現
- 2030年までに1次原料の利用の半減を目指す
- マテリアルパスポート
- プロダクトアズアサービス (Product-as-a-Service)

## ドイツ

- 拡大生産者責任制度 (EPR) 製品設計段階からリサイクル性を考慮することを義務化。
- デジタル製品パスポート (Digital Product Passport, DPP)
- バッテリーパスポート

## フランス

- 2040年までに非リサイクルプラスチックゼロ
- 修理する権利の確立：修理可能性指標の導入
- 衣類廃棄禁止令

## デンマーク

- 気候変動対策と資源効率の向上を両立する。
- 産業共生 (Industrial Symbiosis) のモデル：Kalundborg Symbiosis

- 循環型社会形成推進基本計画（2000年～，2024年改定）
- 市場の拡大（2020年50兆円→2050年120兆円）
- 製品設計段階からの資源循環設計（エコデザイン）
- デジタル技術（製品パスポートなど）の活用
- 地域循環共生圏の推進
- 食品ロス削減、プラスチック資源循環、建設資材の再利用など
- 資源・素材安全保障の観点
- 経済成長とWell-being を同時に実現する新しい成長

# 理想から実現可能なものへ

デジタル技術がサーキュラーエコノミーを推進し実現可能とする。

共有地の悲劇：多数者が利用できる共有資源は乱獲によって枯渇してしまうリスクを持つ。

共有資源論（コモンズ論）：自然資源などの共有資源の維持は地域の自治管理によって成立している。行政による管理や、私有地化だけでは資源の枯渇を回避できない。

ーエリノア・オストロム（2009年ノーベル経済学賞）

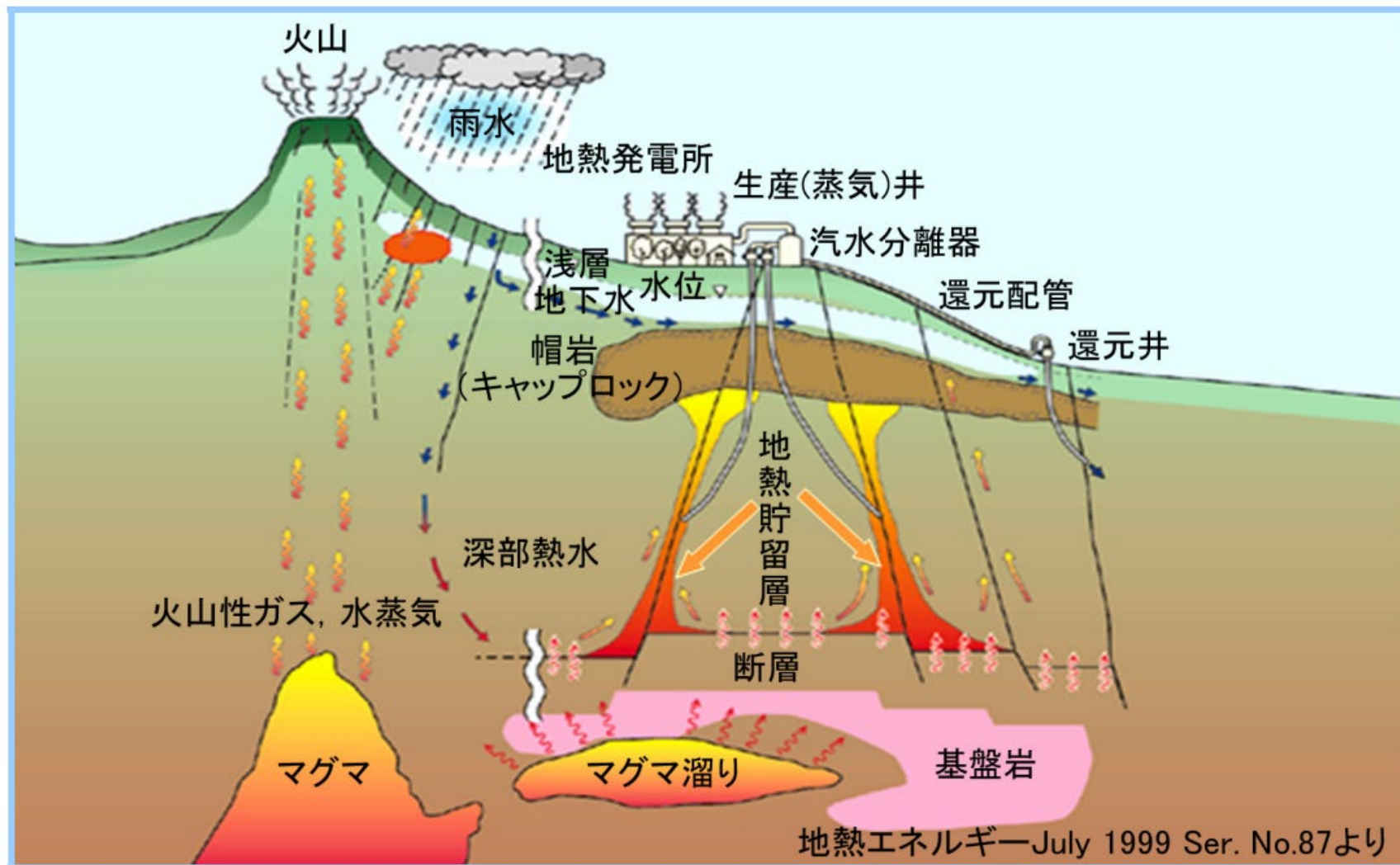
## 共有資源管理の8原則（オストロムの設計原則）

- 1.明確な境界の設定：資源とその利用者が明確に定義されている。
- 2.地域の条件に合ったルール：利用ルールが地域の実情に合っている。
- 3.参加型の意味決定：利用者がルール作りに関与している。
- 4.監視の仕組み：利用状況を監視する人がいて、利用者と関係がある。
- 5.段階的な罰則：違反者には段階的な罰則がある。
- 6.紛争解決の仕組み：迅速かつ安価な紛争解決手段がある。
- 7.自治の承認：外部の政府が地域のルールを認めている。
- 8.多層的な組織：大規模な資源では複数の組織が階層的に管理している。

これまで：共有資源の管理は  
小規模の信頼のあるグループ  
でしか成立しない？



現在：情報技術によるシェア  
リングエコノミーの拡大。よ  
り大きなグループでの共有資  
源管理が成立する可能性。



八丁原地熱発電所 (大分)

一般的に温泉と地熱は浅層、深層の異なる資源を利用していることが多いが、関連性はゼロではない。



地熱資源の利用には温泉事業者との協力が重要

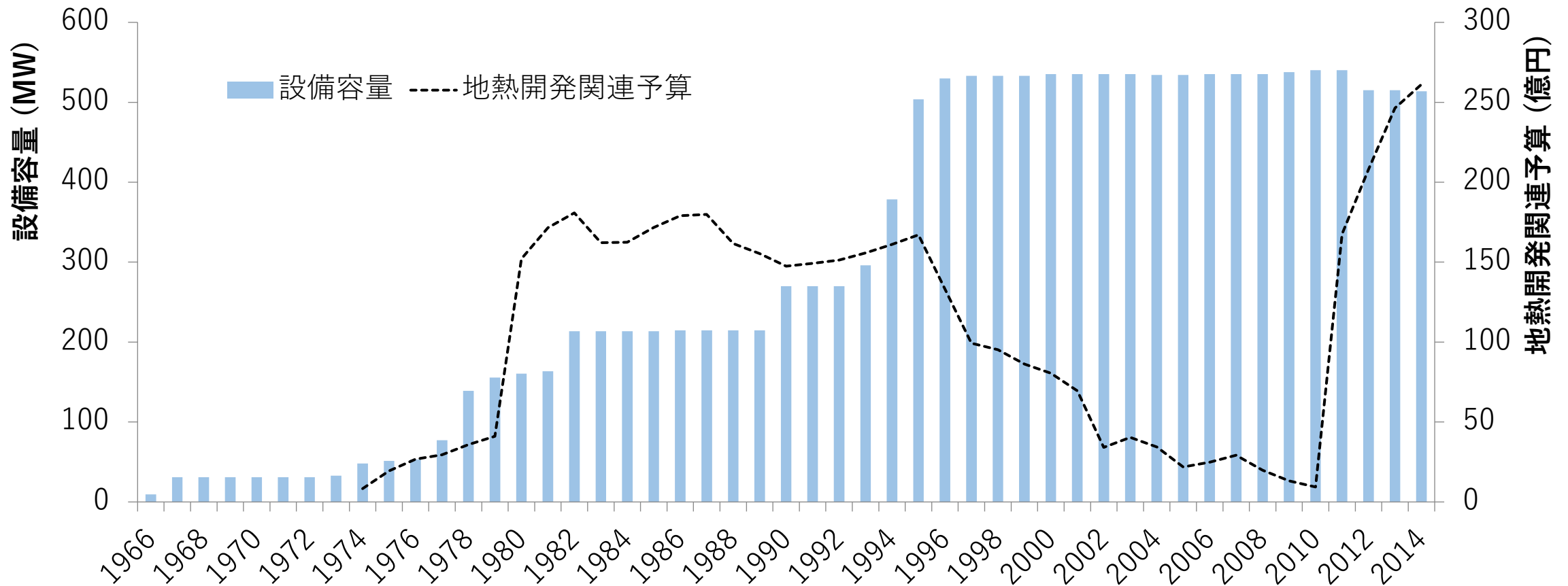
図1 地下資源モデル 地熱エネルギーの起源を示すモデル<sup>(1)</sup>

出典：坂中貴一, 齊藤象二郎, 杉丸典夫, 土屋光由 (2010) 三菱重工技報 Vol.47 No.1

# 地熱発電の導入課題

- これまでコストやリスク、地域合意形成の課題から地熱発電の導入は停滞。固定価格買取制度によって小規模を中心に導入が拡大しているが、2030年や2040年へ向けた現状の2倍以上の目標にはまだ開きがある。

地熱発電の地域・温泉との共生課題 → 地熱発電による地域循環共生圏、サーキュラーエコノミーの推進



出典：一般社団法人火力原子力発電技術協会（2017）を参考に著者作成

## Iceland is closing the circle on geothermal

Iceland is pioneering a circular economy based on its abundant geothermal energy, offering an exciting, replicable template for the world's net-zero transition.

Oliver Gordon | March 1, 2024

<https://www.energymonitor.ai/policy/iceland-is-closing-the-circle-on-geothermal/?cf-view>



## Energy Monitor

安価安定な地熱電力の利用（アルミ精錬企業など）  
副産物の循環（循環型ビジネスモデルへの投資）  
カスケード熱利用（ブルーラグーンなど）  
アイスランドでは地熱の固定価格買取制度は無し。

### Closing the circle

HS Orka is the largest privately owned power producer in Iceland, providing the country with 275MW of electric energy and 175MW of thermal energy capacity. At its Resource Park, there are currently ten companies – spanning aquaculture, biotech, cosmetics, e-fuels, food and tourism – tapping into the multiple resource streams coming from geothermal power plants, including carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), cold water, electricity, hot water, lava-filtered seawater, mineral-rich geothermal fluid and steam.

<https://www.invest.is/opportunity/resource-park-hs-orka>

# 研究プロジェクト：東アフリカ大地溝帯に発達する地熱系の最適開発のための包括的ソリューション

- ケニアにおける地熱資源のカスケード利用と便益の拡大シナリオを提案する。

Environment / Energy (Carbon Neutrality)

 Republic of Kenya

Comprehensive Solutions for Optimum Development of Geothermal Systems in East African Rift Valley

Resolve issues slowing use of the Great Rift Valley's geothermal resources



## SATREPS



## Principal Investigator



Prof.  
FUJIMITSU Yasuhiro

Faculty of Engineering, Kyushu University



Prof.  
Bernard W. IKUA

Deputy Vice Chancellor, Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology (JKUAT)

[https://www.jst.go.jp/global/english/kadai/r0105\\_kenya.html](https://www.jst.go.jp/global/english/kadai/r0105_kenya.html)

# メネンガイ地熱産業パーク構想（ケニア）

- ケニアの地熱開発会社GDCメネンガイ地熱地域を特別経済区（SEZ）とする産業パーク構想を進めている。
- 産業パークにおける地熱利用に関して、2023年に地熱直接利用投資のための提案依頼（RFP）を発出。
- これまでにセメント企業 Karsan Ramji and Sons（Ndovu Cement）と上記供給契約（Steam Offtake Agreement）を締結（2023年末）
- GDCが供給する蒸気を用いて、4MWのウェルヘッド地熱発電ユニットを設置し、自社工場に電力を供給。
- 余剰熱はセメント製造工程の乾燥ユニットにも活用。
- ケニアにも地熱発電の固定価格買取制度はあるが、地熱発電自家消費の場合は対象外。



# ケニア産業界への熱需要調査・ワークショップ

- ケニアは周辺国と比較しての電力・燃料コストが高く、周辺国への産業流出が懸念されている。
- ケニアの産業プロセスでは依然として熱回収が不十分なボイラーの利用が多い。エネルギー・熱のカスケード利用だけでなく、産業全体での効率向上や環境負荷の低減、受容性向上を図る必要がある。
- 地熱産業パーク構想に、サーキュラエコノミーの考え方や、産業共生（industrial symbiosis）の仕組みを取り入れていくことを提案。具体的なシナリオを検討中。

**GEOHERMAL DIRECT HEAT USE WORKSHOP**

Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology, supported by Kyushu University, and the Institute of Science, Tokyo, Japan, holds the workshop to build the future geothermal cascading use scenario in Kenya.

**28 May 2025**  
Venue: Merica Hotel Nakuru

**AGENDA**

9:00 am-12:00 pm  
Keynote speech by Kenya Association of Manufacturers (KAM)  
Keynote speech by Geothermal Development Company (GDC)  
"Introduction of GDC's geothermal industrial park concept"  
Presentations and talks by participants -part 1  
"Participants' heat use activities and future heat demand"  
LUNCH  
1:30 pm-4:00 pm  
Presentations and talks by participants -part 2  
"Participants' heat use activities and future heat demand"  
Group Discussion  
"Benefits and barriers of geothermal heat use"

**HOW TO REGISTER**

Please send the email with the applicant's name and affiliation to the contact. We are willing to cover your actual travel costs and invite you and one colleague to lunch if you join as a speaker.

Contact: [naotoshi.kurogi@gmail.com](mailto:naotoshi.kurogi@gmail.com)

The workshop is supported by JICA-ST LENGO project.  
[https://www.jst.go.jp/global/english/kadaa/r0105\\_kenya.html](https://www.jst.go.jp/global/english/kadaa/r0105_kenya.html)



# 地熱発電の固定価格買取制度の課題

- 固定価格買取制度では、地熱発電を含む再生可能エネルギーの電力を高く固定価格で一定期間買い取ることで、事業リスクを低減し、投資を促すことができる。
- その一方で、発電された電力は系統運用者や小売事業者によって電力消費地（他地域含む）へと向かってしまう。熱と電力が切り離され、電力のみで最適化されたビジネスモデルが促進されて、熱が取り残されてしまう。
- 地熱産業パークなど特定需要家への供給を目指す場合は、電力販売契約（PPA）での供給となり、固定価格買取制度の対象外となる。
- 固定価格買取制度の次の制度や、電力販売契約（PPA）の用途の多様化の議論が進められており、その中でこのような問題を解決する必要がある。
- このような制度設計の是非を分析するときの指標としても、サーキュラーエコノミーや産業共生（industrial symbiosis）の評価軸を応用できる可能性がある。

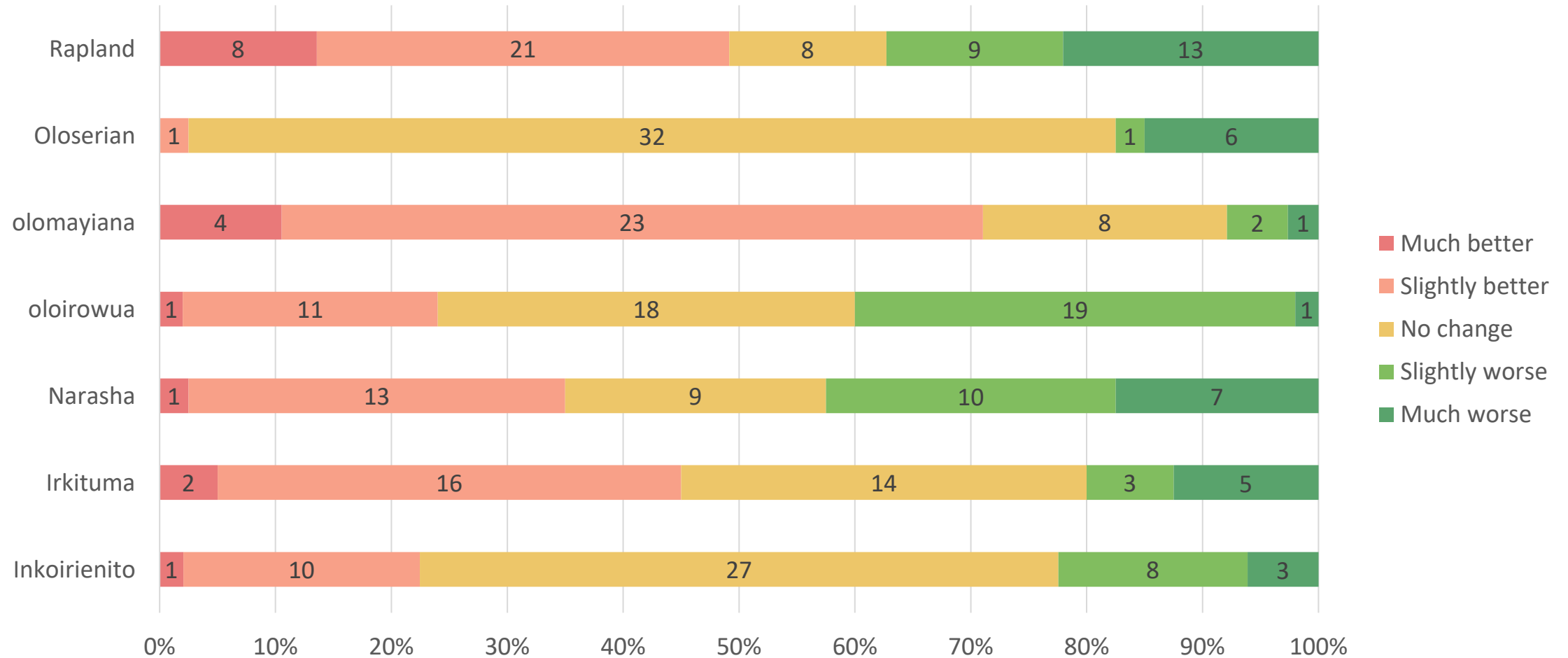
# ケニアにおける地熱発電の社会受容性

- ケニア最大の地熱発電所であるオルカリア地熱発電所は、国立公園ヘルズゲート内に位置し、周辺にはマサイ族の居住地が分布している。これまでの地熱開発では、マサイ族居住地の移住が行われており、強引な再定住プログラムによって、地域の受容性が悪化したケースもある。国際学術誌においても、地熱発電開発の負の側面として報告されている。
- 一方で、若い世代を中心に地熱発電の拡大を歓迎する意見もあり、全体像を把握するために約320人（1人あたり30～40分程度）のアンケートに基づく聞き取り調査を実施。



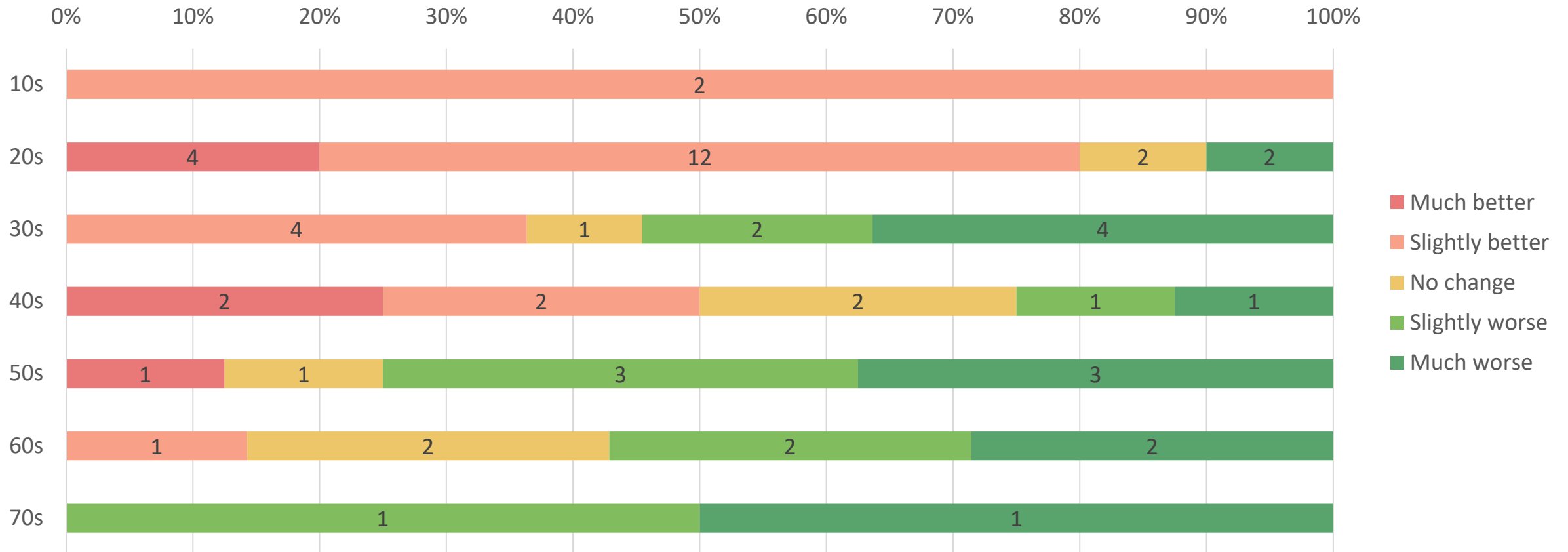
# Overall Well-being (All area)

- Considering all aspects (economic, social, environmental), how would you rate your overall well-being since the geothermal project started? (N=316)



# Overall Well-being (RAPLAND\_Age)

- Considering all aspects (economic, social, environmental), how would you rate your overall well-being since the geothermal project started? (N=58)



統計解析によって地熱に対する選好や幸福度、満足度に対して影響を及ぼしている要因を明らかにする。

社会や政策を変えていくためには、将来像の共通認識の構築や、政策影響のデータに基づく分析が必要。公開データやフィールド調査によって得られたデータをもとに様々な分析を行う。

- ゲーム理論やエージェントベースモデルを用いた合意形成モデル分析（合意形成）
- GIS（地理情報システムを用いた空間的分析、予測）
- 主観的指標（幸福度, Well-beingなど）の活用、統計解析
- 最適化計算（線形計画法）のモデルによるエネルギー・電力需給のシナリオ分析や予測

様々な分析によって社会の変化を捉え、新技術と既存技術・制度の新たな調和を提案する研究を目指す。

- 社会の変化（デジタル化、P2P電力取引、プロシューマ、シェアリングエコノミー）
- 制作・制度の提案（電力市場、電力系統、土地利用・空間計画、環境アセスメント、温暖化対策計画）
- 理論の拡張（共有資源論、社会受容性、社会物理学、サーキュラーエコノミー、コミュニティパワー）

研究室所属学生を中心に各テーマの研究に励んでいます。

# さいごに

- リサイクルエコノミーからサーキュラーエコノミーへ
- ビジネスモデルの再構築
- 政策の転換（プッシュとプル）
- 地産地消やプロシューマー型のエネルギー利用の評価
- ウェルビーイング指標による長期的な持続可能性の向上