

地熱発電の普及に向けた 地熱エネルギーの活用に関する考察

慶應義塾大学経済学部経済学科
大沼あゆみ研究会 13期
学籍番号 21326685
若山 みりあ

勝者は敗者より多く敗北する。
負け続けても挑戦する君はそれでいい。
君は正しい道を走っている。
—Matthew Keith Groves—

目次

序章

第 1 章 日本のエネルギー事情

1-1 日本のエネルギー事情

1-2 日本のエネルギー政策

第 2 章 地熱エネルギーについて

2-1 地熱エネルギーとは

2-2 地熱の間接利用—地熱発電—

2-3 地熱の直接利用

2-4 (補足) 地熱と地中熱

第 3 章 フィールドワーク

3-1 八丈島の概要

3-2 八丈島における環境政策

3-3 八丈島における地熱エネルギーの活用

3-4 フィールドワークまとめ

第 4 章 先行研究

4-1 先行研究紹介

4-2 先行研究を踏まえた考察

第 5 章 試算

5-1 農業利用の CO₂ 削減量

6-2 野菜における CO₂ 削減量

第 6 章 考察

終章

参考文献

終わりに

序章

中学生の頃に理科の授業で、『環境にやさしい発電方法』として原子力発電が一番に挙げられることに疑問を感じた。当時の私は先生に質問をし、二酸化炭素排出量が少なく環境にやさしい、との回答を得たものの、なんだか腑に落ちないと感じた。その数年後、高校生の時に東日本大震災とそれに伴う福島原発事故を目の当たりにし、環境にやさしいエネルギーとは何なのか、また日本のエネルギー問題への関心が強く沸いたとともに、発電方法の選択には環境や安全・安定性だけでなく発電コストのような経済的な観点が大きく影響することに興味を持った。そんな中、地理の授業で日本には地熱資源が豊富でありながら活かされてないことを学び、もっと活かさないものなのか、と感じていた。また、偶然にも大学受験の際の小論文のテーマは原子力発電に関するもので、興味を持っていた内容であったために書きやすかったことを覚えている。

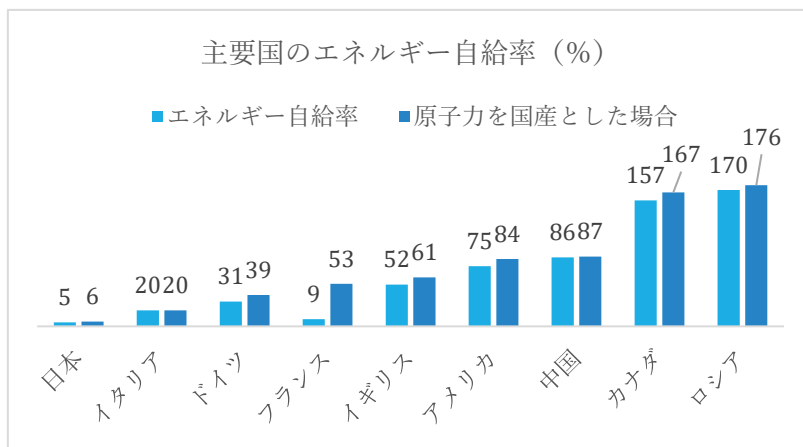
エネルギー問題は私が環境と経済の関係に興味を持ったきっかけであり、入ゼミ時のレポートでもテーマに選んだ問題である。思い返すと私が学生生活を通して関心を持つことが多かったのはエネルギー問題に関わるが多く、ぜひ卒業論文で取り上げたいとゼミに入ったころから考えていたため、テーマにした。

第1章 日本のエネルギー事情

1-1 日本のエネルギー事情

a. エネルギー問題

エネルギー消費大国である日本だが、エネルギー資源は少なく、輸入に大きく依存している。図1-1を見てもわかるように各国と比べても自給率は低く、2014年のデータで輸入依存度は9割を超えている。



図：1-1 主要国のエネルギー自給率比較

IEA「ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES, 2014」,

IEA「ENERGY BALANCES OF NON-OECD COUNTRIES, 2014」より作成

海外の資源に大きく依存し、とりわけ燃料の輸入先である中東情勢の変化に左右されやすいという不安への懸念から、1970年代のオイルショック以降、石油依存度を低減させてきていたが、2011年3月11日の東日本大震災に伴って起きた東京電力福島第一原子力発電所事故により原子力発電所は稼働を止め、再び日本の化石燃料依存の傾向は強まった（図1-2）。これは石油燃料輸入による資金の流出や、CO2排出量の増加にもつながっている（図1-3, 1-4）。

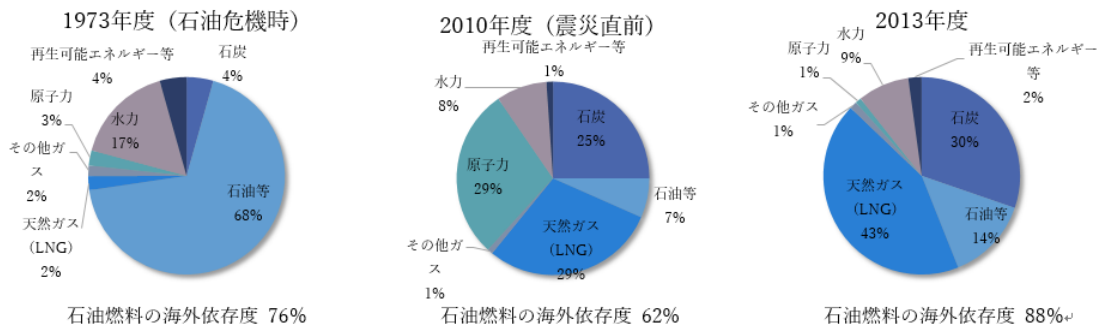
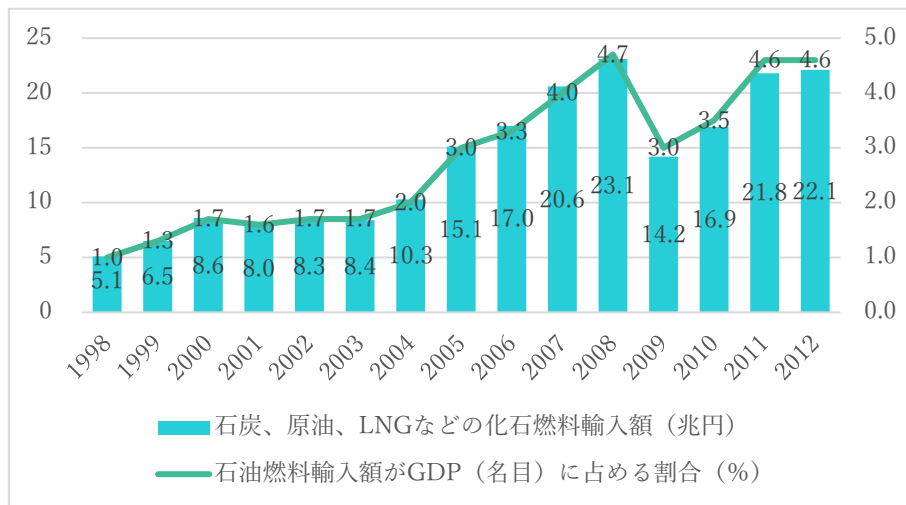


図1-2 海外からの化石燃料に対する依存度増加

経済産業省 (2014年)『エネルギー情勢について』より作成



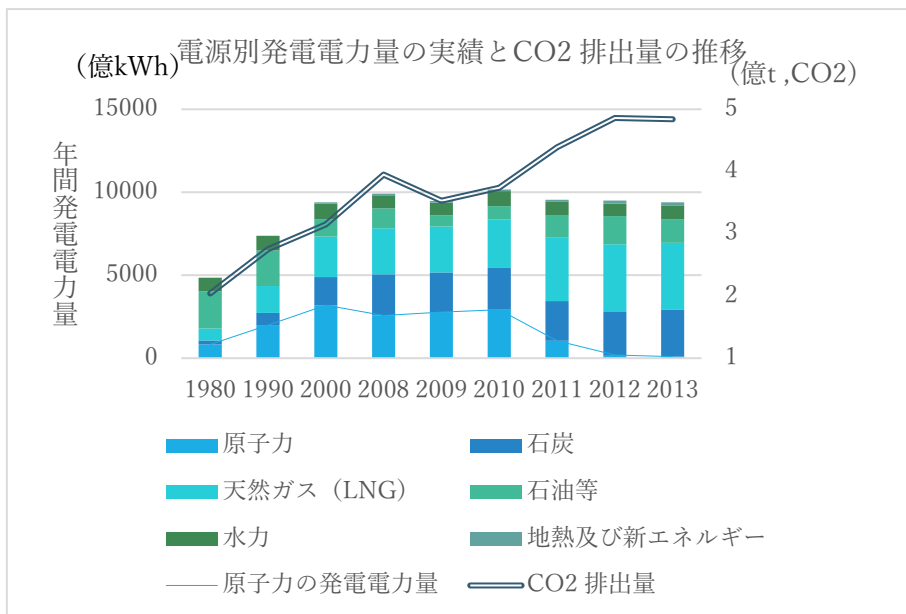
財務省貿易統計より集計。

ナフサ、円滑湯など、非エネルギー用途と考えられる燃料は除く。

2012年の輸入額データは12月までの集計値(16.6兆円)から推計。

図1-3 化石燃料の輸入金額の推移

環境省『低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言』より作成



石油等にはLPG、その他ガスおよび瀝青質化合物が含まれている。

発電電力量は10電力会社の合計値(受電を含む)。

電気事業連合会「原子力・エネルギー」図面集2014をもとに作成(日本における電源別発電電力量の実績)

出典: 電気事業連合会「電気事業における環境行動計画」(CO2 排出量の推移)

図: 1-4 電源別発電電力量の実績とCO2 排出量の推移
関西電力『日本のエネルギー事情』より

1-2 日本のエネルギー政策

近年の日本の新エネルギーに関する動きを以下にまとめる。

a. 固定価格買取制度

2011年に制定された「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」により2012年7月から「再生可能エネルギー固定価格買取制度(Feed-In-Tariff=FIT)」が始まった。この制度は電力会社に対して、太陽光発電や風力発電、バイオマス発電などの再生可能エネルギー発電事業者からの電力を政府が指定した調達価格・調達期間で全量買い取ることを義務付ける制度である。電力会社が買い取る費用は電気利用者から賦課金という形で集められる。これにより発電設備の高い建設コストも回収の見通しが立ちやすくなり、新エネルギーの急速な普及を促すことが期待されている。

種類	太陽光		風力		地熱		水力
区分	10kW~	~10kW	20kW~	~20kW	15MW~	~15MW	1~30MW
単価	32円	37円	22円	55円	26円	40円	24円
種類	水力		バイオマス				
区分	0.2~1MW	~0.2MW	メタン発酵	間伐材	一般木質・ 農産物残渣	建設資材	一般廃棄物・その他
単価	29円	34円	39円	32円	24円	13円	17円

表1-5 FIT 買取価格 (kwhあたり)

(「平成26年度 森町地域新エネルギービジョン 北海道森町」より)

制度が始まって以降、再生可能エネルギーによる発電量は増加しており、とりわけ太陽光発電が急増している。また、家計や企業への負担の軽減を目的として電気料金の上昇を抑制するために固定価格での買取量を制限、政府が決める高めの価格で買い取る電力の量に上限を設ける「総量規制」の導入を検討する動きがある。

一方で、ポテンシャルの大きいとされる風力発電では同時期に導入された環境アセスメントの影響もあり伸びが小さい。今後は風力発電、地熱発電を優遇することも検討されている。

	(1)導入容量 (万kW)		(2)買取電力量 (万kWh)	(3)買取金額 (億円) (※3)	(4)認定容量 (万kW)
	新規認定分(※1)	移行認定分(※2)	制度開始からの累計	制度開始からの累計	新規認定分(※1)
太陽光 (住宅)	440	471	2,407,522	10,325	515
太陽光 (非住宅)	2,668	26	6,436,064	26,080	7,550
風力	59	253	2,044,722	4,475	304
中小水力	22	21	484,901	1,270	79
地熱	1	0	11,533	50	8
バイオマス	75	113	1,638,586	3,569	400
合計	3,265	883	13,023,329	45,768	8,856

- ・当表で「導入」と表現するのは、固定価格買取制度の下で買取が開始された状態をいう。
- ・内訳ごとに、四捨五入しているため、合計とは必ずしも一致しない場合がある。

※1 「新規認定分」とは、本制度開始後に新たに認定を受けた設備。

※2 「移行認定分」とは、再エネ特措法（以下、「法」という。）施行規則第2条に規定されている、法の施行の日において既に発電を開始していた設備、もしくは、法附則第6条第1項に定める特例太陽光発電設備（太陽光発電の余剰電力買取制度の下で買取対象となっていた設備）であって、本制度開始後に本制度へ移行した設備。

表1－6 再生可能エネルギー発電設備の導入等の状況

2016年10月末時点（平成29年2月8日更新）

「固定買取価格制度情報公表ウェブサイト」

http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html より

b. 電力自由化

電力自由化は市場参入規制の緩和による市場競争の導入により、電気料金の引き下げや資源配分の効率化が進むことを期待したものである。

2011年3月11日の東日本大震災および福島第一原子力発電所での事故をきっかけにこれまでの電気事業制度が抜本的に見直され、2013年4月2日「電力システム改革に関する改革方針」が閣議決定された。そこでは①広域系統運用の拡大、②小売および発電の全面自由化、③法的分離の方式による送配電部門の中立性の一層の確保という三段階からなる改革の全体像が示された。

①広域系統運用の拡大に関して、2015年4月1日より「電力広域的運営推進機関」が発足した。この機関は東日本大震災の影響による計画停電等を踏まえ、電源の広域的な活用に必要な送配電網の整備を進めるとともに、これまで原則地域ごとに行われていた電力需給の管理を、地域を超えてより効率的にやり取りし、電力需給の調整機能を強化するものである。

②小売および発電の全面自由化について、これまで東京電力や関西電力といった各地域の電力会社だけが電気を販売しており、家庭や商店では電気の購入先を選択できなかったのが、2016年4月1日より、電気の小売業への参入が全面自由化されることによって家庭や商店も含むすべての消費者が電力会社や料金メニューを自由に選択できることとなった。電力の小売り自由化は2000年3月から始まっており、最初は大規模工場やデパート、オフィスビルなどの「特別高圧区分」が電力会社を自由に選べるようになった。その後2004年4月、2005年4月に自由化領域が拡大され、中小規模の工場や中小ビルの「高圧区分」でも自由化された。そして、2016年4月から全面自由化として「低圧区分」である家庭や商店においても電力会社が選べるようになった。

今後は三段階の改革の総仕上げとして、2018年～2020年を目途に③法的分離の方式による送配電部門の中立性の一層の確保に取り組んでいくことになる。法的分離とは電力会

社の送配電部門全体を別会社化することである。民営電力会社の場合は持株会社形式等をとることが想定される。配送電の自由化では、電力会社が所有する送電ネットワークを、公共のものとしてどの電気供給者にも公平、平等に使わせようとするものである。

c. 2030年のエネルギーミックス目標

2014年に閣議決定されたエネルギー基本計画を受けた検討を経て、経済産業省が2015年7月に発表した『長期エネルギー需給見通し』の概要をまとめる。

これによるとエネルギー政策の重要な点は、「安全性（Safety）を前提とした上で、エネルギーの安定供給（Energy Security）を第一とし、経済効率性の向上（Economic Efficiency）による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合（Environment）を図ることにある。」と述べられている。安全性については原子力発電や石油・ガスなどの燃料の供給設備の安全性の向上に取り組むことが具体的に述べられている。安定供給については危機時に安定供給を確保するために多層化・多様化した需給構造を実現することが必要で、エネルギー調達先国の多角化や国産資源の開発による調達リスクの低減、エネルギー自給率の改善が挙げられている。経済効率性に関しては震災以降上昇する電気料金の抑制とともに、経済成長を支えるエネルギー需給構造の構築も必要であり、電力コストを下げることを目指すと述べた一方で、原発依存度が下がり再生可能エネルギーの導入が促進されていることは電力コストの上昇圧力になっていることも指摘している。環境適合の項目では原発の稼働停止による火力発電の増加で温室効果ガスの排出量が増加しているが、2015年にCOP21を控えており、欧米に遜色ない温室効果ガス削減目標を掲げ世界をリードできるような長期エネルギー需給見通しを示すことを目指すと述べられている。

以上の基本方針を踏まえ、2030年エネルギー需給構造の見通しの電源構成では、上に挙げた政策目標の項目すべてを同時達成するなかで、「徹底した省エネルギー（節電）の推進、再生可能エネルギーの最大限の導入、火力発電の効率化等を進めつつ、原発依存度を可能な限り低減することが基本方針」としている。安全性、安定供給、経済効率性及び環境適合のすべてを同時に達成するためには、バランスのとれた電源構成が求められる。

具体的に、再生可能エネルギーでは、自然条件に依らずに安定した運用ができる地熱・水力・バイオマスが原子力に代わることを見込んでいる。これら電源は環境面や立地面等の制約を踏まえつつ実現可能な最大限まで導入することを見込んでいる。また自然条件によって出力が大きく変動するため調整電源としての火力を必要とするような、太陽光・風力については、国民の負担抑制とのバランスを踏まえながら電力コストを現状よりも引き下げる範囲で最大限導入することを見込んでいる。

その他火力や原子力の見込みも踏まえた結果の2030年度の電力需給構造は以下の通りとなる。

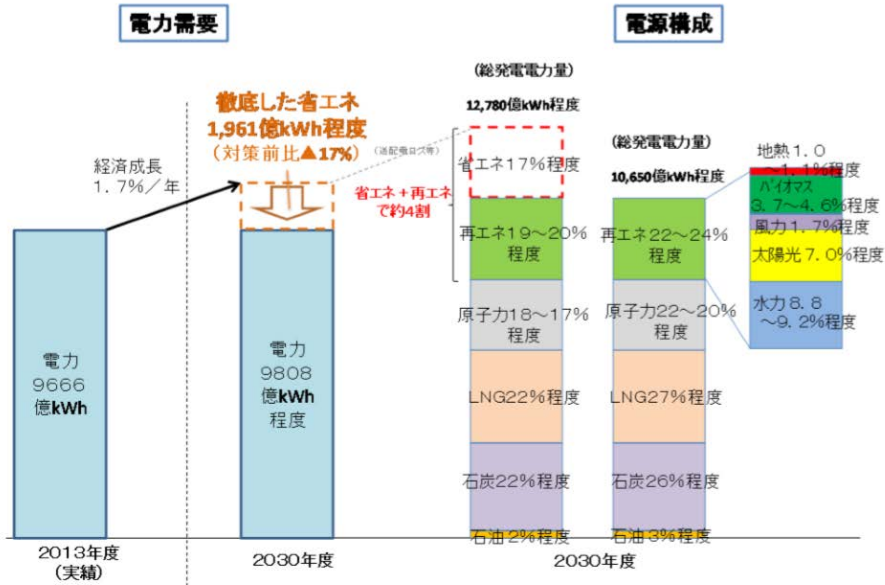


図1-7 2030年度の電力需給構造
 経済産業省『長期エネルギー需給見通し』(2015年7月)より

第2章 地熱エネルギーについて

2-1 地熱エネルギーとは

a. 地熱エネルギーの概要

地熱は地球内部のマグマという熱エネルギー全般を指し、活火山数と地熱資源量は比例する。図2-1と表2-2を見比べると地中活動の起きている地域と地熱資源量の豊富な国が対応していることが分かる。環太平洋火山帯に位置し、火山大国である日本に豊富に存在するエネルギーであり、その資源量は世界三位である。



図2-1 世界の主要な地中活動の起きている地域
(Uses of geothermal energy in food and agriculture より)

	地熱資源量	万 kW
1	アメリカ	3,000
2	インドネシア	2,779
3	日本	2,347
4	フィリピン	600
5	メキシコ	600
6	アイスランド	580
7	ニュージーランド	365
8	イタリア	327

表2-2 地熱資源量 上位8か国

資源エネルギー庁「地熱資源開発の近年の動向」(2012)より作成

地熱エネルギーの特徴は、燃料費がかからず、出力が安定しており、なおかつ地球内部が持つ自然の熱エネルギーであるため原理的に枯渇することがない、という点にある。

2-2 地熱の間接利用—地熱発電—

a.地熱発電の概要

地熱エネルギーの活用方法としてまず思い浮かぶのは地熱発電だろう。地熱発電はマグマ由来の地熱エネルギーを蒸気という形で取り出し、タービンを回す発電方法である。蒸気を利用するという点では火力や原子力も同じであり、タービンを回すという点では水力発電とも同じである。日本では東北と九州に多い。

	地熱発電設備容量	万 kW
1	アメリカ	309.9
2	フィリピン	2190.4
3	インドネシア	119.7
4	メキシコ	95.8
5	イタリア	84.3
6	ニュージーランド	62.8
7	アイスランド	57.5
8	日本	53.6

表 2-3 地熱発電設備容量 上位 8 か国

資源エネルギー庁「地熱資源開発の近年の動向」(2012)より作成

表 2-2 と表 2-3 を比べると、日本が豊富な地熱資源を持ち合わせていながら活かしていない現状がよくわかる。また、図 2-5 をみると、近年日本では地熱発電容量がほぼ増加していないこともわかる。

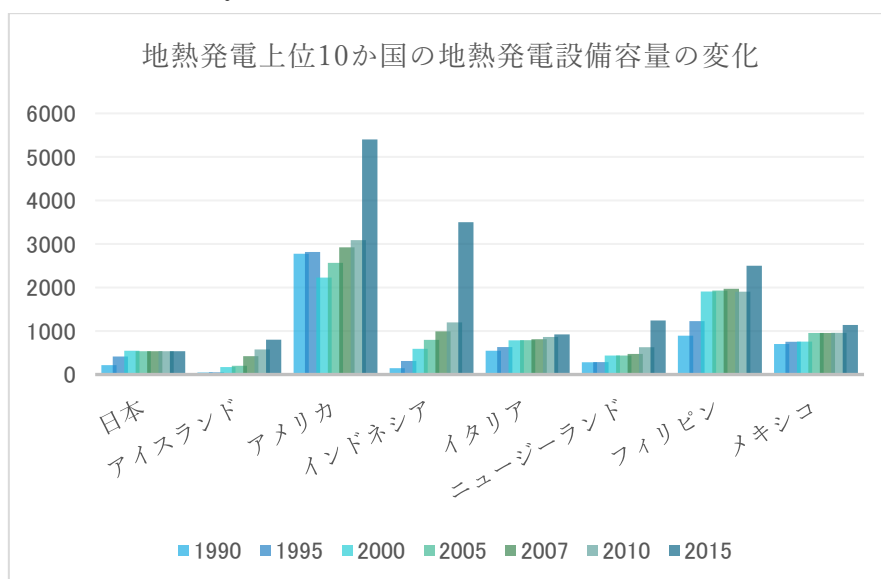


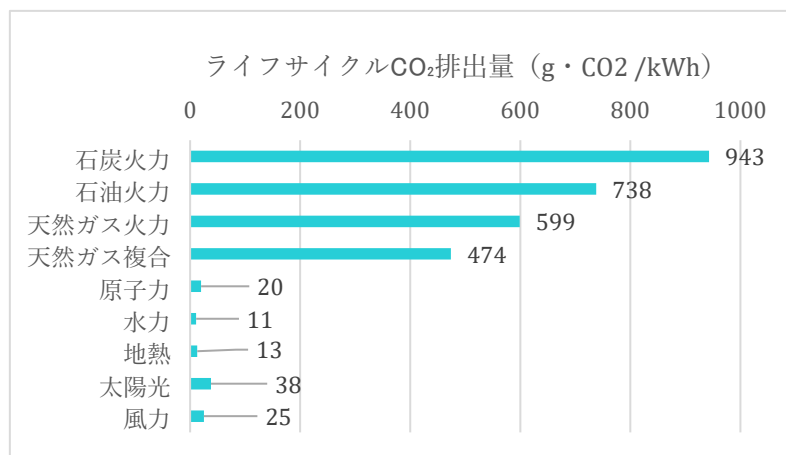
図 2-4 地熱発電上位 10 か国の地熱発電設備容量の変化

Van Nguyen, M., Arason, S., Gissurarson M. and Pálsson, P.G. (2015)¹⁾より作成

b.特徴

地熱発電の特徴をいくつか述べる。

一つ目は他の再生可能エネルギーと共通する点ではあるが、地球温暖化の原因となるCO₂をほとんど排出しないという特徴がある。火力発電と比べると単位発電量当たりのCO₂排出量は約20分のである(図2-5)。



※石油・天然ガスに関しては発電用燃料としての燃焼によるものと間接的なものを合算した数字
各種電源の発電量当たり温室効果ガス排出量 (CO₂換算)

図2-5 各種電源の発電量当たり温室効果ガス排出量 (CO₂換算)

出典：電力中央研究所「ライフサイクルCO₂排出量を評価」より(2010年8月)

二つ目は、天候や季節、昼夜に依らず、安定的に発電できるという特徴がある。これは他の再生可能エネルギーと違う点でもある。例えば設備使用率を他の再生可能エネルギーと比較すると、風力発電は20%、太陽光発電は12%に対し、地熱は70%である。

この出力の安定性から、ベースロード電源の一部を担うことが期待されている。ベースロード電源とは、資源エネルギー庁による定義では「発電(運転)コストが、低廉で、安定的に発電することができ、昼夜を問わず継続的に稼働できる電源」であり、日本では地熱・水力・原子力・石炭(火力)が当てはまる。一方ベースロード電源に対しミドル電源は「発電(運転)コストがベースロード電源の次に安価で、電力需要の動向に応じて、出力を機動的に調整できる電源」、ピーク電源は「発電(運転)コストは高いが、電力需要の動向に応じて、出力を機動的に調整できる電源」である。

環境省のコスト等検証委員会報告書でも、地熱発電のベースロード電源としての可能性について、「日本は世界第三位の地熱資源国であり、その出力安定性も勘案すると、条件の劣る場所も活用することにより、ベース電源の一定の部分の担うことが期待される。」とされている。

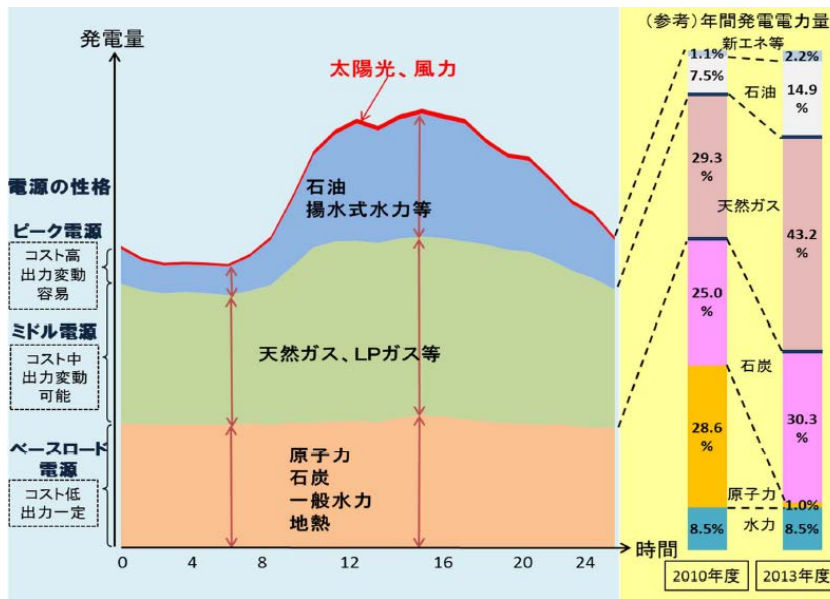


図 2-6 電力需要に対応した電源構成
 経済産業省（2015年）『エネルギー供給対策における取組』より

三つめは純国産エネルギーであることが挙げられる。現在日本は一章で述べたように発電に必要な資源のほとんどを外国から輸入しているが、地熱発電で利用する地熱エネルギーは日本各地の地下の熱を利用するものであり、エネルギー自給率の向上に寄与する。燃料の枯渇や情勢による価格の高騰の心配がないというのは重要な点である。また、下のグラフは世界における地熱発電用タービンのシェアであるが、日本企業のシェアは高く、技術の面でも国産と言える。

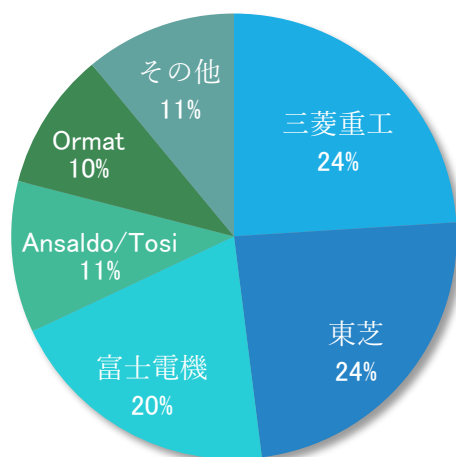


図 2-7 地熱発電用タービンメーカー世界シェア（2010年までの累計）
 日本地熱開発企業協議会より作成

c.地熱発電の障壁

日本の地熱発電のポテンシャルと、地熱発電が海外と比べ普及しているとは言えない現状を見たところで、なぜ日本において普及していないのかについて述べていく。

まず挙げられるのが、地熱資源の多くが国立・国定公園内に存在し、法律上の制限を受けることである。現在未使用の地熱資源の約8割が国立・国定公園内に偏在している。

これに関し、2011年の第4回エネルギー・環境会議（内閣官房国家戦略室）での「エネルギー規制・制度改革アクションプラン」において国立・国定公園内における地熱開発の取り扱いについて、過去の通知を見直すことが示された。これを受けて環境省で「地熱発電事業に係る自然環境影響検討会」が開催され、新たな「国立・国定公園内における地熱開発の取り扱い」が2012年に定められ国定公園外からの傾斜掘削、および第2種、第3種特別地域での条件付き垂直掘削も認可された。

地種区分		資源賦存量		地熱開発の可否		規制緩和	
		万kW	%	地表 (建設 含む)	地下掘削(区 域外からの傾 斜掘削含む)	時期	
自然 公園 内	特別保護地区	700	30	×	×	—	
	特別地域	第1種	260	11	×	○	2015年
		第2種	250	11	○(条 件付 き)*	○	2012年
		第3種	520	22		○	
	普通地域	110	5	○	○	—	
自然公園外		500	21	○	○	—	
合計		2340	100				

第1種：特別保護地区に準ずる景観を有し、特別地域のうちでは風致を維持する

必要性が最も高い地域で会って、現在の景観を極力保護することが必要な地域

第2種：第1種特別地域及び第3種特別地域以外の地域であって、特に農林漁業

活動についてはつとめて調整を図ることが必要な地域

第3種：特別地域のうちでは風致に影響を及ぼす恐れが少ない地域

注記*：地域での合意形成がなされている等、優良事例と環境省に認められた場合に開発が許可される。

表2-8 地熱開発に対する法制度の規制緩和状態

電力中央研究所『地熱発電開発に関する社会的動向調査』より

一方地熱発電の導入ポテンシャルは、国立・国定公園の特別保護地区・特別地域外の制

約が少なく、かつ、150℃以上の熱水資源が利用できる場所で約430万kWある（図2-9）。現在の設備容量の53万kWと比較しても、国立・国定公園の特別保護地区・特別地域に手を付ける前に十分ポテンシャルがあるのではないかと考える。

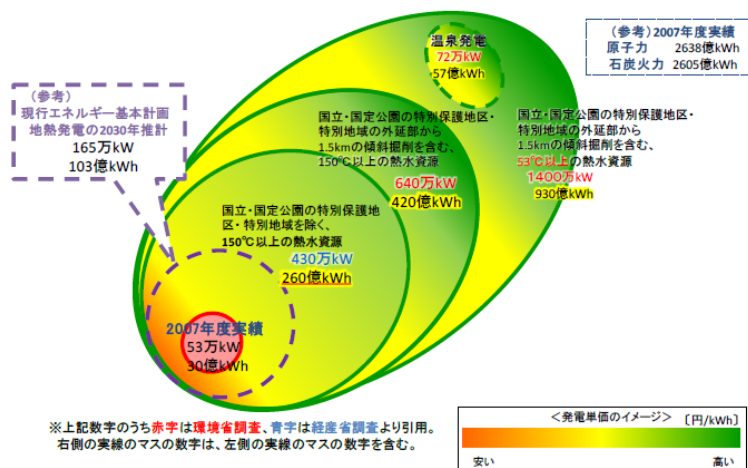


図2-9 地熱発電の導入ポテンシャル
コスト等検証委員会報告書 p 33

二つ目の障壁として温泉事業者との調整が必要な点がある。過去には、地熱開発による温泉への影響を懸念した温泉事業者や自治体の反対が原因で調査や開発が中止された地域もある。このような地域の受容性を高める国の具体的支援はないのが現状である。そのため、規制緩和により地熱開発を促進する動きにある国立・国定公園の問題に対し、温泉問題のような社会的受容性が今後浮き彫りになる可能性がある。

また、高い開発コストも課題である。

発電コストに関しては、地熱発電は再生可能エネルギーの中でも長い年月にわたり、安定的な発電が可能という特徴があり、コストも9.2～11.6円/kWhと試算され（割引率3%、設備利用率80%、稼働年数40年）、発電コストで比べると原子力（8.9円/kWh）や石炭（9.5円/kWh）と同レベルと言える。

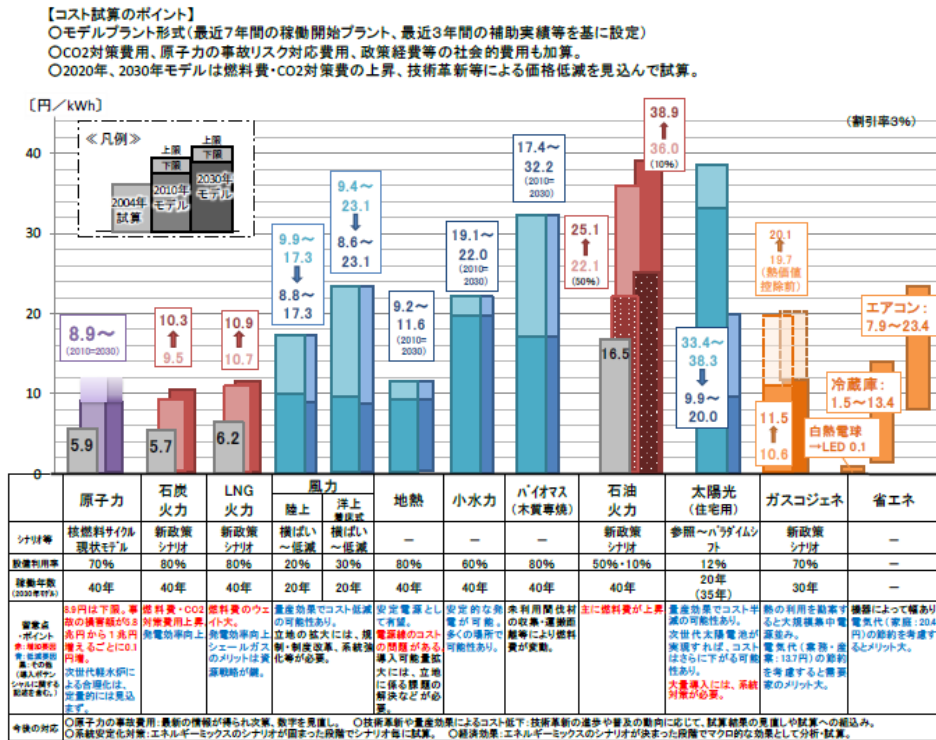


図2-10 主な電源の発電コスト(2004年試算/2010年・2030年モデルプラント)
環境省 コスト等検証委員会報告書より

しかし、開発のコストに関しては、調査段階で複数回の掘削作業が必要なことや、山間部に立地することが多いため送電網や道路の整備作業が必要となり、初期コストが高い。

また、今後導入量の拡大のため、例えば、規制区域外から規制区域内の地下の熱源に向けて斜め掘りとした場合、水平方向の距離が長くなればなるほど、追加的な投資も増え、掘り当てる確率も下がっていくこととなる。

その他に、運用開始までに長い年月を要するため、人件費や利子もかさむ。地熱発電では初期調査から操業まで概ね10年程度かかるといわれている。操業までのステップは以下の通りである。



図2-11 地熱発電所の操業までのステップ

① 地表調査

地下にあり目に見えない地熱を探するため、まず衛星や地面の様子、岩石、温泉水などを調査し、地熱発電のできそうな場所を探す。

② 地下探査・評価

ターゲットを決めたら井戸を掘り、噴気試験を行い蒸気・熱水が出るかどうか、その温度や量を確認する。この際、10m外れると断層に当たらないこともあるという。

③ 建設

ようやく地熱発電所を建設することになる。その際には景観への配慮が重要視されている。

④ 操業

計画から稼働までの期間を他の発電方法と比べたのが以下の表である。

電源	計画～稼働の期間
原子力	20年程度
石炭火力	10年程度
LNG火力	10年程度
一般水力	5年程度
小水力	2～3年程度
地熱	9～13年程度
陸上風力	4～5年程度
洋上風力	—（実用化に至っていないため不明）
バイオマス（木質専焼）	3～4年程度
バイオマス（木質混焼）	1年半程度
石油火力	10年程度
太陽光住宅（住宅用）	2～3か月程度
太陽光（メガソーラー）	1年前後
ガスコジェネ	約一年
石油コジェネ	約10か月
燃料電池	約2週間

表2-12 各発電方法の計画から稼働までの期間

出典：環境省 コスト等検証委員会報告書

また、発電所の規模によっては環境アセスメント（環境影響評価）も必要となる。環境アセスメントは環境に大きな影響を及ぼす恐れがある事業を実施する場合に、あらかじめ事業者自らが環境への影響について調査、予測、評価を行い、その結果を公表し一般の方々、

地方公共団体などから意見を聴き、それらを踏まえて環境保全の観点からより良い事業計画を作り上げていく制度である。

地熱発電所では出力1万 kW 以上では必ず環境アセスメントが必要とされる第一種事業となり、7500～1万 kW では環境アセスメントが必要か個別に判断する第二種事業になる。これに関しては現在、手続きの簡素化・短縮化が検討されている。環境アセスメントは、手続終了までに概ね4年以上の年月がかかる。また、それ以外にも森林法・河川法・温泉法・国土利用計画法・電気事業法などの関連する法令があり、許認可をとる必要がある。

2-3 地熱の直接利用

a.概要

地熱エネルギーの利用方法は地熱発電だけではない。むしろ地熱発電よりも昔から行われてきたのが地熱の直接利用である。地熱の直接利用において重要になるのが、地熱流体の温度である。これは地熱流体の温度によって利用方法が制限されるためである。下の図は利用方法と温度の関係を表している。

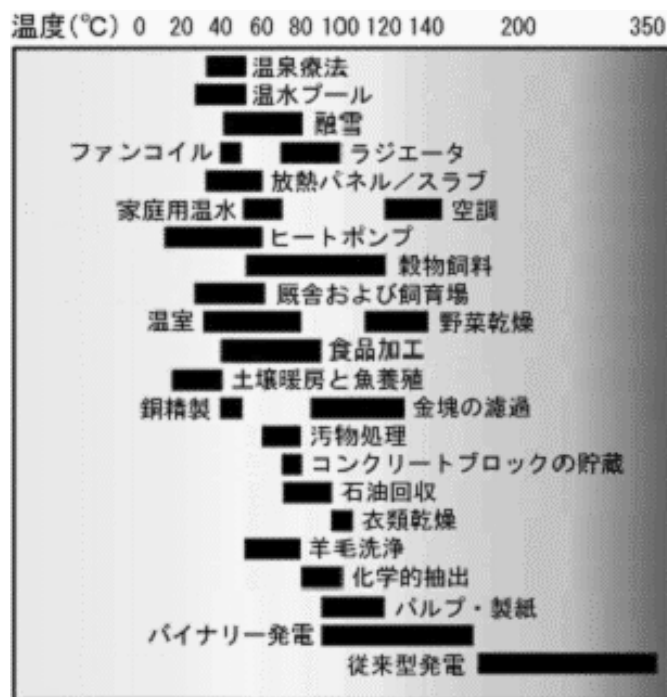


図2-13 熱流体の利用方法を示す図

例えば、地熱流体を温泉に利用するにはその温度は40～50度程度であるのが望ましい。草津温泉では「湯もみ」が有名であるが、「湯もみ」は高温すぎる熱水を温泉として利用するのにちょうどよい温度になるまで下げているのである。「湯もみ」自体が観光客を引き寄せる名物となってはいるが、エネルギーの効率的な利用という面では無駄が発生していると言わざるを得ない。

John W Lund (2010)によると、世界で78か国が地熱エネルギーの直接利用を行っており、2005年は72か国、2000年は58か国、1995年は28か国であったことを踏まえると近年になって増加したことがうかがえる。地熱の直接利用は、世界において容量48493MWtに対し利用量117,740GWh/yr、日本では、容量が2,099.53MWtに対し年使用量は7,138.9GWh/yrである。

地熱の直接利用もCO₂排出量削減に寄与する。John W Lund (2010)によると、1バレルの燃料油は 6.06×10^9 Jのエネルギーを持っており、発電に使われた場合の効率因子を0.35、直接熱を発生させるのに使われた時の効率因子を0.7と設定すると、2009年の世

界で直接利用されている地熱エネルギー423,830TJ/year による年間節約量は発電のとき2億バレル(もしくは3000万トン)、熱生産のとき1億barrel(もしくは1500万トン)の油に相当する。この2億バレルというのは、世界において3日間で消費される量におおよそ等しい。

b.熱水のカスケード利用

地熱資源の効率的な利用方法として、カスケードシステムというものがある。これは、上流部からの排水を段階的に再利用することで地熱エネルギーの無駄をなくすものである。例えば、図2-11のように200°C程度の高温を必要とする地熱発電所から排出された150°C程度の排水は、食品加工や冷蔵プラントに利用することができる。さらにそれらの設備から排出された100°C程度の熱水は団地の暖房や温室を温めるのに利用することができる。

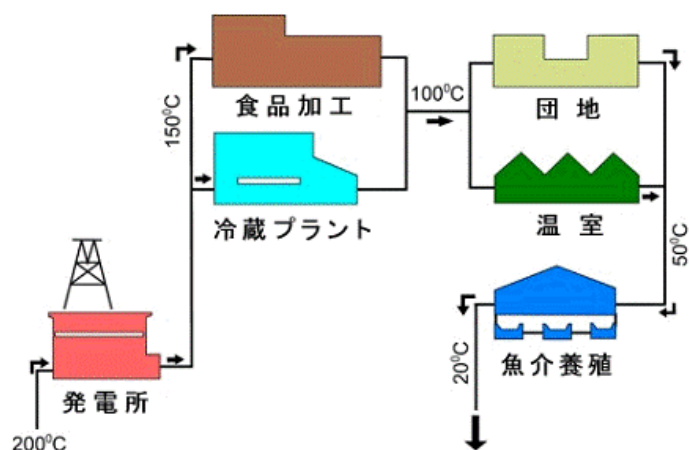


図2-14 地熱エネルギーのカスケード利用

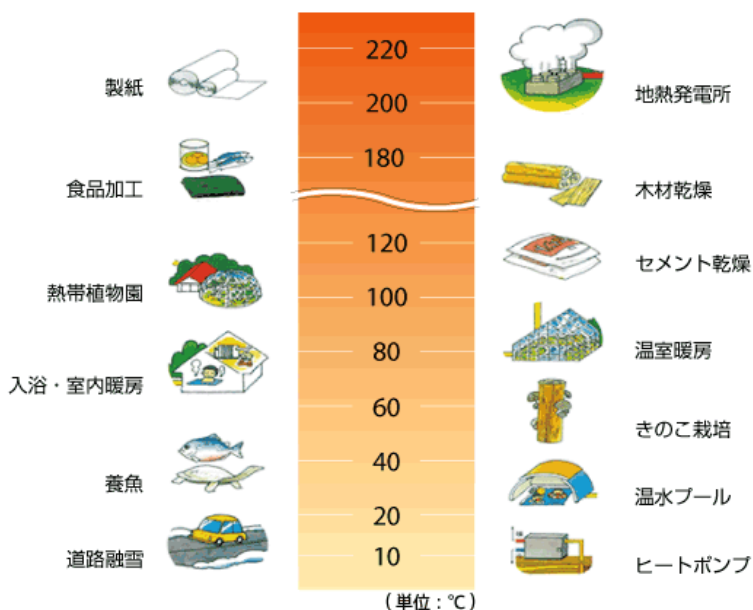


図2-15 温度域による地熱直接利用の用途

JOGMEC 熱水の有効利用

<http://geothermal.jogmec.go.jp/information/hotsprings/use.html> より

このカスケードシステムは地熱エネルギーの効率的な利用だけでなく、地域の雇用創出や地元産業の活性化、観光資源としての貢献といった恩恵を地域にもたらすことが期待できる。

c.農業利用

John W Lund (2010)によれば世界で温室の暖房に地熱を使っているのは34か国だという。2005年のデータでは30か国であった。上位5か国はトルコ、ハンガリー、ロシア、中国、イタリアである。ハウス農業への地熱使用量は世界で年間23,264TJである。地熱を使った温室で栽培されているのは主に野菜と花である。しかしアメリカでは苗栽培が、アイスランドではバナナなどの果物栽培が地熱を使った温室で行われている。また、アメリカにおける地熱の温室への直接利用平均コスト(2005年)は次のとおりである。

初期投資 22.2\$/kWyr

操業・維持費用 2.2\$/kWyr

合計 24.4\$/kWyr

Duffield and Sass (2003)によれば、従来のエネルギーに変わって地熱を利用することで、燃料費を約8割、総操業費用を5～8%削減できるという。



図2-16 地熱の農業利用の例
秋田県 湯沢市の地熱水活用トマト

地熱マルシェ <http://www.enjoytokyo.jp/events/event/1255637/>より

d.地熱利用の事例

- ①北海道 茅部郡(かやべぐん) 森町 濁川(にごりかわ) 森発電所(北海道電力(株))
従来から温泉熱を利用したハウス栽培が実施されていたが、地熱発電所の地下還元熱水の一部を真水と熱交換して造成した温水を近隣のビニールハウスに無償供給している。ビニールハウスではトマトやキュウリの通年栽培を実施。(トマトは森町の基幹作物の一つとなっている。)熱水や温泉水を利用したハウスは面積にすると18万平方メートル以上に及ぶ。
また発電所内道路のロードヒーティングおよび事務所の床暖房にも熱水を利用している。

<温泉熱利用ハウス>

温泉熱利用組合 25 戸、ハウス 433 棟

情熱野菜生産組合 3 戸、ハウス 35 棟

- ・各農家が温泉井戸を所有、温水をダクトで循環
- ・温泉温度は 30~90°Cと井戸によって差が大きく、5°C以下になるハウスもある

	数量 (t)	生産額 (万円)
トマト	957	29,291
キュウリ	123	2,824

表 2-17 温泉熱利用園芸ハウス生産 (2009 年)

北海道農政部 北海道潟園芸高度化推進協議会

『北海道における養液栽培パッケージモデル (太陽光利用型)』(2014 年) より

<地熱利用ハウス>

澄川ハウス利用組合 9 戸、ハウス 31 棟

濁川ハウス利用組合 7 戸、ハウス 35 棟

- ・北海道電力(株)森地熱発電所が地中還元する熱水を真水に熱交換する施設を設置
- ・60~65°Cの温水をダクトで循環
- ・冬場はマイナス15度にもなる森町だが、ハウスの中は常にプラス15度に保てるという。
- ・7月中旬~9月中旬まで定期点検のため休止
- ・費用は熱交換器等の維持経費がかかるが、ボイラー等の減価償却が不要で、重油を使用するよりはるかに安く済む。

	数量 (t)	生産額 (万円)
トマト	765	25,418
キュウリ	147	4,452

表 2 - 1 8 地熱水利用園芸ハウス生産 (2009 年)

北海道農政部 北海道潟園芸高度化推進協議会

『北海道における養液栽培パッケージモデル (太陽光利用型)』(2014 年) より



地熱水利用園芸ハウス園地

図 2 - 1 9 エネルギーの地産地消 地熱発電

国際石油開発帝石 (株) 安達正敏 (2015 年 2 月 13 日) より

②北海道 壮瞥町

1976 年から全国初となる地熱水の野菜栽培利用事業に着手し、1980 年に地熱水を利用した促成栽培など効率性の高い施設園芸を導入。年間を通じた新鮮野菜の安定供給と、省エネルギー化を推進する事業が開始された。温水がハウス地表を這うチューブ管を通り放熱によって地温と室温を上げている。また、排湯地熱水はさらに病院・老人福祉施設、町営温泉施設で入浴用に、中学校では熱交換して暖房に活用されている。

近年は作物をトマトに特化しており、北海道では異例の 2~7 月に収穫・出荷する栽培法を確立している。(北海道でトマトが店頭に並ぶのは通常早くも 4 月ごろ)

〈オロフレトマト〉

- ・温泉を利用した越冬型大型ハウス 28 棟で栽培 (面積 1.57ha)。2.5 km 先の弁景温泉から 65 度の源泉をハウスに引き込んでおり、ハウス内は真冬でも 10~25 度だが、加温には石油エネルギーを一切使っていない。

- ・地力の維持や減農薬・減化学肥料にも取り組み、北海道の推奨する「北のクリーン農産物表示制度 Yes!Clean」の登録生産集団になっている。害虫の少ない冬春に栽培しているために農薬使用量が観光栽培の半分以下にできている。



図 2-20 トマトの根元を這うポリチューブ
胆振総合振興局農務課「クリーンオロフレトマト」

<http://www.iburi.pref.hokkaido.lg.jp/ss/num/clean/cleanorofuretomato.htm> より

③岩手県八幡平市 松川地熱発電所 (東北水力地熱(株))

発電後の蒸気凝縮水に蒸気を加えて加温し、第3セクターの八幡平市産業振興(株)に販売。給湯契約をしているホテルや別荘、ビニールハウスで使用されている。(平成22年時点で、70°C、最大260t/h)

ホテル等：38軒
保養所：25軒
別荘：613軒
商店：15軒
貸別荘施設：1軒
病院：1軒
老人ホーム：1軒
日帰り温泉施設：1軒
農業用ハウス：95棟 (冬季のみ)

④岐阜県 奥飛騨温泉郷

温泉熱を利用してバナナを生産する「奥飛騨ファーム」では、温泉旅館「栃尾壮」の空き部屋に「熱帯植物工場」を造っている。天井にはLED照明があり光合成を促進している。温泉熱を利用した暖房機2台が設置されており、冬は外ではマイナス10度にもなるが館内は常に20~25度に維持されている。電力を使うのはLED照明と温泉暖房機の送風モーターだけで一か月の電気代は約1万3000円で

済むという。

バナナやアセロラなどトロピカルフルーツのほかにハワイ原産のコーヒーも栽培。屋外のビニールハウスでも温泉熱を利用してバナナ栽培をしており、ハウスの中はバナナの苗気に沿った配管を 65 度の温泉水が流れて空気を温めており、常に 30 度を維持している。

⑤（補足）大分九重町 八丁原発所 九州電力

八丁原発所を訪れた見学者が地元にもたらした波及効果は 2012 年度で約 5 億円であったという試算を別府大学国際経営学部の阿部博光教授（環境エネルギー政策）がまとめた。地熱発電所が観光資源としての役割も果たしている。

⑥アイスランド

アイスランドは電力を 100% 自然エネルギーで賄っており、そのうち 20% が地熱発電である。また、アイスランドの地熱発電のタービンのほとんどは日本製であるという。

アイスランドでは地熱のカスケード利用も活発で、発電に使われた後の熱は一般家庭の暖房に使われている。その割合は 90% の家庭に上る。この利用により、暖房費は石油の 4 分の 1 のなったという。また、世界最大の露天温泉であり、観光スポットとして有名なブルーラグーンはスヴァルツェンギ地熱発電所（出力 7.65 万 kW）の排熱水を利用した世界最大級の広さを誇る屋外温泉施設である。アイスランド随一の観光資源で年間入場者数約 40 万人。（アイスランドの人口は約 32 万人）温水中のケイ酸を含む泥を活用した化粧品も販売している。

2-4 (補足) 地熱と地中熱

地熱エネルギーはこれまでに述べてきたように火山に近い場所にある高温のエネルギーを発電などに利用するもので、火山地域や温泉地域などのように限られた地域に存在し、マグマなどの特別な熱源が存在する。

地熱が存在する地域に限られるエネルギーであるのに対し、一方で地球上のどのようなところでも得られる『地中熱』というものも地球には存在する。これは足元にある恒温のエネルギーのことで、地中熱利用促進協会によると『昼夜間、又は季節間の温度変化の小さい地中の熱的特性を活用したエネルギーのこと』と定義づけられている。例えば、東京や福岡では年間を通して地下 50 メートルの地中は 18 度であり、下の図のように外気温は夏と冬で大きく変動するのに対し、地中温度は一年を通して一定に近い。地中熱の場合、地熱のように特定の熱源によって特別な熱が発生しているわけではなく、暖房に利用できる特別な熱が地中にあらかじめ備わっているわけではない。

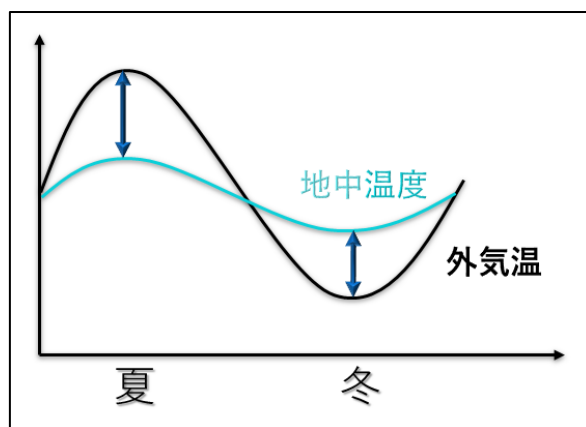


図 2 - 2 1 外気温と地中温度の比較

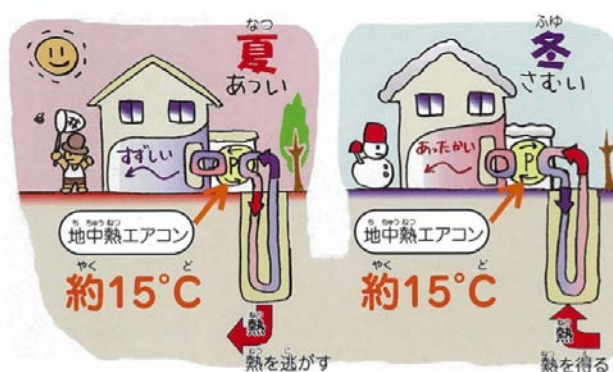


図 2 - 2 2 地中熱を利用した冷暖房
(NPO 法人地中熱利用促進協会 HP より)

以下、簡単に地中熱と地熱を比較した表である。

		地中熱	地熱
場所の制約		なし	火山・温泉の近く
時間の制約		なし	なし
エネルギー 利用形態	電気	—	主に事業用発電
	熱	冷暖房 給湯 融雪	暖房 給湯 融雪

表 2 - 2 3 地中熱と地熱の比較

本論文においては、地域に特有である火山を源泉とするような地熱について取り上げるため、地中熱についての詳しい説明は割愛するが、地中熱もまた環境にやさしい冷暖房の分野などにおいて近年注目されているエネルギーでもある。

第 3 章 フィールドワーク

私は地熱発電を推進したいと思いつつも一度も地熱発電所を見たことがなく、また実際に周辺に住む方々とお会いしたこともなく、研究するにあたって一度現場に行く必要があると感じたため、東京都で唯一の地熱発電所のある八丈町を訪れた。全国にいくつかある地熱発電所の中からなぜ八丈島の地熱発電所を選んだかという、地熱発電所からの地熱水のカスケード利用による農業が行われていること、八丈島地熱館やえこ・あぐりまーと八丈島地熱利用農産物直売所などがあり温泉以外の方法で地熱エネルギーが観光資源として利用されていると考えたこと、自然エネルギーを最大限活用して島のエネルギー自給率を高め、地熱発電をベースロード電源としたエネルギーの自立に取り組まれており、今後のモデルケースになるのではないかと考えことが理由である。訪問日は2017年1月16日及び17日である。

3-1 八丈島の概要

八丈島は本州島側地域の南方海上 278km に位置し面積 69.09 km²の伊豆諸島の島である。これは山手線の内側とほぼ同じ広さである。地形的には富士火山帯に属する火山島で、南東部を占める三原山と北西部を占める八丈富士から成る。三原山は約 10 万年ほど前に噴火してできた山で、八丈富士は約 1 万年前に噴火してできた若い山で、地熱発電は三原山で行われる。島全体が 1964 年富士箱根伊豆国立公園に指定された。



図：3-1 富士箱根伊豆国立公園 八丈島の八丈富士
筆者撮影

気候は黒潮海流の影響を受けた海洋性気候で、年平均気温は 17.8 度で高温多湿で、風が強

く雨がが多いという特徴がある。実際私が訪問した日には八丈島空港における強風のため、飛行機が条件付きの運航となり、到着すると霰が降ってきた。産業は農業（花き観葉植物栽培）と沿岸漁業を基盤としている。

3-2 八丈島における環境政策

八丈島では“クリーンエネルギーのモデル島を目指して”をキーワードとしてクリーンエネルギーへの取り組みを実施している。新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）を誘致して行われた地熱開発促進調査（1989年～1991年）により島南部の中之郷地域を中心に地熱資源が有望視され、町による働きかけが行われで住民視察や通産大臣への陳情が1992年度内に行われた。また、温泉開発が促進され、現在までに足湯を含む7か所の温泉施設が整備されている。地熱発電所は東京電力による高性能地表調査ののち発電所建設工事が着工され、1999年3月に運転開始された。

八丈島では島の電気は大賀郷地域の内燃力発電所と中之郷地域の地熱発電所ですべて供給されている。内燃力発電の燃料（重油）は島の外から調達しており、東日本大震災後には計画停電や営業時間の短縮を行い、島外からの重油の調達を減らすことで、必要なところへ重油が行き渡るようにという配慮がなされたらしい。図3-2のように、必要な電力の4分の1が地熱発電で発電されている。地熱発電は出力を変化させるのが難しいため、一番電気使用量の少ない時期に必要な発電量を賄い、ベース電源となっている。夏や冬といった電力需要の増える時期には、既存のディーゼル発電機を追加運転し補っている。

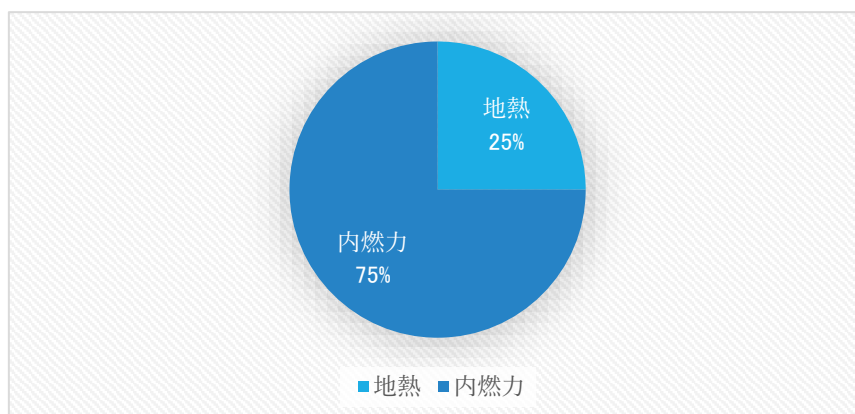


図3-2 八丈島の電力構成

2013年に地熱利用拡大検討が発表され、地熱発電等の再生可能エネルギーの利用を大幅に拡大するためのモデル・プロジェクト実施の検討が開始された。目的としてはエネルギー自給率の向上による全国的なモデル地域の創出と、地域復興策など事業を通じての地域への利益還元がある。一つ目は、地熱発電所を有する唯一の離島である八丈島で、島外からの燃料に頼る内燃力発電の依存度を低減させ地域特性を活用したまちづくりのモデルとなる

ことを目指している。二つ目は既存産業への波及や新産業の創出、観光振興で地元住民への利益還元を目指すものである。これらが最終的には基本構想に掲げている「クリーンアイランドを目指す町」の実現に寄与すると考えている。

地熱利用拡大に向けた専門的知見による検討がされ、また、協議会を組織し地域の声を検討に取り入れる仕組みが作られた。この検討の結果で技術的には地熱発電の拡大が可能なことが確認され、町によって事業者を決める前に必要なルールが検討され条例とガイドラインが策定された。

事業者公募にあったっても地域の声が反映されており、例えば、臭いの問題は住民が強く気にしていることであったため、事業者の公募要項に具体的な基準値の条件が入れられたという。その他にも地域の財産である再エネによる利益を、適切に地域のもたらしのための、地域貢献策の提案も事業者に求める。現時点では公募が行われその中から選定された事業者と町の間での協定の締結に取り組んでいるところである。



図3-3 八丈町役場
筆者撮影

3-3 八丈島における地熱エネルギーの活用

a. 農業

八丈島地熱発電所では生産井から熱水が出ないため、農業への熱供給の熱源はタービンを回した蒸気を凝縮した約 40°C程度の温水を用いていた。熱交換器で周辺の温室団地（約 1 万㎡）へ 12 月～3 月の間送られ、冬場に温室ハウス内を約 15 度に加温するのに使われていた。八丈島では熱帯・亜熱帯の植物が約 1000 種類栽培されており、温室の加温に灯油を使っていたものを、地熱発電所からの熱水を利用することでコストは約 10 分の 1 になったという。現在は温度が低すぎるため、供給は止まっている。

b. 観光

1999年に省エネルギーモデル展示ハウス「えこ・あぐりまーと」が建設され、温室ハウスで栽培された果物や観葉植物を観光客が購入している。

また、地熱発電所に併設されている八丈島地熱館（2013年8月開館）には北海道や九州からの視察も来ているという。表3-5のように毎年来館者数が増えている。地熱館では八丈島の誕生の様子や地熱発電所の仕組み、地熱発電所についてのビデオ上映などがあるが、無料で見学できるようになっている。



図3-4 八丈島地熱館
筆者撮影

地熱館来館者数

2014年度	7187人
2015年度	7356人
2016年度（4月～12月）	7565人

表3-5 八丈島地熱館の来館者数

※島民と観光客の区別はない

筆者調べ

3-4 フィールドワークまとめ

臭い問題は私が発電所に行って強く実感したことでもあり、車に乗っていても地熱発電所に近づくにつれ臭気に気づいたほどの臭いであった。事実日本全国の地熱発電所で一番硫化水素の濃度が高いのだという。私が訪問した日は風が強かったが、風がない日はもっとひどいらしい。また、硫化水素は比重が重く特定の場所にとどまりやすいという事情もある。地熱発電所付近の民宿のご主人の話では、観光客は臭いを感じても近くに温泉があるからだと思っているので黙っているが、実は、温泉は海水由来で硫化水素は少なく、においの

原因は地熱発電所であるらしい。私も温泉にも行って見たが、臭いは気にならなかった。

また、八丈島では地熱発電で電気を作れるだけ作ればいいというわけではなく、島であるため余った電気を送る先がなく、需要が限られているという地域による問題も行く前には考えていなかった点であった。住民の方も、地熱発電の良さはわかっているが、電力が余るのは良くないと考えていらっしやった。また、八丈島では温泉業者との問題はどのように解決されたのかという疑問を持っていたのだが、温泉が町営であるためにそもそも利害関係者がおらず問題にはならなかったと聞き、そこにも地域による違いがあるのだと実感した。

八丈町役場の方とお話の中で、もっと地熱が認知され、活用されるにはということについて聞いたときに、地熱も海や風景などと同じで、内側にいる住民には当たり前になっていて、あまり価値を感じられず、やはり客観的に評価されないと価値を分かりにくいという点が特に印象に残った。



図3-6 八丈島発電所 東京電力運営
筆者撮影

第 4 章 先行研究

4-1 先行研究紹介

これまで地熱エネルギーのポテンシャルや、地熱発電の有効性、地熱の直接利用の有効性について紹介してきたところで、先行研究をいくつか紹介していく。

a.窪田 (2014)

全国市民を対象とした Web アンケート調査 (2013 年 2 月 26 日～3 月 4 日,有効回答数 8,003) の結果、今後地熱発電を導入すべきかどうかに関して、温泉・自然観察を好む人や、電力を安定供給する技術であると認識している人のほうが、有意に導入すべきだとしており、地熱発電導入への理解向上のためには、温泉地などの人々になじみのある地熱利用現場を活用した情報提供や、安定供給力などの地熱発電の技術特性を理解してもらうことが重要である。という結論が述べられている。

b.青柳 (1996)

販売側の「環境にやさしい」アピールはどの程度消費者の態度決定に効果があるのか、「環境にやさしい」商品を積極的に支持する消費者とはどのような消費者なのかを店頭における質問紙調査を行い分析した。その結果、調査対象の企業の商品を購入したことがあるかどうかには、店のアピールに関する設問への正答数、反復来店者であるかどうか、年間の化粧品への支出額、海外での生活経験が有意な変数として取り上げられた。(調査対象の企業はイギリスで創業した化粧品会社である。) このことから、商品を製造・販売する企業がアピールする商品の背景にある事柄について認知している消費者は、そのような商品を購入する傾向にあるという結果が得られたと結論付けている。

c.井村秀文・矢ヶ部恭弘・二渡了(1994)

福岡市でアンケート調査を実施し、持続可能な消費パターンを実現させるために必要な社会システムについて考察した。この調査では市民はごみ問題・資源リサイクルに一番関心を持っており、約 50%の人が重要と考えていた一方で、古紙入り再生商品であるトイレットペーパーを選んで購入しているかという設問に対して「意識して古紙入り商品を選んで買っている」と答えたのは 36.9%に留まった。そこで、どのような条件がそろえば再生商品をより多くの人を使うようになるかという設問に対しては、一番選ばれたのが「身近な店で再生商品がもっと容易に手に入れば」(38.1%)であり、次に「再生商品の値段がもっと安くなれば」(33.3%)が選ばれていた。一方で「再生商品が環境保全に役立つことが理解できれば」は 18.7%とあまり選ばれなかった。このことから、「環境保全や省エネの意義が具体的に消費者に理解されることが重要であるが、それ以前に、入手の容易さ、品揃え、値段といった現実的要因がより強く消費者の行動を支配している。」と指摘している。

また、衣食住のあらゆる日常的行為があたえる環境負荷を日々の生活の中で自覚することの難しさを指摘し、その解決のために、製品の生産と使用のために投入される原材料やエネルギーの量、それに伴って起こる環境負荷の大きさを定量化して製品に表示することで消費者の行動を変えられる可能性や、環境への負荷の小さな製品ほどコスト的に有利になる仕組みの整備の必要性を述べている。

4-2 先行研究を踏まえた考察

地熱発電の普及に向けて障壁となるものには、法的規制、技術的問題、社会受容性がある。法的規制や技術的問題は現在改善されつつあるが、社会的受容性には大きな策はとられていない。

前章の先行研究を踏まえ、地熱エネルギーが理解されるためには、より身近に関わる機会を設けることが必要であり、またそれが人々の地熱発電への受容性の向上につながると考えた。そこで、地熱エネルギーを使った農作物を普及差させることを考えた。温泉が娯楽でありよく行く人と行かない人に分かれるのに対し、野菜などの農作物は誰しもの関わるものであり、より多くの人に地熱エネルギーに関わる機会を設けることができ、より人々の地熱エネルギーへの受容性を高めることに寄与すると考えたからである。

では、そういった農作物が他の農作物との競争の中で人々から選ばれるためには、どうすればいいのか。ここで、生物多様性や広く環境に配慮された財をグリーン財と呼ぶとき、地熱利用農作物のグリーン財としての可能性を考察する。

地熱利用の温室農業により、生産者は本来栽培できない時期に栽培・収穫ができ、消費者は季節にかかわらずおいしい野菜を食べることができる。これは従来の温室栽培と同じことであるが、地熱を利用した温室農業においては、従来の方法よりも二酸化炭素排出量を減らしながら温室の温度を温めることができるという利点がある。

グリーン財の消費者にとっての魅力は二つあり、一つは味覚や健康面に関連する、私的領域である。もう一つが倫理的・公的にある属性である。これは地熱を利用した農業にも当てはまるのだろうか。先ほど述べた地熱利用の農作物の利点を私的領域と公的領域に分類すると、公的領域はもちろん環境にやさしいという点である。二酸化炭素をどんどん排出して作った野菜よりも二酸化炭素排出を減らし地熱を活用して作られた野菜のほうが、気持ちよく食べられるのではないだろうか。

しかし、私的領域はどうだろうか。季節や戸外の気温に関わらず適正温度で育てることにより、よりおいしく、より栄養豊富な農作物が食べられるという点が私的領域に当てはまるが、これは地熱を使ってもいなくても温室栽培をしていることによって得られる利点である。

よって、私的属性においては非グリーン財に劣ってはいないが、優れてもいないことになる。よって、二酸化炭素排出量を削減できるという公的属性のみが地熱利用作物の需要を

喚起することになる。

そこで、地熱利用農作物が選ばれるためには、地熱エネルギーを使った農作物とそうでない農作物の環境に与える影響の差を具体的に表示することが必要だと考えた。

よって、本論文の試算として、地熱エネルギーを使った農作物と化石燃料等を使った場合の農作物のCO₂排出量の比較を行う。

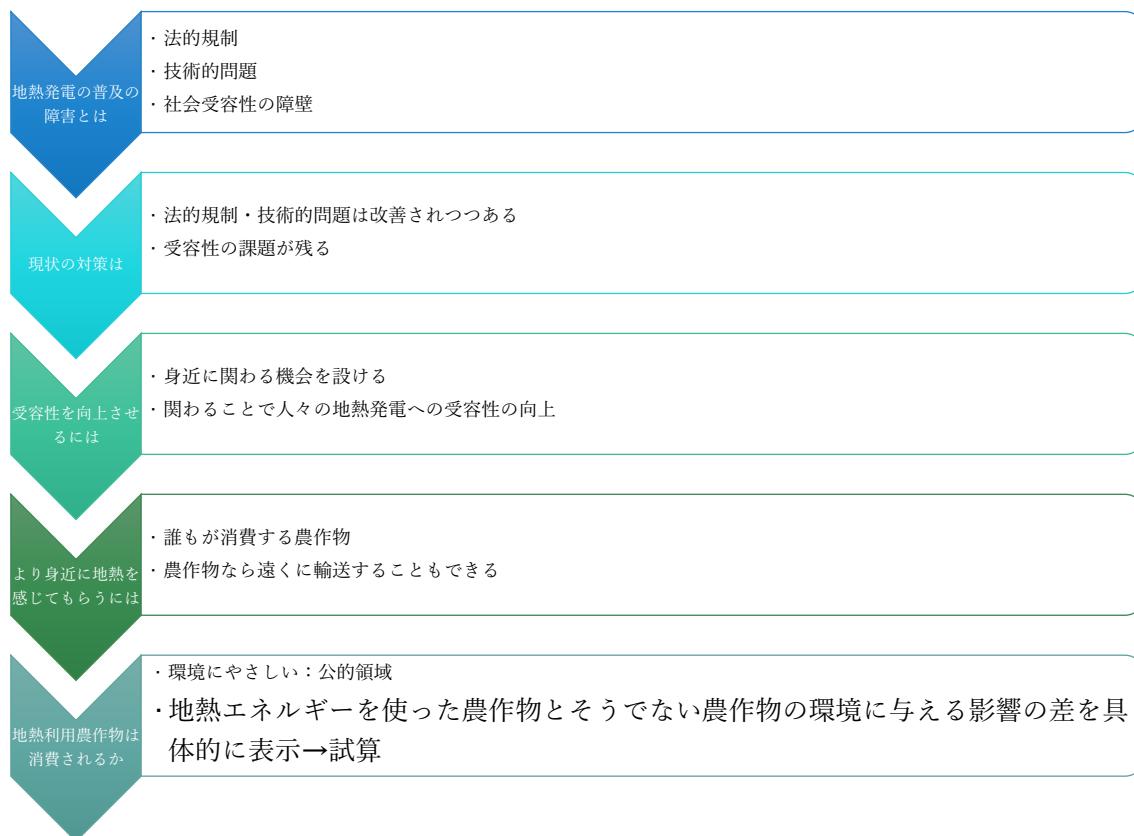


図4-1 ここまでのまとめ

第5章 試算

地熱利用農作物が選ばれるためには、地熱エネルギーを使った農作物とそうでない農作物の環境に与える影響の差を具体的に表示することが必要であり、消費者にとってわかりやすくその価値を数字で示すことが試算の目的である。

5-1 農業利用の CO₂ 削減量

まず、現状で地熱エネルギーをハウス農業に利用することによって削減できている CO₂ 削減量と、その金銭的価値を計算する。

a. 世界での地熱のハウス農業への活用の CO₂ 削減量とその金銭的価値

John W Lund (2010) によればハウス農業への地熱使用量は世界で年間 23,264TJ である。この数字と John W Lund (2010) が試算で利用した数値

- 1 バレルの燃料油は $6.06 \times 10^9 \text{J}$ のエネルギーを持つ
- 発電に使われた場合の効率因子 0.35
- 直接熱を発生させるのに使われた時の効率因子 0.7

を使って、世界でハウス農業に地熱を直接利用することによって節約されている重油の量を求める。

重油で発電して代替するとしたとき

$$23264(\text{TJ}) \div (6.06 \times 10^9(\text{J}) \times 0.35) \quad (\text{bbl})$$

だけ節約していることになる。これを計算すると、1097 万 bbl 分の節約になる。

重油で熱生産して代替するとしたとき

効率を 0.7 にして同様に

$$23264(\text{TJ}) \div (6.06 \times 10^9(\text{J}) \times 0.7) \quad (\text{bbl})$$

だけ節約していることになり、これを計算すると、548 万 bbl である。・・・①

農業では重油を熱生産のために利用するため、以後熱生産の時について考える。

環境省、経済産業省(2016年)によると重油の中でも農産物用ビニールハウスのボイラーに使われる A 重油の使用に関する排出係数は、 $2.71 \text{ tCO}_2/\text{kl}$ である。1bbl=0.159kl であるので、①の数値を kl に換算して重油で代用したときの CO₂ 排出量を計算すると、

$$548 \times 10^4(\text{bbl}) \times 0.159(\text{kl}) \times 2.71 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\text{kl}} \right) = 2,361,277(\text{tCO}_2)$$

環境省、経済産業省(2016年)より、他人から供給された熱の使用によるCO₂排出量は蒸気、温水、冷水のとき0.057 tCO₂/GJであるので、世界における年間のハウス農業への地熱使用23,264TJによるCO₂排出量も計算できる。

$$23264(TJ) \times 0.057 \left(\frac{tCO_2}{GJ} \right)$$

$$= 23264 \times 10^3(GJ) \times 0.057 \left(\frac{tCO_2}{GJ} \right) = 1,326,048(tCO_2)$$

これらの差をとると、世界でハウス農業に地熱を直接利用することによって削減しているCO₂排出量は

$$2,361,277(tCO_2) - 1,326,048(tCO_2) = 1,035,229(tCO_2)$$

環境省(2012)によると、世界最大の排出量取引制度の仕組みである欧州域内排出量取引制度(EU-ETS)における2011年のCO₂取引価格は\$18.8(tCO₂)である。この価格を使って世界における地熱のハウス農業への直接利用によるCO₂排出削減の金銭的価値を計算すると、

$$1,035,229(tCO_2) \times 18.8 \left(\frac{\$}{tCO_2} \right) = 194,623,052(\$)$$

より約1億9460万ドルとなる。

b. 日本での地熱のハウス農業への活用のCO₂削減量とその金銭的価値

農林水産省(2016)によると農林業におけるエネルギー消費は2014年度石油製品(燃料油)が $2,439 \times 10^{10}$ kcal ($1,022 \times 10^8$ MJ)、地熱利用が 74×10^{10} kcal(31×10^8 MJ)である。この地熱利用がすべてハウス農業に使われているとして、日本における地熱のハウス農業への活用によるCO₂排出削減量とその金銭的価値を計算する。

まずこれらの数値を使うと、現在地熱で賄っているハウス農業に必要なエネルギーを重油で代替するときに必要な重油の量は

$$31 \times 10^8(MJ) \div (6.06 \times 10^9(J) \times 0.7) = 730787(\text{bbl})$$

より73万バレルである。・・・②

この重油を使った時のCO₂排出量を求める。

- A重油の使用に関するCO₂排出係数 $2.71 \frac{tCO_2}{kl}$
- 1bbl=0.159kl

を使い、②の数値をklに換算して重油で代用したときのCO₂排出量を計算すると、

$$73 \times 10^4(\text{bbl}) \times 0.159(\text{kl}) \times 2.71 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\text{kl}} \right) = 314,549.7(\text{tCO}_2)$$

一方地熱を使った時の CO2 排出量は

他人から供給された熱の使用による CO2 排出量は蒸気、温水、冷水のとき 0.057 tCO₂/GJ であるから

$$\begin{aligned} & 31 \times 10^8(\text{MJ}) \times 0.057 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\text{GJ}} \right) \\ &= 31 \times 10^8 \times 10^6(\text{J}) \times 0.057 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\text{GJ}} \right) \\ &= 31 \times 10^5(\text{GJ}) \times 0.057 \left(\frac{\text{tCO}_2}{\text{GJ}} \right) \\ &= 176,700(\text{tCO}_2) \end{aligned}$$

よってこれらの差より利用で削減している CO2 の量は

$$314,549.7(\text{tCO}_2) - 176,700(\text{tCO}_2) = 137,849.7 (\text{tCO}_2)$$

欧州域内排出量取引制度(EU-ETS) における 2011 年の CO2 取引価格\$18.8(tCO₂)を使って日本における地熱のハウス農業への直接利用による CO2 排出削減の金銭的価値を計算すると、

$$137,849.7 (\text{tCO}_2) \times 18.8 \left(\frac{\$}{\text{tCO}_2} \right) = 2,591,574.36(\$)$$

より約 259 万ドルとなる。

5-2 野菜における CO2 削減量

次に、身近なハウス野菜において地熱を活用することで CO2 排出量がどれだけ削減されるのか、またその金銭的価値を算出する。

トマト、きゅうり、ナスなどは生育適温が高く、露地栽培できる時期が限られておりハウス農業で栽培されることが多い。青柳みどり・森口祐一・清水浩・近藤美則（1992）の試算によると、きゅうりとトマトの露地栽培とハウス栽培のエネルギー利用量の差は以下である。（露地栽培：ハウスを使わず戸外で自然の状態に栽培すること）

	露地野菜 (kcal/kg)	ハウス野菜 (kcal/kg)	差 (kcal/kg)
きゅうり	668	4287	3619
トマト	979	3470	2491

青柳みどり.森口祐一.清水浩.近藤美則（1992）「生活に関連した二酸化炭素削減
対策の可能性の評価」より

このきゅうりとトマトをハウス野菜として栽培するときのエネルギー利用量を
地熱で賄う場合と重油で賄う場合二つを比べる。

使用した数値は以下である。

- 1kcal = 4200J
- 1 バレルの燃料油は 6.06×10^9 J のエネルギーを持つ
- 重油が直接熱を発生させるのに使われた時の効率因子 0.7
- A 重油の使用に関する CO2 排出係数 $2.71 \frac{tCO_2}{kl}$
- 他人から供給された熱の使用による CO2 排出量(蒸気、温水、冷水のとき) $0.057 tCO_2/GJ$
- 1 bbl = 0.159 kl
- 欧州域内排出量取引制度(EU-ETS) における 2011 年の CO2 取引価格 \$18.8(tCO_2)

計算結果は以下の通りになった。

	きゅうり (1 k g あたり)	トマト (1 k g あたり)
必要エネルギー (kcal)	4287	3470
必要エネルギー (J)	18005400	14574000
必要エネルギー (GJ)	0.01801	0.01457
必要重油量 (bbl)	0.00424	0.00344
必要重油量 (kl)	0.00067	0.00055
重油の CO2 排出量 (t)	0.00183	0.00148
地熱の CO2 排出量 (t)	0.00103	0.00083
CO2 排出量の差 (t)	0.00080	0.00065
CO2 排出量削減の価値 (\$)	0.01509	0.01221
円換算 (1 \$ =110 円)	1.65984	1.34351

第6章 考察

試算で求めた結果をより実感するために、きゅうりとトマトの摂取量のデータを以下に載せる。

	きゅうり	トマト
一日あたり摂取量 (g)	8.8	18.9

表：きゅうりとトマトの一歳以上の平均摂取量
厚生労働省『平成26年国民健康・栄養調査報告』（2016年）より

これを踏まえた試算の結果は以下になる。

	きゅうり	トマト
一日あたり摂取量における 地熱利用のCO ₂ 排出削減の金銭価値 (円)	0.0146	0.0254
一年あたり摂取量における 地熱利用のCO ₂ 排出削減の金銭価値 (円)	5.33	9.27

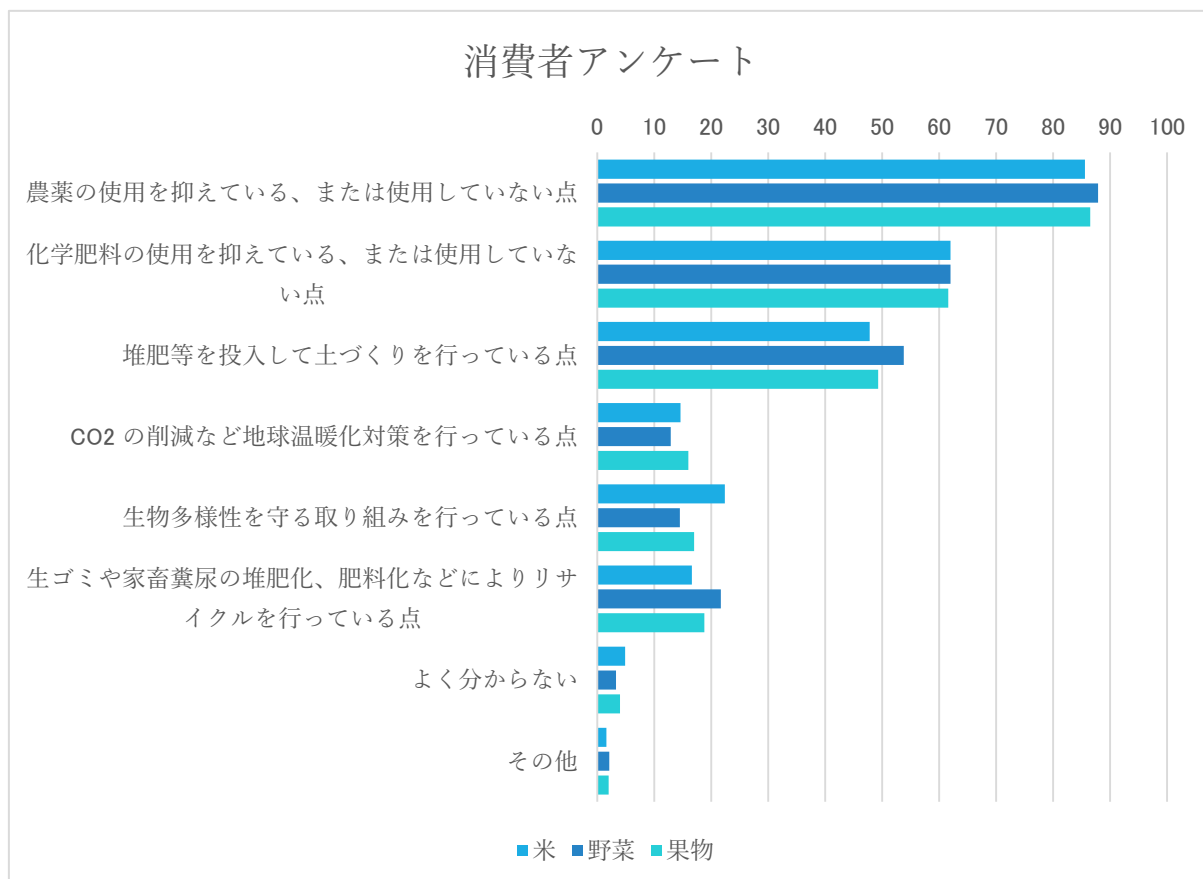
消費者にとって、地熱利用によるCO₂削減の金銭価値はあまり大きいとは言えない価値になった原因として、CO₂排出量削減の価値は排出権取引での価格のみを使って計算しているが、地球温暖化への影響などは一切計算に考慮していないことと、CO₂取引価格に左右される計算方法であることが挙げられる。地球温暖化による生態系への影響などを計算に入れることができなかつたのが限界の一つである。CO₂取引価格は今回、欧州域内排出量取引制度(EU-ETS)を使って計算したが、地域によって価格には幅がある。

また一方で、CO₂排出量削減の金銭的価値が小さかったから購入されることがないというものは無いだろうと考える。地熱を使ったハウス農作物の魅力はCO₂排出量が少ないだけでなく、温室栽培をすることで露地栽培と季節をずらして食べられることの消費者にとっての効用は少なくないと思う。地熱を利用した温室で栽培して、露地野菜と時期をずらして出荷できることによる効用もこれと別にあるはずである。また、北海道のオロフレトマトのように、害虫の活動が活発でない冬に栽培できることによって、農薬を減らすことができるというCO₂とは別の観点で環境にやさしいメリットもある。

今回は消費者に選ばれるためにという観点で資産をしていったが、農家側にとっても地熱を利用することによるメリットはある。農家にとってうれしいことはCO₂削減というよりもまず燃料費の減少だろう。事例でもいくつか挙げたように、地熱や温泉熱の利用は燃料費の低下をもたらす。

試算を行った結果確かに地熱を利用することでCO2を削減できることは数字として示せた。地熱を使えば二酸化炭素排出量が減ることは明確であり、結果でもそのような結果がでた。

では、本当に地熱を利用した農作物は消費者に選ばれるだろうか。



	回答者数	農薬の使用を抑えている、または使用していない点	化学肥料の使用を抑えている、または使用していない点	堆肥等を投入して土づくりを行っている点	CO2の削減など地球温暖化対策を行っている点	生物多様性を守る取り組みを行っている点	生ゴミや家畜糞尿の堆肥化、肥料化などによりリサイクルを行っている点	よく分からない	その他
米	878	85.6	62	47.8	14.6	22.4	16.6	4.9	1.6
野菜	876	87.9	62	53.8	12.9	14.5	21.7	3.3	2.1
果物	880	86.5	61.6	49.3	16	17	18.8	4	2

(品目別、複数回答(3つまで) 単位: %)

2012年8月中旬から下旬にかけて、農林水産情報交流ネットワーク事業の消費者モニター987人を対象に実施し、892人から回答を得た結果である。

回答者数: 米 878人 野菜 876人 果物 880人

図6-1 環境に配慮した農産物を購入する場合に重視する点

出典: 農林水産省 『農林水産統計2015』(2016年1月)

上の図6-1をみると、環境に配慮した農作物という性質を持つもののなかにおいても、人々に選ばれやすいものとそうでないものがあることが分かる。地熱農作物があてはまる『CO2の削減など地球温暖化対策を行っている点』を重視する人は少なく、とくに野菜においては最下位である。

つまり、二酸化炭素排出量を減らせることが表示できたとしても、消費者に選ばれない可能性があるということである。

この理由を考察した結論として、二つの理由を挙げる。まず、私的属性の部分である。農薬の使用を抑えていることは明らかに体によさそうだと考えられるし、化学肥料不使用、堆肥の投入は味覚や健康面で他より優れていると考えられる。すなわち、私的領域の部分で非グリーン財よりも優れている。一方CO2排出量が少ない、生物多様性を守る、リサイクルを行っているといったアピールは、公的にはいいことだと分かっているにもかかわらず私的性質では非グリーン財と変わらない。

二つ目の理由として考えたのは、『無農薬』や『有機栽培』といったものを売りにしている商品はスーパーで見かけることもあるが、『CO2削減』を売りにしているものは見かけることが少ないことが理由ではないかと思う。アンケートを受けるにあたって自分が実際に購入したことがあるかを思い返した時、そもそもスーパーで見かけたこともなく、具体的な商品が想像しにくい利点を、重視して購入するとは答えにくい。

一つ目に挙げたものは、公的属性の数值化や認証により人々に選ばれるようにし、二つ目の点に関しては、実際にスーパーなどに置かれることで変わっていくのではないか。最近では地熱マルシェといったものも行われ、そういった商品に触れる機会が増えることを期待する。

終章

地熱発電は二酸化炭素排出が少ない、他の再生可能エネルギーと比べて季節や天候に関わらず安定的に電力供給ができる、国産のエネルギーであるといった日本の現在のエネルギー問題の課題を克服するのに役に立つ発電方法である。そのうえ、日本には世界で第三位のポテンシャルがある。それにも関わらず、なぜ普及しないのか。これが最初にこのテーマにしようと考えたきっかけであった。そして研究をすすめるなかで地熱発電の普及しない裏には自然公園などの法的規制の問題、計画から操業までに時間がかかる、温泉事業者との対立など、地熱発電ならではの障壁があることを知った。それと同時に、規制の問題や開発に時間がかかるという課題には政策などにより少しずつ改善されていることもわかった。そして、では制度面の問題が解決されたとき最後に地熱発電への障壁として残るのは社会の受容性なのではないだろうかと考えるに至った。現状で社会の受容性を改善するような政策は現状行われていない。どうにかこの部分に関わる論文を書きたいと考えた。

そのときに、窪田（2014）の「温泉や自然観察を好む人々は、そうでない層と比べて地熱開発に賛同しやすい」という論文を読み、地熱発電を身近に感じる人ほど受容性が高いのであれば、温泉や自然観察といった個人の趣味ではなく、野菜や果物といった農作物といったより人々の身近なところに地熱を活用した生産物を普及させることで、社会の受容性を高めることができるのではないかと考えた。そこで本論文では、地熱発電を推進する前段階として社会の受容性を高めるための地熱エネルギーの直接利用による農業をテーマに設定した。

本論文は地熱エネルギーの地熱発電以外の活用方法を紹介し、その利用による二酸化炭素排出量の減少を示し、その金銭的価値を検証したにとどまる。消費者が実際にどのくらいの支払い意思額をもつのか、また地熱が豊富な北海道・東北・九州などから、都市圏に農作物を運ぶとした際の輸送コストや二酸化炭素排出量まで検証できていない。

また、試算ではCO₂の排出量が削減できることは示せたが、その金銭的価値は小さなものとなってしまった。CO₂排出量削減の金銭的価値の計算方法を、排出権取引の価格以外に入れることができなかつたのが課題である。

また、八丈町役場の方のお話で似たような、内側にいるとその価値を感じにくいという点に対して具体策を掲げることができなかつたことも今後の課題である。

参考文献

1. Duffield, W.A. & Sass, J.H. 2003. Geothermal energy – clean power from the earth’s heat. United States Geological Survey Circular No. 1249. Washington, DC, United States Department of the Interior. 36p
2. IEA Key world energy statistics 2016 80p
3. Lund, J.W. 2010. Direct utilization of geothermal energy. *Energies*, 3: 1443–1471.
4. Van Nguyen, M., Arason, S., Gissurarson M. and Pálsson, P.G. 2015. Uses of geothermal energy in food and agriculture – Opportunities for developing countries. Rome, FAO.
5. あおもり地中熱ホームページ
http://www.pref.aomori.lg.jp/sangyo/energy/geo_agri.html
6. 大阪ガス CO2 排出量削減効果の適切な評価方法について
<http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/eco/co2/evaluation.html>
7. 奥飛騨ファーム <http://www.okuhidabanana.net/Pages/default.aspx>
8. 環境省『低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言』（2013年3月）
9. 環境省. 環境アセスメント制度のあらまし. 2012年2月. 17p
10. 環境省. 経済産業省 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル(Ver4.2) (2016年7月)
11. 関西電力 日本のエネルギー事情
http://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nowenergy/japan_energy.html
12. 経済産業省「電力広域的運営推進機関が発足しました ～地域を越え、より効率的に電気のやりとりができるようになります～」
<http://www.meti.go.jp/press/2015/04/20150401008/20150401008.html>
13. 経済産業省 「長期エネルギー需給見通し」 (2015年7月)
14. 資源エネルギー年鑑編集委員会 電力自由化調査チーム『再生可能エネルギーの技術動向と最新ビジネスモデル 2015』通産資料出版会 (2015年3月) p.382
15. 壮瞥町「再生可能エネルギーのまち」 <https://www.town.sobetsu.lg.jp/about/saisei-enerugi.html>
16. 総務省統計局 『世界の統計2016』

<http://www.stat.go.jp/data/sekai/0116.htm#c06>

17. 地熱マルシェ <http://www.enjoytokyo.jp/events/event/1255637/> (最終アクセス 2 月 4 日)
18. 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 JOGMEC
<http://www.jogmec.go.jp/index.html>
19. 日本地熱学会 <http://grsj.gr.jp/whatbook/chapter5.html>
20. 農業環境技術研究所農業環境研究成果情報 第 11 集 (1995 年) 農業生産過程におけるエネルギー消費および CO₂ 排出量の把握
http://www.niaes.affrc.go.jp/sinfo/result/result11/result11_22.html
21. 農林水産省 『農林水産統計 2 0 1 5』農林統計協会 (2016 年 1 月)
22. 北海道農政部 北海道潟園芸高度化推進協議会『北海道における養液栽培パッケージモデル (太陽光利用型)』(2014 年 9 月) www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/nsk/zenbun.pdf

23. 青柳みどり. 「環境にやさしい」企業アピールに対する若者の購買行動に関する研究 環境科学会誌. 1996 年
24. 青柳みどり・森口祐一・清水浩・近藤美則 生活に関連した二酸化炭素削減対策の可能性の評価 環境科学会誌 (1992)
25. 今市栄一, 井内正直, 坂東茂. 日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価. 電力中央研究所 2016 年. 84p
26. 井村秀文*・矢ヶ部恭弘・二渡了. 持続可能な消費パターン実現に向けた市民・企業の意識と行動に関する調査研究. 環境システム研究 vol.22 . 1994 年
27. 大沼あゆみ. 生物多様性保全の経済学 有斐閣.2014 年.378p
28. 川本勝. 地熱発電を用いた日本の新たな電力政策と地熱税. 尚美学園大学総合政策論集 2015 年. No.21, p15-34.
<http://ci.nii.ac.jp.kras1.lib.keio.ac.jp/naid/110010016474> (参照 2016 年 6 月 21 日)
29. 窪田ひろみ. 地熱発電開発と温泉事業との相互理解と地域共生に向けた方策. 電力中央研究所 2012 年. 34p
30. 窪田ひろみ. 発電技術に対する社会的受容性の現状と課題—CCS と地熱発電を事例とした意識調査—. 電力中央研究所 2014 年. 38p
31. 長山浩章. 日本の地熱発電政策のありかた. 福島大学経済学会 商学論集 80 号.

2012 年. 1-10p <http://hdl.handle.net/10270/3592>

32. 稗貫 峻一, 本藤 祐樹. 拡張産業連関モデルを用いた地熱発電のライフサイクル雇用分析. 日本エネルギー学会誌 Vol. 92 2013 年 No. 1, p164-173
<http://jlc.jst.go.jp/DN/JST.JSTAGE/jie/92.164?from=Google>

終わりに

卒業論文のテーマ決めをする際、ゼミに入った時から地熱発電の普及に関して研究したいと考えていたため、大まかなテーマ選びには悩まなかった。しかしながら、地熱発電に関しては先行研究も多く、そこから自分ならではのより細かいテーマ絞り込むことに苦勞をした。そのときに大沼先生から「遺文がやりたい事、自分が面白いと思うことをテーマにしてください」と言っていただき、あまり先行研究はなかったが自分が興味をもって取り組める地熱エネルギーの農業への利用に絞りこむことができた。

地熱エネルギーからの恩恵は、地熱発電所や温泉の近く、熱源の近くに住んでいないと感じにくいものである。しかし農作物であれば輸送が可能であり、私のように東京に住む人でも地熱の恩恵を感じることができる。地熱を利用した農作物が普及すればその背景にある日本の豊富な地熱の存在や、地熱発電への理解を深めてもらうことができ、社会的受容性が高まり、地熱発電の普及が促進できるのではという考えでここまで論文を執筆してきた。人々が地熱をより身近に、そして地熱が日本固有のエネルギーであることを自覚することに少しでもつながれば幸いである。

最後になりますが、本論文の調査にあたり、取材依頼に快く対応してくださった八丈町役場の明石様、親切にしてくださった八丈島の皆さまに感謝申し上げます。人も気候も暖かくフィールドワークでありながら大変思い出に残っています。また、至らない点の多い私に根気強くご指導いただいた大沼先生、小村さん、12期生の先輩方、同期である13期生、そして14期のゼミ生の皆さまにも深く感謝いたします。

経済学部に入った時には、環境問題を専攻できるとは考えていなかった私に、環境経済学の存在や面白さを気づかせてくださったのは日吉での大沼先生の授業でした。ゼミに入った後も、教科書発表や新聞発表、インゼミや本論文の作成において、時には呆れさせてしまうこともあったかと思いますが、常に熱心に指導してくださいました。ゼミに入ってから2年間は、本当に充実したゼミ生活を送ることができました。本当に、ありがとうございました。