

# 地球温暖化緩和対策における 温泉源を利用した地熱発電の可能性

地球温暖化の影響緩和についての1つの策として、二酸化炭素排出の削減を目標とした地熱発電利用の可能性について提示する。地熱は、日本列島固有の重要なエネルギー資源の1つであり、安定したエネルギーが供給されているにもかかわらずもっとも開発が遅れている。温室効果ガスの排出源の大きな要因の一つであるエネルギー転換部門の二酸化炭素排出削減可能性として、日本国内では近年開発が停滞している地熱発電に注目した。特に100～数千kw出力規模の温泉ホテルにおける、現在までの自家用地熱発電所の稼働や利用に注目して、経済面、利便面、さらに環境面の評価を行った。また、地熱発電のこれからの可能性としてカーリーナサイクル発電について評価を加えた。すなわち、実際に国内で製鉄所内の発電所として使用されていることから、代表的な日本の重要な観光資源である温泉源を用いて発電が行えることが分かった。その結果、中小規模の地熱発電所、カーリーナサイクル発電法、さらに温泉を温源とすることを組み合わせる事によって、より効率的な発電が可能となり、経済的な面でも利用が広がる事が示唆された。さらに、現在草津温泉が実施しているプロジェクトの発電所の規模や、日本で最も小規模な地熱発電所であっても、温泉地に設置した場合、年に20,000～300,000[t-CO<sub>2</sub>/年]の二酸化炭素が削減可能であることが明らかになった。日本の地球温暖化防止における大きな対策として提案する。

小長谷 瑞木

Mizuki Konagaya

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科環境科学専攻

## 1 | はじめに

IPCCは第4次評価報告書にて、気候システムの温暖化には疑う余地はないと明言した。大気や海洋の世界平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が具体的な例として観測されていることから、今や明白であると示されている。

実際に、最近12年間（1995～2006年）のうちの11年の世界の地上気温は、測器による記録が存在する期間中（1850年以降）で最も温暖な12年の中に入る。IPCC第3次評価報告書で示された1901～2000年の変化傾向である100年当たり0.6℃上昇したという報告に比べて、第4次評価報告書では、1906～2005年で100年あたり0.74℃上昇したとされ、最近ますます地球温暖化が加速していることを表している。地球温暖化は、海洋の酸性化、海面上昇さらに気候変動などを引き起こす可能性が高いことも示されている。今後引き続いて地球温暖化が進行すれば、生物的、地球的な異常が危惧されている。

また、IPCC第4次評価報告書においても20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高いとされている。これらの温室効果ガスは1750年以降の人間活動の結果、大きく増加しており、氷床コアから決定された工業化以前何千年もの期間の値よりはるかに大きな濃度である。

特に二酸化炭素は最も重要な人為起源の温室効果ガスである。二酸化炭素の世界的大気中濃度は、工業化以前の約280ppmから2005年には379ppmに増加した。工業化以後における大気中の二酸化炭素濃度上昇の主要な原因は化石燃料の使用である。化石起源の二酸化炭素の年間排出量は、1990年代の年当たり6.4GtC（排出量1Gt-C（炭素換算10億t）は、3.67GtCO<sub>2</sub>（二酸化炭素換算36.7億トン）に相当する）（23.5GtCO<sub>2</sub>）から、2000～2005年には7.2GtC（26.4GtCO<sub>2</sub>）に増加したとIPCC第4次評価報告書で報告されている。

さらに、1997年に気候変動枠組条約第3回締結国会議で採択された京都議定書で、二酸化炭素を中心とした温室効果ガスの排出削減目標が定められた。日本は2008年から2012年間に1990年を基準として温室効果ガス排出量を6%削減することが決められた。しかし2003年の段階で基準年の8.3%増加（環境省）となっており、このままでは削減目標の達成は不可能である。

いずれにしても、人為的に発生し進行中である地球温暖化現象を抑えるために、二酸化炭素排出量の削減を進めていかなければいけない。地球温暖化は人類が近い将来に越えなければならない壁である。

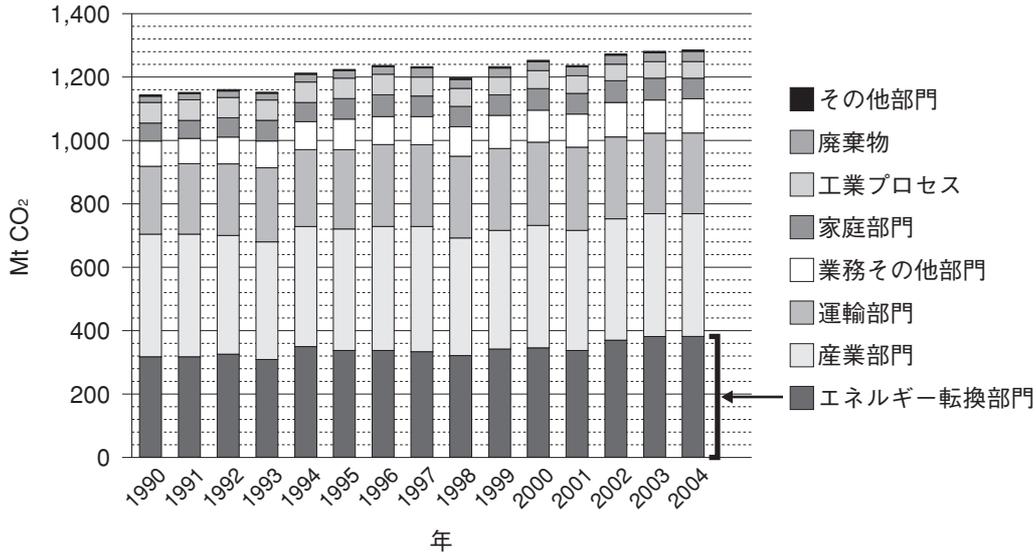
## 2 | 背景・目的

図表1に日本におけるCO<sub>2</sub>の排出量の推移を示した。各部門の経年変化を見ると、排出量の比率にほぼ変化は見られないが、エネルギー転換部門と産業部門は2つで全体の6割を占めており、日本のCO<sub>2</sub>排出量の主要因とも言えるだろう。

今回の研究では、その主要因の1つである、発電所を主とするエネルギー転換部門に注目する。日本には、石油や石炭などのエネルギー資源が乏しく、これらはほぼ輸入（石油：輸入率99.7%）に頼っているのが現状である。化石エネルギー資源の採掘量が限られていて、あと40.5年で枯渇するとされている（BP統計2005（2004年））。こうした状況と呼応するように、石油による発電は減少している（図表2）。現在では、主に原子力発電が推し進められており、その他に天然ガス、石炭による発電が主に行われている。しかし、プルサーマルが開発されたものの、ウランも限りある資源（残り85年、輸入率100%）であり、これから原子力発電を中心として発電を行っていくのは、先の見通しが不透明である。もし原子力発電が出来なくなった時、発電所が原子力発電所ばかりであったら、日本ではエネルギー生産が出来なくなり、大変な混乱を招くと考えられる。

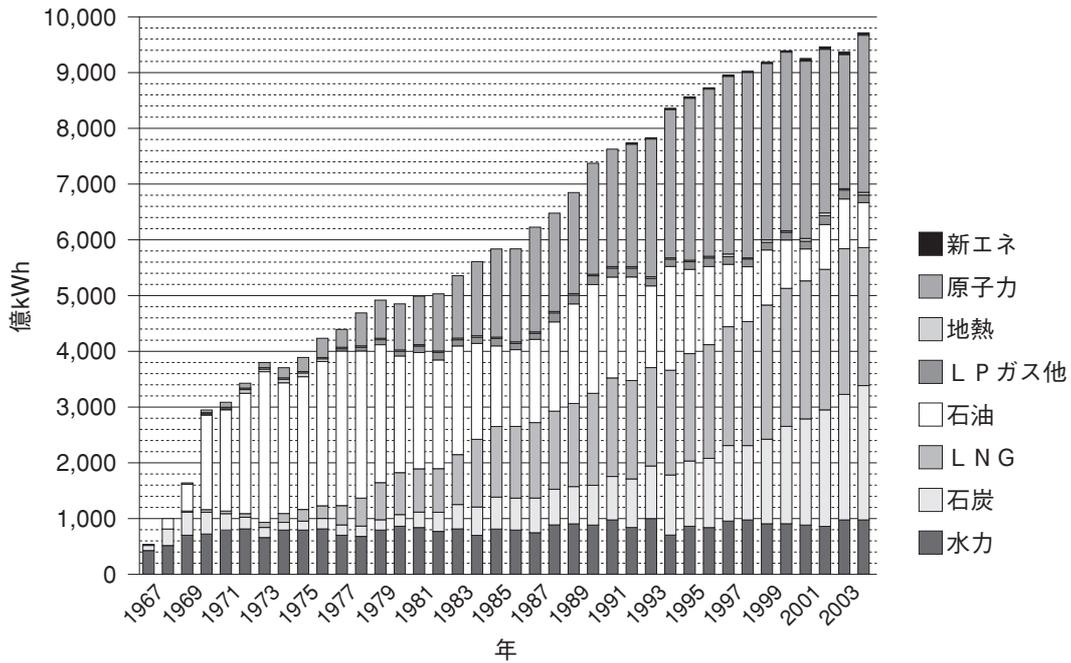
原子力発電で発生する放射性廃棄物も現在の段階では、処理に関して完全に危険がないとは言い切れない。また、

図表1 日本のCO<sub>2</sub>排出量の1990-2004年度の推移



注：直接排出量（自家発・産業用蒸気配分後）  
出所：日本国温室効果ガスインベントリのデータより

図表2 日本における発電電力量の推移

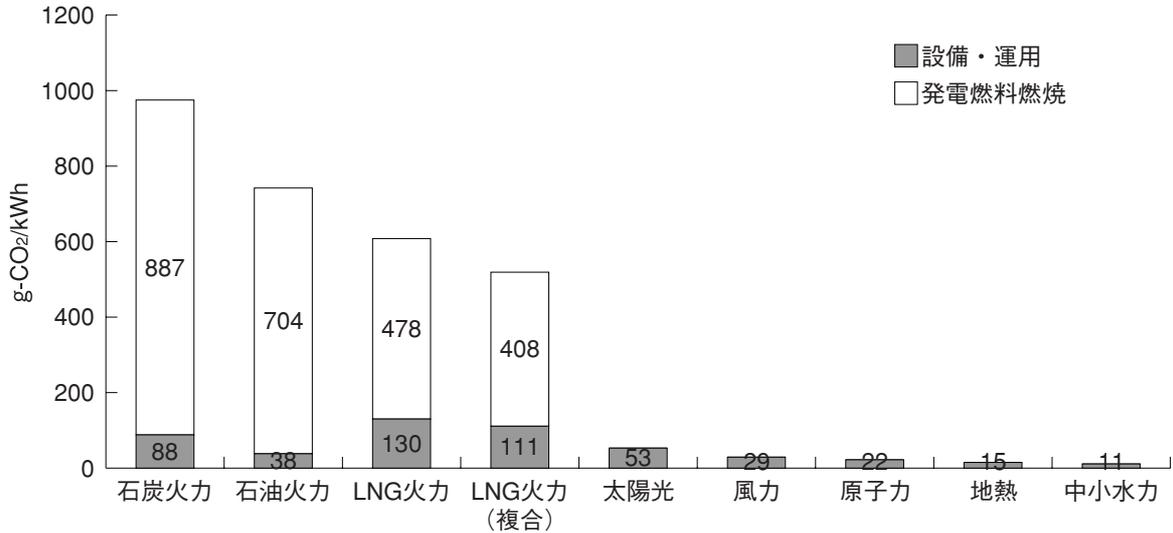


出所：資源エネルギー庁データより

天然ガス（残り66.7年）、石炭（残り164年）に関してもおおよその残り資源量が見積もられており、輸入（輸入率各96.5%、100%）に頼っていることから代替品を探さなければいけない。このような側面も考慮する必要がある。

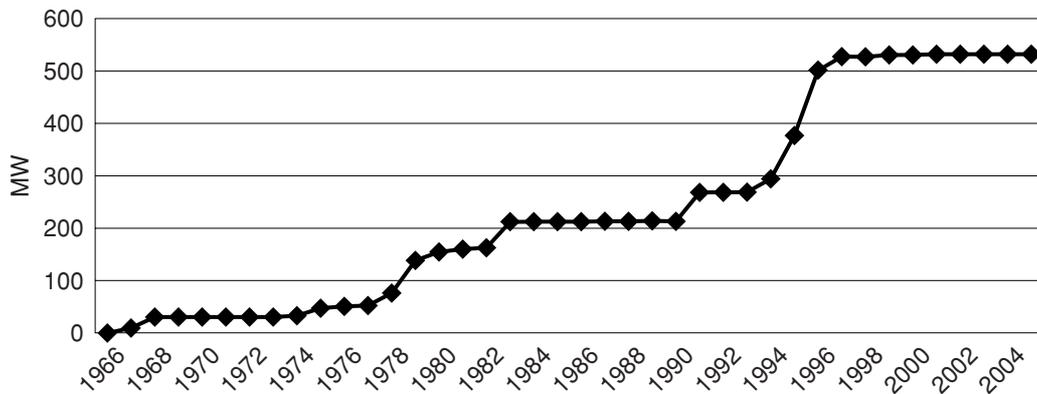
以上の点から、大容量の電力量が必要であるのを考えれば原子力発電が主流になるのは必至ではあるが、原子力発電にのみ頼るのは好ましいことではない。図表3に日本中における発電方式と二酸化炭素排出量を示す。地球温暖化に対して考えれば、できるだけ二酸化炭素の排

図表3 日本における発電方式による二酸化炭素排出量



出所：資源エネルギー庁データより

図表4 日本の地熱発電出力の推移



出所：資源エネルギー庁データより

出力を抑えた発電法を選択しなければいけない。そのためにも、圧倒的に二酸化炭素の排出量が多い火力からは脱却すべき時代になったと言えるだろう。

図表3に示した二酸化炭素の排出量が少ない発電方法の中で、今回の論文では特に地熱発電について注目する。地熱は、日本において水力同様で、純国産かつ再生可能な貴重なエネルギー変換可能である資源である。風力、水力、太陽光発電などクリーンな発電法と言われている発電法の中でも、地熱発電は、季節、天候、時間によって発電量が変化せず、最も安定した電力を得ることができる。しかも今後数百万kWの開発可能資源量が見込ま

れていて、開発有望地点が確認されている。

だが一方地熱発電は、石油ショック時には重要視されたものの、最近10年間ほど新しい発電所などの建設もされておらず停滞状態である(図表4)。その原因としては、原子力発電などに比較すると、大規模発電所の割に出力電力量が小さいこと、施設建設単価が高いこと、探索から実用までの開発期間が長いことなどがあげられる。つまり、燃料費がかからない一方、資本費を中心とした固定費が発電原価の大部分を占める。また、地熱発電は石油代替エネルギーに関する「新エネルギー法」でも新エネルギーから除外されているため、総発電容量の中で占

める割合は0.2%と微々たるものである（海外電力事業統計2005年版）。

### 3 諸外国の例

図表5に地熱発電容量が高い国を示した。大体の国で地熱活動が活発であり、自国の有用な資源を使用しているといえる。アメリカ合衆国では、地熱発電容量のほとんどがカリフォルニア州に集中している。その中で、日本の総発電容量に対する地熱発電容量の割合や国民当たりの地熱発電量を見ると、火山国でありながら地熱エネルギーを発電という形で十分に有効活用していないことが分かる。

現在、日本には18の地熱発電所があり、計20台存在する。その多くは東北地方と九州地方に集中しており、関東近畿地方などには全く存在していない。このうち5つの発電所は事業用である。また、特に認可出力が100～3000kW程度の小規模に発電を行っている発電所では温泉地のホテルに付随して存在しているものが多い。これらのホテルに電力を供給している地熱発電所は、一般電力供給用の大型地熱発電所とは異なり、数は少ないものの独自の開発スタイルを築き上げてきたと考えられる。これらの小型地熱発電所の稼働経過を調べることで、地球温暖化に対してより有効な手段と考えられる地熱発

電の可能性を提言したい。

## 4 中小型地熱発電所の稼働の実態

### (1) 霧島国際ホテル地熱発電所

霧島国際ホテルの敷地内に地熱発電所がある。付近一帯は霧島屋久国立公園となっており、23座の火山群の中に位置している。このため霧島温泉郷では、各所から温泉が噴出し、その泉質と湧出量を誇っている。さらに、温泉が高温の噴気状態で得られることもあり、霧島国際ホテルでは既存の温泉井戸を利用し浴用として使用する前の段階で、蒸気を暖房および給湯加熱の熱源として、また、冷房用の小規模発電に利用して活用を図っている。

他の地域の温泉にも多くみられるが、この温泉郷では、自噴した温泉だけでは湯量が賸り切れず、ボーリングによって温泉噴気を得て蒸気造成温泉として利用している。こうして蒸気を利用した地熱発電が成立しているのである。

霧島国際ホテルの地熱発電所は1984年2月より営業運転を行っている。設備容量・認可出力が共に100kW（所要蒸気量6[t/h]、126.8℃）であり、日本で最も小規模な地熱発電所である。この発電所をまとめると、下記の通りである。

- a. 地熱発電用に生産井を掘っておらず、既存の温泉井戸を利用している。

図表5 地熱発電容量が高い国

国名	総発電設備容量 (MW)	地熱発電容量 (MW)	地熱発電の割合 (%)	国民当たりの地熱発電量(統計局) (MW/百万人)
アメリカ合衆国	1,031,692	2,534	0.2	8.7
フィリピン	13,434	1,931	14.4	23.8
イタリア	78,249	791	1.0	13.7
メキシコ	43,536	953	2.2	9.1
インドネシア	24,706	797	3.2	3.7
日本	272,701	535	0.2	4.2
ニュージーランド	8,555	435	5.1	108.5
アイスランド	1,510	172	11.4	595.2
エルサルバドル	1,133	151	13.3	22.7
コスタリカ	1,715	163	9.5	39.9
ニカラグア	641	78	12.2	14.8
ケニア	1,129	127	11.2	3.9

出所：海外電力事業統計2005年版

- b. 浴用として使用する前の蒸気の熱エネルギーを使用して発電を行っているため、大規模な設備を導入していない。
- c. 100kW程度の発電設備であるため、発電設備は汎用のトレーラで運搬されるコンテナを利用しており、その中に発電機を備え付けている。ちなみにコンテナは2.5m×6.2mであり、温泉の湧出位置などによって移動可能となっている。

この設備での発電所は、1984年2月から2003年4月まで発電を行い、総発電量は9,704,000kWhである。この間での発電による経済効果を下記に記す。

- a. 設備費用：5,000[万円]（発電機、および総配電設備を含む）
- b. 電力料金の節約額：1,500[万円/年]（利用効率80%、電力単価は22[円/kWh]で試算）
- c. 償却：4年
- d. 発電電力単価：償却後は約5[円/kWh]（試算）

設備費用以外の出費としては、ほぼ無人運転なので人件費はかからず、2年に1度設備の検査があり、今回行った聞き取り調査によると、その費用で250～300[万円/年]程度であるようだ。この発電した電力で主にホテルの運営の基盤となるベース電力相当分を担っている。2006年からは、発電方式をバイナリーサイクル発電に

切り替えて地熱発電を行っている。バイナリーサイクル発電とは、水より沸点の低い冷沸点媒体を加熱して、媒体蒸気でタービンを回す方式である（図表6参照）。

また、地熱は冷房などにも利用されており、効果などを下に記す。

- a. 設備費用：3,500万円
- b. 償却：8年（夏の5ヵ月間しか使用していないため）
- c. 既存エネルギーによる代替効果：45[kℓ/年]

結果として冷房による従来の契約電力780kWを550kWまで下げ、夏季の消費電力料金の節減を可能にしてきた。この冷房設備は、1983年夏シーズンから用いられ、現在でも使用されている。

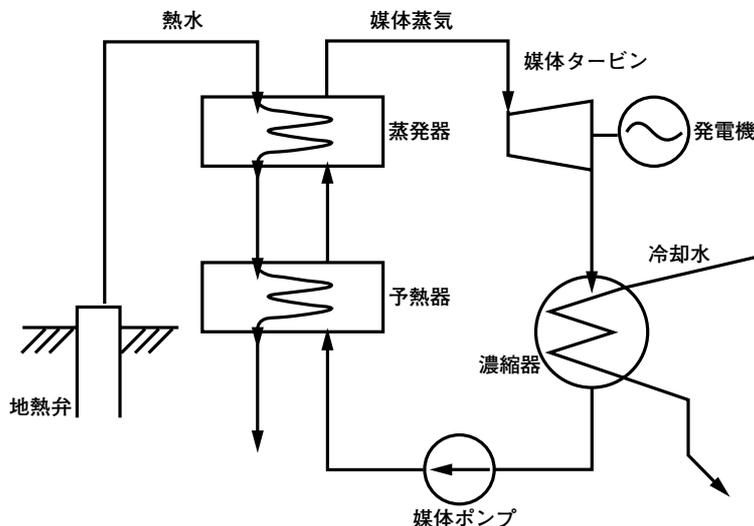
その他の地熱利用に関しても多様な利用があり、地熱エネルギーが有効に使われている実態があるがここでは割愛させていただく。霧島国際ホテル発電所に関する詳しい情報は、大窪（1986）、新版わが国の地熱発電所（2000）を参照にされたい。

## （2）九重地熱発電所

九重地熱発電所は、九重観光ホテルの自家用発電所として使用されており、大分県九重町にある。九重町は、国内最大級の地熱発電所である八丁原発電所をはじめ計5ヵ所の地熱発電所がある地熱利用先進の町ともいえる。

発電所は、2000年12月から実質的稼働をしており、

図表6 バイナリーサイクル発電の仕組み



2001年から2006年までに平均して約7,173[MWh/年]発電している。九重発電所に関して、これまで把握している情報を下記に記す。

- a. 設備費用：約1億5千万円（補助額含めて、蒸気井は除く）
- b. 年間費用：1,320万円（2006年）（人件費、備品消耗材費、修繕費）
- c. 電力会社からの受電力量：3.3[MW]（2006年）
- d. 発電力量：約8,000[MW]（2006年）

九重地熱発電所の概要と特徴を以下に記す。

- a. 霧島国際ホテルの発電所と比較して規模は大きく、認定出力は500kWである。
- b. 全ての電力をホテル内で使用しているわけではなく、余剰電力は九州電力へ余剰電力購入契約に基づき売電している。
- c. 蒸気井が2本あり、一方は温泉用の既存井の利用目的を変更したもの。もう一方は、発電・温泉目的で新規に採掘したもの。

九重地熱発電所では、余剰電力を九州電力へ売電しているが、その売電単価が安く実際の地熱発電の評価が無視されている。地熱発電は、RPS（新エネルギー）の対象になっているが、バイナリーサイクル発電以外はRPS証書対象になっていないため、バイナリーサイクル発電でないと現状として売電は厳しい状況である。発電所について、詳しくは九重地熱発電所のホームページもしくは、現地で確認されたい。

<http://www2u.biglobe.ne.jp/~kuju-kh/kenngaku.hatudenn/hatuden.html>

### （3）杉乃井地熱発電所

大分県別府温泉にある杉乃井ホテルは、2434名が宿泊可能であり、アミューズメント施設を付設している巨大ホテルである。このホテルは、世界最初の本格的な地熱発電所を持っており、運転開始は1980年11月である。認可出力は3,000kWであり、ホテルで利用している地熱発電所の中では、最大級のものである。この発電所の簡単な特徴を下に記す。

- a. 現在では地熱生産井が4本（ピーク時6本）で、当初は出力が小さかったが、第2期工事の後に現在の3,000kWになった。
- b. 発電した電力はホテル内の基盤となるベース電力に充てられていたが、開設当時は使用電力よりも地熱発電所の発電量が多かったために電力会社へ送電していた。
- c. ホテル施設の増設による電力需要の増大、蒸気量の減衰や発電設備の老朽化などのために、現在の電力自給率は1/2程度である。
- d. 発電のほかに、地熱を冷暖房、温室、給湯など幅広く使用している。

## 5 | カリーナサイクル発電の将来性

カリーナサイクル発電とは、バイナリーサイクル発電（図表6参照）の一つで、沸点がマイナス33度のアンモニアと水混合媒体を作動流体に用いた発電システムである。一度使用され気化したアンモニアは、再度水と混ぜて再利用される。この発電法の特徴としては、従来のフロン等を用いた低温熱源発電システムより約40%高い効率で発電することができ、比較的低温な熱源による発電が可能である。また、これまで多く行われてきた数万kW規模の発電よりも規模が小さい数百～数千kWの中小規模の発電に適している。この発電法では、国内には2例ほどしかなく、地熱発電と組み合わせられた形では利用されていないようである。海外では初めて2000年にHusavik（アイスランド）で2,000kWの実用プラントが建設された他いくつか事例があるのみである。

### （1）住友金属鹿島製鉄所

日本の実例の一つとして、住友金属鹿島製鉄所で約3,500kWの発電を1999年より行っている。この製鉄所では、それまで未利用であった製鋼工場から排出される転炉オフガス冷却温排水（98℃）を利用している。その冷却温排水で濃度約88%のアンモニア溶液を加熱してアンモニア蒸気を作り、それでタービンを駆動させて発電を行っている。

NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）が参加していたIEA国際協定関連事業のCADDETのプロジェクト報告によると、この廃熱回収サイクルが日本の全鉄鋼業界に導入されれば、年間で石油換算約700万kℓのエネルギーが節減されるとみられると報告している。また、この発電によって、節減または生産されたエネルギー量は270,600[GJ/年]であり、石油換算約6,600[kℓ/年]のエネルギー消費を節減している。その結果、年間19,536[t-CO<sub>2</sub>]の二酸化炭素削減（石油（C重油）の二酸化炭素排出係数を2.96[kg-CO<sub>2</sub>/ℓ]として試算）であると報告している。

次に経済性を見る。資本コストが約4億5,000万円で、その1/3の約1億5,000万円は産業部門の省エネルギー推進のための政府補助金で賄われている。さらに約13万[円/kW]の投資コストにより、本システムは競争力の高いコストで発電することができると見られている（CADDETプロジェクト報告抜粋）。

この製鉄所では、冷却温排水を使用して、このカーリーナサイクル発電システムで発電をしているが、このシステムに温泉を利用することは可能であると考えられている。また、熱源が高温で豊富なほど発電効率はよく、実際には70℃以上の温泉が必要ともいえる。

## （2）草津温泉

草津温泉は、国内でも豊富な湧出量を誇る。草津町最大の万代源泉では、約96℃の高温な温泉が毎分7,000ℓも噴出する。現在その豊富かつ高温の温泉を使用し、カーリーナサイクル発電を用いた発電所の建設プロジェクトが進んでいる。高温の温泉を今までは、水道水と熱交換させて冷まさせていたが、カーリーナサイクル発電によって96℃の源泉を76℃に下げ、かつ1,000kW発電するというプロジェクトである。温泉によるカーリーナサイクル発電を用いた発電は、世界初の試みである。この発電によって二酸化炭素の排出量が約4,000[t-CO<sub>2</sub>/年]も削減すると考えられている。発電施設の建設費は約5億円で、毎時1,290kWhの発電が可能と見られている。売電した場合、1kWhの当たり9～15円が見込

まれ、東京電力に支払う送電線の借用料を差し引いても、8年後には初期投資費用を回収できるという。

## 6 | 考察

4章、5章に現在の中小規模の地熱発電における、稼働状況や可能性を示した。まず、中小規模の地熱発電所の場合、出力電力は小さいが、その分設備や建設にかかるコストが小さい。数万kWの規模の地熱発電所は、原子力発電所など他の発電様式の発電所に比べて、規模の割に出力電力が小さく、経済面の負担や不安が多いため、この10年ほどは開発が停滞している。

中小規模の地熱発電所は、全国でも数が少なくホテルが所有して自家用に使用しているため、その価値があまり知られることが少なかった。3章に紹介した3つのホテルの発電所は、どれも現在も稼働しており、ホテルの営業に必要な電気を生産して、余剰電力を九州電力に販売している所もある。

4章（1）の霧島国際ホテルでは、100kW程の出力だが、元々の温泉井を発電に利用することによって、コスト面と環境面のバランスをうまく取っている。1年に1500万円の電気代節約をして、4年で設備費を償却しているため、ホテルの経済面で言えば大きな利益になっている。償却後の発電コストは、約5[円/kWh]で購入単価よりも断然安くなっている。さらに発電に必要なスペースも小さく、かつ温泉噴出場所に柔軟に対応できるように移動可能となっている。このような温泉を利用した小規模な発電ならば、多くのホテルや温泉街に設置可能であろう。また、霧島国際ホテルの様に、高温蒸気が多く噴出している地域ではこのような発電は容易にできると予想できる。

応用の例として箱根町付近では多くの高温水蒸気が噴出しているため、温泉街設備やホテルに付随した発電ができると考えられ、その地域に適した出力既定の地熱発電所を建設すれば、経済的にも利益が出ると考えられる。全国には、2006年3月末現在で1,162ヵ所の水蒸気の形で噴出する源泉があり（環境省）、その温度、噴出量が

霧島国際ホテルの水準を満たしていれば同程度の電力が作れるだろう。また、霧島国際ホテルの発電所は、二酸化炭素排出係数を0.000555[t-CO<sub>2</sub>/kWh]（以下同様）として試算すると平均して約281[t-CO<sub>2</sub>/年]の二酸化炭素削減に相当する。

4章の(1)(2)で示したホテルの発電所は、霧島国際ホテルの発電所よりも出力電力が大きく、また温泉井をそのまま利用していないことから、設備費用が高くなっている。しかし出力が大きい分二酸化炭素削減に大きく貢献しており、平均して九重ホテルでは約3,981[t-CO<sub>2</sub>/年]（2001～2006年）、杉乃井ホテルでは約6,432[t-CO<sub>2</sub>/年]（1981～1998年）の削減に貢献していると考えられる。また、余剰電力は、余剰電力購入契約により売電が可能である。

次に5章には、地熱発電においてカーナサイクル発電と温泉を組み合わせる事による可能性を示した。これからの地熱発電において、特に中小規模の発電所には、比較的低温の温源からも効率的に発電が行えることから、バイナリーサイクルが利用されることが考えられる。特に効率がよいと実証されているカーナサイクル発電を利用することはより効果的である。草津温泉のプロジェクトについても環境、経済産業両省は「再生可能エネルギー高度利用地域計画」に認定しており、事業費（約6億円）の半分を国が補助する事が決定している。

また、カーナサイクル発電に適していると考えられる70℃以上の温泉で、比較的湧出量が多い（100,000[l/h]以上）温泉は、日本全国に73カ所ある（独立行政法人産業技術総合研究所地質調査センター発行CD-ROM）。もしその73ヶ所の温泉に1つずつ中小規模の地熱発電所を配置したと考えると、それぞれの発電所が約100kW規模の霧島国際ホテルの発電所程度だった場合、20,513[t-CO<sub>2</sub>/年]程度の二酸化炭素削減が見込まれる。また、それらの発電所が草津温泉に建設される規模である場合、292,000[t-CO<sub>2</sub>/年]程度の二酸化炭素削減になると見込まれる。これらの削減量は、日本人1人が年内に排出している二酸化炭素量（9.87[t-

CO<sub>2</sub>/年];2003年）と比較すると、あまり大きな効果に見えないかもしれない。しかし、新・地球温暖化対策推進大綱（2002）などにおいて、いわゆるエコライフの実践で削減の対象となる量（1人が1年間で10項目に及ぶ行動を行った場合の二酸化炭素削減量）である736[kg-CO<sub>2</sub>/年]と比較すると、約27,000～407,000[人分/年]に相当することとなり、極めて大きな効果であり意義があると考えられることができる。

## 7 | まとめ

京都議定書の削減目標にもあるように、現在確実に進行しつつある地球温暖化を緩和するために、私たちが重要な目標の1つとしてあげなければならないことは二酸化炭素の排出量の削減である。しかし、実際には経済的な発展を妨げてしまうこともあり、目標にはほど遠い削減量であるのが日本の状況である。日本における二酸化炭素排出量の約1/4を占めるエネルギー転換部門は、現在石油主体の火力発電からの移行の段階である。また、原子力発電のみに頼ることは不安がある。資源の少ない日本において特に重要なエネルギー資源であるが、世界の火山国水準に比べて有効的に使用されていない地熱に注目をした。

地熱発電所は、二酸化炭素をほぼ排出せず、半永久的に安定した電力が得られるというメリットの一方、設備規模の割に出力電力が小さく、建設コストがかかると言われていたため、この10年間開発などが停滞してきた。しかし、実際には数万kWの大規模地熱発電所ではなく、ホテルなどが自家用として発電してきた中小規模の発電所では、今までに経済的にも規模的な面でも有効的に使用されてきたことが分かった。特に温泉井をそのまま蒸気井として利用することによって、設備と費用を最小限に抑えて地熱発電を行えることが分かった。そのため、比較的高温で噴出量の多い温泉地におけるホテルや温泉街などに、中小規模の地熱発電を行うことは有効的であると考えられる。特に現在地熱発電がまだ導入されていない箱根町付近など高温蒸気が多く噴出する地域などに

とって特に有効だと考えられる。さらに何にも増して既存の温泉用の設備を利用することで、経済的にも得が出るような発電が可能であると見られる。

また、カーナサイクル発電法を温泉地に利用することは、発電効率を上げることからも有効であることが示されている。実際に、鉄鋼会社が排水を利用して同様に発電を行っていることも、カーナサイクル発電の有効的な面を裏付けている。このカーナサイクル発電法、中小規模の地熱発電所、さらに温泉を結びつけることでより効率的で、経済的にも有効であることが、今までの事柄から示唆されている。今回の調査により、比較的高温で湧出量の多い温泉において、温泉の熱を用いた地熱発電を行うことによって、おおよそ20,000～300,000[t-CO<sub>2</sub>/年]の二酸化炭素が削減できる可能性があることが示唆された。

今後検討するべき点は、実際に現地の調査を行い温泉地においてどれほど地熱発電所が有効であるのかを定量的に判断する点にあるだろう。また、その温泉の温度や噴出蒸気量などによって、経済的にもよい結果になるように発電所の規模や様式を決定しなければならない。

今回の論文によって、中小規模の発電効率のよい地熱発電所が有効に使われていて、経済的にも長けている事が確認された。これから、カーナサイクル発電を取り入れた温泉が生まれることによって、二酸化炭素排出量が大幅に削減できる可能性がある。同時にクリーンなイメージの温泉施設が誕生することが期待される。

#### 謝辞

今回の論文を書くにあたり、地熱発電所のデータ・情報を快く提供して下さい、聞き取り調査にも丁寧に答えて頂いた、大窪三郎氏（霧島国際ホテル）、小池由明氏（九州観光ホテル）、塚崎賢治氏（杉乃井ホテル）に感謝致します。実際に福島県柳津西山地熱発電所を見学させて頂き、後日質問にも丁寧に答えて戴き、発電所関係者の皆様に感謝いたします。また、適切なアドバイスを与えて戴いた林陽生教授（筑波大学生命環境科学研究科）、ならびに同大学大学院気象分野の方にも感謝致します。最後に、温暖化防止の問題を考える機会を与えて頂いた三菱UFJリサーチ&コンサルティング様にも感謝の意を表して、謝辞の言葉とさせていただきます。

#### 【参考文献】

- ・大窪三郎（1984）：霧島国際ホテルにおける地熱エネルギーの利用について。地熱エネルギー，Vol.9，No.3（NO.27），59-65.
- ・吉本守正・明野利寛（2000）：大分県、別府市杉乃井ホテルと九重町にみる地熱利用。地熱エネルギー，Vol.25，No.2，48-51.
- ・社団法人日本地熱調査会（2000）：新版 わが国の地熱発電所設備要覧。
- ・社団法人日本地熱調査会（2000）：セミナー地熱発電コストの低減化対策と今後のあり方
- ・大里和己・佐藤龍也・Mark Mirulli（2003）：カーナサイクル発電の現状と課題について（68）。（演旨），日本地熱学会学術講演会講演要旨集2003，117-117，日本地熱学会
- ・木村紀雄（2002）：バイナリーサイクル発電の導入促進について。地熱技術，Vol.27，Nos. 1&2（Ser.No.60），4-9.
- ・IPCC第4次評価報告書第1作業部会報告書（2007） <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html>
- ・海外電気事業統計（2005年版）：電力調査統計月報
- ・新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：低温排熱回収発電設備，CADDET プロジェクト番号JP-2002-034 <http://www1.infoc.nedo.go.jp/nedo-info/caddet/infostore/jp-2002-034.html>
- ・GIO（温室効果ガスインベントリオフィス）：温室効果ガス排出量・吸収量データベース <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>
- ・環境エネルギー庁：データ <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2006EnergyHTML/html/i1121000.html>
- ・読売新聞（2007年2月9日） <http://www.yomiuri.co.jp/feature/kankyo/20070307ft04.htm>
- ・環境省：<http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/material/kento.html>
- ・独立行政法人産業技術総合研究所地質調査センター（2005）：日本温泉・鉱泉分布図及び一覧（第2版）（CD-ROM版）
- ・BP統計2005：<http://www.bp.com/home.do?categoryId=1010&contentId=7002615>
- ・OECD/NEA-IAEA URANIUM2003：[http://www.meti.go.jp/policy/trade\\_policy/oecd/index.html](http://www.meti.go.jp/policy/trade_policy/oecd/index.html)
- ・経済産業省：総合エネルギー統計：<http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/index.html>
- ・統計局：<http://www.stat.go.jp/>