

再生可能エネルギー資源としての海底熱水の利用

松岡俊文¹・大里和己²

¹ 深田地質研究所

² 地熱技術開発株式会社

Utilization of Submarine Hydrothermal Vents as Renewable Energy Resources

MATSUOKA Toshifumi¹, Osato Kazumi²

¹Fukada Geological Institute

²Geothermal Energy Research & Development Co., Ltd.

要旨：地球温暖化への対応策として再生可能エネルギーの利用が増加している。日本は火山国であり地熱発電が可能な資源量は世界で3番目とされているが、実際の発電量は世界で9番目であり地熱開発は今後より一層加速されると考えられる。海洋底には多くの火山が海嶺に沿って存在し、2010年に沖縄トラフ北部伊平屋海丘において海底下に巨大な地熱貯留層が発見された。ここでは約400℃近い熱水が噴出しチムニーを形成している。本論文ではこの熱水を利用してバイナリー発電を行った場合、どの程度の発電量が期待されるか検討を行った。その結果、今回発見された地熱貯留層に対して海洋底において発電を行えば、約700MWの発電能力がある事が分かった。これは沖縄電力の総発電量の約2分の1に相当する。またコストに関しても陸上での地熱発電と比較して遜色がないことが予測された。今後海洋底で熱水噴出孔を利用した地熱発電の技術開発に期待したい。

キーワード：熱水噴出孔、沖縄トラフ、伊平屋海丘、地熱発電、バイナリー発電

Abstract: The use of renewable energies is rapidly increasing as a way to tackle to the global warming. Japan is a volcanic country and has the third-largest amount of geothermal power resources globally. However, the actual amount of power generated is the ninth-largest in the world, and geothermal development is expected to be further accelerated in the future. Along ocean ridges, many volcanoes exist. In 2010, a substantial geothermal reservoir was discovered beneath the seafloor in the Okinawa Trough (northern Iheya ridge), where hydrothermal fluids of nearly 400°C vented from the chimneys. This paper investigated how much power can be expected using this hydrothermal fluid. As a result, it was found that there is a power generation capacity of about 700MW. This is equivalent to about one-half of the total power generation capacity of Okinawa Electric Power Company. The cost is also expected to be comparable to that of geothermal power generation on the land. We look forward to developing technology for geothermal power generation using hydrothermal vents on the ocean floor in the future.

1. はじめに

地球温暖化が引き起こした気候変動が作り出す自然災害の勢いは止まるところを知らない。2021 年も線状降水帯が日本各地に豪雨をもたらし、多くの災害を引き起こした。これらは温暖化が影響していると考えられている（中北・小坂田, 2018）。近年の気候変動に関しては、国連の政府間パネル（IPCC）の第 6 次評価報告書の第 1 作業部会の報告書である自然科学的根拠が、2021 年 8 月に公開された（IPCC, 2021）。今回の報告書では、温暖化の原因として「人類の影響が大气、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」と言い切っている。地球温暖化が生み出した気候災害の被害を考えるならば、2050 年時点での温室効果ガスの排出量をゼロにすることは、人類にとって必須と言えよう。

我が国においても温暖化対策に対しては、2020 年 10 月 26 日に菅総理の首相所信表明において、2050 年に温室効果ガスの排出量をゼロにすると世界に向けて約束した。この基本方針に従い、脱炭素化と再生可能エネルギーの利用をさら

に進めるべく、現在経済産業省はエネルギー基本計画の見直しを進めている。

本論文においては再生可能エネルギーの一つである地熱エネルギーに関して考察を加える。我が国の地熱資源量は米国、インドネシアに次いで世界で 3 番目と言われており、政府はさらなる利用拡大を進めようとしている。第 5 次エネルギー基本計画においては、2030 年には 1,500MW 程度の発電設備の確保と、利用率 80% で運転される状況を目標とした。しかしながら現状はこの目標値とは、著しく大きな隔たりがある。図 1 に 2011 年までの日本における地熱発電の認可出力と発電電力量の年次変化を示す（経済産業省資源エネルギー庁, 2013）。1970 年代から開始された地熱発電開発の結果、1995 年には、既に国内の地熱発電の設備容量は 500MW を超えていた。しかし、その後、我が国における地熱発電の設備容量は 30 年間大きな変化が見られていない（海江田, 2020）。2021 年時点での我が国の総発電設備容量は 620MW 程度である。

太陽光発電や風力という再生可能エネルギーが急激に発電量を増加されている中で、世界で 3

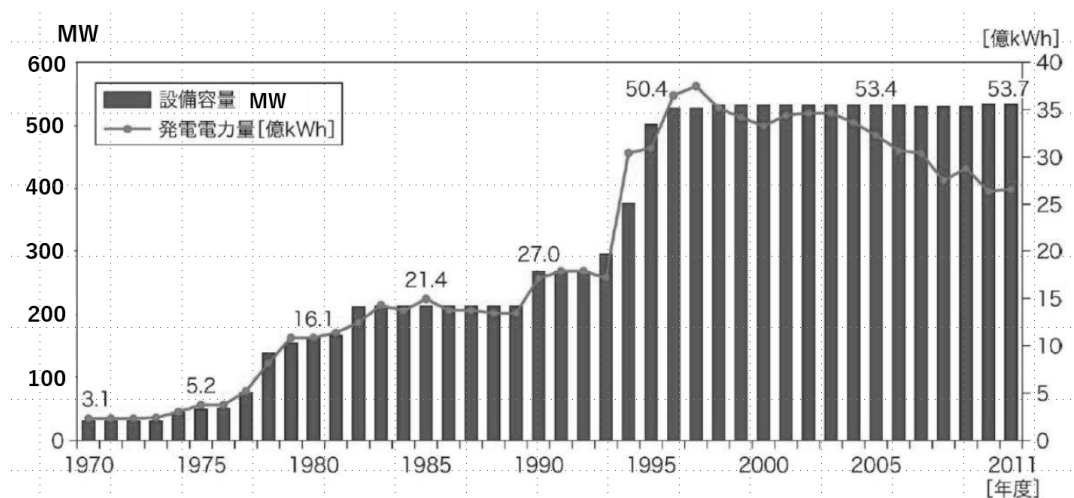


図1 日本の地熱発電の設備容量と発電電力量の推移。

出典：平成 24 年度エネルギーに関する年次報告（経済産業省、2013）一部加筆

番目と言われる地熱資源量を持ちながら、我が国においては何故その有効利用が進まないのか、本論文においてはその原因と、解決策を検討し、海洋底に存在する高温熱水の再生可能エネルギーとしての利用を提案する。

2. 温暖化に対する対応戦略—適応と緩和—

産業革命以前の大気中の二酸化炭素濃度は約 275ppm であったが、人類の活動によって現在は 410ppm を超え 47%の増加となっている (IPCC, 2021)。無論これらは化石燃料を広くエネルギー源として利用してきたためである。化石燃料の利用は大気中の二酸化炭素量を増加させる。増加した大気中の二酸化炭素は地球に対する温室効果を促進させ、気温上昇を引き起こす。

このような温暖化が引き起こす気候災害に対する対応戦略は 2 つ存在する。これらは適応策 (adaptation) と緩和策 (mitigation) と呼ばれている (Herzog, 2018)。適応策は、地球システムの変化に適応するために人間の活動を変えることである。一方緩和策は、温暖化の原因となっている二酸化炭素を大気中から除去する対応策である。適応策は地域に密着したものであり、その利益はより直接的なものになる。例えば、海面上昇が都市の洪水を脅かす場合、あるいは豪雨による河川氾濫が考えられる場合、その都市は様々な洪水対策活動を行う。これは適応策の一つと言える。この場合、すべてのコストは都市が負うが、すべての便益も都市が得られる。

一方、緩和策は二酸化炭素の排出量を下げる行為であり、技術的アプローチとしては、①エネルギー使用量の削減、②低炭素エネルギー源への転換、③二酸化炭素の回収・貯留 (CCS) の 3 つが主要な方策として知られている。しかしながら

地球規模で生じている温暖化に対処して、緩和策を採用した場合のコスト負担者は、緩和策の便益を独り占めする構造になっていない。このため政治的には、適応策は緩和策よりもはるかに簡単に行うことが可能とされている。しかしながら適応策は緩和策に取って代われるものではなく、気温上昇が続く限り適応策を取り続ける必要がある。逆に緩和策だけに頼っていくことも現実的には課題が多く、2 つの対応戦略を融合させながら温暖化対策を進める必要がある。

エネルギーの利用効率を改善する方法は、無数に考えられる。家電製品の効率の改善、自動車の燃費の向上、白熱電球を LED ライトに交換すること等が最初の 1 歩であろう。エネルギーの利用効率に関して議論する際、国内総生産 (GDP) の単位当たりのエネルギー使用量で測ったエネルギー原単位が利用される。米国では 1949 年から 2016 年の間に、エネルギー原単価は年間約 1.5%の割合で減少してきた (DOE, 2017)。すなわちエネルギー関連技術の進展は、エネルギー利用効率を常に上げてきた。しかしながら温暖化問題が顕在化した現在は、エネルギー原単価をさらに早く減少させる努力が必要になるであろう。

緩和策の 2 番目は、低炭素または無炭素のエネルギー源への移行であり、原子力や、太陽光、風力、バイオマス、地熱、水力などの再生可能エネルギーの利用が含まれる。また石炭から天然ガスへの転換も重要な緩和策である。

3 番目の緩和策である CCS (Carbon Capture and Storage) では、化石燃料を利用し続けるが、二酸化炭素は煙突から大気に放散される前に回収され、地下に貯留される。CCS の最適な適用場所は、発電所、製油所、セメント工場、製鉄所、肥料工場などの大規模な産業プロセスである。

3. 再生可能エネルギー

現在再生可能エネルギー（Renewable Energy）の利用は、EUを中心に加速度的に拡大している。再生可能エネルギーとは、太陽光、風、地熱といった地球資源の一部として、自然界に存在するエネルギー源を意味している。その特徴は、「枯渇の心配がないこと」と「CO₂ を排出しない（増加させない）こと」が挙げられる。再生可能エネルギーの大量な導入は温暖化問題に対する緩和策（mitigation）に対応する。このため、今まで利用してきた化石燃料資源に変えて、新しく再生可能エネルギーの利用を始めるには、新しい追加コストが発生する可能性がある。電力会社としてはコスト増加が見込まれる新しいエネルギー源の利用においては、何らかの経済的な見返りが無いと、そのエネルギー源の利用は広がらない。これに対して我が国では、再生可能エネルギーを利用した電力に対して FIT（Feed-in Tariff）と呼ばれる固定価格買取制度が、東日本大震災後の 2012 年に導入された。FIT は再生可能エネルギーで発電した電力を、電力会社が一定価格で一定期間買い取ることを国が義務づけた制度で、電力会社が買い取る費用の一部を利用者から賦課金という形で集め、再生可能エネルギーの利用によるコスト増分をカバーし、より広く利用を進める制度である。

FIT 制度は太陽光発電以外にも、風力発電、バイオマス発電、水力発電、地熱発電に対して適用されている。よく知られているように太陽光発電は現在までに新しい企業体が FIT 制度を利用して自由化された電力業界に参入して来た。さらに現在は、多くの地方自治体において太陽光発電に対する補助金制度が導入されている。また政府は、現在新築住宅に太陽光発電義務化の検討も始めている（毎日新聞 2021 年 8 月 11 日）。

4. 地熱発電

4.1 地熱資源量

一般に地熱資源量は活火山数と比例すると考えられている。表 1 は NEDO 再生可能エネルギー技術白書（2014）から引用した数字を表にしたものであり、各国の火山数、地熱資源量、さらに地熱発電導入量（2010 年時点）を示している。

表 1 国別活火山数と地熱資源量及び地熱発電導入量

国名	活火山数	地熱資源量 MW	地熱発電導入量 MW
米国	160	30,000	3,093
インドネシア	146	27,790	1,197
日本	119	23,470	536
フィリピン	47	6,000	1,904
メキシコ	39	6,000	958
アイスランド	33	5,800	575
ニュージーランド	20	3,650	628
イタリア	13	3,270	843

我が国は地熱資源量としては世界で米国、インドネシアに次いで 3 番目と位置づけられているが、既に利用されている地熱発電導入量は、世界で第 9 番目である（Huttrer, 2020）。政府は 2030 年時点で、1,400～1,550MW の電力を期待している。このため、2030 年までにこれから約 800MW 分の地熱発電所の建設が必要である。これは地熱開発業界においては非常に大きなチャレンジであり、地球温暖化防止の点からも是非とも達成しなければならない目標である。

火山帯は地球内部に存在するマグマが地表に作った地質ユニットの一つである。マグマは地球内部に存在する枯渇することが無い熱源であり、地熱発電はマグマが持っている熱エネルギーを利用し、電力を得ようとする再生可能エネルギーである。火山帯の地下数 km から数十 km には「マグマ溜まり」が存在し、巨大な熱源となっている。しかしながら直接この熱エネルギーを利用するこ

とは出来ない。このため地下水を介して間接的にこの熱源を利用するのが地熱発電と言える。一般的には、マグマを熱源として地下数 km の所に熱水だまりである地熱貯留層が形成される。一般的に地熱貯留層は縦亀裂を多く含む火成岩で形成されていると考えられている。

4.2 発電方法

地熱を利用した発電方法は、「フラッシュ方式」と「バイナリー方式」の2つに大別される。後者のバイナリー発電は比較的最近に実用化された技術であり、我が国においても近年広く採用され始めた。2018 年時点では国内で 70 カ所、約 25MW の電力をバイナリー方式で発電している。

フラッシュ方式は、地熱貯留層から約 200～350℃の熱水を含む蒸気を取りだし、気水分離機によって蒸気を分離後、蒸気機関の原理により蒸気タービンを回転させて発電する。このため熱水は利用されず地下に還元される。発電量が多くなり、利用する蒸気量が増えてくると、地熱貯留層内の熱水の枯渇が考えられる。これは、熱源は枯渇しないが、熱源から地表まで熱を運ぶ熱水が枯渇する場合である。米国カリフォルニア州のガイザース地熱発電所では人為的に地熱貯留層に1日当たり約 5 万トンの水の注入が行われている (Eneidy, S. L., 2016)。すなわち地熱発電に必要な地質学的な条件は、枯れることが無い充分な熱源が存在し、さらに高温の熱水を保持出来る充分大きな地熱貯留層が存在し、地下水の枯渇が無いことである。この条件が満足された時に、地熱は再生可能エネルギーの条件を満足することになる。

また熱源は存在するが、地熱発電に利用出来る流体量が無いような場所も数多く存在する。このような状況に対して近年、地熱増産システム (EGS : Enhanced Geothermal System または

Engineered Geothermal System (浅沼, 2014) と呼ばれる方法論が提案されている。これらは「高温岩体地熱発電」あるいは「天然貯留層の人工的な拡張」、「人工涵養地熱発電」等とも呼ばれている (海江田, 2015, 村岡他, 2013)。基本となる考えは、地熱貯留層を事業者が能動的に作り出したり、天然の地熱貯留層に亀裂を加えたりしてその性状を変化させる。そして地熱発電に充分なだけの熱水や蒸気を地表に提供できるように、地上から水を供給するシステムを作り上げる事である。海外においてもこの様な開発戦略は多くの国で採用されている。

4.3 バイナリー発電

バイナリー発電は、地下からの熱水や蒸気の温度が低温であり、十分な量の過熱蒸気が得られず、フラッシュ発電には耐えられない場合に利用される発電方式である。この方式では地下からの水蒸気で直接蒸気タービンを回すのでは無く、低沸点の作動流体を地熱水によって過熱し、蒸発させてタービンを回す。作動流体の種類によって、オーガニックランキンサイクル (代替フロンを主体とする不活性ガス、ペンタン (沸点 36.07℃)

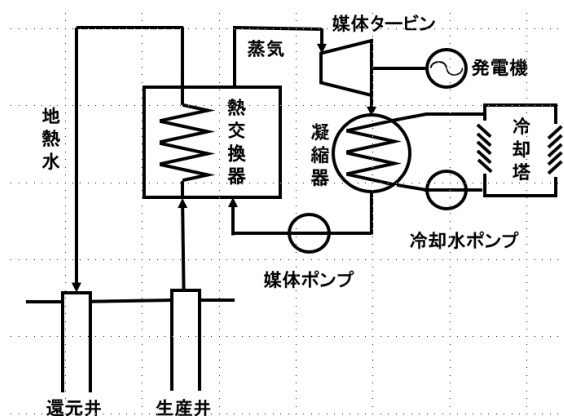


図 2 バイナリー発電の概念図

等の炭化水素) とカリナサイクル (アンモニアと水の混合物) に大別される(Zhang et. al., 2012). 概念図を図2に示す(村上, 2013).

このバイナリー発電の有する利点と欠点は以下の様にまとめられる(福田他, 2013, 大里・村岡, 2008).

- ① 利用した地熱流体は全量を地下に還元する。
これによって地熱貯留層のマスバランスを崩さないため、熱源が充分あれば枯渇の心配は生じない。
- ② 作動流体は低沸点の媒体が選ばれるため、凝縮圧力が水蒸気より高く設定出来る。さらに作動流体の流量を少なく出来る為、タービンがコンパクトに設計できる。
- ③ 腐食・スケール対策がフラッシュ方式に比べて簡単である。フラッシュ方式の場合、タービンを含めほぼ全ての配管において地熱流体が引き起こす腐食やスケール(熱水中に含まれるカルシウムやマグネシウム、シリカなどの無機塩類化合物が配管などに付着した物で、放っておくと管が閉塞される)に対する対策が必要になる。一方バイナリー方式であれば、地熱流体は熱交換器で熱エネルギーを動作流体に渡すため、腐食やスケール対策は比較的簡単である。
- ④ 作動流体の取扱に注意が必要である。一般的にバイナリー発電利用される作動流体は、環境上のリスクを有している場合が多い。良く利用される代替フロンは、オゾン層破壊の危険を有している。また炭化水素系の媒体では、高温・高圧でタービンに送り込まれるため、特別なリーク対策、さらに消火設備などの用意する必要が出てくる。
- ⑤ フラッシュ方式もバイナリー方式でも作動流体はタービンを回転後にガス(蒸気)から冷

却して液体に戻す復水が必要になる。フラッシュ方式の場合は、利用した蒸気の凝縮水を冷却水の一部として利用出来るため、水冷の方式が採用される。一方バイナリー発電では、冷却水の確保が困難な場合も多いため、空冷凝縮器が利用される。このため水冷よりも大きな構造物となり、発電所の構成機器の中で空冷凝縮器が最大の構造物になる場合も多い。この様にバイナリー発電は幾つかの欠点も有するが、熱水の温度が低いときには広く利用され多くの成功例が報告されている(奥村, 2018)。作動流体は原理上何を利用して良いが、サイクル特性の観点から効果的である事、環境上取扱が容易である事、経済性などの検討が行われて、最終的な作動流体が選ばれる。

4.4 地熱発電が抱える課題

実は我が国における再生可能エネルギーとしての地熱開発は、政府の計画通りには進んでいない。経済産業省が2020年にまとめた資料によれば、地熱発電の拡大を阻害している原因として、以下の様に分析されている(経済産業省, 2020)。

- ① 自然面での課題：目に見えない地下資源であり、開発リスク及び開発コストが高い(複数の掘削調査が必要になること、掘削に時間を要すること等から、開発リスク及び開発コストが高い)。
- ② 自然面での課題：地熱資源は火山帯に偏在し、適地が限定的(地熱開発の適地は、北海道や東北、九州等の火山地帯に偏在)。
- ③ 社会面での課題：温泉資源等への影響懸念から、地元の理解促進が不可欠(温泉事業者等による無秩序な開発に対する温泉資源への影響を懸念する声が多い)。
- ④ 社会面での課題：関係法令の規制により、許

認可が必要な地点が多い。また、地域によっては過大な対応が求められる場合がある（国立・国定公園等における関係法令の許認可手続きに時間が要するなど、開発に影響が生じるケースがある）。

上記の社会面での課題の③は、具体的には地熱発電開発によって、温泉源が枯れるということを経営者が心配して、開発に反対するケースが多いという事である。地熱開発が実施される地域は、一般的に温泉も多く存在している。地熱開発に必要な掘削作業をする場合、地元の温泉業者の賛成が得られないと、作業を進めることが困難になる。この根本的な原因は、地熱を地下に存在するエネルギー資源と位置づけて、石油や天然ガスに対する鉱業法のように地熱発電に関する包括的な立法処置が取られていない事である。我が国において地熱発電を進める際に従う立法は温泉法であり、小規模な浴用利用のために制定された温泉法を、地熱発電の開発においても適用するのは、世界的にもユニークと言えよう（金子正彦, 2012）。

温泉法に従う地熱発電では、新規の井戸の掘削は都道府県知事の許可が必要になる。この際掘削によって、温泉の湧出量、温度または成分に影響を及ぼすと認められれば、地熱開発の許可は得られない。一般的に温泉の地熱貯留層と、地熱発電のために利用される地熱貯留層は深度的に大きく違っており、両者は地質学的には違っていると考えられるが、これを科学的に立証することは困難な場合が多い。

社会面の課題の④は、国立・国定公園内で自由に地熱発電開発が出来ないことを意味している。山岳地帯で温泉があるような場所は、多くの場合国立・国定公園である事が多い。近年環境省は地熱開発に対する制限の緩和を試みているが、未だ多くの困難が存在している。これらは立案から事

業化までのリードタイムが長くすると共に、常に事業リスクとして存在し続ける。

最後に地熱開発のコスト構造を見ておこう。地熱発電開発においては、掘削作業に関わるコストが大きいと経産省は考え、問題点の一つであると指摘している（表 2 参照、経済産業省, 2020）。具体的には 30MW の地熱発電所の建設では、調査開発費が 73 億円、環境影響評価費が 3 億円、地上設備建設費が 183 億円となっており、掘削費用が全体の約 28%と大きな部分を占めている。この原因の一つとしては、表 2 において分かるように、地熱貯留層の為の地表調査には 1%しか使われていない。これは地表調査よりも、ともあれ掘削してみようという地熱発電開発の伝統的な手法の影響と考えられる。地表調査を丁寧に行い、地下の地熱貯留層の特定技術を向上することは、今後の大きな課題であろう。

表 2 30MW の地熱発電所建設に係るコスト試算例

（出典：経済産業省 2020）

	経費（億円）	比率（%）
地表調査	2	1
坑井掘削	71	27
環境影響評価	3	1
地上設備建設	183	71
総額	259	

5. 再生可能エネルギーとしての海洋底熱水

5.1 海洋での地熱貯留層

2010 年 9 月に沖縄トラフ（北部伊平屋海嶺、水深 1,000m）において大規模な高温熱水だまりが JAMSTEC の「ちきゅう」による掘削によって発見された（図 3 参照）。そこからは高温の熱水が大量に噴出した。この熱水は海底下数 100m に存在する大規模な地熱貯留層からのものと考え

られる。熱源は海底下近くの海底火山の地下にあるマグマと考えられ、海底下にしみこんだ海水を熱し、それが熱水貯留層を形成したと考えられている（木村，1988，鈴木他，2016）。熱源のマグマが存在する限り、海水は枯渇することは無いためこの熱水は再生可能エネルギー源と考えて良い。本章では、海洋国家である我が国として、日本周辺に数多く賦存する海底熱水源を再生可能エネルギー源として見なし、2050年のゼロエミッションに向けてこの海底地熱エネルギー源の利用法について検討する。

陸上では噴気孔や間欠泉に回る水の多くが降水と地下水であり、これらは地表から地熱を受ける深さまでしみ込んだものであるが、一部には変成水、堆積層中で塩類を溶解した水、マグマから放出されたマグマ水を含む。同様に、海底の熱水噴出孔から噴出する熱水は、海底の断層や透水性の堆積層からしみ込んで火山性の地熱構造で熱せられた海水が多いが、マグマの上昇に伴って放出されたマグマ水も一部含むと考えられている。

熱水噴出孔から噴出する水温は400℃にも達するが、深海の高い水圧によりこの高温でも水は液体のままで沸騰しない。また水深約3,000mで407℃の海水は超臨界状態になる（Bischoff, and Rosenbauer, 1988）。超臨界水を噴出している熱水噴出孔は、大西洋中央海嶺中に、Koschinsky, et al., (2008) によって発見されている。

熱水噴出孔によってはチムニー（煙突）とよばれる海底から柱状に突きだした円柱状の構造物を形成することがある。超臨界の熱水に溶解している鉱物が0℃に近い深海の海水と接触すると、接触面で化学反応が進み生成物が析出・沈殿してこのようなチムニーが形成される。なかには高さ60mに達するものもある。熱水チムニーの生成には、硫化鉱物と硬石膏の沈殿が伴う。チムニー

には一日30cmずつ成長したという記録もある。チムニー構造で黒色の熱水を噴出するものを特に「ブラックスモーカー」とよぶ。ブラックスモーカーが噴出するのは、黒色の硫化物の微細結晶を多量に含むためである。一方、「ホワイトスモーカー」では、無色に近いバリウム・カルシウムの硫酸塩鉱物や石英などを多量に含むためであり、ホワイトスモーカーの熱水はブラックスモーカーの熱水より温度が低い傾向がある。

従来は海底熱水やチムニーは地質学の興味からアプローチが行われてきた。しかしながらチムニー周辺に、本来、生物に有害であるはずの硫化水素やメタンなどを材料に有機物を合成する熱水生物群集や、鎧のような硫化鉄の皮膚を持つ生物などが発見されるに至り、生物学的見地からも注目を浴びるようになった。チムニーの生態系はそれぞれに固有のもので、わずか数メートル程の距離の隣り合うチムニーでも生態が異なることが確認されている。海底熱水の噴出場所は、まさに鉱床が造られている場所であり、現在、有用金属の採取などからも注目を浴びている。

5.2 沖縄伊平屋北海丘での海底下バイナリー発電の検討

沖縄県の伊平屋北熱水域東側海底下では、キヤップロックが複数存在し、地熱貯留層は広大かつ深くまで達している。熱水は上部の方に蒸気を含む軽いものが分布し、下部には塩分を多く含む重い熱水が存在している。図3に当該地域で実施された掘削調査地点を示した（JAMSTEC, 2014）。また、調査掘削・検層、反射法地震探査で確認・推定される潜頭性の熱水だまりの分布を図4（JAMSTEC, 2014）に示した。

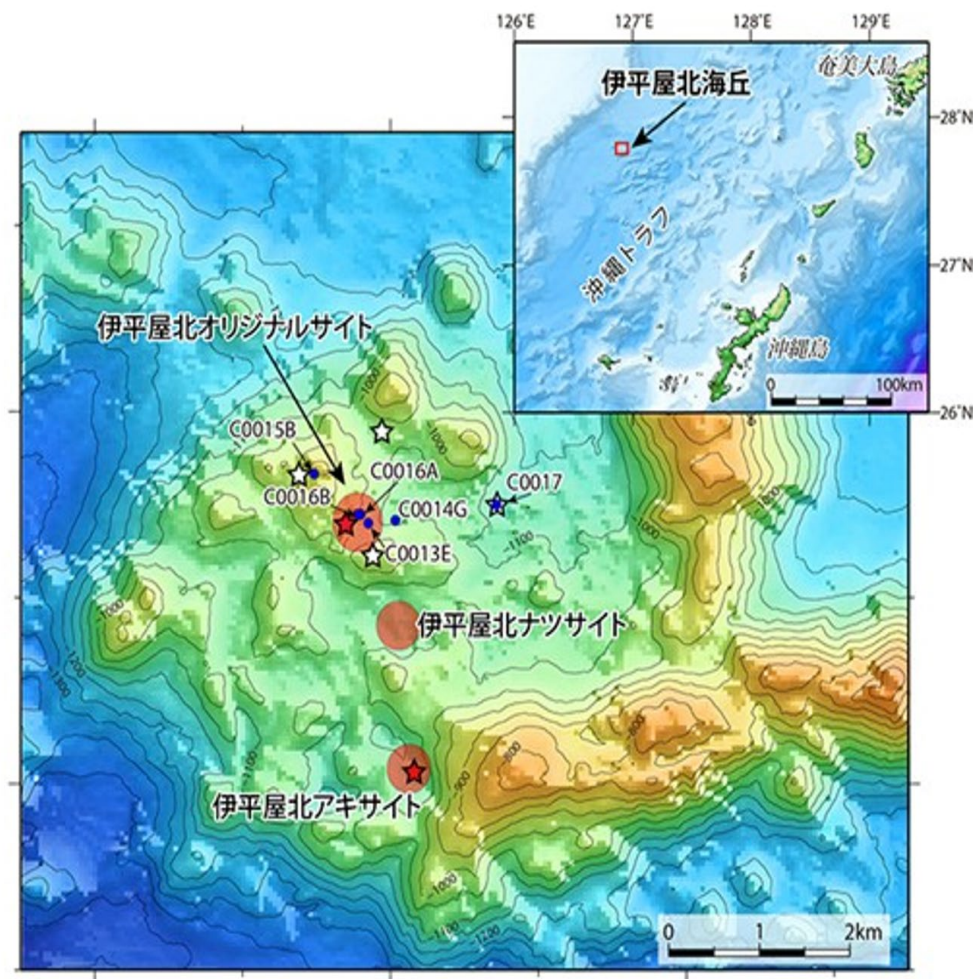


図 3 伊平屋北海丘の掘削地点. 赤の星印は、掘削同時検層とコア試料採取の双方を行った地点。中空の星印は、掘削同時検層のみを行った地点。青丸は、IODP による科学掘削調査が実施された地点(C0013E, C0014G, C0015B, C0016A, C0016B, C0017) 出典 (http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20140726/)

海洋底の熱水系から放出されるエネルギーは、地球全表面から放出される全体量 (44TWth) の 1/4 (10TWe) に及ぶと推定されている (石戸, 2002)。これらの熱は海底から熱水として放出されるが、海嶺に沿った領域は熱エネルギーと鉱物資源の宝庫である。代表的なブラックスモーカーでは、100m×100m 程度の面積に散らばる海底の噴出孔から 350℃～400℃の熱水が総量 100kg/s (360t/h)、熱流束で 250MWth 程度噴出している (石戸, 2002)。さらに熱利用という観点か

ら見ると、海底での熱水活動は、一般に高温で (陸域に比較して高密度で) あることからエネルギー的に魅力がある。この熱エネルギーに対して、バイナリー発電を利用し、発電効率を 10% と仮定すると電力換算で $250\text{MWth} \times 10\% = 25\text{MW}$ 程度の発電電力が得られると考えられる。Hiriart, et al., (2010) によれば、バイナリー発電を利用して一つの熱水噴出孔 (ベント) から約 20MW の電力が得られると推定している。

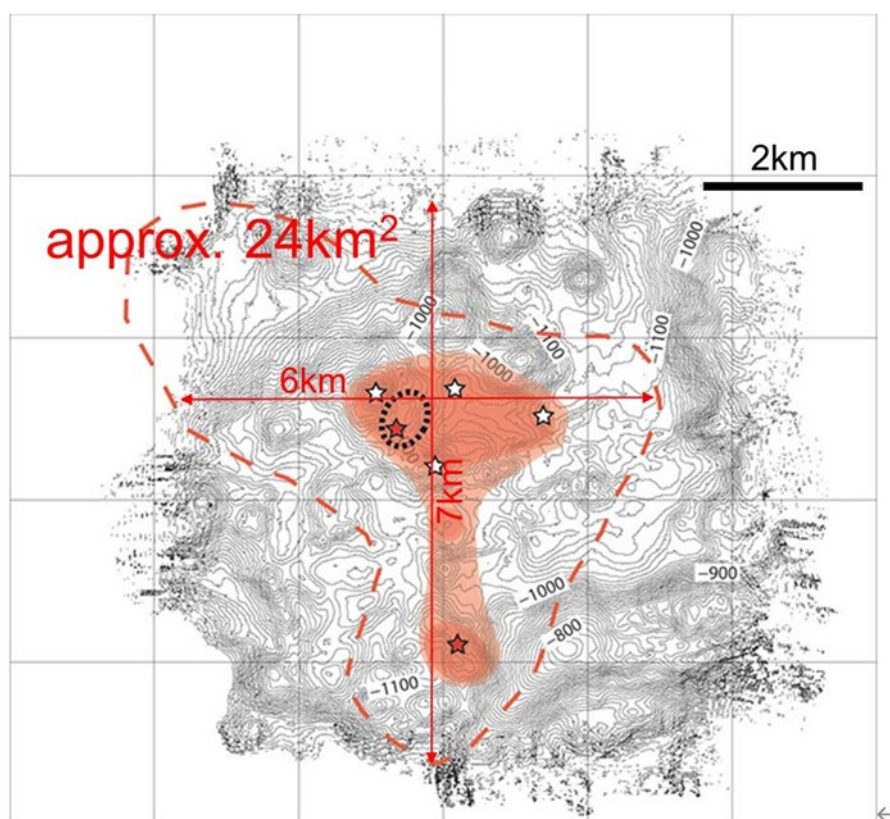


図 4 伊平屋北海丘における調査で推定される熱水溜まりの分布. 黒破線:伊平屋北オリジナルサイトの範囲. 濃い赤:掘削同時検層もしくは海底観察で熱水の存在が確認できる場所. 薄い赤:掘削同時検層データと反射法地震探査データで熱水溜まりが推定される範囲. 赤破線:反射法地震探査データにより拡張しうる範囲. ★:掘削同時検層とコア試料採取双方を行った地点. ☆:掘削同時検層のみを行った地点.

出典 (http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20140726/) に加筆

沖縄県の伊平屋北熱水域東側海底下に広がる地熱貯留層の熱エネルギーを利用して発電を行えば、調査掘削で熱水が確認されたオリジナルサイトの範囲 (0.28km^2) に基づき、図 4 の黒破線で囲った範囲で 25MW 程度の地熱発電が可能である事が解った。さらに、先述の $100\text{m} \times 100\text{m}$ の範囲で 25MW の発電が得られること、つまり面積当たりの発電量は ($0.0025\text{MW}/\text{m}^2$) となることから、赤く着色された範囲で期待できる発電ポテンシャル量は約 700MW となる。実はこの発電量は前述したように、経産省が 2030 年までに達成を考えている地熱発電量におおよそ匹敵する。またこの発電可能量は沖縄電力の総発電量の約半

分となる (2018 年の沖縄電力の発電量は約 1440MW)。

さらに、反射法地震探査の解釈結果から、地熱貯留層として拡張しうる範囲すべてに対応する赤破線の枠内 (約 24km^2) でバイナリー発電が可能であると仮定すると、最大で 60GW の電力が、伊平屋北海丘地域で期待出来る。この様に海洋底熱水を利用してバイナリー発電が海底下で可能になれば、2050 年のゼロエミッションの目標も現実化してくる。

海底から噴出する超臨界熱水を利用して発電を行うには、バイナリー発電方式が適している。バイナリー発電に必要なのは、熱源と作動流体を

冷却する冷却源である。熱源はチムニーから噴出する 300°C を超える熱水であり、冷却源は 2°C 程度の水深 1000m の海水である。1 つの熱水噴出孔（あるいは人工噴出孔）に 1 つの海中バイナリー発電設備を設置するのが適当であると判断される。また熱源側の温度が高いため、作動流体としては高温で利用可能な媒体である、水バイナリーあるいは、カーリーナサイクル（アンモニア水）、二酸化炭素等が良いと考えられる。

自然の噴気孔や掘削を行った人工孔から噴出する熱水から直接接触式の熱交換器で熱を回収し、反対側の海中に設置した直接接触式の熱交換器で海水の冷熱を回収して、その温度差でバイナリー発電を行う。図 5 は Hiriart and Caccillo, (2010) によって提案された模式図を示す。

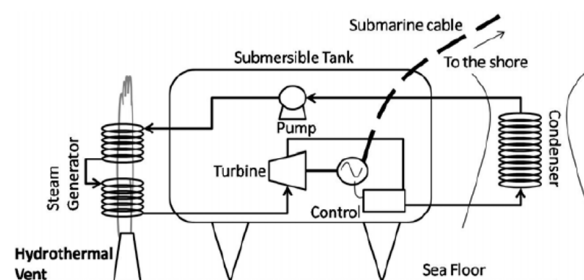


図 5 海底熱水チムニーを利用した地熱発電の概念図
出典: Hiriart and Carrillo (2010)

5.3 海底熱水を利用したバイナリー発電の特徴

第 4 章でバイナリー発電の利点と欠点を議論したが、陸上のバイナリー地熱発電では、利用後の熱水は地下に還元する必要がある。しかしながら海底下の地熱貯留層では流体（海水）が枯渇することは無く、還元する必要性はない。このため陸上の地熱発電では必須であった還元用の坑井は不必要である。さらに冷却は海水を利用するのであれば、熱交換器を設置するだけで十分であり、バイナリー発電が持っていた欠点である大型の空冷装置を必要としない。また腐食とスケールの問題に関しては、スケールが発達しチムニーの流量が低下した場合は、発電ユニットを別の噴出孔に移すか、新しく掘削し人工噴出孔を作れば良い。

課題はコンパクトとは言え、バイナリー発電ユニットを深海の圧力に耐えられる耐圧装置の中に作り込めるかという点である。現在の海中調査船の耐圧を考えるならば、この点に対する工学的な課題は、さほど大きくは無いであろう。

さらに陸上において進められている地熱発電の 4 つの課題（経済産業省, 2020）に対して、社会面での課題に対しては、当然のことながらこの場合は一切考慮する必要が無い。自然面での課題は同様に存在するが、熱水源の調査法に関しては既に多くの海洋調査の技術的な蓄積がなされており、山岳地帯における調査と、深海における調査の違いと考えられる。

この様に海底に存在する地熱貯留層を利用する海底地熱発電の特徴（長所）としては、以下の様な点が考えられる。

- ① 資源量が大きい：海底付近のフロー型だけで全世界で 3 テラワットの発電ポテンシャルが有ると考えられ、それを支える海底下のストック型資源は未知だがさらに膨大で、 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ の熱水の為発電効率も高い。
- ② 陸上と比べ、立地条件の制約が少ない：自然公園（景観）や温泉の制約がない上、高圧の海水で囲まれているため、万が一の蒸気漏えい事故でも安全である。
- ③ ユニット方式の迅速な開発が可能：掘削が不要（天然噴出孔利用）あるいは浅い人工孔掘削（深さ数 10m～数 100m）し、陸上で大量生産したユニット型発電機を船で運搬して沈下・設置のみで稼働可能となる。さらにプラント建設、配管などの付帯作業が発生しない。

これは、陸域地熱開発において生じる特有の開発リードタイムの長さを解消できる。

一方で海底地熱発電の課題と解決策としては、以下の点が挙げられる。

- ① 資源量が未知：陸上の地熱発電を対象とした資源量評価作業は既に終了しており、世界 3 位の資源量を有することは分かっている。一方、レアメタルなどを対象とした海底熱水鉱床などの調査は行われているが、熱水資源の視点で調査が行われた事は無く、資源量の把握にはいたっていない。
- ② 掘削コストが高い：水深が 1000m 程度のため、石油天然ガス用の大深度掘削用リグを使用すると、掘削コストは高価になる。しかしながら、掘削深度は海底下数 100m 程度であり、無人化した専用の海底自動掘削装置 (BMS) で継続的に掘削を行い、掘削完了次第、船で運搬したユニット型海中バイナリー発電機を海底に沈めて設置することで開発のリードタイムを最小化できると共に、コスト削減の可能性も大きい。

深海において数 100m 程度の掘削技術に関しては、一定の技術開発が我が国においても開発されて来た。既に JOGMEC は海洋鉱物資源調査のために 2012 年に、船上設置型と海底着座型の 2 種類の掘削装置（掘削能力：海底下 400m 及び 50m）を有する海洋調査船「白嶺」を就航させた。

- ③ 発電した電力は、海中直流送電線で集約して、電力消費地まで送電することが考えられるが、それには長大な海底送電線敷設が必要になり、コスト増加が考えられる。別の考えは、発電した電力をグリーン水素の形で貯蔵することである。海上浮体式の水素製造プラットフォームで水素に変換して専用タンカーで消費地

に輸送する事も考えられる。

5.4 海洋底バイナリー発電のコスト構造

海洋におけるバイナリー発電に関しては海外の研究者も検討を進めており、Shnell, et al., (2015) は発電コストを含めた詳細な検討を行った。しかしながら、Shell 他 (2015) の開発の概念は、本論文で議論した海洋底熱水貯留層を利用するものではない。Shell 他 (2015) の提案は、海洋掘削リグを用いて深海底から深さ 2,000m の掘削によって超臨界流体を採取して、超臨界 CO₂ タービンによる高効率発電を行うアイデアである。これは海洋においてマントル近くまで掘削し、その熱源の利用を考えた方法である。

発電方法は、熱水の温度を 500℃と想定して熱交換した超臨界 CO₂ 媒体によるクローズドサイクルとして、再圧縮機を用いたブレイトンサイクルにより発電効率 50% の高効率発電を提案している。4 本の生産井 (1 本当たり 50MWe の熱量) を用いて、1 発電所当たり 100MWe の電力を発電し、利用率 90% で 30 年間の稼働としている。また、発電設備は、海底の坑口に接続され、上の船舶から有線で制御可能な無人潜水発電プラントの採用を提唱している。

コストに関しては、初期投資を 13.65 億米ドル、操業費を 2.15 億米ドル (30 年間以上) と見積もっている。送電網は HVDC (高圧直流送電) を想定し、カリフォルニア州沿岸で 150km の敷設距離を仮定して費用算定している。これらの結果、7.3 米セント/kWh の発電コストを算定した。

この発電コストは、IEA/NEA(2010) の地熱発電単価 3.248 (割引率 5%) ~ 4.676 (割引率 10%) 米セント/kWh (稼働年数 40 年) より高価であるが、天然ガス火力発電単価 7.656 (割引率 5%) ~

8.276(割引率 10%)米セント/kWh (稼働年数 40 年)よりは良い結果となり、競争力はあると判断される。また、日本の内閣府コスト等検証委員会(2011)の在来の陸域地熱発電単価 9.2~11.6(割引率 3%)円/kWh (稼働年数 40 年)、天然ガス火力発電単価 10.9~11.4(割引率 3%)円/kWh (稼働年数 40 年)と比較して、遜色のない結果となっている。

表 2 に示したように国内の地熱発電のコスト構造は、掘削費が高額であると考えられている。国内の地熱発電単価が高い原因は、坑井 1 本当りの掘削コストが高く、かつ 1 本当りの生産井から得られる蒸気量が少ないため(日本 3MW/本、ニュージーランド 8MW/本)である。その結果、発電出力あたりの掘削費用が高いこと(日本 2.6 百万米ドル/MW, 世界平均 1.4 百万米ドル/MW)が大きな原因とである。しかしながら、海底地熱発電では、5.2 章で検討したように、陸上の地熱貯留層とは異なり 1 本当りから得られる発電出力が大きくなることが期待できる。海洋での掘削費用に関しても、海洋調査船「白嶺」と同様な掘削装置を用いれば、大幅なコストダウンが図られる。また送電線の敷設長が長くなることを考慮しても、海底地熱発電は陸域の地熱発電と比較して、コスト的に不利であるとは考えられない。

この様に海洋地熱発電においては、チムニーなどの天然のアウトフローを用いる場合には海底面下数 100m 程度の掘削であること、さらに還元井の掘削費用が必要でないことは、大きなコスト削減となると考えられる。また周辺が海水で囲まれているため陸域での開発に比べて安全面で有利であると言える。海底での掘削技術、発電技術などの技術開発が進めば、陸域の地熱開発と比べて発電コストは遜色がないと言える。

6. まとめ

本論文においては日本近海に存在している海底地熱貯留層の再生可能エネルギー源としての利用について検討を加えてきた。日本は豊富な地熱資源を保有しながらその開発が進まない理由は、社会面での課題解決に時間とコストが掛かるという点、さらに発電出力あたりの掘削費用が高いことが挙げられる。本論文で検討を加えた海洋底において高温で噴出している熱水を利用する発電では、これら陸域における地熱発電が抱える課題が存在しない。今後海洋底での発電に向けた技術開発の道筋が付けば、政府が目指している 2050 年ゼロエミッション達成に向けた強力なオプションになるであろう。

謝辞

本論文の内容は公益財団法人深田地質研究所が 2016 年から 2019 年に行った「海洋底熱水の地熱エネルギー資源としての利用に関する研究委員会」において、主に松岡と大里が担当した部分をまとめたものである。同委員会には、以下のよう多くの委員に参加いただき、興味ある多くの議論を進めることが出来た。ここに記して深謝します。高橋亨・當舎利行・池上康之・辻健・中尾信典・海江田秀志・北村孝行・齋藤象二郎・中田春弥・藤井幸奏。

文献

中北栄一・小坂田 (2018) : 気候変動に伴う梅雨期集中豪雨と大気場の将来変化に関するマルチスケール解析, 土木学会論文集 B1, 74, 4, 139-144.

- IPCC (2021): Climate Change 2021 The Physical Science Basis, UNEP.
- 経済産業省資源エネルギー庁 (2013): 平成 24 年度エネルギーに関する年次報告, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013pdf/>.
- 海江田秀志 (2020): 創立 40 周年を経た日本地熱学会の活動, 地熱技術, 45, 1-2.
- Arrhenius, S. (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, Philosophical Magazine and Journal of Science, 41, 237-276.
- Herzog H. (2018): Carbon Capture, MIT Press, Boston, 198.
- DOE (2017): US Energy Information Administration, Monthly Energy Review, report number DOE/EIA-0035(2017/7), 17.
- 毎日新聞 (2021): 新築戸建てに太陽光 政府設置義務化を検討, 毎日新聞東京朝刊, 2021 年 8 月 11 日.
- 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構[編] (2014): NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 2 版.
- Huttrer G. W. (2020): Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report, Proceedings World Geothermal Congress 2020 Iceland, April 26 - May 2, 2020.
- Eney. S. L., (2016): Update of Augmented Injection Benefit Model of The Geysers, Geothermal resources Council. Transition, 40, 893-900.
- 浅沼宏 (2014): Engineering Geothermal System (EGS)型地熱開発の概要, 物理探査, 67, 49-54
- 海江田秀志 (2015): 地熱増産システム(EGS)技術開発の現状と課題. 電力中央研究所報告 N14017.
- 村岡洋文・浅沼宏・伊藤久男 (2013): 延性帯地熱系の把握と涵養地熱系発電利用への展望, 地学雑誌, 122, 343-362.
- Zhang X., He M. and Zhang, Y. (2012): A review of research on the Kalina cycle, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 5309-5318.
- 村上広 (2013): 地熱バイナリー発電の現状と展望, 日本機械学会誌, 116, 4, 232-235.
- 福田憲弘・香月紀人・田之口利恭・齊藤象二郎 (2013): 地熱バイナリー用低温熱回収システム, 日本ガスタービン学会誌, 41, 6, 477-481.
- 大里和己・村岡洋文 (2008): 温泉バイナリー発電, 日本エネルギー学会誌, 87, 10, 812-818.
- 奥村忠彦 (2018): バイナリー発電と熱水活用事例, 地質と調査, 152, 19-24.
- 経済産業省 (2020): 2050 年カーボンニュートラルに向けた地熱をとりまく現状について, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_neutral/pdf/001_05_00.pdf.
- 金子正彦 (2012): 世界の地熱法, 日本地熱学会誌, Vol. 34, Pp123-137.
- 木村政昭 (1988): 沖縄トラフの地形・地質・熱水活動, 地球科学, 22, 65-74.
- 鈴木勝彦・池原研・石橋純一郎・熊谷英憲・山崎徹編 (2016): SIP『次世代海洋資源調査技術』研究開発成果資料集海底熱水鉱床の成り立ち—調査手法の確立に向けて—, 国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC).
- Bischoff, J.L., and Rosenbauer, R.J., (1988), Liquid vapor relations in the critical region of the system NaCl-H₂O from 380 to 414 °C: A refined determination of the critical point and two phase boundary of seawater: Geochimica et Cosmochimica Acta, 52, 2121-2126.
- Koschinsky, A. Garbe-Schönberg, D. Sander, S.

- Schmidt, K. Gennerich H.-H. and Strauss, H. (2008) : Hydrothermal Venting at Pressure-Temperature Conditions above the Critical Point of Seawater, 5° S on the Mid-Atlantic Ridge, *Geology*, 36, 615-618.
- 国立研究開発法人海洋研究開発機構 (2014) : 地球深部探査船「ちきゅう」による「沖縄トラフ熱水性堆積物掘削」について（航海終了報告）http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20140726/.
- 石戸経士 (2002) : 地熱貯留層工学, 地熱調査会, 153-154.
- Hiriart, G., R.M. Prol-Ledesma, S. Alcocer, and S. Espíndola (2010): Submarine geothermics: Hydrothermal vents and electricity generation. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April.
- Hiriart, G. and Carrillo, I. H. (2010) Electricity Generation from Hydrothermal Vents, *Geothermal Councell Transcation* 34.
- Shnell, J., Hiriart, G., Nichols, K., and Orcutt, J. S., (2015) : Energy from Ocean Floor Geothermal Resources: *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.