

〔論 説〕

内部化理論から検証した地熱発電事業の方向性
—地熱タービン分野における世界トップシェア企業を中心に—

影 浦 亮 平 藤 嶋 大 介 堀 口 朋 亨

はじめに

近年、気候変動リスクに対して対応をすべきだという価値観が国際社会で共有され、それが市場を強力に動かしている。脱炭素に世界が動き始め、再生可能エネルギーに注目が集まってきている。数ある再生可能エネルギーのうち、本論文で焦点を当てたいのは地熱発電である。地熱発電は、多くの論文では、社会貢献やサステナビリティのコンテキストから論じられることが多い。現実には、事業としても有望であり、多くの多国籍企業が、新規事業として進出してきている。しかしながら、技術的ハードルが高いがゆえ、事業のライフサイクル理論でいえば、スタートフェイズかプランニングフェイズにあたる段階にあり、事業として成り立っているとは言い難いのが現状である。スタートフェイズまたはプランニングフェイズでは、企業は自社で新技術を開発するだけでなく、他社の事業部門やスタートアップを買収することで、自社の内部資源を充実させようとする。多国籍企業論では、企業の海外進出の動機として、資源の内部化を目指すというものがある。そしてそれは、市場の近くで実行する場合もあるし、グローバルな開発体制の構築過程でも実行されることがある。そこで本論文では、企業の多国籍化戦略、グローバル戦略を理論的に解明する有力な方法である内部化理論を用いて、地熱発電事業を検証する。端的に言えば、技術的ハードルが高い分野では内部化に舵を切る強い誘因があるということ、地熱発電事業の事例から論証するのが本論文の目的である。

1. 内部化理論

内部化理論は、もともと企業の多国籍化を説明する理論であり、企業の海外直接投資 (Foreign Direct Investment: FDI, 以下 FDI) を説明するものである (Horiguchi 2008)。内部化理論が、本論文が設定した、技術的ハードルが高い分野では内部化に舵を切る強い誘因が働く、という仮説になぜ関連するのかを説明するために、まずはその理論展開を説明する。

企業による FDI 決定に関わる諸理論の展開では、1970 年代半ばに、内部化理論といわれる静的アプローチが注目を集めるようになった。この理論は、制度経済学の取引費用仮説を適用することにより、FDI が実行される背景を説明するものであった。国境を越えた有形資産の移転だけでなく、ノウハウや知財などの無形資産の移転を考慮し、契約及びその費用が理論モデルの中に組み込まれた。基本文献である Buckley と Casson (1976) では、内部化理論の基本的な前提は、Coase (1937) の取引費用仮説と Williamson (1975) の市場・階層組織パラダイム (market-hierarchy-paradigm) の二つである。企業が国際

的な取引を実行する時には、基本的に市場を介した外部取引（輸出やライセンス供与など）と内部取引（海外子会社を設置する、または拡大する直接投資など）の二通りの方法がある。内部取引を選択した場合、当該企業が国境を越え、あらゆる経済的・政治的リスクを負担することになる。他方、市場を介した取引では、古典的経済理論の見解に反し、市場の不完全性によって、取引に費用が伴うことが前提となる。取引費用は、主に契約に関連して発生し、契約の開始、策定、締結、監視、執行、調整にかかる費用全てが含まれる。加えて、情報に関わる諸費用、交渉に関わる諸費用も含まれる。また、費用は、特殊性、不確実性、頻度によって変化するのである（Williamson 1975）。内部化理論の中心的なテーゼは、事業の結果として生じる調整費用が市場を介して発生する取引費用よりも低ければ、企業はFDIを通じて国際的な事業活動を企業（または企業グループ）内部で行うというものである（Buckley and Casson 1976）。

Buckley と Casson (1976) は、垂直的内部化と水平的内部化を区別している。垂直統合型では、原材料や中間材の内部取引が市場取引よりも費用面で有利であるため、複数国の事業活動を内部化するとし、水平統合型では、情報や企業固有のノウハウ、経営能力などの知識関連の無形資源を取引する市場を内部化する。ただし、知識は主に公共財としての性質があり、他社の同時期における利用可能性を排除できない。知識やノウハウの他者の同時期における利用可能性を排除するためには、企業はそれを法的に保護する必要がある。しかし、企業固有の知識やノウハウの多くは特許化できないため、それは必ずしも常に可能ではない。そのため外部市場で取引するための「資源の形態」や価格を決めるのは困難であり、その取引費用は、ある事例では、理論的には無限大となってしまふ。

新事業の実行に求められる技術開発に不確実性が伴い、さらに、事業のライフサイクルで、スタートフェイズかプランニングフェイズにあたる段階であれば、企業は市場で必要な資源（中間財・特許・情報など）を取引することは難しく、取引できたとしても非常に高い費用を支払う必要が生じる。その場合、必要なものを内部で取引していくしかない。企業内部に存在しない場合は、新事業に関連すると「考えられる」資源を持つ企業を自社の中に取り込み、経営資源を内部化する。

地熱発電は技術的には大きな挑戦が必要な事業である。地熱発電の潜在的発電量は、石炭、石油、ガス、原子力などの既存の発電技術から得られるものに匹敵し、しかも風力や太陽光などとは異なり、安定的な電力供給が可能である。そのような魅力的な発電資源にも拘らず、これまで活用されてこなかったのは、技術的なハードルが存在したからである。そのハードルに対して解決の糸口を見出すためにこそ、各国の企業は経営資源の内部化に注力しているのである。以下では、その点について検証していく。

2. 地熱発電の技術的ハードルの高さと、技術の発展途上性について

2.1. 地熱発電の仕組み

まずは地熱発電事業および技術に対する理解を深めるところから始めたい。地熱発電とは、地上 1500 m から 3000 m にある、マグマの熱で温められた 150℃ 以上の蒸気や熱水を取り出し、その熱を動力にして電気をつくる発電方法である。この蒸気や熱水は地下の「地熱貯留層」に貯まっており、ここまで井戸を掘って蒸気や熱を取り出し、それらでタービン

を回して電気を発生させる。有限でない上、CO₂排出がほとんどなく、持続可能なエネルギーであるため、太陽光発電や風力発電などと同じように再生可能エネルギーに分類される。しかし、どこでも地熱発電ができるわけではなく、一定以上の地熱を確保する必要があるため、日本では地熱発電所は火山や地熱地域が多い東北地方と九州地方に集中している。

地熱発電の発電方式にはさまざまな種類があるが、代表的なものには、(a)ドライスチーム方式、(b)シングルフラッシュ方式、(c)ダブルフラッシュ方式、(d)バイナリー方式がある。蒸気でタービンを回して発電する仕組みは一般の火力発電や電子力発電と同じであるが、地熱発電では地熱貯留層という天然のボイラーを利用する点が大きく異なる。

発電方式は、得られる地熱の特性や発電の規模に合わせて選定される。ドライスチーム方式は、蒸気だけが噴出する地熱井で使われる発電方式である。シングルフラッシュ方式とダブルフラッシュ方式は、蒸気と熱水と一緒に噴出する地熱井で使われ、熱水は地下に還元される。このうちダブルフラッシュ方式は、1次蒸気を取り出した後の熱水から、さらに2次蒸気を取り出してタービンに導入するもので、効率を向上させる発電方式である。バイナリー方式は高温（70～120℃）の熱水を使って沸点の低い触媒を沸騰させてタービンに導入する蒸気を得る方式である。地熱貯留層から取り出せる蒸気が少なく熱水が多い場合には、地熱貯留層から取り出した蒸気を直接タービンに送って発電する蒸気発電に適さず、この方法が採られる。バイナリー方式では、地熱貯留層から噴出する蒸気や熱水を蒸発器に導き、ペンタンなど低沸点の媒体を蒸気化する。気体となった媒体によってタービンを回す。タービンを回した後の媒体は、凝縮器で再び液体に戻される。バイナリー方式は、一般に小規模な地熱発電所で使われることが多い。また、再生可能エネルギーに定義されているのは現在のところ、バイナリー方式による発電のみである。

日本の電源構成のうち、地熱発電が占める割合は、2011年度時点では0.2%で、2018年度時点も0.2%であった。その間、再生可能エネルギーの割合は10.4%から16.9%に増加しているため、地熱発電の普及が進んでいないことがうかがえる⁽¹⁾。また、2020年3月末時点における地熱発電設備のFIT前導入量とFIT導入量の合計量は59.3万kWであったが、2030年度における導入割合目標として140～155万kWが見込まれている⁽²⁾。

2.2. 地熱発電の長所と課題

地熱発電の導入量は低水準にとどまっているが、そのポテンシャルは高いと言われている。地熱発電の長所については以下の通りである。

①環境への負荷が少ない持続可能なエネルギー

地熱発電はCO₂排出量が少なく、環境にやさしいことで注目を集めている。資源エネルギー庁によると、原材料の精製や施設のメンテナンス・廃棄などのプロセスをすべて含めたkWhあたりの「ライフサイクルCO₂」排出量（単位：g-CO₂）は、

- ・石炭火力発電：943（直接排出864＋間接排出79）

(1) 資源エネルギー庁『国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案』（2020年9月）p.6

(2) 経済産業省『2030年における再生可能エネルギーについて』（2021年7月6日）p.27,28

- ・石油火力発電：738 (直接排出 695 + 間接排出 43)
- ・太陽光発電：38 (直接排出 0 + 間接排出 38)
- ・風力発電：26 (直接排出 0 + 間接排出 26)
- ・原子力発電：19 (直接排出 0 + 間接排出 19)
- ・地熱発電：13 (直接排出 0 + 間接排出 13)

となっており、他の発電方法に比べてCO₂排出量が圧倒的に少ないことがわかる。加えて、地熱発電はエネルギーの枯渇の心配がなく、持続可能なエネルギーとして長期運用が見込める。

②安定した発電量が確保でき価格が変動しにくい

1000 mから3000 mの地下にある地熱貯留層は、絶えず天然の蒸気や温水を噴出させており、天候や時間帯に関係なく安定して発電できる。この安定性は太陽光発電や風量発電にはないメリットである。安定性の観点からは、地熱発電は燃料調達のリスクがないのもメリットである。地熱発電はその場でエネルギーが取り出せるので、例えば火力発電のように、化石燃料を十分輸入できなくなったり、燃料価格が高騰したりする心配がない。特に日本は環太平洋火山帯に位置しており、地熱資源が豊富なことでも知られている。

③発電に使用した蒸気や熱水を再利用できる

地熱発電は発電に使用した蒸気や熱水を再利用できるエコシステムである。発電を終えた後の蒸気や熱水はまだ熱いため、農業用ビニールハウスの暖房や、魚な養殖などに利用することもできる。寒さが厳しい土地でも、地熱発電後の熱水を使用することで、一年中きゅうりやトマトなどの野菜の栽培が可能になっている。例えば、岩手県八幡平市では、地熱温水利用ビニールハウスが1980年代から実用化されている。豪雪地帯の八幡平市は、ビニールハウス栽培で採算を取るのには困難であったが、地熱の再利用によってピーマンの出荷が可能になった。このように、地熱発電は地域の省エネ、そして地方創生にもつながっている。

地熱発電にはしかしながら、以下のような課題も存在する。

①開発コストとリスクが高い

資源エネルギー庁の試算では、地熱を得るための井戸を掘るのにかかる費用は1本数億円とされている。また、事前調査をしても期待したような蒸気や熱水を得られるとは限らない。このため、地熱発電の開発リスクは高いのが特徴である。さらに、地熱発電所を運用するまでには、約10年間かかると言われている。地熱貯留層を探すところから始めて地熱発電所を建設し、運用を開始するまで長い期間がかかる。ただし、経済産業省と独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構(JOGMEC)の支援を受けることができ、その支援内容は地熱資源の調査、データの提供、調査のための採掘井戸の引継ぎなどである。

②規模に対して発電量が少ない

初期費用が高いものの熱効率が低く、地中からの熱の約8割は空気中に逃げてしまい、発電に活用することができない。つまり、地熱発電のエネルギー変換効率、他の発電方

法に比べて低いのがデメリットである。エネルギー変換効率とは、地熱から電力のように異なるエネルギーに変換する際の効率のことである。エネルギー変換効率が高いほど発電効率が良く、低いほど悪くなる。地熱発電の発電効率は8%であり、太陽光発電と比べるとやや劣る。また、風力発電と比較すると半分以下、水力発電で比べると10分の1程度に過ぎない。そのため、投資の元をとるだけでも約20年以上の年月がかかると言われている。

③建設できる場所が限られる

地熱発電所を建設できるのは、地熱貯留層と呼ばれる高温の地層が存在する場所だけである。日本は世界的にみても豊富な地熱貯留層を持つ国だが、それでも北海道・北陸・東北・九州エリアに限られる。地熱貯留層があったとしても、その上が山であると深く採掘しなければならない。そのため、コスト面を考慮すると、海拔が低い場所に限られてしまう。さらに、法律の規制をクリアする必要もある。再エネ発電所の建設にあたっては、周辺の雨水・土砂の流出、地すべりなどを発生させる恐れのある土地の利用が認められていない。

④立地が限定されトラブルを招く恐れがある

地熱発電は大規模な採掘工事と発電設備が必要になるため、景観を損ねる可能性がある。地熱発電に適した地域は温泉地や観光地、公園などになっているケースも多く、それが大きな開発ハードルになる場合がある。そのような場所に発電設備を設置すると、自然破壊やその土地の温泉産業や観光産業などに影響が出る可能性が非常に高く、また近隣との騒音トラブルにもなりかねないため、地元住民との連携が難しくなる。さらに、資源エネルギー庁のガイドラインでは、「環境保全、景観保全のための適切な土地開発の設計を行うように努めること」という項目が設けられている。このため、環境保全や景観保全のための追加コストが発生する。

2.3. 世界の地熱発電の状況

地熱発電に利用できる高温の地熱資源が存在する地域の多くは、世界の火山帯に位置している。現在、30か国で地熱発電所が稼働しており、世界の発電設備容量（発電できる電力）の合計は1595万kW（2019年末時点）である。このほかに、初めての地熱発電所が5年程度以内に完成する予定の国が8か国ある⁽³⁾。

世界初の商用の地熱発電所は1913年にイタリアのラルデレロ地域に建設された。世界の地熱発電の歴史を見ると、1970年代のオイルショックの際に地熱開発が推進され、1980年代に地熱設備の導入が増加した。また、1990年代になって地球温暖化問題が顕在化すると、その後には地熱発電は順調に増加した。近年の特徴として、インドネシアやケニア、トルコなどの新興国で地熱発電所の建設が非常に活発であること、また、欧州中部の火山のない国でも深さ3～5mの井戸を掘削して100～150℃程度の熱水を生産し、比較的の小規模な発電と熱水の直接利用を行っていることが挙げられる。

2019年の世界の地熱発電量は951億kWhであり⁽⁴⁾、世界の総発電量26兆9420億

(3) Hutterer, G.W. (2020) "Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report." Proceeding, World Geothermal Congress 2020.

kWhの約0.35%にとどまっている⁽⁵⁾。地熱発電の上位10カ国の状況を見ると(図1)、一般に人口が多く総発電量が多い国ほど、地熱の割合が小さくなる傾向にあり、年間発電量に占める地熱割合は、米国は0.45%、日本は0.26%である。それに対して、地熱が発電に大きく貢献している国では、ケニア49.49%、アイスランド30.31%、ニュージーランド18.12%、フィリピン13.57%などとなっている。特に、アイスランドでは室内暖房の90%に地熱水が用いられ、一次エネルギー供給の62%を地熱が占めている。また、米国で一番人口が多いカリフォルニア州では、地熱の利用が進んでおり、州の年間総発電量117億kWhのうち6%を地熱発電が担っている。さらに、推定地熱資源量の大きい米国、インドネシア、日本では地熱資源の開発率は低い傾向にある一方で、トルコやフィリピン、ニュージーランド、イタリアは約30%になっており、地熱資源の開発率が高い傾向がある。

図1 地熱発電の上位10カ国の状況(2019年末時点)

国名	地熱設備容量 (万kW) (A)	地熱年間発電量 (億kWh) (B)	設備利用率(%) B/(Ax24時間 x365日)	国全体の 年間発電量 (億kWh) (C)	年間発電量 に占める 地熱割合(%) B/C	推定地熱資源量 (万kW) (D)	地熱資源 開発率(%) A/D
1 米国	370.0	183.66	57%	40660.00	0.45%	3000	12.33%
2 インドネシア	228.9	153.15	76%	2626.61	5.83%	2779	8.24%
3 フィリピン	191.8	98.93	59%	729.22	13.57%	600	31.97%
4 トルコ	154.9	81.68	60%	3050.00	2.68%	450	34.42%
5 ケニア	119.3	99.30	95%	200.63	49.49%	700	17.04%
6 ニュージーランド	106.4	77.28	83%	426.50	18.12%	365	29.15%
7 メキシコ	100.6	53.75	61%	3215.75	1.67%	600	16.77%
8 イタリア	91.6	61.05	76%	2897.08	2.11%	327	28.01%
9 アイスランド	75.5	60.10	91%	198.29	30.31%	580	13.02%
10 日本	53.7	23.13	49%	8922.00	0.26%	2347	2.29%

出所：Huttrer, G.W. (2020) "Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report." Proceeding, World Geothermal Congress 2020, JOGMEC

2.4. 日本の地熱発電の取り組みと今後の見通し

次に、日本の地熱発電への取り組みについて見てみる(図2)。

火山国である日本は、米国、インドネシアに次ぐ、2347万kW相当の世界第3位の地熱資源大国である⁽⁶⁾。2023年4月現在の日本国内で稼働中の地熱発電所の総出力は合計約51万kWと、推定地熱資源量のわずか2.3%であり、発電出力は世界第10位である。図3は、主な日本の地熱発電所の一覧である。

(4) Huttrer, G.W. (2020) "Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report." Proceeding, World Geothermal Congress 2020.

(5) Internal Energy Agency (2020) "World Energy Outlook 2020."

(6) 日本地熱協会 (2023年4月現在)

図2 日本の地熱発電への取り組み

1925年	日本初の地熱発電に成功（大分県）
1966年	日本初の地熱発電所「松川地熱発電所」が運転開始（岩手県）
1970年代	石油ショックを契機に代替エネルギー需要が高まり、地熱資源開発が急拡大
1980年～1997年	サンシャイン計画の下、太陽光、石炭、水素と並び、年間100億円を超える予算が投じられ、地熱エネルギーが促進された
1996年	地熱発電の出力50万kWを達成
1990年代後半	国は地熱発電に対して急速に関心を失い、「新エネルギー」からの地熱フラッシュ発電の除外、RPS法（電気事業による新エネルギー等の利用に関する特別措置法）適用からの地熱フラッシュ発電の除外、技術開発の停止、地熱予算の急激な削減
2010年	事業仕分けにより、国が先導する地熱開発促進調査の終了
2011年	東日本大震災を機に、再び地熱発電が見直される
2012年～現在	地熱発電が再生可能エネルギーとして固定価格買取制度（FIT）の優遇措置として受け入れられたことから地熱資源開発が注目される
2019年	大規模な地熱発電所としては日本で23年ぶりとなる松尾八幡平地熱発電所（岩手県）が2019年1月に、山葵沢（わさびざわ）地熱発電所が2019年5月に運転開始した

出所：e-dash, 地熱情報研究所, JOGMEC などより作成

図3 日本の地熱発電所（発電端出力1,000kW以上、2023年4月現在）

発電所名	所在地	発電	蒸気・熱水供給	発電端容量 (kW)	発電方式	運転開始日	
森発電所	北海道	森町	北海道電力(株)	25,000	DF	1982.11.26	
大沼地熱発電所	秋田県	鹿角市	三菱マテリアル(株)		9,500	SF	1974.06.17
澄川地熱発電所			東北電力(株)	三菱マテリアル(株)	50,000	SF	1995.03.02
上の岱地熱発電所		湯沢市	東北電力(株)	東北自然エネルギー(株)	28,800	SF	1994.03.04
山葵沢地熱発電所			湯沢地熱(株)		46,199	DF	2019.05.20
松川地熱発電所	岩手県	八幡平市	東北自然エネルギー(株)		23,500	DS	1966.10.08
松尾八幡平地熱発電所		岩手地熱(株)			7,499	SF	2019.01.29
葛根地熱発電所		雫石市	東北電力(株)	東北自然エネルギー(株)	(2号) 30,000	SF	1996.03.01
鬼首地熱発電所	宮城県	大崎市	電源開発(株)		14,900	SF	2023.04.02
柳津西山地熱発電所	福島県	柳津町	東北電力(株)	奥会津地熱(株)	30,000	SF	1995.05.25
奥飛騨温泉郷中尾地熱発電所	岐阜県	高山市	中尾地熱発電(株)		1,998	DF	2022.12.01
わいた地熱発電所	熊本県	小国町	(合)わいた会		2,000	SF	2015.06.15
南阿蘇湯の谷地熱発電所		南阿蘇村	(株)南阿蘇湯の谷地熱		2,168	SF	2023.03.03
杉乃井地熱発電所	大分県	別府市	(株)杉乃井ホテル		1,900	SF	2006.04.01
滝上発電所		九重町	九州電力(株)	出光大分地熱(株)	27,500	SF	1996.11.01
滝上バイナリー発電所			出光大分地熱(株)		5,050	B	2017.03.01
大岳発電所			九州電力(株)		14,500	SF	2020.10.05
八丁原発電所			九州電力(株)		(1号) 55,000	DF	1977.06.24
				(2号) 55,000	DF	1990.06.22	
				2,000	B	2006.04.01	
菅原バイナリー発電所		九重町		九電みらいエナジー(株)	5,000	B	2015.06.29
大霧発電所	霧島市	九州電力(株)	日鉄鉱業(株)	30,000	SF	1996.03.01	
山川発電所	鹿児島県	九州電力(株)		30,000	SF	1995.03.01	
山川バイナリー発電所		指宿市	九電みらいエナジー(株)	九州電力(株)	4,990	B	2018.02.23
メディボリス指宿発電所		(株)メディボリスエナジー		1,580	B	2015.02.18	

注：発電方式 DS：ドライスチーム SF：シングルフラッシュ DF：ダブルフラッシュ B：バイナリー

出所：日本の地熱発電所（日本地熱協会のホームページ）

日本の地熱発電は、1966年に松川地熱発電所が運転開始し、その後順調に増加してきたが、1997年以降は1万kWを超える本格的な地熱発電所が建設されることはなく、地熱発電停滞の傾向にあった。しかし、2011年3月に発生した東日本大震災および福島第1原子力発電所事故により、日本のエネルギー政策を根本から見直す必要が生じ、改めて地熱発電が見直されることとなった。

日本の地熱発電の今後の見通しとしては、2021年10月に日本の新たなエネルギー基本計画（第6次）が閣議決定された。そこでは「再生可能エネルギーは主力電源化を目指し、大量導入に取り組む」とされているが、抜本的な新計画は提案されなかった。この再生可能エネルギー大量導入の中で地熱発電は基盤電源とされ、国も推進することとなっており、地熱発電目標である「2030年度までに3倍である150万kW」というかなりチャレンジングな数値を掲げ、日本各国で地熱発電所建設を目指して、地熱資源調査および地熱発電所建設に取り組んでいる。また、2024年秋には第7次エネルギー基本計画の策定が予定されており、地熱発電のさらなる利用促進が期待されている。

2.5. 次世代の地熱発電の展望

持続可能な社会を目指す上で、CO₂をできるだけ排出しないエネルギー源を求めると共に、現在進行している地球の熱環境悪化を防ぐために、様々な対策を進める必要がある。そのなかでも、次世代の地熱発電はどのようなものが想定されているかを見ていく。

EGS発電とは Enhanced Geothermal System 発電の略で、強化地熱システム発電や、人工地熱系発電などと呼ばれるものがある。これは、火山地域でなくても地下深部にいくと（地下数km深）、どこでも高温になり、また高い圧力により岩石中の空隙が閉じ、水を含まない高温の乾燥岩体となるが、ここから熱を取り出して発電を行うというものである。このような高温岩体は火山地域に限ることなく、採掘可能な深度が増せばどこにでもあるものなので、その資源量は飛躍的に増えることが予想されるために、将来的に大いに期待されるものである。特に乾燥高温岩体だけでなく、温度がやや低い、透水性の不十分な岩体までを対象を広げると、その資源量ではさらに大きくなる。

EGS発電においては、熱の抽出に当たってはまず対象の高温岩体を目掛けて1本の深い坑井を掘削し、この坑井に水を入れ高圧をかけて岩盤を破碎する（水圧破碎という）。次に、この破碎された領域に向けてもう1本の坑井を掘り、破碎帯（熱交換面）と2本の坑井を連結させ、一方の坑井から冷水を注入し、破碎帯で高温の岩石と熱交換し、温められた熱水をもう1本の坑井から回収する。このようなシステムは、米国や日本、欧州など世界各地で実際に構築され、1990年代には熱抽出が可能であることが判っていたが、圧入した水の回収率が低いこと、水圧入に大きなエネルギーを要すること、水圧破碎に伴って有感地震が誘発される可能性があること、深い坑井の掘削には高額の費用がかかることなどから、実用化への道は遠かった。しかしその後、米国や欧州を中心に積極的に研究開発が進められており、技術も進歩してきている。

また、地熱貯留層とマグマ溜まりの間にある高温の延性帯をターゲットとした延性帯発電もある。この延性帯領域に複数の坑井を掘り、EGS発電のように一つの坑井から冷水を注入し、高温の延性帯で熱交換し、温められた水を別の坑井から取り出すというものである。このような深度であれば水が散逸することもなく、温められた水のほとんどが回収

されると考えられている。また、このような深度であれば有感地震誘発の可能性も低く、また温泉への影響の可能性もなく、温泉関係者の理解も得られやすいとも考えられている。この延性帯には多量の超臨界水（温度はおよそ400~600℃、圧力はおよそ22~60MPa程度で、エネルギー品位が極めて高い）があるとの分析もあり、このような超臨界水貯留層は日本各地（火山地域深部）にあるとも考えられており、そこからの発電量はTW（テラワット）規模であると想定されている。

さらに、究極の地熱発電といわれる「マグマ発電」がある。活火山の下の数km以深の深さにはマグマ溜まりと呼ばれる高温の溶解岩体がある。マグマの温度は800~1200℃程度であり、エネルギー源としては極めて品質が高い。しかしながら、マグマ溜まりからの熱抽出によるマグマ発電は究極の地熱エネルギー利用と言えるが、開発に至るプロセスにはかなりの困難が予想され、次世代の地熱発電方式としても極めてチャレンジングなものである。マグマ溜まりからの熱抽出としてオープン方式とクローズド方式の2つの方式が考えられている。オープン方式は米国で考案されたもので、融けているマグマ溜まりの上部に、温められた水の回収用に坑井を掘削し、この坑井の中からさらに深部までマグマ溜まりの中を掘り進み、細いパイプを埋め込んで、その細いパイプから冷水を注入し、マグマと接触して蒸気になった水を、細いパイプと水回収用の坑井の環状部から回収するものである。このような熱交換システムが実際にハワイ・キラウエア火山の溶岩湖に形成され（深さ70m）、熱回収に成功している。わが国でもマグマ溜まりからの熱抽出の研究が行われ、クローズド方式である坑井内同軸熱交換器方式が考案された。この方式では、まず対象領域まで掘削し、底面を閉じた金属製のパイプ（外管）を挿入し、この中に断熱性の良いパイプ（内管）を挿入し、同軸二重管式熱交換器を構成する。次に、環状の部分から冷水を注入し、深部で熱交換を行い、温められた流体を内管から回収し、発電あるいは直接利用するものである。このシステムをハワイ・キラウエア火山の山腹に設置し（深さ1000m）、実際に熱回収実験に成功している。

3. 地熱発電事業に見られる内部化の事例について

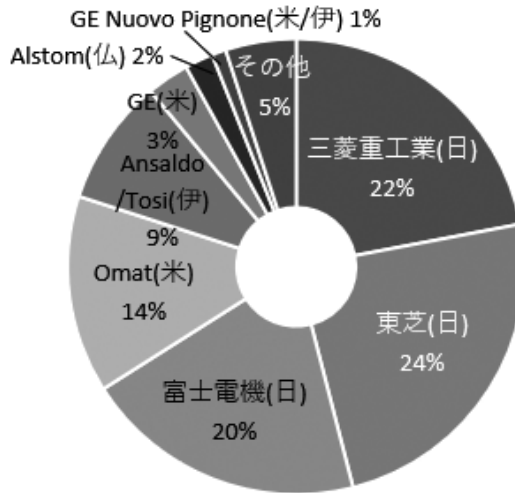
3.1. 提携関係を生み出していく日本企業

ここまで、地熱発電の技術がまだまだ発展途上であることを見てきた。技術的に発展途上であるからこそ、地熱発電事業においては内部化の事例が多く見られるということを見ていきたい。まずは、日本企業が海外の現地企業を統合するところにはまだはいかにせよ、委託の形での提携関係が生じてくるという事例を見ていきたい。

世界に建設されている地熱発電所は、設備容量（発電出力kW）の合計で1595kWで、2025年までに1933kWになると予想されている一方、日本には多くの地熱エネルギーが存在すると言われていながら、2023年4月現在の日本の地熱発電所の出力は合計約51万kWにすぎず、地熱発電の世界市場は、日本市場よりはるかに大きいと言える。

その状況の中、世界各国に建設されている地熱発電所の多くでは、日本企業が製造する地熱用のタービンと発電機が使われている。地熱蒸気には温泉の匂いの元で金属を腐食させる硫化水素ガスが含まれていたり、シリカ等のスケール（水垢のようなもの）が付着したりするなど、地熱蒸気専用の設計技術が不可欠である。そのような過酷な環境において

図4 地熱発電タービンの世界シェア



出所：US National Renewable Energy Laboratory (NREL)
(2015年のデータ)

使用される地熱発電タービンのうち、約65%が日本企業である、三菱重工業や東芝、富士電機により製作されている(図4)。地熱蒸気を直接使用しないバイナリー方式に使用されるタービンは、金属腐食性の課題などがなく欧米各社により製作されている。日本企業の地熱発電タービンにおける国際競争力は高く、機器の製造・輸出だけでなく、海外での地熱発電の設計から建設まで一貫して請け負う例もある。

東芝は、2020年7月現在で累計出力約3.8GWの地熱発電機器を納入しており、設備容量ベースで世界トップクラスのシェアを誇っている。三菱重工業の地熱発電システムも世界各国で導入されているが、地熱発電技術として二相流体輸送⁽⁷⁾とダブルフラッシュ方式の組み合わせを世界で初めて導入するなど、高い技術力が評価されている。

富士電機は、1960年に日本初の実用的な設備を納入して以来、数多くの地熱発電タービンを納入しており、実績も豊富である。2000年以降の納入実績では、世界シェアで約20%を占めている。インドネシアのムアララボ地熱発電所ではプラント全体のエンジニアリングと主要機器などを担当し、主要機器を納入した。インドネシアでこれまで19台の地熱発電用蒸気タービンを納入しており、同国でのシェアは50%を占める。また、ドイツ企業と共同でアイスランドの国営電力会社が建設したテイスタレイキール地熱発電所の発電設備の工事を行った。テイスタレイキール地熱発電所は、建設地点がアイスランドの北部で北緯66度に近いところに立地しており、オーロラが観測できることがある。この発電所の建物の建設や設備の工事は含まれなかったが、発電設備の据付工事は、富士電機がアイスランドの工事会社に委託して施工した。

ケニアでは、2000年以降に35000kWの設備を3台、75000kWの設備を4台、86000kW

(7) 蒸気と熱水が混じっている流体(二相流体)を蒸気井から発電所へ送る方式

の設備を3台、日本企業3社により建設されている。これらのすべては、ケニアの首都ナイロビ北西部にあるナイバシャ湖に近いヘルズゲート国立公園内及び周辺付近のオルカリア地区に立地している。

インドネシアでは、2010年以降、14台で合計70万kW以上が日本企業により建設された。スマトラ島南部に建設されたウルブル地熱発電所の55000kWの設備2台も含まれ、その建設に際してはインドネシアのエンジニアリング会社と共同で設計を行い、現場での工事はすべてインドネシアの工事会社に委託している。

海外の建設現場では、工事施工は地元の工事会社に発注するが、地元企業との協力体制の下、建設現場の総責任は日本企業が担っていることが多い。地熱発電に必要な技術が高度であるがゆえに、海外の現地企業一社で事業を完結できず、日本企業との提携関係が求められるというのが、以上の事例である。

3.2. 技術資源を内部化する日本企業

次に、日本企業による、経営資源の内部化のために企業統合を進める動きについて見ていきたい。

日本企業は、発電事業者として海外の地熱発電開発にも取り組んでいる。2018年5月には国際石油開発帝石（現INPEX）は、九州電力、伊藤忠商事及び海外企業2社との共同出資によるサルーラ地熱IPP事業（独立系発電事業）の1号機から3号機までを、インドネシアの北スマトラ州サルーラ地区に完成させて営業運転を開始した。INPEXは、2021年12月に地熱事業を目的とする子会社として設立したINPEX地熱開発を通じ、インドネシアにおけるムアララボ地熱発電事業に参画し、2022年4月には同事業の参画比率を10%から30%に引き上げ、同国における地熱事業の推進を加速させる方針である。

住友商事は、2019年12月にインドネシア西スマトラ州において地元企業、欧州企業との3社共同出資によりムアララボ地熱発電事業に取り組み、営業運転を開始した。

丸紅は、2021年12月にインドネシアのスマトラ島におけるランタウ・デダップ地熱発電プロジェクトに、東北電力、地元企業及び欧州企業の4社共同出資で取り組み、営業運転を開始した。

オリックスは2017年5月に、地熱発電事業などを手掛ける米国のOrmat Technologies（以下「Ormat」）の発行済み株式の約22%を約6億2700万ドル（約700億円）で取得した。Ormatは、地熱発電設備の設計・製造・販売・据付事業を行うのみならず、自ら地熱資源開発および地熱発電事業を手掛ける世界で唯一の地熱事業垂直統合企業体である。1965年に創業し、ニューヨーク証券取引所、テルアビブ証券取引所、フランクフルト証券取引所に上場している。Ormatの地熱発電設備は、全世界において2200MWの累積導入実績を有し、バイナリー式の発電設備導入量においては世界トップシェアとなる約85%を占めており、地熱発電事業は米国のみならず中米やアフリカなどでも事業展開し、727MWの設備容量を保有している。オリックスは、グループで運営する「別府 杉乃井ホテル」（大分県別府市）において、自家用としては国内最大規模となる1.9MWの「杉乃井地熱発電所」を所有・運営している。2017年3月には東京都八丈町との間で地熱発電利用事業に関する協定を締結するなど、地熱発電事業に取り組んでいる。さらに、この出資を通じてOrmatと戦略的に提携し、主として日本およびアジア地域における地熱発電

事業などを推進していく目標である。

九州電力グループは、2020年6月にキューデン・インターナショナルと西日本技術開発は、地熱技術サービスを提供する米国のThermochemを買収することを発表した。Thermochemは、地熱技術サービス、専門機器の製造販売・研究開発や、コンサルティングサービスを提供しており、その高度な技術力や製品開発力に加えて豊富な知見を有していることから、グローバル市場における地熱発電の開発・運営者から高い知名度を誇っている。この買収により、これまで九州電力グループが培ってきた技術に、Thermochemの高度な技術サービスを掛け合わせることで、グローバル市場における地熱開発・運営体制の強化を目指し、地熱発電ビジネスの拡大とプレゼンス向上を図るとしている。

中部電力は2022年10月に、100%子会社Chubu Electric Power Company Netherlands B.V.を通じて、カナダの地熱技術開発企業であるEavor Technologies Inc. (以下「Eavor」)と同社の株式引受契約を締結した。中部電力が海外で地熱エネルギー関連企業に出資するのは初めてである。Eavorは、世界に先駆けてクローズドループ地熱利用技術の研究・開発を行い、商業化を目指すカナダのグローバルスタートアップ企業である。Eavorは、クリーンで信頼性が高く、安価なエネルギーが地球規模で供給される未来を創造することを目指し、石油・ガス井掘削技術と同社の新たな独自技術を組み合わせた「Eavor-Loop」(エバーループ)を開発した。このEavor-Loopは、世界に先駆けた高い拡張性を持つ地球環境に優しい地熱エネルギー技術で、循環する液体の流れを調節することで、低需要時には液体に熱を貯蔵してより高温にし、高需要時に高効率で電力変換する機能を備えている。地下にループを設置し、内部に水を循環させることで、地下の熱水や蒸気が十分に得られない地域でも効率的に熱を取り出すことが可能であることから、幅広いエリアでの開発が可能であり、掘削後に地下の熱水や蒸気の不足により開発が中止となるリスクを回避できることが特長である。加えて、この技術を活用した発電は、ベースロード運転(季節や天候、昼夜を問わず一定量の電力を安定的に低コストで供給すること)だけではなく、低需要時に地下に蓄熱し、高需要時に蓄熱したエネルギーを電力に変換する負荷追従型の調整力電源としての機能も備えており、将来的にエネルギー業界のゲームチェンジャーとなることが期待されている。中部電力はEavorへの出資を通じて、地熱事業に関する知見の獲得や、Eavorが海外で取り組むプロジェクトへの出資参画機会の拡大を模索すると共に、Eavorが持つ技術の国内展開も検討していきたいと考えている。

鹿島建設も、2023年12月にEavorへの出資を発表した。「鹿島環境ビジョン：トリプルZero2050」において、持続可能な社会を①脱炭素、②資源循環、③自然共生の3つの視点でとらえ、2050年までに達成すべき将来像をZero Carbon, Zero Waste, Zero Impactと表現している。このうち、「Zero Carbon」を達成するための主たる手段の一つとして、使用電力の再生可能エネルギー由来電力への切り替えを進めており、地熱発電はそのエネルギー源になり得る分野として注力している。

以上、見てきたように、地熱発電事業の新技術を自社に内部化しようとする動きは、日本企業の動向において確認することができる。地熱発電は技術的にハードルが高いがゆえに、そのハードルを解決する技術を手に入れて競争優位を獲得するために、企業統合が進みやすいという見方が可能である。

おわりに

本論文では、地熱発電の現状を検討すると同時に、日本企業の事業活動を検討することを通じて、技術的ハードルが高い分野では内部化に舵を切る強い誘因があるということ、地熱発電事業の事例から論証した。地熱発電は技術的にハードルが高いがゆえに、各社が競争優位の獲得のため、そのハードルを解決する技術を手に入れようとする誘因が大きく、そのため企業統合が生じやすいというのが、本論文で提示したい解釈である。3.1.で日本企業が地熱蒸気を直接使用するタービンを得意としているのに対し、欧米企業は地熱蒸気を直接使用しないタービンを得意としていることに触れたように、技術的課題の内容によって、日本と欧米の企業が市場を分けている。そしてそれぞれの商品の展開を補完するような提携がなされている事例も見受けられるが、その提携が資源の内部化を目指してのM&Aに繋がる可能性がある。現時点では、スタートアップ分野で多くのM&A事例があるが、近未来では、さらに合併やM&Aの規模が大きくなっていくことが予測される。産業史を眺めても明らかなように、基盤技術は自社で開発したとしても、関連技術は技術ライセンスを受けたり部品供給を受けたりするのは珍しいことではない。つまり基盤技術を中心に事業は展開されていくのである。しかしながら、基盤技術の開発力だけでは、同様のビジネスモデルを採用した企業に対して、ポーターの差別化 (Porter 1985) やラグマンの内部取引の廉価性 (Rugman 1981) を通じて、競争優位を保ち続けることができない。基盤技術を梃に、重要な関連技術を内部に取り込み、それを事業システム化できた時に、そのシステム自体が模倣困難性を獲得し、競争優位の源泉となるのである。内部化理論は企業の多国籍化を説明する理論ではあるが、特に困難な新事業を推進する企業のマネジメントが競争優位を達成する仕組みをも検証可能とするのではないか。本研究では、技術面の不確実性、困難性、特殊性を前提にした検証が充分なされたとは言えないが、一つの学問的な課題を示すことはできたであろう。

〔参考文献〕

- Buckley, P.J., Casson, M.C. (1976) *The Future of Multinational Enterprise*, London.
- Coase, R.H. (1937) The Nature of the Firm, *Economica*, Vol. 4, S. 386-405.
- Horiguchi, T. (2008) *Economic Rationality and Foreign Direct Investment Behavior of Japanese Companies [in German, Rationalität und Handlungslogik der Auslandsdirektinvestitionsaktivitäten japanischer Unternehmen]*, Peter Lang, Frankfurt a. M.
- Huttrer, G.W. (2020) “Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report.” Proceeding, *World Geothermal Congress 2020*.
- Porter, M.E. (1985) *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*, Free Press.
- Rugman, A.M. (1981) *Inside the Multinationals: The Economics of Internal Markets*, Columbia University Press, New York.
- Williamson, O.E. (1975) *Markets and Hierarchies: Analysis and Antitrust Implications: A*

Study in the Economics of Internal Organization, New York.

江原幸雄 (2019) 『スッキリ! がってん! 地熱の本』 電気書院.

當舍利行, 内田洋平 (2012) 『トコトンやさしい地熱発電の本』 日刊工業新聞社.

日本地熱学会編 (2022) 『みんなが知りたいシリーズ⑱ 地熱エネルギーの疑問 50』 成山堂書店.

(2024.5.9 受稿, 2024.7.8 受理)