

2023年11月14日

ヒートポンプが利用する空気熱・地中熱に関する熱力学的考察

— ヒートポンプの重要性と空気熱の位置づけ —

クリーンエネルギーユニット 柴田善朗

サマリー

ヒートポンプは空調や給湯に広く利用されている高効率機器であり、脱炭素化に向けて促進される電化において非常に重要な役割を果たす。一方で、ヒートポンプが熱源として利用する空気熱（若しくは大気熱）、地中熱、河川熱等の熱の取扱い・位置づけについては慎重な議論が求められる。EU では、温熱用途・冷熱用途のヒートポンプが利用する空気熱、地中熱、河川熱等の熱を自然熱つまり再エネとして定義し、2009年の温熱用途に続き、2022年には冷熱用途においてヒートポンプが利用するこれらの熱を再エネとして認めるための定義式が規定された。しかしながら、地中熱や河川熱は外気温との差の活用という観点で再エネと見なせるものの、外気温そのものである空気熱に関しては慎重な検討が必要である。本稿では、科学的見地に基づき、温熱用途と冷熱用途のヒートポンプのメカニズムを総合的に捉えることで、自然熱の位置づけについて整理した。

温熱用途のヒートポンプが利用する（環境から吸収する）熱が空気熱の場合、空気熱は電力の投入によって初めて利用可能な状態になる人工的な熱で、元々自然界には存在しないことから自然熱とは言えない。その観点において、再エネとして定義することには問題があると考えられる。利用する熱（地中熱や河川熱など）の温度と外気温の差分を再エネと見ることが適当であろう。ヒートポンプが利用する熱が地中熱の場合は、外気温との差を活用することで自然熱の利用として再エネとしての位置づけが認められるが、空気熱ヒートポンプの電力消費量と地中熱ヒートポンプの電力消費量の差、つまり地中熱を利用することでヒートポンプの効率が上昇し、削減できる電力消費量を地中熱量とすべきである。

冷熱用途のヒートポンプの機能は、ある空間からの温熱の除去・除去熱の環境への廃棄である。EU 再エネ指令では、この除去される温熱の一部を再エネとして定義しているが、温熱の除去は冷熱の供給であり冷熱需要そのものであって、外気温との差を活用した自然熱の利用ではない。その観点で、冷熱需要を再エネとして位置付けることは適切とは言い難い。EU 再エネ指令の定義式に基づくと、より大量の電力を消費することでより多く冷熱を作り出し、利用することがより多くの「再エネ」を利用しているということになってしまう。一方、地中熱を利用する場合は、温熱用途の場合と同様に、空気熱ヒートポンプの電力消費量と地中熱ヒートポンプの電力消費量の差、つまり地中熱を利用することでヒートポンプの効率が上昇し、削減できる電力消費量を地中熱量とすることができる。

温熱用途のヒートポンプが利用する空気熱を「再エネ」として、太陽光発電や風力発電等の再エネに加えて、再エネ導入量に上乗せしたとしても、当然のことながら、国・地域全体のエネルギー消費量・CO₂排出量は変化しない。国・地域全体の現在のエネルギー消費量・CO₂排出量は、既に普及しているヒートポンプの省エネ効果を反映済みだからである。したがって、ヒートポンプが利用する空気熱を再エネとして定義し、再エネ導入量に上積みすることは、再エネの数字を「嵩上げする」ことにはなるが、太陽光や風力などの再エネが持つ、CO₂排出削減や自給率向上などの効果を有しないことから、再エネ政策の本来的目標に混在的要素を発生させる可能性がある。また、冷熱用途のヒートポンプの場合は空気熱を利用しておらず、ヒートポンプの電力消費で冷熱が供給されるのみである。

ヒートポンプは非常に優れた高効率機器（省エネ機器）である。高効率な（1次エネルギー効率で）ヒートポンプの普及を拡大することで、エネルギー消費およびCO₂排出の削減効果が期待できる。数値的な再エネ導入の目標というより、CO₂排出削減や自給率向上という再エネの本来的な効用に焦点を当て、科学的な検証に基づき、ヒートポンプの導入強化を進めていく必要がある。

はじめに

ヒートポンプは空調や給湯に広く利用されている高効率機器であり、脱炭素化に向けて促進される電化において非常に重要な役割を果たす。一方で、ヒートポンプが熱源として利用する空気熱（若しくは大気熱）、地中熱、河川熱等の熱の取扱い・位置づけについては慎重な議論が求められる。

EUでは従前からヒートポンプが利用するこれらの熱を「自然熱」と位置づけ、再エネと定義し、再エネ導入量に含めている。これまで、EU再エネ指令（Renewable Energy Directive：RED）ではヒートポンプがこれらの熱を温熱（暖房・給湯）用途に利用する場合の熱量の算定方法が規定されていたが、2022年6月には、冷熱（冷房）用途における算定方法も制定された¹。我が国では2009年からエネルギー供給構造高度化法は「大気中の熱その他の自然界に存する熱」という用語で、大気熱を地中熱等と同列で自然熱として定義しているが²、利用熱量の算定方法は示されていない。政府審議会でも自然熱の取扱いについて議論されている³。

外気温との差を持つ地中熱や河川熱を「自然熱」として、再エネと定義することは理解できるが、外気温そのものである空気熱については、再エネとして定義するかどうかは議論が分かれるところである。筆者は、以前、温熱用途のヒートポンプが利用する空気熱を再エネと見なし得るとしつつも、ヒートポンプは空気熱と同時に電力も必要とすることから、空気熱を他の再エネと全く同じ位置付けて分類することはできないと整理した[1]。その後、2022年にEU再エネ指令で新たに冷熱用途における再エネの定義が規定されたことを受け、本稿では、その内容を吟味し、温熱用途と冷熱用途のヒートポンプのメカニズムを総合的に、科学的見地から再考することで、自然熱に関する見解を改めて再構築する。なお、ヒートポンプには主に電気駆動と熱駆動があるが、普及の大部分を占める前者を本稿の対象とする。

温熱用途におけるヒートポンプが利用する空気熱は人工的に生成されるもの

まず、ヒートポンプによる空気熱利用について考察する。なお、温熱用途を対象とする（冷熱用途については後述する）。温熱用途のヒートポンプは主に一般家庭や業務用施設に設置されているエアコンの暖房利用である。その仕組みは、ヒートポンプに投入する電力と、その電力によって駆動する熱力学サイクルによって外気から吸収する熱量（空気熱）の合計を、温熱として供給する仕組みである（図1の左図参照）。つまり、投入電力量を EL 、外気から吸収する熱量を Q_L 、温熱として供給される温熱を Q_H とすると、

$$EL + Q_L = Q_H \quad (1)$$

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:02018L2001-20220607&from=EN#tocId64>

² 「改正省エネ法における自然熱の扱い」2022年度第4回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 省エネルギー小委員会 工場等判断基準ワーキンググループ 参考資料2

³ 例えば、第63回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会

となる。空気熱は Q_L であり、 Q_H という暖房需要（サービス需要）を満たすために、ヒートポンプは電力と併せて空気熱を利用していることがわかる。ヒートポンプの効率指標である成績係数（Coefficient of Performance: COP）は、温熱用途の場合には、入力電力量に対する温熱供給量の比率であり、

$$COP_H = \frac{Q_H}{EL} \quad (2)$$

と表されることから、式(1)と(2)から、以下の式(3)のように空気熱 Q_L が把握できる。

$$Q_L = Q_H \left(1 - \frac{1}{COP_H}\right) \quad (3)$$

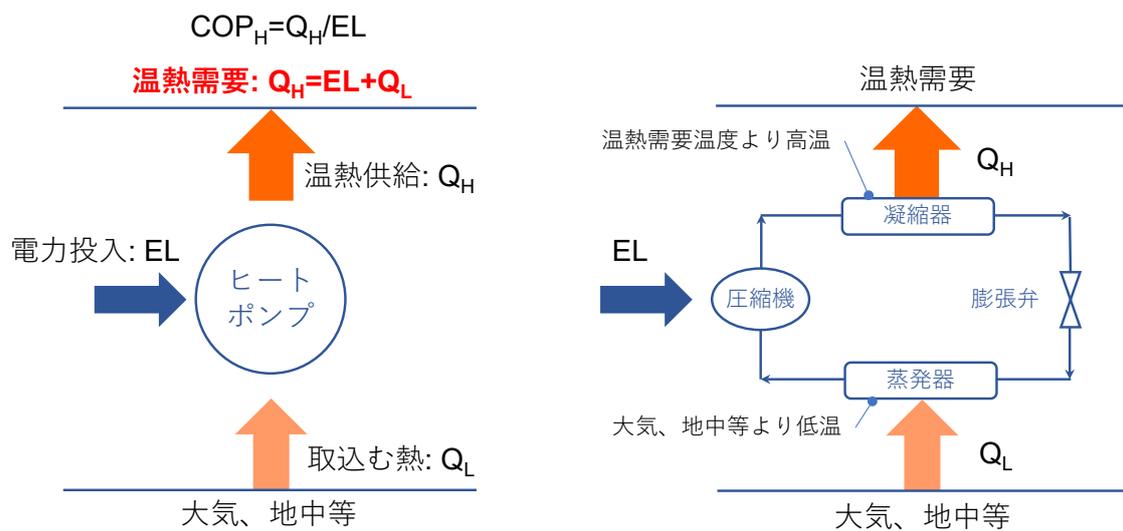


図 1 温熱用途におけるヒートポンプの仕組み

EU 再エネ指令では、

$$E_{RES} = Q_{usable} \times \left(1 - \frac{1}{SPF}\right) \quad (4)$$

という定義式が規定されているが、 E_{RES} は EU 再エネ指令が再エネとして認める空気熱、 Q_{usable} は供給された温熱量、 SPF は温熱供給期間（季節）全体における平均 COP_H である⁴。

⁴ より詳細には、EU 再エネ指令では、 SPF に対して閾値を定め、それ以上のヒートポンプであれば空気熱を再エネとして認めている。

式(3)の Q_L を E_{RES} 、 Q_H を Q_{usable} 、 COP_H を SPF に置き換えれば、式(4)になる。つまり、 Q_L の空気熱を再エネとして認めるというのが EU 再エネ指令である。

しかし、ここで、何故、外気温である空気熱が利用可能になるのか、という点を深掘りする必要がある。熱は、周囲との温度差があって初めて利用することができる。地中熱や河川熱は、冬期は外気温よりも暖かく夏期は冷たいから利用価値があるが、空気熱は大気そのものであり温度差が得られないことからそのままでは利用価値は全くない。

そこで、ヒートポンプの仕組みをより詳しく見る (図 1 の右図参照)。ヒートポンプは、圧縮機、凝縮器、膨張弁、蒸発器から構成され、これらを冷媒が循環する。電力が投入され、圧縮された冷媒は高温高圧になり凝縮器において熱を放出することで温熱を供給する (部屋を暖める)。凝縮器を出た冷媒は膨張弁を経ることによって外気温よりも低温になることで、蒸発器において外気からの熱を吸収できるようになる。外気から熱を吸収した冷媒は圧縮機に戻り再び昇温昇圧される。この一連のサイクルが繰り返される。このサイクルの蒸発器において外気から吸収される熱が空気熱である。

言い換えると、電力投入によって作動するヒートポンプの熱力学サイクルによって、冷媒を外気温よりも低温の状態にすることで初めて、外気から熱を受け取ることができる。注意しなければならない点は、空気熱というのは元々自然には存在しないということである。ヒートポンプによって人工的に作り出した、外気温よりも低い冷熱 (低温状態) が熱力学サイクルの中に発生するからこそ空気熱を使えるようになる。この空気熱を自然熱として、再エネと定義することは、例えば、冷凍機で人工的に製造した氷を自然界に存在する雪氷熱と同様に扱うことに類似している。

したがって、電力の投入によって人工的に作り出された状態においてのみ利用可能な空気熱は自然界には存在せず、自然熱と見なすことはできず、その観点において、再エネと定義することには問題があると考えられる。

地中熱等は再エネであるが、ヒートポンプで利用する場合はどう見るのか

次に、地中熱や河川熱等について考察する。当然のことながら、冬期に外気温より暖かい地中熱は暖房利用できるし、夏期は冷房に使えるので、これらの用途に利用した温熱・冷熱量はそのまま再エネの導入量としてカウントできる。つまり、自然熱の直接利用である。

一方、少し複雑なのは、これらの自然熱をヒートポンプに活用する場合である。まず、地中熱を例に、温熱用途を考える (冷熱については後述する)。空気熱の場合と同様に、式(1)が成立する。したがって、EU 再エネ指令では、式(1)の Q_L が示す地中熱を再エネとして定義しているが、その背景は、空気熱の場合と同じく、単純にこの地中熱を利用しているというヒートポンプの仕組みに基づいている。

ただし、そもそも、地中熱の利用価値は外気温との温度差に起因する。もし、地中熱の温度が外気温と同じであれば、地中熱には利用価値は無く、空気熱と同じこととなる。となれ

ば、地中熱の温度と外気温の差に相当する熱量を再エネとすべきである。この熱量を特定するには、ヒートポンプの原理を見ればわかりやすい。空気熱（外気温）と比べて（冬期に）地中熱は温度が高いことから、地中熱から冷媒への熱供給（図1の右図の蒸発器を参照）が容易になり、より多くの熱量を吸収できることでヒートポンプへの投入電力を削減できるメリット（効率向上）がある。つまり、外気温が高い場合の空気熱ヒートポンプと同じ原理である⁵。この原理に基づくと、地中熱ヒートポンプが利用する再エネとしての地中熱の量は、空気熱ヒートポンプの電力消費量と地中熱ヒートポンプの電力消費量の差として特定されることになる（同じ温熱負荷＝温熱需要の場合）。

以下の式(5)、(6)は式(1)をそれぞれ空気熱利用の場合と地中熱利用の場合で示したものである（下付き文字 A が空気熱、G が地中熱）。

$$EL_A + Q_{LA} = Q_H \quad \text{空気熱の場合} \quad (5)$$

$$EL_G + Q_{LG} = Q_H \quad \text{地中熱の場合} \quad (6)$$

Q_H は温熱需要（サービス需要）であり両者で同じとする。空気熱の場合は Q_{LA} 、地中熱の場合は Q_{LG} の熱が利用される。投入電力は各々 EL_A 、 EL_G となる。上述のロジックに基づくと、地中熱の再エネとしての価値は、 $Q_{LG} - Q_{LA}$ であるから、式(5)と(6)から $EL_A - EL_G$ となり、電力消費量の差として特定すれば、再エネとしての地中熱の量を把握できる。

どのような熱も周囲温度（空調の場合の外気温）との差に由来する熱量⁶のみが利用可能である、ということが原則となる。

なお、この再エネとしての地中熱の量の特定方法の合理性が、冷熱用途のヒートポンプを検討する際に、裏付けされる。

冷熱用途のヒートポンプは温熱の廃棄場所として空気という環境を利用しているだけ

次に冷熱用途について考察する。冷熱用途に利用するヒートポンプは一般家庭の冷房用エアコンをイメージするとわかりやすい。図2に示すように、エアコンを暖房利用する場合（図1）とエネルギーの流れは同じであるが、目的が逆であることに留意が必要である⁷。式(1)はそのまま成立するが、温熱供給時では Q_H がサービス需要であったが、冷熱供給時は冷熱供給つまり温熱除去が目的であることから Q_L がサービス需要となる。つまり、式(1)を

$$Q_H - EL = Q_L \quad (1)'$$

⁵ 暖房時のエアコンは、外気温が低い（高い）ほど効率が悪く（良く）なり電力消費量が増加（減少）する。

⁶ ただし、水等の場合、相変化の際は温度変化がないがその潜熱は利用可能な点には留意が必要である。

⁷ エアコンは、暖房用と冷房用で逆の作動、つまり冷媒の循環方向が逆となる。

と変形するとわかりやすい⁸。

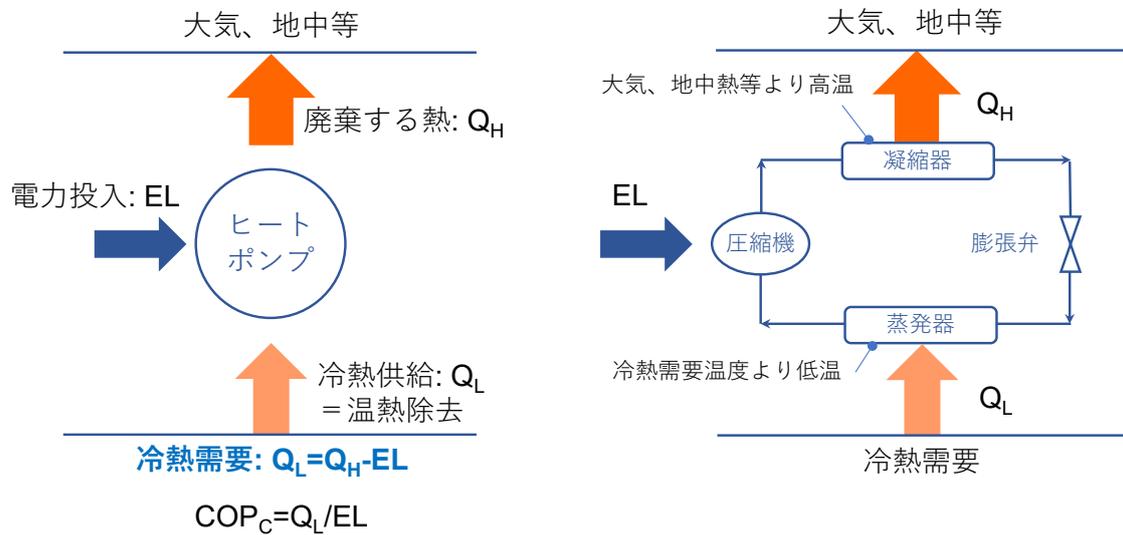


図 2 冷熱用途におけるヒートポンプの仕組み

ここで、EU 再エネ指令で、冷熱用途における再エネをどのように定義しているかを見る。式(7)は、冷熱用途における再エネ量を特定するための式である。

$$E_{RES-C} = (Q_{CSource} - E_{INPUT}) \times S_{SPFP} = Q_{CSupply} \times S_{SPFP} \quad (7)$$

ここで、

- E_{RES-C} : 冷熱における再エネ
- $Q_{CSource}$: 環境に放出される熱
- E_{INPUT} : 冷熱供給システムのエネルギー消費量
- $Q_{CSupply}$: 供給される冷熱
- S_{SPFP} : 供給される冷熱の内、再エネと定義できる割合 (%)

である。 S_{SPFP} については別途ヒートポンプの効率 (SPF) に関する規定があり、より効率の高いものがより多くの再エネを認められるようになっている。式(7)における $Q_{CSource}$ は式(1)の Q_H 、 E_{INPUT} は EL 、 $Q_{CSupply}$ は Q_L に対応しており、 Q_L の一部を再エネとして定義するものである。しかしながら、 Q_L は冷熱需要 (サービス需要) そのものである。つまり、EU 再エネ指令では、冷房を行うことで、ある空間 (例えば部屋) から取除く温熱の一部 (S_{SPFP} の割

⁸ 成績係数は $COP_c = \frac{Q_L}{EL}$ となり、冷熱需要は $Q_L = \frac{Q_H}{1 + COP_c}$ と表現できる。

合を考慮して)を自然熱として、再エネとして位置付けるというものになってしまう。この場合、より多くの電力を消費しより多く冷房を行えば行うほど大量の再エネを利用していることになるからである。EU再エネ指令は、除去する室内の温熱つまり冷房需要(=冷房負荷)を再エネとしていることで、理論的な間違いを犯している。

冷熱用途のヒートポンプが利用する地中熱等の場合はどう考えるのか

地中熱を活用して冷熱を供給するヒートポンプの場合はどうであろうか。地中熱自体は再エネなので、空気熱ヒートポンプのように再エネを利用していないとは言えない。だからと言って、EU再エネ指令のロジック(式(7))によると、冷熱需要が再エネになってしまう。そこで、先述の温熱用途のヒートポンプの場合の考え方を適用する。つまり、冷熱用途のヒートポンプの場合は、外気温よりも(夏期に)低い地中熱を利用することで、ヒートポンプの効率(COP)が上昇するという点に着目する。冷熱用途の空気熱ヒートポンプが再エネを利用していると見なすことは論理的に誤りであるが、地中熱を利用することでヒートポンプの効率向上に寄与する分(=投入電力を削減できる分)を再エネとして認めることはできる。つまり、式(1)'を、空気熱の場合と地中熱の場合で示すと、

$$Q_{HA} - EL_A = Q_L \quad \text{空気熱の場合} \quad (5)'$$

$$Q_{HG} - EL_G = Q_L \quad \text{地中熱の場合} \quad (6)'$$

になる。ここで、冷熱需要(除去する温熱量)は両者で同じ Q_L とする。地中熱の再エネとしての価値は、式(5)'と(6)'から、 $EL_A - EL_G (=Q_{HA} - Q_{HG})$ となり、電力消費量の差を特定すれば、再エネとしての地中熱の量を把握できる。

まとめ

以上の考察を以下に整理する⁹。

- ・ 温熱用途のヒートポンプが利用する(環境から吸収する)熱が空気熱の場合、空気熱は電力の投入によって初めて利用可能な状態になる人工的な熱で、元々自然界には存在しないことから自然熱とは言えず、その観点において、再エネとして定義することには問題があると考えられる。利用する熱(地中熱や河川熱など)の温度と外気温の差分を再エネと見ることが適当であろう。ヒートポンプが利用する熱が地中熱の場合は、再エネとして認められるが、空気熱ヒートポンプの電力消費量と地中熱ヒートポンプの電力消費量の差、つまり地中熱を利用することでヒートポンプの効率が上昇し、削減できる電力消費量を地中熱量とすべきである。

⁹ なお、地中熱等を直接利用する場合、これらの熱の全量が再エネであることは言うまでもない。また、例えば室温が30℃で外気温が25℃の状況において外気を取り入れ冷房する場合は、温度差があることから空気熱は再エネとして認められる。しかしながら、その量を特定することは現実的には不可能に近い。

- ・ 冷熱用途のヒートポンプの機能は、ある空間からの温熱の除去・除去熱の環境への廃棄である。EU 再エネ指令では、この除去される温熱の一部を再エネとして定義しているが、温熱の除去は冷熱の供給であり冷熱需要そのものであって、外気温との差を活用した自然熱の利用ではない。その観点で、冷熱需要を再エネとして位置付けることは適切とは言い難い。EU 再エネ指令の定義式に基づくと、より大量の電力を消費することでより多く冷熱を作り出し、利用することがより多くの「再エネ」を利用しているということになってしまう。一方、地中熱を利用する場合は、温熱用途の場合と同様に、空気熱ヒートポンプの電力消費量と地中熱ヒートポンプの電力消費量の差、つまり地中熱を利用することでヒートポンプの効率が上昇し、削減できる電力消費量を地中熱量とすることができる。

ヒートポンプで利用する地中熱等の自然熱の熱量は、外気温、温熱・冷熱の需要温度、空気熱ヒートポンプの電力消費量、効率（COP）のデータ、効率（COP）・外気温・需要温度の関係式、地中熱温度のデータがあれば推計できる。

温熱用途のヒートポンプが利用する空気熱の量も推計は可能であり、それを、太陽光発電や風力発電等に加えて、再エネ導入量に上乗せすることは、計算上はできる。温熱用途のヒートポンプが利用する空気熱を「再エネ」として、太陽光発電や風力発電等の再エネに加えて、再エネ導入量に上乗せしたとしても、当然のことながら、国・地域全体のエネルギー消費量・CO₂排出量は変化しない。国・地域全体の現在のエネルギー消費量・CO₂排出量は、既に普及しているヒートポンプの省エネ効果を反映済みだからである。したがって、ヒートポンプが利用する空気熱を再エネとして定義し、再エネ導入量に上積みすることは、再エネの数字を「嵩上げする」ことにはなるが、太陽光や風力などの再エネが持つ、CO₂排出削減や自給率向上などの効果を有しないことから、再エネ政策の本来的目標に混在的要素を発生させる可能性がある。また、冷熱用途のヒートポンプの場合は空気熱を利用しておらず、ヒートポンプの電力消費で冷熱が供給されるのみである。

ヒートポンプは非常に優れた高効率機器（省エネ機器）である。高効率な（1次エネルギー効率で）ヒートポンプの普及を拡大することで、エネルギー消費およびCO₂排出の削減効果が期待できる。数値的な再エネ導入の目標というより、CO₂排出削減や自給率向上という再エネの本来的な効用に焦点を当て、科学的な検証に基づき、ヒートポンプの導入強化を進めていく必要がある。

参考文献

[1] 柴田, “我が国における再生可能エネルギーとしてのヒートポンプによる空気熱利用”, IEEJ 2010年10月

お問い合わせ: report@tky.ieej.or.jp