

# 熱再生型電気化学電池による高温ヒートポンプの基本特性

## Performance of High Temperature Heat Pumps Using Thermally Regenerative Electrochemical Cells

田中 耕太郎\*  
Kotaro TANAKA

藤井 孝博\*\*  
Takahiro FUJII

### Abstract

A new type high-temperature heat pump system using thermally regenerative electrochemical cells is proposed in this paper. The thermodynamic cycle of the proposed heat pump system is assumed to be same as the inverse thermodynamic cycle of the alkali metal thermal to electrical converter (AMTEC). The system covers high temperature range from 600 K to about 900 K. The selected working fluid is sodium and the electrolyte material is beta'-alumina solid electrolyte ceramics. The fundamental performance of the heat pump system including the electrode performance has been evaluated based on the analysis method for the AMTEC generator. The typical estimated coefficient of performance (COP) is about 8 for  $\Delta T = 50$  K at the operating output temperature of 800 K, 4 for  $\Delta T = 100$  K, and 2 for  $\Delta T = 200$  K. The calculated result indicates that the new proposed system has a possibility as an advanced type heat pump system, and it is potentially suitable for combined heat supply system with a solar collector and thermal storage system.

キーワード：ヒートポンプ，ケミカルヒートポンプ，熱再生型電池，アルカリ金属熱電変換

Key Words: Heat pump, Chemical heat pump, Thermally regenerative cell, AMTEC

### 1. 緒言

本研究は600Kから900K程度の高温領域で作動が可能なヒートポンプの開発に注目している。本研究で注目しているヒートポンプは、電極反応を利用する電気化学ヒートポンプである。

このような高温領域で作動する高性能ヒートポンプが可能となれば、現在広く使用されている燃焼を利用する加熱装置、すなわちボイラーや乾燥装置などをはじめとする多くの燃焼加熱装置の代替となることが考えられる。また省エネルギー効果を期待して電気ヒータ加熱の代替が考えられる。

図1は太陽熱集光装置、蓄熱装置と組み合わせた熱出力平準化供給システムの構想例である。変動する太陽熱入力は中温ヒートポンプ1により平準化され、また高温ヒートポンプ2との複合化により必要とされる温度へと昇温される。このようなヒートポンプ複合化システムにより利用しやすい一定温度の熱供給が可能となる。図1において、潜熱蓄熱装置は高温ヒートポンプからの一定温度の熱入力

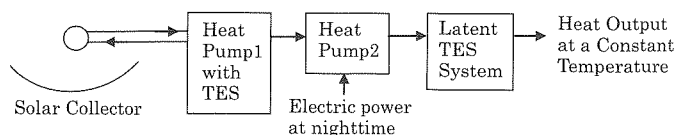


Fig. 1 Solar thermal collector and heat pump hybrid system for high-temperature heat supply

により効率よく稼働される。また昼間に加え、夜間電力によるヒートポンプ駆動と蓄熱による熱利用システムが考えられる。

現在まで、ケミカルヒートポンプに関する研究例は数多く報告されている<sup>(1)</sup>。それらの中で高温領域において作動する系としては無機反応系が候補である。例えば昇温出力温度1000K程度のCaO/Ca(OH)<sub>2</sub>系、CaO/CaCO<sub>3</sub>系などの反応系が有望である<sup>(2)</sup>。また金属水素化物を利用する高温作動型システムが提案されている<sup>(3)</sup>。これらの高温作動ヒートポンプは基本的に気固反応系で、反応圧力を操作することによりバッチ操作で駆動が行われ、蓄熱が可能な点の特徴としている。一方、反応速度に制約がある場合が多く、装置体積あたりの熱交換特性は一般的に低く、また動作係数(COP)も低い点が課題として指摘できる。そのため広く実用化に至っていないのが現状である。

本研究では、固体電解質を隔壁とし、作動媒体に電気化学反応により濃度差を与えて作動する電気化学ヒートポンプ

\*1 芝浦工業大学工学部機械機能工学科・教授  
(〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)  
e-mail: k-tanaka@sic.shibaura-it.ac.jp

\*\*2 産業技術総合研究所  
(原稿受付：2008年12月11日)

ンプに注目した。具体的には、アルカリ金属熱電変換 (AMTEC) と呼ばれる熱再生型濃度差電池の逆サイクルである。ここで AMTEC 発電ならびに発電セル構造に関しては、著者らを含めて研究例が既に多く報告されている<sup>(4-6)</sup>。また、AMTEC 発電の電極部の解析方法に関する報告例がある<sup>(7-8)</sup>。一方、AMTEC 発電の逆サイクルに注目した報告例は恩田ら<sup>(9)</sup>だけである。恩田らは、熱力学的なサイクル効率の検討を AMTEC 逆サイクルであるヒートポンプサイクルに適用して報告している。しかしその検討方法にはこの種の電気化学ヒートポンプの性能を制約する電極性能が含まれていない。

以下、本報告では電気化学式高温ヒートポンプの可能性の評価を目的とし、基礎的性能を概算した結果に関して報告する。特に、電極性能を含めたヒートポンプ性能評価は従来報告されていないものである。

2. 作動原理と特徴

本研究の電気化学ヒートポンプは、広義の意味での吸・発熱反応を利用する方法に属する。通常のケミカルヒートポンプのように可逆的化学反应の吸・発熱反応を直接利用する方式ではなく、固体電解質により作動媒体に濃度差を生じさせ、作動媒体の気液相変化の潜熱を利用する方式である。

図2に従来研究の電気化学ヒートポンプ、本研究で提案する濃度差利用の電気化学ヒートポンプ、通常の機械圧縮式ヒートポンプの三種類の原理図を示した。従来研究の電気化学ヒートポンプは、バッチ式と連続作動式が提案されている<sup>(10)</sup>。(a)に示した方式は連続作動式である。低温部において、自発的に進行しない化学反应を電極反応により進行させて吸熱し、高温部において発熱反応を生じさせる。例えば通常の燃料電池とその逆サイクルである電気分解過程を組み合わせれば、原理的にこの種類のヒートポンプが構成できる。しかし燃料電池と電気分解は発電と物質製造を目的としており、例えば作動媒体を水とした際に

は電気的工作であるギブス自由エネルギー変化量の割合が大きく、熱利用の観点から高性能を示すことはできない。

この方式で具体的に研究された電気化学反応系としては、水溶液中の Fe, Ag, Cu などの金属イオン酸化還元反応系<sup>(11)</sup>がある。しかし水溶液中の金属イオン反応系、例えば  $Fe(CN)_6^{4-} / Fe(CN)_6^{3-}$  系の実験結果では、熱移動量は電極反応に伴うジュール発熱と同程度の熱量に限定される結果を示している<sup>(12)</sup>。また作動温度範囲は水溶液を利用するため限定される。従来提案されている電気化学ヒートポンプは、性能が極端に低く、またその作動温度域が限られていることより、実用化には問題の多い方式といえる。

本研究で注目した濃度差利用方式を(b)に示す。図中に示したイオン伝導体である固体電解質の両端に外部電源から電位差を与えることにより、作動媒体は電気化学的に圧縮され、電池内に大きな圧力差が生じる。すなわち固体電解質は作動媒体のイオン移動ポンプの役目をする。このポンプ効果により蒸発器で生じる低圧蒸気を圧縮させ、固体電解質の右側空間に移動させて高圧として作動媒体を液相とすることができる。作動媒体の気相から液相となる相変化過程の潜熱が高温側から外部に加熱熱量として放出され、ヒートポンプとして作動する。

この方式の第一の特徴は、固体電解質を隔壁とすることにより作動媒体はその全量がイオン化を伴う電気化学反応を行う点である。通常の化学反応槽は反応率の低いことが多く、原理的には高い性能が十分発揮されない場合が多い。その欠点のない方式といえる。

第二の特徴は、電極部を含む固体電解質ポンプ部が高温側に位置し、電気抵抗損失などの損失発熱項は高温側の加熱量となる点である。図2(a)の方式では、固体電解質部は低温側に位置する必要がある、その損失項は低温側に与えられる。固体電解質・電極部が高温側にある点はヒートポンプ作動において大きな利点といえる。

第三の特徴は、作動媒体の気液相変化を利用するため伝熱面積あたりの熱移動量が大きい点である。通常の化学反応方式では、反応熱は大きい場合でも反応速度は大きくな

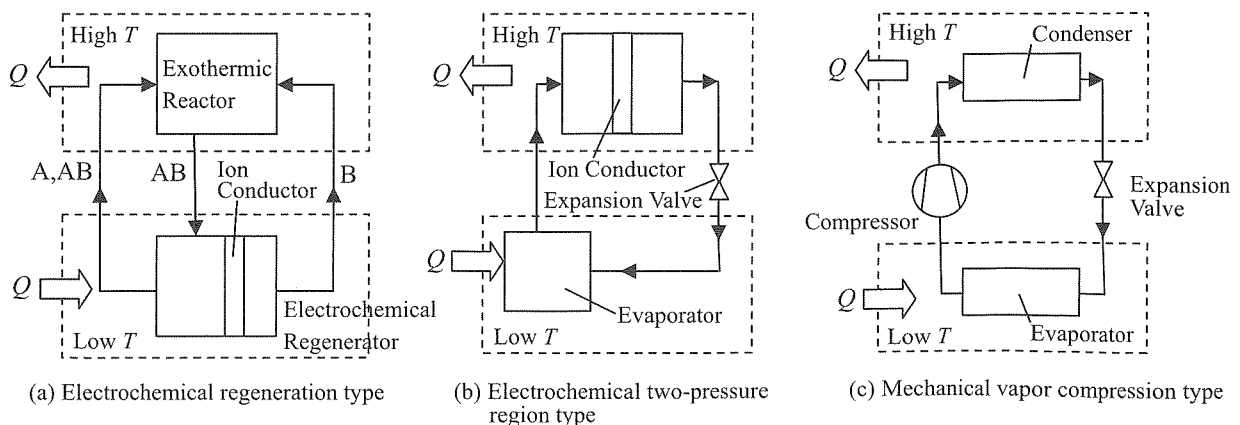


Fig. 2 Types of electrochemical and mechanical regeneration heat pump systems

い場合がある。気液相変化を利用する点では、(a)方式は(c)に示した機械圧縮式と同様の高い熱交換性能が期待できる。特に、本研究の作動媒体はNa使用を考えている。液体金属であるNaの熱伝導率は、例えば水の約100倍であり、熱交換部の熱抵抗は低く抑えることが可能な方式であるといえる。

### 3. セル構造と性能解析方法

ヒートポンプ装置のシステム概要を図3に示す。このヒートポンプシステムは、先に述べたようにアルカリ金属熱電変換(AMTEC)と呼ばれる発電方式の逆サイクルに相当する。ヒートポンプの性能解析方法に関しては、基本的にAMTEC発電装置とほぼ同様の解析方法が適用可能である。しかし、ヒートポンプ作動時には電極内のNa移動方向が逆となり、また電極の作動圧力条件が異なる。以下、ヒートポンプの解析方法に関して、主に発電時と異なる部分の解析方法に関して述べる。

図3において作動媒体であるNaは密閉容器内を時計回りに循環する。 $\beta$ ”アルミナ固体電解質(図中のBASE)は、図の上半分の高温側領域に位置する。Na移動と装置内の圧力に関して述べれば、低温側の外部熱源より熱が入力し、蒸発器では温度 $T_{ev}$ 、蒸気圧力 $p_{ev}$ のNaが蒸発する。蒸発したNa蒸気は固体電解質左側のアノード側電極に移動し、多孔電極内を通過して固体電解質界面に到達する。

ヒートポンプとして作動時、アノード側電極は低圧蒸気側に位置するため、電極内の圧力損失が大きく影響する可能性がある。電荷移動律速のButler-Volmer式に、ヒートポンプ作動時のアノード側電極に関する反応界面の濃度(圧力)項を加えて導いた次式を過電圧 $\eta^a$ の計算に用いた。

$$\eta^a = \frac{2R_0T_b}{F} \ln \left[ \frac{(i/i_0) + \left( (i/i_0)^2 + 4(-k_f i + p^a)/p^a \right)^{0.5}}{2(-k_f i + p^a)/p^a} \right] \quad (1)$$

ここで $R_0$ は一般ガス定数、 $T_b$ は固体電解質部温度、 $F$ はFaraday定数である。 $i$ は電流密度、 $i_0$ は交換電流密度、 $p^a$ はアノード側電極沖合濃度に相当する濃度で、ここでは電極外面における圧力とした。

係数 $k_f$ は圧力損失に関する係数で、相変化に伴う圧力損失項 $\Delta p_{pc}$ 、多孔電極内のNa流れに伴う圧力損失項 $\Delta p_{pe}$ により次式で表される。

$$k_f = \frac{\Delta p_{pc} + \Delta p_{pe}}{i} = \frac{(2\pi MR_0 T_b)^{0.5} + 0.75G(MR_0 T_b / 2\pi)^{0.5}}{F} \quad (2)$$

ここで $M$ はモル比質量、 $G$ はNa流れに伴う圧力損失の係数である。

式(1)における交換電流密度 $i_0$ に関しては、次式に示す係数 $B$ を用いて整理する方法がAMTEC発電装置に関して提案され、係数 $B$ は比較的広い温度と圧力範囲で一定値となる結果が報告されている<sup>(6)</sup>。ヒートポンプ作動条件

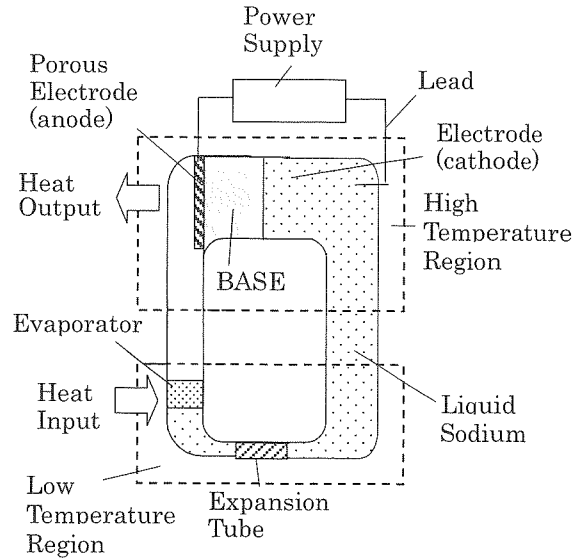


Fig. 3 Operation of electrochemical heat pump

への適合性の検討は今後の課題であるが、本計算では次式の係数 $B$ を用いて交換電流密度を求めた。

$$i_0 = B(p^a p_b / T_b)^{0.5} \quad (3)$$

ここで $p_b$ は $T_b$ に対応するNa飽和蒸気圧力である。

ヒートポンプ作動時に必要となる外部電源の電位 $E_0$ は次式により求められる。

$$E_0 = E_{oc} + \eta^a + \eta^c + iR_t \quad (4)$$

ここで、 $E_{oc}$ は物質移動のない( $i=0$ )のときのNa圧力差に相当する電位、 $\eta^a$ と $\eta^c$ は過電圧で、上添え字 $a$ と $c$ がアノード側とカソード側を示している。ヒートポンプの場合、AMTEC発電と異なりカソード側が液相Naの場合、 $\eta^c$ は0と近似が可能である。 $R_t$ は分極電位を除いた外部電源から電極部までの間の総内部抵抗である。

Na圧力差に相当する圧縮過程に相当する電圧 $E_{oc}$ は、AMTEC発電と同様に固体電解質内の变化を等温過程と仮定した。 $E_{oc}$ はアノード側圧力 $p^a$ とカソード側圧力 $p^c$ により次式で求めることができる。

$$E_{oc} = \frac{R_0 T_b}{F} \ln \left( \frac{p^c}{p^a} \right) \quad (5)$$

以上の式(1)~(3)と式(5)を用いることにより、電流密度 $i$ に対応する入力電圧 $E_0$ を式(4)から求めることができる。また入力電力を $P_i$ とすると次式で入力電力が表される。

$$P_i = iE_{oc} + i\eta^c + i^2 R_t \quad (6)$$

ヒートポンプ作動時に高温側で発生する熱量は、入力電力 $P_i$ にNa潜熱量 $Q_l$ を加えた熱量と考えられる。これらの熱量から、顕熱量 $Q_s$ 、高・低温間の熱伝導・放射伝熱による熱損失量 $Q_{cond+r}$ を差し引いた熱量が実質的な高温側熱出力となる。したがって、ヒートポンプの動作係数COP

は次式で与えられる。

$$COP = \frac{P_i + Q_i - Q_s - Q_{cond+r}}{P_i} \quad (7)$$

ヒートポンプ動作係数を計算するためには熱伝導・放射伝熱による熱損失量を求める必要があり、そのためには具体的なシステム形状の情報が必要である。また作動媒体Naの移動に伴う電極部の圧力損失項、交換電流密度の係数、また電極各部の電圧降下項を考慮するため具体的な数値が必要となる。これらの数値に関して、ここではAMTEC発電実験と設計<sup>(4)</sup>から求められた数値を基準値とし、また本計算では各数値をパラメータとして変化させた際の性能計算を行うことで評価を行なった。今回の計算で用いた数値の基準値は、 $R_i$  = 固体電解質イオン伝導による抵抗値 +  $0.3\Omega\text{cm}^2$ 、 $Q_{cond+r} / (T_b - T_{ev}) = 5\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 、アノード電極内の圧力損失係数  $G = 25$ 、交換電流密度に関する係数  $B = 1000 \text{AK}^{0.5}\text{m}^{-2}\text{Pa}^{-1}$  である。

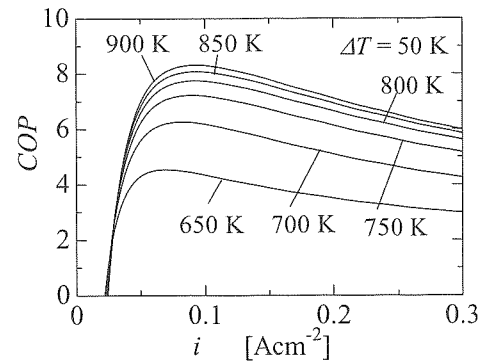
ここで以下の計算結果において、高温側と低温側の温度差  $\Delta T$  は固体電解質部の温度  $T_b$  と低温側Na液温度  $T_{ev}$  の差を示している。外部からの熱入力部は通常のヒートポンプの蒸発器と同様の熱交換構造が可能であり、内外部の間の温度差は大きくないといえる。

一方、高温側の熱出力に関して考えると、通常のヒートポンプ凝縮器とは異なり温度差が大きくなる可能性が指摘できる。すなわち、本方式の場合、電極を含む固体電解質部が発熱部となり、容器外部と伝熱的に直接接触していない構造である。ここで、高压側であるカソード電極側はNa液相であり、Na液は容器と接している。そのためカソード側からNa液相を通して外部に熱を出す構造は伝熱的に高性能を期待できる。しかし、具体的な構造を考えると、例えば管状の固体電解質を用いた場合、カソード電極は管内側となる問題を生じることになる。

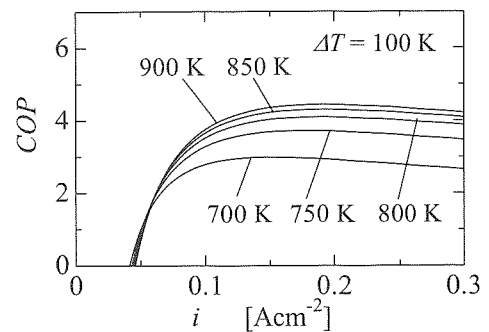
逆にアノード側の伝熱促進を考えると、Na低圧側は金属容器と電氣的絶縁が必要であり、容器と直接接触することができない。放射熱移動による固体電解質部と容器形状の間の熱交換を評価する解析が必要といえる。本方式のヒートポンプ装置において、電極部構造と外部との間の伝熱促進に関する検討は今後の大きな課題の一つといえる。

#### 4. 性能計算結果

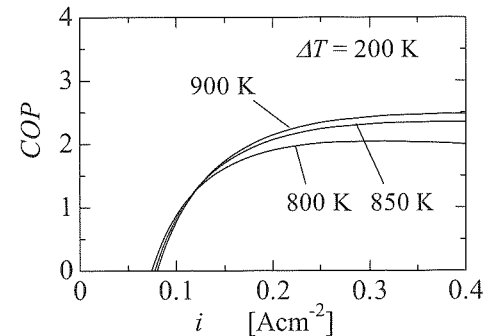
アノード電極面積あたりの電流密度  $i$  を変化させた際のヒートポンプ動作係数  $COP$  の計算結果を図4に示す。図中の温度は高温側電解質部の温度  $T_b$  で、(a)は昇温幅  $\Delta T = 50\text{K}$ 、(b)は $100\text{K}$ 、(c)は $200\text{K}$ の際の結果である。ここで  $\Delta T = T_b - T_{ev}$  である。計算結果より、 $COP$  は  $\Delta T = 50\text{K}$  の時には電流密度が  $0.1\text{Acm}^{-2}$  程度で最大値を示し、 $\Delta T$  が大きくなると最大値の得られる電流密度が大きくなる。AMTEC発電サイクルの場合、電流密度は  $0.5 \sim 1.0\text{Acm}^{-2}$  程度が作動条件である。ヒートポンプ作動の場



(a)  $\Delta T = 50 \text{ K}$



(b)  $\Delta T = 100 \text{ K}$



(c)  $\Delta T = 200 \text{ K}$

Fig. 4 Current density versus  $COP$  curves as a parameter of operating output temperatures

合、電極面積あたりの電流密度は小さく、そのため具体的なセル設計において単位容器体積に収める電極面積はより大きくする必要があると見える。前述のように、固体電解質と電極より構成される発熱部と容器外部の間の熱移動の熱抵抗値を小さくする点が課題であり、特にヒートポンプ設計の場合はこの条件を満たす構造設計がより重要となることが理解できる。

$COP$  の値に注目すると、作動温度が高くなると性能は高まるが、 $850\text{K}$  以上で増加幅は小さくなる傾向にある。温度差  $50\text{K}$  の時  $T_b = 700\text{K}$  で  $COP$  は  $6.3$ 、 $900\text{K}$  で  $8.3$ 、温度差  $100\text{K}$  の時  $700\text{K}$  で  $3.1$ 、 $900\text{K}$  で  $4.4$ 、温度差  $200\text{K}$  の時  $800\text{K}$  で  $2.1$  である。作動温度が高い領域は  $COP$  値の点から望ましいが、一方、電極材料の耐久性などの観点から制約を生じ

る. 今回の性能計算に用いた  $G=25$  の値はMo電極で900K程度までの温度に対応した値である. 例えば1000Kとなると  $G=80$  程度に劣化する結果が測定されている<sup>(7)</sup>.

低温側温度  $T_{ev}$  による制約を考える. 図4の各図において  $T_{ev}$  は600Kを下限としている. その理由は. 温度600Kの限界電流密度が約  $0.6 \text{ Acm}^{-2}$  のためであり, これ以下の温度では電極内圧力損失項による限界電流密度が制約し, 作動条件より外れるためである. 今回の計算に使用した  $G$  に関する基準値は25である. ここで, より小さい  $G$  の値の電極は, より低い温度で大きな限界電流密度となる. したがって, 600K以下を作動域とするヒートポンプには, より薄く粗な  $G$  値の小さい電極が適するといえる. しかし, そのような電極膜は電気抵抗の増加の可能性がある, 性能へ影響することが考えられる. 本方式のヒートポンプ低温側温度の下限値は, Naを作動媒体として利用した場合, 600K程度であるといえる.

図5は蒸発器の温度  $T_{ev}$  を変化させた際の計算結果で, 動作係数の最大値  $COP_{max}$  を実線で, 理想動作係数との比  $COP_{max}/COP_{carnot}$  を破線で示している. ここで  $COP_{max}$  は図4の各線の最大値に対応している. 図より温度  $T_{ev}$  が600~700Kの範囲で  $COP_{max}$  は増加傾向が大きいといえる. 理想動作係数との比  $COP_{max}/COP_{carnot}$  の値も, 600~700Kの温度範囲で性能は上昇し, 700K以上では変化が小さい.

700K以下の範囲で動作係数の増加傾向が大きい理由を式(7)の各項を比較して考察すると,  $Q_i/P_i$  の影響が大きい結果を得た. 例えば  $\Delta T=50\text{K}$  の時,  $Q_i/P_i$  は600Kの時に5.5, 700, 800Kの時に8.8, 9.9と変化する. 600~700Kでの変化が大きくその影響が性能に表れているといえる.

$COP_{max}/COP_{carnot}$  の値は昇温の温度幅  $\Delta T$  に関係なくほぼ0.5となる計算結果が得られた. 今回の電気化学ヒートポンプの性能は理想動作係数のほぼ半分の高い性能値が可能である結果が得られた.

図6と図7は装置に関するパラメータを変化させた際の性能への影響の結果である. 図6は, 電極面積あたりに換算した分極抵抗以外の総内部抵抗値  $R_i$  の性能に対する影響の計算結果である. ここで, 電解質部と電極の抵抗値に関して, 図6以外の計算で  $R_i$  は, BASEのイオン伝導に関する抵抗値とその他成分  $0.3 \Omega \text{ cm}^2$  の和と仮定している. BASE抵抗値は温度の関数であり, 0.5mm厚として650Kで  $0.13 \Omega \text{ cm}^2$ , 900Kで  $0.09 \Omega \text{ cm}^2$  である. その他成分の抵抗として見積もっている  $0.3 \Omega \text{ cm}^2$  と比較すると  $1/2 \sim 1/3$  がBASEの抵抗成分に相当する.

図6の計算結果より抵抗  $R_i$  の影響は  $T_b=700\text{K}$  ではほとんど表れないが, 800K, 900Kでは影響が大きいことが確認できる. この理由は, 高温域では電極面積あたりの作動電流密度が大きくなるため抵抗成分の影響が大きくなるためである. またBASE抵抗値が高温域で低下することが影響している. 現在の発電実験において  $R_i$  は  $0.4 \sim 0.5 \Omega \text{ cm}^2$  が得られている. 計算結果より, ヒートポンプ作動温度が700K程度以下であれば抵抗値の低減の必要性はないが,

より高温域での作動条件には  $R_i$  の新たな低減方策の検討が必要であるといえる.

図7は高温側から低温側への熱伝導・放射熱損失項の影響の計算結果である. 横軸  $Q_{cond+r}/\Delta T$  は総熱損失量を温度差で割った一般的な熱通過率と同様の係数を意味している. ここで総熱損失量とは, ヒートポンプ装置として容器内に高温側と低温側を設けた場合, その間の伝導・放射熱移動の合計値であり, 実際にはNa液戻り管, 容器壁, 電流リード線などを伝わる伝導熱移動, 電極面からの放射熱移動である. この係数はこれらの総熱損失量を電極面積あたりに換算した値である.

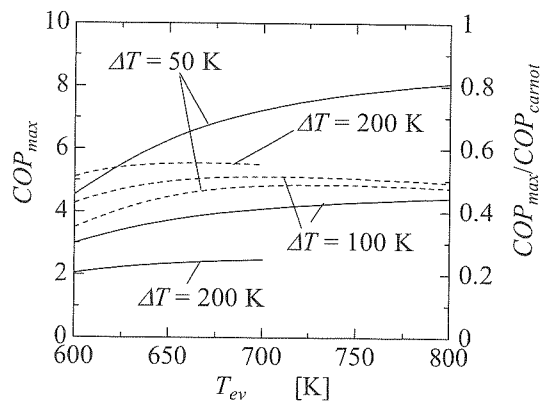


Fig. 5 Temperature dependence of  $COP_{max}$  and  $COP_{max}/COP_{carnot}$  for temperature difference of  $\Delta T = 50, 100$  and  $200 \text{ K}$

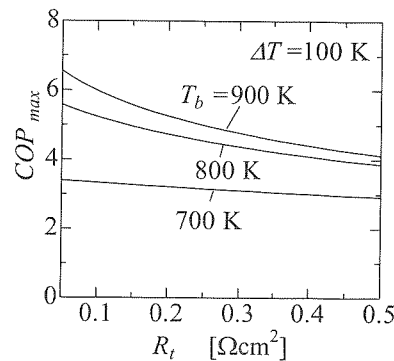


Fig. 6 Effect of total electrical and ionic resistance of electrodes and electrolyte

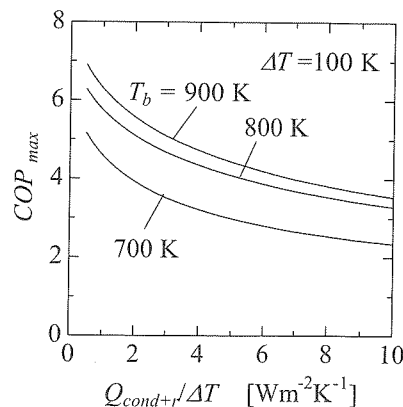


Fig. 7 Effect of thermal loss to maximum coefficient of performance

計算結果より  $Q_{cond+r}/\Delta T$  を  $5\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  程度以下に抑える  
と性能向上の効果が大きいことが理解できる。具体的な熱  
伝導と放射熱損失はセル構造に依存するが、横軸係数は先  
に述べたように電極面積あたりの熱損失係数である。同じ  
容器形状であれば電極面積をより大きく収納することが  
熱損失係数の低減につながる。

概算であるが、直径3mmの固体電解質管を利用するセル  
構造が可能となれば、熱伝導と放射による熱損失係数は  
 $1\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  程度以下の可能性がある。またこのようなセル構  
造の作製は可能である。一方、体積あたりの電極面積を大  
きくしたセル構造の課題は、電極部での物質移動による圧  
力損失を大きくしない構造の検討、内部電極と容器外部を  
電氣的絶縁で結ぶ電流リード構造の検討にある。電流リ  
ード・電流取り出し構造に関しては、作動媒体が導電性Naで  
あるため電氣的絶縁構造の検討が課題である。

## 5. 結言

熱再生型濃度差電池、具体的にはAMTECと呼ばれる熱  
再生型電池に逆に外部から電力を供給して作動する高温  
作動ヒートポンプの基本性能を検討した。高温側温度600  
~900Kの範囲で予想される性能を計算した結果、作動温  
度域が高くなるとCOPは高くなる傾向にあり、性能面か  
らは800~900Kの熱出力に適しているといえる。具体的な  
COPの値は、700~900Kの温度出力で昇温度差  $\Delta T=50\text{K}$   
の際に6~8、 $\Delta T=100\text{K}$ の際に3~4、 $\Delta T=200\text{K}$ の際に2~  
2.5となった。理想的な逆カルノーサイクルのほぼ半分の  
性能であり、本方式が高性能なヒートポンプ方式となる可  
能性が示された。

今回の解析では、具体的なシステム構造の提案には至っ  
ていない。特に、固体電解質・電極部の形状と容器形状に  
伴う高温側熱出力のための熱移動促進は今後の検討課題  
である。また今回の解析計算に用いた電極部のパラメータ  
は、AMTEC発電により得られた係数であり、ヒートポン  
プ作動条件に合わせた実験を今後実施する必要がある。

計算より得られた低温側温度の作動下限は約600Kとな  
った。太陽熱集熱器との組み合わせを考慮した場合、比較  
的集光比の低い装置の集熱温度より、作動温度範囲は高い  
といえる。したがって、今後の検討は、400~600K程度  
の中温度域で作動するヒートポンプとの組み合わせ等の検  
討が必要といえる。

以上の解析で得られた結果より、本研究の電気化学ヒ  
ートポンプは基本的に高性能を期待できる可能性がある。可  
動部のない完全密閉型の新たな方式の小型ヒートパイ  
プ形状のヒートポンプが提案できる。今後は、上記の要素技  
術の開発とともに、小型装置によるヒートポンプ作動の実  
証実験へと進展させる期待性のある方式といえる。

## 参考文献

(1) 蓄熱・増熱・熱輸送技術特別研究会編、蓄熱技術-理論と

- 応用、第II編(2001)、155-227、信山社サイテック。  
(2) 加藤之貴・劉醇一、ケミカルヒートポンプハイブリッ  
ド型高温プロセスの可能性、太陽エネルギー、  
34-3(2008)、15-21。  
(3) 石山新太郎、水素貯蔵型高温化学ヒートポンプシステ  
ム、日本機械学会動力・エネルギー技術シンポジウム  
講演論文集(1996)、297-301。  
(4) K. Tanaka, Designing on Honeycomb Type AMTEC Cells,  
Proc. 4th Intersociety Energy Conversion Engineering  
Conf., (2006), paper No. 4109.  
(5) K. Tanaka, Conceptual Design of Solar Thermal Receiver  
using Alkali Metal Thermal to Electric Converter, Proc.  
RE2008(2008), P-ST-004.  
(6) M. S. El-Genk, J. P. Tournier, AMTEC/TE Static Converters  
for High Energy Utilization, Small Nuclear Power Plants,  
Energy Conversion and Management, 45 (2004), 511-535.  
(7) 田中耕太郎・中桐俊男・藤井孝博・本多武夫、低温作動  
型AMTECセルのカソード側Mo電極内物質移動の特性  
評価、化工論, 30-1(2004)、73。  
(8) M. A. Ryan, R. M. Williams, L. Lara, R. H. Cortez,  
M. L. Homer, V. B. Shields, J. Miller, and K. S. Manatt, The  
Sodium Exposure Test Cell to Determine Operating  
Parameters for AMTEC Electrochemical Cells, Proc. 33rd  
Intersociety Energy Conversion Engineering Conf., (1998),  
paper No. 98-335.  
(9) 恩田和夫・増田俊久・永田進・野崎健・根岸明・田中耕太  
郎、 $\beta''$  アルミナ固体電解質を用いた熱電発電とヒート  
ポンプのサイクル解析、機論B, 55-515 (1989),  
2048-2053。  
(10) G. Kreysa and G. F. Darbyshire, Theoretical Consideration  
of Electrochemical Heat Pump Systems, Electrochemica  
Acta, 35-8(1990), 1283-1289。  
(11) 石原顕光・元平直文・太田健一郎・神谷信行、新しいエ  
レクトロケミカルヒートポンプの理論、電気化学およ  
び工業物理化学, 67-5(1999), 450-457。  
(12) 中山和博・田中耕太郎、電気化学的反応による熱制御  
技術の研究、機械学会第45回学生員講演会講演前刷  
集(2006)、227-228。