

# AMTEC ヒートポンプにおける低圧側電極の性能解析

Analyses of low-pressure side electrode performance by the AMTEC Heat Pump

B06030 小熊 晃 B06045 木村 卓哉 (指導教員 田中 耕太郎)

## 1. 緒言

近年, 地球温暖化問題において削減対象である CO<sub>2</sub> の排出抑制技術が研究されている. 中でも排熱を利用する技術が注目されており, その技術の中の 하나가ヒートポンプである. ヒートポンプ(Heat Pump)は, 排熱を単に捨ててしまうのではなく, 暖房やその他の加熱源として使用することを目的とした装置であり, 排熱などの熱を有効な温度レベルまで高め, 利用できるようにしている.

ここで更なる高効率ヒートポンプを構築するために, 我々は AMTEC を応用したヒートポンプを提案する. ここで AMTEC とは, β”アルミナ固体電解質(BASE)の Na<sup>+</sup>イオン伝導性を利用した熱再生型濃淡電池の一種であり, 温度差に起因する Na 圧力差を電気エネルギーに変換する装置である. これを応用して, 電気エネルギーを入力とし, Na 圧力差を温度差に変換する装置が今回研究を行う逆 AMTEC ヒートポンプである. この装置は, 比較的小さい装置でも高効率が得られ, メンテナンスフリーかつ長寿命の超高温型ヒートポンプが実現可能と言える.

本研究では電極の評価に加え, その結果を基に性能の評価をし, 装置の検討を行うことを目的とする.

## 2. 逆 AMTEC ヒートポンプの原理

AMTEC (Alkali Metal Thermal to Electric Converter: アルカリ金属熱電変換)とは β”アルミナ固体電解質(β” Alumina Solid Electrolyte, BASE)の Na<sup>+</sup>イオン伝導性を利用した熱再生型濃淡電池の一種である. 今回のヒートポンプは, この AMTEC と呼ばれる直接熱電変換方式の逆サイクルを利用したものである. Fig.1 にそのヒートポンプの作動原理を示す. Na 蒸発部が Fig.1 の下部の低温・低圧側に位置し, 外部熱源からの熱入力により蒸発した Na は BASE 左側のアノード側電極に移動し, 多孔電極内を通過して BASE 部に到達する. ここで注目する点は, アノード

側が低温側の飽和蒸気圧に相当する低圧である点が異なることである.

外部から BASE の両端電極に電位が与えられ, BASE は Na<sup>+</sup>イオン移動のポンプとして作動する. したがって, BASE の右側空間は高圧側となり, Na は液相となる. この BASE 両端の気相から液相となる過程での潜熱熱量が高温側に生じる. その熱が高温加熱側に放出され, ヒートポンプとなる. カソード側の液相 Na は下部の低温側に移動し, 膨張弁に相当する膨張管を通して減圧され, 再び蒸発部へと移動してサイクルが形成されている.<sup>(1)</sup>

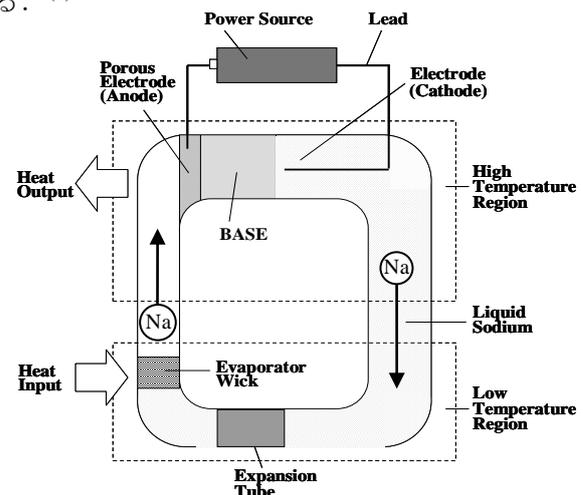


Fig.1 Reverse AMTEC Heat Pump

## 3. 実験装置および実験方法

本実験では AMTEC カソード側電極評価方法を用いる. これは Na 低圧蒸気雰囲気において電極部に外部から電圧を付加する方法で Fig.2 は測定装置の電極部の概略である. この装置は SETC(Sodium Exposure Test Cell)と呼ばれ Na 循環部及び高温・高圧側と低温・低圧側を分離する気密シール部の省略が可能であり, 長時間の電極部性能評価が可能な装置である.

評価対象の電極は, スパッタ法により, BASE に蒸着させた Mo を用いる. 電極は Fig.2 の左から Electrode 1,2,3,4 とし, 厚さはそれぞれ 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 $\mu$ m である. また, Electrode 1,2 間, Electrode 2,3 間が 5mm,

Electrode 3,4 間が 10mm となっている。電極面積は、すべて約 3cm<sup>2</sup>である。

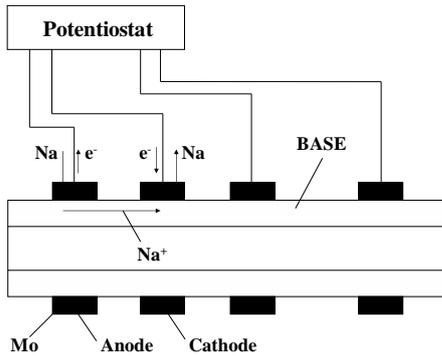


Fig.2 Electrode of SETC

今回は LCR メーターを用いた交流インピーダンス測定を行い、測定値からコイルコイルプロットを作る。装置の等価回路図を仮定し、その理論式を基に作ったグラフとのカーブフィッティングを行い、各要素の値を解析する。今回使用した電極は多孔質であるので、電極表面における不均一性から電流線分布が生じるため並列回路がいくつか連なった回路となる。並列回路にコンデンサを用いた等価回路 1 を Fig.3,に CPE を用いた等価回路を Fig.4 に示す。

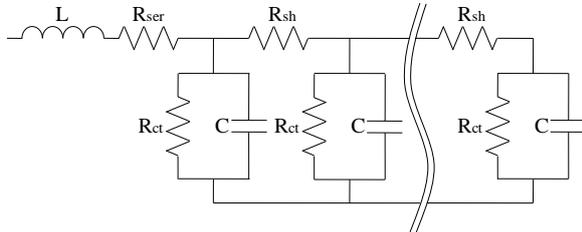


Fig.3 Equivalent circuit 1

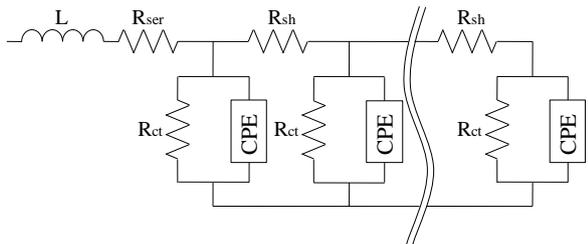


Fig.4 Equivalent circuit 2

ここで、 $R_{ser}$ :電解質抵抗、 $R_{sh}$ :電極シート抵抗、 $R_{ct}$ :電荷移動抵抗、 $L$ :インダクタンス、 $C$ :電気二重層容量、 $CPE$ :Constant Phase Element、 $p$ :CPE 指数、 $T$ :CPE 定数、 $N$ :並列回路の個数を表す。(2)

#### 4. 実験条件

今回は、低温側 Na プール部を 523K、高温側電極部を 873K に固定し、測定周波数範囲を 100mHz~20kHz で測定する。測定箇所は Electrode 1, Electrode 2 であり、単極での測

定を行う。

#### 5. 実験結果及び考察

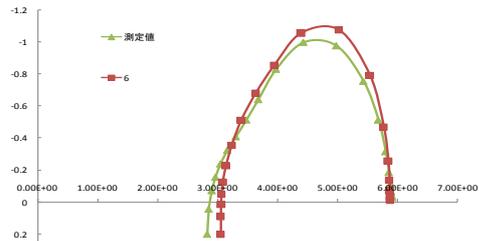


Fig.5 Curve fitting of Equivalent circuit 1

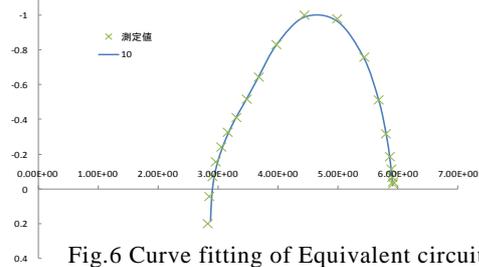


Fig.6 Curve fitting of Equivalent circuit 2

Table.1 Result of curve fitting

	$R_{ser}[\Omega]$	$R_{sh}[\Omega]$	$R_{ct}[\Omega]$	$p$	$T$	$L[\mu H]$	$N$
Electrode 1	2.86	0.258	23.7	0.87	552	2	10
Electrode 2	2.75	0.17	57	0.85	380	2.6	16

等価回路 1,2 でのコイルコイルプロットとカーブフィッティングを行った結果を Fig.5,6 に、等価回路 2 からカーブフィッティングによって得られた値を Table.1 に示す。

コンデンサを含む等価回路 1 でカーブフィッティングを行ったが、うまくフィッティングすることができなかった。Fig.4 から、低周波数側での接線の傾きが実験値と計算値では異なっていることがわかる。等価回路 1 ではこの低周波数側の接線の傾きは一定であるので、この等価回路は間違っているということがわかる。そこでコンデンサの代わりに CPE を用いたのが等価回路 2 である。Fig.5 のように CPE を用いることによって低周波数側の接線の傾きを変化させることができ、実験値にフィッティングすることができた。

Table.1 の結果から電極が厚くなるとシート抵抗が小さくなり、 $N$ が多くなることがわかる。多孔質電極が厚くなることによって電極内部が複雑になり  $N$ が多くなると考えられる。また、スパッタ時間が長くなることから電極の隙間が埋められることでシート抵抗が小さくなったと考えられる。

今回用いた等価回路 2 によって、カーブフィッティングを行うことにより電極の厚さや、温度変化による電極の変化に対する評価をすることができると思える。

#### 参考文献

- 1) 恩田和夫, 田中耕太郎, 他 ;  $\beta$ ”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, 日本機械学会論文集(B編) 55巻 515号, 1989, pp2048-pp2049.
- 2) 板垣昌幸 ; 電気化学インピーダンス法, 丸善株式会社, 2008