ナトリウム - 硫黄電池用可変コンダクタンスヒートパイプの開発

Development of Variable-Conductance Heat Pipe for Na-S Battery

渡辺健次* 木村貴史*2 川畑賢也*3 Kenji Watanabe Atsushi Kimura 柳田智基*2 山内 守 *2 Tomoki Yanagida Mamoru Yamauchi

Kenya Kawabata

概 要 近年,電力コストを低減するために負荷変動平準化による電力の効率的な利用を推進して いる。この負荷平準化の手段の一つとしてナトリウム - 硫黄 (NAS) 電池があるが, 電池を効率的 にかつ長期にわたり安定して使用するには,高温領域における適切な温度調整機能を必要とする。今 回開発した高温適用型の可変コンダクタンスヒートパイプ(VCHP)はこの要求を満たすものであり, 一般のヒートパイプでは成し得ない「制御が可能」で,かつ外部動力やセンサー,可動部も必要とし ない放熱構造体である。このVCHPを取り付けることにより, NAS電池に対する充分な温度調節効 果をもたらし、更に充放電効率の向上に寄与することができる。本論文においては、開発された高温 適用型VCHPの概要について述べる。

1. はじめに

近年,電力コストを低減するための手段として,負荷変動平 準化による電力の効率的な利用を推進している。ナトリウム -硫黄(NAS)電池はこの負荷平準化のひとつの有力な方法であ り,夜間等の余剰電力を貯蔵し高負荷となる昼間に使用するこ とにより,平準化を実現することができる。

このNAS電池は,高効率で反応させるために300 以上で充 放電を行うが,抵抗損失等の発熱により高温になりすぎると熱 劣化が激しく,電池寿命を縮めかねない。このため電池を効率 的にかつ長期にわたり安定して使用するには,温度制御や断熱 といった適切な温度調整機能が必要不可欠となる。しかしなが ら,通常のヒータ(補助ヒータ含む)のON - OFFによる温 度調節や容器(筐体)からの放熱だけでは,充分な温度調節を 望むことは難しい。

こうした電池の特性から,温度調節が可能な放熱機構が必要 となる。筆者らはこの放熱機構の開発に着手,その結果,電池 に対する充分な温度調節効果を持ち充放電効率の向上に寄与す る NAS 電池用の高温適用型可変コンダクタンスヒートパイプ (VCHP)を開発した。本論文においては,開発された高温適 用型VCHPの概要について述べる。

2. VCHPの設計

図1にNAS電池へのVCHP取付けイメージを示す。

2.1 VCHPの構造及び作動

2.1.1 ヒートパイプとVCHP

図2にヒートパイプ(以下HP)とVCHPのイメージ図を示 す。一般的なHPは,密閉型金属容器の内部を真空にし,少量 の作動流体を封入したものである。蒸発部と凝縮部のわずかな 温度差(温度勾配)で作動流体が蒸発と凝縮を繰り返し、この 一連の動作により作動流体の潜熱にて熱輸送を行う。

HPは蒸発部,断熱部,凝縮部にて構成され,容器の内部に は蒸発した作動流体が還流し易いよう,ウィックやメッシュが 入れられている。HPの熱性能である最大熱輸送量は,ウィッ クや作動流体の量等により決定されるが,その作動温度につい ては外部の熱源や放熱部(凝縮部)の温度によって受動的に決 定される。しかしながら,実際にHPをNAS電池の熱伝導デバ



NAS電池へのVCHP取付イメージ 図1 Conceptual image of VCHP installed on NAS battery

* 東京電力株式会社

*2 電力事業部機器配電部

^{*3} 環境・エネルギー研究所



図2 一般的なヒートパイプとVCHP Schematics of ordinary heat pipe and VCHP

イスとして使用する場合には,HPの受熱部(蒸発部)温度を 一定に保持したり,ある基準温度を設定してその温度に対し ON - OFF制御する必要が生じる。

このような理由から,NAS電池の温度制御用熱伝導デバイ スとして,一般のHPでは成し得ない「制御が可能」で,かつ 外部動力やセンサー,可動部も必要としない構造体である VCHPの開発が推進された。

図3に一般HPとVCHPの放熱特性の違いを示す。一般のHP は温度に対する放熱量の傾きが一定であるのに対し,VCHPは ある任意の温度(放熱開始温度)から急激に放熱量が増大し放 熱限界に至る。放熱限界を越えると一般のHPと同様の傾きを たどる。可変コンダクタンスという名称はこの特性に由来して おり,放熱開始点と放熱限界点間の勾配(以下,放熱勾配)は VCHPの重要な特性値である。

2.1.2 VCHPの作動イメージ

図4にVCHPの作動イメージを示す。VCHPはHPの構造体 に不凝縮性ガスを注入したものであり,このガスを溜めるタン クを有する。その作動は,(1)~(2)の順序のように説明され る。

(1) 蒸発部が外部から加熱されて作動流体が蒸発すると温度 の低い凝縮部に向かって蒸気の流れが生じる。

(2)内包されていた不凝縮性ガスが凝縮部端(断熱部側)へ 押し集められ,任意の作動温度にて飽和蒸気圧でバランス



図3 HPとVCHPの放熱特性 Heat radiation characteristics of HP and VCHP

する。

上記(2)における作動流体と不凝縮ガスが成す界面(実際 には拡散層)が放熱量の大小及び放熱開始温度の制御に大きく 寄与する。この界面が凝縮部より蒸発部側にある場合, HPと しての作動状態の特徴である凝縮部への内部伝熱は行われず, その放熱量は容器の伝熱量のみであり,最大放熱量に比較し極 めて微少である。[図4(a)]作動温度が徐々に上昇するに従 い,急激に作動流体の飽和蒸気圧が上昇する。これに対し,不 凝縮性ガスの温度上昇はわずかであり圧力と容積の関係が一定 であるため,界面は作動流体に押し出されるように「作動流体 が混じった放熱に有効な凝縮部」をガス溜め側に移動させる。 [図4(b)]この時点では,作動流体の領域が小さいため,そ の内部伝熱量はまだ少ない。更に温度を上昇させると放熱に有 効な凝縮部が増大し,放熱量も増す。最大放熱量となる時点で は 不凝縮性ガスは完全にガス溜め部に収納される状態となる。 [図4(c)]このとき受熱部(蒸発部)での発熱体からの最大入 熱量に対し,最大放熱量が大きければ,充分な放熱が可能であ り受熱部 (蒸発部)の温度がそれ以上に上昇することはない。

上記から, 伝熱するに充分な適量の作動流体と最適量の不凝 縮性ガスを容器内に封入し,放熱するに充分な凝縮部(放熱部) を持たせることにより, VCHPは上下限の所定温度範囲にて適 切な放熱をすることが可能となる。

NAS 電池への適用を考えた場合, VCHPの下限温度を電池の 最低作動温度(放熱開始点)に,上限温度を最高作動温度(放 熱限界点)に対応させて設計を行えば,外部動力やセンサー, 可動部を必要とせずに,高効率でかつ長期にわたり電池を適正 な温度範囲内に自律的に維持する温度調節機構が可能となる。 2.2 VCHPの設計

2.2.1 設計モデル

図5に設計モデルを示す。前述の説明のとおり,作動過程は 密閉容器内での温度変化による各物質の体積 - 圧力変化とな

$$\frac{V_{\rm g}}{V_{\rm c}} = \frac{P_1}{P_2 - P_1} \cdot \frac{T_0}{T_{\rm c}}$$
(1)

$$n_0 = \frac{P_1 \cdot P_2}{P_2 - P_1} \cdot \frac{V_c}{R \cdot T_0}$$
(2)

り,基本的にボイルシャルルの法則に従うこととなる。

- $V_{
 m g}$:ガス溜め部容積
- V_c:凝縮部容積

- 20 -





- n_c:凝縮部気体モル数
- n₀:混合気体モル数

上記に *T*₁ や *T*₂, *V*_c, *P*₁ や *P*₂ といった設定条件を代入し,ガ ス溜め部の容積,作動流体封入量や初期ガス封入量を決定する。 特に容積比 *V*_g/*V*_c は温度制御性に寄与する部分であり,*V*_g>*V*_c となるほど制御性は向上する。

表1にVCHPの仕様を示す。

2.2.2 材料・構造

図6に今回開発したVCHPの概要を示す。

(1)作動流体

高温制御用 VCHP がその他の HP と大きく異なる点は, 300 を越えるその作動温度と飽和時の最高温度にある。この とき VCHP の作動に関し,作動流体の使用温度範囲が大きく寄 与する。図7に作動流体の使用温度範囲を示す。実使用にあた っては,作動温度範囲が適切であり,そのメリット数(最大熱 流束に影響する流体の特性因子)に関しても著しく損なうもの であってはならない。これらから,作動流体にはダウサームA 相当品(ビフェニル-ジフェニルエーテル混合物)を採用し

表1 VCHP仕様 Specifications of VCHP

項目	仕様	
飽和(最大) 熱輸送量	1000 W (以下の最高温度時において)	
温度制御	蒸発部平均温度	285 + 3 - 1
	温度範囲	温度上昇∆t = 28 以下
	その他	ドライアウト現象が生じないこと
構造	蒸発部長さ	約 1400 mm
	本体高さ	約 900 mm
	その他	電池との接触は均熱板を用いる





図6 VCHP外観 Appearance of VCHP



図7 作動流体の温度範囲 Temperature ranges of working fluids

た。

(2) 封入ガス

封入する不凝縮性ガスとしては,窒素,ヘリウムやキセノン 等も考えられるが,ガスの安定性や低熱伝導性,価格からアル ゴンを選定した。また,その量についてはモデルにより決定し, 封入圧力を管理した。

(3)容器

作動流体と容器の組合せが不適合であると,容器内で反応ガ スが発生することにより制御性が悪くなり,次第に最大熱輸送 量などの性能が落ちる。使用する温度帯からも一般的にHPに 用いられている銅は使用できず,環境劣化等も考慮し,ステン レスを使用することとした。

また,モデルによりガス溜め部の容積と管径を決定し, VCHP全体の形状決定を行った。容器は圧力容器として設計し, 耐圧計算を用い,壁厚を決定した。

更に,作動流体の突沸等によるガス溜め部への流入を抑制す るとともに,仮にガス溜め部内に入った場合においても作動流 体が還流できるよう,細管にてガス溜め部と凝縮部を連結する 構造とした。図8に作動流体の逆流防止構造を示す。

(4) ウィック

基本的に作動流体の還流は重力にて行うよう設計されている が,凝縮部で放熱後還流しやすいよう,また蒸発部の距離が長 いことを配慮して部分的な過度の入熱に対しても均熱化ができ るよう,ウィックを設けた。

(5) 放熱フィン

必要放熱量と自然対流による空冷を考慮し,更にフィンの受 放熱の温度差が大きくできることから,適正な放熱面積をもつ コンパクトなフィン形状とした。また,ネジ締結にてVCHPに 取り付ける別体構造とした。

(6) 各部品の界面

放熱フィンとVCHP,及びVCHPと均熱板を組み合わせる界 面には,伝熱コンパウンドを用いた。界面の接続方法にはこの 他溶接等が考えられるが,運搬時や点検時の脱着を考慮し,こ の方法を選定した。このコンパウンドは主剤がオイルであるた



図8 作動流体逆流防止構造 Prevention mechanism for backward flowing of working fluid



Block diagram of test equipment

め,高温下における伝熱性能の維持能力及び可塑あるいは固着 化が問題となったが,性能を満足するコンパウンドを選定する ことができた。

3. VCHPの性能検証

3.1 検証装置

図9に検証装置の概要を示す。これはVCHPを電池ユニット に搭載した状態を模擬したものであり,装置外部への放熱を考 慮した設計となっている。また,最大熱輸送量1000 Wを確保 できるよう,VCHPへの入熱量を設定した。測定にあたっては, 蒸発部,断熱部,凝縮部の各部位において数点ずつ温度測定を 行い,また,ガス溜め部での圧力測定も実施した。

3.2 検証結果

3.2.1 各部の温度及び勾配

図10に各部の温度分布を示す。放熱開始温度285 に達し た入熱量90W時点では,凝縮部(放熱部)の温度は,ほぼ雰 囲気温度と同じ20 程度である。入熱量が増加するに従い凝 縮部の温度が上昇し,放熱量1000Wでは凝縮部上端で約 120 ,下端で約190 に達した。このことから,VCHPとし ての作動が正常に行われたことが分かる。また,入熱量が大き くなるに従い,凝縮部の温度勾配が高くなったが,これは凝縮 部の温度が蒸発部側から順次上昇していることを示しており, 安定した特性を有していることを示している。

3.2.2 放熱特性結果

入熱量と放熱量が等しいとして求めた放熱特性結果を図11 に示す。n=3で実施した検証であるが,放熱開始温度も3本 ともに仕様範囲内に入っている。また,放熱勾配も高く飽和 (最大)熱輸送量時の温度範囲も3本とも温度制御範囲がΔt= 10 以下となり,仕様を満足する非常に良い制御性を示した。 上記から,製品個体差もなく安定した制御性,放熱特性がある といえる。

3.2.3 作動流体量とガス封入量の関係

封入量の誤差による特性の違いを確認するため以下の検証を 実施した。

(1) 作動流体量の変化

図12に作動流体量を変化させた場合の放熱特性変化を示す。 ガス封入圧を一定にし,基準の作動流体量に対し10%の増減 を持たせた場合の特性変化である。作動流体量が少ない場合に



図10 各部の温度分布

Temperature distribution of VCHP under test

は,放熱勾配には問題がないものの放熱開始温度が高くなる。 また,作動流体量が多い場合には,放熱開始温度には問題がな いが放熱量が多くなるにつれ蒸発部温度が高くなる傾向を示 す。これらはガス封入圧が一定であるため,ガス封入量が作動 流体の増減に対し変化していることに起因する。なお,実際の 封入誤差は1%程度であり,作動流体封入量誤差で制御性が変 化することはない。

(2) ガス封入量

図13にガス封入量を変化させた場合の放熱特性変化を示す。 作動流体量を一定にし,基準のガス封入量に対し約2.5%の増 減を持たせた場合の特性変化である。ガス封入量が多い場合に は,放熱開始温度が上昇する。第2章での説明のとおりガス圧 力の高まりが界面を凝縮部へ追いやった結果である。なお,実 際の封入誤差は0.1%程度であり,ガス封入量誤差で制御性が 変化することはない。

3.2.4 長期信頼性

図14に長期信頼性結果を示す。本試験では6週間にわたる 運転を実施した。運転サイクルは実際の電池の運転を考慮し, 5日間運転ON,2日間OFFの状態で行った。放熱勾配は一定 しており長期においても信頼性が得られている。なお,特性の バラツキは温度測定上のバラツキであると考えられ,特性を大 きく左右するものではない。更に,実機においては3ヶ月から 長いものでは1年間のライフテストを実施している。

4. NAS 電池への効果

以下の項目によりNAS電池へのVCHPの適用が優れている ことが明らかになった。図15にVCHP搭載により確認した電 池温度の推移を示す。

4.1 温度制御性

温度制御範囲は設計値(仕様)に比較し,狭い範囲内で制御 されている。また,各部の温度測定結果においても蒸発部の温 度は長手方向にわたって非常に良好な均熱性を保っている。

4.2 入熱に対する反応

熱入力を増加させ蒸発部の温度を上昇させたときの放熱特性 が,NAS電池の温度制御に利用できるかの判断材料になる。 VCHPは第3章で述べたとおり,放熱開始温度が設計どおり定 まり,これより低温領域では容器の伝熱のみと考えられる低い 放熱量を示し,放熱開始温度から急激に放熱量が立ち上がり, 高温領域でも急激な放熱量の減少が無い,といった非常に優れ た傾向を示している。

4.3 寿命末期の電池温度と効率

VCHPを適用したNAS電池において,電池の寿命末期を想 定した電池発熱となるように放電量を増大させて運転した場合 でも,初期に設定した放熱量のままで電池温度を管理値の上限 値以下に保持でき,効率も目標値をクリアできた。



図11 放熱特性結果 Heat radiation characteristics







図13 ガス封入圧の差による温度制御範囲 Influence of the charging pressure of working gas on the heat radiation characteristics



Results of long-term life tests

— 23 —



図15 VCHPによる電池温度推移 Transition of the temperature of NAS battery with and without VCHP

5. おわりに

今回,NAS電池を対象に温度調節が可能な放熱機構を開発した結果,充分な温度調節効果を有し充放電効率の向上に寄与する高温適用型VCHPの開発に成功した。今後は,更なる低コスト化を追求するとともに,他の制御性放熱機構への展開を図りたい。