亜鉛-臭素電池のシャント電流解析と電池構成

正員 金 成 克 彦 (電総研)

正員 野 崎 健 (電総研)

正員 神 本 正 行 (電総研)

非会員 橋 本 敬 史 (明電舎)

正員 藤 井 利 宣 (明電舎)

Charge and Discharge Simulation of Zinc/Bromine Batteries for Various Battery Configurations

Katsuhiko Kanari, Member, Ken Nozaki, Member, Masayuki Kamimoto, Member (ETL), Takahumi Hashimoto, Non-member, Toshinobu Fujii, Member (Meidensha Corp.)

Zinc/bromine batteries were developed by Meidensha Corporation for load leveling under the "Moon Light Project" by Ministry of International Trade and Industry (MITI). One of problems in the bipolar cell assembly of zinc/bromine batteries is shunt current loss which causes not only a decrease in electrical efficiencies but also non-uniform zinc metal deposition. Computer simulations based on an equivalent circuit model were carried out for estimation of charge and discharge characteristics of a string of the 1MW scale zinc/bromine batteries. The round-trip efficiencies, the residual zinc metal after discharge, the stack currents and the terminal voltage were estimated. The effects of battery configurations and the fluctuation of cell parameters on charge and discharge characteristics are discussed.

キーワード：亜鉛-臭素電池，電池構成，シャント電流，等価回路，亜鉛電析分布，充放電効率

1. ま え が き

亜鉛-臭素電池は，臭化亜鉛の水溶液（電解液）を用いたエネルギー密度の高い二次電池であり⁽¹⁾，電解液は電解槽の外のタンクに貯蔵し，必要なときに電解槽に循環供給して充放電させる。このため，電池出力とは独立に貯蔵容量を増やすことができる，電解液の管理が容易である，などの特徴を電池にもたせることができる⁽²⁾。これらの特徴を生かして，フロー型の亜鉛-臭素電池が電力貯蔵用二次電池^{(3)~(7)}および電気自動車用二次電池^{(8)~(10)}として開発されている。

本電池の単電池の起電力はたかだか1.7~1.9Vであるので，実用的な電圧を得るため多数の単電池をバイポーラ直列接続してスタックを組み立て，このスタックの直並列接続により電池を構成する必要がある。

ムーンライト計画のもとに開発が進められた1MW級亜鉛-臭素電池ストリング⁽⁵⁾⁽⁶⁾では，後で述べるように，30×24×24個の単電池の直並列接続により構成されている。充放電時，スタック内の各単電池に導電性の電解液（正負極液）を並列に供給するので，この電解液を通してシャント電流が流れ，充放電効率の低下⁽¹¹⁾の一因となる。

亜鉛-臭素電池の主要な課題の一つが，亜鉛電析に関連する問題であるが⁽¹⁾，上記のシャント電流はスタック内の単電池当たりの亜鉛電析・溶解量の分布の一因となる⁽¹²⁾。更に，電池を構成する単電池やスタックなどの充放電特性にばらつきがあると，各要素の充放電電流と残留亜鉛量のばらつきが生ずるので，電池性能や信頼性の低下の原因となる。

亜鉛-臭素電池のモデリング，効率推定などのため，

単電池内の活物質の対流，拡散，電気化学反応などを取り扱ったモデル⁽¹³⁾，簡便な式による効率の推定⁽¹⁴⁾，等価回路を用いる方法⁽¹¹⁾などが報告されている。しかし，単電池内のイオン移動，反応を表すモデル⁽¹³⁾は複雑すぎて，多数の単電池が直並列に接続された電池への適用が困難である。また，簡便な式を用いる方法⁽¹⁴⁾やシャント電流コントロールのための解析法⁽¹¹⁾では，充放電時に各単電池の負極で亜鉛が電析・溶解する問題を取り扱っていない。

著者らはこれまで，レドックスフロー型電池の等価回路モデルによるシャント電流解析を行ってきた^{(15)~(17)}。このモデルをもとに，亜鉛-臭素電池のための等価回路モデルを作成し，1~50 kW 級電池⁽³⁾⁽⁴⁾に適用した。充放電電圧，充放電効率を推定した結果，実験結果とよい一致を得てスタックのための等価回路モデルを確立した⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

本研究では，亜鉛-臭素電池の電池構成と電池の充放電特性との関係を明らかにするため，スタックのための等価回路モデル⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾をもとに，電力貯蔵用新型電池の一つとして開発が進められた1 MW 級亜鉛-臭素電池ストリング⁽⁵⁾⁽⁶⁾を対象に等価回路モデルを作成し，充放電シミュレーションを行った。ストリングの充放電電圧や充放電効率へのスタック直並列接続法やスタック特性ばらつきの影響を検討した。

2. シャント電流解析

〈2・1〉 1 MW 級亜鉛-臭素電池の電池構成

電力貯蔵用に開発が進められた亜鉛-臭素電池は，1 kW 級から 50 kW 級にスケールアップされ⁽³⁾⁽⁴⁾，最終的には，1 MW 級の規模で実証試験が行われた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。それぞれの電池の仕様を表 1^{(3)~(6)}に示す。

図 1 に 1 MW 級亜鉛-臭素電池ストリング⁽⁵⁾⁽⁶⁾の電池構成の一例を示す。30 セル（単電池）の直列接続により 1 kW 級スタック（図 2）が，24 個のスタックの並列接続により 25 kW 級サブモジュールが，24 基のサブモジュールの直列接続により 1 MW 級ストリングが構成される。

図 1 に示したように，ストリングに直列接続されている各サブモジュールには，正負極液用のタンクが付属されている。各タンクからの正負極液は，並列に接続されている各スタックに供給され，更に図 2 に示すように，スタック中に直列接続されている各単電池にマニホールドやスリットを通して並列に供給される。

上記のような電池の設計上のポイントは，(i)各サブモジュールに付属されているタンク内の電解液量と電解液中の活物質の初期濃度，(ii)上記のタンク内の

表 1 亜鉛-臭素電池の仕様^{(3)~(6)}

Table 1. Specifications of zinc/bromine batteries^{(3)~(6)}.

Item	1 kW	50 kW	1 MW
Rated output	1 kW	50 kW	1 MW
Capacity	8 kWh	400 kWh	4~8 MWh
Electrode area	800 cm ²	1,600 cm ²	1,600 cm ²
Neg.and Pos.electrolytes	3 M ^a ZnBr ₂ + 2 M NH ₄ Cl + QBr ^b		
Current density	12 mA/cm ²	13 mA/cm ²	13 mA/cm ²
Duration of charge	8 h	8 h	4 h~8 h
Duration of discharge	4 h~8 h	6 h~8 h	4 h~8 h
Number of cells ^{c,d}	16 s	30 s	30 s
Number of stack ^c	4 p	24 p	24 p
Number of submodules ^c		2 s	24 s
Open circuit voltage	1.8 V	1.8 V	1.8 V

a) M: mol/dm³, b) Bromine complex reagent, c) s: Series, p: Parallel, d) in a stack

図 1 1 MW 級亜鉛-臭素電池ストリングの電池構成

Fig.1. Configuration of a string of the 1MW scale zinc/bromine battery.

電解液量と電解液中の活物質の初期濃度のばらつき，(iii)スタック内単電池直列接続とサブモジュールの直列接続数，(iv)単電池の電極面積，充放電電流密度，サブモジュール内のスタック並列接続数，(v)スタック内の単電池の充放電効率，内部抵抗のばらつき，(vi)サブモジュール内の各スタックの充放電効率，内部抵抗のばらつき，などである。

〈2・2〉 モデルおよび仮定 図 2 の亜鉛-臭素電池スタックを，図 3 のような等価回路で表す。等価回路は，単電池の開路電圧 (E_0) と内部抵抗 (R_c)，スリット抵抗 (R_s)，マニホールド抵抗 (R_m) の回路要素から構成される。なお，図 3 中の R_{c1} と R_{c2} および E_{01} と E_{02} の和は，それぞれ， R_c と E_0 である。更に，図 3 のスタックの等価回路の直並列接続により，図 1 のストリングを図 4 のような等価回路で表した。なお，各スタックに電解液を供給するための接続配管

の抵抗は無視した。

著者らは、これまで、等価回路を用いてレドックスフロー型電池の効率推定を行ってきたが^{(15)~(17)}、レド

A_+ , A_- : Positive and negative electrolytes, B: A spacer mesh, C: Bipolar plate, +, -: Positive and negative electrodes, D: Plate with separator (Porous polyethylene membrane), E: Manifold, F: Slit

図 2 スタックの部品構成および電解液の流れ

Fig. 2. Components and bipolar assembly of a stack in a zinc/bromine battery.

R_c : The internal cell resistance, R_s : The slit resistance, R_m : The manifold resistance, E_o : The electromotive force, I_o : The cell current, I_m : The manifold current

図 3 亜鉛-臭素電池スタックの等価回路

Fig. 3. An equivalent circuit model for shunt current analysis on a stack of a zinc/bromine battery.

R_c , R_s , R_m , E_o , I_o and same as those in Fig. 3. I_{st} : The stack current

図 4 1 MW 級亜鉛-臭素電池ストリングの等価回路

Fig. 4. An equivalent circuit model for shunt current analysis on a string of the 1MW scale zinc/bromine battery.

ックスフロー型電池との相異点を考慮して、亜鉛-臭素電池のためのモデルを作成した⁽³⁾⁽⁴⁾。亜鉛-臭素電池では、(i)充電時に亜鉛が電析して負極にとどまり、放電時には亜鉛が溶解する、(ii)正極から拡散してきた臭素と電析亜鉛とが反応して自己放電の原因となる、などを考慮する必要がある。解析にあたり、(i)負極における亜鉛電析、溶解はセル内で一様である、(ii)自己放電などによる効率低下は充電状態により変わらない、などの仮定をおいた。

〈2・3〉 計算方法およびパラメータ 亜鉛-臭素電池ストリングの性能と信頼性に深くかかわる〈2・1〉節の(iii), (v), (vi)について検討するため、図 3, 図 4 の等価回路と以下に示すシミュレーションパラメータを用いて、8 時間率の定電力充放電の条件で充放電シミュレーションを行った。なお、本研究でストリングを対象としたのは、ストリングの充放電特性やスタックなどの直並列時の課題を明らかにすることができるので、電池の充放電特性や充放電時の問題の把握が容易となるからである。

充放電シミュレーションは、正負極液中の臭化亜鉛の初期濃度と各サブモジュールのタンク液量を与えた後、各時間ステップごとに、図 5 に示すようにストリングの充放電電流値 (I_o) を与えて、等価回路の各ノードの電位分布を求めた。このとき、各ノードの電位に関してスタック内は既報の方法⁽¹⁵⁾により式を立て、スタックの並列接続点では、例えば以下のように式を組み立てて繰返し法により各ノードの電位を解いた。

$$\sum_{j=1}^{N_{st}} \frac{\{V_{s1}(k) - V_c(2, j, k) - E_{o1}(j, k)\}}{\{R_c(1, j, k)\}} = I_o \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 V_{s1} , V_c , N_{st} :それぞれ図 4 の等価回路のスタック並列接続点の電位、単電池

の正極側のノードの電位、スタックの並列接続数、 i, j, k : 図4の等価回路の左から k 番目の、サブモジュールの上から j 番目の、スタックの左から i 番目の単電池

求められた電位分布と回路要素の値から等価回路の電流分布を求めた。各単電池を流れる電流より、各単電池の負極に電析または残留する総亜鉛量 (W_{zn}) を以下の式より求めた。

充電時 ($t=0 \rightarrow t_c$)

$$W_{zn} = \int_0^{t_c} \frac{\sum_{i,j,k} I_{cc}(i, j, k) \eta_{FC}(i, j, k)}{nF} dt \dots (2)$$

放電時 ($t=t_c \rightarrow t_d$)

$$W_{zn} = \int_0^{t_c} \frac{\sum_{i,j,k} I_{cc}(i, j, k) \eta_{FC}(i, j, k)}{nF} dt - \int_{t_c}^t \frac{(\sum_{i,j,k} I_{cd}(i, j, k) / \eta_{FD}(i, j, k))}{nF} dt \dots (3)$$

ここに、 $n, F, t_c, t_d - t_c, I_c$: それぞれイオン荷数、ファラデー定数、充電時間、放電時間、単電池に流れる電流、 η_F : 単電池の電流効率に関するパラメータであり、正極からセパレータ(図2のD)を通して拡散してきた臭素と電析亜鉛との自己放電反応などによる効率低下、 η_F や I_c に添えた C, D : それぞれ充電時、放電時、 $\sum_{i,j,k}$: サブモジュール内の単電池の総和

上記の計算にあたり、各充電状態での回路要素の値は、50 kW 級モジュールの電流-電圧特性⁽³⁾⁽⁴⁾や導電率の測定結果⁽²⁰⁾をもとに定めた以下の式⁽¹⁹⁾を用い

図5 亜鉛-臭素電池ストリングの充放電電流、電圧

Fig. 5. Terminal voltage and current of a string of the 1MW scale zinc/bromine battery during charging and discharging with constant power.

た。これらの回路要素値を用いたのは、50 kW 級モジュールと1 MW 級ストリングを構成する単電池、スタックの構造と電池構成材料がほとんど同じであるからである。

$$\sigma_N = 0.354 - 0.228(1 - SOC) + 0.0201(1 - SOC)^2 \dots (4)$$

$$\sigma_P = 0.171 - 0.0317(SOC) + 0.0228(SOC)^2 \dots (5)$$

$$SOC = 1 - [Zn^{2+}] / [Zn^{2+}]_{t=0} \dots (6)$$

$$E_0 = 1.72 + 0.107(SOC) + 0.0113(SOC)^2 \dots (7)$$

$$R_c = R_{sol} + R_{rct} \dots (8)$$

$$R_{rct} = 0.00362 + 0.00105(SOC) + 6.81 \times 10^{-6}(SOC)^2 \dots (9)$$

$$R_{rct} = \{0.00332 - 0.000818(SOC) + 2.21 \times 10^{-4}(SOC)^2\} \times \{1 + f(1 - SOC)^m\} \dots (10)$$

$$f = 0.37 / (1 - 0.1209)^m \dots (11)$$

ここに、 $\sigma_P, \sigma_N, SOC, [Zn^{2+}], R_{sol}, R_{rct}$: それぞれ正極液の導電率、負極液の導電率、充電状態、負極液中の亜鉛イオンの濃度、セル溶液抵抗、反応抵抗、 f, m : 放電末期の開路電圧の増加に関連するパラメータ ($m = 7 \sim 12, f = 0.9 \sim 1.7$)

以上のようにして求めた等価回路要素の基準値⁽¹⁹⁾を表2に示す。

<2・1>節の(iii)のスタック内単電池直列接続数 (N_{cl}) とサブモジュールの直列接続数 (N_{sb}) の影響を検討するときには $N_{sb} \times N_{cl} = 84$ になるように N_{sb} と N_{cl} を変化させた。

<2・1>節の(v)の各スタックの電流-電圧特性と、スタック内の各単電池の電流効率に関するパラメータ (η_F) と内部抵抗 (R_c) のばらつきの影響を検討するときには、 η_F や R_c に、それぞれ、 $\pm 1 \sim 2\%$ 、 $\pm 5\%$ のばらつきを乱数を用いて与えた。その一例として、 η_F のばらつきの例を図6に示した。なお、スタック

表2 充放電シミュレーションに用いた等価回路要素値⁽¹⁹⁾

Table 2. The standard values⁽¹⁹⁾ of the elements of an equivalent circuit model.

	standard values
Internal cell resistance	0.004~0.01 Ω
Manifold resistance	0.4~0.6 Ω
Slit resistance	1,500~2,000 Ω
Open circuit voltage	1.6~1.9 V

Symbol U represents the standard values of η_F

図 6 充放電シミュレーションに用いたスタック内の単電池の η_F 値

Fig. 6. The fluctuation of η_F of the cells in a stack for the charge and discharge simulation.

中央のセルの η_F が端のセルの η_F より大きい場合の検討も行った。

〈2・1〉節の(vi)のサブモジュール内の各スタックの充放電効率や内部抵抗のばらつきの影響を検討するときには、スタックごとに R_c や η_F を基準値⁽¹⁹⁾の1~1.75倍、1倍~0.85倍と変化させた。

3. 結果および考察

〈3・1〉 スタック内電流分布と亜鉛電析分布⁽¹⁹⁾

50 kW 級亜鉛-臭素電池モジュール内のスタックの充放電時の電流分布の計算結果の一例を図7(a)、(b)に示す。このとき表1、表2の値を用いて計算し、スタック内単電池特性のばらつきはないと仮定した。

図7に見られるように、充放電時に充電電流と放電電流の向きが逆にもかかわらず、シャント電流は同じ方向に流れ、しかもスタック中央部で最大になっている。このため、単電池内を流れる電流(絶対値)は、充電時にスタック中央部で最小になり、放電時にはスタック中央部で最大となる。このような電流分布が、図8に示すようなスタック内の亜鉛電析、溶解量の分布の一因となる。

〈3・2〉 スタック内単電池特性ばらつきの影響

図3の等価回路を用いて、例えばスタック内の単電池の η_F や R_c が図6に示したようにランダムにばらついている場合の充放電シミュレーションを行い、単電池当たりの残留亜鉛量、放電電圧の時間変化を求めた。その一例として放電電圧の時間変化を図9に示す。

図9に見られるように、スタックの放電電圧に単電池の R_c のばらつきは影響を与えないが、 η_F が±1~2%とばらつくと単電池の端子電圧は基準の場合よ

(a) Charge

(b) Discharge

図 7 50 kW 級亜鉛-臭素電池スタックの電流分布

Fig. 7. Current distribution in a stack of the 50 kW scale zinc/bromine battery at a SOC 50%.

C: at the end of charge, D: at the end of discharge when average cell voltage reaches 1V, R: Total amount of residual zinc metal

図 8 50 kW 級亜鉛-臭素電池スタック内の充電終了時の亜鉛電析分布(実線)および放電終了時の亜鉛溶解量分布(鎖線)

Fig. 8. Distribution of amounts of zinc metal deposited in the cells and dissolved from the cells in a stack.

り230~480秒速く急落する。この急落時刻は、スタック中央部の一つの単電池の電析亜鉛が完全溶解する時刻に対応する。

既に述べたように、シャント電流により残留亜鉛量はスタック中央部のほうが端の単電池より小さい。スタック内の単電池の η_F にばらつきがある場合、 η_F が大きいほど残留亜鉛量が多い。そこで、スタック中央に η_F の大きな単電池を接続すれば亜鉛が完全溶解する時刻を遅らせることができるので、電池の放電時間を伸ばすことができ、効率向上も期待できる。

なお、電析亜鉛が完全溶解する時刻に関連する残留

$\eta_F/\eta_{Fo}=1\pm0.01$ ($R_c/R_{co}=1$), $\eta_F/\eta_{Fo}=1\pm0.02$ ($R_c/R_{co}=1$) and $R_c/R_{co}=1\pm0.05$ ($\eta_F/\eta_{Fo}=1$)

図9 スタック内に直列接続されている単電池の平均充放電電圧

Fig.9. The average terminal voltage of the cells connected in a stack.

図10 スtringの充放電効率と残留亜鉛損失

Fig.10. The coulombic efficiencies (η_i) and the energy efficiencies (η_e) of a string, and the coulombic loss (L_{Zn}) due to the residual zinc metal of a string after the end of discharge.

亜鉛分布に内部抵抗がほとんど影響しないのは、表2に示したように、内部抵抗に対してスリット抵抗が十分に大きいためである。すなわち、内部抵抗の値を変化させても、等価回路の電流分布の変化が小さいからである。

〈3・3〉 1 MW 級Stringのシミュレーション

(1) スタック分割の影響 図10にスタック内の単電池の直列接続数を変えて構成したStringを、8時間率で定電力充放電させたときの充放電効率、残留亜鉛損失の推定結果を示す。スタック内の単電池直列接続数を大きくするほど（スタック分割数を小さくするほど）充放電効率が下がり、残留亜鉛損失が増加

図11 Stringの端子電圧への内部抵抗のばらつき

Fig.11. Time variation of the terminal voltage of a string.

図12 Stringの端子電圧への単電池の電流効率のばらつきの影響

Fig.12. Time variation of the terminal voltage of a string.

する結果を得た。スタック内単電池の直列接続数が増加させるほど、残留亜鉛損失が増加するのはスタック内のシャント電流分布が著しくなるため⁽¹⁸⁾であり、充放電効率が下がるのはシャント電流の平均値が大きくなる⁽¹⁶⁾ためである。図10より、スタックを分割するほど有利と思われるが、スタック分割を大きくすると部品数が増加し信頼性や経済性の面で不利になるので、単電池直列接続数は20～30が適当と思われる。

(2) スタック特性のばらつきの影響 図11、図12に端子電圧の変化を示すが、それぞれ、各サブモジュール内の単電池の R_c や η_F が基準値⁽¹⁹⁾の1～1.75倍、1～0.85倍である場合の結果である。上記の結果を含め一連のシミュレーションを行った結果、(i)端子電圧の急落する時刻や放電終了時の残留亜鉛に R_c はほとんど影響しないが、 η_F は影響する、(ii)従って端子電圧の急落時刻よりおおよその η_F を推定することができる、(iii) R_c は1 MW 級Stringの電圧効率に、 η_F は主に電流効率に影響する、などの結果を得た。

図 13 サブモジュール内の 5 個のスタック
電流の時間変化

Fig. 13. Time variation of the stack currents of the five stacks in the No. 5 submodule.

図 14 サブモジュール内の No. 2 スタック
の電流の時間変化

Fig. 14. Time variation of the stack current of the No. 2 stack in the No. 5 submodule.

(3) スタック電流 あるサブモジュール内に 5 個並列接続されているスタックの η_F が、基準値の 0.89~0.93 倍にばらついているときのスタック電流の時間変化を図 13 に示す。同図に見られるように、放電末期を除いて、スタック電流の時間変化は小さく、しかも互いに一致している。しかし放電末期には、スタック電流は複雑に変化する結果を得た。また図 14 に、あるスタックに流れる電流の時間変化を示したが、スタック電流が振動する結果が得られた。以上のような結果は実験的にも得られている⁽²⁰⁾。

図 15 に放電末期の各スタック内の残留亜鉛分布の一例を示す。単電池の電流効率のばらつきにより、スタックごとにセル間の残留亜鉛分布が異なり、スタック中央の単電池内の亜鉛が完全に溶解する時刻が、スタックごとに異なる。そのために、図 13 のような結果が得られたと考えられる。また、図 14 に示すようなスタック電流が振動する結果が得られたのは、あるスタックに流れる電流が急変すると、スタック中央部の単電池内の亜鉛の溶解速度も変わり、スタック間の残留亜鉛量のバランスが変わり、各スタックの開路電

図 15 スタック内の単電池間の残留亜鉛分布
Fig. 15. An example of distribution of amounts of residual zinc metal in the five stacks in a submodule.

圧バランスが変化するためである。

4. む す び

亜鉛-臭素電池ストリングの等価回路を用いて充放電シミュレーションを行ったが、明らかになったことは、

(1) ストリングの等価回路モデルにより、シャント電流損失、スタック電流、端子電圧、充放電効率、亜鉛電析・溶解分布などを予測することが可能になった。

(2) 電力貯蔵用亜鉛-臭素電池⁽³⁾⁻⁽⁶⁾では、スタック内の単電池直列接続数は充放電効率、放電停止後の残留亜鉛量などにより、20~30 が適当と思われる。

(3) ストリングを充放電させた場合、内部抵抗のばらつきは放電時間や残留亜鉛量には影響を与えないが、単電池の電流効率のばらつきは、放電末期のスタック電流の急変に関連し、また放電時間、残留亜鉛量、充放電効率へ影響を与える。

本研究の今後の課題は、1 MW 級亜鉛-臭素電池の充放電効率の試験データと予測値の比較である。また、電力貯蔵用の亜鉛-臭素電池の効率を更に向上させるためには、放電終了後に残留している亜鉛の完全溶解過程を省略することであるが、その効果の推定のためには、シミュレーションモデルの改良が必要である。

本研究は、ムーンライト計画、新型電池電力貯蔵システムの研究開発の一環として行われた。

(平成 4 年 11 月 27 日受付、同 5 年 4 月 2 日再受付)

文 献

- (1) 松田・竹原編：電池便覧，3.6.4，亜鉛-臭素電池，p. 298 (平 2) 丸善
- (2) 野崎・金子・小沢：「レドックス・フロー型電池の開発」，電気学会研資，EDD-80-62，ESC-80-26，p. 43 (昭 55)

- (3) T. Fujii, K. Fushimi, T. Hashimoto, Y. Kumai, A. Hirota, H. Itoh, K. Jin-nai, M. Kanazashi, T. Hiramatsu & S. Kondo: "80kWh Zinc/Bromine Battery for Electric Power Storage", Proc. 22nd Intersoc Energy Conv. Eng. Conf., Vol. 1, p. 1045 (1987)
- (4) T. Fujii, M. Igarashi, K. Fushimi, T. Hashimoto, Y. Kumai, A. Hirota, H. Itoh, K. Jin-nai, M. Kanazashi, T. Hiramatsu & T. Nakayama: "4MWh Zinc/Bromine Battery for Electric Power Storage", Proc. 23rd *ibid.*, Vol. 2, p. 335 (1988)
- (5) T. Fujii, M. Igarashi, K. Fushimi, T. Hashimoto, A. Hirota, H. Itoh, K. Jin-nai, Y. Tagami, I. Kouzuma, Y. Sera & T. Nakayama: "4MWh Zinc/Bromine Battery for Electric Power Storage", Proc. 24th *ibid.*, Vol. 3, p. 1319 (1989)
- (6) T. Fujii, M. Igarashi, K. Fushimi, T. Hashimoto, A. Hirota, H. Itoh, K. Jin-nai, T. Hashimoto, I. Kouzuma, Y. Sera & T. Nakayama: "Zinc/Bromine Battery for Electric Power Storage", Proc. 25th *ibid.*, Vol. 3, p. 136 (1990)
- (7) A. Leo: "Status of Zinc-Bromine Battery Development at Energy Research Corporation", Proc. 24th *ibid.*, Vol. 3, p. 1303 (1989)
- (8) J. J. Bolstad & R. C. Miles: "Development of the Zinc/Bromine Battery at Jhonson Controls, Inc", Proc. 24th *ibid.*, Vol. 3, p. 1311 (1989)
- (9) J. P. Zagrodnik & M. D. Eskra: "Zinc/Bromine Battery Development", Proc. 22nd *ibid.*, Vol. 3, p. 1039 (1989)
- (10) H. Nakao, Y. Suzuki & M. Okawa: "Zinc-Bromine Battery Development for Toyota EV30", Proc. the 9th Intern. Electric Vehicle Symposium, Toronto (1988)
- (11) P. G. Grimes, R. J. Bellows & M. Zahn: "Shunt Current Control in Electrochemical Systems Theoretical Analysis", R. E. White, Ed., "Electrochemical Cell Design", p. 259 (1984) Plenum Press Co., New York
- (12) 二又・高橋: 「電気自動車用電池の開発状況, 5. 亜鉛-臭素電池」, 大阪工試季報, 37, 240(昭61)
- (13) T. I. Evans & R. E. White: "A Review of Mathematical Modeling of the Zinc/Bromine Flow Cell and Battery", *J. Electrochem. Soc.*, **134**, No. 11, 2725 (1987)
- (14) J. V. Zee, R. E. White, P. G. Grimes & R. J. Bellows: "A Simple Model of Exxon's Zn/Br₂ Battery" R. E. White, Ed., "Electrochemical Cell Design", p. 259 (1984) Plenum Press Co., New York
- (15) 金成・野崎・小沢: 「1kW級レドックス・フロー型電池スタックのシャント電流解析」, DENKI KAGAKU, **55**, No. 3, 251(昭62)
- (16) K. Kanari, K. Nozaki & T. Ozawa: "Numerical Analysis on Shunt Current and Pumping Loss in a Redox-Flow Cell System", AIChE Symposium Series, "Electrochemical Applications", R. E. White et al. Ed., No. 254, 83, 104 (1987)
- (17) 金成・野崎・小沢: 「1kW級レドックス・フロー型二次電池のシャント電流解析」, DENKI KAGAKU, **57**, No. 6, 517(平元)
- (18) 金成・野崎・橋本・藤井: 「亜鉛-臭素電池のシャント電流解析」, 同上, **59**, 237 (平3)
- (19) K. Kanari, K. Nozaki & H. Kaneko: "Numerical Analysis on Shunt Current in Flow Batteries", Proc. 25th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf., Vol. 3, 326 (1990)
- (20) 藤井: 私信

金 成 克 彦 (正員)

昭和16年2月25日生。40年3月明治大学工学部工業化学科卒業。同年4月電気試験所(現, 電子技術総合研究所)入所。現在, 電子技術総合研究所エネ

ギー基礎部エネルギー材料研究室主任研究官。工学博士。主として, 蓄熱技術, 宇宙エネルギー技術, フロー型電池, 分散電源用高性能電池などの研究に従事。

野 崎 健 (正員)

昭和18年6月11日生。43年3月東京大学大学院工業化学専攻修士課程修了。同年4月電気試験所(現, 電子技術総合研究所)入所。現在, 電子技術総合研究所エネルギー部高温エネルギー研究室主任研究官。主として, 新型電池, 燃料電池などの電気化学的エネルギー技術の研究に従事。60年市村賞受賞。

神 本 正 行 (正員)

昭和23年2月8日生。50年3月東京大学大学院博士課程修了。アメリカ・Northwestern大学材料科学科客員研究員を経て, 52年4月電子技術総合研究所入所。現在, 電子技術総合研究所エネルギー基礎部主任研究官。主として, エネルギー材料, 蓄熱技術, 宇宙エネルギー技術, 熱分析および熱物性測定などの研究に従事。

橋 本 敬 史 (非会員)

昭和27年2月10日生。49年3月東京理科大学大学院理工学部物理科卒業。同年4月(株)明電舎入社。現在, (株)明電舎研究開発総本部総合研究所開発第二部担当課長。主として, 電力貯蔵用亜鉛-臭素電池の開発に従事。

藤 井 利 宣 (正員)

昭和17年5月19日生。44年3月東京都立大学大学院修士課程修了。同年4月(株)明電舎入社。現在, (株)明電舎研究開発総本部総合研究所技師長。主として, 電力貯蔵用亜鉛-臭素電池の開発に従事。