β'' 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*恩田 和夫*¹, 増田 俊久*², 永田 進*²
野崎 健*², 根岸 明*², 田中 耕太郎*¹Cycle Analyses for Thermoelectric Power Generation and
Heat Pumps Using β'' Alumina Solid ElectrolytesKazuo ONDA, Toshihisa MASUDA, Susumu NAGATA,
Ken NOZAKI, Akira NEGISHI, and Kotaro TANAKA

Alkali metal thermoelectric conversion (AMTEC) cycles and the cycles of high-temperature heat pumps using beta'' alumina solid electrolytes are analyzed, and it is shown that the isothermal expansion or compression of the Na⁺ flow through the electrolyte coincides with the expansion or compression process, respectively, in the Ericsson cycle when the internal losses by the electrolyte and the thin electrode are small. It is also shown that the isothermal compression approximation in the heat pump cycle is more consistent with the AMTEC cycle than the adiabatic compression discussed in an earlier report. Typical results for voltage-current characteristics and thermal efficiencies of the AMTEC and the heat pump, including the high-temperature side Na conditions of not only the saturated liquid, but also the super-heated vapor, are presented. The super-heat operation shows a decrease in the power generation efficiency for the AMTEC and an increase in the coefficient of performance for the heat pump.

Key Words: Energy Engineering, Energy Conversion, Thermal Efficiency, Sodium Heat Engine, Alkali Metal Thermoelectric Conversion, High-temperature Heat Pump, Cycle Analysis, Ericsson Cycle, Super-heated Sodium Vapor

1. ま え が き

β'' アルミナ固体電解質(β'' Alumina Solid Electrolyte, BASE)はNa⁺を通すイオン伝導体である。この固体電解質板の両側にあるNaに圧力差を作るとこれが駆動力となり、高圧側から低圧側に電解質中をNa⁺が流れる。外部電源により電解質を通して通電してもNa⁺を流すことができる。中性Naが電解質中へ入るためには、入口界面で電子を外部回路に放出しNa⁺となって電解質中へ入り、出口界面に達したNa⁺は外部回路から電子を貰って中性Naとなって電解質の外へ出る。電解質を挟むNaに温度差を設け蒸気圧差を作ると、熱を直接電気に変える熱電発電装置となる。これはアルカリ金属熱電変換(Alkali Metal Thermoelectric Conversion, AMTEC)あるいはナトリウム熱機関(Sodium Heat Engine, SHE)と呼ばれ、KummerとWeberにより初めて実験的に確認され、特許として発表された⁽¹⁾。その動作原理図を図1に示す。このアルカリ金属熱電変換は可動部がないので信頼性が高く、効率が大きさによらず20~40%と高く、

モジュール方式による構成が可能な高出力密度電源の有力候補として、多くの研究グループにより研究開発されている^{(2)~(10)}。最近はこれらの特徴が宇宙用電源として注目されている⁽⁷⁾⁽⁹⁾。

外部電源により電解質中のNa⁺を低圧力側から高圧力側に流し、固体電解質を圧縮機として機能させ、高温ナトリウムヒートポンプを構成することが提案されている⁽¹¹⁾。ナトリウム-硫黄電池では充電時に、外部から電力の供給を受けて正極活物質である多硫化ナトリウムNa₂S_xからNaを電解質を通して分離し、負極活物質として貯蔵しておき、放電時にこのNaの濃

図1 アルカリ金属熱電発電の作動原理図

* 平成元年4月4日 第66期通常総会講演会において講演。
原稿受付 昭和63年9月8日。

*¹ 正員、電子技術総合研究所(●305 つくば市梅園1-1-4)。

*² 電子技術総合研究所。

度差を利用して電解質中を Na^+ として流し、元に戻すことにより発電する。つまり固体電解質は圧縮機としてもタービンとしても機能し得ることがわかる。電気化学反応によらず、熱的に固体電解質をタービンや圧縮機として機能させると、アルカリ金属熱電変換となり、ナトリウムヒートポンプとなる。

Na^+ の移動に対する固体電解質の抵抗は温度の増加とともに下がるので、内部損失を下げるためには、固体電解質の動作温度を高温側温度に維持するのが望ましい。これまでのアルカリ金属熱電発電は高温側温度に維持された等温膨張の近似のもとに解析され、実験結果と良く一致している⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾。ところで等温膨張は Ericsson サイクルの膨張過程であるが、この膨張過程とアルカリ金属熱電変換の発電過程の比較検討は、著者らの知る範囲でこれまで報告がない。そこでその類似性を本研究では検討した。なお先の高温ナトリウムヒートポンプの解析⁽¹¹⁾は固体電解質による圧縮過程を断熱圧縮で近似している。本研究ではこの圧縮過程を Ericsson サイクルの等温圧縮過程と比較検討し、ヒートポンプサイクルの特性を明確にした。

アルカリ金属熱電変換の高温側の Na は飽和液で固体電解質に接する場合が多い。この状態では液体金属が高温側電極として機能する。アルカリ金属熱電発電の一セル当たりの電圧は 1 V 程度と低いので、実際の発電装置ではセルを直列に接続する必要がある。この時 Na を導電性の高い飽和液でセルに供給しようとすると、電気的短絡が大きな問題となる。一方アルカリ金属熱電変換は液体だけでなく、Na 蒸気を供給しても動作し、電気絶縁は蒸気で供給するほうが容易である⁽¹²⁾⁽¹³⁾。これまで過熱蒸気によるアルカリ金属熱電発電の性能計算は、著者らの知る範囲で報告されていない。この過熱状態を考慮した熱電発電とヒートポンプの性能も本報では検討した。

2. 熱電発電とヒートポンプの サイクル解析

2.1 β'' アルミナ固体電解質の電圧-電流特性
サイクル解析を行う前に固体電解質の電圧-電流特性を記述する基礎式を熱電発電の場合に対して整理しておく⁽²⁾⁻⁽¹⁰⁾。電解質を挟む Na の Gibbs の自由エネルギー G の差 ΔG がイオンの移動に対する熱力学的駆動力となり、アルカリ金属熱電発電のような濃淡電池に対する開路電圧 V は次式で記述される⁽⁶⁾。

$$\Delta V = -\frac{\Delta G}{F} = -\frac{\Delta(H-TS)}{F} = \frac{-v\Delta p + S\Delta T}{F} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし F は Faraday 定数、 H はエンタルピー、 T は温度、 S はエントロピー、 v は比体積、 p は圧力を表す。濃淡電池の固体電解質が高温側温度 T_h に維持され、比体積 v を理想気体式で近似できるとすれば、式(1)は R をガス定数として次式となる。

$$\Delta V = -v\Delta p/F = -(RT_h/F)(\Delta p/p) \quad \dots\dots\dots(2)$$

高圧側圧力 p_h から中間圧力 p_m まで式(2)を積分して

$$V = (RT_h/F)\ln(p_h/p_m) \quad \dots\dots\dots(3)$$

開路状態では、圧力 p_m にある低压側の電解質表面から出る Na 蒸気の実流束 $\dot{n}_m$ は、温度 T_l にある低温凝縮面から出る Na の実流束 $\dot{n}_l$ と等しくなり、正味のナトリウム移動はなくなる。

$$\dot{n}_m = \frac{p_m}{\sqrt{2\pi MRT_h}} = \frac{p_l}{\sqrt{2\pi MRT_l}} = \dot{n}_l \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし M は Na の原子量を表す。式(4)の p_m を式(3)に代入すれば、開路電圧は

$$V = (RT_h/F)\ln\{p_h/(p_l\sqrt{T_h/T_l})\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

次に電流が流れる場合を考える。 Na^+ の実流束を $\dot{n}_i$ とすれば、電流密度 i と次式で結ばれる。

$$i = \dot{n}_i F \quad \dots\dots\dots(6)$$

高圧側の圧力 p_h が一定に保たれれば、低压側電解質表面圧力は式(4)で $\dot{n}_i$ に対する圧力 p_m' だけ、式(5)の低压側の平衡圧 $p_l\sqrt{T_h/T_l}$ より上昇する。つまり、よく知られた次式の電圧-電流特性が得られる。

$$V = \frac{RT_h}{F}\ln\frac{p_h}{p_l\sqrt{T_h/T_l} + \sqrt{2\pi MRT_h}i/F} - iR_0 \\ = (RT_h/F)\ln(p_h/p_m) - iR_0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

ただし p_m は電解質の低压側表面圧力を表す。式(7)右辺最後の項 R_0 は、固体電解質中を Na^+ が移動する時の抵抗と、薄膜電極の電子に対する抵抗の和を表す。式(7)による $V-i$ 特性でこれまでの実験結果はよく説明されている⁽²⁾⁻⁽¹⁰⁾。なお以上の導出で簡単のため、薄膜電極は固体電解質と同じ温度にあり、かつ中性 Na 蒸気が拡散する時の流動抵抗にはならないものと仮定した。

固体電解質をヒートポンプの圧縮機として機能させるサイクルの詳細な解析はこれまで報告されていない。熱電発電の $V-i$ 特性の導出からわかるように、 $\dot{n}_i$ 、 i を負と考えれば式(6)、(7)はそのままヒートポンプに適用できる。つまり図1の外部負荷の代わりに外部電源を置き、 Na^+ を低圧力側から高圧力側へ、熱電発電とは逆に移動させる。高圧側の圧力が一定に保たれ、固体電解質温度が T_h に保たれるとすれば、固体電解質の圧縮機としての動作も式(6)、(7)で記述できる。ただし式(7)中の p_m は正である必要があるの

で,

$$p_i \sqrt{T_h/T_i} + \sqrt{2\pi MRT_h} i / F > 0 \dots\dots\dots (8)$$

の条件を電流密度 i は満足する必要がある。

式(7)の $V-i$ 特性からわかるように, 内部損失を抑えるためには R_0 を低く保つ必要がある。つまり固体電解質全体を高温側温度に保って動作させたほうが, 内部損失は減少する。この意味で固体電解質の圧縮機としての動作は Jeter のような断熱圧縮⁽¹¹⁾より, 熱電発電のような等温過程のほうがよい。ただし R_0 に含まれる薄膜電極の抵抗は, 一般には固体電解質の抵抗に比べて十分小さいので無視し得る。また, 式(7)の導出過程からもわかるように, 高压側圧力 p_h は飽和液体である必要はなく, 過熱蒸気でもよい。ただし過熱蒸気が供給される時, 固体電解質の高温側にも通気性のよい薄膜電極が必要となる。この時式(7)の R_0 にはこの抵抗分も含めればよい。

2・2 熱電発電と Ericsson サイクルの類似性

これまで熱電発電の発電効率については多くの報告^{(2)~(10)}があるので, 本報では Ericsson サイクルとの類似性について述べる。等温膨張は Ericsson サイクルの膨張過程であり, そこでは外部へなされた仕事はその間にサイクルへ供給された熱量と等しくなる。モル流束 $\dot{n}$ に対する Ericsson サイクルの外部仕事 W_{out} および熱入力 Q_{in} は次式で表される。

$$W_{out} = \int_h^m \dot{n} p dv = \dot{n} R T_h \ln \frac{p_h}{p_m} = Q_{in} \dots\dots\dots (9)$$

内部抵抗 R_0 が十分小さければ, 以下に示すように, アルカリ金属熱電発電は Ericsson サイクルの等温膨張過程と等しくなる。内部抵抗が小さければ式(7)の出力電圧は次式で近似される。

$$V = (RT_h/F) \ln(p_h/p_m) \dots\dots\dots (10)$$

熱電発電の電気出力 W_{out} は式(6)の i より次式で求められる。

$$W_{out} = Vi = \dot{n}_i R T_h \ln(p_h/p_m) \dots\dots\dots (11)$$

つまりこの熱電発電は Ericsson サイクルの等温膨張

過程でよく近似される。また発電中に発電出力と同じ熱入力が必要とすることもわかる。

図2にアルカリ金属熱電発電のサイクル構成図を示す。この等温膨張過程が Ericsson サイクルの膨張過程で近似できるため, 図3には高温側が飽和液の場合の熱電発電サイクルの $T-S$ 線図を示した。

発電効率 η_{gen} は多くの報告にあるように次式で表される。

$$\eta_{gen} = W_{out} / \{ W_{out} + (L + \Delta H) \dot{n}_i + W_{pump} + K(T_h - T_i) + (\sigma/Z)(T_h^4 - T_i^4) \} \dots\dots\dots (12)$$

ただし, L は蒸発潜熱を, ΔH はポンプ出口温度から T_h までの顕熱を表し, 固体電解質単位面積当たりの電気出力 W_{out} は式(6), (7)より次式で表される。

$$W_{out} = \dot{n}_i R T_h \ln(p_h/p_m) - (\dot{n}_i F)^2 R_0 \dots\dots\dots (13)$$

W_{pump} は $\dot{n}_i$ のモル流束の液体 Na を圧力 p_i から p_h まで昇圧するポンプ動力を表し, その値は W_{out} と比べ無視できるほど小さい。式(12)右辺分母の第4, 5項は熱伝導損失, 放射熱損失を表し, K は熱伝導損失係数を, Z は放射損失の減少係数を, σ は Stefan-Boltzmann 定数を表す。式(12)右辺分母に W_{out} が含まれるのは, 前述したように発電時に発電出力と同じ熱入力が必要とするためである。なお式(13)の W_{out} は内部発熱分だけ Ericsson サイクルの等温膨張過程と異なり, 内部発熱分だけ W_{out} や Q_{in} を減少させるが, 固体電解質の抵抗は温度の低下とともに増大するので, 固体電解質を一定温度に保つ方向に働く。

2・3 ヒートポンプサイクル Jeter が提案した高温ナトリウムヒートポンプでは, 固体電解質を介して Na 蒸気が断熱圧縮されるものとしてその動作係数が求められている⁽¹¹⁾。前述したように固体電解質は, 高温側温度 T_h に維持して動作させたほうが内部損失が少なくなるので, 以下では圧縮機として機能させる

図2 アルカリ金属熱電発電のサイクル構成図

図3 アルカリ金属熱電発電の $T-S$ 線図

固体電解質を熱発電と同様高温側温度に維持して、等温圧縮過程に用い動作係数などの特性を求めた。内部損失がなければ熱発電と同様、ヒートポンプの圧縮過程は Ericsson サイクルの等温圧縮過程と等しくなる。

固体電解質を用いたヒートポンプのサイクル構成図を図 4 に、高温側が飽和液の場合の T - S 線図を図 5 に示す。固体電解質の低圧側は熱発電と同様薄膜電極を必要とし、高温側は飽和状態なら Na 液を電極として兼用することができ、高温側が過熱蒸気なら、こちらにも熱発電と同様薄膜電極が必要となる。

ヒートポンプの動作係数 COP を、高温側温度 T_h および T_h' (T_h が過熱温度の時その飽和温度 T_h') へ汲み上げた熱量から、低温側 T_l へ失われる熱量を引き、圧縮機動力 $|W_{in}|$ で割ったものと定義すれば、次式が得られる。

$$COP = \{ |W_{in}| + (L + \Delta H_s - \Delta H) |\dot{n}_i| - K(T_h - T_l) - (\sigma/Z)(T_h^4 - T_l^4) \} / |W_{in}| \quad \cdots (14)$$

ここで ΔH_s は過熱蒸気が飽和温度まで下がる顕熱を示し、 ΔH は Na 蒸気が T_l から T_h まで過熱される顕熱を示し、右辺分子第 3、4 項は熱伝導損失と放射熱損失を表す。式(14)分子にある $|W_{in}|$ は熱発電と同様、Ericsson サイクルの等温圧縮過程では圧縮仕事 $|W_{in}|$ と同じ熱量が同時に外部に放出されるためである。 ΔH は熱伝導と放射熱損失の一部を回収することで減らすこともできるが、ここでは未回収とした。圧縮機として固体電解質単位面積当たりで消費される圧縮動力 W_{in} は式(13)と同様次式で表される。

$$W_{in} = \dot{n}_i R T_h \ln(p_h/p_m) - (\dot{n}_i F)^2 R_0 \quad \cdots (15)$$

ただし外部から電流が供給されるため、 i , $\dot{n}_i$ の符号は熱発電と逆に負となり、 W_{in} も負となる。

式(15)を式(14)に代入すると COP は

$$COP = \{ R T_h \ln(p_h/p_m) + |\dot{n}_i| F^2 R_0 + (L + \Delta H_s - \Delta H) - K(T_h - T_l) - (\sigma/Z)(T_h^4 - T_l^4) \} / \{ R T_h \ln(p_h/p_m) + |\dot{n}_i| F^2 R_0 \} \quad \cdots (16)$$

となる。式(12)、(16)の熱発電あるいはヒートポンプサイクルでは、温度 T_l の低温熱源以外への熱損失を考慮していないが、周囲温度が T_l より低く、周囲への熱損失が無視できない場合はこれを考慮する必要がある。

3. 解析結果と考察

Na の熱力学的な物性値は Ohse⁽¹⁴⁾ による式や表によるものを用い、固体電解質のイオンに対する比抵抗 ρ_{BASE} は次式で表した。

$$\rho_{BASE} = T \{ 4.03 \times 10^{-4} \exp(1420/T) + 1.68 \times 10^{-7} \exp(5567/T) \} (\Omega \cdot \text{cm}) \quad \cdots (17)$$

薄膜電極の材料は耐久性に優れたモリブデンとし、その気孔性電極の電気抵抗は十分な測定値が発表されていないので、以下のむく状金属モリブデン(Mo)の比抵抗⁽¹⁵⁾を用いた。

$$\rho_{Mo} = 5.6 \times 10^{-8} \{ 1 + 4.4 \times 10^{-3} (T - 293) \} (\Omega \cdot \text{m}) \quad \cdots (18)$$

これまでのアルカリ金属熱発電の研究を参照し、セルの形状、強度、イオンに対する抵抗や薄膜電極の通気性などの点から、固体電解質および薄膜電極の厚さはそれぞれ 1 mm, 3 μm としてサイクル計算を行った。式(12)、(16)における熱伝導損失、放射熱損失は、配線、放射遮蔽板などを試設計し、 $T_h = 1200 \text{ K}$, $T_l = 500 \text{ K}$ に対してそれぞれ 0.378, 2.28 W/cm² になるような構成を考えた。液体 Na ポンプは小形のものを想定し、その効率を 10% として η_{gen} を求めた。ただし W_{pump} は W_{out} より十分小さい。

3.1 熱発電のサイクル計算結果 過熱蒸気を含めた代表的結果として $T_h = 1200 \text{ K}$, $T_l = 500 \text{ K}$ に対する V - i 特性と η_{gen} - i の関係を図 6 に示す。 $T_h =$

図 4 固体電解質ヒートポンプのサイクル構成図

図 5 固体電解質ヒートポンプの T - S 線図

800°Cで100 W級発電実験が1500時間以上行われている⁽⁹⁾ので、 $T_h=1200$ Kの発電も早晚達成可能と思われる。図6には、 $T_h=1200, 1100$ Kの飽和液の場合と、 $T_h=1200$ Kの過熱蒸気(飽和温度 $T_h'=1100$ K)の場合の3つが示してある。図7にはそれぞれに対し発電効率 η_{gen} が最大になるサイクルを T - S 線図上に示した。

発電効率の最大値は $T_h=1200$ Kの飽和液、 $T_h=1100$ Kの飽和液、 $T_h=1200$ Kの過熱蒸気の順(21.83%, 20.60%, 19.07%)に低下する。 $T_h=1200$ Kでは飽和液の方が過熱蒸気の η_{gen} より高いのは、式(7)において p_h が前者のほうが高く W_{out} が大きくなるためである。 $T_h=1100$ Kの飽和液のほうが $T_h=1200$ Kの過熱蒸気の η_{gen} より高いのは、出力電圧は図6に示すように過熱蒸気のほうが高く W_{out} も大きい、式(12)の分母で、 $T_h=1100$ Kが1200 Kに増えた分 ΔH と熱損失が W_{out} 以上に増大したためである。セルを直列接続するために過熱蒸気を供給し電気絶縁する場合は、熱損失など装置固有の特性はあるが、過熱度は必要最小限に留めるほうが高い発電効率を得られるようである。

図6 熱電発電の V - i 特性と η_{gen} - i の関係

図7 飽和液および過熱蒸気の熱電発電 T - S 線図

3.2 ヒートポンプのサイクル計算結果 固体電解質を用いたヒートポンプは高温動作が可能のため、代表例として過熱蒸気を含めて $T_h=1100, 1000$ K, $T_l=900$ Kの V - i 特性、ヒートポンプ動作係数 (COP) と i の関係を図8に示す。同図には $T_h=1100, 1000$ Kの飽和液の場合と、 $T_h=1100$ Kの過熱蒸気(飽和温度 $T_h'=1000$ K)の三つの場合を示した。 $T_h=1000$ Kの飽和液と $T_h=1100$ Kの過熱蒸気の V - i 特性がほぼ一致するのは、式(7)において T_h が高いほうが右辺第1項は大きくなるが、温度上昇により R_0 は小さくなるので右辺第2項の $-iR_0$ の内部損失(ここでは i は負であるから正)は温度上昇とともに低下するためである。 $T_h=1000$ Kの飽和液と $T_h=1100$ Kの過熱蒸気の COP - i 特性は、式(14)において $W_{in}, \Delta H_s - \Delta H$ がほぼ等しく $T_h=1100$ Kのほうが熱損失が大きいため、 $T_h=1000$ Kのほうが COP は高い。 $T_h=1100$ Kの飽和液に比べて $T_h=1100$ Kの過熱蒸気のほうが COP が高いのは、前者のほうが $|W_{in}|$ が大きく、 $L + \Delta H_s - \Delta H$ が小さいためである。このように過熱効果は同じ最高温度であればヒートポンプでは熱電発電とは逆に良い結果を与える。

熱損失がなければ式(16)からもわかるように、 i の減少とともに COP は増加し、 $i=0$ の時 COP は最大値を取る。しかし、 $i=0$ では熱は汲み上げられず、 i の減少とともに汲み上げ熱量に対して熱損失の割合は増大し、図8に示すように COP は $-1 \sim -3$ A/cm² の電流密度で最大値を取る。

図8で COP がそれぞれ最大となる三つのサイクルを図9の T - S 線図上に示す。 $i=-1 \sim -3$ A/cm² の時式(8)を満足する T_l は579~612 Kとなるので、固体電解質ヒートポンプの低温側運転温度は約580 K以上となろう。 $i=-2$ A/cm² を固定して $T_h=960 \sim 1300$ K, $T_l=600 \sim 940$ Kと変えた時 COP は図10のように変わる。 T_l/T_h が1に接近すると(ただし $T_l/T_h <$

図8 ヒートポンプの V - i 特性と COP - i の関係

図 9 飽和液と過熱蒸気のヒートポンプ T - S 線図

1), ヒートポンプの COP は高くなる傾向をここでも示している。

4. ま と め

β'' アルミナ固体電解質を用いたアルカリ金属熱発電と高温ヒートポンプのサイクル解析を行い、薄膜電極を含む固体電解質の内部損失が小さい時、固体電解質を通しての Na^+ の膨張あるいは圧縮過程は Ericsson サイクルの等温膨張あるいは圧縮過程に一致することを示し、ヒートポンプサイクルではこれまで報告されている断熱圧縮より等温圧縮のほうが熱発電ともよく整合することを示し、ヒートポンプの特性を明らかにした。熱発電およびヒートポンプの電圧-電流特性や熱効率等の代表的計算結果を示すとともに、高温側 Na が飽和液の外に過熱蒸気の場合に対しても検討し、過熱蒸気による運転は熱発電では発電効率を下げる方向に、ヒートポンプでは動作係数を上げる方向に作用することを明らかにした。

図 10 ヒートポンプの T_h , T_c に対する COP 変化

文 献

- (1) Kummer, J. T. and Weber, N., *U. S. Patent* 3, 458, 356 (1969).
- (2) Weber, N., *Energy Conversion*, **14** (1974), 1.
- (3) Hunt, T. K., ほか 2 名, *Proc. 13th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.*, **3** (1978), 2011.
- (4) Hunt, T. K., ほか 2 名, *Solid State Ionics*, **5** (1981), 263.
- (5) Cole, T., *Proc. Workshop on Thermally Regenerative Electrochemical Systems*, 'SERI/CP-234-1577' (1981), 109, Solar Energy Research Institute.
- (6) Hunt, T. K. and Weber, N., *Research and Development on a Sodium Heat Engine*, Final Report DOE/ER/10347-T1 (1982).
- (7) Bankston, C. P., ほか 3 名, *J. Energy*, **7-5** (1983), 442.
- (8) Cole, T., *Science*, **221-4614** (1983), 915.
- (9) Lasecki, J. V., ほか 4 名, *Proc. 22th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.*, **3** (1987), 1408.
- (10) Masuda, T., ほか 3 名, *Proc. 23th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf.*, **1** (1988), 347.
- (11) Jeter, S. M., *Energy*, **12-2** (1987), 163.
- (12) Sievers, R. K., ほか 6 名, *5th Symp. Space Nuclear Power Systems*, (1988), 615.
- (13) Novak, R. F., ほか 3 名, 文献(12)の 625 ページ.
- (14) Ohse, R. W., *Handbook of Thermodynamic and Transport Properties of Alkali Metals*, (1985), 547, Blackwell Scientific Publication.
- (15) 東京天文台編集, 理科年表, (昭 60), 519, 丸善.